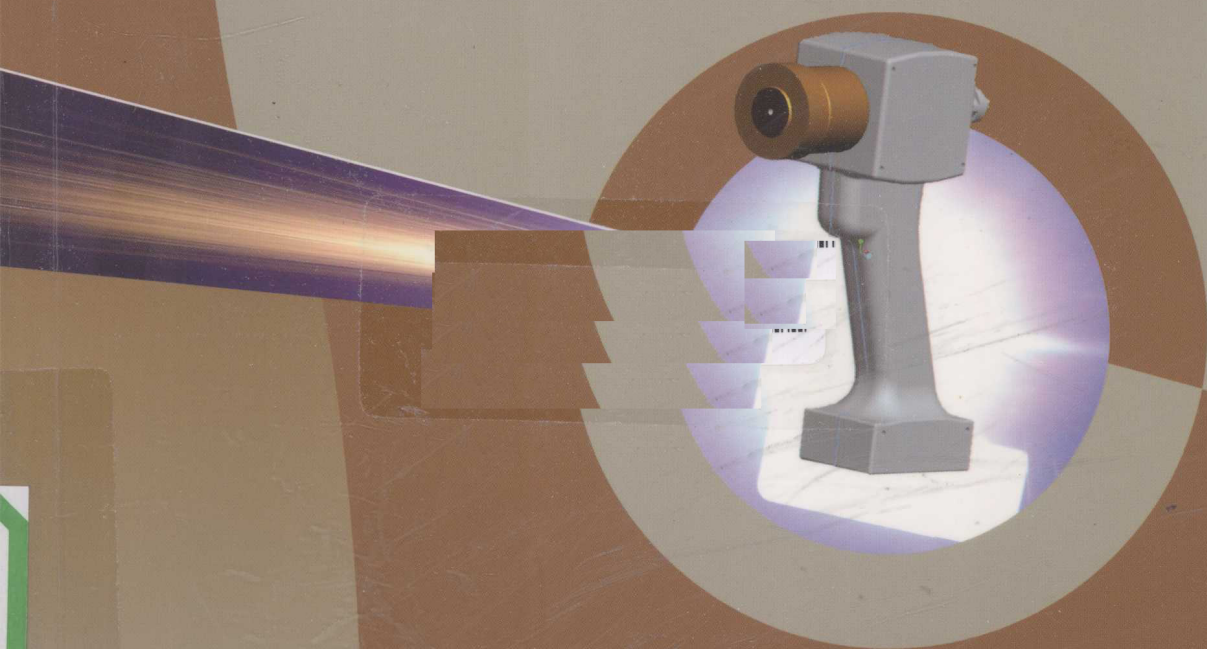


# 多功能微弧等离子 喷涂技术与应用

Multi-Function Micro-Plasma Spraying  
Technology and Application

汪刘应 王汉功 著



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 多功能微弧等离子喷涂 技术与应用

汪刘应 王汉功 著

科学出版社

北 京

## 前 言

等离子喷涂技术是热喷涂技术的重要分支,由于等离子弧具有温度高、能量集中、焰流速度高的特点,并且能够制备出各种高硬度、耐磨损、耐高温、抗氧化、耐腐蚀的功能涂层,因此在航空、航天、原子能等工业领域得到了广泛的应用。传统等离子喷涂设备由于功率大、电源体大而笨重,多采用外送粉,且使得喷涂电能消耗大、成本高、不便于现场作业,因此在诸多领域应用受限。为拓展等离子喷涂技术的应用范围,并推动等离子喷涂技术的发展,我们在认真分析传统等离子喷涂技术优缺点的基础上,从等离子喷涂电源、喷枪设计入手,开发了一种体积小、重量轻、低功率、高效节能的多功能微弧等离子喷涂系统。

本书重点围绕等离子喷涂电源、喷枪设计与技术应用为研究核心,设计了集主电路和控制系统于一体的多功能微弧等离子喷涂逆变电源,开发了具有枪内中心轴向送粉、复合进气方式等特点的等离子喷枪,研制了便携式多功能微弧等离子喷涂系统;通过对多功能微弧等离子喷涂射流、粒子的温度和速度模拟与仿真,研究喷枪设计与喷涂粒子温度和速度之间的关系,最后进行多功能微弧等离子喷涂技术的应用研究。全书力求达到科学性、系统性以及实用性的统一。该书是我们科研团队 10 多年来在热喷涂技术领域科研工作的总结,并得到了国家自然科学基金和总装维修改革科研项目的资助,获得了陕西省科学技术二等奖和 2 项发明专利。书中的一些最新研究成果希望能够为金属材料、粉末冶金、机械制造、表面工程等领域的研究人员提供帮助。

本书出版之际,衷心感谢葛昌纯院士、周克崧院士、马世宁教授、黄小鸥教授、李长久教授对我们工作所给予的支持和鼓励,感谢一起攻关的科研团队的所有人员。特别感谢华绍春、刘顾、侯平均、姚建勋等同志在出版过程中做的大量工作。此外,在多功能微弧等离子喷涂系统研制过程中,得到了山东山大奥太电气有限公司朱茂峰工程师、西北工业大学凝固技术国家重点实验室等单位的大力支持,在此向关心、支持多功能微弧等离子喷涂技术研究的单位和人员表示衷心的感谢!

由于我们涉入热喷涂领域比较晚,对热喷涂技术的研究还比较肤浅,水平有限,加之时间仓促,书中疏漏之处敬请读者批评指正。

作 者

2010 年 1 月

# 目 录

## 前言

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....                 | 1  |
| 1.1 等离子喷涂的原理及特点 .....                 | 1  |
| 1.2 等离子喷涂技术最新进展 .....                 | 2  |
| 1.2.1 等离子喷涂电源的最新进展 .....              | 3  |
| 1.2.2 等离子喷枪的最新进展 .....                | 3  |
| 1.3 等离子喷涂技术的发展趋势.....                 | 10 |
| 1.3.1 等离子喷涂技术的发展方向 .....              | 10 |
| 1.3.2 数值模拟在等离子喷涂中的应用研究 .....          | 11 |
| 1.3.3 等离子喷涂涂层应用研究.....                | 12 |
| 1.3.4 涂层性能检测与分析研究.....                | 13 |
| 1.4 多功能微弧等离子喷涂技术的提出.....              | 14 |
| 参考文献 .....                            | 14 |
| <b>第 2 章 多功能微弧等离子喷涂逆变电源系统设计</b> ..... | 19 |
| 2.1 微弧等离子喷涂电源特性设计.....                | 19 |
| 2.1.1 等离子喷涂电源外特性要求 .....              | 19 |
| 2.1.2 等离子喷涂电源调节特性要求 .....             | 20 |
| 2.1.3 等离子喷涂电源动特性要求 .....              | 21 |
| 2.2 多功能微弧等离子喷涂逆变电源方案.....             | 21 |
| 2.2.1 多功能微弧等离子喷涂逆变电源设计思想.....         | 21 |
| 2.2.2 多功能微弧等离子喷涂逆变电源总体设计方案 .....      | 22 |
| 2.3 多功能微弧等离子喷涂逆变电源主电路设计.....          | 23 |
| 2.3.1 输入整流滤波电路设计 .....                | 23 |
| 2.3.2 新型软开关谐振逆变电路设计 .....             | 24 |
| 2.3.3 主电路参数的选择与计算.....                | 30 |
| 2.3.4 输出整流滤波电路设计 .....                | 33 |
| 2.4 多功能微弧等离子喷涂逆变器控制模式.....            | 35 |
| 2.4.1 多功能微弧等离子喷涂逆变电源控制模式研究 .....      | 35 |
| 2.4.2 驱动电路设计 .....                    | 38 |
| 2.4.3 多功能微弧等离子喷涂逆变电源数字化控制研究 .....     | 39 |
| 2.5 多功能微弧等离子喷涂逆变电源效率.....             | 43 |
| 参考文献 .....                            | 45 |

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| <b>第 3 章 多功能微弧等离子喷枪的设计与实现</b> .....   | 46 |
| 3.1 低温等离子体物理过程与传输特性分析 .....           | 46 |
| 3.1.1 低温等离子体物理过程分析 .....              | 46 |
| 3.1.2 低温直流等离子弧传输模型研究 .....            | 48 |
| 3.1.3 等离子弧的压缩效应 .....                 | 51 |
| 3.2 多功能微弧等离子喷枪的设计 .....               | 54 |
| 3.2.1 喷枪设计要求 .....                    | 54 |
| 3.2.2 喷枪设计方案 .....                    | 55 |
| 3.3 微弧等离子喷枪送粉与进气方式设计 .....            | 55 |
| 3.3.1 传统等离子喷涂送粉方式分析 .....             | 55 |
| 3.3.2 微弧等离子喷涂送粉方式设计 .....             | 57 |
| 3.3.3 微弧等离子喷涂进气方式设计 .....             | 58 |
| 3.4 微弧等离子喷枪喷嘴的设计与优化 .....             | 59 |
| 3.4.1 喷嘴的主要结构形式与几何参数 .....            | 59 |
| 3.4.2 拉瓦尔喷嘴特征参数计算 .....               | 61 |
| 3.4.3 拉瓦尔喷嘴型面设计 .....                 | 62 |
| 3.4.4 基于 MATLAB 的微弧等离子喷涂超音速喷嘴设计 ..... | 64 |
| 3.5 喷枪冷却系统设计 .....                    | 65 |
| 3.5.1 喷枪冷却系统设计方案 .....                | 65 |
| 3.5.2 微弧等离子喷枪冷却过程的数学建模与仿真 .....       | 66 |
| 3.5.3 喷枪冷却的参数计算 .....                 | 70 |
| 3.6 多功能微弧等离子喷枪电弧特性与热效率 .....          | 71 |
| 3.6.1 电弧的伏安特性 .....                   | 71 |
| 3.6.2 喷枪热效率分析 .....                   | 72 |
| 参考文献 .....                            | 74 |
| <b>第 4 章 微弧等离子喷涂射流与粒子特性</b> .....     | 76 |
| 4.1 微弧等离子喷涂射流的特性 .....                | 77 |
| 4.1.1 喷枪出口处基本参量的确定 .....              | 77 |
| 4.1.2 数学模型 .....                      | 79 |
| 4.1.3 结果与分析 .....                     | 83 |
| 4.2 微弧等离子喷涂粒子特性 .....                 | 87 |
| 4.2.1 基本假设 .....                      | 87 |
| 4.2.2 微弧等离子喷涂粒子运动模型 .....             | 87 |
| 4.2.3 微弧等离子喷涂粒子加热模型 .....             | 88 |
| 4.2.4 材料选择与几何模型 .....                 | 89 |
| 4.2.5 结果与分析 .....                     | 89 |

|                                                     |            |
|-----------------------------------------------------|------------|
| 4.3 微弧等离子喷涂 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 粒子温度、速度测试 ..... | 92         |
| 4.3.1 测试设备与原理 .....                                 | 92         |
| 4.3.2 实验方法与测试结果 .....                               | 93         |
| 4.3.3 结果分析 .....                                    | 94         |
| 参考文献 .....                                          | 95         |
| <b>第5章 多功能微弧等离子喷涂复合热障涂层 .....</b>                   | <b>97</b>  |
| 5.1 实验材料与方法 .....                                   | 97         |
| 5.1.1 实验材料 .....                                    | 97         |
| 5.1.2 实验方法 .....                                    | 101        |
| 5.2 空心莫来石隔热涂层的制备与性能 .....                           | 102        |
| 5.2.1 涂层制备 .....                                    | 102        |
| 5.2.2 涂层的组织形貌与结合强度 .....                            | 103        |
| 5.2.3 涂层的隔热性能 .....                                 | 105        |
| 5.2.4 涂层的抗热震性能 .....                                | 106        |
| 5.3 莫来石与金属复合热障涂层的制备 .....                           | 108        |
| 5.3.1 涂层制备 .....                                    | 109        |
| 5.3.2 涂层的组织形貌和结合强度 .....                            | 110        |
| 5.3.3 涂层的隔热性能 .....                                 | 113        |
| 5.3.4 涂层的抗热震性能 .....                                | 115        |
| 5.3.5 涂层热震过程的裂纹扩展 .....                             | 117        |
| 5.4 纳米 $\text{ZrO}_2$ /莫来石与金属复合热障涂层的制备 .....        | 119        |
| 5.4.1 涂层制备 .....                                    | 119        |
| 5.4.2 涂层的组织形貌和结合强度 .....                            | 120        |
| 5.4.3 涂层的隔热性能 .....                                 | 125        |
| 5.4.4 涂层的抗热震性能 .....                                | 131        |
| 5.4.5 涂层热震过程的裂纹扩展 .....                             | 131        |
| 5.5 莫来石基梯度热障涂层的制备 .....                             | 135        |
| 5.5.1 复合梯度热障涂层的制备 .....                             | 135        |
| 5.5.2 涂层的微观组织和结合强度 .....                            | 136        |
| 5.5.3 涂层的隔热性能 .....                                 | 137        |
| 5.5.4 涂层的抗热震性能 .....                                | 138        |
| 参考文献 .....                                          | 139        |
| <b>第6章 吸波涂层的制备与性能研究 .....</b>                       | <b>142</b> |
| 6.1 吸波材料及其制备技术 .....                                | 142        |
| 6.1.1 吸波材料研究进展 .....                                | 142        |

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| 6.1.2 吸波涂层制备技术 .....                | 144        |
| 6.1.3 纳米颗粒喂料制备和涂层性能测试 .....         | 145        |
| 6.2 吸波粉末的表征 .....                   | 152        |
| 6.3 涂层吸波性能的表征 .....                 | 154        |
| 6.3.1 复合粉末的电磁参数 .....               | 155        |
| 6.3.2 复合粉末的反射率模拟 .....              | 156        |
| 6.3.3 复合涂层的电磁波反射率 .....             | 158        |
| 6.3.4 复合涂层的高温反射率 .....              | 162        |
| 6.4 涂层理论厚度和实际厚度的关系 .....            | 164        |
| 6.5 涂层结合强度 .....                    | 166        |
| 6.6 涂层面密度 .....                     | 168        |
| 参考文献 .....                          | 169        |
| <b>第7章 微弧等离子表面淬火硬化层性能研究 .....</b>   | <b>172</b> |
| 7.1 试验材料与方法 .....                   | 172        |
| 7.1.1 试验材料 .....                    | 172        |
| 7.1.2 实验方法 .....                    | 173        |
| 7.1.3 工艺参数的确定 .....                 | 173        |
| 7.2 淬火硬化层组织结构 .....                 | 174        |
| 7.2.1 淬火硬化层宏观形貌特征 .....             | 174        |
| 7.2.2 淬火硬化层显微组织分析 .....             | 175        |
| 7.2.3 淬火工艺参数对硬化带尺寸的影响 .....         | 178        |
| 7.3 淬火硬化层显微硬度特性研究 .....             | 184        |
| 7.3.1 硬度分布特征 .....                  | 184        |
| 7.3.2 淬火工艺对硬化层硬度的影响 .....           | 184        |
| 7.4 淬火硬化层磨损特性 .....                 | 191        |
| 7.4.1 磨损实验结果 .....                  | 191        |
| 7.4.2 磨损形式分析 .....                  | 192        |
| 7.4.3 磨损层表面形貌特征 .....               | 193        |
| 7.4.4 磨损机理的探讨 .....                 | 195        |
| 7.5 基于遗传神经网络的淬火工艺参数优化 .....         | 197        |
| 7.5.1 遗传神经网络训练方法(GA-BP 算法)的实现 ..... | 198        |
| 7.5.2 实验结果建模与仿真 .....               | 198        |
| 7.5.3 基于遗传算法(GA)的工艺参数优化 .....       | 202        |
| 参考文献 .....                          | 206        |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 等离子喷涂的原理及特点

20 世纪 50 年代,为解决航空、航天、原子能等尖端领域对耐高温和隔热涂层的迫切需要,人们在提高喷涂热源温度和速度以及控制喷涂气氛等方面进行了新的探索。1957 年,美国联合碳化物公司(Union Carbide Co.)和等离子动力公司(Thermal Dynamic Co.)相继开发了温度高达 10000K 以上的等离子电弧为热源的大气等离子喷涂技术(air plasma spray),实现了难熔金属和氧化物陶瓷材料的喷涂,促使了热喷涂技术的飞速发展。近 50 年等离子喷涂技术的发展主要集中在喷枪功率和喷涂粒子速度的提高两个方面。70 年代,80kW 级高能等离子喷涂设备研制成功并获得广泛应用;80 年代,100~200kW 高功率等离子喷涂设备也相继出现;90 年代,超音速等离子喷涂研制成功并实现了商业化<sup>[1~3]</sup>。

从发明等离子喷涂到今天仅仅 50 多年时间,等离子喷涂技术已发展成为一种工艺成熟、应用广泛的热喷涂方法。据资料统计,1960 年等离子喷涂在热喷涂市场所占比例为 15%,而 1980 年该比例已上升到 55%,2000 年该比例为 48%。如今,等离子喷涂技术的应用几乎覆盖了所有的工业领域,成为制备各种性能涂层的最先进的工艺方法之一,在机械制造、航空工业、火箭技术、原子能、冶金、造船、交通、微电子、无线电、新能源材料、复合材料等领域有着广泛应用;可以制造耐磨、减摩、固体润滑涂层,耐蚀涂层,温控及热障涂层,以及磁性、导电、绝缘、超导、红外线辐射、太阳能吸收等各类功能涂层,在国民经济建设中有着不可替代的重要地位<sup>[4~10]</sup>。

等离子喷涂采用压缩电弧作为热源,工作气体常用 Ar 或 N<sub>2</sub>,再加入质量分数为 5%~10%的 H<sub>2</sub>。工作气体进入电极腔的弧状区后,被压缩电弧加热离解形成等离子体,其中心温度高达 10000K 以上,同时经孔道高压压缩后呈高速等离子射流喷出。喷涂粉末被送粉气载入等离子焰流,使粉末很快呈熔化或半熔化状态,并高速喷射在零件表面形成致密的层状涂层<sup>[11~15]</sup>。图 1.1 是典型的等离子喷涂过程示意图。

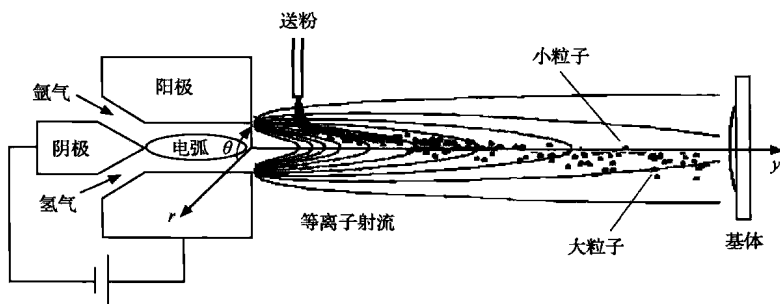


图 1.1 等离子喷涂过程示意图

等离子喷涂具有以下特点：

1) 可以获得各种性能的涂层。等离子喷涂的焰流温度高,热量集中,能熔化一切高熔点和硬度的粉末材料,可以根据工件表面性能要求制备各种不同性能的涂层,如耐磨、耐热、耐腐蚀、隔热和绝缘等涂层。

2) 喷涂涂层组织结构致密,结合强度较高。由于等离子弧能量集中,焰流喷射速度高,能使粉末获得较大动能和较高温度,因此能获得致密度高、与基体结合性能良好的涂层。

3) 喷涂涂层平整、光滑,可精确控制。由于喷涂后的涂层平整、光滑,其厚度可以精确控制,因此切削加工涂层时可直接采用精加工工序。

4) 等离子喷涂可以获得氧化物含量少、杂质少、较纯洁的涂层。采用还原性气体(如  $H_2$ )和惰性气体(如  $Ar$ )作为工作气体,能可靠地保护工件表面和粉末材料不受氧化,适宜于喷涂易氧化的活性粉末材料,并且能够获得比较纯洁的涂层。

5) 喷涂时对工件热变形影响小,无组织变化。在等离子喷涂过程中,工件表面不带电,不熔化,加之粉末的喷射速度高,工件与喷枪的相对移动速度快,因此对工件热变形影响小,无组织结构变化。

6) 喷涂效率高。由于等离子喷涂的粉末具有高温、高速的特点,所以粉末的沉积率较高。采用高能等离子喷涂设备时,每小时可喷涂粉末高达 8kg。

## 1.2 等离子喷涂技术最新进展

等离子喷涂设备主要由等离子喷涂电源、等离子喷枪、控制柜、送粉器以及冷却装置等组成。等离子喷涂电源是等离子射流能量提供装置,其工作电流和电压是影响涂层质量的重要参数。喷枪是集所有喷涂资源(电、气、粉、水)于一体的核心装置,为喷涂材料的熔化、细化及其喷涂能量转换提供空间,喷枪设计的好坏直接影响到喷涂涂层质量。因此,等离子喷涂电源和等离子喷枪是等离子喷涂系统

中最为关键的部件,等离子喷涂技术的进步往往也是以新型等离子喷涂电源和等离子喷枪的研制与开发作为发展标志。

### 1.2.1 等离子喷涂电源的最新进展

国外等离子喷涂电源主要为整流式电源。国外著名的热喷涂公司 Metco 公司研制的等离子喷涂电源为晶闸管整流式电源,功率为 80kW,整机重量达 930kg,尺寸为 690mm×1230mm×1220mm;瑞士 Casolin 公司开发的喷涂电源为小型晶体管式电源,设计紧凑性有所提高,体积和重量减小了很多,功率为 40kW,重量仅为 220kg<sup>[16]</sup>。

国内等离子喷涂电源主要以 20 世纪 70 年代北京航空工艺研究所研制的磁放大器式二极管整流式电源为主,其特点是:电弧工作电流稳定,短期承受超负荷能力强。但是,设备体大笨重,不便于移动、搬运和野外现场作业功耗大,电源外特性不易控制,制造成本高,功率因数低。此外,由于喷涂过程是一个复杂的工艺过程,影响因素很多,现有的等离子喷涂电源基本上都采用继电器接触控制,全部采用硬器件、硬触点和硬线连接,动作响应速度慢,系统设计、调节时间长,可靠性不高。随着电力电子技术和控制技术的发展,国内先后开展了晶闸管整流电源和软开关逆变等离子喷涂电源的研究工作。例如,北京航天材料及工艺研究所开发了 80kW 和 200kW 晶闸管式等离子喷涂电源;甘肃工业大学研制成功了 PLC 控制的 120kW 晶闸管整流式等离子喷涂电源,控制特性较好;华南理工大学正在开发研制 60kW 级软开关逆变等离子喷涂电源<sup>[17, 18]</sup>,但未见应用到应用报道。

### 1.2.2 等离子喷枪的最新进展

随着等离子喷涂技术的发展,国内外等离子喷枪的研制和开发日新月异,其研究主要集中在送粉方式的改进、电弧功率的提高和特殊喷枪结构设计等方面。

#### 1. 送粉方式的改进

传统等离子喷涂的粉末送入方式分为枪外送粉(简称外送粉)和通过阳极喷嘴注入粉末的枪内送粉(简称内送粉)两大类。粉末在送粉气流的输送下,沿垂直于射流或以一定的倾斜角送入射流中,粒子在射流中的运动轨迹在很大程度上取决于它的初速度、粒子直径和粉末材料密度。由于粉末颗粒尺寸不可避免地有一定的分散性,加上等离子射流沿径向高达 4000K/mm 的温度梯度和  $300\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$  的速度梯度<sup>[19~21]</sup>,使得粉末颗粒难以全部进入射流的高温区域,如图 1.2 所示。细小的颗粒只能在射流边缘的低温区域加热,而尺寸较大的颗粒则可能会穿越射流,也不能得到充分的加热,在涂层中形成未熔颗粒,从而影响涂层质量。只有喷涂粉末进入射流高温区域,才能获得足够长的加热加速时间,粉末粒子才能得

到有效的加热和充分熔化。

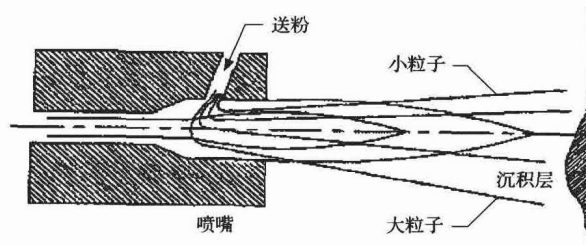


图 1.2 粒子运动轨迹示意图

等离子喷涂过程中,最理想控制粉末运动轨迹的方法是将粉末沿轴向送入等离子射流中。由于粒子和射流轴线保持一致,粒子能够在相对较长的距离上实现加热加速,避免了热泳效应的不利影响(所谓热泳效应是指细颗粒在高温介质中受到负温度梯度方向的力,这意味着颗粒直径越小,温度梯度越大,颗粒就越不容易进入射流高温区)。同时,粉末沿射流轴向送入,还可以加强射流对粒子的保护效果,降低粒子的氧化,即使喷涂不同密度的混合粉末,由于粒子运动轨迹一致,涂层成分也具有较好的均匀性<sup>[22]</sup>。

自 20 世纪 80 年代以来,国内外从事热喷涂研究的学者先后从改进等离子喷枪送粉方式入手进行了等离子喷枪结构设计,多阴极结构和空心阴极结构轴向送粉等离子喷枪也相继开发。例如,20 世纪 90 年代末,Sulzer Metco 公司和 Mettech 公司先后研制成功了三阴极轴向送粉等离子喷枪(Triplex II 和 Axial III),喷枪结构如图 1.3 所示<sup>[23]</sup>。喷枪由三对轴对称分布的电极构成,三束等离子射流在汇流腔内汇聚成一束主等离子流,形成空心管状射流从喷嘴喷出,粉末沿喷枪轴向送进,为使汇聚的射流有足够的热焓,该喷枪功率高达 150kW,空载电压高达 400V,可有效提高等离子射流的挺直度<sup>[24, 25]</sup>。

图 1.4 是三阴极等离子喷枪轴向送粉和径向送粉射流照片。

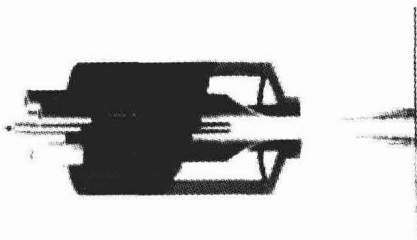


图 1.3 三阴极轴向送粉等离子喷枪结构示意图

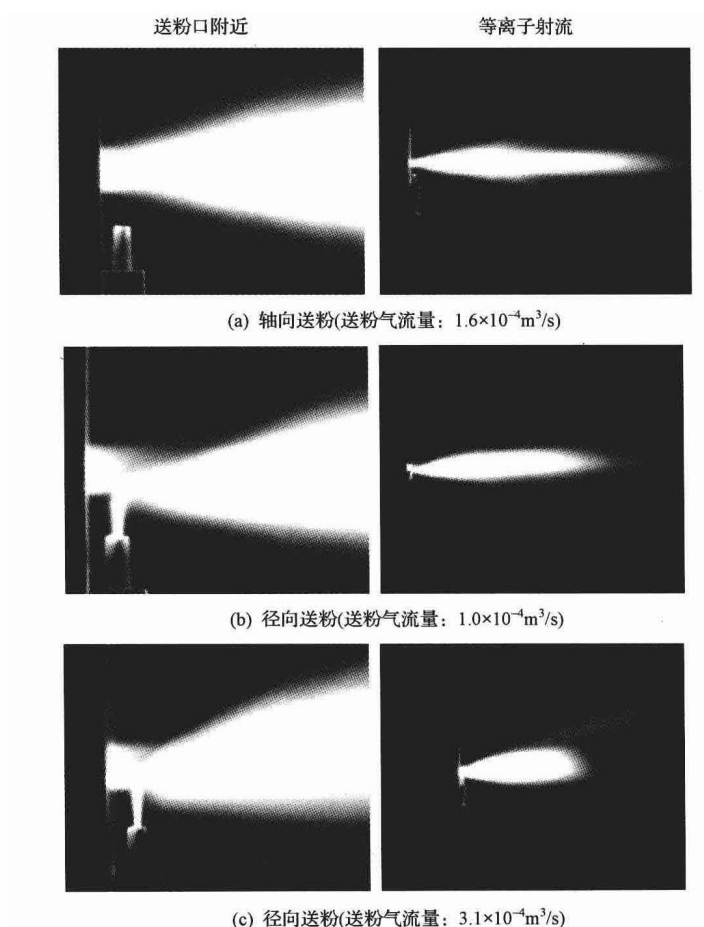


图 1.4 三阴极等离子喷枪的轴向送粉和径向送粉射流照片

观察发现,送粉方式对等离子弧的稳定性有较大的影响。轴向送粉时,等离子弧和粉末在喷嘴中汇合,所有粒子送入到等离子弧的高温区加热加速,等离子弧呈对称状态。而径向送粉时,在送粉载气较小时,粉末被送入到等离子弧下游,没有完全进入高温区,且等离子弧比轴向送粉时变短。随着送粉载气的增加,粉末严重偏离弧柱中心,等离子弧变得更短<sup>[26, 27]</sup>。

三阴极轴向送粉等离子喷枪的优点是<sup>[1]</sup>:①将原来单阴极的单电弧分为三个电弧,降低了喷嘴及阴极因过热而烧损的可能性,延长了喷嘴及阴极的寿命;②由于三根阴极各自离阳极都处于偏位置有一个最短的距离,根据“最小的焔要求最小的弧长”的原理,每个阴极尖端只有一个与阳极对应的弧根,解决了阳极弧根的周向运动及轴向运动,保持了电弧的稳定性;③为避免送粉气流对电弧稳定性的影

响,采用了喷枪中心轴向送粉方式。这样可使粉末的沉积效率大大提高,喷涂同样面积及厚度的涂层与常规等离子喷涂相比仅需一半的时间,可见其工作效率很高,对于大型工件或大批量部件的喷涂其优越性更加突出。由于电弧稳定,噪音比常规等离子喷涂的 120dB 低,仅为 90dB 左右。

表 1.1 是三阴极等离子喷枪与常规等离子喷枪的喷涂送粉速率及粉末沉积效率的对比结果。从表 1.1 可以看出,三阴极等离子喷涂技术比常规等离子喷涂技术要优越。

表 1.1 三阴极与常规等离子喷涂送粉速率及沉积效率的比较

| 材 料                                         | 常规等离子喷涂                                |         | 三阴极等离子喷涂                               |         |
|---------------------------------------------|----------------------------------------|---------|----------------------------------------|---------|
|                                             | 送粉速率/ $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$ | 沉积效率/ % | 送粉速率/ $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$ | 沉积效率/ % |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$                     | 60                                     | 60      | 150                                    | 60      |
| $\text{Cr}_2\text{O}_3$                     | 50                                     | 45      | 150                                    | 45      |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13% $\text{TiO}_2$ | 60                                     | 70      | 150                                    | 70      |
| $\text{ZrO}_2$ -8% $\text{Y}_2\text{O}_3$   | 80                                     | 30      | 150                                    | 30      |
| Ni-5%Al                                     | 80                                     | 70      | 200                                    | 70      |

西安交通大学李长久教授开发的微束等离子喷枪<sup>[28~30]</sup>,如图 1.5 所示。

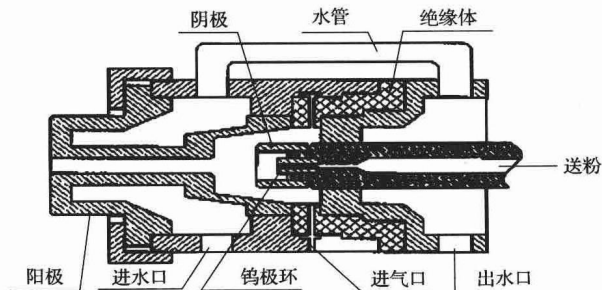


图 1.5 微束等离子喷枪结构示意图

微束等离子喷枪采用空心钨极轴向送粉结构,可使粒子的加热、加速过程扩展到整个电弧和射流区域,喷涂粒子在较小功率下能获得相对较高的速度和温度,从而制备较好的涂层。但是实验表明,空心钨极在单位面积上承受着很大的热负荷,当喷涂粉末通过钨极载入到等离子弧中,容易发生粉末与空心钨极黏结现象,使得空心钨极使用寿命短、等离子射流稳定性差。该项研究目前仍停留在实验室研究阶段,有些技术难题还亟待解决。

## 2. 电弧功率的提高和特殊喷枪结构设计

高能等离子喷涂是为满足陶瓷材料对涂层密度和结合强度以及喷涂效率的更高需求而开发的一种高能、高速的等离子喷涂技术。在电弧电流与普通大气等离子喷涂相当的情况下,可利用较高工作电压(可达几百伏)提高功率,并采用更大的气体流量来提高射流的流速(马赫数  $Ma > 5$ )。文献[31]介绍了一种 100kW 的高能等离子喷枪,如图 1.6 所示。

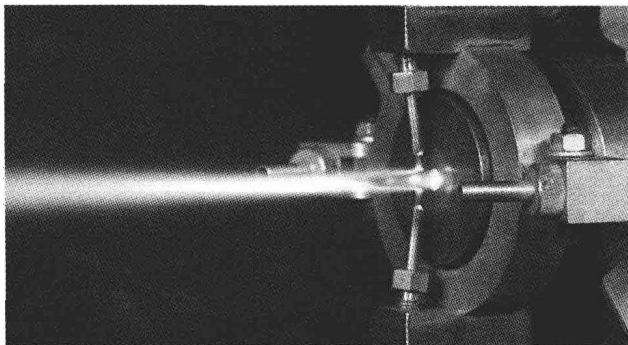


图 1.6 100kW 高能等离子喷枪

该喷枪采用独特的设计方法拉长了等离子弧,降低了工作电流,提高了工作电压,平均工作电压达 240V,减少了阴阳极的损耗,提高了喷嘴的使用寿命。从图 1.6 可以看出,等离子弧中存在三个菱形马赫锥,具有较高的射流速度,喷涂 WC-Co 涂层的粒子平均速度可达 527m/s;同时,还具有较高的喷涂速率(可达 200g/min)和沉积效率(可达 95%)。装甲兵工程学院研制的 HEPJet 高效能超音速等离子喷枪,最大功率 80kW,最大工作气体流量 6m<sup>3</sup>/h,可以喷涂金属粉末、碳化物和氧化物陶瓷粉末等,喷涂 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层的粒子平均速度达 450m/s<sup>[32, 33]</sup>。美国 PRAXAIR-TAFA 公司推出的 PlazJet 高功率等离子喷涂系统,能够稳定工作在 200kW 左右,等离子弧具有极高的热能和速度,可为制备优质涂层提供充足的功率<sup>[34]</sup>。

反应等离子喷涂是对真空等离子喷涂进一步改进的结果,该方法在真空等离子喷涂过程中,在喷嘴出口处的等离子射流中加入反应气体(如 N<sub>2</sub>),反应气体会与加热中的喷涂颗粒相互作用,进而得到新的生成物<sup>[36~40]</sup>。例如,利用这种方法可获得 TiN 涂层,通过喷涂钛粉和注入 N<sub>2</sub> 发生反应而获得,其工作原理如图 1.7 所示。

TiN 具有高熔点、高硬度、耐磨、耐蚀等特点,并且还具有优良的导电性和超导性<sup>[41~45]</sup>。反应等离子喷涂制备 TiN 涂层克服了传统的物理或者化学气相沉积

(PVD 及 CVD) 工艺制备 TiN 涂层存在的沉积速率低、涂层厚度过薄等不足, 文献 [45] 成功制备了纳米晶 TiN 涂层, 涂层厚度达  $500\mu\text{m}$ 。

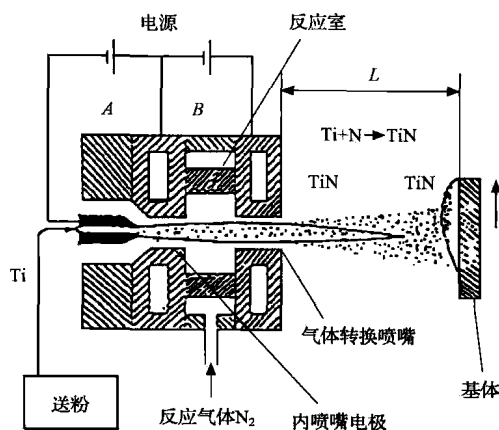


图 1.7 反应等离子喷涂 TiN 涂层原理示意图

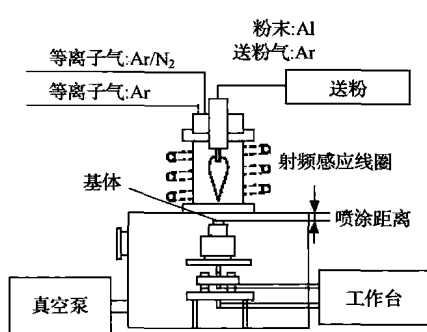


图 1.8 感应方式等离子喷涂原理示意图

感应方式等离子喷涂主要由附加轴向高速粉末喷嘴与直流等离子喷枪组合为一体的射频等离子发生器组成, 其原理如图 1.8 所示<sup>[46]</sup>。它的工作频率在  $40 \sim 4000\text{kHz}$  或更高, 电功率可以达到  $200\text{kW}$ 。感应源部件是一个水冷铜制螺线管, 它环绕着一个石英管, 其上端安装工作气体和送粉入口或直流喷枪, 而下端开放。工作前, 石英管内先抽真空, 再充入惰性气体。工作时, 将螺线管接入高频、高压和小电流, 使石英管内建立起磁场, 将工作气体电离, 形成等离子体, 然后再把电流升到工作电流<sup>[47~51]</sup>。

等离子体因感应电流存在而被加热, 电离后由石英管的另一端喷出, 形成射频等离子射流, 并点燃直流喷枪, 将轴线方向送入的粉末加热并加速喷射到工件表面, 形成射频等离子涂层。射频-直流等离子装置的电功率、气体流量和真空度等参数控制着等离子体的温度、尺寸、形状以及射流的速度。射频等离子喷涂不使用电极, 没有电极烧损, 形成的等离子体很清洁, 喷涂涂层均匀无气孔。由于喷涂射流是在真空腔内形成的, 可以熔敷活性的甚至有毒的金属, 如钙、铀、铌和钛, 可喷涂的粉末粒度范围比常规等离子弧喷涂要宽<sup>[52~55]</sup>。

水稳等离子喷涂通过特殊的喷枪结构拉长电弧来提高电弧电压, 等离子弧通

过一个液流旋涡式空心腔,受到强烈压缩,从而提高电弧电压。喷涂的原理如图 1.9 所示<sup>[1]</sup>,其电弧腔的轴向组装几只彼此绝缘的金属导流环,一定压力的水进入喷枪后,经导流环的切向小孔进入电弧腔,沿腔壁面形成旋涡后流出腔室。水流旋涡依附在壁上,在电弧腔中形成空腔。喷枪的前端有水冷喷嘴,并在喷嘴边部装有水冷的旋转阳极。喷枪的后端中心处装有密封且前后可转动的碳棒阴极,借助于金属丝短路在阴阳极间使水流电离,产生电弧。液流旋涡将弧柱和弧腔金属壁绝缘并冷却压缩电弧,即产生电弧等离子体。等离子焰流离开喷嘴后体积迅速膨胀而产生高速等离子射流。从喷嘴出口处向焰流中注入粉末,形成熔融的喷涂粒子,沉积在基体上形成涂层<sup>[56, 57]</sup>。

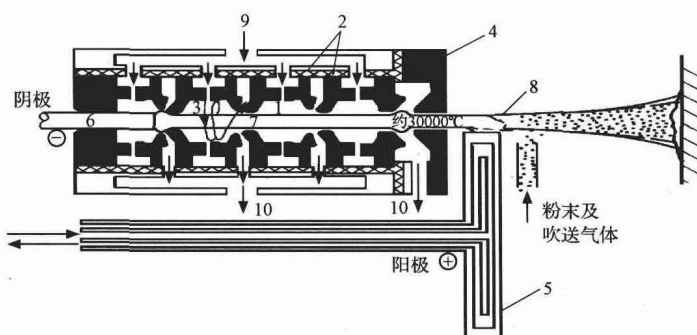


图 1.9 水稳等离子喷涂原理示意图

1. 电弧腔;2. 导流环;3. 水流旋涡;4. 喷嘴;5. 旋转阳极;  
6. 碳棒(阴极);7. 电弧;8. 等离子射流;9. 进水口;10. 出水口

水稳等离子喷涂由于是将水蒸气中的氢氧电离,因而弧压高达 340V,而电流较低,为 400~500A,功率可达 160kW。水稳等离子焰流能量集中,焰流长度大,喷涂效率较高,可达 50kg/h,涂层厚度可达 20mm,而且可以喷涂粒度分散性较大的粉末,因而特别适合陶瓷部件的喷涂成型。由于只需水和空气作为工作介质,其运行成本比其他喷涂方法经济,但其缺点是焰流为氧化焰,不适合喷涂易氧化的金属和碳化物材料<sup>[58~60]</sup>。

微等离子喷涂是 20 世纪 90 年代由乌克兰巴顿焊接研究所开发的一种新型低功率等离子喷涂,其喷枪结构如图 1.10 所示<sup>[35]</sup>,它具有层流等离子射流,发射角小(仅为  $2^{\circ} \sim 6^{\circ}$ ,普通等离子喷枪发射角为  $10^{\circ} \sim 18^{\circ}$ ),功率低(1~3kW),能量集中,噪声小(30~50dB),基体受热低,可在极薄的基体(如厚度为 0.5mm 的不锈钢薄板,厚度为 1.0mm 的锰片)上进行喷涂等特点,因此特别适宜制备小零件及薄壁件的精密涂层,在电子、医疗、家用电器等领域有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。但是微等离子喷涂的粒子速度低,仅为 15~16m/s,使得涂层与基体的结合强度不高,从而限制了它在工业领域中的应用。

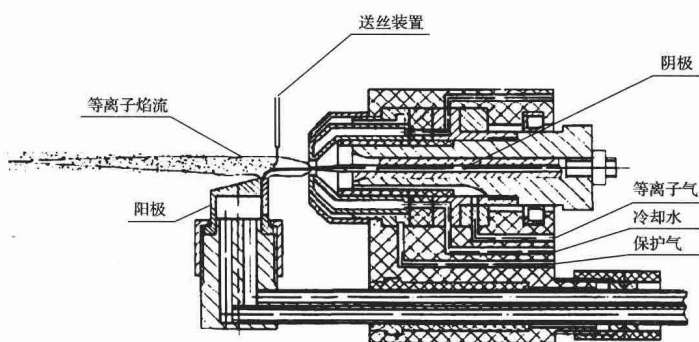


图 1.10 微等离子喷枪结构示意图

### 1.3 等离子喷涂技术的发展趋势

#### 1.3.1 等离子喷涂技术的发展方向

由于等离子弧具有温度高、能量集中、焰流速度高、稳定性好、调节性好等特点,等离子喷涂能够熔化包括高熔点钨、碳化钨在内的各种金属、金属氧化物以及氧化物陶瓷材料,制备出各种高硬度、耐磨损、耐高温、抗氧化、耐腐蚀的物理、化学性能稳定的涂层,在航空、航天、原子能等工业领域有着广阔的应用前景,也促使了等离子喷涂技术的不断发展。纵观等离子喷涂技术的研究现状与发展,等离子喷涂技术将向以下两个方向发展。

##### 1. 向着大功率、高生产效率的等离子喷涂工艺与设备发展

目前等离子喷涂主要以高能等离子喷涂、感应等离子喷涂、水稳等离子喷涂和超音速等离子喷涂为代表,以提高电弧功率和特殊喷枪结构设计作为主要研究方向,提高等离子喷涂粒子速度和改善涂层质量。但是,随着喷涂系统功率的增大,使得它们在应用方面存在以下几点不足:

- 1) 系统电弧功率的增大,使得喷涂电能消耗和喷涂成本显著增加。
- 2) 采用外送粉方式喷涂,粉末很难送到等离子弧的中心高温区,大部分粉末被冷气吹走,使得粉末加热效果差、沉积效率低,等离子弧能源利用率低。
- 3) 晶闸管整流式喷涂电源,设备体大笨重,组件多,安装调试操作复杂,不便于移动、搬运和野外现场喷涂。
- 4) 随着等离子喷涂系统电弧功率的增加,对基体热影响也增大,不适用薄壁件和精密件喷涂加工和维修的需要。