

(第四版)
下册

武汉大学水质工程系 周柏青 陈志和 主编

火力发电厂 水处理



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

(第四版)

下册

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. 下册/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 016943 号

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路 6 号 100014 <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

第十一章 给水系统的腐蚀及其防止

锅炉给水系统是指给水及其主要组成部分（如汽轮机凝结水、加热器疏水）的输送管道和加热设备，其中包括凝结水泵、轴封加热器、低压加热器、除氧器、高压加热器和疏水箱等。在给水系统中流动的水，一般比较纯净，不会发生盐类从水中析出而在管壁上形成沉积物；但是，由于水中存在一定量的溶解氧和游离二氧化碳，给水系统的金属可能发生氧腐蚀和二氧化碳腐蚀。给水系统中大部分设备和管道都是由碳钢或低合金钢制成的，只有低压加热器中的换热管束采用黄铜或不锈钢制成，所以本章主要讨论给水系统中碳钢和黄铜的腐蚀。

给水系统的腐蚀可能严重影响火力发电机组的安全、经济运行。给水系统金属的局部性腐蚀，如省煤器管因腐蚀而穿孔、给水泵的腐蚀损伤等，可导致给水系统设备受到严重的破坏，甚至可能造成事故停炉。给水系统金属的全面腐蚀虽然不致立即引起运行故障，但它不仅缩短了设备寿命，而且在系统内产生大量腐蚀产物。这些腐蚀产物被给水带入锅炉，不仅会在锅炉水冷壁炉管内壁上沉积而加剧锅炉的结垢和腐蚀，而且可能被蒸汽携带到汽轮机中沉积，从而严重影响机组的安全、经济运行。因此，给水系统金属腐蚀的危害性很大，防止给水系统的金属腐蚀是火力发电厂的一项重要工作。

本章在简要介绍金属腐蚀的基本原理基础上，重点介绍给水系统的氧腐蚀和二氧化碳腐蚀。然后，介绍通过给水处理控制给水系统金属腐蚀的原理及运行控制方法。

第一节 金属腐蚀的基本原理

一、腐蚀的定义

金属材料是广泛应用的一类工程材料,它们在使用过程中由于周围环境的影响可能遭到不同形式的破坏,其中最常见的破坏形式有断裂、磨损和腐蚀。断裂是指金属构件因受力超过其弹性极限而发生的破坏;磨损是指金属表面与其相接触的物体或环境介质发生相对运动,因摩擦而产生的损耗或破坏;腐蚀是金属受环境介质的化学或电化学反应而引起的破坏或变质。

上述腐蚀的定义明确地指出了金属腐蚀是包括金属材料和环境介质两者在内的一个具有反应作用的体系。从热力学的观点看,绝大多数金属都具有被环境介质中的氧化剂氧化的倾向。因此,金属发生腐蚀是一种自然的趋势和普遍的现象。例如,钢铁生锈和铜长“铜绿”都是腐蚀的结果。金属腐蚀的原因主要是金属与环境介质中的氧化剂发生了氧化还原反应。许多腐蚀过程中还可能同时存在机械作用(如应力和磨损)或生物作用,但单纯机械应力和磨损引起的金属材料的破坏分别属于断裂和磨损的范畴,而不属于腐蚀的范畴。腐蚀的结果包括金属材料化学成分的改变(如铁变成铁锈)、金相组织发生变化(如碳钢脱碳等)和力学性能的下降(如氢脆和晶间腐蚀导致材料脆化)。

对腐蚀的研究已发展成为一门独立的学科——金属腐蚀学。它是在金属学、物理化学、工程力学等学科基础上发展起来的边缘性学科,它主要研究金属材料腐蚀的普遍规律,以及典型环境下金属腐蚀的原因及控制措施。

二、腐蚀的分类

由于腐蚀领域涉及的范围极为广泛,发生腐蚀的金属材料和环境以及腐蚀的机理也是多种多样的,所以腐蚀的分类有多种方法。下面只介绍几种常用的分类方法。

1. 按腐蚀环境分类

根据腐蚀环境的不同, 金属的腐蚀大致可分为以下几类:

(1) 干腐蚀。干腐蚀是金属在干燥气体介质中发生的腐蚀, 它主要是指金属与环境介质中的氧反应而生成金属氧化物, 所以常称为金属的氧化。过热器和再热器管在干蒸汽中的汽水腐蚀也可归入此类。

(2) 湿腐蚀。湿腐蚀主要指金属在潮湿环境和含水介质中的腐蚀。它又可分为: ① 自然环境中的腐蚀, 如大气腐蚀、土壤腐蚀、海水腐蚀等; ② 工业介质(如酸、碱和盐的溶液以及工业水等)中的腐蚀。热力设备的腐蚀绝大部分属于湿腐蚀, 其中热力设备与空气接触的外表面的腐蚀属于大气腐蚀; 热力设备运行中各种水(如给水、冷却水等)系统内部的腐蚀都可归为工业水腐蚀; 但是, 在热力设备停用过程中, 特别是解体检修期间, 水汽系统内部也可能因空气进入而发生严重的大气腐蚀, 这种腐蚀又称停用腐蚀。

(3) 熔盐腐蚀。熔盐腐蚀是指金属在熔融盐中的腐蚀, 如锅炉烟侧的高温腐蚀。

(4) 有机介质中的腐蚀。此类腐蚀是指金属在无水的有机液体和气体(非电解质)中的腐蚀, 如铝在四氯化碳、三氯甲烷、乙醇中的腐蚀, 镁和钛在甲醇中的腐蚀等。

显然, 按腐蚀环境分类的方法是不够严格的。但是, 这种方法可帮助读者大体上按照金属材料所处的周围环境去认识其腐蚀规律。

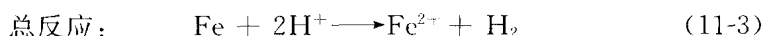
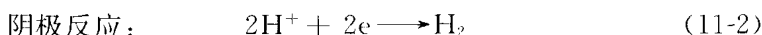
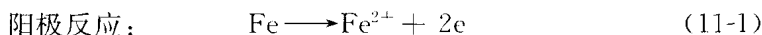
2. 按腐蚀机理分类

根据腐蚀过程的特点, 金属的腐蚀可分为化学腐蚀和电化学腐蚀两大类。

(1) 化学腐蚀。化学腐蚀是指金属表面与非电解质直接发生纯化学作用而引起的破坏。在化学腐蚀过程中, 非电解质中的氧化剂在一定条件下直接与金属表面的原子发生氧化还原反应而生成腐蚀产物, 反应中电子的传递是在金属与氧化剂之间直接进行

的, 所以没有电流产生。单纯化学腐蚀的实例较少, 金属在有机介质中的腐蚀属于化学腐蚀, 但这种腐蚀往往因介质含有少量水分而转变为电化学腐蚀。

(2) 电化学腐蚀。电化学腐蚀是指金属表面与电解质发生电化学反应而引起的破坏。在电化学腐蚀过程中, 金属的氧化(阳极反应)和氧化剂的还原(阴极反应)在被腐蚀的金属表面不同的区域同时进行, 电子可通过金属从阳极区流向阴极区, 从而产生电流。例如, 碳钢在酸中腐蚀时, 在阳极区铁被氧化为 Fe^{2+} , 所放出的电子通过钢的基体由阳极(Fe)流至钢中的阴极(Fe_3C)表面, 被 H^+ 吸收而产生氢气, 即



可见, 电化学腐蚀实际上是一种短路原电池反应的结果, 这种短路原电池称为腐蚀电池。由于阴极与阳极短路, 腐蚀电池反应所释放出来的化学能, 不能对外界作任何有用功。

电化学腐蚀的实例很多, 各种湿腐蚀及熔盐腐蚀皆属此类, 热力设备的腐蚀绝大部分属于电化学腐蚀。因此, 本节主要介绍电化学腐蚀的一些基本概念和原理。

3. 按腐蚀形态分类

根据腐蚀在金属表面上的分布情况可把腐蚀分为全面腐蚀和局部腐蚀两大类。

(1) 全面腐蚀。金属发生全面腐蚀时, 整个与介质接触的金属表面都发生程度(腐蚀深度)相近或相同的腐蚀。此时, 如果各点腐蚀深度相同, 则称为均匀腐蚀, 如钢铁在盐酸等非氧化性酸溶液中的腐蚀。但是, 多数情况下腐蚀表面会呈现出凹凸不平的形态, 如碳钢在海水等中性水溶液中的腐蚀。全面腐蚀, 尤其是均匀腐蚀的危险性较小, 因为它们不仅容易发现和预测, 而且容易控制。例如, 向腐蚀介质中添加缓蚀剂就是一种控制全面腐蚀的非常有效的方法。另外, 能比较容易而准确地测量全面腐蚀

速率，并据此适当增大结构部件的尺寸，即可保证设备的使用寿命。

(2) 局部腐蚀。金属发生局部腐蚀时，腐蚀主要集中于金属表面某些局部区域，而表面的其他部分则几乎未被破坏。局部腐蚀有多种形态，但大都具有隐蔽、难以预测、发展快、破坏性大等特点，所以其危险性较大。它主要有下列八种：

1) 电偶腐蚀。由于两种不同金属在腐蚀介质中互相接触，导致电极电位较负的金属在接触部位附近发生局部加速腐蚀，称为电偶腐蚀。例如，凝汽器铜管胀口附近的碳钢管板，因碳钢的电极电位较负而发生电偶腐蚀。

2) 点蚀。点蚀又可称为孔蚀，它是一种典型的局部腐蚀。其特点是腐蚀主要集中在金属表面某些活性点上，并向金属内部纵深发展，通常蚀孔深度显著地大于其孔径，严重时可使设备穿孔。热力设备中的点蚀主要发生在不锈钢和铜合金部件上。例如：凝汽器不锈钢管或铜管水侧管壁与含氯离子的冷却水接触，在一定条件下都可能发生点蚀；汽轮机停运时保护不当，不锈钢叶片也有可能发生点蚀。

3) 缝隙腐蚀。金属表面上由于存在异物或结构上的原因形成缝隙而引起的缝隙内金属的局部腐蚀，称为缝隙腐蚀。在热力设备中，金属构件采用胀接或螺栓连接的情况下，接合部的金属与金属（如凝汽器不锈钢管和管板）间形成的缝隙，金属与保护性表面覆盖层、法兰盘垫圈等非金属材料（如涂料、塑料、橡胶等）接触所形成的金属与非金属间的缝隙，以及腐蚀产物、泥沙、脏污物、生物等沉积或附着在金属（如凝汽器不锈钢管或铜管）表面上所形成的缝隙等，在含氯离子的腐蚀介质中都可能导致严重的缝隙腐蚀。其中，沉积物下发生的缝隙腐蚀又称为沉积腐蚀。

4) 晶间腐蚀。这种腐蚀首先在晶粒边界上发生，并沿着晶界向纵深处发展。这时，虽然从金属外观看不出有明显的变化，但其力学性能已大为降低了。晶间腐蚀常见于奥氏体不锈钢