

# 现 代 表 面 技 术

钱苗根 姚寿山 张少宗 编著

本书阐述了现代表面技术的涵义、分类、应用和发展,介绍了表面科学的某些基本概念和理论,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,论述了表面分析和检测的内容和功能。本书共分10章,主要内容有:表面技术概论、表面科学的某些基本概念和理论、电镀和化学镀、金属的化学处理、表面涂敷技术、表面改性技术、气相沉积技术、复合表面处理和高分子表面金属化技术、表面微细加工技术、表面分析和检测。

本书是有关表面技术的一本基本教材,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其他领域中管理、研究、设计、制造方面人员阅读。

## 现 代 表 面 技 术

钱苗根 姚寿山 张少宗 编著

\*

责任编辑:张蔼玲 版式设计:霍永明

封面设计:方 芬 责任校对:刘志文

责任印制:何全君

\*

机械工业出版社出版(北京市百万庄大街22号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

煤炭工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·印张 19.75·字数 479千字

1999年4月第1版第1次印刷

印数 0001-4500 定价:28.00元

\*

ISBN 7-111-01898-2/TG·1271

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、68326677-2527

## 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 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。

钱苗根执笔

1998 年 11 月于上海交通大学

# 目 录

## 前 言

## 第一章 表面技术概论 ..... 1

### 第一节 表面技术的涵义 ..... 1

#### 一、使用表面技术的目的 ..... 1

#### 二、与表面现象有关的一些表面技术 ..... 1

### 第二节 表面技术的分类 ..... 3

#### 一、表面技术的基础和应用理论 ..... 3

#### 二、表面覆盖技术 ..... 3

#### 三、表面改性技术 ..... 6

#### 四、复合表面处理技术 ..... 7

#### 五、表面加工技术 ..... 7

#### 六、表面分析和测试技术 ..... 8

#### 七、表面工程技术设计 ..... 8

### 第三节 表面技术的应用 ..... 8

#### 一、表面技术应用的广泛性和重要性 ..... 8

#### 二、表面技术在结构材料以及工程构件 和机械零部件上的应用 ..... 9

#### 三、表面技术在功能材料和元器件上的 应用 ..... 10

#### 四、表面技术在人类适应、保护和优化 环境方面的一些应用 ..... 11

#### 五、表面技术在研究和生产新型材料中 的应用举例 ..... 12

### 第四节 表面技术的发展 ..... 15

#### 参考文献 ..... 18

## 第二章 表面科学的某些基本概念和 理论 ..... 19

### 第一节 固体材料及其表面 ..... 19

#### 一、固体材料 ..... 19

#### 二、材料表面 ..... 20

### 第二节 表面晶体学 ..... 20

#### 一、理想表面结构 ..... 20

#### 二、清洁表面结构 ..... 23

#### 三、实际表面结构 ..... 27

### 第三节 表面热力学 ..... 32

#### 一、液体的表面张力与表面自由能 ..... 32

#### 二、固体的表面张力与表面自由能 ..... 32

#### 三、表面吸附热力学 ..... 34

### 第四节 表面动力学 ..... 36

#### 一、晶格中原子的热振动 ..... 36

#### 二、表面原子的热振动 ..... 39

#### 三、表面扩散 ..... 45

### 第五节 表面电子学 ..... 51

#### 一、基本概念 ..... 51

#### 二、清洁表面的电子结构 ..... 55

#### 参考文献 ..... 59

## 第三章 电镀和化学镀 ..... 60

### 第一节 电镀 ..... 60

#### 一、电镀基本知识 ..... 60

#### 二、电镀工艺过程中的镀前预处理和镀后 处理 ..... 67

#### 三、电镀金属 ..... 67

#### 四、电镀合金 ..... 69

### 第二节 电刷镀 ..... 74

#### 一、基本原理 ..... 75

#### 二、电刷镀设备 ..... 75

#### 三、电刷镀溶液 ..... 76

#### 四、电刷镀工艺 ..... 79

### 第三节 化学镀 ..... 80

#### 一、化学镀镍 ..... 80

#### 二、化学镀铜 ..... 82

#### 参考文献 ..... 84

## 第四章 金属的化学处理（化学转 化膜） ..... 85

### 第一节 氧化处理 ..... 85

#### 一、钢铁的化学氧化 ..... 85

#### 二、有色金属的化学氧化 ..... 89

### 第二节 铝及铝合金的阳极氧化 ..... 91

#### 一、阳极氧化膜的形成机理 ..... 91

#### 二、铝及其合金的阳极氧化工艺 ..... 92

#### 三、阳极氧化膜的着色和封闭 ..... 94

### 第三节 磷化处理 ..... 97

#### 一、钢铁的磷化处理 ..... 97

#### 二、有色金属的磷化处理 ..... 100

|                        |     |                  |     |
|------------------------|-----|------------------|-----|
| 第四节 铬酸盐处理              | 101 | 四、热镀铝            | 154 |
| 一、铬酸盐膜的形成过程            | 101 | 第八节 搪瓷涂敷         | 155 |
| 二、铬酸盐膜的组成和结构           | 101 | 一、瓷釉的基本成分和釉浆     | 155 |
| 三、铬酸盐处理工艺              | 102 | 二、搪瓷的金属基材及表面清洁处理 | 158 |
| 参考文献                   | 104 | 三、釉浆的涂敷和搪瓷烧成     | 158 |
| 第五章 表面涂敷技术             | 105 | 四、搪瓷制品的分类和应用     | 158 |
| 第一节 涂料与涂装              | 105 | 第九节 陶瓷涂层         | 159 |
| 一、涂料                   | 105 | 一、陶瓷涂层的分类和选用     | 159 |
| 二、涂装工艺                 | 112 | 二、陶瓷涂层的工艺及其特点    | 160 |
| 第二节 粘结与粘涂              | 114 | 三、几种典型的陶瓷涂层      | 161 |
| 一、胶粘剂分类                | 114 | 第十节 塑料涂敷         | 163 |
| 二、粘结原理                 | 115 | 一、塑料粉末涂料         | 163 |
| 三、被粘物的表面处理             | 115 | 二、塑料粉末涂敷方法       | 164 |
| 四、主要胶粘剂简介              | 116 | 三、塑料涂敷的发展前景      | 165 |
| 五、胶粘剂的应用               | 118 | 参考文献             | 165 |
| 六、粘涂技术                 | 119 | 第六章 表面改性技术       | 167 |
| 第三节 堆焊                 | 120 | 第一节 金属表面形变强化     | 167 |
| 一、堆焊材料的分类              | 120 | 一、表面形变强化原理       | 167 |
| 二、常用堆焊材料及堆焊工艺          | 120 | 二、表面形变强化的主要方法及应用 | 167 |
| 三、堆焊方法与设备的选择           | 127 | 第二节 表面热处理        | 174 |
| 第四节 热喷涂                | 128 | 一、感应加热表面淬火       | 174 |
| 一、热喷涂原理                | 128 | 二、火焰加热表面淬火       | 178 |
| 二、热喷涂的种类和特点            | 129 | 三、接触电阻加热表面淬火     | 179 |
| 三、热喷涂预处理               | 130 | 四、浴炉加热表面淬火       | 180 |
| 四、热喷涂材料                | 132 | 五、电解液加热表面淬火      | 180 |
| 五、热喷涂装置和设备             | 135 | 六、高密度能量的表面淬火     | 180 |
| 六、热喷涂工艺                | 135 | 七、表面光亮热处理        | 180 |
| 七、热喷涂涂层后处理和涂层性能的<br>检验 | 137 | 第三节 金属表面化学热处理    | 182 |
| 第五节 电火花表面涂敷            | 141 | 一、概述             | 182 |
| 一、电火花表面涂敷原理和特点         | 141 | 二、渗硼             | 183 |
| 二、电火花涂敷工艺及应用           | 143 | 三、渗碳、渗氮、碳氮共渗     | 187 |
| 三、电火花涂敷层的特性            | 144 | 四、渗金属            | 188 |
| 四、电火花涂敷应用实例            | 146 | 五、渗其他元素          | 191 |
| 第六节 熔结                 | 148 | 六、表面氧化和着色处理      | 193 |
| 一、熔结的涵义                | 148 | 七、电化学热处理         | 193 |
| 二、自熔性合金                | 148 | 八、电解化学热处理        | 194 |
| 三、氧—乙炔焰喷焊              | 149 | 九、真空化学热处理        | 194 |
| 四、真空熔结                 | 149 | 第四节 等离子体表面处理     | 195 |
| 第七节 热浸镀                | 151 | 一、等离子体的物理概念      | 195 |
| 一、热浸镀层的种类              | 151 | 二、离子渗氮           | 195 |
| 二、热浸镀工艺                | 151 | 三、离子渗碳、离子碳氮共渗    | 197 |
| 三、热镀锌                  | 152 | 第五节 激光表面处理       | 198 |
|                        |     | 一、激光的特点          | 198 |

|                                |     |                            |     |
|--------------------------------|-----|----------------------------|-----|
| 二、激光表面处理设备                     | 199 | 二、几种常用的离子镀                 | 238 |
| 三、激光表面处理技术                     | 204 | 三、物理气相沉积的三种基本方法之<br>比较     | 241 |
| 第六节 电子束表面处理                    | 207 | 第六节 化学气相沉积                 | 242 |
| 一、电子束表面处理主要特点                  | 208 | 一、化学气相沉积原理                 | 242 |
| 二、电子束表面处理工艺                    | 208 | 二、化学气相沉积技术的分类和简介           | 243 |
| 三、电子束表面处理设备                    | 209 | 三、CVD 技术在工模具上的应用           | 246 |
| 四、电子束表面处理的应用                   | 209 | 第七节 分子束外延                  | 248 |
| 第七节 高密度太阳能表面处理                 | 209 | 一、分子束外延的特点                 | 248 |
| 一、太阳能表面处理设备                    | 209 | 二、分子束外延装置和方法               | 248 |
| 二、太阳能表面淬火                      | 210 | 三、分子束外延的应用                 | 249 |
| 三、太阳能表面处理的应用                   | 210 | 第八节 离子束合成薄膜技术              | 249 |
| 四、几种高能密度表面改性技术用于金<br>属表面热处理的比较 | 210 | 一、离子束在薄膜合成中的应用             | 249 |
| 第八节 离子注入表面改性                   | 211 | 二、直接引出式离子束沉积               | 250 |
| 一、离子注入的原理                      | 212 | 三、质量分离式离子束沉积               | 250 |
| 二、沟道效应和辐照损伤                    | 212 | 四、簇团离子束沉积                  | 250 |
| 三、离子注入的特征                      | 213 | 五、离子束增强沉积                  | 251 |
| 四、离子注入表面改性的机理                  | 213 | 参考文献                       | 251 |
| 五、离子注入的应用                      | 214 | 第八章 复合表面处理和高分子表面<br>金属化技术  | 253 |
| 参考文献                           | 216 | 第一节 复合表面处理技术               | 253 |
| 第七章 气相沉积技术                     | 217 | 一、复合表面化学热处理                | 253 |
| 第一节 薄膜及其制备方法                   | 217 | 二、表面热处理与表面化学热处理的复<br>合强化处理 | 253 |
| 一、薄膜的定义和基本性质                   | 217 | 三、热处理与表面形变强化的复合处理<br>工艺    | 255 |
| 二、薄膜的形成过程及研究方法                 | 218 | 四、镀覆层与热处理的复合处理工艺           | 255 |
| 三、薄膜的种类和应用                     | 219 | 五、覆盖层与表面冶金化的复合处理<br>工艺     | 255 |
| 四、薄膜的制备方法                      | 219 | 六、离子辅助涂覆 (IAC)             | 255 |
| 第二节 真空技术基础                     | 220 | 七、激光、电子束复合气相沉积和复合<br>涂镀层   | 256 |
| 一、真空度和真空区域的划分                  | 220 | 八、离子注入与气相沉积复合表面<br>改性      | 257 |
| 二、真空的特点和应用                     | 220 | 第二节 高分子表面金属化技术             | 257 |
| 三、真空中的气体分子特性                   | 221 | 一、高分子表面金属化新技术的主要工<br>艺及特点  | 258 |
| 四、真空的获得                        | 222 | 二、应用与前景                    | 258 |
| 五、真空泵型号和真空机组                   | 223 | 参考文献                       | 259 |
| 六、真空测量和检漏                      | 224 | 第九章 表面微细加工技术               | 260 |
| 第三节 真空蒸镀                       | 228 | 第一节 表面加工技术简介               | 260 |
| 一、真空蒸镀原理                       | 228 | 一、光刻加工                     | 260 |
| 二、真空蒸镀方式和设备                    | 229 |                            |     |
| 三、真空蒸镀工艺                       | 230 |                            |     |
| 第四节 溅射镀膜                       | 232 |                            |     |
| 一、溅射镀膜原理                       | 232 |                            |     |
| 二、溅射镀膜的特点和方式                   | 234 |                            |     |
| 三、溅射镀膜设备和工艺                    | 237 |                            |     |
| 第五节 离子镀                        | 238 |                            |     |
| 一、离子镀的概念                       | 238 |                            |     |

|                                 |     |                                                   |     |
|---------------------------------|-----|---------------------------------------------------|-----|
| 二、电子束加工 .....                   | 262 | 一、电子显微镜 (TEM) .....                               | 281 |
| 三、离子束加工 .....                   | 263 | 二、场离子显微镜 (FIM) .....                              | 283 |
| 四、激光束加工 .....                   | 264 | 三、扫描隧道显微镜 (STM) .....                             | 283 |
| 五、超声波加工 .....                   | 265 | 四、原子力显微镜 (AFM) .....                              | 285 |
| 六、电火花加工 .....                   | 266 | 五、X 射线衍射 .....                                    | 286 |
| 七、电解加工 .....                    | 267 | 六、电子衍射 .....                                      | 286 |
| 八、电铸加工 .....                    | 268 | 七、X 射线光谱仪和电子探针 .....                              | 288 |
| 第二节 微电子微细加工技术 .....             | 269 | 八、质谱仪和离子探针 .....                                  | 290 |
| 一、微细加工技术对微电子技术发展的<br>重大影响 ..... | 269 | 九、激光探针 .....                                      | 290 |
| 二、微电子微细加工技术的分类和<br>内容 .....     | 270 | 十、电子能谱仪 .....                                     | 291 |
| 参考文献 .....                      | 273 | 十一、弹道电子发射显微术 (BEEM) ...                           | 295 |
| 第十章 表面分析和测试 .....               | 274 | 十二、扫描近场光学显微镜 (SNOM)<br>和光子扫描隧道显微镜<br>(PSTM) ..... | 295 |
| 第一节 表面分析 .....                  | 274 | 第三节 表面检测 .....                                    | 296 |
| 一、表面形貌和显微组织结构分析 .....           | 274 | 一、表面检测的内容 .....                                   | 296 |
| 二、表面成分分析 .....                  | 277 | 二、两类典型的表面检测 .....                                 | 298 |
| 三、表面原子排列结构分析 .....              | 280 | 参考文献 .....                                        | 302 |
| 四、表面原子动态和受激态分析 .....            | 280 | 附录 《现代表面技术》课程教学<br>大纲 .....                       | 304 |
| 五、表面的电子结构分析 .....               | 281 |                                                   |     |
| 第二节 表面分析仪器和测试技术简介 .....         | 281 |                                                   |     |

# 第一章 表面技术概论

## 第一节 表面技术的涵义

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 30 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 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。

### 一、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。

表面技术主要是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：

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、粘结、堆焊、熔结、热喷涂、塑料粉末涂敷、热浸涂、搪瓷涂敷、陶瓷涂敷、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，等等。

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。

### 二、与表面现象有关的一些表面技术

广义地说，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。又如矿物浮选是利用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，从而能粘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 (Membrane)，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、复膜和皮肤等，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介物质相。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，例如血液净化、透析、过滤、血浆分离、人工肺以及富氧膜等（有时为克服生物相容性的一些困难，常配合一些药物如肝素等）。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，尤其是涉及到固—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等。

由此可见，表面技术具有非常广泛的涵义。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、膜技术等因限于篇幅而未能包括在内。

## 第二节 表面技术的分类

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、搪瓷涂敷等。

(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涵义，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) 表面工程技术设计。

现将各部分所包含的内容简略介绍如下。

### 一、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等，它们对表面技术的发展和應用有着直接的、重要的影响。

### 二、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. 粘结

它是用粘结剂将各种材料或制件连结成为一个牢固整体的方法，称为粘结或粘合。粘结剂有天然胶粘剂和合成胶粘剂，目前高分子合成胶粘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敷金属涂层，但用的涂敷金属是一些以铁、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敷、激光熔敷和喷熔涂敷等。

## 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. 塑料粉末涂敷

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，牢固地涂敷在工件表面，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、静电振荡法等等。

## 10. 电火花涂敷

这是一种直接利用电能的高密度能量对金属表面进行涂敷处理的工艺，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，它可分为熔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. 搪瓷涂敷

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。涂敷方法有浸涂、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. 陶瓷涂敷

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温涂层，用于金属表面主要在室温和高温起耐蚀、耐磨等作用。主要涂敷方法有刷涂、浸涂、喷涂、电泳涂和各种热喷涂等等。有的陶瓷涂层有光、电、生物等功能。

#### 14. 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、高频感应、电子束、激光、电弧加热等。

#### 15. 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 左右，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。

#### 16. 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。

#### 17. 化学气相沉积 (Chemical Vapor Deposition, 简称 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、光激发反应等等。工件加热方式有电阻、高频感应、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、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。

#### 18. 分子束外延 (Molecular Beam Epitaxy, 简称 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。

#### 19. 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 (Ion Cluster Beam, 简称 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。

#### 20. 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、锌的铬酸盐钝化等等。

#### 21. 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。

#### 22. 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。

### 三、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。主要方法有感应加热淬火、火焰加热表面淬火、接触电阻加热淬火、电解液淬火、脉冲加热淬火、激光热处理和电子束加热处理等。

#### 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，由抛物面聚焦点、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，对复杂形状的工件注入有困难。

### 四、复合表面处理技术

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处理将获得迅速发展。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。目前已开发的一些复合表面处理如等离子喷涂与激光辐照复合、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等，已经取得良好效果，有的还有意想不到的效果。

### 五、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，在精细化上已从微米级、亚微米级发展到纳米级，对表面加工技术的要求越来越苛刻，其中半导体器件的发展是典型的实例。

集成电路的制作,从晶片、掩模制备开始,经历多次氧化、光刻、腐蚀、处延掺杂(离子注入或扩散)等复杂工序,以后还包括划片、引线焊接、封装、检测等一系列工序,最后得到成品。在这些繁杂的工序中,表面的微细加工起了核心作用。所谓的微细加工是一种加工尺度从亚微米到纳米量级的制造微小尺寸元器件或薄膜图形的先进制造技术,主要包括:

(1) 光子束、电子束和离子束的微细加工。

(2) 化学气相沉积、等离子化学气相沉积、真空蒸发镀膜、溅射镀膜、离子镀、分子束外延、热氧化的薄膜制造。

(3) 湿法刻蚀、溅射刻蚀,等离子刻蚀等图形刻蚀。

(4) 离子注入扩散等掺杂技术。

还有其他一些微细加工技术。它们不仅是大规模和超大规模集成电路的发展基础,也是半导体微波技术、声表面波技术、光集成等许多先进技术的发展基础。

## 六、表面分析和测试技术

各种表面分析仪器和测试技术的出现,不仅为揭示材料本性和发展新的表面技术提供了坚实的基础,而且为生产上合理使用或选择合适的表面技术,分析和防止表面故障,改进工艺设备,提供了有力的手段。

## 七、表面工程技术设计

随着研究的逐步深入和经验的不断积累,人们对材料表面技术的研究,已经不满足于一般的试验、选择、使用和开发,而是要力争按预定的技术和经济指标进行严密的设计,逐步形成一种充分利用计算机技术,借助数据库、知识库、推理机等工具,通过演绎和归纳等科学方法,而能获得最佳效益的设计系统。这类设计系统包括:

(1) 材料表面镀涂层或处理层的成分、结构、厚度、结合强度以及各种要求的性能。

(2) 基体材料的成分、结构和状态等。

(3) 实施表面处理或加工的流程、设备、工艺、检验等。

(4) 综合的管理、经济、环保等分析设计。

目前虽然在许多场合这套设计系统尚不完善,有的差距还很大,但是今后一定能逐步得到完善,使众多的表面技术发挥更大的作用。

# 第三节 表面技术的应用

## 一、表面技术应用的广泛性和重要性

目前表面技术的应用极其广泛,已经遍及各行各业,包含的内容也十分广泛,可以用于耐蚀、耐磨、修复、强化、装饰等,也可以是光、电、磁、声、热、化学、生物等方面的应用。表面技术所涉及的基体材料不仅有金属材料,也包括无机非金属材料、有机高分子材料及复合材料。表面技术的种类很多,把这些技术恰当地应用于构件、零部件和元器件,可以获得巨大的效益。

表面技术应用的重要性主要在于:

(1) 材料的疲劳断裂、磨损、腐蚀、氧化、烧损以及辐照损伤等,一般都是从表面开始的,而它们带来的破坏和损失是十分惊人的,例如仅腐蚀一项,全世界每年损耗金属达一亿吨以上,工业发达国家因腐蚀破坏造成的经济损失约占国民经济总产值的2%~4%,超过

水灾、火灾、地震和飓风等所造成的总和。因此，采用各种表面技术，加强材料表面保护具有十分重要的意义。

(2) 随着经济和科学技术的迅速发展，人们对各种产品抵御环境作用能力和长期运行的可靠性、稳定性提出了越来越高的要求。在许多情况下，构件、零部件和元器件的性能和质量，主要取决于材料表面的性能和质量。例如由于表面技术有了很大的改进，材料表面成分和结构可得到严格的控制，同时又能进行高精度的微细加工，因而许多电子元器件不仅可做得越来越小，大大缩小了产品的体积和减轻了重量，而且生产的重复性、成品率和产品的可靠性、稳定性都获得显著提高。

(3) 许多产品的性能主要取决于表面的特性和状态，而表面（层）很薄，用材十分少，因此表面技术可实现以最低的经济成本来生产优质产品。同时，许多产品要求材料表面和内部具有不同的性能或者对材料提出其他一些棘手的难题，如“材料硬而不脆”、“耐磨而易切削”、“体积小而功能多”等等，此时表面技术就成了必不可少或唯一的途径。

(4) 应用表面技术，有可能在广阔的领域中生产各种新材料和新器件。目前表面技术已在制备高  $T_c$ （临界温度）超导膜、金刚石膜、纳米多层膜、纳米粉末、纳米晶体材料、多孔硅、碳 60 等新型材料中起关键作用，同时又是许多光学、光电子、微电子、磁性、量子、热工、声学、化学、生物等功能器件的研究和生产上的最重要的基础之一。表面技术的应用使材料表面具有原来没有的性能，大幅度拓宽了材料的应用领域，充分发挥材料的潜力。

## 二、表面技术在结构材料以及工程构件和机械零部件上的应用

结构材料主要用来制造工程建筑中的构件、机械装备中的零部件以及工具、模具等，在性能上以力学性能为主，同时许多场合又要求兼有良好的耐蚀性和装饰性。表面技术在这方面主要起着防护、耐磨、强化、修复、装饰等重要作用。

表面防护具有广泛的涵义，而这里所说的“防护”主要指材料表面防止化学腐蚀和电化学腐蚀等能力。腐蚀问题是普遍存在的。工程上主要从经济和使用可靠性角度来考虑这个问题。有时宜用价廉的金属定期更换旧的腐蚀件，但在许多情况下必须采用一些措施来防止或控制腐蚀，如改进工程构件的设计；构件金属中加入合金元素；尽可能减小或消除材料上的电化学不均匀因素；控制环境，采用阴极保护法等等。另一方面，许多表面技术通过改变材料表面的成分和结构以及施加覆盖层都能显著提高材料或制件的防护能力。

耐磨是指材料在一定摩擦条件下抵抗磨损的能力。它与材料特性以及载荷、速度、温度等磨损条件有关。耐磨性通常以磨损量表示；为在一定程度上避免磨损过程中因条件变化及测量误差造成的系统误差，也常以相对耐磨性（即两种材料在相同磨损条件下测定的磨损量的比值）来表示。目前对磨损的分类尚未完全统一，大体有磨料、粘着、疲劳腐蚀、冲蚀、气蚀等磨损。正确确定磨损类别，是选材和采取保护措施的重要依据。采用各种表面技术是提高材料或制件耐磨性的有效途径之一。由于不同类型的磨损与材料表面性能的关系不同，所以要合理选择表面技术和具体的工艺。

强化与防护一样，具有广泛的涵义。这里所说的“强化”，主要指通过各种表面强化处理来提高材料表面抵御除腐蚀和磨损之外的环境作用的能力。例如疲劳破坏，它也是从材料表面开始的，通过表面处理，如化学热处理、喷丸、滚压、激光表面处理等，可以显著提高材料疲劳强度。又如许多制品要求表面强度和硬度高，而心部韧性好，以提高使用寿命，通过合理的选择材料和表面强化处理，能满足这个要求。

在工程上,许多零部件因表面强度、硬度、耐磨性等不足而逐渐磨损、剥落、锈蚀,使外形变小以致尺寸超差或强度降低,最后不能使用。不少表面技术如堆焊、电刷镀、热喷涂、电镀、粘结等,具有修复功能,不仅可修复尺寸精度,而且往往还可提高表面性能,延长使用寿命。

表面装饰主要包括光亮(镜面、全光亮、亚光、光亮缎状,无光亮缎状等)、色泽(各种颜色和多彩等)、花纹(各种平面花纹,刻花和浮雕等)、仿照(仿贵金属、仿大理石、仿花岗石等)多方面特性。用恰当的表面技术,可对各种材料表面装饰,不仅方便、高效,而且美观、经济,故应用广泛。

### 三、表面技术在功能材料和元器件上的应用

材料根据所起的作用大致可以分为结构材料和功能材料两大类。但是,确切地说,并非结构材料以外的材料都可称为功能材料。实际上,功能材料主要指那些具有优良的物理、化学和生物等功能及其相互转化的功能,而被用于非结构目的之高技术材料。功能材料常用来制造各种装备中具有独特功能的核心部件,起着十分重要的作用。

功能材料与结构材料相比较,除了两者性能上的差异和用途不同之外,另一个重要特点是材料通常与元器件“一体化”,即功能材料常以元器件形式对其性能进行评价。

材料的许多性质和功能与表面组织结构密切相关,因而通过各种表面技术可制备或改进一系列功能材料及其元器件。表 1-1 是表面技术在功能材料和元器件上的部分应用情况。

表 1-1 表面技术在功能材料和器件上的部分应用情况

| 作用   | 简要说明    | 常用技术             | 应用举例              |
|------|---------|------------------|-------------------|
| 光学特性 | 反射性     | 电镀、化学转化处理、涂装气相沉积 | 反射镜               |
|      | 防反射性    |                  | 防眩零件              |
|      | 增透性     |                  | 激光材料增透膜           |
|      | 光选择透过   |                  | 反射红外线、透过可见光的透明隔热膜 |
|      | 分光性     |                  | 用多层介质膜组成的分光镜      |
|      | 光选择吸收   |                  | 太阳能选择吸收膜          |
|      | 偏光性     |                  | 起偏器               |
|      | 发光      |                  | 光致发光材料            |
|      | 光记忆     |                  | 薄膜光致变色材料          |
| 电学特性 | 导电性     | 涂装、化学镀、气相沉积等     | 表面导电玻璃            |
|      | 超导性     |                  | 用表面扩散制成的 Nb-Sn 线材 |
|      | 约瑟夫逊效应  |                  | 约瑟夫逊器件            |
|      | 各种电阻特性  |                  | 膜电阻材料             |
|      | 绝缘性     |                  | 绝缘涂层              |
|      | 半导性     |                  | 半导体材料(膜)          |
|      | 波导性     |                  | 波导管               |
|      | 低接触电阻特性 |                  | 开关                |