

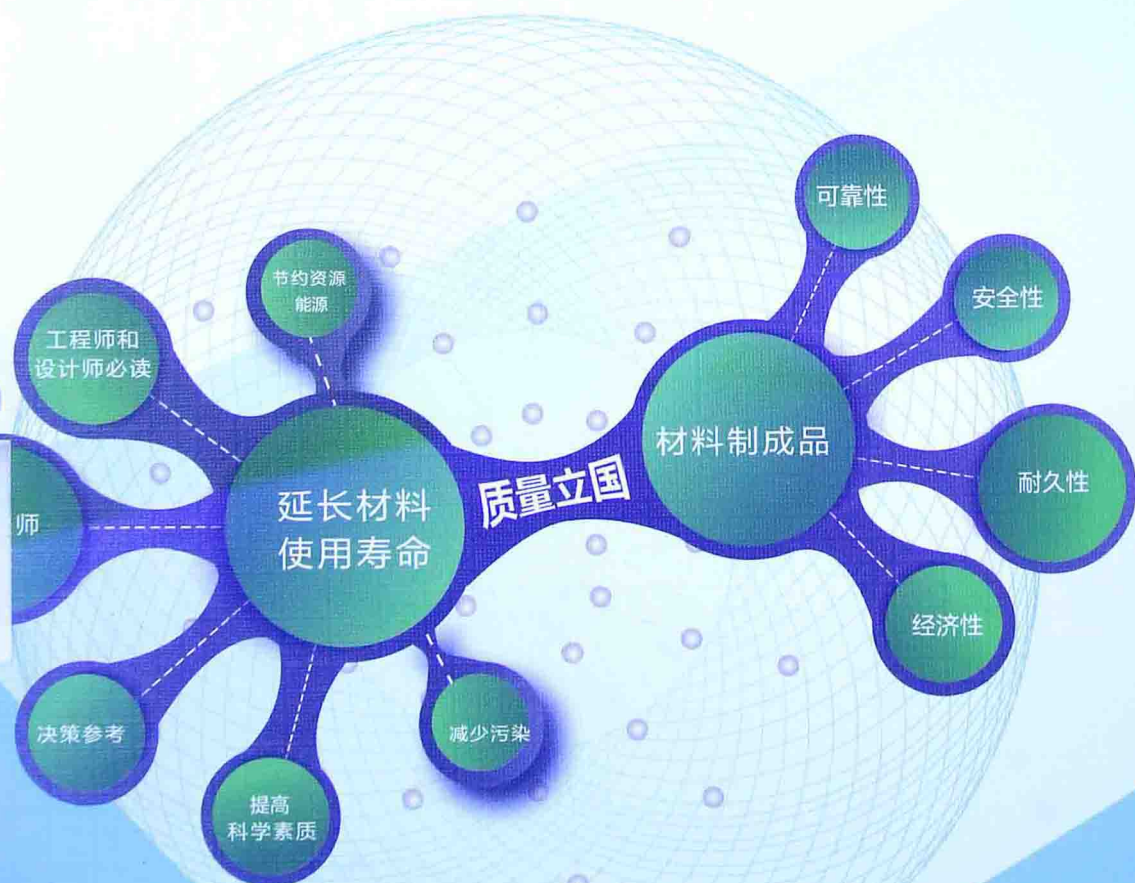


国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

材料延寿与可持续发展

现代表面工程技术与应用

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写
李金桂 周师岳 胡业锋 编 著



化学工业出版社



材料延寿与可持续发展

现代表面工程 技术与应用

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写
李金桂 周师岳 胡业锋 编 著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是《材料延寿与可持续发展》丛书的分册之一，阐述了现代表面工程技术的最新进展以及如何应用这些技术，提高材料制品使用可靠性、安全性、经济性和耐久性，尽可能地延长其使用寿命。本书介绍了形变强化与相变强化、化学转化与电化学转化、热扩散，以及电镀、热喷涂、热浸镀、有机涂装、无机涂装、粉末涂装和复合涂镀等技术内容和相关标准。

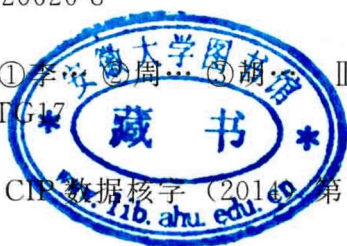
本书可供各个行业产品的设计师以及制造、使用、检验、维护维修和管理工程师使用，也可供相关专业工程技术人员，尤其是工学院大学生、研究生、博士生和教师参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代表面工程技术与应用/李金桂，周师岳，胡业锋
编著. —北京：化学工业出版社，2014.7
(材料延寿与可持续发展)
ISBN 978-7-122-20626-8

I. ①现… II. ①李… ②周… ③胡… III. ①金属
表面保护 IV. ①TG17

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 093711 号



责任编辑：王清颢 段志兵
责任校对：边 涛

文字编辑：糜家铃
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 26½ 字数 509 千字 2014 年 8 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：78.00 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

中航工业北京航空材料研究院

化学工业出版社

《现代表面工程技术与应用》编辑委员会

主 任：李金桂

副 主 任：周师岳 胡业锋

编 委：（按姓氏拼音排序）：

范瑞麟 高玉魁 胡业锋 李金桂 刘世参 刘若愚
南仁植 刘 颖 徐滨士 赵闰彦 魏世丞 周师岳

主 审：徐滨士

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

总前言

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年 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

20 世纪 60~70 年代电子束、激光束、离子束进入表面加工技术，引发了表面技术的重大进步，20 世纪末表面工程学形成，表面工程三大技术可以为材料制品提供材料本来没有而又希望拥有的性能；只要金属表面始终拥有“合适的防护”就可以有效地防止腐蚀、减少磨损、提高疲劳抗力。可以认为表面工程技术是预防与控制引发材料制品提前失效（腐蚀、磨损和疲劳断裂）的最普遍、最有效、最经济的技术措施，最受设计师的青睐。

希望设计师、工程师和使用维护维修工程师能充分利用表面工程技术及其进展为其材料制品服务，在各个行业进行产品设计与制造的同时，进行其表面的设计与制造。以求控制与延缓材料及其制品在使用过程中出现腐蚀、磨损和疲劳断裂，提高使用可靠性、安全性、经济性和耐久性，尽可能地延长使用寿命。

本书得到了许多专家的指导和帮助，周师岳和胡业锋负责粉末涂料与涂装等章节的编写，徐滨士院士对本书进行了全面审定，南仁植教授对第 11 章进行了审校，魏世丞博士对其余各章进行了审校，在此表示衷心的感谢，并对所有为本书做出过贡献的同事、朋友表示衷心的感谢。

21 世纪，表面工程是当代科学家和工程技术人员研究的热门课题，新技术、新设备、新材料、新涂层会不断涌现，希望本书能为表面工程的发展起到一点作用。编著者知识有限，不妥之处欢迎批评指正。

李金桂

2014. 5

I 目录 I

第1章 绪言

- 1.1 从表面技术到表面工程学 /001
 - 1.1.1 三大表面技术 /002
 - 1.1.2 表面技术的功能和应用 /004
 - 1.1.3 表面工程学 /005
- 1.2 表面工程的发展 /008
 - 1.2.1 发展概况 /008
 - 1.2.2 激光表面改性 /009
 - 1.2.3 电子束表面改性 /012
 - 1.2.4 离子注入 /013
 - 1.2.5 化学气相沉积 (CVD) /015
 - 1.2.6 物理气相沉积 /021
 - 1.2.7 电火花沉积 /027
 - 1.2.8 摩擦表面沉积工艺 /028
- 1.3 善待表面与进行表面设计 /028
 - 1.3.1 表面工程设计的目的 /028
 - 1.3.2 表面工程设计内涵 /030
 - 1.3.3 表面层选用或设计的通用原则 /030
 - 1.3.4 表面层选用或设计技术原则 /032
- 1.4 表面工程技术与国家可持续发展 /033
- 参考文献 /036

第2章 表面形变强化和相变强化

- 2.1 概述 /037
- 2.2 表面形变强化 /037
 - 2.2.1 金属表面形变强化原理 /038
 - 2.2.2 弹丸种类的选择 /039
 - 2.2.3 喷丸强化层设计与加工建议 /040
 - 2.2.4 表面强化工艺特点 /041
 - 2.2.5 可进行喷丸强化的金属材料及用途 /042
 - 2.2.6 可用表面喷丸强化处理的主要零件 /042
 - 2.2.7 激光喷丸 /043

- 2.2.8 孔挤压强化 /044
- 2.3 表面相变硬化 /045
 - 2.3.1 感应加热相变硬化 /045
 - 2.3.2 感应加热相变硬化设计与加工建议 /045
 - 2.3.3 感应淬火用钢和铸铁应用实例 /047
 - 2.3.4 激光表面相变硬化 /048
 - 2.3.5 激光表面相变硬化设计与加工建议 /048
 - 2.3.6 激光表面淬火实例 /049
- 2.4 离子注入 /050
 - 2.4.1 性能特点 /050
 - 2.4.2 设计与加工建议 /051
- 参考文献 /052

第3章 化学氧化与化学镀

- 3.1 概述 /053
- 3.2 铝合金化学氧化 /055
 - 3.2.1 性能特点 /055
 - 3.2.2 设计与加工建议 /056
- 3.3 镁合金化学氧化 /057
 - 3.3.1 性能特点 /057
 - 3.3.2 设计与加工建议 /057
- 3.4 钢铁化学氧化 /057
 - 3.4.1 性能特点 /058
 - 3.4.2 设计与加工建议 /058
- 3.5 铜及铜合金化学氧化 /058
 - 3.5.1 性能特点 /058
 - 3.5.2 设计与加工建议 /059
- 3.6 铜及铜合金钝化 /059
 - 3.6.1 性能特点 /059
 - 3.6.2 设计与加工建议 /060
- 3.7 银及银镀层的钝化 /060
- 3.8 钢铁磷化 /060
 - 3.8.1 性能特点 /060
 - 3.8.2 设计与加工建议 /063
 - 3.8.3 用途与膜质量选择 /064
- 3.9 金属表面着色 /064
- 3.10 化学镀 /065

3.10.1 化学镀镍-磷合金的特点 /065

3.10.2 化学镀镍-磷合金的性能 /066

3.10.3 设计与加工建议 /069

参考文献 /070

第4章 电化学转化

4.1 概述 /071

4.2 铝与铝合金耐腐蚀硫酸阳极化 /072

4.2.1 性能特点 /072

4.2.2 设计与加工建议 /073

4.3 铝及其合金耐腐蚀铬酸阳极化 /074

4.3.1 性能特点 /074

4.3.2 设计与加工建议 /075

4.4 铝及铝合金耐摩擦磨损阳极化 /075

4.4.1 性能特点 /075

4.4.2 设计与加工建议 /079

4.5 铝合金磷酸阳极化 /080

4.5.1 性能特点 /080

4.5.2 设计与加工建议 /080

4.6 铝合金草酸阳极化 /081

4.6.1 性能特点 /081

4.6.2 设计与加工建议 /082

4.7 铝及铝合金瓷质阳极化 /082

4.7.1 性能特点 /082

4.7.2 设计与加工建议 /083

4.8 微弧阳极氧化 /083

4.8.1 性能特点 /084

4.8.2 微弧阳极氧化的应用 /086

4.9 镁合金的阳极化 /087

4.10 钛合金的阳极化 /087

4.11 铜和铜合金的阳极化 /087

4.12 硅、锆和钽的阳极化 /088

4.13 锆合金的阳极化 /089

参考文献 /089

第5章 热扩散

5.1 概述 /091

- 5.1.1 渗金属原理 /091
- 5.1.2 热渗金属工艺 /092
- 5.2 钢铁渗碳 /093
 - 5.2.1 渗碳层的组织及性能特点 /094
 - 5.2.2 渗碳用钢种的选择及渗碳层深度要求 /095
 - 5.2.3 设计与加工建议 /097
- 5.3 钢铁渗氮 /098
 - 5.3.1 渗氮层的组织和作用 /098
 - 5.3.2 设计与加工建议 /098
 - 5.3.3 常用渗氮钢种 /099
- 5.4 碳氮共渗 /100
 - 5.4.1 性能特点 /100
 - 5.4.2 设计与加工建议 /101
- 5.5 氮碳共渗 /101
 - 5.5.1 渗层的组织、硬度和深度 /101
 - 5.5.2 设计与加工建议 /102
- 5.6 热渗硼 /103
 - 5.6.1 结构和性能 /103
 - 5.6.2 设计与加工建议 /103
- 5.7 热渗硅 /104
 - 5.7.1 结构和性能 /104
 - 5.7.2 设计与加工建议 /105
- 5.8 热渗锌 /106
 - 5.8.1 结构和性能 /106
 - 5.8.2 设计与加工建议 /107
- 5.9 热渗铝 /108
 - 5.9.1 结构和性能 /108
 - 5.9.2 设计与加工建议 /109
- 5.10 热渗铬 /109
 - 5.10.1 结构和性能 /109
 - 5.10.2 设计与加工建议 /111
- 5.11 热渗锡 /111
 - 5.11.1 结构和性能 /111
 - 5.11.2 主要应用 /112
- 5.12 热渗铍 /112
- 5.13 热渗钒、渗钛、渗钼、渗铌、渗钽 /113

- 5.14 钢铁表面二元共渗 /114
- 5.15 钢铁表面三元共渗 /114
- 5.16 镍、钴基合金热渗铝 /115
- 5.17 镍基合金铝-铬共渗 /116
- 5.18 镍基合金热渗铝硅共渗 /117
- 5.19 镍基合金镀铂+热渗铝 /117
- 5.20 难熔金属热渗硅 /118
- 5.21 铜及铜合金表面热渗金属 /119
- 5.22 铝及铝合金表面热渗金属 /120
- 参考文献 /120

第6章 电化学沉积

- 6.1 概述 /122
 - 6.1.1 电镀原理 /122
 - 6.1.2 电镀工艺 /124
- 6.2 电镀锌 /125
 - 6.2.1 物理化学性能 /125
 - 6.2.2 设计与加工建议 /127
- 6.3 电镀镉 /128
 - 6.3.1 物理化学性能 /128
 - 6.3.2 设计与加工建议 /130
- 6.4 电镀铜 /131
 - 6.4.1 物理化学性能 /131
 - 6.4.2 设计与加工建议 /131
- 6.5 电镀镍 /132
 - 6.5.1 物理化学性能 /133
 - 6.5.2 设计与加工建议 /134
- 6.6 电镀铬 /134
 - 6.6.1 物理化学性能 /135
 - 6.6.2 设计与加工建议 /137
- 6.7 电镀铅 /138
 - 6.7.1 物理化学性能 /138
 - 6.7.2 使用范围 /139
- 6.8 电镀锡 /139
 - 6.8.1 物理化学性能 /140
 - 6.8.2 设计与加工建议 /141
- 6.9 电镀银 /141

- 6.9.1 物理化学性能 /141
- 6.9.2 设计与加工建议 /142
- 6.10 电镀钡 /143
 - 6.10.1 物理化学性能 /143
 - 6.10.2 设计与加工建议 /144
- 6.11 电镀铈 /144
 - 6.11.1 物理化学性能 /144
 - 6.11.2 设计与加工建议 /145
- 6.12 电镀金和金合金 /146
 - 6.12.1 物理化学性能 /146
 - 6.12.2 设计与加工建议 /147
- 6.13 电镀铜-锌合金 /148
 - 6.13.1 物理化学性能 /149
 - 6.13.2 设计与加工建议 /149
- 6.14 电镀铜-锡合金 /149
 - 6.14.1 物理化学性能 /150
 - 6.14.2 设计与加工建议 /150
- 6.15 电镀铅-锡合金 /151
 - 6.15.1 物理化学性能 /151
 - 6.15.2 设计与加工建议 /151
- 6.16 电镀镉-钛合金 /152
 - 6.16.1 物理化学性能 /152
 - 6.16.2 设计与加工建议 /153
- 6.17 电镀镍-镉 /153
 - 6.17.1 物理化学性能 /154
 - 6.17.2 设计与加工建议 /154
- 6.18 其他合金电镀 /155
 - 6.18.1 电镀铅-铟合金 /155
 - 6.18.2 电镀锡-铋合金 /155
 - 6.18.3 电镀锌-镍合金 /155
- 6.19 电刷镀 /155
 - 6.19.1 主要特点 /155
 - 6.19.2 性能与应用 /156
- 参考文献 /158

第7章 热浸镀

- 7.1 概述 /160

- 7.2 热浸镀锌 /162
 - 7.2.1 分类 /162
 - 7.2.2 性能 /163
 - 7.2.3 设计与加工建议 /166
 - 7.2.4 应用 /167
- 7.3 热浸镀铝 /169
 - 7.3.1 性能 /169
 - 7.3.2 设计与加工建议 /170
 - 7.3.3 应用 /171
- 7.4 热浸镀锡 /172
- 7.5 热浸镀铅 /173
 - 7.5.1 性能 /173
 - 7.5.2 设计与加工建议 /174

参考文献 /175

第8章 热喷涂

- 8.1 概述 /176
 - 8.1.1 热喷涂层类型和应用领域 /176
 - 8.1.2 热喷涂技术与工艺 /177
 - 8.1.3 热喷涂层的特点 /182
 - 8.1.4 可热喷涂的材料 /182
- 8.2 热喷涂锌金属 /184
 - 8.2.1 物理化学性能 /184
 - 8.2.2 设计与加工建议 /185
- 8.3 热喷涂铝和铝合金 /187
 - 8.3.1 物理化学性能特点 /187
 - 8.3.2 设计与加工建议 /189
- 8.4 热喷涂铜合金 /189
 - 8.4.1 性能特点 /189
 - 8.4.2 设计与加工建议 /190
- 8.5 热喷涂陶瓷材料 /190
- 8.6 热喷涂可调成分的合金 /191
 - 8.6.1 物理化学性能 /191
 - 8.6.2 设计与加工建议 /192
- 8.7 可在 1050℃ 温度以下工作的高温珐琅 /192
 - 8.7.1 性能特点 /193
 - 8.7.2 设计与加工建议 /194