

表面工程的理论与技术

Theories and Technologies on Surface Engineering

(第2版)

徐滨士 朱绍华 等编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

表面工程的理论与技术

Theories and Technologies on Surface Engineering

(第2版)

徐滨士 朱绍华 等编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

表面工程的理论与技术 / 徐滨士等编著. —2 版.
—北京: 国防工业出版社, 2010. 4
ISBN 978 - 7 - 118 - 06824 - 5

I. 表... II. ①徐... III. ①金属表面处理 IV.
①TG17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 053941 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 960 1/16 印张 26½ 字数 503 千字
2010 年 4 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 68.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422
发行传真: (010) 68411535

发行邮购: (010) 68414474
发行业务: (010) 68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 宋家树 蔡 镭 程洪彬

秘书长 程洪彬

副秘书长 邢海鹰 贺 明

委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟
(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨 伟 肖志力 吴有生

吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起

崔尔杰 韩祖南 傅惠民 魏炳波

本书主审委员 甘茂治

前 言

随着科学技术的进步和生产发展的需求,表面工程做为 一门新型的综合 性学科,在国内外得到了迅速发展,尤其是在当今全球循环经济和低碳经济发 展的需求下,表面工程在机械、材料、冶金、化工、军工等领域得到了广泛的应 用。实践证明,表面工程的运用能有效改善材料表面性能,延长零件的使用寿命,并能有效节约资源能源,减少环境污染,具有很高的投入产出比。特别 是一些常用的表面工程技术已成为提高产品质量,实施设备维修和技术改造的 有力保障。由于表面工程对生产的巨大推动作用,表面工程成为了近 20 年来 发展最快的学科之一,已成为现代制造技术的重要组成部分,为制造业和维 修、再制造领域注入了活力,推动了制造业的技术进步,并成为具有中国特色 的、自主创新的再制造产业的关键技术支撑。

表面工程一直以来在不断完善自身的学科体系。理论上,表面工程在有 关边缘学科交叉渗透的基础上形成了具有特色的基础理论和技术理论;应用 上,表面工程已深入到国民经济的方方面面,并将产生越来越大的经济效益和 社会效益。为了与有关学者、工程技术人员共同推进表面工程的发展,我们于 1999 年编著了《表面工程的理论与技术》一书,后经 2001 年第二次印刷。应国 防工业出版社的邀请,我们对《表面工程的理论与技术》的第 1 版进行了修订。 本书在表面工程学科体系的总体构思下,侧重讨论表面工程的基础理论和技术 理论,表面工程技术的工艺要点、保证质量的措施及技术的复合与发展,力 图探讨贯穿于各种表面技术之中的基本科学技术问题及它们之间的内在联系。 本修订版对第一版中的部分章节做了删减,并重点添加了近 10 年来表面 工程领域研究的新技术、新设备、新工艺、新材料,在单一表面工程、复合表面 工程的基础上,融入了纳米表面工程、自修复技术、自动化表面工程、表面工程 技术设计等表面工程领域的新成果。

本书由徐滨士、朱绍华等编著。各章节编著人员为:第 1 章徐滨士、刘世 参,第 2 章朱绍华、陈伯蠡、张平、马世宁、韩荣生、张甲英、陈威,第 3 章徐滨士、 张平、梁秀兵、董世运、吕耀辉、谭俊、梁志杰,第 4 章乔玉林,第 5 章马世宁、谭

俊、韩荣生、朱绍华、魏世丞、乔玉林,第6章朱张校、魏世丞、许一、卢柯、刘钢,第7章徐滨士、梁秀兵、胡振峰、吕耀辉,第8章徐滨士、朱绍华、陈学楚、许一。全书由徐滨士、朱绍华统稿。同时感谢第一版作者周平安、白新德、彭日辉、单际国、王建军、张伟等为本书奠定的基础。

本书可供有关专业的高等院校师生、研究人员和工程技术人员参考。

感谢有关单位和个人的热情帮助,并向书中参考文献的作者致以敬意。限于编著人员水平,书中不当之处,恳请读者指正并提出宝贵意见。

作者

2009年12月

目 录

第1章 表面工程概论	1
1.1 表面工程的内涵及功能	1
1.1.1 表面工程的内涵	1
1.1.2 表面工程的功能	3
1.2 表面工程技术的分类	3
1.2.1 表面改性技术	3
1.2.2 表面处理技术	4
1.2.3 表面涂覆	4
1.2.4 复合表面工程技术	5
1.2.5 纳米表面工程技术	5
1.3 表面工程的发展	6
1.3.1 表面工程发展的历史性标志	6
1.3.2 表面工程发展的三个阶段	8
1.4 发展表面工程的意义	8
参考文献	12
第2章 表面覆层的形成与结合机理	14
2.1 表面覆层界面结合概述	14
2.1.1 表面覆层含义	14
2.1.2 覆层界面结合的类型	15
2.1.3 覆层界面的结合性能及其影响因素	18
2.2 堆焊层的形成与结合	21
2.2.1 堆焊覆层与基体的冶金结合	21
2.2.2 熔合区的性能特点	23
2.2.3 堆焊覆层质量的控制	35
2.3 热熔融涂层的形成与结合	44
2.3.1 热喷涂涂层的形成	44
2.3.2 热熔融涂层与基材的结合形式	47
2.3.3 影响结合强度的主要因素	51

2.3.4	提高涂层结合强度的措施	53
2.4	电化学沉积镀层的形成与结合	54
2.4.1	金属电沉积过程	55
2.4.2	金属的电结晶过程	59
2.4.3	镀层的结合及其影响因素	61
2.4.4	复合镀层的结合机理	65
2.5	气相沉积层的形成与结合	68
2.5.1	气体与固体的相互结合	68
2.5.2	薄膜的生长	70
2.5.3	不同晶态的形成	72
2.5.4	不同沉积方法的成膜及薄膜结构特点	73
2.5.5	薄膜的附着力及其影响因素	79
2.6	粘涂层的形成与结合	81
2.6.1	粘接的基本条件	81
2.6.2	粘接现象的各种理论解释	86
2.6.3	粘涂层的形成机理	90
2.6.4	粘接强度的影响因素与控制	92
2.7	摩擦化学膜的形成与结合	96
2.7.1	摩擦化学膜的形成	96
2.7.2	摩擦化学膜的形成机理	96
	参考文献	100
第3章	表面熔覆技术	102
3.1	堆焊技术	102
3.1.1	堆焊合金的分类及应用	103
3.1.2	堆焊金属的合金化	108
3.1.3	堆焊方法	110
3.2	热喷涂技术	117
3.2.1	概述	117
3.2.2	热喷涂技术的工艺流程	119
3.2.3	等离子喷涂原理及特点	120
3.2.4	超声速火焰喷涂原理及特点	123
3.2.5	高速电弧喷涂原理及特点	124
3.3	激光熔覆技术	127
3.3.1	激光熔覆技术原理与特点	127
3.3.2	激光熔覆设备与材料	129

3.3.3	激光熔覆层的组织、性能	132
3.3.4	激光熔覆工艺及其对熔覆层质量影响	134
3.3.5	基于激光熔覆的快速成形技术	139
3.4	等离子熔覆技术	143
3.4.1	等离子熔覆原理	143
3.4.2	等离子弧熔覆材料	144
3.4.3	等离子熔覆结晶特征	145
3.4.4	等离子束熔覆层中的缺陷及防止	149
3.4.5	等离子束熔覆工艺参数优化	150
3.4.6	等离子束熔覆技术应用前景	151
3.5	电火花表面强化技术	152
3.5.1	电火花沉积原理	152
3.5.2	电火花表面强化机理	153
3.5.3	电火花表面强化层的特性	154
3.5.4	电火花表面强化的工艺特点	156
3.5.5	电火花强化的工艺参数及质量控制	157
3.5.6	电火花表面强化技术应用和注意事项	158
	参考文献	159
第4章	表面涂装与粘涂技术	163
4.1	表面涂装技术	163
4.1.1	表面涂装涂层的组成	163
4.1.2	表面涂装工艺	170
4.2	表面粘涂技术	171
4.2.1	表面粘涂层的组成	171
4.2.2	常用的表面粘涂层	173
4.2.3	表面粘涂工艺	173
4.3	粘结固体润滑膜技术	175
4.3.1	粘结固体润滑膜的特征	175
4.3.2	粘结固体润滑膜的组成与类型	176
4.3.3	粘结固体润滑膜的摩擦行为	181
4.3.4	粘结固体润滑膜的应用领域	185
	参考文献	188
第5章	表面沉积技术	190
5.1	电镀、电刷镀技术	190
5.1.1	电镀与电刷镀技术基础	190

5.1.2	电沉积纳米结构镀层技术	199
5.1.3	电刷镀纳米复合镀层技术	204
5.2	气相沉积技术	216
5.2.1	真空蒸发镀膜	216
5.2.2	溅射镀膜	220
5.2.3	离子镀膜	225
5.2.4	化学气相沉积	228
5.2.5	离子注入	232
5.2.6	气相沉积技术的应用与进展	234
5.3	摩擦化学边界膜技术	238
5.3.1	摩擦化学边界膜的形成和分析	238
5.3.2	摩擦化学边界膜技术及应用	239
	参考文献	244
第6章	表面改性及表面处理技术	247
6.1	表面渗扩技术	247
6.1.1	概述	247
6.1.2	普通表面渗扩	248
6.1.3	真空化学热处理	256
6.1.4	等离子体化学热处理	257
6.2	表面热处理技术	260
6.2.1	传统表面热处理技术	261
6.2.2	几种新型表面热处理技术	264
6.3	摩擦副运行中的表面自修复技术	265
6.3.1	微纳米自修复材料的分类	266
6.3.2	微纳米自修复材料的作用机理	268
6.3.3	微纳米自修复技术的应用	270
6.3.4	微纳米自修复技术的发展前景	273
6.4	金属材料的表面自身纳米化	273
6.4.1	概述	273
6.4.2	表面自身纳米化的基本原理与制备方法	274
6.4.3	微观变形方式	275
6.4.4	表面纳米化对性能的影响	279
	参考文献	285
第7章	自动化表面技术装备设计及应用	288
7.1	自动化高速电弧喷涂技术及设备	288

7.1.1	自动化高速电弧喷涂系统组成	288
7.1.2	自动化高速电弧喷涂系统关键设备	289
7.1.3	自动化高速电弧喷涂系统在装备零件上的应用实例	295
7.2	自动化电刷镀技术及设备	298
7.2.1	内孔电刷镀装置的设计	298
7.2.2	内孔电刷镀基础镀液的成分设计及优化	300
7.2.3	内孔电刷镀技术在汽车零部件再制造产业化中的应用	302
7.3	自动化微束等离子熔覆技术及设备	305
7.3.1	自动化等离子熔覆技术原理	306
7.3.2	自动化粉末等离子熔覆系统	307
7.3.3	自动化微束等离子束熔覆技术应用	311
	参考文献	314
第8章	表面工程技术设计	315
8.1	概述	315
8.2	表面技术的设计与选择的一般原则	317
8.2.1	适应性原则	317
8.2.2	耐久性原则	320
8.2.3	经济性原则	320
8.2.4	环保性原则	321
8.3	常用表面覆层技术的设计与选择	322
8.3.1	堆焊技术的设计与选择	322
8.3.2	热喷涂技术的设计与选择	323
8.3.3	涂装技术的设计与选择	326
8.3.4	电镀、化学镀及转化膜技术的设计与选择	329
8.4	复合表面技术的设计与选择	333
8.4.1	复合表面技术设计与选择原则	334
8.4.2	以增强耐磨性为主的复合表面技术	337
8.4.3	以增强耐蚀性为主的复合表面技术	361
8.4.4	耐高温热腐蚀复合涂层	371
8.4.5	以增强固体润滑性为主的复合表面技术	373
8.5	表面工程技术经济分析	380
8.5.1	设备的磨损及其补偿	381
8.5.2	技术经济的基本原理	386
8.5.3	技术经济评价的基本方法	390
8.5.4	设备修理、改造与更新的技术经济分析	395
	参考文献	402

Contents

Chapter 1 Introduction to Surface Engineering	1
1.1 Connotation and function of surface engineering	1
1.1.1 Connotation of surface engineering	1
1.1.2 Function of surface engineering	3
1.2 Classification of surface engineering technology	3
1.2.1 Surface modification	3
1.2.2 Surface treatment	4
1.2.3 Surface cladding	4
1.2.4 Composite surface engineering technology	5
1.2.5 Nano surface engineering technology	5
1.3 Progress of surface engineering	6
1.3.1 History indicate of surface engineering progress	6
1.3.2 Three stages of surface engineering technology	8
1.4 Significance of developing surface engineering	8
References	12
Chapter 2 Formation and Bonding Mechanism of Surface Engineering	14
2.1 Introduction on bonding of surface and intersurface	14
2.1.1 Signification of surface coating	14
2.1.2 Classification of the coating interface bonding	15
2.1.3 Bonding strength and influencing factors of the coating interface bonding ...	18
2.2 Formation and bonding of build-up welding coating	21
2.2.1 Metallurgical bonding between the build-up welding coating and substrate ...	21
2.2.2 Character and properties of the bond area	23
2.2.3 Control of the build-up welding coating quality	35
2.3 Formation and bonding of the thermal melt coatings	44
2.3.1 Formation of the thermal melt coatings	44
2.3.2 Types of bonding between the thermal melt coatings with the substrate	47
2.3.3 Major influencing factors on the bond strength	51
2.3.4 Measures for improving bonding strength	53
2.4 Formation and bonding of electrochemical	

deposited coatings	54
2.4.1 Procedures of metal electro-deposition	55
2.4.2 Procedures of metal electro-crystallizing	59
2.4.3 Bonding and influencing factors of plating coatings	61
2.4.4 Bonding mechanisms of the composite plating coatings	65
2.5 Formation and bonding of vapor deposition coatings	68
2.5.1 Combination of gas and solid	68
2.5.2 Growth of the thin films	70
2.5.3 Formation of different crystals	72
2.5.4 Characteristics of formation and structure of thin film deposited by different ways	73
2.5.5 Adherent force and its influencing factors of thin films	79
2.6 Formation and cohesion of adhesive coatings	81
2.6.1 Basic factors of adhesion	81
2.6.2 Theories of adhesion	86
2.6.3 Formation mechanism of adhesive coatings	90
2.6.4 Influencing factors and control measures of adhesive intensity	92
2.7 Formation and cohesion of tribo-chemistry films	96
2.7.1 Formation of tribo-chemistry films	96
2.7.2 Formation mechanisms of tribo-chemistry films	96
References	100
Chapter 3 Surface Cladding Technology	102
3.1 Build-up technology	102
3.1.1 Classification and application of the build-up alloy	103
3.1.2 Build-up metal alloying	108
3.1.3 Build-up methods	110
3.2 Thermal spraying technology	117
3.2.1 Introduction of thermal spraying technology	117
3.2.2 Process of thermal spraying technology	119
3.2.3 Principle and characters of plasma spraying	120
3.2.4 Principle and characters of high velocity oxygen fuel spraying	123
3.2.5 Principle and characters of high velocity electric arc spraying	124
3.3 Laser cladding technology	127
3.3.1 Principle and characters of laser cladding technology	127
3.3.2 Equipment and materials of laser cladding	129
3.3.3 Structure and properties of laser cladding	132
3.3.4 Process of laser cladding and its influence to cladding quality	134

3.3.5	Laser cladding rapid forming technology	139
3.4	Plasma cladding technology	143
3.4.1	Principle and characters of plasma cladding technology	143
3.4.2	Materials of plasma cladding technology	144
3.4.3	Crystal characteristic of plasma cladding technology	145
3.4.4	Defect in plasma cladding and their prevention	149
3.4.5	Parameters optimization of plasma cladding process	150
3.4.6	Application prospect of plasma cladding technology	151
3.5	Electric discharge surface strengthening	152
3.5.1	Principles and characters of electric discharge deposition	152
3.5.2	Mechanisms of electric discharge surface strengthening	153
3.5.3	Characteristics of electric discharge surface strengthening coatings	154
3.5.4	Characteristics of electric discharge surface strengthening technology	156
3.5.5	Technique parameters and quality control in electric discharge surface strengthening	157
3.5.6	Matters need attention for electric discharge surface strengthening technology and their application	158
	References	159
Chapter 4	Surface Coating and Surface Adhesive Technology	163
4.1	Surface coating technology	163
4.1.1	Composition of surface coatings	163
4.1.2	Surface coating process	170
4.2	Surface adhesive technology	171
4.2.1	Composition of surface adhesive coatings	171
4.2.2	Active surface adhesive coatings	173
4.2.3	Surface adhesive process	173
4.3	Adhesive solid lubricating film technology	175
4.3.1	Characteristics of adhesive solid lubricating films	175
4.3.2	Composition and classification of adhesive solid lubricating films	176
4.3.3	Friction behaviour of adhesive solid lubricating films	181
4.3.4	Application area of adhesive solid lubricating film	185
	References	188
Chapter 5	Surface Deposition Technology	190
5.1	Electro-plating and electro-brush plating technology	190
5.1.1	Supporting technology of electro-plating and electro-brush plating	190
5.1.2	Electrodeposition nano-structure coatings technology	199
5.1.3	Electro-brush plating nano-composite coatings technology	204

5.2 Vapor deposition technology	216
5.2.1 Vacuum evaporation	216
5.2.2 Sputtering	220
5.2.3 Ion-plating	225
5.2.4 Chemical vapor deposition	228
5.2.5 Ion-implantation	232
5.2.6 Application and advances of vapor deposition	234
5.3 Boundary film of tribo-chemistry	238
5.3.1 Formation and analysis of boundary film of tribo-chemistry	238
5.3.2 Technologies of boundary film of tribo-chemistry and their application	239
References	244
Chapter 6 Surface Modification and Treatment Technology	247
6.1 Surface pervasion technology	247
6.1.1 Introduction	247
6.1.2 Conventional surface pervasion	248
6.1.3 Vacuum chemical heat treatment	256
6.1.4 Plasma chemical heat treatment	257
6.2 Surface heat treatment	260
6.2.1 Conventional surface heat treatment	261
6.2.2 Several developed surface heat treatment	264
6.3 Surface self-repair technology in running friction pair	265
6.3.1 Classification of micro/nano self-repair materials	266
6.3.2 Action mechanisms of micro/nano self-repair materials	268
6.3.3 Application of micro/nano self-repair technology	270
6.3.4 Prospect of micro/nano self-repair technology	273
6.4 Surface self-nanocrystallization of metallic materials	273
6.4.1 Introduction	273
6.4.2 Principles and preparation methods of self-nanocrystallization	274
6.4.3 Microscopic deformation mode	275
6.4.4 Effect of self-nanocrystallization on surface properties	279
References	285
Chapter 7 Design and Application of Automatic Surface	
Technical Equipments	288
7.1 Automatic high velocity arc spray technology and equipments	288
7.1.1 Composition of automatic high velocity arc spray system	288
7.1.2 Key equipments of automatic high velocity arc spray system	289