



材料延寿与可持续发展

火力发电工程 材料失效与控制

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写
葛红花 廖强强 张大全 编 著



化学工业出版社



材料延寿与可持续发展

火力发电工程 材料失效与控制

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写
葛红花 廖强强 张大全 编 著



化学工业出版社

· 北京 ·

《火力发电工程材料失效与控制》是《材料延寿与可持续发展》丛书之一。在当前煤炭等化石能源仍占主导地位的形势下,我国火电设备的高效和安全运行显得十分重要。《火力发电工程材料失效与控制》结合当前火电设备材料失效现状,对火电系统各种设备材料的失效原理、控制手段和预防方法予以系统阐述,特别是锅炉系统、汽轮机和发电机、凝汽器与其它辅机系统、烟气净化系统和建筑设施的材料防护;对热力设备的清洗和停用保护专门予以论述。

本书适宜于火力发电设计、建设和火电企业运行维护技术人员阅读,也可供电力类院校材料和水化学等专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

火力发电工程材料失效与控制/葛红花,廖强强,
张大全编著. —北京:化学工业出版社,2015.1
(材料延寿与可持续发展)
ISBN 978-7-122-22358-6

I. ①火… II. ①葛… ②廖… ③张… III. ①火
力发电-工程材料-失效分析 IV. ①TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 270004 号

责任编辑:段志兵 王清颢
责任校对:王 静

文字编辑:孙凤英
装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张19¼ 字数360千字 2015年2月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519680) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:58.00元

版权所有 违者必究

《材料延寿与可持续发展》丛书顾问委员会

主任委员：师昌绪

副主任委员：严东生 王淀佐 干 勇 肖纪美

委 员（按姓氏拼音排序）：

安桂华	白忠泉	才鸿年	才 让	陈光章	陈蕴博
戴圣龙	俸培宗	干 勇	高万振	葛昌纯	侯保荣
柯 伟	李晓红	李正邦	刘翔声	师昌绪	屠海令
王淀佐	王国栋	王亚军	吴荫顺	肖纪美	徐滨士
严东生	颜鸣皋	钟志华	周 廉		

《材料延寿与可持续发展》丛书总编辑委员会

名誉主任（名誉总主编）：

干 勇

主 任（总主编）：

李金桂 张启富

副 主 任（副总主编）：

许淳淳 高克玮 顾宝珊 张 炼 朱文德 李晓刚

编 委（按姓氏拼音排序）：

白新德	蔡健平	陈建敏	程瑞珍	窦照英	杜存山
杜 楠	干 勇	高克玮	高万振	高玉魁	葛红花
顾宝珊	韩恩厚	韩雅芳	何玉怀	胡少伟	胡业锋
纪晓春	李金桂	李晓刚	李兴无	林 翠	刘世参
卢凤贤	路民旭	吕龙云	马鸣图	沈卫平	孙 辉
陶春虎	王 钧	王在建	武兵书	熊金平	许淳淳
许立坤	许维钧	杨卯生	杨文忠	袁训华	张 津
张 炼	张启富	张晓云	赵 晴	周国庆	周师岳
周伟斌	朱文德				

办 公 室：袁训华 张雪华

《材料延寿与可持续发展》丛书指导单位

中国工程院

中国科学技术协会

《材料延寿与可持续发展》丛书合作单位

中国腐蚀与防护学会

中国钢研科技集团有限公司

中航工业北京航空材料研究院

化学工业出版社

I 总序言 I

在远古人类处于采猎时代，依赖自然，听天由命；公元前一万年开始，人类经历了漫长的石器时代，五千多年前进入青铜器时代，三千多年前进入铁器时代，出现了农业文明，他们砍伐森林、种植稻麦、驯养猪狗，改造自然，进入农牧经济时代。18世纪，发明蒸汽机车、轮船、汽车、飞机，先进的人类追求奢侈的生活、贪婪地挖掘地球、疯狂地掠夺资源、严重地污染环境，美其名曰人类征服自然，而实际是破坏自然，从地区性的伤害发展到全球性的灾难，人类发现在无休止、不理智、不文明地追求享受的同时在给自己挖掘坟墓。

人类终于惊醒了，1987年世界环境及发展委员会发表的《布特兰报告书》确定人类应该保护环境、善待自然，提出了“可持续发展战略”，表达了人类应该清醒地、理智地、文明地处理好人与自然关系的大问题，指出“既满足当代人的需求，又不对后代人满足其需求的能力构成危害的发展”，称之为可持续发展。其核心思想是“人类应协调人口、资源、环境与发展之间的相互关系，在不损害他人和后代利益的前提下追求发展。”

这实际上是涉及我们人类所赖以生存的地球如何既满足人类不断发展的需求，又不被破坏、不被毁灭这样的大问题；涉及到人口的不断增长、生活水平的不断提高、资源的不断消耗、环境的不断恶化；涉及矿产资源的不断耗竭、不可再生能源资源的不断耗费、水力资源的污染、土地资源的破坏、空气质量的不断恶化等重大问题。

在“可持续发展”战略中，材料是关键，材料是人类赖以生存和发展的物质基础，是人类社会进步的标志和里程碑，是社会不断进步的先导、是可持续发展的支柱。如果不断发现新矿藏，不断研究出新材料，不断延长材料的使用寿命，不断实施材料的再制造、再循环、再利用，那么这根支柱是牢靠的、坚强的、是能够维护人类可持续发展的！

在我国，已经积累了许许多多预防和控制材料提前失效（其因素主要是腐蚀、摩擦磨损磨蚀、疲劳与腐蚀疲劳）的理论、原则、技术和措施，需要汇总和提供应用，《材料延寿与可持续发展》丛书以多个专题力求解决这一课题项目。有一部分专题阐述了材料失效原理和过程，另一部分涉及工程领域，结合我国已积累的材料失

效的案例和经验，更深入系统地阐述预防和控制材料提前失效的理论、原则、技术和措施。丛书总编辑委员会前后花费五年的时间，将分散在全国各个研究院所、工厂、院校的研究成果经过精心分析研究、汇聚成一套系列丛书，这是一项研究成果、是一套高级科普丛书、是一套继续教育实用教材。希望对我国各个工业部门的设计、制造、使用、维护、维修和管理人员会有所启示、有所参考、有所贡献；希望对提高全民素质有所裨益、对国家各级公务员有所参考。

我国正处于高速发展阶段，制造业由大变强，材料的合理选择和使用，以达到装备的高精度、长寿命、低成本的目的，这一趋势应该受到广泛的关注。

中国科学院院士

中国工程院院士

师昌绪

I 总前言 I

材料是人类赖以生存和发展的物质基础，是人类社会进步的标志和里程碑，是社会不断进步的先导，是国家实现可持续发展的支柱。然而，地球上的矿藏是有限的，而且需要投入大量的能源，进行复杂的提炼、处理，产生大量污染，才能生产成为人类有用的材料，所以，材料是宝贵的，需要科学利用和认真保护。

半个多世纪特别是改革开放三十多年来，我国材料的研究、开发、应用有了快速的发展，水泥、钢铁、有色金属、稀土材料、织物等许多材料的产量多年居世界第一。我国已经成为世界上材料的生产、销售和消费大国。“中国材料”伴随着“中国制造”的产品，遍布全球；伴随着“中国建造”的工程项目，遍布全国乃至世界上很多国家。材料支撑我国国民经济连续 30 多年 GDP 年均 10% 左右的高速发展，使我国成为全球第二大经济体。但是，我国还不是材料强国，还存在诸多问题需要改进。例如，在制造环境、运行环境和自然环境的作用下，出现过早腐蚀、老化、磨损、断裂（疲劳），材料及其制品在使用可靠性、安全性、经济性和耐久性（简称“四性”）方面都还有大量的工作要做。

“材料延寿”是指对材料及其制品在服役环境作用下出现腐蚀、老化、磨损和断裂而导致的过早失效进行预防与控制，以尽可能地提高其“四性”，也就是提高水平，提高质量，延长寿命。目标是节约资源、能源，减少对环境的污染，支持国家可持续发展。

材料及制品的“四性”实质上是材料及制品水平高低和质量好坏的最终表征和判断标准。追求“四性”，就是追求全寿命周期使用的高水平、高质量，追求“质量第一”，追求“质量立国”，追求“材料强国”、“制造强国”、“民富、国强、美丽国家”。

我国在“材料延寿与可持续发展”方面，做过大量的研究，取得了显著的成绩，积累了丰富的实践经验，凝练出了一系列在材料全寿命周期中提高“四性”的重要理论、原则、技术和措施，可以总结，服务于社会。

“材料延寿与可持续发展”丛书的目的就在于：总结过去，总结已有的系统控制材料提前损伤、破坏和失效的因素，即腐蚀、老化、磨损和断裂（主要是疲劳与腐蚀疲劳）的理论、原则、技术和措施，使各行业产品设计师，制造、使用和管理工程师有所启示、有所参考、有所作为、有所贡献，以尽可能地提高产品的“四性”，

延长使用寿命。丛书的目的还在于：面对未来、研究未来，推进材料的优质化、高性能化、高强度化、长寿命化，多品质、多规格化、标准化，传统材料的综合优化，材料的不断创新，并为国家长远发展，提出成套成熟可靠的理论、原则、政策和建议，推进国家“节约资源、节能减排”、“可持续发展”和“保卫地球”、“科学、和谐”发展战略的实施，加速创建我国“材料强国”、“制造强国”。

在中国科协和中国工程院的领导与支持下，一批材料科学工作者不懈努力，不断地编写和出版系列图书。衷心希望通过我们的努力，既能对设计师，制造、使用和管理工程师“材料延寿与可持续发展”的创新有所帮助，又能为国家成功实施“可持续发展”、“材料强国”、“制造强国”的发展战略有所贡献。

中国工程院院士

中国工程院副院长

I 前言 I

I 目录 I

电能是最重要的二次能源,电力工业是国民经济和社会发展的**重要基础产业**。电既是促进国民经济发展的生产资料,又是人们生活中不可缺少的生活资料。根据中央“经济要发展,电力工业必须先行”的要求,进入21世纪,我国电力工业获得迅速发展。从2003年开始,我国电力装机容量从不足4亿千瓦到2012年年底突破11亿千瓦,年增长率在8%以上,取得的成绩举世瞩目。

火力发电是历史最久、最重要的一种发电形式,目前国内火力发电装机容量占总装机容量的70%以上。随着我国电力供应政策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、低能耗、少排放机组,同时烟气脱硫脱硝工程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。

本书首先介绍了火电厂的发电系统、材料及其腐蚀特点,然后分章详细介绍了锅炉系统、汽轮机和发电机系统、凝汽器与其它辅机系统、烟气净化系统及其它辅助系统的腐蚀环境、材料及其失效形式和控制方法,最后介绍了热力设备的清洗方法、原理及清洗过程中的腐蚀控制,热力设备的停备用保护,并重点介绍了十八胺停炉保护和气相缓蚀剂保护技术。

本书可供从事火力发电系统设计、制造、运行维护等领域的科技人员和技术工人阅读,也可供大专院校有关专业教师和学生参考。

本书第1、5、6章,第4章的4.1节、4.3~4.6节等部分,第8章的8.1~8.4节由葛红花撰写;第2、7章由廖强强撰写;第3章、第4章的4.2节、第8章的8.5节由张大全撰写。研究生张敏、王学娟、刘快迎、刘晓林、张心华、邵玉佩、王玉娜、刘涛等在材料的整理过程中给予了很大帮助,在此谨表谢意。

编著者

欢迎订阅化学工业出版社专业图书

●表面处理与防腐蚀技术常备书目

ISBN	书 名	主要作者	定价
9787122126900	表面保护层设计与加工指南	李金桂	58
9787122053251	表面工程技术手册（上）	徐滨士	130
9787122053244	表面工程技术手册（下）	徐滨士	130
9787122171597	表面及特种表面加工	冯拉俊	48
9787122081643	典型零件热处理技术	王忠诚	98
9787122113948	电厂防腐蚀及实例精选	窦照英	60
9787122094544	电镀层均匀性和镀液稳定性——问题与对策	张三元	36
9787122110596	电镀工程师手册	谢无极	188
9787122149213	电镀故障精解（第二版）	谢无极	68
9787122161154	电镀故障手册	谢无极	188
9787122165145	电镀化学分析手册	戴永盛	198
9787122113597	电镀实践 1000 例	郑瑞庭	68
9787122041142	电镀添加剂技术问答	刘仁志	28
9787122136589	电镀专利：解析·申请·利用	刘仁志	48
9787122178398	电镀装挂操作问答	郑瑞庭	38
9787122143563	电化学保护简明手册	王强	128
9787122113313	镀铬技术问答	王尚义	36
9787122075635	镀镍技术丛书——镀镍故障处理及实例	陈天玉	29
9787122036919	镀镍技术丛书——复合镀镍和特种镀镍	陈天玉	46
9787122185693	防腐蚀涂装工程手册（第二版）	金晓鸿	88
9787122138293	非金属电镀与精饰：技术与实践（第二版）	刘仁志	58
9787122131072	腐蚀监测技术	[美] 杨列太	128
9787122046086	腐蚀控制系统工程学概论	李金桂	69
9787122034991	腐蚀失效分析案例	赵志农	78

续表

ISBN	书 名	主要作者	定价
9787502590291	腐蚀与防护手册——腐蚀理论、试验及监测（第1卷）（二版）	组织编写	98
9787122032577	腐蚀与防护手册——工业生产装置的腐蚀与控制（第4卷）（二版）	组织编写	89
9787122027368	腐蚀与防护手册——耐蚀非金属材料及防腐施工（第3卷）（二版）	组织编写	98
9787502592646	腐蚀与防护手册——耐蚀金属材料及防蚀技术（第2卷）（二版）	组织编写	98
9787122152428	钢材热镀锌技术问答	苗立贤	39
9787122074232	钢带连续涂镀和退火疑难对策	许秀飞	58
9787122117403	工业清洗及实例精选	窦照英	48
9787122106568	工艺品表面处理技术	郭文显	38
9787122083739	滚镀工艺技术与应用	侯进	58
9787122077325	金属表面防腐蚀工艺	陈克忠	29.8
9787122065919	金属表面粉末涂装	李正仁	48
9787122186003	金属的大气腐蚀及其实验方法	万晔	58
9787122156389	金属清洗与防锈	王恒	78
9787122131942	金属文物保护——全程技术方案	许淳淳	58
9787122126726	铝合金表面处理膜层性能及测试	朱祖芳	68
9787122185662	铝合金表面氧化问答	郑瑞庭	39
9787122133656	铝合金防腐蚀技术问答	方志刚	59
9787122069856	铝合金阳极氧化与表面处理技术（二版）	朱祖芳	68
9787122113306	桥梁钢筋混凝土结构防腐蚀——耐腐蚀钢筋及阴极保护	葛燕	48
9787122038715	热处理工必读	马永杰	22
9787122128829	实用电镀技术丛书（2）——化学镀实用技术（二版）	李宁	68
9787122122018	涂层失效分析	[美] 德怀特 G. 韦尔登	58
9787122099662	涂料及检测技术	陈卫星	29
9787122157584	涂装车间设计手册（第二版）	王锡春	150
9787122164483	涂装工艺与设备	冯立明	98

续表

ISBN	书 名	主要作者	定价
9787122146861	涂装系统分析与质量控制	齐祥安	68
9787122078728	现代电镀手册	刘仁志	158
9787122061812	现代涂装手册	陈治良	148
9787122106957	暂时防锈手册	张康夫	128

● 《材料延寿与可持续发展》系列

序 号	书 号	书 名	主 要 作 者	定价/元
1	978-7-122-20672-5	材料环境适应性工程	蔡健平	69.0
2	978-7-122-20626-8	现代表面工程技术与应用	李金桂	78.0
3	978-7-122-20452-3	表面完整性理论与应用	高玉魁	56.0
4	978-7-122-20532-2	表面耐磨损与摩擦学材料设计	高万振	49.0
5	22380	再制造技术与应用	徐滨士	36.0
6		特种合金钢选用与设计	干 勇	
7	978-7-122-20717-3	钛合金选用与设计	林 翠	39.0
8	978-7-122-20714-2	涂镀钢铁选用与设计	顾宝珊	89.0
9	978-7-122-20718-0	现代橡胶选用设计	熊金平	46.0
10	21540	工程结构损伤和耐久性	胡少伟	59.0
11	978-7-122-20286-4	管道工程保护技术	张炼	46.0
12	21434	煤矿工程设备防护	程瑞珍	50.0
13	978-7-122-20716-6	可再生能源工程材料失效及预防	葛红花	39.0
14	21255	核电材料老化与延寿	许维钧	49.0
15	22358	火力发电工程材料失效与控制	葛红花	58.00
16	978-7-122-20265-9	铁道装备防护	杜存山	32.0
17	978-7-122-20655-8	农业机械材料失效与控制	吕龙云	30.0
18	978-7-122-20462-2	海洋工程的材料失效与防护	许立坤	69.0
19	22459	油气工业的腐蚀与控制	路民旭	46.0

以上图书由化学工业出版社出版。如要以上图书的内容简介和详细目录，或要更多的科

技图书信息，请登录 www.cip.com.cn。

邮购地址：(100011) 北京市东城区青年湖南街 13 号化学工业出版社。

邮购电话：010-64518888, 64518800。

也可以通过当当网、京东商城、亚马逊、化学工业出版社天猫旗舰店等网络书店咨询购买。

如要出版新著，请与编辑联系：010-64519271 Email: dzbb@cip.com.cn

I 目录 I

I 言 語 I

第1章 绪 论

- 1.1 火力发电概述 001
- 1.2 火力发电设备材料特点 003
 - 1.2.1 火力发电设备材料要求 003
 - 1.2.2 火力发电设备主要材料类型 004
- 1.3 火力发电设备腐蚀特点 005
 - 1.3.1 热力设备腐蚀特点 006
 - 1.3.2 热力设备腐蚀影响因素 006
 - 1.3.3 热力设备腐蚀分类方法 007
- 1.4 火力发电厂腐蚀控制重要性 012
- 参考文献 013

第2章 锅炉系统材料与失效预防

- 2.1 水冷壁管 014
 - 2.1.1 水冷壁管的结构与用材 014
 - 2.1.2 锅炉水冷壁管的腐蚀及预防措施 018
 - 2.1.3 锅炉水冷壁的磨损 022
 - 2.1.4 锅炉水冷壁管裂纹分析案例 026
 - 参考文献 030
- 2.2 省煤器 031
 - 2.2.1 省煤器的结构与材料 031
 - 2.2.2 省煤器的磨损 037
 - 2.2.3 省煤器内腐蚀及防护 040
 - 2.2.4 省煤器外腐蚀及防护 042
 - 2.2.5 省煤器积灰现象 046
 - 2.2.6 省煤器内的水击现象 047
 - 参考文献 048
- 2.3 过热器和再热器 050
 - 2.3.1 过热器与再热器的作用 050
 - 2.3.2 过热器与再热器的工作特性 050
 - 2.3.3 过热器与再热器的常用钢材 051
 - 2.3.4 过热器与再热器的结构 052

- 2.3.5 热偏差 059
- 2.3.6 过热器、再热器的高温积灰 064
- 2.3.7 过热器、再热器的超温与破坏 065
- 2.3.8 管子外部的磨蚀或侵蚀 067
- 参考文献 068

第3章 汽轮机与发电机系统材料与失效预防

- 3.1 汽轮机用材料 069
- 3.2 汽轮机零部件失效 077
 - 3.2.1 汽轮机叶片失效 078
 - 3.2.2 汽轮机叶轮失效 084
 - 3.2.3 汽轮机转子失效 085
 - 3.2.4 汽轮机螺栓失效 087
- 3.3 发电机零部件失效 089
 - 3.3.1 汽轮发电机常见的故障形式 089
 - 3.3.2 发电机零件的常见失效形式 090
- 3.4 结束语 092
- 参考文献 092

第4章 凝汽器与其它辅机系统材料及失效预防

- 4.1 凝汽器结构及防护概述 094
 - 4.1.1 凝汽器的作用 094
 - 4.1.2 凝汽器分类及组成 095
 - 4.1.3 凝汽器冷却管的常用材料 098
 - 4.1.4 凝汽器防护的重要性 100
- 参考文献 100
- 4.2 铜合金管凝汽器 101
 - 4.2.1 铜合金管凝汽器的发展历史 101
 - 4.2.2 电厂凝汽器铜管失效的分析 103
 - 4.2.3 凝汽器的运行维护保养 106
- 参考文献 110
- 4.3 不锈钢管凝汽器 111
 - 4.3.1 凝汽器不锈钢管的应用历程 111
 - 4.3.2 铜管与不锈钢管技术经济性能比较 112
 - 4.3.3 凝汽器用不锈钢管特征 115
 - 4.3.4 不锈钢的点蚀及影响因素 120
 - 4.3.5 不锈钢的微生物腐蚀 123

- 4.3.6 凝汽器不锈钢管使用中的其它问题 131
- 4.3.7 不锈钢凝汽器管的维护与管理 132
- 参考文献 137
- 4.4 钛管凝汽器 139
 - 4.4.1 海水冷却凝汽器冷却管选材分析 139
 - 4.4.2 钛及其合金的耐蚀性特点 141
 - 4.4.3 钛管凝汽器泄漏问题 144
 - 4.4.4 钛管凝汽器失效实例 151
 - 4.4.5 钛管凝汽器失效控制 154
 - 参考文献 156
- 4.5 凝结水系统 156
 - 4.5.1 凝结水系统作用及特点 156
 - 4.5.2 二氧化碳 (CO₂) 腐蚀与控制 158
 - 4.5.3 溶解氧的腐蚀与控制 161
 - 参考文献 163
- 4.6 疏水系统 163
 - 4.6.1 疏水系统作用及特点 163
 - 4.6.2 疏水系统腐蚀及控制 164
 - 参考文献 165

第5章 烟气净化系统材料与失效预防

- 5.1 火电烟气净化概述 166
- 5.2 烟气脱硫主系统 168
 - 5.2.1 烟气脱硫技术发展 168
 - 5.2.2 湿式石灰石-石膏法 FGD 工艺 170
 - 5.2.3 FGD 工艺过程腐蚀因素 174
 - 5.2.4 FGD 工艺过程的耐腐蚀材料 177
 - 5.2.5 耐蚀非金属材料衬里 188
- 5.3 烟囱腐蚀控制 195
 - 5.3.1 火电厂烟囱腐蚀现状 195
 - 5.3.2 火电厂烟囱防腐蚀 197
 - 参考文献 200

第6章 其它辅助系统材料与失效预防

- 6.1 输煤系统 201
 - 6.1.1 输送机 201
 - 6.1.2 环锤式碎煤机 203