

## 离心雾化等离子喷涂粒子的形成及其分布研究

杜晓坤, 朱有利, 李占明, 叶雄林

(装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072)

**摘 要:**介绍了离心雾化等离子喷涂技术的工作原理和喷涂粒子的雾化机理,分析了雾化粒子的形成过程。通过试验收集喷涂粒子,使用扫描电镜观察雾化粒子的表面形貌,统计分析了在不同转速的情况下粒子的粒度及其分布,并与理论计算值进行了比较。研究表明,离心雾化等离子喷涂中粒子球形度较好,随着电极转速的提高,粒子的粒度减小,和电弧喷涂的粒子相比,离心雾化等离子喷涂的粒子粒度较大,且分布较均匀。分析了粒子粒度及其分布的影响因素,结果表明粒子粒度与消耗电极的转速、半径、熔融液滴的密度成反比,与熔融液滴的表面张力成正比。

**关键词:**离心雾化;粒子粒度;内孔;热喷涂

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2006)04-0032-04

### Study on the Particle's Formation and Distribution of the Centrifugal Atomization Plasma Spray

DU Xiao-kun, ZHU You-li, LI Zhan-ming, YE Xiong-lin

(National Key Laboratory for Remanufacturing, Beijing 100072, China)

**Abstract:** The equipment and atomizing principle of the Centrifugal Atomization Plasma Spray process (CAPS) were introduced, and the formation of particles was analysed. Through measuring the shape and size distribution of particles collected from CAPS at different rotate speed, the surface profile and microstructure of the particles were analysed using SEM. The experimental results showed that the particles produced by the CAPS process possess good sphericity. The particles size decreased with increase of rotating speed. The particles size produced by CAPS was larger than that of the arc spray. The influencing factors of particles size and distribution were also investigated. The results indicated that the particle size was inversely proportional to the electrode diameter, rotating speed and the droplet density, and was proportional to the surface tension.

**Key words:** centrifugal atomization; particle size; bore; thermal spray

## 0 引 言

机械设备的零部件往往因为磨损和腐蚀而报废,采用热喷涂技术在零部件表面沉积防腐和耐磨涂层是解决零部件腐蚀和磨损的十分有效的手段之一。其中电弧喷涂不锈钢涂层已经成功地应用于修复各类磨损件,但是对于因磨损或腐蚀而失效的内孔零部件来说,现有的各种热喷涂技术由于受喷涂空间的限制而不能在直径较小的内孔表面喷涂有效的涂层。解决这一问题的唯一途径是发展可靠的内孔热喷涂技术。

国外在 90 年代初开始研究内孔热喷涂技术,其主要应用领域之一就是车辆发动机气缸套内壁喷涂耐磨涂层。瑞士 Sulzer Metco 公司研制开发

收稿日期: 2006-04-20

作者简介: 杜晓坤(1978-),男(汉),河南三门峡人,硕士。

了旋转等离子内孔热喷涂技术,利用该技术可以在铝合金气缸内壁上喷涂金属、陶瓷和复合材料涂层<sup>[1]</sup>; Alfred等人研制开发了单丝内孔电弧喷涂技术,利用该技术可以在发动机铝合金缸体内壁直接喷涂金属涂层,以增强汽缸套内壁的耐磨性<sup>[2]</sup>;德国多特蒙德大学材料技术研究所开展了内孔电子束旋转热喷涂技术的研究。以上研究充分表明了开展该项技术研究的重要性和可行性,但是现有的这几种内孔喷涂设备价格昂贵,工艺复杂,而且采用气流雾化技术的工艺需要一定的喷涂距离以保证粒子得到充分的加速,不能满足直径较小的内孔表面的喷涂。基于以上考虑,研制开发了离心雾化等离子喷涂技术。该技术利用离心雾化的原理,将熔融的喷涂粒子雾化并喷射到内孔表面形成涂层,喷涂粒子在雾化的初始时刻即达到了最大速度,能够满足

最小孔径为 70 mm 的内孔表面的喷涂。通过初步的研究发现,在喷涂过程中,雾化粒子的尺寸、速度和温度都是涂层质量的决定因素,所以,研究雾化粒子的受力情况、熔滴的形成过程和熔滴雾化成粒子的过程,对正确理解雾化机理和优化喷涂工艺参数都是十分重要的。文中针对离心雾化等离子喷涂技术的雾化原理和粒子的形成及分布进行了初步的探讨。

## 1 设备的工作原理和雾化过程分析

### 1.1 工作原理

离心雾化等离子喷涂技术是在对旋转电极刷技术和现有的内孔热喷涂技术进行深入研究的基础上研制开发的一种新型的内孔热喷涂技术,工作原理如图 1 所示。

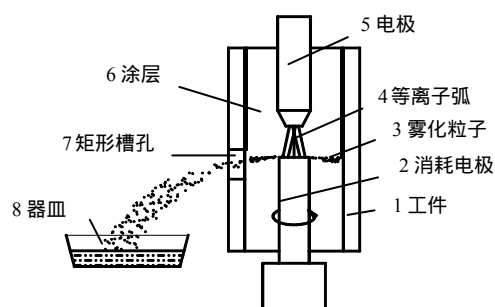


图1 离心雾化等离子喷涂及粒子收集装置示意图

Fig.1 Scheme of Centrifugal Atomization Plasma Spray process and equipment of the particles collection system

1. accessory 2. consumable electrode 3. Atomizing particle 4. plasma arc 5. non-consumable electrode 6. coating 7. rectangular hole 8. container

在离心雾化等离子喷涂中,将喷涂材料制成圆柱状作为消耗电极使用,将其接于电源正极,非消耗电极接负极。由高速电机带动的消耗电极高速旋转的同时,利用它和非消耗电极之间产生的等离子弧将消耗电极的端部熔化,熔化的液体在离心力作用下,被高速甩出并发生雾化,雾化粒子高速喷射到工件表面,与工件表面碰撞后迅速凝固、扁平化并沉积在工件上,扁平化粒子的不断沉积形成涂层。在喷涂过程中,随着消耗电极的熔化和消耗,非消耗电极不断移动,以使其和消耗电极端部保持一定的距离,保证等离子弧的稳定。与此同时,通过进给机构使被喷涂工件往复移动,雾化粒子便可

连续沉积到工件内壁形成完整的涂层<sup>[3]</sup>。

### 1.2 粒子雾化过程的理论分析

高速旋转的消耗电极在等离子弧热源作用下其端部熔化成液膜,液膜在离心力的作用下向电极端面外缘移动,而液膜的表面张力又阻碍液膜飞离消耗电极端部外缘,从而在消耗电极端面外缘形成一个环状液膜<sup>[4]</sup>。随着熔化过程的不断进行,汇入到液膜环上的熔融金属液体不断增加,形成“蝌蚪状”液滴,液滴的形成过程和受力分析如图 2 所示。随着液滴自身质量的增加,所受离心力也逐渐加大。当液滴所受离心力增大到与表面张力相等时,液滴处于临界平衡状态,具备了雾化形成球形液滴的条件,并脱离消耗电极,如图 3 (c)所示。粒子在脱离消耗电极边缘的时刻具有最高速度,这一速度与消耗电极边缘的线速度相等。

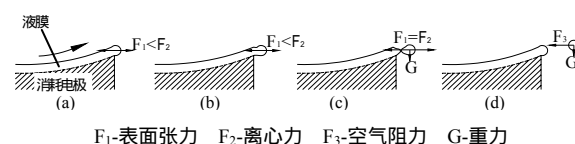


图2 离心雾化等离子喷涂中粒子受力示意图

Fig.2 Scheme of forced particles in the centrifugal atomization plasma spray process

F<sub>1</sub>-surface tension F<sub>2</sub>-centrifugal force F<sub>3</sub>-air resistance G-gravity

熔融液滴脱离消耗电极端部以后,如果液滴超过一定的临界尺寸,则会在空气阻力和重力等因素的作用下产生二次雾化,进一步雾化为更小的粒子。

雾化粒子的粒度可根据雾化粒子脱离消耗电极时需要克服的表面张力与离心力之间的平衡条件计算。假定液滴的形状为球形,则在甩出时的表面张力 $F_1$ 和临界离心力 $F_2$ 分别为<sup>[5]</sup>:

$$F_1 = \sigma \pi d \quad (1)$$

$$F_2 = m \omega^2 D / 2 \quad (2)$$

式中:角速度  $\omega = 2\pi n / 60$ , 质量  $m = \rho \pi d^3 / 6$ 。

在分离的瞬间,界面张力和离心力相等,即  $F_1 = F_2$ , 由此得出液滴理论直径 $d$ 为:

$$d = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{12\sigma}{\rho D}} \quad (3)$$

其中:粒子粒度(粒子直径) $d$ /cm;消耗电极

的角速度  $\omega$ /(rad/s); 消耗电极的密度,  $\rho$ /(g/cm<sup>3</sup>); 消耗电极的直径,  $D$ /cm; 液滴的表面张力,  $\sigma$ /(10<sup>-5</sup>×N/cm)。

由式(3)可以看出, 影响粒子粒度的因素有消耗电极的转速、直径、喷涂材料密度和液滴的表面张力等。

## 2 试验方法

### 2.1 喷涂设备和材料

喷涂设备为装甲兵工程学院研制开发的离心雾化等离子喷涂机。喷涂材料选用直径 30 mm, 长度 200 mm 的 3Cr13 棒材, 其成分组成如表 1 所示。

表 1 喷涂材料的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of spraying material						
材料	Ni	Cr	C	Fe	Si	Mn
3Cr13	0.1	12~14	0.25~0.34	余量	≤0.6	≤0.6

### 2.2 喷涂工艺参数

试验采用的工艺参数如表 2 所示:

### 2.3 粒子的收集及分析方法

试验过程中, 在内径 150 mm 的空心圆柱形工件上切割一个矩形槽孔, 以便引出高速飞行的雾化粒子束流, 在离开工件适当位置放置装有自来水的

器皿, 使飞出的雾化粒子自由落入水中, 如图 1 所示。待水中的粒子完全沉淀后, 清洗并烘干以备观察分析。

采用 Quanta 200 型扫描电子显微镜观察了粒子的表面形貌, 并对粒子大小及分布进行统计分析。

表 2 喷涂工艺参数

Table 2 Processing parameters				
转速/ (r/min)	电流/ A	电压/ V	等离子 气体	气体压 力/MPa
7200				
9000	120	100	氮气	0.6
11400				

## 3 试验结果及分析

图 3(a)是在扫描电镜下观察到的 3Cr13 粒子形貌, (b)为单个粒子的形貌, 可见, 离心雾化等离子喷涂 3Cr13 粒子的球形度较好。通过对收集粒子的粒度进行统计分析, 得到不同转速的情况下粒子粒度的分布情况, 见表 3。在转速为 7 200 r/min 时, 离心雾化等离子喷涂 3Cr13 粒子的粒度主要分布在 250~350  $\mu$ m 的范围内; 转速为 9 000 r/min 时, 粒子粒度主要分布在 200~300  $\mu$ m 的范围内; 转速为 11 400 r/min 时, 粒子粒度主要分布在 150~250  $\mu$ m 的范围内。从粒子粒度分布的情况看, 提高转速, 粒子的粒度有减小的趋势。

表 3 不同转速对应的粒子粒度分布百分比

Table 3 The size distribution percent at different rotating speed							
转速/ (r/min)	粒子粒度分布/ $\mu$ m						
	0~100	100~150	150~200	200~250	250~300	300~350	350
7200	2%	9.3%	6.1%	12%	32%	31.3%	7.3%
9000	8.9%	4.5%	5.9%	24.6%	32.6%	13.4%	10.1%
11400	7.8%	8.8%	18.6%	37.2%	13.4%	6.3%	7.9%

粒子粒度的大小和分布对于涂层的孔隙率和氧化物含量都有一定的影响, 是影响涂层性能的主要因素。图 4 是离心雾化等离子喷涂和电弧喷涂的 3Cr13 粒子在相同放大倍数下的形貌图, 通过比较可以发现, 两种喷涂工艺条件下, 粒子的球形度都比较好, 但是离心雾化等离子喷涂工艺的粒子直径比电弧喷涂粒子直径要大得多, 且分布也较均匀, 在一定程度上降低了涂层的孔隙率和氧化物含量<sup>[3]</sup>。

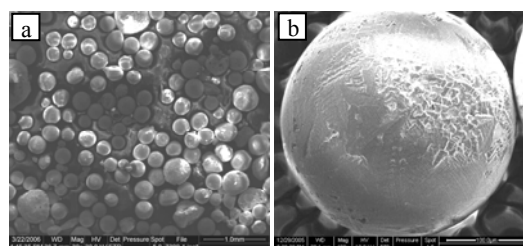


图 3 3Cr13 粒子形貌

Fig.3 Morphology of 3Cr13 particles

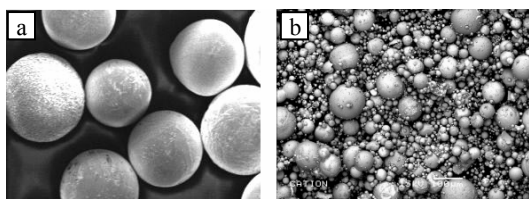


图4 离心雾化等离子喷涂和电弧喷涂 3Cr13 粒子形貌的比较  $\times 80$

(a)离心雾化等离子喷涂(转速: 7200 r/min) (b)电弧喷涂

Fig.4 The particles comparison between CAPS and electric arc spraying  $\times 80$  (a)CAPS (b) electric arc spraying

取 3Cr13 的密度  $\rho = 7.01 \text{ g/cm}^3$ , 表面张力  $\sigma = 0.01872 \text{ N/cm}^{[6]}$ , 由式(3)可以计算出在一次雾化的情况下 3Cr13 的粒子粒度:

$$d = \frac{5.41 \times 10^2}{n\sqrt{D}} \quad (4)$$

对于相同材料的消耗电极, 在不同直径和转速的情况下, 根据(4)式计算, 可得到产生粒子的粒度分布曲线, 如图 5 所示。对比图中的曲线, 可以发现, 增大消耗电极的直径, 提高电耗电机的转速, 都会减小粒子的粒度。在消耗电极转速较低时, 转速对粒子直径的影响较大, 随着转速的不断增大, 转速对粒子直径的影响会越来越小。特别是当转速超过 12 000 r/min 时, 转速的进一步提高对粒子直径的减小作用会很小。这一点可以由(5)式关于粒子直径随转速的变化率清楚地观察到。

$$\frac{\partial d}{\partial n} = -\frac{1}{n^2} \frac{5.41 \times 10^2}{\sqrt{D}} \quad (5)$$

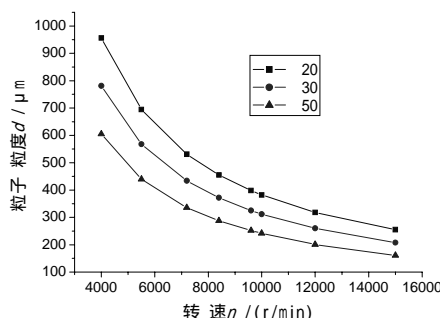


图5 不同直径消耗电极产生的粒子粒度与转速的关系  
Fig.5 The relation of particle size and rotating speed with different diameter of consumable electrode

在直径 30 mm、转速 7 200 r/min (753.6 rad/s) 的情况下根据式(4)可以计算得到的粒子粒度值为

434  $\mu\text{m}$ , 与试验收集的粒子粒度相比, 试验值明显低于理论计算值。这表明, 粒子在飞行的过程中, 会继续雾化、破裂为更小的粒子, 发生二次雾化。

#### 4 结 论

(1) 通过试验观察了离心雾化等离子喷涂工艺雾化粒子的形貌与分布, 在离心雾化等离子喷涂中粒子球形度较好, 随着电极转速的提高, 粒子的粒度减小, 和电弧喷涂的粒子相比, 离心雾化等离子喷涂的粒子粒度较大, 粒度分布较均匀。

(2) 分析了粒子粒度与消耗电极直径、转速、喷涂材料表面张力、密度等参数之间的关系。粒子粒度与消耗电极的转速和半径成反比, 增加消耗电极的转速或增大棒材的直径可以使粒子尺寸减小。另外, 粒子粒度还与喷涂材料的物理性能有直接的关系, 粒子的粒度与熔融液滴的密度成反比, 与熔融液滴的表面张力成正比。

(3) 在消耗电极转速较低时, 转速的提高对粒子直径减小的影响较大, 随着转速的不断增大, 转速对粒子直径的影响会越来越小。

(4) 在离心雾化等离子喷涂工艺中, 熔融粒子将产生两次雾化。首先是熔融粒子在消耗电极粒子的端部受到离心力和表面张力等作用发生的初始雾化。其次是脱离消耗电极端部的粒子在飞行中受到空气阻力和重力的作用, 进一步破碎发生二次雾化。

#### 参考文献:

- [1] Barbezat G, Keller S, Wuest G. Internal Plasma Spray Process For Cylinder Bores In Automotive Industry [C]. Proceedings of the 15th International Thermal Spray Conference, Nice, France, 1998: 963-971.
- [2] Alfred R E Singer, Gordon I Davies, Allen D Roche, et al. Depositing Metal Onto a Surface [P]. US: 5245153, 1993- 09-14.
- [3] 李占明, 朱有利, 叶雄林, 等. 离心雾化等离子喷涂技术的开发与研究 [C]. 第八届国际热喷涂研讨会暨第九届全国热喷涂年会, 丽江, 2005, 71-75.
- [4] 国为民, 陈生大, 冯涤. 等离子旋转电极法制取镍基高温合金粉末工艺的研究 [J]. 航空工程与维修, 1999, 5: 44-46.
- [5] 张义文, 张莹, 陈生大, 等. PREP 制取高温合金

(下转第 39 页)

(上接第 35 页)

粉末的特点 [J]. 粉末冶金技术, 2001, 19(1):  
12-15.

[6] 胡汉起. 金属凝固 [M]. 北京. 冶金工业出版社,  
1985.

---

作者地址: 北京丰台杜家坎 21 号

电话: (010) 66717168; 13810592191

E-mail: duxiaokun2000@163.com