

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

现代表面工程技术

郇振声 杨明安 主 编
钱翰城 高心海 副主编



TG17
460
1-

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

现 代 表 面 工 程 技 术

主 编	酆振声	杨明安		
副主编	钱翰城	高心海		
参 编	葛祥荣	酆定强	王 蕾	陈大凯
	潘 邻	翟海潮	酆定毅	高万振
	余素芳	夏伯才		



机 械 工 业 出 版 社

本书由武汉材料保护研究所、重庆大学、铁道部戚墅堰机车车辆工艺研究所等六家单位从事表面工程技术研究与应用的专家、教授联合编写。本书所述内容,充分反映了作者及所在单位从事表面工程技术研究的获奖成果与实际工程应用的经验,并紧密结合了国际、国内表面工程技术的最新发展。

本书以翔实的资料介绍了金属表面预处理及净化技术、电镀与化学镀技术、电刷镀技术、转化膜技术、涂料涂装技术、防锈封存与包装技术、热喷涂技术、化学热处理技术、气相沉积技术、高能束表面改性技术、表面粘涂技术、液膜溶解扩散焊技术、热浸镀技术、表面分析与表面性能检测、表面工程与摩擦学等表面工程相关领域的学科发展前沿和工艺技术。

本书所述涉及多学科领域,内容丰富,技术先进,实用性和指导性强。本书可供从事机械、材料、化工、冶金、交通和航空航天等行业的科技人员、管理人员和高等学校师生学习使用。

图书在版编目(CIP)数据

现代表面工程技术/酆振声,杨明安主编. —北京:
机械工业出版社, 2007.1 (2007.6重印)

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

ISBN 978-7-111-20153-3

I. 现… II. ①酆…②杨… III. ①金属表面处理
②金属表面保护 IV. TG17

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第124866号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:季顺利 版式设计:冉晓华 责任校对:魏俊云

封面设计:姚毅 责任印制:洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2007年6月第1版·第2次印刷

184mm×260mm·38.75印张·964千字

标准书号:ISBN 978-7-111-20153-3

定价:58.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379729

封面无防伪标均为盗版

前 言

表面工程是一个既古老又新颖的学科,可追溯到 3000 年前,我国就已采用表面保护技术,如用大漆美化和保护器具的表面,在春秋晚期已应用铜器热镀锡技术和鎏金技术,出现块炼铁渗碳钢制品,这说明我国古代表面保护和表面处理技术已有相当高的水平。但是,表面处理技术的迅速发展还是从 19 世纪工业革命开始的,最近 50 多年发展更是突飞猛进。离子束、激光束、电子束、微波及超高真空技术的开发,引发了表面工程技术研究和应用的热潮,并成为 20 世纪 80 年代世界 10 大关键技术之一。

宋健院士在“制造业与现代化”的报告中对现代表面工程技术作了很恰当的概括和评价,他说:“掺杂、扩散、离子注入、外延、溅射、化学沉积(CVD)、光刻、表面贴装、自动化组装和纳米制造工艺等是制造业的伟大创造”。

表面工程是使工件经表面预处理后,通过表面涂覆、表面改性或表面复合处理,改变固体金属表面或非金属表面的化学成分、组织结构、形态和(或)应力状态,以获得所需表面性能的系统工程。表面工程包括表面工程基础理论、表面涂覆、表面改性、表面复合处理、表面加工、表面分析与表面性能检测、表面工程设计等主要内容。表面工程是工程科学技术中一个涉及学科广泛、活力很强、成果突出并与生产实践紧密结合的领域,它渗透到航空航天技术、信息技术、新材料技术、先进制造技术等前沿技术的各个方面。从高科技产品到人们衣食住行、日常用品都离不开表面工程,如离子注入技术应用于半导体材料表面改性,它可高精度控制和精细掺杂,使半导体器件从单个晶体管加工发展到平面集成电路微细加工,使掺杂层更薄,集成电路的特征尺寸接近 $0.1\mu\text{m}$,使新世纪的电子工业成为蓬勃发展的微电子工业;人造卫星飞行时,不断发回各种信息,是依靠薄膜支撑的太阳能电池,将太阳能转化为电能、热能,维持着人造卫星各种设施正常运行;表面工程技术使内燃机的缸套/活塞环、凸轮/挺杆、轴/轴套三对摩擦副降低能耗 $1/4 \sim 1/3$,大修里程从平均 10 万 km 提高到 30 万 km;气相沉积技术应用于切削刀具,引起一场刀具的“黄色革命”,使刀具的使用寿命延长数倍。表面工程技术能改善和美化人们的生活、节约资源与能源,保护和改善人类生活环境,对于实现国民经济可持续发展具有十分重要的作用。

本书共 16 章,第 1 章概论,叙述了表面工程的作用、任务、分类及发展趋势;第 2 章除叙述常用预处理技术,还介绍了几种预处理新方法;第 3~14 章既系统又重点介绍了各种表面涂覆、薄膜、表面改性和复合处理等技术的基础理论、实用工艺方法、工艺材料、工艺装备及质量评价;第 15 章综合介绍表面、表面层分析和物理性能检测;第 16 章叙述表面工程技术的耐磨损作用与耐磨表面工程技术的选用。

本书由郦振声、杨明安担任主编,进行全书的构思和设计,并负责全书统稿和审定;钱翰城、高心海任副主编。具体编写分工为:郦振声编写第 1、2 章;杨明安、余素芳编写第 3、6、7 章;葛祥荣编写第 4 章;钱翰城、夏伯才、赵阳、郑江、张金彬、翟彦博编写第 5、13 章;高心海编写第 8 章;郦振声、郦定强编写第 9 章;王蕾、陈大凯、郦振声编写第 10 章;潘邻编写第 11 章;翟海潮编写第 12 章;郦定强、郦振声编写第 14 章;郦定毅、郦定强

编写第 15 章；高万振编写第 16 章。

本书在编写过程中，得到作者所在单位武汉材料保护研究所等的关怀与帮助，得到崔崑院士及众多从事表面工程工作的专家的热情鼓励和支持，同时引用了许多同仁的大量资料，因篇幅所限未能一一列出，在此一并表示衷心感谢！

表面工程涉及专业知识面广，理论与实践性强，全体编著人员虽辛勤努力工作，但限于学术水平和收集资料所限，书中难免有疏漏和不妥之处，恳请各位专家和广大读者不吝赐教，共同商榷。读者在阅读本书时，若有需要与作者交流沟通之处，请与郇振声联系；宅话：027-82440066。

作 者

目 录

前言

第1章 概论 1

- 1.1 表面工程的定义、作用及任务 1
 - 1.1.1 表面工程的定义 1
 - 1.1.2 表面工程的作用 1
 - 1.1.3 表面工程的主要任务 2
- 1.2 表面工程技术的分类及内容 2
 - 1.2.1 表面工程技术的分类 2
 - 1.2.2 表面涂覆技术 2
 - 1.2.3 表面改性技术 4
 - 1.2.4 表面复合处理技术 5
- 1.3 表面工程技术的发展趋势 5
- 参考文献 6

第2章 金属表面预处理及净化 8

- 2.1 碱液清洗 8
 - 2.1.1 碱液清洗方法 8
 - 2.1.2 碱液清洗配方 9
 - 2.1.3 漂洗 10
- 2.2 溶剂清洗 10
 - 2.2.1 溶剂清洗方法 10
 - 2.2.2 清洗用的有机溶剂 11
 - 2.2.3 溶剂蒸气清洗设备 11
- 2.3 表面活性剂清洗 12
 - 2.3.1 表面活性剂分类及其特点 12
 - 2.3.2 工业清洗中常用的表面活性剂及复配清洗剂 13
- 2.4 化学除锈 14
 - 2.4.1 化学除锈方法 14
 - 2.4.2 除油—除锈二合一处理 16
 - 2.4.3 中和与水洗 16
- 2.5 机械清理与表面精整 17
 - 2.5.1 机械清理方法 17

- 2.5.2 滚筒精整与振动精整 18
- 2.6 表面预处理新技术 19
 - 2.6.1 超声波清洗 19
 - 2.6.2 真空脱脂清洗 20
 - 2.6.3 喷塑料丸退漆(涂料层) 21
 - 2.6.4 空气火焰超声速喷砂、喷丸 21
- 2.7 表面预处理质量检测与评定 22
 - 2.7.1 除油质量评定方法 22
 - 2.7.2 机械预处理质量检测与评定 23
- 参考文献 24

第3章 电镀与化学镀技术 25

- 3.1 概述 25
 - 3.1.1 电镀技术 25
 - 3.1.2 化学镀技术 26
- 3.2 电镀技术与工艺 27
 - 3.2.1 表面准备 27
 - 3.2.2 电镀的镀层及系统工艺设计 29
 - 3.2.3 单金属电镀 31
 - 3.2.4 合金电镀 51
 - 3.2.5 多层合金电镀 58
 - 3.2.6 复合电镀 59
 - 3.2.7 电铸 60
 - 3.2.8 脉冲电流为主的电镀 60
- 3.3 化学镀技术与工艺 61
 - 3.3.1 化学镀镍 61
 - 3.3.2 化学镀铜 63
 - 3.3.3 化学镀金 64
 - 3.3.4 化学镀合金 65
 - 3.3.5 化学镀复合层 66
- 3.4 镀层质量及其检验 67
 - 3.4.1 物理力学性能 67
 - 3.4.2 化学或电化学试验 69
- 3.5 电镀与化学镀的环境保护和

职业安全与卫生	70	5.2.1 阳极氧化过程	116
参考文献	70	5.2.2 阳极氧化膜的性能及用途	117
第4章 电刷镀技术	71	5.2.3 不同阳极氧化方法的工艺及其特点	119
4.1 概述	71	5.2.4 不合格阳极氧化膜的退除	128
4.1.1 电刷镀技术的基本原理	71	5.3 铝及铝合金的微弧等离子体氧化技术	128
4.1.2 电刷镀技术的特点	72	5.3.1 概述	128
4.1.3 电刷镀技术的发展趋势	72	5.3.2 微弧等离子体氧化过程及氧化膜的特性	129
4.2 电刷镀溶液	74	5.3.3 陶瓷层的制备系统	133
4.2.1 电刷镀溶液的分类	74	5.3.4 影响制备陶瓷层质量的因素	136
4.2.2 表面准备溶液	75	5.4 化学转化膜	142
4.2.3 沉积金属溶液的种类	77	5.4.1 化学氧化法	142
4.2.4 镍电刷镀溶液	78	5.4.2 化学磷化处理	146
4.2.5 钴电刷镀溶液	82	5.4.3 铬酸盐处理	149
4.2.6 铜电刷镀溶液	82	5.4.4 草酸盐处理	151
4.2.7 软金属电刷镀溶液	85	5.5 金属的着色和染色	151
4.3 电刷镀设备和工辅具	87	5.5.1 铝合金的着色和染色	151
4.3.1 电刷镀专用电源	88	5.5.2 铜及铜合金的着色	154
4.3.2 镀笔	90	参考文献	155
4.4 电刷镀工艺	91	第6章 涂料涂装技术	156
4.4.1 电刷镀工艺的基本要求	91	6.1 概述	156
4.4.2 碳钢、合金钢及铸铁类金属的电刷镀工艺	94	6.2 涂料	156
4.4.3 铝和铝合金、铜和铜合金的电刷镀工艺	97	6.2.1 现用涂料	156
4.4.4 软金属、贵金属、难镀金属的电刷镀工艺	98	6.2.2 涂料的选择	159
4.5 电刷镀镀层性能、质量控制、缺陷及防止措施	100	6.3 现代涂覆技术	164
4.5.1 镀层金相组织的类型	100	6.3.1 喷涂	164
4.5.2 电刷镀镀层的性能	101	6.3.2 浸涂	166
4.5.3 电刷镀质量控制及缺陷防止措施	108	6.3.3 流涂	167
4.6 电刷镀技术的应用及典型实例	111	6.3.4 辊涂或卷涂	168
4.6.1 电刷镀技术的应用	111	6.3.5 帘涂	168
4.6.2 电刷镀应用实例及效果	112	6.3.6 滚涂或旋转鼓涂覆	169
参考文献	115	6.3.7 电泳涂覆	169
第5章 转化膜技术	116	6.3.8 粉末涂覆	170
5.1 概述	116	6.4 涂膜固化	171
5.2 铝和铝合金的阳极氧化	116	6.5 涂料与涂膜质量及其检验	174
		6.5.1 涂料与涂膜质量	174
		6.5.2 质量控制与检验	177
		6.6 涂装技术中的安全与环境保护	181

6.6.1 表面准备用的设备和材料	181	8.5.3 热喷涂涂层的常见缺陷及防止措施	241
6.6.2 涂料涂覆	181	8.6 热喷涂技术的应用及典型实例	242
6.7 涂料涂装标准化	181	8.7 热喷涂环境保护及安全	248
参考文献	182	参考文献	249
第7章 防锈封存包装	183	第9章 化学热处理技术	250
7.1 概述	183	9.1 概述	250
7.2 防锈封存包装材料	184	9.1.1 化学热处理的主要特点、分类与方法	250
7.2.1 防锈材料	184	9.1.2 化学热处理的基本原理	251
7.2.2 环境封存材料	193	9.1.3 化学热处理的发展	252
7.2.3 包装材料	193	9.2 渗碳	252
7.3 防锈封存包装技术	195	9.2.1 渗碳原理及渗碳过程控制	253
7.3.1 清洗技术	195	9.2.2 气体渗碳	260
7.3.2 防锈封存包装	201	9.2.3 真空渗碳	274
7.4 防锈封存包装质量及其试验与检查	204	9.2.4 离子渗碳	285
7.5 防锈封存包装技术清洁化	206	9.2.5 流态床渗碳	294
参考文献	206	9.2.6 渗碳用钢及渗碳后的热处理	296
第8章 热喷涂技术	207	9.2.7 渗碳层的组织和性能	298
8.1 概述	207	9.3 碳氮共渗	301
8.1.1 热喷涂基本原理	207	9.3.1 概述	301
8.1.2 热喷涂方法的分类及工艺特点	209	9.3.2 气体碳氮共渗	302
8.1.3 热喷涂技术的发展趋势	215	9.3.3 离子碳氮共渗与真空碳氮共渗	307
8.2 热喷涂材料	216	9.3.4 碳氮共渗用钢与碳氮共渗后的热处理	308
8.2.1 热喷涂材料的分类	216	9.3.5 碳氮共渗层的组织和性能	309
8.2.2 热喷涂线材及棒材	217	9.4 渗氮	312
8.2.3 热喷涂粉末材料	220	9.4.1 铁氮二元合金相图与渗氮原理	312
8.3 热喷涂工艺及设备	224	9.4.2 渗氮用钢及其预备热处理	313
8.3.1 火焰喷涂、喷焊工艺及设备	224	9.4.3 气体渗氮	314
8.3.2 电弧喷涂工艺及设备	226	9.4.4 离子渗氮	320
8.3.3 等离子喷涂工艺及设备	227	9.5 氮碳共渗及以氮碳共渗为基的复合处理	325
8.3.4 超声速火焰喷涂工艺及设备	230	9.5.1 气体氮碳共渗	325
8.4 热喷涂工艺的技术基础	231	9.5.2 盐浴氮碳共渗	328
8.4.1 热喷涂涂层的制备工艺	231	9.5.3 氮碳共渗为基的复合处理	329
8.4.2 热喷涂涂层的工程设计	235	9.5.4 离子氮碳共渗	330
8.5 热喷涂涂层性能检测、质量控制、缺陷及防止措施	238	9.6 渗硫、硫氮共渗、硫氮	
8.5.1 热喷涂涂层的性能检测	238		
8.5.2 热喷涂涂层的质量控制	240		

碳共渗	332	10.4.2 等离子体 CVD 的种类及特点 比较	406
9.6.1 渗硫	332	10.4.3 等离子体 CVD 沉积装置与 工艺参数	407
9.6.2 硫氮共渗及其与蒸气处理的 复合	334	10.4.4 等离子体 CVD 的应用	408
9.6.3 硫氮碳共渗	335	10.5 激光物理气相沉积 (LPVD)	414
9.7 低温化学热处理渗层组织与性能 对比及工艺方法的选择	338	10.6 表面复合镀膜处理技术	415
9.7.1 低温化学热处理工艺参数和 渗层的组织结构	338	10.6.1 概述	415
9.7.2 低温化学热处理渗层的性能	339	10.6.2 离子注入与镀膜技术的复合	416
9.7.3 低温化学热处理工艺方法的 选择	344	10.6.3 激光与气相沉积、电子束与 气相沉积技术复合	418
9.8 渗金属及渗硼、渗硅	347	10.6.4 用蒸镀和溅射镀膜法制作 多层功能膜	419
9.8.1 渗铝	347	10.7 多层硬质复合膜与纳米 多层膜	420
9.8.2 渗锌	350	10.7.1 多层硬质耐磨膜	420
9.8.3 渗铬	353	10.7.2 纳米超硬多层膜	420
9.8.4 熔盐碳化物覆层	357	10.7.3 纳米超硬混合膜	421
9.8.5 渗硼	362	参考文献	422
9.8.6 渗硅	365		
9.8.7 共渗、复合渗及镀渗复合	366		
参考文献	369		
第 10 章 气相沉积技术	371	第 11 章 高能束表面改性技术	424
10.1 概述	371	11.1 激光表面改性	424
10.2 化学气相沉积 (CVD)	373	11.1.1 激光表面改性基础	424
10.2.1 化学气相沉积的原理、特点与 分类	373	11.1.2 激光表面淬火	429
10.2.2 化学气相沉积装置	375	11.1.3 激光熔凝	440
10.2.3 几种常用的化学气相沉积层及其 工艺举例	376	11.1.4 激光熔覆	444
10.2.4 化学气相沉积层的性能	377	11.1.5 激光表面合金化	451
10.2.5 化学气相沉积层的应用	380	11.2 电子束表面改性	454
10.2.6 CVD 沉积金刚石薄膜	381	11.2.1 电子束表面改性设备及工作 原理	454
10.2.7 CVD 技术的现状和发展	383	11.2.2 电子束表面改性工艺	455
10.3 物理气相沉积 (PVD)	384	11.2.3 电子束表面改性技术的应用	458
10.3.1 概述	384	11.3 离子注入技术	458
10.3.2 真空蒸镀	386	11.3.1 离子注入原理和特点	459
10.3.3 溅射镀膜	390	11.3.2 离子注入装置	460
10.3.4 离子镀	397	11.3.3 离子注入与材料表面改性	463
10.4 等离子体化学气相沉积 (PCVD)	405	11.3.4 离子注入技术的工业应用	468
10.4.1 等离子体 CVD 反应	405	参考文献	469
		第 12 章 表面粘涂技术	470
		12.1 概述	470

12.1.1 表面粘涂技术的特点	470	13.4.4 冷却过程对焊补后基材组织的 影响	507
12.1.2 表面粘涂技术的原理	471	13.4.5 加热功率对基材组织的影响	507
12.1.3 表面粘涂技术的现状和发展	471	13.4.6 焊材对基材组织的影响	507
12.2 表面粘涂材料与特性	473	13.5 质量检验	508
12.2.1 表面粘涂材料的组成	473	13.5.1 焊补后硬度的检验	508
12.2.2 表面粘涂材料的种类	474	13.5.2 液膜溶解扩散焊界面结合强度的 测试	508
12.2.3 表面粘涂层的主要特性	475	13.6 液膜溶解扩散焊可能产生的问题 及预防	509
12.3 粘涂层的涂敷工艺及涂层 加工	478	13.7 液膜溶解扩散焊的应用 实例	509
12.3.1 粘涂层的涂敷工艺	478	13.8 应用液膜溶解扩散焊的经济 决策	510
12.3.2 粘涂层的加工	482	参考文献	513
12.4 粘涂层施工质量控制、涂层缺陷 及防止措施	482	第 14 章 热浸镀技术	515
12.4.1 粘涂层施工质量控制	482	14.1 概述	515
12.4.2 粘涂层缺陷及防止措施	483	14.2 热浸镀工艺方法	515
12.5 粘涂施工安全防护	484	14.2.1 熔剂法	516
12.6 表面粘涂技术的应用及实例	484	14.2.2 氢还原法	516
12.6.1 表面粘涂技术在修复领域的 应用	484	14.3 热浸镀锌	517
12.6.2 表面粘涂技术的应用实例	485	14.3.1 钢材热浸镀锌层的组织结构及影响 因素	517
参考文献	490	14.3.2 热浸镀锌工业生产	519
第 13 章 液膜溶解扩散焊技术	491	14.3.3 热浸镀锌钢材的性能及 应用	521
13.1 概述	491	14.4 热浸镀铝	524
13.2 液膜溶解扩散焊原理及 特点	491	14.4.1 钢材热浸镀铝层的组织结构及 影响因素	524
13.2.1 液膜溶解扩散焊原理	491	14.4.2 热浸镀铝的工业生产	527
13.2.2 液膜溶解扩散焊的特点	494	14.4.3 热浸镀铝钢材的性能及应用	529
13.3 液膜溶解扩散焊所用材料、 装备及工艺	494	14.5 热浸镀锌铝及铝锌合金	532
13.3.1 液膜溶解扩散焊材料	494	14.5.1 热浸镀 Zn-Al 合金	532
13.3.2 液膜溶解扩散焊装备及 工艺	499	14.5.2 热浸镀 Al-Zn 合金	532
13.4 液膜溶解扩散焊热过程分析及 组织变化	502	14.5.3 热浸镀 Zn-Al 合金与 Al-Zn 合金钢板性能	532
13.4.1 液膜溶解扩散焊焊补过程温度场 的数值模拟	502	14.5.4 热浸镀 Zn-Al 及 Al-Zn 合金钢板 的应用	533
13.4.2 液膜溶解扩散焊焊补过程温度场 的实测结果	506	14.6 热浸镀锡和热浸镀铅	534
13.4.3 液膜溶解扩散焊加热过程对基材 组织的影响	506	14.6.1 热浸镀锡	534

14.6.2 热浸镀铅	534	15.4.2 表面粗糙度和表面光泽度的 检测	554
参考文献	535	15.4.3 覆盖层结合(附着)力的 检测	556
第 15 章 表面分析与表面性能 检测	536	15.4.4 覆盖层厚度的检测	558
15.1 表面分析	536	15.4.5 覆盖层硬度的检测	563
15.1.1 表面形貌和显微组织分析	536	15.4.6 腐蚀试验与评定	565
15.1.2 表面成分分析	538	15.4.7 磨损试验与评定	567
15.1.3 表面晶体结构分析	539	参考文献	570
15.1.4 表面原子态和表面电子态 分析	540	第 16 章 表面工程与摩擦学	571
15.2 常用的表面分析技术和 仪器	540	16.1 表面工程技术的耐磨损 作用	571
15.2.1 透射电子显微镜(TEM)	540	16.1.1 引言	571
15.2.2 扫描电子显微镜(SEM)	541	16.1.2 耐磨表面保护的基本模型	571
15.2.3 扫描透射电镜(STEM)与分析 电子显微镜(AEM)	543	16.1.3 耐粘着磨损表面保护的 基本要求	572
15.2.4 扫描隧道显微镜(STM)与原子力 显微镜(AFM)	544	16.1.4 耐磨料磨损表面保护的 基本要求	574
15.2.5 俄歇电子能谱(AES)	546	16.1.5 耐疲劳磨损表面保护的 基本要求	576
15.2.6 电子探针(EPMA)和扫描电子 显微分析仪	547	16.1.6 耐化学磨损表面保护的 基本要求	576
15.2.7 质谱仪(SIMS)和 离子探针	547	16.1.7 主要耐磨表面保护的技术 类型	577
15.2.8 X射线衍射仪(XRD)	548	16.2 耐磨表面工程技术的选用	579
15.2.9 X射线荧光光谱仪(XRFS)	549	16.2.1 选用的基本原则	579
15.2.10 X射线光电子谱仪(XPS)	549	16.2.2 摩擦学系统分析	579
15.3 表面分析技术应用举例	550	16.2.3 表面保护覆层类型的确定	587
15.4 表面性能检测	554	16.2.4 表面保护覆层类型的评价	599
15.4.1 表面外观质量检测	554	参考文献	610

第 1 章 概 论

表面工程是一个既古老又新颖的学科，人们使用表面工程技术已有悠久的历史。追溯到几千年前，我国早在春秋战国时期就已开始应用钢的淬火、铜器热镀锡、鍍金及油漆等古老技术。但是，表面工程的迅速发展还是从 19 世纪工业革命才开始，20 世纪 80 年代成为世界上 10 大关键技术，进入 20 世纪 90 年代发展势头更猛，出现了表面工程研究的热潮，几乎涉及了工业的各个领域，表面工程技术仍将是主导 21 世纪的关键技术之一。

1.1 表面工程的定义、作用及任务

1.1.1 表面工程的定义

表面工程是经表面预处理后，通过表面涂覆、表面改性或表面复合处理，改变固体金属表面或非金属表面的化学成分、组织结构、形态和（或）应力状态等，以获得所需要表面性能的系统工程。它是近代技术与经典表面工艺相结合而繁衍、发展起来的，有坚实的科学基础，具有明显的交叉、边缘学科的性质和极强的实用性。表面工程在以下方面显示出巨大的作用和生命力。

1.1.2 表面工程的作用

1) 金属材料及其制品的腐蚀、磨损及疲劳断裂等主要损伤，一般都是从材料表面、亚表面或因表面因素而引起的，它们带来的破坏和经济损失是十分惊人的。例如，仅腐蚀一项，据统计全世界钢产量的 1/10 由于腐蚀而损耗，工业发达国家因腐蚀破坏造成的经济损失占国民经济总产值的 2%~4%，美国 1995 年因腐蚀造成的损失至少 3000 亿美元，我国每年因腐蚀造成的损失至少达 2000 亿元。磨损造成的损失与之相近。因此，采用表面改性、涂覆、薄膜及复合处理等工艺技术，加强材料表面防护，提高材料表面性能，控制或防止表面损坏，可延长设备、工件的使用寿命，获得巨大的经济效益。

2) 表面工程不仅是现代制造技术的重要组成与基础工艺之一，同时又为信息技术、航天技术、生物工程等高新技术的发展提供技术支撑。诸如离子注入半导体掺杂已成为超大规模集成电路制造的核心工艺技术。手机上的集成电路、磁带、激光盘、电视机的屏幕、计算机内的集成块等均赖以表面改性、薄膜或涂覆技术才能实现。生物工程中髋关节的表面修补，用超高密度高分子聚乙烯上再镀钴铬合金，寿命达 15~25 年，用羟基磷灰石（简称 HAP）粒子与金属 Ni 共沉积在不锈钢基体上，植入人体后具有良好的生物相容性。又如人造卫星的头部锥体和翼前沿，表面工作温度几千度，甚至 10000°C，采用了隔热涂层、防火涂层和抗烧蚀涂层等复合保护基体金属，才能保证其正常运行。

3) 利用表面工程技术，使材料表面获得它本身没有而又希望具有的特殊性能，而且表层很薄，用材十分少，性能价格比高，节约材料和节省能源，减少环境污染，是实现材料可

持续发展的一项重要措施。

4) 随着表面工程与科学的发展, 表面工程的作用有了进一步扩展。通过专门处理, 根据需要可赋予材料及其制品具有绝缘、导电、阻燃、红外吸收及防辐射、吸收声波、吸声防噪、防沾污性等多种特殊功能。也可为高新技术及其制品的发展提供一系列新型表面材料, 如金刚石薄膜、超导薄膜、纳米多层膜、纳米粉末、碳 60、非晶态材料等。

5) 随着人们生活水平的提高及工程美学的发展, 表面工程在金属及非金属制品表面装饰作用也更引人注目和得到明显的发展。

1.1.3 表面工程的主要任务

1) 提高金属材料抵御环境作用的能力。如提高材料及其制品耐腐蚀、抗高温氧化、耐磨减摩、润滑及抗疲劳性能等, 从而延长其使用寿命。

2) 根据需要, 赋予材料及其制品表面机械功能、物理功能和多种特殊功能、声光磁电转换及存储记忆的功能; 制造特殊新型材料及复层金属板材。

3) 赋予金属或非金属制品表面光泽的色彩、图纹、优美外观。

4) 实现特定的表面加工来制造构件、零件和元器件等。

5) 修复磨损或腐蚀损坏的零件; 挽救加工超差的产品, 实现再制造工程。

6) 研究各类材料表面的失效机理与表面工程技术的应用理论问题, 开发新的表面工程技术: 把“表面与整体”视为一个系统, 进行现代化表面工程设计, 获取更大的经济效益。

1.2 表面工程技术的分类及内容

1.2.1 表面工程技术的分类

表面工程技术种类繁多, 目前还没有统一的分类方法, 可以从不同角度归纳、分类。按照作用原理, 表面工程技术分为原子沉积、颗粒沉积、整体覆盖与表面改性等四种基本类型。亦有按表面层种类、表面功能特性、表面层形成的物理化学过程及实用工艺特点等进行分类。虽然各具特点, 但仍不能全面概括表面工程技术的全部内容, 只有相对意义, 因为有些工艺技术兼具不同类型的特点, 不能简单地归结到哪一类中。所以通常进行综合分类, 大致如下: ①表面工程的基础和应用理论; ②表面涂覆技术、表面改性技术和表面复合处理技术三部分; ③表面加工技术; ④表面分析和性能检测技术; ⑤表面工程技术设计。

现将表面涂覆、表面改性及表面复合处理技术三部分中主要工艺、特点及应用简略介绍。

1.2.2 表面涂覆技术

表面涂覆技术包括: 电镀和化学镀、热喷涂、金属转化膜、涂料涂装、热浸镀、气相沉积、防锈封存包装、堆焊与熔结、搪瓷与陶瓷涂覆、粘涂、溶胶—凝胶、液膜溶解扩散、热烫印、贴箔、衬覆等。

表面涂覆主要工艺方法、特点及用途见表 1-1。

表 1-1 表面涂覆主要工艺方法、特点及用途

类 别		主要特点及用途
电 镀 和 化 学 镀	电镀	电镀种类多,镀层附着力较强,但形状复杂的工件不易得到均匀的镀层。在金属、塑料、陶瓷或石墨等基体上都可电镀,广泛用于提高工件的装饰、防护、减摩耐磨和其他功能
	化学镀	不需外电源,较方便,形状复杂的工件亦可得到均匀、致密、孔隙率低,硬度高的镀层,但镀层的附着力比电镀稍差,成本较高。在金属和绝缘体上都可镀,用于电子、机械、航天、化工等工件,提高其耐磨、抗蚀等性能
	刷镀	不需镀槽,设备简单,电流密度高,沉积速度快,适用于大型、精密及复杂部件的局部不解体现场修复,大型构件的现场施工,比槽镀优越
热 喷 涂	电弧喷涂	喷涂温度高,雾化微粒飞行速度高,生产效率高,成本较低,涂层与基体的结合强度及涂层自身强度均较线材火焰喷涂高。特别适用于厚涂层和大面积喷涂,用于钢铁构件的防锈、防蚀及工件的表面强化、修复
	火焰喷涂	适应性广,但火焰温度与喷速稍低,涂层孔隙率较高,结合强度稍低。最近发展的超声速粉末火焰喷涂,粒子飞行速度达 600m/s,涂层致密、耐磨性好。可制备金属、合金、陶瓷、金属陶瓷、塑料等涂层,用于钢铁构件防蚀或工件表面强化、修复等
	等离子喷涂	等离子弧温度高(10000 ~ 20000°C)、焰流速度高,能喷涂陶瓷类的难熔材料,涂层致密度高(90% ~ 99%之间),结合强度高。可以喷涂金属、陶瓷、碳化物及其混合材料,特别适用制备热障涂层
	特种方法喷涂	有爆炸喷涂和激光喷涂等。涂层光滑致密、结合强度高,但设备昂贵,工艺参数要求精确控制。可喷涂所有难熔金属、陶瓷、金属陶瓷及其复合材料
金 属 转 化 膜	磷化	设备简单,成本低、生产效率高。磷化膜具有微孔结构,良好的吸附能力和润滑性能,还有较高的电绝缘性能。可处理钢铁、铝、锌及其合金,用于防锈、减摩润滑及油漆底层、电绝缘层
	化学氧化	不产生氢脆、膜薄,工件尺寸和表面粗糙度不受影响。氧化膜耐蚀性较差,需进行浸油、封闭等后处理,以提高耐蚀性及润滑性。用于机械工件、电子设备、精密光学仪器、弹簧和兵器等的防护装饰
	阳极氧化	一般膜厚 5 ~ 30 μ m,硬质膜达 30 μ m 以上。膜多孔,有良好的吸附能力。用于处理铝及铝合金制品防护、装饰、耐磨、电绝缘、改善光学及热学性能
	金属着色	可在多种金属表面及金属覆层上得到不同的色彩。主要用于金属制品装饰,如用于建筑、五金、工艺美术品及日用品等方面
涂 料 涂 装	溶剂性涂料	以溶剂为稀释剂是目前应用最普遍的涂料品种,但易燃烧、污染环境。用于机械的非工作裸露表面上作装饰、防护
	水溶性涂料	以水代替溶剂稀释剂,高效、节能、低污染、经济,但调整粘度较困难,施工有特殊要求。用于装饰、防锈、耐酸碱,其中乳胶涂料广泛用于建筑物的内外墙
	高固体分涂料	固体分可达 65% ~ 80%,由于所含溶剂显著减少,也是一种低污染型涂料,主要缺点是烘烤流挂。用于高级轿车、家电产品、船舶、钢结构件的装饰、防蚀涂装
	粉末涂料	是 100% 固体分涂料,安全、卫生,涂料利用率接近 100%,工艺易实现自动化,对工件边角覆盖力强。但装饰性、耐候性较差,薄膜化比较困难。广泛用于电器柜、家电、轻工产品、建筑门窗,在汽车部件上的应用日渐增多
热 浸 镀	浸 锌、浸 铝、浸 锌 铝 合金等	将金属制品浸入熔融金属中得到牢固的金属保护层,常用的工艺有浸铝、浸锌、浸锌铝合金、浸铝、浸锡及浸铅锡合金等。比电镀生产效率高、成本低,浸镀层厚,用于标准件、管道、钢丝、钢板及输电铁塔、矿井支架等防护

(续)

类 别		主要特点及用途
气 相 沉 积	物理气相 沉积(PVD)	用物理方法使镀膜材料,沉积在基体表面形成覆层,有蒸镀、离子镀和溅射镀三类。沉积温度低、工件畸变小、覆层致密,结合力较好,沉积金属、合金、陶瓷和聚合物膜
	化学气相 沉积(CVD)	用化学方法使气体在基体材料表面发生化学反应并形成覆层,有常压、低压、激光、金属有机化合物等类化学气相沉积,沉积温度高,工件畸变大,覆层结合力高,可沉积金属、合金、陶瓷和化合物等
	等离子体 化学气相沉 积(PCVD)	将等离子体引入化学气相沉积形成覆层,具有 PVD、CVD 的优点,沉积温度低、沉积速率快、绕度性好,结合力高,具有广泛的用途,用于超硬膜、金刚石、硬碳膜、立方氮化硼、光导纤维及半导体元件等的沉积。有直流、射频、脉冲与微波等沉积方法
防 锈 封 存 包 装	防锈水	使用方便、生产率高、成本低,但一般又适于结构复杂的大型制品,主要用于钢铁件工序间的短期防锈
	防锈油	防锈能力强,施工方便,不受制品尺寸限制,用厚油时,启封不方便。适用于机械工件的防锈、润滑及金属切削加工
	气相防锈 材料	简便、污染少,不受制品尺寸、结构限制,但启封后制品易失效,在密封较好的状态下使用才有好的防锈效果。适于室内防锈包装
	可剥性材 料	包装美观、防锈期长,启封方便,但不适于大型、结构复杂的制品,材料较贵。兼有防锈、缓冲包装作用。多用于保护精加工面和量具、刀具
	干燥空气 封存	是在密封的包装内,放置干燥剂,工艺简便,易于启封及检查,防锈期长。适用于多种金属的以及有机与无机的材料制品的封存、防霉
堆 焊 与 熔 结	堆焊	在金属零件表面或边缘熔敷上耐磨、耐蚀或特殊性能的金属层,修复外形不合格产品,提高寿命、降低成本,或用它制造双金属零件
	熔结	在材料或零件上熔敷金属涂层,有真空熔敷、激光熔敷和喷熔涂敷等,涂敷的金属是熔点低于基体材料的自熔性合金及有色金属等
其 他 涂 层	搪瓷涂敷	主要施于钢板、铸铁或铝制品表面的玻璃涂层,可起良好的防护和装饰作用,有浸涂、淋涂、喷涂、静电喷涂等,主要用于化工反应器,日用、五金制品等防锈、装饰
	陶瓷涂敷	是以氧化物、碳化物、硅化物、硼化物、氮化物、金属陶瓷和其他无机物等基底的高温涂层,有刷涂、浸涂、喷涂、电泳涂和各种热喷涂等,有耐蚀,耐磨性能,有的还有光、电、生物等功能
	溶胶—凝 胶膜	将溶胶用喷涂或浸渍等方法涂于基材上,经反应形成凝胶,经干燥或烧结等处理,制成所需要薄膜层,性能好,可剪裁,适于制备多功能或大面积薄膜层,如超导薄膜、高效吸波材料、磁性薄膜等,但成本较高
	粘涂	将胶粘剂(在胶粘剂中加入填料如二硫化钼、金属粉末,陶瓷粉末和纤维等)直接涂敷于制品表面形成的涂层,工艺简便,无热影响和变形、快速价廉,用于制品表面磨损、划伤、腐蚀的修复、密封与堵漏及铸件气孔、缩孔的修补等
	达克罗涂 层	由细小片状锌、片状铝、铬酸盐、水和有机溶剂构成涂料,经涂敷和 300°C 左右加热保温,除去水和有机溶剂后形成涂层,涂层薄,防蚀性优良,耐热性好,无氢脆、无环境污染,应用日益广泛

1.2.3 表面改性技术

表面改性是改善工件表面层的机械、物理或化学性能的处理方法。目前大致包括以下几

类：喷丸强化、表面热处理、化学热处理、高能束表面改性、离子注入表面改性等，其主要工艺方法、特点及用途见表 1-2。

表 1-2 表面改性主要工艺方法、特点及用途

分 类	主要特点及用途
喷丸强化	它是在受喷材料的再结晶温度下进行的一种冷加工方法,加工过程由弹丸(钢丸、铸铁丸、玻璃丸、硬质合金丸)以高速度撞击工件表面,使工件表面达到预期的形貌、组织结构和残留压应力,从而大幅度提高其疲劳强度和抗应力腐蚀能力
表面热处理	仅对工件表层进行热处理以改变其组织和性能的工艺。主要方法有感应加热淬火、接触电阻加热淬火、脉冲加热淬火、火焰淬火等
化学热处理	在钢铁及合金表层渗入一种或多种元素,形成固溶体及化合物层,结合强度高,不同渗层分别用于提高工件的耐蚀、抗高温氧化、耐磨减摩、抗疲劳强度等性能。主要方法有固体法、液体法、气体法、真空法及离子法等,应用广泛
高能束表面改性	利用激光、电子束或离子束辐照材料表面和涂层,使表层非晶化和形成相应成分的合金,提高表面耐蚀、耐磨及疲劳强度。射束能量高度集中、加热速度快、工件畸变小、表面晶粒细,但设备昂贵和维修费用较大

1.2.4 表面复合处理技术

这是综合运用两种或多种表面技术的复合，进一步提高材料及制品的表层性能。已开发的一些表面复合技术如热喷涂与涂装复合、等离子喷涂与激光辐照复合、电镀与电泳涂装复合、化学热处理与电镀复合、化学热处理与气相沉积复合、表面强化与固体润滑层复合、多层薄膜技术的复合及隔热涂层、防火涂层与抗烧蚀涂层复合等，其种类繁多，应用效果很好，起到“1+1>2”的协同效果。

1.3 表面工程技术的发展趋势

1. 表面工程新工艺新技术向高效、节能、低污染和经济的方向发展

高性能合金电镀、复合镀层、组合镀层、高速电镀与优质多元化学镀镍基合金及相应的新型添加剂得到不断地开发与应用。高速燃气喷涂（HVOF）、激光喷涂、爆炸喷涂新工艺用于喷涂陶瓷、难熔金属及碳化合、复合材料等，不仅效率高，涂层致密，性能也好，特别适合于航天、原子能尖端技术领域。等离子体化学气相沉积（PCVD）、离子束辅助镀膜（IAC）技术制备高性能系列超硬化合物和多种功能薄膜。双层辉光离子渗金属，真空与离子及低温化学热处理，稀土元素在表面合金化中的应用，提高性能与效率和节约能源明显。各种装饰性彩色氧化膜发展很快，微弧氧化技术有广泛的应用前景。优质、低污染水性涂料、粉末涂料、无溶剂及高固体分涂料发展极为迅速，第五代阴极电泳自溶涂料（ED5）、高装饰性闪光涂料和气相固化涂料亦已开发应用，更清洁、低污染的涂料涂装已成为重要的发展方向。不断开发了新型防锈润滑抗氧化多功能通用油脂，各种加工中心微孔型冷却防锈液，长寿命切削防锈液及超薄型装饰防锈封存材料。其他如冷粘涂层技术及溶胶—凝胶覆层新材料等，均是研究发展的热点。

2. 表面工程的表面复合技术应用日益广泛

表面复合技术充分发挥各种工艺和材料最佳协同效应，获得可靠性、寿命、质量、经济

性等最佳效果,可适应更广泛的需要。电镀—电泳涂装复合技术,可大大提高制品耐蚀与装饰性能。热喷涂与涂装复合工艺,可使产品抗大气腐蚀寿命达 20 年以上。离子注入与气相沉积复合,可大幅度提高航天航空轴承、精密零件、工模具寿命。热喷涂与激光重熔复合,可改变原喷涂层表面的组成、结构和性能,提高表面抗疲劳、耐磨损和耐腐蚀等使用性能。其他如激光硬化与气相沉积复合、表面强化与固体润滑层的复合亦取得显著效果。电镀与渗扩复合、多层薄膜技术复合等一系列具有发展前景的表面复合技术的应用日益广泛。

3. 智能化、自动化在表面工程领域中的应用发展迅速

在表面工程各专业领域中运用计算机控制实施生产过程自动化的技术已获得普遍应用。人工智能技术已应用于涂装生产线、涂装机械手、水溶性静电涂装及涂装计算配色系统等方面。智能热喷涂、喷焊设备也已问世,用于复杂形状工件的喷涂、喷焊,其过程可自动化跟踪、精确控制工艺参数,提高了涂层质量。可以预见,随着计算机性能提高,智能化这一前沿学科将会在 21 世纪的表面工程领域产生深刻的影响。

4. 高能射束在表面工程中应用前景广阔

近 30 年来,利用激光束、电子束、离子束进行材料及其制品表面改性与合金化,如激光熔融扩渗及合金化、激光喷涂、激光电镀、激光“上釉”、激光化学反应涂层,电子束表面合金化及离子注入改性等,有了迅速发展。无论钢、铸铁或硬质合金,经高能射束改性处理都能使其寿命提高,有的提高 3~5 倍以上,节约大量昂贵材料与能源,足以和许多传统的表面处理方法相竞争,预计今后 10 年,该技术将会在生产中较普遍推广和使用。

5. 纳米表面工程技术已成为新的发展方向

纳米表面工程,是指纳米材料和纳米技术有机地与传统表面工程的结合与应用。由于纳米材料具有独特的结构和优异的性能,引入表面工程技术可以使零件表面的服役性能大大提高。如用等离子喷涂方法获得了纳米结构的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 涂层,该涂层致密度达 95~98%,结合强度比传统喷涂粉末涂层提高 2~3 倍,耐磨性提高 3 倍。

纳米颗粒复合电刷镀、纳米热喷涂、纳米涂装、纳米固体润滑、纳米胶粘剂等技术已进入实用阶段,具有广阔的研究空间。在未来的 5~10 年内,纳米表面工程就可能取得跨越式发展。

6. 表面工程设计趋于科学化

机械产品的设计,已从单纯的强度设计发展到材料强度、磨损与腐蚀三大因素综合设计。在解决产品失效的途径时,不仅从分析失效原因、改善工况条件与结构设计、合理选材与改进加工工艺方面,还应正确选择与实施表面工程技术,由整个系统工程综合考虑。

过去,在进行表面工程工艺过程的设计时,往往主要根据经验方法,限制了表面工程最大效益的发挥,今后,建立模拟表面工程过程数学模型,预测表面的服役行为和失效机理、质量控制和过程优化,是现代表面工程技术发展的热点。

参 考 文 献

- [1] 全国科学技术名词审定委员会公布. 机械工程名词(二)[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] 酆振声, 叶扬祥, 等. 机械工程手册: 第 7 卷 机械制造工艺及设备(一)第 8 篇: 材料保护[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [3] 酆振声. 表面工程技术及其发展[C]//全面第三届表面工程大会论文集, 1996.