

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目



先进焊接制造技术丛书

中国焊接学会 组编



表面工程

徐滨士 刘世参 等编著



机械工业出版社
China Machine Press

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

先进焊接制造技术丛书

中国焊接学会 组编

表面工程

徐滨士 刘世参等 编著



机械工业出版社

本书共分 8 章，特点是表面工程技术原理与工艺兼顾，最新研究成果与应用实例密切联系，目的是引导读者正确选择、设计和使用表面工程技术，了解表面工程的发展现状和趋势，提供解决设备零件表面强化、修复问题的设计方法和途径。具体内容主要包括表面热处理、堆焊、热喷涂、电刷镀、气相沉积、特种表面处理技术的原理和应用，以及复合表面工程技术的发展等。

本书的读者对象是大学程度以上的表面工程领域学生、研究人员、工程技术人员及相关领域的专家。

图书在版编目 (CIP) 数据

表面工程 / 徐滨士等编著. —北京: 机械工业出版社, 2000.6

(先进焊接制造技术丛书)

ISBN 7-111-01321-2

I. 表... II. 徐... III. 金属表面保护—技术 IV. TG174.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 63253 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: 武江 何月秋

封面设计: 姚毅 责任印制: 何全君

中国农业出版社印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

850mm×1168mm1/32·10.625 印张·273 千字

0 001—3000 册

定价: 20.00 元

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

先进焊接制造技术丛书

编委会名单

顾问委员会成员

潘际奎 关 桥 徐滨士 林尚扬

斯重遥 田锡唐 周振丰

主 任 陈剑虹

副主任 邹增大 单 平 崔树森

委 员 王其隆 任家烈 史耀武 霍立兴

黄石生 李志远 汪建华 蒋力培

秘 书 康 龙 武 江

序

焊接作为制造业的基础工艺与技术，在 20 世纪为工业经济的发展做出了重要的贡献。在人类引以为自豪的各个领域，如航空航天、核能利用、电子信息、海洋钻探、高层建筑等，都利用了焊接技术的优秀成果。

在今天，焊接作为一种传统技术又面临着 21 世纪的挑战。

一方面，材料作为 21 世纪的支柱已显示出五个方面的变化趋势，即从黑色金属向有色金属变化；从金属材料向非金属材料变化；从结构材料向功能材料变化；从多维材料向低维材料变化；从单一材料向复合材料变化。新材料的连接对焊接技术提出了更高的要求。

另一方面，先进制造技术的蓬勃发展，正从信息化、集成化、系统化、柔性化等几个方面对焊接技术的发展提出了越来越高的要求。

为了充分反映 20 世纪焊接技术的发展成果和 21 世纪对焊接技术提出的新的挑战，中国焊接学会组织了焊接行业最重要的 10 个领域中卓有成就的知名学者编写、出版了《先进焊接制造技术丛书》。同时邀请了焊接界德高望重的著名专家作为丛书编写顾问。

本丛书旨在全面介绍国内外先进焊接技术的发展现状和趋势，对我国焊接制造技术的发展起引导作用。

本丛书是高层次的普及型丛书，以知识性为主，深层次地介绍相关领域的高新技术内容和基本规律，面向广大的焊接工作者、研究人员、高等院校师生及相关领域专家。

本丛书的特点是突出“高、新”二字，有较宽的知识覆盖面，注意相关学科的渗透，有较高的收藏价值。

中国焊接学会在世纪之交以这套丛书奉献给广大的焊接工作者，是对焊接界为祖国经济腾飞及 20 世纪焊接技术的发展所作

贡献的回眸，也是焊接界对迎接 21 世纪新技术挑战的期盼。

原机械工业部技术发展基金委员会及机械工业出版社对本丛书的编辑出版提供了经济支持（97JA0401），在此一并表示深切的感谢。

丛书编委会主任

陈 剑 虹

前 言

表面工程是随着生产力发展,为使机电产品适应高温、高压、高速、重载及腐蚀介质、恶劣工况工作的需要而于近十多年形成并正在迅速发展起来的一门新兴学科。表面工程具有多学科交叉、综合、复合的显著特色,表面工程的有关基础理论和诸多表面技术的研究和运用可有效推进产品质量的提高和环境保护的改善。表面工程在解决耐磨和防腐以及提供功能性涂层方面具有突出的成效,为制造业和再制造业的技术创新以及高新技术的发展提供了有效的手段,在节约能源和材料以及延长设备使用寿命、扩展零件性能等方面起着十分重要的作用。

本书较全面地介绍了表面工程各种表面技术的原理、工艺和设备及其应用,以及现代复合表面工程技术等。书中许多复合表面技术体现了表面工程学科的新进展和发展趋势。

本书内容新颖充实,取材广泛,适用于大学程度以上的表面工程领域学生、研究人员、工程技术人员及相关领域的专家。

本书共分 8 章,特点是表面工程技术原理与工艺兼顾,最新研究成果与应用实例密切联系,目的是引导读者正确选择、设计和使用表面工程技术,了解表面工程的发展现状和趋势,提供解决设备零件表面强化、修复问题的设计方法和途径。

本书主编徐滨士,副主编刘世参,参加编写的还有张伟、张振学、乔玉林。在本书编写过程中,得到了马世宁、朱绍华、张平、刘家俊、温元和、高应苓、翁熙祥等同志的指导以及提供的宝贵资料,在此一并表示感谢。

编 者

2000 年 3 月

目 录

序
前言

| | |
|----------------------------|----|
| 第 1 章 概论 | 1 |
| 1.1 表面工程及其功能 | 1 |
| 1.2 表面工程学科的形成 | 2 |
| 1.3 表面工程的学科体系 | 3 |
| 1.4 表面工程的研究方向 | 3 |
| 1.5 表面工程的研究方法 | 5 |
| 1.6 发展表面工程的意义 | 6 |
| 第 2 章 表面热处理技术 | 10 |
| 2.1 表面热处理 | 10 |
| 2.1.1 概述 | 10 |
| 2.1.2 传统表面热处理技术 | 11 |
| 2.1.3 几种新型表面热处理技术 | 17 |
| 2.2 表面化学热处理技术 | 21 |
| 2.2.1 概述 | 21 |
| 2.2.2 普通化学热处理 | 22 |
| 2.2.3 真空化学热处理 | 33 |
| 2.2.4 等离子体化学热处理 | 35 |
| 2.3 高能量密度能源表面处理技术 | 41 |
| 2.3.1 概述 | 41 |
| 2.3.2 离子注入表面处理 | 42 |
| 2.3.3 激光束表面改性 | 47 |
| 2.3.4 电子束表面改性 | 54 |
| 2.3.5 聚焦光束表面处理 | 58 |
| 第 3 章 堆焊技术 | 61 |
| 3.1 概述 | 61 |

| | | |
|--------------|------------------------|-----------|
| 3.1.1 | 基本概念 | 61 |
| 3.1.2 | 堆焊技术的应用特性 | 62 |
| 3.2 | 堆焊材料及其应用 | 63 |
| 3.2.1 | 铁基合金 | 63 |
| 3.2.2 | 钴基合金 | 68 |
| 3.2.3 | 镍基合金 | 69 |
| 3.2.4 | 铜基合金 | 70 |
| 3.2.5 | 碳化物 | 70 |
| 3.2.6 | 选择堆焊合金的原则 | 71 |
| 3.3 | 堆焊金属的合金化 | 72 |
| 3.3.1 | 合金的过渡形式 | 72 |
| 3.3.2 | 影响堆焊金属成分的因素 | 73 |
| 3.4 | 堆焊方法 | 74 |
| 3.4.1 | 手工电弧堆焊 | 74 |
| 3.4.2 | 埋弧自动堆焊 | 75 |
| 3.4.3 | CO ₂ 气体保护堆焊 | 77 |
| 3.4.4 | 振动电弧堆焊 | 78 |
| 3.4.5 | 等离子弧堆焊 | 80 |
| 3.4.6 | 宽带极堆焊 | 82 |
| 3.4.7 | 激光堆焊 | 84 |
| 第 4 章 | 热喷涂技术 | 85 |
| 4.1 | 概述 | 85 |
| 4.1.1 | 热喷涂及其分类 | 85 |
| 4.1.2 | 热喷涂的主要应用特性 | 86 |
| 4.2 | 待喷涂表面的制备 | 87 |
| 4.2.1 | 表面净化 | 87 |
| 4.2.2 | 表面预加工 | 89 |
| 4.2.3 | 表面粗化 | 89 |
| 4.2.4 | 喷涂结合底层 | 91 |
| 4.3 | 电弧喷涂技术 | 91 |

| | | |
|-------|--------------------------------|-----|
| 4.3.1 | 原理 | 91 |
| 4.3.2 | 电弧喷涂技术的特点 | 92 |
| 4.3.3 | 电弧喷涂设备 | 93 |
| 4.3.4 | 电弧喷涂材料 | 96 |
| 4.3.5 | 电弧喷涂工艺及其对涂层质量的影响 | 97 |
| 4.3.6 | 电弧喷涂应用实例：舰船船体防腐和大功率发动机 曲轴修复 | 100 |
| 4.4 | 高速射流电弧喷涂技术 | 102 |
| 4.4.1 | 开发高速射流电弧喷涂技术的意义 | 102 |
| 4.4.2 | 提高射流速度的技术途径 | 104 |
| 4.4.3 | 拉乌尔喷管加速方案 | 104 |
| 4.4.4 | 液体燃料燃器加速方案 | 105 |
| 4.4.5 | HAS-1 型高速电弧喷涂试验研究 | 107 |
| 4.5 | 等离子弧喷涂 | 113 |
| 4.5.1 | 等离子弧 | 113 |
| 4.5.2 | 等离子喷涂原理及特点 | 115 |
| 4.5.3 | 等离子弧喷涂设备 | 116 |
| 4.5.4 | 等离子弧喷涂工艺参数的确定 | 120 |
| 4.5.5 | 等离子弧喷涂用粉末及气体 | 122 |
| 4.5.6 | 等离子弧喷涂应用实例：在重载履带车辆上的大范围 应用 | 123 |
| 4.6 | 塑料火焰喷涂技术 | 125 |
| 4.6.1 | 塑料粉末火焰喷涂的原理 | 125 |
| 4.6.2 | 塑料粉末火焰喷涂装置 | 126 |
| 4.6.3 | 塑料粉末火焰喷涂材料 | 128 |
| 4.6.4 | 塑料粉末火焰喷涂工艺 | 129 |
| 4.6.5 | 塑料火焰喷涂应用实例：葡萄酒罐内壁火焰喷涂塑料 防护 | 130 |
| 4.7 | 氧-乙炔火焰喷涂与喷熔 | 131 |
| 4.7.1 | 氧-乙炔火焰丝材喷涂技术 | 133 |
| 4.7.2 | 氧-乙炔火焰粉末喷涂技术 | 133 |

| | | |
|------------------------|----------------------------|------------|
| 4.7.3 | 氧-乙炔火焰陶瓷棒喷涂技术 | 134 |
| 4.7.4 | 氧-乙炔火焰粉末喷熔技术 | 138 |
| 4.8 | 特种喷涂技术简介 | 138 |
| 4.8.1 | 高速氧-燃气喷涂 (HVOF) | 138 |
| 4.8.2 | 超音速等离子弧喷涂 | 141 |
| 4.8.3 | 低压等离子弧喷涂 (低真空等离子弧喷涂) | 142 |
| 4.8.4 | 水下等离子弧喷涂 | 143 |
| 4.8.5 | 激光喷涂技术 | 145 |
| 4.8.6 | 气体爆燃式喷涂 | 147 |
| 4.9 | 热喷涂涂层性能检测 | 149 |
| 4.9.1 | 喷涂层质量的现场检验 | 150 |
| 4.9.2 | 喷涂层质量的实验室检验 | 151 |
| 第5章 电刷镀技术 | | 160 |
| 5.1 | 概述 | 160 |
| 5.1.1 | 电刷镀技术的基本原理 | 160 |
| 5.1.2 | 电刷镀技术的特点 | 161 |
| 5.2 | 电刷镀设备 | 163 |
| 5.2.1 | 电刷镀电源应具备的主要性能 | 163 |
| 5.2.2 | 电源的工作原理和控制过程 | 163 |
| 5.3 | 电刷镀溶液 | 168 |
| 5.3.1 | 电刷镀溶液的分类和特点 | 168 |
| 5.3.2 | 常用预处理溶液 | 169 |
| 5.3.3 | 常用电刷镀溶液 | 171 |
| 5.4 | 电刷镀技术的新进展 | 178 |
| 5.4.1 | 电刷镀镀层的抗接触疲劳性能研究 | 178 |
| 5.4.2 | 电刷镀非晶态镀层 | 180 |
| 5.4.3 | 电刷镀复合镀层 | 181 |
| 5.4.4 | 摩擦电喷镀技术 | 183 |
| 5.4.5 | 稀土元素在电刷镀技术中的应用 | 184 |
| 5.4.6 | 电刷镀与其它表面技术的复合 | 184 |

| | | |
|------------|-----------------------------------|------------|
| 5.5 | 电刷镀应用举例 | 185 |
| 5.5.1 | 大面积刷镀银在国家重点工程(30万吨乙烯工程)中的应用 | 185 |
| 5.5.2 | 电刷镀技术在进口大型化工设备维修中的应用 | 187 |
| 第6章 | 气相沉积技术 | 191 |
| 6.1 | 物理气相沉积 | 192 |
| 6.1.1 | 真空蒸发镀膜 | 192 |
| 6.1.2 | 溅射镀膜 | 202 |
| 6.1.3 | 离子镀 | 212 |
| 6.1.4 | 物理气相沉积工艺工程 | 218 |
| 6.2 | 化学气相沉积 | 219 |
| 6.2.1 | 基本原理 | 219 |
| 6.2.2 | 常用CVD沉积方法 | 222 |
| 6.2.3 | 特种化学气相沉积技术 | 224 |
| 6.2.4 | CVD技术的应用及前景 | 228 |
| 6.3 | 气相沉积技术的应用与进展 | 228 |
| 第7章 | 特种表面技术 | 232 |
| 7.1 | 真空熔结技术 | 232 |
| 7.1.1 | 真空熔结的基本原理及工艺过程 | 232 |
| 7.1.2 | 真空熔结涂层合金及其它涂层材料 | 235 |
| 7.1.3 | 熔结涂层的组织与构造 | 236 |
| 7.1.4 | 真空熔结技术的功能与应用 | 238 |
| 7.2 | 摩擦化学边界膜技术 | 240 |
| 7.2.1 | 概述 | 240 |
| 7.2.2 | 原理和基本特征 | 240 |
| 7.2.3 | 摩擦化学反应膜 | 241 |
| 7.2.4 | 摩擦化学反应膜技术的发展 | 256 |
| 7.2.5 | 添加剂的选用和应用实例 | 256 |
| 7.3 | 表面粘涂技术 | 258 |

| | | |
|--------------|--------------------------|------------|
| 7.3.1 | 概述 | 258 |
| 7.3.2 | 表面粘涂技术的应用 | 259 |
| 7.3.3 | 表面粘涂层的组成及形成机理 | 261 |
| 7.3.4 | 影响表面粘涂层性能的因素 | 264 |
| 7.3.5 | 表面粘涂工艺 | 265 |
| 7.3.6 | 粘涂材料及粘涂工艺的新进展 | 266 |
| 7.4 | 电火花表面强化 | 268 |
| 7.4.1 | 电火花表面强化的原理 | 268 |
| 7.4.2 | 电火花表面强化机理 | 269 |
| 7.4.3 | 电火花表面强化层的特性 | 270 |
| 7.4.4 | 电火花强化的工艺参数及质量控制 | 273 |
| 7.4.5 | 电火花表面强化的应用 | 275 |
| 7.5 | 表面喷丸强化技术 | 276 |
| 7.5.1 | 喷丸强化概述 | 276 |
| 7.5.2 | 喷丸强化机理 | 276 |
| 7.5.3 | 喷丸强化设备 | 277 |
| 7.5.4 | 喷丸强化效果 | 279 |
| 7.5.5 | 喷丸强化对合金疲劳强度的影响 | 284 |
| 7.5.6 | 旋片喷丸表面强化技术 | 285 |
| 7.5.7 | 旋片喷丸技术在零件维修中的应用 | 287 |
| 第 8 章 | 表面工程技术设计 | 289 |
| 8.1 | 概述 | 289 |
| 8.2 | 复合表面技术 | 290 |
| 8.2.1 | 以增强耐磨性为主的复合表面技术 | 290 |
| 8.2.2 | 以增强耐蚀性为主的复合表面技术 | 304 |
| 8.2.3 | 以增强固体润滑性能为主的复合表面技术 | 310 |
| 8.3 | 零件表面工程工艺设计 | 315 |
| 8.3.1 | 表面技术的选择 | 315 |
| 8.3.2 | 表面处理工艺规程的编制 | 318 |
| 参考文献 | | 322 |

第1章 概论

机械产品的故障往往是个别零件失效造成的，而零件失效往往是由于局部表面造成的，腐蚀从零件表面开始，摩擦磨损在零件表面发生，疲劳裂纹由零件表面向里延伸。如果应用表面工程技术将机械产品中那些易损零件的易损表面的失效期延长，则产品的整体性能就可以得到提高。

随着现代工业的发展，对机械产品零件表面的性能要求越来越高，要求能在高速、高温、高压，重载以及腐蚀介质工况下可靠而持续地工作，这就对制造技术提出了挑战，既推动着表面工程学科的发展，又呼唤着表面工程技术在制造业中的广泛应用。

1.1 表面工程及其功能

表面工程是经表面预处理后，通过表面涂覆，表面改性或多种表面技术复合处理，改变固体金属表面或非金属表面的形态、化学成份、组织结构和应力状况，以获得所需要表面性能的系统工程。

各种表面技术是表面工程的技术基础，常用的表面技术有：堆焊技术，熔结技术（低真空熔结、激光熔敷等），电镀、电刷镀及化学镀技术，热喷涂技术（火焰喷涂、电弧喷涂、等离子喷涂、爆炸喷涂、高能超声速喷涂等），粘接技术，涂装技术，物理与化学气相沉积技术（真空蒸镀、离子溅射、离子镀等），以及化学热处理、激光相变硬化、激光非晶化、激光合金化、电子束相变硬化、离子注入等。

随着多种表面技术的发展，现在需要进入综合研究的阶段，需要进入尽快把表面技术转化为生产力的综合运用阶段。表面工程是表面技术的工程化，表面工程的实施过程是将表面技术在产

品上的系统运用过程。

表面工程可使局部或整个表面具备如下功能:

- 提高耐磨性或耐腐蚀、抗疲劳、抗氧化、防辐射性能;
- 改善表面的传热性或隔热性;
- 改善表面的导电性或绝缘性;
- 改善表面的导磁性或电磁屏蔽性;
- 改善表面的增光性、反光性或吸波性;
- 改善表面的粘着性或不粘性;
- 改善表面的吸油性或干磨性;
- 改善表面的摩擦系数(提高或降低);
- 改善表面的装饰性或仿古做旧性等。

表面工程的功能还可以列举很多,如减震、密封、催化等等。

表面工程的广泛功能和低廉的成本,给制造业和维修领域注入了活力,推动着制造业的技术创新。

1.2 表面工程学科的形成

表面技术的发展历史悠久,如镏金、贴金技术,油漆技术,淬火技术等。近代的摩擦学、界面力学与表面力学、材料失效与防护学、金属热处理学、焊接学、腐蚀与防护学、光电子学等学科对多种表面技术的发展及其基础理论的研究都做出了巨大贡献,并成功地运用于工程之中。

但表面工程概念的提出始于 20 世纪 80 年代。表面工程学科发展的重要标志是 1983 年英国伯明翰大学沃福森表面工程研究所的建立和 1985 年《表面工程》国际刊物的发行。1985 年召开了第一届表面工程国际会议。1986 年 10 月在布达佩斯召开的国际热处理联合会决定接受表面工程学科并改名为国际热处理与表面工程联合会。

中国机械工程学会表面工程研究所于 1987 年 12 月在北京成

立。1988年11月在北京召开全国首届表面工程现状与未来发展研讨会。同年创办了我国第一本《表面工程》杂志，现改版为在国内外发行的《中国表面工程》。1993年成立了中国机械工程学会表面工程分会。此后，国内召开了多次国际或全国性的表面工程学术会议。自国家第六个五年计划以来，通过在设备维修领域和制造领域推广应用表面工程已取得了几百亿元的经济效益。在国家的节能节材“九五”规划中，建议将发展表面工程作为重大措施之一，并列为节能、节材示范项目。

1.3 表面工程的学科体系

表面工程是随着生产力的发展，为适应生产的需要而形成并正在发展中的一门新兴学科。在国外已有十多年历史，在我国起步的时间也不算长。关于表面工程的学科体系还在进行探讨和完善中。

表面工程是以多个学科的交叉、综合、复合、系统为特色，逐步发展起来的新兴学科，它以“表面”和“界面”为研究核心，在有关学科理论的基础上，根据材料表面的失效机制，以应用各种表面技术及其复合表面技术为特点，逐步形成了与其它学科密切相关的表面工程基础理论，主要有：表面失效分析理论、表面摩擦与磨损理论、表面腐蚀与防理论、表面（界面）结合与复合理论等；表面工程的学科体系初步概括为图 1-1 所示。

上述学科体系中有些内容比较成熟并有专著，如摩擦与磨损、腐蚀与防护、表面强化、加工技术等；有些则属于探讨中或需要重新建立的理论，如表面结合与复合的理论等。

1.4 表面工程的研究方向

我国的表面工程在过去的十几年中，已获得了重大发展，在

国民经济中发挥了重要作用。但表面科学与工程在理论研究和工程应用的总体水平上，与工业发达国家相比仍有较大的差距，原因是各部门的研究自成体系，力量分散，没有综合、复合，攻关力量薄弱，尚难以承接对国民经济建设具有重大影响的关系全局的重点工程和关键技术的攻关。

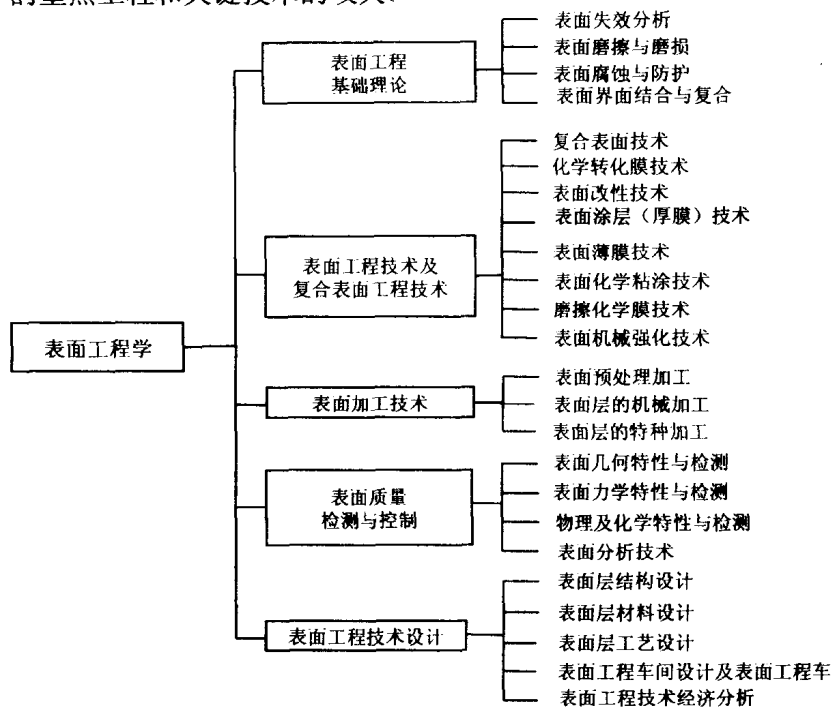


图 1-1 表面工程的学科体系

为解决上述问题，应加强表面工程科学的研究，它的主要任务是：

1) 加强表面工程学科的建设，深入开展表面工程基础理论的研究，全面了解表面（界面）层的显微结构与其性能的关系。研究薄涂层与基体结合强度的测试方法。

2) 承担国民经济建设具有重大影响的关系全局的重点工程项目和关键技术的攻关，对关键项目系统地进行表面技术设计。