

朱月海 鄧玉声 范建伟 编著

# 工业给水处理



同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS

# 工业给水处理

朱月海 邳玉声 范建伟 编著



同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS

## 内 容 提 要

本书共 10 章,较系统而全面地论述了工业给水处理的重要性和现实意义,工业给水处理的原理、方法和设计计算;内容包括工业给水的预处理、水的除铁除锰、水的软化处理、水的离子交换除盐和膜法除盐、循环水冷却构筑物、热力计算、冷却塔测试及水质稳定处理等;每章都附有设计计算的实例。

本书的数据资料基本上来自实践,是通过试验、在工程设计中应用和实际运行中总结得来的,具有实用性和现实指导意义;综合系统性强,以工业给水处理为主线,以掌握水处理的基本原理和方法为出发点,对工业给水处理进行了全面而系统的论述,内容齐全,重点突出,弥补了过去自成系统按内容各自出书造成的不足;内容新颖,编入了新的内容和研究成果,如“冷却塔测试”、同济大学研发的 SCII 多功能微晶水处理器、“反渗透除盐”中的设计计算实例等。

本书可供各有关设计研究院水处理方面的决策和设计人员、给水排水工程科技人员、暖通专业有关人员,化工、纺织、轻工业石化、冶金等系统从事水处理的工程技术人员,企业管理、设计、生产、运行操作等人员使用。本书内容属给水排水专业和有关水处理专业的“工业给水处理”,故可供给水排水和相关专业师生教学参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

工业给水处理/朱月海, 鄧玉声, 范建伟 编著.  
—上海: 同济大学出版社, 2016. 9  
ISBN 978-7-5608-5999-6

I. ①工… II. ①朱… ②鄧… ③范… III. ①工业用水—给水处理 IV. ①TU991.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 214815 号

---

---

## 工业给水处理

朱月海 鄧玉声 范建伟 编著

策划编辑 赵泽毓 责任编辑 高晓辉 熊磊丽 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 [www.tongjipress.com.cn](http://www.tongjipress.com.cn)  
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店  
印 刷 浙江广育爱多印务有限公司  
开 本 787 mm×1 092 mm 1/16  
印 张 42  
字 数 1 048 000  
版 次 2016 年 9 月第 1 版 2016 年 9 月第 1 次印刷  
书 号 ISBN 978-7-5608-5999-6

定 价 180.00 元

---

---

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

# 前 言

众所周知,我国水资源是紧缺、贫乏的,按人均计世界排名在 88 位之后;同时水资源分布又很不均衡,南方 4 个流域(长江流域、华南诸河、东南诸河、西南诸河)占全国水资源总量的 81%;北方 4 个流域(东北诸河、海滦河流域、淮河和山东半岛、黄河流域)仅占全国水资源总量的 14.4%;而每年排放的处理与未经处理的污水 365 亿  $\text{m}^3$  又污染了大批水体,因此不少地区,特别是“三北”(华北、东北、西北)地区出现了不同程度的水危机,影响了工农业生产和人民生活,威胁着国民经济的高速持续发展,因此缓解水资源紧缺和供需矛盾是当务之急。我国海岸线长 18 000 km,具有丰富的海水资源,但含盐量平均高达 35 000 mg/L;而沿海地区淡水资源紧缺;我国西北地区多咸水湖及地下水较多为苦咸水,也缺乏淡水,长期来影响着经济的发展和人民生活水平的提高,因此“工业给水处理”中的“冷却水循环”利用、“海水、苦咸水淡化处理”以及“电渗析、反渗透”等膜法除盐处理非常具有针对性和现实意义。

工业用水中 70%~80%为冷却用水,主要用来冷却生产设备和产品,是用水大户。把冷却设备和产品后温度升高的水,经过冷却构筑物(主要是冷却塔)冷却,把水温降下来,进行持续地循环使用,是行之有效的节水方案,是节能、节电、保护环境、节省水资源、缓解水危机、缓解供需矛盾的重要措施,具有重大的现实意义和深远意义。海水、苦咸水淡化处理和水的除盐技术,长期以来我国起步晚,相对较落后,近几年来随着经济的不断增长,工业发展的迫切需要,投入人力和物力进行较为深入研究,获得了较快发展、应用和提高,特别是膜法除盐水处理技术发展较快,为工业生产的用水需要作出了卓越的贡献,必将较大范围地应用于沿海地区海岛和西北地区的海水、苦咸水淡化处理,为这些地区的经济持续发展和人民生活水平的不断提高作出积极的贡献。

本书基本上包括了工业给水处理的所有内容,结构严密、资料翔实、概念清楚、说理透彻、理论联系实际,实用性较强,是一本工业给水处理的综合性著作。本书在编著和出版的过程中得到同济水处理技术开发公司、同济大学出版社的大力支持和帮助,特别是赵泽毓、熊磊丽两位编辑的帮助,深表感谢,对于所有参考文献的作者表示诚挚和衷心的感谢!

编者

2015 年 12 月

# 目 录

## 前言

第1章 概述 .....	1
1.1 工业用水概况 .....	1
1.1.1 工业用水水量 .....	1
1.1.2 工业用水对水质的要求 .....	1
1.2 天然水中的物质来源及主要离子特性 .....	2
1.2.1 水中的溶解物质及来源 .....	2
1.2.2 水中主要离子及其特性 .....	4
1.2.3 水中碳酸及其平衡 .....	5
1.3 水中溶解物质数量及其组合 .....	7
1.3.1 水中溶解杂质的表示方法 .....	7
1.3.2 水中离子的假想组合 .....	10
1.3.3 水质分析的校核 .....	11
1.4 工业给水处理方法概述 .....	14
1.4.1 水的除铁除锰 .....	14
1.4.2 水的软化 .....	14
1.4.3 水的除盐 .....	15
1.4.4 水的冷却 .....	16
1.4.5 水质的稳定处理 .....	17
第2章 工业给水的预处理 .....	18
2.1 水中物质对后续处理的影响及对水质要求 .....	18
2.1.1 对离子交换树脂的影响和危害 .....	18
2.1.2 对电渗析的影响和危害 .....	19
2.1.3 对反渗透的影响和危害 .....	19
2.1.4 各水处理装置的进水水质要求 .....	19
2.2 水的混凝及混凝药剂 .....	20
2.2.1 水的混凝 .....	20
2.2.2 混凝剂和助凝剂 .....	23
2.3 沉淀与气浮 .....	30
2.3.1 颗粒在静水中的自由沉淀 .....	30
2.3.2 颗粒在静水中的拥挤沉淀 .....	32
2.3.3 斜板、斜管沉淀原理 .....	34

2.3.4 水的澄清 .....	36
2.3.5 气浮净水原理 .....	37
2.4 过滤工艺 .....	41
2.4.1 过滤与吸附概述 .....	41
2.4.2 过滤机理 .....	43
2.4.3 过滤水力学 .....	45
2.4.4 提高滤池性能的途径 .....	49
2.5 氧化与杀菌 .....	51
2.5.1 氯系氧化杀菌剂 .....	52
2.5.2 氧系氧化剂 .....	54
2.5.3 紫外线杀菌 .....	54
2.6 活性炭吸附处理 .....	55
2.6.1 活性炭的吸附作用 .....	55
2.6.2 活性炭预处理工艺 .....	57
2.6.3 活性炭的主要指标 .....	59
2.6.4 颗粒活性炭滤床 .....	62
2.7 精密过滤 .....	64
2.7.1 滤布过滤器 .....	65
2.7.2 烧结滤管过滤器 .....	65
<b>第3章 水的除铁除锰 .....</b>	<b>69</b>
3.1 铁、锰的危害、来源及水中的溶解 .....	69
3.1.1 铁、锰的危害 .....	69
3.1.2 地下水中铁、锰的来源及溶解 .....	70
3.2 水中铁和锰的氧化及影响氧化的因素 .....	72
3.2.1 铁、锰的氧化动力学 .....	72
3.2.2 影响二价铁、锰氧化反应的因素 .....	76
3.3 除铁、除锰的方法 .....	79
3.3.1 空气氧化—过滤法 .....	79
3.3.2 药剂氧化—过滤法 .....	81
3.3.3 生物过滤法 .....	84
3.4 除铁除锰的曝气 .....	85
3.4.1 气水比的确定和计算 .....	85
3.4.2 曝气装置的形式及适用条件 .....	88
3.4.3 气泡式曝气装置设计要点 .....	89
3.4.4 喷淋式曝气装置设计要点 .....	98
3.5 无阀滤池除铁除锰设计 .....	103
3.5.1 无阀滤池概述 .....	103
3.5.2 重力式无阀滤池设计要点 .....	108

3.5.3	重力式无阀滤池除铁除锰设计计算 .....	114
3.5.4	压力式无阀滤池除铁除锰设计计算 .....	120
3.5.5	压力式无阀滤池设计计算例题 .....	123
3.6	接触氧化除铁除锰设计 .....	128
3.6.1	接触氧化过滤除铁除锰的优点及工艺 .....	128
3.6.2	滤料、滤层、滤速及承托层 .....	129
3.6.3	工作周期及反冲洗 .....	131
3.6.4	50 m <sup>3</sup> /h 除铁设备设计 .....	132
3.6.5	40 m <sup>3</sup> /h 双级压力式除铁除锰设备设计 .....	136
<b>第4章</b>	<b>水的软化处理 .....</b>	<b>142</b>
4.1	水软化的目的意义和方法 .....	142
4.1.1	“硬水”及其危害 .....	142
4.1.2	软化的几种基本方法 .....	145
4.2	药剂软化设备的设计计算 .....	146
4.2.1	药剂软化法的基本原理 .....	146
4.2.2	药剂用量计算 .....	148
4.2.3	药剂软化设备的设计计算 .....	149
4.3	离子交换软化的树脂及原理 .....	155
4.3.1	离子交换树脂的种类、构造 .....	155
4.3.2	离子交换树脂的性能 .....	157
4.3.3	离子交换的基本原理 .....	160
4.4	离子交换软化的设备及系统选择 .....	163
4.4.1	固定床离子交换软化设备 .....	163
4.4.2	离子交换软化系统的选择 .....	173
4.4.3	二氧化碳脱气塔的构造、原理及计算 .....	176
4.4.4	固定床软化设备的设计 .....	180
4.5	移动床离子交换软化处理设备 .....	193
4.5.1	移动床的特点和工艺流程 .....	193
4.5.2	移动床设备结构 .....	196
4.5.3	移动床设计计算 .....	198
4.5.4	流动床离子交换软化处理设备 .....	208
<b>第5章</b>	<b>水的离子交换法除盐 .....</b>	<b>216</b>
5.1	水的除盐概述 .....	216
5.1.1	水的软化、除盐和淡化处理 .....	216
5.1.2	水的除盐任务和目的 .....	217
5.2	除盐的交换树脂及系统 .....	217
5.2.1	除盐系统离子交换树脂的性能与原理 .....	219

5.2.2	一般脱盐水离子交换系统 .....	221
5.2.3	高纯水离子交换系统 .....	223
5.2.4	混合床除盐的基本原理和特点 .....	228
5.3	常用离子交换除盐系统 .....	230
5.3.1	复床式系统 .....	230
5.3.2	混床及复床—混床系统 .....	232
5.3.3	双层床 .....	234
5.3.4	弱酸、弱碱及脱气塔的位置 .....	236
5.3.5	苦咸水淡化—二氧化碳再生法 .....	238
5.4	除盐工艺的设计计算 .....	240
5.4.1	设计任务及有关参数 .....	240
5.4.2	混合床设计计算有关参数 .....	242
5.4.3	强酸 RH—脱气塔—强碱 ROH 一级复床设计计算 .....	243
5.4.4	强酸 RH—脱气塔—强碱 ROH—混合床除盐系统设计 计算 .....	247
5.4.5	弱酸 RH—脱气塔—强酸 RH—弱、强 ROH 双层床除盐系统的 设计 计算 .....	254
<b>第 6 章</b>	<b>膜分离法淡化、除盐 .....</b>	<b>260</b>
6.1	电渗析水处理技术 .....	261
6.1.1	电渗析除盐对离子交换膜的要求 .....	262
6.1.2	离子交换膜的分类及性能 .....	262
6.1.3	电渗析除盐的基本原理 .....	263
6.1.4	电渗析除盐的工艺流程和设备构造 .....	265
6.1.5	电渗析器的组装及规格性能 .....	269
6.1.6	电渗析工艺的极化及参数 .....	272
6.1.7	电流效率及最佳电流密度 .....	279
6.1.8	电渗析器工艺设计和计算 .....	281
6.1.9	设计计算实例 .....	287
6.1.10	电渗析器的运行与管理 .....	295
6.2	反渗透除盐技术 .....	298
6.2.1	概述 .....	298
6.2.2	渗透和反渗透 .....	299
6.2.3	反渗透膜 .....	307
6.2.4	RO 工艺方程 .....	314
6.2.5	RO 工艺设计 .....	322
6.2.6	RO 装置设计 .....	330
6.2.7	RO 预处理系统 .....	335
6.2.8	RO 膜的清洗 .....	356



6.2.9 应用实例——RO 装置设计 .....	363
6.3 纳滤水处理技术 .....	377
6.3.1 纳滤技术特点 .....	377
6.3.2 纳滤膜的品种和性能 .....	378
6.3.3 纳滤组器技术性能 .....	379
6.3.4 纳滤系统工艺设计及计算 .....	381
6.3.5 纳滤在水处理中的应用 .....	383
6.4 超滤水处理技术 .....	384
6.4.1 超滤概述 .....	384
6.4.2 超滤膜的性能和装置 .....	385
6.4.3 超滤相关术语定义 .....	388
6.4.4 超滤膜的性能 .....	396
6.4.5 膜的相关性能指数和计算公式 .....	398
6.4.6 超滤系统及设计 .....	400
6.4.7 超滤装置的调试、运行、维护 .....	410
6.4.8 应用实例(以滨特尔 X-Flow XIGA 超滤膜为例) .....	412
6.5 微孔滤膜水处理技术 .....	414
6.5.1 微孔滤膜过滤的原理和特征 .....	414
6.5.2 微孔滤膜的分类、性能及应用 .....	415
6.5.3 微孔滤膜过滤器 .....	417
6.5.4 微孔过滤器设计中应注意的问题 .....	418
<b>第7章 水的循环冷却设备 .....</b>	<b>419</b>
7.1 水的循环冷却概述 .....	419
7.1.1 冷却水用水量 .....	419
7.1.2 冷却水循环使用的意义 .....	420
7.1.3 循环冷却水水源与水质 .....	422
7.2 水冷却设施的分类与组成 .....	425
7.2.1 冷却构筑物分类 .....	425
7.2.2 冷却塔分类 .....	426
7.2.3 冷却塔的构造与组成 .....	427
7.3 冷却塔各部分的功能特性和要求 .....	430
7.3.1 淋水填料 .....	430
7.3.2 配水系统 .....	438
7.3.3 通风设备 .....	447
7.3.4 空气分配装置 .....	450
7.3.5 通风筒 .....	452
7.3.6 除水器 .....	453
7.3.7 塔体 .....	455

7.3.8 集水池 .....	456
7.3.9 防冻措施 .....	457
7.4 冷却塔的选择与布置 .....	458
7.4.1 冷却塔选择考虑的主要因素 .....	458
7.4.2 机械通风玻璃钢冷却塔的优缺点 .....	459
7.4.3 逆流式与横流式冷却塔的比较 .....	460
7.4.4 海拔高度对冷却过程的影响 .....	461
7.4.5 湿热空气的再循环 .....	462
7.4.6 冷却塔的计算机选型 .....	464
7.4.7 冷却塔的平面布置 .....	466
7.5 冷却塔的运行与维护 .....	467
7.5.1 冷却塔部件的维护保养 .....	468
7.5.2 故障及排除 .....	470
7.5.3 风机叶片倾角测量 .....	472
<b>第8章 冷却塔的计算与设计 .....</b>	<b>476</b>
8.1 冷却水的循环系统 .....	476
8.1.1 冷却水的循环系统及组成 .....	476
8.1.2 被冷却的设备位置高于冷却塔 .....	477
8.1.3 被冷却的设备位置低于冷却塔 .....	478
8.2 水冷却的基本原理 .....	478
8.2.1 为什么用水来冷却设备或产品 .....	479
8.2.2 水的蒸发散热 .....	480
8.2.3 水的传导散热和对流散热 .....	481
8.2.4 水的辐射散热 .....	481
8.2.5 不同温度的蒸发与传导散热 .....	481
8.3 湿空气的性质 .....	483
8.3.1 湿空气热力学参数 .....	483
8.3.2 湿空气的压力 .....	484
8.3.3 湿度 .....	485
8.3.4 湿空气的容重 .....	489
8.4 湿空气的焓 .....	490
8.4.1 焓的概念 .....	490
8.4.2 水蒸气的焓 .....	491
8.4.3 空气含热量计算图 .....	491
8.4.4 干、湿球温度及水冷却的理论极限 .....	492
8.4.5 设计气象参数的确定 .....	496
8.5 冷却塔的热力计算 .....	499
8.5.1 散热量 .....	499

8.5.2	总散热量 .....	501
8.5.3	热力计算法 .....	502
8.5.4	焓差法热力计算基本方程 .....	503
8.5.5	焓差的物理意义 .....	507
8.5.6	交换数 $N = \frac{1}{K} \int_{t_2}^{t_1} \frac{dt}{i'' - i}$ 的求解 .....	508
8.5.7	冷却塔的性能 .....	513
8.5.8	横流式冷却塔的热力计算 .....	517
8.5.9	水量损失 .....	523
8.6	冷却塔的设计与计算 .....	524
8.6.1	设计计算的基础资料 .....	524
8.6.2	通风阻力的计算 .....	525
8.6.3	配水系统水力计算 .....	534
8.7	设计计算示例 .....	538
8.7.1	100 t/h 机械通风逆流式冷却塔设计计算 .....	538
8.7.2	大型机械通风冷却塔设计计算 .....	552
<b>第9章</b>	<b>冷却塔测试 .....</b>	<b>557</b>
9.1	测试的目的意义及内容 .....	557
9.1.1	测试的目的意义 .....	557
9.1.2	冷却塔测试的内容 .....	557
9.1.3	冷却塔测试分类 .....	557
9.2	玻璃钢冷却塔及选用曲线 .....	558
9.2.1	玻璃钢冷却塔简述 .....	558
9.2.2	玻璃钢冷却塔的符号说明 .....	559
9.2.3	冷却塔的选用曲线 .....	560
9.3	热工性能测试 .....	562
9.3.1	测试前的准备工作 .....	562
9.3.2	对测试工作的要求 .....	562
9.3.3	测试项目、仪器设备及测试方法 .....	564
9.3.4	测试资料的整理 .....	567
9.3.5	鉴定测试的评价及淋水装置的比较 .....	568
9.3.6	实测横流塔热力计算举例 .....	569
9.4	对测试冷却塔的修正和评价 .....	573
9.4.1	冷却水量对比法 .....	573
9.4.2	冷却水温对比法 .....	574
9.4.3	评价指标及计算例题 .....	574
9.5	噪声与振动测试 .....	579
9.5.1	噪声测试 .....	579
9.5.2	振动测试 .....	583

第 10 章 循环冷却水处理 .....	587
10.1 循环冷却水处理的任務和方法 .....	587
10.1.1 循环过程中的水质变化 .....	587
10.1.2 循环冷却水处理的任務 .....	589
10.1.3 循环冷却水处理的方方法 .....	590
10.2 换热器及水质分析 .....	591
10.2.1 换热器 .....	591
10.2.2 水质常规分析 .....	591
10.2.3 结垢与腐蚀产物的分析 .....	601
10.3 结垢与腐蚀 .....	601
10.3.1 循环冷却水系统的结垢 .....	601
10.3.2 腐蚀概述 .....	603
10.3.3 电化学腐蚀 .....	603
10.3.4 微生物腐蚀 .....	605
10.4 结垢和腐蚀的判别 .....	608
10.4.1 饱和指数法 .....	608
10.4.2 稳定指数法(RSI) .....	611
10.4.3 临界 pH 值 .....	611
10.4.4 磷酸钙饱和指数( $I_P$ ) .....	612
10.5 循环冷却水处理 .....	613
10.5.1 结垢控制与处理 .....	613
10.5.2 污垢控制与处理 .....	619
10.5.3 腐蚀控制与处理 .....	620
10.5.4 阻垢、缓蚀剂复合配方 .....	633
10.5.5 微生物控制与处理 .....	638
10.5.6 SCII 微晶水处理器 .....	650
10.5.7 水处理剂的投加量计算 .....	653
10.6 补充水、旁流水和排污水处理 .....	655
10.6.1 补充水处理 .....	655
10.6.2 旁流水处理 .....	656
10.6.3 排污水处理 .....	658
主要参考文献 .....	659

# 第 1 章 概 述

## 1.1 工业用水概况

### 1.1.1 工业用水水量

目前,我国全年供水量近 6 200 亿  $\text{m}^3$ /年,其中农业用水近 4 000 亿  $\text{m}^3$ /年,工业用水约 1 400 亿  $\text{m}^3$ /年,生活用水约 750 亿  $\text{m}^3$ /年。在工业用水中,循环冷却水是大头,约合工业用水量的 75%,工业用水面广量大,用水量大的企业,往往自建水厂。

有的大型企业,如发电、石油、化工等主要是冷却用水。一个发电量 100 万 kW 的原子能发电站,每小时需要冷却水 60 万 t;上海石化总厂第一期工程需要循环冷却水每小时达 7 万 t,第二期工程后每小时循环冷却水量超过 10 万 t。一些企业的用水分配见表 1-1。

表 1-1 一些工业企业的用水分配率

工业名称	用途及分配比率					
	冷却水	锅炉房	洗涤水	空 调	工艺用水	其他
石油	90.1%	3.9%	2.8%	0.6%		2.6%
化工	87.3%	1.5%	5.9%	3.2%		2.1%
冶金	85.4%	0.4%	9.8%	1.7%		2.7%
机械	42.8%	2.7%	20.7%	12.8%		21.0%
纺织	5.0%	5.1%	29.7%	51.8%		8.4%
造纸	9.9%	2.6%	82.1%	1.3%		4.1%
食品	48.0%	4.4%	30.4%	5.7%	6.0%	5.5%
电力	99.0%	1.0%				

### 1.1.2 工业用水对水质的要求

工业用水种类繁多,不同的工业用水,对水质的要求也各不相同。如果以生活用水水质标准作为分界线,则工业用水水质可分为高于生活用水水质和低于(等于)生活用水水质两大类。低于或等于生活用水水质的,用水量不大的可直接采用自来水,用水量大的、会影响城镇生活用水的,企业应自建水厂,如钢铁、石油化工、电力等用水。

对于工业用水水质高于生活用水水质标准的,要求也各不相同,有的要求进一步去除水中的铁和锰;有的要求去除水中的钙( $\text{Ca}^{2+}$ )和镁( $\text{Mg}^{2+}$ );而有的要求基本上去除水中所有的阳离子和阴离子,达到纯水、高纯水、超纯水的要求,如高压锅炉、电子工业的用水。因此,这些用水需在生活用水(自来水)水质基础上,再要采用不同的工艺进行处理,达到不同用途的水质要求。

以锅炉用水来说,它与锅炉的压力、构造、蒸汽用途等有关。锅炉的主要用途是供给蒸汽,因蒸汽的用途不同而使锅炉的压力也不同。用作生产过程中加热或蒸煮的锅炉压力一般都在  $13 \text{ kg/cm}^2$  以下,称为工业锅炉,用蒸汽作动力的机车锅炉就属于这种类型。对于压力小于  $25 \text{ kg/cm}^2$  的为低压锅炉,对水质的要求主要是进行软化处理,除去水中的钙( $\text{Ca}^{2+}$ )、镁( $\text{Mg}^{2+}$ )离子。用于发电的锅炉,压力都在  $25 \text{ kg/cm}^2$  以上,最高可达  $100 \text{ kg/cm}^2$  以上,对水质的要求是基本去除水中所有的阴阳离子,达到纯水、高纯水的要求,即除盐水。对锅炉水的水质要求是:防止结成水垢;防止锅炉钢板腐蚀;防止污染蒸汽;防止锅炉的苛性脆化。

各种锅炉的进水水质需符合特殊锅炉设备的水质标准。

## 1.2 天然水中的物质来源及主要离子特性

### 1.2.1 水中的溶解物质及来源

由于水分子是极性分子,而且处于高速运动状态,因此,水是一种溶解力很强的物质。天然水源来自雨水,尽管雨水是很净的凝结水,但在下降过程中,在地面或地下流动过程中,接触和溶入较多物质,还会受到人为的污染,使水中含有很多溶解杂质。因此水中杂质来源可分为两种:一是自然过程中进入水中,如地层矿物质在水中溶解,微生物在水中的繁殖及其死亡残骸,水流对地表及河床冲刷带入的泥沙、腐殖质等;二是人为因素造成的进入水中的物质,如工业废水、生活污水、固体废弃物排入水体而带入。无论哪种来源,从水中杂质名称来讲,可分为无机物、有机物及微生物。按杂质的尺寸大小分为悬浮物、胶体物和溶解物三类,见表1-2。

表 1-2 水中杂质按尺寸分类

杂 质	溶解物 (低分子、离子)		胶 体		悬 浮 物		
	0.1 nm	1 nm	10 nm	100 nm	$1 \mu\text{m}$	$10 \mu\text{m}$	$100 \mu\text{m}$ - 1 mm
颗粒尺寸							
分辨工具	电子显微镜可见		超显微镜可见		显微镜可见		肉眼可见
水的外观	透明		浑浊		浑浊		

注:  $1 \text{ mm} = \frac{1}{1000} \text{ m}$ ;  $1 \mu\text{m} = \frac{1}{10^6} \text{ m}$ ;  $1 \text{ nm} = \frac{1}{10^9} \text{ m}$ ;  $1 \mu\text{m} = 1000 \text{ nm}$ ;  $1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm}$ 。

表 1-2 中的颗粒尺寸系按球形计,是一种理想化的状态,故各类杂质的粒度尺寸只是大体的概念,不是绝对的。如悬浮物与胶体之间的尺寸界限,根据颗粒形状和密度不同而略有变化,一般来说,粒径在  $100 \text{ nm} \sim 1 \mu\text{m}$  之间应属于胶体与悬浮物的过渡阶段。小颗粒悬浮物往往也具有一定的胶体特性,只有当粒径大于  $10 \mu\text{m}$  时,才与胶体有明显差别。

#### 1. 悬浮物和胶体物

悬浮物尺寸较大,易于在水中下沉或上浮。如比重小于水,则可上浮到水面。易于下沉的一般是较大颗粒泥沙、矿物质及废渣等;能够上浮的一般是体积较大而比重小的某些有机物。

胶体颗粒尺寸很小,在水中具有稳定性,经长期静置也不会下沉。水中存在的胶体主要

为黏土、某些细菌和病毒、腐殖质、蛋白质等。有机高分子物质通常也属于胶体范围。工业废水、生活污水排入水体,会引入各种各样的胶体或有机高分子物质,如人工合成的高聚物通常来自生产这类产品的企业所排放的废水中,天然水中的胶体一般带负电荷,有时含有少量的金属氧化物胶体。

悬浮物和胶体颗粒是使水产生浑浊现象的根源。浑浊度通称浊度,用 NTU 表示,是衡量水质好与差的一项重要指标,从技术意义上说,是用来反映水中悬浮物、胶体物的水质替代参数。水中有机物如腐殖质、藻类等不仅产生浊度,还会造成水的色、臭、味的变化。水中的病菌、病毒及致病原生动动物会通过水传播疾病。

悬浮物和胶体颗粒是生活饮用水处理和工业用除盐水预处理要去除的对象,特别是胶体颗粒。一般粒径大于 0.1 mm 的泥沙等易去除,在水中通常会自行下沉;而粒径较小的悬浮物和胶体杂质,须投加混凝药剂方可除去,对于去除高分子物质需要投加较多的混凝药剂。

## 2. 溶解杂质

水中溶解杂质是指低分子和离子,它们与水构成均相体系,外观透明,称真溶液。这些物质粒径都很小,一般只有几个埃(用  $\text{\AA}$  表示,  $1 \text{\AA} = 10^{-7} \text{ mm}$ )。有的溶解杂质会使水产生色、臭、味。溶解杂质是工业除盐水等去除对象。

### 1) 溶解气体

天然水中的溶解气体主要是氧、氮、二氧化碳( $\text{CO}_2$ ),有时会有少量的硫化氢( $\text{H}_2\text{S}$ )。

天然水中的氧主要来源于空气中氧的溶解,部分来自藻类和其他水生植物的光合作用。地表水中溶解氧含量与水温、气压、有机物含量等有关。未被污染的天然水中,溶解氧含量一般为  $5 \sim 10 \text{ mg/L}$ ,最高含量不超过  $14 \text{ mg/L}$ 。受污废水、有机物等污染的水体,溶解氧降低,严重污染的水体,溶解氧可为零。

地面水中的  $\text{CO}_2$  主要来自有机物的分解;地下水中的  $\text{CO}_2$  除来源于有机物的分解之外,还有在地层中所进行的化学反应。地面水(除海水之外)中  $\text{CO}_2$  含量一般小于  $20 \sim 30 \text{ mg/L}$ ;地下水中  $\text{CO}_2$  含量从每升几十毫克至  $100 \text{ mg/L}$ ,少数竟高达数百毫克。海水中  $\text{CO}_2$  含量很少。水中的  $\text{CO}_2$  约  $99\%$  呈分子状态,仅  $1\%$  左右与水作用生成碳酸( $\text{H}_2\text{CO}_3$ )。

水中的氮主要来自空气中氮的溶解,部分是有机物分解及含氮化合物的细菌还原等生化过程的产物。

水中硫化氢的存在与某些含硫矿物(如硫铁矿)还原及水中有机物腐烂有关。由于  $\text{H}_2\text{S}$  极易氧化,故地面水中含量很少。如果发现地面水中  $\text{H}_2\text{S}$  含量较高,则往往与含有大量硫物质的生活污水或工业废水污染有关。

### 2) 水中离子

水中离子会对工业生产造成危害,在水处理中应除去,属阳离子的为钙离子( $\text{Ca}^{2+}$ )、镁离子( $\text{Mg}^{2+}$ )、钠离子( $\text{Na}^+$ )、钾离子( $\text{K}^+$ )、锰离子( $\text{Mn}^{2+}$ )、铜离子( $\text{Cu}^{2+}$ )等,在天然水中含量最大的是  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  三种;属于阴离子的为重碳酸根( $\text{HCO}_3^-$ )、硫酸根( $\text{SO}_4^{2-}$ )、氯根( $\text{Cl}^-$ )、碳酸根( $\text{CO}_3^{2-}$ )、硅酸根( $\text{HSiO}_3^-$ )、硝酸根( $\text{NO}_3^-$ )等,含量较大的是  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  三种。

由于各种天然水源所处环境、条件及地质状况各不相同,所含离子种类及含量也有很大差别。工业用水对象不同,要求去除水中的离子也不同,如一般锅炉用水,只要去除水中的  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  离子,而高压锅炉用水,则基本上要去除水中所有的阴阳离子。

## 1.2.2 水中主要离子及其特性

### 1. 钙离子( $\text{Ca}^{2+}$ )

$\text{Ca}^{2+}$  来源主要是地下水在含有  $\text{CO}_2$  的条件下,与含钙岩层(石灰石)接触,使石灰石溶解的结果,其反应式为



也可能由于某些岩石,如石膏石(主要成分为  $\text{CaSO}_4$ )在水中的溶解。在地面水和浅层地下水中,重碳酸钙( $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ )通常是主要成分。 $\text{Ca}^{2+}$  对工业生产有很大影响,其主要原因是钙盐在加热(如煮沸或进入锅炉)或  $\text{CO}_2$  释放时,会分解为碳酸根( $\text{CO}_3^{2-}$ ),从而产生溶解度很低的碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ )或硫酸钙( $\text{CaSO}_4$ ),以致在热交换面上产生沉积而成水垢。

### 2. 镁离子( $\text{Mg}^{2+}$ )

$\text{Mg}^{2+}$  的来源是白云石( $\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$ )在地下水中的溶解或工业废水的污染。在天然水中含量通常比  $\text{Ca}^{2+}$  少。但海水中的含量却比  $\text{Ca}^{2+}$  多 2~3 倍。 $\text{Mg}^{2+}$  的性质与  $\text{Ca}^{2+}$  相似,在生产中会产生氢氧化镁( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ )沉积。

水中  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  的含量总和称为水的硬度。

### 3. 钠离子( $\text{Na}^+$ )和钾离子( $\text{K}^+$ )

$\text{Na}^+$  在天然水中广泛存在,在受海水侵入的水中,含量很大。它的来源是水流经过含钠盐土壤时钠盐溶解的结果。钠盐的一个重要特性是在水中溶解度特别高,而且还会随着温度的升高而迅速提高。半导体、各类电子工业生产对  $\text{Na}^+$  污染很敏感,往往以水中  $\text{Na}^+$  含量作为水质指标。

$\text{K}^+$  在天然水中含量一般并不多,性质同  $\text{Na}^+$  相似,因此在水质分析时一般以  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  总数表示。

### 4. 重碳酸根( $\text{HCO}_3^-$ )

天然水中的  $\text{HCO}_3^-$  是最主要的阴离子。它一方面来源于  $\text{CO}_2$  本身在水中的溶解,但主要是由于水中  $\text{CO}_2$  与碳酸盐反应后所产生的,其反应式如下:



天然水中  $\text{HCO}_3^-$  的含量随 pH 值的变化而不同,这部分内容在 1.2.3 节中论述。

### 5. 硫酸根( $\text{SO}_4^{2-}$ )

$\text{SO}_4^{2-}$  分布广泛,主要是由于地下石膏岩层的溶解。一般地下水和地面水中均含有硫酸盐。由于硫酸盐在水中离解度很强,故属于强酸性阴离子。水中少量硫酸盐对人体健康没有什么影响,但当水中含量超过 250 mg/L 时,则有致泻作用;当超过 400 mg/L 时,水有微涩苦味。

### 6. 氯根( $\text{Cl}^-$ )

$\text{Cl}^-$  的来源可能是地下岩石的溶解,也可以是生活污水或工业废水污染,也可能是海水的侵入。海水中含氯化物约 18 500 mg/L,所以当河道受海潮影响时,每进入 1% 的海水,在河水中便增加 185 mg/L 氯化物。在一般饮用水中,氯化物含量在 2~100 mg/L 之间,水中  $\text{Cl}^-$  含量超过 600 mg/L 时,就有明显的咸味。



### 7. 铁离子( $\text{Fe}^{2+}$ )和锰离子( $\text{Mn}^{2+}$ )

$\text{Fe}^{2+}$ 的主要来源是地下水在缺氧条件下与黄铁矿岩层接触,使水中溶入低价铁离子( $\text{Fe}^{2+}$ )的结果,故含铁较多的几乎都是地下水,一般含铁量在5 mg/L以内,有些地区(如武汉)高达10~20 mg/L。

以 $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ 为例,铁离子在水中的反应为:



从式(1-4)可见,地下水中所含 $\text{Fe}^{2+}$ ,只有当水中有足量的碳酸时才能平衡存在,并且要在缺氧的情况下。式(1-5)实质上是 $\text{Fe}^{2+}$ 被氧化为 $\text{Fe}^{3+}$ ,然后起水解作用。地面中一般均有较充裕的溶解氧,而且 $\text{CO}_2$ 容易散发,所以溶解的 $\text{Fe}^{2+}$ 在地面水中难以存在;它们主要以胶体状态、细分散悬游物状态和有机络合物等状态存在。

锰与铁的性质相近,锰常与铁同存,但锰含量通常比铁少得多。一般原水中锰的含量不超过2~3 mg/L。但锰被氧化后产生的色度则比铁大10倍以上。我国生活用水水质规定,铁的含量 $\leq 0.3$  mg/L,锰 $\leq 0.1$  mg/L。

### 8. 硅酸根( $\text{SiO}_3^{2-}$ )

$\text{SiO}_3^{2-}$ 的来源是含硅土壤的溶解,一般地下中硅含量比地面水多。由于硅酸的溶解度较小,只有水中含矿物质少时才有较大的含硅酸量。硅盐在水中存在的形式有胶体状态和溶解的离子状态。溶解的离子有 $\text{SiO}_3^{2-}$ 和 $\text{HSiO}_3^-$ 。随pH值不同,其含量也不同。当 $\text{pH} \leq 8$ 时,水中硅盐几乎都是 $\text{SiO}_2$ 胶体;当 $\text{pH} \geq 8$ 时,有一部分为 $\text{HSiO}_3^-$ ;当 $\text{pH} > 11$ 时,则几乎全部为 $\text{HSiO}_3^-$ ;当pH更高时即有一部成为 $\text{SiO}_3^{2-}$ 。锅炉水中常常出现 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ,它对蒸汽纯度影响很大。高温高压蒸汽携带这种杂质,在汽轮机中沉淀下来,堵塞蒸汽通道,严重影响汽轮出力,降低发电机组的发电量。所以电力系统对去除水中的溶解性硅和胶体硅要求特别高。

## 1.2.3 水中碳酸及其平衡

天然水中碳酸的来源为:空气中 $\text{CO}_2$ 溶解于地面水中;水中水生动物、植物的新陈代谢;土壤、淤泥中有机物被微生物所分解。

碳酸 $\text{H}_2\text{CO}_3$ 是很弱的酸,即它的离解程度很弱,虽然可以离解为 $\text{H}^+$ 及 $\text{HCO}_3^-$ 离子,但离解度很小,而进一步离解成 $\text{H}^+$ 和 $\text{CO}_3^{2-}$ 离子更加困难。但当条件改变时,水中 $\text{CO}_3^{2-}$ 也会较 $\text{HCO}_3^-$ 多得多。

水中的碳酸与溶解性二氧化碳的平衡反应为



水中未离解的 $\text{H}_2\text{CO}_3$ 浓度仅为水中 $\text{CO}_2$ 浓度的0.1%左右,故式(1-6)中 $\text{H}_2\text{CO}_3$ 和 $\text{CO}_2$ 之间的平衡,在极大程度上趋向左方。实际上溶于水的 $\text{H}_2\text{CO}_3$ 和 $\text{CO}_2$ 不易区别,故混为一谈,常以 $\text{CO}_2$ 表示。

因碳酸是弱酸,在水中分两级电离进行:

