

现代表面技术

XIANDAI BIAOMIAN JISHU

第2版

钱苗根◎编著

- ★ 第1版发行了3万多册
- ★ 内容全面、系统、实用
- ★ 结构科学、合理、严谨



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

现代表面技术

第2版

钱苗根 编著



机械工业出版社

本书阐述了现代表面技术的含义、内容、应用和发展,介绍了固体表面和覆盖层的结构以及固体表面的性能,系统分析了各类表面技术的特点、适用范围、技术路线、典型设备、工艺措施和应用实例,论述了表面技术设计和表面测试分析的内容。本书主要内容包括:表面技术概论,固体表面和覆盖层的结构,固体表面的性能,电镀、电刷镀和化学镀,金属表面的化学处理,表面涂覆技术,气相沉积技术,表面改性技术,复合表面技术,表面加工制造,表面技术设计,表面测试分析。

本书可供高等院校材料科学、材料工程、材料物理、材料化学等相关专业在校师生使用,也可供从事产品设计、工艺制订、技术改造、设备维修、质量和技术管理的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代表面技术/钱苗根编著. —2版. —北京:
机械工业出版社, 2016.6
ISBN 978-7-111-53677-2

I. ①现… II. ①钱… III. ①金属表面处理 IV. ①TG17

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第095668号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:陈保华 责任编辑:陈保华

版式设计:霍永明 责任校对:李锦莉 刘秀丽

封面设计:马精明 责任印制:常天培

北京京丰印刷厂印刷

2016年7月第2版·第1次印刷

184mm×260mm·32.5印张·807千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-53677-2

定价:69.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88361066

读者购书热线:010-68326294

010-88379203

策划编辑:010-88379734

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

教育服务网:www.cmpedu.com

第2版前言

表面技术是一门正在迅速发展的综合性边缘学科，也是一门具有很高使用价值的基础技术。表面技术涉及面十分宽广，各种领域和各行各业都可找到其重要而广泛的应用。表面技术在现代制造、汽车、航空、航天、舰船、海洋、电子、电器、生物、医学、能源、建筑、材料、军事以至人类的日常生活等领域中有着很好的发展和应用前景。

《现代表面技术》自2002年出版以来，已印刷16次，发行了3万多册，深受读者欢迎，有很多学校选作了教材。考虑到该书已出版十多年，这期间表面技术有了较大的发展，很多技术标准进行了修订，所以机械工业出版社委托我对《现代表面技术》进行修订，出版第2版。

经过一年的努力，我完成了修订工作。本书特点和有关说明如下：

1) 根据近十多年来表面技术的发展情况，对第1版的内容进行了增补，而对陈旧、过时的内容予以删除。

2) 表面技术涉及的领域很广，知识面很宽，修订时对各类表面技术做了简明扼要的阐述，而对一些重点和难点进行了较为详细的分析。

3) 基础理论对表面技术的发展十分重要，而表面技术又是一门应用性很强的学科。因此，本书在修订时加强了理论与实际的紧密联系。

4) 本书修订时，增加了不少理论与实际结合的应用实例，鼓励读者自学，勤于思考，丰富想象，激发兴趣，勇于创新。

本书可供高等院校材料科学、材料工程、材料物理、材料化学等相关专业在校师生使用，也可供从事产品设计、工艺制订、技术改造、设备维修、质量和技术管理的工程技术人员参考。

本书修订时，征求了有关教师、学生以及科技人员的意见和建议，并参阅和引录了不少文献资料，同时又得到莫庆华女士和莫强强先生的大力帮助，在此一并表示衷心的感谢。

由于条件和水平有限，本书肯定有不妥之处，希望读者提出宝贵意见。

钱苗根

第1版前言

表面现象和过程在自然界是普遍存在的。广义地说，表面技术是直接与各各种表面现象或过程有关的，能为人类造福或被人们利用的技术。它是一个非常宽广的科学技术领域。

多年来，人们对传统表面技术进行了一系列改进、复合和创新，使大量的现代表面技术涌现出来，在各个工业部门以及农业、生物、医药工程乃至人们日常生活中有着广泛而重要的应用。表面技术为国际性的关键技术之一，是新材料、光电子、微电子等许多先进产业的基础技术。大量表面技术属于高技术范畴，在今后知识经济社会发展过程中将占有重要的地位。

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。

人们使用表面技术已有几千年的历史。但是，表面技术的迅速发展是从19世纪工业革命开始的，最近30多年则发展得更为迅速。一方面人们在广泛使用和不断试验摸索过程中积累了丰富的经验，另一方面20世纪60年代末形成的表面科学给予了有力的促进，从而使表面技术进入了一个新的发展时期。

表面技术的种类繁多，过去是分散在各个技术领域，它们的发展一般是分别进行的。现在，表面技术开始有了坚实的理论基础，人们将各类表面技术相互联系起来，探讨共性，然后从更高的角度来指导各类表面技术的发展。

大力加强表面技术这门新学科的建设，是教育改革、科技发展和经济建设的客观需要。为此，我们拟对本科生、硕士生、博士生三个层次，分别开设《现代表面技术》《表面工程学》和《表面科学与技术》三门课程。本书是在我们编写《表面技术概论》讲义的基础上，经过一定的教学实践，征求专家和学生们的宝贵意见而重新编写的。本书是上述三门课程的基本教材，可供各大专院校有关专业师生使用，同时也可供各个工业部门以及农业、生物、医药工程等领域中管理、研究、设计、制造方面人员阅读。

本书共分10章，其中第一、二、七、九、十章以及第五章的一、二、六、七、八、九、十节由钱苗根执笔；第六、八章以及第五章的三、四、五节由姚寿山执笔，第三、四章由张少宗执笔编写。

在本书编写过程中，编者参阅和引录了许多文献资料，一些主要的文献资料列在各章末的“参考文献”中。姜祥祺、吴以南、薄鑫涛等教授、专家对本书的有关章节作了认真和细致的审校，提出了许多宝贵的意见。上海交通大学现代表面技术实验室的同事们也给予了许多具体的帮助。在此，我们谨向他们表示衷心的感谢。

由于我们学识水平所限，本书必然会存在不少问题，殷切希望专家和读者批评指

正。“现代表面技术”是新开设的一门课程,我们根据我校的实际情况编写了该课程的教学大纲,本书将其作为附录放在书末,供兄弟院校参考。

钱苗根

目 录

第2版前言

第1版前言

第1章 表面技术概论 1

- 1.1 表面技术的含义 1
- 1.2 表面技术的内容 3
- 1.3 表面技术的应用 8
- 1.4 表面技术的发展 17
 - 1.4.1 表面技术发展方向 17
 - 1.4.2 表面技术发展前景 18

第2章 固体表面和覆盖层的结构 20

- 2.1 固体材料和表面界面 20
 - 2.1.1 固体材料 20
 - 2.1.2 表面界面 21
 - 2.1.3 不饱和键 23
- 2.2 固—气表面的结构 23
 - 2.2.1 理想表面 23
 - 2.2.2 清洁表面 24
 - 2.2.3 实际表面 25
- 2.3 表面特征力学和势场 32
 - 2.3.1 表面吸附力 32
 - 2.3.2 表面张力与表面能 34
 - 2.3.3 表面振动与表面扩散 35
- 2.4 表面覆盖层的结构 40
 - 2.4.1 电镀层的结构 41
 - 2.4.2 薄膜的结构 43

第3章 固体表面的性能 47

- 3.1 固体表面的力学性能 47
 - 3.1.1 附着力 47
 - 3.1.2 表面应力 49
 - 3.1.3 表面硬度 50
 - 3.1.4 表面韧性与脆性 53
 - 3.1.5 表面耐磨性能 55
 - 3.1.6 表面抗疲劳性能 63
- 3.2 固体表面的化学性能 65
 - 3.2.1 表面耐化学腐蚀性 65
 - 3.2.2 表面耐电化学腐蚀性能 68
 - 3.2.3 非金属材料的耐蚀性 83

3.2.4 表面选择过滤与分离性能 88

3.2.5 表面防污与防沾污性能 96

3.2.6 表面自洁与杀菌性能 97

3.3 固体表面的物理性能 99

3.3.1 表面技术中的材料热学性能 100

3.3.2 表面技术中的材料电学性能 107

3.3.3 表面技术中的材料磁学性能 114

3.3.4 表面技术中的材料光学性能 121

3.3.5 表面技术中的材料声学性能 131

3.3.6 表面技术中的材料功能转换 135

第4章 电镀、电刷镀和化学镀 142

4.1 电镀的基本知识和原理 142

4.1.1 电镀的范畴和分类 142

4.1.2 电镀的基本过程和构成 143

4.1.3 电镀液 144

4.1.4 电镀反应 145

4.1.5 电极反应机理 147

4.1.6 金属的电沉积过程 148

4.1.7 影响电镀质量的因素 150

4.2 电镀预处理 151

4.2.1 预处理的目的是重要性 151

4.2.2 预处理方法 151

4.2.3 金属的抛光 152

4.3 单金属电镀和合金电镀 154

4.3.1 单金属电镀 154

4.3.2 合金电镀 156

4.4 电刷镀 160

4.4.1 电刷镀的基本原理和特点 160

4.4.2 电刷镀设备 160

4.4.3 电刷镀溶液 162

4.4.4 电刷镀工艺 164

4.4.5 电刷镀的应用 165

4.5 化学镀 166

4.5.1 化学镀的分类和特点 166

4.5.2 化学镀镍 167

4.5.3 化学镀铜 169

第5章 金属表面的化学处理 172

5.1 化学转化膜	172	6.5.2 电火花涂覆工艺及应用	231
5.1.1 化学转化膜的形成过程和 基本方式	172	6.5.3 电火花涂覆层的特性	232
5.1.2 化学转化膜的分类和用途	172	6.6 堆焊与熔结	234
5.2 氧化处理	173	6.6.1 堆焊	234
5.2.1 钢铁的化学氧化	173	6.6.2 熔结	240
5.2.2 有色金属的化学氧化	177	6.7 热浸镀	242
5.3 铝及铝合金的阳极氧化	178	6.7.1 热浸镀层的种类	242
5.3.1 阳极氧化膜的性质和用途	178	6.7.2 热浸镀工艺	243
5.3.2 阳极氧化膜的形成机理	179	6.7.3 热浸镀锌	243
5.3.3 铝及铝合金的阳极氧化工艺	180	6.7.4 热浸镀铝	246
5.3.4 阳极氧化膜的着色和封闭	182	6.8 搪瓷涂覆	247
5.4 微弧氧化	185	6.8.1 瓷釉的基本成分和釉浆	247
5.4.1 微弧氧化技术的由来与发展	185	6.8.2 搪瓷的金属基材及表面清洁 处理	249
5.4.2 微弧氧化设备与工艺	186	6.8.3 釉浆的涂覆和搪瓷烧成	249
5.4.3 影响微弧氧化质量的因素	187	6.8.4 搪瓷制品的分类和应用	250
5.4.4 微弧氧化陶瓷质氧化物膜的 结构和性能	189	6.9 塑料涂覆	250
5.4.5 微弧氧化陶瓷质氧化物膜的 应用	190	6.9.1 塑料粉末涂料	250
5.5 磷化处理	190	6.9.2 塑料粉末涂覆方法	251
5.5.1 钢铁的磷化处理	190	6.10 无机涂料与纳米复合涂料	252
5.5.2 有色金属的磷化处理	194	6.10.1 无机涂料	253
5.6 铬酸盐处理	194	6.10.2 纳米复合涂料	259
5.6.1 铬酸盐膜的形成过程	194	6.11 陶瓷涂层	265
5.6.2 铬酸盐膜的组成和结构	195	6.11.1 陶瓷涂层的分类和选用	266
5.6.3 铬酸盐处理工艺	195	6.11.2 陶瓷涂层的工艺及其特点	267
第6章 表面涂覆技术	198	6.11.3 几种典型的陶瓷涂层	268
6.1 涂料与涂装	198	6.12 达克罗涂覆技术	270
6.1.1 涂料	198	6.12.1 达克罗涂覆技术的由来与 发展	271
6.1.2 涂装	204	6.12.2 达克罗涂层的结构与耐蚀 机理	272
6.2 溶胶-凝胶技术	206	6.12.3 达克罗涂覆工艺流程	272
6.2.1 溶胶-凝胶法简介	206	6.12.4 达克罗涂覆技术的优点与 不足	274
6.2.2 溶胶-凝胶法薄膜或涂层	209	6.12.5 达克罗涂覆技术的应用	275
6.3 黏结与黏涂	212	第7章 气相沉积技术	277
6.3.1 黏结技术	212	7.1 气相沉积与薄膜	277
6.3.2 黏涂技术	216	7.1.1 薄膜的定义与特征	277
6.4 热喷涂与冷喷涂	218	7.1.2 薄膜的形成过程与研究方法	278
6.4.1 热喷涂	218	7.1.3 薄膜的种类和应用	279
6.4.2 冷喷涂	228	7.1.4 薄膜制备方法和气相沉积法 分类	280
6.5 电火花表面涂覆	229	7.2 真空技术基础	281
6.5.1 电火花表面涂覆的原理和 特点	229		

7.2.1 真空度和真空区域的划分	281	9.1.1 电化学技术与物理气相沉积的复合	403
7.2.2 真空的特点和应用	281	9.1.2 电化学技术与表面热扩散处理的复合	406
7.2.3 真空中的气体分子特性	281	9.2 真空镀膜与某些表面技术的复合	406
7.2.4 真空的获得	283	9.2.1 真空镀膜与涂装技术的复合	406
7.2.5 真空泵型号和真空机组	284	9.2.2 真空镀膜与离子束技术的复合	411
7.2.6 真空测量和检漏	285	9.3 表面镀(涂)覆与纳米技术的复合	417
7.3 物理气相沉积	290	9.3.1 复合电镀、复合电刷镀和复合化学镀	417
7.3.1 真空蒸镀	290	9.3.2 纳米黏结、黏涂和纳米热喷涂	423
7.3.2 溅射镀膜	298	9.4 表面热处理与某些表面技术的复合	425
7.3.3 离子镀	308	9.4.1 复合表面热处理	425
7.3.4 离子束沉积	318	9.4.2 表面热处理与表面形变强化处理的复合	426
7.3.5 分子束外延	320	9.5 高能束表面处理与某些表面技术的复合	426
7.4 化学气相沉积	321	9.5.1 激光表面合金化、陶瓷化和增强电镀	427
7.4.1 化学气相沉积的反应方式与条件	321	9.5.2 激光束表面处理与等离子喷涂的复合	428
7.4.2 化学气相沉积的方法与分类	322	9.6 纳米晶粒薄膜和纳米多层薄膜	429
7.4.3 几类化学气相沉积简介	324	9.6.1 纳米薄膜概述	429
7.4.4 化学气相沉积的特点与应用	329	9.6.2 纳米晶复合薄膜	430
第8章 表面改性技术	334	9.6.3 纳米多层膜	433
8.1 金属材料表面改性	334	第10章 表面加工制造	437
8.1.1 金属表面形变强化	334	10.1 表面加工技术简介	437
8.1.2 金属表面热处理	340	10.1.1 超声波加工	437
8.1.3 金属表面化学热处理	348	10.1.2 磨料加工	438
8.1.4 等离子体表面处理	360	10.1.3 化学加工	441
8.1.5 激光表面处理	363	10.1.4 电化学加工	442
8.1.6 电子束表面处理	372	10.1.5 电火花加工	445
8.1.7 高密度太阳能表面处理	374	10.1.6 电子束加工	446
8.1.8 离子注入表面改性	376	10.1.7 离子束加工	448
8.2 无机非金属材料表面改性	385	10.1.8 激光束加工	449
8.2.1 玻璃的表面改性	385	10.1.9 等离子体加工	451
8.2.2 传统陶瓷的表面改性	390	10.1.10 光刻加工	452
8.2.3 先进陶瓷的表面改性	391	10.1.11 LIGA 加工	459
8.2.4 生物无机非金属材料表面改性	394	10.1.12 机械微细加工	461
8.3 高分子材料表面改性	396	10.2 微电子工业和微机电系统的	
8.3.1 偶联剂处理	396		
8.3.2 化学改性	397		
8.3.3 辐射处理	399		
8.3.4 等离子体改性	400		
8.3.5 酶化学表面改性	401		
第9章 复合表面技术	403		
9.1 电化学技术与某些表面技术的复合	403		

微细加工	462	简介	484
10.2.1 微电子工业的微细加工	462	12.2.1 电子显微镜	485
10.2.2 微机电系统的微细加工	466	12.2.2 场离子显微镜	486
第 11 章 表面技术设计	468	12.2.3 扫描隧道显微镜	487
11.1 表面技术设计的要素与特点	468	12.2.4 原子力显微镜	488
11.1.1 表面技术设计的要素	468	12.2.5 X 射线衍射	490
11.1.2 表面技术设计的特征	469	12.2.6 电子衍射	490
11.2 表面技术设计的类型与方法	470	12.2.7 X 射线光谱仪和电子探针	492
11.2.1 表面技术设计的类型	470	12.2.8 质谱仪和离子探针	494
11.2.2 表面技术设计的方法	470	12.2.9 激光探针	494
第 12 章 表面测试分析	478	12.2.10 电子能谱仪	495
12.1 表面分析的类别、特点和功能	478	12.2.11 弹道电子发射显微镜	499
12.1.1 表面分析用主要仪器	478	12.2.12 扫描近场光学显微镜和光子 扫描隧道显微镜	500
12.1.2 依据结构层次的表面分析 类别	482	12.2.13 红外光谱和拉曼光谱	502
12.2 常用表面分析仪器和测试技术		参考文献	507

第1章 表面技术概论

人们使用表面技术已有悠久的历史。我国早在战国时代已进行钢的淬火，使钢的表面获得坚硬层。欧洲使用类似的技术也有很长的历史。但是，表面技术的迅速发展是从19世纪工业革命开始的，尤其是最近50多年发展更为迅速。一方面人们在广泛使用和不断试验的过程中积累了丰富的经验；另一方面自20世纪60年代末形成的表面科学使表面技术进入了一个新的发展时期。

表面技术是一门正在迅速发展的综合性边缘学科。它是根据人们的需要，运用各种物理、化学、生物的方法，使材料、零部件、构件以及元器件等表面，具有所要求的成分、结构和性能。表面技术的应用有耐蚀、耐磨、修复、强化、装饰等，也有光、电、磁、声、热、化学、生物和特殊机械功能方面的应用。表面技术所涉及的基体材料，不仅是金属材料，也包括无机非金属材料、有机高分子材料以及复合材料的各种固体材料。表面技术在知识经济发展过程中，与新能源、新材料、计算机、信息技术、先进制造、生命科学等一样，具有十分重要的作用。今后表面技术仍将快速发展，努力满足人们日益增加的需求，并且更加重视节能、节材和环境保护的研究，促使绿色的表面技术广泛应用。

本章首先阐述表面技术的含义，接着介绍表面技术所包含的组成部分和内容，以及表面技术的应用，最后着重讨论表面技术的发展方向和前景。

1.1 表面技术的含义

1. 使用表面技术的目的

现在表面技术的应用已经十分广泛。对于固体材料来说，使用表面技术的主要目的是：

- 1) 提高材料抵御环境作用能力。
- 2) 赋予材料表面某种功能特性，包括光、电、磁、热、声、吸附、分离等各种物理和化学性能。
- 3) 实施特定的表面加工来制造构件、零部件和元器件等。

表面技术主要通过以下两条途径来提高材料抵御环境作用能力和赋予材料表面某种功能特性。

1) 施加各种覆盖层。主要采用各种涂层技术，包括电镀、电刷镀、化学镀、涂装、黏结、堆焊、熔结、热喷涂、塑料粉末涂覆、热浸涂、搪瓷涂覆、陶瓷涂覆、溶胶-凝胶涂层技术、真空蒸镀、溅射镀、离子镀、化学气相沉积、分子束外延制膜、离子束合成薄膜技术等。此外，还有其他形式的覆盖层，例如各种金属经氧化和磷化处理后的膜层、包箔、贴片的整体覆盖层、缓蚀剂的暂时覆盖层等。

2) 用机械、物理、化学等方法，改变材料表面的形貌、化学成分、相组成、微观结构、缺陷状态或应力状态，即采用各种表面改性技术。主要有喷丸强化、表面热处理、化学热处理、等离子扩渗处理、激光表面处理、电子束表面处理、高密度太阳能表面处理、离子

注入表面改性等。

表面技术的使用,除了上述目的外,还有通过各种表面加工技术来制造机械零部件或电子元器件。表面加工有超声波加工、磨料加工、化学加工、电化学加工、电子束加工、离子束加工、激光束加工、等离子体加工、光刻加工、机械微细加工,以及微电子工业和微机电系统的微细加工等。目前,高新技术不断涌现,大量先进、高端产品对表面加工技术和精细化的要求越来越高。

2. 与表面现象有关的一些表面技术

由于自然界存在的表面现象或过程随处可见,因而与其直接有关的重要表面技术还有许多,现举例如下:

(1) 表面湿润和反湿润技术 湿润是一种重要的表面现象,人们有时要求液体在固体表面上有高度润湿性,而有的却要求有不湿润性,这就需要人们在各种条件下采用表面湿润和反湿润技术。例如洗涤,即除去粘在固体基质表面上的污垢,虽然固体基质和污垢是各种各样的,但能否洗净的基本条件是:洗涤液能湿润且直接附着在基质的污垢上,继而浸入污垢—基质界面,削弱两者之间的附着力,使污垢完全脱离基质形成胶粒而飘浮在洗涤液介质中。又如矿物浮选是借气泡力来浮起矿石的一种物质分离和选别矿物技术,所使用的浮选剂是由捕集剂、起泡剂、pH 调节剂、抑制剂和活化剂等配制的,而其中主要成分捕集剂的加入,是使浮游矿石的表面变成疏水性,从而能黏附于气泡上或由疏水性低密度介质湿润而浮起。

(2) 表面催化技术 早在 18 世纪末科学家就已发现固体表面不仅能吸附某些物质,而且有的可使它们在表面上的化学反应速度大大加快。现在表面催化技术已经有了很大的发展,在工业上获得广泛而重要的应用。例如铁催化剂等用于合成氨工业,不仅实现从空气中固定氮而廉价地制得氨,并且建立了能耗低、自动化程度高和综合利用好的完整工业流程体系。催化是催化剂在化学反应过程中所起的作用和发生的有关现象的总称。催化剂指能够提高反应速率,加快到达化学平衡而本身在反应终了时并不消耗的物质。催化有均相和多相两种。前者是催化剂和反应物处于同一物相,而后者是催化剂和反应物处于不同物相。多相催化在化学工业中占有十分重要的地位。它是一种表面过程,例如在固—气体系中催化反应的主要步骤是:反应物在表面上化学吸附;吸附分子经表面扩散相遇;表面反应或键重排;反应产物脱附。微观研究表明,催化剂表面不同位置有不同的激活能,台阶、扭折或杂质、缺陷所在处构成活性中心,这说明表面状态对催化作用有显著影响。

(3) 膜技术 这里所说的膜是指选择渗透物质的二维材料。实际上生物体有许多这种膜,例如细胞膜、基膜、覆膜和皮肤等,起着渗透、分离物质、保护机体和参与生命过程的作用。膜是把两个物相空间隔开而又使两者互相关联,发生质量和能量传输过程的一个中间介质相。膜在结构上可以是多孔或是致密的。膜两边的物质粒子由于尺寸大小、扩散系数或溶解度的差异等,在一定的压力差、浓度差、电位差或化学位差的驱动下发生传质过程。由于传质速率的不同,造成选择渗透,因而使混合物分离。根据这样的原理,人们已能模拟生物膜的某些功能而人工合成医用膜,医用膜通常由医用高分子制成。目前生物技术的发展已促使膜在分子水平上合成。实际上膜技术涉及的领域是广阔的,不仅在生物、医学方面,而且在化工、石油、冶金、轻工、食品等许多领域都有重要应用。膜材料也不限于高分子材料,有些无机膜,特别是陶瓷膜和陶瓷基复合膜,具有热稳定性、化学稳定性好,强度高。

结构造型稳定及便于清洗、高压反冲等优点,在化工、冶金等部门中很有发展前途。

(4) 表面化学技术 这种表面技术涉及面很广,尤其是涉及固—液界面的许多电现象或过程,如电解、电镀、电化学反应、腐蚀和防腐等,它们已为大家所熟悉。实际上还有一些极其重要的表面电化学技术,例如与许多生物现象有关的细胞膜电势和生物电流。研究发现,细胞膜内外电化学位不等于零。如果生物体系建立了完全的热力学平衡,那么就意味着死亡。进一步研究表明,细胞电势是由膜界面区形成双电层而产生的,并且可将细胞的代谢过程描绘成一个基本的生物燃料电池。脑中有脑电波,它有各种不同的形状,表示脑随思考、情绪与睡眠等变化所处的各种状态。这类表面电化学过程的基本机理已应用于针灸、电脉冲针灸、心电图测量及起搏器等。

由此可见,表面技术具有非常广泛的含义。广义地说,表面技术是直接与各表面现象或过程有关的,能为人类造福或被人们利用的技术。

本书着重讨论表面覆盖、表面改性和表面加工等表面技术,另一些重要的表面技术如表面湿润、表面催化、膜技术等或因限于篇幅而未能包括在内或仅在有关章节做了简略介绍。

1.2 表面技术的内容

表面技术可以从不同的角度进行归纳、分类。例如按照作用原理,表面技术可以分为以下四种基本类型:

- 1) 原子沉积。沉积物以原子、离子、分子和粒子集团等原子尺度的粒子形态在材料表面上形成覆盖层,如电镀、化学镀、物理气相沉积、化学气相沉积等。
- 2) 颗粒沉积。沉积物以宏观尺度的颗粒形态在材料表面上形成覆盖层,如热喷涂、搪瓷涂覆等。
- 3) 整体覆盖。它是将涂覆材料于同一时间施加于材料表面,如包箔、贴片、热浸镀、涂刷、堆焊等。
- 4) 表面改性。用各种物理、化学等方法处理表面,使之组成、结构发生变化,从而改变性能,如表面处理、化学热处理、激光表面处理、电子束表面处理、离子注入等。

实际上,表面技术有着广泛的含义,综合来看,大致上可分为以下几个部分:

- 1) 表面技术的基础和应用理论。
- 2) 表面处理技术。它又包括表面覆盖技术、表面改性技术和复合表面处理技术三部分。
- 3) 表面加工技术。
- 4) 表面分析和测试技术。
- 5) 表面技术设计。

下面对各部分所包含的内容进行简略介绍。

1. 表面技术的基础和应用理论

现代表面技术的基础理论是表面科学,它包括表面分析技术、表面物理、表面化学三个分支。表面分析的基本方面有表面的原子排列结构、原子类型和电子能态结构等,是揭示表面现象的微观实质和各种动力学过程的必要手段。表面物理和表面化学分别是研究任何两相之间的界面上发生的物理和化学过程的科学。从理论体系来看,它们包括微观理论与宏观理

论：一方面在原子、分子水平上研究表面的组成，原子结构及输运现象、电子结构与运动及其对表面宏观性质的影响；另一方面在宏观尺度上，从能量的角度研究各种表面现象。实际上，这三个分支是不能截然分开的，而是相互依存和补充的。表面科学不仅有重要的基础研究意义，而且与许多技术科学密切相关，在应用上有非常重要的意义。

表面技术的应用理论，包括表面失效分析、摩擦与磨损理论、表面腐蚀与防护理论、表面结合与复合理论等，它们对表面技术的发展和應用有着直接的、重要的影响。

2. 表面覆盖技术

(1) 电镀 它是利用电解作用，即把具有导电性能的工件表面与电解质溶液接触，并作为阴极，通过外电流的作用，在工件表面沉积与基体牢固结合的镀覆层。该镀覆层主要是各种金属和合金。单金属镀层有锌、镉、铜、镍、铬、锡、银、金、钴、铁等数十种；合金镀层有锌-铜、镍-铁、锌-镍-铁等一百多种。电镀方式也有多种，有槽镀（如挂镀、吊镀）、滚镀、刷镀等。电镀在工业上使用广泛。

(2) 电刷镀 它是电镀的一种特殊方法，又称接触镀、选择镀、涂镀、无槽电镀等。其设备主要由电源、刷镀工具（镀笔）和辅助设备（泵、旋转设备等）组成，是在阳极表面裹上棉花或涤纶棉絮等吸水材料，使其吸饱镀液，然后在作为阴极的零件上往复运动，使镀层牢固沉积在工件表面上。它不需将整个工件浸入电镀溶液中，所以能完成许多槽镀不能完成或不容易完成的电镀工作。

(3) 化学镀 又称“不通电”镀，即在外无电流通过的情况下，利用还原剂将电解质溶液中的金属离子化学还原在呈活性催化的工件表面，沉积出与基体牢固结合的镀覆层。工件可以是金属，也可以是非金属。镀覆层主要是金属和合金，最常用的是镍和铜。

(4) 涂装 它是用一定的方法将涂料涂覆于工件表面而形成涂膜的全过程。涂料（或称漆）为有机混合物，一般由成膜物质、颜料、溶剂和助剂组成，可以涂装在各种金属、陶瓷、塑料、木材、水泥、玻璃等制品上。涂膜具有保护、装饰或特殊性能（如绝缘、防腐标志等），应用十分广泛。

(5) 黏结 它是用黏结剂将各种材料或制件连结成为一个牢固整体的方法，称为黏结或黏合。黏结剂有天然胶黏剂和合成胶黏剂，目前高分子合成胶黏剂已获得广泛的应用。

(6) 堆焊 它是在金属零件表面或边缘，熔焊上耐磨、耐蚀或特殊性能的金属层，修复外形不合格的金属零件及产品，提高使用寿命，降低生产成本，或者用它制造双金属零部件。

(7) 熔结 它与堆焊相似，也是在材料或工件表面熔覆金属涂层，但用的涂覆金属是一些以铁、镍、钴为基，含有强脱氧元素硼和硅而具有自熔性和熔点低于基体的自熔性合金，所用的工艺是真空熔覆、激光熔覆和喷熔涂覆等。

(8) 热喷涂 它是将金属、合金、金属陶瓷材料加热到熔融或部分熔融，以高的动能使其雾化成微粒并喷至工件表面，形成牢固的涂覆层。热喷涂的方法有多种，按热源可分为火焰喷涂、电弧喷涂、等离子喷涂（超音速喷涂）和爆炸喷涂等。经热喷涂的工件具有耐磨、耐热、耐蚀等功能。

(9) 塑料粉末涂覆 利用塑料具有耐蚀、绝缘、美观等特点，将各种添加了防老化剂、流平剂、增韧剂、固化剂、颜料、填料等的粉末塑料，通过一定的方法，牢固地涂覆在工件表面，主要起保护和装饰的作用。塑料粉末是依靠熔融或静电引力等方式附着在被涂工件表

面,然后依靠热熔融、流平、湿润和反应固化成膜。涂膜方法有喷涂、熔射、流化床浸渍、静电粉末喷涂、静电粉末云雾室、静电流化床浸渍、静电振荡法等。

(10) 电火花涂覆 这是一种直接利用电能的高密度能量对金属表面进行涂覆处理的工艺,即通过电极材料与金属零部件表面的火花放电作用,把作为火花放电电极的导电材料(如 WC、TiC)熔渗于表面层,从而形成含电极材料的合金化涂层,提高工件表层性能,而工件内部组织和性能不改变。

(11) 热浸镀 它是将工件浸在熔融的液态金属中,使工件表面发生一系列物理和化学反应,取出后表面形成金属镀层。工件金属的熔点必须高于镀层金属的熔点。常用的镀层金属有锡、锌、铝、铅等。热浸镀工艺包括表面预处理、热浸镀和后处理三部分。按表面预处理方法的不同,它可分为助镀剂法和保护气体还原法。热浸镀的主要目的是提高工件的防护能力,延长使用寿命。

(12) 搪瓷涂覆 搪瓷涂层是一种主要施于钢板、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。搪瓷涂料通常是精制玻璃料分散在水中的悬浮液,也可以是干粉状。涂覆方法有浸涂、淋涂、电沉积、喷涂、静电喷涂等。该涂层为无机物成分,并融结于基体,故与一般有机涂层不同。

(13) 陶瓷涂覆 陶瓷涂层是以氧化物、碳化物、硅化物、硼化物、氮化物、金属陶瓷和其他无机物为基底的高层涂层,用于金属表面主要在室温和高温起耐蚀、耐磨等作用。主要涂覆方法有刷涂、浸涂、喷涂、电泳涂和各种热喷涂等。有的陶瓷涂层有光、电、生物等功能。

(14) 溶胶-凝胶技术 它是一种先形成溶胶再转变成凝胶的过程。溶胶是固态胶体质点分散在液体介质中的体系,而凝胶则是由溶胶颗粒形成相互连接的、刚性的三维网状结构,分散介质填充在它的空隙中的体系。该过程主要有前驱体的水解、缩合、胶凝、老化、干燥和烧结等步骤。溶胶-凝胶法的优点是可制备高纯度、高均匀性的材料,降低反应温度,设备简单等,已成为高性能玻璃、陶瓷、涂层的重要制备方法之一。溶胶-凝胶技术用于涂层领域有着广阔的前景:可以制成具有各种功能的无机涂料,如耐热涂料、耐磨涂料、导电涂料、绝缘涂料、太阳能选择性吸收涂料、耐高温远红外反射涂料、耐热固体润滑涂料等;同时,还可获得有机-无机复合涂料,具有无机与有机两者优点的综合性能。

(15) 真空蒸镀 它是将工件放入真空室,并用一定方法加热镀膜材料,使其蒸发或升华,飞至工件表面凝聚成膜。工件材料可以是金属、半导体、绝缘体乃至塑料、纸张、织物等;而镀膜材料也很广泛,包括金属、合金、化合物、半导体和一些有机聚合物等。加热方式有电阻加热、高频感应加热、电子束加热、激光加热、电弧加热等。

(16) 溅射镀 它是将工件放入真空室,并用正离子轰击作为阴极的靶(镀膜材料),使靶材中的原子、分子逸出,飞至工件表面凝聚成膜。溅射粒子的动能约 10eV ,为热蒸发粒子的 100 倍。按入射离子来源不同,可分为直流溅射、射频溅射和离子束溅射。入射离子的能量还可用电磁场调节,常用值为 10eV 量级。溅射镀膜的致密性和结合强度较好,基片温度较低,但成本较高。

(17) 离子镀 它是将工件放入真空室,并利用气体放电原理将部分气体和蒸发源(镀膜材料)逸出的气相粒子电离,在离子轰击的同时,把蒸发物或其反应产物沉积在工件表面成膜。该技术是一种等离子体增强的物理气相沉积,镀膜致密,结合牢固,可在工件温度

低于 550℃ 时得到良好的镀层, 绕镀性也较好。常用的方法有阴极电弧离子镀、热电子增强电子束离子镀、空心阴极放电离子镀。

(18) 化学气相沉积 (CVD) 它是将工件放入密封室, 加热到一定温度, 同时通入反应气体, 利用室内气相化学反应在工件表面沉积成膜。源物质除气态外, 也可以是液态和固态。所采用的化学反应有多种类型, 如热分解、氢还原、金属还原、化学输运反应、等离子体激发反应、光激发反应等。工件加热方式有电阻加热、高频感应加热、红外线加热等。主要设备有气体发生、净化、混合、输运装置, 以及工件加热装置、反应室、排气装置。主要方法有热化学气相沉积、低压化学气相沉积、等离子体化学气相沉积、金属有机化合物气相沉积、激光诱导化学气相沉积等。

(19) 分子束外延 (MBE) 它虽是真空蒸镀的一种方法, 但在超高真空条件下, 精确控制蒸发源给出的中性分子束流强度按照原子层生长的方式在基片上外延成膜。主要设备有超高真空系统、蒸发源、监控系统和分析测试系统。

(20) 离子束合成薄膜技术 离子束合成薄膜有多种新技术, 目前主要有两种。

1) 离子束辅助沉积 (IBAD)。它是将离子注入与镀膜结合在一起, 即在镀膜的同时, 通过一定功率的大流强宽束离子源, 使具有一定能量的轰击 (注入) 离子不断地射到膜与基体的界面, 借助于级联碰撞导致界面原子混合, 在初始界面附近形成原子混合过渡区, 提高膜与基底间的结合力, 然后在原子混合区上, 再在离子束参与下继续外延生长出所要求厚度和特性的薄膜。

2) 离子簇束 (ICB)。离子簇束的产生有多种方法, 常用的是将固体加热形成过饱和和蒸气, 再经喷管喷出形成超声速气体喷流, 在绝热膨胀过程中由冷却至凝聚, 生成包含 $5 \times 10^2 \sim 2 \times 10^3$ 个原子的团粒。

(21) 化学转化膜 化学转化膜的实质是金属处在特定条件下人为控制的腐蚀产物, 即金属与特定的腐蚀液接触并在一定条件下发生化学反应, 形成能保护金属不易受水和其他腐蚀介质影响的膜层。它是由金属基底直接参与成膜反应而生成的, 因而膜与基底的结合力比电镀层要好得多。目前工业上常用的有铝和铝合金的阳极氧化、铝和铝合金的化学氧化、钢铁氧化处理、钢铁磷化处理、铜的化学氧化和电化学氧化、锌的铬酸盐钝化等。

(22) 热烫印 它是把各种金属箔在加热加压的条件下覆盖于工件表面。

(23) 暂时性覆盖处理 它是把缓蚀剂配制的缓蚀材料, 在工作需要防锈的情况下, 暂时性覆盖于表面。

3. 表面改性技术

(1) 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, 加工过程由弹丸在很高速度下撞击受喷工件表面而完成。喷丸可应用于表面清理、光整加工、喷丸校形、喷丸强化等。其中喷丸强化不同于一般的喷丸工艺, 它要求喷丸过程中严格控制工艺参数, 使工件在受喷后具有预期的表面形貌、表层组织结构和残余应力, 从而大幅度地提高疲劳强度和抗应力腐蚀能力。

(2) 表面热处理 它是指仅对工件表层进行热处理, 以改变其组织和性能的工艺。主要方法有感应淬火、火焰淬火、接触电阻加热淬火、电解液淬火、脉冲淬火、激光淬火和电子束淬火等。

(3) 化学热处理 它是将金属或合金工件置于一定温度的活性介质中保温, 使一种或

几种元素渗入它的表层,以改变其化学成分、组织和性能的热处理工艺。按渗入的元素可分为渗碳、渗氮、碳氮共渗、渗硼、渗金属等。渗入元素介质可以是固体、液体和气体,但都要经过介质中化学反应、外扩散、相界面化学反应(或表面反应)和工件中扩散四个过程,具体方法有许多种。

(4) 等离子扩渗处理(PDT) 又称离子轰击热处理,是指在通常大气压力下的特定气氛中利用工件(阴极)和阳极之间产生的辉光放电进行热处理的工艺。常见的有离子渗氮、离子渗碳、离子碳氮共渗等,尤以离子渗氮最普遍。等离子扩渗的优点是渗剂简单,无公害,渗层较深,脆性较小,工件变形小,对钢铁材料适用面广,工作周期短。

(5) 激光表面处理 它是主要利用激光的高亮度、高方向性和高单色性的三大特点,对材料表面进行各种处理,显著改善其组织结构和性能。设备一般由激光器、功率计、导光聚焦系统、工作台、数控系统、软件编程系统等构成。主要工艺方法有激光相变非晶化,激光熔覆、激光合金化、激光非晶化、激光冲击硬化。

(6) 电子束表面处理 通常由电子枪阴极灯丝加热后发射带负电的高能电子流,通过一个环状的阳极,经加速射向工件表面使其产生相变硬化、熔覆和合金化等作用,淬火后可获细晶组织等。

(7) 高密度太阳能表面处理 太阳能取之不尽,无公害,可用来进行表面处理。例如对钢铁零部件的太阳能表面淬火,是利用聚焦的高密度太阳能对工件表面进行局部加热,约在0.5s至几秒内使之达到相变温度以上,进行奥氏体化,然后急冷,使表面硬化。主要设备是太阳炉,由抛物面聚焦镜、镜座、机-电跟踪系统、工作台、对光器、温控系统和辐射测量仪等构成。

(8) 离子注入表面改性 它是将所需的气体或固体蒸气在真空系统中电离,引出离子束后,用数千电子伏至数十万电子伏加速直接注入材料,达一定深度,从而改变材料表面的成分和结构,达到改善性能之目的。其优点是注入元素不受材料固溶度限制,适用于各种材料,工艺和质量易控制,注入层与基体之间没有不连续界面。它的缺点是注入层不深,对复杂形状的工作注入有困难。

4. 复合表面技术

表面技术种类繁多,今后还会有一系列新技术涌现出来。表面技术的另一个重要趋向是综合运用两种或更多种表面技术的复合表面技术将获得迅速发展。随着材料使用要求的不断提高,单一的表面技术因有一定的局限性而往往不能满足需要。目前已开发出一些复合表面技术,如等离子喷涂与激光辐射复合、热喷涂与喷丸复合、化学热处理与电镀复合、激光淬火与化学热处理复合、化学热处理与气相沉积复合等。多年来,各种表面技术的优化组合已经取得了突出的效果,有了许多成功的范例,并且发现了一些重要的规律。通过深入研究,复合表面处理将发挥越来越大的作用。复合表面技术还有另一层含义,就是指用于制备高性能复合涂层(膜层)的现代表面技术,其既能保留原组成材料的主要特性,又通过复合效应获得原组分所不具备的优越性能。

5. 表面加工技术

表面加工技术也是表面技术的一个重要组成部分。例如对金属材料而言,表面加工技术有电铸、包覆、抛光、蚀刻等,它们在工业上获得了广泛的应用。

目前高新技术不断涌现,层出不穷,大量先进的产品对加工技术的要求越来越高,在精