金 熙 项成林 齐冬子 编

工业水处理技术问答

第三版

化学工业出版社
环境科学与工程出版中心



ISBN 7-5025-4475-5

9 787502 544751 >

ISBN 7-5025-4475-5/X · 294　定价：53.00元

工业水处理技术问答

（第三版）

金　熙　项成林　齐冬子　编

化学工业出版社
环境科学与工程出版中心
·北　京·

（京）新登字039号

图书在版编目(CIP)数据

工业水处理技术问答/金熙，项成林，齐冬子编．
3版．北京：化学工业出版社，2003.6
ISBN 7-5025-4475-5

Ⅰ．Ⅰ… Ⅱ．①金…②项…③齐… Ⅲ．工业用水-水处理-问答 Ⅳ．TQ085-44

中国版本图书馆CIP数据核字（2003）第042177号

工业水处理技术问答
（第三版）
金 熙 项成林 齐冬子 编
责任编辑：骆文敏
责任校对：陶燕华
封面设计：于 兵

化学工业出版社
环境科学与工程出版中心 出版发行
（北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码100029）
发行电话：（010）64982530
http://www.cip.com.cn

新华书店北京发行所经销
北京管庄永胜印刷厂印刷
三河市东柳装订厂装订
开本850毫米×1168毫米 1/32 印张26½ 插页1 字数702千字
2003年8月第3版 2003年8月北京第1次印刷
ISBN 7-5025-4475-5/X·294
定 价：53.00元

版权所有 违者必究
该书如有缺页、倒页、脱页者，本社发行部负责退换

第三版前言

编写本书的目的是为广大水处理工作者提供简明的技术资料，以迅速推广水处理技术。工业水处理技术牵涉到各行各业，关系到环境保护、水资源的合理使用。我国水资源量虽然是世界的第六位，但人均占有水资源量很低，属贫水国家。所以水资源管理已经成为头等重大课题。当我们开始编写本书第二版时，我国人均年径流量为世界的第 88 位，到第二版出版时已降为第 109 位。最近我们惊奇地从资料[75]中看到又降为 121 位。这些数据使我们更感到节约水资源何等重要。水资源匮乏威胁着人类生存，将会成为深刻的社会危机。紧迫的形势也应促进我们努力掌握水处理技术知识，做好水处理工作。

本书第二版出版以来，深受广大读者欢迎，但我们仍感很不足。主要问题是：近年水处理技术在不断发展，在问答题中反映新的技术还不够；常用数据部分篇幅过大，资料不够系统，有的资料已过时。针对以上问题，本版主要作了以下修改和补充。

(1) 原书名为《工业水处理技术问答及常用数据》，改为《工业水处理技术问答》。

(2) 增补和修改了问答题，由原来的 506 题增加到 666 题。对近年发展较快的膜分离技术，增加了介绍篇幅；新增了海水、苦咸水淡化处理方法的介绍。同时在各章中均补充了近年技术发展和经验积累的新内容。

(3) 将原“第二篇常用数据”进行了压缩修改，改为“附录”。删去了旧的标准、定额及部分不常用的图表，进行了系统分类。主要保留的内容是：水的物理化学性质、各种用水的标准和规定及水处理剂的标准、规定和性能等内容。为方便水处理工作者查找，尽量收集了近年出版较新的技术标准。

(4) 为表达阴阳离子平衡关系，第二版中用[H^-]mol 及[H^+]mol/L 表示当量及当量浓度 N。这种表示方法应用不普及。本版参考有关资料[61]，改用物质的量浓度 $c\left(\frac{1}{x}A^{x-}\right)$/(mol/L)或 $c\left(\frac{1}{x}B^{x+}\right)$/(mol/L)表示阳离子或阴离子的当量浓度；用 $Q_V\left(\frac{1}{x}A^{x-}\right)$/(mmol/L)或 $Q_V\left(\frac{1}{x}B^{x+}\right)$/(mmol/L)表示阳离子或阴离子交换树脂的体积交换容量；用 $Q_m\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$/(mmol/g)或 $Q_m\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$/(mmol/g)表示阳离子或阴离子交换树脂的质量交换容量。详见本书第一章第 20 题。

本书修订过程中曾得到各方面的支持，使我们受益匪浅。在此特向麦玉筠、许建华、包义华、岳舜琳、许振良等同行表示衷心的感谢。

金　熙　项成林　齐冬子

2002.11

第二版序

《工业水处理技术问答及常用数据》在原《工业水处理技术问答》的基础上，经过编著者几年的努力修订，今天和广大读者见面了。

本书主要是为从事工业水处理的实际工作者编写的一本工具书。采用一问一答的形式，内容简明扼要，深入浅出，既有对理论的阐述，又有实践经验的总结。1989年初次出版后，深受广大读者的欢迎。

本次再版增添了许多新的内容。篇幅增加了一倍左右，介绍了目前国际上工业水处理技术的前沿水平，提出了更多的处理实际问题的方法。本书还补充了许多非常有实用价值的数据图表，采用了法定计量单位。对于工厂的技术人员、技术工人、大专院校有关专业的师生和科研工作者都会有很大的益处。

工业水处理技术既是一门边缘科学，又是一门实用技术。在全世界面临淡水资源紧张的条件下，在热工装置和化工、轻工、冶金、机械、电子等行业对超纯水和冷却水的要求日益提高的情况下，推广使用工业水处理技术有着很大的意义。

我国是世界上严重缺乏淡水的国家之一。我国地面水资源只占世界第六位，面人均淡水资源只有2700立方米，占世界第88位，仅为世界人均占有量的四分之一。而我国工业冷却水采用闭路循环的，只占不到50%，又是个很大的浪费。

20世纪70年代以来，我国引进和自行开发了多种冷却水闭路循环的技术，目前，大氮肥厂水的重复利用系数已达到94%以上，取得了很好的经济效益和环境效果。国家的政策是大力推广各种节水技术，保证经济发展和环境保护的需要。因此，无论对已采用或将要采用冷却水闭路循环技术的企业，本书都会是很有用处的。

本书的三位作者都是多年从事工业水处理的生产和管理方面的专家。有着深厚的理论功底和丰富的实践经验。这本书是他们对工业水处理最新理论成果的介绍，也是他们本身多年工作经验的总结。希望能对广大读者有所裨益。

化工出版社多年来为读者提供了许多精品书籍。这次又修订出版了这样一本很有实用价值的书，相信广大读者一定会需要它。

化工部生产协调司　高　岁

1996 年 1 月

第二版前言

本书原名《工业水处理技术问答》，出版于1989年。本书是在原书基础上修改后写成的，修改的主要内容如下：

（1）增补了较多的新问答题，对原有的问答题也作了适当修订。原来为335问，现增加到506问。增补内容考虑的主要因素是：尽量完整介绍工业水处理技术、近年水处理技术的发展和经验积累以及某些实用的计算方法。

（2）为方便水处理工作者查阅资料，本书收集了大量有关水处理的实用技术数据。共计310组图或表，占用篇幅较大。为此，我们感到再用原书名不合适了，故改为现书名：《工业水处理技术问答及常用数据》。全书分为两篇。第一篇为：工业水处理技术问答；第二篇为：常用数据。为使读者了解资料来源，我们在大多数常用数据题目的右上角用方括号[]注明了参考文献编号。对原资料中个别我们认为不够确切之处，加了编者注。

（3）原书使用了一部分非法定计量单位，这次本书中已全改用法定计量单位。如原书的压强（压力）单位为kgf/cm^2、atm、mmHg等，现改为兆帕（MPa）或千帕（kPa）；热量单位原用cal、kcal，现改为焦耳（J）、千焦（kJ）。法定单位规定物质的量单位是摩尔（mol），浓度名称为物质的量浓度。当量或当量浓度是废止的名称，在本书中一律不用。以往当量及当量浓度在水处理技术中应用很普遍，因用其表达水中阴阳离子平衡、离子交换平衡概念清楚、方便计算，而用mol和mol/L来表示有时不够确切。为此，本书中使用了[H^+]mol及[H^+]mol/L来代替当量和当量浓度mN。[H^+]mol表示：物质的量的基本单元为[H^+]，即能提供或接受1mol H^+的物质称为1[H^+]mol。为使读者习惯新单位，本书中增加了一些解释物质的量及其浓度单位的问答题，并在

第二篇中增加了单位换算的篇幅，在许多数据表中增加了新旧单位对照的数据。

本书修订之前，曾于1994年征求过水处理界部分同行及读者的意见。对我们有很多有益的启示。这次修订，我们主观愿望是将本书内容写得更加实用些、概念和数据尽量准确些、服务对象更加广泛些。使本书不仅有助于水处理工作的工人，也有助于技术人员，同时有助于自学水处理技术的管理干部和技术人员。但是由于我们水平有限，尚感写得不尽人意。所以，希望水处理界的同行及广大读者批评指正。

本书在进行修订时，曾得到高岁、胡启明、麦玉筠、薛树森、王增愉、许建华、金墉临、岳舜琳等同志的帮助和支持，在此，谨向以上领导和同行表示感谢。

金　熙　项成林　齐冬子

1996.3

内 容 提 要

本书以问答形式介绍工业水处理技术的知识。全书分五章：水的基本知识、水的净化、水的软化和除盐处理、炉水处理及敞开式循环冷却水的化学处理。共计666个问题，一问一答，内容丰富，深入浅出，通俗易懂。附录中收集了水的物理化学性质、各种用水及水处理剂的技术标准等资料。本书可供从事水处理工作的管理干部、技术人员学习参考，亦可作为工人的自学教材。

本版由金熙、项成林和齐冬子完成修订工作，金熙审阅。

目　　录

第一章　水的基本知识 …… 1

1　地球上水储量的分布及水资源情况如何？ …… 1

2　我国水资源的情况怎样？ …… 2

3　水有些什么特性？ …… 4

4　水在自然界是如何进行循环的？ …… 5

5　地表水和地下水有些什么特点？ …… 6

6　为什么把水作为冷却和传送热量的介质？ …… 9

7　什么叫水的蒸汽压、沸点、冰点？ …… 9

8　什么是饱和蒸汽和过热蒸汽？ …… 9

9　什么叫密度、相对密度？什么叫比热容？ …… 10

10　什么叫溶液、饱和溶液、溶解度？ …… 10

11　何谓溶度积？有何意义？ …… 11

12　什么叫分子、原子、元素？ …… 12

13　什么叫单质、化合物、混合物？ …… 12

14　什么是物质的量及其单位——摩尔？ …… 12

15　什么叫相对原子质量、相对分子质量？什么是摩尔质量？前两者与摩尔质量有何不同？ …… 14

16　怎样用“分数”表示溶液组成的量和单位？ …… 14

17　什么是质量浓度？ …… 15

18　什么是物质的量浓度？ …… 16

19　什么是质量摩尔浓度？ …… 17

20　怎样用物质的量浓度来代替当量浓度？ …… 17

21　如何计算以氢离子为基本单元的摩尔质量？ …… 20

22　天然水中含有哪些杂质？按颗粒大小如何分类？ …… 23

23　什么是水中的悬浮物质？ …… 25

24　什么是水中的胶体物质？ …… 25

25　什么是水中的溶解物质？水中溶有哪些主要离子和气体？ …… 25

26 天然水中的杂质对水质有些什么影响？ …… 26
27 水中的有机物质是指什么？有机物对水体有什么危害？ …… 27
28 为什么水中 CO_2 会对碳钢产生腐蚀？ …… 27
29 水中的主要阴、阳离子对水质有些什么影响？ …… 28
30 为什么有的水会有臭味？ …… 28
31 什么是水的总固体、溶解固体和悬浮固体？ …… 29
32 什么是水的含盐量？ …… 29
33 什么是水的浑浊度？ …… 30
34 如何使用比光浑浊仪？ …… 30
35 什么是光电浊度仪？ …… 31
36 各种类型光电浊度仪的性能有什么不同？使用时要注意什么？
…… 34
37 什么是水的透明度？ …… 35
38 如何以透明度来划分水的等级？ …… 36
39 什么是水的色度？ …… 37
40 什么是水的硬度？ …… 38
41 水的硬度有哪几种？ …… 38
42 硬度的单位是如何表示的？ …… 39
43 硬水对工业生产有什么危害？ …… 39
44 什么是水的碱度？水中的碱度有哪几种形式存在？ …… 40
45 水中各种碱度的相互关系如何？ …… 41
46 碱度的单位是如何表示的？水质的硬度和碱度常标“以
$CaCO_3$ 计”是何意？ …… 42
47 天然水是如何按照硬度和含盐量来分类的？ …… 43
48 天然水如何按水中主要阴阳离子分类？ …… 44
49 如何根据硬度和碱度的关系了解水质？ …… 45
50 什么是水的酸度？ …… 47
51 何谓水的电阻率？ …… 48
52 何谓水的电导度和电导率？和电阻率之间有何关系？ …… 48
53 什么是水的 pH 值？有什么意义？ …… 50
54 天然水中的碳酸从何而来？以什么形态存在？ …… 51
55 什么是电解质？什么叫电离平衡？ …… 51
56 何谓水中碳酸的平衡？ …… 53

57 什么是活性硅？什么是胶体硅？ …… 57
58 水中硅酸化合物以何种形态存在？ …… 57
59 什么叫水的溶解氧（DO）？ …… 58
60 什么叫化学需氧量（COD）？ …… 59
61 什么叫生化需氧量（BOD）？如何以生化需氧量（BOD）来判断水质的好坏？ …… 60
62 什么叫总需氧量（TOD）？ …… 61
63 什么叫总有机碳（TOC）？ …… 61
64 如何对水质分析的结果用阴阳离子总量进行校正？ …… 61
第二章 水的净化 …… 63
65 原水中含有的杂质一般以何种方法将其去除？ …… 63
66 什么是水的预处理？预处理有哪些主要方法？ …… 65
（一）混凝 …… 65
67 为什么水中胶体颗粒不易自然沉降？ …… 65
68 水中胶体颗粒的结构有什么特点？ …… 56
69 怎样使胶体颗粒沉淀？ …… 67
70 什么叫凝聚？ …… 67
71 什么是电凝聚？其原理如何？ …… 68
72 什么叫絮凝？ …… 69
73 什么叫混凝、混凝过程和混凝处理？ …… 70
74 什么叫混凝剂？有哪些常用的混凝剂？ …… 70
75 为什么混凝剂能除去水中的胶体物质？ …… 72
76 碱式氯化铝（PAC）混凝剂有何特点？ …… 73
77 聚丙烯酰胺（PAM）絮凝剂有什么特性？如何应用？ …… 74
78 为什么碳酸镁絮凝剂可以循环使用？ …… 76
79 何谓微生物絮凝剂？ …… 77
80 什么叫助凝剂？有哪些常用的助凝剂？ …… 78
81 pH 值对铝盐混凝剂有些什么影响？ …… 78
82 pH 值对于铁盐混凝剂有些什么影响？ …… 79
83 影响混凝效果的因素是什么？ …… 79
84 混凝剂的投加对水质碱度、酸根有些什么影响？ …… 80
85 凝聚剂的用量是如何确定的？ …… 81
86 石灰水在水的预处理中起什么作用？ …… 82

（二）沉淀与澄清 …… 83
87 沉淀有哪几种形式？ …… 83
88 沉淀处理的效果受哪些因素影响？ …… 83
89 什么是平流沉淀池？ …… 84
90 什么是竖流沉淀池？ …… 86
91 什么是辐流式沉淀池？ …… 86
92 什么叫斜板、斜管沉淀池？ …… 88
93 影响斜板、斜管沉淀池效果的因素是什么？ …… 89
94 同向流斜板、斜管沉淀池有什么特点？ …… 90
95 试述各类沉淀池的适用条件？有何优缺点？ …… 91
96 澄清池和沉淀池有何不同？ …… 92
97 什么是加速澄清池？ …… 92
98 如何进行加速澄清池的操作控制？ …… 94
99 加速澄清池运行中易出现哪些异常现象？应如何处理？ …… 96
100 泥渣在澄清过程中有什么作用？ …… 96
101 为什么要控制澄清池的泥渣回流量？ …… 97
102 如何测定悬浮泥的沉降比？ …… 98
103 什么是水力循环澄清池？ …… 98
104 如何进行水力循环澄清池的操作控制？ …… 99
105 什么是改进型的水力循环澄清池？ …… 100
106 什么是脉冲澄清池？ …… 102
107 如何进行脉冲澄清池的操作控制？ …… 104
108 超脉冲澄清池是什么原理？ …… 105
109 什么是悬浮澄清池？ …… 107
110 如何进行悬浮澄清池的运行管理？ …… 108
111 试述各类澄清池的适用条件？有何优缺点？ …… 108
112 澄清（沉淀）池有几种排泥方法？有何优缺点？ …… 109
113 水温的变化对澄清池出水水质有何影响？ …… 110
114 澄清池出现大量矾花上浮是何原因？ …… 110
115 澄清池里加氯有什么作用？ …… 111
116 什么叫气浮净水技术？ …… 112
117 什么是压力溶气气浮净水技术？ …… 112
118 气浮净水技术有何特点？其适用条件如何？ …… 114

（三）过滤 …… 115
119 过滤在水的净化过程中有何作用？ …… 115
120 滤池的过滤原理是什么？ …… 115
121 快滤池的工作原理是怎样的？ …… 116
122 快滤池要进行哪些测定工作？ …… 117
123 什么叫滤池的水头损失？为什么要控制水头损失？ …… 119
124 快滤池常见什么故障？如何处理？ …… 119
125 为什么滤池要有一定的冲洗时间？ …… 120
126 滤池的冲洗有哪几种方式？ …… 120
127 什么叫反洗强度？怎样确定合适的反洗强度？ …… 121
128 什么是虹吸滤池？ …… 121
129 什么是重力式无阀滤池？ …… 123
130 如何进行重力式无阀滤池的开、停车操作？ …… 124
131 何谓微絮凝直接过滤技术？ …… 125
132 什么是 V 形滤池？ …… 126
133 各种滤池的适用条件如何？有何优缺点？ …… 128
134 过滤池的运行周期缩短应如何处理？ …… 129
135 砂滤池出水浑浊度超标是什么原因？ …… 130
136 什么是上向流过滤池？ …… 130
137 什么是平向流过滤池？ …… 131
138 什么是移动床过滤池？ …… 133
139 什么是单流式机械过滤器？如何运行操作？ …… 133
140 什么是双流式机械过滤器？如何运行？ …… 135
141 机械过滤器在运行中会出现哪些异常现象？应如何处理？ …… 136
142 均粒石英砂滤料滤池有些什么特点？ …… 137
143 什么是生物过滤池？ …… 137
144 什么是影响滤池运行的主要因素？ …… 139
145 什么叫滤层的截污能力？与哪些因素有关？ …… 140
146 对滤池的滤料有何要求？ …… 140
147 什么叫滤料的不均匀系数？其大小对过滤有什么影响？ …… 141
148 什么是双层滤料？有什么特点？ …… 142
149 什么是三层滤料滤池？ …… 142
150 使用三层滤池应注意些什么？ …… 143

151 陶粒滤料有什么特点？ …… 144
152 什么是纤维球滤料？ …… 144
153 什么是微滤机？ …… 145
154 微过滤与常规过滤有些什么区别？ …… 145
155 什么是微孔膜过滤技术？ …… 146
156 微孔过滤的机理和特点是什么？ …… 146
157 什么是超过滤技术？ …… 148
158 超过滤的工作原理及其特点是什么？ …… 149
159 活性炭在水处理中有何作用？ …… 149
160 活性炭过滤原理是什么？ …… 150
161 活性炭过滤器有什么作用？运行时要注意些什么？ …… 150
162 水处理用活性炭吸附装置有哪些形式？ …… 151
163 水处理用活性炭是如何制造的？ …… 153
164 哪种活性炭用在净水和给水处理上？ …… 154
165 如何选用活性炭？ …… 155
166 活性炭有哪些吸附特性？ …… 157
167 哪些因素影响活性炭的吸附？ …… 159
168 活性炭有何技术特性？失效后如何再生处理？ …… 161
169 活性炭净水器对活性炭有何要求？ …… 161
170 什么是纤维状活性炭？ …… 163
171 新活性炭需经哪些处理才能投用？ …… 163
172 如何去除水中的铁和锰？ …… 163
（四）消毒 …… 164
173 为什么要进行水的消毒？ …… 164
174 消毒的方法有哪几种？ …… 164
175 氯气有些什么特性？ …… 165
176 为什么不宜将氯瓶内的液氯都用光？ …… 165
177 在液氯钢瓶上洒水是起什么作用？ …… 166
178 氯气的杀生原理是什么？ …… 166
179 什么是有效氯、需氯量、转效点加氯、结合氯、游离氯和总氯？ …… 166
180 加氯量如何确定？ …… 167
181 加氯点是如何确定的？ …… 169

182 液氯钢瓶在使用过程中，有哪些安全注意事项？ …… 170
183 加氯装置有哪些主要类型？其工作原理如何？ …… 171
184 加氯操作要注意哪些安全事项？ …… 172
185 加氯系统漏氯时如何查找？ …… 173
186 臭氧有哪些物化性质？ …… 173
187 臭氧是如何氧化水中的有机物质的？ …… 174
188 如何制造臭氧消毒剂？ …… 176
189 臭氧发生器的构造怎样？ …… 177
190 哪些因素影响臭氧发生器的产量？ …… 179
191 用什么方法把臭氧加入水中？ …… 182
192 臭氧消毒剂在给水处理中的应用情况怎样？ …… 184
193 二氧化氯的物理、化学性质怎样？ …… 185
194 二氧化氯与氯的杀生效果有些什么不同？与氯、臭氧、紫外线消毒方法的综合评价如何？ …… 186
195 制备二氧化氯有哪些方法？ …… 188
196 对投加二氧化氯有什么要求？ …… 191
197 影响二氧化氯稳定的因素有哪些？ …… 191
198 什么是紫外线消毒？ …… 192
199 紫外线杀菌装置是怎样的？ …… 193
200 紫外线杀菌效果与哪些因素有关？ …… 194
201 用紫外线消毒要注意些什么？ …… 194
第三章 水的软化和除盐处理 …… 196
（一）离子交换剂 …… 196
202 什么叫离子交换剂？可分哪几类？ …… 196
203 离子交换树脂发展的简况怎样？ …… 196
204 磺化煤、天然绿砂及人造沸石有什么主要性能？ …… 197
205 磺化煤在使用时应注意什么？ …… 198
206 磺化煤为什么能“脱色”？应如何处理？ …… 198
207 什么是离子交换树脂？可分哪几类？ …… 199
208 离子交换树脂有哪些主要性能？ …… 200
209 离子交换树脂的结构是怎样的？ …… 201
210 离子交换树脂为什么制成球形？ …… 202
211 离子交换树脂的粒度及均匀性对水处理有什么影响？ …… 202

212 什么叫离子交换树脂的溶胀性？它与什么因素有关？ …… 203
213 什么叫离子交换？ …… 203
214 什么叫离子交换反应的可逆性？ …… 203
215 失效树脂为什么可以通过再生重新获得交换能力？ …… 204
216 什么是离子交换树脂的选择性？有什么规律性？ …… 205
217 怎样识别离子交换树脂的牌号？ …… 206
218 如何选择离子交换树脂？ …… 207
219 如何计算离子交换树脂的用量？ …… 208
220 如何保管好离子交换树脂？ …… 210
221 什么是离子交换树脂的全交换容量和工作交换容量？ …… 211
222 各类离子交换树脂交换容量利用率有什么不同？ …… 212
223 什么叫离子交换树脂的饱和度、再生度？ …… 212
224 树脂的密度有哪几种表示形式？ …… 213
225 弱酸、弱碱性树脂有什么特性？如何应用？ …… 213
226 强碱Ⅰ型、Ⅱ型阴离子交换树脂有什么特点？ …… 214
227 大孔型树脂有些什么特点？ …… 215
228 凝胶型与大孔型树脂有什么区别？ …… 215
229 树脂对使用的温度有何要求？ …… 217
230 对离子交换树脂要检测哪些项目？ …… 217
231 为什么强酸性树脂以钠型出厂，而强碱性树脂以氯型出厂？ …… 219
232 新树脂为什么也要进行处理？如何处理？ …… 219
233 如何鉴别失去标签（志）的树脂？ …… 219
234 阴、阳离子交换树脂混杂后如何分离？ …… 221
235 离子交换树脂的强度为什么会降低？ …… 221
236 离子交换树脂使用后颜色变深说明什么？ …… 221
237 树脂受到污染的原因是什么？ …… 222
238 阴离子交换树脂有机物中毒有些什么典型症状？ …… 223
239 什么叫树脂污染指数？不同的污染指数情况下采用什么措施？ …… 223
240 如何防止树脂受污染和怎样进行处理？ …… 224
241 为什么阴离子交换树脂容易变质？ …… 225
242 树脂受到铁的污染应当如何处理？ …… 226

243 怎样判断树脂受油污染？ …… 226
244 有哪些类别的专用树脂？ …… 226
（二）水的软化处理 …… 227
245 为什么要进行水的软化处理？ …… 227
246 什么是原水、软化水、除盐水、纯水和超纯水？ …… 227
247 为什么软化和除盐水处理前要除去过量的余氯？采用什么方法？ …… 228
248 水的软化处理有哪些基本方法？ …… 228
249 化学软化处理常用哪些药剂？ …… 229
250 石灰软化法的原理是什么？ …… 230
251 为什么石灰软化不能去除非碳酸盐硬度？ …… 231
252 为什么说石灰软化法处理的水是不稳定的？ …… 231
253 为什么石灰软化常和混凝处理同时进行？ …… 232
254 怎样控制石灰软化水的处理？ …… 233
255 什么是后沉淀？如何防止？ …… 233
256 如何制备稳定的石灰浆液？ …… 234
257 石灰软化处理的石灰加量如何估算？ …… 235
258 什么是石灰-纯碱软化处理？ …… 236
259 什么是苛性钠和纯碱-苛性钠软化处理？ …… 238
260 如何估算化学软化处理方法的药剂用量？ …… 238
261 用钠离子交换树脂进行软化处理的原理和特点是什么？ …… 239
262 钠离子交换软化处理的盐耗如何计算？ …… 240
263 二级钠离子软化有什么特点？ …… 241
264 什么是 H-Na 离子交换软化法？ …… 241
265 H-Na 离子软化法有哪几种方式？ …… 242
266 什么是氢离子交换加碱中和法？ …… 245
267 什么是加热软化法？ …… 245
268 离子交换法软化处理有哪些常见故障？如何处理？ …… 245
269 什么是铵-钠离子交换软化处理？ …… 247
270 铵-钠离子交换软化处理系统有哪几种形式？ …… 248
271 什么是钠-氯离子交换处理？ …… 249
272 软化床再生时其树脂层上部为什么要有一定厚度的水层？ …… 250

（三）水的化学除盐处理 …… 251
273 什么是水的化学除盐处理？ …… 251
274 水的离子交换软化和化学除盐处理有什么不同？ …… 251
275 什么是一级复床除盐处理？ …… 252
276 为什么一级复床除盐处理不以阴床-阳床的顺序排列？ …… 253
277 什么叫离子交换平衡及平衡常数？ …… 254
278 离子交换的过程是如何进行的？ …… 255
279 什么叫离子交换过程的分层失效原理？ …… 256
280 什么叫离子交换过程的分层吸附原理？ …… 257
281 什么叫固定床？有什么特点？ …… 258
282 固定床离子交换剂的再生有哪些方式？ …… 259
283 固定床顺流再生的操作如何进行？ …… 259
284 顺流床在再生时会出现哪些异常现象？应如何处理？ …… 260
285 顺流床反洗跑树脂应怎样处理？ …… 261
286 固定床逆流再生如何进行操作控制？ …… 262
287 固定床逆流再生工艺有些什么特点？ …… 265
288 逆流床的中间排水装置有什么作用？有什么要求？ …… 265
289 pNa 计测定阳床出水含钠量应注意什么？ …… 267
290 阴床出水电导率始终较高是什么原因？ …… 267
291 影响电导率测定的有哪些因素？ …… 268
292 复床的串联与组联排列运行有什么不同？ …… 268
293 如何从水质变化情况来判断阴、阳床即将失效？ …… 269
294 控制除盐水的运行终点有哪些方法？ …… 271
295 什么是混合床除盐处理？ …… 272
296 固定式混合床的结构如何？ …… 273
297 如何进行混合床的操作控制？ …… 273
298 为什么有时混合床的阴、阳树脂分层不明显？如何处理？ …… 276
299 混床出水 pH 值偏低是什么原因？ …… 277
300 什么叫树脂的“抱团”现象？它是怎样产生的？如何消除？ …… 278
301 什么是体内再生和体外再生？各有什么优缺点？ …… 279
302 如何选择再生剂？ …… 279

303 用硫酸作为再生剂时应注意些什么？ …… 280
304 为什么有时阴床的再生效率低？ …… 281
305 再生液的质量分数和温度对再生效果有些什么影响？ …… 281
306 再生液的纯度对于再生效果有些什么影响？ …… 283
307 阴树脂再生剂烧碱的质量对树脂工作交换容量有什么影响 …… 284
308 复床再生废水的处理有哪些方法？ …… 285
309 为什么一、二级交换器对树脂层高有一定的要求？ …… 286
310 什么叫水垫层？水垫层有什么作用？ …… 286
311 为什么离子交换器要留有一定的反洗膨胀高度？ …… 287
312 进行除盐水处理时，对再生剂稀释水选择有何要求？ …… 287
313 如何计算酸、碱耗量和比耗？ …… 288
314 怎样选择化学除盐系统？ …… 289
315 什么是移动床除盐处理？ …… 290
316 如何进行移动床的操作？ …… 291
317 什么是流动床离子交换处理？ …… 292
318 什么是浮动床离子交换处理？ …… 293
319 如何进行浮动床的操作控制？ …… 294
320 什么叫落床？浮动床对落床有什么要求？落床有几种方法？ …… 295
321 备用的浮动床投运前为什么要正洗？ …… 296
322 浮动床在运行中应注意哪些问题？ …… 297
323 什么是半逆流再生？ …… 298
324 什么是双层床离子交换处理？ …… 299
325 如何进行双层床的再生操作？ …… 300
326 什么是双室双层床离子交换处理？ …… 301
327 什么是双室双层浮动床？ …… 301
328 如何进行双室双层浮动床的操作控制？ …… 303
329 什么是三室床？ …… 304
330 什么是三层混合床？ …… 305
331 离子交换塔内加入惰性树脂有什么作用？ …… 306
332 什么叫氢离子精处理？ …… 306
333 什么是除碳器？ …… 307

334 影响除碳效果的因素有哪些？ …… 309
335 除碳器在运行中易出现哪些异常现象？应如何处理？ …… 309
336 多面空心球填料有什么优点？ …… 310
337 对离子交换器排水装置垫层的石英砂应有什么要求？ …… 311
338 如何防止盐酸贮槽上发生酸雾？ …… 312
339 什么是超声波树脂清洗器？ …… 312
340 什么是树脂捕捉（集）器？ …… 313
341 如何去除胶体硅？ …… 313
342 测定水中硅酸时为什么要严格控制酸度？ …… 314
343 无钠水、无硅水是怎样制备的？ …… 315
（四）膜分离除盐处理 …… 316
344 什么是膜分离？膜分离过程的推动力是什么？ …… 316
345 我国膜分离技术在水处理领域的应用情况怎样？ …… 316
346 膜分离的基本原理是什么？机理如何？ …… 317
347 膜分离技术有些什么特点？ …… 319
348 工业水处理使用的膜有哪些类型？ …… 319
349 什么叫渗析？什么叫电渗析？ …… 321
350 电渗析的除盐原理是什么？ …… 321
351 电渗析的除盐处理过程如何？ …… 322
352 如何确定电渗析的运行参数？ …… 323
353 如何处理电渗析器的常见故障？ …… 323
354 电渗析的极化沉淀如何防止和消除？ …… 325
355 什么叫电渗析的电流密度、除盐效率和电流效率？ …… 326
356 为什么电渗析器的电极会腐蚀和结垢？ …… 327
357 如何使用和保存电渗析器的离子交换膜？ …… 327
358 电渗析器开、停车时应注意哪些事项？ …… 327
359 什么是频繁倒极电渗析？ …… 328
360 电渗析有些什么特点？ …… 328
361 选用电渗析时要注意哪些问题？ …… 329
362 对进入电渗析器的水质有何要求？ …… 330
363 什么是电去离子净水技术？ …… 330
364 如何测定污染指数 FI 或淤泥密度指数 SDI？ …… 331
365 反渗透除盐原理是什么？反渗透膜如何分类？ …… 332

366 反渗透膜的分离机理是什么？ …… 333
367 膜分离器有哪些形式？它应具备哪些条件？ …… 334
368 板框式膜组件的形式怎样？ …… 334
369 圆管式膜组件的结构怎样？ …… 335
370 螺旋卷式膜组件是怎样的一种结构？ …… 337
371 中空纤维式膜组件的结构怎样？ …… 338
372 各类膜分离器有哪些优缺点？其特性如何？ …… 339
373 对反渗透膜性能有何要求？醋酸纤维素膜与聚酰胺复合膜的性能如何？ …… 340
374 为什么反渗透膜的性能会下降？如何处理？ …… 341
375 反渗透技术有什么用途？ …… 342
376 反渗透的透水率、除盐率、回收水率如何计算？ …… 342
377 反渗透处理有哪些组合形式？ …… 342
378 各种反渗透膜的主要功能有什么不同？ …… 343
379 反渗透膜受到污染的原因是什么？有什么特征？ …… 344
380 反渗透-离子交换联合除盐处理有何优点？ …… 345
381 以反渗透-离子交换生产除盐水其经济效益如何？ …… 346
382 反渗透装置的运行要注意哪些事项？ …… 348
383 为什么反渗透装置的产水量会下降？如何处理？ …… 349
384 如何对反渗透膜进行化学清洗？ …… 350
385 如何防止反渗透系统出现浓差极化现象？ …… 351
386 为什么说给水处理对反渗透的安全运行至关重要？ …… 352
387 超过滤与反渗透有何区别？ …… 353
388 超滤膜污染后如何清洗？ …… 355
389 什么是纳滤？ …… 356
390 纳滤膜有何特点？ …… 357
391 什么是微滤？ …… 357
392 膜分离技术在水处理方面的应用情况如何？ …… 359
393 膜技术如何应用于超纯水制备？ …… 361
394 膜技术如何在高压锅炉补给水处理上应用？ …… 363
395 纯净水的生产是怎样利用膜技术的？ …… 364
396 矿泉水的生产是如何使用膜技术的？ …… 365
（五）海水、苦咸水淡化处理 …… 365

397 何谓海水、苦咸水淡化？ …… 365
398 海水和苦咸水淡化有哪些主要方法？ …… 367
399 什么是海水淡化蒸馏法？ …… 367
400 什么是太阳能海水淡化技术？ …… 367
401 何谓海水淡化多效蒸发蒸馏法？ …… 368
402 海水淡化多效蒸馏法有些什么技术改进？ …… 369
403 什么是多级闪蒸法海水淡化技术？ …… 369
404 什么是海水淡化压汽蒸馏法？ …… 370
405 什么是膜蒸馏？ …… 371
406 什么是核能海水淡化技术？ …… 372
407 各种海水淡化方法的投资费用和运行费用相比究竟怎样？ …… 373
408 海水反渗透淡化对引水和预处理有何要求？ …… 373
409 沙特阿拉伯的 Jeddah 海水反渗透工厂的工艺流程怎样？ …… 375
410 我国西部地区典型的水质情况怎样？ …… 376
411 用电渗析法进行苦咸水淡化存在哪些问题？ …… 377
412 嵊泗镇的海水淡化装置的工艺流程怎样？ …… 378
413 长岛苦咸水淡化站的工艺流程是怎样的？ …… 379
第四章 炉水处理 …… 380
414 为什么要严格控制锅炉给水水质？ …… 380
415 什么叫锅炉补给水、给水、凝结水、疏水、工艺冷凝水、炉水？ …… 380
416 什么是低压、中压、高压和超高压锅炉？对水质要求及控制方法上有何区别？ …… 381
417 什么是汽包锅炉、直流锅炉、超临界锅炉和废热锅炉？ …… 382
418 锅炉给水与炉水有哪些控制项目？ …… 382
419 为什么水未经除盐处理不能用做锅炉给水？ …… 382
420 什么是水垢和水渣？ …… 384
421 常见的锅炉水垢有哪些？ …… 384
422 锅炉水渣的组成是怎样的？ …… 384
423 为什么要监督锅炉给水的硬度？ …… 385
424 锅炉给水的硬度为什么有时不合格？如何处理？ …… 385
425 锅炉水质浑浊的原因是什么？如何处理？ …… 385
426 给水水质不合格是什么原因？应如何处理？ …… 386

427 锅炉给水中带油有什么危害性？ …… 386
428 锅炉给水中含有铜和铁时有什么危害？ …… 387
429 中、高压锅炉常用哪些炉内水处理剂？其作用如何？ …… 387
430 低压锅炉常用哪些炉内水处理剂？其作用如何？ …… 388
431 为什么要监督炉水中的含盐量（或含钠量）、含硅量？ …… 388
432 锅炉给水和炉水的 pH 值应控制在什么范围最好？ …… 388
433 如何调节锅炉给水中的 pH 值？ …… 389
434 锅炉水中的碱度过高有什么危害？ …… 389
435 炉水中的有机物质有何危害？ …… 390
436 锅炉给水为什么需进行除氧处理？ …… 390
437 为什么锅炉给水中要加联氨？ …… 390
438 炉内水处理为什么要加亚硫酸钠？要注意什么？ …… 391
439 为什么除氧器内水的含氧量有时会升高？ …… 392
440 什么是锅炉水的磷酸盐处理？ …… 392
441 什么是协调磷酸盐处理？ …… 393
442 为什么会出现炉水盐类暂时消失的异常现象？ …… 394
443 锅炉水的磷酸根有时为什么会不合格？如何处理？ …… 394
444 为什么要对蒸汽品质进行监督？ …… 394
445 为什么要监督蒸汽中的含钠量？ …… 395
446 硅酸化合物有何危害？ …… 395
447 为什么要进行炉水排污？怎样确定排污量？ …… 396
448 为什么蒸汽中的含钠量或含硅量有时会不合格？如何处理？ …… 397
449 为什么凝结水会受到污染？ …… 397
450 凝结水除盐处理有些什么特点？ …… 398
451 凝结水的溶解氧超指标应如何处理？ …… 398
452 凝结水中，所带氨影响混床出水电导率测定时应如何处理？ …… 398
453 什么是覆盖过滤器？其作用如何？ …… 399
454 对覆盖过滤器的滤料有什么要求？ …… 400
455 何谓磁力过滤器？ …… 400
456 什么是粉末树脂覆盖过滤器？ …… 401
457 为什么要进行锅炉的化学清洗？ …… 402

458 锅炉化学清洗的步骤和方式如何？ …… 403
459 新建锅炉的化学清洗范围有哪些？ …… 403
460 运行锅炉的化学清洗是如何确定的？ …… 403
461 为什么酸洗能够除锈除垢？ …… 404
462 锅炉酸洗的条件是如何确定的？ …… 405
463 锅炉化学清洗（酸洗）的介质应如何选择？ …… 406
464 常用的锅炉酸洗缓蚀剂有哪些？性能如何？ …… 406
465 什么是钝化？有哪些常用的钝化方法？控制条件如何？ …… 410
466 什么是碱洗或碱煮？方法如何？ …… 411
467 如何进行锅炉化学清洗？ …… 411
468 锅炉化学清洗有些什么质量要求？ …… 412
469 锅炉化学清洗的药剂用量是如何估算的？ …… 412
第五章 敞开式循环冷却水的化学处理 …… 415
（一）循环冷却水 …… 415
470 什么是工业冷却水？冷却水系统通常可分哪几种型式？ …… 415
471 什么是密闭式循环水系统和敞开式循环水系统？ …… 416
472 敞开式循环水系统可分为哪几类？ …… 416
473 冷却塔的工艺构造包括哪些部分？ …… 418
474 为什么工业用水有必要采用循环冷却水系统？ …… 419
475 什么是循环水系统容积？ …… 420
476 什么是循环水在系统内的平均停留时间？ …… 420
477 循环水的冷却原理是什么？ …… 421
478 什么是空气的干球温度和湿球温度？它对冷却塔的冷却效率有何影响？ …… 421
479 冷却水在循环过程中有哪些水量损失？ …… 422
480 什么是循环水的浓缩倍数？ …… 424
481 为什么提高浓缩倍数可以节约用水和药剂费用？ …… 424
482 如何计算间断加药的循环冷却水系统中药剂的消耗量？ …… 426
483 循环冷却水中溶解离子浓度随浓缩倍数的变化是如何计算的？ …… 427
484 敞开式循环冷却水中悬浮物浓度随浓缩的变化关系是如何计算的？ …… 429
485 冷却水循环使用后易带来什么问题？ …… 431

486 对循环水及其补充水的杂质控制有些什么要求？ …… 432
487 冷却水的化学处理方法有什么优点？其处理方法如何分类？ …… 433
488 我国常用的缓蚀阻垢复合配方有哪些？ …… 434
489 什么是换热器、水冷却器？为什么水处理工作者应了解水冷却器的有关情况？ …… 435
490 什么是夹套式换热器？ …… 436
491 什么是蛇管式换热器？ …… 437
492 什么是套管式换热器？ …… 438
493 什么是列管式换热器？ …… 439
494 列管式水冷却器容易发生哪些问题？ …… 441
495 什么是板式换热器？ …… 442
496 什么是螺旋板式换热器？ …… 443
（二）腐蚀的抑制 …… 444
497 什么是腐蚀？ …… 444
498 什么叫做全面腐蚀和局部腐蚀？ …… 444
499 什么是金属的腐蚀电化学过程？碳钢在冷却水中的腐蚀机理是什么？ …… 445
500 什么叫极化和去极化作用？ …… 446
501 什么叫电偶腐蚀？ …… 446
502 什么是氧浓差腐蚀电池？ …… 447
503 什么是缝隙腐蚀？ …… 448
504 什么是点蚀？ …… 448
505 什么是不锈钢的应力腐蚀开裂？ …… 449
506 什么是磨蚀和空化作用？ …… 449
507 什么是微生物腐蚀？ …… 450
508 控制金属腐蚀有哪些方法？ …… 451
509 CH-784 涂料的特点如何？ …… 453
510 为什么在有铜和铜合金设备的冷却水系统中还要考虑加铜缓蚀药剂？ …… 454
511 水中溶解氧对腐蚀有什么影响？ …… 455
512 水中溶解盐类的浓度对腐蚀有什么影响？ …… 456
513 水的温度对腐蚀有什么影响？ …… 456

514 水的 pH 值对腐蚀的影响如何？ …… 457
515 水流速度对腐蚀的影响如何？ …… 457
516 何谓缓蚀剂？缓蚀剂分为几类？ …… 458
517 氧化膜型缓蚀剂有什么特性？ …… 459
518 沉淀膜型缓蚀剂有什么特性？ …… 459
519 吸附膜型缓蚀剂有什么特点？ …… 460
520 铬酸盐缓蚀剂的特点是什么？ …… 460
521 铬酸盐排污水有什么处理方法？ …… 461
522 聚磷酸盐缓蚀剂的缓蚀机理是什么？ …… 462
523 什么是聚磷酸盐的水解或降解？聚磷酸盐水解对冷却水系统有何影响？ …… 463
524 什么是磷系配方的酸性处理？ …… 464
525 什么是磷系配方的碱性处理？ …… 464
526 什么是聚磷酸盐/膦酸盐/聚羧酸盐复合配方？ …… 465
527 什么是锌盐/聚磷酸盐/膦酸盐/聚羧酸盐复合配方？ …… 466
528 作为缓蚀剂的锌盐有什么特性？ …… 466
529 什么是有机胺类缓蚀剂？ …… 467
530 唑类化合物缓蚀剂有什么特性？常用的有哪几种？ …… 468
531 硅系水质稳定剂的特点是什么？ …… 469
532 近年硅系配方有哪些发展？ …… 469
533 钼系水质稳定剂的特点是什么？ …… 470
534 近年钼系配方有何发展？ …… 471
535 钨系水质稳定剂有何特点？近来发展怎样？ …… 472
536 什么叫做缓蚀剂的增效作用？ …… 473
537 腐蚀速度的表示方法有哪些？ …… 473
538 如何测算和评定金属的腐蚀速度？ …… 474
（三）结垢的防止 …… 475
539 冷却水系统中的水垢是如何形成的？ …… 475
540 沉积物有哪些组分？什么是污垢？什么是水垢？ …… 476
541 冷却水系统中的沉积物（污垢）来自哪些方面？ …… 477
542 为什么要进行垢样分析？垢样分析有哪些项目？ …… 477
543 什么是水冷却器的热流密度？ …… 478
544 什么是水冷却器的污垢热阻值和极限污垢热阻值？ …… 479

545 什么是污垢附着速度？ …… 480
546 污垢热阻值与污垢附着速度有何相应关系？ …… 481
547 判断水垢组成有什么简便定性方法？ …… 483
548 如何根据垢样分析结果判断水质的腐蚀或结垢倾向？ …… 483
549 判断水质的腐蚀或结垢倾向有哪些常用方法？ …… 484
550 什么是碳酸钙饱和 pH 值（pHs)？什么是碳酸钙饱和指数（I_S)？ …… 486
551 碳酸钙饱和指数在实用上有何参考价值？它有什么局限性？ …… 486
552 什么是稳定指数（S)？它有什么局限性？ …… 487
553 碳酸钙饱和 pH 值（pHs）是如何计算的？ …… 488
554 如何用查表法计算碳酸钙饱和 pH 值（pHs)？ …… 491
555 如何用查图法计算碳酸钙饱和 pH 值（pHs)？ …… 493
556 敞开式循环冷却水浓缩之后 pH 值会怎样变化？ …… 495
557 敞开式循环冷却水浓缩之后碱度会怎样变化？ …… 497
558 什么是极限碳酸盐硬度法？如何测算？ …… 500
559 什么是碳酸钙的临界 pH 值（pH_C)？测定 pH_C 有何意义？ …… 501
560 什么是结垢指数（*PSI*)？ …… 501
561 什么是磷酸钙饱和 pH 值（pH_P)？如何计算？ …… 502
562 如何用查图法计算磷酸钙饱和 pH 值（pH_P)？如何判断磷酸钙结垢的倾向？ …… 506
563 防止结水垢有什么方法？ …… 508
564 什么是水的磁化处理？ …… 509
565 什么是水的静电处理？ …… 509
566 为什么加酸或加二氧化碳能防止结垢？ …… 511
567 何谓阻垢剂？常用的有哪些阻垢剂？ …… 512
568 阻垢剂的阻垢机理是什么？ …… 513
569 什么叫聚合电解质？ …… 514
570 什么是共聚物？应用于冷却水处理中的共聚物有什么特点？ …… 514
571 什么是聚丙烯酸阻垢剂？ …… 515
572 什么是聚甲基丙烯酸阻垢剂？ …… 515

573 什么是水解聚马来酸酐阻垢剂？ …… 516
574 常用的聚羧酸二元或三元共聚物有哪些？ …… 516
575 什么是膦酸盐？常用的有哪些品种？ …… 518
576 什么是有机磷酸酯？什么是锌/多元醇磷酸酯/聚羧酸盐/磺化木质素复合配方？ …… 520
577 什么是膦羧酸阻垢剂？ …… 521
578 什么是全有机配方？ …… 521
（四）微生物的控制 …… 523
579 什么是微生物？其生长条件受什么因素影响？ …… 523
580 什么是细菌？ …… 524
581 什么是藻类？循环冷却水中常见的有哪些藻类？ …… 524
582 什么是真菌？循环冷却水中常见的有哪些真菌？ …… 525
583 微生物给冷却水系统带来什么样的危害？ …… 526
584 黏泥和污垢有什么区别？ …… 526
585 为什么黏泥会加速金属设备的腐蚀？ …… 527
586 真菌是怎样破坏冷却塔中木材的？ …… 527
587 藻类对循环冷却水系统有何危害？ …… 528
588 循环冷却水中微生物来自哪些方面？为什么循环水的微生物危害比直流水严重得多？ …… 528
589 循环冷却水中有哪些常见危害的细菌？ …… 529
590 什么是自养菌和异养菌？ …… 529
591 为什么要测定循环水中的异养菌数？ …… 530
592 铁细菌有什么特性和危害？应控制多少？ …… 530
593 氧化硫细菌有什么特性和危害？应控制多少？ …… 531
594 硫酸盐还原菌有什么特性和危害？应控制多少？ …… 532
595 什么是氮化细菌和硝化菌群？有什么特点和危害？ …… 532
596 循环冷却水中含氨有何危害？ …… 533
597 怎样全面监测循环冷却水中的微生物？ …… 534
598 通过哪些化学分析项目可以了解循环冷却水中微生物的动向？ …… 534
599 怎样通过物理观测了解循环冷却水系统中微生物的动向？ …… 535
600 循环水中的黏泥量是如何测定的？ …… 535

601 循环冷却水系统中的藻类怎样监测？ …… 536
602 菌藻检测有哪些基本方法？ …… 537
603 细菌检测有什么简易新方法？ …… 538
604 控制循环冷却水系统中的微生物有哪些方法？ …… 540
605 昆虫在循环冷却水系统中有何危害？如何防止？ …… 541
606 杀生剂如何分类？什么是氧化性和非氧化性杀生剂？ …… 542
607 氯与溴杀生剂各有何特点？冷却水中含氨对氯杀生有何影响？ …… 543
608 循环冷却水系统怎样进行液氯杀菌？ …… 545
609 什么是次氯酸盐杀生剂？ …… 546
610 什么是氯锭？ …… 547
611 什么是氯化异氰尿酸杀生剂？ …… 548
612 哪些溴化合物可用于循环冷却水？ …… 549
613 常用的氯酚类杀生剂有哪些？有何特性？ …… 550
614 什么是季铵盐类杀生剂？有何特性？ …… 551
615 什么是二硫氰酸甲酯杀生剂？ …… 552
616 什么是异噻唑啉酮杀生剂？ …… 553
617 什么是酰胺类杀生剂？ …… 553
618 什么是戊二醛杀生剂？ …… 554
619 重金属盐类杀生剂有哪些？有什么特性？ …… 554
620 乙基大蒜素杀生剂有什么特性？ …… 555
621 什么是洗必泰杀生剂？ …… 556
622 什么是季鏻盐杀生剂？ …… 556
623 为什么要测定非氧化性杀生剂的毒性？ …… 557
624 什么是药剂的 LD_{50}？ …… 557
625 什么是药剂的 LC_{50} 和 TL_m？ …… 558
626 常用杀生剂的毒性试验数据是多少？ …… 559
627 选择杀生剂应注意什么？ …… 560
628 如何有效地使用氯杀生？ …… 561
629 如何有效地使用非氧化性杀生剂？ …… 562
（五）清洗与预膜 …… 564
630 为什么要进行循环冷却水系统的清洗和预膜？ …… 564
631 怎样进行循环冷却水系统开车前的系统清洗？系统清洗常用

哪些化学药剂？ …… 565
632 什么是表面活性剂？ …… 567
633 不停车清洗有什么方法？ …… 567
634 怎样不停车清洗水冷却器中的黏泥？ …… 569
635 怎样不停车清洗水冷却器中的水垢？ …… 570
636 为什么需要对水冷却器进行单台清洗？单台清洗有哪些方法？ …… 572
637 如何进行水冷却器的单台酸清洗？ …… 574
638 如何进行水冷却器的单台碱清洗？ …… 576
639 如何进行水冷却器的钝化处理？ …… 576
640 常用的预膜剂及配方有哪些？ …… 577
641 影响聚磷酸盐预膜效果的有哪些因素？ …… 578
642 怎样进行预膜处理的运行与监测？ …… 579
（六）试验及运行管理 …… 580
643 筛选缓蚀阻垢配方之前应作哪些调查？ …… 580
644 为什么要进行旋转挂片试验？ …… 581
645 什么是动态模拟试验？如何进行？ …… 582
646 为什么要进行动态模拟中型试验？ …… 583
647 如何对模拟试验结果进行评价？ …… 585
648 什么是动态污垢监测试验？ …… 585
649 对循环冷却水的腐蚀试片有些什么要求？ …… 587
650 循环水的监测换热器有什么作用？ …… 588
651 点蚀的深度用什么方法测定？ …… 589
652 为什么循环冷却水系统一定要注意综合治理？综合治理要注意哪些问题？ …… 589
653 为什么循环冷却水的化学处理技术不易完全解决壳程水冷却器的腐蚀和结垢问题？ …… 592
654 如何解决壳程水冷却器的腐蚀和沉积问题？ …… 592
655 为什么循环水系统要进行旁流处理？ …… 593
656 如何计算循环水的旁滤量？ …… 594
657 为什么冷却塔内木结构要定期喷药进行灭菌处理？ …… 596
658 什么是冷却塔木结构的补充性防腐措施？ …… 596
659 为什么要加强循环冷却水系统的监测工作？ …… 597

660 对循环冷却水系统应作哪些必要的监测工作？ …… 597
661 以聚磷酸盐为缓蚀剂的冷却水系统，在正常运行时要控制哪些主要项目？ …… 598
662 怎样进行正确地加药？ …… 600
663 怎样估算缓蚀阻垢剂及非氧化性杀生剂的消耗量？ …… 601
664 怎样估算循环冷却水中的加酸量？ …… 602
665 循环水的 pH 值是怎样实现自动调节的？ …… 602
666 循环水系统的 pH 值降得过低了怎么办？ …… 604
附录 …… 606
附录 1 水、蒸汽、水溶液及空气的物理化学性质 …… 606
1.1 水和蒸汽的物理化学性质 …… 606
1.1.1 水的部分物理化学性质 …… 606
1.1.2 不同温度下水的部分常用物理性质 …… 606
1.1.3 (0～99.4)%真空时水的沸点 …… 608
1.1.4 压力 90.67～106.40kPa 时水的沸点 …… 609
1.1.5 水和过热蒸汽的动力黏度 …… 610
1.1.6 水和过热蒸汽的运动黏度 …… 614
1.1.7 饱和水蒸气的黏度 …… 616
1.1.8 饱和水蒸气表（按温度排列） …… 616
1.1.9 饱和水蒸气表（按压力排列） …… 618
1.1.10 过热水蒸气表 …… 619
1.1.10.1 蒸汽压力 0.51MPa (5.0atm)，饱和温度 151.11℃ …… 619
1.1.10.2 蒸汽压力 0.91MPa (9.0atm)，饱和温度 174.53℃ …… 620
1.1.10.3 蒸汽压力 1.52MPa (15.0atm)，饱和温度 197.36℃ …… 621
1.1.10.4 蒸汽压力 2.53MPa (25.0atm)，饱和温度 222.90℃ …… 622
1.1.10.5 蒸汽压力 4.05MPa (40atm)，饱和温度 249.18℃ …… 623
1.1.10.6 蒸汽压力 10MPa (98.7atm)，饱和温度 310.96℃ …… 623

1.1.10.7 蒸汽压力 15MPa（148.0atm），饱和温度
342.12℃ …… 623
1.1.10.8 蒸汽压力 20MPa（197.4atm），饱和温度
365.71℃ …… 624
1.1.11 水的比热容与压力和水温的关系 …… 624
1.1.12 水的热导率（导热系数）与压力和水温的关系 …… 625
1.1.13 不同温度下绝对纯水的理论电导率、电阻率和 pH 值 … 625
1.1.14 水的离子积常数 …… 625
1.2 水溶液的物理化学性质 …… 626
1.2.1 部分易溶盐类的溶解度（20℃） …… 626
1.2.2 部分难溶盐类的溶度积常数（25℃） …… 626
1.2.3 部分弱酸的电离常数（25℃） …… 627
1.2.4 部分弱碱的电离常数（25℃） …… 628
1.2.5 铝和铁的羟基络合物的水解平衡常数 …… 628
1.2.6 络合离子的不稳定常数 …… 629
1.3 水溶液及除盐水的电导率和电阻率 …… 630
1.3.1 部分离子的电导率（25℃） …… 630
1.3.2 部分离子的摩尔电导率（25℃） …… 631
1.3.3 不同温度、不同含量的 NaCl 溶液的电导率 …… 631
1.3.4 除盐水或蒸馏水的电导率、电阻率和近似的电解质含量（25℃） …… 631
1.4 水处理剂溶液的密度 …… 632
1.4.1 氢氧化钠（NaOH）水溶液的密度（4～20℃） …… 632
1.4.2 盐酸（HCl）的密度（4～20℃） …… 633
1.4.3 硫酸（H_2SO_4）的密度（4～20℃） …… 634
1.4.4 碳酸钠（Na_2CO_3）水溶液的密度（4～20℃） …… 637
1.4.5 氯化钠（NaCl）水溶液的密度（20℃） …… 637
1.4.6 石灰乳的密度（20℃） …… 638
1.4.7 氨水的密度（20℃） …… 638
1.4.8 部分盐类水溶液的密度 …… 639
1.5 空气的特性 …… 640
1.5.1 空气的组成及质量 …… 640
1.5.2 空气的温湿换算 …… 640

1.5.3 空气的黏度与压力、温度的关系 …… 643
附录 2 水处理剂的技术要求、性能和牌号等 …… 644
2.1 凝聚剂和絮凝剂技术标准 …… 644
2.1.1 硫酸亚铁，GB 10531—89 …… 644
2.1.2 硫酸铝，HG 2227—91 …… 644
2.1.3 硫酸铝钾，HG/T 2565—94 …… 645
2.1.4 聚合硫酸铁，GB 14591—93 …… 645
2.1.5 聚合硫酸铁，HG/T 2153—93 …… 645
2.1.6 氯化铁，GB 4482—93 …… 646
2.1.7 结晶氯化铝，ZBG 77001—90（同 HG/T 3541—90） …… 647
2.1.8 聚合氯化铝，GB/T 15892—95 …… 647
2.1.9 聚合氯化铝，HG/T 2677—95 …… 648
2.1.10 聚丙烯酰胺，GB 17514—1998 …… 648
2.2 缓蚀剂技术标准 …… 649
2.2.1 三聚磷酸钠，GB 9983—88 …… 649
2.2.2 聚偏磷酸钠，HG/T 2837—1997 …… 650
2.2.3 磷酸氢二钠，GB 6008—85（同 HG/T 2965—2000） …… 650
2.2.4 磷酸三钠，HG/T 2517—93 …… 651
2.2.5 重铬酸钠，GB 1611—92 …… 651
2.2.6 硅酸钠，GB/T 4209—1996 …… 651
2.2.7 硫酸锌，HG/T 2326—92 …… 653
2.2.8 氯化锌，HG/T 2323—92 …… 653
2.2.9 亚硝酸钠，GB 2367—90 …… 654
2.2.10 巯基苯并噻唑，GB 11407—89 …… 654
2.2.11 十八胺，ZBG 71005—89（同 HG/T 3503—89） …… 655
2.3 阻垢分散剂技术标准 …… 655
2.3.1 羟基亚乙基二膦酸（HEDPA），HG/T 3537—1999 …… 655
2.3.2 羟基亚乙基二膦酸二钠，HG/T 2839—1997 …… 655
2.3.3 液体氨基三亚甲基膦酸（ATMP），
HG/T 2841—1997 …… 656
2.3.4 固体氨基三亚甲基膦酸（ATMP），
HG/T 2840—1997 …… 657
2.3.5 乙二胺四亚甲基膦酸钠（EDTMPS），

HG/T 3538- -89 …… 657
2.3.6 聚氧乙烯醚丙三醇磷酸酯，HG/T 2228 -91 …… 658
2.3.7 多羟基化合物磷酸混酯，HG/T 2228—91 …… 659
2.3.8 聚丙烯酸（PAA），GB/T 10533- 2000 …… 659
2.3.9 聚丙烯酸钠（PAAS），HG/T 2838—1997 …… 660
2.3.10 水解聚马来酸酐（HPMA），GB/T 10535- -1997 …… 660
2.3.11 马来酸酐-丙烯酸共聚物，HG/T 2229—9[illegible] …… 661
2.3.12 丙烯酸-丙烯酸甲酯共聚物，HG/T 2429—93 …… 661
2.3.13 丙烯酸-丙烯酸羟丙酯共聚物（Ⅰ）及丙烯酸钠-甲基丙烯酸羟乙酯 丙烯酸甲酯共聚物(Ⅱ)，HG/T 2429 - 93 …… 662
2.3.14 丙烯酸-2-甲基-2-丙烯酰胺基丙磺酸类共聚物，HG/T 3642— 1999 …… 663
2.3.15 单宁，GB 5308 —85 …… 663
2.3.16 2 膦酸基-1,2,4-三羧基丁烷（PBTC），HG/T 3662—2000 …… 664
2.4 杀生剂技术标准 …… 664
2.4.1 氯，GB/T 5138—1996 …… 664
2.4.2 次氯酸钠，HG/T 2498 -93 …… 665
2.4.3 次氯酸钙，GB 10666 -95 …… 665
2.4.4 漂白粉，HG/T 2496—93 …… 666
2.4.5 二氧化氯，HG/T 2777 - 1996 …… 666
2.4.6 三氯异氰尿酸，HG/T 3263 - 2001 …… 666
2.4.7 氯化十二烷基二甲基苄基铵，HG/T 2230—91 …… 667
2.4.8 异噻唑啉酮衍生物，HG/T 3657—1999 …… 667
2.5 除氧剂技术标准 …… 668
2.5.1 水合肼，HG/T 3259 - 90 …… 668
2.5.2 亚硫酸钠，HG/T 2967 - 2000 …… 669
2.5.3 氨醌，HG 7 1360—-80 …… 669
2.6 清洗剂及清洗用缓蚀剂的技术标准 …… 670
2.6.1 氨基磺酸，HG 2527 —93 …… 670
2.6.2 柠檬酸，GB 1987—-80 …… 670
2.6.3 甲酸，GB/T 2093 - 93 …… 670
2.6.4 苯胺，GB 2961— 90 …… 671

2.6.5 甲醛，GB/T 9009—1998 …… 671
2.6.6 硫脲，HG/T 3266—88（同 ZBG 17013 88） …… 672
2.6.7 六亚甲基四胺，GB/T 9015—1997 …… 672
2.6.8 吡啶，GB 3694－ 83，3695—83，3696—83，
3697 83 …… 673
2.6.9 工业氟化氢铵，HG/T 3586—1999 …… 674
2.7 杀生剂及其他水处理剂的毒性试验等数据 …… 674
2.7.1 氯化剂的有效氯 …… 674
2.7.2 水中游离氯对水生生物的影响 …… 675
2.7.3 国产常用杀生剂 …… 675
2.7.4 杀生剂毒性试验数据 …… 677
2.7.5 混凝剂、除氧剂、清洗剂、润湿剂及缓蚀阻垢剂毒性
试验数据 …… 685
2.8 我国水处理用离子交换树脂的牌号、性能及技术要求 …… 690
2.8.1 离子交换树脂结构及床型代号 …… 690
2.8.2 我国离子交换树脂的名称、型态、型号与结构对照表 …… 691
2.8.3 我国主要离子交换树脂的物理化学性质 …… 694
2.8.4 凝胶型强酸性苯乙烯系阳离子交换树脂（001×7）
技术指标．GB/T 13659-- 92 及 DL 519- 93 …… 696
2.8.5 凝胶型强酸性苯乙烯系阳离子交换树脂（002）技术
指标，DL 519—93 …… 697
2.8.6 大孔型强酸性苯乙烯系阳离子交换树脂（D001）技术
指标，GB/T 16579 1996 及 DL 519—93 …… 697
2.8.7 弱酸性丙烯酸系阳离子交换树脂（116），
HG/T 2166 91 …… 698
2.8.8 大孔型弱酸性丙烯酸系阳离子交换树脂（D113）技术
指标，HG/T 2164 91 及 DL 519 93 …… 699
2.8.9 大孔型弱酸性丙烯酸系阳离子交换树脂（D111）技术
指标，DL 519—93 …… 700
2.8.10 凝胶型强碱性Ⅰ型苯乙烯系阴离子交换树脂（201×7）
技术指标，GB/T 13660—92 及 DL 519—93 …… 701
2.8.11 凝胶型强碱性Ⅰ型苯乙烯系阴离子交换树脂（201×4）
技术指标，HG/T 2163－91 …… 702

2.8.12 大孔型强碱性Ⅰ型苯乙烯系阴离子交换树脂（D201）技术指标，GB/T 16580- 1996 及 DL 519—93 …… 702
2.8.13 大孔型强碱性Ⅱ型苯乙烯系阴离子交换树脂（D202）技术指标，HG/T 2754- 1996 及 DL 519- 93 …… 704
2.8.14 大孔型弱碱性苯乙烯系阴离子交换树脂（D301）技术指标，HG/T 2165- 91、HG/T 2624 -94 及 DL 519 93 …… 706
2.8.15 三层混床专用离子交换树脂（D001-TR、D201-TR 及 S-TR），HG/T 2623—94 …… 707
2.9 国外离子交换树脂生产厂及牌号 …… 708
2.9.1 国外离子交换树脂主要生产厂家及牌号表 …… 708
2.9.2 国内外离子交换树脂牌号对照表 …… 709
附录 3 各种用水标准及规定 …… 716
3.1 饮用水及生活用水 …… 716
3.1.1 我国生活饮用水水质标准，GB 5749—85，1999 年修订稿，2001.9.1 实施 …… 716
3.1.1.1 生活饮用水水质常规检验项目及限值 …… 716
3.1.1.2 生活饮用水水质非常规检验项目及限值 …… 717
3.1.1.3 饮用水源水中有害物质的限值 …… 718
3.1.2 我国城镇建设行业饮用净水水质标准，CJ 94—1999 …… 719
3.1.3 中国台湾饮用水水质标准（1998 年 2 月） …… 720
3.1.4 世界卫生组织（WHO）饮用水水质准则（第二版），1993 年公布，1998 年修订 …… 723
3.1.4.1 饮用水的细菌学质量 …… 723
3.1.4.2 饮用水中对健康有影响的化学物质 …… 723
3.1.4.3 饮用水中常见的对健康影响不大的化学物质 …… 728
3.1.4.4 饮用水中放射性组分 …… 729
3.1.4.5 饮用水中含有能引起用户不满的物质及其参数 …… 729
3.1.5 美国现行饮用水水质标准（2001 年） …… 730
3.1.5.1 国家一级饮用水法规 …… 730
3.1.5.2 国家二级饮用水法规 …… 739
3.1.6 欧盟饮用水水质指令（98/83/EC） …… 739
3.1.7 法国生活饮用水水质标准（95—368） …… 741

3.1.8 我国饮用矿泉水标准，GB 8537—1995 …… 745
3.1.9 我国饮用净水卫生标准，GB 17323- 1998 及
GB 17324—1998 …… 747
3.2 地面水、地下水、海水、农渔业等用水及排污水 …… 748
3.2.1 我国地表水环境质量标准，GB 3838- 2002
（代替 GB 3838—88，GHZB 1 1999） …… 748
3.2.1.1 水域功能和标准分类 …… 748
3.2.1.2 地表水环境质量基本项目标准限值 …… 748
3.2.1.3 集中式生活饮用水地表水源地补充项目标准限值 …… 749
3.2.1.4 集中式生活饮用水地表水源地特定项目标准限值 …… 750
3.2.2 地下水质量标准，GB/T 14848—93 …… 751
3.2.3 我国农田灌溉水质标准，GB 5084—85 …… 753
3.2.4 我国渔业水质标准，GB 11607—89 …… 755
3.2.5 我国景观娱乐用水水质标准，GB 12941—91 …… 756
3.2.6 我国海水水质标准，GB 3097—82 …… 757
3.2.7 我国污水综合排放标准，GB 8978—1996 …… 758
3.2.7.1 第一类污染物最高允许排放浓度 …… 758
3.2.7.2 第二类污染物最高允许排放浓度 …… 759
3.2.7.3 部分行业最高允许排水量 …… 762
3.2.8 我国建设行业污水排入城市下水道水质标准，
CJ 3082—1999 …… 765
3.3 纯水、锅炉给水、炉水及蒸汽 …… 766
3.3.1 我国电子级水的技术指标，GB 11446.1—1997 …… 766
3.3.2 美国电子和半导体水质要求，ASTM D 5127- 99 …… 766
3.3.3 我国火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量，
GB/T 12145 -1999 …… 768
3.3.3.1 范围 …… 768
3.3.3.2 蒸汽质量标准 …… 768
3.3.3.3 锅炉给水质量标准 …… 769
3.3.3.4 汽轮机凝结水质量标准 …… 770
3.3.3.5 锅炉炉水质量标准 …… 771
3.3.3.6 补给水质量标准 …… 771
3.3.3.7 减温水质量标准 …… 772

3.3.3.8 疏水和生产回水质量标准 …… 773
3.3.3.9 热网补充水质量标准 …… 773
3.3.3.10 水内冷发电机的冷却水质量标准 …… 773
3.3.3.11 停、备用机组启动时的水、汽质量标准 …… 773
3.3.3.12 水汽质量劣化时的处理 …… 774
3.3.4 我国工业锅炉水质标准，GB 1576—2001 …… 776
附录4 水处理有关的标准检索表 …… 778
4.1 水处理剂标准 …… 778
4.1.1 水处理剂国家标准 …… 778
4.1.2 水处理剂行业标准 …… 780
4.2 各种用水水质标准 …… 783
4.2.1 用水水质国家标准 …… 783
4.2.2 用水水质行业标准 …… 784
4.3 工程建设、管理、维修标准 …… 784
4.3.1 工程建设、管理、维修国家标准 …… 784
4.3.2 工程建设、管理、维修行业标准 …… 785
4.4 水质、污垢、活性炭及离子交换树脂的分析测定或试验方法 …… 785
4.4.1 水污染物分析方法国家标准 …… 785
4.4.2 锅炉用水和冷却水分析方法国家标准 …… 789
4.4.3 工业循环冷却水分析及试验方法国家标准 …… 791
4.4.4 电子级水质分析方法国家标准 …… 793
4.4.5 饮用天然矿泉水水质分析方法国家标准 …… 793
4.4.6 活性炭及离子交换树脂测定方法国家标准 …… 795
4.4.7 工业循环冷却水水质、污垢、缓蚀阻垢剂的分析测定方法行业标准 …… 795
附录5 单位及单位换算 …… 797
5.1 中华人民共和国法定计量单位，GB 3100- 93 …… 797
5.1.1 国际单位制的基本单位 …… 797
5.1.2 国际单位制的辅助单位 …… 798
5.1.3 国际单位制中具有专门名称的导出单位 …… 798
5.1.4 国家选定的非国际单位制单位 …… 799
5.1.5 用专门名称表示的国际单位制的导出单位 …… 799

5.1.6 用于构成十进倍数和分数单位的词头 …… 800
5.2 常用计量单位与国际计量单位换算汇总表 …… 801
主要参考文献 …… 805
元素周期表

第一章　水的基本知识

1　地球上水储量的分布及水资源情况如何?[52]

水，是地球上分布最广的自然资源。地球上水的总量约有 $1.386\times10^{9}km^{3}$。如果全部平铺在地球表面上，可以达到3000m的水层厚度。地球表面的四分之三都被水覆盖着。

储水量虽然如此丰富，但海水就占了整个储水量的96.5%，淡水量的全部总和只不过占总储水量的2.53%。水资源是指全球水量中对人类生存、发展的可用的水量，主要是指逐年可以得到更新的那部分淡水量。所以淡水储量并不等于水资源量。实际上能供人类生活和工农业生产使用的淡水资源还不到淡水储量的万分之一。水资源总量的统计和计算比较复杂。水资源中最能反映水资源数量和特征的是河流的年径流量，它不仅包含降雨时产生的地表水，而且包括地下水的补给。所以，常用年径流量来比较各国的水资源。全球年径流量约为 $47\times10^{12}m^{3}/a$（$1\times10^{12}m^{3}/a$，万亿立方米每年）。

地球上水储量的分布情况如下表：

序号	水体存在类别	体积/$10^{4}km^{3}$	所占比例/%	
			总储水量	淡水储量
1	海洋水	133800	96.5	—
2	地下水	2340	1.7	—
	（其中：地下淡水）	（1053）	（0.76）	（30.1）
3	土壤水	1.65	0.001	0.05
4	冰川与永久雪盖	2406.41	1.74	68.7
5	永冻土底冰	30.0	0.2	0.86
6	湖泊水	17.64	0.013	—
	（其中：淡水）	（9.10）	（0.007）	（0.26）
7	沼泽水	1.147	0.0008	0.03

续表

序号	水体存在类别	体积/10^4km^3	所占比例/%	
			总储水量	淡水储量
8	河床水	0.212	0.0002	0.006
9	生物水	0.112	0.0001	0.003
10	大气水	1.29	0.001	0.04
总储量		138598.461	100	-
其中：淡水储量		3502.921	2.53	100

资料来源：联合国会议论文，《世界水平衡和地球水资源》，1977.3。

2 我国水资源的情况怎样？

我国年平均降雨量为 648.2mm（1956～1976 年平均值），淡水资源总量为 $2.8142\times10^{12}\ m^3/a$（$10^{12}\ m^3/a$ 为万亿立方米每年），其中河川年径流量为 $2.7115\times10^{12}\ m^3/a$。年径流量约占全球的 5.8%，居世界第六位，仅次于巴西、俄罗斯、美国、印度尼西亚和加拿大。

虽然我国水资源总量不少，但由于地广人多，所以我国的人均水资源占有量及单位国土水资源占有量均低于世界平均值。按我国水利部门的统计资料[75]，1995 年我国人口为 12.11 亿，人均淡水资源占有量为 $2323m^3/a$，人均年径流量为 $2238.6m^3/a$。在统计的 153 个国家中我国排名为第 121 位。如以当前（2001.3 公布）的 12.95 亿人口计，人均年径流量仅为 $2094m^3/a$。我国人均水资源占有量仅约为世界平均值的四分之一。国际上确定：人均水资源占有量 $1000m^3/a$ 为生存起码需求标准，$2000m^3/a$ 则处在严重缺水的边缘。我国 1995 年每公顷耕地水资源占有量为 $29480m^3/a$，折合成亩均水资源占有量约为 $1965m^3/a$，为世界平均值的四分之三左右。

世界及部分国家的国土面积、耕地面积、人口及水资源情况见下表。在 153 个国家中人均年水资源占有量冰岛居第 1 位，科威特为第 153 位。

我国水资源的分布在时间和空间上也很不均衡。我国属季风气候，降水大部分集中在汛期。夏季径流量几乎占全年的40%，大

世界及部分国家的水资源等情况[75]

国　名	国土面积 /$10^4\times km^2$	年水资源量①		计算人口 (1995) /10^4 人	人均年水资源量 (1995)		计算耕地面积(1995) /10^4 ha②	单位耕地年水资源量 (1995) /[$m^3/(10^4 m^2\cdot a)$]②
		$10^8 m^3/a$	位次		$m^3/(a\cdot 人)$	位次		
巴西	851.197	69500	1	16179	42957	20	53500	129906
俄罗斯	1707.54	42700	2	14700	29048	31	130970	32603
美国	936.352	30560	3	26325	11608.7	56	185742	16453
印度尼西亚	190.457	29860	4	19575.6	15253.6	49	17130	174314
加拿大	997.1	29010	5	2946.3	98462	8	45420	63870
中国	959.696	27115	6	121121(1995) 129500(2001.3)	2238.6(1995) 2094(2001.3)	121	91977	29480
孟加拉	0.069	23570	7	12043.3	19571	44	8456	278737
印度	328.759	20850	8	93577.4	2228	122	166100	12553
冰岛	10.3	1680	50	26.9	624535	1	6	28000000
科威特	1.782	2	153	154.7	103	153	5	10000
全球	陆地面积 14902.5	468500		364000(1971) 543600(1995) 618000(2001.7)	12871(1981) 8618(1995) 7581(2001.7)		1218267(1993)	38456(1993)

① 以多年平均河川径流量为代表；

② 原文中 ha 为 hm^2，有误。1ha（公顷）$=10^4 m^2$，1a（公亩）$=10^2 m^2$。

量淡水未被利用就通过洪水排入大海。而其余时间又往往缺水。从地区上来说，我国长江流域及其以南地区的径流量约占全国的81%，而北方广大地区不足20%。南方人均年径流量约为4000多m^3/a，北方只有900多m^3/a，南方为北方的4.4倍。北方特别干旱地区人均年径流量往往还低得多，例如河北省仅约$300m^3/a$。单位耕地面积的水资源量，南方约为北方的9.1倍，南方亩均径流量约为$4100m^3/a$，北方约为$450m^3/a$。

以上情况说明：我国是贫水国家，已被联合国列为世界上十三个贫水国家之一。对于我国，加强水资源的管理尤其具有重大意义。如果不能做到节约水资源和提高水的利用率，水资源问题可能成为经济发展的瓶颈，势必会影响我国社会主义建设的速度。我国政府对环境和水资源保护问题越来越重视。已于1988年颁布了《中华人民共和国水法》，并规划和正在实施南水北调等宏伟的水利工程。作为每一个水处理工作者，尤其需要加强管理、挖潜、杜绝浪费、提高效益。

3　水有些什么特性？

水的分子式为H_2O，相对分子质量为18.015，在水分子中，氢占11.19%，氧占88.81%，常温下，是无色、无味、无臭的透明液体，纯水几乎不导电。

水有着异常的特性，正由于这些特性，使水对自然界和人类生活产生了巨大的作用和影响。

水有固态、液态、气态的三态变化。水的融点为0℃，沸点为100℃。常温下以液态存在。在工业生产中，常利用水的固、液、气三态变化的特性，来进行能量的变换。

水在4℃（实为3.98℃）时体积最小而密度最大（为$1g/cm^3$）。在超过或低于此温度时，密度减小，而体积却膨胀。这与通常物质的热胀冷缩的变化规律不一样。天然水在变成冰时，体积变大而密度变小。由于冰的密度（$0.917g/cm^3$）比水小，故浮在水面上，这不仅隔绝了严寒气温，而且保护了水下生物的生存，对于地球上生物的存在与进化有着极大的作用。

水有着比所有的液体和固体物质都大的比热容，因此，当水温度每升高或降低1℃时，1g水所吸收或放出的热量，比其他物质都要大得多；1g水温度升高或降低1℃，所吸收或放出的热量约为4.2J（1cal）。水在所有的液体中有着最大的比蒸发热，在100℃时，达到2256.7J/g（539.0cal/g）；当冰融解为水时，其热容量要增加两倍以上，而一般固体熔化时，比热容量的变化都很微小；水在沸腾时，水温仍可保持在100℃，而冰在融化时冰水混合的水温也仍可以保持在0℃。

水是溶解能力很强的溶剂，多数物质在水中有很大的溶解度。水的介电常数很大，可达到80左右。水对各种溶质的电离能力也很强，使水中溶解的各种物质可以进行各种化学反应。

水在常温下有着较大的表面张力（仅次于汞），20℃时，表面张力达到72.75×10^{-3}N/m（72.75dyn/cm），而其他液体只有$(2.0\sim5.0)\times10^{-2}$N/m（20～50dyn/cm），故水具有明显的毛细管现象，并有润湿的作用。这对于自然界的机体生命活动和各种物理化学作用有着重大的影响。

水又是一切有机化合物和生命物质的氢的来源。组成一切有机化合物的碳、氢、氧等元素，主要来自水和空气中的二氧化碳。植物通过光合作用把二氧化碳和水转化为各种有机物的生命物质。因此，一切生命都和水的各种特性密切相关。

4　水在自然界是如何进行循环的？

自然界中，水在太阳照射和地心引力等的作用和影响下不停地运动，不断地转化。自然界的水在不断地循环。如图1-0-1所示。降水（包括雨雪等）到达地面之后，通过径流至江、河、湖、海、水库等，或径渗流至地层，或是通过蒸发至大气中，以这样的方式循环不止，这就构成自然界水的循环。

自然界循环的水量只占地球上总水量的0.031%，其中径流和渗流的约占0.003%。人类社会为了满足生活和生产的需要，也构成了一个取水和排水的水的社会循环体系。人类从水的社会循环体系中取用的水量又不过是径流和渗流水量的2%～3%，是地球总

水量的数百万分之一，是微不足道的，但对人类的活动关系极大。水的每一循环都掺入不同的杂质。

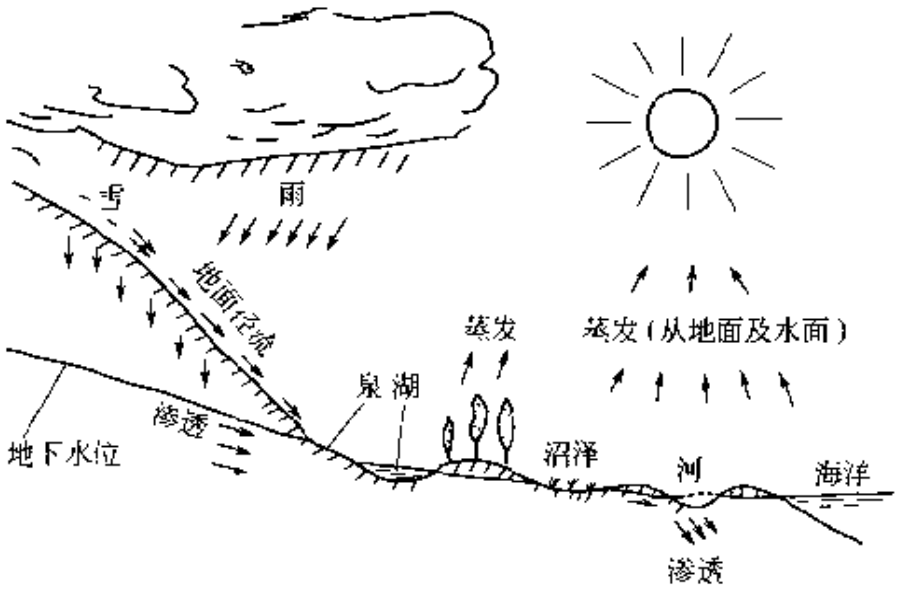


图 1-0-1　自然界中水的循环

5　地表水和地下水有些什么特点？

地表水是指雨雪、江河、湖泊以及海洋的水。这些水的特点都与它们的形成过程密切相关。雨雪在降落的过程中都溶有一定数量的杂质，如 O_2、CO_2、N_2 等，还可能混有工业和城市的废气、烟尘。这部分地表水总的来说杂质少且含盐量低、平均含盐量只有 40mg/L 左右，硬度也很低，平均也只有 0.025mmol/L 左右，属于软水。江河的水是经过地面径流汇集而成的，它接触了岩石及其风化产物、土壤等，溶入了一些盐类，因此，含盐量比雨雪高。我国江河水的平均含盐量为 166mg/L。河水还由于其冲刷作用，卷带了大量的泥沙、黏土等悬浮物质，而使水的浑浊度很高。湖水由于湖面宽广、流动缓慢，故蒸发量较大。如果流入和排出湖泊的水量都较大时，那么湖水的蒸发量相对较小，因而可以保持较低的含盐量而成为淡水湖。否则，如果流入的水量大部分被蒸发，使湖水浓缩含盐量增高，那就变成咸水湖或盐湖。湖泊由于光照面积大，有利于微生物的生长和繁殖，因此水中微生物的量较大。海洋水的蒸发量每年有 $40\times10^4 km^3$，从江河每年带入溶解盐类有 3.85×

10^9t，经过长年累月，海水中的含盐量高达35000mg/L左右。

地下水是雨水经过土壤及地层的渗透流动而形成的水，在其漫长的流程和广泛的接触中，溶入较多的盐类。但是，另一方面，地下水由于地层的层层过滤，悬浮物很少，水质清澈而透明，浑浊度较低。

总之，不管地表水或是地下水，都不是纯净的。因此，必须经过处理才能使用。

我国及世界河流水质例[1]　　mg/L

河　流	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$Na^+ + K^+$	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	含盐量
长江	28.9	9.6	8.6	128.9	13.4	4.2	193.6
黄河	39.1	17.9	46.3	162.0	82.6	30.0	377.9
黑龙江	11.6	2.5	3.7	54.9	6.0	2.0	83.7
西江	18.5	4.8	8.1	91.5	2.8	2.9	128.6
松花江	12.0	3.8	6.8	64.4	5.9	1.0	93.9
闽江	2.6	0.6	6.7	20.2	1.9	0.5	35.5
塔里木河	107.6	841.5	10265	1.7.2	6052	14368	31751.3
亚乌孙河	5.4	0.5	3.3	18.1	0.8	2.6	30.7
密西西比河	37	11	23	115	55	23	264
尼罗河	15.7	3.6	9.4	63.0	18.0	6.0	115.7
泰晤士河	75.9	4.8	12.3	211.0	39.1	12.2	358.3
莱茵河	50.3	11.7	5.2	181.4	24.6	8.0	281.2
多瑙河	58.2	13.5	5.3	236	15.4	2.6	331.0
伏尔加河	37.0	3.0	12.0	108.0	18.0	17.0	195.0
顿河	64.0	7.7	8.7	231.8	14.1	3.9	330.2
湄公河	12	1.6	3.7	49	0.4	0.4	67.1
木曾川	4.7	0.9	5.6	18.1	2.3	1.3	32.9

我国及世界湖泊、水库的水质例[1]

分类	湖泊、水库	离子总量	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{-}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	$\frac{1}{2}Ca^{2+}$	$\frac{1}{2}Mg^{2+}$	Na^{+}	HCO_3	$\frac{1}{2}SO_4^{2-}$	Cl^-
		mg/L	mg/L						mol%					
淡水湖	武汉南湖	138.7	18.9	1.83	17.9	70.7	15.8	13.7	25.2	4.2	20.7	30	8.8	10.5
	长春新立城水库	121.3	20.5	5.61	3.17	79.9	5.0	7.1	31.5	14	4.5	40.5	3.3	6.2
	湖北洪湖	127.12	22.4	3.17	11.4	75.3	10.3	4.55	32.4	7.5	14.4	35.5	6.36	3.76
	贝加尔湖(苏)	91.4	15.2	4.2	6.1	59.2	4.9	1.8	28.1	13.0	8.9	43.3	4.5	2.2
	伊利湖(美)	127	31.2	7.65	6.54	89.5	13.1	8.8	33.8	11.5	4.7	39.5	5.4	5.1
	苏黎世湖(瑞士)	138.2	41.1	7.2	5.1	72.9	11.1	0.83	36.1	10.4	3.5	45.3	4.3	0.4
咸水湖	乌塔湖(美)	1230	67	86	252	108	380	337	7.9	16.9	25.2	8.6	18.8	22.6
	伊塞克湖(苏)	5823	114	294	1475	240	2115	1585	3.1	13	34	2.1	23.8	24.1
		g/L	g/L											
盐湖	内蒙雅布赖盐湖	361.5	—	46.6	52.9	—	68.9	148.1	-	31.4	20.6	—	12.4	35.5
	死海(巴勒斯坦)	261.87	17.26	43.1	18.7	—	0.52	174.9	8.3	34.5	7.2	—	0.1	49.0
	大盐湖(美)	265.5	0.55	7.15	96.6	—	8.5	152.7	0.3	6.2	43.5	—	4.1	45.9

我国地下水水质例[2]

mg/L

地　区	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$Na^{+}+K^{+}$	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Fe^{2+}	Mn^{2+}	含盐量	H_2S	游离 CO_2	pH	特　点
石家庄井水	82.9	19.8	16.2	219.6	37.3	28.0	—	—	403.8	—	-	7.6	
哈尔滨井水	78.2	12.8	23.5	317.2	8.0	21.34	0.02	—	461.0	76.4	11.5	6.9	含 H_2S
佳木斯水源	37.2	12.6	20.4	140	15	40	10	1.0	276.2	-	60	6.6	含铁、锰
宁夏同心县井水	481.0	437.8	2790.0	488.2	3938.5	2127.6	—	--	10476		—	—	苦咸水
湖南岳阳井水	2.83	1.56	5.29	9.76	8.95	2.55	1.4～2.1	—	38.0	—	79.4	5.5	含铁，极软，强腐蚀性
天津塘沽地下水	8.0	3.7	317	464	48	200	--	—	1040.7	(含 F^- 5.0)		8.3	含氟矿化水

6 为什么把水作为冷却和传送热量的介质？

把水作为冷却和传送热量的介质是由它的特性决定的。而水的各种异常的特性是由它的结构上的特点所决定的。水在分子结构上的特点就是具有极大的极性和很强的生成氢键的能力，因而大大地增强了分子之间的作用力，使得水的内聚力很大。一般液体的内聚力（如以内压力表示）只有：200～500MPa（2000～5000atm）；而水的内压力高达2200MPa（22000atm），相差10倍左右。因此，如果要改变水的物态，就需要更多的热量和更高的温度，以克服这些内聚力。水有最大的比热容，比等体积空气的比热容大3300倍。因此，要使水温每升高1℃或降低1℃，需要吸收或放出的热量，要比其他物质大得多。也就是说，比起其他物质，水就具有储存或放出较多热量的能力。由于水的这种特性，因此工业生产上把它广泛作为冷却介质，通过换热设备，来传送和吸收工艺介质的热量，从而使工艺介质得到冷却。水还作为载热体被广泛应用，先是吸收储存热量而变为蒸汽，再是传送热量，并作功。这就是水被广泛地作为冷却和传送热量的介质的原因。

7 什么叫水的蒸汽压、沸点、冰点？

水可蒸发为蒸汽，蒸汽又可凝结为水，在某温度下，蒸发和冷凝达到平衡时的蒸汽，叫做该温度下的饱和蒸汽，此时的蒸汽压力称为该温度下水的饱和蒸汽压，或简称为水蒸气压。

水的蒸汽压是随温度升高而增大的。当水的温度升高到一定值时，水的蒸汽压等于外界压力，水就沸腾，这时的温度叫做水在该压力下的沸点。常压101.325kPa（1atm）下，水的沸点为100℃。水和冰平衡共存时的温度称为水的凝固点（或称冰的熔点），习惯上叫做冰点。在101.325kPa（1atm）压力下，水的冰点是0℃。

8 什么是饱和蒸汽和过热蒸汽？

水在一定的压力下加热，水的温度随着不断加热而上升，当水温升高到某一温度时，水就开始沸腾（俗称水开了），这时候水的温度称为沸腾温度。如再继续加热，水温保持不变，水即开始汽化，而逐步变为蒸汽。水在一定的压力下的沸腾温度也称为饱和温

度。这个温度与其所受压力大小有关，压力愈大，则沸腾温度（饱和温度）也就越高；反之，压力小，则沸腾温度也低。例如压力为0.10MPa（1atm）时，其饱和温度为99.09℃；压力为4.05MPa（40atm）时，其饱和温度为249.18℃；压力为10.13MPa（100atm）时，其饱和温度为309.53℃。

从上可知，水在一定压力下，加热至沸腾，水就开始汽化，也就逐渐变为蒸汽，这时蒸汽的温度也就等于饱和温度。这种状态的蒸汽就称为饱和蒸汽。

如果把饱和蒸汽继续进行加热，其温度将会升高，并超过该压力下的饱和温度。这种超过饱和温度的蒸汽就称为过热蒸汽。

9 什么叫密度、相对密度？什么叫比热容？

物质的密度表示单位体积中所含该物质的质量，其单位为kg/m³（千克每立方米）或g/cm³（克每立方厘米）。水在4℃时的密度为1g/cm³。相对密度为无因次量，表示物质的密度与水在4℃时的密度的比值。

单位物质的温度每升高（或降低）1℃所吸收（或放出）的热量叫做该物质的比热容，其国际单位制的单位为J/(kg·K)(焦[耳]每千克开[尔文])，导出单位为J/(g·K)(焦[耳]每克开[尔文])。1g水的温度每升高（或降低）1℃所吸收（或放出）的热量为4.1868J（即1cal），因此水的比热容为4.1868J/(g·K)[(即1cal/(g·℃)]。

10 什么叫溶液、饱和溶液、溶解度？

由两种或两种以上物质组成的均匀而稳定的体系叫做溶液。溶液分液体相及固体相，即溶液有液体溶液和固体溶液，不定义气体溶液。为了方便，一般将溶液中的最多的物质称为溶剂，将其他物质称为溶质。水系统为液体溶液，水被称为溶剂，溶于水中的其他杂质为溶质。如水和食盐组成的均匀而稳定的澄清溶液称为食盐水溶液。

在一定的条件下，物质的溶解和结晶达到平衡时的溶液叫做饱和溶液。

在一定的温度下，饱和溶液中所含溶质的量，称为该溶质在该温度下的溶解度。一般是把在室温下（20℃）时100g水中该物质溶解度超过10g的称为易溶物质；在1～10g之间的称可溶物质；在0.1～1.0g之间的称为微溶物质；而溶解度在0.1g以下的，称为难溶物质。

11 何谓溶度积？有何意义？

溶度积是表示在难溶电解质的饱和溶液中，当温度一定时，其离子的物质的量浓度（mol/L）的乘积为一个常数，这就叫溶度积，或称溶解平衡常数（K_s）。例如，从手册中查得在25℃时AgCl的$K_s=1.8\times10^{-10}$。AgCl在水中的溶解平衡如下：

$$AgCl(固)\rightleftharpoons Ag^+ + Cl^-$$

在水中产生等量的Ag^+及Cl^-离子。

$$[Ag^+][Cl^-]=1.8\times10^{-10}$$

令S为该难溶盐的溶解度（mol/L），则

$$S=[Ag^+]=[Cl^-]=\sqrt{1.8\times10^{-10}}$$
$$=1.34\times10^{-5}\text{mol/L}=0.0134\text{mmol/L}$$

故AgCl在25℃时的溶解度是0.0134mmol/L。

多离子的溶解平衡通式为：

$$A_nB_m(固)\rightleftharpoons nA+mB$$
$$K_s=[A]^n[B]^m$$

例如，查得$Zn(OH)_2$的$K_s=7.1\times10^{-18}$，其溶解平衡式为：

$$Zn(OH)_2(固)\rightleftharpoons Zn^{2+}+2OH^-$$

相当于通式中$n=1$，$m=2$；则

$$K_s=[Zn^{2+}][OH^-]^2=[S][2S]^2=4S^3=7.1\times10^{-18}$$
$$S=1.21\times10^{-6}\text{mol/L}=1.21\times10^{-3}\text{mmol/L}$$

故$Zn(OH)_2$的溶解度是1.21×10^{-3}mmol/L。

溶度积的意义在于：

（1）水溶液中，组成其难溶电解质的离子浓度乘积，如果正好等于溶度积时，这时的溶液叫做饱和溶液。

（2）水溶液中，组成某难溶电解质的离子的浓度乘积，如果大

于溶度积时，就产生过饱和。这时就会发生沉淀。但当沉淀物析出之后，该溶液仍是饱和溶液。

(3) 水溶液中，组成某难溶电解质的离子的浓度的乘积，如果小于其溶度积时，叫做不饱和溶液。因此，这时如再继续加入此难溶电解质，还可以继续溶解，直到饱和为止。

在工业水处理中，经常应用溶解平衡的概念，使某些难溶物质，从水中沉淀析出。或是利用溶度积来判断水溶液是否会产生沉积，为防止结垢提供依据。

12 什么叫分子、原子、元素？

分子是物质能够保持其化学特性的最小微粒。例如水是由能够保持水的特点的水分子构成。物质在发生物理变化时，分子没有发生质的变化，如水加热变成蒸汽，水分子仍然保持其特性没有发生变化，但是物质在发生化学变化时，分子就会发生变化，例如水电解时，水分子就变成与其特性完全不同的氢分子和氧分子。

原子是组成分子的更小微粒，它不保持原物质的性质。原子是由带有正电荷的原子核和带有负电荷而围绕原子核周围空间高速运动的电子组成。原子核又由带正电的质子微粒和不带电荷的中子微粒构成。

原子核中电荷数相同的一类原子称元素。

13 什么叫单质、化合物、混合物？

如果是由相同元素原子组成的物质就称为单质。如氧气是由相同的两个氧原子组成 O_2；氢气是由相同的两个氢原子组成 H_2。

如果是由不相同元素原子组成的物质就称为化合物。例如水 (H_2O) 是由氧原子和氢原子两种不相同元素原子组成。

如果由两种以上的单质或化合物组成的物质称为混合物。在混合物中各个组分仍然保持它们各自的性质。例如空气就是氧气、氮气等多种气体组成的气体混合物。水溶液可认为是液体混合物。混合物分为气体混合物、液体混合物和固体混合物三类。

14 什么是物质的量及其单位——摩尔？

1971 年第 14 届国际计量大会决定，摩尔是国际单位制 (SI)

物质的量的基本计量单位，其符号是 mol。

摩尔表示一个系统的物质的量，该系统所包含的基本单元数与 0.012kg 碳-12（^{12}C）[1] 的原子数相等。在使用摩尔时，必须指明基本单元，它可以是分子、原子、离子、电子及其他基本单元，或这些单元的特定组合。

已知 1 个 ^{12}C 原子的质量是 1.993×10^{-26}kg，所以 1mol 碳-12 所含的碳原子数目为：

$$\frac{0.012\text{kg/mol}}{1.993\times10^{-26}\text{kg}}=6.022045\times10^{23}\text{个/mol}$$

这个数目称为阿佛伽德罗常数（N_0）。即当某物质含有的基本单元数量等于阿佛伽德罗常数时，该物质的量就是 1mol。物质的质量（m）除以物质的量（n），称为摩尔质量 M。M 的单位 g/mol。例如，

1mol ^{12}C 原子含有 6.022045×10^{23} 个碳原子，具有 12.0000g 的质量，摩尔质量 $M(^{12}C)=12.0000$g/mol；

1mol 水分子含有 6.022045×10^{23} 个水分子，具有 18.015g 的质量，摩尔质量 $M(H_2O)=18.015$g/mol；

1mol OH^- 离子含有 6.022045×10^{23} 个 OH 离子，具有 17.0069g 的质量，摩尔质量 $M(OH^-)=17.0069$g/mol；

1mol e 电子含有 6.022045×10^{23} 个电子，具有 548.60μg 的质量，摩尔质量 $M(e)=548.60\times10^{-6}$g/mol。

物质的量（n）是以阿佛伽德罗常数（N_0）为计数单位的。即某物质所含有的基本单元数为阿佛伽德罗常数的多少倍，就是多少摩尔，n 可由下式计算：

$$n=\frac{\text{物质的质量 g}}{\text{物质的摩尔质量 g/mol}}\quad\text{mol}$$

如 36.030g 的水就等于 2.0mol H_2O。

---

[1] 碳-12（^{12}C）是指碳的稳定同位素，其原子核中有 6 个质子和 6 个中子。

15　什么叫相对原子质量、相对分子质量？什么是摩尔质量？前两者与摩尔质量有何不同？

分子和原子的质量都很小，如碳-12 原子的质量只有 1.993×10^{-23}g，因此在使用上很不方便。为便于使用，国际上统一规定，用碳-12 的原子质量的十二分之一作为基准，即称碳单位。以它作为标准单位计算出来的各种元素原子的相对质量就称为元素的相对原子质量（原子量）。也就是说，化学元素周期表中所列的各元素的相对原子质量都是令碳-12 等于 12.0000 作为基础而得出的相对质量。

相对分子质量（分子量）是组成该分子的所有原子的相对原子质量之和。如水分子由 1 个氧原子和 2 个氢原子组成。氧的相对原子质量为 15.999，氢的相对原子质量为 1.0079。则水的相对分子质量为 18.015。

摩尔质量是 1mol 物质以 g 为单位的质量。如，

^{12}C（碳）原子的相对原子质量为 12.0000，其摩尔质量为 12.0000g/mol；

S（硫）原子的相对原子质量为 32.06，其摩尔质量为 32.06g/mol；

H_2O（水）分子的相对分子质量为 18.015，其摩尔质量为 18.0152g/mol；

H^+（氢）离子的摩尔质量为 1.0079g/mol。

由此可得出结论：任何原子的摩尔质量单位是 g/mol 时，其数值等于该元素的相对原子质量。这种关系可以推广到分子、离子等其他基本单元。

16　怎样用“分数”表示溶液组成的量和单位？

分数为无量纲量，用分数表示溶质 B 与溶液（混合物）之比，分为质量分数、体积分数和摩尔分数三种。

（1）质量分数　溶质 B 的质量分数 ω_B 定义为：溶质 B 的质量 m_B 与混合物（溶液）的质量 $\sum_B m_B$ 之比。例如将 111kg 纯固碱 NaOH 溶于 1000kg 的水中，此时 NaOH 溶液的质量分数

$\omega(NaOH)=111/(1000+111)=0.10$ 或 10%。

用以前重量百分浓度表示，则为 NaOH%（W/W）=10，与质量分数 $\omega(NaOH)$ 等量。旧的重量百分浓度应废除，采用质量分数表示。

（2）体积分数　溶质 B 的体积分数 φ_B 定义为：

$$\varphi_B=x_B\cdot V_{m,B}/\sum_B x_B\cdot V_{m,B}$$

式中　$x_B\cdot V_{m,B}$——纯物质 B 在相同温度压力下的体积（x_B 为摩尔分数，$V_{m,B}$ 为摩尔体积）；

$\sum_B x_B\cdot V_{m,B}$——混合物（溶液）在相同温度压力下的体积。

例如，无水乙醇 70cm³ 加 30cm³ 水，则 $\varphi(C_2H_5OH)=70/(70+30)=0.70$ 或 70%。

以前的表示为：乙醇%（V/V）=70，与体积分数等量。旧的容量（V/V）百分浓度应废除，改用体积分数表示。

（3）摩尔分数　溶质 B 的摩尔分数 x_B 定义为：B 的物质的量 n_B 与混合物（溶液）的物质的量 $\sum_B n_B$ 之比。摩尔分数又称物质的量分数。

$$x_B=n_B/\sum_B x_B$$

以前的克分子百分数应用摩尔分数代替。

过去用的‰、ppm 及 ppb 也是无量纲量符号。1‰表示千分之一，1ppm 表示百万分之一，1ppb 表示十亿分之一。但国家标准中仅收入了%符号，表示 10^{-2} 或 0.01。国家标准中已不使用‰、ppm 及 ppb 符号，故采用 10^{-3}、10^{-6} 及 10^{-9} 代替。例如，5ppm 应写成 5×10^{-6}。ppm 及 ppb 不能用 m（毫）及 μ（微）来表示，因 m 及 μ 词头不能用来表示无量纲量。常用 ppm 代替 mg/L、ppb 代替 μg/L，从概念上是不正确的。

17　什么是质量浓度？

溶液中溶质 B 的质量浓度 ρ_B 定义为：溶质 B 的质量除以混合物（溶液）的体积，即

$$\rho_B=m_B/V$$

式中　m_B——溶质 B 的质量；

V——混合物（溶液）的体积。

国际单位制 SI 单位为 kg/m^3，在分析化学中常用 g/dm^3。$1kg/m^3=1g/dm^3=1g/L$。在工业水处理系统中，通常使用的单位是 g/L、mg/L 或 μg/L，即在 1 升溶液中含有溶质的克数、毫克数或微克数。$1g/L=10^3mg/L=10^6\mu g/L$。在天然水中，常用的是 mg/L 单位。除盐水多用 μg/L 单位。

例如，在每升天然水中含有 5mg 氯离子，则 $\rho(Cl^-)=5mg/L$。在每升除盐水中含有 10μg 钠离子，则 $\rho(Na^+)=10\mu g/L$。

18 什么是物质的量浓度？

溶液中 B 溶质的浓度又称 B 的物质的量浓度，符号为 c_B。定义为：B 的物质的量除以混合物（溶液）的体积，即

$$c_B=n_B/V$$

式中 n_B——溶质 B 的物质的量；

V——混合物（溶液）的体积。

c_B 在国际单位制（SI）的单位为 mol/m^3，但在分析化学中常用 SI 的分数单位为 mol/dm^3，即 mol/L。水处理行业中常用 SI 的分数单位 mol/L、mmol/L 及 μmol/L，分别表示每升溶液中所含溶质的摩尔、毫摩尔及微摩尔的数量。

按照规定，“浓度”二字独立使用时，就是指物质的量浓度。

用物质的量浓度表示时，必须指明基本单元。例如，在 1L 水溶液中含有 98.0718g 硫酸时，可写成 $c(H_2SO_4)=1mol/dm^3$ 或 1mol/L，也可写成 $c\left(\frac{1}{2}H_2SO_4\right)=2mol/dm^3$ 或 2mol/L。

按国际规定，物质的量浓度除可用 c_B 符号外，还可用符号 [B] 表示。[B] 用来表示平衡浓度，其单位也是 mol/dm^3 或 mol/L。

物质的量浓度 c_B 可代替以前的克分子浓度（或称摩尔浓度）M 和当量浓度 N，故应停止使用 M 及 N，代之以 c_B。

19 什么是质量摩尔浓度？

溶液中 B 溶质的质量摩尔浓度的符号为 b_B 或 m_B，其定义为：溶液中溶质 B 的物质的量除以溶剂的质量，即

$$b_B = n_B / m_A$$

式中 n_B——溶质 B 的物质的量；

m_A——溶剂 A 的质量。

在国际单位制 SI 中 b_B 的单位是 mol/kg，也常使用其分数单位 mmol/g。

用质量摩尔浓度表示时，必须指明基本单元。例如在 1kg 水中加入105.998g碳酸钠所形成的碳酸钠溶液，可写成$b(Na_2CO_3)=1mol/kg$，也可写成 $b\left(\frac{1}{2}Na_2CO_3\right)=2mol/kg$。

20 怎样用物质的量浓度来代替当量浓度？

在国际标准及国家标准中均已废除当量浓度，规定用物质的量的浓度来代替。但由于取消当量及当量浓度带给计算上的不便，使人们一时不习惯。故需讨论如何用物质的量浓度来恰当表达当量浓度的问题。

当量，作为一个化学量，在化学学科中已沿用了一百多年；当量定律，更被人看成是滴定分析计算的基础。水溶液中的阴阳离子应是平衡的。用当量浓度来表达水中化学的酸碱及氧化还原平衡的概念，容易说明问题，又方便计算。例如，2N $MgCl_2$ 溶液中，其 Mg^{2+} 及 Cl^- 均为 2N，可清楚地了解 Mg^{2+} 与 Cl^- 在水中的平衡关系。如用物质的量浓度 mol/L 来表示，则溶液中的 $MgCl_2$ 分子应为 1mol/L，Mg^{2+} 离子也为 1mol/L，而 Cl^- 离子为 2mol/L，不能一目了然地了解 Mg^{2+} 与 Cl^- 的平衡关系。所以用分子或离子为基本单元的物质的量浓度在表达平衡方面尚有不足。

但物质的量浓度有其表达准确、用法规范的优点，使用时必须指明基本单元，如果令基本单元等于当量，则用物质的量的浓度所表达的就实际上等于当量浓度。

在本书第二版中采用的是以氢离子为基本单元的物质的量浓度

代替当量浓度。即将能够提供或接受 1mol H^+ 离子的物质的质量称为一个氢离子摩尔，1[H^+]mol。以氢离子为基本单元的物质的量浓度的常用单位是[H^+]mol/L、[H^+]mmol/L 或[H^+]μmol/L。这样，一个氢离子摩尔实际上就等于一个克当量。以氢离子为基本单元的物质的量浓度实际上等于当量浓度，即 1[H^+]mol/L=1N、1[H^+]mmol/L=1mN/L、1[H^+]μmol/L=1μN/L。

由于以上表示方法不普及，故本书本版参考国家标准 GB 3102.8—93《物理化学和分子物理学的量和单位》，根据等物质的量规则，调整了表示方法。即令基本单元等于当量值来表达物质的量浓度。

在水处理系统与此关系较多的是如何表达硬度、碱度和离子交换树脂的交换容量的单位。现分别说明。

(1) 硬度　硬度包括铁、铝等高价金属离子，因其在天然水中含量极少，所以通常是指水中的钙镁二价离子，即指 Ca^{2+}、Mg^{2+} 或其混合物的浓度。

单独表示 Ca^{2+} 或 Mg^{2+} 时，因钙及镁的摩尔质量分别为 40.078g/mol 及 24.305g/mol，如果 1L 水溶液中含有 40.078g Ca^{2+} 或 24.305g Mg^{2+}，则可写成：

$$c(Ca^{2+})=1mol/L \text{ 或 } c\left(\frac{1}{2}Ca^{2+}\right)=2mol/L\doteq 2N$$

$$c(Mg^{2+})=1mol/L \text{ 或 } c\left(\frac{1}{2}Mg^{2+}\right)=2mol/L\doteq 2N$$

Ca^{2+} 及 Mg^{2+} 的混合物一般称为硬度，如水中的 $c(Ca^{2+})=0.8mol/L$，$c(Mg^{2+})=0.2mol/L$，则

$$\text{硬度}=c(Ca^{2+}+Mg^{2+})=1mol/L=2N$$

(2) 碱度　碱度的成分较复杂，其主要成分为含 HCO_3^-、CO_3^{2-} 及 OH^- 的化合物。在水中碱度一般为三者的混合物，组成不定。其中 HCO_3^- 或 OH^- 每 mol 可接受 1mol H^+，而 CO_3^{2-} 可接受 2mol H^+。因此 $c(HCO_3^-+CO_3^{2-}+OH^-)$ 与当量浓度不相当。

只有 $c\left(HCO_3^- + \frac{1}{2}CO_3^{2-} + OH^-\right)$ 才能和当量浓度相等。故本书中规定碱度为 $c\left(HCO_3^- + \frac{1}{2}CO_3^{2-} - OH^-\right)$。国家标准中在这方面没有具体规定。参考某些资料[61]，用 $\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)^*$ 代表与 OH^- 反应的正离子，基本单元是接受 1mol OH^- 的正离子；用 $\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)^*$ 代表与 H^+ 反应的负离子，基本单元是接受 1mol H^+ 的负离子。故将碱度改写为碱度 $\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$，以明确表示碱度的基本单元是能接受 1mol H^+ 的负离子。即碱度 $\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$ 1mol/L = $c\left(HCO_3^- + \frac{1}{2}CO_3^{2-} + OH^-\right)$ 1mol/L = 碱度 1N。

(3) 离子交换树脂交换容量　交换容量的表示方法有两种：

① 以体积计的湿离子交换剂的交换容量，以前的单位为mN/L或 mN/mL，现一般表示为 mmol/L 或 mmol/mL。其符号为：总交换容量 Q_V^*，平衡交换容量 Q_V^{eq}，工作交换容量 Q_V^o。

② 以质量计的干离子交换剂的交换容量、以前的单位为mN/g，现一般表示为 mmol/g。其符号为：总交换容量 Q_m^*，平衡交换容量 Q_m^{eq}，工作交换容量 Q_m^o。

以上交换容量单位中物质的量的基本单元为能提供或接受 1mol H^+ 的质量，即规定 1mol/L = 1N。本书中也采用这种表示方法。但为避免误会，本书在符号后加 $\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$ 或 $\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$，以区别阴阳树脂，并明确表示其基本单元是能提供或接受 1mol H^+ 的物质。如阳离子交换树脂的体积工作交换容量的符号和单位是 $Q_V^o\left(\frac{1}{x}A^{x-}\right)$，mmol/L 或 mmol/mL；阴离子交换树脂的体积工作交换容量的符号和单位是 $Q_V^o\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$，mmol/L 或 mmol/mL。按交换容量的分类，其符号见下表。

交换容量分类	符号			
	体积交换容量 /(mmol/L 或 mmol/mL)		质量交换容量 /(mmol/g)	
	阳树脂	阴树脂	阳树脂	阴树脂
总交换容量	$Q_V^0\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$	$Q_V^0\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$	$Q_m^0\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$	$Q_m^0\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$
平衡交换容量	$Q_V^{eq}\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$	$Q_V^{eq}\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$	$Q_m^{eq}\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$	$Q_m^{eq}\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$
工作交换容量	$Q_V^{op}\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$	$Q_V^{op}\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$	$Q_m^{op}\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$	$Q_m^{op}\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$

注：$\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$及$\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$中的 x 表示 A 或 B 的价数。

21 如何计算以氢离子为基本单元的摩尔质量？

凡能提供或接受 1mol 氢离子的物质的质量称为以氢离子为基本单元的摩尔质量 $M\left(\frac{1}{x}A^{x+},\ \frac{1}{x}B^{x-}\right)$，单位为 g/mol。$M\left(\frac{1}{x}A^{x-},\ \frac{1}{x}B^{x-}\right)$对计算以氢离子为基本单元的物质的量浓度不可缺少。

酸碱盐的 H^+摩尔质量必须根据化学反应式来确定，同一物质在不同反应式中可以有不同的 H^+摩尔质量。例如，H_3PO_4 与 NaOH 反应，有以下三种方式：

(A) $H_3PO_4+3NaOH=\!=\!=Na_3PO_4+3H_2O$

(B) $H_3PO_4+2NaOH=\!=\!=Na_2HPO_4+2H_2O$

(C) $H_3PO_4+NaOH=\!=\!=NaH_2PO_4+H_2O$

(1) 酸的 H^+摩尔质量 $M\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$的计算：

$$M\left(\frac{1}{x}A^{x-}\right)=M(\text{酸的摩尔质量})/n\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)\quad \text{g/mol}$$

$n\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$为酸所提供的氢离子的物质的量。(A)、(B)、(C) 式中的 $n\left(\frac{1}{x}A^{x-}\right)$不同，分别为 3、2、1。$H_3PO_4$ 的摩尔质量

$M(H_3PO_4)$为98g/mol。所以，（A）、（B）、（C）三式中 H_3PO_4 的 H^+ 摩尔质量分别是：

$$M\left(H_3PO_4, \frac{1}{x}A^{x-}\right)_A = 98/3 = 32.67 \quad g/mol$$

$$M\left(H_3PO_4, \frac{1}{x}A^{x-}\right)_B = 98/2 = 49 \quad g/mol$$

$$M\left(H_3PO_4, \frac{1}{x}A^{x+}\right)_C = 98/1 = 98 \quad g/mol$$

（2）碱的 H^+ 摩尔质量 $M\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$的计算：

$$M\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right) = M(\text{碱的摩尔质量})/n\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right) \quad g/mol$$

$n\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$为碱所接受的氢离子的物质的量。在（A）、（B）、（C）式中 $n\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$均为 1。NaOH 的摩尔质量 $M(NaOH)$为 40g/mol。所以三式中 NaOH 的 H^+ 摩尔质量均为：

$$M\left(NaOH, \frac{1}{x}B^{x-}\right) = 40/1 = 40 \quad g/mol$$

（3）盐的 H^+ 摩尔质量 $M\left(\frac{1}{x}AB\right)$的计算：

$$M\left(\frac{1}{x}AB\right) = M(\text{盐的摩尔质量})/n\left(\frac{1}{x}AB\right) \quad g/mol$$

在(A)式中，Na_3PO_4 的 H^+ 摩尔质量 $M\left(Na_3PO_4, \frac{1}{x}AB\right)$为：

$$M\left(Na_3PO_4, \frac{1}{x}AB\right) = M(Na_3PO_4)/3 = 164/3 = 54.67 \quad g/mol$$

（B）式中，Na_2HPO_4 的 H^+ 摩尔质量 $M\left(Na_2HPO_4, \frac{1}{x}AB\right)$为：

$$M\left(Na_2HPO_4, \frac{1}{x}AB\right) = M(Na_2HPO_4)/2 = 142/2 = 71 \quad g/mol$$

（C）式中，NaH_2PO_4 的 H^+ 摩尔质量 $M\left(NaH_2PO_4, \frac{1}{x}AB\right)$为：

$$M\left(NaH_2PO_4, \frac{1}{x}AB\right)=M(NaH_2PO_4)/1=120 \quad g/mol$$

在水溶液中溶质 B 的以氢离子为基本单元的物质的量浓度 $c_B\left(\frac{1}{x}A^{x+}, \frac{1}{x}B^{x-}\right)$，相当于当量浓度，与物质的量浓度 c_B 有以下关系：

$$c_B\left(\frac{1}{x}A^{x+}, \frac{1}{x}B^{x-}\right)=c_B \cdot M_B/M_B\left(\frac{1}{x}A^{x+}, \frac{1}{x}B^{x-}\right) \quad mol/L$$

式中 M_B——B 溶质的摩尔质量，g/mol；

$M_B\left(\frac{1}{x}A^{x-}, \frac{1}{x}B^{x+}\right)$—— B 溶质的氢离子摩尔质量，g/mol。

按上式，分析化学中常用的一些化学品的 c_B 与 $c_B\left(\frac{1}{x}A^{x+}, \frac{1}{x}B^{x-}\right)$的关系如下。

（1）酸碱滴定

c_B 的基本单元 \ $c_B\left(\frac{1}{x}A^{x+}, \frac{1}{x}B^{x-}\right)$/(mol/L)	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	c_B 换算为 $c_B\left(\frac{1}{x}A^{x+}, \frac{1}{x}B^{x-}\right)$	$c_B\left(\frac{1}{x}A^{x+}, \frac{1}{x}B^{x-}\right)$ 换算为 c_B	$c_B\left(\frac{1}{x}A^{x+}, \frac{1}{x}B^{x-}\right)$ 的基本单元
	c_B/(mol/L)							
HCl	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	×1	×1	HCl
H_2SO_4	0.025	0.05	0.1	0.25	0.5	×2	$\times\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}H_2SO_4$
$H_2C_2O_4$	0.025	0.05	0.1	0.25	0.5	×2	$\times\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}H_2C_2O_4$
NaOH	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	×1	×1	NaOH
KOH	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	×1	×1	KOH
Na_2CO_3	0.025	0.05	0.1	0.25	0.5	×2	$\times\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}Na_2CO_3$

（2）氧化还原滴定

c_B 的基本单元 \ $c_B\left(\frac{1}{x}A^{x+},\frac{1}{x}B^{x-}\right)$/(mol/L)	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	c_B 换算为 $c_B\left(\frac{1}{x}A^{x+},\frac{1}{x}B^{x-}\right)$	$c_B\left(\frac{1}{x}A^{x+},\frac{1}{x}B^{x-}\right)$ 换算为 c_B	$c_B\left(\frac{1}{x}A^{x+},\frac{1}{x}B^{x-}\right)$ 的基本单元
	c_B/(mol/L)							
$KMnO_4$	0.01	0.02	0.04	0.1	0.2	×5	$\times\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}KMnO_4$
$K_2Cr_2O_7$	0.0083	0.017	0.033	0.083	0.17	×6	$\times\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}K_2Cr_2O_7$
$Na_2C_2O_4$	0.025	0.05	0.1	0.25	0.5	×2	$\times\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}Na_2C_2O_4$
$Na_2S_2O_3$	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	×1	×1	$Na_2S_2O_3$
I_2	0.025	0.05	0.1	0.25	0.5	×2	$\times\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}I_2$
$KBrO_3$	0.0083	0.017	0.033	0.083	0.17	×6	$\times\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}KBrO_3$
$NaNO_2$	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	×1	×1	$NaNO_2$

22 天然水中含有哪些杂质？按颗粒大小如何分类？

水中杂质种类极多。按其性质可分为无机物、有机物和微生物。按分散体系分类，即按杂质粒子的大小及同水之间的相互关系来分类，可分为以下三类。

（1）分子-离子分散系。小于1nm（纳米，10^{-9}m），包括各种无机、有机的低分子物及其离子，在水中成为溶液。

（2）胶态分散系。大小由1～200nm，其中有的高分子物以溶液存在，溶胶微粒以溶胶存在。

（3）粗分散系。大于0.2μm（微米，10^{-6}m），其中有悬浊液和乳浊液。

水的各种分散系中杂质颗粒大小如下[11]。

分类	高分散系 （分子、离子） [0.5～10Å(1nm)] /Å(0.1nm)	胶态分散系 （高分子、溶胶） [1～200nm(0.2μm)] /nm	粗分散系 （悬浊、乳浊） [0.2～1000μm(1mm)] /μm
无机物	H_2O 2.76 O_2 2.90 CO_2 3.24 水合离子 K^+ 3.50 Cl^- 3.68 Na^+ 4.34 NO_3 4.06 Ca^{2+} 5.44 OH^- 4.92 Mg^{2+} 5.92	金溶胶 4 硅溶胶 20～50 金属氢氧化物 10～100 炭黑 10～500 黏土 5～4000	颜料 0.1～5 金属粉尘 0.001～100 煤尘 1～100 灰尘 1～200 水泥 3～100 浮选矿粉 10～200 细泥 4～50 细砂 50～250 中砂 250～500
有机物	染料 9～13 谷氨酸 5×8×16 蔗糖 8×9×11 水合离子 甲酸 7 乙胺 8 乙酸 9 苯酸 12 刚果红 14 二苯醋酸 16	脱氧核糖核酸 DNA 2 酶 25 蛋白质 10～70 纤维素、橡胶 0.5×400～800 絮凝剂 400～800	红血球 7.5 纸浆纤维 5～100 石油微滴 5～100 头发粗 30～200
微生物		病毒 3～150	细菌 (0.2～1)×(1～30) 硫磺菌 20～50 藻类 3～5 酵母 5～8 阿米巴 10～50 动物性浮游生物 40～300
观测方法	质子显微镜 ～10	电子显微镜 1～1000 超显微镜 4～10000 X线衍射 2～100	普通显微镜 0.2～1000 光散射 0.01～10 肉眼 70～
射线波长	X线 ～100(10nm)	远紫外线 10～200	近紫外线 0.2～0.38 可见光线 0.38～0.78 红外线 0.78～300

注：$1\mu m=10^{-6}m$，$1nm=10^{-9}m$，$1Å=10^{-10}m$。

天然水在大自然的循环过程中，无时不与外界接触，在与地面、地层接触时，溶解了土壤和岩石，卷带了各种悬浮物质；水溶解了来自空气的和有机物分解出来的气体；水还经常受到工业废物、排出物、油状物及工艺加工的物料所污染，使水中杂质的成分变得非常复杂。这些杂质与水接触物质的过程有关，其数量又与水的接触时间和条件有关。这些杂质对工业生产的影响很大，不仅影响生产装置的换热设备，产生腐蚀和结垢，乃至被迫停产，而且还

影响产品的质量。因此，要根据各种生产装置对水质的要求，对天然水中的各种杂质，采用相应的方法进行必要的处理。

23　什么是水中的悬浮物质？

水中的悬浮物质是颗粒直径约在 10^{-4}mm 以上的微粒。肉眼可见。这些微粒主要是由泥沙、黏土、原生动物、藻类、细菌、病毒以及高分子有机物等组成，常常悬浮在水流之中，产生水的浑浊现象。这些微粒很不稳定，可以通过沉淀和过滤而除去。水在静置的时候，重的微粒（主要是砂子和黏土一类的无机物质）会沉下来。轻的微粒（主要是动植物及其残骸的一类有机化合物）会浮于水面上，用过滤等分离方法可以除去。悬浮物是造成浑浊度、色度、气味的主要来源。它们在水中的含量也不稳定，往往随着季节、地区的不同而变化。

24　什么是水中的胶体物质？

水中的胶体物质是指直径在 10^{-4}～10^{-6}mm 之间的微粒。胶体是许多分子和离子的集合物。天然水中的无机矿物质胶体主要是铁、铝和硅的化合物。水中的有机胶体物质主要是植物或动物的肢体腐烂和分解而生成的腐殖物。其中以湖泊水中的腐殖质含量最多，因此常常使水呈黄绿色或褐色。

由于胶体物质的微粒小，重量轻，单位体积所具有的表面积很大，故其表面具有较大的吸附能力，常常吸附着多量的离子而带电。同类胶体因带有同性的电荷而相互排斥，它们在水中不能相互黏合而处于稳定状态。所以，胶体颗粒不能藉重力自行沉降而去除，一般是在水中加入药剂破坏其稳定，使胶体颗粒增大而沉降予以去除。

25　什么是水中的溶解物质？水中溶有哪些主要离子和气体？

水中的溶解物质是直径小于或等于 10^{-6}mm 的微小颗粒。主要是溶于水中的以低分子存在的溶解盐类的各种离子和气体。溶解物质在水中呈真溶液状态。可以用离子交换或除盐等方法予以去除。

天然水中溶解的离子，主要是水流经岩层时所溶解的矿物质，

如碳酸钙（石灰石），碳酸镁（白云石），硫酸钙（石膏），硫酸镁（泻盐），二氧化硅（砂），氯化钠（食盐），无水硫酸钠（芒硝）等。随着天然水在地面或地下所流过的岩层不同，水的酸碱性有所不同，所溶解的离子也不同。这些主要离子如表所示。

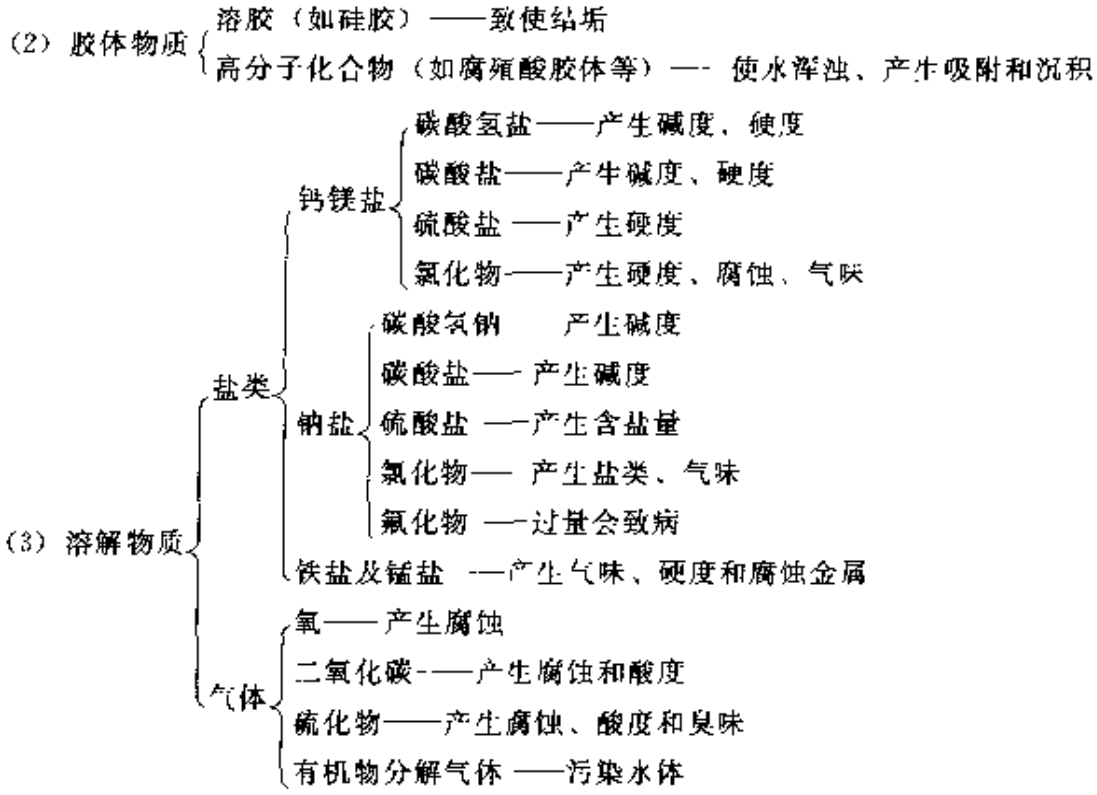
类别	阳离子		阴离子		质量浓度/(mg/L)
	名称	符号	名称	符号	
Ⅰ	钠离子	Na^+	碳酸氢根	HCO_3^-	自几个至几万
	钾离子	K^+	氯离子	Cl^-	
	钙离子	Ca^{2+}	硫酸根	SO_4^{2-}	
	镁离子	Mg^{2+}	硅酸氢根	$HSiO_3^-$	
Ⅱ	铵离子	NH_4^+	氟离子	F^-	自十分之几至几个
	铁离子	Fe^{2+}	硝酸根	NO_3^-	
	锰离子	Mn^{2+}	碳酸根	CO_3^{2-}	
Ⅲ	铜离子	Cu^{2+}	氢硫根	HS^-	小于十分之一
	锌离子	Zn^{2+}	硼酸根	BO_2^-	
	镍离子	Ni^{2+}	亚硝酸根	NO_2^-	
	钴离子	Co^{2+}	溴离子	Br^-	
	铝离子	Al^{3+}	碘离子	I^-	
			磷酸氢根	HPO_4^{2-}	
			磷酸二氢根	$H_2PO_4^-$	

天然水中常见的溶解气体有氧气（O_2）、二氧化碳（CO_2）、有时还有硫化氢（H_2S）、二氧化硫（SO_2）、氮气（N_2）和氨（NH_3）等。这些溶解于水中的气体，大都对金属有腐蚀作用，是引起水系统金属腐蚀的重要因素。

26 天然水中的杂质对水质有些什么影响？

天然水中的杂质对水质的主要影响如下：

（1）悬浮物质
- 泥沙、黏土——使水浑浊、产生沉积
- 藻类及原生动物——使水有色度、有臭味、浑浊并产生黏泥
- 细菌——致病、产生黏泥、产生腐蚀
- 其他不溶物质——产生沉积



27 水中的有机物质是指什么？有机物对水体有什么危害？

水中的有机物质主要是指腐殖酸和富里酸的聚羧酸化合物、生活污水和工业废水的污染物。其中前者是多官能团芳香族类大分子的弱性有机酸，占水中溶解的有机物质95%以上。腐殖物质是水生生物一类的生命活动过程的产物。生活污水主要是人体排泄物和垃圾废物。各种工业废水中的有机物有动植物纤维、油脂、糖类、染料、有机酸、各种有机合成的工业制品、有机原料等。这些有机物污染着水体，并使水质恶化。

水中的有机物有个共同特点，就是要进行生物氧化分解，需要消耗水中的溶解氧，而导致水中缺氧。同时会发生腐败发酵，使细菌滋长，恶化水质，破坏水体；工业用水的有机污染，还会降低产品的质量。有机物是引起水体污染的主要原因之一。

28 为什么水中 CO_2 会对碳钢产生腐蚀？

二氧化碳是水中存在较多的杂质，通常情况下是以游离状态存在；水中存在的大量碳酸氢根在pH低时，也是以 CO_2 游离状态存在的。于是产生了碳酸平衡问题，反应式如下：

$$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^- \rightleftharpoons 2H^+ + CO_3^{2-}$$

因此，水中 CO_2 越多，生成 H^+ 越多，水的 pH 值越低，产生酸性的腐蚀性水，破坏了碳钢表面生成的保护膜引起碳钢腐蚀。其腐蚀的化学反应如下：

$$2CO_2 + Fe(OH)_2 = Fe(HCO_3)_2$$

$$4Fe(HCO_3)_2 + O_2 + 2H_2O = 4Fe(OH)_3 + 8CO_2$$

如果除盐水中进入 CO_2，水的电导率即会上升，腐蚀性增大。因此除盐水箱应当有防止大气中 CO_2 溶入水箱的措施，如用 N_2 或其他惰性气体在水箱顶部空间进行保护，可以防止 CO_2 污染纯水水质。

29　水中的主要阴、阳离子对水质有些什么影响？

水中主要的阴离子有 Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^-、CO_3^{2-}、OH^- 等，其中 HCO_3^-、CO_3^{2-}、OH^- 在水中常与阳离子 K^+、Na^+、Mg^{2+}、Ca^{2+} 等组成硬度和碱度，它们之间的量的变化要影响水的 pH 值变化，从这一变化可以知道水的属性是腐蚀型的或是结垢型的。因此，它们是影响水的性质的主要离子。Cl^- 是水中最为常见的阴离子，是引起水质腐蚀性的催化剂，能强烈地推动和促进金属表面电子的交换反应，特别是对水系统的不锈钢材料，应力集中处（如热应力、震荡应力等），会引起 Cl^- 的富集，加速电化学腐蚀过程。SO_4^{2-} 也是水中较为普遍存在的腐蚀性阴离子，使水的电导率上升，同时又能与阳离子 Ca^{2+} 等生成 $CaSO_4$ 沉淀而结垢，它又是水中硫酸盐还原菌的营养源。

水中主要的阴离子有 K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+} 和 Fe^{3+}、Mn^{2+} 等，其中 Na^+ 是水中最为常见的阳离子，Na^+、K^+ 的存在使水的电导率上升，增加了水的不稳定倾向；其中 Ca^{2+}、Mg^{2+} 是组成水中硬度的主要离子，在一定的条件下，常在受热设备的表面结垢，影响传热效果。Fe^{3+}、Mn^{2+} 很易生成 $Fe(OH)_3$、$Mn(OH)_2$ 的沉淀形成水垢，从而产生垢下腐蚀，又是铁细菌生长的促进剂。

30　为什么有的水会有臭味？

清净的水是无臭、无味、无色透明的液体。但被污染的水体，

常会使人感觉有不正常的气味。用鼻闻到的称为臭，用口尝到的称为味。水的臭味主要来源有：

（1）水中的水生动物、植物或微生物的繁殖和腐烂而发出的臭味；

（2）水中有机物质的腐败分解而散发的臭味；

（3）水中溶解气体如 SO_2、H_2S 及 NH_3 的臭味；

（4）溶解盐类或泥土的气味；

（5）排入水体的工业废水所含杂质如石油、酚类等的臭味；

（6）消毒水过程中加入氯气等的气味。

由于上述的各种原因，所以有的水会有臭味。例如湖泊、沼泽水中因水藻繁殖或有机物过多而带有鱼腥气味及霉烂气味；浑浊的河水常有泥土气味或涩味；温泉水常带有硫磺气味；地下水有时会有硫化氢味；含氧量较多的水、含硫酸钙量多的水、有机物多的水或含 NO_2^- 高的水，常有不正常的甜味；水中含有氯化钠而带有咸味；水中含有硫酸镁，硫酸钠带有苦味；含铁的水带有涩味；生活污水及工业废水的气味更是多种多样。

31　什么是水的总固体、溶解固体和悬浮固体？

水中除了溶解气体之外的一切杂质称为固体。而水中的固体又可分为溶解固体和悬浮固体。这二者的总和即称为水的总固体。

溶解固体是指水经过过滤之后，那些仍然溶于水中的各种无机盐类、有机物等。悬浮固体是指那些能过滤掉的不溶于水中的泥砂、黏土、有机物、微生物等悬浮物质。

总固体的测定是蒸干水分再称重得到的。因此选定蒸干时的温度有很大的关系，一般规定控制在 105～110℃。

32　什么是水的含盐量？

水的含盐量（也称矿化度）是表示水中所含盐类的数量。由于水中各种盐类一般均以离子的形式存在，所以含盐量也可以表示为水中各种阳离子的量和阴离子的量的和。

水的含盐量与溶解固体的含义有所不同，因为溶解固体不仅包括水中的溶解盐类，还包括有机物质。同时，水的含盐量与总固体

的含义也有所不同，因为总固体不仅包括溶解固体，还包括不溶解于水的悬浮固体。所以，溶解固体和总固体在数量上都要比含盐量高。但是，在不很严格的情况下，当水比较清净时，水中的有机物质含量比较少，有时候也用溶解固体的含量来近似地表示水中的含盐量。当水特别清净的时候，悬浮固体的含量也比较少（如地下水），因此有时也可以用总固体的含量来近似表示水中的含盐量。

33　什么是水的浑浊度？

由于水中含有悬浮及胶体状态的微粒，使得原是无色透明的水产生浑浊现象，其浑浊的程度称为浑浊度。浑浊度是表达水中不同大小、不同相对密度、不同形状的悬浮物、胶体物质、浮游生物和微生物等杂质对光所产生的效应。并不直接表示水样杂质的含量，但与杂质存在的数量相关。浑浊度的单位是用“度”来表示的，就是相当于1L的水中含有1mg的SiO_2（或是1mg白陶土、硅藻土）时，所产生的浑浊程度为1度，或称杰克逊。浑浊度单位为JTU，1JTU＝1mg/L的白陶土悬浮体。现代仪器显示的浑浊度是散射浑浊度单位NTU，也称TU。1TU＝1JTU。最近，国际上认为，以福尔马肼（Formazin）浊度标准重现性较好，选作各国统一标准FTU。1FTU≒1JTU。浑浊度是一种光学效应，是光线透过水层时受到阻碍的程度，表示水层对于光线散射和吸收的能力。它不仅与悬浮物的含量有关，而且还与水中杂质的成分、颗粒大小、形状及其表面的反射性能有关。控制浑浊度是工业水处理的一个重要内容，也是一项重要的水质指标。根据水的不同用途，对浑浊度有不同的要求，生活饮用水的浑浊度不得超过1度；要求循环冷却水处理的补充水浑浊度小于2～5度；除盐水处理的进水（原水）浑浊度应小于2～5度；制造人造纤维要求水的浑浊度低于0.3度。由于构成浑浊度的悬浮及胶体微粒一般是稳定的，并大都带有负电荷，所以不进行化学处理就不会沉降。在工业水处理中，主要是采用混凝、澄清和过滤的方法来降低水的浑浊度。

34　如何使用比光浑浊仪？

水的浑浊度的测定方法有多种。而国内大都使用比光浑浊仪。

此仪器是根据形成浑浊度的水中悬浮颗粒的浓度、大小和形状不同，而产生不同的透光度的光学原理制成的。水越是浑浊，则反射光越强，透光度越弱；水越是清澈，则反射光弱，透光度越强。比光浑浊仪如图 1-0-2。

比光浑浊仪的使用步骤如下：

（1）取水样时，当浑浊度估计大于 40 度的原水，选用低杯，并配用原水滤镜；当浑浊度在 10～40 度的清水，选用高杯，并配用沉淀水滤光镜；对浑浊度小于 10 度的过滤水时，使用高杯和清水滤光镜。水样要充分摇动均匀混合，以免水样沉淀影响浑浊度。

（2）将水样放至水样杯内至一定刻度，然后把盖杯盖上，并使盖杯底正好与杯中水平而贴平，不应存有气泡，并用洁净干燥的白布或滤纸揩拭杯外水渍。

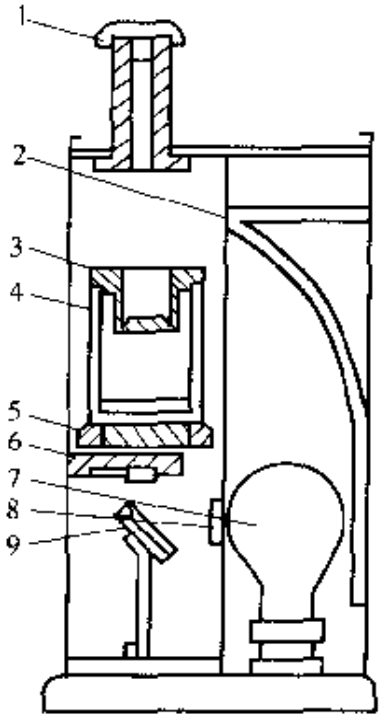


图 1-0-2　比光浑浊仪示图

1—接目筒；2—磨砂反光板；3—盖杯；4　水样杯；5—杯座；6—滤光镜；7—乳白灯泡；8—调节孔；9　反光片

（3）把水样放至杯座上，并检查滤光镜是否与测定水样相适应。

（4）接通电源，从接目镜中检查滤光镜内圆孔的明暗程度，转动刻度盘，来调节孔的光线强弱，使小圆孔变明亮或变暗淡，直至调节小圆孔的光度与背景反射光的强度相同。

（5）记录刻度盘的指示刻度。从刻度与浑浊度的对照表可以查得水样的浑浊度数。

（6）分析结束时，关电源，倒去水样，用洁净干燥白布或滤纸将杯与盖杯揩拭干净，放至专用盒中，为下次测定水样做好准备。

35　什么是光电浊度仪？

利用射入水样的透射光、散射光经过光电效应显示出电压高低而转换为水样的浑浊度大小的仪器。光电浊度仪又可分为透射光浊

度仪、散射光浊度仪及透射光--散射光浊度仪等类型。

34题中所介绍的比光浑浊度仪虽仍广为应用，但属目视方法．浑浊度由检测者肉眼观察、比较、判断取得读数，其结果受检测者的视力、经验及主观意志的影响，测定浑浊度的偏差较大。据中国城镇供水协会组织不同类型浊度仪测定的浑浊度结果比较如下表：

不同类型浊度仪测定浑浊度结果比较

仪器类型	参加测定公司数	考核样浑浊度/NTU	测定平均值/NTU（FTU）	相对误差/%	相对标准偏差/%（CV）
散射光浊度仪	27	4.9	4.9	0	4.5
透射光浊度仪	9	4.9	4.7	4.1	9.2
分光光度计	16	4.9	4.6	6.1	9.1
总　　计	52	4.9	4.7	4.1	6.8

可见散射光浊度仪测定的重现性和重复性是最好的（相对误差为0%），精度也高（相对标准偏差最低，为4.5%）。

（1）透射光浊度仪　入射光通过一定浑浊度的水样后，发生了光的吸收，只有部分光能够透射。透射光强度 I_t 和入射光强度 I_0 的关系如下：

$$\lg \frac{I_t}{I_0} = -K \cdot D \cdot L$$

式中　D---水样的浑浊度；

L---测量槽的长度即光程长；

K---常数。

令 $I_t/I_0 = T$，即 T 为透光率

则　　$D = -\lg T/(K \cdot L) = 1/K \cdot L \lg T$

故水的浑浊度 D 愈小，透光率 T 愈大。透射光浊度仪的设计原理就是利用 D 与 T 的关系，根据透光率指示水的浑浊度。

（2）散射光浊度仪　光线射入水中，引起水中的微粒对光的散射，散射光的强度与水中微粒特性、微粒大小、入射光的波长有关。例如当水中微粒大小等于或大于入射光波长时，散射光强度与

入射光强度、微粒表面积 A 及粒子数 N 成正比：

$$I_R/I_0 - K \cdot A \cdot N$$

式中 I_R—— 散射光强度；

K —常数。

散射光光电池产生电压的高低转换成浑浊度的大小，根据上述原理设计了散射光浊度仪，如图 1-0-3。

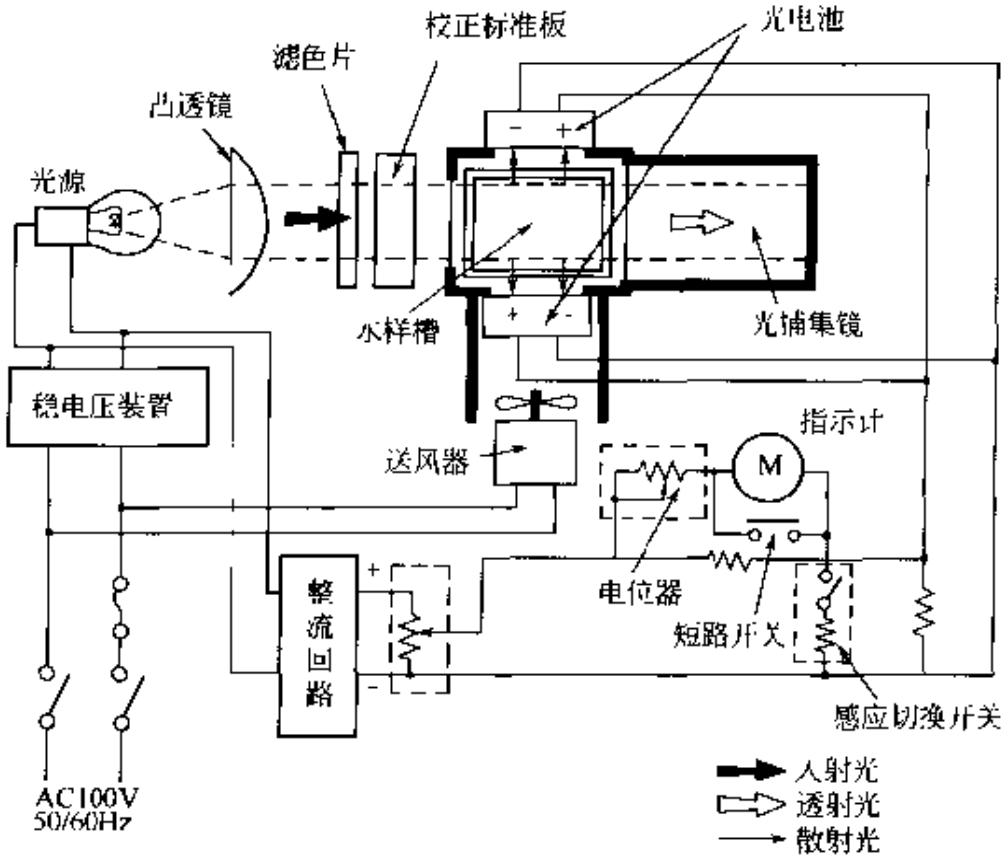


图 1-0-3 散射光浊度仪原理示图

入射光源经凸透镜后，再入滤色片以避免水的色度影响，成为单色光，因单色光灵敏度高。光从标准浊度校正板进入水样槽，其中透射光在光捕集镜里被吸收，只有散射光到光电池，经光电效应，电压转换，从指示计中读出浑浊度。

（3）透射光-散射光浊度仪 利用透射光 I_t 和散射光 I_R 比值与浑浊度成正比的原理制成的积分球仪即属于此类型，故又称比例式浊度仪，其原理如图 1-0-4 所示。

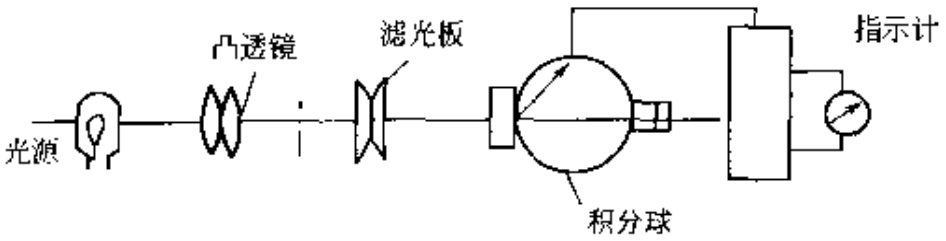


图 10-4　积分球浊度仪原理图

在积分球里，透射光 I_t 和散射光 I_R 经反射收集于光电池里，经转换，从指示计中读出浑浊度。

36　各种类型光电浊度仪的性能有什么不同？使用时要注意什么？

光电浊度仪中的透射光和散射光浊度仪的性能比较如下表。

透射光浊度仪与散射光浊度仪性能比较

透射光浊度仪	散射光浊度仪
(1) 对低浑浊度水灵敏度不高	(1) 对低浑浊度水有较高的灵敏度
(2) 浑浊度为 0 时，信号最大	(2) 浑浊度为 0 时，信号为 0
(3) 负响应—随着浑浊度增大，信号减弱	(3) 直接响应—浑浊度增大，信号增强
(4) 在中等浑浊度范围内，根据比耳定律显示曲线性响应	(4) 较低浑浊度范围内呈线性响应，如光程小，高量程内可呈线性
(5) 水中色度显示出浑浊度	(5) 水中色度不显示浑浊度，但某些色度可产生负误差
(6) 对浑浊度的测量没有上限—依设计条件而定，如光程	(6) 对浑浊度的测量没有上限—依设计条件而定，如光程

在使用光电浊度仪时应注意以下事项。

(1) 在使用前应检查光电浊度仪是否经过检定合格，先熟悉仪器的使用说明书，接上电源后预热 30min，然后用零浑浊度水调零。

检查水样测浊槽或测浊管是否清洁，是否有划痕。不清洁的测浊槽（管）不应使用。

(2) 不同的场合选用不同型的浊度仪，即针对所要测定的水样浑浊程度、测定目的、要求来选用不同类型的浊度仪。实验室或水

处理厂在日常工作中选用何种类型浊度仪，应根据具体情况而定。一般测定浊度大于 1NTU 的水样，如沉淀池出水的水样，则透射光浊度仪已能满足需要。采用透射光浊度仪可依靠适当的滤光片而避免水的色度的影响。散射光浊度仪及透射光-散射光浊度仪使用在小于 1NTU 的浑浊度测定且要求精度高的测定工作，如水厂出厂水及管网水浑浊度的测定，或水质质量评价检测时的浑浊度测定，一般散射光浊度仪及透射光-散射光浊度仪价格较透射光浊度仪为昂贵。至于生产监控用的在线连续测定用的浊度仪类型也有多种，应视具体情况不同选用。

（3）使用光电浊度仪时应遵守一些准则，如对散射光浊度仪提出下列要求：

① 光源钨丝灯在色温 2200～3000K 以下工作；

② 在水样试管内，入射光及散射光的距离（光程）不要大于 10cm；

③ 检测器接受光的角度集中在相对于入射光光路为 90°，偏离不大于 30°，检测器及滤光系统将在 400～600nm 之间有光谱峰值响应；

④ 水样槽应无色透明；

⑤ 无浑浊度水样存在时，很少有杂散光到达检测器，暂短预热后无显著漂移；

⑥ 在 0～40NTU 浑浊度范围内，应能检出 0.02NTU 或更小的浊度差。

对于透射光-散射光浊度仪，上述原则同样适用。

37　什么是水的透明度？

透明度是指水样的澄清程度，即以开始能见到放置在水层底部的用中文老 5 号铅字，或俄文 10 号铅字时的水层高度（cm）来表示其度数。在测定时，把水样装满透明度计，然后松动下端的弹簧夹，使水迅速流出，当刚能辨认出底部铅字时，关闭弹簧夹，记录这时水层的高度（cm）。其高度之 cm 数就是透明度。对于生活饮用水，铅字法透明度大于 30cm 即认为透明度合格。

测定透明度还可以用十字法。观察物体为白瓷板或白塑料板上的十字图像。一种是宽度 1mm、长度 28mm 的两条粗黑线交叉成十字形，并在四格内各有直径为 1mm 的圆点，隔水层俯视时，不见黑点而可见十字的时刻，水层高度即为透明度。这种十字法测得水层高度约为铅字法的十倍，即透明度大于 300cm 者为合格。这种方法的精确度略高，但水层所需高度甚大，使用不便。另一种为双十字线，长度 3.5cm、粗 0.5mm，二线相隔 1.0mm，观察时以明确分辨出四条线为清楚。这种十字法适于测定浑浊度 100～800 度的水，透明度为 20cm 时相当于浑浊度 100 度。这两种十字法的图像示意如图 1-0-5。

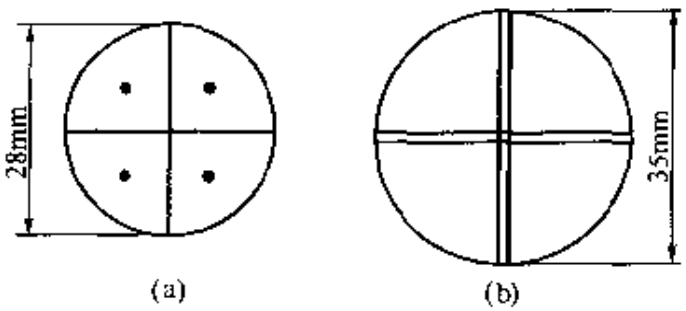


图 1 0-5　透明度十字法图像

(a) 十字圆点法；(b) 双十字法

此外，还有白瓷盘法。以直径 30cm 的白瓷圆盘或(15×21) cm^2 的白瓷板，用绳悬挂成平放状态沉入水中，到水面上恰不能看到时为止，沉入的深度即为该水的透明度。此方法适用在河水、湖水或净水厂水池等处进行现场测定，所得结果比较粗略。

由于透明度是按人的视觉所作的官能试验，受测定者的目力影响较大，因此，结果不是很精确。透明度与浑浊度的意义相反，但两者反映的却是同一事物，表示水中杂质对透过光线的阻碍程度，它们可以相互换算。

38　如何以透明度来划分水的等级？

水的透明度反映出水质的澄清程度，因此，有时用透明度来划分水质的等级。划分如下表：

分　级	野　外　鉴　别　特　征
透明的水	无悬浮物及胶体，60cm 水深处可见 3mm 的粗线
微浊的水	有大量悬浮物，30～60cm 水深处可见 3mm 的粗线
浑浊的水	有很多的悬浮物，半透明状，小于 30cm 水深处可见到 3mm 的粗线
极浊的水	有大量的悬浮物或胶体，似乳状，水的可见度很浅，不能清楚看见 3mm 的粗线

39　什么是水的色度？

水的色度是对天然水或处理后的各种水进行颜色定量测定时的指标。

天然水经常显示出浅黄、浅褐或黄绿等不同的颜色。产生颜色的原因是由于溶于水的腐殖质、有机物或无机物质所造成。另外，当水体受到工业废水的污染时也会呈现不同的颜色。这些颜色分为真色与表色。真色是由于水中溶解性物质引起的，也就是除去水中悬浮物后的颜色。而表色是没有除去水中悬浮物时产生的颜色。这些颜色的定量程度就是色度。色度的测定是用铂钴标准比色法，亦即用氯铂酸钾（K_2PtCl_6）和氯化钴（$CoCl_2 \cdot 6H_2O$）配制成测色度的标准溶液，规定 1L 水中含有 2.419mg 的氯铂酸钾和 2.00mg 氯化钴时，将铂（Pt）的浓度为每升 1mg 时所产生的颜色深浅定为 1 度（1°）。

水色度往往会影响造纸、纺织等工业产品的质量。各种用途的水对于色度都有一定的要求：如生活用水的色度要求小于 15°；造纸工业用水的色度要求小于 15°～30°；纺织工业的用水色度要求小于 10°～12°；染色用水的色度要求小于 5°。

工业废水可能使水体产生各种各样的颜色，但水中腐殖质、悬浮泥砂和不溶解矿物质的存在，也会使水带有颜色。例如，黏土能使水带黄色，铁的氧化物会使水变褐色，硫化物能使水呈浅蓝色，藻类使水变绿色，腐败的有机物会使水变成黑褐色等等。

常见水中物质引起的颜色[8]如下：

水中存在物质	硬 水	低价铁	高价铁	硫化氢	硫细菌	锰的化合物	腐殖酸盐
水的颜色	浅蓝	灰蓝	黄褐	翠绿	红色	暗红	暗黄或灰黑

40 什么是水的硬度？

水中有些金属阳离子，同一些阴离子结合在一起，在水被加热的过程中，由于蒸发浓缩，容易形成水垢，附着在受热面上而影响热传导，我们把水中这些金属离子的总浓度称为水的硬度。如在天然水中最常见的金属离子是钙离子（Ca^{2+}）和镁离子（Mg^{2+}），它与水中的阴离子如碳酸根离子（CO_3^{2-}）、碳酸氢根离子（HCO_3^-）、硫酸根离子（SO_4^{2-}）、氯离子（Cl^-）以及硝酸根离子（NO_3^-）等结合在一起，形成钙镁的碳酸盐、碳酸氢盐、硫酸盐、氯化物以及硝酸盐等硬度。水中的铁、锰、锌等金属离子也会形成硬度，但由于它们在天然水中的含量很少，可以略去不计。因此，通常就把Ca^{2+}、Mg^{2+}的总浓度看做水的硬度。

水的硬度对锅炉用水的影响很大，因此，应根据各种不同参数的锅炉对水质的要求对水进行软化或除盐处理。

41 水的硬度有哪几种？

水的硬度分为碳酸盐硬度和非碳酸盐硬度两种。

（1）碳酸盐硬度　主要是由钙、镁的碳酸氢盐[$Ca(HCO_3)_2$、$Mg(HCO_3)_2$]所形成的硬度，还有少量的碳酸盐硬度。碳酸氢盐硬度经加热之后分解成沉淀物从水中除去，故亦称为暂时硬度，其反应式如下：

$$Ca(HCO_3)_2 \xlongequal{\triangle} CaCO_3\downarrow + CO_2\uparrow + H_2O$$

$$Mg(HCO_3)_2 \xlongequal{\triangle} Mg(OH)_2\downarrow + 2CO_2\uparrow$$

（2）非碳酸盐硬度　主要是由钙镁的硫酸盐、氯化物和硝酸盐等盐类所形成的硬度。这类硬度不能用加热分解的方法除去，故也称为永久硬度，如 $CaSO_4$、$MgSO_4$、$CaCl_2$、$MgCl_2$、$Ca(NO_3)_2$、$Mg(NO_3)_2$、等。

碳酸盐硬度和非碳酸盐硬度之和称为总硬度。

水中 Ca^{2+} 的含量称为钙硬度。

水中 Mg^{2+} 的含量称为镁硬度。

当水中的总硬度小于总碱度时，它们之差称为负硬度。

42　硬度的单位是如何表示的？

硬度的常用单位是 mmol/L 或 mg/L。过去常用的当量浓度 N 现已停用。换算时，1N＝0.5mol/L。

由于硬度并非是由单一的金属离子或盐类形成的，因此，为了有一个统一的比较标准，有必要换算为另一种盐类。通常用 CaO 或者是 $CaCO_3$ 的质量浓度来表示。当硬度为 0.5mmol/L 时，等于 28mg/L 的 CaO，或等于 50mg/L 的 $CaCO_3$。此外，各国也有的用德国度、法国度来表示硬度。1 德国度等于 10mg/L 的 CaO，1 法国度等于 10mg/L 的 $CaCO_3$。0.5mmol/L 相当于 2.8 德国度、5.0 法国度。常用硬度单位之间关系如下表所示：

硬度单位	mmol/L	mN	德国度	法国度	CaO /(mg/L)	$CaCO_3$ /(mg/L)
mmol/L	1	2	5.6077	10.0086	56.077	100.086
mN	0.5	1	2.8039	5.0043	28.039	50.043
德国度	0.17833	0.35665	1	1.7848	10.0000	17.848
法国度	0.09991	0.19983	0.5603	1	5.6029	10.0000
CaO/(mg/L)	0.017833	0.035665	0.1000	0.17848	1	1.7848
$CaCO_3$/(mg/L)	0.009991	0.01998	0.05603	0.1000	0.5603	1

43　硬水对工业生产有什么危害？

硬水作为工业生产用的冷却水，会使换热器结水垢，严重的不仅会阻碍水流通道，使热交换效果大大降低，影响生产的顺利进行，甚至被迫停产。结垢还会产生垢下腐蚀，会使换热器穿孔而损坏，不仅物料漏损，而且增加设备投资费用，浪费钢材。硬水用于洗涤，也往往影响产品质量，如纺织印染会造成织物的斑点，不仅影响美观，而且影响强度。硬水作为锅炉用水，在锅内加热后，经过蒸发浓缩过程，使锅炉受热面结水垢，而水垢的导热性能极差。水垢和钢材的导热系数如表所示：

名称	热导率		名称	热导率	
	W/(m·K)	kcal/(m·h·℃)		W/(m·K)	kcal/(m·h·℃)
碳钢	34.9～52.3	30～45	硅酸盐水垢	0.08～0.23	0.07～0.20
铸钢	29.1～58.2	25～50	碳酸盐水垢(非晶体)	0.23～1.16	0.2～1.0
含油水垢	0.12	0.1	碳酸盐水垢(晶体)	0.58～5.82	0.5～5.0
硫酸盐水垢	0.23～2.33	0.2～2.0			

由上表可见，水垢的导热性能只有钢材的几百分之一。在锅炉内结垢之后，如果仍要达到无水垢时同样的炉水温度，势必要提高受热面的壁温，例如 1.01MPa（10atm）的锅炉，壁温为 280℃，当硅酸盐水垢达 1mm 厚时，要达到同样的炉水温度，壁温要提高到 680℃，此时钢板的强度自 3.92MPa（40kgf/cm²）降至 0.98MPa（10kgf/cm²），严重的会引起爆裂事故。金属温度升高还会使金属伸长，1m 长的钢板，每升高 100℃，伸长 1.2mm，增加材料应力，导致损坏。此外，结垢之后，使受热面的传热情况变坏，燃烧热也不能很好地传给水，降低了锅炉的热效率，从而白白浪费燃料，如结有 1.5mm 厚硫酸盐水垢，就要浪费燃料 10% 以上，并使锅炉的出力大为降低。结水垢之后，还得经常清洗，不仅影响生产，而且降低锅炉使用寿命，还要耗费人力物力。因此，硬水对工业生产的危害很大，必须根据产品或设备对水质的要求，对硬水进行软化、除盐或其他有效的水处理。

44 什么是水的碱度？水中的碱度有哪几种形式存在？

水的碱度是指水中能够接受 H^+ 离子与强酸进行中和反应的物质含量。水中产生碱度的物质主要由碳酸盐产生的碳酸盐碱度和碳酸氢盐产生的碳酸氢盐碱度，以及由氢氧化物存在和强碱弱酸盐水解而产生的氢氧化物碱度。所以，碱度是表示水中 CO_3^{2-}、HCO_3^-、OH^- 及其他一些弱酸盐类的总和。这些盐类的水溶液都呈碱性，可以用酸来中和。然而，在天然水中，碱度主要是由 HCO_3^- 的盐类所组成。可认为：

$$\text{总碱度 } M=[HCO_3^-]+2[CO_3^{2-}]+[OH^-]-[H^+]$$

当 pH 值大于 7.0 时，$[H^+]$可略去，故，

$$M=c\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)=[HCO_3^-]+2[CO_3^{2-}]+[OH^-] \quad mol/L$$

形成水中碱度的物质碳酸盐和碳酸氢盐可以共存，碳酸盐和氢氧化物也可以共存。然而，碳酸氢盐与氢氧化物不能同时存在，它们在水中能起如下反应：

$$HCO_3^- + OH^- = CO_3^{2-} + H_2O$$

由此可见，碳酸盐、碳酸氢盐、氢氧化物可以在水中单独存在，除此之外，还有两种碱度的组合，所以，水中的碱度有五种形式存在，即：

（1）碳酸氢盐碱度 HCO_3^-；

（2）碳酸盐碱度 CO_3^{2-}；

（3）氢氧化物碱度 OH^-；

（4）碳酸氢盐和碳酸盐碱度 $HCO_3^- + CO_3^{2-}$；

（5）碳酸盐和氢氧化物碱度 $CO_3^{2-} + OH^-$。

45　水中各种碱度的相互关系如何？

水中的碱度是用盐酸中和的方法来测定的。在滴定水的碱度时采用两种指示剂来指示滴定的终点。

用酚酞作指示剂时，滴定的终点为 pH8.2～8.4，称为酚酞碱度或 P 碱度。此时，水中的氢氧化物全部被中和，碳酸盐转化为碳酸氢盐，就是碳酸盐被中和了一半。即 P 碱度 $=\frac{1}{2}CO_3^{2-}$ ＋全部 OH^-。

用甲基橙作指示剂时，滴定的终点 pH 为 4.3～4.5，称为甲基橙碱度或 M 碱度。此时，水中的氢氧化物、碳酸盐及碳酸氢盐全部被中和，所测得的是水中各种弱酸盐类的总和，因此又称为总碱度。即 M 碱度＝全部 HCO_3^- ＋全部 CO_3^{2-} ＋全部 OH^-。

如果水中单独存在 OH^- 碱度，水的 pH＞11.0；水中同时存在 OH^-、CO_3^{2-} 时，pH9.4～11.0；如水中只有 CO_3^{2-} 存在时，pH＝9.4；当 CO_3^{2-}、HCO_3^- 共同存在时，pH8.3～9.4；单一的

HCO_3^- 存在时，pH＝8.3；但 pH＜8.3 时，水中碱度也只有 HCO_3^- 存在，此时的 pH 值变化只与 HCO_3^- 和游离的 CO_2 含量有关。

所测水中碱度的形式与各种碱度的数量关系如下表：

碱度存在的形式	所测定碱度 $(HCO_3^- + \frac{1}{2}CO_3^{2-} + OH^-)$/(mol/L)	产生碱度的物质及其数量/(mol/L)		
		$\frac{1}{2}CO_3^{2-}$	HCO_3^-	OH
碳酸氢盐	$P=0$	0	M	0
碳酸盐和碳酸氢盐	$2P<M$	$2P$	$M-2P$	0
碳酸盐	$2P=M$	M	0	0
碳酸盐和氢氧化物	$2P>M$	$2(M-P)$	0	$2P-M$
氢氧化物	$M=P$	0	0	M

46　碱度的单位是如何表示的？水质的硬度和碱度常标“以 $CaCO_3$ 计”是何意？

碱度可以是单组分，也可以是多组分。单组分碱度可以用分数、质量浓度或物质的量浓度表示。但在天然水中碱度包括多组分，一般为 HCO_3^-、CO_3^{2-} 及 OH^-。其中 HCO_3^- 及 OH^- 可以接受 1mol H^+（为一价），CO_3^{2-} 可以接受 2mol H^+（为二价）。所以，用物质的量浓度 $c(HCO_3^- + CO_3^{2-} + OH^-)$ 或质量浓度 $\rho(HCO_3^- + CO_3^{2-} + OH^-)$ 都不能表达与水中其他离子、特别是与硬度的关系。故碱度通常采用以下两种方式表示：

(1) 物质的量浓度，其基本单元为可接受 1mol H^+ 的物质。即 $c\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right) = c(HCO_3^- + \frac{1}{2}CO_3^{2-} + OH^-)$，其单位为 mol/L 或 mmol/L。

(2) 质量浓度，并标“以 $CaCO_3$ 计”。即 $\rho\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right) = \rho(HCO_3^- + \frac{1}{2}CO_3^{2-} + OH^-)$，其单位为 mg/L。

“以 $CaCO_3$ 计”的含意，即将质量浓度中的溶质 B 的质量折合成能提供或接受相等氢离子的碳酸钙（$CaCO_3$）质量（即折合成相同当量的 $CaCO_3$ 质量）。其优点是能够方便表达水中离子的平衡关

系。因此，水中的碱度、硬度、钙离子及镁离子都常用此法表示浓度。$CaCO_3$ 的摩尔质量 M 近似 100g/mol，可提供或接受 2mol H^+，故 $c\left(\frac{1}{x}A^{x+},\frac{1}{x}B^{x-}\right)$（即当量）等于 50g/mol，$\rho\left(\frac{1}{x}A^{x+},\frac{1}{x}B^{x-}\right)=50c\left(\frac{1}{x}A^{x+},\frac{1}{x}B^{x-}\right)$。例如，水的碱度 $c\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$ 或硬度 $c\left(\frac{1}{2}Ca^{2+}+\frac{1}{2}Mg^{2+}\right)$ 为 2mmol/L 时，都可写成 100mg/L（以 $CaCO_3$ 计）。如果水中 HCO_3^- 碱度为 61mg/L，则可接受 H^+ 1mmol/L，可以写成 50mg/L（以 $CaCO_3$ 计）。如水中钙离子含量为 40mg/L，则 $c\left(\frac{1}{2}Ca^{2+}\right)$ 为 2mmol/L，可写成钙硬为 100mg/L（以 $CaCO_3$ 计）。如水中镁离子含量为 6mg/L，则 $c\left(\frac{1}{2}Mg^{2+}\right)$ 为 0.5mmol/L，可写成镁硬 25mg/L（以 $CaCO_3$ 计）。

各种碱度单位的换算关系如下：

$c\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$ /(mmol/L)	$CaCO_3$ /(mg/L)	Na_2CO_3 /(mg/L)	NaOH /(mg/L)	HCO_3^- /(mg/L)	CO_3^{2-} /(mg/L)	OH^- /(mg/L)
1	50	53	40	61	30	17
0.02	1	1.06	0.8	1.22	0.6	0.34
0.0189	0.943	1	0.755	1.151	0.566	0.321
0.025	1.25	1.325	1	1.525	0.75	0.425
0.0164	0.82	0.869	0.656	1	0.492	0.279
0.0333	1.667	1.767	1.333	2.033	1	0.567
0.0588	2.941	3.118	2.353	3.588	1.765	1

47 天然水是如何按照硬度和含盐量来分类的？

天然水按照硬度和含盐量的多少分类如下表所示。

名 称	按硬度分	按含盐量分	
	mmol/L	mg/L	
极硬水	大于 4.5	高盐水	大于 1000
硬水	3.0～4.5	次高盐水	500～1000
中硬水	1.5～3.0	中盐水	200～500
软水	0.5～1.5	低盐水	100～200
极软水	小于 0.5	极低盐水	小于 100

含盐量又称矿化度。含盐量小于1000mg/L的水质，一般也称为淡水，大于1000mg/L的水又泛称咸水，即高含盐量的水。其中，高含盐量的水又可分四类：

微咸水——含盐量在1000～3000mg/L；

咸水——含盐量在3000～10000mg/L；

盐水——含盐量在10000～50000mg/L；

卤水——含盐量在50000mg/L以上。

48 天然水如何按水中主要阴阳离子分类？

按照水中含量最多的阴阳离子（以mol/L计）分类。阳离子按钙、镁和钠（包括钾）离子数量分类，阴离子按碳酸氢根、硫酸根及氯根数量分类，则天然水的分类[1]如下表：

天然水									
类	碳酸盐 [C] HCO_3^-			硫酸盐 [S] SO_4^{2-}			氯化物 [Cl] Cl^-		
组	钙 Ca	镁 Mg	钠 Na	钙 Ca	镁 Mg	钠 Na	钙 Ca	镁 Mg	钠 Na
型	Ⅰ Ⅱ Ⅲ	Ⅰ Ⅱ Ⅲ	Ⅰ Ⅱ Ⅲ	Ⅱ Ⅲ Ⅳ	Ⅱ Ⅲ Ⅳ	Ⅰ Ⅱ Ⅱ	Ⅱ Ⅲ Ⅳ	Ⅱ Ⅲ Ⅳ	Ⅰ Ⅱ Ⅲ

注：表中钠（Na）代表钠加钾（Na+K）。

Ⅰ型：$HCO_3^- > \frac{1}{2}Ca^{2+} + \frac{1}{2}Mg^{2+}$；

Ⅱ型：$HCO_3 < \frac{1}{2}Ca^{2+} + \frac{1}{2}Mg^{2+} < HCO_3^- + \frac{1}{2}SO_4^{2-}$；

Ⅲ型：$HCO_3^- + \frac{1}{2}SO_4^{2-} < \frac{1}{2}Ca^{2+} + \frac{1}{2}Mg^{2+}$；

Ⅳ型：$HCO_3 = 0$。

水的类型可用符号代表。例如，[C]CaⅠ型代表碳酸钙组Ⅰ型水。即阴离子中HCO_3^-最多，阳离子中钙最多，且$HCO_3 > \frac{1}{2}Ca^{2+} + \frac{1}{2}Mg^{2+}$。分类图示例如下：

[C]Ca Ⅱ 长江水	$\frac{1}{2}Ca^{2+}$	$\frac{1}{2}Mg^{2+}$	$Na^+ + K^+$
	HCO_3^-	$\frac{1}{2}SO_4^{2-}$	Cl^-
[C]Na Ⅱ 黄河水	$\frac{1}{2}Ca^{2+}$	$\frac{1}{2}Mg^{2+}$	$Na^+ + K^+$
	HCO_3^-	$\frac{1}{2}SO_4^{2-}$	Cl^-
[Cl]Na Ⅲ 海水	$\frac{1}{2}Ca^{2+}$	$\frac{1}{2}Mg^{2+}$	$Na^+ + K^+$
	HCO_3^-	$\frac{1}{2}SO_4^{2-}$	Cl^-

我国不同区域水质大致分类[1,67]如下：

分　　区	潮湿区	湿润区	过滤区	干旱区
年降水量/mm	>1600	1600～800	800～400	<400
平均含沙量/(kg/m³)	0.1～0.3	0.2～5	1～30	—
常见浑浊度/(mg/L)	50～300	100～2000	500～20000	--
矿化度/(mg/L)	<100	100～300	200～500	>500
总硬度/(mmol/L)	<0.5	0.5～1.5	1.5～3.0	>3.0
pH 值	6.0～7.0	6.5～7.5	7.0～8.0	7.5～8.0 以上
水质类型	[C]Ca [C]Na	[C]Ca [C]Na	[C]Ca [C]Na [S]Na	[C]Ca [S]Na [Cl]Na
地区范围	东南沿海	长江流域 西江流域 西南地区 黑龙江、松花江流域	黄河流域 河北地区 辽河流域	内蒙地区 西北地区

49　如何根据硬度和碱度的关系了解水质？

天然水中的硬度主要是指 Ca^{2-}、Mg^{2-} 等金属离子，水中的碱度主要是指碳酸氢盐碱度 HCO_3^-。而水中主要存在的离子有 Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^+、K^+ 和 HCO_3^-、SO_4^{2-}、Cl^- 等。水中的硬度与硬度之间的关系分为三种情况。

（1）碱度＞硬度（以 mol/L 计）

$HCO_3^- > \frac{1}{2}(Ca^{2+} + Mg^{2+})$，如下表：

水中主要的阳离子	$\frac{1}{2}Ca^{2+}$	$\frac{1}{2}Mg^{2+}$	$Na^+ + K^+$	
水中主要的阴离子	HCO_3^-		$\frac{1}{2}SO_4^{2-}$	Cl^-
生成盐类	$\frac{1}{2}Ca(HCO_3)_2$	$\frac{1}{2}Mg(HCO_3)_2$	$NaHCO_3$ $KHCO_3$	$\frac{1}{2}Na_2SO_4$，NaCl， $\frac{1}{2}K_2SO_4$，KCl

由表可见，水中的硬度（Ca^{2+}、Mg^{2+}）都变成为碳酸氢盐，并同时还有 Na^+、K^+的碳酸氢盐，但没有非碳酸盐硬度存在。此时，碱度减去硬度所得的差值等于 Na^+、K^+的碳酸氢盐。这部分多出的 Na^+、K^+的碳酸氢盐碱度即所谓过剩碱度亦称为负硬度。

（2）碱度＝硬度（以 mol/L 计）

即 $HCO_3^- = \frac{1}{2}(Ca^{2+} + Mg^{2+})$，如下表：

水中主要的阳离子	$\frac{1}{2}Ca^{2+}$	$\frac{1}{2}Mg^{2+}$	$Na^+ + K^+$	
水中主要的阴离子	HCO_3^-		$\frac{1}{2}SO_4^{2-}$	Cl^-
生成盐类	$\frac{1}{2}Ca(HCO_3)_2$	$\frac{1}{2}Mg(HCO_3)_2$	$\frac{1}{2}Na_2SO_4$，$\frac{1}{2}K_2SO_4$，NaCl，KCl	

由上可见，此时只有 Ca^{2+}、Mg^{2+}的硬度及其碳酸氢盐碱度，既无非碳酸盐硬度，亦无 Na^+、K^+的碳酸氢盐。

（3）碱度＜硬度（以 mol/L 计）

即 $HCO_3^- < \frac{1}{2}(Ca^{2+} + Mg^{2+})$。此时又有两种情况，一是 $\frac{1}{2}Ca^{2+} > HCO_3^-$ 的钙硬水，如下表：

水中主要的阳离子	$\frac{1}{2}Ca^{2+}$		$\frac{1}{2}Mg^{2+}$	$Na^{+}+K^{+}$
水中主要的阴离子	HCO_3^-	$\frac{1}{2}SO_4^{2-}$		Cl^-
生成盐类	$\frac{1}{2}Ca(HCO_3)_2$	$\frac{1}{2}CaSO_4$	$\frac{1}{2}MgSO_4$	$\frac{1}{2}Na_2SO_4$，$\frac{1}{2}K_2SO_4$，NaCl，KCl

由此可见，此时水中有非碳酸盐硬度 $CaSO_4$、$MgSO_4$ 的存在，但没有镁的碳酸盐硬度 $Mg(HCO_3)_2$。

另一种情况是 $\frac{1}{2}Ca^{2+}<HCO_3^-$ 的镁硬水，如下表：

水中主要的阳离子	$\frac{1}{2}Ca^{2+}$	$\frac{1}{2}Mg^{2+}$		$Na^{+}+K^{+}$
水中主要的阴离子	HCO_3^-	$\frac{1}{2}SO_4^{2-}$		Cl^-
生成盐类	$\frac{1}{2}Ca(HCO_3)_2$，$\frac{1}{2}Mg(HCO_3)_2$	$\frac{1}{2}MgSO_4$	$\frac{1}{2}Na_2SO_4$ $\frac{1}{2}K_2SO_4$	NaCl，KCl

由此可见，水中有镁的碳酸盐硬度 $Mg(HCO_3)_2$ 的存在，但没有钙的非碳酸盐硬度存在，而有镁的非碳酸盐硬度 $MgSO_4$ 的存在。

但上述两种情况，无论是哪种，水中都有非碳酸盐的硬度存在，而没有 Na^+、K^+ 的碳酸氢盐存在。

50 什么是水的酸度？

水的酸度是指水中所含能提供 H^+ 离子与强碱（如 NaOH、KOH 等）发生中和反应的物质总量。这些物质能够放出 H^+，或者经过水解能产生 H^+。水中形成酸度的物质有三部分：

（1）水中存在的强酸能全部离解出 H^+，如硫酸（H_2SO_4）、盐酸（HCl）、硝酸（HNO_3）等；

（2）水中存在的弱酸物质，如游离的二氧化碳（CO_2）、碳酸

（H_2CO_3）、硫化氢（H_2S）、醋酸（CH_3COOH）和各种有机酸等；

（3）水中存在的强酸弱碱组成的盐类，如铝、铁、铵等离子与强酸所组成的盐类等。

天然水中，酸度的组成主要是弱酸，也就是碳酸。天然水中在一般的情况下不含强酸酸度。

水中酸度的测定是用强碱的标准溶液（如 0.1mol/L NaOH）来滴定的。如用甲基橙指示剂所测得的酸度是指强酸酸度和强酸弱碱形成盐类的酸度；而用酚酞指示剂所测得的酸度包括了上述二部分酸度，即称为总酸度。

51 何谓水的电阻率？

在测定水的导电性能时，与水的电阻值大小有关，电阻值大，导电性能差，电阻值小，导电性能就良好。根据欧姆定律，在水温一定的情况下，水的电阻值 R 大小与电极的垂直截面积 F 成反比，与电极之间的距离 L 成正比，如下式：

$$R=\rho\frac{L}{F}$$

式中 ρ —电阻率，或称比电阻。

电阻的单位为欧姆（欧，代号 Ω），或用微欧（μΩ），1Ω 等于 $10^6\mu\Omega$；电阻率的国际制（SI）单位为欧米（Ω·m）。

如果电极的截面积 F 做成 $1cm^2$，两电极间的距离 L 为 1cm，电阻率的单位为 Ω·cm 时，那么电阻值就等于电阻率值。

水的电阻率的大小，与水中含盐量的多少、水中离子含量、离子的电荷数以及离子的运动速度有关。因此，纯净的水电阻率很大，超纯水电阻率就更大。水越纯，电阻率越大。

52 何谓水的电导度和电导率？和电阻率之间有何关系？

由于水中含有各种溶解盐类，并以离子的形态存在。当水中插入一对电极时，通电之后，在电场的作用下，带电的离子就产生一定方向的移动，水中阴离子移向阳极，阳离子移向阴极，使水溶液起导电作用。水的导电能力的强弱程度，就称为电导度 S（或称电导）。电导度反映了水中含盐量的多少，是水的纯净程度的一个重

要指标。水越纯净，含盐量越少，电阻越大，电导度越小。超纯水几乎不能导电。电导的大小等于电阻值的倒数，即

$$S=\frac{1}{R}$$

式中 R——电阻，Ω；

S——电导度（电导），单位过去用欧姆$^{-1}$（ohm^{-1}）或姆欧（moh，℧）表示。而目前通常用的国际制电导度的单位为西门子（Siemens），代号用 S，或用 μS 表示，$1S=10^6\mu S$。

因 $R=\rho\frac{L}{F}$（见 51 题），代入上式，则得到：

$$S=\frac{1}{\rho}\cdot\frac{F}{L}$$

对于一对固定的电极来说，两极间的距离不变，电极面积也不变，因此 L 与 F 为一个常数。令：

$$Q=\frac{L}{F}$$

式中 Q 称为电极常数。也就是说，对一定的电极就有一定的电极常数 Q 值。可得到

$$S=\frac{1}{\rho}\cdot\frac{1}{Q}$$

式中$\frac{1}{\rho}$就称为电导率（或称比电导），令 $\kappa=\frac{1}{\rho}$，电导率的国际制单位为西·米$^{-1}$（S·m^{-1}），其意义是截面积为 $1m^2$，长度 1m 的导体的电导。当电极常数 $Q=1$ 时，电导率值就等于电导度值。

电导率 κ，电导度 S 与电阻率 ρ 三者关系如下：

$$\kappa=SQ=\frac{1}{\rho}$$

由于水溶液中溶解盐类都以离子状态存在，因此具有导电能力，所以电导率也可以间接表示出溶解盐类的含量（含盐量）。

以上概念，对于除盐水处理的水质控制及其水质标准和监测都非常重要。

几类水的电导率及电阻率大致如下[8]：

物　质	电阻率 /Ω·cm	电导率 /(μS/cm)
30%H_2SO_4	1	1000×10^4
海水	33	33×10^3
0.05%NaCl	1000	1000
天然水	20×10^3	50
普通蒸馏水	1000×10^3	1
超纯蒸馏水	10×10^6	0.10

各种纯水的电导率（25℃）[32]如下：

水质纯度	电导率/(μS/cm)	所对应的含盐量/(mg/L)
纯水	≤10	2～5
非常纯水	≤1	0.2～0.5
高(超)纯水	≤0.1	0.01～0.02
理论纯水	0.054	0.00

53　什么是水的 pH 值？有什么意义？

水的 pH 值是表示水中氢离子浓度的负对数值，表示为：

$$pH=-\lg[H^+]$$

pH 值有时也称氢离子指数。由水中氢离子的浓度可以知道水溶液是呈碱性、中性或是酸性。由于氢离子浓度的数值往往很小，在应用上很不方便，所以就用 pH 值这一概念来作为水溶液酸、碱性的判断指标。而且，氢离子浓度的负对数值恰能表示出酸性、碱性的变化幅度的数量级的大小，这样应用起来就十分方便。并由此得到：

（1）中性水溶液，$pH=-\lg[H^+]=-\lg10^{-7}=7$；

（2）酸性水溶液，pH＜7，pH 值越小，表示酸性越强；

（3）碱性水溶液，pH＞7，pH 值越大，表示碱性越强。

如果按 pH 值（酸、碱度）将水质进一步地详细分类，可以得到：

（1）强酸性水溶液，pH＜5.0；

（2）弱酸性水溶液，pH＝5.0～6.4；

（3）中性水溶液，pH＝6.5～8.0；

（4）弱碱性水溶液，pH＝8.1～10.0；

（5）强碱性水溶液，pH＞10。

54　天然水中的碳酸从何而来？以什么形态存在？

天然水中碳酸的来源，主要有三个方面：

（1）空气中的二氧化碳溶解于水中而产生；

（2）由水中的水生动物和植物新陈代谢及有机物生物氧化而产生；

（3）由岩石及土壤中的碳酸盐和碳酸氢盐被溶解而产生。

天然水中的碳酸以三种不同的化合形态存在：

（1）游离碳酸或游离二氧化碳包括溶解的气体 CO_2 和未离解的 H_2CO_3 分子。习惯上，可将水中的 CO_2 当作碳酸的总量，因为在常温常压下平衡时，水中 99%以上是 CO_2，H_2CO_3 不足 1%。

（2）碳酸氢盐碳酸或碳酸氢盐 CO_2 例如含于 $Ca(HCO_3)_2$ 或 $Mg(HCO_3)_2$ 中的 CO_2，主要是以 HCO_3^- 形式存在。

（3）碳酸盐碳酸或碳酸盐 CO_2 例如中性盐碳酸钙 $CaCO_3$，碳酸镁 $MgCO_3$ 中的 CO_2，主要是以 CO_3^{2-} 形态而存在。

由于碳酸化合物是天然水中主要的杂质，而又是决定水中酸、碱度以及 pH 值的主要因素，对水质有多方面的作用，这对于工业水处理中的软化、除盐以及循环冷却水的防垢和防蚀处理影响都很大。因此，必须引起注意。

55　什么是电解质？什么叫电离平衡？

电解质是在水溶液中能够导电的物质，非电解质则没有这种能力。所有酸、碱、盐类都是电解质；许多有机物质，如醇、醛、酮等则是非电解质。电解质在水中具有导电能力的原因是由于它在水中发生离解或电离，生成带正电荷的阳离子和带负电荷的阴离子。在溶液中完全电离、全部以离子状态存在的电解质称为强电解质，如强酸、强碱及强酸强碱所形成的盐类。只有一部分电离为离子的电解质称为弱电解质，如弱酸、弱碱及弱酸弱碱所形成的盐类。

弱电解质在水中的电离过程是一种可逆过程。已经电离的正负离子又会相互碰撞，可能再结合成分子，因而分子和离子同时存在，最终在分子和离子之间建立起动平衡状态，称为电离平衡。

例如：

$$NH_4OH \rightleftharpoons NH_4^+ + OH^-$$

其电离通式可写成：

$$AB \rightleftharpoons A^+ + B^-$$

电离平衡式为

$$[A^+][B^-]/[AB]=K$$

K 称为电离常数。$[A^+]$、$[B^-]$及$[AB]$的单位均为物质的量浓度，mol/L。在温度一定时，电离常数为固定值。如 25℃时，NH_4OH 的电离常数 K 为：

$$K=[NH_4^+][OH^-]/[NH_4OH]=1.76\times10^{-6}$$

多元酸、碱及盐类可以连续进行数次电离，称为多元电解质的分级电离。例如碳酸可以二级电离，磷酸可以三级电离，放出氢离子。各级电离都可列出电离平衡式，并各有电离常数。碳酸的二级电离平衡式如下：

$H_2CO_3 \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^-$（一级电离）

$HCO_3^- \rightleftharpoons H^+ + CO_3^{2-}$（二级电离）

一级电离常数 $K_1=[H^+][HCO_3^-]/[H_2CO_3]$

$=4.45\times10^{-7}$（25℃）

二级电离常数 $K_2=[H^+][CO_3^{2-}]/[HCO_3^-]$

$=4.69\times10^{-11}$（25℃）

磷酸的三级电离平衡式为：

$H_3PO_4 \rightleftharpoons H^+ + H_2PO_4^-$　（一级电离）

$H_2PO_4^- \rightleftharpoons H^+ + HPO_4^{2-}$　（二级电离）

$HPO_4^{2-} \rightleftharpoons H^+ + PO_4^{3-}$　（三级电离）

一级电离常数 $K_1=[H^+][H_2PO_4^-]/[H_3PO_4]$

$=7.6\times10^{-3}$（25℃）

二级电离常数 $K_2=[H^+][HPO_4^{2-}]/[H_2PO_4^-]$

$=6.2\times10^{-8}$（25℃）

三级平衡常数 $K_3=[H^+][PO_4^{3-}]/[HPO_4^{2-}]$

$=4.4\times10^{-13}$（25℃）

在分级电离中，一级电离要比二级电离高几个数量级，二级电离又要比三级电离高几个数量级。

了解电离平衡可以了解弱电解质在水中的平衡状况。天然水中存在碳酸，循环水中常使用磷酸盐药剂，它们在水中的平衡状况均会影响系统的腐蚀或结垢状况。

不同温度下的碳酸平衡常数[1]如下：

t/℃	$K_1\times10^7$	pK_1	$K_2\times10^{11}$	pK_2
0	2.65	6.579	2.36	10.625
5	3.04	6.517	2.77	10.557
10	3.43	6.464	3.24	10.490
15	3.80	6.419	3.71	10.430
20	4.15	6.381	4.20	10.377
25	4.45	6.352	4.69	10.329
30	4.71	6.327	5.13	10.290
40	5.06	6.298	6.03	10.220
50	5.16	6.287	6.73	10.172
60	5.02	6.299	7.20	10.143
70	4.69	6.329	7.52	10.124
80	4.21	6.376	7.55	10.122

注：$pK_1=-\lg K_1$，$pK_2=-\lg K_2$。

56 何谓水中碳酸的平衡？

碳酸是二元弱酸，可以进行分级电离，各级的平衡反应如下：

$$CO_2+H_2O\rightleftharpoons H_2CO_3\rightleftharpoons H^++HCO_3^-\rightleftharpoons 2H^++CO_3^{2-}$$

从式中可知，水中碳酸为以下三种形式：H_2CO_3、HCO_3^- 及 CO_3^{2-}。如果水中碳酸物的摩尔总量为 C，则：

$$C=[H_2CO_3]+[HCO_3^-]+[CO_3^{2-}]$$

在一定温度下，当 C 值固定并达到电离平衡时，三种形式的碳酸量呈一定固定的比例。此比例将决定于氢离子的浓度。当 H^- 增加时，pH 值降低，反应向左进行，游离的碳酸 H_2CO_3（或 CO_2）增多；当 H^+ 减少时，pH 值升高，反应向右进行，则 HCO_3^-、CO_3^{2-} 依次增多。如果把这三种形式碳酸在总量中所占的比例分别以 α_0、α_1、α_2 表示，则：

$$[H_2CO_3]=C\alpha_0$$
$$[HCO_3^-]=C\alpha_1$$
$$[CO_3^{2-}]=C\alpha_2$$
$$\alpha_0+\alpha_1+\alpha_2=1$$

经计算，在25℃时，上述三种碳酸的比例与水中$-\lg[H^+]$(即pH值)的关系如下表及图1-0-6所示：

pH值	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	5.0	6.0	7.0
H_2CO_3/% $100\alpha_0$	100	99.99	99.96	99.86	99.56	95.75	69.20	18.64
HCO_3^-/% $100\alpha_1$	…	0.01	0.04	0.14	0.44	4.25	30.80	81.32
CO_3^{2-}/% $100\alpha_2$	—	—	—	—	—	—	—	0.04
pH值	7.5	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	
H_2CO_3/% $100\alpha_0$	6.74	2.46	0.17	0.01	—	—	—	
HCO_3^-/% $100\alpha_1$	93.12	97.08	95.36	68.02	17.54	2.08	0.21	
CO_3^{2-}/% $100\alpha_2$	0.14	0.46	4.47	31.97	82.46	97.92	99.79	

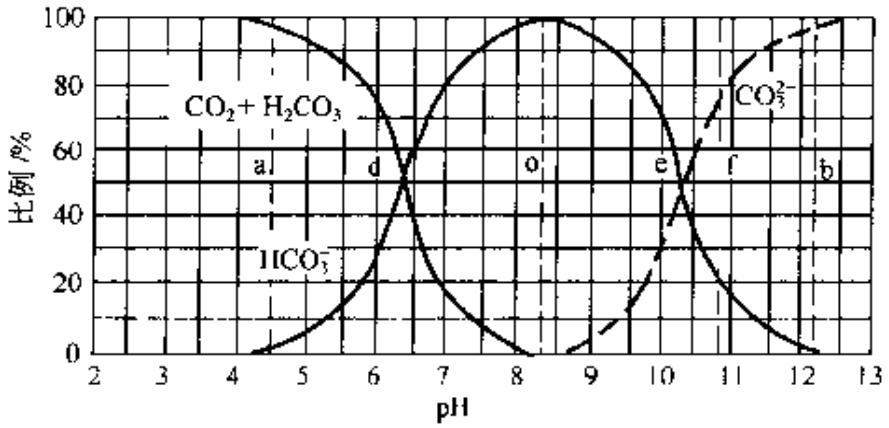


图1-0-6　三类碳酸的比例变化曲线

由图1-0-6可见：在低pH值时，只有$CO_2+H_2CO_3$；在高pH值时，只有CO_3^{2-}；当pH值在8.3左右时，HCO_3^-占绝对优势。因此，水中碳酸的平衡与pH值有着密切的关系。在一定的pH值条件下，三类碳酸将处于一定的平衡关系。

不同 pH 值下的碳酸平衡系数 (25℃)[1] 详表

pH	α_0[3]	α_1[2]	α_2[3]	α[4]
4.5	0.9861	0.01388	2.058×10^{-8}	72.062
4.6	0.9826	0.01741	3.250×10^{-8}	57.447
4.7	0.9782	0.02182	5.128×10^{-8}	45.837
4.8	0.9727	0.02731	8.082×10^{-8}	36.615
4.9	0.9659	0.03414	1.272×10^{-7}	29.290
5.0	0.9574	0.04260	1.998×10^{-7}	23.472
5.1	0.9469	0.05305	3.132×10^{-7}	18.850
5.2	0.9341	0.06588	4.897×10^{-7}	15.179
5.3	0.9185	0.08155	7.631×10^{-7}	12.262
5.4	0.8995	0.1005	1.184×10^{-6}	9.946
5.5	0.8766	0.1234	1.830×10^{-6}	8.106
5.6	0.8495	0.1505	2.810×10^{-6}	6.644
5.7	0.8176	0.1824	4.286×10^{-6}	5.484
5.8	0.7808	0.2192	6.487×10^{-6}	4.561
5.9	0.7388	0.2612	9.729×10^{-6}	3.828
6.0	0.6920	0.3080	1.444×10^{-5}	3.247
6.1	0.6409	0.3591	2.120×10^{-5}	2.785
6.2	0.5864	0.4136	3.074×10^{-5}	2.418
6.3	0.5297	0.4703	4.401×10^{-5}	2.126
6.4	0.4722	0.5278	6.218×10^{-5}	1.894
6.5	0.4154	0.5845	8.669×10^{-5}	1.710
6.6	0.3608	0.6391	1.193×10^{-4}	1.564
6.7	0.3095	0.6903	1.623×10^{-4}	1.448
6.8	0.2626	0.7372	2.182×10^{-4}	1.356
6.9	0.2205	0.7793	2.903×10^{-4}	1.282
7.0	0.1834	0.8162	3.828×10^{-4}	1.224
7.1	0.1514	0.8481	5.008×10^{-4}	1.178
7.2	0.1241	0.8752	6.506×10^{-4}	1.141
7.3	0.1011	0.8980	8.403×10^{-4}	1.111
7.4	0.08203	0.9169	1.080×10^{-3}	1.088
7.5	0.06626	0.9324	1.383×10^{-3}	1.069
7.6	0.05334	0.9449	1.764×10^{-3}	1.054
7.7	0.04282	0.9549	2.245×10^{-3}	1.042
7.8	0.03429	0.9629	2.849×10^{-3}	1.032
7.9	0.02741	0.9690	3.610×10^{-3}	1.024
8.0	0.02188	0.9736	4.566×10^{-3}	1.018

续表

pH	α_0 ①	α_1 ②	α_2 ③	α ④
8.1	0.01744	0.9768	5.767×10^{-4}	1.012
8.2	0.01388	0.9788	7.276×10^{-4}	1.007
8.3	0.01104	0.9798	9.169×10^{-4}	1.002
8.4	0.8764×10^{-2}	0.9797	1.154×10^{-3}	0.9972
8.5	0.6954×10^{-2}	0.9785	1.451×10^{-3}	0.9925
8.6	0.5511×10^{-2}	0.9763	1.823×10^{-3}	0.9874
8.7	0.4361×10^{-2}	0.9727	2.287×10^{-3}	0.9818
8.8	0.3447×10^{-2}	0.9679	2.864×10^{-3}	0.9754
8.9	0.2720×10^{-2}	0.9615	3.582×10^{-3}	0.9680
9.0	0.2142×10^{-2}	0.9532	4.470×10^{-3}	0.9592
9.1	0.1683×10^{-2}	0.9427	5.566×10^{-3}	0.9488
9.2	0.1318×10^{-2}	0.9295	6.910×10^{-3}	0.9365
9.3	0.1029×10^{-2}	0.9135	8.548×10^{-3}	0.9221
9.4	0.7997×10^{-3}	0.8939	0.1053	0.9054
9.5	0.6185×10^{-3}	0.8703	0.1291	0.8862
9.6	0.4754×10^{-3}	0.8423	0.1573	0.8645
9.7	0.3629×10^{-3}	0.8094	0.1903	0.8404
9.8	0.2748×10^{-3}	0.7714	0.2283	0.8143
9.9	0.2061×10^{-3}	0.7284	0.2714	0.7867
10.0	0.1530×10^{-3}	0.6806	0.3192	0.7581
10.1	0.1122×10^{-3}	0.6286	0.3712	0.7293
10.2	0.8133×10^{-4}	0.5735	0.4263	0.7011
10.3	0.5818×10^{-4}	0.5166	0.4834	0.6742
10.4	0.4107×10^{-4}	0.4591	0.5409	0.6490
10.5	0.2861×10^{-4}	0.4027	0.5973	0.6261
10.6	0.1969×10^{-4}	0.3488	0.6512	0.6056
10.7	0.1338×10^{-4}	0.2985	0.7015	0.5877
10.8	0.8996×10^{-5}	0.2526	0.7474	0.5723
10.9	0.5986×10^{-5}	0.2116	0.7884	0.5592
11.0	0.3949×10^{-5}	0.1757	0.8242	0.5482

① α_0，$[H_2CO_3]$在总碳酸盐中所占的摩尔比；

② α_1，$[HCO_3^-]$在总碳酸盐中所占的摩尔比；

③ α_2，$[CO_3^{2-}]$在总碳酸盐中所占的摩尔比；

④ $\alpha=\dfrac{1}{\alpha_1+2\alpha_2}$，代表碳酸盐的 pH 值系数。

说明：$\alpha_0+\alpha_1+\alpha_2=1$

57 什么是活性硅？什么是胶体硅？

活性硅（或称反应性硅）是二氧化硅溶解于水所形成的硅酸，因此也称溶解硅。硅酸化合物的测定是用钼酸作反应剂，使生成钼黄或钼蓝比色而测得。通过强碱性阴离子交换树脂可将其除去。非活性硅（或称非反应性硅）是与钼酸盐试剂不起反应的那部分二氧化硅，用常规检测法是测不出来的，它是由全硅（用重量法或氢氟酸转化后测得）减去反应性硅求得的，用离子交换或其他纯水法都只能除去一部分。在工业应用中，通常把非反应性硅称胶体硅，但严格说，这两者是有一定区别的。胶体硅经常产生于可溶性二氧化硅浓度较高及 pH 较低的水中。非反应性硅仅指与试剂不起反应的不溶解的二氧化硅。天然水中泥砂、黏土、悬浮的有机物、铁铝氧化物和碳酸钙等胶体颗粒的表面，都会吸附硅酸。这些硅酸，有的与钼酸不产生反应，有的则反应缓慢。各种水源中事实上并不含有真正的胶体硅，它所含的不溶解硅为非反应性硅。胶体硅与非反应性硅的结构，如图 1-0-7 所示。

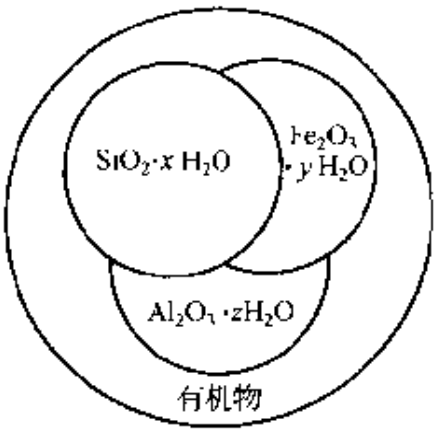


图 1 0 7 胶体硅与非反应性硅的结构

非活性硅在常规检测中虽然常被忽略，但它在进入高压动力系统后，会分解成有害的反应性形态，所以也不能忽视。

58 水中硅酸化合物以何种形态存在？

硅酸化合物也是天然水中的一种主要杂质，研究其形态，对于制备除盐水是至关重要的。硅酸化合物存在的形态，与水的性质有关，特别是水的 pH 值对其影响很大。由于 pH 变化，其形态也很多，也比较复杂。硅酸可以写成通式 $xSiO_2 \cdot yH_2O$。在水中存在形态为：

当 $x=1$，$y=1$ 时，成为偏硅酸 H_2SiO_3；

当 $x=1$，$y=2$ 时，成为正硅酸 H_4SiO_4；

当 $x>1$ 时，成为多硅酸，如 $H_2Si_2O_5$ 等。

这些硅酸在水中的溶解度极小。从其溶度积可知（25℃时，H_2SiO_3 溶度积为 1×10^{-11}），当 pH 值等于 6 时，其溶解度只有 0.005mmol/L，当 pH 等于 7 时，为 0.05mmol/L。由此可知：硅酸在酸性或微酸性的水溶液中，很少以离子态存在，pH 值越低，离子态的硅酸化合物越少，而胶体硅却越多。只有 pH 值大于 10.5 时，才有少量的 SiO_3^{2-} 存在。总之，在天然水中，硅酸呈溶解状态和胶状硅酸两种形式，不同形式硅酸的比例与水的氢离子浓度即 pH 值有关。

离子交换除盐处理，只能除去水中溶解状的硅化合物，胶态硅大都是通过混凝澄清处理予以去除。而用钼蓝法测定水中硅酸化合物时，也只能测定溶解状硅酸化合物。而全硅量的测定，要事先将胶态硅用氢氟酸转化成溶解硅酸化合物，然后，再用钼蓝法测定。

59 什么叫水的溶解氧（DO）？

溶解于水中的游离氧称为溶解氧（用 DO 表示），常以 O_2 mg/L、mL/L 等单位来表示。

天然水中氧的主要来源是大气溶于水中的氧，其溶解量与温度，压力有密切关系。温度升高氧的溶解度下降，压力升高溶解度增高。天然水中溶解氧含量约为 8～14mg/L，敞开式循环冷却水中溶解氧一般约为 6～8mg/L。

在 0.10MPa（1atm）压力及不同温度下，氧在水中的溶解度如下：

温度/℃	0	1	2	3	4	5	6	7
溶解度/(mg/L)	14.6	14.2	13.8	13.4	13.1	12.8	12.4	12.1
温度/℃	8	9	10	11	12	13	14	15
溶解度/(mg/L)	11.8	11.6	11.3	11.0	10.8	10.5	10.3	10.1
温度/℃	16	17	18	19	20	25	30	35
溶解度/(mg/L)	9.9	9.7	9.5	9.3	9.1	8.3	7.5	7.0
温度/℃	40	45	50	60	70	80	90	100
溶解度/(mg/L)	6.5	6.0	5.6	4.8	3.9	2.9	1.6	0

加压下氧在水中的溶解度[17]

压力 /[kgf/cm²(MPa)]	温度/℃	溶解度 /(cm³/g水)	压力 /[kgf/cm²(MPa)]	温度/℃	溶解度 /(cm³/g水)
9.52(0.93)	25	0.28	27.20(2.67)	260.0	1.71
20.06(1.97)	25	0.56	6.80(0.67)	315.6	0.63
25.16(2.47)	25	0.70	13.60(1.33)	315.6	1.42
6.80(0.67)	162.8	0.15	20.40(2.00)	315.6	2.19
13.60(1.33)	162.8	0.31	7.07(0.69)	343.3	1.22
20.40(2.00)	162.8	0.46	11.90(1.17)	343.3	1.85
6.80(0.67)	204.4	0.18	13.94(1.37)	343.3	2.29
10.20(1.00)	204.4	0.28	19.04(1.87)	343.3	2.96
6.80(0.67)	260.0	0.64	19.65(1.93)	343.3	2.56
13.60(1.33)	260.0	0.91	21.01(2.06)	343.3	2.99
20.40(2.00)	260.0	1.35			

水体中的溶解氧含量的多少，也反映出水体遭受到污染的程度。当水体受到有机物污染时，由于氧化污染物质需要消耗氧，使水中所含的溶解氧逐渐减少。污染严重时，溶解氧会接近于零，此时厌氧菌便滋长繁殖起来，并发生有机污染物的腐败而发臭。因此，溶解氧也是衡量水体污染程度的一个重要指标。

60 什么叫化学需氧量（COD）？

所谓化学需氧量（COD），是在一定的条件下，采用一定的强氧化剂处理水样时，所消耗的氧化剂量。它是表示水中还原性物质多少的一个指标。水中的还原性物质有各种有机物、亚硝酸盐、硫化物、亚铁盐等。但主要的是有机物，因此，化学需氧量（COD）又往往作为衡量水中有机物质含量多少的指标。化学需氧量越大，说明水体受有机物的污染越严重。

化学需氧量（COD）的测定，随着测定水样中还原性物质以及测定方法的不同，其测定值也有不同。目前应用最普遍的是酸性高锰酸钾氧化法与重铬酸钾氧化法。高锰酸钾（$KMnO_4$）法，氧化率较低，但比较简便，在测定水样中有机物含量的相对比较值时，可以采用。重铬酸钾（$K_2Cr_2O_7$）法，氧化率高，再现性好，适用于测定水样中有机物的总量。

有机物对工业水系统的危害很大。含有大量有机物的水在通过除盐系统时会污染离子交换树脂，特别容易污染阴离子交换树脂，使树脂交换能力降低。有机物在经过预处理时（混凝、澄清和过滤），约可减少50%，但在除盐系统中无法除去，故常通过补给水带入锅炉，使炉水pH值降低。有时有机物还可能带入蒸汽系统和凝结水中，使pH降低，造成系统腐蚀。在循环水系统中有机物含量高会促进微生物繁殖。因此，不管对除盐、炉水或循环水系统，COD都是越低越好，但并没有统一的限制指标。在循环冷却水系统中COD（$KMnO_4$法）>5mg/L时，水质已开始变差。

61 什么叫生化需氧量（BOD）？如何以生化需氧量（BOD）来判断水质的好坏？

所谓生化需氧量（BOD）是在有氧的条件下，由于微生物的作用，水中能分解的有机物质完全氧化分解时所消耗氧的量称为生物化学需氧量简称生化需氧量。它是以水样在一定的温度（如20℃）下，在密闭容器中，保存一定时间后溶解氧所减少的量（mg/L）来表示的。当温度在20℃时，一般的有机物质需要20天左右时间就能基本完成氧化分解过程，而要全部完成这一分解过程就需100天。但是，这么长的时间对于实际生产控制来说就失去了实用价值。因此，目前规定在20℃下，培养5天作为测定生化需氧量的标准。这时候测得的生化需氧量就称为五日生化需氧量，用BOD_5表示。如果是培养20天作为测定生化需氧量的标准时，这时候测得的生化需氧量就称为20天生化需氧量，用BOD_{20}表示。

生化需氧量（BOD）的多少，表明水体受有机物污染的程度，反映出水质的好坏。判断标准如下表所示：

生化需氧量(BOD_5)/(mg/L)	水质状况	生化需氧量(BOD_5)/(mg/L)	水质状况
1.0以下	非常洁净	7.5	不良
2.0	洁净	10.0	恶化
3.0	良好	20.0以上	严重恶化
5.0	有污染		

62 什么叫总需氧量(TOD)?

总需氧量的测定，是在特殊的燃烧器中，以铂为催化剂，于900℃下将有机物燃烧氧化所消耗氧的量，该测定结果比COD更接近理论需氧量。

TOD用仪器测定只需约3min可得结果，所以，有分析速度快、方法简便，干扰小、精度高等优点，受到了人们的重视。如果TOD与BOD_5间能确定它们的相关系数，则以TOD指标指导生产有更好的实用意义。

63 什么叫总有机碳(TOC)?

水中的有机物质的含量，以有机物中的主要元素 碳的量来表示，称为总有机碳。

TOC的测定类似于TOD的测定。在950℃的高温下，使水样中的有机物气化燃烧，生成CO_2，通过红外线分析仪，测定其生成的CO_2之量，即可知总有机碳量。在测定过程中水中无机的碳化合物如碳酸盐、重碳酸盐等也会生成CO_2，应另行测定予以扣除。

若将水样经0.2μm微孔滤膜过滤后，测得的碳量即为溶解性有机碳(DOC)。TOC、DOC是较为经常使用的水质指标。

64 如何对水质分析的结果用阴阳离子总量进行校正?

水溶液中的阴阳离子是平衡的。所以，按能提供或接受H^+离子的物质的量计，阳离子的总和应该等于阴离子的总和。(即阳离子的总当量数应等于阴离子的总当量数)。但是，水质分析结果往往有误差，故需用阳离子总量(∑阳)和阴离子总量(∑阴)进行分析的校正。按平衡：

$$c\left(\sum 阳,\frac{1}{x}A^{x+}\right)=c\left(\sum 阴,\frac{1}{x}B^{x-}\right)$$

水中如果有K^+、Na^+、NH_4^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Fe^{3+}、Al^{3+}……等阳离子和OH^-、NO_3^-、Cl^-、HCO_3^-、CO_3^{2-}、SO_4^{2-}、SiO_3^{2-}……等阴离子，那么：

$$c\left(\sum 阳,\frac{1}{x}A^{x+}\right)-\sum 阳\left(K^++Na^++NH_4^++\frac{1}{2}Ca^{2+}\right.$$

$$+\frac{1}{2}Mg^{2+}+\frac{1}{3}Fe^{3+}+\frac{1}{3}Al^{3+}+\cdots\Big)\ mol/L$$

$$c\left(\Sigma阴,\ \frac{1}{x}B^{x-}\right)=\Sigma阴\Big(OH^-+NO_3^-+Cl^-+HCO_3^-$$

$$+\frac{1}{2}CO_3^{2-}+\frac{1}{2}SO_4^{2-}+\frac{1}{2}SiO_3^{2-}+\cdots\Big)\ mol/L$$

要注意，在水中：

$\Sigma阳(K^++Na^++NH_4^++Ca^{2+}+Mg^{2+}+Fe^{3+}+Al^{3+}+\cdots)mol/L$

$\neq\Sigma阴(OH^-+NO_3^-+Cl^-+HCO_3^-+CO_3^{2-}+SO_4^{2-}+SiO_3^{2-}+\cdots)$ mol/L

而一般各阴阳离子的分析结果均以 mg/L 计。因此，应该按下式换算：

$$c\left(\Sigma阳,\frac{1}{x}A^{x+}\right)=\frac{K^+}{39.10}+\frac{Na^+}{23.00}+\frac{NH_4^+}{18.04}+\frac{Ca^{2+}}{20.04}$$

$$+\frac{Mg^{2+}}{12.15}+\frac{Fe^{3+}}{18.62}+\frac{Al^{3+}}{8.99}+\cdots$$

$$c\left(\Sigma阴,\frac{1}{x}B^{x-}\right)=\frac{OH^-}{17.01}+\frac{NO_3^-}{62.00}+\frac{Cl^-}{35.45}+\frac{HCO_3^-}{61.02}$$

$$+\frac{CO_3^{2-}}{30.00}+\frac{SO_4^{2-}}{48.03}+\frac{SiO_3^{2-}}{38.04}+\cdots$$

$$分析误差\ \varepsilon=\left\{c\left(\Sigma阳,\ \frac{1}{x}A^{x+}\right)-c\left(\Sigma阴,\ \frac{1}{x}B^{x-}\right)\Big/\right.$$

$$\left.\left[c\left(\Sigma阳,\ \frac{1}{x}A^{x+}\right)+c\left(\Sigma阴,\ \frac{1}{x}B^{x-}\right)\right]\right\}\times100\%$$

上述误差不得大于±2%。否则就要检查分析项目有无漏项，分析的方法和步骤有无错误或分析误差过大等。必要时要重新取样分析，直至符合误差范围。

第二章　水的净化

65　原水中含有的杂质一般以何种方法将其去除？

地面水源和地下水源都含有很多杂质。地面水源中粗大的杂质较多，但在取水过程已被去除，所以给水处理一般是指去除那些较细小的杂质。

原水中细小杂质主要是溶解在水里的盐类、悬浮杂质和胶体颗粒。一般说来，地面水中悬浮物含量较多，而地下水中溶解盐类含量要高一些，苦咸水及海水的含盐量则更高。

采用物理化学方法进行水处理可分为三种情况：一是在处理过程中只发生物理变化；二是在处理过程中只发生化学变化；三是在处理过程中同时发生物理及化学变化。

水中杂质的种类及粒度尺寸，以及应用的处理方法，以图2-0-1来表示。图中第三行属于生物法未在本书中讨论，其他的处理方法均属于物理化学方法，将在书中以下各章中加以叙述。图2-0-1中第二行所示的反渗透是用以去除水中的溶解物质，超过滤用以去除水中的大分子。微孔过滤是利用筛除的物理作用。

图2-0-1最后两行所示的处理方法中，化学氧化指通过化学的氧化过程来去除水中有机物、无机物及杂质。用于有机物的氧化剂包括过锰酸钾、氯及臭氧等。化学氧化与活性炭所适用的杂质粒度范围基本一致。活性炭吸附主要用于去除水中的有机物质。

在物理化学方法中，化学沉淀、离子交换、反渗透、化学氧化以及活性炭吸附等是用于去除水中溶解物质的方法，混凝沉淀及过滤则为去除胶体以及较大颗粒的方法，这可以由图中的粒度尺寸看出来。

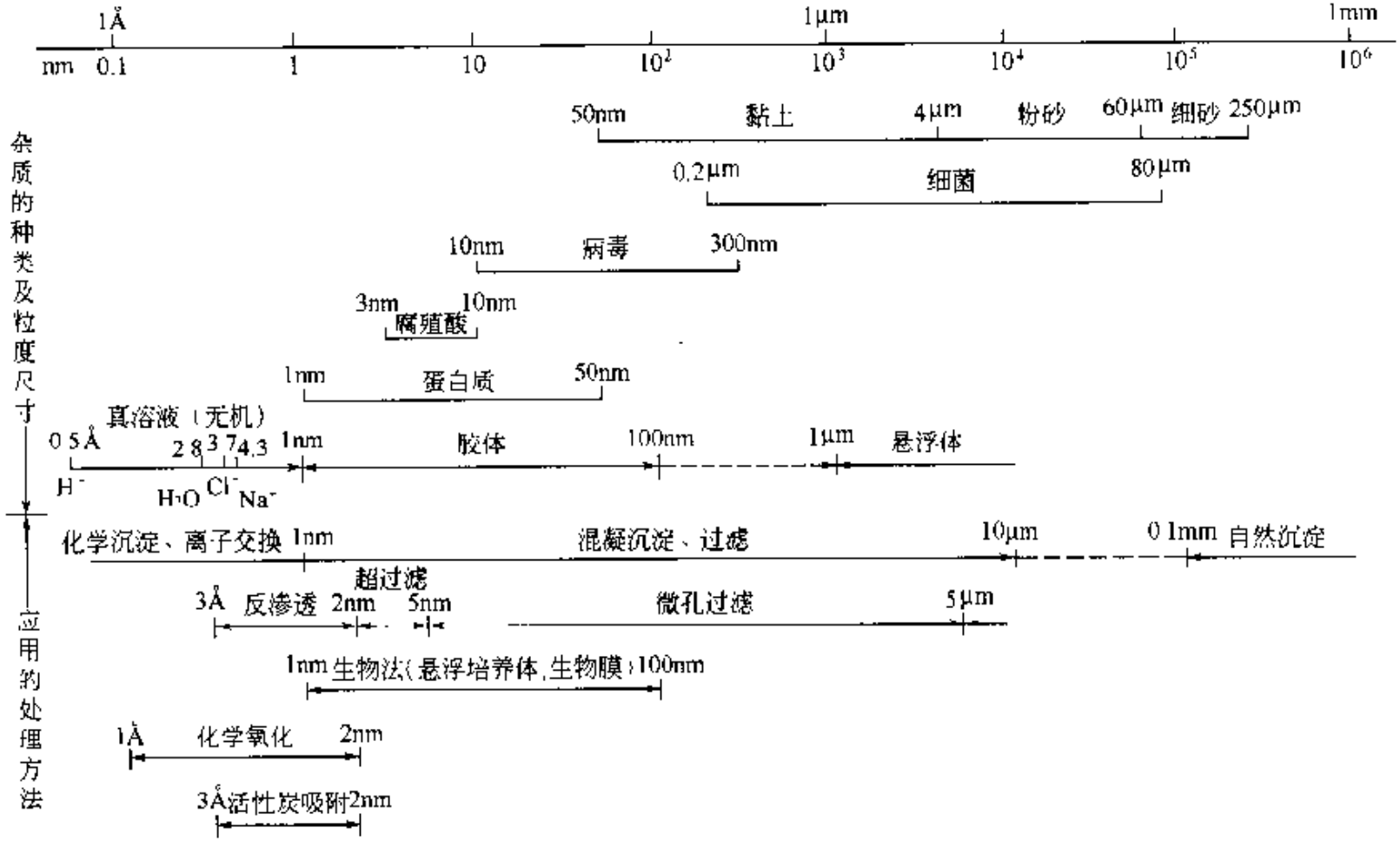


图 2-0-1　水中的杂质与处理方法

66 什么是水的预处理？预处理有哪些主要方法？

水的预处理是在水精制处理之前，预先进行的初步处理，以便在水的精处理时取得良好效果，提高水质。因为自然界的水都有大量的杂质，如泥沙、黏土、有机物、微生物、机械杂质等，这些杂质的存在，严重影响精制水的水质与处理效果，因此必须在精处理之前将一些杂质降低或除去，这就需要预处理，有时也称前处理。

预处理的方法很多，主要有预沉、混凝、澄清、过滤、软化、消毒等。用这些方法预处理之后，可以使水的悬浮物（浑浊度）、色度、胶体物、有机物、铁、锰、暂时硬度、微生物、挥发性物质、溶解的气体等杂质除去或降低到一定的程度。

预沉　就是在大容积、低流速的情况下，水中固体颗粒因重力作用而从水中分离出来。如沉沙池、预沉池。

混凝　利用铁盐、铝盐、高分子等混凝剂，与水中的杂质通过絮凝和架桥作用生成大颗粒沉淀物，然后通过其他设备，如澄清池、过滤池等，予以除去。

澄清　通过混凝剂作用而形成的大颗粒沉淀物在澄清池内分离，沉淀物除去，得到澄清水。

过滤　将被处理的水，流经装有特殊过滤材料装置，如各种滤池等，截留水中杂质，予以去除。

软化　采用化学药剂，如石灰水、纯碱等，使水中碳酸氢盐硬度除去；或是采用阳离子交换树脂等方法除去水中的钙、镁、铁离子等，这一过程称为软化。

消毒　加入杀生剂，如液氯、漂白粉等，杀灭水中的微生物。

（一）混　　凝

67 为什么水中胶体颗粒不易自然沉降？

水中胶体颗粒是 $10^{-4}\sim10^{-6}$mm 大小的微粒，在水中很稳定，不易沉降。它的自然沉降速度每秒只有 0.154×10^{-6}mm，沉降 1m 需 200 年。这是因为胶体颗粒一般是由难溶物质从水溶液中析出时

形成的，许多离子或分子聚集起来到达一定量时，所形成微粒物质的表面产生了吸附能力，从而能吸附水中的许多离子，或者是由于颗粒表面电离而产生许多离子，微粒表面就具有带电性能。于是：

（1）同类胶体带有同性电荷，因此产生同性相斥，从而阻止胶体微粒之间的接触和黏合，使得一直保持微粒状态而悬浮于水中；

（2）胶粒表面还有一层水分子紧紧地包围着，这层水化层也阻碍和隔绝了胶体微粒间的接触，使得胶体微粒在热运动时，保持微粒状态的稳定，而不能被彼此黏合，悬浮于水中。

由于上述两个原因，使得水中胶体颗粒不易自然沉降。

68　水中胶体颗粒的结构有什么特点？

水中胶体颗粒由三个部分组成，即胶核、吸附层、扩散层。水中胶体物质比较多的是 H_2SiO_3。硅酸胶体在水中会水解生成 $Si(OH)_4$，并在一定的条件下发生聚合反应：

$$mSi(OH)_4 \longrightarrow m(SiO_2)+2mH_2O$$

生成的若干 SiO_2 结合成胶核，其表面的分子未完全脱水而以 H_2SiO_3 形态存在，并分级电离为：

$$H_2SiO_3 \rightleftharpoons HSiO_3^- + H^+ \rightleftharpoons SiO_3^{2-} + 2H^+$$

在放出 H^+ 后形成胶团，其结构如图 2-1-1 所示。

结构式为：

$$\{m[SiO_2]\cdot nSiO_3^{2-}\cdot 2(x-n)H^+\}^{2x-}\cdot 2xH^+$$

硅酸是弱电解质，所以只有一部分产生电离，因此可认为胶核表面上同时存在有 H_2SiO_3、$HSiO_3^-$、SiO_3^{2-} 等不同形态的分子和离子。H_2SiO_3 胶体颗粒的结构，胶核带负电，吸附层带正电，扩散层负电大于正电，因而整个胶体颗粒呈负电性如图 2-1-1。胶体物质难以处理是由于它带有同性电荷不易沉降，而处于稳定状态。如用 ζ 来表示吸附层和扩散层间的电位差，ζ 电位越大，带电量也越大，胶粒也就越稳定越不易沉降。如果 ζ 电位越小或接近于零，胶粒就很少带电，或不带电，因此就不稳定，使胶粒之间易于相互接触黏合而沉降。因此，在工业水处理中，经常采用降低 ζ 电位的方法，使胶体微粒分离或除去。

69 怎样使胶体颗粒沉淀？

要使胶体颗粒沉淀，就要促使胶体颗粒相互接触，成为大的颗粒，亦即凝聚起来，藉其质量而沉淀。换句话说，就是使胶粒的带电量减少或者消失。因此，就要采取措施使ζ电位减少或等于零，这个过程也叫做胶体颗粒的脱稳作用。这些措施有：

（1）加入相反电荷的胶体，使他们之间产生电中和作用；

（2）加入与水中胶体颗粒电荷相反符号的高价离子，使得高价离子从扩散层进入吸附层，以降低ζ电位；

（3）增加水中盐类浓度的办法，使胶体的带电层受到压缩，以减少ζ电位。

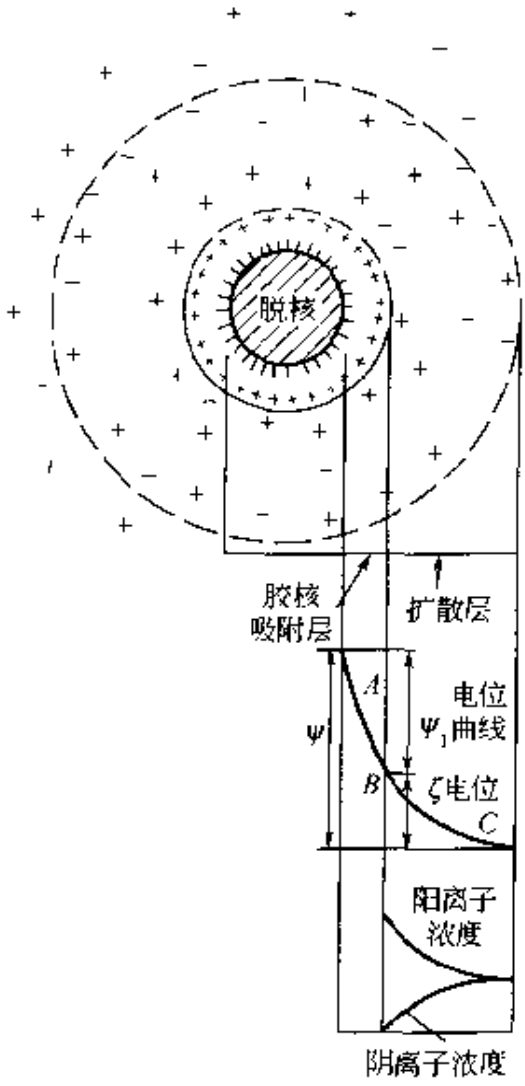


图 2-1-1 硅酸胶团结构示意

通过以上措施，使水中胶体颗粒相互接触，黏合成为大颗粒而沉淀。水的混凝澄清处理，使用铝盐、铁盐混凝剂，就是使胶体颗粒产生脱稳作用的一种措施，从而使水得到澄清。

70 什么叫凝聚？

要使胶体颗粒沉淀，就必须使微粒相互碰撞而黏合起来，也就是要消除或者降低ζ电位。由于天然水中胶体大都是带负电荷，因此就在水中投入大量带正离子的混凝剂，当大量的正离子进入胶粒吸附层时，扩散层就会消失，ζ电位趋于零。这样就消除了胶体微粒之间的静电排斥，而使微粒聚结。这种通过投入大量正离子电解质的方法，使得胶体微粒相互聚结的作用称为双电层作用。根据这

个机理，使得水中胶体颗粒相互聚结的过程称为凝聚。换言之，凝聚就是向水中加入硫酸铝、硫酸亚铁、明矾、氯化铁等混凝剂，以中和水中带负电荷的胶体微粒，使得变为不稳定状态，从而达到沉淀的目的。

71　什么是电凝聚？其原理如何？

电凝聚是利用电化学方法产生氢氧化物作为凝聚剂净水的一种工艺。作为阳极，在电流作用下，金属离子进入水中与水电解产生的氢氧根形成氢氧化物，氢氧化物絮凝将杂质颗粒吸附。生成絮状物。

电凝聚是对经过自来水厂常规净化后的水进一步净化的一种预处理技术。电凝聚能除浊、脱色，还能去除水中重金属离子和细菌，对去除水中的有机物质也有一定的效果。它的装置具有结构紧凑，占地面积小，不需要使用药剂，维护操作方便和实现自动化容易的优点。应用电凝聚净水装置进一步净化生活饮用水，对于提高水质起到了积极的作用，并能满足一些以水为原料的工厂，如食品厂、饮料厂、化妆品厂等生产中用水的需要。此外，电凝聚净水工艺还可用来作为纯水和高纯水的预处理工艺；也可处理生活污水和各种工业污水。

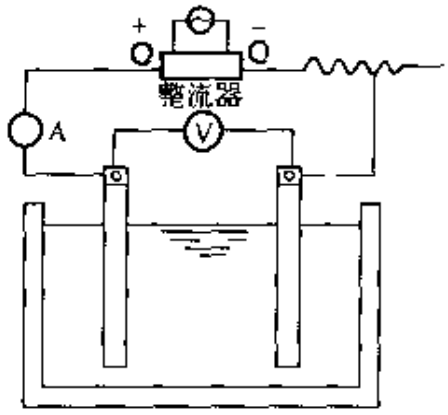


图 2-1-2　电凝聚的原理

电凝聚净水的基本原理，请见图 2-1-2 示。

作为金属阳极可以是铝或铁。如铝做阳极时，当直流电源通电后，阳极金属放电成为金属离子并进入水中。

$$Al-3e\longrightarrow Al^{3-}$$

水被电解

$$H_2O\longrightarrow H^{+}+OH$$

带正电荷的氢离子在阴极上获得电子成为氢气。

$$2H^{+}+2e^{-}\longrightarrow H_2\uparrow$$

带有负电荷的氢氧根离子向阳极移动，并在阳极放电，生成新

生态的氧。

$$4OH^- - 4e \longrightarrow 2H_2O + 2[O]$$

在阴极产生氢气气泡，在阳极产生氧气气泡，这些气泡上升时，就能将悬浮物带到水面，于是在水面上就形成了浮渣层，带到水面的物质增多后，浮渣层就变密或变厚。

过程中产生的 Al^{3-} 与 OH^- 反应生成 $Al(OH)_3$，这是一种活性很强的凝聚剂。

$$Al^{3+} + 3OH^- \longrightarrow Al(OH)_3 \downarrow$$

如果以铁作为阳极，可能发生的电化学反应是：

铁的溶解

$$Fe - 2e \longrightarrow Fe^{2+}$$

Fe^{2+} 与 OH^- 反应生成氢氧化亚铁

$$Fe^{2-} + 2OH^- \longrightarrow Fe(OH)_2 \downarrow$$

$Fe(OH)_2$ 氧化成氢氧化铁，它也是一种强活性凝聚剂。

$$4Fe(OH)_2 + O_2 + 2H_2O \longrightarrow 4Fe(OH)_3 \downarrow$$

反应生成的氢氧化铝或氢氧化铁，与水中的悬浮颗粒生成絮状物，这些絮状物相对密度较小时就上浮分离，相对密度较大时则向下沉淀分离。

因此在通直流电进入水中的过程中，就同时有两个作用：一个是产生的气体将悬浮物带到水面形成浮渣层进行分离，另一个是反应生成的氢氧化铝或氢氧化铁是凝聚剂，可以使悬浮小粒凝聚起来，依靠相对密度的不同上浮分离或沉淀分离。

此外，电凝聚还有共沉淀作用，即电凝聚时产生 $Fe(OH)_3$ 与水中金属氢氧化物共沉淀，如果铝做阳极时，形成的 $Al(OH)_3$ 还能吸附水中的硅化物和氟化物。同时，在阴、阳电极处可发生氧化、还原作用，还可以去除水中的一些有害物质．如氰根被氧化变成 CO_2 和 N_2 而除去，水中 Cr^{6-} 通过还原成毒性较小的三价铬。

72　什么叫絮凝？

高分子混凝剂溶于水后，会产生水解和缩聚反应而形成高聚合物。这种高聚合物的结构是线型结构，线的一端拉着一个胶体颗

粒，另一端拉着另一个胶体颗粒，在相距较远的两个微粒之间起着黏结架桥作用，使得微粒逐步变大，变成了大颗粒的絮凝体（俗称矾花）。因此，这种由于高分子物质的吸附架桥而使微粒相互黏结的过程，就称为絮凝。换言之，絮凝是在水中加高分子物质——絮凝剂，帮助已经中和的胶体微粒进一步凝聚，使其更快地凝成较大的絮凝物，从而加速沉淀。

73　什么叫混凝、混凝过程和混凝处理？

通过双电层作用而使胶体颗粒相互聚结过程的凝聚，和通过高分子物质的吸附架桥作用而使胶体颗粒相互黏结过程的絮凝，这两者总称为混凝。

所谓混凝过程，是指在水处理过程中，向水中投加药剂，进行了水与药剂的混合，从而使水中的胶体物质产生凝聚和絮凝，这一综合过程称为混凝过程。

混凝处理：在水中加入药剂后，产生了电离和水解作用，形成了胶体，并与水中其他胶体颗粒进行吸附作用，使其絮凝成为大的颗粒，最后产生沉降等的水处理过程称为混凝处理。

74　什么叫混凝剂？有哪些常用的混凝剂？

在水处理中，能够使水中的胶体微粒相互黏结和聚结的这类物质，称为混凝剂。

混凝剂大致分为无机混凝剂和有机混凝剂两类。常用的混凝剂如下：

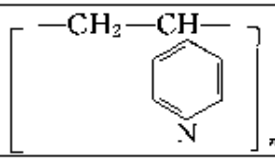
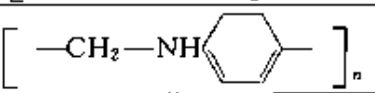
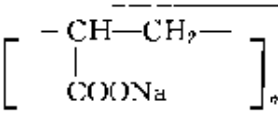
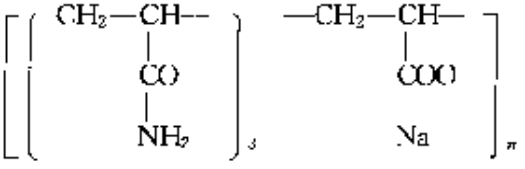
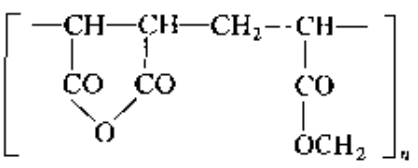
（1）常用的无机混凝剂

混凝剂名称	分子式及相对分子质量(M_r)	主要成分含量	形状	适用 pH 范围
硫酸铝	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ M_r666	Al_2O_3 15%	块、粒、粉状	6～7.8
硫酸铝钾（明矾）	$Al_2(SO_4)_3 \cdot K_2SO_4 \cdot 24H_2O$ M_r949	Al_2O_3 10%	结晶块状	6～8
铝酸钠	$Na_2Al_2O_4$ M_r164	$Al_2O_3$55% Na_2O35%	结晶	
聚合氯化铝（PAC）	$[Al_2(OH)_nCl_{6-n}]_m$ $n=1\sim5$（整数），$m\leqslant10$	Al_2O_3 10%	液体	7～8

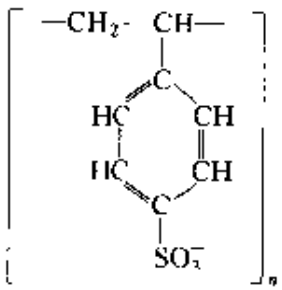
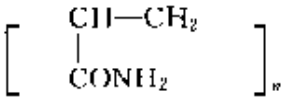
续表

混凝剂名称	分子式及相对分子质量(M_r)	主要成分含量	形状	适用 pH 范围
硫酸亚铁（绿矾）	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$ M_r278	$FeSO_4$ 55% Fe20%	结晶 粒状	5～11
硫酸铁	$Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$ M_r562	$Fe_2(SO_4)_3$ 70%	粉末状	5～11
氯化铁	$FeCl_3 \cdot 6H_2O$ M_r270	$FeCl_3$ 60%	结晶	8.5～11
铵矾	$Al_2(SO_4)_3 \cdot (NH_4)_2SO_4 \cdot 24H_2O$ M_r906.6	Al_2O_3 11%	块状 粉末状	10
聚合硫酸铁（PFS）	$[Fe_2(OH)_n(SO_4)_{3-\frac{n}{2}}]_m$ $n=1$ 或 2，$m=f(n)$	$Fe_2(SO_4)_3$	液体 固体 粉末	7～8

（2）常见的有机混凝剂

型别	名　称	结　构　式	适用 pH 范围	聚合度
阳离子型聚合电解质	聚乙烯吡啶类		>6	
	水溶性苯胺树脂			
	多乙胺	$[-CH_2CH_2NH-]_n$		
	聚合硫脲	$[R\quad NHCSNH-]_n$		
阴离子型聚合电解质	聚丙烯酸钠		最佳 8.5	高聚合
	顺丁二烯共聚物		>6	高聚合
	藻朊酸钠		>6	低聚合
	聚丙烯酰胺部分水解的盐		最佳 6.5	高聚合
	纤维素纳	$---OCH_2\quad COONa$	>6	低聚合
	马来酸酐与丙烯酸酯共聚物		>6	低聚合

续表

型别	名称	结构式	适用pH范围	聚合度
阴离子型聚合电解质	聚苯乙烯磺酸盐(PSS)		>6	低聚合
非离子型聚合物	聚丙烯酰胺		5～10	
	苛性淀粉			
	水溶性脲树脂			
	聚氧化乙烯聚合物	$[-CH_2-CH_2O-]_n$	>8	

75　为什么混凝剂能除去水中的胶体物质？

混凝剂由于在混凝过程中的一些物理化学作用，使得能够除去水中的胶体物质，这是因为：

（1）吸附作用：由于混凝剂特别是高分子物质，在水中起着吸附架桥作用，而使水中微粒相互黏结成大颗粒，然后用沉淀的方法去除胶体物质。

（2）中和作用：由于混凝剂在水中产生大量的高电荷的正离子，而天然水中的胶体物大都带负电，使它们异电相吸，相互中和，从而消除了胶体微粒之间的静电斥力，且能长为大颗粒，藉自重沉降而去除。

（3）表面接触作用：絮凝过程是以微粒作核心在其表面上进行的，而使微粒表面相接触，并黏结成大颗粒，通过沉淀而去除。

（4）过滤作用：絮凝在水中沉降的过程，犹如一个过滤网下降，从而包裹着其他微粒一起沉降。

通过上述这些复杂的过程而除去水中的胶体物质。

76 碱式氯化铝（PAC）混凝剂有何特点？

碱式氯化铝（PAC）又称聚合羟基铝。

聚合羟基铝是一种无机高分子的多价聚合电解质絮凝剂，分为聚合羟基氯化铝和聚合羟基硫酸铝两类。聚合羟基氯化铝是一种介于三氯化铝和氢氧化铝之间的水解聚合产物，通称碱式氯化铝（PAC）。

碱式氯化铝的色泽随盐基度大小而变。盐基度在40%～60%范围时为淡黄透明，60%以上时逐渐变为无色透明。味酸涩。固体碱式氯化铝的形状亦随盐基度而异。盐基度在30%以下时为晶体状；30%～60%为胶体状；60%以上时逐渐变为树脂状。70%以下时易吸潮并液化，70%以上时不易潮解。

碱式氯化铝与酸作用发生解聚反应，使聚合度和盐基度降低，形成正铝盐，絮凝效果也随之降低。

碱式氯化铝与碱反应，可增加其聚合度和盐基度，会进一步生成氢氧化铝沉淀和铝酸盐。碱式氯化铝和硫酸铝或其他多价酸盐混合，易产生共沉，降低或完全失去絮凝性能。碱式氯化铝加温到110℃以上时，会发生分解，陆续放出氯化氢气体，最后分解为氧化铝。

氧化铝含量是碱式氯化铝有效成分的衡量指标。一般说来，相对密度越大，氧化铝含量越高。

盐基度是碱式氯化铝的另一个重要质量指标，是该产品的结构形态、聚合度、絮凝能力、贮存稳定性、pH值的决定因素。

黏度：在相同氧化铝含量下，碱式氯化铝的黏度较硫酸铝低，因此，有利于输送与使用。

冻结温度：碱式氯化铝的析出温度较硫酸铝低，有利于低温地区的使用和贮存。

pH值：与其他絮凝剂相比，在相同浓度时碱式氯化铝的pH值最高。因此，其腐蚀性最小。

过滤性能：在水处理中，采用碱式氯化铝处理的沉淀出水比采用硫酸铝的浑浊度小，絮凝体大，所以在过滤时一般截留在滤层的

表层，可缩短冲洗时间并易于冲洗干净。碱式氯化铝不但具有良好的絮凝性能，而且在原水浑浊度增高时，其投加量的增长幅度小于三氯化铁、浑浊度越高，其差别越显著。如与硫酸铝比较、则在任何浑浊度时，碱式氯化铝的投加量均小于硫酸铝投加量。碱式氯化铝可应用于黄河高浑浊度水的处理。在一定的范围内，原水浑浊度越高，浑浊度变化范围越大，其优越性越明显。

碱式氯化铝加入水中后即发生水解和聚合反应，生成一系列铝盐水解聚合物，然后通过絮凝沉淀和过滤去除，这种作用与硫酸铝、三氯化铁絮凝剂类似。根据毒性试验表明，它无毒，在动物体内无明显蓄积作用，也无致畸性和致突变性，无致癌危险性，用它净化的自来水符合生活饮用水标准。

碱式氯化铝絮凝剂具有絮凝体形成迅速、絮体颗粒大、机械强度好、沉降速度高等优点。用于高浊度水、低温低浊水、有色水和受污染水，均能达到良好的絮凝效果，并且对原水的 pH 值、温度、浑浊度、碱度、有机物等的变化，均有较强的适应性。如与有机高分子聚合物联用处理高浑浊度水，效果更好。

由于碱式氯化铝的有效成分（Al_2O_3）高，用量少，且便于运输、贮存和使用，在达到同样絮凝效果的条件下，按 Al_2O_3 计算，用于低浊度水，其用量仅为硫酸铝的 75%～50%；用于高浑浊度水，约相当于硫酸铝的 30%～40%。具有用量少，净水成本低的优点。

77 聚丙烯酰胺（PAM）絮凝剂有什么特性？如何应用？

聚丙烯酰胺的理化特性、分类、絮凝机理及应用如下：

（1）理化特性　聚丙烯酰胺絮凝剂（PAM）是由丙烯酰胺聚合而成的有机高分子聚合物，无色、无味、无臭，易溶于水，没有腐蚀性。在常温下比较稳定，高温、冰冻时易降解，并降低絮凝效果，故其贮存与配制投加时，温度不得超过 65℃，室内温度不得低于 2℃。

聚丙烯酰胺的分子式为：$(-CH_2-\underset{\displaystyle CONH_2}{\underset{|}{CH}}-)_n$。

式中丙烯酰胺相对分子质量为71.08，n值为$2\times10^4\sim9\times10^4$，故聚丙烯酰胺相对分子质量一般为$1.5\times10^6\sim6\times10^6$。

（2）产品分类　聚丙烯酰胺产品按其形态来分，有粉剂和胶体两种。粉剂产品含聚丙烯酰胺92%，胶体产品含聚丙烯酰胺8%～9%。按相对分子质量来分，有高相对分子质量、中相对分子质量、低相对分子质量3种。高相对分子质量的产品分子量一般大于800万，主要用在石油工业中的水处理；中相对分子质量产品主要用于水处理，分子量一般为150万～600万；低相对分子质量产品分子量一般小于20万，主要用在纺织、造纸工业中的水处理，纺织品的浆料和纸张增强剂。

按离子型来分、有阳离子型、阴离子型和非离子型。阳离子型一般毒性较强，主要用于工业用水和有机质胶体多的工业废水；阴离子型一般是聚丙烯酰胺的水解产品，由非离子型改性而来，它带有部分阴离子电荷，可使这种线型聚合物得到充分伸展，从而加强了吸附能力，适用于处理含无机质多的悬浮液或高浑浊度水。

（3）絮凝机理　聚丙烯酰胺具有极性基团，其酰胺基团易于借氢键作用在泥沙颗粒表面吸附；另外，聚丙烯酰胺有很长的分子链，其长度一般有1000Å，但宽度只有1Å，很大数量级的长链在水中有巨大的吸附表面积，其絮凝作用好，可利用长链在颗粒之间架桥，形成大颗粒絮凝体，加速沉降。

聚丙烯酰胺在NaOH等碱类作用下，可起水解反应，水解体是聚丙烯酰胺和聚丙烯酸钠的共聚物，是阴离子型高分子絮凝剂。部分水解后的聚丙烯酰胺使主链原来呈卷曲状的分子链得以展开拉长，增加吸附面积，提高架桥能力，所以部分水解体的絮凝效果要优于非离子型的效果。处理高浑浊度水的聚丙烯酰胺，一般使用部分水解体产品，因为最佳水解度（水解度是聚丙烯酰胺分子中酰胺基转化为羟基的百分数）的聚丙烯酰胺提高水中悬浮物的沉降速度是非水解体的2～9倍。如水解度过低，则效果不明显，与非水解体相似；如水解度过高，虽然主链展开度更大，但由于分子链负电荷过强，和阴离子性质的泥土颗粒斥力增大，则反而影响对水中阴

离子型黏土类胶粒的吸附架桥作用，使絮凝效果低于非离子型的产品。由于每条河流中泥沙成分不同，泥土颗粒的负电荷强弱也不同，最佳水解度是变数，一般以25%～35%水解度的产品效果较好。

(4) 搅拌与投加　聚丙烯酰胺水解体粉剂产品，是处理高浑浊度水最有效的高分子絮凝剂之一，可单独作用，也可与普通絮凝剂配合使用。在处理含沙量高的高浑浊度水时，效果均显著。

聚丙烯酰胺水解体粉剂，溶解搅拌时间一般为0.5～1.0h，提高水温和搅拌速度，可以加快溶解速度，但水温过高会引起降解反应，故最高水温不得超过65℃，搅拌速度以桨叶的周边线速度计不超过10m/s为宜，否则会造成絮凝剂断链，降低絮凝结果。

聚丙烯酰胺的投加量，随原水含沙量增高而增加。其投加浓度，从絮凝效果而言是越稀越好，但浓度太稀会增加投加设备，一般以0.2%的投加浓度为宜。工作溶液2%，投加时借助水注射器再稀释10倍。

聚丙烯酰胺的最大处理含沙量远大于普通絮凝剂各种絮凝剂最大处理含沙量如下表

絮凝剂名称	处理最大含沙量/(kg/m³)	絮凝剂名称	处理最大含沙量/(kg/m³)
硫酸铝	<10	聚合铝	<60
三氯化铁	<40	聚丙烯酰胺	<150

78　为什么碳酸镁絮凝剂可以循环使用？

碳酸镁是可以再生循环利用的一种用子水处理的新型絮凝剂。使用这种絮凝方法，符合“再生、再循环、再利用”三再原则的要求。使用碳酸镁作为絮凝剂，需要在原水中投石灰，把pH值提高到11以上，使碳酸镁水解为氢氧化镁絮凝物。原水经絮凝沉淀处理后，通入CO_2把pH值调整到符合饮用水的要求。

沉淀下来的污泥集中送到浓缩池，通入CO_2使其碳酸化，可转化为易溶子水的碳酸氢镁与其他污泥分离。碳酸氢镁经曝气再转化为碳酸镁，可以循环再利用。如果原水中含有一定量的镁，经过几次循环后，就可不再投加新的碳酸镁，构成一个封闭循环系统。

污泥中的镁盐再生之后，其中的黏土可以浮选分离出来用以填充洼地。最后剩下的碳酸钙沉淀物，可以分离出来焙烧成石灰。在焙烧过程中产生的 CO_2，又可用来再生碳酸镁。

原水在 pH 值调高达 11 以上的条件下，进行絮凝沉淀，不仅除色效果好（如对 Fe、Mn 的去除），污泥量少，而且还有很好的杀菌作用。

79　何谓微生物絮凝剂?

微生物絮凝剂是近年来研制开发的新型絮凝剂。它是利用生物技术，从微生物或其分泌物中提取、纯化而获得的一种安全、高效、且能自然降解的新型水处理剂，如糖蛋白、多糖纤维素、蛋白质和 DNA 等，由于微生物絮凝剂既可生物降解又安全可靠，最终可实现无污染排放，其明显的特性与优势，为水处理技术发展展示了一个广阔的前景。微生物絮凝剂有可能取代或大部分取代传统的无机高分子和合成有机高分子絮凝剂。

产生絮凝剂的微生物，是具有分泌絮凝剂能力的菌种，至今发现已超过 17 种，包括霉类、细菌、放线菌和酵母菌等。因此，微生物絮凝菌亦有多种。最具有代表性的有：酱油曲霉产生的絮凝剂 AJ7002；用拟青霉素产生的微生物絮凝剂 PF101；以及利用红平细球菌研制的微生物絮凝剂 NOC-1 等。

微生物絮凝剂的絮凝机理认为：微生物絮凝剂的大分子借助离子键、氢键和范德华力，同时吸附多个胶体颗粒，使在颗粒间产生“架桥”现象，从而形成一个网状三维结构而沉淀下来。絮凝过程是胶体颗粒与微生物絮凝剂大分子相互靠近、吸附并形成网状结构的过程。因而，絮凝剂大分子与胶体颗粒的表面电荷对絮凝效果有很重要的影响，而系统的 pH 直接影响表面电荷，从而也影响它们间的靠近和吸附行为；系统中的各种离子，尤其是高价异种离子能够明显地改变胶体 ζ 电位，降低其表面电荷，促进絮凝剂大分子与胶体颗粒的吸附与架桥。如阳离子的影响，特别是 Ca^{2+} 的加入，减少了絮凝剂大分子和胶体颗粒表面的负电荷，促进“架桥”的形成。

微生物絮凝剂与无机或有机合成的高分子絮凝剂相比，具有活性高、絮凝范围广泛、安全无害、不污染环境等特点，可广泛应用于给水和污水处理。

80　什么叫助凝剂？有哪些常用的助凝剂？

在水处理中，有时使用单一混凝剂不能取得良好的效果，需要投加辅助药剂以提高混凝效果，这种辅助药剂称为助凝剂。

助凝剂的作用是：加速混凝过程，加大凝絮颗粒的密度和质量，使其更迅速沉淀；加强黏结和架桥作用，使凝絮颗粒粗大且有较大表面，可充分发挥吸附卷带作用，提高澄清效果。

常用的助凝剂有两类：

（1）调节或改善混凝条件的助凝剂　如 CaO、$Ca(OH)_2$、Na_2CO_3、$NaHCO_3$ 等碱性物质，可以提高水的 pH 值。用 Cl_2 氧化剂，可以去除有机物对混凝剂的干扰，并将 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+}（在亚铁盐做混凝剂时更为重要）。此外还有氧化镁 MgO 等。

（2）改善絮凝体结构的高分子助凝剂　如聚丙烯酰胺、骨胶、海藻酸钠、活性硅酸 $Na_2 \cdot 3SiO_2 \cdot xH_2O$ 等。

81　pH 值对铝盐混凝剂有些什么影响？

pH 值对铝盐混凝剂主要有下列两个方面的影响：

（1）pH 值对 $Al(OH)_3$ 胶粒电荷性质的影响　pH 值对于铝盐混凝剂的混凝过程的影响很大。由于铝盐在水解过程中所生成的氢氧化铝 $Al(OH)_3$ 胶体物质是属于典型的两性化合物，当其离解时能生成带正电的阳离子，也能生成带负电的阴离子，而混凝过程去除胶体物质需要大量带正电荷（而不是负电荷）的混凝剂微粒，这个关键取决于 pH 值。当 pH＞8.5 时，$Al(OH)_3$ 离解面成为带负电的铝酸盐，如下列反应：

$$Al(OH)_3 \rightleftharpoons AlO_2^- + H_2O + H^+$$

当 pH＜5 时，因吸附了水中的 SO_4^{2-} 而带负电。

因此，铝盐作混凝剂时要获得良好的混凝效果，要求控制 pH 值在 5.5～8.5。

(2) pH 值对 $Al(OH)_3$ 溶解度有很大的影响　水中 pH 值过高或是过低，都会使得 $Al(OH)_3$ 的溶解度增大。在 pH 为 7.5 以上时，$Al(OH)_3$ 溶解度逐步增加，而不断生成溶于水的偏铝酸盐。当 pH 到达 9 时，溶解度迅速增大而成为铝酸盐。但如果 pH 低于 5.5 时，$Al(OH)_3$ 溶解度也会迅速增大而产生 Al^{3+}，其反应式如下：

$$Al(OH)_3 + 3H^+ = Al^{3+} + 3H_2O$$

只有 pH 在 8 左右，才生成难溶的 $Al(OH)_3$ 胶体物质。

82　pH 值对于铁盐混凝剂有些什么影响？

由于铁盐混凝剂的水解性能优于铝盐，而且水解产物的溶解度极小。因此，pH 值对于铁盐混凝剂的影响就比较小。只有 pH＜3 时，铁盐混凝剂的水解才受到抑制，或者是碱性很强的情况下，才有可能重新溶解，这种情况在天然水中是不常有的。

然而必须注意，在实际生产中，正常使用的是亚铁盐，例如硫酸亚铁 $FeSO_4$，当 pH＜8.5 时，有如下反应：

$$FeSO_4 = Fe^{2+} + SO_4^{2-}$$

$$Fe^{2+} + H_2O = Fe(OH)^+ + H^+$$

$$Fe(OH)^+ + H_2O = Fe(OH)_2 + H^-$$

因 $Fe(OH)_2$ 在水中的溶解度很大，而 Fe^{2+} 只能形成简单的络合物，混凝效果甚差。因此，只有在水中有足够溶解氧存在的条件下，使 pH＞8.5，才能将 Fe^{2+} 迅速氧化为 Fe^{3+}，而发生如下反应：

$$4FeSO_4 + O_2 + 10H_2O = 4Fe(OH)_3 + 4H_2SO_4$$

但是，天然水的 pH 值一般都小于 8.5。因此，上述氧化反应极其缓慢。为此，要投加一定量的碱剂（通常加石灰）以提高 pH 值。或是通氧化剂氯气把 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+}。从这一点来说，水的 pH 值对于亚铁混凝剂的使用有很大的影响。

83　影响混凝效果的因素是什么？

影响混凝效果的主要因素有：

（1）水温　低温时混凝效果差，絮凝很缓慢，那是由于无机盐类混凝剂在水解时是吸热反应，水温低时，水解十分困难。其次，低温的水黏度大，水中杂质的热运动减慢，彼此接触碰撞的机会减少，不利相互凝聚。水的黏度大，水流的剪力增大，絮凝体的成长受到阻碍，因此，水温低时混凝的效果差。只有水温升高，分子之间的扩散速度加大，有利于混凝反应的进行。通常最佳温度为20～29℃。

（2）水的pH值和碱度的影响　详见81题pH值对铝盐混凝剂和82题pH值对铁盐混凝剂的影响。

（3）水中杂质的成分、性质和浓度的影响　水中的杂质像黏土之类，如粒径细小而均一，则混凝效果差；颗粒的浓度过低也不利于混凝；水中如存在大量的有机物质会吸附于胶粒表面，使失去了原有胶体微粒的特性而具备了有机物的高度稳定性，混凝效果就差；水中溶解盐类的浓度，如果引起阴离子的增加，与胶体微粒带的电荷相同，也影响混凝效果。

此外，混凝效果还与混凝剂的用量、混凝剂投加时与水的混合速度及其混合的均匀性等有关。

84　混凝剂的投加对水质碱度、酸根有些什么影响？

常用的混凝剂大都为无机盐，是由强酸弱碱生成的盐。投加后，水质的变化是浑浊度下降、碱度下降、酸根增加。除浑浊度之外，碱度、酸根对水质变化的影响是很小的。如果是高分子混凝剂，除浑浊度下降之外，水质基本上没有变化。例如，投加1mg/L混凝剂，其酸根、碱度的变化如下：

混凝剂	化学式	相对分子质量	纯度/%	酸根增加		碱度下降
				mg/L(以 $CaCO_3$ 计)		
硫酸铝	$Al(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$（含 Al_2O_3 15.3%）	666	95～99	SO_4^{2-}	0.45	0.45
铝铵矾	$Al_2(SO_4)_3 \cdot (NH_4)_2SO_4 \cdot 24H_2O$	906.6	—	SO_4^{2-} (NH_4^+)	0.44 (0.11)	0.33

续表

混凝剂	化学式	相对分子质量	纯度/%	酸根增加		碱度下降
				mg/L(以 $CaCO_3$ 计)		
硫酸铝钾(明矾)	$Al_2(SO_4)_3 \cdot K_2SO_4 \cdot 24H_2O$	949	—	SO_4^{2-} (K^+)	0.421 (0.105)	0.316
硫酸铁	$Fe_2(SO_4)_3$ (Fe^{3+} 25.2%)	400	94.4	SO_4^{2-}	0.71	0.71
硫酸亚铁(绿矾)	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ($FeSO_4$ 19.68%)	278	98	SO_4^{2-}	0.35	0.35
氯化绿矾	$6(FeSO_4 \cdot 7H_2O)+Cl_2$ (质量比)	—	—	SO_4^{2-} (Cl_2)	0.34 (0.04)	0.38
三氯化铁	$FeCl_3$ ($FeCl_3$ 60%)	162	60	(Cl^-)	0.56	0.56

85 凝聚剂的用量是如何确定的?

尽管人们已在胶体化学和沉淀形成机理方面积累了大量的知识来解释凝聚过程中发生的种种现象，但是目前仍不能做到根据水样的简单分析来预测合适的凝聚条件。因此常采用凝聚试验来确定凝聚剂的用量以及适宜的凝聚条件等。然后在实际运行的设备上再进一步调整。凝聚试验可在图 2-1-3 的凝聚试验台上进行。

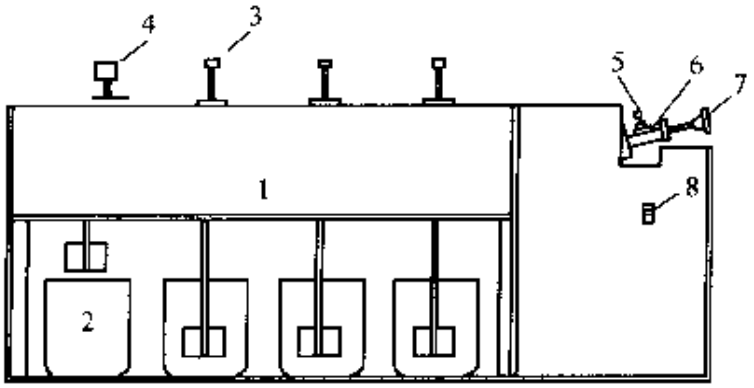


图 2-1-3 凝聚试验台

1- 试验台；2 烧杯；3 搅拌器；4—离合器；5—调速拉钮；6—计数器；7—调速杆；8—开关

将试验水样置于一组烧杯（烧杯的容积一般为 600mL，内装

500mL 的水样）内，每个烧杯内放入一搅拌器（搅拌器的叶片尺寸为 4cm×6cm，转速调节范围为 25～160r/min）。为了模拟水与凝聚剂的快速混合，先将转速调在 100～160r/min 范围内，待搅拌稳定后，再向各个烧杯里添加不同剂量的凝聚剂。快速混合的时间最少为 30s，通常为 1～3min。随即将转速调到 20～40r/min，以模拟慢速混合，持续 15～20min，让絮凝物与悬浮颗粒充分接触。然后，停止搅拌使之静置，让絮凝物在重力作用下沉降，仔细观察直到所有的絮凝物沉降到烧杯底部为止。从开始观察时起，每隔一定的时间间隔（如每 2min）测定一次清水与沉渣层界面的高度。根据烧杯内清水层高度达到 100mm 所需要的时间，把絮凝物的沉降效果分成四个等级。通常在沉降结束或者沉降 15min 之后，对各烧杯内上部清水进行必要的分析（如 pH、浑浊度、色度、耗氧量等），并将分析结果记录在凝聚报告中。最后对各个烧杯的凝聚效果作一总的评价，确定合适的剂量和 pH 值。

等级	清水层达到 100mm 所需时间/min	沉淀效果的评价
1	<2	最佳。能在流速较高的上流式固体接触式澄清器内得到最佳沉降效果
2	2～4	佳。能在流速适中的上流式固体接触式澄清器内得到良好的沉降效果
3	4～7	一般。能在低流速的上流式澄清器得到满意的沉降效果
4	>7	差。除非选用低的上升流速，否则沉淀效果较差

在实际运用时，还要根据水处理装置的性能与其他有关因素，对凝聚剂的用量作适当的调整。

86 石灰水在水的预处理中起什么作用？

在水的预处理中，加入石灰水 $Ca(OH)_2$，主要是起到软化和助凝两个作用，具体来说：

(1) 除去暂时硬度，软化水质；

$$Ca(HCO_3)_2+Ca(OH)_2 \longrightarrow 2CaCO_3\downarrow+2H_2O$$

$$Mg(HCO_3)_2+2Ca(OH)_2 \xlongequal{} 2CaCO_3\downarrow+Mg(OH)_2\downarrow+2H_2O$$

（2）去除水中 CO_2，减少腐蚀，提高水的 pH 值；

$$CO_2+Ca(OH)_2 \xlongequal{} CaCO_3\downarrow+H_2O$$

（3）中和过量的混凝剂，并由于提高 pH 值而增加混凝剂的混凝效果，起到助凝剂的作用；

$$4FeSO_4+4Ca(OH)_2+O_2+2H_2O \xlongequal{} 4CaSO_4+4Fe(OH)_3\downarrow$$

（4）去除水中胶体硅，提高脱盐水水质；

$$H_2SiO_3+Ca(OH)_2 \xlongequal{} CaSiO_3\downarrow+H_2O$$

（5）除去镁盐，同时起软化作用；

$$MgCl_2+Ca(OH)_2 \xlongequal{} Mg(OH)_2\downarrow+CaCl_2$$

$$MgSO_4+Ca((OH)_2 \xlongequal{} Mg(OH)_2\downarrow+CaSO_4$$

（二）沉淀与澄清

87 沉淀有哪几种形式？

将水中杂质转化为沉淀物而析出的各种方法，统称为沉淀处理。沉淀处理可分三种形式：

（1）自然沉降沉淀　水中固体颗粒在沉淀的过程中不改变大小、形状和密度，如对于泥沙含量高的水进行预沉，就属于自然沉降沉淀。

（2）混凝沉淀　水中固体颗粒由于相互接触凝聚而改变其大小、形状和密度的沉淀过程称为混凝沉淀。

（3）化学沉淀　水中投加某种药剂，使溶解于水中的杂质产生结晶或沉积的过程称为化学沉淀。

88 沉淀处理的效果受哪些因素影响？

沉淀处理的效果主要决定于沉淀物的溶解度，而影响沉淀物溶解度的因素是很多的。主要有：

（1）同离子效应的影响　水中加入含有共同离子的电解质时，可以使沉淀物的溶解度显著降低，这就是沉淀反应的同离子效应。

在水的沉淀处理中，利用同离子效应，适当加大沉淀剂的用量，加快沉淀处理，使沉淀完全，可以取得明显效果。

（2）盐效应的影响　当水中难溶盐存在时，加入强电解质，使得饱和的难溶盐变成不饱和溶液，反而使沉淀物的溶解度增加，这个现象称为盐效应。因此，在沉淀处理时，要注意避免强电解质的盐类加入，影响沉淀的效果。

（3）酸效应的影响　水的酸度对沉淀物溶解度有一定影响，这就是沉淀反应的酸效应。但这个影响对不同的沉淀物有所不同，如对强酸盐沉淀影响就不大，而在沉淀弱酸盐时，酸度的影响明显。因此，要使弱酸盐类沉淀，一般尽可能在较低的酸度下进行。

（4）络合效应的影响　在沉淀处理中，要尽量避免在水中加入络合剂，因此络合剂往往能与水中被沉淀的离子生成络合物，而增加了沉淀物的溶解度，影响沉淀效果。

（5）水温的影响　大多数沉淀物质的溶解反应是吸热反应，溶解度是随着温度的升高而增大，因此，沉淀处理过程要注意水温的变化。

此外，在沉淀处理时，要尽量避免产生胶体溶液，因胶体溶液会增大溶解度，所以要加一些破胶物质促进胶凝作用。沉淀在初生成时是“亚稳态”，经一定时间后逐渐转变为“稳定态”。它们的晶体结构不一样，前者的溶解度比后者大，因此，沉淀处理时，要尽力使其转化为“稳定态”，沉淀效果就好。

89　什么是平流沉淀池？

平流沉淀池是一个底面为长方形的钢筋混凝土或是砖砌的、用以进行混凝反应和沉淀处理的水池。其特点是构造简单、造价较低、操作方便和净水效果十分稳定。缺点是占地面积大，排泥比较困难。平流沉淀池的结构形式如图 2-2-1 所示。

平流沉淀池主要由下面几部分组成：

（1）进水区　进水区也是平流沉淀池的混合反应区，原水与混凝剂在此混合，并起反应，形成絮凝体，再以每秒 0.2m 流速进入

沉淀池，此处由于断面突然扩大，流速骤降，絮凝体藉自重而不断沉降。进水区就是为了防止水流干扰，使进水均匀地分布在沉淀池的整个断面，并使流速不致太大，以免矾花破碎。

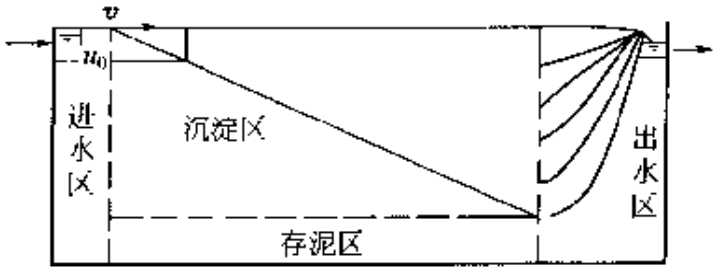


图 2-2-1　平流式沉淀池的结构示意图

（2）沉淀区　沉淀区的作用是使悬浮物沉降，达到出水悬浮物含量低于 10mg/L，在特殊情况下不大于 15mg/L。池的设计应使进、出水均匀，池内水流稳定，提高水池的有效容积，减少紊动影响，提高沉淀效率。池内水流的雷诺数❶ Re 一般为 4000～15000，多属紊流。弗劳德数❷ Fr 一般控制在 1×10^{-4}～1×10^{-5} 之间。有效高度一般为 3.0～4.0m，长宽比应不小于 4∶1，长深比应不小于 10∶1。水流水平流速一般为 10～25mm/s。停留时间（水充满沉淀池所需时间）一般为 1.0～3.0h。

（3）出水区　沉淀后的水应从出水区均匀流出，不能跑“矾花”，因此，出水渠的长度要等于或大于沉淀池宽度。

（4）存泥区和排泥　存泥区是为存积下沉的泥，另一方面是供排泥用。为了排泥，沉淀池底部可采用斗形底，可采取穿孔排泥和机械虹吸排泥等形式。

---

❶ 雷诺数：是用以比较黏性液体流动状态的一个无因次数。雷诺数 $Re=\frac{wl\rho}{\mu}$。式中 w、ρ 与 μ 分别表示流体的流速、密度和黏度，l 表示物体的水力半径（或线度）。一般认为圆管中 $Re<2300$ 时为滞流（层流）、$Re>10000$ 时为湍流（紊流）、$Re=2300$～10000 时为过渡流。

❷ 弗劳德数：是表示液体流动状态的另一个无因次数。弗劳德数 $Fr=\frac{w^2}{lg}$，g 为重力加速度。

平流沉淀池是常用的水处理沉淀池，适用于处理水量很大的水厂。

90　什么是竖流沉淀池？

竖流沉淀池是水流方向直上直下，而不是水平向流动，反应室设在池中。最常用的是水经过涡流反应室，经反应之后，原水从导流筒直下，水中絮体颗粒沉降至池底，清水上升经顶部辐射出水槽引出，积泥下沉由池底排出，其结构如图 2-2-2 所示：

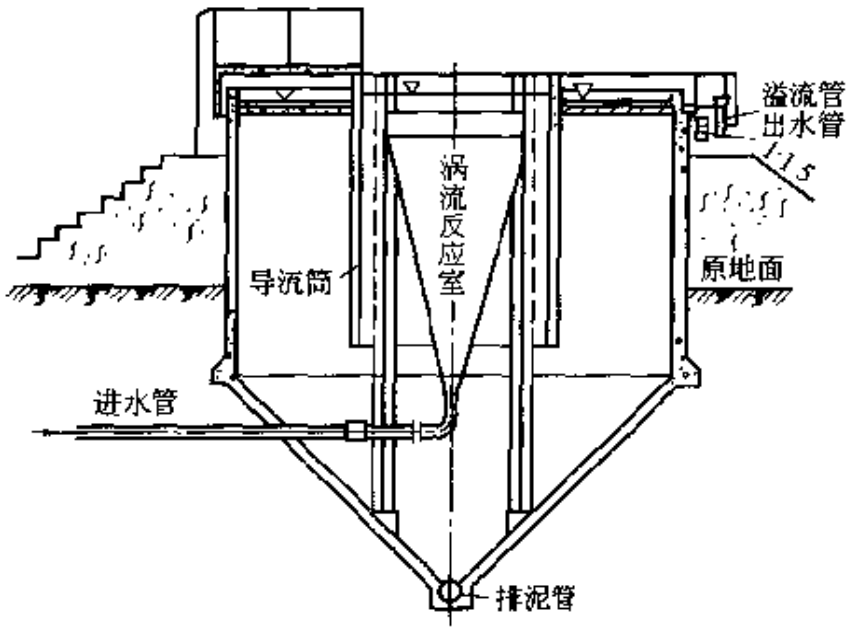


图 2-2-2　竖流式沉淀池（带涡流反应室的锥底池）

竖流沉淀池具有管理简单，排泥方便的特点。但出水量小，沉淀效果较差，池径不大于 10m，目前只有山区或小型工业企业给水厂使用。

91　什么是辐流式沉淀池？

辐流式沉淀池，水是从中心向四周辐射形流动，随着水流断而的扩大，流速变慢，而使水中悬浮颗粒沉淀下来，是处理高浊度水的有效水池。有时用于预沉池，可不加混凝剂让泥沙自然沉淀，如我国西北地区的黄河水，泥沙量大的地区经常使用。当然也可以投加混凝剂、助凝剂，作为一般沉淀池使用。

辐流式沉淀池如图 2-2-3 所示。

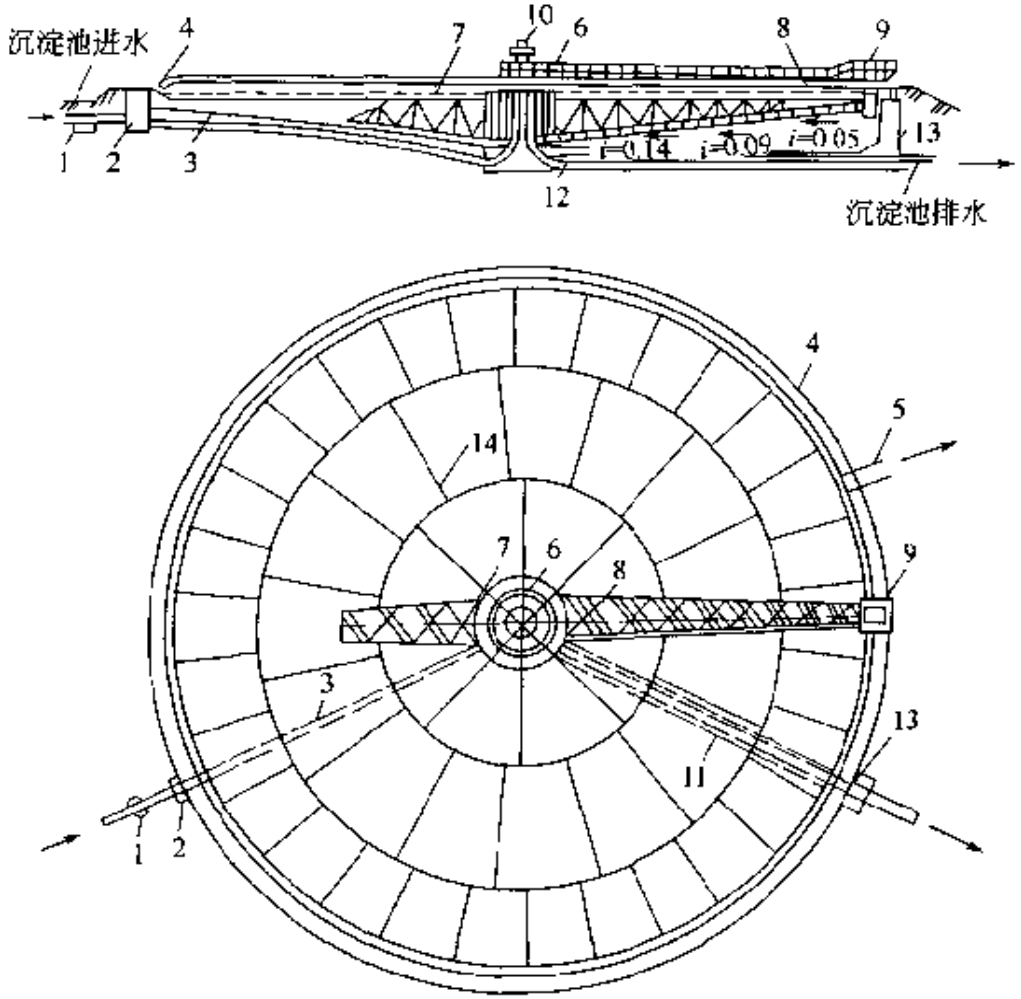


图 2-2-3　辐流式沉淀池示意图

1—流量计；2—进水阀；3—进水管；4—圆形集水槽；5—出水槽；6、7、8—刮泥桁架；9—牵引设备；10—筒形配水罩；11—排泥管；12—排泥阀；13—排泥计量表；14—池底伸缩缝

辐流式沉淀池底大都做成圆形。池深：在直壁区约 1.5～3.0m；池中深 3.0～7.0m；池底有坡度。

进水管直伸至水池中心，经筒形配水罩，水向四周沿水平方向流动。由于过水断面像扇形辐射流方向逐步扩大，水的流速从大而变得越来越小，水中固体颗粒就逐步沉淀下来。比较清的水上升入圆形集水槽，经出水槽流出，泥沙沉积于池底。池内安装有 1～3r/h 缓慢旋转的刮泥桁架，可以把沉下来的泥沙随时刮向池子中

心，由排泥管排走。

辐流式沉淀池不能做得太小，因为当中心进水向四周流动扩散时，保持水流稳定和使颗粒下沉，都需要有一定的停留时间，否则泥沙还未沉下来就进入集水槽，沉淀效果就差了。

本池适用于大水量，高浊度的水，实践证明，原水含沙量在1～90kg/m³时，沉淀效率可达90%左右，排泥也方便。但造价高，机电设备复杂，耗用钢材多。

92　什么叫斜板、斜管沉淀池？

根据沉淀理论，沉淀的效果与沉淀面积和沉降高度有关，与沉降时间关系不大。因此，就设想了一种沉淀池，以增加沉淀面积，降低沉降高度来提高沉淀效果。而斜板、斜管沉淀池就是根据这个原理进一步发展了平流沉淀池。

斜板、斜管沉淀池（如图2-2-4），是在池中安放一组并排叠成并有一定坡度的平板或管道，被处理的水从管道或平板的一端，流向另一端，这相当于很多很多个很浅很小的沉淀池组合在一起。

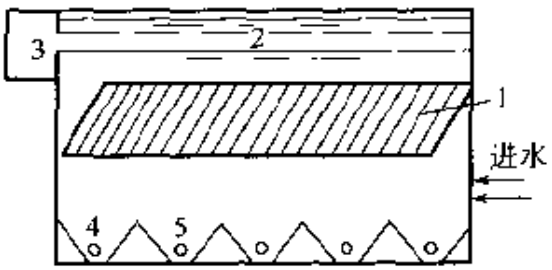


图2-2-4　斜板、斜管式沉淀池示图
1—斜管；2—集水管；3—集水槽；4—排泥管；5—集泥斗

由于平板的间距和管道的管径较小，所以水流在此处成为层流状态。因此，当水在各自的平板或管道之间流动，各层隔开互相不干扰，为水中固体颗粒的沉降创造十分有利的水力条件，从而也提高了水处理效果和能力。

斜板、斜管沉淀池的特点是：

（1）增加了沉淀面积　由于沉淀池的截留速度 $v_0 = \frac{\text{处理水量}\,Q}{\text{沉淀面积}\,F}$，它是指沉淀池中能够全部去除最小颗粒的沉淀速度，对于斜板、斜管沉淀池来说，它的沉淀面积比平流沉淀池的面积大得多。如果说，要去除同样大小的颗粒，也即截留速度（或沉淀速

度）v_0 相同时，处理水量增加的倍数，相当于沉淀面积增加的倍数。由于斜板、斜管沉淀池增加了沉淀面积，因此相应地、也就增加了水处理量，并达到同样的处理效果。

（2）水力条件的改善　主要是斜管的管径，斜板的间距在足够小时，水流处于层流状态，即雷诺数 Re 在 500 以下，一般只有 30～300。此时，颗粒的沉降，不受水流的干扰，提高了沉降的稳定性。颗粒沉降的路程短，因而缩短了沉降时间。

斜板、斜管沉淀池对于小城镇的水处理是简单易行的，对于改造平流沉淀池以提高处理水量也是行之有效的。但大型的斜板、斜管沉淀池还需要不断完善排泥系统，如作为饮用水处理还需注意杀菌问题。

93　影响斜板、斜管沉淀池效果的因素是什么？

影响斜板、斜管沉淀池效果的主要因素有：

（1）斜板、斜管的倾斜角度对沉淀效果的影响　斜管的倾斜角（如图 2-2-5）对水中泥沙沉淀效果有很大影响。

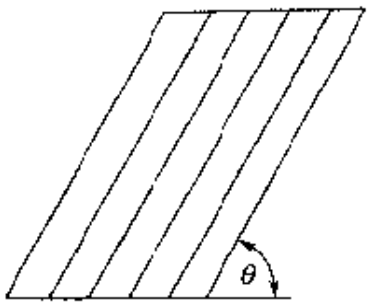


图 2-2-5　斜管的倾斜角 θ 示意图

检测结果说明，斜管的倾斜角越小，除去沉淀的颗粒越小。在实际生产中，对矾花颗粒来说，倾斜角 35°～45°时效果好，从排泥通畅考虑一般选用 60°角。

斜管倾斜角	0°	30°	45°	60°	90°
去除沙粒大小(20℃)/mm	0.088	0.09	0.10	0.12	0.58

（2）斜板、斜管的长度对沉淀效果的影响　从实际使用中证明，长度大时泥水分离充分，沉淀效果较好。但是，斜板、斜管过长，不仅造价增加，制作及安装都有困难，沉淀效果的提高也不很显著。实际生产中，异向流沉淀池的斜板、斜管长度采用 1000mm 左右；同向流沉淀池的斜板、斜管长度取 2500mm 左右。

（3）进水方向对于沉淀效果的影响　斜管、斜板沉淀池的进水

方向通常有两种，如图 2-2-6 所示。

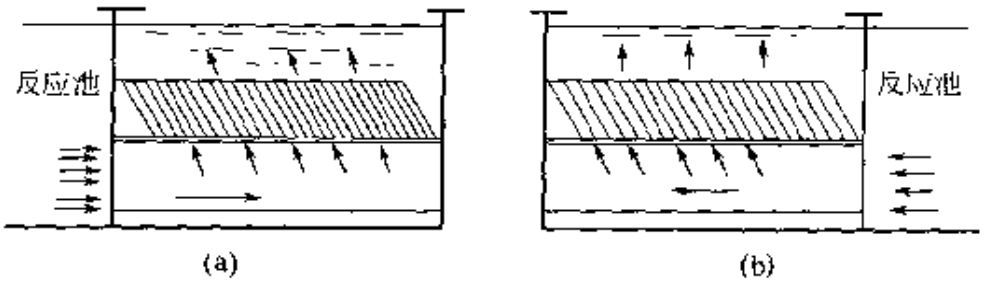


图 2-2-6　斜管、斜板沉淀池进水方向示意图

经实际使用（a）式的效果比较好；（b）式是从反应池进入的水流直接进入斜管的，对于沉淀与排泥畅通都不利。

（4）斜管中的上升流速对沉淀效果的影响　一般来说，上升流速越小，沉淀效果越好。但过小的上升流速，显示不出斜管沉淀池的优点，达不到提高处理水量的目的。在处理低温水和处理水量比较大的时候，可以把上升流速选得低一些。一般情况下，在倾斜角 60°时，上升流速为 3.5～5.0mm/s。

（5）斜板的间距和斜管管径对沉淀效果的影响　斜板的间距越小越好，因为可以增加沉淀面积，能提高沉淀效果。但为了加工方便，间距做成不小于 50mm，而不宜大于 150mm。斜管可以做成正方形或六角形，其内切圆直径越小越好，然而管径太小，加工困难，成本费又高，对排泥也不利，一般斜管内径做成 25～45mm。

生产运行中斜管、斜板沉淀池的进水量和加药量要尽量稳定，药量调节要及时，排泥装置要畅通可靠，否则，也会影响沉淀效果和出水水质。

94　同向流斜板、斜管沉淀池有什么特点？

水在异向流斜板、斜管沉淀池的斜板（管）之间流动时，沉降颗粒在重力作用下，沿着斜板（管）下降，而澄清液是沿着斜板（管）的底面上升，两个流体逆向流动，使得两种流体的界面产生紊动，从而降低了悬浮物的分离效率。而同向流斜板、斜管沉淀池（称兰美拉）（如图 2-2-7）就克服了这一缺点。

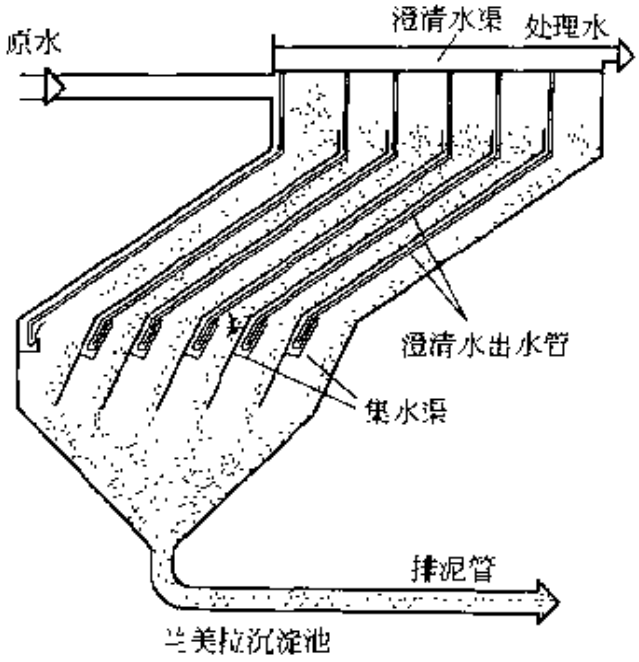


图 2-2-7　同向流沉淀池示图

这种沉淀池的特点是原水由斜板（管）上部流入，而澄清水的汇集装置设在斜板（管）的下端，这种结构使斜板（管）间的澄清水和沉淀颗粒都是同一方向向下流，两股流体的界面，不再产生紊流，因而其分离效果比较好。由于沉淀颗粒和澄清水都是下降流，使得沉淀颗粒较容易下滑，而且斜板（管）倾角小于原来装置，所以又可以加大沉降面积，沉降效率也可以提高。因此，同向流沉淀池的澄清效果好。

95　试述各类沉淀池的适用条件？有何优缺点？

各沉淀池的适用条件及优缺点如下：

型　式	适　用　条　件	主要优缺点
平流式沉淀池	①　一般用于大中型水处理厂 ②　原水含沙量大时，可作预沉池	优点： ① 水处理适应性强、潜力大、效果稳定 ② 操作管理方便 ③ 造价低，就地取材，施工较简单 ④ 带机械排泥设备时，排泥效果好 缺点： ① 占地面积较大 ② 排泥比较难

续表

型　式	适　用　条　件	主要优缺点
竖流式沉淀池	一般用于小型水处理厂	优点： ① 占地面积小 ② 排泥方便，结构紧凑 缺点： ① 施工困难 ② 上升流速低，出水量小，沉淀效果差
辐流式沉淀池	① 一般用于大中型水处理厂 ② 处理高浊水时可作预沉池	优点： ① 沉淀效果好 ② 有机械排泥装置效果好 缺点： ① 投资及管理费大 ② 施工困难 ③ 刮泥装置维修困难，消耗金属材料多
斜　管 斜　板 沉淀池	① 宜用于中小型水处理厂 ② 用于老池改造，改建扩建，挖潜	优点： ① 沉淀效率高 ② 池体小，占地小 缺点： ① 斜管、斜板价格高，费用大 ② 排泥困难

96　澄清池和沉淀池有何不同？

当进行沉淀处理时，我们发现在反应阶段使水中保持若干先前生成的泥渣，可以大大地改善其沉淀过程。为此，现代沉淀处理的设备在运行中都有泥渣参与，凡带有泥渣运行的沉淀设备称为澄清池。它是利用悬浮泥渣层与水中杂质相碰撞、吸附、黏合，以提高沉淀处理效果的一种设备，与单纯依靠固体杂质重力沉降的沉淀池有所不同。

97　什么是加速澄清池？

常用的加速澄清池结构如图 2-2-8。

加速澄清池主要是由第一反应室、第二反应室及分离室所组成。此外，还有进出水系统、加药系统、排泥系统以及机械搅拌提升系统，大的加速澄清池还有刮泥装置。其中，第二反应室、第一反应室与分离室之间的容积比为 1∶3(或 2.5)∶7。

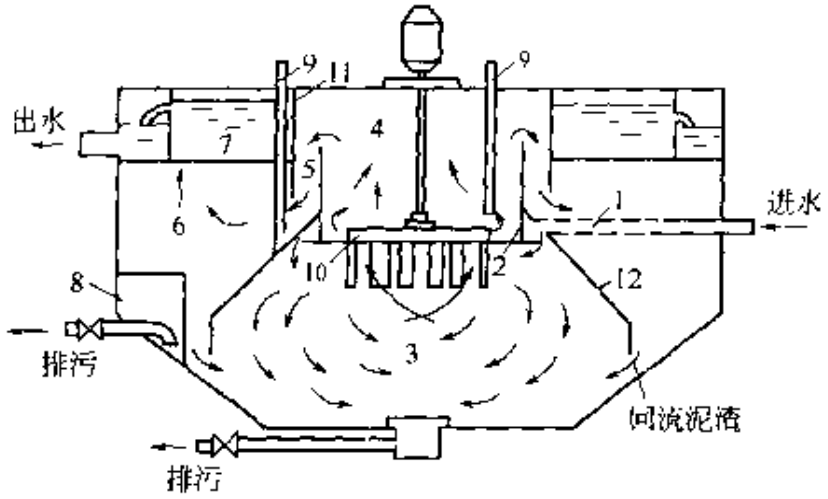


图 2-2-8　加速澄清池示图

1—进水管；2—进水槽；3—第一反应室（混合室）；4—第二反应室；5—导流室；6—分离室；7—集水槽；8—泥渣浓缩室；9—加药管；10—机械搅拌器；11—导流板；12—伞形板

加速澄清池的工作原理如下：

加速池是将混凝、反应和澄清的过程建在同一个构筑物内，利用悬浮状态的泥渣层作为接触介质，来增加颗粒的碰撞机会，并提高了混凝效果。

经过加药的原水进入三角形分配槽，并从底边的调节缝流入第一反应室。水中的空气从三角槽顶部伸出水面的放空管排走。进入第一反应室的水，经过搅拌、提升至第二反应室，在此进一步进行混凝反应，以便聚结成更大的颗粒，然后从四周进入导流室而流向分离室。由于进入分离室时，断面积突然扩大，因此流速骤降，泥渣下沉，清水以每秒 1.0～1.4mm 的上升速度向上经集水槽流出。沉下的泥渣从回流缝进入第一反应室，再与从三角槽出来的原水相互混合。在分离室里，部分泥渣进入泥渣浓缩斗，定期予以排除。池底也有排泥阀，以调整泥渣的含量。提升循环回流的水量是处理水量的 3～5 倍。经一定循环之后，泥渣量会不断增加，需要进行排放，以控制一定的沉降比。在第二反应室和导流室内部装有导流板，目的是为了改善水力条件，既利于混合反应，又利用泥渣与水的分离。在处理高浊度的水和池子直径较大时，有的在池底还设有

刮泥机装置，以便把池底的沉泥刮至池子中央，从排污管排放，因此排泥很方便。

98　如何进行加速澄清池的操作控制？

加速澄清池的操作控制步骤如下。

(1) 加速澄清池开车前的检查

① 按设计要求检查土建各部是否竣工，质量是否合格；

② 检查搅拌、提升机和刮泥机的安装质量是否合格；

③ 机电、进出水系统、加药系统、排泥系统是否合乎设计要求；

④ 检查并清扫全池（包括进水三角配水槽）；

⑤ 各机部件及阀门等加油润滑。

(2) 加速澄清池开车前的沉降试验

① 在加速澄清池的池顶外壁十字对称处设立不锈钢的沉降观测点（至少四点以上）；

② 用水准仪测量各观测点标高；

③ 缓慢开进水阀，向池内布水，进水的速度是澄清池处理水量的四分之一；

④ 进水至池高三分之二处，静置 24h，测量各观察点标高，观察沉降是否均匀；

⑤ 再次进水至辐射出水槽的出水孔眼底线处（即未出水状态，但辐射槽受浮力最大）；

⑥ 再静置 24h，测定各观测点标高，观测其沉降是否均匀；

⑦ 把池内水全部放尽；

⑧ 再静置 24h，测定各观察点标高，视沉降后回弹是否均匀，如果不均匀沉降超过 5mm 以上，要作相应处理，直至沉降试验合格。

(3) 加速澄清池开车前的准备工作

① 关闭排泥阀，排空阀；

② 刮泥机试车 24h 合格并检查旋转方向是否正确；

③ 搅拌、提升机试车 8h 合格，并检查转动方向是否正确；

④ 备浑浊仪一只，100mL 取样瓶若干只，100mL 量筒若干只，定时钟一只；

⑤ 作搅拌机的调速试验，测试搅拌叶轮外缘一点的线速度为：0.5、0.85、1.5m/s 时，记录转动轴的转数。

(4) 加速澄清池的开车

① 调节好刮泥机各部的润滑水；

② 开刮泥机；

③ 在原水中投加混凝剂，开车初期，投加量适当多一点，一般 40～50mg/L；

④ 开进水阀，控制好进水速度；

⑤ 当水位升高后，水进入第二反应室时，开搅拌机（开车初期控制线速度适当高一点，一般 1.5m/s 左右）；

⑥ 在水位升至辐射出水槽之前，测定分离室表面水的浑浊度，如水不合格时，可关进水阀门，进行回流运转，以便形成活性泥渣层，或增加混凝剂量，有时还可加适量黏土；

⑦ 出水；

⑧ 调节搅拌机线速度为 0.85m/s 左右。

(5) 加速澄清池的正常运行操作控制

① 每小时分析：进水、出水、第一反应室、第二反应室、分离室的浑浊度；每两小时分析：第一反应室、第二反应室的五分钟沉降比。取样管阀要常开；

② 如第一反应室沉降比达到 10%～15%，需要进行排泥；

③ 每四小时开排泥斗阀一次；

④ 如进水浑浊度过高或过低，或是处理水量变化大时，要适当调节搅拌机的转速；

⑤ 控制回流量为出水量的 4 倍左右，使回流流速达到 200mm/s，回流量的控制可以调节搅拌提升机的高、低来达到。叶轮的开启度离第二反应室平台五分之四时，回流量约为四倍进水量；

⑥ 如发现分离室矾花上浮时，可以提高搅拌机转速或调节回

流量，并可开排泥斗阀，以降低分离室悬浮泥的高度，保证出水水质合格。

（6）加速澄清池的停车操作

① 关进水阀，并停加混凝剂；

② 开排空阀及排泥斗阀门；

③ 当水位降低至第二反应室底部时，停搅拌机；

④ 当池底水排空时，停刮泥机；

⑤ 检查各部是否正常。

99 加速澄清池运行中易出现哪些异常现象？应如何处理？

出现的异常现象及处理方法见下表。

序号	异常现象	原因	处理方法
1	清水区有细小絮状物上升，出水混浊	（1）提升水量过大 （2）加药量不足	（1）降低提水水量 （2）加大投药量
2	池面有大颗粒矾花上升	加药量过大	适当降低加药量或加强排泥工作
3	清水区翻花	（1）进水水温过高 （2）进水流量过大 （3）加药中断 （4）排泥不及时，泥渣层过高	（1）降低进水水温至正常值 （2）调小进水水量 （3）恢复加药 （4）及时排泥，控制泥渣层高度
4	泥渣层高度（或浓度）增加过快，出水浑浊度上升	排泥量少	缩短排泥周期，延长排泥时间
5	清水区有大量气泡	（1）加石灰水量大 （2）池内泥渣沉积入长日久而发酵 （3）进澄清池水中带空气	（1）减少加量 （2）停运进行清泥工作 （3）设法放净空气

100 泥渣在澄清过程中有什么作用？

澄清池在运行中保持有一定数量的泥渣，能够促进澄清作用。这个作用有如下几个方面：

（1）接触介质作用。泥渣中的矾花颗粒是一种吸附剂，能够吸附水中的悬浮物和反应生成的沉淀物，使其与水分离，这在实质上就是一种“接触混凝”的过程。同时，反应生成的沉淀物又起着结

晶核心作用，促使沉聚物逐渐长大，加速沉降分离。

（2）架桥过滤作用。由于泥渣中含有较多的矾花，该矾花在形成过程中构成许多网眼，这时的泥渣层好象是一层过滤网，能够阻留微小悬浮物和沉聚物的通过，从而产生了架桥过滤作用。

（3）碰撞凝聚作用。泥渣层的矾花颗粒大，它们相互之间的间距较小，使水流在通过泥渣层时受到阻流而改变其方向，形成了紊动。它有利于颗粒间的碰撞，凝聚成较大的颗粒而加速沉降。

同时，由于水的紊流，将导致矾花颗粒发生不规则的扰动，这在一定程度上有利于改变泥渣颗粒浓度的分布状态，又使悬浮颗粒上升速度减小，这样也有利于颗粒的沉降。

为了加速澄清池中泥渣层浓度的形成，新投入运行的澄清池可以加入一定量的黏土，以尽快形成足够的泥渣层高度。

但是泥渣层浓度过大，反而不利于澄清过程。这是因为：第一，由于泥渣层浓度的增加，将导致澄清池截面水上升流速的增加，这将导致水紊流的加剧，引起矾花上翻，不利于细小悬浮物的沉降；第二，由于失去活性表面的矾花相对增多，使一部分刚刚失去稳定性的胶体颗粒丧失最有利的凝聚条件，不能及时地被吸附。

一般讲泥渣悬浮式澄清池，其泥渣悬浮层的浓度维持在5%～15%（体积分数），其高度为1.5～3m之间。

对泥渣循环式澄清池而言，应控制第二反应室泥渣浓度为2500～5000mg/L。

101　为什么要控制澄清池的泥渣回流量？

对澄清池而言，泥渣层是作为一个“过滤区”，将穿过泥渣层的水中杂质、细小沉淀物等过滤掉。生产实践表明，保留一定浓度的泥渣层，对于水的混凝和澄清有很大的好处。

但是澄清池在运行过程中，由于种种因素的影响，加之泥渣层的流动，则可能导致泥渣的流失，会因活性和浓度的减少而影响其应有的作用。

采用泥渣回流，可以人为地补充反应区的泥渣量，使泥渣层始终保持一定的活性和浓度，以保证澄清池的良好运行。

102 如何测定悬浮泥的沉降比？

悬浮泥沉降比的测定，是澄清池操作的重要依据，对出水水质有很大的关系。测定沉降比的方法是：取250mL量筒（筒径40mm，筒高320mm）将含悬浮泥的水样放入筒中，静置5、15、30、60min，观察其悬浮泥的沉降情况。用沉降后悬浮泥的体积占水样总体积的分数来表示，称为悬浮泥的沉降比。

103 什么是水力循环澄清池？

水力循环澄清池是利用原水的动能，在水射器的作用下，将池中的活性泥渣吸入和原水充分混合，从而加强了水中固体颗粒间的接触和吸附作用，形成良好的凝絮，加速了沉降速度使水得到澄清。

水力循环澄清池的结构如图2-2-9所示：

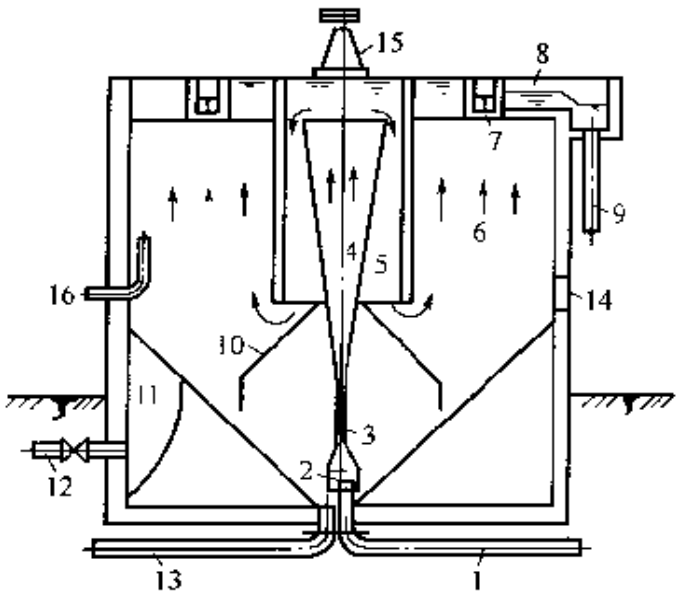


图2-2-9 水力循环澄清池示意图

1—进水管；2—喷嘴；3—喉管；4—第一反应室；5 第二反应室；6—分离室；7—环形集水槽；8—出水槽；9—出水管；10 伞形板（用于大池）；11 沉渣浓缩室；12—排泥管；13—放空管；14—观察窗；15—喷嘴与喉管距离调节装置；16—取样管

水力循环澄清池的工作原理：加了混凝剂的原水从进水管道进入喷嘴，以高速喷入喉管，在喉管的喇叭口周围形成真空，吸入大约3倍于原水的泥渣量，经过泥渣与原水的迅速混合，进入渐扩管

形的第一反应室，以及第二反应室中进行混凝处理。喉管可以上、下移动以调节喷嘴和喉管的间距，使等于喷嘴直径的1～2倍，并借此控制回流的泥渣量。水流从第二反应室进入分离室，由于断面积的突然扩大，流速降低，泥渣就沉下来，其中一部分泥渣进入泥渣浓缩斗定期予以排出，而大部分泥渣被吸入喉管进行回流，清水上升从集水槽流出。

104　如何进行水力循环澄清池的操作控制？

水力循环澄清池的操作控制，主要有两个方面的要求：一是投药适当，及时调节；二是排泥及时。具体的操作控制如下。

(1) 开车前的准备工作

① 水力循环澄清池竣工，具备开车条件之后，清扫池子；

② 检查设备各部，包括土建、水射器及其调节系统等；

③ 做好池子的沉降试验；

④ 调整好喷嘴与喉管间的距离，一般先调至二倍喷嘴直径；

⑤ 配好药剂浓度（先经初步试验确定合适的加药量），并备适量黏土，作开车准备。

(2) 开车操作控制

① 开进水阀，先调整好进水量约等于设计处理水量的三分之二左右；

② 投加混凝剂。开车初期要适当增加药量，一般约为正常投药量的2倍左右。如果泥渣难以形成，还可适当加点黏土或泥浆于水中；

③ 当出水时，如水质不合格可先行排放，并调整加药量，以达到最佳控制数据；

④ 观察泥渣回流情况，调整好喷嘴与喉管的间距；

⑤ 泥渣层形成之后（一般约3h），此时调节进水量至设计值；

⑥ 排泥操作要及时。定时巡回检查，如发现泥渣层上升，即行排泥；

⑦ 每两小时分析第一反应室出口处的5min沉降比（即将泥渣水样放在100mL的量筒内，静置5min，泥渣下降，其体积占水样

体积的分数，就是沉降比），控制沉降比在10%～15%，超过时需排泥；

⑧ 开车期间水量要求稳定，如果要增加水处理量，应在半小时前，适当多加混凝剂；并排除部分泥渣以降低泥渣层的高度，然后逐步增加进水量；

⑨ 如中途停止运行达24h，池底泥渣会处于压实状态，并会失去活性。因此，重新开车运行时，应先排除池底少量泥渣，然后加大进水量和加药量，使池底泥渣松动，并具有吸附活性，再调整进水量为正常水量的三分之二，待出水水质稳定后，再适当调整进水量和加药量至正常状况。

（3）运行中特殊情况的操作处理

特殊情况	引起的可能原因	操作处理方法
清水区内大颗粒矾花普遍上浮，但水色仍透明	投药过量	适当减少加药量，加强排泥操作
清水区内有细小矾花上浮，出水变浑，第二反应室矾花亦细小，第一反应室泥渣层浓度越来越低	投药量不足	增加药剂量
反应室泥渣浓度过高，沉降比超过20%；泥渣浓缩斗排泥浓度高，沉降比超过80%；清水区泥渣层逐渐升高，出水水质差	排泥不及时，排泥量不够大	要及时排泥，缩短排泥周期，延长排泥时间
清水区矾花大量上浮，甚至出现翻池情况，水质变坏	① 由于池内泥渣回流不畅 ② 积泥日久发酵，放出气泡等现象 ③ 进水温度比池内水温高1℃以上；或池面受强烈阳光偏照，造成池水对流 ④ 进水量过大，上升流速过高 ⑤ 加药中断，或排泥不及时	检查进水量，加药量及排泥情况，及时调节至适量。进水管道要覆土，以免阳光照射，水温升高

105 什么是改进型的水力循环澄清池？

改进型水力循环澄清池中的水力旋流絮凝系统，把推流、旋

流、回流三种流态有机地结合在一个构筑物内，产生了特有的水力搅拌效果。如图 2-2-10 所示：

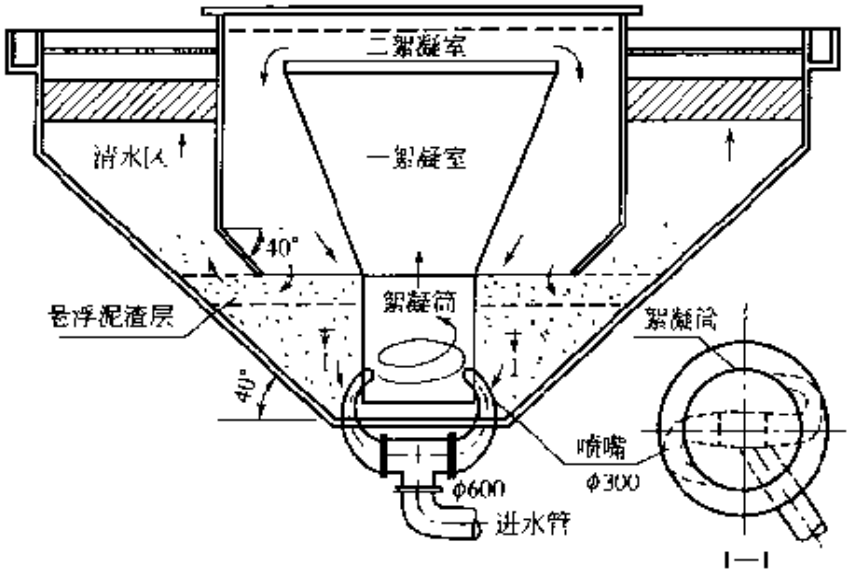


图 2-2-10　改进型水力循环澄清池

（1）改变水力提升器构造形式，采用较小的喷嘴流速和回流比。改进型池子的水力提升，是通过两个水平相对安装与混合筒成切线连接喷嘴所产生的螺旋运动造成的压差，来形成泥渣回流。这与标准型池子利用竖向安装水射器所形成的高速射流，把活性泥渣吸入絮凝室在池内循环的机理不同。由于采用旋流喷嘴流速较小(3m/s)，能耗大大减少，见下表。

两种提升方式能耗比较

池　型	进水量/(m^3/h)	喷嘴流速/(m/s)	水头损失/m	回流比 n/倍
标准型	267	9.5	4.84	4.14
改进型	1313	3	0.70	2

（2）扩大絮凝室容积，增加絮凝时间。分析标准型水力循环澄清池第一、二絮凝室容积与分离区容积的比，一般为 1.5∶8.5，而机械搅拌澄清池其容积比为 3∶7，即水力循环澄清的絮凝时间远小于机械搅拌澄清池，因此，药耗一般偏高。为了减少药耗，适当增加絮凝室以提高絮凝效果是必要的。为此，改进型水力循环澄清池第一、二絮凝室容积与分离室容积的比，增为 4.17∶10.15，

与机械搅拌澄清池的两者容积比 3∶7 相接近，总絮凝时间由标准型的 100～140s 增到 270s，增加了一倍多。

(3) 在导流筒下端增设反裙板。在各地技术改造中，早有增设各种形式裙板的做法。如重庆机床厂等均在第二絮凝室出口处，加设一圈宽 0.5～0.6m、向内倾斜 40°的反裙板，既起导流作用，又增加絮凝时间；梧州富民水厂的导流筒由 2.2m 加长至 4.05m（下段 1.05m 为倾斜 20°的导流伞形板），运转效果也有明显改善。

改进型水力循环澄清池增设的反裙板，其共同点，都是为了增加絮凝时间，改善絮凝效果。而它的特点，不是盲目加长导流筒长度，而是在保证工艺要求的前提下，研究确定二絮凝室高度和反裙板长度，而且裙板是向池中心倾斜，以充分利用底部空间，改善絮凝条件；延长水流路线，以增加水流与锥底活性泥渣的接触时间，为泥渣分离创造条件；也由于这些作用的存在，还为减少分离区高度提供了条件。

(4) 取消喉管与喷嘴的调节装置和伞形罩，使构造更为简单。与改进前比较，提高了池子利用率，改善了絮凝条件。旋流喷嘴与絮凝筒直接连接，活性泥渣回流量控制问题正在探索之中，但有一点可以肯定：当进水压力、喷嘴流速为定值时，絮凝筒直径直接影响着泥渣回流量。絮凝筒大，回流泥渣增加；反之，则回流泥渣量减少。

106 什么是脉冲澄清池？

脉冲澄清池是一种悬浮泥渣层澄清池。它是间歇性进水的。当进水时上升流速增大，悬浮泥渣层就上升，在不进水或少进水时，悬浮泥渣层就下降，因此，使悬浮泥渣处于脉冲式的升降状态，而使水得到澄清。这种池子称为脉冲澄清池。

脉冲澄清池的关键设备是脉冲发生器，脉冲发生器的形式很多，有虹吸式、真空式、钟罩式、皮膜切门式以及浮筒切门式等。以钟罩式脉冲发生器的结构简单而广为使用。脉冲澄清池的结构如图 2-2-11 所示。

脉冲澄清池主要由两部分组成：上部为进水室和脉冲发生器；

下部为澄清池池体，包括配水区、澄清区、集水系统和排泥系统等组成。

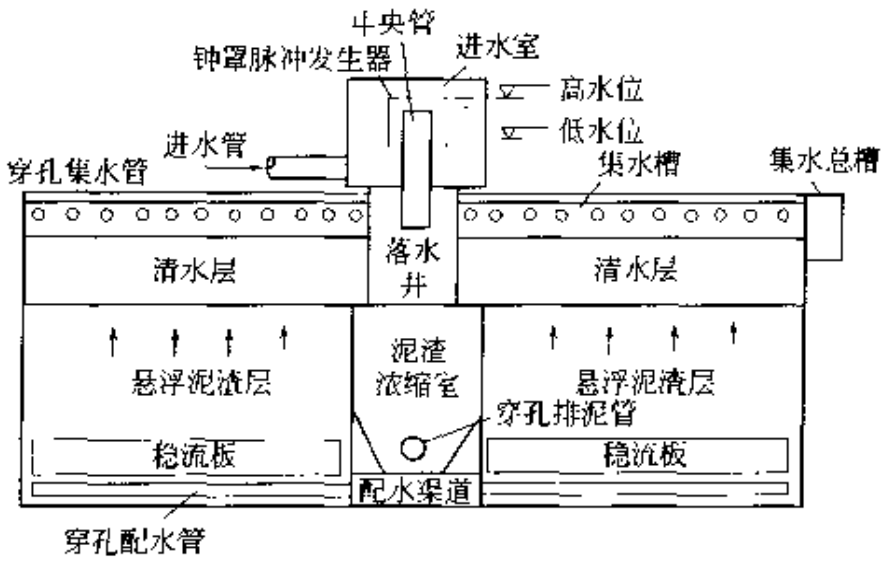


图 2-2-11　钟罩式脉冲澄清池示意图

脉冲澄清池的工作原理如下：经过加药的原水从进水管道均匀地进入进水室，室内水位逐步上升，使钟罩内的空气也逐渐被压缩，当水位超过中央管顶时，开始从中央管内壁溢流而下，并因此将被压缩在钟罩顶部的空气带走，从而造成真空，发生了虹吸。进水室里的水就迅速从中央管流下，水位下降，直至低于虹吸破坏器口时，空气迅速进入钟罩内，并破坏真空，使虹吸停止。这时，进水室水位重新上升，到达高水位后，虹吸又发生，如此进行周期性的脉冲循环。

进水室的水通过钟罩，从中央管、落水井进入配水渠道，然后经过穿孔配水管孔，高速喷出（一般流速 2～4m/s），在稳流板下面进行剧烈的混合反应，然后从稳流板的缝隙流出，并以1.0mm/s左右缓慢速度向上流动，使泥渣层浮起来。因为悬浮泥渣层的活性泥有一定的吸附作用，再由于在脉冲式水流的作用下，悬浮层时而膨胀上升，时而稳定下降，一上一下，有利于水中杂质和矾花颗粒的相互碰撞而凝聚。当水流上升至泥渣浓缩室顶部时，断面突然扩大，流速迅速减小，有利于改善泥水分离条件，清水上

升通过穿孔集水槽进总集水槽，而悬浮层中不断增加的泥渣，流入泥渣浓缩室（约占澄清池面积15%~20%），定期予以排除。

107 如何进行脉冲澄清池的操作控制？

脉冲澄清池的操作控制步骤如下：

(1) 开车前的准备工作

① 脉冲池竣工后，检查各部是否符合设计要求，特别是脉冲发生器；

② 脉冲池的沉降试验合格；

③ 根据原水的浑浊度、碱度、pH及水温等，进行最佳投药量的试验，确定脉冲池的加药量；

④ 备好分析仪器，配好药剂等工作，为开车做准备。

(2) 开车操作控制

① 开进水阀，调整好进水量，测定脉冲发生器工况，并使处于良好状态。

钟罩式虹吸发生器的正常工况参数：从进水低位到高水位的时间一般为25~30s（或称充水时间）；虹吸发生，进水室放空，从高水位放至低水位时间5~10s（或称放水时间）；充水时间比放水时间（称充放比）一般为4∶1或3∶1。

② 由于开车初期悬浮泥渣层尚未形成，投药量要适当增加（一般2倍），并可投加适量黏土，使形成悬浮泥渣层后，再适当降低加药量。

③ 出水之后，如水质不合格可先排放，待合格之后，再引出使用。

④ 调整好脉冲周期（进水室充水和放水所需要时间），稳定进水量，否则会造成悬浮泥渣层的混乱波动，破坏脉冲效果。需要增加负荷时，要在半小时前加大药量（最好停止脉冲动作，以悬浮方式运行2~4h，待水量稳定之后，再开始脉冲，这样不致因水量突增，引进悬浮层过量膨胀而进入清水区）。

⑤ 间歇运行时，停池时间不宜超过24h。否则，应将池子排空，重新开车。

⑥ 如有少量细小矾花进入清水区，可以暂停脉冲，不必排泥，使悬浮层稳定之后，再进行脉冲。

⑦ 及时排泥，定期检测。当悬浮层高度大于 2000mm 时，或泥层浑浊度大于 2000 mg/L 时，应立即排泥；如排泥斗的污泥上浮，或出现排泥 5min 的沉降比超过 80%，应立即开大排泥操作。并根据原水浑浊度变化情况，调整排泥周期及排泥时间。

108　超脉冲澄清池是什么原理?

超脉冲澄清池是由脉冲发生系统、进出水、斜板和排泥等 4 个系统组成。见图 2-2-12。

加过净水剂的原水通过原水管 1 进入真空室 2，由于真空泵 3 抽气，使室内水位上升，当升至水位计 4 的上部触点时，电磁阀 5 打开，真空破坏，水流迅速经压力配水廊道 6 经穿孔配水管 7 高速喷射进入池内。当真空室水位下降至下部触点时，电磁阀关闭，一个充放周期结束。进入池内的水流升至斜板区 9 时，水中微粒便与泥渣碰撞，发生接触凝聚，形成完好的絮粒。固液分离后，澄清水便由集水管流入集水槽。

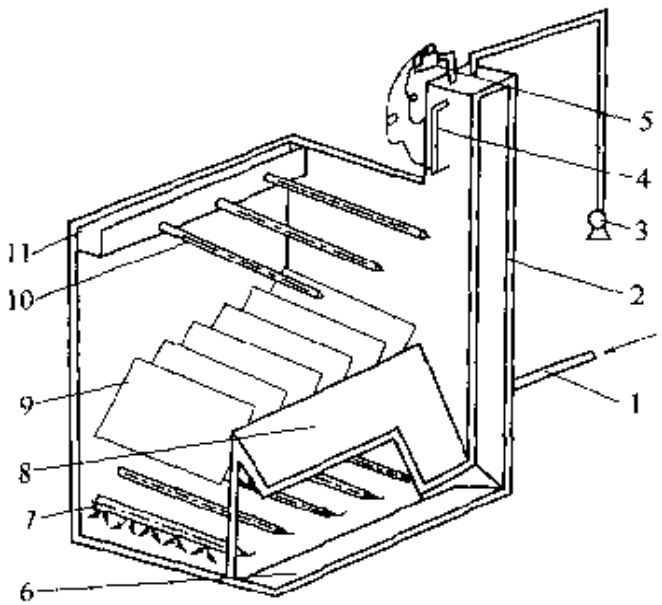


图 2-2-12　超脉冲澄清池构造

1—原水管；2—真空室；3—真空泵；4—水位计；5—电磁阀；6—配水廊道；7—穿孔配水管；8—污泥浓缩室；9—带导流片的斜板组件；10—出水管；11—出水渠

在带有导流片的斜板系统中，见图 2-2-13，沉淀的泥渣沿着斜板向下滑动，一边下滑一边得到稠化。上升水流在导流片的作用下，产生缓慢的旋涡，将斜板上的泥渣重又浮起，并相互接触碰撞，形成内部泥渣的再循环，每经过一片导流片，便产生一次再循环，从而加快了絮体的结合，使斜板间的悬浮泥渣层达到很高的浓度。水流穿过高浓度的悬浮层，起到了泥渣过滤作用，不但使水的浑浊度很快降低，而且大大缩短了絮凝时间。同时，缓慢的涡旋运动使悬浮泥渣层的凝聚力得到加强，从而可使处于较高上升流速下的悬浮层保持在斜板之间。

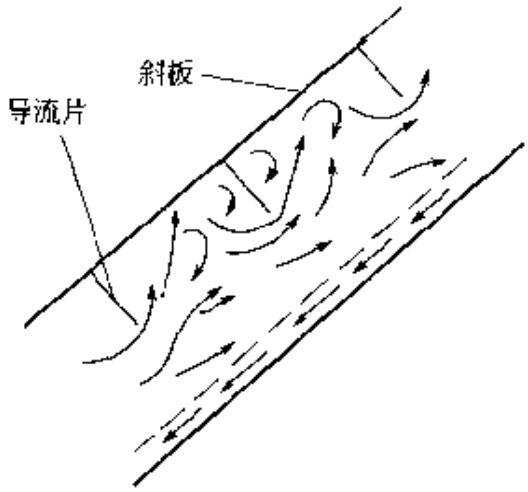


图 2-2-13　斜板区内水流运动示意图

悬浮泥渣层上界面的高度由泥渣浓缩室的上沿高度来控制。浓缩室内的水处于静止状态，泥渣进入泥渣浓缩室后便自然压缩。这样，在池内的同一高度水平上，出现泥渣浓度梯度，使池内泥渣悬浮层的“多余”泥渣不断地向泥渣浓缩室横向扩散，如图 2-2-14，浓缩后的泥渣由排泥系统定时排出池外。

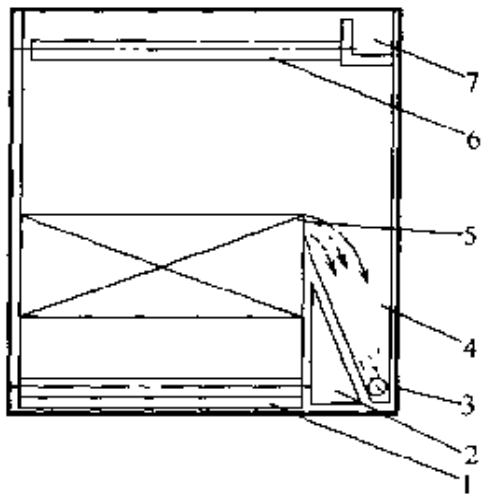


图 2-2-14　污泥横向扩散

1—穿孔配水管；2—配水廊道；3—穿孔排泥管；4—污泥浓缩室；5—斜板；6—穿孔出水管；7—集水槽

由此可见，超脉冲澄清池除了靠脉冲作用，保持整个悬浮泥渣层的均质膨胀外，还依靠浓密的泥渣层在斜板间的再循环来提高絮凝效果，形成良好的絮粒，使澄清水从浓密的悬浮层中分离出

来，从而获得快速高效的净水能力。

109 什么是悬浮澄清池？

悬浮澄清池是悬浮泥渣型的澄清池。其结构如图 2-2-15 所示：

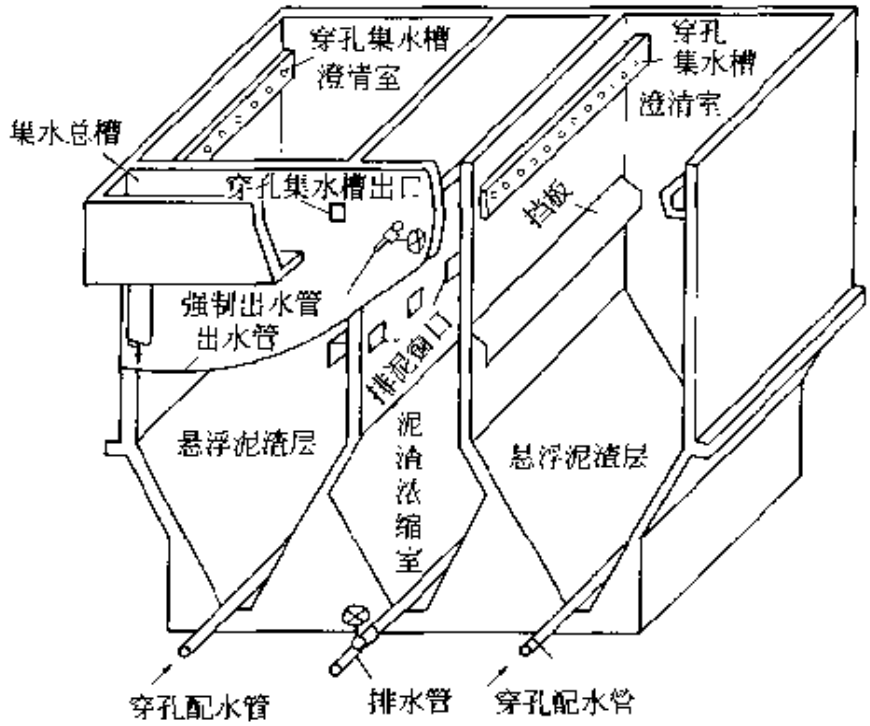


图 2-2-15 悬浮澄清池示意图（锥底式）

原水投加混凝剂后，通过底部穿孔管进入悬浮泥渣层，和池内原有的活性泥渣相互接触，进行混凝反应，除去水中固体颗粒使水得到净化，这即称为悬浮澄清池。悬浮澄清池又分单层式和双层式两种。

悬浮澄清池主要由澄清室、泥渣浓缩室、进出水系统和排泥系统等组成。

悬浮澄清池的工作原理如下：

原水中加入混凝剂后，先经过气-水分离器，由穿孔配水管进入悬浮澄清池底部，自下而上通过悬浮泥渣层——由于水流上升流速控制适当，使上升水流对于矾花的摩擦力等于矾花的重力时，矾花就处于悬浮状态，当到达一定的浓度后，就形成悬浮泥渣层。原水中的固体颗粒杂质与悬浮泥渣层相接触，而被吸附，清净的水从

穿孔集水管流出。当悬浮泥渣层中不断增加泥渣的浓度时，就从排泥窗口进入泥渣浓缩室，并经下沉浓缩后，定期排除。

110　如何进行悬浮澄清池的运行管理？

悬浮澄清池的运行管理工作如下进行。

（1）开车之前，应进行竣工验收，检查和清扫各部，并做好沉降试验。

（2）开车初期，先控制较低的上升流速，一般约0.5～0.7mm/s。加大混凝剂的用量为正常加药量的两倍。当悬浮泥渣层形成之后，开启强制出水阀，将水量逐渐加大，使上升流速达到0.9～1.0mm/s，然后适当调低加药量。

（3）运行中控制好悬浮泥渣层。悬浮泥渣层的矾花颗粒能吸附水中的胶体物质，因接触凝聚，原水就从悬浮泥渣层中渗透而得到澄清。泥渣层的浓度对净水效果影响很大，浓度过低，接触凝聚就差，出水水质也差，但是浓度过大，泥渣层中孔隙减少，孔隙间的上升流速增加，会使泥渣膨胀带出矾花。有时泥渣层厚度高达2.0m左右，此时应立即排泥，并适当减少进水量，保持悬浮层厚度在1.5m左右。当上升流速增大时，悬浮层的浓度会降低；上升流速小时，悬浮层的浓度变高。因此，在增加出水量时，要同时增加混凝剂量，以保证悬浮层保持一定的浓度。处理低浊度的水，亦需适当增加混凝剂的用量。

（4）悬浮澄清池在停池后恢复运行时，先应增大上升流速至1.6～2.0mm/s以冲动悬浮泥渣层。此时要细致观察，而当悬浮层扩散到排渣筒进口附近时，暂停进水，待其下沉至距进口0.8m左右时，即以正常流速投入运行。一般在一小时左右可出合格清水。

（5）穿孔管排泥要畅通，应设有压力0.29～0.39MPa（3.0～4.0kgf/cm^2）的冲洗设备，冲洗孔眼朝下成45°角，一般冲洗2min，即可使排泥获得较好的效果。

（6）水量的变化不应太频繁，以免破坏已形成的悬浮层。

111　试述各类澄清池的适用条件？有何优缺点？

各类澄清池的适用条件及优缺点如下。

型　式	适　用　条　件	主　要　优　缺　点
加速澄清池	① 适用于大中型水处理厂 ② 进水悬浮物含量一般<3000mg/L，短期允许：5000～10000mg/L ③ 一般建于圆形场地	优点： ① 适应性较强，处理效果较稳定 ② 处理效率高，单位面积产水量大 ③ 采用机械刮泥，处理高浊水也有一定适应性 缺点： ① 需要机械搅拌设备，投资较高 ② 机械维修较麻烦
水力循环澄清池	① 适用于中小型水处理厂 ② 一般用于圆形池子 ③ 进水悬浮物含量小于2000mg/L，短期允许小于5000mg/L	优点： ① 池子结构简单 ② 无机械搅拌设备 缺点： ① 投药量较大 ② 对水质变化、水量变化、温度变化的适应性较差
脉冲澄清池	① 适用于大中小型水厂 ② 可做成圆形、矩形或方形池子 ③ 进水悬浮物含量一般小于3000mg/L，短期允许5000～10000mg/L ④ 宜于平流池改造	优点： ① 混合充分，布水均匀 ② 虹吸式机械设备较简单 缺点： ① 真空式设备较复杂 ② 操作管理要求高
悬浮澄清池	① 要求水量变化不可太大，每小时不大于10%，水温不大于1℃ ② 进水悬浮物含量小于3000mg/L ③ 适用于圆形或方形池子	优点： ① 构造简单 ② 能处理高浊度的水 缺点： ① 需要气水分离设备 ② 对进水量、温度的适应性较差

112　澄清（沉淀）池有几种排泥方法？有何优缺点？

各种排泥方法及其适用条件和优缺点如下。

排泥方法	适　用　条　件	主　要　的　优　缺　点
人工排泥	① 一般宜用于小型水处理厂 ② 原水水质较清 ③ 池数不少于2个，轮换用	优点： ① 池底结构简单 ② 造价低 缺点： ① 排泥耗水量大 ② 劳动强度较大
多斗底重力排泥	① 用于原水浑浊度较高时 ② 一般用于大中型水处理厂	优点： ① 劳动强度小 ② 耗水量较小 缺点： ① 池底结构复杂，施工较困难 ② 排泥不够彻底

续表

排泥方法	适 用 条 件	主 要 的 优 缺 点
穿孔管排泥	① 对进水浑浊度适应范围广 ② 可用于改建的水厂	优点： ① 劳动强度小 ② 排泥耗水量小 ③ 排泥时不用停水 ④ 池底结构简单 缺点 ① 孔眼易堵，排泥效果不稳定 ② 检修不方便
机械吸泥机排泥	① 可用于原水浑浊度较高时 ② 用于排泥次数较多时 ③ 用于大中型水厂的平流沉淀池	优点： ① 排泥效果好 ② 劳动强度低，操作简便 ③ 池底结构简单 ④ 可连续性排泥 缺点： 设备多、耗材多
机械刮泥机排泥	① 用于原水浑浊度高的情况下 ② 适于排泥次数多的时候 ③ 用于大中型水厂辐流式沉淀池及加速澄清池	优点： ① 排泥效果好，彻底 ② 劳动强度低，操作方便 ③ 可以连续性排泥 缺点： ① 设备多，耗材多 ② 有刮泥板装置，池底结构较复杂
机械吸泥船式排泥	① 用于原水浑浊度高的情况 ② 用于大型水厂预沉池 ③ 用于含沙量大的原水处理	优点： ① 排泥效果好 ② 可连续性排泥 ③ 操作方便 缺点： 设备维修复杂

113 水温的变化对澄清池出水水质有何影响？

澄清池在运行过程中，进、出水温都是相对稳定的，因此，水的流动状态是有规律的、稳定和正常的，出水系统的水流处于层流状态，因此水质稳定。但是当澄清池中的进水温度出现较大温差和波动时，会出现热水流现象，造成水流的局部区域扰动，水流速度发生瞬间变化，破坏正常的悬浮泥渣层，出现泥渣上浮，或是水流“短路”，使澄清池的出水水质浑浊度上升。

114 澄清池出现大量矾花上浮是何原因？

澄清池出现矾花上浮的原因是多方面的，它将直接影响出水水质，因此要引起注意。澄清池出现大量矾花上浮的原因如下。

(1) 澄清池搅拌机的转速过快，搅碎了矾花，而碎矾花再凝聚

就更困难，使泥渣强度下降，矾花上浮。遇到此种情况时，要控制好搅拌机叶轮外缘的线速度，不得超过设计规定。并适当增加混凝剂的用量，重新形成悬浮泥渣层。

（2）澄清池回流缝堵塞，活性泥无法回流，矾花沿池壁上浮。此时要开启回流缝冲洗管道，疏通堵塞，适当进行中心排污，并提升搅拌机的回流量至出水水量的4～5倍，就可以避免上浮现象。

（3）没有及时定期排泥，或者泥渣层高度波动较大，或是泥渣层过高，引起矾花上浮。这时，要及时进行排泥，调整或控制好泥渣层高度。

（4）混凝剂加量小，难以形成矾花，凝聚效果差，悬浮物没能分离和沉淀；或是混凝剂加量过大，产生反离子现象，难以凝聚，也会产生矾花上浮现象。

（5）水温突变，引起水流扰动，泥渣层上浮。此时，可适当降低搅拌速度和增加混凝剂用量，调节出水量使水流稳定。如果有可能，可以适当投加活性泥或黏泥。

（6）如果是加石灰浆的澄清池，由于加量过大，会生成$CaCO_3$胶体，使得矾花体积大而密度小易上浮。但如果加量过少，生成的$CaCO_3$沉淀小，矾花体积小，反应区上部的泥渣层强度降低而上浮，这时，要适当调整搅拌机速度，并稳定控制碱度$c\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$ $2P-M=0\sim-0.4\text{mmol/L}$，并适当增加混凝剂量。

115　澄清池里加氯有什么作用？

澄清池里加氯主要有四大作用：

（1）杀菌灭藻，抑制微生物的滋长；

（2）分解水中的有机物质，破坏水中胶体物质的稳定，使它们在混凝剂的作用下予以去除；

（3）提高混凝剂的效果，有些混凝剂如$FeSO_4$，在氯的氧化作用下Fe^{2+}转化为Fe^{3+}，发挥混凝剂的效用；

（4）氯气是强氧化剂，可以把水中的还原性物质如氧化亚铁、氧化亚锰等，氧化为高价化合物，防止其腐蚀和污染水质，便于去

除。例如把水中 H_2S 类物质氧化、脱氢，生成硫磺等沉淀，予以去除。

但应注意，加氯量要适中。加量不足，不能起到应有作用；加氯过量要引起腐蚀，要增加下一道工序如活性炭过滤器的负担，甚至穿过活性炭过滤器进入脱盐水系统而影响阳离子交换树脂的性能，降解其交换基团，降低其交换能力，缩短工作交换容量，使出水水质变差等。因此澄清池出水的余氯要严格控制，正常操作控制在 0.1～0.3mg/L 为好。

116 什么叫气浮净水技术？

气浮净水技术是在水中通入或是产生大量的微细气泡，使其粘附于杂质絮粒上，造成整体密度小于水的状态，并依靠浮力使其浮至水面，从而获得固、液分离的一种净水方法。这是当今国际上正在积极研究和推广的一种水处理技术。我国的气浮净水技术经多年来的研究已达到相当水平。

气浮技术的方法种类很多，有压力溶气法，真空释气法，微孔布气法，电解产气法，化学产气法，机械碎气法及生产产气法等。但是，研究和应用最多的是压力溶气法气浮净水技术。

水中并非所有的物质都能粘附到气泡上去的，亲水性大的物质无力挤开水膜，粘附不上气泡，故不能气浮。有的物质虽容易被气浮，但也不是任何气泡都能附着上去的，例如大的气泡具有较大的上升力，但大的上升力产生的惯性不仅不能使气泡很好地附着于絮粒表面，反而造成严重的紊流而撞碎絮体，甚至会把已经附着的小气泡也拉下来。因此，制造一种大小尺寸能够控制而惯性力小的细微气泡，成了取得气浮净水效果的关键。气泡直径大小一般在10～120μm 之间，能满足气泡微细度的要求。

117 什么是压力溶气气浮净水技术？

压力溶气气浮法所产生气泡的微细度和稳定性很高，能很好满足气浮技术要求，能耗低、操作管理可靠、简易，并能适应大、中、小型设备的要求，所以与其他形式气浮法相比，占有一定的优势。

压力溶气气浮净水技术的工艺流程如图 2-2-16。

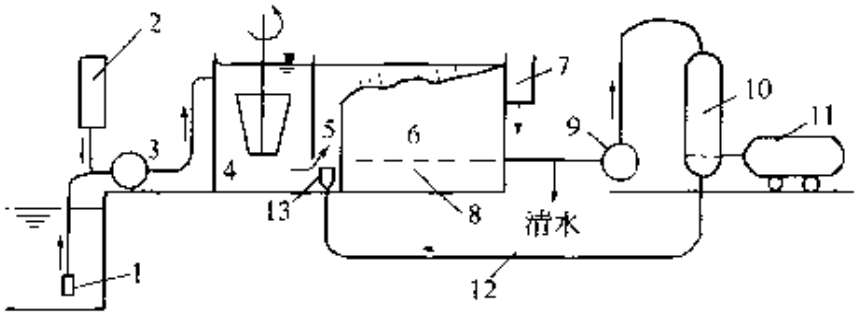


图 2-2-16　气浮净水工艺流程示意

1- 原水取水口；2—絮凝剂投加设备；3—原水泵；4- 絮凝池；5—气浮池接触室；6—气浮池分离室；7—排渣槽；8　集水管；9—回流水泵；10—压力溶气罐；11—空气压缩机；12—溶气水管；13—溶气释放器

原水经原水泵 3 提升，并于泵前吸入絮凝剂后，进入絮凝池 4，经絮凝后的水自底部进入气浮池的接触室 5，与溶气释放器 13 释出的微气泡相遇，絮粒与气泡粘附，即在气浮池分离室 6 进行渣、水分离。浮渣布于池面，定期刮（溢）入排渣槽 7，清水由集水管 8 引出，进入后续处理构筑物。其中部分清水，则经回流水泵 9 加压，进入压力溶气罐 10；与此同时，空气压缩机 11 将压缩空气压入压力溶气罐，在溶气罐内完成溶气过程，并由溶气水管 12 将溶气水输往溶气释放器 13。供气浮用。

从以上工艺流程可知，压力溶气气浮法主要由三大部分组成，即压力溶气系统、溶气释放系统及气浮分离系统。

压力溶气系统包括水泵、空压机、压力溶气罐及其他附属设备。其中压力溶气罐是影响溶气效率的关键设备；其功能是在一定的压力下，尽可能多地将空气溶于水中。在实现高效率溶气的前提下，要求尽可能地减小压力溶气罐的体积，降低泵与压缩机的电耗，充分利用压入的空气，减少未溶空气的排放，提高溶气罐的管理水平，做到水位自动控制。

其主要工艺参数为：

溶气罐压力：0.2～0.4MPa；

罐的过流密度：3000～5000$m^3/(d \cdot m^2)$；

填料层高度：0.8～1.3m；

液位控制范围：0.6～1.0m（罐底以上）；

溶气罐承压能力：0.8MPa以上。

溶气释放系统功能是将压力溶气水通过消能、减压，使溶入水中的气体以微气泡的形式释放出来，并能迅速而均匀地与水中的杂质相粘附。

气浮分离系统的功能是确保一定容积来完成微气泡群与水中絮粒充分混合、接触、粘附以及带气絮粒与清水的分离。

118　气浮净水技术有何特点？其适用条件如何？

气浮与一般沉淀、澄清相比，具有下列特点。

（1）由于它是依靠无数微气泡粘附絮粒，因此，对凝聚的要求可适当降低。一般能节约絮凝剂量及减少絮凝时间。

（2）单位面积产水量高，且可缩短清水与泥渣的分离时间，使池子容积及占地面积减小，造价降低。

（3）处理后的出水水质，有利于后续处理，延长滤池的冲洗周期，节约冲洗耗水量。

（4）排泥方便，耗水量小，泥渣含水率低，为泥渣进一步浓缩处理提供了有利条件。

（5）池的深度较浅，池体结构简单，管理方便，可随时开、停，而不影响出水水质。

（6）日常运转电耗稍高。

（7）增加一套供气、溶气、释气设备。

由于气浮是依靠气泡来托起絮粒的，絮粒越多、越重，所需气泡量越多。故气浮不宜用于含泥砂质多的高浊度原水，一般适用以下条件的水。

（1）低浊原水（一般原水常年悬浮物含量在100mg/L以下）。

（2）含藻类及有机杂质（如水草、腐叶等）较多的水。

（3）低温度（水温在4℃以下）水，也包括冬季水温较低而用沉淀、澄清处理效果不好的原水。

（4）水源受到一定程度的污染及色度高、溶解氧低的原水。

（三）过　滤

119　过滤在水的净化过程中有何作用？

水处理的沉淀和澄清过程，把水中一部分较大的固体颗粒或容易沉降的杂质加以去除。但要进一步使水净化，就得利用过滤的方法，使水通过滤料层后，将水中的细小颗粒杂质截留下来，从而使水得到进一步的澄清和净化，把水的浑浊度再降低些。过滤还可以使水中的有机物质、细菌、病毒等随着浑浊度的降低而被大量去除，并为滤后的消毒创造了良好的条件，水中细菌失去浑浊物的保护和依存而呈现裸露形态是有利于杀菌的。因此过滤是使工业用水和生活用水达到卫生、安全的极其重要的净化措施。对于软化和除盐水处理，也需对原水进行过滤净化，使浑浊度小于 5mg/L，甚至有的要求接近零，这样，可使离子交换树脂免受悬浮物的污染，并可提高工作交换容量。对于循环冷却水处理来说，其补充水必须要经过过滤，浑浊度要小于 5mg/L，以确保循环冷却水在低浊度下运行，避免冷却水系统的淤泥沉积。

120　滤池的过滤原理是什么？

滤池里以不同大小颗粒的滤料，从上到下、由小而大依次排列。当水从上流经滤层时，水中的固体悬浮物质进入上层滤料形成的微小孔眼，受到吸附和机械阻留作用被滤料的表面层所截留。同时，这些被截留的悬浮物之间又发生重叠和架桥等作用，就好像在滤层的表面形成一层薄膜，继续过滤着水中的悬浮物质，这就是所谓滤料表面层的薄膜过滤。这种过滤作用不仅滤层表面有，面当水进入中间滤层也有这种截留作用，为区别于表面层的过滤，称为渗透过滤作用。此外，由于滤料彼此之间紧密地排列，水中的悬浮物颗粒流经滤料层中那些曲曲弯弯的孔道时，就有着更多的机会及时间与滤料表面相互碰撞和接触，于是，水中的悬浮物在滤料的颗粒表面与凝絮体相互粘附，从而发生接触

混凝过程。

综上所述，滤池的过滤就是通过薄膜过滤、渗透过滤和接触混凝过程，使水进一步得到净化。

121 快滤池的工作原理是怎样的？

快滤池是给水处理中最常用的一种滤池。其结构如图 2-3-1 所示：

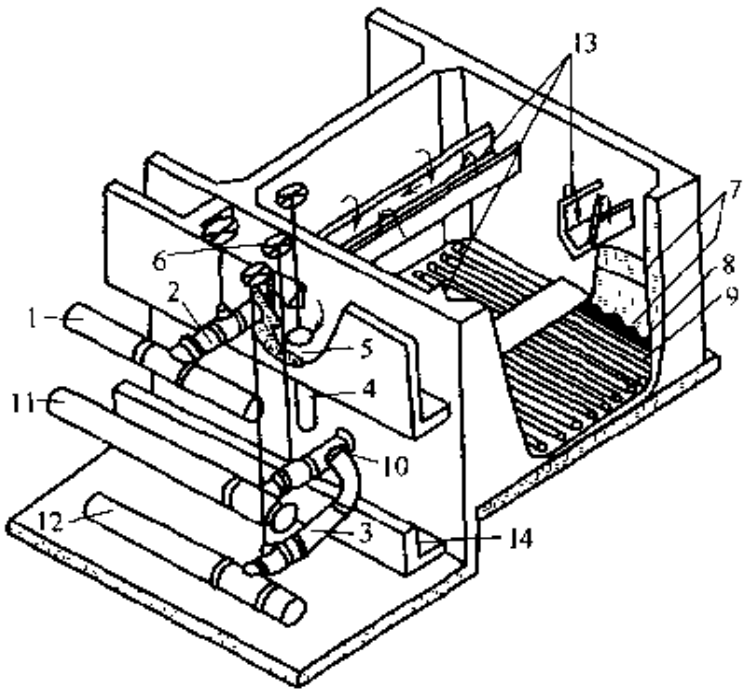


图 2-3-1 快滤池结构示意图

1—浑水干管；2—浑水支管；3—清水支管；4—排水管；5—排水阀；6—浑水渠；7—滤料层；8—承托层；9—配水支管；10—配水干管；11—冲洗水总管；12—清水总管；13—布水槽；14—排水渠

快滤池是一种滤速大的池型，一般滤速达 8m/h，最大可达 35m/h。快滤池有单层滤料、双层滤料和多层滤料，以及变孔隙过滤等。其特点，除滤速快之外，滤层厚，通常要大于 0.7m。大都设在混凝沉淀之后。进水浑浊度＜20mg/L，具有截留、沉淀、架桥、絮凝等综合作用。

快滤池用砖或钢筋混凝土建造，池内由配水干管、支管、承托层、滤层以及布水槽等组成，池旁由清水管、反洗水管及滤水管等

管廊和管渠等组成。

快滤池的工作原理分过滤和反洗两个过程。

过滤时：经过澄清的水浑浊度小于 20mg/L，从浑水干管 1，经过浑水渠 6，流入布水槽 13 进入滤池，水经过滤料（砂）层，以8～14m/h 过滤速度，将水中的残余杂质截留在滤料表面及滤层里面，使水变清成为洁净的过滤水。过滤水经由级配卵石组成的承托层 8、配水支管 9，汇集到配水干管 10。最后，从过滤水管进入过滤水池，此时出水浑浊度小于 5mg/L 或更低。

反洗时：先关闭浑水管道上的进水阀，等滤池的水位下降 10cm 左右时，再关过滤水管上的阀门，然后开启排水管 4 及冲洗水的排水阀门 5，冲洗水从冲洗水管 11，经过配水系统的干管 10、支管 9，水从下而上流过承托层 8 和滤料层 7，滤料在上升水流的作用下，悬浮起来并逐步膨胀到一定高度，使得滤料中的杂质、淤泥冲洗下来，废水进入布水槽 13，经浑水渠和排水管，排入沟渠，冲洗直至排出水清澈为止。冲洗强度通常控制在 12～15L/(s·m^2) 范围内。

122 快滤池要进行哪些测定工作?

快滤池的运行管理要定期进行滤速、冲洗强度、滤层的膨胀率及滤层泥球百分率测定，来指导生产管理工作。具体做法如下：

(1) 过滤速度测定　简易的测定方法是关闭进水阀门，让滤池水位下降，在一定的时间内下降的水位高度就是滤速。如用秒表计时，当时间 60s，水位下降 0.2m，那么滤速：

$$S=\frac{0.2\text{m}}{60\text{s}}\times 3600\text{s/h}=12\text{m/h}$$

此值稍低于运行中的真实滤速。因为，在测定时的水位低于运行时的水位，滤速就慢一些。

(2) 冲洗强度测定　根据冲洗用去的水量、冲洗经历时间以及滤池面积的测定来计算冲洗强度 (W)：

$$W=\frac{\text{冲洗水量(L)}}{\text{滤池面积(m}^2\text{)}\times\text{冲洗时间(s)}}\quad \text{L/(s}\cdot\text{m}^2\text{)}$$

（3）滤层膨胀率测定　滤层的膨胀率是指滤层在一定反洗强度下发生体积膨胀，体积膨胀前后的差与滤层膨胀前体积的比值。即：

$$\text{滤层膨胀率}=\frac{V-V_0}{V_0}\times 100\%$$

式中　V_0、V——分别表示滤层膨胀前、后的体积，m^3。

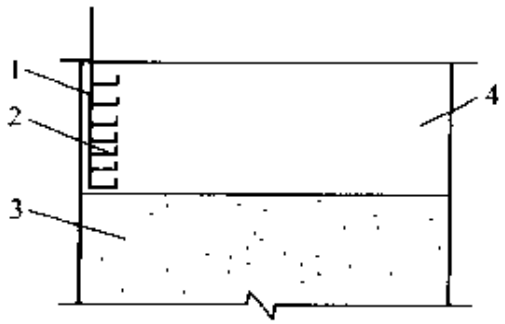


图 2-3-2　滤层膨胀率测定示图

1—测棒；2—小方盘；

3—滤料；4—滤池

快滤池的滤层膨胀率在 40%～50%为好。需要指出的是，当水温升高时，水的黏度和密度下降，必须用更大的反洗强度，才能使滤层达到同样的膨胀率。

测定滤层膨胀率时，可做一个特制测棒，在测棒上每隔 2cm 钉有许多小方盘。在冲洗之前，将测棒固定在池壁上，如图 2-3-2 所示。

在反冲洗滤层膨胀时，将砂滤料上升留在各盘内，等冲洗完毕后取出检查，有滤料的最高一格小方盘的高度，就是滤料层膨胀的高度。并由此计算出滤层的膨胀率。

（4）滤料泥球百分率的测定　测定滤层泥球百分率的目的是评价冲洗效果的好坏。冲洗效果好的，滤池砂面平坦，没有泥球污泥层，否则就有。测定时，将取样器（图 2-3-3 所示）垂直插入滤层至砂面平齐，取出样 200～250mL，倒在直径 200～250mm、高 40～60mm、蒙有 2.5mm 孔眼的筛上，然后把筛子放在盛有清水的盆内小心摇动，使砂穿过筛孔，而留在筛上是大于 2.5mm 的泥球，再把泥球放到预先充水的玻璃量筒中，计算加入泥球前后的量筒中水位刻度的变化，就可以得到

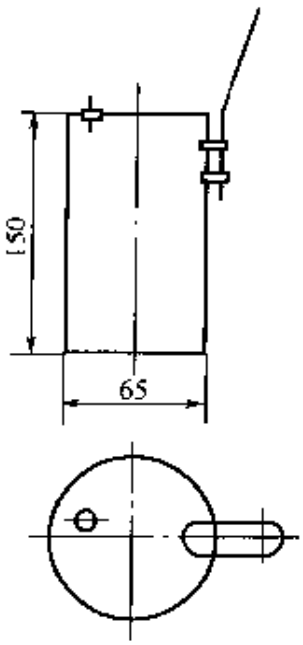


图 2-3-3　取砂样器

泥球体积。泥球的体积分数如下计算：

$$\text{泥球体积分数}=\frac{\text{泥球体积(mL)}}{\text{砂样总体积(mL)}}\times 100\%$$

冲洗效果的好坏据下表评定：

泥球体积分数/%	0.0～0.2	0.2～0.5	0.5～1.0	1.0～5.0	大于5.0
判断	极好	好	满意	不好	极坏

123 什么叫滤池的水头损失？为什么要控制水头损失？

水头损失是指水通过滤层的压力降，水头损失是常用来判断滤池是否需要冲洗的指标之一。

当滤池运行到水头损失达一定数值时，就应停用，进行反冲洗。滤池不能运行到水头损失过大，其原因有：

(1) 当水头损失很大时，过滤操作必须增加压力，这样就易于造成滤层破裂，在滤层的个别部位有裂纹的现象。此时，大部分水从裂纹处穿过，形成水流短路，破坏了薄膜过滤作用，从而影响水质。

(2) 水头损失与滤层中杂质含量有关。水头损失过大，说明滤层中杂质量太多，会造成滤料结块，反洗不易洗净等不良后果。

此外，滤层设备各部分是按一定压力设计的，不能承受过高的压力。

124 快滤池常见什么故障？如何处理？

快滤池常见的故障及处理的方法如下：

(1) 滤层气阻　原因是滤池进水带气、水中溶解的气体逸出以及“负水头”产生所引起。滤层气阻会使水质恶化，滤料层开裂及产水量减少等危害。

处理方法：①增加砂面上的水深，不使产生“负水头”；②更换表面滤料；③增大滤料粒径；④增大滤速。

(2) 滤层结泥球　原因是：长期反冲洗不干净，或是支承层及配水系统堵塞。结泥球会使水质恶化。

处理方法：①适当调整冲洗强度和冲洗时间；②增设表面冲洗装置或用压缩空气辅助冲洗；③结泥严重时，进行人工翻砂清洗，应检查支承层及配水系统是否堵塞并及时处理；④将滤池反洗后，在砂面上保持 20～30cm 水深，每 m^2 池面约加 0.3kg 液氯或 1kg 漂白粉，浸泡 12h，以破坏结泥球的有机物质。

（3）跑砂、漏砂　原因是：①冲洗强度过大；②滤料级配不当；③冲洗水不均匀；④支承层移位。跑砂、漏砂使水质差，滤料漏失。

处理方法：应检查配水系统并适当降低冲洗强度。

（4）微生物滋长　原因是：进水中常带有多种藻类及水生生物停留在滤层中并滋长繁殖，尤其在炎热及水温高的情况下，繁殖更快。微生物的滋长也会使水质变差，并影响卫生标准，微生物还会分泌黏液使滤料层黏结并堵塞。

处理方法：在过滤前进行加氯杀菌灭藻处理。

125　为什么滤池要有一定的冲洗时间？

滤池的冲洗效果与冲洗强度、滤层膨胀率及冲洗时间有关。但是，即使冲洗强度及滤层膨胀率适当，如果冲洗时间不足，也达不到冲洗效果。由于冲洗时间不足，使冲洗的泥渣废水来不及排除，冲洗虽已结束，但脏物仍阻留在滤层中，并有可能使滤料被污泥所覆盖，过滤的能力也就差了。这样，滤池的出水量越来越小，出水浑浊度会逐渐升高，滤池的阻力增大，能耗增加。因此，必须要保证一定的冲洗时间。根据测定及运行经验，冲洗时间可按下表确定：

滤料组成	冲洗时间 /min	冲洗强度 /[L/(s·m^2)]	膨胀率 /%
单层滤料	5～7	12～15	45
双层滤料	6～8	13～16	50

126　滤池的冲洗有哪几种方式？

按照供给冲洗水源不同而有两种方式：一是水塔冲洗；二是加

压水泵冲洗。水塔冲洗操作简单，但造价较高；水泵冲洗操作比较麻烦，耗电较大，但投资较小。

当用水塔冲洗时，水塔的水深不要超过3m，以免冲洗初期和末期的水位相差太大，而影响冲洗强度变化过大，水塔的容积应容有单个滤池冲洗水量的1.5倍。当用加压水泵冲洗时，其扬程应大于滤池各部水头损失之和，而流量应根据冲洗强度和滤池面积来决定。

127 什么叫反洗强度？怎样确定合适的反洗强度？

反洗强度，是指每平方米过滤面积上，单位时间内所用去的冲洗水量。单位是$L/(m^2 \cdot s)$。反洗强度与滤料的级配有关。反洗强度与滤料级配的关系见下表。

滤料			反冲洗强度/[$L/(m^2 \cdot s)$]		
种类	级配/mm	层高/mm	水反洗	擦洗	
				空气	水
无烟煤	0.8～1.5	700	10		
石英砂	0.5～1.2	700	15		
大理石	0.5～1.2	700	15		
无烟煤	0.8～1.8	400～500	13～16	10～5	～10
石英砂	0.5～1.2	400～500	13～16	10～15	～10
石英砂	0.5～1.2	1200	15～18		
无烟煤	0.5～1.2	1200	10～12		

128 什么是虹吸滤池？

虹吸滤池可以做成圆形或方形，一般是由数格（如6～8格）滤池组成一个整体，便于管理和冲洗。由于滤池的进水和冲洗水的排除都由虹吸管完成，所以叫虹吸滤池。

虹吸滤池的构造如图2-3-4所示，图的右半部表示滤池的过滤情况，图的左半部表示滤池的反冲洗情况。

虹吸滤池的工作原理：经过沉淀或澄清的水由进水槽1流入环形配水槽2。在过滤时，原水由进水虹吸管3进入水封槽4。再经进水堰5和布水管6流入各格滤池中，各格滤池独立运行。

当某格滤池内水位上升，超过出水井 11 内的控制堰 12 的堰顶高，并克服滤料层 7、配水系统 8 及出水管 10 的总水头损失时，开始过滤。此时，水经滤料层和配水系统流入环形集水槽 9，经出水管 10 流入出水井 11，通过控制堰 12 和清水管 13，再流到过滤水池。

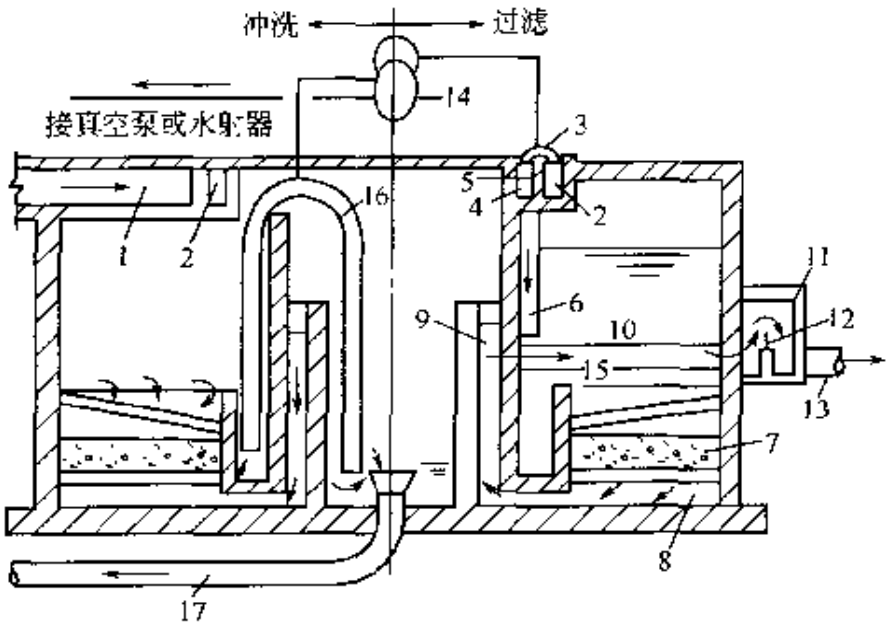


图 2-3-4　虹吸滤池示意图

1—进水槽；2—环形配水槽；3—进水虹吸管；4—进水虹吸管水封槽；5—进水堰；6—布水管；7—滤料层；8—配水系统；9—环形集水槽；10—出水管；11—出水井；12—控制堰；13—清水管；14—真空系统；15—洗水槽；16—冲洗虹吸管；17—冲洗排水管

虹吸滤池是依靠池内水位和控制堰口 12 出水水位之间的高差来过滤的。因此，当经过一定时间的过滤运行，滤层的阻力增大，水头损失增加，致使滤层上的水位升高，当水位逐步升高至一定的高度时，也即水头损失到达一定的最大允许值时（一般为 1.5～2.0m 左右），滤池就要进行反冲洗。此时，首先破坏进水虹吸管 3 的真空，使配水槽 2 的水不再进入滤池。利用真空泵和水射器使虹吸管 16 形成真空，滤池内的水通过冲洗虹吸管和冲洗排水管 17 排走，直至滤池内水位继续降低至环形集水槽 9 水位以下时，就开始反冲洗。水自下而上通过滤层，冲洗的废水继续由冲洗排水管排

出。而冲洗的水源是由组合中的其他几格滤池通过环形集中槽源源不断供给，直至排出水水质清洁时为止。要结束滤池的冲洗就要破坏冲洗虹吸管 16 的真空，可以打开冲洗虹吸管上放空气阀，让空气进入，冲洗即行停止，然后再启动虹吸管 3 滤池又重新开始过滤。

129 什么是重力式无阀滤池？

重力式无阀滤池由于其操作简单，管理方便，而在生产上广为使用。重力式无阀滤池的平面形式大都为长方形，砖或钢筋混凝土结构，一般两个滤池为一组建在一起，其构造如图 2-3-5 所示：

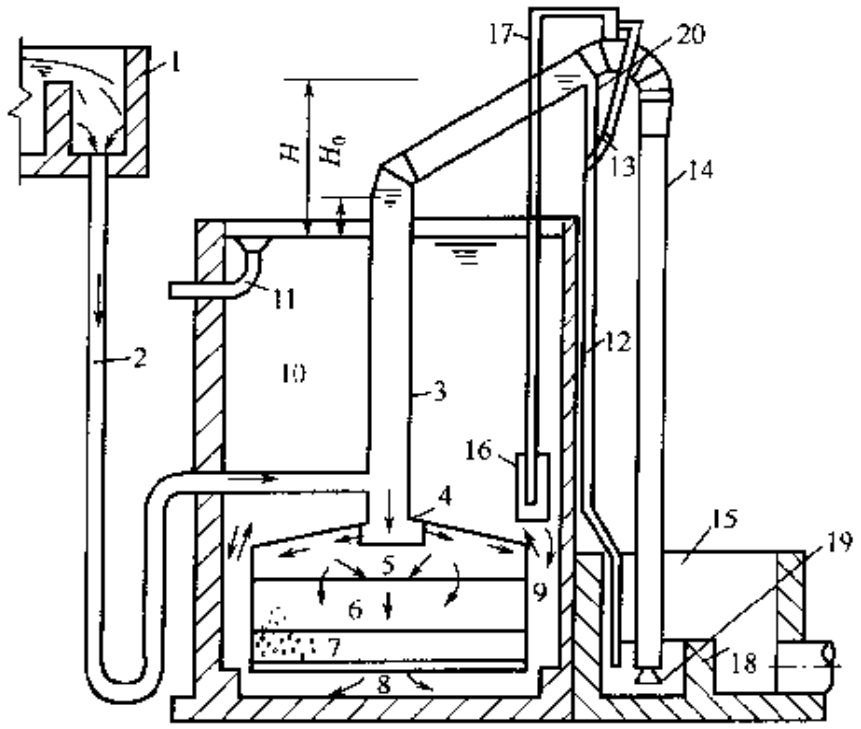


图 2-3-5 无阀滤池示意图

1—配水槽；2—进水管；3—虹吸上升管；4 顶盖；5—布水挡板；6 滤料层；7—配水系统；8—集水区；9—连通渠；10—冲洗水箱；11—出水管；12—虹吸辅助管；13—抽气管；14—虹吸下降管；15—排水井；16 虹吸破坏斗；17—虹吸破坏管；18—水封堰；19 反冲洗强度调节器；20—虹吸辅助管管口

无阀滤池的工作原理如下：

过滤时的流程是：经沉淀或澄清后的清水，从配水槽 1、U 形进水管 2，进入虹吸上升管 3，再由顶盖 4 内的布水挡板 5 均匀地

布水于滤料层 6 中，水自上而下通过滤料层过滤，过滤水从小阻力配水系统 7 进入集水区 8 后，通过连通渠 9 流到冲洗水箱 —即出水箱 10，当水位上升至出水管 11 时，过滤水就流入清水池。

滤池刚投入运行时，滤料层较清洁，但当运行到一定的时间之后，由于滤料层中固体颗粒杂质的逐渐增多，因此水头损失也随之增加，水位就沿着虹吸上升管慢慢升高，当水头损失增大到一定程度之后，使虹吸上升管中的水位升高到虹吸辅助管管口 20 时，水便从辅助管 12 中急速流下，依靠水流的夹气和引射作用，通过抽气管 13 不断带走虹吸管中的空气，使虹吸管形成真空，虹吸上升管中的水便大量地越过管顶，沿虹吸下降管 14 落下，这时，就开始了反冲洗过程。冲洗水箱的水经过连通渠、集水区和配水系统从下而上冲洗滤料层，冲洗的废水通过虹吸管，流入排水井 15，从水封堰 18 溢流至沟渠。在冲洗过程中，水箱的水位逐渐下降，约冲洗 5min 左右，水箱水位下降到虹吸破坏斗 16 缘口以下时，虹吸破坏管 17 会把器内的存水吸光，露出管口，空气迅速从虹吸破坏管进入虹吸管顶，虹吸即被破坏，冲洗过程就此结束，过滤又重新开始。

在滤池的运行过程中，遇到出水水质不理想，或是滤层阻力过大，这时，可以进行人工强制反冲洗。打开 20 管处的人工强制反冲洗压力管阀门，通过压力水抽走虹吸管的空气，即可达到人为的强制冲洗的目的。

130 如何进行重力式无阀滤池的开、停车操作？

重力式无阀滤池的开、停车操作步骤如下。

(1) 开车前应具备的条件及准备工作

① 按照设计要求已全部竣工；

② 虹吸上升管及液位计的接头和虹吸破坏管等都已经过气密试验不漏气；

③ 人工强制反冲洗压力管已接好，水压不小于 0.25MPa ($2.5kgf/cm^2$)；

④ 虹吸辅助管口标高与进水分配槽溢流堰标高需要核对，否

则会影响虹吸的形成，堰口要两次粉刷校正好；

⑤ 调整好反冲洗强度调节器的开启度；

⑥ 滤料及垫层要严格按级配填装；

⑦ 将冲洗水箱充满水，并清洗联通渠，使排出水清净为止；

⑧ 打开进水阀门半圈，对滤料进行小流量清洗，并排气；

⑨ 试验人工强制反冲洗，使反冲洗时间维持在 5min 左右。

(2) 开车操作

① 打开进水阀门，流量计投入使用，控制水量在设计范围；

② 待冲洗水箱的水位上升至出水之前，取样分析浑浊度要小于 5mg/L，方可出水；

③ 每小时巡回检查各部，并分析进、出水浑浊度一次。

(3) 停车操作

① 关进水阀，检查各部是否正常；

② 停流量计；

③ 如停池时间长，将滤池内水排放。如果是短时间停车（如三天左右），池内水不必排放，但在使用前要进行一次人工强制反冲洗。

131 何谓微絮凝直接过滤技术?

微絮凝直接过滤，国内统称直接过滤，它是指在原水中加入絮凝剂之后、经快速混合形成肉眼看不见的微絮凝体时，就直接进入滤池进行过滤，滤前不设沉淀（或澄清）设备。

在这种过滤系统中，滤池不仅起常规过滤作用，而且起絮凝和沉淀作用。

直接过滤是以接触絮凝作用为主，机械过滤及沉淀作用为辅。微絮凝体通过滤料孔隙进入滤层后，与滤料进行接触絮凝，而将絮凝物从水中截留而去除。

在直接过滤处理系统中，为了达到接触絮凝的目的，在滤前投加少量絮凝剂，主要是为了形成微絮凝体，以利于进入滤池后与滤料之间的吸附。故微絮凝体的尺寸一般不大于 40～60μm。

微絮凝直接过滤对原水水质和絮凝剂有一定的要求：

（1）原水：在正常情况下，不能有过高的浑浊度，一般以60～100度以内为宜。在特殊情况下，不得超过200～300度，以利于直接进入滤池过滤，并保证有一定过滤周期。但根据目前的发展，对常年浑浊度200度左右、短期浑浊度300度以下的原水，只要措施得当，一般均可采用直接过滤。

基于上述要求，水库或湖泊水是直接过滤的理想水源。它们的特点是常年浑浊度低，一般在10～20度以下，只有在暴雨或大风（浅水库）时，才出现较高浑浊度（200～300度），但时间短，从几小时到3～5天；另外，藻类及浮游生物的孳生，也是水库、湖泊的特点。但一般具有季节性，且多在秋季发生，持续1～2周或更长一些。

（2）常用絮凝剂及其投量：在直接过滤中，控制投药量是滤前处理的关键，它直接影响过滤效果。因为投药量的多少决定了颗粒表面的电性及有效碰撞率。为控制投量，常采用恒压定量投药装置。

直接过滤中，常用的絮凝剂是精制硫酸铝（含$Al_2O_3$16%）或聚合铝、三氯化铁等。助凝剂一般用聚丙烯酰胺（阴离子型），也可用活化硅酸（水玻璃），其中SiO_2含量为30%。根据在抚顺东公园水厂的试验：水温20℃左右，滤速为8m/h，不同原水浑浊度的最佳投药量可见下表。

原水浑浊度/度	10	30	50	90	200	300
硫酸铝最佳投量/(mg/L)	4	6	8	10	18	20

药剂投量决定胶体脱稳，并与产生的絮凝体量有关。

如果滤速提到12m/h，则投药量相应有所增加，且过滤周期相应缩短。当浑浊度大于200～300度时，只有在采用助凝剂的条件下，采用8m/h滤速，才能保证过滤周期达到7～8h以上。

采用聚合氯化铝代替硫酸铝，投药量可大为降低。

132　什么是V形滤池？

V形滤池是一种高速新型均粒滤料滤池。

该型滤池已在法国、英国、意大利、委内瑞拉、摩洛哥、以色列等国家的一些水厂采用。国内已有南京、西安、上海等城市采用。它的特点是：采用单层加厚均粒石英砂滤料，深层截污，滤速可达 7～20m/h，一般为 12.5～15m/h；V 形进水槽（兼作反冲洗时原水表面清扫布水槽）和排水槽分设两侧，池子可沿着长度的方向发展，布水均匀；底部采用带柄滤头底板的排水系统，不设砾石支承层；反冲洗采用压缩空气，滤后水和原水等 3 种流体，成为一种独特的气、水反冲洗形式。因此，可用最小的水头损失和电耗，而获得理想的冲洗效果。见图 2-3-6。

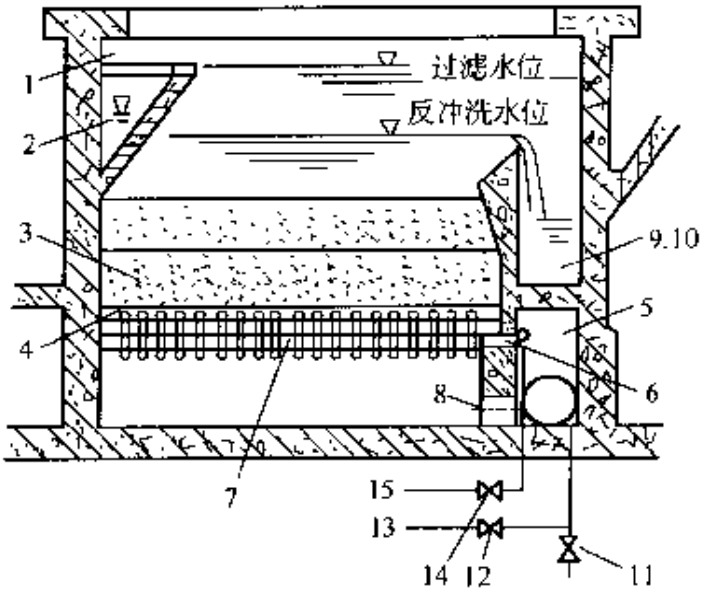


图 2-3-6　单格 V 形滤池

1—原水入口；2　原水进水（或扫洗）V 形槽；3—滤床；4—滤板和带柄滤头；5—反冲气水进入及滤后水收集槽；6—反冲洗空气分配孔；7　空气层；8—反冲洗水分配孔；9 - 冲洗废水排水槽；10—冲洗排水阀；11—滤后水出水阀；12—反冲洗进水阀；13—反冲洗水管；14--反冲进气阀；15—压缩空气管

V 形滤池有单格及双格两种池型。当过滤面积较小时，可由单格矩形池组成；当过滤面积较大时，则由双格组成。单格 V 形滤池在长边的池壁一侧设 V 形进水槽（又作为扫洗水槽），槽下布开孔；而在另一侧设反冲洗排水槽，该槽在过滤时淹没在水下。

双格V形滤池，它在池内设有两个V形水槽和一个中间反冲洗排水槽。在冲洗排水槽下面，设有大截面矩形暗渠。在过滤时用以收集滤后水；在反冲洗时用以分布气冲空气和反冲洗水。气流和水流通过均布于整个滤池长度方向上的方孔，而向滤板下方均匀分配。滤池的进水管、反冲洗进气管和出水管，均与矩形暗渠连通，见图2-3-7。

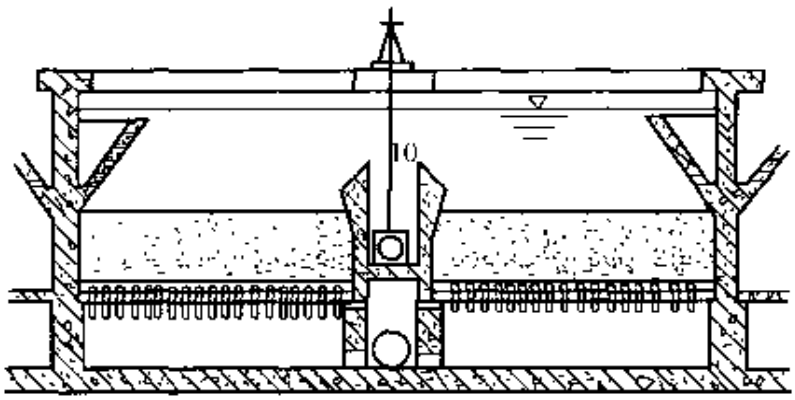


图2-3-7　双格V形滤池

在滤池冲洗排水槽的一端设有出水闸门。各种管路上均设有四个主要阀门：出水阀、反冲洗进水阀、反冲进气阀和冲洗排水阀。这些阀门均为防漏型蝶阀，通过气动活塞控制。

滤池在工作周期内随着滤料层截留水中杂质量的不断增加，滤层对水流的阻力增大，滤速减少，出水量下降，此时滤池就要进行反冲洗。国内外滤池的反冲洗方法有两种，一种是国内通常采用的水反冲洗法，另一种是国外已较多采用的气水反冲洗。

气水反冲洗是用空气冲洗后再用水或空气和水同时冲洗。当空气冲洗时对滤料产生很大的震动，使滤料间反复碰撞摩擦，由于滤料层的激烈搅拌，使滤料间的泥球结构受到破坏，便于冲洗，从而达到反冲洗的目的。

133　各种滤池的适用条件如何？有何优缺点？

常用的几种滤池的适用条件和优缺点如下。

（1）快滤池　快滤池又分普通快滤池和双层滤池两种。适用于

进水浑浊度小于 20mg/L，短期内可以小于 50mg/L。用于大中小型水处理厂，一般单池面积不大于 100m²。

普通快滤池的运行管理方便，但阀件多，渗漏多，需有专设冲洗设备。双层滤池的滤速高，工作周期长，可由普通快滤池改造而成。但滤料选择严格，冲洗操作较严格，且易沉泥。

（2）接触双层滤池　适用于 5000m³/d 以下的小水处理厂，进水浑浊度要求小于 150mg/L。

其优点是可用一次净化原水，处理构筑物少，占地少，基建投资低；但工作周期短，加药管理复杂，冲洗操作较严格。

（3）虹吸滤池　适用于大、中型水处理厂。每格池面积小于 25m²，进水浑浊度要求小于 20mg/L。

其优点是阀件简单，不需专设冲洗设备，可以自动化控制；但需配有抽真空设备，池子深，结构复杂。

（4）无阀滤池　无阀滤池分重力式和压力式两种。重力式无阀滤池单池面积小于 25m²，适用于中、小型水处理厂，进水浑浊度要小于 20mg/L；压力式无阀滤池单池面积小于 5m²，宜用于小型水处理厂，进水浑浊度要求小于 150mg/L。

重力式无阀滤池操作管理十分方便，能自动反冲洗，但检修时清砂不方便；使用压力式无阀滤池可省去二级泵站，但清砂也不方便，工作周期短，冲洗操作控制较严格。

（5）压力滤池　适用于小型水厂，进水浑浊度小于20mg/L。其优点是滤池可用钢制，灵活性大，并可与除盐水处理或软化处理串联使用。也可作为一次净化处理省去二级泵站。缺点是清砂不方便，工作的周期也比较短，用钢材制作时耗钢材较多。

134　过滤池的运行周期缩短应如何处理？

过滤池的运行周期缩短，将会减少过滤池的出力，并可能造成过滤池的水流短路而使水质变坏，致使软化或除盐水用离子交换树脂受到污染。因此，要及时进行检查和处理。首先应检查上道工序澄清池的处理效果是否良好，澄清池的加药量和出水浑浊度控制是

否良好，然后检查过滤池工况是否正常，并应适当加大反冲洗速度进行清洗处理，如反冲洗速度可调至12～15L/(s·m²)。其中，活性炭过滤器的反洗速度可以是12L/(s·m²)；砂过滤器为15L/(s·m²)。为了改善反洗效果，可以在滤池的底部，通入压缩空气进行搅拌擦洗，使沉积于过滤砂中的污泥清洗干净，以提高过滤效果和运行周期。

135 砂滤池出水浑浊度超标是什么原因?

砂滤池出水浑浊度由于设计要求不同，而指标有所不同，一般为1～5mg/L，如出水浑浊度超标应及时找出原因，否则将影响下一道工序的正常运行。超标的主要原因有：

(1) 进水浑浊度严重超标，砂滤池无法承受负荷，使出水浊度超标。要迅速查出澄清池出水浑浊的原因，予以消除；

(2) 滤池长时间没有进行反洗。这时要将反洗强度适当增大，时间可适当延长，有时也可进行二次反洗，清除滤层积泥；

(3) 滤池虽然经过反冲洗，但反洗不彻底，反洗强度不够。此时，应调整反冲洗强度的调节器；或者调整反冲洗流量，加大反洗强度；或者增加反冲洗次数；或是缩短两次反冲洗的间隔时间；

(4) 砂滤池内件损坏，出水偏流、短路，此时应当抢修好砂滤池；

(5) 石英砂过滤层高度不够，过滤的效果差，出水浑浊度高。处理的方法是按设计加足过滤层。在第一次装填料时，要多加3～5cm，因为运行反冲洗时，部分细砂要损失。此外，还要控制好过滤水量不能过大，不得超过设计要求。这样，才能操作控制好砂滤池的出水浑浊度不超标。

136 什么是上向流过滤池?

滤池的过滤水流方向是自下而上，水是先从粗滤料再流向细滤料的过滤池。如图2-3-8。

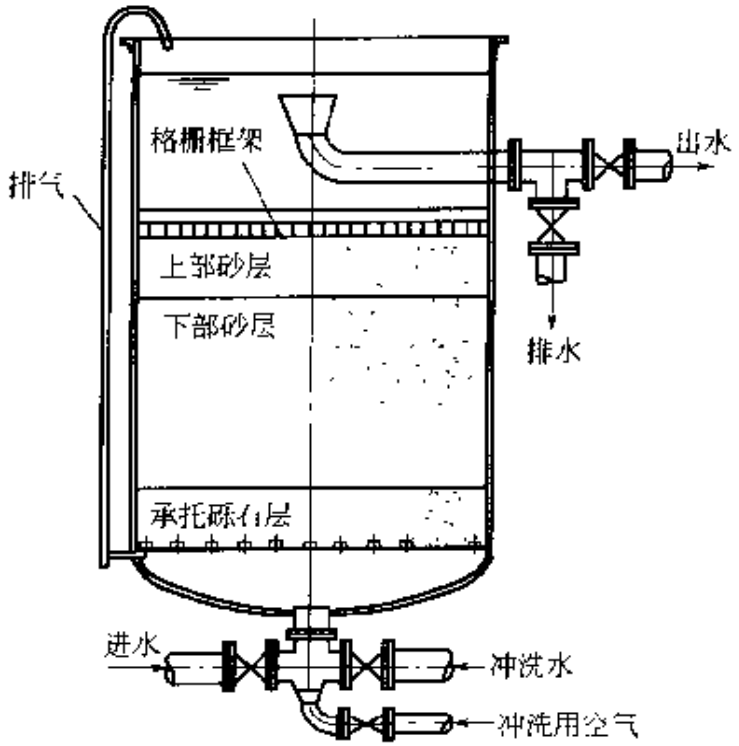


图 2-3-8　上向流滤池的构造

以往快滤池反冲洗时，由于滤层处于流动状态，冲洗后沉降速度小的细滤料位于滤层上部，而沉降速度大的粗滤料位于下部，因此过滤时，水中悬浮物几乎都被上部细滤层所截留，整个滤层不能得到很好的利用，而过滤的阻力也升得很快。上向流过滤池就是改进这种工况的滤池。上向流过滤池原水由下部流入滤池，并向上流动，所以悬浮物不仅在下部进水部的粗滤层中被截留，而且被整个滤层所截留，因此，滤层的利用率高，上过滤的滤层阻力比向下过滤小，截留的悬浮物也多。

但如果上向流滤池的流速过大，则滤层会膨胀起来并开始呈流动状态，这时的滤层便不能去除悬浮物，并且已被截留的悬浮物也会随水流出。为防止出现这种现象，因此要限制滤速，或是上部设立格栅，防止滤层膨胀。

137　什么是平向流过滤池？

平向流过滤池水是由圆筒形滤层的中心流向四周，滤速在中心处最大，流向四周时逐渐减小，在流出处最小。悬浮物经低流速过

滤而除去。平向流过滤池如图 2-3-9 所示。

当滤速大时，悬浮物达到的深度也大。所以在滤速沿滤层逐渐减小的滤池中，悬浮物的截留深度也将增大，从而使整个滤层发挥作用。

大部分悬浮物已被去除的水以低滤速通过四周滤层时，得到最后的净化，因而过滤水质良好。悬浮物的截留深度大和过滤水质好，这是两个互相矛盾的问题，但在平向流滤池中这两个问题都能同时得到解决。

此外，平向流滤池的优点是高度愈大，则过滤面积也愈大，而且过滤面积与其平面面积无关，所以平向流滤池的设置面积小。与此同时，因为反冲洗水量是由滤池平面面积决定的，所以可以节省反冲洗水。

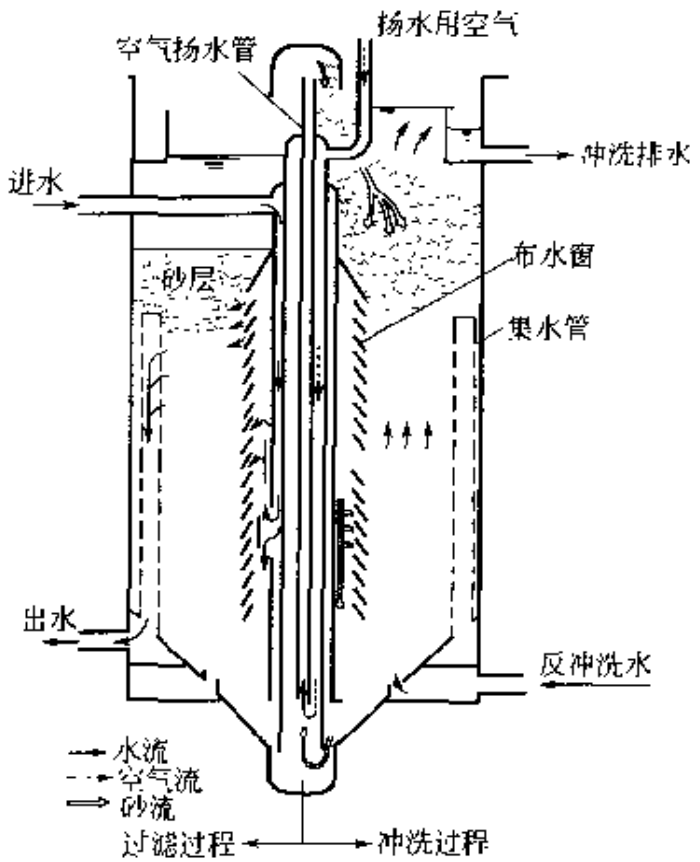


图 2-3-9　平向流滤池的构造

平向流滤池中，在最容易积污的滤层流入处，设空气扬水装置

以保证冲洗效果。

138 什么是移动床过滤池？

移动床过滤池是将过滤操作和冲洗操作分开，使其分别在各自的水槽中连续进行。这就改变了其他滤池把过滤和反冲洗操作都是在一个池体内反复进行的间歇式的工艺，改变了滤层必须具有充分贮留悬浮物的功能。移动床过滤池如图 2-3 10 所示。

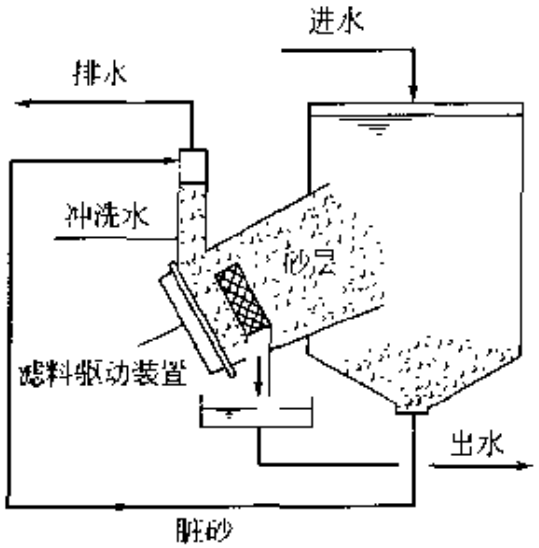


图 2-3-10 移动床滤池

移动床滤池就是将滤料的清洗移至池外，使过滤操作能连续进行。在滤池中，原水通过滤层过滤，经集水装置流出池外。另一方面滤料由滤层上部取出池外，并经过清洗干净后，由滤层下部送入。由下部送入滤料的过程是先用水压推开安装在滤层下部的隔板，并使整个滤层向上移动，然后把隔板退回原位，让出空间。这时已被洗净的滤料流入其中。这种操作在高位水箱的水位作用下可自动进行。上述滤池中，水流方向与滤料运动的方向相反时，可称为逆流式移动床滤池。

139 什么是单流式机械过滤器？如何运行操作？

单流式机械过滤器的结构如图 2-3-11 所示。

单流式过滤器是一种最简单的过滤器，它的进水和出水都只有一路。单流式过滤器的本体是一个圆柱形钢制容器，器内装备有进水装置、排水系统。有时还有进压缩空气的装置。器外设有各种必要的管道和阀门等。

(1) 进水装置可以是漏斗形的或其他形的，它的任务是使进水沿过滤器的截面均匀的分配。

(2) 排水系统是过滤器的一个重要部分，它的作用是：

① 在过滤器下部引出清水时，不让滤料带出；

② 使出水的汇集和反洗水的进入，沿着过滤器的截面均匀分布；

③ 在大阻力排水系统中，它还有调整过滤器水流阻力的作用。

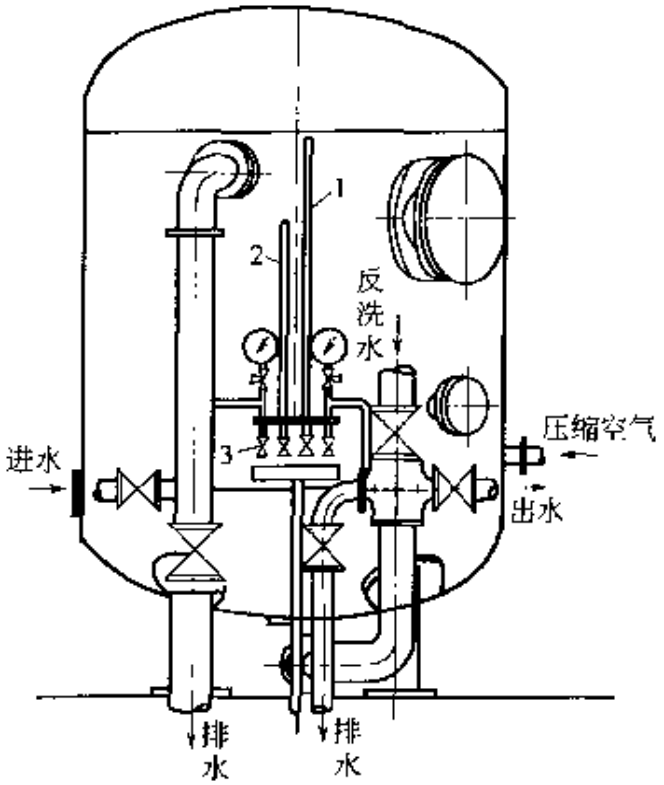


图 2-3-11　单流式过滤器

1—空气管；2—监督管；3—采样阀

排水系统的类型较多，现在常使用的有排水帽式、支管开缝式和支管钻小孔式等。

单流式机械过滤器的运行操作包括反洗、正洗和运行三个步骤。

(1) 反洗　反洗时先关闭出、入口阀门，保持滤层上部水位200～300mm。

开启反洗排水阀门，开启压缩风阀门，向过滤器内送入强度为18～25L/(s·m^2)的压缩风，吹洗3～5min。

压缩风不停，开启反洗入口阀门，以反洗排水中无正常颗粒的滤料为限，控制反洗水流量。在反洗过程中，应经常检查反洗排水中有无正常颗粒的滤砂，以防滤料跑失。

待反洗排水后，停止压缩风的吹洗，继续用水反洗 3～5min。

（2）正洗　正洗时开启正洗排水阀门、入口水阀门，维持正流水流速 10～15m/h。冲洗至出水清净后，即可投入运行。

正洗时，出水应无滤料，否则可能是因为反洗操作不当而造成过滤器下部配水装置损坏。此时应停止正洗、查明原因并处理好后，再恢复正洗。

（3）运行　运行流速为 10～12m/h。运行周期的控制以其水头损失达到容许极限（规定一般应小于 0.05MPa）或按一定运行时间来进行反洗。

140　什么是双流式机械过滤器？如何运行？

单流式过滤器的过滤能力主要是利用其表面的薄膜过滤作用，其滤层中的渗透过滤能力没有能充分发挥。为了充分利用滤层的过滤能力，故设计了双流式过滤器，结构如图 2 3-12 所示。在双流式过滤器中，进水分为两路：一路由上部进，另一路由下部进。经过过滤的出水，都由中部引出。这样，由上部进入的水的过滤和普通单流式的相同，主要起薄膜过滤作用；由下部进入的水，由于先遇到颗粒大的滤料，随后遇到的是颗粒逐渐减小的滤层，所以在这里主要是起渗透过滤作用。这样，滤料的截污能力就可以较完全地发挥出来。

双流式过滤器的内部结构和单流式不同的地方，是中间设有排水系统；滤层较高，在中间排水系统以上的滤层高为 0.6～0.7m，以下为 1.5～1.7m。它所用滤料的有效粒径和不均匀系数均较单流式的大，如用石英砂时，滤料的颗粒粒径为 0.4～1.5mm，平均粒径为 0.8～0.9mm，不均匀系数为 2.5～3。

双流式过滤器的运行情况：开始运行时，上部和下部的进水约各占 50%；运行了一段时间后，在上层由于阻力增加快，其通过水量比下层通过的水量要少。其滤速按出水量计应控制在 10～12m/h。清洗时先用压缩空气吹 5～10min，继之用清水从中间引入，自上部排出，先反洗上部。然后，停止送入压缩空气，由中部和下部同时进水，上部排出，进行整体反洗。此

反洗强度控制在 16～18L/(m² · s)，反洗时间为 10～15min。最后，停止反洗，进行运行清洗，待水质变清时开始过滤送水。

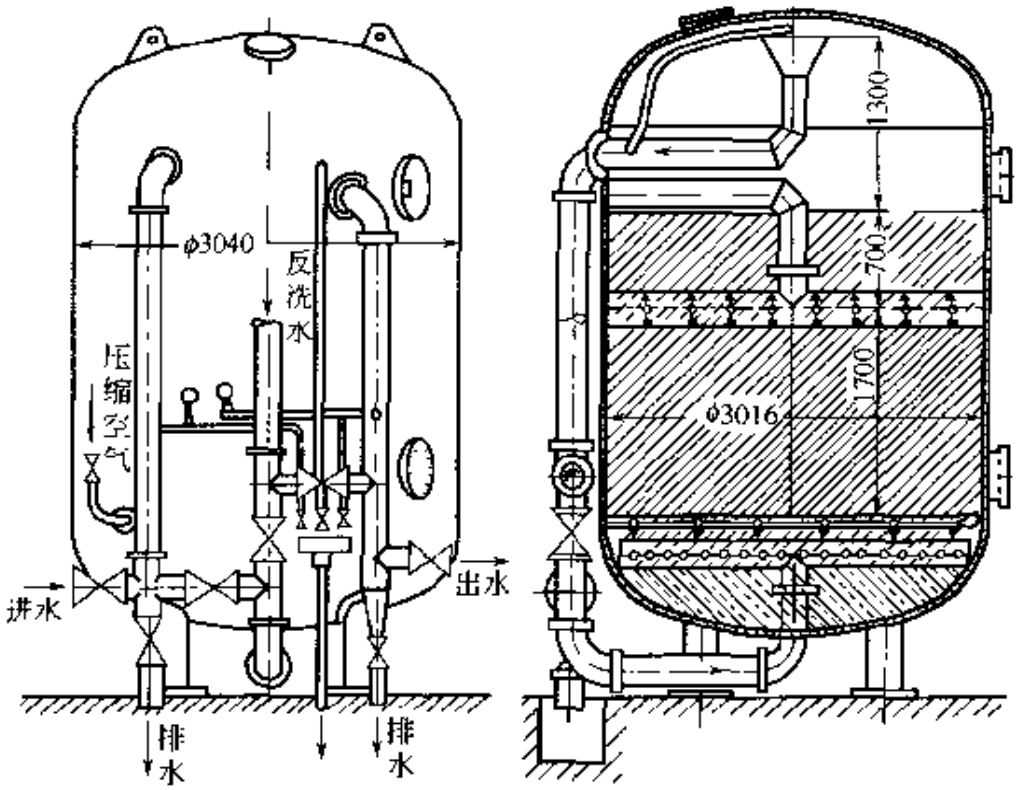


图 2-3-12　双流式过滤器

141　机械过滤器在运行中会出现哪些异常现象？应如何处理？

机械过滤器在运行中出现的异常现象及处理方法见下表。

序号	异常现象	原　因	处理方法
1	过滤器周期性水量减少	(1) 过滤砂与悬浮物结块	(1) 加强反洗及水质澄清
		(2) 反洗强度不够或反洗不彻底	(2) 调整水压力和流量
		(3) 反洗周期过长	(3) 应适当增加反洗次数缩短反洗周期
		(4) 配水装置或排水装置损坏引起偏流	(4) 检查配水装置或排水装置
		(5) 滤层高度太低	(5) 适当增加滤层高度
		(6) 原水水质突然浑浊(如洪水期水中悬浮物急剧增加)	(6) 加强原水水质分析和澄清工作，掌握水质变化规律

续表

序号	异常现象	原　因	处　理　方　法
2	过滤器流量不够	(1) 进水管道或排水系统水头阻力过大 (2) 滤层上部被污泥堵塞或有结块情况	(1) 改变或排除进水管道或排水系统故障 (2) 清除污泥或结块彻底反洗过滤器尽量降低水中悬浮物含量
3	反洗中过滤砂流失	(1) 反洗强度过大 (2) 排水或配水装置损坏导致反洗水在过滤器截面上分布不均	(1) 立即降低反洗强度 (2) 检查，检修排水或配水装置
4	反洗时间很长浑浊度才降低	(1) 反洗水在过滤器截面上分布不均匀或有死角 (2) 滤层太脏	(1) 检查、检修配水或排水装置，消灭死角 (2) 适当增加反洗次数和反洗强度
5	过滤出水浑浊度达不到要求	(1) 滤层表面被污泥严重污染 (2) 滤层高度不够 (3) 过滤速度太快	(1) 加强和改进水的混凝，澄清工作，增大反洗强度 (2) 增加滤层高度 (3) 调整过滤水的速度
6	运行时出水中有滤砂	排水装置损坏	卸出过滤砂，检修排水装置

142　均粒石英砂滤料滤池有些什么特点？

均粒石英砂滤料滤池是国内外目前使用的新型的滤池。均粒石英砂滤料的颗粒的粒径比较均匀，过滤时能较好地克服表面堵塞，能充分发挥整个滤床的截污能力，具有过滤周期长，水头损失小，反冲洗耗水率低等特点，能在较高的滤速下，提供优质的过滤水。平均滤速在 15～20m/h 左右，过滤周期宜控制在 50h 左右。均粒石英砂滤料的反冲洗，对于粒径较小的，除采用反冲洗方式外，还可采用气、水反冲洗方式。气、水反冲洗时，作用滤料上的力，主要是空气泡与滤料间的摩擦力、颗粒间碰撞力口及水的剪切力等相互作用，以增加反冲洗效果。方式上可以气、水同时，或先气后水进行反冲。

143　什么是生物过滤池？

生物过滤池是利用微生物摄取水中的溶解或悬浮状态的营养物质，使水中胶体及溶解状态的有机物被生物膜所吸附，并为微生物所分解最终成为微生物代谢产物 CO_2 和 H_2O 而除去。因此生物过

滤池大都用于污水处理领域，微生物被固定在滤料的固体表面上。微生物在充氧的情况下不断繁殖而形成生物膜。生物滤池的构造有圆形和方形的。圆形大都使用旋转布水器，如图 2-3-13；方形一般使用固定喷嘴式布水器。由于滤池净化水时，是通过滤料表面微生物的作用，在水流的过程中得到净化，因此滤池以深度大者为好，但是，滤料层的深度大，会使水头损失也增大，所以深度一般以1.5～2.0m为限。布水的方式有旋转式、移动式、固定式等。其

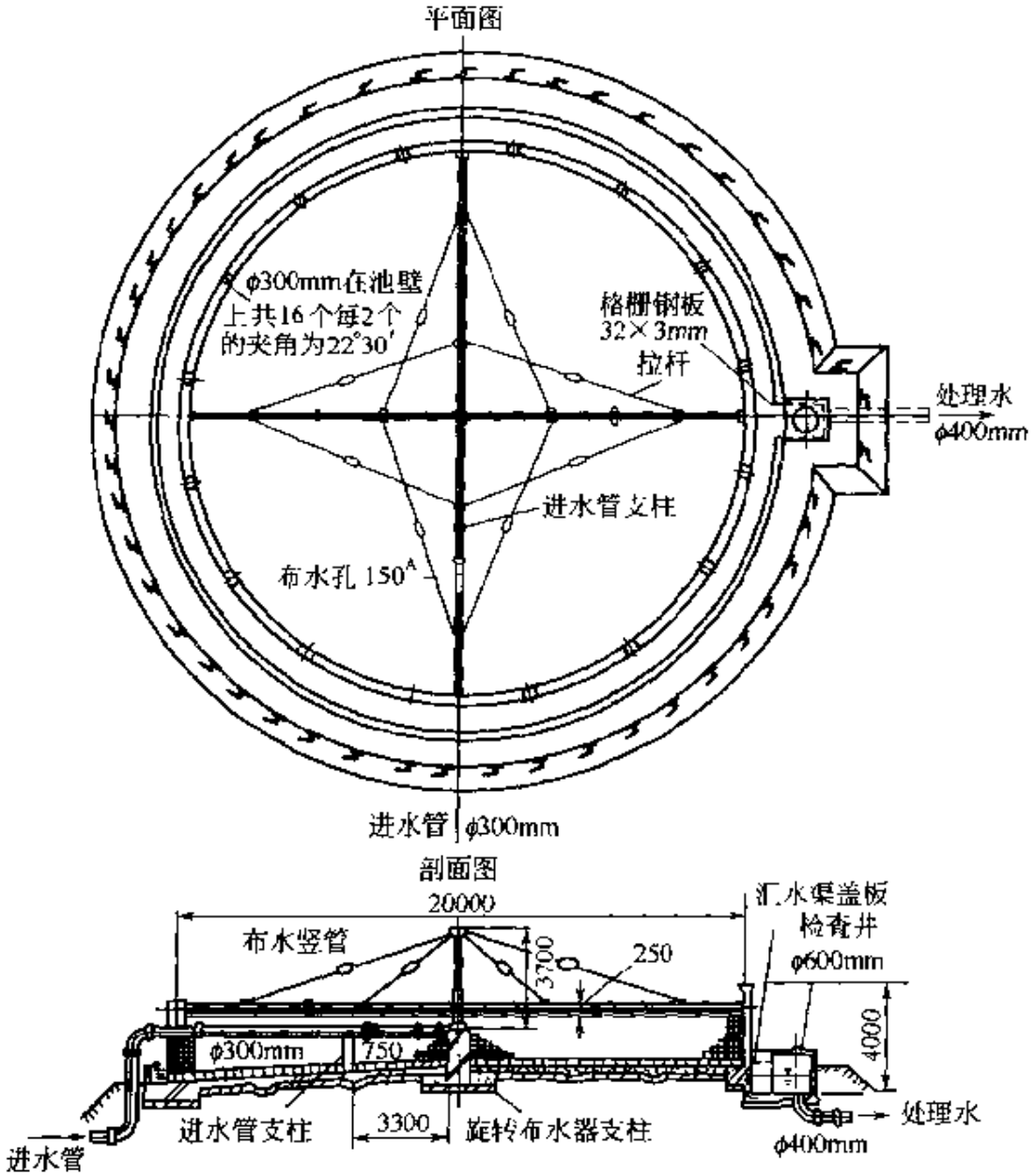


图 2-3-13　生物滤池的典型构造（圆形生物滤池）

中以旋转式消耗动力最小，布水也最均匀。

144 什么是影响滤池运行的主要因素？

影响滤池运行的主要因素有滤速、反洗和水流的均匀性等。

（1）滤速 滤池的滤速不能过于慢，因为滤速过慢，单位过滤面积的处理水量就小。为了达到一定的出水量，势必要增大过滤面积，也就要增加投资。但如果滤速过快，不仅增加了水头损失，过滤周期也会缩短，并会使出水的质和量下降。滤速一般选择 10～12m/h。如图 2-3-14 所示：

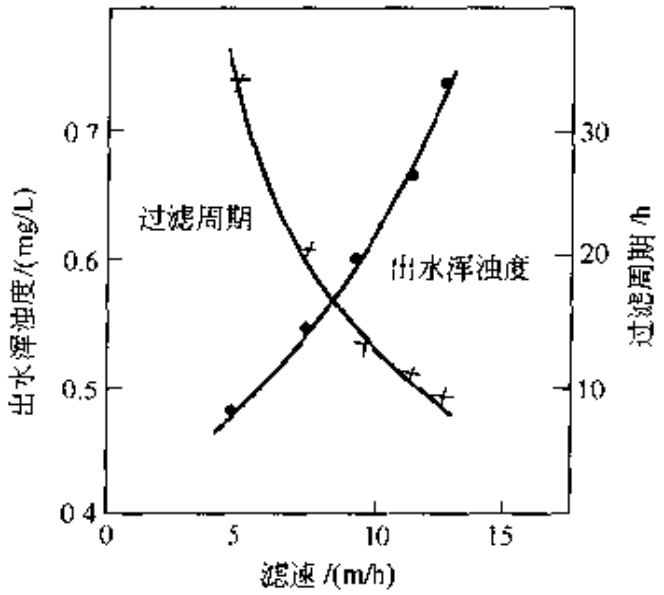


图 2-3-14 滤速对出水浑浊度、过滤周期的影响

（2）反洗 反洗是用以除去滤出的泥渣，以恢复滤料的过滤能力。为了把泥渣冲洗干净，必须要有一定的反洗速度和时间。这与滤料大小及相对密度、膨胀率及水温都有关系。滤料用石英砂的反洗强度为 15L/(m^2 · s)；而用相对密度小的无烟煤时为 10～12 L/(m^2 · s)。反洗时，滤层的膨胀率为 25%～50%，反洗时间 5～6min。只有反洗效果好，才能使滤池的运行良好。

（3）水流的均匀性 无论是运行或反洗时，都要求各截面的水流分布均匀。要使水流均匀，主要是排水系统要良好。只有水流的均匀性，才能使过滤效果良好。

145 什么叫滤层的截污能力？与哪些因素有关？

滤层的截污能力是指单位体积滤层所能除去悬浮物的公斤数。

截污能力又称泥渣容量，与下列因素有关：

（1）滤料粒径　滤料粒径大，形成的滤孔通道体积大，截污能力也大。同时滤料粒径大，悬浮物也易于渗透到滤层深处，使截污能力相应增大。但如果滤料粒径过大，水中的细小悬浮物颗粒易产生穿透，从而影响出水浑浊度。

（2）处理方式　过滤水中的杂质因处理方式不同，其被滤料截留的能力也不同。据测试，当滤料粒径为 0.5～1.0mm 时，未经处理的水，其截污能力为 0.5～1.0kg/m³；经石灰处理的水，其截污能力为 1.5～2.0kg/m³；对于经混凝处理的水，其截污能力为 2.5～3.0kg/m³。

146 对滤池的滤料有何要求？

滤池常用的滤料有石英砂和无烟煤以及陶土粒、磁铁矿、塑料珠等。不管使用哪种滤料，一般都要满足如下要求：

（1）滤料要有足够的机械强度，不致冲洗时引起磨损和破碎，磨损率在 3%以下；

（2）滤料要有足够的化学稳定性，不能溶于水，否则要影响过滤水质。滤料也不能向水中释放出其他有害物质；

（3）滤料要价格便宜，货源充足，最好能就地取材；

（4）滤料要有一定的级配和适当的孔隙率和粒度；

（5）滤料的形状以球形或基本圆球形为好，具有最大的表面积，但其表面以粗糙为好；

（6）滤料如果是无烟煤，则要求在酸、碱中均为稳定；石英砂滤料要求耐酸，在碱溶液中有极微量的溶解，可以进行如下测试：石英砂分别在盐酸（含量 400mg/L）、NaOH（含量 400mg/L）、NaCl（含量 500mg/L）浸泡 24h，溶液中全固形物增加不超过 20mg/L，SiO_2 的增量不得超过 10mg/L。如用于高压电厂的水处理，SiO_2 增量不超过 2mg/L。

滤料在一定的冲洗强度下，由于粒度大小和相对密度不同，而松密度也各不相同，在冲洗强度大时，滤料的松密度减小，具体见下表：

滤料的松密度[32]

滤料	相对密度	粒度/mm	在下列冲洗强度[L/(m²·s)]下的松密度/(g/cm³)										
			5	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
石榴石	4.13	0.297～0.250	2.18	1.9	1.84	1.78	1.71	1.66	1.60	1.47	1.37	—	—
石英砂	2.65	0.84～0.707	1.97	1.85	1.81	1.78	1.75	1.71	1.68	1.60	1.54	1.47	1.42
		0.595～0.500	1.87	1.74	1.69	1.65	1.61	1.58	1.56	1.50	1.44	—	—
		0.500～0.420	1.82	1.68	1.64	1.60	1.56	1.53	1.50	1.41	1.35	1.27	1.23
		0.420～0.354	1.73	1.61	1.56	1.54	1.48	1.45	1.41	1.33	1.26	—	—
无烟煤	1.5～1.7	2.0～1.68		1.31	1.31	1.30	1.29	1.28	1.27	1.24	1.21	1.19	1.17
		1.41～1.19		1.29	1.29	1.27	1.26	1.24	1.23	1.20	1.16	1.14	1.12
		1.00～0.841		1.25	1.24	1.23	1.21	1.19	1.18	1.15	1.12	1.09	1.07
		0.707～0.595		1.21	1.20	1.18	1.16	1.15	1.13	1.09	0.60		

147 什么叫滤料的不均匀系数？其大小对过滤有什么影响？

滤料的不均匀系数是指80%（按重量计）能通过筛孔孔径（d_{80}）的滤料、与10%滤料能通过的筛孔孔径d_{10}之比。滤料不均匀系数用K_{80}表示，即：$K_{80}=d_{80}/d_{10}$。

滤料颗粒如果不均匀，有两大影响：一是使反洗操作困难。因为反洗强度太大，会带出细小的滤料，造成滤料的流失；而反洗强度太小又不能松动下部大块滤砂，长期下去易造成滤层“结块”。二是会使过滤情况恶化。

因为滤料颗粒大小不均匀，就意味着有细小滤料颗粒。这些细小颗粒会集中在滤层表面，结果会使过滤下来的污物堆积在滤层表面，使水头损失增加比较快，过滤周期变短。

慢滤池或快滤池用砂选用的不均匀系数有所区别。不均匀系数一般要求<2.0，在1.8～2.0比较合适。

148　什么是双层滤料？有什么特点？

双层滤料一般由无烟煤和石英砂组成。无烟煤相对密度为1.5～1.8；石英砂相对密度为2.65左右。无烟煤比石英砂轻，所以它的粒径可以选得大一些。当滤池反洗时，颗粒大而相对密度小的无烟煤在上层，颗粒小而相对密度大的石英砂在下层，于是滤料的颗粒和孔隙呈“上大下小”的状态。

双层滤料与单层相比，其截污能力较大，防止细小悬浮物的穿透；水头损失增加得较慢；滤速也可以提高。

149　什么是三层滤料滤池？

三层滤料滤池为“反粒度”滤床。其上层为大粒径的轻质滤料；中层一般为中粒径的石英砂；下层则为小粒径的重质滤料。上层粗滤料的孔隙较大，截泥容量也大，能够截留去除水中的大部分杂质。下层细滤料的孔隙较小，比表面积大，能够截留去除水中细小的少量剩余杂质，起到精滤作用，从而保证了出水水质。这些滤床的整个深度的级配充分发挥了每层滤料的过滤作用，因此，它具有滤后水浑浊度低、过滤周期长、可作高速过滤等特点。图2-3-15表示三层滤料滤床粒径关系，图中虚线表示“反粒度”结构。

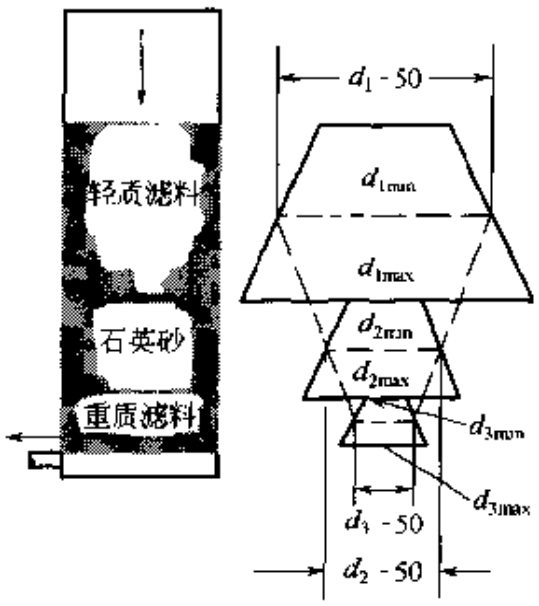


图2-3-15　无混杂三层滤料滤床粒径分布

三层滤料可分为3种类型：

（1）轻质滤料（无烟煤）-石英砂-重质滤料（石榴石、磁铁矿、钛铁矿等）。三层滤料滤床粒径分布见图2-3-15。

（2）聚氯乙烯-无烟煤-石英砂滤料。瑞典使用过此种滤料，上层聚氯乙烯，粒径为5mm，中

层无烟煤，粒径为 2～3mm，下层石英砂，粒径为 1mm，各层厚度均匀 0.6m。

（3）轻质无烟煤-重质无烟煤-石英砂滤料。

一般常用的三层滤料的级配如下。

滤垫层名称	材料名称	相对密度	粒径/mm	层厚/mm
滤层	无烟煤	1.58	0.8～2.0	600
	石英砂	2.64	0.5～1.0	230
	磁铁矿	4.74	0.25～0.50	70
垫层	磁铁矿	4.76	0.5～1.0	50
	磁铁矿	4.76	1.0～2.0	50
	磁铁矿	4.76	2.0～4.0	70
	磁铁矿	4.76	4.0～8.0	70
	石英石	2.76	8.0～16	100

滤池的滤速为 20～50m/h；冲洗强度为 15～20L/(m^2 · s)；冲洗时间 7min。三层滤料过滤池有防止悬浮物穿透的能力，还可以提高滤速和延长过滤周期的特点。

150　使用三层滤池应注意些什么？

（1）滤料要经过严格筛选，要符合设计的级配要求，要保证滤层间不混杂，对不同滤料之间的级配要合理；

（2）安装或大修时需要按照要求，划线分层，均匀铺料。尤其是密度大的滤料，是很难利用反冲洗改善其铺料缺陷的，所以安装时更要严格；

（3）反冲洗装置需有很好的配水均匀性，防止偏流冲击，造成严重乱层；

（4）反冲洗强度要严格控制，不能超过上层滤料所允许的冲洗强度，但又要保证下层滤料有足够的反冲洗时间以便冲洗干净。

对于滤料面层积泥，国内外常采用表面清洗或是空气擦洗的方法，但对三层滤池要谨慎使用空气擦洗方法，以免乱层。同时要注

意防止上层轻质无烟煤滤料的流失。

151　陶粒滤料有什么特点？

陶粒滤料是一种新型净水材料。它是将具有膨胀性能的页岩或黏土粉碎均化，添加活化剂和水搅拌成球形，然后入窑高温烧结成陶粒再将其破碎筛分、水洗烘干而制成。这种陶粒滤料具有良好的物理、化学和水力性能，比表面积大，孔隙率高，吸附能力强，截污能力大。因此，陶粒滤料滤池具有过滤水质好、水头损失小、产水量高、工作周期长以及反冲洗水量小等特点。

净水用陶粒滤料的粒径一般为 0.5～2.5mm，滤料表面多微孔、粗糙、有棱角，呈颗粒状，表面色泽大多为铅灰色，少部分呈褐色。松密度一般为 500～1000kg/m^3。相对密度为 2.4～2.6。孔隙率约 55%～78%。酸（HCl）可溶率＜3%；碱（NaOH）可溶率＜2%。陶粒滤料的比表面积是石英砂的 6～8 倍；孔隙率是 1.7～2.2 倍；吸附比表面积大 2 倍以上。陶粒滤料的滤速比石英砂滤料有较大的提高。因此陶粒滤料的产水率高、冲洗强度低、冲洗次数少，总冲洗水量比石英砂低 3.4～2.4 倍。

152　什么是纤维球滤料？

纤维球滤料是近年来过滤技术的新材料，是过去砂子、陶粒、泡沫塑料等滤料的进一步发展。用化学纤维丝制成的纤维球滤料与传统的填料不同，是可以压缩的软性滤料，空隙率大，占滤料层的 93%～95%。在过滤过程中，由于水流经过滤层产生阻力，引起滤料层压缩，其空隙是沿着水流的方向逐渐变小，因而过滤水质好。滤速可达 20～85m/h，比砂滤料具有截留量大、滤速高、水头损失小、工作周期长等优点。纤维球滤料的再生，需用气、水反冲，再反复使用。目前，纤维球滤料国内外都在进一步开发研制中。日本尤尼奇卡公司用聚酯纤维制作的纤维球滤料的物理性能如下：形状为球状或扁平椭圆体；纤维径：20～50μm；纤维长：15～20mm；滤球径 10～30mm；密度为 1.38g/cm^3；充填密度：50kg/m^3；空隙率：96%；比表面积 3000m^2/(m^4 滤料)；滤速达 20～85m/h；实际截泥量：6kg/m^3 滤料。用气水反冲，冲洗水量为过

滤水量的1%～2%。

153 什么是微滤机？

微滤机是一个鼓状的金属框架，上面覆盖有不锈钢的支撑网与工作网。如图2 3-16。

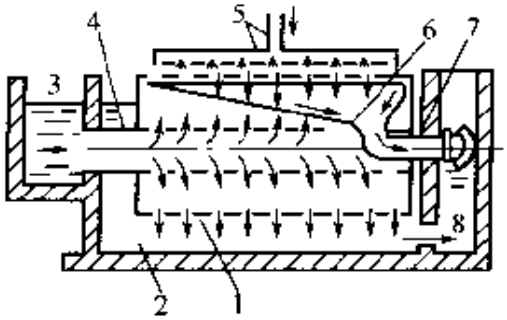


图2-3-16 微滤机示意图

微滤机成功地应用于地面水的处理，尤其是去除水库水中的浮游生物。

旋转鼓筒1置于池2中，其1/3的直径露出水面。水由水槽3经孔管4（同时作为转筒的轴）进入，从鼓筒里向外过滤，过滤后的水沿槽8引出。鼓筒上方有滤网的冲洗设备5，鼓筒内排水槽6收集冲洗水沿管7（作为转筒的支撑）排走。

微滤机有不同的规格，鼓筒的直径由0.3～3.0m，长度与直径相等，生产能力为250～36000m^3/d。不锈钢丝网的规格有700目/in^2×100目/in^2、500目/in^2×100目/in^2及400目/in^2×100目/in^2。约相当于滤网孔径35～60μm。过滤强度可取10～25L/(m^2·s)，冲洗滤网的水量为过滤水量的1%～3%。微滤机运行管理中主要的矛盾是滤网冲洗是否干净的问题。

微滤机具有占地面积小，生产能力大、操作管理方便等优点，它可用于生活饮用水水厂原水的预处理、工业用水的处理、生活用水的预处理与最后处理以及工业废水中有用物质的回收等。

154 微过滤与常规过滤有些什么区别？

微过滤是一种精密过滤技术。它的孔径范围一般为0.05～10μm，介于常规过滤和超滤之间，是属于以压力为驱动力达到分离和浓缩的目的，无相态的变化和界面质量的转移，与常规过滤有所区别。常规过滤一般分深层过滤和筛网状过滤，它所用的介质，如纸、石棉、玻璃纤维、陶瓷、布、毡等，都是一些孔形极不整齐的多孔体，孔径分布范围较广，无法标明它的孔径大小，过滤时粒子是靠陷入介质内部曲折的通道而被阻留了。阻留

率则随压力的增加而下降，介质厚，对颗粒的容纳量大，用于一般澄清过滤。

微过滤所用的过滤介质具有类似筛网状的结构，是由天然或合成高分子材料所形成。它具有形态较整齐的多孔结构。孔径分布较均一。过滤时近似过筛的机理，使所有直径大的粒子全部拦截在滤膜表面上。压力的波动不会影响它的过滤效果。由于过滤只限于表面，因此便于观察、分析和研究截留物。膜过滤的介质薄，颗粒容纳量小。因此在使用时宜设置预过滤装置。

155　什么是微孔膜过滤技术？

用特种纤维素或高分子聚合物及无机材料制成的微孔滤膜，利用其均一孔径，来截留水中的微粒、细菌等，使其不能通过滤膜而被去除。这种微孔膜过滤技术又称精密过滤技术，能够过滤微米级（μm）或纳米级（nm）的微粒和细菌。常用于电子工业、半导体、大规模集成电路生产中使用的高纯水等的进一步过滤。微孔膜的规格目前有十多种，孔径从 14μm 至 0.025μm，膜厚 120～150μm，膜的种类有：混合纤维素酯微孔滤膜；硝酸纤维素滤膜；聚偏氟乙烯滤膜；醋酸纤维素滤膜；再生纤维素滤膜；聚酰胺滤膜；聚四氟乙烯滤膜以及聚氯乙烯滤膜等。

156　微孔过滤的机理和特点是什么？

微孔过滤（MF）是利用微孔膜（孔径范围一般为 0.05～10μm）使水中的微粒得到过滤与分离。微孔膜的微孔具有比较整齐均匀的网状结构，通常结构形态有三种类型如图 2-3-17。

① 通孔型　例如核孔膜，它是以聚碳酸酯为基材，膜孔呈圆筒状垂直贯通于膜面，孔径异常均匀［图 2-3-17(a)］。

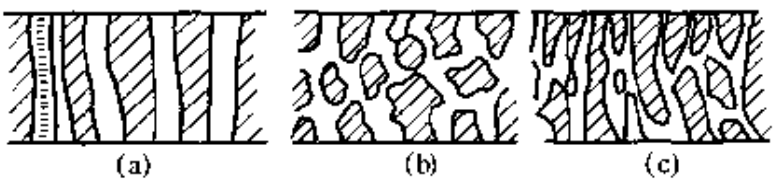


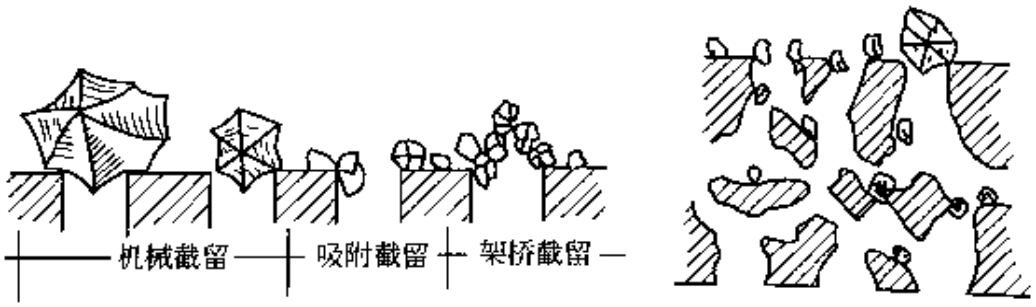
图 2-3-17　几种有代表性的膜断面结构

② 网络型　这种膜的微观结构基本上是对称的［图 2-3-17(b)］。

③ 非对称型　其中有海绵型与指孔型两种，都可以认为是上列两种结构的不同型式的复合［图 2-3-17(c)］。

非对称型微孔滤膜是日常应用比较多的膜品种之一。

微孔过滤就是利用膜的结构筛网进行过滤，在静压差的作用下，小于膜孔的粒子通过过滤膜，大于膜孔的粒子则被截留于膜



(a) 在膜的表面层的截留　　(b) 在膜内部的网络中截留

图 2-3 18　微孔滤膜的各种截留作用

上，从而使得颗粒大小不同的组分得以分离。微孔滤膜的截留机理大体为以下几种情况，如图 2-3-18。

① 机械截留　指膜可以截留比它孔径大或与孔径相当的微粒等杂质，即筛分作用。

② 物理作用或吸附截留　包括吸附和电性质等各种因素的影响。

③ 架桥截留　从电镜观察中可以见到，在孔的入口处，微粒因架桥作用同样可以被截留。

④ 网络型膜的网络内部截留作用　微粒并非被截留在膜的表面，而是在膜的内部。

如上所述，对滤膜的截留作用来说，机械作用固然相当重要，但微粒等杂质与孔壁之间的相互作用有时比孔径大小显得突出。

微孔滤膜的主要特点是：

① 孔径均一　微孔滤膜的孔径十分均匀，例如平均为 0.45μm 的滤膜，其孔径变化范围仅在 0.45μm±0.02μm。

② 高孔隙率　微孔滤膜的表面上有无数微孔，约为 $10^7 \sim 10^{11}$

个/cm²，孔隙率一般高达 70%～80%左右，通常其通量比具有同等截留能力的滤纸至少快 40 倍。

③ 滤材薄　大部分微孔滤膜的厚度都是 100～150μm 左右，较一般过滤介质为薄。当过滤一些高价液体或少量贵重液体时，被膜所占有的液体的损失量少。其次，运输时单位面积的质量轻（5mg/cm²）。另外，贮存时少占空间也是它的优点。

④ 驱动压力低　由于空隙率高、滤材薄，因而流动阻力小，一般只需较低的压力（约 207kPa）即可。

157　什么是超过滤技术？

超过滤是一种薄膜分离技术。就是在一定的压力下（压力为 0.07～0.7MPa，最高不超过 1.05MPa），水在膜面上流动，水与溶解盐类和其他电解质是微小的颗粒，能够渗透超滤膜，而相对分子质量大的颗粒和胶体物质就被超滤膜所阻挡，从而使水中的部分微粒得到分离的技术。超滤膜的孔径是数十至几百埃（Å）、介于反渗透与微孔膜之间。超滤膜的孔径是由一定相对分子质量的物质进行截留试验测定的，并以相对分子质量的数值来表示的。

在水处理中，应用超滤膜来除去水中的悬浮物质和胶体物质。在医药工业上超滤膜的应用也十分广泛。

超过滤膜受到污染或结垢时，一般采用双氧水或次氯酸钠溶液来清洗。不能通过反洗来清洗膜面。超过滤最高运行温度为 45℃，pH＝1.5～13.0。超过滤是去除水中有机物质的一项措施，也可以去除微量胶体物、生物体以及树脂碎末等。超过滤常置于除盐系统之后，或置于反渗透装置之前来保护反渗透膜。

超滤膜组件中所用的膜材料一般有：二醋酸纤维（CA），三醋酸纤维（CTA），氰乙基醋酸纤维（CN-CA），聚砜（PS），磺化聚砜（SPS），聚砜酰胺（PSA），还有酚酞侧基聚芳砜（PDC），聚偏氟乙烯（PVDF），聚丙烯腈（PAN），聚酰亚胺（PI），甲基丙烯酸甲酯-丙烯腈共聚物（MMA-AN）及纤维素等。其中以醋酸纤维素（CA）、聚砜（PS）、聚丙烯腈（PAN）、聚醚砜（POS）等已广为应用。此外，还有动态形成的超滤膜。

158 超过滤的工作原理及其特点是什么？

超过滤的工作原理如图 2-3-19。

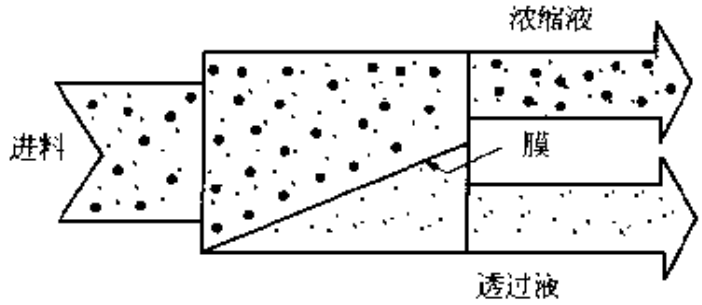


图 2-3-19 超过滤的工作原理示意

进料液在一定压力作用下，水和小分子溶质透过膜成为透过液，而大分子溶质被膜截留为浓缩液。超滤过程主要有三种情况：

① 被吸附在过滤膜的表面上和孔中（基本吸附）；

② 被保留在孔内或者从那里被排出（堵塞）；

③ 机械地被截留在过滤膜的表面上（筛分）。

超过滤的特点：一是它的工作范围十分广泛，在水处理中分离细菌、大肠杆菌、热源、病毒、胶体微粒、大分子有机物质等，还可以用于特殊溶液的分离；二是超过滤可以在常温下进行，因此对热敏感性物质如药品、蛋白质制剂、果汁、酶制品等的分离、浓缩、精制等，不会影响产品质量；三是超过滤过程不发生相变，因此能耗低；四是超滤过程是压力作驱动力，故装置结构简单、操作方便、维修容易。因此，超过滤发展迅速，在过去的 10 年间，全世界超滤膜的生产平均年增长率在 12%左右。

159 活性炭在水处理中有何作用？

活性炭被广泛应用于生活用水及食品工业、化工、电力等工业用水的净化、脱氯、除油和去臭等。一般在除盐水处理过程中，于阳离子交换器的前面（少数的也有设在后面的）设置活性炭过滤器。由于活性炭的比表面积很大，其表面又布满了平均直径为20～30 埃（Å）的微孔，因此，活性炭具有很高的吸附能力。此外，活性炭的表面有大量的羟基和羧基等官能团，可以对各种性质的有

机物质进行化学吸附、以及静电引力作用，因此，活性炭还能去除水中对于阴离子交换剂有害的腐殖酸、富维酸、本质素磺酸等有机物质，还可以去除像游离余氯一类对阳离子交换剂有害的物质，从而提高了除盐水处理能力。通常，能够去除 63%～86%胶体物质；50%左右的铁；以及 47%～60%的有机物质。

160　活性炭过滤原理是什么？

活性炭对水中杂质物的去除作用，是基于活性炭的活性表面和不饱和化学键。

由于活性炭的表面积很大（500～1500m^2/g）。加之表面又布满了平均直径为 2～3nm 的微孔，所以活性炭具有很高的吸附能力。

同时，由于活性炭表面上的碳原子在能量上是不等值的，这些原子含有不饱和键，因此具有与外来分子或基团发生化学作用的趋势，对某些有机物有较强的吸附力。

研究证明，活性炭对氯的吸附，不完全是其表面对氯的物理吸附作用，而是由于活性炭表面起了催化作用，促使游离氯的水解，和产生新生态氧的过程加速。其反应式如下：

$$Cl_2 + H_2O \rightleftharpoons HCl + HClO$$

$$HClO \xrightarrow{\text{活性炭}} HCl + [O]$$

（新生态氧）

这里产生的［O］可以和活性炭中的碳或其他易氧化组分相互反应而得以去除：

$$C + 2[O] \longrightarrow CO_2\uparrow$$

161　活性炭过滤器有什么作用？运行时要注意些什么？

活性炭过滤器有两个作用：

（1）利用活性炭的活性表面除去水中的游离氯，以避免化学水处理系统中的离子交换树脂，特别是阳离子交换树脂受到游离氯的氧化作用。

（2）除去水中的有机物、如腐殖酸等，以减轻有机物对强碱性

阴离子交换树脂的污染。

据统计，通过活性炭过滤器，可以除去水中60%～80%的胶体物质；50%左右的铁和50%～60%的有机物等。

活性炭过滤器在实际运行中，主要考虑入床水浑浊度，反洗周期，反洗强度等关系。

(1) 入床水浑浊度。入床水浑浊度高，会带给活性炭滤层过多的杂质、这些杂质被截留在活性炭滤层中，并堵塞滤池间隙及活性炭表面，阻碍其吸附效果的发挥。长期运行下去，截留物就停留在活性炭滤层间，形成冲不掉的泥膜，造成活性炭老化失效。

所以进入活性炭过滤器的水，最好把浑浊度控制在5mg/L以下，以保证其正常的运行。

(2) 反洗周期。反洗周期的长短是关系到滤池效果好坏的主要因素。反洗周期过短，浪费反洗水；反洗周期过长则影响活性炭吸附效果：

一般讲，当入床水浑浊度在5mg/L以下时，应4～5天反洗一次。

(3) 反洗强度。活性炭过滤器在反洗中，滤层膨胀率对滤层冲洗是否彻底，影响较大。滤层膨胀率过小，下层的活性炭悬浮不起来，其表面冲洗不干净；当膨胀率过大，容易跑“炭”。

在运行中一般控制其膨胀率为40%～50%。

(4) 反洗时间。一般当滤层膨胀率为40%～50%，反洗强度为13～15L/(m^2 · s)时，活性炭过滤器的反洗时间为8～10min。

162 水处理用活性炭吸附装置有哪些形式？

水处理用活性炭吸附装置主要有固定床、移动床和流动床三种形式。

(1) 固定床 固定床活性炭处理装置的构造见图2 3-20。

可以一个塔或几个塔并联或是串联，操作可间歇或切换使用。为防止装置滤层的阻塞，要定期反冲洗，在活性炭上部设置表面冲洗设备。

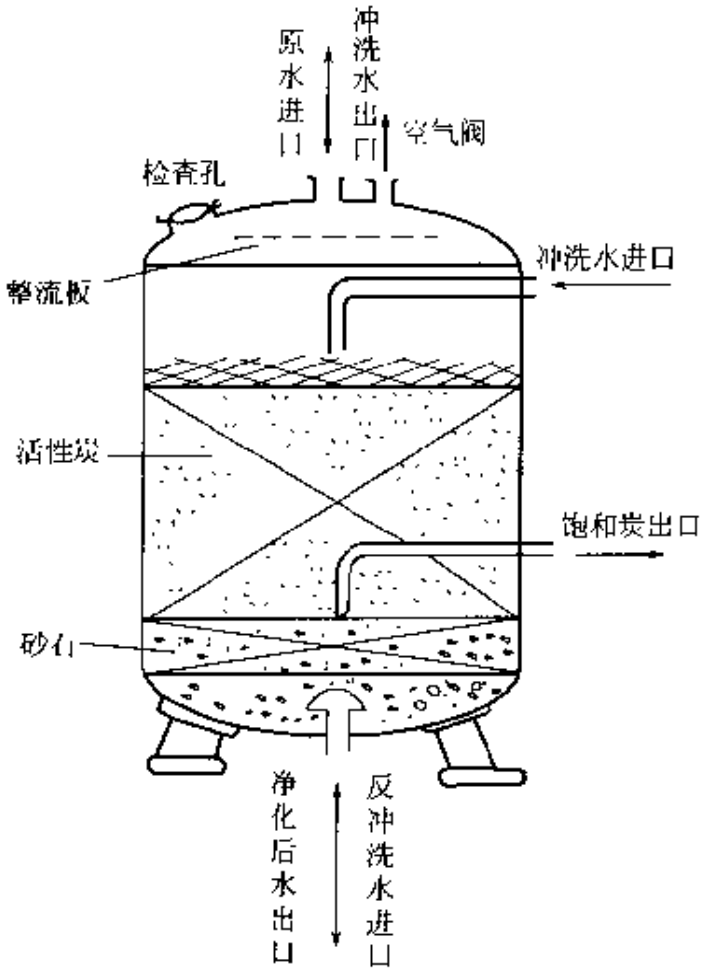


图 2-3-20　固定床吸附塔

(2) 移动床　移动床活性炭吸附塔的构造见图 2 3-21。

固液两相吸附时，一般吸附速度较慢，采用固定床一般要有较高的活性炭层，即吸附带较长，而在移动床吸附塔内，吸附已经饱和的活性炭间歇地从塔底部取出，每天 1～2 次，或每星期 --次。取出的饱和炭量约为吸附塔内总炭量的 5%～10%。所要处理的水自塔底向上流动，从塔顶部出水管排出，因此可以充分利用活性炭的吸附容量，移动床吸附塔的水头损失较小，由于水从塔底进入，水中夹带的悬浮物（给水处理悬浮物应小于 1mg/L），随着饱和炭的间歇卸出，不需反冲洗设备，吸附塔内的炭层不能上下混合，要自上而下地有次序地移动。当卸出饱和炭后，再从塔顶加入等量新炭或再生炭。

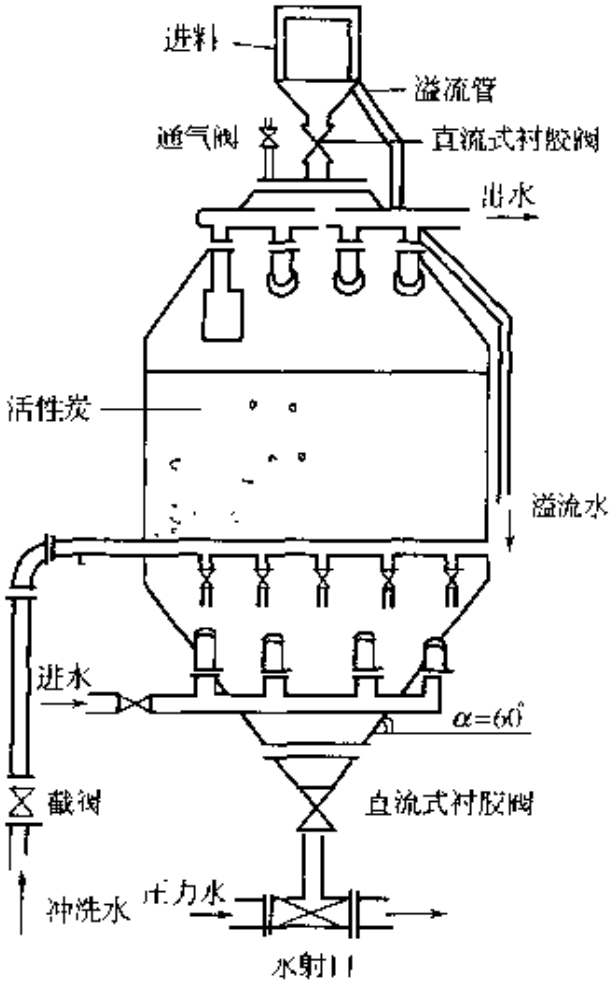


图 2-3-21　移动床吸附塔

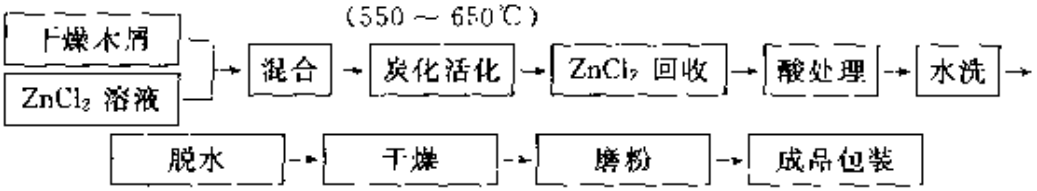
（3）流化床　流化床目前使用较少，由于流化床内活性炭粒径较小，在塔内上层的活性炭与从塔底进入的水充分搅动，使炭与水接触的表面积增大，因此可以用少量的炭处理较多的水，不需反冲洗，预处理要求低，可以连续运转。充填的活性炭的粒度分布决定静止层及流化层高度，另外运行操作要求较高。

163　水处理用活性炭是如何制造的？

活性炭的制造是将原料加热脱水、炭化及活化后得到多孔性的活性炭。在制造过程中以活化过程最为重要，目前活性炭制造工艺中有药品活化法和气体活化法两种。

药品活化法（化学活化法），在加热的情况下，用氯化锌、硫酸、磷酸等作活化剂，将原料浸在这些药品溶液中经低温炭化和高

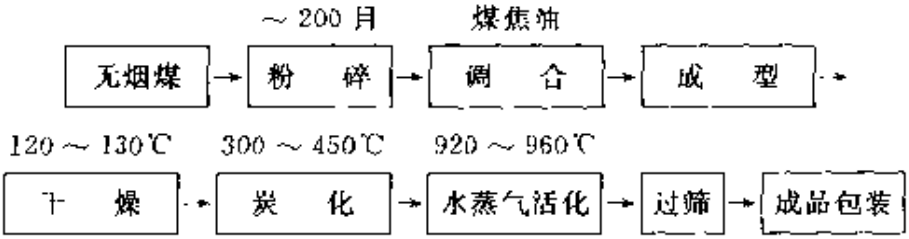
温活化而得。



我国粉末活性炭生产多以 $ZnCl_2$ 作活化剂，转炉为活化炉。气体活化法（物理活化法），将原料在有水蒸气、CO_2，或空气等活化气的情况下进行高温加热，整个制造过程包括：干燥——原料在120～130℃下脱水；炭化－－加热温度在170℃以上时原料中有机物开始分解，到400～500℃炭化完毕；活化－－原料中有机物炭化后有一部分残留在炭基本构造的微孔中，使微孔堵塞，在有活化气存在的情况下，残留炭氧化，与此同时炭的基本构造也有一些烧损，使微孔扩大，得到多孔结构的无定形炭。

用水蒸气活化时 $C+H_2O \longrightarrow H_2+CO+5497J$，因此加热温度达750～950℃，并在缺氧的气氛下进行活化。

我国粒状炭目前基本上采用水蒸气活化法，以立式炉或管式炉为活化炉进行生产。



164　哪种活性炭用在净水和给水处理上？

活性炭的种类按生产原料可分为木质炭和煤质炭。用木材、木屑、果壳、植物纤维等原料制成的活性炭叫木质炭；另一类用褐煤、泥煤、烟煤、半烟煤、无烟煤制成的活性炭叫煤质炭。若按颗粒大小分有粉末炭（粒度在200目以下）和颗粒炭（粒度在1.6～3.2mm）。若按用途分有触媒载体炭、回收吸附炭、脱硫脱色炭及净水用活性炭。

成品活性炭，其外观是黑色固体物质，无嗅无味，主要成分碳

占 80%以上，其余为氢、氧、铁、硫、磷、钙等以及水分和灰分。不溶于水和有机溶剂，各种类型的活性炭都是由微晶碳组成的海绵状物质。

净水用活性炭，一般用无烟煤作原料，经破碎后直接碳化和水蒸气活化制得，外观为不定形颗粒炭，粒度为 2～4mm，在液相中对低浓度和高浓度的有机物质，均具有较高的吸附能力，如对酚的吸附量为 150mg/g（当进水酚含量＝300mg/L 时），它具有发达的孔结构，过滤孔比较发达，因此对煤化工、石油化工废水中大分子有机物的吸附优于一般活性炭。由于制造工艺简单，原料易得，所以成本较低，机械强度也较好，与一般粒状炭一样，能经受多次高温再生，是有前途的廉价吸附剂。另一方面在给水处理上，人们还是喜欢用木质活性炭，木质活性炭吸附容量大，有高的碘值和亚甲蓝值，当前生产的家用或集团用净水器，一般都装填木质活性炭。

165 如何选用活性炭？

首先选择的活性炭应具有较好的吸附性能，再生后性能恢复较好，化学稳定性好，机械强度高，碘值、亚甲蓝值大，价格适中，来源方便，最后要对活性炭进行吸附容量测定、吸附等温线测定、柱子试验以及再生试验等。具体选用注意以下方面：

（1）要了解活性炭的性能技术指标。因为活性炭在生产过程中采用工艺流程不一样，活性炭的性能差别很大，其碘值、亚甲蓝值、机械强度、比表面积、总孔容积、中孔容积、堆积密度等都是必须收集的活性炭性能技术指标。下表为我国用于水处理的木质及煤质活性炭国家标准。

净化水用水质活性炭技术指标，GB /I 13804—92

项　　目		指　　标		
		优 级	一 级	二 级
碘吸附值/(mg/g)	≥	1000	900	800
亚甲基蓝脱色力/(mg/g)	≥	120	105	90
强度/%	≥	90	85	85

续表

项　　目		指　　标		
		优级	一级	二级
干燥减重/%	≤	10.0	10.0	10.0
pH 值	≥	7.0～11.0	7.0～11.0	7.0～11.0
充填密度/(g/cm³)	≥	0.32	0.32	0.32
粒度 2.00～0.63mm(10～28 目)/%	≥	90	85	80
灼烧残渣/%	≤	5.0	5.0	5.0

净化水用煤质颗粒活性炭技术指标，GB 7701.4—1997

项　　目		指　标
孔容积/(cm³/g)		≥0.65
比表面积/(m²/g)		≥900
飘浮率/%		≤2
pH 值		6～10
苯酚吸附值/(mg/g)		≥140
水分/%		≤5.0
强度/%		≥85
粒度/%	>2.50mm	≤2
	1.25～2.50mm	≥83
	1.00～1.25mm	≤14
	<1.00mm	≤1

项　　目	指　　标		
	优级品	一级品	合格品
碘吸附值/(mg/L)	≥1050	900～1019	800～899
亚甲蓝吸附值/(mg/L)	≥180	150～179	120～149
灰分/%	≤10	11～15	-
装填密度/(g/L)	380～500	450～520	480～560

（2）要注意活性炭的细孔构造情况。活性炭在制造过程中，由于材质和工艺上的差异，经过活化，往往使活性炭内部所形成的大孔、中孔、微孔的比表面积比率都不一样，造成孔容积、比表面积也不一样，3 种孔径在水处理中所起的作用不一样，大孔主要起通道作用，即水中有机污染物经过大孔能顺利而通畅地进入中孔或微孔，中孔除了起通道作用使被吸附物质到达微孔之外，还能对分子直径较大的有机物质起到直接吸附的作用。微孔能吸附液相中 1nm 以下小分子有机物，它的容积和比表面积标志着活性炭吸附能力的优劣。对于水处理用活性炭来说，微孔担负着除去水中有机物的极其重要的角色。给水用活性炭最好选择微孔和过渡孔（中

孔）都较为发达和比表面积较大的活性炭品种。

（3）活性炭的碘值、亚甲蓝值。选用活性炭，一般是依据活性炭的碘值和亚甲蓝值来进行选择的。选用能去除水中 COD_{Cr}，TOC 以及其他有机污染物的活性炭碘值要大于 900mg/g，亚甲蓝值应大于 120mg/g。

碘分子直径约为 0.534nm，亚甲蓝分子直径在 1.5～2.8nm 之间，而木质炭（椰壳炭）大部分孔隙的直径在 1.8～4nm，非常适合水中小分子有机物的吸附。对水中大分子有机物的吸附，由中孔、大孔来解决。因此碘值、亚甲蓝值这两项指标仍然是目前衡量和评价活性炭的传统指标。

美国生产的 F-400 水处理活性炭其碘值为 1050mg/g，亚甲蓝值为 200mg/g，远远高出国产活性炭这两项指标。下表为几种不同国产活性炭性能的测定结果。

几种国产活性炭性能测试结果

指　　标	1号 木质炭	2号 木质炭	3号 木质炭	4号 木质炭	5号 木质炭
微孔容积/(cm^3/g)	0.445	0.500	0.451	0.350	0.257
比表面积/(cm^2/g)	1224	940	932	661	677
孔径 2.8nm 以下/%	66.81	43.56	68.97	62.25	79.65
碘吸附值/(mg/g)	900	800	900	800	800
亚甲蓝值/(mg/g)	131.8	63.7	106.5	83.8	37.1

水处理试验结果表明，去除水中有机物效果好的是 1 号木质炭和 3 号木质炭，这和碘值高、亚甲蓝值高是相符合的。

此外，还需测定活性炭的吸附容量来判定其吸附能力的大小。有时还需测定活性炭的吸附速度等供选用活性炭时参考。

166　活性炭有哪些吸附特性？

活性炭有很多不同形状和不同大小的细孔，孔壁的总面积即为表面积，每克活性炭的表面积高达 700～1600m^2，由于这样大的表面积，使活性炭具有较强的吸附能力。

活性炭的吸附特性不仅受细孔构造的影响，而且受表面化学性质的影响。

活性炭除碳元素外，还含有两种物质，一是以化学键结合的元素，如氧和氢；另一种是灰分，其灰分随活性炭种类不同而异，椰壳炭灰分小于3%，而煤质活性炭灰分高达20%～30%左右，活性炭中含硫是比较低的，质量好的活性炭中不应检出硫化物。

氢和氧的存在对活性炭的性质有很大的影响，因为这些元素与碳以化学键结合，而使活性炭的表面上有了各种有机官能团形式的氧化物及碳氢化物，这些氧化物和碳氢化物使活性炭与吸附质分子发生化学作用，显示出活性炭在吸附过程中的选择吸附特性。

活性炭的吸附作用有三种类型。

(1) 物理吸附　分子力产生的吸附称为物理吸附，它的特点是被吸附的分子不是附着在吸附剂表面固定点上，而稍能在界面上作自由移动。它是一个放热过程、吸附热较小、一般为21～41.8kJ/mol，不需要活化能，在低温条件下即可进行。为可逆过程，即在吸附的同时，被吸附的分子由于热运动还会离开固体表面，这种现象称为解吸。物理吸附可以形成单分子层吸附又可形成多分子层吸附，由于分子力的普遍存在，一种吸附剂可以吸附多种物质，但由于吸附物质不同，吸附量也有所差别，这种吸附现象与吸附剂的表面积、细孔分布有着密切关系，也和吸附剂表面张力有关。

活性炭对芳香族化合物吸附优于对非芳香族化合物的吸附，如对苯的吸附优于对环己烷的吸附。

对不含有磷、碳、氰、氟的无机元素或基团的有机化合物的吸附总是优于含有其他无机元素或基团的有机化合物。如活性炭对苯的吸附要高于对吡啶（氮苯）的吸附。

对带有支链烃类的吸附，优于对直链烃类的吸附。

对相对分子质量大的沸点高的有机化合物的吸附总是高于相对

分子质量小的沸点低的有机化合物的吸附等。

(2) 化学吸附　活性炭在制造过程中炭表面能生成一些官能团，如羧基、羟基、羰基等，所以活性炭也能进行化学吸附。

吸附剂和吸附质之间靠化学键的作用，发生化学反应，使吸附剂与吸附质之间牢固的联系在一起，这种连接过程是放热过程。由于化学反应需要大量的活化能，一般需要在较高的温度下进行，吸收热较大，在41.8～418kJ/mol范围内，为选择性吸附。一种吸附剂只能对某种或特定几种物质有吸附作用，因此化学吸附只能是单分子层吸附，吸附是较稳定的，不易解吸，这种吸附与吸附剂和吸附质的表面化学性质有关。

活性炭在制造过程中，由于制造工艺不一样，活性炭表面往往有碱性氧化物易吸附溶液中酸性物质，若活性炭表面呈酸性氧化物则易吸附溶液中碱性物质。

(3) 交换吸附　一种物质的离子由于静电引力聚集在吸附剂表面的带电点上，在吸附过程中，伴随着等量离子的交换，离子的电荷是交换吸附的决定因素。被吸附的物质往往发生了化学变化，改变了原来被吸附物质的化学性质，这种吸附也是不可逆的，因此仍属于化学吸附，活性炭经再生也很难恢复到原来的性质。

在水处理过程中，活性炭吸附过程多为几种吸附现象的综合作用。

167　哪些因素影响活性炭的吸附?

影响活性炭吸附的因素有以下几个方面。

(1) 活性炭的性质　活性炭的物理及化学性质决定其吸附效果，而活性炭的性质又与活性炭制造时使用的原料加工方法及活化条件有关。用于水处理的活性炭应有3项要求：吸附容量大、吸附速度快及机械强度好。活性炭的吸附容量除其他外界条件外，主要与活性炭的比表面积有关，比表面积大，说明细孔数量多，可吸附在细孔壁上的吸附质就多。吸附速度主要与

粒度及细孔分布有关，对于水处理用的活性炭，要求中孔（过渡孔）直径20～1000Å较为发达，有利于吸附质向细孔中扩散，活性炭粒度越细，吸附速度越快，但水头损失要增加，一般在8～30目范围较宜。活性炭的机械耐磨强度，直接影响活性炭的使用寿命。

（2）吸附质的性质及浓度　活性炭吸附溶质的量与溶质在溶剂中溶解度有关，如活性炭从水中吸附有机酸的次序是按甲酸、乙酸、丙酸、丁酸次序增加。溶解度越小，活性炭越易吸附，有机物在水中溶解度随分子链增加而减小，而吸附容量是随相对分子质量增加而增加。

活性炭是非极性的吸附剂，可以在极性溶液中吸附非极性或极性小的溶质。

活性炭处理废水时，对芳香族化合物的吸附效果较脂肪族化合物好；不饱和链有机物较饱和链有机物好；在同系统中，活性炭吸附大分子有机物较小分子有机物好。

（3）溶液pH值的影响　由于活性炭能吸附水中H^+、OH^-，因此影响对其他离子的吸附，因pH值控制某些化合物的离解度和溶解度。不同溶质吸附的最佳pH值应通过实验来确定，一般情况下pH值高时，吸附效果就差。

（4）温度的影响　吸附剂吸附单位质量吸附质放出的总热量称为吸附热。吸附热越大，则温度对吸附的影响越大。对于液相吸附，在水处理时主要为物理吸附，吸附热较小，温度变化对吸附容量影响较小，对有些溶质，温度高时，溶解度变大，对吸附不利。

（5）多组分溶质的共存　活性炭通常不是吸附单一品种污染物，往往是多种污染物同时存在于液相中。由于性质不同，它们可以互相促进，干扰或互不干扰。活性炭对混合溶质的吸附较纯溶质的吸附为差，当溶液中存在其他溶质时，会导致另一种溶质的吸附很快穿透。但有时活性炭对混合溶质的总吸附效果较单一组分要高。

168 活性炭有何技术特性？失效后如何再生处理？

国产活性炭的主要技术特性如下表。

序号	活性炭牌号	制造原材料	粒径/mm	比表面积/(m^2/g)	生产厂	备注
1	C-11 型触媒炭	杏核	0.4～0.7（24～40 目）	1100	北京光华木材厂	醋酸吸附大于 500mg/L，耐磨强度大于 70%
2	C 21 型触媒炭	椰子核	0.4～0.7（24～40 目）	1100		
3	X 型吸附炭	杏核、核桃壳	1.4～3.5（6～14 目）	900		
4	8# 炭	煤粉焦油	1.5～2.0	927	太原新华化工厂	
5	5# 炭	煤粉焦油	<3.0	806		
6	活化无烟煤	阳泉无烟煤	1.0～3.5	520		
7	PJ-20 活性炭	优质烟煤	（8～16 目）	～1000		
8	15# 颗粒炭	木炭、煤焦油	3～4	～800	上海活性炭厂	碘值大于 22%，耐磨强度大于 95%
9	14# 颗粒炭					苯吸附率大于 25%，耐磨强度大于 95%

活性炭失效之后，需要进行再生，再生的方法有下列四种：

（1）加热至 100℃左右，使其中的水汽化；在 800℃下熔烤；并加热至 800～900℃之间进行活化，使吸附在活性炭上的有机物被氧化而去除，从而使活性炭得到再生。

（2）用蒸汽吹洗再生。用蒸汽吹洗可使低沸点的挥发性吸附物基本上吹净。此法简单，耗损少。

（3）用 10%酸或者碱来再生，使有机吸附物解析而去除。

（4）用溶剂四氯化碳、二氯甲烷、丙酮等进行活性炭的再生。

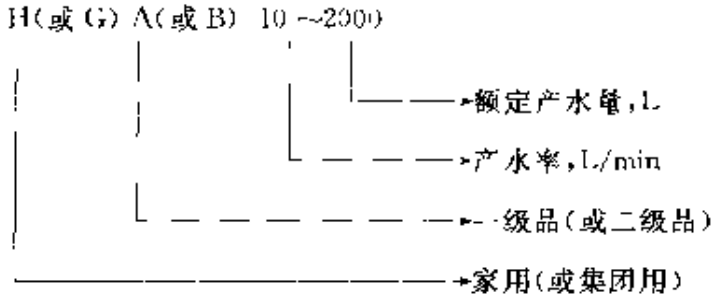
169 活性炭净水器对活性炭有何要求？

我国活性炭净水器于 1993 年已制定行业标准 CJ 3023—93，其型号与标记规范如下。

活性炭净水器标准，CJ 3023—93

（中华人民共和国城镇建设行业标准）

型号与标记：



因为净水器关系到人们的生活饮用水质量，因此，所采用的活性炭技术上有严格要求。对活性炭水分、强度、碘吸附值、亚甲蓝吸附值等都有明确指标。A级净水器要比B级高、具体技术要求如下表所示：

净水器所采用颗粒活性炭的技术要求

项　　目	指　　标	
	A级净水器用	B级净水器用
水分/%	≤5	≤5
强度(球磨法)/%	≥90	≥85
碘吸附值/(mg/g)	≥1000	≥800
亚甲蓝吸附值/(mg/g)	≥135	≥105
苯酚吸附值/(mg/g)	≥120	≥120
半脱氯值/cm	≤6.0	≤8.0
堆积密度/(g/cm³)	≤0.5	≤0.5
粒度	不规定	
pH	4～11	
氯化物/%	≤0.5	
铅/(μg/g)	≤10	
锌/(μg/g)	≤50	
镉/(μg/g)	≤1	
砷/(μg/g)	≤2	

170　什么是纤维状活性炭？

此类活性炭是由聚丙烯腈或沥青等制成纤维状，经过氧化、磺化、碳化、石墨化等工序而制成。这是一种新近发展起来的活性炭，具有良好的吸附性和除臭性能，除臭能力是普通活性炭的50倍。其比表面积达1150m^2/g。吸附性能：碘值2850mg/g；亚甲基蓝258mg/g；苯43.6%，丁基硫13.50%，纤维状活性炭还包括毡状活性炭，其密度约为0.025mg/L，比表面积也有每克达1000m^2。

171　新活性炭需经哪些处理才能投用？

刚装入的活性炭，首先必须充满水浸泡24小时以上，使其充分润湿，排除炭粒间及其内部孔隙中的空气，使炭粒不浮在水上，然后封入孔、试压并正洗，洗去活性炭中无烟煤粉尘，洗至出水透明无色，无微细颗粒后，即可投入使用。

172　如何去除水中的铁和锰？

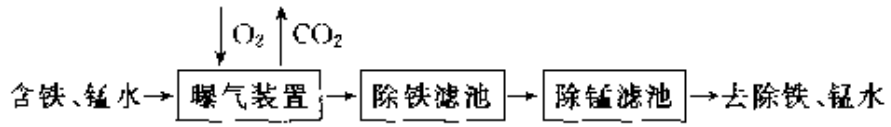
水中含有过量的铁和锰，不宜于生活饮用和工业生产。这种水质情况大都发生在地下水源。

去除水中铁的工艺，是由曝气、氧化反应和过滤等三部分组成。水的pH值对二价铁的氧化反应速度影响很大，曝气充氧去除部分CO_2，pH可提高到7.0以上，才能获得二价铁良好的氧化反应和三价铁的絮凝沉淀，然后经过滤予以去除。但往往水中普遍含有少量的溶解性硅酸，这样水中的$SiO(OH)_3$离子强烈地吸附在三价铁的氢氧化物胶体表面，从而使三价铁的氢氧化物胶体凝聚困难，导致穿透滤层而影响除铁效果。因此，广泛采用接触氧化法除铁。此法是水经过曝气充氧后，通过滤料吸附除铁和接触氧化，并在滤料表面逐步生成具有催化活性的铁质滤膜，铁质活性滤膜又进一步起到除铁的作用。接触氧化除铁利用了铁质活性滤膜的催化作用，从而大大加快了二价铁的氧化速度，更有效地除去水中的铁。

去除水中的锰，广泛采用接触氧化除锰工艺，使含有锰的水经曝气后，通过滤层过滤，高价锰的氢氧化物便逐步吸附在滤料表面上，形成锰质滤膜，具有接触催化作用，从而大大加快氧化速度，

水中二价锰也氧化为三价锰而被吸附去除。

但是水中铁、锰往往同时存在，而铁的氧化还原电位比锰要低，这样二价铁对高价锰便成了还原剂，因此，大大阻碍了二价锰的氧化，只有水中基本上不存在二价铁的情况下，二价锰才能被氧化，所以在水中铁、锰共存时，应先除铁后除锰。当水中铁、锰含量较高，需采用两级过滤处理。工艺流程示图如下。



（四）消　　毒

173　为什么要进行水的消毒？

地面水常常受到土壤、工业废水、生活污水及各种杂质的污染，促使细菌滋生，有时每毫升水中细菌数可达几万乃至几十万个；在有的水域里，大肠杆菌甚至达数万个以上。虽然在水处理的过程中，经过混凝、沉淀（或澄清）、过滤等的净化过程，粘附在悬浮物上的大部分细菌、大肠杆菌、病原菌和其他一些微生物也一同被除去。但是，并不彻底，还存在一定量的对人体有毒害的微生物。为了保障人民的健康，防止疾病的传播，还必须进行水的消毒，以杀灭水中的病毒。我国“生活饮用水水质标准”中规定，在水样中细菌总数不超过 100 个/mL。总大肠菌群或粪大肠菌群每 100mL 水样中均不得检出。为此，在混凝澄清过滤之后还需进行消毒。在工业冷却水处理中，为了防止循环水产生生物黏泥，要控制循环水中的异养菌数不超过 1×10^5 个/mL，因此，对于作为循环水系统补充水的过滤水，亦需要进行消毒杀菌处理。在除盐水处理系统，为了防止离子交换树脂受到细菌的污染，也需要对其原水进行消毒杀菌。此外，消毒还可以除去水的色度。

174　消毒的方法有哪几种？

水的消毒方法可分化学的和物理的两种。物理消毒方法有加热

法、紫外线法、超声波等法。化学方法有加氯法、臭氧法、重金属离子法以及其他氧化剂法等。其中以加氯法使用最为普遍，因为氯的消毒能力强，价格便宜，设备简单、余氯测定方便，便于加量调节等优点而得到广泛应用。加氯法，除使用氯气之外，还有氯的化合物，如次氯酸钠、次氯酸钙、氯胺类以及最近国外在自来水厂中广为应用的二氧化氯——这是一种比氯的氧化性能更为强烈的氧化剂。消毒还可以用非氧化型杀生物剂，如氯酚类消毒剂和季铵盐类化合物。最近国外研制的二硫氰酸甲酯、盐酸十二烷基胍、有机溴化物等，以及国内研制成功的 NL-4，SQ8，BCDMH 等都是有效的消毒剂。此外，早期使用的还有铜盐，如硫酸铜等杀生剂，这些都属于化学方法消毒。

175　氯气有些什么特性？

氯气是黄绿色的气体。在大气压下，温度 0℃时，每升重 3.214g，其密度（质量）约为空气的 2.5 倍；在－34.03℃时，为液态；常温下，加压到 0.6～0.8MPa 亦为液态，此时每升重 1468.41g，约为水重的 1.5 倍。因此，同样重量的氯气与液氯相比，体积相差 456 倍，故常使氯气液化，便于灌瓶、贮藏和运输。

氯气是具有强烈刺激性的窒息性气体。对人体有害、尤其对于呼吸系统及眼部黏膜伤害很大，引起气管痉挛和产生肺气肿，使人窒息而死亡。氯气含量到 3.5mg/L 时，就可以使人嗅到气味，14.0mg/L 时，咽喉会疼痛，20.0mg/L 时，引起气呛，当 50.0mg/L 时就会发生生命危险，再高时会引起死亡。生产环境的空气中最高允许含量为 1mg/m^3。

氯气能溶于水，溶解度随水温的增高而减少。在常压下（氯分压为 0.1MPa 时），如水温在 10℃时，可溶解 1%；20℃时，可溶解 0.7%，当 30℃时，只能溶解 0.55%。

176　为什么不宜将氯瓶内的液氯都用光？

氯气在干燥的时候，化学性质不活泼，不会燃烧。但在遇水或受潮后对金属有严重的腐蚀性，化学性质十分活泼。因此，在氯气的使用过程中，特别要注意盛氯钢瓶不能进水，以免钢瓶腐蚀，发

生事故。所以使用时，钢瓶内的液氯不宜全部用光，要留 10～15kg。更不宜抽空，以防止漏入空气和带进水而产生腐蚀和发生事故。

177　在液氯钢瓶上洒水是起什么作用？

钢瓶内的液氯，在使用的过程中，因气化挥发需吸收大量的热，每气化 1kg 液氯，约吸收 2.9×10^2J（69cal）热量，故会使氯气钢瓶外壳周围的温度降低而结露，从而阻碍了液氯的进一步气化。为此，在使用过程中，把水淋洒在氯气的钢瓶上，并不是为了冷却，而是供给液氯气化时所需要的热量。

178　氯气的杀生原理是什么？

氯气加入水中之后，在几秒钟内很快水解而产生次氯酸，其反应如下：

$$Cl_2+H_2O\rightleftharpoons HClO+H^++Cl^-$$

次氯酸 HClO 在水中又部分地离解为：

$$HClO\rightleftharpoons H^-+ClO^-$$

氯的杀菌作用，主要是靠次氯酸 HClO。由于次氯酸的相对分子质量很小，是中性分子，它能很快扩散到带负电的细菌表面，并透过细菌的细胞壁而穿透到细菌的内部，以氯的强氧化作用来破坏细菌赖以生存的酶系统，从而阻止细菌吸收葡萄糖，停止新陈代谢，使细菌死亡，以达到杀生的目的。

次氯酸根 ClO^- 是离子态的，也具有一定的杀生作用，但由于细菌表面带负电荷，因同性相斥而难以接近，故 ClO^- 的杀生效果较差。

氯气的杀生效果还与水的 pH 值等有关，通常在 pH 值低时，效果比较好。

179　什么是有效氯、需氯量、转效点加氯、结合氯、游离氯和总氯？

有效氯是指氯型杀生剂加入水中所能产生的具有氧化能力的氯含量。氯气加入水中后几乎全部转化为具有氧化能力的 HClO 或 ClO^-，故其有效氯含量为 100%。而次氯酸盐、二氯异氰尿酸盐

等氯型杀生剂的有效氯均低于100%。二氯异氰尿酸钠的有效氯理论值为64.5%，代表值为61.0%。

由于水中含有一定的微生物、黏泥、有机物及其他还原性化合物要消耗掉一部分有效氯，这部分被消耗的氯称为需氯量，加氯量正好达到需氯量控制点时，称为转效点。只有加氯超过需氯量之后，也就是加氯超出转效点之后，才能测出水中的余氯量。转效点加氯就是向水中加入足够量的氯，直到满足需氯量，再继续加氯使之有剩余氯产生，而剩余的部分氯称为游离余氯或简称为余氯。我国生活饮用水水质标准规定（GB 5749 -85），加氯接触30分钟后，游离性余氯不应低于0.3mg/L；对于集中式给水厂的出厂水，管网末梢水的余氯不应低于0.05mg/L；对于不同用途的工业用水，其控制余氯量也不相同。保留一定数量余氯的目的是为了保持持续的杀生力，防止水的污染。

结合氯是氯与水中某些化合物反应生成的具有氧化能力的氯的化合物。例如氯与水中的氨反应生成一氯胺（NH_2Cl）、二氯胺（$NHCl_2$）及三氯胺（NCl_3），它们仍有一定的氧化能力，其含氯总量称为结合氯，或化合性氯。

加入水中的氯量如高于需氯量与结合氯之和时，剩余的氯在水中多以HClO和ClO^-存在，称为游离(余)氯，或自由性氯（游离余氯$=Cl_2+HClO+ClO^-$）。

水中余氯的总和为总氯。平时所分析得的余氯实际上是游离氯与部分具有氧化能力的结合氯之和。

180　加氯量如何确定？

在水处理中加氯量包含两个部分：一部分是实际消耗的需氯量；另一部分是用以抑制水中残存细菌的再度繁殖而多加的剩余氯量，一般要通过需氯的试验来确定。根据水质情况不同，加氯量大致有三种情况。

(1) 如果水质清净（如纯净的蒸馏水），由于水中没有细菌存在，水中氨、有机物质和还原性的物质等都不存在，需氯量为零，因此，加氯量即等于余氯量，如图2-4-1所示。

（2）由于一般水中，都受到各种杂质的污染，为了氧化有机物质和消毒杀生，需要消耗一定的氯，水质越差，耗氯越大。同时，加氯一定要超过需氯量 M 点，才能保证一定的余氯量。如图 2-4-2 所示。

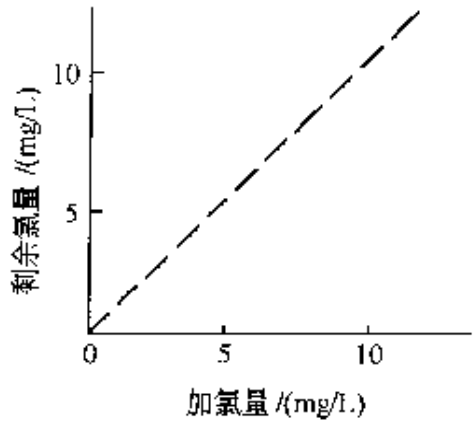


图 2-4-1　纯净水的余氯与加氯量之间的关系

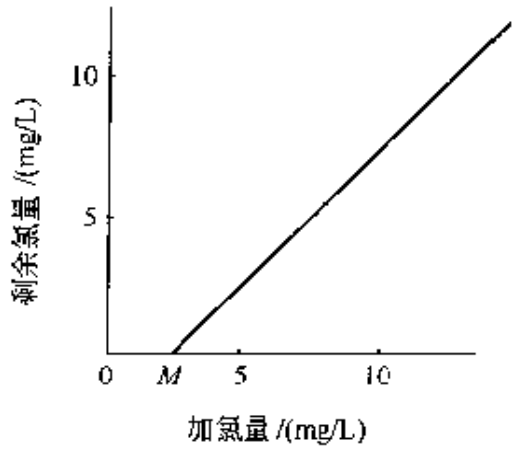


图 2-4-2　一般水中余氯与加氯量之间关系

（3）当水的污染程度比较严重时（如循环冷却水处理漏氨时），而且水中的工艺泄漏物主要是氨和氮化合物时，情况比较复杂。此时，加氯量如图 2-4-3 所示。

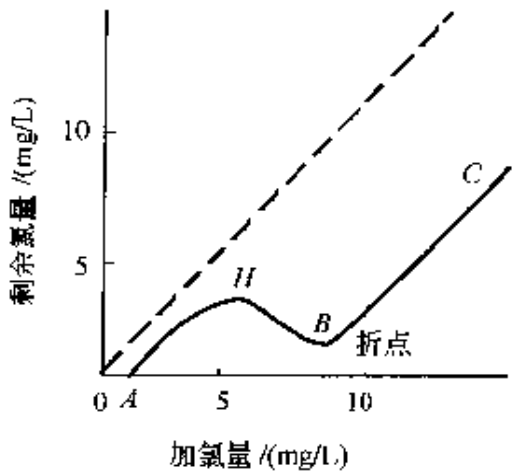


图 2-4-3　折点加氯示图

从图上可知：在开始加氯时，$0A$ 段加氯量消耗于水中，而余氯为 0，此时，虽杀灭细菌，但效果还不可靠，因为无余氯来抑制细菌的再度繁殖；在 AH 段，表示加氯量增加时，余氯量也有增加，只是增长得较慢一点，也即表示加氯后，有余氯存在，有一定的杀菌效果，但余氯是化合性氯；在 HB 段，表示加氯量虽然增加，然而余氯反而下降，假如水中有氨存在，这时化合性余氯产生了如下反应：

$$2NH_2Cl+HClO \rightleftharpoons N_2\uparrow+3HCl+H_2O$$

从上式可知，化合性余氯成分被转化为氮气，因此余氯反而下降；当到达 B 点之后，进入 BC 段，表示水中消耗氯的杂质全部殆尽，此时，就出现了游离性余氯（几乎全为 HClO）。只有这时杀生能力最强，效果最好。习惯上把 H 点称为峰点，为余氯量最高点，此时为化合性余氯而不是游离性余氯。B 点称为折点，余氯较低，然而继续加氯，余氯就增加，而且是游离性余氯。这种加氯的方法又称为折点加氯。

鉴于上述情况，一般加氯量按下述确定：当水中含氨量小于 0.3mg/L 时，加氯量控制在折点后；当含氨量大于 0.5mg/L 时，加氯量控制在峰点之前；当含氨量在 0.3～0.5mg/L 时，加氯量控制在峰点与折点之间。但是，由于各地水质不同，尚需要根据实际生产情况经过试验来确定。一般来说，经过混凝、沉淀、过滤后的水，或清净的地下水，加氯量可采用 0.5～1.5mg/L；如果水源水质较差，或是经过混凝、沉淀、而未经过过滤，或是为了改善混凝条件，使其中一部分氯来氧化水中的杂质，加氯量可采用1.0～2.5mg/L。

181　加氯点是如何确定的？

加氯点主要是从加氯效果、卫生要求以及设备保护来确定的。大致情况如下。

（1）大多数情况是在过滤后的清水中加氯。加氯点是在过滤水到清水池的管道上，或清水池的进口处，以保证氯与水的充分混合，这样加氯量少，效果也好。

（2）过滤之前加氯或与混凝剂同时加氯，这样可以氧化水中的有机物质。这种方法，对污染较严重的水或色度较高的水，能提高混凝效果，降低色度和去除铁、锰等杂质。尤其在用硫酸亚铁作为混凝剂时，利用加氯，促使亚铁氧化为三价铁。还可改善净水构筑物的工作条件，防止沉淀池底部的污泥腐烂发臭；防止滋长青苔；防止微生物在滤料层中生长繁殖，延长滤池的工作周期。对于污染严重的水，加氯点在滤池前为好，也可以采用二次加氯，滤前一

次，滤后一次。这样可以节省加氯量，还可以确保水中保持余氯。

（3）在管网很长的情况下，要在管网中途补充加氯，加氯点设在中途加压水泵站内投加，这样也可确保余氯控制。

（4）循环冷却水系统的加氯点，通常有三处，一是循环水泵的吸入口；二是远离循环水泵的冷却塔水池底部，由于冷却塔水池是微生物重要的滋长地，此处加氯，杀生的效果最好；三是加在水泵后的给水总管中，这样可减少氯的挥发，减少氯耗。

182　液氯钢瓶在使用过程中，有哪些安全注意事项？

（1）氯瓶不能在烈日下曝晒，不能靠近炉火或高温处，以免迅速气化时发生意外。液氯钢瓶上装有一只或数只低熔点安全塞，由熔点为70℃左右的合金制成，一旦氯瓶超温，安全塞自行熔化，氯气从钢瓶内逸出，不致引起钢瓶爆炸。钢瓶内的液氯不装满，一般只装80%～85%左右，其中15%～20%为气态氯空间。

（2）卧式氯瓶上有两只出氯气总阀，使用时，一个阀在上，一个阀在下。氯气是从上面一只总阀接入加氯机的，其简单构造如图2-4-4所示。

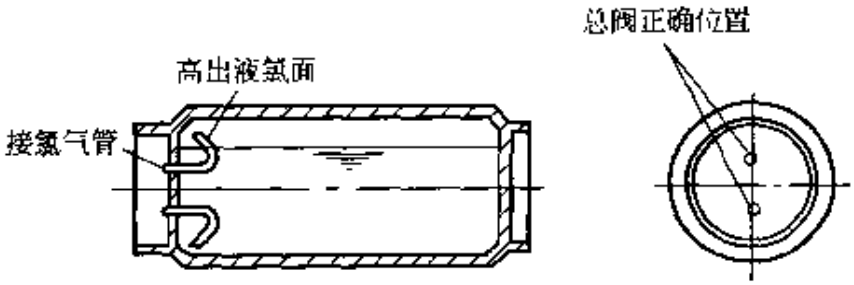


图2-4-4　卧式氯瓶安装位置示意图

（3）氯瓶的总阀外边，要装保护帽，防止运输和使用时碰坏。氯瓶上的螺纹全部都是右旋螺纹，使用时应注意旋转方向。

（4）氯瓶外壳要安装喷淋水装置，以供给液氯气化时的热量。

（5）氯瓶在使用时，不可把氯全部用光，要留10～15kg余量，或30～50kPa（0.3～0.5kgf/cm^2）余压。更不能抽成真空，以免水倒回，引起腐蚀。

（6）在氯瓶与加氯机之间要设置中间缓冲槽，可使氯气中的杂

质沉落在缓冲槽中。万一加氯机发生故障，中间缓冲槽可以起保护作用，以防止水回到氯瓶中。

（7）严防氯瓶碰撞。要轻装轻卸，不要滚动，严禁采用抛、滑及其他引起碰撞的方法装卸，以免发生事故。

（8）按规定期限进行氯瓶的检查和试压，严格执行氯瓶使用安全规程。

（9）使用氯瓶的周围场所，不得有火种和易燃物。放置地点的气温应低于40℃。

（10）使用氯瓶时，如发生瓶阀冻结，严禁用火、开水、蒸汽等直接加热瓶体，以免发生爆炸。只可用35℃以下的温水或湿布加热。

183　加氯装置有哪些主要类型？其工作原理如何？

加氯装置的种类比较多，有转子加氯机、真空加氯机，水力引射加氯机等。

国内常用的主要是ZJ型转子加氯机。如图2 4-5所示。目前有Ⅰ型（加氯量5～45kg/h）、Ⅱ型（加氯量2～10kg/h）两种。其工作原理是：来自氯瓶的氯气首先进入旋风分离器3，再通过弹簧膜阀1和控制阀2进入转子流量计4和中转玻璃罩5，再由水射器7与压力水混合，使氯气溶解于水中被送至加氯点。

各部分作用如下：

（1）弹簧膜阀1，当氯瓶中压力小于一定压力（如0.1MPa，1kgf/cm^2）时，此阀即自动关闭，以确保氯瓶内保持一定余压的安全要求。

（2）控制阀2和转子流量计4，用于控制和测定加氯量。

（3）旋风分离器3，用于分离氯气中可能带进的一些杂质。运行一定时间后应打开分离器下部旋塞来除去积累杂质。

（4）中转玻璃罩5，用以观察加氯机的工作情况，此外还可以稳定加氯量，防止压力水倒流和避免水源中断时破坏罩内真空。

（5）平衡水箱6，可以补充和稳定中转玻璃罩内水位，避免当水流中断时，使中转玻璃罩真空破坏。

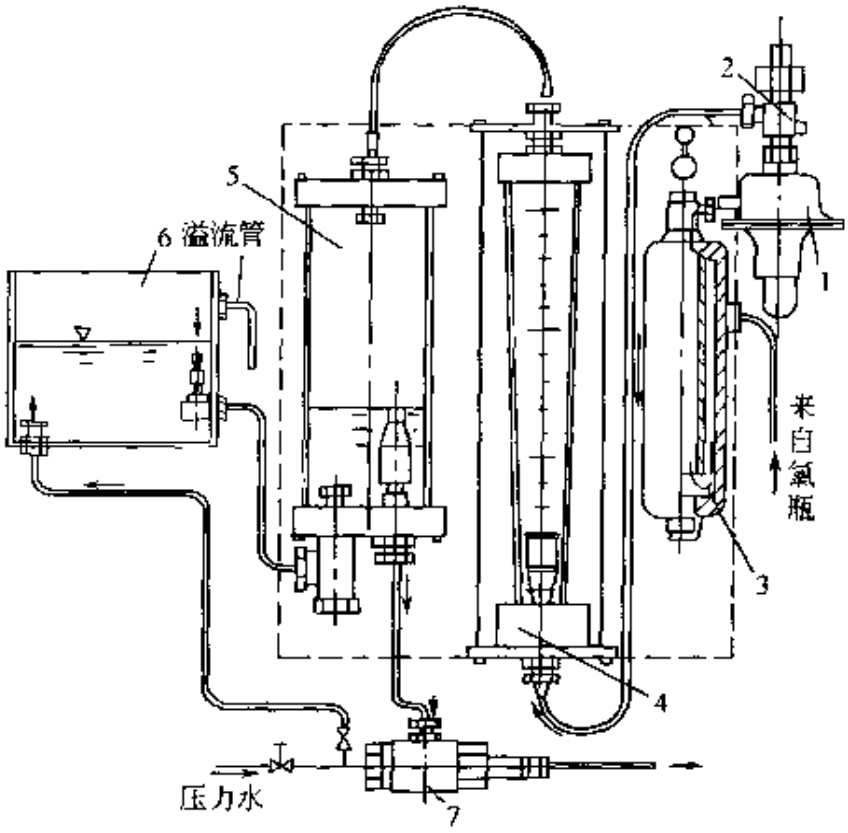


图 2-4-5　ZJ 型转子加氯机

1—弹簧膜阀；2—控制阀；3—旋风分离器；4—转子流量计；
5--中转玻璃罩；6—平衡水箱；7—水射器

（6）水射器 7，从中转玻璃罩内抽吸所需氯，并使其与水混合，使氯气溶解。同时还可以使玻璃罩内保持负压状态。

184　加氯操作要注意哪些安全事项？

（1）套在氯瓶阀上的安全帽应当旋紧，不可随意去掉，吊运及上、下车操作都要小心轻放。

（2）在加氯操作前，应先用 10%氨水检查氯瓶是否漏气，如发现有白色烟雾时，表示有漏氯，要处理好再使用。

（3）加氯机和氯瓶不要放在阳光下或靠近其他热源附近。

（4）如操作氯瓶的出氯总阀，发现阀芯过紧，难以开启时，不允许用锄头敲击，也不能用长扳手硬扳，以免扭断阀颈。

（5）如发现加氯机的氯气管有阻塞，须用钢丝疏通，再用打气筒吹掉杂物，切不可用水冲洗。

（6）开启氯瓶出氯总阀时，应先缓慢开半圈，随即用10%氨水检查有否漏气。

（7）如发现大量漏氯气时，首先，人要居上风侧，并立即组织抢救。抢救人员必须戴好防毒面具，漏氯部位先用竹签塞堵，并将氯瓶移至附近水体中，用大量自来水（或碱水）喷淋，使氯气溶于水中，排入污水管道，以减少对空气的污染。

（8）加氯的过程中，如水射器的压力水突然中断时，应迅速关闭氯瓶的出氯总阀。

（9）使用中的氯瓶应挂上“正在使用”的标牌；氯瓶用完后应挂上“空瓶”标牌；新运来的应挂上“满瓶”标牌，以便识别。瓶子要求专瓶专用，不可混用。

（10）在加氯间应备有专用工具和防毒面具，供意外时使用。

（11）有条件的单位，应结合岗位责任制，设立专人专职加氯和维修。

185　加氯系统漏氯时如何查找？

氯气是极毒气体，一旦出现泄漏氯，要迅速采取安全措施，及时寻找泄漏点并予处理。安全措施包括带防毒面具，停加氯机，进行通风等。

在查找泄氯点时，可在设备、管路、阀门相接处滴加氨水，其反应如下：

$$2NH_4OH+Cl_2 \longrightarrow NH_4Cl+NH_4ClO+H_2O$$

上式中生成的NH_4ClO是一种极易挥发的白色雾气，一旦发现有白色雾气冒出，即为泄氯点，然后进行消除。

186　臭氧有哪些物化性质？

臭氧既是一种强氧化剂，亦是一种消毒剂。臭氧作为消毒剂，能杀菌和灭病毒，反应快，投量少，适应性强，在pH值5.6～9.8，水温0～37℃范围内变化时，对消毒效果影响很少。臭氧作为氧化剂能去除水中色、嗅、味和氧化水中可溶性亚铁、二价锰盐类、氰化物、硫化物，亚硝酸盐等。分解水中溶解性有机物，有助于水的絮凝作用，强化水的澄清、沉淀和过滤效果，提高了处理后

的出水水质。下面介绍臭氧的化学性质。

臭氧（O_3）是一种不稳定的具有特殊“新鲜”气味的气体，它是氧的同素异性体，每个分子中含有3个氧原子，常温常压下是一种不稳定的淡蓝色气体，并能自行分解为氧气。臭氧是良好的氧化剂，具有很强的氧化能力，在天然元素中仅次于氟。

臭氧相对密度为氧的1.5倍，空气的1.6倍，在水中溶解度比氧约高10倍，比空气高25倍，1%（质量分数）浓度的臭氧在水中半衰期仅30min，所以臭氧不能像其他常用气体那样装瓶贮存。臭氧主要物理特性和在水中溶解度见下表。

臭氧的主要物理性能

熔点/℃	192.5±0.4	固体密度/(g/cm³,77.4K)	1.728
沸点/℃	−111.9+0.3	自由能/(kJ/mol,AF25℃)	136
临界温度/℃	−12.1	颜色：固体	暗紫色
临界压力/MPa	5.53	液体	蓝黑色
临界体积/(cm³/mol)	111	气体	淡蓝色
气体密度/(g/L,0℃,1atm)	2.144		

臭氧在水中溶解度

温　度/℃	溶解度/[L(气)/L(水)]	温　度/℃	溶解度/[L(气)/L(水)]
0	0.64	27	0.27
1.18	0.50	40	0.117
15	0.456	55	0.031
19	0.381	60	0

臭氧与水中无机物反应，是放出一个性质活泼的氧原子使无机物氧化，同时放出一个氧分子，臭氧氧化有机物一般认为先生成过氧化物或羟基。

187　臭氧是如何氧化水中的有机物质的？

臭氧是极强的氧化剂，具有很强的氧化能力，它的氧化还原电位：

$$O_3+2H^++2e \rightleftharpoons O_2+H_2O \text{（酸性条件下）} \quad E^\circ=2.37V$$

$O_3+H_2O+2e \rightleftharpoons O_2+2OH^-$（碱性条件下） $E^\circ=1.24V$

由于臭氧不稳定，在水中能迅速分解，其分解速度随着温度、pH 值的增高而增强，在纯水中臭氧分解的半衰期为 15～30min，溶解在水中的臭氧受到羟基离子的催化作用也能很快被还原。

臭氧氧化分解水中有机物，对烯烃类化合物的双键氧化能力最强，其次是胺类和碳氢双键，再其次是炔烃类三键化合物、碳环、杂环化合物、硫化物、磷化物等，臭氧对醇、醛、醚及碳氢化合物的单键氧化能力最弱。

臭氧与水中有机物反应机理是比较复杂的，各种解释不一，根据 Hoigne 和 Bader 提出的臭氧在水中的反应理论认为：臭氧与水中有机物进行反应，通过两条途径进行，其一臭氧与有机物直接反应，亦称 D 反应，其二臭氧与有机物间接反应，即臭氧分解产生羟根自由基（OH·）的间接反应，亦称 R 反应。二者比较，以 D 反应速度比较缓慢，有选择性，是去除水中有机物的主反应。R 反应是羟根自由基（OH·）和水中有机物、微生物、CO_3^{2-}、HCO_3^- 反应。虽然反应能力强，反应速度快，但是选择性差，它既能与有机物反应加速臭氧分解速度，又能与水中碳酸根和碳酸氢根反应。生成次自由基 CO_3·和 HCO_3·，次自由基也能和有机物反应，但反应速度非常缓慢。下图为臭氧在水中反应途径。

臭氧在水中反应途径：

- D 反应 / 直接反应：直接氧化有机物、微生物等，可产生直接氧化产物，反应速度慢，有选择性
- R 反应 / 间接反应（OH·反应）：通过 OH·可氧化有机物，微生物等，反应速度快，无选择性，通过 OH·对 HCO_3^- 氧化成 HCO_3·反应，速度中等，通过 OH·对 CO_3^{2-} 氧化成 CO_3^-·反应速度快

臭氧去除水中有机物的效果一般认为是 D 反应和 R 反应的叠加作用，上述两种反应进行的程度取决于不同的反应条件。当水中 pH 值小于 8 时，OH·自由基会大大减少，或者水中添加大量 HCO_3^- 时，也可捕集 OH·自由基，同样可以缓解 OH·自由基的反应强度，这样就减弱了臭氧分解速度。因此在低 pH 值或高碱度

情况下，则可强化臭氧直接反应，有利臭氧充分利用，增强其脱色杀菌效果和去除有机物能力，反之处理高 pH 值或低碱度水质情况下，臭氧分子分解迅速强化了羟基自由基的氧化作用。

臭氧用子给水厂水质处理，以天然水体或受污染的天然水体作自来水源水时，pH 值一般在 6.0～8.5 之间，水体中并存在相当数量的碳酸根离子和碳酸氢根离子，臭氧投加后仍然以 D 反应为主、R 反应为辅的途径去除水中污染有机物。

188　如何制造臭氧消毒剂?

臭氧制造方法很多，其中有化学法、电解法、紫外线法、放射线照射法和无声放电法等。

化学法生产的臭氧产量有限，不能为生产所利用，电解法有相当高的产率，并能获得较高的臭氧浓度，目前已有商品在市场出现，但生产的 O_3 往往与 ClO_2、H_2O_2、Cl_2 共存。紫外线法使用较早，但生成的臭氧量少，只适合使用消毒剂量少的地方。

无声放电是一种可以获得大量低浓度臭氧化气体（臭氧重量占空气重量的 1%～2%）的技术，适合大规模工业化生产，是目前给水处理厂常用的工业生产臭氧的方法。若采用高频、中频、高电压、纯氧气源无声放电法可获得较高的臭氧浓度（臭氧重量占总重量的 4%～5%）。

无声放电法发生臭氧的原理是在一对交流电极之间隔一介电体，当空气或氧气通过高压电极时，在具有足够动能的放电电子中，使氧分子电离，一部分氧分子就被聚合成臭氧，如图 2-4 6 所示。

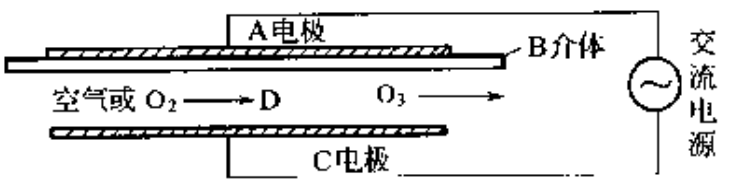


图 2-4-6　无声放电法臭氧发生器原理

图中 A 和 C 都是电极，一般用金属材料不锈钢制成，B 是介

电体，它是一种绝缘物质，一般用耐高压玻璃作为介体。当交流高压电作用时，在B和C的间隙中产生无声放电现象，高压电流从A透过B而传到C，由于介电体B的阻挡，大电流不能通过，只能通过极小的电流，电压极高，B和C的间距D很小，一般只有几毫米，因而使间隙D中电压强度很大，电子在高电场作用下速度很快，不断袭击通过放电间隙D的空气或氧气内的氧分子。氧分子在高速电子袭击下，有一部分就变成带电的离子，带电离子又不断碰撞结合成分子，又不断电离、碰撞，直至达到某种平衡状态生成一定数量的臭氧，反应方程式如下：

$$O_2 + e \longrightarrow O + O + e$$

$$O + O_2 \rightleftharpoons O_3$$

$$O + O + O \longrightarrow O_3$$

此种臭氧生成方式只能使通过放电区域的气体中的一小部分变成臭氧，一般只占1%～2%重量，所含有的臭氧气体通常称臭氧化气体，因此臭氧水处理实际上均指使用一定浓度臭氧化气体进行处理，而不是使用纯臭氧进行水处理。

189　臭氧发生器的构造怎样？

臭氧发生器有板式和管式两类，它们的构造各不相同。

（1）板式臭氧发生器　按电极安装方式可分为立板式和卧板式两种。目前使用的设备大多为立板式，此法广泛用于自来水消毒方面其构造如图2-4-7所示。

图中1和2是金属铸成的外表面平滑且平行的箱形极板，1为高压极，2为低压极（地极），介电体用玻璃板制成，电极板和玻璃板都开有中心孔，玻璃板的一面贴上锡箔或涂以金属涂料，中心孔用陶瓷管连接，两块相邻玻璃板间的空间为放电空间。空气从四周进入放电空间，经放电反应后生成臭氧，然后臭氧化气体经由中心孔道引出，冷却水在箱板内流动。一台大型臭氧发生器可装有24组单元，共96块玻璃板，48个放电空间。

近年来采用薄型不锈钢板作为高压极，低压极用铝合金制成，

在不锈钢高压极与玻璃板间形成放电区，空气或氧气在接近大气压下通入，此型最新产品有 84 个组件。

另外，还有卧板式臭氧发生器，但使用不如立板式广泛。

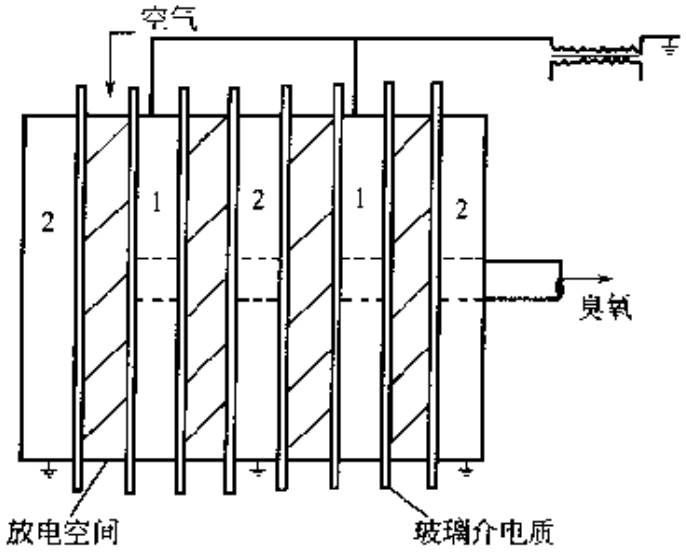


图 2-4-7　立板式臭氧发生器

1—高压极；2—低压极（地极）

（2）管式臭氧发生器　按其构造也可分为卧管式和立管式两种。英国、德国、日本所生产的臭氧发生器立管为多，我国各地近年来采用的臭氧发生器都是卧管式。

① 卧管式臭氧发生器　此型设备的外形与换热器相似，是一个圆筒形密闭容器，一般采用同轴管形式容器，装有水平金属管（不锈钢）多根，两端固定在两块管板上，从而将容器分为 3 部分，中央部分通入冷却水的冷却管系。两端部分，一端进入干燥空气或氧气，另一端汇集放电管后的臭氧化气体，每根金属管构成一个低压管（地极），管内装一根与其同轴的玻璃管（或瓷管）作为介电体。玻璃管的内表面用银或铝等金属喷镀与高压电源相连，玻璃放电管的一端封死，用不锈钢环固定其中心位置，使与不锈钢管轴重合，玻璃管的外径略小于地极管的内径，这样就有一个环形空隙可以放电，待处理的空气或氧气通过这个空隙，经由放电而生成臭氧气体，见图 2-4-8。

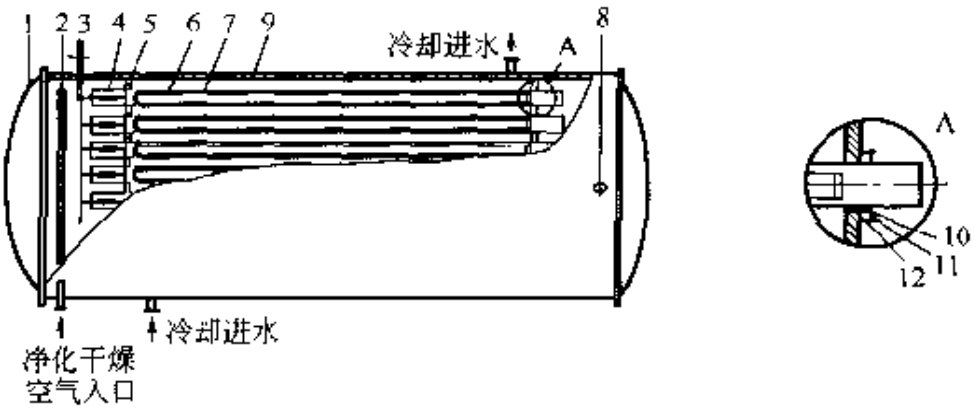


图 2-4-8 管式臭氧发生器

1—封头；2—布气管；3—高压电极接线柱；4—高压熔丝；5—花板；6—玻璃介电管；7—不锈钢管高压电极；8—臭氧化气出口；9—筒壁；10—压环；11—螺丝；12—乙丙橡胶圈

不锈钢管长度一般用 1m。直径 40～50mm，玻璃管长 1.15～1.3m，两管之间的缝隙一般为 2～3mm，并要求两管缝保持均匀，这就要求钢管和玻璃管都很直，挠度要求不超过 0.02%。

这种臭氧发生器承受一些小的压力 0.1MPa（1kg/cm²），可将生成的臭氧送到使用地点。现在的最新装置每根放电管每小时可产生臭氧 15g 以上，臭氧浓度可达 20gO_3/m³ 空气，电能消耗为每千克臭氧 17W·h，这些数据是采用 50 周频率的电源取得的。如改用高频，性能还可以改进，这种类型的发生器，其最大装置有 500 根以上的放电管，每小时臭氧产量达 7500g。

② 立管式臭氧发生器　这种设备是将放电管垂直排列安装于金属容器内，分成 3 部分，与卧管式一样，干燥气体自顶部引入，一系列的金属管组成高压极，每根金属管同轴装入由特种玻璃制成的介电管内，玻璃管的下端是封闭的，它的内径略大于金属管的外径，有一个环状空隙供气体上升通过，玻璃介电管在容器内部差不多完全浸没在冷却水中，容器即形成低压电极（地极），放电在介电管和高压极金属管间的环状空隙内发生。

190　哪些因素影响臭氧发生器的产量？

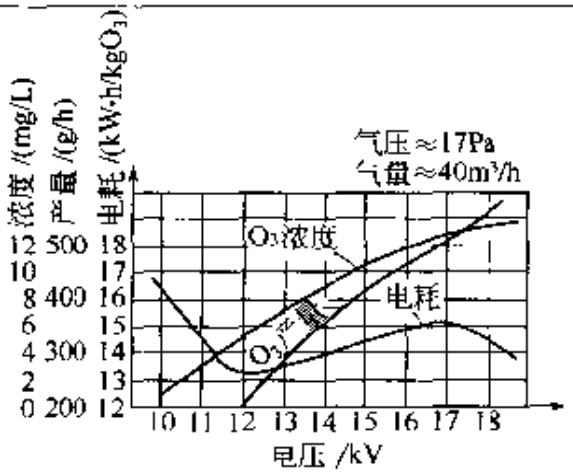
根据理论计算每千瓦小时（kW·h）可产臭氧 1230g，即生产每公斤臭氧只需 0.82kW·h。但在工业生产实践中，以空气制臭

氧的耗电量达 15kW·h/kgO_3 以上，还不包括空气干燥部分。目前国内生产的臭氧发生器耗电量为 16～20kW·h/kgO_3。由于工业生产臭氧加在电极上的电能只有 5%～10%左右真正用在生产臭氧上，而 90%以上电能转变成热能损失掉，而转变成热能部分又必须用流动的冷却水及时排出，不使放电区域温度太高，导致臭氧受热分解，使臭氧产率减低。工业化臭氧发生器运转稳定时，臭氧浓度可达 1.02%～1.22%，其质量分数为 1%～2%，相当于臭氧化空气中含臭氧浓度 20～25mg/L，国产臭氧发生器其臭氧化空气中臭氧浓度为 10～14mg/L。

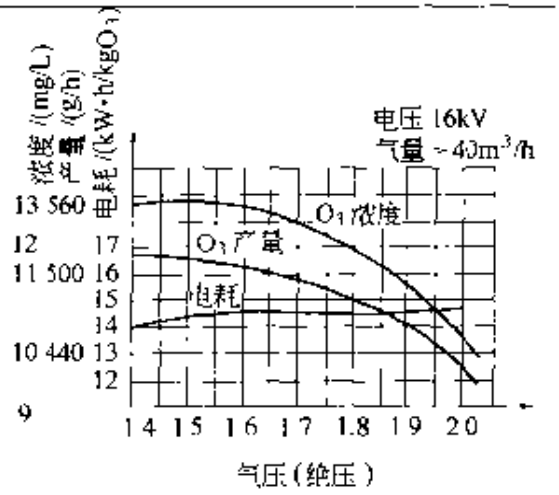
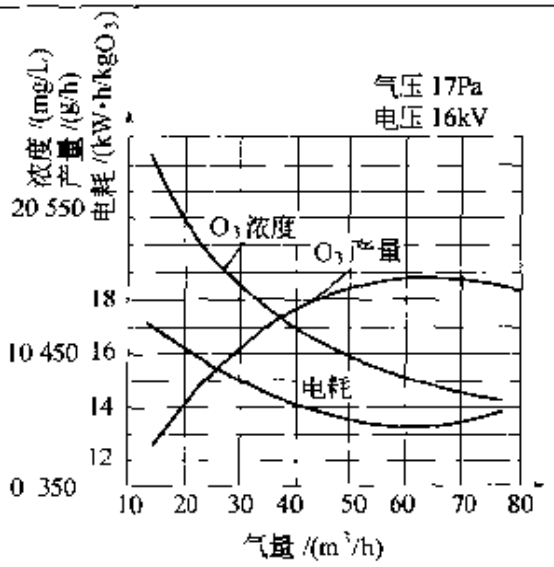
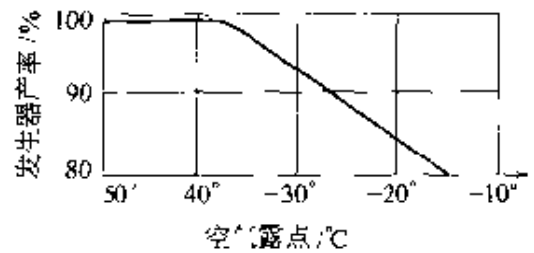
生产臭氧的气源目前主要采用清洁干燥的空气，也有采用富氧空气和纯氧，后者气源可提高臭氧化气体中臭氧浓度和单位电耗的臭氧产量。

臭氧发生器输入电流的频率从 50Hz 变成中频 500～800Hz，或高频（高于 1000Hz）臭氧浓度和产率都可增加，其中产量可增加 2.7～3.3 倍，最高可达 7 倍。

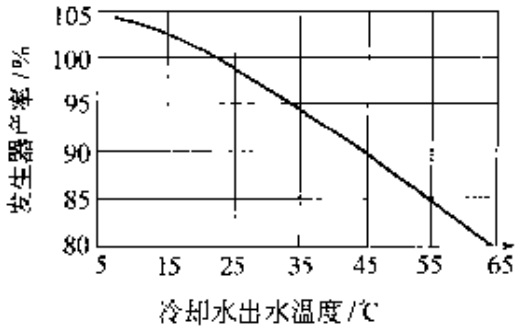
臭氧发生器的臭氧产量、产率和臭氧浓度与空气的露点、气量、气压、电压等因素有很大关系，下面是某水厂使用的 QD-500 型臭氧发生器运行特性和前苏联生产的 ОП-121 型臭氧发生器产率与空气湿度和冷却水温度的关系。从图 2-4-9［（1）～（5）］的发生器特性曲线及其说明中，可知影响产量的诸因素。

发生器特性	特性曲线图示，图 2-4-9
（1）变电压特性 发生器的工作气压和气量不变时，产生的臭氧化气中的臭氧浓度、产量和比电耗随发生器的工作电压的变化而改变	 QD-500 型臭氧发生器变电压特性曲线

续表

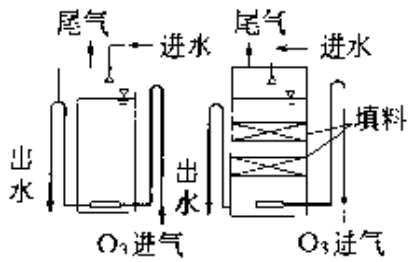
发 生 器 特 性	特性曲线图示，图 2-4-9
(2) 变气压特性 工作电压和气量不变时，臭氧化气中的臭氧浓度、产量和比电耗随工作气压(绝对压力)的变化而改变	 QD-500 臭氧发生器变气压特性曲线
(3) 变气量特性 工作电压和气压不变时，臭氧化气中的臭氧浓度、产量和比电耗随工作气量的变化而改变	 QD-500 臭氧发生器变气量特性曲线
(4) 产率与空气湿度关系 发生器的臭氧产率随着空气湿度的增大而下降，因此，要求对原料空气需进行深度干燥处理，使其露点达到－50℃以下(含湿量相应为 0.032g 水/m³ 气)	 ОП-121(前苏联)臭氧发生器产率与空气湿度的关系

续表

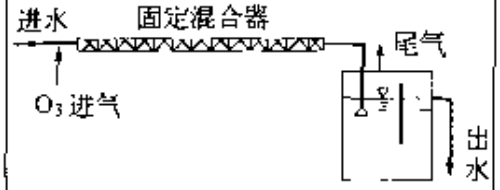
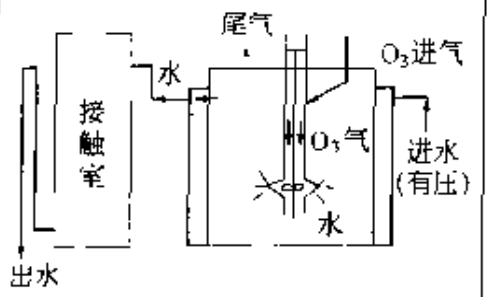
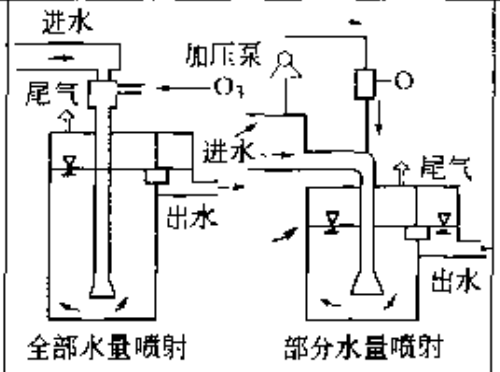
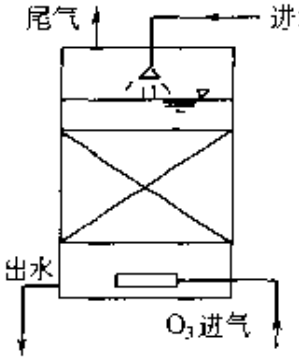
发生器特性	特性曲线图示，图 2-4-9
(5) 产率与冷却水温关系 发生器的臭氧产量与冷却水的出水温度有关，温度愈高，产率愈低	 ОП-121(前苏联)臭氧发生器产率与冷却水出水温度的关系

191 用什么方法把臭氧加入水中？

臭氧用于水处理的过程，是臭氧从气相到液相的传质过程，亦是溶于水中的臭氧同水中无机物、有机物起氧化反应的过程。受传质速度控制的污染物去除时，应选用传质效率高的装置如螺旋混合器，蜗轮注入器、水喷射器等。受化学反应速度控制的污染物去除时，宜选用可较长时间保持一定溶解氧浓度的接触反应装置，如鼓泡式接触氧化塔，这样能适应臭氧和污染物进行缓慢化学反应，达到分解降解污染物的目的。臭氧加注入水中的方法见下表及图2-4-10。

类型	图示，图 2-4 10	运行方式	传质能力	优缺点
鼓泡塔		气水顺流、逆流或多级串联交迭逆顺流。连续运行或间断批量运行	传质效率低	优点：能耗较低 缺点：(1) 喷头堵塞时布气不均匀 (2) 混合差，易返混 (3) 接触时间长 (4) 价格高

续表

类型	图示，图 2-4-10	运行方式	传质能力	优　缺　点
固定混合器		气水强制混合，可顺流或逆流连续运行。水量大，可部分投加	传质能力极强	优点：(1) 设备体积小，占地少 (2) 接触时间短 (3) 处理效果稳定 (4) 易操作，管理方便 (5) 无噪声，无泄漏 (6) 用材省，价格低 缺点：(1) 流量不能显著变化 (2) 耗能
蜗轮注入器		气水强制混合，多用于部分投加，淹没深度<2m	传质能力强	优点：(1) 水头损失小，臭氧向水中转移压力大 (2) 混合效果好 (3) 接触时间较短 (4) 体积较小 缺点：(1) 流量不能显著变化 (2) 耗能较多 (3) 有噪声
喷射器		气液强制或抽吸通过孔道，可部分投加或全部投加	优质能力较强及界面面积较高	优点：(1) 混合好 (2) 接触时间短 (3) 设备小 缺点：(1) 流量不能显著变化 (2) 耗能较多
填料塔		气水逆流通过填料空隙，可连续或间断批量运行	传质好，随气水流量及填料类型而定	优点：气水比适应范围广 缺点：(1) 耗能高 (2) 价格贵 (3) 易堵塞 (4) 填料表面积垢，维护困难

192 臭氧消毒剂在给水处理中的应用情况怎样?

臭氧作为一种消毒剂，于1886年首先在法国用于水处理。以后经过不断的研究试验，于1906年在法国民斯市建成了第一座用臭氧消毒的自来水厂，在20世纪30年代我国福建厦门水厂也用过德国制造的管式臭氧发生器进行自来水的消毒。目前全世界在运转的臭氧化自来水厂已经超过1000多家，其中规模较大的水厂有加拿大蒙特利尔市水厂 $230\times10^4\ m^3/d$，莫斯科水厂 $120\times10^4\ m^3/d$，法国瓦兹勒瓦水厂 $80\times10^4\ m^3/d$，纳伊市水厂 $60\times10^4\ m^3/d$，德国奥利水厂 $50\times10^4\ m^3/d$。

国内给水厂使用臭氧的有北京田村山水厂、燕山石化给水厂、南京炼油厂给水车间以及上海周家渡水厂等单位。

臭氧既是氧化剂又是消毒剂的这一特性，可利用来除去水中色、臭、味，除去水中的铁盐和锰盐，使低价铁锰转变成氢氧化物，然后通过沉淀方法除去。若臭氧单独使用，可作为原水预臭氧化处理，以改善水的澄清效果，起到除去部分有机物的作用．臭氧还可作为饮用水消毒剂，杀灭病毒和病菌。

臭氧在水处理中的应用优选工艺已经成为研究的热点，臭氧生物活性炭为其中之一。臭氧生物活性炭是臭氧与活性炭的联合使用。采用臭氧生物活性炭工艺是在自来水厂常规工艺流程的基础上，用预臭氧化代替预氯化，然后在快滤池后面设置生物活性炭池，也有将臭氧加在生物活性炭池前的，也有两处都加的，采用这些水处理技术，能充分发挥臭氧直接氧化较大分子的有机物，使原来不可生物降解的有机物转化成容易降解的有机物，如臭氧可将腐殖质氧化成醋酸、草酸、甲酸、对苯二酸、二氧化碳和酚类化合物。这些氧化物可生化性极好，并可把溶解性 Fe^{2+}、Mn^{2+} 氧化成不可溶的高价态，使其在沉淀或砂滤阶段除去，并促进了絮凝作用，改善了预处理效果。由于臭氧氧化，从而提高了水中溶解氧含量、满足了后继生物活性炭滤池生物的需氧量，经臭氧氧化之后，水中溶解氧常呈饱和状态或接近饱和状态，因而有利于后续生物活性炭生物生长繁殖的要求。其次该工艺又充分利用活性炭巨大的比

表面积和优越的吸附性能，加上足够的溶解氧，水中可生化性溶解性有机物截留在活性炭表面，给微生物的生长创造了良好的条件，从而使活性炭池附着的好氧微生物大量生长繁衍，活性炭池变成了生物活性炭池，担负着水中有机物生物氧化降解作用和氨氮硝化作用。总之该工艺能发挥生物氧化降解水中有机物，活性炭吸附水中有机物、臭氧化学氧化水中有机物，达到协同作用、降低处理后水中有害有毒有机物的目的。

193　二氧化氯的物理、化学性质怎样？

二氧化氯的物理性质：

二氧化氯的分子式为 ClO_2，是一种随浓度升高颜色由黄绿色到橙色的气体，具有与氯气相似的刺激性气味。沸点 11℃，凝固点 −59℃，临界点 153℃，水中的溶解热为 2.76×10^4J/mol。液体密度为 1.64kg/L，气体密度为 3.09g/L（11℃）。纯二氧化氯的液体与气体性质极不稳定，在空气中二氧化氯的浓度超过 10%时就有很高的爆炸性。因此二氧化氯不能像液氯那样装瓶运输，必须在现场现制现用。二氧化氯易溶于水，溶解度约为氯气的 5 倍。在常温（25℃），1.1×10^4Pa 分压下，溶解度约为 8g/L。与氯不同，二氧化氯在水中以纯粹的溶解气体形式存在，不发生水解反应。二氧化氯的水溶液在较高温度与光照下，会生成 ClO_2^- 与 ClO_3^-，因此应在阴凉避光处存放。二氧化氯溶液质量浓度在 10g/L 以下时，基本没有爆炸的危险。

二氧化氯的化学性质：

二氧化氯的化学性质非常活泼，一般在酸性条件下具有很强的氧化性，其氧化能力仅次于臭氧。可氧化水中多种无机和有机物，氧化反应举例如下：

（1）与无机物反应

对铁、锰的氧化反应：

$$2ClO_2+5Mn^{2+}+6H_2O=\!=\!=5MnO_2+2Cl^-+12H^+$$

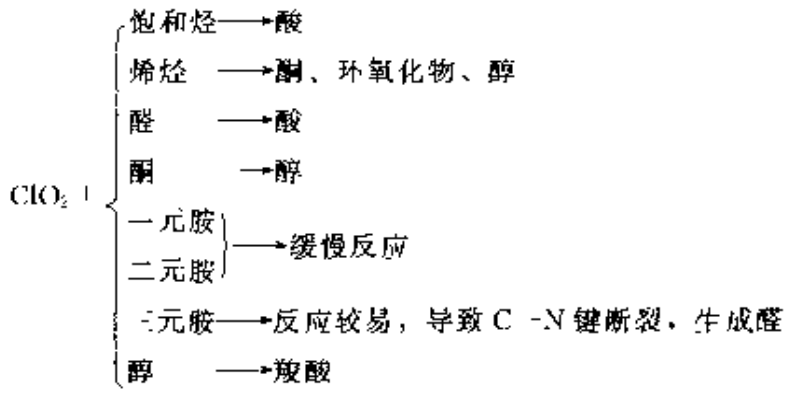
$$ClO_2+5Fe(HCO_3)_2+13H_2O=\!=\!=5Fe(OH)_3+10CO_3^{2-}+Cl^-+21H^-$$

对氰根的氧化反应：

$$2ClO_2 + 2CN^- = 2CO_2 + N_2 + 2Cl$$

（2）与有机物反应

二氧化氯与水中有机物的反应比较复杂，主要发生氧化反应，典型的反应物与产物如下：



值得注意的是，二氧化氯与酚能迅速反应，但不生成有异味的氯酚。而氯与酚反应，发生取代反应，形成氯醌。根据二氧化氯与酚的浓度比率不同，产物也不相同。比率高时主要产物为1,4-苯醌，比率低时主要产物为2-氯1,4-苯醌。

二氧化氯与腐殖酸反应，不会生成三氯甲烷，主要生成如下四类氧化产物：苯多羧酸，二元脂肪酸，羧苯基二羟乙酸，一元脂肪酸。它们的致突变性相对较低。而氯与腐殖酸反应则会形成三氯甲烷。

（3）光解反应

二氧化氯对光较为敏感，见光易发生如下分解：

$$2ClO_2 + H_2O \xrightarrow{光} HClO_3 + HCl + 2O^*$$

即使在黑暗的条件下，二氧化氯溶液在室温下每天仍有2%～10%的离解率，但如果将溶液在黑暗中冷却到2℃，离解率可下降到每天1%以下。另外，二氧化氯在碱性条件下（pH≥9）会发生歧化反应而降低氧化性。

194　二氧化氯与氯的杀生效果有些什么不同？与氯、臭氧、紫外线消毒方法的综合评价如何？

二氧化氯和氯虽同为杀生剂，但是两种不同物质，消毒杀菌性

能有很大的不同：

实验研究表明，二氧化氯对大肠杆菌、痢疾杆菌、沙门氏菌、异养菌、铁细菌、硫酸盐还原菌、军团菌、脊髓灰质炎病毒、肝炎病毒、兰伯氏贾第虫胞囊、尖刺贾第虫胞囊等均有很好的杀灭作用，效果优于氯气。例如在相同条件下，2.0mg/L 的 ClO_2 作用 30s 后，就能杀死近 100%的水中的大肠杆菌，而用 5.0mg/L 的 Cl_2，作用 5min，才能杀死 90%。

二氧化氯之所以与氯不同是在碱性条件下仍具有很好的杀菌能力，其杀菌效果受 pH 值的影响较小。而氯气在 pH＝8～9 时，杀菌率大幅度下降，仅为 44%～45%。这是因为，在碱性条件下，氯主要以 ClO^- 的形式存在，由于细菌表面带负电，ClO 难与细菌接近，杀菌作用受到影响。

二氧化氯对病毒的消毒效果，要比 O_3 和 Cl_2 更有效。例如对饮用水中内毒杆菌的毒素去除率为卫生学中的一项重要指标，0.20～0.25mg/L 的 ClO_2 可在几分钟内将其杀灭，而氯气效率则低得多。

另外，在含有氨氮的水中，二氧化氯的杀菌效果要远远高于氯气。这是因为二氧化氯不与氨反应，以游离态二氧化氯分子的形式存在，保持较高的杀菌效率。而氯与氨反应，形成了杀菌效力很低的氯胺，降低了杀菌效果。

一般对消毒剂的评价可以从杀菌效果与消毒剂的稳定性两方面来考虑。其中杀菌效果反映了消毒剂的使用剂量、作用时间；而消毒剂的稳定性则反映了持续杀菌的能力。就杀菌效果来看，臭氧＞二氧化氯＞氯＞氯胺；就稳定性来看，氯胺＞二氧化氯＞氯＞臭氧。所以综合而言，二氧化氯的性能最佳。

二氧化氯与臭氧和紫外线的综合比较如下表所示。

综合比较项目	液氯	二氧化氯	臭氧	紫外线
消毒效果	较好	很好	很好	一般
除臭去味	无作用	好	好	无作用

续表

综合比较项目	液氯	二氧化氯	臭氧	紫外线
pH 的影响	很大	小	小～不等	无
水中的溶解度	高	很高	低	无
三卤甲烷的形成	极明显	无	当溴存在时有	无
水中的停留时间	长	长	短	短
杀菌速度	中等	快	快	快
等效条件所用的剂量	较多	少	较少	-
处理水量	大	大	较小	小
使用范围	广	广	水量较小时	水量较小时，悬浮物较少
除铁、锰效果	不明显	很好		不明显
氨的影响	很大	无	无	无
原材料	易得	易得	—	—
管理简便性	较简便	简便	复杂	较复杂
自动化程度	一般	高	较高	较高
投资	低	低	高	较高
设备安装	简便	简便	复杂	较复杂
占地面积	大	小	大	小
维护工作量	较小	小	大	较大
电耗	低	低	高	较高
运行费用	低	低	高	较高
维护费用	低	低	高	高

195 制备二氧化氯有哪些方法？

二氧化氯的生产方法分为电解法和化学法两种。

在工业上用量大（如纸浆漂白等），ClO_2 生产规模也大。生产的方法也很多，其中有 Persson 法、Kesting 法等等。

在水处理上应用的电解法，是将食盐溶液电解，产生 ClO_2、Cl_2、O_3 及 H_2O_2 混合气体。食盐溶液电解装置中电解槽是由不锈

钢圆筒和塑料圆筒组成。不锈钢内壁与塑料筒之间的部分为阴极室，不锈钢圆筒为阴极。塑料筒体内部为阳极室，阳极室内有阳极和中性电极，以高密度石墨为中性电极。金属阳极表面涂有一层有较低氧化电位的金属氧化物，阳极室与阴极室由离子隔膜隔开。电解后阴极室得到烧碱溶液，阳极室得到含有氯、二氧化氯、过氧化氢和臭氧的混合消毒剂。

此法以食盐为原料电解生成的复合消毒剂，原材料易得且低廉，产品纯度低，其中二氧化氯仅占10%左右，大多数为氯气。电极、隔膜的使用寿命不长，维护费用高。因此，目前已逐渐被化学法二氧化氯发生器及次氯酸钠发生器所取代。

在水处理上应用比较多的是化学法，是以氯酸钠或亚氯酸钠为原料经化学反应来制取 ClO_2 的方法，与电解法的综合比较如下。

综合比较项目	电解法	化学法	
		氯酸钠法	亚氯酸钠法
产品先进性	第一代产品	第二代产品	第三代产品
二氧化氯产率	<10%	30%左右	>95%
消毒液成分	90%氯气	30%ClO_2、30%ClO_3^-、30%Cl_2	95%以上 ClO_2
操作管理	复杂，劳动强度大	较复杂	简单
使用寿命	短	较长	长
制造成本	高	中	低
技术性能	不够稳定	不够稳定	稳定
自动化程度	低	低	高
产品系列	单一	齐全	齐全
应用领域	原料来源不便的偏远地区	医院污水等	饮用水等各种场合

根据以上的比较可知，以亚氯酸钠工艺为主的发生器应是水处理用小型二氧化氯发生装置的主流工艺，这主要是由于其原料转化率高、产品纯净，产量调节方便的原因。

化学法以 $NaClO_3$ 为原料时，生产 ClO_2 的基本反应式为：

$$NaClO_3 + 酸化剂 + 还原剂 \longrightarrow ClO_2 + \frac{1}{2}Cl_2 + 钠盐 + H_2O$$

式中的酸化剂可用 HCl 或 H_2SO_4，催化及还原剂有 SO_2、NaCl、HCl、Cl_2、H_2O_2、CH_3OH、Na_2SO_4 等。钠盐的酸根视所用酸化剂而定。氯酸钠法的工艺流程见图 2-4-11。

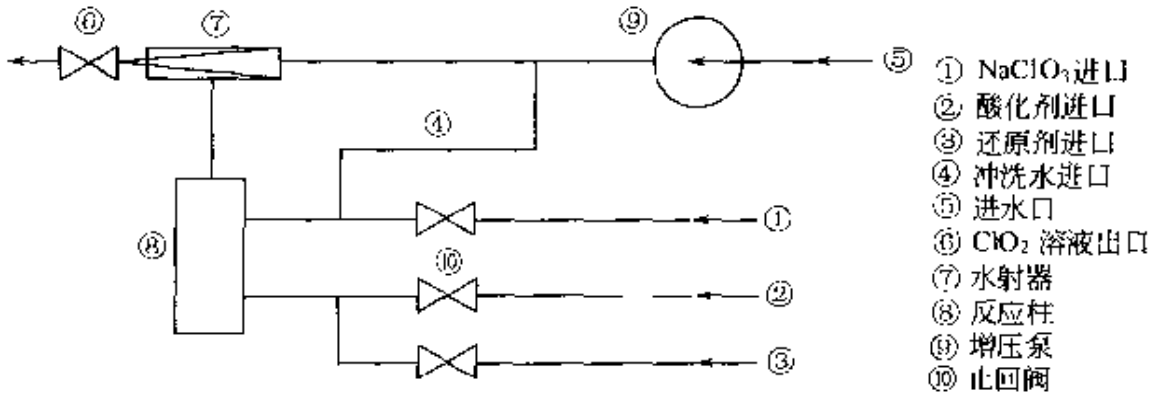


图 2-4-11 ClO_2 的制备流程（以氯酸钠为原料）

以 $NaClO_2$ 为原料时，主要有两种方法，一种是与 HCl 反应；另一种是与 Cl_2 反应，反应式如下：

$$5NaClO_2 + 4HCl \longrightarrow 4ClO_2 + 5NaCl + 2H_2O$$

$$2NaClO_2 + Cl_2 \longrightarrow 2ClO_2 + 2NaCl$$

亚氯酸钠法的工艺流程见图 2 4-12。

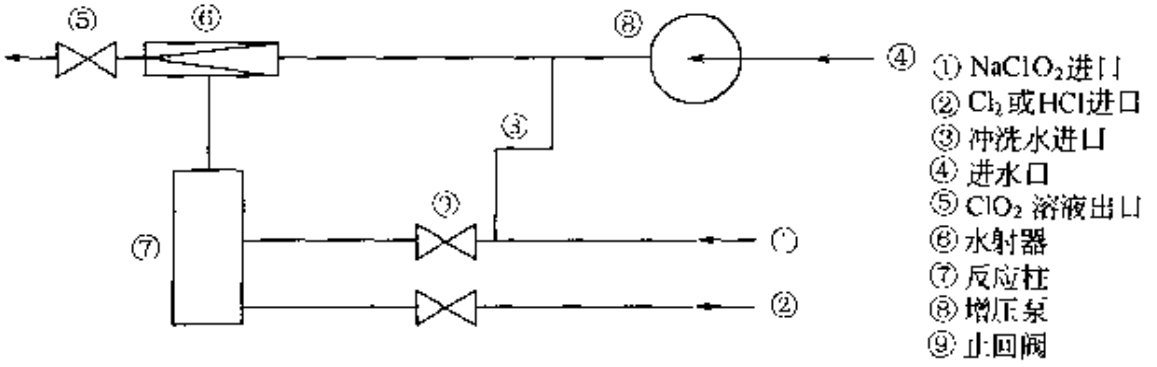


图 2-4-12 ClO_2 制备流程（以亚氯酸钠为原料）

固体的二氧化氯产品大都是以亚氯酸钠为主要原料生产的。

目前市场上 ClO_2 发生装置产出的 ClO_2 纯度变化很大。这里有很多原因，如反应物的转化率不高，反应物的残留和发生各种副反应，使得 ClO_2 与一定量的 ClO_2^-、ClO_3^-、Cl^-、Cl_2 共存，只能称为氯制剂。要提高 ClO_2 纯度必须优化生产系统的各个步骤和提

高发生器系统的科技含量。实践证明，ClO_2 纯度达到95%以上，转化率达70%以上的 ClO_2 发生器是完全能够做到的。

196　对投加二氧化氯有什么要求？

投加二氧化氯的要点如下：

（1）二氧化氯化学性质活泼、易分解，生产后不便贮存，必须在使用地点就地制取，因此，制取及投加设备往往是连续的。

（2）在水处理中投加二氧化氯的地点，视投加目的而异。如主要为了杀菌则应在滤后投加；如要求配水系统中保持杀灭微生物的余氯量，在配水系统中补充投加也是必要的；如主要为去除三卤甲烷，则应在滤前投加；如果要求去锰，则在投加后应有足够时间使二氧化锰沉淀；如果为了控制嗅和味，则在若干点分散投加。

（3）在设备的建设和运转过程中，本身必须要有特殊的防护措施，因为盐酸和亚硝酸钠等药剂如果使用不当，或二氧化氯水溶液浓度超过规定值，会引起爆炸。因而其水溶液的质量浓度应不大于6～8mg/L，并避免与空气接触。

（4）二氧化氯的投加量与原水水质及使用目的有关，一般在0.1～1.5mg/L范围内，需通过试验确定。

在制备二氧化氯的过程中，除了可以调节浓度以外，还可以改变投加量，以适应水质、水量的变化。

197　影响二氧化氯稳定的因素有哪些？

由于二氧化氯的化学性质极不稳定，不便于运输和贮存，因此，要在现场发生和使用。但加入稳定剂之后，使二氧化氯性质稳定，便于贮存和使用，这就是稳定性二氧化氯，保质期可达二年。影响二氧化氯的稳定有较多因素，如pH值、温度、光、杂质离子（特别是重金属离子）等。要使二氧化氯稳定可以采取以下措施：

（1）二氧化氯在pH8.5～9.5时十分稳定，因此采用增加缓冲液的方法来控制pH值。

（2）由于温度、光、热要引起 ClO_2 分解，因此，用过氧化氢于碱性条件下，在某些非金属催化剂作用下能形成诸如过氧化碳酸钠一类化合物，对 ClO_2 产生物理、化学的稳定作用。

(3) 由于杂质离子（主要是有些重金属离子）具有催化剂作用，而与强氧化剂 ClO_2 起反应，引起不稳定，故工艺用水应用除盐水。

(4) 如果工艺水中微生物过多也会使 ClO_2 不稳定，故应用热杀菌法对工艺水进行处理。

经过上述处理后，就成为稳定性二氧化氯。

198 什么是紫外线消毒?

紫外线是光谱中介于可见光的紫色光和 X 射线之间波段范围内的光波。其波长范围在 100nm 和 400nm 之间。其中又可分为长波紫外，中波紫外，短波紫外和真空紫外四个波段。也有分为 A、B、C、D 波紫外线。

A 波紫外线（长波紫外线）315～400nm

B 波紫外线（中波紫外线）280～315nm

C 波紫外线（短波紫外线）200～280nm

D 波紫外线（真空紫外线）100～200nm

紫外线杀菌的原理是生物细胞内含有的脱氧核糖核酸（DNA）能吸收 240～280nm 范围内的光波，而在对 260nm 波长的光波吸收达到最大值，使 DNA 受到破坏导致细菌死亡。

紫外线杀菌的强度单位是微瓦·秒/平方厘米（$\mu W \cdot s/cm^2$）。下表为杀伤各种微生物所需剂量。

各种微生物杀伤剂量

微生物名称	紫外线强度/($\mu W \cdot s/cm^2$)	微生物名称	紫外线强度/($\mu W \cdot s/cm^2$)
伤寒菌	7600	溶血性链球菌	5500
大肠杆菌	6100	绿色链球菌	3800
沙门氏菌	10000	金黄葡萄菌	6600
菌痢杆菌	4200	黄曲霉菌	9900
霍乱孤菌	6500		

紫外线消毒特点是：杀生能力强，接触时间短；设备简单，操作管理方便，处理后的水无色、无味、无中毒的危害；不会增加像氯气杀生时出现的氯离子。然而，紫外线没有余氯那样的持续杀生

作用，而且汞灯使用寿命短，价格贵，处理水量也小。

199 紫外线杀菌装置是怎样的？

在饮用水生产中应用的紫外杀菌装置由低压汞灯、壳体、电气装置组成。通电后可产生波长为 254nm 的紫外线。这种波长的紫外线辐射能量应占灯管总辐射能量的 80%以上。

紫外线灯管外套有石英管，要求能耐高温，对 254nm 的紫外线通过率为 90%以上。

紫外线灯管的壳体常用不锈钢材料制成，壳体内壁要求有很高的光洁度，对紫外线的反射率至少达 85%以上。

水在通过装有紫外灯管的壳体时受紫外光辐射，实现对水的消毒杀菌。壳体有立式、卧式两种，壳体直径的选用应根据流量决定。上海市地方标准 DB 314.2—89 “紫外光消毒器”中规定见下表。

紫外线灯功率和水流量

功率/W	15	20	30	50	90
最大出水量/(m^3/h)	0.2	0.6	1.0	2.0	3.0

紫外线杀菌装置的电气装置包括电源开关，指示灯，计时器，事故报警装置等。见图 2-4-13。

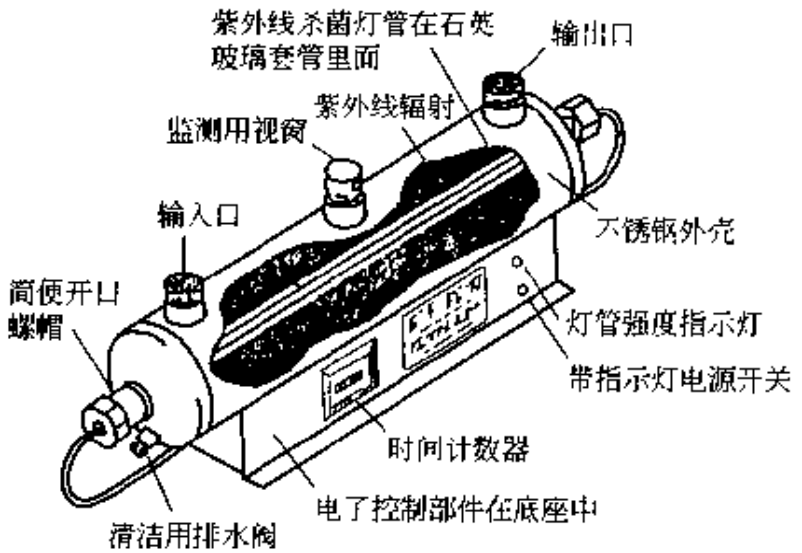


图 2-4-13 紫外线杀菌装置

200　紫外线杀菌效果与哪些因素有关?

影响紫外线杀菌效果的因素主要有灯管的功率，水流速度即水体在壳体内停留时间。水层受辐射的距离。

紫外线灯管的功率随着使用时间的增加其辐射能量随之降低，杀菌效果下降，如图 2-4-14 所示灯管使用时间到 2000h，发射强度下降 25%左右，使用时间为 10000h，发射强度只有额定的 55%左右。为保证产品质量，紫外灯管使用时间到 1000h 后应及时调换新灯管。

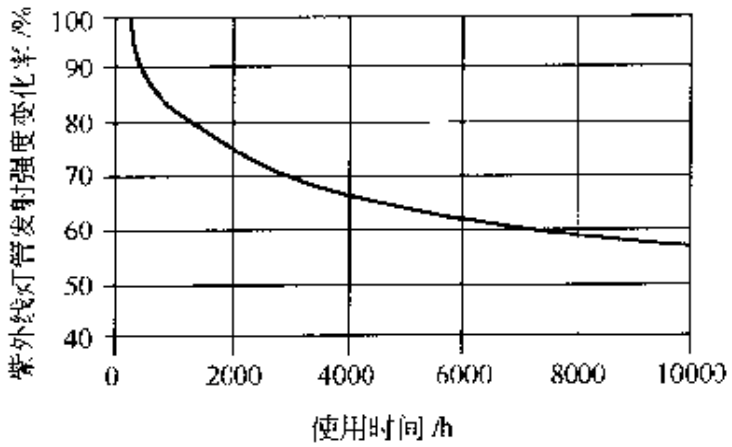


图 2-4 14　253.7nm 紫外线灯管发射强度变化率与使用时间关系

应保证供电电压的稳定以使辐射能量的稳定。

当水流量一定时，过流面积大，水流速度慢，水体在壳体内有足够长的停留时间，有利于杀菌。但是，壳体直径越大，水层厚度也越厚，离灯管的距离也就越远，杀菌效果也就差。据资料介绍 30W 紫外灯对 1cm 的水层灭菌效率为 90%，对 4cm 水层灭菌效率只有 40%左右。为保证水体在壳体内有足够的停留时间，又不致水层过厚，可在壳体内加装折流板以提高灭菌效果。

201　用紫外线消毒要注意些什么?

用紫外线消毒，在运行中要注意：

(1) 紫外线消毒不像氯气消毒有余氯能保持作用，因而消毒后的水要加强管理，防止再污染。

(2) 使用紫外线汞灯消毒时，灯管点燃后须有 5～15min 的稳

定时间。

（3）电气方面要采取措施，以保证灯管的额定功率和电压稳定，否则点燃功率不足时，将影响杀菌效果。

（4）紫外线消毒的设备和管理均较简单，但目前灯管使用寿命较短、价格较贵。紫外线消毒的应用场所是一些给水量较小的场所和小规模的工业用水的水厂，采用的大都是紫外线低压汞灯消毒。给水量较大的是采用紫外线高压汞灯消毒，目前在试用阶段，运行中需精心操作。

第三章　水的软化和除盐处理

（一）离子交换剂

202　什么叫离子交换剂？可分哪几类？

凡是能够与溶液中的阳离子或阴离子具有交换能力的物质都称为离子交换剂。

离子交换剂分无机质类和有机质类两大类。无机质类又可分天然的——如海绿砂；人造的——如合成沸石。有机质类又分碳质和合成树脂两类。其中碳质类如磺化煤等；合成树脂类分阳离子型——如强酸性和弱酸性树脂；阴离子型——如强碱性（Ⅰ、Ⅱ型）和弱碱性树脂；其他类型的有氧化还原型树脂、两性树脂和螯合树脂等类。

203　离子交换树脂发展的简况怎样？

离子交换现象早在18世纪中期就为汤普森（Thompson）所发现。直至1935年亚当斯（Aclams）和霍姆斯（Holmes）研究合成了具有离子交换功能的高分子材料，即第一批离子交换树脂——聚酚醛系强酸性阳离子交换树脂和聚苯胺醛系弱碱性阴离子交换树脂。离子交换树脂的大发展主要是在第二次世界大战以后。当时美国和英国一些公司成功地合成了聚苯乙烯系阳离子交换树脂，在此基础上又陆续开发了交换容量高、物理-化学稳定性好的其他聚苯乙烯系离子树脂，相继又开发了聚丙烯酸系阳离子树脂。20世纪60年代，离子交换树脂的发展又取得了重要突破，美国罗姆-哈斯公司（Rohm ancl Hass）和德国拜耳公司（Bayer）合成了一系列物理结构和过去完全不同的大孔结构离子交换树脂。这类树脂除具有普通离子交换树脂的交换基团外，同时还有像无机和碳质吸附剂

及催化剂那样的大孔型毛细孔结构，使离子交换树脂兼具了离子交换和吸附的功能，为离子交换树脂的广泛应用开辟了新的前景。

离子交换树脂和它的应用技术的发展一直是相互促进、互相依赖的。随着离子交换树脂的发展，树脂应用技术也在不断改善，开始是间歇式工艺，很快就发展到固定床工艺，20 世纪 60 年代后逆流技术及连续式离子交换工艺，双层床技术等获得了很快的发展，这些新的应用技术和工艺的开发，使离子交换树脂在许多领域的应用更加有效和经济。20 世纪 70 年代后，人们正以极大的兴趣，注意着热再生离子交换技术的发展。

204　磺化煤、天然绿砂及人造沸石有什么主要性能?

将无烟煤粉碎过筛，用发烟硫酸（或浓硫酸）处理后，除去多余的酸，即得到磺化煤。

磺化煤有如下主要性能：

（1）外观。磺化煤为黑色，不规则的细粒，粒径一般为 0.3～1.6mm 左右。

（2）湿视密度。一般为 0.55～0.65g/mL 之间。

（3）溶胀性。为多孔物质，具有吸水能力，吸水后体积膨胀为 10%～15%。

（4）交换容量。磺化煤的全交换容量 $Q_V^0\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$ 为 500mol/m^3 左右，工作交换容量 $Q_V^0\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$ 为 200～380mol/m^3 之间。

（5）稳定性。磺化煤的稳定性较差，最高耐热温度不超过 40℃。一般年损耗率为 10%～15%。

某些产地生产的磺化煤、天然绿砂及人造沸石的性能如下表。

无机离子交换剂的产品性能表[1.10]

品　　种	磺化煤	天然绿砂	人造沸石
产地举例	大连	抚顺	上海
外观	黑色	淡绿色	白色
粒度[2]/mm	0.3～1.2[1]	0.42～0.84	—
平均粒径/mm	0.48	0.6	0.67

续表

品　　种	磺化煤	天然绿砂	人造沸石
真密度/(g/cm³)	1.4	1.8	1.6
视密度/(g/cm³)	0.6～0.7 (0.55～0.65)①	1.0～1.2	0.65～0.72
允许 pH 值	≤8.5	6～8	6～8
允许温度/℃	40～60	30	30
膨胀度/%	15～30	—	—
总交换容量 $Q_V^0\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$/(mol/m³)	～500(≥250)②	300～350	～570

① 括号内为《水处理商品手册》的数据；

② 颗粒分布，0.5～1.6mm>80%，<0.5mm<10%（质量分数）[30]。

205　磺化煤在使用时应注意什么？

磺化煤在使用时应注意以下几点：

(1) 磺化煤在使用前应进行筛分，以清除碎末。使用的筛子依次为 55 目和 12 目，筛分后的粒度为 0.3～1.6mm。

(2) 磺化煤最好用水力装罐，初次使用可能杂质、碎末较多，为了反洗方便可考虑分两次装填：第一次先装至 0.9m 高，第二次再装至预定高度。每次装完，应用清水反洗至出水清澈时为止。

(3) 磺化煤的反洗流速应在 15～20m/h，时间为 30～45min。

(4) 磺化煤的再生可采用 10%食盐溶液，盐耗按 200g/mol 估算，再生流速为 3～4m/h 为宜。

(5) 正洗流速为 10～15m/h，正洗终点为出水硬度 0.25mmol/L。

206　磺化煤为什么能“脱色”？应如何处理？

磺化煤“脱色”是磺化煤的高分子骨架产生“胶溶”的一种现象，此时交换床出水呈黄褐色。

磺化煤产生“脱色”有两种情况：

(1) 磺化煤中部分低分子有机物产生溶解，并被水带出。这种脱色现象比较轻微，一般正洗几分钟即可消除。

(2) 一种情况是由于进水温度（或 pH 值）较高，较高的水温（或 pH 值）会使磺化煤遭到“降解”破坏，出水带色严重。

交换床刚投入运行时，出水稍有带色现象时，可以稍微加长正洗时间，待出水正常后即可投入运行。

如交换床出水带色严重，加长正洗时间也不见减轻，此时应尽快查明原因，进行处理。

207 什么是离子交换树脂？可分哪几类？

用化学合成法将高分子共聚物制成的有机单体颗粒的离子交换剂，称为离子交换树脂。离子交换树脂是由交联的结构骨架、以化学键结合在骨架上的固定离子基团和以离子键与固定基团以相反符号电荷结合的可交换离子。

离子交换树脂分类如下。

（1）按功能分：

强酸性树脂　其交换基团如磺酸基　SO_3H。

强碱性树脂　其交换基团如季铵基(Ⅰ)型　$CH_2N(CH_3)_3OH$；季铵基(Ⅱ)型　$CH_2N(CH_3)_2C_2H_4OH \cdot OH$。

弱酸性树脂　其交换基团如羧酸基　COOH；膦酸基　$-PO_3H_2$。

弱碱性树脂　其交换基团如伯胺基　$-CH_2NH_2$；仲胺基　$-CH_2NHR$[1]；叔胺基　CH_2NR_2。

氧化还原树脂　其交换基团如　CH_2SH；$Ar(OH)_2$。

两性树脂　其交换基团如　$-NR_2$；　COOH。

螯合树脂　其交换基团如　$-CH_2-N\begin{matrix}CH_2COOH\\CH_2COOH\end{matrix}$

（2）按结构分：凝胶型和大孔型树脂。

（3）按聚合物的单体分：苯乙烯类；丙烯酸类；酚醛类；环氧类；乙烯基吡啶类；脲醛类和氯乙烯类等。

（4）按用途分：工业级；食品级；分析级；核子级；双层床用树脂；高流速混床用树脂；移动床用和覆盖过滤器用树脂等类。

---

[1] R为烃基。

208 离子交换树脂有哪些主要性能？

离子交换树脂是高分子化合物，所以它的性能因制造工艺、原料配方、聚合温度、交联剂等的不同而不同，其主要性能分为两部分。

（1）物理性能

① 外观　树脂是一种透明或半透明的物质，因其组成不同，颜色各异，如苯乙烯树脂呈黄色，也有呈黑色和赤褐色的，但对性能影响不大。一般情况下，原料杂质多或交联剂多，树脂的颜色稍深（但树脂在运行过程中，因为各种原因有时颜色也会变化）。树脂外形呈球状，要求圆球率达到90%以上。

② 粒度　树脂颗粒的大小将影响交换速度、压力损失、反洗效果等。颗粒大小不能相差太大。用于水处理的离子交换树脂的颗粒以20～40目为宜。粒度的表示方法以有效粒径和不均匀系数来表示。

③ 密度　关系到水处理工艺和树脂装填量。密度的表示方法有：干真密度（一般1.6g/cm^{3}左右）、湿真密度（一般1.04～1.30g/cm^{3}之间）、视湿密度（一般在0.60～0.80g/cm^{3}之间）。

④ 含水率　树脂的含水率越大，表示孔隙率越大，交联度越小。

⑤ 溶胀率　树脂浸水之后要溶胀，它与交联度、活性基团、交换容量、水中电解质密度、可交换离子的性质等有关。树脂在交换与再生过程中会发生胀缩现象，多次胀缩树脂易碎裂。

⑥ 耐磨性　反映树脂的机械强度。它应保证每年树脂耗量不超过7%。

⑦ 溶解性　树脂内含有低聚合物要逐渐溶解，在树脂使用过程中也会发生胶溶。

⑧ 耐热性。阳树脂耐温100℃左右，强碱性阴树脂可耐60℃，弱碱性阴树脂可耐温80℃。但在低于或等于0℃时，易结冰而破碎。

⑨ 导电性　干树脂不导电，湿树脂可导电。

（2）化学性能

① 离子交换树脂的交换反应具有可逆性，因此既可以交换，也可以再生，可反复使用。

② 具有酸、碱性。H^+型阳离子交换树脂和OH^-型阴离子交换树脂等的性能与电解质酸、碱相同，在水中能电离出H^+和OH^-的能力。

③ 具有中和与水解性能。因它具电解质性质，能与酸、碱进行中和反应，也能进行水解。

④ 离子交换树脂吸着各种离子的能力不一，具有选择性。

⑤ 交换容量。表示其交换离子量的多少。根据树脂的形态可分平衡交换容量、全交换容量、工作交换容量等。

209　离子交换树脂的结构是怎样的?

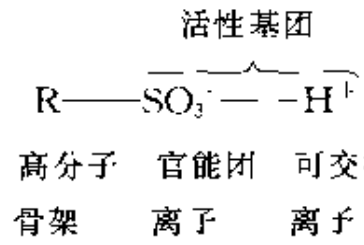
离子交换树脂结构主要由高分子骨架和活性基团两部分组成。

（1）高分子骨架　也称母体结构，它具有网状结构，是不溶于酸或碱的高分子物质。高分子骨架按其聚合单体可以分为苯乙烯系、酚醛系及丙烯酸系等。

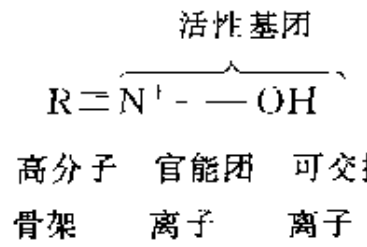
（2）活性基团　它牢固地结合在高分子骨架上，由不能自由移动的官能团离子和可以自由移动的可交换离子两部分组成。其中：①官能团离子决定离子交换树脂的“酸”、“碱”性和交换能力的强弱。官能团离子是强酸的（$—SO_3^-$），就叫强酸性离子交换树脂；是强碱的（$\equiv N^+$），就叫强碱性离子交换树脂。同样，按官能团离子的性质，还可以有弱酸（$—COO^-$），弱碱（$—NH_2^+$）和其他类型的离子交换树脂。②可交换离子。现代交换理论把离子交换树脂看做是一种胶体型物质：高分子骨架是“胶核”，活性基团作为高分子骨架表面的“双电层”，官能团和部分可交换离子组成吸附层，另一部分可交换离子组成扩散层。由于可交换离子是可以自由移动的，因而可以与水中同符号的离子发生交换反应。

如果离子交换树脂上的可交换离子为阳离子，例如H^+，就叫H型阳离子交换树脂；如果可交换离子为阴离子，例如OH^-，就叫OH型阴离子交换树脂。其余可依次类推。

H 型强酸性离子交换树脂结构可示意如下：



OH 型强碱性阴离子交换树脂：



210 离子交换树脂为什么制成球形？

离子交换树脂根据需要，可以制成粉状，不规则的颗粒或球状。但在化学水处理中使用的离子交换树脂是球状的。由于球状树脂制造简单，在采用悬浮聚合时，可以直接制成球形。在体积相同的情况下，球状树脂的表面积最大，有利于提高交换能力。

球状树脂充填性好，阻力较均匀，使树脂层各处的流量较均匀；而且水通过球状树脂层压力损失小，树脂的磨损也小。

树脂成球状的质量分数通常用圆球率表示，一般要求圆球率在90%以上。

211 离子交换树脂的粒度及均匀性对水处理有什么影响？

树脂粒度的大小，对水处理工艺有较大的影响，树脂颗粒过大，则使交换速度减慢；树脂颗粒过小，又会使水通过树脂层的压力损失增大。树脂的粒度应均匀，否则由于小颗粒树脂堵塞了大颗粒间的孔隙，会使水流不均和阻力增大。

另外，树脂粒度不均匀也使反洗操作不易控制；反洗流速过大会冲掉小颗粒树脂；而反洗流速过小，又不能松动大颗粒树脂，使反洗效果变差。一般水处理使用的树脂粒度以20～40目为宜，也就是0.3～1.2mm。在高流速装置中要求粒度范围更窄，约0.45～0.65mm，这可使流体阻力更小，同时树脂球粒的耐压强度较一致。

212　什么叫离子交换树脂的溶胀性？它与什么因素有关？

离子交换树脂是亲水性高分子化合物，当将干的离子交换树脂浸入水中时，其体积常常要变大，这种现象称为溶胀，使离子交换树脂含有水分。由于树脂具有这种性能，因而在其交换和再生过程中会发生胀缩现象，多次的胀缩就容易促使颗粒破裂。

影响离子交换树脂溶胀的因素有：

（1）交联度。高交联度树脂的溶胀能力较低。

（2）活性基团。活性基团易电离，即交换容量愈高，树脂的溶胀性越大。

（3）溶液浓度。溶液中电解质浓度越大，树脂内外溶液的渗透压差反而减小，树脂的溶胀就小，所以对于“失水”的树脂，应将其先浸泡在饱和食盐水中，使树脂缓慢膨胀，不致破碎，就是基于上述道理。

一般讲，强酸性阳离子交换树脂由 Na 型变成 H 型，强碱阴离子交换树脂由 Cl 型变成 OH 型，其体积均增加约 5%。

213　什么叫离子交换？

所谓离子交换，就是水中的离子和离子交换树脂上的离子，所进行的等电荷摩尔量的反应。

离子交换的反应过程可以用 H 型阳离子交换树脂 HR 和水中 Na^+ 交换反应过程为例：

$$HR^{①}+Na^+ \rightleftharpoons NaR+H^+$$

从上式可知：在离子交换反应中，水中的阳离子（如 Na^+）被转移到树脂上去了，而离子交换树脂上的一个可交换的 H^+ 转入水中，Na^+ 从水中转移到树脂上的过程是离子的置换过程。而树脂上的 H^+ 交换到水中的过程称游离过程。因此，由于置换和游离过程的结果，使得 Na^+ 与 H^+ 互换位置，这一变化，就称为离子交换。

214　什么叫离子交换反应的可逆性？

离子交换树脂主要的化学性质之一就是能进行离子交换反应，

① 此处 R 表示离子交换树脂的交换基团。

并且这个反应是可逆的。

当含有 Na^+ 的水与 H 型树脂相遇时，即产生下述反应：

$$RH-Na^- \longrightarrow RNa+H^+$$

这个反应实际上是离子交换的制水过程，这个过程是遵循“等电荷摩尔量”（即等当量）进行的；反之，当用盐酸（或硫酸）通过 Na 型树脂时，则会有下面的反应：

$$RNa+H^+ \longrightarrow RH+Na^-$$

这个反应实际上是阳离子树脂失效后的再生反应。

需要说明的是，上述两个反应向哪个方向进行，决定于当时水中各种离子的浓度。

将上述两个反应式合并表示如下：

$$RH+Na^+ \underset{\text{再生}}{\overset{\text{运行}}{\rightleftharpoons}} RNa+H^+$$

离子交换反应的可逆性是离子交换树脂能够反复使用的重要原因。

215　失效树脂为什么可以通过再生重新获得交换能力？

为了说明上述问题，以 Na 型树脂交换水中 Ca^{2+}、制取软化水来加以说明。

当把含有 Ca^{2+} 的水通入 Na 型离子交换树脂时，Na 型树脂即吸着水中的 Ca^{2+}，并把本身含有的 Na^+ 释放出来；

$$2RNa+Ca^{2+} \longrightarrow R_2Ca+2Na^+$$

交换反应的结果，除去了水中的 Ca^{2+}。

当上述交换反应达到平衡时，根据质量作用定律，可得出：

$$K_{Na}^{Ca}=\frac{[R_2Ca]\cdot[Na^+]^2}{[RNa]^2\cdot[Ca^{2+}]}$$

式中　K_{Na}^{Ca}——平衡常数；

$[R_2Ca]$、$[RNa]$——分别表示反应达到平衡时，树脂中 Ca^{2+}，Na^+ 的浓度，mol/L；

$[Ca^{2+}]$、$[Na^+]$——分别表示反应达到平衡时，水中的 Ca^{2+}，Na^+ 浓度，mol/L。

当运行到出水中 Ca^{2+} 含量开始上升时，表示树脂失效了。为了使树脂重新获得交换能力，就要用 NaCl 对树脂进行再生：

$$2NaCl + R_2Ca \longrightarrow 2RNa + CaCl_2$$

此时，尽管 $K_{Na}^{Ca} > 1$，不利于树脂的再生，但由于再生时，NaCl 的浓度很高，而 Ca^{2+} 的浓度又很小，就可以使再生反应进行下去。

所以在化学水处理中，就是通过提高再生剂的浓度，反复利用离子交换平衡的移动，使失效的树脂重新获得交换能力。

216　什么是离子交换树脂的选择性？有什么规律性？

由于离子交换树脂对于水中各种离子吸着（或吸附）的能力不相同，对于其中一些离子很容易被吸着，而对另一些离子却很难吸着。被树脂吸着的离子，在再生的时候，有的离子很容易被置换下来，而有的却很难被置换。离子交换树脂的上述这种性能称之为选择性。树脂的选择性在实际水处理运行中，将影响离子交换过程和树脂的再生过程。

离子交换树脂的选择性有其一定的规律性，例如，水中离子载的电荷越大，就越易被离子交换树脂吸着。反之，如果离子的电荷越小，就越不容易被吸着，如二价的离子比一价的离子更易被吸着。但如果离子载有相同的电荷时，原子序数大的元素所形成的离子的水合半径小，就容易被离子交换树脂所吸着。

在含盐量不太高的水溶液中，常见离子的选择性次序为：

（1）对于强酸性阳离子交换树脂：

$Fe^{3+} > Al^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^{+} \approx NH_4^{+} > Na^{+} > H^{+} > Li^{+}$；

（2）对于强碱性阴离子交换树脂：

$SO_4^{2-} > NO_3^{-} > Cl^{-} > OH^{-} > F^{-} > HCO_3^{-} > HSiO_3^{-}$；

（3）对于弱酸性阳离子树脂：

$H^{+} > Fe^{3+} > Al^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^{+} > Na^{+} > Li^{+}$；

（4）对于弱碱性阴离子交换树脂：

$OH^{-} > SO_4^{2-} > NO_3^{-} > PO_4^{3-} > Cl^{-} > HCO_3^{-} > HSiO_3^{-}$。

但必须指出，选择性能还与离子交换树脂的活性基团有关。

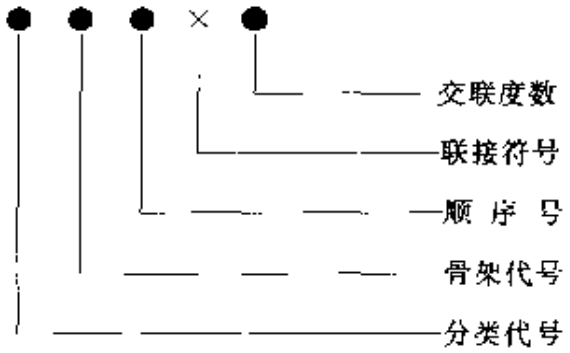
217 怎样识别离子交换树脂的牌号?

按我国国家标准（GB 1631—89）规定，离子交换树脂的牌号，以三位阿拉伯数字组成，数字从左到右，如下所示：

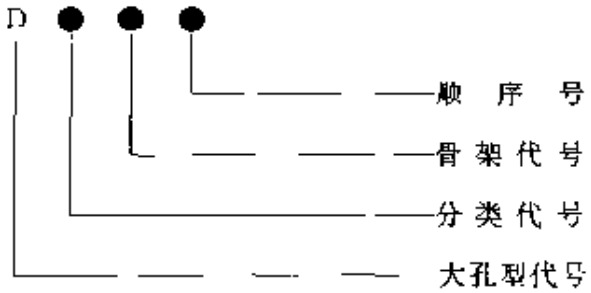
第一位数字	第二位数字	第三位数字
代表产品分类	代表骨架（或基团）名称	代表顺序号

如果用图解可以表示如下：

凝胶型离子交换树脂



大孔型离子交换树脂



离子交换树脂的牌号三位阿拉伯数字组成的各位数意义如下：

第一位数字的代号与分类名称如下：

代 号	分类名称	代 号	分类名称
0	强酸性	4	螯合性
1	弱酸性	5	两性
2	强碱性	6	氧化还原性
3	弱碱性		

第二位数字的代号与分类名称如下：

代　号	分类名称	代　号	分类名称
0	苯乙烯系	4	乙烯吡啶系
1	丙烯酸系	5	脲醛系
2	酚醛系	6	氯乙烯系
3	环氧系		

第三位数字是表示离子交换树脂的顺序。

此外，凡大孔型离子交换树脂，首位字母用“D”表示，凡凝胶型离子交换树脂的交联度值用“×”号连接阿拉伯数字来表示。

举例来说：

如 201×7 型离子交换树脂：“2”表示强碱型树脂；“0”表示苯乙烯系的离子交换树脂；“1”表示顺序号为 1；“×”表示连接符号；“7”表示交联度为 7。

如 D113 型离子交换树脂：“D”表示大孔型离子交换树脂；“1”表示弱酸性树脂；“1”表示丙烯酸系；“3”表示顺序号为 3。

218　如何选择离子交换树脂？

选择离子交换树脂的一般原则是选择交换容量大、容易再生、而且使用耐久的树脂。具体来说：

（1）交换容量是离子交换树脂性能的一个重要指标，交换容量越大则同体积的树脂能吸附的离子越多，一个交换周期的制水量也越大。一般来说，弱酸或弱碱性树脂比强酸或强碱性的树脂交换容量大。另外，在同类树脂中，由于树脂的交联度不同，交换容量也不同。一般交联度小的树脂交换容量大；交联度大的树脂交换容量小。因此在选择树脂时要注意。

（2）要根据原水中需要去除离子的性质来选择树脂。如果只需要去除水中交换吸附性弱的离子时，则必须选用强酸或强碱性树脂。

（3）要根据出水水质要求来选择树脂。如果只需要部分除盐的系统，可以选用强酸性阳树脂和弱碱性阴树脂配合使用。对于必须完全除盐的纯水或高纯水系统，则要选择吸附性最强的强酸性阳离

子交换树脂和强碱性阴离子交换树脂配合使用，以去除较难吸附的离子。

（4）要根据原水中杂质的成分来选择树脂。如原水中有机物较多，或去除离子的半径较大时，应选用交联网孔直径较大的树脂。尽量选择高强度多孔性树脂。

（5）用于混合床的树脂，较多的是强酸-强碱性树脂的组合。但要考虑混合床树脂再生时分层容易，因此，要求两种树脂的湿真密度之差应大一些，一般应不小于15%～20%。另外，还要考虑到混合床运行时交换流速比较大，树脂磨损较为严重的情况，故应选择耐磨性的树脂。

（6）要根据除盐水工艺要求来选择树脂。例如双室床，选用强、弱性树脂配合使用，因为弱性树脂容易再生，对再生剂的质量要求也比较低，可以利用强性树脂再生后的再生液来再生弱性树脂，这样，再生剂的消耗低，制水成本低。

219　如何计算离子交换树脂的用量？

离子交换树脂用量的计算是先进行初算，再进行复算调整。计算步骤如下。

（1）树脂的体积用量计算：

$$V=\frac{Q\times\sum I}{E}$$

式中　V——树脂体积，m^3；

Q——周期制水量，m^3 或 t；

$\sum I$——原水中阳离子或阴离子的浓度 $c\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$ 或 $c\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$，mmol/L，取分析最高值；

E——离子交换树脂的工作交换容量 $Q_V\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$ 或 $Q_V\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$，mmol/L。

（2）树脂的重量计算：

$$w_1=V\times\gamma \quad t$$

式中 w_1- ——树脂重量，t；

γ——树脂的视密度，g/mL。

第二步进行复算调整。

因为，
$$V=\frac{1}{4}\cdot\pi d^2\times H$$

式中 d- ——离子交换塔内径，m；

H ——树脂的填装高度，m。

注意：H 的选择，对一级除盐水处理，当交换塔径在 2m 以上时，树脂层高度不低于 1.5m（一般选择 1.8m）；对塔径＜2m 时，高度可适当放低。混合床的塔径在 1.5m 以上时，树脂总高度不低于 1m，不高于 1.5m；塔径＜1.5m 时，高度可适当放低。混床的阴、阳树脂比例原则上可按 2 比 1。使用上可根据具体情况适当调整。

由于
$$d=\sqrt{\frac{V\times 4}{\pi\times H}}\quad \text{m}$$

计算的 d，常有小数，因此，要调整为设备加工模数的整数 D。此时，离子交换树脂的实际用量 w：

$$w=\frac{1}{4}\pi D^2\times H\quad \text{t}$$

离子交换树脂的实际用量，也就是离子交换塔内树脂的填充量（有的称树脂装填量），与离子交换设备的出力（产水量）有密切关系，大致如下表所示。

离子交换设备的出力与树脂填充量[3][2]

参数 / 设备直径/mm 与面积/m^2	流速/(m/h)			树脂层高/m		
	15	20	25	1.6	2.0	2.5
	流量/(m^3/h)	流量/(m^3/h)	流量/(m^3/h)	树脂体积/m^3	树脂体积/m^3	树脂体积/m^3
$\phi800F=0.5$	7.5	10	12.5	0.8	1.0	1.25
$\phi1000F=0.785$	11.8	15.7	19.6	1.256	1.57	1.96
$\phi1250F=1.17$	19.05	25.4	31.8	2.03	2.54	3.18
$\phi1600F=2.0$	30	40	50	3.2	4.0	5.0

续表

参数 / 设备直径/mm 与面积/m²	流速/(m/h)			树脂层高/m		
	15	20	25	1.6	2.0	2.5
	流量/(m³/h)	流量/(m³/h)	流量/(m³/h)	树脂体积/m³	树脂体积/m³	树脂体积/m³
ϕ1800 F=2.54	38.1	50.8	63.5	4.06	5.08	6.35
ϕ2000F=3.14	47.1	62.8	78.5	5.02	6.28	7.85
ϕ2200F—3.80	57	76	95	6.08	7.6	9.5
ϕ2500F=4.9	73.6	98.2	122.7	7.84	9.8	12.25
ϕ2800F—6.15	92.3	123	153.8	9.84	12.30	15.38
ϕ3200F=8.04	120.6	160.8	201	12.06	16.08	20.1

说明：阳离子交换器冲洗用水可采用过滤后的澄清水。阴树脂则需用经过氢交换后去除阴离子的水。

220 如何保管好离子交换树脂？

离子交换树脂的保管工作十分重要，应注意以下方面。

(1) 防冻 离子交换树脂应贮藏于室内，要保持周围环境温度在5～40℃。树脂在出厂时都含有一定的水分，如果温度在0℃以下，会使树脂中的水结冰，并使体积增大，造成树脂的粉碎和崩裂，从而损失了离子交换能力。如果树脂周围的环境温度可能低于5℃，为了防止树脂结冰，可以把树脂储存于食盐水溶液中。但是食盐水的浓度要根据气温条件进行配制，不同的气温要配制不同浓度的盐水，以防止食盐水结冰，使树脂免遭破损。浓度配制时，可参照下表所示的食盐水冰点与浓度的关系：

食盐含量/%	10℃时的相对密度	冰冻点/℃
10	1.07	—7.0
15	1.11	—10.8
20	1.15	—16.3
23.5	1.18	—21.2

(2) 防干 离子交换树脂由于受热和太阳晒，水分蒸发而干燥，或是在贮运和使用过程中水分消失，使树脂的体积忽缩忽胀，从而造成树脂破碎或树脂机械强度下降，丧失或降低了离子交换能力。在发生此种情况时，切不可把树脂直接投入水中，而是先将其

浸泡于饱和的食盐水中，使树脂缓慢膨胀才不致破碎。离子交换树脂切忌露天堆放。

此外，离子交换树脂也不宜长期贮存，一般不得超过5年。否则，特别是阴离子型树脂可能因交换基团的分解，而明显降低其交换容量。

(3) 防霉　离子交换树脂长期放置在交换器内不用，会滋长青苔和细菌繁殖，从而使其发霉造成树脂污染。因此，必须定期进行换水和反冲洗。也可以用1.5%的甲醛溶液浸泡消毒。

保管离子交换树脂，必须将阴离子树脂和阳离子树脂分开堆放，挂上标签，切不可混杂。

221　什么是离子交换树脂的全交换容量和工作交换容量?

将离子交换树脂中所有的活性基团都变成可交换离子之后，而把这些可交换离子全部交换下来的容量称为全交换容量。因此，全交换容量也即表示离子交换树脂中能够起交换作用的活性基团的总数。

离子交换树脂的工作交换容量是在水处理的实际运行条件下(或模拟条件下)，也就是离子交换树脂在动态的工作状态下测得的交换容量。由此可知，运行条件不同，测得的工作交换容量也就不同，影响工作交换容量的因素很多，例如，水的离子浓度、交换终点的控制指标、树脂层的高度、交换速度以及交换基团的形式等。在实际使用中，树脂的工作交换容量更有意义，但全交换容量与工作交换容量没有固定的比值关系，因此，不能以全交换容量去推算工作交换容量。

此外，还有平衡交换容量，也就是离子交换树脂在水溶液中到达交换平衡状态时的交换容量。

离子交换树脂的交换容量单位可用重量法和容积法两种方法表示。重量法是指单位质量的干树脂所具有的交换容量 $Q_m\left(\frac{1}{x}A^{x+},\ \frac{1}{x}B^{x-}\right)$，用 mmol/(g 树脂)，也可用 mol/(g 树脂)来表示；容量法

是指单位体积的湿树脂所具有的交换容量 $Q_V\left(\frac{1}{x}A^{x+}, \frac{1}{x}B^{x}\right)$，用 mmol/(L 树脂)，也可用 mol/(L 树脂)来表示。但要注意，重量法指的是干树脂的重量，容积法指的是充分膨胀后湿树脂的体积。交换容量常用容积法表示。

222 各类离子交换树脂交换容量利用率有什么不同?

各类离子交换树脂的交换容量利用率因树脂的性能不同，再生度不同，以及交换的残余容量不同而有差异。这是由于再生度不能很高，也不能等树脂完全失效后再生，而是残留一定的交换容量以确保出水水质，因此树脂交换容量利用率不可能很高，其情况如下表：

各类离子交换树脂交换容量利用率的比较

树脂类别	全交换容量	可利用率	再生度	失效度	残留容量	实际利用率
强酸树脂	1	1	≈0.65	≈0.85	≈0.15	≈0.5
弱酸树脂	1	1	≈0.95	≈0.60	≈0.40	≈0.55
强碱树脂	1	≈0.93	≈0.40	≈0.85	≈0.15	≈0.25
弱碱树脂	1	≈0.82	≈0.80	≈0.95	≈0.05	≈0.75

从上表可见，弱碱树脂交换容量的实际利用率最高。

223 什么叫离子交换树脂的饱和度、再生度?

离子交换过程中，离子交换树脂上的交换基团被水中离子置换而失去交换能力时，即称为“失效”。离子交换树脂失效时的工作交换容量占全交换容量的比值称为离子交换树脂的饱和度。

离子交换树脂的再生度，就是在树脂失效之后，经过再生处理重新获得交换能力的程度称为再生度。再生度可以表示为：

$$T=\frac{RH\text{ 或 }ROH}{Q_V^a}\times 100\%$$

式中 T——离子交换树脂的再生度，%；

RH——阳离子交换树脂中的 H^+ 总浓度，mol/L；

ROH——阴离子交换树脂经过再生后测得的全交换容量，或是

阴离子交换树脂中的OH^-总浓度，mol/L；

Q_V——该树脂的体积全交换容量$Q_V\left(\frac{1}{x}A^{x+}, \frac{1}{x}B^{x-}\right)$，mol/L。

再生度越高，说明再生效果越好，一般情况下逆流再生比顺流再生的再生度高。再生度与再生剂的用量、浓度、流速、温度、正洗流速和水质等都有关系。

224 树脂的密度有哪几种表示形式？

树脂的密度有三种表示形式：

(1) 干真密度 即在干燥的状态下，组成树脂合成材料的本身密度，即：

$$\text{干真密度}=\frac{\text{干树脂质量}}{\text{树脂颗粒的真体积}}\ \text{g/mL}$$

此值一般为1.6g/mL左右，通常只用于树脂性能的研究方面。

(2) 湿真密度 即树脂在水中，经过充分膨胀之后，树脂颗粒本身的密度，也即单位体积湿树脂中树脂骨架的质量。

$$\text{湿真密度}=\frac{\text{湿树脂质量}}{\text{湿树脂颗粒体积}}\ \text{g/mL}$$

此值一般在1.04～1.30g/mL之间，阳树脂的湿真密度常比阴树脂大。在离子交换树脂用于混合床和双层床操作工艺时，为了使两种离子交换树脂能供湿真密度的不同而分层，必须使搭配树脂的湿真密度有足够的差值。

(3) 湿视密度 树脂在水中充分膨胀之后的树脂堆积密度，即：

$$\text{湿视密度}=\frac{\text{湿树脂质量}}{\text{湿树脂的堆体积}}\ \text{g/mL}$$

此值一般在0.60～0.85g/mL之间。此密度用于计算离子交换树脂交换塔中装填湿树脂的量。

225 弱酸、弱碱性树脂有什么特性？如何应用？

弱酸、弱碱性树脂的特性和应用范围如下。

(1) 弱酸性阳离子交换树脂 此树脂不能与中性盐所分解的离

子起离子交换反应（中性盐即强酸阴离子如 SO_4^{2-} 、Cl^- 、NO_3^- 等所形成的盐类），只能同弱酸盐类（亦即碳酸氢盐碱度）起离子交换反应，例如与水中常见的弱酸盐类碳酸氢盐的反应如下：

$$R(COOH)_2+\begin{matrix}Ca\\Mg\\Na_2\end{matrix}\Big\}(HCO_3)_2\rightleftharpoons R(COO)_2\Big\{\begin{matrix}Ca\\Mg\\Na_2\end{matrix}+2H_2CO_3$$

交换之后，不产生强酸。弱酸性树脂在失效之后容易进行再生，酸的耗量也低，通常约为理论值的 1.1 倍左右。因此比较经济，排废酸造成污染也比较小。

弱酸性阳离子交换树脂，应用子原水中碱度比较高的除盐系统，从而减轻强酸性树脂的负担。

（2）弱碱性阴离子交换树脂　此类树脂只能吸附强酸根离子，例如水中 SO_4^{2-} 、Cl^- 、NO_3^-；对子弱酸根离子如 HCO_3^- 的吸附能力很差；对于更弱的酸根离子如 $HSiO_3^-$ 吸附能力几乎没有。此外，其中的弱碱 OH 型树脂，对于能吸附的酸根也是有条件的，只能在酸性水溶液中进行。

弱碱性树脂极易用碱再生，不论是用强碱如 NaOH、KOH 和弱碱 Na_2CO_3、NH_4OH 都可以。

弱碱性阴离子交换树脂，常和强碱性阴树脂联合使用，甚至还可以用强碱性树脂再生之后的废液来再生，所以耗碱量很低。另外，弱碱性阴树脂由于交联度低、孔隙大，因此，所吸附的有机物质可以在再生时被清洗出去。

弱碱性阴树脂常应用子原水中强酸性阴离子及有机物质含量比较高的除盐系统。

226　强碱Ⅰ型、Ⅱ型阴离子交换树脂有什么特点？

强碱Ⅰ型阴离子交换树脂是用三甲胺[$(CH_3)_3N$]进行胺化处理得到的树脂，例如国产的 201×7 等阴树脂；强碱Ⅱ型阴离子交换树脂是用二甲基乙醇胺[$(CH_3)_2NC_2H_4OH$]进行胺化处理得到的，例如国产的 D202 阴树脂等。

Ⅰ型阴树脂比Ⅱ型的碱性强，热稳定性好，氧化性能稳定，并

且其季铵基团能在长时间内保持稳定。Ⅱ型树脂的耐热性能稍差，且季铵基团在所使用的过程中会转化为弱碱基团，从而降低了强碱的交换能力。Ⅰ型的除硅能力比Ⅱ型强，如果水中 SiO_2 含量占阴离子总量四分之一以上时，宜选用Ⅰ型阴树脂，不宜采用Ⅱ型树脂。Ⅰ型树脂还可以用在水质要求较高的除盐系统中。但Ⅱ型树脂的工作交换容量比Ⅰ型大得多，再生时碱耗也低，而且水中氯离子对其交换容量的影响很小。当水中有较多氯离子存在时，Ⅰ型阴树脂的交换容量会明显降低。

227　大孔型树脂有些什么特点？

大孔型树脂是在凝胶型树脂制备的基础上改进发展制得，它的特点：

（1）树脂的结构上，存在永久性微孔。其大小、孔道的数量和分布情况，是根据需要在制备过程中通过致孔剂来调节，不是仅仅通过交联度来控制的，树脂无论在干、湿情况下都永久性地存在孔道；

（2）树脂的表面积，由于内部为多孔海绵状，其表面积可以人为调节到 $1000m^2/g$ 以上；

（3）交换速度，由于大孔树脂内部微孔多而大，表面积大，离子交换扩散速度增大，交换速度加快，有的比凝胶型树脂大 10 倍；

（4）应用范围，扩大到非水体系，甚至气体也可以用；

（5）稳定性，耐溶胀收缩性能好。有好的耐化学性能和耐辐照性能。耐磨损性能也较好。有良好的耐热和耐冷热变化性能。有较强的抗有机物污染性能。流动性能好，对流体阻力小。一般用于吸附和分离相对分子质量大的物质。

但大孔型树脂的价格贵，体积交换容量低，再生剂耗量略高。

228　凝胶型与大孔型树脂有什么区别？

凝胶型树脂与大孔型树脂的主要区别在于它们的孔隙度不同。

用普通聚合法制成的离子交换树脂，是由许多不规则的网状高分子所组成，类似凝胶，所以称为凝胶型树脂。常见的凝胶型树脂，如苯乙烯系列的 001，201 等。

凝胶型树脂的孔隙度很小，一般都在 3nm 以下，而且严格的讲这些孔隙并不是真正的孔，而是交联与水合多聚物凝胶结构之间的距离，它随运行条件而改变，在干的凝胶型树脂中，这种“孔”实际上是消失了。

凝胶型树脂浸入水中会发生溶胀，体积变大。这种溶胀性会使树脂的机械强度降低；同时当凝胶型树脂在不同离子形态时，其膨胀率也会发生变化，这样就会因为树脂的反复膨胀、收缩而使树脂颗粒破裂。

大孔型树脂则不同：它的“孔”大于原子距离，而且不是凝胶结构的一部分，所以这个孔是真正的孔，其大小及形状不受环境条件而改变，因而在水溶液中不显示溶胀。

由于无机物离子的直径都很小（0.3～0.7nm），用普通的凝胶型树脂是完全可以除去；但当水中有有机物分子存在时，由于其分子很大（胶硅化合物的粒径可大于 50nm，某些蛋白质分子为 5～20nm），用普通凝胶树脂除去它们则有困难。而且再生时，这些被吸附的有机物也不易被再生下来，所以凝胶型树脂易于被有机物所污染。

由于大孔型树脂的孔径较大，在 10～200nm 以上，因之它能够比较容易地吸着高分子有机物，并且容易被再生下来，所以有较好的抗污染性。

大孔型树脂有交换容量较低，再生时酸碱用量大及价格较高等问题。

凝胶型树脂在聚合的时候，需要加入交联剂，并要控制交联剂数量上的变化，使得在树脂中形成相应的微孔，孔径在 0.5～5nm 之间。主要是用于吸附水中阴、阳离子，对有机物的吸附能力很弱。易污染老化，比表面积＜0.1m^2/g 干树脂。外观呈透明球状颗粒。

大孔型树脂是在合成的过程中，添加芳香烃、脂肪烃、醇类等有机溶剂，即所谓致孔剂，当树脂聚合后，除去上述溶剂，即在树脂里形成许多大孔。大孔树脂在湿态时呈不透明或乳白色，内表面

积在5m²/g以上，视密度与真密度之差大于0.05g/cm³。大孔树脂在水处理中能起吸附、过滤作用，能去除有机物质、腐殖酸、水质磺酸等；还可除铁、去色、并保护离子交换树脂免受污染，而延长交换树脂的使用寿命。在纯水制备过程中，如果主要起过滤作用，大孔型树脂要装在离子交换树脂或反渗透装置的前面；如果主要是用于吸附，大孔树脂宜于酸性水中进行吸附。

229　树脂对使用的温度有何要求？

各种树脂均具一定的耐热性能，在使用中对温度要求都有一定的界限，过高或过低都会严重影响树脂的机械强度和交换容量。温度过低如小于或等于0℃时，树脂易冻结，使机械强度降低，颗粒破碎，从而影响树脂的使用寿命、降低交换容量；温度过高，会引起树脂热分解，也影响树脂的交换容量和使用寿命。各种树脂的耐热性能应由鉴定试验来确定。但一般来说，阳树脂比阴树脂的耐热性能好。盐型树脂比H型或OH型好，而盐型又以Na型树脂耐热性能最好。一般的阳树脂可耐100～110℃，阴树脂可耐50～60℃（强碱性）。而弱碱阴树脂的耐热性能要比强碱性的好，一般可耐80～90℃。因此，树脂在使用时，对于水温要有严格的控制。

230　对离子交换树脂要检测哪些项目？

检测离子交换树脂的目的：一是检验新树脂的质量；二是掌握树脂使用后的质量变化情况。故树脂使用前应有检测数据，使用后也应定期（半年）进行检测。

离子交换树脂检测之前要清洗和转型，阳树脂转为钠型，阴树脂转为氯型，以便于在统一的基础上分析比较。检测的项目有：

（1）离子交换树脂的全交换容量。全交换容量是树脂性能的重要标志，交换容量愈大，同体积的树脂能吸附的离子愈多，周期制水量愈大，相应的酸、碱耗量也就低，检测全交换容量也为了便于选择树脂。

（2）离子交换树脂的工作交换容量。工作交换容量是树脂交换能力的重要技术指标。是指动态工作状态下的交换容量，工作交换容量的大小与进水离子浓度、终点控制、树脂层高、交换速度等有

关。因此，工作交换容量的测定具有重要的实用价值。

（3）离子交换树脂的机械强度。树脂在使用过程中相互磨擦，以及每一运行周期树脂的膨胀与收缩和表面承受压力，会使树脂破裂、粉碎，所以树脂机械强度的检测，关系树脂的使用寿命。

（4）离子交换树脂的密度检测。检测树脂的视密度用来计算离子交换塔所需湿树脂的用量。湿视密度一般为 0.6～0.85g/mL；检测树脂的湿真密度是便于确定反冲洗强度大小，并且与混合床树脂分层有很大关系。湿真密度一般为 1.04～1.30g/mL 左右。

（5）离子交换树脂所含的水分。因为树脂交联网孔内都有一定量的水分，与树脂交联度及孔隙率有关，交联度越小，孔隙率则越大，因此，检测树脂水分计算出含水率，可以间接反映出树脂交联度的大小。一般树脂含水率约 50%左右。

（6）离子交换树脂的颗粒度。颗粒大小对树脂交换能力、树脂层中水流分布的均匀程度、水通过树脂层的压力降以及交换与反洗操作等都有很大影响。树脂的颗粒度越小，其交换速度越大，水力损失也大，进、出水压差也越大。因此，颗粒度与运行操作有很大的关系。

（7）离子交换树脂的中性盐分解容量。检测树脂中性盐的分解容量主要是测定树脂中的强酸或强碱基团的组成。因为树脂交换基团的组成不同，使水中离子交换和吸附强度也不相同。另外，检测中性盐的分解也是测定树脂交换基团的离解能力。离解能力强的，离子交换速度快，否则，就慢。检测树脂中性盐分解容量对选用树脂很重要。

（8）离子交换树脂中灰分及铁含量。灰分和铁会沉积在树脂表面，堵塞孔隙，不易洗脱，长期积累会影响树脂交换能力和使用寿命。因此需要及时检测，采取措施。

（9）离子交换树脂的耗氧量。耗氧量主要是反映树脂受有机物污染的程度。树脂受有机物污染之后，清洗水耗量剧增，工作交换容量降低，出水水质差。检测树脂耗氧量，以判断树脂被污染的程度，及时采取有效措施。

231　为什么强酸性树脂以钠型出厂，而强碱性树脂以氯型出厂？

强酸性阳离子交换树脂是将聚苯乙烯白色球状颗粒磺化而得，过量的硫酸用氢氧化钠中和成钠型，并用清水洗涤，因此强酸性树脂通常以钠型出厂。

强碱性阴离子交换树脂是将聚苯乙烯甲基化，然后用叔胺（R═N）胺化，最后用盐酸中和过量的胺成氯型，并用清水洗涤之。因此强碱性阴树脂通常以氯型出厂。

232　新树脂为什么也要进行处理？如何处理？

新的离子交换树脂，因常含有少量低聚合物和未参加聚合反应的物质，除了这些有机物外，还往往含有铁、铝、铜等无机物质。因此，当树脂与水、酸、碱或其他溶液相接触时，上述可溶性杂质就会转入溶液中而影响水质。所以，新树脂在使用之前要进行处理。

具体的处理方法如下。

(1) 用食盐水处理　用10%的食盐水溶液，约等于被处理的树脂体积2倍，浸泡20h以上，然后放尽食盐水，用清水漂净，使排出水不带黄色。如果有杂质及细碎树脂粉末也应漂洗干净。

(2) 用稀盐酸处理　用2%～5%浓度的HCl溶液，约等于被处理树脂体积2倍，浸泡4h以上，然后，放尽酸液，用清水洗至中性为止。

(3) 用稀氢氧化钠溶液处理　用4%的NaOH溶液，约等于被处理树脂体积2倍，浸泡4h，然后放尽碱液，用清水洗至中性为止。

上述处理，如采用3m/h流速的流动方式处理，效果会更好。

新树脂经处理之后，稳定性能会显著提高。有的树脂在使用时尚需转型处理。

233　如何鉴别失去标签（志）的树脂？

在实际工作中，由于对树脂保管不善，或是其他原因，失去了标签（志），分不清是阴树脂还是阳树脂，这时切不可贸然使用，必须设法予以鉴别，常用方法及步骤如下。

(1) 取被鉴别的树脂样品 2mL，置于 30mL 的试管中，并用吸管吸去树脂层上部的水。

(2) 加入 1mol/L 的 HCl 溶液 5mL。摇动 1～2min，并将树脂上部的清液吸去，重复操作 2～3 次。

(3) 加入纯水清洗，摇动 1min，将树脂上部的清液吸去，重复操作 2～3 次，以去除过剩的 HCl。

经过上述操作之后，阳树脂转为 H 型树脂，阴树脂转为 Cl 型树脂。

(4) 加入质量分数为 10% 的 $CuSO_4$ 水溶液 5mL（其中含 1% H_2SO_4，以酸化），摇动 1min，并按 (3) 步骤充分用纯水清洗。

经过上述处理之后，鉴别方法如下：

如果树脂变成浅绿色，则加入 2mL 5mol/L NH_4OH 溶液，摇动 1min。用纯水充分清洗，经此处理如果树脂颜色变为深蓝色，即为强酸性阳离子交换树脂；如果树脂的颜色仍为浅绿色，则为弱酸性阳离子树脂。

但如果经上述 (1)～(4) 步骤处理时树脂颜色不变，那么，需要采取下面方法及步骤：

(1) 加入 1mol/L NaOH 溶液 5mL，摇动 1min，用倾泻法充分清洗；

(2) 加入酚酞溶液 5 滴，摇动 1min，用纯水充分清洗。

经上述处理后，鉴别方法如下：

此时树脂的颜色有两种可能：一是仍然不变；二是变为红色。

如果是变为红色时，即为强碱性阴离子交换树脂。如果仍然不变颜色时，需要采取下面的方法：

(1) 加入 1mol/L 的盐酸 HCl 溶液 5mL 摇动 1min，然后用纯水清洗 2～3 次。

(2) 加入 5 滴甲基红，摇动 1min，用纯水充分清洗。经上述处理后，鉴别方法如下：

如果树脂呈桃红色，则为弱碱性阴离子交换树脂。如果树脂的颜色仍然不变，则为无离子交换能力的共聚物颗粒。

234 阴、阳离子交换树脂混杂后如何分离？

在实际工作中，常会遇到树脂混杂，需要设法分离。分离方法：将混杂的树脂浸泡在饱和食盐水溶液中，经过一定时间的搅拌，利用阴、阳树脂的相对密度不同，在饱和食盐水溶液中的浮、沉性能也不同。强碱性阴离子交换树脂会浮在上面层，强酸性阳离子交换树脂会沉于底层，以此予以分离。

235 离子交换树脂的强度为什么会降低？

离子交换树脂的强度降低造成破碎的原因主要有：

(1) 离子交换树脂由于强氧化剂的作用而分解，降低了树脂强度。这种情况大都发生在阳树脂，例如由于进水余氯控制过高而受到影响。但是阴树脂受有机物的严重污染也会降解影响其强度。从运行的经验表明，有必要使进水的耗氧量降低至 1mg/L 以下（27℃，高锰酸钾法氧化 4h），国外有的规定进水耗氧量＜0.3mg/L。

(2) 离子交换树脂由于反复的机械摩擦而损坏，如经常反冲洗、快速水力输送、交换流速过大、空气及超声波的擦洗等，影响树脂强度。

(3) 由于离子交换树脂有时在高压力、高流速状况下运行，进、出水压差太大，树脂受到挤压碎裂而损失其强度。

(4) 由于在运行操作中树脂的容积膨胀太大，例如树脂在转型时的膨胀速度过快过大，反复胀缩而使树脂强度降低。

(5) 树脂的热稳定性能差，使用时水温过高，例如凝结水回收水温较高，往往会引起树脂碎裂，使强度降低。

(6) 由于树脂保管不当，失水干燥，一旦遇水就会胀裂；或是环境温度低于 0℃，因树脂内部水分冻结而胀裂、破碎，造成树脂的强度降低。

236 离子交换树脂使用后颜色变深说明什么？

离子交换树脂是一种半透明或透明的物质，依其组成的不同，其颜色也不一样。苯乙烯系树脂均呈黄色；丙烯酸系树脂有的无色透明，有的呈乳白色。一般讲，交联剂多，原料中杂质多，制出的树脂颜色则深。

离子交换树脂在使用一段时间后，由于水中的铁质或有机物的污染，其颜色也会变深；失效的离子交换树脂的颜色，比再生好的树脂要稍深一些。

因此有时候可以从树脂颜色的变化，看出树脂的“失效”程度。

237　树脂受到污染的原因是什么？

离子交换树脂在运行的过程中，如果发现颜色变深；树脂交换容量不断地下降；清洗水不断地增加；出水水质变差；周期性制水量不断下降等现象，可以认为树脂受到污染。污染的原因主要有：

（1）有机物引起的污染　有机物质在水中往往带有负电，成为阴离子交换树脂污染的主要物质。有机物主要是存在于天然水中的腐殖酸、胶团性的有机杂质、相对分子质量从500到5000的高分子化合物以及多元有机羧酸等，这些物质吸附在树脂上，有的占据或者结合了树脂上的活性基团，有的使树脂的强碱活性基团碱性降低而降解，使树脂降低了离子交换能力。这类污染从COD的监测中可以检出。

（2）油脂引起的污染　水中往往含有油类物质，形成膜状物，堵塞或包裹了树脂的微孔，阻碍树脂微孔中的活性基团进行离子交换。

（3）悬浮物引起的污染　水中悬浮物质，紧裹着树脂表面的液膜层，从而隔绝了树脂的离子交换过程，使树脂受到污染。这种污染以阳离子交换树脂为多。

（4）胶体物质引起的污染　水中胶体颗粒常带负离子，使阴离子交换树脂受到污染。胶体物质中以胶体硅对树脂的危害最大，它吸附并在树脂的表面上聚合，阻止树脂进行离子交换。

（5）高价金属离子引起的污染　原水中的高价金属离子（如混凝剂中高价金属离子的后移等），如Al^{3+}、Fe^{3+}等扩散进入阳离子交换树脂的内部，由于这些高价金属离子的交换势能高，与树脂中的固定离子$-SO_3^-$牢固结合形成$Al(SO_3)_3$、$Fe(SO_3)_3$等，从而使这部分的固定离子失去作用，丧失了离子交换能力。

（6）再生剂不纯引起的污染　离子交换树脂的再生剂不纯往往混有许多杂质，尤其是烧碱（NaOH）中的杂质甚多，如 Fe^{3+}、NaCl、Ns_2CO_3 等，对阴离子交换树脂的污染最为严重。

此外，细菌、藻类以及水中含氮、氨基酸之类物质等也会不同程度地使树脂受到污染。

238　阴离子交换树脂有机物中毒有些什么典型症状？

阴离子交换树脂易受有机物污染中毒，如果在操作运行中掌握其典型症状，判断其污染状况，能及时再生与复苏处理。其典型症状大致如下。

（1）阴离子交换树脂的冲洗用水量逐渐增大。这是由于有机物中的羧酸基团与再生剂苛性钠起作用而产生 COONa。而要使—COONa水解恢复至—COOH 型式需要大量的冲洗水。

（2）阴床出水电导率逐渐增加，pH 值逐渐下降（可低至5.4～5.7）。因为再生时未除去的有机物，在恢复运行后会游离（即泄漏）出来而进入出水中。由于这种污染是累积性的，泄漏会一个周期比一个周期严重。

（3）二氧化硅过早泄漏。有机物存在子树脂床的强碱交换部位，使阴离子交换树脂的除硅容量下降。

（4）经过一段时间后，交换容量全面下降。

239　什么叫树脂污染指数？不同的污染指数情况下采用什么措施？

污染指数是耗氧量（mg O_2/L）与总阴离子含量（mg/L），或与溶解固形物（mg/L）的比值。不同的比值（污染指数）采取的措施不同。如下表：

在不同污染指数下可采用的措施

污染指数表示方式	比　值	可采用的措施
（耗氧量，mg O_2/L）/（总阴离子量，mg/L）	<0.004	不需处理
	0.004～0.008	采用大孔型树脂
	0.008～0.015	采用专门除有机物的树脂
	>0.015	加氯、凝聚、澄清和过滤

续表

污染指数表示方式	比　值	可采用的措施
（耗氧量，mg（O_2/L）/（溶解固形物，mg/L）	<0.002	不需处理
	0.002～0.005	二床系统：不需处理 混床系统：采用抗污染性能好的树脂或保护措施（如前面有一级除盐，且二床系统中用大孔型强碱树脂）
	0.005～0.015	二床系统：采用抗污染性能好的树脂 混床系统：采用抗污染性能好的树脂并考虑预处理保护措施
	0.015～0.03	除上述措施外，还应增加预处理保护措施
	>0.03	除上述措施外，必须用加氯或凝聚、澄清

240　如何防止树脂受污染和怎样进行处理？

要防止树脂遭受污染必须控制好各项水处理工艺指标，层层把关。例如：

（1）要搞好混凝澄清处理，必须正确选择混凝剂，并由试验确定最佳的药剂投加量，防止铝盐、铁盐后移，严格控制砂滤器、活性炭过滤器出水中的浑浊度。Al^{3+}、Fe^{3+}要小于0.3mg/L；化学需氧量COD小于1mg/L。并通过活性炭过滤来吸附有机物质。

（2）搞好预处理的杀菌灭藻工作，控制好进入阳离子交换器前的余氯量。

（3）为了防止再生剂中的杂质对树脂引起的污染，除了要选用优质再生剂之外，对再生剂的运输和贮存过程中的容器要采取防腐措施，同时要避免混杂装货，要有专用车辆及装贮容器。

（4）对于可能接触树脂的压缩空气，要净化除油；要防止从脱除二氧化碳器的鼓风机中吸入未净化的空气；水源吸水口附近，必须禁止设立油脂码头或油船停靠站，防止油脂污染水体。

（5）定期用压缩空气吹洗树脂，以去除悬浮物、有机物和铁等，这样既可以清除又可以防止树脂沾上污染物。

虽然用各种措施来防止树脂受到污染，但经过一段时间运行之后，树脂有时还会受到污染，这是除盐水处理中常见的。这时可采用以下措施进行处理。

(1) 阴离子型树脂最容易受污染，污染程度也最为严重。当阴离子型树脂受污染时，可以用碱性食盐水法进行处理，其要求如下：

食盐水质量分数	pH 值	浸泡方式	循环流动方式
10%	10	40h，40℃	20h，流速 2.5m/h

碱性食盐水法处理加烧碱是增加腐殖酸之类物质的溶解度，并以 NaCl 与 NaOH 之比为 5 的配方来调节 pH 值为 10。此法能除去 90%以上的有机物质。水溶液适当加热，处理效果会更好。

如果是阳离子型树脂受到污染，可用酸或食盐水法除去污染物，处理条件如下：

酸或食盐水质量分数	浸泡时间/h	流动方式
10% HCl	6	4h，速度 2m/h
15% NaCl	30	15h，速度 2m/h

(2) 当严重污染时，在碱性食盐水的溶液中加入适量的次氯酸钠（一般<0.5%），来氧化腐殖酸有机物，使其分解。

(3) 改变阴离子树脂高分子骨架憎水性为亲水性。苯乙烯系的高分子骨架，是憎水性的，与腐殖酸相同，这两个高分子的吸引力都很强，难以解吸。因此，可以用亲水性的丙烯酸系高分子骨架，分子间吸引力比较弱，这样进入树脂的有机物经过碱再生处理容易解吸出来。

为防止树脂污染，使离子交换过程处于良好状态，经常有计划地进行树脂的复苏处理是很有必要的。

241 为什么阴离子交换树脂容易变质？

阴离子交换树脂的化学稳定性要比阳离子交换树脂差，所以阴离子树脂对于氧化剂和高温的抵抗能力较弱。阴离子树脂最易受到侵害的部位是分子中的氮，如季铵型的强碱性阴树脂在受到氧化剂侵蚀时季铵逐渐变为叔胺、仲胺、伯胺，使得碱性减弱，最后降解为非碱性物质。这就是阴离子交换树脂的氧化变质过程。在此过程

中，强碱性交换基团逐渐降解减少，弱碱性交换基团比例增加，阴树脂总的交换基团也在减少。开始时阴离子树脂氧化变质的速度最大，随后逐渐降低，约两年之后，氧化变质速度几乎恒定。为了防止阴树脂氧化变质，在进入阴离子交换塔之前，要尽力将水中氧化剂除去。运行中，要切实控制好水温。有的厂为了提高阴树脂的除硅效果将再生剂溶液加温，但要注意切不可过高。

242　树脂受到铁的污染应当如何处理？

树脂受铁的污染颜色变深，由深褐色直至完全变黑。分析树脂中铁含量，如果 Fe<0.01%，没有问题；如果 Fe>0.10%表示受到严重污染；当 Fe 在 0.01%～0.10%为中等污染。铁污染时，可用 4%的亚硫酸钠（Na_2SO_3）溶液浸泡 4～12h，或用 10% HCl 接触树脂 5～12h，但在处理之前需用食盐水处理，使其树脂失效（转型）。

243　怎样判断树脂受油污染？

树脂受到油的污染，会产生“抱团”现象，这类污染大都发生在阳离子交换树脂。油附着于树脂上增加了树脂颗粒的浮力。被油污染的树脂颜色呈棕色至黑色。判断树脂是否受到油的污染，只要取少许树脂加水摇动 1min，观察水面是否有“彩色”出现，如果有“彩色”说明是油的污染。受油污染的树脂，用非离子型表面活性剂为主的碱性清洗剂处理最为有效。

244　有哪些类别的专用树脂？

随着离子交换树脂应用技术的发展，以水处理技术为中心，国内外相继研制出众多类别的专用树脂。它们是：高纯树脂；双层床用树脂；移动床用树脂；混合床用树脂；惰性树脂；高流速用树脂；高强度树脂；耐氧化树脂；抗污染树脂；抗冻树脂；大颗粒树脂；粉状树脂；液态树脂；浸渍树脂；带指示剂树脂；催化反应用树脂；核级树脂；食品、医药专用树脂；农用树脂；色谱用树脂；吸附树脂以及其他应用树脂（包括分析用、精制用、碳化、磁性、酶载体用、热再生、去除有害气体用树脂等）。这些专用树脂，已被广泛应用于各个领域里。

（二）水的软化处理

245　为什么要进行水的软化处理？

天然水中含有各种盐类，这些盐类溶解为阳离子和阴离子，主要有 Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^{+} 和 HCO_3^-、SO_4^{2-}、Cl^- 等。含有这些盐类的水，在加热蒸发浓缩的过程中（如锅炉用水），Ca^{2+}、Mg^{2+} 等离子不断地与水中某些阴离子结合成难溶物质而析出，并生成水垢（俗称水锈），附在锅炉的受热面上。由于水垢的导热性能很差，从而阻碍了热交换，大大降低了锅炉的热效率，既浪费燃料又易烧坏部件，并危及安全，造成不良后果。为了消除或减少这些危害，就要把水中能形成水垢的硬度成分，如钙、镁离子，还有其他高价金属离子如铁、铝、锰等（因含量很少，虽然成垢，可略去不计），予以去除。因此，就需要进行水的软化处理。

246　什么是原水、软化水、除盐水、纯水和超纯水？

原水。是指未经过处理的水。从广义来说，对于进入水处理工序前的水也称为该水处理工序的原水。例如由水源送入澄清池处理的水称为原水。

软化水，是指将水中硬度（主要指水中钙、镁离子）去除或降低一定程度的水。水在软化过程中，仅硬度降低，而总含盐量不变。

除盐水，是指水中盐类（主要是溶于水的强电解质）除去或降低到一定程度的水。其电导率一般为 1.0～10.0μS/cm，电阻率（25℃）（0.1～1.0）$\times 10^6\Omega\cdot$cm，含盐量为 1～5mg/L。

纯水，是指水中的强电解质和弱电解质（如 SiO_2、CO_2 等），去除或降低到一定程度的水。其电导率一般为：1.0～0.1μS/cm，电阻率(1.0～10.0)$\times 10^6\Omega\cdot$cm。含盐量＜1mg/L。

超纯水，是指水中的导电介质几乎完全去除，同时不离解的气体、胶体以及有机物质（包括细菌等）也去除至很低程度的水。其电导率一般为 0.1～0.055μS/cm，电阻率(25℃)＞$10\times 10^6\Omega\cdot$cm，

含盐量<0.1mg/L。理想纯水（理论上）电导率为0.05μS/cm，电阻率（25℃）为$18.3\times10^6\Omega\cdot cm$。

247 为什么软化和除盐水处理前要除去过量的余氯？采用什么方法？

软化和除盐水处理所用的离子交换树脂是高分子的有机化合物，如果被氧化，就会破坏树脂的交联键，从而使树脂发生化学降解而降低交换能力。预处理时所加的氯是强氧化剂，因此，必须在除盐水处理的阳离子交换塔进水前（或是炭滤器的出水）将过量余氯去除。

但是，如果阳离子交换塔的进水余氯被除净，虽然树脂被氧化可以得到控制，可是这时的水质失去了持续杀菌能力，容易受到污染，又有可能在阳离子交换树脂的进水表层滋长微生物，使树脂受到有机物的侵害，权衡得失，还需保持一定的余氯量。一般保持余氯为0.02～0.1mg/L。

去除余氯的方法大都采用活性炭吸附法。水中的游离余氯（HClO，ClO^-）进入活性炭装置后，与活性炭$C_{活}$发生化学反应：

$$HClO+C_{活}\longrightarrow C_{活}O+H^++Cl$$

$$ClO^-+C_{活}\longrightarrow C_{活}O+Cl$$

这是一种表面化学反应，余氯被$C_{活}$表面吸附进行分解，生成的O将$C_{活}$氧化，生成炭的氧化物$C_{活}O$，余氯被还原为Cl而除去。为此，活性炭过滤必须设在阳离子交换塔前面。

248 水的软化处理有哪些基本方法？

软化处理的基本方法有三种。

（1）化学软化法 就是在水中加入一些药剂，从而把水中的钙、镁离子转变为难溶的化合物，并使其沉淀析出。如石灰软化法等。

（2）离子交换软化法 利用离子交换剂活性基团中的H^+、Na^+等阳离子与水中的硬度成分Ca^{2+}、Mg^{2+}进行离子交换，从而除去Ca^{2+}、Mg^{2+}以达到软化的目的。

（3）热力软化法　就是将水加热到100℃或100℃以上，在煮沸过程中，使水中的钙、镁的碳酸氢盐转变为$CaCO_3$和$Mg(OH)_2$沉淀去除。热力软化法只能基本上除去碳酸盐硬度，而不能去除非碳酸盐硬度。

此外，还有电渗析软化法等，但通常使用的主要方法是离子交换软化法和化学软化法。

249　化学软化处理常用哪些药剂？

化学药剂软化处理大多是和凝聚、沉淀或澄清过程同时进行的，这种过程也称沉淀软化过程。水中含有的硬度或碱性物质，在添加化学药剂后，会转变成难溶于水的化合物，形成沉淀而除去。根据原水水质和对出水水质的要求，并结合当地当时的有关规定选用一种药剂或同时使用几种药剂。常用药剂见下表。

化学软化处理常用的药剂

药　剂	活性组分的化学式	相对分子质量	可提供或接受[H]的摩尔数（化合价）	用　途
生石灰	CaO	56.1	2	软　化
熟石灰（又名消石灰）	$Ca(OH)_2$	74.1	2	软　化
白云石	CaO及MgO	可变的	可变的	软化和除硅
氧化镁	MgO	40.3	2	除　硅
纯碱	Na_2CO_3	106	2	软　化
苛性钠	$NaOH$	40.0	1	软　化
氯化钙	$CaCl_2$	111	2	脱　碱
石膏	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	172	2	脱　碱
硫酸铝	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	666	6	沉淀软化冷法凝聚用
铝酸钠	$NaAlO_2$	82	1	冷或热石灰软化
硫酸铁	$Fe_2(SO_4)_3$	400	6	沉淀软化冷法凝聚用
绿矾（硫酸亚铁）	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	278	2	沉淀软化冷法凝聚用

续表

药　剂	活性组分的化学式	相对分子质量	可提供或接受[H^+]的摩尔数（化合价）	用　途
聚电解质（助凝剂）	可变的	可变的	可变的	冷或热石灰软化
磷酸三钠	$Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$	380	3	补充软化用
磷酸氢二钠	$Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$	358	2	补充软化用
硫酸	H_2SO_4	98	2	中和碱性水

250　石灰软化法的原理是什么？

石灰软化处理是将石灰乳[$Ca(OH)_2$]加入水中，与水中的硬度成分碳酸化合物起反应，生成难溶的$CaCO_3$，或其他难溶的碱性物质[如$Mg(OH)_2$]，使其沉淀析出，以达到软化的目的。软化反应过程如下所示：

$$Ca(OH)_2+CO_2 \rightleftharpoons CaCO_3\downarrow+H_2O$$

$$Ca(OH)_2+Ca(HCO_3)_2 \rightleftharpoons 2CaCO_3\downarrow+2H_2O$$

$$Ca(OH)_2+Mg(HCO_3)_2 \rightleftharpoons CaCO_3\downarrow+MgCO_3+2H_2O$$

$$Ca(OH)_2+MgCO_3 \rightleftharpoons CaCO_3\downarrow+Mg(OH)_2\downarrow$$

熟石灰加入水中，首先与CO_2起化学反应，然后再与$Ca(HCO_3)_2$以及$Mg(HCO_3)_2$起反应。但是$Ca(OH)_2$与$Ca(HCO_3)_2$和$Ca(OH)_2$与$Mg(HCO_3)_2$的反应产物不同，由于$MgCO_3$的溶解度比$CaCO_3$大得多，故要使Mg^{2+}反应生成难溶的$Mg(OH)_2$才会沉淀出来，所以石灰的消耗量也大，需增加一倍。

当水中的碱度大于硬度时，此时水中含有钠盐碱度，例如$NaHCO_3$，因此，通常采用石灰-石膏软化法，在进行软化的同时，还可以降低水的钠盐碱度，反应如下：

$$2NaHCO_3+CaSO_4+Ca(OH)_2 \rightleftharpoons 2CaCO_3\downarrow+Na_2SO_4+2H_2O$$

虽然石灰软化除去硬度还不够彻底，操作条件也不大好，但由于石灰价格低廉，来源宽广，因此，常常被用于原水中碳酸盐硬度较高、非碳酸盐硬度较低，且又不要求深度软化的场所。

251 为什么石灰软化不能去除非碳酸盐硬度？

水中的非碳酸盐硬度，例如 $CaCl_2$、$CaSO_4$、$MgCl_2$ 和 $MgSO_4$ 等是不能用石灰处理予以去除的。因为熟石灰与 Ca^{2+} 的非碳酸盐硬度根本不起作用；对于 Mg^{2+} 的非碳酸盐硬度虽然起反应，但生成氢氧化镁的同时又产生了等摩尔量的非碳酸盐的钙硬度，例如：

$$MgSO_4 + Ca(OH)_2 = Mg(OH)_2\downarrow + CaSO_4$$

$$MgCl_2 + Ca(OH)_2 = Mg(OH)_2\downarrow + CaCl_2$$

由此可见，石灰处理是无法消除非碳酸盐硬度的。对于硬度大于碱度的水，可以采用石灰-苏打软化法，即用石灰降低水的碳酸盐硬度，而利用苏打（Na_2CO_3）来降低水的非碳酸盐硬度，从而达到软化处理的目的，其反应如下：

$$CaSO_4 + Na_2CO_3 = CaCO_3\downarrow + Na_2SO_4$$

$$CaCl_2 + Na_2CO_3 = CaCO_3\downarrow + 2NaCl$$

$$MgSO_4 + Na_2CO_3 = MgCO_3 + Na_2SO_4$$

$$MgCl_2 + Na_2CO_3 = MgCO_3 + 2NaCl$$

$$MgCO_3 + Ca(OH)_2 = Mg(OH)_2\downarrow + CaCO_3\downarrow$$

此种软化处理的方法，可使水的硬度降低到 0.15～0.20mmol/L，即 $c\left(\frac{1}{2}Ca^{2+} + \frac{1}{2}Mg^{2+}\right) = 0.3 \sim 0.4 mmol/L$。

252 为什么说石灰软化法处理的水是不稳定的？

因为经石灰软化的水是处于过饱和状态，特别是含有碳酸钙，所以是不稳定的。水中 $Ca(HCO_3)_2$ 变成 $CaCO_3$ 和 H_2O，但当水中有 CO_2 存在时，根据碳酸平衡方程式：

$$Ca(HCO_3)_2 \rightleftharpoons CaCO_3\downarrow + H_2O + CO_2$$

化学反应从右向左进行时 $CaCO_3$ 溶解，此时，又变成暂时硬度。当反应向生成 $CaCO_3$ 的方向进行，这时由于 CO_2 生成，使水具有腐蚀性，又因 $CaCO_3$ 的存在产生结垢。因此要控制反应平衡和使水质稳定有一定的难度，所以这时水质是不稳定的。

目前对石灰软化水的水质是否稳定采用不稳定度 n 来评价，见下表。

不稳定度[①] $n_{\cdot}c\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$/(mmol/L)	评价	不稳定度[①] $n_{\cdot}c\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$/(mmol/L)	评价
≤0.05	优	≤0.15	可
≤0.10	良	>0.15	劣

① 编者注：见参考文献 [51]。不稳定度应为氢氧根规范运行时的 OH^- 或碳酸氢根规范运行时的 HCO_3^- 的波动值。

有的采用两倍酚酞碱度 P 减去甲基橙碱度 M 来评价：

$2P-M_{\cdot}c\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$/(mol/L)	评　价
=0	稳　定
>0	结　垢
<0	腐　蚀

除此之外，还有用悬浮物含量来评价：

悬浮物含量/(mg/L)	评　价	悬浮物含量/(mg/L)	评　价
≤5	优	≤20	可
≤10	良	>20	劣

253　为什么石灰软化常和混凝处理同时进行？

石灰软化常和混凝处理同时进行，是取混凝处理之长，来补石灰处理之短的巧妙方法。因为，石灰处理可以将水中的 Ca^{2+}、Mg^{2+} 分别转变为 $CaCO_3$ 和 $Mg(OH)_2$ 难溶于水的物质。然而这种沉淀物常常不能形成大颗粒，有的呈胶体状态悬浮于水中。这正像其他胶体物质一样，由于带有相同电荷互相排斥，而不能聚合成大颗粒沉淀下来，反而使水中的 $CaCO_3$ 等物质增加，这对于水处理是不利的。为此，必须设法将石灰软化过程生成的难溶物质，经混凝过程使其形成沉淀物而除去。因为混凝过程所形成的凝絮能吸附石灰处理中形成的胶体物质成为大颗粒，在澄清池里沉降下来，从而既除去了硬度，又能使水得到澄清。石灰处理中的混凝剂，一般采用铁盐，如硫酸亚铁 $FeSO_4 \cdot 7H_2O$。由于硫酸亚铁在使用过程中，pH 值需在 8.5 以上，以便将 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+}。而石灰处理过程，恰好可以提高水的 pH 值，将亚铁盐氧化为铁盐。但铝盐混凝剂要求 pH 值在 5.5～8.5 范围内，因此，不宜与石灰处理同时

进行。

254　怎样控制石灰软化水的处理？

石灰水能够除去水的碳酸氢盐硬度，即暂时硬度，使水得到部分软化。软化的效果与石灰用量的关系很大。石灰用量过小，生成$CaCO_3$沉淀量少；用量过大，水的pH值升得太高，生成的$CaCO_3$容易形成胶体而影响沉淀效果。石灰软化的效果是通过酚酞碱度与甲基橙碱度的变化来检验的，也就是用水的碱度和pH值变化来控制石灰软化处理。但在实际操作中，要稳定控制碱度和pH值，使$2P-M=0$是困难的。因此，实际生产中，是以$2P-M$为控制指标，使其尽量接近零运行。控制方法有以下三种：

（1）控制$2P-M$在一定的正值范围，如0～20mg/L（以$CaCO_3$计），这样软化得比较完全。一般推荐这种控制方法，$2P-M$值最好在5～20mg/L（以$CaCO_3$计）。

（2）控制$2P-M$在一定的负值范围，如0～－20mg/L（以$CaCO_3$计），这样水中$CaCO_3$处于不饱和状态，水不易结垢，但有腐蚀性。

（3）控制$2P-M$在正负值上下波动，如±10mg/L（以$CaCO_3$计）。一般不推荐这种控制方法，因为出水不稳定，反而容易造成后沉淀，在过滤器或脱盐装置中结垢。

除$2P-M$之外，往往将pH值作为辅助指标进行控制，软化后的pH值因原水水质而异，生产厂往往根据实际情况制定指标，一般控制pH值在10.0左右。

255　什么是后沉淀？如何防止？

石灰软化后的水不稳定，因为水中碳酸钙处于过饱和状态。水中析出的碳酸钙结晶有时候来不及在澄清池中完全沉淀下来，而被带出澄清池，在系统其他地方沉积，这就是石灰软化的“后沉淀”。碳酸钙往往在通过过滤池时沉积在石英砂的表面，使砂粒增大。影响过滤效果，同时很难清理。

虽然“后沉淀”一般是指碳酸钙，但其他高价金属离子也可能发生后沉淀。当石灰软化采用铝盐混凝时，可能发生铝盐后沉淀。

铝盐可能带入砂滤池，与碳酸钙一起产生白色沉淀。特别是当石灰软化水作为补充水进入循环冷却水系统中，易产生白水，并在水冷器上产生沉积。铝盐的后沉淀常常危害循环冷却水系统。

过量的铝盐混凝剂在水中生成两性的 $Al(OH)_3$ 化合物，既能溶于酸，又能溶于碱。当 pH 值大于 8.5 时，发生以下反应：

$$Al(OH)_3 \rightleftharpoons AlO_2^- + H_2O + H^+$$

氢氧化铝生成溶解的铝酸盐。故在石灰软化的碱性条件下（一般 pH＞9.5），澄清水中带有大量溶解性铝。当水的 pH 值降低时，以上反应向左进行，铝酸盐又会生成溶解度很低的氢氧化铝，约在 pH 值为 7.5 时溶解铝最低。循环冷却水的 pH 值多在 6.5～8.5，故澄清水补入循环水中后因 pH 值下降会使过饱和的氢氧化铝结晶、沉淀，往往使水色变白，产生黏性很强的铝垢。

为稳定石灰软化水，防止产生后沉淀，宜采取以下措施。

（1）严格控制运行 pH 值或 $2P-M$ 值。控制 $2P-M$ 在负值（以 $CaCO_3$ 计，0～－20mg/L）或 pH 值在 9.5 运行时，水中 $CaCO_3$ 处于不饱和状态，不易产生后沉淀。如果控制 $2P-M$ 为正值，软化虽较完全，但水中 $CaCO_3$ 容易过饱和，故操作时应注意稳定指标，避免上下大幅波动。$2P-M$ 值最好不要在正负之间波动，这样最不稳定。

（2）石灰软化不宜采用铝盐混凝，应采用铁盐混凝，一般采用硫酸亚铁。

（3）延长澄清池运行的沉降时间，使泥渣循环更充分，建立第一反应室更大的表面积，使反应更充分。在水向上流的装置中保持较高的泥渣层。

256　如何制备稳定的石灰浆液？

石灰消化系统是由石灰贮槽、加料机、消化器、排渣机及石灰浆槽等设备组成。石灰粉经过这些设备后可制成 2%～3%浓度的石灰浆。要制备浓度稳定的石灰浆必须把握以下环节：选用纯度合格的石灰粉，其 CaO 含量在 85%以上；石灰加料速度要均匀，不可过量或断料；控制好进入消化器的石灰层厚度；控制抽雾水的流

量，以便利用水力引射把生石灰消化时放出的热气、粉尘抽走；调整好喷淋水，使水直接喷淋在消化室出口灰浆分离堰处，以防止石灰渣堆积影响消化器及桨叶的正常工作；水量的控制与调节，要注意消化器加水量不能超过桨叶马达的负荷，保持桨叶转动灵活。在制备过程中，浆液与石灰消化后的渣子要分开，以免渣进入澄清池而影响正常运行。石灰渣经水洗之后用排渣机排出。也可用滤网分离石灰渣，但应注意不要浪费石灰粉和影响浆液的浓度。

257　石灰软化处理的石灰加量如何估算？

石灰软化处理中所发生的全部反应很复杂，除主要沉淀反应外还有共沉淀及吸附反应。所以石灰加量难以计算得十分精确。但可以根据主要反应估算，能基本满足生产需要。在实际处理时可以根据估算量通过调整试验确定最佳加量。处理的目的与要求不同，加量也不同。当不加混凝剂时，估算如下：

（1）只要求消除 $Ca(HCO_3)_2$，不要求除 $Mg(HCO_3)_2$。石灰主要与 CO_2 及 $Ca(HCO_3)_2$ 起反应，则石灰加量 D_1 为：

$$D_1=[CO_2]+[Ca(HCO_3)_2] \quad mmol/L 或 mol/m^3$$

式中 $[CO_2]$、$[Ca(HCO_3)_2]$分别为各自在原水中的物质的量浓度，mmol/L 或 mol/m^3。

（2）要求消除 $Ca(HCO_3)_2$ 及 $Mg(HCO_3)$（原水中碱度大于硬度）。石灰除与 CO_2 和 $Ca(HCO_3)_2$ 反应之外，还与 $Mg(HCO_3)_2$ 及 $NaHCO_3$ 起反应。则石灰加量 D_2 为：

$$D_2=[CO_2]+[Ca(HCO_3)_2]+[NaHCO_3]+2[Mg(HCO_3)_2]$$

$$mmol/L 或 mol/m^3$$

式中 $[CO_2]$、$[Ca(HCO_3)_2]$、$[NaHCO_3]$、$[Mg(HCO_3)_2]$分别为各自在原水中的物质的量浓度，mmol/L 或 mol/m^3。

（3）要求消除 $Ca(HCO_3)_2$ 和 $Mg(HCO_3)_2$（原水中硬度与碱度大致相等）。石灰只与 CO_2、$Ca(HCO_3)_2$ 和 $Mg(HCO_3)_2$ 反应，不与 $NaHCO_3$ 反应。故石灰加量 D_3 为：

$$D_3=[CO_2]+[Ca(HCO_3)_2]+2[Mg(HCO_3)_2] \quad mmol/L 或$$

mol/m³

以上计算得出的 D_1、D_2 或 D_3 需再加上过剩石灰用量（一般为 0.1mmol/L）后，方为估算的石灰加量。

当石灰软化处理同时加入混凝剂时，需再加上混凝剂消耗的石灰用量 D_A。D_A 随原水水质而有差别，分两种情况：

（1）原水中 $\frac{1}{2}Ca^{2+}$ mmol/L 近似等于 HCO_3^- mmol/L 时，混凝剂中的铁离子发生以下反应：

$$Fe^{3+} + \frac{3}{2}Ca(OH)_2 \longrightarrow Fe(OH)_3 + \frac{3}{2}Ca^{2+}$$

$$D_A \approx \frac{3}{2}[Fe] \quad mmol/L$$

其中 [Fe] 为混凝剂的铁离子在水中的物质的量浓度，mmol/L。

（2）原水中 HCO_3^- mmol/L $\geqslant \frac{1}{2}Ca^{2+} + \frac{1}{3}Fe^{3+}$ mmol/L 时，发生以下反应：

$$Fe^{3+} + 3HCO_3^- \longrightarrow Fe(OH)_3 + 3CO_2$$

$$3CO_2 + 3Ca(OH)_2 \longrightarrow 3CaCO_3 \downarrow + 3H_2O$$

$$D_A \approx 3[Fe] \quad mmol/L$$

因此，加混凝剂时估算的石灰总加量 D 为：

$$D = (D_1、D_2 \text{ 或 } D_3) + D_A + 0.1 \quad mmol/L \text{ 或 } mol/m^3$$

以上的 D_1、D_2、D_3、D_A 及 D 的石灰加量均按 100%CaO 计，实际加量需按石灰产品的纯度进行折合。

258 什么是石灰-纯碱软化处理？

石灰一般用于去除水中的碳酸盐硬度，纯碱用于除去非碳酸盐硬度。石灰-纯碱软化可以是冷法、温热法或热法。冷法温度为原水温度；热法温度为 98℃或以上；温热法温度介于二者之间，通常为 50℃。化学反应式如下：

$$Ca(HCO_3)_2 + Ca(OH)_2 = 2CaCO_3 \downarrow + 2H_2O$$

$$Mg(HCO_3)_2 + 2Ca(OH)_2 = Mg(OH)_2 \downarrow + 2CaCO_3 \downarrow + 2H_2O$$

$$MgCl_2 + Ca(OH)_2 = Mg(OH)_2 \downarrow + CaCl_2$$

$$MgSO_4 + Ca(OH)_2 = Mg(OH)_2 \downarrow + CaSO_4$$

$$CO_2 + Ca(OH)_2 = CaCO_3 \downarrow + H_2O$$

$$4Fe(HCO_3)_2 + 8Ca(OH)_2 + O_2 = 4Fe(OH)_3 \downarrow + 8CaCO_3 \downarrow + 6H_2O$$

$$Fe_2(SO_4)_3 + 3Ca(OH)_2 = 2Fe(OH)_3 \downarrow + 3CaSO_4$$

$$H_2SiO_3 + Ca(OH)_2 = CaSiO_3 \downarrow + 2H_2O$$

$$H_2SiO_3 + Mg(OH)_2 = Mg(OH)_2 \cdot H_2SiO_3 \downarrow$$

$$CaSO_4 + Na_2CO_3 = CaCO_3 \downarrow + Na_2SO_4$$

$$CaCl_2 + Na_2CO_3 = CaCO_3 \downarrow + 2NaCl$$

$$Ca(OH)_2 + Na_2CO_3 = CaCO_3 \downarrow + 2NaOH$$

石灰 纯碱法也可用硫酸亚铁作凝聚处理，其反应类似石灰法。

此法适用于全碱度小于全硬度的水，可用于无水冷壁低压锅炉的补给水处理。当用于离子交换的预处理时，如软化采用的是热法，则需将处理后水的温度降至约 40℃。

用石灰-纯碱法时，药剂剂量必须正确，氢氧化钙或碳酸钠过量会发生自反应而增加水中氢氧化钠含量。过量的纯碱本身在蒸汽锅炉中会水解而生成氢氧化钠和二氧化碳：

$$Na_2CO_3 + H_2O \xrightarrow{\triangle} 2NaOH + CO_2 \uparrow$$

水解生成的氢氧化钠可能成为锅炉苛性脆化或碱性腐蚀的一个因素。二氧化碳则会导致凝结水管路发生腐蚀。

在含二氧化碳高的原水中用此法时，可在软化前先进行脱气处理，就更为经济。

石灰-纯碱软化法所产生的碳酸钙和氢氧化镁，虽然是难溶的，但实际上还会有少量钙、镁剩留于溶液中。出水硬度在用冷法时通常为 0.5～0.8mmol/L；温热法时为 0.3～0.6mmol/L；热法时为 0.05～0.2mmol/L。硬度还可能更高，这与所用药量及软化要求达到的程度有关。

出水中维持过剩的碳酸盐和氢氧碱度，可以调节钙和镁的溶解度。在本法中，是以纯碱控制碳酸盐的过剩量，过剩碳酸盐 $c\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$一般维持在 0.4～1.2mmol/L。氢氧碱度的过剩量是由石

灰剂量来控制，一般维持在 $c\left(\frac{1}{x}B^{x}\right)<0.8\text{mmol/L}$ 以下。在实际运行中，过剩量应根据运行温度和对出水的具体要求而决定。这与单独用石灰作为软化剂时不一样，在单纯的石灰软化中不维持过剩的碳酸盐，而且，氢氧碱度的过剩量也是低的。

对过滤后的软化出水应进行控制试验，分析其硬度（H），酚酞碱度（P）和甲基橙碱度（M）。分析结果用来计算各个药剂的过剩程度。采用热石灰-纯碱法的典型控制可按下式计算：

石灰控制：

$$2P-M=5\sim15\text{mg/L}\ (\text{以}\ CaCO_3\ \text{计})$$

纯碱控制：

$$M-H=20\sim40\text{mg/L}\ (\text{以}\ CaCO_3\ \text{计})$$

259　什么是苛性钠和纯碱-苛性钠软化处理？

苛性钠软化可以除去水中碳酸盐和非碳酸盐硬度，反应如下：

$$Ca(HCO_3)_2+2NaOH=\!=\!=CaCO_3\downarrow+Na_2CO_3+2H_2O$$

$$Mg(HCO_3)_2+4NaOH=\!=\!=Mg(OH)_2\downarrow+2Na_2CO_3+2H_2O$$

$$CO_2+2NaOH=\!=\!=Na_2CO_3+H_2O$$

$$CaCl_2+Na_2CO_3=\!=\!=CaCO_3\downarrow+2NaCl$$

$$CaSO_4+Na_2CO_3=\!=\!=CaCO_3\downarrow+Na_2SO_4$$

$$MgSO_4+2NaOH=\!=\!=Mg(OH)_2\downarrow+Na_2SO_4$$

$$MgCl_2+2NaOH=\!=\!=Mg(OH)_2\downarrow+2NaCl$$

$$4Fe(HCO_3)_2+16NaOH+O_2=\!=\!=4Fe(OH)_3\downarrow+8Na_2CO_3+6H_2O$$

苛性钠软化处理，在碳酸盐和非碳酸盐硬度比例合适时最为有效。如果碳酸盐硬度所占比例太低，可改用纯碱-苛性钠软化处理，即在投苛性钠的同时适量投加一些纯碱。

由于纯碱和苛性钠价格较贵，因此一般较少采用。此法用于无水冷壁的低压锅炉。

260　如何估算化学软化处理方法的药剂用量？

化学软化处理方法的纯药剂用量按以下公式估算，实际用量按药剂的纯度进行折合。

（1）石灰软化法：

$$CaO = 56D \quad mg/L 或 g/m^3$$

式中 D 为加入水中石灰的物质的量浓度，mmol/L。计算方法见257题。

（2）石灰-纯碱软化法，同时加混凝剂：

$$CaO = 56\{[CO_2] + 2A + [H_{Mg}] + D_A + 0.1\} \quad mg/L 或 g/m^3$$

$$Na_2CO_3 = 106\left\{[H_F] + \frac{1}{2}A_c\right\} \quad mg/L 或 g/m^3$$

（3）苛性钠软化法，同时加混凝剂：

$$NaOH = 40\left\{2[CO_2] + 2[H_T] + 2[H_{Mg}] + 2D_A + \alpha\right\} \quad mg/L 或 g/m^3$$

式中 A——原水总碱度 $c\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$，mmol/L 或 mol/m³；

$[CO_2]$——原水中 CO_2 浓度 $c(CO_2)$，mmol/L 或 mol/m³；

$[H_T]$——原水中碳酸盐硬度 $c(Ca^{2+} + Mg^{2+})$，mmol/L 或 mol/m³；

$[H_F]$——原水中非碳酸盐硬度 $c(Ca^{2+} + Mg^{2+})$，mmol/L 或 mol/m³；

$[H_{Mg}]$——原水中镁硬度 $c(Mg^{2+})$，mmol/L 或mol/m³；

D_A——因加入混凝剂多消耗的石灰量，mmol/L 或mol/m³。计算方法见257题；

A_c——残余碱度 $c\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$，一般为 0.5～0.75mmol/L 或 mol/m³；

α——苛性钠过剩量 $c\left(\frac{1}{x}B^{x}\right)$，可取 0.13～0.18mmol/L 或 mol/m³。

261　用钠离子交换树脂进行软化处理的原理和特点是什么？

钠离子交换软化处理的原理是将原子通过钠型阳离子交换树脂，使水中的硬度成分 Ca^{2-}、Mg^{2+} 与树脂中的 Na^{1} 相交换，从而

吸附水中的 Ca^{2+}、Mg^{2+}，使水得到软化。如以 RNa 代表钠型树脂，其交换过程如下：

$$2RNa+Ca^{2+}\longrightarrow R_2Ca+2Na^+$$

$$2RNa+Mg^{2+}\longrightarrow R_2Mg+2Na^+$$

即水通过钠离子交换器后，水中的 Ca^{2+}、Mg^{2+} 被置换成 Na^+。水经过一级 Na^+ 交换后，残余硬度一般小于 1.5×10^{-2} mmol/L，可供低压锅炉使用。

当钠离子交换树脂失效之后，为恢复其交换能力，就要进行再生处理。再生剂为价廉货广的食盐溶液（可因地制宜、就地取材，如亦可用海水或 $NaNO_3$ 废液等），再生过程的反应如下：

$$R_2Ca+2NaCl\longrightarrow 2RNa+CaCl_2$$

$$R_2Mg+2NaCl\longrightarrow 2RNa+MgCl_2$$

经上述处理，树脂即可恢复原来的交换性能。

钠离子交换软化处理的特点是：

（1）除去水中的硬度而碱度不变，只不过是 Ca^{2+}、Mg^{2+} 与 Na^+ 进行等电荷摩尔量交换而已；

（2）在一般天然水中 Mg^{2+} 的含量都比较少，主要起交换作用的是 Ca^{2+} 与 Na^+，而钙的摩尔质量 $M\left(\frac{1}{2}Ca\right)$ 是 20，钠的摩尔质量 $M(Na)$ 是 23，基本接近，因此，钠离子交换软化处理的水中含盐量基本不变，水中溶解固形物也没有多大变化；

（3）在再生过程中，有时由于正洗不彻底，或者是再生剂系统阀门的泄漏，使软化处理后的水中氯根反而比原水有所增加，但通过精心操作是可以避免的。

262　钠离子交换软化处理的盐耗如何计算？

所谓盐耗是对已经失效的树脂，使其再恢复交换能力所消耗的再生剂量。即每恢复 1mol 树脂交换能力 $M\left(\frac{1}{x}A^{x+},\frac{1}{x}B^{x-}\right)$ 时，所消耗再生剂（NaCl）的克数。

在实际生产中，为简便起见，用下式来计算：

$$盐耗=\frac{2G}{VH}\quad g/mol$$

式中 G——再生一次所消耗的 NaCl 的量，g；

V——周期制水量，m^3；

H——被处理水的硬度，mol/m^3。

由于离子交换是等［H^+］摩尔进行的，从理论上来说每除去 0.5mol 的硬度需要消耗 1mol 的 NaCl，即 58.5g。然而，实际生产运行中盐耗是上述理论值的 3 倍左右。通常为 150～200g/mol，主要与操作管理及工艺等都有关。

263 二级钠离子软化有什么特点？

所谓二级钠离子软化，是指将原水经过一级钠离子软化后，再进入钠离子软化器进行再次软化。

二级钠离子软化有如下特点：

（1）由于一级钠型软化床的“拦阻”作用，二级钠床的入口水硬度已经很低，所以二级钠型软化床的树脂高度不需要很高，一般为 1.5m 左右；

（2）二级钠床的交换水流速可以允许较高。当采用一般凝胶型树脂时可为 40～60m/h；

（3）由于二级钠床做“后盾”，所以一级钠床的失效硬度可以允许高一些。例如为 $c\left(\frac{1}{2}Ca^{2+}\right)$ 200μmol/L；

（4）因为采用二级钠床软化，所以一级钠床的盐耗可以低一些［如 100～110g/mol $\left(\frac{1}{2}Ca^{2+}\right)$］。

264 什么是 H-Na 离子交换软化法？

由于 Na 离子交换软化法只能除去水中的硬度，而不能除去碱度。但是，在水处理中有时既要除去硬度，又要除去碱度。于是，在水处理系统中同时设置 H 离子交换和 Na 离子交换，这样就可以达到同时除硬和除碱的目的。这种方法叫做 H-Na 离子交换软化法。

H-Na 离子交换软化法的 H 型离子交换剂 RH，遇水中的碳酸

盐和非碳酸盐硬度，发生反应，具有除盐软化作用，例如：

$$Ca(HCO_3)_2+2RH=\!=\!=CaR_2+2H_2CO_3$$

$$Mg(HCO_3)_2+2RH=\!=\!=MgR_2+2H_2CO_3$$

$$CaSO_4+2RH=\!=\!=CaR_2+H_2SO_4$$

$$MgSO_4+2RH=\!=\!=MgR_2+H_2SO_4$$

$$CaCl_2+2RH=\!=\!=CaR_2+2HCl$$

$$MgCl_2+2RH=\!=\!=MgR_2+2HCl$$

上述反应，产生的游离酸，与钠离子交换后的碱相中和，从而也达到除碱的目的。因为钠离子交换后，只不过是水中的硬质成分 Ca^{2-}、Mg^{2+} 被置换成 Na^+。碱度 $Ca(HCO_3)_2$、$Mg(HCO_3)_2$ 变成碱度 $NaHCO_3$。此时遇到游离酸有如下反应：

$$2NaHCO_3+H_2SO_4=\!=\!=Na_2SO_4+2H_2CO_3$$

$$NaHCO_3-HCl=\!=\!=NaCl+H_2CO_3$$

于是水中的碱度亦被除去。

265　H-Na 离子软化法有哪几种方式？

H-Na 离子软化法通常有三种方式。

(1) 强酸性 H 离子交换剂的 H-Na 离子交换软化法　此法可将水中的各种阴离子转化成为相应的酸并中和水中的碱，这与直接加酸不同，因其不增加水的含盐量。有并联系统和串联系统两种：

① 并联 H-Na 离子交换软化法　这种系统如图 3-2-1 所示。

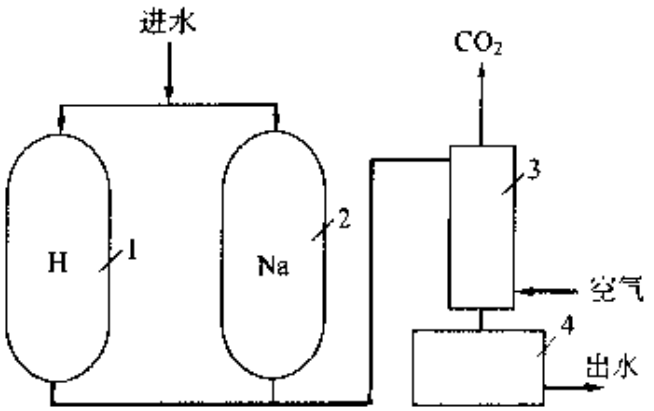


图 3-2-1　并联 H-Na 离子交换软化法示意图

1—H 型离子交换器；2—Na 型离子交换器；3—除碳器；4—水箱

这时，水同时进 H-Na 两个交换器，出水进行混合。中和之后所产生的 CO_2 从除碳器中除去。

H 型离子交换器的交换反应，可将水中阳离子变成 H^+。如 H 型树脂用 RH 表示，其反应如下：

$$2RH+\begin{matrix}Ca\\Mg\\Na_2\end{matrix}\Bigg\}\begin{matrix}(HCO_3)_2\\Cl_2\\SO_4\end{matrix}\longrightarrow R_2\begin{cases}Ca\\Mg\\Na_2\end{cases}+\begin{cases}2H_2CO_3\\2HCl\\H_2SO_4\end{cases}$$

Na 型交换器的交换反应，可将水中各种阳离子转变为 Na^+，如 Na 型树脂以 RNa 表示，反应过程如下：

$$2RNa+\begin{matrix}Ca\\Mg\end{matrix}\Bigg\}\begin{matrix}(HCO_3)_2\\Cl_2\\SO_4\end{matrix}\longrightarrow R_2\begin{cases}Ca\\Mg\end{cases}+Na_2\begin{cases}(HCO_3)_2\\Cl_2\\SO_4\end{cases}$$

H^+、Na^+ 交换器的出水进行中和，其反应如下：

H 型交换器　Na 型交换器

出水酸↓　　出水碱↓

$$\left.\begin{matrix}H_2SO_4\\2HCl\\H_2CO_3\end{matrix}\right\}+2NaHCO_3\longrightarrow\begin{cases}Na_2SO_4+2H_2O+2CO_2\uparrow\\2NaCl+2H_2O+2CO_2\uparrow\\(Na_2CO_3+2H_2O+2CO_2\uparrow)\end{cases}$$

为了确保软化水不出酸性水，一定要控制好 H^+、Na^+ 交换器出水量的相互比例。在实际操作时，保持水中含残余碱度 $c\left(\frac{1}{x}B^{x}\right)$0.3～0.5mmol/L，作为中和控制的终点。

② 串联 H-Na 离子交换软化法　这种系统布置如图 3-2-2 所示。

(2) 弱酸性 H 离子交换剂的 H-Na 离子软化法　由于弱酸性 H 离子交换剂仅与弱酸盐类（碳酸氢盐碱度）反应，故不会产生强酸。例如弱酸树脂丙烯酸型树脂 $R(COOH)_2$ 和碳酸氢盐反应如下：

$$R(COOH)_2+\left.\begin{matrix}Ca\\Mg\\Na_2\end{matrix}\right\}(HCO_3)_2 \longrightarrow R(COO)_2\left\{\begin{matrix}Ca\\Mg\\Na_2\end{matrix}\right. +2H_2CO_3$$

此软化法可利用废酸进行再生以降低酸耗，因此比较经济。

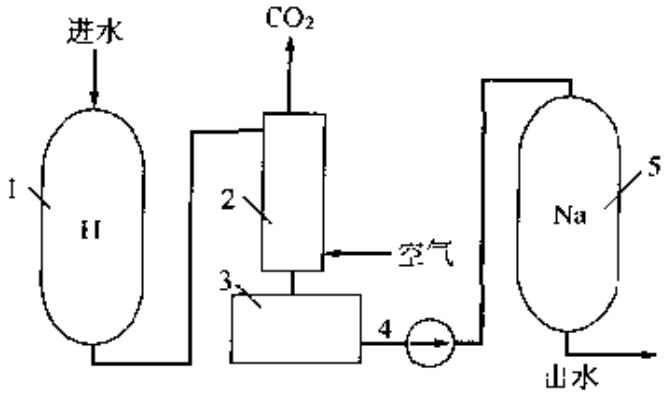


图 3-2-2　串联 H-Na 离子交换软化法示意图

1—H 型离子交换器；2—除碳器；
3—水箱；4—泵；5—Na 型离子交换器

（3）H 型交换剂采用贫再生方式的 H-Na 离子交换软化法　所谓贫再生方式，就是用不足量的酸进行再生（相当于接近理论量的酸进行再生），使交换器的上部树脂变成 H 型，而下部仍为 Ca、Mg、Na 型树脂。因此，运行时水在上层，会产生大量的强酸，当水流到下层时，强酸中的 H^+ 又与 Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^- 进行交换。

H 型树脂采用贫再生方式的 H-Na 离子交换软化法系统见图 3-2-3。

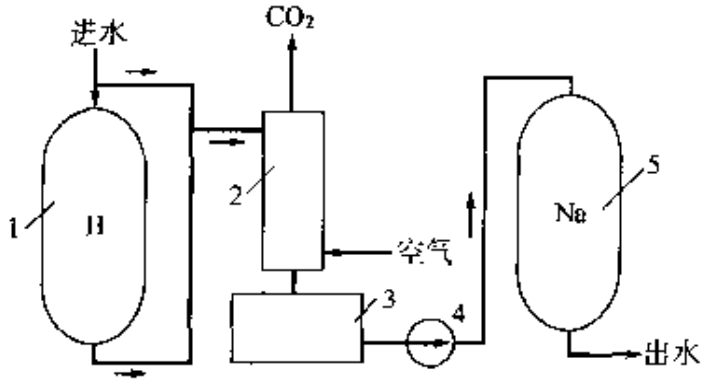


图 3-2-3　H 型贫再生 H-Na 软化法示意图

1—H 型离子交换器；2—除碳器；3—水箱；4—泵；5—Na 型离子交换器

这样，经过这种贫再生的 H 交换器之后，只是降低了水的碳酸盐硬度，而非碳酸盐硬度基本上不发生变化。

266　什么是氢离子交换加碱中和法？

经氢离子交换后，原水中的 Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^{+} 被 H^{+} 置换，降低了水的硬度。可是，水中的 Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^{+} 的硫酸盐及氯化物，被 H^{+} 交换时，生成相应的酸，使出水呈酸性。所以，必须进一步处理。

氢离子交换后加碱法，是在将 H^{+} 交换水除碳后，加碱中和至过剩碱度 $c\left(\frac{1}{x}B^{x}\right)$ 为 0.36mmol/L 时止。由于氢离子交换的出水是酸性水，先在除碳器中除去二氧化碳。否则，在加碱中和时，二氧化碳将被固定。每中和 1mmol/L 酸度，需用碱量 40mg/L（折合成 100%纯度的 NaOH）。此法适用于低压锅炉。

267　什么是加热软化法？

当将水加热到 100℃以上时，水中碳酸盐硬度受热分解，形成沉淀，降低硬度。反应如下：

$$Ca(HCO_3)_2 \xlongequal{} CaCO_3\downarrow + CO_2\uparrow + H_2O$$

$$Mg(HCO_3)_2 \xlongequal{} MgCO_3 + CO_2\uparrow + H_2O$$

$$MgCO_3 + H_2O \xlongequal{} Mg(OH)_2\downarrow + CO_2\uparrow$$

此法的缺点是 $CaCO_3$ 及 $Mg(OH)_2$ 的溶解度虽小，却仍有一定的溶解量。如 18℃时，$CaCO_3$ 溶解度为 13mg/L，$Mg(OH)_2$ 溶解度为 8.4mg/L。所以，残余硬度仍较高，而且沉淀产物都留在锅炉内。

268　离子交换法软化处理有哪些常见故障？如何处理？

对水进行离子交换软化处理常见故障和产生的原因及其消除方法如下。

（1）离子交换剂的工作交换容量很低

产生的原因	消除方法
① 再生剂(NaCl)的质量差	用化学分析法检验食盐质量，选用合格的食盐

续表

产生的原因	消除方法
② 耗盐量太少，再生不充分	增加食盐(NaCl)用量
③ 离子交换剂的颗粒被悬浮物所污染	用洁净的过滤水来清洗并用空气擦洗离子交换剂。需改进预处理的混凝和过滤工况，降低进水浑浊度
④ 原水中高价金属离子 Al^{3+}、Fe^{3+} 等量多，使离子交换剂"中毒"	用2%～3%浓度的酸定期活化离子交换剂
⑤ 食盐溶液浓度配制太低	增加食盐溶液浓度，控制在3%～5%
⑥ 排水装置损坏，造成水偏流	检修排水装置，重新装填树脂层
⑦ 反洗强度不够，或不完全	精心操作，调整反洗压力和水量
⑧ 再生流速太快，与离子交换剂的接触时间太短	调整再生流速至3～6m/h；或者延长再生时间为1h
⑨ 正洗不彻底，残留再生液未冲洗清净就进入水箱	测定正洗出水硬度是否合格，不合格时，将正洗水排入地沟，不进入水箱
⑩ 正洗时间过长，消耗离子交换剂的交换能力	调整正洗水量，控制好正洗时间

(2) 离子交换器的周期制水量不足

产生的原因	消除方法
① 离子交换剂的层高太低	增高离子交换剂，使层高在1.5m以上
② 进水及排水系统的阻力过大	改进排水和进水系统，尽力减少水头损失

(3) 反洗过程中，有离子交换剂漏失

产生的原因	消除方法
① 中间排水管损坏；排水管网套损坏；排水管法兰松动	更换排水管；检查并修好网套；将排水管联接法兰拧紧
② 反洗强度太大，离子交换剂从反排管漏失	降低反洗强度；反排出水管装一塑料网套
③ 交换器内，交换剂截面上的流速分布不均匀，局部短路，交换剂被水流携带出去	改善配水系统，重新装填离子交换剂层，消除短路
④ 交换剂质量差，耐磨性能差，以致粉碎，被反洗水带出	选用耐磨性能好、强度高的离子交换剂

（4）再生食盐耗量大

产生的原因	消除方法
① 再生流速过大，废液排出浓度高，造成食盐溶液浪费	调整再生流速，控制食盐水浓度
② 食盐水中杂质过多，包围交换剂，使食盐水的耗量大	改善食盐水的沉淀和过滤系统，增强冲洗强度，清洗交换剂

（5）软水中出现交换剂颗粒

产生的原因	消除方法
排水装置损坏	修好排水装置。或在软水管上装一树脂捕捉器

（6）出水硬度较高

产生的原因	消除方法
① 原水中 Ca^{2+}、Mg^{2+} 含量高	采用二级软化
② 再生剂系统的阀门泄漏	修理好阀门，避免泄漏
③ 正在再生的交换器的出水阀门关不严，造成再生液渗漏	关闭或修好出水阀门
④ 交换剂层高不够；交换流速太快，交换不完全	增加交换剂的层高，调整交换流速
⑤ 水温过低（低于 5℃），交换效果差	设法提高原水温度至 10℃以上

（7）软水氯根（Cl^-）增高

产生的原因	消除方法
① 置换操作或正洗不彻底	改善置换或正洗操作
② 再生剂盐水阀漏	修好盐水阀
③ 操作有误，如制水时开启盐水阀；再生时却开启出水阀门	加强操作技能教育，提高操作水平

269 什么是铵-钠离子交换软化处理？

阳离子交换剂如果是用铵盐再生的，那么，交换剂就变成了铵型交换剂（RNH_4），在软化处理时，原水经过铵型交换剂处理后，水中的阳离子就交换成铵离子，其反应如下：

$$2RNH_4+\begin{cases}Ca\\Mg\\Na_2\end{cases}\begin{cases}(HCO_3)_2\\Cl_2\\SO_4\end{cases}\longrightarrow R_2\begin{cases}Ca\\Mg\\Na_2\end{cases}+\begin{cases}2NH_4HCO_3\\2NH_4Cl\\(NH_4)_2SO_4\end{cases}$$

如果在软化处理时，水中的阳离子一部分交换为钠离子；一部分交换为铵离子。这样的两种水混合在一起，就称为铵-钠离子交换处理。

经过铵离子交换后的生成物，受热分解，如下所示：

$$NH_4HCO_3 \xrightarrow{\triangle} NH_3\uparrow + CO_2\uparrow + H_2O$$

$$NH_4Cl \xrightarrow{\triangle} NH_3\uparrow + HCl$$

$$(NH_4)_2SO_4 \xrightarrow{\triangle} 2NH_3\uparrow + H_2SO_4$$

由上可见，NH_4HCO_3 分解为 NH_3、CO_2 而逸出，不再组成锅炉水的碱度；而 NH_4Cl 和 $(NH_4)_2SO_4$ 分解的 NH_3 逸出的同时，还生成盐酸和硫酸。然后再与 Na 离子交换后的水中碱度 $NaHCO_3$ 相中和，从而也降低了水中的碱度，反应如下：

$$2NaHCO_3 \longrightarrow Na_2CO_3 + CO_2\uparrow + H_2O$$

$$2NaHCO_3 \longrightarrow 2NaOH + 2CO_2\uparrow$$

$$Na_2CO_3 + H_2SO_4 \longrightarrow Na_2SO_4 + CO_2\uparrow + H_2O$$

$$NaOH + HCl \longrightarrow NaCl + H_2O$$

从以上反应可以看出，经过铵离子和钠离子交换的水要控制好，比例要适中，否则，锅炉水的碱度还是降不下来的，或者会出现酸性水。因此，根据水质情况，在软化处理时，保持两者的适当比例很重要。

铵-钠离子法对水处理设备的防腐蚀要求不高，但此法因 NH_3 在系统中循环有可能造成铜合金部件的腐蚀，所以只用于低压锅炉。

270　铵-钠离子交换软化处理系统有哪几种形式？

铵-钠离子交换软化处理适用于原水中钠离子与全部阳离子之比小于 25%，或是钠离子与总硬度之比小于 30%～35%，以及铵的交换程度在 40%～85%之间时，可以应用铵-钠离子交换处理。出水的水质适用于低压锅炉补给水。

铵-钠离子交换处理系统有两种形式，即综合和并联两种，如图 3-2-4 和图 3-2-5。

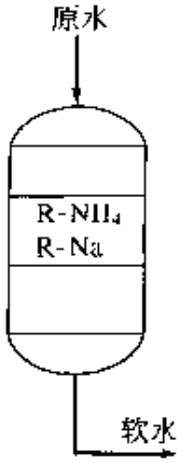


图 3-2-4　NH_4-Na 离子交换综合系统

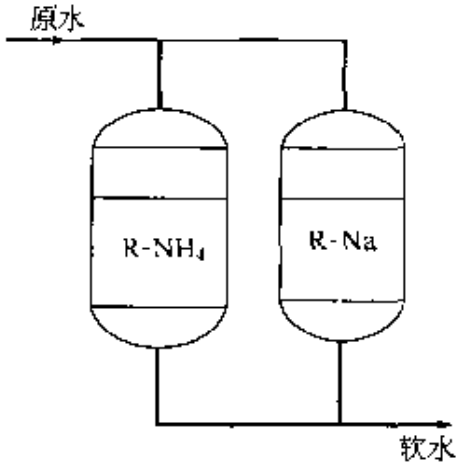


图 3-2-5　NH_4-Na 离子交换并联系统

并联系统即原水分别进铵型树脂交换器和钠型树脂交换器，出水汇合在一起。综合系统是在原有的钠离子交换器内，利用硫酸铵和食盐的混合液作为再生剂，进行再生的，然后，在同一交换器内进行铵-钠离子交换，达到软化和降低碱度的目的。

271　什么是钠-氯离子交换处理？

钠-氯（或氯-钠）离子交换处理如图 3-2-6 所示。

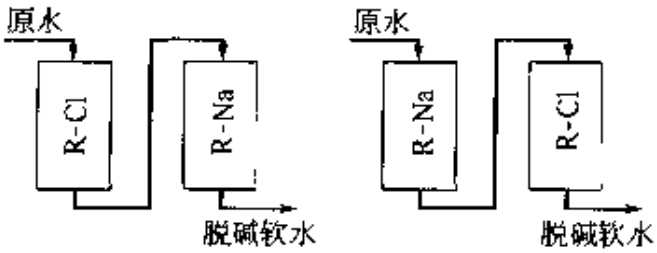


图 3-2-6　氯-钠（或钠-氯）离子交换系统

原水在经过氯型树脂的阴离子交换器后，进行下列反应：

$$2R\text{-}Cl + Ca(HCO_3)_2 \longrightarrow 2R\text{-}HCO_3 + CaCl_2$$

$$2R\text{-}Cl + Mg(HCO_3)_2 \longrightarrow 2R\text{-}HCO_3 + MgCl_2$$

$$R\text{-}Cl + NaHCO_3 \longrightarrow R\text{-}HCO_3 + NaCl$$

$$2R\text{-}Cl + CaSO_4 \longrightarrow R_2\text{-}SO_4 + CaCl_2$$

$$2R\text{-}Cl + MgSO_4 \longrightarrow R_2\text{-}SO_4 + MgCl_2$$

$$2R\text{-}Cl + Na_2SO_4 \longrightarrow R_2\text{-}SO_4 + 2NaCl$$

从上可知，原水通过氯型阴离子交换器后，树脂转型，水中盐类的阴离子都转换为氯离子。所以，水的碱度降低了。这时，水再经过钠离子交换器时，进行如下反应：

$$2R\text{-}Na + CaCl_2 \longrightarrow R\text{-}Ca + 2NaCl$$

$$2R\ Na + MgCl_2 \longrightarrow R\ Mg + 2NaCl$$

这时，水中的硬度也变为氯化钠了。因此氯-钠离子交换处理既除碱又可起软化作用。

当氯型阴离子交换剂失效之后，可用食盐溶液再生，其反应如下：

$$R\text{-}HCO_3 + NaCl \longrightarrow R\text{-}Cl + NaHCO_3$$

$$R_2SO_4 + 2NaCl \longrightarrow 2R\text{-}Cl + Na_2SO_4$$

由此可知，氯-钠离子交换处理，不必用酸，无需防酸腐蚀的措施，不需设置脱碳器，运行操作简单。并可以利用钠离子交换器的再生废液来再生氯离子交换剂，因而也可降低运行费用。但此法选用强碱阴树脂（一般都采用Ⅱ型强碱阴树脂），价格贵。虽有除碱、软化作用，但是水中的含盐量（以 mmol/L 计）并未降低，而且又将水中的阴离子转换为氯离子，对防止钢材腐蚀（特别是不锈钢）十分不利。

272　软化床再生时其树脂层上部为什么要有一定厚度的水层？

有三个作用：

（1）缓冲作用。当再生液以一定流速通过树脂层时，由于水层的缓冲作用，不至于使再生液直接冲刷树脂层表面，造成其凸凹不平，这就避免了再生液因此而短路通过树脂层，从而影响再生效果。

（2）有使再生液均匀分配的作用。

（3）隔断作用。水层会隔断空气与树脂层的接触，避免了再生液通过树脂层时，由于其冲击作用而将空气挤压进树脂，而形成“空气栓”区，影响软化床的运行和再生效果。

树脂层上部的水层厚度一般为 200～300mm。

（三）水的化学除盐处理

273　什么是水的化学除盐处理？

由于近年来锅炉向高温高压化迅速发展，因此，对于锅炉补给水水质的要求也越来越高，需要把水中的盐类几乎除尽。为此，阴、阳离子交换技术得到迅速的发展。如用 H 型阳离子交换剂与水中的各种阳离子进行交换而放出 H^+；而用 OH 型阴离子交换剂与水中的各种阴离子交换而放出 OH^-。这样，当水经过这些阴、阳离子交换剂的交换处理后，就会把水中的各种盐类基本除尽。这种方法，就称为水的化学除盐处理。

274　水的离子交换软化和化学除盐处理有什么不同？

有三个不同。

（1）要除去水中的离子不同。软化仅要求除去水中的硬度离子，主要是 Ca^{2+} 和 Mg^{2+}；而化学除盐则必须把水中全部的成盐离子（阳、阴离子）都除掉。

（2）处理中使用的交换树脂有些不同。因为水的软化只要求除去水中的硬度离子，所以它可以使用阳离子交换树脂，也可以使用磺化煤做交换剂。

水的化学除盐是要除去水中的全部成盐离子，所以它必须同时使用强酸性阳离子交换树脂和强碱性阴离子交换树脂，而且不能使用盐型树脂（在水处理中，有时将 RNa、RCl 一类的树脂称为盐型树脂）。

因为盐型树脂虽然可以除去水中原来的成盐离子，但又生成新的成盐离子，使水的含盐量基本不变。

例如：　$RNa+KHSiO_3 \longrightarrow RK+NaHSiO_3$

再比如：　$RCl+NaHSiO_3 \longrightarrow RHSiO_3+NaCl$

所以它除去水中的成盐离子必须同时使用强酸性阳树脂和强碱性阴树脂

$$\begin{matrix}RH\\ROH\end{matrix}+NaHSiO_3 \xlongequal{} \begin{matrix}RNa\\RHSiO_3\end{matrix}+H_2O$$

（3）使用的再生剂不同。水的离子交换软化，其交换剂失效后可以用盐类来再生。比如再生 Na 型离子交换剂就可以用食盐做再生剂。

$$R_2Ca+2NaCl \xlongequal{} 2RNa+CaCl_2$$

化学除盐工艺其交换剂失效后，其再生剂必须为强酸（HCl 或 H_2SO_4）和强碱；不使用盐类做再生剂。

例如：　　$RNa+KCl \xlongequal{} RK+NaCl$

再生的结果使 H 型离子交换树脂变成了“盐型”树脂，会影响化学除盐效果。

对阴离子交换树脂的再生也是如此。即：

$$RCl+NaHSO_4 \xlongequal{} RHSO_4+NaCl$$

再生的结果也使 OH 型离子交换树脂变成了“盐型”树脂，其结果也会影响化学除盐的效果。

275　什么是一级复床除盐处理？

原水通过阳离子交换剂时，水中的阳离子如 Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+、Na^+ 等被交换剂所吸附，而交换剂上可以交换的 H^+ 被置换到水中，并且和水中的阴离子生成相应的无机酸。其反应如下式：

$$RH^+ + \begin{cases}\frac{1}{2}Ca^{2+}\\ \frac{1}{2}Mg^{2+}\\ Na^+\\ K^+\end{cases} \begin{cases}\frac{1}{2}SO_4^{2-}\\ Cl^-\\ HCO_3^-\\ HSiO_3^-\end{cases} \xlongequal{} R \begin{cases}\frac{1}{2}Ca^{2+}\\ \frac{1}{2}Mg^{2+}\\ Na^+\\ K^+\end{cases} + H^+ \begin{cases}\frac{1}{2}SO_4^{2-}\\ Cl^-\\ HCO_3^-\\ HSiO_3^-\end{cases}$$

当含有无机酸的水，通过阴离子交换剂时，水中的阴离子如 SO_4^{2-}、Cl^-、HCO_3^- 等被交换剂所吸附，而交换剂上的可交换离子 OH^- 被置换于水中，并和水中的 H^+ 结合成为 H_2O。其反应如下式：

$$ROH^- + H^+ \begin{cases} \frac{1}{2}SO_4^{2-} \\ Cl \\ HCO_3 \\ HSiO_3 \end{cases} \rightleftharpoons R \begin{cases} \frac{1}{2}SO_4^{2-} \\ Cl^- \\ HCO_3 \\ HSiO_3^- \end{cases} + H_2O$$

经过上述阴、阳离子交换器处理的水，水中的盐分被除去，此即为一级复床的除盐处理。一级复床除盐的处理过程，通常是由强酸性 H 型交换器、除碳器以及强碱性 OH 型交换器组成，如图 3-3-1所示。

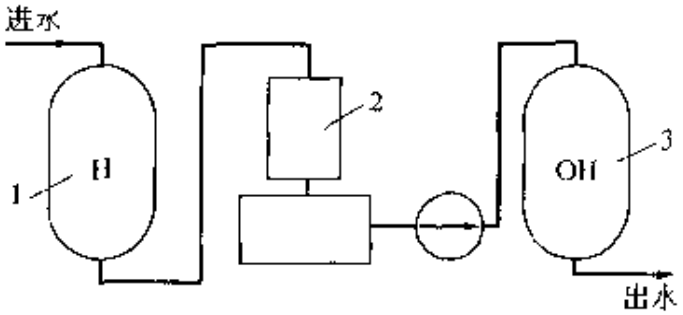


图 3-3-1　一级复床除盐系统示图

1—强酸性 H 型交换器；2—除碳器；3- 强碱性 OH 型交换器

在一级复床除盐系统中，一般在阴离子交换器前面设有除碳器，以去除水中 CO_2（即去除 HCO_3），减轻阴离子交换器的负担。

276　为什么一级复床除盐处理不以阴床-阳床的顺序排列？

一级复床的除盐处理是以阳床-阴床的顺序排列，不可以颠倒为阴床-阳床的顺序排列，原因如下。

（1）阴离子交换树脂失效再生时，是用 NaOH 再生的，如果阴床放在前面，那么再生剂中的 OH^- 再生时，被吸附在阴树脂上，在运行时，遇到水中的阳离子 Ca^{2+}、Mg^{2+}、Fe^{3+} 等产生反应，其结果是生成 $Ca(OH)_2$、$Mg(OH)_2$、$Fe(OH)_3$、$Ca(HSiO_3)_2$ 等的沉淀，附着在阴树脂的表面，阻塞和污染树脂，阻止其继续进行离子交换，而且难以清除。

（2）阴离子交换树脂的交换容量比阳离子交换树脂低得多，又

极易受到有机物的污染，因此，如果阴床放在阳床之前，势必有更多机会遭受到有机污染，交换容量还会更低，对除盐水处理不利。

（3）除盐水处理最难点之一是除去水中的硅酸根 $HSiO_3$，是由强碱阴离子交换树脂去除的。但是硅酸根 $HSiO_3^-$ 在碱性水中是以盐型 $NaHSiO_3$ 存在的，而 $HSiO_3^-$ 在酸性水中是以硅酸（H_2SiO_3）形式存在的。强碱阴离子交换树脂对于硅酸的交换能力要比硅酸盐的交换能力大得多，即最好是在酸性水的情况下进行交换，而阳离子交换塔的出水刚好是呈酸性的水，因此，阴床设置在阳床之后，对去除水中的硅酸根十分有利。

（4）离子交换树脂的交换反应有可逆现象存在。这是反离子作用，所以要有很强的交换势，离子交换才比较顺利进行。把交换容量大的强酸阳树脂放在第一级，交换下来的 H^+ 迅速与水中的阴离子生成无机酸，再经过阴离子树脂交换下来的 OH^-，使 H^+ 与 OH^- 生成 H_2O，消除了反离子影响，对阴离子交换反应十分有利。

（5）阳离子交换器的酸性出水可以中和水中的碱度（HCO_3^-），生成的 H_2CO_3 可通过除碳器除去。所以阳床在前能够减轻阴床的负荷。

277　什么叫离子交换平衡及平衡常数？

离子交换剂和水中离子之间的离子交换反应是可逆的，并按等电荷摩尔量进行。它们之间的离子交换根据质量作用定律，当正反应速度和逆反应速度相等的时候，溶液中各种离子的浓度就不再改变而达到平衡，即称为离子交换平衡。例如 H 型强酸性阳离子交换树脂 RH，同水中 Na^+ 进行交换，其反应式如下：

$$RH+Na^+ \rightleftharpoons RNa+H^+$$

按照质量作用定律，在离子交换反应达到平衡时，树脂中含 Na^+ 浓度和 H^+ 浓度的比值[RNa]/[RH]，与水中 Na^+ 浓度与 H^+ 浓度的比值$[Na^+]/[H^+]$，成正比关系。其比值在一定的温度条件

下是一个常数，称为平衡常数或选择性系数，以 K 表示：

$$K=\frac{[RNa]/[RH]}{[Na^-]/[H^-]}=\frac{[RNa][H^+]}{[RH][Na^+]}$$

式中 K——离子交换平衡常数；

$[RNa]$——反应平衡时交换剂中 Na^+ 浓度，mol/L；

$[RH]$——反应平衡时交换剂中 H^+ 浓度，mol/L；

$[H^+]$——反应平衡时水溶液中 H^+ 浓度，mol/L；

$[Na^+]$——反应平衡时水溶液中 Na^+ 浓度，mol/L。

从平衡常数 K 的大小，可以看出交换剂上的 H^- 变成 Na^- 的难易程度。如果 $K>1$，则 Na^- 容易到交换剂上去，而把 H^+ 放出来，K 越大，就越容易吸附 Na^+ 而放出 H^+。对于一定的树脂来说，与水中不同的离子，有不同的交换能力。因此，K 值的大小各不相同。如 H 型强酸性阳离子交换树脂，对水中常见的几种阳离子的平衡常数 K 如下：

水中的阳离子	Li^+	H^+	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
平衡常数 K 值	0.8	1.0	2.0	3.0	3.0	26.0	42.0

OH 型强碱性阴离子交换树脂（Ⅰ型），对水中常见的几种阴离子的交换平衡常数 K 如下：

水中的阴离子	HCO_3^-	Cl^-	HSO_4^-	NO_3^-
平衡常数 K 值	6.0	22.0	35.0	65.0

278 离子交换的过程是如何进行的？

离子交换进行的过程，可以用 H^+ 型树脂对于水中 Na^+ 进行交换为例，如图 3-3-2 所示。从图中可知，离子交换的过程分为以下五步进行。

① 水中的 Na^- 逐步扩散至树脂颗粒表面的边界水膜处，这步称为膜扩散。

② Na^+ 进入树脂颗粒内部的交联网孔，并进行扩散，这步称为内扩散。

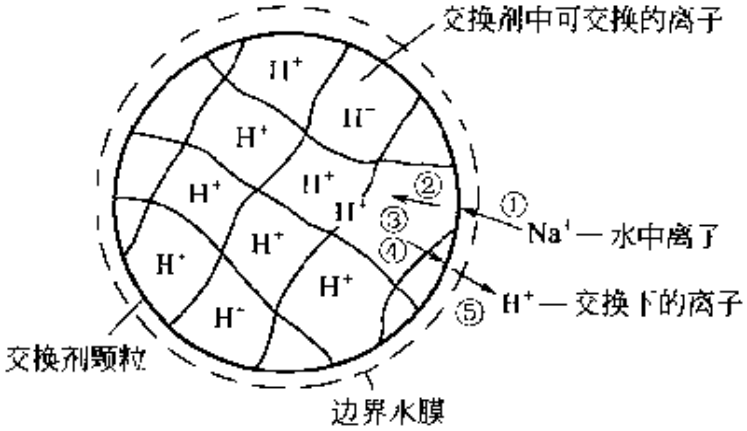


图 3-3-2　离子交换过程示意图

③ Na^+ 与树脂中的交换基团相接触，并与交换基团上可交换的 H^+ 进行离子交换。

④ 被交换下来的 H^+ 从树脂颗粒内部的交联网孔中向树脂的表面扩散。

⑤ H^+ 进一步扩散至树脂颗粒表面的边界膜处，并进入水溶液中。

从此可见，整个交换过程的速度取决于 Na^+、H^+ 的扩散速度。因此，要使离子交换过程迅速而有效地进行，就得设法使交换与被交换的离子扩散速度加快。

279　什么叫离子交换过程的分层失效原理？

固定床的运行方式，通常是使水自上而下地不断通过树脂层。由于水和树脂层上、下部接触的先后次序不同，在树脂层的不同高度处的交换作用也就不同。

下面以 Ca^{2+} 交换 Na 型树脂层为例加以说明。当水通过再生好的 Na 型树脂层时，水中的 Ca^{2+} 首先与处于表面层的树脂进行离子交换，所以这树脂层很快就失去了交换水中 Ca^{2+} 的作用，此后的水再通过该树脂层时，水中的 Ca^{2+} 就不再与这层树脂进行交换了，交换作用进入到下一层的树脂层，由于处于上部的树脂层其交换树脂已呈 Ca 型，水通过该层后，水质没有变化，故这一层称为“失效层”。

在失效层的下一层树脂称为工作层，水在通过这一层时，

水中的 Ca^{2+} 就与树脂层中 Na^{-} 进行交换作用，直至达到交换的平衡。

为了保证一定的出水质量，处于交换床最下面的一层离子交换树脂（相当于工作层的厚度）不能发挥其全部的离子交换作用，只能起到保护出水水质，使出水中的 Ca^{2+} 不超过规定的标准，故这一层树脂称为“保护层”。分层失效原理见图 3-3-3。

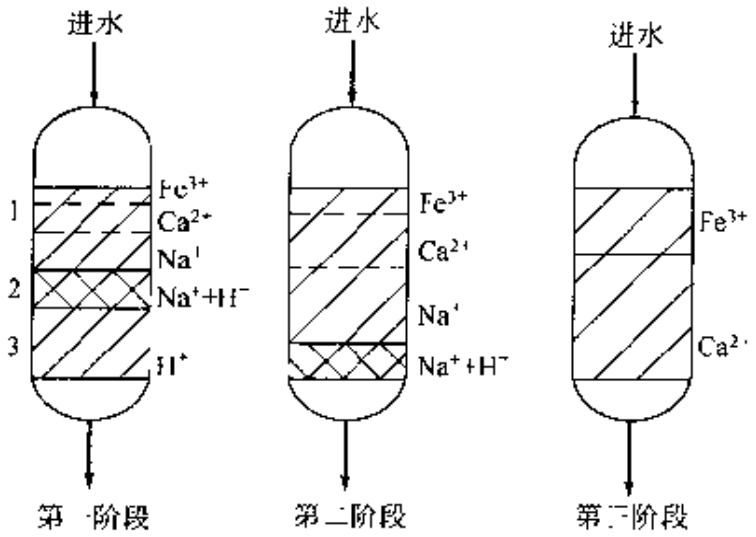


图 3-3-3　分层失效原理

1—失效层；2—工作层；3—保护层

在交换床的整个交换过程中，工作层自上而下不断的移动，直至工作层的下缘与保护层下缘相重合时，因为交换的不完全，出水水中的 Ca^{2+} 残留量增加，并很快地上升，这称之为失效。树脂失效后需要进行再生，以恢复其交换能力。在交换过程中，整个树脂层就是这样从“分层”达到交换“失效”，这就是一般所说的“分层、失效”原理。

280　什么叫离子交换过程的分层吸附原理？

天然水中不会只含单纯一种阳离子，通常都含有多种阳离子。为了说明问题，以含有 Fe^{3+}，Ca^{2+} 和 Na^{+} 的水通过刚再生好的 H 型离子交换树脂为例：

进水的初期，由于交换树脂是 H 型，故水中各种阳离子都与树脂上的 H^{+} 相交换。但因各种阳离子选择性的不同，交换树脂吸

附的离子在树脂层中有分层现象。即依据离子被树脂吸附能力的大小，自上而下依次被吸附的顺序为 Fe^{3+}、Ca^{2+}、Na^{+}。

当交换床不断进水时，由于 Fe^{3+} 比 Ca^{2+} 和 Na^{+} 更易被吸附，于是进水中的 Fe^{3+} 可与已吸附了 Ca^{2+} 的树脂层进行交换，Ca^{2+} 被 Fe^{3+} 置换下来，使吸附 Fe^{3+} 的交换层不断扩大；而被置换下来的 Ca^{2+} 会连同进水中的 Ca^{2+} 一起，又进入已吸附了 Na^{+} 的树脂层，将 Na^{+} 置换下来，使吸附 Ca^{2+} 的交换层不断扩大和下移。

同理，吸附 Na^{+} 的交换层也会不断扩大和下移。

在吸附 Na^{+} 的树脂层下面，有一层树脂层是 Na^{+} 和 H 型树脂进行交换的区域，可以把它看做是“工作层”。所以当此层移动到交换床树脂层下沿时，若再运行，则进水中交换能力较小的 Na^{+} 就会首先出现在水中。

所以当含有 Fe^{3+}、Ca^{2+}、Na^{+} 的水自上而下地通过 H 型交换树脂时，它们在树脂层中的分布规律大体如下：

（1）被吸附离子在树脂层中的分布，是按其被交换树脂吸附能力的大小，自上而下依次分布、最上部是吸附能力最大的离子，最下部是吸附能力最小的离子。依据以上原理，交换后的树脂层中的离子，按自上而下的顺序排列 Fe^{3+}、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^{+} 和 H^{+}。

（2）各种离子被吸附能力的差异越大，则它们在树脂层中的分布就越明显（例如对化合价不同的离子）。

（3）对于交换能力差异较小的不同离子（例如化合价相同的离子），在树脂层中的分布差异并不明显，仅在同一树脂层上，表现出上、下部吸附离子含量的比例的不同。

281　什么叫固定床？有什么特点？

所谓固定床，就是指水在交换床中不断地流过，进行离子交换，而床内树脂层是固定在一个交换器中，一般不将交换剂转移到床体外部进行再生。

固定床工艺有两个特点：①所用树脂量较大，但其利用率低。因为当交换床运行时，只有工作层树脂在工作，其余大部分树脂则经常充当“支撑”作用。而且当床内树脂需要再生

前，其上部树脂已呈失效状态；②固定床的运行不是连续的，而是呈周期性的，从失效到再生合格前这段时间不能供水，所以需要备用供水设施。

从目前情况看，固定床工艺应用时间较长，工艺和技术都比较成熟，而且对水质的适应性强，树脂的损耗也比较小。所以固定床工艺仍旧是目前化学水处理的主要方法。

282　固定床离子交换剂的再生有哪些方式？

固定床离子交换剂的再生方式，按照再生和运行的形式，主要分为顺流再生和逆流再生两种。

顺流再生方式运行时水流的方向和再生时再生液流动的方向是一致的，通常运行时的水流方向和再生液是由上而下流动的。顺流再生有的增设空气搅拌。逆流再生方式是运行时水流的方向和再生时再生液流动的方向相反。通常交换时水的流向是自上而下流动的；而再生时再生液的流向是从下而上流动的。它们都各自有其特点，但以逆流再生的方式比较好。固定床离子交换的两种再生方式如图 3-3-4 所示：

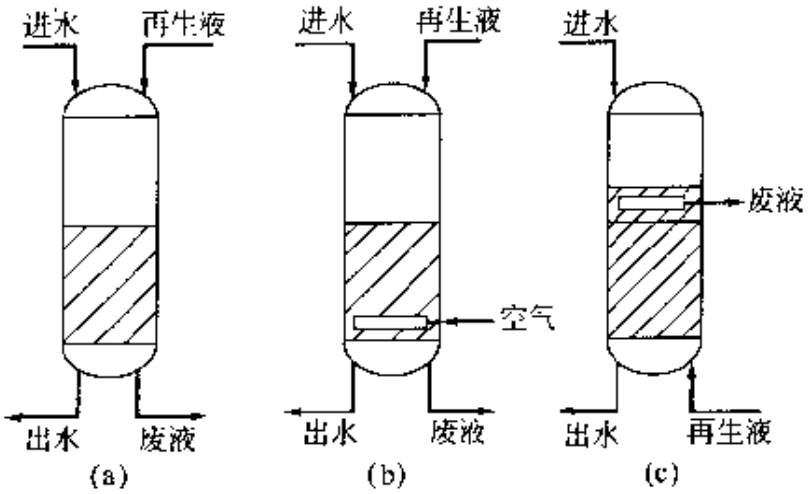


图 3-3-4　固定床的再生方式示意图

（a）顺流再生；（b）搅拌再生；（c）逆流再生

283　固定床顺流再生的操作如何进行？

固定床顺流再生操作控制通常是分为四个步骤进行的。如图 3-3-5 所示。

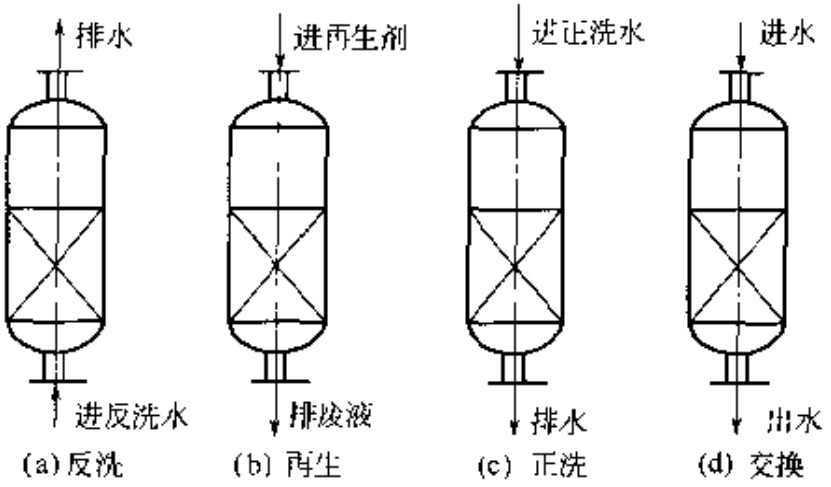


图 3-3-5 固定床顺流再生示图

(1) 反洗 在离子交换剂失效之后，进行一次自下而上的对交换剂的反冲洗，为的是使离子交换剂能够松动一下，使得再生时再生液分布均匀，再生效果好一些。另外，通过反洗，可以消除离子交换剂上层部位在运行时所截留的悬浮物质。反洗用的水一般是：第一级交换器可用过滤水清洗；第二级交换器可用一级交换器的出水。反洗的操作控制：当反洗之初的几分钟，阀门要开大，然后迅速关小，反冲洗强度控制在 12～15$m^3/(m^2 \cdot h)$。反洗的控制终点是水质清净为止，时间约 15～20min。操作时应注意不使交换剂颗粒冲至床体外。

(2) 再生 再生液的浓度控制在 2%～6%，再生流速为 3～7m/h，时间约 45min 左右，再生液的耗量约为理论值的 2～5 倍。

(3) 正洗 经再生之后，为了清除残留的再生剂及其再生时的生成物质，需要进行正洗操作。正洗的流速控制在 3～6m/h，时间约 30min 左右。

(4) 交换 操作时要控制一定的交换流速，这与运行方式有很大的关系。一般控制在 20m/h，直至失效。

284 顺流床在再生时会出现哪些异常现象？应如何处理？

顺流床在再生时易出现的异常现象及处理方法见下表：

序号	异常现象	原　　因	处理方法
1	再生时床子打不进再生液	(1) 床内压力过大 (2) 进再生液的管路堵塞 (3) 进再生液阀打不开 (4) 再生计量箱出口阀打不开或污堵 (5) 水力引射器真空度低	(1) 检查并开大再生排水阀，降低床内压力 (2) 检查进再生液管路，阀门是否损坏等，并及时排除之 (3) 检查进再生液阀情况并打开 (4) 打开计量箱出口阀或疏通污堵 (5) 检查水力引射器是否正常，水压是否太低，喉管是否堵塞，并排除故障
2	再生时往计量箱"返水"	(1) 床内压力大 (2) 水力引射器真空度低 (3) 运行床再生液阀不严，压力高水从运行床向再生系统返水	(1) 调整再生床排水阀，适当降低再生床内压力 (2) 检查水力引射器真空低的原因；如系水压低，应提高水力引射器入口水压力；如系喉管堵塞，应及时清污等 (3) 关严运行床再生液阀
3	往计量箱放再生液特别慢	(1) 从储罐到计量箱的管路堵塞 (2) 室温低于15℃时，浓碱易结晶凝固	(1) 及时清除污物，并采取措施减少再生剂中杂质 (2) 提高室温至15℃以上
4	离子交换树脂交换容量下降	(1) 树脂再生时析出沉淀物 (2) 再生时再生剂量不足或浓度低 (3) 反洗不彻底，树脂层中的悬浮物没有反洗掉 (4) 正洗时间过长消耗了树脂交换容量 (5) 床内因偏流产生"窝酸"或"窝碱"，致使废液上返，将再生好的树脂污染了	(1) 化验原水中重金属离子情况，加强预处理工作，对沉淀物可用3%～5% HCl清洗之 (2) 检查再生剂用量，严格控制再生液浓度 (3) 加强反洗工作，调整反洗时间和反洗强度 (4) 调整正洗时间，防止过度冲洗 (5) 检查偏流产生原因，并及时消除

285　顺流床反洗跑树脂应怎样处理？

顺流床反洗跑树脂有如下原因：

(1) 反洗流速过大。床子的反洗流速应为12～15m/h，树脂的膨胀率，阳树脂为60%，阴树脂为80%～100%。当反洗操作超过上述数值时，容易造成跑树脂。

发现跑树脂时，应立即关闭反洗入口阀，待树脂落实后，再重新反洗。

(2) 树脂层严重污染。由于树脂的粒度一般均在20～40目之

间比较均匀，所以入床水中的悬浮物大都集中在树脂层表面，并形成污泥层，易造成“沟流”短路。

在操作时，尽管反洗水流量不大，但由于水流从狭窄的沟缝中流出，这样就造成水流不能均匀地通过树脂层，使局部树脂的反洗流速很高。高速的水流将尚未严重污染的树脂颗粒冲刷下来带走，也会造成反洗跑树脂。

发现这种情况，应适当缩短反洗周期、延长反洗时间、并加大反洗强度和做好入床水的预处理工作。

如树脂层污染严重，应考虑打开交换床上人孔，观察树脂层的情况，必要时进行人工清洗。

(3) 偏流。有两种情况可能产生树脂层的“偏流”。一是前面讲过的树脂层污染；另一种情况是下部配水装置损坏或污堵。这种情况会产生局部反洗流速过高而造成反洗跑树脂。

(4) 反洗操作不当，上部树脂有空气。若树脂中有空气，会从监视镜中看到一层树脂漂在水面。这是由于树脂层上部有空气，而树脂又未充分湿润，即被反洗水托起来所致。此时如不停止反洗，也会造成跑树脂。因此应停止反洗，从入口阀进水将漂在水上的那层树脂“湿润”下来，把空气排走，然后再进行反洗。

286　固定床逆流再生如何进行操作控制？

固定床逆流再生的操作可分气顶压法、水顶压法、低流速法及无顶压法四种。操作控制原理基本相同。以气顶压法为例，其步骤如图 3-3-6 所示。

逆流再生的具体操作控制如下。

(1) 小反洗操作　当交换器运行失效之后，即行停运。小反洗水从中间排管进入，首先把在运行中附着在压脂层的污物和粘附在中间排管网套上的杂质，用小反洗水冲洗干净。这些杂质大都是悬浮物质和有机物质，如果不及时清洗，就会渗入压脂层下部，影响树脂交换性能。操作控制小反洗流速约 15m/h，清洗至排出水的浑浊度小于 1mg/L 为止。

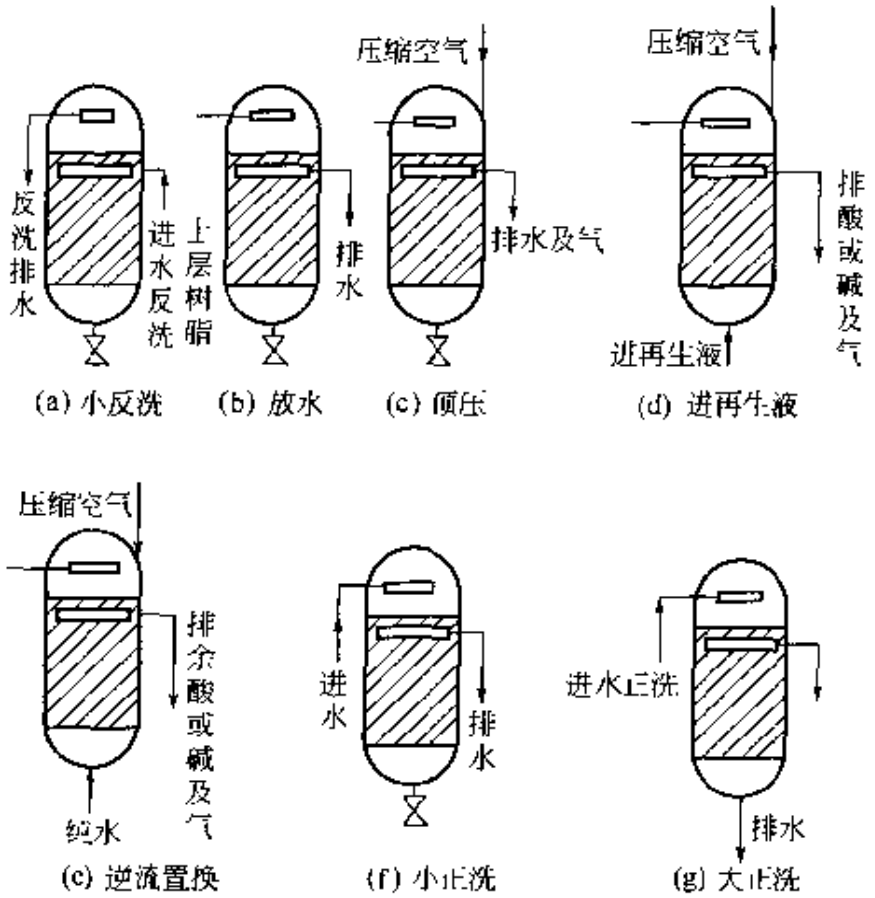


图 3-3-6　固定床逆流再生示意图

(2) 上部放水操作　目的是为了使压脂层在小反洗后均匀沉降一下，使树脂压脂层面平整。操作是将中间排管上部的水从中间排管放尽为止。

(3) 顶压操作　从交换器顶部送入压缩空气。对压缩空气的要求是要除油以避免污染树脂。顶压的目的是为了再生时再生液能均匀上升，并使树脂不乱层，顶压操作要控制压力稳定在 29～49kPa (0.3～0.5kgf/cm^2)；

顶压除用压缩空气之外，也可以用水，压力控制在 19.6～39.2kPa (0.2～0.4kgf/cm^2)。也可以不用压缩空气和水顶压，而采用再生低流速法或无顶压法，再生流速约在 2m/h 左右，在用无顶压法时，中间排水管上的小孔流速要调整到 0.1m/s 左右，不会产生乱层。

（4）酸（碱）再生操作　再生剂是从交换器的底部进入，中间排管排出。再生液酸的质量分数（如盐酸）2%左右，碱（如烧碱）3%左右，再生流速 3～5m/h。再生时间控制在 40～45min。再生操作时要特别注意中间排水管的排出液中气、水混合正常。如果只是排气，说明再生液的压力不足；如果只是排水（再生液），说明再生液的压力太高或是顶压的空气压力太低，这时会造成树脂乱层，或是造成再生液从塔顶溢出事故。

（5）置换操作　在再生结束之后，停止进再生液，用除盐水以 3～5m/h 的流速进行置换操作。通过置换，可以把残留在树脂中的再生液排出，也可以达到充分利用再生液的目的。置换操作的终点控制：如果是强酸性阳离子交换树脂的交换器，排出水酸度应小于 5mmol/L，含钠小于 200μg/L。如果是强碱性阴离子交换树脂的交换器，排出水的电导率小于 15μS/cm，或是碱度 $c\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$ 小于 0.5mmol/L，置换操作时间需 40min 左右。

（6）小正洗或小反洗操作　目的是为了清洗压脂层残留的废再生液，直至干净。小正洗时水是从中间排管排出，时间约 15min，流速约 10m/h。

（7）大正洗操作　操作时从顶部进水，底部排出，直到阳离子交换器出水钠离子浓度稳定并小于 200μg/L，阴离子交换器出水电导率小于10μS/cm，硅（以 SiO_2 计）小于 100μg/L 为止。

（8）正常运行操作　大正洗操作合格之后，关闭排水阀，打开出水阀，即可使水进入水箱，投入正常运行。

（9）大反洗操作　当阳离子交换器经过 10 次左右制水周期之后，或阴离子交换器经过 20 次左右制水周期之后，要进行一次大反洗操作。操作时从底部进水，顶部排出水，将整个树脂层松动一下。大反洗流速从小到大，但要密切注意树脂不要从交换器顶流失，在此原则下，大反洗流速要大一点好，一般约为 5～7m/h。同时还要注意中间排水管不致造成弯曲和断裂。大反洗结束之后，即转入再生处理，此时再生剂的浓度应适当提高一些。

固定床逆流再生几种再生方法比较

操作方式	条　　件	优　　点	缺　　点
气顶压法	① 压缩空气压力 29～49kPa，压力稳定，不间断 ② 气量 0.2～0.3m³/(m²·min) ③ 再生液流速 3～5m/h	① 不易乱层，稳定性好 ② 操作容易掌握 ③ 耗水量少	需设置净化压缩空气系统
水顶压法	① 水压 19.6～39.2kPa ② 压脂层厚 300mm ③ 顶压水量为再生液流量的1～1.5倍	操作简单	再生废液量大，增加废水中和处理的负担
低流速法	再生液流速 2～3m/h 左右	设备及辅助系统简单	不易控制。再生时间较长
无顶压法	① 中排液装置小孔流速应不大于 0.1m/s ② 压脂层厚 280mm，再生时处于干的状态 ③ 再生流速 2～3m/h	① 操作简便 ② 外部管系简单 ③ 不需要任何顶压系统，投资省	再生时间稍长

287　固定床逆流再生工艺有些什么特点？

（1）水质好　由于固定床逆流再生，进水自上而下，与进再生液自下而上方向相反。故新鲜的再生液首先与失效程度比较低的树脂相接触，从而使下部的树脂有充分的机会进行再生，可使这部分树脂的工作交换容量大为提高，未能充分再生的树脂却留在交换器上部，首先与进水相接触进行离子交换，从而减少了反离子作用，而对出水水质影响大的关键部位树脂——即出水前的“把关”树脂层是再生十分良好的树脂，所以出水水质好。实际生产中可得到证实。例如，我们都知道：阳床出水水质的好坏，可以看水中 Na^+ 量的多少，Na^+ 含量越小，水质越好。据测定，在同样情况相同运行条件下，顺流再生要比逆流再生工艺出水的 Na^+ 量大 6～10 倍。

（2）再生树脂不乱层　固定床逆流再生设有中间排水管，以及有 150～200mm 的压脂层，加上 29.4～49.0kPa 压力的压缩空气顶压，因此，再生时树脂处于压实状态，不会乱床（层），再生液

的分布也均匀，使树脂得到比较高的再生度，再生效果好。

（3）再生液消耗低　固定床在树脂失效后，根据离子选择性原理，如对于阳床，Na^+分布在下部，上部是Ca^{2+}、Mg^{2+}等离子。再生时，从底部进再生剂时，新鲜的再生液很容易把树脂中的Na^+置换出来。被置换出来的Na^+又可与上部树脂中的Ca^{2+}相交换，依此连锁反应，使再生迅速，再生效率又高。因此，再生液的浓度可以适当降低，利用率可提高，损失又少，使再生液耗量大为降低。据实际生产测定，逆流再生的再生剂耗量比起顺流可以减少50%左右。

（4）水耗低　逆流再生的流速比较低，废再生液也少，反冲洗效率又高，容易清洗干净，耗水量大为减少。据实测，逆流再生的阳床再生水耗可减少25%左右，阴床再生水耗可减少45%左右。

（5）树脂的再生度高　经实际测定，逆流再生的底层树脂再生度可达90%以上，而顺流再生只有50%左右。虽然逆流再生的顶层树脂再生度稍低，然而，顶层树脂首先接触进水，水中的反离子浓度很低，因而能充分利用这部分树脂的交换容量，以提高离子交换的经济性。

288　逆流床的中间排水装置有什么作用？有什么要求？

中间排水装置是指设在逆流床床层表面上的排水系统。

中间排水装置有三个作用：①使再生液和冲洗水上流时，能均匀地从中间排水装置排出，避免由于液流的流动使树脂“乱层”；②再生时，收集废再生液和顶压介质（顶压风或顶压水）；③反洗压实层。

对于中间排水装置的要求是：

（1）中间排水装置的主管或支管应能在水流的冲击下不弯曲变形。

为此，中间排水装置应采用高强度材料，如不锈钢或碳钢管衬胶，并需有加强措施，同时要有固定装置。不能使用塑料管。

（2）再生时防止交换树脂颗粒漏出。一般都要采用在支管处包

缝一层为 10 目，一层为 50 目的尼龙网，或套塑料网套。塑料套须经蒸汽或热开水烫缩，紧固在中排支管上。

（3）布液均匀。由于支管通常包缝尼龙网，水流在支管中流动时受到限制。为了保证流速的均匀性，应做下述考虑：①支管开孔的总面积应为进水管的 4～6 倍，开孔面积太小时，布液不易均匀；②支管间隔一般为 200～300mm，间隔太大可能使配水不均匀；太小时安装又不方便；③开孔的位置应采用支管两侧开水平孔、交叉排列，同一排的孔眼应在同一水平线上。

289　pNa 计测定阳床出水含钠量应注意什么？

除盐水处理阳床出水质量的控制主要是含钠量，是采用 pNa 计来测定的。因此在操作控制时，要用好 pNa 计，除了仪器的正确定位，按规定进行电极清洗之外，应注意下列几点：

（1）电极的处理。新电极或久置未用的电极，应用蘸有四氯化碳或乙醚的棉花揩净电极头部，然后用纯水清洗，再在 pNa4（即 pNa＝4 的标准液）定位液中浸泡 1～2 小时后再使用。如 pNa 电极长时间不用，一般以干燥存放为宜。

（2）使用 pNa 计遇到酸性水样时（阳床出水是酸性水），必须先滴加 0.2mol/L 二异丙胺，使 pH 达到 10 左右。使用温度以 20～40℃为宜，不宜在 15℃以下使用。

（3）电极内芯参比溶液应浸满，否则，使用时无信号。

（4）使用 pNa 计时，仪器附近不应有强磁场，不宜将 pNa 计置于电源总开关附近。不使用时，应保持仪器干燥。

290　阴床出水电导率始终较高是什么原因？

阴床经过再生后投入运行，但电导率始终较高，要使其降下来也比较难，发生此种情况的原因可能是：

（1）阳床的出水 Na^+ 含量太高，当超过 500μg/L 时，阴床出水电导率升高比较明显。Na^+ 高，可能是阳床产生偏流泄漏 Na^+，或是制水周期将结束，树脂将要失效引起的。

（2）阴床前设有脱碳器的，要检查一下脱碳效率。有时可能由于 CO_2 未能去除，水中 HCO_3 含量高，增加了阴床的负荷，致使

电导率升高。此外，还要检查一个周围的空气，是否受到污染，因为这些污染物质，可由鼓风机吸入溶于水中。如是氨厂，有时大气中有可能含氨，当鼓风机吸入后，在除碳器中溶于水，因而使水中 NH_4^+ 增加，以致影响阴床出水电导率的升高。

(3) 阴床用 NaOH 再生后，没有置换好，或是正洗不彻底，Na^- 残留于阴树脂中，当制水时释放于水中，也会使出水的电导率升高。

(4) 由于疏忽，阴床混入了阳离子交换树脂，在阴床再生时，变成钠型树脂混杂在阴树脂中，而在制水时放出 Na^+，因此，阴床的出水电导率始终较高。

291 影响电导率测定的有哪些因素?

电导率可定性地反映水中离子的多少，但还不能定量地反映水中离子的成分和数量。其大小与水中离子的多少、离子的摩尔电导、离子的电荷数以及离子的迁移速度都有关系。影响电导率测定准确性的因素主要有：①与水的温度变化有关。因为水温升高，水的黏度降低，离子的迁移速度加快，因此测得电导率偏高，反之就偏低，因而要进行校正，以水温 20℃时为参比；②与水的流速有关。因为测定电导率时将其电极插入被测的水中，水的流速如果很低，水中杂质会容易粘附在电极上，造成电极污染，因此，就影响所测电导率的准确性；③与水质污染影响有关。主要是水接触空气，受到空气中 CO_2、尘埃等的污染，水质越纯其稳定性越差，越容易被污染，从而使水的电导率升高。有的纯水贮槽因没有保护好，从而使电导率升高。为了有统一的标准，便于对比，二级除盐水的电导率的测定点，选在混合床出水的母管处，进行连续性的测定分析。

292 复床的串联与组联排列运行有什么不同?

复床的组联排列是将原水进入各台阳床，而每台阳床出水混合在一个公共集水总管，然后，从集水总管再分配到每一台阴床。组联排列又称母管式组合。这种排列运行的优点是比较充分地利用各交换器的制水能力，对于各阴、阳床的再生或者水质监测，可以根

据生产的需要进行比较灵活的控制。然而，监测的项目相应比较多。如阳床出水的钠度、酸度；阴床出水的电导率、硅根等，所以比较麻烦。复床组联排列运行如图 3-3-7。

复床的串联排列是原水从一公共的集水总管分别进入阳床和阴床的串联排列运行，每一阳、阴床成为一个系列，然后，各阴床的出水重新混合进入另一公共集水总管。串联排列又称单元式组合。这种排列的优点是一个系列的复床可以同时进行再生，监测也比较方便。然而其缺点是阳、阴床不一定会同时失效，往往是阴床先失效，而阳床仍有一定交换能力没能充分利用，致使再生频繁，制水成本增加。复床串联运行如图 3-3-8 所示。

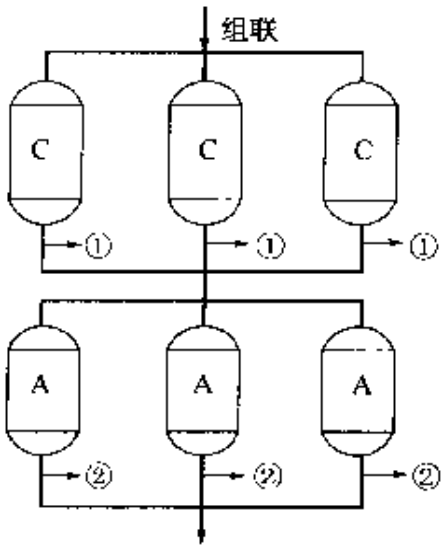


图 3-3-7　复床组联排列运行示意
C—阳床；A—阴床；①、②—监测点

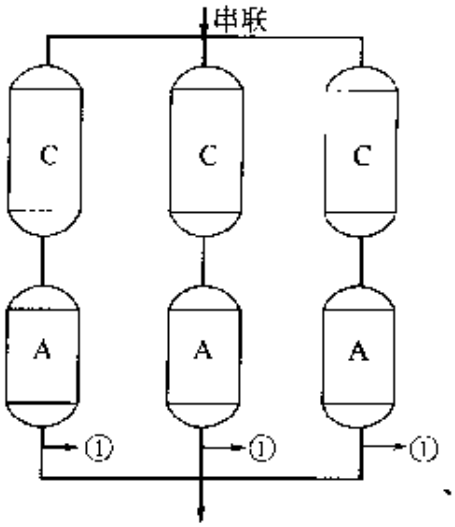


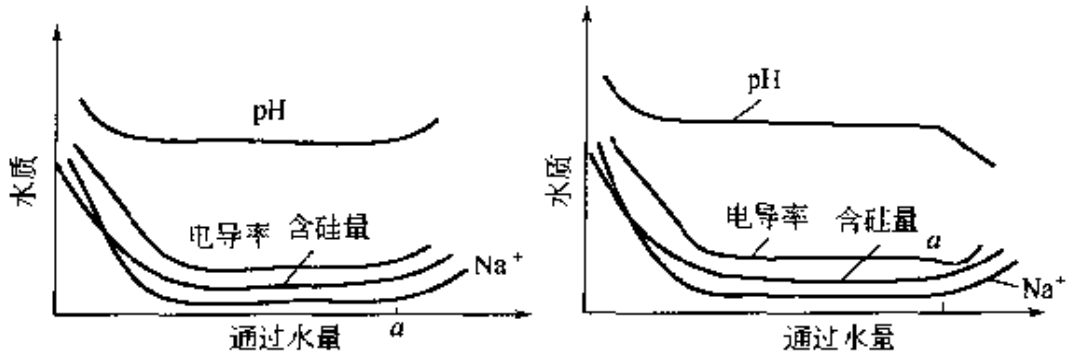
图 3 3 8　复床串联排列运行示意
C—阳床；A—阴床；①—监测点

从串联排列图可知，此种系列对监测控制比较方便，只需要监控阴床出水水质即可。

293　如何从水质变化情况来判断阴、阳床即将失效？

在实际生产中，根据水质变化情况来判断阴、阳床的失效，以便及时采取必要的措施，是很有意义的。如在阴、阳床串联运行的系统中，阳床先失效，那么，阴床出水的水质由于阳床的漏钠量增加，而使碱性（NaOH）增强，pH 会升高，阴床去硅的效果显著降低，从而使阴床出水的硅含量升高，这时水的电导率也会升高，

当发现上述水质情况变化时，表明阳床已失效。这种失效前引起的水质变化，可以从水质监控测定的变化曲线图 3-3-9 中看到。在图中，当运行至 a 点后，各组水质监控的曲线都向上，这时应停止运行，进行再生处理。



(a) 阳床先失效　　(b) 阴床先失效

图 3-3-9　水质监控变化曲线示意

如果在运行中阴床先失效，这时，由于有阳床出水的酸性水通过，因此，阴床出水的 pH 下降，与此同时，集中在交换剂下部的硅也释放出来，使得出水硅量增加，此时，电导率的曲线会出现一个奇特的现象：先是向下降（误认为水质转好），十几分钟后，出现迅速上升。如图 3-3-10 所示。

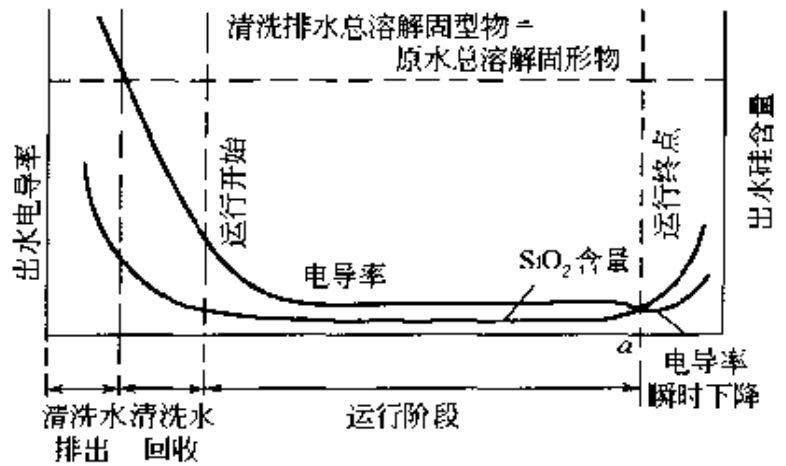


图 3-3-10　阴床出水水质变化曲线示图

从图可见：当运行到达 a 点之后，阴床出水的各项水质监控指标都会迅速上升，这时应立即停止运行，进行再生处理。

294　控制除盐水的运行终点有哪些方法？

控制除盐水的运行终点目前采用的主要有三种方法。

(1) 制水批量法　即制水达到规定的批量后停止运行，进行再生。其特点是可以主动调节制水量，安排各树脂床定时错开轮流再生。但是制水量往往与水质变化及树脂再生度有密切关系。因此，在没有进行各种工况下的批量终点测试时，批量往往定得比较低而偏于保守，即当批量到达终点时，实际上距离树脂失效还有相当长的时间，即树脂还有较大的交换能力未能利用，导致再生频繁，酸、碱耗量增加，而且由于树脂转型次数过多，引起膨胀、收缩的次数过多而影响使用寿命，所以往往是不经济的。

(2) 控制电导率或含硅量的失效法　根据水质标准，当出水的电导率或硅酸根（以 SiO_2 计），其中之一达到或接近失效值时，即停止运行。这方法能够充分利用树脂的交换能力。但从阳、阴床串联运行中得到的经验表明：往往是阴床先失效，而阳床尚有余量。同时，目前国内硅酸根表的质量还不稳定，作为终点控制仪表还不够完善，故用电导率控制比较好。

(3) 树脂的工交容量法　此法是规定阳床及阴床工作交换达到一定容量时，即停止运行，进行再生。例如某厂规定对阳床的出水终点控制是：水的总阳离子浓度 $c\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$ 乘以制水量，其乘积控制在 11000mol 左右；对阴床的出水终点控制是：水的总阴离子浓度 $c\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$ 乘以制水量，其乘积控制在 5500mol 左右。此法要以分析为基础，也比较麻烦。

其中以 (2) 法控制，比较合理也比较简单，但电导仪、硅酸根表要可靠。

此外，阳床的终点控制也有用 pNa 表示的，以控制 Na^+ 小于

200μg/L；有的正在研制以电导率与制水量的乘积为信号的终点控制器。混合床还有以进出水的压差来控制的，但是，压差与交换流速、树脂的性能有关，要根据具体情况通过试验确定，当压差超过一定值时，即停止运行，进行再生处理。

295　什么是混合床除盐处理？

在同一个交换器中，将阴、阳离子交换树脂按照一定的体积比例进行填装，在均匀混合状态下，进行阴、阳离子交换，从而除去水中的盐分，称为混合床除盐处理。

混合床的阴、阳离子交换树脂在交换过程中，由于是处于均匀混合状态，交错排列，互相接触，可以看做是由许许多多的阴、阳离子交换树脂而组成的多级式复床，可相当于1000～2000级。因为是均匀混合，所以，阴、阳离子的交换反应几乎是同时进行的，所产生的 H^+ 和 OH^- 随即合成 H_2O，交换反应进行得很彻底，出水水质好。阴、阳离子几乎全部除尽，出水电导率可达<0.1μS/cm，SiO_2 可达<100μg/L。混合床的阳树脂用 RH 表示，阴树脂用 R′OH 表示，其工作原理可用下列反应式表示：

$$RH+R'OH+\begin{cases}\frac{1}{2}Ca^{2+}\\ \frac{1}{2}Mg^{2+}\\ Na^+\\ K^+\end{cases}\begin{cases}\frac{1}{2}SO_4^{2-}\\ Cl^-\\ HCO_3^-\\ HSiO_3^-\end{cases}\longrightarrow R\begin{cases}\frac{1}{2}Ca\\ \frac{1}{2}Mg\\ Na\\ K\end{cases}+R'\begin{cases}\frac{1}{2}SO_4\\ Cl\\ HCO_3\\ HSiO_3\end{cases}+H_2O$$

混合床中的树脂失效之后，应先将阴、阳树脂进行分离，然后分别进行再生。

混合床中阴、阳树脂的正确选择是确保出水水质和提高再生水平的关键，因此，树脂的选择应当遵循以下原则：

（1）为了保证阴、阳树脂在再生时分层良好，就要有一定的相对密度差。要求湿真相对密度阳树脂比阴树脂大15%～20%，至少不得小于10%。

(2) 当出水水质要求高时，混合床中的树脂必须选用强酸性阳树脂和强碱性阴树脂相配合。如果用强酸性阳树脂和弱碱性阴树脂匹配，或是弱酸性阳树脂和强碱性阴树脂相匹配时，则出水水质就会降低。

(3) 由于混合床的交换流速比较高，有时超过 50m/h，树脂的磨损较为严重，必须选用高强度和耐磨性能好的阴、阳树脂。特别是阳树脂，如果磨损破碎后，会使树脂分层造成困难，也影响出水水质和周期制水量。

混合床的除盐处理可以单独使用，例如用于处理回收的锅炉蒸汽凝结水等。但在高参数的锅炉中，由于锅炉补给水的用量较大，水质要求又高，所以，往往作二级除盐使用．即在一级复床除盐系统的后面，串联混合床除盐处理，以进一步纯化水质。

296　固定式混合床的结构如何？

固定式混合床离子交换器，上部装有进水排管装置，材质可用重磅硬塑料管，或用不锈钢管，在管外装塑料网套，但也可以不套，只要操作多留神；在混合床的下部设有布水和进酸装置，有的采用伞形布水帽，有的采用两块多孔板之间夹一层涤纶网；中部设有中间排水装置，可以用不锈钢管材，外套 1～2 层塑料网套，中间排水管道上部设有进碱装置，外套 1～2 层塑料网套，进碱管可用硬塑料管或不锈钢管材。其结构如图 3-3-11 （见 274 页）。

297　如何进行混合床的操作控制？

混合床的操作控制按如下步骤进行：

(1) 反洗分层操作　当混合床运行失效之后，必须设法将阴、阳树脂分离，以便再生。这是关键的操作步骤。在实际生产中，大都采用水力筛分法，利用阴、阳树脂相对密度的不同，用反洗的水力，将树脂悬浮起来，在到达一定的膨胀率之后，让树脂沉降下来，阳树脂的相对密度大沉于下面，阴树脂的相对密度小浮于上面，使两种树脂明显分开。反洗分层操作时，开始的流速要小，逐渐增大流速至 10m/h 左右，树脂膨胀率达到 50%，时间约 15min，

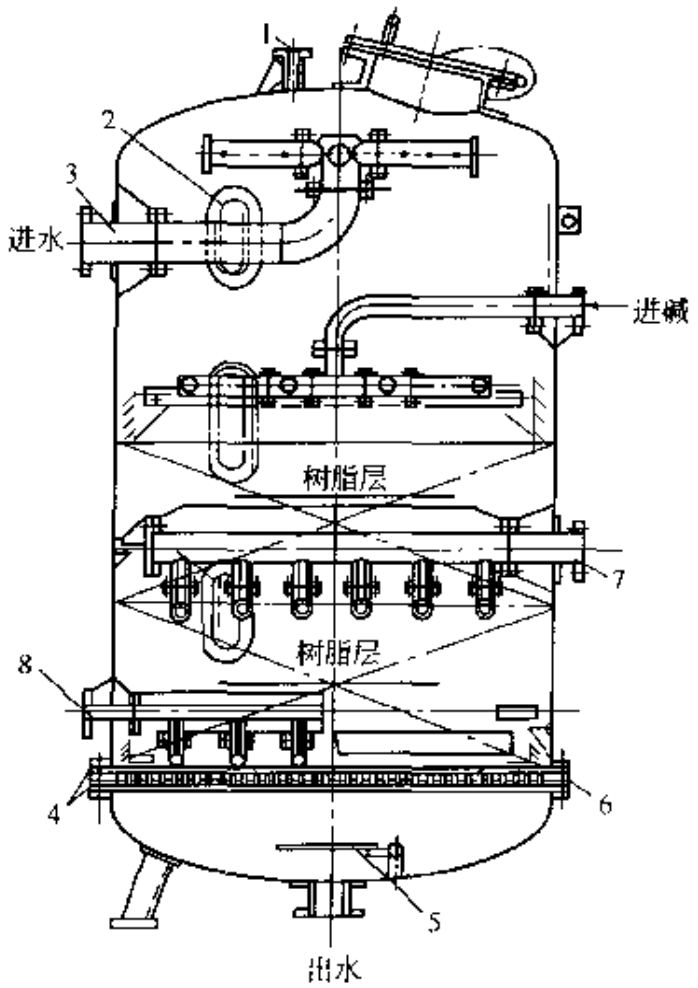


图 3 3 11　混合床离子交换器的结构示图

1－放空气管；2－观察孔；3—进水装置；4—多孔板；5—挡水板；6—滤布层；7—中间排水装置；8- 进压缩空气装置

然后静置，放水操作，约 10～15min，将水放至树脂层上面约 100mm 为止。

混合床树脂分层有时要 2 次，甚至 3 次方才分好，有的时候通以压缩空气反洗，或者通入 NaOH 溶液，将阴树脂再生成 OH 型，阳树脂变为 Na 型，使两者间密度差加大，以增加分层效果。

(2) 再生操作　有体外及体内再生两种，而体内再生又有两步法和一步法之分。一步法是分别同时进酸、碱通过阳、阴树脂，从中间排管排出混合再生废液，然后，分别同时进水对阴、阳树脂进行置换与清洗。一步法的再生时间可以缩短，但再生系统要可靠。

通常使用的两步法就是分别进酸、进碱，依次对阳、阴树脂进行再生。两步法再生可用图 3-3-12 来表示。图上可以看出混合床再生操作步骤：①阴树脂再生。进碱（NaOH）质量分数 5%，时间 40min，再生流速 6m/h 左右，废碱从中间排管排放，为防止碱液进入阳树脂内，故从底部进入少量的水与再生碱液一起从中间排管排放。②阴树脂置换。以流速 6m/h 进行置换清洗，废液从中排管排放，直至排出水 OH^- 碱度 $c\left(\frac{1}{x}B^{x+}\right)$ 小于 0.5mmol/L。③阳树脂再生。进酸（HCl）质量分数 4%，时间 30min，流速 6m/h，废酸从中排管排放，为了防止酸液进入阴树脂，并对阴树脂进行小流量清洗，因此，从进碱管进入一定清洗水，与再生酸液一起从中排管排放。④阳树脂置换。以 6m/h 流速进行置换清洗，废液从中排管排放，直至排出水酸度小于 0.5mmol/L 为止。⑤串联清洗。从进碱管进清洗水，对阴、阳树脂进行串联清洗，从底部排放。直至排水电导率小于 1.5μS/cm。

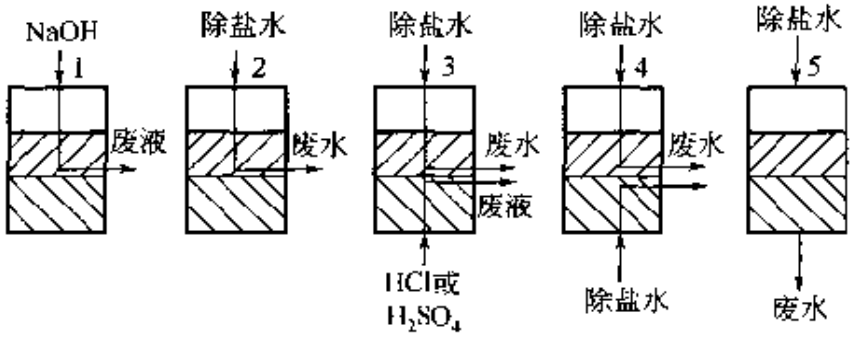


图 3-3-12　混合床两步法再生示图

1—阴树脂再生；2—阴树脂清洗；3—阳树脂再生、阴树脂清洗；4—阴、阳树脂各自清洗；5—串联清洗

（3）阴、阳树脂混合操作　树脂经再生和清洗之后，将分层的树脂进行均匀混合。从底部通入已经净化除油的压缩空气，时间约 5min，然后从底部迅速排水。

（4）正洗操作　从顶部进水，以 15m/h 流速进行正洗，直至电导率小于 0.2μS/cm，硅根小于 20μg/L，即为正洗合格。

（5）正常运行操作　从顶部进水，底部出水进入水箱，操作控制流速约 40m/h 左右，当电导率超过 0.2μS/cm 或二氧化硅超过 20μg/L，就停止制水，重新再生。

298　为什么有时混合床的阴、阳树脂分层不明显？如何处理？

混合床的阴、阳树脂分层不明显的主要原因有：

（1）阴、阳树脂的密度相差太小，难以分离；

（2）反洗分层时的流速太低，树脂的膨胀高度不够；

（3）阳树脂粉碎严重，密度减小，混杂在阴树脂里，难以分离；

（4）与树脂的失效程度有关．失效程度大的，分层就容易，失效程度小的难以分层。这是由于在进行离子交换时，树脂吸附不同的离子之后，密度也各不相同，因此，沉降的速度也不相同。例如对于阳树脂，不同型的密度排列为：

$$\rho_{H}<\rho_{NH_4}<\rho_{Ca}<\rho_{Na}<\rho_{K}<\rho_{Ba}$$

对于阴树脂不同型的密度排列为：

$$\rho_{OH}<\rho_{Cl}<\rho_{CO_3}<\rho_{HCO_3}<\rho_{NO_3}<\rho_{SO_4}$$

由此可见，阴树脂中的 ρ_{SO_4} 的密度较大，在失效时就沉降下来了。如果此时阳树脂未失效，因 ρ_H 小，则 H 型树脂浮在阳树脂上部，两者密度相差小，就难以分层。此外，H 型阳树脂与 OH 型阴树脂接触，它们电离出的 H^+ 和 OH^- 结合成水，而带负电的 $R—SO_3^-$ 与带正电的 $R{\equiv}N^+$ 发生静电相吸，所以难以分离。

对树脂分层不明显的处理方法是：

（1）在选择树脂时要考虑到所选择的阴、阳树脂有较大的相对密度差异，至少相差 10%以上。例如选用强碱性 201×7 树脂（即 717 树脂）的视密度为 0.65～0.75g/mL；强酸性 001×7 树脂（即 732 树脂）视密度为 0.75～0.85g/mL，相差 12.5%，大于 10%，可以配用。

（2）控制大反洗的分层速度至 10m/h，树脂的膨胀率要保持

在50%以上。

(3) 为提高分层效果，在分层之前通以10%质量分数NaOH(至少6%)，使阳树脂转变为Na型，阴树脂转变为OH型，用以加大两者的相对密度差，同时还可以消除发生静电相吸的现象，达到分层较好的目的。

有时一次分层不明显，还需多次。

299 混床出水pH值偏低是什么原因？

(1) 阴离子树脂被再生酸所污染有三种情况。第一种情况，阳、阴离子树脂分层不良是引起阴离子树脂被再生酸污染的一个原因。由于分层不良，阴离子树脂混杂在阳离子树脂中，在阳离子树脂再生时这部分阴离子树脂被酸所污染。另外由于混床的流速大，树脂的磨损大，特别是阳离子树脂经常被磨损，或者破碎，使颗粒变小，密度降低，与阴离子树脂相互混杂而难以分离。此时的阴离子树脂就最易被酸污染。第二种情况是设计上的原因。如中间排水管位置设计偏高。使阴离子树脂在中间排水管的下部；或者由于树脂装填时，阳、阴离子树脂比例不对，少装了阳离子树脂，多装了阴离子树脂；因此也使部分阴离子树脂在再生时受到酸污染。第三种情况是阴离子树脂的降解和水解。强碱阴离子树脂在使用过程中，强碱基团不断地降解，弱碱基团不断增加。这些弱碱基团与再生剂接触时，形成的盐型弱碱基团，在正洗时，由于pH值上升，弱碱基团会发生水解，并放出酸来，使混床的出水pH偏低。

(2) 阴离子树脂被有机物污染。污染阴离子树脂的有机物，常见的是腐殖酸和富里酸。这类有机酸带负电荷、吸附在阴离子树脂上，不仅使阴离子树脂交换容量大为降低，而在一定条件下，有机酸会释放出来，致使混床出水pH偏低，电导率增高。

(3) 阳、阴离子树脂混合不均匀，会引起沉积在下部的阳离子树脂缓慢地释放出残余的酸再生液，使混床投用初期有酸性水泄漏。

因此，树脂混合也是比较重要的操作。

（4）再生系统不严，阀门损坏，引起酸再生液泄漏，也会使混床排出酸性水。

300 什么叫树脂的“抱团”现象？它是怎样产生的？如何消除？

树脂的“抱团”现象是指在混床中，阳离子树脂与阴离子树脂之间由于静电引力，而使其不易分层的现象。

关于“抱团”，有一种说法是：当阳、阴离子树脂混合在一起，彼此接触时，由于阳离子树脂脱下来的 H^+ 离子，与阴离子树脂脱下来的 OH^- 离子互相结合成水。于是阳离子树脂由于失去一些阳离子而显负电性，阴离子树脂由于失去一些阴离子而显正电性，这两种带异性电荷的树脂小球就会互相吸引成团状，而不易分离。

碎树脂末和某些悬浮物会增大树脂的“抱团”作用。

如果在“抱团”的树脂中加入任何电解质（如苛性碱），则带负电的阳离子树脂就会结合阳离子而显电中性；带正电的阴离子树脂就会结合阴离子而显电中性，“抱团”的阳、阴离子树脂就会因此而散开。所以在分层前，向床内树脂通入少量的碱，就可以消除树脂的“抱团”，改善分层效果。

具体方法可参照如下：

反洗完毕后，待树脂落床下来；保持树脂层上部有 200～300mm 厚的水层。开启碱水力引射器向混床内注入少量（例如 $0.2m^3$）的碱。

众所周知，阳、阴离子树脂是否分层明显，还与树脂的失效程度有关。使碱液自上而下地通过树脂层，使阴离子树脂尽可能地转变成 OH 型；使阳离子树脂转变为 Na 型，也可以增加阳、阴离子树脂在不同离子型的密度差，收到强化分层的效果。

注碱完后，关闭正洗排水阀，静置 10min，以使注碱反应时间较为充分。

静置完毕，开始分层操作。分层时从监视镜应看到树脂在水力的冲击下，上下扰动。待分层排水中无泡沫时，关闭反洗入口阀，待树脂落实下来后，阳、阴离心树脂层间会有一道清澈的分界线，

表示分层效果理想。

301　什么是体内再生和体外再生？各有什么优缺点？

体内再生就是失效的树脂仍在原交换器内进行的再生；体外再生是把失效的树脂全部压送入专用的再生器进行的再生。两种方法的再生过程和原理是相同的，但各有优缺点。体内再生的优点是管道系统和再生操作简单，设备投资低，树脂的磨损率低。但其缺点是交换流速不能太高，对中排装置的机械强度要求较高。体外再生的优点是：①交换与再生在不同的设备内进行，使设备紧凑，更能适合于交换与再生的各自用途；②体外再生在专用的再生器内进行，有利于提高再生效率，再生剂也不会漏入出水中而污染水质；③可以减少备用设备，几台设备合用同一台再生器；④体外再生器的结构简单，可提高运行流速，设备所需要的停车时间可以缩短，效率大为提高。但是体外再生，由于将树脂压进、压出，树脂的磨损率较大，容易粉碎而失去效用。

302　如何选择再生剂？

再生剂是根据离子交换树脂的性能不同而有区分的选择。通常用于阳离子交换树脂的再生剂有：HCl、H_2SO_4、NH_3等；用于阴离子交换树脂的再生剂有：NaOH、Na_2CO_3、$NaHCO_3$，也可以用NH_3等。具体地说，强酸性阳树脂可用HCl或H_2SO_4等强酸；不宜采用HNO_3，因其具有氧化性；弱酸性阳树脂可以用HCl、H_2SO_4，或者是NH_3；强碱性阴树脂可用NaOH等强碱；弱碱性阴树脂可以用NaOH，或Na_2CO_3、$NaHCO_3$等，也可用NH_3。其中NH_3虽再生效率低，但因价格低廉而常被采用。

此外，再生剂的选择，还应根据水处理工艺、再生效果、经济性及再生剂的供应情况综合考虑。例如HCl与H_2SO_4相比较，HCl的再生效果好，据测定，在同样用4倍理论用量的再生剂，同样的再生流速，用HCl比用H_2SO_4再生，可以提高001×7树脂的交换率42%～50%。同时，H_2SO_4是二元酸，虽然产生二级电离，但离解度小，酸的利用率很低，还会产生“钙化”生成难溶的

$CaSO_4$ 沉积，吸附于树脂表面。阻塞了树脂的孔隙，使树脂的交换能力降低，从而也使再生效率降低。但是，H_2SO_4 也有浓度高，价格便宜，腐蚀性相应较低的特点。而 HCl 虽然再生效果好，但有浓度低，价格贵，腐蚀性强等缺点。对强碱性阴树脂来说，由于要求提高除硅能力，通常是用强碱 NaOH。而 Na_2CO_3、$NaHCO_3$ 由于碱性低，难以取代树脂中的阴离子，特别是 $HSiO_3^-$ 阴离子大部分仍留在树脂中，使得交换效果降低，出水中硅酸的残留量会增加，影响出水水质。

303　用硫酸作为再生剂时应注意些什么？

H_2SO_4 由于价格便宜，对设备管线的防腐蚀要求比较低，所以再生中广为应用。但因再生过程中易生成 $CaSO_4$，且 $CaSO_4$ 在水中的溶解度较小，有生成沉淀的危险，即容易在阳树脂上结钙。故在使用时，是适当采用低浓度，加大再生流速来进行再生的。但应注意：

（1）在一步法再生时，配制 H_2SO_4 的含量为 0.5%～2.0%，以 8m/h 流速进行再生，并间以 6m/h 流速逆洗 10min，以防止 $CaSO_4$ 的沉淀。

（2）分步法再生时是在一次再生中，分别用不同浓度的 H_2SO_4 溶液进行再生的。分步再生又可分为二、三、四步法三种，其中二步法因操作简便而被广泛应用。再生操作时，可按下表进行控制操作：

再生方法	酸量（占 H_2SO_4 总量）	H_2SO_4 质量分数/%	流率/[m³/(m²·h)]
二步法再生操作	1/2	2	8
	1/2	4	4
三步法再生操作	1/3	2	12
	1/3	4	8
	1/3	6～8	4
四步法再生操作	1/4	0.5	16
	1/4	1.0	12
	1/4	2.0	8
	1/4	5.0	1

$CaSO_4$ 虽易形成过饱和溶液，但从过饱和溶液中析出沉积物还需要经过一段时间。因此，采用加快再生液的流速以防止沉积。在操作的时候应注意观察排出的再生废液是否呈现 $CaSO_4$ 白色浑浊物，如果发现，应调节再生流速。

304　为什么有时阴床的再生效率低？

阴床再生效率低的主要原因有：

（1）再生时碱液的温度比较低，黏度大，化学活动性能差，再生效果差。但是加温也要适中，加温过高会使阴树脂的交换基团分解，树脂也会变质失效。因此，将碱加温的温度范围是：对强碱性阴树脂（Ⅰ型）35～50℃，强碱性阴树脂（Ⅱ型）30～40℃；对于弱碱性阴树脂以 25～30℃为宜。在上述温度下，最容易置换阴树脂中的 $HSiO_3^-$，并可提高阴树脂的工作交换容量，再生液温度每提高 1℃，工作交换容量可以提高 0.6%，去硅效果可提高 1.7%。

（2）再生液中的杂质较多，如果碱液中 NaCl、Na_2CO_3 以及重金属等含量很高，也会使阴床的再生效率降低。有时碱在贮存或运输的过程中，进入较多的铁质，会使阴树脂受到污染，也会使再生效率降低。

（3）阴树脂的有机污染、聚合胶体硅的沉积等很难以再生来消除，因此再生的效率低。

（4）再生时，碱液的浓度低，再生的流速过慢，都会降低再生效果。

（5）阴树脂的化学稳定性较差，易受氧化剂的侵蚀，尤其是季铵型的强碱性阴树脂的季铵被氧化为叔、仲、伯胺，使交换基团降解，碱性减弱，再生效果差。

305　再生液的质量分数和温度对再生效果有些什么影响？

（1）再生液质量分数对再生效果的影响　从理论上说，再生液的质量分数越高，再生越彻底。但实际上，再生液的质量分数过高，反而会使树脂的再生度下降。如在水的软化处理时，不同质量分数的 NaCl 溶液，对阳离子交换树脂进行的再生试验见图 3-3-13

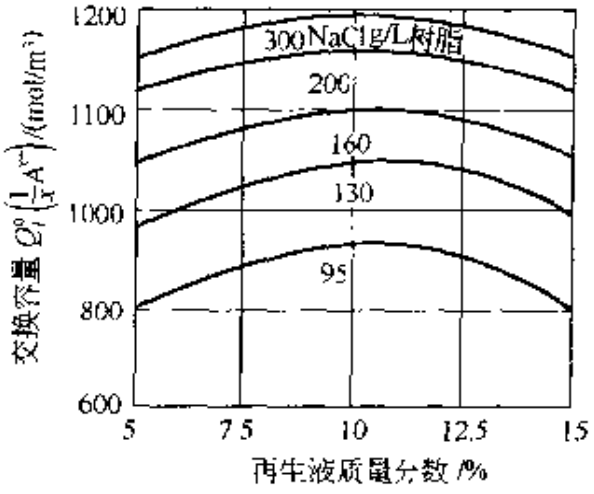


图 3-3-13 再生液质量分数与树脂交换容量之间关系

所示。由图可见，当 NaCl 质量分数超过 10%时，再生效果反而降低。因为再生液质量分数过高，对一定的再生液量来说，体积就少了，因此，就不能均匀地通过树脂层，并与树脂保持足够的接触时间；而且由于质量分数过高，还会发生离子对树脂交换基团的压缩作用，使得再生效果下降。因此，必须合理地控制再生液的质量分数。此外，再生液质量分数对于树脂再生效果的影响，还与树脂吸附离子价数有关，如用一价再生剂来置换树脂中吸附的一价离子时，一般再生剂质量分数的影响较小。但用一价再生剂如 HCl，来再生二价离子如 Ca^{2+} 时，浓度对提高再生效果有显著影响。在实际生产中，再生剂质量分数的控制范围通常如下表所示：

再生液质量分数/% 再生方式	HCl	H_2SO_4	NaOH	Na_2CO_3	$(NH_4)_2SO_4$	NaCl
顺流再生	4～8	1～5	4～6	4～5	4～6	4～8
逆流再生	2.5～4.0	1～4	3～5	3～4	3～5	4～6

（2）再生液温度对再生效果的影响　由于再生液温度的提高会增加扩散速度，对再生有利。如果把再生液 HCl 预热至 40℃，来再生 H 型离子交换树脂，就能大大改善树脂中铁及氧化物的清除效果。把再生液 NaOH 预热，来再生阴离子交换树脂，其效果更加显著，特别对于硅酸型阴树脂的再生效果有着明显的提高。如将 2%浓度的 NaOH，从 16℃加温到 35℃，来再生强碱性（Ⅱ型）阴离子交换树脂，经测定其效果如图 3-3-14 所示：

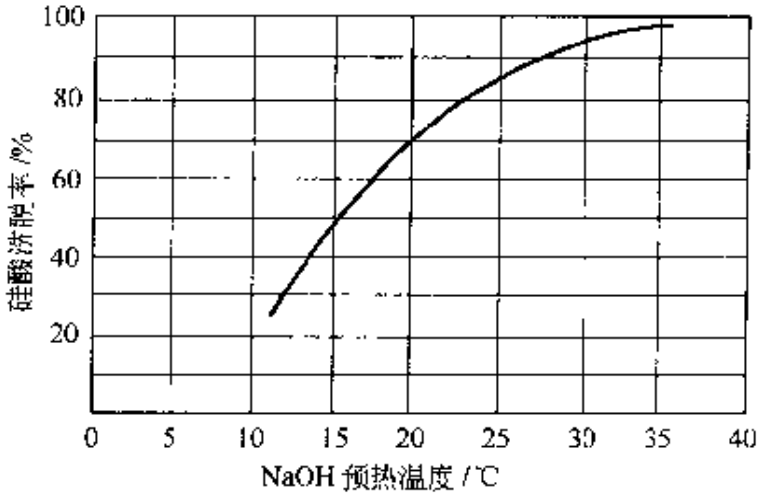


图 3-3-14　碱液加热与脱硅效果

从图 3-3-14 可见，在再生液温度 16℃时，交换时间为 100min，硅酸洗脱率只 50%，而加热至 35℃时，硅酸洗脱率接近 100%。然而，必须注意温度过高会造成树脂的交换基团分解，影响其交换容量和使用寿命。因此，在实际生产中，对碱液预热的最佳温度为：对于强碱性Ⅰ型阴树脂是 35～50℃；Ⅱ型阴树脂是35℃＋3℃。由于阳树脂的交换容量比较大，因此，再生剂很少进行加热。

306　再生液的纯度对于再生效果有些什么影响？

再生液的纯度对于离子交换剂的再生效果和出水水质的影响很大，纯度差的再生液可对再生效果产生如下影响。

(1) 使交换剂的交换容量大为降低　如果 NaOH 溶液中含有 1%～2%氯化物（主要是 NaCl），用来再生阴离子交换树脂，再生的效果就很差，可以使树脂的交换容量降低 15%，严重的甚至降低 50%。

(2) 使得交换剂的再生周期大大缩短　如 NaOH 中含氯化物过多时，由于 Cl^- 对于强碱性阴树脂的亲合力是 OH^- 对阴树脂亲合力的 20 倍左右。因此，被树脂吸附之后，就难以洗脱而残留于树脂中，因而大大降低了树脂的工作交换容量和周期制水量，再生周期大大缩短，而且提高了制水成本。

(3) 使交换剂的再生程度大为降低　如软化处理用 NaCl 溶液

再生时，由于食盐溶液中有时含有大量的硬度盐类，由于杂质的存在，严重时可以使再生程度下降到30%以下。如用12%浓度的NaCl溶液再生时，再生效果随着再生剂NaCl中的硬度盐类含量的增加而大为降低，如图3-3-15所示：

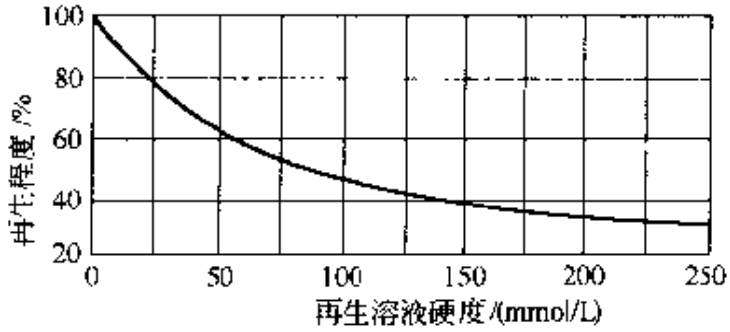


图3-3-15　再生液中的硬度对再生程度的影响

(4) 影响出水水质　不纯的再生剂如含有Fe^{3+}、NaCl、Na_2CO_3、SiO_2以及$NaClO_3$、Al_2O_3等物，不但污染树脂使其中毒，而且有的吸附在树脂表面上，正洗时难以清洗干净，而在制水时释放出来进入水中，影响出水水质。因此，必须根据要求选用纯度较高的再生剂，有的还必须在使用前经过澄清、过滤以去除杂质。

在阴树脂用NaOH再生时，为保证出水水质，有条件的地方应尽量使用纯度较高的碱。

为使再生剂保持纯净，必须在运输、贮存、溶化和使用过程中，加强防护，避免杂质混入。特别是对再生剂NaOH来说，运输和盛器都比较马虎是目前的通病，需引起重视；固碱在溶化之前要清除铁锈，有的还要配以过滤澄清装置；运送液碱的贮槽要专用，不可混杂使用；贮槽要有防腐措施，如衬胶、涂玻璃钢或是用塑料制品等。纯净的碱液是透明色的，如变成淡红色或红色溶液时说明受到铁污染，就要引起注意。

307　阴树脂再生剂烧碱的质量对树脂工作交换容量有什么影响？

阴树脂再生剂烧碱的质量对树脂工作交换容量及出水水质有很

大的影响。烧碱中常有氯化物、氯酸盐及铁酸盐等污染物，严重影响烧碱的质量。不同质量的烧碱对阴离子交换树脂工作交换容量的影响如下表所示：

成分 / NaOH种类	NaOH /%	Na_2CO_3 /%	NaCl /%	Fe_2O_3 /%	某阴树脂工作交换容量 $Q_V^c\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$/(mol/m³)
化学纯烧碱	≥95.0	3.0	0.01	0.0029	244.3
进口水银法生产NaOH	≥99.5	≤0.45	≤1	≤0.004	231.4
仿制隔膜法生产NaOH	≥96.1	1.65	2.2	<0.01	217.5
工业烧碱	30	1.0	5.0	0.01	142.7

强碱Ⅰ型阴离子交换树脂的平衡常数 K_{OH}^{Cl}，一般在15～20，说明树脂对 Cl^- 的亲和力很强。因此，烧碱中含有氯化钠时，对树脂再生度的影响很大。Ⅱ型强碱阴离子交换树脂的平衡常数 K_{OH}^{Cl} 为1.5，说明它对 Cl^- 的亲和力要小得多。因此，同样质量的烧碱对Ⅱ型强碱阴离子交换树脂再生度的影响就远较对Ⅰ型树脂的影响小。

烧碱中如含有氯酸钠，在接触铁制的容器时（如运输槽车、贮槽等）会生成铁酸盐 FeO_4^{2-}，它是比高锰酸钾还要强的氧化剂，在碱性溶液中具有强氧化性能，会使阴树脂氧化而降解，降低其工作交换容量。氯铁酸盐极不稳定，其对树脂的危害程度尚需进一步研究。

308 复床再生废水的处理有哪些方法？

（1）回收使用 将复床的反洗后期，正洗后期及再生后期的水引入专用水箱，供下次反洗使用。

这样做有三个好处：一是节约用水，便于降低自用水量；二是由于回收水中有一定量未使用完的再生剂，有利于降低单耗；三是可以减少再生废水排放量，有利于中和处理。

（2）稀释法 将再生废水排至贮水池，然后利用回收水或污水将再生废水稀释至排放浓度后，再行排放。

（3）相互中和法 将阳离子床和阴离子床的再生废水，排入一个池中，利用阳离子床再生废水中的酸性，来中和阴离子床再生废

水中的碱性而后排放。

这种方法比较简单、经济。中和后废水一般呈碱性。

(4) 过滤中和法　将相互中和后的再生废水通过中和过滤器，过滤器中装有碳酸钙，可与再生废水中的废酸起反应，并将其除去。

(5) 利用弱酸性树脂处理　将再生废水通过弱酸性树脂，当废酸液通过时，树脂变成 H 型，将水中的酸除去；当废碱液通过时，树脂将 H^+ 放出，使水中的废碱被中和，树脂转变成盐型。

由于弱酸性树脂交换容量大，所以用这种方法比较经济，再生废水一般可保持在 pH＝6～9 的范围内。

(6) 对于电厂，可用冲灰水中和。用冲灰水中碱性来中和再生废水。

309　为什么一、二级交换器对树脂层高有一定的要求？

树脂层高度对离子交换有一定的影响，因为树脂层过低，就没有保护层，在运行时，水中的盐类容易穿透树脂层，使出水水质达不到要求。如果树脂层过高，就会增加树脂层的阻力，同时也是不经济的。因此，对一、二级交换器的树脂层高有一定的要求：一级除盐交换器，如直径在 2m 以上，树脂层高不得低于 1.5m；如直径在 2m 以下时，树脂层高不得低于 1.2m。二级除盐交换器（如混床），树脂层高一般不大于 1.5m，但最低不小于 1m。

310　什么叫水垫层？水垫层有什么作用？

所谓水垫层是指树脂层表面到进水装置之间，留有一定高度的空间，这个空间在运行或反洗时被水所占据，故称为水垫层。

水垫层有两个作用：

(1) 提供反洗时树脂的膨胀空间。交换床在反洗时，树脂在反洗水的冲击下，充分膨胀。此时，由于树脂颗粒的互相碰撞和反洗水的冲击，使包围在树脂颗粒表面的污泥剥离下来，并被反洗水带走。

同时为防止细小的树脂颗粒被水带走，留有一个适当的缓冲空间。

（2）水垫层可以减缓水流对树脂层表面的冲刷，并在一定程度上，可以使水流在交换床截面上均匀分布。

水垫层的高度一般应相当于树脂层高度的60%～100%。

311　为什么离子交换器要留有一定的反洗膨胀高度？

在树脂反洗时，都有一定的膨胀率，其大小为反洗树脂时的膨胀高度与反洗前树脂层的高度之比。膨胀率与树脂的颗粒大小、真密度等物理性能以及水温等都有关，与操作时控制反洗流速的大小也有关系。但是，对于一定的树脂，水温高，黏度低则树脂的反洗膨胀率就越小；反之，水温低，黏度大，则在同样的反洗强度下，膨胀率就越大。在经过运行之后，树脂层的表面上积有悬浮物等杂质，在再生之前，要进行小反洗来冲洗干净，有时为了提高再生效果，有必要定期使整个树脂层松动。为了保证一定的反洗效果，要有一定的反冲洗膨胀高度，膨胀高度过低，达不到反洗要求，又会造成树脂的流失；过高，也要增加设备的投资。实际生产表明，交换器的反洗膨胀高度为树脂层的80%左右为好。

312　进行除盐水处理时，对再生剂稀释水选择有何要求？

阳床的再生是以酸作为再生剂的，以H^+来置换出树脂吸附的Ca^{2+}、Mg^{2+}、Fe^{3+}等阳离子，因此再生剂的稀释水中存在少量的Ca^{2+}、Mg^{2+}等阳离子，对交换反应不会有太大的影响。如果一级脱盐水供应紧张时，为了降低脱盐水的耗量，短期内选择过滤水作为再生剂的稀释水是可以的，因面在系统原始开车时采用过滤水。当然，正常运行时，应以除盐水作为阳床再生剂的稀释水。

阴床是以碱来再生的，再生剂的稀释水必须采用除盐水，不能用过滤水，因为过滤水会使碱液混入Ca^{2+}、Mg^{2+}、Fe^{3+}等阳离子，发生下列反应：

$$Ca(HCO_3)_2+2OH^- \longrightarrow Ca(OH)_2\downarrow+2HCO_3^-$$

$$Mg(HCO_3)_2+2OH^- \longrightarrow Mg(OH)_2\downarrow+2HCO_3^-$$

生成的$Ca(OH)_2$、$Mg(OH)_2$沉淀污染阴树脂，大大地降低阴树脂的交换容量。混床也用除盐水来稀释再生剂，这样，可以提高再生效果，缩短正洗时间，节约正洗水，提高工作交换容量和混床

出水质量。

313　如何计算酸、碱耗量和比耗？

（1）除盐水处理的酸、碱耗量计算

所谓除盐水处理的酸、碱耗量，就是离子交换剂经过再生后，每恢复 1mol 的交换能力 $M\left(\frac{1}{x}A^{x+},\ \frac{1}{x}B^{x-}\right)$，所需要消耗再生剂酸、碱的克数。可用下式表示：

$$\text{酸、碱耗量}=\frac{G}{VH}\quad \text{g/mol}$$

式中　G——离子交换剂在再生时所消耗的酸、碱量（按 100%质量分数计），g；

V　阴、阳离子交换床的周期制水量，m^3；

H——被离子交换剂所吸附的离子浓度 $c\left(\frac{1}{x}A^{x+},\ \frac{1}{x}B^{x-}\right)$，mmol/L，或 mol/m^3。对子阳床可以近似采用阳床进水的碱度加阳床出水酸度；对于阴床可以近似采用阴床的进水酸度。

（2）除盐水处理的比耗计算

所谓除盐处理的比耗就是再生剂的耗量相当于离子交换剂工作交换容量理论量的倍数；也就是再生时的酸、碱耗量与再生时理论上所需要的酸、碱量的比值。它又是再生效率的倒数。但由于离子交换反应，是按等电荷摩尔质量进行的，也就是说，每除去 1mol 的阳离子 $M\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$，在理论上只需要 1mol 的酸 $M\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$，每除去 1mol 的阴离子 $M\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$（或酸度）只需要 1mol 的碱 $M\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$。所以，酸、碱比耗可用下式表示：

$$\text{酸、碱比耗}=\frac{\text{酸耗量或者碱耗量}}{\text{酸或碱的摩尔质量 }M\left(\frac{1}{x}A^{x+},\ \frac{1}{x}B^{x-}\right)}$$

比耗的单位用倍数或是百分比来表示。其式中酸的摩尔质量

$M\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$：HCl 为 36.5，$H_2SO_4$ 为 49；碱的摩尔质量$M\left(\frac{1}{x}B^{c}\right)$：NaOH 为 40。

此外，酸、碱耗量的计算，还可以用再生水平这一概念来进行。再生水平就是再生一定体积的离子交换剂所消耗再生剂的量（以 100%的浓度计），单位为：kg/m^3 树脂，或 g/L 树脂。

酸、碱耗量、比耗和再生水平，都是反映除盐水处理水平高低的重要指标，努力降低酸、碱耗量是提高经济效益的重要途径。

314　怎样选择化学除盐系统？

化学除盐系统的选择是根据不同的原水水质和出水水质要求、技术经济比较等综合性的因素来决定的。下表列举的化学除盐系统提供选择时参考。其中阴、阳表示阴、阳离子交换器；除碳、混表示除碳器、混合床；强、弱表示强酸或弱酸树脂及强碱或弱碱树脂。

序号	适用的原水水质条件	选择的除盐系统组成	出水水质要求		除盐系统的特点
			电导率/(μS/cm)	SiO_2/(μg/L)	
1	碱度、含盐量、硅酸的含量不高	阳强-除碳-阴强	<10	<100	系统紧凑、简单
2	碱度和含盐量均低，硅酸含量高	阳强 除碳 阴强 混	<0.5	<20	系统简单、水质稳定
3	碱度和硅酸含量不高，但 $Cl^- + \frac{1}{2}SO_4^{2-}$ 超过 2mmol/L	阳弱 阴弱 除碳 阴强	<10	<100	阴弱工作交换容量大，易再生，阴弱除硅好，运行经济性好
4	含盐量及硅酸含量不高，但碱度 $c\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$ 超过 3mmol/L	阳弱-阳强-除碳 阴强	<20	<100	阳弱工作交换容量大，易再生，运行经济性好
5	硅酸含量不高，但碱度、Cl^- 及 SO_4^{2-} 含量均高	阳弱 阳强 除碳-阴弱 阴强	<5	<100	运行的经济性最好，但设备多

续表

序号	适用的原水水质条件	选择的除盐系统组成	出水水质要求		除盐系统的特点
			电导率/(μS/cm)	SiO_2/(μg/L)	
6	碱度、含盐量及硅酸均很低	混	1～5	10～100	树脂交换容量小
7	碱度和硅酸含量很低，Cl^-、SO_4^{2-}较高	阳$_{弱}$-阴$_{弱}$-除碳-混	<1.0	<50	运行经济性好
8	碱度高，含盐量及含硅量低	阳$_{弱}$-除碳-混	1～5	<100	运行经济性好
9	碱度、含盐量、硅酸均高	阳$_{弱}$-阳$_{强}$-阴$_{弱}$除碳-阴$_{强}$混	<0.5	<20	运行经济性好，水质稳定，设备多
10	碱度低、含盐量低	阳$_{强}$-阴$_{弱}$	10～30	大部未除	设备少，再生费用低，除去一部分CO_2
11		阳$_{强}$-阴$_{弱}$-除碳	10～20	大部未除	再生费用低，CO_2基本除去
12		阳$_{强}$ 阴$_{强}$	5～15	20～100	设备少，再生费用高，CO_2基本除去

315 什么是移动床除盐处理？

在除盐的过程中，定期地排出一部分已经失效的树脂和补充等量的已经再生好的树脂，被排出的失效树脂在另一专用设备中进行再生和清洗，这样方式的除盐水处理，称为移动床除盐处理。

移动床克服了固定床体积大、树脂用量多的缺点。在处理同样水量的情况下，移动床的树脂用量只是固定床的二分之一至三分之一；移动床避免了固定床在再生时间内停止制水的缺点，基本上做到了连续制水。因此，移动床可具有设备小、占地少、投资少、交换流速大（是固定床的2～3倍）等优点。但移动床由于交换流速大而使树脂磨损较大，对水量、水质变化的适应性比固定床差。

移动床采用快速逆流运行方式，水是从下而上进入交换器，水流首先接触的是树脂层的下部，先是较慢的渗透流出树脂层，而后流速加快时，整个树脂层就会被水托起，顶在交换器上部，成为压

实状态，而后由顶部出水，形成倒置床。在离子交换过程中，塔内树脂依次分为：饱和层、工作层和保护层。如图 3-3-16 所示：

移动床交换系统的形式较多，大致可分：单塔式、两塔式（交换塔和再生清洗塔）和三塔式（交换塔、再生塔和清洗塔）等三种。以使用三塔式较多。

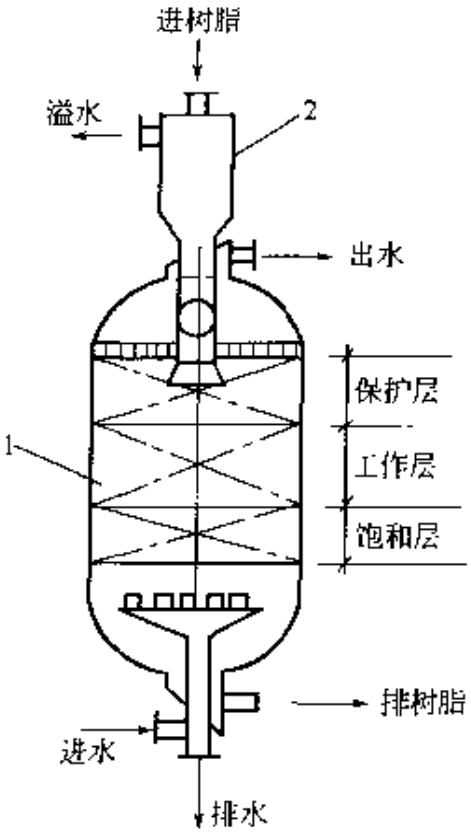


图 3-3-16　移动床交换器
1—交换塔；2—树脂贮存斗

316　如何进行移动床的操作？

以三塔式移动床为例，其流程如图 3-3-17 所示。操作步骤如下。

（1）进水托层（床）操作　进水，将进水装置上部的树脂进行托层（床），从塔顶部放空气阀排尽空气，进行离子交换，并出水。控制交换流速为 40～60m/h。与此同时，将进水装置下部的失效树脂压送至再生塔顶，送脂完毕关送脂阀。

（2）失效树脂再生　送至再生塔的失效树脂，在顶部塔斗经再生废液的预再生，然后藉重力树脂徐徐落下。与此同时，再生塔的底部进水与再生液相混合，配成 4%～8%溶液，以8～10m/h的再生流速上升，与从上部下落的树脂相遇进行再生，时间为 30～45min。

（3）再生树脂清洗　再生好的树脂送至清洗塔斗徐徐落下，塔底部进清洗水，对树脂进行清洗，待树脂落至底部时清洗已经结束，清洗好的树脂存入交换塔的塔斗。

（4）运行终点控制操作　运行时间约 1h，即为终点，关进出水阀，迅速开大排水阀，打开交换塔顶部放空气阀，空气进入塔体，树脂落床。与此同时，交换塔上塔斗内已经再生清洗好的树脂落入塔内。然后，继续进行进水托层（床）操作。

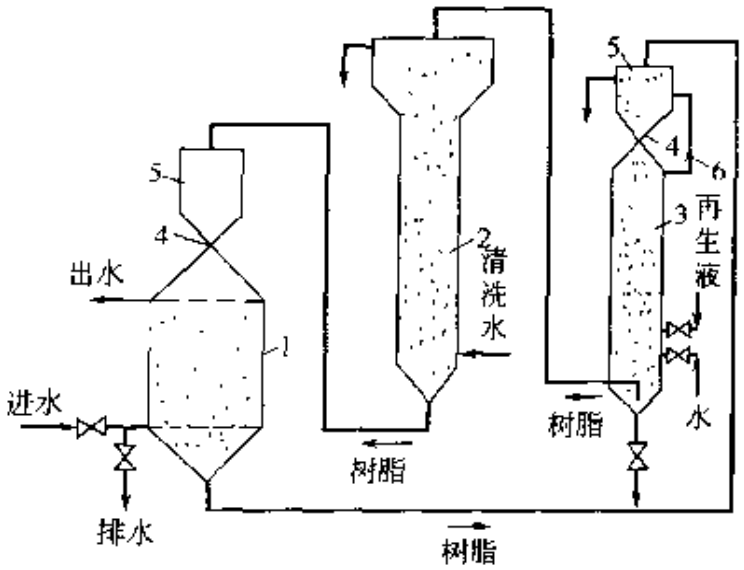


图 3-3-17　三塔式移动床流程示图

1- 交换塔；2—清洗塔；3- 再生塔；4—浮球阀；5—贮存斗（漏斗）；6—连通管

317　什么是流动床离子交换处理？

移动床离子交换处理工艺有托床、落床、送脂等周期性的动作，制水过程不完全是连续的。而流动床离子交换处理是使离子交换过程完全连续，也即做到连续性送水、制水、树脂连续性再生与送脂。它具有树脂装载量小、水质好、设备简单、操作方便等特点。流动床又分无压力式和有压力式两类，工艺原理基本相同。流动床的流程如图 3-3-18 所示。

运行的时候，原水由交换塔底部进入向上流动，通过树脂层，并使树脂悬浮，经过离子交换后的水从交换塔的上部溢流出来。因此，水流不能太快，避免带出树脂。经过离子交换失效的树脂质量增加，会自行降落到交换塔的底部，然后，被水力引射器抽送到再生塔的上部，再渐渐下落。在这过程中，树脂先是与从再生塔中下部上升的再生液相遇进行再生，然后再被向上流动的清洗水进行清洗处理，而成为新鲜的树脂落到再生塔的底部，依靠交换塔与再生塔之间水位差的推动力，树脂被送到交换塔的上部，再投入离子交换处理工作。这一周而复始的水处理过程就称为流动床的离子交换处理。

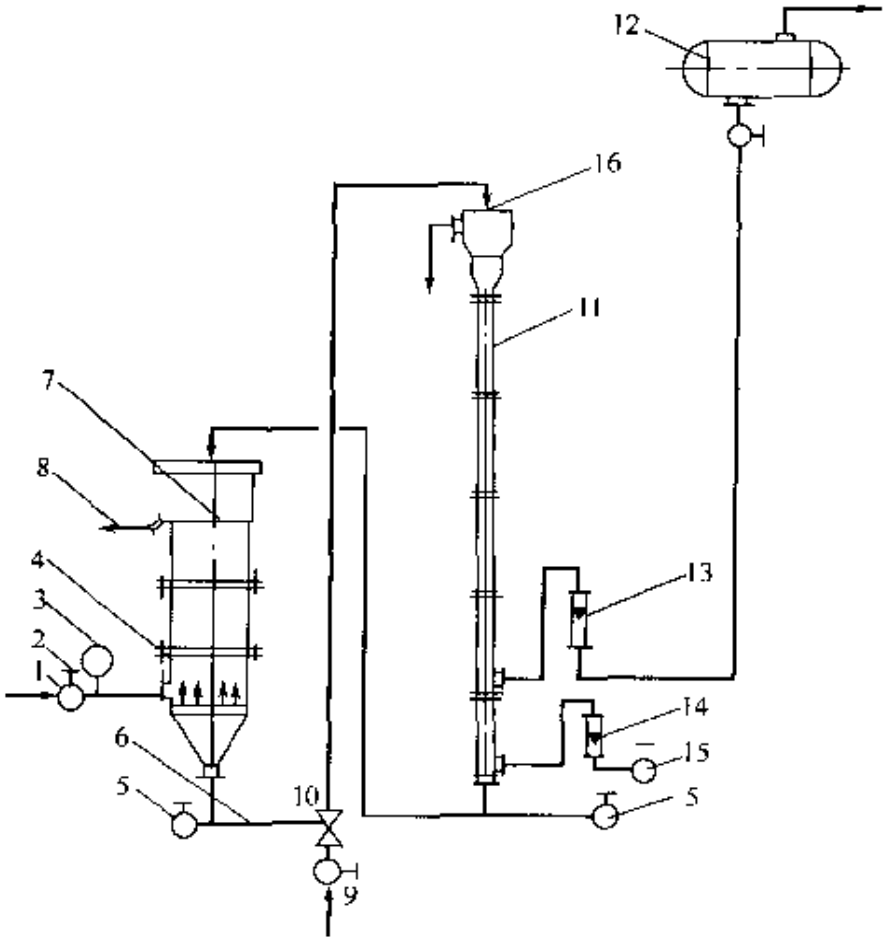


图 3-3-18　流动床流程示图

1—生水管；2—生水阀；3—压力表；4—泄水罩；5—故障排除阀；6—失效树脂输送管；7—交换塔；8—出水管；9—水力喷射器水源阀门；10—水力喷射器；11—再生塔；12—再生液贮槽；13—再生液流量计；14—清洗水流量计；15—清洗水阀门；16—废液排出口

318　什么是浮动床离子交换处理？

浮动床离子交换处理是在进行离子交换时，水从交换器底部以约 30m/h 的速度穿过进水装置，由于水流动能的作用，把惰性树脂和离子交换树脂托起，以压缩的状态向上浮动，在交换器的进水装置的上方，形成了一层浮动状态的树脂空间。

图 3-3-19 示出，在浮动状态层的区间里、树脂在水中呈现自由浮动状态，而在浮动树脂层上部是压缩的树脂层，压缩的树脂层是不会乱床的，但如果在制水过程中，水流在压缩的树脂层中产生偏流短路时，那么在这一部位的水流速就会增加，从而使一些树脂

颗粒由浮动状态层上升到压缩层中的偏流短路部位，这样，水流就会自动地均匀分布于整个截面上，避免了水中离子的泄漏，确保了出水水质。这就是浮动床自动调节功能。

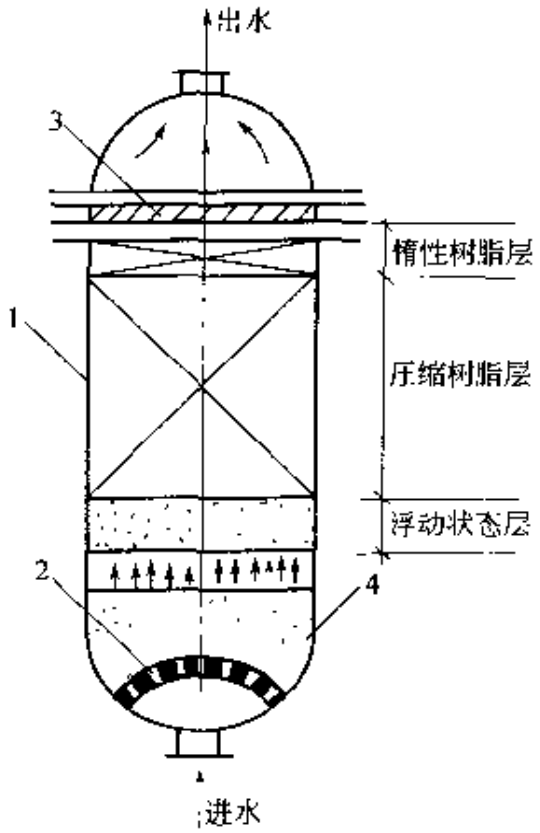


图 3-3-19　浮动床示意图

1--床体；2　进水装置；3—出水装置；4—级配石英砂垫层

浮动床大都采用逆流再生，水流从下而上，再生液流向自上而下。因此，浮动床也同样有逆流再生的优点：如出水水质比较好，阳床 Na^+ 可以小于 100μg/L，阴床出水的 SiO_2 含量可达到 20～50μg/L，酸、碱耗量也较低，交换流速高达 30～50m/h，是通常固定床交换流速的 2 倍左右，自用水小于 5%，操作也简便。但对于进水水质要求较严格，悬浮物要小于 2mg/L 以下，因为悬浮物进入交换器内会污染树脂，并难以处理。同时由于交换流速高，因此对树脂的强度要求较高。

319　如何进行浮动床的操作控制？

浮动床的操作控制步骤，如图 3-3-20 所示。其操作步骤如下。

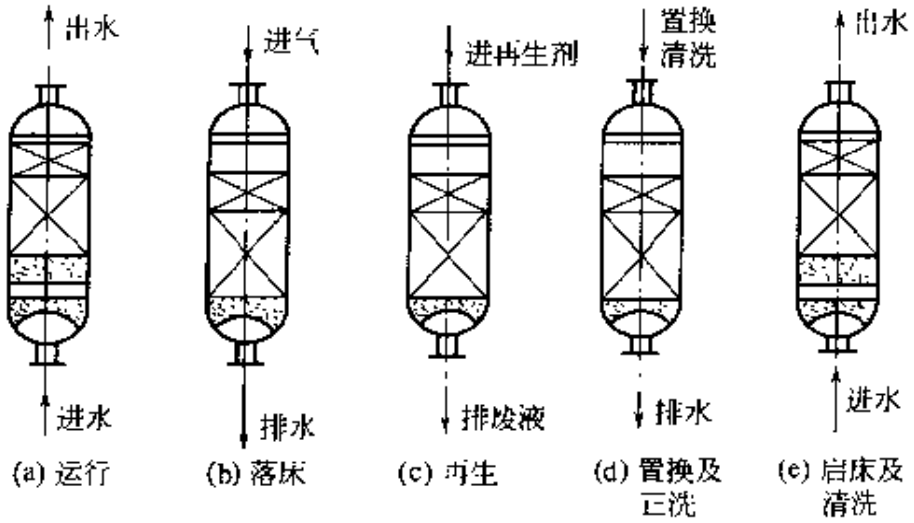


图 3-3-20　浮动床操作控制示意图

(1) 运行操作　浮动床运行时，由交换器的底部进水，顶部出水，控制交换流速 30～50m/h。

(2) 落床操作　当树脂失效时，进行落床操作。为了避免乱床，采用排水落床方式，即开启进空气阀，迅速打开排水阀。

(3) 再生操作　再生时，从交换器顶部进再生液，再生流速控制在 4～7m/h，浓度 2%～4%，时间为 45min。

(4) 置换及正洗操作　关再生液进行置换操作，控制流速 5m/h，约 25min，然后转入正洗操作，此时控制流速 15m/h 左右，正洗到阳床出水酸度和阴床出水碱度 $c\left(\frac{1}{x}\mathrm{B}^{x-}\right)$ 与进水相比都要小于 0.2mmol/L 为止。

(5) 启床及清洗操作　启床时要迅速进水，进行托床，流速 30～50m/h，在 2～3min 内就成床，此时进行清洗，出水排放，清洗 3～5min，取样分析，如果水质合格就进入水箱投入运行。

当阳床运行时间 2～3 个月，阴床运行 4～6 个月后，要进行一次彻底清洗。

320　什么叫落床？浮动床对落床有什么要求？落床有几种方法？

落床是指浮动床失效后，利用排水或停止进水的方法使床内树

脂层下落的过程。

浮动床落床要求树脂迅速下落，避免“乱层”。因为浮动床失效时，其树脂大部分为失效型，且为有序的排列，下部树脂失效严重，上部树脂特别是保护层树脂，失效较轻。

在落床时，树脂层和床内水做相对运动，树脂颗粒穿过水层逐渐下落时，由于树脂“盐型”（即吸着的离子）不同，产生的微小密度差不同，以及树脂颗粒大小的差异等，都会使树脂层在下落时有小距离的窜动现象，这种窜动，会影响树脂层的平稳下移。所以落床时间越长，树脂就越容易乱层。因此落床时必须尽快关闭出、入口阀，缩短浮动床的落床时间。

浮动床落床有三种方法：

（1）重力落床。浮动床失效后，关闭出、入口阀，树脂依靠自身重力落床。

此种方法落床后树脂层表面平整，但落床时间较长。

（2）压力落床。浮动床失效后，关入口阀，开正洗排水阀，树脂层依靠出口水压力落床。

此种落床方法时间短，树脂层密实。但落床后，常在树脂层表面中部出现凹坑，说明水流在树脂层内分配不均，有乱层情况。

（3）排水落床。浮动床失效后，关出、入口阀，开正洗排水阀，树脂层在水层的作用下落床。

此种落床方法时间短，但树脂层表面中部有凹坑，说明有乱层。而且放水时，容易出现空气进入树脂层的情况。

321　备用的浮动床投运前为什么要正洗？

再生合格的浮动床在备用期间会由于种种原因，造成浮动床投运后的一段时间内，出水质量降低。所以为了保证浮动床投运后送出合格的水质，在浮动床投运前要进行短时间的正洗。

造成备用浮动床出水质量降低的原因，通常认为有如下几个方面。

（1）浮动床备用时，床内的水是不流动的，从化学平衡的角度看，会产生如下的逆反应：

$$RH + Na^+ \rightleftharpoons RNa^+ + H^+$$

逆反应的结果，会使蓄积在床内的水质变差，在浮动床刚投运时，这部分不合格的水排出，会造成出水质量变差。

（2）杂质的污染。关于这个问题，有两种观点。一种认为是蓄积在树脂层中的废再生液和再生产物的污染。由于床内装置和水力分布等问题，加之再生流速较低，会有部分废再生产物和再生废液留在树脂层中。由于运行时的流速远远高于再生流速，所以可能会将部分废再生液和再生产物带到出水水中，造成出水水质变差。

另一种观点则认为是由于系统中的杂物，如铁等的污染。由于除盐水设备，管道，阀门等大都采用铁制成，会有部分铁化物被带到浮动床中去，从而造成出水水质的污染。所以，备用床在正式投运时，要经过短时间的正洗。

322　浮动床在运行中应注意哪些问题？

浮动床在运行中应注意如下几个问题。

（1）要防止空气进入浮动床。顺流床有约 1/3 的空间为水垫层，在进入空气后，打开空气阀，就可以用水把空气赶出来。浮动床由于装满树脂，一旦进入空气，就会直接进入树脂中，很难排净。这些空气在树脂层中蓄积，会影响再生效果和运行时的离子交换过程。

浮动床在操作中必须采取措施，严格防止空气进入浮动床中，再生系统应严密；酸、碱计量箱应高于水射器等。浮动床装倒 U 形管，以防止空气的漏入等。

（2）应防止阴浮动床中混入阳树脂。阴浮动床中混入少量的阳树脂，会使阴浮动床运行时出水 Na^- 增高，电导率增大，所以应采取措施，防止阴浮动床中混入阳树脂。除了在保管与装卸树脂应特别注意外，在阳床出口处安装树脂捕捉器也是十

分必要的。

（3）入床水浑浊度要尽量小。浮动床对入床水的浑浊度有较高的要求，一般要求浑浊度小于2mg/L；不少厂家曾因入床水浑浊度高，出水质量变坏，单耗上升的情况。所以要做好入床水的预处理工作。树脂的反洗工作也应及时、彻底。

（4）水垫层的高度要适宜。

（5）置换水质量对保护层的再生度影响很大，应尽可能降低其中的杂质离子浓度。

（6）在进行成床或落床操作时，应使整个床层像活塞那样整体向上成床或落床，防止出现偏流。

（7）为了使液流向上时不乱层，并减少阻力，不少单位采用了在树脂层的上部加一层300mm高的聚乙烯白球。这种做法应持慎重态度，因为这方法有两个问题要注意：一个是树脂导出体外反洗时，树脂与白球的分离有一定困难；另一个是在运行时，细树脂颗粒从白球缝中进入白球层中时，再生也洗不下来，给浮床的运行造成了一定的困难。

323　什么是半逆流再生？

半逆流再生是四床五塔式除盐系统，离子交换处理的工艺流程为：阳床→脱碳→阴床→阳床→阴床。阴、阳树脂均为强碱、强酸性交换树脂。第一台阳床及阴床装有较多的树脂，可基本上除去所有的离子；第二台阳床及阴床的树脂较少，起精制作用。再生时，酸、碱再生液分别先进入第二台阴、阳床，再串联至第一台的阴、阳床进行再生。各台交换器均采用顺流再生，操作较简便。此法具有分层再生的意思，由于树脂失效时，其型态排列阳床为：Ca型→Mg型→Na型→H型，当再生时按其反方向进行，即H型→Na型→Mg型→Ca型，这样的再生效率较高，因为H置换出来Na，又可以继而置换出Ca、Mg。因此，大大减轻了由H来置换的负担，取得了逆流再生相似的效益，故称为半逆流再生。此法适用于含盐量较高的除盐水处理。但设备较多，投资较大。

324 什么是双层床离子交换处理？

双层床离子交换处理是将两种具有不同的相对密度、不同的颗粒度和交换特性的树脂（如强酸性和弱酸性阳离子交换树脂；强碱性和弱碱性阴离子交换树脂），放在同一个固定床离子交换器中，进行的离子交换处理称为双层床离子交换处理。由于所放的树脂不同，故又可分为阳双层床和阴双层床之分。双层床在运行的时候进水是从上而下的；再生时，再生液是由下而上进行的。双层床的运行、再生状态如图 3-3-21 所示。

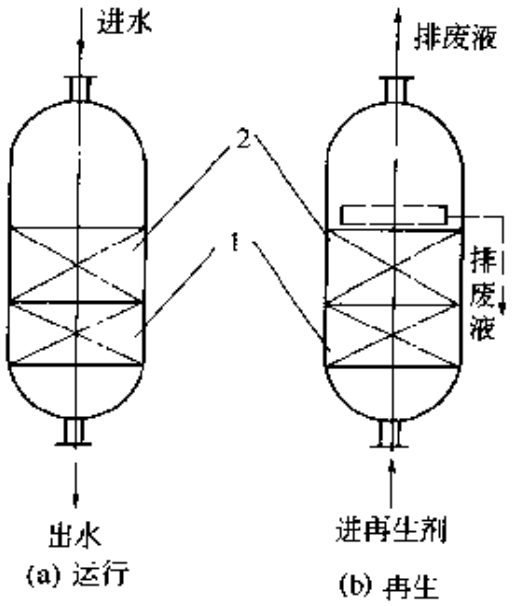


图 3-3-21 双层床运行再生示意图
1—强性树脂；2—弱性树脂

双层床有如下特点：

(1) 有两种树脂同存于一个交换器中，可以充分利用各种树脂的性能。但在树脂的选择上要考虑利于分层和两种树脂的配比关系，一般地弱酸（碱）树脂层高要占两层树脂总高的 30%以上，如两层树脂总高为 1.6～1.7m，则弱酸（碱）树脂高度要在 500mm 以上。如果树脂的分层困难，可在两层树脂中间用隔板分开而成为两个室，故又称双室双层床。

(2) 提高了树脂的利用率、工作交换容量和出水水质，并且节约了酸、碱耗量。再生时，新鲜的再生液先经过难以再生的强酸（碱）树脂，然后再以废液来再生上层的弱酸（碱）树脂，再生液能充分利用，排出废液的浓度低，易于中和处理。

(3) 节省离子交换设备。减少设备的占地面积和投资。

(4) 防止树脂遭受有机污染。但要注意再生时避免 $CaSO_4$ 沉淀（当在阳双层床用 H_2SO_4 再生时）及胶体硅的污染。

325 如何进行双层床的再生操作?

双层床的再生操作有气压法、水压法及低流速法三种，与固定床逆流再生法相似，但操作控制终点有所不同。下面为气压法操作步骤。

(1) 小反洗操作 当运行至树脂失效之后，先从中排管道进水进行小反洗以松动树脂层，清除上层树脂污物及中排管的涤纶网（或塑料网）上的悬浮物和碎树脂，清洗至出水清净为止。

(2) 放水操作 停止小反洗后，开中排管阀，放水至中排管不出水为止。

(3) 顶压操作 进气，维持压力稳定在 39.2～49.0kPa (0.4～0.5kgf/cm^2)。

(4) 再生操作 再生剂用 HCl 时，含量 2.5%、流速控制在 5m/h；如用 H_2SO_4 时，先用含量 0.8%、后用 2%，流速控制在 5m/h；如用 NaOH 时，先是含量 1.0%～1.5%、流速控制 6m/h；后用含量 2%～3%，流速控制 3m/h，时间要 1h。

(5) 置换操作 置换流速与再生时相同，对于阳双层床：置换到酸度小于 10mmol/L，硬度小于 5mmol/L；对于阴双层床：控制流速 3～5m/h，直至电导率小于 100μS/cm，碱度 $c\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$小于 50μmol/L。

(6) 正洗操作 终点控制：对于阳双层床 Na^+ <100μg/L，硬度为 0，酸度<0.2mmol/L；对阴双层床：SiO_2 <100μg/L，电导率<10μS/cm。

(7) 运行操作 阳双层床出水的 Na^+ <500μg/L，或阴双层床出水电导率≤10μS/cm、SiO_2 ≤100μg/L。

(8) 双层床的反洗分层操作 阳双层床运行 10 周期左右，阴双层床运行 20 周期左右，要进行大反洗一次。大反洗初期，强、弱两种树脂发生混合，经过 30min 左右反洗之后，可以见到良好

的分层，然后，停止大反洗操作，让树脂沉降下来，分层就更加明显了。

326 什么是双室双层床离子交换处理？

在进行离子交换时，吸附水中的不同离子与各种树脂的性能有很大的关系。为了提高离子交换效率，有时需要两种树脂相匹配来进行离子交换。但在两种树脂混在一起时，往往分层再生比较困难，当树脂破碎时，就更加不容易了；同时各种树脂都有着不同的特点，其再生或交换条件也各不相同。为了避免这类缺点，可在一个交换器内，把两种树脂相互隔开成为两个室，各室装一种树脂，因此，称为双室床。为了避免各室的碎树脂堵塞布水装置，并使再生剂分布均匀，因此，往往在一个室内，在树脂上层加了一层颗粒度为 1～2mm，密度为 0.12～0.15g/cm^3 的惰性树脂层或聚氯乙烯塑料白球。因而，每个室就由一层是离子交换树脂，另一层为惰性树脂（或聚氯乙烯白球）所组成，故又称为双室双层床。如图 3-3-22所示。

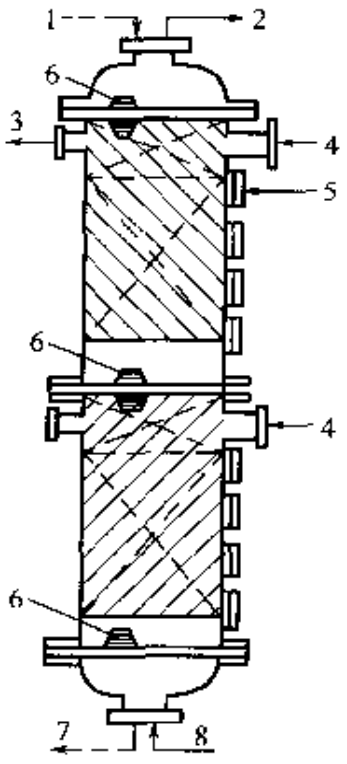


图 3-3-22 双室双层床示图

1—进再生碱液；2 运行出水；3 取样；4—装树脂；5—监视孔；6—水帽；7—再生废液排出；8 运行进水

327 什么是双室双层浮动床？

双室双层浮动床交换器由上、中、下三块多孔板将交换器分为上、下两个室。上下多孔板装有单叠片式水帽，中部多孔板装有双头叠片式水帽。下部装弱性树脂，上部装强性树脂，而各室的树脂上部，装有一层惰性树脂，工作时具有浮动床状态，采用逆流再生。故称为双室双层浮动床。

双室双层浮动床制水工作原理见图 3-3-23。

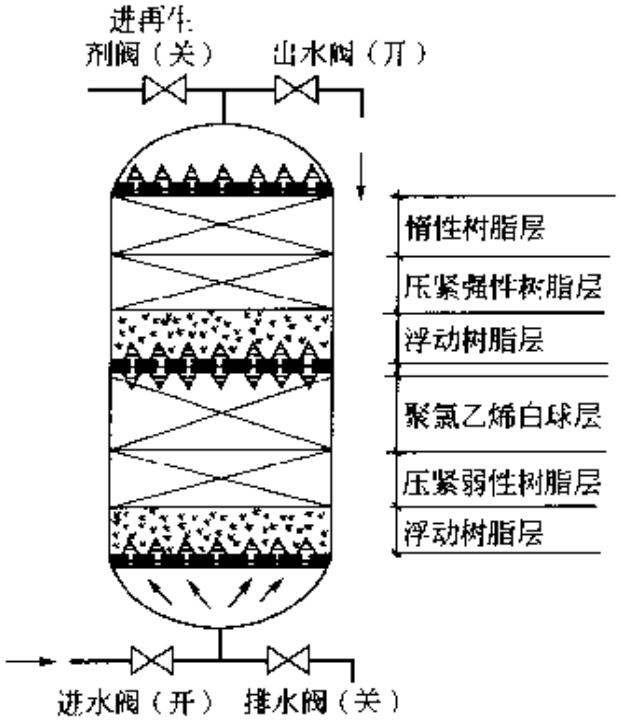


图 3-3-23　双室双层浮动床工作原理示图

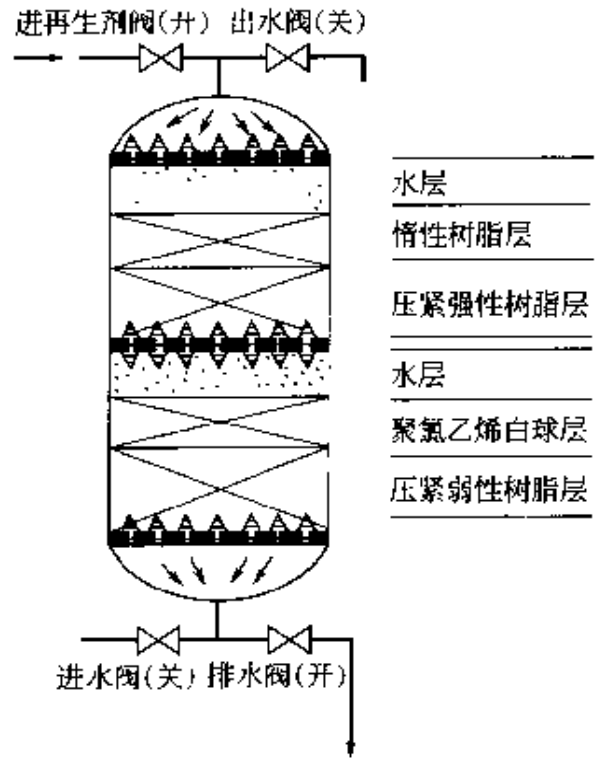


图 3-3-24　双室双层浮动床再生原理示图

运行时，水是从交换器底部进入，经过多孔板及水帽，在水流作用下，先是下室的弱性树脂及惰性树脂被托起，并在布水装置的上部形成一层 100mm 左右厚的浮动状态层，在浮动层的上部是压紧树脂层，在此，水与弱性树脂进行离子交换后，穿过中间多孔板的双叠片式水帽，在上室形成一定的流速，也同样形成浮动的树脂层，并在其上形成压紧的强性树脂层，水在此再次进行离子交换。经过处理的水从交换器顶部流出。

双室双层浮动床的再生，其再生剂是从交换器的顶部进入，以一定的再生流速及浓度通过布水帽，再经过惰性树脂层而使再生液均匀分布，对压缩层强性树脂进行再生。然后通过中间多孔板布水帽，同样地对下室的弱性树脂进行再生，使其恢复交换能力．如图 3-3-24 所示。

双室双层浮动床的工作与交换时的流向相反，故亦称为逆流再生，但其流向又与固定床逆流再生工艺相反。

328 如何进行双室双层浮动床的操作控制？

双室双层浮动床的操作控制如图 3-3-25 所示。其操作控制步骤简述如下。

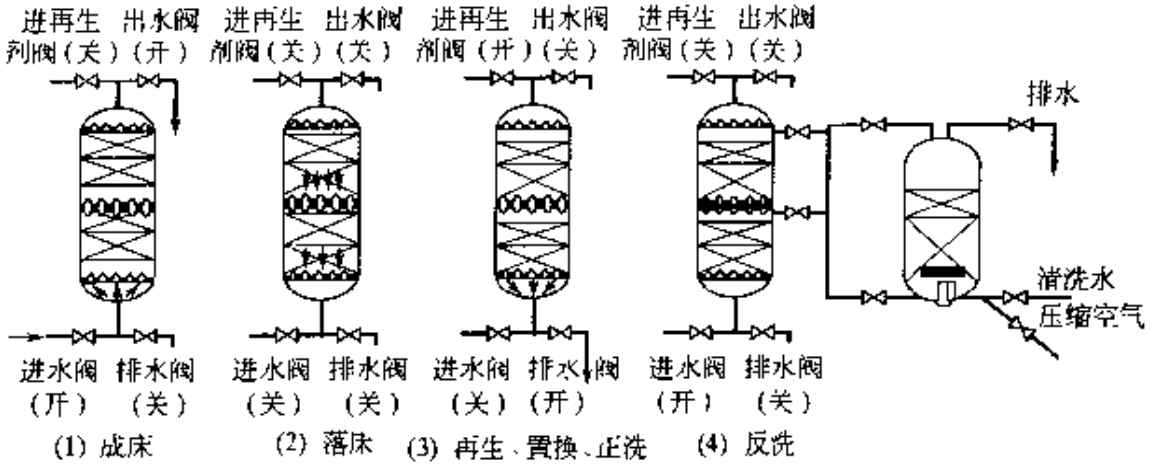


图 3-3-25 双室双层浮动床操作控制示图

(1) 成床 开出水阀，再开进水阀，控制流速 30～50m/h，约 2min 左右即可成床，此时因水质不稳定要先行排放，经 3～5min 后，取样分析，当阳床出水硬度等于零、钠度小于 200μg/L、

酸度小于 10mmol/L；阴床出水电导率小于 10μS/cm、硅根小于 100μg/L，即为合格水进入水箱，直至失效。

（2）落床　树脂经过离子交换失效之后，进行再生前的落床操作。落床有压力落床、放压落床及重力落床等方法。为使树脂不乱层和树脂表面分布均匀，以采用重力落床为好。重力落床只需要关闭出水阀和进水阀。树脂藉其重力自动落床，时间约 3～4min。

（3）再生、置换、正洗　先配好 2%左右浓度的再生液，打开排水阀和进再生剂阀。控制流速 3～6m/h，时间约 30～40min。然后关再生剂阀，维持原来流速置换至再生液完全排出，约 15～30min 再转入正洗：将流速提高至 10～20m/h，正洗终点控制至出水达到合格水为止。

（4）反洗　阳床经过 20 周期左右，阴床经过 60 周期左右的运行后，为了清洗树脂中的悬浮物或微生物以及漂洗细碎树脂，可分别将树脂压入清洗塔进行反洗，流速约 10m/h。为了提高清洗效果，可以通以 294kPa 压缩空气（要除油）进行擦洗，直至排出水从锈黄色变为清澈为止。然后再压入交换器中进行再生操作。

329　什么是三室床？

在一个交换器内，除了进、出水布水装置之外，用两块多孔板把交换器分成三部分空间，也称三个室，在上下两个室内装阳离子交换树脂，中间一室装阴离子交换树脂，这样的装置称三室床离子交换处理。三室床的简单示图如图 3-3-26。

由于普通混合床的阴阳树脂分层困难，再生剂易使树脂受到污染，有时放钠，有时漏酸，影响水质。因此，用三室床新工艺来代替普通混合床，可以免除树脂分层之难，又可以提高出水水质。

三室床有如下特点：①渗透冲击压力小。因为渗透冲击压力是树脂磨损的主要因素，而混合床在两个树脂分界面附近都受到酸、碱液的渗透压力，但三室床可以避免。②阴树脂受高价离子的污染

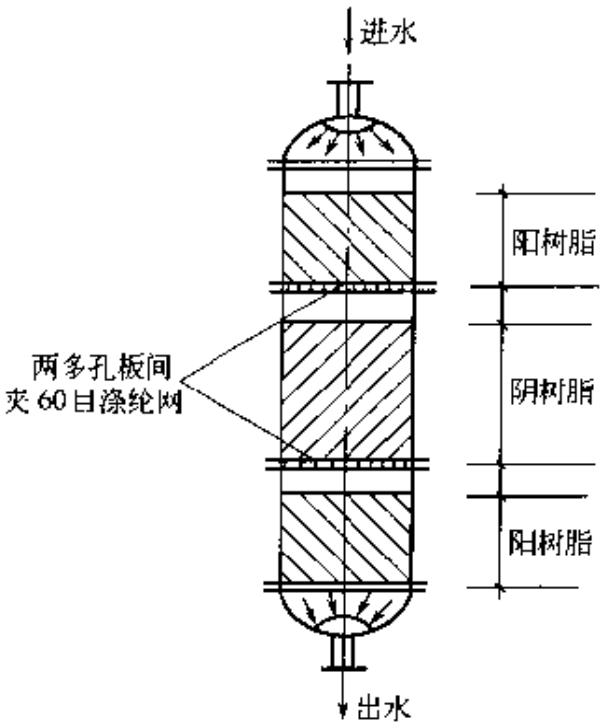


图 3-3-26　三室床示意图

可能性小。因为污染物在上部阳床部分已经被除去，即使是阳床有漏钠，还可以通过底部阳床再除去。③三室床运行中树脂的应力小。因为三室床中树脂分成三层，每层有一块支承隔板，承托树脂的受力，这样，底部树脂可以不承受其他树脂的荷重，因此运行流速可高达 300m/h。

330　什么是三层混合床?

我们知道：普通混合床是阴、阳树脂相混，设有中间排管，再生时，碱液从上而下从中间排管排出，酸从下而上也从中间排管排出。由于阴、阳树脂的分层不清，而中间排管本身也要占一定的容积，因此，再生时碱液会接触到阳树脂，酸液会接触到阴树脂，形成部分阳树脂变成钠型树脂，部分阴树脂变成氯型，而严重影响出水水质。为了避免混合床的上述缺点，在强酸性、强碱性的阳、阴树脂的中间，加一层惰性树脂。这层惰性树脂的相对密度是在阴、阳树脂之间，这样，在反洗分层转入再生时，就可将树脂从上而下分为三层：阴树脂　惰性树脂　阳树脂，这就称为三层混床，如图 3 3-27 所示。

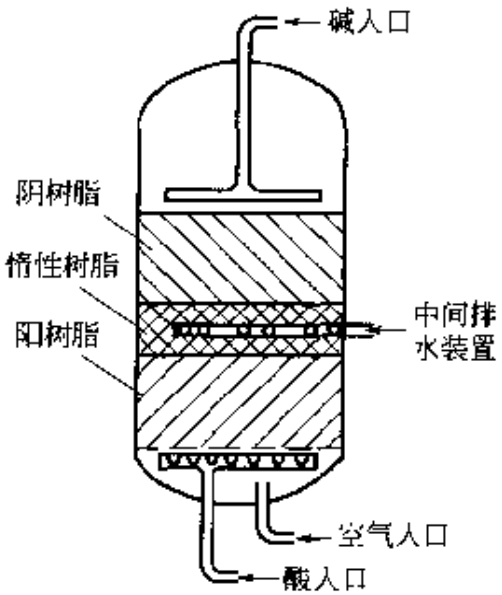


图 3-3-27　三层混合床示意图

其中，惰性树脂是一种偏丙烯酸盐及二乙烯苯的聚合物，呈圆球形，密度为 704～736g/L、颗粒大小 25～40 目、有效直径 0.45mm，均匀系数为 1.9。

331　离子交换塔内加入惰性树脂有什么作用？

离子交换塔内加入一层惰性树脂或是聚氯乙烯白球，可因各种离子交换塔的不同要求而有所不同，其作用有两个方面：

（1）浮动床内装入的聚氯乙烯白球层，再生时，再生剂可沿塔体断面均匀分布，与离子交换树脂接触好，提高再生效果。浮动床运行时，床体被托起，这层聚氯乙烯白球为避免布水帽（或滤帽）的缝隙被碎树脂阻塞，具有拦截细碎树脂的作用。白球在浮动床又具有调节树脂填充率的作用，因为填充率太小，不易成床；填充率过大，对树脂转型膨胀也不利，这时白球起到少量调节作用。

（2）混合床加入一层惰性树脂是为了避免阴、阳树脂交叉污染，即在混床再生时，阳或阴树脂分别受到 NaOH 或 H_2SO_4(HCl)的污染。因为在装置树脂时，很难精确计算树脂的转型膨胀率，阳树脂不可能刚巧在中排管道的中心线处，同样阴树脂也如此，无法恰到好处。因此，加入的惰性树脂在阳、阴树脂之间，将阴、阳树脂隔开，这样对反洗分层和阳、阴树脂的再生十分有利。否则，树脂受交叉污染，正洗和运行时，会缓慢放出 Na^+、Cl^-（或 SO_4^{2-}），使混床出水电导率居高不下，影响水质。

332　什么叫氢离子精处理？

复床出水的电导率一般小于 10～15μS/cm，而杂质钠离子

Na^-，会引起复床出水电导率高。为了进一步提高水质，故在复床之后，设置一个氢型阳离子交换器，以便彻底除去复床出水中的Na^+，其反应如下：

$$RH^+ + Na^+ \longrightarrow RNa^- + H^-$$

这个氢型阳离子交换器即称为氢离子精处理。它的特点是：①出水的电导率可以接近于纯水电导率的理论值（0.04μS/cm，18℃）；②可以代替混合床，省去混合床树脂分层的复杂操作步骤；③工艺简单，投资少，占地面积小；④出水电导率一直非常稳定。但当阴床泄漏SiO_2时，氢离子精处理装置的出水电导率会急剧上升，因此，可以用它来预测阴床SiO_2的泄漏，作为硅根表的代用品。目前工业上用硅根表相当昂贵，维修及保养困难，且不能很快得到分析结果，而氢离子精处理出水电导率却反馈十分迅速，检测很方便。

333　什么是除碳器？

除碳器又称二氧化碳脱气塔。由于原水中含有大量的碳酸氢盐碱度，经过H型交换器处理之后，树脂上所带的H^+被置换到水中而成为碳酸，当水的pH值小于4.3时，水中碳酸几乎完全以二氧化碳的形式存在，如下式的变化：

$$H^+ + HCO_3^- \longrightarrow H_2CO_3 \longrightarrow CO_2 + H_2O$$

当H^+增加，即pH越低时，上述反应就向右进行。此时，用一个装置水从上喷淋而下，空气从下鼓风而上，经过塔中的瓷环填料，使空气流与水滴充分接触，由于空气中的二氧化碳量很小，分压很低，只占大气压力的0.03%，根据亨利定律，经过H型交换器处理的水，由于二氧化碳分压高，逸入分压低的空气流中而被带走，从而除去了水中的二氧化碳，也即除去了水中大量的阴离子HCO_3^-。这种装置称为除碳器。如图3-3-28所示。

由于除碳器的作用，可大大地减轻阴床的负担，从而提高了阴床的周期制水量，减少了再生剂的消耗。

经除碳器后，水中的二氧化碳含量小于5mg/L，每处理$1m^3$水需15～$40m^3$空气，淋水密度为$60m^3/(m^2 \cdot h)$。一般情况下，

水的碱度大于 40mg/L 时，都需设置除碳器，并大都设在阳床后面，阴床前面。

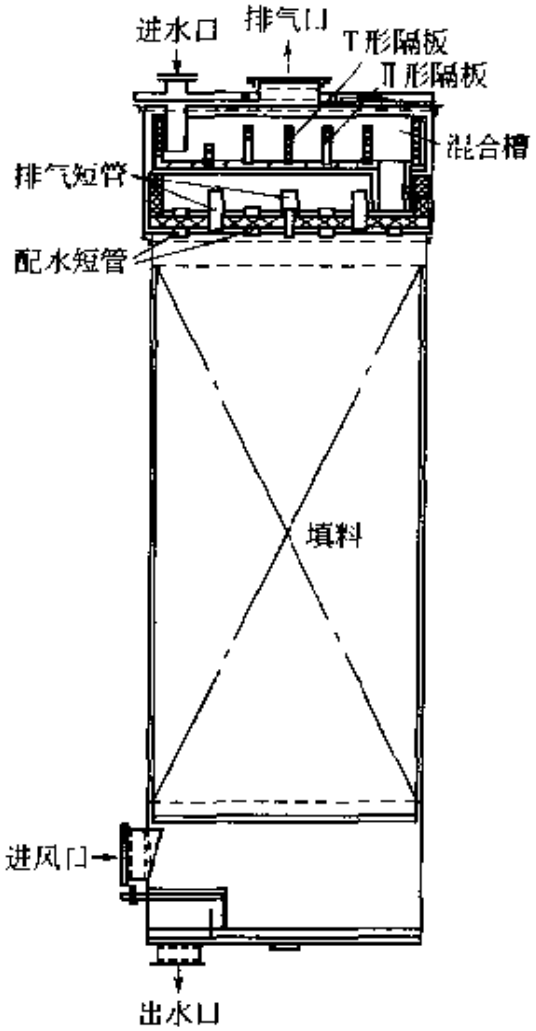


图 3-3-28　除碳器示意图

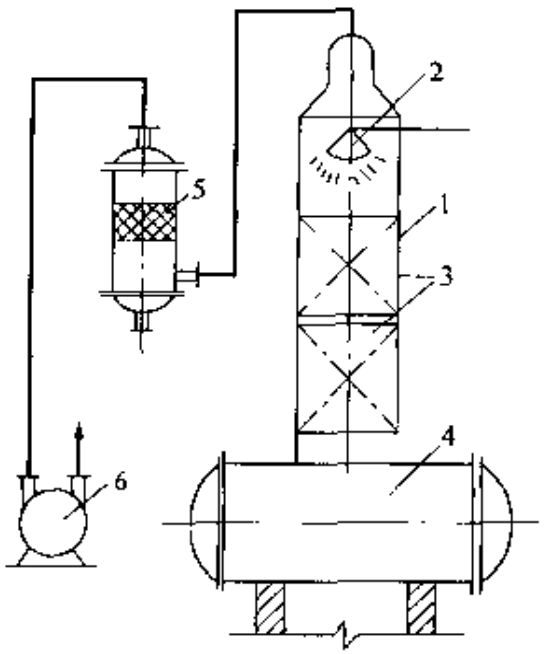


图 3-3-29　真空除碳器示意图

1—除气塔体；2—喷淋装置；3—填料层；4—水箱；5—干燥器；6—真空泵

除碳器的形式，除上述鼓风除碳器之外，还有真空除碳器，如图 3-3-29 所示。

被处理的水从除气塔 1 的顶部，经喷淋装置 2 喷洒而下，而于填料层 3 中成膜状，在除气塔顶设有抽真空装置，可以是真空泵，或是 2～3 级蒸汽引射器，使塔体内成为真空状态，真空度可达到 99.3～100.0kPa。水中的二氧化碳及氧气等逸出并被抽走，二氧化碳可除去 96%以上，溶解氧可小于 300μg/L，并可防止强碱Ⅱ型阴离子交换树脂的氧化，以延长使用寿命。

但要注意真空除碳系统必须十分严密而不漏气，否则，不仅真空度达不到要求，而且，已处理好的水会再溶入二氧化碳和氧气。

334　影响除碳效果的因素有哪些？

影响除碳效果的因素如下。

（1）负荷。由于进入除碳器水中的 CO_2 量很高。若除碳器的进水负荷过大，则可能恶化除碳效果。

因此除碳器的进水应连续、均匀且维持额定负荷运行。

（2）风水比。所谓风水比是指在除碳时每处理 $1m^3$ 除碳水所需要空气的立方米数。

理论上，除去 CO_2 其风水比应维持在 $15\sim40m^3$ 空气/m^3 水。风水比低于上述数值时，也会使除碳效果受到影响。

（3）风压。选择鼓风机时，应考虑塔内填料层的阻力以及其他阻力的总和。风压过低会使 CO_2 不能顺利地从风筒处排走，则已脱出的 CO_2 还会重新溶解在水中，使水中 CO_2 含量增高。

（4）填料。填料主要影响水的分散度，分散度大，有利于除碳。

填料不同，其比表面积不同，对水的分散度影响也不同，因而其除碳效果也不同。

（5）水温。提高水温会加快 CO_2 从水中的除脱速度，有利于除碳；同时由于大部分的除碳器都是置于户外，适当提高水温对冬季运行也有利。

除碳水温度受阴离子交换树脂热稳定性的影响，所以水温不超过 40℃为适宜。

（6）除碳器的鼓风机的进风质量要好，要新鲜空气不含灰尘。否则污染气体的杂质（如 CO_2、NH_3 等），会随之溶入水中，影响除碳效果和阴塔进水的水质。所以，鼓风机入口最好要有过滤装置。

335　除碳器在运行中易出现哪些异常现象？应如何处理？

除碳器在运行中出现的异常现象及处理方法见下表。

序号	异常现象	原　　因	处 理 方 法
1	出水 CO_2 含量偏高	(1) 进水量偏大，除碳器过负荷运行	(1) 调整进水负荷至额定值
		(2) 进水水温偏低	(2) 适当提高进水温度
		(3) 配水装置故障，配水不均	(3) 检修故障的配水装置
		(4) 除碳风机出力不足	(4) 提高风机出力
		(5) 填料局部破碎，除碳风走近路	(5) 重新筛选填料
		(6) 填料高度不够	(6) 补充填料至适宜高度
2	除碳器顶部排风量小	(1) 除碳风机风压低	(1) 提高除碳风压
		(2) 除碳风机进风口堵塞	(2) 清除进风口的堵塞物
		(3) 填料破碎，阻力大	(3) 重新筛选填料
		(4) 除碳器内壁防腐涂料大片脱落	(4) 检查除碳器内防腐涂层情况，及时清除脱落物
3	除碳风机运行中振动	(1) 风机出入口机壳螺钉松动	(1) 紧固机壳上松动的螺钉
		(2) 风机基础不牢固	(2) 检查风机基础情况，对症处理
		(3) 机壳腐蚀严重，变形变薄	(3) 检修或更换腐蚀机壳
		(4) 叶轮组装时不正	(4) 重新组装叶轮并找正之
4	风机皮带跳动	两皮带轮距离较近或皮带过长	重新调整皮带轮距离或改换较短的皮带

336　多面空心球填料有什么优点？

近年来开发的多面空心球是塑料制品除碳器填料，具有比表面积大，易于堆放，不易破碎等优点。

以下为多面空心球的一些参考数据：

比表面积，236m^3/m^3 多面球；

空隙率 0.91%；

堆密度 91kg/m^3；

个数 11500 个/m^3；

挂水试验：球重 70.3g，挂水后 90g；

挂水率 28%。

拉希瓷环填料（ϕ25×25×2.5mm）和多面空心球填料在除碳

器中的除碳效果对比试验见下表所示。

拉希环			多面空心球		
负荷/(t/h)	出水 CO_2/(mg/L)	风水比/(m^3/m^3)	负荷/(t/h)	出水 CO_2/(mg/L)	风水比/(m^3/m^3)
100	3.3	101	100	<2.2	147.2
150	4.4	73.6	150	2.2	98.1
200	8.8	55.2	200	3.3	73.6
250	24	44.16	250	4.8	58.83
300	55	36.8	300	5.0	49.06

注：试验条件：入口水碱度 140～150mg/L，水温 15℃，填料均为 2m 高。

从表中可以看出：

（1）采用拉希环作填料的除碳器，当流量低于 150t/h，风水比高于 50m^3/m^3 水时，其出水 CO_2 可维持低于 5mg/L；当流量超过 200t/h 时，除碳效果即迅速恶化。

（2）当采用多面空心球作填料的除碳器，当流量达 300t/h，风水比为 49.06m^3/m^3 水时，仍能维持正常运行，出水中 CO_2 为 5mg/L，达到了预期值。

（3）在风水比相近的情况下（对拉希环填料为 250t/h，对空心球填料为 300t/h），空心球的除碳效果是拉希环的 4 倍，证明空心球填料由于比表面积大，在相同的风水比的情况下，有着更好的除碳效果和布水性能。

337　对离子交换器排水装置垫层的石英砂应有什么要求？

用石英砂做垫层，要求 SiO_2 含量在 99%以上，并要求尽力选用圆形，避免使用片状。在使用前要用 15%～20%质量分数的盐酸处理 24h 以上，以溶解部分可溶性杂质。此外，还要求严格按级配进行铺装，见下表。

石英砂粒径/mm	厚度(Ⅰ型)/mm	厚度(Ⅱ型)/mm
(顶层)1～2	150	200
2～4	100	100
4～8	100	150
8～16	150	200
(底层)16～32	200	250
合　计	700	900

注：交换器直径较大时选Ⅱ型。

338 如何防止盐酸贮槽上发生酸雾?

用盐酸作为阳离子交换剂的再生剂时，常见盐酸的贮槽上飘浮着酸雾，不仅严重腐蚀设备，而且造成大气污染。防止酸雾发生通常有两种方法：

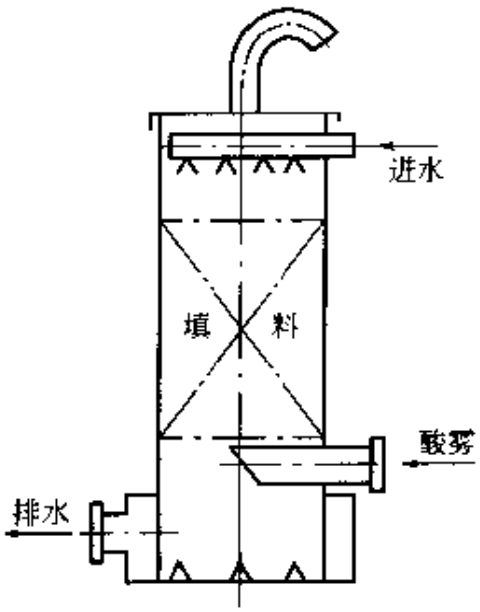


图 3-3-30 酸雾吸收器结构示图

(1) 设置酸雾吸收器 其结构如图 3-3-30 所示。

从盐酸贮槽引出的酸雾管道进入酸雾吸收器，并被从顶部喷淋而下的水所吸收。吸收器内装有填料，以增加吸收效果。

(2) 石蜡油液封 石蜡油(或称白油)的化学性质稳定，一般不与酸、碱起化学反应，在常温下不易氧化，对水的亲和力较小。因此，在盐酸的贮槽中，加入 10～12cm 厚的白油层覆盖在盐酸的表面，能够阻止酸雾的发生。选用的石蜡油为 18 号白油，闪点不低于 200℃，凝固点不高于 −15℃，相对密度 d_4^{20} 0.86 左右，分子直径约 10～7Å (1～0.7nm)。在使用的过程中，即使不慎而漏入树脂层，也没有影响。石蜡油液封使用十分方便，效果显著。

339 什么是超声波树脂清洗器?

超声波树脂清洗器是采用超声波的方法使树脂得到净化的装置，如图 3-3-31 所示。

这种净化装置可以清除树脂颗粒表面的污染物。清洗时，被污染的树脂从顶部进入，经过中间的超声波场之后，由底部排出；冲洗水由底部进入，上部流出，从树脂分离出的污染物及树脂的碎屑随冲洗水从顶部溢出。应控制好树脂的进入和排出速度，要避免树脂的流失。

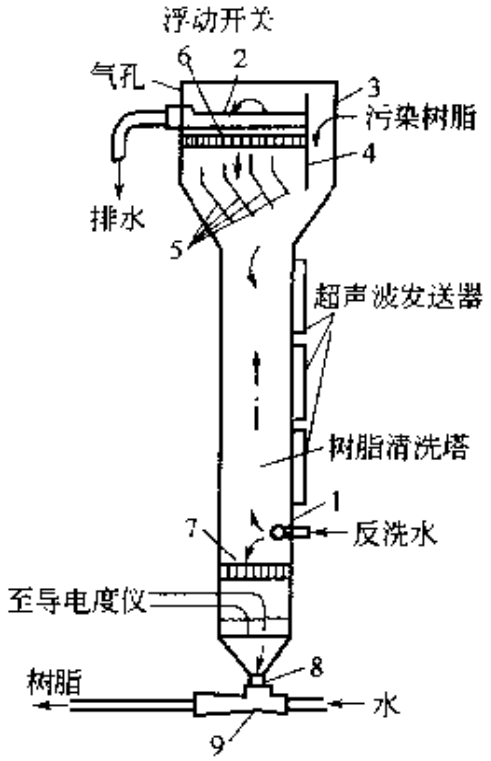


图 3-3-31　超声波树脂清洗装置

1　反洗水；2—排除污物罩帽；
3—污树脂进入；4　转向装置；
5　导向板；6、7—流通隔板；
8—出口漏斗；9　抽出器

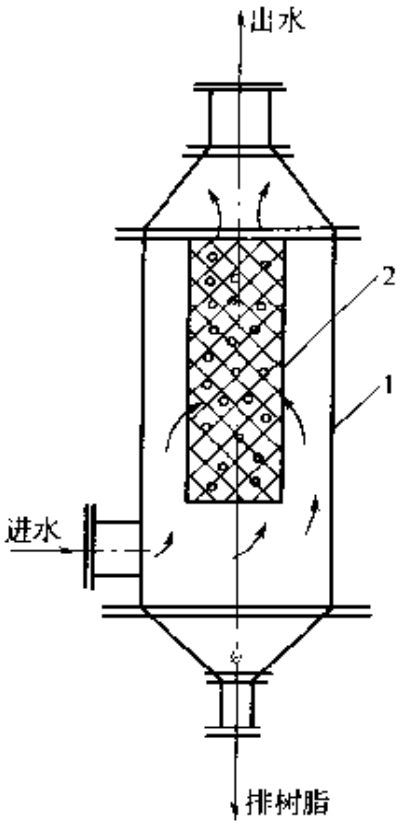


图 3-3-32　树脂捕捉器示意图

1　壳体；2—外包 50 目塑料网套出水管

340　什么是树脂捕捉（集）器？

为了防止交换器在运行过程中因排水装置的损坏，而引起树脂流失，为此在交换器的出水管上，安装一个流失树脂的收集装置，叫做树脂捕捉（集）器。其结构如图 3-3-32 所示。

应定期检查捕集器是否存有树脂，如发现有，应分析原因，并检修交换器的排水装置。

341　如何去除胶体硅？

除盐水中的胶体硅一旦进入锅炉，在高温高压的作用下，会转化为活性硅，在锅炉和蒸汽系统形成硅垢。因此，胶体硅的去除十分重要。经测定，澄清池除胶体硅的效率可达 50%～80%，过滤除硅能力达 10%～20%，而复床和混床除硅都不到 5%。因此，除硅应当以澄清池为主。

由于胶体硅的颗粒十分微小，粒径约 $10^{-3}\sim10^{-5}$mm；表面常有负电的胶粒存在，其自然沉降速度十分缓慢，每秒钟只有 10Å (1nm)，因而靠自然沉降除胶体硅是不可能的。因此，必须根据胶体物质的特性，在水中加入一种带正电胶体的高价离子，或利用增大水溶液中盐类浓度等方法，使其发生电中和，降低胶体硅的吸附层和水溶液间的电位差。为达到此目的，一般是在水的澄清处理中，加入一定量的带正电荷的混凝剂胶体如 $Al(OH)_3$、$Fe(OH)_3$ 或加入镁剂如 MgO，与胶体硅异电相吸，聚凝成大颗粒，藉其重量由沉淀而除去。据试验，除硅处理的混凝剂投加量为 40～60mg/L；对于 MgO 加量，其估算方法是每去除 1 份 SiO_3^{2-} 约加 15 份 MgO 量。

342　测定水中硅酸时为什么要严格控制酸度？

以比色法测定水中的溶解硅时，是在 0.10～0.25mmol/L 的低酸度下进行的。溶解硅与钼酸铵 $(NH_4)_2MoO_4$ 产生硅钼酸络合物而生成钼黄，在酸度大于 0.6mmol/L 时，不能形成钼黄，并在一定的酸度下，被还原成钼蓝，用钼蓝的蓝色程度通过比色来测定水中溶解硅的含量，其反应如下：

$$H_4SiO_4+3Mo_4O_{13}^{2-}-6H^+\longrightarrow H_4[Si(Mo_3O_{10})_4]+3H_2O$$

当在测定炉水的溶解硅时，因常有一定量的磷酸根 PO_4^{3-} 与钼酸铵生成磷钼酸黄色复盐，干扰了分析的结果，但磷钼酸复盐在酸度大于 1.2～1.5mmol/L 时就分解了，因此，测定水中溶解硅时要严格控制酸度。所以，在测定时，先将酸度控制在 0.10～0.25mmol/L，此时，形成稳定的黄色的硅钼和磷钼酸复盐，然后再加入硫酸，将酸度控制在 2.2～3.0mmol/L，即 pH 在 1.5～3.0 左右，以破坏其中的磷钼酸复盐，并在此条件下，将黄色硅钼酸复盐还原成蓝色。实践证明 pH＝1.5～3.0 时，硅酸的测定最好。

水中胶体硅的测定，目前的方法是用氢氟酸 HF 在 100℃下加热，使形成可溶性 H_2SiF_6，然后根据上述要求控制在一定的酸度下，再按溶硅的方法进行测定，但要注意隐蔽过剩的氟离子。当测定水中微量硅的操作时，应注意：分析器皿要先用盐酸洗净，然后

用含硅量小于 3μg/L 的无硅水充分洗净，用滤纸拭干，避免污染。器皿的材质可用塑料或有机玻璃；试剂应保持新鲜，尤其是还原剂保藏时间最多不能超过两周。

343　无钠水、无硅水是怎样制备的？

在测定阳床出水的钠度、复床和混合床出水的硅根时，需要使用无钠水和无硅水。无钠水、无硅水的制备工艺流程如图 3-3-33 所示。

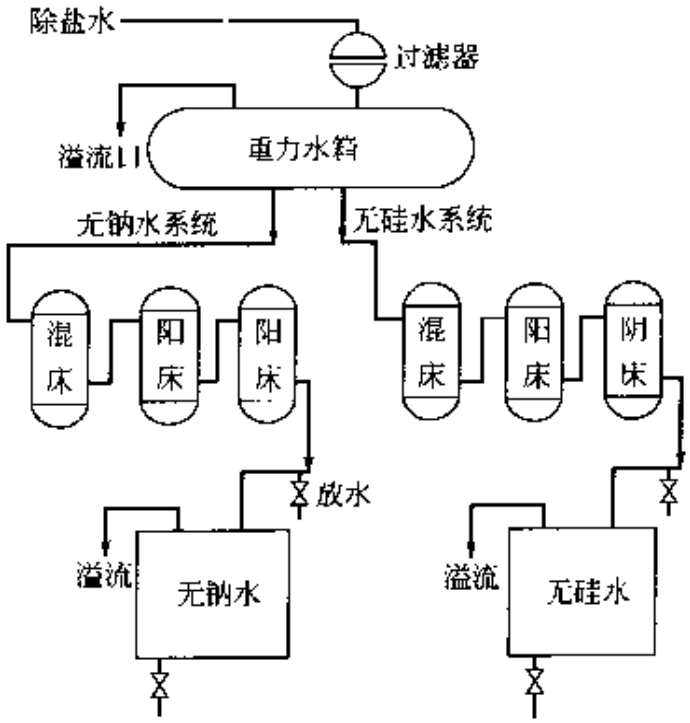


图 3-3-33　无硅水、无钠水的制备工艺流程示图

由图 3-3-33 可知，除盐水先通过过滤器，以便除去铁等杂质，流入重力水箱。重力水箱是起缓冲作用，并保持一定的水量。

无钠水的制备：重力水箱里的除盐水，先经过混合床处理（大都是用有机玻璃做的交换柱），然后再进二级阳床进行离子交换，使出水的钠离子小于 2μg/L，即称为无钠水，进入无钠水箱。

无硅水的制备：重力水箱里的除盐水，先经混合床处理，再进入阳床除去水中残留的阳离子，然后再进入阴床，除去水中残留的阴离子，使出水的硅根（以 SiO_2 计）小于 3μg/L，即称为无硅水，

并进入无硅水箱。

（四）膜分离除盐处理

344 什么是膜分离？膜分离过程的推动力是什么？

没有经过处理的水实际上是混合物，混合物之所以能被分离，是由于它们之间的物理或化学性质有所差异。我们就是利用这些差异将其分开的。性质完全相同的物质称为元素和化合物，元素和化合物是不能被分离的。性质愈相近，分离就愈困难，反之亦然。膜分离是利用一张特殊制造的、具有选择透过性能的薄膜，在外力推动下对混合物进行分离、提纯、浓缩的一种分离新方法。这种薄膜必须具有使有的物质可以通过、有的物质不能通过的特性。膜可以是固相、液相或气相。目前使用的分离膜绝大多数是固相膜。

物质透过分离膜的能力可以分为两类：一种借助外界能量，物质发生由低位向高位的流动；另一种是以化学位差为推动力，物质发生由高位向低位的流动。下表列出一些主要膜分离过程的推动力。

主要膜分离过程的推动力

推 动 力	膜 过 程
压力差	反渗透、超滤、微滤、气体分离
电位差	电渗析
浓度差	透析、控制释放
浓度差（分压差）	渗透气化
浓度差加化学反应	液膜、膜传感器

345 我国膜分离技术在水处理领域的应用情况怎样？

我国膜分离技术是从 1958 年开始开发的，其研究和应用大致可分为三个阶段。

第一个阶段是 20 世纪 60 年代的开创时期。这个时期电渗析是我国最早得到推广应用的膜分离过程，其应用领域涉及苦咸水淡

化；电厂锅炉补给水预除盐；电子、医药行业超纯水制造等。离子交换膜、隔板、电极及其他配套设备已能自己制造，并几经换代使电渗析装置日趋完善。

第二个阶段是20世纪70年代。这一时期，电渗析、反渗透、超滤和微滤等各种膜和相应组件、装置都在研究中，或已开发出来，除电渗析外。其他膜组件仍未得到应用。

第三个阶段是20世纪80年代以后。这一时期我国膜分离技术跨入应用阶段，一些技术上较为成熟的膜过程开始得到应用。在自己研制成功的醋酸纤维素（CA）膜与复合膜生产装置的基础上，又相继引进了外国有关公司的反渗透膜生产线。反渗透技术已在我国电厂锅炉补给水预除盐、超纯水制造、海水和苦咸水淡化等方面大规模推广应用，并取得很好的技术效益和经济效益。

346　膜分离的基本原理是什么？机理如何？

由于分离膜具有选择透过的特性，所以它可以使混合物质有的通过、有的留下。分离膜之所以能使混在一起的物质分开，基于两个方面的原理：

（1）根据它们物理性质的不同——主要是质量、体积大小和几何形态差异，用过筛的办法将其分离。

（2）根据混合物的不同化学性质。物质通过分离膜的速度取决于以下两个步骤的速度：首先是从膜表面接触的混合物中进入膜内的速度（称溶解速度）；其次是进入膜内后从膜的表面扩散到膜的另一表面的速度。二者之和为总速度。总速度愈大，透过膜所需的时间愈短；总速度愈小，透过时间愈长。溶解速度完全取决于被分离物与膜材料之间化学性质的差异；扩散速度除化学性质外还与物质的相对分子质量有关。混合物中各物质透过的总速度相差愈大，则分离效率愈高；若总速度相等，则无分离效率可言。

但是，由于膜分离的过程不同，它们的分离机理也不完全相同。各种主要水处理过程的分离机理如下表所示。

各种主要水处理膜过程的分离机理

膜过程	分离体系[①] 相1 相2	推动力	分离机理	渗透物	截留物	膜结构
微滤	L L	压力差 (0.01～0.2MPa)	筛分	水、溶剂溶解物	悬浮物、颗粒、纤维和细菌(0.01～10μm)	对称和不对称多孔膜
超滤	L L	压力差 (0.1～0.5MPa)	筛分	水、溶剂、离子和小分子(相对分子质量<1000)	生化制品、胶体和大分子(相对分子质量(1000～300000)	具有皮层的多孔膜
纳滤	L L	压力差 (0.5～2.5MPa)	筛分+溶解/扩散	水和溶剂(相对分子质量<200)	溶质、二价盐、糖和染料(相对分子质量200～1000)	致密不对称膜和复合膜
反渗透	L L	压力差 (1.0～10.0MPa)	溶解/扩散	水和溶剂	全部悬浮物、溶质和盐	致密不对称膜和复合膜
电渗析	L L	电位差	离子交换	电解离子	非解离和大分子物质	离子交换膜
渗析	L L	浓度差	扩散	离子、低相对分子质量有机质、酸和碱	相对分子质量大于1000的溶解物和悬浮物	不对称膜和离子交换膜
渗透蒸发	L G	分压差	溶解/扩散	溶质或溶剂(易渗透组分的蒸气)	溶质或溶剂(难渗透组分的液体)	复合膜和均质膜
膜蒸馏	L L	温度差	气-液平衡	溶质或溶剂(易汽化与渗透的组分)	溶质或溶剂(难汽化与渗透的组分)	多孔膜
气体分离	G G	压力差 (1.0～10.0MPa)，浓度差(分压差)	溶解/扩散	易渗透的气体和蒸气	难渗透的气体和蒸气	复合膜和均质膜
液膜	L L	化学反应与浓度差	反应促进和扩散传递	电解质离子	非电解质离子	载体膜
膜接触器	L L G L L G	浓度差 浓度差(分压差) 浓度差(分压差)	分配系数	易扩散与渗透的物质	难扩散与渗透的物质	多孔膜和无孔膜

① 分离体系中 L 表示液相，G 表示气相或蒸气。

347 膜分离技术有些什么特点？

膜分离技术与蒸馏、吸附、萃取等传统的分离技术相比具有以下特点。

（1）膜分离是一个高效的分离过程。例如以重力为基础的分离技术最小极限颗粒是微米（μm），而膜分离可以做到将颗粒大小为纳米（nm）的物质进行分离。

（2）膜分离过程的能耗比较低。大多数膜分离过程都不发生“相”的变化，而“相”变化的潜热是很大的，所以能耗低。以海水淡化为例，膜技术反渗透比其他分离方法能耗低，见下表：

几种方法淡化海水能耗比较

分离方法	需要消耗的动力 /(kW·h/m³)	需要消耗的热量 /(kJ/m³)
理论值	0.72	2577
反渗透(水回收率40%)	3.5	16911
冷冻	9.3	33472
溶剂萃取	25.6	92048
多级闪蒸	62.8	225936

（3）多数膜分离过程的工作温度与室温接近。因此，特别适用于对热过敏物质的处理。如用膜分离处理的水可以在室温或更低温下进行，确保不发生局部过热现象，大大提高了药品使用的安全性。

（4）膜分离设备本身没有运动的部件，工作温度又在室温附近，所以维护工作量减少，操作简便，开、停车方便。

（5）膜分离过程的规模和处理能力可以在很大范围内变化，而它的效率、设备单价、运行费用等都变化不大。

（6）膜分离由于分离效率高，通常设备的体积比较小，占地较少。

（7）膜分离不同于水的澄清和除盐过程，不需要消耗大量的混凝剂和酸、碱等化学药品，所以不致造成对环境的危害。

348 工业水处理使用的膜有哪些类型？

工业水处理采用的膜分离技术主要有反渗透（RO），超过滤

（UF）和电渗析（ED）三种。以反渗透的应用最为广泛。但近年来，纳滤（NF）和微滤（MF）技术也开始应用于水处理的各个领域。

反渗透膜主要有纤维素和非纤维素两类。其中纤维素膜有醋酸纤维素、三醋酸纤维素等；非纤维素膜主要是芳香族聚酰胺膜。反渗透使用的都为半透膜，只对水具有选择性的高度渗透性，而对水中大部分溶质的渗透性很低。反渗透膜在使用时要制成组件式装置，其型式有涡卷式、管式、板框式，中空纤维式和条束式等。膜厚为几个 μm 至 0.1mm 左右。

超滤膜与反渗透膜都是不具备离子交换性质的中性膜，属于压力推动的滤膜。两膜基本相似，主要有醋酸纤维素和非纤维素聚合物膜，组件装置可以做成涡卷式、管式和板式等。

超滤膜和反渗透膜中的纤维素膜有：①超薄式膜：非对称性构造的醋酸纤维素膜，如 0.06～0.3μm 二乙酰纤维素膜；②复合膜：如硝酸纤维素和醋酸纤维素复合为 0.1μm 三乙酰纤维素膜；③混合膜：将二乙酰和三乙酰纤维素混合制膜；④中空纤维膜：做成内径 24～30μm，外径 45～65μm 的中空纤维管式。

超滤膜和反渗透膜中的非纤维素膜有：①芳香族聚酰胺中空纤维素膜（最初是以尼龙 66 作纤维素，后改为芳香族酰胺）；②带电膜，如磺化 2,6-二甲基次苯基醚离子膜；③聚咪唑并吡喃酮膜；④聚间二氮茚膜；⑤玻璃膜，如 $Na_2O \cdot B_2O_3 \cdot SiO_2$ 制成中空纤维膜；⑥动态膜。

电渗析膜是离子交换膜，为电力推动式滤膜。主要有异相膜、均相膜和半均相膜三种类型。电渗析的组件装置有压滤式和水槽式两类。其中压滤式又有垂直型和水平型两种。

纳滤膜（NF）介于反渗透膜和超滤膜之间，是近十多年发展较快的膜品种，在水的软化、不同价阴离子分离等方面有独特优点而广泛应用。

微滤（MF）又称为精过滤，其基本原理属于筛网状过滤，在静压差作用下，小于膜孔的粒子通过滤膜，大于膜孔的粒子则被截

留在膜面上，使大小不同的组分得以分离。

349　什么叫渗析？什么叫电渗析？

渗析是属于一种自然发生的物理现象。如将两种不同含盐量的水，用一张渗透膜隔开，就会发生含盐量大的水的电解质离子穿过膜向含盐量小的水中扩散，这个现象就是渗析。这种渗析是由于含盐量浓度不同而引起的，称为浓差渗析。渗析过程与浓度差的大小有关，浓差越大，渗析的过程越快，否则就越慢。因为是以浓差作为推动力的，因此，扩散速度始终是比较慢的。如果要加快这个速度，就可以在膜的两边施加一直流电场。电解质离子在电场的作用下，会迅速地通过膜，进行迁移过程，这就称为电渗析。渗析膜是用高分子材料制成的一种薄膜，上面有离子交换活性基团。膜内含有酸性活性基团的称为阳膜；如有碱性活性基团的称阴膜。从膜的结构上分，又可分为异相膜、均相膜、半均相膜三种。

350　电渗析的除盐原理是什么？

电渗析的除盐原理如图 3-4-1 所示。

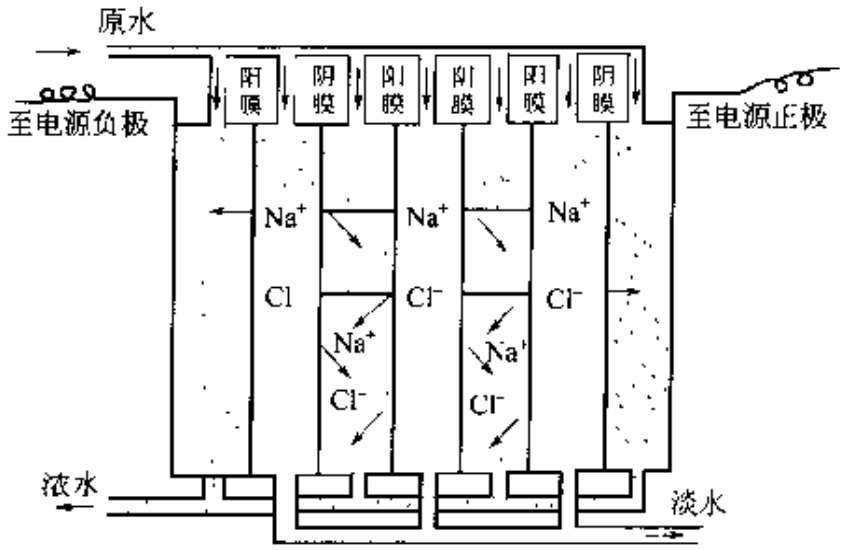


图 3-4-1　电渗析除盐原理示意图

在用电渗析进行除盐处理时，先将电渗析器两端的电极接上直流电，水溶液就发生导电现象，水中的盐类离子在电场的作用下，各自向一定方向移动。阳离子向负极，阴离子向正极运动。在电渗

析器内设置多组交替排列的阴、阳离子交换膜，此膜在电场作用下显示电性，阳膜显示负电场，排斥水中阴离子而吸附阳离子，在外电场的作用下，阳离子穿过阳膜向负极方向运动；阴膜显示正电性，排斥水中的阳离子，而吸附了阴离子，在外电场的作用下，阴离子穿过阴膜而向正极方向运动。这样，就形成了去除水中离子的淡水室和离子浓缩的浓水室，将浓水排放，淡水即为除盐水。这一过程为电渗析除盐原理。

351　电渗析的除盐处理过程如何？

电渗析除盐处理发生七个物理化学过程。

（1）反离子迁移过程　阳膜上的固定基团带负电荷，阴膜上的固定基团带正电荷。与固定基团所带电荷相反的离子穿过膜的现象称为反离子迁移。如在电渗析器中，淡室中的阳离子穿过阳膜，阴离子穿过阴膜进入浓室就是反离子迁移过程，这也是电渗析的除盐过程。

（2）同性离子迁移过程　与膜上固定基团带相同电荷的离子，穿过膜的现象称为同性离子迁移。由于交换膜的选择透过性不可能过到100%。因此，也存在着浓室中的阴离子会少量穿过阳膜，或阳离子穿过阴膜而进入淡室，数量虽少，但降低了除盐效率。

（3）电解质的浓差扩散过程　这是由于浓水室与淡水室的浓度差而引起的。其结果是由浓室的离子向淡室扩散。从而使淡室的含盐量增加，降低了除盐效率。

（4）压差渗透过程　由于浓、淡室的压力不同，由压力高的向压力低侧进行离子渗透，因此，如果浓室的压力过高，也会降低除盐效率。

（5）水的渗透过程　由于淡室中水的压力比浓室要大，因此，会向浓室渗水，使产水量降低。

（6）水的电渗透过程　由于水中离子是以水合离子的形式存在，因此伴随着离子的迁移，故有水的电渗透发生，使淡水产量降低。

（7）在运行时，由于操作不良而造成极化现象，使淡水室

水量的水电离，在直流电场的作用下，水电离产生的 H^+ 穿过阳膜，OH^- 穿过阴膜进入浓水室，在那里与 Ca^{2+}、Mg^{2+} 生成沉淀，也称为极化沉淀。故此，不仅电耗增加，而且还会造成沉淀等后果。

352　如何确定电渗析的运行参数？

对电渗析器要经过一段时间的调试才能制定出最佳运行参数，这对于实现稳定和长周期运行关系很大。需要确定的参数主要有：

（1）流速和压力　电渗析器有一定的额定流量，不能过大或过小。过大，使进水压力过高，会发生装置的泄漏和变形。过小，悬浮物会粘附于电渗析器中，造成水流压力上升，除盐率下降，造成水流死角和局部极化结垢。因此水流过管道时的线速度控制在50～200mm/s。

（2）电流和电压　电渗析器以电位差为动力进行除盐，要控制一定的直流电压，以得到一定的工作电流。工作电流应低于极限电流。工作电流高，有利于提高设备效率；工作电流低，有利于防止极化。一般控制工作电流为极限电流的 90%。如果选定的工作电流发生变化，要查清原因，不可贸然采用提高电压的办法来处理。

（3）倒极和酸洗　倒极就是将运行的电渗析器阴、阳极互换一下。根据调试和运行情况来确定倒极和酸洗的时间间隔。但在水质和温度变化时，可根据具体情况来更改间隔周期。

（4）水的回收率　运行实践表明，为得到 1t 淡水，约需 2.2～2.5t 原水（包括极水），水的回收率控制在 40%～45%左右。国外现在采用的倒极电渗析器，水的回收率大约在 50%～95%范围内。

353　如何处理电渗析器的常见故障？

电渗析器在实际运行中常见的故障原因及其处理方法如下。

（1）电渗析器的水压高、出水量低或水流不畅

故障的原因可能是：①开车前管路未冲洗干净，致使杂质堵塞水流通道；②在组装时，隔板和膜的进出水孔未对准，或是部分隔板框网收缩变形，或是隔板框和隔网厚度配合不适当；③级段间的

水流倒向时，进出水孔错位。

上述故障的处理方法是：①拆开电渗析器清除出水孔、布水槽等处杂物，然后重新组装，或在进水管道加设过滤器；②变形的隔板要调换。对隔板加工要注意厚度均匀，与框网厚度的配合要良好；③对进出水孔错位，要仔细检查并重新组装测试。

（2）电渗析器的除盐效果差、电流偏低

故障原因是：①部分阴、阳膜可能装错；或是部分浓、淡室隔板装错，以及膜破裂；②电路系统接触不良，树脂膜受到污染，性能变坏。

处理方法是：①重新组装，并去除已损坏的隔板或膜；②检查电路，使接触良好。定期用酸、碱液对树脂膜进行复苏处理。

（3）电渗析器电流不稳、出水流量不稳及压力表抖动等

故障原因是：①电渗析器内的空气未排尽，或水泵吸口管路漏气使水带气；②流量计及压力表离泵出口太近，受水泵冲击而抖动，或是系统阻力太大。

处理方法是：①设法使装置内部空气排尽，修好系统漏气处；②改装流量计和压力表的位置，并尽力减少系统阻力。

（4）电渗析器的出水水质下降，或是某一段水质特别差

原因是：①原水预处理效果差，膜堆和极室沉淀结垢严重；②某段的树脂膜破裂，或是浓、淡室间泄漏。

处理方法是：①改进预处理。重新拆开电渗析器，清洗膜、隔板和极框；②拆开电渗析器检查，调换隔板和膜。

（5）淡室水质突然下降，电耗增加，转子流量计上有黄褐色铁锈

原因是：①个别膜破裂（尤其是靠近极室的膜），电极腐蚀断裂，电极接线柱松动；②原水含铁量较多，或管网有腐蚀，铁溶入水中。

处理方法是：①及时调换破膜或断极，电极的接触始终要良好；②加强原水预处理。管路尽量不使用铁管，而要有防腐措施，开车时管网存水要排放干净，受铁污染处要及时清洗。

（6）电渗析器本体漏或变形

原因是：①组装时螺杆未拧紧；②隔板边框夹有杂物和隔板破裂，或是隔板和膜厚薄不均匀；③开车时速度过快，电渗析器骤然升压，使隔板受冲击而变形，或停车过速，使失压过快，膜堆也会变形。

处理方法是：①检查和拧紧螺杆；清除边框杂物或调换破裂隔板，在漏水处垫以石棉绳或塑料薄片后重新拧紧；②开车时要缓慢，随时监视压力表及流量计小心调节，停车时也不可过速，并及时打开放空气阀门，不使电渗析器本体受负压。

354　电渗析的极化沉淀如何防止和消除？

由于水中离子在膜中的迁移速度大于在水溶液中的速度，而且，淡室膜面上离子的浓度，也总是低于溶液中的浓度。如果电流密度越高，浓度差也越大，当电流密度上升到某一数值时，膜面上的离子浓度会低到零，这时发生膜面上大量水的电解现象，称为极化现象。

电渗析过程中产生的浓差极化，会产生很多不利因素和危害如下：

（1）电阻增大，电流下降，除盐率下降；

（2）浓水和淡水的 pH 发生变化，常称之为中性扰乱；

（3）电流效率下降；

（4）膜表面上出现沉淀或结垢，这主要在阴膜的浓水室一侧。

由于极化淡水室的 OH^- 富集在阴膜浓水一侧，因此这滞流层内溶液的 pH 值变大，呈碱性。同时，淡水室内的阴离子 HCO_3^-、SO_4^{2-} 等迁过阴膜，也富集在这里，还有浓水室中的硬度离子也被阻挡在这滞流层中，这样由于这些正负离子的离子积大于它们组成 $Mg(OH)_2$、$CaCO_3$ 或 $CaSO_4$ 的溶度积时，就在阴膜浓水室一侧滞流层内产生沉淀或污垢。

防止和消除极化沉淀，有下列方法：①极限电流法。要严格控制电渗析器的工作电流，始终低于产生极化时的极限电流，从而避免极化的产生。②倒换电极法。定时倒换电极，使离子的迁移方向

改变，从而使浓、淡室也相应倒换，约 2～4 小时倒极一次，这样，即使有轻微沉淀也会得到消除。③清洗法。定期用 1%～2%浓度的盐酸循环清洗 1 小时左右，并使沉淀物清除排出。④拆洗法。电渗析器经半年或一年运行之后，将装置拆开，把隔板和膜片等清洗干净。

355　什么叫电渗析的电流密度、除盐效率和电流效率？

（1）电渗析的电流密度是在运行时，每单位面积膜所通过的平均电流，用下式表示：

$$I=\frac{A\times 1000}{F}\quad \mathrm{mA/cm^2}$$

式中　I——电流密度，$\mathrm{mA/cm^2}$；

A——工作电流，A；

F——膜的有效面积，$\mathrm{cm^2}$。

（2）除盐效率是表示电渗析法除去水中含盐量的效果，是电渗析器的重要技术指标，可用下式表示：

$$N=\frac{W_{进}-W_{出}}{W_{进}}\times 100\%$$

式中　N——除盐率，%；

$W_{进}$——淡室进口水的含盐量 $c\left(\frac{1}{x}\mathrm{A}^{x+},\ \frac{1}{x}\mathrm{B}^{x-}\right)$，mmol/L；

$W_{出}$——淡室出口水的含盐量 $c\left(\frac{1}{x}\mathrm{A}^{x+},\ \frac{1}{x}\mathrm{B}^{x-}\right)$，mmol/L。

（3）电流效率就是电渗析器在运行过程中的电流利用率。由于电渗析器的耗电量较大，因此电流效率也是重要的技术指标，可用下式表示：

$$\eta=\frac{26.8\times Q\times(W_{进}-W_{出})}{\Sigma I}$$

式中　η——电流效率，%；

Q——淡水产量，$\mathrm{m^3/h}$；

ΣI——工作电流总量，A；

26.8——常数。

356　为什么电渗析器的电极会腐蚀和结垢？

电渗析器通电之后，电极表面就会产生电化学反应，在阳极处有初生态氧[O]和 H_2 产生，极水呈酸性，具有强烈的氧化作用，从而腐蚀电极。而在阴极处的极水是呈碱性的，当水中有 Ca^{2+}、Mg^{2+} 和 HCO_3^- 存在时，就会产生 $CaCO_3$ 和 $Mg(OH)_2$ 的水垢沉积。为此，目前采取在钛丝电极外面涂以钌来提高耐腐蚀性能，并选择适宜的极框，使得极水有足够的流量和湍动作用，促使沉积物排出。目前国内除上述电极之处，还有石墨电极、铅板电极和不锈钢电极等。

357　如何使用和保存电渗析器的离子交换膜？

如果是新膜，在使用前需要先在清水中浸泡 24h 再进行裁膜。例如聚乙烯异相膜，在使用中会发生阳膜缩短，阴膜伸长的现象，故最好将膜放在 1% NaOH 溶液中浸泡 4～6h，然后用清水冲洗后再裁膜，这样，运行时膜的尺寸变化小。

如果是已经使用过的旧膜，暂不使用时，需要晾干后存放。存放时应平摊，避免阳光照射，不要受湿，不沾油污。

在运行时，水温不能太低，以 5～40℃为宜，水温过高膜会溶胀，水温过低膜会收缩引起破裂。

在检修拆装时，要防止膜的机械损伤或折裂。

358　电渗析器开、停车时应注意哪些事项？

（1）电渗析器在开车时，应先通水，后通电；在停车时，应先停电后停水。

（2）浓、淡、极水的阀门应做到同时缓慢开启，要均匀、切勿猛开猛关。并控制好压力。通常使淡水室压力比浓水、极水压力高出 4.9～9.8kPa（0.05～0.1kgf/cm^2）。

（3）通电时，电压应逐步升高，直到电流稳定在工作点为止。

（4）运行期间，应定期测定淡、浓、极水的流量和压力；记录工作电压、电流；测定原水、淡水、浓水的电阻率、温度；定期分析原水浑浊度、耗氧量、游离氯、氯根、硬度和含盐量等。

（5）在暂停运行时，应保持膜在湿润状态，避免干缩；如果长期停运时，应将设备解体，并按规定保存好各部件。

359　什么是频繁倒极电渗析？

频繁倒极电渗析是具有选择透过性的离子交换膜，在外加直流电场的作用下，使水中的离子定向迁移，并有选择地通过带有不同电荷的离子交换膜、从而达到杂质和水分离的过程。但由于单向电渗析膜堆内部极化沉淀和阴极区沉淀，影响电渗析的正常运行，为了克服这个缺陷，采取的方法是使电渗析频繁倒电极，这就成了频繁倒极电渗析（EDR）。每小时倒电极 3～4 次。这样，由于电极的变化，有效地破坏了极化层，从而防止了因浓差极化引起的膜堆内部的沉淀结垢，也减少了黏性污泥和微生物在膜面上的黏着和积累。同时也减少了原来清除沉积物时需使用的酸和防垢剂等的用量，减少了环境污染，提高水的回收率，降低运行和维修费用。

360　电渗析有些什么特点？

电渗析作为膜分离技术有其自己特点，

（1）能量消耗不大　电渗析运行过程中，不发生相的变化，仅是用电能来迁移水中已解离的离子，一般它耗用的电能是和水中含盐量成正比的。因此对含盐量 3000～4000mg/L 以下的水的淡化，电渗析被认为是耗能少的比较经济的技术。

（2）药剂耗量少，环境污染小　电渗析运行时不需要加入药剂，仅在定期清洗时用少量酸，输液时不需要高压泵。所以和离子交换法比较，耗用药剂量少得多，因此废酸、废碱少。

（3）操作简便，易于向自动化方向发展　电渗析通常都是控制在恒定的直流电压下运行。运行时只要在恒定电压下，控制好浓、淡、极水的流量和压力，定期倒换电极，因此易于进行自动化操作。

（4）设备紧凑，占地面积不大　水流是通过紧固形多膜对电渗析器进行淡化除盐的，辅助设备不多，所以占地面积小，规模较小的可以把辅助设备组合在一起。

（5）设备经久耐用，预处理简便　膜和电渗析器的隔板等都是高分子材料制成，国外对比的看法，认为离子交换膜比反渗透膜抗污染好，电渗析器设备材质比蒸馏法所用的金属材料耐腐蚀性强。另外，由于在电渗析器中水流方向是和膜面平行，不像反渗透器中水流要垂直通过膜面，所以一般认为电渗析对进水水质指标要求没有反渗透那样高。

（6）水的利用率高，排水处理容易　电渗析器进水中的浓水和极水可以考虑循环使用或套用，所以水的利用率高。

（7）设备规模、除盐浓度的范围适应性大　从小型到大型的不同隔板的组装形式和多台的串联、并联可以适应不同大小的水处理规模和除盐程度的要求。

电渗析存在的主要缺点是：耗水量较大；电极的腐蚀和结垢问题未获彻底解决；有机物对膜的污染常使除盐率迅速下降。

361　选用电渗析时要注意哪些问题？

（1）电渗析是利用电能来迁移离子进行膜分离的，当水中含盐量较低时，水的电阻率就较高，此时电渗析器的极限电流值也较小，电渗析运行易于产生极化。因此一般认为水中含盐量小于10～50mg/L时，不宜用电渗析除盐；换言之，电渗析器出口淡水的含盐量不宜低于10～50mg/L。不像离子交换法可以深度除盐，获得超纯水。

（2）电渗析对离解度小的盐类和不离解的物质难以去除。例如对水中的硅酸就不能去掉，对碳酸根的迁移率就小一些，对不离解的有机物就去除不掉。不像离了交换法可以去除硅酸盐，不像反渗透去除物质的范围要广泛得多。

（3）某些高价金属离子和有机物会污染离子交换膜，降低除盐效率。

（4）电渗析器是由几十到几百张极薄的隔板和膜组成，部件多，组装较繁，一个部件局部出问题即要影响到整体。

（5）电渗析是使水流在电场中流过，当施加到一定电压后，靠近膜面的水的滞流层中，电解质的含量变得极小，从而水的离解度

增大，易产生极化、结垢和中性扰乱现象。这是电渗析运行中较难掌握又必须重视的问题。

362　对进入电渗析器的水质有何要求？

进入电渗析器的水质，根据〈电渗析技术〉国标中规定了七项指标，具体如下：

（1）水温：5～40℃；

（2）耗氧量（高锰酸钾法）：<3mg/L；

（3）游离氯：<0.2mg/L；

（4）铁：<0.3mg/L；

（5）锰：<0.1mg/L；

（6）浑浊度：1.5～2mm 隔板 <3mg/L；

0.5～0.9mm 隔板 <1mg/L；

（7）淤泥密度指数值 SDI<3～5(ED)；SDI<7(EDR)。

363　什么是电去离子净水技术？

电去离子净水技术（EDI）是一种将电渗析和离子交换树脂相结合的除盐新工艺，我国也称填充床电渗析。

电去离子净水技术 EDI 就是在电渗析器的淡水室中填装阴、阳离子混合离子交换树脂，将电渗析和离子交换结合在一个装置中，成为一个联合体，其 EDI 工艺示意图见图 3-4-2。

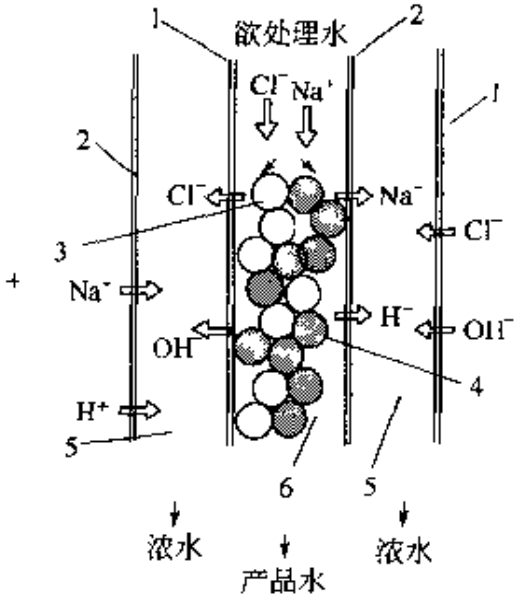


图 3-4-2　EDI 工艺示意图

1—阴离子交换膜；2—阳离子交换膜；3—阴离子交换剂；4—阳离子交换剂；5—浓水室；6—淡水室

由于淡水室中，离子交换剂的颗粒不断地发生交换作用与再生作用，而构成了“离子通道”，活跃的离子活动，使淡水室的电导率大大增加，从而减弱了电渗析的极化现象，提高了电渗析器的极限电流，达到了水质的高

度净化。此外，由于淡水室填装了离子交换剂，使淡水室中的水流速度要比普通电渗析中的大大增加，而且离子交换剂颗粒又起着滚动搅拌作用，促进了离了的扩散、改善了水力学状况，也导致淡水室电导率的增加。

EDI除盐工艺过程如下：①在外电场的作用下，水中电解质离子通过离子交换膜（阴、阳膜）进行选择性迁移的电渗析过程；②阴阳混合离子交换剂上的OH^-和H^-对水中电解质离子的离子交换过程，从而加速去除淡水室中的离子；③电渗析的极化过程所产生的H^+、OH^-和离子交换剂进行了电化学再生过程，这一过程既能保证高质量的纯水，又能达到离于交换剂的自行再生。

电渗析与混合离子交换，两者错综地结合一起的电去离子过程，既利用离子交换深度除盐克服了电渗析过程因发生浓差电极化作用而除盐不彻底，又利用电渗析的极化作用发生电离，产生的OH^-和H^+来实现离子交换剂的自身再生，克服了离子交换树脂失效后通常需要化学再生剂来进行再生的缺点，从而，使EDI基本上能够去除水中的全部离子，为制备纯水、超纯水等创造条件。

364　如何测定污染指数FI或淤泥密度指数SDI?

污染指数FI或淤泥密度指数SDI，是表示进反渗透水中悬浮物、胶体物质的浓度和过滤特性。是反渗透进水检测指标之一，以确保反渗透的安全运行。其测定装置的示意图见图3-4-3。

水样在压力为0.2MPa条件下，通过一标准过滤器，过滤器直径为47mm，内装0.45μm孔径的滤膜。将开始通水时流出500mL水所需要的时间t_1记录下来，继续通水15min后再记下通入500mL水所需要的时间t_2，总的测试时间（T）为15min，则污染指数FI或淤泥密度指数SDI用下式计算：

$$FI(或\ SDI)=\frac{(1-t_1/t_2)\times 100}{T}$$

FI值越大，水质越差。对进入卷式反渗透组件水的污染指数以不大于3为宜。

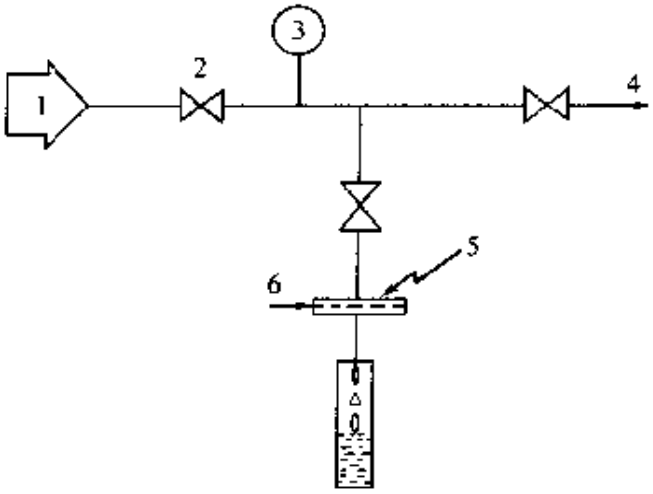


图 3-4-3　污染指数测定装置示意图

1—进水；2—阀门；3—压力表；4　放气；5· 过滤器；6—微孔滤膜

365　反渗透除盐原理是什么？反渗透膜如何分类？

反渗透是 20 世纪 60 年代发展起来的一项新的薄膜分离技术，是依靠反渗透膜在压力下使溶液中的溶剂与溶质进行分离的过程。

要了解反渗透法除盐原理，先要了解“渗透”的概念。渗透是一种物理现象，当两种含有不同浓度盐类的水，如用一张半渗透性的薄膜分开就会发现，含盐量少的一边的水分会透过膜渗到含盐量高的水中，而所含的盐分并不渗透，这样，逐渐把两边的含盐浓度融和到均等为止。然而，要完成这一过程需要很长时间，这一过程也称为自然渗透。但如果在含盐量高的水侧，试加一个压力，其结果也可以使上述渗透停止，这时的压力称为渗透压力。如果压力再加大，可以使水向相反方向渗透，而盐分剩下。因此，反渗透除盐原理，就是在有盐分的水中（如原水），施以比自然渗透压力更大的压力，使渗透向相反方向进行，把原水中的水分子压到膜的另一边，变成洁净的水，从而达到除去水中盐分的目的，这就是反渗透除盐原理，如图 3-4-4 所示。

目前，反渗透膜如以其膜材料化学组成来分，主要有纤维素膜和非纤维素膜两大类。如按膜材料的物理结构来分，大致可分为非对称膜和复合膜等。

在纤维素类膜中最广泛使用的是醋酸纤维素膜（简称 CA 膜）。

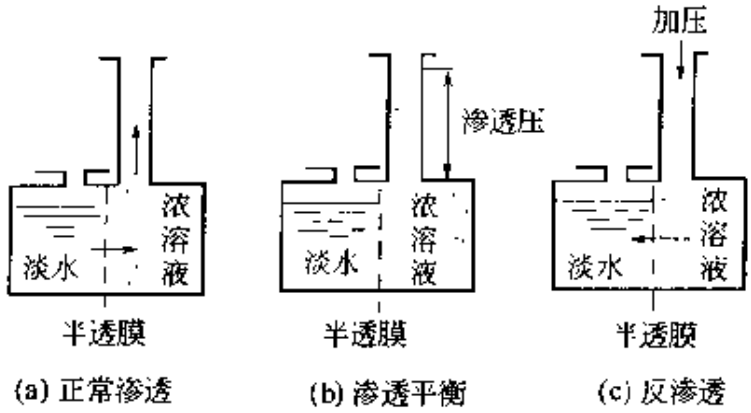


图 3-4-4　反渗透除盐原理示意图

该膜总厚度约为 100μm，其表皮层的厚度约为 0.25μm，表皮层中布满微孔，孔径约 0.5～1.0nm，故可以滤除极细的粒子，而多孔支撑层中的孔径很大，约有几百 nm，故该种不对称结构的膜又称为非对称膜。在反渗透操作中，醋酸纤维素膜只有表皮层与高压原水接触才能达到预期的脱盐效果，决不能倒置。

非纤维素类膜以芳香聚酰胺为主要品种，其他还有聚哌嗪酰胺膜，聚苯骈咪唑膜，聚砜酰胺膜，聚四氟乙烯接枝膜，聚乙烯亚胺膜等等。近年来发展起来的聚酰胺复合膜，是由一层聚酯无纺织物作支持层，由于聚酯无纺织物非常不规则并且太疏松，不适合作为盐屏障层的底层，因而将微孔工程塑料聚砜浇铸在无纺织物表面上。聚砜层表面的孔控制在大约 15nm。屏障层采用高交联度的芳香聚酰胺，厚度大约在 200nm。高交联度芳香聚酰胺由苯三酰氯和苯二胺聚合而成。由于这种膜是由三层不同材料复合而成故称为复合膜。

366　反渗透膜的分离机理是什么？

反渗透膜是属于一种压力推动的膜滤方法，所用的膜不具离子交换性质，可以称为中性膜。反渗透用半透膜为滤膜，必须在克服膜两边的渗透压下操作，过去使用醋酸纤维素膜时的操作压力为 5～6MPa（50～60atm），现今所用的聚酰胺复合膜的操作压力为 1.5MPa(15atm) 左右。

半透膜是指只能通过溶液中某种组分的膜。对水处理所用的半

透膜要求只能通过水分子。当然，这种对水的透过选择性并不排斥少量的其他离子或小分子也能透过膜。

对膜的半透性机理有以下各种解释，但都不能解释全部渗透现象。

一种解释认为这是筛除作用。即膜孔介于水分子与溶质分子之间，因此水能透过，而溶质不能透过。但这不能解释和水分子的大小基本一样盐分离子不能透过的原因。

第二种解释是认为反渗透膜是亲水性的高聚物，膜壁上吸附了水分子，堵塞了溶质分子的通道，水中的无机盐离子（Na^+、K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-…）则较难通过。

最后，有一种机理认为是由于水能溶解于膜内，而溶质不能溶解于膜内。

367　膜分离器有哪些形式？它应具备哪些条件？

工业应用中通常需要较大面积的膜。安装膜的最小单元被称为膜组件，或称为膜分离器。它是在外界驱动力作用下能实现对混合物中各组分分离的器件。其主要形式有：板框式；圆管式；螺旋卷式；中空纤维式等 4 种类型。

一种性能良好的膜组件应具备以下条件：

（1）膜在容器内能得到合理的和足够的机械支撑并可使高压原料液和低压透过液严格分开；

（2）原料液在膜面上的流动状态均匀合理，以减少浓差极化；

（3）单位体积的膜组件中应填充较多的有效膜面积，并使膜的安装和更换方便；

（4）装置牢固并保证有足够的强度、运行安全可靠、价格低廉和容易维护。

368　板框式膜组件的形式怎样？

板框式膜组件是模分离历史上最早问世的一种膜组件形式，其外观很像普通的板框式压滤机。与其他膜组件相比，板框式膜组件的最大特点是构造比较简单面且可以单独更换膜片。

板框式膜组件又分系紧螺栓式和压力容器式。

（1）系紧螺栓式　如图 3-4-5 所示。系紧螺栓式膜组件是先由圆形承压板、多孔支撑板和膜，经粘结密封构成脱盐板，再将一定数量的这种脱盐板多层堆积起来并放入 O 形密封圈，最后用上、下头盖（法兰）以系紧螺栓固定组成而得。原水由上头盖进口流经脱盐板的分配孔，在诸多脱盐板的膜面上逐层流动，最后从下头盖的出口流出。与此同时，透过膜的淡水在流经多孔支撑板后，分别于承压板的侧面管口处流出。

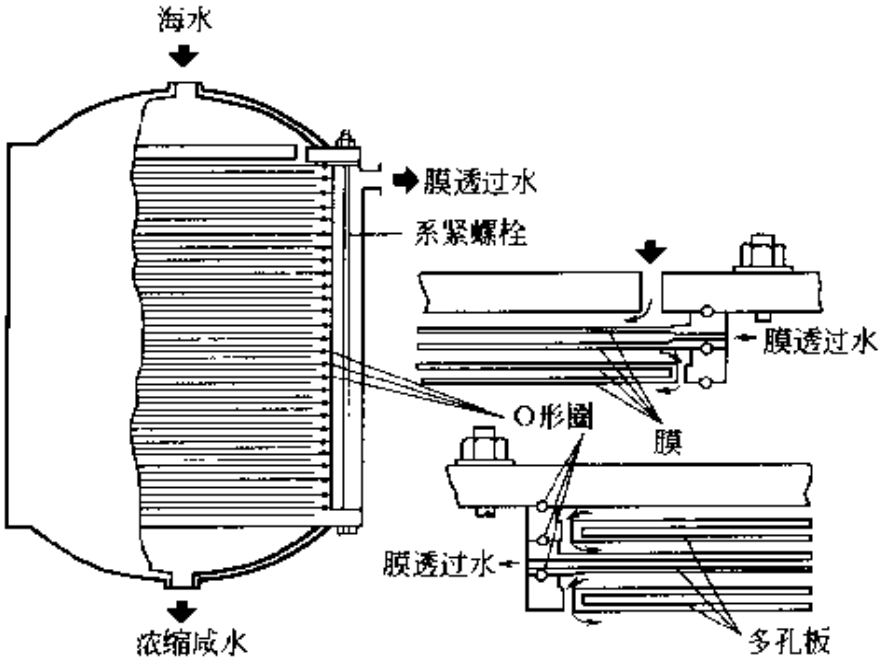


图 3 4 5　系紧螺栓式板框式膜组件

（2）耐压容器式　如图 3-4-6 所示（见 336 页）。耐压容器式膜组件主要是把多层脱盐板堆积组装后，放入一个耐压容器中而成。原水从容器的一端进入，分离后的浓水和淡水则由容器的另一端排出。容器内的大量脱盐板是根据设计要求串、并联相结合构成，其板数从进口到出口依次递减，目的是保持原水的线速度变化不大以减轻浓差极化影响。

369　圆管式膜组件的结构怎样？

圆管式膜组件其结构主要是把膜和支撑体均制成管状，使两者装在一起，或者将膜直接刮制在支撑管内（或管外），再将一定数

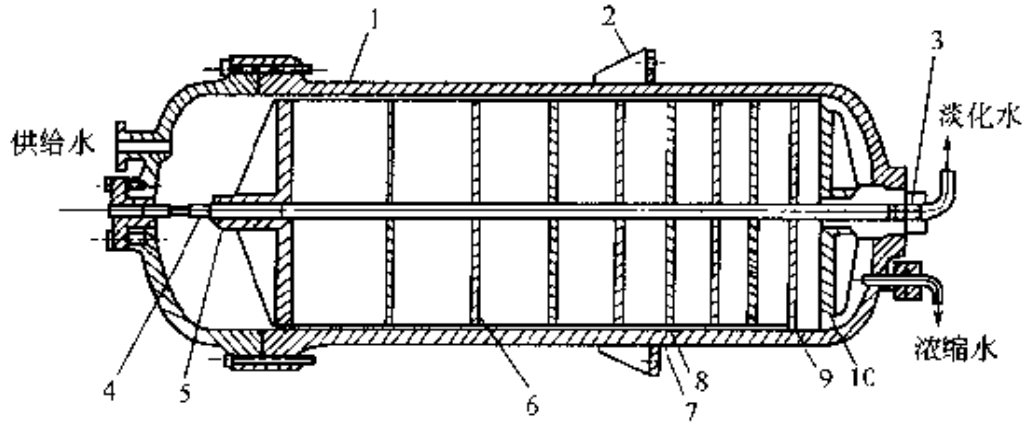


图 3-4-6　耐压容器式板框式膜组件

1—膜支撑板；2—安装支架；3—支撑座；4—淡化水顶轴；5—淡水管螺母；6—开口隔板；7—水套；8—封闭隔板；9--周边密封；10　基板

量的这种膜管以一定方式连成一体而组成，其外形极似列管式换热器。

圆管式膜组件分内压型和外压型。

(1) 内压型管式分内压型单管式和管束式两种：

① 内压型单管式　图 3-4-7 为内压型单管式膜组件的结构示意图。其中膜管是被裹以尼龙布、滤纸一类的支撑材料并被镶入耐压管内。膜管的末端被做成喇叭口形，然后以橡皮垫圈密封。原水是

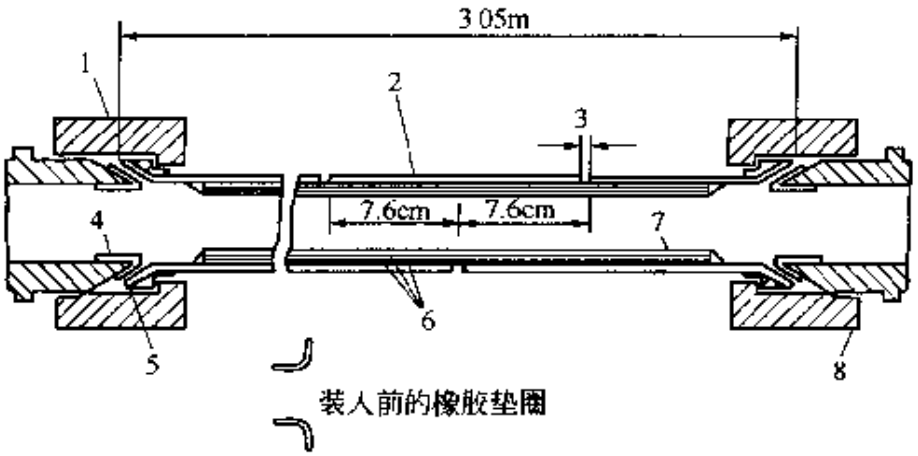


图 3-4-7　内压型单管式膜组件

1　螺母；2—支撑管外径 2.54cm 钢管（壁厚 0.09cm）；3—φ1.6mm 孔；4—橡胶垫圈；5—套管；6—3 层尼龙布或 1.5 层尼龙＋滤纸；7—管状膜；8—扩张接口

由管式组件的一端流入，于另一端流出。淡水透过膜后，于支撑体中汇集，再由耐压管上的细孔中流出。具体使用时是把许多这种管式组件以并联或串联的形式组装成一个大的膜组件。

② 内压型管束式　其结构如图 3-4-8 所示。这是在多孔性耐压管内壁上直接喷注成膜，再把许多耐压膜管装配成相连的管束，然后把管束装置在一个大的收集管内，构成管束式淡化装置。原水由装配端的进口流入，经耐压管内壁的膜管，于另一端流出，淡水透过膜后由收集管汇集。

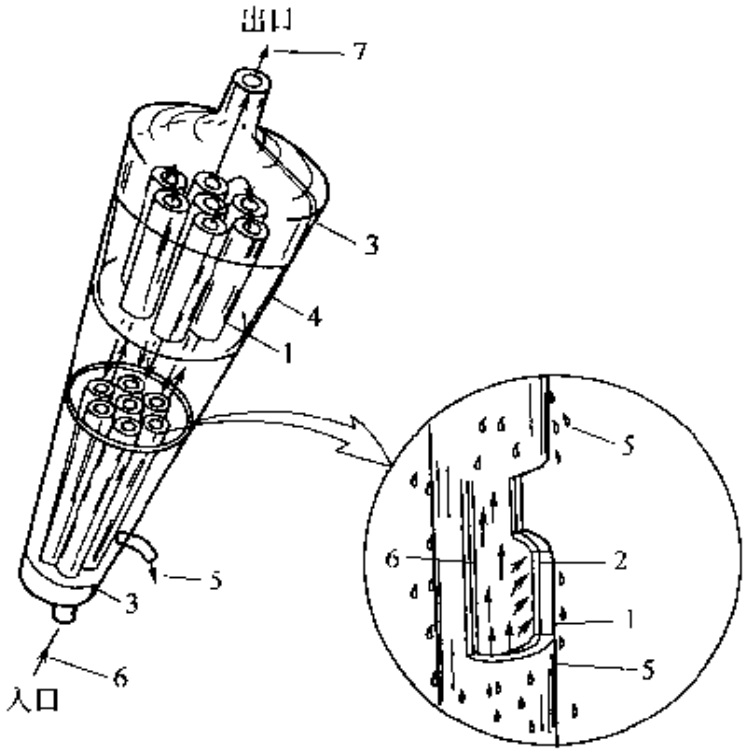


图 3-4-8　内压型管束式膜组件

1　玻璃纤维管；2—反渗透膜；3—末端配件；4—PVC 淡化水搜集外套；5· 淡化水；6—供给水；7—浓缩水

(2) 外压型圆管式

与内压型圆管式相反，分离膜是被刮制在管的外表面上。水的透过方向是由管外向管内的。

370　螺旋卷式膜组件是怎样的一种结构?

螺旋卷式膜组件又称卷式膜组件。是由美国于 1964 年研制成

功的，是目前反渗透、超滤及气体分离过程中最重要的膜组件形式，在反渗透领域中占据了大部分市场份额（高达75%左右）。

螺旋卷式膜组件的结构是由中间为多孔支撑材料，两边是膜的“双层结构”装配组成的。也就是把膜—多孔支撑体—膜—原水侧隔网依次叠合，绕中心集水管紧密地绕卷在一起，形成一个膜元件、再装进圆柱形压力容器里，构成一个螺旋卷式膜组件。被处理的水沿着与中心管平行的方向在隔网中流动，浓缩液由压力容器的另一端引出，而渗透液（淡水）汇集到中央集水管中被引导出来。如图3-4-9所示。

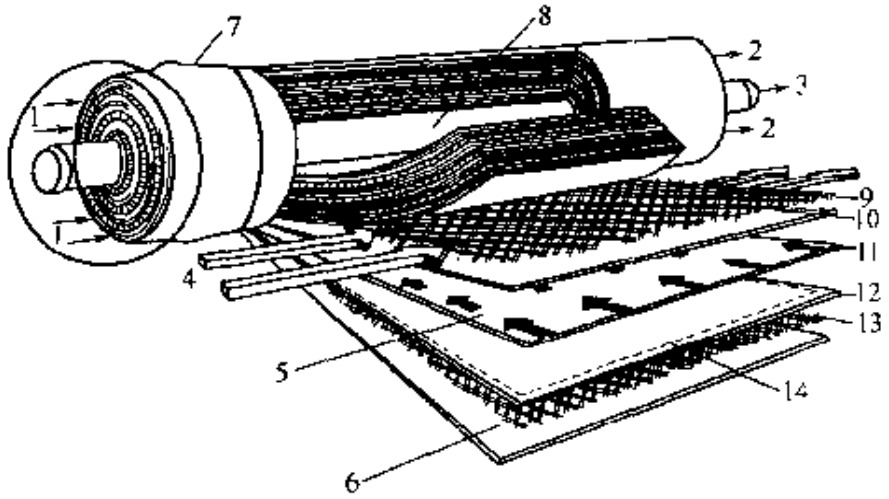


图3-4-9　螺旋卷组件

1—原水；2—废弃液；3—渗透水出口；4—原水流向；5—渗透水流向；6—保护层；7—组件与外壳间的密封；8—收集渗透水的多孔管；9—隔网；10—膜；11—渗透水的收集系统；12—膜；13—隔网；14—连结两层膜的缝线

在实际应用中，通常是把几个膜元件的中心管密封串联起来，再安装到压力容器中，组成一个单元。

371　中空纤维式膜组件的结构怎样？

中空纤维式膜是一种极细的空心膜管，它本身不需要支撑材料就可以耐很高的压力。它实际上是一根厚壁的环柱体，纤维的外径有的细如人发，约为50～200μm，内径为25～42μm。其特点是具有在高压下不产生形变的强度。

中空纤维膜组件的组装是把大量（有时是几十万或更多）的中

空纤维膜，如图 3-4-10 那样弯成 U 形而装入圆筒型耐压容器内。纤维束的开口端用环氧树脂浇铸成管板。纤维束的中心轴部安装一根原料液分布管，使原液径向均匀流过纤维束。纤维束的外部包以网布使纤维束固定并促进原液的湍流状态。淡水透过纤维的管壁后，沿纤维的中空内腔，经管板放出；被浓缩了的原水则在容器的另一端排掉。

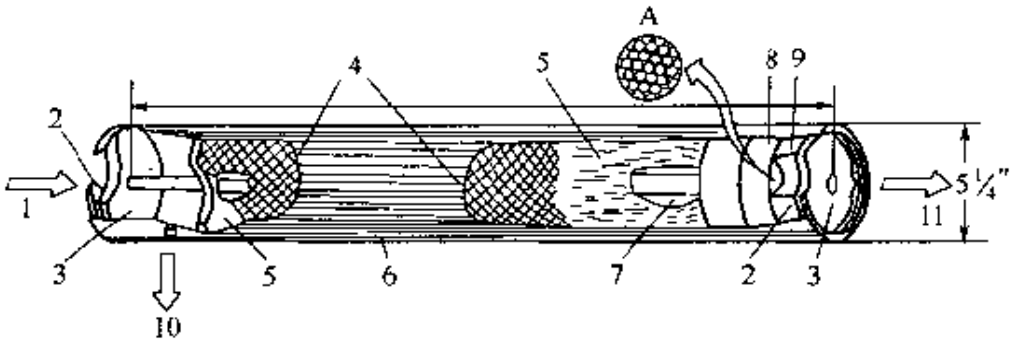


图 3-4-10　中空纤维式膜组件结构

1—原水进口；2　O 环密封；3—端板；4—流动网格；5—中空纤维膜；
6—壳；7—原水分布管；8—环氧树脂管板；9—支撑管；
10—浓缩水出口；11—透过水出口；
A 为中空纤维膜放大断面图

中空纤维式装置的主要优点是：单位体积内的有效膜表面积比率高，故可采用透水率较低而物理化学稳定性好的尼龙中空纤维。该膜不需要支撑材料，寿命可达 5 年。

372　各类膜分离器有哪些优缺点？其特性如何？

各类膜分离器的优缺点如下表。

类型	优　点	缺　点	使用状况
板框式	结构紧凑、简单、牢固、能承受高压； 可使用强度较高的平板膜； 性能稳定，工艺简便	装置成本高，流动状态不良，浓差极化严重； 易堵塞，不易清洗，膜的堆积密度较小	适于小容量规模； 已商业化
管式	膜容易清洗和更换； 原水流动状态好，压力损失较小，耐较高压力； 能处理含有悬浮物的、黏度高的，或者能析出固体等易堵塞流水通道的溶液体系	装置成本高； 管口密封较困难； 膜的堆积密度小	适于中小容量规模； 已商业化

续表

类型	优　点	缺　点	使用状况
螺旋卷式	膜堆积密度大，结构紧凑； 可使用强度好的平板膜； 价格低廉	制作工艺和技术较复杂，密封较困难； 易堵塞，不易清洗； 不宜在高压下操作	适于大容量规模； 已商业化
中空纤维式	膜的堆积密度大； 不需外加支撑材料； 浓差极化可忽略； 价格低廉	制作工艺和技术复杂； 易堵塞，清洗不易	适于大容量规模； 已商业化

它们的特性比较如下表。

类　型	膜堆积密度 /(m^2/m^3)	操作压力高限 /MPa	透水率① /[$m^3/(m^2 \cdot d)$]	单位体积的透水量 /[$m^3/(m^3 \cdot d)$]
板框式	492	5.49	1.00	502
内压管式	328	5.49	1.00	335
外压管式	328	6.86	0.61	220
螺旋卷式	656	5.49	1.00	670
中空纤维式	9180	2.64	0.073	670

① 指以 5000×10^{-6} NaCl 溶液作为原液，脱盐率达 92%～96%时的透水率。

373　对反渗透膜性能有何要求？醋酸纤维素膜与聚酰胺复合膜的性能如何？

反渗透分离过程的主要关键是要求膜具有较高的透水速度和脱盐性能，故对反渗透膜要求具有下列性能：

（1）单位膜面积的透水速度快、脱盐率高；

（2）机械强度好，压密实作用小；

（3）化学稳定性好，能耐酸碱和微生物的侵袭；

（4）使用寿命长，性能衰减小。

醋酸纤维素膜是最先发展起来的反渗透膜，但由于醋酸纤维素是一种酯类，易发生水解，水解的结果将降低乙酰基的含量，使膜的性能受到损害，同时膜也更易受到生物的侵袭。近年发展起来的聚酰胺复合膜，由于各种性能优越，已逐渐取代醋酸纤维素膜，该两种膜的性能对比如下表：

序号	聚酰胺复合膜	醋酸纤维膜
(1)	化学稳定性好，不会发生水解，脱盐率基本不变	不可避免地会发生水解，脱盐率会衰减
(2)	脱盐率高，>98%	脱盐率95%，逐年衰减
(3)	生物稳定性好，不受微生物侵袭	易受微生物侵袭
(4)	有较宽的pH值适用范围，可在pH值3～11中运行	只能在pH值4～7范围内运行
(5)	膜在运行中不会被压紧，因此产水量不随使用时间而改变	在运行中膜会被压紧，因而产水量会不断下降
(6)	膜透水速度高、故工作压力低，耗电量也较低	膜透水速度较小，要求工作压力高，耗电量也较高
(7)	使用寿命较长，一般使用五年以上性能仍基本不变	使用寿命一般仅三年
(8)	抗氯性较差，价格较高	价格较便宜

374 为什么反渗透膜的性能会下降？如何处理？

反渗透膜的性能下降主要原因是由于膜表面受到了污染，如表面结垢，膜面堵塞；或是膜本身的物理化学变化而引起的。物理变化主要是由于压实效应引起膜的透水率下降；化学变化主要是由于pH值的波动而引起的，如使醋酸纤维素膜水解；游离氯也会使芳香聚酰胺膜性能恶化。反渗透膜污染堵塞的主要原因是由于膜面沉积和微生物的滋长而引起的。其中微生物不仅堵塞膜，并对醋酸纤维素有侵蚀损害作用。因此，在膜内必须保持一定的余氯量，但是余氯太高，又会引起膜性能下降，故在醋酸纤素膜前保持余氯0.1～0.5mg/L，而在芳香聚酰胺膜前余氯要小于0.1mg/L。

反渗透膜的清洗处理是一个细致而又烦杂的工作，目前国产膜的质量还不够高，多次清洗膜易损坏。为了减轻清洗工作，必须要搞好前处理，严格把好水质关，否则，“后患无穷”。

处理的方法是：定期用0.1%甲醛溶液，或100mg/L质量浓度的新洁尔灭循环清洗处理至少1h。已经污染的膜要用2%柠檬酸铵溶液（pH=4～8）进行清洗，或用亚硫酸氢钠、六偏磷酸钠、稀盐酸等来防止锰、铁及碳酸盐的结垢。有时也用酶洗涤剂对有机

物进行清洗。清洗压力控制在 0.34～0.98MPa（3.5～10kgf/cm²），清洗流速为原来水处理流速的 2～3 倍。

375 反渗透技术有什么用途？

反渗透技术通常用于海水、苦咸水的淡化；水的软化处理；废水处理以及食品、医药工业的提纯、浓缩、分离等方面。此外，反渗透技术应用于预除盐处理也取得较好的效果，能够使离子交换树脂的负荷减轻 90%以上，树脂的再生剂用量也可减少 90%。因此，不仅节约费用，而且还有利于环境保护。反渗透技术还可用于除去水中的微粒、有机物质、胶体物质，对减轻离子交换树脂的污染，延长使用寿命都有着良好的作用。

376 反渗透的透水率、除盐率、回收水率如何计算？

$$\text{透水率}=\frac{V}{F}\quad \text{L/(m}^2\cdot\text{h)}$$

式中 V——单位时间内渗透的水量，L/h；

F——单位膜面积，m^2。

$$\text{除盐率}=\frac{E_i-E_o}{E_i}\times 100\%$$

式中 E_i——反渗透处理进水中的含盐量，mg/L；

E_o——反渗透处理出水中的含盐量，mg/L。

$$\text{回收水率}=\frac{V_o}{V_i}\times 100\%$$

式中 V_o——渗透出水水量，L；

V_i——进水量，L。

377 反渗透处理有哪些组合形式？

反渗透模件的组合形式大致有下列几种。

（1）多级串联处理 当水源水中含盐量较高，同时对反渗透出水水质要求又比较高时，可采用多级串联方式，即将第一级出水作为第二级进水。在这种处理方式下，第二级的排水（浓水）水质远较第一级的进水水质为优，可与第一级的进水混合作为进水。在几级串联型式中，需有中间贮水箱及高压泵

等，如图 3-4-11 所示。

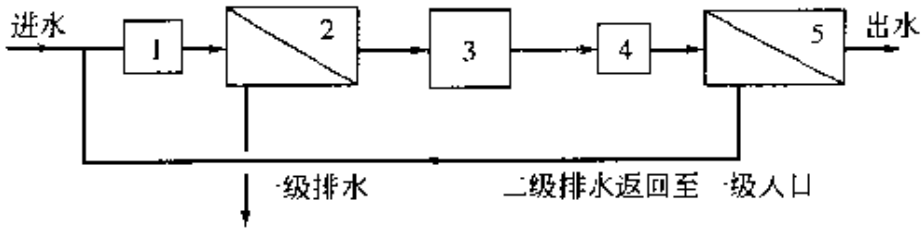


图 3-4-11　多级串联型式

1—高压泵；2——级反渗透装置；3—中间贮水箱；
4　高压泵；5—二级反渗透装置

（2）多段组合处理　当水源水中含盐量不太高时，为了获得较高的回收水率，可采用如图 3-4-12 所示的多段组合型式。第一段的浓水进入第二段作为进水，然后将两段的渗透出水混合作为产品水。必要时，可再增加一段，即将第二段浓水作为第三段的进水，第三段渗透出水与前两段出水汇合成产品水（即淡水）。

这种方式的优点是可降低水耗，提高回收水率。

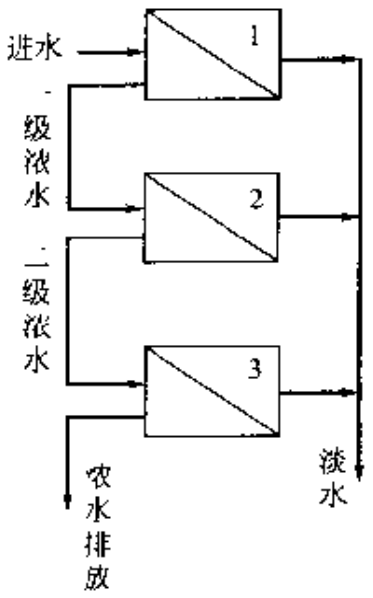


图 3-4-12　多段组合处理

1　第一段反渗透装置；
2—第二段反渗透装置；
3—第三段反渗透装置

（3）带中间升压泵的三段连接方式　在水源特别缺乏的地区，为了尽可能节约用水，即使水源水质较差，含盐较高，也希望获得较高的回收（水）率。此时，在多段组合的各段之间（由于每一级进水的含盐量都很高），必须设置高压泵，以保证压差达到要求值。这种连接方式原理如图 3-4-13（见 344 页）第一、二段的浓水作为下一段的进水而进一步处理，只有第三段的浓水排出系统。同时，各段反渗透设备的除盐量要逐段递增，才能保证最终出水水质。

378　各种反渗透膜的主要功能有什么不同？

各种反渗透膜其主要功能比较如下。

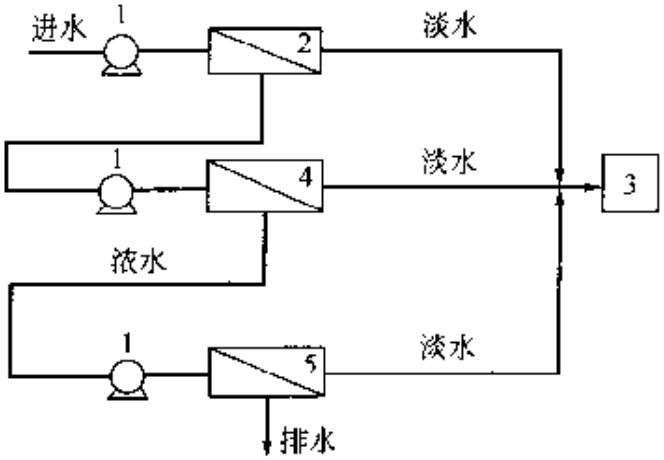


图 3-4-13　带有中间升压泵的三段连接系统

1—高压泵；2—第一段反渗透装置；3—淡水箱；
4- 第二段反渗透装置；5—第三段反渗透装置

各种反渗透膜件主要功能的比较[327]

模件型式 / 项　目	涡　卷　型		中空纤维型	管状膜型
	醋酸纤维膜	合成膜		
盐去除率	中	高	中～高	中
透过水量	中	中～大	大	小
回收水率	大	大	中	低
耐久性	良	良	中	良
耐热性	中	良	中	中
耐压性	中	良	中	中
耐药品性	中	良	中	中
预处理	普通	普通	复杂	简易
耐故障性	好	好	—	好
制水价格	低	低	低	高

379　反渗透膜受到污染的原因是什么？有什么特征？

反渗透膜受到污染的主要原因是由金属氧化物沉积引起的，常见的金属氧化物有氢氧化铁、氢氧化铝和氧化锰等。还有微生物黏泥，水中的悬浮物与胶体物质在膜表面的沉积，以及碳氢化合物和硅酮基的油及酯类覆盖膜面等。其特性如下表所示：

反渗透组件污染的一般特征

污染原因	一般特征		
	盐透过率	组件的压损	产水量
金属氧化物 (Fe、Mn、Ni、Cu等氧化物)	增加速度快① ≥2倍	增加速度快① ≥2倍	急速降低① 20%～25%
钙沉淀物 ($CaCO_3$、$CaSO_4$)	增加 10%～25%	增加 10%～25%	稍微减少 <10%
胶状物质 (如胶体硅等)	缓慢增加② ≥2倍	缓慢增加② ≥2倍	缓慢减少② ≥50%
混合胶体 (Fe+有机物等)	增加速度快① 2～4倍	缓慢增加② ≥2倍	缓慢减少② ≥50%
细菌③	增加 ≥2倍	增加 ≥2倍	减少 ≥50%

① 24h内发生；② 2～3周以上发生；③ 在无甲醛保护液情况下。

380 反渗透-离子交换联合除盐处理有何优点？

反渗透-离子交换联合处理方式，可以降低水源水质多变所带来的影响，并可减少再生频率，从而提高了水处理装置运行的灵活性和可靠性，在水源的选择上也有了更大的余地。例如，原水含盐量从1000mg/L增至1500mg/L，反渗透设备在工作压力2.75MPa，出力仅降低1%～2%；而离子交换设备遇此情况，必然会严重地降低交换容量。这说明，反渗透设备的出力与水质（原水含盐量）的关系不大，只同工作压力差及水质成分所决定的渗透压差成比例变化。这是反渗透工艺的一个很大的优点。

在电厂锅炉补给水处理上使用反渗透-离子交换联合系统，有不少优点。

(1) 离子交换设备的再生剂用量可以降低90%～95%，再生剂贮放场地可以大大减小。

(2) 由于反渗透装置可将原水含盐量降低到原来的$1/10$～$1/20$，因此除盐设备的盐泄漏可以减小，运行周期可以延长。

(3) 原来不适宜采用离子交换除盐的水（如含盐高的原水、经

处理过的城市污水、受酸性污染的水等）都可能用来作为除盐设备的进水。

（4）除盐系统可以简化，有的水源甚至在反渗透后用混床处理就可满足锅炉用水的要求。

（5）原水中用一般处理方法不易除去的物质如胶体物质、有机物、铁离子、二氧化硅等也可被除去。

（6）延长了离子交换树脂的使用寿命。

（7）通常混床出水电导率为 0.1μS/cm，反渗透-除盐联合系统约为 0.07μS/cm。

（8）提高了对水源水质变化的适应性和出水质量的可靠性。

（9）由于除盐设备排放的废液量减少了，有利于环境保护。

381　以反渗透-离子交换生产除盐水其经济效益如何?

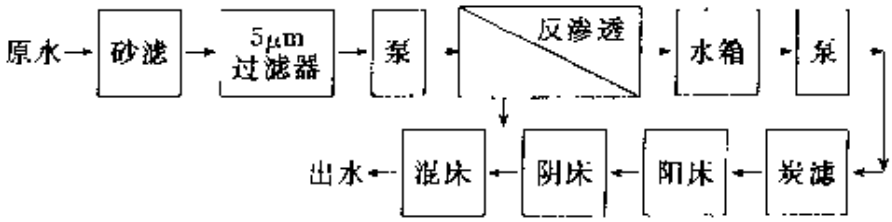
20 世纪 60 年代发展起来的反渗透膜技术已为世人所瞩目，但由于价格昂贵国内少有问津。随着反渗透技术的发展和相对价格的下降，因此，80 年代后应用者已愈来愈多，尤其是聚酰胺复合膜以其优异的性能使过去的醋酸纤维素膜相比之下大为逊色。在原水含盐量较高的地区，以反渗透作前处理除盐，虽然一次性投资大一些，但该装置在节约酸、碱、水、电等方面的经济效益是十分诱人的，投资很快就可收回。尤其是保护水环境方面，它是离于交换法所不能比拟的。离子交换床排出的酸、碱等废液，常使江河污染，鱼虾人畜遭殃。因此，根据各地不同的水质情况，选择合理的水处理方式，不但会收到很好的经济效益，且有利于环境保护造福于民。

现以某大型化肥厂对除盐水系统的改造为例，来说明以反渗透作除盐水预处理的经济效益。

该厂以地下水为水源，井水含盐量高达 900mg/L 左右，过去以电渗析作为离子交换床的预处理，但仍然不能保证除盐水的安全生产，酸、碱消耗量十分惊人。在 1995 年初着手进行以反渗透作为除盐水预处理的设计，以代替过去使用的电渗析，改造前后的流程示意图见图 3-4-14。



(a) 改造前流程



(b) 改造后流程

图 3-4-14　改造前后流程对比

增加的反渗透预除盐系统采用的两套 7-4 排列螺旋卷式膜组件结构的反渗透装置，处理水量为 120t/h。反渗透装置费用为 380 万元，加以其他配套装置如细砂过滤器、水箱、配电系统等总投资约 500 万元。该套系统在 1995 年 12 月即投入生产，装置运行正常，出水能力、除盐率和耗水率均能达到设计保证值，其出水水质如下表。

原水水质和经反渗透后出水水质

分析项目	原水水质	出水水质	
		设计值	实际值
pH	8.3		6.6
Na^+/(mg/L)	248	10	2
Ca^{2+}/(mg/L)	10		0
Mg^{2+}/(mg/L)	6		0
Cl^-/(mg/L)	126	10	2.32
SO_4^{2-}/(mg/L)	120	1.5	0
HCO_3^-/(mg/L)	350	8	6.1
SiO_2/(mg/L)	12		0.028
电导率/(μS/cm)	1050		17

反渗透系统投用后所取得的经济效益是十分可观的，现将投产前后各项指标和节约价值列表如下：

流程改造前后指标对比

项　　目	实际发生		年节约量	年节约价值/万元
	1995年	1996年		
硫酸	2018t	228t	1790t	80.55
烧碱	1962t	236t	1726t	138.08
原料运输费	56万元/年	12万元/年		44.0
树脂	101.75万元/年	14.54万元/年		87.21
电渗析维修费	35万元/年	-		35.0
电渗析人工费	15万元/年	-		15.0
节水			470000t	94.0
节电			96万度	45.12
总节约价值				538.96

从上表中可以看出，反渗透装置投用后，年节约价值十分显著，其投资费用不到一年即可收回。但这种情况是发生在高含盐量水的系统，究竟采用反渗透-离子交换处理水含盐量分界点以多少为合适，美国DOW化学公司经过不断地研究，从1978年的325mg/L降低到1982年的130mg/L，以后又降低到75mg/L。值得注意的是，DOW公司不仅制造反渗透膜，同时也生产离子交换树脂。至于我们采用反渗透-离子交换系统的经济效益如何，还要根据我们的水质情况，以及国内的原材料、电力、水等价格进行详细计算和比较后才能作出决策。

382　反渗透装置的运行要注意哪些事项?

反渗透装置的运行注意事项如下。

(1) 醋酸纤维素膜的水解易造成反渗透装置的性能恶化，为此，必须严格控制水的pH值，给水的pH值必须维持在5～6，而复合膜可以在给水pH3～pH11范围下运行。

(2) 当注入的次氯酸钠量不足而使给水中的游离氯不能测出时，在反渗透装置的膜组件上会有黏泥发生，反渗透装置的压差将增大。但对于复合膜和聚酰胺膜来讲，必须严格控制进入膜组件的游离氯量，超过规定值将导致膜的氧化分解。

(3) 若把FI值超标的水供给反渗透装置作为给水，在膜组件

的表面将附着污垢，这样必须通过清洗来去除污垢。

（4）过量的给水流量将使膜组件提前劣化，因此给水流量不能超过设计标准值。此外浓水的流量应尽量避免小于设计标准值，在浓水流量过小的条件下运转，会使反渗透装置的压力容器内发生不均匀的流动及由于过分浓缩而在膜组件上析出污垢。

（5）反渗透装置的高压泵即使有极短的时间中断运转都可能使装置发生故障。

（6）反渗透装置入口压力要保持有适当的裕度，否则由于没有适当的压实，除盐率会降低。

（7）反渗透装置停止时应用低压给水置换反渗透装置内的水。这是为了防止在停运时二氧化硅的析出（在冬季时水温下降之故）。

（8）需经常注意精密过滤器的压差。出现压差急剧上升的原因主要是精密过滤器浑浊度的泄漏。相反，出现压差急剧下降的原因是精密过滤器元件的破损，以及精密过滤器元件紧固螺丝松动等。

（9）当反渗透装置入口和出口的压差超过标准时，说明膜面已受污染或者是给水流量在设计值以上。如经流量调整尚不能解决压差问题，则应对膜面进行清洗。

（10）在夏天给水温度高，产水的流量就过多，有时不得不降低操作压力，这样做将导致产水水质下降。为了防止这点，可减少膜组件的根数，而操作压力仍保持较高的水平。

383 为什么反渗透装置的产水量会下降？如何处理？

反渗透装置的产水量会下降，要查明原因，制订处理对策。根据运行经验，产水量下降原因主要有以下几点。

序号	原　因	对　策
1	膜组件数量的减少	按照设计的膜组件数量运行
2	低压力运转	按照设计的基准压力运行
3	发生膜组件的压密	当在大大超过基准压力的条件下运转就会发生膜组件的压密，必须更换膜组件
4	运转温度的降低	按照设计温度 25℃运行

续表

序号	原　因	对　策
5	在较高的回收率条件下运转	当在75%以上回收率条件下运转时，浓水的水量就减少，这样膜组件内水的浓缩倍率就上升，结果造成给水水质严重下降。由于这种给水的渗透压上升，导致透过水量的减少。严重时，将在膜面上析出盐垢。必须按设计回收率产水
6	金属氧化物和污浊物附着在膜面上	每天进行低压冲洗
7	在运转中反渗透装置压差上升	改进预处理装置的运行管理，改善进反渗透水质 用药品清洗膜组件
8	油分的混入	注意油绝对不能进入给水 更换膜组件

384　如何对反渗透膜进行化学清洗？

膜清洗频率与预处理措施的完善程度是紧密相关的。预处理越完善，清洗间隔越长；反之，预处理越简单，清洗频率越高。一般膜清洗是遵循“10%法则”——当校正过的淡水流量与最初200h运行（压紧发生之后）的流量相比，降低了10%和（或）观察到压差上升了10%～20%就需进行清洗。尽可能在脱盐率下降显示出来以前采取措施。正规安排的保护性维护清洗不足以保护反渗透系统，譬如，由于预处理设备运行不正常，进水条件在短时间内就会发生变化。

反冲洗对于防止大颗粒对某些型式反渗透膜件的堵塞是有效的。但不是所有的污染都可通过简单的反冲洗就能清除掉，还需要有周期的化学清洗。化学清洗除需增加药剂和人工费用外，还有污染问题，所以也不可过于频繁，每月不应超过1～2次，每次清洗时间约1～2h。

化学清洗系统通常包括一台化学混合箱和与之相配的泵、混合器、加热器等。化学清洗常是根据运行经验来决定（可以根据每列设备压降读数与运行时间的关系曲线，或是依据产水量、淡水水质和膜的压降等）。

化学清洗所用的药剂和方法，需根据污染源来决定。下表可供参考，但更应重视积累和应用本单位的经验。为了保证效果，在化

学清洗前要进行冲洗。冲洗前先降压，再用2～3倍正常流速的进水冲洗膜，靠流体的搅动作用将污物从膜面剥离并冲走。然后针对污染特征，选择清洗液对膜进行化学清洗。为了保护反渗透膜件，液温最好不超过35℃。

系统若停用5天以上，最好用甲醛冲洗后再投用。如果系统停用两周或更长一些时间，需用0.25%甲醛浸泡，以防微生物在膜中生长。化学药剂最后每周更换一次。

针对各种污染物采用的清洗剂

污染原因	清洗液	药剂用量(L/台膜件)	清洗方法
金属氧化物沉淀	(1) 0.2mol/L柠檬酸铵，pH 4～5 (2) 4%亚硫酸氢钠	≈100	(1)维持0.4MPa压力，15L/mm流量，循环2h (2) 保持1MPa压力，水冲洗30min (3) 正常运行
钙沉淀物	(1) 盐酸，pH=4 (2) 柠檬酸，pH=4	≈100	(1) 维持0.4MPa压力，15L/min流量，循环2h (2) 保持1MPa压力，水冲洗30min (3) 正常运行
有机物、胶体物	(1) 柠檬酸，pH=4 (2) 盐酸，pH=2 (3) 氢氧化钠，pH=12 (4) 中性洗净剂	≈200	(1) 维持0.4MPa压力，40L/min流量，循环2h (2) 保持1MPa压力，水冲洗30min (3) 正常运行
细菌及黏泥	1%甲醛溶液	≈100	(1) 维持0.4MPa压力，15L/min流量，循环2h (2) 保持1MPa压力，水冲洗30min (3) 正常运行

385 如何防止反渗透系统出现浓差极化现象？

反渗透膜表面上被溶质或其他被截留物质形成浓差极化时，膜的传递性能以至分离性能均将迅速衰减。为了减小浓差极化的影响，除工艺设计要充分考虑外，具体运行中也可采取一些改善对策，以防止反渗透系统出现浓差极化现象。具体作法如下。

(1) 增高流速　首先可以采用化工上常用的增加骚动的措施。也就是说设法加大流体流过膜面的线速度，其中也包括采用层流薄层流道法。

(2) 填料法　如将 29～100μm 的小球放入被处理的液体中，令其共同流经反渗透器以减小膜边界层的厚度而增大透过速度。小球的材质可用玻璃或甲基丙烯酸甲酯制作。此外，对管形反渗透器来说，也可向进料液中填加微形海绵球，不过，对板式和卷式组件而言，加填料的方法是不适宜的，主要是因有将流道堵塞的危险。

(3) 装设湍流促进器　所谓湍流促进器一般是指可强化流态的多种障碍物。例如对管式组件而言，内部可安装螺旋挡板。对板式或卷式的膜组件可内衬网栅等物以促进湍流。实验表明，这些湍流促进器的效果很好。

(4) 脉冲法　主要作法是在流程中增设一脉冲发生装置，使液流在脉冲条件下通过膜分离装置。脉冲的振幅和频率不同，其效果也不一样。对流速而言，振幅越大或频率越高，透过速度也越大。虽然动力增加了 25%～50%，但是，换来了透过速度提高了 70% 的得益，有相当的经济价值。

(5) 搅拌法　是目前应用广泛，特别是在测试装置中必定使用的一种方法。其主要作法是在膜面附近增设搅拌器，也可以把装置放在磁力搅拌器上回转使用。试验表明，传质系数与搅拌器的转数成直线关系。

(6) 加分散阻垢剂　为防止反渗透膜结垢，某厂过去曾以加硫酸或盐酸来调节 pH 值，但因酸系统的腐蚀和泄漏使操作者很感麻烦。现在改用一种 PTP-0100 的高效阻垢分散剂可免去加酸的麻烦，并使系统运行正常。

386　为什么说给水处理对反渗透的安全运行至关重要？

因为给水的原水　地表水或地下水，都含一些可溶或不可溶的有机和无机物质，虽然反渗透是能够截留这些物质的。但是，反渗透主要是用于除盐，如果反渗透的给水处理无完善，那么给水中有过高的浑浊度、悬浮物质、硬度等，会淤积在反渗透膜的表面

上，使表面结垢，堵塞水流通道，造成膜组件压差增加，产水量下降，除盐率降低，危害反渗透器的使用寿命。

因此，要规定反渗透的给水水质标准，不合标准的给水不可向反渗透装置供水。反渗透给水水质标准如下表。

项目 \ 常用膜的品种与型式	卷式（醋酸纤维素膜）	中空纤维式（芳香聚酰胺）	卷式（FT-30 复合膜）
浑浊度			0.5FTU
污染指数(FI)	<4	<3	<5
水温	15～35℃	15～35℃	<45℃
pH 值	5～6	3～11	2～11
$(COD)_{Mn}$(高锰酸钾法以 O_2 计)	<1.5mg/L	<1.5mg/L	<1.5mg/L
游离氯(以 Cl_2 计)	0.2～1mg/L	<0.1mg/L	<0.1mg/L
含铁量(以 Fe 计)	<0.05mg/L	<0.05mg/L	<0.05mg/L

由于反渗透膜的材质不同，使其有不同的化学稳定性。所以，对给水中 pH、余氯、水温、微生物以及其他化学物质等的忍耐程度也有很大差异。给水的浑浊度、悬浮物质和胶体物质的含量要有严格控制。污染指数 FI 的指标不要超出，FI 越低越好。总之，严格按上表给水水质标准执行，对反渗透装置的运行是有好处的。

387 超过滤与反渗透有何区别？

超过滤（UF）是利用一种压力活性膜，除去水中的胶体、颗粒和相对分子质量高的物质。与反渗透一样，受压溶液是在压力下通过膜（图 3-4-15），膜的设计可使一定大小的分子被除去。

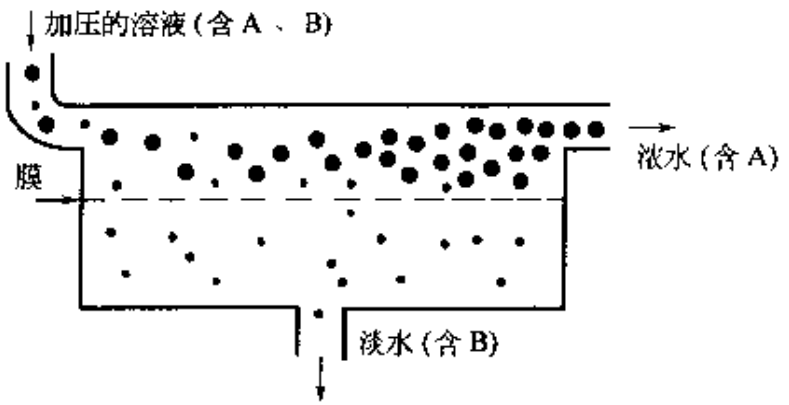


图 3-4-15 超过滤的原理示意图

超过滤膜的孔结构与反渗透膜不同之处在于：它可使盐和其他电解质通过，而胶体与相对分子质量大的物质通不过（图 3-4-16）。

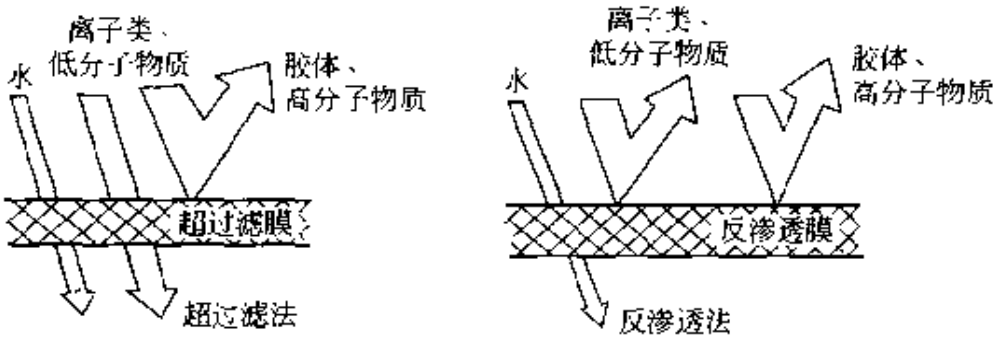


图 3-4-16　超过滤膜与反渗透膜作用上的差别

由于胶体物质和相对分子质量大的物质的渗透压力低，所以，超过滤所需的压力比反渗透低，在一般情况下所用压力为 0.07～0.7MPa，最高不超过 1.05MPa。超过滤的压力虽低，所用的膜却比较厚实。以中空纤维膜为例，反渗透用的膜不能反洗，而超过滤用的膜则可以通过反洗来有效地清洗膜面，以保持其高流速。

其次，超过滤与反渗透膜件特性上也有区别，表现在膜材质、运行参数等有所不同，主要特性比较如下表：

反渗透和超过滤膜件特性对比

项　　目	反　渗　透	超　过　滤
膜材	醋酸纤维素，芳香聚酰胺	纤维素或非纤维素聚合物
外壳结构	玻璃纤维或环氧树里钢	聚砜
最高运行温度/℃	30	45
最高运行压力/MPa	淡水　2.8 海水　5.6	0.7 1.05
名义上相对分子质量的界限	200	80000
pH 值	4～11	1.5～13

超过滤膜是由纤维素或非纤维素的聚合物注塑于多孔的支承材料上所构成，孔径大小约 0.002～0.02μm。膜件主要型式为中空

纤维型和涡卷型，也有采用管状的。中空纤维型超过滤装置的运行示图如图 3-4-17。

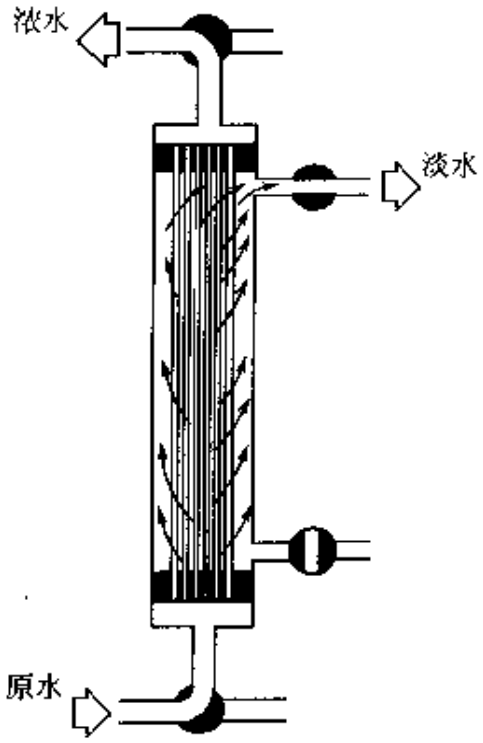


图 3-4-17　中空纤维型超过滤装置的运行

388　超滤膜污染后如何清洗？

超滤膜的污染是指水中的微粒、胶体粒子或溶质分子与膜发生物化相互作用或因浓度极化使某些溶质在膜的表面的浓度超过溶解度，以及机械作用而引起在膜表面或膜孔内吸附、沉积而造成膜孔径变小或堵塞，使膜产生透过流量与分离特性的不可逆变化现象。

超滤膜被污染需要清洗时，必须了解污染物的性质和组成，然后筛选有效的清洗方法。一般采用物理方法、化学方法或物理与化学同时使用的方法。

物理清洗法最常用的是水力冲洗。水力冲洗又分等压冲洗（即膜的两侧无压差）和压差反冲洗（即膜的两侧有压力差）。一般来说，压差冲洗比等压冲洗效果好。

化学清洗法是采用化学清洗剂清洗。因污染的性质而异可分为：酸性清洗剂、碱性清洗剂、氧化性清洗剂和生物酶清洗剂等。

酸性清洗剂常用：0.1mol/L HCl、0.1mol/L 草酸、1%～3%柠檬酸、1%～3%柠檬酸铵、EDTA 等，这类清洗剂对去除 Ca^{2+}、Mg^{2+}、Fe^{3+} 等金属盐类及其氢氧化物、无机盐凝胶层是较为有效的。

碱性清洗剂主要是：0.1%～0.5% NaOH 水溶液，它对去除油脂类污染物有较好效果。

氧化性清洗剂如 1.0%～1.5% H_2O_2、0.5%～1.0% NaClO、0.05%～0.1%叠氮酸钠等，对去除有机物污染有良好效果。

生物酶制剂如 1% 胃蛋白酶、胰蛋白酶等对去除蛋白质、多

糖、油脂类的污染是有效的，清洗时温度控制在55～60℃处理效果更好，但要注意所用膜的耐温性能。

化学清洗法一定要防止对膜性能的破坏。

超滤膜的清洗步骤如下可供参考。

（1）先用清水冲洗整个超滤系统，水温最好采用膜组件所能承受的较高温度。

（2）选用合适的清洗剂进行循环清洗，清洗剂中可含EDTA或六偏磷酸钠等络合剂。

（3）用清水冲洗，去除清洗剂。

（4）在规定的条件下校核膜的透水通量，如未能达到预期数值时，重复第二步、第三步清洗过程。

（5）用0.5%的甲醛水溶液浸泡消毒并贮存。

389 什么是纳滤?

纳滤（NF）是其分离膜具有纳米级的孔径的分子级分离技术。是介于反渗透（RO）和超滤（UF）之间的膜分离装置。反渗透几乎可以截留水中所有的离子，但要求操作压力高，水通量也受到限制；而超滤能截留水中相对分子质量较大的有机物、细菌等，但对低相对分子质量物质、离子则不起截留作用；对于那些水处理要求有较高的水流量，而对某些物质（如单价盐类）的截留无严格要求的情况下，需要一种介于RO和UF之间的膜分离技术，这就是纳滤技术。

纳滤膜与其他分离膜的分离性能比较，它恰好填补了超过滤与反渗透之间的空白，它能截留透过超滤膜的那部分小相对分子质量的有机物、透析被反渗透膜所截留的无机盐。

纳滤类似于反渗透与超过滤，均属压力驱动型膜过程，但其传质机理却有所不同。一般认为，超滤膜由于孔径较大，传质过程主要为孔流形式，而反渗透膜通常属于无孔致密膜，溶解-扩散的传质机理能够满意地解释膜的截留性能。由于大部分纳滤膜为荷电型，其对无机盐的分离行为不仅受化学势控制，同时也受到电势梯度的影响。

由于无机盐能透过纳滤膜，使其渗透压远比反渗透膜的低。因此，在通量一定时，纳滤过程所需的外加压力比反渗透的低得多；而在同等压力下，纳滤的通量则比反渗透大得多。此外，纳滤能使浓缩与除盐同步进行。所以用纳滤代替反渗透时，浓缩过程可有效、快速地进行，并达到较大的浓缩倍数。

纳滤膜组件的操作压力一般为 0.7MPa 左右，最低的为 0.3MPa。它对相对分子质量大于 300 的有机溶质有 90%以上的截留能力，对盐类有中等程度以上的脱除率。

纳滤膜材料基本上和反渗透膜材料相同，主要有醋酸纤维素(CA)、醋酸纤维素-三醋酸纤维系（CA-CTA）、磺化聚砜（S-PS)、磺化聚醚砜（S-PES）和芳香族聚酰胺复合材料以及无机材料等。目前，最广泛用的为芳香族聚酰胺复合材料。

商用的纳滤膜组件多为卷式，另外还有管式和中空纤维式。

390　纳滤膜有何特点？

纳滤膜的一个很大特征是膜本体带有电荷。这是它在很低压力下具有较高除盐性能和截留相对分子质量为数百的物质，也可脱除无机盐的重要原因。

目前纳滤膜多为薄层复合膜和不对称合金膜。纳滤膜有如下特点。

（1）NF 膜主要去除直径为 1nm 左右的溶质粒子，故被命名为“纳滤膜”，截留物相对分子质量为 200～1000。

（2）NF 膜对二价或高价离子，特别是阴离子的截留率比较高，可大于 98%，而对一价离子的截留率一般低于 90%。

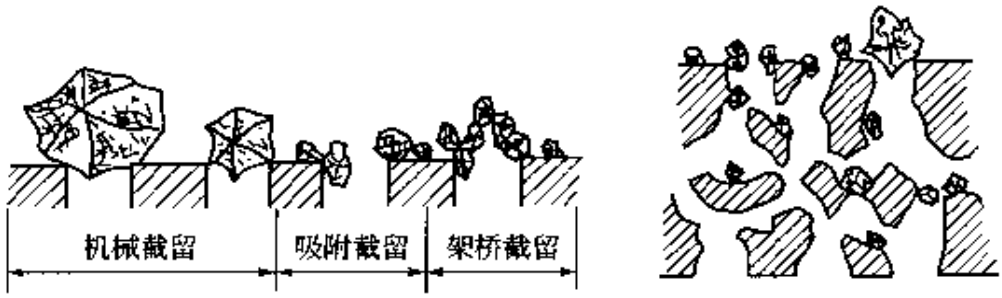
（3）NF 膜的操作压力低，一般为 0.7MPa 左右，最低的为 0.3MPa。

（4）NF 膜多数为荷电膜，因此，其截留特性不仅取决于膜孔大小，而且还有膜静电作用。

391　什么是微滤？

微滤（MF）又称为微孔过滤，它属于精密过滤，其基本原理是筛分过程。在静压差作用下滤除 0.1～10μm 的微粒，操作压力

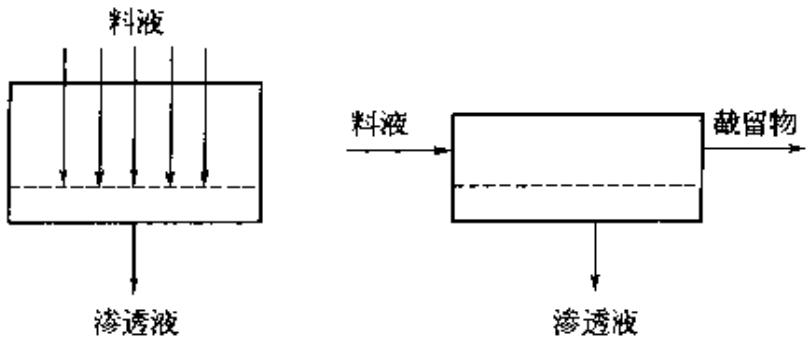
为 0.7～7kPa。除此以外，还有膜表面层的吸附截留和架桥截留，以及膜内部的网络中截留，如图 3-4-18 所示。



(a) 膜的表面层截留　　(b) 膜内部的网络中截留

图 3-4-18　微滤膜各种截留作用示意图

微滤操作有死端过滤和错流过滤两种方式如图 3-4-19 所示：



(a) 死端过滤　　(b) 错流过滤

图 3-4-19　死端过滤和错流过滤示意图

在死端过滤时，溶剂和小于膜孔的溶质在压力驱动下透过膜，大于膜孔的颗粒被截留，通常堆积在膜面上。随着操作时间的增加，膜面上堆积的颗粒越来越多，膜的渗透速率将下降，这时必须停下来清洗膜表面的污染层或更换膜。错流过滤是在压力推动下料液平行于膜面流动，与死端不同的是料液流经膜面时会把膜面上的滞留物带走，从而使污染层保持在一个较薄的水平。近年来微滤的错流操作技术发展很快，在许多领域有代替死端过滤的趋势。

目前市场上微孔滤膜的材质可分为有机和无机两大类。有机聚合物有纤维素酯、聚碳酸酯、聚砜、聚酰胺、聚丙烯等很多品种。

但由于聚合物材料固有的局限性，使得有机材质的微孔膜不能在某些极端条件下应用，而无机膜有良好的化学热稳定性，它的孔径可以被很好地控制在较窄的范围内，所以人们把注意力转向了陶瓷、金属等无机材料。

微滤膜广泛应用于制药行业的除菌过滤和电子工业用高纯水的制备。随着水资源的日趋紧张及社会生活水平的提高，苦咸水海水淡化的预处理，以及饮用水生产和城市污水处理是微滤技术的潜在市场。

392 膜分离技术在水处理方面的应用情况如何？

膜分离技术的微孔过滤（MF）、超滤（UF）、反渗透（RO）、纳滤（NF）、电渗析（ED）、膜蒸馏（MD）以及无机膜等在水处理方面的应用情况如下。

（1）微孔过滤 微孔过滤属于精密过滤，是滤除 0.1～10μm 微粒的过滤技术。在水处理的应用领域和状况见下表。

领 域	应 用 状 况
高纯水的制备	小型的无流动微滤器被广泛用于高纯水的分水系统。是目前微滤应用的第二大市场
城市污水处理	费用可低于超滤。能除去病毒。目前经济性和技术上还存在一些问题
饮用水的生产	若市场能顺利接受，其经济性优于砂滤。大规模应用将取代氯气消毒法
工业废水的处理	含油废水处理等

（2）超滤 在水处理中 UF 分离技术是分子级的，能截留水中大分子溶质。在水处理的应用情况见下表。

应 用 领 域	应 用 状 况
高纯水的制备	已广泛用于电子工业集成电路生产过程中。主要采用中空纤维组件。膜渗透流率大、能耗低。也用作医药工业用水
城市污水处理： 家庭污水处理	在旅馆、办公楼、住宅楼已被采用。在新建的 500 户以上大的住宅楼有可能实现小规模的水循环，即用超滤处理过的生活污水冲洗厕所等，可减少 40%的家庭用水

续表

应用领域	应用状况
阴沟污水处理 饮用水的生产	正处于与其他非膜技术的竞争之中。经济性和技术是主要障碍 水得率比较低，如不解决好将面临纳滤的竞争和可能的限制
工业废水的处理	造纸和含油废水处理等

（3）反渗透　最早应用的反渗透膜醋酸纤维素和芳香聚酰胺非对称膜是按照海水和苦咸水除盐要求开发的，对 NaCl 的截留率高达 99.5%以上，操作压力高达 10.5MPa，称之为高压 RO，以后开发的一些高压 RO 复合膜使海水反渗透除盐的操作压力可降至 6.5MPa。1995 年以后开发的低压 RO 膜可在 1.4～2MPa 下进行苦咸水除盐，对 NaCl 的截流率仍高达 99%以上。

RO 技术于 20 世纪 80 年代初在我国得到应用，首先用于电子工业超纯水及饮料业用水的制备，而后用于电厂用水处理，20 世纪 90 年代起在饮用水处理方面获得普及。应用情况如下表。

应用领域	应用状况
海水和苦咸水淡化	这是 RO 技术应用规模最大，技术也相对比较成熟的领域，到 1995 年 12 月，全世界 RO 淡化工厂产水量达 7293079m^3/d，占总淡化生产量的 35%，占当年世界淡化市场 88%。建于沙特阿拉伯 Jeddah 市的世界最大的海水反渗透工厂，二期工程总生产能力达到 2×56800m^3/d，RO 技术将成为 21 世纪淡化技术的主要方法
超纯水生产 纯净水生产 锅炉用水软化	反渗透装置是超纯水和纯净水生产中的主要设备。用膜法生产电子工业半导体生产用的超纯水有流程简单、水质优良等特点。美国电子工业已有 90%以上用反渗透和离子交换树脂结合的工艺生产超纯水。用反渗透膜技术代替传统的离子交换技术生产热电厂、化工厂、石化厂及其他锅炉用水是一种必然趋势。这三方面应用的前景都很好
废水处理 工业废水处理 市政废水处理	对废水排放来说，反渗透、纳滤等膜技术是极佳的选择。但工业废水成分复杂，往往给反渗透膜和操作带来困难。下面列举几个废水处理的应用例子。从电镀漂洗水中回收重金属离子和清洗水已成功用于生产，国外处理镀镍废水的反渗透装置已有几百套，规模可达 2300m^3/d，有较好应用前景。从金属加工中所形成的含油废水中回收乳化油及水，可采用 UF 或 RO 进行深度处理，在许多国家都有工业应用，装置能力可达 2500L/h，有一定应用前景。将 NF，RO 等膜技术与生物处理、絮凝、沉降等技术结合处理城市废水，可提高出水水质

（4）纳滤　纳滤膜的传递性能介于 RO 与 UF 之间。是在反

渗透膜的基础上发展起来，它的截留相对分子质量200～1000。对NaCl的截留率一般只有40%～90%，但对二价离子特别是阴离子截留率＞99%，NF膜对一价、二价阴离子截留率上的差别，使NF膜在低价和高价离子的分离方面有独特功能，所以纳滤更适用于水的净化和软化以及某些工业废水、市政废水的处理。

（5）电渗析　电渗析在水处理方面应用比较广泛，状况如下表。

领　域	应用状况
饮用及过程用水的制备 苦咸水除盐	电渗析是最早、至今仍是最重要的应用领域，1988年销售额5亿美元，占总额的1/3左右，估计以后年增长率为10%
海水除盐	因耗电量大而未广泛使用，发展趋势为高温电渗析，需研制低电阻、热稳定性好（温度＞80℃）的膜
锅炉进水等工业过程用初级纯水的制备	为电渗析第二大应用领域，1988年销售额3亿美元，估计年增长率为15%
高纯水的制备	处于实验室规模。1988年销售额0.2亿美元，估计年增长率将很大。混合床离子交换树脂电渗析过程已实现工业化，被用于半导体工业用高纯水的制备，关键在于该过程的可靠性及膜电阻，增强隔板空间的导电性及减薄膜厚是未来研究方向

（6）膜蒸馏　在水处理中主要用于海水、苦咸水淡化。

（7）无机膜　无机膜多为有孔膜，孔径在0.004～100μm之间，起微滤和纳滤的作用，在水处理中用子低浑浊度饮用水的制备，如用无机膜生产0.1～0.2NTU低浑浊度饮用水。

393　膜技术如何应用于超纯水制备？

超纯水用于电于工业、电厂高压锅炉、制药等。水的电阻率要求接近18MΩ·cm、电解质含量10～20μg/L，水的纯度为99.99999%。超纯水的制备一般包括预处理、除盐　后处理三道工序，目前使用反渗透（RO）和超过滤（UF）联合技术是纯水制备最佳系统。反渗透能除去90%以上的总溶解盐、95%以上的溶解

有机物、98%以上的微生物及胶体。超滤和微滤（MF）可将系统中产生的微粒、细菌除去，有效地保证终端用水的水质。从超纯水制造的典型的超纯水制造工艺流程（图 3-4-20）和基本流程（图 3-4-21）可见，膜技术在超纯水制造中至关重要。预处理通常是由凝聚、过滤和杀生组成，近年来以微滤、超滤来替代，大大简化预处理过程。

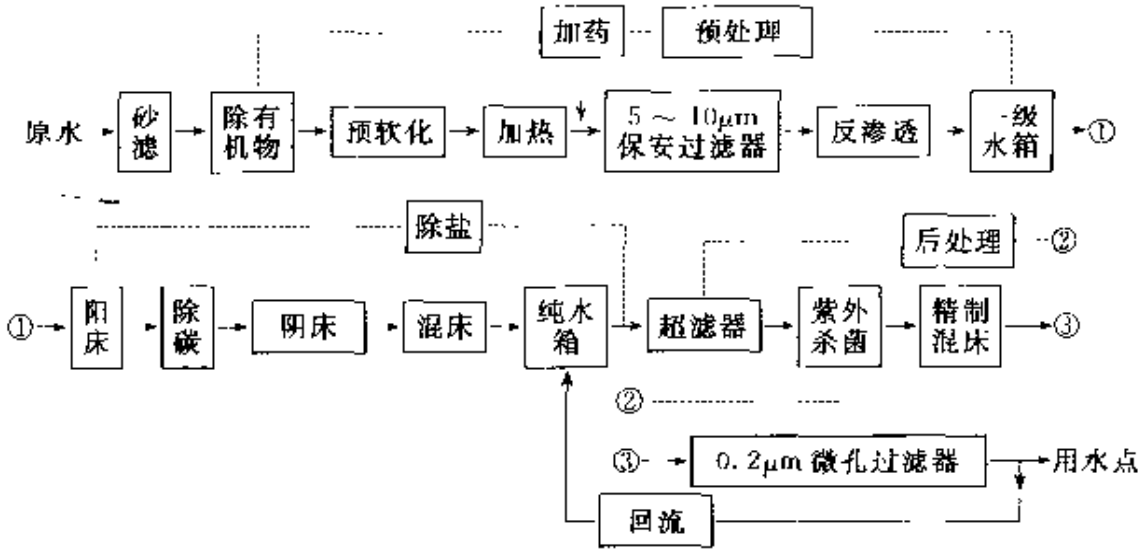


图 3-4-20　典型的超纯水制造工艺流程

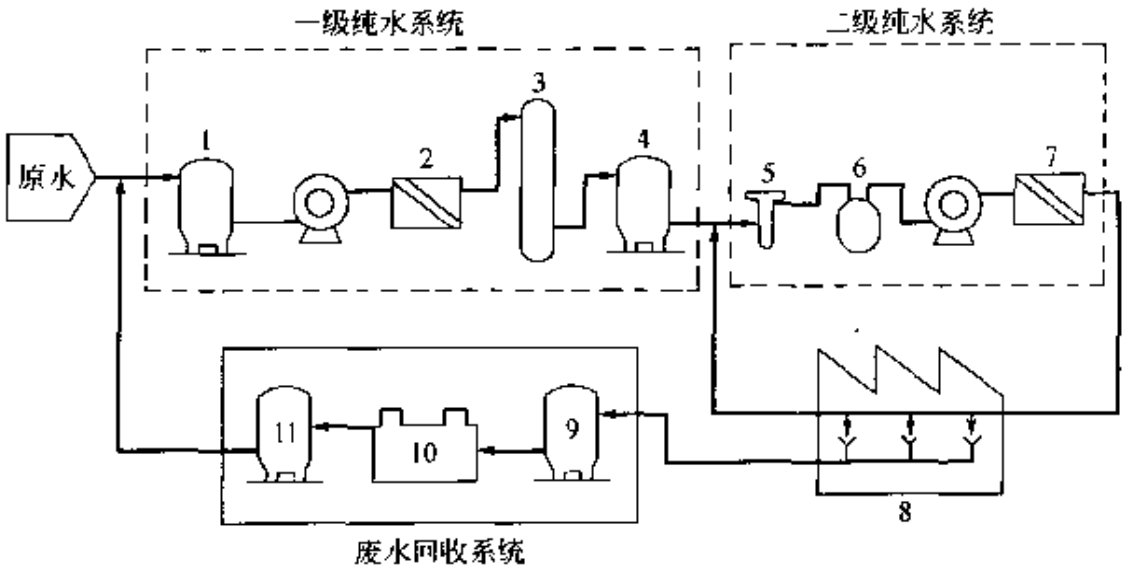


图 3-4-21　超纯水制造的基本流程

1—过滤装置；2—反渗透膜装置；3- 脱氯装置；4、9　离子交换装置；5—紫外线杀菌装置；6-- 非再生型混床离子交换器；7—UF 过滤膜装置（RO 膜装置）；8 -用水点；10—紫外线氧化装置；11—活性炭过滤装置

超纯水制造中 RO 膜以聚酰胺卷式组件为主，操作压力 1.47MPa 的低压下可除盐 99.5%以上。二级纯水时要求能脱除 TOC 的复合膜。

394　膜技术如何在高压锅炉补给水处理上应用?

膜技术，特别是反渗透技术在制备高压锅炉补给水方面国外已普遍采用，我国从 20 世纪 70 年代末开始引进国外技术，目前已建成 100t/h 以上的反渗透装置超过 50 套，应用于电厂、炼油、石化、化肥等行业的高压锅炉补给水处理，发展前景广阔。例如某发电厂超高压锅炉补给水的制备，见图 3-4-22 所示。

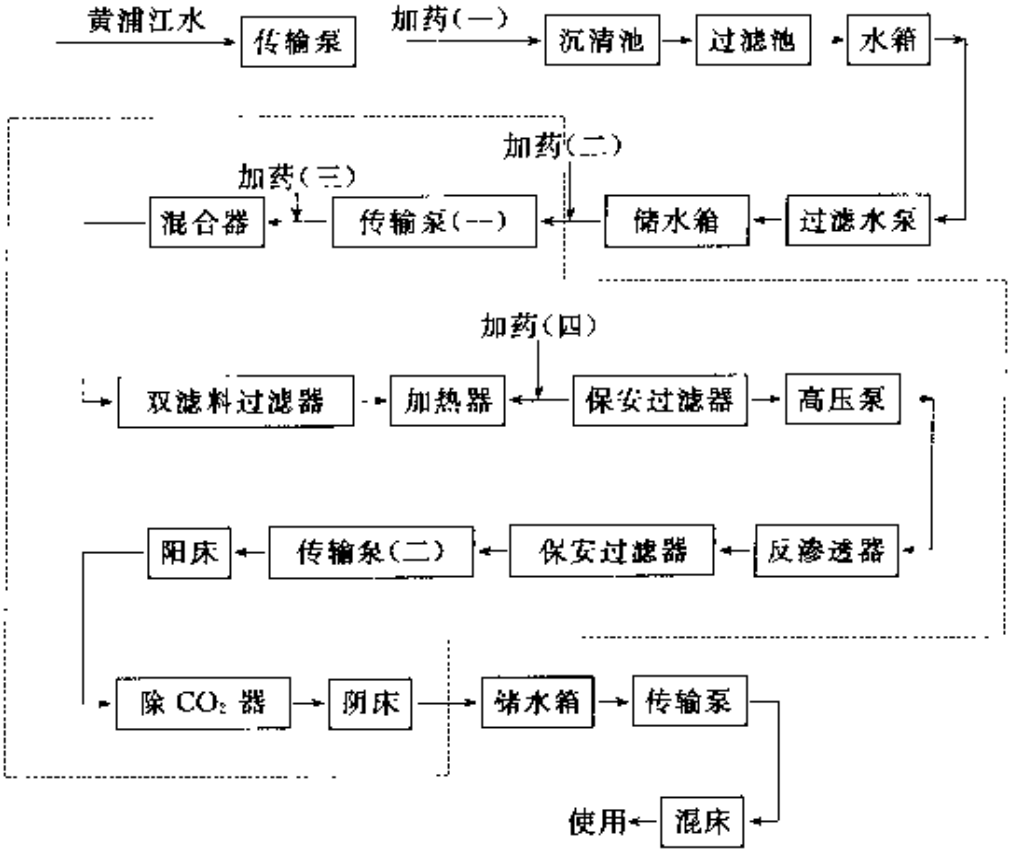


图 3-4-22　高压锅炉补给水制备工艺流程图

加药（一）为 PAC、Cl_2；加药（二）为 Cl_2；
加药（三）为 $FeCl_3$、HCl；加药（四）为 Na_2SO_3

该工艺采用 SC-4200B 型卷式膜反渗透器，产水量 50t/h，回收率 75%。原水为黄浦江水，经预处理。产水水质，阴床出口：电阻率＞100kΩ·cm，SiO_2＜20×10^{-9}，硬度－0；混合床出口：

电阻率>5MΩ·cm，SiO_2<10×10^{-9}。

395 纯净水的生产是怎样利用膜技术的?

纯净水主要是居民饮用水。纯净水的生产工艺与膜技术的应用密切相关。我国第一条纯净水制造工艺流程就是以反渗透为主，采用 RO-DI-MF 工艺，如图 3-4-23 所示。

图 3-4-24 是纯净水生产采用电渗析、离子交换、超过滤的 ED-DI-UF 联合工艺，该工艺最大优点是运行低压化。

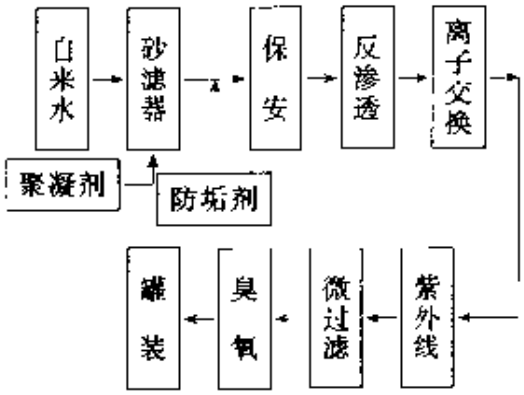


图 3-4 23 RO-DI-MF 制纯净水工艺图

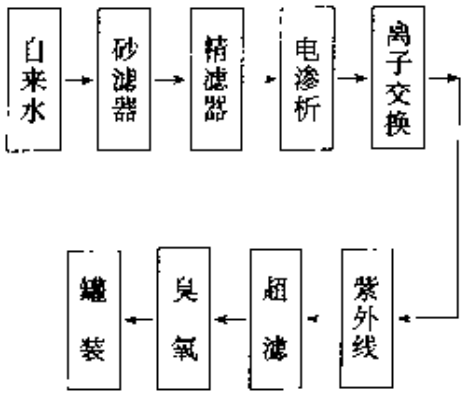


图 3-4-24 ED-DI-UF 制纯净水工艺图

图 3-4-25 是电渗析与反渗透（PA 膜）联合制纯净水工艺，其优点是对污染程度较高的地表水适应性较强。

图 3-4-26 是根据现行国家纯净水标准，以我国多数城市自来水水质为设计依据而开发的二级反渗透制取纯净水工艺，是目前比较先进的工艺，并被许多著名纯净水制造厂所采用。

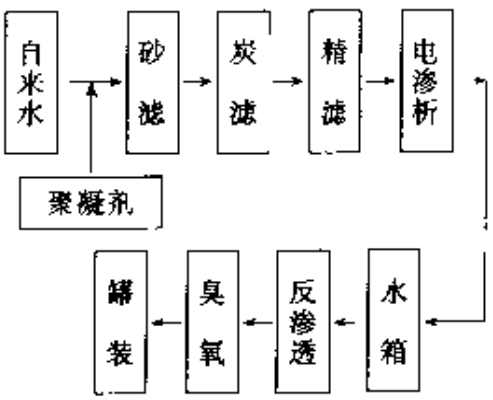


图 3-4-25 ED-RO 制纯净水工艺图

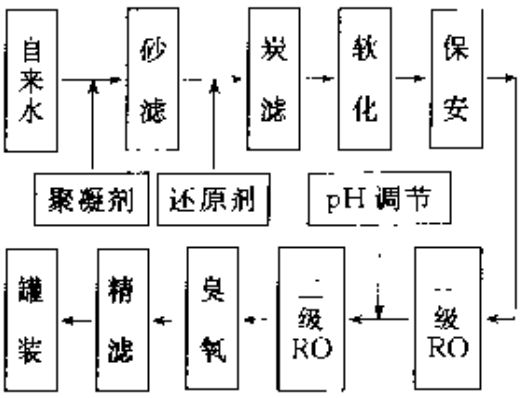


图 3-4-26 二级 RO 制纯净水工艺图

396 矿泉水的生产是如何使用膜技术的?

应用膜技术生产矿泉水主要有两种方法，一是微滤，二是超滤。微滤可以采用多级微滤膜串联工艺。但也可以用超滤和微滤组合工艺，应根据水源的水质情况而选定。微滤用于胶体、微粒含量少，浑浊度较低，水质比较稳定的矿泉水水源。而超滤适用于胶体、微粒较多的水源。MF 和 UF-MF 制矿泉水的工艺如图 3-4-27 和图 3-4-28 所示。

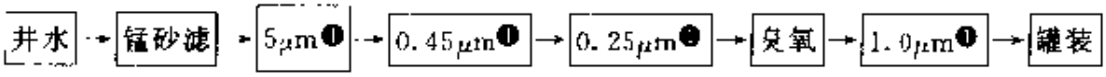


图 3-4 27 MF 制矿泉水工艺图

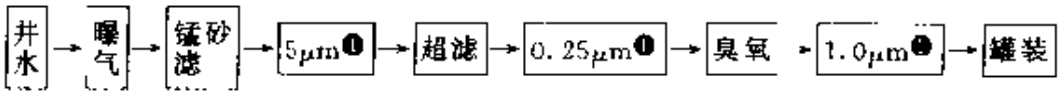


图 3-4-28 UF-MF 制矿泉水工艺图

在矿泉水制造中，膜过滤技术和细菌指标的控制是有效的关键技术之一。而膜本身品质的优劣直接影响矿泉水产品是否合格。孔径分布、孔隙率和膜的完整性是矿泉水过滤膜的关键指标。

(五) 海水、苦咸水淡化处理

397 何谓海水、苦咸水淡化?

苦咸水的含盐量高于 1000mg/L，并在 15000mg/L 以下，海水的含盐量在 40000mg/L 左右。将这种高含盐量的水，经过净化或淡化处理，去除其中大部或全部的盐分，达到生活饮用水的卫生标准或工业用水标准，这一处理过程称为海水、苦咸水淡化。

苦咸水问题在我国西部地区比较突出，那里年降雨量低，水资源十分贫乏。地表水和浅水井溶解着大量的杂质，长年干旱缺雨，水源补给水又少，使水质矿化度高，水味苦涩，危害人体健康；我

❶ 微滤器及其膜微孔的尺寸。

国有广大的干旱地区和近海以及岛屿，缺乏淡水，严重影响人们的生活用水及工农业生产。

海水淡化难度是很大的，因为含盐量很高，其中含 NaCl 为几万 mg/L 占 70%以上；其次还有硫酸盐、Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^{+} 等，达几千个 mg/L。海水水质的平均值如下表所示。

海水水质平均值[1]　　mg/L

成　分	含　量	质量分数/%	成　分	含　量
Cl^-	18980	55.17	B	4.6
Na^+	10560	30.70	F	1.4
SO_4^{2-}	2560	7.44	Rb	0.2
Mg^{2+}	1272	3.70	Al	0.16～1.9
Ca^{2-}	400	1.16	Li	0.1
K^+	380	1.10	P	0.001～0.1
HCO_3^-	142	0.41	Ba	0.03
Br^-	65	0.19	I	0.05
Sr^{2+}	13	0.04	Cu	0.001～0.09
SiO_2	6	Σ99.91	Fe	0.002～0.02
NO_3	2.5		Mn	0.001～0.01
总含盐量	34400		As	0.003～0.02

海水中盐分的组成大致如下表。

海水中主要盐分的组成[8]

盐的分子式	1kg 海水中的盐分量/g	盐分的质量分数/%
NaCl	27.213	77.758
$MgCl_2$	3.807	10.878
$MgSO_4$	1.658	4.737
$CaSO_4$	1.260	3.600
K_2SO_4	0.863	2.465
$CaCO_3$	0.123	0.345
$MgBr_2$	0.076	0.217
合　计	35.000	100.00

面对这样高浓度含盐量水进行的淡化处理，在过去一般是用蒸馏方法，而现在大都采用膜分离技术。

398　海水和苦咸水淡化有哪些主要方法？

海水、苦咸水淡化的方法主要有：电渗析法、反渗透法和蒸馏法等。据1995年12月底统计，全世界海水、苦咸水淡化处理还是以蒸馏法为多，且又以多级闪蒸为主。与蒸馏法相比反渗透法，由于投资费用低，能耗低，占地少，生产成本低，建造周期短，已有后来者居上的趋势。近年来，反渗透方法的市场占有率已处于优势地位。

399　什么是海水淡化蒸馏法？

海水、苦咸水淡化蒸馏法（WD）是把海水、苦咸水加热，使水沸腾蒸发，变成蒸汽，然后再将蒸汽冷凝成为淡水的过程。这个过程中，需要把海水加热沸腾，消耗能量大，如将废热利用，则较为经济。蒸馏法的特点是设备结构简单，操作容易，淡水质量好。

海水淡化蒸馏方法大致可分为：太阳热蒸馏法；多效真空蒸馏法；闪蒸（急骤）蒸馏法；蒸汽压缩蒸馏法。

400　什么是太阳能海水淡化技术？

利用太阳能产生的热能，直接或间接以驱动海水的相变过程，使海水蒸馏淡化；或是利用太阳能发电以驱动渗析过程，这是利用太阳能间接使海水淡化技术。

由于海水淡化要消耗大量的燃料或电力，从我国国情出发，我国广大农村、孤岛等地区至今缺乏电力，因此用太阳能进行海水淡化受到青睐。它的突出优点是利用自然能，运行费用低、设备简单。但产水规模小并受自然条件的制约是其缺点。

当前太阳能海水淡化中以蒸馏法为主。有三种方式：①被动式太阳能蒸馏系统，如单级或多级倾斜盘式太阳能蒸馏器；回热式、球面聚光式太阳能蒸馏器等。②主动式太阳能蒸馏系统，有单级或多级附加集热器的盘式、自然或强迫循环式太阳能蒸馏器。③与常规海水淡化装置相结合的太阳能系统。太阳能可与多数常规海水淡化系统相结合，如利用太阳能发电进行反渗透法或冷冻法

进行海水淡化。此外，还有太阳能多级闪蒸、太阳能多级沸腾蒸馏等技术。

目前，太阳能蒸馏法海水淡化产水率低，同时还存在一些问题：其一是蒸汽的凝结潜热未被重新利用而损失于大气中；其二是传统太阳能蒸馏器是自然对流的换热模式，限制了热能利用率提高；其三是蒸馏器中待蒸发的海水热容量太大，限制了运行温度的提高，减弱了蒸发的驱动力。因此，必须研制和开发新型的太阳能海水淡化技术，如目前设计了最新颖的降膜蒸发和降膜凝结新技术，使太阳能直接作用在降膜海水上，使海水迅速升温并蒸发，蒸汽冷凝后即得淡水。

401 何谓海水淡化多效蒸发蒸馏法？

蒸馏法最简单的是只有一个蒸发器如图 3-5-1（a）所示，该种流程因为只用一个蒸发器，所以叫做单效蒸馏。单效蒸馏没有回收蒸发蒸汽里的热量，所以是不经济的。在单效蒸馏的基础上发展起来的多效蒸发蒸馏法（MWD），从热量回收利用的角度来看，它是比较经济的，因为蒸发蒸汽中的热量是经过多次回收利用。图 3-5-1（b）是一个三效蒸馏的原理图，并给出水温的实际数字为例子。为了避免高温所产生的水垢，所以蒸馏温度都低于 100℃。进入蒸发器内的蒸汽的温度都比器内沸腾的海水温度高出几度，以保证蒸汽管和海水之间有足够的传热率。在一效蒸发器内，用 100℃

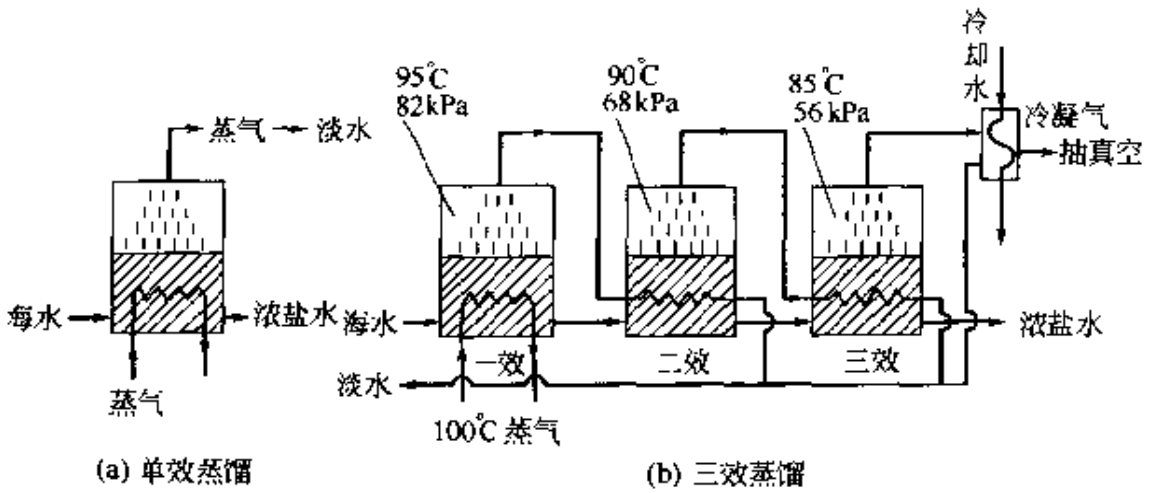


图 3-5-1 蒸馏法原理

蒸汽把海水加热到95℃并使之沸腾，这时必须保持器内压力为0.082MPa（0.82大气压），同时需把蒸发的95℃蒸汽及时排出到二效蒸发器内，并用于加热二效蒸发器内的海水，二效蒸发器内的蒸汽又进入三效蒸发器内用于加热三效蒸发器内的海水。如此，二效、三效蒸发器内的蒸汽在加热海水的过程中被冷凝为淡水并产生一定的真空度，以维持淡水不断地流出。三效蒸发器内海水生成蒸汽进入冷凝器内凝结成淡水，冷凝器内真空度应小于三效蒸发器内的真空度，以保证冷凝器的淡水进到淡水管内。实际运转资料给出每吨蒸汽在单效、二效、三效蒸馏系统中生产的淡水量，分别为0.9、1.75、2.5吨，这可以看出蒸汽热量的利用效率随着效数的增加而逐渐提高。

多效蒸发按结构可分为垂直、水平管膜蒸发器和塔式多效蒸发器等。按运行温度可分为高温多效（112℃左右）和低温多效(70℃左右蒸发)。

多效蒸发海水淡化法，虽使用较早，但目前结垢和腐蚀都存在问题，因此市场占有率低。但由于能耗低，近几年来在结构、材料、工艺等方面正在不断的研究与改进。

402　海水淡化多效蒸馏法有些什么技术改进?

由于多效蒸馏技术的海水淡化法易产生蒸发器结垢和腐蚀，设备投资和维修费用较高，故不利于大规模推广。经研究和改进，发展了低温多效蒸馏技术。它有以下特点：浓海水的蒸发温度不超过70℃，低温下大大减少设备的结垢和腐蚀；由于蒸发温度低，换热器可以选用廉价材料，同样的投资规模，可以得到更多的换热面积，提高了造水比（每消耗1吨蒸汽可产生的淡水吨数。），降低产水的成本。

403　什么是多级闪蒸法海水淡化技术?

多级闪蒸法海水淡化技术（MSF）是将经加热的海水，通过节流孔引入压力较低的蒸发室，由于热海水的饱和蒸汽压力大于蒸发室的压力，并迅速扩容，热海水就急速汽化，沸腾蒸发。由于汽化吸热，蒸发室内温度下降，直至海水温度和蒸汽温度基本平衡，

这个过程叫做闪蒸，蒸发室也称闪蒸室。把多个闪蒸串联起来，热海水依次进入压力逐级降低的闪蒸室中，逐级进行闪蒸和冷凝，这就是多级闪蒸的海水淡化。产生的蒸汽在海水预热管外侧冷凝而得淡水。

每个闪蒸室包括节流孔，汽水分离器，冷凝器，淡水集中盘等。其多级闪蒸原理见图 3-5-2 所示。

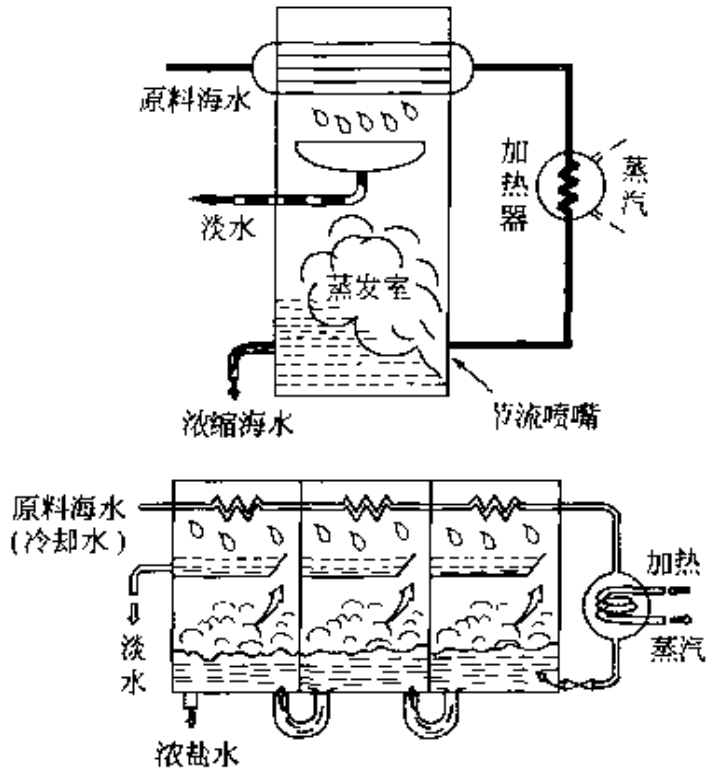


图 3-5-2　多级闪蒸原理

多级闪蒸的级间温差 2～3℃，由于级间温差而相应地产生饱和蒸汽压差，使热海水每进入下一级就闪蒸一次，多级闪蒸的造水比与多效蒸馏相近，一般在 8 左右。

多级闪蒸的冷凝器可分为短管式和长管贯流式两种。

多级闪蒸法的特点是加热与蒸发过程分离，结垢和腐蚀状态有所缓解，设备构造简单，适于大规模生产，所以应用比较广泛。但是海水循环量大，操作费用较高。

404　什么是海水淡化压汽蒸馏法？

压汽蒸馏法也称蒸汽压缩蒸馏法（VC），利用压缩机的动能，

把海水在蒸发器中的蒸汽抽出进行压缩，使其升压和升温（温度可升高 10℃左右），将此温度的蒸汽作为热源送回蒸发器中来加热海水，再使海水蒸发。而经过压缩机压缩的蒸汽进入蒸发器后冷凝得到淡水。压汽蒸馏法的原理如图 3-5-3 所示。

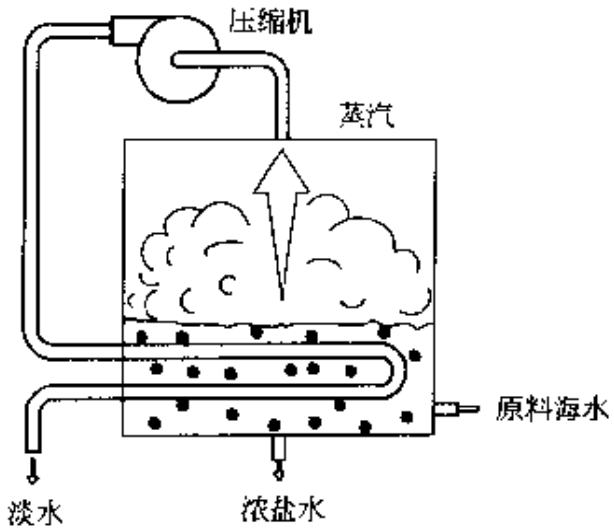


图 3-5-3　压汽蒸馏原理

压缩蒸馏法在运行时，不需要外部提供加热蒸汽（有的在启动时需辅助热源预热海水），靠机械能转化为热能。其特点是热效率高，比能耗较低，结构紧凑。但压缩机的造价也高，腐蚀和结垢状况仍然严重，故难以大型化，只用于中、小型蒸馏淡化。因此，又开发了低温负压的压汽蒸馏技术，在真空状态下进行海水蒸发，系统操作温度低于 70℃，降低了造水成本，延长了设备使用寿命。

405　什么是膜蒸馏？

膜蒸馏是最近几年发展起来的一种新型膜分离技术，它主要是利用高分子膜的某些结构上的功能，来达到蒸馏的目的。由于它具有某些膜技术所不具备的优点，可望成为一种廉价的高效分离手段。

膜蒸馏的分离模型如图 3-5-4 所示。在疏水性多孔膜的一侧与高温原料水溶液相接（即暖侧），而在膜的另一侧则与低温冷壁相邻（即冷侧）。正是借助这种相当于暖侧与冷侧之间温度差的蒸气压差，促使暖侧产生的水蒸气通过膜的细孔，再经扩散到冷侧的冷壁表面被凝缩下来，而液相水溶液由于多孔膜的疏水作用无法透过膜被留在暖侧，从而达到与气相水分离的目的。

在非挥发性溶质水溶液的膜蒸馏过程中，只有水蒸气能透过膜孔，所以蒸馏液十分纯净，可望成为大规模、低成本制备超纯水的

有效手段。

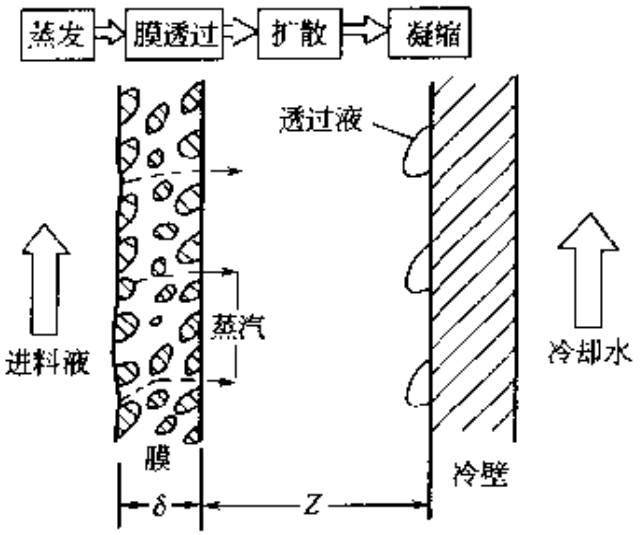


图 3-5-4　膜蒸馏法的分离原理

δ—膜的厚度；Z—扩散层厚度

对于水溶液的膜蒸馏应选用那些没有亲水基团的高分子材料。目前所采用的膜材料中普遍认为聚四氟乙烯最好，聚偏氟乙烯和聚丙烯等也是较好的可选用材料。膜的孔径一般在 0.2～0.4μm 之间较为合适。孔径太小时，蒸馏通量太低；孔径太大时，本体溶液将通过膜孔进入另一侧，从而降低溶质的截留系数。

膜蒸馏用组件通常有平板式、螺旋卷式及中空纤维式三种形式。

406　什么是核能海水淡化技术?

核能海水淡化技术是利用核供热堆和多效蒸馏的接合来实现海水淡化的技术。我国在摩洛哥坦坦地区建设的核能海水淡化示范工程即为一例。我国提供一座核供热堆（NHR-10）和一座高温多效蒸馏工艺相结合。NHR-10 输出 105～135℃饱和蒸汽，作为海水淡化厂的热源。

海水淡化厂采用竖管塔式布置高温多效蒸馏器，共 28 效，日产淡水 4080m^3/d。新蒸汽在第一效内被海水冷凝后作为给水返回蒸汽发生器，而海水被加热并部分蒸发成二次蒸汽，这些蒸汽作为

下一效主要热源去加热海水，如此蒸发-冷凝直至最后一效。自第二效以后的凝结水即为生产的淡水。

407 各种海水淡化方法的投资费用和运行费用相比究竟怎样？

海水淡化方法很多，沿用至现在其投资费用和运行费用究竟怎样是大家关心的问题。由于国内海水淡化规模较小，应用时间也不长，所以目前还无法得到这方面的统计数据。现将国外的各种淡化法费用列表如下。

各种淡化法的费用

方　法	容量/(m^3/d)	1961年 \$/(m^3·d)	折算到1994年 \$/(m^3·d)	1994年的费用 \$/(m^3·d)
投资费用				
MSF	3785	560	2668	2114～2668
高温 MED	3785	552	2631	2114～2668
低温 MED	3785	—	—	1057～1612
VC	379～757	608	2896	1321～2642
ED	946	523	2491	528～793
RO	946	—	—	528～793
运行费用				
MSF	3785	0.285	1.36	1.59～2.11
高温 MED	3785	0.304	1.45	1.59～2.11
低温 MED	3785	—	—	1.06～1.61
ED	946	0.264	1.26	0.26～0.52
RO	946	—	—	0.26～0.52

注：MSF为多级闪蒸；MED为多效蒸馏；VC为压汽蒸馏；ED为电渗析；RO为反渗透。

由上表可以看出反渗透海水淡化装置其投资费用和运行费用为最低。目前，海水反渗透（SWRO）淡化工厂大多建在高温、干旱的中东产油国，其中沙特阿拉伯的Jeddah SWRO淡化厂为目前世界上最大的SWRO工厂，它的第一期工程建成于1989年4月。第二期工程建成于1994年3月，二期工程的淡化能力各为56800m^3/d。

408 海水反渗透淡化对引水和预处理有何要求？

海水中有很多浮游生物和悬浮物，直接自海表层中取水，这些杂质易给水的预处理带来困难。较理想的引水体系是在海岸附近钻

井，自海水井中取水。因为通过地下地层过滤，海水已得到了极好的机械净化。从海水井得到的进水悬浮物和有机物含量少，溶解氧浓度低（溶解氧会使膜受到损伤，并增加设备的腐蚀），而海水井的水生物活性低，季节变化对水温的影响小，甚至可避免。这样就大大减少了对预处理的要求。

海水反渗透（RO）除盐进水的杂质所引起的问题及预处理方法综合列于下表中。

用于海水及苦咸水除盐的预处理方法

组　分	问　题	预处理方法
悬浮固体	膜被粒子污染，引起通量下降	砂滤；多滤材过滤；絮凝过滤；微孔过滤筒（5～25μm）；超滤
$CaCO_3$，$MgCO_3$，$CaSO_4$，SiO_2，$BaSO_4$，$SrSO_4$，CaF_2	膜被沉淀或结垢所污染，引起通量下降	在低水回收率下操作（使其中成垢物浓度不超过饱和溶解度）；加入酸或螯合剂以防沉淀；加入可溶性组分，以进行化学沉淀（如石灰软化）；加入抗垢剂（如 SHMP）①；砂滤以脱除 SiO_2
胶体[黏泥，$Al(OH)_3$，铁的胶体化合物]	胶体污染膜，通量下降	絮凝后，用 UF 脱除
微生物	膜面上形成黏液层，引起通量下降，某些膜（如醋酸纤维素）会被微生物降解	氯化（间歇式或连续加入②）；亚硫酸氢钠（间歇式或连续加入）；UV 处理；臭氧；投加 $CuSO_4$③（对藻类、浮游生物）；投加氯铵
氯	为消毒而投加的氯，对很多膜有损坏作用	投加亚硫酸氢钠④，用活性炭过滤
硫化氢	不能用膜脱除	氧化成硫酸盐，空气吹扫
有机物	吸附在膜面上，可引起通量下降，某些高分子量有机物可絮凝成胶体	活性炭过滤，若使用阳离子聚合物（絮凝剂）可减少腐殖酸之类有机物对膜的污染
溶氧	氧会损坏某些膜，氧可增加腐蚀	投用亚硫酸氢钠，真空除气
pH	若不控制在允许的操作范围内膜将受损伤	加酸（HCl，H_2SO_4）或碱（石灰，NaOH）

① SHMP 为六偏磷酸钠；

② 间歇式加入是指每 8h 以 5～10mg/L 浓度投氯 15min，连续投氯是指连续投入氯，使进水中氯浓度保持 0.5～2mg/L；

③ 在大多数情况下加入 $CuSO_4 \cdot 5H_2O$<0.5mg/L 就够了；

④ 余氯浓度为 1mg/L，投加 1.5～6mg/L 亚硫酸以与之反应。

近年用微滤(MF)、超滤(UF)作为 RO 除盐进水预处理的研究和应用已有很多报道，以 MF 作为海水淡化的预处理与常规表面水处理相比，在经济上具有很强的竞争能力。

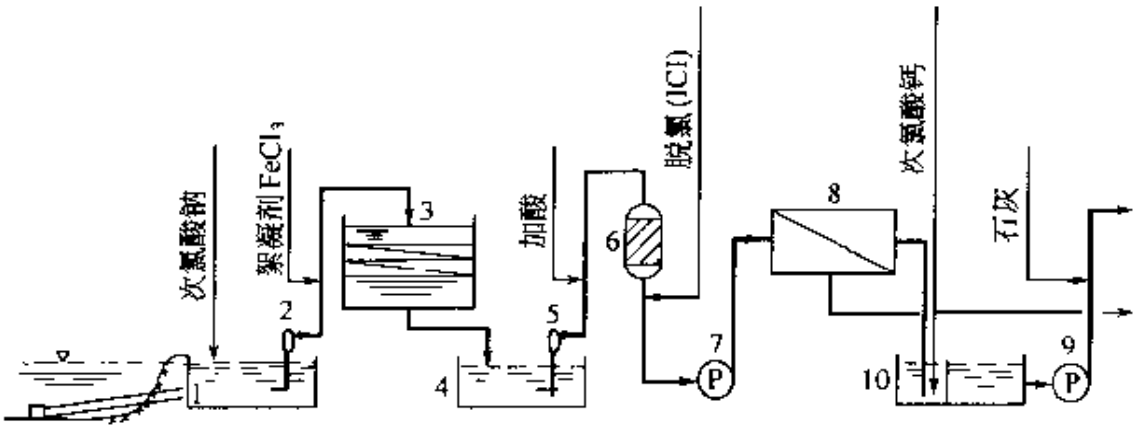
409　沙特阿拉伯的 Jeddah 海水反渗透工厂的工艺流程怎样？

Jeddah SWRO 工厂Ⅰ期、Ⅱ期工程生产能力各为 56800m^3/d，总生产能力达到 113600m^3/d，Ⅱ期工程性能如下表所示。

Ⅰ期、Ⅱ期工程的性能(测定时间 1995 年 4 月)

项　　目	Ⅰ期	Ⅱ期	设计规定值
透过液 EC/(μs/cm)	538	281	—
透过液 Cl^-/(mg/L)	157	82	625
投产运行时间/a	6	1	—
膜的平均年更换率/%	16.7	0	10(Ⅱ期)

RO 工厂流程示于图 3-5-5，Ⅰ期工程所有设备紧凑地安置在 200m 长 100m 宽面积内。



编号	设备名称	标准能力	设备使用数	备用数①
1	海水蓄水池			
2	海水原水泵	4374m^3/h	2	1
3	双介质过滤器		14	
4	过滤水贮槽			
5	过滤水泵	3380m^3/d	2	1
6	微保安过滤		10	2
7	高压泵	16224m^3/d	10	
8	RO 组件		148×10	
9	产水泵	28388m^3/d	2	1
10	产水槽			

① 设备使用数和备用数是对Ⅰ期工程。

图 3-5-5　Jeddah RO 工厂流程

取自红海表面下 9m 深处的海水，经拦污栅和带式移动筛除去较大的碎屑、浮游生物等，进入海水蓄水池，池内加入次氯酸钠灭菌，以防体系受细菌和海藻污染，次氯酸钠由电解氯化装置制造。氯化灭菌后的海水在进入双介质过滤器(DMF)前还需加入絮凝剂 $FeCl_3$ 以加强过滤作用，DMF 底上为碎石层，上面为无烟煤及砂层。每期工程使用 14 只 DMF，依次每天有一只进行反冲洗，即每只 DMF 两周清洗一次。

从 DMF 出来的过滤水进入中间贮槽，在泵入微保安过滤器(MGF)之前，先加 H_2SO_4 调 pH，以防结垢和膜降解，经 MGF 脱除>10μm 的粒子，MGF 是对高压泵及 RO 膜组件的最后保护线。产生的淡水最后加次氯酸钙和石灰水以灭菌、调 pH，防止配送水管道的腐蚀。

410 我国西部地区典型的水质情况怎样?

我国西部陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆五省区终年干旱少雨，是属于国内最为严重的缺水地区。地表水和浅井水是西部省区主要饮用水资源。除新疆外，流经以上四省区的黄河水，携带大量泥沙，溶解大量杂质，水源补给少，再加三废污染的影响，所以，西部地区地表水多为水质已有不同程度污染的苦咸水，地下水几乎都是高矿化、高氟苦咸水。下列两表为西部地区典型水质。

中国西部省区地表水典型水质主要指标 mg/L

水 源	陕西洛河(吴旗段)	甘肃环江河(庆阳段)	新疆塔里木河
pH 值	7.5	7.6	
K^+	5.9	3.7	580.0($K^+ + Na^+$)
Na^+	316.0	310.5	
Ca^{2+}	99.8	96.2	121.0
Mg^{2+}	143.2	85.1	220.0
Cl^-	499.9	298.8	791.0
SO_4^{2-}	628.8	576.4	580.0
HCO_3^-	186.1	280.1	172.0
NO_3^-	28.0	27.5	
总硬度(以 $CaCO_3$ 计)	38.3	590.8	1207.6
TDS	1904.0	1618.5	2450.0
水化学类型	SO_4 · Cl-Na · Mg	SO_4 · Cl-Na · Mg	SO_4 · Cl-Na · Mg

中国西部省区地下水典型水质主要指标　　mg/L

水　源	陕西朝邑 69 米井水	甘肃陇东 73 米井水	宁夏银川 井水	青海茫崖 井水	新疆若羌 井水
pH 值	8.3	7.7	8.1	7.5	7.3
K^+	994.8 ($K^+ + Na^+$)	3.4	11.5	403.2 ($K^+ + Na^+$)	3.3
Na^+		550.0	296.8		360.0
Ca^{2+}	80.6	121.2	90.2	399.0	379.2
Mg^{2+}	141.5	88.8	40.1	117.3	113.9
Cl^-	1174.2	399.6	346.4	494.9	499.2
SO_4^{2-}	879.0	1173.5	417.9	1041.0	1326.2
HCO_3^-	454.6	137.3	302.0	187.3	181.8
F^-	1.6		1.8	2.1	2.0
总硬度(以 $CaCO_3$ 计)	783.2	658.1	390.3	1479.3	2810.0
TDS	3739.0	2506.0	1425.6	3038.0	2810.0
水化学类型	SO_4·Cl-Na	SO_4·Cl-Na	SO_4·Cl-Na	SO_4·Cl-Ca·Na	SO ·Cl-Ca·Na

苦咸水作为饮用水不仅影响居民身体健康，同时又制约着人类的社会经济活动。因此，选用适当技术措施，净化、淡化苦咸水，就地制取符合卫生标准的生活饮用水和工业用水，是当前迫切需要解决的问题。

411　用电渗析法进行苦咸水淡化存在哪些问题？

20 世纪 50 年代美国、英国开始将电渗析法（ED）用于苦咸水淡化，80 年代我国在苦咸水淡化方面应用得到迅速发展，中国西部省区油田几乎都用电渗析法制取生活饮用水，至今仍有不少单位在使用，长期困扰人们的生活饮用水问题初步得到解决。但是，电渗析法在苦咸水淡化工程中也有其局限性，由于电渗析法的除盐率不是很高，尤其对耗氧量、氨氮及硅的去除率仅 15%～45%，但由于原水中上述指标含量较低，去除率虽低，仍能满足生活饮用水卫生要求；但电渗析对 SO_4-Na 型和 Cl-Na 型水去除率较低，而苦咸水中 SO_4^{2+} 和 Cl^- 均较高，因此，很难满足生活饮用水卫生要求。此外，由于电渗析不能去除水中有机物和细菌；加之设备运行能耗及水耗均较大；电极腐蚀和膜污染问题未获彻底解决，使之维

修工作较困难。以上因素均影响了电渗析在苦咸水淡化中的应用，而逐渐被反渗透（RO）装置取而代之。

412 嵊泗镇的海水淡化装置的工艺流程怎样？

我国浙江嵊泗镇采用反渗透装置海水淡化。海水取自海滩沉井，海水预处理有 NaClO 发生器杀灭微生物，3 台自动加药，分别投加混凝剂 $FeCl_3$、还原剂 $NaHSO_3$、阻垢剂 H_2SO_4 调 pH，其工艺流程如图 3-5-6 所示。

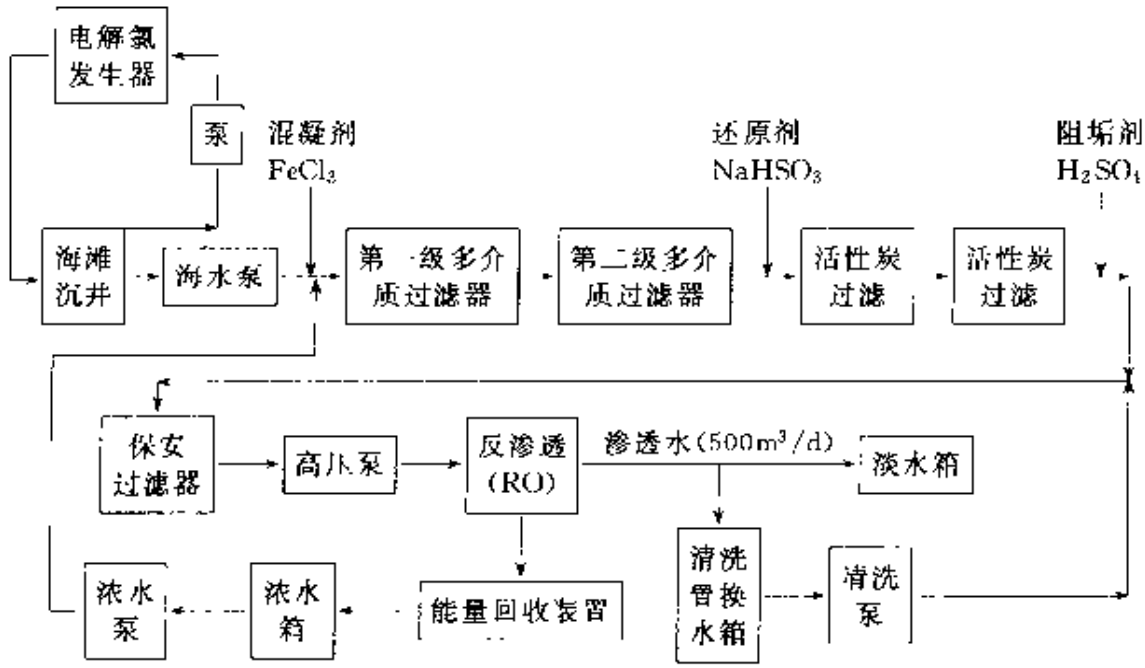


图 3-5-6 浙江省嵊泗镇 500m³/d 反渗透海水淡化的工艺流程

设计海水取水量 60t/h，产水量 20.8t/h，TDS＜500mg/L（淡水水质），淡水回收率 35%。实际运行时，海滩沉井海水及淡化水的水质如下。

项　　目	海滩沉井海水	淡化水
电导率(25℃)/(μS/cm)	31100	318
TDS/(mg/L)	26776	162.8
pH 值	7.69	6.31
总碱度(以 $CaCO_3$ 计)/(mg/L)	133.6	3.77
总硬度(以 $CaCO_3$ 计)/(mg/L)	5303	8.77
Na^+	8064.5	55.6
Cl^-	14850	96.3

413 长岛苦咸水淡化站的工艺流程是怎样的？

我国山东长岛县南长山岛苦咸水淡化站的原水是地下 17m 的井水，浑浊度 0.7～0.9 度，pH 值 7.1，总硬度（以 $CaCO_3$ 计）1098.9mg/L，总溶解固体 2900～4300mg/L，水温 18～20℃。其苦咸水淡化的工艺流程如图 3-5-7 所示：

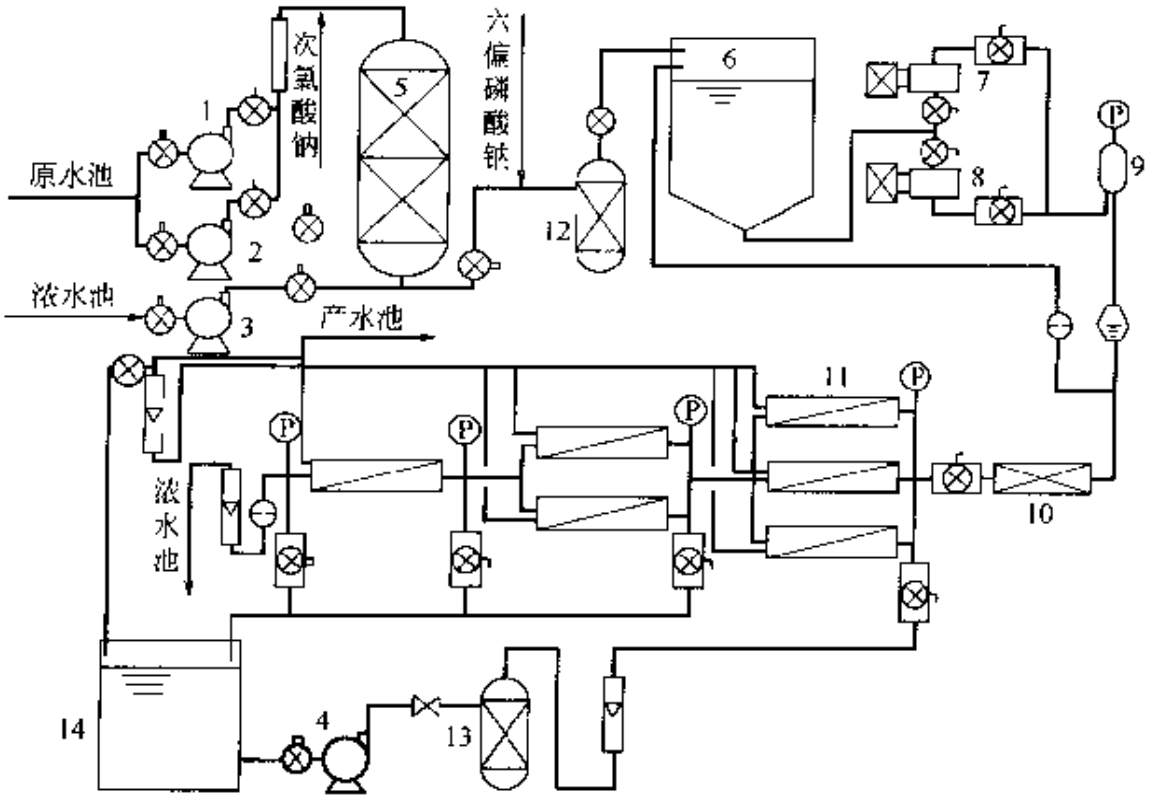


图 3-5-7 长岛淡化站工艺流程图

1—预处理主泵；2—预处理备用泵；3—反冲泵；4—清洗泵；5—双层滤料过滤器；6 过滤水箱；7—反渗透主泵；8—反渗透备用泵；9—不锈钢缓冲器；10 高压滤器；11—SRC-0414 组件（6 根）；12、13—精密滤器；14—清水箱

预处理水量 84t/d，污染指数 1.3～3.9，余氯 0.2～0.4mg/L，反渗透采用卷式组件，为海洋局杭州水处理中心研制，型号 SRC-0414，RO 操作压力 2.5MPa，产水量（25℃）60t/d，除盐率 84%～90%，水回收率 66.7%～72.7%，水质达到饮用水标准。

第四章　炉水处理

414　为什么要严格控制锅炉给水水质？

严格控制锅炉给水的水质有着十分重要的意义，它是防止热力系统设备的结垢、腐蚀和积盐的必要措施，并对锅炉安全、经济运行提供有力的保证。对锅炉给水水质进行严格监督的目的，具体地说有三条：①防止结垢。如果进入锅炉的水质不符标准，而又未及时正确处理，则经一段时间运行后，在和水接触的受热面上，会生成一层固体的附着物——水垢。由于水垢的导热性能很差，比金属要相差几百倍。因此，使得结垢部位温度过高，引起金属强度下降，局部变形，产生鼓泡，严重的还会引起爆裂事故，危及安全运行；结垢还会严重影响锅炉换热效果，大大地降低锅炉运行的经济性，如在省煤器中结有1mm厚水垢，燃料就得多耗1.5%～2.0%；由于结垢会使汽轮机凝汽器内真空度降低，从而使汽轮机的热效率和出力降低。严重时，甚至要被迫停产进行检修。因此，控制水质防止结垢十分重要。②防止腐蚀。锅炉给水水质不良，会造成省煤器水冷壁、给水管道、加热器、过热器以及汽轮机冷凝器等的腐蚀。腐蚀不仅要缩短设备的使用寿命，造成经济损失，同时腐蚀产物又会转入水中污染水质，从而加剧了受热面上的结垢，结垢又促进了垢下腐蚀，造成腐蚀和结垢的恶性循环。③防止积盐。锅炉给水中的超量杂质和盐分，随蒸汽带出而沉积于过热器和汽轮机中，这种现象称为积盐。过热器的积盐会引起金属管壁过热，甚至爆裂；汽轮机内积盐会降低出力和效率，严重的会造成事故。

由上可见，对于锅炉给水水质的严格控制是十分必要的。

415　什么叫锅炉补给水、给水、凝结水、疏水、工艺冷凝水、炉水？

补给水是指原水经净化处理后，用来补充锅炉汽水损失的水。

补给水按其净化方法可分为软化水，蒸馏水和除盐水。

给水是指送进锅炉的水。给水通常由补给水，凝结水及工艺冷凝水等组成。

凝结水是指在汽轮机中作完功后的蒸汽，经冷凝而成的水。有的称透平冷凝水或蒸汽冷凝液。

疏水是指各种蒸汽管道和用汽设备中的蒸汽凝结而成的水。

工艺冷凝水是指蒸汽用户返回的蒸汽冷凝水。

炉水是指在锅炉本体系统中流动的水。

416 什么是低压、中压、高压和超高压锅炉？对水质要求及控制方法上有何区别？

所谓低压、中压、高压、超高压锅炉是由锅炉产生蒸汽的压力大小不同而划分的。按照表压力分等级如下：

低压锅炉：<2.45MPa(<25kgf/cm^2)；

中压锅炉：3.82～5.78MPa(39～59kgf/cm^2)；

高压锅炉：5.88～12.64MPa(60～129kgf/cm^2)；

超高压锅炉：12.74～15.58MPa(130～159kgf/cm^2)；

亚临界锅炉：15.68～18.62MPa(160～190kgf/cm^2)；

高临界锅炉：>22.45MPa(>229kgf/cm^2)。

由于锅炉的工作压力不同，对于水质要求以及控制方法上也有不同。工作压力越高的锅炉，对水质的要求也越高，控制也越严。水质控制的目的是防止锅炉及其附属水、汽系统中的结垢和腐蚀，确保蒸汽质量，汽轮机的安全运行，并在保证上述条件下，减少锅炉的排污损失，提高经济效益。低压锅炉可以在炉内水处理，但目前一般是采用炉外水处理的方式以软化水作为补充水；中压锅炉及部分高压锅炉，通常采用脱碱、除硅、除盐和钠离子交换（中压锅炉）后的软化水作为补充水。而在炉内主要采用磷酸盐处理。对于高压及亚临界汽包锅炉，现在一般都是用化学除盐水补给，而在炉内采用磷酸盐处理或是挥发性处理。对于直流锅炉必须采用挥发性处理。此外，对给水处理中的溶解氧、炉水的含盐量、SiO_2 和 pH 值的调节等，也因锅炉压力的提高而要求更严。

417　什么是汽包锅炉、直流锅炉、超临界锅炉和废热锅炉?

汽包锅炉。锅炉给水经省煤器提高水温后进入汽包，然后由下降管经下联箱进入上升管（即水冷壁或炉管），在上升管中，吸收炉膛里的热量成为汽水混合物又回到汽包中，水汽混合物在汽包中进行汽、水分离，分离出的饱和蒸汽导入过热器内被加热为过热蒸汽送往作功。这一类型炉称汽包锅炉。

直流锅炉。是从管束的一端供水，并经长束管子内加热、蒸发、过热，然后在管的另一端产生过热蒸汽的锅炉。

超临界锅炉。工作压力超过 22.45MPa 的锅炉。在临界压力下，汽水的密度差等于零。因此，无法像汽包锅炉那样利用汽水的密度差建立压头，进行自然循环流动，只有用直流锅炉型式，依靠外部动力（如水泵）进行强制循环流动，所以超临界锅炉实际上都是直流锅炉。

废热锅炉。是利用各种工艺过程所产生的废热作为热源来生产蒸汽或热水的锅炉。

418　锅炉给水与炉水有哪些控制项目?

锅炉给水与炉水的控制项目是根据锅炉工作压力的不同而异。

（1）低压锅炉的给水与炉水控制项目，详见国家标准 GB 1576--2001。

低压锅炉的给水控制项目：

悬浮物、总硬度、pH 值、含油量等；

低压锅炉的炉水控制项目：

总碱度、pH 值。

（2）中、高压锅炉的给水与炉水控制项目

给水控制项目：

硬度、溶解氧、铁、铜、钠、二氧化硅、pH 值、联氨、油等；

炉水控制项目：

总含盐量、SiO_2、pH 值、氯离子（Cl^-）、磷酸根（PO_4^{3-}）。

419　为什么水未经除盐处理不能用做锅炉给水?

锅炉给水要求一定纯净的水质，以确保锅炉的安全经济运行。

所以要经除盐处理，这是因为：未经除盐处理的水中除含有少量悬浮杂质外，还存在 Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^{+} 等阳离子和 SO_4^{2-}、Cl^{-}、HCO_3^{-}、$HSiO_3^{-}$ 等阴离子所组成的溶解盐类及 O_2、CO_2 等气体杂质。这些杂质随水进入锅炉中，会在锅炉及蒸汽系统中产生以下危害：

（1）O_2、CO_2 等气体在给水管路和热力设备中造成腐蚀。

（2）含有溶解盐类的水进入锅炉受热后，水不断被蒸发，盐类逐渐浓缩、超过其溶度积而析出产生沉积物。又由于钙镁盐类的溶解度随温度升高而降低及碳酸氢盐受热分解产生沉积物。反应式如下：

$$Ca(HCO_3)_2 \longrightarrow CaCO_3\downarrow + H_2O + CO_2\uparrow$$

$$Mg(HCO_3)_2 \longrightarrow Mg(OH)_2\downarrow + 2CO_2\uparrow$$

由于上述原因，盐类物质在锅炉系统中极易生成水垢或水渣。水垢的热导率只有金属的几十至几百分之一，从而导致锅炉受热而热阻增加，使受热而受热不匀或局部过热，直至爆管的危险。这样就使设备寿命缩短，燃料消耗高。

（3）污染蒸汽。盐类及杂质进入锅炉系统后，由于水滴携带或蒸汽的溶解携带，水中钠盐、硅酸盐的气体杂质会带入蒸汽系统。锅炉的压力等级越高，携带量越大。这些杂质会造成热力设备的腐蚀。盐类物质会沉积在蒸汽通过的各个部位，如过热器、汽轮机等，影响机组的安全经济运行。

由于上述原因，未经除盐处理的水不能作为锅炉给水。

给水处理是根据锅炉压力等级的不同而有所不同。等级越高，对给水的纯度要求越高。用于低压锅炉的给水，要经过软化处理或部分除盐处理，主要是除去水中的硬度，通常是以 H^{+} 型或 Na^{+} 型离子交换树脂软化或石灰软化法处理。对于中压以上锅炉的给水，要经过化学除盐处理，将水中的阳离子如 Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^{+} 和阴离子中的 Cl^{-}、SO_4^{2-}、HCO_3^{-}、$HSiO_3^{-}$ 等，以及溶解气体全部除去或降低到一定程度。通常采用离子交换或膜分离技术等方法。

420　什么是水垢和水渣?

由于炉水水质的不良，在经过一段时间的运行之后，与水接触的受热面上会形成一层固态附着物，这就是水垢。但从炉水中析出的固体物质，有时还会呈悬浮状态存在，或者是以沉渣状态沉积在汽包和下联箱底部等流速缓慢处，这些呈悬浮状态和沉渣状态的物质就称为水渣。

421　常见的锅炉水垢有哪些?

常见的锅炉水垢主要有5种：

(1) 碳酸盐水垢。主要成分是钙镁的碳酸盐，以碳酸钙为主，有时高达50%以上。

(2) 硫酸盐水垢。主要成分是$CaSO_4$，常达50%以上。

(3) 磷酸盐水垢。主要成分是$Ca_3(PO_4)_2$。

(4) 硅酸盐水垢。主要成分是SiO_2，有时达20%以上。

(5) 混合水垢。是各种水垢的混合物。

常见水垢可能存在的组分如下：

方解石　λ-$CaCO_3$（结晶形$CaCO_3$）

方解石　β-$CaCO_3$（结晶形$CaCO_3$）

硬石膏　$CaSO_4$

单硅钙石　$2CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$

硬硅钙石　$5CaO \cdot 5SiO_2 \cdot H_2O$

硅灰石　β-$CaSiO_3$

羟钙石　$Ca(OH)_2$

磷钙土　$Ca_3(PO_4)_2 \cdot H_2O$(碱度低时产生)

锥辉石　$Na_2O \cdot Fe_2O_3 \cdot 4SiO_2$

查明水垢及其组分，就可以采取有效的预防措施。

422　锅炉水渣的组成是怎样的?

锅炉水渣的组成有：碳酸钙、氢氧化镁、蛇纹石($3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$)、铁的氧化物($Fe_2O_3$、$Fe_3O_4$)、碱式磷灰石[$Ca_{10}(OH)_2(PO_4)_6$]、氢氧化铁、碱式碳酸镁[$Mg(OH)_2 \cdot MgCO_3$]、磷酸镁$Mg_3(PO_4)_2$、镁橄榄石($2MgO \cdot SiO_2$)和铜的氧

化物($CuO \cdot Cu_2O$)等。知道水渣的组成后，就可以制定防止措施。

423　为什么要监督锅炉给水的硬度？

硬度超标的水容易在锅炉中结垢。钙镁的碳酸盐因受热分解由易溶盐转化为难溶盐，从水中析出。

$$Ca(HCO_3)_2 \xrightarrow{\triangle} CaCO_3\downarrow + CO_2\uparrow + H_2O$$

$$Mg(HCO_3)_2 \xrightarrow{\triangle} Mg(OH)_2\downarrow + 2CO_2\uparrow$$

随着炉水水温升高，部分反常溶解度盐类如 $CaCO_3$、$CaSO_4$ 的溶解度下降。又因炉水不断被蒸发浓缩，使硬度所形成的盐类也相应浓缩成垢。

为了防止锅炉系统和给水系统中生成钙、镁水垢，以及避免增加炉内磷酸盐处理的用药量，不使锅炉水中产生过多的水渣，为此，要监督锅炉给水的硬度，以便采取有效措施，控制硬度不得超过指标。

424　锅炉给水的硬度为什么有时不合格？如何处理？

锅炉给水硬度不合格的原因主要是：①组成锅炉给水的补给水、凝结水、疏水及工艺冷凝水中渗入了杂质，使得硬度增大，这样水质也会变得浑浊；②未经除盐处理的水由于阀门等的不严密，泄漏至给水系统，造成硬度增高。

处理的方法是加强锅炉水及汽质的监督，查明污染的来源，及时进行处理；同时要对各管线、阀门进行检查，特别是补给水系统，以防止硬水渗入给水中。

425　锅炉水质浑浊的原因是什么？如何处理？

锅炉水质浑浊的主要原因与处理方法如下：

锅炉水质浑浊的主要原因	处　理　方　法
由于给水水质浑浊或硬度太高	查明来源，分别进行处理
锅炉长期未排污，或是排污量不够	严格按排污规定进行定期排污，调整好排污量
锅炉检修后启动的初期，或新炉投用时，炉水会产生浑浊	此种情况下，要适当增加锅炉排污量

426 给水水质不合格是什么原因？应如何处理？

给水水质不合格的主要原因如下。

（1）组成锅炉给水的凝结水，疏水，工艺冷凝水及补给水漏进杂质，使其水质劣化。造成水质劣化的原因及处理方法见下表。

异常现象	原因	处理方法
组成锅炉给水的凝结水，疏水，生产返回水及补给水劣化。使炉水中含钠量、电导率等控制项目超标	（1）凝汽器有泄漏，生水漏到凝结水中	（1）对凝汽器进行堵漏
	（2）疏水水质超标	（2）放掉疏水箱中不合格的水，查找污染来源并消除之
	（3）工艺冷凝水水质超标	（3）放掉不合格的生产返回水，查找污染原因并消除之
	（4）除盐水水质劣化	（4）查找除盐水劣化原因并消除之
	（5）有关水泵盘根漏生水	（5）检修有关水泵

（2）由于锅炉连续排污扩容器产生的蒸汽严重带水。

在通常情况下，排污扩容器所产生的蒸汽是返回脱氧器作为加热汽源，如果蒸汽中夹带了含盐量较高的排污水，必然会造成给水的污染。

排污扩容器产生蒸汽带水的最大可能是水位过高，所以应及时调整排污扩容器的运行方式，降低其水位，避免蒸汽带水现象的发生。

（3）未经处理的原水由于阀门等的不严密，泄漏到给水系统中，也是造成给水水质不合格的原因。

427 锅炉给水中带油有什么危害性？

由于给水中带油，会给锅炉系统产生严重的危害。例如：①油质附着在炉管管壁上，受热的时候就会分解生成热导率很小的附着物，只有0.093～0.1163W/(m·K)[0.08～0.10kcal/(m·h·℃)]，严重影响管壁的传热，造成管壁金属的变形，危及炉管安全；②给水中的油会使炉水形成泡沫及生成水中漂浮的水渣，促使蒸汽品质的恶化；③油沫水滴会被蒸汽带到过热器中，受热分解产生热导率很小的附着物，导致过热器管的过热损坏。

428 锅炉给水中含有铜和铁时有什么危害？

锅炉给水中含有铜和铁时，会在金属受热面上形成铜垢或铁垢，由于金属表面与铜垢、铁垢沉积物之间的电位差异，从而引起了金属的局部腐蚀，这种腐蚀一般是坑蚀，容易造成金属穿孔或爆裂，所以危害性很大。因此，严格控制给水中铜和铁的含量，是防止锅炉腐蚀的必要措施。给水中的铜与铁，一般来源于凝结水、补给水以及生产回水系统，因此必须防止以上水系统的腐蚀。给水中铜和铁的含量，也是作为评价热力系统金属腐蚀程度的依据之一。

429 中、高压锅炉常用哪些炉内水处理剂？其作用如何？

中、高压锅炉常用炉内水处理剂及作用如下表。

药剂		作用
名称	分子式	
氢氧化钠（苛性钠）	NaOH	调整 pH 值、碱度 （调节锅炉水、给水的碱度。防止锅炉的结垢和腐蚀）
碳酸钠（苏打）	Na_2CO_3	
磷酸钠（磷酸三钠）	Na_3PO_4	
磷酸二氢钠（磷酸一钠）	NaH_2PO_4	
六偏磷酸钠	$(NaPO_3)_6$	
磷酸	H_3PO_4	
三聚磷酸钠	$Na_5P_3O_{10}$	
硫酸	H_2SO_4	
氢氧化钠	NaOH	除硬 （使锅炉水的硬度成分变成不溶性沉淀物，防止结垢）
磷酸三钠	Na_3PO_4	
磷酸三钾	K_3PO_4	
磷酸氢二钠	Na_2HPO_4	
聚磷酸盐		
合成高分子化合物		分散淤渣 （使淤渣分散悬浮在水中，容易经排污排出，防止结垢）
丹宁		
木质素		
淀粉	$(C_6H_{10}O_5)_n$	
亚硫酸钠	Na_2SO_3	除氧 （除去给水中的溶解氧，防止腐蚀）
亚硫酸氢钠（重亚硫酸钠）	$NaHSO_3$	
联氨（肼）	N_2H_4	
丹宁		
消泡剂（酰胺类、醇类等）		防止锅炉水起泡沫
氨	NH_3	中和、形成保护膜 （防止冷凝水管路因 CO_2 引起的腐蚀）
吗啉	C_4H_8ONH	
环己胺	$C_6H_{11}NH_2$	
烷基胺	RNH_2（R—C_{10}～C_{12}）	
其他胺类		

430 低压锅炉常用哪些炉内水处理剂？其作用如何？

低压锅炉常用炉内水处理剂及作用如下：

药剂名称	作用
烧碱(NaOH)	用于防锅炉结垢处理，与水中碳酸盐，镁盐等反应，去除硬度 $Ca(HCO_3)_2 + 2NaOH \longrightarrow CaCO_3\downarrow + Na_2CO_3 + 2H_2O$ $MgSO_4 + 2NaOH \longrightarrow Mg(OH)_2\downarrow + Na_2SO_4$ 分散 $CaCO_3$ 微粒，阻止 $CaCO_3$ 吸附在金属表面而结垢
纯碱(Na_2CO_3)	用于防止水中硫酸钙、硅酸钙等在炉内结成硬垢 $CaSO_4 + Na_2CO_3 \longrightarrow Na_2SO_4 + CaCO_3\downarrow$ $CaSiO_3 + Na_2CO_3 \longrightarrow Na_2SiO_3 + CaCO_3\downarrow$ Na_2CO_3 可部分水解为 NaOH，起到防垢作用
磷酸三钠(Na_3PO_4)	用于增加炉内泥渣的流动性，使生成磷酸钙高度分散的胶体质点，阻止水垢结成，去除镁垢，并对老水垢有松散作用。还可以生成磷酸铁的金属保护膜，防止氧腐蚀
栲胶	可在炉内金属表面生成单宁酸铁的电中性绝缘层，阻止水垢粘附在金属表面；阻止晶体生长，并减小氧的腐蚀
腐殖酸钠	防垢
膦及聚羧酸类阻垢剂	这些阻垢消垢剂主要有 ATMP、EDTMP、HEDP、PAA、聚马来酸等。用于炉内处理的消垢阻垢作用

431 为什么要监督炉水中的含盐量（或含钠量）、含硅量？

限制炉水中的含盐量（或含钠量）和含硅量是为了保证蒸汽品质。因蒸汽带水，使炉水中的钠盐和硅酸带入蒸汽。当炉水含盐量在一定范围时，蒸汽带水量基本一定。但当含盐量或含硅量超过一定数值时，蒸汽带水量会明显增加，使蒸汽品质明显变坏。

当炉水含盐量增加到一定程度时，炉水黏度增加，炉水中小气泡不易长大，同时可能产生泡沫层，使蒸汽带水量增加，蒸汽中含盐量也增加。

在高压锅炉中，蒸汽对水中某些物质（如硅酸）有选择性溶解性携带现象，又称选择性携带。蒸汽对硅酸的溶解性携带量与炉水中硅酸含量成正比。即炉水中含硅量越大，蒸汽中含硅量也越高。蒸汽中含硅量超标可能造成 SiO_2 在汽轮机中沉积。

432 锅炉给水和炉水的 pH 值应控制在什么范围最好？

为了防止给水系统的腐蚀，给水的 pH 值应控制在 8.5～9.2

范围内。如果给水 pH 值超过 9.2，虽对钢材防止腐蚀有利，但是，因为给水中 pH 的提高通常是采用加氨的方法，pH 值高，就意味着水、汽系统中氨的量较多。这样，在氨富集的地方，会引起铜的氨蚀。为了避免上述情况发生，所以给水中 pH 不可过高。通常给水中的氨量控制在 1～2mg/L 以下。

炉水中的 pH 值控制应不低于 9，这是因为：①pH 值低时，水对锅炉钢材的腐蚀性增强；②炉水中的磷酸根与钙离子的反应，只有在 pH 值足够高的条件下，才能生成容易排污的水渣；③为了抑制炉水中硅酸盐的水解，减少硅酸在蒸汽中的溶解携带量，pH 值应控制得高一些。但是炉水的 pH 值也不能太高，否则，游离 NaOH 较多，容易引起碱性脆蚀。

433　如何调节锅炉给水中的 pH 值？

为了防止给水对锅炉系统金属的氢去极化作用而引起的腐蚀，以及防止金属表面的保护膜遭到腐蚀破坏，通常是在给水中加氨（或胺）来调节 pH 值，使得保持在 8.5～9.2 之间，氨溶于水呈碱性的氨水（NH_4OH）与水中的碳酸起中和反应：

$$NH_4OH + H_2CO_3 \longrightarrow NH_4HCO_3 + H_2O$$

$$NH_4OH + NH_4HCO_3 \longrightarrow (NH_4)_2CO_3 + H_2O$$

如加入的氨量将 H_2CO_3 中和至 NH_4HCO_3 时，pH 值约为 7.9；如果中和至 $(NH_4)_2CO_3$ 时，水中 pH 值约为 9.2。由于给水 pH 调节值在 8.5～9.2，因此加氨量稍多于第一步反应而接近第二步反应。通常将 NH_4OH 配成 0.5%质量分数与 N_2H_4 一起加入除氧器的出口给水管中。实际所需的加氨量，尚须通过运行过程的调试来决定。

434　锅炉水中的碱度过高有什么危害？

锅炉水中碱度过高时，可能会引起水冷壁管的碱性腐蚀和应力腐蚀破裂；还可能使炉水产生泡沫而影响蒸汽品质。对于铆接或胀接锅炉，碱度过高也会引起苛性脆化。因此，需要对锅炉水进行碱度监督。

435 炉水中的有机物质有何危害?

炉水中的有机物质是由于原水中的有机物（腐殖酸类物质）形成稳定的水溶性胶体，离子交换无法去除，因而由补给水系统进入锅炉；有时也有树脂类高分子有机化合物以粉末状进入锅炉，这些有机物在炉水蒸汽循环的高温和高压作用下，大部分发生热水解，由于其离解作用而产生酸性物质，导致炉水 pH 值降低。有的工厂，长期炉水 pH 值难以达标，经多方检测，方知是由有机酸引起的。树脂粉末，特别是磺酸型阳树脂经高温、高压作用下分解生成硫酸，使炉水 pH 值降低。由此，产生腐蚀的危害。有时，有的还会从炉水系统进入蒸汽中，引起蒸汽循环系统的腐蚀、危害很大。有机物质一旦造成炉水危害，除了搞好炉内水处理，尽力确保水汽品质合格外，主要的解决方法是搞好补给水处理以及水的预处理。

436 锅炉给水为什么需进行除氧处理?

氧在电化学腐蚀过程中起去极化作用，产生以下反应：

$$2H_2O+O_2+4e \longrightarrow 4OH^-$$

水中溶解氧推动电化学腐蚀反应，会使锅炉系统形成严重的氧腐蚀。因此，给水在进入锅炉之前需进行除氧处理。

除氧处理一般用物理方法，即热力除氧。将给水用蒸汽加热至沸腾，使溶解氧脱出。当水温加热到 99℃时，水中溶解氧可脱到 0.1mg/L。

不同压力等级的锅炉对给水溶解氧含量的要求不同。例如，高压锅炉要求≤7μg/L，中压锅炉要求≤15μg/L，低压锅炉要求≤0.05～0.1mg/L。因此，经热力除氧之后，有时候还不能达到要求，故往往需要再进行化学除氧。即在给水中加入化学药剂除氧，如加联氨或亚硫酸钠等。化学除氧的目的是消除热力除氧后的残余溶解氧和除去由于水泵及给水系统不严密而漏入给水中的溶解氧。

437 为什么锅炉给水中要加联氨?

为了防止锅炉水系统及管路遭受氧腐蚀，确保完全消除热力除

氧之后而残留的溶解氧和由于泵及给水系统的不严密而漏入给水的氧，有必要在给水中加入适当量的联氨。联氨（N_2H_4）又称肼，常用的为其水合物水合肼（$N_2H_4 \cdot H_2O$）。

由于联氨在碱性的水溶液中是一种很强的还原剂，它与水中溶解氧产生如下反应：

$$N_2H_4 + O_2 \longrightarrow N_2 + 2H_2O$$

因而加联氨的作用是化学方法除去溶解氧，反应的生成物 N_2 和 H_2O，对热力系统没有任何危害。

此外，在大于 200℃高温下，联氨还可将 Fe_2O_3 还原成 Fe_3O_4 或 Fe，以防止炉内形成铁垢，其反应如下：

$$N_2H_4 + 6Fe_2O_3 \longrightarrow 4Fe_3O_4 + N_2 + 2H_2O$$

$$N_2H_4 + 2Fe_3O_4 \longrightarrow 6FeO + N_2 + 2H_2O$$

$$N_2H_4 + 2FeO \longrightarrow 2Fe + N_2 + 2H_2O$$

联氨还能将 CuO 还原成 Cu_2O 或 Cu，以防止炉内结铜垢。

实际生产中，通常使用 40%质量分数联氨（$N_2H_4 \cdot H_2O$），加在锅炉给水泵的吸入口，或是除氧器的出口管处。加量的控制通常是以省煤器入口给水中含 N_2H_4 50μg/L 左右为准。N_2H_4 有毒、易燃、易挥发，使用时应特别注意。

438　炉内水处理为什么要加亚硫酸钠？要注意什么？

锅炉水系统腐蚀的主要原因是水中的溶解氧。锅炉补给水中的氧，虽然经过除氧器的脱除，然而由于除氧深度的限制，以及给水系统设备和管路的泄漏，渗入了氧气，进入炉内。为了消除残存的氧气，需要加入亚硫酸钠（Na_2SO_3），与氧起化学反应并生成硫酸钠而除去，反应式如下：

$$2Na_2SO_3 + O_2 \longrightarrow 2Na_2SO_4$$

亚硫酸钠虽能除氧，但会增加水中含盐量。通常只用于低压锅炉，不能用于高压锅炉。因其在炉内分解，产生有害的 SO_2 气体：

$$Na_2SO_4 - H_2O \rightleftharpoons 2NaOH + SO_2$$

在使用时，必须严格控制给水中亚硫酸钠的含量，使之不超过 5～12mg/L，如果过量，会引起炉内产生二氧化硫和硫化氢等腐蚀性

气体，使金属受到腐蚀。所以，监督给水中的亚硫酸钠是十分必要的。

439　为什么除氧器内水的含氧量有时会升高？

除氧器内水的含氧量升高的主要原因有：①进水量过大，超过除氧器的处理能力；②进水的含氧量过大，且有漏空气现象；③进水温度过低，进水位置过低；④除氧器的压力未及时调整；⑤排气阀门开度过小；⑥除氧器的喷水装置损坏，淋水托盘倾斜、腐蚀或脱落，水流不能均匀分配；⑦取样系统泄漏空气，使测定数据不准，含氧量高。

440　什么是锅炉水的磷酸盐处理？

为了防止在锅炉中产生钙垢和碱性腐蚀，在给水中加入磷酸盐，使得随给水进入炉内的 Ca^{2+} 不会形成水垢，而是生成水渣，并通过锅炉排污予以排除。这种向锅炉水中投加磷酸盐的处理方法称为锅炉水的磷酸盐处理。在炉水中加入磷酸盐溶液，控制好一定量的磷酸根（PO_4^{3-}），在碱性的条件下，产生如下反应：

$$10Ca^{2+}+6PO_4^{3-}+2OH^- \longrightarrow Ca_{10}(OH)_2(PO_4)_6$$

生成的 $Ca_{10}(OH)_2(PO_4)_6$ 称为碱式磷酸钙，是一种松软的水渣，很容易随锅炉排污而除去。

因此，只要控制好炉水中的 PO_4^{3-} 的量，就可以使炉水中的 Ca^{2+} 含量非常少，而 PO_4^{3-} 的量可按照下表加以控制。

锅炉压力(表压)/MPa(大气压)	PO_4^{3-} 量/(mg/L)		
	不分段蒸发	分段蒸发	
		净　段	盐　段
≤5.98(≤59)	5～15	5～12	≯75
6.08～17.23(60～170)	2～10	2～10	≯75

在实际生产中，通常用磷酸三钠（$Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$）或酸式磷酸钠（Na_2HPO_4）配制成 5%～8% 质量分数，经过过滤去渣，再用补给水配成 3%，直接加入锅炉水中，或者加入给水中。加量的多少，与给水中 Ca^{2-} 量有关，实际使用时，还得通过调试来

确定。

441　什么是协调磷酸盐处理？

对那些以除盐水或蒸馏水为补给水的和凝结水回收水质很好的锅炉，向炉内添加酸式磷酸盐 Na_2HPO_4 或 NaH_2PO_4（有时还要加 Na_3PO_4），使得锅炉水中维持一定量的 PO_4^{3-} 浓度，并消除炉水中的游离碱 NaOH，这就称为协调磷酸盐处理，也称磷酸盐-pH 协调控制。

游离碱 NaOH 是产生碱性腐蚀的原因。其主要来源有三个方面：

（1）碳酸氢钠和碳酸钠受热分解：

$$NaHCO_3 \longrightarrow CO_2\uparrow + NaOH$$

$$Na_2CO_3 + H_2O \longrightarrow CO_2\uparrow + 2NaOH$$

（2）碳酸盐硬度与磷酸盐的化学反应产生：

$$3Ca(HCO_3)_2 + 2Na_3PO_4 \longrightarrow 6CO_2\uparrow + Ca_3(PO_4)_2\downarrow + 6NaOH$$

（3）一级除盐水的 H 型交换器漏 Na^+ 过多，或是由于阴床再生正洗不好而放出 Na^+，使得复床出水呈弱碱性，也会有少量的游离碱。

在协调磷酸盐处理时，炉内添加了酸式磷酸盐之后，可消除游离 NaOH，其化学反应如下：

$$Na_2HPO_4 + NaOH = Na_3PO_4 + H_2O$$

$$NaH_2PO_4 + 2NaOH = Na_3PO_4 + 2H_2O$$

但是，炉水中的磷酸三钠在蒸发浓缩的过程中也会水解产生少量的 NaOH。

$$Na_3PO_4 + 0.15H_2O \longrightarrow Na_{2.85}H_{0.15}PO_4\downarrow + 0.15NaOH$$

由磷酸三钠水解产生的 NaOH，有可能局部高度浓缩而引起碱蚀。因此，要求控制炉水磷酸盐溶液中 Na^+ 摩尔数与 PO_4^{3-} 摩尔数之比不大于 2.85，否则，要多加 Na_2HPO_4 或 NaH_2PO_4；如果摩尔比小于 2.2 时，则应加入适量的碱。因此，要搞好协调磷酸盐处理，必须严格控制锅炉水质，主要是控制好炉水的 pH 值和碱度。

442 为什么会出现炉水盐类暂时消失的异常现象？

炉水中某些易溶钠盐（Na_2SO_4、Na_2SiO_3、Na_3PO_4 等）在锅炉负荷增高时，浓度明显降低，使人发生错觉，但当负荷减少或停炉时，钠盐的浓度会重新升高，这种炉水水质异常现象称为盐类暂时消失现象。产生这种现象是由于某些盐类的特性所决定的。如上述三种钠盐在炉水中的溶解度先是随炉水温度升高而增大，当温度升至一定的数值后，继续升高时，其溶解度就会下降，这种变化以 Na_3PO_4 最为明显，尤其当水温超过 200℃后，它的溶解度随着炉水温度的升高而急剧下降，这时钠盐就析出并附着在炉管的管壁上，而炉水中的钠盐浓度却在降低；但当锅炉负荷减小或停炉时，沉积于管壁上的钠盐又被溶解下来，使其在炉水中的浓度增加。判断盐类暂时消失现象，可以分析炉水中 PO_4^{3-} 与酚酞碱度的关系。如果锅炉的负荷急增，炉水的 PO_4^{3-} 减少，酚酞碱度升高；而锅炉负荷减小时，PO_4^{3-} 增加，酚酞碱度降低，就可以肯定发生了盐类暂时消失现象。这是因为当盐类暂时消失时，炉水中的磷酸盐以 $Na_{2.85}H_{0.15}PO_4$ 形态沉积在炉管管壁上，而此时伴有游离 NaOH 产生，故酚酞碱度上升：

$$Na_3PO_4 + 0.15H_2O \rightleftharpoons Na_{2.85}H_{0.15}PO_4 + 0.15NaOH$$

反之，当 $Na_{2.85}H_{0.15}PO_4$ 被炉水中 NaOH 溶解时，炉水 PO_4^{3-} 增加，酚酞碱度减小。

443 锅炉水的磷酸根有时为什么会不合格？如何处理？

锅炉水的磷酸根不合格主要是由于磷酸盐的加量过大或不足引起的，有时也因加药设备管道的堵塞，或是加药设备不完善造成的。处理此类故障时，首先要检修好加药设备，疏通好管道，调整好磷酸盐的加量。当锅炉水磷酸根过高时，应注意对蒸汽质量的监督，并加大排污量。有时，由于给水硬度较高，消耗了部分磷酸盐而引起磷酸根的不足，此时，应对给水进行软化处理，以使磷酸盐的消耗不致过多。

444 为什么要对蒸汽品质进行监督？

从锅炉汽包送出的饱和蒸汽所含有的盐类物质，有的会沉积在

过热器内，有的则被过热蒸汽带出而沉积在汽轮机中。对于中、低压锅炉，一般来说，饱和蒸汽中的钠盐主要沉积在过热器内；硅化合物主要沉积在汽轮机内，生成不溶于水的 SiO_2 沉积物，因而会严重地影响汽轮机的运行。因此，为了防止蒸汽的流通部分，特别是在汽轮机内积盐，所以要对蒸汽品质进行监督。一方面要检查蒸汽品质的恶化原因，另一方面是判断饱和蒸汽中盐类在过热器中的沉积量。

445　为什么要监督蒸汽中的含钠量？

由于蒸汽中的盐类主要是钠盐，所以蒸汽中的含钠量可以近似表示含盐量的多少。含钠量也作为蒸汽品质的主要指标之一。由过热蒸汽带入汽轮机的钠化合物，一般为 Na_2SO_4、Na_2SiO_3、NaCl 和 NaOH 等，由于这类杂质在过热蒸汽中的溶解度不大，而且随着蒸汽压力的下降，溶解度也会很快下降。所以在汽轮机内，当蒸汽压力稍有降低时，它们在蒸汽中的含量就高于溶解度，因此，很容易从蒸汽中析出而沉积在汽轮机内，不仅影响汽轮机的出力，而且还危及安全运行。为了避免此类故障的发生，一定要监督蒸汽中的含钠量，以便及时发现蒸汽品质的恶化状况，迅速采取有效措施。

446　硅酸化合物有何危害？

硅酸化合物在水中的溶解度很小，其中溶解性的硅酸称为活性硅（或溶硅），而大部分却在水中进行聚合而成为双分子或三分子聚合物，最后成为完全不溶解的多分子聚合物，即称为胶体硅。它们在水中处于动平衡状态，并随 pH 值而变化，当 pH 值高时，较多转变为可溶性硅。硅酸化合物存在于水和蒸汽中的危害很大，一旦进入锅炉后，胶体硅随着温度、压力及 pH 值升高而转化为溶硅，从而使炉水中的含硅量不断增加，有时即使加大排污量也难以改变炉水含硅量。同时，硅酸在高温的蒸汽中有较大的溶解度，并随压力、温度的升高而溶解度不断增大。因此，进入锅炉的硅酸在炉内的沉积虽然不多，却大部分被蒸汽带走。硅酸随着蒸汽的做功过程，温度、压力的降低，而溶解度降低，因此就沉积在汽轮机的

叶片或喷嘴中形成质硬的硅酸盐垢。严重时，可使汽轮机效率大幅度下降，阻塞通道，限制出力，影响汽轮机的生产安全。为此，必须在炉外水处理中，尽力把硅酸化合物除尽。

447　为什么要进行炉水排污？怎样确定排污量？

为了使锅炉水的含盐量、含硅量控制在规定的范围内，避免汽质的不良，或造成炉管阻塞，危及锅炉的安全运行，需要定期按照运行工况，放掉一部分锅炉水（即炉水排污），并补充等量的除盐水，这就需要定期定量进行炉水排污。

锅炉的排污量是按照不同参数的锅炉，由测得的含盐量、含钠量、含硅量以及氯离子等计算而定的，例如：高压或超高压锅炉，其排污率可如下计算：

$$P=\frac{S_{GE}-S_B}{S_P-S_{GE}}\times 100\%$$

式中　P——锅炉排污率，%；

S_{GE}——锅炉给水中的含盐量，含钠量或含硅量，mg/L；

S_B——蒸汽中的含盐量，含钠量或含硅量，mg/L；

S_P——排污水中的含盐量，含钠量或含硅量，mg/L。

在实际操作控制时，是选取计算结果中最大的一组排污率来确定排污量。

对于软化水作为补充水的锅炉，可以用含盐量或氯离子来计算排污率。由于当以软化水作为补给水时，锅炉蒸汽中的含盐量（或 Cl 量）远远小于给水中的含量，故可以略去。可用下式计算：

$$P=\frac{S_{GE}}{S_P-S_{GE}}\times 100\%$$

式中符号同上。

必须指出，为了防止炉内水渣的积聚，锅炉排污率应不小于 0.3%。排污也同时带走了热量，浪费了燃料，因此，在保证汽质合格的前提下，应尽量减少锅炉排污率不超过下表的规定：

补给水性质	锅　炉	排污率最高值
化学软化水	热电厂锅炉	<5%
化学软化水	凝汽式电厂锅炉	<2%
除盐水或蒸馏水	热电厂锅炉	<2%
除盐水或蒸馏水	凝汽式电厂锅炉	<1%

448　为什么蒸汽中的含钠量或含硅量有时会不合格？如何处理？

蒸汽中含钠量或含硅量不合格的主要原因及处理方法如下。

主　要　原　因	处　理　方　法
由于锅炉水中的含钠量、含硅量超过规定指标	查明不合格水的来源，并予及时处理，或减少其使用量，以降低浓度
由于锅炉的负荷、水位、汽压变化过快	按照热化学试验测定结果，严格控制锅炉的运行方式
由于设有蒸汽减温器的降温喷水水质不良，或是表面式减温器泄漏	查漏和堵漏。喷淋水质的凝结水要合格方可使用
由于锅炉加药浓度过大，或加药速度太快	降低锅炉加药的浓度或速度
由于汽水分离器效率低，或是各分离元件的接合处不严密	及时消除汽水分离器的缺陷

449　为什么凝结水会受到污染？

凝结水和补给水组成锅炉的给水，对水质要求是非常高的。凝结水是由蒸汽作功之后凝结而成的，水质应该是非常纯的，但是实际上往往受到污染。这是因为：

（1）蒸汽系统的凝汽器渗漏。通常在凝汽器的管子与管板结合的地方，出现了不严密处，使得冷却水渗漏到凝结水中；或是由于系统的腐蚀而出现裂纹、穿孔、损坏等造成凝汽器的泄漏，使凝结水受到污染。

（2）金属腐蚀产物的污染。凝结水系统的设备和管路由于某种原因被腐蚀，金属腐蚀产物进入凝结水中，其中主要是铁和铜的腐蚀产物的污染。

（3）热用户返回水的杂质污染。热用户返回的凝结水中，往往含有许多杂质，随着不同的应用场合与生产工艺，杂质的成分与污

染的途径也不同。有时也有未经处理的原水、油类等漏入蒸汽的凝结水中。

因此需要经常对凝结水进行水质分析和检测，发现水质受污染时，查明原因，及时处理。

450 凝结水除盐处理有些什么特点？

凝结水的回收，特别是高参数、大容量锅炉机组的凝结水，通常具有数量大和含盐量低的特点。因此，凝结水的除盐处理要求设备在流通量大和含盐量低的情况下运行。此外，在凝汽器泄漏等的特殊情况下，要求设备具有应急应变能力。根据上述特点，宜采用高速运行的混合床，其流速一般为 50～70m/h，最高可达 130～140m/h。由于流速高，要防止树脂磨损，因此，必须选择有比较好的机械强度和颗粒均匀的树脂，其粒径为 0.45～0.65mm。考虑到锅炉给水采用加氨处理，凝结水中若有较多的氨会影响交换能力，以及考虑到水温比较高和泄漏对树脂（特别是阴树脂）的影响，在选择强酸、强碱型树脂的比例时，阳树脂：阴树脂＝1：1.5为宜。树脂的再生方式以体外再生为好。

451 凝结水的溶解氧超指标应如何处理？

要根据凝结水溶解氧超指标的原因，采取相应的处理措施，见下表。

溶解氧超指标的原因	处 理 方 法
凝结水泵运行中填料函泄漏，空气漏入	调换填料、搞好轴封，消除泄漏
凝汽器的真空部位漏气	查漏和堵漏
凝汽器的过冷却度太大	调整好凝汽器的过冷却度

452 凝结水中，所带氨影响混床出水电导率测定时应如何处理？

为避免锅炉系统碳钢的腐蚀，对锅炉给水和炉水的 pH 值有严格的规定，特别是中、高压锅炉，控制 pH＝8.5～9.2。它是采用加氨或加联氨等方法来调节的，因此锅炉的蒸汽系统往往带有一定的氨，凝结水处理的混床出水也含有氨。由于氨的存在干扰电导率

的测定，数据偏高很多。根据国标规定，氨引起的电导率超标，水质仍然是合格的，可以处理，不必排放，因为锅炉给水就需要加氨。这时，将测定电导率的流程稍作改变，即在凝结水处理的混床出水取样处，加 H^+ 交换柱（内装 001×7 强酸性阳离子交换树脂），使取样水通过 H^+ 交换柱再测定电导率。这时水中的 NH_4^+ 被交换，电导率如果合格，则可认为混床出水水质也合格，可以继续回收。

氨浓度对于电导率的影响，经过大量试验测定，重现性很好，下表可以作为实际使用时参考。

氨质量浓度/(mg/kg)	未经 H^+ 交换柱的电导率/(μS/cm)	经 H^+ 交换柱的电导率/(μS/cm)					
		序号 1	序号 2	序号 3	序号 4	序号 5	平均
1	6.6	1.9	1.9	2.0	2.0	1.9	1.94
3	14.0	2.1	2.1	2.1	2.2	2.1	2.12
10	27.0	2.3	2.2	2.3	2.2	2.3	2.26
30	49.0	2.5	2.5	2.5	2.4	2.5	2.48
110	84.0	2.8	2.7	2.7	2.7	2.8	2.74
300	150.0	3.1	3.0	3.0	3.1	3.0	3.04
1000	275.0	3.5	3.4	3.4	3.5	3.4	3.44
3000	465	3.7	3.6	3.6	3.6	3.6	3.62

453 什么是覆盖过滤器？其作用如何？

覆盖过滤器用于汽轮机凝结水回收中去除悬浮态、胶态金属腐蚀产物，特别是除铁。由于凝结水中这些很微小的悬浮物和胶体颗粒大都能穿透普通的粒状滤粒，而无法截留，一旦它们进入凝结水处理的除盐系统，则会污染树脂使其交换容量下降，工作周期缩短。所以就用覆盖过滤器的过滤元件（称滤元），以及助滤剂——极细的粉状物质（如纸浆）作为滤料而形成的滤膜，用以过滤凝结水中的上述物质。由于滤料是极细小的粉状物，因此，在失效时，不能以水流反冲洗的办法来恢复其过滤能力，因为，这些粉状物质很容易被水流冲走。所以，在失效后就更换新的滤料。使用的时候，凝结水从管外通过膜层和管孔进入管内，进行过滤处理。由于起过滤作用的是覆盖在滤元上的滤料，因此也就称为覆盖过滤。

454 对覆盖过滤器的滤料有什么要求？

覆盖过滤器的滤料，要求呈粉末状，化学稳定性好，质地均匀，亲水性强，杂质含量少，滤料本身有孔隙，吸附能力强等。常用的滤料为棉质纤维素纸粉，是将干纸板经粉碎，再用 30 目筛子过筛而成。如果是专用于凝结水除油的覆盖过滤器，可以采用活性炭的粉末（200～100 目）作滤料，除要求化学稳定性好、多孔、吸附能力强外，还要有良好的除油性能。

覆盖过滤器的滤料其特性列举如下，以供选用参考。

项目 \ 牌号	BW 40	BW-100
颜色	白 色	白 色
筛分：		
40 目以下/%	0.8～1.0	1.0
100 目以下/%	83～90	92～95
200 目以下/%	25	75～80
纸浆膜的密度/(g/mL)	0.17～0.21	0.27～0.30
水分/%	5～7	5～7
铁质/%	<0.015	<0.020
铜/%	<0.0006	<0.0006

455 何谓磁力过滤器？

凝结水中铁的腐蚀产物 Fe_3O_4 和 γ-Fe_2O_3 是磁性物质，利用磁力的吸引来清除或滤去这些磁性物质，这种过滤设备称为磁力过滤器。

磁力过滤器分为永磁和电磁两种。如图 4-0-1 所示是水磁过滤器的示图。永磁过滤器是在圆形过滤器的壳体内，布置有若干层的永久磁铁，每层又有若干呈辐射状排列的磁棒，垂直连接在中心立轴上。立轴可以旋转，通水流速为 500m/h。永久磁铁吸附了一定量的铁质后，磁性吸力减弱，需要进行清洗。这种设备的除铁效率只有 30%～40%。

电磁过滤器如图 4-0-2 所示。它是高梯度的磁性分离器，本体用非磁性材料制成，内部充填强磁性材料（如钢丝棉、钢纤维、铁

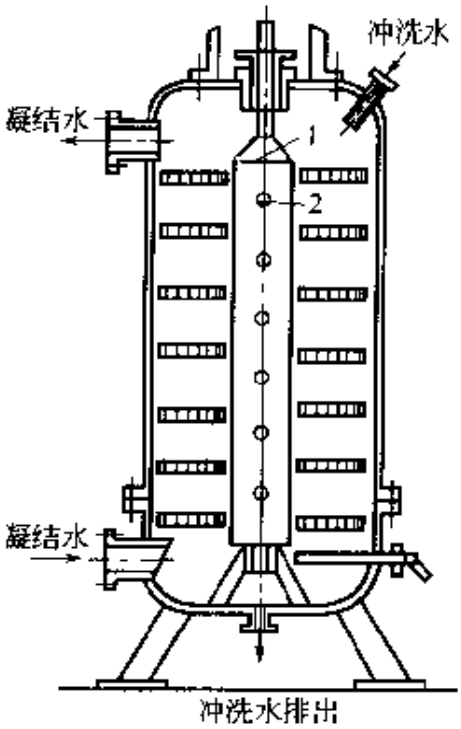


图 4-0-1　永磁过滤器内部示意

1—轴；2—磁棒

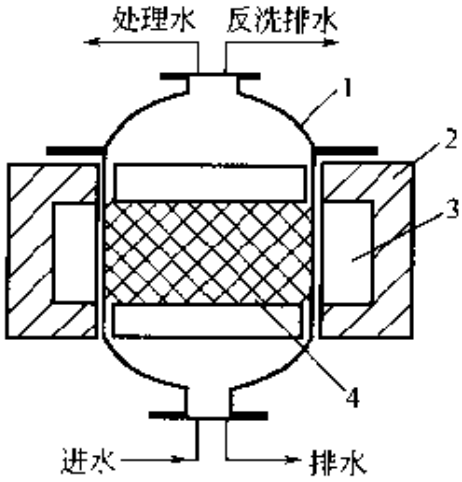


图 4-0-2　电磁过滤器结构示意

1—压力容器；2—屏蔽罩；3—空心线圈；4—填料

球等)。铁球为 6～8mm 软铁或纯铁小球，小球层高可达 1000～2000mm；过滤器壳外是能改变磁场强度的电磁线圈。通直流电时，线圈产生强磁场，使填充料磁化。需清洗时，停止向线圈送电，使磁场消除，再用空气和水反洗。电磁过滤器的特点是流速高，可用于高温除铁，其除铁效率可达 65%～85%。运行参数如下表所示。

项　　目	建议参数	项　　目	建议参数
运行流速/(m/h)	1000，最高 1500	反洗时间/s	50～60
磁场强度/(A/cm)	500～1000	除铁效率/%	65～85
氧化铁吸附量/(g 铁/kg 球)	2	机炉起动期间除铁效率/%	45～60
反洗流速/(m/h)	800	铜和镍除去率/%	<50

456　什么是粉末树脂覆盖过滤器？

覆盖过滤器的滤料是采用高纯度、高剂量的再生剂进行再生的、完全转型的强酸阳树脂和强碱阴树脂，并粉碎至一定细度经混

合而制成的粉末树脂，这种过滤器称为粉末树脂覆盖过滤器。粉末树脂与大颗粒树脂具有同样的选择性，并且每单位重量（干）树脂的最大交换容量相同。普通离子交换树脂珠粒的粒径通常为300～1000μm，而粉末树脂的粒径在70μm以下，因此粉末树脂具有较大的比表面积。由于粉末树脂的粒径小，静电作用也突出，因此，当阳、阴两种粉末树脂在纯水处理中均匀混合时，由于相反电荷的作用而相互凝聚黏结，体积发生膨胀形成不带电荷的、多孔的、过滤性能好的絮凝体，这种絮凝体含有较多不易释出的水而保持弹性，在运行中不致被压实。絮凝体可以除去凝结水中的杂质（包括80%～90%的胶体硅或放射性物质在内），但由于滤速过高，不能截留粒径小于5μm的细小颗粒。

粉末树脂过滤器的运行特性如下，可供选用时参考。出水质量：Fe残余量5～10μg/L；Cu残余量1～3μg/L；$SiO_2 \leqslant 15\mu g/L$（除硅效果开始阶段好，后来差一些，高温下除硅效果不太理想）；电导率0.1～0.15μS/cm。

粉末树脂单位耗量：用于过滤时为0.4kg/m^{2}过滤面积；用于除离子时为0.8～1.0kg/m^{2}过滤面积。滤膜厚度为3～6mm时，一般可运行1～2星期；在6～10mm时，可运行2～3星期。运行流速为8～10m/h。运行终点由周期累计出水量、离子穿透或极限压差三者决定。例如在机组起动时、过滤负荷大，就要注意极限压差；在冷凝器泄漏时要注意水质防止穿透；机组正常运行时，凝结水质量好，要注意周期出水量。

粉末树脂在干燥状态下，保存于气密性能良好的袋中，使用时再开封。

粉末树脂覆盖过滤器具有设备简单，出水水质好，适用温度较高（最高可达100℃）等优点，但存在运行费用高，粉末树脂价格贵，运行周期短等不足。

457　为什么要进行锅炉的化学清洗？

锅炉的化学清洗，是保持受热面内表面清洁，防止受热面因结垢、腐蚀引起事故，以及提高锅炉水汽品质的必要措施之一。

锅炉的化学清洗，要求能除去新建锅炉在轧制、加工过程中形成的高温氧化轧皮以及在存放、运输、安装过程中所产生的腐蚀产物，焊渣和泥沙污染物等；除去运行锅炉在金属受热面上积聚的氧化铁垢、钙镁水垢、铜垢、硅酸盐垢和油垢等。

458　锅炉化学清洗的步骤和方式如何？

锅炉化学清洗的步骤一般是：系统水冲洗、碱洗或碱煮、碱洗后水冲洗、酸洗、酸洗后的水冲洗和钝化。

锅炉化学清洗的方式可分为：

（1）循环清洗：清洗液全循环；

（2）开式清洗：又称开路清洗，清洗液半循环，多点排放；

（3）浸泡清洗：清洗液不循环。

一般情况下，采用循环清洗或开式清洗。

459　新建锅炉的化学清洗范围有哪些？

新建锅炉的化学清洗范围：

（1）直流炉和过热蒸汽出口压力为 9.8MPa 及以上的汽包炉，在投产前必须进行化学清洗；压力在 9.8MPa 以下的汽包炉，除锈蚀严重者外，一般可不进行酸洗，但必须进行碱煮。

（2）再热器一般不进行化学清洗，但出口压力为 17.4MPa 机组的锅炉再热器可根据情况进行化学清洗。清洗时，必须保证管内流速达 0.15m/s 以上。过热器进行化学清洗时，必须有防止立式管产生气塞和腐蚀产物在管内沉积的措施。

（3）容量为 20×10^4kW 及以上的火力发电机组，凝结水及高压给水系统必须进行化学清洗（不包括高压加热器）；容量为 20×10^4kW 以下的火力发电机组，凝结水及高压给水管道的化学清洗，应根据管道内壁的腐蚀产物情况决定。

460　运行锅炉的化学清洗是如何确定的？

运行炉化学清洗的确定，一般可参考电力部门有关规定确定。当水冷壁管内的沉积物量或锅炉化学清洗的间隔时间超过下表中的极限值时，就应安排化学清洗。锅炉化学清洗的间隔时间，还可根据运行水质的异常情况和大修时锅内的检查情况，作适当变更。

以重油和天然气为燃料的锅炉和液态排渣炉，应按下表中规定的提高一级参数锅炉的沉积物极限量确定化学清洗。一般只需清洗锅炉本体。蒸汽通流部分是否进行化学清洗，应按实际情况决定。

确定需要化学清洗的条件

炉　型	汽包锅炉			直流炉
主蒸汽压力/MPa(kgf/cm²)	<5.88 (<60)	5.88～12.64 (60～129)	>12.74 (>130)	
沉积物量/(g/m²)	600～900	400～600	300～400	200～300
清洗间隔年限/a	一般 12～15	10	6	4

沉积物量，是指水冷壁管热流密度最高处向火侧 180°部位割管取样，用洗垢法测得沉积物量。

461　为什么酸洗能够除锈除垢？

酸洗是化学清洗的关键步骤，是锅炉除锈除垢的必然环节。酸洗除锈除垢是一个物理化学过程，以化学过程为主，其机理十分复杂，各种酸洗液的作用也不完全相同，但主要是由于酸的溶解、剥离和疏松作用。以无机酸盐酸为例，与钙镁水垢能产生以下反应而使其溶解：

$$CaCO_3+2HCl \rightleftharpoons CaCl_2-H_2O+CO_2\uparrow$$

$$MgCO_3\cdot Mg(OH)_2+4HCl \rightleftharpoons 2MgCl_2+3H_2O+CO_2\uparrow$$

盐酸对附着在金属表面上的氧化物有溶解和剥离双重作用，使铁锈从金属上脱落下来。

$$FeO+2HCl \rightleftharpoons FeCl_2+H_2O$$

$$Fe_2O_3+6HCl \rightleftharpoons 2FeCl_3+3H_2O$$

盐酸也会与裸露的金属起作用而产生腐蚀：

$$Fe+2HCl \rightleftharpoons FeCl_2+H_2\uparrow$$

所以为抑制酸洗的腐蚀作用，在酸洗液中必须加一定量的酸洗专用的缓蚀剂。

某些水垢成分（如硅酸盐、硫酸盐等）不能溶于盐酸，但也可

能由于盐酸对垢的疏松作用使其脱落。如以碳酸盐为主的水垢，在其主要成分被酸溶解时，产生大量 CO_2 气泡，起到搅拌作用。夹在其中少量不溶水垢也可能一起除去。

柠檬酸对氧化铁的溶解反应与无机酸相似，但同时又能与溶解产物 Fe^{3+} 作用生成络合物，所以具有酸洗能力强和附加腐蚀轻的优点。

氢氟酸溶解氧化铁的能力很强，是因为 F^- 的络合能力强，能和 Fe^{3+} 生成 FeF_6^{3-} 络合物。氢氟酸能与 SiO_2 生成可溶性的 H_2SiF_6。所以用其他酸很难清洗的硅酸盐垢也能用其洗去。

462　锅炉酸洗的条件是如何确定的？

锅炉酸洗的条件是这样确定的。

（1）酸洗介质的选择，一般根据垢的成分，锅炉设备的构造、材质，清洗效果，缓蚀效果，经济性的要求，药物对人体的危害以及废液排放和处理要求等因素进行综合考虑。一般应通过试验选用清洗介质，以及确定清洗参数。可选用的酸洗介质有盐酸、氢氟酸、柠檬酸、EDTA 铵盐等。

应根据清洗介质和炉型来选择清洗方式。盐酸、柠檬酸、EDTA铵盐一般可采用循环清洗，氢氟酸可采用开式清洗。

（2）酸洗液的浓度可由试验确定。用盐酸清洗水垢时可由垢厚选择酸液浓度。

水垢厚度/mm	≤0.5	0.5～1.0	1.0～1.5	1.5～2.0	2～5	5～10	>10
HCl 质量分数/%	3～5	5～6	6～7	7～8	10	12	15

为了减少酸洗液对金属的腐蚀，盐酸的最大质量分数一般不应大于 10%，最好＜5%；氢氟酸不宜超过 3%，有机酸不宜超过 10%。

（3）选择性能良好稳定的酸洗缓蚀剂。缓蚀效率至少＞95%，最好＞98%；易溶于酸；不易变质易保存；对环境污染小，废液易处理。

（4）循环酸洗应维持炉管中酸液的流速为 0.2～0.5m/s，不得

大于 1m/s。开式酸洗应维持炉管中酸液的流速为 0.15～0.5m/s，不得大于 1m/s。

（5）酸液温度越高，清洗效果越好，但金属的腐蚀速度也随之增加，缓蚀剂的效果随温度升高而降低。在酸洗时，酸液温度不可过高，无机酸的清洗温度一般采用 40～70℃，柠檬酸的清洗温度为 90～98℃，EDTA 铵盐的清洗温度为 120～140℃。

清洗时盐酸液与金属接触的时间一般不超过 12h。

（6）三价铁离子会加速钢铁的腐蚀。故酸洗废液，即使其酸的浓度仍较高，一般不能再用来清洗第二台锅炉。为抑制 Fe^{3+} 的影响，可加入还原剂如 Na_2SO_3、N_2H_4、$SnCl_2$、NH_4CNS 等。

（7）若氧化铁垢中含铜量较高时，应采取防止金属表面产生镀铜的措施。

463　锅炉化学清洗（酸洗）的介质应如何选择？

锅炉酸洗的介质应根据不同成分的垢和不同的清洗条件来选定，具体请见 407 页～409 页表。

464　常用的锅炉酸洗缓蚀剂有哪些？性能如何？

国产酸洗缓蚀剂的品种、牌号很多（见 410 页表），其类别及特点大致如下：

（1）醛-胺缩聚物类　由甲醛、苯胺合成，工艺简单，可以现场配制，水溶性较好。但有一定毒性，存放后性能不很稳定。

（2）硫脲及其衍生物类　缓蚀性能好，但水溶性能略差。使用时需先用少量温软化水调成糊状，否则易结块。

（3）吡啶及其衍生物类　具有较好的缓蚀性能和酸溶解性能。有的略带吡啶臭味。

（4）化工、医药产品的残料加工的缓蚀剂　成分复杂，多为含硫、氮的高分子化合物经改性处理后的产品。一般都具有较高的缓蚀效率。

缓蚀剂的用量需根据清洗酸的性质及缓蚀剂的缓蚀效率来确定。一般用量多不超过酸洗液质量的 5%，常用量是 0.2%～0.3%。

清洗介质的选择

序号	清洗工艺名称	清洗介质	添加药品	适用于清洗垢的种类	清洗的工艺条件	适用炉型及金属材料	优缺点
1	盐酸清洗	4%～7% HCl		$CaCO_3$>3% Fe_3O_4>40% SiO_2<5%	温度：55～60℃ 流速：0.2～1m/s 时间：一般 4～6h	汽包炉 碳钢②	清洗效果好，价格便宜，货源广，废液易于处理
2	盐酸清洗清除硅酸盐垢	4%～7% HCl	0.5%氟化物	Fe_3O_4>40% SiO_2>5%	温度：55～60℃ 流速：0.2～1m/s 时间：一般 4～6h	汽包炉 直流炉 碳钢②	对含硅酸盐的氧化铁垢清洗效果好，价格便宜，货源广
3	盐酸清洗清除碳酸盐垢、硫酸盐垢和硅酸盐硬垢	4%～7% HCl	清洗前必须用 Na_3PO_4、NaOH 碱煮。然后清洗液中加入 0.2% NH_4HF_2 或 0.4% NaF 及 0.5%$(NH_2)_2CS$（无 CuO 不加）	$CaCO_3$ > 3% $CaSO_4$ > 3% Fe_3O_4 > 40% SiO_2 > 20% CuO<5%	温度：55～60℃ 流速：0.2～1m/s 时间：一般 4～6h，不超过 12h	汽包炉 碳钢及低合金钢②	对坚硬的硅酸盐、氧化铁垢（CuO<5%）有足够的清洗能力，价格便宜，货源广，清洗工艺简单，易于掌握。废液较难处理
4	盐酸清洗后氨洗除铜	1.32%～1.5% $NH_3 \cdot H_2O$	盐酸清洗后用 1.3%～1.5% $NH_3 \cdot H_2O$ 及 0.5%～0.75%$(NH_4)_2S_2O_3$ 清洗除铜	Fe_3O_4>40% CuO>5%	温度：25～30℃ 流速：0.2～1m/s 时间：1～1.5h		适用于含 CuO>5% 的氧化铁垢的清洗。清洗后除铜效果好，但工艺步骤多

续表

序号	清洗工艺名称	清洗介质	添加药品	适用于清洗垢的种类	清洗的工艺条件	适用炉型及金属材料	优缺点
5	盐酸清洗，硫脲一步除铜钝化	4%～7% HCl	0.2% NH_4HF_2 或 0.4% NaF 及 6～8 倍铜离子浓度的 $(NH_2)_2CS$	Fe_3O_4>40% CuO>5%	温度：55～60℃ 流速：0.2～1m/s 时间：一般 4～6h 不超过 12h		适用于含 CuO＞5% 的氧化铁垢的清洗。工艺简单，效果好
6	盐酸清洗，硫脲一步除铜钝化还原铁工艺	4%～7% HCl	0.2% KCNS（若 Fe^{3+}＜500mg/L 不加），0.2% NH_4HF_2 或 0.4% NaF 及 6～8 倍铜离子浓度的 $(NH_2)_2CS$	Fe_3O_4>40% CuO>5%	温度：55～60℃ 流速：0.2～1m/s 时间：一般 4～6h 不超过 12h	汽包炉碳钢及低合金钢②	
7	盐酸清洗后微酸性除铜钝化	0.2%～0.3% $H_3C_6H_5O_7$	HCl 洗后漂洗时，在 0.2%～0.3% $H_3C_6H_5O_7$ 溶液中添加① 1.5%～2% $NaNO_2$ 并保持 100～200mg/L $CuSO_4$，50～100mg/L Cl	Fe_3O_4>40% CuO>5%	温度：35～55℃ 流速：0.2～1m/s 时间：4～6h	汽包炉 直流炉	适用于含 CuO 和 Fe_3O_4 垢的清洗，在 pH 值为 4～5 的条件下漂洗，除铜效果好。但当 pH 值控制不当时，易产生 $NaNO_2$ 分解造成二次污染

续表

序号	清洗工艺名称	清洗介质	添加药品	适用于清洗垢的种类	清洗的工艺条件	适用炉型及金属材料	优缺点
8	柠檬酸清洗	2%～4% $H_3C_6H_5O_7$	在 $H_3C_6H_5O_7$ 中添加氨水调 pH 值至 3.5～4	Fe_3O_4>40%	温度：90～98℃（≯85℃） 流速：0.2～1m/s 时间：4～6h	直流炉过热器为奥氏体钢	清洗系统简单，不需对阀门采取防护措施，危险性较小，清除氧化铁垢能力较差
9	“协调 EDTA”清洗	EDTA 浓度 2%～10%，根据小型试验定，清洗后残余 EDTA 应在 1.5%左右	根据垢样确定	$CaCO_3$>3% Fe_3O_4>40% CuO<5%	温度：130℃±10℃ 流速：0.1m/s 时间：一般 8～12h	汽包炉奥氏体钢	清洗系统简单，时间短，清洗水量少，但药品价格昂贵，废液必须回收，废液回收率为 80%左右
10	氢氟酸开路式清洗	1%～1.5% HF		Fe_3O_4>40% SiO_2>20%	温度：55～60℃ 流速：0.15～1m/s 时间：并式 2h 开式＋浸泡≯4h	直流炉过热器为奥氏体钢	对氧化铁垢溶解能力强，反应速度快，清洗时间短。废液处理较麻烦，需用石灰中和

① 盐酸清洗，微酸性除铜钝化溶液中含有 Cl 时，应事先用盐酸将水的 pH 值调到 5，当水温升至 56℃时，按照 $H_3C_6H_5O_7$、$NaNO_2$ 和 $CuSO_4$ 的先后顺序依次加入，并搅拌均匀。

② 不能用于清洗奥氏体不锈钢及对氯离子敏感的合金钢；也不宜用于过热器和炉前系统的清洗。

常用的酸洗缓蚀剂如下：

牌　号	主　要　成　分	研制或生产单位	适用的清洗酸
02-钢铁缓蚀剂	醛-胺聚合物	现场配制	HCl
天津若丁 801	二邻甲苯硫脲	河北工学院化工厂	HCl、H_2SO_4、H_3PO_4、HF、HAc
抚顺改型若丁 FHX-2	吡啶及喹啉的衍生物	抚顺石农兵化工厂	HCl、H_2SO_4
SH 415	安乃静、氨基吡啉副产品的胶体	陕西省化工研究院	HCl
SH-416	杂环酮胺类化合物	陕西省化工研究院	HF
IS-129	咪唑啉类	陕西省化工研究院	HCl
IS-156	咪唑啉类	陕西省化工研究院	HCl
LAN-5	乌洛托品、苯胺、硫氰酸钾	蓝星化学清洗集团公司清洗剂总厂	HNO_3
LAN-826		蓝星化学清洗集团公司清洗剂总厂	各种有机及无机酸

465　什么是钝化？有哪些常用的钝化方法？控制条件如何？

钝化是化学清洗的重要步骤之一。酸洗后因金属表面活化，暴露在大气中易受腐蚀。钝化处理是在酸洗之后用钝化液使金属表面形成稳定的保护膜，避免锅炉在酸洗后投运前生锈。常用的钝化方法及其控制条件如下：

钝化方法	药品名称	钝化液质量分数/%	钝化液温度/℃	钝化时间/h
磷酸三钠	$Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$	1～2	80～90	8～24
联氨	$N_2H_4 \cdot H_2O$	300～500mg/L，用氨水调 pH 值至 9.5～10	90～95	24～50
亚硝酸钠	$NaNO_2$	1.0～2.0，用氨水调 pH 值至 9～10	50～60	4～6
微酸性除铜钝化	$NaNO_2$① $H_3C_6H_5O_7$ $CuSO_4$ Cl^-	1～2 0.2～0.3 100～200mg/L 50～100mg/L	50±5	4～6
多聚磷酸钠	H_3PO_4 $Na_5P_3O_{10}$	0.15 0.2 用氨水调 pH 值至9.5～10	维持 45℃漂洗 1h 左右，加氨调 pH 值至9.5～10.0 后再升温至 75℃，循环 1～2h	

① 在 0.2%～0.3% $H_3C_6H_5O_7$ 溶液中直接加入 1%～2%的 $NaNO_2$，并添加 100～200mg/L $CuSO_4$ 和维持 Cl^- 为 50～100mg/L。

466 什么是碱洗或碱煮？方法如何？

碱洗或碱煮是去除新建锅炉内部涂层防锈剂及运行炉内垢层表面的油污等附着物，改善清洗表面的润湿性，为下一步酸洗创造有利条件。

新建锅炉需碱煮，即将锅炉点火升温，升至一定压力，维持时间 8～12h。高中压锅炉一般升至 0.98～1.96MPa（10～20atm），低压锅炉一般为 0.29～0.49MPa（3～5atm）。

运行锅炉多采用碱洗，温度为 90～95℃，时间为 8～24h。碱洗步骤可视清洗表面情况有选择地进行。如主要是碳酸盐水垢，且表面润湿性较好时，可不进行碱洗而直接酸洗。

为改善清洗表面的润湿性，通常在清洗液中添加 0.05%的润湿剂。常用的有：烷基苯磺酸盐、OP-15、JX-1（一种中性表面活性洗涤剂）或海鸥洗涤剂。

常用的碱洗或碱煮配方

碱洗液名称	清洗液组成	适用范围
磷酸盐	Na_3PO_4 0.2%～0.5% Na_2HPO_4 0.1%～0.2%	高中低压炉
磷酸盐、烧碱	Na_2HPO_4 0.2%～0.5% NaOH 0.5%～0.8%	中低压炉①
磷酸盐、烧碱	$Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$ 0.5%～1.0% NaOH 0.2%	中低压炉①
纯碱、烧碱	Na_2CO_3 0.3%～0.5% NaOH 0.2%	低压炉

① 清洗范围内有奥氏体钢制部件时，一般不用 NaOH 碱洗。

467 如何进行锅炉化学清洗？

锅炉化学清洗的工艺过程如下。

（1）应做好化学清洗前的准备工作：

机组热力系统应安装或检修完毕，并经水压试验合格；

清洗系统已安装好，经试压合格，各种转动设备应试运转无异常；

备好化学清洗用水量；

排放系统应畅通，并能有效处理废液装置；

配好化学清洗药品，并有化验仪器；

参加化学清洗人员应培训完毕；

腐蚀挂片及监测仪器齐备；

不进行清洗的设备、系统要有效隔离；

应在汽包水位监视点、加药点、清洗泵等处设岗，并装通讯联系。

（2）确定化学清洗方案，计算好药品用量。

（3）对新机组在化学清洗前必须进行水冲洗，冲洗流速 0.5～1.5m/s，冲洗终点以出水达到透明无杂物为准。

（4）碱洗或碱煮。煮炉过程中需由底部排污 2～3 次，最后进行大量换水。至排水 pH 值降至 9 左右，水温降至 70～80℃，即可将水全排出。

（5）碱洗后用过滤水、软水或除盐水冲洗，洗至出水 pH≤8.4，水质透明。

（6）加缓蚀剂加酸进行酸洗。当酸洗液中铁离子浓度趋于稳定，监视管内基本清洁，再循环 1 小时左右，便可停止酸洗。

（7）酸洗后水冲洗。冲洗至排出液 pH 值为 4～4.5，含铁量＜20～30mg/L 为止。

（8）钝化。漂洗液含铁量＜500mg/L，用氨水调 pH 值至 9～10 后再加钝化药剂进行钝化。

468　锅炉化学清洗有些什么质量要求？

化学清洗的质量应达到下列要求。

（1）被清洗的金属表面应清洁，基本上无残留氧化物和焊渣，不出现二次浮锈，无点蚀，无明显金属粗晶析出的过洗现象，不允许有镀铜现象并应形成完整的钝化保护膜。

（2）腐蚀挂片(指示片)的平均腐蚀速度，应小于 10g/(m^2 · h)。

（3）固定设备上的阀门，不应受到损伤。

469　锅炉化学清洗的药剂用量是如何估算的？

锅炉化学清洗常用的药剂是盐酸、柠檬酸、氢氟酸和 EDTA

等。药剂用量的估算如下。

（1）盐酸及氢氟酸用量

对于清洗新投产的锅炉及运行锅炉的氧化物及金属氧化物时的盐酸和氢氟酸的用量：

$$G_s=\alpha\frac{V\cdot C\cdot\rho}{K}\quad t$$

式中 α——过剩系数，新投入运行锅炉采用 1.2，运行锅炉采用 1.4～1.6；

V——清洗液体积，m^3；

C——清洗所用酸液的质量分数，%；

K——工业酸的质量分数，%；

ρ——清洗液密度，t/m^3。

（2）盐酸清洗钙垢时的用量

$$G_s=(0.73F\cdot\delta\cdot\gamma+d)\frac{100}{K}\quad kg$$

式中 F——被清洗面积，m^2；

δ——垢的平均厚度，m；

γ——$CaCO_3$ 的密度，一般为 1550kg/m^3；

d——清洗后溶液中残存酸量 kg，一般排酸的质量分数为 1%左右；

K——工业盐酸的质量分数，%；

0.73——与每 kg $CaCO_3$ 反应所需盐酸的数量，kg。

（3）柠檬酸的用量

常采用柠檬酸铵作为清洗介质，浓度一般为 2%～4%，其用量：

$$G_v=\beta\frac{W_G\cdot F\times10^{-4}}{K}\quad t$$

式中 W_G——锅炉水冷壁单位面积上的垢量，g/m^2；

F——被清洗面积，m^2；

β——每克氧化铁耗用的药剂量，g/g，对于柠檬酸铵 β=2.5～3.0g/g；

K — 工业酸（或药剂）的质量分数，%。

（4）EDTA 的用量

$$G_E = G_1 + G_2 + G_3 \quad t$$

式中 G_1— 应维持的 EDTA 宽裕量，通常取 1.5%Q；

Q— 锅炉清洗容积，m^3；

G_2— 清洗 W_z 量垢时，按 Fe_3O_4 ∶ EDTA = 1 ∶ 1 络合所需 EDTA 量，络合换算系数为 3.8，所以 $G_2 = 3.8W_z$；

W_Z —锅炉水冷壁上的总垢量，t；

G_3 —综合各种因素，化学清洗时应考虑的药剂宽裕量，根据经验取$(G_1 + G_2) \times 10\%$。

所以

$$G_E = \left(\frac{1.5}{100}Q + 3.8W_Z\right) \times 1.1 \quad t$$

第五章　敞开式循环冷却水的化学处理

(一) 循环冷却水

470　什么是工业冷却水？冷却水系统通常可分哪几种型式？

化学工业、石油工业、冶金工业及建筑的空调系统中常需要将热工艺介质进行冷却，水的特性很适合用作冷却介质。工业冷却水通过换热器（或称热交换器、水冷却器、水冷器）与工艺介质间接换热。热的工艺介质在热交换过程中降低温度，冷却水被加热而温度升高。工业冷却水的用量往往很大，在化学工业许多企业中占到工业用水总量的90%～95%以上。因此要进行回收循环使用。

冷却水系统基本可分为直流水系统和循环水系统。

在直流水系统中，冷却水只经换热器一次利用后就被排掉了，所以直流水又称为一次利用水。直流冷却水系统通常用水量很大，水经换热器后的温升较小，而排出水的温度也较低，水中的含盐量基本上不浓缩。一般只有在具有可供大量使用的低温水，并且水费便宜的地区采用这种系统。但由于排水对环境的污染问题，所以现在即使在水量丰富的地区也不提倡采用直流水系统。图5-1-1为直流水系统的示意图。

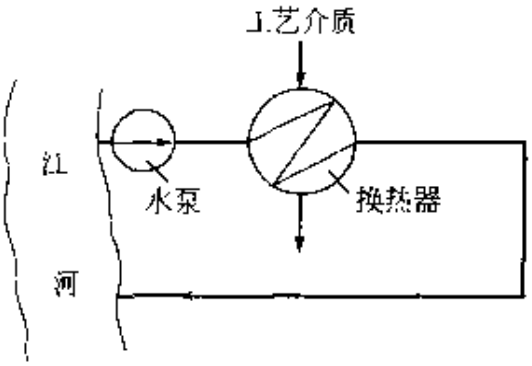


图5-1-1　直流水系统示意图

在循环水系统中，冷却水可以反复使用。水经换热器后温度升高，由冷却塔或其他冷却设备将水温降低下来，再由泵将水送往用

户，水在如此不断地进行重复使用，所以采用循环水系统可提高水的重复利用率。随着节约用水的需要，许多工业正逐渐转向采用循环水系统。

471 什么是密闭式循环水系统和敞开式循环水系统？

在密闭式循环水系统中，水不暴露于空气中，水的再冷是通过一定类型的换热设备用其他的冷却介质进行冷却的。冷却水损失极小，基本上不浓缩。内燃机的冷却水系统是密闭式循环系统的代表，如图 5-1-2 所示。

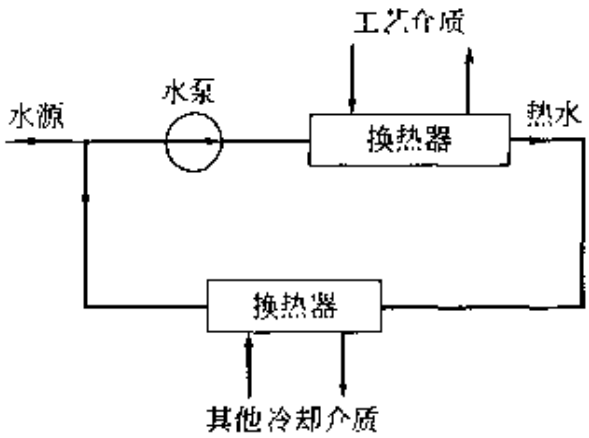


图 5-1-2 密闭式循环水系统

在敞开式循环水系统中，冷却水通过换热器后水温提高成为热水，热水经冷却塔曝气与空气接触，由于水的蒸发散热和接触散热使水温降低，冷却后的水再循环使用。敞开式冷却水系统又叫冷却塔系统，因为它常用冷却塔作为水的冷却设备，这种系统在工厂中得到广泛使用。如图 5-1-3 所示。

这种敞开式循环冷却水系统，由于在循环过程中要蒸发掉一部分水，还要排出一定的浓缩水，故要补充一定的新鲜水，以维持循环水中的含盐量或某一离子含量在一定值上。比较起来，循环水补充的新鲜水是很有限的，一般只是直流用水量的四十分之一左右。

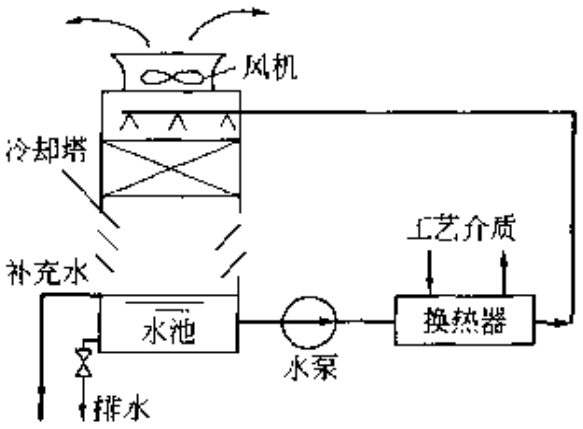
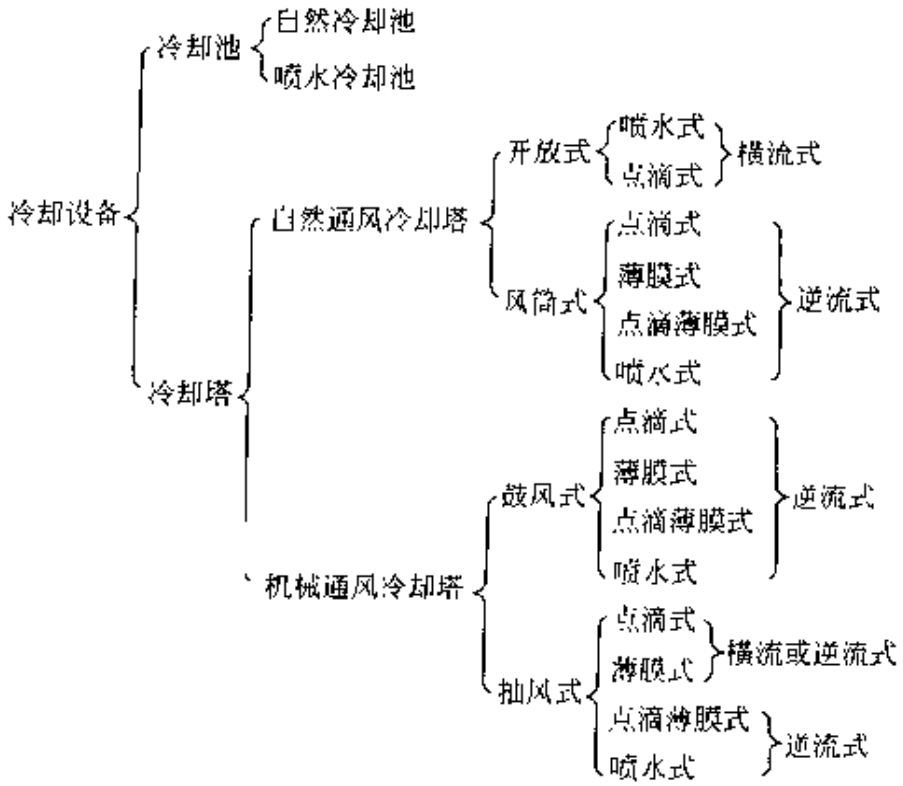


图 5-1-3 敞开式循环冷却水系统

472 敞开式循环水系统可分为哪几类？

敞开式冷却系统是目前应用最广、类型最多的一种冷却系统。根据热水与空气接触的不同方式，冷却系统可分为两大类，即冷却

池和冷却塔，分类如下。



冷却池分自然冷却池与喷水冷却池两种。

自然冷却池藉池面水与空气接触，以接触、辐射和蒸发传热的过程散热。适用于冷却水量大、冷却幅宽（即冷却前后温差）不大的循环系统，所在地区还必须具备可利用的天然湖泊、洼地或人工水库的条件。常用于火力发电厂。

喷水冷却池是利用人工或天然水池，在池上布置水管和喷嘴将热水喷出，使水分散成细水滴。这样增加了水和空气的接触面积，使水的蒸发速率增加，单位水池面积的冷却效率比自然冷却池提高了。该种冷却池适用于冷却水量较小、冷却幅宽不大的系统，并且须有足够开阔场地、洼地或池塘可以利用的地方。

冷却池的特点是冷却过程缓慢、效率低、冷热水温差小，需要很大的贮水量和占地面积。同时水池露天，水质易受污染。冷却池是最早采用的冷却系统，目前已多采用冷却塔作冷却设备了。

冷却塔是一个塔形建筑，水气热交换在塔内进行，可以人工控制空气流量来加强空气与水的对流作用以提高冷却效果。冷却塔具

有占地面积小和冷却效果好等特点，近年发展的小型玻璃钢冷却塔，兼有体轻、安装使用方便等优点，所以现在冷却塔不仅已在用水量大的工厂广泛使用，而且在用水量不大的工厂、宾馆的空调系统多已取代了直流系统和冷却池。

473　冷却塔的工艺构造包括哪些部分？

冷却塔中一般包括通风筒、配水系统、淋水装置、通风设备、收水器和集水池等部分。

① 通风筒　通风筒的作用是创造良好的空气动力条件，减少通风阻力，并将塔内的湿热空气送往高空。机械通风冷却塔采用强制通风，故一般风筒较低；而自然通风冷却塔的通风筒起抽风和送湿热空气的作用故筒体较高。

② 配水系统　将热水均匀分布到整个淋水装置上，热水分布均匀与否对冷却效果影响很大。如水量分配不好，不仅直接降低冷却效果，也会造成冷却水滴飞溅到塔外。配水系统一般有槽式、管式和池式配水等三种。此外，还有旋转配水系统，但不多用。

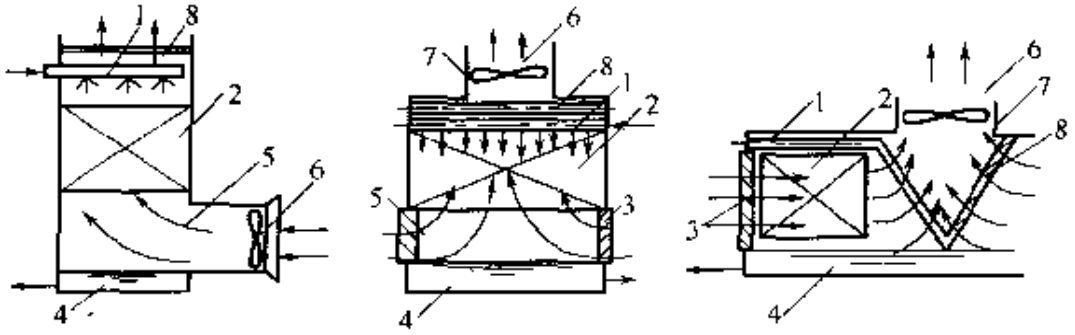
③ 淋水装置　淋水装置也称填料，是冷却设备中的一个关键部分，其作用是将需要冷却的热水多次溅散成水滴或形成水膜，以增加水和空气的热交换。水的冷却过程主要是在淋水装置中进行的。根据在淋水装置中水被淋洒成的表面形式，一般可将淋水装置分成点滴式、薄膜式及点滴薄膜式等三种。

④ 通风设备　在机械通风冷却塔中利用通风机产生预计的空气流量，以保证要求的冷却效果。常用的是轴流式风机，这种风机的特点是风量大，风压较小，还可以作短时间反转以融化冬季进风处的冰凌，同时通过调整叶片角度可得到合适的风量和风压。根据风机安装所在位置，又可分为鼓风式和抽风式。

⑤ 收水器　将排出湿热空气中所携带的水滴与空气分离，减少逸出水量损失和对周围环境的影响。

⑥ 集水池　设于冷却塔下部，汇集淋水装置落下的冷却水。有时集水池还具有一定的储备容积，起调节流量作用。

图 5-1-4 为各式机械通风冷却塔构造的示意图。



(a) 鼓风逆流式冷却塔　(b) 抽风逆流式冷却塔　(c) 抽风横流式冷却塔

图 5-1-4　各式机械通风冷却塔

1—配水系统；2—淋水装置；3—百叶窗；4—集水池；
5—空气分配区；6—风机；7—风筒；8—收水器

474　为什么工业用水有必要采用循环冷却水系统？

在 20 世纪初，随着工业的迅速发展，工业用水愈来愈多，但是，几乎没有一家工厂用循环水。到了 40 年代，人们生活用水、农田用水和工业用水之间出现了争夺，直流水系统已受到了水资源的限制，于是另觅用水的出路而发展了循环水系统。例如一套冷却水用量约为 20000t/a 左右的装置，如采用循环水系统，每小时补充四五百吨新鲜水就够了，节约的水量非常可观。

我国淡水资源并不丰富，且分配甚不均衡，北方缺雨少水，更显水源紧张。如华北地区和京津一带已连年闹水荒，严重影响工农业的发展和人们的生活用水，节约用水日益迫切。在水源上得天独厚的长江流域和江南水乡，由于不注意排水的处理，江河湖泊遭受不同程度的排水污染，影响人们饮用水的质量和鱼类的生存。为保护生态环境不被破坏，环保部门对排出水的温度、pH 值及其他污染物都有规定。为使有害成分达到排放标准，只有减少污水的流量才能适合处理和降低污水处理的费用。因此，无论从节约水源还是从经济观点和保护环境的观点出发，都应设法减少取水量，降低冷却水排污量，限制使用直流水系统，尽可能推广采用敞开式循环冷却水系统，这是大势所趋。

循环水比起直流水，除了节约新鲜水量、减少排污水量之外，还可以防止热污染，因为 $1m^3$ 直流排放水每升高 1℃ 就要带出

4.1868×10⁶J（焦耳）的热量。循环水还因控制换热器的污垢热阻而提高传热效果和生产效率，减少设备体积，节约钢材。循环水有效控制了系统中设备的腐蚀，从而提高设备的使用寿命。

475 什么是循环水系统容积？

循环水系统容积又称系统保有水量，它包括冷却塔水池、旁滤池、循环水管道、换热器、集水井等空间体积。

系统容积大小，对系统的化学清洗、预膜、正常运行等的初始投药量和水处理药剂在系统中停留时间有很大影响。

如果系统容积（V）过小，则每小时水在系统内循环次数就增加，因而水被加热的次数就增多，药剂被分解的机率越高。如果系统容积过大，则药剂在系统中停留的时间长，药剂分解的机率也高，同时初始加药量多，特别是间断投加的杀生剂消耗大。因而系统容积不可太大，也不可过小。一般系统容积（V）按所投加的药剂允许停留时间计算求得，或按循环水小时循环量的 1/3 或 1/5 确定。一般防腐防垢药剂在系统中停留时间不超过 50h 左右。循环冷却水在系统中的设计停留时间不应超过药剂的允许停留时间。

476 什么是循环水在系统内的平均停留时间？

循环水在系统内的平均停留时间可以用下式表示：

$$T=\frac{V}{B+D}$$

式中 V——循环水系统容积，m^3；

B——循环水排污水量，m^3/h；

D——风吹损失水量，m^3/h；

T——系统容积 V（m^3）的水排完所需的时间，h。

实际上，停留时间这个概念很复杂也很笼统，有些水可能在塔内循环一次就排出了，而另一些水可能要循环多次，所以 T 只能表示平均停留时间，它与实际情况有出入。

为了使各种药剂在系统内保持应有的效力并防止沉淀，对停留时间 T 应加以限制，不能过大，一般不超过 50 小时。如采用聚磷酸盐药剂，在系统中停留时间太长了，不仅使药剂失效，而且水解

后能直接转化为正磷酸盐，形成磷酸钙沉淀，从而增加换热器的热阻。此外，水在系统中停留时间愈长，微生物愈易繁殖。反之停留时间 T 也不能太短，因药剂还未在水处理中发挥作用就被排掉，造成药剂的浪费。所以停留时间是选择水处理药剂时需注意的重要因素。

477　循环水的冷却原理是什么？

循环水的冷却是通过水与空气接触，由蒸发散热、接触散热和辐射散热三个过程共同作用的结果。

① 蒸发散热　水在冷却设备中形成大小水滴或极薄水膜，扩大其与空气的接触面积和延长接触时间，使部分水蒸发，水汽从水中带走汽化所需的热量，从而使水冷却。

② 接触散热　水与空气对流接触时，如果空气的温度低于水的温度，则水中的热量会直接传给空气，使空气温度升高，水温降低。二者温差越大，传热效果越好。

③ 辐射散热　辐射散热不需要传热介质的作用，而是由一种电磁波的形式来传播热能的现象。辐射散热只是在大面积的冷却池内才起作用。在其他类型的冷却设备中，辐射散热可以忽略不计。

这三种散热过程在水冷却中所起的作用，随空气的物理性质不同而异。春、夏、秋三季内，室外气温较高，表面蒸发起主要作用，最炎热夏季的蒸发散热量可达总散热量的 90%以上，故水的蒸发损失量最大，需要的补充水量也最多。在冬季，由于气温降低，接触散热的作用增大，从夏季的 10%～20%增加到 40%～50%，严寒天气甚至可增加到 70%左右，故在寒冷季节水的蒸发损失量减少，补充水量也就随之降低。

478　什么是空气的干球温度和湿球温度？它对冷却塔的冷却效率有何影响？

干球温度和湿球温度是测定冷却塔冷却效率的主要气象资料。干球温度是温度计水银球干燥时所测的温度，即用一般温度计所测得的气温。湿球温度是在温度计水银球上盖上一层很薄的湿布，湿

布中的水分必然要蒸发进入空气中，其蒸发所需的汽化热则由水温降低所散发的热来供给，水温不断下降直至稳定在 τ 时，该时的温度就是湿球温度。空气的干、湿球温度一般可从干、湿球温度计中测得。

湿球温度对冷却塔中水的冷却效率密切相关，其效率系数可用下式表示：

$$\eta=\frac{t_1-t_2}{t_1-\tau_1}=\frac{1}{1+\frac{t_2-\tau_1}{\Delta t}}$$

式中 η——冷却塔的效率系数；

t_1——进塔水温，℃；

t_2——出塔水温，℃；

Δt——进塔水温和出塔水温之差（即冷却幅宽），℃；

τ_1——进塔空气的湿球温度，℃；

t_2 τ_1——冷却幅高，℃。

从上式可以看出，当进塔和出塔水温差确定时，效率系数 η 是冷却幅高（$t_2-\tau_1$）的单元函数，因此出塔水温 t_2 愈接近湿球温度 τ_1 时，效率系数值就愈高。湿球温度 τ_1 由干球温度和空气的湿度而决定，它代表在当地气温条件下，水可能被冷却的最低温度，也是冷却设备出水温度的理论极限值。但冷却幅高过低时，基建投资也增大。故一般设计采用冷却幅高值为 4～6℃。

479 冷却水在循环过程中有哪些水量损失？

冷却水在循环过程中共有四部分水量损失。

（1）蒸发水量 E

冷却水在冷却塔中与空气接触对流换热，使部分水蒸发逸入大气。这部分损失的水量为蒸发水量。

$$E=\alpha R/100 \quad m^3/h$$

其中 R——系统中循环水量，m^3/h；

α——蒸发损失率，%。

α 随季节而变化，根据统计资料，α 值大致如下：

Δt/℃	5	10	15	20
夏季	0.7	1.4	2.2	2.9
春季	0.5	1.0	1.5	2.0
冬季	0.3	0.7	1.0	1.4

如粗略计算，可按下式：

$$E=(0.1-0.002\theta)\Delta tR/100 \quad m^3/h$$

其中 Δt — 冷却塔进出水温差，℃；

θ——空气的干球温度，℃。

(2) 风吹损失水量 D

空气从冷却塔中带出部分水滴，称为风吹损失水量。对于强制通风的冷却塔，D 值一般按循环水量的 0.1%估算。但近年冷却塔经过结构改进，较先进的塔型实际可达到 0.05%以下。

(3) 排污水量 B

为了控制冷却水循环过程中因蒸发损失而引起含盐量浓缩，必须人为地排掉一部分水量，即排污水量。

$$B=\frac{E}{N-1}-D \quad m^3/h$$

式中 N——浓缩倍数。

(4) 渗漏损失 F

在管道、阀件和贮水系统中因渗漏而损失的水量。

在敞开式循环冷却水系统，为维持系统的水量平衡，补充水量 M 应是蒸发水量 E、风吹损失水量 D、排污水量 B 和渗漏损失 F 各项水量损失之和，如图 5-1-5 所示。

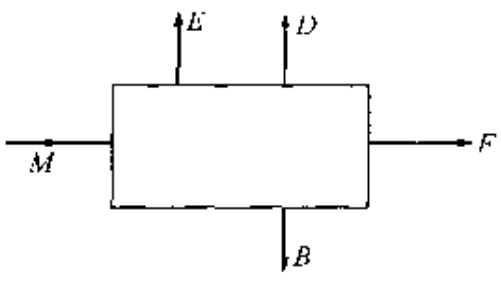


图 5-1-5 循环水系统水量平衡示意图

$M=E+D+B+F$

在上式这些值中间，补充水量 M 和排污水量 B 可以直接用流量计测定，蒸发水量 E 和风吹损失 D 按上述方法求得，渗漏损失 F 因水量较小一般可忽略不计。

480 什么是循环水的浓缩倍数？

循环冷却水通过冷却塔时水分不断蒸发，因为蒸发掉的水中不含盐分，所以随着蒸发过程的进行，循环水中的溶解盐类不断被浓缩，含盐量不断增加。为了将循环水中含盐量维持在某一个浓度，必须排掉一部分冷却水，同时要维持循环过程中水量的平衡，为此就要不断地补充新鲜水。新鲜水的含盐量和经过浓缩过程的循环水的含盐量是不相同的，两者的比值 N 称为浓缩倍数，并以下式表示：

$$N=\frac{S_{循}}{S_{补}}$$

式中 $S_{循}$——循环水的含盐量，mg/L；

$S_{补}$——补充新鲜水的含盐量，mg/L。

用含盐量计算浓缩倍数比较麻烦，同时因倍数提高之后有些盐类沉积，故用含盐量算出的倍数也有误差。因此，一般选用在水中比较稳定的离子来计算倍数。这种离子在浓缩过程中不应受外界条件干扰，不分解、不沉积，投加的药剂中不应含有此离子。在实际中往往选择循环水中某种不易消耗而又快速测定的离子浓度或电导率来代替含盐量浓缩倍数的计算。一般常以补充水及循环水中的氯离子浓度来计算浓缩倍数。但循环水中以液氯杀生而引入氯离子时，则不宜采用氯离子计算倍数。故通常选用 SiO_2、K^{+} 来计算浓缩倍数，有时也可采用几种离子所测定的浓缩倍数的平均值来作倍数的基准。

481 为什么提高浓缩倍数可以节约用水和药剂费用？

根据循环水系统的水量平衡和物料衡算，浓缩倍数 N 可按下式求得

$$N=\frac{E+D+B}{D+B} \quad 或 \quad N=\frac{M}{M-E}$$

由上面的公式还可以得出 M/E 的比值和浓缩倍数 N 的关系，如图 5-1-6 所示。

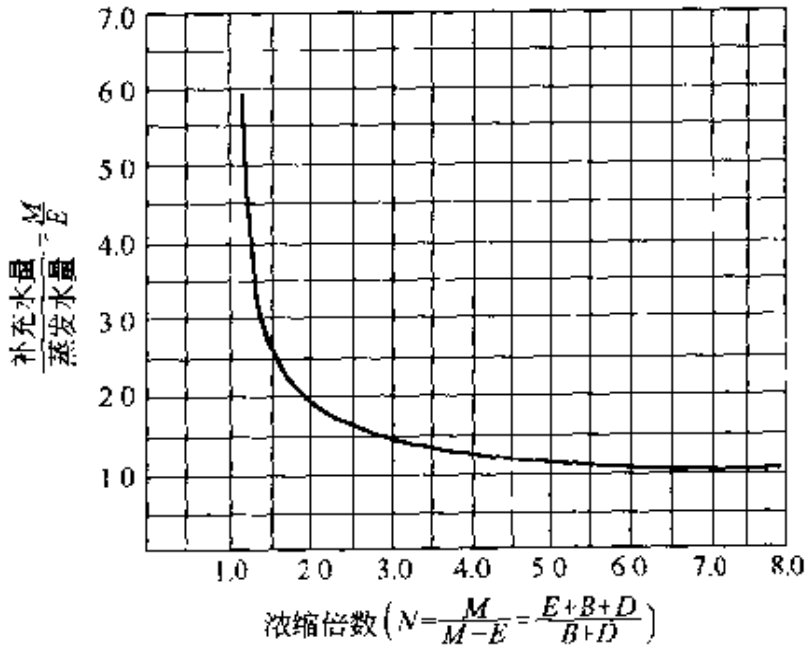


图 5-1-6 $\frac{M}{E}$比值和浓缩倍数 N 的关系

从图 5-1-6 可以看出，浓缩倍数 N 值越大，M/E 比值越小，即在蒸发水量 E、风吹损失水量 D 不变，排污水量 B 越小的条件下，补充水量 M 就越小。说明为了节约补充水和减少排污水量，应该尽量采用大的浓缩倍数。当 $N=1\sim2$ 时，随着浓缩倍数增加，补充水量 M 和排污水量 B 迅速减少，但当浓缩倍数大于 5～6 以后，M/E 曲线变得很平缓，因此排污水量 B 的进一步减小，节水数量就不大了。

不同浓缩倍数时，补充水及排污水量占循环水量的百分率大致如下表。

冷却塔进出口水温差/℃	蒸发水率/%	M 或 B	浓缩倍数						
			1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	5.0
			补充水率(M)或排污水率(B)/%						
5	0.85	M	2.6	1.7	1.4	1.3	1.2	1.13	1.06
		B	1.6	0.8	0.5	0.33	0.24	0.18	0.11
8	1.36	M	4.1	2.7	2.3	2.0	1.9	1.8	1.7
		B	2.6	1.3	0.9	0.6	0.44	0.35	0.24

续表

冷却塔进出口水温差/℃	蒸发水率/%	M或B	浓缩倍数						
			1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	5.0
			补充水率(M)或排污水率(B)/%						
10	1.70	M	5.1	3.4	2.8	2.6	2.4	2.3	2.1
		B	3.3	1.6	1.0	0.8	0.6	0.5	0.33
12	2.04	M	6.1	4.1	3.4	3.1	2.9	2.7	2.6
		B	4.0	1.9	1.3	0.9	0.7	0.6	0.4
14	2.38	M	7.1	4.8	4.0	3.6	3.3	3.2	3.0
		B	4.7	2.3	1.5	1.1	0.9	0.7	0.5

注：假定风吹损失占循环水量的0.1%，入塔空气干球温度为35℃。

提高浓缩倍数不但可以节约用水，而且也可减少随排水而流失的药剂量，因而节约了药剂费用。敞开式循环水系统的浓缩倍数应尽量争取达到3～5倍，但究竟选用多大的浓缩倍数为合适，必须首先分析浓缩后的水质情况。如果水中有害离子氯根或成垢离子钙、镁等含量过高，并有产生腐蚀或结垢的倾向，则浓缩倍数就不宜提得过高，以免增加腐蚀或结垢。浓缩倍数高了，增加了水在系统的停留时间，不利于微生物的控制。

操作时若保持浓缩倍数不变，蒸发量大时，要增大补充水量；操作时若保持水平衡，增大补充水量M或排污水量B，都要影响浓缩倍数下降，因而操作时，不能任意改变M、B值。

482　如何计算间断加药的循环冷却水系统中药剂的消耗量？

某些循环冷却水系统采用间断加药方式，如每日或每班（8小时）向系统中投加一次缓蚀阻垢药剂。由于排污水带走了部分药剂，所以循环水中药剂的浓度会逐步降低。如果补充水及排污水都是连续进行的，而且其水量大致稳定，则循环水中药剂浓度与时间变化的关系式如下：

$$C=C_0e^{-B(t-t_0)/V} \quad 或 \quad \ln C=\ln C_0-\frac{B}{V}(t-t_0)$$

式中　V——系统容积，m^3；

B——排污水量（包括渗漏、风吹损失），m^3/h；

C_0 ——药剂初始质量浓度，mg/L；

C ——药剂变化后质量浓度，mg/L；

t_0——形成 C_0 时的时刻，h；

t——形成 C 时的时刻，h；

e——自然对数底数，约为 2.718。

例如，某系统容积为 6000 m^3，连续排污量为 300 m^3/h，每 8h 加药一次，加药后初始浓度为 10 mg/L。则 8 h 后药剂浓度为：

$$C=10e^{-300(8-0)/6000}=10e^{-0.4}=6.70\ mg/L$$

8h 需补充的药量为：

$$(C-C_0)V/1000=(10-6.70)\times6000/1000=19.8\ kg$$

掌握药剂浓度与时间变化的关系，一方面可以计算间断加药每次的加药量，另外可掌握每个加药间隔期间药剂的最高及最低浓度范围。如上例，每 8 h 加药一次，药剂浓度范围为 6.7～10.0 mg/L。实际上起缓蚀阻垢作用的浓度是 6.7 mg/L 而不是 10.0 mg/L。如果这个浓度起不到应有的作用，则应提高初始浓度（如将 10.0 mg/L 提高到 12.0 mg/L 或其他浓度）或者降低加药间隔时间（如将 8 h 降到 4h）。

以上计算式未考虑药剂的化学降解或沉积，所以实际上变化后药剂浓度要比以上计算值低一些。这部分因降解、沉积等原因造成的药剂损失与药剂的性质、停留时间、水质等因素都有关系，很难用理论式来计算。一般多由现场实测或进行该药剂的专门试验，归纳成损耗率公式进行计算。有时可用以上浓度与时间关系的理论式计算结果与实际药剂损耗率进行对比来估计某些易水解药剂（如聚磷酸盐）的水解率。

483 循环冷却水中溶解离子浓度随浓缩倍数的变化是如何计算的？

假设循环冷却水系统为连续补充水和连续排污，其水量基本稳定。并假设水中溶解离子浓度的变化与大气无关，冷却水中某些能导致结垢的离子浓度在使用阻垢分散剂所允许的极限浓度范围之内，不析出沉积。这样，溶解离子只由补充水带入，只从排污水带

出。在运行一段时间之后，浓缩倍数会达到一个稳定值，因而水中溶解离子也基本稳定在一定浓度。

运行过程中由于各种原因有时需要提高或降低浓缩倍数，调整补充水或排污水量，则会引起水中溶解离子浓度的变化，其关系式为：

$$C=NC_M-(NC_M-C_0)e^{-B(t-t_0)/V}$$

式中 V——系统容积，m^3；

B—— 排污水量（包括渗漏、风吹损失），m^3/h；

C_M —某离子在补充水中的质量浓度，mg/L；

C_0——某离子在循环冷却水中的初始质量浓度，mg/L；

C—— 某离子在循环冷却水中变化后的质量浓度，mg/L；

t_0——形成 C_0 时的时刻，h；

t——形成 C 时的时刻，h；

N——要求达到的浓缩倍数；

e —自然对数底数，约为 2.718。

当 $NC_M>C_0$ 时，离子浓度增高，为浓缩过程。当 $NC_M<C_0$ 时，离子浓度降低，为稀释过程。

用该关系式可以大致计算出从冷态运行到一定倍数所需的时间。例如，某系统容积为 4800 m^3，排污水量为 480 m^3/h，补充水中氯离子为 50 mg/L，该系统未使用氯型杀生剂，故氯离子浓度只受浓缩影响，无其他增加因素。要求计算从冷态运行达到 3 倍时大约所需时间。

冷态时 $C_M=C_0=50$ mg/L，$t-t_0=5$ h 时，$C=3\times50-(3\times50-50)e^{480\times5/4800}=150-100e^{-0.5}=89.4$ mg/L，按此法计算的 $(t-t_0)$ 与氯离子质量浓度 C 的关系如下表：

$t-t_0$ /h	0	5	10	15	20	25	30	35	40	50	60
C /(mg/L)	50	89.4	113.2	122.7	136.5	141.8	145.0	147.0	148.2	149.3	149.8

由该式计算结果，达到 $N=3$ 时，时间为无穷长。如果取达到 $0.95N$ 时的时间，即 $C=142.5$ mg/L 时，约为 25～30 h。

用该式也可计算降低浓缩倍数所需的大致时间。例如系统容积为 2000m³ 的系统，补充水的钙离子质量浓度为 40 mg/L。该系统已浓缩至 5 倍，即循环水中钙离子为200 mg/L。为减少碳酸钙结垢倾向，希望将钙离子降至 160 mg/L，即 4 倍。如果排污水量为220 m³/h，计算降至 4 倍大约需要的时间。

$t-t_0=5$ h 时，$C=4\times40-(4\times40-200)e^{-220\times5/2000}=160+40e^{-0.55}=183.1$ mg/L，不同 $(t-t_0)$ 与钙离子质量浓度 C 的关系如下表：

$t-t_0$/h	0	5	10	15	20	25	30
C/(mg/L)	200	183.1	173.3	167.7	164.4	162.6	161.5

该式计算结果达到 4 倍时，时间也为无穷长，如取达到 4.05 倍，即钙离子为 162 mg/L 的时间，则约需 25～30 h。

484　敞开式循环冷却水中悬浮物浓度随浓缩的变化关系是如何计算的?

敞开式循环冷却水系统中的悬浮物一部分来源于补充水。由于补充水多是经过预处理的水，所以其悬浮物含量大致一定。另一部分来源于空气中的尘埃。空气中的含尘量随地区和季节不同有较大差异，其带入循环水中的浓度往往要比补充水所带进的高许多倍。如果空气尘埃在冷却塔中的淋洗效率为 1.0，由空气带入系统的

$$\text{尘埃量}=R_A C_A \quad \text{g/h},\ R_A=1000\lambda R/\gamma_A$$

其中　R_A 为冷却塔空气流量，m³/h；C_A 为空气中含尘量，g/m³；R 为循环冷却水量，m³/h；λ 为冷却塔的气水比；γ_A 为空气密度，kg/m³。

空气带入系统的尘埃大部分沉积在冷却塔池底部，可通过塔池池底排污排出系统。悬浮在循环水中的只占空气尘埃量的一小部

分，约为 1/5～1/2。即由空气带入系统的悬浮物量＝$\beta R_A C_A$，β 为悬浮物沉降系数，应通过试验确定。一般 $\beta=0.2\sim0.5$。当无试验资料时，可选用 $\beta=0.2$。

系统中的悬浮物由补充水及空气带入，经过浓缩，又通过连续排污排出一部分，其浓度变化为以下关系式：

$$C=NC_M+\beta R_A C_A/B-(NC_M+\beta R_A C_A/B-C_0)e^{B(t-t_0)/V}$$

式中 V——系统容积，m^3；

B——排污水量（包括渗漏、风吹损失），m^3/h；

C_M——补充水中悬浮物质量浓度，mg/L；

C_0——循环水中悬浮物初质量浓度，mg/L；

C——循环水中悬浮物变化后质量浓度，mg/L；

t_0——悬浮物形成 C_0 时的时刻，h；

t——悬浮物形成 C 时的时刻，h；

N——要求达到的浓缩倍数；

e——自然对数底数，约为 2.718。

根据上式可大致计算系统在不同倍数、不同运行时间的悬浮物浓度。例如，某系统的系统容积 V 为 2000 m^3、循环水量 R 为 10000 m^3/h、补充水悬浮物为 10 mg/L、空气含尘量 C_A 为 5.45 mg/m^3、冷却塔气水比 λ 为 1.0、空气密度 γ_A 为 1.2 kg/m^3，如选 $\beta=0.2$，则：

$$R_A=1000\times1.0\times10000/1.2=8.333\times10^6 \quad m^3/h$$

$$\beta R_A C_A=0.2\times8.333\times10^6\times5.45/1000=9083 \quad g/h$$

如不同倍数时的排污水量 B 及补充水量 M 已经算出，则可根据 B 值计算不同时间的悬浮物浓度，如 $N=1.5$、$B=348.8$ m^3/h 时，以 C_{24} 表示 24 小时后的浓度，则：

$$C_{24}=1.5\times10+9083/348.8-(1.5\times10+9083/348.8-10)$$
$$e^{348.8(24-0)/2000}=40.5 \quad mg/L$$

计算结果归纳为下表：

N	M /(m³/h)	B /(m³/h)	C_8 /(mg/L)	C_{16} /(mg/L)	C_{24} /(mg/L)	C_{48} /(mg/L)	C_{72} /(mg/L)	C_{96} /(mg/L)	C_C /(mg/L)
1.5	523.2	348.8	33.3	39.1	40.5	41.0	41.0	41.0	41.0
2	348.8	174.4	41.2	56.7	64.4	71.2	72.0	72.1	72.1
3	261.6	87.2	46.6	72.4	90.6	118.9	128.8	132.3	134.2
4	232.5	58.1	48.6	79.3	103.5	150.1	173.3	184.8	196.3
5	218.0	43.6	49.7	83.1	111.2	171.1	206.6	227.7	258.3

如果浓缩过程无限期延长，则 $t=\infty$，$e^{-B(t-t_0)/V}$ 趋近于 0。此时 C 值为 C_C 趋近于平衡，$C_C=NC_M+\frac{\beta R_A C_A}{B}$。$C_A$ 很高的地区 C_C 会很高，这时悬浮物会在系统中流速低的部位沉积下来。例如壳程水冷却器的管间即常有悬浮物沉积。所以系统中悬浮物有可能达不到 C_C 值。在这种情况下应考虑改善冷却塔的环境，使 C_A 降低，或者在系统中加旁滤器除掉部分悬浮物。

485　冷却水循环使用后易带来什么问题？

冷却水在循环使用过程中，水在冷却塔内和空气充分接触，使水中的溶解氧得到补充，所以循环水中溶解氧总是饱和的。水中溶解氧是造成金属电化学腐蚀的主要原因。加上水浓缩后含盐量增加，电导率上升，也增加了腐蚀倾向。这是冷却水循环使用后易带来的问题之一。

水浓缩之后成垢离子成倍增加。特别由于碳酸氢盐是很不稳定的盐类，它在换热器表面上受热会分解为碳酸盐和二氧化碳。碳酸钙的溶解度很低，使传热面上结碳酸钙水垢的倾向增加，这是问题之二。

冷却水和空气接触，吸收了空气中大量的灰尘、泥砂、微生物及其孢子，使系统的污泥增加。冷却塔内的光照、适宜的温度、充足的氧和养分都有利于细菌和藻类的生长，从而使系统黏泥增加，在换热器内沉积下来，造成了黏泥的危害，这是水循环使用后易带来的问题之三。

冷却水的循环使用对换热器带来的腐蚀、结垢和黏泥问题要比使用直流水严重一些或严重得多。因此，循环冷却水如果不加以处

理，则以上问题的发生将使换热器的水流阻力加大，水泵的能耗增加，传热效率降低，并使生产工艺条件处于不正常状况。现代的一些工厂，为了提高传热效率的需要，换热器的管壁很薄，并且严格控制污垢的厚度，换热器一旦发生腐蚀或结垢，尤其是局部腐蚀的发生，将使换热器很快泄漏并导致报废，给生产带来巨大的损失。因此，循环冷却水系统必须综合解决腐蚀、结垢和黏泥（微生物）三个问题。

486 对循环水及其补充水的杂质控制有些什么要求？

要搞好循环水取得良好的效果，对于循环水和补充水的各种杂质应当有限制性的要求，这种限制性的控制指标就是水质控制的边界条件，如果超出控制指标，会给循环水处理带来危害。对于水中的钙离子和碱度除了需要限制最高允许量之外，还需控制最低允许量。因含量过低可能造成腐蚀。这些限制指标应随缓蚀阻垢剂的发展而调整，下表仅供参考。

循环水系统中各种离子或杂质的允许含量

名　称	允许含量	过高或过低时的危害
浑浊度	一般要求≤20mg/L，使用板式、翅片式和螺旋式换热器时宜≤10mg/L	污垢沉积
含盐量（以电导率计）	投加缓蚀阻垢剂时，一般不宜>3000μS/cm	腐蚀或结垢
钙离子（以 $CaCO_3$ 计）	根据碳酸钙稳定指数和磷酸钙饱和指数进行控制，大致要求≥50mg/L，≤500mg/L	过高结水垢，过低则腐蚀
总碱度（以 $CaCO_3$ 计）	根据碳酸钙稳定指数选定pH值指标，总碱度根据pH值自然平衡，大致要求≥50mg/L，≤500mg/L	过高结水垢，过低则腐蚀
钙离子加总碱度（均以 $CaCO_3$ 计）	采用全有机配方时，大致要求二者之和≤1000mg/L	过高可能结水垢
铁和锰（总铁量）	≤0.5mg/L	过高表明系统有腐蚀，可形成黏性污垢，导致局部腐蚀
铜离子	对碳钢换热，要求 Cu^{2+} ≤0.1mg/L	过高产生点蚀

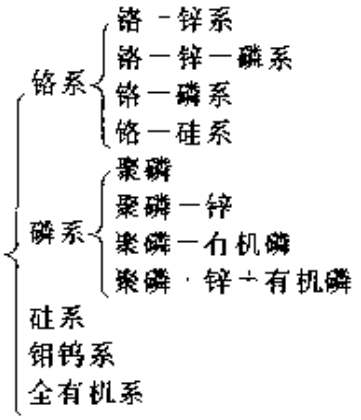
续表

名　称	允许含量	过高或过低时的危害
铝离子	Al^{3+} ≤0.5mg/L	过高促进污垢沉积
硅酸(以 SiO_2 计)	≤175mg/L	过高使硅酸镁垢沉积
镁离子与硅酸	Mg^{2+}（mg/L，以 $CaCO_3$ 计）×SiO_2(mg/L，以 SiO_2 计)<15000	过高使硅酸镁垢沉积
氯离子	根据换热器的材质、壳程或管程、结构、应力及药剂、配方情况决定，一般碳钢换热器系统≤1000mg/L，不锈钢换热器较多的系统≤300mg/L	过高促进局部腐蚀，对碳钢主要是点蚀，对不锈钢主要是应力腐蚀开裂
硫酸根加氯离子	SO_4^{2-} +Cl ≤1500mg/L	过高促进腐蚀

487　冷却水的化学处理方法有什么优点？其处理方法如何分类？

冷却水处理虽然有较多的方法，可以是物理法、物理化学法、化学法。但迄今为止，其他方法都没有在冷却水处理中得到普遍应用，不是效果不好，就是成本太高或使用有一定的局限性。独有化学处理方法得到日益广泛的应用，因为比较起来，化学处理方法的操作简单，综合效果也令人满意。提高循环水的浓缩倍数后，化学药品的消耗可以大大降低，在经济上也能为用户所接受。因此，其他的方法如阴（阳）极保护法、涂料覆盖法等使用得还较少。

冷却水的化学处理是用加入化学药品的方法来防止循环冷却水系统腐蚀、结垢和黏泥等问题的产生。常用的处理药剂有缓蚀剂、阻垢剂和杀生剂等。目前习惯用处理药剂中的缓蚀剂的种类来划分缓蚀阻垢配方的系列。但在20世纪80年代开发的全有机系实际上是碱性运行以阻垢为目的的配方。循环冷却水化学处理的缓蚀阻垢配方的系列大致如下图。



488　我国常用的缓蚀阻垢复合配方有哪些?

我国在敞开式循环冷却水系统中广泛使用化学处理方法始于20世纪70年代。尽管铬系配方有缓蚀效果好、易控制微生物等优越性，但考虑其排污对环境的危害，所以在我国没有推广应用。我国一开始就采用了磷系配方。初期有的厂采用了单一聚磷酸盐配方。在长期使用中证明其效果良好、费用低，可以满足生产的要求。但其存在以下不足。

(1) 聚磷酸盐容易水解产生正磷酸盐，并和钙离子生成磷酸钙水垢。故要求水中钙离子和pH值都不能太高，控制较严格。

(2) 水中钙离子一般需控制<100mg/L（以$CaCO_3$计），故限制了浓缩倍数的提高。如果要求提高倍数运行，则需将补充水进行软化处理，除去部分钙离子。

(3) 由于运行时需加酸调pH值，在6.0～7.0的低pH值下，操作需十分谨慎，如加酸过量，可能造成低pH值腐蚀。

(4) 配方中无高效阻垢剂。药剂对水冷器换热管的热端与冷端的缓蚀效果有差别。有可能产生热端结垢或冷端腐蚀的情况。

为此目前单一聚磷酸盐配方已基本不用，多已采用磷系、钼系、硅系、钨系等复合配方或全有机配方，常用的有：

① 锌盐/聚磷酸盐　二者协同效应好，缓蚀效果比单一聚磷酸盐好。pH值宜在中性范围，水中钙离子含量也不宜过高。

② 聚磷酸盐/磷酸盐/聚羧酸盐　20世纪70年代以来广泛应用的磷系复合配方，兼有良好的缓蚀与阻垢作用。药剂用量少、费用低。可在偏碱性pH值8.0左右运行。允许水中钙离子含量

>100mg/L（以 $CaCO_3$ 计），甚至达到 200～300mg/L（以 $CaCO_3$ 计）。

③ 锌盐/聚磷酸盐/膦酸盐/聚羧酸盐　这种 20 世纪 80 年代开发推广的磷系复合配方的特点是聚磷酸盐的比例较少，聚羧酸盐采用阻垢性能较好的二元或三元共聚物。运行 pH 值<8.5，钙离子含量一般允许<400mg/L（以 $CaCO_3$ 计）。

④ 锌盐/多元醇磷酸酯/聚羧酸盐/磺化木质素　这种 20 世纪 80 年代开发的配方可以很好地控制水中的硬垢和污泥。运行 pH 值一般<8.5，钙离子含量<600mg/L（以 $CaCO_3$ 计）。

⑤ 膦酸盐/聚羧酸盐或锌盐/膦酸盐/聚羧酸盐　这种 20 世纪 80 年代开发推广的全有机配方适用于结垢性水质，允许在较高的 pH 值 8.5～9.0 下运行，钙硬加总碱度<900mg/L（均以 $CaCO_3$ 计）。

⑥ 膦酸盐/膦羧酸盐/聚羧酸盐　这种 20 世纪 90 年代开发出来的全有机配方适用于结垢性水质，允许在自然 pH 值 8.5～9.3 下运行，钙硬加总碱度<1100mg/L（均以 $CaCO_3$ 计）。

⑦ 聚磷酸盐/钼酸钠/葡萄糖酸钠　这种 20 世纪 80 年代开发的配方已成功地应用于大型装置，其含磷低、利于环保。

⑧ 聚磷酸盐/钼酸盐/膦酸盐/聚羧酸盐　这种 20 世纪 90 年代开发的配方中钼酸盐和聚磷酸盐以某种聚合形态存在，缓蚀效果优于聚磷酸盐，并具有用药少的优点。

⑨ 硅酸钠/膦酸盐　这种配方价格低廉，排放无污染。已成功应用于中小型装置的低倍数循环水系统。

⑩ 钨酸钠/膦酸盐　这种配方的特点是无公害，已经应用于某些系统。

489　什么是换热器、水冷却器？为什么水处理工作者应了解水冷却器的有关情况？

换热器又称热交换器，是工艺系统中工艺介质通过间壁（管壁或板壁）互相进行换热的设备。换热器中的热介质与冷介质进行热交换，使热介质温度降低、冷介质温度升高。冷介质可能是水，也

可能是其他物料。用水作冷介质的换热器称为水冷却器，或称水冷器。在水冷却器中热介质与水进行热交换，使热介质温度降低、水的温度升高。

在化工、石油化工、炼油、大力发电等工艺系统中水冷却器不可缺少，数量较多。按水冷却器在工艺过程中的用途常可分为以下三类：①冷却工艺介质的水冷却器，其热介质为液体或气体；②回收并冷凝蒸汽透平机所排出蒸汽的水冷却器，使蒸汽变为冷凝水，又称蒸汽冷凝器、表面冷凝器或表冷器；③冷却润滑油的水冷却器，俗称油冷器。

水冷却器消耗水量很大。冷却热介质中的每 1kJ 热量需要 0.02388kg 冷却水（水温升以 10℃计）。例如某大型化肥厂水冷却器共 77 台，总热负荷约 1130×10^6kJ/h（270×10^6kcal/h），冷却水如温升 10℃，则需冷却水 27000m³/h。系统中有一台表面冷凝器的热负荷为 347.5×10^5kJ/h，仅此一台就需冷却水 8300m³/h。因此，可以说水冷却器确实是用水大户。如果采用直流水，水资源浪费太大。采用循环冷却水则能大大节约水资源。所以，从根本上说，设置循环冷却水系统是为了保证水冷却器用水，是为水冷却器服务的。循环冷却水系统中的腐蚀、结垢、微生物等危害也主要表现在水冷却器上。其换热管壁很薄，容易腐蚀穿孔；污垢沉积又极易影响其换热效率。故化学处理的效果也集中表现在水冷却器上。因此，在进行循环冷却水化学处理时，必须始终关注水冷却器的全面情况。在考虑化学处理方案时也应同时了解水冷却器的不同特点，如设备结构、应力消除情况、管程或壳程、材质、涂层性质、热流密度、工艺介质的性质等。

换热器的型式有夹套式、蛇管式、套管式、列管式、板式、螺旋板式等类型，水冷却器以列管式最常用，蛇管式中的喷淋换热器及螺旋板式换热器也很常见。

490　什么是夹套式换热器？

夹套式换热器用于控制反应器的温度。用作加热时，从反应器外的夹套中通蒸汽；用作冷却时，可在夹套内通冷却水。夹套式水

冷却器除常见的反应器夹套之外，往复式压缩机水夹套也属此类。由于其结构的限制，传热面积都不大，热流密度也不高。见图 5-1-7。

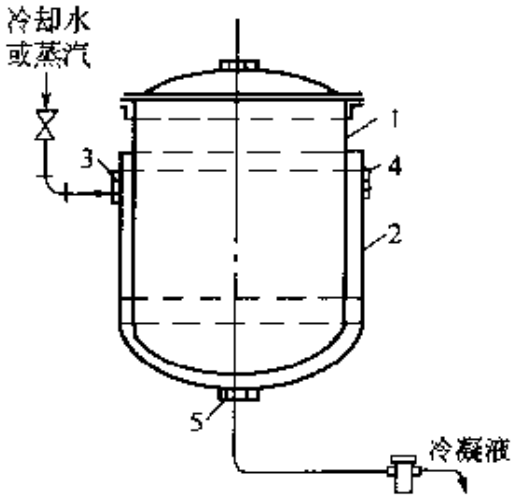


图 5-1-7　夹套式换热器

1—反应器；2—夹套；3，4—蒸汽或冷却水接管；5—冷凝水或冷却水接管

491　什么是蛇管式换热器？

蛇管式换热器分为沉浸式和喷淋式两种。

① 沉浸式蛇管换热器　见图 5-1-8。热交换管可由肘管连接的直管或盘成螺旋形的蛇形管构成。蛇管安装在容器中，运行时容器中充满液体（或冷却水），故称为沉浸式。其优点是结构简单，便于防腐，能承受高压。缺点是传热面有限，管外流体流动性差，传热效率低。

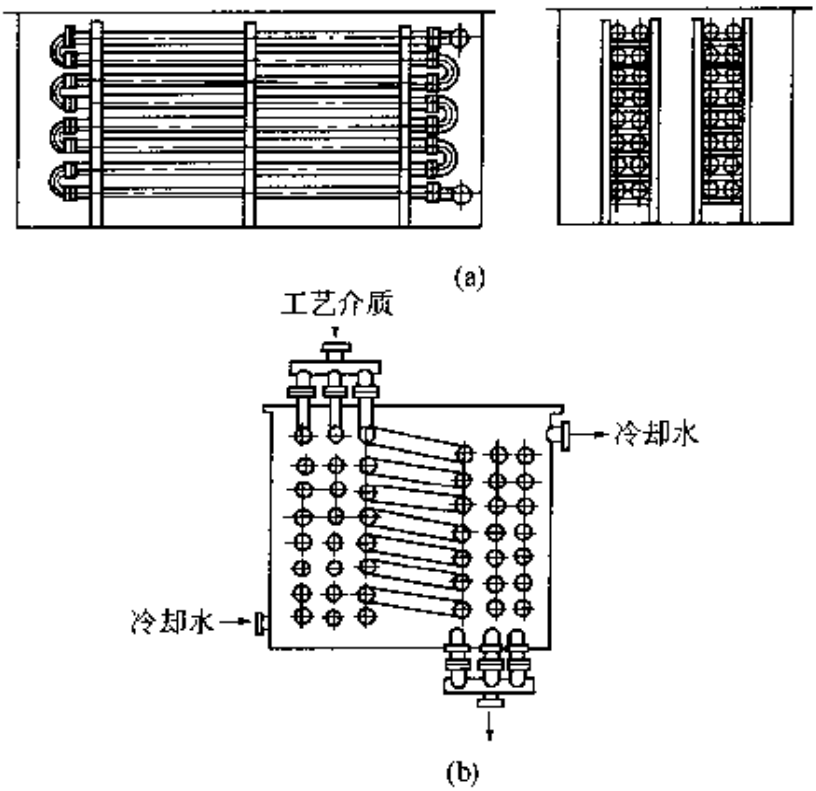


图 5-1-8　沉浸式蛇管换热器

② 喷淋式蛇管换热器　见图 5-1-9。工艺介质在管内流动，冷却水由管上方的水槽分布后，淋至排管各层管子的表面，最后落入水池中。喷淋式水冷器结构简单，造价低，能承受高压，同时便于清洗和检修。由于喷淋的冷却水部分汽化，冷却水用量少。在中小氮肥厂中应用很广。主要缺点是喷淋不易均匀；只能安装在室外，易积垢和长藻类。

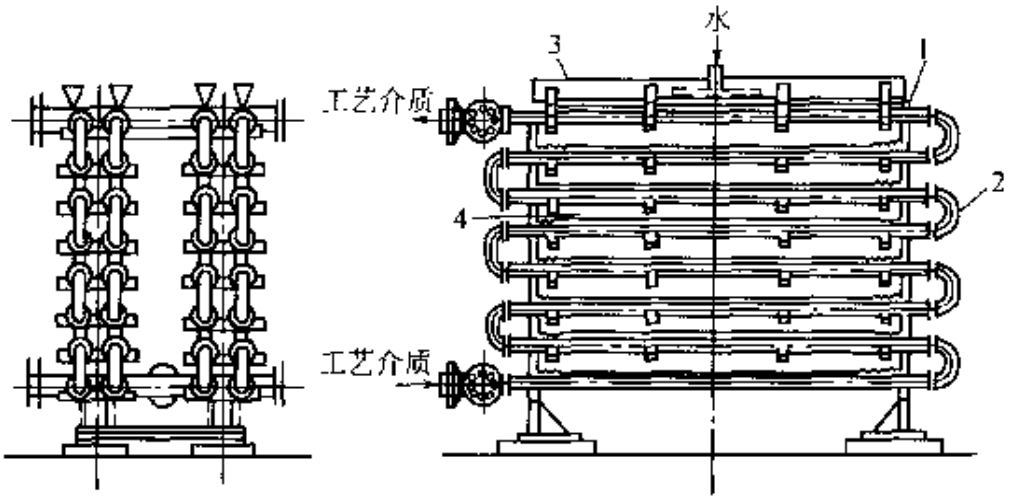


图 5-1-9　喷淋式蛇管冷却器

1—直管；2—U 形管；3　水槽；4—齿形檐板

492　什么是套管式换热器？

见图 5-1-10。将两种直径不同的直管装成同心套管，每一段套管称为一程，每程的内管与下一程的内管顺序地用U形肘管相连接，而外管之间也互联，即为套管换热器。一种流体在内管内流

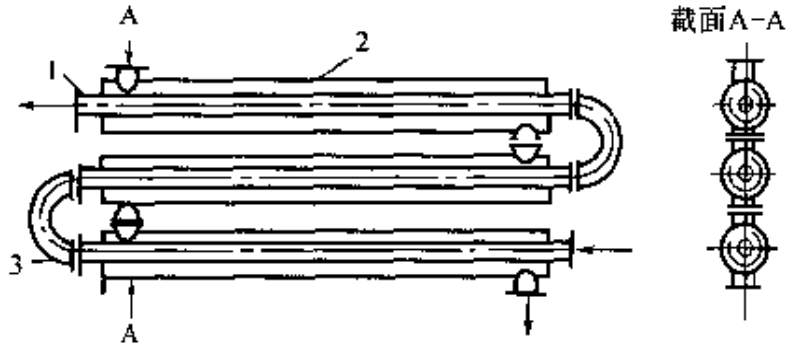


图 5-1-10　套管式换热器

1　内管；2—外管；3—U 形肘管

动，另一种流体在套管间的环隙中流动，进行热交换。套管换热器是用标准管与管件组合而成，构造较简单，加工方便．排数和程数可根据需要确定，伸缩性大。主要缺点是接头多，易漏，占地较多，单位面积消耗金属量大。适用于流量和换热量不大的场合。

493　什么是列管式换热器？

列管式换热器主要由壳体、管束、管板（又称花板）和顶盖（又称封头）等部件构成。管束安装在壳体内，两端用胀接或焊接方式固定在管板上，两种流体分别流经管内外进行换热。水流经管内的称为管程水冷却器，流经管外的称壳程水冷却器。

为提高流体的流速常在壳程设折流挡板。常用挡板型式有两种：圆缺形（也称弓形）和交替排列的环形及圆盘形。

目前广泛使用的列管式换热器主要有以下几种。

① 固定管板列管式换热器　见图 5-1-11 及图 5-1-12。两端管板是和壳体连为一体的。其特点是结构简单，适用于管内外温差小、管外物料较清洁、不易结垢的情况。管内外温差大于 50℃时，因壳体和管束的热膨胀程度不同，可能将管子拉弯或拉松，损坏换热器。这时如壳体承受压力不太高，则可采用在壳体上具有补偿圈（或称膨胀节）的固定管板式换热器。

管内流体通过一程管束就流出的称单程换热器，如图 5-1 11。有时为提高管内流体的流速，可设计成双程、四程或六程换热器。如图 5 1-12 为双程换热器，流体通过第一程后，再折回，流过第二程管束后才流出。

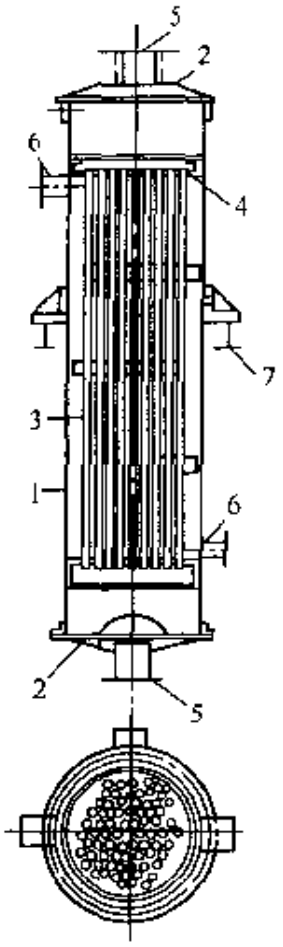


图 5-1-11　单程列管式换热器

1—壳体；2 -顶盖；3—管束；4 -管板；5，6　接管；7—支架

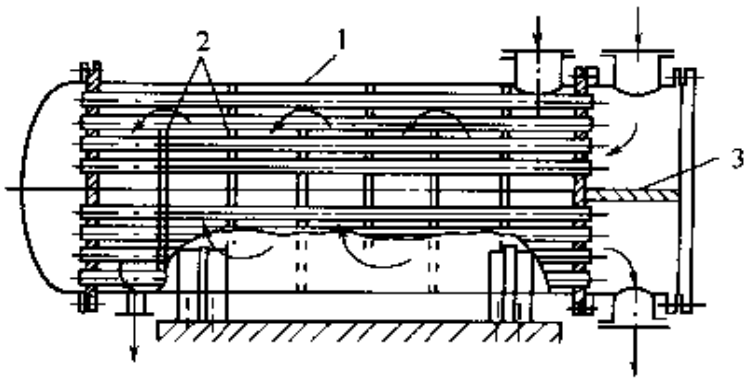


图 5-1-12　有折流挡板的双程列管式换热器

1—壳体；2—挡板；3—隔板

② 浮头列管式换热器　见图 5-1-13。该种换热器一端的管板不与壳体相连，便于自由伸缩。适用于管内外温差较大、需常拆卸清洗的情况。其结构较复杂。

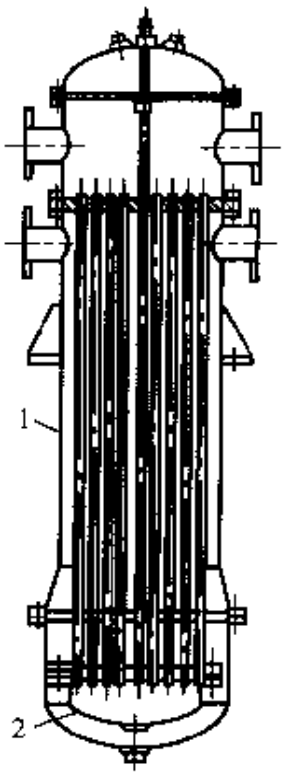


图 5-1-13　浮头列管式换热器

1—壳体；2—浮头

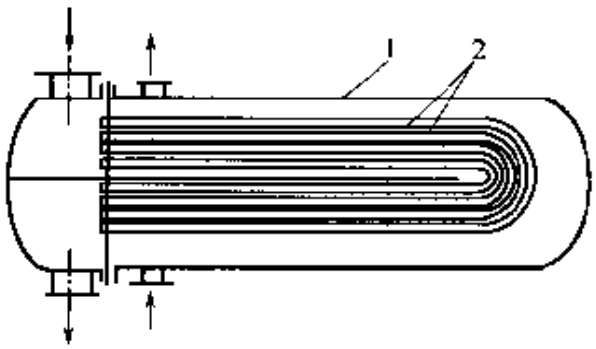


图 5 1 14　U 形列管式换热器

1—外壳；2—U 形管

③ U 形列管式换热器　见图 5 1-14。该种换热器只有一端设管板，U 形管的两端分别装在管板两侧，封头用隔板隔成两室，

管子可以自由伸缩。其结构比浮头式简单，化工厂中常见。

列管式水冷却器几乎是最常见的型式。与前几种型式相比，单位体积所能提供的传热面积要大得多，传热效率高，结构紧凑、坚固、能选用多种材质，可以用于高温、高压的大型装置。

494　列管式水冷却器容易发生哪些问题?

列管式水冷却器是应用最广的水冷却器。其优点很多。如化学处理方法得当，不仅能够满足工艺系统高效传热的要求，也能保证长周期运行，使用寿命也很长，碳钢管程水冷却器的寿命往往达到10年以上。但也有些水冷却器损坏的原因与列管式水冷却器的结构等因素有关，这是化学处理方法难以解决的，故应加以注意。常见的有以下几种情况。

① 碳钢壳程水冷却器的积垢与垢下腐蚀　水流经壳程或是管程常根据工艺系统的要求而定。设计时一般尽量使温度高、压力高、腐蚀性强的工艺介质流经管内，这样壳体材质可以不考虑耐温、耐压和耐蚀的要求而选用普通材质，这样就迫使冷却水流经壳程。因壳程水冷却器的水流速低，又有很多折流板形成死角，极易积污垢。污垢造成垢下腐蚀，容易穿孔泄漏。故碳钢壳程水冷却器的使用寿命一般为3～5年，很难达到10年。近年来国内外的设计者为解决此问题，尽量多采用管程水冷却器，少用壳程水冷却器。

② 不锈钢壳程水冷却器的应力腐蚀开裂　应力腐蚀开裂的特点是换热管突然成批发生破裂。发生应力腐蚀开裂的奥氏体不锈钢水冷却器的寿命比碳钢壳程水冷却器的寿命还短，有的甚至只使用一两个月就报废。产生应力腐蚀开裂的三个条件是：设备结构上存在拉应力；有氯离子富集；有较高的壁温为诱导。调查发现，发生应力腐蚀开裂的均为壳程水冷却器。这是因为壳程水冷却器管板及折流板的缝隙处容易富集氯离子，氯离子的浓缩区往往是开裂的起点。同时发现固定管板的水冷却器不利于热膨胀、易产生热应力，比U形管水冷却器更易发生开裂。壁温和水温也是开裂的诱导因素。开裂起点常发生在工艺介质达200℃左右或更高时，均发生在热端。解决开裂问题，除应注意消除设备制造中的应力外，还应稳

定操作温度。

③ 管板渗漏　这种泄漏不是由于管壁受腐蚀穿孔，而是由于管板与换热管之间密封不严造成的渗漏。其特点一般是由小至大，开始只有少量工艺介质漏入水中，继而逐步增加泄漏量。当泄漏严重时，往往也需更换水冷却器，其寿命一般达不到 10 年。其原因是由于管膨胀引起的热应力所致。出现这种渗漏的为碳钢管程固定管板列管式水冷却器，管束较长，温差也较大。

④ 电偶腐蚀　是水冷却器中不同材质的电位不同引起的腐蚀。某厂一台水冷却器的换热管为黄铜，壳体为碳钢。碳钢的电位较负，成为阳极。运行不足 2 年，壳体穿孔报废。某厂一台壳程水冷却器的换热管为铜镍合金（70/30CuNi），折流板为碳钢。约 3 年后发现折流板已被腐蚀得不存在了。

⑤ 换热管磨损　一般因换热管震动，受折流板摩擦而穿孔。这种损坏的特点是：工艺介质突然大量漏入水中，但泄漏的换热管数并不多。一般停车堵漏后，水冷却器仍可继续使用。

495　什么是板式换热器？

板式换热器由传热板片（见图 5-1-16）、密封垫片和压紧装置 3 部分组成，其流向示意见图 5-1-15。

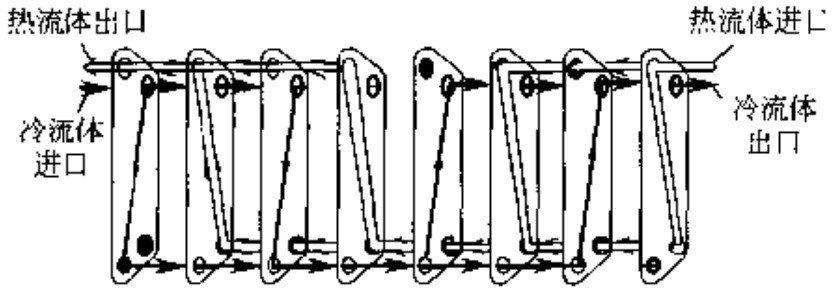


图 5-1-15　板式换热器流向示意图

与各种管式换热器不同，板式换热器是通过传热板片换热的。冷热流体分别在板片的两侧流过进行传热。传热板片由 0.5～3mm 的金属薄板压制成型，材质有不锈钢、黄铜或铝合金等。为增强刚度、避免变形，一般将板片压成波纹形，如图 5-1-16 为人字形波纹。波纹既增大了传热面积，又增强了流体的湍流程度。板片的四

个角上各开一孔，作为冷热流体的进出口。板片四周及孔周围压有密封垫片槽，可贴入密封垫片。垫片可根据流体流动的需要来放置，从而起到允许或阻止流体进入板面之间通道的作用。按传热需要将若干块传热板片排列在支架上，由压板借压紧螺杆压紧后，相邻板间就形成了流体通道。藉助垫片的恰当布置，使冷、热流体在传热板片的两侧流过进行传热。不同厚度的垫片可以调节板间距（一般4～6mm），即调节流量。

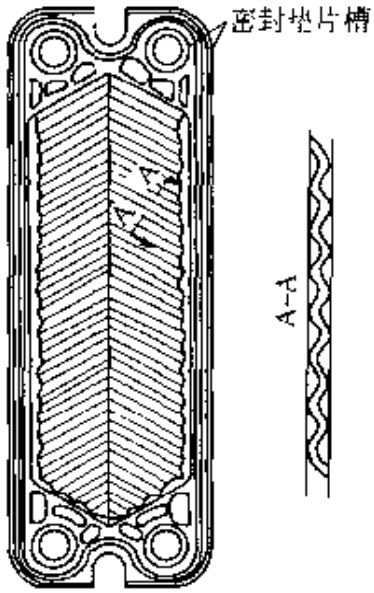


图 5-1-16 板式换热器的传热板片
（人字形波纹板片结构）

板式换热器的主要优点是在低流速下即能达到湍流，传热效率比列管式换热器高，设备紧凑，操作灵活性大，板片制造、检修及清洗都比较方便。其缺点主要是处理量不大，同时受板片刚度及垫片性能的限制，允许的操作压力和温度都不能太高。操作表压一般低于1.5MPa，最高不超过2MPa。用合成橡胶垫片时，操作温度应低于130℃，用压缩石棉垫片应低于250℃。

496 什么是螺旋板式换热器？

螺旋板式换热器由两张薄板平行卷制而成，这样就形成两个互相隔开的螺旋形通道，分别通入冷热流体进行逆流换热。两板之间焊有定距柱，用以保持板间距及增强板的刚度。在换热器中心，装有隔板，使两个螺旋通道分开。见图5-1-17。

螺旋板式换热器的优点是结构紧凑，制作简便；因流体流向不断改变，易形成湍流，且允许流速达2m/s，故传热效率好；由于流道长，又可在逆流条件下传热，所以可在较小温差下运行，能够充分利用温度较低的热源；因流速较大，且螺旋流动，对污垢起冲刷作用，故不易结垢和堵塞。其主要缺点是操作压力和温度不能太高，一般要求表压＜2MPa，温度＜300～400℃；不易检修；阻力损失较大。

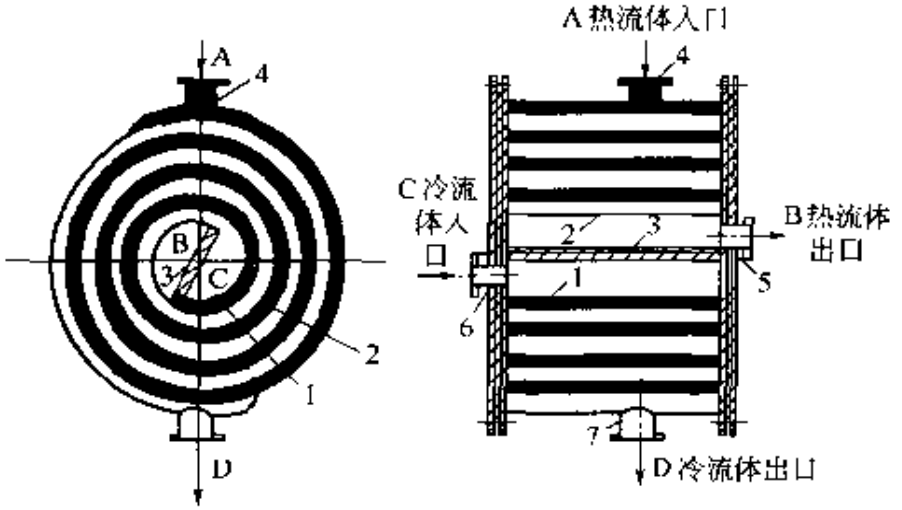


图 5-1-17　螺旋板式换热器

1，2—金属片；3—隔板；

4，5—热流体连接管；6，7—冷流体连接管

（二）腐蚀的抑制

497　什么是腐蚀？

由于和周围介质相作用，使材料（通常是金属）遭受破坏或使材料性能恶化的过程称为腐蚀。

腐蚀是一种电化学过程，通过腐蚀，一种金属可以恢复到它原来自然的状态。例如：铁的腐蚀过程即是由铁回复到赤铁矿（Fe_2O_3）、磁铁矿（Fe_3O_4）的状态。

498　什么叫做全面腐蚀和局部腐蚀？

在水中金属的腐蚀是电化学腐蚀。电化学腐蚀又分为全面腐蚀和局部腐蚀。全面腐蚀相对较均匀，在金属表面上大量分布着微阴极和微阳极，故这种腐蚀不易造成穿孔，腐蚀产物氧化铁可在整个金属表面上形成，在一定情况下有保护作用。当腐蚀集中于金属表面的某些部位时，则称为局部腐蚀。局部腐蚀的速度很快，往往在早期就可使材料腐蚀穿孔或龟裂，所以危害性很大。垢下腐蚀、缝隙腐蚀、晶间腐蚀等均属局部腐蚀。

全面腐蚀的阴、阳极并不分离，阴极面积等于阳极面积，阴极

电位等于阳极电位。局部腐蚀的阴、阳极互相分离，阴极面积大于阳极面积，但阳极电位小于阴极电位，腐蚀产物无保护作用。

499　什么是金属的腐蚀电化学过程？碳钢在冷却水中的腐蚀机理是什么？

金属的腐蚀电化学反应实际上是这样的过程：首先是在溶液中的金属释放自由电子（通常把释放自由电子的氧化反应称为阳极反应）；自由电子传递到阴极（接受电子的还原反应称为阴极反应）；电子再由阴极传递到溶液中被其他物质吸收。因此腐蚀过程是一个发生在金属和溶液界面上的多相界面反应，同时也是一个多步骤的反应。由以上叙述中可以看出，一个腐蚀过程至少由一个阳极（氧化）反应和一个阴极（还原）反应组成。

碳钢在冷却水中的腐蚀是一个电化学过程。由于碳钢组织表面的不均一性，因此，当它浸入水中时，在其表面就会形成许多微小的腐蚀电池。其腐蚀过程用图 5-2-1 示意说明。

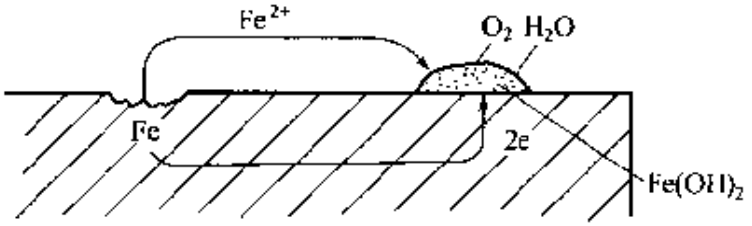


图 5-2-1　铁的电化学腐蚀

在阳极：　　$Fe \longrightarrow Fe^{2+} + 2e$

在阴极：　　$O_2 + 2H_2O + 4e \longrightarrow 4OH$

在水中：　　$Fe^{2+} + 2OH^- \longrightarrow Fe(OH)_2$

阳极区域 Fe 不断失去电子，变成 Fe^{2+} 进入溶液，也即铁不断被溶解腐蚀，留下的电子，通过金属本体移动到阴极渗碳体的表面，与水和溶解在水中的 O_2 起反应生成 OH 离子。在水中，阴、阳极反应生成的 Fe^{2+} 与 OH^- 相遇即生成不溶性的白色 $Fe(OH)_2$ 堆积在阴极部位，铁的表面不再和水直接接触，这就抑制了阳极过程的进行。但当水中有溶解氧时，阴极部位的反应还要进行下去，因 $Fe(OH)_2$ 这种物质极易被氧化为 $Fe(OH)_3$，即铁锈。由于铁锈

基本不溶于水，所以只要水中不断有 O_2 溶入，这种腐蚀电池的共轭反应也就不断进行。换言之，也就是碳钢的腐蚀会不断地进行下去。

上述腐蚀电池中，阳极氧化反应和阴极还原反应必须同时进行，如其中一个反应被停止，则整个反应就会停止，故称之为共轭反应。因此，如果能设法控制在其阴极过程或阳极过程，则整个腐蚀过程也就会相应的得到控制。反之，如果在阳极不断除去 Fe^{2+} 或在阴极表面不断充分供给 O_2，则共轭反应也就会加速进行，也即腐蚀过程变快。因此，采取不同的方式控制其阴极或阳极过程，就是控制冷却水系统腐蚀的各种方法的依据。

500　什么叫极化和去极化作用？

金属腐蚀过程中，电流在阳极部位和阴极部位间流动，这说明阳极部位和阴极部位间有电位差。如果水中不含氧，则由于腐蚀反应过程中生成的原子态氢和氢气覆盖在阴极表面，产生了与腐蚀电位相反的电压称为氢气的超电压，使电位差起了变化，阻止了电流的流动也就是停止了腐蚀过程的进行。这种由于反应生成物所引起的电位差变化称为极化。氢气在腐蚀过程中起了极化作用，极化作用起了抑制腐蚀过程的作用。

当水中有溶解氧存在时，阴极反应按下式进行：

$$H_2+\frac{1}{2}O_2 \longrightarrow H_2O \text{ 或 } \frac{1}{2}O_2+H_2O+2e \longrightarrow 2OH^-$$

由于氧参加了反应，夺走了覆盖在阴极表面上的原子态氢和氢气，因而使氢气的极化作用遭到破坏。排除极化的作用称为去极化，氧在腐蚀过程中起了去极化作用，去极化作用起了助长腐蚀过程的作用。

501　什么叫电偶腐蚀？

很多生产装置是用不同的金属或合金制造而成，这些材料是互相接触的。由于不同金属电位间存在着差异，在水溶液（电介质）中形成电偶电池。较活泼的电位较负的金属是阳极，腐蚀速度要比未偶合时高；电位较正的金属是阴极受到保护，腐蚀速度下降或停

止。在系统中，常见的电偶腐蚀有铁和黄铜、铁和不锈钢、铝和钢、锌和钢以及锌和黄铜等，不论在哪种情况下，都是前一种金属遭受腐蚀。

某些金属在海水中的电偶序如下[110]：

镁	电位负端（阳极性）
镁合金	
锌	
铝	
镉	
杜拉铝（硬铝、飞机合金等）	
铸铁、软钢	
铁铬合金（活化态）	
高镍铸铁	
18-8 型不锈钢（活化态）	
锡焊条	
铅	
锡	
因科镍（铬镍铁合金）（活化态），镍（活化态）	
镍铬铝合金，耐酸镍基合金（哈氏合金-2）	
蒙乃尔（耐蚀高强度镍铜合金），铜镍合金，青铜，铜，黄铜	
银焊条	
因科镍（钝化态），镍（钝化态）	
1Cr13 不锈钢（钝化态）	
18 8 型不锈钢（钝化态）	
银	
钛	
石墨	
金	电位正端（阴极性）
铂	

502 什么是氧浓差腐蚀电池？

氧浓差腐蚀电池是金属在水中腐蚀时最普遍、危害最大，但又是最难防治的一种腐蚀电池。氧浓差电池是介质浓度影响阴极反应而产生电位差。最常见的氧浓差电池有两种类型，一种是在不同深度的水中由于溶解氧浓度不同而造成氧浓度梯度产生的氧浓差电池，如水线腐蚀；另一种则是冷却水系统中最常见，也是危险最大

的污垢下腐蚀或叫做沉积物腐蚀。在沉积物下面形成缝隙区，在这些缝隙区的溶液中，氧要得到补充是非常困难的；面缝隙外的金属表面上的溶液，氧的供应很充分，因而缝隙外是富氧区——阴极，而缝隙内则是贫氧区　　阳极。缝隙区形成的氧浓差电池造成的腐蚀部位在缝隙之内，或在沉积物下面。

503　什么是缝隙腐蚀？

所谓缝隙腐蚀是金属表面被覆盖部位在某些环境中产生局部腐蚀的一种型式。大量换热器的腐蚀穿孔，其中最主要的原因是污垢下的腐蚀——缝隙腐蚀的一种类型。

缝隙腐蚀的产生要有两个条件：一是要有危害性阴离子（如Cl^-）存在；二是要有滞留的缝隙。作为一个腐蚀部位，缝隙要宽到足够能使液体进入，但又要窄到能保持一个滞留区。一般认为宽度在千分之一英寸（1 英寸－25.4mm）以下就会导致腐蚀，宽度在 1/8 英寸（3.175mm）以上腐蚀很少产生。

504　什么是点蚀？

点蚀过去有称为坑蚀、孔蚀，但现在比较统一的叫法称点蚀。点蚀是一种特殊的局部腐蚀，导致在金属上产生小孔。若用 P 表示腐蚀孔的深度，d 表示腐蚀孔的宽度，当 $P/d\leqslant 1$ 时称为局部腐蚀；当 $P/d>1$ 时称为点蚀。产生点蚀的原因主要是水中离子或黏泥在金属表面产生沉积，这些沉积物覆盖在金属表面使水中溶解氧和缓蚀剂不能扩散到金属表面上，从而造成局部腐蚀。水中 Cl^- 对点蚀也有影响，点蚀倾向随着 Cl 浓度的升高而增加。温度对点蚀影响较大，升高温度会使钝化膜的保护性能下降，还可能导致应力腐蚀开裂。因此，点蚀经常发生在换热器的高温区和流速缓慢发生沉积的部位，增加水的流速有利于氧的扩散，有利于钝化膜的修补，而且亦可带走小孔上的沉积物，有利于控制点蚀的发生。

点蚀是潜伏性和破坏性最大的一种腐蚀类型。点蚀都是大阴极小阳极，有自催化特性。小孔内腐蚀，使小孔周围受到阴极保护。孔越小，阴、阳极面积比越大，穿孔越快。点蚀发生有时往往是在材料的一侧开始，在另一侧扩大穿孔，使得检测很困难。由于点蚀

极强的破坏性，现在已愈来愈引起人们的重视。

505　什么是不锈钢的应力腐蚀开裂？

不锈钢的应力腐蚀开裂是指不锈钢在应力和腐蚀的共同作用下所引起的开裂。金属在制造过程中往往处于应力状态，因而会在垂直于应力的方向开裂。高温、高氯化物浓度及其腐蚀条件的存在，都会促使应力腐蚀开裂。因此，应力腐蚀开裂是电化学作用和机械作用的综合结果。压应力不会导致开裂，相反有抑制的作用；张应力对开裂产生作用比较明显，像冷加工时的剩余应力、热应力、焊接应力、外加应力等都会产生张应力。

为防止不锈钢的应力腐蚀开裂，常用的防止方法是：

（1）设计换热器时应尽力避免应力集中现象。

（2）消除或减少设备上存在的残余应力。

（3）尽量将金属表面由张应力变为受压应力。

（4）尽量控制水中有害离子浓度，对水中氯离子浓度要特别注意。

（5）控制操作温度，使水冷器壁温控制在安全温度内，这对不锈钢应力腐蚀也是很重要的。

506　什么是磨蚀和空化作用？

磨蚀是由于腐蚀流体和金属表面间的相对运动，引起金属的加速破坏或腐蚀，这类腐蚀常与金属表面上的湍流程度有关。湍流使金属表面液体的搅动比层流时更为剧烈，使金属与介质的接触更为频繁，故通常叫做湍流腐蚀。湍流腐蚀实际上是一种机械磨耗和腐蚀共同作用的结果。磨蚀的外表特征是槽、沟、波纹、圆孔和山谷形，还常常显示有方向性。在工厂中，像泵的叶片、阀、弯管、肘管、透平叶片、喷嘴等流速变化较大的部位，易产生磨蚀。

空化作用又称空泡腐蚀，它是磨蚀的一种特殊形式，是由于金属表面附近的液体中有蒸气泡的产生和破灭所引起的。在高流速液体和压力变化的设备中易发生这类腐蚀，如水力透平机，船用螺旋桨、泵叶轮等。空泡腐蚀的外表十分粗糙且蚀孔分布紧密，它是腐蚀和机械作用两者引起的。

对于防止磨蚀和空化作用一般都采用以下方法：

（1）选用硅铁、硅铜较耐磨蚀的材料来代替一般材料。

（2）适当改变设计，使介质液流更合理以减轻这类腐蚀的破坏。

（3）改变环境，降低温度，去除介质中悬浮粒子也是很有效的办法。

（4）采用有弹性的较耐蚀的涂层。

除上述方法外，防止空泡腐蚀另有一些特殊办法，如：改变设计使流程中流体动压差减小；抛光泵叶轮和螺旋桨的表面以减小破坏。

507　什么是微生物腐蚀？

微生物腐蚀是一种特殊类型的腐蚀，它是由于微生物的直接或间接地参加了腐蚀过程所起的金属毁坏作用。微生物腐蚀一般不单独存在，往往总是和电化学腐蚀同时发生的，两者很难截然分开。引起腐蚀的微生物一般为细菌及真菌，但也有藻类及原生动物等，在大多数场合下都可看作是各种细菌共同作用而造成危害的。微生物影响腐蚀主要是通过使电极电位和浓差电池发生变化而间接参与腐蚀作用这条途径，其方式大体分以下几类：

（1）由于细菌繁殖所形成的黏泥沉积在金属表面，破坏了保护膜，构成局部电池；

（2）由细菌代谢作用引起氧和其他化合物的消耗，形成浓差电池，在局部电池中发生去极化作用；

（3）由细菌代谢产物的作用引起以下变化：

① 影响 pH 值或酸度；

② 影响氧化还原电位；

③ 使环境的化学状况发生变化（包括氨、硝酸盐、亚硝酸盐、硫酸盐、硫化物等其他离子，在反应中起催化作用）；

④ 生成或消耗氧而影响氧的浓度。

微生物腐蚀是一种局部腐蚀，其危害是极其严重的。微生物参与的腐蚀比一般电化学腐蚀速度快得多。可能使新的换热器仅几个

月就因点蚀泄漏而停产。

508　控制金属腐蚀有哪些方法？

冷却水对金属的腐蚀主要是电化学腐蚀。大部分控制方法不能完全消除这种腐蚀，只能减缓腐蚀，使其控制在一个可接受的程度。常用以下方法。

(1) 化学处理法——添加缓蚀剂

即在循环冷却水系统中加入低剂量的缓蚀剂（又称腐蚀抑制剂），使金属的腐蚀受到抑制。缓蚀剂在水中的浓度一般保持几毫克到几十毫克每升。

缓蚀剂的缓蚀机理可从电化学腐蚀抑制和形成金属保护膜两个角度来看。从电化学腐蚀角度看，缓蚀剂抑制了阳极或阴极过程，在金属表面产生极化作用，使腐蚀电流减小，达到缓蚀作用。从成膜理论角度看，缓蚀剂在金属表面上形成一层难溶的保护膜，阻止了冷却水中氧的扩散和金属的溶解。

添加缓蚀剂的化学方法能将金属的腐蚀速度控制在允许的范围，可对全系统进行保护，且经济实用，是目前应用最广泛的方法。

(2) 提高运行 pH 值

提高循环冷却水系统运行的 pH 值可以降低碳钢的腐蚀速度。这是因为天然水中均含有一定量的碳酸氢盐及碳酸盐，pH 值提高之后碳酸盐碱度提高了，容易在金属表面形成碳酸盐保护膜。同时当 pH 值达到 8.0 以上时，溶解氧能使碳钢表面生成一层钝化膜（γ-Fe_2O_3）。由于循环冷却水在曝气和提高浓缩倍数时，水的 pH 值会自然增长，一般在 8.0～9.5 之间。故可尽量在自然 pH 值下运行，系统中可不加酸或少加酸。

(3) 涂料覆盖法

这种方法是在碳钢换热器的传热表面或封头上涂上防腐涂料，形成一层连续的牢固附着的薄膜，使金属与冷却水隔绝，避免受到腐蚀。此法可应用于系统中部分换热器的防腐蚀。只要涂料选择合适、涂敷的质量好，换热器的使用寿命可以很长，已发现有的使用

已超过 20 年。在实际应用中证明在以下情况时，涂料覆盖换热器有特殊的效果。

① 系统中不锈钢换热器比率大，碳钢换热器可全部采用涂料涂覆。这样可以不考虑全系统的腐蚀问题，系统中可不加缓蚀剂。

② 碳钢壳程水冷却器的管外极易结污垢而造成严重的垢下腐蚀，平均寿命约为 30 个月左右。采用涂料涂覆可解决污垢问题，寿命大大提高，有的已使用 10 年以上。

③ 用海水冷却的碳钢水冷却器，其腐蚀速度极高。因海水中氯离子含量可高达 20000mg/L 左右，对不锈钢也可能产生应力腐蚀开裂。采用涂料涂覆的碳钢水冷器，既可避免海水腐蚀又可降低造价，所以很有前途。

(4) 采用耐蚀材料的换热器

即采用比碳钢耐蚀的材料来制造换热器。常采用的金属耐蚀材料有铜合金、不锈钢、铝和钛合金，非金属耐蚀材料有石墨、搪玻璃、氟塑料、聚丙烯、石墨改性聚丙烯等。金属材料比起非金属材料来有热导率高、强度高、耐压力高、耐温度高的特点，适合于大型的换热器。

(5) 电化学保护法——阴极保护法

从电化学腐蚀反应看，阳极的金属受到腐蚀，而阴极上的金属并未受到腐蚀。如果改变设备的外部条件，使其整个变为一个大阴极，则设备就会被保护不被腐蚀。这就是牺牲阳极保护。即利用电偶腐蚀的原理，牺牲电位较低的一种金属来保护另一种金属。有以下两种方法。

① 护屏保护　在需要保护的碳钢或铜换热器上，用电位较低的锌、镁或其合金作为阳极，使换热器受到保护。被护屏保护的范围称为护屏作用的半径。介质的电导率愈大，则护屏的作用半径愈大。故此法更适用于海水，最适用于保护换热器的管板和封头。

② 外加电流保护　将需要保护的碳钢设备接到直流电源的负极上，在正极上接上辅助阳极，如石墨、碳精等，使碳钢设备在外加电流的作用下变成阴极而受到保护。这种保护法需要耗电能。只

适用于形状简单的换热器，如蛇管或排管换热器之类。

以上防蚀方法中，(5) 法不常用，(1)、(2)、(3)、(4) 法均常用。可以单独采用其中一种，也可以几种方法共用。

509 CH-784 涂料的特点如何？

涂料覆盖法对碳钢防腐蚀是一种很有效的方法。它所形成的连续的牢固薄膜使碳钢与水完全隔绝，实际上是使碳钢不产生电化学腐蚀。用于碳钢换热器水侧的涂料一般是环氧树脂类的涂料，有热固型或冷固型。目前国内广泛使用效果较好的是 CH-784 涂料，是一种热固型涂料。故以此为例介绍涂料覆盖的方法。

① CH-784 涂料的组成　它是一种改性环氧树脂，主成分是环氧树脂与丁酯化三聚氰胺甲醛树脂。二者在加热烘烤下交联固化成膜。在 180～200℃烘烤时，环氧基发生开环反应，使各层涂料结合成为致密的整体。所形成的膜强度好、附着力强、光滑致密、抗水渗透性好。

该涂料的底漆中加入了磷酸锌及铬酸锌，起钝化缓蚀作用；加入了铝粉及氧化铁红，能增加膜的封闭作用并提高耐热性。面料中加入丁三氧化二铬，使涂料的化学稳定性增强，耐酸碱腐蚀、封闭性好。

② 涂料的涂覆　涂料总厚度要求 200～250μm，一般涂底漆 2 层、面漆 4 层。涂敷工序大致为：清理、除锈、除油等表面处理；涂底漆、面漆，烘烤，修整。管程换热器一般采用灌注法。即换热器整体组装后使其直立，灌入漆。这种方法用漆量少，管下流出的漆可循环使用。壳程换热器可以整体在喷淋槽中滚动喷淋，也可单根喷涂（或涂刷）后再组装。

③ 涂料的热固化　涂料涂覆之后需烘烤加热固化，在 140℃以上开始发生交联反应，在 180～200℃完全固化。这种热固型涂料适合于大多数水冷器。因大多数水冷器的工艺介质入口温度在 100～200℃，有的达 200℃以上。所以水侧壁温常常大于 100℃，热固型涂料牢固耐热，使用安全，不易脱落。冷固型涂料的适用性不够广。当水冷器的入口工艺介质温度＞100℃时，曾发生涂料脱

落，造成局部小阳极腐蚀、加速泄漏的情况。但在入口工艺介质温度为六十余度的一台壳程水冷器上使用了冷固型涂料，效果却良好，多年未损坏。

④ 涂料的传热效果　CH-784 涂料的热导率为 0.49W/(m·K)，如按涂敷厚度为 200～250μm 计，会增加热阻 4.1×10^{-4}～$5.1\times10^{-4}m^2\cdot K/W$。按敞开式循环冷却水系统对换热器水侧污垢热阻值的要求，只允许增加 1.72×10^{-4} 或 $3.44\times10^{-4}m^2\cdot K/W$，显然涂敷涂料后增加的热阻是会影响传热效果的。故新设计水冷器如采用涂料防腐时，应考虑涂料影响传热的因素，适当增加传热面积。但是涂料又有其对传热十分有利的一面，即其表面光滑疏水，不易滞留沉积物。特别是对壳程水冷器的传热非常有利。因为未涂敷涂料的壳程水冷器往往积垢很厚，其污垢热阻值实际上大于 1.72×10^{-4} 或 $3.44\times10^{-4}m^2\cdot K/W$ 很多倍，有可能达到 40×10^{-4} $m^2\cdot K/W$ 或更高。所以涂敷涂料之后实际上会提高壳程水冷器的传热效率。

CH-784 涂料换热器使用寿命的长短关键在于涂敷质量。因此应由有经验和有条件有资质的单位涂敷。国内外的换热器都曾有使用该种涂料的经验，并获得很好的效果。

510　为什么在有铜和铜合金设备的冷却水系统中还要考虑加铜缓蚀药剂？

铜是贵金属，在腐蚀过程中通常不析氢。因此，除非有氧或其他氧化剂如硝酸存在，否则它不受酸的腐蚀。铜和铜合金的阴极反应主要是氧还原为氢氧根离子。铜基合金耐中性和弱碱性溶液腐蚀，但含氨溶液例外。氨对铜合金的腐蚀是由于铜、氧和氨反应会形成可溶性铜氨络合物所致，反应如下：

$$H_2O+Cu+\frac{1}{2}O_2-4NH_3 \longrightarrow Cu(NH_3)_4^{2+}+2OH^-$$

由于铜和铜合金有良好的耐蚀性、高电导率和热导率、成形性能、机械加工性能，所以常常应用于冷却水系统换热设备中。在有铜和铜合金设备的冷却水系统中，应该注意其腐蚀问题，尤

其是合成氨工厂冷却水系统中常常有氨。此外，聚丙烯酸盐对铜合金也有侵蚀趋势。为了防止这种侵蚀作用，在配方中常加入苯并三唑、甲基苯并三唑或巯基苯并噻唑之类的铜缓蚀剂。铜缓蚀剂除了保护铜设备以外，也相应地保护了碳钢设备。因一旦铜设备未得到保护而受到腐蚀时，水中的铜离子会置换出化学活泼性大的铁，使铜离子被还原而沉积在碳钢上，造成碳钢的缝隙腐蚀和点蚀。反应如下：

$$Cu^{2+} + Fe \longrightarrow Fe^{2-} + Cu\downarrow$$

因此，凡冷却水系统中碳钢与铜或铜合金设备共存时，都必须考虑投加铜缓蚀剂，一般加量为 0.5～2mg/L。

511　水中溶解氧对腐蚀有什么影响？

在冷却水中含有较丰富的溶解氧，在通常情况下，水中含 O_2 6～10mL/L。氧对钢铁的腐蚀有两个相反的作用：

（1）参加阴极反应，加速腐蚀；

（2）在金属表面形成氧化物膜，抑制腐蚀。

一般规律是在氧低浓度时起去极化作用，加速腐蚀，随着氧浓度的增加腐蚀速度也增加。但达到一定值后，腐蚀速度开始下降，这时的溶解氧浓度称为临界点值。腐蚀速度减小的原因是由于氧使碳钢表面生成氧化膜所致。溶解氧的临界点值与水的 pH 值有关，当水的 pH 值为 6 时，一般不会形成氧化膜。所以溶解氧愈多，腐蚀愈快。当 pH 值为 7 左右时，溶解氧的临界点含量为 20mL/L，pH 值升高到 8 时，其临界点含量为 16mL/L。因此，碳钢在中性或微碱性水中时，腐蚀速度起先随溶解氧的浓度增加而增加，但过了临界点，腐蚀速度随溶解氧的浓度继续升高而下降，这也是碳钢在碱性水中腐蚀速度比在酸性水中要低的原因。

一般来说，循环冷却水在 30℃左右时，溶解氧只有 8～9mL/L，往往不会超过临界点值，所以溶解氧常是加速腐蚀的主要因素。在换热器中，当水不能充满整个换热器时，在水线附近特别容易发生水线腐蚀，这是因为在换热器中，水温升高，溶解氧逸到上部空间，在水线附近产生氧的浓差电池，导致并加速这

种局部腐蚀。

512　水中溶解盐类的浓度对腐蚀有什么影响？

水中溶解盐类的浓度对腐蚀的影响，综合起来有以下三个方面。

（1）水中溶解盐类浓度很高时，将使水的导电性增大，容易发生电化学作用，增大腐蚀电流使腐蚀增加。

（2）影响 $Fe(OH)_2$ 的胶体状沉淀物的稳定度，使保护膜质量变差，增大腐蚀。

（3）可使氧的溶解度下降，阴极过程减弱，腐蚀速度变小。

上面综合作用的结果，一般来说是使腐蚀增加。

关于水中不同离子与腐蚀的关系，一般有以下原则性认识：

（1）水中 Cl^-、SO_4^{2-} 等离子的含量高时，会增加水的腐蚀性。Cl 不仅对不锈钢容易造成应力腐蚀，而且还容易破坏金属上的氧化膜，因此，Cl 也是使碳钢产生点蚀的主要原因。

（2）水中的 PO_4^{3-}、CrO_4^{2-}、WO_4^{2-} 等离子能钝化钢铁或生成难溶沉淀物覆盖金属表面，起到抑制腐蚀的作用。

（3）Ca^{2+}、Zn^{2+}、Fe^{2+} 等离子由于能与阴极产物 OH^- 生成难溶的沉淀沉积子金属表面，起到防腐蚀作用。而 Cu^{2+}、Fe^{3+} 等具有氧化性的阳离子，由于能促进阴极去极化作用，因而是有害的。

513　水的温度对腐蚀有什么影响？

像大多数化学反应一样，腐蚀的速率随水温的升高而成比例地增加。一般情况下，水温每升高 10℃，钢铁的腐蚀速率约增加 30%。这是由于当温度升高时：①氧扩散系数增大，使得溶解氧更容易达到阴极表面而发生去极化作用；②溶液电导率增加，腐蚀电流增大；③水的黏度减小，有利于阳极和阴极反应的去极化作用。所有这些将使得腐蚀速度加大。但是另一方面，水温度的提高可使水中溶解氧浓度减少。因此，以上多方面的因素对实际装置的影响表现也不一样。

在密闭容器内，腐蚀率随温度的升高而直线上升。但在开放系统中，起先随温度上升腐蚀率变大，到 80℃时，腐蚀率最大。以

后即随温度的升高而急剧下降、这是因为温度升高所引起的反应速率的增大不如溶解氧浓度减少所引起的反应速率的下降来得大。

冷却水中如含有侵蚀性离子 Cl⁻ 时，则随温度增加对奥氏体不锈钢的腐蚀性急剧增大，应力腐蚀开裂的可能性大大增加。

514　水的 pH 值对腐蚀的影响如何？

在自然界，正常温度下，水的 pH 值一般在 4.3～10.0 之间，碳钢在这样的水溶液中，它的表面常常形成 $Fe(OH)_2$ 覆盖膜。此时碳钢腐蚀速度主要决定于氧的扩散速度而几乎与 pH 值无关，在 pH 值为 4～10 之间，腐蚀率几乎是不变的。pH 在 10 以上时，铁表面被钝化，腐蚀速度继续下降。当 pH 低于 4.0 时，铁表面保护膜被溶解，水中 H^+ 离子浓度增加因而发生析氢反应，腐蚀速度将急剧增加。

实际上，由于水中钙硬的存在，碳钢表面常有一层 $CaCO_3$ 保护膜，当 pH 值偏酸性时，则碳钢表面不易形成有保护性的致密的 $CaCO_3$ 垢层，故 pH 值低时，其腐蚀率要比 pH 值偏碱性时高些。

515　水流速度对腐蚀的影响如何？

碳钢在冷却水中被腐蚀的主要原因是氧的去极化作用，而决定腐蚀速度的又与氧的扩散速度有关。流速的增加将使金属壁和介质接触面的层流层变薄而有利于溶解氧扩散到金属表面。同时流速较大时，可冲去沉积在金属表面的腐蚀、结垢等生成物，使溶解氧更易向金属表面扩散，导致腐蚀加速，所以碳钢的腐蚀速度是随着水流速度的升高而加大。随着流速进一步的升高，腐蚀速度会降低，这是因流速过大，向金属表面提供氧量已达到足使金属表面形成氧化膜，起到缓蚀的作用。如果水流速度继续增加，则会破坏氧化膜，使腐蚀速度再次增大。当流速很高时（大于 20m/s），腐蚀类型将转变为以机械破坏为主的冲蚀。

一般来说，水流速度在 0.6～1m/s 时，腐蚀速度最小。当然水流速度的选择不能只从腐蚀角度出发，还要考虑到传热的要求，流速过低会使传热效率降低和出现沉积，故水走管程的换热器的冷

却水流速不宜小于 0.9m/s。水走壳程时，流速无法达到上述要求，故宜尽量避免采用壳程换热器。如工艺必须采用壳程时，流速不应小于 0.3m/s。当受条件限制不能达到上述流速时，应采取防腐涂层、反向冲洗等措施。

516　何谓缓蚀剂？缓蚀剂分为几类？

缓蚀剂又叫腐蚀抑制剂。凡是添加到腐蚀介质中能干扰腐蚀电化学作用，阻止或降低金属腐蚀速度的一类物质都称为缓蚀剂。其作用均是通过在金属表面上形成保护膜来防腐蚀的。

缓蚀剂种类很多，通常有以下三种分类方法：

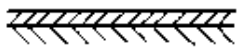
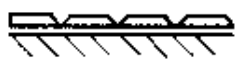
（1）按药剂的化学组成，一般可分为无机缓蚀剂和有机缓蚀剂两大类。

（2）按药剂对电化学腐蚀过程的作用不同，可分阳极缓蚀剂（如铬酸盐、亚硝酸盐等）和阴极缓蚀剂（如聚磷酸盐、锌盐等）以及两极性缓蚀剂（如有机胺类）三种。阳极缓蚀剂和阴极缓蚀剂能分别阻止阳极或阴极过程的进行，而两极性缓蚀剂能同时阻止阴、阳极过程的进行。

常用缓蚀剂的种类

无机缓蚀剂		有机缓蚀剂
阳极缓蚀剂	阴极缓蚀剂	
铬酸盐	聚磷酸盐	有机胺
钼酸盐	锌盐	醛类
钨酸盐	亚硫酸盐	膦酸盐
正磷酸盐	三氧化二砷	杂环化合物
硅酸盐		有机硫化合物
硼酸盐		咪唑啉类
亚硝酸盐		葡萄糖酸盐
亚铁氰化物		

（3）按药剂在金属表面形成各种不同的膜，则可分为氧化膜型、沉淀膜型和吸附膜型，如下表及图 5-2-2 所示：

缓蚀剂分类		缓蚀剂举例	保护膜的特点	形成的保护膜 图 5-2-9
氧化膜型		铬酸盐、钼酸盐、钨酸盐、亚硝酸盐	致密、膜较薄，与金属结合紧密	
沉淀膜型	水中离子型	聚磷酸盐、锌盐、硅酸盐、磷酸盐、有机磷酸酯	多孔、膜厚与金属结合不太紧密	
	金属离子型	巯基苯并噻唑、苯并三唑、甲基苯并三唑	比较致密、膜较薄	
吸附膜型		硫醇类 有机胺类化合物 葡萄糖酸钠 其他表面活性剂	在非清洁表面上吸附性差	

517　氧化膜型缓蚀剂有什么特性？

氧化膜型缓蚀剂又叫钝化膜型缓蚀剂。它能使金属表面氧化，形成一层致密的耐腐蚀的钝化膜而防止腐蚀。如铬酸盐在溶液中使碳钢表面生成一层 γ-Fe_2O_3 金属氧化物的膜，它紧密地牢固地粘附在金属表面，改变了金属的腐蚀电势，并通过钝化现象降低腐蚀反应的速度。氧化膜型缓蚀剂的防腐作用是很好的，但是这类缓蚀剂如果加入量不够，不足以使阳极全部钝化，则腐蚀会集中在未钝化完全的部位进行，从而引起危险的点蚀。所以这类缓蚀剂往往用量较多。

氧化膜型缓蚀剂在成膜过程中会被消耗掉，故在投加这种缓蚀剂的初期，需加入较高的浓度，待成膜后就可减少用量，加入的药剂只是用来修补破坏的氧化膜。氯离子、高温及高的水流速度都会破坏氧化膜，故应用时要考虑适当提高其浓度。

518　沉淀膜型缓蚀剂有什么特性？

沉淀膜型缓蚀剂能与水中某些离子或和腐蚀下来的金属离子相互结合沉淀在金属的表面上，形成一层难溶的沉淀物或表面络合物，从而阻止了金属的继续腐蚀。由于这种防蚀膜没有和金属表面直接结合，它是多孔的，常表现出对金属的附着不好。因此，从缓蚀效果来看，这种缓蚀剂稍差于氧化膜缓蚀剂。目前在水处理技术

中应用较多的聚合磷酸盐，例如六偏磷酸钠，三聚磷酸钠等就属于沉淀膜型缓蚀剂。

519　吸附膜型缓蚀剂有什么特点？

吸附膜型缓蚀剂都是有机化合物。它们之所以能起缓蚀作用是因为在它的分子结构中具有可吸附在金属表面的亲水基团和遮蔽金属表面的疏水基团。亲水基团定向地吸附在金属表面，而疏水基团则阻碍水及溶解氧向金属扩散，从而达到缓蚀的作用。当金属表面呈活性的和清洁的时候，吸附膜型缓蚀剂形成满意的吸附膜和表现出很好的防蚀效果。但如果在金属表面有腐蚀产物覆盖或有垢沉积物，就不能提供适宜的条件以形成吸附膜型防蚀膜。所以这类缓蚀剂在使用时，可加入润湿剂，以帮助缓蚀剂向铁锈覆盖的金属表面渗透，提高缓蚀效果。

520　铬酸盐缓蚀剂的特点是什么？

常用的铬酸盐缓蚀剂是铬酸钠(Na_2CrO_4)、铬酸钾(K_2CrO_4)和重铬酸钠($Na_2Cr_2O_7 \cdot 2H_2O$)或重铬酸钾($K_2Cr_2O_7 \cdot 2H_2O$)。这种缓蚀剂是阳极型、氧化膜型缓蚀剂，起缓蚀作用的是阴离子。当它加入到水中，可产生下列反应

$$CrO_4^{2-} + 3Fe(OH)_2 + 4H_2O \longrightarrow Cr(OH)_3 + 3Fe(OH)_3 + 2OH^-$$

所形成的两种水合氧化物，随后脱水生成 Cr_2O_3 和 Fe_2O_3 的混合物，在阳极上形成钝化膜，阻滞了阳极过程的进行。铬酸盐形成的钝化膜中约含 10%的 Cr_2O_3 和 90%的 γ-Fe_2O_3。

铬酸盐是阳极缓蚀剂，在相当高的剂量时，是一种很有效的钝化缓蚀剂。但在低剂量使用时，则有坑蚀的危险，故单独使用铬酸盐时，CrO_4^{2-} 剂量应保持在 150mg/L，有的认为应在 200～250mg/L 以上，初始质量浓度应为 500～1000mg/L。若与其他阴极缓蚀剂（如聚磷酸盐、锌盐等）配伍，其剂量便可大大降低。

铬酸盐使用的 pH 值范围较广，可在 6～9.5 使用。在碱性水中成膜效果最好，故一般推荐 pH 值在 7.5～8.5 运行。

使用铬酸盐最主要的问题是排污水对自然环境引起的污染。因为铬和其他重金属一样，对许多水生物和人体有毒性。现在国际上

许多国家规定，排放水中 Cr^{6+} 离子的含量不得超过 0.05mg/L，这是一般的污水处理方法所不易达到的标准。因此，铬酸盐作为缓蚀剂，虽然有着缓蚀效果好和不易滋生菌藻的优点，但由于排水的污染问题，故目前尚未在国内推广使用。

521 铬酸盐排污水有什么处理方法？

铬酸盐作为循环水系统的缓蚀剂，由于环保方面的原因其使用受到严格的限制。我国环保规定六价铬最高允许排放质量浓度为 0.5mg/L，而有些国家限制到 0.05mg/L。但铬酸盐诱人的缓蚀效果促使人们寻求对铬酸盐排水进行处理和循环使用的方法，现简单介绍几种可以使用的处理方法。

① 化学还原法　用化学方法从冷却塔排污水中除铬可分为两步，首先将六价铬还原为三价铬，然后再将三价铬以氢氧化铬的形式沉淀下来，这样就将铬从排污水中分离出来。六价铬还原为三价铬时，最合适的 pH 值应控制在 2.0～3.0 的范围内，还原剂可用二氧化硫、硫酸亚铁、亚硫酸氢钠。其还原反应用下式表示：

$$3SO_2 + Na_2Cr_2O_7 + H_2SO_4 \longrightarrow Cr_2(SO_4)_3 + Na_2SO_4 + H_2O$$

铬酸盐被还原后，应使用石灰或氢氧化钠将铬酸盐转化成氢氧化铬从水中沉淀下来。

$$Cr_2(SO_4)_3 + 3Ca(OH)_2 \longrightarrow 2Cr(OH)_3\downarrow + 3CaSO_4$$

② 电化学还原法　在这种除铬系统中，将直流电通入铁阴极和铁阳极以产生氢氧化亚铁。然后，氢氧化亚铁将铬酸盐从六价铬还原为不溶解的三价铬。

在电化学过程中所发生的反应如下式：

阳极　$$Fe \longrightarrow Fe^{2+} + 2e$$

阴极　$$2H_2O + 2e^- \longrightarrow H_2 + 2OH^-$$

水中　$$3Fe^{2+} + CrO_4^{2-} + 4H_2O \longrightarrow 3Fe^{3+} + Cr(OH)_3\downarrow + 5OH^-$$

电化学法除铬的优点在于它能在水的 pH 值为 6.0～9.0 这样广阔的范围内应用。

③ 离子交换法　冷却塔排污水中的铬酸根是一种相当稳定和

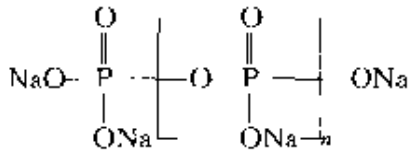
易溶的阴离子。但是，铬酸根离子可以离子形式被特殊树脂中的氯离子、硫酸根离子或氢氧根离子所交换而有选择地从排污水中除去，铬酸盐还可以回收重复使用。

最早的工业除铬装置，使用的是强碱阴离子交换树脂，但该树脂易于被有机物污染，同时抵抗氧化的能力也不如弱碱树脂。因此，在以后的除铬装置中，大都采用弱碱树脂。

采用弱碱阴离子树脂的除铬系统，除了回收铬酸盐的价值之外，与化学还原法相比，主要优点在于它没有处理污泥的问题，正洗水和反洗水都可以再送回冷却水系统重复使用。

522　聚磷酸盐缓蚀剂的缓蚀机理是什么？

聚磷酸盐是传统的、广泛应用的缓蚀剂，是磷酸盐的无机聚合物。其结构通式为：



工业上常用的六偏磷酸钠和三聚磷酸钠是一些 n 值在一定范围的聚磷酸盐的混合物。聚磷酸盐主要起缓蚀作用，同时也有阻垢作用。

一般认为聚磷酸盐是阴极型、沉淀膜型缓蚀剂。聚磷酸盐的负离子能够和水中溶解的钙离子形成胶状带正电荷的络合物，并在金属表面再与腐蚀下来的 Fe^{2+} 络合形成聚磷酸钙铁沉淀膜，保护了阴极。有人认为聚磷酸盐也有阳极缓蚀剂的作用，因膜的成分中含有 γ-Fe_2O_3。

聚磷酸盐缓蚀的必要条件是活化的金属表面、水中一定量的钙离子和溶解氧。因沉淀膜中含有一定 Fe^{2+} 离子，故需要一定溶解氧以促进电化作用。溶解氧低于 2mg/L 时，成膜不牢固，缓蚀效果不好。因敞开式循环冷却水系统中溶解氧是饱和的，可满足成膜要求。含钙量少的软水不宜用聚磷酸盐作缓蚀剂，循环水中的钙离子含量需>20mg/L（如以 $CaCO_3$ 计，则为 50mg/L）才能达到良好的缓蚀效果。

聚磷酸盐在水垢中有晶格畸变作用，故兼有阻垢作用。

523 什么是聚磷酸盐的水解或降解？聚磷酸盐水解对冷却水系统有何影响？

聚磷酸盐在有水存在的情况下，重新分解生成正磷酸盐的现象称为聚磷酸盐的水解。而聚合度较大的较长链聚磷分子加水降解为较短链的聚磷酸盐以及一部分正磷酸盐称为降解。

聚磷酸盐的水解是使用聚磷酸盐作为水处理剂中一个关键的问题，它关系到冷却水系统中正磷酸根的含量、磷酸钙垢的析出、缓蚀阻垢效果、系统停留时间和排污等一系列问题。水解或降解后生成的正磷酸盐虽然有一定的缓蚀作用，但它是一种阳极型缓蚀剂，用量不足时易产生局部腐蚀，而且与水中的钙离子会生成磷酸钙 $Ca_3(PO_4)_2$ 和羟基磷灰石 $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ 沉淀，使换热器结垢。正磷酸盐又是微生物的营养品，能促进微生物生长。因此，为避免聚磷酸盐水解危害系统，需要选择合适的运行条件，循环水中的正磷酸盐也往往作为指标来控制。

影响聚磷酸盐水解的主要因素有以下几点：

① 温度　一般水温增高水解转化成正磷酸盐的量也将增多，所以有人用热水熔化玻璃态聚磷酸盐是错误的。

② pH 值　聚磷酸盐在酸性溶液中的水解速度比中性溶液快，因此，控制好水中 pH 值很关键。

③ 微生物　当水中有微生物存在时，由于微生物的活性，也会使水解速度加快。

某国外资料认为聚磷酸盐水解转化为正磷酸盐的速率受 pH 值、温度和溶液离子浓度等因素的影响。经实测，当加六偏磷酸钠的循环水中总磷酸盐为 25mg/L 时，日平均水解率为以下值 $[PO_4^{3-}/(mg/L)]$：

pH 值	43.3℃ (110°F)	48.9℃ (120°F)	54.4℃ (130°F)
6.0	0.70	1.9	
7.5	0.26	0.56	1.6

循环冷却水中的实际正磷酸盐含量还与聚磷酸盐的加入量及其

在系统中的停留时间等因素有关。因此，聚磷酸盐缓蚀剂浓度高的系统结磷酸盐水垢的可能性要大一些。聚磷酸盐水溶液不宜长期存放，应在使用时在现场溶解。

524 什么是磷系配方的酸性处理？

磷系配方的酸性处理又可称为低 pH 值高磷酸盐处理，这是国外循环冷却水较古老的一种经典处理方法。采用单一聚磷酸盐缓蚀剂。酸性处理一般加硫酸，将循环冷却水的 pH 值调至 6.0～7.0 左右。在这个 pH 值范围内，可稳住 $Ca(HCO_3)_2$ 而没有碳酸钙析出的危险，从而防止换热器中水垢的形成。酸性处理将使结垢的可能性减小，但腐蚀的倾向却增加了，可以将缓蚀剂的用量增大来抑制腐蚀，一般要加入 20～40mg/L 的聚磷酸盐。

酸性处理一般可以取得较好的缓蚀、阻垢效果，同时药剂费用也较为经济。但它也有一定的缺点：① 低 pH 值加酸时，如操作不慎可能会使 pH 值过低，而引起设备的腐蚀；②高剂量的磷排放也会引起对环境的污染；③需严格控制水中钙含量，Ca^{2+} 不能太高，一般＜100mg/L（以 $CaCO_3$ 计）。补充水含钙量高时，需进行软化处理。

525 什么是磷系配方的碱性处理？

磷系配方的碱性处理又可称为高 pH 值低磷酸盐法。碱性处理是 20 世纪 60 年代末国外提出的一种处理方法。这是使循环冷却水的 pH 值保持在碱性范围，一般控制在 7.5～8.5 左右。碱性处理和酸性处理相比，水的腐蚀性减轻，但结垢的可能性增加了。所以碱性处理除加酸量减少外，缓蚀剂量也减少很多，一般聚磷酸盐加入量为 5～20mg/L。同时采用了磷系复合配方，即配方中除加入聚磷酸盐之外，还加入高效的阻垢剂和分散剂以抑制水垢和污泥的形成。碱性处理允许水中钙含量适当提高，一般＞100mg/L（以 $CaCO_3$ 计），有的达到 200～300mg/L（以 $CaCO_3$ 计）。

碱性处理比酸性处理的适应性广。但影响处理效果的因素很多，如水的 pH 值、钙离子含量、正磷酸盐含量，阻垢分散剂的质量和用量等。因而各项指标都需严格控制。

526 什么是聚磷酸盐/膦酸盐/聚羧酸盐复合配方？

这是20世纪70年代以来广泛应用的典型的磷系复合配方。这种配方兼有良好的缓蚀和阻垢作用，优于单一聚磷酸盐配方及锌盐/聚磷酸盐复合配方，在偏碱性条件下运行。缓蚀剂及阻垢剂用量都不大。因此该配方除缓蚀阻垢效果良好之外，突出的特点是药剂费用低，有的甚至低到每立方米循环水的药剂费用只需0.001～0.002元。所以至今应用仍较广泛。

聚磷酸盐一般采用六偏磷酸钠。常用的膦酸盐为羟基亚乙基二膦酸（HEDP）、氨基三亚甲基膦酸（ATMP）或乙二胺四亚甲基膦酸（EDATMP），或其钠盐。聚羧酸盐过去均采用聚丙烯酸或其钠盐，但近年有的已改用聚甲基丙烯酸、水解聚马来酸酐或丙烯酸的二元共聚物，或其钠盐。水中总无机磷酸盐指标一般在8～14mg/L（以PO_4^{3-}计）范围，有的低至4～6mg/L（PO_4^{3-}）。总无机磷酸盐实际代表了水中聚磷酸盐及其水解的正磷酸盐含量。有机磷酸盐代表膦酸盐含量，其指标一般在1.5～4.0mg/L（以PO_4^{3-}计）。水中聚丙烯酸的含量一般在1～4mg/L（100%计）范围，有的达6～10mg/L。系统中水冷器如兼有碳钢及铜材，可在复合配方中另加铜缓蚀剂杂环化合物，如巯基苯并噻唑、苯并三唑或甲基苯并三唑，用量为0.5～2.0mg/L。

运行pH值一般在7.2～8.4范围内，多<8.0。即适当加酸调节pH值至腐蚀状态。

水中钙含量一般均>100mg/L（以$CaCO_3$计），高限为200～300mg/L（以$CaCO_3$计）不等。由于配方中含有阻垢剂，所以对钙含量的控制不像单一聚磷酸盐配方那样严格。但由于配方中阻垢剂的含量不多，也不允许钙含量太高。当补充水含钙量低，循环水中钙含量<100mg/L（以$CaCO_3$计）时，这种配方的缓蚀效果不太好，可在配方中加入锌盐增强缓蚀效果，锌离子含量一般在1.0～2.5mg/L范围。

为防止磷酸钙水垢沉积，仍需控制正磷酸盐在水中的含盐量。控制指标根据运行pH值、聚磷酸盐加入量等因素而定，一般为

<2～6.5mg/L（以 PO_4^{3-} 计），或控制小于总无机磷酸盐指标的50%。

用这种配方时，要求补充水中的含钙量不高，如低碱软水（长江水系）、中硬中碱水经石灰软化后的水。用极软极低碱水或中碱软水（负硬度水）为补充水时，配方中需加锌。由于补充水含钙量低，利于浓缩倍数提高，常可达3～5倍。补充水含钙量高、结垢倾向严重的水不宜采用这种复合配方。

527 什么是锌盐/聚磷酸盐/膦酸盐/聚羧酸盐复合配方？

这种配方是20世纪80年代开发出来的。其药剂虽与前题所述的聚磷酸盐/膦酸盐/聚羧酸盐复合配方相似，但配比和运行条件则有差异。其特点是：配方中聚磷酸盐的比例较少，而聚羧酸盐的比例较多。聚羧酸盐不是采用均聚物聚丙烯酸或其钠盐，而是采用了阻垢性能较好的二元或三元共聚物。药剂用量约为45～65mg/L（商品质量浓度）。这种配方的阻垢性能比前题的磷系复合配方好。运行pH值为碱性，一般<8.5，多为7～8，可少量加酸或不加酸调pH值。稳定指数一般<7.5，在轻微腐蚀状态下运行。允许水中的钙含量及碱度可适当提高。例如某些厂的控制指标为：钙硬度<400mg/L（以 $CaCO_3$ 计），总碱度<300mg/L（以 $CaCO_3$ 计）。因此，这种配方适合用于以中硬水质为补充水的系统。这种配方实际上又可作为全有机配方的补充配方。当全有机配方在冷态或低倍数下运行时，常在配方中增加低含量的锌盐和聚磷酸盐，实际上就是这种配方。

528 作为缓蚀剂的锌盐有什么特性？

在冷却水系统中，锌盐是最常用的阴极型缓蚀剂，起作用的是锌离子。锌离子在阴极部位的高pH值区能迅速形成氢氧化锌 $Zn(OH)_2$ 沉淀膜。锌盐的阴离子一般不影响它的缓蚀性。常用的锌盐是一水硫酸锌（$ZnSO_4 \cdot H_2O$）、七水硫酸锌（$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$）或氯化锌（$ZnCl_2$）。

锌盐成膜很迅速，故在系统初开车时常用作预膜剂。但锌膜质地松软不耐久，所以不宜单独使用，必须和其他缓蚀剂复合使用。

锌的特点是可以和许多缓蚀阻垢剂复合使用，能够起很好的增效作用。例如，锌与聚磷酸盐复合使用可加速形成沉淀膜，膜的成分是磷酸钙铁、γFe_2O_3、磷酸锌和氢氧化锌，比单一聚磷酸盐所形成的膜更致密。当水中含钙量低时，锌和聚磷酸盐复合使用时缓蚀效果能够提高。除聚磷酸盐之外，锌还可以和铬酸盐、膦酸盐及有机磷酸酯等缓蚀阻垢剂复合使用，都有增效作用，所以应用极广泛。

锌的一个缺点是在 pH 值较高时有产生沉淀的倾向，某大化肥厂曾有过锌在蒸汽冷凝器中结垢的情况。一般认为应控制 pH 值≤8.3。当低剂量锌离子与优良阻垢剂复合使用时，也允许 pH 值在＞8.3 下运行。锌的另一缺点是对水生生物有一定毒性，在排放时受到限制。我国地面水要求 Zn^{2+} ≤1.0mg/L，渔业水要求≤0.1mg/L。污水排放的一级标准为 Zn^{2+} ≤2.0mg/L，二级标准为≤4.0mg/L，三级标准为≤5.0mg/L。故循环水中的锌离子浓度以低剂量为宜，应低于环保规定的排放浓度，这样也可减少锌垢沉淀倾向。

529　什么是有机胺类缓蚀剂？

有机胺类缓蚀剂是指胺类、环胺类、酰胺类、酰胺羧酸类等缓蚀剂，它们都有一个亲水基团氨基和亲油的长碳链 $C_8 \sim C_{20}$ 的烷基。而亲水基团的氨基具有化学吸附和物理吸附作用，能吸附在金属表面上形成一层保护膜或与金属表面的离子形成一种螯合物的保护膜，由于这层膜对金属起着一定的缓蚀作用和保护作用。有机胺类药剂，不仅是缓蚀剂而且也是表面活性剂，对于污泥和垢层有着一定的渗透剥离和杀生作用，其主要产品有：

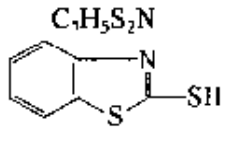
胺　类	环　胺　类	酰　胺　类	酰胺羧酸类
伯　胺	烯胺类	烷基取代酰胺	单羧酸类
仲　胺	吗啉类	吗啉酰胺	二羧酸类
叔　胺	哌嗪类		
季　铵	咪唑啉类		

有机胺的应用很广泛，可用于腐蚀性溶液的防腐蚀（如乙醇胺）、低压锅炉防腐蚀（如吗啉、十八胺）、酸洗缓蚀剂（如苯胺）、

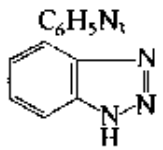
油田防腐（如双十六胺）及循环冷却水的杀生（如季铵盐、二溴次氨基丙酰胺）。国外有些报道，某些有机胺（如二甲胺、乙胺、二乙胺）曾用于循环冷却水，可作为缓蚀阻垢复合配方之组成，但未见具体应用实例的报道。国内未在循环冷却水中作缓蚀剂使用。

530　唑类化合物缓蚀剂有什么特性？常用的有哪几种？

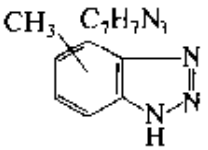
有机杂环化合物中的唑类化合物为抑制铜腐蚀的缓蚀剂，对铜和铜合金具有特殊的缓蚀性，故被称为铜缓蚀剂。常用的有巯基苯并噻唑（MBT）、苯并三唑（BTA）及甲基苯并三唑（MBTA、TTA）三种，其分子式与结构式为：



巯基苯并噻唑

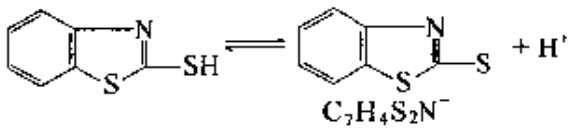


苯并三唑



甲基苯并三唑

唑类化合物在水中能游离出 H^+，其负离子能与金属铜表面上的活性铜原子或铜离子结合成十分稳定的络合物，能修补铜金属表面自然形成的氧化亚铜保护膜。其所形成的膜十分致密牢固，虽其厚度只有几个分子，约数百纳米厚，但缓蚀效果很好。以巯基苯并噻唑为例，在水中离解式为：



$C_7H_4S_2N^-$

其负离子与铜生成 $Cu(C_7H_4S_2N)_2$ 保护膜。

在碳钢及铜设备同时存在的系统中一般需加入唑类缓蚀剂。它既保护了铜设备，也保护了碳钢设备。因一旦铜受到腐蚀，铜离子会被化学活泼性大的铁还原，使铜沉积在钢材上，形成电偶腐蚀。

$$Cu^{2+} + Fe \longrightarrow Fe^{2+} + Cu\downarrow$$

唑类的加药量一般是 1～2mg/L，比较保证的浓度是 2mg/L。

巯基苯并噻唑在 pH 值 8～11 时较有效。有人认为除非在磷系配方中加入 Zn^{2+}，否则 MBT 会影响聚磷盐的缓蚀作用。另外，MBT 的抗氯性较差，当有氯存在时，易被氯氧化成二硫化物，使保护膜破坏。MBT 水溶性差，使用时需将粉剂在 pH>10 的碱液中溶解。

苯并三唑及甲基苯并三唑的抗氯性能比巯基苯并噻唑好，pH 值在 5.5～10 时缓蚀作用都很好。但其价格比巯基苯并噻唑贵得多。

531　硅系水质稳定剂的特点是什么？

作缓蚀剂用的硅酸盐为硅酸钠，又称水玻璃（俗称泡花碱）。其分子式为 $Na_2O \cdot mSiO_2$，m 为水玻璃的模数，以 $m=2.5\sim3.0$ 为宜。

硅酸盐的缓蚀作用，据认为硅酸钠在水中呈一种带电荷的胶体微粒，与金属表面溶解下来的 Fe^{2+} 离子结合，形成硅酸等凝胶，覆盖在金属表面起到缓蚀作用，故硅酸盐是阳离子型、沉淀膜型缓蚀剂。溶液中的腐蚀产物 Fe^{2+} 离子是形成沉淀膜必不可少的条件，因此，在成膜过程中，必须是先腐蚀后成膜，一旦膜形成，腐蚀也就减缓。

硅酸盐作为缓蚀剂，其最大的优点是：操作方便；在正常使用浓度下完全无毒，因为加入水中的都是天然水中本来就存在的物质，所以不会产生排污水污染问题；药剂来源丰富，价格低廉。硅酸盐缓蚀剂一般和聚磷酸盐、膦酸盐或聚羧酸盐复合使用。

硅系水质稳定剂的缺点是药剂用量大，特别是会在硬度高的水中生成硅酸钙或硅酸镁水垢，一旦水垢生成就很难消除，故硅系水质稳定剂目前只在少数厂使用，还没有使用在浓缩倍数高或换热器热流密度大的装置。

532　近年硅系配方有哪些发展？

单一硅酸盐的使用在国内外虽已有历史，但主要用于供水管道的防腐蚀，在有传热面的冷却系统很少采用。近年我国对硅系的药剂及配方研制已有一定成果，使硅系药剂应用逐渐广泛。

① 硅酸盐被膜缓蚀剂　为微溶性玻璃状固体，由硅酸盐为主的药剂制成。其溶于水后能在金属表面生成 1μm 厚的保护膜，可以防蚀防垢。已用于海洋船舶柴油机的缸套冷却水防止海水腐蚀，海水供水及冷却水系统的防蚀、防垢和防海生物（如海虹）以及热水锅炉防“红锈水”等。使用时将该固体块置于补充水槽中使其缓慢溶解。利用药剂在不同温度下溶解度不同（水温高溶解度大）的

特点，控制水温使药剂保持在一定浓度。作防腐蚀剂用时，水温45℃以下药剂浓度 SiO_2 需保持 0.2～1.0mg/L，45～95℃需 5～10mg/L。

② 磷硅系固体水处理剂　为玻璃态固体，有的制成小球状。为防止产生硅垢，在硅酸盐中加入了磷系药剂，使其保持了磷硅两种药剂的优点。有的药剂以硅为主，加入少量聚磷酸盐等药，有的以聚磷酸盐为主，加入少量 SiO_2、CaO、MgO 或分散剂等。药剂的组分不同溶解速度及缓蚀阻垢性能也有差异。这种药剂的商品名称较多，如复方硅酸盐被膜水处理剂、可控释放玻璃水处理剂、缓溶固体缓蚀阻垢剂等。现已用于热水系统、蒸汽系统、海水冷却及循环冷却水系统的缓蚀和阻垢。

③ 硅系复合水质稳定配方　用单一硅酸钠试验时，水温 25℃时腐蚀率低，50℃时高。这说明单一硅酸钠不宜用于循环冷却水系统，但几个单位的试验研究证明：以硅酸盐为主复合少量膦酸盐（如 HEDP）或聚丙烯酸钠的配方可以用于循环冷却水系统作缓蚀阻垢剂，并已用于循环量 4000m^3/h 的系统多年。该单位的配方为：硅酸钠（以 SiO_2 计）45～55mg/L、HEDP 3～5mg/L、BTA 1.5～2.5mg/L。自然 pH 值约 8～9，浓缩倍数>2.0。该配方的特点是价廉、无公害、易控制微生物，特别适用于高硅水质。但如在高浓缩倍数或高热流密度系统使用需慎重，因壁温高或有碳酸钙垢的系统均有可能结硅垢。一些试验还证明：硅酸盐预膜效果不理想，推荐用聚磷酸盐和硫酸锌预膜，复合硅系运行。

533　钼系水质稳定剂的特点是什么？

钼系水质稳定剂采用钼酸盐为缓蚀剂，常用的是钼酸钠（$Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$）。钼酸盐与铬酸盐一样也是阳极型、氧化膜型缓蚀剂，它在铁阳极上生成一层具有保护膜作用的亚铁-高铁-钼氧化物的络合物的钝化膜。这种膜的缓蚀效果接近高浓度铬酸盐或硝酸盐所形成的钝化膜，但是在成膜过程中，它又与聚磷酸盐相似，必须要有溶解氧存在。

钼酸盐单独使用需要投加较高剂量才能获得满意的缓蚀效果。

故为了减少钼酸盐的投加浓度、降低处理费用和提高缓蚀效果，常与其他药剂如聚磷酸盐、葡萄糖酸盐、锌盐等复合使用。

钼系水质稳定剂的主要优点是：缓蚀效果较好，尤其是和其他药剂共用可大大地抑制点蚀的发生。热稳定性高，可用于热流密度高及局部过热的系统。不会与水中钙离子生成钼酸钙沉淀。对碳钢、紫铜、黄铜和铝均有缓蚀作用。毒性较低，不像铬、锌对环境有严重的污染，也不像磷对水体有富营养化作用。

钼系缓蚀剂单独使用时需要 400～500mg/L（Na_2MoO_4），使用剂量大，处理费用高。因此国内应用不广泛。

534　近年钼系配方有何发展？

钼系水质稳定剂用于循环冷却水系统虽有缓蚀优良、热稳定性好、不产生钙垢及无公害的优点，但因用量大、药剂费用高，故尚不能代替磷系。近年来国内外复合钼系配方的研究为钼系应用开拓了前景，已经在国内推广应用。今后在严格限制磷排污地区和腐蚀型水质的处理方面更有推广前途。

（1）钼酸钠加葡萄糖酸钠或聚磷酸钠。钼酸钠加葡萄糖酸钠复合配方已成功地用于大型循环水系统多年。碱性运行，复合药剂用量 140～180mg/L，其中 MoO_4^{2-} ＞20mg/L。缓蚀阻垢效果良好，缺点是费用较高，同时葡萄糖酸钠中未彻底转化的葡萄糖，为微生物提供营养，对控制微生物增加了一定困难。因此，有的厂已取消葡萄糖酸钠改用其他药剂来替代。

（2）近年国内外开发的低钼复合配方已将 MoO_4^{2-} 用量由以往的 20mg/L 降至 4～6mg/L，已在一些系统成功应用。例如美国 Drew 公司的钼酸盐、正磷酸盐、芳香唑类复合配方使用时不调 pH 值，可在 8.5～9.5 运行，其特点是控制点蚀极佳，药费下降。国内研制的钼酸盐、膦酸盐及羧酸聚合物缓蚀效果也较好。为节约预膜费用，也可采用磷系预膜、复合钼系日常处理。

（3）国外介绍在密闭系统中用 200mg/L 钼酸钠加 100mg/L 亚硝酸钠处理的效果及费用均优于用 800～1500mg/L 亚硝酸钠加硼酸盐的配方。

（4）国内近年较突出的成果是以磷钼聚合物为主的系列缓蚀阻垢剂的研制和应用。磷钼聚合物可以和膦酸盐（如 HEDP）、聚羧酸（如聚丙烯酸钠）和芳香唑（如苯并三唑）等药剂复合产生协同效应。其合成工艺独特，为阴阳极混合型缓蚀剂。既具有磷系的阴极缓蚀作用，又具有钼系的阳极缓蚀作用，使金属上形成沉淀及钝化两种膜。因而钼及磷的用量均极低，缓蚀效果又优于磷系。该复合缓蚀阻垢剂的日常总用量为 10～60mg/L，一般用量＜15mg/L。运行 pH 值适应性广，可以不调 pH 值在碱性条件下运行。对碳钢、紫铜、黄铜的缓蚀效果均良好。预膜时采用复合缓蚀阻垢剂 280mg/L 加 300mg/L 助剂，时间为 30～48h。其效果优于磷加锌预膜剂。也可以用钼酸盐、聚磷酸盐、锌及芳香唑复合剂 60mg/L 作基础处理，投药 48h。

535　钨系水质稳定剂有何特点？近来发展怎样？

钨系水质稳定剂是近年开发的新型非铬非磷缓蚀阻垢剂，主要由我国研制开发。采用钨酸钠（$Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$）等钨酸盐为缓蚀剂。钨酸盐的性能类似钼酸盐，也是阳极型、钝化膜型缓蚀剂。它能吸附于金属表面与两价铁离子形成非保护性络合物。二价铁被溶解氧氧化成三价铁，从而使亚铁-钨酸盐络合物转化成钨酸铁，在金属上形成钝化保护膜。该钝化膜形成的前提是有溶解氧存在。

钨酸盐缓蚀剂的优点是无公害，缓蚀性能优于钼系及磷系，可在碱性下运行，操作方便。对碳钢、紫铜、铜合金、铝、锌均有缓蚀作用。对防止氯离子对碳钢腐蚀及对不锈钢的应力腐蚀均有很好作用。

用单一钨酸盐为缓蚀剂时加药量较大，约需 WO_4^{2-} 200mg/L 以上，费用高。故钨系推广应用的关键是降低加药量，开发优良的钨系复合配方。现已有不少复合配方试验成功并用于生产。

钨酸钠与葡萄糖酸钠系列复合剂的缓蚀阻垢效果较好，有时可加入少量锌或聚羧酸（水解聚马来酸酐或聚丙烯酸）。这种配方能使 WO_4^{2-} 用量减少，但日常运行配方中不宜低于 20mg/L，预膜剂中约为 150mg/L。钨系与有机酸有协同效应，与膦酸盐复合效果

也较好。国内某系统原来用磷系配方，系统磷酸钙垢严重，后改用钨系，配方钨含量5mg/L，膦酸盐4mg/L，大大减轻了结垢。

536　什么叫做缓蚀剂的增效作用？

当采用两种以上的药剂组成缓蚀剂时，往往比单用这些药剂的缓蚀效果好且用量少，这个现象叫做缓蚀剂的增效作用或协同效应。例如单用铬酸盐为缓蚀剂时需要很高的剂量，至少需要150mg/L以上。单用锌盐作为缓蚀剂时效果较差。但当两者联合低剂量使用时，5～10mg/L的$Na_2Cr_2O_7$及5～10mg/L的Zn^{2+}就可以得到很好的缓蚀效果。由于复方缓蚀剂的增效作用，同时还节约了药剂，因此目前很少采用单一的缓蚀药剂。如现在使用较普遍的磷系配方中，除了聚磷酸盐外，还添加有机磷酸盐或锌盐等药剂。同样，铝系或钨系配方也因复合其他缓蚀剂，使钼酸盐或钨酸盐用量大大降低、药费下降，有利于推广。

537　腐蚀速度的表示方法有哪些？

腐蚀速度又称腐蚀率，通常表示的是单位时间的平均值。有以下表示方法。

① 质量变化表示法　用单位时间单位面积上质量的变化来表示腐蚀速度。常用的单位是毫克/(分米^2·日)[mg/(dm^2·d)]，简写为mdd；有时也用克/(米^2·时)[g/(m^2·h)]或克/(米^2·日)[g/(m^2·d)]来表示。

② 腐蚀深度表示法　用单位时间内的腐蚀深度来表示腐蚀速度。常用的单位是毫米/年（mm/a）。在欧美常用的单位是密耳/年（mil/a，mpy），即毫英寸/年。

1mil（密耳）$=10^{-3}$in（英寸）；1mpy=0.0254mm/a

③ 机械强度表示法　适用于表示某些特殊类型的腐蚀，即用前两种表示法都不能确切地反映其腐蚀速度的。如应力腐蚀开裂、气蚀等。这类腐蚀往往伴随着机械强度的降低。因此可测试腐蚀前后强度的变化，如张力、压力、弯曲或冲击等极限值的降低率来表示。

④ 采用腐蚀电流密度表示腐蚀速度　是电化学测试方法。常

用的单位是微安/厘米^2（$\mu A/cm^2$）。$1\mu A/cm^2=0.0117mm/a$。

上述四种方法中，现场一般采用（1）、（2）两种。几种常用腐蚀速度的换算关系如下表。

项　目	g/(m^2·h)	g/(m^2·d)	mg/(dm^2·d) mdd	mm/a	mil/a mpy	in/a ipy
g/(m^2·h)	1	24	240	8.76/γ	345/γ	0.345/γ
g/(m^2·d)	0.042	1	10	0.365/γ	14.4/γ	0.0144/γ
mdd	0.0042	0.1	1	0.0365/γ	1.44/γ	0.00144/γ
mm/a	0.114γ	2.74γ	27.4γ	1	39.4	0.0394
mpy	0.0029γ	0.0695γ	0.695γ	0.0254	1	0.001
ipy	2.9γ	69.5γ	695γ	25.4	1000	1

注：γ为金属的相对密度。

538　如何测算和评定金属的腐蚀速度？

通常采用的腐蚀评定方法有电化学测定法、失重法等。对于冷却水处理缓蚀效果的评定，最常用的是失重法。

失重法是将金属试件（试片或试管）置于循环冷却水系统的旁路中，测算其被腐蚀之后的失重，以评定金属的腐蚀速度。根据金属腐蚀原理可知金属被腐蚀的过程就是金属阳极过程，因此，金属被腐蚀的结果就是失去质量，当然金属表面的腐蚀产物必须清除干净，否则不是失重而是增重。根据金属在单位面积上和单位时间内失去的质量可计算出质量表示法的腐蚀速度（V_W）及深度表示法的腐蚀速度（V_L）。

$$V_W=\frac{W_1-W_2}{F\cdot t}$$

$$V_L=V_W/\gamma$$

现场应用时，可将两种表示法的腐蚀速度综合为下式。

$$V=K\frac{W_1-W_2}{F\cdot t\cdot\gamma}$$

式中　V——腐蚀速度；

W_1——试件未腐蚀前质量，mg；

W_2——试件经过腐蚀并除去表面产物后的质量，mg；

F——试件暴露在冷却水中的表面积，cm^2；

t——试件受腐蚀的时间，h；

γ——金属的密度，g/cm^3；

K —— 所采用腐蚀速度单位的常数，通常所采用的几种单位的 K 值为：

几种腐蚀速度单位的 K 值

腐蚀速度(V)的单位	常数 K 值	腐蚀速度(V)的单位	常数 K 值
密耳/年(mil/a,mpy)	3449	毫克/(平方分米·日)	
毫米/年(mm/a)	87.6	[mg/(dm²·d),mdd]	2000γ

几种常用金属的密度/(g/cm^3)

金　属	密　度	金　属	密　度
碳钢	7.85	黄铜 H80	8.65
紫铜	8.92	不锈钢	7.92

以失重法测得的腐蚀数据是均匀腐蚀速度，但在有些情况下，特别是缓蚀剂对点蚀抑制效果不大时，点蚀就会严重，因此，根据金属腐蚀失重而算出来的平均腐蚀深度并不能代表点蚀的深度，所以在点蚀发生较多的情况下，除测定其均匀腐蚀速度外，还应测出最大点蚀深度和单位面积上的点蚀数目，并求出最大点蚀深度与平均腐蚀速度之比，若比值为 1，则表示腐蚀是均匀的，比值愈大，则点蚀愈严重。碳钢管壁的平均腐蚀深度一般应控制在≤0.125mm/a，铜、铜合金和不锈钢则应≤0.005mm/a。

（三）结垢的防止

539　冷却水系统中的水垢是如何形成的？

在循环冷却水系统中，水垢是由过饱和的水溶性组分形成的。水中溶解有各种盐类，如碳酸氢盐、碳酸盐、硫酸盐、氯化物、硅酸盐等，其中以溶解的碳酸氢盐如 $Ca(HCO_3)_2$、$Mg(HCO_3)_2$ 最不稳定，极容易分解生成碳酸盐。因此，当冷却水中溶解的碳酸氢盐较多时，水流通过换热器表面，特别是温度较高的表面，就会受热分解，其反应如下：

$$Ca(HCO_3)_2 \xrightarrow{\triangle} CaCO_3\downarrow + H_2O + CO_2\uparrow$$

当循环水通过冷却塔，溶解在水中的 CO_2 会逸出，水的 pH 值升高，此时，碳酸氢盐在碱性条件下也会发生如下的反应：

$$Ca(HCO_3)_2 + 2OH^- \longrightarrow CaCO_3\downarrow + 2H_2O + CO_3^{2-}$$

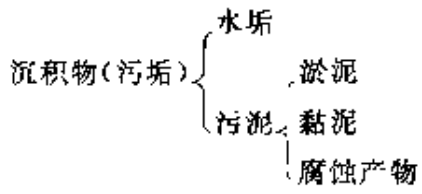
如水中溶有适量的磷酸盐与钙离子时，也将产生磷酸钙的沉淀：

$$2PO_4^{3-} + 3Ca^{2+} \longrightarrow Ca_3(PO_4)_2\downarrow$$

上述一系列反应中生成的 $CaCO_3$ 和 $Ca_3(PO_4)_2$ 等均属难溶性盐，它们的溶解度比起 $Ca(HCO_3)_2$ 来要小得多。同时，它们的溶解度与一般的盐类还不同，其溶解度不是随着温度的升高而加大，而是随着温度的升高而降低。因此，在换热器传热表面上，这些难溶性盐很容易达到过饱和状态而从水中结晶析出，尤其当水流速度小或传热面较粗糙时，这些结晶沉淀物就会沉积在传热表面上，形成了通常所称的水垢。由于这些水垢结晶致密，比较坚硬，又称之为硬垢。常见的水垢成分为：碳酸钙、硫酸钙、磷酸钙、镁盐、硅酸盐。

540　沉积物有哪些组分？什么是污垢？什么是水垢？

循环冷却水系统经常遇到污垢沉积问题。沉积物附着在换热器上危害很大。沉积物的组分很复杂，不同文献对沉积物的分类不完全一致。有的将沉积物统称为污垢，污垢中包括了水垢。有的将沉积物分为污垢和水垢两大类，污垢中不包括水垢。如按前者分类，沉积物的组分可按以下划分。



各类沉积物的组成大致如下：

① 水垢　又称硬垢或无机垢。为补充水中带入的难溶或微溶盐在循环水中条件变化时所形成的垢。常见的有碳酸钙、磷酸钙或羟基磷灰石、硫酸钙、氢氧化镁、硅酸镁等。

② 污泥　相对水垢而言较疏松，又称软垢。常含有泥渣、粉

尘、砂粒、腐蚀产物、有机物、微生物菌落和分泌物、氧化铝、磷酸铝、磷酸铁、各种碎屑等。

③ 淤泥　以泥砂、粉尘为主的软垢。

④ 黏泥　又称生物沉积物。由微生物及其分泌物和残骸组成，为具有滑腻感的胶状黏泥或黏液。

⑤ 腐蚀产物　由于设备腐蚀而产生的金属氧化物，主要为氧化铁、氧化铜等。

541　冷却水系统中的沉积物（污垢）来自哪些方面？

① 来自补充水　未经预处理或预处理不良的补充水会使泥砂、悬浮物、微生物带入系统。即使澄清、过滤、消毒良好的补充水也会有一定浑浊度并带有少量微生物。澄清过程中还可能将混凝剂的水解产物如铝或铁离子留在补充水中。另外，不管是否经过预处理，补充水中都会带入易形成水垢的溶解盐。

② 来自空气　泥砂、粉尘、微生物及其孢子会随空气从冷却塔带入循环系统。有时候昆虫（如甲壳虫）也会大量带入系统，引起换热器堵塞。当冷却塔周围空气受到污染时，硫化氢、二氧化硫、氨等腐蚀性气体有可能随空气进入循环水中产生腐蚀。

③ 来自化学处理药剂　如在循环水中加锌盐或聚磷酸盐缓蚀剂，则有结锌垢或磷酸盐水垢的可能性。

④ 来自工艺介质泄漏　换热器泄漏，特别是漏油、漏氨或某些有机物会导致或促进污泥沉积。

⑤ 来自系统腐蚀所形成的腐蚀产物。

542　为什么要进行垢样分析？垢样分析有哪些项目？

对循环冷却水系统的污垢和腐蚀产物进行分析，目的是从一个角度评价系统的腐蚀和结垢倾向，是对系统监测的方法之一，即在系统检修期间对有代表性的设备和部位采垢样分析其组成，主要采样部位是水冷却器的换热管壁，有时也在管板、封头及冷却塔池等处采样。往往对重点水冷却器每年在同一部位取样分析，以便积累资料逐年对比。采样后应记录采样日期、设备及部位、水冷却器的工况及垢样特征等，并在采样的同时测定该部位的垢厚，必要时进

行拍照。

供分析用的试样需经50～60℃干燥6～8h，然后研磨至全部通过0.125mm（120目）分样筛，保存在干燥器中供分析用，分析项目一般有：

① 水分含量　105～110℃干燥6h以上至恒重测得。

② 550℃灼烧失重　(550±10)℃灼烧至恒重测得，包括有机物、水分、化合水和硫化物等物质。

③ 550～950℃灼烧失重　主要代表垢样中的二氧化碳（即碳酸盐垢）含量，由950℃灼烧失重减去550℃灼烧失重而得。

④ 酸不溶物　代表SiO_2及部分铁、铝、钙等不溶性化合物。

⑤ 除测定腐蚀产物（Fe_3O_3、FeS、SO_4）及水垢（CaO、MgO）含量等外，往往要根据系统的配方特点分析P_2O_5、ZnO或Cr_2O_3，或根据预处理所用混凝剂的情况分析Al_2O_3，如系统中有铜材水冷却器还要分析CuO。

⑥ 对微生物黏泥较多的垢样，往往同时分析垢中异养菌、铁细菌及硫酸盐还原菌等细菌的数量，以每克垢样的菌数表示。

543　什么是水冷却器的热流密度？

水冷却器是用冷却水与工艺介质进行热交换的换热设备，又称换热器或热交换器。水冷却器的设计和运行都应保证冷却水带走一定的热量，以满足工艺的需要。即

$$Q=K\cdot F\cdot \Delta t_m$$

式中　Q——水冷却器的传热速率，J/s(W)；

F——水冷却器的传热面积，m^2；

Δt_m——工艺介质与冷却水的平均温差，℃；

K——水冷却器的总传热系数，$W/(m^2\cdot K)$。

水冷却器的热流密度又称传热强度或热强度，是水冷却器单位面积的传热速率，代表水冷却器的传热效率。热流密度$=Q/F=K\cdot \Delta t_m$。

在设计水冷却器时，要求达到规定的Q和Δt_m，K值如能增大则水冷却器的传热面积F可减少，热流密度增大，可以节省水冷却器

的材料。对已设计好的水冷却器 F 为定值，同时要求 Δt_m 一定，则 K 值增加时热流密度及传热速率均能提高。

从提高传热效率的角度，热流密度当然是越高越好。但总传热系数 K 与传热介质有关，如气体与水传热的 K 值一般为 12～60，煤油与水约 350 左右，水与水一般 800～1800，冷凝蒸汽与水一般 290～4700W/(m²·K)。K 值如提不高，热流密度就不可能太高。故一般蒸汽冷凝器的热流密度很高，而润滑油冷却器的热流密度很低。

热流密度高时，水侧结水垢的可能性增大，这是因为热流密度高时，水侧壁温也高，二者成正比关系。管壁的温度越高，结水垢的倾向越大。在同一冷却系统的水冷却器中，结垢倾向往往不同，如蒸汽冷凝器的水侧管壁容易结垢，而润滑油冷却器一般不结垢，有时偏于腐蚀。同一台水冷却器的工艺介质热端的水侧容易结垢，而冷端不易结垢。系统的管道和水冷却器的封头没有传热，所以几乎不结水垢。考虑到热流密度过大会带来易结水垢的不利因素，国外有些研究认为热流密度最好不超过 5.82×10^4 W/m²[5×10^4 kcal/(m²·h)]，有的认为 1.40×10^4～2.56×10^4 W/m² 较合适。

544　什么是水冷却器的污垢热阻值和极限污垢热阻值？

水冷却器的总传热系数为 K。K 的倒数称为水冷却器的总热阻，即 $R=\frac{1}{K}$。管壁上热的传导路线是通过工艺介质、工艺介质侧的污垢、传热管壁金属、冷却水侧的污垢然后到冷却水中的。故总热阻 R 为工艺介质给热热阻、工艺介质侧污垢热阻、管壁的热传导热阻、冷却水侧污垢热阻和冷却水给热热阻五项之和。在系统稳定运行时，工艺介质和冷却水给热热阻和管壁热传导热阻均较稳定，可视为常数。工艺介质侧的污垢热阻也较稳定或可忽略。只有水侧污垢热阻 r 决定于管壁的污垢，影响总热阻 R 很大。水侧污垢热阻 r 即通常所称的水冷却器的污垢热阻值。r 的高低是评价循环冷却水系统处理优劣的重要数据。水稳处理应尽量控制 r 在较低值，使总传热系数 K 在较高值，以保证水冷却器能有较高的传热效率。

污垢热阻值 r 一般由试验或监测换热器进行测定。该换热器初运行时，水侧无垢。运行一段时间之后产生污垢。则：

$$r=\frac{1}{K}-\frac{1}{K_C}\quad m^2\cdot K/W$$

式中 K_C——清洁管的总传热系数，$W/(m^2\cdot K)$；

K——结垢管的总传热系数，$W/(m^2\cdot K)$。

K_C、K 可由当时工艺介质和冷却水的流量和进出口温度算出。

以上所测得的 r 是某时刻的瞬时污垢热阻值，使用价值不大，不能作为设计水冷却器的直接根据。只有极限污垢热阻值 r^* 才能作为比较的依据。在实践中证明：当冷却水中投加具有阻垢性能的水处理剂时，改变了垢层的形态，使坚硬和致密的硬垢变成了软垢，水流剪切力的作用可使垢层脱落，因此污垢层并不是无限制增长。当污垢增长速度与脱落速度相等时的污垢热阻值基本上不变化，则称为极限污垢热阻值 r^*。r^* 可通过试验，由多个不同时刻的瞬时 r 值近似计算得出。

极限污垢热阻值 r^* 应按工艺要求规定指标并严加控制。当工艺无特殊要求时，应符合以下规定：敞开式系统宜低于 $(1.72\sim3.44)\times10^{-4}m^2\cdot K/W$[$(2\sim4)\times10^{-4}m^2\cdot h\cdot K/kcal$]；密闭式系统宜低于 $0.86\times10^{-4}m^2\cdot K/W$($1.0\times10^{-4}m^2\cdot h\cdot K/kcal$)。

545 什么是污垢附着速度？

污垢附着速度又称污垢沉积速率，它表示水冷却器换热面上污垢的增长速度。由于水冷却器在运行期间无法测定，所以常用监测换热器测定污垢附着速度。以单位时间单位面积上污垢附着的质量来表示，常用的单位是毫克/(厘米^2·30日)[$mg/(cm^2\cdot30d)$，mcm]或毫克/(分米^2·日)[$mg/(dm^2\cdot d)$，mdd]。

其计算方法为：

$$\text{月污垢沉积速率}=\frac{(W-W')\times1000}{F\cdot\frac{t}{24\times30}\times10000}$$

$$=72\times\frac{W-W'}{F\cdot t}\quad mg/(cm^2\cdot30d)$$

式中 W——试验后经烘干处理的传热管质量，g；

W'——经酸洗去污垢并烘干的传热管质量，g；

F——与冷却水接触的传热管面积，m^2；

t——试验时间，h。

由本法测得的污垢沉积速率包括水垢、腐蚀产物及黏泥等各种污垢在内。该数据可与污垢热阻值及垢厚等数据对照，从一个角度定量地评定系统的传热效果，是监测污垢沉积的经常项目。

546 污垢热阻值与污垢附着速度有何相应关系？

在系统设计时一般规定了水侧污垢热阻值的高限。但污垢热阻值的测定和计算都较麻烦，故常希望测定监测换热器的污垢附着速度来了解污垢热阻值的数值。

污垢沉积量与垢厚和污垢热阻值有大致相应的关系。

$$\text{平均垢厚}\ \delta = r \cdot \lambda \quad \text{m}$$

式中 r——污垢热阻值，$m^2 \cdot K/W$；

λ——污垢层的热导率，$W/(m \cdot K)$。

$$\text{污垢沉积量} = 10^5 \cdot \delta \cdot \rho \quad mg/cm^2$$

式中 ρ——污垢层的密度，g/cm^3。

但污垢的密度及热导率与污垢的组成有关，往往差异很大，需要根据实验才能取得可靠的数据。以下介绍某国外研究单位提出的看法供参考。

根据实验积累的数据，监测换热器在运行的头一个月污垢沉积量急剧增长，以后不再大量增加。大约第一个月的沉积量为年沉积量的50%～60%左右。如以50%计，可用第一个月连续运行时间为30d所测得的沉积量乘以2倍，大致等于一年的沉积量。如果污垢热阻值要求控制在1.72×10^{-4}～$3.44\times10^{-4}\ m^2 \cdot K/W$，则可根据污垢密度和热导率估算出年垢厚及第一个月运行30d的污垢附着速度控制值。

当碳钢材质的污垢组成为腐蚀产物时（即$Fe_2O_3 \cdot H_2O$），污垢的热导率如以0.58W/(m·K)计，允许的年垢厚应低于0.1～0.2mm。污垢密度约为1.7～2.5g/cm^3。如密度按1.7g/cm^3计，

则年沉积量应控制在 17～34mg/cm² 以下。30d 的污垢附着速度应控制在 8.5～17mg/cm² 以下。

当碳钢材质的污垢组成主要是多组分水垢时（Fe_2O_3＜17%），污垢热导率约为 0.58～1.16W/(m·K)，允许的年垢厚应低于 0.1～0.4mm。水垢密度约为 1.3g/cm³，则年沉积量应控制在13～52mg/cm² 以下，30d 的污垢附着速度应控制在 6.5～26mg/cm² 以下。

由于污垢密度及热导率数据要根据千变万化的污垢成分来确定，所以难以规定一个统一的垢厚和污垢附着速度控制值。但各单位可根据自己的经验制定控制指标。

冷却水系统中各种污垢的大致平均热导率（导热系数）[4,5] 如下表。

名　称	热　导　率		污垢热阻/(m²·K/W)	
	kcal/(m·h·℃)	W/(m·K)	垢厚为 0.1mm 时	垢厚为 1.0mm 时
钙镁的碳酸盐垢（$CaCO_3$·$MgCO_3$ 量＞50%）	0.5～0.6	0.58～0.70	0.00017～0.00014	0.0017～0.0014
硫酸钙垢	0.5～2.5	0.58～2.91	0.00017～0.000034	0.0017～0.00034
硅酸盐垢（SiO_2 量＞20%～25%）	0.05～0.2	0.058～0.23	0.0017～0.00043	0.017～0.0043
氧化铁垢	0.1～0.2	0.12～0.23	0.00083～0.00043	0.0083～0.0043
钙、镁的碳酸盐与硅酸盐混合物	0.7～3.0	0.81～3.49	0.00012～0.000029	0.0012～0.00029
生物黏泥垢	0.2～0.4	0.23～0.47	0.00043～0.00021	0.0043～0.0021

假定污垢密度为 1.3g/cm³、污垢热导率为 0.58～1.16 W/(m·K)，则控制的污垢热阻值与允许厚度和允许的污垢年附着速度可大致按下表。

控制的污垢热阻值/(m²·K/W)	允许平均厚度/mm	允许的年污垢附着速度/[mg/(cm²·a)]
0.0001	0.058～0.12	7.5～15
0.0002	0.12～0.23	15～30
0.0003	0.17～0.35	23～45
0.0004	0.23～0.46	30～60
0.0005	0.29～0.58	38～75
0.0006	0.35～0.70	45～90

547 判断水垢组成有什么简便定性方法？

要简便地判断循环水系统中水垢的主要组成是采用酸溶法。即用垢样加酸之后观察其溶解和反应情况，以此定性地判断其主要成分，见下表。

常见水垢主要成分	水垢经酸溶解后的情况
碳酸盐垢	加酸之后有大量气泡产生
硅酸盐垢	在热 HCl 和 HNO_3 中缓慢溶解，产生白色不溶物
氧化铁垢	加 HNO_3 溶解，产生黄色溶液
铜　垢	加 HNO_3 溶解，产生蓝色和黄绿色溶液
磷酸盐垢	加钼酸铵试液再加 HNO_3，产生黄色沉淀，然后再加氨水使沉积物溶解，说明是磷酸盐垢

548 如何根据垢样分析结果判断水质的腐蚀或结垢倾向？

根据设备上垢层状况及垢样分析结果，可以大致判断冷却水系统的水冷却器属于腐蚀型、结垢型、污垢型还是良好型。垢样中的各种成分的百分比均反映某种倾向，例如：550℃灼烧失重为污泥因子，反映微生物情况和污泥危害；氧化钙、氧化镁、二氧化碳、五氧化二磷为结垢因子，反映结垢情况，其中二氧化碳和五氧化二磷含量可分别表示碳酸盐和磷酸盐垢的数量；三氧化二铁为腐蚀因子，表示腐蚀情况；二氧化硅和三氧化二铝表示原水中泥砂沉积和预处理情况；三氧化硫表示有无硫酸盐还原菌活动。但是如何根据垢样分析结果来划分类型及等级却是困难的工作，需要有丰富的经验才能科学划分，由于不同的水质条件、药剂配方和水冷却器工况都会影响垢层组分的比例，所以并没有统一的划分标准。

国内一些工厂参考国外经验，有以下判别方法可供参考。

(1) 根据换热管表观情况、垢厚及孔蚀深度评价水冷却器的等级。

等　级	水冷却器换热管表观情况	参考指标/mm	
		年垢厚(硬垢)	孔蚀深度
优　级	管内外干净，很少见到污垢和腐蚀产物，清洗周期可以二年以上	≤0.2	≤0.2

续表

等　级	水冷却器换热管表观情况	参考指标/mm	
		年垢厚(硬垢)	孔蚀深度
良好级	管内外较干净，个别部位有些污垢和腐蚀产物，可不清洗或简单冲洗后即可使用	0.2～0.3	0.2～0.3
一般级	管内外污垢和腐蚀产物较多，需清洗后方可投运	～0.4	～0.4
差　级	管内外污垢和腐蚀产物严重，甚至有大量管泄漏或阻塞，清洗极为困难	>0.5	>0.5

(2) 按垢样的腐蚀因子、结垢因子和污垢因子的比例判别水冷却器或冷却水系统的类型和等级。下表是使用磷系配方及季铵盐剥离剂时的半定量判定规律。有一定参考价值，但还需结合其他监测手段综合进行判断才能作出更精确的判定。

名　称	垢样组成	良好型	腐蚀型	结垢型	污泥型
污泥因子	550℃灼烧失重	10%～25%	10%左右	10%～25%	30%～60%
腐蚀因子	Fe_2O_3	60%～85%	90%左右	15%～55%	20%～50%
结垢因子	$CaO+MgO+P_2O_5$	10%～25%	10%左右	35%～75%	20%～45%

除此，国外还介绍用垢样中某些成分与 SiO_2 的比值来判别。用 CaO/SiO_2 表示结垢倾向，当＞2 时有产生沉积的倾向；用 Fe_2O_3/SiO_2 表示腐蚀倾向，当＜2 时良好，＞5 时腐蚀，2～5 时需注意。还有人认为垢样中 SiO_2＜6%时没有硅垢危害。

549　判断水质的腐蚀或结垢倾向有哪些常用方法？

准确判断水质的结垢或腐蚀程度应该根据各种试验结果。在试验之前往往先根据水质及某些运行条件进行计算，作出对结垢或腐蚀倾向的初步判断，以便考虑试验方案。目前的计算方法都是根据水中某种盐类的溶解平衡关系提出的，就是说水中某种盐类达到能够析出的数量，即有结水垢的倾向。如果该盐类在水中能全部溶解，则在金属表面上完全没有水垢作保护层，即有腐蚀倾向。循环冷却水中最易成垢的是碳酸钙，如使用磷系配方的常有磷酸钙垢，某些水质还可能产生硫酸钙、硅酸镁等水垢，故常以这几种盐类分

别判断结垢或腐蚀倾向。

（1）以碳酸盐为主的结垢趋势

① 朗格利尔（Langelier）饱和指数（I_S）法；

② 赖兹纳（Ryznar）稳定指数（S）法；

③ 极限碳酸盐硬度判断法；

④ 临界 pH 值（pHc）结垢指数法；

⑤ 帕科拉兹（Puckorius）结垢指数（PSI）法；

⑥ 经验饱和指数法。

经验饱和指数即

$$I_S = pH - pH_S = 0.5 \sim 2.5$$

式中 I_S——饱和指数；

pH——水的实际 pH 值；

pH_S——水的饱和 pH 值。

若饱和指数 I_S 处于 0.5～2.5 范围内，即该水质不会腐蚀也不结垢；

若饱和指数 $I_S < 0.5$ 则将会产生腐蚀；

若饱和指数 $I_S > 2.5$ 则将会产生结垢。

（2）磷酸钙垢的判断

根据磷酸钙在水中溶解和离解的平衡关系，推导出正磷酸根（PO_4^{3-}）、钙离子和 pH 值的计算关系式，以此来判断磷酸钙的结垢趋势。

（3）硫酸钙结垢倾向的判断

如果循环水中 Ca^{2+}、SO_4^{2-} 离子含量（mg/L）的乘积大于 5×10^5 则将会产生硫酸钙垢。也有资料认为二者的乘积（均以 $CaCO_3$ 计，mg/L）大于 1.5×10^5 时可能产生硫酸钙垢。

（4）硅酸镁结垢倾向的判断

为避免硅酸盐水垢，一般 SiO_2 不宜超过 175mg/L，当镁含量大于 40mg/L 时，应控制 Mg^{2+} 与 SiO_2 的乘积＜15000、Mg^{2+} 以 $CaCO_3$ 计，单位 mg/L。

以上计算方法均有一定的参考价值，也均有其不同程度的局限性，因为以上算法都是以单一盐类来考虑的，实际上水中离子错综

平衡、互有影响，并非单一盐。另外，在计算中无法考虑微生物对腐蚀和结垢的影响，但作为初步判断还是可用的，可以在使用中结合考虑其他因素适当修正。应注意的是：以上计算是针对未加药系统的，但系统加入水处理剂之后，使水质的腐蚀或结垢倾向改善，上述方法对加药系统只能作参考。

550 什么是碳酸钙饱和 pH 值（pH_S）？什么是碳酸钙饱和指数（I_S）？

天然水中最易成垢的化合物是碳酸盐，而碳酸盐在水中是极不稳定的。

1936 年，朗格利尔（Langlier）根据水中碳酸的平衡关系，提出了饱和 pH 值和饱和指数的概念，以判断 $CaCO_3$ 水垢在水中是否会析出，并据此提出用加酸或加碱等办法来控制水垢的析出。所谓饱和 pH 值，即是碳酸钙在水中呈饱和状态时的 pH 值（pH_S）。这时水中的碳酸氢钙既不分解成 $CaCO_3$，碳酸钙也不会继续溶解。朗格利尔推导出计算饱和 pH 值（pH_S）的公式，pH_S 可由水的硬度、总溶解固体量、碱度和水温计算得出，并以水的实际 pH 值与 pH_S 值的差值来判断水垢的析出，此差值朗格利尔称它为饱和指数，以 I_S 表示之。他提出当 $I_S>0$ 时，水中的碳酸钙（$CaCO_3$）必定处于过饱和状态，就有可能析出沉淀，这种水属结垢型水；当 $I_S<0$ 时，此时水中碳酸钙（$CaCO_3$）必定处于不饱和状态，则原来附在传热面上的 $CaCO_3$ 垢层会被溶解掉，使金属表面裸露在水中而受到腐蚀，故而他把这种水称作腐蚀型水；当 $I_S=0$ 时，$CaCO_3$ 既不析出，原有 $CaCO_3$ 垢层也不会被溶解掉，这种水属于稳定型，即不腐蚀也不结垢。如以式表示，则可写成：

$$I_S=pH-pH_S>0 \qquad 结垢$$

$$I_S=pH-pH_S=0 \qquad 不腐蚀不结垢$$

$$I_S=pH-pH_S<0 \qquad 腐蚀$$

551 碳酸钙饱和指数在实用上有何参考价值？它有什么局限性？

冷却水系统中结垢主要是由碳酸钙引起的。碳酸钙饱和指数能

够反映水的结垢或腐蚀的倾向，故目前国内外都用来对水定性，作为选择处理措施的参考。有人认为，在直流冷却水系统中，饱和指数（I_S）在±(0.25～0.30)范围内可认为是稳定的。在循环冷却水系统中，为了降低钢的腐蚀，有人建议 I_S 在 0.75～1.0 的范围内。但是另外一种看法是+0.5 的饱和指数是令人满意的，大于该值可能会导致过剩的 $CaCO_3$ 沉淀结垢，特别是在温度升高情况下。在采用磷系缓蚀剂高 pH 法的循环冷却水系统中，$CaCO_3$ 的饱和指数可以允许到+2.5，而仍能控制 $CaCO_3$ 垢。

虽然饱和指数是一个比较常用的指数，它对原水的性质可以起到定性的预示作用，在一定温度下也可以起到某些控制作用，但是，它也有着如下的局限性。

(1) 冷却水流经换热器时进口和出口水温是不同的，那么在计算碳酸钙饱和指数时，如果选用热端温度做依据，控制热端不结垢，则冷端必然腐蚀；反之，控制冷端不结垢，则热端必然结垢。在这样一些复杂情况下，饱和指数对许多因素均未考虑进去，只按某一点温度计算其 pH_S 作为控制操作指标是不够全面的。

(2) 如果冷却水中含有胶态二氧化硅或有机体（例如藻类），那么 $CaCO_3$ 可能沉淀在胶体或有机体上，而不沉淀在金属表面上。如果情况是这样的话，即使饱和指数是正数，腐蚀仍会发生。

(3) 如果络合离子投加到已经处理的水中，例如聚磷酸盐、膦酸盐，它们妨碍了 $CaCO_3$ 沉淀，在这种情况下，饱和指数不能用作判断冷却水腐蚀性或结垢趋势的指标。人们从长期实践中积累的经验证明，按饱和指数控制冷却水的操作是偏保守的，特别是在加有阻垢剂时，甚至还会得出相反的结论。

552　什么是稳定指数（S）？它有什么局限性？

1944 年，赖兹纳（Ryznar）提出，利用饱和指数（I_S）判断水质时，经常出现错误。因此，他提出用经验式 $S=2pH_S-pH$ 来代替饱和指数（I_S）作为判断水质的依据，并把 $2pH_S-pH$ 的差值称作稳定指数。这个指数表明在特定条件下，一种水引起结垢或

腐蚀程度。赖兹纳通过实验，用比较定量的数值来表示水质稳定性，提出了利用稳定指数做如下的判断。

$2pH_S-pH<3.7$	严重结垢
$3.7<2pH_S-pH<6.0$	结垢
$2pH_S-pH\approx6.0$	稳定
$6.0<2pH_S\quad pH<7.5$	腐蚀
$2pH_S-pH>7.5$	严重腐蚀

赖兹纳稳定指数和碳酸钙饱和指数一样，在近代冷却水处理工作中仍被用来作为预示水结垢或腐蚀的标志，并用以指导冷却水系统的操作。赖兹纳稳定指数是由经验公式计算的，在定量上与长期实践结果相一致，因而比碳酸钙饱和指数准确，但它有着如下的局限性。

（1）它只反映了化学作用，没有涉及电化学过程和严密的物理结晶过程。

（2）没有考虑到水中表面活性物质或络合离子的影响。

（3）忽略了其他阳离子的错综平衡关系。

因此，赖兹纳稳定指数也不能作为表示水的腐蚀或结垢的绝对指标。在使用中还要考虑其他因素给予修正。

553　碳酸钙饱和 pH 值（pH_S）是如何计算的？

碳酸钙饱和 pH 值是根据碳酸钙的溶解平衡和碳酸平衡状态确定的。碳酸钙在水中溶解时：

$$CaCO_3\text{（固）}\rightleftharpoons Ca^{2+}+CO_3^{2-}$$

水中各级碳酸平衡反应式为：

$$CO_2+H_2O\rightleftharpoons H_2CO_3\rightleftharpoons H^++HCO_3^-\rightleftharpoons 2H^-+CO_3^{2-}$$

$$[Ca^{2+}][CO_3^{2-}]=K_S=4.8\times10^{-9}(25℃)$$

$$[H^+][HCO_3^-]/[H_2CO_3]=K_1=4.45\times10^{-7}(25℃)$$

$$[H^-][CO_3^{2-}]/[HCO_3^-]=K_2=4.69\times10^{-11}(25℃)$$

式中　K_S——碳酸钙的溶解平衡常数或称碳酸钙的溶度积；

K_1、K_2——碳酸盐的一、二级电离常数。

碳酸平衡及碳酸钙溶解平衡反应可综合为下式：

$$2HCO_3^- \rightleftharpoons CO_3^{2-} + 2H^+$$

$$+$$

$$Ca^{2+} \rightleftharpoons CaCO_3(\text{固})$$

当达到饱和 pH 值时：

$$[H^+]_S = K_2[HCO_3^-]/[CO_3^{2-}] = K_y[Ca^{2+}]/[HCO_3^-]/K_S$$

两边取 p 值（－lg 值），则

$$p[H^+]_S = pH_S = p[Ca^{2+}] + p[HCO_3^-] + pK_2 - pK_S \quad (1)$$

式中的 $[H^+]$、$[Ca^{2+}]$ 与 $[HCO_3^-]$ 均表示离子活度，$[Ca^{2+}]$ 与 $[HCO_3^-]$ 需根据分析值进行换算。

离子活度＝分析值[mol/L]×α_i

＝分析值[mg/L，以 $CaCO_3$ 计]×$\alpha_i/(50\times10^3\times Z_i)$

式中 α_i——活度系数；

Z_i—— 电荷数；

50——$\frac{1}{2}CaCO_3$ 的摩尔质量，g/mol。

故 $[Ca^{2+}]$ ＝Ca(分析值 mg/L，以 $CaCO_3$ 计)×$\alpha_{Ca}/(50\times10^3\times2)$

按碱度定义，总碱度 $c\left(\frac{1}{2}B^{z-}\right)(\text{mol/L}) = [OH^-] + 2[CO_3^{2-}] + [HCO_3^-]$。在循环水的条件下，一般 pH 值＜9，$OH^-$ 及 CO_3^{2-} 可忽略不计，故可认为总碱度 $M \approx HCO_3^-$。从而

$[HCO_3^-] = M$(分析值 mg/L，以 $CaCO_3$ 计)×$\alpha_{HCO_3^-}/(50\times10^3\times1)$

则（1）式可改为：

$$pH_S = 9.699 - \lg Ca - \lg M + (p\alpha_{Ca^{2+}} + p\alpha_{HCO_3^-}) + (pK_2 - pK_S) \quad (2)$$

Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的活度系数 $\alpha_{Ca^{2+}}$ 及 $\alpha_{HCO_3^-}$ 与水的离子强度决定，为总溶解固体量（TDS，mg/L）的函数。令 $A = (p\alpha_{Ca^{2+}} + p\alpha_{HCO_3^-})$，为总溶解固体系数，可按下式计算：

$$A = 2.5TDS^{1/2}/(200 + 5.3TDS^{1/2} + 0.0275TDS)$$

当 TDS＜3200mg/L，可简化为以下经验式：

$$A = 0.1\times\lg TDS - 0.1$$

令 $B=pK_2-pK_s$，K_2、K_s 均随温度而变化，故 B 为温度系数，可按以下回归式计算：

$T<20℃$ 时

$$B=2.596-0.0256T$$

$20℃\leqslant T<30℃$ 时

$$B=2.512-0.0212T$$

$30℃\leqslant T<54℃$ 时

$$B=2.368-0.0164T$$

$54℃\leqslant T<66℃$ 时

$$B=2.242-0.014T$$

$66℃\leqslant T\leqslant 76℃$ 时

$$B=2.042-0.011T$$

为此碳酸钙饱和 pH 值可按以下推荐公式计算。

$$pH_s=9.699+A+B-C-D$$

或

$$pH_s=9.70+A+B-C-D$$

式中 A——总溶解固体系数；

B——温度系数；

C——钙硬系数，等于 $\lg Ca$；

D——碱度系数，等于 $\lg M$。

因此，pH_s 可根据循环冷却水的总溶解固体量、水温（或典型换热器的壁温）、钙离子含量及碳酸氢根碱度（或近似用总碱度）计算。

国外另一个计算公式的计算结果也与上式相近，即：

$$pH_s=9.5954+\lg\left[\frac{0.4TDS^{0.10106}}{CA\times TA}\right]+1.84e^{(0.547-0.00637t-0.0000358t^2)}$$

式中 TDS——总溶解固体量，mg/L；

CA——钙硬，以钙离子计，mg/L；

TA——碳酸盐碱度，以 $CaCO_3$ 计，mg/L；

t——温度，℉（℉＝1.8×℃＋32）；

e——自然对数底数，约为 2.718。

554　如何用查表法计算碳酸钙饱和 pH 值（pH_S）?

上题的 pH_S 公式计算法，可以用列表将 A、B、C、D 值算出，改为查表法计算，其计算结果与公式法相同。

$$pH_S=9.70+A+B-C-D$$

A 为总溶解固体系数，由循环水的 TDS（总溶解固体量），mg/L 查得。

TDS/(mg/L)	45	60	80	105	140	175	220
A 值	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13
TDS/(mg/L)	275	340	420	520	640	800	1000
A 值	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20
TDS/(mg/L)	1250	1650	2200	3100	≥4000 或≤13000		
A 值	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25		

B 为温度系数，由循环水的水温(℃)查得。

B 值：

水温 /℃	尾数									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	2.60	2.57	2.54	2.52	2.49	2.47	2.44	2.42	2.39	2.37
10	2.34	2.31	2.29	2.26	2.24	2.21	2.19	2.16	2.14	2.11
20	2.09	2.07	2.05	2.02	2.00	1.98	1.96	1.94	1.92	1.90
30	1.88	1.86	1.84	1.83	1.81	1.79	1.78	1.76	1.74	1.73
40	1.71	1.70	1.68	1.66	1.65	1.63	1.61	1.60	1.58	1.57
50	1.55	1.53	1.52	1.50	1.49	1.48	1.46	1.44	1.43	1.42
60	1.40	1.39	1.37	1.36	1.35	1.33	1.32	1.31	1.29	1.28
70	1.27	1.26	1.25	1.24	1.23	1.22	1.21			

C 为钙硬系数，由循环水的钙含量（mg/L，以 $CaCO_3$ 计）查得或计算得。$C=\lg$(钙含量)。

D 为碱度系数，由循环水的总碱度（mg/L，以 $CaCO_3$ 计）查得或计算得。$D=\lg M$(碱度)。

C 或 D 值由下表可以查得。

钙硬或碱度（以 $CaCO_3$ 计）/(mg/L)	尾数									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		0.00	0.30	0.48	0.60	0.70	0.78	0.85	0.90	0.95
10	1.00	1.04	1.08	1.11	1.15	1.18	1.20	1.23	1.26	1.28
20	1.30	1.32	1.34	1.36	1.38	1.40	1.41	1.43	1.45	1.46
30	1.48	1.49	1.51	1.52	1.53	1.54	1.56	1.57	1.58	1.59
40	1.60	1.61	1.62	1.63	1.64	1.65	1.66	1.67	1.68	1.69
50	1.70	1.71	1.72	1.72	1.73	1.74	1.75	1.76	1.76	1.77
60	1.78	1.79	1.79	1.80	1.81	1.81	1.82	1.83	1.83	1.84
70	1.85	1.85	1.86	1.86	1.87	1.88	1.88	1.89	1.89	1.90
80	1.90	1.91	1.91	1.92	1.92	1.93	1.93	1.94	1.94	1.95
90	1.95	1.96	1.96	1.97	1.97	1.98	1.98	1.99	1.99	2.00
100	2.00	2.00	2.01	2.01	2.02	2.02	2.03	2.03	2.03	2.04
110	2.04	2.05	2.05	2.05	2.06	2.06	2.06	2.07	2.07	2.08
120	2.08	2.08	2.09	2.09	2.09	2.10	2.10	2.10	2.11	2.11
130	2.11	2.12	2.12	2.12	2.13	2.13	2.13	2.14	2.14	2.14
140	2.15	2.15	2.15	2.16	2.16	2.16	2.16	2.17	2.17	2.17
150	2.18	2.18	2.18	2.18	2.19	2.19	2.19	2.20	2.20	2.20
160	2.20	2.21	2.21	2.21	2.21	2.22	2.22	2.22	2.22	2.23
170	2.23	2.23	2.24	2.24	2.24	2.24	2.25	2.25	2.25	2.25
180	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.27	2.27	2.27	2.27	2.28
190	2.28	2.28	2.28	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29	2.30	2.30
200	2.30	2.30	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.32	2.32	2.32

钙硬或碱度（以 $CaCO_3$ 计）/(mg/L)	尾数									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
200		2.32	2.34	2.36	2.38	2.40	2.42	2.43	2.45	2.46
300	2.48	2.49	2.51	2.52	2.53	2.54	2.56	2.57	2.58	2.59
400	2.60	2.61	2.62	2.63	2.64	2.65	2.66	2.67	2.68	2.69
500	2.70	2.71	2.72	2.72	2.73	2.74	2.75	2.76	2.76	2.77
600	2.78	2.79	2.79	2.80	2.81	2.81	2.82	2.83	2.83	2.84
700	2.85	2.85	2.86	2.86	2.87	2.88	2.88	2.89	2.89	2.90
800	2.90	2.91	2.91	2.92	2.92	2.93	2.93	2.94	2.94	2.95
900	2.95	2.96	2.96	2.97	2.97	2.98	2.98	2.99	2.99	3.00

另一种查表法用电导率代替总溶解固体量粗略计算如下（适用于生产现场）。

$$pH_S = C_1 + C_2 + C_3$$

式中　C_1— —水的总碱度系数；

C_2——水的钙硬系数；

C_3——水的电导率系数。

C_1、C_2、C_3可以分别由下表来查取。

用来计算 pH_S 值的常数表

总碱度 $c\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$ /(mmol/L)	C_1	钙硬 /°G (德国度)	C_2	电导率 /(μS/cm)	C_3
0.1	3.8	5.0	3.06	300	1.68
0.2	3.7	5.6	3.01	320	1.69
0.3	3.6	6.8	2.94	400	1.70
0.4	3.4	7.8	2.87	520	1.71
0.5	3.33	9.0	2.80	600	1.72
0.6	3.23	10.0	2.76	800	1.73
0.7	3.15	11.2	2.70	900	1.74
0.8	3.10	12.0	2.67	1000	1.75
0.9	3.06	13.4	2.63	1200	1.76
1.0	3.00	14.4	2.60		
1.2	2.91	15.6	2.56		
1.4	2.85	16.6	2.52		
1.6	2.80	18.0	2.49		
1.8	2.74	20.0	2.46		
2.0	2.70	22.0	2.38		
2.4	2.63				
2.8	2.56				
3.2	2.50				
3.6	2.45				

注：钙硬 1 德国度＝0.178mmol/L＝17.8mg/L $CaCO_3$。

555 如何用查图法计算碳酸钙饱和 pH 值（pH_S）?

pH_S 也可由查图法（见图 5-3-1）计算。该法由以下简化公式计算。

$$pH_S=(pK_2-pK_S)+p[Ca]+p[碱度]$$

式中 pK_2-pK_S——含盐量和水温的函数；

$p[Ca]$ 钙离子（mg/L）的函数；

$p[碱度]$——总碱度 $c\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$(mmol/L)的函数。

由于图的尺寸关系，视觉有一定误差，故精确程度不如公式法和查表法。现举例说明该图的用法。

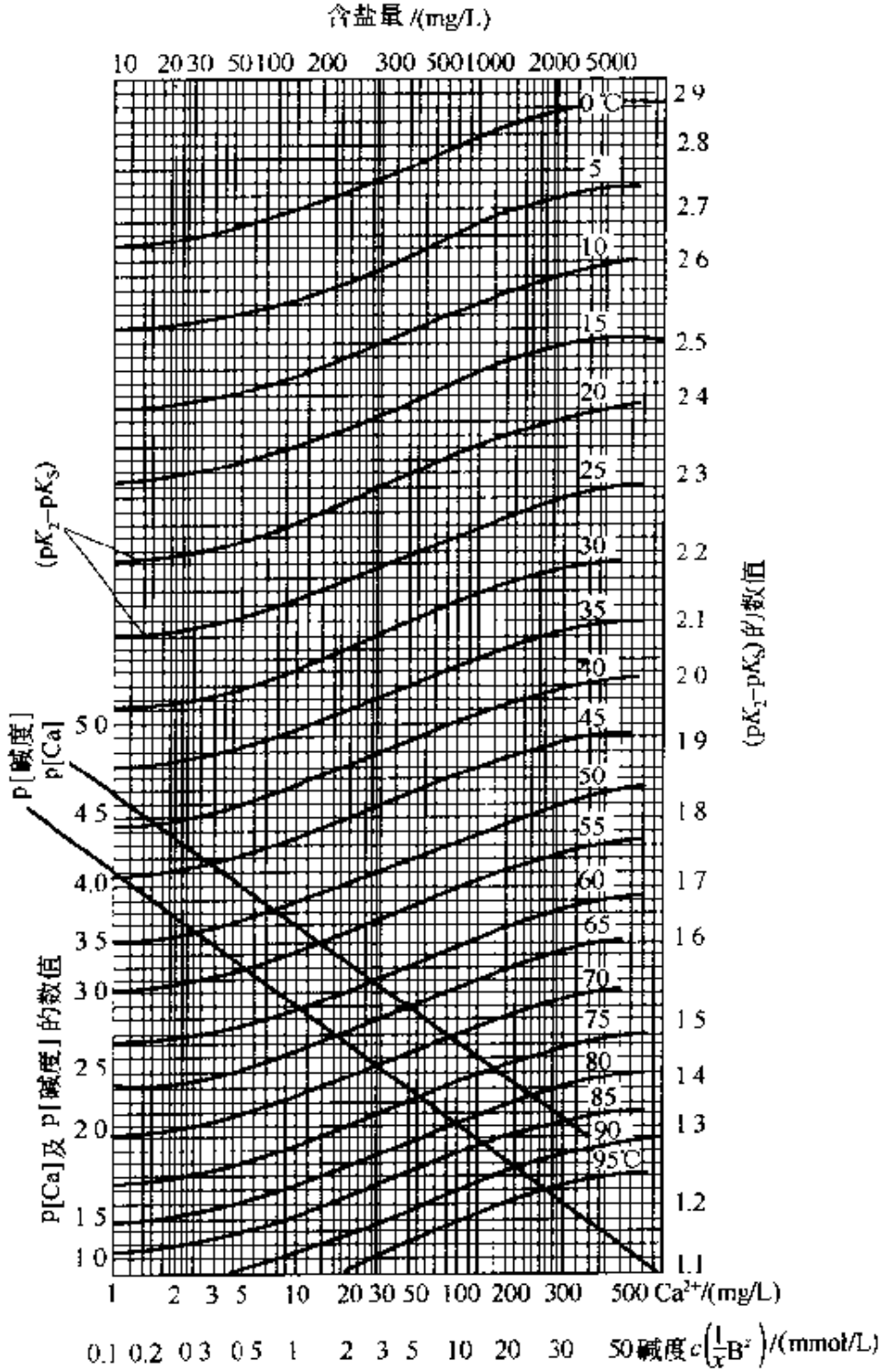


图 5-3-1　pH_s 值计算图

例：某循环冷却水系统的水温为 30℃，钙离子含量 72mg/L，

总碱度 $c\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$ 3mmol/L，总溶解固体量为 240mg/L，计算 pH_S 值。

从图 5-3-1 中查得：

pK_2　pK_S　2.04（含盐量 240mg/L 与温度 30℃ 交点的纵坐标）

p[Ca]　2.76（Ca 72mg/L 与 p[Ca]线交点的纵坐标）

p[碱度]　2.54［碱度 $c\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$ 3 mmol/L 与 p[碱度]线交点的纵坐标］

$pH_S=2.04+2.76+2.54=7.34$

556　敞开式循环冷却水浓缩之后 pH 值会怎样变化？

敞开式循环冷却水在浓缩过程中由于碳酸盐碱度发生变化使 pH 值也发生变化，主要有以下反应：

$$2HCO_3^- \rightleftharpoons CO_3^{2-} + CO_2\uparrow + H_2O$$

一部分碳酸氢盐受热分解为碳酸盐和二氧化碳，部分溶解二氧化碳被空气带走，使水中酸性物质减少。因而浓缩水如不加酸调节而任其自然变化，pH 值会上升。浓缩后的自然 pH 值应由现场实测。判断循环水的腐蚀结垢倾向需要了解浓缩之后水的 pH 值和碱度，但在考虑化学处理方案阶段大都无条件实测，只能依据补充水质进行估算。

理论上 pH 值与 $\lg[HCO_3^-]$成正比，和 $\lg[CO_2]$成反比，但实际上循环水中的碱度和溶解二氧化碳均为未知数，所以用理论式难以计算。大都根据试验结果或现场数据归纳成经验式计算。经验证明影响循环水自然 pH 值的主要因素是浓缩倍数、补充水碱度及补充水 pH 值，不同水质难以用一个公式计算，为此将其分为四种类型考虑。低碱或中碱水从冷态开始浓缩时，pH 值迅速上升。当倍数达到 1.3 左右后，pH 值平稳上升，一般不超过 9.3。石灰软化水的 pH 值一般在 9.0～11.0，虽然其碱度不低，但碳酸盐碱度不高，不全为 HCO_3^-，还含有部分 CO_3^{2-} 甚至 OH^- 碱度。而循环水

在碱度平衡时主要是含 HCO_3^- 碱度。所以当以石灰软化水为补充水时，在初浓缩的短暂期间会先吸收一些空气中的 CO_2 来中和 CO_3^{2-} 或 OH^- 碱度，这时 pH 值会迅速下降。待碱度基本转化为 HCO_3^- 之后，继续浓缩 pH 值才会上升。因此，用石灰软化水为补充水的系统自然 pH 值一般不会超过 8.5。用极软极低碱水为补充水的系统自然 pH 值多不超过 8.0。

以下公式可作近似计算式。

不同类型补充水的循环水自然 pH 值的计算式

（适用于 $N-1.3\sim5.0$）

计算式类型	类型 A	类型 B	类型 C	类型 D
补充水类型	中硬中碱水 A 及低碱软水	中硬中碱水 B 及负硬度（中碱软）水	极软极低碱水	石灰软化水
计算公式	$pH=6.78+0.204pH_{补}+0.094N+0.0022M_{补}$	$pH=6.75+0.204pH_{补}+0.0819N+0.0022M_{补}$	$pH=pH_{补}+0.1N+0.8$	$pH=7.90+0.1N+0.0055M_{补}$
公式适用范围	$pH_{补}=6.8\sim8.3$ $TH=50\sim300$ $M_{补}=50\sim200$	$pH_{补}=7.5\sim8.5$ $TH=50\sim300$ $M_{补}=200\sim300$	$pH_{补}=6.5\sim7.5$ $TH<50$ $M_{补}<50$	$pH_{补}=9.0\sim11.0$ $TH<150$ $M_{补}<150$
备注	计算公式为实验式，代表的水质是长江水系	计算公式为实验式，代表的水质是黄河流域水及负硬度水	计算公式为归纳式，代表的水质是华南及吉林水	计算公式为归纳式

注：1. TH 为补充水总硬度，$M_{补}$ 为补充水总碱度，单位均为 mg/L（以 $CaCO_3$ 计）；$pH_{补}$ 为补充水 pH 值；N 为浓缩倍数。

2. 中硬中碱 A 类水，$TH=150\sim300$，$M_{补}=150\sim200$；中硬中碱 B 类水，$TH=150\sim300$，$M_{补}=200\sim300$。

除补充水质和浓缩倍数之外，还有其他因素影响循环水的 pH 值。采用氯系杀生剂时，氯最终变为 HCl 使 pH 值降低。据统计加氯可使系统 pH 值降低 0.1～1.1，夏季影响很大。粗算时可用计算值减去 0.2。此外，冷却塔的环境影响也不可忽视。当空气中含有 H_2S、SO_2 等酸性化合物时，循环水 pH 值偏低，含 NH_3 等使 pH 值偏高。需根据具体情况调整计算值。

557 敞开式循环冷却水浓缩之后碱度会怎样变化？

循环冷却水的总碱度随浓缩倍数增加而增加，但敞开式系统中部分碳酸盐碱度分解为二氧化碳逸出，故循环水自然 pH 值时的总碱度不等于浓缩倍数乘以补充水总碱度（$NM_{补}$），而是小于 $NM_{补}$。如果用酸调低 pH 值，则总碱度就更大大低于 $NM_{补}$ 了，甚至可能大大低于 $M_{补}$。

敞开循环冷却水系统的总碱度 M 有以下两种理论计算式：

① 根据亨利定律计算。水与大气交换时水中 CO_2 的平衡由空气中 CO_2 的分压决定。推导出：

$$M=K_h \cdot p_{CO_2}(a_1-2a_2)/a_0$$

K_h 为亨利系数，根据水温可查得。a_0、a_1、a_2 各为 H_2CO_3、HCO_3^-、CO_3^{2-} 的碳酸盐分配系数，根据水的 pH 值可查得。p_{CO_2} 为空气中 CO_2 的分压，农村中可取 0.03%，城市中可取 0.06%，工业区可取 0.1%。

② 根据溶解 CO_2 平衡导出：

$$pH=\lg(0.88M/CO_2)-6.35$$

式中 pH——循环水的 pH 值；

M——循环水的总碱度（以 $CaCO_3$ 计），mg/L；

CO_2——循环水溶解 CO_2 量，mg/L。

机械通风时取 $CO_2=5$mg/L，则 $\lg M=pH-5.60$

自然通风时取 $CO_2=10$mg/L，则 $\lg M=pH-5.29$

因用理论式计算结果不理想，故国内外均有人用现场实际数据作 pH-M 曲线，再换算成经验计算式。例如，国外的 Kunz 曲线可换算为：

$$\lg M=0.619pH-2.663(适用于\ pH\ 值\ 4.3\sim8.3)$$

国内有人根据 22 套大型冷却系统的数据进行归纳为经验计算式。其冷却塔均为机械通风，循环水温为 30～40℃。

理论式与经验式的共同之处是：M 主要决定于循环水的 pH 值。$\lg M$ 与 pH 成直线关系，pH 高，M 也高。M 与补充水的 $pH_{补}$、$M_{补}$ 及浓缩倍数 N 均无直接关系。自然 pH 由 $pH_{补}$、$M_{补}$

及 N 计算出，故自然 M 与之有间接关系。但用酸调过 pH 值的水的 M 可以说与补充水的 $pH_{补}$、$M_{补}$ 和 N 毫无关系。

补充水的水质也对 M 有影响。常见的中硬中碱水的硬度和碱度大体平衡，其浓缩后的 pH—M 关系大致接近。极软极低碱水与石灰软化水浓缩后的 pH—M 关系很相近，因其 $M_{补}$ 很低，浓缩后在相同 pH 值下 M 比中硬中碱水低。负硬度水的碱度大大超过硬度，浓缩后在相同 pH 值下 M 比中硬中碱水要高。故将其归纳为三种类型，根据补充水的类型选择经验计算式。计算结果比较近似，可以据此判断水的腐蚀结垢倾向和估算运行中的加酸量。已投产的装置可以积累现场的 pH 值和 M 值分析数据，将其归纳为本装置的 pH-M 曲线和计算式，则可算得更准确些。

不同类型补充水的循环水总碱度 M 的计算式

项　目	类型Ⅰ	类型Ⅱ	类型Ⅲ	
补充水类型	中硬中碱及低碱软水	中碱软水（负硬度水）	极软极低碱水及石灰软化水	
计算式	$\lg M=$ 0.629pH−3.027	$\lg M=$ 0.608pH−2.542	$\lg M=$ 0.679pH−3.67	
适用范围			极软极低碱水	石灰软化水
补充水 pH 值	6.8～8.5	7.5～8.5	6.5～7.5	9.0～11.0
补充水硬度（以 $CaCO_3$ 计）/(mg/L)	50～300	50～150	＜50	＜150
补充水总碱度（以 $CaCO_3$ 计）/(mg/L)	50～300	200～300	＜50	＜150

注：1. M 为循环水的总碱度，mg/L（以 $CaCO_3$ 计）。

2. pH 为循环水的 pH 值。当 pH 等于自然 pH 值时，计算所得 M 为自然 pH 值时的总碱度。自然 pH 值可由 $pH_{补}$、$M_{补}$ 及 N 计算得，加氯时应减去加氯降低值。当加酸调节 pH 值时，pH 等于规定的（即运行条件下的）pH 值，计算所得 M 为运行条件下的总碱度。

3. 以上公式适用于循环水 pH＜9.0，pH＞9.0 时误差渐增大。

为便于使用，以上计算公式列表或制成图表查用。见下表及图 5-3-2。

循环水总碱度 M 计算值(以 $CaCO_3$ 计)/(mg/L)

循环水 pH 值	补充水类型Ⅰ		补充水类型Ⅱ		补充水类型Ⅲ	
	lg$M$	M	lg$M$	M	lg$M$	M
6.5	1.0615	11.5	1.4100	25.7	0.7435	5.5
6.6	1.1244	13.3	1.4708	29.6	0.8114	6.5
6.7	1.1873	15.4	1.5315	34.0	0.8793	7.6
6.8	1.2502	17.8	1.5924	39.1	0.9472	8.9
6.9	1.3131	20.6	1.6532	45.0	1.0151	10.4
7.0	1.3760	23.8	1.7140	51.8	1.0830	12.1
7.1	1.4389	27.5	1.7748	59.5	1.1509	14.2
7.2	1.5018	31.8	1.8356	68.0	1.2188	16.6
7.3	1.5647	36.7	1.8964	78.8	1.2867	19.4
7.4	1.6276	42.4	1.9572	90.6	1.3546	22.6
7.5	1.6905	49.0	2.0180	104	1.4225	26.5
7.6	1.7534	56.7	2.0788	120	1.4904	30.9
7.7	1.8163	65.5	2.1396	138	1.5583	36.2
7.8	1.8792	75.7	2.2004	159	1.6262	42.3
7.9	1.9421	87.5	2.2612	182	1.6941	49.4
8.0	2.0050	101	2.3220	210	1.7620	57.8
8.1	2.0679	117	2.3828	241	1.8299	67.6
8.2	2.1308	135	2.4436	278	1.8978	79.0
8.3	2.1937	156	2.5044	319	1.9657	92.4
8.4	2.2566	181	2.5652	367	2.0336	108
8.5	2.3195	209	2.6260	423	2.1015	126
8.6	2.3824	241	2.6868	486	2.1694	148
8.7	2.4453	279	2.7476	559	2.2373	173
8.8	2.5082	322	2.8084	643	2.3052	202
8.9	2.5711	372	2.8692	740	2.3731	236
9.0	2.6340	431	2.9300	851	2.4410	276
9.1	2.6969	498	2.9908	979	2.5089	323
9.2	2.7598	575	3.0516	1126	2.5768	377
9.3	2.8227	665	3.1124	1295	2.6447	441
9.4	2.8856	768	3.1732	1490	2.7126	516
9.5	2.9485	888	3.2340	1714	2.7805	603

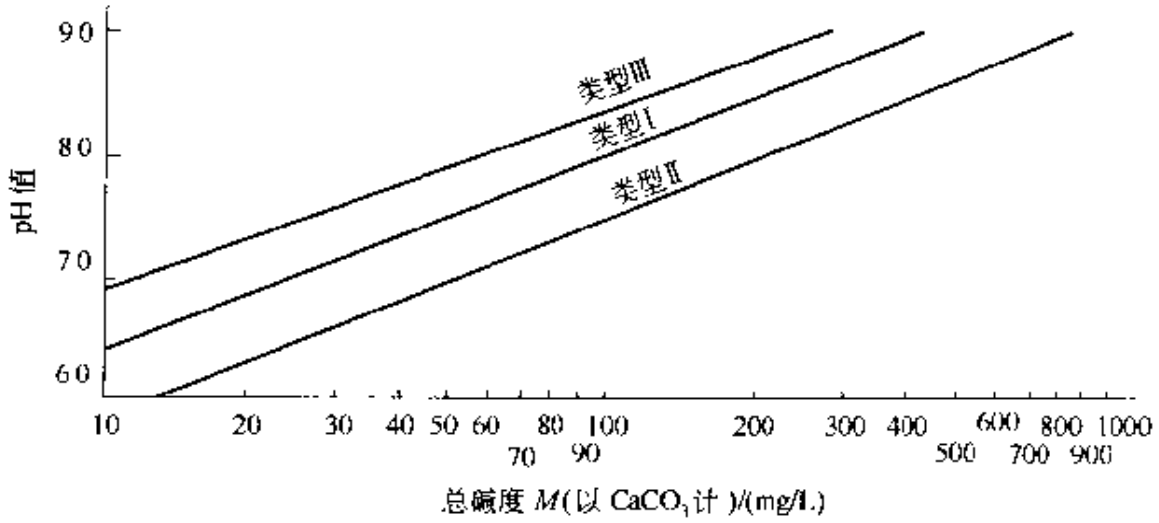


图 5-3-2　循环水的 pH-M 关系

558　什么是极限碳酸盐硬度法？如何测算？

极限碳酸盐硬度是指循环冷却水所允许的最大碳酸盐硬度值，超过此值即会引起碳酸盐结垢。过去常利用此法判断低浓缩倍数的循环冷却水或直流式冷却水系统的结垢倾向。

极限碳酸盐硬度应做相似条件的模拟试验后决定，如无上述条件时，也可按下述经验公式测算：

$$[H_n]=\frac{1}{2.8}\left[8+\frac{[O]}{3}-\frac{t-40}{5.5-\frac{[O]}{7}}-\frac{2.8H_y}{6-\frac{[O]}{7}+\left(\frac{t-40}{7}\right)^3}\right]$$

式中　H_n——循环水的极限碳酸盐硬度 $c\left(\frac{1}{x}A^{x-}\right)$，mmol/L；

H_y——补充水的非碳酸盐硬度 $c\left(\frac{1}{x}A^{x-}\right)$（永久硬度），mmol/L；

t——冷却水温度，℃；如 $t<40$℃，仍按 40℃计算；

[O]——补充水的耗氧量，mg/L。

上式适用于耗氧量≤25mg/L，最高温度 $t=30\sim65$℃的循环冷却水。

求得极限碳酸盐硬度后，可按下式判断循环水是否发生碳酸钙沉淀。

$$NH_m > H_n \quad 结垢$$

$$NH_m < H_n \quad 稳定，不会结垢$$

式中 N——循环水的浓缩倍数；

H_m——补充水的碳酸盐硬度 $c\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$，mmol/L。

559 什么是碳酸钙的临界 pH 值（pH_C）？测定 pH_C 有何意义？

对于难溶或微溶性盐如碳酸钙在沉淀前必须出现一定的过饱和度才能析出沉淀。那么，在碳酸钙发生沉淀析出的 pH 就称为碳酸钙临界 pH 值，以 pH_C 表示。如果把 pH_C 和用计算得到的 pH_S 作一比较，可发现 $pH_C > pH_S$。pH_C 可用实验方法求得。

当水的实际 pH 值超过它的 pH_C 时即结垢，小于 pH_C 时就不发生结垢。临界 pH 相当于饱和指数中的 pH_S，不同的是 pH_S 是计算值，而 pH_C 是实验测定值，在计算 pH_S 时许多因素未考虑进去，而实测的 pH_C 因是实验数据已包括各种影响因素在内，其数值显然要比 pH_S 值高。据实验测定结果，在实际操作中水的 pH 值，一般可以用 $pH_C = pH_S + (1.7 \sim 2.0)$。

临界 pH 值高于饱和 pH 值，也就是说临界 pH 允许冷却水在更高的钙离子浓度和碱度下运转，不过在实际操作中，由于 pH 值、水温和水质等方面的波动，因此不能在这个极限上操作。

560 什么是结垢指数（*PSI*）？

1979 年帕科拉兹（Puckorius）提出用平衡 pH 值（pH_{eq}）代替实际 pH 值，以修正 Ryznar 指数。他认为水的 pH 值受到缓冲，往往不能与 HCO_3^- 始终存在正确的对应关系。而水的总碱度不易受到缓冲，因而更能准确地指示水的腐蚀或结垢倾向。pH_{eq} 不是实际 pH 值，而是由总碱度 M 校正过的 pH 值，与水的总碱度相匹配。对数百例循环水进行研究，总结出 M 与 pH_{eq} 的关系式如下。

$$pH_{eq} = 1.465 \lg M + 4.54$$

式中 M——总碱度，mg/L（以 $CaCO_3$ 计）。

结垢指数按下式计算：

$$PSI=2pH_S-pH_{eq}$$

判断指标如下：

$PSI>6$　腐蚀

$PSI\approx6$　稳定

$PSI<6$　结垢

Puckorius 认为，当 pH＞8.0 时，pH 值受缓冲更明显，用 *PSI* 比 Ryznar 指数更准确。使用 *PSI* 法，总碱度 *M* 值必须为已知数。藉助下表可由总碱度查得平衡 pH 值（pH_{eq}）。

pH_{eq}值：由总碱度查平衡 pH 值（pH_{eq}）

总碱度 *M*（以 $CaCO_3$ 计）/(mg/L)	尾数									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0		6.00	6.45	6.70	6.89	7.03	7.14	7.24	7.33	7.40
100	7.47	7.53	7.59	7.64	7.68	7.73	7.77	7.81	7.84	7.88
200	7.91	7.94	7.97	8.00	8.03	8.05	8.08	8.10	8.13	8.15
300	8.17	8.19	8.21	8.23	8.25	8.27	8.29	8.30	8.32	8.34
400	8.35	8.37	8.38	8.40	8.41	8.43	8.44	8.46	8.47	8.48
500	8.49	8.51	8.52	8.53	8.54	8.56	8.57	8.58	8.59	8.60
600	8.61	8.62	8.63	8.64	8.65	8.66	8.67	8.68	8.69	8.70
700	8.71	8.72	8.73	8.74	8.74	8.75	8.76	8.77	8.78	8.79
800	8.79	8.80	8.81	8.82	8.82	8.83	8.84	8.85	8.85	8.86
900	8.87	8.88	8.88	8.89	8.90	8.90	8.91	8.92	8.92	8.93

561　什么是磷酸钙饱和 pH 值（pH_P）？如何计算？

磷酸钙在水中有以下溶解及电离关系：

$$Ca_3(PO_4)_2(固)\rightleftharpoons 3Ca^{2+}+2PO_4^{3-}$$

$$H_3PO_4\rightleftharpoons H^++H_2PO_4^-$$

$$H_2PO_4^-\rightleftharpoons H^-+HPO_4^{2-}$$

$$HPO_4^{2-}\rightleftharpoons H^-+PO_4^{3-}$$

磷酸钙的溶度积常数 $K_S=[Ca^{2+}]^3[PO_4^{3-}]^2=10^{-28}\sim10^{-33}$

磷酸的一级电离常数 $K_1=\dfrac{[H^+][H_2PO_4^-]}{[H_3PO_4]}=7.6\times10^{-3}$

（25℃）

磷酸的二级电离常数 $K_2=\dfrac{[H^+][HPO_4^{2-}]}{[H_2PO_4^-]}=6.2\times10^{-8}$ (25℃)

磷酸的三级电离常数 $K_3=\dfrac{[H^+][PO_4^{3-}]}{[HPO_4^{2-}]}=4.4\times10^{-13}$ (25℃)

当温度一定时，K_1、K_2、K_3 及 K_S 均为固定值。当氢离子 H^+ 浓度（即 pH 值）变化时，电离平衡发生变化。H^+ 增加（即 pH 值降低）时，电离平衡式向左进行，PO_4^{3-} 减少，溶解平衡式向右进行。即 $Ca_3(PO_4)_2$ 在水中处于不饱和状态，固体 $Ca_3(PO_4)_2$ 会继续溶解。反之，当 H^+ 减少（即 pH 值升高）时，电离平衡式向右进行，PO_4^{3-} 增加，溶解平衡向左进行。则 $Ca_3(PO_4)_2$ 在水中呈过饱和状态，倾向于沉积，即可能结 $Ca_3(PO_4)_2$ 水垢。pH_p 为 $Ca_3(PO_4)_2$ 的饱和 pH 值，在此 pH 值下 $Ca_3(PO_4)_2$ 处于饱和状态，既不溶解也不沉积。pH_s 由 $Ca_3(PO_4)_2$ 的溶解及电离平衡常数推导计算。

令 $[\Sigma]=[H_3PO_4]+[H_2PO_4^-]+[HPO_4^{2-}]+[PO_4^{3-}]$

经推导后得出下式。

$$[Ca^{2+}]^3\left[\frac{}{K_1K_2K_3+K_1K_2[H^+]+K_1[H^+]^2+[H^+]^3}\right]=K_S$$

两边取对数，并经整理得到下面的计算式。

$$2\lg\left[\frac{}{K_1K_2K_3+K_1K_2[H^+]+K_1[H^+]^2+[H^+]^3}\right]-\lg K_S$$
$$=-3\lg[Ca^{2+}]-2\lg[\Sigma]$$

该式的左侧二项统称为 pH-温度因数（$F_{pH,t}$），因 K_1、K_2、K_3 及 K_S 均随温度而变，$[H^+]$ 决定 pH 值。式中右侧二项各为钙因数（F_{Ca}）和磷酸盐因数（F_{PO_4}）。即 $F_{Ca}=-3\lg[Ca^{2+}]$，$F_{PO_4}=-2\lg[\Sigma]$。当水中磷酸钙达到饱和时，水的 pH 值应为饱和 pH 值，即 pH_p。此时 $F_{Ca}+F_{PO_4}=F_{pH,t}$。通常将这三种因数的数据列成表格，以方便计算。

钙因数（F_{Ca}）可根据水中钙离子含量（mg/L，以 $CaCO_3$ 计）

由钙因素表查出，也可按下式计算。

$$F_{Ca}=15.00-3\lg(\text{钙离子})$$

式中　钙离子——水中钙离子质量浓度，mg/L（以 $CaCO_3$ 计）。

磷酸盐因数（F_{PO_4}）可根据水中总正磷酸盐含量（mg/L，以 PO_4^{3-} 计）由磷酸钙因素表查出，也可按下式计算。

$$F_{PO_4}=9.955-2\lg(\text{正磷})$$

式中　正磷——总正磷酸盐含量，mg/L（以 PO_4^{3-} 计）。

$F_{pH-t}=F_{Ca}+F_{PO_4}$，根据 $F_{Ca}+F_{PO_4}$ 及水的温度由 pH 值-温度因素表查得的 pH 值即为 pH_P 值。

钙因数表

Ca^{2+}（$CaCO_3$）/(mg/L)	F_{Ca}	Ca^{2+}（$CaCO_3$）/(mg/L)	F_{Ca}	Ca^{2+}（$CaCO_3$）/(mg/L)	F_{Ca}
1	15.00	40	10.19	350	7.37
2	14.10	50	9.90	400	7.19
4	13.19	60	9.67	500	6.90
6	12.67	80	9.29	600	6.67
8	12.29	100	9.00	800	6.29
10	12.00	120	8.76	1000	6 00
12	11.76	140	8.56	1200	5.76
14	11.56	160	8.39	1400	5.56
16	11.38	180	8.23	1600	5.39
18	11.23	200	8.10	1800	5.23
20	11.10	250	7.81		
30	10.57	300	7.57		

磷酸盐因数表

PO_4^{3-} /(mg/L)	F_{PO_4}	PO_4^{3-} /(mg/L)	F_{PO_4}	PO_4^{3-} /(mg/L)	F_{PO_4}
1	9.96	12	7.80	60	6.40
2	9.35	15	7.60	65	6.33
3	9.00	20	7.35	70	6.26
4	8.75	25	7.16	80	6.15
5	8.56	30	7.00	90	6.05
6	8.40	35	6.87	100	5.96
7	8.26	40	6.75	110	5.87
8	8.15	45	6.65	120	5.80
9	8.05	50	6.56		
10	7.96	55	6.47		

pH 值-温度（F_{pH-t}）因数表[7]

pH 值	10℃ (50)①	20℃ (68)	30℃ (86)	40℃ (104)	50℃ (122)	60℃ (140)	70℃ (158)	80℃ (176)	90℃ (194)	100℃ (212)
6.0	13.64	14.00	14.32	14.64	14.86	15.04	15.30	15.42	15.58	15.68
6.1	14.02	14.38	14.69	15.02	15.44	15.56	15.69	15.81	16.02	16.04
6.2	14.40	14.76	15.07	15.38	16.90	16.04	16.05	16.20	16.46②	16.42②
6.3	14.78	15.13	14.45	15.74	16.30	16.46②	16.44②	16.57	16.89②	16.81②
6.4	15.14	15.51	15.82	16.14	16.68	16.84③	16.81②	16.94	17.32②	17.19②
6.5	15.52	15.87	16.18	16.50	17.04	17.20②	17.18②	17.32	17.73②	17.59②
6.6	15.90	16.24	16.53	16.88	17.38	17.56②	17.54②	17.70	18.13②	17.94②
6.7	16.21	16.61	16.88	17.24	17.70	17.88	17.91	18.06	18.50②	18.30②
6.8	16.58	16.95	17.22	17.60	18.00	18.18	18.25	18.40	18.87②	18.68②
6.9	16.91	17.29	17.57	17.92	18.31	18.49	18.60	18.73	19.20②	19.02②
7.0	17.30	17.61	17.92	18.24	18.59	18.78	18.92	19.06	19.52②	19.38②
7.1	17.62	17.92	18.25	18.55	18.88	19.08	19.25	19.40	19.83②	19.70②
7.2	17.94	18.23	18.57	18.86	19.18	19.36	19.57	19.70	20.12②	20.02②
7.3	18.24	18.53	18.86	19.14	19.44	19.66	19.87	20.00	20.39②	20.34②
7.4	18.54	18.81	19.13	19.42	19.72	19.94	20.16	20.30	20.65②	20.64②
7.5	18.83	19.08	19.40	19.70	19.96	20.20	20.44	20.56	20.90	20.93
7.6	19.10	19.35	19.66	19.96	20.22	20.46	20.71	20.84	21.14	21.20
7.7	19.38	19.60	19.92	20.20	20.46	20.70	20.96	21.10	21.36	21.47
7.8	19.62	19.84	20.17	20.44	20.69	20.94	21.20	20.34	21.59	21.72
7.9	19.86	20.08	20.40	20.68	20.92	21.18	21.43	21.58	21.82	21.96
8.0	20.10	20.32	20.64	20.92	21.16	21.40	21.67	21.80	22.04	22.20
8.1	20.32	20.54	20.86	21.14	21.37	21.64	21.89	22.03	22.26	22.44
8.2	20.54	20.76	21.08	21.36	21.58	21.86	22.12	22.24	22.47	22.66
8.3	20.76	20.98	21.29	21.58	21.81	22.06	22.33	22.46	22.69	22.88
8.4	20.97	21.19	21.50	21.78	22.02	22.28	22.54	22.68	22.99	23.10
8.5	21.18	21.41	21.72	22.00	22.23	22.50	22.75	22.90	23.11	23.32
8.6	21.38	21.62	21.94	22.22	22.44	22.70	22.96	23.10	23.31	23.52
8.7	21.60	21.83	22.15	22.42	22.66	22.90	23.17	23.31	23.52	23.72
8.8	21.80	22.04	22.36	22.62	22.86	23.10	23.36	23.51	23.73	23.94
8.9	22.00	22.25	22.56	22.83	23.08	23.30	23.57	23.72	23.93	24.15
9.0	22.20	22.46	22.76	23.02	23.28	23.52	23.76	23.93	24.13	24.36
9.1	22.43	22.66	22.96	23.26	23.40	23.71	23.97	24.12	24.35	24.56
9.2	22.64	22.86	23.17	23.46	23.69	23.92	24.17	24.32	24.54	24.76
9.3	22.84	23.06	23.37	23.66	23.90	24.12	24.36	24.53	24.74	24.97
9.4	23.04	23.27	23.57	23.86	24.10	24.32	24.56	24.74	24.93	25.18

续表

pH 值	10℃ (50)①	20℃ (68)	30℃ (86)	40℃ (104)	50℃ (122)	60℃ (140)	70℃ (158)	80℃ (176)	90℃ (194)	100℃ (212)
9.5	23.24	23.47	23.77	24.06	24.30	24.54	24.75	24.93	25.13	25.38
9.6	23.45	23.67	23.97	24.26	24.51	24.71	24.95	25.12	25.32	25.58
9.7	23.65	23.87	24.17	24.45	24.71	24.91	25.14	25.32	25.52	25.78
9.8	23.86	24.07	24.37	24.65	24.91	25.11	25.33	25.52	25.71	25.98
9.9	24.06	24.27	24.56	24.85	25.10	25.34	25.52	25.71	25.91	26.18
10.0	24.26	24.46	24.76	25.04	25.30	25.53	25.70	25.91	26.09	26.37
10.1	24.45	24.66	24.96	25.23	25 50	25.73	25.89	26.10	26.28	26.57
10.2	24.65	24.86	25.14	25.42	25.70	25.92	26.07	26.29	26.47	26.75
10.3	24.84	25.05	25.35	25.62	25.89	26.12	26.25	26.48	26.66	26.94
10.4	25.03	25.24	25.54	25.82	26.09	26.32	26.44	26.66	26.85	27.15
10.5	25.22	25.44	25.73	26.01	26.28	26.50	26.62	26.85	27.03	27.35
10.6	25.42	25.64	25.93	26.21	26.46	26.69	26.80	27.04	27.23	27.55
10.7	25.62	25.84	26.12	26.40	26.64	26.88	26.98	27.23	27.11	27.74
10.8	25.82	26.03	26.32	26.59	26.83	27.06	27.16	27.42	27.60	27.94
10.9	26.00	26.23	26.51	26.78	27.01	27.24	27.34③	27.61	27.79	28.14
11.0	26.20	26.43	26.70	26.98	27.19	27.44	27.51	27.80	27.96	28.35

① 括号内为℉。

② 原资料来自美国 Nalco 公司资料，原文数据有些异常，也许有误差。

③ 原文为 27.14。

计算例：如循环水中的钙离子含量为 64mg/L（以 $CaCO_3$ 计为 160mg/L），磷酸盐以 PO_4^{3-} 计为 5mg/L、温度为 40℃，则从钙因数表查得钙因数 $F_{Ca}=8.39$，从磷酸盐因数表查得磷酸盐因数 $F_{PO_4}=8.56$。则 $F_{pH_P}=F_{Ca}+F_{PO_4}=16.95$。查 pH 值-温度因数表，在 40℃栏下，$F_{pH-t}$为 16.95 时，pH 值为 6.62，即 pH_P 为 6.62。

562 如何用查图法计算磷酸钙饱和 pH 值（pH_P）？如何判断磷酸钙结垢的倾向？

磷酸钙饱和 pH 值（pH_P）除可采用上题的查表法之外，还可用查图法计算。其原理与查表法相同，各种因数的数据用图表示，见图 5-3-3。

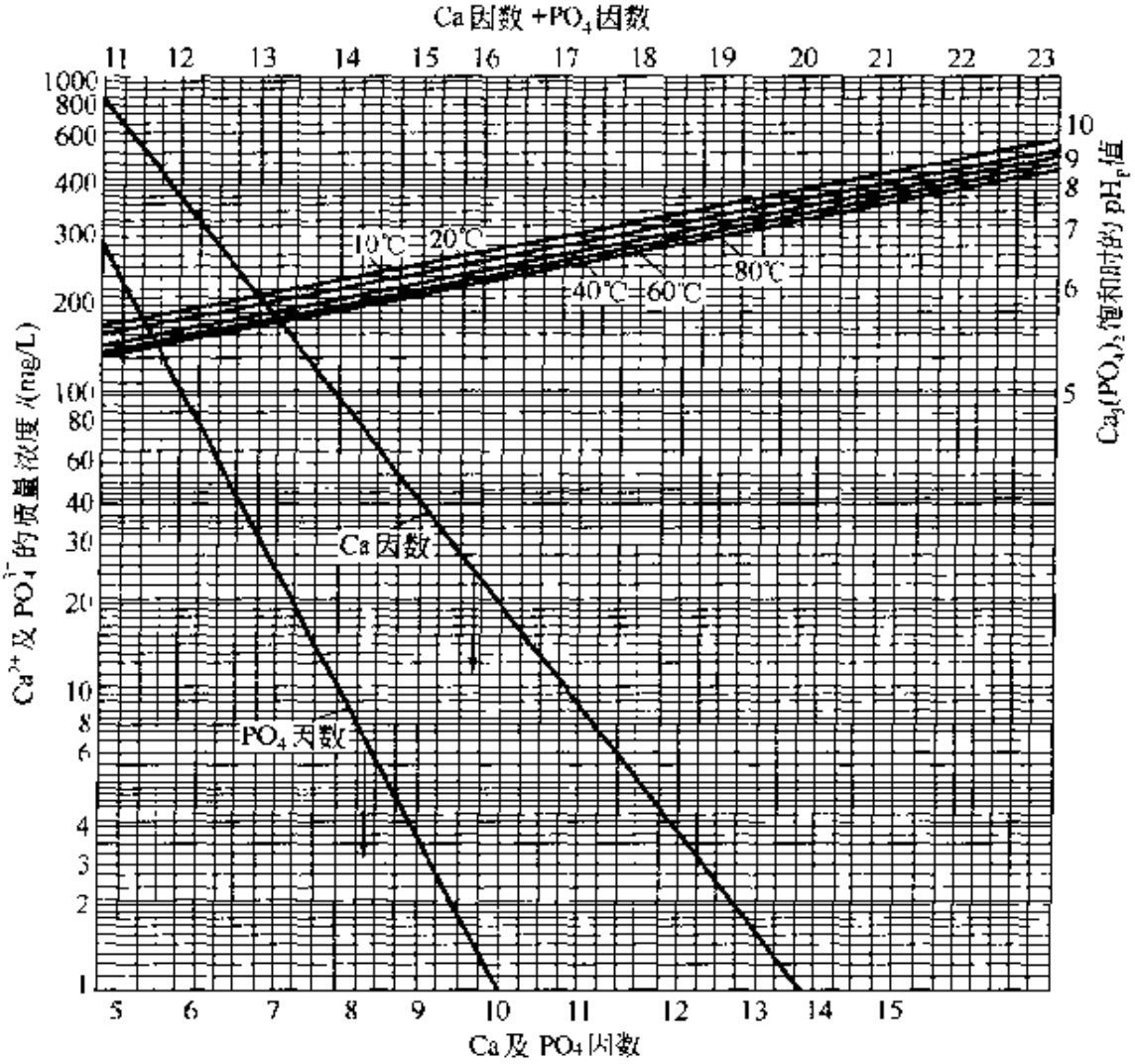


图 5-3-3　Ca^{2+}、PO_4^{3-} 浓度与 pH_p 的关系

计算例：已知某冷却水的 Ca^{2+} 含量为 24mg/L，正磷酸根（PO_4^{3-}）为 6mg/L，水温 $t=40℃$，求磷酸钙的 pH_P。

在图的左边纵坐标上找出 Ca＝24mg/L 的点，以水平线向右延长，与 Ca 因数线相交后再向下做垂线交于图中下方的横坐标得到“Ca 因数”为 9.7。

“PO_4 因数”与求“Ca 因数”的方法相同，当 PO_4^{3-} 为 6mg/L 时查得“PO_4 因数”－8.3。

“Ca 因数”＋“PO_4 因数”＝9.7＋8.3＝18.0

根据“Ca 因数”与“PO_4 因数”之和 18.0，在图中上方的横坐标上查出 18.0 时，垂直向下与 40℃的温度线相交，再以水平线

向右交于图中的右方纵坐标上即得到磷酸钙的饱和 pH_P 为 6.9。

此计算结果说明，在以上水质条件下，pH 值如低于 6.9，磷酸钙不饱和，不会结垢。如果 pH 值大于 6.9，则有结垢倾向。但因水垢是在超过过饱和区之后才会析出，所以实际上 pH 值在 6.9 时并不会结磷酸钙垢，控制 pH＜6.9 则偏于保守。根据经验，当水中加阻垢剂时，可允许 pH 值比 pH_P 高 1.5 左右。即一般控制运行 pH＜pH_P＋1.5。故本例水质的运行 pH 值应控制在 8.4 以下，否则可能结磷酸钙水垢。

实际上循环水的 pH 值控制指标多半是根据水质稳定处理方案确定的，并不是根据磷酸钙结垢的倾向而定的。所以经常是根据 pH 值控制指标来确定应控制的 PO_4^{3-} 含量。假如将上例的运行 pH 值定为 8.6，则其 pH_P 应控制在 8.6－1.5＝7.1 。查图可知 Ca 因数加 PO_4 因数约为 18.6，减去 Ca 因数 9.7 之后，则 PO_4 因数应为 8.9。查图可得，PO_4^{3-} 应为 3.4mg/L 左右。即在该水质下，如果要在 pH 值 8.6 运行，则水中的正磷酸盐应控制在 3.4mg/L 以下。

563　防止结水垢有什么方法？

防止或控制水垢的方法有化学方法和物理方法。国内已使用的物理方法有磁化处理及静电处理。目前物理方法多应用在单台设备或小型循环水系统中，其技术尚待掌握。对于大中型循环冷却水系统来说，采用化学方法处理较成熟、经济和有效。因最常见的水垢是碳酸钙，所以各种方法的重点是解决碳酸钙沉积问题。以下是常采用的化学方法。

(1) 除去部分成垢离子。碳酸钙水垢的成垢离子是钙及碳酸根（由碳酸氢根转化来）离子。在补充水中钙离子及碱度较高时，可在预处理工序中除掉部分硬度和碱度，即采用软化补充水。软化水的成垢离子较低，有利于提高循环水的浓缩倍数。常用的软化方法有离子交换法及石灰软化法两种。

(2) 加酸或二氧化碳气，降低循环水的 pH 值，稳定碳酸氢盐。

（3）在循环水中加入少量阻垢剂，破坏碳酸钙等成垢盐类的结晶生长，防止水垢沉积。

564　什么是水的磁化处理？

利用磁场效应对于水的处理作用，称为水的磁化处理。

磁化处理的过程很简单，如图 5-3-4 所示，当水在两块永久磁铁的 NS 极间隙间，垂直于磁力线的方向流过磁铁后，即完成磁化处理的过程。从这个示意图也可以看出，水流必须切割磁力线，才能起磁化处理的作用。经过磁化处理的水称为磁化水，磁化处理的设备称为磁水器。

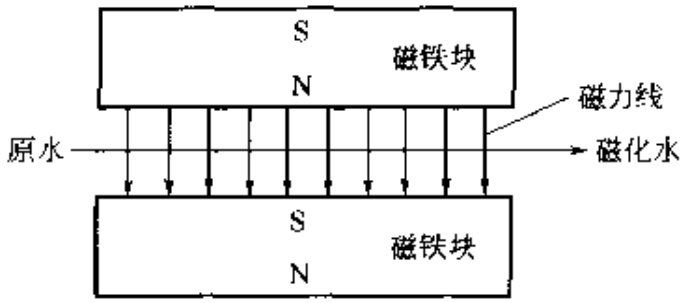


图 5-3-4　水的磁化处理示意

我国在水的磁化处理中，特别是在锅炉水的磁化处理应用，几经反复，到目前为止仍处于实践和研究初始阶段。在水处理中，磁化处理可以作为一种简易的缓垢处理方法，经磁化处理的水，只形成细粒的泥渣沉积物，可通过排污水排掉，因此不致在管壁或金属表面易产生黏结性的结垢物。另一方面，磁化水还可能使旧的结垢脱落下来。

应用磁化处理时，注意下列两点。第一，磁化处理只能起缓垢的作用，不能代替锅炉给水及冷却水处理的全部处理内容。因此，在应用磁化处理的同时，必须考虑如何解决其他处理问题。第二，根据目前的经验，磁化处理是否能够起缓垢作用，只能靠实际的使用效果来答复，而不能在使用前做出预测。

565　什么是水的静电处理？

静电水垢控制器是使水在一定强度的静电场中进行处理的设

备。当水通过静电水垢控制器时，水在其电场的作用下产生极化，并使水偶极子的正极端趋向静电场的阴极，负极端趋向静电场的阳极，且按正、负的次序被整齐地排列起来。当水中含有溶解盐时，这些盐类的正、负离子就被若干水偶极子所包围，使其不能在水中自由游动，这样这些溶解盐的离子就不能接触器壁，因而达到控制水垢生成的目的。当热交换装置中已存在老垢时，因水的极化作用，使水分子趋向器壁，从而使老垢龟裂、变形，逐渐脱落。当老垢致密坚实时，由于水能够进入金属与水垢底层之间，这时水垢就在其与水的接触面徐徐溶解，直至完全去除为止。

经静电水垢控制器处理的水，还可以杀灭循环水系统中的藻类和菌类。有人经过实验：经静电处理的水，对斜生栅列藻的杀伤率，14 天即可达 100%；对埃希氏大肠杆菌的杀菌率，6.5h 后达 92.9%。

静电水垢控制器由直流高压发生器和控制器制成，如图 5-3-5 所示。在控制器中，用聚四氟乙烯绝缘的卷线铁心作为阳极，以控制器的金属外壳为阴极。水从控制器的壳体与以聚四氟乙烯包裹的阳极之间通过，经受静电场处理后再进入用水设备。

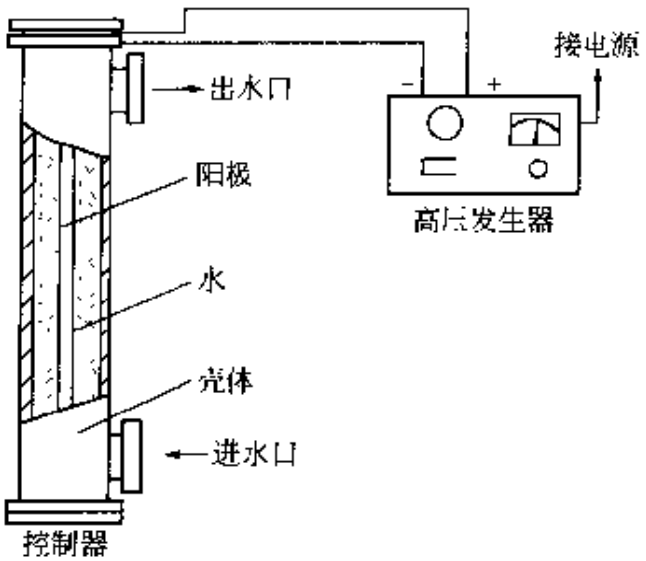


图 5-3-5　静电阻垢器示意图

静电水垢控制器是利用物理方法进行水处理的一个实例，它具

有简单易行，操作管理方便，处理费用低，不给环保带来污染等优点，尤其是适用于较小的循环冷却水系统。但应用静电水处理时，需要注意以下几点：①静电水处理只起阻垢和杀灭菌藻作用，对于腐蚀性的水，还应考虑缓蚀措施；②循环水中的悬浮物、泥、沙等仍要严格控制，静电水垢控制器不起处理泥、沙等悬浮物质的作用。

566　为什么加酸或加二氧化碳能防止结垢？

（1）酸化法，即在循环水中加酸（一般是加硫酸），将水中碳酸盐钙硬转变为溶解度较大的非碳酸盐钙硬，如下式：

$$Ca(HCO_3)_2 + H_2SO_4 \longrightarrow CaSO_4 + 2CO_2\uparrow + 2H_2O$$

加酸后水中钙含量虽未减少，但碳酸盐碱度减少了，因而碳酸钙结垢的可能性就人为地降低了。碱度降低之后，pH 值也相应下降。当 pH 值降至≤pHs，或 ZpHs · pH≥6.0 时，则不结碳酸钙水垢。

酸化法是早期应用的方法。早期时，循环水中不加水质稳定剂，只加酸以改变水的性质。后来开发了磷系缓蚀配方，酸化法则发展成为磷系配方的酸性处理法。近年虽开发了许多优良的阻垢分散剂，循环水可以在碱性下运行，许多系统仍适当加酸调节 pH 值以防自然 pH 值过高。这虽与早期单纯加酸的酸化法不同，但加酸后降低碳酸盐碱度、减少结垢倾向的意义是相同的。

（2）碳化法，是一种较古老的阻垢方法。一般是利用某些工厂烟道废气或某些化工厂废气中的二氧化碳通入循环水系统中，使其发生以下反应：

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \longrightarrow Ca(HCO_3)_2$$

因碳酸氢钙的溶解度大大高于碳酸钙，可避免碳酸钙在换热器上结垢。

从碳酸平衡关系看，当 pH 值确定之后，水中游离二氧化碳与 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 的比例即固定。即使通入的二氧化碳浓度很

高，吸收量也有限。另外，循环水在通过冷却塔时，部分过饱和的二氧化碳从水中逸出，使碳酸钙在冷却塔中析出，堵塞填料，即发生钙垢转移。为解决此问题，有的在冷却塔中适当补充一些二氧化碳，并控制好 pH 值。为此，一般认为碳化法是一种较难掌握的方法，只适用于有二氧化碳废气可利用，并且阻垢要求不太高的系统。

567　何谓阻垢剂？常用的有哪些阻垢剂？

阻垢剂是能够控制产生水垢和污泥的水处理化学药剂。常将阻垢剂与缓蚀剂共同称为循环冷却水的水质稳定剂，或缓蚀阻垢剂。通常的水处理剂往往同时具有缓蚀和阻垢两种性能，所以有时不能截然区分缓蚀剂和阻垢剂。只能按其主要性能区分。例如，通常认为有机磷酸盐是阻垢剂，也有缓蚀作用；聚磷酸盐为常用的缓蚀剂，也有阻垢作用。

早期采用的阻垢剂都是经过加工的天然聚合物产品，如淀粉、葡萄糖酸钠、丹宁、磺化木质素等。天然阻垢剂具有价格低廉、无公害等优点，但其阻垢率较低，故药剂用量较多。一般在循环水中的浓度需保持 50～100mg/L 以上，葡萄糖酸钠约需 200～500 mg/L。由于天然聚合物的阻垢效果不能满足生产上越来越高的要求，不利于循环水浓缩倍数的提高，所以使用者渐少，并多不单独使用，而是与人工合成的缓蚀阻垢剂复合使用。

20 世纪 60 年代以来开发的新型阻垢剂均为人工合成或聚合产品，比天然阻垢剂的阻垢率高，能够满足更高的阻垢要求。其使用浓度仅为几个 mg/L，一般＜10mg/L。常用的阻垢剂有以下几类。

（1）聚羧酸类　常用的均聚羧酸有聚丙烯酸、聚甲基丙烯酸及水解聚马来酸酐。近年已开发出多种二元或三元共聚物，如丙烯酸-丙烯酸酯、丙烯酸-水解聚马来酸酐、丙烯酸-甲基丙烯酸酯-甲基丙烯酸羟酯等共聚物。

（2）膦酸类　常用的有羟基亚乙基二膦酸（HEDP）、氨基三亚甲基膦酸（ATMP）及乙二胺四亚甲基膦酸（EDATMP）。

（3）有机磷酸酯类　如六元醇磷酸酯、聚氧乙烯基磷酸酯。

（4）膦羧酸类　如2-膦酸基丁烷-1,2,4-三羧酸(PBTCA)。

568　阻垢剂的阻垢机理是什么?

阻垢剂不仅能够控制水垢，也能在一定程度上控制腐蚀产物、黏泥和淤泥。加入很少量的阻垢剂却能控制大量的成垢物质，一般认为其阻垢机理如下：

（1）晶格畸变　无机垢（如碳酸钙）晶体在成长时，是按照一定晶格排列的，结晶致密，比较坚固。在水中含有聚羧酸或有机磷酸盐（膦酸或有机磷酸酯）阻垢剂时，阻垢剂的基团具有对金属离子（如Ca^{2+}）的螯合能力，对无机垢的结晶形成了干扰，使晶格发生歪曲，成为不规则的晶体，这就是晶格畸变作用。晶格畸变使硬垢变为无定型的软垢。这种垢的结晶不易长大，垢层中有大量空隙，彼此黏结力差，在水流中容易被冲走，可以随排污水一起排掉。

（2）络合增溶　聚磷酸盐、有机磷酸盐或聚羧酸等药剂在水中能够夺取钙镁离子，形成稳定的络合物。这实际上等于降低了水中钙镁离子的浓度，即减少了Ca^{2+}与CO_3^{2-}结合形成$CaCO_3$的机会。也就是说，相当于提高了循环水中钙镁离子的允许浓度，即增大了钙镁盐的溶解度。络合增溶的作用可以使更多的碳酸钙稳定在水中不析出。

（3）凝聚与分散　阴离子型阻垢剂（如聚羧酸类）在水中所离解的负离子能够吸附成垢盐（如碳酸钙）的微晶粒子，首先使微晶粒子形成双电层，并进而吸附在负离子的分子链上，使微晶粒子带负电。由于分子链上的多个微晶粒带有相同电荷，彼此相斥，不能结成大晶粒，使成垢盐难以沉积在金属传热面上形成垢层。阴离子阻垢剂的负离子对微晶粒既有凝聚作用，又能将其分散到整个水系统中，使其呈平均分散状况。这种凝聚和分散作用使成垢盐微晶粒稳定地悬浮在水中，实际上减少了微晶粒碰撞长大、形成晶核、进而析出的机会，使水中能容纳更多的成垢盐。

569　什么叫聚合电解质？

聚合电解质是指各种单体经过聚合反应生成的聚合物。从聚合物在水中能电离的这个意义上来说，聚合物又被称为聚合电解质。

聚合物的性质主要由其链长或相对分子质量和它链上的特性基团而定。特性基团所具有的电荷性能，将决定聚合物在水中的性质。根据其主链上的不同特性基团，聚合物可分为三类。

（1）聚合物在水中电离后，带有正电荷的，称为阳离子型，其典型的特性基团是胺和季铵。

（2）聚合物在电离后，带有负电荷的，称为阴离子型，其典型的特性基团是羧酸和磺酸。

（3）聚合物在水中不能离子化的，称非离子型，其典型的特性基团是酰胺和醇。

这类聚合物有些用在水处理系统中作为阻垢分散剂或絮凝剂。

570　什么是共聚物？应用于冷却水处理中的共聚物有什么特点？

两种或多种单体经共聚反应而成的产物叫共聚物。

冷却水化学处理在过去的三十多年中经历了较大的变化，从高效铬系配方转向磷系配方，现在又有向全有机配方演变的趋向。导致这些变化的原因在于含有铬、磷冷却水的排放受到环保严格的控制。磷、锌盐配方不仅存在排放问题，也存在磷酸钙垢和锌垢的问题，以致这些配方难以在苛刻的条件下运转。因此，共聚物类药剂被大量地研究和使用，是与以上情况紧密相关的。用于冷却水处理上的共聚物有以下特点：

（1）可以利用不同功能团的单体或它们不同的构成比，共聚成具有特殊水处理功能的共聚物，如具有分散、阻垢功能的共聚物、缓蚀功能或者兼具两种功能的共聚物；

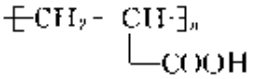
（2）目前所研究和应用的共聚物，尚未产生公害问题，符合环保排放要求；

（3）和其他水处理药剂组合应用时，产生协同效应，大大提高了水处理效果；

（4）适用的水质范围宽，能应用于条件苛刻的冷却水系统中。

571　什么是聚丙烯酸阻垢剂？

聚丙烯酸（PAA）是阴离子型聚合电解质，为循环水中最常用的聚羧酸阻垢剂。其结构式为：



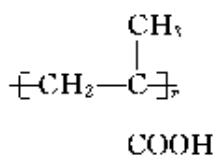
低相对分子质量的聚丙烯酸是无色透明固体，商品一般为25%～30%的水溶液或其钠盐。水溶液呈酸性，是一种比碳酸强的弱酸。在水中对强酸、强碱、氧化剂、还原剂是稳定的。聚丙烯酸在水中起阻垢作用的是聚合物的负离子，有絮凝、分散和晶格畸变作用，对 Ca^{2+}、Mg^{2+}、Fe^{3+}、Cu^{2-} 等离子有很好的螯合能力。除对水垢有良好的阻垢性能之外，还能对非晶状的泥土、粉尘、腐蚀产物和生物碎屑等起分散作用。

用于阻垢剂的聚丙烯酸应为低相对分子质量的产品，相对分子质量较大时阻垢率降低。数均相对分子质量在 1×10^3 左右（即聚合度 $n=10\sim15$）时阻垢效果较好。聚丙烯酸水溶液的黏度随相对分子质量和浓度增加而增加。故一般是测定水溶液的黏度来计算相对分子质量，这样测定的黏均相对分子质量比数均相对分子质量略高。所以阻垢率较高时，产品的黏均相对分子质量常在数千（最佳为3000，最佳范围为2000～4000）。由于相对分子质量对阻垢率的影响很大，所以对聚丙烯酸商品的相对分子质量应加强监测。

聚丙烯酸的使用质量浓度常在2～10mg/L（以PAA 100%计）范围内，一般2～4mg/L。在复合配方中与聚磷酸盐、膦酸盐、锌盐、芳香族唑类有较好的协同效应。

572　什么是聚甲基丙烯酸阻垢剂？

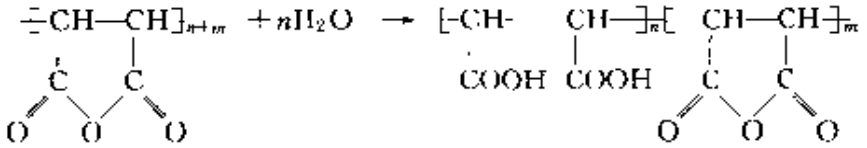
聚甲基丙烯酸（PMAA）的性能和结构都与聚丙烯酸相似，均为阴离子型聚合电解质，也是较常用的聚羧酸阻垢剂。其结构式为：



阻垢性能与聚丙烯酸相似，但在耐温方面比聚丙烯酸有所提高。所以除可以用于循环冷却水的阻垢之外，也可用于低压锅炉阻垢。相对分子质量为500～2000时，阻垢率较高。其价格较聚丙烯酸贵。

573　什么是水解聚马来酸酐阻垢剂?

水解聚马来酸酐（HPMA）为阴离子型聚电解质，与聚丙烯酸的作用机理和性能相类似，也是较常使用的聚羧酸阻垢剂。水解聚马来酸酐是聚马来酸酐分子部分水解的产物。



聚马来酸酐结构式　　水解聚马来酸酐结构式

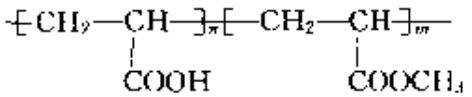
据介绍，约60%～70%的酸酐结构被水解为羧酸。其结构实际上比上式复杂，上式只是简化的分子结构示意。在水中具有晶格畸变和分散作用。由于其羧基数量较多，阻垢性能及耐温性能均优于聚丙烯酸和甲基丙烯酸。在循环水系统，不仅能抑制碳酸钙及硫酸钙垢，在高pH值下对磷酸钙也有较好的阻垢效果。同时与锌配合有很好的协同效应，能起良好的缓蚀作用。因其能在175℃的高温仍能保持优异的阻垢性能，故可用于蒸汽机车及海水淡化闪蒸装置的阻垢。

水解聚马来酸酐是淡黄色固体，水溶性好。水溶液呈淡棕色。商品的质量分数约为50%水溶液，数均相对分子质量约为1000。

574　常用的聚羧酸二元或三元共聚物有哪些?

近年开发出多种聚羧酸的二元或三元共聚物，由于其具有两种以上的基团，所以改善了聚丙烯酸等均聚物的性能。已开发的共聚物品种繁多，国内已有生产并应用于生产上的有代表性的品种如下。

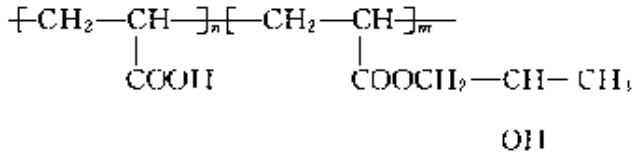
① 丙烯酸-丙烯酸甲酯共聚物　其结构式为：



该二元共聚物可适应碱性运行、水温较高及含钙量较高的水质，对

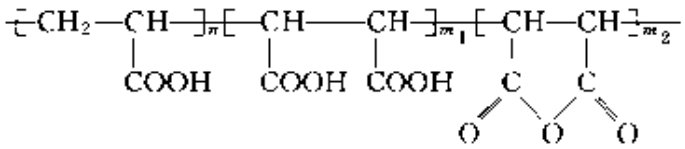
磷酸钙、磷酸锌、氢氧化锌和氢氧化铁有良好的抑制和分散作用，常与聚磷酸盐、有机磷酸酯和锌盐等药剂复配使用。

② 丙烯酸-丙烯酸羟丙酯共聚物　其结构式为：



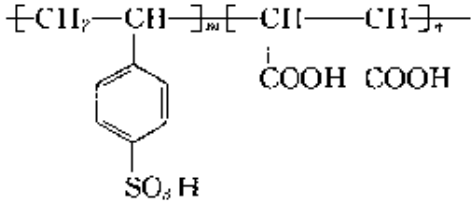
这种二元共聚物的特点是在碱性条件下对磷酸钙、磷酸锌、氢氧化锌、水合氧化铁等有很好的抑制和分散作用。除可用于循环冷却水系统之外，还用于油田注水及低压锅炉阻垢。

③ 丙烯酸-水解聚马来酸酐共聚物　其结构式为：



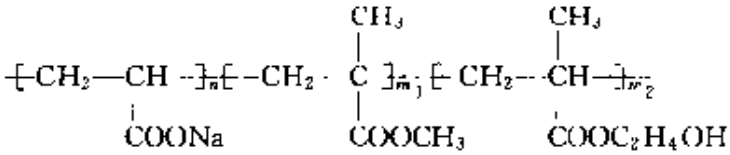
这种二元共聚物的性能与水解聚马来酸酐相似，比聚丙烯酸的热稳定性强，又比水解聚马来酸酐的价格低。可应用于循环冷却水的碱性运行，加药量为 1～5mg/L（100%）范围。也能用于蒸汽机车及低压锅炉阻垢。

④ 苯乙烯磺酸-马来酸共聚物　其结构式为：



这种二元共聚物的热稳定性及分散作用均比聚丙烯酸有所提高，常用于循环冷却水及低压锅炉系统中控制碳酸钙、磷酸钙、硅酸盐、氧化铁及污泥沉积。

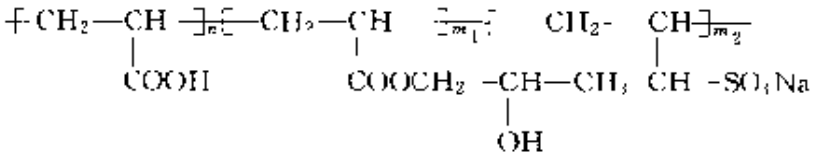
⑤ 丙烯酸钠-甲基丙烯酸甲酯-甲基丙烯酸羟乙酯共聚物　其结构式为：



这种三元共聚物的阻垢性能优于丙烯酸-丙烯酸羟丙酯共聚物。适

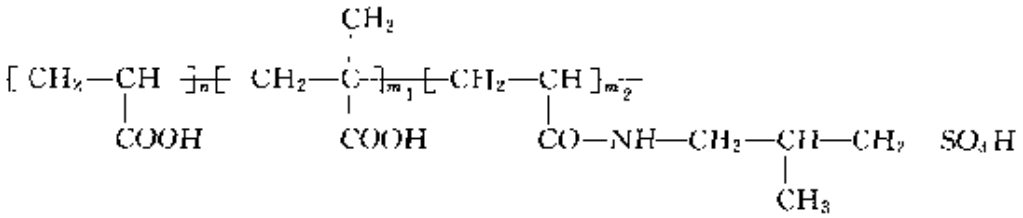
应碱性运行及含钙量较高的水质，并对磷酸钙、氧化铁及悬浮粒子有较好的分散作用，允许适当提高循环水中正磷酸盐含量。商品的相对分子质量为1500～4000。

⑥ 丙烯酸-丙烯酸羟丙酯 丙烯磺酸钠共聚物　其结构式为：



这种三元共聚物是近年开发的优良阻垢剂，更加适应碱性运行和含钙量高的水质。

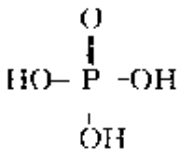
⑦ 丙烯酸-甲基丙烯酸-AMPS共聚物　AMPS单体为2-丙烯酰胺基-2甲基丙基磺酸。该共聚物结构式为：



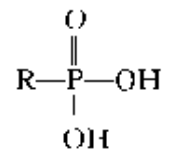
这种近年开发的优良三元共聚物更加适应碱性运行和含钙量高的水质，对Zn^{2+}、Mn^{2+}、Fe^{2+}、黏泥、氧化铁和PO_3^{3-}均有良好的分散作用。

575　什么是膦酸盐？常用的有哪些品种？

膦酸是20世纪70年代以来循环冷却水化学处理中广泛应用的重要的有机磷酸盐缓蚀阻垢剂。其结构式中磷原子和碳原子直接连接，膦酸可以看做是磷酸分子中的一个羟基被烃基R所取代的产物。



磷酸的结构式

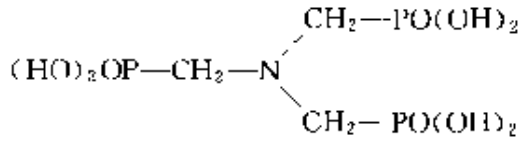


膦酸的结构式

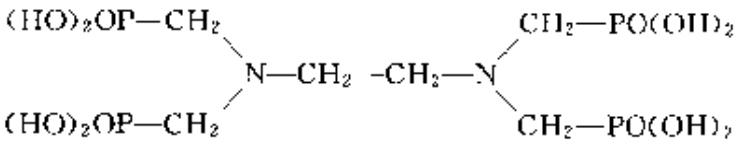
由于膦酸结构中有这种碳磷相接的C－P键，所以具有良好的化学稳定性，有一定程度的耐氧化性能，不易水解，能耐较高温度等优点。

多元膦酸为阴极性缓蚀剂，又是一类非化学当量的阻垢剂。对许多金属离子，如 Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cu^{2+}、Zn^{2+} 等有优异的螯合能力，阻垢效率好，使用剂量少。一般阻垢用量多为 1.5～5.0mg/L (100%)，用于缓蚀则剂量较高。其阻垢机理主要是具有明显的晶格畸变作用和络合增溶作用。起缓蚀阻垢作用的为其负离子，膦酸或其钠盐均有效。产品多为 30%～50%的水溶液，有时也制成白色粉状，分酸型及钠型两种。多元膦酸的品种很多，最常用及有代表性的品种如下。

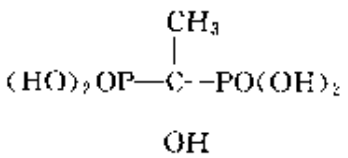
① 氨基三亚甲基膦酸（ATMP） 旧称氨基三甲叉膦酸。对碳酸钙的阻垢效果很好，在循环冷却水中很常用。其结构式为：



② 乙二胺四亚甲基膦酸（EDATMP） 旧称乙二胺四甲叉膦酸。能与多价离子如钙、镁、铁、铝、锌等形成稳定的络合物。除在循环冷却水中常用之外，在低压锅炉的炉内处理也常用。其结构式为：

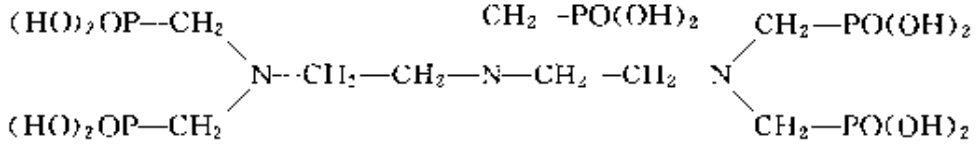


③ 羟基亚乙基二膦酸（HEDP） 旧称羟基乙叉二膦酸，其结构式为：



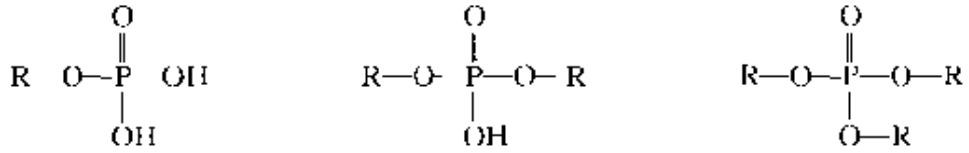
由于其分子结构中没有C—N键，所以比 ATMP 及 EDATMP 的抗氧化性能好，不易被活性氯氧化而水解成正磷酸盐，更加适合与氧化性缓蚀阻垢剂配合使用，在循环冷却水中很常用。

④ 二亚乙基三胺五亚甲基膦酸（DETAPMP） 其特点是与 Mn^{2+} 复合使用时，对碳钢和铜合金均有良好的缓蚀效果。应用尚不广泛。其结构式为：



576　什么是有机磷酸酯？什么是锌/多元醇磷酸酯/聚羧酸盐/磺化木质素复合配方？

有机磷酸酯是20世纪70年代开发的另一种有机磷酸盐缓蚀阻垢剂。其结构中含有C—O—P键，碳原子与磷原子不直接连接，而是通过氧原子相连的。因此，有机磷酸酯可以看作磷酸分子羟基中的氢原子被烃基R取代的产物。磷酸中三个羟基中的氢都可以被取代，所以可制成磷酸一酯、二酯或三酯。其结构式为：

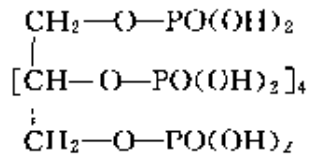


磷酸一酯　　磷酸二酯　　磷酸三酯

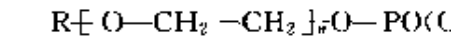
水处理中常用的是磷酸一酯和磷酸二酯。

由于有机磷酸酯中的C—O—P键不如C—P键牢固，所以其耐氧化性能及抗水解性能都比膦酸差。特别在温度较高、碱性较强时，容易水解生成正磷酸。但比起聚磷酸盐来，水解速度要慢些，药剂用量少些，所以水解造成的危害不如聚磷酸盐大。有机磷酸酯用于循环冷却水中控制硫酸钙垢，消除硬垢，稳定锌盐和分散污泥、油垢方面有较好的效果。其阻垢机理主要是晶格畸变。在用量较大时，能在金属上形成化学吸附膜，为阳极性缓蚀剂。较有代表性的品种如下。

① 六元醇磷酸酯　为有代表性的多元醇磷酸酯。其结构式为：



② 聚氧乙烯基磷酸酯　在有机磷酸酯中接入几个氧乙烯基，可提高阻垢和缓蚀性能。其结构式为：

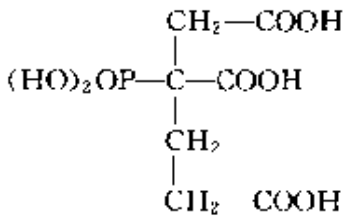


当 $R=C_8H_{17}$— 时，产品则为聚氧乙烯醚辛基苯磷酸酯。

锌盐/多元醇磷酸酯/聚羧酸盐/磺化木质素是20世纪80年代开发出来的缓蚀阻垢配方。多元醇磷酸酯兼有阻垢和缓蚀作用，能稳定锌离子。磺化木质素是污垢和铁垢的有效分散剂。聚羧酸盐一般采用丙烯酸的二元或三元共聚物或其钠盐。这几种药剂联合使用时可以很好地控制循环水中的硬垢和污泥，甚至可使已沉积的钙垢逐渐疏松消解。锌盐/多元醇磷酸酯/磺化木质素复合剂的商品用量一般为30～50mg/L，聚羧酸的商品用量一般为10～15mg/L。这种复合配方适用于结垢性水质，一般稳定指数＜6.0。运行pH值一般＜8.5，钙硬＜600mg/L（以$CaCO_3$计）。

577　什么是膦羧酸阻垢剂？

膦羧酸既含有膦酸基—$PO(OH)_2$，又含有羧基－COOH，具有两种基团的特点。故其阻垢性能优于常用的多元膦酸。在高温、高钙含量和碱性水质条件下，不易形成难溶的膦酸钙，与锌盐和聚磷酸盐有良好的协同效应。在高剂量使用时，是一种高效缓蚀剂。较典型的膦羧酸产品为2-膦酸基丁烷-1，2，4-三羧酸（PBTCA），其结构式为：



是近年开发的优良产品。

578　什么是全有机配方？

全有机配方于1967年由国外开发，20世纪80年代在我国开始应用，目前在我国已成为磷系配方之后又一类广泛使用并较成熟的配方了。

全有机配方是碱性运行配方，一般不加酸调pH值。由于浓缩使循环水的硬度、碱度和pH值自然升高，使循环水的腐蚀倾

向降低、结垢倾向增加。循环水主要依靠自身性质形成自限制性保护膜而得到缓蚀。药剂的作用以阻垢分散为主。不需要加入聚磷酸盐之类的缓蚀剂。但当碳钢和铜材同在一系统时，仍需加入唑类铜缓蚀剂。有时候在配方中加少量复合锌离子，可显著增加缓蚀效果。这种配方适用于结垢性水质，稳定指数<6.0，多在4～5左右。

根据阻垢药剂的发展情况，全有机配方也在发展，配方的药剂和适应性也在变化。以下是两类配方的简单介绍。

(1) 膦酸盐/聚羧酸盐或锌盐/膦酸盐/聚羧酸盐复合配方

这是20世纪80年代开发并推广的全有机配方。采用的膦酸盐为羟基亚乙基二膦酸、氨基三亚甲基膦酸、乙二胺四亚甲基膦酸或其钠盐。采用的聚羧酸盐为均聚羧酸（聚丙烯酸、聚甲基丙烯酸或水解聚马来酸酐）或聚羧酸的二、三元共聚物，或其钠盐。药剂用量根据水质而定，相差很多。以十多个厂的数据为例，用量大致如下：

膦酸盐(100%)	1.5～8mg/L	铜缓蚀剂	0.5～2mg/L
聚羧酸盐(100%)	1～8mg/L	锌离子	1～2mg/L

商品复配药剂量为30mg/L、60mg/L或75～85mg/L不等。

运行pH值多为自然pH值，常在8.0～9.5范围内。允许水中的钙含量及碱度均较高。一般控制钙硬加总碱度<900mg/L（以$CaCO_3$计），$SO_4^{2-}+Cl^-$<1000mg/L。

(2) 膦酸盐/膦羧酸盐/聚羧酸盐复合配方

这是20世纪90年代开发并推广的全有机配方。其配方中除了加入阻垢性能较好的膦羧酸盐2-膦酸基丁烷-1,2,4-三羧酸之外，聚羧酸盐采用了丙烯酸的二、三元共聚物，有时甚至采用两种共聚物复配，例如丙烯酸-丙烯酸羟丙酯-丙烯磺酸钠共聚物及丙烯酸-甲基丙烯酸-AMPS共聚物。为此，这种配方的阻垢分散能力更好，对钙硬的容忍性更高。这种配方也多在自然pH值下运行，一般在8.5～9.3范围内。商品复合药剂的总加入量约为40～60mg/L。适

用于高钙高碱高盐水质。如有的规定：钙硬加总碱度＜1100mg/L（以 $CaCO_3$ 计），$SO_4^{2-}+Cl^-$ ＜2000mg/L。

应说明的是：不论（1）或（2）类全有机配方均只适用于结垢性水质，而不适用于腐蚀性水质。另外，其处理费用高于磷系配方。

由于循环冷却水在冷态或低浓缩倍数运行时，系统的 pH 值、温度及钙含量均较低，多倾向腐蚀，故全有机配方在这时常另加少量锌及聚磷酸盐，当提高浓缩倍数转入热态运行之后则停加聚磷酸盐，减少锌或停加锌。

全有机配方虽一般在自然 pH 值下运行，但有时也适当加酸调 pH 值。因在补充水中钙硬和碱度很高又在高浓缩倍数运行时，钙硬和总碱度可能超标。故有的规定 pH 值大于一定值（如＞9.0）时加酸调节，有的则规定总碱度大于一定值［如＞400mg/L（以 $CaCO_3$ 计）］时加酸调节。

（四）微生物的控制

579 什么是微生物？其生长条件受什么因素影响？

微生物是一些细小多为肉眼看不见的单细胞生物，在各种水域、空气、土壤中到处都有它们的存在。微生物的门类有细菌、藻类、真菌和原生动物。

微生物的生长受下列因素影响：①温度（对许多微生物来说，20～30℃最适宜）；②光照强度（对藻类发生特别重要）；③pH 值或酸碱度；④溶解氧与溶解硫化物的含量；⑤无机物（SiO_2、NO_2-N、NH_4-N、HCO_3^-、PO_4^{3-}、Mn、Fe 等）的浓度；⑥有机物（COD 或 BOD）的浓度；⑦循环水的浓缩倍数。上述条件并非所有微生物都需要，每种微生物有着各自不同的要求，而且需要量也有一定的限制浓度，如好气性环境和厌气性环境均各有相应的菌类繁殖，具有哪种倾向的细菌发生和生长，决定于介质——水和土壤中的含氧量和无机物、有机物含量。

580 什么是细菌?

细菌极其微小，其直径一般只有 0.5～1.0μm，有的达到 2μm；其长度一般为 3～5μm，少数也可达 80～150μm。据估计，(1～5)×10^9（10～50 亿）个细菌的干重约 1mg，即每个细菌的质量约 0.2×10^{-12}～1×10^{-12}g。它们的形状各异，有球状的、杆状的、弧状的和螺旋状的。它们通常都是以单细胞或多细胞的菌落生存。细菌细胞由荚膜（或黏液膜）、细胞壁、鞭毛、细胞膜、细胞质、细胞核以及芽孢等构成。

细菌对生存条件的要求各有很大的差别，如对温度的要求，有的喜冷（0～25℃），有的喜热（45～75℃），更多的是喜中等温度(20～45℃)。又如对空气的需要，有的需空气，有的则厌气，而有的又是兼性的，有空气能生存，没有空气也能生存。

细菌的繁殖是非常快的，其繁殖靠细胞分裂，一般每隔 20～30min 分裂一次，在 24h 内可获 72 代，如果条件适宜，经过 10h 就可繁殖数亿个。

581 什么是藻类？循环冷却水中常见的有哪些藻类?

微生物藻类的细胞内含有叶绿素，能进行光合作用，制造自己生长所需要的营养物质，是光合作用的自养生物。藻类生长的三要素是空气、水和阳光，三者缺一就会抑制藻类生长，其中以光的影响尤为重要。藻类根据其所处的环境，则有“着生”和“浮游”之别，“着生”即附着在其他物体上生长；“浮游”者则一般都是微小且绝大多数是肉眼看不见的藻类。藻类细胞都有明显的细胞壁，在细胞壁内即为原生质，除蓝藻外都具有明显的细胞核。蓝藻的繁殖则完全靠细胞分裂，亦有少数会形成孢子，所以也称它为“裂殖藻”。

藻类存在于土壤和水体中，常随空气和补充水带入冷却水系统，循环冷却水系统中的温度、pH 值和营养源非常适宜藻类的生长，而冷却塔的配水池和塔壁正好是藻类生存繁殖的一个良好的环境。下表是冷却水系统常见到的一些藻类，以及它们生长所需的温度和 pH 值。

冷却水系统常见的一般藻类及生长条件

藻的种类	例　子	生长条件	
		温度/℃	pH 值
绿藻	小球藻、普通单细胞丝状的丝藻	30～35	5.5～8.9
蓝绿藻(含蓝色素层)	微囊藻、单细胞黏液型丝状的颤藻、席藻	32～40	6.0～8.9
硅藻(细胞内含有棕色色素及二氧化硅)	脆杆硅藻、细长连续的小环硅藻、成轮形等片硅藻、大的矩形或圆锥形等片硅藻	18～36	5.5～8.9

582　什么是真菌？循环冷却水中常见的有哪些真菌？

真菌是不含叶绿素的单细胞呈丝状的简单植物，它不分化出根、茎和叶，是不能进行光合作用的真核生物。

真菌不含叶绿素，不进行光合作用，大部分菌体都是寄生在动植物的遗骸上，菌丝则以此为营养而生长。菌丝有数 μm 大小，大都无色，少数呈暗色。在污染了的冷却水中常形成软泥，引起管道堵塞。有些真菌能利用木材的纤维素作为碳源，将其转变为葡萄糖和纤维二糖，从而破坏冷却塔中的木结构。它还可能参与氨化、硝化和反硝化作用，引起电化学和化学腐蚀。真菌的监控指标每毫升不得超过 10 个。

真菌最宜生长的温度为 25～30℃，pH 为 6 左右。然而在冷却塔中发现的许多菌种却能在 34℃或甚至更高的温度下良好生长，它们常以生成孢子进行繁殖。下表是冷却水系统中常见的真菌，以及它们生长的适宜条件。

冷却水系统常见的真菌及其适宜的生长条件

真菌类型	生长条件		特　性	产生的问题
	温度/℃	pH		
丝状霉菌	0～38	2～8 最适宜为 5～6	黑、黄褐、棕、蓝、黄、绿、白、灰等色附在木头表面	产生黏泥及木腐病
酵母菌	0～38	2～8 最适宜为 5～6	皮革状或橡胶状的生长物，通常带有色素	产生黏泥，使水和木材变色
担子菌属	0～38	2～8 最适宜为 5～6	白色或棕色	木材内部产生腐蚀

583 微生物给冷却水系统带来什么样的危害?

微生物在冷却水系统中的大量繁殖，会使冷却水颜色变黑，发生恶臭，污染环境。同时，会形成大量黏泥使冷却塔的冷却效率降低，木材变质腐烂。黏泥沉积在换热器内，使传热效率迅速降低和水头损失增加，沉积在金属表面的黏泥会引起严重的垢下腐蚀，同时它还隔绝了缓蚀阻垢剂对金属的作用，使药剂不能发挥应有的缓蚀阻垢效能。所有这些问题导致冷却水系统不能长期安全运转，影响生产，造成严重的经济损失。因此，微生物的危害与水垢、腐蚀对冷却水系统的危害是一样的严重，甚至可以说，二者比较起来控制微生物的危害是首要的。

584 黏泥和污垢有什么区别?

黏泥是由微生物群体及其分泌物所形成的胶黏状物。好氧性荚膜细菌能够在细菌周围产生荚膜，即能分泌由多糖和多肽类物质所组成的黏性外壳。荚膜能保护细胞并能黏结营养物。细菌的这种黏性外壳使它具有特殊的黏结作用，既具有内聚性，又具有黏着性。内聚性是指微生物之间有互相聚合在一起的能力，使微生物容易黏结在一起。黏着性是指黏泥能够粘附水中的各种粘附物质，连成片的黏泥和金属表面具有极强的牢固的结合能力。因此，黏泥极易附着在设备上，造成沉积物的危害。多种细菌都能产生黏泥，通常分不出黏泥是由何种细菌产生的。一般水中异养菌数量高时，容易产生黏泥。故循环水中的异养菌数量应作为控制指标。

污垢的组成包括水垢、黏泥、腐蚀产物、淤泥、悬浮物等。黏泥为污垢的一部分，是由微生物形成的软垢。黏泥的外表有一种黏液具有黏性，手摸有滑腻感。实际上，系统中的沉积物不会是单一的微生物黏泥，而是含有其他污垢成分的。习惯上所说的黏泥是指在换热器、冷却塔、水槽壁、池底、管道上沉积的胶黏状软泥。其组成以微生物黏泥为主，也含有一部分水垢、腐蚀产物、淤泥、悬浮物等。软垢区别于硬垢是其较软，垢的组成中 600℃的灼烧减量[1]>20%，一般为 40%～60%。而硬垢的手感较硬，600℃的灼

[1] 微生物为有机物，600℃灼烧减量代表垢样中的有机物含量。

烧减量＜20%。

585　为什么黏泥会加速金属设备的腐蚀？

细菌聚集形成的菌落，附着在金属壁上，微生物不仅本身分泌黏液构成沉积物，而且也粘住在正常情况下可以保持在水相的其他悬浮杂质形成黏泥团。在黏泥团的周围和黏泥团的下方形成氧的浓差电池，黏泥团的下部因缺氧而成为活泼的阳极，铁不断被溶解引起严重的局部腐蚀。

微生物黏泥除了会加速垢下腐蚀外，有些细菌在代谢过程中，生成的分泌物还会直接对金属构成腐蚀。如氧化硫细菌其氧化产物硫酸，可使局部区域的 pH 值降到 1.0～1.4，对这部分金属直接发生氢的去极化作用，加快了金属的腐蚀；又如厌氧性硫酸盐还原菌，其还原产物 H_2S 可直接腐蚀金属，生成硫化铁，硫化铁沉积在钢铁表面与没有被硫化铁覆盖的钢铁又构成一个腐蚀电池，加速金属的腐蚀；铁细菌则直接就将亚铁氧化成高铁，在阳极表面上直接起了阳极去极化作用，从而加速了腐蚀。因此，细菌促进腐蚀过程是多种多样的，在大多数情况下，可以认为细菌引起的腐蚀，常是各种细菌共同作用的结果。

藻类在日光的照射下，会与水中 CO_2、HCO_3^- 等碳源起光合作用，吸收碳素作营养而放出氧，因此，当藻类大量繁殖时，会增加水中溶解氧含量，有利于氧的去极化作用，腐蚀过程因此而加速。

586　真菌是怎样破坏冷却塔中木材的？

木材是由纤维素、半纤维素和 20%～30%木质素所组成。纤维素是一种多糖物质（$(C_6H_{10}O_5)_n$），是木材细胞壁的组成部分，木质素是一种聚合的非多糖物质，它似一种黏合剂，能将纤维素黏结在一起。

真菌中的子囊菌和半知菌容易寄生在连续受潮或浸泡在水中的如填料板条或其他结构木材上，它分泌出的消化酶能将纤维素作为碳源而消耗破坏掉，木材中的纤维素被破坏了，只留下起结合作用的木质素，因此降低了木材的结构强度，当木材表面细胞被水冲掉

时，它就失去了基本部分，如果木材仍然处于潮湿状态时，木材将出现易碎和变黑，而在干燥时出现裂缝，这种破坏情况是在木材表面发生，故又称之为木材患了“软腐病”。而“白腐病”和“棕腐病”则是木材内部受到侵蚀、腐烂，它也是真菌如担子菌寄生的结果，它们可以破坏木质素或纤维素，使木材变朽，表面看来，木材似乎仍然完好，相当坚固，但内部已经腐朽，很容易被锐利的物体戳穿或者压碎。

587　藻类对循环冷却水系统有何危害？

藻类对循环冷却水系统的危害主要有：

（1）冷却塔中是藻类生长的理想环境，它们会在塔壁、水槽中、配水池里繁殖，通过碳的同化作用，借助阳光，使水中的 CO_2 和 HCO_3^- 进行光合作用，并吸收碳作营养而放出氧。藻类的大量繁殖，会使水中溶解氧增加，腐蚀性也就随着增大。

（2）许多藻类在其细胞中产生具有恶臭的油类和环醇类，藻类死亡后成为污泥会产生臭味并使水变色。

（3）冷却塔的配水槽和喷嘴上也常因藻类繁殖，堵塞孔口，影响配水的均匀性使塔的冷却效率下降。塔壁上大片藻类脱落也可能造成系统堵塞。

（4）硅藻由于其细胞壁上充满着聚合的二氧化硅，将引起硅污垢。

588　循环冷却水中微生物来自哪些方面？为什么循环水的微生物危害比直流水严重得多？

循环冷却水中的微生物来自两个方面：一是冷却塔在水的蒸发过程中需要引入大量的空气，微生物也随空气带入冷却水中；二是冷却水系统的补充水或多或少都会有微生物，这些微生物也随补充水进入冷却水系统中。

循环水的温度、pH 值和营养成分都是有利于微生物的繁殖，冷却塔上充足的日光照射更是藻类生长的理想地方。而直流水系统没有空气冷却的蒸发过程，只有随水流带入的微生物，再说直流水系统所提供的微生物繁殖的条件不如循环水，即适宜的水温、pH

值和营养成分。循环水加入的药剂和工艺泄漏物有时也会成为微生物的营养成分，促进微生物生长。最关键的是，循环水排出的污水，又返回系统循环、造成恶性循环，而在直流水中繁殖起来的微生物立即排走了。故循环水的微生物危害比直流水严重得多，而且浓缩倍数越高越严重。如有些循环水系统，补充水中的细菌总数只有 10^2～10^3 个/mL，但循环水中的细菌总数可达 10^5 个/mL 以上，如杀生不利甚至高达 10^8 个/mL，这就造成系统中微生物的严重危害。

589 循环冷却水中有哪些常见危害的细菌？

循环冷却水中存在的细菌门类极多，但基本上属格兰氏(Gram)阴性类细菌，多能产生黏泥危害。下表是循环冷却水系统中常见的一些危害细菌，以及其适宜的生长条件。

冷却水系统中常见的细菌及其生长条件

真菌类型	生长条件		产生的问题
	温度/℃	pH值	
好氧性荚膜细菌	20～40	4～8 最适宜 7.4	形成严重的细菌黏泥
好氧芽孢细菌	20～40	5～8	产生黏泥，并生成难以消灭的芽孢
氧化硫细菌	10～37 最适宜 25～30	0.6～7.8 最适宜 2.0～3.5	使硫化物被氧化为硫或硫酸
厌氧硫酸盐还原菌	0～70 最适宜 20～55	5.5～9.0 最适宜 7.0～7.5	在好氧菌黏泥下生长，引起腐蚀，导致硫化氢的形成
铁细菌	0～40 最适宜 20～30	6～8 最适宜 微酸性 6～7	在细菌的外膜沉淀氢氧化铁，形成大量的黏泥沉积物
硝化菌群	5～40 最适宜 30	6.0～9.5	产生 NO_2^-，使水质变酸性，并严重影响氧化型杀生剂的作用，使水质全面恶化

590 什么是自养菌和异养菌？

按碳的营养来源不同，微生物分为自养菌和异养菌两大类。

自养菌（无机营养型） 能直接利用无机物如空气中二氧化碳

及无机盐类作为营养物来源，合成细胞所需要的碳源的微生物，叫自养菌。自养菌又分光能自养菌与化学能自养菌。如藻类和含叶绿素的细菌利用叶绿素吸收光能，从二氧化碳合成所需化合物的微生物叫光能自养菌。而化学能自养菌能氧化一定的无机化合物，利用产生化学能还原二氧化碳合成有机碳化物，这类细菌如硝化菌群、铁细菌、氧化硫细菌等。自然界中的化学能营养菌分布较光能营养菌普遍，对于自然界中氮、硫、铁等物质转化有很大作用。

异养菌　利用环境中的有机碳化合物进行氧化发酵得到细胞所需的营养物的菌种叫异养菌。它可以是不含叶绿素的。其中有些细菌生活在动植物尸体上吸收养料，这种营养方式叫腐生；有些细菌生活在活动的动、植物上吸收养料这叫寄生。在循环冷却水中异养菌利用水中的有机碳化合进行繁殖。一般常将用特定异养菌培养基培养出的细菌统称为异养菌。经有关研究人员监测分析，循环冷却水中的异养菌约分 60 个属。

591　为什么要测定循环水中的异养菌数？

循环冷却水中，以异养菌的生长繁殖最快，数量也最多，它代表水中大部分细菌的数量，所以一般测定时，常以异养菌的数量认作为水中细菌总数。80%～90%的异养菌的细胞壁外可形成荚膜。荚膜是一种细胞壁的变性外层，膨胀成为凝胶状，即为黏液层。所以大部分异养菌是能产生黏泥的细菌。产生生物黏泥对循环水危害很大。因此，测定异养菌数是循环冷却水处理日常监测的主要项目之一，每周要进行 1～2 次，监控指标小于 5×10^5 个/mL。测定的方法有平皿稀释法，平皿涂布法、TTC 显色法等。

592　铁细菌有什么特性和危害？应控制多少？

铁细菌不是细菌的科名或属名，而是分散在不同目、科、属中的有一定特性的细菌，在自然界分布很广。铁细菌为好氧化能自养菌，一般能生活在含氧少但溶有较多铁质和二氧化碳的弱酸性（pH 值 6～7）水中，在碱性条件下不易生长。例如在 pH 值为 7.8～8.3 的海水中通常不存在铁细菌。但 pH 值下降时，可能存在铁细菌。铁细菌在亚铁转化为高铁的过程中起催化作用，能将细胞内

的亚铁氧化为高铁，从而获得能量。

$$4FeCO_3 + O_2 + 6H_2O \longrightarrow 4Fe(OH)_3 + 4CO_2 + 能量$$

$$2Fe^{2+} + (x+2)H_2O + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow Fe_2O_3 \cdot xH_2O + 4H^+ + 能量$$

式中以碳酸盐为碳素来源，反应产生的能量很小。它们为了满足对能量的需要，必须要有大量的高铁，如 $Fe(OH)_3$ 的形成。这种不溶性铁化合物排出菌体后形成某种定型结构，其质量和体积总量要超过有生活力的微生物原生质的好几倍。铁化合物在细菌周围形成大量棕色黏泥，从而引起管道堵塞，同时它们在铁管管壁上形成锈瘤细节，产生点蚀。

冷却水中有铁细菌繁殖时，常出现浑浊度和色度增加，有时 pH 值也发生变化，发出异臭，铁的含量增加，溶解氧减少，水管等设备中有棕色沉淀物，水的流量减少。如果采集悬浮物进行显微镜下检查时，可以发现铁细菌的菌落或氢氧化铁鞘层。铁细菌是循环冷却水中重要危害微生物之一，是水处理监控的主要对象，监控指标每毫升小于 100 个。

593　氧化硫细菌有什么特性和危害？应控制多少？

氧化硫细菌为一种好氧性化能自养细菌，在无氧情况下不能生长，反之在氧非常多的环境中也不能生长，一般经常在氧与硫化氢同时存在的微好气环境中发现。

氧化硫细菌特别是硫杆菌属能把硫、硫化物或者硫代硫酸盐氧化成硫酸，甚至在局部区域中生成相当于 10% 质量分数的硫酸，使 pH 值降到 1.0～1.4，从而对铁管或水泥管产生腐蚀破坏。

$$2H_2S + O_2 \longrightarrow 2H_2O + 2S + 能量$$

$$2S + 3O_2 + 2H_2O \longrightarrow 2H_2SO_4 + 能量$$

$$Na_2S_2O_3 + 2O_2 + H_2O \longrightarrow Na_2SO_4 + H_2SO_4$$

氧化硫细菌也常与铁细菌共存。氧化硫细菌产生的黏质膜也可能堵塞管道，并使水发生臭气。氧化硫细菌的控制指标是$<1\times10^4$个/mL。

594 硫酸盐还原菌有什么特性和危害？应控制多少？

硫酸盐还原菌属兼性营养菌，既能利用有机碳化合物进行化能异养，又能利用矿物质进行化能自养，后者为次要。它是一种弧状的厌氧性细菌，体内有一种过氧化氢酶，能将硫酸盐（亚硫酸盐、硫代硫酸盐）还原成硫化氢，从中获得生存的能量，其反应如下：

$$H_2SO_4+8H^{+}+8e \longrightarrow H_2S-4H_2O+能量$$

$$CaSO_4+8H^{+}+8e \longrightarrow Ca(OH)_2+2H_2O+H_2S+能量$$

由于过氧化氢酶需在还原状态下才能存活，因此氧会使它们致死，故硫酸盐还原菌在有氧的情况下是不会繁殖的，所以它常生存在氧化硫细菌的沉积物下面。

硫酸盐还原菌在冷却水系统中繁殖生长的潜在危险是很大的，因为这种菌最适宜生长温度是 20～30℃，而且有的还可在高达 55～60℃的温度下存活，生存的 pH 值范围是 5.5～9.0，加上冷却水中含有一定的硫酸盐，特别是在加硫酸调 pH 的系统中，硫酸根含量更高，一旦其他细菌形成的黏泥较多，或水的浑浊度很高，产生了较多的沉积物时，这就给硫酸盐还原菌提供了良好的生长环境。

冷却水系统中如果有大量硫酸盐还原菌繁殖生长时，则会使系统发生严重的腐蚀，因为这种菌还原生成的 H_2S 有臭味并会腐蚀钢铁，形成黑色的硫化铁沉积物，这些沉积物又会进一步引起垢下氧的浓差电池腐蚀和电偶腐蚀。

当这种菌大量发生时，仅加入氯气杀菌效果不好，因 Cl_2 会与 H_2S 起反应而被消耗掉，所以需投加其他的杀生剂。硫酸盐还原菌的监控指标是每毫升不得超过 50 个。

595 什么是氮化细菌和硝化菌群？有什么特点和危害？

氮化细菌包括氨化菌、硝酸菌（又称硝化菌）、亚硝酸菌（又称亚硝化菌）和反硝化菌。在土壤中常见。

氨化菌为好氧性异养菌，能使水中有机态氮化合物转化为无机态氮（氨）。

硝酸菌、亚硝酸菌和反硝化菌被称为硝化菌群。硝酸菌及亚硝酸菌为化能自养菌。反硝化菌为兼性营养菌。

亚硝酸菌能使氨氧化成亚硝酸：

$$2NH_3+3O_2 \longrightarrow 2HNO_2+2H_2O+能量$$

硝酸菌能将亚硝酸氧化成硝酸：

$$2HNO_2+O_2 \longrightarrow 2HNO_3+能量$$

反硝化菌起反硝化作用。广义的反硝化作用是指一切硝酸盐的还原作用，包括硝酸盐还原成亚硝酸盐、铵盐以及其他还原态氮化物。许多反硝化菌能进行以下反硝化反应。

$$HNO_3+2[H] \longrightarrow HNO_2+H_2O$$

$$HNO_3+8[H] \longrightarrow NH_3+3H_2O$$

狭义的反硝化作用是指硝酸盐因微生物作用生成分子态氮的作用。但能进行这类反硝化作用的细菌不多。某些反硝化细菌，如反硝化杆菌、反硝化硫化细菌可进行这种反应，但必须在缺氧的条件下才能进行。故在循环水系统中不大可能发生生成分子态氮的反硝化作用。

硝化菌群对水质的危害很大，尤其是反应产物中的亚硝酸根，它能与氯起反应，从而大大地降低了氯的杀菌效果，使水质恶化。产物中的硝酸根，不但对水质的碱度产生影响，而且会使水的 pH 下降，并使加氯杀菌变为困难，微生物的危害难以控制。在循环水中的控制指标应为：亚硝酸菌＜100 个/mL，反硝化菌＜1000 个/mL，氨化菌＜1×10^5 个/mL。

596　循环冷却水中含氨有何危害？

循环冷却水中含氨主要是由于空气和水源中含氨或含氨的换热设备泄漏而将氨带入冷却水系统中的。水中含氨的危害主要是由于硝化菌群能使氨氧化成为亚硝酸根，而亚硝酸根为还原性物质，在通氯杀菌时，只有将亚硝酸根全部氧化为硝酸根之后，才有游离余氯出现，否则水中就根本不会存在游离余氯，因而也就不能控制微生物。亚硝酸根转化为硝酸根，从理论上说细菌也会起一定作用，但主要是靠通氯来完成。水中亚硝酸根含量大于 1mg/L 时，通氯

杀菌就开始产生困难，当亚硝酸根含量大于 10mg/L 时，困难就很大，往往出现氯的消耗高、余氯不达标、化学耗氧量（COD）增长、浑浊度上升、水变黑、系统黏泥量增加的情况，造成水质恶性循环。在这种情况下，使用氧化性杀生剂的效果就很差，应该改用非氧化性杀生剂，使水质恢复正常，亚硝酸根下降后再用氯杀菌。所以冷却水中要严防含氨的换热器泄漏，控制氨含量，一般认为水中氨含量＞10mg/L 时，就易造成微生物的危害。

597　怎样全面监测循环冷却水中的微生物？

循环冷却水中微生物所造成的危害是十分严重的，如果要在微生物造成危害之后采取措施往往是事倍功半还要耗费大量的杀生剂和金钱。因此，事先全面监测循环冷却水的微生物情况是十分必要的。全面监测包括：①物理观测；②化学分析；③黏泥测定；④微生物监测四方面，微生物监测又分藻类、真菌及细菌三方面。只有通过全面监测才能对冷却水中微生物的情况作出正确的判断，有时仅仅依靠某一项监测结果还不能反映冷却水中微生物的真实情况。

598　通过哪些化学分析项目可以了解循环冷却水中微生物的动向？

了解循环冷却水中微生物的动向可以通过以下化学分析项目进行观察：

① 余氯（游离余氯）　加氯杀菌时要注意余氯出现的时间和余氯量，如余氯出现的时间较正常时间长得多，或余氯量总是达不到规定的指标，这时就要密切注意循环冷却水中微生物的动向，因为微生物繁殖严重时就会使循环冷却水中耗氯量大大地增加。

② 氨　循环冷却水中一般不含氨，但由于工艺介质泄漏或吸入空气中的氨时也会使水中出现含氨，这时不能掉以轻心，除积极寻找氨的泄漏点外，还要注意水中是否含有亚硝酸根，水中的氨含量最好是控制在 10mg/L 以下。

③ NO_2^-　当水中出现含氨和亚硝酸根时，说明水中已有亚硝酸菌将氨转化为亚硝酸根，这时循环冷却水系统加氯将变为十分困难，耗氯量增加，余氯难以达到指标，水中 NO_2^- 含量最好是控制

在＜1mg/L。

④ 化学需氧量（COD） 水中微生物繁殖严重时会使 COD 增加，因为细菌分泌的黏液增加了水中有机物含量，故通过化学需氧量的分析，可以观察到水中微生物变化的动向．正常情况下水中 COD 最好＜5mg/L（$KMnO_4$ 法）。

599 怎样通过物理观测了解循环冷却水系统中微生物的动向？

循环冷却水系统中微生物的动向除了用化学分析进行观测外，还可以通过以下物理观测了解其动向。

① 色 循环冷却水中的微生物如能控制在正常指标以下时，一般水色比较透明、清澈，如微生物为害时则水色变暗、变黑，色度较大。

② 嗅 在正常情况下循环水不会有异味，当发现循环水发臭或带有一种腥味时，则水中的微生物已开始危害了。

③ 观察冷却塔黏泥 冷却塔上的配水池和配水槽是水中黏泥和菌胶团最易沉积的地方。正常情况下可以清楚地看见各个出水孔，有危害时这些部位会出现黏泥或菌胶团，严重时配水池和配水槽上会有一层厚厚的黏泥甚至堵塞出水孔，这说明水中的微生物繁殖已很严重了。

④ 观察藻类 冷却塔顶部配水装置和塔的内壁、支撑构件上是藻类最易生长的地方，对这些部位应经常观察是否出现藻类，因为藻类用肉眼还是可以观察到的。

⑤ 观察挂片 如果循环冷却水系统中的腐蚀挂片是装在透明的有机玻璃管里，则通过观察挂片也可以了解水中微生物的动向，正常情况挂片上不会出现黑色的黏泥或菌胶团，但当微生物为害时，则挂片上也会布满黏泥或菌胶团。

⑥ 测定循环水中的黏泥量 这是一个行之有效的办法，它对于观测、判断水中微生物的动向起了主要的作用。

600 循环水中的黏泥量是如何测定的？

循环水中黏泥量的多少直接反映出系统中微生物的危害情况，因此黏泥量的测定非常重要，一般是采用生物过滤网法。生物过滤

网是用 25# （163 目）的筛绢制成漏斗。水量 $1m^3$ 的循环冷却水可用小泵经转子流量计以一定的流速（通常为 1m/s）通过生物过滤网。生物过滤网需浸入水箱中，以免水流冲击。循环水中的黏泥物质被截留在生物过滤网滤斗内，然后将这些被截留的物质移入 100mL 的量筒中，静置 30min，读出沉降在量筒底部黏泥状捕集物的容积（mL），那么，黏泥量由下式计算得（mL/m^3）：

$$\text{黏泥量}=\frac{\text{沉降捕集物容量(mL)}}{\text{进生物过滤网的通水量}(m^3)}$$

对生物黏泥量应每天测定一次，其监控指标应小于 $4mL/m^3$。图 5-4-1 是生物黏泥量测定流程示意图。

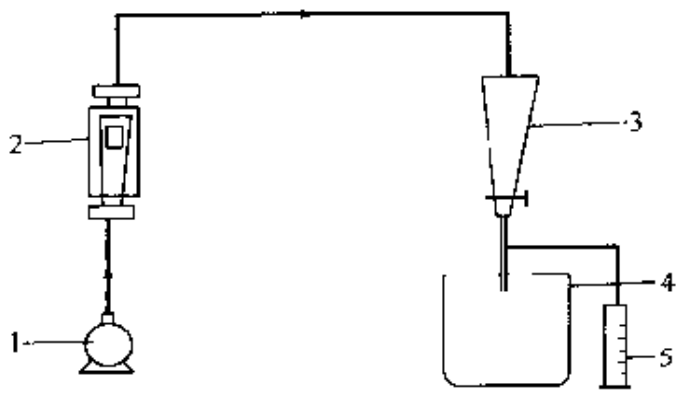


图 5-4-1　生物过滤网法黏泥量测定流程示意图

1—小水泵；2—流量计；3　生物过滤网；4—水箱；5—量筒

601　循环冷却水系统中的藻类怎样监测？

在循环水系统或贮水池中都有各种藻类生长，尤其是使用磷酸盐的冷却水系统如不注意对微生物的控制，藻类的繁殖生长要造成极大危害。循环水系统中的藻类常生长在冷却塔的配水装置、塔的内壁、淋水板和支撑构件上，在换热器内则不会生长藻类。

藻类微生物的分析测定，通常是在专门的分析室内进行，一般用以下方法进行检测。

① 设备表面藻类的测定　将从设备表面取来的藻样少许，放在载玻片上滴上一滴水，用镊子和解剖针把藻团尽量分开，盖上盖玻片，然后放在生物显微镜下观察，根据形态定出属名和种类。

② 循环水中藻类的测定　取循环冷却水样 1L，倒入离心管中经过离心沉淀，用细的移液管把离心管底的浮游生物取出来放在载玻片上，再用移液管取一滴离心管中部的清液滴于玻片上，盖上盖玻片，放在生物显微镜下观察，根据形态定出属名和种类。

602　菌藻检测有哪些基本方法?

检测循环冷却水或污垢中的菌藻种类及数量方法相同，水样中的菌藻数以个/mL 表示，污垢需先用生理盐水稀释到一定稀释度的水样，测出水样中菌藻数之后，再折合为每克（g）湿污垢的菌藻个数。有以下三种基本的检测方法。

① 镜检法　用血球计数板在生物显微镜上直接计数或判别属种。血球计数板是一种载玻片，上有 $0.1mm^3$ 的空间，面积为 $1mm^2$，刻有 400 小格便于计数。将水样置入后可根据小格内的菌藻数和水样稀释度计算出菌藻每毫升的个数，此法多用于藻类属种判别及计算，也可用于测细菌总数，但因其误差大，多不用此法测。

② 标准平皿计数法　又称平板法，即将不同稀释度的水样接种到无菌培养皿中，加入培养基，在培养箱中培养，这种培养基中加有凝固剂，冷却后为固体，使菌种不移动，每个菌种经培养后增殖成肉眼可见的菌落，易于计算。由于不同菌藻所要求的培养基成分和 pH 值不同，所以一种培养基不可能检出水中总细菌量，只能用某种特定培养基检测某一特定菌藻，如异养菌、真菌、氨化菌及藻类。培养温度影响菌落生长速度和准确度，较合适的条件是：

名　称	培养温度/℃	培养时间	培养 pH 值	一般检测频率
异养菌	28～32	72h	7.2～7.4	每周 1～3 次
真菌	28～32	72h	4.5～5.5	每周或每月 1 次
氨化菌	28～32	72h	7.0	每月 1 次
蓝藻、裸藻	35	21d		不定期
绿藻	25～35	21d		不定期
硅藻	25	21d	7.0	

异养菌培养基的成分一般为：

牛肉膏	3g	琼脂	15～20g
蛋白胨	10g	蒸馏水	1000mL
NaCl	5g		

真菌培养基一般用察氏培养基，其成分为：

$NaNO_3$	3g	$FeSO_4$	0.01g
K_2HPO_4	1g	蔗糖	20g
KCl	0.5g	琼脂	20g
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	0.5g	蒸馏水	1000mL

③ 液体稀释法　将不同稀释度的水样加入试管，用某种特定液体培养基培养，使细菌在生命活动中产生一定化学物质，根据有无这种物质，判断有无这种细菌。由于采用稀释绝迹法，水样是按一系列的10倍稀释的（如稀释度10^{-1}、10^{-2}、10^{-3}、10^{-4}……）。低稀释度的试管生长细菌，高稀释度的不生长细菌，则可根据稀释法测数统计表得到每毫升的菌数。为判定不同细菌不仅培养基的成分和pH不同，而且往往要加入不同的指示剂。下表中七种菌是用此法检测的，培养温度均为28～30℃，检测频率一般每月一次。

名　称	培养时间/d	培养pH值	鉴定有无该细菌的方法
氧化硫细菌	14	6.0～6.2	加入$BaCl_2$试剂有白色沉淀，证明有SO_4^{2-}产生
硫酸盐还原菌	21	7.0～7.2	试管中有黑色沉淀，并有H_2S味
铁细菌	14	6.8～7.0	原液棕红色消失，产生褐、黑色沉淀，并用镜检验证
氨化菌	7		加入萘氏试剂，出现黄或褐色沉淀，证明有氨存在
亚硝化菌	14	7.2	加入格里斯试剂溶液呈红色，证明有NO_2^-存在
硝化菌	14	7.2	加入二苯胺试剂溶液呈蓝色，证明NO_2^-已氧化成NO_3
反硝化菌	7	7.0～7.2	管中有气体，加入萘氏试剂，出现黄或褐色沉淀，证明有氨存在

603　细菌检测有什么简易新方法？

近年来国内外研制了许多细菌检测的简易新方法，这些方法多是针对平皿法、稀释法和镜检法存在的缺点加以改进的。用平皿法

和稀释法需在试验室消毒、配制各种培养基等，工作耗时量大，新的方法多使这些工作商品化，用新的检测仪器或器皿方便现场使用，提高了工效，但随之会使检测费用增加。平皿法和稀释法虽相对较准确，但培养时间长，出数据慢，新的方法则多能缩短检测时间，但有的准确度略差，并需与标准平皿计数法或稀释法作对比试验校正检测数据，新的方法如下。

① 浸片法　这是一种用已消毒并载有培养基的试片代替标准平皿的方法，将测试片浸入水中 5s，取出放入无菌培养袋密封，经 12～24h 培养，纸片上出现微红色的菌落，即数得细菌总数。或是一种两面分别涂以 BHI 和改良 DHL 培养基的生物测试片浸入水中片刻，再放入套管中培养 48h，根据菌落密度和颜色，判定细菌总数。

② 测试瓶法　又称小瓶法，用已消毒并装有培养基的密封小瓶代替稀释法的试管，采用绝迹稀释法按规定注入水样，并置于 30～37℃下培养 1～3d，有的为 7d，进行细菌计数。

③ 亚甲基蓝法　又称褪色法，利用蓝色亚甲基蓝（又称美蓝）作为受氢体，根据亚甲基蓝褪色时间来测定脱氢酶的活力高低的原理测异养菌数，按褪色时间与平板菌落计数法的标准曲线得出水中含菌数，可使培养时间缩短到几至十几小时。

④ 比浊法与比色法　根据细菌生长引起菌液浑浊度或颜色变化面检测。

⑤ 阻抗法　由细菌生长引起培养基的化学变化，并以阻抗的变化形式测知。

⑥ 电位法　利用细菌在培养液中的生长和代谢作用，发生电极电位随时间变化来测定。

⑦ 发光法　ATP（三磷酸腺苷）存在于菌体内，与荧光素酶相互作用而发出生物光这一原理，制造 ATP 光度计检测细菌总数。

⑧ 截留法　用涂有一种特殊着色溶液的微孔过滤膜来截留水中细菌，由薄膜变色来快速检测细菌数。

此外，还有如 JLQ-S_1 型半自动菌落计数器、美国 Biotren Ⅲ型全自动菌落计数器、全自动螺旋菌落计测器等。

604　控制循环冷却水系统中的微生物有哪些方法？

控制微生物不是消灭微生物，只是将其控制在不引起危害的一定数量之内。控制微生物的数量不是根本目的，主要的目的是控制微生物黏泥及其带来的污垢和腐蚀的危害。控制好循环水中的微生物有以下原则。

(1) 循环水系统中的杀生措施不可缺少。循环水的环境使微生物以成千上万倍的速度繁殖生长。即使补充水中微生物很少，循环水中微生物也可能造成危害。

(2) 加强补充水的前处理，严防危害物质进入系统。即避免大量微生物、特别是黏泥进入系统。也就是以预防为主。因为浓缩倍数提高后使黏泥浓缩，一旦黏泥危害，很难排出系统外。

(3) 合理排污，尽力设法将有害物质排出系统外。

控制微生物需采取多种方法综合处理。以下是控制的主要方法，可以单独采用，也可多种方法齐用。

① 混凝沉降法　用地表水作补充水时，一般需经混凝处理。混凝处理的主要作用是使悬浮物沉淀，降低水的浑浊度。与此同时，细菌、藻片、黏泥、有机物等也能随混凝过程除去一部分。据调查，约可除去微生物的 80% 以上，异养菌数可降至 10^3 个/mL 以下。有机物（化学耗氧量，COD）也可除去 50% 左右。当石灰软化与混凝沉淀同时进行时，水的 pH 值一般控制在 9～11 的范围。在此高 pH 值下，一部分微生物不能适应，而难以生存繁殖。

② 过滤法　地面水或地下水一般均经过滤后再补入循环水系统。过滤器在滤除悬浮物质的同时，也滤除了部分微生物和黏泥。有些厂经考核，原水经混凝沉淀及过滤之后，各种菌数均减少 90% 以上。

循环冷却水系统中常进行旁流处理，一般是安装旁滤池。旁滤池为装有石英砂的过滤器。通常是将循环系统中 2%～5% 的水量通过旁滤池过滤之后再返回系统。旁滤池定期或不定期进行反洗，

将过滤的脏物（悬浮物、微生物、黏泥等）排出系统之外，减少其对系统的危害。反洗水往往很脏很臭，含大量微生物及黏泥。旁滤池如使用得当，比无旁滤系统的浑浊度减少50%以上，黏泥量也约减少50%以上。

③ 化学杀生法　化学杀生法是向循环冷却水系统中投加无机或有机的化学药剂，杀死或抑制微生物生长繁殖，从而控制微生物。该化学药剂为杀生剂，或称杀菌剂、抑菌剂或杀菌灭藻剂。各种杀生剂以各种方式杀伤微生物。有的能穿透其细胞壁，破坏细胞体内的蛋白质，使微生物死亡。有的能破坏微生物中的酶，使其新陈代谢失调，从而窒息死亡或抑制繁殖。有的阳离子表面活性剂能降低细胞壁的可透性，影响微生物吸收营养物及体内废物的排泄，使微生物死亡。

化学杀生法是控制微生物的通用的有效方法。一般为间歇加药。杀生后因菌数降低，黏泥量也相应降低。不论补充水在前处理中是否已经除过微生物，在循环系统中都有必要使用杀生剂。即使系统未进行缓蚀阻垢的化学处理，也有必要进行化学杀生。污染严重的原水，也可先进行化学杀生，再补入循环水系统。

控制微生物应采取多种综合措施。例如，冷却塔周围植树种草坪防风砂，冷却塔及水池加盖遮阳光防藻，冷却塔涂料防藻，池底排污排除黏泥，泄漏的换热器就地排污减少污染物等等。这许多措施都是控制微生物的辅助方法。

605　昆虫在循环冷却水系统中有何危害？如何防止？

昆虫虽不属于微生物的范畴，在循环冷却水系统中造成的生物危害也与微生物相似，有时危害也很严重。有些环境中昆虫较多，特别在南方地区夏季昆虫大量繁殖，往往随空气带入冷却塔进入循环系统。较常见的甲壳虫类危害较大。某种甲壳虫的粗细与水冷却管的内径相近，能够堵塞管程换热器的管口，阻止水流通，也能沉积在壳程换热器的管间，因而影响传热，使换热器超温，同时造成垢下腐蚀。昆虫的生物性质带来的特殊危害是：在水中缓慢解肢腐烂，腐殖质使水中产生咖啡色的泡沫，水中的有机物质（COD）

含量增高。有时候甚至在甲壳虫进入系统之后两个月才发生大量泡沫，泡沫甚至影响到系统中液位计的准确性。

防止昆虫危害最有效的措施是严格灯火管制。即在塔区（冷却塔附近）夜间不能开灯，或在塔周围设杀虫灯或探照灯将昆虫引离冷却塔。就是说，预防昆虫进塔最重要。其次是，必须加强循环水泵前滤网的管理，滤网如有破损需及时检修。还应随时清理附着在滤网上的昆虫尸体。甲壳虫虽不能穿过滤网，但长期附着在滤网上会慢慢解肢腐烂，最后还会随水流进入循环系统，造成危害。

当甲壳虫已经进入系统时，要在不停车的情况下将其清除出系统是十分困难的工作。采取的措施可用换热器反向冲洗或壳程换热器空气搅动，然后就地排污。但彻底清除还需停车处理。使用杀生剂不能清除甲壳虫。

606　杀生剂如何分类？什么是氧化性和非氧化性杀生剂？

化学杀生法所用的杀生剂可从不同角度进行分类。按其对微生物杀生的程度可分为微生物杀生剂和微生物抑制剂。前者能在短时间内产生各种生物效应，真正杀死微生物，多为强氧化剂。后者不能大量杀死微生物，而是阻止其繁殖，以达到控制微生物数量的目的。按照杀生剂的化学成分可分为无机杀生剂和有机杀生剂。按照杀生剂的杀生机制可分为氧化性杀生剂和非氧化性杀生剂。

氧化性杀生剂是具有氧化性质的杀生药剂，通常是强氧化剂，能氧化微生物体内起代谢作用的酶，从而杀灭微生物。卤素中的氯、溴、碘和臭氧、双氧水、过氧乙酸、过一硫酸盐、高铁酸钾等都属于氧化性杀生剂。但在循环冷却水中最常用的只是氯及其化合物，如液氯、次氯酸钠、次氯酸钙、漂白粉、氯化异氰尿酸及二氧化氯[1]。近年溴化合物已用于循环冷却水系统，其发展也越来越受到重视。

非氧化性杀生剂不以氧化作用杀死微生物，而是以致毒剂作用

---

[1] 二氧化氯的性质、杀生效果及特点见本书第二章（四）清毒部分的193～197题。

于微生物的特殊部位，以各种方式杀伤或抑制微生物。非氧化性杀生剂的杀生作用不受水中还原性物质的影响，一般对 pH 值变化不敏感。非氧化性杀生剂的品种很多。按其化学成分有氯酚类、有机硫类、胺类、季铵盐类、酰类、烯类、醛类、重金属类等。考虑其杀生力、排放余毒及费用等各方面的情况，实际在循环冷却水系统中常用的品种并不多。最常用的是季铵盐、二硫氰酸甲酯、异噻唑啉酮、戊二醛等。近年开发的季鏻盐也已用于生产。

循环冷却水系统的杀生一般以氧化性杀生剂为主，多采用氯、异氰尿酸或二氧化氯为经常性杀生剂，辅助使用非氧化性杀生剂。氧化性杀生剂的杀生力强、价廉，其不足之处是在水中还原性物质含量多时药剂消耗量大、效率降低。非氧化性杀生剂可以弥补氧化性杀生剂之不足，它对污垢的渗透及剥离作用也优于氯。非氧化性杀生剂如作为主要杀生手段经常地使用则费用很高，故一般与氧化性杀生剂配合使用，常常在单用氧化性杀生剂有困难的时候辅助使用。

607　氯与溴杀生剂各有何特点？冷却水中含氨对氯杀生有何影响？

氯与溴都是氧化性杀生剂。二者溶解在水中，和水反应生成次氯酸或次溴酸：

$$Cl_2 + H_2O \rightleftharpoons HClO + HCl$$

$$Br_2 + H_2O \rightleftharpoons HBrO + HBr$$

次氯酸或次溴酸在水中发生以下离解反应：

$$HClO \rightleftharpoons H^+ + ClO^-$$

$$HBrO \rightleftharpoons H^+ + BrO^-$$

一般认为，起杀生作用的主要是 HClO 或 HBrO，而 ClO^- 或 BrO^- 的杀生作用很低。电离的程度取决于水的 pH 值。由图 5-4-2 可见，在 pH 值为 6.5～9.0 范围内 HClO 发生强烈电离。当 pH＜6.5 时，游离氯几乎完全以次氯酸形式存在。而 pH＞9.0 时，游离余氯大部分以次氯酸根形式存在，次氯酸含量很少。HBrO也随pH值升高而离解，但离解同样摩尔分数时，HBrO的pH值要高

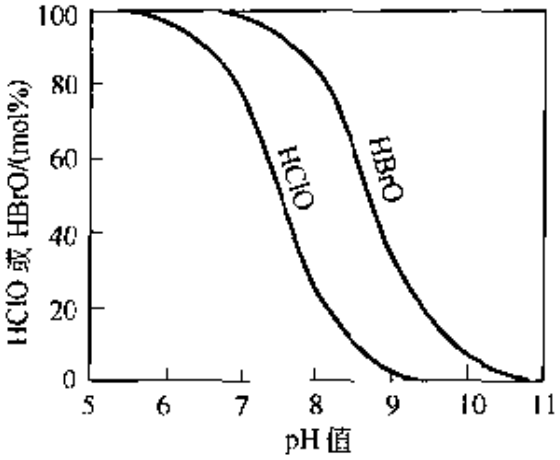


图 5-4-2　次氯酸及次溴酸含量与 pH 值的关系

些。按电离常数为 $K_{HClO}=3.2\times10^{-8}$（20℃）、$K_{HBrO}=2.06\times10^{-9}$ 计，HClO 及 HBrO 的摩尔分数见下表。

pH 值	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5
HClO 含量/(mol%)	99.7	99.0	96.9	90.8	75.8	49.7	23.8	9.0	3.0	0.98
HBrO 含量/(mol%)	100.0	99.9	99.8	99.4	98.0	93.9	82.9	60.5	32.7	13.3

由此可见，pH 值在酸性时氯的杀生效果较好，pH 值升高时效果下降，氯耗增加。如用溴杀生，不仅酸性时杀生效果好，碱性运行时效果也很好。所以，在碱性运行时，溴杀生比氯有利。在实际使用时，还有其他因素影响氯耗及杀生效率。例如，另一种看法认为 pH 值高时，微生物的繁殖减慢，pH 值低时，微生物黏泥分泌量增加。因此，实际上 pH 值达到 8.5 时，氯的杀生效率仍很好。也有不少装置 pH 运行值达到或超过 9.0 时仍能用氯杀生，达到微生物控制的要求。

水中含氨时，HClO 与氨会起作用，产生氯胺类化合物，称为化合性氯。其成分随水的 pH 值而定。反应式如下：

pH>7.5　　$HClO+NH_3 \rightleftharpoons NH_2Cl+H_2O$

pH=5.0～6.5　　$2HClO+NH_3 \rightleftharpoons NHCl_2+2H_2O$

pH<4.4　　$3HClO+NH_3 \rightleftharpoons NCl_3+3H_2O$

NH_2Cl、$NHCl_2$ 及 NCl_3 分别为一氯胺、二氯胺及三氯胺。水在碱

性运行时主要存在一氯胺，酸性运行时则产生二氯胺（见图 5-4-3）。当水中不含 HClO 时，氯胺会缓慢离解放出 HClO，因而也有持久性的杀生作用。但其杀生作用比氯差得多。所以水中含氨实际上是消耗了氯，使氯效大大降低。

溴也能与氨生成溴胺化合物，但一溴胺和二溴胺的杀生力与次溴酸相近，故一般认为含氨水用溴杀生有利，溴耗不增加。但含氨水中如存在硝化菌群会将氨转化成 NO_2^-，仍会多消耗溴剂。

溴的杀生速度比氯快，对金属的腐蚀性比氯低。从环保角度看，溴的衰减速度快，排放后无污染。环保对余氯量有严格要求，而对余溴量无要求，这方面也优于氯。

使用溴杀生需要在现场发生，因使用不便及价格等原因，未见用于循环水中。近年国内外均研制生产了多种氧化性溴化合物，已经用于循环水系统，其发展越来越受到人们的重视。

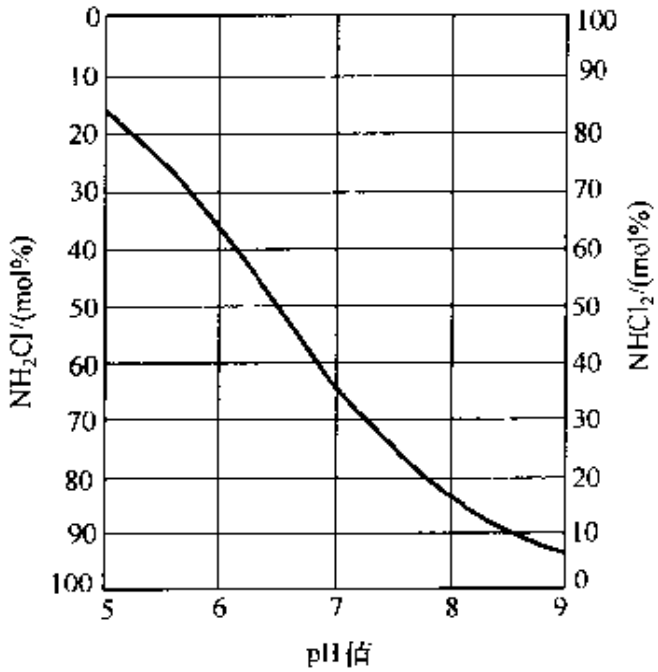


图 5-4-3　一氯胺与二氯胺所占的摩尔分数与 pH 值的关系

608　循环冷却水系统怎样进行液氯杀菌？

氯加入水中要消耗在微生物或黏泥等产生的有机物质上，还要被含活性氮的化学物质如氨、聚丙烯酰胺等所消耗而形成氯胺，因

此，只有满足了这些需氯的消耗后，水中才会出现游离有效氯，这个过程称为“转效点氯化”，也即往水中加氯，只有过了转效点后，加入的氯才会产生多余的游离有效氯，该游离的剩余氯，常简称为余氯。

为保证杀生效果，在冷却水系统中要保持一定的余氯量和维持一定的接触时间，余氯量和接触时间要视系统的情况而定，一般循环冷却水的回水余氯量保持在 0.3～1.0mg/L。

投氯的方式有连续和间歇两种。连续加氯是在水中经常保持一定的余氯量，这样能提高杀生效果，但费用较大，故循环冷却水中一般均采用间歇式加氯，即在一天中间歇地加 1～3 次，或每两天加氯一次，每次达到规定的余氯量后维持一定接触时间。

加氯装置有两种：一种是干的气体氯化器，它利用合适的扩散器供给系统氯气；另一种液体氯化器是利用水射器将水和氯气混合后，再加入系统中。在敞开式冷却水系统中一般是将氯加入冷水池的水面下，在正常水位下 2/3 水深处，并远离水泵的吸水口，这样可使氯在水池中有充分的接触时间。

余氯量的监测应在系统的终端进行，即在入塔的回水管上采样，因为终端如能保持一定的余氯量，则整个系统都可保证有余氯存在。

氯加入系统，会与水中碱度中和，而消耗于有机物产生的 H_2S 和 SO_2 时，会产生氢离子，其反应如下：

$$Cl_2 + H_2O \longrightarrow HCl + HClO$$

$$Ca(HCO_3)_2 + 2HCl \longrightarrow CaCl_2 + 2H_2O + 2CO_2$$

$$H_2S + 4Cl_2 + 4H_2O \longrightarrow 10H^+ + 8Cl^- + SO_4^{2-}$$

$$Cl_2 + SO_2 + 2H_2O \longrightarrow 4H^+ + 2Cl^- + SO_4^{2-}$$

碱度减少和反应生成的 H^+ 会降低循环冷却水 pH 值，因此，在加氯的过程中，为避免循环水 pH 值过于偏低，必须中断或减少为调 pH 而投入的酸量。

609　什么是次氯酸盐杀生剂?

次氯酸盐也是氯型氧化性杀生剂。常用的有次氯酸钠

(NaClO)、次氯酸钙［或称漂粉精，$Ca(ClO)_2$］及漂白粉［CaCl(ClO)］。次氯酸盐为固体药剂，由于价格相对较贵，过去多用于小规模饮用水的消毒。近年来在大型循环冷却水系统也有应用。当用较高浓度次氯酸盐时，对系统有良好的剥离作用，可以用来处理设备上沉积的黏泥。

次氯酸盐溶于水中后能离解产生次氯酸，因此其杀生作用与氯相似。

$$NaClO+H_2O \rightleftharpoons HClO+NaOH$$

$$Ca(ClO)_2+2H_2O \rightleftharpoons 2HClO+Ca(OH)_2$$

$$2CaCl(ClO)+2H_2O \rightleftharpoons 2HClO+Ca(OH)_2+CaCl_2$$

HClO 的离解百分率与 pH 值有关。故次氯酸盐的杀生效果也与 pH 值有关。pH 值低时，杀生能力较强。

循环水质是结垢型时，为避免结钙垢，一般选用次氯酸钠。水中含钙量少的腐蚀型水则宜选用次氯酸钙或漂白粉。

次氯酸盐价廉、来源方便，运输和使用都比较安全。但贮存期不宜长，以防分解失效。

610　什么是氯锭？

氯锭是一种锭剂氯型杀生剂，分钙型及钠型两种。钙型氯锭加入水系统后水解成次氯酸（HClO）和氢氧化钙，钠型水解成次氯酸和氢氧化钠。次氯酸为有效氯，起氧化杀生作用。

氯锭由一定组分的原料压制而成。一般为 ϕ30 的白色锭剂，每锭质量 20g 左右，含有效氯为 55%～60%。加工好的锭剂在真空下密封于小塑料袋中，一般每袋 2kg。20～25 小袋装入大塑料袋，并用铁桶密封包装，便于长期贮存。

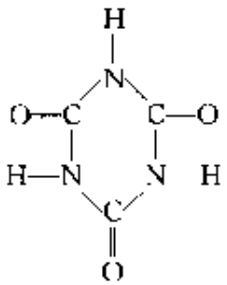
氯锭可以代替液氯、次氯酸钠、次氯酸钙杀生，有使用方便的优点。可以不设加氯设备及计量装置，使用时按小袋计量，拆去塑料袋放入带孔篮筐或网袋中，悬挂浸于循环水池中使其逐渐水解。由于锭剂缓缓溶解，故可使余氯保持时间长，投药间隔可以延长。加药周期钠剂可 24h 以上，钙剂可 48h 以上。每次加药剂约 10mg/L。一般钙剂宜在 pH 值＜8.3 时使用。硬度高易结垢或 pH

值高的水宜选用钠剂。由于钙剂溶解较慢，投药时宜将药挂在水流湍急处，钠剂宜在水流平缓处。

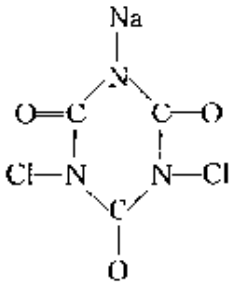
氯锭虽有药性持久、计量包装、便于贮存、使用安全方便等优点，但价格贵是其不足。

611 什么是氯化异氰尿酸杀生剂？

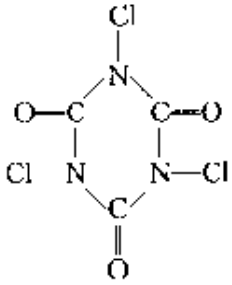
氯化异氰尿酸又称氯化三聚异氰酸，为白色粉末状或颗粒状氧化性杀生剂。氯化异氰尿酸由异氰尿酸氯化后制得。通常使用的是二氯化异氰尿酸钠（商品名称为优氯净，SDC）及三氯化异氰尿酸（商品名称为强氯精）两种。氯化异氰尿酸在水中能水解生成次氯酸与异氰尿酸，其杀生作用与氯相同。其结构式如下：



异氰尿酸



二氯化异氰尿酸钠



三氯化异氰尿酸

异氰尿酸、二氯化异氰尿酸钠及三氯化异氰尿酸的物理化学性质

项　　目	异氰尿酸	二氯化异氰尿酸钠	三氯化异氰尿酸
缩写名	ICA	DCCNa	TCCA
分子式	$C_3O_3N_3H_3$	$C_3O_3N_3Cl_2Na$	$C_3O_3N_3Cl_3$
相对分子质量	129.08	219.98	232.44
有效氯理论值/%		64.5	91.5
有效氯代表值/%		61.0	90.0
熔点(分解)/℃	330	240～250	225～230
密度/(g/cm³)			
粉末状	0.50～0.65	0.50～0.65	0.55～0.70
颗粒状	0.80～0.85	0.90～0.96	0.92～0.98
1%溶液的pH值	3.5～4.3	5.5～6.5	2.8～3.2
溶解度(25℃水)/(g/100g)	0.3	25	1.2
大鼠 LD_{50}/(mg/kg)	>5000	1670	750

氯化异氰尿酸贮存稳定性好、使用方便、溶解性好，在中小型

循环冷却水系统中有的用来代替氯作杀生剂，使用剂量一般为20～25mg/L。氯化异氰尿酸也可制成片剂，直接投入冷却塔水池中作缓溶杀生剂。因其处理费用较氯高，故在大型系统中应用较少。

612 哪些溴化合物可用于循环冷却水？

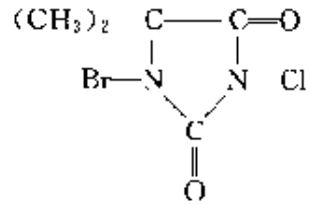
循环冷却水中尚未见使用溴杀生，但近年国内外已有多种氧化性溴化合物用于循环水系统，较有发展前景的有以下品种。

① 卤化海因类　已有报道的品种见下表。

卤化海因类杀生剂

名　　称	别　　名	缩写名	分　子　式
1-溴-3-氯-5,5′-二甲基代乙内酰脲	溴氯二甲基海因	BCDMH	$C_5H_6O_2N_2BrCl$
1,3-氯-5,5′-二甲基代乙内酰脲	二氯二甲基海因	DCDMH	$C_5H_6O_2N_2Cl_2$
1,3-溴-5,5′-二甲基代乙内酰脲	二溴二甲基海因	DBDMH	$C_5H_6O_2N_2Br_2$
溴 氯-甲基乙基代乙内酰脲	溴氯甲乙基海因	BCMEH	$C_6H_8O_2N_2BrCl$

其中较有代表性的是 BCDMH，其结构式为：



卤化海因类为缓慢释放型氧化性杀生剂。商品为粉剂或片剂。BCDMH在水中水解，以次溴酸和次氯酸的形式释放溴和氯。释放次溴酸的反应很快发生，而释放次氯酸的反应很慢，后释放的次氯酸在水中又与溴离子发生以下反应：

$$Br^- + HClO(或\ ClO^-) \longrightarrow HBrO(或\ BrO^-) + Cl^-$$

次溴酸是杀生的关键活性组分。用此类缓慢释放型产品比单质溴的杀生效率高，pH 值的适用范围广，在去除和防止生物黏泥方面的效果也比氯好得多。

国内商品名称为菌藻清的产品，系白色结晶粉末，熔点＞158～164℃，含量≥97%，干燥失重≤0.5%，溴含量≥30%，氯含量≥14%。推荐每日加药量为 1.2～2.4mg/L。

② 活性溴化合物　是由溴盐（如 NaBr）与氯反应制得的水溶

液。Br 易被氯氧化反应生成 HBrO，次溴酸起杀生作用。这种溴氯结合的处理方法可减少氯的投加量，提高杀生处理效果，减少对环境的污染。配制时一般要求 Br^-/Cl_2 的摩尔比略高于 1∶1。国外已有这种活性溴商品。

③ 氯化溴（BrCl） 为低沸点（5℃）液体，在水中可释放 HBrO，发生以下反应：

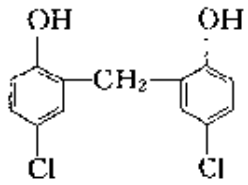
$$BrCl+H_2O \longrightarrow HBrO+H^++Cl^-$$

国外已有商品供应，需用较大的容器贮运，使用时需配备费用较高的供给装置，有一定危险性。故国外也只用于大型装置。

613 常用的氯酚类杀生剂有哪些？有何特性？

国外早年在循环水中作为非氧化性杀生剂使用得最多的氯酚类有五氯苯酚钠和三氯苯酚钠。关于苯酚的杀菌机理有两种说法：一种认为酚能溶于苯酯类，从而渗透到菌体内部与细胞质作用形成胶体溶液，并使蛋白质变性，从而杀死微生物；另一种说法是认为在有氧存在下，酚被氧化为醌，再与生物体蛋白质的羰基和氨基进行加成反应，从而使生物体组织变性。由于其余毒高，对环境有危害，现已不用，我国未使用过。

20 世纪 70 年代以来，我国使用较多的氯酚类杀生剂为 2,2'-亚甲基双(4-氯苯酚)，又称双氯酚，其分子式为：$C_{13}H_{10}Cl_2O_2$，结构式为：



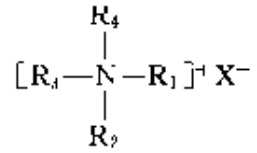
双氯酚是高效广谱的杀生剂，在氯酚类中杀生力最强，排放余毒相对较轻。对各类细菌及藻类均有很强的杀生和抑制作用，对真菌的杀生效果尤为显著。故在大检修期间常用其对木结构进行喷药处理，以杀灭真菌，防止侵蚀木材。双氯酚的商品代号为 NL-4，含量约为 30%。循环冷却水中用药量一般为 NL-4 100mg/L。

双氯酚的毒性等级对哺乳动物为低毒，但对鱼类为高毒。使用

后毒性可被生物降解，但仍有余毒。故投药后一般停止排污，循环24h后排放。因此，近年双氯酚的应用已逐渐减少。

614　什么是季铵盐类杀生剂？有何特性？

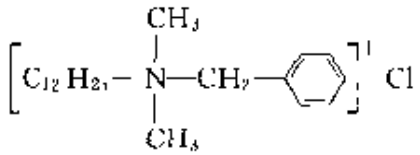
季铵盐是长碳链含氮的阳离子型表面活性剂类化合物。其结构通式为：



R_1、R_2、R_3及R_4为烃基，X为卤素Cl或Br。季铵盐在水中电离后带正电荷，容易吸附在带负电的微生物表面，并渗透入微生物内部干扰其细胞结构，使微生物死亡。季铵盐的品种非常多，都可以起到同样的杀生作用。但最常用的是氯化十二烷基二甲基苄基铵（LDBC）及溴化十二烷基二甲基苄基铵（LDBB）。近年又推出应用的一种是氯化十二烷基三甲基铵。它们的结构式为：

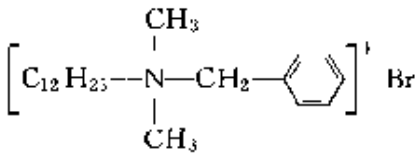
氯化十二烷基二甲基苄基铵

$(C_{21}H_{38}ClN)$



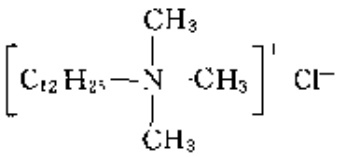
溴化十二烷基二甲基苄基铵

$(C_{21}H_{38}BrN)$



氯化十二烷基三甲基铵

$(C_{15}H_{34}NCl)$



除以上三种季铵盐之外，国内常用的季铵盐商品还有T-801及TS-802。

季铵盐对哺乳动物及鱼类的毒性均为低毒，药效最佳时间为24h，24h后自然降解，可安全排放。其突出的优点是剥离污泥、油污的效果比许多药剂好，既是杀生剂，又是很好的污泥剥离剂。其缺点是杀生力不很强，药效持续时间短，使用后水中微生物的数量回升快。高剂量使用时易起泡。水中含阴离子表面活性剂时可能

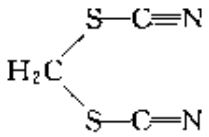
产生浑浊或沉淀而失效。季铵盐常与二硫氰酸甲酯或双三丁锡氧化物复合使用，能起到较好的增效作用。

几种季铵盐商品的成分、含量、使用浓度及适宜 pH 值

商品名称	药剂成分	药剂含量/%	使用质量浓度/(mg/L)	适宜pH值
1227	氯化十二烷基二甲基苄基铵	40～45	100	7～9
洁尔灭	氯化十二烷基二甲基苄基铵	90	50～100	7～9
1231	氯化十二烷基二甲基铵		100	5.5～9.5
新洁尔灭	溴化十二烷基二甲基苄基铵	85～90	50～100	7～9
T-801	聚季铵盐		50～100	7～9
TS-802	几种季铵盐复合物		100～150	7～9

615 什么是二硫氰酸甲酯杀生剂?

二硫氰酸甲酯又称二硫氰基甲烷或亚甲基（甲叉）二硫氰酸酯，其分子式为：$CH_2(SCN)_2$，结构式为：



二硫氰酸甲酯是一种浅黄色或近于无色的针状结晶，有恶臭和刺激味。它是一种广谱杀生剂，对细菌、真菌、藻类及原生动物都有较好的杀生效果，它比一般的杀生剂杀菌能力都强，特别是对硫酸盐还原菌效果最好，故其使用浓度较低。

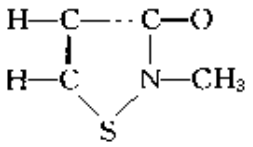
二硫氰酸甲酯中的硫氰酸根可阻碍微生物呼吸系统中电子的转移。在正常呼吸作用中，三价铁从初级细胞色素脱氢酶接受电子，当加入二硫氰酸甲酯后，硫氰酸根与高铁离子形成弱酸盐 $Fe(CNS)_3$，使高铁离子失去活性，从而引起细胞死亡。因此凡含细胞色素的微生物均能被杀死，硫酸盐还原菌之所以能被杀死，就是因为这种细菌含有含铁细胞色素。

二硫氰酸甲酯适宜在中性条件下运行，高 pH 值（>8.0）下容易降解。其毒性等级对哺乳动物为中等毒性，对鱼类为中、高毒。又因其不溶于水，所以一般不单独使用，通常与一些特殊分散剂、渗透剂或其他杀生剂复合使用，以增强其对黏泥的穿透力。

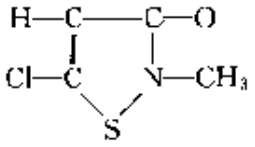
国内生产的二硫氰酸甲酯复合药剂水溶液的商品牌号为 SQ8 及 S15，都是应用广泛、经济、高效的杀生剂。商品的投药质量浓度一般为 25～30mg/L。SQ8 约含二硫氰酸甲酯 10%，氯化十二烷基二甲基苄基铵 20%，既保持了前者杀生力强的性能，又具备了后者剥离能力强的性能，二者的复合起了增效作用。S15 约含二硫氰酸甲酯 10%及溶剂和助剂。

616 什么是异噻唑啉酮杀生剂？

异噻唑啉酮是 20 世纪 90 年代在我国推广应用的杀生剂。目前广泛应用的是 2-甲基-4-异噻唑啉-3-酮（C_4H_5NOS）和 5-氯-2-甲基-4-异噻唑啉-3-酮（C_4H_4NOSCl）两者的混合物，二者的摩尔比约为 1∶3，其结构式为：



2 甲基-4-异噻唑啉-3-酮



5-氯-2-甲基 4 异噻唑啉-3-酮

商品的有效成分为 13.9%或 1.5%。它是一种黄绿色或橙黄色透明液体。我国商品牌号如 SM-103、NC-905、JH-706 等，有效成分为 1.5%。

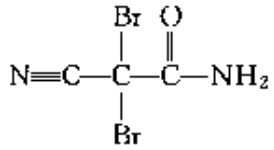
异噻唑啉酮是高效广谱杀生剂，在水中投药量含有效成分 0.5～1.0mg/L，即可有效地抑制各种细菌、真菌和藻类。对 pH 值的适应范围广（5.5～9.5），水溶性好，能和许多药剂复配。

纯异噻唑啉酮的毒性等级应为中或高毒。但因其杀生力极强，投药量很低，且降解后成为乙酸，所以实际上毒性很低。商品 SM-103 对哺乳动物的毒性等级为低毒，在水中投药质量浓度为 20～100mg/L。

617 什么是酰胺类杀生剂？

某些酰胺类化合物对微生物具有很强的杀灭能力。例如，水杨酸对菌、藻都有很强的杀灭能力。将水杨酸在结构上改进为[*N*-(2,2-二氯乙烯基)]水杨酰胺，既保留了水杨酸的强杀生力，又能降低对动物的毒性。国内外已用于循环冷却水系统的酰胺类化

合物为 2,2-二溴-3-次氨基丙酰胺（DBNPA）又名 2,2-二溴-3-次氮基丙酰胺，其分子式为：$C_3H_2Br_2N_2O$，结构式为：



DBNPA 为高效广谱杀生剂，易水解，高 pH 值、加热、紫外照射均可加速降解，容易被还原剂脱溴变为无毒的氰乙酸胺而失去杀生活性。在碱性条件下不稳定，一般限用于 pH＜7.5 或＜8.0 的情况。国内已使用的有效成分含量约为 18.3%，溶剂为聚乙二醇 200。

DBNPA 与氯的协同效应很强。国外介绍某实例，DBNPA 2.5mg/L 及氯 0.5mg/L 合用效果很好，甚至在高 pH 值（8～9）时杀生速度也很快，比单独使用时效果好得多。这可能是 DBNPA 在水中脱溴所产生的 Br^- 与氯作用的结果。

618　什么是戊二醛杀生剂？

戊二醛[$(CH_2)_3(CHO)_2$]于 20 世纪 90 年代在我国开发应用，已应用于循环冷却水系统的杀生。

戊二醛为高效广谱杀生剂，水溶性良好，能与水以任何比例互溶，加入水中无色无味无臭，无腐蚀性，使用的 pH 值范围较广。商品纯度为 15%及 45%两种。商品纯度为 15%时，使用质量浓度一般为 100mg/L。戊二醛可以和季铵盐复合使用。复合商品为 15%的戊二醛及适量的季铵盐。

由资料查得，2%戊二醛水溶液（相当于 20000mg/L）的小白鼠口服毒性试验的 LD_{50} 值为 12.6mL/kg。故纯戊二醛对动物的毒性等级应为高毒。但其使用后会被生物降解，毒性有一定降低。戊二醛与氨、铵盐及伯胺类化合物会发生化学反应，降低其杀生能力。

619　重金属盐类杀生剂有哪些？有什么特性？

早期使用的重金属盐类杀生剂是铜盐和汞盐。铜的化合物主要是硫酸铜，其次是氯化铜。用硫酸铜来杀菌除藻的历史悠久。汞的

化合物有汞的氧化物（如 Hg_2O、HgO）和汞的卤化物（如 HgCl、$HgCl_2$、HgF_2 等），而常用的有机汞有苯基汞盐、磷酸乙基汞盐和吡啶汞盐等。

硫酸铜对细菌微生物有较强的杀生作用，一般认为铜离子能凝结菌体的胶体物质，从而破坏了细胞的呼吸和代谢作用，致使细胞死亡。硫酸铜控制菌、藻的有效浓度不仅比氯气的用量低，而且杀生速度也快，如循环冷却水中菌藻类繁殖严重时，可采用冲击式投加硫酸铜 0.2～1.0mg/L，如需防止污泥的形成亦可投加 2mg/L 的硫酸铜。

汞的化合物均属有毒物质，都具有较强的杀生作用，一般来说，凡具有渗透性的有机汞化合物比无机汞化合物的毒性大，而无机汞离子的杀菌力比有机汞为强。

由于这些重金属离子对水生生物和哺乳动物都有相当的危害，特别是对鱼类的毒性仍较严重，以及铜离子、汞离子等可以沉积到钢铁表面上，常引起金属的电偶腐蚀，所以我国在循环冷却水系统中未曾使用过铜离子或汞离子杀生。

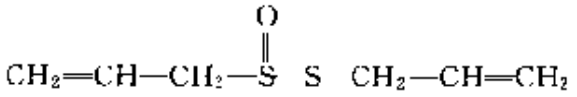
在循环冷却水中，国内外惟一尚在使用的重金属杀生剂为有机锡化合物。

常见的有机锡化合物是 *n*-氯化三丁基锡[$(C_4H_9)_3SnCl$]、*n*-氢氧化三丁基锡[$(C_4H_9)_3SnOH$]和双(*n*-氧化三丁基锡){$[(C_4H_9)_3Sn]_2O$,TBTO}。这些化合物为广谱杀生剂，不仅对各种细菌、真菌和藻类均能控制，同时有抑制污泥增长的功能。

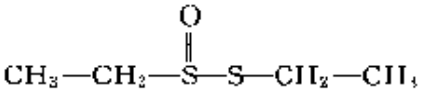
由于有机锡对鱼类及动物有毒，故常与季铵盐复配。常用的是双(*n*-氧化三丁基锡)与氯化十二烷基二甲基苄基铵的复配物。如前者含量 5%、后者含量 24%时，投药质量浓度为 20～40mg/L，适合于偏碱性水使用。

620　乙基大蒜素杀生剂有什么特性?

大蒜能防治某些疾病，这是我国人民早就熟悉的。大蒜中具有杀菌作用的主要成分是大蒜素，大蒜素的化学结构式是：



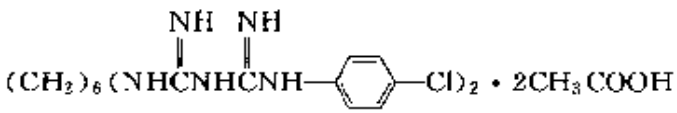
20世纪七八十年代用于循环冷却水中作杀生剂的是乙基大蒜素，分子式为$C_4H_{10}S_2O$，与大蒜素有相似的结构：



它的杀生作用，主要是靠其分子结构中的  与微生物细胞中含硫物质起作用，抑制菌体的正常代谢，导致菌体细胞死亡。乙基大蒜素的商品名称为401及402。401的含量为15%，投加质量浓度为100～300mg/L；402的含量为80%，投加质量浓度为50～100mg/L。乙基大蒜素杀生效果好，药效可维持24h左右，适用于酸性条件，在碱性条件下易降解。它对动物的毒性很强，但投用后能被生物降解。因其有很浓的大蒜气味，且货源存在问题，故近年已不使用。

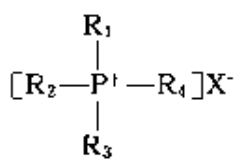
621　什么是洗必泰杀生剂？

洗必泰为双(正-对氯苯双胍)己烷的醋酸盐、盐酸盐、葡萄糖酸盐或柠檬酸盐。醋酸洗必泰的结构式为：



洗必泰的杀生效果好、对动物为低毒。可适用于碱性运行。因醋酸洗必泰的溶解性能好，国外较常用，投加质量浓度约为40～50mg/L。盐酸洗必泰的溶解性能较差，但投加质量浓度较低，处理费用低。国内某厂已在现场使用过，投加质量浓度为20mg/L。

622　什么是季鳞盐杀生剂？

其结构式为：

式中R_1、R_2、R_3及R_4为烷基，X^-为卤素。季鳞盐杀生高效，对黏泥有强渗透剥离作用，是近年国外已应用于循环冷却水系统的新

品种。国内正在研制开发，在几个厂试用后效果很好，估计有开发前途。品种有氯化十二烷基三丁基鏻（DTPC）及氯化十四烷基三丁基鏻（TTPC）。

623　为什么要测定非氧化性杀生剂的毒性？

非氧化性杀生剂均有一定的毒性，故对微生物有很强的杀生能力，但当加入冷却水系统杀生之后，仍含有一定未反应的残余量，尚存一定余毒。这些残余杀生剂通过排污进入江河后，会对自然水体造成污染。为保护环境，排污水中的含毒量需符合国家标准的规定。因而在选用非氧化性杀生剂时，需了解其毒性等级。毒性物质排入水体后，直接危害水生生物，可能造成水生生物死亡或渔业减产。故一般需作鱼类的急性中毒试验，测定杀生剂的 LC_{50} 值。水体中的残余杀生剂还会直接或间接危害牲畜及人类。故还需进行哺乳动物毒性试验，一般试验的动物是小白鼠或大白鼠，测定杀生剂的 LD_{50} 值。LC_{50} 及 LD_{50} 值均需由专业研究机构测定。

624　什么是药剂的 LD_{50}？

LD_{50} 是药剂对哺乳动物毒性的数据，由动物的急性中毒试验测得。LD_{50} 表示动物使用该药剂之后的半致死量，其单位是 mg/kg。例如某药剂的 LD_{50} 为 10mg/kg，就表示动物使用该药剂量每公斤体重为 10mg 时会造成 50%死亡（或存活）。

试验所用的动物一般为小白鼠或大白鼠。中毒途径有三种，即服药、皮肤接触及呼吸系统感染。服药方式有两种：一种是注射法，即药剂经腹腔注射注入试验动物；另一种是经口染法，即口服药剂。两种服药方法试验所得的 LD_{50} 数据不同。毒性分级时，一般经口染法的 LD_{50} 为注射法的 3.5～5 倍。如注射法的试验结果 LD_{50} 为 10mg/kg，则经口染法的 LD_{50} 大约是 35～50 mg/kg。故毒性试验的结果除需注明试验的动物名称之外，还需注明染毒途径。

按我国 GB 5044—85 职业性接触毒物危害程度分级如下：

毒性分级	危害程度	急性中毒 LD_{50}		
		经口/(mg/kg)	经皮/(mg/kg)	吸入/(mg/m³)
Ⅰ	极度	<25	<100	<200
Ⅱ	高度	25～500	100～500	200～2000
Ⅲ	中度	500～5000	500～2500	2000～20000
Ⅳ	轻度	>5000	>2500	>20000

625 什么是药剂的 LC_{50} 和 TL_m？

鱼类急性中毒试验所测得的半致死药剂浓度称为 LC_{50}，或称半忍耐限度 TL_m。LC_{50} 或 TL_m 以药剂质量浓度 mg/L 表示。如果说某药剂的 LC_{50} 或 TL_m 等于 5mg/L，那么该药剂在水中质量浓度为 5mg/L 时会使试验的鱼死亡（或存活）50%。

试验多选用莫桑比克非洲鲫鱼或中华红鲤。将尺寸合适、健康的试验鱼置于试验水中加药观察鱼的生存情况，试验的水质、水量和水温等条件均需按规定控制稳定。试验的时间为 24、48、96h，有时长达 7d，一般多为 96h。由于试验时间不同，LC_{50} 或 TL_m 值也不同，故鱼类急性中毒试验结果除需注明鱼的品种之外，更需注明试验的时间●。

按世界卫生组织 1975 年农药毒性分级，见下表。

鱼类试验，48h

毒性分级	TL_m/(mg/L)
剧　毒	<0.5
中等毒	0.5～10
低　毒	>10

白鲑鱼试验，96h

毒性分级	TL_m/(mg/L)
剧　毒	<0.1
高　毒	0.1～1.0
中　毒	1.0～10
低　毒	>10

考虑到环境安全，药剂的排放浓度应低于 LC_{50} 或 TL_m 的安全浓度。

$$安全浓度 = 96LC_{50} \times 应用系数$$

安全浓度的计算式有多种。有的推荐式为：

● 注：$24TL_m$、$48TL_m$、$96TL_m$（或 LC_{50}）各代表试验时间为 24、48、96h 的 TL_m（或 LC_{50}）。

安全浓度$=48TL_m\times0.3/(24TL_m/48TL_m)^2$

商业上常近似采用：安全浓度$=96TL_m\times0.1$，即应用系数为0.1。

626 常用杀生剂的毒性试验数据是多少？

常用杀生剂的毒性试验数据

杀生剂名称	试验生物	LD_{50}/(mg/kg)	LC_{50}/(mg/L)
2,2′亚甲基双(4-氯苯酚)(双氯酚)			
双氯酚(含量100%)	非洲鲫鱼及红鲤		0.66(96h)
NL-4(含双氯酚29%～30%)	小白鼠(口服)	1580	
NL-4(含双氯酚29%～30%)	非洲鲫鱼及红鲤		2.193(96h)
季铵盐			
氯化十二烷基二甲基苄基铵单水化合物	小白鼠(口服)	910±160(24h)	
1227(含量45%)	鱼		8.1
新洁尔灭(溴化十二烷基二甲基苄基铵)	鱼		15(96h)
T-801(聚季铵盐)	小白鼠(口服)	2062±65	
TS-802(复合季铵盐)	小白鼠(口服)	4571±87	
	鱼		12.4(96h)
二硫氰酸甲酯	小白鼠(口服)	50.19	
	非洲鲫鱼/丰鲤		1.159/1.622(24h) 0.959/1.199(48h) 0.938/0.849(96h)
SQ8(含二硫氰酸甲酯约10%，氯化十二烷基二甲基苄基铵约20%)	小白鼠(口服)	247.4	
	非洲鲫鱼/白鲢鱼		6.31/2.85(24h) 5.94/2.58(48h) 5.75/2.50(96h)
SI5(含二硫氰酸甲酯约10%)	非洲鲫鱼/白鲢鱼		8.4/3.5(24h) 7.6/2.2(48h) 7.4/2.0(96h)
2%戊二醛溶液	小白鼠(口服)	12.6mL/kg	
SM-103(两种异噻唑啉酮混合物，有效成分1.5%)	小白鼠(口服)	3000～3500	

续表

杀生剂名称	试验生物	LD_{50}/(mg/kg)	LC_{50}/(mg/L)
异氰尿酸	大白鼠	>5000	
二氯化异氰尿酸	小白鼠	745	
优氯净(二氯化异氰尿酸钠)	大白鼠	1670	
	小白鼠	1229.84±82.59	
强氯净(三氯化异氰尿酸)	大白鼠	750	
D-284(含 N-二甲基甲酰胺 45%，二硫氰酸甲酯 10%)	非洲鲫鱼/白鲢鱼		9.7/4.0(24h) 8.2/2.4(48h) 7.8/2.3(96h)
2,2 二溴-3-次氨基丙酰胺(DBNPA)	豚鼠(雌)	118	
盐酸洗必泰	小白鼠	110	
醋酸洗必泰	大白鼠(口服)	2000	
乙基大蒜素	大白鼠(口服)	140	
	小白鼠(口服)	80	

627 选择杀生剂应注意什么?

杀生剂最好通过本单位试验筛选，进行杀生试验，再应用于现场。选择杀生剂一般需考虑以下因素。

① 广谱高效　杀生剂应能有效控制种类广泛的微生物，对各种细菌、真菌和藻类均应有效。使用后，杀生率一般应在 90%以上。药效应维持 24h 以上。

② 与其他化学药剂和使用条件相容　杀生剂应与缓蚀阻垢剂及其他杀生剂匹配相容，不互相干扰。例如，季铵盐与阴离子表面活性剂共用时，易产生沉淀；季铵盐也不宜和氯酚类杀生剂共用；当水中含氨或还原性物质时，会影响氧化性杀生剂的效果。杀生剂的适应 pH 值应与运行 pH 值范围相近。

③ 不危害环境　为防止排污水对环境造成公害，应了解杀生剂的毒性等级，同时还需了解当地环保部门的规定，以及允许排放的指标。对杀生剂的降解性能也应作调查或测定。非氧化性杀生剂投用之后，本身可被微生物分解，余毒随时间而降低。投用非氧化性杀生剂时，一般停止排污 24h，要排污时，余毒应达到环保要求。

④ 经济实用　杀生剂最好既高效又价廉，来源方便，溶解性能好，使用安全方便。在循环冷却水系统中，杀生剂的种类虽可随时改变，但应作一定的设计规划，选择一个较好的方案。例如采用以氯为主，辅助使用排氧化性杀生剂的方法是经济合理的方法。单独使用非氧化性杀生剂的费用要高出许多倍。从药品价格这一条来说，任何非氧化性杀生剂都不能与氯相比。因此非氧化性杀生剂不宜长期经常使用，最好是非定期辅助使用。又如两种或两种以上非氧化性杀生剂复合使用可以增效，使杀生剂用量减少、降低费用。

⑤ 要注意微生物的抗药性　有资料介绍微生物对氯无抗药性。但一般试验均证明微生物对非氧化性杀生剂有抗药性。故应避免长期单独使用一种非氧化性杀生剂，最好两三种杀生剂交替使用。但如偶尔使用非氧化性杀生剂，则不必顾虑抗药性问题。

628　如何有效地使用氯杀生？

氯杀生虽具有杀生力强、广谱、费用低等优点，但要有效地发挥氯杀生的长处，也需要掌握氯杀生的规律，注意以下问题。

① 严格管理　加氯工作最要紧的是严字当头。这包括氯的安全措施、供应工作及指标控制等一系列工作。必须按规定的加氯间隔时间及余氯指标加氯，避免氯供应中断或加氯不认真。中断加氯或长期加氯不达标，都会使系统中黏泥剧增，某些受氨污染严重的系统断氯两三天即可能细菌猛升、黏泥剧增，达到难以控制的恶化状况。

② 加氯的间隔时间和通氯时间　加氯的间隔时间和通氯时间都要根据具体情况而定，即主要由停氯后异养菌数回升到加氯前的数量所需的时间而定。例如，国内某石化厂水质较好，无氨污染，经测定停氯后异养菌数回升到加氯前约需 48h 以上，故定为两天加氯一次，每次通氯 1h。某氮肥厂系统受氨污染严重，测定停氯后异养菌数回升到加氯前仅为 10h。该厂规定加氯间隔时间为 12h（即每日通氯 2 次），每次达到余氯指标约 2h，然后再小剂量通氯

维持余氯 2h，这样可保证停氯后至下次加氯开始约为 8h，＜10h。因此，污染物（还原性物质）含量高的水，间隔时间应缩短。冬季菌数较低，间隔时间可长些。目前间隔时间一般为 8h、12h、24h，少数为 48h。间隔 8h 过于保守，没有必要。因通氯次数过多不仅氯耗高，还会使系统中氯离子大量增加，同时 pH 值下降并增加水的腐蚀性。

③ 加氯机能力　经验证明：每次冲击加氯均宜速战速决，不宜拖延时间。尽可能在 2h 之内达到余氯指标，最好 1h 达到。以水系统中氨污染为例，亚硝酸菌会将氨转化为亚硝酸根。通氯杀生时，必先氧化 NO_2^-，NO_2^- 基本消灭之后才能达到杀生目的。由于水中的微生物在不断繁殖，更由于水中还在不断地漏进氨，所以 NO_2^- 是在不断地产生，低速通氯只能互相相持，不能压倒 NO_2^-，水中很难产生余氯，以致无法彻底杀生。为此加氯机的能力应适当加大，以使提高加氯速度。这样可以减少氯耗，提高杀生效率。

④ 余氯指标及分析方法　各种系统加氯的余氯指标为 0.3～0.8、0.4～0.8、0.5～0.8、0.5～1.0mg/L 不等。应说明，余氯的指标与分析方法互相相关。一般采用邻联甲苯胺法分析余氯，余氯使其氧化成黄色化合物，根据比色得到余氯数值。这种分析方法也受到水中其他物质的干扰。例如水中含 NO_2^- 两性物质时也能将邻联甲苯胺氧化成黄色化合物，使余氯分析出现假象。故系统中含 NO_2^- 时，应采用 DPD 法（*N*，*N*-二甲基-1，4-苯二胺硫酸盐法），测得的余氯是真实的。微生物是否有效杀灭，与余氯是否真正达到低限指标有关。只要分析是准确真实的，低限指标定为 0.3mg/L 是合理的。余氯过高对木结构及混凝土结构都有侵蚀，一般认为高限应不超过 1.0mg/L。有的国外资料认为，为保护木结构，余氯的高限指标应为 0.8mg/L。总之，只要真正保证分析方法准确，余氯并不需要太高。

629　如何有效地使用非氧化性杀生剂？

非氧化性杀生剂的杀生机理与氧化性杀生剂不同，它不受水中还原物质的干扰，对黏泥的剥离作用好，可以弥补氧化性杀生剂的

某些不足。其缺点主要是有一定毒性，对环境不利，同时费用较高。国内外有些设计在循环冷却水中不用氧化性杀生剂，只定期投加非氧化性杀生剂，例如每周或每两周加一次。这种方法费用很高，不够有效，也不够科学。所以，目前国内多不采用“定期加药”方式，而是在必要时采用冲击式的不定期加药。要做到用药有效合理，需要积累经验，根据本单位的实际情况确定。但以下原则是普遍应注意的。

(1) 根据监测数据对症下药　应建立对微生物的监测手段和监测制度，对各种有害微生物的数量、黏泥量、有关化学污染物含量(如 COD、NH_4^+、NO_2^- 等) 进行监测，根据监测数据判断是否应投加非氧化性杀生剂。例如，有的系统平时只用氯杀生，仅在水质恶化或有其他困难时才使用非氧化性杀生剂，一般多在夏季使用 ～5 次。如水质较好，一年只用 1～2 次，甚至全年不用非氧化性杀生剂。这样既控制了微生物，又降低了费用。

(2) 将微生物危害控制在苗头，适时加药　即在水质有恶化倾向时及时加药，对微生物“先发制胜”，将微生物控制在大量黏泥产生之前，才能达到事半功倍的效果。因系统中已经产生大量黏泥之后，就很难在不停车状态下清除出系统。要掌握这个原则并不容易。需要积累多年的监测数据，不断总结自己的经验和吸取其他单位的经验。掌握微生物危害的规律之后，则可将非氧化性杀生剂用得巧妙适时。例如，某厂的经验是：当 NO_2^- ＞ 1mg/L、黏泥量 ＞4mL/m³，在连续三次加氯，余氯均不合格时就投加非氧化性杀生剂。有的厂在发现有黏泥沉积倾向时采取先剥离后“围歼”的办法，先使用剥离效果好的季铵盐类杀生剂剥离黏泥，24h 后进行排污处理，然后再投加 SQ8 之类的高效杀生剂，杀灭剥离下来浮于水中的菌藻，把微生物控制在较低数量。许多厂在系统漏油时，多采用季铵盐类杀生剂。还有的厂在停车前加药剥离系统黏泥，使水冷器及冷却塔填料上的黏泥剥落，以减少停车后清理的工作量。总之，要根据本系统的规律，掌握加药时机，千万不能拖到黏泥危害严重时才加药。

（五）清洗与预膜

630 为什么要进行循环冷却水系统的清洗和预膜？

循环冷却水系统，无论是新系统或是老系统，在开车正常投药之前都要进行系统清洗和预膜工作。清洗和预膜工作被称为循环水系统化学处理的预处理。对于新系统来说，设备和管道在安装过程中，难免会有碎屑、杂物和尘土留在系统之中，有时冷却设备的锈蚀和油污也很严重，这些杂物和油污如不清洗干净，将会影响下一步的预膜处理。老系统的冷却设备还常有垢、黏泥和金属腐蚀产物，严重影响设备寿命和换热效率。因此，清洗工作做得好，对新系统来说，可以提高预膜效果，减少腐蚀和结垢的产生；对已投产的老系统来说，可以提高换热效率，改善工艺操作条件，保证长的生产周期，降低能耗和延长设备使用寿命。所以，清洗工作是循环水系统开车必不可少的一个环节。清洗方法分为物理方法及化学方法两类。物理方法是用较大的流速冲掉垢物。化学方法是用化学药剂溶解或分散垢物。按系统及运行情况可分为单台清洗或系统清洗，停车或不停车清洗。

预膜处理又称为基础处理，是在系统清洗之后、正常运行之前化学处理的必要步骤。循环水系统的预膜是为了提高缓蚀剂的成膜效果，即在循环水开车初期投加较高的缓蚀剂量，待成膜后，再降低药剂浓度维持补膜，即所谓的正常处理。这种预膜处理，其目的是希望在清洗后的金属表面上能很快地形成一层保护膜，防止产生腐蚀速度很大的初腐蚀。实践也证明在同一个系统中，经过预膜和未经预膜的设备，在用同样的缓蚀剂情况下，其缓蚀效果却相差很大。因此，循环水开车初期的预膜工作必须要给以高度重视。

循环水系统除了在开车时必须要进行预膜外，在发生以下情况时也需进行重新预膜：①年度大检修系统停水后；②系统进行酸洗之后；③停水 40h 或换热设备暴露在空气中 12h；④循环水系统 pH＜4 达 2h。

631　怎样进行循环冷却水系统开车前的系统清洗？系统清洗常用哪些化学药剂？

新系统开车前或老系统检修后，一般按水冲洗、化学清洗的步骤进行清洗，然后进行预膜处理，再转入正常的化学处理运行。

（1）系统水冲洗　这是最常用的物理清洗方法。即通过较大的水流速度冲掉系统中较疏松的沉积物和碎片。水冲洗无法清除大块的建筑材料、焊渣、硬垢、腐蚀产物及大量泥砂等物。故在水冲洗之前应先进行人工清扫，先清除管道、冷却塔、水池及换热器中的杂物。水冲洗时向循环水池中充入清洁的工业用水，开循环水泵进行循环冲洗，并不断少量排污及补充水。冷却塔应设有回水旁路管，这样回水可以不经塔进行循环，可避免污染或损坏塔填料。如果水清洗时，浑浊度很高，水很脏时，各换热器也应接旁路管，避免污染换热器而水走旁路，待水清后再进换热器。循环水泵入口应设过滤网。水流速度应高于 1.5m/s。为保证高水流速度，必要时可同时开启备用循环水泵。水冲洗过程中应对水中的浑浊度不断进行监测。初循环时，水中的浑浊度会增加数倍或数十倍，经过不断排、补水，浑浊度逐步降低并稳定，当补充水与循环水的浑浊度基本相等、循环水的浑浊度连续维持 3h 以上不再增长时，停止补充水及排水，水冲洗即完成。水冲洗一般需要 24～48h。

（2）系统化学清洗　系统化学清洗的目的是清除水冲洗难以去除的油污、微生物及少量水垢和浮锈等沉积物，使金属露出活性表面。加入的药剂主要是表面活性剂或阻垢分散剂。同时加入杀生剂，并加酸适当调低 pH 值，有时还需加入消泡剂。

当水冲洗合格后，随即向系统投入硫酸，调节 pH 值。一般控制在 5.5～6.5，有的控制为 6.0～7.0。同时连续加氯，控制一定余氯量（如＞0.3mg/L），直到化学清洗结束。加入清洗剂之后，每 2h 需对水中的浑浊度、铁离子或钙离子含量监测一次，当其增长缓慢并趋于稳定时，可停止清洗。一般待浑浊度维持 3h 不再增

加、同时循环泵出水和回水的铁离子含量不变时，结束清洗。清洗时间大约24～48h。清洗阶段不排水、不补水。清洗结束时立即大量排水并补水，进行系统水的置换。当浑浊度降至10mg/L以下时，可开始下一步的预膜工作。

(3) 常用的系统清洗药剂及配方　应根据系统中垢物的组成选择化学药剂及配方。

新系统清洗的主要目的是除油污。宜采用表面活性剂清洗。常用的表面活性剂有：琥珀酸二乙酯磺酸钠（即渗透剂T）、十二烷基磺酸钠、聚氧乙烯山梨糖醇酐油酸酯（即吐温-80）等。较有代表性的国外清洗剂组成如下：

渗透剂T	16%	乙醇	2%
异丙醇	30%～31%	水	50%～51%

其使用质量浓度为40mg/L，控制pH值为5.5～6.5。国内类似的清洗剂为TS-101，含润湿剂及醇类，使用质量浓度为40～100mg/L。

以上清洗剂除油污的效果很好，但不能涂掉水垢和腐蚀产物。故国内对新旧系统清洗有的采用表面活性剂与阻垢分散剂复合使用。目的是在除去油污的同时，能够除去部分水垢和浮锈。但这种全系统的化学清洗方法也不可能彻底清除水垢，特别是难以清除腐蚀产物。系统化学清洗的配方多种多样，常用的典型复合配方如下。

a. TS-101 100mg/L，吐温-80 50mg/L，六偏磷酸钠50mg/L。

b. TS-101 100mg/L，六偏磷酸钠100mg/L。

c. 吐温-80 50mg/L，羟基亚乙基二膦酸（以100%计）25mg/L，聚丙烯酸钠（以100%计）10 mg/L。

d. 羟基亚乙基二膦酸（以100%计）20～25mg/L，聚丙烯酸钠（以100%计）8～10mg/L。

使用表面活性剂清洗时，系统中可能产生大量泡沫。故常需投入消泡剂。循环水系统中常用的消泡剂主要含液体石蜡和硬脂酸类。某种消泡剂的大致组成如下：

液体石蜡	82%	硬脂酸	3%
聚乙二醇硬脂酸	6%	异丙醇	1%
聚丙二醇硬脂酸	6%		

一般使用质量浓度为 3～5mg/L，根据现场实际情况调整用量。

某些旧系统中附着有黏泥，故有的在加入清洗剂之前先加入剥离效果较好的杀生剂（如季铵盐）剥离 4～8h。

低 pH 值有利于分散垢物，故化学清洗时均加硫酸调节 pH 值至微酸性。

632　什么是表面活性剂？

在日常生活中，如将油和水一起加入烧杯，静置后就会分成两层，上层是油，下层是水，但在烧杯中加入少量表面活性剂，例如肥皂或洗衣粉，再搅拌混合则就呈一种乳状液很难分层了。因为表面活性剂的分子通常是由具有溶于油的亲油基和易溶于水的亲水基部分所组成，这两个基团有把油水两相连接起来不使它分离的能力。也就是说，原来油和水两相之所以不相溶而分成两层，是由于两种液面间存在一种力即表面张力，加入表面活性剂后，通常表面张力就降低了，所以一般凡由亲水基和亲油基组成的具有降低表面张力能力的化合物称为表面活性剂。如清洗剂中所用的琥珀酸二乙酯磺酸钠就是表面活性剂中的一种，利用它可以清洗设备及管道中的油脂。

633　不停车清洗有什么方法？

循环冷却水系统在运行状况下进行清洗的方法有以下两类：

(1) 不停车单台清洗

为物理清洗方法，可在不停车状况下对个别水冷却器进行处理，清除附着的软垢，恢复传热效率。

① 空气搅动法　在单台水冷却器正常运行期间，将压缩空气（或者是氮气）通入水冷却器水侧。空气使冷却水的流动处于紊流状态，可以松散粘附在管壁上的沉积物，使其随水流带出。压缩空气的压力应比冷却水压力大 0.15～0.18MPa。这种方法常用以处理壳程水冷却器中的软垢。可在壳程水冷却器的壳下部接多个空气

管口，并在冷却水出口管处接就地排污口。定期或不定期进行空气搅动，污水就地排放，以免污垢再返回系统。这样处理之后，往往能使工艺介质的温差大幅增加。

图 5-5-1 为列管式水冷却器（水走壳程）空气搅动法示意图。

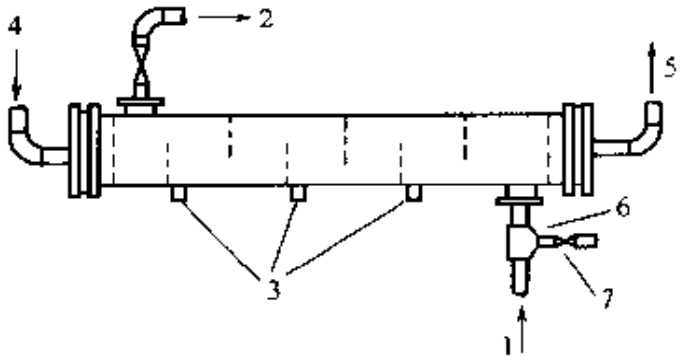
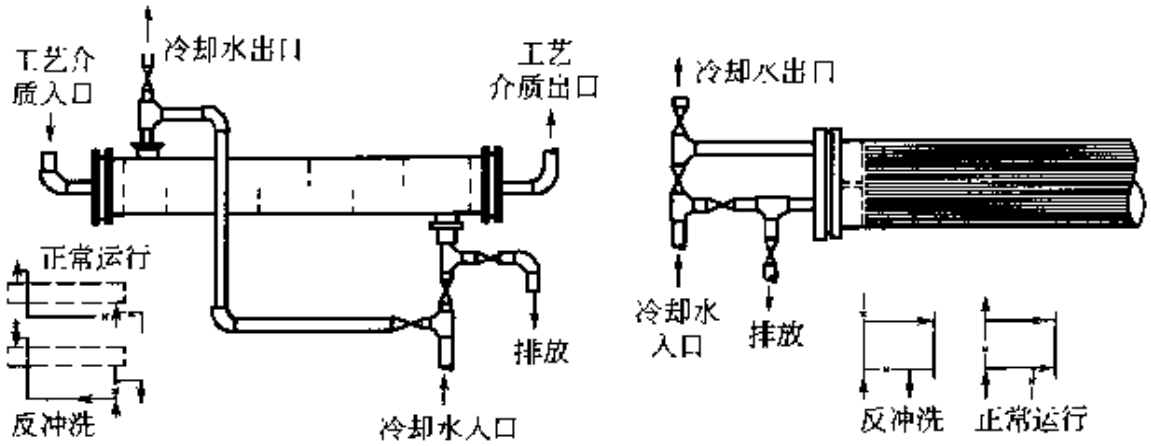


图 5-5-1 空气搅动法示意图

（列管式水冷却器，水走壳程）

1—冷却水进口；2—冷却水出口；3 压缩空气进入点；4－工艺介质进口；5－工艺介质出口；6—压缩空气管；7—快速启动空气阀

② 反冲洗法 反冲洗又称回洗。通过定期或不定期改变水的流向冲洗水冷却器上附着的软垢。适用于壳程及管程水冷却器。反冲洗法示意图见图 5-5-2。



(a) 水走壳程时 (b) 水走管程时(U形管)

图 5-5-2 反冲洗法示意图

③ 胶球清洗法 胶球清洗是将海绵状橡胶球通过螺旋式水泵

随冷却水压入水冷却器的管子中，利用胶球的挤擦作用除去管内壁的沉积物。胶球从水冷却管的另一端流出后，用粗筛截住回收，循环使用。胶球有吸水性，吸水后密度与水相同。球的直径需比管内径大 1.0mm，使用一段时间后，如因受摩擦直径变小，则应废弃更换。此法在我国电力企业应用较广，适用于管程铜水冷却器的软垢清洗。

（2）不停车的系统清洗

为化学清洗方法，是在不停车的情况下向循环水中加入化学药剂对系统中沉积的污垢进行清洗，通过排污水将污垢排出系统。采用不停车的系统清洗时，应在处理之前根据监测数据掌握污垢障碍的原因，针对污垢的性质提出合适的处理方案。如果污垢是以微生物为主的黏泥软垢，则应使用杀生剂进行剥离。不停车处理微生物软垢，一般效果很好。如果污垢的组成主要是水垢，则应使用阻垢分散剂进行处理。不停车处理水垢的效果不如停车单台酸洗彻底。不宜用不停车系统清洗方法处理腐蚀产物，因阻垢分散剂对铁锈的作用很小。

634　怎样不停车清洗水冷却器中的黏泥？

结垢或黏泥沉积都可能使水冷却器的换热效率下降。如果循环水的色、味异常，菌数及黏泥量超标，又在监测水冷却器表面沉积黏泥，则可推断微生物黏泥为主要危害。这时系统不停车清洗的目的是将水冷却器表面的黏泥剥离下来并排出系统外。这种系统清洗实际上是强化了的杀生处理。采用较大的杀生剂量，特别是加入剥离效果较强的非氧化性杀生剂进行杀生，使黏泥剥落入循环水系统中，再通过排污使黏泥排出系统。其基本方法是“杀生剥离—排污”或“杀生剥离—排污—再杀生—排污”。循环水中加入杀生剂后一般运行 24h 不排污，24h 之后开排污阀，排污水量适当加大以利黏泥排出系统。例如，某厂水冷却器黏泥沉积使换热效率下降。处理方法是向循环冷却水中加入双（*n*-氧化三丁基锡）与氯化十二烷基二甲基苄基铵的复合剂约 50mg/L，循环 24h 不排污，剥离下来大量黏泥块漂浮在水中。黏泥块经分析，600℃灼烧减量为

73%，异养菌数＞10^8 个/g。进行排污后水中菌数及黏泥量仍较高，故再在水中加入 SQ8 杀生剂，24h 后进行排污，经这样处理后菌数及黏泥量均在合格范围内，同时水冷器换热效率也恢复正常。杀生剥离的杀生剂常用季铵盐（1227、洁尔灭或新洁尔灭），有的也使用大量次氯酸盐（次氯酸钠、次氯酸钙或漂白粉）剥离。有的在杀生剥离期间加强氯杀生，改为连续加氯，同时将余氯指标提高（如原为 0.3～0.7mg/L，改为 0.7～0.9mg/L）。有的适当加酸，使 pH 值在微酸性运行（如 6.0～6.5）1～2d。在再杀生时多采用杀生力更强的二硫氰酸甲酯复合杀生剂（SQ8、S15）等。

不停车清洗黏泥有时除加强杀生之外还加入清洗剂或阻垢剂，即在杀生的同时，加强了对黏泥及水垢的分散作用，有利于排出系统。其方法是“杀生剥离—分散—排污”或“杀生剥离—分散—再杀生—排污”。例如，有的在杀生剥离 24h 之后，加 TS-101 或吐温-80 清洗剂运行 24～48h，有的将正常运行的缓蚀阻垢配方的使用浓度加大，运行 24～48h，然后开始排污。如果清洗的效果不够满意，有时可再进行一个“杀生剥离 分散—再杀生—排污”的清洗循环。总之，不停车系统清洗黏泥的方法很灵活，药剂、时间都没有固定不变的模式。系统清洗的总时间大约需 3～5d，有时达 7d。某些单位在停车检修之前有时也进行一次类似的“杀生剥离—分散－排放”的系统清洗，目的是减少停车后人工清洗水冷却器的工作量。某些单位停车检修之后的系统化学清洗过程中也往往增加了杀生剥离工序，即“杀生剥离—分散—排放”，目的是更好地清除系统中积存的黏泥。

当系统水冷却器漏油时，其危害也类似黏泥沉积，也可能在水冷却器上形成软垢影响传热。解决油污问题也与黏泥沉积相同，一般采用季铵盐处理，用“杀生剥离 排污”方法可恢复换热效率。近年来，在含油的循环水中加入生物酶，以消除油的污染取得了很好效果。

635 怎样不停车清洗水冷却器中的水垢?

当水冷却器的换热效率下降时，应通过监测查明原因。如果腐

蚀率、菌数及黏泥量均不超标，而在监测换热器发现水垢，则可推断水垢为主要危害。

处理水垢的主要方法是将其溶解和分散。一般是加大阻垢剂量及加酸调低 pH 值。如果长期处于结垢状态，就应考虑调整缓蚀阻垢配方。在不停车情况下清除水垢不如停车单台酸洗彻底和容易，但为保证生产仍必须采取一定处理措施。

处理措施之一是增加阻垢剂量、减少缓蚀剂量。一般是增加有机磷酸盐及聚羧酸盐阻垢剂的用量，减少聚磷酸盐及锌盐的用量。但单纯采用这种措施，要想在不停车情况下清除碳酸钙、磷酸钙、磷酸锌、氢氧化锌等水垢还达不到目的，还必须加酸降低 pH 值运行。因降低 pH 值会改变各种离子的平衡关系（如改变碳酸钙饱和指数、稳定指数、磷酸钙饱和指数），使水垢的溶解度增加。加酸消垢的方法有以下两种。

一种方法实际上是改变运行条件，少量加酸，使 pH 值略降低运行，使水垢缓慢溶解。例如，原来运行 pH 值为 8.0～8.5，可改为 7.5～8.0，7.0～7.5，甚至 6.5～7.0 运行。这样运行半个月、一个月或者两三个月，使水垢逐渐消失，直到监测数据正常为止。这种方法实际上是让水质在腐蚀状态下运行。如果主要结磷酸钙垢，可以暂时减少聚磷酸盐投加量。如主要结锌垢，可暂停加锌盐。也可在降低 pH 值的同时，适当增加阻垢剂用量。

另一种方法是不停车系统酸洗。就是加酸，将 pH 值降到 5.5 左右，在 1～3d 内将水垢洗下。同时加大分散剂量或同时停加聚磷酸盐和锌盐。清洗结束时，大量排污。采用这种方法应极其慎重。因为循环水系统中有混凝土、木材等结构，低 pH 值会使其受到侵蚀。系统中已使用多年的换热器也有可能因此泄漏。调 pH 值万一不慎降到 4.3 以下，则会破坏金属上的保护膜，使全系统腐蚀。原则上这种方法不宜提倡。应该提倡加强对系统腐蚀结垢情况的监测，在结水垢的苗头发现时，尽可能采用前一种方法解决。有的单位采用 pH 值为 2～3 的低 pH 值系统清洗方法除水垢，这是更不宜推广的。在不得已需采用这种方法时，尽可能控制 pH 值不低于

5.0。其前提是：对全系统水冷却器的完好状况心中有底，能够确保清洗后无水冷却器泄漏。

某厂多次发生蒸汽表面冷凝器结水垢，使真空度下降，如有时从54.66kPa（410mmHg）降到零，使生产受到影响。该厂采取降低pH值清洗，控制pH为5.5，3d后真空度恢复如初。该厂表面冷凝器的材质为不锈钢，无腐蚀泄漏的危险。该厂将临时加酸点设在表面冷凝器冷却水入口处，控制表面冷凝器的冷却水出口pH值为5.5左右。这部分低pH值的出水与全系统的循环水汇合之后，pH值会提高到5.5以上，因此不会造成系统腐蚀。

不停车的系统酸洗只适用于清洗水垢，不适用于清洗腐蚀产物。如以碳酸钙水垢为例，pH值为5～6时，碳酸的形态以H_2CO_3、HCO_3^-为主，CO_3^{2-}已不存在。故碳酸钙水垢被转化为可溶的碳酸氢钙。而铁的氧化物要在更低的pH值下才能溶解。一般pH值在4～5时开始溶解，pH＜3时大量溶解。因此，腐蚀产物宜采用单台酸洗，而不宜采用系统酸洗的方法。

636　为什么需要对水冷却器进行单台清洗？单台清洗有哪些方法？

单台清洗是指停车状态下对水冷却器的清洗。清洗的对象可以是新水冷却器，也可以是旧水冷却器。新水冷却器在并入系统之前有两种情况需进行化学清洗。一种是涂有防腐油、表面有油垢，一般需碱清洗。另一种是保管不良、表面产生浮锈，一般需酸清洗。旧水冷却器清洗是运行后停车检修期间的单台清洗。其目的是除去运行期间水冷却器表面的沉积物。单台清洗可以弥补循环水系统化学处理方案之不足。由于系统中各台水冷却器的工况不同，沉积情况也不同。例如，有些热强度极高的水冷器（多为蒸汽冷凝器）更容易结水垢，壳程水冷却器的水速低，极易积污垢。尽管缓蚀阻垢配方可适应系统中多数水冷器，但对某些特殊水冷却器的适应性可能不足，仍会产生一些沉积。这些水冷却器的沉积物在积累一、二年或数年之后，换热效率会下降或产生垢下腐蚀。系统化学清洗往往也不能解决个别特殊问题。所以，利用每年系统停车检修的机会

有计划地进行单台清洗十分必要，以恢复水冷却器的换热效率，保证生产。

现场常用的单台清洗方法如下：

① 人工清洗　一般为机械捅刷与水冲洗相结合。管程水冷却器拆除封头后，用螺旋钢钎、尼龙刷等工具逐根管进行捅刷，并用自来水或消防车水冲洗。壳程水冷却器需拆除外壳，对管间捅刷或冲洗。这种方法劳动量大、费时间、效率低、除垢不彻底，同时所使用的工具还会伤害换热管。对壳程水冷却器管间的硬垢和铁锈很难清除。近年来多已尽量不用这种方法。

② 水力清洗　即采用专用的高压水枪对管程水冷却器的换热管逐根进行冲洗。冲洗水由柱塞泵加压到 10MPa（约 100 大气压）以上，采用与管径相应的特别喷嘴冲洗，水流速应不小于 2.0～2.5m/s。其清洗速度比人工清洗高，耗劳动力较少，清洗效果好，能够除去较硬的垢锈沉积物。近年已被广泛采用。但此法不适用于清洗壳程水冷却器。

③ 酸清洗　或称酸洗，是清除垢物的化学方法。酸洗能够除去水垢及铁锈等硬垢，主要是由于氢离子与金属化合物的反应，对垢物起到溶解作用及剥离、疏松作用。反应如下：

$$CaCO_3(s)+2H^- \cdots\rightarrow Ca^{2+}+H_2O+CO_2\uparrow$$

$$FeO(s)+2H \longrightarrow Fe^{2+}+H_2O$$

$$Fe_2O_3(s)+6H^- \longrightarrow 2Fe^{3-}+3H_2O$$

由于酸的良好溶解作用，几乎能将水垢和腐蚀产物全部除去，这是人工清洗和水力清洗无法做到的。酸能够洗到任何角落，能够将壳程水冷却器清洗干净。因此，酸洗是最彻底的清洗方法，应用十分广泛。

④ 碱清洗　或称碱洗，是清除油污的化学清洗方法。一般用烧碱及磷酸盐水溶液作为清洗液，少量加入润湿剂。多用于清洗新水冷却器除防锈剂。

⑤ 钝化处理　酸洗或碱洗之后，金属表面处于活化状态，极易产生浮锈。水冷却器酸洗或碱洗之后，如果不能及时并入系统进

行预膜处理，则需进行钝化处理。即用化学药剂浸泡或循环冲洗，使其表面形成一层保护膜，避免在存放期间生锈。存放时还需充氮保护。

637　如何进行水冷却器的单台酸清洗？

水冷却器单台酸清洗是清除腐蚀产物和水垢的最佳方法。确定酸清洗方案时主要需考虑以下问题。

（1）酸清洗用酸的选择　可用于酸洗的无机和有机酸很多，有盐酸、硝酸、硫酸、氨基磺酸、氢氟酸、磷酸、柠檬酸、乙二胺四乙酸（EDTA）等。水冷却器清洗主要采用盐酸、硝酸及硫酸三种，最常用盐酸。不锈钢及铝水冷却器宜用硝酸清洗。硝酸有氧化性及钝化作用，酸中不含氯离子，不会使水冷却器产生应力腐蚀开裂。硫酸清洗腐蚀产物的能力很强，但溶解钙垢后，生成的大量硫酸钙有再沉积的危险。故沉积物中以碳酸钙水垢为主时，需慎用。碳钢水冷却器多采用盐酸清洗，但盐酸清洗硅酸盐水垢能力较差，如遇这种特殊情况，可用氢氟酸与盐酸或硝酸复合处理。酸洗液的质量分数随沉积物的厚度而定，一般为5%～10%。

（2）酸清洗用缓蚀剂　酸洗会腐蚀金属，产生以下反应：

$$Fe+2H^{+}\longrightarrow Fe^{2+}+H_2\uparrow$$

故酸洗时需投加缓蚀剂以减少金属腐蚀。经试验及监测，加入缓蚀剂之后，多能使腐蚀速度降到1mm/a以下。如以酸洗时间6h、腐蚀速度为1mm/a计，腐蚀深度只有0.7×10^{-3}mm，可以忽略不计。因此，酸洗是安全可靠的方法。酸洗缓蚀剂可以现场配制，也可采用商品缓蚀剂。酸洗缓蚀剂的牌号很多，其类别及特点大致如下。

① 醛-胺缩聚物类　由甲醛、苯胺合成。工艺简单，可以现场配制。水溶性较好，但有一定毒性，存放性能不很稳定。

② 硫脲及其衍生物类　缓蚀性能好，但水溶性能略差。使用时需先用少量温软化水调成糊状，否则易结块。

③ 吡啶及其衍生物类　具有较好的缓蚀性能和酸溶解性能。有的略带吡啶臭味。

④ 化工、医药产品的残料加工成的缓蚀剂　成分复杂，多为含硫、氮的高分子化合物经改性处理后的产品。一般具有较高的缓蚀性能。

(3) 酸清洗配方　化工企业常用的典型酸清洗配方如下。

酸洗液	盐酸，5%～10%	硫酸，5%～10%	硝酸，5%～10%
清洗金属	碳钢、铜	碳钢	不锈钢、铝、铜、铸铁
缓蚀剂配方	1. 乌洛托品（六亚甲基四胺）　0.5% 2. 苯胺　0.2% 乌洛托品　0.3% 3. 苯胺　0.5% 乌洛托品　0.5% 醋酸　0.5% 4. 若丁缓蚀剂　0.3%～0.5%	若丁缓蚀剂（硫脲或吡啶衍生物）　0.5%～1.0%	1. 乌洛托品　0.3% 苯胺　0.2% 硫氰酸钾　0.1% 2. LAN-5 缓蚀剂　0.5%

(4) 酸清洗的进行　酸洗的方式有浸泡及循环清洗两种，以循环方式效果较好。停车期间需设酸槽及循环酸泵，用临时管线与水冷却器相接，可进行循环清洗。水冷却器中酸液流速应维持 0.2～0.5m/s，<1.0m/s。用无机酸清洗时，酸液温度一般需维持 40～70℃。在酸洗系统中应设腐蚀挂片，监测酸洗的腐蚀速度。清洗过程中需不断监测酸液中的酸度及铁或钙离子的含量。酸洗过程中酸度不断下降，当酸含量<4%时，可适当补充一定量的酸。此外，酸洗过程中铁或钙离子不断增加，浑浊度也增加。如果酸液太脏，也可以排掉一部分酸液，另补充一部分新酸液。当铁或钙离子含量稳定，基本不增长，1h 后可停止酸洗。一般酸洗时间约为 4～6h。水冷却器在酸洗前后均应试压、堵漏。旧水冷却器的换热管可能被腐蚀而泄漏，酸洗前如不堵漏则酸液会串至工艺侧。部分已穿孔的换热管可能被腐蚀产物堵塞，酸洗前可能并不表现泄漏，酸洗之后则暴露泄漏问题。所以，酸洗前后的试压、堵漏均不可忽略。酸洗

之后，金属表面很活泼，容易产生浮锈。故酸洗结束排出酸洗液之后，应立即用清洁水冲洗，并需用0.2%左右的氢氧化钠溶液进行中和。如水冷却器不能及时投入运行进行预膜处理时，则应进行钝化处理。

638 如何进行水冷却器的单台碱清洗？

碱清洗或称碱洗，常用此法清洗锅炉、化工系统的新水冷却器也常用碱洗防锈剂等油污。清洗液一般用烧碱（NaOH）及磷酸盐水溶液，同时加入少量（如0.05%）的润湿剂。常用的润湿剂有烷基苯磺酸盐、OP-15、JX-1或海鸥洗涤剂等。化工企业常用的碱清洗配方如下。

项　目	1	2	3
配方/%	NaOH 3～6 $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$ 2～5 水玻璃(3.2) 1～2 洗衣粉 1～2	NaOH 0.5～0.8 Na_2HPO_4 0.2～0.5 润湿剂	NaOH 0.2 $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$ 0.5～1.0 润湿剂
清洗温度/℃	80～90	90～95	90～95
清洗时间/h	2～3	8～24	8～24

碱洗可采用浸泡或循环清洗方法，以循环清洗的效果为好。碱洗结束排出碱洗液后需用水清洗10～15min，至pH值≤8.4。如水冷却器不能及时投入运行进行预膜处理时，则应进行钝化处理。

639 如何进行水冷却器的钝化处理？

酸清洗或碱清洗之后，金属表面处于活化状态，极易产生浮锈。钝化处理就是用化学药剂溶液浸泡或循环清洗水冷却器，使其表面形成一层保护膜，避免在存放期间生锈。化工企业曾用的参考配方如下。

(1) 用氨水调pH值至9.5，加入$NaNO_2$ 0.5%～0.6%，常温钝化3h左右。

(2) 尿素3.5%、$NaNO_2$ 3.5%、苯甲酸钠0.4%及Na_2CO_3 1%，常温钝化3～5h。

(3) $NaNO_2$ 0.4%、H_3PO_4 0.5%～1.0%、$ZnSO_4$ 0.5～

1.0%及 Na_2SiO_3 0.5%～2.0%，常温或＜60℃钝化 30～60min。此配方钝化效果好，但时间过长有可能产生 $SiO_2 \cdot xH_2O$ 白色胶状沉积。

(4) $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$ 1%～2%，80～90℃，钝化 8～24h。

钝化结束后，排液、吹干、封存。钝化后可存放多日，效果好的可存放一个月左右，如果再用氮气封存，则存放时间还可以长一些。

640 常用的预膜剂及配方有哪些?

预膜药剂及配方多种多样。习惯上预膜剂多采用与正常配方中相同的缓蚀剂，其用量为正常运行用量的数倍或数十倍。例如，磷系配方以采用聚磷酸盐为主的预膜剂；铬、钼、钨或硅系分别采用铬酸盐、钼酸盐、钨酸盐或硅酸盐为主的预膜剂，并复合聚磷酸盐。由于锌离子具有快速成膜的特点，所以各类预膜剂中多复合锌离子。为防止高浓度缓蚀剂沉积，需适当加酸，调低 pH 值。某些预膜剂中也复合少量阻垢分散剂，实际上同时起了清洗作用。预膜有时也采用与正常运行配方不同的缓蚀剂，如磷系预膜、其他系运行。敞开式循环水系统常用的典型预膜剂配方介绍如下。

① 单一聚磷酸盐预膜剂　即采用单一六偏磷酸钠或三聚磷酸钠，用量约为正常运行时缓蚀剂量的 7 倍，约 200mg/L。预膜 pH 值为 6.0±0.5 或 6.0±0.3。预膜水温为常温。预膜时间＞24h，一般为 48h。要求循环水中钙含量不低于 125mg/L(以 $CaCO_3$ 计)。

② 磷-锌复合预膜剂　为聚磷酸盐与锌盐的复合剂。一般六偏磷酸钠与一水硫酸锌 ($ZnSO_4 \cdot H_2O$) 的比例为 4∶1，折合成六偏磷酸钠与七水硫酸锌 ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) 的比例为 4∶1.6。复合剂用量为 400～800mg/L。预膜 pH 值为 5.5～6.5。预膜水温为常温。预膜时间随水温升高而减少，一般为 12～48h。预膜时要求循环水中钙含量不小于 125mg/L (以 $CaCO_3$ 计)。

③ 磷-锌-阻垢剂复合预膜剂　六偏磷酸钠加锌盐用量约 200mg/L，另加商品阻垢剂量约 100～200mg/L。阻垢剂一般为聚羧酸盐、膦酸盐等。预膜 pH 值一般为 6.0～7.0，常温预膜，约

24～48h。

641　影响聚磷酸盐预膜效果的有哪些因素？

在碳钢系统中基本上采用磷系预膜，特别是磷-锌复合预膜剂应用最广。磷、锌在金属表面上所形成的是沉淀膜。除了金属表面的清洁程度影响预膜的效果之外，以下因素都影响预膜的效果。

① 钙离子含量　聚磷酸盐形成沉淀膜时需要钙、铁等二价离子存在，故预膜时要求水中有足够的钙离子。一般在水中钙离子含量为250～500mg/L(以$CaCO_3$计)时预膜效果较好。预膜剂中加锌可弥补钙离子之不足。锌离子成膜快.但不牢固,不能代替钙离子。实践证明,不管预膜剂中是否含锌,水中钙离子含量都不得低于125mg/L(以$CaCO_3$计)。钙离子不足时，应在水中加氯化钙或次氯酸钙。

② 预膜剂浓度　预膜剂浓度高则成膜速度快、质量好。浓度降低时，预膜时间需相对延长。使用磷-锌复合预膜剂时，新系统首次开车的用量一般为400～800mg/L。常用量是800mg/L，其中六偏磷酸钠为640mg/L，一水硫酸锌为160mg/L，即锌离子含量为58mg/L。经使用证明，预膜效果好、时间短。因旧设备的金属表面已有一定钝化，故有的在停车检修后预膜时的复合预膜剂用量改为200～300mg/L。在上述预膜剂浓度下，一般预膜时间为12～48h。

③ pH值　pH值过高可能产生磷酸盐或锌盐沉积，影响膜的致密性及其与金属的结合力。pH值过低使膜因增溶而被破坏，造成金属腐蚀。最佳的预膜pH值范围是5～7。一般常选择5.5～6.5或6.0～7.0。

④ 预膜温度及预膜时间　水温高成膜速度快，预膜时间短。最佳预膜温度为50～60℃，预膜时间只要4～8h，膜的质量也较好。但系统要达到此温度是不现实的，只能采用常温预膜。系统初开车时水温低，且受季节限制，故只能根据当时的水温适当延长预膜时间。例如，有的根据试验确定，水温大于20℃时，预膜时间为24～36h；水温10～20℃时，48h。当然，还要根据预膜剂类型、

用量及其他条件确定预膜时间。预膜时间也不宜过长。

⑤ 流速　水流处于湍流状态时，可加快预膜剂的扩散速度，有利于电沉积过程，因此有利于成膜，使成膜快、质量好。故预膜时水流速不宜过低，流速加大也可以防止污垢沉积。但流速过大会起冲刷作用。故要求水流速在 0.5～3.0m/s 范围内，最好＞1.0m/s。

⑥ 浑浊度和铁离子　这类物质易沉积，使生成的膜松散，抗腐蚀性能差。故要求水的浑浊度≤10mg/L，总铁含量应≤0.5mg/L。

642　怎样进行预膜处理的运行与监测？

预膜处理的先决条件是金属表面清洁无沉积物。故循环冷却水系统必须在系统清洗之后进行预膜，这样才能使防护膜均匀致密、附着牢固，发挥较好的缓蚀效果。当系统清洗结束后，浑浊度＜10mg/L时，预膜处理即可开始，并停止补充水及排污水。预膜剂一般为固体药剂，可将其直接缓慢地加入水池，使其在水流中溶解。同时加酸调低 pH 值。对水的 pH 值、温度、钙离子、铁离子、浑浊度和药剂浓度应严格监测、分析和控制，防止处理不当产生结垢或腐蚀。预膜时间可根据水温等因素确定。

预膜处理在循环水开车初期进行，一般没有工艺热负荷，故水温为补充水的温度，一般不升高。如在特殊情况下，预膜期间系统已开始有热负荷，则应随时注意热负荷的变化，根据水温、药量和正磷酸盐的监测数据，考虑缩短预膜时间等相应的措施，防止水冷却器结垢。预膜结束时，要大量排水、补水，尽快转入正常运行时的配方和条件。

系统中预膜的效果一般不易观察到。故检查预膜效果一般是根据对挂片的肉眼判断，质量好的膜看起来均匀致密，有蓝色的色晕。另有两种用化学溶液的检验方法：

① 硫酸铜溶液法　由 15g 氯化钠及 5g 硫酸铜溶于 100mL 水中配成硫酸铜溶液。将此溶液滴于预膜和未预膜的挂片上，测定挂片上出现红点的时间，二者的时差愈大，表示预膜的效果愈好。红

点是硫酸铜与铁反应置换出的铜所致。故预膜质量好的挂片，出现红点的时间长。

② 亚铁氰化钾溶液法　由 15g 氯化钠及 5g 亚铁氰化钾溶于 100mL 水中配成亚铁氰化钾溶液。将此溶液滴于预膜和未预膜的挂片上，测定挂片上出现蓝点的时间，二者时差愈大，表示预膜效果愈好。预膜质量好的膜不易产生蓝点。蓝点为普鲁士蓝沉淀，由溶液与铁离子反应生成。反应式如下：

$$4Fe^{3+}+3K_4[Fe(CN)_6]\longrightarrow Fe_4[Fe(CN)_6]_3+12K^+$$

（六）试验及运行管理

643　筛选缓蚀阻垢配方之前应作哪些调查？

筛选循环水化学处理的缓蚀阻垢配方一般需要通过旋转挂片试验、动态模拟试验、甚至动态模拟中型试验等步骤。但掌握现场实际情况是筛选配方的基础，所以首先应对要处理的循环冷却水系统进行全面的调查，要尽可能全面、详细。

(1) 水质情况

① 水源情况　了解原水是地表水还是地下水，是否受到污染。地下水需收集不少于一年的逐季水质全分析资料。如水源有几口井，则每口井的水质都应了解。地表水需收集不少于一年的逐月水质全分析资料。

② 补充水质　了解原水是否经过预处理及预处理方法，所采用絮凝剂或混凝的品种。需收集不少于一年的逐月水质全分析资料。

③ 循环水质　如循环系统已经运行，则可直接采用现场的循环水水质资料作筛选配方的依据。但应选用浓缩倍数稳定时的数据，至少一年逐月的数据。并应尽可能了解自然 pH 值时的数据。

(2) 循环冷却水系统的设计数据

需了解冷却塔的型式、循环水量（m^3/h）、系统容积 V（m^3）、设计进塔及出塔水温（℃）。还应了解该系统可能达到的浓缩倍数

及运行倍数下的排污水量 $B(m^3/h)$、风吹损失水量 $D(m^3/h)$和补充水量 $M(m^3/h)$。并了解全年中气温、湿度和水温的变化趋势。

为防止药剂分解或水解产生沉淀，药剂在系统中的平均停留时间 $T[V/(B+D)]$一般不宜超过 50h。

(3) 水冷却器的数据与工艺系统的特点

需了解系统中全部水冷却器的数据：水冷却器的台数，各台水冷却器的型式、结构、材质、热强度、工艺介质、冷却水进出口温度、水流速等。如水冷器材质不同，对缓蚀阻垢剂的要求也不同。壳程水冷却器单靠缓蚀阻垢剂不易处理好，有时还需采取一些其他措施。

应了解设计允许的极限污垢热阻值及要求控制的污垢沉积量。还应了解水冷却器中工艺介质的性质，即了解泄漏的工艺介质可能带给系统哪些危害。

(4) 排放环境及大气污染情况

需了解排污水排出后流经地区的环境，如有无农作物、水产作物及最终排入的水域等，当地环境保护部门对排放的有关规定和要求。

应了解冷却塔周围环境及临近的生产装置是否有废气污染大气，当地的主导风向，以及大气污染对冷却塔的影响。

644 为什么要进行旋转挂片试验?

为了尽可能考虑流速的影响，作为水腐蚀测试第一步的筛选测试往往采用旋转挂片法。旋转挂片测试是在实验室的给定条件下，来筛选和评价水处理药剂酸方缓蚀效果的测试方法，但旋转挂片测试不能评定水质的结垢程度和药剂的阻垢程度。试验装置如图5-6-1所示。

试片固定在试验架上，用电动机带动试验架在水中旋转，使挂片与水保持一定的相对运动。一般试验架的旋转速度为 45～75 r/min (转/分)，试片与水的相对速度为 0.3～0.5m/s。几个试杯中分别装入空白及不同配方的水样，置于恒温水浴中。试验水样模拟现场循环水的水质成分、浓缩倍数及 pH 值。试验水温为 (50±

1)℃，也可选用生产装置中典型水冷却器的最高水温。试验的材质应与现场水冷却器的管材一致。试验时间一般为 72h。

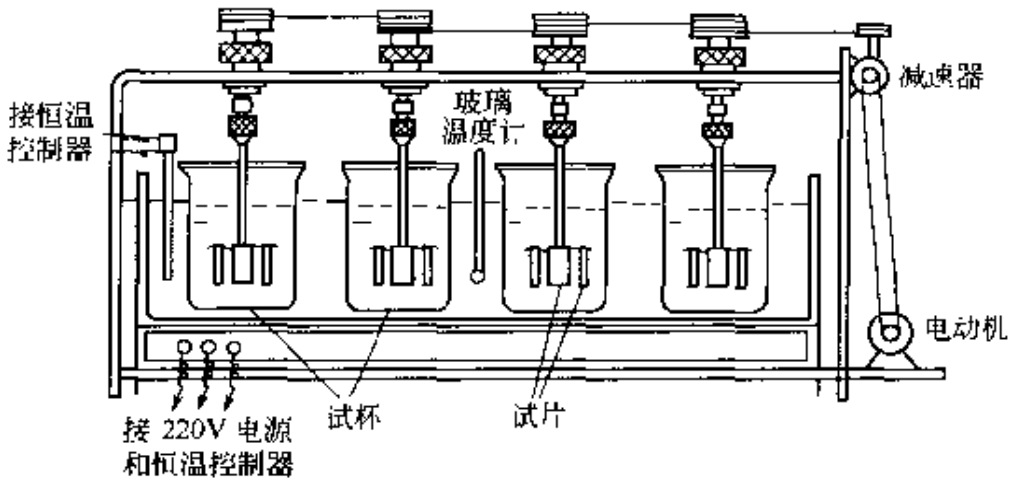


图 5-6-1　旋转挂片试验装置示意图

试验停止后，根据试片失重计算每个试杯中试片的腐蚀速度，效果良好的配方可作为初选配方，进一步在动态模拟试验中验证。

645　什么是动态模拟试验？如何进行？

动态模拟试验是一种对循环冷却系统腐蚀、结垢状况进行研究的测试方法。这种试验装置是动态的、有传热面的，为单管或三管式换热器，模拟生产上水冷却器的材质、壁温和水流动状态等，是试验室内评定水稳配方和工艺条件的一种较理想的综合性测试方法，试验数据可为中试及现场使用提供依据。动态模拟试验的参考流程如图 5-6-2。

循环冷却水进入模拟换热器的换热管内，加热之后的冷却水进入冷却塔，经冷却后循环使用。热介质在换热管外加热，一般采用低压蒸汽或热水加热，图 5-6-2 的加热介质为热水，热水由其他热源（蒸汽或电）加热。换热管材一般采用管外电镀的 20 号碳钢或与现场水冷却器换热管相同的材质（如不锈钢、黄铜等）。管规格为 ϕ10mm×1mm 或 ϕ19mm×2mm。

试验用水一般模拟生产现场冷却水质进行配制，有条件的可直接用现场水。设计管内水流速约 1.0m/s，换热管入口水温为 25～45℃，进出口水温差约 5℃，入口水温波动为±0.02℃，浓缩倍数

为 2～5 倍。试验周期一般 7～14d，有的达一个月。试验结束后对试管进行剖管检查，测定污垢热阻平均值、不同温度端的垢层厚度和点蚀数据、管及挂片的腐蚀率，并对垢样成分进行分析，综合判断循环冷却水的腐蚀和结垢倾向。

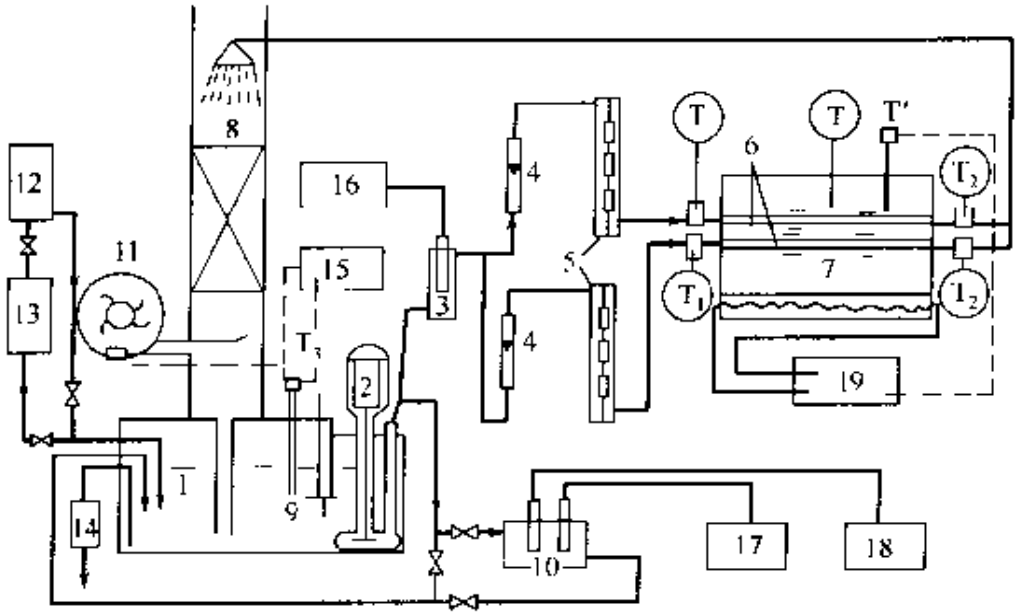


图 5-6 2　动态模拟试验流程图

1—凉水池；2—循环水泵；3—快速腐蚀测试阱电极；4 -转子流速计；5—挂片器；6—试验换热管；7　热水浴；8—冷却塔；9—挂片器、挂片；10—测试阱电极；11—送风机；12--计量加药器；13—计量补水器；14- 计量排水器；15—继电器；16—Fc 快速腐蚀测试仪；17—电导率仪；18—pH 计；19—恒温控制器；T、T_1、T_2—玻璃温度计；T'、T_4—触点温度计

动态模拟试验一般要根据旋转挂片、动态污垢监测等试验对配方筛选的初步结果，选择几种配方和工艺条件的试验与空白（不加药）试验进行对比，以便筛选出最经济合理的配方。因此，往往需要进行多轮动态模拟试验，为节省试验时间，有的动态模拟试验装置往往设计成两套或四套并联，可在一轮试验中得出两组或四组数据。

646　为什么要进行动态模拟中型试验？

动态模拟中型试验一般称中型试验，是一种比普通动态模拟试验规模大、模拟更加完善的试验装置，用于进一步验证经动态模拟试验筛选出来的配方和工艺条件，运行周期一般三个月以上。

中型试验的流程与动态模拟试验的流程基本相同，见图 5-6-3。为与不加药的空白试验对比，一般两套换热器并联试验，每套装置设一台冷却塔和两台换热器，冷却塔安装在室外，通常水循环量是 30～50m³/h，补充水采用生产现场水，换热器由 12 根管组成，可分别装入不同材质的换热管，水流速 0.6～1.0m/s，换热管可以每月拆卸检查，测定综合数据，判断配方的缓蚀阻垢效果。

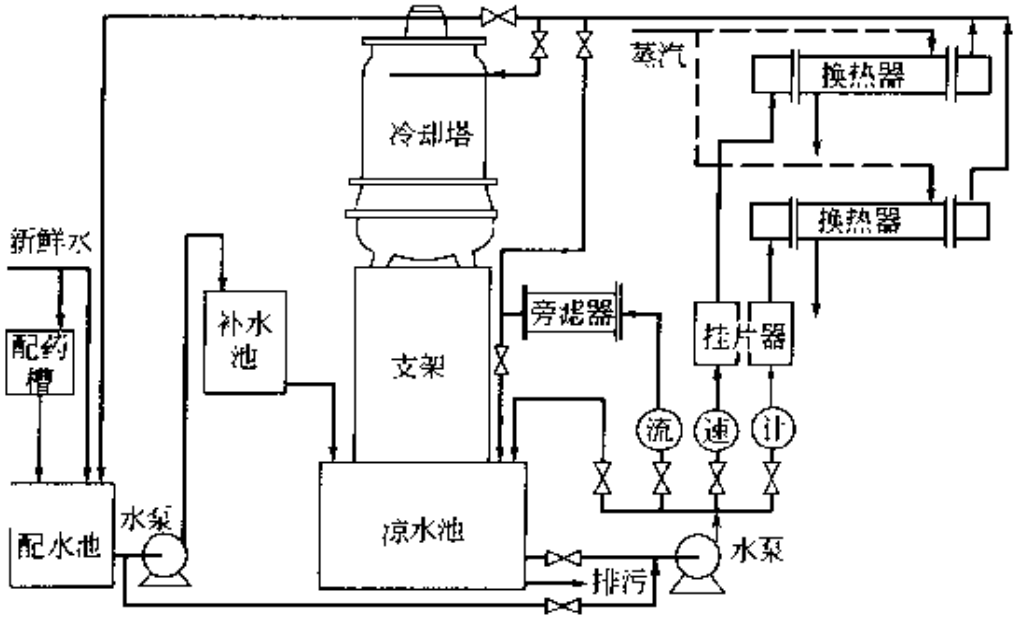


图 5-6-3　中试装置工艺流程示意图

中型试验在以下几方面的模拟优于动态模拟试验：

(1) 用现场水作补充水，水质与现场更相近；

(2) 冷却塔的运行条件，如水气比、排污率、补水率、风吹损失率都可以模拟；

(3) 运行 pH 值及药剂停留时间等均可模拟现场实际；

(4) 微生物和污泥状况较接近现场实际，可以综合评定缓蚀、阻垢、杀生及抗污泥的效果。

为此，中型试验是一种比动态模拟试验更完善的测试方法，大中型循环冷却水系统用的水质稳定配方应尽可能经过中型试验验证。

647 如何对模拟试验结果进行评价？

循环冷却水动态模拟试验、中试以及现场监测试验，其结果要进行评价，下表的数据可作为参考的评价指标。

项目	评价内容	动态模拟试验指标	中型试验指标	现场监测试验指标	评价级别
碳钢腐蚀控制①	平均腐蚀速度/mdd② (mm/a)	0～6 (0～0.028)	0～8 (0～0.037)	0～10 (0～0.046)	很好
	平均腐蚀速度/mdd (mm/a)	6～12 (0.028～0.056)	8～15 (0.037～0.070)	10～20 (0.046～0.093)	好
	平均腐蚀速度/mdd (mm/a)	12～15 (0.056～0.070)	15～20 (0.070～0.093)	20～25 (0.093～0.116)	可以允许
污垢附着控制①	粘附速度/mcm③	0～6	0～10	0～15	很好
	极限污垢热阻值/10^{-4} $m^2 \cdot K/W$(10^{-4} $m^2 \cdot h \cdot ℃/kcal$)	0～0.86 (0～1.0)	0～1.29 (0～1.5)	0～1.72 (0～2.0)	
	粘附速度/mcm	6～15	10～20	15～30	好
	极限污垢热阻值/10^{-4} $m^2 \cdot K/W$($10^{-4} m^2 \cdot h \cdot ℃/kcal$)	0.86～1.72 (1.0～2.0)	1.29～2.58 (1.5～3.0)	1.72～3.44 (2.0～4.0)	
	粘附速度/mcm	15～20	20～30	30～40	可以允许
	极限污垢热阻值/10^{-4} $m^2 \cdot K/W$($10^{-4} m^2 \cdot h \cdot ℃/kcal$)	1.72～2.58 (2.0～3.0)	2.58～3.87 (3.0～4.5)	3.44～5.16 (4.0～6.0)	
细菌控制	异养菌总数/10^4 个/mL	1～10	1～10	1～10	很好
	异养菌总数/10^4 个/mL	10～50	10～50	10～50	好
	异养菌总数/10^4 个/mL	50～100	50～100	50～100	可以允许

① 碳钢传热面上如有坑蚀，则腐蚀评价应降低一级。

② mdd 为 $mg/(dm^2 \cdot d)$。

③ mcm 为 $mg/(cm^2 \cdot 30d)$。

648 什么是动态污垢监测试验？

动态模拟监测试验是一种对循环冷却系统中结垢状况进行测试的方法，是一种动态的、有传热面的试验方法，适用于结垢型水质的评选。运态污垢监测装置又称 D.D.M. 装置。由循环冷却水系统及污垢监测系统两部分组成。循环水系统设有冷却塔、风机、水

池、循环水泵等。污垢监测系统是该装置的核心，是由一根内装管状电加热元件的不锈钢换热管和有机玻璃外套管组成。不锈钢管和有机玻璃管之间保持一定的环隙以通过冷却水。在不锈钢管壁内埋藏几根铠装式热电偶，以此反映管壁的温度。根据壁温变化可了解换热管的污垢热阻值。通过有机玻璃管可观察不锈钢管外垢物附着情况。

该装置的冷却水在环隙中的流速一般为 0.3～0.6m/s，水温为 40～60℃。运行时应控制电加热元件的电功率不变，使换热管的热流量为恒定值。同时需严格控制冷却水的流速和温度保持恒定。这样水侧瞬时污垢热阻值可由该时刻的壁温与清洁管的壁温差计算得。当冷却水温恒定时：

$$\text{水侧瞬时污垢热阻值}=\frac{1}{K_f}-\frac{1}{K_c}=\frac{F}{Q}(T_f-T_c)\quad m^2\cdot K/W$$

式中 Q——换热管的热流量，W；

F—— 换热管的外表面积，m^2；

K_c——换热管清洁时的总传热系数，$W/(m^2\cdot K)$；

K_f—— 换热管结垢时的总传热系数，$W/(m^2\cdot K)$；

T_c—— 换热管清洁时的管壁温度，℃；

T_f—— 换热管结垢时的管壁温度，℃。

上式中 F 为固定值，在电加热功率不变时，Q 为恒定值，瞬时污垢热阻值可由（T_f-T_c）的变化关系在自动记录仪器上得到，也可以根据 T_f 变化曲线得到极限污垢热阻。配方的阻垢率可根据极限壁温差计算得。

$$\text{阻垢率}=100(\Delta t_0-\Delta t)/\Delta t_0\quad \%$$

式中 Δt_0——空白试验时的极限壁温差，℃；

Δt——加药试验时的极限壁温差，℃。

试验时首轮先作空白试验，然后采用旋转挂片试验时初评较优配方进行加药试验。每轮试验时间为 7～14d。

动态污垢监测试验利用试验过程中壁温的变化来反映污垢沉积情况，并便于自动记录，可直接得出污垢热阻值和阻垢率。该装置

还可以调节加热元件的功率，改变加热管的热流量，以模拟不同热流密度和壁温的水冷却器条件。故这种试验方法具有快速、方便和灵敏的特点。但由于采用的是不锈钢换热管，故不能反映碳钢腐蚀对污垢热阻的影响。虽能通过挂片测得碳钢的腐蚀速度，但不能反映热负荷条件下的腐蚀状况。故该法主要适用于结垢型水质的评选。腐蚀型水质应采用动态模拟试验评选。

近年国内又研制成腐蚀结垢监测仪，它的原理和结构与上述的动态污垢监测装置相同，只是内管的材质选用与现场水冷却器相同的材质，如碳钢、铜或不锈钢等。这样，不仅能评定动态、有热负荷时的结垢状况，也能评定其腐蚀状况。其作用与动态模拟试验相同。其区别是：腐蚀结垢监测仪的换热管直接由电加热，同时冷却水流经换热管外（环隙）。

649　对循环冷却水的腐蚀试片有些什么要求？

挂片测试是测定循环冷却水对于金属腐蚀的最常用的方法之一。化工行业标准 HG/T 3523—83（冷却水化学处理标准腐蚀试片技术条件）、对挂片即金属腐蚀试片的材质、规格、表面处理及安装有一定的要求。

① 材质　根据循环水系统的热交换器材质，可采用碳钢、不锈钢、铝材、铜等。

② 试片的尺寸、加工及封装　为了消除边界效应的影响，减少暴露的端晶以减少试片试验的误差，故要求试片单位质量的表面积要大，边缘面积比例小，即要求薄形试片，一般厚度为 1～3mm，推荐的标准腐蚀试片尺寸（长×宽×厚）有两种：

Ⅰ型：50.0 ±0.1×25.0 ±0.1×2.0 ±0.1mm

Ⅱ型：72.4 ±0.1×11.5 ±0.1×2.0 ±0.1mm

表面光洁度全部 ∇_7。挂孔 ϕ(4.0 ±0.1)mm，光洁度 ∇_4。由于规定了加工公差，试片面积为固定值，且为整数，便于计算腐蚀速度。Ⅰ型面积为 28.00cm^2，Ⅱ型为 20.00cm^2。试片加工后经编号除油再用航空防锈纸或兵器防锈纸包装，有效期一年半。

③ 试片表面处理　加工成一定规格的试片需经以下步骤处理：

去除表面油污→抛光或用零号金相砂纸磨光→水冲洗→甲醇、丙酮脱脂→干燥→称重→编号→放入干燥器内。如果使用按标准技术条件加工和封装的试片，只需先经蒸馏水擦洗再用无水乙醇浸洗，然后吹干即可备使用。

对使用过的试片处理：去除表面腐蚀产物→甲醇、丙酮浸泡→干燥→称重。

去除腐蚀产物用酸洗方法，不同材质试片的处理方法也不同：低碳钢是 15% HCl＋0.5%缓蚀剂常温下浸泡 15s；不锈钢是以 15%HNO_3 在常温下浸泡 5min；铜及铜合金用 10%H_2SO_4 在常温下浸 5min；铝及铝合金用重铬酸钾 20g＋磷酸 28mL 于 1L 水中浸泡 30s。

650　循环水的监测换热器有什么作用？

循环冷却水的监测换热器又称监测热交换器，是安装在现场的监测装置，用以监测系统中水冷却器的腐蚀和结垢情况。监测换热器的位置一般在冷却塔附近的回水管线上，有时与重点水冷却器并联安装。

监测换热器的设计应模拟现场重点水冷却器的条件，主要是模拟材质、壁温及水的流动状态，一般为水走管程，有单管式或多管式，根据现场情况，管子可经预膜或不预膜，管子可采用 ϕ19×2mm 或 ϕ(8～10)×1mm，长度为 400～500mm 或 700～1000mm。管内水流速约保持 0.6～1.0m/s。换热器单位传热面积的热流密度与壁温密切相关，对结垢程度是关键性的影响因素，故除了模拟冷却水的进出口温度之外，更主要是水冷却器热端的介质温度。监测换热器的热源多采用常压蒸汽，这对模拟热流密度高的水冷却器是适当的，对热流密度低的宜用热水，有的引用现场的工艺介质就更加符合实际。

有些现场采用动态污垢监测装置的污垢监测系统代替监测换热器，换热管由电加热。调节加热元件的电功率来选择不同的热流密度及壁温。水走管外（环隙）适用于监测结垢型水质的系统。

监测换热器的运行周期一般是 1～3 个月，由于腐蚀和结垢的

程度随运行周期而差异，为便于数据对比，多固定每月[(30±1)d]取管一根剖管检查，观察腐蚀结垢情况。监测换热器是有换热面的监测方法，测出的是完整的综合数据，可测污垢热阻、垢层厚度、垢样成分、平均腐蚀速度和点蚀深度等，能全面了解腐蚀、结垢和微生物状态，所以比监测挂片更加接近生产实际，同时由于每月都能拆卸观察和分析情况，能及时发现问题，所以对指导生产运行更有参考价值。

651　点蚀的深度用什么方法测定？

测量点蚀深度有以下方法。

① 孔深仪　可用千分表改装成孔深仪，在测量端上焊接一个硬而细的尖针，利用针尖测点蚀深度，如图 5-6-4。

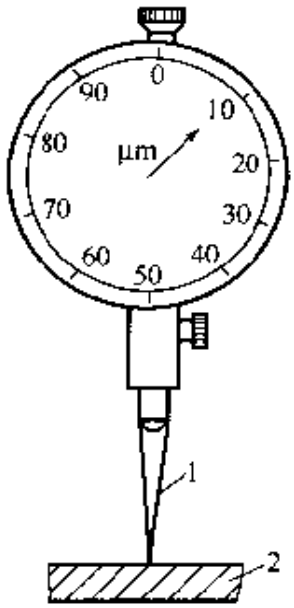


图 5-6-4　用千分表改装的孔深仪

1—针尖；2—金属表面

② 金属切削法　对管状式样的外壁可用精密机床切削外圆的方法，可测单位面积上的点数和最大点蚀深度。

③ 金相显微测试方法　先将换热管沿纵向剖开，用带显微刻度的金相显微镜进行观察，测出点深及垢厚。

④ 显微聚焦测量　采用 50～60 倍聚焦显微镜，使点蚀孔的表面和底部在显微镜的视场中两次清晰成像，然后根据目镜焦距的变化测得点蚀深度，可达微米（μm）的数量级。

⑤ 采用 ES-200B 型 X 光电子能谱仪的 XPS 仪，离子剥蚀技术。

652　为什么循环冷却水系统一定要注意综合治理？综合治理要注意哪些问题？

循环冷却水系统的水垢附着、腐蚀、微生物黏泥等危害问题的发生，大多是由于各种因素引起的或多种因素综合作用的结果，有些问题并不是化学药剂所能解决的，所以仅注意循环冷却水的化学

处理而忽视其他工作，就不能解决系统的所有问题。

循环冷却水系统综合治理需要做的工作很多，内容广泛。归纳起来大体上是抓好以下四方面的工作。

① 防止污染物通过补充水带入系统；

② 防止大气污染物通过冷却塔带入系统；

③ 尽量设法排除系统中的污染物；

④ 尽力减少工艺泄漏物的危害。

以下列举一些常见的综合治理措施。

① 严格把好补充水的质量关　补充水中的机械杂质、悬浮物、胶体物、有机物、铁、锰、微生物等带入循环水中，均可能造成危害。补充水进入循环系统后，因浓缩倍数提高使这些杂质的浓度也成倍增加。因排污水量很低，故这些杂质很难排出系统，在系统积累后可能产生沉积或腐蚀。对超标的杂质，化学处理也无能为力。化学处理的前提是要清洁的补充水，不能处理脏水。故要搞好循环水的化学处理，必须首先把好预处理质量关，防止杂质进入系统。

根据水质情况，一般预处理的方法有预沉、混凝、澄清、过滤、清毒等工序，可使杂质达到质量要求。对于有结垢倾向的水质，必要时可进行软化处理，除去部分碳酸盐硬度及部分碱度。软化方法采用石灰软化法或离子交换法。

② 种植草坪和水池加盖防风沙　某些资料说明，冷却塔系统在风沙之后浑浊度立即增加一倍，沉积物也相应增加。为防风沙，一般应在冷却塔周围种草坪阻风沙。风沙常见地区一般水池上加盖防沙，有的在塔顶也加盖。加盖还能起到遮阳光阻止藻类生长的作用。在沙尘暴常发生地区安排以上措施更为重要。

③ 合理安置冷却塔，防止环境危害　在设计时就应考虑到环境对冷却塔的影响，使塔位置距离污染源远些，避免在其下风向。某些设置不当的冷却塔会多年受环境的危害，得不到解决。如某些冷却塔离煤场、锅炉或高炉附近，常受到煤粉、烟尘、高炉粉尘等污染。环境中的工艺泄漏物或排放物（如酸性气体、氨、有机物等）如吹入冷却塔会使系统腐蚀加重或受到微生物的危害。

④ 加强滤网管理，防止机械杂质危害　系统中的塑料布、木块、塔填料、锈蚀物等机械杂质和昆虫等常会堵塞水冷却器影响传热。故加强循环水泵前的滤网管理十分重要。对滤网应及时清理和检修。有的将碳钢滤网改为不锈钢网以防腐蚀。

⑤ 灯火管制防昆虫　有些环境中夏季昆虫大量繁殖，往往随空气带入冷却塔进入循环系统。某种甲壳虫的粗细与换热管的内径相近，当滤网有漏洞时，会进入水冷却器堵住管口，不仅影响传热又造成垢下腐蚀。如果滤网无漏洞，甲壳虫也会附着在滤网上，慢慢解肢进入系统造成沉积和腐蚀，并形成咖啡色泡沫。解决的办法主要是严格灯火管制，即夜间在塔区不能开灯，或在塔周围设杀虫灯或探照灯将昆虫引开。

⑥ 旁滤池除去系统内杂质　旁流处理就是从循环水系统中抽出循环水量的2%～5%的水，经旁滤池过滤之后再返回系统。旁滤池可以过滤掉水中大部分悬浮固体、黏泥、微生物等。当旁滤池反洗时，这些杂质随反洗水排出系统。反洗水常是黑色脏水，故排出的杂质比系统排污水多得多，使系统中的杂质不易积累和危害。许多实例说明，设旁滤池后浑浊度降低50%以上，黏泥量和微生物也大量降低。

旁滤池多采用重力式无阀滤池，滤料多用石英砂，也可用无烟煤。滤料上杂质增多后，水头压力损失增加，可使过滤自动停止，进行反洗。

旁滤池不适用于含油污过多的水。油垢容易使滤料堵塞。

⑦ 池底排污和就地排污　池底排污是将排污管深入池底最低处，利用虹吸原理排污。可排出池底含沉积物较多的水，优于溢流排污。就地排污就是临时将系统排污口改在某台因泄漏受污染的水冷却器出口处，以减少其对整个系统的污染。为清除壳程水冷却器的沉积物，有时采用空气搅动措施或反冲洗措施使沉积物悬浮起来，这时也宜就地排污，使悬浮起来的沉积物不再返回系统。这些减少系统污染物的措施应在设计时考虑，以便随时采用。

⑧ 工艺泄漏物的管理　工艺介质（如氨、有机物、油类等）

泄漏均能造成危害。故应加强对泄漏物的监测，及时对水冷却器堵漏。如无条件停车堵漏，则需采取就地排污等措施。

653　为什么循环冷却水的化学处理技术不易完全解决壳程水冷却器的腐蚀和结垢问题？

化工生产中用的换热器种类较多，应用最广泛的是列管式换热器。列管换热器根据水流流程又可分为管程和壳程，水走换热管内的称为管程水冷却器，水走换热管外的称为壳程水冷却器。为了提高壳程水冷却器的传热效率，在壳内往往设有折流板，迫使水的流速与方向不断改变，这就形成了折流板附近的涡流区和滞流区。在这些流向改变和流速慢的地方，水中的污泥和黏泥就容易沉积下来，垢下出现坑蚀会使换热管很快锈穿。

由于壳程水冷却器中换热管外的空间较大，故壳程水冷却器的平均水流速度都较低，一般只有 0.3～0.6m/s，死角处甚至基本不流动，流速过低容易引起沉积，沉积物不仅隔绝药剂对金属表面的作用，且易发生垢下腐蚀。

壳程水冷却器的换热管要穿过管板和折流板，管与板之间的缝隙易于氯离子富集，如果换热管是不锈钢材质，氯离子的富集易使不锈钢材遭受应力腐蚀开裂。有时在设备制造上选用了不同材质的折流板和换热管，电位较负的金属就遭受电偶腐蚀。

综上所说，由于壳程水冷却器的特点容易产生沉积和沉积下的腐蚀，不锈钢材质的壳程水冷却器还存在应力腐蚀开裂和电偶腐蚀的可能，以上问题都不是单纯用化学处理技术所能解决的。故相对来说，壳程水冷却器的腐蚀和结垢都比管程水冷却器严重，使用的寿命也比管程短。

654　如何解决壳程水冷却器的腐蚀和沉积问题？

根据一些工厂的经验，综合起来有以下几种方法。

① 空气扰动　在壳程水冷却器的滞流区增添空气管，定期地通以压缩空气（或氮气），空气扰动的结果，可以将沉积下的黏泥和污泥随水流带出，特别在夏季微生物黏泥增多时，此法效果明显。

② 涂料保护　由于化学处理技术不能彻底解决壳程水冷却器的腐蚀问题，因此有不少厂使用涂料保护方法已取得良好的效果。性能好的涂料不仅具有良好的防腐作用，而且由于涂料表面光洁，故不易形成污泥和黏泥的沉积。

③ 单台酸洗　壳程水冷却器内的沉积和结垢不易避免，用机械方法又不能清除这些沉积物，但在停车期间采用单台酸洗可以取得很好的效果，酸洗过程因加有缓蚀剂，故腐蚀轻微不会损伤设备。相反地，因清除沉积物后消除了垢下腐蚀的隐患，使水冷却器的寿命得以延长。

④ 注意选材　壳程不锈钢水冷却器中的折流板与换热管的材质往往不一致，两种不同材质的接触与偶合，组成宏观的电偶腐蚀电池，电位较负的为阳极受到腐蚀，如碳钢折流板腐蚀就很严重。故从防腐的角度来看，两者的材质最好选用一致。工艺介质低于150℃的碳钢壳程水冷却器改为不锈钢材质也可提高寿命。

⑤ 消除应力　设备上应力的存在是应力腐蚀的内因条件，消除应力是减少应力腐蚀的必要措施。奥氏体不锈钢经过冷变形、加工或焊接存在内应力，水中氯离子含量过高或氯离子的富集，就可以引起材料的应力腐蚀开裂，消除应力后可使水冷却器的寿命大大提高。频繁的开停车，特别是突然停车，会造成非稳定的热应力与拉力，此种应力很大，为防止对不锈钢设备的损坏，保持连续稳定的操作是很有意义的。

655　为什么循环水系统要进行旁流处理？

所谓旁流处理，就是取部分循环水量进行处理，之后再返回系统内，以满足循环水水质的要求。

旁流处理可以按处理物质的形态分为悬浮固体处理和溶解固体处理两类。但是实用上一般是处理循环水的悬浮固体，因为从空气中带进系统的悬浮杂质以及微生物繁殖所产生的黏泥和补充水中的泥沙、黏土、难溶盐类；循环水中的腐蚀产物、菌藻、工艺介质的渗漏等因素，常常使循环水的浑浊度增加，单单依靠加大排污量是

不能彻底解决的，也是很不经济的。有的工厂由于没有设置旁流处理，水的浑浊度始终达不到要求，浑浊度经常在20～30mg/L，因而影响传热和引起腐蚀，以后在系统中增设了旁滤池，浑浊度就可保持在10mg/L以下，微生物及黏泥量也减少，由此可见旁流处理的必要。对于空气中含尘量较多的地区及微生物黏泥严重的系统，设置旁流处理效果尤为显著。

循环水悬浮固体处理通常采用过滤处理。这种方法简单易行，而且效果也较好，一般是在回水总管进冷却塔前接出一支管，这部分水流经滤池处理后直接入冷却水池。旁流处理量的确定可以用公式计算，但由于影响计算结果准确性的因素较多，通常对于处理悬浮物的旁流量按照经验取循环水量的2%～5%。旁滤池所用的过滤介质有几种类型，但用得最广的是砂子，为了提高效率，可用无烟煤或者混合的过滤介质来代替。如果水中有油污，旁滤池是不实用，因为油类会很快地使过滤介质堵塞。

656　如何计算循环水的旁滤量?

确定循环冷却水系统的旁滤量，比较简单的做法是按循环冷却水量的一个分数来假设，并以此来设计旁流处理装置的容量。但这样决定的旁滤池不是偏大，就是偏小，如果用计算的方法来确定旁滤量，则比较科学和切合现场的实际情况。计算循环水的旁滤量一般以水中的浑浊度为计算根据。影响水中的浑浊度因素很多，如补充水水质、空气中的悬浮物质、水中微生物的控制情况、运行中的浓缩倍数等等，因此无法对它进行精确计算，所以一般计算时就用设置旁滤池前的浑浊度和设置旁滤池后要求循环水的浑浊度为设计依据，前者可由运行时的操作数据得出。附有旁流处理装置的冷却水系统如图5-6-5所示。

设循环水系统的补充水流量为$M m^3/h$，补充水的浑浊度为$C_M g/m^3$；进入冷却塔的空气量为$R_A m^3/h$；空气中所含悬浮物为$C_A g/m^3$；排污水量为$B m^3/h$；循环水浑浊度在没有使用旁滤池时为$C_R mg/L$；设置旁滤池后要求循环水浑浊度为$C mg/L$；出旁滤池的循环水浑浊度为$C_S mg/L$；旁滤量为$S m^3/h$。

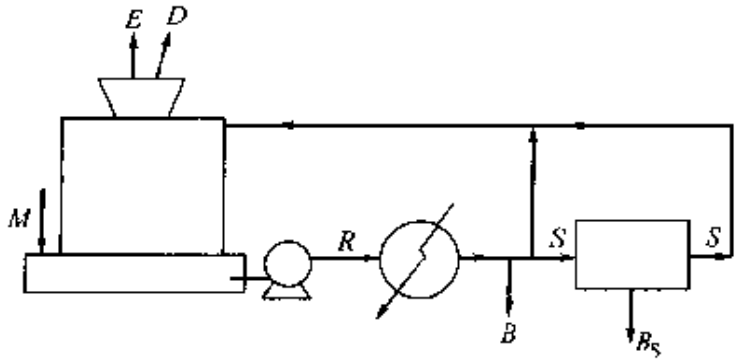


图 5-6-5　附有旁流处理装置的冷却水系统

在没有设置旁滤池时，循环水系统带出的悬浮物为 BC_R，在系统浑浊度不变的情况下，这个数值相当于带入循环水系统的悬浮物量，即循环水补充水、空气中悬浮物之总和，以式子表示

$$BC_R = MC_M + R_A C_A$$

设置旁滤池后，循环水中排出的悬浮物，为 $BC+S(C-C_S)$，而带入的悬浮物量基本不变，根据图 5-6-6 的物料平衡得

$$BC_R = MC_R + R_A C_A = S(C-C_S) + BC$$

$$S = \frac{B(C_R - C)}{C - C_S} \quad m^3/h$$

计算实例　某厂循环水系统 $R=8000m^3/h$，排污水量 $B=30m^3/h$，循环水浑浊度 $C_R=100mg/L$，今要求设置旁滤池，并使循环水浑浊度 $C=20mg/L$，出旁滤池的浑浊度 $C_S=5mg/L$，求旁滤量 S。

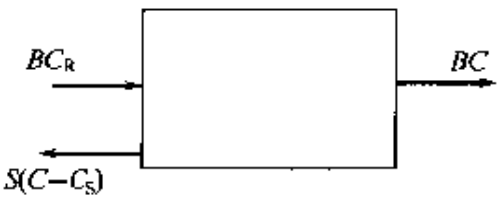


图 5-6-6　具有旁滤的循环冷却水物料平衡图

解：由上式

$$S = \frac{B(C_R - C)}{C - C_S}$$

$$= \frac{30(100-20)}{20-5} = 160 \quad m^3h$$

旁滤量与循环水量之比为 $\frac{S}{R} = \frac{160}{8000} = 2\%$

657　为什么冷却塔内木结构要定期喷药进行灭菌处理?

冷却塔运行一定时间后，塔的木结构会因受真菌侵蚀而腐蚀。这些微生物滋生在水浸不到的地方，因这些部位水中的杀生剂达不到。收水器、通风筒、配水池以及强制通风的其他部分，尤易受到真菌的侵蚀。有些木质冷却塔通常是用有抗真菌性能的红杉心木建成，塔内所用的木材在安装成构筑物之前用杀真菌的木材防腐剂加压处理。但是这些防腐剂在五年到七年内将全部从木材内沥滤出，或是在运输和安装过程中，木材防腐剂受损，从而易受真菌感染，真菌可导致木材严重损坏。常见的侵害有表面腐烂软化的软腐病，以及从内部破坏纤维素的白腐病。所以对于木质冷却塔进行定期的检查和喷药灭菌处理是很有必要的。喷药的部位为全部木质结构，特别要注意平时水浸不到的地方。现在国内很多工厂已对木质冷却塔每年进行一次喷洒药剂处理。

冷却塔喷洒药剂的工作一般是在停车大检修中进行，塔内停水并清扫冲洗干净后开始喷洒药剂。常用的是含双氯酚的溶液（即NL-4灭菌剂）。因该药剂有毒性并能刺激皮肤和呼吸道，故工作人员在喷洒时要做好防护措施。

喷药处理虽达不到彻底消除真菌危害的目的，但可防止局部受侵蚀的木材加速侵蚀，适当延长使用寿命。特别是喷药处理时彻底清除了塔中附着的黏泥，进行了较彻底的全面杀菌，故大检修后系统中微生物危害程度往往大幅降低，菌数较少。

658　什么是冷却塔木结构的补充性防腐措施?

我国在20世纪70年代引进了美国马利公司的木质冷却塔，其中的木构件是用铜、铬、砷水载复合防腐剂进行防腐处理，按其标准规定防腐剂的最低浸注深度为9.5mm，但经过检查测定普遍只有1～3mm，距最低浸注深度还差的很远。因此，为使木质冷却塔延长使用寿命必须要进行补充性防腐措施。补充性防腐是为了提高木材表层的药剂吸收量，在木材表面、开裂面、腐朽面内层形成一个木材表面薄膜，防止木材表面腐败或继续腐败。木质冷却塔的补充性表面防腐处理大都由木材防腐专业施工单位来进行。在进行处

理前，先要对木构件上残留的泥、尘土、沉积盐进行清除，以利木材对药剂的吸收，然后对木构件的败坏情况作全面的检查，以便采取相应的措施，最后是对清除了表面附着物的木构件在表面干爽的情况下喷洒含有六价铬、二价铜、五价砷含量为8%的防腐剂，喷刷次数为1～2遍，对败坏严重的地方则用大防腐剂量喷刷。喷刷之后的木构件宜干燥数日再投入运行。

659　为什么要加强循环冷却水系统的监测工作？

监测工作的作用就是依靠各种监测手段，收集由生产反映出的有关信息，随时修正冷却水水质所出现的弊病，并推断和考察运行结果。首先，必须通过分析监测了解化学处理是否严格按规定的指标运行。此外，监测工作还用以验证试验室有关试验结果，因为经试验提供的配方，受到各方面条件的限制，与生产实际还有一定的差异，所以必须接受生产的检验。尽管监测装置也不能完全模拟实际生产条件，但毕竟还是要接近一些。通过监测可以发现一些新的问题，反过来为试验提出新的课题。

总之，监测工作在整个水质控制管理中是一个重要的环节，严格的监测工作是冷却水处理的可靠和必要保证，没有严格的监测工作就没有良好的冷却水处理效果，只有通过长期、严格、细致的监测工作，才能掌握冷却水水质的脉搏，通过水质的微小变化洞察其后果，从而可提前采取预防措施，以免引起不良的后果。

660　对循环冷却水系统应作哪些必要的监测工作？

化学处理的监测工作是生产管理的必要内容，主要包括以下方面。

① 水质分析　应对原水、补充水及循环水每月进行一次全分析以积累历史资料。对循环水中主要指标应进行经常性的控制项目分析，如pH值、浑浊度、溶解固体量（或电导率）、碱度、钙离子、镁离子、氯离子、硫酸根、三氧化硅、总铁含量、化学耗氧量、缓蚀阻垢剂含量等。为测定浓缩倍数，对补充水和循环水中相应项目均应分析，如钾离子、二氧化硅、电导率等。系统中可能含有的泄漏物应定期分析，如氨、油、有机物等。

② 挂片　在水池或在循环水管旁路上设置挂片，运行一定时间后取出，测定它的腐蚀速度。由于挂片管理简单，如将挂片安置在有机玻璃管里，观察起来更为方便和直观。缺点是挂片不带换热面，对生产设备的模拟性较差。

③ 监测换热器　这种监测换热器的运行条件较为接近生产实际，能同时取得腐蚀速度和结垢的数据。缺点是一台监测换热器难以反映不同条件的各台工艺换热器的实际情况。可考虑设置两台监测换热器分别监测两种有代表性的工艺水冷却器。

④ 工艺水冷却器的监测　在生产正常的情况下，循环水量、工艺介质流量　工艺介质进口温度一般是稳定的，因此，工艺介质出口温度和进出口冷却水的温差，可以直接反映水冷却器换热效果，从而评定冷却水质量好坏。这个方法简便适用，且能直接反映生产实际效果。

⑤ 微生物活动的监测　冷却水中需经常监测微生物活动情况，如异养菌数、铁细菌数、硫酸盐还原菌数、黏泥量等。同时还需监测与微生物活动密切相关的化学项目，如余氯、亚硝酸根、化学耗氧量(COD)等。

⑥ 年度大检修期间的综合考察　年度大检修期间是检验化学处理效果的极好机会，水冷却器拆开之后，效果一目了然。考察之后应结合全年运行的监测数据进行总结，作为下一个年度调整配方及运行条件的参考资料。对水冷却器主要是外观检查、垢样分析及点蚀数和深度。外观检查时应在清洗前摄像留档，记录锈或垢的特征、厚度和分布。垢样分析取样以管壁为主，分别取热端及冷端垢样。对重点水冷却器应每年在同一部位取样以积累资料逐年对比。除水冷却器之外，还应对循环水系统全面考察，如配水系统、填料、水池、塔结构等。水池中的污泥沉积量往往直接反映化学处理的效果，必要时需取样测定菌种及菌数。对木结构塔应检查塔体藻类附着情况和检查真菌侵蚀情况。

661　以聚磷酸盐为缓蚀剂的冷却水系统，在正常运行时要控制哪些主要项目？

冷却水系统经预膜处理转入正常运行后，应按设计规定严格控

制各项工艺指标和不断监测系统中换热设备的结垢、腐蚀情况，以便及时发现问题加以解决。一般地说，采用磷系配方的冷却水系统要控制以下项目。

① pH 值　磷系配方中，pH 值是一个极为重要的项目，必须严格按设计的指标加以控制，这有助于聚磷酸盐膜的生成和维持。pH 值控制过高，容易结垢；pH 值偏低，对膜有破坏作用，且使腐蚀倾向增加。因此，pH 值的控制应稳定，波动范围要小。如在系统中设置 pH 自动记录和自动调节加酸装置，对提高处理效果会有很大的作用。

② Ca^{2+}　聚磷酸盐螯合水中的 Ca^{2+} 沉积在阴极表面形成一层保护膜而起到缓蚀作用，故水中必须要有足够的 Ca^{2+}，但 Ca^{2+} 过高，易于生成碳酸钙和磷酸钙的垢。Ca^{2+} 控制适当才能达到缓蚀和阻垢的效果。

③ Cl^-　Cl^- 高了对膜有破坏作用，对不锈钢容易产生点蚀和应力腐蚀。应根据系统的具体运行条件和原水含 Cl^- 情况确定指标。

④ 浑浊度　浑浊度高是冷却水系统形成沉积的主要原因，因此要求浑浊度越低越好。发现浑浊度有较大变化时，应及时查找原因采取措施，因浑浊度的变化反映了冷却水质的变化。菌藻的繁殖，补充水的水质都会影响浑浊度。

⑤ 总铁　循环水中总铁的变化，反映了系统中腐蚀抑制的情况，如总铁不断上升，说明系统中铁在不断的溶解，腐蚀在加重，应引起注意。

⑥ 总无机磷酸盐　它反映聚磷酸盐的含量，说明投加的药量是否适当。

⑦ 总磷酸盐　是有机磷酸盐和无机磷酸盐的总和。

⑧ 正磷酸盐　聚磷酸盐的水解产物，正磷酸盐高了容易结成磷酸钙垢。

⑨ 余氯　正确控制余氯量对保证杀菌灭藻和保护木质塔具有重要意义。如果通氯后，连续测不出余氯，则说明系统中出现异常

情况，如有机物增加、漏氨或有 NO_x 存在，因为这些物质都会与氯作用而消耗大量的氯。因此，通过余氯测定，也可及时发现系统中的问题，便于及时采取措施。

⑩ 浓缩倍数　浓缩倍数的测定是依靠测定循环水和补充水中某些离子含量来实现的，浓缩倍数高于或低于规定值，应加大或减小排污量，使其稳定在规定值范围内。控制好浓缩倍数对节约用水和降低药剂费用的意义很大。

⑪加入其他的药剂　如聚丙烯酸钠、聚马来酸、杀生剂等。

662　怎样进行正确地加药？

在化学处理过程中，正确地进行加药是很重要的，加药方式和加药地点不当，往往会使处理效果不好。

① 加药方式　一般的加药方式是将所用的缓蚀剂和阻垢剂溶成一定浓度的液体，以计量泵连续地加入水池。这种加药方式较好，可保证冷却水中药剂浓度稳定，波动范围小。但也有采用间断地投加，即每班或每天加 1～2 次，这种投加方式使药剂浓度极不稳定，波动范围大。剂量低了影响缓蚀阻垢效果，剂量高了也易产生不良后果。如某厂曾采用间断地向冷却水池加硫酸锌的方法，结果因浓度波动大和局部过量而产生了锌盐的沉积。

② 加药地点　药剂加入冷却水池不要靠近排水口，以免药剂直接被排走。药剂在池中要有一个混合的时间，使其混合均匀。不要靠近某一台泵的入口加药，这样会造成药剂浓度分布不均，加酸时更要注意到这一点，酸的局部过量会使腐蚀加剧，选择加药地点时要慎重。

③ 药剂的分析与检验　为保证药剂在水中的含量，应对水中药剂含量进行分析，根据分析数据调整加药量。采用由厂商提供的复合缓蚀阻垢剂时，应由供应厂方提出检验方法，投入水中后应分析控制其主药剂的含量。

加药时，除了要注意以上问题外，还必须充分了解药剂的性能，要注意药剂的共容性，如季铵盐和聚丙烯酸反应会生成沉淀，六偏磷酸钠用蒸汽或高温水溶化会水解为正磷酸盐易形成水垢。

663 怎样估算缓蚀阻垢剂及非氧化性杀生剂的消耗量？

选择循环冷却水化学处理方案时需根据水费、药费等综合费用进行经济比较，需事先估算药剂消耗量。方案确定之后估算的药剂消耗量则为进货的依据。消耗量的估算随加药方式而不同。

① 一次性或首次投入药剂　例如，系统初开车时清洗剂或预膜剂均为一次性加入的，往往为冷态运行，不排污不补充水。投加非氧化性杀生剂也属一次性投入，虽多为热态，但往往停止排污24h。所以，一次性药剂消耗量（即投加量）T_1 与排污水量无关，即

$$T_1=100V\cdot C_1/1000S=V\cdot C_1/10S \quad kg$$

式中　V——系统容积，m^3；

C_1——循环水中纯药剂的质量浓度，mg/L；

S——商品药剂的纯度，%。

系统中日常所用的缓蚀阻垢剂首次加入量可按一次性投入估算，日常维持量按以下两种方法估算。

② 连续排污并连续加药系统的维持药剂投入量　如系统中缓蚀阻垢剂浓度已达到规定的浓度 C_2，设连续加药使药剂质量浓度一直维持 C_2 mg/L，则药剂消耗量 T_2 为：

$$T_2=100B\cdot C_2/1000S=B\cdot C_2/10S \quad kg/h$$

其中 B 为排污水量、渗漏量及风吹损失之和，m^3/h。

③ 连续排污但间断加药系统的维持药剂投入量　如加药间隔时间为$(t-t_0)$h，则

$$C_3=C_0\cdot e^{B(t-t_0)/V} \quad mg/L$$

式中　C_0——纯药剂的初始质量浓度，mg/L；

C_3——纯药剂变化后的质量浓度，mg/L；

t_0——形成 C_0 时的时刻，h；

t——形成 C_3 时的时刻，h；

e——自然对数底数，约为 2.718。

药剂消耗量 $T_3=100(C_0-C_3)V/1000(t-t_0)S$

$$\approx(C_0-C_3)V/10(t-t_0)S \quad kg/h$$

计算时需特别注意商品药剂纯度问题。循环水中药剂浓度一般以分析测定为根据，以纯药剂量表示。例如，要求维持水中纯聚丙烯酸质量浓度为3mg/L，而商品聚丙烯酸一般纯度为30%，即$S=30$。故水中商品聚丙烯酸的质量浓度应为$3\times100/30=10$mg/L。某些商品采用代号，不明确成分，在水中不分析测定。药剂量可以商品浓度表示。这时可令$S=100$进行计算。

有些药剂可能在水中没有完全有效利用。如有些药（如聚磷酸盐）有水解问题，有的固体药剂（如玻璃状聚磷酸盐）难以完全溶解。考虑到这些因素，有时还需在以上计算量上再根据经验增加一些富裕量。进货时，还要考虑运行初期或临时事故因浓缩倍数达不到设计要求可能使药剂消耗量增加的情况。

664　怎样估算循环冷却水中的加酸量？

用酸调节循环冷却水的pH值，实际上是用酸中和了水中部分碱度。即加酸摩尔量应等于水中降低的碱度摩尔量。

设循环冷却水降低的碱度为$\Delta M=M_{前}-M_{后}$（以$(CaCO_3)$计，mg/L。

如采用98%的硫酸调pH值，则单位循环水所需加酸量$\Delta A=\dfrac{\Delta M\times98}{100\times0.98\times1000}=\dfrac{\Delta M}{1000}$，g/L或kg/m³。其中98为硫酸的相对分子质量。

$M_{前}$、$M_{后}$均与补充水的pH值和碱度无关。$M_{前}$为浓缩至一定倍数时自然pH值下的总碱度。$M_{后}$为该浓缩水调节至所要求pH值下的总碱度。可由现场实测或按本书556及557题的公式计算得。故

$$\text{系统中的首次加酸量}=\Delta A\cdot V\quad kg$$

$$\text{系统中的经常加酸量}=\Delta A\cdot B\quad kg/h$$

式中　V——系统总容积，m³；

B——排污水、渗漏水及风吹损失之和，m³/h。

665　循环水的pH值是怎样实现自动调节的？

循环水中的pH值，经常受各种因素的影响而发生波动，譬如

在加氯的时候或补充水质和水量发生变化的时候，都会使 pH 值波动而难以控制。循环水的 pH 值一般是采用定期监测的方法，但这只能是事后发现，pH 值的波动不能得到及时的调节。磷系药剂处理要求 pH 值波动范围要小，而且控制要稳定，这是一项很重要的控制指标，它直接影响药剂的处理效果。因此，实现循环水 pH 值自动调节对稳定 pH 操作，发挥药剂的处理效果会有很大好处。以下简要地介绍某厂利用国产设备实现循环水 pH 值的自动调节系统。

在该调节系统中，选用了上海第二分析仪器厂出品的 PHGF-22 型压力流通式酸度发送器及其配套的 PHG-21B 型工业酸度计。如图 5-6-7 所示，循环水泵的出口水样经减压阀 3，流经酸度发送器后直接排入地沟。调节水样减压阀 3 使进入酸度发送器的水样压力为 0.01MPa。调节空气减压阀 5 使进入酸度发送器的空气压力略大于循环水样压力，可控制在 0.011～0.012MPa，以使参比电极中的氯化钾溶液缓慢、均匀、连续地渗出玻璃电极，勾通测量桥路，以保证仪表正常工作，测量正确。

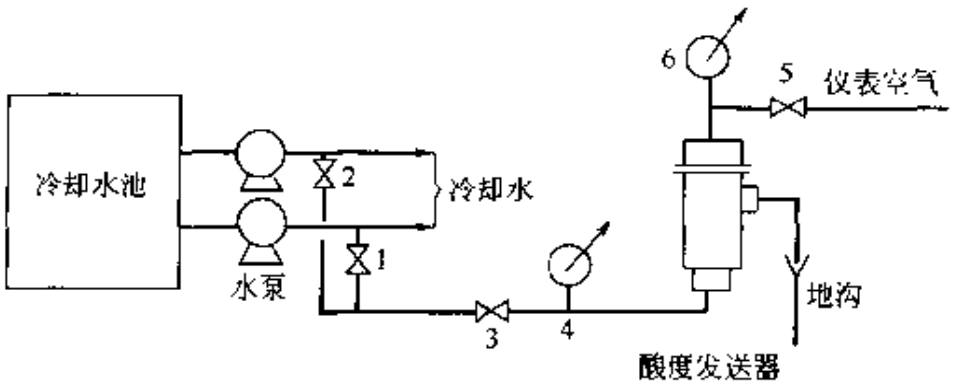


图 5-6-7　酸度发送器安装图

1,2—取样截止阀；3—水样减压阀；4,6—压力表；5—空气减压阀

调节仪表 EWY-303 接受工业酸度计 PHG-21B 送来的 0～10mA 直流测量信号，输出 0.02～0.1MPa 的气压信号，经过气动操作器（遥控板）QFB-100 进行气动功率放大后，加至密闭的低位浓硫酸贮槽，从而将酸压至冷却水池中。当循环水泵出口水的 pH 值变化时，工业酸度计 PHG-21B 的信号、调节仪表 EWY-303

的输出信号使低位酸槽上方的气压，均随之变化，对加入冷却水池酸量进行控制，从而实现了对循环水 pH 值的调节。图 5-6-8 是循环水 pH 值测量调节系统的示意图，在加入水池的输酸管上还装有限流孔板，它的孔径可根据需酸量和酸槽上方的压力，经过试验后来选择。

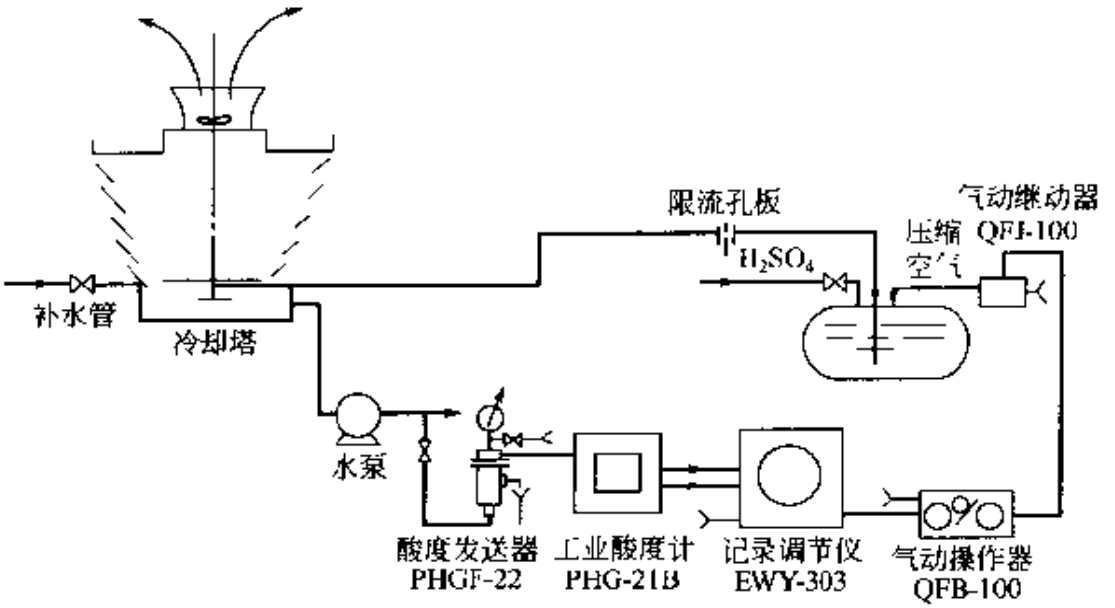


图 5-6-8　循环水 pH 值测量调节系统

666　循环水系统的 pH 值降得过低了怎么办?

循环水系统由于操作失误或其他原因，有时会发生 pH 值降得过低的事故，过多的酸漏入循环水系统其后果是严重的。当 pH 值降到 5 以下时，碳钢表面形成的钝化膜会很快被破坏；在 pH 值为 4 左右时，析氢反应开始，使铁迅速溶解，腐蚀速度就很快。冷却水的 pH 值较低时，混凝土水池也会遭到严重侵蚀，使水的硬度增加。

当发生 pH 值降得过低时，一般的处理方法是停止加酸并开大排污阀增加补充水量，使 pH 值自然回升。如果 pH 值降到 4.5 以下时，除加大排污和增加补充水使 pH 值迅速恢复正常外，还应加入相当于十倍正常浓度的腐蚀抑制剂，并使这种浓度保持一星期或十天，以便重新形成保护膜。

漏酸后切勿加入苛性钠，因为当 pH 值达到 7 左右时，系统中过量的亚铁离子会以水合氧化物沉淀出来。

$$Fe^{2+} + 2OH \longrightarrow Fe(OH)_2$$

氢氧化亚铁很快就被水中的氧气氧化成为氢氧化铁、产生严重的污垢。

$$2Fe(OH)_2 + \frac{1}{2}O_2 + H_2O \longrightarrow 2Fe((OH)_3$$

大量难溶的水合氧化铁将在水流速慢的地方沉积，从而产生沉积下的腐蚀。

附　录

附录 1　水、蒸汽、水溶液及空气的物理化学性质

1.1　水和蒸汽的物理化学性质

1.1.1　水的部分物理化学性质[1]

项　　目	数　　据	项　　目	数　　据
相对分子质量，H_2O	18.015	3.98℃（最大密度点）	1.0000
质量组成/%		100℃	0.9584
氢	11.19	汽	
氧	88.81	100℃(101.325kPa)	0.5974×10^{-3}
冰点(101.325kPa)/℃	0.00	冰的熔解热(0℃)	333.56J/g
沸点(101.325kPa)/℃	100.00		79.67cal/g
密度/(g/cm³)			6.01kJ/mol
冰			1.435kcal/mol
−20℃	0.9403	水的汽化热(100℃)	2256.7J/g
−10℃	0.9186		539.0cal/g
0℃	0.9167		40.65kJ/mol
水			9.710kcal/mol
0℃	0.9999		

注：101.325kPa＝1atm（标准大气压）。

1.1.2　不同温度下水的部分常用物理性质

温度/℃	外　压		密　度/(kg/m³)	焓，比能		比　热　容	
	/100kPa(100kN/m²)	/(kgf/cm²)		/(kJ/kg)	/(kcal/kg)	/[kJ/(kg·K)]	/[kcal/(kg·℃)]
0	1.013	1.033	999.9	0	0	4.212	1.006
10	1.013	1.033	999.7	42.04	10.04	4.191	1.001
20	1.013	1.033	998.2	83.90	20.04	4.183	0.999
30	1.013	1.033	995.7	125.8	30.02	4.174	0.997
40	1.013	1.033	992.2	167.5	40.01	4.174	0.997

续表

温度/℃	外压 /100kPa (100kN/m²)	外压 /(kgf/cm²)	密度 /(kg/m³)	焓,比能 /(kJ/kg)	焓,比能 /(kcal/kg)	比热容 /[kJ/(kg·K)]	比热容 /[kcal/(kg·℃)]
50	1.013	1.033	988.1	209.3	49.99	4.174	0.997
60	1.013	1.033	983.2	251.1	59.98	4.178	0.998
70	1.013	1.033	977.8	293.0	69.98	4.187	1.000
80	1.013	1.033	971.8	334.9	80.00	4.195	1.002
90	1.013	1.033	965.3	377.00	90.04	4.208	1.005
100	1.013	1.033	958.4	419.1	100.10	4.220	1.008
110	1.433	1.461	951.0	461.3	110.19	4.223	1.011
120	1.986	2.025	943.1	503.7	120.3	4.250	1.015
130	2.702	2.755	934.8	546.4	130.5	4.266	1.019
140	3.624	3.699	926.1	589.1	140.7	4.287	1.024
150	4.761	4.855	917.0	632.2	151.0	4.312	1.030
160	6.181	6.303	907.4	675.3	161.3	4.346	1.038
170	7.924	8.080	897.3	719.3	171.8	4.386	1.046
180	10.03	10.23	886.9	765.3	182.3	4.417	1.055
190	12.55	12.80	876.0	807.6	192.9	4.459	1.065
200	15.54	15.85	863.0	852.4	203.6	4.505	1.076
210	19.07	19.45	852.8	897.6	214.4	4.555	1.088
220	23.20	23.66	840.3	943.7	225.4	4.614	1.102
230	27.98	28.53	827.3	990.2	236.5	4.681	1.118
240	33.47	34.13	813.6	1038	247.8	4.756	1.136
250	39.77	40.55	799.0	1086	259.3	4.844	1.157
260	46.93	47.85	784.0	1135	271.1	4.949	1.182
270	55.03	56.11	767.9	1185	283.1	5.070	1.211
280	64.16	65.42	750.7	1237	295.4	5.229	1.249
290	74.42	75.88	732.3	1290	308.1	5.485	1.310
300	85.81	87.6	712.5	1345	321.2	5.736	1.370
310	98.76	100.6	691.1	1402	334.9	6.071	1.450
320	113.0	115.1	667.1	1462	349.2	6.573	1.570
330	128.7	131.2	640.2	1526	364.5	7.24	1.73
340	146.1	149.0	610.1	1595	380.9	8.16	1.95
350	165.3	168.6	574.4	1671	399.2	9.50	2.27
360	189.0	190.32	528.0	1761	420.7	13.98	3.34
370	210.4	214.5	450.5	1892	452.0	40.32	9.63

温度/℃	热导率 /[W/(m·K)]	热导率 /[kcal/(m·h·℃)]	[动力]黏度 /[(mPa·s)或cP]	[动力]黏度 /(10⁻⁶ kgf·s/m²)	运动黏度 /(10⁻⁵ m²/s)	体积膨胀系数 /(10⁻³/℃)	表面张力 /(mN/m)	表面张力 /(10⁻³ kgf/m)
0	0.551	0.474	1.789	182.3	1.789	−0.063	75.6	7.71
10	0.575	0.494	1.305	133.1	1.306	+0.070	74.1	7.56
20	0.599	0.515	1.005	102.4	1.006	0.182	72.7	7.41
30	0.618	0.531	0.801	81.7	0.805	0.321	71.2	7.26
40	0.634	0.545	0.653	66.6	0.659	0.387	69.6	7.10

续表

温度/℃	热导率 /[W/(m·K)]	热导率 /[kcal/(m·h·℃)]	[动力]黏度 /[(mPa·s)或cP]	[动力]黏度 /(10^{-6} kgf·s/m^2)	运动黏度 /(10^{-5} m^2/s)	体积膨胀系数 /(10^{-4}/℃)	表面张力 /(mN/m)	表面张力 /(10^{-3} kgf/m)
50	0.648	0.557	0.549	56.0	0.556	0.449	67.7	6.90
60	0.659	0.567	0.470	47.9	0.478	0.511	66.2	6.75
70	0.668	0.574	0.406	41.4	0.415	0.570	64.3	6.56
80	0.675	0.580	0.355	36.2	0.365	0.632	62.6	6.38
90	0.680	0.585	0.315	32.1	0.326	0.695	60.7	6.19
100	0.683	0.587	0.283	28.8	0.295	0.752	58.8	6.00
110	0.685	0.589	0.259	26.4	0.272	0.808	56.9	5.80
120	0.686	0.590	0.237	24.2	0.252	0.864	54.8	5.59
130	0.686	0.590	0.218	22.2	0.233	0.919	52.8	5.39
140	0.685	0.589	0.201	20.5	0.217	0.972	50.7	5.17
150	0.684	0.588	0.186	19.0	0.203	1.03	48.6	4.96
160	0.683	0.587	0.173	17.7	0.191	1.07	46.6	4.75
170	0.679	0.584	0.163	16.6	0.181	1.13	45.3	4.62
180	0.675	0.580	0.153	15.6	0.173	1.19	42.3	4.31
190	0.670	0.576	0.144	14.7	0.165	1.26	40.0	4.08
200	0.663	0.570	0.136	13.9	0.158	1.33	37.7	3.84
210	0.655	0.563	0.130	13.3	0.153	1.41	35.4	3.61
220	0.645	0.555	0.124	12.7	0.148	1.48	33.1	3.38
230	0.637	0.548	0.120	12.2	0.145	1.59	31.0	3.16
240	0.628	0.540	0.115	11.7	0.141	1.68	28.5	2.91
250	0.618	0.531	0.110	11.2	0.137	1.81	26.2	2.67
260	0.604	0.520	0.106	10.8	0.135	1.97	23.8	2.42
270	0.590	0.507	0.102	10.4	0.133	2.16	21.5	2.19
280	0.575	0.494	0.098	10.0	0.131	2.37	19.1	1.95
290	0.558	0.480	0.094	9.6	0.129	2.62	16.9	1.72
300	0.540	0.464	0.091	9.3	0.128	2.92	14.4	1.47
310	0.523	0.450	0.088	9.0	0.128	3.29	12.1	1.23
320	0.506	0.435	0.085	8.7	0.128	3.82	9.81	1.00
330	0.484	0.416	0.081	8.3	0.127	4.33	7.67	0.782
340	0.457	0.393	0.077	7.9	0.127	5.34	5.67	0.578
350	0.43	0.37	0.073	7.4	0.126	6.68	3.81	0.389
360	0.40	0.34	0.067	6.8	0.126	10.9	2.02	0.206
370	0.34	0.29	0.057	5.8	0.126	26.4	4.71	0.048

1.1.3 (0～99.4)%真空时水的沸点[32]

真空/%	沸点/℃	压力 /kPa	压力 /mmHg	压力 /(kgf/cm^2)	真空/%	沸点/℃	压力 /kPa	压力 /mmHg	压力 /(kgf/cm^2)
99.4	0	0.613	4.6	0.0063	99.1	6	0.933	7.0	0.0095
99.3	2	0.707	5.3	0.0072	99.0	8	1.067	8.0	0.0109
99.2	4	0.813	6.1	0.0083	98.8	10	1.227	9.2	0.0125

续表

真空/%	沸点/℃	压力 /kPa	压力 /mmHg	压力 /(kgf/cm²)	真空/%	沸点/℃	压力 /kPa	压力 /mmHg	压力 /(kgf/cm²)
98.6	12	1.400	10.5	0.0143	82.1	58	18.145	136.1	0.185
98.4	14	1.600	12.0	0.0163	80.3	60	19.918	149.4	0.203
98.2	16	1.813	13.6	0.0185	78.4	62	21.838	163.8	0.223
98.0	18	2.066	15.5	0.0211	76.4	64	23.905	179.3	0.244
97.7	20	2.333	17.5	0.0238	74.2	66	26.144	196.1	0.267
97.4	22	2.640	19.8	0.0269	71.8	68	28.558	214.2	0.291
97.1	24	2.986	22.4	0.0305	69.3	70	31.157	233.7	0.318
96.7	26	3.360	25.2	0.0343	66.5	72	33.944	254.6	0.346
96.3	28	3.773	28.3	0.0385	63.5	74	36.957	277.2	0.377
95.8	30	4.240	31.8	0.0432	60.3	76	40.183	301.4	0.410
95.3	32	4.760	35.7	0.0485	56.9	78	43.636	327.3	0.445
94.8	34	5.320	39.9	0.0542	53.3	80	47.343	355.1	0.483
94.1	36	5.946	44.6	0.0606	49.4	82	51.316	384.9	0.523
93.5	38	6.626	49.7	0.0676	45.1	84	55.582	416.9	0.567
92.7	40	7.373	55.3	0.0752	40.7	86	60.115	450.9	0.613
91.9	42	8.199	61.5	0.0836	35.9	88	64.941	487.1	0.662
91.0	44	9.106	68.3	0.0929	30.8	90	70.101	525.8	0.715
89.7	46	10.092	75.7	0.1029	25.4	92	75.594	567.0	0.771
89.0	48	11.159	83.7	0.1138	19.4	94	81.446	610.9	0.831
87.8	50	12.332	92.5	0.1258	13.5	96	87.673	657.6	0.894
86.6	52	13.612	102.1	0.139	6.9	98	94.299	707.3	0.962
85.2	54	14.999	112.5	0.153	0	100	101.325	760.0	1.033
83.7	56	16.505	123.8	0.168					

注：1mmHg=133.322Pa，1kgf/cm²=98.0665kPa。

1.1.4 压力 90.67～106.40kPa 时水的沸点[18]

压力 /kPa	压力 /mmHg	沸点/℃	压力 /kPa	压力 /mmHg	沸点/℃
90.67	680	96.916	92.00	690	97.317
90.93	682	96.996	92.27	692	97.396
91.20	684	97.077	92.53	694	97.477
91.47	686	97.157	92.80	696	97.556
91.73	688	97.237	93.07	698	97.635

续表

压力		沸点	压力		沸点
/kPa	/mmHg	/℃	/kPa	/mmHg	/℃
93.33	700	97.714	100.00	750	99.630
93.60	702	97.793	100.27	752	99.704
93.87	704	97.872	100.53	754	99.778
94.13	706	97.950	100.80	756	99.852
94.40	708	98.028	101.07	758	99.926
94.67	710	98.106	101.33	760	100.000
94.93	712	98.184	101.60	762	100.073
95.20	714	98.262	101.87	764	100.147
95.47	716	98.339	102.13	766	100.220
95.73	718	98.417	102.40	768	100.293
96.00	720	98.494	102.67	770	100.366
96.27	722	98.571	102.93	772	100.439
96.53	724	98.648	103.20	774	100.511
96.80	726	98.724	103.47	776	100.584
97.07	728	98.801	103.73	778	100.656
97.33	730	98.877	104.00	780	100.728
97.60	732	98.953	104.26	782	100.800
97.86	734	99.029	104.53	784	100.872
98.13	736	99.105	104.80	786	100.944
98.40	738	99.180	105.07	788	101.016
98.67	740	99.255	105.33	790	101.087
98.93	742	99.331	105.60	792	101.158
99.20	744	99.406	105.87	794	101.229
99.47	746	99.481	106.13	796	101.300
99.73	748	99.555	106.40	798	101.371

1.1.5 水和过热蒸汽的动力黏度[17]

$1\mu=10^{-6}\,kgf\cdot s/m^2$；$1\eta=10^{-6}\,Pa\cdot s$

温度/℃	压力/MPa(kgf/cm²)									
	0.10(1)		1.96(20)		3.92(40)		5.88(60)		7.85(80)	
	μ	η	μ	η	μ	η	μ	η	μ	η
100	1.231	12.08	28.8	282.5	28.9	283.5	29.0	284.5	29.1	285.5
110	1.272	12.48	25.9	254.1	26.0	255.0	26.1	256.0	26.2	257.0
120	1.312	12.87	23.5	230.5	23.6	231.5	23.7	232.5	23.8	233.5

续表

温度/℃	压力/MPa(kgf/cm²)									
	0.10(1)		1.96(20)		3.92(40)		5.88(60)		7.85(80)	
	μ	η	μ	η	μ	η	μ	η	μ	η
130	1.353	13.27	21.6	211.9	21.7	212.9	21.8	213.9	21.9	214.8
140	1.393	13.66	20.1	197.2	20.2	198.2	20.3	199.1	20.5	201.1
150	1.433	14.06	18.8	184.4	18.9	185.4	19.0	186.4	19.2	188.4
160	1.474	14.46	17.6	172.7	17.7	173.6	17.8	174.6	18.0	176.6
170	1.514	14.86	16.6	162.8	16.7	163.8	16.7	163.8	16.9	165.8
180	1.555	15.25	15.7	154.0	15.8	155.0	15.8	155.0	15.9	156.0
190	1.595	15.65	14.9	146.2	14.9	146.2	15.0	147.2	15.1	148.1
200	1.636	16.05	14.1	138.3	14.1	138.3	14.2	139.3	14.3	140.3
210	1.676	16.45	13.4	131.4	13.4	131.5	13.5	132.4	13.6	133.4
220	1.717	16.84	1.723	16.90	12.8	125.6	12.9	126.5	12.9	126.5
230	1.757	17.24	1.764	17.31	12.2	119.6	12.3	120.7	12.3	120.7
240	1.797	17.63	1.805	17.71	11.7	114.8	11.8	115.8	11.8	115.8
250	1.838	18.03	1.846	18.11	1.857	18.21	11.3	110.9	11.3	110.9
260	1.878	18.43	1.887	18.51	1.898	18.62	10.8	105.9	10.9	106.9
270	1.919	18.82	1.928	18.91	1.939	19.02	10.4	102.0	10.4	102.0
280	1.959	19.22	1.969	19.31	1.981	19.43	1.996	19.58	10.0	98.1
290	1.999	19.61	2.009	19.71	2.022	19.84	2.037	19.98	9.7	95.2
300	2.039	20.00	2.050	20.11	2.063	20.24	2.079	20.39	2.099	20.59
310	2.079	20.40	2.091	20.51	2.105	20.65	2.121	20.80	2.140	21.00
320	2.119	20.79	2.131	20.91	2.146	21.05	2.162	21.21	2.182	21.40
330	2.159	21.18	2.172	21.31	2.187	21.45	2.204	21.62	2.223	21.81
340	2.199	21.57	2.212	21.71	2.228	21.85	2.245	22.02	2.265	22.22
350	2.238	21.96	2.253	22.10	2.268	22.25	2.286	22.43	2.307	22.63
360	2.278	22.35	2.293	22.50	2.310	22.66	2.328	22.84	2.349	23.04
370	2.318	22.74	2.334	22.89	2.351	23.06	2.370	23.25	2.391	23.45
380	2.358	23.13	2.374	23.29	2.392	23.46	2.411	23.65	2.433	23.86
390	2.397	23.52	2.414	23.68	2.432	23.86	2.452	24.06	2.474	24.27
400	2.437	23.90	2.454	24.07	2.473	24.26	2.494	24.46	2.516	24.68
410	2.476	24.29	2.494	24.46	2.513	24.66	2.535	24.87	2.558	25.09
420	2.516	24.68	2.534	24.86	2.554	25.06	2.576	25.27	2.600	25.50
430	2.555	25.06	2.573	25.24	2.595	25.45	2.617	25.67	2.641	25.91
440	2.594	25.45	2.613	25.63	2.635	25.85	2.658	26.07	2.683	26.32
450	2.633	25.83	2.653	26.02	2.675	26.24	2.699	26.47	2.724	26.72
460	2.672	26.21	2.692	26.41	2.715	26.64	2.739	26.87	2.765	27.13
470	2.711	26.59	2.732	26.80	2.755	27.03	2.780	27.28	2.807	27.53
480	2.749	26.97	2.771	27.19	2.795	27.42	2.821	27.67	2.848	27.94
490	2.788	27.35	2.811	27.57	2.835	27.81	2.862	28.07	2.889	28.31
500	2.827	27.73	2.850	27.96	2.875	28.20	2.902	28.47	2.930	28.75
510	2.865	28.11	2.889	28.34	2.915	28.59	2.942	28.86	2.971	29.15
520	2.904	28.48	2.928	28.72	2.954	28.98	2.982	29.26	3.012	29.55
530	2.942	28.86	2.967	29.11	2.994	29.37	3.023	29.65	3.054	29.96
540	2.980	29.24	3.006	29.49	3.033	29.76	3.063	30.05	3.095	30.36

续表

温度/℃	压力/MPa(kgf/cm²)									
	0.10(1)		1.96(20)		3.92(40)		5.88(60)		7.85(80)	
	μ	η	μ	η	μ	η	μ	η	μ	η
550	3.018	29.61	3.045	29.87	3.073	30.15	3.104	30.45	3.136	30.77
560	3.056	29.98	3.084	30.25	3.113	30.54	3.145	30.84	3.177	31.17
570	3.094	30.35	3.123	30.63	3.153	30.93	3.185	31.24	3.218	31.58
580	3.132	30.73	3.162	31.01	3.192	31.32	3.226	31.64	3.259	31.98
590	3.170	31.10	3.201	31.39	3.232	31.71	3.266	32.03	3.300	32.38
600	3.208	31.47	3.239	31.77	3.272	32.09	3.306	32.42	3.341	32.78
610	3.246	31.84	3.277	32.14	3.311	32.47	3.346	32.81	3.382	33.17
620	3.283	32.20	3.315	32.51	3.350	32.85	3.385	33.20	3.422	33.56
630	3.321	32.57	3.353	32.89	3.389	33.23	3.425	33.59	3.462	33.96
640	3.358	32.94	3.391	33.26	3.427	33.61	3.464	33.97	3.502	34.35
650	3.396	33.31	3.429	33.63	3.466	33.99	3.503	34.36	3.542	34.74
660	3.433	33.67	3.467	34.00	3.504	34.37	3.542	34.74	3.581	35.13
670	3.470	34.03	3.505	34.37	3.542	34.74	3.581	35.12	3.621	35.52
680	3.507	34.39	3.542	34.74	3.580	35.11	3.620	35.50	3.660	35.90
690	3.544	34.75	3.579	35.11	3.618	35.49	3.659	35.88	3.700	36.29
700	3.580	35.11	3.616	35.47	3.656	35.86	3.697	36.26	3.739	36.67

温度/℃	压力/MPa(kgf/cm²)									
	9.81(100)		14.71(150)		19.61(200)		24.52(250)		29.42(300)	
	μ	η	μ	η	μ	η	μ	η	μ	η
100	29.3	287.4	29.6	290.4	30.0	294.3	30.4	298.2	31.0	304.1
110	26.4	259.0	26.7	261.9	27.0	264.9	27.5	269.8	27.8	272.7
120	24.0	235.4	24.3	238.4	24.6	241.3	25.1	246.2	25.3	248.2
130	22.1	216.8	22.4	219.7	22.7	222.7	23.1	226.6	23.4	229.6
140	20.6	202.1	20.8	204.0	21.1	207.0	21.5	210.9	21.8	213.9
150	19.4	190.3	19.5	191.3	19.8	194.2	20.1	197.2	20.4	200.1
160	18.1	177.6	18.3	179.5	18.5	181.5	18.8	184.4	19.1	187.4
170	17.0	166.8	17.2	168.7	17.3	169.7	17.6	172.6	17.9	175.6
180	16.0	157.0	16.2	158.9	16.3	159.9	16.5	161.9	16.8	164.8
190	15.1	148.1	15.3	150.0	15.4	151.1	15.6	153.0	15.8	155.0
200	14.3	140.3	14.5	142.2	14.6	143.2	14.8	145.2	14.9	146.2
210	13.7	134.4	13.8	135.4	13.9	136.4	14.0	137.3	14.2	139.3
220	13.0	127.5	13.1	128.5	13.2	129.5	13.3	130.5	13.5	132.4
230	12.4	121.6	12.5	122.6	12.6	123.6	12.7	124.6	12.9	126.5
240	11.9	116.7	12.0	117.7	12.1	118.7	12.2	119.7	12.3	120.7
250	11.4	111.8	11.5	112.8	11.6	113.8	11.7	114.8	11.8	115.8
260	10.9	106.9	11.0	107.9	11.1	108.9	11.2	109.9	11.3	110.9
270	10.5	103.0	10.6	104.0	10.7	105.0	10.8	105.9	10.9	106.9
280	10.1	99.1	10.2	100.1	10.3	101.0	10.4	102.0	10.5	103.0
290	9.7	95.2	9.8	96.1	10.0	98.1	10.1	99.1	10.2	100.1

续表

温度/℃	压力/MPa(kgf/cm²)									
	9.81(100)		14.71(150)		19.61(200)		24.52(250)		29.42(300)	
	μ	η	μ	η	μ	η	μ	η	μ	η
300	9.4	92.2	9.5	93.2	9.6	94.2	9.7	95.2	9.9	97.1
310	2.240	22.00	9.2	90.3	9.3	91.2	9.4	92.2	9.6	94.2
320	2.207	21.65	8.3	86.3	9.0	88.3	9.1	89.3	9.3	91.2
330	2.248	22.06	8.4	82.4	8.6	84.4	8.7	85.3	9.0	88.3
340	2.290	22.46	7.9	77.5	8.1	79.5	8.3	81.4	8.6	84.4
350	2.334	22.86	2.423	23.77	7.5	73.6	7.8	76.5	8.2	80.4
360	2.373	23.28	2.458	24.12	6.9	67.7	7.4	72.5	7.7	75.5
370	2.415	23.69	2.496	24.49	2.84	27.86	6.7	65.7	7.2	70.6
380	2.457	24.10	2.536	24.88	2.78	27.27	5.4	53.0	6.6	64.7
390	2.499	24.51	2.576	25.27	2.701	26.50	3.4	33.3	5.7	55.9
400	2.541	24.93	2.618	25.68	2.732	26.80	3.2	31.4	4.6	45.1
410	2.583	25.34	2.659	26.09	2.768	27.15	3.1	30.4	3.9	38.3
420	2.625	25.75	2.702	26.50	2.806	27.53	2.966	29.10	3.7	36.30
430	2.667	26.16	2.744	26.92	2.846	27.91	2.993	29.36	3.5	34.34
440	2.709	26.58	2.786	27.33	2.887	28.32	3.024	29.67	3.4	33.35
450	2.751	26.99	2.829	27.75	2.928	28.72	3.058	30.00	3.4	33.35
460	2.793	27.40	2.872	28.17	2.969	29.13	3.096	30.37	3.4	33.35
470	2.835	27.81	2.914	28.59	3.012	29.55	3.136	30.76	3.30	32.38
480	2.876	28.22	2.957	29.01	3.055	29.97	3.177	31.16	3.334	32.70
490	2.918	28.63	3.000	29.43	3.098	30.39	3.219	31.57	3.370	33.06
500	2.960	29.04	3.043	29.85	3.141	30.82	3.261	31.99	3.408	33.43
510	3.001	29.44	3.086	30.27	3.185	31.24	3.304	32.42	3.451	33.84
520	3.043	29.85	3.129	30.69	3.229	31.66	3.348	32.84	3.492	34.25
530	3.085	30.26	3.173	31.12	3.273	32.09	3.392	33.27	3.535	34.68
540	3.127	30.67	3.217	31.54	3.318	32.52	3.437	33.71	3.578	35.10
550	3.169	31.08	3.261	31.96	3.363	32.96	3.482	34.15	3.622	35.53
560	3.211	31.50	3.304	32.39	3.408	33.40	3.527	34.59	3.666	35.96
570	3.253	31.91	3.348	32.82	3.452	33.85	3.572	35.03	3.711	36.40
580	3.295	32.32	3.391	33.25	3.497	34.29	3.618	35.48	3.756	36.84
590	3.337	32.73	3.434	33.68	3.542	34.73	3.663	35.93	3.801	37.28
600	3.378	33.14	3.477	34.10	3.586	35.17	3.708	36.37	3.846	37.72
610	3.419	33.54	3.520	34.52	3.630	35.60	3.753	36.81	3.891	38.17
620	3.460	33.94	3.562	34.93	3.674	36.03	3.798	37.25	3.936	38.61
630	3.501	34.34	3.604	35.35	3.718	36.46	3.843	37.69	3.982	39.06
640	3.541	34.73	3.646	35.76	3.761	36.89	3.887	38.13	4.027	39.50
650	3.582	35.13	3.688	36.17	3.805	37.32	3.932	38.57	4.073	39.95
660	3.622	35.53	3.730	36.58	3.848	37.74	3.977	39.00	4.119	40.40
670	3.663	35.92	3.772	35.99	3.891	38.17	4.022	39.44	4.165	40.85
680	3.703	36.31	3.814	37.40	3.934	38.59	4.066	39.88	4.211	41.30
690	3.743	36.71	3.856	37.81	3.977	39.01	4.111	40.32	4.257	41.75
700	3.782	37.10	3.897	38.22	4.020	39.43	4.155	40.75	4.303	42.20

注：横线以上为水的黏度，横线以下为蒸汽的黏度。

1.1.6 水和过热蒸汽的运动黏度[17]

$10^{-6}m^2/s$

温度/℃	压力/MPa(kgf/cm²)									
	0.10 (1)	1.96 (20)	3.92 (40)	5.88 (60)	7.85 (80)	9.81 (100)	14.71 (150)	19.61 (200)	24.52 (250)	29.42 (300)
100	20.90	0.295	0.296	0.297	0.298	0.299	0.301	0.304	0.308	0.313
110	22.23	0.267	0.268	0.269	0.269	0.271	0.273	0.276	0.280	0.283
120	23.55	0.244	0.245	0.246	0.247	0.248	0.251	0.254	0.258	0.260
130	24.92	0.226	0.227	0.228	0.229	0.230	0.233	0.236	0.240	0.242
140	26.31	0.213	0.214	0.215	0.216	0.217	0.219	0.221	0.225	0.227
150	27.77	0.201	0.202	0.204	0.205	0.206	0.207	0.208	0.212	0.215
160	29.25	0.190	0.191	0.192	0.194	0.195	0.196	0.198	0.200	0.202
170	30.77	0.182	0.182	0.182	0.184	0.185	0.186	0.187	0.189	0.191
180	32.31	0.174	0.174	0.174	0.175	0.176	0.177	0.178	0.180	0.181
190	33.90	0.167	0.167	0.167	0.168	0.168	0.169	0.171	0.172	0.172
200	35.53	0.160	0.160	0.161	0.161	0.162	0.163	0.163	0.163	0.165
210	37.21	0.154	0.154	0.155	0.156	0.156	0.157	0.157	0.158	0.159
220	38.90	1.763	0.149	0.150	0.150	0.151	0.151	0.152	0.152	0.154
230	40.63	1.864	0.145	0.145	0.145	0.146	0.147	0.147	0.147	0.149
240	42.40	1.962	0.141	0.141	0.141	0.142	0.143	0.143	0.143	0.144
250	44.21	2.061	0.928	0.138	0.138	0.139	0.139	0.139	0.139	0.140
260	46.07	2.162	0.987	0.135	0.136	0.136	0.136	0.136	0.136	0.136
270	47.93	2.263	1.045	0.133	0.133	0.133	0.133	0.133	0.133	0.133
280	49.88	2.365	1.103	0.667	0.131	0.131	0.131	0.131	0.131	0.131
290	51.81	2.470	1.161	0.712	0.129	0.129	0.129	0.130	0.13	0.13
300	53.80	2.576	1.219	0.757	0.515	0.128	0.128	0.128	0.13	0.13
310	55.83	2.683	1.277	0.800	0.553	0.410	0.128	0.128	0.13	0.13
320	57.88	2.789	1.334	0.843	0.590	0.430	0.127	0.127	0.13	0.13
330	59.98	2.898	1.392	0.886	0.626	0.464	0.127	0.127	0.13	0.13
340	62.12	3.009	1.450	0.928	0.661	0.496	0.127	0.126	0.12	0.13
350	64.28	3.120	1.509	0.970	0.696	0.527	0.285	0.123	0.12	0.12
360	66.49	3.235	1.570	1.012	0.731	0.558	0.315	0.125	0.12	0.12
370	68.72	3.353	1.630	1.055	0.765	0.588	0.342	0.208	0.123	0.12
380	70.96	3.472	1.692	1.098	0.799	0.617	0.367	0.237	0.135	0.12
390	73.26	3.590	1.754	1.141	0.833	0.646	0.391	0.254	0.171	0.126
400	75.60	3.712	1.817	1.185	0.867	0.676	0.414	0.277	0.200	0.136

续表

温度/℃	压力/MPa(kgf/cm²)									
	0.10 (1)	1.96 (20)	3.92 (40)	5.88 (60)	7.85 (80)	9.81 (100)	14.71 (150)	19.61 (200)	24.52 (250)	29.42 (300)
410	77.97	3.833	1.881	1.230	0.902	0.705	0.437	0.298	0.218	0.164
420	80.38	3.958	1.945	1.274	0.937	0.734	0.459	0.318	0.229	0.188
430	82.80	4.081	2.010	1.319	0.972	0.763	0.482	0.337	0.248	0.202
440	85.31	4.208	2.076	1.364	1.007	0.793	0.504	0.356	0.266	0.217
450	87.80	4.337	2.142	1.410	1.043	0.822	0.526	0.375	0.284	0.232
460	90.32	4.469	2.209	1.456	1.079	0.852	0.548	0.394	0.301	0.247
470	92.88	4.602	2.277	1.504	1.115	0.882	0.570	0.412	0.317	0.253
480	95.47	4.734	2.346	1.551	1.152	0.912	0.592	0.430	0.333	0.268
490	98.10	4.866	2.416	1.599	1.189	0.942	0.614	0.448	0.348	0.283
500	100.8	5.005	2.486	1.647	1.226	0.973	0.635	0.466	0.364	0.297
510	103.5	5.114	2.557	1.695	1.264	1.004	0.658	0.484	0.380	0.311
520	106.2	5.284	2.630	1.744	1.302	1.035	0.680	0.502	0.395	0.324
530	109.0	5.426	2.703	1.794	1.340	1.067	0.702	0.520	0.411	0.338
540	111.8	5.568	2.777	1.844	1.378	1.098	0.725	0.538	0.426	0.353
550	114.6	5.714	2.851	1.895	1.417	1.131	0.748	0.557	0.442	0.367
560	117.5	5.862	2.927	1.947	1.457	1.163	0.771	0.575	0.458	0.381
570	120.4	6.012	3.003	2.000	1.498	1.196	0.795	0.594	0.474	0.395
580	123.3	6.164	3.080	2.053	1.539	1.230	0.819	0.613	0.490	0.409
590	126.2	6.316	3.168	2.106	1.580	1.264	0.843	0.632	0.506	0.423
600	129.2	6.468	3.236	2.159	1.621	1.298	0.867	0.652	0.523	0.438
610	132.3	6.621	3.315	2.213	1.662	1.331	0.891	0.671	0.539	0.452
620	135.3	6.776	3.394	2.267	1.703	1.365	0.915	0.690	0.556	0.466
630	138.4	6.933	3.474	2.322	1.745	1.399	0.939	0.709	0.572	0.480
640	141.5	7.091	3.555	2.377	1.788	1.434	0.964	0.728	0.588	0.495
650	144.6	7.251	3.637	2.433	1.830	1.469	0.988	0.748	0.604	0.509
660	147.8	7.412	3.720	2.489	1.873	1.504	1.013	0.768	0.621	0.524
670	151.0	7.575	3.803	2.546	1.917	1.540	1.038	0.788	0.638	0.538
680	154.2	7.740	3.887	2.603	1.961	1.576	1.063	0.808	0.655	0.553
690	157.4	7.906	3.972	2.660	2.005	1.612	1.088	0.828	0.672	0.568
700	160.7	8.073	4.057	2.718	2.049	1.648	1.114	0.848	0.689	0.583

注：表中黑线以上为水的黏度，以下为蒸汽黏度。

1.1.7 饱和水蒸气的黏度[17]

温度/℃	饱和压力/MPa(kgf/cm²)	动力黏度		运动黏度
		/(10^{-6} Pa·s)	/(10^{-6} kgf·s/m²)	/(10^{-6} m²/s)
150	0.47(4.8)	14.79	1.507	5.80
160	0.62(6.3)	15.22	1.551	4.67
170	0.79(8.1)	15.65	1.596	3.80
180	1.00(10.2)	16.09	1.640	3.12
190	1.26(12.8)	16.54	1.686	2.59
200	1.56(15.9)	17.00	1.733	2.16
210	1.91(19.5)	17.47	1.781	1.82
220	2.32(23.7)	17.94	1.828	1.54
230	2.79(28.5)	18.43	1.879	1.32
240	3.34(34.1)	18.94	1.930	1.13
250	3.98(40.6)	19.45	1.982	0.974
260	4.70(47.9)	20.00	2.039	0.843
270	5.50(56.1)	20.57	2.096	0.732
280	6.42(65.5)	21.16	2.157	0.637
290	7.44(75.9)	21.81	2.223	0.557
300	8.59(87.6)	22.49	2.293	0.487
310	9.87(100.6)	23.25	2.370	0.426
320	11.29(115.1)	24.08	2.455	0.372
330	12.87(131.2)	25.06	2.554	0.325
340	14.61(149.0)	26.20	2.671	0.282
350	16.53(168.6)	27.65	2.818	0.243
360	18.67(190.4)	29.76	3.033	0.207
370	21.05(214.7)	33.88	3.454	0.169

1.1.8 饱和水蒸气表（按温度排列）

温度/℃	绝对压力		蒸汽比容/(m³/kg)	蒸汽密度/(kg/m³)	蒸汽焓：汽化热				蒸汽比熵/[kJ/(kg·K)]
	/(kgf/cm²)	/kPa(kN/m²)			/(kcal/kgf)	/(kJ/kg)	/(kcal/kgf)	/(kJ/kg)	
0	0.0062	0.61	206.5	0.00484	595.0	2491.3	595.0	2491.3	9.1544
5	0.0089	0.87	147.1	0.00680	597.3	2500.9	592.3	2480.0	9.0242
10	0.0125	1.23	106.4	0.00940	599.6	2510.5	589.6	2468.6	8.8995
15	0.0174	1.71	77.9	0.01283	602.0	2520.6	587.0	2457.8	8.7806
20	0.0238	2.34	57.8	0.01729	604.3	2530.1	584.3	2446.3	8.6663
25	0.0323	3.17	43.40	0.02304	606.6	2538.6	581.6	2433.9	8.5570
30	0.0433	4.24	32.93	0.03036	608.9	2549.5	578.9	2423.7	8.4523
35	0.0573	5.62	25.25	0.03960	611.2	2559.1	576.2	2412.6	8.3518
40	0.0752	7.38	19.55	0.05115	613.5	2568.7	573.5	2401.1	8.2560
45	0.0977	9.58	15.28	0.06545	615.7	2577.9	570.7	2389.5	8.1638

续表

温度/℃	绝对压力 /(kgf/cm²)	绝对压力 /kPa (kN/m²)	蒸汽比容 /(m³/kg)	蒸汽密度 /(kg/m³)	蒸汽焓 /(kcal/kgf)	蒸汽焓 /(kJ/kg)	汽化热 /(kcal/kgf)	汽化热 /(kJ/kg)	蒸汽比熵 /[kJ/(kg·K)]
50	0.1258	12.33	12.054	0.0830	618.0	2587.6	568.0	2378.1	8.0751
55	0.1605	15.73	9.588	0.1043	620.2	2596.8	565.2	2366.5	7.9901
60	0.2031	19.92	7.687	0.1301	622.5	2606.3	562.5	2355.1	7.9084
65	0.2550	25.01	6.207	0.1611	624.7	2615.6	559.7	2343.4	7.8297
70	0.3177	31.16	5.052	0.1979	626.8	2624.4	556.8	2331.2	7.7544
75	0.393	38.5	4.139	0.2416	629.0	2629.7	554.0	2315.7	7.6819
80	0.483	47.4	3.414	0.2929	631.1	2642.4	551.2	2307.3	7.6116
85	0.590	57.8	2.832	0.3531	633.2	2651.2	548.2	2295.3	7.5438
90	0.715	70.1	2.365	0.4229	635.3	2660.0	545.3	2283.1	7.4785
95	0.862	84.5	1.985	0.5039	637.4	2668.8	542.4	2271.0	7.4157
100	1.033	101.3	1.675	0.5970	639.4	2677.2	539.4	2258.4	7.3545
105	1.232	120.8	1.421	0.7036	641.3	2685.1	536.3	2245.5	7.2959
110	1.461	143.3	1.212	0.8254	643.3	2693.5	533.1	2232.4	7.2386
115	1.724	169.1	1.038	0.9635	645.2	2702.5	530.0	2221.0	7.1833
120	2.025	198.6	0.893	1.1199	647.0	2708.9	526.7	2205.2	7.1289
125	2.367	232.1	0.7715	1.296	648.8	2716.5	523.5	2193.1	7.0778
130	2.755	270.2	0.6693	1.494	650.6	2723.9	520.1	2177.6	7.0271
135	3.192	313.0	0.5831	1.715	652.3	2731.2	516.7	2166.0	6.9781
140	3.685	361.4	0.5096	1.962	653.9	2737.8	513.2	2148.7	6.9304
145	4.238	415.6	0.4469	2.238	655.5	2744.6	509.6	2137.5	6.8839
150	4.855	476.1	0.3933	2.543	657.0	2750.7	506.0	2118.5	6.8383
160	6.303	618.1	0.3075	3.252	659.9	2762.9	498.5	2087.1	6.7508
170	8.080	792.4	0.2431	4.113	662.4	2773.3	490.6	2054.0	6.6666
180	10.23	1003	0.1944	5.145	664.5	2782.6	482.3	2019.3	6.5858
190	12.80	1255	0.1568	6.378	666.4	2790.1	473.5	1982.5	6.5075
200	15.85	1554	0.1276	7.840	667.7	2795.5	464.2	1943.5	6.4318
210	19.55	1917	0.1045	9.567	668.6	2799.3	454.4	1902.1	6.3577
220	23.66	2320	0.0862	11.600	669.0	2801.0	443.9	1858.5	6.2848
230	28.53	2797	0.07155	13.98	668.8	2800.1	432.7	1811.6	6.2132
240	34.13	3347	0.05967	16.76	668.0	2796.8	420.8	1762.2	6.1425
250	40.55	3976	0.04998	20.01	666.4	2790.1	408.1	1708.6	6.0721
260	47.85	4693	0.04199	23.82	664.2	2780.9	394.5	1652.1	6.0014
270	56.11	5503	0.03538	28.27	661.2	2760.3	380.1	1591.4	5.9298
280	63.42	6220	0.02988	33.47	657.3	2752.0	364.6	1526.5	
290	75.88	7442	0.02525	39.60	652.6	2732.3	348.1	1457.8	
300	87.6	8591	0.02131	46.93	646.8	2708.0	330.2	1382.5	
310	100.7	9876	0.01799	55.59	640.1	2680.0	310.8	1301.3	
320	115.2	11300	0.01516	65.95	632.5	2648.2	289.5	1212.1	
330	131.3	12880	0.01273	78.53	623.5	2610.5	266.6	1113.7	
340	149.0	14510	0.01064	93.98	613.5	2568.6	240.2	1005.7	
350	168.6	16530	0.00884	113.2	601.1	2516.7	210.3	880.5	
360	190.3	18660	0.00716	139.6	583.4	2442.6	170.3	713.4	
370	214.5	21030	0.00585	171.0	549.8	2301.9	98.2	411.1	
374	225.0	22060	0.00310	322.6	501.1	2098.0			

1.1.9 饱和水蒸气表（按压力排列）

绝对压力 kPa/(kN/m²)	绝对压力 atm	温度 /℃	蒸汽的比容 /(m³/kg)	蒸汽的密度 /(kg/m³)	蒸汽的焓 /(kJ/kg)	汽化热 /(kJ/kg)
1.0	0.00987	6.3	129.37	0.00773	2503.1	2476.8
1.5	0.0148	12.5	88.26	0.01133	2515.3	2463.0
2.0	0.0197	17.0	67.29	0.01486	2524.2	2452.9
2.5	0.0247	20.9	54.47	0.01836	2513.8	2444.3
3.0	0.0296	23.5	45.52	0.02197	2536.8	2438.4
3.5	0.0345	26.1	39.45	0.02535	2541.8	2432.5
4.0	0.0395	28.7	34.88	0.02867	2546.8	2426.6
4.5	0.0444	30.8	33.06	0.03205	2550.9	2421.9
5.0	0.0493	32.4	28.27	0.03537	2554.0	2418.3
6.0	0.0592	35.6	23.81	0.04200	2560.1	2411.0
7.0	0.0691	38.8	20.56	0.04864	2566.3	2403.8
8.0	0.0790	41.3	18.13	0.05514	2571.0	2398.2
9.0	0.0888	43.3	16.24	0.06156	2574.8	2393.6
10	0.0987	45.3	14.71	0.06798	2578.5	2388.9
15	0.148	53.5	10.04	0.09956	2594.0	2370.0
20	0.197	60.1	7.65	0.13068	2606.4	2354.9
30	0.296	66.5	5.24	0.19093	2622.4	2333.7
40	0.395	75.0	4.00	0.24975	2634.1	2312.2
50	0.493	81.2	3.25	0.30799	2644.3	2304.5
60	0.592	85.6	2.74	0.36514	2652.1	2393.9
70	0.691	89.9	2.37	0.42229	2659.8	2283.2
80	0.799	93.2	2.09	0.47807	2665.3	2275.3
90	0.888	96.4	1.87	0.53384	2670.8	2267.4
100	0.987	99.6	1.70	0.58961	2676.3	2259.5
120	1.184	104.5	1.43	0.69868	2684.3	2246.8
140	1.382	109.2	1.24	0.80758	2692.1	2234.4
160	1.579	113.0	1.21	0.82981	2698.1	2224.2
180	1.776	116.6	0.988	1.0121	2703.7	2214.3
200	1.974	120.2	0.887	1.1273	2709.2	2204.6
250	2.467	127.2	0.719	1.3904	2719.7	2185.4
300	2.961	133.3	0.606	1.6501	2728.5	2168.1
350	3.454	138.8	0.524	1.9074	2736.1	2152.3
400	3.948	143.4	0.463	2.1618	2742.1	2138.5
450	4.44	147.7	0.414	2.4152	2747.8	2125.4
500	4.93	151.7	0.375	2.6673	2752.8	2113.2
600	5.92	158.7	0.316	3.1686	2761.4	2091.1
700	6.91	164.7	0.273	3.6657	2767.8	2071.5
800	7.90	170.4	0.240	4.1614	2773.7	2052.7
900	8.88	175.1	0.215	4.6525	2778.1	2036.2
1×10^3	9.87	179.9	0.194	5.1432	2782.5	2019.7
1.1×10^3	10.86	180.2	0.177	5.6339	2785.5	2005.1
1.2×10^3	11.84	187.8	0.166	6.0241	2788.5	1990.6
1.3×10^3	12.83	191.5	0.151	6.6141	2790.9	1976.7
1.4×10^3	13.82	194.8	0.141	7.1038	2792.4	1963.7
1.5×10^3	14.80	198.2	0.132	7.5935	2794.5	1950.7
1.6×10^3	15.79	201.3	0.124	8.0814	2796.0	1938.2
1.7×10^3	16.78	204.1	0.117	8.5674	2797.1	1926.5

续表

绝对压力 kPa/(kN/m²)	绝对压力 atm	温度 /℃	蒸汽的比容 /(m³/kg)	蒸汽的密度 /(kg/m³)	蒸汽的焓 /(kJ/kg)	汽化热 /(kJ/kg)
1.8×10^4	17.76	206.9	0.110	9.0533	2798.1	1914.8
1.9×10^3	18.75	209.8	0.105	9.5392	2799.2	1903.0
2×10^3	19.74	212.2	0.0997	10.0338	2799.7	1892.4
3×10^3	29.61	233.7	0.0666	15.0075	2798.9	1793.5
4×10^3	39.48	250.3	0.0498	20.0959	2789.8	1706.8
5×10^4	49.35	263.8	0.0394	25.3663	2776.2	1629.2
6×10^3	59.21	275.4	0.0324	30.8494	2759.5	1556.3
7×10^3	69.08	285.7	0.0273	36.5744	2740.8	1487.6
8×10^3	79.95	294.8	0.0235	42.5768	2720.5	1403.7
9×10^4	88.82	303.2	0.0205	48.8945	2699.1	1356.6
10×10^3	98.69	310.9	0.0180	55.5407	2677.1	1293.1
12×10^3	118.43	324.5	0.0142	70.3075	2631.2	1167.7
14×10^3	138.17	336.5	0.0115	87.3020	2583.2	1043.4
16×10^3	157.90	347.2	0.00927	107.8010	2531.1	915.4
18×10^3	177.64	356.9	0.00744	134.4813	2456.0	766.1
20×10^3	197.38	365.6	0.00566	176.5961	2354.2	544.9

1.1.10 过热水蒸气表[12,62]

1.1.10.1 蒸汽压力 0.51MPa(5.0atm)[12]，饱和温度 151.11℃

温度 /℃	比容 /(m³/kg)	焓 /(kJ/kg)	比熵 /[kJ/(kg·K)]	温度 /℃	比容 /(m³/kg)	焓 /(kJ/kg)	比熵 /[kJ/(kg·K)]
151.11	0.3818	2747.8	6.8285	300	0.5329	3064.3	7.4684
160	0.3917	2767.5	6.8747	310	0.5426	3085.3	7.5040
170	0.4024	2790.1	6.9254	320	0.5524	3105.3	7.5392
180	0.4130	2812.3	6.9744	330	0.5621	3126.3	7.5735
190	0.4234	2834.0	7.0221	340	0.5717	3146.8	7.6074
200	0.4336	2855.8	7.0682	350	0.5814	3167.7	7.6409
210	0.4438	2877.2	7.1130	360	0.5910	3188.2	7.6740
220	0.4539	2898.1	7.1561	370	0.6006	3209.2	7.7066
230	0.4640	2919.0	7.1984	380	0.6102	3230.1	7.7389
240	0.4740	2940.0	7.2394	390	0.6198	3251.1	7.7707
250	0.4839	2960.9	7.2796	400	0.6294	3272.0	7.8021
260	0.4938	2981.4	7.3189	410	0.6390	3292.9	7.8331
270	0.5036	3002.4	7.3575	420	0.6485	3313.9	7.8636
280	0.5134	3022.9	7.3951	430	0.6581	3334.8	7.8938
290	0.5232	3043.4	7.4320	440	0.6677	3356.1	7.9239

续表

温度/℃	比容/(m³/kg)	焓/(kJ/kg)	比熵/[kJ/(kg·K)]	温度/℃	比容/(m³/kg)	焓/(kJ/kg)	比熵/[kJ/(kg·K)]
450	0.6772	3377.5	7.9532	580	0.8008	3658.4	8.3108
460	0.6867	3398.4	7.9826	590	0.8102	3680.6	8.3363
470	0.6962	3419.8	8.0114	600	0.8197	3702.4	8.3619
480	0.7058	3441.1	8.0399	610	0.8292	3725.0	8.3874
490	0.7153	3462.9	8.0684	620	0.8387	3747.2	8.4125
500	0.7248	3484.3	8.0984	630	0.8481	3769.4	8.4372
510	0.7343	3505.5	8.1241	640	0.8576	3791.6	8.4619
520	0.7438	3527.4	8.1513	650	0.8670	3814.2	8.4886
530	0.7533	3549.2	8.1785	660	0.8765	3836.8	8.5109
540	0.7628	3570.9	8.2053	670	0.8860	3859.4	8.5348
550	0.7723	3592.7	8.2321	680	0.8954	3882.0	8.5587
560	0.7818	3614.6	8.2585	690	0.9049	3904.6	8.5825
570	0.7913	3636.2	8.2848	700	0.9143	3927.6	8.6060

1.1.10.2 蒸汽压力 0.91MPa(9.0atm)[12]，饱和温度 174.53℃

温度/℃	比容/(m³/kg)	焓/(kJ/kg)	比熵/[kJ/(kg·K)]	温度/℃	比容/(m³/kg)	焓/(kJ/kg)	比熵/[kJ/(kg·K)]
174.53	0.2190	2772.9	6.6292	330	0.3097	3117.5	7.2921
180	0.2225	2786.3	6.6595	340	0.3152	3138.8	7.3269
190	0.2290	2810.6	6.7123	350	0.3207	3159.8	7.3608
200	0.2353	2834.5	6.7621	360	0.3261	3181.1	7.3943
210	0.2414	2858.7	6.8101	370	0.3316	3202.1	7.4274
220	0.2474	2880.5	6.8576	380	0.3370	3223.4	7.4600
230	0.2533	2903.1	6.9028	390	0.3424	3244.4	7.4923
240	0.2591	2925.3	6.9463	400	0.3478	3265.7	7.5241
250	0.2649	2947.1	6.9886	410	0.3532	3287.1	7.5555
260	0.2706	2968.9	7.0296	420	0.3586	3308.4	7.5865
270	0.2762	2990.2	7.0698	430	0.3640	3329.3	7.6170
280	0.2818	3011.6	7.1088	440	0.3694	3350.7	7.6472
290	0.2874	3032.9	7.1469	450	0.3747	3372.5	7.6769
300	0.2930	3054.3	7.1841	460	0.3801	3393.8	7.7062
310	0.2986	3075.6	7.2210	470	0.3854	3415.2	7.7355
320	0.3042	3096.6	7.2570	480	0.3908	3436.9	7.7644

续表

温度/℃	比容/(m³/kg)	焓/(kJ/kg)	比熵/[kJ/(kg·K)]	温度/℃	比容/(m³/kg)	焓/(kJ/kg)	比熵/[kJ/(kg·K)]
490	0.3961	3458.3	7.7929	600	0.4545	3699.5	8.0881
500	0.4014	3480.1	7.8209	610	0.4598	3722.1	8.1140
510	0.4068	3501.8	7.8490	620	0.4651	3744.3	8.1390
520	0.4121	3523.6	7.8766	630	0.4704	3766.9	8.1643
530	0.4174	3545.4	7.9038	640	0.4757	3789.1	8.1890
540	0.4227	3567.2	7.9311	650	0.4809	3811.7	8.2132
550	0.4280	3589.3	7.9577	660	0.4862	3834.3	8.2379
560	0.4383	3611.1	7.9842	670	0.4915	3857.3	8.2618
570	0.4386	3633.3	8.0106	680	0.4968	3879.9	8.2857
580	0.4439	3655.1	8.0366	690	0.5020	3902.9	8.3095
590	0.4492	3677.3	8.0625	700	0.5073	3925.5	8.3334

1.1.10.3 蒸汽压力 1.52MPa(15.0atm)[12]，饱和温度 197.36℃

温度/℃	比容/(m³/kg)	焓/(kJ/kg)	比熵/[kJ/(kg·K)]	温度/℃	比容/(m³/kg)	焓/(kJ/kg)	比熵/[kJ/(kg·K)]
197.36	0.1342	2791.3	6.4519	370	0.1970	3191.6	7.1795
200	0.1353	2798.5	6.4673	380	0.2004	3213.0	7.2126
210	0.1396	2825.3	6.5235	390	0.2037	3234.7	7.2453
220	0.1437	2851.2	6.5762	400	0.2070	3256.5	7.2779
230	0.1476	2876.3	6.6264	410	0.2103	3277.8	7.3102
240	0.1514	2901.0	6.6746	420	0.2136	3299.6	7.3416
250	0.1552	2924.9	6.7207	430	0.2169	3323.5	7.3725
260	0.1589	2948.3	6.7646	440	0.2202	3343.2	7.4031
270	0.1625	2971.4	6.8073	450	0.2235	3364.5	7.4332
280	0.1661	2994.0	6.8488	460	0.2268	3386.3	7.4634
290	0.1697	3016.6	6.8890	470	0.2300	3408.1	7.4931
300	0.1732	3038.8	6.9283	480	0.2333	3430.2	7.5224
310	0.1767	3060.6	6.9664	490	0.2365	3452.0	7.5513
320	0.1801	3082.7	7.0037	500	0.2398	3473.8	7.5798
330	0.1835	3104.5	7.0401	510	0.2430	3496.0	7.6078
340	0.1869	3126.3	7.0757	520	0.2462	3517.7	7.6355
350	0.1903	3148.1	7.1109	530	0.2494	3539.9	7.6631
360	0.1937	3169.8	7.1456	540	0.2527	3561.7	7.6903

续表

温度/℃	比容/(m³/kg)	焓/(kJ/kg)	比熵/[kJ/(kg·K)]	温度/℃	比容/(m³/kg)	焓/(kJ/kg)	比熵/[kJ/(kg·K)]
550	0.2559	3583.9	7.7175	630	0.2815	3762.7	7.9252
560	0.2591	3606.1	7.7443	640	0.2847	3785.3	7.9503
570	0.2623	3628.3	7.7707	650	0.2879	3808.3	7.9750
580	0.2655	3650.5	7.7971	660	0.2911	3830.9	7.9993
590	0.2687	3673.1	7.8230	670	0.2942	3853.5	8.0236
600	0.2719	3695.3	7.8490	680	0.2974	3876.6	8.0474
610	0.2751	3717.9	7.8750	690	0.3006	3899.2	8.0713
620	0.2783	3740.5	7.9001	700	0.3038	3922.2	8.0952

1.1.10.4 蒸汽压力 2.53MPa(25.0atm)[12]，饱和温度 222.90℃

温度/℃	比容/(m³/kg)	焓/(kJ/kg)	比熵/[kJ/(kg·K)]	温度/℃	比容/(m³/kg)	焓/(kJ/kg)	比熵/[kJ/(kg·K)]
222.90	0.08150	2802.2	6.2639	470	0.1367	3396.5	7.2457
230	0.08355	2824.0	6.3083	480	0.1387	3418.5	7.2754
240	0.08631	2854.1	6.3669	490	0.1407	3441.1	7.3047
250	0.08896	2883.0	6.4426	500	0.1427	3463.3	7.3336
260	0.09151	2910.2	6.4732	510	0.1447	3485.5	7.3625
270	0.09397	2936.6	6.5222	520	0.1467	3508.1	7.3910
280	0.09636	2962.2	6.5687	530	0.1487	3530.3	7.4190
290	0.09871	2986.9	6.6131	540	0.1506	3552.9	7.4466
300	0.1010	3011.1	6.6558	550	0.1526	3575.5	7.4793
310	0.1033	3035.0	6.6972	560	0.1546	3597.7	7.5015
320	0.1055	3058.5	6.7370	570	0.1565	3620.3	7.5283
330	0.1077	3081.5	6.7759	580	0.1585	3642.9	7.5547
340	0.1099	3104.5	6.8136	590	0.1604	3665.5	7.5810
350	0.1120	3127.5	6.8504	600	0.1623	3688.2	7.6070
360	0.1142	3150.1	6.8864	610	0.1643	3710.8	7.6334
370	0.1163	3172.8	6.9220	620	0.1662	3733.4	7.6589
380	0.1184	3195.4	6.9568	630	0.1682	3756.4	7.6840
390	0.1205	3218.0	6.9911	640	0.1701	3779.0	7.7092
400	0.1225	3240.2	7.0246	650	0.1720	3802.0	7.7393
410	0.1246	3262.8	7.0577	660	0.1740	3825.1	7.7590
420	0.1266	3285.0	7.0903	670	0.1759	3847.7	7.7833
430	0.1287	3307.2	7.1222	680	0.1778	3870.7	7.8075
440	0.1307	3329.3	7.1536	690	0.1798	3893.7	7.8318
450	0.1327	3351.5	7.1845	700	0.1817	3917.2	7.8557
460	0.1347	3374.1	7.2151				

1.1.10.5 蒸汽压力 4.05MPa(40atm)[12]，饱和温度 249.18℃

温度/℃	比容/(m^3/kg)	焓/(kJ/kg)	比熵/[kJ/(kg·K)]	温度/℃	比容/(m^3/kg)	焓/(kJ/kg)	比熵/[kJ/(kg·K)]
249.18	0.05078	2801.0	6.0780	430	0.07899	3285.5	6.8823
250	0.05090	2803.9	6.0826	440	0.08032	3303.8	6.9149
260	0.05297	2840.3	6.1517	450	0.08164	3332.3	6.9472
270	0.05491	2874.2	6.2149	460	0.08295	3355.3	6.9790
280	0.05676	2906.1	6.2731	470	0.08426	3378.3	7.0104
290	0.05849	2935.8	6.3267	480	0.08556	3401.4	7.0414
300	0.06016	2964.3	6.3765	490	0.08685	3424.4	7.0719
310	0.06178	2991.9	6.4238	500	0.08814	3447.4	7.1017
320	0.06335	3018.3	6.4686	510	0.08942	3470.4	7.1310
330	0.06488	3044.2	6.5117	520	0.09069	3493.5	7.1603
340	0.06638	3069.8	6.5536	530	0.09196	3516.1	7.1892
350	0.06786	3094.5	6.5938	540	0.09322	3539.1	7.2176
360	0.06931	3119.2	6.6331	550	0.09448	3562.1	7.2457
370	0.07074	3143.5	6.6712	560	0.09574	3585.2	7.2733
380	0.07215	3167.7	6.7081	570	0.09699	3608.2	7.3005
390	0.07355	3191.6	6.7441	580	0.09824	3631.2	7.3277
400	0.07493	3215.5	6.7797	590	0.09948	3654.2	7.3545
410	0.07630	3238.9	6.8144	600	0.1007	3677.3	7.3809
420	0.07765	3262.4	6.8488				

1.1.10.6 蒸汽压力 10MPa(98.7atm)[62]，饱和温度 310.96℃

温度/℃	比容/(m^3/kg)	焓/(kJ/kg)	比熵/[kJ/(kg·K)]	温度/℃	比容/(m^3/kg)	焓/(kJ/kg)	比熵/[kJ/(kg·K)]
310.96	0.01800	2724.4	5.6143	450	0.02974	3242.2	6.4220
350	0.02242	2924.2	5.9464	500	0.03277	3374.1	6.5984
400	0.02641	3098.5	6.2158	600	0.03833	3624.0	6.9025

1.1.10.7 蒸汽压力 15MPa(148.0atm)[62]，饱和温度 342.12℃

温度/℃	比容/(m^3/kg)	焓/(kJ/kg)	比熵/[kJ/(kg·K)]	温度/℃	比容/(m^3/kg)	焓/(kJ/kg)	比熵/[kJ/(kg·K)]
342.12	0.01035	2611.6	5.3122	450	0.01845	3158.2	6.1443
350	0.01148	2693.8	5.4450	500	0.02079	3309.7	6.3471
400	0.01566	2977.6	5.8851	600	0.02489	3581.2	6.6776

1.1.10.8 蒸汽压力 20MPa(197.4atm)[62]，饱和温度 365.71℃

温度/℃	比容/(m^3/kg)	焓/(kJ/kg)	比熵/[kJ/(kg·K)]	温度/℃	比容/(m^3/kg)	焓/(kJ/kg)	比熵/[kJ/(kg·K)]
365.71	0.005873	2413.8	4.9338	500	0.01477	3240.2	6.1440
400	0.009952	2820.1	5.5578	600	0.01816	3536.9	6.5055
450	0.01270	3062.4	5.9061				

1.1.11 水的比热容与压力和水温的关系[17]

温度/℃	压力/MPa(kgf/cm^2)					
	4.90(50)	9.81(100)	14.71(150)	19.61(200)	24.52(250)	29.42(300)
	比热容/[kcal/(kg·℃)]					
0	1.004	1.002	1.000	0.998	0.996	0.994
20	0.996	0.994	0.992	0.989	0.987	0.984
40	0.994	0.992	0.989	0.986	0.984	0.981
60	0.995	0.992	0.989	0.986	0.983	0.980
80	0.999	0.995	0.992	0.989	0.985	0.982
100	1.004	1.000	0.997	0.993	0.989	0.986
120	1.011	1.007	1.003	0.999	0.995	0.991
140	1.019	1.015	1.029	1.006	1.002	0.997
160	1.033	1.028	1.023	1.015	1.013	1.008
180	1.050	1.044	1.038	1.032	1.027	1.021
200	1.071	1.064	1.057	1.050	1.043	1.037
220	1.097	1.088	1.080	1.072	1.064	1.056
240	1.132	1.121	1.110	1.100	1.090	1.081
260	1.181	1.166	1.152	1.139	1.127	1.114
280		1.231	1.212	1.194	1.177	1.161
300		1.352	1.300	1.266	1.242	1.223
310			1.372	1.318	1.283	1.257
320			1.480	1.391	1.355	1.298
330			1.653	1.501	1.409	1.352
340			1.939	1.675	1.529	1.425
350				1.963	1.693	1.536

注：1kcal/(kg·℃)＝4.1868kJ/(kg·K)。

1.1.12 水的热导率（导热系数）与压力和水温的关系[17]

压力 /MPa(kgf/cm²)	温度/℃					
	30	50	70	90	110	130
	热导率/[W/(m·K)]					
0.10(1)	0.6113	0.6364	0.6531	0.6657	0.6783	
98.67(1000)	0.6490	0.6783	0.6692	0.7201	0.7327	0.7453
245.17(2500)	0.7076	0.7369	0.7620	0.7829	0.7997	0.8164
394.66(4000)	6.7536	0.7871	0.8122	0.8332	0.8533	0.8792
591.99(6000)	0.8081	0.8415	0.8667	0.8918	0.9127	0.9337
789.32(8000)	0.8541	0.8876	0.9211	0.9462	0.9672	0.9881

1.1.13 不同温度下绝对纯水的理论电导率、电阻率和pH值[32]

温度 /℃	pH值	电导率 /(μS/cm)	电阻率 /MΩ·cm	温度 /℃	pH值	电导率 /(μS/cm)	电阻率 /MΩ·cm
0	7.472	0.0119	84.18	55	6.568	0.204	4.90
5	7.367	0.0168	59.40	60	6.509	0.244	4.10
10	7.267	0.0233	42.86	65	6.451	0.289	3.46
15	7.173	0.0316	31.63	70	6.397	0.338	2.96
20	7.084	0.0421	23.77	75	6.346	0.393	2.55
25	6.998	0.0550	18.18	80	6.298	0.452	2.21
30	6.917	0.0709	14.10	85	6.251	0.517	1.94
35	6.840	0.0898	11.13	90	6.208	0.586	1.71
40	6.767	0.112	8.91	95	6.166	0.659	1.52
45	6.698	0.139	7.22	100	6.127	0.737	1.36
50	6.631	0.169	5.90				

1.1.14 水的离子积常数[1]

温度/℃	$-\lg K$	$K/10^{-14}$	温度/℃	$-\lg K$	$K/10^{-14}$
0	14.89	0.13	30	13.73	1.89
10	14.45	0.36	40	13.42	3.80
18	14.13	0.74	50	13.25	5.60
20	14.07	0.86	60	12.90	12.60
22	14.00	1.00	70	12.68	21.00
24	13.93	1.19	80	12.47	34.00
26	13.86	1.38	90	12.28	52.00
28	13.79	1.62	100	12.13	74.00

注：任何水溶液中都将保持水的电离平衡，因此水中 H^+ 和 OH^- mol/L浓度的乘积都是一个固定数值，称为水的离子积常数。即 $K=[H^+][OH^-]$，离子积常数随温度升高而增长。

1.2 水溶液的物理化学性质

1.2.1 部分易溶盐类的溶解度（20℃）[1]

g/(100g水)

分子式	溶解度	分子式	溶解度	分子式	溶解度
$AlCl_3 \cdot 6H_2O$	45.9	KCl	34.0	$(NH_4)_2SO_4$	75.4
$Al(NO_3)_2 \cdot 9H_2O$	73.0	$KMnO_4$	6.4	$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$	21.5
$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	36.2	KNO_3	31.6	NaCl	36.0
$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	16.6[14]	$KOH \cdot 2H_2O$	112.0	$NaHCO_3$	9.6
$Ca(OH)_2$	0.165	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	54.5	$NaNO_3$	88.0
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	0.202	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	35.5	$Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$	11.0
$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	20.7	$MnSO_4 \cdot 5H_2O$	62.9	$Na_2SO_4 \cdot 7H_2O$	44.6
$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	91.9	NH_4Cl	37.2	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	54.4
$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	26.5	NH_4NO_3	192.0		

1.2.2 部分难溶盐类的溶度积常数（25℃）[1]

分子式	K_S	pK_S	分子式	K_S	pK_S
$Al(OH)_3$	1.3×10^{-33}	32.9	$Fe(OH)_3$	3.2×10^{-38}	37.50
$BaCO_3$	5.1×10^{-9}	8.29	$MgCO_3$	1.0×10^{-5}	5.00
$CaCO_3$	4.8×10^{-9}	8.32	$Mg(OH)_2$	1.8×10^{-11}	10.74
$Ca(OH)_2$	5.5×10^{-6}	5.26	$MnCO_3$	3.8×10^{-11}	10.42
$CaSO_4$	2.5×10^{-5}	4.63	$Mn(OH)_2$	1.1×10^{-13}	12.96
$Cu(OH)_2$	5.0×10^{-20}	19.30	$ZnCO_3$	1.5×10^{-11}	10.84
$FeCO_3$	5.7×10^{-11}	10.25	$Zn(OH)_2$	7.1×10^{-18}	17.15
$Fe(OH)_2$	1.0×10^{-15}	15.00			

注：在一定温度下，难溶盐的饱和溶液有固定的平衡常数，即溶度积 K_S。K_S 由难溶盐离子的物质的量浓度乘积计算得。其反应式及通式为：

$$A_xB_y(固) \rightleftharpoons xA^{y+} + yB^{x-}$$

$$K_S=(A^{y+})^x(B^{x-})^y=(xS)^x(yS)^y$$

其中 S 为 A_xB_y 的溶解度（mol/L）；x、y 各为阴、阳离子的价数；yB、xA 各为阴、阳离子的物质的量浓度（mol/L）。如 $Ca(OH)_2$，$x=1$，$y=2$，则 $K_S=4S^3$。当难溶盐的阴阳离子价数相等时，$x=y=1$，$K_S=S^2$。

$$pK_S=-\lg K_S。$$

1.2.3 部分弱酸的电离常数（25℃）[1,32]

名　称	分　子　式		K	pK
甲酸	$HCOOH$		1.78×10^{-4}	3.75
醋酸	CH_3COOH		1.75×10^{-5}	4.76
草酸	$H_2C_2O_4$	K_1	5.6×10^{-2}	1.25
		K_2	5.1×10^{-5}	4.29
碳酸	H_2CO_3	K_1	4.45×10^{-7}	6.35
		K_2	4.69×10^{-11}	10.33
磷酸	H_3PO_4	K_1	7.6×10^{-3}	2.12
		K_2	6.2×10^{-8}	7.21
		K_3	4.4×10^{-13}	12.36
硫酸	H_2SO_4	K_2	1.2×10^{-2}	1.94
亚硫酸	H_2SO_3	K_1	1.3×10^{-2}	1.90
		K_2	6.3×10^{-8}	7.20
硫化氢	H_2S	K_1	8.9×10^{-8}	7.05
		K_2	1.3×10^{-13}	12.90
亚硝酸	HNO_2		5.1×10^{-4}	3.29
亚氯酸	$HClO_2$		1.1×10^{-2}	1.97
次氯酸	$HClO$		3.0×10^{-8}	7.53
氢氰酸	HCN		4.9×10^{-10}	9.31
氢氟酸	HF		6.75×10^{-4}	3.17
铬酸	H_2CrO_4	K_1	1.6×10^{-1}	0.8
		K_2	3.16×10^{-7}	6.5
砷酸	H_3AsO_4	K_1	6.45×10^{-3}	2.19
		K_2	1.15×10^{-7}	6.94
		K_3	3.16×10^{-12}	11.50
硼酸	H_3BO_3	K_1	5.70×10^{-10}	9.24
		K_2	1.8×10^{-13}	12.74
		K_3	1.6×10^{-14}	13.80
硅酸	$Si(OH)_4$	K_1	2.5×10^{-10}	9.6
	$SiO(OH)_3$	K_2	2.0×10^{-13}	12.7
苯酚	C_6H_5OH		1.3×10^{-10}	9.90
苯甲酸	C_6H_5COOH		2.0×10^{-5}	4.70
邻苯二甲酸	$C_6H_4(COOH)_2$	K_1	1.12×10^{-3}	2.95
		K_2	3.9×10^{-6}	5.41
酒石酸	$H_2C_4H_4O_6$	K_1	9.1×10^{-4}	3.04
		K_2	4.27×10^{-5}	4.37
琥珀酸	$C_2H_4(COOH)_2$	K_1	6.4×10^{-5}	4.19
		K_2	3.0×10^{-6}	5.52

续表

名　称	分 子 式		K	pK
柠檬酸	$H_3C_6H_5O_7$	K_1	8.7×10^{-4}	3.06
		K_2	1.8×10^{-5}	4.74
		K_3	4×10^{-6}	5.40
过氧化氢	H_2O_2		2.4×10^{-12}	11.62
苦味酸	$C_6H_2(NO_2)_3OH$		4.2×10^{-1}	0.38

注：弱酸及弱碱均为弱电解质。

弱电解质在溶液中只有一部分电离，在一定温度下分子和离子之间建立起平衡状态，称电离平衡。一般通式为：$AB \rightleftharpoons A^+ + B^-$

$$\text{电离常数 } K=\frac{[A^+][B^-]}{[AB]} \quad \text{mol/L}$$

K_1、K_2、K_3 各代表一、二、三级电离常数

$$pK=-\lg K。$$

1.2.4　部分弱碱的电离常数（25℃）[1,32]

名　称	分 子 式	K	pK
氨溶液	NH_4OH	1.8×10^{-5}	4.75
甲　胺	CH_3NH_2	4.8×10^{-4}	3.32
乙　胺	$C_2H_5NH_2$	4.7×10^{-4}	3.33
苯　胺	$C_6H_5NH_2$	4.2×10^{-10}	9.38
尿　素	NH_2CONH_2	1.5×10^{-14}	13.82
吡　啶	C_5H_5N	1.5×10^{-9}	8.82
二甲胺	C_2H_6NH	1.18×10^{-3}	2.93
三甲胺	C_3H_9N	8.1×10^{-5}	4.09
联　氨	$N_2H_4\cdot H_2O$ (NH_2NH_3OH)	3×10^{-5}	4.52
喹　啉	C_9H_7N	1×10^{-9}	9.00

1.2.5　铝和铁的羟基络合物的水解平衡常数[1]

反　应　式	K	pK
$Al^{3+}+2H_2O \rightleftharpoons Al(OH)^{2+}+2H^+$	1×10^{-5}	5.00
$2Al^{3+}+2H_2O \rightleftharpoons Al_2(OH)_2^{4+}+2H^+$	5.4×10^{-7}	6.27
$6Al^{3+}+15H_2O \rightleftharpoons Al_6(OH)_{15}^{3+}+15H^+$	1×10^{-47}	47
$7Al^{3+}+17H_2O \rightleftharpoons Al_7(OH)_{17}^{4+}+17H^+$	1.6×10^{-49}	48.80
$8Al^{3+}+20H_2O \rightleftharpoons Al_8(OH)_{20}^{4+}+20H^+$	2×10^{-69}	68.70
$13Al^{3+}+34H_2O \rightleftharpoons Al_{13}(OH)_{34}^{5+}+34H^+$	4×10^{-98}	97.40

续表

反 应 式	K	pK
$Al^{3+}+3H_2O \rightleftharpoons Al(OH)_3$(固)$+3H^+$	8×10^{-10}	9.10
$Al(OH)_3$(固)$\rightleftharpoons Al^{3+}+3OH$	1.3×10^{-34}	32.90
$Al(OH)_3$(固)$+H_2O \rightleftharpoons Al(OH)_4^- + H^+$	1.8×10^{-13}	12.74
$Al(OH)_3$(固)$+OH^- \rightleftharpoons Al(OH)_4^-$	20	−1.3
$Fe^{3+}+H_2O \rightleftharpoons Fe(OH)^{2+}+H^+$	6.8×10^{-3}	2.17
$2Fe^{3+}+2H_2O \rightleftharpoons Fe_2(OH)_2^{4+}+2H^+$	1.4×10^{-3}	2.85
$Fe(OH)^{2+}+H_2O \rightleftharpoons Fe(OH)_2^+ + H^+$	2.6×10^{-5}	4.58
$Fe^{3+}+3H_2O \rightleftharpoons Fe(OH)_3$(固)$-3H^+$	1×10^{-6}	6.00
$Fe(OH)_3$(固)$\rightleftharpoons Fe^{3+}+3OH^-$	3.2×10^{-38}	37.50
$Fe(OH)_3$(固)$\rightleftharpoons Fe(OH)^{2+}+2OH^-$	6.8×10^{-25}	24.17
$Fe(OH)_3$(固)$\rightleftharpoons Fe(OH)_2^+ + OH^-$	1.7×10^{-15}	14.77
$Fe(OH)_3$(固)$\rightleftharpoons Fe(OH)_3$(液)	2.9×10^{-7}	6.54
$Fe(OH)_3$(固)$+OH^- \rightleftharpoons Fe(OH)_4^-$	1×10^{-5}	5.00

注：K 为水解平衡常数；$pK=-\lg K$。

1.2.6 络合离子的不稳定常数[1]

络 合 平 衡	不稳定常数 K_c	$pK_c(-\lg K_c)$
$Ag(NH_3)_2^+ \rightleftharpoons Ag^+ + 2NH_3$	5.89×10^{-8}	7.23
$Cd(NH_3)_4^{2-} \rightleftharpoons Cd^{2+} + 4NH_3$	2.75×10^{-7}	6.56
$Cu(NH_3)_4^{2+} \rightleftharpoons Cu^{2+} + 4NH_3$	9.33×10^{-13}	12.03
$Zn(NH_3)_4^{2+} \rightleftharpoons Zn^{2+} + 4NH_3$	2.00×10^{-9}	8.70
$AlF_6^{3-} \rightleftharpoons Al^{3+} + 6F^-$	1.45×10^{-20}	19.84
$AgCl_4^{3-} \rightleftharpoons Ag^+ + 4Cl^-$	5.00×10^{-6}	5.30
$HgI_4^{2-} \rightleftharpoons Hg^{2+} + 4I^-$	1.38×10^{-30}	29.86
$Ag(CN)_2^- \rightleftharpoons Ag^+ + 2CN^-$	1.00×10^{-21}	21.00
$Cd(CN)_4^{2-} \rightleftharpoons Cd^{2+} + 4CN^-$	7.66×10^{-18}	17.11
$Cu(CN)_4^{3-} \rightleftharpoons Cu^+ + 4CN^-$	5.13×10^{-31}	30.29
$Fe(CN)_6^{4-} \rightleftharpoons Fe^{2+} + 6CN^-$	1.00×10^{-24}	24.00
$Fe(CN)_6^{3-} \rightleftharpoons Fe^{3+} + 6CN^-$	1.00×10^{-31}	31.00
$Zn(CN)_4^{2-} \rightleftharpoons Zn^{2+} + 4CN^-$	1.00×10^{-16}	16.00
$Fe(CNS)^{2+} \rightleftharpoons Fe^{3+} + CNS^-$	9.33×10^{-4}	3.03
$Hg(CNS)_4^{2-} \rightleftharpoons Hg^{2+} + 4CNS^-$	1.29×10^{-22}	21.89
$Ca(PO_3)_3^- \rightleftharpoons Ca^{2+} + 3PO_3^-$	3.50×10^{-4}	3.46
$Mg(PO_3)_3^- \rightleftharpoons Mg^{2+} + 3PO_3^-$	4.90×10^{-4}	3.31
草酸根，$C_2O_4^{2-}=R^{2-}$		
$AlR_2^+ \rightleftharpoons Al^{3+} + 2R^{2-}$	1.00×10^{-13}	13.00

续表

络 合 平 衡	不稳定常数 K_c	$pK_c(-\lg K_c)$
$FeR_3^{3-} \rightleftharpoons Fe^{3+} + 3R^{2-}$	6.30×10^{-21}	20.20
$MgR_2^{2-} \rightleftharpoons Mg^{2+} + 2R^{2-}$	4.17×10^{-5}	4.38
水杨酸根，$C_6H_4O(COO)^{2-} = R^{2-}$		
$AlR^{+} \rightleftharpoons Al^{3+} + R^{2-}$	1.00×10^{-14}	14.00
$CuR_2^{2-} \rightleftharpoons Cu^{2+} + 2R^{2-}$	3.54×10^{-19}	18.45
$FeR_3^{3} \rightleftharpoons Fe^{3+} + 3R^{2-}$	1.58×10^{-37}	36.80
酒石酸根，$(CHOH)_2(COO)_2^{2-} = R^{2-}$		
$CaR_2^{2-} \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2R^{2-}$	9.78×10^{-10}	9.01
$CuR_4^{6-} \rightleftharpoons Cu^{2+} + 4R^{2-}$	6.31×10^{-7}	6.20
$FeR^{+} \rightleftharpoons Fe^{3+} + R^{2-}$	3.24×10^{-8}	7.49
$PbR \rightleftharpoons Pb^{2+} + R^{2-}$	1.66×10^{-4}	3.78
$ZnR_2^{2-} \rightleftharpoons Zn^{2+} + 2R^{2-}$	4.80×10^{-9}	8.32
柠檬酸根，$C_3H_4OH(COO)_3^{3-} = R^{3-}$		
$AlR \rightleftharpoons Al^{3+} + R^{3-}$	1.00×10^{-20}	20.00
$CuR^{-} \rightleftharpoons Cu^{2+} + R^{3-}$	6.30×10^{-15}	14.20
$FeR \rightleftharpoons Fe^{3+} + R^{3-}$	1.00×10^{-25}	25.00
$PbR^{-} \rightleftharpoons Pb^{2+} + R^{3-}$	3.16×10^{-7}	6.50
$ZnR^{-} \rightleftharpoons Zn^{2+} + R^{3-}$	4.0×10^{-12}	11.40

注：络合物的离子不是绝对稳定的，仍有一定程度的电离，同样可达到电离平衡，可称为电离平衡。以络合平衡常数 K_c 来表示络合离子的不稳定程度，又称不稳定常数。例如，

$$[Fe(CN)_6]^{3-} \rightleftharpoons Fe^{3+} + 6CN^{-}$$

$$K_c = \frac{[Fe^{3+}\ mol/L][6CN^{-}\ mol/L]^6}{[Fe(CN)_6^{3-}\ mol/L]} = 1.00\times10^{-31}$$

1.3 水溶液及除盐水的电导率和电阻率

1.3.1 部分离子的电导率 (25℃)[1]

$\mu S/cm$(每 mg/L)

阳离子	Na^+	K^+	NH_4 N	Ca^{2+}	Mg^{2+}	
电导率	2.13	1.84	5.24	2.60	3.82	
阴离子	Cl^-	F^-	NO_3-N	HCO_3^-	CO_3^{2-}	SO_4^{2-}
电导率	2.14	2.91	5.10	0.715	2.82	1.54

1.3.2 部分离子的摩尔电导率 (25℃)[37]

$\mu S/cm$(每 mmol/L)

离子	$^{\infty}\lambda_0$	离子	$^{\infty}\lambda_0$	离子	$^{\infty}\lambda_0$
K^+	73.52	Cl^-	76.34	HS^-	72
Na^+	50.11	NO_3^-	71.44	HSO_3^-	71
H^+	349.82	$\frac{1}{2}SO_4^{2-}$	79.8	$\frac{1}{2}SO_3^{2-}$	80
NH_4^+	73.4	OH^-	198	$H_2PO_4^-$	29
$\frac{1}{2}Ca^{2+}$	59.5	HCO_3^-	44.48	$\frac{1}{2}HPO_4^{2-}$	60
$\frac{1}{2}Mg^{2+}$	53.06	$\frac{1}{2}CO_3^{2-}$	83	$\frac{1}{3}PO_4^{3-}$	78

注：$^{\infty}\lambda_0$ 为无限稀释时的离子摩尔电导率。

1.3.3 不同温度、不同含量的 NaCl 溶液的电导率[32]

温度/℃	氯化钠溶液的电导率/($\mu S/cm$)		
	0.02mg/L NaCl	0.05mg/L NaCl	0.10mg/L NaCl
5	0.0435	0.08	0.128
10	0.0556	0.10	0.167
15	0.0769	0.125	0.200
20	0.0909	0.142	0.233
25	0.111	0.167	0.270
30	0.142	0.200	0.323
35	0.167	0.222	0.357
40	0.189	0.263	0.400
45	0.222	0.303	0.435
50	0.250	0.370	0.500

1.3.4 除盐水或蒸馏水的电导率、电阻率和近似的电解质含量 (25℃)[32]

电导率 /($\mu S/cm$)	电阻率 /$\Omega \cdot cm$	近似的电解质含量/(mg/L)			
		NaCl	HCl	NaOH	CO_2
0.1	10000000	0.04	0.01		
0.2	5000000	0.08	0.02	0.03	
1	1000000	0.4	0.13	0.2	0.8

续表

电导率 /(μS/cm)	电阻率 /Ω·cm	近似的电解质含量/(mg/L)			
		NaCl	HCl	NaOH	CO_2
2	500000	0.8	0.26	0.4	2.5
4	250000	1.6	0.55	0.8	5.5
6	166000	2.5	0.9	1	20
8	125000	3.2	1.2	1.5	40
10	100000	4	1.5	2	70
20	50000	8	2	4	320
30	33333	14	3	5	730
40	25000	19	4	6	1400
50	20000	24	4.5	7	2200
60	16666	28	5.5		
70	14286	33	6.5		
80	12500	38	7.5	11	
90	11111	43	8		
100	10000	50	9	14	
200	5000	100	18	27	

1.4 水处理剂溶液的密度

1.4.1 氢氧化钠（NaOH）水溶液的密度（1～20℃）[2,55]

波美计	密度 /(g/cm³)	NaOH 含量				
		/%	/(mol/L)	/(kg/m³),/(g/L)	/(lb/ft³)	/(lb/gal)(美)
1.4	1.0095	1	0.25	10.10	0.6305	0.0842
2.9	1.0207	2	0.51	20.41	1.274	0.1704
4.5	1.0318	3	0.77	30.95	1.932	0.2583
6.0	1.0428	4	1.04	41.71	2.604	0.3181
7.4	1.0538	5	1.32	52.69	3.289	0.4397
8.8	1.0648	6	1.60	63.89	3.988	0.5332
10.2	1.0758	7	1.88	75.31	4.701	0.6284
11.6	1.0869	8	2.17	86.95	5.428	0.7256
12.9	1.0979	9	2.47	98.81	6.168	0.8246
14.2	1.1089	10	2.77	110.9	6.923	0.9254
16.8	1.1309	12	3.39	135.7	8.472	1.133
19.2	1.1530	14	4.04	161.4	10.08	1.347

续表

波美计	密度 /(g/cm³)	NaOH 含量				
		/%	/(mol/L)	/(kg/m³),/(g/L)	/(lb/ft³)	/(lb/gal)(美)
21.6	1.1751	16	4.70	188.0	11.74	1.569
23.9	1.1972	18	5.39	215.5	13.45	1.798
26.1	1.2191	20	6.10	243.8	15.22	2.035
28.2	1.2411	22	6.83	273.0	17.05	2.279
30.2	1.2629	24	7.58	303.1	18.92	2.529
32.1	1.2848	26	8.35	334.0	20.85	2.788
34.0	1.3064	28	9.15	365.8	22.84	3.053
35.8	1.3279	30	9.96	398.4	24.87	3.324
37.5	1.3490	32	10.79	431.7	26.95	3.602
39.1	1.3696	34	11.64	465.7	29.07	3.886
40.7	1.3900	36	12.51	500.4	31.24	4.176
42.2	1.4101	38	13.40	535.8	33.45	4.472
43.6	1.4300	40	14.30	572.0	35.71	4.773
45.0	1.4494	42	15.22	608.7	38.00	5.080
46.3	1.4685	44	16.15	646.1	40.34	5.392
47.5	1.4873	46	17.11	684.2	42.71	5.709
48.8	1.5065	48	18.08	723.1	45.14	6.035
49.9	1.5253	50	19.07	762.7	47.61	6.364

注：$1kg/m^3-0.062427\ lb/ft^3=0.0083152\ lb/gal$（美）。

1.4.2 盐酸（HCl）的密度（4～20℃）[2,5a]

波美计	密度 /(g/cm³)	HCl 含量				
		/%	/(mol/L)	/(kg/m³),/(g/L)	/(lb/ft³)	/(lb/gal)(美)
0.5	1.0032	1	0.28	10.03	0.6263	0.0837
1.2	1.0082	2	0.55	20.16	1.259	0.1683
2.6	1.0181	4	1.12	40.72	2.542	0.3399
3.9	1.0279	6	1.69	61.67	3.850	0.5147
5.3	1.0376	8	2.27	83.01	5.182	0.6927
6.6	1.0474	10	2.87	104.7	6.539	0.8741
7.9	1.0574	12	3.48	126.9	7.921	1.059
9.2	1.0675	14	4.10	149.5	9.330	1.247
10.4	1.0776	16	4.72	172.4	10.76	1.439
11.7	1.0878	18	5.37	195.8	12.22	1.634

续表

波美计	密度 /(g/cm³)	HCl 含量				
		/%	/(mol/L)	/(kg/m³)，/(g/L)	/(lb/ft³)	/(lb/gal)(美)
12.9	1.0980	20	6.02	219.6	13.71	1.833
14.2	1.1083	22	6.68	243.8	15.22	2.035
15.4	1.1187	24	7.36	268.5	16.76	2.241
16.6	1.1290	26	8.04	293.5	18.32	2.450
17.7	1.1392	28	8.74	319.0	19.91	2.662
18.8	1.1493	30	9.45	344.8	21.52	2.877
19.9	1.1593	32	10.16	371.0	23.16	3.096
21.0	1.1691	34	10.89	397.5	24.81	3.317
22.0	1.1789	36	11.63	424.4	26.49	3.542
23.0	1.1885	38	12.37	451.6	28.19	3.769
24.0	1.1980	40	13.13	479.2	29.92	3.999

1.4.3 硫酸（H_2SO_4）的密度（4～20℃）[2,55]

波美计	密度 /(g/cm³)	H_2SO_4 含量				
		/%	/(mol/L)	/(kg/m³)，/(g/L)	/(lb/ft³)	/(lb/gal)(美)
0.35	1.0024	0.5	0.051	5.02	0.3132	0.0419
0.50	1.0035	0.7	0.072	7.03	0.4387	0.0587
0.7	1.0051	1	0.103	10.05	0.6275	0.0839
1.7	1.0118	2	0.21	20.24	1.263	0.1689
2.6	1.0184	3	0.31	30.55	1.907	0.2550
3.5	1.0250	4	0.42	41.00	2.560	0.3422
4.5	1.0317	5	0.53	51.59	3.220	0.4305
5.4	1.0385	6	0.64	62.31	3.890	0.5200
6.3	0.0453	7	0.75	73.17	4.568	0.6106
7.2	1.0522	8	0.86	84.18	5.255	0.7025
8.1	1.0591	9	0.97	95.32	5.950	0.7955
9.0	1.0661	10	1.09	106.6	6.655	0.8897
9.9	1.0731	11	1.20	118.0	7.369	0.9851
10.8	1.0802	12	1.32	129.6	8.092	1.082
11.7	1.0874	13	1.44	141.4	8.825	1.180
12.5	1.0947	14	1.56	153.3	9.567	1.279
13.4	1.1020	15	1.69	165.3	10.32	1.379
14.3	1.1094	16	1.81	177.5	11.08	1.481
15.2	1.1168	17	1.94	189.9	11.85	1.584
16.0	1.1243	18	2.07	202.4	12.63	1.689
16.9	1.1318	19	2.19	215.0	13.42	1.795
17.7	1.1394	20	2.33	227.9	14.23	1.902

续表

波美计	密度 /(g/cm³)	H_2SO_4 含量				
		/%	/(mol/L)	/(kg/m³),/(g/L)	/(lb/ft³)	/(lb/gal)(美)
18.6	1.1471	21	2.46	240.9	15.04	2.010
19.4	1.1548	22	2.59	254.1	15.86	2.120
20.3	1.1626	23	2.73	267.4	16.69	2.231
21.1	1.1704	24	2.87	280.9	17.54	2.344
21.9	1.1783	25	3.01	294.6	18.39	2.458
22.8	1.1862	26	3.15	308.4	19.25	2.574
23.6	1.1942	27	3.29	322.4	20.13	2.691
24.4	1.2023	28	3.43	336.6	21.02	2.809
25.2	1.2104	29	3.58	351.0	21.91	2.929
26.0	1.2185	30	3.73	365.6	22.82	3.051
26.8	1.2267	31	3.88	380.3	23.74	3.173
27.6	1.2349	32	4.04	395.2	24.67	3.298
28.4	1.2432	33	4.19	410.3	25.61	3.424
29.1	1.2515	34	4.34	425.5	26.56	3.551
29.9	1.2599	35	4.50	441.0	27.53	3.680
30.7	1.2684	36	4.66	456.6	28.51	3.811
31.4	1.2769	37	4.82	472.5	29.49	3.943
32.2	1.2855	38	4.98	488.5	30.49	4.077
33.0	1.2941	39	5.15	504.7	31.51	4.212
33.7	1.3028	40	5.32	521.1	32.53	4.349
34.5	1.3116	41	5.49	537.8	33.57	4.488
35.2	1.3205	42	5.66	554.6	34.62	4.628
35.9	1.3294	43	5.83	571.6	35.69	4.770
36.7	1.3384	44	6.01	588.9	36.76	4.914
37.4	1.3476	45	6.19	606.4	37.86	5.061
38.1	1.3569	46	6.37	624.2	38.97	5.209
38.9	1.3663	47	6.55	642.2	40.09	5.359
39.6	1.3758	48	6.74	660.4	41.23	5.511
40.3	1.3854	49	6.93	678.8	42.38	5.665
41.1	1.3951	50	7.12	697.6	43.55	5.821
41.8	1.4049	51	7.30	716.5	44.73	5.979
42.5	1.4148	52	7.51	735.7	45.93	6.140
43.2	1.4248	53	7.71	755.1	47.14	6.302
44.0	1.4350	54	7.91	774.9	48.37	6.467
44.7	1.4453	55	8.11	794.9	49.62	6.634
45.4	1.4557	56	8.32	815.2	50.89	6.803
46.1	1.4662	57	8.53	835.7	52.17	6.974
46.8	1.4768	58	8.74	856.5	53.47	7.148
47.5	1.4875	59	8.96	877.6	54.79	7.324
48.2	1.4983	60	9.17	899.0	56.12	7.502

续表

波美计	密度 /(g/cm³)	H_2SO_4 含量				
		/%	/(mol/L)	/(kg/m³),/(g/L)	/(lb/ft³)	/(lb/gal)(美)
48.9	1.5091	61	9.39	920.6	57.47	7.682
49.6	1.5200	62	9.67	942.4	58.83	7.865
50.3	1.5310	63	9.84	964.5	60.21	8.049
51.0	1.5421	64	10.07	986.9	61.61	8.236
51.7	1.5533	65	10.31	1010	63.03	8.426
52.3	1.5646	66	10.54	1033	64.46	8.618
53.0	1.5760	67	10.78	1056	65.92	8.812
53.7	1.5874	68	11.01	1079	67.39	9.008
54.3	1.5989	69	11.26	1103	68.87	9.207
55.0	1.6105	70	11.50	1127	70.38	9.408
55.6	1.6221	71	11.76	1152	71.90	9.611
56.3	1.6338	72	12.00	1176	73.44	9.817
56.9	1.6456	73	12.26	1201	74.99	10.02
57.5	1.6574	74	12.51	1226	76.57	10.24
58.1	1.6692	75	12.78	1252	78.15	10.45
58.7	1.6810	76	13.04	1278	79.75	10.66
59.3	1.6927	77	13.30	1303	81.37	10.88
59.9	1.7043	78	13.56	1329	82.99	11.09
60.5	1.7158	79	13.83	1355	84.62	11.31
61.1	1.7272	80	14.10	1382	86.26	11.53
61.6	1.7383	81	14.37	1408	87.90	11.75
62.1	1.7491	82	14.63	1434	89.54	11.97
62.6	1.7594	83	14.90	1460	91.16	12.19
63.0	1.7693	84	15.16	1486	92.78	12.40
63.5	1.7786	85	15.43	1512	94.38	12.62
63.9	1.7872	86	15.68	1537	95.95	12.83
64.2	1.7951	87	15.94	1562	97.49	13.03
64.5	1.8022	88	16.18	1586	99.01	13.23
64.8	1.8087	89	16.43	1610	100.5	13.43
65.1	1.8144	90	16.66	1633	101.9	13.63
65.3	1.8195	91	16.96	1656	103.4	13.82
65.5	1.8240	92	17.12	1678	104.8	14.00
65.7	1.8279	93	17.35	1700	106.1	14.19
65.8	1.8312	94	17.56	1721	107.5	14.36
65.9	1.8337	95	17.78	1742	108.7	14.54
66.0	1.8355	96	17.98	1762	110.0	14.70
66.0	1.8364	97	18.17	1781	111.2	14.87
66.0	1.8361	98	18.36	1799	112.3	15.02
65.9	1.8342	99	18.53	1816	113.4	15.15
65.8	1.8305	100	18.68	1831	114.3	15.28

1.4.4 碳酸钠（Na_2CO_3）水溶液的密度（4～20℃）[2]

（1）Na_2CO_3

波美计	密度 /(g/cm³)	Na_2CO_3 浓度			
		/%	/(kg/m³),/(g/L)	/(lb/ft³)	/(lb/gal)(美)
1.2	1.0086	1	10.09	0.6296	0.0842
2.7	1.0190	2	20.38	1.272	0.1701
5.6	1.0398	4	47.59	2.596	0.3471
8.3	1.0606	6	63.64	3.973	0.5311
10.9	1.0816	8	86.53	5.402	0.7221
13.5	1.1029	10	110.3	6.885	0.9204
16.0	1.1244	12	134.9	8.423	1.126
18.5	1.1463	14	160.5	10.02	1.359

（2）$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$

波美计	密度 /(g/cm³)	$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$ 浓度			
		/%	/(kg/m³),/(g/L)	/(lb/ft³)	/(lb/gal)(美)
1.2	1.0086	2.70	27.23	1.700	0.2272
2.7	1.0190	5.40	55.02	3.435	0.4592
5.6	1.0398	10.80	112.3	7.010	0.9370
8.3	1.0606	16.20	171.8	10.72	1.434
10.9	1.0816	21.60	233.6	14.58	1.949
13.5	1.1029	27.00	297.7	18.59	2.485
16.0	1.1244	32.40	364.3	22.74	3.040
18.5	1.1463	37.80	433.3	27.05	3.616

1.4.5 氯化钠（NaCl）水溶液的密度（20℃）[14,55]

密度 /(g/cm³)	NaCl 浓度			密度 /(g/cm³)	NaCl 浓度		
	/%	/(g/L)	/(mol/L)		/%	/(g/L)	/(mol/L)
1.005	1	10.1	0.17	1.063	9	95.6	1.63
1.013	2	20.3	0.35	1.071	10	107.1	1.83
1.020	3	30.6	0.52	1.078	11	118.0	2.02
1.027	4	41.1	0.70	1.086	12	130.0	2.22
1.034	5	51.7	0.88	1.093	13	142.0	2.43
1.041	6	62.5	1.07	1.101	14	154.0	2.63
1.043	7	73.4	1.26	1.109	15	166	2.84
1.056	8	84.5	1.44	1.116	16	179	3.06

续表

密度 /(g/cm³)	NaCl 浓度			密度 /(g/cm³)	NaCl 浓度		
	/%	/(g/L)	/(mol/L)		/%	/(g/L)	/(mol/L)
1.124	17	191	3.27	1.172	23	270	4.61
1.132	18	204	3.48	1.180	24	283	4.84
1.140	19	217	3.71	1.189	25	297	5.08
1.148	20	230	3.93	1.197	26	311	5.32
1.156	21	243	4.15	1.20	26.4	318	5.43
1.164	22	256	4.38				

1.4.6 石灰乳的密度（20℃）[14]

密度 /(g/cm³)	CaO 含量		$Ca(OH)_2$ 含量	密度 /(g/cm³)	CaO 含量		$Ca(OH)_2$ 含量
	/%	/(g/L)	/%		/%	/(g/L)	/%
1.009	0.99	10	1.31	1.119	14.30	160	18.90
1.017	1.96	20	2.59	1.126	15.10	170	19.95
1.025	2.93	30	3.87	1.133	15.89	180	21.00
1.032	3.88	40	5.13	1.140	16.67	190	22.03
1.039	4.81	50	6.36	1.148	17.43	200	23.03
1.046	5.74	60	7.58	1.155	18.19	210	24.04
1.054	6.64	70	8.78	1.162	18.94	220	25.03
1.061	7.54	80	9.96	1.169	19.68	230	26.01
1.068	8.43	90	11.14	1.176	20.41	240	26.97
1.075	9.30	100	12.29	1.184	21.12	250	27.91
1.083	10.16	110	13.43	1.191	21.84	260	28.86
1.090	11.01	120	14.55	1.198	22.55	270	29.80
1.097	11.85	130	15.66	1.205	23.24	280	30.71
1.104	12.68	140	16.76	1.213	23.92	290	31.61
1.111	13.50	150	17.84	1.220	24.60	300	32.51

1.4.7 氨水的密度（20℃）[14,55]

密度 /(g/cm³)	NH_3 浓度			密度 /(g/cm³)	NH_3 浓度		
	/%	/(g/L)	/(mol/L)		/%	/(g/L)	/(mol/L)
0.994	1	9.94	0.58	0.936	16	149.8	8.81
0.990	2	19.79	1.16	0.930	18	167.3	9.84
0.981	4	39.24	2.31	0.923	20	184.6	10.86
0.973	6	58.38	3.43	0.916	22	201.6	11.86
0.965	8	77.21	4.54	0.910	24	218.4	12.85
0.958	10	95.75	5.63	0.904	26	235.0	13.82
0.950	12	114.0	6.71	0.896	28	251.4	14.79
0.943	14	132.0	7.77	0.892	30	267.6	15.74

1.4.8 部分盐类水溶液的密度[3]

g/cm³

序号	名称	温度	无水物含量/%																	
		℃	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	40	50
1	$AlCl_3$	18	1.008	1.016	1.034	1.053	1.071	1.090	1.109	1.129	1.149	—	1.189	-	1.227	1.252	—	1.302	--	—
2	$Al_2(SO_4)_3$	19	1.009	1.019	1.040	1.061	1.083	1.105	1.129	1.152	1.176	1.201	1.226	1.252	1.278	1.306	1.333	-	—	—
3	$CaCl_2$	20	1.007	1.015	1.032	1.049	1.066	1.084	1.102	1.120	1.139	1.158	1.178	1.197	1.218	1.238	1.260	1.282	1.396	—
4	$FeCl_3$	20	1.007	1.015	1.032	1.049	1.067	1.085	1.104	1.123	1.142	1.162	1.182	1.204	1.225	1.247	1.268	1.292	1.415	1.574
5	$FeSO_4$	18	1.009	1.018	1.038	1.058	1.079	1.100	1.122	1.145	1.168	1.191	1.214		—	—	--	—	—	—
6	$Fe_2(SO_4)_3$	17.5	1.007	1.016	1.033	1.050	1.067	1.084	1.103	-	1.141	—	1.181	—	—	--	—	1.307	1.449	1.613
7	$NaHCO_3$	18	1.006	1.013	1.028	1.043	1.058	—		—	—	-	—	—		—	-	—	—	-
8	Na_2CO_3	20	1.009	1.019	1.040	1.061	1.082	1.103	1.124	1.146	-	—	—	—	—	—	—	—	--	—
9	Na_2HPO_4	18	1.009	1.020	1.043	1.067	1.072	1.078	—	--	—	—	-	—	—	--	—	-	—	—
10	Na_3PO_4	15	1.009	1.019	1.041	1.062	1.085	1.108	—	—	--	—	—	-	—	—	—	—	—	—
11	Na_2SO_3	19	1.008	1.017	1.036	1.056	1.075	1.095	1.115	1.135	1.155	1.176	--	—	—	—	—	-	—	—

1.5 空气的特性

1.5.1 空气的组成及质量[32]

化学式	N_2	O_2	Ar	CO_2	H_2	Ne	He	Kr	Xe
体积/%	78.03	20.99	0.933	0.030	0.01	0.0018	0.0005	0.0001	0.00001
质量/%	75.47	23.20	1.28	0.046	0.001	0.0012	0.00007	0.0003	0.00001

注：空气的相对分子质量为 28.96，即摩尔质量为 28.96g/mol。

1.5.2 空气的温湿换算

相对湿度/%

干球温度/℃	干、湿球温度差/℃																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	81	64	46	29	13																	
2	81	64	47	30	14																	
3	81	65	47	31	16																	
4	81	65	48	32	18	4																
5	82	65	48	33	20	5																
6	82	66	49	30	22	6	5															
7	82	66	49	32	23	7	6															
8	82	66	50	33	24	8	7															
9	83	67	50	35	26	9	8	7														
10	83	67	51	36	28	11	9	8														
11	84	68	52	37	30	12	10	9	8	6												
12	84	68	52	38	32	13	1.	10	9	7	6											
13	84	69	53	40	33	15	12	11	10	8	7											
14	84	69	53	41	35	17	14	12	11	9	8											
15	85	70	54	42	36	19	16	14	12	10	9	7										
16	85	70	55	43	37	20	18	16	13	11	10	8	4									
17	86	71	56	44	38	22	20	18	15	12	11	9	5									
18	86	71	57	45	40	24	22	20	17	15	12	10	6	5								
19	87	72	58	46	41	26	24	22	19	17	13	11	7	6	5							
20	87	72	59	47	42	28	26	24	20	18	15	12	8	7	6							
21	87	73	60	48	43	30	28	26	22	19	17	14	9	8	7							
22	88	74	61	50	44	32	30	26	23	20	18	16	10	9	8	5						
23	88	74	62	51	45	34	32	30	25	22	19	16	12	10	9	6	4					
24	88	75	63	52	46	35	33	31	26	24	21	19	14	11	10	8	5	3				
25	89	76	64	53	47	36	34	33	28	25	22	20	16	12	11	9	6	4				
26	90	77	65	55	48	38	36	35	30	26	23	21	18	13	12	11	7	5	2			
27	90	77	65	56	50	39	38	37	32	27	24	22	20	14	13	12	8	6	3			
28	90	78	67	58	51	40	39	38	33	28	25	23	21	16	14	13	9	7	4			

续表

干球温度/℃	干、湿球温度差/℃																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
29	91	79	68	59	52	44	40	39	34	29	26	24	22	18	15	14	10	8	5	1		
30	91	80	69	60	54	42	41	40	35	30	27	25	23	19	16	15	11	9	6	2		
31	91	81	71	61	55	43	42	41	37	31	28	26	24	21	17	16	12	10	7	3		
32	92	82	72	62	56	44	43	42	38	32	29	27	25	22	18	17	13	11	8	4	2	
33	92	82	73	63	58	46	45	43	39	33	30	28	26	23	19	18	14	12	9	5	3	1
34	92	83	74	64	59	48	46	44	40	34	31	29	27	24	20	19	15	13	10	6	4	2
35	92	83	75	65	60	50	48	45	41	35	32	30	28	25	21	20	16	14	11	7	6	3
36	93	84	76	66	61	51	49	46	42	37	33	31	29	26	22	21	17	15	12	8	6	4
37	93	84	77	67	62	52	50	47	43	38	35	32	30	27	23	22	18	16	12	9	7	5
38	93	85	78	68	63	53	51	48	45	39	36	33	31	28	24	23	19	17	14	10	8	6
39	93	85	79	69	64	54	52	49	46	40	38	34	32	29	25	24	20	18	15	11	9	7
40	93	85	80	70	65	56	53	50	48	41	39	35	33	30	26	25	21	19	16	12	10	8
41	94	86	81	71	66	58	55	51	49	42	40	36	34	31	27	26	22	20	17	13	11	9
42	94	86	82	72	67	60	57	52	50	43	41	37	35	32	28	27	23	21	18	15	12	10
43	94	87	82	73	68	61	59	53	51	45	42	38	36	33	29	28	24	22	19	16	13	11
44	94	87	83	74	69	62	60	54	52	46	43	39	37	34	30	29	25	23	20	17	14	12
45	95	88	83	74	70	63	61	55	53	48	45	40	38	35	32	30	26	24	21	18	15	13
46	95	88	84	75	71	64	62	56	54	50	46	42	39	36	33	31	27	25	22	19	16	14
47	95	88	85	76	72	66	63	58	55	51	47	43	40	37	34	32	28	26	23	20	17	15
48	95	89	85	76	73	68	64	60	56	52	48	45	41	38	35	33	29	27	24	21	18	16
49	95	89	85	79	74	69	65	61	57	53	49	46	42	39	36	34	30	28	25	22	19	17
50	95	89	85	79	75	70	66	62	58	54	50	47	43	40	37	35	31	29	26	23	20	18
51	95	89	85	80	75	71	66	62	59	54	50	47	44	41	38	36	32	30	26	24	21	19
52	95	89	85	80	75	71	66	62	59	54	50	47	44	42	38	36	32	30	26	24	21	19
53	95	89	85	80	75	71	66	62	59	54	50	47	44	42	38	37	32	31	27	25	22	20
54	95	89	85	80	75	71	66	62	59	54	50	48	45	43	39	37	33	31	27	26	22	20
55	95	89	85	80	75	71	67	62	60	55	51	48	45	43	39	37	33	31	28	26	22	21
56	95	89	85	80	75	71	67	62	60	55	51	48	46	45	40	38	33	32	28	26	23	21
57	95	89	85	80	75	71	67	63	60	55	51	48	46	45	40	38	34	32	28	26	23	21
58	95	89	85	80	76	71	67	63	60	56	51	49	46	45	40	38	34	33	29	27	23	22
59	95	89	85	80	76	72	67	63	61	56	52	49	46	45	41	39	34	33	29	27	24	22
60	95	89	85	80	76	72	67	64	61	56	52	49	47	45	41	39	35	34	30	27	24	24
61	95	90	85	80	76	72	68	64	61	57	52	50	47	46	42	40	35	34	30	28	25	24
62	95	90	85	80	76	72	68	65	62	57	52	50	47	46	42	40	36	35	30	28	25	25
63	95	90	85	80	76	72	68	65	62	58	53	50	48	46	42	40	36	36	31	29	25	25
64	95	90	85	80	76	72	68	65	62	58	53	51	48	46	43	41	37	36	31	29	26	26

续表

干球温度 /℃	干、湿球温度差/℃																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
65	95	90	85	80	77	73	69	65	62	58	53	51	48	46	43	41	37	36	32	29	27	26
66	96	90	85	81	77	73	69	65	63	59	53	51	49	46	43	41	38	36	32	30	27	27
67	96	90	85	81	77	73	69	66	63	59	54	52	49	47	44	42	38	37	32	30	28	27
68	96	90	85	81	77	73	69	66	63	59	54	52	49	47	44	42	39	37	33	31	28	28
69	96	90	85	81	77	73	70	66	64	60	54	53	49	47	44	43	39	37	33	31	29	28
70	96	90	85	81	77	73	70	66	64	60	55	53	50	48	44	43	39	38	34	32	29	28
71	96	90	86	82	78	74	70	67	64	60	55	53	50	48	45	43	40	38	34	32	30	29
72	96	90	86	82	78	74	70	67	64	61	55	53	50	48	45	44	40	38	34	33	31	29
73	96	90	86	82	78	74	71	67	65	61	56	54	50	49	45	44	41	39	35	33	32	29
74	96	90	86	82	78	74	71	67	65	62	56	54	51	49	47	44	41	39	36	34	33	30
75	96	90	86	82	78	74	71	68	65	62	56	54	51	49	47	44	41	39	36	34	33	31
76	96	91	86	82	78	74	71	68	65	62	57	54	51	50	47	45	42	40	36	35	34	32
77	96	91	86	82	78	74	71	68	66	62	57	55	52	50	47	45	42	40	37	35	34	32
78	96	91	87	83	78	74	71	68	66	63	57	55	52	51	48	46	43	41	37	35	34	32
79	96	91	87	83	78	75	72	69	66	63	58	55	53	51	48	46	43	41	38	36	35	33
80	96	91	87	83	78	75	72	69	66	63	58	55	53	51	48	46	44	42	38	36	35	33
81	96	91	87	83	78	75	72	69	67	64	59	56	53	52	48	47	44	42	39	36	35	33
82	96	91	87	83	78	75	72	70	67	64	59	56	54	52	49	47	45	43	39	37	35	34
83	96	91	87	83	78	75	73	70	67	64	59	56	54	53	49	48	45	43	39	37	36	34
84	96	91	87	83	78	75	73	70	67	64	60	57	54	53	49	48	45	43	40	38	36	34
85	96	91	87	83	78	76	73	70	67	65	60	57	54	53	49	49	45	44	40	38	36	34
86	96	92	87	84	79	76	73	70	67	65	60	57	55	54	50	49	46	44	40	38	37	35
87	96	92	87	84	79	76	73	71	67	65	61	58	55	54	50	49	47	45	41	39	37	35
88	96	92	88	84	79	76	73	71	68	65	61	58	55	54	50	50	47	45	41	39	38	35
89	96	92	88	84	79	76	73	71	68	65	61	58	55	54	51	50	47	45	41	39	38	36
90	96	92	88	84	79	76	74	71	68	65	62	58	56	55	51	50	47	46	42	40	38	36
91	96	92	88	84	79	77	74	71	68	65	62	59	56	55	51	50	48	46	42	40	38	36
92	96	92	88	84	79	77	74	72	68	66	62	59	56	55	51	51	48	46	42	40	39	37
93	96	92	88	84	79	77	74	72	69	66	62	59	57	55	52	51	48	46	43	41	39	37
94	96	93	88	85	79	77	74	72	69	66	63	60	57	55	52	52	49	47	43	41	39	37
95	96	93	89	85	79	78	75	72	69	66	63	60	58	56	53	52	49	47	44	42	40	38
96	96	93	89	85	80	78	75	72	69	67	63	60	58	56	53	52	49	47	44	42	40	38
97	96	93	89	85	80	78	75	73	70	67	64	61	58	57	53	53	49	47	44	43	40	39
98	96	93	89	85	80	79	75	73	70	67	64	61	59	57	54	53	50	48	45	43	41	39
99	96	93	89	85	80	79	75	73	70	67	64	61	59	57	54	53	50	48	45	43	41	39
100	96	93	89	85	80	79	75	73	70	67	64	61	59	57	54	53	50	48	45	43	41	39

1.5.3 空气的黏度与压力、温度的关系[17]

10^{-8}Pa·s

压力 /MPa(atm)	温度/℃																	
	−70	−50	−25	0	25	50	75	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
0.10(1)	1350	1455	1590	1710	1820	1925	2050	2160	2360	2570	2740	2920	3090	3255	3400	3550	3690	3830
2.03(20)	1401	1500	1628	1743	1850	1953	2075	2183	2380	2588	2756	2935	3104	3267	3410	3559	3698	3837
5.07(50)	1526	1604	1700	1810	1912	2008	2126	2227	2419	2621	2786	2961	3126	3286	3429	3576	3714	3851
7.60(75)	1654	1726	1769	1873	1966	2054	2160	2266	2454	2648	2804	2982	3145	3303	3444	3591	3728	3866
10.13(100)	1784	1856	1871	1951	2033	2115	2218	2312	2496	2679	2835	3006	3165	3320	3459	3605	3742	3878
15.20(150)	2145	2122	2140	2132	2188	2253	2327	2410	2584	2742	2893	3058	3205	3356	3494	3636	3772	3908
20.27(200)	2743	2540	2368	2330	2349	2384	2460	2504	2661	2807	2949	3113	3256	3413	3538	3671	3782	3915
25.33(250)	3192	2918	2646	2564	2551	2554	2611	2635	2778	2893	3024	3172	3308	3456	3584	3703	3826	3952
30.40(300)	3633	3297	2933	2795	2741	2742	2753	2761	2853	2974	3096	3228	3354	3497	3620	3742	3856	3987
35.46(350)	4084	3654	3226	3033	2954	2896	2923	2897	2952	3063	3179	3288	3408	3546	3667	3784	3916	4030
40.53(400)	4544	4016	3505	3285	3163	3117	3061	3042	3054	3148	3251	3351	3459	3590	3709	3819	3946	4064
45.60(450)	4988	4385	3789	3521	3375	3254	3224	3183	3166	3232	3320	3413	3512	3642	3752	3859	3976	4101
50.66(500)	5450	4737	4065	3761	3577	3429	3381	3245	3271	3327	3387	3472	3567	3693	3804	3902	4023	4144
55.73(550)	5895	5093	4335	4004	3777	3608	3534	3463	3377	3414	3456	3540	3626	3744	3834	3946	1059	4182
60.80(600)	6368	5442	4619	4250	3987	3788	3702	3607	3482	3500	3537	3604	3690	3793	3896	3989	4112	4217
70.93(700)	7270	6150	5172	4717	4390	4145	4007	3889	3717	3679	3687	3743	3806	3897	3927	4079	4183	4296
81.06(800)	8176	6788	5667	5158	4794	4491	4342	4169	3939	3867	3855	3879	3934	4010	4094	4173	4279	4375
91.19(900)	9022	7363	6078	5539	5164	4829	4665	4448	4165	4070	4025	4027	4066	4124	4191	4272	4365	4453
101.33(1000)	9756	7910	6458	5878	5510	5152	4943	4721	4409	4272	4209	4173	4205	4243	4298	4377	4458	4524

附录 2　水处理剂的技术要求、性能和牌号等

2.1　凝聚剂和絮凝剂技术标准

2.1.1　硫酸亚铁，GB 10531—89

分子式：$FeSO_4 \cdot 7H_2O$

相对分子质量：278.01

外观：淡绿色或淡黄绿色结晶。

水处理剂硫酸亚铁国家标准

指标项目		指标					
		饮用水处理用			工业用水处理用		
		优等品	一等品	合格品	优等品	一等品	合格品
硫酸亚铁($FeSO_4 \cdot 7H_2O$)含量/%	≥	97.0	94.0	90.0	97.0	94.0	90.0
二氧化钛(TiO_2)含量/%	≤	0.5	0.5	0.75	0.5	0.5	0.75
水不溶物含量/%	≤	0.2	0.5	0.75	0.2	0.5	0.75
游离酸(以 H_2SO_4 计)含量/%	≤	0.35	1.0	2.0	—	—	—
砷(As)含量/%	≤	0.0005	0.0005	0.0005		—	—
重金属(以 Pb 计)含量/%	≤	0.002	0.002	0.002	—	—	—

2.1.2　硫酸铝，HG 2227—91

分子式：$Al_2(SO_4)_3$(无水物)；$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$(水合物)

相对分子质量：342.15（无水物）；666.41（水合物）

外观：无水物为白色结晶粉末；水合物呈片状、粒状或粉状。

水处理剂硫酸铝行业标准

指标项目		指标		
		固体		溶液
		一等品	合格品	
氧化铝(Al_2O_3)含量/%	≥	15.60	15.60	7.80
铁(Fe)含量/%	≤	0.52	0.70	0.25
水不溶物含量/%	≤	0.15	0.15	0.15
pH 值(1%水溶液)	≥	3.0	3.0	3.0
砷(As)含量/%	≤	0.0005	0.0005	0.0003
重金属(以 Pb 计)含量/%	≤	0.002	0.002	0.001

注：工业水处理用的产品不检验砷和重金属。

2.1.3 硫酸铝钾[58]，HG/T 2565—94

别名：明矾，钾明矾，钾铝矾，白矾

分子式：$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$

相对分子质量：258.20

外观：无色透明大颗粒结晶、碎片或粉末。

工业硫酸铝钾化工行业标准

指标项目		指标		
		优等品	一等品	合格品
外观		无色透明、半透明块状、粒状或晶状粉状		
$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ 含量(以干基计)/%	≥	99.2	98.6	97.6
铁(Fe)含量(干基计)/%	≤	0.01	0.01	0.05
重金属(以 Pb 计)含量/%	≤	0.002	0.002	0.005
砷(As)含量/%	≤	0.0002	0.0005	0.001
水不溶物含量/%	≤	0.2	0.4	0.6
水分/%	≤	1.0	1.5	2.0

2.1.4 聚合硫酸铁，GB 14591—93

分子式：$[Fe_2(OH)_n(SO_4)_{3-\frac{n}{2}}]_m$，$n=1$ 或 2

外观：液体产品为红褐色或深红褐色的黏稠液，固体产品为淡黄色或浅灰色的树脂状颗粒。

净水剂聚合硫酸铁国家标准

项目		指标	
		Ⅰ型(液体)	Ⅱ型(固体)
密度(20℃)/(g/cm³)	≥	1.45	—
全铁含量/%	≥	11.0	18.5
还原性物质(以 Fe^{2+} 计)含量/%	≤	0.10	0.15
盐基度/%		9.0～14.0	9.0～14.0
pH 值(1%水溶液)		2.0～3.0	2.0～3.0
砷(As)含量/%	≤	0.0005	0.0008
铅(Pb)含量/%	≤	0.0010	0.0015
不溶物含量/%	≤	0.3	0.5

2.1.5 聚合硫酸铁，HG/T 2153—93

分子式：$[Fe_2(OH)_n(SO_4)_{3-\frac{n}{2}}]_m$，$n=1$ 或 2

外观：红褐色溶液，无沉淀。

净水剂用聚合硫酸铁的技术指标

项　目	指　标		项　目	指　标	
	Ⅰ型	Ⅱ型		Ⅰ型	Ⅱ型
密度(20℃)/(g/cm³) ≥	1.45		pH值(1%水溶液)	2.0～3.0	2.0～3.0
全铁含量/% ≥	11.0	18.5	砷(As)含量/% ≤	0.0005	0.0008
还原性物质(以Fe^{2+}计)含量/% ≤	0.10	0.15	铅(Pb)含量/% ≤	0.0010	0.0015
盐基度/%	9.0～14.0	9.0～14.0	不溶物含量/% ≤	0.3	0.5

工业水处理用聚合硫酸铁的技术指标

项　目	指　标		项　目	指　标	
	一等品	合格品		一等品	合格品
密度(20℃)/(g/cm³) ≥	1.45	1.33	盐基度/%	12.0	8.0
全铁含量/% ≥	11.0	9.0	pH值(1%水溶液)	2.0～3.0	2.0～3.0
还原性物质(以Fe^{2+}计)含量/% ≤	0.10	0.20			

2.1.6　氯化铁[58]，GB 4482—93

分子式：$FeCl_3$（无水物）

相对分子质量：162.20

净水剂氯化铁国家标准

指标名称		指　标/%					
		Ⅰ型 无水氯化铁			Ⅱ型 氯化铁溶液		
		优等品	一等品	合格品	优等品	一等品	合格品
外观		褐绿色晶体			红棕色溶液		
氯化铁($FeCl_3$)含量	≥	98.7	96.0	93.0	44.0	41.0	38.0
氯化亚铁($FeCl_2$)含量	≤	0.70	2.0	3.5	0.20	0.30	0.40
不溶物含量	≤	0.50	1.50	3.0	0.40	0.50	0.50
游离酸(以HCl计)含量	≤				0.25	0.40	0.50
砷(As)含量	≤	0.0020			0.0020		
铅(Pb)含量	≤	0.0040			0.0040		

2.1.7　结晶氯化铝[58]，ZBG 77001—90(同 HG/T 3541　90)

分子式：$AlCl_3 \cdot 6H_2O$

相对分子质量：241.43

水处理剂结晶氯化铝专业标准

指标名称		指标	
		一等品	合格品
外观		橙黄色或淡黄色晶体	
结晶氯化铝($AlCl_3 \cdot 6H_2O$)含量/%	≥	95.0	88.5
铁(Fe)含量/%	≤	0.25	1.10
不溶物含量/%	≤	0.10	0.10
砷(As)含量/%	≤	0.0005	0.0005
重金属(以 Pb 计)含量/%	≤	0.002	0.002
pH 值(1%水溶液)	≥	2.5	2.5

2.1.8　聚合氯化铝[58]，GB/T 15892—95

分子式：$[Al_2(OH)_nCl_{6-n} \cdot xH_2O]_m$，$n=1\sim5$，$m\leqslant10$

外观：液体产品是无色、淡灰色、淡黄色或棕褐色透明或半透明液体，无沉淀。固体产品是无色、淡灰色、淡黄色或棕褐色晶体粒或粉末。

水处理剂聚合氯化铝国家标准

指标名称		指标(适用于饮用水处理)			
		液体		固体	
		优等品	一等品	优等品	一等品
相对密度(20℃)	≥	1.21	1.19		
氧化铝(Al_2O_3)含量/%	≥	12.0	10.0	32.0	29.0
盐基度/%		60.0～85.0	50.0～85.0	60.0～85.0	50.0～85.0
水不溶物含量/%	≤	0.2	0.5	0.5	1.5
pH 值(1%水溶液)		3.5～5.0		3.5～5.0	
氨态氮(N)含量/%	≤	0.01	0.03	0.03	0.09
硫酸根(SO_4^{2-})含量/%	≤	3.5		9.8	
砷(As)含量/%	≤	0.0005		0.0005	
锰(Mn)含量/%	≤	0.0025	0.015	0.0075	0.045
六价铬(Cr^{6+})含量/%	≤	0.0005		0.0015	

续表

指标名称		指标(适用于饮用水处理)			
		液体		固体	
		优等品	一等品	优等品	一等品
汞(Hg)含量/%	≤	0.00002		0.00002	
铅(Pb)含量/%	≤	0.001		0.003	
镉(Cd)含量/%	≤	0.0002		0.0006	
相对密度(20℃)	≥	1.19	1.18		
氧化铝(Al_2O_3)含量/%	≥	10.0	9.0	29.0	27.0
盐基度/%		50.0～85.0	45.0～85.0	50.0～85.0	45.0～85.0
水不溶物含量/%	≤	0.5	1.0	1.5	3.0

2.1.9 聚合氯化铝，HG/T 2677—95

工业聚合氯化铝化工行业技术标准

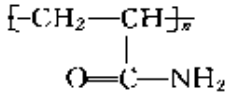
指标名称		指标				
		液体			固体	
		优等品	一等品	合格品	一等品	合格品
氧化铝(Al_2O_3)含量/%	≥	10.0～11.0			28.0	27.0
密度(20℃)/(g/cm³)	≥	1.19			—	—
盐基度/%		45～60			45～80	
pH值(10g/L溶液)		3.5～5.0			3.5～5.0	
硫酸盐(以SO_4计)含量/%	≤	3.5			9.0	
铁(Fe)含量/%	≤	0.01		--	—	
酸不溶物含量/%	≤	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0

2.1.10 聚丙烯酰胺，GB 17514—1998

分子式：$(C_3H_5NO)_n$

相对分子质量：1×10^4～2×10^7

结构式：



固体外观：白色或微黄色颗粒或粉末；

胶体外观：无色或微黄色透明胶体。

水处理剂聚丙烯酰胺国家标准

指标名称		指标		
		饮用水用	污水处理用	
		优等品	一等品	合格品
固体量(固体)/%	≥	90.0	90.0	87.0
丙烯酰胺单体含量(干基)/%	≤	0.05	0.10	0.20
溶解时间(阴离子型)/min	≤	60	90	120
溶解时间(非离子型)/min	≤	90	150	240
筛余物(1.00mm 网筛)/%	≤	5	10	10
筛余物(180μm 网筛)/%	≤	85	80	80
相对分子质量		按用户要求,误差<10%		
水解度		按用户要求或按标准≤2%,非离子型≤5%		

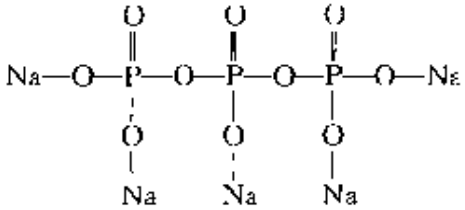
2.2 缓蚀剂技术标准

2.2.1 三聚磷酸钠[58], GB 9983—88

分子式：$Na_5P_3O_{10}$

相对分子质量：367.86

结构式：



工业三聚磷酸钠国家标准

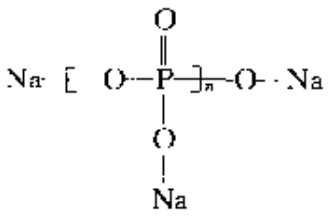
指标名称		指标		
		优等品	一级品	二级品
外观		白色粒状或粉状		
五氧化二磷(P_2O_5)含量/%	≥	57.0	56.5	55.0
三聚磷酸钠($Na_5P_3O_{10}$)含量/%	≥	96	90	85
三聚磷酸钠(Ⅰ型)含量/%		5～40		
水不溶物含量/%	≤	0.10	0.10	0.15
铁(Fe)含量/%	≤	0.007	0.015	0.030
白度/%	≥	90	80	70
pH 值(1%水溶液)		9.2～10.0		
表观密度/(g/cm³)低密度		0.35～0.50		
中密度		0.51～0.65		
高密度		0.66～0.99		
颗粒度(1.0mm 试验筛筛余量)/%	≤	5.0	5.0	5.0

2.2.2 聚偏磷酸钠，HG/T 2837—1997

分子式：$(NaPO_3)_6$ 或 $Na_{n+2}P_nO_{3n+1}$，$n=10\sim16$（平均值）

相对分子质量：611.77

结构式：



外观：白色细粒状物。

水处理剂聚偏磷酸钠化工行业标准

指标项目		指标		
		优等品	等品	合格品
总磷酸盐(以 P_2O_5 计)含量/%	≥	68.0	67.0	65.0
非活性磷酸盐(以 P_2O_5 计)含量/%	≤	7.5	8.0	10.0
水不溶物含量/%	≤	0.05	0.10	0.15
铁(Fe)含量/%	≤	0.05	0.10	0.20
pH 值(1%水溶液)			5.8～7.3	
溶解性		合格	合格	合格
平均聚合度 $\bar{n}$		10～16	—	—

2.2.3 磷酸氢二钠[68]，GB 6008—85(同 HG/T 2965—2000)

分子式：$Na_2HPO_4\cdot12H_2O$

相对分子质量：258.14

工业用磷酸氢二钠国家标准

指标名称		指标	
		一级品	二级品
外观		白色均匀流砂状结晶	
磷酸氢二钠($Na_2HPO_4\cdot12H_2O$)/%	≥	97.0	96.0
硫酸盐(以 SO_4 计)/%	≤	0.7	1.2
氯化物(以 Cl 计)/%	≤	0.05	0.10
水不溶物/%	≤	0.05	0.10
氟化物(以 F 计)/%	≤	0.05	
砷(As)/%	≤	0.005	
pH 值		9.0±0.2	9.0±0.2

2.2.4 磷酸三钠，HG/T 2517 -93

分子式：$Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$

相对分子质量：380.12

工业磷酸三钠化工行业标准

指标名称		指标		
		优等品	一等品	合格品
外观		白色或微黄色结晶		
磷酸三钠(以 $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$ 计)含量/%	≥	98.5	98.0	95
甲基橙碱度(以 Na_2O 计)/%		16.5～19.0	16.0～19.0	15.5～19.0
不溶物含量/%	≤	0.05	0.10	0.10
硫酸盐(以 SO_4^{2-} 计)含量/%	≤	0.50	0.50	0.80
氯化物(以 Cl^- 计)含量/%	≤	0.30	0.40	0.50
铁(Fe)含量/%	≤	0.01		
砷(As)含量/%	≤	0.005		

2.2.5 重铬酸钠[58]，GB 1611—92

分子式：$Na_2Cr_2O_7 \cdot 2H_2O$

相对分子质量：297.99

国家标准

指标名称		指标		
		优等品	一等品	合格品
外观		鲜艳橙红色针状或小粒状结晶		
重铬酸钠($Na_2Cr_2O_7 \cdot 2H_2O$)含量/%	≥	99.3	98.3	98.0
硫酸盐(以 SO_4 计)含量/%	≤	0.20	0.30	0.40
氯化物(以 Cl 计)含量/%	≤	0.10	0.10	0.20

2.2.6 硅酸钠，GB/T 4209—1996

分子式：$Na_2O \cdot mSiO_2 \cdot xH_2O$，$m=2.2\sim3.7$

硅酸钠国家标准：

工业液体硅酸钠技术指标

型号级别 / 指标项目		液-1			液-2			液-3			液-4			液-5		
		优等品	1等品	合格品	优等品	1等品	合格品	优等品	1等品	合格品	优等品	1等品	合格品	优等品	1等品	合格品
铁(Fe)含量/%	≤	0.02	0.05	—	0.02	0.05	—	0.02	0.05	—	0.02	0.05	—	0.02	0.05	—
水不溶物含量/%	≤	0.20	0.40	0.50	0.20	0.40	0.50	0.20	0.60	0.80	0.20	0.40	0.50	0.20	0.80	1.00
密度(20℃)/(g/cm³)		1.318～1.342			1.368～1.394			1.436～1.465			1.368～1.394			1.526～1.599		
氧化钠(Na_2O)含量/%	≥	7.0			8.2			10.2			9.5			12.8		
二氧化硅(SiO_2)含量/%	≥	24.6			26.0			25.7			22.1			29.2		
模数(m)		3.5～3.7			3.1～3.4			2.6～2.9			2.2～2.5			2.2～2.5		

工业固体硅酸钠技术指标

型号级别 / 指标项目		固-1		固-2		固-3		固-4	
		1等品	合格品	1等品	合格品	1等品	合格品	1等品	合格品
可溶固体总含量/%	≥	97.0	95.0	97.0	95.0	97.0	95.0	97.0	95.0
铁(Fe)含量/%	≤	0.12		0.12		0.12		0.10	—
模数(m)		3.5～3.7		3.1～3.4		2.6～2.9		2.2～2.5	

2.2.7 硫酸锌[58]，HG/T 2326 92

分子式：无水物 $ZnSO_4$；一水合物 $ZnSO_4 \cdot H_2O$；七水合物 $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$

相对分子质量：无水物 161.45；一水合物 179.47；七水合物 287.55

外观：一水合物为白色结晶或颗粒，七水合物为无色斜方晶系结晶或颗粒。

化工行业标准

指标名称		指标(Ⅰ类)			指标(Ⅱ类)		
		优等品	一等品	合格品	优等品	一等品	合格品
主含量	(以 Zn 计)/%	35.70	35.34	34.61	22.51	22.06	20.92
	(以 $ZnSO_4 \cdot H_2O$ 计)/%	98.0	97.0	95.0			
	(以 $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 计)/%				99.0	97.0	92.0
不溶物含量/%	≤	0.020	0.050	0.10	0.020	0.050	0.10
pH 值(50%溶液)	≥	4.0	4.0		3.0	3.0	
氯化物(以 Cl 计)含量/%	≤	0.20	0.60		0.20	0.60	
铅(Pb)含量/%	≤	0.002	0.007	0.010	0.002	0.010	0.010
铁(Fe)含量/%	≤	0.008	0.020	0.060	0.005	0.020	0.060
锰(Mn)含量/%	≤	0.01	0.03	0.05	0.01	0.01	
镉(Cd)含量/%	≤	0.002	0.007	0.010	0.002	0.010	
铜(Cu)含量/%	≤	0.001			0.002		

2.2.8 氯化锌，HG/T 2323—92

分子式：$ZnCl_2$

相对分子质量：136.30

工业氯化锌化工行业标准

指标名称		指标(Ⅰ类)		指标(Ⅱ类)		指标(Ⅲ类)	
		优等品	一等品	一等品	合格品	一等品	合格品
外观		白色粉末或小颗粒				无色透明的水溶液	
氯化锌($ZnCl_2$)含量/%	≥	96.0	94.7	94.7	93.0	40.0	40.0
碱式盐(以 ZnO 计)含量/%		1.6～2.0	1.6～2.0	≤2.0	≤2.0	0.65～0.85	
硫酸盐(以 SO_4 计)含量/%	≤	0.01	0.01	0.01	0.05	0.004	0.004

续表

指标名称		指标(Ⅰ类)		指标(Ⅱ类)		指标(Ⅲ类)	
		优等品	一等品	一等品	合格品	一等品	合格品
钡(Ba)含量/%	≤	0.1	0.1	0.1	0.2	0.04	0.04
铁(Fe)含量/%	≤	0.0005	0.0005	0.001	0.002	0.0002	0.0004
重金属(以 Pb 计)含量/%	≤	0.0005	0.0005	0.001	0.002	0.0002	0.0004
盐酸不溶物含量/%	≤	0.010	0.020				
锌片腐蚀		通过试验				通过试验	
pH 值						3～4	3～4

2.2.9 亚硝酸钠[58]，GB 2367－90

分子式：$NaNO_2$

相对分子质量：70.00

工业亚硝酸钠国家标准

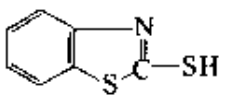
指标名称		指标		
		优等品	一等品	合格品
外观		白色或微带浅灰色或淡黄色结晶		
亚硝酸钠($NaNO_2$)含量(以干基计)/%	≥	99.0	98.5	98.0
硝酸钠($NaNO_3$)含量(以干基计)/%	≤	0.80	1.00	1.90
氯化物(以 NaCl 计)含量(以干基计)/%	≤	0.10	0.17	
水不溶物含量/%	≤	0.05	0.06	0.10
水分含量/%	≤	1.4	2.0	2.5

2.2.10 巯基苯并噻唑，GB 11407—89

分子式：$C_7H_5NS_2$

相对分子质量：167.25

结构式：



硫化促进剂 M 国家标准

指标名称		指标		
		优级品	一级品	合格品
外观		淡黄色或灰白色粉末颗粒		
初熔点/℃	≥	173.0	171.0	170.0
灰分/%	≤	0.30	0.30	0.30
加热减量/%	≤	0.30	0.10	0.50
筛余物①(150μm)/%	≤	0.0	0.1	0.1

① 适用于粉末，不适用于颗粒。

2.2.11　十八胺[58]，ZBG 71005—89（同 HG/T 3503—89）

分子式：$C_{18}H_{39}N$

结构式：$CH_3(CH_2)_{16}CH_2NH_2$

相对分子质量：269.51

十八胺专业标准

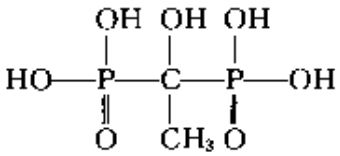
指标名称		指标	
		一级品	合格品
外观		白色固体	淡黄色固体
凝固点/℃	≥	37.0	35.0
总胺值/(KOH mg/g)	≥	195	187
碘值	≤	3.0	4.0

2.3　阻垢分散剂技术标准

2.3.1　羟基亚乙基二膦酸（HEDPA），HG/T 3537—1999

分子式：$C_2H_8O_7P_2$

结构式：



相对分子质量：206.03

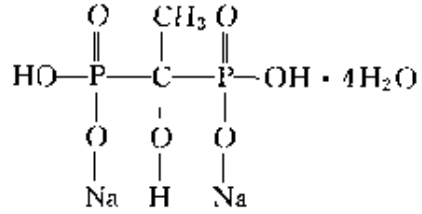
外观：无色至淡黄色黏稠透明液体，无沉淀。

水处理剂羟基亚乙基二膦酸化工行业标准

指标项目		指标		
		优等品	一等品	合格品
活性组分/%	≥	58.0	50.0	50.0
磷酸(以 PO_4^{3-} 计)含量/%	≤	0.5	0.8	1.0
亚磷酸(以 PO_3^{3-} 计)含量/%	≤	1.0	2.0	3.0
氯化物(以 Cl^- 计)含量/%	≤	0.3	0.5	1.0
pH 值(1%水溶液)	≤	2	2	2
密度(20℃)/(g/cm³)	≥	1.40	1.34	1.34
钙螯合值/(mg/g)	≥	500	450	450

2.3.2　羟基亚乙基二膦酸二钠，HG/T 2839—1997

分子式：$C_2H_6O_7P_2Na_2 \cdot 4H_2O$

结构式：

相对分子质量：322.05

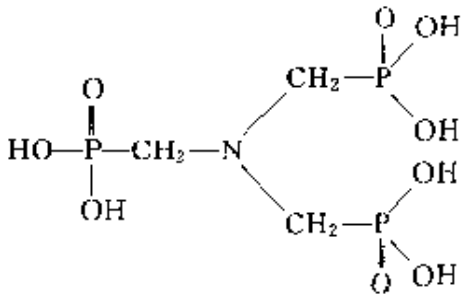
外观：白色粉末。

羟基亚乙基二膦酸二钠固体产品化工行业标准

指标项目		指标		
		优等品	一等品	合格品
活性组分(以 $Na_2HEDP \cdot 4H_2O$ 计)/%	≥	94.0	88.0	82.0
磷酸盐(以 PO_4 计)含量/%	≤	0.3	0.7	1.0
亚磷酸盐(以 PO_3 计)含量/%	≤	1.0	3.0	5.0
氯化物(以 Cl^- 计)含量/%	≤	1.0	2.0	3.0
水不溶物/%	≤	0.1	0.1	0.1

2.3.3 液体氨基三亚甲基膦酸（ATMP），HG/T 2841—1997

分子式：$N(CH_2PO_3H_2)_3$，$C_3H_{12}NO_9P_3$

结构式：

相对分子质量：299.05

外观：无色或微黄色液体，无沉淀。

液体氨基三亚甲基膦酸化工行业的技术指标

项目		指标		
		优等品	一等品	合格品
活性组分/%	≥	50.0	50.0	50.0
亚磷酸(以 PO_3^{3-} 计)含量/%	≤	1.0	3.0	5.0
磷酸(以 PO_4^{3-} 计)含量/%	≤	0.5	0.8	1.0

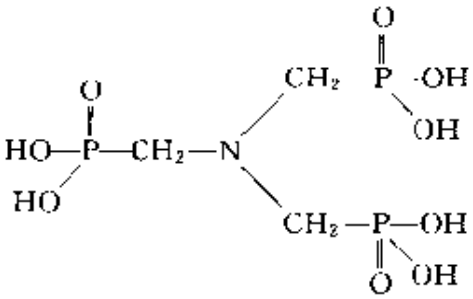
续表

项　　目		指　　标		
		优等品	一等品	合格品
氯化物(以 Cl^-)含量/%	≤	1.0	2.0	3.5
pH 值(1%水溶液)		1.5～2.5	1.5～2.5	1.5～2.5
密度(20℃)/(g/cm³)	≥	1.28	1.28	1.28
钙螯合值/(mg/g)	≥	350	300	300

2.3.4　固体氨基三亚甲基膦酸（ATMP），HG/T 2840—1997

分子式：$N(CH_2PO_3H_2)_3$，$C_3H_{12}NO_9P_3$

结构式：



相对分子质量：299.05

外观：白色颗粒状固体。

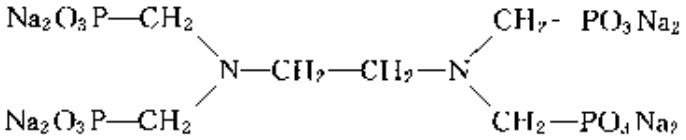
固体氨基三亚甲基膦酸化工行业的技术指标

项　　目		指　　标		
		优等品	一等品	合格品
活性组分/%	≥	80.0	75.0	70.0
氨基三亚甲基膦酸含量/%	≥	75.0	65.0	55.0
亚磷酸(以 PO_3^{3-} 计)含量/%	≤	2.0	4.0	8.0
磷酸(以 PO_4^{3-} 计)含量/%	≤	1.0	1.0	2.0
氯化物(以 Cl^-)含量/%	≤	2.5	4.0	6.0
水分含量/%	≤	12	15	17
水不溶物含量/%	≤	0.05	0.05	0.05
pH(1%水溶液)		1.2～1.6	1.2～1.6	1.2～1.6

2.3.5　乙二胺四亚甲基膦酸钠（EDTMPS），HG/T 3538—89

分子式：$C_6H_{12}O_{12}N_2P_4Na_8$

结构式：



相对分子质量：611.98

外观：黄棕色透明液体。

乙二胺四亚甲基膦酸钠溶液产品化工行业标准

指标项目		指标		
		优等品	一等品	合格品
活性组分(以乙二胺四亚甲基膦酸钠计)含量/%		28～30	28～30	28～30
有机磷(以P计)含量/%	≥	4.5	4.0	3.3
亚磷酸(以PO_3计)含量/%	≤	1.0	2.0	5.0
磷酸(以PO_4计)含量/%	≤	0.5	1.0	2.0
氯化物(以Cl计)含量/%	≤	2.0	4.0	6.0
乙二胺含量/%	≤	0.012	0.050	0.080
pH(1%水溶液)		9.5～10.5	9.5～10.5	9.5～10.5
密度(20℃)/(g/cm³)		1.3～1.4	1.3～1.4	1.3～1.4

2.3.6 聚氧乙烯醚丙三醇磷酸酯[58]，HG/T 2228—91

商品名：A类多元醇磷酸酯

结构式：$R_1(C_3H_5)[-O(-CH_2CH_2O-)_xCH_2CH_2)]_yR_2R_3$

式中：$x=0\sim2$，R_1 为 $(HO-)_x$ 或 $\left(-O-\overset{\overset{O}{\|}}{\underset{\underset{O}{|}}{P}}-OH\right)_m$ 或

$\left(-O-\overset{\overset{O}{\|}}{\underset{\underset{O}{|}}{P}}-O\right)_m$

其中，$m=0\sim2$，$x+m=2$

R_2 为 $(HO)_q$，$q=1\sim2$

R_3 为 $\left(-O-\overset{\overset{O}{|}}{\underset{\underset{O}{|}}{P}}-OH\right)_n$ 或 $\left(-O-\overset{\overset{O}{\|}}{\underset{\underset{O}{|}}{P}}-O\right)_n$

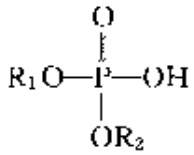
其中，$n=1\sim3$，$q+n=y$

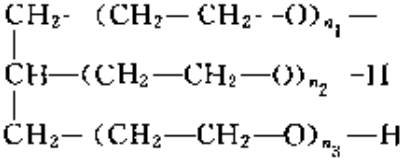
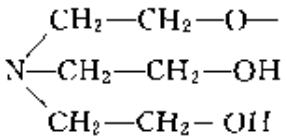
聚氧乙烯醚丙三醇磷酸酯化工行业标准

指标名称		指标	
		一等品	合格品
有机磷酸酯(以 PO_4 计)含量/%	≥	33.5	32.0
无机磷酸(以 PO_4 计)含量/%	≤	8.0	9.0
pH 值(1%水溶液)		1.5	2.5

2.3.7 多羟基化合物磷酸混酯[58]，HG/T 2228—91

商品名：B类多元醇磷酸酯

结构式：

式中 R_1 和 R_2 可分别为 H，HO—CH_2—CH_2—O，CH_3—CH_2—O—CH_2—CH_2—O—， 或 

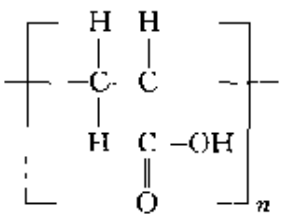
其中 n_1，n_2 和 n_3 可分别为 0 或 1

多羟基化合物磷酸混酯化工行业标准

指标名称		指标	
		一等品	合格品
有机磷酸酯(以 PO_4 计)含量/%	≥	33.5	32.0
无机磷酸(以 PO_4 计)含量/%	≤	9.0	10.0
pH 值(1%水溶液)		1.5	2.5

2.3.8 聚丙烯酸（PAA），GB/T 10533—2000

分子式：$\{C_3H_4O_2\}_n$

结构式：

相对分子质量：<10000

外观：无色或淡黄色液体。

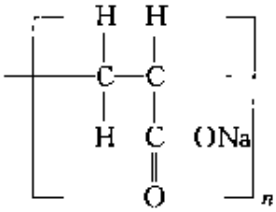
聚丙烯酸溶液产品国家标准

指标项目		指标
固体含量/%	≥	30.0
游离单体(以 CH_2=CH·COOH 计)/%	≤	0.50
pH(10%水溶液)	≤	3.0
密度(20℃)/(g/cm³)	≥	1.09
极限黏数(30℃)/(dL/g)		0.060～0.10

2.3.9 聚丙烯酸钠（PAAS）HG/T 2838- 1997

分子式：$\{C_3H_3O_2Na\}_n$

结构式：



相对分子质量：<10000

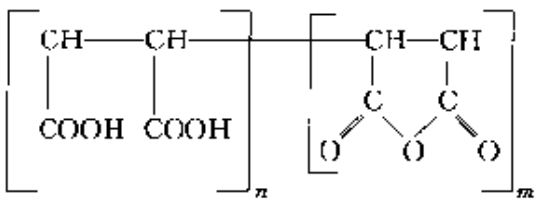
外观：无色或黄色透明液体。

水处理剂聚丙烯酸钠化工行业标准

指标项目		指标	
		优等品	一等品
固体含量/%	≥	30.0	30.0
游离单体(以 CH_2=CH·COOH 计)含量/%	≤	0.50	1.0
pH 值		6.5～7.5	6.0～8.0
密度(20℃)/(g/cm³)	≥	1.15	1.15
极限黏数(30℃)/(dL/g)		0.060～0.085	0.055～0.10

2.3.10 水解聚马来酸酐（HPMA），GB/T 10535—1997

结构式：



相对分子质量：<5000

外观：棕黄色透明液体。

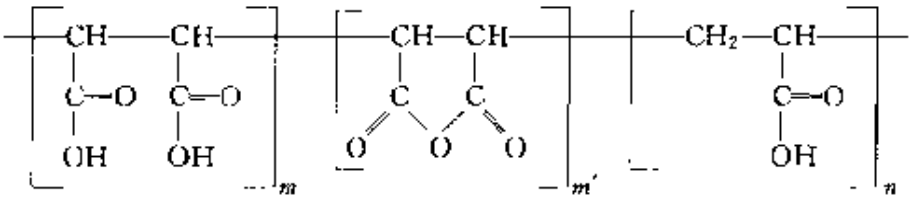
水解聚马来酸酐溶液国家标准

指标项目		指标		
		优等品	一等品	合格品
固体含量/%	≥	48.0	48.0	48.0
平均相对分子质量	≥	700	450	300
溴值/(mg/g)	≤	80	160	—
pH(1%水溶液)		2.0～3.0	2.0～3.0	2.0～3.0
密度(20℃)/(g/cm³)	≥	1.18	1.18	1.18

2.3.11 马来酸酐-丙烯酸共聚物[58]，HG/T 2229—91

分子式：$(C_3H_4O_2)_n \cdot (C_4H_2O_3)_m \cdot (C_4H_4O_4)_m$

结构式：



相对分子质量：平均 300～4000

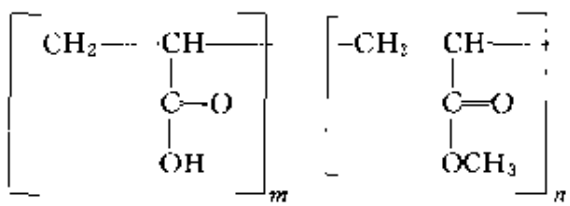
马来酸酐-丙烯酸共聚物化工行业标准

指标名称		指标		
		优等品	一等品	合格品
外观		浅棕色透明液体		
固体分含量/%	≥	48.0	48.0	48.0
数均相对分子质量		450～700	300～450	280～300
游离单体(以马来酸计)含量/%	≤	9.0	13.0	15.0
pH 值(1%水溶液)		2.0～3.0	2.0～3.0	2.0～3.0
密度(20℃)/(g/cm³)		1.18～1.22	1.18～1.22	1.18～1.22

2.3.12 丙烯酸-丙烯酸甲酯共聚物[58]，HG/T 2429—93

分子式：$(C_3H_4O_2)_m \cdot (C_4H_6O_2)_n$

结构式：



相对分子质量：3000～20000

A类（丙烯酸-丙烯酸甲酯共聚物）化工行业标准

指标项目		指标	
		一等品	合格品
外观		无色或淡黄色黏性液体	
密度(20℃)/(g/cm³)		1.10～1.20	1.10～1.20
pH值(1%原样的水溶液)		2.50±0.5	2.50±0.5
固体含量/%		30.0±2.0	27.0+1.0
游离单体(以丙烯酸计)/%	≤	1.00	2.50
极限黏数(30℃)/(dL/g)		0.065～0.095	0.065～0.095

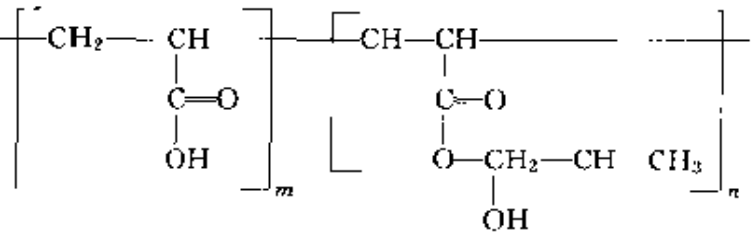
2.3.13 丙烯酸-丙烯酸羟丙酯共聚物（Ⅰ）及丙烯酸钠-甲基丙烯酸羟乙酯-丙烯酸甲酯共聚物（Ⅱ）[58]，HG/T 2429—93

分子式：（Ⅰ）$(C_3H_4O_2)_m \cdot (C_6H_{10}O_3)_n$

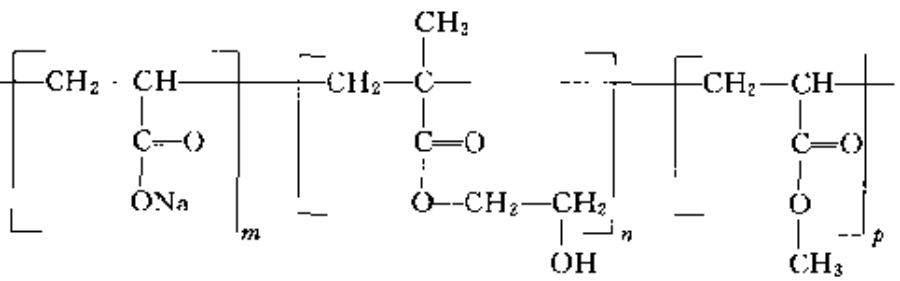
（Ⅱ）$(C_3H_3O_2Na)_m \cdot (C_5H_{10}O_3)_n \cdot (C_4H_6O_2)_p$

结构式：

（Ⅰ）



（Ⅱ）



相对分子质量：（Ⅰ）500～1000000

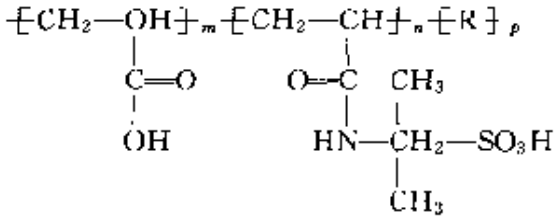
（Ⅱ）500～200000

丙烯酸和多种丙烯酸酯的二元或三元共聚物（Ⅰ）及（Ⅱ）化工行业标准

指标项目		指标	
		一等品	合格品
外观		无色或黄色黏稠液体	
密度(20℃)/(g/cm³)		1.10～1.20	1.10～1.20
pH 值(1%原样的水溶液)		7.50±1.00	7.50±1.00
固体含量/%		30.0±2.0	27.0±1.0
游离单体(以丙烯酸计)/%	≤	0.50	1.00
极限黏数(30℃)/(dL/g)		0.065～0.095	0.065～0.095

2.3.14　丙烯酸-2-甲基-2-丙烯酰胺基丙磺酸类共聚物，HG/T 3642—1999

结构式：



外观：无色或黄色透明液体。

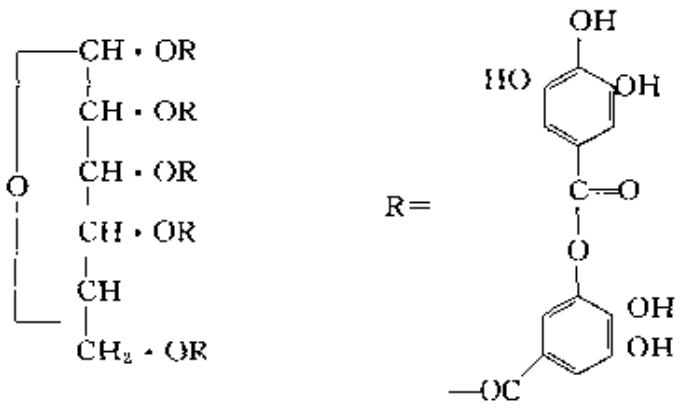
水处理剂丙烯酸-2-甲基-2-丙烯酰胺基丙磺酸类共聚物化工行业标准

指标名称		指标
固体含量/%	≥	30.0
游离单体(以 CH_2═CH－COOH 计)含量/%	≤	0.50
pH 值(1%水溶液)	≤	2.5
密度(20℃)/(g/cm³)	≥	1.05
极限黏数(30℃)/(dL/g)		0.055～0.100

2.3.15　单宁[58]，GB 5308—85

分子式：$C_{76}H_{52}O_{46}$

结构式：



相对分子质量：1701.20

外观：淡黄色至浅棕色无定形粉末。

工业单宁酸国家标准

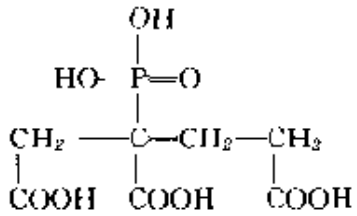
指标名称		指标		
		一级	二级	三级
单宁酸(干基计)含量/%	≥	81.0	78.0	75.0
干燥失重/%	≤	9.0	9.0	9.0
水不溶物/%	≤	0.6	0.8	1.0
总颜色①	≤	2.0	3.0	4.0

① 0.5%的试样溶液在罗维邦（Lovibond）上测定总颜色。

2.3.16　2-膦酸基-1，2，4-三羧基丁烷（PBTC），HG/T 3662—2000

分子式：$C_7H_{11}O_9P$

结构式：



相对分子质量：270.13

外观：无色至淡黄色透明液体。

水处理剂 2-膦酸基-1,2,4-三羧基丁烷化工行业标准

项目		指标	
		一等品	合格品
活性组分(PBTC)/%	≥	50.0	50.0
膦酸(以 PO_4^{3-} 计)含量/%	≤	0.20	0.50
亚磷酸(以 PO_4^{3-} 计)含量/%	≤	0.50	0.80
pH 值(1%水溶液)		1.5～2.0	1.5～2.0
密度(20℃)/(g/cm³)	≥	1.270	1.270

2.4　杀生剂技术标准

2.4.1　氯，GB/T 5138—1996

分子式：Cl_2

相对分子质量：70.91

性状：黄绿色气体，有窒息性气味。有毒，并有强烈的刺激臭和腐蚀性。

工业用液氯国家标准

指标名称		指标		
		优等品	一等品	合格品
氯含量(体积分数)/%	≥	99.8	99.6	99.6
水分含量(质量分数)/%	≤	0.015	0.030	0.040

2.4.2 次氯酸钠[58]，HG/T 2498—93

分子式：NaClO（无水物）；$NaClO \cdot 5H_2O$（水合物）

相对分子质量：74.44（无水物）；164.52（水合物）

次氯酸钠溶液化工行业标准

指标名称		指标		
		Ⅰ型	Ⅱ型	Ⅲ型
外观		浅黄色液体		
有效氯(以Cl计)含量/%	≥	13.0	10.0	5.0
游离碱(以NaOH计)含量/%		0.1～1.0	0.1～1.0	0.1～1.0
铁(Fe)含量/%	≤	0.010	0.010	0.010

2.4.3 次氯酸钙，GB 10666—95

分子式：$Ca(ClO)_2$；$Ca(ClO)_2 \cdot 2H_2O$

相对分子质量：142.98；179.01

钙法次氯酸钙国家标准

指标名称		指标		
		优级品	一级品	合格品
外观		白色或微灰色的粉状及粒状固体		
有效氯/%	≥	65.0	60.0	55.0
水分/%	≤	3.0	4.0	4.0
稳定性检验有效氯损失/%	≤	8.0	10.0	12.0
过筛率/%：粒状，通过0.355～2mm筛孔	≥	90.0		
粉状及粉粒状		协商指标		

钠法次氯酸钙国家标准有效氯指标

指标名称		优级品	一级品	合格品
有效氯/%	≥	70.0	67.0	62.0

2.4.4 漂白粉，HG/T 2496—93

分子式：$CaCl(ClO)\cdot 2H_2O$

相对分子质量：163.01

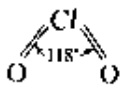
漂白粉化工行业标准

指标名称		指标		
		一级品	二级品	三级品
外观		白色粉末		
有效氯/%	≥	35.0	32.0	28.0
有效氯与总氯量之差/%	≤	2.0	3.0	5.0
水分/%	≤	4.0	5.0	7.0
热稳定系数	≥	0.75		—

2.4.5 二氧化氯[68]，HG/T 2777—1996

分子式：ClO_2

结构式：



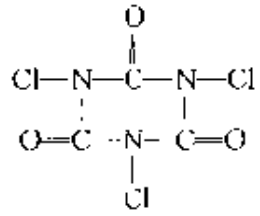
相对分子质量：67.45

稳定性二氧化氯溶液化工行业标准

指标名称		指标
外观		无色或微黄色透明液体，无悬浮物
二氧化氯(ClO_2)含量/%	≥	2.0
密度(20℃)/(g/cm³)		1.020～1.060
pH值		8.2～9.2
砷(As)含量/%	≤	0.0003
重金属(以Pb计)含量	≤	0.002

2.4.6 三氯异氰尿酸，HG/T 3263—2001

分子式：$C_3Cl_3N_3O_3$

结构式：

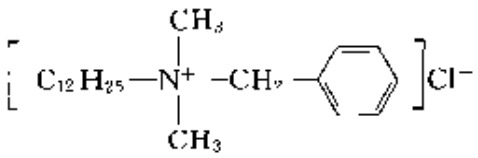
相对分子质量：232.41

三氯异氰尿酸的化工行业标准

指标名称		指标	
		优等品	合格品
有效氯(以Cl计)含量/%	≥	90.0	88.0
水分/%	≤	0.5	1.0
pH值(1%水溶液)		2.6～3.2	

2.4.7　氯化十二烷基二甲基苄基铵[58]，HG/T 2230－91

分子式：$C_{21}H_{38}NCl$

结构式：

相对分子质量：339.99

氯化十二烷基二甲基苄基铵化工行业标准

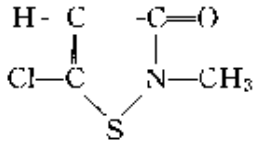
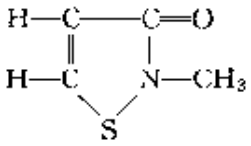
指标项目		指标		
		优等品	一等品	合格品
外观		无色(或淡黄色)黏稠透明液体，无沉淀		
活性含量/%		44～46	44～46	44～46
铵盐含量/%	≤	1.5	2.5	4.0
pH值(1%水溶液)		6.0～8.0	6.0～8.0	6.0～8.0
色泽(Hazen)	≤	100#	200#	500#

2.4.8　异噻唑啉酮衍生物，HG/T 3657—1999

本品为5-氯-2-甲基-4-异噻唑啉3-酮（CMI）和2-甲基-4-异噻唑啉-3-酮（MI）的混合物

CMI　　MI

分子式：C_4H_4ClNOS　　C_4H_5NOS

结构式：　　

相对分子质量：149.60　　115.15

外观：琥珀-金黄色或淡绿到蓝色透明或微浑浊液体。

异噻唑啉酮衍生物化工行业标准

指标名称		指标	
		1类	2类
活性物含量/%	≥	14.0	1.50
CMI/MI/(质量分数)		2.5～4.0	2.5～4.0
pH值		2.0～4.0	2.0～2.5
密度(20℃)/(g/cm³)	≥	1.30	1.02

2.5　除氧剂技术标准

2.5.1　水合肼，HG/T 3259—90

分子式：$N_2H_4 \cdot H_2O$

相对分子质量：50.06

工业水合肼化工行业标准

指标名称	指标(80%水溶液)			指标(40%水溶液)	
	优等品	一等品	合格品	一等品	合格品
外观	无色透明发烟液体		无色透明或略带浑浊的发烟液体	无色透明发烟液体	无色透明或略带浑浊的发烟液体
水合肼($N_2H_4 \cdot H_2O$)含量/% ≥	80.0	80.0	80.0	40.0	40.0
不挥发物含量/% ≤	0.010	0.020	0.050	—	—
铁(Fe)含量/% ≤	0.0005	0.0005	0.0005	—	—
重金属(以Pb计)含量/% ≤	0.0005	0.0005	0.0050	0.001	
氯化物(以Cl^-计)含量/% ≤	0.001	0.003	0.005	0.02	0.05
硫酸盐(以SO_4^{2-}计)含量/% ≤	0.0005	0.002	0.005	0.002	0.003

2.5.2 亚硫酸钠，HG/T 2967—2000

分子式：Na_2SO_3（无水物）；$Na_2SO_3 \cdot 7H_2O$（七水物）

相对分子质量：126.04（无水物）；252.15（七水物）

外观：无色或略带彩色的白色粉末。

工业无水亚硫酸钠化工行业标准

指标名称		指标		
		优等品	一等品	合格品
亚硫酸钠(Na_2SO_3)含量/%	≥	97.0	96.0	93.0
铁(Fe)含量/%	≤	0.003	0.005	0.02
水不溶物含量/%	≤	0.02	0.03	0.05
游离碱(以 Na_2CO_3 计)含量/%	≤	0.10	0.40	0.80
硫酸钠(以 Na_2SO_4 计)含量/%	≤	2.5		
氯化钠(以 NaCl 计)含量/%	≤	0.10		

2.5.3 氢醌[58]，HG 7—1360—80

别名：对苯二酚

分子式：$C_6H_4(OH)_2$

结构式：

相对分子质量：110.11

氢醌化工行业标准

指标名称		指标	
		照相级	工业级
外观		白色、近乎白色的结晶或结晶粉末	深灰色或微带米黄色结晶粉末
含量/%	≥	99.5	99.0
初熔点/℃	≥	171.0	170.5
干燥失重/%	≤	0.1	0.3
灰分/%	≤	0.05	0.3
重金属(Pb)/%	≤	0.0001	
铁(Fe)/%	≤	0.001	
硫酸盐/%	≤	0.01	

2.6 清洗剂及清洗用缓蚀剂的技术标准

2.6.1 氨基磺酸，HG 2527—93

分子式：NH_2SO_3H

相对分子质量：97.09

工业氨基磺酸化工行业标准

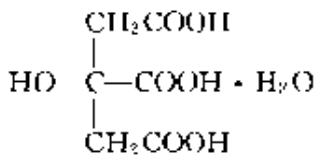
指标名称		指标		
		优级品	一级品	合格品
外观		无色或白色结晶		白色粉末
氨基磺酸(NH_2SO_3H)含量/%	≥	99.5	98.0	92.0
硫酸盐/%	≤	0.4	1.0	—
水不溶物/%	≤	0.02	·	—
铁(Fe)/%	≤	0.01	0.01	—
干燥损失/%	≤	0.2	—	—

2.6.2 柠檬酸[38]，GB 1987—80

别名：枸橼酸，2 羟基丙三羧酸

分子式：$C_6H_8O_7 \cdot H_2O$

结构式：



相对分子质量：210.14

柠檬酸国家标准（药典规定）

指标名称		指标	指标名称		指标
外观		无色透明或白色结晶颗粒	铁(Fe)/%	≤	0.001
含量/%	≥	99.0	灼烧残渣/%	≤	0.1
硫酸盐/%	≤	0.05	草酸盐		合格
重金属(Pb)/%	≤	0.001	钙盐		合格
砷(As)/%	≤	0.0001			

2.6.3 甲酸，GB/T 2093- 93

分子式：HCOOH

相对分子质量：46.02

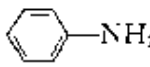
外观：无色透明的无悬浮物液体。

工业甲酸国家标准

指标名称		指标		
		优级品	一级品	合格品
色度(铂-钴)/号	≤	10	20	—
甲酸含量/%	≥	90.0	85.0	85.0
稀释试验(酸+水=1+3)		不浑浊	合格	—
氯化物(Cl)/%	≤	0.003	0.005	0.020
硫酸盐(SO_4)/%	≤	0.001	0.002	0.050
铁(Fe)/%	≤	0.0001	0.0005	0.0010
蒸发残渣/%	≤	0.006	0.020	0.080

2.6.4 苯胺，GB 2961 -90

分子式：C_6H_7N，$C_6H_5NH_2$

结构式：

相对分子质量：93.13

苯胺国家标准

指标名称		指标		
		优级品	一级品	合格品
外观		淡黄色油状透明液体，贮存时颜色允许变深		
苯胺含量(以干品计)/%	≥	99.6	99.5	99.3
硝基苯含量/%	≤	0.002	0.010	0.015
水分/%	≤	0.1	0.3	0.5
干品凝固点/℃	≥	−6.2	−6.4	−6.5

2.6.5 甲醛，GB/T 9009—1998

分子式：CH_2O，HCHO

相对分子质量：30.03

工业甲醛溶液国家标准

指标名称		指标		
		优级品	一级品	合格品
外观		无色透明液体，低温贮存时容许有少量甲醛凝聚物沉淀		
色度 Hazen 单位（铂 钴号）	≤	10	—	—
甲醛含量/%		37.0～37.4	36.7～37.4	36.5～37.4

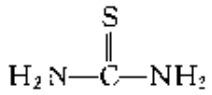
续表

指标名称		指标		
		优级品	一级品	合格品
甲醇含量/%	≤	供需方协商		
酸度(以甲酸计)/%	≤	0.02	0.04	0.05
铁含量/%	≤	0.0001	槽装 0.0003	0.0005
	≤		桶装 0.0010	0.0010
密度(ρ_{20})/(g/cm³)				1.075～1.114

2.6.6 硫脲，HG/T 3266—88（同 ZBG 17013 88）

分子式：CH_4N_2S

结构式：



相对分子质量：76.12

工业硫脲化工行业标准

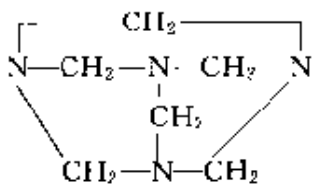
指标名称		指标		
		优级品	一级品	合格品
外观		白色结晶		
硫脲含量/%	≥	99.0	98.5	98.0
加热减量/%	≤	0.40	0.50	1.00
灰分/%	≤	0.10	0.15	0.30
水不溶物/%	≤	0.02	0.05	0.10
硫氰酸盐（以 CNS 计）/%	≤	0.02	0.05	0.10
熔点/℃	≥	171	170	-

2.6.7 六亚甲基四胺，GB/T 9015—1997

别名：乌洛托品

分子式：$C_6H_{12}N_4$

结构式：



相对分子质量：140.19

外观：白色斜晶系晶体。

工业六次(亚)甲基四胺国家标准

指标名称		指标		
		优等品	一等品	合格品
纯度/%	≥	99.3	99.0	98.0
水分/%	≤	0.5	0.5	1.0
灰分/%	≤	0.03	0.05	0.08
水溶液外观		合格		—
重金属(以 Pb 计)/%	≤	0.001		—
氯化物(以 Cl 计)/%	≤	0.015		—
硫酸盐(以 SO_4 计)/%	≤	0.02		
铵盐(以 NH_4 计)/%	≤	0.0001		- -

2.6.8 吡啶[58],GB 3694 —83,3695—83,3696—83,3697- 83

分子式：C_5H_5N

结构式：



相对分子质量 79.1

纯吡啶国家标准，GB 3694—83

指标名称		指标
外观(铂-钴单位)		40
密度(20℃)/(g/cm³)		0.980～0.984
总馏程范围/℃	≤	2
初馏点/℃	≥	114.0
终馏点/℃	≤	116.5
水分/%		0.20

***α*-甲基吡啶国家标准，GB 3695—83**

指标名称		指标
外观		无色或微黄色透明液体
馏程 126～131℃馏出量(体积分数)/%	≥	95
水分/%	≤	0.3

***β*-甲基吡啶国家标准，GB 3696—83**

指标名称		指标
外观		无色或微黄色透明液体
馏程 138～145℃馏出量(体积分数)/%	≥	95
密度(20℃)/(g/cm³)		0.930～0.960

吡啶溶剂国家标准，GB 3897—83

指标名称		指标
外观		微黄色透明液体
馏程 120～140℃馏出量(体积分数)/%	≥	95
水分/%	≤	1.0

2.6.9 工业氟化氢铵，HG/T 3586—1999

分子式：NH_4HF_2

相对分子质量：57.04

外观：无色或白色透明片状结晶。

工业氟化氢铵化工行业标准

指标名称		指标	
		优等品	一等品
氟化氢铵(NH_4HF_2)含量/%	≥	97.0	95.0
干燥减量/%	≤	3.0	5.0
灼烧残渣含量/%	≤	0.2	0.2
硫酸盐(以 SO_4 计)含量/%	≤	0.1	0.1
氟硅酸铵[$(NH_4)_2SiF_6$]含量/%	≤	2.0	4.0

2.7 杀生剂及其他水处理剂的毒性试验等数据

2.7.1 氯化剂的有效氯[1]

氯化剂名称	分子式	相对分子质量	含氯量/(质量/%)	有效系数	有效氯/(质量%)
氯	Cl_2	71	100	1	100
次氯酸	HClO	52.5	67.7	2	135.4
次氯酸钠	NaClO	74.5	47.7	2	95.4
漂白粉	CaCl(ClO)	127	56	1	56
次氯酸钙，漂粉精	$Ca(ClO)_2$	143	49.6	2	99.2
二氧化氯	ClO_2	67.5	52.6	5(酸性)	263
				1(中性)	52.6
亚氯酸钠	$NaClO_2$	90.5	39.2	4(酸性)	156.8
一氯胺	NH_2Cl	51.5	69	2	138
二氯胺	$NHCl_2$	86	82.5	2	165
三氯胺	NCl_3	120.5	88.5	3	265.5

注：1. 有效氯指所含氯中可起氧化作用的比例，以 Cl_2 作为100%的比较值。

2. 有效系数指每个氯原子在氧化时所能夺取的电子数，Cl_2 为1，Cl 为0，Cl^- 为2。

2.7.2 水中游离氯对水生生物的影响[19]

质量浓度/(mg/L)	观察对象	作用
0.001	虹鳟鱼	经 10 分钟的最低致毒浓度
0.003	水蚤亚目	危险浓度
0.0034	竹荚鱼	危险浓度
0.005	戈烈炎鱼	经 24 小时降低活动力
0.01	戈烈炎鱼	经 4 天 67%致死
0.04	戈烈炎鱼	经 2 天致死
0.05～0.16	鲈鱼	经 96 小时 50%致死
0.06	淡水鲑幼鱼	经 2 天致死
0.08～0.10	细鳞大马哈鱼	经 1～2 天 100%致死
0.08	虹鳟鱼	经 7 天 50%致死
0.099	鲷	经 96 小时 50%致死
0.1	原生动物	致死
0.13～0.20	银大马哈鱼	经 1～2 天 100%致死
0.132	胭脂鱼	经 7 天 50%致死
0.19	鳊鱼	经 96 小时 50%致死
0.25	工大马哈鱼	经 2.2 小时 100%致死

2.7.3 国产常用杀生剂

化合物名称、代号及组成	适用 pH 值	适用剂量/(mg/L)	主要研制及生产单位
液氯(Cl_2)	6.0～8.5	余氯 0.3～1.0	
二氧化氯(ClO_2)	6.0～10	余氯 0.5～2.0	青岛海晨环保公司
稳定性二氧化氯(ClO_2)	6.0～10	20～30 (浓度 2%)	上海技源科技有限公司 华东理工大学
次氯酸钠(NaClO)	6～8.5	～100	上海电化厂
次氯酸钙,漂粉精[$Ca(ClO)_2 \cdot 2H_2O$]	6～8.5	～100	上海电化厂
优氯净或菌藻净(二氯异氰尿酸钠,DCCNa)	7～10	20～25	沪太联营化工厂
强氯精(三氯异氰尿酸,TCCA)	7～10	20～25	南京纳科精细化工公司
NS-501(钠型氯锭,有效氯≥55%)	>8.3		南京水处理工业公司

续表

化合物名称，代号及组成	适用 pH 值	适用剂量/(mg/L)	主要研制及生产单位
NS-502(钙型氯锭，有效氯≥55%)	<8.3		南京水处理工业公司
SY-84(钛型氯锭，有效氯≥65%)	7～8	10	浙江上虞塑料仪器厂
SY-86(钠型氯锭，有效氯≥65%)	>8.3	10	浙江上虞塑料仪器厂
TS-803(含水合肼，黏泥剥离剂)		50～100	天津化工研究院
臭氧(O_3)	6～9	残余 0.1	上海环保设备总厂
NL-4(含三氯酚约 30%)	6～8.5	100	南京大学研究 六合县第二化工厂制造
1227(含 LDBC 40%～45%)	7～9	100	上海洗涤剂三厂
洁尔灭(含 LDBC 约 90%)	7～9	50～100	上海试剂厂 无锡红旗制药厂
1231(含十二烷基三甲基氯化铵)	5.5～9.5	100	上海洗涤剂三厂
新洁尔灭(含 LDBB 85%～90%)	7～9	50～100	上海洗涤剂三厂
T-801(聚季铵盐)	7～9	50～100	天津化工研究院
TS-802(聚季铵盐及分散剂)	7～9	100～150	天津化工研究院
TS-806(聚季铵盐酵基化合物)	7～9		天津化工研究院
Ys-01(LDBC 及酚类衍生物)	7～9	100～150	燕山石化公司研究院研究，北京市兴华水质稳定剂厂生产
SQ8(含 MT 及 LDBC)	6～10	25～30	广东省化工研究所
S15(含 MT 等)	6～8	25～30	广东省化工研究所
YTS-20(MT≥10%)	6～7	30～50	江苏泰州市新丰化工厂
SM-103(含两种异噻唑啉酮，$C_4H_5NOS+C_4H_4NOSCl$)	7～9	20～50	上海医科大学研究 朱泾化工厂生产
戊二醛(25%)	适用较宽范围	2～8 一般 4～6	武汉新景化工公司
季鳞盐(RP-71)		1～7	石油化工科学研究院
西维因(α-甲胺基甲酸萘酯)		50～100	江苏常州农药厂等
洗必泰[双(正对氯苯双胍)己烷醋酸盐]	～8	30～50	锦州第一制药厂
401(含乙基大蒜素 15%)	6.5～7.0	100～300	
402(含乙基大蒜素 80%)		50～100	
氯溴二甲基海因	3.5～10	0.8～1.2	上海鑫岛环保科技公司

2.7.4 杀生剂毒性试验数据[4,11,13,34,35,36,38,60]

化合物名称、主要成分及缩写	试验生物种类及中毒途径	急性中毒剂量		毒性等级	试验单位、年代或参考文献
		LD_{50} /(mg/kg)	LC_{50} /(mg/L)		
过氧乙酸	大鼠经口	1540		中毒	[58]
	小鼠经皮	1410		中毒	[58]
异氰尿酸(ICA)	大白鼠	>5000		微毒	南京大学，1979 江苏卫生防疫站，1985。[35]
二氯异氰尿酸(DCCA)	小白鼠	745		中毒	[33],[35]
二氯异氰尿酸钠(DCCNa)，又称优氯净，菌藻净	大白鼠	1670		中毒	[33],[35]
	小白鼠经口(雄)	2346.67		中毒	江苏卫生防疫站，1985
	小白鼠经口(雌)	2270.00		中毒	江苏卫生防疫站，1985
	小白鼠	1229.84±82.58		中毒	河北省药品检验所，1984，[11]
	斑鱼		24h，200～400	低毒	[11]
			96h，1.34	中毒	[11]
二氯异氰尿酸钾(DCCK)	大白鼠	1220		中毒	[33],[35]
三氯异氰尿酸(TCCA)，又称强氯精	大白鼠	750		中毒	[33],[35]
二氧化氯(ClO_2)	小白鼠经口	67(以Cl_2计)		高毒	[33]
二氯二甲基海因(DCDMH)	小白鼠经口(雄)	2710		中毒	[58]
	小白鼠经口(雌)	1470		中毒	[58]
50% DCDMH溶液	鱼		90～96h，10	中毒	[60]
氯溴二甲基海因(BCDMH)	小白鼠经口	929		中毒	[58]
	胖头鱼		96h，10	中毒	[43]
	刺鱼		96h，4	中毒	[43]
四氯甘脲	小白鼠经口	1780		中毒	[58]
A-491(栗田，含水含联氨约53%)	非洲鲫鱼		24h，4.2	中毒	外商提供
	非洲鲫鱼		48h，2.8	中毒	外商提供
	非洲鲫鱼		96h，2.0～2.2	中毒	

续表

化合物名称、主要成分及缩写	试验生物种类及中毒途径	急性中毒剂量		毒性等级	试验单位、年代或参考文献
		LD_{50} /(mg/kg)	LC_{50} /(mg/L)		
对氯苯酚	大白鼠经口	750		中毒	[58]
	大白鼠经皮	1390		中毒	[58]
邻氯苯酚	大白鼠经口	670		中毒	[58]
	大白鼠经皮	950		中毒	[58]
间氯苯酚	小白鼠经口	750		中毒	
2,4 二氯苯酚	小白鼠经口	580		中毒	[58]
2,3,6-三氯苯酚	刺鱼		96h,0.5	高毒	[43]
2,4,5-三氯苯酚	大白鼠经口	820		中毒	
	豚鼠经口	1000		中毒	
2,4,6-三氯苯酚	小白鼠经口	820		中毒	
五氯苯酚(26%)	鱼		90~96h,0.5	高毒	[30]
五氯苯酚	大白鼠经口	146~175		高毒	[58]
五氯苯酚(100%)	白鼠经口	200		高毒	[60]
五氯苯酚	刺鱼		96h,0.2	高毒	[43]
九氯酚钠	大白鼠经口	140~280		高毒	[58]
	兔经口	100~300		高毒	[58]
	鱼虾		0.3~0.6	高毒	[58]
双氯酚(DDM)：					
2,2'-亚甲基双(4-氯苯酚)	非洲鲫鱼及红鲤		96h,0.66	高毒	南京大学,1979
G4 或 NL-4(含 DDM29%~30%)	小白鼠经口	1580		中毒	[11]
G4 或 NL-4(含 DDM29%~30%)	豚鼠经口	1250		中毒	[11]
G4 或 NL-4(含 DDM29%~30%)	狗经口	2000		中毒	[11]
G4 或 NL-4(含 DDM29%~30%)	非洲鲫鱼及红鲤		96h, 2.193	中毒	南京大学,1979
G4 或 NL-4 稀释液	非洲鲫鱼及红鲤		7.2mg/L	未死亡	南京大学,1979
双三丁基氧化锡	鼠经口	190		高毒	[43]
三丁基氯化锡	鼠经口	200		高毒	[58]
	兔经皮	680		中毒	[58]

续表

化合物名称、主要成分及缩写	试验生物种类及中毒途径	急性中毒剂量		毒性等级	试验单位、年代或参考文献
		LD_{50} /(mg/kg)	LC_{50} /(mg/L)		
氯化十二烷基二甲基苄基铵(LDBC)	鱼		96h,3.65	中毒	[11,34,58]中科院微生物所,1980
1227(含LDBC45%)	鱼		8.1	中毒	
50%LDBC溶液	鱼		90～96h,19	低毒	[60]
氯化十二烷基二甲基苄基铵单水化合物	小白鼠经口	24h,910±160		中毒	[11,34,58]
氯化十二烷基二甲基苄基铵单水化合物	小白鼠经口	7d,660±107		中毒	[11,34,58]
溴化十二烷基二甲基苄基铵(LDBB)	鱼		5.8	中毒	[11]
新洁尔灭(含LDBB≥95%)	鱼		96h,15	低毒	[58]
氯化十四烷基二甲基苄基铵单水化合物	小白鼠经口	24h,1100±226		中毒	[34,58]
		7d,720±181		中毒	[34,58]
N7326(含氯化十四烷基二甲基苄基铵)	小白鼠(注射)	316		中毒	南京大学,1982,[11]
	非洲鲫鱼及红鲤		96h,8mg/L未死亡	低毒	南京大学,1982,[11]
T 801(聚季铵盐)	小白鼠经口	2062±65		中毒	天津医药工业研究所,[34]
	金鱼		96h,12.4	低毒	天津水产研究所,[34]
TS 802(几种季铵盐复合剂)	小白鼠经口	72h,4571±87		中毒	[11],天津市药物研究所,1982
氯化聚2-羟丙基1,1-N-二甲基铵(聚季铵盐)	小白鼠经口	1032±65		中毒	[58]
氯化十二烷基三甲基铵	大白鼠经口	250～300		高毒	[58]
氯化十六烷基三甲基铵	大白鼠经口	250～300		高毒	[58]

续表

化合物名称，主要成分及缩写	试验生物种类及中毒途径	急性中毒剂量		毒性等级	试验单位、年代或参考文献
		LD_{50} /(mg/kg)	LC_{50} /(mg/L)		
氯化十八烷基三甲基铵	大白鼠经口	1000		中毒	[58]
氯化双十八烷基二甲基铵	兔经口	15000		无毒	[58]
	鱼		1～10	中毒	[58]
氯化十六烷基吡啶鎓	黑鼠经口	200		高毒	[58]
氯化双癸基二甲基铵	兔	15000		无毒	[58]
	鱼		1～10	中毒	[58]
溴化二癸二甲基铵(DDAB)					
1. 含 DDAB 100%	鼠(口服)	24h, 661±56		中毒	美国威尔斯实验所，1967
	鼠(口服)	7d, 295±35		中毒	美国威尔斯实验所，1967
	鼠(静脉注射)	24h, 15±2.2		中毒	美国威尔斯实验所，1967
	鼠(静脉注射)	7d, 14+3.1		中毒	美国威尔斯实验所，1967
	兔(皮肤急性)	1300		中毒	美国威尔斯实验所，1968
	兔(皮肤亚急性)	20d,615		中毒	美国威尔斯实验所，1968
	蓝腮翻车鱼		20h,0.6	高毒	美国威尔斯实验所，1971
	蓝腮翻车鱼		48h,0.3	高毒	美国威尔斯实验所，1971
	蓝腮翻车鱼		96h,0.27	高毒	美国威尔斯实验所，1971
2. 含 DDAB 50%	鼠(口服)	24h, 1190±101		中毒	美国威尔斯实验所，1967
	鼠(口服)	7d, 530+62		中毒	美国威尔斯实验所，1967
	鼠(静脉注射)	24h, 27±4			美国威尔斯实验所，1967
	鼠(静脉注射)	7d, 25+5.5			美国威尔斯实验所，1967
	鲶鱼		48h, 4.8±0.74	中毒	美国食品与药物研究所，1971

续表

化合物名称，主要成分及缩写	试验生物种类及中毒途径	急性中毒剂量		毒性等级	试验单位、年代或参考文献
		LD_{50} /(mg/kg)	LC_{50} /(mg/L)		
	鲶鱼		96h，2.6±0.6	中毒	美国食品与药物研究所，1971
	蓝腮翻车鱼		48h，0.75±0.28	高毒	美国食品与药物研究所，1971
	蓝腮翻车鱼		96h，0.59±0.24	高毒	美国食品与药物研究所，1971
	古比鱼		48h，1.9	中毒	荷兰中央试验室，1978
	古比鱼		96h，1.2	中毒	荷兰中央试验室，1978
3. 百毒杀（Deciquan 222 含DDAB）	虹鳟鱼		48h，1.18	中毒	美国威尔斯实验所，1971
	虹鳟鱼		96h，1.10	中毒	美国威尔斯实验所，1971
	非洲鲫鱼		96h，4.76～5.71	中毒	南京大学，1990
Ys-01（LDBC约18%，酚类衍生物约12%）	小白鼠（雄）	573		中毒	中国预防医学中心卫生研究所，1984.7
	小白鼠（雌，雄）	3286		中毒	中国预防医学中心卫生研究所，1984.7
	金鱼		48h，10.29	中毒	天津市水产研究所，1984.9
	金鱼		72h，7.12	中毒	天津市水产研究所，1984.9
	金鱼		96h，6.57	中毒	天津市水产研究所，1984.9
	金鱼		96h，3.84	中毒	天津市水产研究所，1988.11
二硫氰酸甲酯（MT）	小白鼠经口	50.19		高毒	[11]
	白鲢鱼		24h，1.159	中，高毒	[34]
	白鲢鱼		48h，0.959	中，高毒	[34]
	白鲢鱼		96h，0.538	中，高毒	[34]
	丰鲤		24h，1.622	中，高毒	[34]

续表

化合物名称，主要成分及缩写	试验生物种类及中毒途径	急性中毒剂量		毒性等级	试验单位、年代或参考文献
		LD_{50} /(mg/kg)	LC_{50} /(mg/L)		
二硫氰酸甲酯(MT)	丰鲤		48h,1.199	中,高毒	[34]
	丰鲤		96h,0.849	中,高毒	[34]
	斑鱼		24h,2.5	中毒	[34]
	斑鱼		48h,1.9	中毒	[34]
	斑鱼		96h,1.4	中毒	[34]
MT溶液(10%)	鼠经口	230		高毒	[60]
	刺鱼		96h,5	中毒	[43]
	鱼		96h,3.2	中毒	[60]
SI5（MT约10%，溶剂及助剂90%）	非洲鲫鱼		24h,8.4	中毒	1983,[11]
	非洲鲫鱼		48h,7.6	中毒	1983,[11]
	非洲鲫鱼		96h,7.4	中毒	1983,[11]
	白鲢鱼		24h,3.5	中毒	1983,[11]
	白鲢鱼		48h,2.2	中毒	1983,[11]
	白鲢鱼		96h,2.0	中毒	1983,[11]
SQ8（MT约10%，LDBC约20%）	小白鼠经口	247.4		中毒	中山医学院卫生系,1981
	白鲢鱼		24h,2.85	中毒	[11]
	白鲢鱼		48h,2.58	中毒	[11]
	白鲢鱼		96h,2.50	中毒	[11]
	丰鲤		24h,3.72	中毒	[11]
	丰鲤		48h,2.70	中毒	[11]
	丰鲤		96h,2.27	中毒	[11]
	非洲鲫鱼		24h,6.31	中毒	[11]
	非洲鲫鱼		48h,5.94	中毒	[11]
	非洲鲫鱼		96h,5.75	中毒	[11]
D-284（Drew Biospere 284）（MT约10%，*N*二甲基甲酰胺45%）	非洲鲫鱼		24h,9.7	中毒	1983,[11]
	非洲鲫鱼		48h,8.2	中毒	1983,[11]
	非洲鲫鱼		96h,7.8	中毒	1983,[11]
	白鲢鱼		24h,4.0	中毒	1983,[11]

续表

化合物名称，主要成分及缩写	试验生物种类及中毒途径	急性中毒剂量		毒性等级	试验单位、年代或参考文献
		LD_{50} /(mg/kg)	LC_{50} /(mg/L)		
D-284	白鲢鱼		48h,2.4	中毒	1983,[11]
	白鲢鱼		96h,2.3	中毒	1983,[11]
AB-12(法国，含有机硫衍生物)	非洲鲫鱼		96h，3.0～3.4	中毒	南京大学,1979
	红鲤		96h,2.8	中毒	南京大学,1979
杀菌2号(含2-硫氰基亚甲硫基苯并噻唑)	大白鼠	2000		中毒	[11]
D-244(主成分2,2-二溴次氮基丙酰胺,DBNPA)	豚鼠(雌)	118		中毒	1981,[11]
DBNPA溶液(20%)	鼠经口	130		高毒	[60]
SM 103(两种异噻唑啉酮混合物，有效浓度1.5%)	小白鼠(口服)	3000～3500		低毒	上海市化学品毒性检定所,1991
丙烯醛	大白鼠经口	46		高毒	[58]
	小白鼠吸入	6h,165		高毒	[58]
	兔经皮	562		中毒	[58]
	胖头鱼		0.03	高毒	[43]
丙烯醛(90%)	鼠经口	40		高毒	[43]
2%戊二醛溶液	小白鼠经口	12.6mL/kg		高毒	[31]
戊二醛*	雄小鼠经口	290		高毒	[58]
	经皮	>750		中毒	[58]
	腹腔	16.2		高毒	[58]
	雄大鼠经口	311		高毒	[58]
	经皮	>750		中毒	[58]
	腹腔	18.2		高毒	[58]
水杨醛	白鼠经口	300～2000		中毒	[58]
甲醛丙烯醛共聚物	大白鼠经口	830		中毒	[58]
α-溴代肉桂醛	小白鼠经口	1752		中毒	[58]
	小白鼠经皮	2220		中毒	[58]
西维因(α-甲胺基甲酸1萘酯)	大白鼠经口	540～710		中毒	

续表

化合物名称，主要成分及缩写	试验生物种类及中毒途径	急性中毒剂量		毒性等级	试验单位、年代或参考文献
		LD_{50} /(mg/kg)	LC_{50} /(mg/L)		
西维因(α-甲胺基甲酸1-萘酯)	大白鼠(雄)经口	850		中毒	[58]
	大白鼠经皮	>4000		中毒	[58]
	家兔经皮	>2000		中毒	[58]
	鲤鱼		48h,>10	低毒	[58]
洗必泰(双氯苯双胍己烷醋酸盐)	大白鼠经口	2000		低毒	中科院微生物所,1979
盐酸洗必泰	小白鼠经口	110		中毒	中科院微生物所,1979
葡萄糖酸洗必泰	小白鼠经口	1800		中毒	
柠檬酸洗必泰	小白鼠经口	>10000		微毒	
十二烷基胍盐酸盐(35%溶液)	鼠经口	700		中毒	[60]
	鱼		90~96h,0.8	高毒	[60]
十二烷基胍盐酸盐	胖头鱼		96h,0.5	高毒	[93]
十六烷基二甲基(2-亚硫酸)乙基铵	小白鼠	>5000		微毒	[58]
季鳞盐(氯化四甲基鳞)	鼠经口	1000		中毒	
	虹鳟鱼		96h,0.46	高毒	[58]
	鲤鱼		96h,0.18	高毒	[58]
棉隆(3,5-二甲基四氢1,3,5-2H噻二嗪2-硫酮)	雄白鼠经口	650		中毒	[58]
六氯二甲基砜	雄白鼠经口	691		中毒	[58]
二甲基二硫代氨基甲酸钠(30%)	小白鼠经口	500		中毒	[60]
福美锌(二甲基二硫代氨基甲酸锌)	大白鼠经口	1400		中毒	[58]
代森钠(1,2-亚乙基双二硫代氨基甲酸钠)	鼠经口	395		高毒	[58]

续表

化合物名称，主要成分及缩写	试验生物种类及中毒途径	急性中毒剂量		毒性等级	试验单位、年代或参考文献
		LD_{50} /(mg/kg)	LC_{50} /(mg/L)		
乙基硫代亚磺酸乙酯	小白鼠经口	80		高毒	[58]
	大白鼠经口	140		高毒	[58]
	白鼠静脉注射	46.7		高毒	[58]
	白鼠皮下注射	102.2		高毒	[58]
WSCP（聚氧亚乙基二甲基亚氨亚乙基二甲基亚氨亚乙基二氯化物）	鼠经口	3690		中毒	[58]
苯基醋酸汞	大白鼠经口	30		高毒	[58]
铜离子	胖头鱼		1	中毒	[43]
	刺鱼		2	中毒	[43]

注：1. 2.7.4及2.7.5中“毒性等级”按“世界卫生组织1975年农药毒性分级”鱼类毒性分级及GB 5044—85“职业性接触毒物危害程度分级”动物毒性分级的规定分级。

2. 部分“急性中毒剂量”（LD_{50}或LC_{50}）原参考资料中未注明试验药剂的浓度，使用时请注意。

* 原文未注明溶液浓度，可能是25%。

2.7.5 混凝剂、除氧剂、清洗剂、润湿剂及缓蚀阻垢剂毒性试验数据

化合物名称，主要成分及缩写	试验生物种类及中毒途径	急性中毒剂量		毒性等级	试验单位、年代或参考文献
		LD_{50} /(mg/kg)	LC_{50} /(mg/L)		
硫酸亚铁	白鼠经口	1389～2778		中毒	[58]
聚合硫酸铁	小白鼠经口	3215.70		中毒	南京市卫生防疫站，[34]
	大白鼠经口	5804.82		微毒	南京市卫生防疫站，[34]
水解聚丙烯酰胺	刺鱼		～100	低毒	[43]
壳聚糖	小白鼠经口	>16000		无毒	[58]
亚硫酸钠	大白鼠经口	>1000		中毒	[58]
	大白鼠静脉注射	115		高毒	[58]
	家鼠静脉注射	130		高毒	[58]

续表

化合物名称、主要成分及缩写	试验生物种类及中毒途径	急性中毒剂量		毒性等级	试验单位、年代或参考文献
		LD_{50} /(mg/kg)	LC_{50} /(mg/L)		
亚硫酸氢钠	大白鼠经口	115		高毒	[58]
无水肼(联氨)	白鼠经口	59		高毒	[58]
	兔经皮	25		高毒	[58]
氢醌(对苯二酚)	动物经口	致死量 80～200		高毒	[58]
异抗坏血酸	大白鼠经口	18000		无毒	[58]
二乙基羟胺	白鼠经口	2190		中毒	[58]
甲乙基酮肟	白鼠经口	2100～3700		中毒	[58]
氨基磺酸	小白鼠经口	3100		中毒	[58]
柠檬酸	家兔静脉注射	975		中毒	[58]
甲酸	白鼠	1210		中毒	[58]
	狗	4000		中毒	[58]
乙二胺四乙酸(EDTA)	小白鼠经口	2050		中毒	[58]
	小白鼠腹腔注射	260		高毒	[58]
苯胺	狗经口	300		高毒	[58]
丙炔醇	白兔	0.07mL/kg		高毒	[58]
	豚鼠	0.05mL/kg		高毒	[58]
二苯基硫脲	大白鼠经口	2000		中毒	[58]
	家兔经口	15000		相对无毒	[58]
六亚甲基四胺(乌洛托品)	大白鼠	致死量 1900		中毒	[58]
喹啉(苯并吡啶)	大白鼠经口	460		高毒	[58]
壬基酚聚氧乙烯醚	大白鼠经口	1600		中毒	[58]
烷醇酰胺	大白鼠经口	>10000		相对无毒	[58]
琥珀酸二烷酯磺酸钠	小白鼠经口	4800		中毒	[58]
	大白鼠经口	1900		中毒	[58]
石油磺酸钠	大白鼠经口	1200～3000		中毒	[58]
苯甲酸	白鼠经口	2700		中毒	[58]
	兔经口	2000		中毒	[58]

续表

化合物名称，主要成分及缩写	试验生物种类及中毒途径	急性中毒剂量		毒性等级	试验单位、年代或参考文献
		LD_{50} /(mg/kg)	LC_{50} /(mg/L)		
苯甲酸	兔皮下注射	2000		中毒	[58]
六偏磷酸钠	胖头鱼		~100	低毒	[43]
	刺鱼		~100	低毒	[43]
铬酸钠（六价铬）	兔皮下注射	243		高毒	[58]
CrO_4^{2-}	刺鱼		96h，~100		[43]
$Na_2Cr_2O_7$	虹鳟鱼		96h，285	低毒	[34]
	水蚤		96h，3	中毒	[34]
$Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$	虹鳟鱼		96h，7340	相对无毒	Natl. Eng. 1981. N4. N5，[34]
	水蚤		96h，3220	相对无毒	Natl. Eng. 1981. N4. N5，[34]
	蓝腮鱼		96h，6790	相对无毒	Natl. Eng. 1981. N4. N5，[34]
锌离子	胖头鱼		6	中毒	[43]
	刺鱼		8	中毒	[43]
α-巯基苯并噻唑	胖头鱼		5	中毒	[43]
	家兔经口	500		中毒	[58]
苯并二唑	虹鳟鱼		96h，39	低毒	[58]
	大白鼠经口	560		中毒	[58]
	大白鼠吸入	5.7		中毒	[58]
甲基苯并二唑	大白鼠经口	675		中毒	[58]
	大白鼠吸入	>1.7		中毒	[58]
	虹鳟鱼		96h，2..4	低毒	[58]
十六胺及双十六胺	鼠经口	~100		高毒	[58]
吗啉	雄大鼠经口	1050		中毒	[58]
环己烷	大白鼠经口	614		中毒	[58]
2-羟基膦酰基乙酸（Belcor 575，固体分47%~53%）	大白鼠经口 虹鳟鱼	2700	96h，190	中毒 低毒	[58] [58]
膦酰基聚丙烯酸（Belclene 500，固体分 34%~36%）	大白鼠经口 虹鳟鱼	>11700	96h，>100	无毒 低毒	[58] [58]
苯甲酸钠	大白鼠经口	4070		中毒	[58]
水杨酸钠	大白鼠经口	780		中毒	[58]

续表

化合物名称，主要成分及缩写	试验生物种类及中毒途径	急性中毒剂量		毒性等级	试验单位、年代或参考文献
		LD_{50} /(mg/kg)	LC_{50} /(mg/L)		
单宁	小白鼠经口	6000		微毒	[58]
磺化木质素		>5000		微毒	[58]
	刺鱼		~100	低毒	[43]
Dequest 2060（含二亚乙基三胺五亚甲基膦酸，DETATMP）	大白鼠经口 家兔皮肤吸收	6570~7830 7940		微毒 微毒	[58] [58]
ATMP（氨基三亚甲膦酸，50%）	大白鼠经口	7300		微毒	[33]
	鼠（亚急）	90d，6000		微毒	[33]
	蓝腮鱼及虹鳟鱼		96h，>330	低毒	[58]
ATMP-Na（氨基三亚甲基膦酸钠）	鼠	17800		实际无毒	
HEDP（羟基亚乙基二膦酸）	鼠	3130		低毒	[33]
	鼠（亚急）	56d，5000		低毒	[33]
	蓝腮鱼		96h，500	低毒	[33]
	虹鳟鱼		96h，360	低毒	[33]
Dequest 2010（含 HEDP 60%）	大白鼠经口 家兔皮肤吸收	2400 >7940			[58] [58]
EDTMP（亚乙基二胺四亚甲基膦酸，25%）	大白鼠经口 家兔经口	6900 >5010		微毒 微毒	[33] [33]
EDTMP(17%)	蓝腮鱼及虹鳟鱼		>1000	相对无毒	[33]
HDTMP（六亚甲基二胺四亚甲基膦酸）	鼠	8900		相对无毒	[33]
HDTMP(25%)	大白鼠经口	>7940		微毒	[58]
HDTMP(钠盐 20%)	蓝腮鱼及虹鳟鱼		>1000	相对无毒	[58]
PBTC（2-膦酸基丁烷-1，2，4-三羧酸，50%）	大白鼠经口	>6500		微毒	[58]
PAA（聚丙烯酸）	大白鼠经口	5000		微毒	[58]
	水蚤		>1000	相对无毒	[58]

续表

化合物名称，主要成分及缩写	试验生物种类及中毒途径	急性中毒剂量		毒性等级	试验单位、年代或参考文献
		LD_{50} /(mg/kg)	LC_{50} /(mg/L)		
Belclene 200（HPMA，聚马来酸水溶液）	大白鼠经口	>5000			[58]
	虹鳟鱼		96h，>100	低毒	[58]
POC HS 2020（丙烯酸-丙烯醛共聚物50%溶液）	小白鼠经口	4683 (5.62cm³/kg)		中毒	[58]
Belclene 400（丙烯酸-2-丙烯酰胺-2-甲基丙烷磺酸—次磷酸调聚物50%水溶液）	大白鼠经口	>10		高毒	[58]
SPC-402（低磷、锌，膦，聚合物复合溶液）	小白鼠	1090		低毒	[33]
CP-602（六元醇磷酸酯溶液）	小白鼠经口	5000		微毒	南京大学，1983，[11]
	小白鼠（注射）	1370～2910		微毒	南京大学，1983，[11]
	非洲鲫鱼		96h，～2000	相对无毒	南京大学，1983，[11]
	红鲤		96h，550	低毒	南京大学，1983，[11]
N-7350（多元醇磷酸酯、锌、磺化木质素复合溶液）	小白鼠（注射）	2000		中毒	南京大学，1985，[11]
	非洲鲫鱼		240	低毒	南京大学，1985，[11]
DCI-01（多元醇磷酸酯、锌、磺化木质素复合溶液）	小白鼠（注射）	1080		中毒	南京大学，1985，[11]
	非洲鲫鱼		150	低毒	南京大学，1985，[11]
PAE（丙烯酸及其酯类共聚物复合溶液）	小白鼠（注射）	6810		微毒	南京大学，1985，[11]
PAE钠型/PAE酸型	非洲鲫鱼		2100/2250	相对无毒	南京大学，1985，[11]
N 7319（丙烯酸及其酯类共聚物复合溶液）	小白鼠（注射）	21500		无毒	南京大学，1985，[11]
	非洲鲫鱼		3600	相对无毒	南京大学，1985，[11]
TS-706D，TS-706E，TS-706F（为磷系缓溶固体缓蚀阻垢剂）	动物	>1500		中毒	天津市劳动卫生职业病研究所，1990，[34]

2.8 我国水处理用离子交换树脂的牌号、性能及技术要求

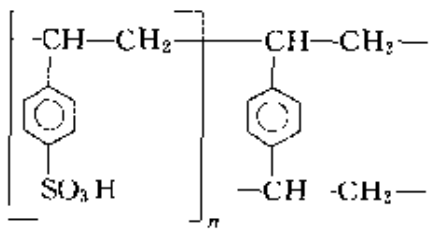
2.8.1 离子交换树脂结构及床型代号[21]

代 号	名 称
AA	丙烯酸 CH_2 $CHCO_2H$
AN	丙烯酰胺—CH_2—CH—$CONR_2$
ANSBⅠ	丙烯酰胺强碱Ⅰ型—CH_2—CH—$CONR_3^+Cl^-$
ANSBⅡ	丙烯酰胺强碱Ⅱ型—CH_2—CH—$CON(CH_2)_2$—$CH_2CH_2OH^+$ Cl^-
AR	阴离子交换树脂 Anion Exchange Resin
C	碳化树脂
CMP	可控孔
CR	阳离子交换树脂 Cation Exchange Resin
DVB	二乙烯苯$(CH_2=CH)_2(C_6H_4)$
DVP	二乙烯吡啶$(CH_2=CH)_2(C_5H_3N)$
EDTA	乙二胺四乙酸—$N(CH_2COOH)_2$
EP	环氧
EPA	环氧胺 CH_2—CH—CH_2Cl，$H(NHCH_4CH_2)_nNH_2$ （CH 与 O 成环）
F	甲醛 HCHO
FB	游离铵
FC	浮动床
IB	中强碱
IP	等孔
MA	甲基丙烯酸—CH_2 $C(CH_3)$ CO_2H
MB	混合床
MF	三甲胺、甲醛 $N(CH_3)_3$，HCHO
MI	带指示剂混合床
MP 或 MR	大孔
NP	胺基磷酸树脂 —NH—$CH_2PO_3H_2$
PA	磷酸树脂—PO_4H_2
PAE	聚丙烯酸酯
PAF	多胺、甲醛 $H(HNCH_2CH_2)_nNH_2$，HCHO
PAM	多胺、Polymamine
PE	聚乙烯
PEPA	多乙烯多胺

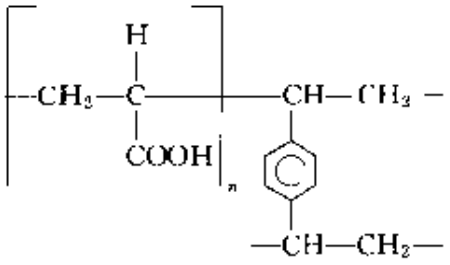
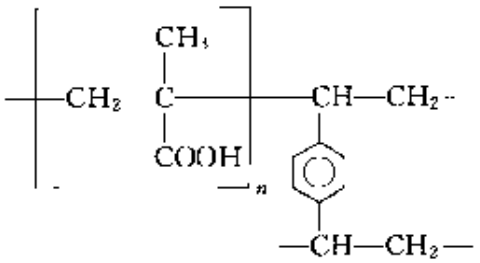
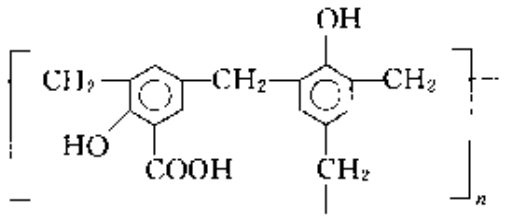
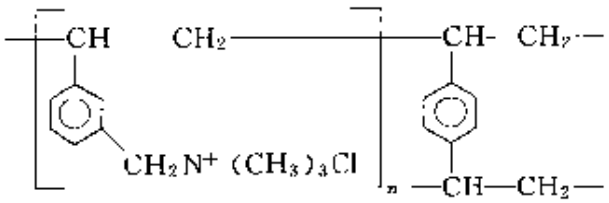
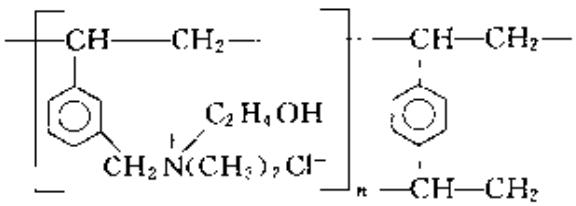
续表

代　号	名　　称
PF	酚醛 AROH,HCHO
PFA	羟基羧盐(—OH)、(—CO_2H)
PFAM	酚、醛、胺 AROH、HCHO、NR_2H
PMMA	聚甲基丙烯酸酯
PO	多孔
PS	聚苯乙烯—CH_2—$\underset{\vert}{C}H$—Ar
PSD	聚苯乙烯—二乙烯苯
PY	吡啶树脂
SA	聚苯乙烯型强酸树脂 $PSDSO_3H$
SBⅠ	聚苯乙烯型强碱树脂 $PSDCH_2NR_3^+Cl^-$
	聚苯乙烯型强碱Ⅰ型 $PSD-CH_2N^+(CH_3)_3Cl^-$
SBⅡ	聚苯乙烯型强碱Ⅱ型 $PSD—CH_2N(CH_3)_2(CH_2CH_2OH)^+Cl^-$
SIR	浸渍树脂
SC	双层床
TETA	三乙烯四胺
VP	乙烯吡啶(CH_2=CH)(C_5H_4N)
WA	弱酸阳树脂
WB	弱碱阴树脂 Weak base(WB1～3)
WB1	弱碱伯胺树脂—NH_2
WB2	弱碱仲胺树脂—NHR
WB3	弱碱叔胺树脂—NR_2

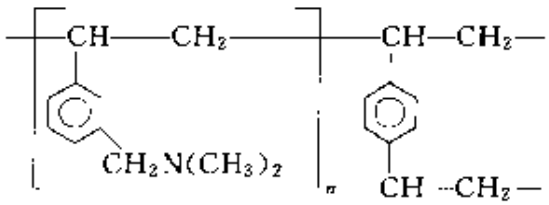
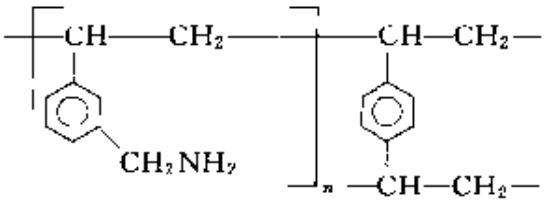
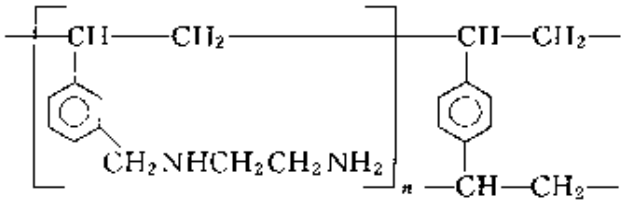
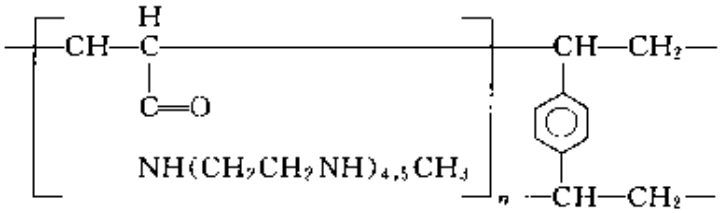
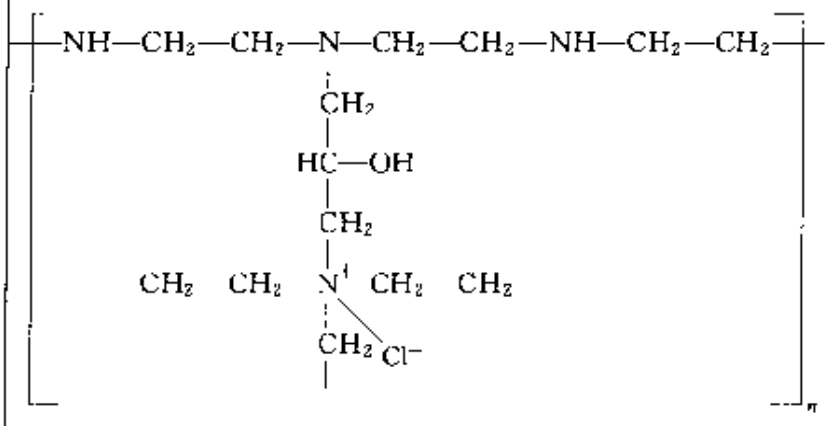
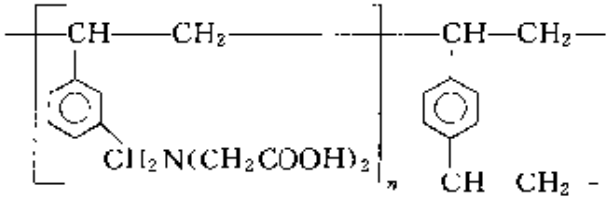
2.8.2　我国离子交换树脂的名称、型态、型号与结构对照表[217]

名　称	型态及型号	结　　构
强酸性苯乙烯系阳离子交换树脂	凝胶型,001	
	大孔型,D001	

续表

名　称	型态及型号	结　　构
弱酸性丙烯酸系阳离子交换树脂	凝胶型，111	
	大孔型，D111	
	凝胶型，112	
弱酸性酚醛系阳离子交换树脂	凝胶型，122	
强碱性季铵Ⅰ型阴离子交换树脂	凝胶型，201	
	大孔型，D201	
强碱性季铵Ⅱ型阴离子交换树脂	凝胶型，202	
	大孔型，D202	

续表

名　称	型态及型号	结　构
弱碱性苯乙烯系阴离子交换树脂	凝胶型，301 大孔型，D301	
	大孔型，D302	
	凝胶型，303	
弱碱性丙烯酸系阴离子交换树脂	大孔型，D311	
弱碱性环氧系阴离子交换树脂	凝胶型，331	
螯合性胺羧基离子交换树脂	凝胶型，401	

2.8.3 我国主要离子交换树脂的物理化学性质[21,32,58]

型号	全名称	功能基团	出厂型态	粒度 0.315～1.25 mm/%	外观
001×7	凝胶型强酸性苯乙烯系阳离子交换树脂	$-SO_3H$	Na 型	≥95	棕黄至棕褐色球状颗粒
001×10	凝胶型强酸性苯乙烯系阳离子交换树脂	SO_3H	Na 型	≥95	棕黄至棕褐色球状颗粒
002	凝胶型强酸性苯乙烯系阳离子交换树脂	$-SO_3H$	Na 型	≥95	棕黄至棕褐色透明球状颗粒
D001	大孔型强酸性苯乙烯系阳离子交换树脂	$-SO_3H$	Na 型	≥95	浅棕色不透明球状颗粒
D111	大孔型丙烯酸系阳离子交换树脂	—COOH	H 型	≥95	乳白或淡黄色不透明球状颗粒
D113	大孔型丙烯酸系阳离子交换树脂	COOH	H 型	≥90	乳白或淡黄色不透明球状颗粒
201×4	凝胶型强碱性季铵Ⅰ型苯乙烯系阴离子交换树脂	$-N^+(CH_3)_3$	Cl 型	≥95	浅黄至金黄色球状颗粒
201×7	凝胶型强碱性季铵Ⅰ型苯乙烯系阴离子交换树脂	$-N^+(CH_3)_3$	Cl 型	≥95	浅黄至金黄色球状颗粒
D201	大孔型强碱性季铵Ⅰ型苯乙烯系阴离子交换树脂	$N^+(CH_3)_3$	Cl 型	≥95	浅黄色不透明球状颗粒
D201	大孔型强碱性季铵Ⅱ型苯乙烯系阴离子交换树脂	$-N^+\begin{cases}(CH_3)_2\\ C_2H_4OH\end{cases}$	Cl 型	≥95	乳白或浅黄色不透明球状颗粒
D301	大孔型弱碱性苯乙烯系阴离子交换树脂	$N(CH_3)_2$	游离铵型	≥95	乳白或浅黄色不透明球状颗粒

含水量/%	湿真密度/(g/mL)	湿视密度/(g/mL)	全交换容量 Q_m $\left(\frac{1}{x}A^{x+},\ \frac{1}{x}B^{x-}\right)$/(mmol/g)	机械性能		转型膨胀率/%	允许使用最高温度/℃	适用pH范围
				耐磨率/%	磨后圆球率/%			
45～53	1.24～1.28	0.77～0.87	≥4.3	93	≥70～95	Na→H 5～10	H型100 Na型120	0～14
37～45	≥1.28	0.84～0.90	≥4.0	≥95		Na→H 1～8	H型100 Na型120	0～14
38～43	≥1.30	0.81～0.87	≥4.4		≥95	Na→H ≤10	H型100 Na型120	0～14
45～60	1.23～1.28	0.75～0.85	≥3.8	≥95	≥80	Na→H 5～10	H型100 Na型120	0～14
40～50	1.12～1.22	0.72～0.82	≥9.5		≥90	H→Na ≤70	100	4～14
45～55	1.11～1.20	0.72～0.80	≥10.5		≥60～90	H→Na ≤80	100	4～14
53～63	1.04～1.08	0.66～0.73	≥3.6		≥75～95	Cl→OH 25～28	OH型60 Cl型80	0～14
42～48	1.06～1.11	0.66～0.75	≥3.2	≥95	≥75～95	Cl→OH 18～22	OH型60 Cl型80	0～14
45～65	1.06～1.10	0.65～0.75	≥3.5		≥60～90	Cl→OH 15～20	OH型50 Cl型100	0～14
45～60	1.06～1.12	0.67～0.77	≥3.2			Cl→OH 5～9	OH型40 Cl型100	0～14
45～65	1.03～1.07	0.65～0.72	≥4.2		≥85～95	游离胺型→盐型 15～20	100	0～9

2.8.4 凝胶型强酸性苯乙烯系阳离子交换树脂（001×7）技术指标[58]，GB/T 13659—92 及 DL 519—93

001×7 树脂（钠型）的国家标准性能指标，GB/T 13659—92

指标名称		指标		
		优等品	一等品	合格品
含水量/%		46～52	45～53	45～53
质量全交换容量 $Q_m^n\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$/(mmol/g)	≥	4.5	4.4	4.3
体积全交换容量 $Q_V^n\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$/(mmol/mL)	≥	1.8	1.7	1.7
湿视密度/(g/cm³)		0.77～0.87		
湿真密度/(g/cm³)		1.24～1.28		
粒度/% 0.315～1.25mm	≥	95		
小于 0.315mm	≤	1		
有效粒径/mm		0.40～0.60		
均一系数	≤	1.7		
磨后圆球率/%	≥	95	85	70

水处理用 001×7 树脂(氢型)/(钠型)的电力行业技术要求，DL 519—93③

指标名称	指标		
	001×7	001×7FC②	001×7MB②
全交换容量 $Q_m^n\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$/(mmol/g)	≥5.0/≥4.5		
体积交换容量 $Q_V^n\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$/(mmol/mL)	≥1.75/≥1.9	≥1.75/≥1.9	≥1.7/≥1.8
含水量/%	51～56/45～50		
湿视密度/(g/cm³)	0.73～0.83/0.77～0.87		
湿真密度/(g/cm³)	1.17～1.22/1.25～1.29		
有效粒径①/mm	0.40～0.70	≥0.50	0.71～0.90
均一系数①	≤1.60	≤1.60	≤1.40
粒度①/%	(0.315～1.250mm) ≥95.0 (<0.315mm) <1	(0.450～1.250mm) ≥95.0 (<0.450mm) <1	(0.710～1.250mm) ≥95.0 (<0.710mm) <1
磨后圆球率/%	≥90		

① 有效粒径、均一系数和粒度测定用钠型。

② FC—浮动床；MB—混合床。

③ DL 519—93 为电力工业部制订的火力发电厂水处理用离子交换树脂验收标准。

2.8.5 凝胶型强酸性苯乙烯系阳离子交换树脂（002）技术指标[58]，DL 519—93

水处理用 002 SC 树脂(氢型)/(钠型)的电力行业技术要求

指标名称	002 SC	指标名称	002 SC
全交换容量 $Q_m^n\left(\frac{1}{z}A^{z+}\right)$/(mmol/g)	≥4.9/≥4.4	湿真密度/(g/cm³)	≥1.24/≥1.30
		有效粒径/mm	≥0.63
		均一系数	≤1.40
体积交换容量 $Q_V^n\left(\frac{1}{z}A^{z+}\right)$/(mmol/mL)	≥1.9/≥2.1	粒度/%	(0.630～1.250mm)≥95.0
			(<0.630mm)<1
含水量/%	46～51/38～43		
湿视密度/(g/cm³)	0.78～0.84/0.81～0.87	磨后圆球率/%	≥95

注：有效粒径、均一系数和粒度测定用钠型。002 SC 树脂主要用于双层床和混床高速水处理。

2.8.6 大孔型强酸性苯乙烯系阳离子交换树脂（D001）技术指标，GB/T 16579 1996 及 DL 519—93

出厂：钠型

外观：驼色至褐色球状不透明颗粒。

D001 大孔强酸性苯乙烯系阳离子交换树脂

国家标准技术指标，GB/T 16579—1996

项目	D001			D001-FC			D001-SC D001-MB		
	优等品	一等品	合格品	优等品	一等品	合格品	优等品	一等品	合格品
含水量/%	45～55		45～60	45～55		45～60	45～55		45～60
质量全交换容量 $Q_m\left(\frac{1}{z}A^{z+}\right)$/(mmol/g)≥	4.30	4.00	3.80	4.30	4.00	3.80	4.30	4.00	3.80
体积全交换容量 $Q_V\left(\frac{1}{z}A^{z+}\right)$/(mmol/mL)≥	1.75	1.70	1.60	1.75	1.70	1.60	1.75	1.70	1.60
湿视密度/(g/mL)	0.75～0.85								
湿真密度/(g/mL)	1.23～1.28								
范围粒度/%(粒径/mm)	≥95(0.315～1.25)			≥95(0.45～1.25)			≥95(0.63～1.25)		
下限粒度/%(粒径/mm)	≤1(≤0.315)			≤1(≤0.45)			≤1(≤0.63)		
有效粒径/mm	0.40～0.70			≤0.50			0.65～0.90		
均一系数 ≤	1.7			1.6			1.4		
渗磨圆球率/% ≥	90	85	80	90	85	80	90	85	80

水处理用 D001(氢型)/(钠型)树脂的电力行业技术要求[58]，DL 519—93

指标名称	D001（或 FC②）	D001 SC②	D001 MB②	D001 TR②
全交换容量 $Q_m^a\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$/(mmol/g)	≥4.8/≥4.35			
体积交换容量 $Q_V^a\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$/(mmol/mL)	≥1.65/≥1.75			
含水量/%	50～60/45～55			
湿视密度/(g/cm³)	0.74～0.80/0.75～0.82			
湿真密度/(g/cm³)	1.16/～1.24/1.25～1.28			
有效粒径①/mm	≥0.50	0.65～0.90		
均一系数①	≤1.60	≤1.4		
粒度①/%	(0.450～1.250mm) ≥95.0	(0.630～1.250mm) ≥95.0	(0.710～1.250mm) ≥95.0	
	(<0.450mm) <1	(<0.630mm) <1	(<0.710mm) <1	
渗磨圆球率/%	≥90			

① 有效粒径、均一系数和粒度测定用钠型。

② FC—浮动床；SC—双层床；MB—混合床；TR—三层床。

2.8.7 弱酸性丙烯酸系阳离子交换树脂（116），HG/T 2166—91

出厂：氢型

外观：微黄色或微粉红色透明球状颗粒。

116 树脂化工行业标准技术指标，HG/T 2166—91

指标名称	指标		
	优等品	一等品	合格品
含水量/%	45～52	45～55	
质量全交换容量 $Q_m^a\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$/(mmol/g) ≥	11.2	11.0	10.5
体积全交换容量 $Q_V^a\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$/(mmol/mL)≥	4.3	4.0	3.8
湿视密度/(g/mL)	0.68～0.78		
湿真密度/(g/mL)	1.14～1.18		

续表

指标名称			指标		
			优等品	一等品	合格品
转型膨胀率(H→Na)/%		≤	70	73	75
粒度/%	0.315～1.25mm	≥	95		
	小于0.315mm	≤	1	—	
有效粒径/mm			0.40～0.60		
均一系数		≤	1.8		
渗磨圆球率/%		≥	75	65	50

2.8.8 大孔型弱酸性丙烯酸系阳离子交换树脂（D113）技术指标[58]，HG/T 2164—91 及 DL 519－ 93

D113 树脂（氢型）的化工行业性能指标，HG /T 2164—91

指标名称		指标		
		优等品	一等品	合格品
含水量/%		45～52	45～52	45～55
质量全交换容量/$Q_m^0\left(\frac{1}{z}A^{z+}\right)$/(mmol/g)	≥	11.0	10.8	10.5
体积全交换容量 $Q_V^0\left(\frac{1}{z}A^{z+}\right)$/(mmol/mL)	≥	4.5	4.2	3.9
湿视密度/(g/cm³)		0.75～0.80	0.74～0.80	0.72～0.80
湿真密度/(g/cm³)		1.15～1.20		
转型膨胀率(H→Na型)/%	≤	65	75	80
粒度(0.315～1.25mm)/%	≥	95	95	90
有效粒径/mm		0.35～0.55		
均一系数	≤	1.7		
渗磨圆球率/%	≥	90	75	60

水处理用 D113 树脂（氢型）的电力行业技术要求，DL 519—93

指标名称		指标		
		D113	D113 FC	D113 SC
氢型率/%	≥	98		
全交换容量 $Q_m^a\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$/(mmol/g)	≥	10.8		
体积交换容量 $Q_V^a\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$/(mmol/mL)	≥	4.2		
含水量/%		45～52		
湿视密度/(g/cm³)		0.72～0.80		
湿真密度/(g/cm³)		1.14～1.20		
有效粒径/mm		0.40～0.70	≥0.50	0.35～0.50
均一系数	≤	1.60	1.60	1.40
粒度/%		(0.315～1.250mm) ≥95.0 (<0.315mm) <1	(0.450～1.250mm) ≥95.0 (<0.450mm) <1	(0.315～0.630mm) ≥95.0 (<0.315mm) <1
渗磨圆球率	≥	90		
转型膨胀率(H→Na)/%	≤	70		

2.8.9 大孔型弱酸性丙烯酸系阳离子交换树脂（D111）技术指标[38]，DL 519—93

水处理用 D111 树脂（氢型）的电力行业技术要求

指标名称		指标		
		D111	D111 FC	D111 SC
氢型率/%	≥	98		
全交换容量 $Q_m^a\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$/(mmol/g)	≥	9.5		
体积交换容量 $Q_V^a\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$/(mmol/mL)	≥	3.5		
含水量/%		40～50		
湿视密度/(g/cm³)		0.72～0.82		
湿真密度/(g/cm³)		1.12～1.22		
有效粒径/mm		0.40～0.70	≥0.50	0.35～0.50
均一系数	≤	1.60	1.60	1.40
粒度/%		(0.315～1.250mm) ≥95.0 (<0.315mm) <1	(0.450～1.250mm) ≥95.0 (<0.450mm) <1	(0.315～0.630mm) ≥95.0 (<0.315mm) <1
渗磨圆球率/%	≥	90		
转型膨胀率(H→Na)/%	≤	70		

2.8.10 凝胶型强碱性Ⅰ型苯乙烯系阴离子交换树脂（201×7）技术指标[58]，GB/T 13660—92 及 DL 519 93

201×7 树脂（氯型）的国家标准性能指标，GB/T 13660—92

指标名称		指标		
		优等品	一等品	合格品
含水量/%		42～48		
质量全交换容量 $Q_m^0\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$/(mmol/g)	≥	3.6	3.4	3.2
体积全交换容量 $Q_V^0\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$/(mmol/mL)	≥	1.4	1.3	1.2
中性盐分解容量/$Q_m\left(\frac{1}{x}B^{x}\right)$/(mmol/g)	≥	3.2	3.0	2.8
湿视密度/(g/cm³)		0.66～0.75		
湿真密度/(g/cm³)		1.06～1.11		
粒度/% (0.315～1.25mm)	≥	95		
小于 0.315mm	≤	1		
有效粒径/mm		0.42～0.58		
均一系数	≤	1.7		
磨后圆球率/%	≥	95	90	75

水处理用 201×7 树脂(氢氧型)/(氯型)的电力行业技术要求，DL 519—93

指标名称		指标			
		201×7	201×7 FC	201×7 SC	201×7 MB
全交换容量 $Q_m^0\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$/(mmol/g)	≥	3.8②			
强型基团容量 $Q_m\left(\frac{1}{x}B^{x}\right)$/(mmol/g)	≥	3.6/3.5			
体积交换容量 $Q_V^0\left(\frac{1}{x}B^{x}\right)$/(mmol/mL)	≥	1.1/1.3	1.1/1.3	1.05/1.25	1.1/1.3
含水量/%		53～58/42～48			
湿视密度/(g/cm³)		0.66～0.71/0.67～0.73			
湿真密度/(g/cm³)		1.06～1.19/1.07～1.1			
有效粒径④/mm		0.40～0.70	≥0.50	≥0.63	0.50～0.65

续表

指标名称	指标			
	201×7	201×7 FC	201×7 SC	201×7 MB
均一系数①	≤1.60	≤1.30	≤1.40	≤1.40
粒度①/%	(0.315～1.250mm) ≥95.0	(0.450～1.250mm) ≥95.0	(0.630～1.250mm) ≥95.0	(0.400～0.900mm) ≥95.0
	(<0.315mm) <1	(<0.450mm) <1	(<0.630mm) <1	(>0.900mm) <1
磨后圆球率/%	≥90			

① 有效粒径，均一系数和粒度测定用氯型；

② 最大再生容量。

2.8.11 凝胶型强碱性Ⅰ型苯乙烯系阴离子交换树脂（201×4）技术指标[58]，HG/T 2163 -91

201×4 树脂（氯型）的化工行业标准技术指标

指标名称		指标		
		优等品	一等品	合格品
含水量/%		54～62	53～63	53～63
质量全交换容量 $Q_m\left(\frac{1}{x}B^x\right)$/(mmol/g)	≥	4.0	3.8	3.6
体积全交换容量 $Q_V\left(\frac{1}{x}B^x\right)$/(mmol/mL)	≥	1.15	1.05	0.95
中性盐分解容量 $Q_m\left(\frac{1}{c}B^{r-}\right)$/(mmol/g)	≥	3.5	3.3	3.1
湿视密度/(g/cm³)		0.66～0.73		
湿真密度/(g/cm³)		1.04～1.08		
粒度/% 0.315～1.250mm	≥	95		
小于 0.315mm	≤	1		
均一系数	≤	1.7		
有效粒径		0.42～0.60		
磨后圆球率/%		95	90	75

2.8.12 大孔型强碱性Ⅰ型苯乙烯系阴离子交换树脂（D201）技术指标，GB/T 16580 -1996 及 DL 519—93

出厂：氯型

外观：乳白色至淡黄色球状不透明颗粒。

D201 大孔强碱性苯乙烯系阴离子交换树脂

国家标准技术指标，GB/T 16580—1996

指标名称		D201			D201 MB			D201-FC			D201-SC		
		优等品	一等品	合格品	优等品	一等品	合格品	优等品	一等品	合格品	优等品	一等品	合格品
含水量/%		50～60		45～65	50～60		45～65	50～60		45～65	50～60		45～65
质量全交换容量 $Q_m^{\ddagger}\left(\frac{1}{x}B^{+}\right)$ /(mmol/g) ≥		3.8	3.7	3.5	3.8	3.7	3.5	3.8	3.7	3.5	3.8	3.7	3.5
体积全交换容量 $Q_V^{\ddagger}\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$ /(mmol/mL) ≥		1.2	1.1	0.9	1.2	1.1	0.9	1.2	1.1	0.9	1.2	1.1	0.9
中性盐交换容量 $Q_m\left(\frac{1}{x}B^{x}\right)$ /(mmol/g) ≥		3.7	3.6	3.4	3.7	3.6	3.4	3.7	3.6	3.4	3.7	3.6	3.4
湿视密度/(g/mL)		0.65～0.75											
湿真密度/(g/mL)		1.06～1.10											
粒度/%(粒径/mm)	范围粒度	≥95(0.315～1.25)			≥95(0.45～0.90)			≥95(0.45～1.25)			≥95(0.63～1.25)		
	上限粒度	—			≤1(≥0.90)		—	—			—		
	下限粒度	≤1(≤0.315)		—	—			≤1(≤0.45)		—	≤1(≤0.45)		—
有效粒径/mm		0.40～0.70			—			≥0.50					
均一系数 ≥		1.6	1.7		—			1.6			1.4		
渗磨圆球率/% ≥		90	80	60	90	80	70	90	80	60	90	80	60

水处理用 D201 树脂(氢氧型)/(氯型)的电力行业技术要求[58]，DL 519—93

指标名称	指标			
	D201	D201 FC	D201 SC	D201 MB D201 TR
全交换容量 $Q_m^a\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$/(mmol/g) ≥	4.0②			
强型基团容量 $Q_m\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$/(mmol/g) ≥	3.8/3.7			
体积交换容量 $Q_V^a\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$/(mmol/mL) ≥	0.95～1.15	0.95～1.15	0.90～1.10	0.95～1.15
含水量/%	55～65/50～60			
湿视密度/(g/cm³)	0.63～0.70/0.65～0.73			
湿真密度/(g/cm³)	1.05～1.08/1.06～1.10			1.05～1.09
有效粒径①/mm	0.40～0.70	≥0.50	≥0.65	
均一系数①	≤1.60	≤1.60	≤1.40	
粒度①/%	(0.315～1.250mm) ≥95.0	(0.450～1.250mm) ≥95.0	(0.630～1.250mm) ≥95.0	(0.450～0.900mm) ≥95.0
	(≤0.315mm) <1	(≤0.450mm) <1	(≤0.630mm) <1	(>0.900mm) <1
渗磨圆球率/%	≥90			

① 有效粒径，均一系数和粒度测定用氯型。

② 最大再生容量。

2.8.13 大孔型强碱性Ⅱ型苯乙烯系阴离子交换树脂（D202）技术指标，HG/T 2754—1996 及 DL 519—93

出厂：氯型

外观：乳白色或淡黄色球状颗粒。

D202 大孔型强碱性苯乙烯系阴离子交换树脂化工行业标准技术指标，HG/T 2754—1996

指标名称	D202			D202-FC			D202-SC		
	优等品	一等品	合格品	优等品	一等品	合格品	优等品	一等品	合格品
含水量/%	47～57	45～60		47～57	45～60		47～57	45～60	
质量全交换容量 $Q_m^a\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$/(mmol/g) ≥	3.60	3.40	3.20	3.60	3.40	3.20	3.60	3.40	3.20
体积全交换容量 $Q_V^a\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$/(mmol/mL) ≥	1.3	1.1	1.0	1.2	1.1	1.0	1.2	1.1	1.0

续表

指标名称		D202			D202-FC			D202-SC		
		优等品	一等品	合格品	优等品	等品	合格品	优等品	一等品	合格品
中性盐交换容量 $Q_m\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$ /(mmol/g)	≥	3.40	3.20	3.00	3.40	3.20	3.00	3.40	3.20	3.00
湿视密度/(g/mL)		0.67～0.77			0.67～0.77			0.67～0.77		
湿真密度/(g/mL)		1.06～1.12			1.06～1.12			1.06～1.12		
粒度(粒径/mm)/%	范围粒度/%	≥95(0.315～1.25)			≥95(0.45～1.25)			≥95(0.63～1.25)		
	上限粒度/%	—			—			—		
	下限粒度/%	≤1(<0.315)		—	≤1(≤0.45)			≤1(<0.63)		
有效粒径/mm		0.40～0.70			≥0.50			—		
均一系数	≤	1.6	1.7		1.6			1.4		
渗磨圆球率/%	≥	90	80	60	90	80	60	90	80	70

水处理用 D202 树脂(氢氧型)/(氯型)的电力行业技术要求

指标名称		指标		
		D202	D202 FC	D202 SC
全交换容量 $Q_m^a\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$/(mmol/g)	≥	3.7②		
强型基团容量 $Q_m\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$/(mmol/g)	≥	3.5～3.4		
体积交换容量 $Q_V^a\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$/(mmol/mL)	≥	1.0～1.2	0.95～1.15	1.0～1.2
含水量/%		50～60/47～57		
湿视密度/(g/cm³)		0.67～0.72/0.68～0.73		
湿真密度/(g/cm³)		1.06～1.10/1.07～1.12		
有效粒径①/mm		0.40～0.70	≥0.50	≥0.63
均一系数①		≤1.60	≤1.50	≤1.40
粒度①/%		(0.315～1.250mm) ≥95	(0.450～1.250mm) ≥95	(0.630～1.250mm) ≥95
		(<0.315mm) <1	(<0.450mm) <1	(<0.630mm) <1
渗磨圆球率/%		≥90		

① 有效粒径，均一系数和粒度测定用氯型。

② 最大再生容量。

2.8.14 大孔型弱碱性苯乙烯系阴离子交换树脂（D301）技术指标，HG/T 2165 -91、HG/T 2624 -94 及 DL 519- 93

出厂：游离胺型

外观：乳白色或浅黄色不透明球状颗粒。

D301 树脂的化工行业标准技术指标[58]，HG/T 2165—91

指标名称		指标		
		优等品	一等品	合格品
含水量/%		50～60	50～60	45～65
质量全交换容量$Q_m^a\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$/(mmol/g)	≥	4.8	4.6	4.2
体积全交换容量$Q_V^a\left(\frac{1}{x}B^{x}\right)$/(mmol/mL)	≥	1.5	1.4	1.3
湿视密度/(g/cm³)		0.65～0.72		
湿真密度/(g/cm³)		1.03～1.07		
粒度/% 0.315～1.25mm	≥	95		
小于 0.315mm	≤	1		
有效粒径/mm		0.45～0.70		
均一系数	≤	1.6	1.7	1.7
渗磨圆球率/%	≥	95	90	85

D301—FC 树脂的化工行业标准技术指标，HG/T 2624—94

指标名称			指标		
			优等品	一等品	合格品
含水量/%			50～60		45～65
质量全交换容量$Q_m^a\left(\frac{1}{x}B^{x}\right)$/(mmol/g)		≥	5.0	4.8	4.3
体积全交换容量$Q_V^a\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$/(mmol/mL)		≥	1.5	1.4	1.3
湿视密度/(g/mL)			0.65～0.72		
湿真密度/(g/mL)			1.03～1.07		
粒度/%	0.45～1.25mm	≥	95		
	小于 0.45mm	≤	1		
有效粒径/mm			0.50～0.75		
均一系数		≤	1.6		
渗磨圆球率/%		≥	95	90	82

水处理用 D301 树脂（游离胺型）的电力行业技术要求，DL 519—93

指标名称		指标		
		D301	D301FC	D301SC
全交换容量 $Q_m^a\left(\frac{1}{x}B^{x}\right)$ /(mmol/g)	≥	4.8		
强型基团容量 $Q_m\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$ /(mmol/g)	≤	1.0		
体积交换容量 $Q_V^a\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$ /(mmol/mL)	≥	1.4		
含水量/%		48～58		
湿视密度/(g/cm³)		0.65～0.72		
湿真密度/(g/cm³)		1.03～1.06		
有效粒径/mm		0.40～0.70	≥0.50	0.30～0.50
均一系数	≤	1.60	1.60	1.40
粒度/%		(0.315～1.250mm)≥95.0 (<0.315mm)<1	(0.450～1.250mm)≥95.0 (<0.450mm)<1	(0.315～0.630mm)≥95.0 (<0.315mm)<1
渗磨圆球率/%	≥	90		
转型膨胀率(OH→Cl)/%	≤	28	30	28

2.8.15 三层混床专用离子交换树脂（D001-TR、D201-TR及S-TR），HG/T 2623—94

D001-TR：大孔型强酸性苯乙烯系阳离子交换树脂，出厂为钠型，外观为棕黄色至棕褐色不透明球状颗粒。

D201-TR：大孔型强碱性苯乙烯系阴离子交换树脂，出厂为氯型，外观为乳白色至淡黄色不透明球状颗粒。

S-TR：惰性树脂，外观为能区别于 D001-TR 和 D201-TR 的其他颜色的球状颗粒。

三层混床树脂化工行业标准技术指标，HG/T 2623—94

指标名称	指标						
	D001-TR			D201-TR			S-TR
	优等品	一等品	合格品	优等品	一等品	合格品	
含水量/%	45～55			50～60			≤12
质量全交换容量 $Q_m\left(\frac{1}{x}A^{x-},\frac{1}{x}B^{x-}\right)$/(mmol/g) ≥	1.4	4.3	4.2	3.8	3.7	3.6	
体积全交换容量 $Q_V\left(\frac{1}{x}A^{x-},\frac{1}{x}B^{x-}\right)$/(mmol/mL) ≥	1.80	1.70	1.60	1.20	1.10	1.00	—
湿视密度/(g/mL)	0.75～0.85			0.65～0.75			0.67～0.72
湿真密度/(g/mL)	1.20～1.28			1.06～1.09			1.14～1.17
粒度/%(粒径/mm)	≥95 (0.71～1.25)			≥95 (0.45～0.90)			≥98 (0.71～0.90)
	≤1(<0.71)			≤1(>0.90)			
渗磨圆球率/% ≥	95	90	85	95	90	85	95

2.9 国外离子交换树脂生产厂及牌号

2.9.1 国外离子交换树脂主要生产厂家及牌号表[21]

国家	树脂生产厂	树脂牌号	国家	树脂生产厂	树脂牌号
美国	Rohm and Haas	Amberlite	法国	Dia-Prosium①公司	Duolite
	Dow 化学公司	Dowex		Deapprozin 公司	Allasion, Zeolite
	Ionac 化学公司	Ionac		别罗特(Rohm and Haas 子公司)	Amberlite
	Nalco 化学公司	Nalcite	日本	三菱化成工业公司	Diaion
	Permutit 公司	Permutit		东京有机化学公司	Amberlite
	Mobey 化学公司	Lewatit	意大利	Resemdion 公司	Relite
	Diamond Shamrock 公司①	Duolite	荷兰	Imacti 公司	Imacasmit
英国	Zerolit 公司	Zerolit	瑞典	Fine 化学公司	Sephadex
	Permutit 公司	Zerokarb	匈牙利	Chemolimpex 公司	Varion
德国	Bayer 公司	Lewatit	捷克	Spolex 化学公司	Ostion
德国	VEB 化学公司	Wofatit	原苏联	塑料科学研究院等	КУ,АН

① 在美国、澳大利亚用“Diamond Shamrock”名称，在欧洲用“Dia Prosium”，在日本为住友及 Ataka 公司。

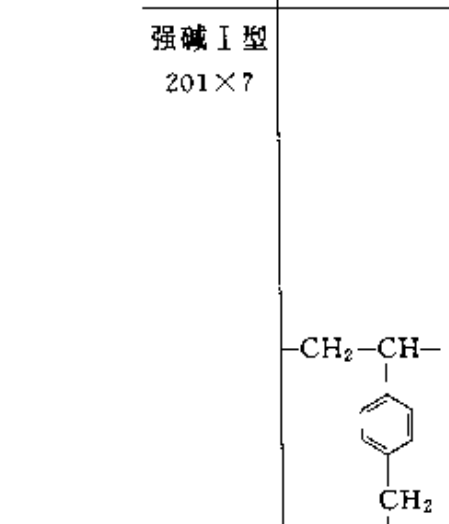
2.9.2 国内外离子交换树脂牌号对照表[21]

国产型号	基本结构	日 本	美 国	英 国	原联邦德国	原民主德国	法 国	原苏联	捷 克
强酸,001		Diaion K	Amberlite IR 120	Zeokarb 225	Lewatit S100		Allassion CS	КУ-2	Ostion KS
		Diaion BK	Dowex50	Zerolit 215			Duolite C-20	SDB-3	Katex SKM
		Diaion SK	Nalcite HCR	Zerolit 225	Lewatit 115		Duolite C 21	SDV-3	
		Diaion SK-1B	Nalcite 1-16	Zerolit 325	Lewatit 1080		Duolite C-25		
			Permutit Q	Zerolit 425	Ionenausta usherrl	Wofatit KPS	Duolite C-27		
			Ionac 240	Zerolit SRC			Duolite C-202		
							Duolite C-204		
							Duolite ARC -351		
大孔强酸 D001		Diaion PK Diaion HPK	Amberlite 200	Zerolit S-1104	Lewatit SP-100		Allassion AS	КУ-2-12P	Katex KP-
			Amberlite 252	Zerolit S-625	Lewatit SP 112		Duolite C 20HL	КУ-23	Ostion KSP
			Amberlyst 15	Zerolit S-925	Lewatit SP 120	Wofatit KS-10	Duolite C 26		
			Amberlyst XN 1004		Lewatit CA9259HL	Wofatit KS-11	Duolite C 261		
			Amberlyst XN 1005			Wofatit OK-80	Duolite ES-26		
			Amberlyst XN 1010				Duolite ES-264		
			Permutit QX						
			Dowex 50W						
			Dowex MSC 1						

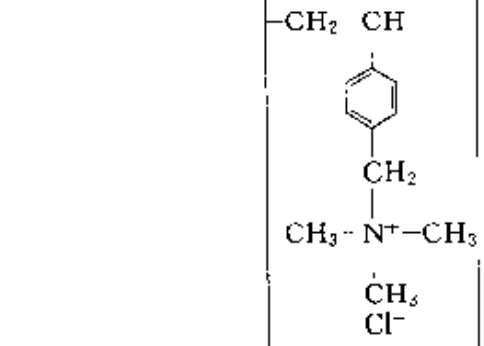
续表

国产型号	基本结构	日　本	美　国	英　国	原联邦德国	原民主德国	法　国	原苏联	捷　克
弱酸.111		Diaion WK20	Amberlite IRC-50	Zeokarb 226		Wofatit CP-300	Allasslon CC	КБ-1,4	
			Bio-Rad 70	Zeokarb 236			Duolite CC	КМ	
				Zerolit 236				КР	
大孔弱酸 D111	$-CH_2-CH_2-$ $O=C$ OH	Diaion WK10	Amberlite IRC-84		Lewatit CNP 80	Wofatit CA-20	Duolite C-433	КБ-3	Ostion KM
		Diaion WK11	Permutit 216		Ionenaustaus-		Duolite C-464		
			Dowex CCR-2		cher IV				
			Ionac 270						
			Ionac CC						
			Ionac CNN						
			Permutit H-70						
			Permutit C						
			Fermutit Q210						

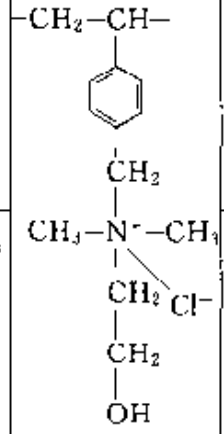
续表

国产型号	基本结构	日　本	美　国	英　国	原联邦德国	原民主德国	法　国	原苏联	捷　克
强碱Ⅰ型 201×7		Diaion SA-10A Diaion SA-10B Diaion SA 11A Diaion SA-11B Diaion SA-100	Amberlite IRA-400 Amberlite CG-400 Amberlite IRA-401 Dowex I Dowex MSA-1 Permutit S	DeAcidite FF De Acidite IP DeAcidite SRA DeAcidite 61～64 Zerolit FF	Lewatit M500 Ionenaustauscher Ⅲ	Wofatit ES Wofatit RS Wofatit RO	Allassion AG 217 Allassion AR 12 Allassion AS Duolite A101 Duolite A104	AB 17 AB-19	Anex SD-TM Ostion AT Ostion SD TM
强碱Ⅰ型 214	$CH_3-N^+(CH_3)_3Cl^-$	Diaion SA-101 神胶 800 神胶 801	Nalcite SBR Ionac A-540 Bio Rad AG 1 Illco A244	Zerolit FX Zerolit P (IP) Zerolit FF (IP) Zerolit ES (IP)		Wofatit SBT Wofatit SBW	Duolite A109 Duolite A121 Duolite A143 Duolite A12 ES、ESF、ARA		

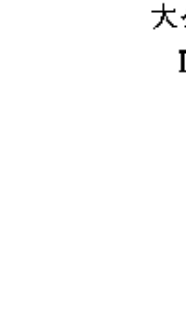
续表

国产型号	基本结构	日　本	美　国	英　国	原联邦德国	原民主德国	法　国	原苏联	捷　克
大孔强碱 Ⅰ型 D290 D201		Diaion PA	Amberlite IRA-900 Amberlite IRA-902 Amberlite IRA-958 Ambersorb XE-352 Amberlyst A-26 Amberlyst A-27 Amberlyst XN-1001 Amberlyst XN-1006 Dowex 21K Dowex AG21K Dowex MSA-1 Ionac A-641	DeAcidite K-MP Zerolit S-1095 Zerolit S-1102 Zerolit K(MP) Zerolit MPF	Lewatit MP-500	Wofatit SZ-30 Wofatit EA-60	Allassion AR-10 Doulite A-140 Doulite A-161 Doulite ES-143 Doulite ES-161	AB-17Π	katex AP-1 Ostion ADP

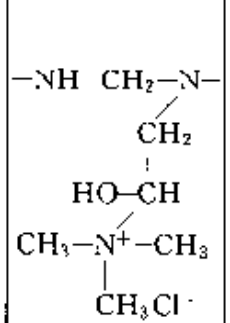
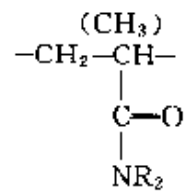
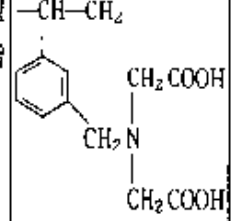
续表

国产型号	基本结构	日　本	美　国	英　国	原联邦德国	原民主德国	法　国	原苏联	捷　克
强碱Ⅱ型 202		Diaion SA-20A Diaion SA-20B Diaion SA-21A Diaion SA-21B Diaion SA-200 Diaion SA-201	Amberlite IRA-410 Amberlite IRA-411 Dowex 2 Naclite SAR Permutit A-300D	Zerolit N(IP)	Lewatit M-600 Permutit ES	Wofatit SBK	Allassion AQ-227 Duolite A-40 Duolite A-102	AB-27 AB-29	Anex SD Anex D
大孔强碱Ⅱ型 D206 D252 D202		Diaion PA404 Diaion PA406 Diaion PA408 Diaion PA410 Diaion PA420	Amberlite IRA-910 Amberlite IRA 911 Amberlite XE-224 Amberlyst A-2 Amberlyst XN-1002 Inoac A651	Zerolit S-1106 Zerolit MPN	Lewatit MP 600	Wofatit SL-30	Allassion AR-20 Allassion DC-22 Duolite A-402C Duolite A 160	AB-27Π AB-29Π	Ostion ADP

续表

国产型号	基本结构	日　本	美　国	英　国	原联邦德国	原民主德国	法　国	原苏联	捷　克
弱碱 301			Amberlite IRA-45 Nalcite WBR	Zerolit H(IP) Zerolit M(IP) Zerolit M DeAcidite GHJ	Ionenaustauscher Ⅱ		Duolite ES106 Duolite A-114 Duolite A303	AH-17 AH 18 AH 19 AH-20	Ostion AMP Ostion AW
大孔弱碱 D301		Diaion WA-20 Diaion WA-21	Amberlite IRA-93 Amberlite IRA-94 Amberlite IRA-94S Amberlyst A-21 Amberlyst XE-1003 Ionac A-320 Dowex MWA-1 Permutit S-440	Zerolit MPH Zerolit S-1101	Lewatit MP-60 Lewatit OC-1002 Lewatit CA-9247HL Lewatit CA-9222	Wofatit AD-40 Wofatit AD-11 Wofatit RO-71	Duolite A-305 Duolite ES-308 Duolite ES-368	AH-89×77П	Anex AP-DM Ostion AWP

续表

国产型号	基本结构	日　本	美　国	英　国	原联邦德国	原民主德国	法　国	原苏联	捷　克
弱碱 331			Dowex WGR Ionac A 300 Ionac A-310	DeAcidite A		Wofalit L150 Wofalit MD	Duolite A30B Duolite A30 Duolite A57 Duolite A340 Duolite ES-57 Duolite ES-371	ПЭК ЭДЭ-10 ЭДЭ-10П	
大孔弱碱 D311		Diaion WA-10 Diaion WA-11 Diaion WA-30	Amberlite IRA-68 Amberlite XE-168 Amberlite XE-236		Lewatit MP-64		Duolite ES-366		
EDTA 型螯合树脂 D401		DiaionCR-10	Amberlite IRC-718 Dowex A-1 Bio-Chelex 100	Zerolit S-1006	Lewatit TP207	Wofatit MC-50	Duolite ES-466 Duolite A-374	KT-1 KT-2 KT-3 KT-4 XKA-1	

附录 3　各种用水标准及规定

3.1　饮用水及生活用水

3.1.1　我国生活饮用水水质标准，GB 5749—85，1999 年修订稿，2001.9.1 实施

3.1.1.1　生活饮用水水质常规检验项目及限值

项　　目	限　　值
感官性状和一般化学指标	
色/度	色度不超过 15 度，不得呈现其他异色
浑浊度/度(NTU)	不超过 1 度(NTU)[1]，特殊情况下不超过 5 度(NTU)
臭和味	不得有异臭、异味
肉眼可见物	不得含有
pH 值	6.5～8.5
总硬度(以 $CaCO_3$ 计)/(mg/L)	450
铝/(mg/L)	0.2
铁/(mg/L)	0.3
锰/(mg/L)	0.1
铜/(mg/L)	1.0
锌/(mg/L)	1.0
挥发酚类(以苯酚计)/(mg/L)	0.002
阴离子合成洗涤剂/(mg/L)	0.3
硫酸盐/(mg/L)	250
氯化物/(mg/L)	250
溶解性总固体/(mg/L)	1000
耗氧量(以 O_2 计)/(mg/L)	3，特殊情况下不超过 5mg/L[2]
毒理学指标	
砷/(mg/L)	0.05
镉/(mg/L)	0.005
铬(六价)/(mg/L)	0.05
氰化物/(mg/L)	0.05
氟化物/(mg/L)	1.0
铅/(mg/L)	0.01
汞/(mg/L)	0.001
硝酸盐(以 N 计)/(mg/L)	20

续表

项　　目	限　　值
硒/(mg/L)	0.01
四氯化碳/(mg/L)	0.002
氯仿/(mg/L)	0.06
细菌学指标	
细菌总数/(CFU/mL)③	100
总大肠菌群	每 100mL 水样中不得检出
粪大肠菌群	每 100mL 水样中不得检出
游离余氯	在与水接触 30 分钟后应不低于 0.3mg/L，管网末梢水不应低于 0.05mg/L（适用于加氯消毒）
放射性指标④	
总 α 放射性/(Bq/L)	0.5
总 β 放射性/(Bq/L)	1

①表中 NTU 为散射浊度单位；②特殊情况包括水源限制等情况；③CFU 为菌落形成单位；④放射性指标规定数值不是限值，而是参考水平；放射性指标超过表中所规定的数值时，必须进行核素分析和评价，以决定能否饮用。

3.1.1.2　生活饮用水水质非常规检验项目及限值

项　　目	限值/(mg/L)	项　　目	限值/(mg/L)
感官性状和一般化学指标		1,1-二氯乙烯	0.03
硫化物	0.02	1,2-二氯乙烯	0.05
钠	200	三氯乙烯	0.07
毒理学指标		四氯乙烯	0.04
锑	0.005	苯	0.01
钡	0.7	甲苯	0.7
铍	0.002	二甲苯	0.5
硼	0.5	乙苯	0.3
钼	0.07	苯乙烯	0.02
镍	0.02	苯并[a]芘	0.00001
银	0.05	氯苯	0.3
铊	0.0001	1,2-二氯苯	1
二氯甲烷	0.02	1,4-二氯苯	0.3
1,2-二氯乙烷	0.03	三氯苯(总量)	0.02
1,1,1-三氯乙烷	2	邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯	0.008
氯乙烯	0.005	丙烯酰胺	0.0005

续表

项　　目	限值/(mg/L)	项　　目	限值/(mg/L)
六氯丁二烯	0.0006	五氯酚	0.009
微囊藻毒素 LR	0.001	亚氯酸盐	0.2(适用于二氧化氯消毒)
甲草胺	0.02		
灭草松	0.3	一氯胺	3
叶枯唑	0.5	2,4,6 三氯酚	0.2
百菌清	0.01	甲醛	0.9
滴滴涕	0.001	三卤甲烷①	该类化合物中每种化合物的实测浓度与其各自限值的比值之和不得超过1
溴氰菊酯	0.02		
内吸磷	0.03(感官限值)		
乐果	0.08(感官限值)		
2,4-滴	0.03	溴仿	0.1
七氯	0.0004	二溴一氯甲烷	0.1
七氯环氧化物	0.0002	一溴二氯甲烷	0.06
六氯苯	0.001	二氯乙酸	0.05
六六六	0.005	三氯乙酸	0.1
林丹	0.002	三氯乙醛(水合氯醛)	0.01
马拉硫磷	0.25(感官限值)	氰化氰(以 CN^- 计)	0.07
对硫磷	0.003(感官限值)		
甲基对硫磷	0.02(感官限值)		

① 三卤甲烷包括氯仿、溴仿、二溴一氯甲烷和一溴二氯甲烷共四种化合物。

3.1.1.3 饮用水源水中有害物质的限值

项　　目	限值/(mg/L)	项　　目	限值/(mg/L)
乙腈	5.0	二甲苯	0.5
丙烯腈	2.0	乙苯	0.3
乙醛	0.05	氯苯	0.3
三氯乙醛	0.01	1,2-二氯苯	1
甲醛	0.9	二硝基苯	0.5
丙烯醛	0.1	硝基氯苯	0.05
二氯甲烷	0.02	二硝基氯苯	0.5
1,2-二氯乙烷	0.03	三氯苯	0.02
环氧氯丙烷	0.02	三硝基甲苯	0.5
二硫化碳	2.0	四氯苯	0.02
苯	0.01	六氯苯	0.05
甲苯	0.7	异丙苯	0.25

续表

项　　目	限值/(mg/L)	项　　目	限值/(mg/L)
苯乙烯	0.02	钼	0.07
苯胺	0.1	钴	1.0
二乙胺	3.0	铍	0.002
己内酰胺	3.0	硼	0.5
丙烯酰胺	0.0005	锑	0.005
氯乙烯	0.005	镍	0.02
三氯乙烯	0.07	钡	0.7
四氯乙烯	0.04	钒	0.05
邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯	0.008	钛	0.1
氯丁二烯	0.002	铊	0.0001
水合肼	0.01	马拉硫磷(4049)	0.25
四乙基铅	0.0001	内吸磷(E059)	0.03
石油(包括煤油、汽油)	0.3	甲基对硫磷(甲基 E605)	0.02
吡啶	0.2	对硫磷(E605)	0.003
松节油	0.2	乐果	0.08
苦味酸	0.5	林丹	0.002
丁基黄原酸	0.005	百菌清	0.01
活性氯	0.01	甲萘威	0.05
硫化物	0.02	溴氰菊酯	0.02
黄磷	0.003	叶枯唑	0.5

3.1.2 我国城镇建设行业饮用净水水质标准[59]，CJ 94—1999

项　　目		限　值
感官性状	色/度	5
	浑浊度/度(NTU)	1
	臭和味	无
	肉眼可见物	无
一般化学指标	pH	6.0~8.5
	硬度(以碳酸钙计)/(mg/L)	300
	铁/(mg/L)	0.2
	锰/(mg/L)	0.05
	铜/(mg/L)	1.0
	锌/(mg/L)	1.0
	铝/(mg/L)	0.2

续表

项目		限值
一般化学指标	挥发性酚类(以苯酚计)/(mg/L)	0.002
	阴离子合成洗涤剂/(mg/L)	0.20
	硫酸盐/(mg/L)	100
	氯化物/(mg/L)	100
	溶解性总固体/(mg/L)	500
	高锰酸钾消耗量(CODcfu 以氧计)/(mg/L)	2
	总有机碳①(TOC)/(mg/L)	4
毒理学指标	氟化物/(mg/L)	1.0
	氰化物/(mg/L)	0.05
	硝酸盐(以氮计)/(mg/L)	10
	砷(As)/(mg/L)	0.01
	硒(Se)/(mg/L)	0.01
	汞(Hg)/(mg/L)	0.001
	镉(Cd)/(mg/L)	0.01
	铬(六价)/(mg/L)	0.05
	铅(Pb)/(mg/L)	0.01
	银(Ag)/(mg/L)	0.05
	氯仿/(μg/L)	30
	四氯化碳/(μg/L)	2
	滴滴涕(DDT)/(μg/L)	0.5
	六六六/(μg/L)	2.5
	苯并[a]芘/(μg/L)	0.01
细菌学指标	细菌总数/(cfu/mL)	50
	总大肠菌群/(cfu/100mL)	0
	粪大肠菌群/(cfu/100mL)	0
	游离余氯(管网末梢水)(如用其他消毒法则可不列入)/(mg/L)	≥0.05
放射性指标	总α放射性/(Bq/L)	0.1
	总β放射性/(Bq/L)	1.0

① 试行。

3.1.3 中国台湾饮用水水质标准[59] (1998 年 2 月)

序号	项目	指标限值
微生物学参数:		
1	大肠杆菌/(个/100mL)	6
2	细菌总数/(CFU/mL)	100

续表

序　号	项　　目	指标限值
物理参数：		
3	嗅/TON[c]	3
4	浑浊度/NTU	4
5	色度/Pt-Co 标准	10
化学参数：		
(一)影响健康的物质/(mg/L)		
6	砷	0.05
7	铅	0.05
8	硒	0.01
9	铬	0.05
10	镉	0.005
11	钡	2.0
12	锑	0.01
13	镍	0.1
14	汞	0.002
15	氰化物	0.05
16	亚硝酸盐(以氮计)	0.1
17	总三卤甲烷	0.1
挥发性有机物/(mg/L)		
18	三氯乙烯	0.005
19	四氯化碳	0.005
20	1,1,1 二氯乙烷	0.20
21	1,2-二氯乙烷	0.005
22	氯乙烯	0.002
23	苯	0.005
24	对二氯苯	0.075
25	1,1-二氯乙烯	0.007
农药/(mg/L)		
26	硫丹	0.003
27	林丹	0.0002
28	去草胺	0.02

续表

序　号	项　　目	指标限值
29	2,4-二氯苯氧基乙酸	0.07
30	百草枯	0.01
31	灭多虫	0.01
32	呋喃丹	0.02
33	异丙威	0.02
34	二嗪农	0.02
35	对硫磷	0.005
36	EPN	0.02
37	单丁烯磷	0.005
38	单(2-丁烯)磷	0.003
（二）可能影响健康的物质/(mg/L)		
39	氟化物	0.8
40	硝酸盐氮(以N计)	10
41	银	0.05
影响饮用的物质/(mg/L)		
42	铁	0.3
43	锰	0.05
44	铜	1.0
45	锌	5.0
46	硫酸盐	250
47	酚	0.001
48	阴离子表面活性剂	0.5
49	氯化物	250
50	氨氮(以N计)	0.5
51	总硬度(以$CaCO_3$计)	500
52	总溶解固体	800
其他：		
53	余氯/(mg/L)	0.2～1.5
54	pH值	6.5～8.5

① TON为嗅的阈值。

注：译自台湾饮用水水质标准：Water Quality Standards in Taiwan。

3.1.4 世界卫生组织（WHO）饮用水水质准则（第二版）[59]，1993年公布，1998年修订

3.1.4.1 饮用水的细菌学质量①

项　目	指标限值
所有用于饮用的水	
大肠杆菌或耐热大肠菌	在任意100mL水样中检测不出
进入配水管网前的处理水	
大肠杆菌或耐热大肠菌	在任意100mL水样中检测不出
总大肠菌群	在任意100mL水样中检测不出
配水管网中的处理水	
大肠杆菌或耐热大肠菌	在任意100mL水样中检测不出
总大肠菌群	在任意100mL水样中检测不出。对于供水量大的情况，应检测足够多次的水样，在任意12个月中95%水样应合格

① 如果检测到大肠杆菌或总大肠菌，应立即进行调查。如果发现总大肠菌，应重新取样再测。如果重取的水样中仍检测出大肠菌，则必须进一步调查以确定原因。

3.1.4.2 饮用水中对健康有影响的化学物质

（一）无机组分　　mg/L

项　目	指标限值	备　注
锑	0.005(p)①	
砷	0.01②(p)	含量超过6×10^{-4}将有致皮肤癌的危险
钡	0.7	
铍		NAD
硼	0.5(p)	
镉	0.003	
铬	0.05(p)	
铜	2(p)	会导致急性肠胃炎
氰化物	0.07	
氟化物	1.5	当制定国家或地区标准时，应考虑当地的气候条件、用水量及其他摄入氟的途径
铅	0.01	众所周知，并非所有的给水都能立即满足指标值的要求，所有其他可用以减少水铅接触的推荐措施都应采用

续表

项　　目	指标限值	备　　注
锰	0.5(p)	ATO
汞(总)	0.001	
钼	0.07	
镍	0.02	
硝酸盐(以NO_3^-计)	50(短时间)	每一项浓度与它相应的指标值的比率的总和不能超过1
亚硝酸盐(以NO_2计)	3(p)(短时间) 0.2(p)(长时间)	
硒	0.01	
铀	0.002(p)	NAD

(二) 有机组分

μg/L

项　　目	指标限值	备　　注
氯化烷烃类		
四氯化碳	2	
二氯甲烷	20	
1,1-二氯乙烷		NAD
1,1,1-三氯乙烷	2000(p)	
1,2-二氯乙烷	30②	过量致险值为10^{-5}
氯乙烯类		
氯乙烯	5②	过量致险值为10^{-5}
1,1-二氯乙烯	30	
1,2-二氯乙烯	50	
三氯乙烯	70(p)	
四氯乙烯	40	
芳香烃族		
苯	10②	过量致险值为10^{-5}
甲苯	700	ATO
二甲苯族	500	ATO
乙苯	300	ATO
苯乙烯	20	ATO
苯并[a]芘	0.7②	过量致险值为10^{-5}

续表

项　　目	指标限值	备　　注
氯苯类		
一氯苯	300	ATO
1,2-二氯苯	1000	ATO
1,3-二氯苯		NAD
1,4-二氯苯	300	ATO
三氯苯(总)	20	ATO
其他类		
二-(2-乙基己基)己二酸	80	
二-(2-乙基己基)邻苯二甲酸酯	8	
丙烯酰胺	0.5②	过量致险值为 10^{-5}
环氧氯丙烷	0.4(p)	
六氯丁二烯	0.6	
乙二胺四乙酸(EDTA)	600(p)	
次氮基二乙酸	200	
二烃基锡		NAD
三丁基氧化锡	2	
微囊藻毒素	1(p)	适用于总微囊藻毒素

(三) 农药

μg/L

项　　目	指标限值	备　　注
草不绿	20②	过量致险值为 10^{-5}
涕灭威	10	
艾氏剂/狄氏剂	0.03	
莠去津	2	
噻草平/苯达松	300	
涕呋喃	7	
氯丹	0.2	
绿麦隆	30	
二氯氰	0.6	

续表

项　　目	指 标 限 值	备　　注
滴滴涕	2	
1,2-二溴-3 氯丙烷	1[②]	过量致险值为 10^{-5}
1,2-二溴乙烷	0.4～15(p)[②]	
2,4-二氯苯氧基乙酸	30	
1,2-二氯丙烷	40(p)	
1,3-二氯丙烷		NAD
1,3-二氯丙烯	20[②]	过量致险值为 10^{-5}
敌草快	10(p)	
二溴乙烯		NAD
七氯和七氯环氧化物	0.03	
六氯苯	1[②]	过量致险值为 10^{-5}
异丙隆	9	
林丹	2	
2-甲基-4 氯苯氧基乙酸(MCPA)	2	
甲氧氯	20	
丙草胺	10	
草达灭	6	
二甲戊乐灵	20	
五氯苯酚	9(p)	
二氯苯醚菊酯	20	
丙酸缩苯胺	20	
达草止	100	
西玛三嗪	2	
特丁津(TBA)	7	
氟乐灵	20	
氯苯氧基除草剂，不包括 2,4-D 和 MC-PA		
2,4-DB	90	
二氯丙酸	100	
2,4,5-涕丙酸	9	
2-甲-4-氯丁酸(MCPB)		NAD
2-甲-4-氯丙酸	10	
2,4,5-T	9	

（四）消毒剂及消毒副产物　　μg/L

项　　目	指标值	备　　注
消毒剂		
一氯胺	3	
二氯胺和三氯胺		NAD
氯	5	ATO 在 pH＜8.0 时，为保证消毒效果，接触 30min 后，自由氯应＞0.5mg/L
二氧化氯		由于二氧化氯会迅速分解，故该项指标值尚未制定。且亚氯酸盐的指标值足以防止来自于二氧化氯的潜在毒性
碘		NAD
消毒副产物		
溴酸盐	25②(p)	过量致险值为 7×10^{-5}
氯酸盐		NAD
亚氯酸盐	200(p)	
氯酚类		
2-氯酚		NAD
2,4-二氯酚		NAD
2,4,6-三氯酚	200②	过量致险值为 10^{-5}，ATO
甲醛	900	
3-氯 4-二氯甲基-5-羟基-2(5*H*)-呋喃酮(MX)		NAD
三卤甲烷类		每一项的浓度与它相对应的指标值的比率不能超过 1
三溴甲烷	100	
一氯二溴甲烷	100	
二氯一溴甲烷	60②	过量致险值为 10^{-5}
三氯甲烷	200②	过量致险值为 10^{-5}
氯化乙酸类		
氯乙酸		NAD

续表

项　　目	指标值	备　　注
二氯乙酸	50(p)	
三氯乙酸	100(p)	
水合三氯乙醛	10(p)	
氯丙酮		NAD
卤乙腈类		
二氯乙腈	90(p)	
二溴乙腈	100(p)	
氯溴乙腈		NAD
三氯乙腈	1(p)	
氯乙腈(以 CN 计)	70	
三氯硝基甲烷		NAD

① (p) 为临时性指标值，该项目适用于某些组分，对这些组分而言，有一些证据说明这些组分具有潜在的毒害作用，但对健康影响的资料有限；或在确定日容许摄入量 (TDI) 时不确定因素超过 1000 以上。

② 对于被认为有致癌性的物质，该指导值为致癌危险率为 10^{-5} 时其在饮用水中的浓度（即每 100000 人中，连续 70 年饮用含浓度为该指导值的该物质的饮用水，有一人致癌）。

NAD 为没有足够的资料用于确定准荐基于健康考虑的指导值。

ATO 为该物质的浓度等于或低于基于健康考虑的指导值时，可能会影响水的感官、嗅或味。

3.1.4.3　饮用水中常见的对健康影响不大的化学物质

化学物质	备注(1993 年公布)	备注 (1998 年修订)	备注(1984 年第一版)
石棉	U		
茨蒽		U	
草甘膦		U	
银	U		
锡	U		

注：U 为对于这些组分不必要提出一个健康基准指标值，因为它们在饮用水中常见的浓度下对人体健康无毒害作用。

3.1.4.4 饮用水中放射性组分

Bq/L

项　　目	指标限值	备　　注
总α活性	0.1	如果其中一项超标，那么更详细的放射性核元素分析必不可少。较高的值并不一定说明该水质不适于人类饮用
总β活性	1	

3.1.4.5 饮用水中含有能引起用户不满的物质及其参数

项　　目	指标限值[1]	用户不满的原因
物理参数		
色度/TCU[2]	15	外观
嗅和味	—	应当可以接受
水温	—	应当可以接受
浑浊度/NTU[3]	5	外观；为了最终的消毒效果，平均浑浊度≤1NTU，单个水样≤5NTU
无机组分/(mg/L)		
铝	0.2	沉淀，脱色
氨	1.5	味和嗅
氯化物	250	味道，腐蚀
铜	1	洗衣房和卫生间器具生锈(健康基准临时指标值为 2mg/L)
硬度	500(以 $CaCO_3$ 计)(1984 年第一版)	高硬度：水垢沉淀，形成浮渣
硫化氢	0.05	嗅和味
铁	0.3	洗衣房和卫生间器具生锈
锰	0.1	洗衣房和卫生间器具生锈(健康基准临时指标值为 0.5mg/L)
溶解氧	—	间接影响
pH	6.5～8.5(1984 年第一版)	低 pH：具腐蚀性； 高 pH：味道，滑腻感用氯进行有效消毒时最好 pH<8.0
钠	200	味道
硫酸盐	250	味道，腐蚀
总溶解固体	1000	味道

续表

项　目	指标限值①	用户不满的原因
锌	3	外观，味道
有机组分/(μg/L)		
甲苯	24～170	嗅和味(健康基准指标值为 700μg/L)
二甲苯	20～1800	嗅和味(健康基准指标值为 500μg/L)
乙苯	2～200	嗅和味(健康基准指标值为 300μg/L)
苯乙烯	4～2600	嗅和味(健康基准指标值为 20μg/L)
一氯苯	10～120	嗅和味(健康基准指标值为 300μg/L)
1,2-二氯苯	1～10	嗅和味(健康基准指标值为 1000μg/L)
1,4-二氯苯	0.3～30	嗅和味(健康基准指标值为 300μg/L)
三氯苯(总)	5～50	嗅和味(健康基准指标值为 20μg/L)
合成洗涤剂	—	泡沫，味道，臭味
消毒剂及消毒副产物/(μg/L)		
氯	600～1000	嗅和味(健康基准指标值为 5mg/L)
氯酚类/(μg/L)		
2-氯酚	0.1～10	嗅和味
2,4-二氯酚	0.3～40	嗅和味
2,4,6-三氯酚	2～300	嗅和味(健康基准指标值为 200μg/L)

① 这里所指的基准值不是精确数值。根据当地情况，低于或高于该值都可能出现问题，故对有机物组分列出了味道和气味的上下限范围。

② TCU，真色度单位。

③ NTU，散色浊度单位。

注：本表摘译自 Guidelines for Drinking Water quaity，the Second Edition (1992)。Guidelines for Drinking Water quality，2nd Edition (Vol. 2 Health criteria and other supporting information，1996 and Addendum to Vol. 2. 1998)。

3.1.5　美国现行饮用水水质标准[59]（2001 年）

3.1.5.1　国家一级饮用水法规

国家一级饮用水法规（NPDWRs 或一级标准），它是法定强制性的标准，用于公共给水系统。一级标准限定了饮用水中有害污染物质的浓度，以保护公众健康。

污染物	MCLG[1] /(mg/L)[2]	MCL[1]TT /(mg/L)[2]	从水中摄入后对健康的潜在影响	饮用水中污染物的来源
Ⅰ. 微生物学指标				
隐性孢子虫	0 (2002-1-1 实施)	TT[3] (2002-1-1 实施)	肠胃疾病(如痢疾、呕吐、腹部绞痛)	人类和动物粪便
兰伯氏贾第氏虫	0	TT[3]	肠胃疾病(如痢疾、呕吐、腹部绞痛)	人类和动物粪便
异养菌总数	未定(n/a)	TT[3]	对健康无害,但能指示在控制微生物中处理的效果	自然存在于外界的细菌中
军团菌	0	TT[3]	军团菌病,通常为肺炎	水中常见,在温度高时繁殖快
总大肠杆菌(包括粪型大肠杆菌和埃希氏大肠杆菌)	0	5.0%[3]	用于指示其他潜在的有害细菌[5]	大肠杆菌自然存在于外界环境中;粪型大肠杆菌和埃希氏大肠杆菌来源于人类和动物粪便
浑浊度	未定(n/a)	TT[3]	浑浊度是衡量水浑浊的尺度。它通常用于指示水质和过滤效果好坏(如是否有致病生物存在)。高浑浊度通常与高浓度的致病微生物(如病毒、寄生虫和一些细菌)相关联。这些生物会导致呕吐、腹泻、腹部绞痛和头痛等症状	土壤冲刷
病毒	0	TT[3]	肠胃疾病(如痢疾、呕吐、腹部绞痛)	人类和动物粪便
Ⅱ. 消毒剂和消毒副产物				
溴酸盐	0 (2002-1-1 实施)	0.010 (2002-1-1 实施)	可致癌	饮用水消毒副产物
氯	MRDLG=4[4] (2002-1-1 实施)	MRDL=4[4] (2002-1-1 实施)	刺激眼鼻;胃不适	水中用于控制微生物的添加剂

续表

污染物	MCLG[1]/(mg/L)[2]	MCL[1]TT/(mg/L)[2]	从水中摄入后对健康的潜在影响	饮用水中污染物的来源
氯胺	MRDLG=4[1]（2002-1-1 实施）	MRDL=4[1]（2002-1-1 实施）	刺激眼鼻；胃不适，贫血	水中用于控制微生物的添加剂
二氧化氯	MRDLG=0.8[1]（2002-1-1 实施）	MRDL=0.8[1]（2002-1-1 实施）	贫血；影响婴儿和幼儿的神经系统	水中用于控制微生物的添加剂
亚氯酸盐	0.8（2002-1-1 实施）	1.0（2002-1-1 实施）	贫血；影响婴儿和幼儿的神经系统	饮用水消毒副产物
卤乙酸（HAA5）	未定[3]（2002-1-1 实施）	0.06（2002-1-1 实施）	可致癌	饮用水消毒副产物
总三卤甲烷（TTHMs）	0	0.1	肝脏、肾和中枢神经系统问题；可致癌	饮用水消毒副产物
	未定[3]（2002-1-1 实施）	0.08（2002-1-1 实施）		
Ⅲ. 无机化学物指标				
锑	0.006	0.006	增加血液胆固醇，减少血液中葡萄糖含量	从炼油厂，阻燃剂，电子，陶器，焊料工业中排放出
砷	0[7]	0.05	伤害皮肤，血液循环问题，可致癌	天然矿物溶蚀；水从玻璃或电子制造工业废物中流出
石棉（>10μm 纤维）	7×10^7 光纤/L	7×10^7 光纤/L	导致良性肠息肉	输水管道中石棉水泥的损坏；天然矿物溶蚀
钡	2	2	血压升高	钻井排放；金属冶炼厂排放；天然矿物溶蚀
铍	0.004	0.004	肠道功能受损	金属冶炼厂，焦化厂，电子，航空，国防工业的排放
镉	0.005	0.005	肾脏功能受损	镀锌管道腐蚀，天然矿物溶蚀，金属冶炼厂排放；水从废电池和废油漆中流出

续表

污染物	MCLG[1] /(mg/L)[2]	MCL[2] TT /(mg/L)[2]	从水中摄入后对健康的潜在影响	饮用水中污染物的来源
总铬	0.1	0.1	多年使用铬含量过高的水会致过敏性皮炎	钢铁厂，纸浆厂排放，天然矿物溶蚀
氰化物（以氰计）	0.2	0.2	神经系统损伤，甲状腺功能障碍	炼钢厂，金属加工厂，塑料厂及化肥厂排放
铜	1.3	TT[3] 处理界限值 =1.3	短期接触使肠胃疼痛，长期接触使肝或肾损伤，有肝豆状核变性的病人，在水中铜浓度超过作用浓度时，应遵医嘱	家庭管道系统腐蚀，天然矿物溶蚀，木材防腐剂淋溶
氟化物	4.0	4.0	骨骼疾病（疼痛和脆弱），儿童得齿斑病	为保护牙齿，向水中添加氟，天然矿物溶蚀，化肥厂及铝厂排放
铅	0	TT[3] 处理界限值 =0.015	婴儿和儿童：身体和智力发育迟缓；成年人：肾脏问题，高血压	家庭管道腐蚀，天然矿物溶蚀
无机汞	0.002	0.002	肾脏功能受损	天然矿物溶蚀，炼油厂和工厂排出；从垃圾填埋场或耕地流出
硝酸盐（以氮计）	10	10	“蓝婴儿综合症”（6个月以下的婴儿受到影响未能及时治疗）。症状：婴儿身体呈蓝色，呼吸短促	化肥溢出，化粪池或污水渗漏，天然矿物溶蚀
亚硝酸盐（以氮计）	1	1	“蓝婴儿综合症”（6个月以下的婴儿受到影响未能及时治疗）。症状：婴儿身体呈蓝色，呼吸短促	化肥溢出，化粪池或污水渗漏，天然矿物溶蚀
硒	0.05	0.05	头发或指甲脱落。指甲和脚趾麻木，血液循环问题	炼油厂排放；天然矿物溶蚀，矿场排放

续表

污染物	MCLG[3]/(mg/L)[4]	MCL[1]TT/(mg/L)[2]	从水中强入后对健康的潜在影响	饮用水中污染物的来源
铊	0.0005	0.0005	头发脱落；血液成分变化，肾，肠，肝问题	从矿砂处理场滤出，电子，玻璃制造厂，制药厂排出
Ⅳ. 有机物指标				
丙烯酰胺	0	TT[9]	可导致神经系统及血液疾病，可致癌	在污泥或废水处理过程中加入水中
草不绿	0	0.002	眼睛，肝，肾，脾功能受损，贫血症，可致癌	庄稼除莠剂流出
阿特拉津	0.003	0.003	心血管系统功能受损，再生繁殖障碍	庄稼除莠剂流出
苯	0	0.005	贫血症，血小板减少，可致癌	工厂排放，气体储罐及废渣回堆土淋溶
苯并[a]芘	0	0.0002	再生繁殖障碍，可致癌	储水槽、管道涂层淋溶
呋喃丹	0.04	0.04	血液及神经系统功能受损，再生繁殖障碍	用于稻子与苜宿的熏蒸剂的淋溶
四氯化碳	0	0.005	肝脏功能受损，可致癌	化工厂和其他企业排放
氯丹	0	0.002	肝脏与神经系统功能受损，可致癌	禁止用的杀白蚁药剂的残留物
氯苯	0.1	0.1	肝，肾功能受损	化工厂及农药厂排放
2,4-二氯苯氧基乙酸	0.07	0.07	肾，肝，肾上腺功能受损	庄稼上除莠剂流出
茅草枯	0.2	0.2	肾有微弱变化	公路旁莠剂流出
1,2-二溴 3-氯丙烷	0	0.0002	再生繁殖障碍，可致癌	大豆，棉花，菠萝及果园土壤熏蒸剂流出或溶出
邻-二氯苯	0.6	0.6	肝，肾或循环系统功能受损	化工厂排放

续表

污染物	MCLG[①] /(mg/L)[②]	MCL[①] TT /(mg/L)[②]	从水中摄入后对健康的潜在影响	饮用水中污染物的来源
对-二氯苯	0.075	0.075	贫血症，肝，肾，或脾受损，血液变化	化工厂排放
1,2-二氯乙烷	0	0.005	可致癌	化工厂排放
1,1 二氯乙烯	0.007	0.007	肝功能受损	化工厂排放
顺 1,2-二氯乙烯	0.07	0.07	肝功能受损	化工厂排放
反 1,2 二氯乙烯	0.1	0.1	肝功能受损	化工厂排放
二氯甲烷	0	0.005	肝功能受损，可致癌	化工厂排放和制药厂排放
1,2 二氯丙烷	0	0.005	可致癌	化工厂排放
二-(2-乙基己基)己二酸	0.4	0.4	一般毒性或再生繁殖障碍	PVC 管道系统溶出，化工厂排出
二-(2 乙基己基)邻苯二甲酸酯	0	0.006	再生繁殖障碍，肝功能受损，可致癌	橡胶厂和化工厂排放
地乐酚	0.007	0.007	再生繁殖障碍	大豆和蔬菜抗莠剂的流出
二噁英(2,3,7,8 TCDD)	0	3×10^{-8}	再生繁殖障碍，可致癌	废物焚烧或其他物质焚烧时散布，化工厂排放
敌草快	0.02	0.02	生白内障	施用抗莠剂时流出
草藻灭	0.1	0.1	胃，肠功能受损	施用抗莠剂时流出
异狄氏剂	0.002	0.002	影响神经系统	禁用杀虫剂残留
熏杀环	0	TT[③]	胃功能受损，再生繁殖障碍，可致癌	化工厂排出，水处理过程中加入
乙基苯	0.7	0.7	肝、肾功能受损	炼油厂排放
二溴化乙烯	0	0.00005	胃功能受损，再生繁殖障碍	炼油厂排放

续表

污染物	MCLG[1] /(mg/L)[2]	MCL[1] TT /(mg/L)[2]	从水中摄入后对健康的潜在影响	饮用水中污染物的来源
草甘膦	0.7	0.7	胃功能受损，再生繁殖障碍	用抗莠剂时溶出
七氯	0	0.0004	肝损伤，可致癌	禁用杀白蚁药残留
环氧七氯	0	0.0002	肝损伤，再生繁殖障碍、可致癌	七氯降解
六氯苯	0	0.001	肝，肾功能受损，可致癌	冶金厂，农药厂排放
六氯环戊二烯	0.05	0.05	肾，胃功能受损	化工厂排出
林丹	0.0002	0.0002	肾，肝功能受损	畜牧，木材，花园所使用杀虫剂流出或溶出
甲氧滴滴涕	0.04	0.04	再生繁殖障碍	用于水果，蔬菜，苜宿，家禽杀虫剂流出或溶出
草氨酰	0.2	0.2	对神经系统有轻微影响	用于苹果，土豆，番茄杀虫剂流出
多氯联苯	0	0.0005	皮肤起变化，胸腺功能受损，免疫力降低，再生繁殖或神经系统障碍，可致癌	废渣回填土溶出，废弃化学药品的排放
五氯酚	0	0.001	肝，肾功能受损，可致癌	木材防腐工厂排出
毒莠定	0.5	0.5	肝功能受损	除莠剂流出
西玛津	0.004	0.004	血液功能受损	除莠剂流出
苯乙烯	0.1	0.1	肝，肾，血液循环功能受损	
四氯乙烯	0	0.005	肝功能受损，可致癌	从PVC管流出，工厂及干洗工场排放
甲苯	1	1	神经系统，肾，肝功能受损	炼油厂排放

续表

污染物	MCLG[①] /(mg/L)[②]	MCL[①]TT /(mg/L)[②]	从水中摄入后对健康的潜在影响	饮用水中污染物的来源
毒杀芬	0	0.003	肾，肝，甲状腺受损	棉花，牲畜杀虫剂流出，溶出
2,4,5-涕	0.05	0.05	肝功能受损	禁用抗莠剂的残留
1,2,4-三氯苯	0.07	0.07	肾上腺变化	纺织厂排放
1，1，1-三氯乙烷	0.2	0.2	肝，神经系统，血液循环系统功能受损	金属除脂场地或其他工厂排放
1，1，2-三氯乙烷	0.003	0.005	肝，肾，免疫系统功能受损	化工厂排放
三氯乙烯	0	0.005	肝脏功能受损，可致癌	炼油厂排出
氯乙烯	0	0.002	可致癌	PVC 管道溶出，塑料厂排放
总二甲苯	10	10	神经系统受损	石油厂，化工厂排出
V．放射性指标				
总 α 放射性	无[⑦] 0 (2003 8 12 实施)	555mBq/L (15pCi/L)	可致癌	天然矿物浸蚀
β 粒子和光子	无[⑦] 0 (2003-8-12 实施)	40μSv/a (4mrem/a)	可致癌	天然和人造矿物衰变
镭^{226}，镭^{228}	无[⑦] 0 (2003 8 12 实施)	185mBq/L (5pCi/L)	可致癌	天然矿物浸蚀
铀	0 (2003-8-12 实施)	30μg/L (2003-8-12 实施)	可致癌；肾毒性	天然矿物浸蚀

＊编者注：原文为"血液升高"。

① 最大污染物浓度（MCL）——公共供水系统的用户水中污染物的最大允许浓度。MCLG 中的安全极限要确保检测值略超过 MCL 不会对公共健康产生重大危害。MCL 是

强制性标准。

最大污染物浓度指标值（MCLG）——饮用水中污染物不会对人体健康产生未知或不利影响的最大浓度。MCLG是非强制性指标。

最大剩余消毒剂浓度（MRDL）——饮用水中消毒剂的最大允许浓度。保持一定多余的消毒剂对控制微生物污染是必要的。

最大剩余消毒剂浓度指标值（MRDLG）——饮用水中消毒剂对人体健康产生未知或不利影响的最大浓度。MRDLGs没有反映消毒剂在控制微生物污染作用的优势。

处理技术（TT）——公共供水系统必须遵循的强制性处理方法，以保证对污染物的控制。

② 除特别指明外，一般单位为mg/L。

③ 地表水处理规则要求采用地表水或受地表水直接影响的地下水的给水系统，(a) 进行水消毒；(b) 进行水过滤，以满足下述污染物能控制到下列浓度。

隐性孢子虫：(2002年1月1日实施) 99%去除或灭活；

兰伯氏贾第氏虫：99.9%去除或灭活；

病毒：99.99%去除或灭活；

军团菌：未限定，但EPA认为，若贾第虫和病毒被去除或灭活，军团菌也能被控制；

浑浊度：任何时候浑浊度不超过5NTU，采用过滤的供水系统确保浑浊度不大于1NTU，(采用常规过滤或直接过滤则不大于0.5NTU)，任何一个月中，每天的水样合格率至少大于95%。到2002年1月1日，则要求任何时候浑浊度不超过1NTU，任何一个月中，95%的每日所取水样的浑浊度不超过0.3NTU；

HPC（异养菌平皿计数）：每mL不大于500个细菌群。

④ 每月总大肠杆菌阳性水样不超过5%，每月例行检测总大肠杆菌的样品少于40只的给水系统，总大肠杆菌阳性水样不得超过1个。含有总大肠杆菌的水样，要分析粪型大肠杆菌，粪型大肠杆菌和埃希氏大肠杆菌不允许存在。

⑤ 粪型大肠杆菌和埃希氏大肠杆菌的存在能指示水体受到人类和动物粪便的污染，这些排泄物中的致病菌（病原体）可引起腹泻、痉挛、呕吐、头痛或其他症状。这些病原体特别对婴儿、儿童和免疫系统有障碍的病人的身体健康造成威胁。

⑥ 虽然对这类污染物未定MCLG，但对一些单独的污染物有单独的最高污染物浓度指标值。

三卤甲烷：溴二氯甲烷（0）；溴仿（0）；二溴氯甲烷（0.06mg/L）。

盐乙酸：四氯乙酸（0）；三氯乙酸（0.3mg/L）。

⑦ 1986年安全饮用水法修正案通过前，未建立MCLGs指标，所以，此污染物无MCLGs值。

⑧ 在水处理技术中规定，含铅和铜的管要注意防腐。若超过10%的自来水水样中两者浓度大于处理界限值（铜的处理界限值为1.3mg/L，铅为0.015mg/L），则需立即采取解决措施。

⑨ 每个供水系统必须书面向政府保证，在饮用水系统中使用丙烯酰胺和熏杀环（1-氯-2，3环氧丙烷）时，聚合体投加量和单体浓度不应超过以下规定：

丙烯酰胺＝0.05%，剂量为1mg/L时（或相当量）；

熏杀环＝0.01%，剂量为20mg/L时（或相当量）。

3.1.5.2 国家二级饮用水法规

国家二级饮用水法规（NSDWRs或二级标准），为非强制性准则，用于控制水中对美容（皮肤、牙齿变色），或对感官（如嗅、味、色）有影响的污染物浓度。美国环保局（EPA）推荐二级标准但未规定强制执行，但各州可选择性采纳，加作为强制性指标。

污染物	二级标准	污染物	二级标准
铝	0.05～0.2mg/L	锰	0.05mg/L
氯化物	250mg/L	嗅	嗅阈值为3
色	15(色度单位)	pH值	6.5～8.5
铜	1.0mg/L	银	0.1mg/L
腐蚀性	无腐蚀性	硫酸盐	250mg/L
氟化物	2.0mg/L	总溶解固体	500mg/L
发泡剂	0.5mg/L	锌	5mg/L
铁	0.3mg/L		

3.1.6 欧盟饮用水水质指令（98/83/EC）

A. 微生物学参数

指标	指标值/(个/mL)
埃希氏大肠杆菌	0
肠道球菌	0

以下指标用于瓶装或桶装饮用水：

指标	指标值	指标	指标值
埃希氏大肠杆菌	0/250mL	细菌总数(22℃)	100/mL
肠道球菌	0/250mL	细菌总数(37℃)	20/mL
铜绿假单胞菌	0/250mL		

B. 化学物质参数

指标/(μg/L)	指标值	备注
丙烯酰胺	0.10	注1
锑	5.0	
砷	10	
苯	1.0	
苯并[a]芘	0.010	
硼	1.0	

续表

指标/(μg/L)	指标值	备　注
溴酸盐	10	注 2
镉	5.0	
铬	50	
铜	2.0	注 3
氰化物	50	
1,2-二氯乙烷	3.0	
环氧氯丙烷	0.10	注 1
氟化物	1.5	
铅	10	注 3 和注 4
汞	1.0	
镍	20	注 3
硝酸盐	50	注 5
亚硝酸盐	0.50	注 5
农药	0.10	注 6 和注 7
农药(总)	0.50	注 6 和注 8
多环芳烃	0.10	特殊化合物的总浓度 注 9
硒	10	
四氯乙烯和三氯乙烯	10	特殊指标的总浓度
三卤甲烷(总)	100	特殊化合物的总浓度 注 10
氯乙烯	0.50	注 1

注：1. 参数值是指水中的剩余单体浓度，并根据相应聚合体与水接触后所能释放出的最大量计算而得。

2. 如果可能，在不影响消毒效果的前提下，成员国应尽力降低该值。

3. 该值适用于由用户水嘴处所取水样，且水样应能代表用户一周用水的平均水质。成员国必须考虑到可能会影响人体健康的峰值出现情况。

4. 该指令生效后 5～15 年，铅的参数值为 25μg/L。

在达到指令中规定的参数值前，成员国应确保采用适当的方法，尽可能降低水中铅的浓度，

5. 成员国应确保［硝酸根浓度］/50＋［亚硝酸根浓度］/3≤1，方括号中为以 mg/L 为单位计的硝酸根和亚硝酸根质量浓度，且出厂水亚硝酸盐含量要小于 0.1mg/L。

6. 农药是指：有机杀虫剂、有机除草剂、有机杀菌剂、有机杀线虫剂、有机杀螨剂、有机除藻剂、有机杀鼠剂、有机杀黏菌剂和相关产品及其代谢副产物、降解和反应产物。

7. 参数值适用于每种农药。对艾氏剂、狄氏剂、七氯和环氧七氯，参数值为 0.030μg/L。

8. 农药总量是指所有能检测出和定量的单项农药的总和。

9. 具体的化合物包括苯并[b]呋喃、苯并[k]呋喃、苯并[g,h,i]芘、茚并[1,2,3-cd]芘。

10. 如果可能，在不影响消毒效果的前提下，成员国应尽力降低下列化合物值：氯仿、溴仿、二溴一氯甲烷和一溴二氯甲烷，该指令生效后 5～15 年，总三卤甲烷的参数值为 150μg/L。

C. 指示参数

指标		指导值	单位	备注
色度		用户可以接受且无异味		
浑浊度		用户可以接受且无异常		注 7
嗅		用户可以接受且无异常		
味		用户可以接受且无异常		
氢离子浓度		6.5～9.5	pH 单位	注 1 和注 3
电导率		2500	μS/cm(20℃)	注 1
氯化物		250	mg/L	注 1
硫酸盐		250	mg/L	注 1
钠		200	mg/L	
耗氧量		5.0	mg (O_2)/L	注 4
氨		0.50	mg/L	
TOC		无异常变化		注 6
铁		200	μg/L	
锰		50	μg/L	
铝		200	μg/L	
细菌总数(22℃)		无异常变化		
产气荚膜梭菌		0	个/100mL	注 2
大肠杆菌		0	个/100mL	注 5
放射性参数	氚	100	Bq/L	
	总指示用量	0.10	mSv/年	

注：1. 不应具有腐蚀性。

2. 如果原水不是来自地表水或没有受地表水影响，则不需要测定该参数。

3. 若为瓶装或桶装的静止水，最小值可降至 4.5pH 单位，若为瓶装或桶装水，因其天然富含或人工充入二氧化碳，最小值可降至更低。

4. 如果测定 TOC 参数值，则不需要测定该值。

5. 对瓶装或桶装的水，单位为个/250mL。

6. 对于供水量小于 10000m^3/d 的水厂，不需要测定该值。

7. 对地表水处理厂，成员国应尽力保证出厂水的浑浊度不超过 1.0NTU。

注：译自 Council Directive 98/83/EC on the Quality of Water Intended for Human Consumption。

3.1.7 法国生活饮用水水质标准 (95—368)

序号	指标	单位	指导标准	备注
A. 感官指标				
1	色度	mg/L Pt/Co 标准	<15	
2	浑浊度	Jackson 单位	<2	

续表

序号	指　标	单　位	指导标准	备　注
3	嗅	稀释数	2(12℃)　3(25℃)	
4	味	稀释数	2(12℃)　3(25℃)	
B. 理化指标				
5	温度	℃	≤25	
6	氢离子浓度	pH 单位	6.5～9.0	
7	电导率	μS/cm(20℃)	400	
8	氯化物	mg/L	200	
9	硫酸盐	mg/L	250	
10	镁	mg/L	50	
11	钠	mg/L	150	
12	钾	mg/L	12	
13	铝	mg/L	0.2	
14	干残留物	mg/L	≤1500	
15	溶解氧	%氧饱和度	≥75%	地下水除外
C. 过量有害物质				
16	硝酸盐	mg/L	50	
17	亚硝酸盐	mg/L	0.1	
18	氨	mg/L	0.5	
19	凯氏氮	mg/L	1	
20	高锰酸盐指数	mg/L	5	
21	硫化氢	mg/L	不得检出	
22	氯仿萃取物	mg/L	—	—
23	酚(以苯酚计)	μg/L	0.5	
24	表面活性剂	μg/L	200	
25	铁	μg/L	200	
26	铜	mg/L	1	
27	锰	μg/L	50	
28	锌	mg/L	5	
29	磷(以 P_2O_5 计)	mg/L	5	
30	氟化物	mg/L	1.5(8～12℃) 0.7(25～30℃) 12～25℃之间以内推法计算	
31	银	μg/L	10	

D. 有毒物质指标/(μg/L)

序号	指　标	指　导　标　准	备　注
32	砷	50	
33	铍	5	

续表

序号	指　标	指　导　标　准	备　注
34	镉	50	
35	铬(总)	50	
36	汞	1	
37	镍	50	
38	铅	50	
39	锑	10	
40	硒	10	
41	多环芳烃(共6种)	0.2	
42	苯并[3,4]芘蒽	0.01	
43	总苯并芘及苯并芘蒽	<0.2	
E. 微生物学指标			
44	总大肠菌群	不少于95%水样为0个/100mL	
45	耐热大肠菌	0/100mL	
46	粪型链球菌	0/100mL	
47	亚硫酸盐还原梭菌	≤1 孢子/20mL	
48	沙门氏菌	0/5L	
49	致病葡萄球菌	0/100mL	
50	粪型噬菌体	0/50mL	
51	肠道病毒	0/10L	

注：对于冰冻水

1. 37℃下，24h后复活细菌数≤20/mL；
2. 22℃下，72h后复活细菌数≤100/mL；
3. 分析应于水冰冻后12h内开始。

F. 农药及类似物质/(μg/L)			
52	有机氯杀虫剂	0.1	除特别规定外，任何单一物质要求小于0.1μg/L；总量要求小于0.5μg/L
53	艾氏剂和狄氏剂	0.003	
54	七氯和七氯环氧	0.03	
55	有机磷及氨基甲酸酯类杀虫剂	0.1	
56	除草剂	0.1	
57	杀霉剂	0.1	
58	多氯联苯(PCB)	0.1	
59	多氯三联苯(PCT)	0.1	

G. 软化水

序号	指　标	单　位	指导标准	备　注
60	总硬度	法国度	≥15	
61	碱度	法国度	≥2.50	

续表

序号	指　标	单　位	指导标准	备　注
H. 其他参数				
如果证明有以下情况发生，则可能要采取特别措施以控制水质：				
62	CO_2 浓度		对碳酸钙有腐蚀性	
63	电导率	μS/cm(20℃)	偏离 400μS/cm (20℃)	
64	二氧化硅	mg/L	≥100	
65	钙	mg/L	≥100	
66	溶解氧		<75%饱和度	地下水除外
67	TOC		高于正常浓度	
68	氯仿提取物（pH中性条件下）	mg/L	0.1	
69	硼	mg/L	≥1	
70	有机氯化物（指非农药类）	μg/L	≥1	
71	余氯	mg/L	≥0.1	
72	钡	μg/L	≥100	
73	细菌总数（37℃，24h）	CFU/mL	≥10（非冰冻水） ≥2（经消毒之出厂水）	
74	细菌总数（22℃，72h）	CFU/mL	≥100（非冰冻水） ≥20（经消毒之出厂水）	
75	寄生虫（卵）		存在	
76	藻类		存在	
77	其他可见物（微型动物）		线虫、真菌	
78	悬浮物		酵母	

说明：上述内容是根据1995年6月生效的法国《1989年1月3日法令第89—3号修正案》而整理的。该修正案是通过《1990年4月10日法令第90—330号》、《1991年3月7号法令第91—257号》和《1995年4月5日法令95—363号》而修订的。

法国到目前为止并无国家强制性的DBP标准，而是采用欧盟指令为标准，下表中所列的，仅仅是推荐指标，是政府希望各自来水供应者努力达到的目标。

微污染物及氯化副产物推荐指标

指　　标	单　　位	指导标准	备　注
总二卤甲烷(THM)	μg/L	30	
三氯乙烯	mg/L	30	
四氯化碳	mg/L	3	
四氯乙烯	mg/L	10	
1,2-二氯乙烷	μg/L	10	

附：下述物质达到表中所列浓度会使嗅阈值超过 2（本表不属于法国标准中的内容）：

参　　数	数　　值
烷基苯	10μg/L
土嗅素	0.005μg/L
2-甲基异冰片	0.005μg/L
碘仿(CHI_3)	1μg/L
癸醛	0.1μg/L
乙醛	5μg/L
一氯胺-二氯胺	0.15μg/L
2,4,6-三氯苯甲醚	0.0001μg/L

3.1.8　我国饮用矿泉水标准，GB 8537—1995

(一) 感官要求应符合下表的规定

项　　目		要　　求
色度/度	≤	15，并不得呈现其他异色
浑浊度/NTU	≤	5
臭和味		具有本矿泉水的特征性口味，不得有异臭、异味
肉眼可见物		允许有极少量的天然矿物盐沉淀，但不得含有其他异物

(二) 理化要求

(1) 界限指标　必须有一项（或一项以上）指标符合下表的规定。

项　目		指　标	项　目		指　标
锂/(mg/L)	≥	0.20	偏硅酸/(mg/L)	≥	25.0（含量在25.0～30.0mg/L范围时，水温必须在25℃以上）
锶/(mg/L)	≥	0.20（含量在0.20～0.40mg/L范围时，水温必须在25℃以上）	硒/(mg/L)	≥	0.010
锌/(mg/L)	≥	0.20	游离二氧化碳/(mg/L)	≥	250
溴化物/(mg/L)	≥	1.0	溶解性总固体/(mg/L)	≥	1000
碘化物/(mg/L)	≥	0.20			

（2）限量指标　均必须符合下表的规定。

项　目		指　标	项　目		指　标
锂/(mg/L)	≤	5.0	汞/(mg/L)	≤	0.0010
锶/(mg/L)	≤	5.0	银/(mg/L)	≤	0.050
碘化物/(mg/L)	≤	0.50	硼(以 H_3BO_3 计)/(mg/L)	≤	30.0
锌/(mg/L)	≤	5.0	硒/(mg/L)	≤	0.050
铜/(mg/L)	≤	1.0	砷/(mg/L)	≤	0.050
钡/(mg/L)	≤	0.70	氟化物(以 F 计)/(mg/L)	≤	2.00
镉/(mg/L)	≤	0.010	耗氧量(以 O_2 计)/(mg/L)	≤	3.0
铬(Cr^{6+})/(mg/L)	≤	0.050	硝酸盐(以 NO_3^- 计)/(mg/L)	≤	45.0
铅/(mg/L)	≤	0.010	^{226}镭放射性/(Bq/L)	≤	1.10

（3）污染物指标　均必须符合下表的规定。

项　目		指标	项　目		指标
挥发性酚(以苯酚计)/(mg/L)	≤	0.002	亚硝酸盐(以 NO_2 计)/(mg/L)	≤	0.0050
氰化物(以 CN 计)/(mg/L)	≤	0.010	总β放射性/(Bq/L)	≤	1.50

（4）微生物指标　均必须符合下表的规定。

项　目	指　标	
	水源水	灌装产品
菌落总数/(cfu/mL)	5	50
大肠菌群/(个/100mL)	0	

（三）其他要求

1. 应在保证原水卫生安全的条件下开采和灌装。在不改变饮用天然矿泉水的特性和主要成分条件下，允许曝气、倾析、过滤和

除去或加入二氧化碳。

2. 禁止用容器将原水运至异地进行灌装。

3. 灌装产品净含量的允许公差为：600mL 以下（含 600mL），±3.0%；600mL 以上至 1500mL（含 1500mL），±2.0%；1500mL 以上，±1.5%。

3.1.9 我国饮用净水卫生标准，GB 17323—1998 及 GB 17324 1998

（一）感官指标

项　目	要　求	项　目	要　求
色度/度 ≤	5，不得呈现其他异色	臭和味	无异味、异臭
浑浊度/度 ≤	1	肉眼可见物	不得检出

（二）质量理化指标

项　目	指　标	项　目	指　标
pH 值	5.0～7.0	高锰酸钾消耗量（以 O_2 计）/(mg/L) ≤	1.0
电导率[(25±1)℃]/(μS/cm) ≤	10	氯化物（以 Cl⁻ 计）/(mg/L) ≤	6.0

（三）污染理化指标

项　目	指　标	项　目	指　标
铅（以 Pb 计）/(mg/L) ≤	0.01	游离氯（以 Cl^- 计）/(mg/L) ≤	0.005
砷（以 As 计）/(mg/L) ≤	0.01	三氯甲烷/(mg/L) ≤	0.02
铜（以 Cu 计）/(mg/L) ≤	0.1	四氯化碳/(mg/L) ≤	0.001
氰化物（以 CN⁻ 计）①/(mg/L) ≤	0.002	亚硝酸盐（以 NO_2^- 计）/(mg/L) ≤	0.002
挥发酚类（以苯酚计）①/(mg/L) ≤	0.002		

① 氰化物指标、挥发酚类指标只限采用蒸馏法的产品。

（四）微生物指标

项　目	指　标
菌落总数/(cfu/mL) ≤	20
大肠菌数/(MPN/100mL) ≤	3
致病菌（指肠道致病菌和致病性球菌）	不得检出
霉菌、酵母菌/(cfu/mL)	不得检出

3.2 地面水、地下水、海水、农渔业等用水及排污水

3.2.1 我国地表水环境质量标准，GB 3838—2002（代替 GB 3838- 88，GHZB 1—1999）

3.2.1.1 水域功能和标准分类

依据地表水水域环境功能和保护目标，按功能高低依次划分为五类：

Ⅰ类 主要适用于源头水、国家自然保护区；

Ⅱ类 主要适用于集中式生活饮用水地表水源地一级保护区、珍稀水生生物栖息地、鱼虾类产卵场、仔稚幼鱼的索饵场等；

Ⅲ类 主要适用于集中式生活饮用水地表水源地二级保护区、鱼虾类越冬场、洄游通道、水产养殖区等渔业水域及游泳区；

Ⅳ类 主要适用于一般工业用水区及人体非直接接触的娱乐用水区；

Ⅴ类 主要适用于农业用水区及一般景观要求水域。

对应地表水上述五类水域功能，将地表水环境质量标准基本项目标准值分为五类，不同功能类别分别执行相应类别的标准值。水域功能类别高的标准值严于水域功能类别低的标准值。同一水域兼有多类使用功能的，执行最高功能类别对应的标准值。实现水域功能与达功能类别标准为同一含义。

3.2.1.2 地表水环境质量基本项目标准限值

mg/L

序号	项目 \ 分类		Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类	Ⅳ类	Ⅴ类
1	水温/℃		人为造成的环境水温变化应限制在： 周平均最大温升≤1 周平均最大温降≤2				
2	pH 值(无量纲)		6～9				
3	溶解氧	≥	饱和率 90%（或 7.5）	6	5	3	2
4	高锰酸盐指数	≤	2	4	6	10	15

续表

序号	分类 / 项目		Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类	Ⅳ类	Ⅴ类
5	化学需氧量(COD)	≤	15	15	20	30	40
6	五日生化需氧量(BOD_5)	≤	3	3	4	6	10
7	氨氮(NH_3 N)	≤	0.15	0.5	1.0	1.5	2.0
8	总磷(以P计)	≤	0.02(湖、库0.01)	0.1(湖、库0.025)	0.2(湖、库0.05)	0.3(湖、库0.1)	0.4(湖、库0.2)
9	总氮(湖、库,以N计)	≤	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0
10	铜	≤	0.01	1.0	1.0	1.0	1.0
11	锌	≤	0.05	1.0	1.0	2.0	2.0
12	氟化物(以F⁻计)	≤	1.0	1.0	1.0	1.5	1.5
13	硒	≤	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
14	砷	≤	0.05	0.05	0.05	0.1	0.1
15	汞	≤	0.00005	0.00005	0.0001	0.001	0.001
16	镉	≤	0.001	0.005	0.005	0.005	0.01
17	铬(六价)	≤	0.01	0.05	0.05	0.05	0.1
18	铅	≤	0.01	0.01	0.05	0.05	0.1
19	氰化物	≤	0.005	0.05	0.2	0.2	0.2
20	挥发酚	≤	0.002	0.002	0.005	0.01	0.1
21	石油类	≤	0.05	0.05	0.05	0.5	1.0
22	阴离子表面活性剂	≤	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3
23	硫化物	≤	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0
24	粪大肠菌群/(个/L)	≤	200	2000	10000	20000	40000

3.2.1.3 集中式生活饮用水地表水源地补充项目标准限值

mg/L

序号	项目	标准值
1	硫酸盐(以SO_4^{2-}计)	250
2	氯化物(以Cl^-计)	250
3	硝酸盐(以N计)	10
4	铁	0.3
5	锰	0.1

3.2.1.4 集中式生活饮用水地表水源地特定项目标准限值

mg/L

序号	项目	标准值	序号	项目	标准值
1	三氯甲烷	0.06	37	2,4,6-三氯苯酚	0.2
2	四氯化碳	0.002	38	五氯酚	0.009
3	三溴甲烷	0.1	39	苯胺	0.1
4	二氯甲烷	0.02	40	联苯胺	0.0002
5	1,2 二氯乙烷	0.03	41	丙烯酰胺	0.0005
6	环氧氯丙烷	0.02	42	丙烯腈	0.1
7	氯乙烯	0.005	43	邻苯二甲酸二丁酯	0.003
8	1,1-二氯乙烯	0.03	44	邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯	0.008
9	1,2-二氯乙烯	0.05	45	水合肼	0.01
10	二氯乙烯	0.07	46	四乙基铅	0.0001
11	四氯乙烯	0.04	47	吡啶	0.2
12	氯丁二烯	0.002	48	松节油	0.2
13	六氯丁二烯	0.0006	49	苦味酸	0.5
14	苯乙烯	0.02	50	丁基黄原酸	0.005
15	甲醛	0.9	51	活性氯	0.01
16	乙醛	0.05	52	滴滴涕	0.001
17	丙烯醛	0.1	53	林丹	0.002
18	三氯乙醛	0.01	54	环氧七氯	0.0002
19	苯	0.01	55	对硫磷	0.003
20	甲苯	0.7	56	甲基对硫磷	0.002
21	乙苯	0.3	57	马拉硫磷	0.05
22	二甲苯[1]	0.5	58	乐果	0.08
23	异丙苯	0.25	59	敌敌畏	0.05
24	氯苯	0.3	60	敌百虫	0.05
25	1,2-二氯苯	1.0	61	内吸磷	0.03
26	1,4-二氯苯	0.3	62	百菌清	0.01
27	三氯苯[2]	0.02	63	甲萘威	0.05
28	四氯苯[3]	0.02	64	溴氰菊酯	0.02
29	六氯苯	0.05	65	阿特拉津	0.003
30	硝基苯	0.017	66	苯并[a]芘	2.8×10^{-6}
31	二硝基苯[4]	0.5	67	甲基汞	1.0×10^{-6}
32	2,4-二硝基甲苯	0.0003	68	多氯联苯[5]	2.0×10^{-5}
33	2,4,6-三硝基甲苯	0.5	69	微囊藻毒素-LR	0.001
34	硝基氯苯[5]	0.05	70	黄磷	0.003
35	2,4-二硝基氯苯	0.5	71	钼	0.07
36	2,4-二氯苯酚	0.093			

续表

序号	项　　目	标准值	序号	项　　目	标准值
72	钴	1.0	77	钡	0.7
73	铍	0.002	78	钒	0.05
74	硼	0.5	79	钛	0.1
75	锑	0.005	80	铊	0.0001
76	镍	0.02			

① 二甲苯：指对 二甲苯、间 二甲苯、邻-二甲苯。
② 三氯苯：指 1,2,3-三氯苯、1,2,4 三氯苯、1,3,5-三氯苯。
③ 四氯苯：指 1,2,3,4-四氯苯、1,2,3,5-四氯苯、1,2,4,5-四氯苯。
④ 二硝基苯：指对 二硝基苯、间-二硝基苯、邻-二硝基苯。
⑤ 硝基氯苯：指对-硝基氯苯、间-硝基氯苯、邻-硝基氯苯。
⑥ 多氯联苯：指 PCB-1016、PCB-1221、PCB-1232、PCB-1242、PCB-1248、PCB-1254、PCB-1260。

3.2.2　地下水质量标准[58]，GB/T 14848—93

本标准适用于一般地下水，不适用于地下热水、矿水、盐卤水。

依据我国地下水水质现状、人体健康基准值及地下水质量保护目标，并参照了生活饮用水、工业、农业用水水质要求，将地下水质量划分为五类。

Ⅰ类：主要反映地下水化学组分的天然低背景含量。适用于各种用途。

Ⅱ类：主要反映地下水化学组分的天然背景含量。适用于各种用途。

Ⅲ类：以人体健康基准值为依据。主要适用于集中式生活饮用水水源及工、农业用水。

Ⅳ类：以农业和工业用水要求为依据。除适用于农业和部分工业用水外，适当处理后可作生活饮用水。

Ⅴ类：不宜饮用，其他用水可根据使用目的选用。

地下水质量分类指标

指标名称	指标				
	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类	Ⅳ类	Ⅴ类
色/度	≤5	≤5	≤15	≤25	>25
臭和味	无	无	无	无	有

续表

指标名称	指标				
	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类	Ⅳ类	Ⅴ类
浑浊度/度	≤3	≤3	≤3	≤10	>10
肉眼可见物	无	无	无	无	有
pH值	6.5～8.5	6.5～8.5	6.5～8.5	5.5～6.5. 8.5～9	<5.5,>9
总硬度(以$CaCO_3$计)/(mg/L)	≤150	≤300	≤450	≤550	>550
溶解性总固体/(mg/L)	≤300	≤500	≤1000	≤2000	>2000
硫酸盐/(mg/L)	≤50	≤150	≤250	≤350	>350
氯化物/(mg/L)	≤50	≤150	≤250	≤350	>350
铁(Fe)/(mg/L)	≤0.1	≤0.2	≤0.3	≤1.5	>1.5
锰(Mn)/(mg/L)	≤0.05	≤0.05	≤0.1	≤1.0	>1.0
铜(Cu)/(mg/L)	≤0.01	≤0.05	≤1.0	≤1.5	>1.5
锌(Zn)/(mg/L)	≤0.05	≤0.5	≤1.0	≤5.0	>5.0
钼(Mo)/(mg/L)	≤0.001	≤0.01	≤0.1	≤0.5	>0.5
钴(Co)/(mg/L)	≤0.005	≤0.05	≤0.05	≤1.0	>1.0
挥发性酚类(以苯酚计)/(mg/L)	≤0.001	≤0.001	≤0.002	≤0.01	>0.01
阴离子合成洗涤剂/(mg/L)	不得检出	≤0.1	≤0.3	≤0.3	>0.3
高锰酸盐指数/(mg/L)	≤1.0	≤2.0	≤3.0	≤10	>10
硝酸盐(以N计)/(mg/L)	≤2.0	≤5.0	≤20	≤30	>30
亚硝酸盐(以N计)/(mg/L)	≤0.001	≤0.01	≤0.02	≤0.1	>0.1
氨氮(NH_4)/(mg/L)	≤0.02	≤0.02	≤0.2	≤0.5	>0.5
氟化物/(mg/L)	≤1.0	≤1.0	≤1.0	≤2.0	>2.0
碘化物/(mg/L)	≤0.1	≤0.1	≤0.2	≤1.0	>1.0
氰化物/(mg/L)	≤0.001	≤0.01	≤0.05	≤0.1	>0.1
汞(Hg)/(mg/L)	≤0.00005	≤0.0005	≤0.001	≤0.001	>0.001
砷(As)/(mg/L)	≤0.005	≤0.01	≤0.05	≤0.05	>0.05
硒(Se)/(mg/L)	≤0.01	≤0.01	≤0.01	≤0.1	>0.1
镉(Cd)/(mg/L)	≤0.0001	≤0.001	≤0.01	≤0.01	>0.01
铬(六价,Cr^{6+})/(mg/L)	≤0.005	≤0.01	≤0.05	≤0.1	>0.1
铅(Pb)/(mg/L)	≤0.005	≤0.01	≤0.05	≤0.1	>0.1
铍(Be)/(mg/L)	≤0.00002	≤0.0001	≤0.0002	≤0.001	>0.001
钡(Ba)/(mg/L)	≤0.01	≤0.1	≤1.0	≤4.0	>4.0
镍(Ni)/(mg/L)	≤0.005	≤0.05	≤0.05	≤0.1	>0.1

续表

指标名称	指标				
	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类	Ⅳ类	Ⅴ类
滴滴涕/(μg/L)	不得检出	≤0.005	≤1.0	≤1.0	>1.0
六六六/(μg/L)	≤0.005	≤0.05	≤5.0	≤5.0	>5.0
总大肠菌群/(个/L)	≤3.0	≤3.0	≤3.0	≤100	>100
细菌总数/(个/mL)	≤100	≤100	≤100	≤1000	>1000
总α放射性/(Bq/L)	≤0.1	≤0.1	≤0.1	>0.1	>0.1
总β放射性/(Bq/L)	≤0.1	≤1.0	≤1.0	>1.0	>1.0

3.2.3 我国农田灌溉水质标准，GB 5084—85

化学指标单位：mg/L

项目 \ 分类		一类	二类
水温/℃	≤	35	35
pH 值		5.5～8.5	5.5～8.5
全盐量	≤	1000(非盐碱土地区) 2000(盐碱土地区) 有条件的地区可以适当放宽	1500(非盐碱土地区) 2000(盐碱土地区) 有条件的地区可以适当放宽
氯化物	≤	200	300
硫化物	≤	1	1
汞及其化合物	≤	0.001	0.001 0.005(绿化地)
镉及其化合物	≤	0.002(轻度污染灌区) 0.005	0.003(轻度污染灌区) 0.01 0.05(绿化地)
砷及其化合物	≤	0.05(水田) 0.1(旱田)	0.1(水田) 0.5(旱田及绿化地)
六价铬化合物	≤	0.1	0.5
铅及其化合物	≤	0.5	1.0
铜及其化合物	≤	1.0	1.0(土壤 pH<6.5) 3.0(土壤 pH>6.5)
锌及其化合物	≤	2.0	3.0(土壤 pH<6.5) 5.0(土壤 pH>6.5)

续表

项目 \ 分类		一类	二类
硒及其化合物	≤	0.02	0.02
氟化物	≤	2.0(高氟区) 3.0(一般地区)	3.0(高氟区) 4.0(一般地区)
氰化物	≤	0.5(土层小于1m地区) 1.0(一般地区)	0.5(土层小于1m地区) 1.0(一般地区)
石油类	≤	5.0(轻度污染灌区) 10.0	10.0
挥发性酚	≤	1.0(土层小于1m地区) 3.0	1.0(土层小于1m地区) 3.0
苯	≤	2.5(土层小于1m地区) 5.0	2.5(土层小于1m地区) 5.0
三氯乙醛	≤	0.5(小麦) 1.0(水稻、玉米、大豆)	0.5(小麦) 1.0(水稻、玉米、大豆)
丙烯醛	≤	0.5	0.5
硼	≤	1.0(西红柿、马铃薯、笋瓜、韭菜、洋葱、黄瓜、梅豆、柑橘) 2.0(小麦、玉米、茄子、青椒、小白菜、葱) 4.0(水稻、萝卜、油菜、甘蓝)	1.0(西红柿、马铃薯、笋瓜、韭菜、洋葱、黄瓜、梅豆、柑橘) 2.0(小麦、玉米、茄子、青椒、小白菜、葱) 4.0(水稻、萝卜、油菜、甘蓝)
大肠菌群/(个/L)	≤	10000 (生吃瓜果收获前一星期)	10000 (生吃瓜果收获前一星期)

国家环境保护局 1985-04-25 发布　　1985-10-01 实施

注：1. 一类是指工业废水或城市污水作为农业用水的主要水源，并长期利用的灌区。灌溉量：水田 800m³/(亩·a)，旱田 300m³/(亩·a)。二类是指工业废水或城市污水作为农业用水的补充水源，而实行清污混灌轮灌的灌区。灌溉量不超过一类的一半。

2. 放射性物质按国家放射防护规定的有关标准执行。

(1) 在以下具体条件的地区，全盐量水质标准可略放宽。

a. 在水资源缺少的干旱和半干旱地区。

b. 具有一定的水利灌排工程设施，能保证一定的排水和地下径流条件的地区。

c. 有一定的淡水资源能满足冲洗土体中盐分的地区。

d. 土壤渗透性较好，土地较平整，并能掌握耐盐作物类型和生育阶段的地区。

(2) 轻度污染灌区指污染物含量超过土壤本底上限，但农作物残留不超过农作物本底上限。

3.2.4 我国渔业水质标准[31]，GB 11607--89

化学指标单位：mg/L

项目序号		标准值
色、臭、味		不得使鱼虾贝藻类带有异色、异臭、异味
漂浮物质		水面不得出现明显油膜或浮沫
悬浮物质		人为增加的量不得超过 10mg/L，而且悬浮物质沉积于底部后，不得对鱼虾贝类产生有害的影响
pH 值		淡水 6.5～8.5，海水 7.0～8.5
溶解氧		连续 24 小时中，16 小时以上必须大于 5mg/L，其余任何时候不得低于 3mg/L，对于鲑科鱼类栖息水域冰封期其余任何时候不得低于 4mg/L
生化需氧量(五天、20℃)		不超过 5mg/L，冰封期不超过 3mg/L
总大肠菌群		不超过 5000 个/L（贝类养殖水质不超过 500 个/L）
汞	≤	0.0005
镉	≤	0.005
铅	≤	0.05
铬	≤	0.1
铜	≤	0 01
锌	≤	0.1
镍	≤	0.05
砷	≤	0.05
氰化物	≤	0.005
硫化物	≤	0.2
氟化物(以 F⁻ 计)	≤	1
非离子氨	≤	0.02
凯氏氮	≤	0.05
挥发性酚	≤	0.005
黄磷	≤	0.001
石油类	≤	0.05
丙烯腈	≤	0.5
丙烯醛	≤	0.02
六六六(丙体)	≤	0.002
滴滴涕	≤	0.001
马拉硫磷	≤	0.005
五氯酚钠	≤	0.01
乐果	≤	0.1
甲胺磷	≤	1.0
甲基对硫磷	≤	0.0005
呋喃丹	≤	0.01

3.2.5 我国景观娱乐用水水质标准[58]，GB 12941—91

本标准适用于以景观、疗养、度假和娱乐为目的的江、河、湖（水库）、海水水体或其中一部分。

本标准按照水体的不同功能，分为三大类。

A类：主要适用于天然浴场或其他与人体直接接触的景观、娱乐水体。

B类：主要适用于国家重点风景游览区及那些与人体非直接接触的景观娱乐水体。

C类：主要适用于一般景观用水水体。

景观娱乐用水水质标准

指标名称		指标		
		A类	B类	C类
色		颜色无异常变化		不超过25色度单位
臭		不得含有任何异臭		无明显异臭
漂浮物		不得含有漂浮的浮膜、油斑和聚集的其他物质		
透明度/m	≥	1.2		0.5
水温/℃		不高于近十年当月平均水温2℃②		不高于近十年当月平均水温4℃
pH值		6.5～8.5		
溶解氧(DO)/(mg/L)	≥	5	4	3
高锰酸盐指数/(mg/L)	≤	6	6	10
生化需氧量(BOD_5)/(mg/L)	≤	4	4	8
氨氮①/(mg/L)	≤	0.5	0.5	0.5
非离子氨/(mg/L)	≤	0.02	0.02	0.2
亚硝酸盐氮/(mg/L)	≤	0.15	0.15	1.0
总铁/(mg/L)	≤	0.3	0.5	1.0
总铜/(mg/L)	≤	0.01(浴场0.1)	0.01(海水0.1)	0.1
总锌/(mg/L)	≤	0.1(浴场1.0)	0.1(海水1.0)	1.0
总镍/(mg/L)	≤	0.05	0.05	0.1
总磷(以P计)/(mg/L)	≤	0.02	0.02	0.05
挥发酚/(mg/L)	≤	0.005	0.01	0.1
阴离子表面活性剂/(mg/L)	≤	0.2	0.2	0.3

续表

指标名称		指标		
		A类	B类	C类
总大肠菌群/(个/L)	≤	10000		
粪大肠菌群/(个/L)	≤	2000		

① 氨氮和非离子氨在水中存在化学平衡关系，在水温高于20℃、pH值>8时，必须用非离子氨作为控制水质的指标。

② 浴场水温各地区可根据当地的具体情况自行规定。

本标准未作明确规定的项目，执行GB 3838《地面水环境质量标准》和GB 3097《海水水质标准》中的标准值及其有关规定。

3.2.6 我国海水水质标准[31]，GB 3097--82

按用途，海水水质要求分三类。第一类适用于保护海洋生物资源和人类的安全利用（包括盐场、食品加工、海水淡化、渔业和海水养殖等用水），以及海上自然保护区。第二类适用于海水浴场及风景游览区。第三类适用于一般工业用水、港口水域和海上开发作业区等。

(1) 海水水质要求

污染物名称	第一类	第二类	第三类
悬浮物质	人为造成增加的量不得超过10mg/L	人为造成增加的量不超过50mg/L	人为造成增加的量不得超过150mg/L
色、嗅、味	海水及海产品无异色、异臭、异味		海水无异色、异臭、异味
漂浮物质	水面不得出现油膜、浮沫和其他杂质		水面不得出现明显的油膜、浮沫和其他杂质
pH	7.5～8.4	7～8.8	6.5～9.0
化学耗氧量	<3mg/L	<4mg/L	<5mg/L
溶解氧	任何时候不低于5mg/L	任何时候不低于4mg/L	任何时候不低于3mg/L
水温	不超过当地、当时水温4℃		
大肠菌群	不超过10000个/L(供人生食的贝类养殖水质不超过700个/L)		
病原体	含有病原体的工业废水、生活污水须经过严格消毒处理，消灭病原体后，方可排放		
底质	砂石等表面的淤积物不得妨碍种苗的附着生长		
	溶出的成分应保证海水水质符合表(1)、表(2)的要求		
有害物质	应符合表(2)规定的最高允许浓度要求		

(2) 海水中有害物质最高允许浓度

mg/L

名称	最高允许浓度单位		
	第一类	第二类	第三类
汞	0.0005	0.001	0.001
镉	0.005	0.01	0.01
铅	0.05	0.1	0.1
总铬	0.1	0.5	0.5
砷	0.05	0.1	0.1
铜	0.01	0.1	0.1
锌	0.1	1.0	1.0
硒	0.01	0.02	0.03
油类	0.05	0.1	0.5
氰化物	0.02	0.1	0.5
硫化物	按溶解氧计		
挥发性酚	0.005	0.01	0.05
有机氯农药	0.001	0.02	0.04
无机氮	0.1	0.2	0.3
无机磷	0.015	0.03	0.045

注：无机氮和无机磷为防止暖流内湾海域产生“赤潮”的限制值；海水中放射性物质应符合 GBJ 8—74《放射防护规定》中露天水源的限制浓度。

3.2.7 我国污水综合排放标准，GB 8978—1996

3.2.7.1 第一类污染物最高允许排放浓度

mg/L

序号	污染物	最高允许排放浓度	序号	污染物	最高允许排放浓度
1	总汞	0.05	8	总镍	1.0
2	烷基汞	不得检出	9	苯并[a]芘	0.00003
3	总镉	0.1	10	总铍	0.005
4	总铬	1.5	11	总银	0.5
5	六价铬	0.5	12	总α放射性	1Bq/L
6	总砷	0.5	13	总β放射性	10Bq/L
7	总铅	1.0			

注：第一类污染物，指能在环境或动植物体内蓄积，对人体健康产生长远不良影响者。一律在车间或车间处理设施排出口取样。

3.2.7.2 第二类污染物最高允许排放浓度

mg/L

序号	污染物	适用范围	一级标准	二级标准	三级标准
1	pH	一切排污单位	6～9	6～9	6～9
2	色度(稀释倍数)	染料工业	50	80(180)	-
		其他排污单位	50	80	—
3	悬浮物(SS)	采矿、选矿、选煤工业	70(100)	300	—
		脉金选矿	70(100)	400(500)	—
		边远地区砂金选矿	70(100)	800	—
		城镇二级污水处理厂	20	30	—
		其他排污单位	70	150(200)	400
4	五日生化需氧量(BOD_5)	甘蔗制糖、苎麻脱胶、湿法纤维板工业(染料、洗毛)	20(30)	60(100)	600
		甜菜制糖、酒精、味精、皮革、化纤浆粕工业	20(30)	100(150)	600
		城镇二级污水处理厂	20	30	—
		其他排污单位	20(30)	30(60)	300
5	化学需氧量(COD)	甜菜制糖、焦化、合成脂肪酸、湿法纤维板、染料、洗毛、有机磷农药工业	100	200	1000
		味精、酒精、医药原料药、生物制药、苎麻脱胶、皮革、化纤浆粕工业	100	300	1000
		石油化工工业(包括石油炼制)	60(100)	120(150)	500
		城镇二级污水处理厂	60	120	—
		其他排污单位	100	150	500
6	石油类	一切排污单位	5(10)	10	20(30)
7	动植物油	一切排污单位	10(20)	15(20)	100
8	挥发酚	一切排污单位	0.5	0.5	2.0
9	总氰化合物	电影洗片(铁氰化合物)	0.5	0.5(5.0)	1.0(5.0)
		其他排污单位	0.5	0.5	1.0

续表

序号	污染物	适用范围	一级标准	二级标准	三级标准
10	硫化物	一切排污单位	1.0	1.0	1.0(2.0)
11	氨氮	医药原料药、染料、石油化工工业	15	50	—
		其他排污单位	15	25	—
12	氟化物	黄磷工业	10	15(20)	20
		低氟地区(水体含氟量<0.5mg/L)	10	20	30
		其他排污单位	10	10	20
13	磷酸盐(以P计)	一切排污单位	0.5	1.0	—
14	甲醛	一切排污单位	1.0	2.0	5.0
15	苯胺类	一切排污单位	1.0	2.0	5.0
16	硝基苯类	一切排污单位	2.0	3.0	5.0
17	阴离子表面活性剂(LAS)	合成洗涤剂工业	5.0	10(15)	20
		其他排污单位	5.0	10	20
18	总铜	一切排污单位	0.5	1.0	2.0
19	总锌	一切排污单位	2.0	5.0	5.0
20	总锰	合成脂肪酸工业	2.0	5.0	5.0
		其他排污单位	2.0	2.0	5.0
21	彩色显影剂	电影洗片	1.0(2.0)	2.0(3.0)	3.0(5.0)
22	显影剂及氧化物总量	电影洗片	3.0	3.0(6.0)	6.0
23	元素磷	一切排污单位	0.1	0.1(0.3)	0.3
24	有机磷农药(以P计)	一切排污单位	不得检出	0.5	0.5
25	乐果①	一切排污单位	不得检出	1.0	2.0
26	对硫磷①	一切排污单位	不得检出	1.0	2.0
27	甲基对硫磷①	一切排污单位	不得检出	1.0	2.0
28	马拉硫磷①	一切排污单位	不得检出	5.0	10
29	五氯酚及五氯酚钠(以五氯酚计)①	一切排污单位	5.0	8.0	10

续表

序号	污染物	适用范围	一级标准	二级标准	三级标准
30	可吸附有机卤化物(AOX)(以Cl计)[1]	一切排污单位	1.0	5.0	8.0
31	三氯甲烷[1]	一切排污单位	0.3	0.6	1.0
32	四氯化碳[1]	一切排污单位	0.03	0.06	0.5
33	三氯乙烯[1]	一切排污单位	0.3	0.6	1.0
34	四氯乙烯[1]	一切排污单位	0.1	0.2	0.5
35	苯[1]	一切排污单位	0.1	0.2	0.5
36	甲苯[1]	一切排污单位	0.1	0.2	0.5
37	乙苯[1]	一切排污单位	0.4	0.6	1.0
38	邻-二甲苯[1]	一切排污单位	0.4	0.6	1.0
39	对-二甲苯[1]	一切排污单位	0.4	0.6	1.0
40	间-二甲苯[1]	一切排污单位	0.4	0.6	1.0
41	氯苯[1]	一切排污单位	0.2	0.4	1.0
42	邻二氯苯[1]	一切排污单位	0.4	0.6	1.0
43	对二氯苯[1]	一切排污单位	0.4	0.6	1.0
44	对-硝基氯苯[1]	一切排污单位	0.5	1.0	5.0
45	2,4二硝基氯苯[1]	一切排污单位	0.5	1.0	5.0
46	苯酚[1]	一切排污单位	0.3	0.4	1.0
47	间-甲酚[1]	一切排污单位	0.1	0.2	0.5
48	2,4-二氯酚[1]	一切排污单位	0.6	0.8	1.0
49	2,4,6-三氯酚[1]	一切排污单位	0.6	0.8	1.0
50	邻苯二甲酸二丁酯[1]	一切排污单位	0.2	0.4	2.0
51	邻苯二甲酸二辛酯[1]	一切排污单位	0.3	0.6	2.0
52	丙烯腈	一切排污单位	2.0	5.0	5.0
53	总硒[1]	一切排污单位	0.1	0.2	0.5
54	粪大肠菌群数	医院[2]、兽医院及医疗机构含病原体污水	500个/L	1000个/L	5000个/L
		传染病、结核病医院污水	100个/L	500个/L	1000个/L

续表

序号	污染物	适用范围	一级标准	二级标准	三级标准
55	总余氯(采用氯化消毒的医院污水)	医院②、兽医院及医疗机构含病原体污水	≤0.5③	≥3(接触时间≥1h)	≥2(接触时间≥1h)
		传染病、结核病医院污水	≤0.5③	≥6.5(接触时间≥1.5h)	≥5(接触时间≥1.5h)
56	总有机碳(TOC)①	合成脂肪酸工业	20	40	—
		苎麻脱胶工业	20	60	—
		其他排污单位	20	30	—

① 对1997年12月31日前建设的单位无规定。

② 指50个床位以上的医院。

③ 加氯消毒后须进行脱氯处理，达到本标准。

注：括号内数据适用于1997年12月31日前建设的单位。“其他排污单位”指除所列行业以外的一切排污单位。

3.2.7.3 部分行业最高允许排水量

序号	行业类别				最高允许排水量或最低允许水重复利用率	
1	矿山工业	有色金属系统选矿			水重复利用率75%	
		其他矿山工业采矿、选矿、选煤等			水重复利用率90%(选煤)	
		脉金选矿	重选		16.0m³/t(矿石)	
			浮选		9.0m³/t(矿石)	
			氰化		8.0m³/t(矿石)	
			碳浆		8.0m³/t(矿石)	
2	焦化企业(煤气厂)				1.2m³/t(焦炭)	
3	有色金属冶炼及金属加工				水重复利用率80%	
4	石油炼制工业(不包括直排水炼油厂) 加工深度分类： A. 燃料型炼油厂 B. 燃料+润滑油型炼油厂 C. 燃料—润滑油型+炼油化工型炼油厂 (包括加工高含硫原油页岩油和石油添加剂生产基地的炼油厂)				A	>500万吨，1.0m³/t(原油) 250～500万吨，1.2m³/t(原油) <250万吨，1.5m³/t(原油)
					B	>500万吨，1.5m³/t(原油) 250～500万吨，2.0m³/t(原油) <250万吨，2.0m³/t(原油)
					C	>500万吨，2.0m³/t(原油) 250～500万吨，2.5m³/t(原油) <250万吨，2.5m³/t(原油)

续表

序号	行业类别			最高允许排水量或最低允许水重复利用率
5	合成洗涤剂工业	氯化法生产烷基苯		200.0m³/t(烷基苯)
		裂解法生产烷基苯		70.0m³/t(烷基苯)
		烷基苯生产合成洗涤剂		10.0m³/t(产品)
6	合成脂肪酸工业			200.0m³/t(产品)
7	湿法生产纤维板工业			30.0m³/t(板)
8	制糖工业	甘蔗制糖		10.0m³/t(甘蔗)
		甜菜制糖		4.0m³/t(甜菜)
9	皮革工业	猪盐湿皮		60.0m³/t(原皮)
		牛干皮		100.0m³/t(原皮)
		羊干皮		150.0m³/t(原皮)
10	发酵、酿造工业	酒精工业	以玉米为原料	100.0m³/t(酒精)
			以薯类为原料	80.0m³/t(酒精)
			以糖蜜为原料	70.0m³/t(酒精)
		味精工业		600.0m³/t(味精)
		啤酒工业(排水量不包括麦芽水部分)		16.0m³/t(啤酒)
11	铬盐工业			5.0m³/t(产品)
12	硫酸工业(水洗法)			15.0m³/t(硫酸)
13	苎麻脱胶工业			500m³/t(原麻) 750m³/t(精干麻)
14	黏胶纤维工业单纯纤维	短纤维(棉型中长纤维、毛型中长纤维)		300.0m³/t(纤维)
		长纤维		800.0m³/t(纤维)
15	化纤浆粕			本色:150m³/t(浆) 漂白:240m³/t(浆)
16	制药工业医药原料药[1,3]	青霉素		4700m³/t(青霉素)
		链霉素		1450m³/t(链霉素)
		土霉素		1300m³/t(土霉素)
		四环素		1900m³/t(四环素)

续表

序号	行业类别		最高允许排水量或最低允许水重复利用率
16	制药工业医药原料药[①,②]	洁霉素	9200m³/t(洁霉素)
		金霉素	3000m³/t(金霉素)
		庆大霉素	20400m³/t(庆大霉素)
		维生素 C	1200m³/t(维生素 C)
		氯霉素	2700m³/t(氯霉素)
		新诺明	2000m³/t(新诺明)
		维生素 B_1	3400m³/t(维生素 B_1)
		安乃近	180m³/t(安乃近)
		非那西汀	750m³/t(非那西汀)
		呋喃唑酮	2400m³/t(呋喃唑酮)
		咖啡因	1200m³/t(咖啡因)
17	有机磷农药工业[①,③]	乐果[②]	700m³/t(产品)
		甲基对硫磷(水相法)[②]	300m³/t(产品)
		对硫磷(P_2S_5 法)[②]	500m³/t(产品)
		对硫磷($PSCl_3$ 法)[②]	550m³/t(产品)
		敌敌畏(敌百虫碱解法)	200m³/t(产品)
		敌百虫	40m³/t(产品)(不包括二氯乙醛生产废水)
		马拉硫磷	700m³/t(产品)
18	除草剂工业[①,③]	除草醚	5m³/t(产品)
		五氯酚钠	2m³/t(产品)
		五氯酚	4m³/t(产品)
		2 甲-4-氯	14m³/t(产品)
		2.4-D	4m³/t(产品)
		J 草胺	4.5m³/t(产品)
		绿麦隆(以 Fe 粉还原)	2m³/t(产品)
		绿麦隆(以 Na_2S 还原)	3m³/t(产品)

续表

序号	行 业 类 别	最高允许排水量或最低允许水重复利用率
19	火力发电工业[①]	3.5m³/t(产品)
20	铁路货车洗刷	5.0m³/辆
21	电影洗片	5m³/1000m(35mm 胶片)
22	石油沥青工业	冷却池的水循环利用率 95%

① 产品按 100%浓度计。

② 不包括 P_2S_5、$PSCl_3$、PCl_5 原料生产废水。

③ 适用于 1998 年 1 月 1 日后建设的单位。

3.2.8 我国建设行业污水排入城市下水道水质标准，CJ 3082—1999

mg/L

序号	项目名称	最高允许浓度	序号	项目名称	最高允许浓度
1	pH 值	6.0～9.0	19	总铅	1.0
2	悬浮物	150(400)	20	总铜	2.0
3	易沉固体/[mL/(L·15min)]	10	21	总锌	5.0
4	油脂	100	22	总镍	1.0
5	矿物油类	20.0	23	总锰	2.0(5.0)
6	苯系物	2.5	24	总铁	10.0
7	氰化物	0.5	25	总锑	1.0
8	硫化物	1.0	26	六价铬	0.5
9	挥发性酚	1.0	27	总铬	1.5
10	温度/℃	35	28	总硒	2.0
11	生化需氧量(BOD_5)	100(300)	29	总砷	0.5
12	化学需氧量(COD_{Cr})	150(500)	30	硫酸盐	600
13	溶解性固体	2000	31	硝基苯类	5.0
14	有机磷	0.5	32	阴离子表面活性剂(LAS)	10.0(20.0)
15	苯胺	5.0	33	氨氮	25.0(35.0)
16	氟化物	20.0	34	磷酸盐(以 P 计)	1.0(8.0)
17	总汞	0.05	35	色度	80 倍
18	总镉	0.1			

注：括号内数值适用于有城市污水处理厂的城市下水道系统

3.3 纯水、锅炉给水、炉水及蒸汽

3.3.1 我国电子级水的技术指标，GB 11446.1—1997

指标 \ 级别	EW-Ⅰ	EW Ⅱ	EW-Ⅲ	EW Ⅳ
电阻率(25℃)/MΩ·cm	18以上(95%时间)，不低于17	15(95%时间)，不低于12	12.0	0.5
全硅，最大值/(μg/L)	2	10	50	1000
>1μm微粒数，最大值/(个/mL)	0.1	5	10	500
细菌个数，最大值/(个/ml)	0.01	0.1	10	100
铜，最大值/(μg/L)	0.2	1	2	500
锌，最大值/(μg/L)	0.2	1	5	500
镍，最大值/(μg/L)	0.1	1	2	500
钠，最大值/(μg/L)	0.5	2	5	1000
钾，最大值/(μg/L)	0.5	2	5	500
氯，最大值/(μg/L)	1	1	10	1000
硝酸根，最大值/(μg/L)	1	1	5	500
磷酸根，最大值/(μg/L)	1	1	5	500
硫酸根，最大值/(μg/L)	1	1	5	500
总有机碳，最大值/(μg/L)	20	100	200	1000

3.3.2 美国电子和半导体水质要求，ASTM D 5127 99

项目 \ 级别	E 1	E-1.1	E 1.2	E 2	E 3	E 4
线宽/μm	1.0～0.5	0.5～0.25	0.25～0.18	5.0～1.0	>5	
电阻率(25℃)	18.2	18.2	18.2	17.5	12	0.5
温度						
压力						
内毒素/(单位 EU/ml.)	0.03	0.03	0.03	0.25		
总有机碳/(μg/L)	5	2	1	50	300	
溶解氧/(μg/L)	1	1	1			
蒸发残余物/(μg/L)	1	0.5	0.1			
显微镜测微粒/L (micro range)[①]						
0.1～0.2	1000	1000	200			
0.2～0.5	500	500	100	3000		
0.5～0.1	50	50	1		10000	
10						100000

续表

项目 \ 级别	E 1	E 1.1	E 1.2	E 2	E-3	E-4
在线测微粒/L						
(micro range)①						
0.05～0.1	500	500	100			
0.1～0.2	300	300	50			
0.2～0.3	50	50	20			
0.3～0.5	20	20	10			
>0.5	4	4	1			
细菌/100mL						
100mL样品	1	1	1			
1L样品	1	1	0.1	10	10000	100000
硅						
总硅/(μg/L)	3	0.5	0.5	10	50	1000
溶硅/(μg/L)	1	0.1	0.05			
离子和金属/(μg/L)						
铵	0.1	0.10	0.05			
溴化物	0.1	0.05	0.02			
氯化物	0.1	0.05	0.02	1	10	1000
氟化物	0.1	0.05	0.03			
硝酸盐	0.1	0.05	0.02	1	5	500
亚硝酸盐	0.1	0.05	0.02			
磷酸盐	0.1	0.05	0.02	1	5	500
硫酸盐	0.1	0.05	0.02	1	5	500
铝	0.05	0.02	0.005			
钡	0.05	0.02	0.001			
硼	0.05	0.02	0.005			
钙	0.05	0.02	0.002			
铬	0.05	0.02	0.002			
铜	0.05	0.02	0.002	1	2	500
铁	0.05	0.02	0.002			
铅	0.05	0.02	0.005			
锂	0.05	0.02	0.003			
镁	0.05	0.02	0.002			
锰②	0.05	0.02	0.002			
镍	0.05	0.02	0.002	1	2	500
钾	0.05	0.02	0.005	2	5	500
钠	0.05	0.02	0.005	1	5	1000
锶	0.05	0.02	0.001			
锌	0.05	0.02	0.002	1	2	500

① 应为微粒的粒径范围/μm。

② 原文中 Maganese 应为 Manganese。

3.3.3 我国火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量，GB/T 12145—1999

3.3.3.1 范围

本标准规定了火力发电机组和蒸汽动力设备在正常运行和停、备用机组启动时的水汽质量标准；

适用于锅炉出口压力为3.8～25.0MPa（表大气压）的火力发电机组及蒸汽动力设备。

3.3.3.2 蒸汽质量标准

自然循环、强制循环汽包炉或直流炉的饱和蒸汽和过热蒸汽质量应符合表1的规定。

表1 蒸汽质量标准

项目 \ 炉型 / 压力/MPa / 类别		汽包炉			直流炉			
		3.8～5.8	5.9～18.3		5.9～18.3		18.4～25.0	
		标准值	标准值	期望值	标准值	期望值	标准值	期望值
钠含量/(μg/kg)	磷酸盐处理	≤15	≤10	—	≤10	≤5	<5	<3
	挥发性处理		≤10	≤5				
电导率（氢离子交换后，25℃）/(μS/cm)	磷酸盐处理	—	≤0.30		—	—		—
	挥发性处理				≤0.30	≤0.30	≤0.30	≤0.30
	中性水处理及联合水处理	—	—		≤0.20	≤0.15	<0.20	<0.15
二氧化硅含量/(μg/kg)		≤20	≤20		≤20		<15	<10

为了防止汽轮机内部积结金属氧化物，蒸汽中铁和铜的含量应符合表2的规定。

表2 蒸汽质量标准

项目 \ 炉型 / 压力/MPa / 类别	汽包炉				直流炉			
	3.8～15.6		15.7～18.3		15.7～18.3		18.4～25.0	
	标准值	期望值	标准值	期望值	标准值	期望值	标准值	期望值
铁含量/(μg/kg)	≤20	—	≤20	—	≤10	—	≤10	—
铜含量/(μg/kg)	≤5	—	≤5	≤3	≤5	≤3	≤5	≤2

3.3.3.3 锅炉给水质量标准

（1）给水的硬度、溶解氧、铁、铜、钠、二氧化硅的含量和电导率应符合表3的规定。

表3 锅炉给水质量标准

炉型	锅炉过热蒸汽压力/MPa	电导率(氢离子交换后,25℃)/(μS/cm)		硬度 $c\left(\frac{1}{x}A^{x-}\right)$/(μmol/L)	溶解氧	铁	铜		钠		二氧化硅	
					μg/L							
		标准值	期望值		标准值	标准值	标准值	期望值	标准值	期望值	标准值	期望值
汽包炉	3.8～5.8	—	—	≤2.0	≤15	≤50	≤10	—	-	—	应保证蒸汽二氧化硅符合标准	
	5.9～12.6	—	—	≤2.0	≤7	≤30	≤5	—	—	—		
	12.7～15.6	≤0.30	—	≤1.0	≤7	≤20	≤5	—	-	—		
	15.7～18.3	≤0.30	≤0.20	约为0	≤7	≤20	≤5	—	—	—		
直流炉	5.9～18.3	≤0.30	≤0.20	约为0	≤7	≤10	≤5	≤3	≤10	≤5	≤20	—
	18.4～25.0	≤0.20	≤0.15	约为0	≤7	≤10	≤6	≤3	≤5	-	≤15	≤10

液态排渣炉和原设计为燃油的锅炉，其给水的硬度和铁、铜的含量，应符合比其压力高一级锅炉的规定。

（2）给水的联氨、油的含量和pH值应符合表4的规定。

表4 给水的联氨、油含量和pH值标准

炉型	锅炉过热蒸汽压力/MPa	pH值(25℃)	联氨含量/(μg/L)	油含量/(mg/L)
汽包炉	3.8～5.8	8.8～9.2	—	<1.0
	5.9～12.6	8.8～9.3(有铜系统)	10～50	≤0.30
	12.7～15.6	或	或	
	15.7～18.3	9.0～9.5(无铜系统)	10～30(挥发性处理)	
直流炉	5.9～18.3	8.8～9.3(有铜系统)	10～50 或 10～30(挥发性处理)	≤0.30
	18.4～25.0	或 9.0～9.5(无铜系统)	20～50	<0.1

注：1. 压力在3.8～5.8MPa的机组，加热器为钢管，其给水pH值可控制在8.8～9.5。

2. 用石灰、钠离子交换水为补给水的锅炉，应改为控制汽轮机凝结水的pH值，最大不超过9.0。

3. 对大于12.7MPa的锅炉，其给水总碳酸盐（以二氧化碳计算）应小于等于1mg/L。

（3）直流炉加氧处理给水溶解氧的含量、pH 值和电导率应符合表 5 的规定。

表 5　给水溶解氧含量、pH 值和电导率标准

处理方式	pH 值(25℃)	电导率(经氢离子交换后，25℃)/(μS/cm)		溶解氧含量/(μg/L)	油含量/(mg/L)
		标准值	期望值		
中性处理	7.0～8.0(无铜系统)	≤0.20	≤0.15	50～250	约为 0
联合处理	8.5～9.0(有铜系统)	≤0.20	≤0.15	30～200	约为 0
	8.0～9.0(无铜系统)				

3.3.3.4　汽轮机凝结水质量标准

（1）凝结水的硬度、钠和溶解氧的含量和电导率应符合表 6 的规定。

表 6　凝结水的硬度、钠和溶解氧的含量和电导率标准[1]

锅炉过热蒸汽压力/MPa	硬度 $c\left(\frac{1}{z}A^{z-}\right)$/(μmol/L)	钠含量/(μg/L)	溶解氧含量/(μg/L)	电导率(经氢离子交换后，25℃)/(μS/cm)		二氧化硅含量/(μg/L)
				标准值	期望值	
3.8～5.8	≤2.0	—	≤50	—	—	应保证炉水中二氧化硅含量符合标准
5.9～12.6	≤1.0	—	≤50	—	—	
12.7～15.6	≤1.0	—	≤40	≤0.30	<0.20	
15.7～18.3	约为 0	≤5[3]	≤30[2]			
18.4～25.0	约为 0	≤5[3]	≤20[2]	<0.20	<0.15	

① 对于用海水、苦咸水及含盐量大而硬度小的水作为汽机凝汽器的冷却水时，还应监督凝结水的钠含量等。

② 采用中性处理时，溶解氧应控制在 50～250μg/L；电导率应小于 0.20μS/cm。

③ 凝结水有混床处理时钠可放宽至 10μg/L。

（2）凝结水经氢型混床处理后硬度、二氧化硅、钠、铁、铜的含量和电导率应符合表 7 的规定。

表 7　凝结水经氢型混床处理后的硬度、二氧化硅、钠、铁、铜的含量和电导率标准

硬度 $c\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$ /(μmol/L)	电导率(经氢离子交换后,25℃)/(μS/cm)		二氧化硅	钠	铁	铜
	标准值	正常运行值	μg/L			
约为 0	≤0.20	≤0.15	≤15	≤5①	≤8	≤3

① 凝结水混床处理后的含钠量应满足炉水处理的要求。

3.3.3.5　锅炉炉水质量标准

(1) 汽包炉炉水的含盐量、氯离子和二氧化硅含量，根据制造厂的规范并通过水汽品质专门试验确定，可参考表 8 的规定控制。

表 8　汽包炉炉水含盐量、氯离子和二氧化硅含量标准

锅炉过热蒸汽压力/MPa	处理方式	总含盐量①	二氧化硅①	氯离子①	磷酸根含量/(mg/L)			pH 值①(25℃)	电导率(25℃)/(μS/cm)
					单段蒸发	分段蒸发			
		mg/L				净段	盐段		
3.8～5.8	磷酸盐处理	—	—	—	5～15	5～12	≤75	9.0～11.0	—
5.9～12.6		≤100	≤2.00②	—	2～10	2～10	≤50	9.0～10.5	<150
12.7～15.6		≤50	≤0.45②	≤4	2～8	2～8	≤40	9.0～10.0	<60
15.7～18.3	磷酸盐处理	≤20	≤0.25	≤1	0.5～3	—	—	9.0～10.0	<50
15.7～18.3	挥发性处理	≤2.0	≤0.20	≤0.5	—	—	—	9.0～9.5	<20

① 均指单段蒸发炉水，总含盐量为参考指标。

② 汽包内有洗汽装置时，其控制指标可适当放宽。

(2) 汽包炉进行磷酸盐-pH 值协调控制时，其炉水的 Na^+ 与 PO_4^{3-} 的摩尔比值，应维持在 2.3～2.8。若炉水的 Na^+ 与 PO_4^{3-} 的摩尔比低于 2.3 或高于 2.8 时，可加中和剂进行调节。

3.3.3.6　补给水质量标准

补给水的质量，以不影响给水质量为标准。

(1) 澄清器出水质量标准　澄清器（池）出水水质应满足下一级处理对水质的要求；澄清器（池）出水浑浊度正常情况下小于

5FTU，短时小于10FTU。

（2）进入离子交换器的水，应注意水中浑浊度、有机物和残余氯的含量。按下列数值控制：浑浊度＜5FTU（固定床顺流再生）；浑浊度＜2FTU（固定床对流再生）；残余氯＜0.1mg/L；化学耗氧量＜2mg/L（$KMnO_4$ 30min 水浴煮沸法）。

（3）离子交换器出水标准，一般可按表9控制。

表9　补给水质量标准

种　类	硬度 $c\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$ /(μmol/L)	二氧化硅含量 /(μg/L)	电导率(25℃) /(μS/cm)		碱度 $c\left(\frac{1}{x}B^{x-}\right)$ /(mmol/L)
			标准值	期望值	
一级化学除盐系统出水	约为0	≤100	≤5②	-	
一级化学除盐-混床系统出水②	约为0	≤20	≤0.30①	≤0.20①	—
石灰、二级钠离子交换系统出水	≤5.0	—	—		0.8～1.2
氢-钠离子交换系统出水	≤5.0	—	—	—	0.3～0.5
二级钠离子交换系统出水	≤5.0	-	—	—	—

① 离子交换器出水质量应能满足炉水处理的要求。

② 对于用一级化学除盐系统加混床出水的一级盐水，其电导率可放宽至10μS/cm。

（4）蒸发器和蒸汽发生器中的水汽质量，应符合下列规定。

① 二次蒸汽　钠含量≤500μg/kg；二氧化硅含量≤100μg/kg；游离二氧化碳含量，以不影响锅炉给水质量为标准。

② 蒸发器和蒸汽发生器的给水　硬度 $c\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$≤20 μmol/L；溶解氧（经除氧后）≤50μg/L。

③ 蒸发器内的水　蒸发器和蒸汽发生器内水的质量，应根据水汽品质试验确定；磷酸根含量应为5～20mg/L，对于采用锅炉排污水作为补充水的蒸发器，磷酸根含量不受此限制。

3.3.3.7　减温水质量标准

锅炉蒸汽采用混合减温时，其减温水质量，应保证减温后蒸汽

中的钠、二氧化硅和金属氧化物的含量符合蒸汽质量标准表1和表2的规定。

3.3.3.8 疏水和生产回水质量标准

疏水和生产回水质量以不影响给水质量为前提，按表10控制。

表10 疏水和生产回水质量标准

名称	硬度 $c\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$/(μmol/L)		铁含量/(μg/L)	油含量/(mg/L)
	标准值	期望值		
疏水	≤5.0	≤2.5	≤50	-
生产回水	≤5.0	≤2.5	≤100	≤1(经处理后)

生产回水还应根据回水的性质，增加必要的化验项目。

3.3.3.9 热网补充水质量标准

热网补充水质量按表11控制。

表11 热网补充水质量标准

溶解氧含量/(μg/L)	总硬度 $c\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$/(μmol/L)	悬浮物含量/(mg/L)
<100	<700	<5

3.3.3.10 水内冷发电机的冷却水质量标准

(1) 双水内冷和转子独立循环的冷却水质量，应符合表12的规定。

表12 双水内冷和转子独立循环的冷却水质量标准

电导率(25℃)/(μS/cm)	铜含量/(μg/L)	pH值(25℃)
≤5	≤40	>6.8

(2) 冷却水的硬度 $c\left(\frac{1}{x}A^{x+}\right)$ 按汽轮发电机的功率规定为：200MW以下不大于10μmol/L；200MW及以上不大于2μmol/L。

(3) 汽轮发电机定子绕组采用独立密闭循环水系统时，其冷却水的电导率应小于2.0μS/cm。

3.3.3.11 停、备用机组启动时的水、汽质量标准

(1) 锅炉启动后，并汽或汽轮机冲转前的蒸汽质量，可参照

表 13的规定控制，且在 8h 内应达到正常运行的标准值。

表 13　汽轮机冲转前的蒸汽质量标准

炉　型	锅炉过热蒸汽压力/MPa	电导率(氢离子交换后,25℃)/(μS/cm)	二氧化硅	铁	铜	钠
			μg/kg			
汽包炉	3.8～5.8	≤3.0	≤80	—	—	≤50
	5.9～18.3	≤1.0	≤60	≤50	≤15	≤20
直流炉	—		≤30	≤50	≤15	≤20

（2）锅炉启动时，给水质量应符合表 14 的规定，且在 8h 内达到正常运行时的标准。

表 14　锅炉启动时给水质量标准

炉　型	锅炉过热蒸汽压力/MPa	硬度 $c\left(\frac{1}{z}A^{z+}\right)$/(μmol/L)	铁	溶解氧	二氧化硅
			μg/L		
汽包炉	3.8～5.8	≤10.0	≤150	≤50	—
	5.9～12.6	≤5.0	≤100	≤40	—
	12.7～18.3	≤5.0	≤75	≤30	≤80
直流炉	—	约为 0	≤50	≤30	≤30

（3）机组启动时，凝结水质量可按表 15 的规定开始回收。

表 15　机组启动时凝结水回收标准

外　状	硬度 $c\left(\frac{1}{z}A^{z+}\right)$/(μmol/L)	铁	二氧化硅	铜
		μg/L		
无色透明	≤10.0	≤80	≤80	≤30

注：对于海滨电厂还应控制含钠量不大于 80μg/L。

（4）机组启动时，应严格监督疏水质量。当高、低加热器的疏水含铁量不大于 400μg/L 时，可回收。

3.3.3.12　水汽质量劣化时的处理

当水汽质量劣化时，应迅速检查取样是否有代表性；化验结果是否正确；并综合分析系统中水、汽质量的变化，确认判断无误

后，应立即向本厂领导汇报情况，提出建议。领导应责成有关部门采取措施，使水、汽质量在允许的时间内恢复到标准值。下列三级处理值的涵义为：

一级处理值　-有因杂质造成腐蚀、结垢、积盐的可能性，应在72h内恢复至标准值；

二级处理值——肯定有因杂质造成腐蚀、结垢、积盐的可能性，应在24h内恢复至标准值；

三级处理值——正在进行快速结垢、积盐、腐蚀，如水质不好转，应在4h内停炉。

在异常处理的每一级中，如果在规定的时间内尚不能恢复正常，则应采用更高一级的处理方法。对于汽包锅炉，恢复标准值的办法之一是降压运行。

(1) 凝结水（凝结水泵出口）水质异常时的处理值见表16规定。

表16　凝结水质异常①时的处理值

项　目		标准值	处理值		
			一级	二级	三级
电导率(经氢离子交换后，25℃)/(μS/cm)	有混床	≤0.20	0.20～0.35	0.35～0.60	>0.60
	无混床	≤0.30	0.30～0.40	0.40～0.65	>0.65
硬度 $c(\frac{1}{z}A^{z+})$/(μmol/L)	有混床	约为0	>2.0	—	—
	无混床	≤2.0	>2.0	>5.0	>20.0

① 电厂采用海水冷却时，当凝结水中的含钠量大于400μg/L时，应紧急停机。

(2) 锅炉给水水质异常时的处理值，见表17规定。

表17　锅炉给水水质异常的处理值

项　目		标准值	处理值		
			一级	二级	三级
pH值(25℃)	无铜系统	9.0～9.5	<9.0或>9.5	—	
	有铜系统	8.8～9.3	<8.8或>9.3		-
电导率(经氢离子交换后，25℃)/(μS/cm)		≤0.30	0.30～0.40	0.40～0.65	>0.65
溶解氧含量/(μg/L)		≤7	>7	>20	--

(3) 锅炉水水质异常时的处理值，见表 18 规定。

表 18　锅炉炉水水质异常时的处理值

项　目		标准值	处　理　值		
			一级	二级	三级
pH 值	磷酸盐处理	9.0～10.0	9.0～8.5	8.5～8.0	<8.0
	挥发性处理	9.0～9.5	9.0～8.0	8.0～7.5	<7.5

当出现水质异常情况时，还应测定炉水中氯离子含量、含钠量、电导率和碱度，以便查明原因，采取对策。

3.3.4　我国工业锅炉水质标准，GB 1576—2001

本标准规定了工业锅炉运行时的水质要求。本标准规定适用于出口蒸汽压力小于等于 2.5MPa，以水为介质的固定式蒸汽锅炉和汽水两用锅炉，也适用于以水为介质的固定式承压热水锅炉和常压热水锅炉。

(1) 蒸汽锅炉和汽水两用锅炉的给水，一般应采用锅外化学处理。水质标准应符合下表规定。

项　目		给　水			锅　水		
额定蒸汽压力/MPa		≤1.0	>1.0 ≤1.6	>1.6 ≤2.5	≤1.0	>1.0 ≤1.6	>1.6 ≤2.5
悬浮物/(mg/L)		≤5.0	≤5.0	≤5.0		—	—
总硬度/(mmol/L)①		≤0.03	≤0.03	≤0.03	—	—	—
总碱度 /(mmol/L)②	无过热器	—	—	—	6～26	6～24	6～16
	有过热器	—	—		—	≤14	≤12
pH(25℃)		≥7	≥7	≥7	10～12	10～12	10～12
溶解氧/(mg/L)③		≤0.1	≤0.1	≤0.05		—	—
溶解固形物 /(mg/L)④	无过热器	—	—		<4000	<3500	<3000
	有过热器	-	—	—	—	<3000	<2500
SO_3^{2-} /(mg/L)		—		—	—	10～30	10～30
PO_4^{3-} /(mg/L)			—	—	—	10～30	10～30

续表

项　　目	给　　水			锅　　水		
相对碱度（游离 NaOH：溶解固形物）[5]	—	·	—	—	<0.2	<0.2
含油量/(mg/L)	≤2	≤2	≤2	—	—	—
含铁量/(mg/L)[6]	≤0.3	≤0.3	≤0.3	—	—	—

① 硬度 mmol/L 的基本单元为 $c(1/2Ca^{2+}、1/2Mg^{2+})$，下同。

② 硬度 mmol/L 的基本单元为 $c(OH^-、1/2CO_3^{2-}、HCO_3^-)$，下同。

对蒸汽品质要求不高，且不带过热器的锅炉、使用单位在报当地锅炉压力容器安全监察机构同意后，碱度指标上限值可适当放宽。

③ 当锅炉额定蒸发量大于等于 6t/h 时应除氧，额定蒸发量小于 6t/h 的锅炉如发现局部腐蚀时，给水应采取除氧措施，对于供汽轮机用汽的锅炉给水含氧量应小于等于 0.05mg/L。

④ 如测定溶解固形物有困难时，可采用测定电导率或氯离了（Cl^-）的方法来间接控制，但溶解固形物与电导率或与氯离子（Cl^-）的比值关系应根据试验确定。并应定期复试和修正此比值关系。

⑤ 全焊接结构锅炉相对碱度可不控制。

⑥ 仅限燃油、燃气锅炉。

（2）额定蒸发量小于等于 2t/h，且额定蒸汽压力小于等于 1.0MPa 的蒸汽锅炉和汽水两用锅炉（如对汽、水品质无特殊要求）也可采用锅内加药处理。但必须对锅炉的结垢、腐蚀和水质加强监督，认真做好加药、排污和清洗工作，其水质应符合下表规定。

项　　目	给　　水	锅　　水
悬浮物/(mg/L)	≤20	—
总硬度/(mmol/L)	≤4	—
总碱度/(mmol/L)	—	8～26
pH(25℃)	≥7	10～12
溶解固形物/(mg/L)		<5000

（3）承压热水锅炉给水应进行锅外水处理，对于额定功率小于等于 4.2MW 非管架式承压的热水锅炉和常压热水锅炉，可采用锅

内加药处理，但必须对锅炉的结垢、腐蚀和水质加强监督，认真做好加药工作，其水质应符合下表的规定。

项　　目	锅内加药处理		锅外化学处理	
	给水	锅水	给水	锅水
悬浮物/(mg/L)	≤20		≤5	—
总硬度/(mmol/L)	≤6	—	≤0.6	—
pH(25℃)[①]	≥7	10～12	≥7	10～12
溶解氧/(mg/L)[②]	—	—	≤0.1	—
含油量/(mg/L)	≤2	—	≤2	

① 通过补加药剂使锅水 pH 值控制在 10～12。

② 额定功率大于等于 4.2MW 的承压热水锅炉给水应除氧，额定功率小于 4.2MW 的承压热水锅炉和常压热水锅炉给水应尽量除氧。

(4) 直流（贯流）锅炉给水应采用锅外化学水处理，其水质按 776 页表中额定蒸汽压力为大于 1.6MPa、小于等于 2.5MPa 的标准执行。

(5) 余热锅炉及电热锅炉的水质指标应符合同类型、同参数锅炉的要求。

附录 4　水处理有关的标准检索表

4.1　水处理剂标准

4.1.1　水处理剂国家标准

标　准　号	标　准　名　称
	A. 凝聚剂及絮凝剂
GB 4482—93(代 GB 4482—81 及 GB 4483—84)	净水剂氯化铁
GB 10531—89	水处理剂硫酸亚铁
GB 14591- 93	净水剂聚合硫酸铁
GB /T 15892- 95	水处理剂聚合氯化铝
GB 17514—1998	水处理剂聚丙烯酰胺
ZGB 77001—90(同 HG/T 3541--90)	水处理剂结晶氯化铝

续表

标准号	标准名称
	B. 缓蚀剂
GB 537—97(代 GB 537—84)	工业十二水合四硼酸二钠(硼砂)
GB 1611—92(代 GB 1611—79)	重铬酸钠
GB 1902—94(代 GB 1902- 80)	食品添加剂苯甲酸钠
GB 2367--90(代 GB 2367 -80)	工业用亚硝酸钠
GB/T 4209—1996(代 GB/T 4209—84)	硅酸钠
GB 4553—93(代 GB 4553—84)	工业级硝酸钠
GB 6008—85(同 HG/T 2965- 2000)	工业用磷酸氢二钠
GB 9006—88	工业焦磷酸钠
GB 9983- 88	工业三聚磷酸钠
GB 10205- 88	磷酸氢二铵,磷酸二氢铵
GB 11407 -89	硫化促进剂 M(巯基苯并噻唑)
ZBG 71005 -89(同 HG/T 3503- 89)	十八胺
	C. 阻垢分散剂
GB 5308—85	工业单宁酸
GB/T 10533—2000(代 GB/T 10533—89)	水处理剂聚丙烯酸
GB/T 10535—1997(代 GB/T 10535—89)	水处理剂水解聚马来酸酐
	D. 杀生剂
GB 1608—97(代 GB 1608--86)	工业级高锰酸钾
GB 1616- 88(代 GB 1616—79)	过氧化氢
GB/T 5138—1996(代 GB/T 5138—85)	工业用液氯
GB/T 10666—1995(代 GB/T 10666 -89)	次氯酸钠(漂粉精)
	E. 清洗剂及清洗缓蚀、钝化、助剂
GB 209—92	工业氢氧化钠
GB 210- 92	工业碳酸钠
GB 320- 93(代 GB 320- 83)	工业合成盐酸
GB 337--84(代 GB 337—64)	浓硝酸
GB 534- -89(代 GB 534—82)	工业硫酸
GB 536- 88(代 GB 536- 85)	氨
GB 1606—1998(代 GB 1606—86)	工业碳酸氢钠
GB/T 1626- 88	工业草酸
GB 1987 -80	药用柠檬酸
GB 2091—92(代 GB 2091—80)	工业磷酸
GB/T 2093—93(代 GB/T 2093—80)	工业甲酸
GB 2961—90(代 GB 2961—82)	苯胺
GB 3694- -83	纯吡啶

续表

标 准 号	标 准 名 称
GB 3695 -83	α-甲基吡啶
GB 3696—83	β 甲基吡啶
GB 3697—83	吡啶溶剂
GB 5462—92	工业盐(氯化钠)
GB 6783—86	食品添加剂明胶
GB 7744—1998(代 GB 7744—87)	工业氢氟酸
GB 7746- 1997(代 GB 7746—82)	工业无水氟化氢
GB/T 9909—1998(代 GB/T 9909—88)	工业甲醛溶液
GB/T 9015 -1998	工业六次甲基四胺(乌洛托品)
GB/T 11199- 89	离子交换膜法氢氧化钠
ZBG 17013 -88(同 HG/T 3266- 88),(代 HG 2- -165—65)	工业硫脲
	F. 吸附剂及离子交换树脂
GB/T 1631—89(代 HG 2—884—76)	离子交换树脂分类、命名和型号
GB 7701.4—1997(代 GB 7701.4—87)	净化水用煤质颗粒活性炭
GB 9004 -88	工业氧化镁
GB 10504—89	3A 分子筛(沸石)
GB/T 16579- 1996	D001 大孔强酸性苯乙烯系阳离子交换树脂
GB/T 16580—1996	D201 大孔强碱性苯乙烯系阴离子交换树脂
GB 13659—92(代 HG 2—885- -76)	001×7 凝胶型强酸性苯乙烯系阳离子交换树脂
GB 13660—92(代 HG 2—886—76)	201×7 凝胶型强碱性Ⅰ型苯乙烯系阴离子交换树脂
GB/T 13804 -92	净化水用木质活性炭

注：GB 为国家标准；

ZBG (ZB/T G) 为中国专业标准。

4.1.2 水处理剂行业标准

标 准 号	标 准 名 称
	A. 凝聚剂及絮凝剂
HG/T 2153- -93	水处理剂聚合硫酸铝
HG 2227- 91(代 GB 3151—82)	水处理剂硫酸铝
HG/T 2565- -94	工业硫酸铝钾
HG/T 2677—95	工业聚合硫酸铝
HG/T 3541—90(同 ZBG 77001 -90)	水处理剂结晶氯化铝

续表

标准号	标准名称
	B. 缓蚀剂
HG/T 2323—92(代 GB 1625 -79)	工业氯化锌
HG/T 2326—92(代 GB 1625—79)	硫酸锌
HG/T 2517—93(代 GB 1607—79)	工业级十二水磷酸三钠
HG/T 2519- 93	工业六偏磷酸钠
HG/T 2767—1996	工业磷酸氢二钠
HG/T 2837- -97(代 GB/T 10532 —89)	水处理剂聚偏磷酸钠
HG/T 2965 —2000(同 GB 6008—85,代 HG/T 2965—85)	工业磷酸氢二钠
HG/T 2968 —1999	工业焦磷酸钠
HG/T 3503—89(同 ZBG 71005 —89)	十八胺
	C. 阻垢分散剂
HG/T 2228- 91	聚氧乙烯烃内三醇磷酸酯,多羟基化合物磷酸混酯
HG/T 2229- -91	丙烯酸-马来酸酐共聚物
HG/T 2429—93	丙烯酸-丙烯酸甲酯共聚物,丙烯酸丙烯酸羟丙酯共聚物,丙烯酸钠甲基丙烯酸羟乙酯-丙烯酸甲酯共聚物
HG/T 2430—93	水处理剂 阻垢缓蚀剂Ⅱ
HG/T 2431— 93	水处理剂 阻垢缓蚀剂Ⅲ
HG/T 2838—1997(代 GB/T 10534- -89)	净水剂 聚丙烯酸钠
HG/T 2839—1997(代 GB/T 10537—89)	净水剂 羟基亚乙基二膦酸二钠(羟基乙叉二膦酸二钠)
HG/T 2840- -1997(代 GB/T 10536—89)	净水剂 氨基三亚甲基膦酸(氨基三甲叉膦酸,固体)
HG/T 2841—1997(代 ZB/TG 71003 —89)	净水剂 氨基三亚甲基膦酸(氨基三甲叉膦酸)
HG/T 3537- -1999(代 HG/T 3537—89)	水处理剂 羟基亚乙基二膦酸
HG/T 3538— 1989(代 ZB/TG 71004—89)	水处理剂 乙二胺四亚乙基膦酸钠(乙二胺四甲叉膦酸钠)
HG/T 3642—1999	水处理剂 丙烯酸-2-甲基-2-丙烯酰胺丙磺酸类共聚物
HG/T 3662 —2000	水处理剂 2-膦酸基-1,2,4-三羧基丁酸
	D. 杀生剂
HG 2 —347 —76	五氯酚钠

续表

标准号	标准名称
HG/T 2230—91	氯化十二烷基二甲基苄基铵(十二烷基二甲基苄基氯化铵)
HG/T 2496—93(代 HG 1—30—64)	漂白粉
HG/T 2498—93(代 HG 1—1178—78)	次氯酸钠溶液
HG/T 2544—93	工业对氯苯酚
HG/T 2777—1996	稳定性二氧化氯溶液
HG/T 2989—93(代 GB 437—88)	硫酸铜
HG 3250—2001(代 ZBG 12015—89)	工业亚氯酸钠
HG 3263—2001(代 ZBG 16009—89)	三氯异氰尿酸
HG/T 3657—1999	水处理剂异噻唑酮衍生物
QB 349—66	溴
	F. 清洗剂及清洗缓蚀、钝化、助剂
HG 1—1052—77	二氯化锡
HG/T 2527—93	工业氨基磺酸
HG/T 3266—88(同 ZBG 17013—88)	工业硫脲
HG/T 3458—76(代 HG 3—987—76)	化学试剂苯甲酸
HG/T 3464—77	化学试剂三氯化锑
HG/T 3586—1999	工业氟化氢铵
	F. 除氧剂
HG 7—1360—80	照相级及工业级氢醌(对苯二酚)
HG/T 2967—2000(代 HG/T 2967—88)	工业无水亚硫酸钠
HG/T 3259—90(代 ZBG 14001—90)	工业水合肼
	G. 吸附剂及离子交换树脂
HG/T 2163—91	201×4 强碱性苯乙烯系阴离子交换树脂
HG/T 2164—91	D113 大孔弱酸性丙烯酸系阳离子交换树脂
HG/T 2165—91	D301 大孔弱碱性苯乙烯系阴离子交换树脂
HG/T 2166—91	116 弱酸性丙烯酸系阳离子交换树脂
HG/T 2524—93	4A 分子筛
HG/T 2623—1994	三层混床专用离子交换树脂
HG/T 2624—1994	D301-FC 大孔弱碱性苯乙烯系阴离子交换树脂
HG/T 2690—1995	13X 分子筛
HG/T 2754—1996	D202 大孔强碱Ⅱ型苯乙烯系阴离子交换树脂

续表

标 准 号	标 准 名 称
DL 519—93	火力发电厂水处理用离子交换树脂验收标准（001×7，002SC，D001，D111，D113，201×7，D201，D202，D301 树脂）
DL/T 582—1995	水处理用活性炭性能试验导则
DL/T 673—1999	火电厂水处理用 001×7 强酸性阳离子交换树脂报废标准
DL/T 807—2002	火力发电厂水处理用 201×7 强碱性阴离子交换树脂报废标准
CJ 3023—93	净水器采用的颗粒活性炭技术要求

注：HG 为化工行业标准；

QB 为轻工行业标准；

DL 为电力行业标准；

CJ 为城市建设行业标准。

4.2 各种用水水质标准

4.2.1 用水水质国家标准

标 准 号	标 准 名 称
GB 1576—2001(代 GB 1576—79)	工业锅炉的水质标准
GB 3097—82	海水水质标准
GB 3552—83	航行于中国领海的船舶污染物排放标准
GB 3553—83	电影洗片水污染物排放标准
GB 3838—2002(代 GB 3838—88 及 GHZB 1—1999)	地面水环境质量标准
GB 4274—84	梯恩梯工业水污染物排放标准
GB 4275—84	黑索金工业水污染物排放标准
GB 4277—84	雷汞工业生产废水排放标准
GB 4278—84	二硝基重氮酚工业水污染物排放标准
GB 4279—84	叠氮化铅、二硝基间苯二酚铅、D·S 共晶工业水污染物排放标准
GB 4286—84	船舶工业污染物排放标准
GB 4914—85	海洋石油开发工业含油污水的排放标准
GB 4917—85	普通过磷酸钙(普钙)工业废水排放标准
GB 5084—85	农田灌溉水质标准
GB 5749—85	生活饮用水卫生标准
GB 8537—1995	饮用天然矿泉水标准
GB 8978—1996	污水综合排放标准
GB 11446.1—1997(代 GB 11446.1—89)	电子级水质量标准

续表

标 准 号	标 准 名 称
GB 11607 -89	渔业水质标准
GB/T 12145—1999(代 GB 12145—89)	火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量标准
GB 12941—91	景观娱乐用水水质标准
GB 13456—92	钢铁工业水污染物排放标准
GB 13457—92	肉类加工工业水污染物排放标准
GB 13458 -92	合成氨工业水污染物排放标准
GB 14374—93	航天推进剂水污染物排放标准
GB 14470.1- 93	兵器工业水污染物排放标准—火炸药
GB 14470.2- 93	兵器工业水污染物排放标准—火工品
GB 14470.3—93	兵器工业水污染物排放标准 -弹药装药
GB/T 14848 -93	地下水质量标准
GB/T 17323- 1998	瓶装饮用纯净水卫生标准
GB/T 17324 -1998	瓶装饮用纯净水卫生标准

注:GHZB为国家环境保护总局标准。

4.2.2 用水水质行业标准

标 准 号	标 准 名 称
CJ 25.1—88	生活杂用水水质标准
CJ 94 -1999	饮用净水水质标准
CJ/T 3020—93	生活饮用水源水质标准
CJ/T 3025- 93	城市污水厂污水污泥排放标准
CJ 3082—1999	污水排入城市下水道水质标准
SD 163- 85	火力发电厂水汽质量标准

注：CJ为城镇建设行业标准；

SD为水利电力行业标准。

4.3 工程建设、管理、维修标准

4.3.1 工程建设、管理、维修国家标准

标 准 号	标 准 名 称
GB 7119—86	评价企业合理用水技术通则
GB 50050—95	工业循环冷却水处理设计技术规范
GBJ 109—87	工业用水软化、除盐设计技术规范
GB/T 17219—1998	饮用水输配水设备浸泡水的卫生要求
GB/T 50106—2001	给水排水制图标准

4.3.2 工程建设、管理、维修行业标准

标准号	标准名称
HG/T 3523—83(代 HG 5—1526—83)	冷却水化学处理标准腐蚀试片技术条件
HG/T 20690—2000	化工企业循环冷却水处理设计技术规定
HG 25141—91	化学水处理装置维护检修规程
HG 25142 91	冷却塔维护检修规程
HG 25143 91	工业水沉淀池维护检修规程
HG 25145--91	水处理加药柱塞泵维护检修规程
HG 25146—91	工业水加氯机维护检修规程
SD 116 84	火力发电厂凝汽器管选材导则
DL/T 523—1993	盐酸酸洗缓蚀剂应用性能评价指标及浸泡腐蚀试验方法
DL/T 561—1995(代 SD 196—86)	火力发电厂水汽化学监督导则
DL/T 794—2001(代 SD 135—1986)	火力发电厂锅炉化学清洗导则
SDGJ 2—85	火力发电厂化学水处理设计技术规定
CJ 19—87	工业用水分类及定义
CJ 20—87	工业企业水量平衡测试方法
CJ 21—87	工业用水考核指标及计算方法
CJJ/T 76—98	城市地下水动态观测规程

4.4 水质、污垢、活性炭及离子交换树脂的分析测定或试验方法[58,78]

4.4.1 水污染物分析方法国家标准[58]

标准号	标准名称
GB 3839—83	制定地方水污染物排放标准的技术原则与方法
GB 7466--87	水质 总铬的测定
GB 7467—87	水质 六价铬的测定 二苯碳酰二肼分光光度法
GB 7468—87	水质 总汞测定 冷原子吸收分光光度法
GB 7469—87	水质 总汞测定 高锰酸钾-过硫酸钾消解法 双硫腙分光光度法
GB 7470—87	水质 铅的测定 双硫腙分光光度法
GB 7471—87	水质 镉的测定 双硫腙分光光度法
GB 7472—87	水质 锌的测定 双硫腙分光光度法

续表

标准号	标准名称
GB 7473—87	水质 铜的测定 2,9-二甲基 1,10 菲罗啉分光光度法
GB 7474—87	水质 铜的测定 二乙基二硫代氨基甲酸钠分光光度法
GB 7475 87	水质 铜、锌、铅、镉的测定 原子吸收分光光度法
GB 7476 87	水质 钙含量的测定 EDTA 滴定法
GB 7477 87	水质 钙和镁总量的测定 EDTA 滴定法
GB 7478 87	水质 铵的测定 蒸馏和滴定法
GB 7479—87	水质 铵的测定 纳氏试剂比色法
GB 7480 87	水质 硝酸盐氮的测定 酚二磺酸分光光度法
GB 7481—87	水质 铵的测定 水杨酸分光光度法
GB 7482—87	水质 氟化物的测定 茜素磺酸锆目视比色法
GB 7483—87	水质 氟化物的测定 氟试剂分光光度法
GB 7484 87	水质 氟化物的测定 离子选择电极法
GB 7485—87	水质 总砷的测定 二乙基二硫代氨基甲酸银分光光度法
GB 7486—87	水质 氰化物的测定 第一部分：总氰化物的测定
GB 7487 87	水质 氰化物的测定 第二部分：氰化物的测定
GB 7488—87	水质 五日生化需氧量（BOD_5）稀释与接种法
GB 7489—87	水质 溶解氧的测定 碘量法
GB 7490 87	水质 挥发酚的测定 蒸馏后 4-氨基安替比林分光光度法
GB 7491—87	水质 挥发酚的测定 蒸馏后溴化容量法
GB 7492—87	水质 六六六、滴滴涕的测定 气相色谱法
GB 7493—87	水质 亚硝酸盐氮的测定 分光光度法
GB 7494—87	水质 阴离子表面活性剂的测定 亚甲蓝分光光度法
GB 8972 88	水质 五氯酚的测定 气相色谱法
GB 9803—88	水质 五氯酚的测定 藏红 T 分光光度法
GB 11889 89	水质 苯胺类化合物的测定 N-(1-萘基)乙二胺偶氮分光光度法

续表

标准号	标准名称
GB 11890—89	水质 苯系物的测定 气相色谱法
GB 11891—89	水质 凯氏氮的测定
GB 11892—89	水质 高锰酸盐指数的测定
GB 11893—89	水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法
GB 11894—89	水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法
GB 11895—89	水质 苯并[a]芘的测定 乙酰化滤纸层析荧光分光光度法
GB 11896—89	水质 氯化物的测定 硝酸银滴定法
GB 11897—89	水质 游离氯和总氯的测定 *N*,*N*-二乙基-1,4 苯二胺滴定法
GB 11898—89	水质 游离氯和总氯的测定 *N*,*N*-二乙基-1,4-苯二胺分光光度法
GB 11899—89	水质 硫酸盐的测定 重量法
GB 11900—89	水质 痕量砷的测定 硼氢化钾-硝酸银分光光度法
GB 11901—89	水质 悬浮物的测定 重量法
GB 11902—89	水质 硒的测定 2,3-二氨基萘荧光法
GB 11903—89	水质 色度的测定
GB 11904—89	水质 钾和钠的测定 火焰原子吸收分光光度法
GB 11905—89	水质 钙和镁的测定 原子吸收分光光度法
GB 11906—89	水质 锰的测定 高碘酸钾分光光度法
GB 11907—89	水质 银的测定 火焰原子吸收分光光度法
GB 11908—89	水质 银的测定 镉试剂 2B 分光光度法
GB 11909—89	水质 银的测定 3,5-Br_2-PADAP 分光光度法
GB 11910—89	水质 镍的测定 丁二酮肟分光光度法
GB 11911—89	水质 铁、锰的测定 火焰原子吸收分光光度法
GB 11912—89	水质 镍的测定 火焰原子吸收分光光度法
GB 11913—89	水质 溶解氧的测定 电化学探头法
GB 11914—89	水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法
GB 12990—91	水质 微型生物群落监测 PFU 法
GB 12997—91	水质 采样方案设计技术规定

续表

标 准 号	标 准 名 称
GB 12998—91	水质 采样技术指导
GB 12999—91	水质采样 样品的保存和管理技术规定
GB 13192—91	水质 有机磷农药的测定 气相色谱法
GB 13193—91	水质 总有机碳(TOC)的测定 非色散红外线吸收法
GB 13194—91	水质 硝基苯、硝基甲苯、硝基氯苯、二硝基甲苯的测定 气相色谱法
GB 13195—91	水质 水温的测定 温度计或颠倒温度计测定法
GB 13196—91	水质 硫酸盐的测定 火焰原子吸收分光光度法
GB 13197—91	水质 甲醛的测定 乙酰丙酮分光光度法
GB 13198—91	水质 六种特定多环芳烃的测定 高效液相色谱法
GB 13199—91	水质 阴离子洗涤剂的测定 电位滴定法
GB 13200—91	水质 浊度的测定
GB 13266—91	水质 物质对蚤(大型蚤)急性毒性测定方法
GB 13267—91	水质 物质对淡水鱼(斑马鱼)急性毒性测定方法
GB/T 13896—92	水质 铅的测定 示波极谱法
GB/T 13897—92	水质 硫氰酸盐的测定 原子吸收分光光度法
GB/T 13898—92	水质 铁(Ⅱ、Ⅲ)络合物的测定 原子吸收分光光度法
GB/T 13899—92	水质 铁(Ⅱ、Ⅲ)络合物的测定 三氯化铁分光光度法
GB/T 13900—92	水质 黑索金的测定 分光光度法
GB/T 13901—92	水质 二硝基甲苯的测定 示波极谱法
GB/T 13902—92	水质 硝化甘油的测定 示波极谱法
GB/T 13903—92	水质 梯恩梯的测定 分光光度法
GB/T 13904—92	水质 梯恩梯、黑索金、地恩梯的测定 气相色谱法
GB/T 13905—92	水质 梯恩梯的测定 亚硫酸钠分光光度法
GB/T 14204—93	水质 烷基汞的测定 气相色谱法
GB/T 14375—93	水质 一甲基肼的测定 对二甲氨基苯甲醛分光光度法

续表

标 准 号	标 准 名 称
GB/T 14376—93	水质 偏二甲基肼的测定 氨基亚铁氰化钠分光光度法
GB/T 14377 93	水质 三乙胺的测定 溴酚蓝分光光度法
GB/T 14378 93	水质 二乙烯二胺的测定 水杨醛分光光度法
GB/T 14671—93	水质 钡的测定 电位滴定法
GB/T 14672—93	水质 吡啶的测定 气相色谱法
GB/T 14673—93	水质 钒的测定 石墨炉原子吸收分光光度法
GB/T 15503—95	水质 钒的测定 钽试剂(BPHA)萃取分光光度法
GB/T 15504—95	水质 二硫化碳的测定 二乙胺四乙酸铜分光光度法
GB/T 15505—95	水质 硒的测定 石墨炉原子吸收分光光度法
GB/T 15506—95	水质 钡的测定 原子吸收分光光度法
GB/T 15507—95	水质 肼的测定 对二甲氨基苯甲醛分光光度法

4.4.2 锅炉用水和冷却水分析方法国家标准[58]

标 准 号	标 准 名 称
GB 6903—86	锅炉用水和冷却水分析方法 通则
GB 6904.1—86	锅炉用水和冷却水分析方法 pH 的测定 玻璃电极法
GB 6904.2—86	锅炉用水和冷却水分析方法 pH 的测定 比色法
GB 6905.1—86	锅炉用水和冷却水分析方法 氯化物的测定 摩尔法
GB 6905.2—86	锅炉用水和冷却水分析方法 氯化物的测定 电位滴定法
GB 6905.3- 86	锅炉用水和冷却水分析方法 氯化物的测定 汞盐滴定法
GB 6906—86	锅炉用水和冷却水分析方法 联氨的测定
GB 6907—86	锅炉用水和冷却水分析方法 水样的采集方法
GB 6908—86	锅炉用水和冷却水分析方法 电导率的测定

续表

标准号	标准名称
GB 6909.1—86	锅炉用水和冷却水分析方法 硬度的测定 高硬度
GB 6909.2 86	锅炉用水和冷却水分析方法 硬度的测定 低硬度
GB 6910—86	锅炉用水和冷却水分析方法 钙的测定 络合滴定法
GB 6911.1—86	锅炉用水和冷却水分析方法 硫酸盐的测定 重量法
GB 6911.2—86	锅炉用水和冷却水分析方法 硫酸盐的测定 铬酸钡光度法
GB 6911.3—86	锅炉用水和冷却水分析方法 硫酸盐的测定 电位滴定法
GB 6912.1—86	锅炉用水和冷却水分析方法 硝酸盐和亚硝酸盐的测定 硝酸盐紫外光度法
GB 6912.2—86	锅炉用水和冷却水分析方法 硝酸盐和亚硝酸盐的测定 亚硝酸盐紫外光度法
GB 6912.3—86	锅炉用水和冷却水分析方法 硝酸盐和亚硝酸盐的测定 α-萘胺盐酸盐光度法
GB 6913.1—86	锅炉用水和冷却水分析方法 磷酸盐的测定 正磷酸盐
GB 6913.2 -86	锅炉用水和冷却水分析方法 磷酸盐的测定 总无机磷酸盐
GB 6913.3—86	锅炉用水和冷却水分析方法 磷酸盐的测定 总磷酸盐
GB/T 10538—89	锅炉用水和冷却水分析方法 季铵盐的测定 二氯甲烷萃取分光光度法
GB/T 10539—89	锅炉用水和冷却水分析方法 钾离子的测定 火焰光度法
GB 12146—89	锅炉用水和冷却水分析方法 氨的测定 苯酚法
GB 12147 -89	锅炉用水和冷却水分析方法 纯水电导率的测定
GB 12148—89	锅炉用水和冷却水分析方法 全硅的测定 低含量硅氢氟酸转化法
GB 12149—89	锅炉用水和冷却水分析方法 硅的测定 钼蓝比色法
GB 12150—89	锅炉用水和冷却水分析方法 硅的测定 硅钼蓝光度法
GB 12151—89	锅炉用水和冷却水分析方法 浊度的测定(福马肼浊度)

续表

标准号	标准名称
GB 12152—89	锅炉用水和冷却水分析方法 油的测定 红外光度法
GB 12153—89	锅炉用水和冷却水分析方法 油的测定 紫外分光光度法
GB 12154—89	锅炉用水和冷却水分析方法 全铝的测定
GB 12155—89	锅炉用水和冷却水分析方法 钠的测定 动态法
GB 12156—89	锅炉用水和冷却水分析方法 钠的测定 静态法
GB 12157—89	锅炉用水和冷却水分析方法 溶解氧的测定 内电解法
GB 14415—93	锅炉用水和冷却水分析方法 固体物质的测定
GB 14417—93	锅炉用水和冷却水分析方法 全硅的测定
GB 14418—93	锅炉用水和冷却水分析方法 铜的测定
GB 14419—93	锅炉用水和冷却水分析方法 碱度的测定
GB 14420—93	锅炉用水和冷却水分析方法 化学耗氧量的测定 重铬酸钾快速法
GB 14421—93	锅炉用水和冷却水分析方法 聚丙烯酸的测定 比浊法
GB 14422—93	锅炉用水和冷却水分析方法 苯并三氮唑的测定 紫外分光光度法
GB 14423—93	锅炉用水和冷却水分析方法 2-硫基苯骈噻唑的测定 紫外分光光度法
GB 14424—93	锅炉用水和冷却水分析方法 余氯的测定
GB 14425—93	锅炉用水和冷却水分析方法 硫化氢的测定 分光光度法
GB 14426—93	锅炉用水和冷却水分析方法 亚硫酸盐的测定
GB 14427—93	锅炉用水和冷却水分析方法 铁的测定

4.4.3 工业循环冷却水分析及试验方法国家标准[28,73]

标准号	标准名称
GB/T 13689—92	工业循环冷却水中铜的测定 二乙基二硫代氨基甲酸钠分光光度法
GB/T 14630—93	工业循环冷却水中钙含量的测定 原子吸收光谱法
GB/T 14637.1—93	工业循环冷却水中锌含量的测定 原子吸收光谱法
GB/T 14637.2—93	工业循环冷却水水垢中锌含量的测定 原子吸收光谱法
GB/T 14638.1—93	工业循环冷却水中铜含量的测定 原子吸收光谱法

续表

标准号	标准名称
GB/T 14638.2—93	工业循环冷却水水垢中铜含量的测定　原子吸收光谱法
GB/T 14639—93	工业循环冷却水中镁含量的测定　原子吸收光谱法
GB/T 14640—93	工业循环冷却水中钾含量的测定　原子吸收光谱法
GB/T 14641-93	工业循环冷却水中钠含量的测定　原子吸收光谱法
GB/T 14642—93	工业循环冷却水及锅炉水中氟、氯、磷酸根、亚硝酸根、硝酸根和硫酸根的测定　离子色谱法
GB/T 14643.1—93	工业循环冷却水中黏液形成菌的测定　平皿计数法
GB/T 14643.2—93	工业循环冷却水中土壤菌群的测定　平皿计数法
GB/T 14643.3—93	工业循环冷却水中黏泥真菌的测定　平皿计数法
GB/T 14643.4—93	工业循环冷却水中土壤真菌的测定　平皿计数法
GB/T 14643.5—93	工业循环冷却水中硫酸盐还原菌的测定　MPN 法
GB/T 14643.6—93	工业循环冷却水中铁细菌的测定　MPN 法
GB/T 15451—1995（代 HG 5—1502—85）	工业循环冷却水中碱度的测定
GB/T 15452—1995（代 HG 5—1506—85 及 HG 5—1507—85）	工业循环冷却水中钙、镁离子的测定　EDTA 滴定法
GB/T 15453—1995（代 HG 5—1505—85）	工业循环冷却水中氯离子的测定　硝酸银滴定法
GB/T 15454-1995	工业循环冷却水中钠、铵、钾、镁和钙离子的测定　离子色谱法
GB/T 15455—1995	工业循环冷却水中溶解氧的测定　碘量法
GB/T 15456—1995	工业循环冷却水中需氧量(COD)的测定　高锰酸钾法
GB/T 15893.1—1995（代 HG 5—1503—85）	工业循环冷却水中浊度的测定　散射光法
GB/T 15893.2—1995（代 HG 5—1501—85）	工业循环冷却水中 pH 值的测定　电位法
GB/T 15893.3—1995（代 HG 5—1594—85）	工业循环冷却水中硫酸盐的测定　重量法
GB/T 15893.4—1995（代 HG 5—1504—85）	工业循环冷却水中溶解性固体的测定　重量法
GB/T 16632—1996	水处理剂阻垢性能测定　碳酸钙沉积法
GB/T 16633—1996	工业循环冷却水中二氧化硅含量的测定　分光光度法
GB/T 166634—1996	工业循环冷却水用磷锌预膜液中锌含量的测定　原子吸收光谱法
GB/T 16635—1996	工业循环冷却水用磷锌预膜液中钙含量的测定　原子吸收光谱法
GB/T 16881—1997	水的混凝、絮凝杯罐试验方法
GB/T 18175—2000	水处理剂　缓蚀性能的测定　旋转挂片法

4.4.4 电子级水质分析方法国家标准[58]

标准号	标准名称
GB 11446.3 —89	电子级水检测方法通则
GB 11446.4 —89	电子级水电阻率的测试方法
GB 11446.5—89	电子级水中痕量金属的原子吸收分光光度测试方法
GB 11446.6 —89	电子级水中痕量二氧化硅的分光光度测试方法
GB 11446.7—89	电子级水中痕量氯离子的离子色谱测试方法
GB 11446.8 —89	电子级水中总有机碳的测试方法
GB 11446.9 · 89	电子级水中微粒的仪器测试方法
GB 11446.10—89	电子级水中细菌总数的滤膜培养测试方法
GB 11446.11—89	电子级水中细菌总数的平皿培养测试方法

4.4.5 饮用天然矿泉水水质分析方法国家标准[58]

标准号	标准名称
GB 8538.1 87	饮用天然矿泉水分析总则
GB 8538.2—87	饮用天然矿泉水水样的采集和保存
GB 8538.3—87	饮用天然矿泉水色的测定方法
GB 8538.4—87	饮用天然矿泉水臭和味的测定方法
GB 8538.5—87	饮用天然矿泉水中肉眼可见物的测定方法
GB 8538.6—87	饮用天然矿泉水浑浊度的测定方法
GB 8538.7—87	饮用天然矿泉水 pH 值的测定方法
GB 8538.8—87	饮用天然矿泉水中矿化度测定方法
GB 8538.9—87	饮用天然矿泉水中总硬度的测定方法
GB 8538.10—87	饮用天然矿泉水中碱度的测定方法
GB 8538.11—87	饮用天然矿泉水中酸度的测定方法
GB 8538.12—87	饮用天然矿泉水中钾和钠的测定方法
GB 8538.13—87	饮用天然矿泉水中钙的测定方法
GB 8538.14 -87	饮用天然矿泉水中镁的测定方法
GB 8538.15—87	饮用天然矿泉水中铁的测定方法
GB 8538.16—87	饮用天然矿泉水中锰的测定方法
GB 8538.17 -87	饮用天然矿泉水中铜的测定方法
GB 8538.18—87	饮用天然矿泉水中锌的测定方法
GB 8538.19 —87	饮用天然矿泉水中铬的测定方法
GB 8538.20—87	饮用天然矿泉水中铅的测定方法
GB 8538.21--87	饮用天然矿泉水中镉的测定方法
GB 8538.22—87	饮用天然矿泉水中汞的测定方法
GB 8538.23 -87	饮用天然矿泉水中银的测定方法
GB 8538.24—87	饮用天然矿泉水中锶的测定方法
GB 8538.25—87	饮用天然矿泉水中锂的测定方法

续表

标 准 号	标 准 名 称
GB 8538.26 -87	饮用天然矿泉水中锶的测定方法
GB 8538.27 -87	饮用天然矿泉水中钒的测定方法
GB 8538.28—87	饮用天然矿泉水中钼的测定方法
GB 8538.29—87	饮用天然矿泉水中钴的测定方法
GB 8538.30 -87	饮用天然矿泉水中镍的测定方法
GB 8538.31 -87	饮用天然矿泉水中铝的测定方法
GB 8538.32—87	饮用天然矿泉水中铍的测定方法
GB 8538.33—87	饮用天然矿泉水中砷的测定方法
GB 8538.34—87	饮用天然矿泉水中硼的测定方法
GB 8538.35—87	饮用天然矿泉水中硒的测定方法
GB 8538.36—87	饮用天然矿泉水中氟化物的测定方法
GB 8538.37 -87	饮用天然矿泉水中氯化物的测定方法
GB 8538.38—87	饮用天然矿泉水中溴化物的测定方法
GB 8538.39 -87	饮用天然矿泉水中碘化物的测定方法
GB 8538.40—87	饮用天然矿泉水中氨氮的测定方法
GB 8538.41 -87	饮用天然矿泉水中硫化物的测定
GB 8538.42 -87	饮用天然矿泉水中硝酸盐氮的测定方法
GB 8538.43—87	饮用天然矿泉水中亚硝酸盐氮的测定方法
GB 8538.44—87	饮用天然矿泉水中碳酸盐和重碳酸盐的测定方法
GB 8538.45—87	饮用天然矿泉水中硫酸盐的测定方法
GB 8538.46—87	饮用天然矿泉水中磷酸盐的测定方法
GB 8538.47—87	饮用天然矿泉水中二氧化硅的测定方法
GB 8538.48 -87	饮用天然矿泉水中游离二氧化碳的测定方法
GB 8538.49—87	饮用天然矿泉水中气体的测定方法
GB 8538.50—87	饮用天然矿泉水中耗氧量的测定方法
GB 8538.51 -87	饮用天然矿泉水中氰化物的测定方法
GB 8538.52—87	饮用天然矿泉水中挥发酚类的测定方法
GB 8538.53—87	饮用天然矿泉水中六六六的测定方法
GB 8538.54 -87	饮用天然矿泉水中阴离子合成洗涤剂的测定方法
GB 8538.55—87	饮用天然矿泉水中苯并[a]芘的测定方法
GB 8538.56—87	饮用天然矿泉水中总α放射性的测定方法
GB 8538.57—87	饮用天然矿泉水中总β放射性的测定方法
GB 8538.58 -87	饮用天然矿泉水中氡的测定方法
GB 8538.59 -87	饮用天然矿泉水中镭的测定方法
GB 8538.60—87	饮用天然矿泉水中氚的测定方法
GB 8538.61—87	饮用天然矿泉水中细菌总数的测定方法
GB 8538.62 -87	饮用天然矿泉水中总大肠菌群的测定方法
GB 8538.63 -87	饮用天然矿泉水中粪大肠菌群的测定方法

4.4.6 活性炭及离子交换树脂测定方法国家标准

标准号	标准名称
GB 5475—85	离子交换树脂取样方法
GB/T 5476- 1996 (代 GB 5476—85)	离子交换树脂预处理方法
GB 5757 -86	离子交换树脂含水量测定方法
GB 5758—86	离子交换树脂粒度分布测定方法
GB 5759—86	氢氧型阴离子交换树脂含水量测定方法
GB 5760—86	阴离子交换树脂交换容量测定方法
GB 7702.1--1997	煤质颗粒活性炭水分测定方法
GB 7702.2—1997	煤质颗粒活性炭粒度测定方法
GB 7702.3—1997	煤质颗粒活性炭强度测定方法
GB 7702.4—1997	煤质颗粒活性炭装填密度测定方法
GB 7702.5—1997	煤质颗粒活性炭水容量测定方法
GB 7702.6—1997	煤质颗粒活性炭亚甲蓝吸收值测定方法
GB 7702.7 1997	煤质颗粒活性炭碘吸附值测定方法
GB 7702.8—1997	煤质颗粒活性炭苯酚吸附值测定方法
GB 7702.9—1997	煤质颗粒活性炭着火点测定方法
GB 7702.10—1997	煤质颗粒活性炭有效防护时间测定方法
GB 7702.11- 1997	煤质颗粒活性炭对苯蒸气防护时间测定方法
GB 7702.12—1997	煤质颗粒活性炭对氯乙烷蒸汽吸附率测定方法
GB 7702.13—1997	煤质颗粒活性炭四氯化碳蒸汽吸附率测定方法
GB 7702.14—1997	煤质颗粒活性炭硫容量测定方法
GB 8144—87	阳离子交换树脂交换容量测定方法
GB 8330—87	离子交换树脂湿真密度测定方法
GB 8331—87	离子交换树脂湿视密度测定方法
GB 11991—89	离子交换树脂转型膨胀率测定方法
GB 11992—89	氯型强碱性阴离子交换树脂质量交换容量、中性盐分解容量测定方法
GB/T 12598—90	离子交换树脂强度测定方法 渗磨法

4.4.7 工业循环冷却水水质、污垢、缓蚀阻垢剂的分析测定方法行业标准[73]

标准号	标准名称
HG/T 2022—91 (代 HG 5—1598—85)	工业循环冷却水中游离氯和总氯的测定 *N*,*N*-二乙基-1,4-苯二胺滴定法
HG/T 2023 -91 (代 HG 5—1598—85)	工业循环冷却水中游离氯和总氯的测定 *N*,*N*-二乙基-1,4-苯二胺分光光度法
HG/T 2024—91	水处理药剂阻垢性能测定方法 鼓泡法

续表

标准号	标准名称
HG/T 2156—91	工业循环冷却水中阴离子表面活性剂的测定 亚甲蓝分光光度法
HG/T 2157—91 (代 HG 5—1510—85)	工业循环冷却水中铵的测定 电位法
HG/T 2158—91 (代 HG 5—1510—85)	工业循环冷却水中铵的测定 蒸馏和滴定法
HG/T 2160—91	冷却水动态模拟试验方法
HG/T 2162—1996	水处理剂产品分类和命名
HG/T 3516—1999 (代 HG 5-1595-85)	工业循环冷却水中硝酸盐的测定 2,6 二甲基苯酚分光光度法
HG/T 3517—85 (代 HG 5-1516--85)	工业循环冷却水中二氯酚(DDM)残留量测定方法
HG/T 3518—85 (代 HG 5—1518—85)	工业循环冷却水中巯基苯并噻唑测定方法
HG/T 3519—85 (代 HG 5-1519--85)	工业循环冷却水中苯并三氮唑测定方法
HG/T 3520—2000 (代 HG 3520—85)	工业循环冷却水中磷锌预膜液中钙离子测定方法
HG/T 3521—85 (代 HG 5—1524—85)	工业循环冷却水磷系复合抑制剂中乙二胺四甲叉膦酸(EDTMPA)测定方法
HG/T 3522—85 (代 HG 5—1525—85)	工业循环冷却水磷系复合抑制剂中羟基乙叉二膦酸盐(HEDPA)测定方法
HG/T 3525—85 (代 HG 5—1593—85)	工业循环冷却水中铝离子测定方法
HG/T 3526—85 (代 HG 5 1509—85)	工业循环冷却水中亚硝酸根离子测定方法
HG/T 3527—85 (代 HG 5-1596--85)	工业循环冷却水中油含量测定方法
HG/T 3528—85 (代 HG 5—1597—85)	工业循环冷却水中微量聚丙烯酸和聚马来酸测定方法
HG/T 3530-85 (代 HG 5—1601—85)	工业循环冷却水污垢和腐蚀产物试样的调查、采取和制备
HG/T 3531—85 (代 HG 5-1602-85)	工业循环冷却水污垢和腐蚀产物中水分含量测定方法
HG/T 3532—85 (代 HG 5—1603—85)	工业循环冷却水污垢和腐蚀产物中硫化亚铁含量测定方法
HG/T 3533—85 (代 HG 5—1604—85)	工业循环冷却水污垢和腐蚀产物中灼烧失重测定方法
HG/T 3534--85 (代 HG 5-1605—85)	工业循环冷却水污垢和腐蚀产物中酸不溶物、磷、铁、铝、钙、镁、锌、铜含量测定方法
HG/T 3535—85 (代 HG 5-1606--85)	工业循环冷却水污垢和腐蚀产物中硫酸盐含量测定方法

续表

标 准 号	标 准 名 称
HG/T 3536—85 （代 HG 5—1607—85）	工业循环冷却水中污垢和腐蚀产物中二氧化碳含量测定方法
HG/T 3539—90 （代 ZB/T G 76001—90）	工业循环冷却水中铁含量的测定　邻菲啰啉分光光度法
HG/T 3540—90 （代 ZB/T G 76002—90）	工业循环冷却水中磷含量的测定　钼酸铵分光光度法
HG/T 3609—2000 （代 HG/T 3524—85 及 HG 5—1592—85）	工业循环冷却水水质分析方法规则
HG/T 3610—2000 （代 HG/T 3529—85 及 HG 5—1600—85）	工业循环冷却水污垢和腐蚀产物分析方法规则
HG 5—1513—85	工业循环冷却水中正磷酸盐测定方法
HG 5—1514—85	工业循环冷却水中总无机磷酸盐测定方法
HG 5—1515—85	工业循环冷却水中总磷酸盐测定方法
HG 5—1520—85	工业循环冷却水中化学耗氧量测定方法
HG 5—1522—85	工业循环冷却水中磷锌预膜液中锌离子测定方法
HG 5—1523—85	工业循环冷却水中磷锌预膜液中铁离子测定方法
SD 164—85	火力发电厂排水水质分析方法

附录5　单位及单位换算

5.1　中华人民共和国法定计量单位，GB 3100—93

我国的法定计量单位包括5.1.1至5.1.6表中的单位。

5.1.1　国际单位制的基本单位

量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克(公斤)	kg
时间	秒	s
电流	安[培]	A
热力学温度	开[尔文]	K
物质的量	摩[尔]	mol
发光强度	坎[德拉]	cd

5.1.2 国际单位制的辅助单位

量的名称	单位名称	单位符号
[平面]角	弧度	rad
立体角	球面角	sr

5.1.3 国际单位制中具有专门名称的导出单位

量的名称	单位名称	单位符号	其他表示示例
频率	赫[兹]	Hz	s^{-1}
力；重力	牛[顿]	N	$kg \cdot m/s^2$
压力、压强；应力	帕[斯卡]	Pa	N/m^2
能[量]；功；热	焦[耳]	J	$N \cdot m$
功率；辐射通量	瓦[特]	W	J/s
电荷[量]	库[仑]	C	$A \cdot s$
电位；电压；电动势	伏[特]	V	W/A
电容	法[拉]	F	C/V
电阻	欧[姆]	Ω	V/A
电导	西[门子]	S	A/V
磁通[量]	韦[伯]	Wb	$V \cdot s$
磁通[量]密度；磁感应强度	特[斯拉]	T	Wb/m^2
电感	亨[利]	H	Wb/A
摄氏温度	摄氏度	℃	
光通量	流[明]	lm	$cd \cdot sr$
[光]照度	勒[克斯]	lx	lm/m^2
[放射性]活度	贝可[勒尔]	Bq	s^{-1}
吸收剂量	戈[瑞]	Gy	J/kg
剂量当量	希[沃特]	Sv	J/kg

5.1.4 国家选定的非国际单位制单位

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系和说明
时间	分 [小]时 日(天)	min h d	1min=60s 1h=60min=3600s 1d=24h=86400s
[平面]角	[角]秒 [角]分 度	(″) (′) (°)	1″=(π/648000)rad (π为圆周率) 1′=60″=(π/10800)rad 1°=60′=(π/180)rad
旋转速度	转每分	r/min	1r/min=(1/60)s
长度	海里	n mile	1n mile=1852m(只用于航程)
速度	节	kn	1kn=1n mile/h =(1852/3600)m/s(只限于航行)
质量	吨 原子质量单位	t u	$1t=10^3kg$ $1u\approx1.6605655\times10^{-27}kg$
体积	升	L(l)	$1L=1dm^3$ $=10^{-3}m^3$
能	电子伏	eV	$1eV\approx1.6021892\times10^{-19}J$
级差	分贝	dB	
线密度	特[克斯]	tex	1tex=1g/km

5.1.5 用专门名称表示的国际单位制的导出单位

量的名称	单位名称	单位符号	基本单位表示式
黏度	帕秒	Pa·s	kg/(m·s)
力矩	牛米	N·m	$kg\cdot m^2/s^2$
表面张力	牛每米	N/m	kg/s^2
热流密度、辐照度	瓦每平方米	W/m^2	kg/s^2
热容、熵	焦每开	J/K	$kg\cdot m^2/(s^2\cdot K)$
比热容、比熵	焦每千克开	J/(kg·K)	$m^2/(s^2\cdot K)$
比能	焦每千克	J/kg	m^2/s^2
热导率	瓦每米开	W/(m·K)	$kg\cdot m(s^4\cdot K)$
能密度	焦每立方米	J/m^3	$kg/(m\cdot s^2)$
电场强度	伏每米	V/m	$kg\cdot m/(s^3\cdot A)$
电荷体密度	库每立方米	C/m^3	$A\cdot s/m^3$

续表

量的名称	单位名称	单位符号	基本单位表示式
电位移	库每平方米	C/m^2	$A \cdot s/m^2$
电容率	法每米	F/m	$A^2 \cdot s^4/(kg \cdot m^3)$
磁导率	亨每米	H/m	$kg \cdot m/(s^2 \cdot A^2)$
摩尔能	焦每摩	J/mol	$kg \cdot m^2/(s^2 \cdot mol)$
摩尔熵、摩尔热容	焦每摩开	$J/(mol \cdot K)$	$kg \cdot m^2/(s^2 \cdot mol \cdot K)$
电阻率	欧米	$\Omega \cdot m$	$kg \cdot m^3/(s^3 \cdot A^2)$
电导率	西每米	S/m	$s^3 \cdot A^2/(kg \cdot m^3)$

5.1.6 用于构成十进倍数和分数单位的词头

所表示的因数	词头名称	词头符号	所表示的因数	词头名称	词头符号
10^{18}	艾[可萨]	E	10^{-1}	分	d
10^{15}	拍[它]	P	10^{-2}	厘	c
10^{12}	太[拉]	T	10^{-3}	毫	m
10^{9}	吉[咖]	G	10^{-6}	微	μ
10^{6}	兆	M	10^{-9}	纳[诺]	n
10^{3}	千	k	10^{-12}	皮[可]	p
10^{2}	百	h	10^{-15}	飞[母托]	f
10^{1}	十	da	10^{-18}	阿[托]	a

注：1. 周、月、年（年的符号为 a），为一般常用时间单位。

2. [ ] 内的字，是在不致混淆的情况下，可以省略的字。

3. ( ) 内的字为前者的同义语。

4 角度单位度分秒的符号不处于数字后时，用括弧。

5. 升的符号中，小写字母 l 为备用符号。

6. r 为“转”的符号。

7. 人民生活和贸易中，质量习惯称为重量。

8. 公里为千米的俗称，符号为 km。

9. 10^4 称为万，10^8 称为亿，10^{12} 称为万亿，这类数词的使用不受词头名称的影响，但不应与词头混淆。

5.2 常用计量单位与国际计量单位换算汇总表

国际计量单位				非国际单位与国际单位的换算关系	
计量名称	单位名称	单位符号	基本单位表示式	公制的换算	英制的换算
温度	开[尔文]	K	K	K＝℃(摄氏度)＋273.15	°F(华氏度)＝(℃×$\frac{9}{5}$)＋32 ℃＝(°F－32)×$\frac{5}{9}$ °R(兰氏度)＝°F＋459.67
长度	米	m	m	1m＝10dm(分米)＝100cm(厘米) ＝10^3mm(毫米)＝10^6μm(微米) ＝10^9nm(纳米)＝10^{10}Å 1km(千米,公里)＝10^3m	1yd(码)＝3ft＝0.9144m 1ft(英尺)＝12in＝0.3048m 1in(英寸)＝0.0254m＝25.4mm 1mile(英里)＝1760yd＝1609.3m
面积	平方米	m^2	m^2	$1m^2-10^2dm^2-10^4cm^2-10^6mm$ $1km^2=10^6m^2=10^2$ha(公顷)＝1500市亩	$1ft^2=144in^2=0.092903m^2$ $1in^2=6.4516\times10^{-4}m^2=6.4516cm^2$ 1acre(英亩)＝4046.9m^2＝0.40469ha
体积,容积	立方米	m^3	m^3	$1m^3=10^3$L(升,cm^3)＝10^6cm^3(mL,cc)	$1ft^3=1728in^3=0.0283168m^3$ ＝28.3168L $1yd^3=27ft^3=0.76455m^3$ $1m^3$＝220.0UKgal(英加仑) ＝264.18USgal(美加仑) ＝6.2899 bbl(美石油桶) ＝6.285 bbl(英石油桶)

续表

国际计量单位				非国际单位与国际单位的换算关系	
计量名称	单位名称	单位符号	基本单位表示式	公制的换算	英制的换算
质量	千克（公斤）	kg	kg	1kg=10^3g=10^6mg（毫克） 1t（吨）=10^3kg 1g（克）=10^3mg=10^6μg（微克）	1lb（磅）=16oz（英两，盎司） =0.4536kg 1t=0.9842 长吨（tn，英） =1.1023 短吨（美）
密度	千克每立方米	kg/m^3	kg/m^3	1kg/m^3=1g/L=10^{-3}g/cm^3 =10^{-3}g/mL=10^{-3}t/m^3	1lb/ft^3=0.0160185g/cm^3 =16.0185kg/m^3 1lb/in^3=27.680g/cm^3 =2.7680×10^4kg/m^3
比容	立方米每千克	m^3/kg	m^3/kg	1m^3/kg=1L/g=10^3L/kg =10^3cm^3/g	1ft^3/lb=0.062428m^3/kg =62.428cm^3/g
质量流率	千克每秒	kg/s	kg/s	1kg/s=3600kg/h=3.6t/h=86.4t/d	1lb/s=3600lb/h=0.4536kg/s =1.6329t/h=39.1896t/d
体积流率	立方米每秒	m^3/s	m^3/s	1m^3/s=60m^3/min=3600m^3/h =10^3L/s=6×10^4L/min	1ft^3/s=60ft^3/min=3600ft^3/h =0.0283168m^3/s 1m^3/s=220.0UKgal/s=264.18USgal/s
速度	米每秒	m/s	m/s	1m/s=60m/min=3600m/h=3.6km/h	1ft/s=60ft/min=3600ft/h =0.68182mile/h=0.3048m/s
加速度	秒每2次方秒	m/s^2	m/s^2	1m/s^2=100cm/s^2（伽，Gal）	1ft/s^2=0.3048m/s^2
力，重力	牛[顿]	N	kg·m/s^2	1kgf（千克力）=10^3gf（克力）=9.80665N 1dyn（达因）=10^{-5}N	1 长吨（英）=2240lbf=9.964×10^3N 1 短吨（美）=2000lb=8.8965×10^3N 1lbf（磅力）=0.4536kgf=4.44827N 1pdl（磅达，lb·ft/s^2）=0.138255N

续表

国际计量单位				非国际单位与国际单位的换算关系	
计量名称	单位名称	单位符号	基本单位表示式	公制的换算	英制的换算
能[量]，功，热	焦[耳]	J(N·m)，(W·s)	$kg \cdot m^2/s^2$	1kcal(千卡)=10^3cal(卡)=4.1868×10^3J 1kW·h(千瓦·时)=3.6×10^6J=3.6MJ(兆焦)	1BTU(英热单位)=0.252kcal=1055.1J 1Hp·h(英，马力·时)=0.7457kW·h =2.6840×10^6J
功率	瓦[特]	W(J/s)	$kg \cdot m^2/s^3$	1W=0.8598kcal/h=0.10197kgf·m/s =10^7erg/s 1Hp(米制马力)=75kgf·m/s=735.499W	1BTU/min=60BTU/h=17.585W 1Hp(英制马力)=550lbf·ft/s=745.7W
压力，压强，应力	帕[斯卡]	Pa (N/m^2)	$kg/(s^2 \cdot m)$	1atm(标准大气压)=760.0mmHg=101325Pa =0.101325MPa(兆帕) 1kgf/cm²(工程大气压)=98066.5Pa 1mmHg(托，Torr)=133.322 Pa 1mmH_2O(毫米水柱)=9.80665 Pa 1dyn/cm²(μbar)=0.1Pa	1lbf/in²(psi)=144lbf/ft² =0.070307kgf/cm² =6894.8Pa 1kgf/cm²=14.223lbf/in² 1inH_2O=25.4mmH_2O=249.08Pa
表面张力	牛[顿]每米	N/m (J/m^2)	kg/s^2	1kgf/m=10gf/cm=9.80665N/m 1dyn/cm=10^{-3}N/m	1lbf/ft=1.488kgf/m=14.594N/m
热容，熵	焦[耳]每开[尔文]	J/K	$kg \cdot m^2/(s^2 \cdot K)$	1kcal/℃=10^3cal/℃=4186.8J/K 1J/K=0.23885cal/℃	1BTU/°F=0.4536kcal/℃ =1899.1J/K
比热容，比熵	焦[耳]每千克开[尔文]	J/(kg·K)	$m^2/(s^2 \cdot K)$	1kcal/(kg·℃)=4186.8 J/(kg·K) =4.1868J/(g·K)	1BTU/(lb·°F)=1kcal/(kg·℃) =4186.8J/(kg·K)
比能	焦[耳]每千克	J/kg	m^2/s^2	1kcal/kg=4186.8J/kg=4.1868J/g 1kgf·m/kg=9.80665J/kg	1BTU/lb=778.16ft·lbf/lb =2326.0J/kg

续表

国际计量单位				非国际单位与国际单位的换算关系	
计量名称	单位名称	单位符号	基本单位表示式	公制的换算	英制的换算
[动力]黏度	帕[斯卡]秒	Pa·s	kg/(m·s)	1g/(cm·s)(P,泊)=100cP(厘泊)= 1dyn·s/cm²=0.0102kg·s/m²=0.1Pa·s 1cP=1mPa·s	1lb/(ft·s)=3600lb/(ft·h) =0.03108lb·s/ft² =1.4882Pa·s
运动黏度	平方米每秒	m²/s	m²/s	1cm²/s(沲,St)=100cm²/100s(厘沲,cst) =0.36m²/h=10⁻⁴m²/s 运动黏度(m²/s)×密度(kg/m³) =[动力]黏度 Pa·s	1ft²/s=3600ft²/h=0.092903m²/s
热导率	瓦[特]每米开[尔文]	W/(m·K)	kg·m/(s³·K)	1kcal/(cm·h·℃)=100kcal/(m·h·℃) =116.30W/(m·K) 1kcal/(m·s·℃)=3600kcal/(m·h·℃) =4186.8W/(m·K)	1BTU/(in·s·°F)=3600BTU/(in·h·°F) =12BTU/(ft·s·°F) =7.4769×10⁴W/(m·K) 1BTU/(ft·h·°F)=1.73076W/(m·K)
传热系数	瓦[特]每平方米开[尔文]	W/(m²·K)	kg/(s³·K)	1kcal/(m²·h·℃)=1.1630W/(m²·K) 1kcal/(m²·s·℃)=4186.8W/(m²·K)	1BTU/(ft²·s·°F)=3600BTU/(ft²·h·°F) =2.0442×10⁴W/(m²·K)
热流密度	瓦[特]每平方米	W/m²	kg/s²	1kcal/(m²·h)=1.1630W/m² 1kcal/(m²·s)=4186.8W/m²	1BTU/(ft²·s)=3600BTU/(ft²·h) =1.1357×10⁴W/m²
污垢热阻	平方米开[尔文]每瓦	m²·K/W	s³·K/kg	1m²·h·℃/kcal=0.8598m²·K/W 1m²·s·℃/kcal=0.2388m²·K/kW	1ft²·h·°F/BTU=3600ft²·s·°F/BTU =0.1761m²·K/W
电导率	西[门子]每米	S/m	s³·A²/(kg·m³)	1Ω/m(姆欧/米)=1/Ω·m=1S/m=0.01S/cm	

主要参考文献

1 汤鸿霄著. 用水废水化学基础. 北京：中国建筑工业出版社，1979

2 Water and Waste Treatment Data Book. The Permutit Company Inc，1961

3 Drew Principles of Industrial Water Treatment. Drew Chemical Corporation，1979

4 徐寿昌等编. 工业冷却水处理技术. 北京：化学工业出版社，1984

5 纪芳田，包义华编. 循环冷却水处理基础知识. 北京：化学工业出版社，1986

6 龙荷云编著. 循环冷却水处理. 南京：江苏科学技术出版社，1984

7 龙荷云编著. 循环冷却水处理. 南京：江苏科学技术出版社，1991

8 金传良，郑连生编. 水质技术工作手册. 北京：能源出版社，1989

9 水电部西安热工研究所编. 高、中压锅炉的水汽质量管理. 1987（内部教材）

10 魏宝明主编. 金属腐蚀理论及应用. 北京：化学工业出版社，1984

11 南京大学生物系曾昭琪主编. 菌藻集刊，1983～1985 年各期（内部交流）

12 石油化工给排水设计建设组编. 石油化工设计给排水. 设计参考资料 13，1977

13 杨东方，陈洁编. 低压锅炉水处理技术问答. 北京：中国建筑工业出版社，1983

14 姚继贤主编. 工业锅炉水处理及水质分析. 北京：劳动人事出版社，1987

15 许京骐，陈培康主编. 给水排水新技术. 北京：中国建筑工业出版社，1989

16 武汉水利电力学院电厂化学教研室编. 锅炉的化学清洗与停炉保护. 1983（内部教材）

17 石化部化工设计院主编. 氮肥工艺设计手册. 理化数据分册. 北京：石油化学工业出版社，1977

18 武汉水利电力学院肖作善编. 高压汽包锅炉的炉水处理. 1983（内部教材）

19 蔡宏道主编. 环境污染与卫生监测. 北京：人民卫生出版社，1981

20 化学工业部节能计量办公室编. 化工常用计量单位手册. 1987

21 钱庭宝，刘维林编. 离子交换树脂应用手册. 天津：南开大学出版社，1989

22 渠田工业水处理药剂手册编委会编. 卓振环译. 包文濂等校. 水处理药剂手册. 北京：中国石油出版社，1991

23 吉林图书馆编译. 北京市环境保护科学研究所审校. 国外环境标准选编. 北京：中国标准出版社，1984

24 顾夏声，黄铭荣，王占生等编著. 水处理工程. 北京：清华大学出版社，1985

25 四川省五局编写组. 工业锅炉安全运行基本知识. 北京：国防工业出版社，1981

26 许保玖编著. 当代给水与废水处理原理讲义. 北京：清华大学出版社，1983

27 卡登爱尔，卡尔普等著. 张亚杰等译. 水的净化新概念. 北京：中国建筑工业出版社，1982

28 井出哲夫等编著. 张自杰等译. 水处理工程理论与应用. 北京：中国建筑工业出版社，1986

29 北京天龙水处理技术公司编. 工业水处理实用手册（上）. 1991
30 化学工业部工业水处理科技情报中心站水处理商品手册编辑组. 水处理商品手册. 1984
31 夏青，张旭辉主编. 水质标准手册. 北京：中国环境科学出版社，1990
32 宋珊卿等编. 动力设备水处理手册. 北京：水利电力出版社，1988
33 净水技术，2(1986)，2(1988)，3(1988)，1(1995)，2(1999)
34 工业水处理. 1(1981)，4(1984)，5(1985)，1(1987)，5(1990)，3(1991)，6(1991)，2(1992)
35 大氮肥. 1(1981)；6(1985)；5(1986)
36 中国石化总公司工业水技术中心编. 水稳技术培训班讲义. 第四章. 1987（内部教材）
37 C.E. 汉密尔顿主编. 美国材料和检验学会（ASTM）水手册. 北京：化学工业出版社，1988
38 美国梅特卡夫和埃迪公司. 废水工程·处理、处置及回用（第二版）. 北京：化学工业出版社，1986
39 华东建筑工业设计院主编. 给水排水设计手册. 第四册. 北京：中国建筑工业出版社，1985
40 [美] 贝茨公司编. 秦裕珩等合译. 工业水处理手册. 北京：化学工业出版社，1982
41 [美] M.G. 方坦纳，N.D. 格林著. 左景伊译. 腐蚀工程. 北京：化学工业出版社，1982
42 王箴主编. 化工辞典. 北京：化学工业出版社，1992
43 [美] J.W. 麦科伊著. 麦玉笏等译. 冷却水的化学处理. 北京：化学工业出版社，1988
44 [美] 小沃尔特·J. 韦伯著. 上海市政工程设计院译. 水质控制物理化学方法. 北京：中国建筑工业出版社，1980
45 [日] 丰田环吉著. 吴自迈译. 工业用水及其水质管理. 北京：中国建筑工业出版社，1978
46 许保玖编. 给水处理. 北京：中国建筑工业出版社，1979
47 [法] 德格雷蒙公司编著. 工业俊等译. 水处理手册. 北京：中国建筑工业出版社，1983
48 国家标准目录. 北京：中国标准出版社，1989
49 国家、专业（部）标准和国际标准目录. 北京：化学工业部标准化研究所，1989
50 中国国家标准汇编. 北京：中国标准出版社，1993
51 武汉水利电力学院编. 热力发电厂水处理. 北京：水利电力出版社，1976
52 方子云主编. 水资源保护手册. 南京：河海大学出版社，1988
53 Geo. Clifford White. Handbook of Chlorination and Alteranative Disinfectants. Van Nostrand and Reinhard，1992

54 化工百科全书编辑委员会. 化工百科全书. 第二卷. 北京：化学工业出版社，1991
55 宋业林编. 化学水处理技术问答. 北京：中国石化出版社，1995
56 李伯涵，邓茂光，梁显荣编. 水处理技术300问. 四川：泸天化厂科研设计出版社，1991
57 周本省主编. 工业水处理技术. 北京：化学工业出版社，1997
58 何铁林主编. 水处理化学品手册. 北京：化学工业出版社，2000
59 深圳自来水公司主编. 澳门自来水有限公司协编. 国际饮用水水质标准汇编. 北京：中国建筑工业出版社，2001
60 王志文译. 工业冷却水微生物抑制论. 台湾正文书局，1992
61 张铁恒. 分析化学中的量和单位. 北京：中国标准出版社，1995
62 刘积资. 工业锅炉安全技术. 北京：化学工业出版社，1993
63 许振良编著. 膜法水处理技术. 北京：化学工业出版社，2001
64 刘茉娥等编. 膜分离技术应用手册. 北京：化学工业出版社，2001
65 郑领英，王学松编著. 膜技术. 北京：化学工业出版社，2000
66 陈培康，裘本昌主编. 给水净化新工艺. 学术书刊出版社，1990
67 岳舜琳主编. 水质检验工. 北京：中国建筑工业出版社，1997
68 叶婴齐主编. 工业用水处理技术. 上海：上海科学普及出版社，1995
69 王方. 电去离子净水技术. 膜科学与技术. 2001，4
70 林斯清. 海水和苦咸水淡化. 水处理技术. 2001，2
71 郑宏飞. 太阳能海水淡化技术. 自然杂志. 22卷，1期
72 郑文祥等. 摩洛哥坦地区核能海水淡化示范项目. 核动力工程. 2000，2
73 中化化工标准化研究所编. 化学工业国家、行业标准和国际标准目录（2001）. 北京：化学工业出版社，2001
74 宋业林编. 水处理技术问答. 北京：中国石化出版社，2002
75 陈家琦，王浩，杨小柳. 水资源学. 北京：科学出版社，2002
76 郑淳之主编. 水处理剂和工业循环冷却水系统分析方法. 北京：化学工业出版社，2000