

表面保护层 设计与加工指南

《材料延寿与可持续发展》丛书编委会 组织编写

李金桂 编著

BIAOMIAN BAOHUCENG
SHEJI YU JIAGONG ZHINAN



化学工业出版社

表面保护层 设计与加工指南

《材料延寿与可持续发展》丛书编委会 组织编写

李金桂 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。为了预防与控制引发材料提前失效的腐蚀、摩擦磨损和断裂（疲劳与腐蚀疲劳等），可广泛采用材料表面防护层，包括形变与相变强化、化学与电化学转化膜、热扩散层，以及电镀、热喷涂层、热浸镀、有机涂层、无机漆层、复合涂镀层和气相沉积层等。本书简明地阐述各种防护层的性能、特点、适用范围、不适用范围、相关标准，特别提出了它们的设计与加工指南。

可供各种产品和工程建设项目的的设计、制造、使用、检验、维护维修和管理等部门的设计师、工程师们使用，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

表面保护层设计与加工指南/李金柱编著. —北京：化学工业出版社，2012.2

ISBN 978-7-122-12690-0

I. 表… II. 李… III. 金属表面保护-指南 IV. TG17-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 217886 号

责任编辑：段志兵
责任校对：宋 玮

装帧设计：关 飞

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：三河市万龙印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张 20¼ 字数 375 千字 2012 年 5 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：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(按姓名拼音排序)：

安桂华	才 让	陈光章	戴圣龙	干 勇	高万振
葛昌纯	俸培宗	侯保荣	柯 伟	李晓红	刘翔声
师昌绪	王淀佐	吴荫顺	徐滨士	肖纪美	严东生
颜鸣皋					

《材料延寿与可持续发展》丛书编辑委员会

名誉主编：干 勇

主 编：李金桂

常务副主编：张启富

副 主 编：许淳淳 洪乃丰 高克玮 顾宝珊 张 炼 朱文德

编 委(按姓名拼音排序)：

白新德	陈亨远	程瑞珍	蔡健平	窦照英	杜存山
杜 楠	高克玮	高玉魁	葛红花	顾宝珊	洪乃丰
韩恩厚	纪晓春	吕龙云	李金桂	李毓芬	刘世参
路民旭	马鸣图	孙 辉	熊金平	陶春虎	王一建
王 钧	武兵书	许淳淳	许维钧	许立坤	张 炼
张晓云	张启富	周国庆	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

总序言

在远古人类处于采猎时代，依赖自然，听天由命；公元前一万年以来，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，进入牧童经济时代。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的重大问题。

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问题项目。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

我国改革开放三十多年来，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，支撑着“中国制造”的产品遍布世界、“中国建造”的重大工程项目遍布全国，促进了国家 GDP 连续高速发展，中国已经成为世界上第二经济大国。但是，我国还不是材料强国，我国的材料多处于中、低档水平，支撑起来的“中国制造”的产品水平不高、价格太低、无缘名牌；“中国建造”的重大工程中的主要结构件、专用件、关键件和重要件许多还依赖进口；我国在材料的选用、材料制成品的设计、加工、制造和材料保护等方面与先进国家相比还存在较大差距，导致材料制成品在制造环境、运行环境和自然环境的侵蚀下，容易出现腐蚀、摩擦磨损磨蚀、断裂（疲劳），引发“中国制造”的产品和“中国建造”的重大工程项目出现种种问题。

材料寿命是人类所用材料的核心。材料性能优良，质量稳定，使用安全、可靠、经济，是材料寿命的前提；没有使用安全、可靠、经济，就谈不上使用寿命。材料寿命的延长表达了上述性能的全面提升；材料延寿，就是提高材料制成品使用的可靠性、安全性、经济性和耐久性，就是延长材料制成品的使用寿命，就是节约了资源、能源、实施了低碳经济、减少了环境污染、支持了人类可持续发展。

我国建国以来材料研究取得了显著的成绩，在满足经济建设需求的同时，一大批材料研究、材料应用研究、材料加工研究和材料保护研究相继发展壮大起来，并为材料及其制成品的使用可靠性、安全性、经济性和耐久性做了大量的工作，积累了丰富的理论和实践经验，在材料全生命周期中凝炼出一些重要的原则、技术和措施。

“材料延寿与可持续发展”有两方面的工作：一是总结过去。总结系统控制材料提前损伤、提前破坏和提前失效的因素的理论、原则、技术和措施，使各个行业的产品设计师，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；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。这项工作实质上是针对过去与现在，总结现有成果，及早服务于国家建设。

二是研究未来。面对未来，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、新材料的不断创新，由此促

进我国从“材料生产、销售、消费大国”转变为“材料强国”。为此，我们组织了“材料延寿与可持续发展”的战略研究，在开展大量的调查研究基础上，从国家长远发展的眼光提出一整套的理论、原则、政策和建议，促使我国早日成为“材料强国”，支持国家“节约资源、节能减排”、“可持续发展”和“保卫地球”战略。

目前，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在努力地开展工作，提出研究报告，编写并出版发行《材料延寿与可持续发展》系列图书，供相关方面领导和工作人员参考。

希望通过我们的努力，既能为设计师、制造、使用和管理工程师提高其产品对环境抗力的理论、原则、技术和措施；又为国家成为“材料强国”，提出种种设想、原则、措施和政策建议。

由于我们水平有限，不当之处，敬请批评指正。

中国工程院 院士 

前言

观察物体，映入我们眼帘的，首先是该物体的表面。任何物体离有表面，没有表面谈不上物体，设计产品必当设计表面。腐蚀从表面开始，摩擦磨损在表面发生，美好装饰在表面进行，赋予产品特种功能在表面施加。人类对表面的关注和研究始于远古，在 20 世纪后期，由于三束（电子束、激光束和离子束）的进入，极大地促进了对表面的认识，催生了一门新的科学，称为表面工程学。

本世纪初出版的《国防科技名词大典》对“表面工程”的定义是：“将材料表面与基体一起作为一个系统进行设计，利用表面改性转化技术、薄膜技术和涂镀层技术，使材料表面获得材料本身没有而又希望具有的性能的系统工程。”指出表面工程“可有效地改善和提高材料和产品的性能（耐蚀、耐磨、装饰性能），确保产品使用可靠和安全，延长使用寿命，或赋予材料和器件特殊的物理和化学性能，例如声光磁电的转换和存储性能，使电子器件多功能化和超小型化，有效地节约有限的资源和能源，减少环境污染，维护可持续发展。”

表面工程技术所形成的材料表面保护层，能够防止腐蚀，调整摩擦匹配（利用摩擦、减少磨损），装饰美化生活，赋予特种功能（给以物体原本没有而又希望拥有的种种性能）。

材料表面保护层是预防与控制引发材料提前失效三大因素〔腐蚀、摩擦和疲劳（腐蚀疲劳）〕最普遍、最常见、最有效、最经济、最成功的技术措施。经过千百万人的研究和应用，形成的表面工程技术，造就了那么多的表面层，我们拾到了其中的一部分，以《表面保护层设计与加工指南》为题成书，力图以比较简练的方式，告诉设计师和工程师们如何利用、如何设计、如何制造，以求材料制成品（产品、设备和工程建设项目）拥有比较理想的使用可靠性、安全性、经济性和耐久性。

本书编写过程中得到了许多专家的指导和帮助，徐滨士、刘世参、魏士丞、范瑞麟、高玉魁、刘若愚、刘颖、赵闰彦等参与了本书的立题、编写和审稿工作，尤其徐滨士院士对本书进行了全面审定，在此表示衷心的感谢，并对所有为本书做出过贡献的同仁表示感激之情！

表面工程发展迅速，表面保护层和功能层日新月异。本书中可能存在不当之处，欢迎批评指正。

李金桂

目 录

第 1 章 绪言

1.1 表面工程技术的概念和内涵	1
1.2 表面工程工艺技术的近代发展	5
1.3 表面工程技术的应用	6
1.4 表面工程学的形成	7
1.5 表面工程技术与国家可持续发展	7
参考文献	9

第 2 章 表面形变强化和相变强化层

2.1 概述	11
2.2 表面形变强化层	12
2.2.1 金属表面形变强化原理	13
2.2.2 弹丸种类的选择	14
2.2.3 喷丸强化层设计与加工建议	14
2.2.4 表面强化工艺特点	16
2.2.5 可进行喷丸强化的金属材料及用途	16
2.2.6 可用表面喷丸强化处理的主要零件	17
2.2.7 激光喷丸	17
2.2.8 孔挤压强化	18
2.3 表面相变硬化层	19
2.3.1 感应加热相变硬化层	19
2.3.2 感应加热相变硬化层设计与加工建议	20
2.3.3 感应淬火用钢和铸铁应用实例	21
2.3.4 激光表面相变硬化层	22
2.3.5 激光表面相变硬化层设计与加工建议	23
2.3.6 激光表面淬火实例	23

2.4 离子注入层	25
2.4.1 离子注入层的性能特点	25
2.4.2 离子注入层设计与加工建议	25
参考文献	26

第3章 化学处理膜层

3.1 概述	28
3.2 铝合金化学氧化膜	31
3.2.1 性能特点	31
3.2.2 设计与加工建议	31
3.3 镁合金化学氧化膜	32
3.3.1 性能特点	32
3.3.2 设计与加工建议	32
3.4 钢铁化学氧化膜	33
3.4.1 性能要求	33
3.4.2 设计与加工建议	34
3.5 铜及铜合金化学氧化膜	34
3.5.1 性能特点	34
3.5.2 设计与加工建议	34
3.6 铜及铜合金钝化膜	35
3.6.1 性能特点	35
3.6.2 设计与加工建议	35
3.7 银及银镀层的钝化膜	36
3.8 钢铁磷化膜	36
3.8.1 钢铁磷化膜的性能	36
3.8.2 设计与加工建议	39
3.8.3 用途与膜重选择	39
3.9 金属表面着色	40
3.10 化学镀	41
3.10.1 化学镀镍磷合金镀层的特点	41
3.10.2 化学镀镍磷合金镀层的性能	41
3.10.3 设计与加工建议	44
参考文献	44

第4章 电化学转化膜

4.1	概述	46
4.2	铝与铝合金耐腐蚀硫酸阳极化膜	47
4.2.1	性能特点	47
4.2.2	设计与加工建议	49
4.3	铝及其合金耐腐蚀铬酸阳极化膜	50
4.3.1	性能特点	50
4.3.2	设计与加工建议	50
4.4	铝及铝合金耐摩擦磨损阳极化膜	51
4.4.1	性能特点	51
4.4.2	设计与加工建议	54
4.5	铝合金磷酸阳极化胶接膜	55
4.5.1	性能特点	55
4.5.2	设计与加工建议	56
4.6	铝合金草酸阳极化绝缘膜	56
4.6.1	性能特点	56
4.6.2	设计与加工建议	57
4.7	铝及铝合金瓷质阳极化装饰膜	58
4.7.1	性能特点	58
4.7.2	设计与加工建议	58
4.8	微弧阳极氧化陶瓷膜层	59
4.8.1	性能特点	60
4.8.2	微弧阳极氧化膜的应用	61
4.9	镁合金的阳极化膜	62
4.10	钛合金的阳极化膜	62
4.11	铜和铜合金的阳极化膜	63
4.12	硅、锆和钽的阳极化	64
4.13	锆合金的阳极化膜	64
	参考文献	64

第5章 热扩散层

5.1	概述	66
-----	----------	----

5.1.1	渗金属原理·····	67
5.1.2	热渗金属工艺·····	68
5.2	钢铁渗碳层 ·····	69
5.2.1	渗碳层的组织及性能特点·····	70
5.2.2	渗碳用钢种的选择及渗碳层深度要求·····	71
5.2.3	设计与加工建议·····	72
5.3	钢铁渗氮层 ·····	73
5.3.1	渗氮层的组织和作用·····	73
5.3.2	设计与加工建议·····	74
5.3.3	常用渗氮钢种·····	75
5.4	碳氮共渗层 ·····	75
5.4.1	性能特点·····	76
5.4.2	设计与加工建议·····	76
5.5	氮碳共渗层 ·····	77
5.5.1	渗层的组织、硬度和深度·····	77
5.5.2	设计与加工建议·····	77
5.6	热渗硼层 ·····	78
5.6.1	结构和性能·····	78
5.6.2	设计与加工建议 ·····	79
5.7	热渗硅层 ·····	79
5.7.1	结构和性能·····	79
5.7.2	设计与加工建议·····	81
5.8	热渗锌层 ·····	81
5.8.1	结构和性能·····	81
5.8.2	设计与加工建议·····	82
5.9	热渗铝层 ·····	83
5.9.1	结构和性能·····	83
5.9.2	设计与加工建议·····	84
5.10	热渗铬层 ·····	85
5.10.1	结构和性能 ·····	85
5.10.2	设计与加工建议 ·····	86
5.11	热渗锡层 ·····	87
5.11.1	结构和性能 ·····	87
5.11.2	主要应用 ·····	87

5.12	热渗铍层	88
5.13	热渗钒层、渗钛层、渗钼层、渗铌层、渗钽层	88
5.14	钢铁表面二元共渗层	90
5.15	钢铁表面三元共渗层	90
5.16	镍、钴基合金热渗铝层	91
5.17	镍基合金铝-铬共渗层	92
5.18	镍基合金热渗铝-硅共渗层	93
5.19	镍基合金镀铂 + 热渗铝层	93
5.20	难熔金属热渗硅层	94
5.21	铜及铜合金表面热渗金属层	95
5.22	铝及铝合金表面热渗金属层	96
	参考文献	96

第 6 章 电镀层

6.1	概述	98
6.1.1	电镀原理	99
6.1.2	电镀工艺	100
6.2	锌镀层	102
6.2.1	物理化学性能	102
6.2.2	设计与加工建议	103
6.3	镉镀层	104
6.3.1	物理化学性能	104
6.3.2	设计与加工建议	106
6.4	铜镀层	107
6.4.1	物理化学性能	107
6.4.2	设计与加工建议	108
6.5	镍镀层	108
6.5.1	物理化学性能	109
6.5.2	设计与加工建议	110
6.6	铬镀层	111
6.6.1	物理化学性能	111

6.6.2	铬镀层的设计与加工建议	113
6.7	铅镀层	114
6.7.1	物理化学性能	114
6.7.2	使用范围	115
6.8	锡镀层	115
6.8.1	物理化学性能	116
6.8.2	设计与加工建议	116
6.9	银镀层	117
6.9.1	物理化学性能	117
6.9.2	设计与加工建议	118
6.10	钯镀层	119
6.10.1	物理化学性能	119
6.10.2	设计与加工建议	120
6.11	铑镀层	120
6.11.1	物理化学性能	120
6.11.2	设计与加工建议	121
6.12	金和金合金镀层	122
6.12.1	物理化学性能	122
6.12.2	设计与加工建议	123
6.13	铜-锌合金镀层	124
6.13.1	物理化学性能	125
6.13.2	设计与加工建议	125
6.14	铜-锡合金镀层	125
6.14.1	物理化学性能	126
6.14.2	设计与加工建议	126
6.15	铅-锡合金镀层	127
6.15.1	物理化学性能	127
6.15.2	设计与加工建议	127
6.16	镉-钛合金镀层	128
6.16.1	物理化学性能	128
6.16.2	设计与加工建议	129
6.17	镍镉扩散镀层	130
6.17.1	物理化学性能	130

6.17.2	设计与加工建议	130
6.18	其他合金镀层	131
6.18.1	铅铟扩散镀层	131
6.18.2	锡铋合金镀层	131
6.18.3	锌镍合金镀层	131
6.19	电刷镀层	132
6.19.1	主要特点	132
6.19.2	性能与应用	132
	参考文献	134

第7章 热浸镀层

7.1	概述	136
7.2	热浸镀锌层	138
7.2.1	分类	138
7.2.2	性能	139
7.2.3	设计与加工建议	142
7.2.4	应用	144
7.3	热浸镀铝层	145
7.3.1	热浸镀铝层性能	145
7.3.2	设计与加工建议	147
7.3.3	应用	148
7.4	热浸镀锡层	148
7.5	热浸镀铅层	149
7.5.1	性能	149
7.5.2	设计与加工建议	151
	参考文献	151

第8章 热喷涂层

8.1	概述	152
8.1.1	热喷涂层类型和应用领域	152
8.1.2	热喷涂技术与工艺	154
8.1.3	热喷涂涂层的特点	158
8.1.4	可热喷涂的材料	159

8.2	热喷锌涂层	161
8.2.1	物理化学性能	161
8.2.2	设计与加工建议	162
8.3	热喷铝涂层	164
8.3.1	性能特点	164
8.3.2	设计与加工建议	165
8.4	热喷涂铜合金涂层	166
8.4.1	性能特点	166
8.4.2	设计与加工建议	167
8.5	喷涂陶瓷涂层	167
8.6	可调成分的合金包覆抗高温氧化涂层	168
8.6.1	物理化学性能	168
8.6.2	设计与加工建议	169
8.7	可在 1050℃ 温度以下工作的高温珐琅涂层	169
8.7.1	性能特点	170
8.7.2	设计与加工建议	171
8.8	可在 1050℃ 温度以下工作的无钎珐琅涂层	171
8.8.1	工艺与性能	171
8.8.2	设计与加工建议	172
8.9	可在 1000℃ 温度以下工作的高温珐琅涂层	172
8.9.1	性能特点	172
8.9.2	设计与加工建议	173
8.10	可在 900℃ 温度以下工作高温珐琅涂层	173
8.10.1	性能特点	173
8.10.2	设计与加工建议	174
8.11	自黏结材料涂层	174
8.11.1	自黏结镍铝复合材料涂层	174
8.11.2	自黏结不锈钢材料涂层	175
8.12	耐摩擦磨损涂层	176
8.12.1	碳化钨/钴金属陶瓷涂层	176
8.12.2	喷钼涂层	177
8.12.3	钼-镍铬硼硅复合材料涂层	177
8.12.4	钼-铁合金复合材料涂层	179