



“十二五”国家重点图书出版规划项目
材料科学研究与工程技术系列

金属材料工程实践教程

Practice Tutorials of Metallic Materials Engineering

- 主 编 李学伟
- 副主编 王树成 周长海
- 主 审 王振廷

哈尔滨工业大学出版社



“十二五”国家重点图书出版规划项目
材料科学研究与工程技术系列

金属材料工程实践教程

Practice Tutorials of Metallic Materials Engineering

- 主 编 李学伟
- 副主编 王树成 周长海
- 主 审 王振廷

哈尔滨工业大学出版社

内容提要

本书选择了表面处理在生产实际中较有代表性的典型技术和常规热处理工艺技能训练作为教材的主要内容。全书共7章,内容包括:热喷涂实践技术,感应表面处理实践技术,微机控制生产实践技术,化学转化实践技术,化学镀实践技术,电刷镀实践技术,常用材料热处理工艺综合设计实践,并适当反映了近年来国内外各项技术的新成果、新发展。

本书注重技能实训,突出针对性、典型性、适用性,简要地介绍了相关表面工程技术的基础知识,以大量的图例作为说明,通过详细的讲解和丰富的实际案例,使读者轻松掌握其操作技能。本书结构清晰,内容翔实,实例丰富,图文并茂。便于教师指导学生边学边练,学以致用。

本书可作为普通高等院校材料类、机械类专业本科生教材,也可作为相关专业工程技术人员的参考书及培训用书。

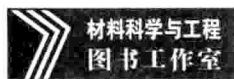
图书在版编目(CIP)数据

金属材料工程实践教程/李学伟主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2014.3

ISBN 978-7-5603-4491-1

I. ①金… II. ①李… III. ①金属材料-高等学校-教材 IV. ①TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 297016 号



责任编辑 李广鑫

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街10号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 15 字数 318 千字

版 次 2014年3月第1版 2014年3月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-4491-1

定 价 30.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

本书是“十二五”国家重点图书出版规划项目,材料科学研究与工程技术系列图书。本书立足普通高等院校金属材料工程专业学生学习和就业需要,兼顾相关专业培训和自学要求。在内容上,理论知识深入浅出,便于理解;工艺配方翔实具体,力争做到紧跟学科前沿;实际应用及操作,易于掌握。

全书共分7章,主要内容包括热喷涂实践技术,表面感应处理实践技术,微机控制生产实践技术,化学转化膜实践技术,化学镀实践技术,电刷镀实践技术,常用材料热处理工艺综合设计实践。在表面热处理技术中较详细地介绍了各种技术的原理、工艺、常见问题及解决措施、典型的实践训练;在热处理技术中介绍了常规热处理工艺方法、热处理设备和典型实践训练。全书注重工程应用,体现了科学性、先进性和实用性。

本书采用最新国家标准,结合表面处理和热处理技术最新成果,考虑目前专业教学的需求,教材内容和结构有自己的特色,是编者多年来技能培训实践的积累和教学经验的总结。本书是为普通高等院校材料类、机械类专业本科生及相关专业大专院校师生编写的教材,也可作为相关专业技术人员的参考书和培训使用。

本书由周长海(第1章、第6章)、孙俭峰(第2章)、于玉城(第3章)、王树成(第4章)、李学伟(第5章)、王淑花(第7章)等编写。本书由李学伟任主编,王树成、周长海任副主编,黑龙江科技大学王振廷教授任主审。

感谢黑龙江科技大学材料科学与工程学院在本书编写和出版的过程中给予的大力支持和帮助。

由于编著水平有限,书中难免有缺欠和不当之处,恳请读者批评和提出改进意见。

编 者

2013年8月

于黑龙江科技大学

目 录

第1章 热喷涂实践技术	1
1.1 概述	1
1.1.1 热喷涂技术的概念	1
1.1.2 热喷涂技术原理	1
1.1.3 热喷涂涂层的结构	2
1.1.4 热喷涂技术的应用	4
1.1.5 热喷涂技术发展的主要方向	8
1.2 热喷涂技术工艺方法	11
1.2.1 热喷涂技术工艺方法分类	11
1.2.2 热源概述	11
1.2.3 热喷涂工艺	14
1.3 热喷涂涂层材料	22
1.3.1 热喷涂材料的要求	22
1.3.2 热喷涂材料的分类	23
1.3.3 热喷涂材料的应用原理	24
1.4 涂层设计及制备	30
1.4.1 涂层设计的基本原理	30
1.4.2 粘结底层材料选择	31
1.4.3 热喷涂工艺选择	32
1.4.4 涂层结构设计	33
1.4.5 涂层制备工艺优化设计	35
1.4.6 表面预处理	36
1.4.7 表面净化	36
1.4.8 表面机械加工	38
1.4.9 遮蔽处理	39
1.4.10 表面粗化	40
1.4.11 预热处理	42
1.5 涂层性能检测试验方法	42
1.6 安全防护	53
1.6.1 设备安全防护	53
1.6.2 人身安全防护	56

1.7 常见问题分析和解决措施	57
1.8 典型的热喷涂技术实践训练	60
实训一 等离子体喷涂 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 耐腐蚀涂层实践训练	60
实训二 电弧喷涂铝防腐涂层实践训练	63
实训三 超音速火焰喷涂 WC-10Co-4Cr 涂层实践训练	66
习题与思考题	69
附录:安全操作	70
第2章 感应表面热处理实践技术	72
2.1 概述	72
2.1.1 感应加热工艺技术简介	72
2.1.2 感应加热原理	73
2.1.3 感应加热特点	74
2.1.4 感应加热应用	74
2.2 感应加热设备和感应器	76
2.2.1 感应加热电源	76
2.2.2 感应淬火机床	77
2.2.3 电源的选择	78
2.2.4 感应器	79
2.3 常见问题分析和解决措施	87
2.3.1 设备故障与处理	87
2.3.2 感应淬火件常见缺陷及原因	90
2.4 典型的高频感应加热实践训练	90
实训一 高频感应钎焊	90
实训二 高频感应表面淬火	95
习题与思考题	104
第3章 微机控制渗碳实践技术	105
3.1 概述	105
3.1.1 渗碳目的、工艺特点和分类	105
3.1.2 常用渗碳钢及其选择	105
3.1.3 渗碳中的主要物理化学过程	109
3.1.4 零件渗碳后的热处理	109
3.1.5 微机控制渗碳工艺	110
3.2 微机控制渗碳设备构造、原理及使用	110
3.2.1 微机控制渗碳设备的构造	110
3.2.2 微机控制渗碳设备工作原理	111
3.2.3 微机控制渗碳设备的使用方法	117
3.3 微机控制渗碳淬火工艺组织性能	119

3.3.1 微机控制渗碳淬火工艺	119
3.3.2 微机控制渗碳淬火组织和性能	125
3.4 常见问题分析和解决措施	127
3.5 典型的渗碳技术实践训练	128
实训 20 钢微机渗碳工艺设计及组织性能实践训练	128
习题与思考题	131
第4章 化学转化膜实践技术	132
4.1 概述	132
4.1.1 化学转化膜概述	132
4.1.2 化学转化膜技术的研究现状与发展趋势	134
4.2 化学转化膜技术原理	134
4.2.1 磷化处理原理	134
4.2.2 氧化处理原理	141
4.3 常见问题分析和解决措施	143
4.3.1 磷化处理常见问题和解决措施	143
4.3.2 钢铁常温发黑常见问题和解决措施	144
4.4 化学转化膜处理液的配制及工艺检测	145
4.4.1 磷化处理液的配制及工艺实践	145
4.4.2 发黑液配制及工艺规范	150
4.4.3 化学氧化处理液的配制及工艺规范	152
4.5 典型化学转化膜技术实践训练	153
实训 钢铁常温磷化实践训练	153
习题与思考题	155
第5章 化学镀实践技术	157
5.1 概述	157
5.1.1 化学镀概述	157
5.1.2 化学镀液的研究现状与发展趋势	158
5.2 化学镀原理、镀液组成及工艺控制	160
5.2.1 化学镀原理	160
5.2.2 化学镀镍的机理和特点	161
5.2.3 化学镀镍溶液的配方组成	162
5.2.4 化学镀镍的工艺因素控制	165
5.3 化学镀镍的配制及工艺实践	167
5.3.1 化学镀镍液的配制与维护	167
5.3.2 化学镀镍溶液稳定性测定	168
5.3.3 钢件表面预处理	169
5.3.4 化学镀镍配方和工艺	169

5.3.5 镀层性能检测	173
5.4 常见问题分析和解决措施	177
5.4.1 不良镀层的退除	177
5.4.2 废液处理(化学沉淀法)	178
5.5 典型化学镀镍工艺实践训练	179
实训 钢和铜化学镀镍实践训练	179
习题与思考题	181
第6章 电刷镀实践技术	182
6.1 概述	182
6.1.1 电刷镀技术概述	182
6.1.2 电刷镀技术发展概述	183
6.2 电刷镀原理、设备、镀液组成及工艺	184
6.2.1 电刷镀原理	184
6.2.2 电刷镀设备	184
6.2.3 电刷镀溶液	191
6.3 电刷镀工艺	202
6.3.1 概述	202
6.3.2 电刷镀的一般工艺过程	203
6.4 常见问题分析和解决措施	203
6.5 典型的电刷镀技术实践训练	205
实训 电刷镀铜实践训练	205
习题与思考题	207
第7章 常用材料热处理工艺综合设计实践	208
7.1 概述	208
7.1.1 热处理工艺概述	208
7.1.2 常规热处理工艺方法	212
7.2 常用热处理炉概述	215
7.3 热处理常见问题分析和解决措施	219
7.3.1 淬火开裂现象	219
7.3.2 硬度和组织未达到要求	220
7.4 典型热处理技术实践训练	220
实训一 碳钢热处理工艺设计实践训练	220
实训二 高速钢和淬火、回火的处理工艺设计实践训练	224
习题与思考题	227
附录	228
参考文献	230

第1章 热喷涂实践技术

1.1 概 述

1.1.1 热喷涂技术的概念

为了保持经济的可持续发展,降低资源消耗,为使我国逐步构建成循环经济和节约型社会,“十二五”规划提出了关于我国循环经济的“4R”发展原则,即减量化、再利用、再循环和再制造。其中再制造是核心重点,而作为再制造领域中十分重要的技术热喷涂,被广泛应用于现代工业,并取得了显著的社会效益和经济效益。

热喷涂技术是利用热源将喷涂材料加热至熔化或半熔化状态,并以一定的速度喷射沉积到经过预处理的基体表面形成涂层的方法,使经过热喷涂的材料表面得到强化和改性,获得具有某种功能表面的应用性很强的材料表层复合技术。该技术已成为表面工程领域表面改性最有效的技术之一。热喷涂技术涂层形成原理如图 1.1 所示。

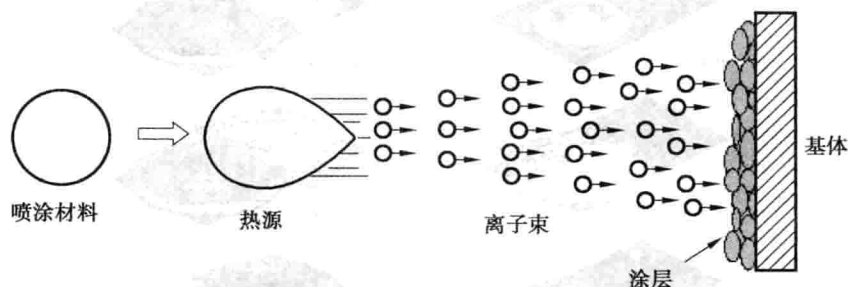


图 1.1 热喷涂技术涂层形成原理

1.1.2 热喷涂技术原理

热喷涂技术工艺方法很多,各有特点。无论何种工艺方法,喷涂过程中形成涂层的原理和涂层结构基本一致。热喷涂形成涂层的过程一般经历四个阶段:加热熔化阶段、熔滴雾化阶段、微粒飞行阶段和微粒碰撞沉积阶段。

1. 加热熔化阶段

用线(棒)材作为喷涂材料,其端部进入热源高温区,即被加热熔化并形成熔滴;粉末材料则是直接进入热源高温区,在行进过程中被加热至熔化或半熔化。

2. 熔滴雾化阶段

在外加压缩气流或热源自身射流的作用下,使线(棒)材熔化形成的熔滴脱离线(棒)材,并雾化成微细微粒加速向前喷射;对粉末材料而言,则没有雾化过程,而是直接在气流或热源射流作用下向前喷射。

3. 微粒飞行阶段

雾化或半熔化的微细粒子在外加压缩气流或热源自身射流的作用下向前喷射飞行,随着飞行距离的增加而减速。

4. 微粒碰撞沉积阶段

具有较高温度和速度的微细粒子以一定的动能冲击基体材料表面,产生强烈的碰撞,微粒的动能转化为热能并传递给基体材料,微粒在表面横向流动产生变形,由于热传递的作用,变形粒子迅速冷凝并伴随着体积收缩,呈扁平状牢固地粘结在基体材料表面上。随着喷涂粒子束不断地冲击碰撞基体表面,“碰撞—变形—冷凝收缩—填充”过程连续进行,颗粒与颗粒之间相互交错叠加地粘结在一起,最终沉积形成涂层,如图 1.2 所示。

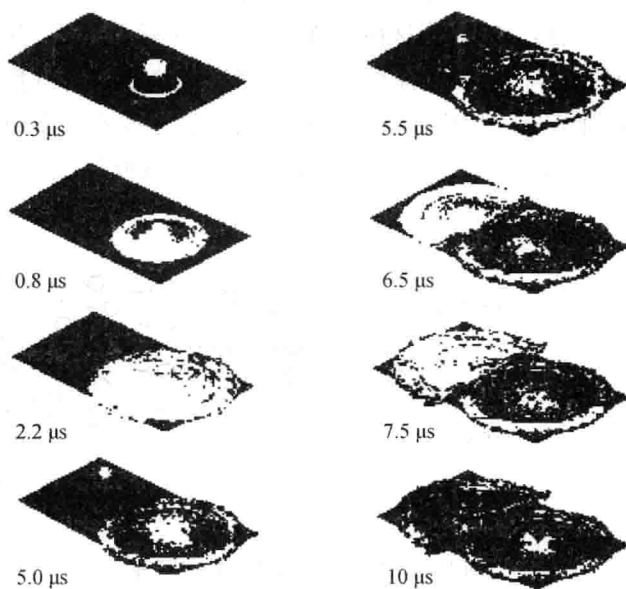


图 1.2 热喷涂涂层形成过程示意图

1.1.3 热喷涂涂层的结构

热喷涂涂层的结构与被喷涂材料的组织结构有明显差异,取决于工艺方法。涂层是由无数变形的扁平粒子相互交错呈波浪式堆积而成的层状结构,小薄片间存在着夹杂物、空隙、空洞等缺陷。首先,在喷涂过程中,熔化或半熔化状态粒子与喷涂工作气体及周围环境气氛进行化学反应,使得喷涂材料经喷涂后出现表面氧化物;其次,变形扁平粒子的相互叠加产生搭桥效应,不可避免地会在涂层中出现小部分孔隙;第三,部分碰撞的微粒被

反弹散失;第四,试样表面凹陷处存在的气体等都会导致涂层不可避免地存在着孔隙或空洞。图 1.3 为不同热喷涂工艺制备涂层的典型结构。

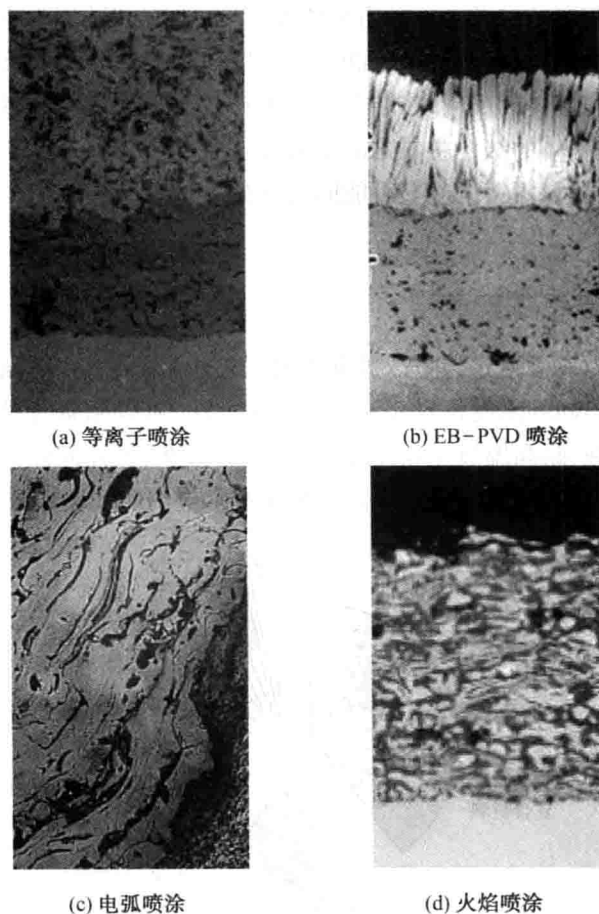


图 1.3 典型热喷涂涂层结构

涂层的结合包含涂层与基体表面的结合(就是通常所说的涂层结合强度)和形成涂层颗粒与颗粒之间的内聚力(即涂层自身结合强度)。一般来说,涂层自身结合强度高于涂层与基体的结合强度,但属于物理-化学结合。这种物理-化学结合包含以下几种方式:

1. 机械结合

熔融态的微粒撞击基体表面,随即铺展在凹凸不平的表面上,与微观起伏的表面相互嵌合,形成机械咬合。一般,涂层与基体表面的结合主要是机械结合。机械结合的强弱与基体表面的微观粗糙度密切相关,在一定的粗糙度下,涂层与基体具有良好的结合力。

2. 物理结合

在高速运动的熔融粒子撞击基体表面充分变形后,涂层原子或分子与基体表面原子之间的距离接近晶格的尺寸时,就形成了范德华力或次价键的结合,分子或原子附着于基

体表面形成了涂层。

3. 冶金结合

冶金结合是当熔融的粒子高速撞击基体表面时,涂层和基体界面出现扩散和合金化的一种结合方式。涂层材料在基体表面的结晶过程,基本上不是对基体晶格的外延,大多数情况是由于涂层与基体的反应,在结合界面上产生金属间化合物或固溶体。当对涂层进行重熔时,涂层与基体的结合主要是冶金结合。

形成热喷涂涂层时,同一试件上可能同时并存上述三种结合方式,但一般以机械结合为主。

1.1.4 热喷涂技术的应用

热喷涂技术作为表面强化与防护最重要的工艺技术之一,在表面工程领域内占的比例越来越高。选用不同的涂层材料和不同的工艺方法,可以制备各种性能不同的功能涂层,如耐磨损、耐腐蚀、耐高温氧化和高温磨损、耐磨减摩、可控间隙封严、热障屏蔽、导电绝缘等,在国民经济各个领域十分活跃。热喷涂技术应用的领域如图 1.4 所示。

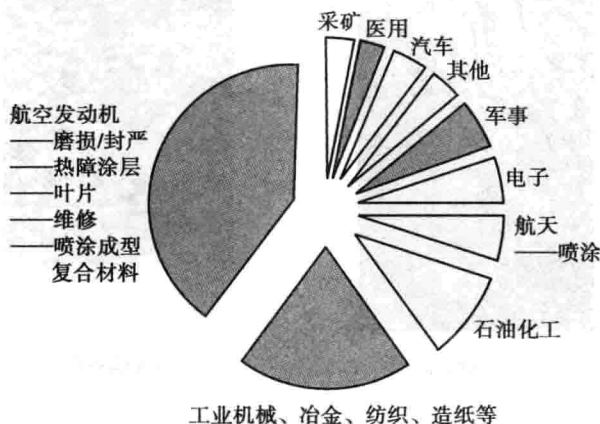


图 1.4 热喷涂应用领域分布

1. 在水利系统中的应用

图 1.5 为热喷涂技术在我国大型水电站和跨江大桥上的应用。通过对水电站闸门和桥墩支架表面的热喷涂处理,形成耐腐蚀涂层以提高基体材料的耐腐蚀性。有关应用相当广泛,像龙塔、东方明珠电视塔等钢结构以及各种桥梁的防腐与维护均采用热喷涂技术。

2. 在造纸业中的应用

图 1.6 为造纸机械中两种辊筒的照片。图 1.6(a)为单烘缸圆筒表面热喷涂 Mo 涂层的照片。单烘缸是铸铁圆筒结构,使用环境为 1 MPa 高压超高温。在烘干过程中,辊筒表面会有残留碎片,需进行刮除,刮板刮除过程对筒表面产生磨损,从而影响烘干效果和产品质量,对整个工序产生重大影响。通过对单烘缸圆筒表面热喷涂 Mo 涂层后,大大提高了其耐磨性。图 1.6(b)为造纸机械中压光机辊筒表面热喷涂 WC-Co 涂层的照片。



(a) 三峡永久闸门喷锌



(b) 东海大桥桥墩支架喷铝

图 1.5 防腐蚀热喷涂涂层在水利系统中的应用

3. 在食品机械中的应用

图 1.7 为高分子热喷涂涂层在食品机械中的应用照片。通过对食品机械中的辊筒进行热喷涂高分子涂层代替了传统的刷漆,极大地提高了其对化学产物的抗蚀性和辊筒的使用寿命。

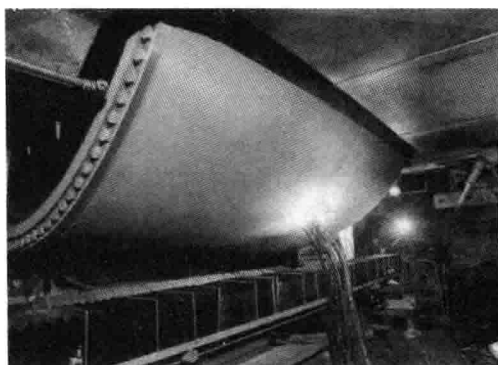
热喷涂高分子涂层用途广泛,当用在地板上,可以提高地板的耐滑性,若在高分子涂层中加入氧化铝粒子效果会更好。

4. 在汽车工业中的应用

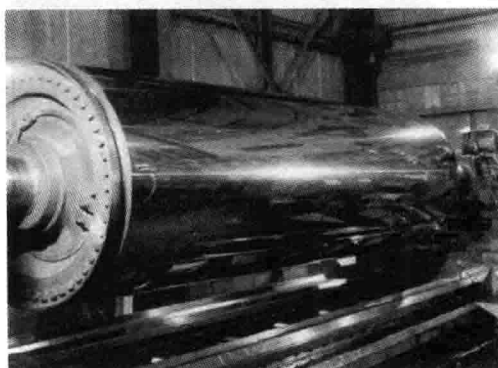
汽车、机车动力等交通运输机械的内燃机关键零部件经受高温磨损、高温腐蚀等工况条件,这使热喷涂涂层得到了综合应用。图 1.8 为汽车内燃机部件采用热喷涂技术的零件:曲轴、发动机缸体、气门、同步器环、活塞、活塞环、喷油嘴、氧传感器、同步发电机盖等。其中,曲轴为电弧喷涂 $1\text{Cr}13$ 或碳钢系列涂层来提高曲轴的耐磨性,同时涂层的储油作用增加其润滑性,显著提高使用寿命;缸套一般采用 HVOF 喷涂 $\text{NiCr-Cr}_3\text{C}_2$ 涂层,提高缸套的耐高温磨损性能;同步器环、活塞环采用火焰喷涂金属 Mo 涂层,提高其高温耐磨性。

5. 在石化工业中的应用

石油化工机械零部件在腐蚀环境条件下服役,承受着各种腐蚀介质和机械磨损的共



(a) 单烘缸圆筒表面热喷涂Mo涂层



(b) 压光机辊筒表面热喷涂WC-Co涂层

图 1.6 耐磨耐腐蚀热喷涂涂层在造纸工业中的应用

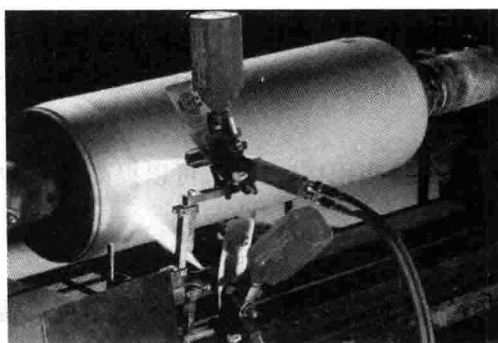


图 1.7 高分子热喷涂涂层在食品机械中的应用

同作用,加速了机械零部件表面的腐蚀磨损,因此对石油化工机械零部件的表面性能有着特殊的要求。例如,油田原油抽油泵的柱塞、泥浆泵的缸套、石油钻杆的接头都存在以磨粒磨损为主的破坏形式;石化冶炼中的各类泵柱塞、燃气轮机动力设备部件主要是以腐蚀磨损或高温燃气冲蚀为主的破坏形式;各类化工容器则是以化工介质腐蚀为主的腐蚀破坏。根据工况条件的不同,必须选用相应的涂层材料和涂层制备工艺技术,对各零部件进



图 1.8 热喷涂涂层在汽车内燃机部件中的综合应用

行防腐、耐腐蚀、耐冲蚀防护与修复。图 1.9 为石化工业中典型热喷涂的应用。

6. 在冶金工业中的应用

冶金机械设备的零部件工况条件比较复杂,大多是在重载、高温环境下服役。其主要破坏形式有高温磨损、高温氧化,而某些特殊工段的零部件,除要求表面耐磨性能外,同时还应具备一定的功能特性。采用热喷涂技术可制备耐高温、耐高温氧化、耐磨损、抗地震、抗熔融金属腐蚀、阻粘连等特殊功能涂层,达到提高功能、提高效率、节能、节材、延长零部件使用寿命的目的。图 1.10 为热喷涂技术在瓦楞辊、导辊上的应用。

7. 在国防工业中的应用

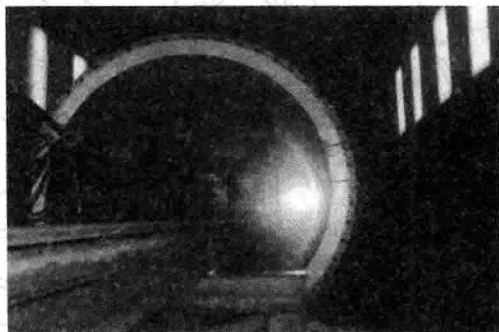
热喷涂技术在国防工业中主要用于提高航空发动机热效率的热障涂层、封严涂层、抗高温烧蚀涂层、耐磨损涂层。在发动机叶片、尾翼喷管上主要应用等离子喷涂 $\text{MCrAlY}-\text{Y}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ 双层涂层;而发动机机壳喷涂可磨耗密封涂层,飞机起落架通常采用 HVOF 喷涂 WC-Co 涂层提高耐磨耐蚀性。图 1.11 为等离子喷涂热障涂层的应用。

8. 在生物工程领域的应用

在不锈钢或钛合金基体上等离子喷涂生物功能羟基磷灰石涂层,有效地克服了金属型人工骨骼与生物组织的不兼容性和体液的腐蚀问题,且涂层的多孔性和一定的粗糙度有利于生物体组织向人工骨骼表面的生长和亲和,是理想的人工骨骼材料。图 1.12 为等



(a) 阀门密封面HVOF喷涂WC-Co涂层



(b) 反应器内等离子喷涂不锈钢涂层

图 1.9 热喷涂涂层在石化工业中的应用

离子喷涂羟基磷灰石在人工齿根和人工骨骼方面的应用。

1.1.5 热喷涂技术发展的主要方向

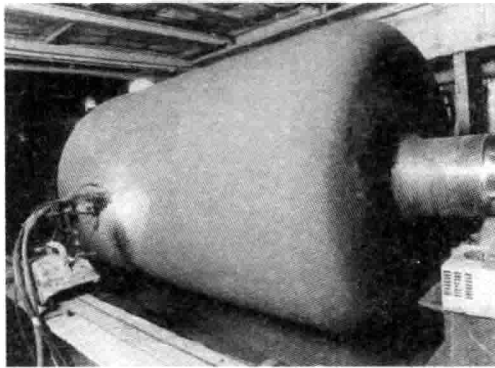
热喷涂技术经过近一个世纪的发展,从简单的工艺技术的发展成为完整的工业体系,已成为先进制造技术的重要组成部分。在成长和发展过程中,由于专业和学科间的不断渗透、交叉、融合,技术日趋系统化集成化,已经发展成为集机械学、材料科学、热动力学、高新技术和生物工程等为一体的新兴交叉学科,在制造业领域形成了完整的工业体系。热喷涂技术的核心是优质、高效、低消耗的表面改性,达到赋予基体材料表面特殊功能的目的。技术的发展主要是新技术的发现、材料的创新、涂层质量控制软件体系、涂层制备基础理论研究和检测技术等诸方面。

1. 新的工艺技术和新的应用领域不断涌现

涂层质量很大程度上依赖于喷射熔滴的速度,提高热喷涂射流和喷涂粒子的速度已成为当前国际热喷涂技术发展的新趋势,相继出现了爆炸喷涂、高速活性燃气火焰喷涂(HVAF)、高速电弧喷涂、活性电弧喷涂、高速等离子喷涂、三阴极内送粉等离子喷涂、溶液等离子喷涂(SPS)、冷气动力喷涂(CGDS)等新技术。这些技术的共同特点是大幅度提



(a) 瓦楞辊热喷涂Ni/Cr-CrC涂层



(b) 连续退火炉导辊热喷涂 Cr_3C_2 涂层

图 1.10 耐磨耐高温热喷涂在冶金工业中的应用

高了喷涂粒子的飞行速度,降低了涂层孔隙率,提高了涂层结合强度。

2. 新型热喷涂材料的发展

在氧化锆涂层上使用新成分和氧化锆复合,作为双层复合涂层;纳米涂层(纳米先驱溶液、纳米团聚体粉末)材料、功能复合涂层材料、生物功能涂层材料、金属间化合物涂层材料、微晶或非晶涂层材料等的制备,已成为人们日益关注的重点。

3. 在线控制质量保证体系的建立

涂层质量与喷涂工艺方法及工艺参数有十分紧密的关系,标准工艺参数的重现性和稳定性是保证涂层质量最基本的环节。工艺参数变化影响因素诸多,如热功率的大小、热温度的分布、喷涂粒子的分布状况、粒子速度的高低,均是影响涂层质量的重要因素。在线质量控制、检测喷涂热源温度场的分布、喷涂粒子的飞行速度及状态,都为优化并稳定涂层制备工艺参数,获得优质涂层提供了基本保障。

4. 涂层制备基础理论和涂层性能检测方法的发展

采用神经网络、试验设计和其他优化方法来确定热喷涂涂层制备工艺及参数与涂层性能之间的关系。研究建立喷涂粒子受热状况、运动形式与喷嘴出口处条件之间的数学