

电弧喷涂亚稳态复合涂层技术

梁秀兵 陈永雄 程江波 张志彬 著



科学出版社

电弧喷涂亚稳态复合涂层技术

梁秀兵 陈永雄 程江波 张志彬 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

亚稳态合金材料因结构独特、性能优良而被作为一种新型材料体系备受关注,其中利用电弧喷涂粉芯丝材技术制备亚稳态复合涂层材料是新近发展起来的新兴技术。

本书总结了作者近 10 年来在此领域的研究成果。第 1 章总结了制备亚稳态复合涂层所用的自动化高速电弧喷涂技术的基本特点以及亚稳态涂层材料的分类;第 2 章阐述了作者关于电弧喷涂工艺过程的传热传质等科学性问题的研究成果,作为理解制备亚稳态涂层材料技术的基础;第 3 章总结了制备亚稳态涂层材料所用粉芯丝材的原理性知识;第 4 章至第 6 章分别阐述了电弧喷涂 Fe 基、Ni 基和 Al 基三种非晶纳米晶复合涂层的研究结果;第 7 章和第 8 章分别阐述了 FeAl 基金属间化合物与非晶纳米晶复合涂层以及高熵复合涂层的初步研究结果;第 9 章简要介绍了亚稳态复合涂层材料的应用及未来发展趋势。

本书可供从事材料科学与工程专业方面的科研、教学和工程技术人员阅读,也可作为相关专业研究生、本科生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电弧喷涂亚稳态复合涂层技术 / 梁秀兵等著. —北京:科学出版社,2014.7
ISBN 978-7-03-041455-9

I. ①电… II. ①梁… III. ①电弧喷涂-亚稳态-涂层技术
IV. ①TG174.442

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 165823 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:赵桂芬
责任印制:肖 兴 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 7 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2014 年 7 月第一次印刷 印张:17 1/2 彩插:1

字数:353 000

定价:100.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

亚稳态复合涂层材料是很有发展前景的新型材料,近年来得到国内外学者的广泛关注。例如,非晶材料与晶态材料相比,组织结构和成分更加均匀,不存在晶界、位错等容易引发局部腐蚀的晶体缺陷,具有更加优异的耐磨和防腐性能。纳米晶材料的晶粒细小,大量原子处于晶界上,存在高体积分数的三叉晶界,表现出了比普通晶态材料和非晶材料更高的强度和塑性变形能力等。同时,非晶前驱体的部分纳米化可以提高其耐磨性能,改善材料塑性。非晶纳米晶复合涂层材料的制备在工艺上要求具有很高的冷却速率以抑制熔融态合金的结晶。在开发非晶纳米晶等亚稳态复合材料的高新技术中,高速电弧喷涂是创新性较强、发展较快的新技术之一,且具备材料制备与成形一体化的特征,在装备维修与再制造以及快速成形等领域具有广阔的应用前景。

《电弧喷涂亚稳态复合涂层技术》一书对高速电弧喷涂工艺的基础理论阐述比较系统和深入,对 Fe 基、Ni 基、Al 基的非晶、纳米晶与高熵合金等体系的复合涂层材料制备技术介绍比较全面,对这些复合涂层材料的性能研究也比较深入。所以,该书的技术性和创新性强,对研究成果的总结成体系,是介绍热喷涂技术制备亚稳态复合材料领域的新书。该书的出版对于推动电弧喷涂基础理论研究和新型亚稳态材料制备技术的发展,以及促进电弧喷涂亚稳态复合涂层技术的工程化应用,都有重要的理论价值和实践意义。

徐滨士

2014 年 6 月于北京

前 言

材料表面的腐蚀和磨损是机械零部件失效的两种主要形式,针对这些失效的防护、修复与再制造已成为当今国内外材料科学、表面工程等领域的重大科研课题。电弧喷涂技术作为表面工程领域不可或缺的工艺体系之一,在机械零部件表面防护与再制造方向发挥了极其重要的作用。自电弧喷涂技术的构思被提出以来,逐渐向自动化、智能化、高效稳定化方向发展,在不断地更新与完善。

亚稳态材料具有高强度、高硬度、良好的耐磨性和耐蚀性等优势,因而其在机械、航空、航海、电力等各个行业都具有广阔的应用前景。电弧喷涂技术具有材料制备与快速凝固成形一体化优势,能实现非晶纳米晶等亚稳态复合涂层的制备。电弧喷涂亚稳态复合涂层技术在交叉学科的基础上逐步形成了具有自身鲜明特色的基础理论和技术理论,并在工程应用领域里初显成效,并将产生越来越大的经济和社会效益。

为了与有关学者、工程技术人员共同推进表面工程和亚稳态材料制备技术的发展,我们总结了近十年来的研究成果,撰写了《电弧喷涂亚稳态复合涂层技术》一书。全书以高速电弧喷涂技术和亚稳态复合涂层材料为主线,共分9章,其中第1~3章主要介绍了亚稳态复合涂层材料的电弧喷涂制备技术特点和材料的分类、电弧喷涂工艺过程的传热传质等基础理论以及制备亚稳态涂层材料所用粉芯丝材的基本知识;第4~6章分别介绍了电弧喷涂Fe基、Ni基和Al基三种非晶纳米晶复合涂层的研究结果;第7、8章分别介绍了FeAl基金属间化合物与非晶纳米晶复合涂层以及高熵复合涂层的初步研究结果;第9章简要介绍了亚稳态复合涂层材料的应用及未来发展趋势。全书从自动化高速电弧喷涂设备的创新设计、工艺优化、材料选择、粉芯丝材制备、性能检测、质量控制和工程应用等角度详细阐述了电弧喷涂亚稳态复合涂层制备技术,介绍了高速电弧喷涂亚稳态复合涂层的成形原理、喷涂材料设计与性能研究等基础问题,兼顾了理论性和实用性,便于读者掌握技术的本质及要领。

本书由徐滨士院士审定,由梁秀兵、陈永雄、程江波、张志彬等撰写。各章执笔人为:第1章,梁秀兵、陈永雄;第2章,陈永雄、梁秀兵;第3章,付东兴、朱子新;第4章,程江波、梁秀兵;第5章,郭永明、商俊超、胡振峰;第6章,张志彬、蔡志海、张平;第7章,陈永雄、梁秀兵;第8章,梁秀兵、商俊超、乔玉林;第9章,陈永雄、张志彬。全书由梁秀兵研究员统稿。

本书的研究成果得益于国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目“自动化

高速电弧喷涂制备非晶纳米晶复合涂层技术”(No. 2009AA03Z342)、国家自然科学基金项目“高非晶含量铁基电弧喷涂层的厚成形机理与性能”(No. 50905185)、“防腐与耐磨双重功能铝基亚稳态复合涂层成形机制与性能”(No. 51375492)、“异质双丝电弧喷涂成形机理及其涂层的热扩散改性行为研究”(No. 51105377)、教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-13-1068),以及军队科研等项目。

值本书出版之际,向科技部、国家自然科学基金委、教育部等单位 and 部门表示衷心感谢。同时,向书中参考文献的作者致以敬意。

限于作者水平,书中难免存在不当之处,恳请读者指正并提出宝贵意见。

作 者

2014 年 6 月

彩图

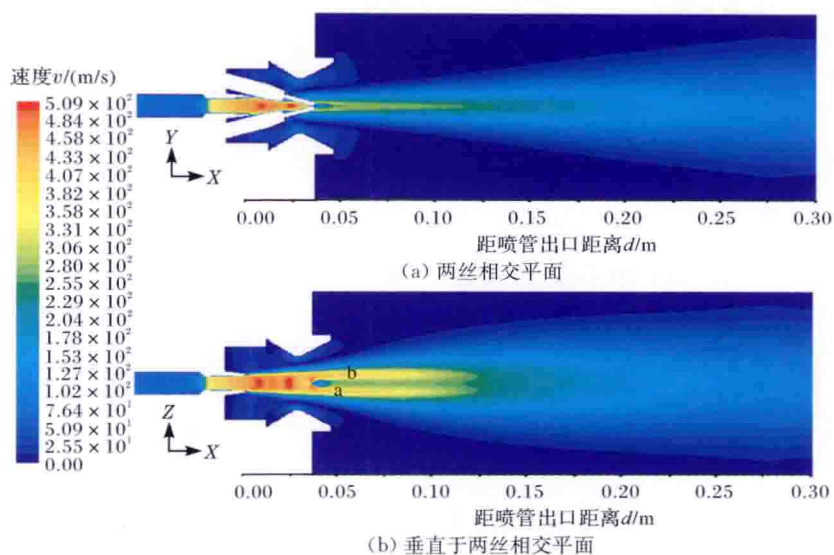


图 2.8 原有 HAS-01 喷枪雾化气体自由射流速度等值线图

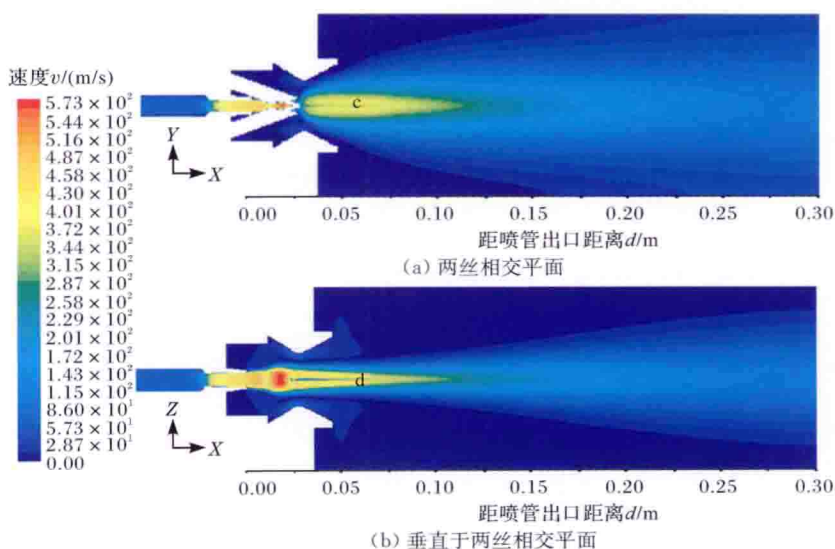


图 2.9 改造后喷枪雾化气体自由射流速度等值线图

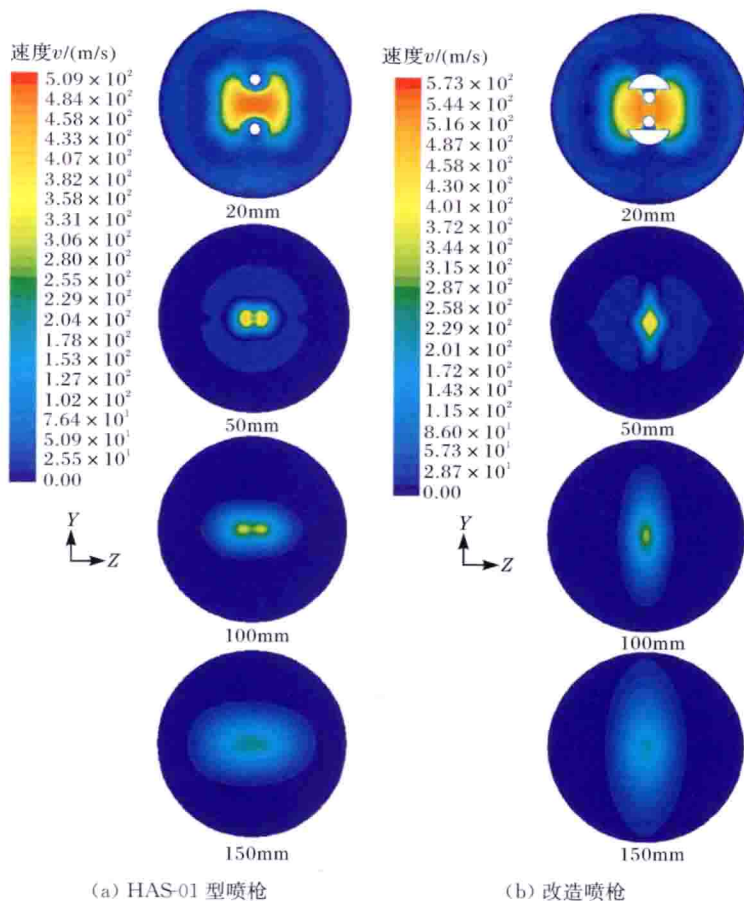


图 2.10 距喷管出口不同距离的截面处气体速度的径向分布结果

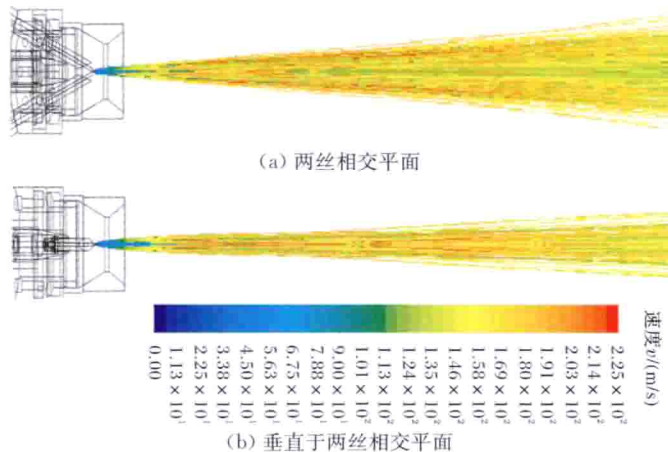


图 2.11 改造后喷枪雾化熔滴飞行轨迹等值线图

目 录

序

前言

第 1 章 概述	1
1.1 自动化高速电弧喷涂技术	2
1.1.1 电弧喷涂技术的发展历程	2
1.1.2 自动化高速电弧喷涂原理及系统组成	3
1.1.3 自动化高速电弧喷涂关键技术与设备	7
1.1.4 自动化高速电弧喷涂工艺	9
1.2 热喷涂亚稳态材料	9
1.2.1 亚稳态材料的基本概念	10
1.2.2 热喷涂纳米材料	10
1.2.3 热喷涂非晶材料	11
1.2.4 热喷涂准晶材料	11
1.2.5 亚稳态复合材料	12
参考文献	12
第 2 章 电弧喷涂基础理论	15
2.1 电弧喷涂的成形过程	15
2.1.1 喷涂弧区丝材熔化与熔滴形成过程	15
2.1.2 电弧喷涂粒子加速雾化过程	19
2.1.3 单个熔滴扁平化沉积及热传输过程	29
2.1.4 大量熔滴叠加形成涂层的传热传质过程	32
2.2 电弧喷涂涂层的组织特点与基本性能	33
2.2.1 组织形貌特征	34
2.2.2 电弧喷涂涂层的残余应力	35
参考文献	39
第 3 章 电弧喷涂粉芯丝材	41
3.1 电弧喷涂粉芯丝材的技术特点	41
3.2 粉芯丝材的典型制备工艺	43
3.2.1 金属带法粉芯丝材的制备原理	43
3.2.2 基本工艺过程	44

3.2.3 影响丝材成型质量的工艺参数	45
3.3 电弧喷涂粉芯丝材制备关键技术	46
3.3.1 丝材成分的设计	47
3.3.2 粉芯的选材与表征	48
3.3.3 粉芯的制备工艺	50
参考文献	51
第4章 铁基非晶纳米晶电弧喷涂复合涂层	53
4.1 铁基非晶纳米晶涂层材料体系的设计与制备	53
4.1.1 非晶/纳米晶涂层合金体系的设计	53
4.1.2 粉芯丝材制备	56
4.2 电弧喷涂铁基非晶纳米晶涂层组织结构与力学性能	57
4.2.1 FeCrBSiMnNbY 非晶纳米晶涂层	57
4.2.2 FeBSiNb 非晶涂层的组织结构分析	64
4.3 电弧喷涂铁基非晶/纳米晶涂层抗冲蚀性能	76
4.3.1 攻角的影响	77
4.3.2 入射粒子速度的影响	80
4.3.3 环境温度的影响	80
4.3.4 涂层冲蚀机理分析	85
4.4 Fe 基非晶纳米晶涂层摩擦学性能	91
4.4.1 干摩擦条件下非晶纳米晶涂层的磨损性能	91
4.4.2 油润滑条件下铁基非晶/纳米晶涂层的磨损性能	105
4.4.3 电弧喷涂铁基非晶纳米晶涂层的失效机制	109
参考文献	117
第5章 镍基非晶纳米晶电弧喷涂复合涂层	120
5.1 材料体系的设计与制备	120
5.1.1 镍基非晶纳米晶涂层喷涂丝材的设计	121
5.1.2 丝材制备	122
5.2 涂层的组织结构及力学性能	124
5.2.1 涂层的组织结构	124
5.2.2 涂层的相结构分析	126
5.2.3 涂层的晶体结构分析	128
5.2.4 涂层的差热分析	129
5.2.5 涂层微观力学性能	130
5.3 涂层的摩擦学性能	133
5.3.1 室温条件下 Ni 基非晶纳米晶涂层的摩擦磨损性能	133

5.3.2 涂层的高温摩擦磨损试验	140
参考文献	150
第6章 铝基非晶纳米晶电弧喷涂复合涂层	151
6.1 铝基非晶态合金材料概述	151
6.1.1 铝基非晶态合金传统制备工艺概述	152
6.1.2 铝基非晶态合金的性能特征	153
6.2 材料体系的设计与制备	154
6.2.1 合金成分的设定及其原理	155
6.2.2 粉芯丝材的制备	156
6.3 铝基非晶纳米晶涂层的微观结构及力学性能	158
6.3.1 铝基非晶纳米晶涂层的组织结构分析	158
6.3.2 非晶纳米晶形成机理分析	168
6.3.3 涂层微观力学性能	171
6.4 铝基非晶纳米晶涂层的防腐蚀性能	172
6.4.1 中性盐雾加速腐蚀性能	173
6.4.2 电化学腐蚀性能	175
6.5 铝基非晶纳米晶涂层的耐磨损性能	181
6.5.1 干摩擦条件下耐磨损性能	182
6.5.2 腐蚀与磨损交互作用下的失效行为研究	185
6.5.3 不同环境下摩擦磨损失效机制	189
参考文献	195
第7章 非晶纳米晶与金属间化合物复合涂层	197
7.1 FeAl 基金属间化合物非晶纳米晶复合涂层材料体系设计	197
7.2 FeAl 和 FeAlMn 粉芯丝材及其涂层	200
7.2.1 粉芯丝材的制造	200
7.2.2 高速电弧喷涂粉芯丝材制备涂层	201
7.2.3 FeAl 和 FeAlMn 复合涂层的组织性能	201
7.3 含 Nb、Cr、B 合金元素 FeAl 基粉芯丝材及其涂层	209
7.3.1 显微硬度	209
7.3.2 结合强度	210
7.3.3 FeAlNbB 系列涂层的组织形貌	210
7.3.4 FeAlNbB 系列涂层的 XRD 分析	211
7.3.5 FeAlNbB 涂层微观组织 TEM 分析	212
7.3.6 FeAlCrNbB 涂层微观组织 TEM 分析	214
7.4 FeAlNbB 系列涂层的摩擦学性能	216

7.4.1	滑动摩擦磨损性能	216
7.4.2	微动摩擦磨损性能	220
7.4.3	高温摩擦磨损性能	230
	参考文献	235
第8章	高熵合金复合涂层	236
8.1	材料的设计与制备	236
8.1.1	粉芯丝材的设计与制造	236
8.1.2	涂层的制备	236
8.2	涂层的组织结构和常规力学性能	237
8.2.1	涂层的组织结构	237
8.2.2	涂层力学性能测试	243
8.3	涂层摩擦磨损性能和电化学腐蚀性能	246
8.3.1	涂层的摩擦磨损性能	246
8.3.2	涂层的电化学腐蚀性能	251
8.4	热处理对高熵合金复合涂层的影响	253
8.4.1	FeCrNiCoCu(B)高熵合金涂层的热物理性能	253
8.4.2	热处理对涂层组织结构和显微硬度的影响	253
8.4.3	热处理对涂层摩擦磨损性能的影响	256
	参考文献	257
第9章	亚稳态复合涂层技术的应用和展望	259
9.1	发动机曲轴再制造的应用	259
9.1.1	机器人自动化高速电弧喷涂系统	259
9.1.2	喷涂工艺设计	260
9.1.3	发动机曲轴再制造的典型工艺流程设计	262
9.1.4	曲轴再制造技术应用的经济性评估	263
9.2	薄壁零件再制造的应用	264
9.3	电站锅炉管道的高温磨损与腐蚀防护应用	265
9.4	装备防腐工程中的应用	266
9.4.1	钢结构件表面 Al 基亚稳态涂层防腐技术应用	266
9.4.2	镁合金表面 Al 基亚稳态涂层防护技术的应用	267
9.5	亚稳态涂层技术的展望	268
	参考文献	269

第 1 章 概 述

为了充分利用能源和节约社会资源,促进节能减排,大力发展绿色制造业,中国特色的再制造工程应运而生。再制造工程是以装备全寿命周期为指导,以废旧装备性能实现提升为目标,以优质、高效、节能、节材、环保为准则,以先进技术和产业化生产为手段,进行修复、改造废旧装备的一系列技术措施和工程活动的总称^[1]。所以,再制造是废旧装备高技术修复、改造的产业化。再制造工程作为我国新世纪以来发展的先进制造和绿色制造的新方向,以节约资源能源、保护环境为特色,以综合利用信息技术、纳米技术、生物技术、寿命预测技术等高科技为核心,充分体现了具有中国特色自主创新的特点。因此,再制造工程高度契合了构建循环经济和建设创新型国家的战略需求。

电弧喷涂表面工程技术是再制造工程的关键支撑技术之一,它可以制备出优于本体材料性能的表面功能薄层,在恢复零件尺寸的同时,进一步提升了零件的表面性能^[2,3],因而被广泛应用于装备的防腐蚀、耐磨损等领域^[4~6]。但是,传统的电弧喷涂是通过人工控制喷涂参数,控制精度低、涂层质量不稳定,且作业环境恶劣,长期以来被认为是“粗放型”的维修技术,很大程度上影响了电弧喷涂技术的质量和它的发展。运用自动化技术提升装备维修技术水平,研发高技术的自动化高速电弧喷涂维修保障设备与新材料,对解决装备零部件的批量化再制造难题,以及满足零部件的长效防腐与高效耐磨等高性能要求具有重要意义。同时,由于金属材料在电弧喷涂弧区能发生充分的冶金反应,该技术在材料制备与成形一体化方面发展潜力巨大。

近年来,作者将智能控制技术、逆变电源技术、红外测温技术、数值仿真技术综合集成创新,研制新型自动化高速电弧喷涂设备,将传统的“粗放型”电弧喷涂技术提升为喷涂工艺与涂层质量精确可控的先进高效维修技术。并基于自动化高速电弧喷涂设备效率高、稳定性好的优点,在材料制备与成形一体化思路指导下,自主创新研发了 Fe 基、Ni 基和 Al 基非晶纳米晶复合涂层材料,以及 FeAl 基金属间化合物与非晶纳米晶复合涂层材料、高熵合金等新型亚稳态复合涂层材料,具有防腐、耐磨和抗热腐蚀与冲蚀等优异性能。本章主要围绕自动化高速电弧喷涂技术和热喷涂亚稳态涂层材料方面的基本概念、原理、特点与组成等内容进行概述,为理解后续章节的内容打下基础。

1.1 自动化高速电弧喷涂技术

电弧喷涂的工艺参数主要包括电弧电压、电弧电流、送丝速度、气体压力、气体流量、喷涂距离以及喷枪的行走轨迹和速度等。传统的电弧喷涂都是通过人工控制这些参数,控制精度低,且作业环境恶劣,很大程度上影响了电弧喷涂技术的质量和它的发展。因此,自动化电弧喷涂技术成为今后研究与应用的必然发展趋势。但目前的自动化电弧喷涂技术还处于初级阶段,无论是在喷涂设备方面还是软件及工艺控制方面,都需要不断地完善和提高。

1.1.1 电弧喷涂技术的发展历程

电弧喷涂技术由瑞士的 Schoop 于 20 世纪 20 年代提出构思,起初主要用于装饰。1945 年二战结束后,美国研制出 Metco-2E 型军用喷枪,第一次带有可以调节丝材速度的自动调节装置,这使金属喷涂作业进入了可以长期稳定喷涂的新阶段。进入 20 世纪 60 年代,以英国 Metalisation 公司的电弧喷涂设备为代表标志着电弧喷涂设备已形成规格化和系列化。60 年代末 70 年代初,电弧喷涂技术在美国和西欧发展迅速,使用部门也越来越多地认识到这项技术的优越性,这使得电弧喷涂技术不断完善,设备性能也越来越好。从 20 世纪 80 年代开始,电弧喷涂枪则向着高效、低耗、高稳定性和便于维护的方向发展。90 年代以后,电弧喷涂设备得到迅速发展与更新,自动化电弧喷涂技术开始得到应用。

我国在 20 世纪 50 年代初从前苏联引进该技术,60 年代初我国研制成功封闭喷嘴固定式喷枪,主要用于旧件的修复。之后,由于设备材料等方面的限制,一直到 80 年代初,中国的电弧喷涂技术一直停留在原有水平,并被认为是一种“高效率,低质量”的技术。80 年代后期,大型钢结构腐蚀、磨损防护的潜在市场又推动了电弧喷涂的应用和发展,国内许多单位加快了对电弧喷涂技术与设备的研发。

近 20 年来,随着电弧喷涂技术的不断更新完善,已经研制开发出新型的高速电弧喷涂技术。高速电弧喷涂技术是利用气体动力学原理,将高压空气通过特殊设计的喷管加速后作为高速雾化气流来雾化和加速熔融金属,并将雾化粒子高速喷射到工件表面形成致密涂层^[7,8]。与普通电弧喷涂技术相比,高速电弧喷涂技术具有沉积效率高、涂层组织致密、电弧稳定性高、通用性强、经济性好等特点。与此同时,伴随着加速技术的引入,又涌现出了许多新的电弧喷涂技术,如高速脉冲电弧喷涂^[9]、燃气电弧喷涂^[10]、等离子转移电弧喷涂^[11]及单丝电弧喷涂^[12]等新技术。这些电弧喷涂新技术的出现,不仅提高了喷涂效率,而且进一步改善了电弧喷涂涂层的质量。同时,为提高电弧喷涂工艺的质量和效率,改善作业环境,适应再制造工程技术的产业化生产要求,电弧喷涂逐渐向自动化方向发展,成为当

今的一大研究热点。

1.1.2 自动化高速电弧喷涂原理及系统组成

电弧喷涂技术利用两根连续送进的金属丝之间产生的电弧熔化金属,采用高压气流将其雾化并高速喷射至工作表面形成涂层。图 1.1 是电弧喷涂原理示意图。喷涂时,两根彼此绝缘的丝材分别连接喷涂电源的正负极。在两根丝材短接前的瞬间,端部由于高电流密度产生电弧,同时,高压气体将电弧熔化的金属雾化成微熔滴,并将微熔滴加速喷射到工件表面,经冷却、扁平化后沉积到基体上^[13]。丝材经送丝机构连续、均匀地送进,从而实现了持续雾化、喷射沉积并形成涂层的工艺过程。

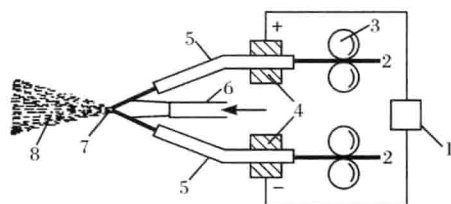


图 1.1 电弧喷涂原理示意图

1. 直流电源; 2. 金属丝; 3. 送丝轮; 4. 导电块; 5. 导电嘴; 6. 空气喷嘴; 7. 电弧; 8. 喷涂射流

自动化高速电弧喷涂技术是通过操作机或机器人等自动化设备夹持高速电弧喷涂枪,采取数控系统控制喷枪在空间进行各种运动,实时反馈控制与调节喷涂工艺参数,使得喷枪能够按照设定的程序自动实现喷涂作业,获得成形涂层的工艺技术。与手工电弧喷涂工艺相比,自动化高速电弧喷涂技术极大地改善了喷涂工人的作业环境和劳动强度,能实现各种零件表面高质量涂层的制备与快速成形。影响电弧喷涂成形技术的关键因素之一就是电弧喷涂设备,它需要较高精度的自动化控制系统,精确控制喷枪的姿态与运动,进而控制了零件的尺寸和变形。

欧美等国家普遍使用六自由度(6R)关节式工业机器人实现自动化电弧喷涂作业^[14]。在国内除了著者外还未见有他人发表过关于关节式机器人的自动化电弧喷涂系统的报道,有少数单位研究了基于直角坐标式自动行走机构的自动化电弧喷涂装置,并在汽车覆盖件的快速成形等领域得到了初步应用。对于复杂型面的电弧喷涂,采用直角坐标式自动化装置时,控制比较复杂,且喷枪姿态、运动速度等参数的调节范围有限。著者分别集成开发的基于操作机和机器人的自动化高速电弧喷涂系统,其总体结构的设计如图 1.2 所示,操作机或机器人末端手臂通过专用夹具与高速电弧喷涂枪相连,采用推丝或拉丝的送丝方式(驱动丝材直径可达 3mm),并将送丝机固定在机器人的手臂上,喷涂工件固定在 1 自由度变位机(工作台)上,采用集成的中央控制系统实现自动化喷涂的所有控制操作,包括

操作机或机器人与变位机的运动、喷涂电源与送丝机的起停、电压与电流的调节等控制,另外,该控制器还备用喷涂过程实时反馈控制的数字量接口(如粒子温度、速度以及涂层表面温度等信息的监测与控制)。

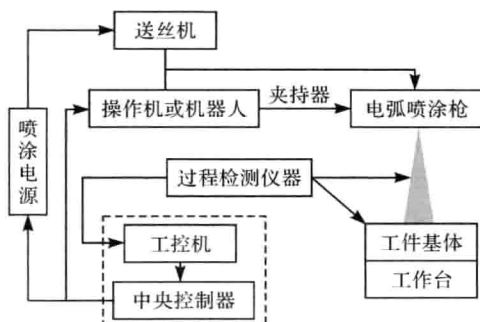


图 1.2 机器人电弧喷涂系统结构原理图

1. 操作机自动化高速电弧喷涂系统

开发的操作机自动化高速电弧喷涂系统由多自由度操作机、变位机、中央控制器、触摸屏操作界面和逆变式电弧喷涂电源设备等部分组成。系统将自动化操作机和变位机与高速电弧喷涂设备相结合,在控制系统指令下协调工作,实现了操作机和变位机各轴与高速电弧喷涂设备之间的联动控制。通过离线软件编程规划喷枪的运动路径,操作臂带动喷枪完成高效、精准作业。通过触摸屏对喷涂起停控制等喷涂参量进行设置等。图 1.3 是以操作机和变位机作为自动化系统主体设备的实物图,操作机包括 X、Y、Z 三个坐标式移动主轴和一个摆动轴,它可以带动喷涂设备进行上下摆动(转动)。

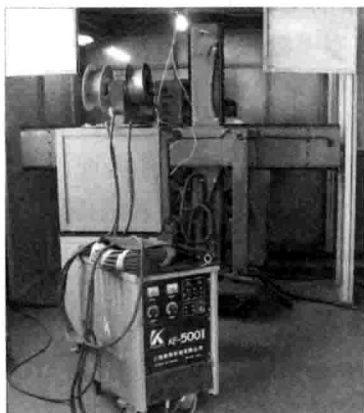


图 1.3 操作机自动化高速电弧喷涂系统

控制部分是实现自动化高速电弧喷涂的核心单元,主要控制操作机和变位机的各轴、喷涂逆变电源和触摸屏。在它的控制下,系统实现操作机和变位机各轴与高速电弧喷涂设备的联动与协调工作,根据规划的路径和设置的参数系统自动完成喷涂作业。系统采用 NextMoveES 控制卡,该控制卡具有高速 DSP 芯片和 FPGA 芯片,用于实现高速实时处理和程序编写。通过 MintMT 语言编程来控制步进电动机和伺服电动机的运动,提供了强大的程序命令来满足复杂的设计要求。

2. 关节式机器人自动化高速电弧喷涂系统

关节式机器人的动作空间大、运动速度调节范围宽、控制精度高,适合于对喷涂控制精度要求更高的场合,如电弧喷涂快速成形以及复杂型面零件的喷涂再制造(如曲轴)。因此,将机器人和变位机与高速电弧喷涂设备相结合,实现了机器人和变位机各轴之间以及与高速电弧喷涂设备之间的联动控制。利用机器人夹持喷枪,带动喷枪运动,被喷涂的工件固定在变位机上。通过控制单元规划喷枪的运动路径并控制几个轴的联动,来使喷枪按规划的路线进行运动。喷涂电源的电流可在控制单元的控制下适时地调节,送丝速度通过控制电流的大小来实现。通过示教盒来对喷涂进行控制,其中包括控制喷涂的起停、喷涂参数的实时调节以及一些参数的设置。通过对涂层温度的实时监控,系统自动调节送丝速度,形成了全自动化控制。

此系统主要组成部分有控制单元、机器人、变位机、高速电弧喷涂设备。而且,如果外加一些质量监控设备,例如 SprayWatch-2i 型热喷涂监测系统、红外热像仪等,还可对电弧喷涂飞行粒子的状态、涂层表面的温度场进行实时测量,实现自动化系统的最优控制。例如,作者选用 MOTOAMN-HP20 型 6R 机器人为该自动化电弧喷涂系统的主体,考虑与喷涂电源的匹配性,调压调速控制电路与电源的电流调节电路的动态响应快,提高电动机机械力矩特性,保证稳定送丝,并利于丝材引弧与燃弧。常规推丝式送丝机的导丝管比较长(2m 或 3m),喷枪大范围动作时送丝不够稳定,影响喷涂质量。为保证稳定送丝,研究将送丝机固定在机器人操作臂上,使送丝距离缩短到 0.9m 的范围内,大大减小了送丝阻力,而且,可改善管线的布置,结构紧凑,避免喷涂设备与机器人之间的干涉。使用的送丝机与机器人的安装效果如图 1.4(a)所示。图 1.4(b)所示的 MOTOAMN-HP20 机器人配备的 NX100 控制系统完成机器人各轴的运动控制,同时,NX100 预留的外部轴控制模块可实现变位机的转动控制,它可以和机器人实现联动作业。由于 NX100 控制中央控制柜没有电弧喷涂控制模块,本研究在弧焊基板的基础上,外加转接控制电路,使电弧喷涂电源(见图 1.4(c))等设备在示教模式时可实现进丝、退丝;在再现模式时可实现电源启动、进丝、高压空气启动,以及喷涂电压、电