

(第四版)
上册

武汉大学水质工程系 周柏青 陈志和 主编

热力发电厂 水处理



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

(第四版)

上册

火力发电厂 水处理

武汉大学水质工程系 周柏青 陈志和 主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书为《热力发电厂水处理》第四版,共十八章,分上、下两册。上册内容为水的净化,共计十章,主要包括水的混凝、沉淀、澄清和过滤等去除悬浮物和胶体的处理,反渗透、离子交换、电除盐等除盐处理。此外,对凝结水精处理、循环冷却水处理和废水处理也作了较为详细的介绍。下册内容为金属的腐蚀与防护,共计八章,主要包括给水系统、锅炉水汽系统、汽轮机、凝汽器和发电机内冷水系统的腐蚀与控制,汽包锅炉的结垢、蒸汽污染、积盐及其防止,直流锅炉的水化学工况,化学清洗和停用保护。

本书主要供从事电厂化学工作的工人、技术人员阅读,也可作为电厂化学专业的培训教材,还可供从事水质科学与技术、环境工程、水务工程、给水排水等专业人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

热力发电厂水处理. 上册/周柏青, 陈志和主编.
4 版. —北京: 中国电力出版社, 2009
ISBN 978-7-5083-7082-8

I. 热… II. ①周… ②陈… III. 热电厂-水处理
IV. TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 016941 号

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路 6 号 100044 http://www.cepp.com.cn)
北京市同江印刷厂印刷
各地新华书店经售

*

1976 年 9 月第一版
2009 年 6 月第四版 2009 年 6 月北京第十六次印刷
850 毫米×1168 毫米 32 开本 30.125 印张 792 千字
印数 89701—92700 册 上、下册共定价 49.80 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
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

第四版前言

《热力发电厂水处理》(上、下册)自1976年第一版、1984年第二版和1996年第三版发行以来,深受广大读者的欢迎。为了符合目前电厂水处理发展,满足读者的需要,又对第三版进行了重新修订。在这次修订中,增添了许多近年来发展起来的新技术,并删除了一些陈旧的内容。

本书第四版仍分上、下两册,上册主要讲述水质净化处理,下册主要讲述以控制热力发电厂水汽系统的腐蚀为主要目的的水质调节处理。

与第三版相比,第四版在内容编排上作了大幅调整,并进行了一些内容的增减。增补的主要内容包括微滤,超滤,纤维过滤,盘式过滤,自清洗过滤,电除盐,废水处理,给水处理方式及其运行控制,直流锅炉的水化学工况及其运行控制,汽包锅炉炉水的低磷酸盐处理、平衡磷酸盐处理和氢氧化钠处理,锅炉烟气侧的腐蚀与防护,汽轮机的腐蚀及其防止,发电机内冷水系统的腐蚀与防护等;删减的主要内容包括沉淀软化、连续床离子交换、蒸馏、闪蒸、电渗析、协调pH-磷酸盐处理、水处理系统设计等。

《热力发电厂水处理》(上、下册)由武汉大学周柏青、陈志和主编,具体分工为:武汉大学陈志和编写第一、六、八章;武汉大学周柏青和海军工程大学王晓伟合作编写第二~四章;武汉大学周柏青编写第五、九章;武汉艺达水处理工程有限公司邹向群和武汉大学周柏青合作编写第七章;武汉大学黄梅编写第十章;武汉大学李正奉编写第十一、十二、十五、十七章;武汉大学谢学军编写第十三、十四、十六章;湖北省电力试验研究院喻亚非编写第十八章。全书由周柏青、陈志和统稿。

大唐国际发电股份有限公司安洪光审阅了本书的编写提纲,中国电力企业联合会标准化部杜红纲审稿,他们都提出了许多宝贵的意见,在此谨表诚挚的感谢!

本书涉及面较广,加之编者水平所限,错漏之处,敬请读者批评指正。

作 者

2008年10月23日

于武汉大学

第三版前言

《热电厂水处理》(上、下册)自1976年第一版和1984年修订版发行以来,受到广大读者的欢迎。今为了满足读者的需要,重新作了修订,作第三版出版。在这次修订中,采用了我国法定计量单位,增添了许多近年发展起来的新技术,并删除了一些陈旧的内容。

本书第三版仍分上、下两册,上册主要讲述水质的净化,下册主要讲述热电厂机炉系统水处理。修订中,力求内容简明易懂,切合实际;阐述原理,尽量说明物理与化学性能,避免繁复的公式推导;对于常用的水处理方法、系统、设备和数据,以及某些实践经验,都作了必要的介绍,以供读者参考。

本书内容的选材和安排,以我国现实情况为主,适当选用了一些对我国有一定参考价值的国外资料。

本书修订工作的分工如下:上册第一、二、三和七章:施燮钧,第四、五和六章:王蒙聚,第八章:肖作善,上册由施燮钧统稿;下册第十五章:施燮钧,第十六章:王蒙聚,其余各章均由肖作善修订,并由肖作善统稿。

本书第一版部分章节是由杨炳坤同志编写的。在修订第二版的过程中，陈绍炎、钱达中、黄锦松、赵连璞等校内外诸同志曾对一些章节提出了宝贵的意见。这次第三版经窦照英同志全文审阅，他提供了许多宝贵的建议。作者谨对上列同志表示衷心的感谢。

由于我们水平有限，书中一定尚有错漏和欠妥之处，诚恳希望读者批评指正。

作 者

写于武汉水利电力大学

1994 年 12 月

目 录

第四版前言

第三版前言

上 册

第一章 电厂用水水质概述.....	1
第一节 电厂用水水源及水质特点.....	1
第二节 天然水中的杂质及特征.....	5
第三节 电厂用水的水质指标	11
第四节 天然水的分类	20
第五节 水质校核	23
第二章 水的混凝	27
第一节 胶体化学基础	27
第二节 混凝原理及过程	34
第三节 混凝剂与助凝剂	42
第四节 混凝剂加药系统	49
第五节 絮凝反应池	55
第三章 沉淀与澄清	60
第一节 颗粒的沉降速度	60
第二节 平流沉淀池	63
第三节 斜板(管)沉淀池	70
第四节 澄清原理	73
第五节 机械搅拌澄清池	76

第六节	水力循环澄清池	86
第七节	泥渣悬浮澄清池	89
第四章	过滤	94
第一节	过滤介质	95
第二节	过滤原理	110
第三节	过滤设备	130
第五章	反渗透除盐	165
第一节	基本原理	165
第二节	反渗透膜	169
第三节	膜元件（膜组件）	181
第四节	给水预处理	195
第五节	反渗透装置及其运行	212
第六节	反渗透装置的故障与对策	229
第六章	离子交换除盐	234
第一节	离子交换树脂和离子交换原理	234
第二节	离子交换平衡和离子交换速度	248
第三节	动态离子交换的层内过程	259
第四节	一级复床除盐	265
第五节	带有弱型树脂床的复床除盐	282
第六节	离子交换装置及其运行	293
第七节	混合床除盐	317
第八节	水的脱碳处理及除碳器	324
第九节	离子交换除盐系统	329
第十节	离子交换树脂的使用与维护	340
第七章	电除盐技术	353
第一节	离子交换膜	354
第二节	电除盐的物理化学过程	364
第三节	EDI 装置	369
第四节	EDI 装置的运行	382

第五节	EDI 装置的维护	395
第八章	凝结水精处理	402
第一节	概述	402
第二节	凝结水过滤	407
第三节	凝结水混床除盐	414
第四节	凝结水精处理系统及运行	419
第五节	盐量的漏过机理及氨化混床	433
第六节	树脂的分离技术	442
第七节	混床树脂的体外再生	454
第八节	凝结水精处理系统常见的异常情况及 处理方法	458
第九章	循环冷却水处理	461
第一节	冷却水系统	461
第二节	冷却水中的污损生物及其危害	463
第三节	循环冷却水的水质变化	466
第四节	冷却水系统中的沉积物及其控制	470
第五节	阻垢处理	480
第六节	冷却水系统的腐蚀及其控制	487
第七节	冷却水系统中微生物的控制	496
第十章	火电厂废水处理	506
第一节	概述	506
第二节	火电厂排水及其特点	513
第三节	废水的收集和处理方法	524
第四节	火电厂的废水处理系统	546
第五节	污泥及污泥处理技术	569

下 册

第十一章	给水系统的腐蚀及其防止	579
第一节	金属腐蚀的基本原理	580

第二节	给水系统的腐蚀·····	607
第三节	防止给水系统腐蚀的方法·····	618
第四节	给水处理及其运行控制·····	644
第十二章	汽包锅炉的结垢、积盐及其防止·····	656
第一节	水垢和水渣的特性·····	657
第二节	水垢的形成及其防止·····	662
第三节	蒸汽的污染·····	668
第四节	蒸汽流程中的盐类沉积物·····	681
第五节	获得洁净蒸汽的方法·····	691
第十三章	汽包锅炉的腐蚀及其防止·····	709
第一节	水汽系统的腐蚀及其防止·····	709
第二节	汽包锅炉炉水处理·····	719
第三节	锅炉烟气侧的腐蚀与防护·····	744
第十四章	汽包锅炉的水、汽质量监督·····	756
第一节	水、汽质量标准·····	756
第二节	水、汽的取样方法·····	763
第三节	水、汽质量劣化时的处理·····	772
第四节	汽包锅炉的热化学试验·····	776
第十五章	直流锅炉机组的水化学工况·····	786
第一节	直流锅炉机组水汽系统概述·····	786
第二节	直流锅炉中杂质的溶解与沉积特性·····	789
第三节	水化学工况及其控制方法·····	800
第四节	直流锅炉启动时的清洗与化学监督·····	812
第五节	直流锅炉的热化学试验·····	817
第十六章	汽轮发电机的腐蚀及其防止·····	819
第一节	汽轮机的腐蚀及其防止·····	819
第二节	发电机内冷水系统的腐蚀与防护·····	826
第十七章	凝汽器的腐蚀与防护·····	846

第一节	凝汽器管材·····	846
第二节	凝汽器管的腐蚀形态·····	851
第三节	凝汽器管的选用·····	862
第四节	凝汽器腐蚀的防止·····	866
第十八章	化学清洗和停用保护·····	875
第一节	化学清洗的必要性和清洗范围·····	875
第二节	化学清洗的常用药品·····	880
第三节	化学清洗方案的制定·····	901
第四节	化学清洗的实施及监督·····	912
第五节	热力设备的停用腐蚀及停用保护·····	927
参考文献 ·····		935

第一章 电厂用水水质概述

第一节 电厂用水水源及水质特点

目前电厂用水水源主要有两种：地表水和地下水。另外，中水也正逐渐成为电厂用水的另一种水源。

一、地表水

地表水是指流动或静止在陆地表面的水，主要是指江河、湖泊、水库和海洋的水。

1. 江河水

江河水流域面积广阔，又是敞开流动的水体，所以水质易受自然条件影响，是水源中最为活跃的部分。这种水的化学组分具有多样性与易变性。通常江河水中悬浮物和胶体杂质含量较多，浊度高于地下水。由于我国幅员辽阔，大小河川纵横交错，自然地理条件相差悬殊，因而各地区江河水的浊度也相差很大。

我国黄土高原、黄河水系，水土流失严重，悬浮物和含沙量较高，变化范围也很大。冬季枯水季节悬浮物含量有时仅几十毫克/升至几百毫克/升；而夏季多雨季节，可增加到几克/升至数百克/升。东北、华东和中南地区大部分河流的浊度均比较低，平均悬浮物含量为 50~400mg/L。

江河水的含盐量及硬度较低，其含盐量一般为 50~500mg/L，硬度一般为 1.0~8.0mmol/L，是电厂用水最合适的水源。江河水最大的缺点是易受工业废水、生活污水及其他各种人为的污染。表 1-1 列出了我国不同地区江河水的水质

组成。

表 1-1

江河水水质组成

mg/L

江 河	阳离子			阴离子			含盐量
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	
长江(武汉段)	39.03	9.78	8.4	110.6	37.04	15.8	221
黄河(甘肃段)	50.44	21.44	50.80	188.83	98.09	57.08	502
湘江(湘潭段)	27.4	5.4	2.7	65.88	17.9	11.8	138
赣江(南昌段)	16.88	2.47	5.63	45.34	8.53	9.6	90.4
珠江(广州段)	34.61	5.36	22.36	76.25	23.54	49.0	210
额尔齐斯河(新疆)	71.14	4.27	38.86	128.14	107.30	28.0	385

注 表中数据为 2003 年实测值。

2. 湖泊及水库水

湖泊及水库水主要由江河水和降水补给,水质与江河水类似。但由于水的流动性小,储存时间长,经过长期自然沉淀,因此浊度较低。水的流动性小、透明度高,给水中生物,特别是藻类的繁殖创造了良好的条件,因而,湖泊及水库水一般含藻类较多,使水产生色、嗅、味。因为进、出水交替缓慢,停留时间比江河水长,所以当含有较多的氮与磷时,就会使水富营养化。又由于水的不断蒸发,故含盐量往往比江河水高。按其含盐量分,湖泊有淡水湖、微咸水湖和咸水湖,前两种湖可作为电厂用水的水源。

3. 大气水

大气水是指自然界的雨水和雪水,也称降水,它是通过水的蒸发和凝结过程而形成的天然水,所以比较洁净。但是这种水中仍有少量杂质,这是由于它们在从空中降至地面的过程中,受到大气的污染。

大气水中除含有 O₂、CO₂、N₂ 及一些惰性气体外,还含有少量的离子组分。因为降雨过程对大气进行了“洗涤”,所以大

气水的离子组分不仅决定于降雨本身的化学组成、降雨量大小及空气中杂质的种类与数量，而且还取决于降雨时的物理条件，如降雨形式、气温、风向、云层高度和雨前天气等。

大气水的含盐量一般不大于 $40\sim 50\text{mg/L}$ ，硬度一般不大于 $0.07\sim 0.1\text{mmol/L}$ 。这种水的纯度虽然高，但是由于很难收集，加之它的量决定于气候条件，所以不能用作电厂用水的水源。大气水是江河水的主要来源。

4. 海水

由于海水长年的蒸发浓缩作用，所以其显著的特点是含盐量高，在 35g/L 左右。其中以氯化钠的含量为最高，约占含盐量的 89% ；其次是硫酸盐和硅酸盐；钙、镁离子总量一般为 $50\sim 60\text{mmol/L}$ ，有时高达 $100\sim 200\text{mmol/L}$ 。

各地海水水质基本上是相似的，各主要离子之间的比例基本上是稳定的，只有 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 含量的变化较大。常见离子含量的次序依次是 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$ ， $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > (\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ 。 $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ 在海水中含量最小，这是因为它们随内陆水流入海洋后，参与了碳酸盐平衡移动的化学反应，一部分 HCO_3^- 转变成 CO_3^{2-} ，并与海水中的 Ca^{2+} 反应生成 CaCO_3 ，而 CaCO_3 被海中海生生物吸收，组成其骨骼而沉积下来。

海水中的 CO_2 含量很少，约十分之几毫克/升，这是因为海水中的 CO_2 含量与大气中的 CO_2 含量间形成稳定平衡的结果。所以，上层海水中的 CO_2 与大气中的 CO_2 含量相近，随着海水深度的增加， CO_2 含量也略有增大。海水的 pH 值主要决定于 CO_2 的含量，其变化范围较小，上层海水的 pH 值在 $8.1\sim 8.3$ 之间，随着深度的增大，pH 值略降低，但一般不低于 7.6 。

虽然海水属于地表水，但由于其含盐量高，必须经过淡化处理才能应用，未经过淡化处理的海水主要限于用来冷却换热设备。位于海滨的火电厂，主要用海水作为凝汽器的冷却水水源。

二、地下水

存在于地球表面以下土壤和岩层中的水称为地下水。

地下水是由雨水和地表水经过地层的渗流而形成的。水在地层渗透过程中，通过土壤和砂砾的过滤作用，悬浮物和胶体已基本或大部分去除，所以地下水浊度普遍较低。又由于地下水流经岩层时，溶解了各种可溶性物质，因而水中含盐量通常高于地表水。至于含盐量的多少及盐类的成分，则取决于地下水流经地层的矿物质成分、地下水的埋深和与岩石接触的时间等， NaCl 、 Na_2SO_4 、 MgCl_2 、 MgSO_4 和 CaCl_2 及其他易溶盐类最易溶于地下水。地下水含盐量一般在 $100 \sim 5000 \text{mg/L}$ 之间，硬度通常在 $2 \sim 10 \text{mmol/L}$ 。我国水文地质条件比较复杂，各地区地下水含量相差很大。一般情况下，多雨地区，如东南沿海地区及西南地区，由于地下水受大量雨水补给，故含盐量相对低些；干旱地区，如西北、内蒙古等地，地下水含盐量较高。当土壤中含有较多有机物时，氧气将消耗于生物氧化，产生 CO_2 、 H_2S 等气体，该气体溶于水，使水具有还原性。还原性的水与高价铁锰矿石反应，使它们以低价离子形态进入水中，因此地下水游离 CO_2 含量高，并普遍含有 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 。由于溶解氧在地层中消耗后得不到补充，所以地下水中溶解氧含量很少。

地下水受外界影响小，水质比较稳定，是电厂用水的主要水源之一。表 1-2 列出了我国不同地区地下水的水质组成。

表 1-2 地下水水质组成 mg/L

地 区	阳离子			阴离子			含盐量
	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	
河南沁北	91.24	24.9	11.2	223.3	117.2	16.6	503.4
石家庄	98.2	24.0	23.31	232.0	119.04	34.16	550
西安	30.48	35.73	58.88	313.02	38.42	34.03	518.6
呼和浩特	12.0	8.88	273.75	394.67	136.32	115.23	956

注 表中数据为 2000~2003 年间的实测值。

三、中水

中水主要是指城市污水和生活污水经过处理后达到一定的水质标准，可在一定范围内重复使用的非饮用杂用水，也称其为再生水。

中水回用的水质首先要满足卫生要求，主要指标有细菌总数、大肠杆菌群数、余氯量、悬浮物、生物需氧量和化学耗氧量；其次要满足感观要求，其衡量指标有色度、浊度、臭味等；此外，还要求水质不会引起设备管道的严重腐蚀和结垢，主要指标有 pH 值、浊度、溶解性物质和蒸发残渣等。

中水是水资源有效利用的一种形式。在火力发电厂中，中水主要用于工业冷却水的补充水，以及消防、绿化、道路清洁、公厕等用水。

第二节 天然水中的杂质及特征

水在自然循环的过程中，能溶解大气中、地表面和地下岩层中的许多物质，而且在天然水的流动过程中还会夹带一些固体物质，而使天然水体中不同程度地含有各种杂质。

天然水中杂质有的呈固态，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。表 1-3 为天然水中常见的杂质。

表 1-3 天然水中的常见杂质

悬浮物	胶体杂质		主要离子		溶解气体		生物生成物
	无机物	有机物	阴离子	阳离子	主要气体	微量气体	
硅铝铁 酸盐、 砂粒、 黏土、 微生物	$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	腐殖质	Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-}	Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}	O_2 、 CO_2	N_2 、 H_2S 、 CH_4	NH_3 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 PO_4^{3-} 、 HPO_4^{2-} 、 H_2PO_4^-

天然水中杂质种类很多，按其性质可分为无机物、有机物和