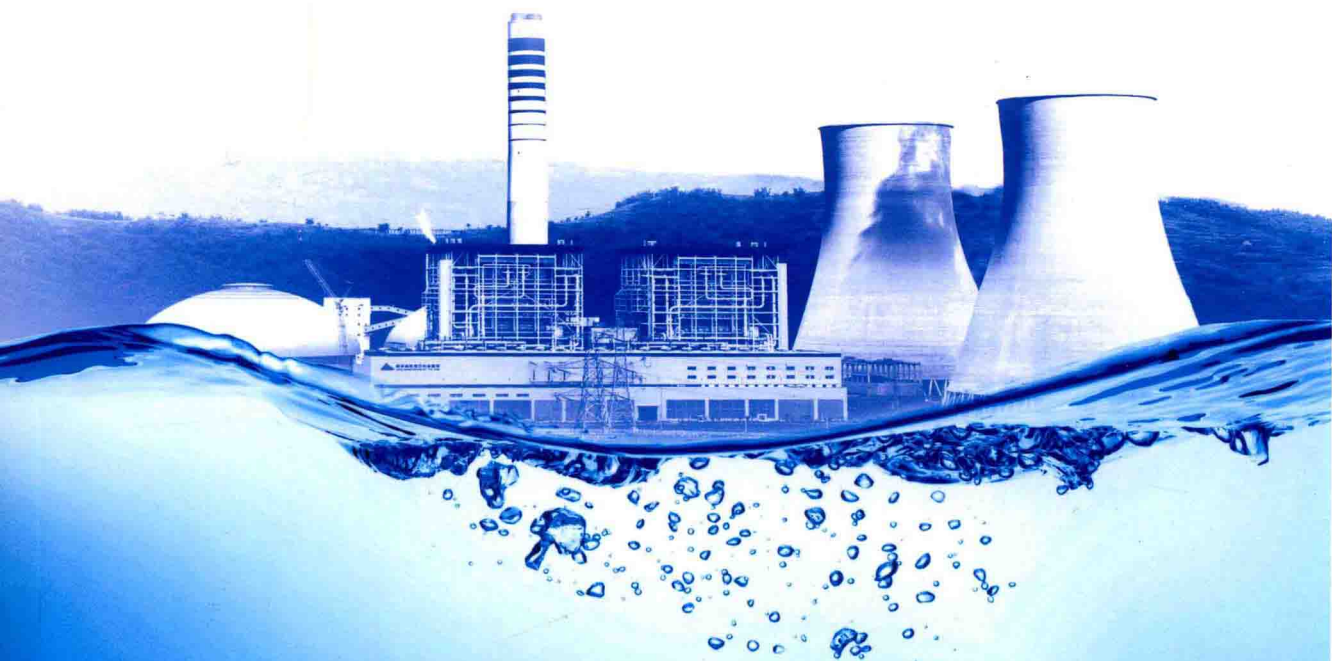


HUOLI FADIANCHANG  
SHUICHULI JI SHUIZHI KONGZHI

(第三版)

# 火力发电厂 水处理及水质控制

李培元 周柏青 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

HUOLI FADIANCHANG  
SHUICHULI JI SHUIZHI KONGZHI

(第三版)

# 火力发电厂 水处理及水质控制

李培元 周柏青 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书是在《火力发电厂水处理及水质控制》(第二版)及《发电厂水处理及水质控制》的基础上重新修订而成的。本书全面系统地介绍了火力发电厂水质处理及控制过程中各个操作单元的基本原理、工艺流程、设备结构、设计原则及控制方法。主要内容包括:天然水体的水资源及水质特性,锅炉用水的水质指标,水的混凝、沉淀与澄清处理,水的过滤处理,水的吸附、除铁、除锰、除氟、除砷与消毒处理,水的膜过滤、膜渗透,膜除盐、离子交换除盐、电除盐及蒸馏法除盐,锅炉设备金属的腐蚀与防止,锅炉给水和炉水的水质调节与控制,热力设备的化学清洗与保护,凝结水的精处理及空冷机组的水工况,冷却塔的设计、冷却原理,循环冷却水的处理与控制,火力发电厂的废(污)水特性、处理原理、处理工艺流程和中水回用等。另外,还介绍了城镇废(污)水中的污染物及物理、化学处理和生物转化处理的基本原理、工艺流程等,共计二十三章。

本书可作为在电力、环保、冶金、石油等领域工作的工程技术人员、管理人员的工作参考及培训用书,也可作为高等院校水质科学与技术专业、环境工程专业、应用化学专业本科生、研究生的教学参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

火力发电厂水处理及水质控制/李培元,周柏青主编. —3版. —北京:中国电力出版社,2018.7  
ISBN 978-7-5198-1133-4

I. ①火… II. ①李… ②周… III. ①火电厂-水处理②火电厂-水质控制 IV. ①TM621.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第220769号

---

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:韩世韬(010-63412373)

责任校对:李楠 郝军燕

装帧设计:赵姗姗

责任印制:蔺义舟

---

印 刷:北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次:2000年2月第一版 2018年7月第三版

印 次:2018年7月北京第六次印刷

开 本:787毫米×1092毫米 16开本

印 张:42.25

字 数:1052千字

印 数:12001—13500册

定 价:148.00元

---

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换



## 前 言

本书是在《火力发电厂水处理及水质控制》(第二版)和《发电厂水处理及水质控制》的基础上重新修订而成的,同时也参考了近几年出版的一些新的文献资料。本书自2000年出版以来,已先后重印了多次,得到了各方读者的认可和支持。

本次修订,增加了膜的过滤处理(包括微滤、超滤、纳滤和渗透),地下水的除铁、除锰、除氟、除砷处理,城市饮用水的消毒处理,废(污)水的其他物理、化学处理(包括离心处理、中和处理、电解处理、氧化还原处理、吹脱处理、汽提处理等),水体的自净与稳定塘、好氧生物处理、厌氧生物处理及生物脱氮、脱磷处理,火力发电厂的脱硫、脱硝废水处理及中水回用等内容。

另外,本次修订还改写了水的过滤处理、反渗透脱盐、电除盐、离子交换除盐、凝结水精处理、冷却塔设计及锅炉给水和炉水的水化学工况等内容。其他章节也都进行了适当的删减和补充,使本书的内容更加丰富和新颖,也更加适应目前实施的节约用水、循环用水、串联用水及超低排放等社会需求。

本书由李培元、周柏青主编,具体分工为:武汉大学李培元编写第一、二、三、四、六、九、十二、十八、十九、二十、二十一、二十二章;武汉大学周柏青编写第五、七、八、十一章;武汉大学陈志和编写第十章;武汉大学李正奉编写第十三、十四、十五、十六章;西安热工研究院田文华编写第十七章;武汉大学黄梅编写第二十三章。全书由李培元、周柏青统稿。

在本书编审过程中,山西省电力公司原教授级高级工程师段培珍、西安热工研究院化学所原教授级高级工程师陈洁、华北电力设计院化学室原教授级高级工程师聂承信,对本书的编写大纲和各章节进行了详细的审订,并提出了许多宝贵的意见和建议,在此向他们表示衷心的感谢。

在本书出版之际,编者向编写过程中被参考和引用的有关书籍和文献资料的作者表示深切的敬意和感谢。另外,还感谢曾参与第二版编写的武汉大学曹顺安教授、杨万生副教授、夏中明副教授。

由于编者水平有限,书中难免有不妥或错误之处,敬请读者批评指正。

主 编

2018年4月

## 第二版前言

《火力发电厂水处理及水质控制》，自 2000 年 2 月第一次印刷出版以来，已重印两次，受到了广大读者的厚爱和支持。但自进入 21 世纪以来，我国电力工业得到飞速发展，单机容量已从 200~300MW 向 600~1000MW，甚至 1200MW 发展，300~600MW 机组已成为 21 世纪的主力机组。由于亚临界压力和超临界压力机组对水汽质量提出了更高的要求，水处理技术及水质控制技术也有了很大发展，因此，我们对本书进行了修订，以满足目前水处理技术人员的实际需要。

第二版编写过程中，在仍以第一版的基本框架和基本内容为主，并保持了原有逻辑性、系统性和完整性的基础上，增加了一些 600~1000MW 亚临界和超临界压力机组及国外引进机组的资料，如 UF 技术、EDI 技术、蒸汽加氧吹扫技术、AVT 水工况、CWT 水工况、凝汽器不锈钢管和钛管的腐蚀及其防止等；删去了一部分内容，如水的消毒处理、阳离子交换处理、电渗析除盐和一些药剂标准等；重新改写了一部分内容，如水的澄清、沉降和过滤处理，水的吸附处理，热力设备的腐蚀与防止，热力设备的清洗，凝结水精处理等。另外，对少部分章节只是进行了文字修正。

第二版和第一版一样，全部采用国家规定的法定计量单位，在锅炉水处理中过去所表示的物质的量浓度单位 meq/L（或 eq/L、 $\mu\text{eq/L}$ ）全部改为 mmol/L（或 mol/L、 $\mu\text{mol/L}$ ），但都是指电化学摩尔质量，即其基本单元相当于具有一个电荷的粒子。

在第二版的编写过程中，邀请了武汉大学动力与机械学院水质工程系的陈志和、周柏青、曹顺安教授，杨万生、李正奉、夏中明副教授参与部分章节的编写工作。

在本书第二版的审稿过程中，武汉大学的钟金昌、钱达中、郑芳俊教授，对各章节进行了审订，提出了许多宝贵的意见和建议，在此向他们表示衷心的感谢。

由于时间仓促、水平有限，书中难免有不妥或错误之处，敬请各位读者批评指正。

主 编

2007 年 5 月

## 第一版前言

高参数、大容量热力设备的不断出现,对火力发电厂水处理技术,水汽质量控制及管理水平,都提出了更高的要求。为此,我们根据近些年来国内外的大量文献资料和科研成果,编成此书,以供有关工程技术人员、管理人员及在校本科生、研究生和教师参考。

本书全部采用国家规定的法定计量单位,在锅炉水处理中过去所表示的物质的量浓度单位 meq/L (或 eq/L、 $\mu\text{eq/L}$ ) 全部改为 mmol/L (或 mol/L、 $\mu\text{mol/L}$ ),但都是指电化学摩尔质量,即其基本单元相当于具有一个电荷的粒子。因此,书中硬度、碱度、含盐量及摩尔浓度分率的含义分别为:

$$\text{硬度} = [1/2\text{Ca}^{2+}] + [1/2\text{Mg}^{2+}]$$

$$\text{碱度} = \text{滴定中所用的} [\text{H}^+] \text{量}$$

$$\text{含盐量} = [1/2\text{Ca}^{2+}] + [1/2\text{Mg}^{2+}] + [\text{Na}^+] + \dots$$

$$\text{在 } \text{Ca}^{2+}、\text{Na}^+ \text{ 混合液中, } \text{Ca}^{2+} \text{ 的摩尔浓度分率} = \frac{[1/2\text{Ca}^{2+}]}{[1/2\text{Ca}^{2+}] + [\text{Na}^+]},$$

$$\text{Na}^+ \text{ 的摩尔浓度分率} = \frac{[\text{Na}^+]}{[1/2\text{Ca}^{2+}] + [\text{Na}^+]}$$

在以上各式及书中,符号  $[\ ]$  表示相应物质的量浓度。

为了便于从事火力发电厂水处理工作的人员学习、参考,将水汽质量控制中所涉及的现代分析检测技术及微机诊断技术,以及水处理设备、凝结水精处理设备的程控技术等内容,也同时编入本书,这是非常有益的。

本书的编写,除邀请了武汉水利电力大学电厂化学教研室的陈志和、周柏青教授,杨万生、曹顺安和于萍副教授外,还特别邀请了西安热工研究院副总工程师杨东方高级工程师和高秀山高级工程师,湖北电力试验研究所许维宗教授级高级工程师,美国海德能公司徐平博士和张烽高级工程师。这对提高本书的学术水平和丰富本书的内容都是很重要的,在此向他们表示深切的谢意。

在本书的审稿过程中,武汉水利电力大学的钟金昌、钱达中、郑芳俊教授,对各章节进行了审订,提出了许多宝贵的意见和建议,在此向他们表示衷心的感谢。

由于本书所涉及的内容非常广泛和时间仓促,加之我们的水平有限,书中难免有不妥或错误之处,敬请各位读者批评指正。

主 编

1999年10月

# 目 录

前言

第二版前言

第一版前言

## 第一章 天然水体资源与物质组成 ..... 1

第一节 水资源与水的特性 ..... 1

第二节 天然水体的物质组成 ..... 5

第三节 影响陆地水化学组成的因素 ..... 13

## 第二章 锅炉用水概述 ..... 17

第一节 锅炉用水的水质指标 ..... 17

第二节 天然水体的分类 ..... 22

第三节 天然水体的水化学特性 ..... 25

第四节 天然水体中的化合物 ..... 30

## 第三章 水的混凝处理 ..... 41

第一节 水中胶体颗粒的主要特性 ..... 41

第二节 胶体颗粒的稳定性与脱稳方法 ..... 44

第三节 混凝处理原理 ..... 48

第四节 混凝剂、助凝剂和混凝试验 ..... 54

第五节 絮凝反应与动力学过程 ..... 62

第六节 混凝处理设备 ..... 68

## 第四章 水的沉淀、沉降与澄清处理 ..... 74

第一节 水的沉淀处理 ..... 74

第二节 悬浮颗粒在静水中的沉降 ..... 78

第三节 平流式沉淀池 ..... 82

第四节 斜板、斜管沉淀池 ..... 89

第五节 澄清池 ..... 93

第六节 澄清池的运行管理与调整试验 ..... 102

## 第五章 水的过滤处理 ..... 104

第一节 过滤介质 ..... 104

第二节 粒状滤料床的截污原理 ..... 112

第三节	粒状滤层的水头损失	115
第四节	过滤设备的工作过程	118
第五节	过滤设备	128
<b>第六章</b>	<b>水的吸附、除铁、除锰、除氟、除砷与消毒处理</b>	<b>139</b>
第一节	吸附处理原理与类型	139
第二节	活性炭的性能	141
第三节	活性炭的吸附容量与吸附速度	145
第四节	活性炭在水处理中的应用	150
第五节	活性炭床的运行与管理	153
第六节	地下水的除铁	155
第七节	地下水的除锰	160
第八节	水的除氟和除砷	162
第九节	饮用水的消毒处理	166
<b>第七章</b>	<b>微滤、超滤、纳滤和渗透</b>	<b>171</b>
第一节	微滤	171
第二节	超滤	176
第三节	纳滤	185
第四节	渗透	192
<b>第八章</b>	<b>反渗透除盐</b>	<b>198</b>
第一节	基本原理	198
第二节	反渗透膜	201
第三节	膜元件(膜组件)	208
第四节	给水预处理	214
第五节	反渗透装置及其运行	221
第六节	反渗透装置的故障与对策	227
<b>第九章</b>	<b>离子交换理论概述</b>	<b>231</b>
第一节	离子交换树脂	231
第二节	离子交换树脂的性能指标	240
第三节	离子交换平衡	248
第四节	离子交换动力学	253
第五节	动态离子交换过程	256
<b>第十章</b>	<b>离子交换除盐</b>	<b>261</b>
第一节	一级复床除盐	261
第二节	带有弱性树脂的一级复床除盐	269
第三节	离子交换装置及运行操作	276
第四节	除碳器	287



第五节	混合床除盐 .....	293
第六节	离子交换除盐系统 .....	297
第七节	除盐单元的工艺计算 .....	301
<b>第十一章</b>	<b>电除盐技术 .....</b>	<b>309</b>
第一节	EDI 除盐原理 .....	309
第二节	EDI 装置 .....	318
第三节	EDI 运行技术 .....	325
第四节	EDI 的维护 .....	334
<b>第十二章</b>	<b>蒸馏法除盐 .....</b>	<b>338</b>
第一节	多效蒸馏法除盐 .....	339
第二节	闪蒸蒸发法除盐 .....	346
第三节	水垢的形成与防止 .....	351
<b>第十三章</b>	<b>热力设备的腐蚀 .....</b>	<b>354</b>
第一节	腐蚀的基本原理 .....	354
第二节	火力发电机组水汽系统概况 .....	364
第三节	热力设备的氧腐蚀 .....	368
第四节	热力设备的酸性腐蚀 .....	371
第五节	热力设备的流动加速腐蚀 .....	374
第六节	热力设备的介质浓缩腐蚀和应力腐蚀 .....	377
第七节	凝汽器管的腐蚀及其控制 .....	379
第八节	停用腐蚀与停用保护 .....	384
<b>第十四章</b>	<b>锅炉给水水质调节 .....</b>	<b>389</b>
第一节	给水水质调节的重要性 .....	389
第二节	给水水质调节方式与水质标准 .....	391
第三节	AVT 水化学工况 .....	394
第四节	CWT 水化学工况 .....	407
<b>第十五章</b>	<b>汽包锅炉的炉水调节与蒸汽质量控制 .....</b>	<b>415</b>
第一节	水垢和水渣的特性 .....	415
第二节	汽包锅炉的炉水水质调节 .....	419
第三节	蒸汽品质与污染 .....	430
第四节	各种杂质在饱和蒸汽中的溶解特性 .....	434
第五节	各种杂质在过热器和汽轮机中的沉积 .....	437
第六节	蒸汽纯度标准与控制方法 .....	443
<b>第十六章</b>	<b>热力设备的清洗 .....</b>	<b>450</b>
第一节	热力设备清洗的必要性和范围 .....	450

	第二节	化学清洗常用药剂 .....	451
	第三节	化学清洗的工艺流程 .....	455
	第四节	超临界机组启动阶段的化学监督 .....	460
	第五节	化学清洗的质量检查和废液的处理 .....	467
<b>第十七章</b>	<b>凝结水精处理</b> .....		468
	第一节	概述 .....	468
	第二节	凝结水前置处理 .....	473
	第三节	凝结水除盐 .....	479
<b>第十八章</b>	<b>空冷机组的水工况</b> .....		494
	第一节	发电厂的空冷系统 .....	494
	第二节	空冷系统中的主要设备 .....	500
	第三节	空冷机组的水化学工况及防腐处理 .....	507
<b>第十九章</b>	<b>循环冷却水的冷却构筑物与设计</b> .....		514
	第一节	冷却构筑物 .....	514
	第二节	水的冷却 .....	518
	第三节	冷却塔设计 .....	522
<b>第二十章</b>	<b>循环冷却水处理</b> .....		529
	第一节	敞开式循环冷却水系统的特点 .....	529
	第二节	水质稳定性的判断 .....	535
	第三节	防垢处理 .....	538
	第四节	污垢的形成与防止 .....	557
	第五节	微生物控制 .....	561
<b>第二十一章</b>	<b>废(污)水处理概述</b> .....		571
	第一节	废(污)水污染物与水质标准 .....	571
	第二节	废(污)水的处理方法与工艺流程 .....	574
	第三节	浮力浮上法 .....	576
	第四节	废(污)水的其他物理化学处理法 .....	581
<b>第二十二章</b>	<b>生物处理</b> .....		592
	第一节	天然水体的自净与稳定塘 .....	592
	第二节	好氧生物处理法 .....	598
	第三节	厌氧生物处理法 .....	614
	第四节	废(污)水的脱氮、除磷处理 .....	618
	第五节	污泥的处理与处置 .....	622
	第六节	中水水质标准与中水回用 .....	627

<b>第二十三章</b>	<b>火力发电厂废水处理及回用</b> .....	632
第一节	火力发电厂排放的废水 .....	632
第二节	火力发电厂各类废水处理技术 .....	637
第三节	火力发电厂脱硫、脱硝废水的处理 .....	645
第四节	废水的集中处理及回用 .....	654
第五节	火力发电厂的水平衡 .....	658
<b>参考文献</b>	.....	663

## 天然水体资源与物质组成

### 第一节 水资源与水的特性

#### 一、水资源

##### 1. 世界水资源概况

水资源 (water resources) 是指可直接被人类利用, 并能不断更新的天然淡水, 这主要是指陆地上的表面水和地下浅层水。联合国教科文组织和世界气象组织对水资源的定义为: 作为水资源的水应当是可供利用或可能被利用、具有足够的数量和可用量, 并适合于某地水需求而能长期供应的水源。

地球是一个水量极其丰富的天体, 这是它与其他星球的不同之处。海洋和陆地上的液态水和固态水构成了一个连续的圈层, 平均水深可达 3000m, 覆盖着 3/4 以上的地球表面, 称为水圈 (hydrosphere), 它包括江河湖海中一切淡水和咸水、土壤水、浅层与深层地下水以及两极冰帽和高山冰川的冰, 还包括大气中的水滴和水蒸气。表 1-1 列出地球上各种水的分布和停留时间。

表 1-1 水的分布与停留时间

分布	面积 ( $\times 10^6 \text{ km}^2$ )	水量 ( $\times 10^3 \text{ km}^3$ )	占总量的百分比 (%)	平均停留时间
江河	—	1~2	0.000 1	12~20d
大气圈 (云和水汽)	516	13	0.001	9~12d
土壤水 (潜水面以上)	130	67	0.005	15~30d
盐湖与内陆海	0.5	104	0.007	10~ $10^2$ 年
淡水湖	0.85	125	0.009	10~ $10^2$ 年
地下水 (800m 深度以上)	130	8300	0.59	$10^2 \sim 10^3$ 年
冰川与冰帽	28.2	29 200	2.07	$10^4$ 年
海洋	361	1370 000	97.31	$10^3 \sim 10^4$ 年

由表 1-1 中的数据可知, 地球上水的总量约为  $1.4 \times 10^9 \text{ km}^3$ , 但能供人类利用的水不多。水圈中, 海水占 97.3%, 难以直接利用; 淡水只占 2.7%, 而淡水的 99% 难以直接被人类利用。因为两极冰帽和大陆冰川的淡水储存量占 86%; 浅层地下水储量约占淡水总量的 12%, 必须凿井方能提取; 最容易被人们直接利用的江河湖沼水, 还不到总淡水量的 1%。

水圈中的水处于不断循环运动中,它包括水的蒸发、水汽输送、冷凝降水、水渗入和地表水与地下水径流五个基本环节,它们相互独立、相互交错、相互影响。水的蒸发是海水和陆地水在太阳能的作用下蒸发为水蒸气;水汽输送是水蒸气和云在密度差的作用下,随气流迁移到内陆,当遇到冷空气时,凝结为雨和雪,雨和雪又在重力作用下降至地面,称为冷凝降水。一部分降水在位差的作用下沿地球表面流动,汇于江河、湖泊,另一部分降水渗入地下,形成地下水流,这两种水流最后又复归大海。水的这种循环运动都是在自然力的作用下进行的,称为自然循环。

天然水体的自然循环又可分为大循环和小循环。前者是指发生在全球海洋与陆地之间的水量交换过程,也称外循环;后者是指发生在海洋与大气之间或陆地与大气之间的水量交换过程,也称内循环。

评价水资源是否丰富,可以用径流量的利用率作为标准:径流量利用率不足 10% 的为淡水资源丰足;径流量利用率在 10%~20% 之间的为淡水资源不足;径流量利用率超过 20% 的为淡水资源严重不足。

地球上的淡水资源分布极不平衡,大约有 60%~65% 以上的淡水集中分布在 9~10 个国家,如美国、哥伦比亚、加拿大等。而占世界人口总量 40% 的 80 多个国家是水资源缺乏的国家,有近 30 个国家为严重缺水国家。随着工农业发展和城市的扩展,特别是人口的剧增及人类活动的失控,水资源将日趋匮乏,而且水质严重下降,从而导致巨大的经济损失和生态破坏。

## 2. 我国水资源概况

我国水资源总量比较丰富,多年平均水资源总量大约为  $2.8124 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,占世界径流资源总量的 6%,居世界第六位。由于我国人口众多,因此人均水资源占有量仅为世界人均占有量的 1/4,而且时空分布极不均匀,致使许多地区和城市严重缺水,特别是西北、华北及部分沿海城市。以北京为例,全市水资源人均占有量仅为全国的 1/6。

据有关资料报道,我国实际可能利用的水资源约为 8000 亿~9500 亿  $\text{m}^3$ 。随着我国人口增长、城市化进程加速及工农业发展,到 2030 年前后,年用水总量将达到 7000 亿~8000 亿  $\text{m}^3$ ,即需水量已向可能利用水资源量的极限逼近。

我国水资源在地区上分布不均衡的特征是东南多、西北少,在时间上分布也不均衡,由于季风的影响,降雨量和径流量年内变化大,年际变化不稳定,从而导致我国北方和西北地区出现资源性缺水。我国水资源在空间(地区)和时间上的分布不均衡,也导致了我国的水土资源组合不相匹配,西北、东北、黄河、淮河流域径流量占全国总径流量的 17%,但土地面积却占全国的 65%。长江以南地区径流量占全国的 83%,而土地面积仅占 35%。由于这种水资源与人口、耕地分布的不相匹配,使各地对水的利用率差别很大,南方多水地区水的利用率较低,北方干旱地区的地表水、浅层地下水的开发利用率高,这就进一步造成了水资源的不平衡。水资源的过度开发、利用,必然造成水资源的严重污染。

水资源受到污染不仅使水资源更加缺乏,而且还要增加大量资金和设备进行处理,从而使工农业产品成本提高、质量下降及水产品大量减产。大规模开采地下水或不断提高地表水利用率,将导致大面积地下水水位下降、河流断流、水质恶化、土地沙漠化等现象加剧,使农田生态环境受到破坏。

近些年来,我国一直是以粗放型的取水增长,维持了近1.4%的人口增加率和9%左右的经济增长率。因此,水资源及其安全性已成为制约我国经济发展和国家安全的重要因素。

## 二、水的特性

(1) 水的缔合现象。在水分子的结构中,两个氢原子核排列成以氧原子核为顶的等腰三角形,因此氧的一端带负电荷,氢的一端带正电荷,使水分子成为一个极性分子。水分子在正极一方两个裸露的氢原子核与负极一方氧的两对孤对电子之间很容易形成氢键,从而产生两个或多个水分子的集聚体,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。

(2) 水的状态。水在常温下有三态。水的熔点为  $0^{\circ}C$ , 沸点为  $100^{\circ}C$ , 在自然环境中可以固体存在,也可以液体存在,并有相当部分变为水蒸气。图 1-1 是水的物态图(或称三相图),图中表明了冰—水—汽、冰—汽、水—汽和冰—水共存的温度、压力条件。火力发电厂的生产工艺就是利用水的这种三态变化来转换能量的。

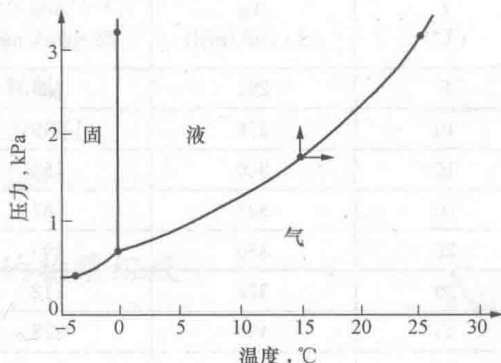


图 1-1 水的物态图

(3) 水的密度。水的密度与温度之间的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密实,高于或低于  $3.98^{\circ}C$  时,水的聚合物结构比较疏松。因此,冰总是浮于水面,水的这一特性为水生生物冰下过冬提供了必要的生存条件。

(4) 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。

(5) 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,而且能与许多金属氧化物、非金属氧化物及活泼金属产生化合作用。

(6) 水的黏度。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。

(7) 水的电导率。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  $1cm \times 1cm$ 、长  $1cm$  体积的水所测得的电阻,单位是  $\Omega \cdot cm$  (欧姆·厘米),电导率的单位是  $S/cm$  (西门子/厘米) 或  $S/m$ 、 $\mu S/cm$ 。

表 1-2 列出水的电阻率、电导率和离子积,  $25^{\circ}C$  时纯水的电阻率为  $1.83 \times 10^7 \Omega \cdot cm$ 。

表 1-2 中的纯水电导率,可按它含有的  $H^+$  和  $OH^-$  的量估算

$$\kappa_{H_2O} = c_H \Delta_H + c_{OH} \Delta_{OH} \quad (1-1)$$

式中:  $\kappa_{H_2O}$  为水的电导率,  $\mu S/cm$ ;  $c_{H^+}$ 、 $c_{OH^-}$  为  $H^+$  和  $OH^-$  的量的浓度,  $mol/cm^3$ 。

它们的值可根据水的离子积  $K_{H_2O}$  计算,因为纯水有式 (1-2) 的关系

$$1000c_{H^+} = 1000c_{OH^-} = \sqrt{K_{H_2O}} \quad (1-2)$$

因此, 25°C时纯水的电导率为

$$\kappa_{H_2O} = \frac{350 \times 10^6 \times \sqrt{1.008 \times 10^{-14}}}{1000} + \frac{196 \times 10^6 \times \sqrt{1.008 \times 10^{-14}}}{1000} = 0.0548 (\mu S/cm)$$

可见纯水的电导率为 0.0548 μS/cm, 它是纯水制备工艺所能达到的极限值, 同时也说明纯水的导电能力极低。

表 1-2 水的电阻率、电导率和离子积

t (°C)	Δ <sub>H</sub> (S·cm <sup>2</sup> /mol)	Δ <sub>OH</sub> (S·cm <sup>2</sup> /mol)	K <sub>H<sub>2</sub>O</sub> × 10 <sup>-14</sup>	电阻率 (Ω·cm)	电导率 (μS/cm)
5	251	133	0.185	62.1 × 10 <sup>6</sup>	0.016
10	276	149	0.292	45.5 × 10 <sup>6</sup>	0.022
15	300	164	0.452	31.2 × 10 <sup>6</sup>	0.032
20	325	182	0.681	26.3 × 10 <sup>6</sup>	0.038
25	350	196	1.008	18.3 × 10 <sup>6</sup>	0.055
30	375	212	1.471	14.1 × 10 <sup>6</sup>	0.071
35	400	228	2.084	9.75 × 10 <sup>6</sup>	0.102
40	421	244	2.918	7.66 × 10 <sup>6</sup>	0.131
45	444	260	4.012	7.10 × 10 <sup>6</sup>	0.141
50	464	276	5.45	5.80 × 10 <sup>6</sup>	0.172

注 Δ<sub>H</sub>、Δ<sub>OH</sub>—H<sup>+</sup> 和 OH<sup>-</sup> 的摩尔电导率, S·cm<sup>2</sup>/mol; K<sub>H<sub>2</sub>O</sub>—水的离子积。

(8) 水的沸点与蒸汽压力。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变为蒸汽, 这一过程称为蒸发。进入容器空间的水分子不断运动, 其中一部分水蒸气分子碰到水面, 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。当水的蒸发速度与水蒸气的凝结速度相等时, 水面上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 1-3。

表 1-3 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 (°C)	120	143	158	179	211	374

表 1-4 列出水的蒸汽压与温度之间的关系。

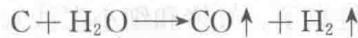
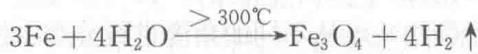
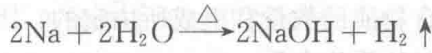
表 1-4 水的蒸汽压力与温度之间的关系

温度 (°C)	0	40	80	100	120	140	180	374
蒸汽压力 (Pa)	6.1 × 10 <sup>2</sup>	7.4 × 10 <sup>3</sup>	4.7 × 10 <sup>4</sup>	1.0 × 10 <sup>5</sup>	2.0 × 10 <sup>5</sup>	3.6 × 10 <sup>5</sup>	1.0 × 10 <sup>6</sup>	2.2 × 10 <sup>7</sup>

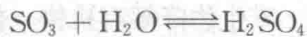
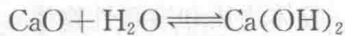
当气体高于某一温度时, 不管加多大压力都不能将气体液化, 这一温度称为气体的临界温度。在临界温度下, 使气体液化的压力称为临界压力。水的临界温度为 374°C, 临界压力

为 22.0MPa。

(9) 水的化学性质。水虽有很强的稳定性，即使加热到 2000℃，也只有 0.588% 的水解离为氢和氧，但当水与某些物质接触时，却很容易发生化学反应。水能与金属和非金属作用放出氢



水还能与许多金属和非金属的氧化物反应，生成碱和酸



## 第二节 天然水体的物质组成

### 一、天然水体的物质组成

天然水体是海洋、河流、湖泊、沼泽、水库、冰川、地下水等地表与地下贮水体的总称，包括水和水中各种物质、水生生物及底质。

天然水体分为海洋水体和陆地水体，陆地水体又可分为地表水体 (surface water) 和地下水 (underground water)。这些天然水体在自然循环运动中，无时不与大气、土壤、岩石、各种矿物质、动植物等接触。由于水是一种很强的溶剂，极易与各种物质混杂，所以天然水体是含有许多溶解性的和非溶解性的物质、组成成分又非常复杂的一种综合体。化学概念上那种理想的纯水在自然界中是不存在的。

天然水中混杂的物质，有的呈固态，有的呈液态或气态，它们大多以分子态、离子态或胶体颗粒存在于水中，几乎包含了地壳中的大部分元素。天然水中含量较多、比较常见的物质组成见表 1-5。

表 1-5 天然水的物质组成

主要离子		微量元素	溶解气体		生物生成物	胶体		悬浮物质
阴离子	阳离子		主要气体	微量气体		无机	有机	
$\text{Cl}^-$	$\text{Na}^+$	Br、F	$\text{O}_2$	$\text{N}_2$	$\text{NH}_3$ 、 $\text{NO}_3^-$	$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	腐殖质	硅铝酸
$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{K}^+$	I、Fe	$\text{CO}_2$	$\text{H}_2\text{S}$	$\text{NO}_2^-$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$	$\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$		盐颗粒
$\text{HCO}_3^-$	$\text{Ca}^{2+}$	Cu、Ni		$\text{CH}_4$	$\text{HPO}_4^{2-}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$		砂粒
$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{Mg}^{2+}$	Co、Ra			$\text{H}_2\text{PO}_4^-$			黏土

天然水体的物质组成不仅与它的形成环境有关，也与和水相接触的物质组成及物理化学作用所进行的条件有关。其中，包括溶解—沉淀、氧化—还原、水相—气相间离子平衡、固—液两相之间离子交换、有机物的矿质化、生物化学作用等，从而使天然水体的物质组成相差非常悬殊。

影响天然水体物质组成的直接因素主要有岩石、土壤和生物有机体，这些因素可使水增



加或减少某些离子和分子。影响天然水体物质组成的间接因素主要有气候和水文特征。详细内容见本章第三节。

除了上述直接因素和间接因素外，人类在生活和生产过程中产生的各种污染物，也会从不同的途径进入天然水体。

天然水体的水质就是由所含物质的数量和组成所决定的，因为这些物质从锅炉用水的角度上看都是有害的，所以称这些物质为杂质。

## 二、天然水中物质的特征与来源

天然水中的物质(杂质或污染物)可从不同的角度进行分类：按化学性质，可将水中杂质分为无机杂质(主要包括溶解性离子、气体和细小泥沙)、有机杂质(主要包括腐殖质和蛋白质、脂肪等)和微生物杂质(主要包括原生动物、藻类、细菌、病毒等)；按物理性质(颗粒大小)，可分为悬浮性物质、胶体物质和溶解性物质；按杂质的污染特征，又可分为可生物降解有机物(也称耗氧有机物)、难生物降解有机物(如各种农药、胺类化合物)、无直接毒害无机物(如泥沙、酸、碱和氮、磷等)和有直接毒害无机物(如氰化物、砷化物等)。

从水的净化和处理的需要，假定水中的物质均呈球形，并按其直径大小分成悬浮固体、胶体和溶解物质三大类，溶解物质又分为溶解气体、溶解无机离子和溶解性有机物质，如图1-2所示。但水中的各种物质并非全部为球形，各种物质的尺寸界限也不能截然分开，特别是悬浮固体和胶体之间的尺寸界限，常因形状和密度的不同而有所变化，所以图1-2中的数字只能表示一个大体的尺寸概念。

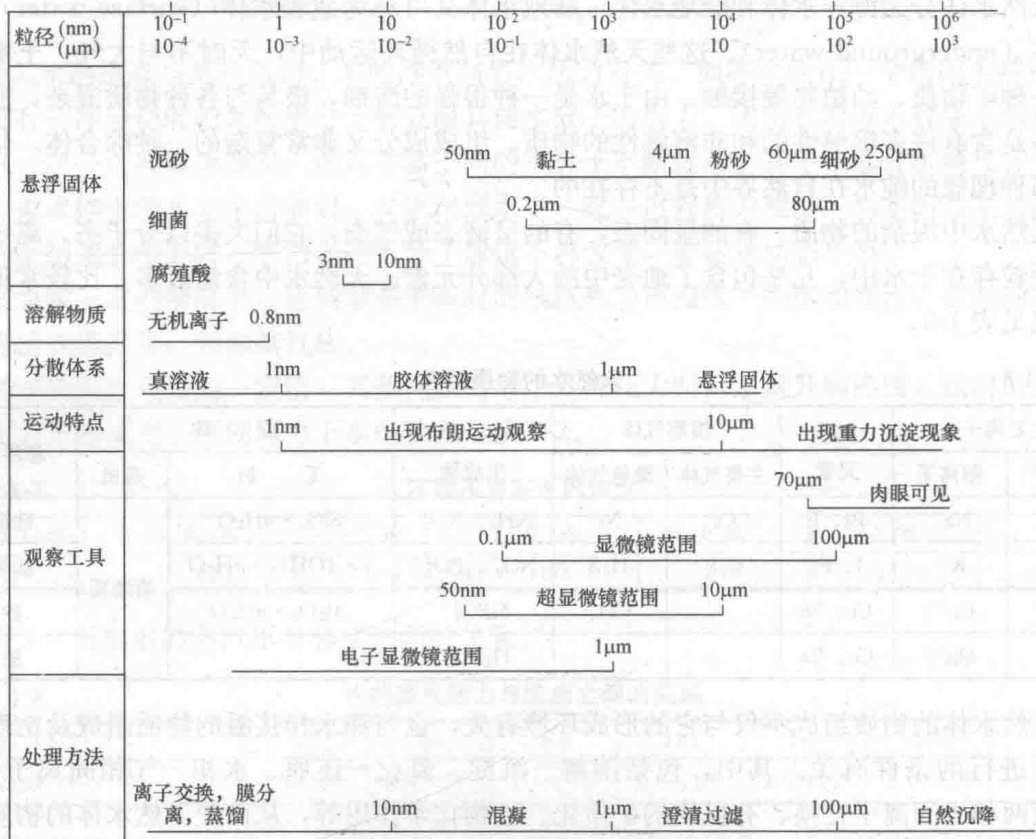


图 1-2 天然水体中各种物质尺寸大小与特征