

DOI: 10.7652/xjtuxb201406016

内送粉超音速等离子喷涂颗粒飞行状态分析

谭超¹, 魏正英¹, 魏培¹, 刘伯林¹, 付丽倩¹, 韩志海²

(1. 西安交通大学机械制造系统国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 西安交通大学材料学院, 710049, 西安)

摘要: 针对超音速等离子喷涂过程中飞行颗粒与气流相互作用过程难以从实验获得的问题, 采用数值计算方法, 对以内送粉形式加入的原料颗粒的飞行状态进行跟踪分析, 并利用 SprayWatch-2i 仪对飞行颗粒进行在线监测。计算得到了粒子的动力学和热力学行为以及撞击基体前的速度和温度分布, 发现颗粒在喷涂距离为 80~100 mm 的速度和温度最大, 这与实验收集到的此范围内单个颗粒的形态相符, 可选择此范围为最佳喷涂距离。通过分析韦伯数以及小直径颗粒的速度分布得出, 在内送粉超音速等离子喷涂过程中, 颗粒在喷枪内部和近出口位置会发生破碎细化和雾化, 这与实验观测的结果一致。该计算及分析结果可为颗粒在射流中的传热传质研究提供参考, 为获得高质量涂层提供理论依据。

关键词: 等离子喷涂; 内送粉; 颗粒; 超音速

中图分类号: TG174.44; O359 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)06-0091-07

In-Flight Particle Behavior in Internal Powder Injection Supersonic Plasma Spray

TAN Chao¹, WEI Zhengying¹, WEI Pei¹, LIU Bolin¹, FU Liqian¹, HAN Zhihai²

(1. State Key Laboratory of Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Material Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To investigate the thermal and dynamic behaviors of in-flight particles in plasma flow the velocity and temperature before impinging plate, and the trajectories of particles injected by inner channel are analyzed for whole supersonic plasma flow, the actual in-flight particles are on-line monitored by SprayWatch-2i. Numerical test result indicates that both particle velocity and temperature achieve the maximum at the distance of 80~100 mm, which coincides with the status of observed individual particle in the experiments. So this range of 80~100 mm can be taken as the best spraying distance. According to the analysis for Weber number and velocity distribution of particles with small diameters, particles are melted and refined inside the gun or near the gun exit in internal powder injection supersonic plasma spray, which supports the experimental results on heat and mass transfer of particles.

Keywords: plasma spray; inner powder injection; particle; supersonic

等离子喷涂是一种制备高性能涂层的方法, 已经运用于金属和非金属涂层的制备过程, 在防腐蚀、隔热涂层方面有着自己独特的特点^[1], 涂层与基板

的结合有着更好的热物性、耐磨性、防腐性以及其他的特殊表面属性^[2]。与目前国内外流行的枪外送粉亚音速大气等离子喷涂技术(APS)相比, 国内最新

收稿日期: 2014-01-16。 作者简介: 谭超(1989—), 男, 硕士生; 魏正英(通信作者), 女, 教授。 基金项目: 国防“973 计划”资助项目(613112-K3); 西安交通大学金属材料强度国家重点实验室开放研究项目(20131310)。

网络出版时间: 2014-03-19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140319.1749.004.html>

开发的内送粉超音速等离子喷涂技术(SAPS)可制备出细密柱晶结构的热障涂层,使涂层的热震性能、隔热性能和高温氧化性能等方面均有所提高^[3]。研究发现,在超音速等离子喷涂过程中,原料颗粒通过内送粉方式送入高温高速气流中,会发生颗粒的破碎细化 and 雾化现象,从而容易获得更加细密的涂层微观组织结构,使涂层结合强度、致密性和孔隙率都有所改善^[4]。

在等离子喷涂过程中,粒子温度和速度是影响粒子碰撞、沉积形成涂层过程的主要因素,直接影响到涂层质量。虽然用实验的方法测量粒子的温度和速度可以得到直观的数据,但是实验的工作量大,测试成本高^[5],因此采用数值计算的方法来研究等离子体射流中的物理和化学过程,以及粉末颗粒在射流中的热力学和动力学行为将成为主要的研究手段。

粉末的速度特性取决于粉末的受力,粉末的受热取决于其与等离子体的热量交换,因而与周围等离子体的温度、受热时间等直接相关。对于颗粒运动的分析,Chyou 等将注入的粉末当作一种离散相,通过求解拉格朗日坐标系下的运动方程、热传导和质量传导速率方程得到其飞行状态^[6],但没有考虑飞行颗粒对气流的影响。Xiong 等分析了不同粒径的颗粒在飞行过程中的熔化和氧化行为^[7]。Zhao 等则分析了超音速等离子喷涂过程中颗粒的熔化细化行为^[8]。Kanta 等利用神经网络方法预测飞行粒子的速度和表面温度等^[9]。冯拉俊等运用龙格-库塔法分析了颗粒在气流中的速度和温度分布,以及粒子特性(如密度、比热容等)对颗粒运动的影响^[5]。杨庆功等则运用双流体模型对浓度较高的飞行粒子进行了两相流分析^[10]。与 Li 等^[11]类似,本文在前期胡福胜等对超音速喷枪内外部多物理场下的高温高速等离子体气流特性研究^[12]的基础上,采用拉格朗日法并基于牛顿第二定律,对进入及流出计算域的所有粒子进行轨迹跟踪,主要考虑粒子所受的拖曳力、热泳力、压力梯度力等,得到粒子的加热加速行为,并结合在线监测实验以及通过收集飞行中的颗粒完成验证分析。

1 颗粒计算模型

颗粒飞行状态的分析,通过求解拉格朗日参考系下的质量、动量、能量守恒控制方程实现颗粒-气体的两相流计算。为了简化计算,进行如下假设:

- (1)颗粒是球形的,不考虑其气化和蒸发;
- (2)在湍流工况下,认为在颗粒与涡流相互作用

期间,等离子体湍流脉动的平均强度保持不变。

1.1 粒子加速加热模型

粉末颗粒在运动过程中受到气流的拖拽力作用,这一作用可用如下方程表示^[13]

$$m_d \frac{d\mathbf{v}}{dt} = C_D \rho (\mathbf{U} - \mathbf{v}) |\mathbf{U} - \mathbf{v}| \frac{A_d}{2} + m_d \mathbf{g} \quad (1)$$

式中: m_d 为颗粒质量; $\mathbf{v} = u\mathbf{i} + v\mathbf{j} + w\mathbf{k}$ 是颗粒速度矢量; C_D 为气体阻力系数; ρ 、 $\mathbf{U}$ 分别表示颗粒周围气体的密度、气流速度矢量; A_d 为颗粒迎风面积; V_d 表示颗粒体积; $\mathbf{g}$ 为重力加速度矢量。对于本计算中所采用的球形颗粒, $A_d = \pi d^2/4$, $V_d = \pi d^3/6$ (其中 d 为颗粒直径)。

上述方程考虑了颗粒在飞行过程中受到的空气阻力与重力的作用。

阻力系数 C_D 由下式计算^[14]

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{6}{1 + Re^{1/2}} + 0.4 \quad (2)$$

式中: Re 为局部雷诺数,可表示为

$$Re = \frac{\rho |\mathbf{U} - \mathbf{v}| d}{\mu} \quad (3)$$

式中: μ 为颗粒周围气体动力黏度。

当等离子体射流中存在压力梯度时,球形颗粒所受压力梯度力为

$$F_P = -\frac{\pi}{6} d_p^3 \nabla P \quad (4)$$

式中: P 为压力。

颗粒在温度梯度 ∇T 的气流中受到的热泳力可表示为

$$F_T = -6\pi\mu\omega d_p C_s \frac{1}{1 + 3C_m Kn} \frac{K_g/K_p + C_t Kn}{1 + 2K_g/K_p + 2C_t Kn} \frac{\nabla T}{T} \quad (5)$$

式中: Kn 是克努森数; K_g 和 K_p 分别是气体和颗粒的热导率;常数 C_s 取值为1.17^[15]; C_t 和 C_m 与协调系数及切向动量协调系数有关,热泳力计算中常用值为 $C_t = 2.18$ 和 $C_m = 1.14$ 。

等离子体射流与粒子间的热量交换包括热传导、对流和辐射3种方式,其中热传导和辐射所占比例较小^[16],粒子的加热问题可用对流传热模型处理。根据传热学定律,粒子的加热速率可表示为

$$\rho_p c_p d_p \frac{dT_p}{dt} = 6h_c (T_g - T_p) \quad (6)$$

式中: T_p 和 T_g 分别是颗粒温度和气流温度; ρ_p 和 c_p 分别是颗粒密度和比热容; h_c 为对流换热系数,可由下式计算

$$h_c = \frac{K_g Nu}{d} \tag{7}$$

式中: $Nu=2+0.6Pr^{1/3}Re^{1/2}$ 是努塞尔数,其中 Pr 是普朗特数。

1.2 颗粒破碎机理

超音速等离子体射流高的能量密度和速度会引起颗粒在飞行过程中发生破碎,这种现象可以类比液滴的破碎过程。液滴的破碎主要与韦伯数 We 和 Ohnesorge 数 Oh 有关。其中 We 表示气流阻力和表面张力之比,由下式表示

$$We = \frac{\rho d (U - v)^2}{\sigma} \tag{8}$$

式中: ρ 为气流的密度; σ 为液滴的表面张力; d 为液滴直径; U 和 v 分别为气流和液滴的运动速度。

Oh 表示黏性力和表面张力之比,由下式表示

$$Oh = \frac{\mu_p}{(\rho_L \sigma d)^{1/2}} \tag{9}$$

式中: μ_p 为液滴的动力黏度; ρ_L 为液滴密度。

在低 Oh (通常 $Oh<0.1$) 的情况下,随着 We 的不同,破碎主要存在振动破碎、袋状破碎、多态破碎、剪切破碎和爆炸破碎这 5 种破碎形式^[17,8]。

通过研究发现,在等离子喷涂过程中,颗粒熔滴破碎的条件为:熔滴和等离子体射流的密度满足 $\rho_p/\rho_g>500$,雷诺数 $Re>500$,同时大的 We 值和小 Oh 值更容易引起熔滴的破碎。

2 颗粒计算模型条件的设置

本文计算中,超音速等离子喷涂采用的颗粒为氧化锆(ZrO_2)粉末,其原始粒径为 $45\ \mu m$ 。

对于粉末颗粒飞行过程中与等离子气流的传热和相互作用分析,是在前期对超音速等离子喷涂多物理场研究的基础上进行的,利用全场计算结果作为边界条件,即提取喷枪内截面的流场特性作为颗粒计算模型的入口边界。超音速等离子喷涂采用的工艺条件见表 1。

表 1 超音速等离子喷涂主要工艺参数

工艺参数	数值
工作气体(氩氢气体)	H_2 体积分数为 20%
主气流量/ $L \cdot min^{-1}$	70
主气压力/MPa	0.8
送粉气流量/ $L \cdot min^{-1}$	13
电流/A	420
功率/kW	65
送粉量/ $g \cdot min^{-1}$	45
送粉速度/ $m \cdot s^{-1}$	20

图 1 所示颗粒计算模型包含阳极固体、送粉管道和外部大气环境部分,整个模型采用结构化网格,共包括 384 867 个计算节点、332 024 个计算单元。前期根据内送粉超音速等离子喷枪的实际尺寸建立了全三维计算模型,考虑气体的电离与复合反应,以及等离子射流边缘的非局域热力平衡效应,得到了喷枪内部的多物理场分布,图 2 为截取的图 1 所示计算模型主气入口位置处的速度场和温度场分布。

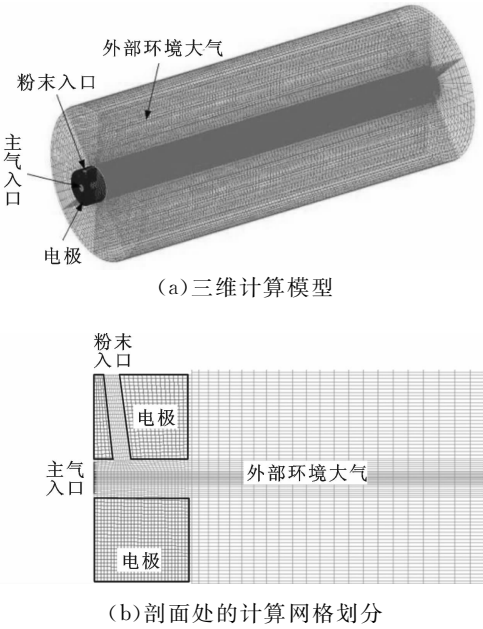


图 1 内送粉等离子喷涂颗粒的计算几何模型

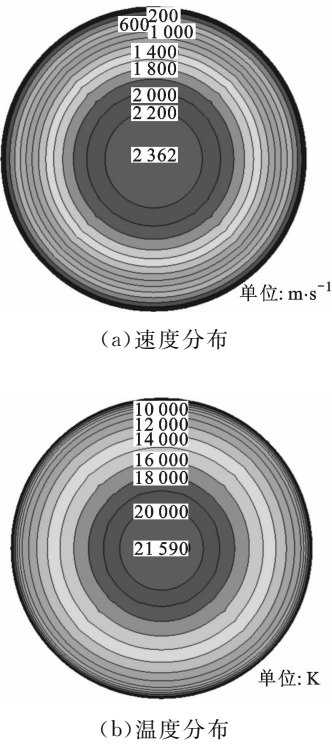


图 2 入口截面的速度和温度分布

从图 2 可以看出,截面处的最大速度和温度都出现在中心位置,越贴近壁面,阻力越大,气流速度越小;越贴近壁面,电弧对气体的加热作用越弱,且壁面的冷却作用越强,气体温度越低。表 2 为颗粒计算模型的条件设置。

表 2 计算模型的条件设置

参数	数值
喷嘴出口直径/mm	5.6
送粉角度/(°)	76
送粉口距喷嘴出口距离/mm	14.5
送粉管直径/mm	2
大气压/MPa	0.1
电极热导率/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	398

气体密度计算采用理想气体方程,黏度计算采用 Sutherland 定律,比热容计算采用 JANNAF 方法。

3 计算结果分析

根据以上条件设置,计算得出粉末颗粒在超音速等离子体射流中的加速加热过程,颗粒的速度和温度分布如图 3 所示。

从图 3 看出,高速气流进入到大气环境后,大量空气卷吸入射流中,射流变形较大。原料颗粒的加入对送粉口附近气流的稳定性产生了影响。由于采用内送粉形式,颗粒较好的被送入气流中心,气流对其的拖拽效果更加强烈,所以颗粒主要沿轴线分布。在不同喷涂距离 X (取边长为 5 mm 的立方体区域作统计)测其平均速度和温度如图 4 所示。

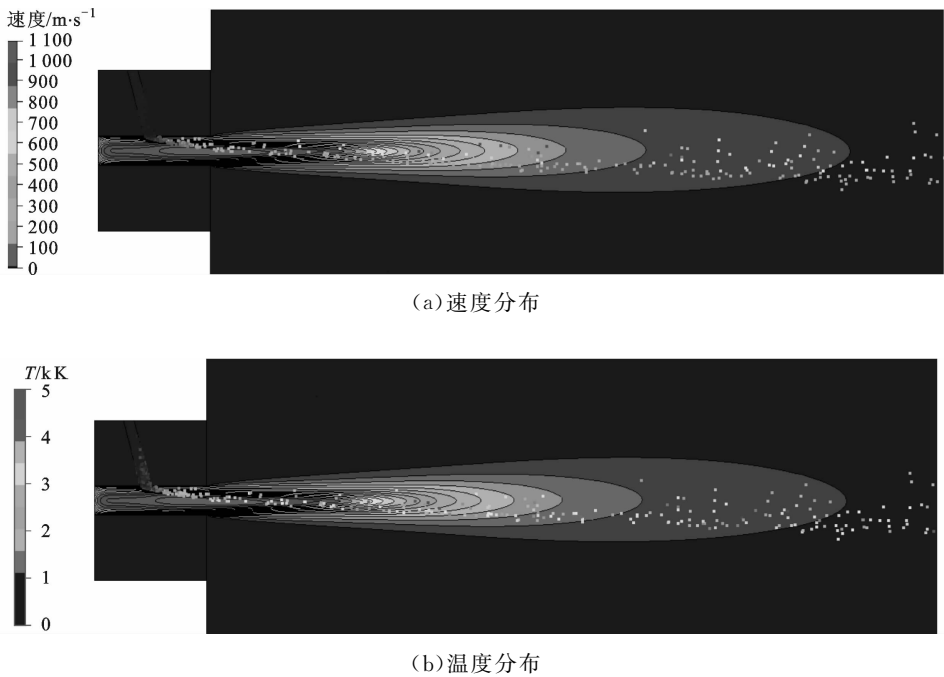


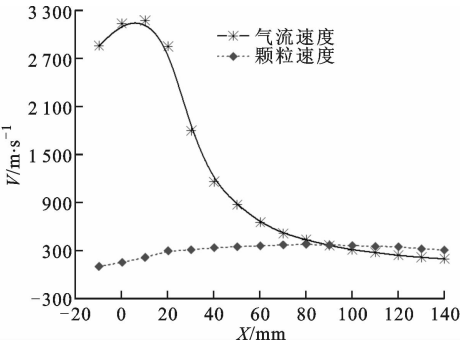
图 3 粉末颗粒在等离子体射流中的速度和温度分布

从图 4 可以看出,颗粒的飞行过程可以分成 3 个阶段:颗粒在距喷嘴出口 X 为 80 mm 之前,气流的速度和温度高于颗粒,颗粒被加速且处于熔化过程;在 X 为 80~100 mm 时,气流的速度和温度与颗粒的速度和温度相近,颗粒等速飞行且处于熔融状态;在 X 为 100 mm 以后,气流的速度和温度低于颗粒,这时颗粒被减速和被冷却。通过以上分析,可以得出被喷涂的工件应放在距喷嘴出口 80~100 mm 左右,以使颗粒在撞击基板时速度和温度最高。

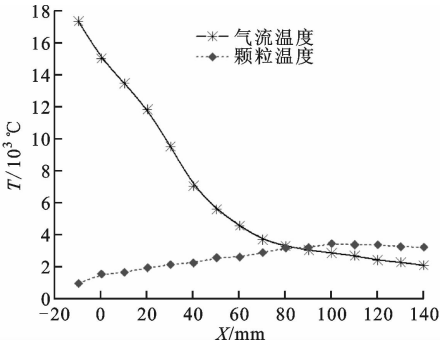
图 5 为计算得到的超音速等离子喷涂和普通等

离子喷涂颗粒在各个喷涂距离处的拖拽力。由图 5 可以看出,超音速等离子喷涂颗粒所受气流的拖拽力要远远大于普通等离子喷涂,所以颗粒的飞行速度要高于普通等离子喷涂,从而熔融颗粒撞击基体时的动量大,能量转换效率高,熔滴铺展充分,涂层薄片有效结合增加,涂层结合强度、致密性和孔隙率都有所改善。此外,当喷涂距离 $X < 80$ mm 时,拖拽力大于 0,颗粒加速飞行; X 为 80~100 mm 时,拖拽力近似为 0; $X > 100$ mm 时,拖拽力小于 0,气流的拖拽力为阻力,这与图 4a 的分析结果相同。

图 6 为计算得到的超音速等离子喷涂和普通等



(a)速度对比



(b)温度对比

图 4 气流特性与颗粒特性对比

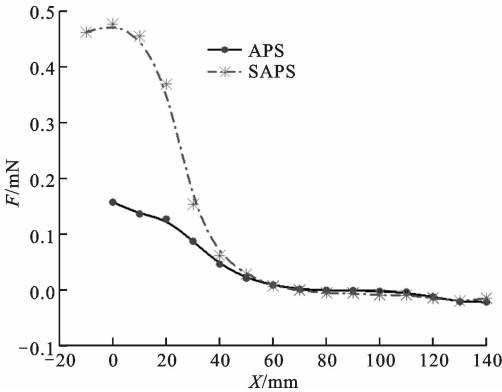


图 5 2 种喷涂工艺下颗粒所受的拖拽力

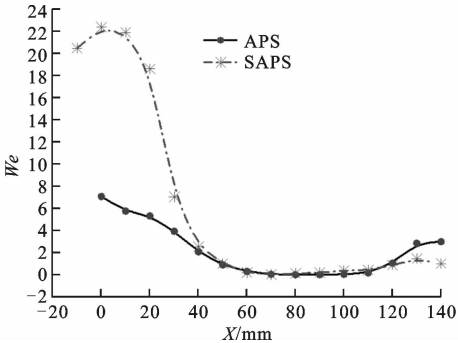


图 6 2 种喷涂工艺下韦伯数的变化

在喷枪出口位置处达到最大,为 22.5,远远大于普通等离子喷涂喷枪出口位置处的 We 值,说明颗粒破碎细化主要发生在喷枪内部和近喷枪出口位置处,且内送粉超音速等离子喷涂颗粒更容易发生细化。在 80~100 mm 处, We 值近似等于 0,这是由于在这一区域,气流和颗粒的相对速度近似为 0。此外,喷涂过程中, Oh 值都小于 0.1,可以得出颗粒主要为振动破碎和袋状破碎^[8]。破碎后的细小熔滴表面能大,碰撞到基体上飞溅小,冷速快,晶粒来不及长大,容易获得更加细密的涂层组织,涂层的韧性等综合指标均有所改善。

4 实验分析

对于颗粒的飞行状态,利用 SprayWatch-2i 仪进行测量,如图 7 所示。该装置可安装于等离子喷枪侧面,利用超高速 CCD 探头测定快门开闭间隙内高速飞行粒子的位移轨迹长度,除以设定好的曝光时间测量速度,通过对 1 000 个粒子飞行轨迹的统计平均,计算出平均速度。粒子温度的测量是通过双色高温测量法原理来实现的, SprayWatch-2i 系统采用 2 个可透过波长为 850 nm 和 700 nm 的光学双色滤光片来接收不同温度颗粒表面辐射,集成到相机上,再经过双色高温法曲线测算出粒子的表面温度。

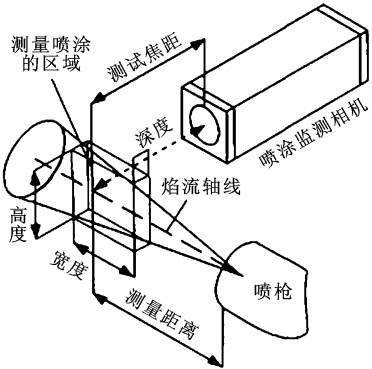


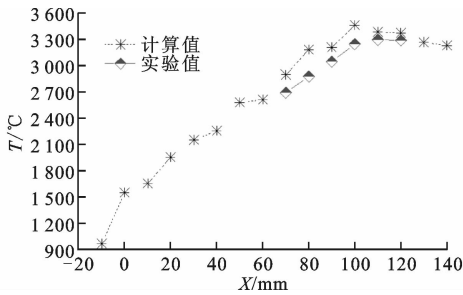
图 7 SprayWatch-2i 仪测量原理

用该装置测量得出的颗粒温度和速度与计算值的对比曲线如图 8 所示。

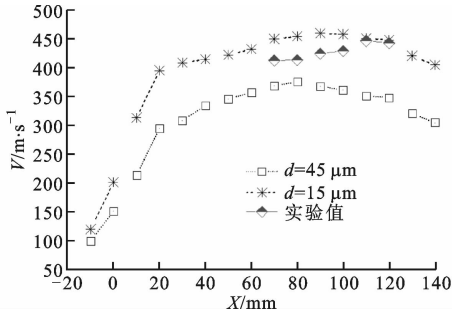
从图 8 可以看出,颗粒计算温度略高于实验值,二者具有相同的变化趋势,最大相对误差为 10.7%,产生误差的原因是颗粒计算模型没有考虑颗粒在飞行过程中的气化与蒸发效应,而小直径颗粒的加速过程更符合测量得到的速度值,其计算值与实验值的相对误差在 10% 以内。这是由于熔融颗粒在与高速气流的相互作用中会产生破裂细化,

离子喷涂颗粒的 We 变化。

从图 6 可以看出,超音速等离子喷涂的 We 值



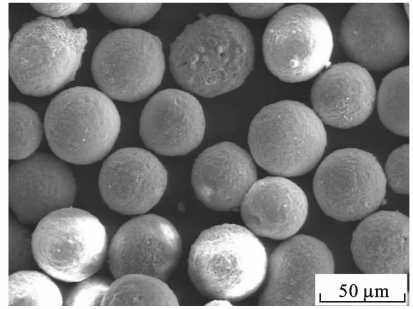
(a)温度对比



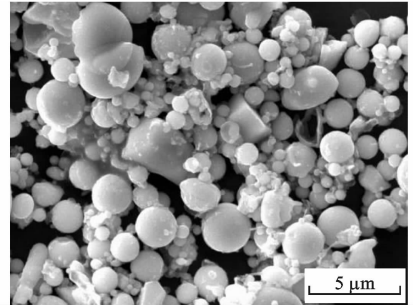
(b)速度对比

图 8 颗粒速度和温度的实验值与计算值对比

起的。这些分析验证了前面图 4 和图 5 的计算结果。



(a)原始粉末



(b)射流中 90 mm 截面处收集的粒子

图 9 粒子形貌

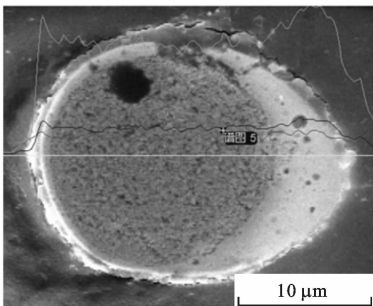
变成直径更小的粒子,这些小颗粒在气流中受到的加速效果更强。颗粒细化过程可通过原始颗粒尺寸与射流中尺寸的对比如图 9 为原始颗粒的形貌和射流中 90 mm 截面处收集的粒子形貌,可以看出射流中小直径颗粒占的比例较多。这一分析结果与图 6 中对韦伯数的分析相同。

为了直观地得到颗粒在超音速等离子体射流中的飞行状态,在水中收集 3 个喷涂距离处单个氧化锆颗粒如图 10 所示。从图 10 可以看出:不同距离处的飞行颗粒呈现不同形态;70 mm 处的颗粒呈椭圆形,这是由于颗粒受到气流拖拽力而处于加速阶段,而且颗粒表层已熔、中心为熔,正处于熔化状态;100 mm 处的颗粒呈球形,说明颗粒受到的拖拽力最小,且已完全熔化,颗粒温度最高;120 mm 处的颗粒之间发生碰撞相连,这是由于颗粒受到气流阻力引

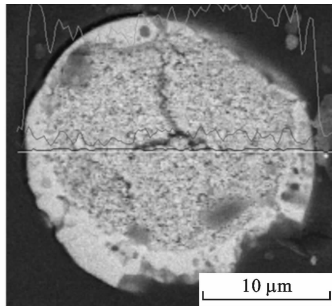
5 结 论

通过对颗粒在超音速等离子体射流中的加热加速过程的计算分析可以得出,颗粒在距喷嘴出口约 80~100 mm 处其速度和温度与气流的相近,且颗粒的飞行速度和温度可以同时达到最大,故在实际应用中应将基材放在此喷涂距离范围内,这一计算结果与实验分析结果相符。

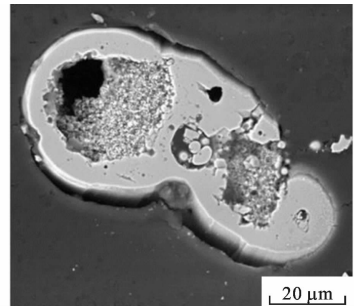
通过对韦伯数的分析可以得出,颗粒在喷枪内部和近喷枪出口处更容易发生破碎细化,所以小直径颗粒的速度计算值与实验值更接近,相对误差小于 10%。从飞行中颗粒形貌与原始颗粒形貌的对比如图 9 可以看出,在实际的喷涂过程中的确产生了颗粒的细化和雾化现象,使得颗粒更好地得到加速和加



(a)70 mm 处颗粒



(b)100 mm 处颗粒



(c)120 mm 处颗粒

图 10 不同喷涂距离处收集到的颗粒形态

热,从而产生性能更好的涂层结构。

参考文献:

- [1] 尹志坚,王树保,傅卫,等. 热喷涂技术的演化与展望[J]. 无机材料学报, 2011, 26(3): 225-232.
YIN Zhijian, WANG Shubao, FU Wei. Evolution and prospect of thermal spraying technique [J]. Journal of Inorganic Materials, 2011, 26(3): 225-232.
- [2] PFENDER E. Thermal plasma technology: where do we stand and where are we going [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1999, 19(1): 1-31.
- [3] 韩志海,王海军,白宇,等. 超音速等离子喷涂制备细密柱晶结构热障涂层研究进展[J]. 热喷涂技术, 2011, 3(2): 1-14.
HAN Zhihai, WANG Haijun, BAI Yu. Development of thermal barrier coating with fine columnar crystal structure fabricated by supersonic atmospheric plasma sprayed [J]. Thermal Spray Technology, 2011, 3(2): 1-14.
- [4] BAI Y, HAN Z H, LI H Q, et al. Structure-property differences between supersonic and conventional atmospheric plasma sprayed zirconia thermal barrier coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205(13/14): 3833-3839.
- [5] 冯拉俊,曹凯博,雷阿利. 等离子喷涂陶瓷粒子加热加速行为的数值模拟[J]. 热加工工艺, 2007, 35(11): 46-51.
FENG Lajun, CAO Kaibo, LEI Ali. Numerical simulation on calefaction and acceleration process of ceramic powders in plasma spray [J]. Hot Working Technology, 2007, 35(11): 46-51.
- [6] CHYOU Y P, PFENDER E. Behavior of particulates in thermal plasma flows [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1989, 9(1): 45-71.
- [7] XIONG H B, ZHENG L L, LI L, et al. Melting and oxidation behavior of in-flight particles in plasma spray process [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(25/26): 5121-5133.
- [8] ZHAO Weitao, WU Jiuhui, BAI Yu, et al. Melting refining mechanisms in supersonic atmospheric plasma spraying [J]. Plasma Chemistry Plasma Process, 2013, 32(6): 1227-1242.
- [9] KANTA A F, PLANCHE M P, MONTAVON G, et al. In-flight and upon impact particle characteristics modelling in plasma spray process [J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204(9/10): 1542-1548.
- [10] 杨庆功,李萌盛. 双流体模型模拟喷涂飞行区内的速

度分布[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2006, 29(9): 1120-1123.

YANG Qinggong, LI Mengsheng. Simulation of the velocity distribution in the spray cone based on the two-phase flow model [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2006, 29(9): 1120-1123.

- [11] LI H P, CHEN X. Three-dimensional simulation of a plasma jet with transverse particle and carrier gas injection [J]. Thin Solid Films, 2001, 390(1/2): 175-180.
- [12] 胡福胜,魏正英,刘伯林,等. 高效能超音速喷枪内等离子喷涂三维数值分析[J]. 材料科学与工艺, 2013, 21(2): 137-142.
HU Fusheng, WEI Zhengying, LIU Bolin, et al. Numerical analysis of spraying process with high efficiency atmospheric supersonic plasma gun [J]. Materials Science & Technology, 2013, 21(2): 137-142.
- [13] ZHANG W. Integration of process diagnostics and three dimensional simulations in thermal spraying [M]. New York, USA: Stony Brook University, 2008.
- [14] RANMACHANDRAN K, NISHIYAMA H. Three-dimensional effects of carrier gas and particle injections on the thermo-fluid fields of plasma jets [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2002, 35(6): 307-317.
- [15] TALBOT L. Thermophoresis: a review [C] // Proc. Int'l Symp. on Rarefied Gas Dynamics. New York, USA: AIAA Book, 1981: 467-488.
- [16] 王汉功,查柏林. 超音速喷涂技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 18-63, 179-195.
- [17] JOSEPH D D, BELANGER J, BEAVERS G S. Breakup of a liquid drop suddenly exposed to a high-speed air-stream [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1999, 25(6/7): 1263-1303.

[本刊相关文献链接]

- 胡福胜,魏正英,谭超,等. 普通大气等离子喷涂过程的数值分析. 2013, 47(9): 92-99. [doi:10.7652/xjtuxb201309016]
- 唐文勇,陈清华,陈子云,等. 送粉气流对冷喷涂流场及粒子速度影响的数值模拟. 2012, 46(7): 82-86. [doi:10.7652/xjtuxb201207015]
- 赵伟涛,吴九汇,白宇,等. 超声速等离子喷涂氧化锆粒子时的加热熔化特性分析. 2012, 46(1): 97-102. [doi:10.7652/xjtuxb201201018]
- 高敏,李长久,李成新,等. 喷涂条件与热处理对 $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CoO}_{3-\delta}$ 涂层含氧量的影响. 2010, 44(3): 115-119. [doi:10.7652/xjtuxb201003024]

(编辑 刘杨)