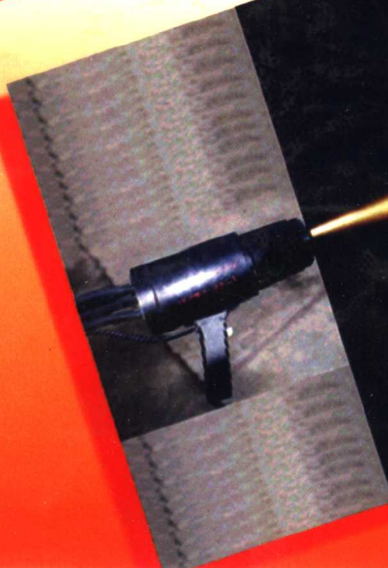


CHAOYINSU DIANHU
PENTU JISHU

超音速电弧 喷涂技术

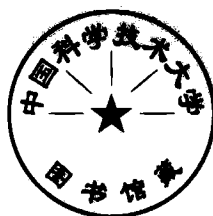
王汉功 著



國防工業出版社

超音速电弧喷涂技术

王汉功 著



国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

超音速电弧喷涂技术/王汉功著. —北京:国防工业出版社, 1999(2000.4 重印)

ISBN 7-118-02185-7

I. 超… II. 王… III. 电弧喷涂, 超音速 IV. TG174.442
中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 44320 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)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

开本 787 × 1092 1/32 印张 3½ 插页 1 73 千字

1999 年 9 月第 1 版 2000 年 4 月北京第 2 次印刷

印数: 701 - 1200 册 定价: 40.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

前 言

电弧喷涂是热喷涂技术的重要分支,我国从 50 年代开始引进、研究和应用该项技术。电弧喷涂具有生产成本低、生产效率高、能源利用率高、安全性好等一系列的优点,在设备维修与产品制造中得到广泛应用,并取得了良好的经济效益与社会效益。但是,由于电弧喷涂涂层孔隙率、涂层与基体的结合强度等性能指标不及等离子喷涂和超音速火焰喷涂,因此,其应用受到了一定的限制。为了提高电弧喷涂的涂层质量,日美等发达国家投入大量的人力物力,不断开发新型的电弧喷涂设备、喷涂材料和喷涂工艺。随着技术的进步,电弧喷涂的应用领域不断扩大,近年来,电弧喷涂在航空航天、原子能等高新技术领域也得到了应用,但传统电弧喷涂技术几十年来没有根本的突破。

我国科技人员对电弧喷涂技术也进行了大量的研究,取得了可喜的研究成果。第二炮兵工程学院的科技人员在认真分析普通电弧喷涂优缺点的基础上,从提高粒子速度入手,采用拉伐尔喷嘴和计算机辅助设计等先进技术,研制成功了超音速电弧喷涂设备,经专家鉴定,其喷涂粒子速度、粒子的雾化效果、涂层与基体的结合强度和涂层的孔隙率等主要性能指标均有大的突破,处于国际领先水平,将我国电弧喷涂技术的研究推向国际先进行列。

为了进一步推动超音速电弧喷涂技术的应用,使其产生

12020706

更大的经济效益和社会效益,现将超音速电弧喷涂技术的原理、试验以及应用撰写成书,作为国庆 50 周年的献礼,奉献给社会。

参加本书撰写工作的还有查柏林、杨晖同志,刘学元、苏勋家、郭晓华、汪刘应等同志参加了超音速电弧喷涂技术的研究。在研制过程中,得到了西安交通大学金属材料强度国家重点实验室和固体火箭燃烧、热结构与内流场国防科技重点实验室等单位的大力支持,在此,向参与、关心、支持超音速电弧喷涂技术研究的单位和人员表示衷心地感谢!

由于作者水平有限,加之时间仓促,错误与不当之处敬请读者指正。

作 者

1999 年 8 月

内 容 简 介

本书详细介绍了具有国际领先水平的“超音速电弧喷涂技术”的基本原理和超音速电弧喷涂关键设备——喷枪及电源的设计思想;对超音速电弧喷涂的粒子速度、粒子雾化效果、涂层孔隙率、涂层与基体的结合强度、涂层显微硬度、涂层显微组织、喷涂粒子的变形与扁平化、涂层耐蚀性等性能的测试情况进行了介绍,并对测试结果从理论上进行了深入的分析

该书内容新颖,知识性、实用性强,它是作者科学研究成果的总结,提供的资料、信息十分宝贵,可供航空、航天、机械、能源、交通、化工等工业部门以及科研、教学等单位从事表面强化、防腐及维修等工作的工程技术人员使用与参考。



作者简历

王汉功 男 1940年8月生，河南济源人 1965年毕业于中国人民解放军炮兵技术学院机电工程系，历任教员、教研室主任、研究所所长等职，主要从事维修工程、故障诊断和表面工程技术研究 现任中国人民解放军第二炮兵工程学院机电工程系教授、博士生导师，西安交通大学兼职博士生导师，中国设备管理协会技术委员会委员，中国机械工程学会表面工程分会理事。编辑出版的专著有《光学仪器基础》、《装备维修管理》、《导弹使用维修工程》、《导弹可靠性维修性工程》等。有50余篇学术论文分别在国际学术刊物、国际学术会议、国内核心期刊和学术会议上发表；有22项科研成果获奖，其中获国家科技进步一等奖1项，军队科技进步一等奖2项、二等奖4项、三等奖10项、四等奖5项。荣立二等功1次、三等功2次。1994年被评为全军优秀教员，1993年起享受国家政府特殊津贴，1997年被二炮批准为导弹技术专家，1999年获全军重大科技

目 录

第1章 绪论	1
1.1 电弧喷涂的发展史	1
1.2 普通电弧喷涂的优缺点分析	4
1.2.1 优点	4
1.2.2 缺点	5
1.3 电弧喷涂面临新的挑战与发展机遇	6
1.4 超音速电弧喷涂研制成功并通过鉴定	7
第2章 超音速电弧喷涂的原理与实现	9
2.1 超音速电弧喷涂的原理	9
2.2 超音速电弧喷涂的电源设计.....	10
2.2.1 电弧稳定性与电源外特性.....	11
2.2.2 电源主电路的设计	12
2.2.3 可控硅触发电路的设计	15
2.2.4 伺服电机调速电路的设计.....	18
2.3 超音速电弧喷涂喷枪的设计.....	21
2.3.1 拉伐尔喷嘴的设计	21
2.3.2 喷枪的结构设计	28
2.4 超音速电弧喷涂粒子速度的测定.....	28
2.4.1 测试过程.....	29
2.4.2 测试结果.....	30

2.4.3 测试结果分析	32
2.4.4 粒子速度的计算机仿真	32
第3章 试验与分析	39
3.1 粒子雾化效果测定与分析	39
3.1.1 超音速电弧喷涂粒子雾化结果的测定	40
3.1.2 超音速电弧喷涂的雾化过程分析	44
3.1.3 雾化的影响因素	48
3.2 涂层结合强度的测试与分析	49
3.2.1 涂层结合强度的测试	49
3.2.2 涂层结合强度的分析	51
3.2.3 试验结果的分析	52
3.3 涂层孔隙率的测定与分析	54
3.3.1 涂层孔隙率测定结果	55
3.3.2 孔隙率的测定结果分析	58
3.4 涂层显微硬度测试与分析	59
3.4.1 涂层显微硬度测试结果	60
3.4.2 涂层显微硬度测试结果分析	60
3.5 涂层显微组织分析	61
3.5.1 涂层显微组织	62
3.5.2 涂层显微组织分析	69
3.6 涂层耐蚀性试验与分析	74
3.6.1 铝涂层耐蚀防护原理与特点	74
3.6.2 铝复合涂层	75
3.6.3 铝涂层与铝复合涂层耐蚀性试验	76
3.6.4 试验结果分析	78
3.7 超音速电弧喷钛涂层试验与分析	79
3.7.1 试验材料和过程	79

3.7.2 试验结果	80
3.7.3 试验结果分析	85
3.7.4 试验结论	88
第4章 超音速电弧喷涂技术的应用	89
4.1 防腐领域的应用	89
4.1.1 大型桥梁防腐蚀	91
4.1.2 导弹阵地防腐	92
4.1.3 电站锅炉管壁防腐蚀	92
4.2 修复领域的应用	94
4.2.1 曲轴的修复	95
4.2.2 车床主轴的修复	95
4.2.3 模具的修复	96
4.3 生产领域的应用	97
4.3.1 印刷辊的表面强化	97
4.3.2 铸件缺陷的修复与铸件表面强化	98
结束语	99
参考文献	101

第 1 章 绪 论

1.1 电弧喷涂的发展史

电弧喷涂是利用两根连续送进的金属丝作为自耗电极，在其端部产生电弧作为热源，用压缩气流将熔化了了的丝材雾化，并以高的速度喷向工件形成涂层的一种热喷涂方法，其工作原理如图 1.1 所示。

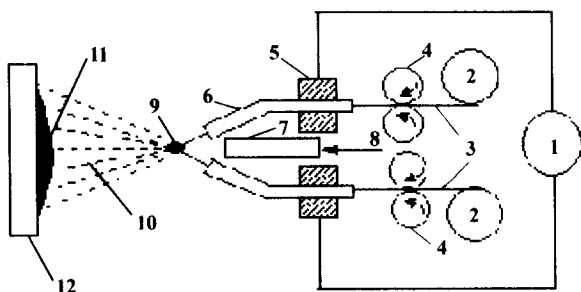


图 1.1 电弧喷涂原理图

- 1 - 直流电源；2 - 丝盘；3 - 金属丝；4 - 送丝滚轮；5 - 导电块；
6 - 导电嘴；7 - 空气喷嘴；8 - 压缩空气；9 - 电弧；10 - 喷涂粒子
流；11 - 涂层；12 - 工件。

电弧喷涂设备一般由整流电源、控制装置、喷枪、送丝装置及金属丝盘等组成。其整流电源开始是采用一般的电弧焊

整流电源,在实践中,发现这种特性的电源有很大的局限性,不能满足电弧喷涂时金属丝熔化——雾化过程的特殊要求。实际的电弧喷涂过程中,弧长以很高频率波动,在送丝速率发生变化的情况下,为了保持电弧稳定,要求喷涂电流能够随弧长的微小变化而快速增减,根据这一要求,研制了适合电弧喷涂用的专用电源。这种专用电源是平特性或略呈上升的外特性,动特性具有足够大的电流上升速率,并且电源具有电压调节装置,以满足喷涂不同金属材料 and 工艺的要求。

电弧喷枪是电弧喷涂的主要设备,电弧喷涂技术的进步与喷枪的改进和发展是密切相关的。最早的喷枪雾化头结构比较简单,仅由导电嘴和空气喷射管组成,称为敞开式喷嘴,如图 1.2 所示。这种结构对熔化金属的雾化效果较差,喷出的金属颗粒比较粗大,并且粒子速度只有 $50 \sim 100\text{m/s}$,几经改进,目前较为先进的喷枪采用二次雾化头结构,加装空气帽,将弧区适当封闭,并将雾化气流分为两路,由辅助的二次雾化气流将弧区适当压缩,称为封闭式喷嘴,如图 1.3 所示。这种结构增加了弧区的压力,提高了空气流的喷射速度和电弧温度,使喷射的金属粒子速度可达 200m/s ,加强了对熔化

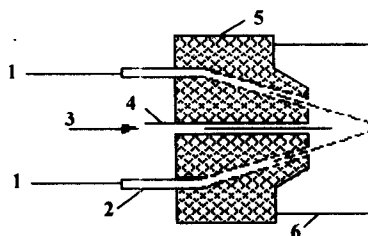


图 1.2 敞开式喷嘴结构示意图

- 1 - 金属丝; 2 - 导电嘴; 3 - 压缩空气; 4 - 雾化喷嘴;
5 - 绝缘块; 6 - 弧光罩。

金属的雾化效果,使喷出的颗粒更加细微,同时提高了涂层与基体的结合强度。

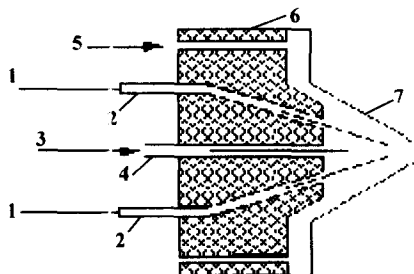


图 1.3 封闭式喷嘴结构示意图

1—金属丝; 2—导电嘴; 3—压缩空气; 4—雾化喷嘴;
5—二次雾化气; 6—绝缘块; 7—空气帽。

按驱动金属丝的动力源不同,电弧喷枪分为电动式、空气马达式和气动蜗轮式。电动式适用于固定式喷枪,空气马达式和气动蜗轮式适用于手持式喷枪。按推动金属丝的方式不同,电弧喷枪分为推式、拉式和推拉式。推式是由喷枪外的动力装置将金属丝推向喷枪;拉式是由与喷枪连成一体动力装置带动金属丝;推拉式由推、拉两种动力方式组成。推式结构的喷枪重量轻,便于手工操作,但推丝距离受到限制。

自 1913 年瑞士工学博士 M. U. Schoop 提出电弧喷涂的设计方案后,1916 年研制成功了实用型的电弧喷枪,到 30 年代电弧喷涂得到了发展,主要用于设备旧件的修复和喷锌、喷铝用于钢铁构件的防腐。电弧喷涂 50 年代初已经在很多国家工业上得到应用,并传入我国。60 年代初我国研制成功封闭喷嘴固定式喷枪,主要用于旧件修复,60 年代中期至 70 年代,由于技术水平及其他历史原因的限制,在不同地区发展很

不平衡,在一些国家和地区曾被看成一种落后技术而放置起来。但在欧洲一些国家,电弧喷涂技术的应用一直没有停止过。随着科学技术的发展,电弧喷枪不断得到改进,加上电弧喷涂效率高,成本低等优点,从 80 年代开始电弧喷涂技术的研究和应用有了长足的进展,成为热喷涂领域非常活跃并倍受重视的技术之一,世界各国都密切关注电弧喷涂设备及工艺的新进展,并争相投入到它的研制开发中。

90 年代后,高能高速喷涂方法成为热喷涂发展的趋势,人们采用各种技术来提高喷涂粒子的速度与温度,从而改善涂层的性能。我国从事电弧喷涂的科技人员通过采用拉伐尔喷嘴技术,研究成功高速电弧喷涂和超音速电弧喷涂技术,大大提高了电弧喷涂涂层的质量。超音速电弧喷涂采用拉伐尔喷嘴和计算机辅助设计技术,优化了喷枪的设计,将粒子的速度提高到超音速,涂层质量接近等离子喷涂,开拓了电弧喷涂的应用领域,推动了电弧喷涂的发展,代表了当今电弧喷涂发展的最高水平。

1.2 普通电弧喷涂的优缺点分析

1.2.1 优点

电弧喷涂和普通火焰喷涂相比有以下优点:

1. 热效率高

火焰喷涂时,火焰产生的热量大部分散失到大气和冷却系统中去了,热能的利用率只有 5% ~ 15%;而电弧喷涂是直接用电能转化为热能来熔化金属,热能利用率高达 60% ~ 70%。

2. 生产效率高

电弧喷涂的生产效率高,表现在单位时间内喷涂的金属

重量大,其生产效率正比于喷涂电流。一般情况下,电弧喷涂的生产效率是火焰喷涂的 3 倍以上。

3. 操作简单,安全可靠

电弧喷涂设备没有复杂的操纵机构,只要把工作电压、电流根据喷涂材料的不同选在规定范围内,均可保证喷涂质量;而且仅使用电能和压缩空气,不用氧、乙炔等易燃气体,安全可靠。

4. 生产成本低

电能的价格远低于氧气和乙炔,所以,火焰喷涂所消耗的燃料价格是电能价格的数十倍,电弧喷涂的成本比火焰喷涂降低 30% 以上。

5. 涂层结合强度高

电弧喷涂可在不提高工件温度、不使用贵重底材的条件下获得高的结合强度,一般可达 20MPa,是火焰喷涂的 2.5 倍,新研制的二次雾化喷枪,结合强度可达 40MPa。

6. 可方便地制备假合金涂层

电弧喷涂只需两根不同成分的金属丝,就可以制备出假合金涂层,以获得独特的综合性能。

由于电弧喷涂具有独特的优点,因此在材料防腐、耐磨、旧件修复以及生产领域得到较为广泛的应用,产生了很大的经济和社会效益。

1.2.2 缺点

电弧喷涂与超音速火焰喷涂及等离子喷涂相比,其主要缺点有:

1. 涂层与基体结合强度低

经实验得出,电弧喷涂的涂层与基体的结合强度通常为 20MPa 左右,经改进的二次雾化电弧喷枪,其涂层与基体的

结合强度最高达 40MPa;与超音速火焰喷涂和等离子喷涂的涂层与基体结合强度高达 60MPa 以上相比,其结合强度偏低。

2. 涂层孔隙率高

电弧喷涂涂层表面的孔隙率高达 10% 以上,而超音速火焰喷涂和等离子喷涂的涂层表面孔隙率一般小于 5%。高的孔隙率,不仅影响涂层与基体的结合强度,而且影响涂层的耐磨、耐腐蚀性能。

1.3 电弧喷涂面临新的挑战与发展机遇

电弧喷涂虽然具有不少独特的优点,但结合强度低和孔隙率高等缺点,严重影响它在某些领域的应用,致使电弧喷涂在热喷涂中只占 10% 左右。随着科学技术的发展,各种新技术相继问世,并飞速发展,如果电弧喷涂不能克服自身存在的缺点,它的应用领域就有可能被其他技术所取代,在热喷涂中所占的份额还有可能下降,这对电弧喷涂来讲,不能不说是一种挑战。

在受到挑战的同时,电弧喷涂也迎来了发展的机遇。正是由于电弧喷涂有较多的优点,使热喷涂中从事电弧喷涂研究的工作者产生了极大兴趣。科学技术的发展,在为其他技术领域注入活力的同时,也为电弧喷涂克服自身的缺点提供了新的技术途径。从提高压缩空气气流的速度出发,来提高喷涂粒子的速度,使粒子的速度达到或超过音速,进而提高电弧喷涂涂层与基体的结合强度并同时降低孔隙率,这种发展机遇是一定会被人们抓住的。

如果电弧喷涂在结合强度与孔隙率方面有较大突破,能

够达到或接近等离子喷涂与超音速火焰喷涂的涂层质量,电弧喷涂的应用将会有很大突破。有人预言,到 21 世纪,电弧喷涂在热喷涂中将占 15% 的比例,它会给人们带来更大的经济效益和社会效益。

1.4 超音速电弧喷涂研制成功并通过鉴定

以第二炮兵工程学院王汉功教授为组长的科研小组,在认真深入地研究普通电弧喷涂优缺点的基础上,大胆提出超音速电弧喷涂的设想,并经二炮业务机关批准立项进行研究。经近三年的刻苦攻关,技术上取得重大突破,终于研制成功了超音速电弧喷涂设备,并于 1998 年 5 月 7 日在西安召开了“超音速电弧喷涂技术研究”鉴定会。参加会议的有中国表面工程学会、热喷涂专业委员会、沈阳工业大学、清华大学、西安交通大学、太原理工大学、冶金工业部钢铁研究总院、武汉材料保护研究所、航天工业总公司、装甲兵工程学院、空军、二炮等单位从事热喷涂研究的 16 位专家和代表,鉴定委员会主任由我国电弧喷涂专家、留美学者、沈阳工业大学温谨林教授担任。会议听取了课题研究总结报告,观看了超音速电弧喷涂表演,参观了不同材料的喷涂样品,审查了课题有关材料,进行了认真讨论,鉴定意见如下:

(1)课题立项起点高,设计思想先进;经测试,各项技术指标均达到或超过立项任务书的要求,提供鉴定的技术资料完整,数据可靠,符合标准化要求。

(2)该项研究属于开创性工作,工作量和难度很大,试验手段先进,其创新和先进性如下:

1) 应用空气动力学原理和计算机辅助设计以及拉伐尔