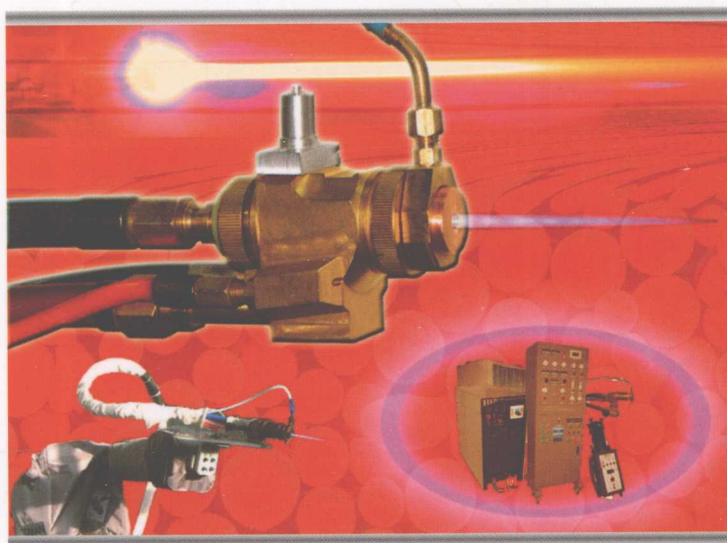


● 热喷涂技术丛书

热喷涂材料及应用

—— 王海军 主编 ——



国防工业出版社

National Defense Industry Press

出版工部局：京北一，總主筆張王，現定又將林新創

國防工業出版社

45441480(010); 电话: 010-66458432; 北京 · 5818980(010); 邮编: 100084

内 容 简 介

本书共分八章。包括绪论,热喷涂材料的制备与选择,热喷涂用金属及其合金材料,热喷涂用陶瓷材料,热喷涂用有机塑料材料,热喷涂用复合材料,热喷涂材料的性能分析与检测,热喷涂材料的应用实例。

本书可作为从事热喷涂技术的工程技术人员和大专院校相关专业的师生参考书。

图书在版编目(CIP)数据

热喷涂材料及应用/王海军主编. —北京:国防工业出版社,2008.3

(热喷涂技术丛书)

ISBN 978-7-118-05359-3

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 139624 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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 21¼ 字数 381 千字

2008 年 3 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。相对于其他材料制备技术,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声速火焰喷涂,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声速等离子喷涂系统(HEPJet),可在小气体流量(3m³/h ~ 6m³/h)和较低功率(50kW ~ 80kW)下获得超声速粒子射流,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》的第三分册,分为八章,主要从热喷涂材料属

性的角度对其进行了分类,并对一些常用的喷涂材料的规格参数以及相关涂层的主要性能、应用作了较详细的介绍。对于面向热喷涂生产一线的高级蓝领技术人员,无论从热喷涂材料的选取角度,还是从对相关涂层性能的预测角度都提供了一种更为直观的依据。

本书由王海军任主编,各章节编写人员为:第一章、第二章王海军,第三章刘明,第四章、第八章郭永明,第五章张兴,第六章陆欢,第七章蔡志海。全书由王海军、郭永明统稿,郑济宏审稿。韩志海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。

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。

本书由王海军任主编,各章节编写人员为:第一章、第二章王海军,第三章刘明,第四章、第八章郭永明,第五章张兴,第六章陆欢,第七章蔡志海。全书由王海军、郭永明统稿,郑济宏审稿。韩志海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。

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 绪论	1
1.1 热喷涂材料的发展简况	1
1.2 热喷涂技术概述	3
1.2.1 热喷涂技术的定义	3
1.2.2 热喷涂工艺方法的分类	3
1.2.3 热喷涂涂层的形成和结合机理	4
1.3 热喷涂材料的要求	6
1.4 热喷涂材料的分类	7
1.5 热喷涂材料的发展展望	8
第二章 热喷涂材料的制备与选择	10
2.1 热喷涂材料的制备方法	10
2.1.1 热喷涂线材制备方法	10
2.1.2 热喷涂粉末材料制备方法	12
2.1.3 热喷涂纳米结构粉末材料	18
2.2 热喷涂材料的选择	27
2.2.1 耐磨涂层材料的选择原则	27
2.2.2 耐蚀涂层材料的选择	30
2.2.3 耐高温涂层材料的选择	32
2.2.4 热障涂层材料的选择	34
第三章 热喷涂用金属及其合金材料	35
3.1 概述	35
3.2 热喷涂用纯金属及其合金材料	36
3.2.1 锌及其合金材料	36
3.2.2 铝及其合金材料	40
3.2.3 铁及其合金材料	44
3.2.4 铜及铜合金材料	57
3.2.5 镍及镍合金材料	67

3.2.6	其他金属及其合金材料	79
3.3	热喷涂用自熔性合金材料	93
3.3.1	镍基自熔性合金材料	93
3.3.2	钴基自熔性合金材料	103
3.3.3	铁基自熔性合金材料	108
3.3.4	铜基自熔性合金材料	123
第四章	热喷涂用陶瓷材料	125
4.1	概述	125
4.1.1	热喷涂用陶瓷涂层材料的分类	125
4.1.2	热喷涂用陶瓷涂层材料的生产方法	125
4.1.3	热喷涂工艺对陶瓷涂层材料的特殊要求	126
4.1.4	热喷涂用陶瓷涂层材料的包装和储存	126
4.2	热喷涂用氧化物类陶瓷粉末	127
4.2.1	概述	127
4.2.2	氧化铝基陶瓷粉末	133
4.2.3	氧化锆基陶瓷粉末	147
4.2.4	二氧化钛基陶瓷粉末	153
4.2.5	氧化镁基陶瓷粉末	158
4.2.6	氧化铬基陶瓷粉末	161
4.2.7	硅酸盐类陶瓷粉末	165
4.2.8	特殊功能氧化物陶瓷粉末	167
4.2.9	其他纯氧化物陶瓷粉末	170
4.3	热喷涂用碳化物类陶瓷粉末	171
4.3.1	金属型碳化物粉末	171
4.3.2	非金属型碳化物粉末	175
4.4	热喷涂用氮化物类陶瓷粉末	176
4.4.1	氮化钛陶瓷粉末	176
4.4.2	氮化硅陶瓷粉末	177
4.4.3	氮化硼陶瓷粉末	177
4.4.4	其他氮化物耐磨陶瓷粉末	178
4.5	热喷涂用硼化物、硅化物类陶瓷粉末	179
4.5.1	硼化物陶瓷粉末	179
4.5.2	硅化物陶瓷粉末	180
4.6	热喷涂用陶瓷棒材	181

4.6.1	概述	181
4.6.2	陶瓷棒材的规格与化学成分	182
4.6.3	陶瓷棒材火焰喷涂涂层的性能	182
第五章	热喷涂用有机塑料材料	184
5.1	概述	184
5.1.1	热塑性塑料粉末	185
5.1.2	热固性粉末	192
5.2	喷塑材料的研究方向	194
第六章	热喷涂用复合材料	195
6.1	热喷涂用复合粉末材料	195
6.1.1	金属间复合粉末	196
6.1.2	金属-陶瓷复合粉末	202
6.1.3	陶瓷改性的塑陶复合粉末	226
6.1.4	陶瓷型复合粉末	227
6.1.5	金属-有机塑料复合粉末	229
6.1.6	金属-无机非金属复合粉末	230
6.1.7	其他复合粉末	232
6.2	热喷涂用复合芯型丝材	233
6.2.1	包覆型自粘结复合丝材	235
6.2.2	填充型复合丝材	236
6.2.3	弥散冶金型复合丝材	237
第七章	热喷涂材料的性能分析与检测	238
7.1	概述	238
7.2	热喷涂线材的性能分析与检测	238
7.2.1	热喷涂线材的性能	238
7.2.2	热喷涂线材的成分分析	239
7.3	热喷涂粉末材料的性能与检测	242
7.3.1	喷涂粉末的性能	243
7.3.2	喷涂粉末颗粒形貌的分析与检测	244
7.3.3	喷涂粉末粒度的分析与检测	248
7.3.4	喷涂粉末流动性能的分析与检测	266
7.3.5	喷涂粉末松装密度的分析与检测	268
7.3.6	喷涂粉末的比表面的分析与检测	271
7.3.7	喷涂粉末的成分与组织结构分析	276

第八章 热喷涂材料的应用实例	283
8.1 概述	283
8.2 国防工业领域中的应用	285
8.2.1 飞机发动机叶片、尾翼喷管上的应用	286
8.2.2 飞机起落架上的应用	287
8.3 冶金工业领域中的应用	287
8.4 石油化工领域中的应用	288
8.5 能源工业中的应用	289
8.5.1 引排风机、煤粉风机上的应用	290
8.5.2 煤粉生产、输送系统中的应用	291
8.5.3 电厂轴类工件上的应用	291
8.5.4 火电厂其他设备、设施上的应用	291
8.5.5 核能中的应用	292
8.6 机械制造工业中的应用	292
8.6.1 机械加工制造业中的应用	292
8.6.2 轻纺工业中的应用	293
8.6.3 汽车工业领域中的应用	294
8.7 生物工程领域中的应用	296
8.8 快速成形制造技术中的应用	297
8.9 模具制造技术中的应用	298
附录一 常用维氏、布氏、洛氏硬度的换算表	299
附录二 部分推荐厂商及产品	301
参考文献	329

第一章 绪 论

1.1 热喷涂材料的发展简况

为了保持经济可持续发展、降低资源消耗,进入 21 世纪后我国开始构建循环经济、建设节约型社会,提出了关于建设我国循环经济的“4R”发展原则(Reduce 减量化,Reuse 再利用,Recycle 再循环,Remanufacture 再制造)。其中再制造是循环经济中最具活力的部分,而热喷涂技术是再制造领域中一项十分重要的技术。它可以制备耐磨、耐腐蚀、隔热、导电、绝缘、减磨、润滑、防辐射等多种功能涂层,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。

热喷涂材料是热喷涂技术的重要组成部分,它与热喷涂工艺、热喷涂设备共同构成了热喷涂技术的主体。自瑞士的 M.U.Schoop 博士于 1910 年完成最初的金属熔液喷涂装置以来,热喷涂技术已有近百年的历史。在此期间相继出现了火焰喷涂、电弧喷涂、爆炸喷涂、等离子喷涂、超声速火焰喷涂、高速电弧喷涂、超声速等离子喷涂以及冷喷涂技术,而热喷涂材料也伴随着设备与技术的发展不断发展。回顾历史,热喷涂材料的发展大体经历了四个阶段。

第一阶段是以金属和合金为主要成分的粉末和线材为主要特征。早期的粉末材料主要是通过破碎及混合等初级制粉方法生产的,而线材则是用拉拔工艺制造出一定直径的金属丝或合金丝。材料的种类也比较单一,主要是一些金属及其合金,如铝、锌、铜、镍、钴和铁等。涂层功能较单一,大体是防腐和耐磨损,应用面相对较小。这些材料采用的喷涂工艺只有粉末火焰喷涂、线材火焰喷涂及电弧喷涂等。

第二阶段是以自熔性合金为主要特征。20 世纪 50 年代中期,人们发现要解决工业设备中存在的大量磨损问题,十分有必要改进工艺,制取更耐磨的涂层。经过几年的努力,自熔性合金问世并发展了火焰喷焊工艺,这就是著名的“硬面技术”。自熔性合金是在 Ni、Co 和 Fe 基的金属中加入 B、Si、Cr 这些能形成低熔点共晶合金的元素及抗氧化元素,喷涂后再加热重熔,获得硬面涂层。这项技术在某种程度上是受焊接堆焊工艺的启发。由于这些涂层具有高硬度、高

冶金结合及很好的抗氧化性,从而在耐磨及抗氧化性方面迈出了一大步。自熔性合金的出现,对热喷涂技术起了巨大的推动作用。

这一阶段另一项技术突破是等离子喷涂设备的问世。等离子焰流温度高达 $1\text{万}^{\circ}\text{C}$,几乎可以喷涂一切具有物理熔点的材料。于是,一些具有较高耐磨、耐高温、抗燃气腐蚀及隔热性能的陶瓷和金属陶瓷材料就可以作为热喷涂材料进行使用,使热喷涂技术开始从简易的维修车间步入航空、航天等高技术产业领域,并解决了大量令冶金工程师头痛的材料问题。

第三阶段是以复合材料的发展为主要特征。20世纪70年代中期出现了一系列的复合粉和自粘结一次喷涂粉末,而80年代,则是以夹芯焊丝作为电弧喷涂材料进入市场为主要标志。通过材料成分与结构的“复合”,达到喷涂工艺的改进和涂层性能的提高。镍包铝和铝包镍复合粉取代了传统的Mo丝,改善了打底层粘结性;自粘结一次粉综合了打底粉与工作粉双重功能,简化了喷涂工艺。怕氧化或氮化的金属或陶瓷被Ni或Co这些金属包裹之后,不仅保护了核心成分,同时又会与核心成分发生化学或冶金反应,赋予涂层更好的性能。复合材料不局限于粉末,在线材方面也出现了复合喷涂丝。尤其是填充型复合线材,已开始拥入市场,这些复合丝可以用线材火焰喷涂,但主要用电弧喷涂,使这些原来只能形成金属-合金涂层的工艺,可以喷涂带有陶瓷类硬质点的硬质耐磨材料,使涂层的应用面大为拓展。

第四阶段是以软线材料和纳米材料为主要特征。为克服粉末喷涂的缺点把粉末熔炼轧制成线材进行喷涂很早就开始应用了,但是,有许多材料无法轧制成线材。之后又产生了粉芯线材,即把粉末包在钢皮中进行喷涂,可以用火焰,也可以用电弧喷涂。但有许多导电性能差的粉末或不导电的材料无法用电弧喷涂。同时钢皮材料成分也混入涂层之中,粉芯线材熔粉不均也都直接影响涂层的质量。法国SNMI公司把包皮材料改用塑料做成柔性软线,塑料材料在喷涂过程中(大约 400°C)就挥发掉不参与涂层中去,而且所有可用于热喷涂的材料都可以做成软线,这就是热喷涂材料形态上的进步和新发展。

纳米材料是指由极细晶粒组成的特征维度尺寸 $<100\text{nm}$ 的固体材料。自纳米材料诞生到现在已制备出包括金属、非金属、有机、无机和生物等在内的各种纳米材料。由于其不同于微观和宏观物质的许多介观特性,成为科技发展前沿中极具挑战性的研究领域。同一种材料,当尺寸减小到纳米级时,由于位错的滑动受到限制,表现出比基体相材料高得多的硬度,其强度和硬度可提高4倍~5倍。纳米材料界面量大,界面原子排列混乱,原子受外力作用产生变形时,很容易迁移、扩散,表现出非常好的塑性、韧性、延展性,具有高强度、高塑性甚至超塑性的纳米材料,对材料的表面改性具有特殊意义。表面工程在其发展过程中,

正需要具有许多特质的纳米材料来促进其发展。

1.2 热喷涂技术概述

1.2.1 热喷涂技术的定义

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。

1.2.2 热喷涂工艺方法的分类

热喷涂工艺方法随技术的进步在不断丰富和发展,目前热喷涂通常按所选用的热源和选用材料的形状进行分类。其分类见图 1-1,部分喷涂方法的工艺特点见表 1-1。

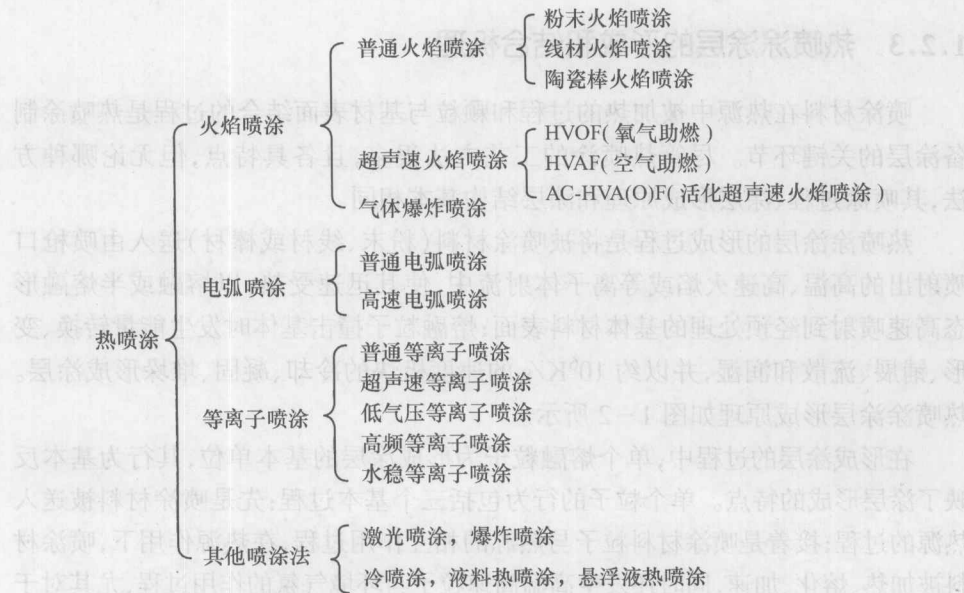


图 1-1 热喷涂的分类

表 1-1 部分喷涂方法的工艺特点

工艺方法	电弧喷涂	火焰喷涂	超声速火焰喷涂	等离子喷涂	超声速等离子喷涂	爆炸喷涂
热源	电弧	燃烧火焰	燃烧火焰	等离子弧	等离子弧	爆炸燃烧火焰
热源温度/℃	4000~6000	2600~3100	<3300	>10000	>10000	3300
粒子飞行速度/(m/s)	80~300	70~120	400~900	200~320	350~800	600~800
材料形状	线、带	粉、线、棒	粉	粉	粉	粉
喷涂速度/(kg/h)	<300	<10	<10	<10	<10	<3
涂层厚度/mm	0.1~5	0.1~3	0.1~1	0.1~1.5	0.1~1	0.05~0.5
涂层孔隙率/%	3~10	5~15	1~5	3~10	1~5	1~3
涂层结合强度/MPa	10~50	10~50	40~80	30~60	40~80	>60
涂层氧化程度	中~高	中~高	较低	低	低	较低

1.2.3 热喷涂涂层的形成和结合机理

喷涂材料在热源中被加热的过程和颗粒与基材表面结合的过程是热喷涂制备涂层的关键环节。尽管热喷涂的工艺方法很多,且各具特点,但无论哪种方法,其喷涂过程、涂层形成原理和涂层结构基本相同。

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 的速度极快的冷却、凝固、堆积形成涂层。热喷涂涂层形成原理如图 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:先是喷涂材料被送入热源的过程;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,尤其对于金属材料,由于喷涂通常在大气气氛中进行,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

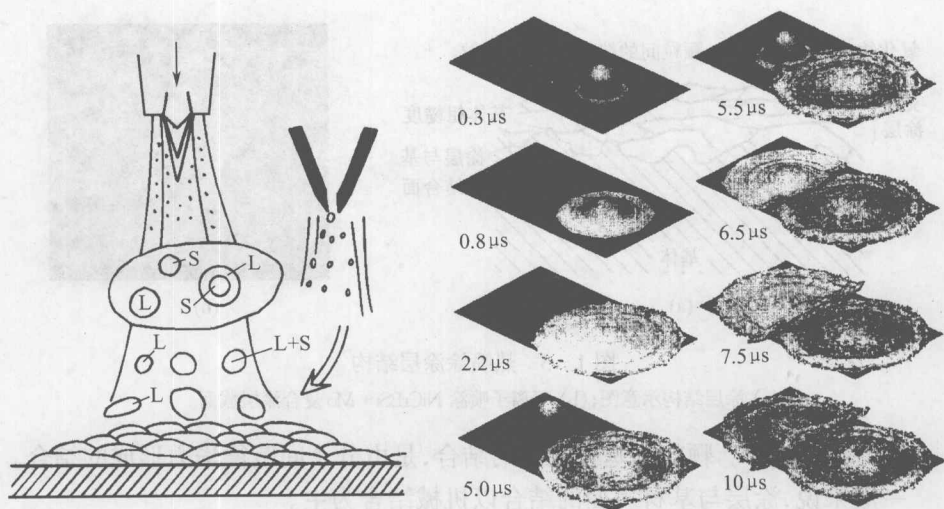


图 1-2 热喷涂涂层形成原理

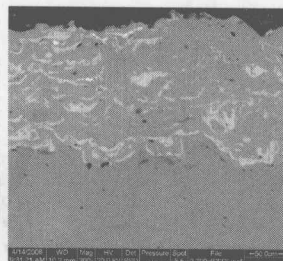
在数十微秒的极短时间内完成的。这些基本过程对所形成涂层的组织结构以及性能影响较大,因而对于给定的材料,通常通过调节粒子的参量(如粒子尺寸、形状、速度与温度、喷涂系统、工艺参数等)来改变涂层结构和性能。

涂层的形成过程表明,涂层是由无数变形粒子互相交错呈波浪式堆叠在一起而形成的层状组织结构(见图 1-3)。在喷涂过程中,由于熔融的颗粒在熔化、软化、加速及飞行以及与基材表面接触过程中与周围介质发生了化学反应,使得喷涂材料经喷涂后会出现氧化物,而且,由于颗粒的陆续堆叠和部分颗粒的反弹散失,在颗粒之间不可避免地存在一部分孔隙或空洞。因此,喷涂层是由变形颗粒、气孔和氧化物所组成。涂层中氧化夹杂物的含量及涂层的密度取决于热源、材料及喷涂条件。采用等离子弧高温热源、超声速喷涂以及保护气氛等可减少涂层中的氧化物夹杂和气孔;涂层经过重熔后可消除涂层中的氧化夹杂物和气孔,并使层状结构变成均质状结构,同时涂层与基材的结合状态也将发生变化。

涂层的结合包括涂层与基材表面的结合以及涂层内聚的结合。前者的结合强度称为结合力,后者的结合强度称为内聚力。目前,一般认为涂层与基材表面之间的结合以及涂层颗粒之间的结合相同,均属物理-化学结合,包括以下几种类型:

(1) 机械结合。具有一定功能的熔融状粒子撞击到经粗化处理的基材表面时,铺展成扁平状的液态薄片覆盖并紧贴基材表面的凹凸点上,在冷凝时收缩咬住凸点(或称抛锚点),形成机械结合。

(2) 冶金-化学结合。这是当涂层和基材表面出现扩散和微区合金化时的一种结合类型,包括在结合面上生成金属间化合物或固熔体。



(a) 涂层结构示意图; (b) 等离子喷涂 NiCrBSi + Mo 复合涂层截面。

1.3 热喷涂材料的要求

(5) 涂层材料是粉末时,其形状、粒度分布、表面状态应符合要求,且要有好的流动性才能获得好的均匀的涂层;当涂层材料是棒材或丝材时,应有较好的成形性能,且具有一定的强度、径值也应均匀准确、表面清洁无污染。

1.4 热喷涂材料的分类

热喷涂材料分类方法很多,具体如下:

(1) 按材料性质分:金属与合金、氧化物陶瓷、金属陶瓷复合材料、有机高分子材料(塑料)等。

(2) 按使用性能与目的分:防腐材料、耐磨材料、耐高温热障材料、减摩材料以及其他功能材料。

(3) 按材料形态分:可以分为粉末、线材和棒材三大类,如图 1-4 所示。

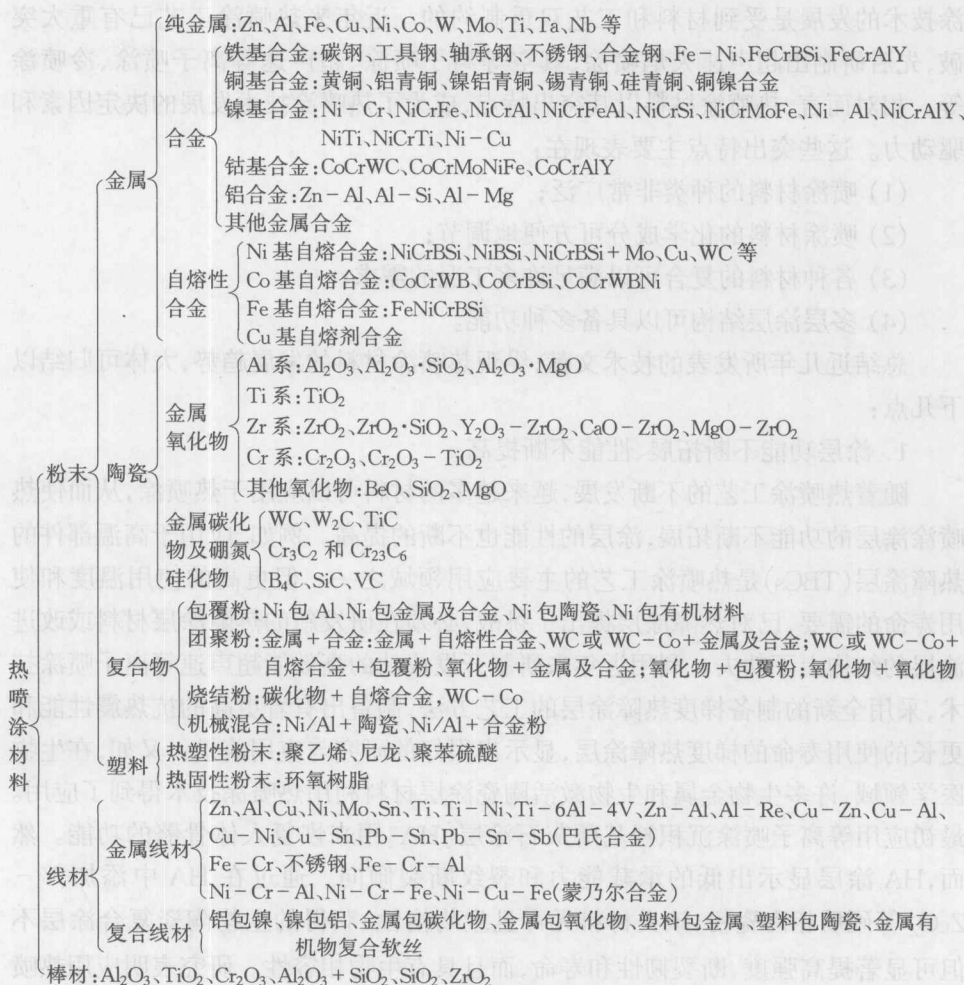


图 1-4 热喷涂材料分类

对于粉末材料,基于送粉特性及经济性考虑,其颗粒大小一般具有一定的粒度分布范围。一般金属粉末的粒度范围为 -150 目 $\sim +270$ 目,而陶瓷粉末常为 -325 目 $\sim +400$ 目。另外,不同的工艺方法对喷涂粉末的粒度也会提出要求,如高效能超声速等离子喷涂材料的粉末应在 -325 目 $\sim +400$ 目。

1.5 热喷涂材料的发展展望

进入 21 世纪以后,随着科学进步和工业生产的发展,人们对热喷涂技术的需求不断扩大。这就要求热喷涂技术以更快的速度发展,不断完善。然而热喷涂技术的发展是受到材料和工艺双重制约的。近年来热喷涂工艺已有重大突破,先后研制出超声速火焰喷涂、真空等离子喷涂、超声速等离子喷涂、冷喷涂等。相对而言,热喷涂材料以其突出特点,成为了热喷涂技术发展的决定因素和驱动力。这些突出特点主要表现在:

- (1) 喷涂材料的种类非常广泛;
- (2) 喷涂材料的化学成分可方便地调节;
- (3) 各种材料的复合可以满足许多工况的需求;
- (4) 多层涂层结构可以具备多种功能。

总结近几年所发表的技术文献,纵观热喷涂材料的发展趋势,大体可归结以下几点:

1. 涂层功能不断拓展、性能不断提高

随着热喷涂工艺的不断发展,越来越多的材料可以应用于热喷涂,从而使热喷涂涂层的功能不断拓展,涂层的性能也不断的提高。例如,应用于高温部件的热障涂层(TBCs)是热喷涂工艺的主要应用领域之一。但更高的使用温度和使用寿命的需要,已对热障涂层提出了挑战,必须在研发新的热障涂层材料或改进涂层的结构上下功夫。利用近年来研制开发成功的高效能超声速等离子喷涂技术,采用全新的制备梯度热障涂层的工艺方法,制备出有着更高的抗热震性能和更长的使用寿命的梯度热障涂层,显示出很好的研究与应用前景。又如,在生物医学领域,许多生物金属和生物激活陶瓷涂层材料利用热喷涂技术得到了应用。最初应用等离子喷涂沉积羟基磷灰石涂层[HA]用来恢复人体骨骼的功能。然而,HA 涂层显示出低的承载能力和裂纹断裂倾向。通过在 HA 中添加 $Y-ZrO_2$ 等硬质相陶瓷粉,该类材料无毒且生物惰性,获得的生物陶瓷复合涂层不但可显著提高强度、断裂韧性和寿命,而且具有生物相容性。研究表明应用热喷涂方法获得的生物涂层材料应用于人体骨骼功能恢复、植入和愈合极具潜力。