



中国腐蚀与防护学会
著作出版基金

材料延寿与可持续发展

材料失效系统控制

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写
李金桂 陈建敏 何玉怀 等编著



化学工业出版社



中国腐蚀与防护学会
著作出版基金

材料延寿与可持续发展

材料失效系统控制

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写
李金桂 陈建敏 何玉怀 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

材料及其制品在服役环境（自然环境和运行环境）作用下，出现腐蚀、摩擦和断裂，是一种自然现象，不可避免，但科学研究与大量事实一再证明，设计、制造、使用、材料、工艺、检测工程师共同携手，进行系统预防与控制，可以提高材料及其制品的环境抗力，减少腐蚀、磨损和断裂，减少提前损伤、提前破坏、提前失效及其所造成的损失。本书全面系统地阐述了材料与制品在加工、装配、储存、运输、使用、维护、维修的全过程中所遭遇的环境作用引发的变质、退化或破坏；提出了控制其提前失效要从设计开始，贯穿于设计、制造、使用、维护、维修全过程，进行全员、全方位地系统化控制的理念及其理论、原则、技术和措施。

本书可供各种行业研制、设计、制造、检验、储运、维护维修、供应、管理等部门的设计师、工程师和管理人员使用；也可作为工学院师生的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

材料失效系统控制/李金桂等编著. —北京：化学工业出版社，2018.1

（材料延寿与可持续发展）

ISBN 978-7-122-30945-7

I. ①材… II. ①李… III. ①材料科学-失效分析-研究 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 272740 号

责任编辑：刘丽宏 段志兵 王清颢

文字编辑：孙凤英

责任校对：王素芹

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：三河市延风印装有限公司

装订：三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 20 字数 380 千字 2018 年 1 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：98.00 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—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

中国航发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

丨 总前言 丨

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

《材料失效系统控制》作者之一李金桂的一个梦，就是希望我国的材料制品在设计制造出来之后，在各种使用服役环境下，在其全使用寿命期内拥有“能用、好用和经久耐用”的特点，成为世界名牌。这个梦，是在长期的腐蚀失效控制实践中形成的。

作者及行业同仁从1980年腐蚀调查开始，到2009年《腐蚀控制系统工程学概论》的问世，一门新的学科的形成，历经三十年，同行戏称是“三十年磨一剑”！

实际上材料及其制品在服役环境作用下，不可避免地发生退化、变质甚至失效，不仅有金属的腐蚀、非金属的老化，还有摩擦磨损磨蚀、疲劳断裂。

摩擦是运动的必要条件，没有摩擦，就没有运动，调整摩擦系数，既是控制运动的必然，也是减少能源消耗和减少磨损的考量，所以早于“腐蚀”进入了设计。以调节表面的摩擦系数设计，达到相对运动的目的，为了缩短航空母舰上舰载飞机的跑道，增加了跑道的摩擦系数；为了将大型钢结构件能通过螺栓拧紧拧牢，使其接触面获得适当的摩擦系数，以拥有相应的摩擦力，不会失去拧紧力，以免出现“打滑”而使构件失效；对于高速旋转构件（例如涡轮发动机，每分钟旋转超过一两万转，甚至数万转）必须使其具有良好的润滑，以满足旋转的需求。所以“摩擦学设计”比较早地进入了设计、制造、使用维护，进行了系统控制。中国工程院谢友柏院士是我国摩擦学设计的领头人。他提出摩擦学系统工程思想，构造理论和方法的框架，并在大型汽轮发电机组和高速透平机械转子轴承系统等的摩擦学设计与安全运行上，取得丰硕的理论及应用成果。

控制断裂失效，确保使用安全的设计，最早实施失效系统控制的是力学领域。无论是车、船、飞机，还是公路、铁路、机场，甚至自行车、小推车的制造，首先需要考虑的是载荷，包括永久荷载（恒载）、可变荷载（活载荷）、偶然荷载（特殊载荷或偶然作用）。选择材料、设计零部件、组装成成品，承受载荷，满足人们日益增长的功能要求，首先需要确保其使用可靠性，防止超重、超载、疲劳、蠕变等强度上的失效，防止断裂。从设计开始，设计、制造、使用、维护、维修全方位进行控制系统的就是在断裂领域。

从设计入手，在设计、制造、运输、储存、使用、维护、维修全过程中，实施全方位、全员参与的对材料及其制品失效预防与控制的系统工程，达到提高其使用可靠性、安全性、经济性和耐久性，尽可能延长使用寿命的目的，需要从三个方面入手，腐蚀的系统控制、摩擦磨损的系统控制以及断裂（疲劳断裂等）的系统控制。本书试图从三个方面阐述系统控制的相关内容，以达到材料及其制品的可靠性、安全性、耐久性，延长使用寿命，节约资

源、能源，支持国家可持续发展。

相约中科院兰州化学物理研究所润滑与防护材料中心主任兼表面工程与再制造事业部主任陈建敏研究员，中国航发北京航空材料研究院检测研究中心副主任兼 225 研究室主任何玉怀高级工程师共同承担本书的编著。陈建敏研究员负责第二篇“摩擦、磨损控制系统工程”，参与编写的还有中科院兰州化学物理研究所的李红轩研究员、崔海霞副研究员、吉利副研究员；何玉怀高级工程师负责第三篇“疲劳断裂控制系统工程”，参与编写的还有北京航空材料研究院的刘新灵研究员、姜涛和刘德林两位高级工程师。中国环境科学出版社的吴再思编审对全书进行了认真的审定；在编写过程中还得到了杭州五源科技实业有限公司总经理王一建研究员、北京钢铁研究总院袁训华博士的大力帮助，在此，一并表示衷心感谢。

材料失效及其控制是当代一个十分丰富而又十分复杂的课题，由于编著者认知有限，书中存在诸多不足和缺陷，敬请批评指正。

李金桂

I 目录 I

绪 论

0.1 材料失效及其危害 1

 0.1.1 材料及其制品遭遇的三大环境 1

 0.1.2 材料及其制品失效的三大表现 3

 0.1.3 材料制品提前失效的危害 5

0.2 材料失效系统控制 7

 0.2.1 系统工程学 7

 0.2.2 系统工程学的工业实践与成效 9

 0.2.3 材料失效控制系统工程 9

 0.2.4 材料失效系统控制各阶段任务 11

0.3 对三大失效表现各有表述 14

0.4 表面工程技术在控制失效中的广泛应用 15

 0.4.1 表面技术的功能和应用 15

 0.4.2 表面工程技术的发展 16

 0.4.3 表面工程三大技术 20

 0.4.4 表面工程技术使用的三个要点 23

参考文献 24

第一篇 腐蚀控制系统工程

第 1 章 系统研究 精心设计

1.1 腐蚀与腐蚀控制 27

 1.1.1 腐蚀的类别 27

 1.1.2 腐蚀预防与控制 28

1.2 腐蚀控制系统工程学 29

 1.2.1 概念 29

 1.2.2 “腐蚀控制系统工程学”对腐蚀问题的深化认识 31

 1.2.3 腐蚀控制的设计因素 33

 1.2.4 防腐蚀结构设计的职责 33

 1.2.5 防腐蚀结构设计原则 35

1.3 隔离侵蚀环境设计	38
1.3.1 侵蚀环境的隔离设计	38
1.3.2 排水设计	39
1.3.3 通风设计	41
1.4 合理的构型设计	42
1.4.1 介质流动管道及容器内腔的设计	42
1.4.2 避免冷热不均诱发腐蚀的设计	43
1.4.3 合理的连接结构的设计	43
1.4.4 结构组合件的装配设计	45
1.5 预防应力与腐蚀协同作用的设计	46
1.5.1 应力与腐蚀协同作用效应	47
1.5.2 应力的作用和影响	48
1.5.3 预防应力腐蚀的设计	50
1.5.4 防止零、部件腐蚀疲劳的设计	54
1.6 预防电偶腐蚀的设计	56
1.6.1 电偶腐蚀内涵	56
1.6.2 电偶腐蚀的控制原理	58
1.6.3 电偶腐蚀控制原则	60
1.7 阴极保护设计	60
1.7.1 阴极保护设计原理	61
1.7.2 阴极保护系统的设计要点	63
1.8 合理地选用材料	65
1.8.1 设计选材的重要性与复杂性	65
1.8.2 选材依据	72
1.8.3 设计选材原则	73
1.9 电子电器产品的环境适应性	74
1.9.1 实施环境工程确保环境适应性	74
1.9.2 环境适应性试验方法	75
1.9.3 环境-腐蚀效应	77
1.9.4 电子产品的腐蚀控制	82
参考文献	85

第2章 科学制造 科学使用

2.1 制造与材料	86
2.1.1 制造与材料的关系	86

2.1.2	制造就是材料加工	86
2.1.3	制造工程中需要控制的因素	88
2.2	严格制造工艺, 防止埋下祸根	88
2.2.1	制造过程中的宝贵的经验	88
2.2.2	制造过程中预防腐蚀原则	89
2.2.3	原材料及预成型的控制	90
2.2.4	锻造过程中的工艺控制	91
2.2.5	铸造过程中的工艺控制	92
2.2.6	焊接过程中的工艺控制	93
2.2.7	特种加工过程中的工艺控制	96
2.2.8	热处理过程中的工艺控制	98
2.3	表面工程技术的应用	99
2.3.1	表面转化改性层	100
2.3.2	涂镀层	101
2.4	精加工过程的腐蚀控制	107
2.4.1	精加工过程中产品零件的临时性保护	107
2.4.2	表面加工过程中的腐蚀控制	109
2.4.3	在装配过程中的腐蚀控制	113
2.5	使用维修过程中的腐蚀控制	116
2.5.1	使用因素	117
2.5.2	维护因素	117
2.5.3	金属腐蚀特征及鉴别	118
2.6	维护是确保电子电器使用可靠性的关键	121
	参考文献	122

第二篇 摩擦、磨损控制系统工程

第3章 摩擦、磨损与润滑

3.1	摩擦	123
3.1.1	摩擦概述	123
3.1.2	摩擦的类型	123
3.1.3	主要摩擦理论	125
3.1.4	影响摩擦的因素	128
3.1.5	摩擦的利用和控制	130
3.2	磨损和耐磨材料	131

3.2.1 磨损的三个阶段	131
3.2.2 材料磨损理论	132
3.2.3 减少磨损的方法	133
3.3 润滑和润滑材料	136
3.3.1 润滑概述	136
3.3.2 润滑的类型	137
3.3.3 润滑剂	139
3.3.4 润滑剂的性能	141
3.3.5 润滑技术	142
参考文献.....	146

第4章 摩擦学失效与延寿

4.1 摩擦学失效	147
4.1.1 磨损失效	147
4.1.2 润滑失效	152
4.1.3 摩擦学失效分析及预防控制	156
4.2 摩擦学测试与状态检测	158
4.2.1 摩擦学测试技术	159
4.2.2 摩擦学状态检测和辨识技术	164
4.2.3 检测技术的发展	169
4.3 摩擦学失效控制与延寿	172
4.3.1 摩擦学设计	172
4.3.2 摩擦学数据库	179
4.3.3 润滑油优化应用与延寿	182
4.3.4 固体润滑材料应用技术	194
4.3.5 固-油复合润滑延寿技术.....	205
4.3.6 表面工程延寿和磨损修复技术	211
4.3.7 重大装备的润滑管理	215
参考文献.....	218

第三篇 疲劳断裂控制系统工程

第5章 疲劳失效及其影响因素

5.1 疲劳断裂（失效）的基本概念	219
5.1.1 疲劳断裂的危害性	219
5.1.2 交变应力与交变应变	219

5.1.3 疲劳断裂过程	220
5.1.4 疲劳断裂失效的分类	221
5.2 疲劳失效的主要影响因素	222
5.2.1 形状	222
5.2.2 尺寸	223
5.2.3 表面状况的影响	223
5.2.4 平均应力对疲劳强度的影响	225
5.2.5 载荷持续情况的影响	225
5.2.6 腐蚀的影响	226
5.2.7 温度的影响	229
5.2.8 微动磨损与接触的影响	230

第6章 疲劳失效的设计控制基础

6.1 选材	233
6.2 抗机械疲劳设计技术和方法	235
6.2.1 抗机械疲劳结构设计	235
6.2.2 抗机械疲劳设计方法	236
6.3 抗疲劳失效材料设计	239
6.3.1 提高疲劳极限的材料选择和设计	239
6.3.2 延缓疲劳裂纹萌生的材料选择和设计	240
6.3.3 降低裂纹扩展速率的材料选择和设计	240
6.4 抗腐蚀疲劳设计	241
6.4.1 材料的选择和设计方法	241
6.4.2 抗腐蚀疲劳结构设计方法	241
6.5 抗疲劳磨损设计	242
6.6 环境	242
6.7 结构与工艺设计	243
6.8 改善疲劳强度的表面处理方法	243
6.8.1 表面冷作强化	244
6.8.2 表面热处理强化	245
6.9 提高机器零件疲劳强度的其他方法	246
6.9.1 建立预应力及预紧力	246
6.9.2 调节和恢复材料性能	246
6.9.3 表面防护	246
6.10 可检性	247

6.10.1 结构合理布局	247
6.10.2 制定合理的检验程序	248
6.10.3 控制安全工作应力	248

第7章 疲劳失效的表面完整性控制

7.1 表征表面完整性的物理量	249
7.2 表面粗糙度控制	251
7.3 残余应力场控制	252
7.4 表面再结晶缺陷控制	253
7.4.1 预回复热处理对再结晶的抑制作用	254
7.4.2 渗碳对再结晶的抑制作用	255
7.4.3 去除表面变形层对再结晶的抑制作用	256
7.4.4 涂层对再结晶的抑制作用	257
7.4.5 晶界强化元素对再结晶危害的修复作用	258

第8章 材料与结构的热工艺控制

8.1 铸造	259
8.1.1 多肉类缺陷	259
8.1.2 孔洞类缺陷	260
8.1.3 裂纹冷隔类缺陷	261
8.1.4 表面缺陷	264
8.1.5 残缺类缺陷	265
8.1.6 夹杂类缺陷	266
8.2 锻造	267
8.2.1 锻造缺陷及其分类	267
8.2.2 裂纹	268
8.2.3 折叠	268
8.2.4 组织缺陷	268
8.3 焊接	269
8.3.1 焊接缺欠的定义及分类	269
8.3.2 焊接裂纹	270
8.3.3 空穴	274
8.3.4 焊缝中的固体夹杂物	275
8.3.5 未焊透、未熔合和咬边	277
8.3.6 焊接残余应力	279
8.3.7 其他缺欠	280