

中国腐蚀状况及控制战略研究丛书
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

火电厂防腐蚀与水处理

葛红花 张大全 赵玉增 著



科学出版社

中国腐蚀状况及控制战略研究丛书
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

火电厂防腐蚀与水处理

葛红花 张大全 赵玉增 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

火电是我国电力工业的重要组成部分。火力发电离不开水,不同的水处理过程会对电厂热力设备金属的腐蚀防护产生直接影响。本书结合著者多年来的研究成果,较系统地阐述了火电厂防腐蚀与水处理之间的关系。本书介绍了我国火力发电现状、火电厂金属腐蚀特点及火电厂水处理的重要性,简述了金属腐蚀与控制原理,研究讨论了锅炉给水处理、锅内水处理、凝汽器循环冷却水处理及腐蚀结垢控制技术、海水淡化设备腐蚀与控制以及热力设备停备用保护技术与应用,同时开展了我国火电厂腐蚀现状调查并对结果进行了分析。

本书适用于火力发电系统设计、建设和火电企业运行维护技术人员阅读,也可供电力类院校电厂化学和材料类专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

火电厂防腐蚀与水处理/葛红花,张大全,赵玉增著. —北京:科学出版社, 2017.5

(中国腐蚀状况及控制战略研究丛书)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-052532-1

I. ①火… II. ①葛… ②张… ③赵… III. ①火电厂—电厂设备防腐
②火电厂—水处理 IV. ①TM621.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 075255 号

责任编辑:李明楠 孙静惠/责任校对:王 瑞

责任印制:肖 兴/封面设计:铭轩堂

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 5 月第 一 版 开本:720 × 1000 1/16

2017 年 5 月第一次印刷 印张:20

字数:400 000

定价:118.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“中国腐蚀状况及控制战略研究”丛书

顾问委员会

主任委员：徐匡迪 丁仲礼

委 员（按姓氏笔画排序）：

丁一汇	丁仲礼	王景全	李 阳	李鹤林	张 偲
金翔龙	周守为	周克崧	周 廉	郑皆连	孟 伟
郝吉明	胡正寰	柯 伟	侯立安	聂建国	徐匡迪
翁宇庆	高从堦	曹楚南	曾恒一	缪昌文	薛群基
魏复盛					

“中国腐蚀状况及控制战略研究”丛书

总编辑委员会

总 主 编：侯保荣

副总主编：徐滨士 张建云 徐惠彬 李晓刚

编 委（按姓氏笔画排序）：

马士德	马化雄	马秀敏	王福会	尹成先	朱锡昶
任小波	任振铎	刘小辉	刘建华	许立坤	孙虎元
孙明先	杜 敏	杜翠薇	李少香	李伟华	李言涛
李金桂	李济克	李晓刚	杨朝晖	张劲泉	张建云
张经磊	张 盾	张洪翔	陈卓元	欧 莉	岳清瑞
赵 君	胡少伟	段继周	侯保荣	宫声凯	桂泰江
徐玮辰	徐惠彬	徐滨士	高云虎	郭公玉	黄彦良
常 炜	葛红花	韩 冰	雷 波	魏世丞	

丛 书 序

腐蚀是材料表面或界面之间发生化学、电化学或其他反应造成材料本身损坏或恶化的现象,从而导致材料的破坏和设施功能的失效,会引起工程设施的结构损伤,缩短使用寿命,还可能导致油气等危险品泄漏,引发灾难性事故,污染环境,对人民生命财产安全造成重大威胁。

由于材料,特别是金属材料的广泛应用,腐蚀问题几乎涉及各行各业。因而腐蚀防护关系到一个国家或地区的众多行业 and 部门,如基础设施工程、传统及新兴能源设备、交通运输工具、工业装备和给排水系统等。各类设施的腐蚀安全问题直接关系到国家经济的发展,是共性问题,是公益性问题。有学者提出,腐蚀像地震、火灾、污染一样危害严重。腐蚀防护的安全责任重于泰山!

我国在腐蚀防护领域的发展水平总体上仍落后于发达国家,它不仅表现在防腐技术方面,更表现在防腐蚀意识和有关的法律法规方面。例如,对于很多国外的房屋,政府主管部门依法要求业主定期维护,最简单的方法就是在房屋表面进行刷漆防蚀处理。既可以由房屋拥有者,也可以由业主出资委托专业维护人员进行防护工作。由于防护得当,许多使用上百年的房屋依然完好、美观。反观我国的现状,首先是人们的腐蚀防护意识淡薄,对腐蚀的危害认识不清,从设计到维护都缺乏对腐蚀安全问题的考虑;其次是国家和各地区缺乏与维护相关的法律与机制,缺少腐蚀防护方面的监督与投资。这些原因就导致了我国在腐蚀防护领域的发展总体上相对落后的局面。

中国工程院“我国腐蚀状况及控制战略研究”重大咨询项目工作的开展是当务之急,在我国经济快速发展的阶段显得尤为重要。借此机会,可以摸清我国腐蚀问题究竟造成了多少损失,我国的设计师、工程师和非专业人士对腐蚀防护了解多少,如何通过技术规程和相关法规来加强腐蚀防护意识。

项目组将提交完整的调查报告并公布科学的调查结果,提出切实可行的防腐蚀方案和措施。这将有效地促进我国在腐蚀防护领域的发展,不仅有利于提高人们的腐蚀防护意识,也有利于防腐技术的进步,并从国家层面上把腐蚀防护工作的地位提升到一个新的高度。另外,中国工程院是我国最高的工程咨询机构,没有直属的科研单位,因此可以比较超脱和客观地对我国的工程技术问题进行评估。把这样一个项目交给中国工程院,是值得国家和民众信任的。

这套丛书的出版发行,是该重大咨询项目的一个重点。据我所知,国内很多领域的知名专家学者都参与到丛书的写作与出版工作中,因此这套丛书可以说涉及

了我国生产制造领域的各个方面,应该是针对我国腐蚀防护工作的一套非常全面的丛书。我相信它能够各领域的防腐蚀工作者提供参考,用理论和实例指导我国的腐蚀防护工作,同时我也希望腐蚀防护专业的研究生甚至本科生都可以阅读这套丛书,这是开阔视野的好机会,因为丛书中提供的案例是在教科书上难以学到的。因此,这套丛书的出版是利国利民、利于我国可持续发展的大事情,我衷心希望它能得到业内人士的认可,并为我国的腐蚀防护工作取得长足发展贡献力量。

徐匡迪

2015年9月

丛 书 前 言

众所周知,腐蚀问题是世界各国共同面临的问题,凡是使用材料的地方,都不同程度地存在腐蚀问题。腐蚀过程主要是金属的氧化溶解,一旦发生便不可逆转。据统计估算,全世界每 90 秒钟就有一吨钢铁变成铁锈。腐蚀悄无声息地进行着破坏,不仅会缩短构筑物的使用寿命,还会增加维修和维护的成本,造成停工损失,甚至会引起建筑物结构坍塌、有毒介质泄漏或火灾、爆炸等重大事故。

腐蚀引起的损失是巨大的,对人力、物力和自然资源都会造成不必要的浪费,不利于经济的可持续发展。震惊世界的“11·22”黄岛中石化输油管道爆炸事故造成损失 7.5 亿元人民币,但是把防腐蚀工作做好可能只需要 100 万元,同时避免灾难的发生。针对腐蚀问题的危害性和普遍性,世界上很多国家都对各自的腐蚀问题做过调查,结果显示,腐蚀问题所造成的经济损失是触目惊心的,腐蚀每年造成损失远远大于自然灾害和其他各类事故造成损失的总和。我国腐蚀防护技术的发展起步较晚,目前迫切需要进行全面的腐蚀调查研究,摸清我国的腐蚀状况,掌握材料的腐蚀数据和有关规律,提出有效的腐蚀防护策略和建议。随着我国经济社会的快速发展和“一带一路”战略的实施,国家将加大对基础设施、交通运输、能源、生产制造及水资源利用等领域的投入,这更需要我们充分及时地了解材料的腐蚀状况,保证重大设施的耐久性和安全性,避免事故的发生。

为此,中国工程院设立“我国腐蚀状况及控制战略研究”重大咨询项目,这是一件利国利民的大事。该项目的开展,有助于提高人们的腐蚀防护意识,为中央、地方政府及企业提供可行的意见和建议,为国家制定相关的政策、法规,为行业制定相关标准及规范提供科学依据,为我国腐蚀防护技术和产业发展提供技术支持和理论指导。

这套丛书包括了公路桥梁、港口码头、水利工程、建筑、能源、火电、船舶、轨道交通、汽车、海上平台及装备、海底管道等多个行业腐蚀防护领域专家学者的研究工作经验、成果以及实地考察的经典案例,是全面总结与记录目前我国各领域腐蚀防护技术水平和发展现状的宝贵资料。这套丛书的出版是该项目的重点,也是向腐蚀防护领域的从业者推广项目成果的最佳方式。我相信,这套丛书能够积极地影响和指导我国的腐蚀防护工作和未来的人才培养,促进腐蚀与防护科研成果的产业化,通过腐蚀防护技术的进步,推动我国在能源、交通、制造业等支柱产业上的长足发展。我也希望广大读者能够通过这套丛书,进一步关注我国腐蚀防护技术的发展,更好地了解和认识我国各个行业存在的腐蚀问题和防腐策略。

在此,非常感谢中国工程院的立项支持以及中国科学院海洋研究所等各课题承担单位在各个方面的协作,也衷心地感谢这套丛书的所有作者的辛勤工作以及科学出版社领导和相关工作人员的共同努力,这套丛书的顺利出版离不开每一位参与者的贡献与支持。

侯保荣

2015年9月

序

我国电力工业的发展是从火电开始的。国内第一台发电机组是 1882 年由英国人在上海创建的 12 千瓦发电机组。1949 年中华人民共和国成立时,我国发电设备装机总容量 185 万千瓦,年发电量 43 亿千瓦时,分列世界第 25 位和第 21 位。随着我国经济的快速发展和人民生活水平的不断提高,几十年来电力工业获得迅猛发展。截至 2016 年年底,全国全口径发电装机容量已达 16.5 亿千瓦,位居世界第一,其中火电占 65%以上。我国煤资源丰富,火力发电成本低、安全可靠,火电行业在我国社会经济发展中发挥了重要作用。

腐蚀是一种悄悄进行的破坏,是工业生产过程中的毒瘤。工业生产中金属材料的腐蚀不但致使企业因设备破坏、停工停产、产品质量下降等而产生巨大经济损失,同时也是影响安全生产的重要因素之一。电力工业由于其产品的特殊性,对安全运行的要求极为严格,电力设备腐蚀控制长期以来是电力安全运行的重要环节,因此,火电厂腐蚀防护新技术的研究、应用与推广具有重要意义。

金属腐蚀往往是在与水接触的界面上进行,其腐蚀程度除了与该金属的耐蚀性有关外,还取决于其所接触的介质侵蚀性,如水中含有的侵蚀性物质种类、浓度、水的温度、压力等均对金属腐蚀过程产生影响。火电厂热力设备中最常用的金属材料是钢铁及其合金、铜及其合金,这些材料在一般的水溶液中易发生腐蚀。火力发电需要用大量的水,如锅炉补给水、给水、凝汽器循环冷却水、凝结水、发电机内冷水等,这些水的水质好坏直接关系到相关设备的金属腐蚀程度和设备使用寿命。对不同的水质采用合适的水处理和防腐蚀技术,可有效降低金属腐蚀速率,延长设备使用寿命,保障电力安全运行。

该书结合著者多年来在火电厂工业水处理、停炉保护、凝汽器腐蚀防护等方面的研究成果和经验,较系统地阐述了火电厂防腐蚀与水处理之间的关系。该书为从事火电厂设计、选材、运行维护、水处理等的工程技术人员和大专院校相关师生提供了很好的参考。

周同定

2017 年 3 月

前 言

电能具有清洁、无污染、来源广泛、使用方便的特点，是目前最重要的二次能源。电力工业是国民经济和社会发展的基础产业，它既是促进经济发展的生产资料，又是人类不可缺少的生活资料，电力工业的发展受到世界各国的高度重视。火力发电是历史最久、最重要的一种发电形式，目前中国火力发电装机容量占总装机容量的 65% 以上。随着国内电力供应的逐步宽松以及国家对节能减排的日益重视，我国开始加大力度调整火力发电行业的结构，“上大压小”，大力发展大容量、高参数、低耗能、少排放机组，更提出了“火电灵活性”的发电理念，同时烟气脱硫脱硝工程也在全国火电厂全面铺开，这些变化对火电厂的材料选择和失效控制提出了新的要求。

水是火力发电的重要原料。水既是发电的工质，又是常用的冷却介质，火力发电厂的大部分热力设备与水或汽直接接触，水、汽品质成为影响热力设备安全经济运行的重要因素之一。火电厂水处理的目的是保证热力系统运行时各部位接触的水、汽品质良好，以防止热力设备金属表面的腐蚀、结垢和积盐。火电厂的水处理包括补给水处理、给水处理、锅内水处理、凝结水处理、循环冷却水处理、发电机内冷水处理等。沿海电厂由于淡水资源缺乏，多采用海水淡化处理来获得淡水。这些不同的水处理过程对发电设备金属的腐蚀与防护产生了直接影响。

本书是中国工程院重大咨询项目“我国腐蚀状况及控制战略研究”的重要成果之一。在侯保荣院士等的领导下，2015~2016 年著者在我国火力发电行业 60 多家电厂开展了腐蚀状况及控制技术、火电厂建设和运行中的防腐蚀投入、腐蚀损失等方面的调研。结合著者多年来的研究成果，本书较系统地阐述了火电厂防腐蚀与水处理之间的关系，首先介绍了火力发电现状、火电厂金属腐蚀特点及火电厂水处理的重要性，然后分章分别阐述了金属腐蚀与控制原理、锅炉给水处理、锅内水处理、凝汽器循环冷却水处理、海水淡化设备腐蚀与控制、热力设备停用保护，最后详细分析了本次针对我国火电厂腐蚀现状调查的结果。

本书第 1 章、第 2 章 (2.2)、第 3 章 (3.1~3.6)、第 4 章 (4.1~4.4)、第 5 章 (5.1~5.4)、第 6 章 (6.3)、第 7 章 (7.1~7.3) 由葛红花撰写，第 2 章 (2.1、2.3~2.5)、第 3 章 (3.7)、第 4 章 (4.5)、第 5 章 (5.5)、第 6 章 (6.1~6.2)、第 7 章 (7.4) 由张大全撰写，第 8 章由赵玉增、葛红花撰写。在火电厂腐蚀现状调查中，作者团队受到华能国际电力股份有限公司陈戎、华电国际电力股份有限公

司马天忠、华东电力设计院蔡冠萍、浙江省电力公司电力科学研究院祝邨伟和胡家元等专家的指导和帮助，以及校友江存武、张雅丽、王治国等的大力支持。研究生袁群、徐学敏、张敏、夏铁峰等在本书材料的整理过程中给予了很大帮助。在此谨表谢意。

由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请读者批评指正。

作 者

2017 年 3 月

目 录

丛书序

丛书前言

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 我国电力工业的发展	1
1.2 火力发电现状	2
1.3 火力发电概述	4
1.4 火电厂金属腐蚀特点	5
1.4.1 火电厂热力设备的金属材料	5
1.4.2 火电厂腐蚀介质特点	6
1.4.3 火电厂金属材料腐蚀特点	8
1.5 火电厂水处理的重要性	9
1.5.1 水质不良的危害	9
1.5.2 火电厂水处理的主要内容	10
参考文献	12
第 2 章 金属腐蚀与控制原理	13
2.1 腐蚀电化学原理	13
2.1.1 腐蚀原电池的类型	13
2.1.2 腐蚀电化学的基本概念	14
2.1.3 电化学腐蚀热力学	18
2.1.4 电化学腐蚀动力学	20
2.1.5 腐蚀电化学研究方法	25
2.2 腐蚀控制原理及常用方法	27
2.2.1 金属腐蚀防护基本原理	27
2.2.2 常用的防腐蚀方法	30
2.3 防腐蚀化学品理论基础	32
2.3.1 化学键与分子结构	32
2.3.2 酸碱理论及应用	33

2.3.3 表面化学·····	34
2.3.4 配位化学·····	36
2.3.5 化学结构与防腐蚀性能的关系·····	38
2.3.6 缓蚀剂的协同作用·····	39
2.4 缓蚀剂合成及其应用·····	41
2.4.1 缓蚀剂的作用特征及分类·····	41
2.4.2 聚合型缓蚀剂·····	42
2.4.3 气相缓蚀剂·····	43
2.4.4 环境友好缓蚀剂·····	43
2.4.5 氨基酸缓蚀剂·····	44
2.4.6 缓蚀剂研究开发展望·····	45
2.5 缓蚀组装技术·····	46
2.5.1 缓蚀自组装技术·····	46
2.5.2 氨基酸缓蚀自组装膜·····	47
2.5.3 自组装缓蚀膜的表征技术·····	49
2.5.4 缓蚀组装技术发展·····	50
参考文献·····	51
第3章 锅炉给水处理·····	54
3.1 锅炉给水处理概述·····	54
3.1.1 锅炉组成及工作过程·····	54
3.1.2 锅炉的水循环·····	55
3.2 水的预处理·····	56
3.2.1 预处理概述·····	56
3.2.2 水的混凝处理·····	57
3.2.3 沉淀与澄清·····	59
3.2.4 水的过滤处理·····	59
3.3 水的净化处理·····	60
3.3.1 离子交换水处理·····	60
3.3.2 膜法水处理·····	62
3.4 凝结水处理·····	64
3.4.1 凝结水处理的目及作用·····	64
3.4.2 凝结水的过滤·····	64
3.4.3 凝结水的混床除盐·····	65
3.4.4 凝结水处理的工艺流程·····	65

3.5 锅炉给水质量标准	66
3.5.1 给水质量标准	66
3.5.2 凝结水质量标准	68
3.5.3 锅炉补给水质量标准	69
3.6 给水水质与金属腐蚀	69
3.6.1 锅炉给水杂质引起的腐蚀	69
3.6.2 给水系统金属腐蚀的控制	72
3.7 电厂给水处理杀菌剂	74
3.7.1 杀菌剂的主要种类	74
3.7.2 水处理杀菌剂发展方向	76
3.7.3 硼化溴基杀菌剂在燃机电厂原水净化中的应用	76
参考文献	78
第4章 锅内水处理	80
4.1 锅内水处理概述	80
4.1.1 炉水中杂质的来源	80
4.1.2 锅内水垢的生成及危害	81
4.2 锅内加药处理方法	82
4.2.1 纯碱处理法	82
4.2.2 磷酸盐处理法	82
4.2.3 全挥发性处理法	83
4.2.4 中性水处理法	84
4.2.5 联合水处理法	85
4.2.6 聚合物处理法	85
4.3 锅内水处理加药及锅炉排污	85
4.3.1 锅内水处理的加药方法	85
4.3.2 加药装置和加药系统	86
4.3.3 锅内加药处理时的注意事项	86
4.3.4 锅炉排污	86
4.4 锅炉水汽质量标准	87
4.4.1 锅炉炉水质量标准	87
4.4.2 蒸汽质量标准	88
4.5 多元胺锅炉水处理剂	89
4.5.1 多元胺在模拟高温高压水汽中的腐蚀抑制作用	89
4.5.2 多元胺炉内水处理剂的腐蚀电化学测试	90

4.5.3	表面形貌分析	92
4.5.4	20#钢表面憎水特性	93
4.5.5	多元胺炉内水处理剂在模拟高温高压水中的分解特性	94
4.5.6	多元胺炉内水处理剂的急性经口毒性实验	94
4.5.7	多元胺炉内水处理剂的现场应用实验	95
	参考文献	99
第5章	凝汽器循环冷却水处理	100
5.1	概述	100
5.1.1	火电厂凝汽器应用概况	100
5.1.2	我国凝汽器冷却水水质状况及面临的问题	102
5.1.3	循环冷却水水质稳定剂	105
5.2	循环水的化学水处理技术	107
5.2.1	循环水的化学水处理技术概述	107
5.2.2	循环水水质稳定剂的选择	110
5.2.3	阻垢剂性能及复配	111
5.2.4	阻垢剂对碳酸钙结晶过程的影响	113
5.3	物理水处理技术	116
5.3.1	物理水处理技术概述	116
5.3.2	电磁处理的阻垢性能研究	118
5.3.3	磁场水处理阻垢机理探讨	120
5.3.4	磁处理对冷却水系统中金属腐蚀行为的影响	126
5.4	不锈钢凝汽器的腐蚀及影响因素	129
5.4.1	不锈钢凝汽器的应用与特性	129
5.4.2	不锈钢在模拟冷却水中的钝化	132
5.4.3	模拟水中影响不锈钢耐蚀性能的因素	140
5.4.4	硫离子对不锈钢钝化膜的破坏作用	148
5.5	凝汽器的运行维护	154
5.5.1	凝汽器选材	154
5.5.2	铜合金凝汽器缓蚀阻垢剂性能评价	159
5.5.3	不锈钢凝汽器缓蚀阻垢剂评价	164
	参考文献	169
第6章	海水淡化设备腐蚀与控制	171
6.1	低温多效海水淡化铜合金热交换管失效分析	171
6.1.1	海水水质分析	171

6.1.2	失效管样的表面分析实验	172
6.1.3	腐蚀浸泡实验	181
6.1.4	腐蚀管样的酸洗实验	186
6.1.5	总结	189
6.2	低温多效海水淡化铜合金热交换管耐蚀性研究	189
6.2.1	海水的取样、预处理及水质分析	190
6.2.2	预氧化铜管和光亮铜管模拟腐蚀实验研究	191
6.2.3	预氧化铜管和光亮铜管腐蚀的表面分析研究	194
6.2.4	预氧化铜管和光亮铜管的腐蚀电化学实验研究	196
6.2.5	预氧化铜管和光亮铜管的酸洗实验研究	200
6.2.6	总结	203
6.3	反渗透海水淡化产水腐蚀与控制	204
6.3.1	反渗透海水淡化技术的应用	204
6.3.2	碳钢在一级反渗透产水和海水中的腐蚀行为比较	204
6.3.3	碳钢在一级反渗透产水中的腐蚀控制研究	215
6.3.4	不锈钢在一级反渗透产水中的腐蚀与防护技术研究	221
6.3.5	总结	225
	参考文献	225
第 7 章	热力设备停备用保护	228
7.1	热力设备停备用保护概述	228
7.1.1	热力设备停备用腐蚀特点	228
7.1.2	停备用腐蚀的影响因素	229
7.2	停备用保护方法	230
7.2.1	停炉保护方法	230
7.2.2	其他热力设备停备用保护方法	236
7.3	十八胺停炉保护	239
7.3.1	十八胺成膜条件研究	240
7.3.2	十八胺成膜机理分析	243
7.3.3	十八胺在电厂停备用保护中的应用	249
7.3.4	ODA 成膜效果的评价方法	253
7.3.5	十八胺停备用保护的实施方法	254
7.4	气相缓蚀剂停炉保护	255
7.4.1	热力设备的气相缓蚀剂停备用保护原理	256
7.4.2	气相缓蚀剂停备用保护的基本要求	256
7.4.3	气相缓蚀剂停备用保护的应用	258

7.4.4 热力设备气相缓蚀剂停用保护的展望	260
参考文献	262
第 8 章 我国火电厂腐蚀现状调查	264
8.1 火电厂腐蚀状况调查及现状分析	264
8.1.1 参加问卷调查的火力发电厂基本情况	266
8.1.2 火力发电厂腐蚀状况问卷调查	266
8.2 案例分析	290
8.2.1 锅炉水冷壁腐蚀失效	290
8.2.2 高压加热器换热管	291
8.2.3 汽轮机腐蚀	292
8.2.4 凝汽器管腐蚀	293
8.3 火电厂腐蚀检测及评估方法	294
参考文献	298