

# 热喷涂发展趋势 ——新型高能高速喷涂方法

Development of Thermal Spray

——New Type of High Energy and High Velocity Spray

中国科学院金属研究所 韩忠

沈阳工业大学 赵晖

Han Zhong (Institute of Metal Research, Academia sinica)

Zhao Hui (Shengyang University of Technology)

**[摘要]** 介绍了两种高能高速喷涂新技术——超音速火焰喷涂及超音速等离子喷涂,分析了两种喷涂方法的发展背景及基本原理,比较了它们的涂层特点及应用范围,指出超音速火焰喷涂及超音速等离子喷涂是获得高质量涂层的高新技术。

**关键词:** 超音速火焰喷涂 超音速等离子喷涂 高能高速喷涂

**[Abstract]** High energy and high velocity spray technique——supersonic flame spray and supersonic plasma spray are introduced in this paper. Their development context and principle are analyzed, and their coatings characteristics and scope of application are compared also.

**Keywords:** supersonic flame spray supersonic plasma spray high energy and high velocity spray

## 1 前言

热喷涂技术作为一种较好的金属材料表面防护和强化技术,以其独特的优势,在提高产品可靠性和延长部件使用寿命方面起着越来越重要的作用。随着航空、航天等尖端技术的飞速发展,迫切需要高熔点、高强度、高纯度的涂层,热喷涂技术正是为了适应这种需要不断发展起来。针对热喷涂工艺中影响涂层质量的基本因素:喷涂材料的加热温度、喷涂材料撞击到基体材料上的速度以及在加热、喷涂和冷却时,喷涂材料和基体的氧化程度,人们对热喷涂装置在提高热喷涂热源温度、喷射速度以及改善喷涂气氛等方面进行不断的摸索。如何使喷涂过程产生最大的热能及动能,从而使热喷涂材料达到最佳的熔化状态及尽可能高的飞行速度,是热喷涂设备进行改进和发展的重要依据。

近些年来,国际上热喷涂技术已向高能高速喷涂方向发展,以超音速火焰喷涂及超音速等离子喷涂为两个代表,这两种方法都是通过大幅度提高喷涂颗粒的速度来获得高质量的涂层,下面就对两种新型喷涂方法分别

作以介绍。

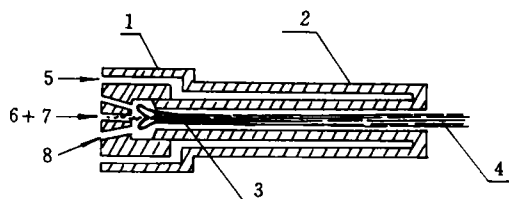
## 2 超音速火焰喷涂

### 2.1 发展背景

超音速火焰喷涂是发挥了传统的火焰喷涂在提供动能方面具有潜在优势而发展起来的一种高速火焰喷涂。作为高能高速喷涂方法,最早出现的是使喷涂材料的速度和动能极大提高的爆炸喷涂和能使任何高熔点材料都可以进行喷涂的等离子喷涂,然而,爆炸喷涂因其商业上的原因以及其本身固有的缺点,限制了它的推广应用。而等离子喷涂也因其极高的热源温度限制了一些喷涂材料的使用。为此,行家们再一次把目标集中在热喷涂技术的经典工艺——火焰喷涂上。从一些研究中可以看出,喷涂颗粒的飞行速度对涂层质量有更重大更直接的影响,虽然传统的火焰喷涂在提高热能方面潜力有限,始终不能与等离子喷涂相比,在从爆炸喷涂的成功中,人们看到了传统的火焰喷涂在提高动能方面的巨大潜力。经过几年的努力,1982年初由美国 Browning Engineering 公司首先推出了高速火焰喷枪 Jet-Kote。

## 2.2 基本原理

以 Jet-Kote 为例,超音速火焰喷枪的基本原理(见图1)是:利用可燃气体,如氢气、丙烷或丙烯等与氧气混合,在燃烧室点燃,剧烈膨胀的气体受水冷喷嘴的约束形成超音速高温火焰流,粉末沿燃烧室轴心由惰性气体,如氮气送入,受到加热与加速而喷出。



1 燃烧室 2 喷嘴 3 火焰 4 粒子流  
5 冷却水 6 粉末 7 可燃气体 8 送粉气

图1 超音速喷枪原理示意图

## 2.3 涂层的特点

超音速火焰喷涂的火焰温度通常不超过 3000℃,但是它极高速(可达普通火焰喷涂的 4~5 倍)的焰流造成极高的颗粒飞行速度,给涂层性能带来了一系列的影响,使超音速火焰喷涂涂层具有以下特点:

- (1) 较高冲击能量使涂层密度更高且表面更光滑。
- (2) 涂层孔隙率小,耐腐蚀性好。
- (3) 化学分解少,好的粘结性使涂层硬度更高。
- (4) 涂层更硬,韧性大,耐磨性好。
- (5) 颗粒粘结性强化使涂层结合强度更高。
- (6) 在空气中暴露时间极短,氧化物含量低。
- (7) 较好的颗粒受热状态,未熔颗粒含量低。
- (8) 在高温中停留时间极短,粉末化学成分和相变最小。
- (9) 改善了残余应力,涂层较厚。

## 2.4 涂层的应用

超音速火焰喷涂适合喷涂金属粉、合金粉、混合粉以及碳化物粉。特别是对于金属合金及有粘结相的碳化物最具意义。超音速火焰喷涂不高的热源温度与极高的速度,防止过高热源温度造成的材料过分氧化与蒸发。以 Jet-Kote 为例,喷涂的粉末包括很宽范围的铁合金、镍合金和钴合金。特别适用的有在金属基体中含有碳化物的涂层。

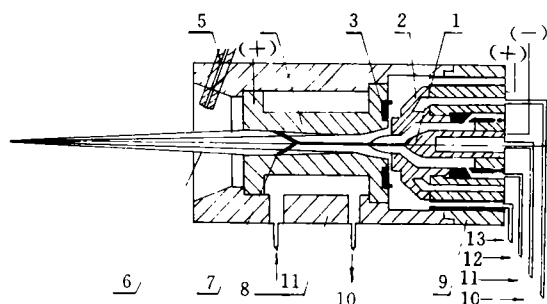
## 3 超音速等离子喷涂

### 3.1 发展背景

超音速等离子喷涂是针对常规的大气等离子喷涂存在的许多不足之处发展起来的一种新型喷涂方法。等离子喷涂极高的热源温度为喷涂一些高熔点材料,如陶瓷,提供了方便条件。但是由于普通的等离子喷涂本身的特点导致涂层的性能难以进一步提高,限制了它的应用。分析原因:首先是等离子焰流的流速不高且等离子弧较短,对喷涂颗粒的加速作用小,颗粒的飞行速度不够高,其次是紊乱的等离子射流热熔随离喷嘴的距离增大而急剧下降,而卷入射流中的空气含量急剧增加,焰流边缘处的颗粒在熔化状况、飞行速度及氧化程度与中心处不同,造成涂层质量下降。这些不足使高熔点材料陶瓷涂层结合强度低,孔隙率高,质量受到局限。为了找到一种能获得高质量陶瓷涂层的可靠的喷涂方法,1986 年美国 Browning Engineering 公司推出的第一台超音速等离子喷涂枪 Plaz-Jet。

### 3.2 基本原理

以 Plaz-Jet 为例,超音速等离子喷涂的基本原理(见图2)是:由后枪体输入主气(氩气)和次级气(氦气或氮气/氩气),从钨极与一次喷嘴之间通过的主气流量较小,大流量的次级气经气体旋流环作用,通过二次喷嘴喷出。钨极接负极,引弧时一次喷嘴接正极,在初级气中经高频引弧,正极接二次喷嘴,即在钨极与二次喷嘴内壁间产生电弧,在旋转的次级气强烈作用下,电弧被压缩在喷嘴中心并拉长至喷嘴外缘,形成扩展等离子弧。具有很高功率的扩展弧有效地加热主气及次级气,从喷嘴喷出高温度高速度的压缩细长的超音速等离子射流。喷涂粉末送进集聚的超音速焰流,被有效地加热加速,撞击工件形成涂层。



1 钨极 2 一次喷嘴 3 气体旋流环  
4 二次喷嘴 5 送粉嘴 6 等离子射流  
7 扩展弧 8 前枪体 9 后枪体  
10 冷却回水 11 冷却进水 12 主气 13 次级气

图2 超音速等离子喷涂枪原理示意图

### 3.3 涂层特点

超音速等离子喷涂与常规的等离子喷涂的涂层相比, 具有如下不同的特点:

(1) 气体的旋流稳定作用与收缩作用使超音速等离子焰流被有效地压缩而稳定集聚, 不发散, 高热焰, 使高熔点材料涂层均匀。

(2) 高速(超音速)的等离子焰流使喷涂颗粒冲击能量高, 使涂层致密坚硬, 孔隙率小。

(3) 高热焰, 超高速的等离子喷涂使喷涂颗粒极高的速度与喷涂颗粒良好的熔化状况完美结合, 使高熔点材料陶瓷涂层结合强度大大提高, 从而得到前所未有的高质量涂层。

### 3. 4 涂层的应用

超音速等离子喷涂已用于不锈钢及碳化钨粉末涂层, 涂层质量与爆炸喷涂和超音速火焰喷涂相近。而超音速等离子喷涂尤其适用于  $Al_2O_3$ 、 $Cr_2O_3$  等陶瓷粉末涂层, 涂层致密坚硬, 明显优于常规大气等离子喷涂。

## 4 结论

\* \* \* \* \*

## 中法新材料的对比试验

为确保直九国产化研制新材料不低于 80 年代法国标准先进水平, 哈飞公司对新材料进行了系统的剖析。进行对比试验的有铝合金 2618A、7075 板、2024、2214、2014, 合金钢 15CrMnMoVA、30Ni4CrMoA、35Ni4Cr2MoA、30Cr3MoA 和不锈钢 1Cr17Ni3 等 10 类, 33 种金属材料, 保证关键件及部分重要件的安全可靠。

经对比试验, 其应力腐蚀、显微组织、裂纹扩展速率、耐盐雾腐蚀, 中法材料相当。根据不同的材料, 选择下列相关项目作对比试验: 室温拉伸、低温拉伸(—55℃)、高温拉伸(200℃)、应力腐蚀、晶间腐蚀, 耐盐雾腐蚀、显微组织、低倍组织、高倍组织、带状组织、晶粒度、脱碳、夹杂物、电导率、含氢量、裂纹扩展速率、断裂韧性、疲劳性能、轴向高频疲劳、扭转剪切性能。

直九国产化装机的新材料按要求进行了全项复验、性能剖析、工艺试验及上述 10 类材料的中法对比试验,

\* \* \* \* \*

《材料工程》从 1996 年开始被中国科学引文数据库收录为来源期刊。

中国科学引文数据库利用该库的数据资源已开发出两种产品, 即《中国科学引文索引》(光盘版) 和 (印刷版)。欲购者请与中科院文献情报中心中国科学引文数据库联系。

电话: (010) 62564354 传真: (010) 62566846

(1) 超音速火焰喷涂尤其适用于金属合金及有粘结相的碳化物粉末涂层, 高质量的涂层是其它热喷涂方法无法比拟的。

(2) 超音速等离子喷涂对高熔点材料陶瓷粉末涂层最具优势, 高质量的涂层是其它热喷涂方法无法得到的。

(3) 超音速火焰喷涂与超音速等离子喷涂是热喷涂技术向高能高速喷涂方向发展的标志, 为提供高质量涂层提供了可靠的新技术。与其它热喷涂方法相辅相成, 为热喷涂技术提供了更广阔的应用前景。

### 参考文献

- 1 韩忠. 超音速火焰喷枪的研制, 硕士研究生论文. 沈阳工业大学, 1994
- 2 朱胜等. 扩展弧超音速等离子焰流的形成机理及其陶瓷涂层的特点, 第七届叙全国焊接学术会议论文集. 第 1 册. 青岛. 1993

\* \* \* \* \*

已达到法国标准或实物的总体水平, 并经功能考核, 做疲劳试验, 按法国宇航公司的寿命曲线进行寿命计算, 寿命达到国产化任务书规定的“七五”考核指标, 并有充分的潜力。直九国产化机经地面试车及空中飞行 200 多小时, 工作正常未发现材质问题。因此, 已装机的新材料具有安全性和可靠性, 可以满足直九国产化直升机的使用要求。

由于新材料研制起点高、标准先进, 相当一部分材料达到或接近国际同类产品的先进水平, 初步形成我国直升机新的材料体系, 并在航材研制和管理等方面摸索出一套较为可行的办法。这对直九后继机及至我国直升机事业进一步发展将是有益的。

鉴于部分材料虽达标, 但性能裕量少, 研制材料生产炉批少, 少数材料个别指标偏离法标, 这需主机厂严格入厂检验, 确保装机材料质量。

(廖美东)

\* \* \* \* \*