

材料表面强化技术

孙希泰 等编著



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

材料表面强化技术/ 孙希泰等编著. —北京: 化学工业出版社, 2005. 2

ISBN 7-5025-6641-4

I. 材… II. 孙… III. 金属表面保护 IV. TG174

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 008023 号

材料表面强化技术

孙希泰 等编著

责任编辑: 丁尚林 陶艳玲

责任校对: 陈 静

封面设计: 潘 峰

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

[http:// www. cip. com. cn](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 787mm×1092mm 1/16 印张 26 字数 656 千字

2005 年 4 月第 1 版 2005 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6641-4 TB·114

定 价: 55.00 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

内 容 提 要

本书按表面强化层形成的物理化学过程对表面强化技术进行分类，形成了表面强化技术的系统化与科学体系。重点阐述了液-固转变、气-固转变、水溶液沉积、固态相变、固态扩渗、表面粉末冶金、表面形变强化、离子注入与冲击硬化、涂料与涂塑等九大类表面强化技术的基本原理、工艺技术与应用。

本书内容全面系统，技术新。除传统的工艺外，添加了许多新技术，一些不常见的工艺也成为了本书介绍的内容。对从事材料表面技术的工程技术人员及高等院校师生有较强的参考价值。

前言

表面工程是 20 世纪 80 年代中期刚刚出现的新学科，是在传统的表面硬化技术和腐蚀防护基础上，引入一些科学技术新成就，如气相沉积、离子注入、激光、电子束、等离子等技术，拓宽了表面工程的应用范围，使其成为表面硬化、表面防腐、机械修复、制造新材料、功能材料、复合材料以及表面装饰方面等不可缺少的工艺手段，广泛应用于机械制造、冶金、建筑、船舶、生活用品、航天、航空以及核工业等技术领域，逐渐形成独立的科学体系。

表面强化是决定强化层（膜）的成分、组织、结构的关键技术，是表面工程的核心内容。表面强化技术发展十分迅速，成果累累，令人眼花缭乱。它既包括传统的表面淬火、渗碳淬火、电镀、化学镀、涂料……等传统工艺，更多是新的工艺技术。一些基础学科的新成就，特别是三束进入表面强化技术之后，不仅出现了气相沉积、离子注入等表面强化新技术，而且也发展和充实了传统的表面强化技术。如离子轰击化学热处理、高能量密度加热表面淬火、激光电镀等，活跃了表面强化技术的研究与开发，应用面不断扩大，远远超出热处理与表面防护的范畴，形成自身的科学体系，急需将它统一起来。本书作者将表面强化技术定义为“增强材料表面强度、硬度、耐磨性、耐蚀性、物理性能以及美观等表面技术方法的总称”，它包括机械的、物理的、化学的以及物理化学的一系列表面强化处理方法，其中有使用多年，甚至千年以上的传统工艺，更多的是科学技术发展中的新技术，如激光、电子束、等离子等用于表面强化的新技术。用“增强”材料有关表面性能来概括“表面强化”，使它的含义既能包括传统的表面硬化技术、表面防护技术，也能包括表面改性技术、表面涂层技术等，将它们统一起来，形成一个整体。

目前，各类表面强化技术是由不同学科，不同专业的工艺技术发展而成的，各类人员的基础不同，研究方向差别很大，建立表面强化技术科学系统十分重要。本书作者曾承担编写过《材料耐磨、抗蚀及其表面技术概论》一书中表面强化技术部分，又以它为基础开过选修课。经验证明，按层形成的物理化学过程对表面强化技术进行分类，能将它们归纳在一起，找出其共性和特殊性，形成表面强化技术的系统化的科学体系。本书将表面强化技术分为九类，即：(1) 液-固转变；(2) 气-固转变；(3) 水溶液沉积；(4) 固态相变；(5) 固态扩渗；(6) 表面粉末冶金；(7) 表面形变强化；(8) 离子注入与冲击硬化；(9) 涂料与涂塑。前 8 类强化材料主要是金属，部分是陶瓷或金属加陶瓷，其中前 6 类都是相变过程，都要遵守结晶规律和相图，结晶受到抑制后形成非平衡的过渡相，甚至形成非晶态，这是它们的共性。但是它们又有各自的特殊性，液-固转变与固态相变，过冷度是相变动力；气-固转变、水溶液沉积，过饱和度为相变动力；固态扩渗需要浓度梯度；粉末冶金则靠压力产生的晶体缺陷促进热扩散。表面形变强化是用机械能增加晶体缺陷。离子注入是靠注入元素含量和增加晶体缺陷引起硬化。表面形变强化、离子注入与冲击硬化都是非平衡状态。涂料与涂塑是高分子材料，具有自身的固化规律，单列一类。不难看出，这样分类，不仅概括了所有的表面强化技术，找出其共性及内在联系，将其系统化，形成自身的科学系统，而且可以用材料

物理基础的理论指导各类表面强化技术研究与发展，研究其形成机制，提高层的组织、结构、性能等，可使研究目标明确，方法合理，互相促进，共同提高，以及它们的合理搭配和综合利用，促进表面工程的全面发展。可见，材料物理基础是表面强化技术的理论基础。

基于这种思路，本书除绪论外，将各类表面强化技术分别列为一章。其中熔融-凝固和水溶液沉积两章显得过多，打破常规比较多，将电火花强化、铸渗、搪瓷、上釉等与堆焊、热喷涂、热镀等都放在第2章；溶胶-凝胶成膜与电镀、化学镀等都放在第4章。机械镀与形变强化放在第8章。这也解决了多年来难于解决的问题，如热镀在化学热处理中为液体渗；形变强化未被重视，气相沉积、离子注入等新技术到处乱放等，在本书中都得到了合适的位置。由于粉末冶金具有节省原材料、节省加工设备、少或无切削、可制作一般冶金方法不能制作的合金等突出优点，可能成为未来制作陶瓷粉末涂层的重要方法，尽管目前资料不多，本书中也列为一章。需要说明的是，许多技术是互相渗透，相互借鉴，其物理化学过程往往比较复杂，本书的分类只是作为一种尝试。

为了使表面强化技术全面系统，本书力图做到全、新。强化层材料与基材都包括金属、陶瓷和高分子聚合物等材料。强化层的结构有平衡结晶组织、非平衡组织和非晶态组织。本书介绍的内容，除传统的工艺外，添加了许多新技术。不常见的工艺也成为本书首次入选的内容。如第1章添加自蔓延合金涂层、铸渗、搪瓷、上釉等；第3章添加溶胶-凝胶涂层；第5章添加等离子弧加热表面淬火；第6章添加离子轰击渗金属和机械能助渗；第7章添加机械镀等。总之，设法将全部表面强化技术都收集到书内，特别是新技术、新工艺。在编写过程中，深深体会到本书涉及面太广，牵扯学科很多，很难全都照顾到，如玻璃表面强化被遗漏就是一个遗憾。

本书编写目的是想为表面工程学科的建立做点基础工作，可作为材料科学与工程类有关专业教材。为此各章、节都加强了有关层形成机制，组织、结构、性能有关内容，篇幅不宜太大，留有余地，以便读者选用。

参加本书编写的有山东大学材料科学与工程学院教师孙希泰（第1、2、5、6、7章），陈鹭滨（第3章），孙毅（第4章），刘如伟（第8章）、元永新（第9章）和庄光山（第10章）。全书由孙希泰负责统稿和主编，姜江负责主审。

由于本书内容涉及许多学科，各种表面强化技术的专著很多，本书的一些内容，特别是一些图表多借助于有关专著，在此深表谢意！编者知识面有限，疏漏和错误都可能存在，敬请批评指正。

孙希泰

2005年1月于山东大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 表面工程学科体系	1
1.1.1 表面工程的功能	1
1.1.2 表面强化技术是表面工程的核心内容	3
1.1.3 表面强化技术的分类	4
1.1.4 强化层的性能取决于成分与结构	6
1.1.5 材料物理基础和表面物理化学是表面工程的基础理论	6
1.1.6 磨损理论、腐蚀理论和断裂理论是表面工程的相关理论	8
1.2 表面预处理	8
1.2.1 除油	8
1.2.2 除锈	9
1.2.3 机械法清理	10
1.3 涂层的机械加工	11
1.3.1 涂层的切削加工	11
1.3.2 涂层的磨削加工	11
1.4 表面分析技术	11
1.4.1 显微镜	12
1.4.2 表面成分和原子状态分析	14
1.4.3 表面晶体结构分析	16
1.5 表面层性能测试与检验	17
1.5.1 层（膜）的外观检查	17
1.5.2 层（膜）的厚度测量	17
1.5.3 硬度测量	19
参考文献	20
第 2 章 表面熔融强化	21
2.1 基本理论	21
2.1.1 熔体的结晶过程	21
2.1.2 熔体非晶化过程	22
2.1.3 表面熔融强化的分类	23
2.2 堆焊	23
2.2.1 概述	23
2.2.2 电弧堆焊	24
2.2.3 埋弧堆焊	26
2.2.4 等离子弧堆焊	30

2.2.5	气体保护自动堆焊	34
2.2.6	氧-乙炔焰堆焊	37
2.2.7	电渣堆焊	38
2.2.8	堆焊合金	39
2.3	热喷涂	40
2.3.1	基本原理	40
2.3.2	火焰喷涂	42
2.3.3	电弧喷涂 (ARC)	44
2.3.4	等离子弧喷涂	44
2.3.5	激光喷涂	46
2.3.6	热喷涂材料	49
2.3.7	热喷涂应用	54
2.4	热熔结	55
2.4.1	基本理论	55
2.4.2	真空熔结	56
2.4.3	激光熔凝	57
2.4.4	电子束熔凝	59
2.5	热镀	60
2.5.1	概述	60
2.5.2	热镀锌	62
2.5.3	热镀铝	65
2.5.4	热镀锡	68
2.5.5	热镀铅-锡	69
2.6	电火花表面强化	70
2.6.1	电火花表面强化及其原理	70
2.6.2	电火花强化层的组织与性能	72
2.6.3	电火花强化工艺	73
2.6.4	电火花强化的应用	75
2.7	铸渗	77
2.7.1	铸渗及其原理	77
2.7.2	铸渗工艺	79
2.7.3	铸渗在耐磨方面的应用	80
2.8	自蔓延高温合成陶瓷涂层	83
2.8.1	基本原理	83
2.8.2	合成 Al_2O_3 复合陶瓷钢管	84
2.9	搪瓷	85
2.9.1	搪瓷及其基本原理	85
2.9.2	搪瓷工艺	88
2.9.3	搪瓷工艺流程	93
2.9.4	搪瓷及其应用	97

2.10 陶瓷上釉	103
2.10.1 陶瓷	103
2.10.2 上釉	105
2.10.3 上釉工艺	112
参考文献	114
第3章 气相沉积技术	116
3.1 概述	116
3.1.1 气相沉积及分类	116
3.1.2 气相沉积的物理基础	117
3.1.3 气相沉积层的组织结构	118
3.2 物理气相沉积 (PVD)	119
3.2.1 真空蒸发镀膜 (蒸镀)	119
3.2.2 溅射镀膜	121
3.2.3 离子镀	124
3.3 化学气相沉积	128
3.3.1 化学气相沉积及分类	128
3.3.2 常压化学气相沉积装置	128
3.4 等离子化学气相沉积 (PCVD)	131
3.4.1 基本原理	131
3.4.2 PCVD 沉积装置	132
3.5 气相沉积的应用	134
3.5.1 耐磨膜	134
3.5.2 润滑膜	135
3.5.3 防蚀膜	136
参考文献	136
第4章 水溶液沉积表面强化	138
4.1 概述	138
4.2 电镀	139
4.2.1 电镀的基本原理	139
4.2.2 电镀工艺	145
4.3 电刷镀	159
4.3.1 刷镀的基本原理	159
4.3.2 刷镀液	162
4.3.3 刷镀工艺	164
4.3.4 刷镀的应用	166
4.4 化学镀	169
4.4.1 基本原理	169
4.4.2 化学镀镍及其合金	170
4.4.3 化学镀铜	173
4.4.4 化学镀其他合金	173

4.4.5	复合化学镀	173
4.5	转化膜	175
4.5.1	基本原理	175
4.5.2	化学转化膜	176
4.5.3	电化学转化膜	185
4.6	金属表面着色	194
4.6.1	引言	194
4.6.2	不锈钢着色	194
4.6.3	铜及其合金着色	195
4.6.4	锌层着色	196
4.6.5	其他金属着色	196
4.7	溶胶-凝胶镀膜	196
4.7.1	引言	196
4.7.2	溶胶-凝胶的基本原理	197
4.7.3	溶胶-凝胶法镀膜工艺	200
4.7.4	溶胶-凝胶镀膜的应用	201
	参考文献	205
第5章	表面固态相变强化——表面淬火	207
5.1	基本原理	207
5.2	较高能量密度加热表面淬火	208
5.2.1	感应加热表面淬火	208
5.2.2	快速加热表面淬火	214
5.3	高能量密度加热表面淬火	217
5.3.1	激光加热表面淬火	218
5.3.2	电子束加热表面淬火	222
5.3.3	等离子弧加热表面淬火	224
5.3.4	其他高能量密度加热表面淬火	228
	参考文献	230
第6章	固态扩渗表面强化——化学热处理	232
6.1	概述	232
6.1.1	化学热处理的基本原理	232
6.1.2	化学热处理的渗层结构	233
6.1.3	化学热处理的分类及目的	234
6.2	提高疲劳强度及耐磨性的化学热处理	237
6.2.1	渗氮	237
6.2.2	氮碳共渗	246
6.2.3	渗碳	250
6.2.4	碳氮共渗	259
6.3	提高耐磨性的化学热处理	261
6.3.1	渗硼	263

6.3.2	渗钒和渗其他碳化物形成元素	266
6.3.3	以硼为主的共渗	268
6.4	减磨的化学热处理	269
6.4.1	硫氮共渗	269
6.4.2	蒸气处理	270
6.4.3	石墨化渗层	270
6.4.4	镀渗合金层	270
6.5	提高耐蚀性的化学热处理	271
6.5.1	渗铬	271
6.5.2	渗硅	275
6.5.3	渗锌	276
6.6	提高抗高温氧化的化学热处理	276
6.6.1	渗铝	277
6.6.2	以铬、铝为主的共渗	279
	参考文献	281
第7章	表面粉末冶金强化	283
7.1	引言	283
7.2	轧制烧结表面冶金强化	284
7.3	电接触触热焊涂层	285
7.3.1	基本原理	285
7.3.2	电接触触热焊工艺与性能	288
7.3.3	电接触强化的应用	292
	参考文献	294
第8章	表面形变强化	295
8.1	基本原理	295
8.1.1	概述	295
8.1.2	表面喷丸与滚压、孔挤压强化原理	296
8.2	喷丸强化	301
8.2.1	喷丸强化用设备及弹丸	301
8.2.2	喷丸工艺	310
8.2.3	喷丸强化的应用	313
8.3	表面滚压和孔挤压强化	320
8.3.1	滚压和孔挤压强化用设备	320
8.3.2	滚压和孔挤压强化	321
8.3.3	滚压、挤压强化的应用	321
8.4	机械镀	323
8.4.1	机械镀的分类	324
8.4.2	机械镀镀层形成机理	324
8.4.3	机械镀用设备	325
8.4.4	机械镀工艺	326

8.4.5 机械镀的应用	328
参考文献	329
第9章 离子注入与冲击硬化	330
9.1 基本理论	330
9.1.1 离子注入特点	330
9.1.2 发展概况	330
9.1.3 离子注入的物理基础	331
9.1.4 离子注入层的组织结构	336
9.2 离子注入装置	340
9.2.1 离子源	340
9.2.2 加速器	342
9.2.3 质量分析器	342
9.2.4 聚焦、偏转和扫描	343
9.2.5 靶室	344
9.3 离子注入工艺	344
9.3.1 材料表面强化用离子注入	344
9.3.2 离子注入工艺	345
9.4 离子注入的应用	346
9.4.1 提高表面硬度	346
9.4.2 提高耐磨性	347
9.4.3 提高疲劳性能	350
9.4.4 提高耐蚀性	351
9.4.5 提高抗高温氧化性	354
9.4.6 离子注入在半导体方面的应用	356
9.4.7 离子注入应用于其他材料的表面强化	358
参考文献	358
第10章 化学粘接涂层	359
10.1 概论	359
10.2 涂料涂层	359
10.2.1 涂料的组成	359
10.2.2 涂料的成膜过程	368
10.2.3 涂料的分类和命名	370
10.2.4 涂装方法	371
10.2.5 防锈和防腐蚀涂料	375
10.2.6 装饰性涂料	383
10.2.7 功能性涂料	386
10.2.8 高固体分涂料	391
10.2.9 水溶性涂料	391
10.2.10 非水分散型涂料	392
10.2.11 防腐蚀涂装实例	393

10.3 塑料涂层..... 395

10.3.1 引言..... 395

10.3.2 粉末涂料的种类..... 396

10.3.3 涂塑方法..... 401

10.3.4 涂塑的应用..... 405

参考文献..... 410

第 1 章 绪 论

1.1 表面工程学科体系

表面工程是利用物理的、化学的、物理化学的以及机械的等工艺方法，使工件表面获得所要求的成分、组织和性能，以提高产品质量的工程。它是 20 世纪 80 年代世界 10 项关键技术之一，是近 10~20 年发展最迅速的科学技术，正在成为一门新型的独立学科。

表面工程原来主要属于热处理和耐蚀防腐。前者主要内容有表面淬火、化学热处理等，是以提高表面强度、硬度、耐磨性为主，常称为表面硬化（强化）技术；后者主要内容有化学粘接涂层、电镀、转化膜等，是以提高耐蚀性为主，常称为防护技术。两者有联系，有交叉，又具有相对独立性。近来，许多科学技术的新成就、新技术，如气相沉积、激光技术、电子束技术等渗透到表面工程之后，拓宽了表面工程的应用范围，它不仅是表面强化、防护的重要手段，而且已成为制造新材料、功能材料、复合材料以及机件修复必不可少的手段，远远超出了热处理和耐蚀防腐的范畴，逐渐形成了自己的学科体系。

表面工程始于 20 世纪 80 年代，1984 年英国首先成立表面工程学会，出版了《表面工程》杂志。1985 年召开了第一届表面工程国际会议，随后于 1987 年和 1988 年分别在英国和日本又召开了第二届和第三届表面工程国际会议。我国于 1987 年成立了机械工程学会表面工程研究所，1988 年召开了首届表面工程现状与将来研讨会，出版《表面工程》杂志，1991 年召开第二届学术会议，同时举办了中日表面工程研讨会，1994 年成立中国机械工程学会表面工程分会。表面工程用途广泛，适应面宽，从航天、核能等新技术，到机械制造、冶金、船舶、建筑以及生活用品都大量使用，发展十分迅速，成果累累，令人眼花缭乱。因此迫切需要建立表面工程的学科体系，研究和利用表面工程理论，为培养表面工程专业人才创造条件。

表面工程是一门正在发展中的新型学科，对其学科体系问题还在讨论完善过程中，徐滨士、刘家俊、马士宁三人先后在几篇文章中作过论述。本书作者根据自己曾作过的论述，稍加补充列于图 1-1。

1.1.1 表面工程的功能

综观表面工程在科学技术和经济发展中的作用，它具有以下 5 大功能。

1.1.1.1 充分发挥材料潜力

使用材料时，表面高硬度、强度、耐磨性与心部韧性、塑性之间常常存在着矛盾，二者处理不当，不是造成材料浪费，就是早期失效。使用整体材料，在许多情况下难于处理得恰当，有时甚至无法解决。而采用表面强化处理则很容易做到两者兼顾，使材料的潜力得到充分发挥。使用多年的中碳钢调质后表面淬火和低碳钢渗碳后淬火，都是解决这对矛盾良好的实例。上述技术再与辊压、喷丸处理结合起来，还能进一步延长产品的使用寿命或提高其可靠性。如六缸柴油机曲轴喷丸处理后疲劳强度提高 30%~38%。冷作模具承受冲击载荷大，其表面耐磨性与心部韧性之间的矛盾更加突出，经渗硼后表面耐磨性由高硬度的硼化物层承担，再适当地提高回火温度将基体硬度降低到 60HRC 以下，使心部韧性得到改善，既发挥

了硼化物层的耐磨优势，又避免发生脆性断裂，可使模具寿命延长十几倍。气相沉积碳化物、氮化物等超硬膜新技术，对提高工模具寿命效果显著，已广泛用于许多领域。如 CVD 沉积 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的硬质合金，在 $1000\sim1500^\circ\text{C}$ 时刃部仍保持高硬度，使用寿命比沉积 TiC、TiN 高 2 倍。

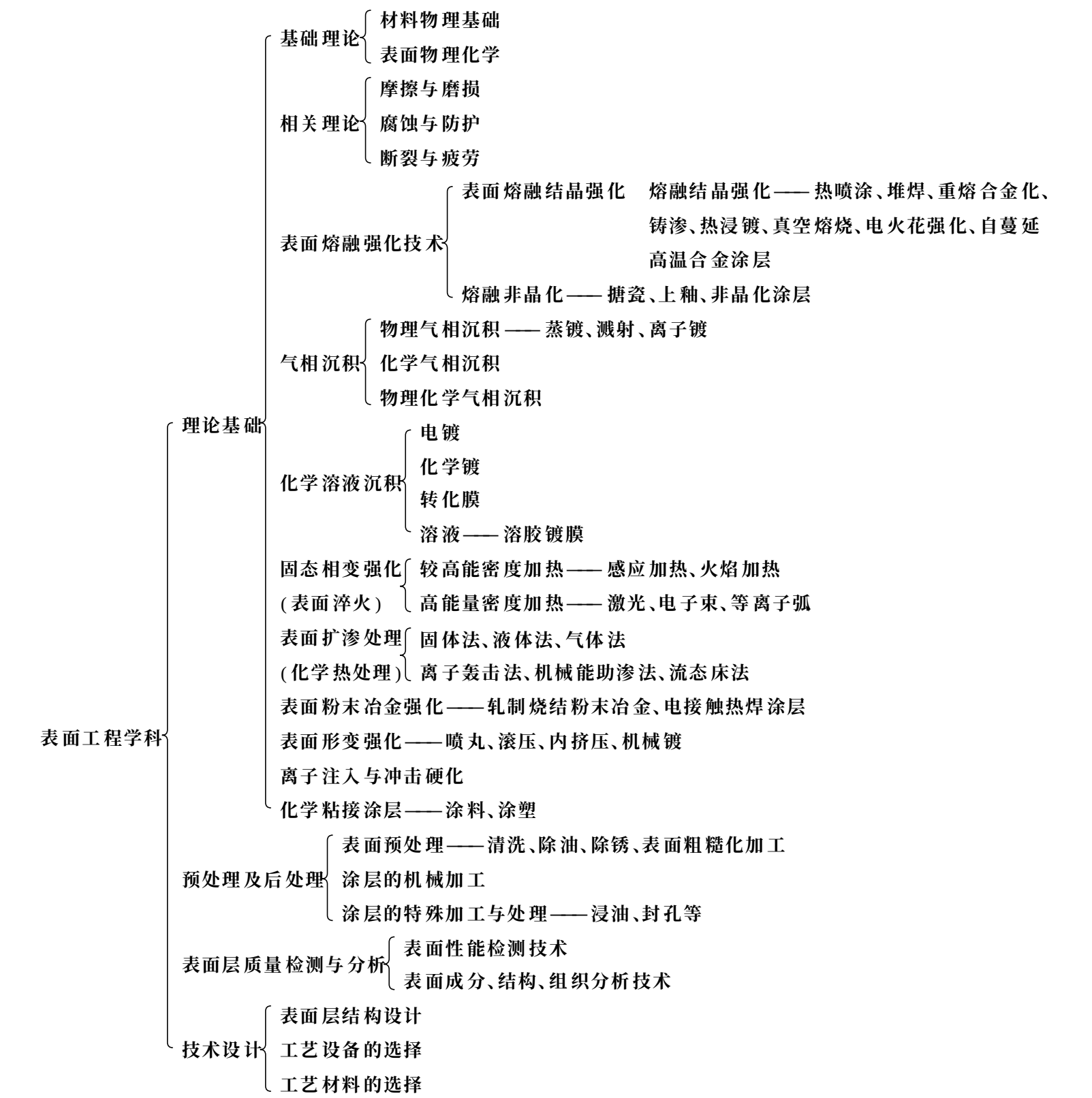


图 1-1 表面工程学科体系

1.1.1.2 节约材料资源

节约材料资源也像节能一样，是普遍关注的问题。用普通材料经表面强化处理，可能代替价格高的材料，甚至代替昂贵的稀缺材料。用铁基粉末烧结成形后渗锌，代替铜制作弹子锁芯，耐蚀性好，节约了大量铜。用低碳钢渗铝，代替高合金耐热钢制作渗碳罐，节约了铬镍资源并降低了成本。英国汽车排气系统采用渗铝后，寿命比碳钢延长 3 倍，钴合金 Hs25 叶片于 1205°C 工作 2h 后，因氧化起皮而失效，经铬铝共渗后于 1205°C ，工作 100h，仅失重 14g cm^2 ，表面刚刚起皮。有人分析，船舶寿命周期一般为 20~30 年，报废时实际失效件只是一部分，

大约还有 70% 可以继续工作，如果用表面强化处理其中一些薄弱部位，可使船舶寿命延长到 30~35 年，船舶的全寿命周期费用降低 30% 左右。快中子增殖堆的燃料包套和核聚变的第一层壁材料是在钒和钒合金表面以 Ni 为中间层，化学气相沉积 Mo 制作的。

1.1.1.3 制作新材料

纳米材料具有独特的物理、化学性质，应用前景广泛，极受重视。用蒸镀法和溅射法沉积可制作纳米材料。日本用 $\text{SiCl}_4\text{-C}_2\text{H}_5\text{-H}_2$ 混合气体 CVD 制出 SiC-C 纳米复合材料的致密形板和多孔形板。

晶须正在成为工程上的重要原材料，CVD 技术是制作 Si_3N_4 、TiC、 Al_2O_3 、 ZrO_2 等晶须的重要方法，最近又开发出一种气相沉积制作超微粒薄膜技术。近几年研制出的性能渐变的梯度材料大多采用 PVD、CVD、CVD+PVD、等离子喷涂等表面技术制作。如日本在碳基材料两侧分别用 CVD 沉积 SiC/ C，和 PVD 沉积 TiC/ Ti，再将两者融合制成 3mm 厚度材料。目前，生产半导体器件和集成电路，多采用离子注入。掺杂离子注入已成为半导体生产的基本方法。不仅如此，表面强化处理还是制造复合材料的预处理手段。

1.1.1.4 维修与修复

表面强化技术大量用于修复领域，拓宽了修复的范围，有时可变废为宝，有时可解决燃眉之急。在船舶、电力、机械甚至军事装备等行业，广泛应用刷镀、喷涂、堆焊、化学粘接涂层等表面强化技术，维修一些局部损伤或修复一些已失效的机器零件，取得了良好的经济效益。如用刷镀修复的坦克零件，耐磨性是原产品的 4.3 倍；刷镀修复万匹马力柴油机的定时齿圈；热喷涂处理运输船尾轴套；以及用化学粘接高温涂料修复船用柴油机排烟管等，解决了一些长期无法解决的难题，经济效益都相当可观。

1.1.1.5 装饰

表面强化技术一直是装饰工程的重要手段，近来也在不断发展，如沉积 TiN 代替黄金，化学镀仿制各类文物及装饰品以及各类涂料的装饰等。

1.1.2 表面强化技术是表面工程的核心内容

表面强化技术是决定强化层（膜）的成分、组织、结构和性能的关键，是表面工程的核心内容。但是，到目前为止，有关表面强化技术的含义与内容，国内外均未统一。表面强化技术原来分属于热处理和耐蚀防腐，两者各持其主，有联系，有交叉，有的表面强化技术，如渗锌、渗铝等在两者都有，而使用多年、行之有效的表面形变强化技术，如喷丸等，两者却均未收入。国内外有关文摘性刊物，大多是将表面强化和表面防护分别放在各自位置，也不统一。有的甚至把部分表面强化技术，如转化膜、电镀，与表面预处理混在一起，统称为表面处理。一些基础学科的新技术引入表面工程之后，将其称为表面改性，但它的定义和内容一直也不太明确。由于许多科学技术领域的新成就，特别是“三束”进入表面强化技术之后，不仅出现了离子注入、气相沉积等一些表面强化新技术，而且也充实了许多传统的表面强化技术，如离子轰击化学热处理、高能量密度加热表面淬火等，使表面强化技术的研究开发十分活跃，应用面不断扩大，远远超出热处理和耐蚀防腐的范畴，形成自身的科学体系，急需将它统一起来。事实上，许多表面强化技术之间是有联系的，如渗铝、热喷涂铝、热镀铝、电镀铝，一直到气相沉积铝的硬化层的主要性能基本上相同的，其中有许多技术可以互相借鉴。许多表面强化技术的应用范围也不是单一的，常常是既能用于提高表面硬度、强度和防腐性能，又能用于装饰、维修机件，甚至作为制造复合材料的预处理工艺。

我们将表面强化技术定义为“增强材料表面强度、硬度、耐磨性、耐蚀性、物理性能以

及美观等表面处理方法的总称”。它包括机械的、物理的、化学的以及物理化学的一系列表面强化处理方法。其中有使用多年，甚至千年以上的传统工艺，更多的则是科学技术发展中的一些新成就，如激光、离子束、电子束等应用于表面强化的新技术。用“增强”材料有关表面性能来概括表面强化技术，使它的含义远远超出传统的内容，所增强的性能不仅包括材料的强度、硬度、耐磨性、耐蚀性，而且还包括物理性能和外观。这不仅与今天的表面强化技术的功能相一致，使其自成体系，而且有利于表面强化技术的发展和综合应用。

应该指出，表面技术包括表面强化技术、表面加工技术和表面预处理技术（一般称为表面处理）。后两者的目的是改变材料外形和表面状态，一般不增强材料使用性能，不属于表面强化技术，应加以区别。

有关表面强化技术的著作较多，但内容差别很大，也没有较为一致的系统，这很不利于表面工程技术的发展。本文定义的表面强化技术，不仅能够概括传统的表面强化技术内容，还可概括表面改性技术和表面涂层技术，将它们融成一体，形成总的表面强化技术体系。

1.1.3 表面强化技术的分类

尽管表面强化的工艺、设备和性能千差万别，但是表面强化层的形成大多是相变过程。相变的动力是相变前后的相的自由焓差；相变的阻力是新旧相之间界面引起的表面能增加；遵守相图和结晶规律，形成不同组织的强化层；当结晶过程受到抑制时，将发生非晶化转变成非晶态强化层，或发生非平衡转变成过渡相强化层。为此我们根据强化层形成的物理化学过程，也就是按相变动力和阻力的不同对表面强化技术进行分类，如图 1-1 所示，以找出表面强化技术的系统性和基础理论。

1.1.3.1 表面熔融强化

表面熔融强化也称表面冶金强化，是通过加热将工件表面或涂敷在表面上的合金材料熔化，或将熔化了的材料涂敷于工件表面，随后进行冷却凝固，形成强化层（涂层）。表面熔融强化是液相-固相转变，表面熔融的液体一般是按形核和晶体长大的结晶规律进行结晶。强化层组织主要取决于过冷度，过冷度越大晶粒越细。过冷到一定温度时，结晶受到抑制，将保持熔点附近的液相结构，形成非晶态强化层，遵守非晶化转变规律。

表面熔融强化包括热喷涂、堆焊、热镀、真空熔烧、重熔合金化、电火花强化、铸渗、自蔓延、搪瓷、上釉等。其加热方法有用常规加热速度的，如真空熔烧、热镀；较高能量密度加热的，如火焰喷涂、电弧喷涂、电火花强化；高能量密度加热的，如等离子弧、激光束和电子束等。

1.1.3.2 气相沉积表面强化

气相沉积是由气相直接沉积成固体膜，是通过物理的、化学的或物理化学的方法产生气体原子、离子、分子或几个原子、分子集体团，并使它们在基体材料上结合或凝固成固体膜。气相沉积是气相-固相相变过程，也遵守结晶规律和非晶化转变规律，其特殊性在于平衡结晶时遵守蒸气压-温度曲线，靠过饱和度沉积。气相沉积有物理气相沉积（PVD）、化学气相沉积（CVD）和物理化学气相沉积（PCVD）。

1.1.3.3 化学溶液沉积表面强化

化学溶液沉积强化是在溶液中通过化学或电化学反应产生原子、离子，在基体材料上沉积成膜，也称化学溶液镀膜。它也是相变过程，遵守结晶规律和非晶化规律。其特殊性在于平衡结晶时遵守溶解度曲线，靠过饱和度沉积。

化学溶液表面强化有化学镀、电镀、转化膜和溶胶成膜等。

1.1.3.4 表面固态相变强化（表面淬火）

表面固态相变强化常称为表面淬火，利用的是固态相变重结晶。其特点是快速加热将钢加热到奥氏体状态，再快冷使高温奥氏体向珠光体相变受到抑制，转变为非平衡的过渡相马氏体。

表面淬火大多采用感应加热和火焰加热，近来，激光、电子束、等离子弧等高能量密度加热进入后，加热速度快，自激冷却，冷却速度快，细化了马氏体组织，使其硬度高、耐磨性好、疲劳强度高。

1.1.3.5 表面扩渗强化（化学热处理）

表面扩渗强化常称为化学热处理，是用另外元素的扩散渗入进行重结晶，也遵守相图和结晶规律，其特点是固态扩散渗入，改变表面化学成分，动力是浓度梯度。过去化学热处理主要是纯热（温度）扩渗，温度高、时间长、耗能量大。本书作者根据机械能助渗和离子轰击化学热处理温度低、时间短、节能显著的特点，提出 21 世纪化学热处理可能是大多采用其他能与热能（温度）相结合的化学热处理新技术。

1.1.3.6 表面粉末冶金强化

粉末冶金是将粉末原料经混合、压制成毛坯后加热，或边加压、边加热到低于熔点的温度，保温一定时间，使材料致密化、坚实化，烧结成形。它是固态扩散结晶，其特殊性是加压产生的晶体缺陷密度大的固体颗粒间的扩散结晶过程。目前只发现轧制烧结粉末冶金和前苏联电接触焊粉末涂层是表面粉末冶金强化。但由于粉末冶金具有节省原材料、节省设备、少无切削、可制作一般冶金方法不能制作的合金等突出优点，很可能成为制作陶瓷涂层的重要方法。为此，本书将它列为一类。

1.1.3.7 表面形变强化

表面形变强化是用机械的方法使表面产生塑性变形，引起表面加工硬化，也称表面加工硬化。其特殊性是用机械能造成表面层高密度位错、亚晶碎化等不平衡组织的强化表面层。表面形变强化主要有喷丸、内挤压和辊压。根据硬化层形成原理，本书将新开发的机械镀也放在这一类。

1.1.3.8 离子注入和冲击硬化

离子注入是在加速器中以几万到几十万伏电压作用下，加速一种或几种离子束流注入固体表面层，形成注入层。离子注入增加表面层注入元素含量，并产生大量晶体缺陷而引起表面强化。其特殊性是注入元素不受相图限制，可形成过饱和固溶体等不平衡相和非晶态相。

其他高能粒子，如能量密度为 10^9 W/cm^2 的激光，射入金属表面也能造成大量晶体缺陷，使表面层硬度提高。为此将所有高能粒子引起的表面硬化统称为冲击硬化。

1.1.3.9 化学粘接涂层

化学粘接涂层是利用化学粘接技术形成的高分子有机涂层，其中有涂料涂层和塑料涂层。

涂料涂层（包括油漆）是将可固化的黏结剂（漆料）、硬质颗粒（颜料）与溶剂等组成的涂料涂敷于固体表面，干燥固化后形成涂层。黏结剂大多是高分子聚合物，如天然树脂、合成树脂及合成后形成高分子聚合物。涂料涂层的形成遵守高分子材料的固体反应的基本规律。

塑料涂层也称涂塑，是将塑料粘接在固体表面形成高分子聚合物涂层。热塑性塑料使用较高分子量的树脂粉末熔融后固化成膜。热固性粉末涂料使用低分子量树脂，加热熔化后与固化剂发生交联，形成三维网状的固体膜。可见涂料涂层与塑料涂层都遵守高分子聚合物的固化规律。与前 8 类不同，涂层材料主要是高分子聚合物，具有其自己独特规律，本书也按