

现代表面工程技术

姜银方 主 编 ●
朱元右 戈晓岚 副主编 ●



化学工业出版社
教材出版中心

现代表面工程技术

姜银方 主编

朱元右 戈晓岚 副主编



化学工业出版社
教材出版中心

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

现代表面工程技术/姜银方主编. —北京: 化学工业出版社, 2005. 11

ISBN 7-5025-7921-4

I. 现… II. 姜… III. 金属表面处理 IV. TG17

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 139368 号

现代表面工程技术

姜银方 主编

朱元右 戈晓岚 副主编

责任编辑: 陈丽 刘俊之

文字编辑: 咎景岩

责任校对: 蒋宇

封面设计: 郑小红

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京云浩印刷有限责任公司印刷
三河市前程装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 17 $\frac{3}{4}$ 字数 328 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7921-4

定 价: 32.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

表面现象和表面过程是自然界中普遍存在的，也是人们日常生活时时刻刻直接面对的。广义地说，表面科学与技术是研究表面现象和表面过程并为人类造福或被人们利用的科学技术。

表面技术具有学科的综合性、手段的多样性、广泛的功能性、很强的实用性和巨大的增效性。表面技术不仅是一门广博精深和具有极高实用价值的基础技术，还是一门新兴的边缘性学科；在学术上丰富了材料科学、冶金学、机械学、电子学、物理学、化学等学科，开辟了一系列新的研究领域，现代工业的需求是表面工程迅速发展的动力，是新材料、光电子、微电子等许多先进产业的基础技术；环境保护的紧迫性是促进表面工程迅速发展的时代要求；现代科技成果为表面工程的迅速发展提供了技术支撑。

现代表面工程技术在国民经济中起着不可估量的作用。表面工程技术是人类进步的里程碑，是尖端技术发展的基本条件，国民经济依赖于它的开发与应用。它促进和推动传统产业的技术进步，并引起产业结构的变化，是知识密集、技术密集的新产业。

本书以理论为指导，以技术应用为目标，把熟悉原理和掌握应用作为学习的基本要求。在内容上力求做到系统性、实用性和综合性，通俗易懂并具有实际指导意义。

本书系统阐述了各种表面工程技术的基础理论、应用及最新技术。首先对表面工程技术的内涵进行了阐述，继而简明扼要地论述了表面工程技术的理论与基础知识，为阅读本书奠定了一些理论基础；然后从介绍传统的表面处理技术入手，特别阐述了一些表面技术的新进展，对基体表面前处理技术给予重点介绍；还介绍和论述了电镀、化学镀新技术（包括非金属电镀）、表面涂敷新技术、表面改性新技术、气相沉积技术、复合表面处理技术和高分子表面金属化技术、表面细微加工技术、表面分析和性能测试、表面工程与再制造等方面的内容。

本书具有很强的可读性和可操作性，能适合不同的读者，既可作为高等院校相关专业的教材，又可作为技术人员和技术工人的培训教材。本书共分十一章，其中第一、三、七、九、十章以及第二章第四节由姜银方（江苏大学）执笔；第四、五、六、八章由朱元右（南京工程学院）执笔，第二章的一、二、三节以及第十一章由戈晓岚（江苏大学）执笔。参加编写的还有冯爱新、刘新佳、张洁、刘桂玲、袁国定、陆文龙等。全书由姜银方负责统稿审订。戈晓岚任全书的主

审。本书在编写过程中参阅了国内外相关的资料、文献和教材，征求了有关教师、学生以及从事表面科学与技术工作的科技人员和工程技术人员的意见和建议，在此一并表示衷心的感谢。

由于时间仓促，编著的学识水平有限，加以表面科学与技术的发展迅速，书中必然存在不少问题，恳请各位专家和读者批评指正。

编者
2005年8月

内 容 提 要

本书系统阐述了各种表面工程技术的基础理论、应用及最新技术。首先论述了表面工程技术的基础理论,从介绍传统表面处理技术入手,特别阐述了一些表面技术的新进展。具体内容包括:表面工程技术的基础理论,基体表面预处理技术,电镀、化学镀新技术,表面涂敷新技术,表面改性技术,气相沉积技术,复合表面处理技术和高分子表面金属化技术,表面微细加工技术,表面分析和性能测试,表面工程与再制造。

本书可作为高等院校各相关专业本科生选修课教材及各行业高级技术与管理人员的培训教材和自学参考书,也可供硕士研究生等学习参考。

目 录

第一章 绪论	1
第一节 表面工程技术的发展背景	1
一、表面工程技术迅速发展的原因	1
二、表面工程技术在国民经济中的地位和意义	2
第二节 表面工程技术的学科体系	3
第三节 表面工程技术的应用	4
一、表面技术在结构材料上的应用	5
二、表面技术在功能材料和元器件上的应用	5
三、表面技术在人类适应、保护和优化环境方面的应用	7
四、表面技术在研究和生产新型材料中的应用	8
第四节 表面工程技术的发展趋势	10
一、研究复合表面技术	10
二、完善表面工程技术设计体系	10
三、开发多种功能涂层	11
四、研究开发新型涂层材料	11
五、深化表面工程基础理论和测试方法的研究	11
六、扩展表面工程的应用领域	12
七、积极为国家巨大工程建设服务	13
八、向自动化、智能化的方向迈进	13
九、降低对环保的负面效应	13
第二章 表面工程技术的基础理论	15
第一节 表面晶体学	15
一、理想表面	16
二、清洁表面	16
三、覆盖表面	20
四、金属表面的组织形貌	22
第二节 金属的表面现象	24
一、吸附现象	24
二、润湿及黏着	28

三、金属表面反应	30
第三节 表面缺陷与表面扩散	31
一、表面缺陷模型 (TLK 模型)	31
二、表面扩散	32
第四节 涂层形成机制	33
一、金属涂层形成机制	34
二、非金属涂层形成机制	39
第三章 基体表面前处理技术	43
第一节 前处理技术内容及发展趋势	43
一、前处理技术内容与作用	43
二、基体前处理技术的回顾与发展	45
第二节 表面整平	46
一、磨光	46
二、抛光	47
三、滚光	47
四、振动磨光	47
五、刷光	47
六、塑料整平	48
七、成批光饰	48
第三节 表面清洗	48
一、除油	49
二、除锈	54
三、除油除锈联合处理	54
第四节 化学抛光	56
一、低碳钢工件化学抛光	56
二、铝及其合金的化学抛光	56
第五节 电化学抛光	57
第六节 磷化处理	58
一、磷化膜的形成机理	58
二、磷化配方及工艺规范	58
三、影响磷化的因素	59
四、磷化膜的后处理	61
五、有色金属的磷化处理	61
第七节 金属表面的钝化及活化	61

一、金属表面钝化现象	61
二、钝化理论	62
三、铬酸盐处理	62
四、铜及铜合金的钝化	63
五、不锈钢钝化	64
六、金属表面的活化	64
第八节 空气火焰超音速喷砂、喷丸表面预处理	65
一、超音速喷砂	66
二、超音速表面喷丸	67
第四章 电镀、化学镀新技术	68
第一节 合金电镀	68
一、合金电镀基本知识	68
二、合金电镀工艺	73
第二节 复合电镀	79
一、复合电镀原理	79
二、复合电镀工艺	80
第三节 非晶态合金电镀	82
一、电镀镍磷非晶态合金	83
二、电镀镍硫非晶态合金	83
三、电镀铁铝非晶态合金	83
第四节 电刷镀新技术	84
一、电刷镀基本原理	85
二、电刷镀设备	85
三、电刷镀工艺	86
四、流镀	86
第五节 非金属电镀	88
一、塑料电镀	88
二、石膏和木材电镀	89
三、玻璃和陶瓷电镀	90
第六节 化学镀与化学转化镀新技术	91
一、化学镀	91
二、化学转化镀	92
第七节 表面着色新技术	94
一、铝及铝合金着色	95

二、不锈钢着色	97
三、铜及铜合金着色	98
第五章 表面涂敷新技术	99
第一节 表面涂装新技术	99
一、涂料	99
二、涂装工艺	101
三、静电喷涂	101
四、电泳涂装	101
五、粉末喷涂	102
六、粘涂	104
第二节 热喷涂表面覆盖技术	105
一、热喷涂原理	106
二、热喷涂材料	107
三、热喷涂工艺	107
第三节 堆焊和熔结	111
一、堆焊	111
二、熔结	113
第四节 其他表面涂敷技术	115
一、电火花表面涂敷	115
二、热浸镀	118
三、搪瓷涂敷	120
四、陶瓷涂层	121
五、塑料涂敷	123
第六章 表面改性新技术	126
第一节 激光表面处理技术	126
一、激光表面处理设备	127
二、激光表面处理工艺	127
第二节 电子束表面处理	130
一、电子束表面处理原理	130
二、电子束表面处理设备	131
三、电子束表面处理工艺	131
第三节 高密度太阳能表面处理	133
一、太阳能表面处理设备及特点	133

二、太阳能表面处理工艺	133
三、几种高能密度表面处理技术用于金属表面热处理的比较	134
第四节 表面扩渗新技术	134
一、渗金属、渗硼、渗硅、渗硫	135
二、共渗与复合渗	137
三、等离子体表面扩渗	140
四、电加热表面扩渗	142
五、电解表面扩渗	142
第五节 离子注入	142
一、离子注入原理	143
二、离子注入表面改性的机理	146
三、离子注入表面改性的应用	147
第六节 其他表面改性技术	148
一、表面形变强化	148
二、表面热处理	150
第七章 气相沉积技术	152
第一节 薄膜及其制备方法	152
一、薄膜的定义与类型	152
二、薄膜的应用	153
三、薄膜的制备方法	154
第二节 真空蒸镀	154
一、真空蒸镀原理	154
二、真空蒸镀设备	155
三、真空蒸镀工艺	155
第三节 溅射镀膜	159
一、溅射镀膜原理	159
二、溅射镀膜工艺	162
三、磁控溅射镀膜	164
第四节 离子镀膜	165
一、离子镀膜原理	166
二、离子镀膜工艺	166
三、反应离子镀	167
四、空心阴极放电离子镀	169
五、多弧离子镀	171

第五节 化学气相沉积	172
一、化学气相沉积原理	172
二、化学气相沉积工艺	173
第六节 分子束外延	177
一、分子束外延的特点	177
二、分子束外延工艺	178
三、分子束外延技术的发展	179
第八章 复合表面处理技术和高分子表面金属化技术	180
第一节 复合表面处理新技术	180
一、复合表面扩渗	180
二、碳氮共渗与氧化抛光复合处理	181
三、表面热处理与表面扩渗的复合强化处理	181
四、粘涂与电刷镀复合技术	182
五、热处理与表面形变强化的复合处理工艺	182
六、覆盖层与表面冶金化的复合处理工艺	183
七、电镀与薄膜复合工艺	183
八、激光、电子束复合气相沉积和复合涂镀层	184
九、磁控溅射与油漆复合工艺	185
十、改善铁、钛、铝及其合金摩擦学特性的表面复合处理工艺	186
十一、多层涂层	186
第二节 复合镀层	187
一、纤维增强金属复合材料镀层	187
二、化合镀复合材料	189
三、层状复合材料	189
四、光学复合材料	190
第三节 镀覆层与热处理复合工艺	191
一、电镀与表面扩渗复合工艺	191
二、热处理与薄膜复合工艺	193
三、含铝复合处理	193
第四节 离子注入与气相沉积复合表面改性	193
一、IAC的原理与机理	194
二、IAC的方法	195
三、IAC的应用	196
第五节 高分子表面金属化新技术	198

一、高分子表面金属化新技术的主要工艺及特点	199
二、高分子表面金属化新技术的应用与前景展望	200
第九章 表面微细加工技术	202
第一节 表面加工技术简介	202
一、激光束加工	202
二、离子束加工	204
三、电子束加工	205
四、超声波加工	207
五、电解加工	208
六、电火花加工	209
七、电铸加工	210
八、光刻加工	211
第二节 微电子微细加工技术	214
一、微细加工技术对微电子技术发展的重大影响	214
二、微电子微细加工技术的分类和内容	215
第十章 表面分析和性能测试	219
第一节 表面分析	219
一、表面形貌和显微组织结构分析	219
二、表面成分分析	219
三、表面原子排列结构分析	220
四、表面原子动态和受激态分析	221
五、表面的电子结构分析	221
第二节 表面分析仪器和测试技术简介	222
一、电子显微镜 (TEM)	222
二、扫描隧道显微镜 (STM)	224
三、原子力显微镜 (AFM)	225
四、X 射线衍射	227
五、电子探针	227
六、激光探针	228
七、电子能谱仪	229
第三节 表面检测	230
一、外观检测	230
二、镀、涂层或表面处理层厚度的测定	233

三、涂层的耐蚀性检验	235
四、涂层的耐磨性试验	237
五、涂层的孔隙率试验	239
六、涂层的硬度试验	239
七、涂层的结合强度(附着力)试验	239
第四节 薄膜弹性模量的测定——纳米压痕技术	244
一、问题的提出	244
二、薄膜弹性模量和硬度的确定	245
三、纳米压痕系统的组成及工作原理	246
四、纳米压痕技术的其他应用	247
第十一章 表面工程与再制造	249
第一节 再制造工程概论	249
一、再制造工程的技术内涵	249
二、再制造工程的学科体系	252
第二节 再制造技术的应用	253
一、再制造与表面工程技术	253
二、再制造的其他技术	254
三、再制造技术的应用实例	255
四、再制造工程的发展与意义	261
参考文献	265

第一章 绪 论

表面工程技术涉及面广，信息量大，是多种学科相互交叉、渗透与融合形成的一种通用性工程技术。它利用各种物理的、化学的、物理化学的、电化学的、冶金以及机械的方法和技术，使材料表面得到我们所期望的成分、组织结构和性能或绚丽多彩的外观。其实质就是要得到一种特殊的表面功能，并使表面和基体性能达到最佳的配合。因此它是一种节材、节能的新型工程技术，综合运用了各种学科的成果。

第一节 表面工程技术的发展背景

一、表面工程技术迅速发展的原因

表面工程技术的发展历史悠久，如中国古代的贴金或镏金技术、淬火技术、桐油漆防腐技术等。近代的摩擦学、界面力学与表面力学、材料失效与防护、金属热处理学、焊接学、腐蚀与防护学、光电子学等学科对多种表面工程技术的发展及其基础理论的研究都做出了巨大贡献，并成功地应用于工程之中。表面工程概念的提出始于 20 世纪 80 年代。1983 年，英国 T. Bel 教授首先提出了表面工程的概念。表面工程学科发展的重要标志是 1983 年英国伯明翰大学沃福森表面工程研究所的建立和 1985 年国际刊物《表面工程》的发行。1986 年 10 月，国际热处理联合会决定接受表面工程的概念，并把自己的会名改为国际热处理及表面工程联合会。

表面工程技术的应用对提高产品的性能、降低成本、节约资源具有十分重要的意义。表面工程技术将成为主导 21 世纪工业发展的关键技术之一。表面工程技术迅速而富有成效发展的原因主要如下。

首先，表面工程技术的属性是其迅速发展的基础。表面工程具有学科的综合性、手段的多样性、广泛的功能性、潜在的创新性、环境的保护性、很强的实用性和巨大的增效性，因而受到各行各业的重视。表面工程概念的提出是表面科学向生产力转化的要求，是人们对表面技术认识上的一次飞跃。表面工程技术既可对材料表面改性，制备多功能（防腐、耐磨、耐热、耐高温、耐疲劳、耐辐射、抗氧化以及光、热、磁、电等特殊功能）的涂、镀、渗、覆层，成倍延长机件的寿命，又可对产品进行装饰，还可对废旧机件进行修复。采用表面工程措施的费用一般占产品价格的 5%~10%，却可以大幅度地提高产品的性能及附加值，从

而获得更高的利润。采用表面工程措施的平均效益高达 5~20 倍以上。

其次, 现代工业的需求是表面工程迅速发展的动力。现代工业的发展对机电产品提出了更高的要求, 体积要小巧, 外形要美观, 而且能在高温、高速、重载以及腐蚀介质、恶劣环境下可靠持续地工作。航空航天工业的需求促进了能够制备耐热、隔热涂层的等离子喷涂技术的发展; 海上钻井平台的需求促进了钢结构表面防腐技术的发展; 汽车工业的技术与艺术完善结合的追求促进了涂装技术的发展; 电子信息技术的需求促进了薄膜技术的发展等等。

再次, 环境保护的紧迫性是促进表面工程迅速发展的时代要求。表面工程能大量节约能源、节省资源、保护和优化环境。表面工程最大的优势是能够以多种方法制备出优于基材性能的表面功能薄层。该薄层厚度一般从几十微米到几毫米, 仅占工件厚度的几百分之一到几十分之一, 却使工件具有了比基材更高的耐磨性、抗腐蚀性和耐高温性能。在热工设备及高温环境下, 用表面处理技术在设备、管道及部件上施加隔热涂层, 可以减少热损失。在高、中温炉内壁涂以远红外辐射涂层可节电约 30%。用表面沉积铬层的塑料部件替代汽车上某些金属部件如隔板等, 可减轻汽车质量, 增加单位燃料平均行驶里程, 也可间接受到节能的效果。为了改善人工植入材料与肌体的生物相容性, 可以在植入材料制成的器件上沉积第三种材料的薄膜。广泛应用的电镀工艺产生大量工业废水, 造成环境污染, 沉积新技术可部分取代电镀, 有利于环境保护。

还有, 现代科技成果为表面工程的迅速发展提供了技术支撑。计算机的广泛应用和推广, 提高了表面工程技术设备的自动化程度, 改善了表面涂层的制备效率和质量, 使得表面工程技术设计可用数值模拟方法。新能源和新材料等技术的发展, 加速了表面工程技术的发展。例如, 离子束、电子束和激光束三束技术的发展, 使得具有高效率和高质量的高密度能源的表面涂覆和强化的成本越来越低; 采用纳米级材料添加剂的减摩技术可以在摩擦部件动态工作中智能地修复零件表面的缺陷, 实现材料磨损部位原位自动修复, 并使裂纹自愈; 用电刷镀制备含纳米金刚石粉末涂层的方法可以用来修复模具, 延长使用寿命, 是模具修复的一项突破; 各种陶瓷材料、非晶态材料、高分子材料等也将不断地被应用于表面工程中。

二、表面工程技术在国民经济中的地位和意义

现代表面工程技术在国民经济中起着不可估量的作用。表面工程技术作为材料科学与工程的前沿, 是人类进步的里程碑, 是尖端技术发展的基本条件, 国民经济依赖于它的开发与应用。它促进和推动传统产业的技术进步, 并引起产业结构的变化, 是知识密集、技术密集、保密性强的新产业。

表面工程新技术的应用, 能使产品不断更新、物美价廉、占领市场并明显

提高经济效益。产品的更新换代要求价廉物美、绚丽多彩的外观,各种机件、构件、管道、设备要求延长寿命,都使得表面工程技术面临着对传统、现有的表面处理技术进行革新。使镀(涂)层质量和性能有所突破,外观(表)绚丽多彩,五光十色、图纹生辉,使非金属材料金属化、金属材料非金属化,使各类产品新颖、美观、耐用并价格低廉才富有竞争力。这就要求各种新科技、新材料重新组合,相互交融、交叉渗透。这使传统的表面处理技术从工艺配方、装备、自动控制以及相应的分析、检测、鉴别、环保等环节都遇到了新的挑战。

表面工程技术涉及众多行业的通用共性技术,如机械、军工、模具、轻工、仪器仪表、电子电器、建筑、桥梁、石油、航空航天、船舶车辆、基础结构工程、工业冷凝系统、化工反应系统以及为了适应海洋石油开采的港口设备、石油化工等。

现代表面工程技术的兴起同时也促进了新型表面工艺材料的发展。如镀(喷、涂、渗、粘、覆)层工艺材料,电镀、刷镀溶液,各种添加剂以及非金属材料(如陶瓷、高分子材料和复合材料)等应运而生,也为高科技、尖端技术提供一些特殊性能的材料,如非晶态、超导、固体润滑材料,太阳能转换材料,金刚石薄膜等等。

第二节 表面工程技术的学科体系

表面工程技术是随着生产力的发展,以多个学科交叉、综合、复合、系统为特色,为适应生产的需要而形成并正在发展中的一门新兴学科,它以“表面”和“界面”为研究核心,在有关学科理论的基础上,根据材料表面的失效机制,以应用各种表面工程技术及其复合表面工程技术为特点,逐步形成了与其他学科密切相关的表面工程基础理论。关于表面工程技术的学科体系还在进行探讨和完善中,表面工程技术可以从不同的角度进行归纳分类。从材料科学的角度,按沉积物的尺寸进行,表面工程技术可以分为以下四种基本类型:

① 原子沉积。以原子、离子、分子和粒子集团等原子尺度的粒子形态在基体上凝聚,然后成核、长大,最终形成薄膜。被吸附的粒子处于快冷的非平衡态,沉积层中有大量结构缺陷。沉积层常和基体反应生成复杂的界面层。凝聚成核及长大的模式,决定着涂层的显微结构和晶型。电镀、化学镀、真空蒸镀、溅射、离子镀、物理气相沉积、化学气相沉积、等离子聚合、分子束外延等均属此类。

② 颗粒沉积。以宏观尺度的熔化液滴或细小固体颗粒在外力作用下于基体材料表面凝聚、沉积或烧结。涂层的显微结构取决于颗粒的凝固或烧结情况。热喷涂、搪瓷涂敷等都属此类。