

BIANMIAN GONGCHENG JISHU
DE SHEJI YU XUANZE

表面工程技术的设计与选择

宣天鹏 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



表面工程技术的设计与选择

宣天鹏 编著



机械工业出版社

前 言

表面工程技术是实施表面工程的技术基础，是各种表面技术在零件表面形成功能镀覆层，或进行再制造时的综合体现。常见的表面工程技术有电镀、化学镀、热喷涂、熔覆、气相沉积、化学热处理、表面强化、转化膜技术、涂装、热浸镀等。

在实际应用中，不同材质的零件在不同服役环境下对表面的硬度、耐磨性、耐蚀性、导电性、导热性等都有着不同的要求，通常可以采取多种表面工程技术来满足零件的性能需要。因此，就需要从现有的表面处理装备，操作人员的技术水平，表面处理工艺的性价比，零件材质的成分、结构、状态及性能，镀覆层的成分、结构、厚度、结合力、外观，对环境的影响等多方面进行分析、比较和甄别，优化、设计出性能优异的表面镀覆层，选择最佳的表面工程技术，以达到低成本、低能耗、无毒、无污染、方便快捷地赋予零件以特殊性能的镀覆层，显著延长零件使用寿命的目的。

不同的表面工程技术都有其长处和不足之处，其适应的场合也各不相同，因此设计、选择、使用的关键是尽可能地扬长避短。对在某工况条件下服役的某材质的零件而言是最佳选择的表面处理技术，则有可能不适用于另一环境下零件的表面处理，反过来也是如此。因此，对表面工程技术的设计与选择不能是一成不变的，而需要经过反复的试验、比较后方可得以确定。

表面工程技术的设计首先要对需要处理工件的形状、材质、服役条件、性能要求等作全面的分析，然后设计并选择合适的镀覆层材质与结构、表面技术工艺方法及装备、工艺流程、表面预处理和后处理工艺，以及制定工艺规程，核算、评价技术经济指标等。

为了加深读者对表面工程技术设计和选择的理解，本书首先分析、说明了表面工程技术的分类、作用及设计、选择的原则，然后对热喷涂、电化学沉积、化学转化膜、表面改性、涂装和气相沉积技术的工艺、装备、材料等作了较为详尽的阐述，并给出了上述表面工程技术在相关领域实际应用时设计、选择的典型案例。最后综合介绍了表面复合处理技术的选择与应用，以及不同表面工程技术设计、选择的典型应用案例。

在本书的编写过程中，作者参考、引用了大量的文献资料，并在全书最后的参考文献中予以列出。在此，对在本书中被引用文献资料的诸位作者表示衷心的感谢，并致以崇高的敬意。

随着科学技术的迅猛发展，表面工程新技术、新工艺层出不穷，表面工程技术在国民经济各个领域都得到了更加广泛的应用。限于本书的篇幅，以及作者的水平有限，书中不可避免地存在着谬误和遗漏之处，敬请专家和读者指正，作者表示真诚的谢意。

宣天鹏

目 录

前言

第1章 表面工程技术的分类、作用及选择原则	1
1.1 表面工程及其特征	1
1.1.1 表面工程的技术特征	1
1.1.2 表面工程的科学体系	2
1.2 表面工程技术的分类与作用	4
1.2.1 表面工程技术的分类	4
1.2.2 表面工程技术的作用和功能	6
1.3 表面工程技术的设计、选择和应用	16
1.3.1 表面工程技术设计、选择的原则	16
1.3.2 表面工程技术的工艺规程	21
第2章 热喷涂技术的设计与选择	24
2.1 热喷涂技术原理与涂层的形成	24
2.1.1 热喷涂涂层形成的基本过程	24
2.1.2 热喷涂涂层的结构	25
2.1.3 热喷涂涂层与基体的结合	26
2.2 热喷涂的分类与技术特征	27
2.2.1 热喷涂技术的分类	27
2.2.2 热喷涂技术的特点	28
2.2.3 热喷涂的工艺步骤	29
2.3 火焰喷涂	31
2.3.1 线材火焰喷涂	31
2.3.2 粉末火焰喷涂	32
2.3.3 高速火焰喷涂	34
2.3.4 爆炸喷涂	35
2.4 电弧喷涂	37
2.4.1 电弧喷涂原理	37
2.4.2 电弧喷涂设备	38
2.4.3 电弧喷涂的特点	38
2.5 等离子喷涂	39
2.5.1 常规等离子喷涂	39
2.5.2 真空等离子喷涂	40
2.5.3 超声速等离子喷涂	41
2.5.4 水稳等离子喷涂	43

2.6 其他喷涂技术	44
2.6.1 激光喷涂	44
2.6.2 冷气动力喷涂	45
2.7 热喷涂材料	47
2.7.1 热喷涂材料的性能要求	47
2.7.2 热喷涂材料的分类	48
2.7.3 金属、合金线材与粉末	49
2.7.4 自熔性合金	67
2.7.5 陶瓷材料	73
2.7.6 塑料粉末	82
2.7.7 复合材料	83
2.8 热喷涂涂层的设计与选择	85
2.8.1 热喷涂涂层设计的基本原则	85
2.8.2 热喷涂工艺、设备、材料的选择	86
2.8.3 热喷涂技术的选择与应用	90
第3章 电化学镀覆技术的设计与选择	101
3.1 电镀	101
3.1.1 电镀过程与基本理论基础	101
3.1.2 电镀溶液的组成	107
3.1.3 金属共沉积的条件及特征	108
3.1.4 金属与合金的电镀	112
3.1.5 复合电镀	126
3.2 电刷镀	131
3.2.1 电刷镀的基本原理	131
3.2.2 电刷镀的特点	132
3.2.3 电刷镀设备	132
3.2.4 电刷镀工艺	134
3.2.5 电刷镀溶液	136
3.2.6 电刷镀的应用	139
3.3 化学镀	140
3.3.1 化学镀的基本原理	141
3.3.2 化学镀镍	142
3.3.3 化学镀钴	146
3.3.4 化学镀铜	149
3.3.5 化学镀铁	152
3.3.6 化学复合镀	154
3.4 电化学镀覆层的设计与选择	159
3.4.1 电镀层	159
3.4.2 电刷镀层	163

3.4.3 化学镀层	168
第4章 化学转化膜技术的设计与选择	172
4.1 化学转化膜基础	172
4.1.1 化学转化膜的分类	172
4.1.2 化学转化膜的形成方式与制备方法	173
4.1.3 化学转化膜的用途	174
4.2 金属与合金的化学氧化	174
4.2.1 钢铁的化学氧化	174
4.2.2 铝及铝合金的化学氧化	179
4.2.3 镁及镁合金的化学氧化	181
4.2.4 铜及铜合金的化学氧化	182
4.3 金属与合金的阳极氧化	182
4.3.1 铝及铝合金的阳极氧化	183
4.3.2 镁及镁合金的阳极氧化	193
4.3.3 金属与合金的微弧氧化	196
4.4 金属与合金的磷化处理	200
4.4.1 磷化的分类、性质和机理	200
4.4.2 钢铁的磷化处理	202
4.4.3 有色金属的磷化处理	204
4.5 金属的钝化	206
4.5.1 金属钝化的分类	206
4.5.2 钢铁的钝化	207
4.5.3 有色金属及其合金的钝化	208
4.6 化学转换膜的设计及选择	210
4.6.1 化学氧化	210
4.6.2 阳极氧化及微弧氧化	213
4.6.3 磷化及钝化	216
第5章 表面改性技术的设计与选择	220
5.1 化学热处理	220
5.1.1 化学热处理的原理与分类	220
5.1.2 渗碳	223
5.1.3 渗氮	228
5.1.4 碳氮共渗与氮碳共渗	234
5.1.5 渗金属	236
5.1.6 其他化学热处理	239
5.2 表面热处理	239
5.2.1 表面热处理的分类	240
5.2.2 表面热处理的组织性能及材料	240
5.2.3 感应表面热处理	241

5.3 高能量密度表面处理	244
5.3.1 激光表面处理	244
5.3.2 电子束表面处理	248
5.4 离子注入	249
5.4.1 离子注入原理及特征	250
5.4.2 离子注入的装置与工艺参数	251
5.4.3 离子注入的改性原理	251
5.5 化学热处理及表面强化技术的设计与选择	252
5.5.1 化学热处理	252
5.5.2 表面感应热处理	260
5.5.3 表面激光热处理	263
第6章 涂装技术的设计与选择	266
6.1 涂装、涂料及成膜过程	266
6.1.1 涂装的分类及其功能	266
6.1.2 涂料的组成及分类	267
6.1.3 涂装工艺过程与成膜过程	270
6.1.4 多层涂膜与涂膜的防护机理	273
6.1.5 常用涂料膜层	274
6.2 浸涂	277
6.2.1 浸涂的特点	277
6.2.2 浸涂设备	278
6.2.3 浸涂方法	278
6.3 喷涂涂装	279
6.3.1 空气喷涂	279
6.3.2 高压无气喷涂	282
6.3.3 静电喷涂	283
6.4 电泳涂装	285
6.4.1 电泳涂装的原理与过程	286
6.4.2 电泳涂装的特点	286
6.4.3 电泳涂装的设备	287
6.4.4 电泳涂装工艺及影响因素	288
6.5 粉末涂装	289
6.5.1 粉末涂装的特点	289
6.5.2 粉末涂料的种类及制备	290
6.5.3 流化床涂装法	292
6.5.4 粉末静电涂装	293
6.6 涂装技术及涂膜的设计与选择	296
6.6.1 涂装要素设计与选择的原则	296
6.6.2 涂装技术的选择与应用	297

第7章 气相沉积技术的设计与选择	319
7.1 物理气相沉积	320
7.1.1 物理气相沉积的特点	320
7.1.2 真空蒸镀	320
7.1.3 溅射镀膜	324
7.1.4 离子镀膜	328
7.2 化学气相沉积	333
7.2.1 化学气相沉积的特点、分类与应用	333
7.2.2 化学气相沉积原理	334
7.2.3 化学气相沉积的设备与工艺	335
7.2.4 化学气相沉积方法	336
7.3 气相沉积技术的选择与应用	342
7.3.1 物理气相沉积	342
7.3.2 化学气相沉积	348
第8章 复合表面处理技术的选择与应用	353
8.1 表面复合化学热处理	353
8.2 激光复合表面处理	371
8.3 气相沉积复合表面处理	378
8.4 电化学镀覆复合表面处理	388
第9章 表面处理技术的比较与选择	396
9.1 飞机起落架的电镀硬铬与超声速火焰喷涂 WC 涂层	396
9.2 表面处理技术对 Co-Cr 合金义齿耐蚀性的影响	400
9.3 热镀锌钢工件的表面 FEVE 氟碳涂料的涂装	401
9.4 近海水工钢闸门的热喷锌 + 涂料封闭防腐技术	404
9.5 45 钢的氮碳共渗 + 化学镀镍双重表面强化工艺	407
9.6 电站阀门三种表面镀层耐蚀和抗氧化性能的比较	409
9.7 三种汽车零件磷化工艺的选择与改进	410
9.8 无油润滑、高压动密封件渗氮与复合表面处理工艺	414
9.9 重载传动件磨损轴颈的热喷涂修复	417
9.10 不同镀覆层材料在西沙海洋大气环境中的腐蚀行为	419
9.11 汽轮机转子轴颈损伤原因及修复	421
9.12 不锈钢/铝多层复合板的界面处理方法	424
参考文献	427

第1章 表面工程技术的分类、作用及选择原则

长期以来,人们认识到一旦使用的产品、零件等发生表面材料的损耗和流失,就会引起几何尺寸的改变、使用性能的破坏,进而降低了其使用寿命,不能完成正常的工作。在生产实际中,零件的大多数失效是由于环境的磨损、腐蚀、疲劳等对材料表面的侵蚀作用所造成的。因此,人们就采用了各种手段和措施来防止、控制环境对材料表面的破坏,并取得了良好的效果。经过了对材料表面结构、性质、行为,表面重新构造,表面质量监控方法等长期的研究与开发,逐步形成并促进了表面科学理论、表面工程技术、表面分析检测技术、表面工程设计、表面工程应用的迅速发展。

1.1 表面工程及其特征

表面工程是以表面技术为基础,材料科学、物理学、化学、冶金学、摩擦学、腐蚀防护学等学科交叉形成的一门综合性学科,涵盖了表面科学基础理论、表面工程技术、表面质量控制、表面技术设计等。

在表面科学理论的指导下,可以利用物理、化学、机械等表面技术手段改变材料表面的状态、化学组成、组织结构等;或者在材料表面形成所需的镀覆层,赋予材料表面以光、电、磁、热、耐磨、耐蚀、装饰等特殊性能,以满足不同的环境与条件下对产品、零件的需求。目前,表面工程已成为很多高技术领域产品制造或再制造的重要手段之一。

从学科系统的角度出发,表面工程主要研究的是材料表面和界面的结构特征,物理、化学、力学行为与性能,表面改性或重构的机制与相应的工艺手段。从工程上看,基于零件的服役条件与性能要求,表面工程的功能是分析材料表面的失效形式与机制,设计出新的材料表面,应用相关的表面工程技术加以实施,获得具有良好使用性能的新的材料表面。简而言之,表面工程是应用各种镀覆层技术、表面改性技术等来提高产品和零件的质量,延长其使用寿命的系统工程。

1.1.1 表面工程的技术特征

表面工程的技术特征如下:

- 1) 在不改变零件整体材质的前提下,赋予表面以基体材料不具备的特殊性能。
- 2) 可以实现多种基材与镀覆层的组合。基材可以是金属、有机材料、无机材料;镀覆层可以是金属、合金、高分子、陶瓷、非晶态等构成的单一或复合材料。

3) 可对磨损、腐蚀破坏的零件进行再制造,从而达到节约能源、降低损耗、保护环境的目的。

1.1.2 表面工程的科学体系

表面工程包括表面科学、表面应用基础理论、表面工程技术、表面工程的应用、表面质量的检测与控制、表面工程的技术设计等。

1. 表面科学

表面科学是现代表面技术的基础理论,包括表面分析技术、表面物理和表面化学。表面分析技术主要涉及表面的原子结构、原子类型和电子能态结构等,揭示了表面现象的微观本质和各种动力学过程。表面物理(表面化学)是研究表、界面上发生的物理(化学)过程,从微观层面上看,它们是在原子、分子水平上研究表面的组成、原子结构及迁移现象、电子结构及运动等,以及对表面宏观性质的影响;从宏观层面上看,它们是从能量的角度出发来研究各种表面现象。不能将表面科学的三个组成部分截然分开,它们之间是相互依存、相互补充的关系。

2. 表面应用基础理论

表面应用基础理论是表面在各种服役和环境条件下表现行为的理论基础,直接影响了表面工程的发展、应用,包括表面失效分析理论、表面摩擦磨损理论、表面腐蚀与防护理论、表面的结合与复合理论等。

3. 表面工程技术

表面工程技术是各种表面技术在零件的制造及再制造时的综合体现,是实施表面工程的技术基础。常见的表面工程技术有电镀(合金电镀、复合电镀、电刷镀、非晶态电镀等)、化学镀(多元化学镀、复合化学镀、非晶态化学镀等)、热喷涂(火焰喷涂、电弧喷涂、等离子喷涂、激光喷涂、超声速喷涂、爆炸喷涂等)、熔覆(激光熔覆、等离子熔覆、真空熔结、堆焊等)、气相沉积(物理气相沉积、化学气相沉积等)、化学热处理(渗碳、渗氮、渗金属等)、表面强化(表面淬火、喷丸、滚压等)、转化膜技术(阳极氧化、化学氧化、磷酸盐膜、铬酸盐膜、草酸盐膜等)、涂装、热浸镀、离子注入、热烫印等。

4. 表面工程的应用

表面工程的应用是利用表面覆盖、表面改性、表面涂镀等技术手段,赋予或提高了表面各项功能特性,使表面能够胜任磨损、腐蚀、疲劳、电磁辐射等恶劣条件下的工作,并可以形成新的、具有特殊功能的器件。

5. 表面质量的检测与控制

表面质量的检测与控制是利用各种物理与化学的手段、宏观与微观分析仪器等,检测、分析表面的几何、物理、化学、力学性质等,用以优化表面工程技术。

6. 表面工程的技术设计

表面工程的技术设计是根据服役条件、技术要求等,设计合适的表面结构、表

面层材质、表面制备工艺等；根据产品性质、生产规模等，合理设计表面工程车间、表面工程生产线等；从产品的技术水平、市场需求、生产成本、销售模式等出发，精确分析、计算表面工程产品的技术、经济可行性和效益。

从不同的视角出发，目前大致有两类关于表面工程体系的划分方法，详见表1-1和表1-2。

表 1-1 表面工程的体系之一

表面工程	表面工程基础理论	表面失效分析
		表面摩擦与磨损
		表面腐蚀与防护
		表面结合与复合
	表面工程技术	化学转化膜技术
		表面改性技术
		表面镀覆层技术
		表面薄膜技术
		表面化学粘涂技术
		复合表面技术
		摩擦化学膜技术
		表面机械强化技术
	表面加工技术	表面预处理加工
		表面层的机械加工
		表面层的特种加工
	表面质量检测与控制	表面几何特性及检测
		表面力学特性及检测
		表面物理、化学特性及检测
		表面分析技术
	表面工程技术设计	表面层结构设计
		表面层工艺设计
		表面层材料设计
		表面工程车间设计及表面工程车
		表面工程技术经济分析

表 1-2 表面工程的体系之二

表面工程	表面科学	一般基础理论	表面物理
			表面化学
		专用基础理论	腐蚀与防护
			镀覆层形成机制
			镀覆层附着力
			电化学
			膜科学
			感光化学、发光材料
			化学催化及酶催化
			半导体理论
			其他新技术
	表面工程技术	电化学方法	
		化学方法	
		热加工方法	
		真空技术	
		其他表面技术	
	表面工程应用	表面强化	
		表面防护	
		表面改性	
		半导体材料、大规模集成电路	
		新型功能材料	
		指令膜及涂装	
		生物防护、伪装等特种涂料	

1.2 表面工程技术的分类与作用

1.2.1 表面工程技术的分类

从不同的角度观察和分析,表面工程技术可以有多种分类方法。

1. 按表面化学成分改变与否分类

(1) 表面化学成分改变 在改变表面化学成分的同时,也改变了表面的组织结构,进而使表面具有了不同的性能。

1) 表面有镀覆层。通过涂装、贴片、包箔、电镀、化学镀、气相沉积、熔覆、热喷涂、热浸镀、堆焊等表面覆层的方法,在基体表面形成一层或数层、有一

定厚度的、与基体不同的材料,获得化学组成、组织结构、性能有别于基体的表面镀覆层。

2) 表面无附加覆层。利用阳极氧化、化学热处理、表面合金化、离子注入等表面改性的方法,使所需的原子(或离子)进入基体表面,达到改变基体表面化学组成、相结构、性能的目的。

(2) 表面化学成分不改变 保持原材料表面的化学成分不变,通过表面淬火、喷丸、滚压、重熔等方法改变表面的组织结构,进而改善或提高表面的使用性能。

2. 按作用机制分类

(1) 原子沉积 沉积物质以原子、离子、分子和粒子团等原子尺度粒子形态在材料表面构成外加镀覆层,包括电镀、化学镀、气相沉积等。

(2) 颗粒沉积 沉积物质以宏观颗粒的形态在材料表面形成覆盖层,包括热喷涂、搪瓷涂敷等。

(3) 整体覆盖 将覆层材料均匀涂敷于材料的工作表面,包括热浸镀、贴片、涂装、堆焊等。

(4) 表面改性 利用物理、化学、机械等方法改变材料表面的结构和性能,包括电化学转化、表面处理、化学热处理、离子注入、喷丸等。

3. 按表面覆层种类分类

(1) 表面无覆层 通过化学预处理、精整、机械强化等,不改变基体表面的化学组成,只改变其表面形态、应力状态、组织结构等。

(2) 表面金属覆层 利用电镀、化学镀、热喷涂、热浸镀、熔覆、气相沉积、表面合金化等,在基体表面形成金属、合金、金属基复合层。

(3) 表面有机覆层 使用涂装等方法,在基体表面涂覆涂料、橡胶、塑料、柏油涂层等。

(4) 表面无机覆层 借助热喷涂、熔烧、烘烤等方法,在基体表面涂覆搪瓷、玻璃、陶瓷、水泥涂层等。

(5) 表面化学转化层 通过电化学、化学处理,在钢铁或锌、铝、镁、钛金属或合金表面形成氧化物、磷酸盐、铬酸盐、草酸盐膜层等。

4. 按表面层功能特性分类

(1) 装饰 表面具有不同的色泽、花纹等,美化材料的外观,增加视觉欣赏性。

(2) 耐磨减摩 表面耐磨粒磨损、粘着磨损、腐蚀磨损等,抗擦伤咬死、减摩自润滑、可磨耗密封等。

(3) 耐腐蚀 耐大气、海水、土壤、化学介质浸渍腐蚀等。

(4) 耐热及热功能 耐热、抗高温氧化、抗热疲劳、热绝缘、热辐射等。

(5) 光、电、磁等 透光、反光、消光、导电、超导、绝缘、半导体、软磁、硬磁、磁光等。

(6) 其他 吸波、红外反射、太阳能吸收、屏蔽、焊接性、热加工、修复、催化、生物功能等。

5. 按工艺方法特点分类

(1) 电化学法 利用电极反应在材料基体表面形成镀覆层, 如电镀、电刷镀、阳极氧化等。

(2) 化学法 利用化学物质的相互作用和转化, 在基体表面形成镀覆层, 如化学镀、化学转化等。

(3) 热加工法 在高温下将材料熔融或热扩散, 在基体表面形成涂、渗层, 如热喷涂、热浸镀、堆焊、熔覆、表面合金化等。

(4) 高真空法 利用材料在高真空条件下汽化、受激离子化而形成的表面镀覆层, 如真空蒸镀、离子镀、溅射镀等。

1.2.2 表面工程技术的作用和功能

1. 提高材料抵御磨损、腐蚀的能力, 延长零件的使用寿命

磨损消耗了机器运转的能量, 导致了接触表面的损坏, 缩短了零部件的使用寿命, 损耗了大量的材料。利用表面工程技术在材料表面形成抗磨层可以避免或减轻磨损造成的破坏, 节约能源和原材料, 延长机器的使用寿命。各种表面镀覆技术不但可使零件具备适应恶劣环境和特殊工况条件的能力, 又能以高性能镀覆层与普通材料的组合来代替昂贵的整体材料。因此, 提高材料表面摩擦学性能的表面强化处理和对摩擦表面施加耐磨镀覆层处理等具有十分重要的意义。采用有效的表面工程技术, 可以减少零件的磨损损失 1/3 以上。例如, 阀门硬密封面、冲头、运煤机输送槽板、刀具、模具等, 使用等离子涂覆、真空熔结等技术形成高耐磨复合涂层, 可延长使用寿命 4~6 倍。

材料的腐蚀问题遍及国民经济各个领域。据统计, 每年因腐蚀造成的直接损失大约占发达国家国民生产总值的 4% 以上, 世界范围内每年因腐蚀造成报废的金属材料约占金属年总产量的 1/3。而且, 各种腐蚀也增加了对环境的污染程度, 引发了飞机坠毁、桥梁坍塌、锅炉爆炸、油气管道泄漏等人为灾难事故。表面镀覆层隔绝了基体材料与空气、CO₂ 等的接触, 延缓了大气和腐蚀性气体的腐蚀进程。保护性镀覆层是防止金属材料免受海水腐蚀普遍采用的方法, 仅油漆涂层就有防锈油漆层、防生物污染的防污漆层等。对于处在海洋潮汐区和飞溅区的某些结构和装置, 表面包覆蒙乃尔合金可以防止海水的腐蚀。在材料表面采取有效的防护方法, 可减少腐蚀损失 15%~30%。对化工装置、耐热炉件、汽车排气系统、消声器、烟囱、挡热板等零部件表面形成热浸镀铝层后, 可提高表面抗硫化气氛腐蚀, 热反射率可达 80% 以上, 使其在 500~900℃ 温度区间具有优异的耐热性能。

2. 赋予材料表面以特殊的物理、化学性能

材料表面的化学组成、组织结构等决定了材料在服役条件下所表现出来的功能特性,因此有目的地对材料表面进行重新构造,就能够获得基体材料原本不具备的性能,拓展材料的用途及制造新的器件。利用表面工程技术可以在材料的表面形成功能镀覆层,使表面具有优异的物理、化学、生物特性及其相互转化的功能。表1-3介绍了利用表面工程技术制备功能镀覆层的情况。

表 1-3 表面工程技术制备功能镀覆层的应用举例

领 域	性 能 要 求	表面工程技术	镀覆层种类	应 用
热 学	耐热	热喷涂	Fe、Ni、Ti、Al 基涂层	轧辊、导卫
	抗氧化	熔覆、热喷涂、扩渗、电化学沉积	铝化物涂层、MnCrAlY 涂层、Ni 基非晶态镀层、陶瓷涂层	涡轮机叶片
	隔热	等离子喷涂、物理气相沉积	ZrO ₂ 陶瓷材料等	燃烧室
	导热	等离子化学气相沉积、电镀	BN-SiN 陶瓷薄膜、Fe-Ni 合金镀层等	散热器
	保温	涂敷	聚氨酯材料	保温涂层
	吸热	磁控溅射	Al-Al ₂ O ₃ 金属陶瓷复合膜	吸热型热控薄膜材料
磁 学	磁记录	气相沉积、电镀、化学镀	Fe 基、Co 基、Ni 基合金薄膜等	磁记录介质薄膜
	磁光记录		Tb-Fe-Co、Gd-Fe-Co 薄膜等	磁光记录介质薄膜
	存储记忆	脉冲激光沉积、化学气相沉积、溶胶-凝胶	Cu ₂ S、A (Sr ²⁺ 、Ba ²⁺ 、Pb ²⁺ 等) Bi ₂ B (Ta ⁵⁺ 、Nb ⁵⁺ 等) ₂ O ₉ 薄膜等	固体电解质薄膜、铁电记忆薄膜
	电磁屏蔽	热喷涂、电镀、化学镀、气相沉积、贴片	有机涂层(银系、铜系、镍系、碳系等)、Fe/Ni、Cu/Ni、Ni 基镀覆层	电磁屏蔽镀覆层
	吸波	涂敷	铁氧体、金属微粉、导电高分子等	吸波涂层

(续)

领 域	性 能 要 求	表面工程技术	镀膜层种类	应 用
电 学	导电	热解喷雾、涂覆、浸渍、溶胶-凝胶、气相沉积	金属膜、金属氧化物膜、高分子膜、复合膜、化合物膜等	导电玻璃、气敏元件、抗静电涂层
	电阻	热分解、气相沉积、电镀、化学镀、涂覆	非金属膜、金属膜、金属氧化物膜、合成膜等	薄膜电阻
	超导	表面扩散、溅射	MgB ₂ 膜、外延 YB-CuO 薄膜等	高温超导量子干涉器件、高温超导延迟线
	绝缘	气相沉积、直接渗氮法	SiO ₂ 多层复合薄膜、渗氮硅薄膜等	绝缘薄膜
	半导体	气相沉积	GaN 半导体薄膜、 β -FeSi ₂ 、微晶硅薄膜等	半导体器件
	波导	溶胶-凝胶、气相沉积	SiO ₂ /ZrO ₂ /H 薄膜、高纯 Ge 膜等	光功率分配器、波导光电探测器
光 学	增透	气相沉积、电镀、化学镀	MgF ₂ 增透膜等	透镜、手机视屏
	反光	气相沉积	金属、Na ₃ AlF ₆ 、MgF ₂ 介质膜等	反光镜
	滤光	气相沉积、浸渍法	Al/MgF ₂ 多层膜、聚苯乙烯(C ₈ H ₈)膜等	滤光片
	偏振	气相沉积、涂敷	Au、Ag/介质多层膜等	起偏器、检偏器
	光吸收	气相沉积、离子注入	金属/半导体/减反多层膜等	太阳能电池、护目镜
	分光	气相沉积	多层介质膜等	分光镜
	发光	溶胶-凝胶	Al ₂ O ₃ : Tb ³⁺ 薄膜等	硅基光电子器件
功 能 转 换	光-电转换	水热法合成	TiO ₂ 改性薄膜等	薄膜太阳能电池
	电-光转换	气相沉积、热扩散	SiO ₂ : Si 薄膜、ZnS: Mn、ZnS: Mn/SrS: Ce 多层膜等	电致发光器件
	热-电转换	气相沉积	SnO ₂ 等金属氧化物/Ni-Cr 多层膜等	电阻式温度传感器
	电-热转换	气相沉积	Cr、Ni-Cr 薄膜等	金属薄膜加热器
	光-热转换	溶胶-凝胶	Ni-Al ₂ O ₃ 薄膜等	太阳光热转换吸收薄膜