



材料延寿与可持续发展

铁道装备防护

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写
杜存山 等编著



化学工业出版社



材料延寿与可持续发展

铁道装备防护

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写
杜存山 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是《材料延寿与可持续发展》丛书之一,介绍了铁道装备(钢轨、机车车辆以及零部件、铁路钢桥、混凝土桥梁、接触网等)在制造、使用过程中出现的材料腐蚀、磨损、断裂等破坏特点、机理及防护技术;针对近几年高速铁路的大规模建设和应用,介绍了目前我国高速铁路的耐久性问题。

本书可供从事铁路行业产品生产单位、工程设计单位及管理部门的工程技术人员使用,也可供相关专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

铁道装备防护/杜存山等编著. —北京:化学工业出版社,
2014. 6

(材料延寿与可持续发展)

ISBN 978-7-122-20265-9

I. ①铁… II. ①杜… III. ①高速铁路-铁
路工程-防护工程-研究 IV. ①U238

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 069269 号

责任编辑:王清颖 段志兵

文字编辑:余纪军

责任校对:徐贞珍

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11¼ 字数200千字 2014年9月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686)

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:32.00 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	王一建	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

《铁道装备防护》编委会

主 任：杜存山

委 员：杜存山 张银花 贾恒琼 穆恩生 曹 卫 张红生
李洪刚 赵 民 高文会 裴顶峰 张 弘 贺春江

丨 总序言 丨

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。”

这实际上是涉及到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练 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。

“材料寿命”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、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

铁路运输在我国国民经济和人民生活中占据着很重要的地位。特别是进入 21 世纪以来,我国的国民经济得到了飞速发展,人们的生活水平有了较大改善,经济交往、人员往来也不断增加,并且随着我国铁路运行速度的提高,铁路运输在国民经济中的地位也在不断加强。这就要求铁道工程安全、运营管理不出纰漏,维护工程及时到位,保证人民生命和财产不遭受损失,而铁道工程是保证这一切顺利进行的物质基础。高速铁路大范围的建成并投入运营,众多新技术、新材料的投入应用,都对铁道工程的防护提出了新的、更高的要求。

铁道工程所用材料涉及范围很广,有金属材料、无机水泥混凝土材料、高分子材料、新型复合材料等,其中金属材料处于应用的主导地位。在铁路运营中出现的大小事故,很多是由材料腐蚀、断裂、老化、磨损等使设备无法正常运行而造成的。面对日益短缺的自然资源,铁路工作者在设计和使用过程中应尽可能地延长材料的使用寿命,提高材料制成品的可靠性、安全性、经济性和耐久性,支持国家“节约资源、节能减排”、“低碳经济”、“可持续发展”和“保卫地球”等战略。

本书首先从铁道行业的各种装备所可能遭遇的腐蚀、摩擦磨损、断裂等现象开始,力求讲清楚预防与控制它们的理论、原则、技术和措施,确保其使用的可靠性、安全性、经济性和耐久性,获得较长的使用寿命。

本书按照材料在铁道工程中使用环境的不同、所产生的病害不同及采用的防护措施的差异,分钢轨、机车车辆、铁路桥梁、接触网 4 章进行分析介绍;同时为方便读者阅读,在第 1 章对铁道工程进行了简述,并且针对当前高速铁路大范围投入运营,在第 6 章前瞻性介绍了我国高速铁路的耐久性问题。

参加本书各章编写工作的有:贾恒琼(第 1 章),张银花、高文会、裴顶峰、贺春江(第 2 章),杜存山、曹卫、赵民、张弘(第 3 章),杜存山(第 4 章),穆恩生、张红生(第 5 章),李洪刚、杜存山(第 6 章)。全书由杜存山统稿。

本书可供铁路科技工作者、材料专业师生参考学习。

本书在编写过程中,中国铁道科学研究院应用化学事业部的同事给予了许多帮

助和指导，特致感谢。

铁道工程技术正在不断发展，材料日新月异，编著者尽力向读者提供较全面和实用的内容。由于时间仓促，书中难免有不当之处，诚请广大读者批评指正。

编著者

2014. 5

I 目录 I

第1章 绪言

- 1.1 铁道工程概述 /001
- 1.2 铁道工程的腐蚀与防护 /001
- 1.3 铁道工程与可持续发展 /002
- 参考文献 /003

第2章 钢轨的损伤与防护

- 2.1 钢轨的材质 /004
 - 2.1.1 钢轨的构成及类型 /004
 - 2.1.2 钢轨生产设备及工艺 /006
 - 2.1.3 钢轨材质和性能 /006
- 2.2 工作环境对钢轨产生病害的影响 /009
 - 2.2.1 介质环境对钢轨病害产生的影响 /009
 - 2.2.2 载荷环境对钢轨病害产生的影响 /011
- 2.3 钢轨磨损及预防 /015
 - 2.3.1 磨损成因 /015
 - 2.3.2 磨损特点 /016
 - 2.3.3 磨损危害 /016
 - 2.3.4 磨损预防措施 /016
- 2.4 钢轨波磨与预防 /017
 - 2.4.1 波磨成因 /017
 - 2.4.2 波磨形态 /019
 - 2.4.3 波磨特点 /019
 - 2.4.4 波磨危害 /019
 - 2.4.5 波磨预防措施 /020
- 2.5 钢轨滚动接触疲劳伤损与预防 /021
 - 2.5.1 形成机理 /021
 - 2.5.2 滚动接触疲劳伤损特点 /024
 - 2.5.3 预防措施 /024
- 2.6 钢轨擦伤与预防 /025
 - 2.6.1 擦伤成因 /026
 - 2.6.2 钢轨擦伤特征 /026

- 2.6.3 擦伤的危害 /027
- 2.6.4 擦伤预防措施 /027
- 2.7 钢轨接头伤损与预防 /027
 - 2.7.1 接头伤损原因 /028
 - 2.7.2 接头伤损特征 /033
 - 2.7.3 接头伤损的危害 /034
 - 2.7.4 预防措施 /034
- 2.8 钢轨腐蚀及预防措施 /035
- 参考文献 /035

第3章 铁路机车车辆材料损伤及防护

- 3.1 铁路机车车辆的分类 /037
- 3.2 机车及客车材料损伤与防治 /039
 - 3.2.1 机车的损伤和腐蚀 /039
 - 3.2.2 客车的损伤和腐蚀 /041
 - 3.2.3 防治对策 /042
- 3.3 机车及客车的涂料涂装处理 /043
 - 3.3.1 钢材的表面预处理 /043
 - 3.3.2 预涂底漆 /044
 - 3.3.3 防锈底漆 /044
 - 3.3.4 腻子 /046
 - 3.3.5 中涂漆 /047
 - 3.3.6 面漆 /048
 - 3.3.7 其他功能涂料 /049
 - 3.3.8 涂装工艺 /051
 - 3.3.9 施工工艺的控制要点 /052
- 3.4 货车车体材料腐蚀与防护 /052
 - 3.4.1 货车的运营环境及腐蚀 /052
 - 3.4.2 货车的防腐蚀选材 /054
 - 3.4.3 货车的防腐蚀设计 /060
 - 3.4.4 目前防腐体系 /063
 - 3.4.5 铸钢转向架、车钩的腐蚀防护 /064
 - 3.4.6 铁道货车厂段修涂装 /064
- 3.5 车轮材料损伤与防护 /064
 - 3.5.1 裂损或崩轮 /065
 - 3.5.2 踏面接触疲劳剥离 /065
 - 3.5.3 踏面制动热裂纹 /065

- 3.5.4 踏面擦伤 /066
- 3.5.5 轮缘裂纹及缺损 /066
- 3.5.6 轮缘辗堆及轮辋外侧面辗边 /067
- 3.6 制动摩擦材料 /067
 - 3.6.1 列车制动简介 /067
 - 3.6.2 制动摩擦材料类型、工艺特点和装备水平 /068
 - 3.6.3 制动摩擦材料质量控制及存在的问题 /070
 - 3.6.4 中国铁路合成摩擦材料的使用情况 /071
 - 3.6.5 制动摩擦材料的发展方向 /075
- 3.7 机车车辆用橡胶材料 /076
 - 3.7.1 分类 /076
 - 3.7.2 机车车辆橡胶材料的性能要求 /078
 - 3.7.3 工况对橡胶材料的影响 /082
 - 3.7.4 解决机车车辆橡胶材料存在问题的方法及未来发展方向 /084
- 参考文献 /086

第4章 铁路桥梁损伤与防护

- 4.1 铁路桥梁的分类 /087
- 4.2 铁路钢桥损伤与防护 /088
 - 4.2.1 钢桥疲劳受损 /088
 - 4.2.2 钢桥腐蚀 /089
 - 4.2.3 钢桥的防疲劳破坏方法 /090
 - 4.2.4 钢桥的加固及修补 /090
 - 4.2.5 钢桥的防腐蚀涂料及涂装体系 /090
 - 4.2.6 铁路钢桥防腐蚀涂装工艺 /099
- 4.3 既有混凝土桥梁腐蚀与防护 /100
 - 4.3.1 桥梁疲劳损伤 /101
 - 4.3.2 材料劣化因素 /101
 - 4.3.3 影响机理 /104
 - 4.3.4 预防措施 /106
 - 4.3.5 修补与防护 /107
- 4.4 新建混凝土桥梁的防护 /109
 - 4.4.1 新建混凝土梁配件防护 /109
 - 4.4.2 混凝土桥面防水层 /110
 - 4.4.3 混凝土桥梁表面防护 /112
- 参考文献 /113

第5章 接触网的材料选用

- 5.1 铁路电气化和接触网的概念 /114
 - 5.1.1 铁路电气化简介 /114
 - 5.1.2 接触网的概念 /115
 - 5.1.3 接触网的要求 /116
- 5.2 接触网的组成 /116
- 5.3 接触悬挂的材料选用 /117
 - 5.3.1 导线及滑板材料 /118
 - 5.3.2 承力索 /126
 - 5.3.3 承力索终端锚固线夹和接触导线终端锚固线夹 /126
 - 5.3.4 张力补偿装置 /127
 - 5.3.5 接触网的电连接类零件 /127
 - 5.3.6 吊弦及吊弦线夹 /127
- 5.4 支持装置的材料选用 /128
 - 5.4.1 腕臂 /128
 - 5.4.2 绝缘子 /129
- 5.5 定位装置的材料选用 /130
- 5.6 支柱及基础的材料选用 /131
 - 5.6.1 横跨 /131
 - 5.6.2 支柱 /132
- 5.7 金具的材料选用 /134
- 5.8 接触网检修 /135
 - 5.8.1 接触网检修的必要性 /135
 - 5.8.2 接触网检修方式及程序 /135
 - 5.8.3 接触网的检修 /137
- 参考文献 /140

第6章 我国高速铁路的耐久性问题

- 6.1 高速铁路的发展 /142
- 6.2 我国高速铁路的结构形式 /144
 - 6.2.1 板式无砟轨道 /144
 - 6.2.2 双块式无砟轨道 /145
- 6.3 高速铁路的耐久性问题 /146
 - 6.3.1 基床 /146
 - 6.3.2 双块式无砟轨道道床板 /147
 - 6.3.3 CRTS I 型轨道板 /148

6.3.4	CRTSⅡ型轨道板	/148
6.3.5	水泥乳化沥青砂浆(CA砂浆)	/148
6.3.6	混凝土桥面防水层	/149
6.4	高速铁路病害预防措施	/150
6.4.1	提高基床强度	/150
6.4.2	减少双块式无砟轨道道床板裂缝	/150
6.4.3	控制轨道板裂缝	/151
6.4.4	CRTSⅠ型板式无砟轨道预应力钢棒窜出防护方案	/152
6.4.5	确保水泥乳化沥青砂浆层完整	/153
6.4.6	强化混凝土梁桥面防水体系	/155
参考文献		/155
索引		/156

第1章 绪言

1.1 铁道工程概述

铁道的发展已有 100 多年的历史。世界第一条行驶蒸汽机车的永久性公用运输铁路，是 1825 年通车的英国斯托克顿—达灵顿铁路。此后，铁路主要是依靠牵引动力来发展的。牵引机车从最初的蒸汽机车发展成内燃机车、电力机车。运行速度也随着牵引动力的发展而加快。

铁道工程是由轨道、路基、桥梁、隧道构成的异质结构体，将这些结构体连成有机整体的是线路。铁道工程是由土木工程、机械工程、信号工程三大部分构成的，土木工程包括轨道、路基、桥梁、隧道、站场工程，机械工程包括机车、车辆工程。如今，大型桥梁和隧道工程已形成专门的学科领域。本书主要研究铁道装备在制造、使用过程中的材料腐蚀破坏特点及防护技术，通过防腐蚀手段延长其使用寿命，达到节约资源、减少经济损失的目的。

1.2 铁道工程的腐蚀与防护

腐蚀是指材料受环境介质的作用发生化学反应而破坏的现象，在概念上也不仅仅是金属材料，还包括非金属材料及复合材料等。铁道工程领域是各种材料，特别是金属材料——钢铁的主要用户之一，使用中的一个主要问题就是腐蚀。目前铁路车厢结构中的材料以耐大气腐蚀钢为主，桥梁中以钢筋混凝土结构为主，钢桥材料则主要为 16Mn。由于金属材料及防护措施的改进，相对 20 世纪 90 年代以前，腐蚀问题显著减轻，突出的表现就是车辆等钢结构设施的使用寿命和维修周期延长，钢材因腐蚀引起的截换量大大下降。如客车的段修期由过去的 1.5 年延长到 2 年，厂修由 4~6 年延长到 6~8 年，货车厂修由 6~8 年延长到 8~10 年，机车架修由 $20 \times 10^4 \text{ km}$ 延长到 $40 \times 10^4 \text{ km}$ ^[1]。

从国外铁路腐蚀资料来看，美国铁路 5 年内因金属腐蚀损失达 4 亿~5 亿美元之多。

我国铁路上使用的钢铁量，可以从钢轨、车辆、机车、桥梁、通信线等计算出