



普通高等教育“十二五”规划教材

电厂水处理技术

张 芳 李宇春 朱志平 杨晓焱 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

电厂水处理技术

张 芳 李宇春 朱志平 杨晓焱 编
李 锐 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是普通高等教育“十二五”规划教材，密切结合我国火力发电厂实际，系统地介绍了火力发电厂补给水处理和凝结水处理的全过程。全书共分六章，第1章为火电厂水处理综述，介绍水的基本知识及水在火电厂中的重要作用，同时明确水处理工作者在电厂的任务；第2章重点阐述了混凝处理及澄清过滤的原理方法及其常用设备，阐明了清水制备的全过程；第3、4章介绍了火力发电厂应用较广泛的预脱盐和离子交换除盐技术，重点介绍离子交换树脂的性能、离子交换除盐及其设备；第5、6章结合电厂实际介绍了电除盐系统及凝结水精处理过程，重点介绍高速混床与体内再生混床的异同，以及提高混床树脂再生度的方法。同时为了巩固课堂知识，本书还在每章结尾附有相应内容的思考题与习题。

本书以传统的补给水处理为基础，对最新水处理技术进行了相应阐述，可作为高等院校电厂化学专业学生的教科书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电厂水处理技术/张芳等编. —北京: 中国电力出版社, 2014.9

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-6207-9

I. ①电… II. ①张… III. ①火电厂-水处理-高等学校-教材 IV. ①TM621.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 155546 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 9 月第一版 2014 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 10.75 印张 257 千字

定价 24.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

随着发电机组参数和效率的不断提高以及对电力高温高压设备服役性能要求的增高，电力系统对补给水的质量要求也越来越严格。同时，由于工、农、渔业等相关领域的快速发展，水体被污染程度和污染物种类正在不断增加，从而使原水中的杂质含量增大，杂质种类增多，并产生了很多未知杂质和不确定因素。因此，补给水处理需要更多、更新的技术手段来适应机组参数和原水水质的变化。

长沙理工大学应用化学专业长期服务国家电力系统，有着与电力行业合作 30 多年的历史，电力化学已经成为最明显的特色，电厂水处理工程是应用化学专业（包括火电厂化学、核电化学及电网化学方向）本科生的重要必修课之一，而火力发电厂的锅炉补给水处理凝结水精处理恰恰又是这门课程的主要内容。所以，编者结合培养电力人才的需求与教学过程的体会，力求在讲授基础理论知识、基本知识、基本技能的同时，紧密联系生产实际，全面系统地介绍锅炉补给水处理以及凝结水精处理系统。本书以传统的补给水处理为基础，对最新水处理技术进行了相应阐述，可作为高等院校电厂化学专业的教科书。

目前，电厂化学水处理类图书的内容都比较广泛，牵涉到的内容除了锅炉补给水处理和凝结水处理外，还全部或部分包括了给水处理、炉水处理、循环冷却水处理以及水汽监督等。所以在选教材的过程中容易出现交叉内容。而本书内容完全按照电厂水处理工程这门课程的教学大纲进行编写，避免了交叉浪费。另外，与大部分的水处理资料相比，本书更侧重系统性，按照工艺流程系统中预处理—预脱盐—除盐进行介绍，使学生能更加系统地掌握水处理的内容。

本书由长沙理工大学张芳编写，参与编写工作的还有李宇春、朱志平、杨晓焱；本书由重庆远达水务有限公司总工、高级工程师李锐主审，主审老师提出了许多宝贵的建议与意见，在此表示衷心的感谢。在编写的过程中，徐召金、杨帆、钟峰等同学做了大量工作，在此也表示衷心的感谢。由于编者水平有限，书中难免有疏漏之处，敬请广大读者批评指正，以便进一步修改和完善。

编 者

2014 年 7 月



目 录

前言

1 火电厂水处理综述	1
1.1 火力发电厂中水处理的任务与目的	1
1.2 水的基本性能	3
1.3 水化学概况	6
1.4 常用水质指标	11
1.5 水质资料的校核	16
1.6 水处理方法概述	18
思考题与习题	21
2 水的预处理	23
2.1 水的混凝处理	23
2.2 水的沉降与澄清	29
2.3 水的过滤处理	38
2.4 预处理系统的选择	70
思考题与习题	72
3 水的预脱盐	74
3.1 电渗析	74
3.2 反渗透法	80
3.3 预脱盐系统的选用	89
思考题与习题	90
4 离子交换除盐	91
4.1 离子交换树脂	91
4.2 离子交换的基本理论	103
4.3 水的离子交换处理	108
4.4 再生系统和机械设备	122
4.5 离子交换系统的选择	126
思考题与习题	127

5 电去离子脱盐	128
5.1 EDI 技术发展过程	128
5.2 电去离子法原理	129
5.3 EDI 运行方式	131
5.4 国内外主要商业化 EDI 模块技术参数	132
5.5 电去离子法工艺系统	134
5.6 电去离子法的优缺点	136
5.7 EDI 与混床经济性分析	137
5.8 电去离子法的影响因素	137
思考题与习题	140
6 凝结水精处理设备及其系统	141
6.1 系统概述	141
6.2 凝结水处理系统	147
6.3 高速混床的再生系统	153
6.4 氨型混床及提高混床树脂再生度的方法	154
6.5 混床的漏过机理	158
思考题与习题	162
参考文献	164

1 火电厂水处理综述

水在火力发电厂中具有极其重要的作用，水质的好坏直接影响到电厂的安全经济运行，而掌握水的基本性能和相关水化学知识是学好发电厂水处理工程的基础。

1.1 火力发电厂中水处理的任务与目的

1.1.1 水在火力发电厂中的作用

图 1-1 所示为凝汽式发电厂热力设备中水、汽系统流程。从图中可以看出，水在火力发电厂的生产工艺中，既是热力系统的工作介质，也是某些热力设备的冷却介质。当火力发电机组运行时，几乎所有的热力设备中都有水或蒸汽在流动，所以水质的优劣，是影响发电厂安全经济运行的重要因素。水处理工作的主要任务，就是改善水质或采取其他措施，以消除由于水质不良而引起的危害。

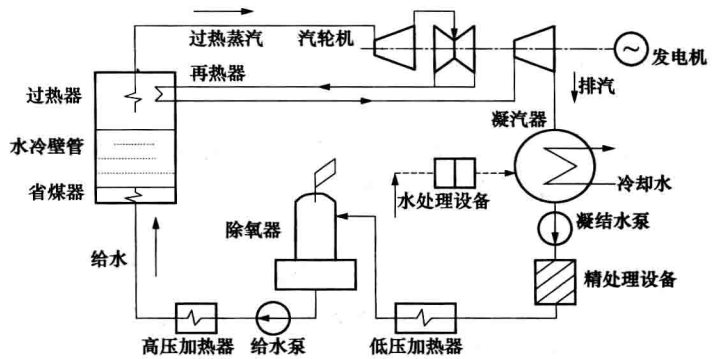


图 1-1 凝汽式发电厂水、汽系统流程

1.1.2 汽水品质不合格的危害性

在火力发电厂中，如汽水品质不符合规定，则可能引起以下危害：

(1) 热力设备的结垢。如果进入锅炉的水中有易于沉积的杂质，则在其运行过程中会发生结垢现象。垢的导热性为金属的 $1/100 \sim 1/10$ ，而且极易在热负荷很高的部位生成，所以垢对锅炉的危害性很大。它可使金属壁温过高，引起金属强度下降，从而使锅炉的管道发生局部变形、鼓包，甚至爆管。此外，垢还会降低锅炉的传热效率，从而影响电厂的经济效益。

对于高参数的大型锅炉，给水中的硬度已被全部去除，故形成的主要是氧化铁垢。在汽轮机凝汽器内，因冷却水水质问题而结垢会导致凝汽器真空度下降、汽轮机的热效率和出力降低。

(2) 热力设备的腐蚀。火力发电厂中的热力设备会因水质不良而引起腐蚀问题，如给水管道、各种加热器、锅炉的省煤器、水冷壁、过热器和汽轮机凝汽器等。

高参数热力设备的腐蚀，是因为有一种或几种因素的存在：如碱性或酸性介质的形成；杂质含量从 $\mu\text{g/L}$ 级或 mg/L 级浓缩至百分数级的过程；对腐蚀敏感的材料的存在；拉应力的存在。

腐蚀不仅会缩短设备本身的服役期，而且由于金属腐蚀产物转入水中，成为炉管上新的

腐蚀源，同时使给水中杂质增多，促进了炉管内的结垢过程，结成的垢转而又加剧炉管的腐蚀，形成恶性循环。如果金属的腐蚀产物被蒸汽带到汽轮机中，则会因它们的沉积而严重地影响汽轮机的安全和运行的经济性。

(3) 过热器和汽轮机内积盐。水质问题还会引起锅炉产生的蒸汽不纯，而使蒸汽带出的杂质沉积在蒸汽的通流部位，如过热器和汽轮机，从而产生积盐现象。

过热器管内积盐会引起金属管壁局部温度过高，以致爆管；汽轮机内积盐会大大降低汽轮机的出力和效率。当汽轮机内积盐严重时，还会使推力轴承负荷增大，隔板弯曲，降低汽轮机工作效率或造成事故停机。

1.1.3 现代高参数电厂中的水质问题

火力发电厂中锅炉机组的参数越高，其热能利用率也就越高，发电的经济性也越好。在高参数电厂中水处理问题尤为重要，这与现代机组的特点有关。这些特点如下：

(1) 为了节省金属消耗量，力求达到最大的蒸汽生产率，锅炉的局部热负荷较过去的设计高。

(2) 高温、高压汽轮机中采用的合金材质，在经热处理提高强度后，对蒸汽纯度很敏感，极易引起腐蚀龟裂。

(3) 各种盐类在蒸汽中的溶解度，随着蒸汽参数的提高而有所增大。

1.1.4 电厂用水的类别

水在火力发电厂水汽循环系统中所经历的过程不同，水质常有较大的差别。因此根据实际的需要，人们常给予这些水以不同的名称，它们是原水、锅炉补给水、给水、锅炉水、锅炉排污水、凝结水、冷却水和疏水等。现简述如下：

(1) 原水。也称为生水，是未经任何处理的天然水（如江河水、湖水、地下水等），它是电厂各种用水的水源。

(2) 锅炉补给水。原水经过各种水处理工艺净化处理后，用来补充发电厂汽水损失的水称为锅炉补给水。按其净化处理方法的不同，锅炉补给水又可分为软化水和除盐水等。

(3) 给水。送进锅炉的水称为给水。给水主要是由凝结水和锅炉补给水组成。

(4) 锅炉水。在锅炉本体的蒸发系统中流动着的水称为锅炉水，习惯上简称炉水。

(5) 锅炉排污水。为了防止锅炉结垢和改善蒸汽品质，用排污的方法，排出一部分炉水，这部分排出的炉水称为锅炉排污水。

(6) 凝结水。蒸汽在汽轮机中做功后，经冷却凝结成的水称为凝结水，它是锅炉给水的主要组成部分。

(7) 冷却水。用作冷却介质的水为冷却水。这里主要指用做冷却做功后的蒸汽的冷却水，如果该水循环使用，则称循环冷却水。

(8) 疏水。进入加热器的蒸汽将凝结水和给水加热后，这部分蒸汽的凝结水，以及机组停运时，蒸汽系统中的蒸汽冷凝下来的水，都称为疏水。

在水处理工艺过程中，还有清水、自用水等。

1.1.5 电厂化学水处理工作人员的主要工作和任务

(1) 为锅炉制备数量充足、质量合格的补给水。

(2) 做好汽轮机、凝汽器循环冷却水处理和化学监督工作。

(3) 做好热力系统汽、水的化学监督检测工作和炉内及凝结水的化学处理工作。

(4) 做好热力设备大、小修的化学检查和保护工作。

(5) 做好电厂燃料、灰、渣的化验分析工作，指导锅炉燃烧，并向厂部提供数据，做好成本核算工作。

(6) 做好电厂用油的运行监督分析和油务处理工作。

(7) 做好有关电厂化学工作的小型试验，并根据试验结果提出实施方案，指导热力设备的化学清洗工作。

(8) 做好电厂污水处理工作，为节水降耗当好参谋。

1.2 水的基本性能

1.2.1 水分子的结构

水的基本化学式为 H_2O ，它不仅是地球上分布最广的一种资源，也是一切生命的基本成分，如人体的含水量达 60%~70%。

在水分子的结构中，O-H 的键长为 0.096nm，H-H 的键长为 0.154nm，H-O-H 的夹角为 104.5° ，两个氢原子核排列成以氧原子为顶的等腰三角形。氧的一端带负电荷，氢的一端带正电荷，因此水分子是一个极性很强的分子，即氧的一端为负极，氢的一端为正极。由于水分子在正极一方有两个裸露的氢核，在负极一方有氧的两对孤对电子，这样就使每一个水分子都可以把自己的两个氢核交出与其他两个水分子共有，而同时氧的两对孤对电子又可以接受第三个、第四个氧核，使这五个水分子之间形成四个氢键，其中每一个外围分子又再与另外的分子继续生成氢键。这种现象称为水分子的缔合现象，所以水是单个分子 H_2O 和 $(H_2O)_n$ 的混合物， $(H_2O)_n$ 称为水分子的集聚体或聚合物。

1.2.2 水的特性

1. 水的状态

水在常温下有三态。水的凝固点为 $0^\circ C$ ，沸点为 $100^\circ C$ ，在自然环境中可以以固体存在，也可以以液体存在，并有相当部分变为水蒸气。图 1-2 是水的物态图（或称三相图），图中表明了冰-水-气、冰-气、水-气和冰-水共存的温度、压力条件。火力发电厂生产工艺中的能量转换过程就是以水和气为工质来实现的。

2. 水的密度

水的密度与温度关系和一般物质有些不同，一般物质的密度均随温度上升而减小，而水的密度是 $3.98^\circ C$ 时最大，为 $1g/cm^3$ 。高于或低于此温度时，其密度都小于 $1g/cm^3$ ，这通常由水分子之间的缔合现象来解释，即在 $3.98^\circ C$ 时，水分子缔合后的聚合物结构最紧密，高于或低于 $3.98^\circ C$ 时，水的聚合物结构比较疏松。

3. 水的比热容

几乎在所有的液体和固体物质中，水的比热容最大，同时有很大的蒸发热和溶解热。这是因为水加热时，热量不仅消耗于水温升

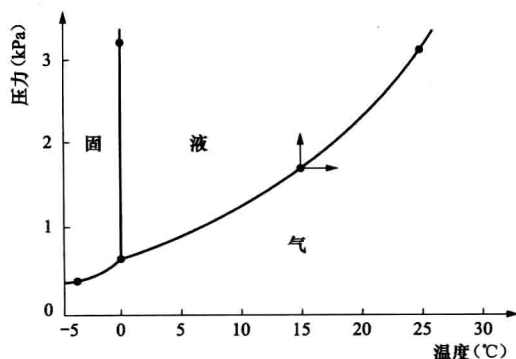


图 1-2 水的物态图

高,还消耗于水分子聚合物的解离。所以,在火力发电厂和其他工业中,常以水作为传送热量的介质,表 1-1 列出了水的定压 (0.1MPa) 下的比热容。

表 1-1 水的比热容 (不含空气的水在 0.1MPa 下的比定压热容)

温度 (°C)	比热容 [J/(kg·°C)]	温度 (°C)	比热容 [J/(kg·°C)]	温度 (°C)	比热容 [J/(kg·°C)]	温度 (°C)	比热容 [J/(kg·°C)]
0	4217.3098	20	4181.7330	50	4180.4771	90	4204.7533
5	4205.8833	25	4175.8733	60	4184.2443	100	4215.6356
10	4191.7782	30	4178.3846	70	4189.2669		
15	4185.5000	40	4178.3816	80	4195.9637		

4. 水的溶解能力

水有很大的介电常数,溶解能力极强,是一种很好的溶剂,溶解于水中的物质可以进行许多化学反应,而且能与许多金属的氧化物、非金属的氧化物及活泼金属产生化合作用。表 1-2 列出了水的介电常数。

表 1-2 水的介电常数

温度 (°C)	介电常数	温度 (°C)	介电常数	温度 (°C)	介电常数	温度 (°C)	介电常数
0	87.90	25	78.36	50	69.88	80	60.93
5	85.90	30	76.58	55	68.30	85	59.55
10	83.95	35	74.85	60	66.76	90	58.20
15	82.04	38	73.83	65	65.25	95	56.88
18	80.93	40	73.15	70	63.78	100	55.58
20	80.18	45	71.50	75	62.34		

5. 水的表面张力

在水体内部,由于每个水分子受其四方相邻水分子的引力,所以每个水分子受力是平衡的。但靠近表面的水分子则受力不平衡,水体内部对它的引力大,外部空气对它的引力小,从而使水体表面分子受到一种向内的拉力,称为表面张力。水有很大的表面张力,可达到 $72.75 \times 10^{-5} \text{N/cm}$,表现出异常的毛细、润湿、吸附等特性。

6. 水的黏度

表示水体运动过程中所发生的内摩擦力,其大小与内能损失有关。纯水的黏度取决于温度,与压力几乎无关。表 1-3 列出水的动力黏度和运动黏度与温度的关系。

表 1-3 水的动力黏度和运动黏度

温度 (°C)	动力黏度 (Pa·s)	运动黏度 (cm ² /s)	温度 (°C)	动力黏度 (Pa·s)	运动黏度 (cm ² /s)	温度 (°C)	动力黏度 (Pa·s)	运动黏度 (cm ² /s)
0	0.001 788 7	0.017 887	35	0.000 720 5	0.007 248	70	0.000 406 2	0.004 154
5	0.001 515 5	0.015 156	40	0.000 653 3	0.006 584	75	0.000 379 5	0.003 892
10	0.001 306 1	0.013 065	45	0.000 595 8	0.006 017	80	0.000 355 6	0.003 659
15	0.001 140 6	0.011 416	50	0.000 549 7	0.005 546	85	0.000 334 1	0.003 451
20	0.001 004 6	0.010 064	55	0.000 507 2	0.005 146	90	0.000 314 6	0.003 259
25	0.000 894 1	0.008 968	60	0.000 470 1	0.004 781	95	0.000 298 1	0.003 099
30	0.000 801 9	0.008 054	65	0.000 439 5	0.004 445	100	0.000 282 1	0.002 944

7. 水的电导

因为水是一种很弱的两性电解质，能电离出少量的 H^+ 和 OH^- ，所以即使是理想的纯水也有一定的导电能力，这种导电能力常用电导率来表示。

电导率是电阻率的倒数。电阻率是对断面为 $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ 、长为 1cm 的水所测得的电阻，单位是欧姆·厘米 ($\Omega \cdot \text{cm}$)，电导率的单位是西门子/厘米 (S/cm 或 $\mu\text{S}/\text{cm}$)。

表 1-4 列出了水的电阻率和电导率， 25°C 时纯水的电阻率为 $1.83 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ 。

表 1-4 水的电阻率和电导率

t ($^\circ\text{C}$)	A_H	A_{OH}	$K_{H_2O} (\times 10^{-14})$	电阻率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	电导率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
	(S · cm ² /mol)				
5	251	133	0.185	62.1×10^6	0.016
10	276	149	0.292	45.5×10^6	0.022
15	300	164	0.452	31.2×10^6	0.032
20	325	182	0.681	26.3×10^6	0.038
25	350	196	1.008	18.3×10^6	0.055
30	375	212	1.471	14.1×10^6	0.071
35	400	228	2.084	9.75×10^6	0.102
40	421	244	2.918	7.66×10^6	0.131
45	444	260	4.012	7.10×10^6	0.141
50	464	276	5.45	5.80×10^6	0.172

注 A_H 、 A_{OH} 分别为 H^+ 和 OH^- 的摩尔电导率， K_{H_2O} 为水的离子积。

8. 水的沸点与蒸汽压

水的沸点与蒸汽压力有关。如将水放在一个密闭容器中，水面上就有一部分动能较大的水分子能克服其他水分子的引力，逸出水面进入容器上部空间成为蒸汽，这一过程称为蒸发。进入容器空间的水分子不断运动，其中一部分水蒸气碰到水面，被水体中的水分子所吸引，又返回到水中，这一过程称为凝结。当水的蒸发速度与蒸汽的凝结速度相等时，水面的水分子数量不再改变，即达到动态平衡。

在温度一定的情况下，达到动态平衡时的蒸汽称为该温度下的饱和蒸汽，这时的蒸汽压力称为饱和蒸汽压，简称蒸汽压。当水的温度升高到一定值，其蒸汽压力等于外界压力时，水就开始沸腾，这时的温度称为该压力下的沸点，不同压力下水的沸点见表 1-5，表 1-6 列出了水的蒸汽压与温度之间的关系。

表 1-5 不同压力下水的沸点

压力 (MPa)	0.196	0.392	0.588	0.98	1.96	22
沸点 ($^\circ\text{C}$)	120	143	158	179	211	374

表 1-6 水的蒸汽压与温度之间的关系

温度 ($^\circ\text{C}$)	0	40	80	100	120	140	180	374
蒸汽压 (Pa)	6.1×10^2	7.4×10^3	4.7×10^4	1.0×10^5	2.0×10^5	3.6×10^5	1.0×10^6	2.2×10^7

当气体高于某一温度时，不管加多大压力都不能将气体液化，这一温度称为气体的临界

温度。在临界温度下，使气体液化的压力称为临界压力。水的临界温度为 374.15℃，临界压力为 22.12MPa。

1.3 水化学概况

水化学是研究天然水中的化学过程及其杂质组分分配规律的一门学科，它探讨海水、河水、湖水和地下水等的水质变化和某些水处理的原理。水化学的主要依据是化学基础理论。

1.3.1 天然水中的杂质分类

1. 按杂质颗粒大小分类

按水中杂质的尺寸大小，可分为溶解物（小于 1.0nm）、胶体颗粒（1.0~100nm）和悬浮物（大于 100nm）三种，详见图 1-3。

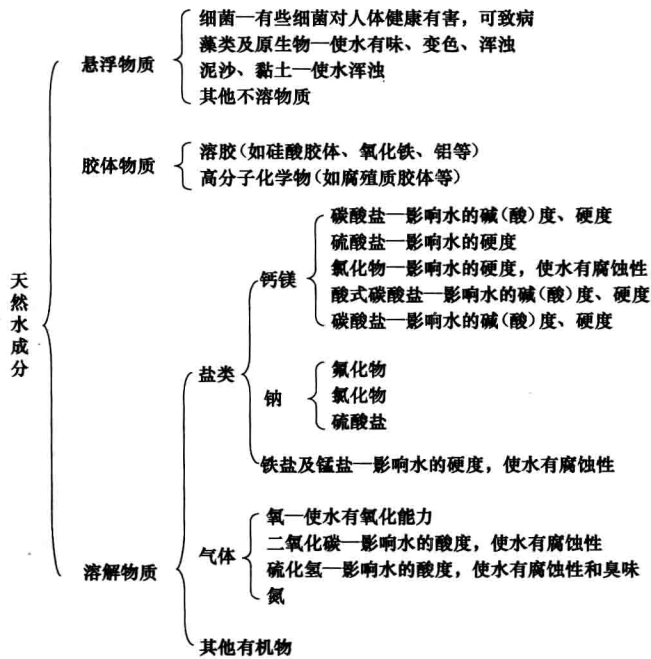


图 1-3 天然水中的基本成分

的产物，属于亲水的酸性物质，分子量在几百到数万之间。腐殖质本身一般对人体无直接毒害作用，但其中的大部分种类可与其他化合物作用，而具有危害人体健康的潜能。例如，腐殖酸与氯反应会生产有致癌作用的三卤甲烷。

(3) 生物（微生物）杂质。这类杂质包括原生动动物、藻类、细菌、病毒等。它们会使水产生异臭异味，增加水的色度和浑浊度，导致各种疾病等。

3. 按杂质来源分类

按照杂质的来源，可将水中的杂质分为天然的和污染性的物质两大类。

随着人类活动的不断拓展和人类社会生产种类及规模的不断扩大，天然水体中污染物的种类和数量不断增加，其中数量最多的是人工合成的有机物，以农药、杀虫剂和有机溶剂为主。目前，全世界已在水中检测出 2000 多种有机化学物。

2. 按杂质化学结构分类

从化学结构上可以将水中的杂质分为无机杂质、有机杂质和生物杂质三类。

(1) 无机杂质。天然水体中的无机杂质主要是溶解性的离子、气体及悬浮性的泥沙。溶解离子有 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 等阳离子和 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 等阴离子。离子的存在使天然水表现出不同的含盐量、硬度、pH 值和电导率特性，进而表现出不同的物理化学性质。泥沙的存在使水浑浊。

(2) 有机杂质。天然水体中的有机杂质与水体环境密切相关。常见的有机杂质为腐殖质类以及蛋白质等。腐殖质是土壤的有机组分，植物与动物残骸在土壤分解过程中的

1.3.2 天然水中的杂质与环境关系

地球上的水量是很大的,据估计约为 $1.4 \times 10^9 \text{ km}^3$ 。如果把地球表面夷平,使天然水完全平铺在地面上,其厚度可达 2600m。

地球上的水在地面上的分布极不均匀。它的 97.47% 处于浩瀚的海洋中,约有 2.2% 形成南北极的冰山和冰川,其余不足 1% 处于大陆部分。在大陆水中绝大部分为地下水,至于江、河、湖中的水仅占总水量的 0.2%。

天然水是大自然中各种生态循环的重要组成部分,它在大自然的各个部位,生生不息,循环不已。因此,天然水中污染的杂质,因受环境影响的不同,而有不同的情况。

1. 大气水

大气水来自地表水的蒸发,其中海洋水的蒸发量占很大部分。大气中的水分会因气候条件的变化而转变成雨、雪和雹等形态降落到地面上来,这是人们可以获得的大气降水。

大气降水因为经过蒸发的过程,理应十分纯净,但实际上由于它和低空大气相接触,仍然有一定程度的污染。大气水中会夹带大气中的尘埃,且有可能与低空的气体建立起溶解平衡。

低空大气层中气体的平均组成见表 1-7,其中, CO_2 、 CO 、 SO_2 和氮的氧化物等组分大都来自燃烧产物和工业地区的排放物,它们在大气中的含量,常因地区环境条件的不同而有较大差异。

表 1-7 大气中气体的平均组成

气体名称	体积百分率 (%)	分压 (Pa)	气体名称	体积百分率 (%)	分压 (Pa)
N_2	78.1	79×10^3	CO	$(0.06 \sim 1) \times 10^{-4}$	$(0.06 \sim 1) \times 10^{-1}$
O_2	20.9	21×10^3	SO_2	1×10^{-4}	0.1
Ar	0.93	0.94×10^3	N_2O	5×10^{-5}	0.05
H_2O	0.1~2.8	$(0.1 \sim 2.8) \times 10^3$	H_2	5×10^{-5}	0.05
CO_2	0.03	30	O_3	$(0.1 \sim 1.0) \times 10^{-5}$	$(1 \sim 10) \times 10^{-3}$
Ne	1.8×10^{-3}	1.8	Xe	8.7×10^{-5}	8.8×10^{-3}
He	5.2×10^{-4}	0.52	NO_2	$(0.05 \sim 2) \times 10^{-5}$	$(0.05 \sim 2) \times 10^{-2}$
CH_4	1.5×10^{-4}	0.15	Rn	6×10^{-13}	6×10^{-10}
Kr	1.1×10^{-4}	0.11			

SO_2 和 CO_2 在大气中的含量虽然不大,但由于它们在水中的溶解度比大气的组成物 O_2 和 N_2 的溶解度大许多(见表 1-8),所以当大气受这些气体污染程度大时,常常可使大气降水的水质受到很大影响。例如,含高浓度 SO_2 大气中雨水的 pH 值可降到 4.4~5.5 之间,因为雨水的酸碱缓冲性很小,所以只要水中溶解有少量酸性物质,便会使水具有较强的酸性。

大气降水中还有一些会因地区不同而变化的组分,如近海地区的降水中含有 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 的量都较内陆地区的多,因为蒸发出的海水蒸气中携带有水滴。

表 1-8 气体在水中的溶解度 (25℃)

气体名称	溶解度 (mg/kg)
N_2	17.5
O_2	39.3
CO_2	1450
SO_2	94 100

注 气体溶解度是指 25℃ 该气体的压力(包括水蒸压力)为 101.3kPa(即一个标准大气压)时,它在水中的溶解度。

2. 地表水

当降水到达地面后,由于它与地面上动植物、土壤、岩石等相接触,会发生一系列生物和化学作用,从而使水中杂质的量为增加。而且,由于各地区的地理条件、地质组分和生物活动等情况不同,当水与这些环境接触之后就会形成杂质组成不同的各种类型天然水。

在以花岗岩为主的地质结构地区的地表水中,溶解的矿物质最少,一般不超过 30mg/L。例如我国黑龙江、福建、湖南和广西等地的某些地表水就属于此类。在地质结构不是以花岗岩为主的地区,其地表水通常含有中等程度的硬度、碱度和含盐量。

地球上的生物生态循环对天然水水质的影响很大,特别是对地表水。例如,有机体在水中光合作用时,会吸取水中无机碳(CO_2 、 HCO_3^- 和 CO_3^{2-})并放出氧,使水的 pH 值上升。又如,水体中有机体在合成细胞时,会吸取水中 N、P、K 等营养元素。

当今,人类的活动会对水质产生很大影响。例如,城市生活污水的排放会增加天然水中有机物和矿物质的含量。工业和农业排放的废水中有机物的种类繁多,典型废水的有机碳含量可高达 100~300mg/L,有机氮可高达 10~30mg/L,有机磷可高达 1~2mg/L,而一般地表水的有机碳仅为 1~5mg/L,有机氮小于 1mg/L,有机磷小于 0.5mg/L。

水中有机物如属于可进行生物降解的,则可通过天然水的自净化作用或在污水处理的过程中除去。水中不能进行生物降解的有机物,如腐殖质等,则会使水带色,且会改变水中重金属离子的溶解度和各种离子间的平衡关系。

杂质进入大海之后,会进行与岩石分化作用相反的过程,产生新的岩石,于是使海水水质长期稳定不变,表 1-9 所列 of 海水中的主要成分及含量。

表 1-9 海水主要成分及平均含量

成分	含量 (mg/L)	占总含盐量的比例 (%)	成分	含量 (mg/L)	占总含盐量的比例 (%)
Cl^-	18 980	55.17	F	1.4	—
Na^+	10 560	30.7	Rb	0.2	—
SO_4^{2-}	2560	7.44	Al	0.16~1.9	—
Mg^{2+}	1272	3.70	Li	0.1	—
Ca^{2+}	400	1.16	P	0.001~0.1	—
K^+	380	1.10	Ba	0.05	—
HCO_3^-	142	0.41	I	0.05	—
Br^-	65	0.19	Cu	0.001~0.09	—
Sr^{2+}	13	0.04	Fe	0.002~0.02	—
SiO_2	6	—	Mn	0.001~0.01	—
NO_3^-	2.5	—	As	0.003~0.02	—
B	4.6	—			

3. 地下水

地下水主要是由于雨水和地表水渗入地下而成的。当它通过土壤时,由于过滤作用而将水中的悬浮物去除,所以地下水常常是清澈透明的。地下水的含盐量和硬度常比地表水高,因为在地表水渗入地下时,沿途溶解了许多物质。

1.3.3 天然水的分类

在水处理中,有时为了选择处理方法、对水处理设备进行工艺计算,或者判断可能生成

沉积物的组成,需要对天然水体进行分类。天然水体分类的方法有许多种,这里主要从电厂水处理的角度进行分类。

1. 按含盐量分类

按水中含盐量的高低,可将天然水分为四种类型,见表 1-10。

表 1-10 天然水按含盐量分类

低含盐量水	中等含盐量水	较高含盐量水	高含盐量水
<200mg/L	200~500mg/L	500~1000mg/L	>1000mg/L

我国江河水质变化很大,例如闽江的含盐量仅为 35.5mg/L,而塔里木河的含盐量高达 31751.3mg/L,江河水属于低含盐量的约占一半,剩余基本为中等含盐量水。我国江河的平均含盐量为 166mg/L,而世界江河的平均含盐量小于 100mg/L。

地下水大部分是中等含盐量水。

2. 按硬度分类

按水硬度的高低,可将天然水分为五种类型,见表 1-11。

表 1-11 天然水按硬度分类

极软水	软水	中等硬度水	硬水	极硬水
<1.0mmol/L	1.0~3.0mmol/L	3.0~6.0mmol/L	6.0~9.0mmol/L	>9.0mmol/L

我国江河水的硬度情况:在东南沿海一带最低,大都小于 0.5mmol/L,为极软水区;越向西北硬度越大,最高可达 3~6mmol/L;东北地区,硬度由北向南增大,松花江和东北沿海又低达 0.5~1.0mmol/L。

3. 按阴阳离子的相对含量分类

水中溶解性的盐类都是以离子状态存在的,所以水分析的结果常以离子表示,但在水处理中有时将阴、阳离子结合起来,写成化合物的形式。结合顺序的排列原则是:阳离子按 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 的顺序排列,阴离子按 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 的顺序排列,即 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 首先结合,若有剩余的 Ca^{2+} 则与 SO_4^{2-} 结合,再与 Cl^- 结合;若有剩余的 HCO_3^- ,则与 Mg^{2+} 结合,再与 Na^+ 或 K^+ 结合。根据它们的含量,作图解如图 1-4 所示。

这种结合排列的理由:一是根据电中性原则,即全部阳离子所带的正电荷与全部阴离子所带的负电荷相等,当以带一个电荷的摩尔质量为基本单元时,全部阳离子的毫摩尔数

等于全部阴离子的毫摩尔数;二是根据组合形成化合物的溶解度大小,溶解度小的先结合。 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的碳酸氢盐最易转化成沉淀物,其次是它们的硫酸盐;阳离子 Na^+ 和 K^+ 、阴离子 Cl^- 都不易生成沉淀物。

根据上述这种假想结合原则,又可以将天然水分成碱性水和非碱性水。

$\frac{1}{2}\text{Ca}^{2+}$	$\frac{1}{2}\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+\text{+K}^+$		mmol/L
$\frac{1}{2}\text{HCO}_3^-$		$\frac{1}{2}\text{SO}_4^{2-}$	Cl^-	
$\frac{1}{2}\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	$\frac{1}{2}\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$	NaHCO_3 KHCO_3		

图 1-4 水中离子的假象组合

(1) 碱性水。碱性水是指碱度 (A) 大于硬度 (H) 的水, 即 $[\text{HCO}_3^-] > \left[\frac{1}{2}\text{Ca}^{2+}\right] + \left[\frac{1}{2}\text{Mg}^{2+}\right]$, 如图 1-4 所示。由图 1-4 可知, 在碱性水中, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 都是以 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 、 $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ 的状态存在, 而没有 Ca^{2+} 的非碳酸盐硬度, 另外还有一部分 NaHCO_3 , 称过剩碱度 (A_G), 在早期的水处理中也称负硬度, 即

$$A_G = A - H \quad (1-1)$$

$\frac{1}{2}\text{Ca}^{2+}$	$\frac{1}{2}\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	mmol/L	
HCO_3^-		$\frac{1}{2}\text{SO}_4^{2-}$		Cl^-
$\frac{1}{2}\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	$\frac{1}{2}\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$	$\frac{1}{2}\text{MgSO}_4$		

图 1-5 非碱性水图解

(2) 非碱性水。非碱性水是指硬度大于碱度 ($H > A$) 的水, 即 $\left[\frac{1}{2}\text{Ca}^{2+}\right] + \left[\frac{1}{2}\text{Mg}^{2+}\right] > [\text{HCO}_3^-]$, 如图 1-5 所示。由图 1-5 可知, 在非碱性水中, 有 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的非碳酸盐硬度, 而没有过剩碱度 A_G 。

此外, 也可将水分为碳酸盐型和非碳酸盐型, 前者为

$[\text{HCO}_3^-] > \left[\frac{1}{2}\text{SO}_4^{2-}\right] + [\text{Cl}^-]$, 后者为 $[\text{HCO}_3^-] < \left[\frac{1}{2}\text{SO}_4^{2-}\right] + [\text{Cl}^-]$, 我国的天然水多数为碳酸盐型。

1.3.4 天然水的利用

大自然中存在的天然水的量虽然非常丰富, 然而处于大陆地区的可以利用的淡水量却有限。近年来随着工业的迅速发展, 用水量大为增加, 有许多工业发达的地区出现了水源水量不足和水体受到严重污染的问题。再者, 由于有一些现代工业对水质的要求非常高, 因此还出现了需要对天然水进行深度处理的问题。

下面对工业用水、生活用水和废水三个方面作简要叙述。

1. 工业用水

工业用水中需要量最大的是冷却水, 它的用量约为工业用水总量的 90%。在电力、石油、钢铁和许多化学工业部门都需要大量冷却水。例如, 在日产千吨合成氨的工厂中, 冷却水用量为 22 000t/h; 一台发电量为 100MW 的机组, 冷却水用量约为 9000t/h。为了防止冷却水系统出现附着物和腐蚀等故障, 常需要将大量的水进行处理。

在工业用水中, 对水质要求最高的是电子工业和高参数锅炉用水。例如, 在电子工业的半导体器件和集成电路生产中几乎每道工序均需“纯水”乃至“高纯水”。它不仅要求水的含盐量达 $\mu\text{g/L}$ 级, 或者说, 它的纯度达 99.999 999 9%, 而且要求水中几乎没有悬浮物和细菌。又如, 对于压力为 6~17MPa 的直流锅炉, 要求给水的钠含量不大于 $10\mu\text{g/L}$ 。对于如此纯净的水, 必须有精密的水处理工艺才能制取。

总之, 不同的工业对水质有不同的要求, 为了达到这些要求, 必须有相应的处理, 例如, 混凝、石灰处理、离子交换和投加稳定剂等都是在化学反应基础上的。

2. 生活用水

生活用水主要是供饮用和洗涤, 它除了要求在色、臭、味等方面的物理性能必须良好

外, 还应对人体无毒。

对于生活用水处理, 除了必须进行混凝与过滤等与工业用水相同的处理外, 还常常需要用氯进行消毒, Cl_2 在水溶液中发生的氧化反应也是与水化学分不开的。

3. 废水

在自然界中, 水体的污染和自净化本来是一种生态平衡。而现在由于工业的发展, 人为污染破坏了这种生态平衡。这不仅是由于污染量大的关系, 而且由于某些污染物不易被自然界的微生物降解。因此, 必须借助于人工的废水处理, 否则, 水体的污染将危及人类本身的生存。

废水处理的方法很多, 对于各种不同的污染都应有其相应的对策。其中, 化学处理是一个重要的部分。

1.4 常用水质指标

水质是水及其所含杂质共同表现出来的物理、化学和生物学的综合特性, 亦即水溶液的使用性质。表示水中杂质个体成分或整体性质的项目, 称为水质指标, 它是衡量水质好坏的参数。

天然水都有不同程度的自然污染和人为污染, 使水中含有各种各样的杂质。由于工业用水的种类繁多, 因此对水质的要求也各不相同, 即使是同一种类型的工业产品, 不同的生产部门所制定的用水水质标准也不完全一致。对大多数工业用水来说, 不仅要求除去水中的悬浮物和胶体杂质, 而且还要求不同程度地除去溶解物质, 现将锅炉用水的各种水质指标、符号及常用单位列于表 1-12 中。

表 1-12 锅炉用水的水质指标

水质指标	符号	常用单位	水质指标	符号	常用单位
悬浮物	XG	mg/L	重碳酸根	HCO_3^-	mg/L
浊度	ZD	NTU	碳酸根	CO_3^{2-}	mg/L
透明度	TD	cm	氯离子	Cl^-	mg/L
含盐量	C	mmol/L	硅酸根	SiO_3^{2-}	mg/L
灼烧减少固体	SG	mg/L	磷酸根	PO_4^{3-}	mg/L
灼烧残渣	SC	mg/L	硫酸根	SO_4^{2-}	mg/L
电导率	DD 或 K	$\mu\text{S}/\text{cm}$	硝酸根	NO_3^-	mg/L
碱度	A	mmol/L	亚硝酸根	NO_2^-	mg/L
硬度	H	mmol/L	钙	Ca^{2+}	mg/L
碳酸盐硬度	H_T	mmol/L	镁	Mg^{2+}	mg/L
非碳酸盐硬度	H_F	mmol/L	钾	K^+	mg/L
化学需氧量	COD	mmol/L	钠	Na^+	$\mu\text{g}/\text{L}$
含油量	Y	mg/L O_2	铵	NH_4^+	mg/L
二氧化碳	CO_2	mg/L	铁	Fe^{2+} 、 Fe^{3+}	$\mu\text{g}/\text{L}$
溶解氧	O_2	$\mu\text{g}/\text{L}$	铝	Al^{3+}	$\mu\text{g}/\text{L}$
			pH		

在表 1-12 中列出的各种指标中, 有许多是代表某一种离子或化合物, 称为成分指标。