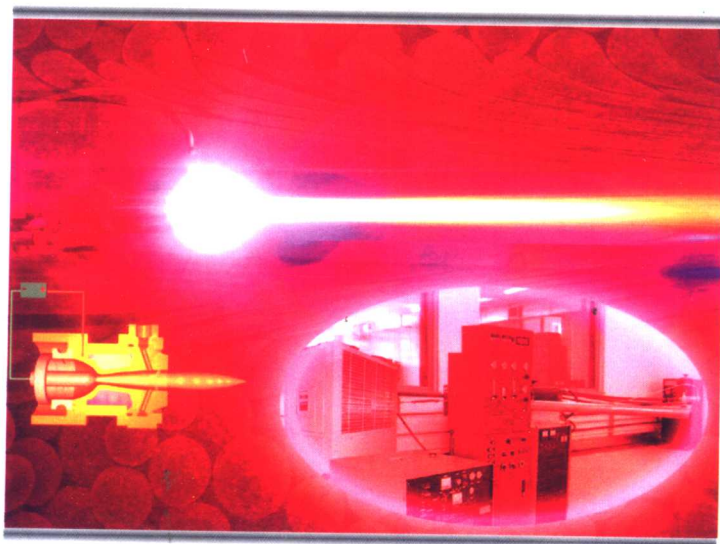


● 热喷涂技术丛书

热喷涂

实用技术

—— 王海军 主编 ——



国防工业出版社

National Defense Industry Press

热喷涂技术丛书

热喷涂实用技术

王海军 主编

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书系统地介绍了热喷涂的基础知识,一些典型的热喷涂设备的基本原理与组成,火焰喷涂、电弧喷涂和等离子喷涂的工艺特点,一些重要的热喷涂材料和涂层设计,涂层的质量检测,热喷涂涂层的机械加工与性能评价以及安全防护等内容。

本书注重理论与实际相结合,突出实用性,同时也介绍了热喷涂技术领域的最新发展和研究成果。可作为从事热喷涂的工程技术人员和大专院校相关专业的参考书,也可作为热喷涂技术普及读物和技术培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

热喷涂实用技术/王海军主编. —北京:国防工业出版社,2006.5

(热喷涂技术丛书)

ISBN 7-118-04456-3

I. 热... II. 王... III. 热喷涂 IV. TG174.442

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 017593 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 20 字数 358 千字

2006 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

热喷涂是一门具有悠久历史的工艺性技术,学科上主要涉及热加工和材料科学。热喷涂技术是表面工程的关键技术之一,是维修与再制造的重要手段。相对于其它材料制备技术,具有工艺相对简单、灵活、可喷涂材料种类多、涂层质量好、应用范围广、经济效益大等特点。随着科学技术的进步,现代热喷涂技术在理论与实践上都有了很大的发展。例如:传统的火焰喷涂已发展到超音速火焰喷涂,可以喷涂结合力高、十分致密的 WC-Co、NiCr-Cr₃C₂ 等超硬涂层,已成功替代了对环境有污染的镀硬铬工艺;电弧喷涂已由普通金属丝电弧喷涂发展成为高速金属-陶瓷复合管状丝电弧喷涂,涂层的质量大幅提高,应用范围也得到扩展;冷喷涂的出现可在较低温度(600℃以下)下喷涂一些高塑性易氧化的金属材料,获得高致密度和纯净的涂层;装甲兵工程学院最近研制成功的高效能超音速等离子喷涂系统(HEPJet),可在小气体流量(3m³/h~6m³/h)和较低功率(50kW~80kW)下获得超音速粒子射流,能制备超高硬度 WC 硬质合金涂层和梯度功能热障涂层,还可方便的制备纳米结构涂层,相对于国内外普通等离子喷涂,涂层的质量有了显著提高。在涂层后加工领域,电解、超声先进切削、研磨技术的出现,解决了高硬度难加工的金属或陶瓷涂层的精细加工问题,显著提高了涂层后加工的质量和效率。

为了较全面系统地向热喷涂生产领域的工程技术人员普及热喷涂技术的基本知识,推广现代热喷涂技术在先进制造、设备维修和再制造技术领域的应用,我们组织编写了这套《热喷涂技术丛书》。包括《热喷涂实用技术》、《热喷涂技术问答》、《热喷涂材料及应用》和《热喷涂工程师指南》四个分册。《丛书》主要供热喷涂技术领域的工程技术人员及蓝领工人阅读使用,也可供先进制造技术领域的设计人员、技术人员及大专院校相关专业的师生参考。

本书为《热喷涂技术丛书》的第一分册,分为十一章,较全面系统地介绍

了有关热喷涂的基础知识,热喷涂设备的基本原理与组成,热喷涂工艺的特点和主要参数,一些重要的热喷涂材料和涂层设计,涂层的结构特点和涂层质量检测,涂层的机械加工和一些典型应用实例。同时也介绍了热喷涂技术领域的最新研究成果。

本书由王海军任主编,各章节编写人员为:第一章 王海军,第二章 周世魁、魏伟(北京矿冶研究总院),第三章、第四章 潘荣辰,刘明,第五章、第七章 王海军,周世魁,第六章、第八章 蔡江、谢凤宽;第九章 翁熙祥,第十章 周世魁,第十一章 王建。全书由王海军、周世魁统稿,韩志海审稿。陆欢、张兴等同志参加了校阅工作。

本书得到了装甲兵工程学院许多同事的帮助与支持,在此深表感谢。

翁熙祥教授对本书编写给予了悉心指导,对全书的构思及整体结构提出了许多宝贵意见,在此表示诚挚的感谢。

本书在编写过程中参考了许多文献,特别是近年来的相关著作和学术论文资料,在此谨向原文献作者表示诚挚的敬意。

由于编者的水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请各位读者、同行和专家批评指正。

目 录

第一章 热喷涂技术概述	1
1.1 热喷涂技术的定义和分类	1
1.2 热喷涂技术的发展概况	1
1.3 热喷涂涂层形成机理	2
1.4 热喷涂技术的特点	3
1.5 热喷涂技术的应用	5
第二章 热喷涂材料	9
2.1 热喷涂材料分类和要求	9
2.2 热喷涂线材	11
2.2.1 锌、铝、锌铝合金及低熔点合金丝	11
2.2.2 铁基合金丝	14
2.2.3 铜与铜合金丝	16
2.2.4 镍与镍合金丝	16
2.2.5 其它丝材	18
2.3 热喷涂(熔)粉末材料	20
2.3.1 金属及合金粉末	20
2.3.2 陶瓷材料粉末	28
2.3.3 纳米材料粉末	36
2.3.4 塑料粉末	38
2.3.5 复合材料粉末	39
第三章 热喷涂工件的表面制备	41
3.1 基体表面净化处理	41
3.1.1 常用表面除油处理技术	41
3.1.2 表面除锈处理	43
3.2 基体表面预加工	44
3.3 基体表面粗化处理	45
3.3.1 喷砂处理	45

3.3.2	机械加工法粗化·····	50
3.3.3	电拉毛·····	52
3.4	非喷涂表面的保护·····	52
3.4.1	胶带保护·····	52
3.4.2	化合物保护·····	52
3.4.3	机械保护·····	53
第四章	热喷涂涂层设计 ·····	54
4.1	根据使用要求选择喷涂材料·····	54
4.1.1	耐磨损涂层·····	54
4.1.2	耐热和抗氧化涂层·····	57
4.1.3	耐腐蚀涂层·····	58
4.1.4	电绝缘和导电涂层·····	60
4.1.5	控制机械部件间隙的涂层·····	61
4.2	复合涂层系统设计·····	61
4.3	喷涂工艺的选择·····	63
第五章	火焰喷涂(熔)技术 ·····	65
5.1	气体燃烧火焰基础·····	65
5.1.1	气体燃料燃烧方式·····	65
5.1.2	燃气和助燃气的混合·····	66
5.1.3	脱火、回火及回火的预防·····	66
5.1.4	火焰的形貌、构成和性质·····	67
5.2	火焰线材喷涂技术·····	69
5.2.1	火焰线材喷涂原理及特点·····	70
5.2.2	火焰线材喷涂设备·····	70
5.2.3	火焰线材喷涂技术的应用及其实例·····	79
5.3	火焰粉末喷涂技术·····	84
5.3.1	火焰粉末喷涂的分类及特点·····	84
5.3.2	普通火焰粉末喷涂·····	85
5.3.3	火焰塑料粉末喷涂·····	93
5.3.4	超声速火焰粉末喷涂技术·····	99
5.3.5	爆炸喷涂技术·····	106
5.4	氧—乙炔火焰粉末喷熔技术·····	110
5.4.1	氧—乙炔火焰粉末喷熔的原理·····	110
5.4.2	氧—乙炔火焰粉末喷熔的特点·····	112

5.4.3	工件对火焰粉末喷熔的适应性	112
5.4.4	氧—乙炔焰粉末喷熔设备	114
5.4.5	氧—乙炔焰粉末喷熔工艺	117
5.4.6	氧—乙炔焰喷熔用粉末的特性	121
5.4.7	氧—乙炔焰粉末喷熔应用实例	123
第六章	电弧喷涂技术	125
6.1	电弧喷涂原理及特点	125
6.1.1	电弧喷涂原理	125
6.1.2	电弧喷涂的主要特点	126
6.2	电弧喷涂设备	127
6.2.1	电弧喷涂电源	127
6.2.2	送丝机构	129
6.2.3	送丝软管	131
6.2.4	电弧喷涂枪	132
6.2.5	控制系统	133
6.2.6	电弧喷涂设备维护与故障排除	134
6.3	电弧喷涂工艺参数	135
6.3.1	喷涂电压	136
6.3.2	工作电流	137
6.3.3	雾化空气	138
6.3.4	喷涂距离	139
6.4	电弧喷涂工艺	140
6.4.1	表面预处理	140
6.4.2	电弧喷涂层的材料选择	141
6.4.3	喷涂	141
6.4.4	后处理	144
6.5	电弧喷涂的应用	146
6.5.1	长效防腐涂层的应用	146
6.5.2	机械零件修复与预保护	147
6.5.3	工业锅炉受热管件耐高温腐蚀涂层的应用	148
6.5.4	电弧喷涂快速制模技术	148
第七章	等离子喷涂技术	150
7.1	等离子喷涂的基本知识	150
7.1.1	等离子弧的压缩效应	150

7.1.2	等离子弧的类型	151
7.1.3	等离子焰流的特性	152
7.1.4	等离子焰流工作气体	153
7.1.5	等离子喷涂的基本原理和特点	154
7.1.6	等离子喷涂的主要工艺参数	156
7.2	普通等离子喷涂	157
7.2.1	普通等离子喷涂的特点	158
7.2.2	普通等离子喷涂设备	158
7.2.3	普通等离子喷涂工艺	169
7.2.4	普通等离子喷涂应用实例	171
7.3	低压等离子喷涂	173
7.3.1	低压等离子喷涂特点	173
7.3.2	低压等离子喷涂设备	175
7.3.3	低压等离子喷涂的工艺	178
7.4	超声速等离子喷涂	179
7.4.1	超声速等离子喷涂的特点	180
7.4.2	超声速等离子喷涂设备	181
7.4.3	超声速等离子喷涂工艺	185
7.4.4	超声速等离子喷涂应用实例	188
7.5	水稳等离子喷涂	189
7.6	三阴极等离子喷涂	190
第八章	其它喷涂技术	193
8.1	激光喷涂技术	193
8.2	冷喷涂技术	194
8.3	电热爆炸喷涂技术	197
第九章	热喷涂涂层的机械加工	199
9.1	热喷涂涂层机械加工的特点	199
9.1.1	加工过程中冲击与振动大	199
9.1.2	刀具容易崩刃和产生非正常磨损	199
9.1.3	刀具耐用度低	199
9.1.4	热喷涂涂层易剥落	200
9.1.5	需冷却	200
9.2	热喷涂涂层的车削加工	200
9.2.1	刀具材料的选择	200

9.2.2	刀具几何参数的选择	205
9.2.3	车削切削用量的选择	216
9.3	热喷涂涂层的磨削	225
9.3.1	影响砂轮切削性能的因素及其选用	225
9.3.2	磨削用量的选择	227
9.3.3	国外部分热喷涂涂层的磨削规范	228
9.4	热喷涂涂层的电解磨削	231
9.4.1	电解磨削原理	231
9.4.2	电解磨削的工艺特点	231
9.4.3	电解磨削电解液的选择	232
9.4.4	电解磨削用设备	233
9.4.5	电解磨削的工艺参数	235
9.5	热喷涂涂层的超声振动车削	235
9.5.1	超声振动车削原理	235
9.5.2	超声振动车削的装置	236
9.5.3	超声振动车削热喷涂涂层的工艺参数	237
9.5.4	超声振动车削热喷涂涂层实例	241
第十章	热喷涂材料与涂层检测	242
10.1	热喷涂粉末的性能检测	242
10.1.1	热喷涂粉末粒度测试	243
10.1.2	热喷涂粉末流动性能测试	246
10.1.3	热喷涂粉末松装密度测量方法	248
10.2	热喷涂涂层的性能检测	249
10.2.1	测定涂层性能的目的	250
10.2.2	涂层性能检测项目和分类	250
10.2.3	热喷涂涂层常规性能检测	252
10.2.4	涂层力学和机械性能检测	259
10.2.5	涂层使用性能检测	271
10.2.6	热喷涂涂层结构的金相检测	279
第十一章	热喷涂的安全与防护	286
11.1	安全技术	286
11.1.1	防火防爆	286
11.1.2	电器设备的防护	287
11.1.3	机械设备的防护	287

11.2 劳动防护.....	287
11.2.1 劳动防护措施.....	287
11.2.2 个人防护和卫生保健.....	289
11.2.3 操作人员警示语.....	289
附录 部分推荐厂商及其产品.....	291
参考文献.....	307

第一章 热喷涂技术概述

1.1 热喷涂技术的定义和分类

热喷涂技术是指利用某种热源将喷涂材料迅速加热到熔化或半熔化状态,再经过高速气流或焰流使其雾化,加速喷射在经预处理的零件表面上,使材料表面得到强化和改性,获得具有某种功能(如耐磨、防腐、抗高温等)表面的一种应用性很强的材料表层复合技术。

热喷涂方法通常可按热源性质进行分类和命名。常用的热喷涂方法可分为:火焰喷涂、电弧喷涂和等离子喷涂与其它喷涂方法等,热喷涂分类如图 1-1 所示。

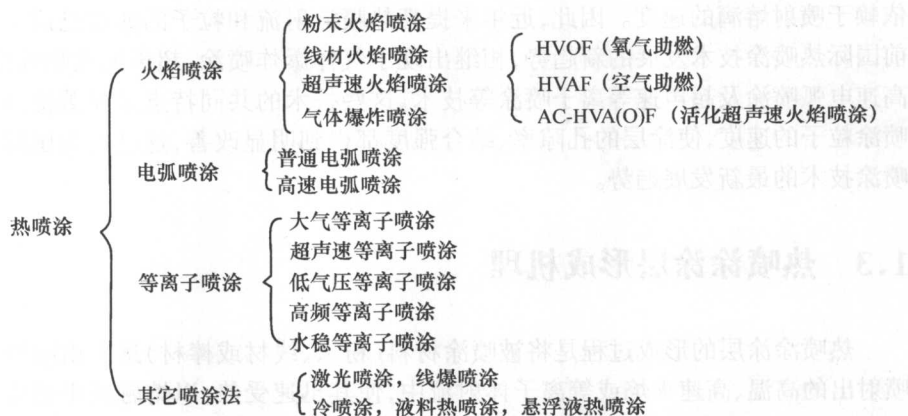


图 1-1 热喷涂方法分类

1.2 热喷涂技术的发展概况

热喷涂技术自 1910 年由瑞士的 M.U.Schoop 博士完成最初的金属熔液喷涂装置以来,已有近百年的历史。最初,热喷涂主要用于喷涂装饰涂层,以氧—

乙炔火焰或电弧喷涂铝线和锌线为主。20 世纪 30 年代—40 年代,随着火焰和电弧线材喷涂设备的完善及火焰粉末喷枪的出现,热喷涂技术从最初的喷涂装饰涂层发展为用钢丝修复机械零件,喷涂铝或锌作为钢铁结构的防腐蚀涂层。50 年代爆炸喷涂技术及随后等离子喷涂技术的开发成功,使热喷涂技术在航天航空等领域获得了广泛的应用。同一时期研制成功了自熔合金粉末,使通过涂层重熔工艺消除涂层中的气孔,与基体实现冶金结合成为可能,扩大了热喷涂技术的应用领域。80 年代初期开发成功超声速火焰喷涂技术,90 年代初期得到广泛应用,使 WC-Co 硬质合金涂层的应用从航天航空领域大幅度扩大到各种工业领域。功率高达 200kW 的高能等离子喷涂技术、超声速等离子喷涂技术及轴向送粉式等离子喷涂技术,尤其是高效能超声速等离子喷涂技术的出现,为在各个工业领域进一步有效地利用热喷涂技术提供了有力的手段。

自热喷涂技术进入实际应用以来,新的工艺方法以及新型结构喷枪的开发都对热喷涂技术的发展起到了巨大的推动作用。自 20 世纪 80 年代以来,热喷涂技术的新概念不断出现,新的技术不断涌现,与此同时,关于热喷涂技术的基础研究也越来越受到重视。

随着先进制造业和高新材料的发展,现代工业要求涂层更加致密、强度(内聚强度和结合强度)更高、可靠性更好,而涂层的致密性和结合强度很大程度上依赖于喷射熔滴的速度。因此,近年来提高热喷涂射流和粒子的速度已成为当前国际热喷涂技术发展的新趋势,相继出现了气体爆炸喷涂、超声速火焰喷涂、高速电弧喷涂及超声速等离子喷涂等技术,这些技术的共同特点是显著提高了喷涂粒子的速度,使涂层的孔隙率、结合强度都得到明显改善,这已成为国际热喷涂技术的最新发展趋势。

1.3 热喷涂涂层形成机理

热喷涂涂层的形成过程是将被喷涂材料(粉末、线材或棒材)送入由喷枪口喷射出的高温、高速火焰或等离子体射流中,使其迅速受热,以熔融或半熔融形态高速喷射到经预处理的基体材料表面;熔融粒子撞击基体时发生能量转换、变形、铺展、流散和润湿,并以约 10^6K/s 的速度极快地冷却、凝固、堆垛形成涂层。涂层形成过程如图 1-2 所示。

在形成涂层的过程中,单个熔融粒子为形成涂层的基本单位,其行为基本反映了涂层形成的特点。单个粒子的行为包括三个基本过程:先是喷涂材料送入热源的过程;接着是喷涂材料粒子与热源的相互作用过程,在热源作用下,喷涂材料被加热、熔化、加速,同时还发生高温高速粒子与环境气氛的作用过程,尤其

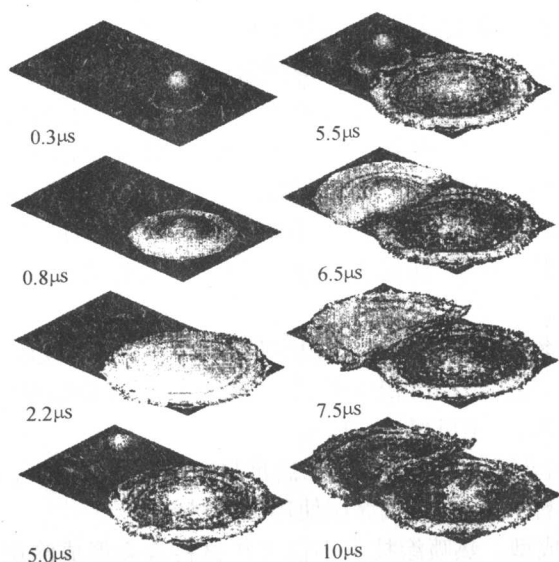


图 1-2 热喷涂涂层形成过程

对于金属材料,由于通常喷涂在大气气氛中进行,热源中空气的卷入,会导致喷涂粒子与气氛反应,如氧化等;最后是高温高速熔融粒子与基体(或已沉积形成的涂层)的作用,包括熔融粒子与基体的碰撞、横向流动扁平化和急速冷却凝固。整个过程是在数十微秒的极短时间内完成的。这些基本过程对所形成涂层的组织结构以及性能影响较大。对于给定的材料,描述高速粒子的参量一般主要包括粒子尺寸、形状、速度与温度,喷涂系统、工艺参数等,涂层结构与性能的影响主要通过这些参数来调整 and 实现。

一般只要具有熔融状态,能形成熔融态粒子或准熔融态粒子的材料,均可以通过热喷涂形成涂层。涂层的性能与涂层材料本身密切相关。选择合适的材料,可以获得具有优越的耐磨、耐蚀、耐热、绝热、耐辐射等性能的表面强化和防护涂层,也可获得使材料表面具有导电、绝缘、特殊光学、磁学、电学等性能的功能涂层。

1.4 热喷涂技术的特点

热喷涂特点很多,采用热喷涂技术制备各种表面强化和表面防护涂层,具有许多独特的优点。主要有以下几点:

(1) 涂层基体材料广泛。可制备涂层的基体除了金属材料,还有无机材料(玻璃、陶瓷、石膏等)和有机材料(包括木材、布、纸类等)等。

(2) 能够喷涂的材料范围广,制备的涂层种类多。有熔点且熔点远低于沸点或拟熔融态的材料均可用于喷涂,包括各种金属及合金、陶瓷、金属陶瓷、金属间化合物、非金属矿物、塑料等几乎所有固态工程材料,此外,还能制成具有特殊性能的不同材料构成的复合涂层或叠加涂层,因而能够制备各种各样的保护层和功能涂层,如耐磨、减摩自润滑、可磨耗密封、摩阻、耐蚀、抗氧化、耐高温、热障、绝缘、导电、超导、辐射、防辐射、屏蔽、抗干扰、波长吸收、催化及生物功能等涂层。

(3) 沉积效率较高,特别适合沉积厚膜涂层。与电镀、化学镀、离子镀、气相沉积等技术相比,热喷涂的沉积效率、生产效率较高,且涂层厚度能够控制,可从几十微米到几毫米,甚至可厚达 20mm。

(4) 节约贵重材料,降低成本。在满足强度要求的前提下,制件基体可以用较普通材料代替贵重材料,仅涂层使用优质材料。

(5) 可喷涂成型。热喷涂技术不仅可在材料表面形成涂层,还可以用来制造机械零件实体,即喷涂成型。该方法是先在成型模表面形成涂层,然后采用合适的方法脱去成型模后而成为涂层成型制品。

(6) 一般不受工件尺寸和施工场所的限制。既可喷涂大型重型工件,又可喷涂小件、薄壁件;既可在工厂内施工,也可现场施工;可以在整体表面上进行喷涂,也可在大型构件的限定表面上进行喷涂。对大型构件的局部表面制备涂层,是既经济又方便的方法。

(7) 对基体材料的热影响小。与热扩散渗镀、气相沉积、高温合成、烧结等工艺相比,除喷熔外,热喷涂对基体的热影响最小,基体受热温度一般不超过 200℃,从而使母材的组织结构与性能不发生变化,工件的变形可以忽略,因此热喷涂也可称为一种“冷工艺”。

(8) 调整涂层成分比较容易。通过调整涂层材料的种类、配比及涂覆工艺等,能够比较容易地调整涂层成分和涂层性能。

热喷涂技术的局限:

(1) 热喷涂涂层耐高应力、冲击和重载性能较差。热喷涂涂层与基体的结合主要为物理和机械结合,结合强度较低,一般低于 50MPa。但气体爆炸喷涂、超声速火焰喷涂、超声速等离子喷涂及超高速冷喷涂等先进工艺正使热喷涂涂层的结合强度得到相当大的提高,最高甚至可达 200MPa。

(2) 涂层的力学性能及耐蚀、抗氧化、绝缘等性能都比致密实体的同种材料要差。喷涂涂层含有不同程度的孔隙和夹杂,片层状涂层结构导致涂层的各向

异性,这降低了涂层的力学性能及耐蚀、抗氧化、绝缘等性能。图 1-3 示出了热喷涂涂层与整体致密材料的性能比较。

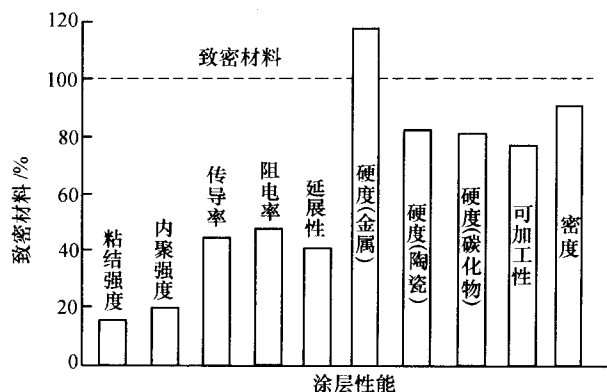


图 1-3 热喷涂涂层与整体致密材料的性能比较

孔隙的存在,虽然使热喷涂涂层在用于防腐蚀、绝缘、耐高温等工况时不利,但在用于气敏元件(如氧探测器)、可磨损密封、催化、生物功能等时,则可获得意想不到的成功。孔隙还是很好的储油结构,使涂层具有更好的减摩润滑性能。

(3) 热能利用率比较低,成本相对较高。占热喷涂技术主体地位的等离子喷涂,其热能却只有 10%~20% 被用于熔化涂层材料;而等离子喷涂陶瓷涂层的沉积效率依据喷涂材料的不同,在 30%~80% 间变化,特别是喷涂小件时,涂层材料的沉积率低。这些都使得热喷涂涂层的成本相对较高。

(4) 热喷涂粒子呈线性飞行的特性,难于在易遮蔽的凹腔、复杂型面、细长内孔、盲孔等部位喷涂合格涂层。

(5) 热喷涂工作环境较差,有噪声、粉尘、热和弧光辐射问题,必须采取相应的劳动保护与环境保护措施。但随着计算机控制技术、机器人技术等先进技术的应用,热喷涂操作和产业化生产已能完全自动化。

掌握喷涂技术的特点,再根据表面涂层产品的形状、尺寸精度及其所需表面性能、设备经费和运行费用、作业地点的环境条件等,来综合考虑是否采用热喷涂方法,这样才能在保证涂层性能与质量的基础上获得热喷涂技术的最佳经济效益。

1.5 热喷涂技术的应用

热喷涂技术涉及面广、加工工艺相对简单灵活、应用范围广(表 1-1 列出了

热喷涂技术的应用)、经济效益大的现代加工新技术,它可使表面具备耐磨、防腐、绝热、耐热、导电、绝缘、抗冲蚀、抗氧化、减摩、润滑、防辐射等功能,不但可以用于机械零部件的修复和表面强化,而且可以用于制造。由于喷涂材料的选择范围广,不受整体材料合金化的限制,可较方便地获得超硬合金、各种陶瓷或金属陶瓷涂层以及各种功能涂层,且涂层相对于整体高级材料而言材料用量少,比起整体提高材质无疑要经济得多,因此可大胆使用贵重材料,其成本不会增加很多,而材料的表面性能却能得到大幅提高,经热喷涂修复的零件,其使用寿命一般可以达到甚至数倍超过新品。某重负荷车辆多种修复件的实车考核表明,其使用寿命比新品提高了1.4倍~8.3倍。

表 1-1 热喷涂技术的应用

领域	零 部 件	工艺 ^①	涂层用途	涂层材料
火箭技术	火箭头部和喷管	1	耐热、抗冲蚀	Al_2O_3 , ZrO_2 , W
宇宙飞行器	喷气推进弹体整流罩; 宇宙研究装置; 超短波天线	1 1 1	绝热; 防粘连、绝热、热辐射性能; 绝热、绝缘	ZrO_2 , Al_2O_3 ; Al_2O_3 , ZrO_2 , W 金属及氧化物、碳化物等; Al_2O_3
航空	喷气发动机涡轮和压气机; 叶片; 燃气涡轮叶片; 燃烧室内衬; 起落架轴颈; 机翼和机身承力结构; 前整流舱; 机匣	1 1, 2 1 1 1 1 1 1 1	耐冲蚀; 耐热; 耐热; 耐热; 耐磨; 强度、刚度; 滑动、封严; 耐磨、润滑减摩、封严	Co-WC, TiC, Cr_2O_3 ; Ni-Al, Ni-Cr-B-Si; Ni-Al, Al, Al_2O_3 ; Co-Cr-Al-Y, MgAlO_2 ; 硬质碳化物及其合金; 纤维增强复合材料; 聚苯脂-硅铝; 镍包石墨, 镍包硅藻土
机械制造	压铸模具; 可拆卸的和不可拆卸的压膜; 难熔金属挤压模具; 轧机; 高频感应圈; 大型零件(例如涡轮); 铸件的半永久性模具、机床导轨; 管状金属结构; 烧结舟; 切削和磨削工具, 其中包括精磨; 量具;	1 1, 2 1 1 1 1 1, 2 1 1 1 1	耐热; 耐热和防止粘合、耐磨; 绝热; 防止粘合; 电绝缘; 耐热; 耐磨; 绝热; 防止粘合; 持久性、精确度; 持久性;	Cr-Ni 合金; Al_2O_3 , Ni-Al; Ni-Cr-B-Si; Al_2O_3 , ZrO_2 ; Al_2O_3 ; Al_2O_3 ; Al_2O_3 ; Mo, Ni-Cr-B-Si 等; Al_2O_3 ; Al_2O_3 ; 硬质合金, 金刚石, 碳化物等; 碳化物;