

# 等离子体喷涂中颗粒加热过程数值模拟

何翔<sup>1,2,3,4</sup>, 刘敏<sup>2,3,4</sup>, 文魁<sup>2,3,4</sup>, 杨焜<sup>2,3,4</sup>, 闫星辰<sup>2,3,4</sup>, 王凯<sup>2,3,4</sup>

(1.中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083; 2.广东省新材料研究所, 广州 510650;  
3.现代材料表面工程技术国家工程实验室, 广州 510650;  
4.广东省现代表面工程技术重点实验室, 广州 510650)

**摘要:** **目的** 研究颗粒在等离子体喷涂中的加热过程及影响因素。**方法** 使用 Fluent 软件对处于等离子射流中颗粒的加热过程与状态进行求解计算, 根据计算结果分析了喷距、颗粒直径与颗粒材料对颗粒加热状况与内部温度梯度的影响。**结果** 对于不同的喷距, 在颗粒升温过程中, 颗粒表面温度高于中心温度; 在颗粒降温过程中, 颗粒表面温度低于中心温度, 并且降温过程中的表面-中心温差远小于升温过程中的表面-中心温差。在颗粒升温过程中, 其内部存在不同的加热阶段。对于不同的直径, 虽然大颗粒比小颗粒能进入射流中心更深的位置, 但小颗粒的加热效果更好。表面-中心温差随着颗粒直径的增大而增大, 三种不同直径的颗粒的表面-中心温差变化曲线都表现出相似的趋势。对于不同材料的颗粒, 热导率越低的颗粒, 其表面-中心温差越高, 越难以完全熔化。**结论** 喷距、颗粒直径与颗粒材料对颗粒加热状况和内部温度梯度有很大的影响, 该模拟结果能为分析颗粒与等离子体之间的传热提供参考。

**关键词:** 等离子喷涂; 颗粒; 加热过程; 交互作用; 表面-中心温差; 数值模拟; Fluent

**中图分类号:** TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)09-0018-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.09.003

## Numerical Simulation of Particle Heating Process in Plasma Spray

HE Xiang<sup>1,2,3,4</sup>, LIU Min<sup>2,3,4</sup>, WEN Kui<sup>2,3,4</sup>, YANG Kun<sup>2,3,4</sup>, YAN Xing-chen<sup>2,3,4</sup>, WANG Kai<sup>2,3,4</sup>

(1.College of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2.Guangzhou Research Institute of Non-ferrous Metals, Guangzhou 510650, China; 3.National Engineering Laboratory for Modern Materials Surface Engineering Technology, Guangzhou 510650, China; 4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Modern Surface Engineering Technology, Guangzhou 510650, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To study the heating process of particles in plasma spray and influence factors. **Methods** The heating process and state of particles in plasma spray was calculated by Fluent software. Then the effect of standoff distance, diameter and materials of particles on the heating condition and temperature gradient of particles was analyzed based on the calculation

收稿日期: 2016-03-05; 修订日期: 2016-04-03

**Received:** 2016-03-05; **Revised:** 2016-04-03

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划 (973 项目, 2012CB625100); 国家自然科学基金资助项目 (51301046); 广东省科技项目 (2013B050800031)

**Fund:** Supported by National Basic Research Program of China (2012CB625100), National Natural Science Foundation of China (51301046) and Science and Technology Program of Guangdong Province (2013B050800031)

**作者简介:** 何翔 (1990—), 男, 硕士生, 主要研究方向为等离子体喷涂数值模拟。

**Biography:** HE Xiang (1990—), Male, Master, Research focus: plasma spray simulation.

**通讯作者:** 刘敏 (1965—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为表面技术。

**Corresponding author:** LIU Min (1965—), Male, Master, Professorate senior engineer, Research focus: surface technology.

results. **Results** During the heating process of particles under different standoff distances, the surface temperature of particles was higher than the center temperature of particles. In the cooling process, the center temperature was lower than the surface temperature and the surface-center temperature difference was far less than that in the heating process. There were different heating stages in heating process. For different diameters of particle, small particles could obtain better heating than the bigger one, although the bigger one could enter a deeper position in the center than the smaller one. The surface-center temperature difference increased with the raising of particle diameter. And particles with three different diameters had the similar tendency of the surface-center temperature difference. In regard to different materials, the materials with lower thermal conductivity had higher surface-center temperature difference, thus that would be harder for melting of particles completely. **Conclusion** Heating condition and temperature gradient of particles are sharply influenced by standoff distance, diameter of particles and materials of particles. And this simulation results can provide reference for the analysis of heat transfer between particles and plasma.

**KEY WORDS:** plasma spray; particle; heating process; interaction; surface-center temperature difference; numerical simulation; Fluent

等离子喷涂作为一种典型的涂层制备工艺,在现代表面工程领域中被广泛应用。等离子体喷涂过程中,工作气体通过电弧加热,以热等离子体射流的形式从喷枪喷出,用于喷涂的粉末进入热等离子体射流之后,受到射流的加热与加速,最终撞击到基材表面形成涂层<sup>[1]</sup>。在等离子体喷涂过程中,涂层质量直接受到颗粒的温度、速度、熔化程度等因素的影响。因此了解颗粒撞击基材前的速度、温度等,对于改进喷涂工艺,提升涂层质量是十分重要的。处于等离子体射流中的颗粒的温度与速度受到许多因素的影响,如果通过实验来优化喷涂参数,需要进行大量的实验,耗时耗力且成本较高。同时,由于现有技术的局限,对于粒径在数十微米的粉末颗粒的传热传质现象无法进行精确检测。通过计算机模拟来优化喷涂参数,能够大大降低成本并且提高效率<sup>[2]</sup>。关于等离子体发生器部分的数值模拟,国内外学者已经做了许多研究<sup>[3-5]</sup>。对于等离子体与颗粒交互作用部分的数值模拟,国内外也有一定研究。ZHANG.T<sup>[6]</sup>研究了处于氩氢等离子体中的镍颗粒的加热历程,并且比较了不同直径、不同送粉速度的颗粒的受热情况。谭超、魏正英等<sup>[7]</sup>计算了大气情况下氧化锆颗粒的飞行状态,并且由计算结果确定了最佳的喷涂距离。范群波、王鲁等<sup>[8]</sup>计算了氧化锆陶瓷颗粒在等离子体喷涂中的温度分布,并且比较了不同喷距下处在等离子体射流中的颗粒内部温度的变化。

本文使用 Fluent 软件模拟了处于等离子体射流中颗粒的加热历程,考虑了颗粒有限大热导率、Knudsen 效应、强烈蒸发效应等对颗粒传热的影响,

并且对模拟结果进行了分析。

## 1 基本假设

假设如下: 1) 颗粒为球体。2) 颗粒内部的热量传递只考虑热传导,忽略颗粒熔化后的对流换热。3) 不考虑颗粒之间的碰撞。4) 采用垂直送粉方式进行送粉末,送粉位置如图 1。粉末颗粒的初始速度与载气速度相同。

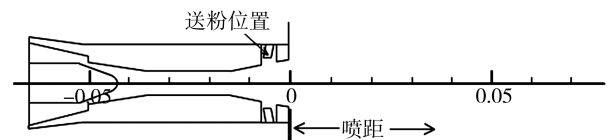


图 1 位置示意  
Fig.1 Diagram of position

## 2 颗粒计算模型

### 2.1 能量方程

对于颗粒内部不同位置的温度变化过程可用方程 (1) 描述:

$$\rho_p c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \kappa_p \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

式中:  $\rho_p$  为颗粒密度;  $c_p$  为颗粒比热;  $T$  为颗粒温度;  $r$  为距离颗粒中心的位置;  $\kappa_p$  为颗粒热导率。式 (1) 的边界条件如下:

$$\text{颗粒中心边界条件: } \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_0 = 0 \quad (2)$$

颗粒表面边界条件 (未达到沸点):

$$\left( \kappa_p \frac{\partial T}{\partial r} \right)_w = q_0 \quad (3)$$

对于正在熔化的颗粒, 采用以下方法处理<sup>[9]</sup>:

$$\bar{c}_p = c_p + L_m \delta(T - T_m) \quad (4)$$

式中:  $\bar{c}_p$  为颗粒的等效热容;  $L_m$  为颗粒熔化潜热;  $\delta$  为狄拉克  $\delta$  函数;  $q_0$  为颗粒表面热流密度 (未达到沸点);  $T_m$  为颗粒熔点。

当颗粒温度达到沸点时,  $T = T_v$ , 其中  $T_v$  为颗粒沸点。

在颗粒进入强烈蒸发阶段时, 颗粒的半径将随着蒸发的进行而减小, 其变化量由式(5)计算<sup>[10]</sup>:

$$\frac{dr_w}{dt} = -\frac{q_1}{\rho_p L_v} \quad (5)$$

当颗粒强烈蒸发时, 会存在质量流在颗粒表面流动, 质量流的流动方向与热流相反, 这将导致传入颗粒的热流量降低<sup>[11]</sup>。文献[11]研究了无对流条件下颗粒强烈蒸发对颗粒传热的影响, 并且提出了以下表达式来描述这个现象:

$$\frac{q_1}{q_0} = \frac{L_v}{S_\infty - S_w} \int_{T_w}^{T_\infty} \frac{\kappa dT}{h - h_w + L_v} \quad (6)$$

式中:  $q_0$  为向未强烈蒸发颗粒传热的热流密度;  $q_1$  为向强烈蒸发颗粒传热的热流密度;  $L_v$  为蒸发潜热;  $T_\infty$  和  $T_w$  分别为等离子体温度和颗粒表面温度;  $h_w$  为颗粒表面温度所对应的焓值;  $S_\infty$  和  $S_w$  分别为等离子体温度和颗粒表面温度所对应的热传导势,  $S = \int_{T_0}^T \kappa dT$ 。文献[11]的研究表明, 式(6)的比值在有对流的情况下也有很好的近似。

在考虑 Knudsen 效应对传热的影响时, 采用以下方法处理 Knudsen 效应对颗粒传热的影响<sup>[12]</sup>。在无对流的情况下, 考虑 Knudsen 效应计算的热流量  $q_0$  与不考虑 Knudsen 效应计算的热流量  $q_{0c}$  之比为:

$$\frac{q_0}{q_{0c}} = \frac{1}{1 + z^* / r_w} \quad (7)$$

式中:  $r_w$  是颗粒半径;  $z^*$  是热传导势跳跃距离, 可以用式(8)表示。

$$z^* = \frac{2-a}{a} \frac{\gamma}{1+\gamma} \frac{4\bar{\kappa}}{\rho^* \bar{v} \bar{c}_{pa}} \quad (8)$$

式中:  $a$  为热协调系数 ( $a=0.8$ );  $\gamma$  是比热比 ( $\gamma=5/3$ );  $\rho^*$  为气体密度;  $\bar{v}$  为气体平均热运动速度;  $\bar{c}_{pa}$  和  $\bar{\kappa}$  分别为在颗粒壁面温度  $T_w$  与跳跃温度  $T_g$  之间的等离子体比热和热导率的积分平均值。文献[13]的结果表明, 在有对流情况下, 也可以采

用以上方法处理 Knudsen 效应对颗粒传热的影响, 文献[14]—[15]对于 Knudsen 效应也采用了相同的处理方法。

## 2.2 运动方程

颗粒的运动方程为:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (9)$$

式中:  $F_x$  包括热泳力与由压力梯度所产生的力;  $u$  为等离子体速度;  $u_p$  为颗粒速度;  $\rho$  为等离子体密度;  $F_D$  由(10)式计算得。

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D \text{Re}}{24} \quad (10)$$

式中:  $\text{Re}$  为雷诺数;  $C_D$  为阻力系数, 由(11)式计算得。

$$C_D = \begin{cases} f(\text{Re}_\infty) = 24 / \text{Re}_\infty & \text{Re}_\infty < 0.2 \\ f(\text{Re}_\infty) = (24 / \text{Re}_\infty)(1 + 3\text{Re}_\infty / 16) & 0.2 \leq \text{Re}_\infty < 0.2 \\ f(\text{Re}_\infty) = (24 / \text{Re}_\infty)(1 + 0.11\text{Re}_\infty^{0.810}) & 0.2 \leq \text{Re}_\infty < 21 \\ f(\text{Re}_\infty) = (24 / \text{Re}_\infty)(1 + 0.189\text{Re}_\infty^{0.632}) & 21 \leq \text{Re}_\infty < 200 \end{cases} \quad (11)$$

为了考虑 Knudsen 效应对颗粒阻力系数  $C_D$  的影响, 根据文献[9]使用以下公式进行计算:

$$\frac{C_{dk}}{C_d} = \left( \frac{q_0}{q_{0c}} \right)^{0.45} \quad (12)$$

式中:  $C_d$  为不考虑克努森效应时的阻力系数;  $C_{dk}$  为考虑克努森效应时的阻力系数。

## 3 颗粒计算模型条件

### 3.1 等离子喷涂工况

采用 F4-VB 型喷枪, 等离子喷涂工况参数如表 1。等离子射流的温度差和速度场见图 2—3。

表 1 等离子喷涂工况参数

Tab.1 Working condition parameters of plasma spray

参数	数值
电流	800 A
Ar 流量	50 L/min
H <sub>2</sub> 流量	12 L/min
载气流量 (Ar)	2 L/min
压强	101 325 Pa

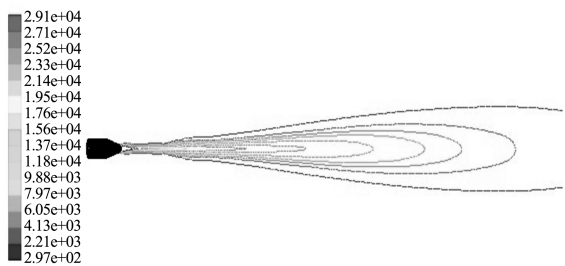


图 2 等离子射流温度场  
Fig.2 Temperature of plasma jet

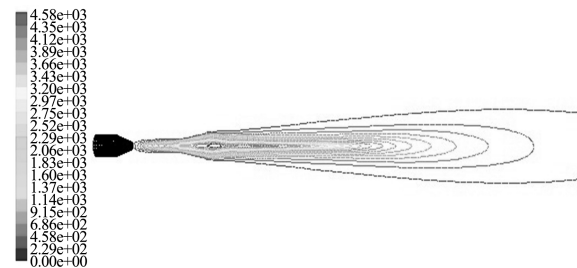


图 3 等离子射流速度场  
Fig.3 Velocity of plasma jet

3.2 颗粒属性

模拟所用的颗粒为氧化铝及氧化锆，其物性参数如表 2。

表 2 颗粒物性参数

Tab.2 Physical and thermal properties of particles

材料	熔点 /K	沸点 /K	固相热导率 /(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	液相热导率 /(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	密度 /(kg·m <sup>-3</sup> )
氧化铝	2326	3252	5.86	5.86	3960
氧化锆	2950	5000	2	3	5890

4 结果与讨论

4.1 喷距对氧化铝颗粒加热的影响

模拟所用喷枪为内送粉，取喷枪出口为横坐标零点，如图 1。图 4 为直径 30 μm 的氧化铝颗粒表面温度、中心温度以及颗粒所处位置的等离子体温度随喷距变化曲线图。从图 4a 与图 4b 中可以看出，在喷距约 94 mm 之前，等离子体温度高于颗粒表面温度，颗粒处于升温状态；在喷距约 94 mm 之后，等离子体温度低于颗粒表面温度，颗粒处于降温状态。在颗粒升温状态中，等离子体温度呈现先上升后下降的趋势，最高值约为 11 000 K。

如图 4a，在升温状态下，颗粒表面与颗粒中心有明显的温差，这是由于氧化铝热导率较低导致的。

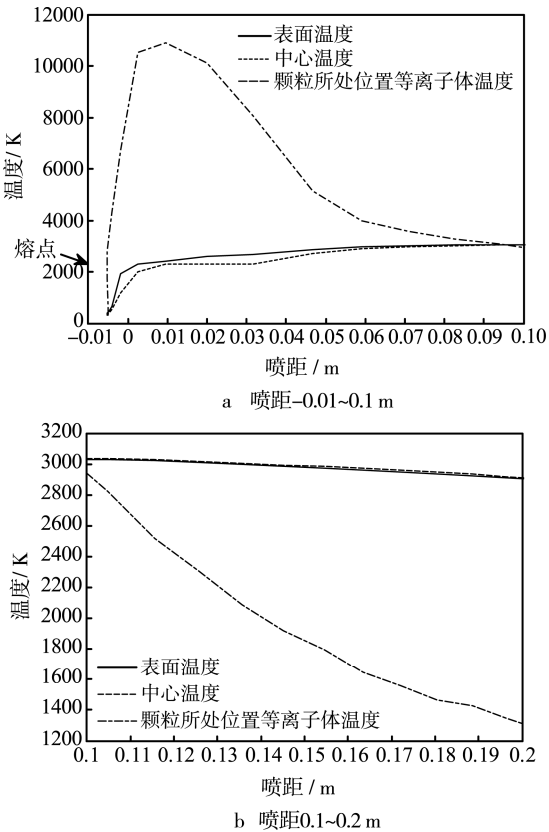


图 4 颗粒及等离子体温度随喷距的变化  
Fig.4 Plasma temperature varies with standoff distance:  
a) standoff distance between -0.01~0.1 m; b) standoff distance between 0.1~0.2 m

低的热导率导致颗粒表面热量难以传入颗粒内部，因而用于表面升温的热量较颗粒中心多，从而导致颗粒表面升温较快，与中心产生较大的温差。在喷距约 94 mm 处，等离子体温度低于颗粒表面温度时，颗粒进入降温状态。从图 4b 中可以看出，在降温状态下，颗粒表面温度低于颗粒中心温度，并且颗粒表面与中心的温差较升温状态小得多。这是由于颗粒在降温状态时，颗粒表面与等离子体温差远远小于颗粒处于升温状态时的温差，导致颗粒表面与等离子体交换的热流量较升温状态小得多，因此表面降温较慢，颗粒表面与中心温差不明显。

氧化铝颗粒在升温状态下表面与中心的大温差，导致了颗粒内部存在不同的加热阶段。当颗粒中心处于固相加热阶段或熔化阶段时，颗粒表面可能已经处于液相加热阶段。

图 5 为 30 μm 氧化铝颗粒表面对流换热热流量与颗粒向外辐射热流量随喷距变化图。可以看出，在等离子体对颗粒的传热中，以对流换热为主。与对流换热相比，辐射传热所传递的热流量大约低三个数量级。在喷距约为 0~10 mm 处，由于等离子

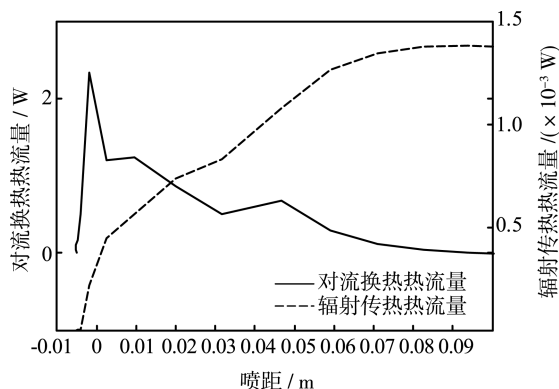


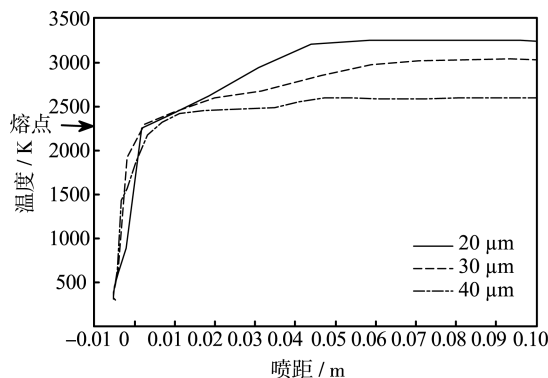
图5 氧化铝颗粒表面对流传热热流量与颗粒向外辐射热流量随喷距的变化

Fig.5 Surface heat flow of convection and radiation of alumina particles vary with standoff distance

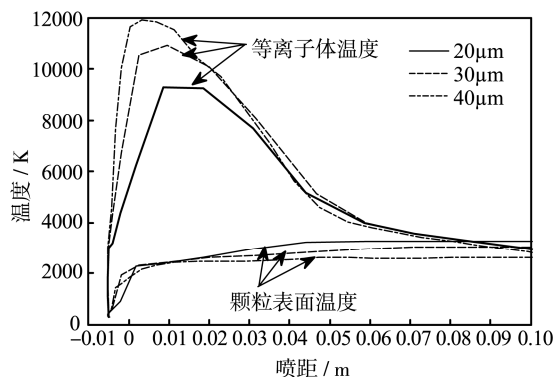
体与颗粒表面温差较大,对流传热量较大;在喷距10 mm之后,由于等离子体与颗粒表面温差下降,对流传热量逐渐下降。而辐射传热量随着颗粒表面温度的升高而升高,当颗粒表面温度较高时,辐射传热逐渐变得显著。

## 4.2 直径对氧化铝颗粒加热的影响

图6与图7为不同直径氧化铝颗粒的表面温度与等离子体温度、热流密度随喷距的变化曲线。从图6a中可以看出,三种直径的颗粒在固相加热阶段升温速度较快,而当表面温度超过熔点之后,由于颗粒内部接近表面的区域开始熔化,在熔化过程中,该区域温度维持在熔点,而颗粒表面继续升温,这导致表面与该区域温差增大,从而由表面向该区域传递的热量增大。同时,在液相加热阶段,等离子体向颗粒表面传递的热量不断减少,使得颗粒表面用于升温的热量减少,因此表面升温速度减缓。从图6b可以看出,直径为20  $\mu\text{m}$ 的颗粒所处位置的等离子体温度最高达到约9000 K,而直径为40  $\mu\text{m}$ 的颗粒所处位置的等离子体温度最高达到约12 000 K,这说明大颗粒能进入射流中心更深的位置。直径为20  $\mu\text{m}$ 的颗粒,最高温度约为3252 K;但是如图6a,直径越小的颗粒能达到的最高温度直径为30  $\mu\text{m}$ 的颗粒,最高温度约为3000 K;直径为40  $\mu\text{m}$ 的颗粒,最高温度约为2600 K。这是由于小颗粒有较小的表面积和较高的速度,其表面热流密度高于另外两种直径的颗粒(如图7),因此虽然小颗粒进入射流中心的深度不如大颗粒,但是能得到更好的加热。



a 颗粒表面温度随喷距变化



b 颗粒表面温度与等离子体温度随喷距变化

图6 不同直径的氧化铝颗粒的表面温度与等离子体温度随喷距的变化

Fig.6 Surface temperature of alumina particles with different diameters and plasma temperature vary with standoff distance: a) surface temperature of alumina particles; b) surface temperature of alumina particles and plasma temperature

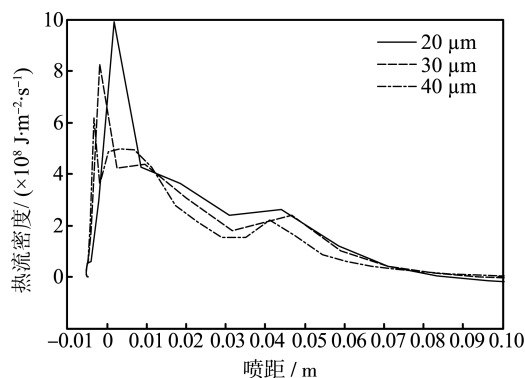


图7 不同直径氧化铝颗粒表面热流密度随喷距的变化  
Fig.7 Surface heat flux of alumina particles with different diameters varies with standoff distance

图8为不同直径的颗粒表面-中心温差随喷距的变化曲线。从图8a、8b、8c中可以看出,颗粒中心完全熔化所对应的喷距随着颗粒直径的增大而增大,说明相对于小颗粒,大颗粒完全熔化更难,这是因为大颗粒熔化时需要吸收更多的熔化潜热。从图8d中可以看出,颗粒的最高表面-中心温差随着直径的增大而增大:直径为40  $\mu\text{m}$ 的颗粒的最高

表面-中心温差最大, 约 780 K; 直径为 30  $\mu\text{m}$  的颗粒的最高表面-中心温差略小, 约 750 K; 直径为 20  $\mu\text{m}$  的颗粒的表面-中心温差最高只有约 390 K。

从图 8d 中还可以看出, 三种不同直径颗粒的表面-中心温差都出现相似的变化趋势: 颗粒表面温度未达到熔点时, 表面-中心温差随着表面温度的增大而增大; 当颗粒表面温度达到熔点之后, 颗粒表面温度上升速度减缓, 因此表面-中心温差开

始下降, 此时表面-中心温差出现了第一个极大值。当颗粒中心也进入熔化阶段时, 颗粒中心温度将会维持在熔点, 此时颗粒表面温度继续增加, 表面-中心温差开始上升, 出现一个极小值。当颗粒中心完全熔化时, 颗粒中心温度超过熔点并且迅速上升, 逐渐趋近于表面温度, 此时表面-中心温差再次下降, 并且出现第二个极大值, 这个极大值正好处于颗粒中心温度超过熔点的位置。

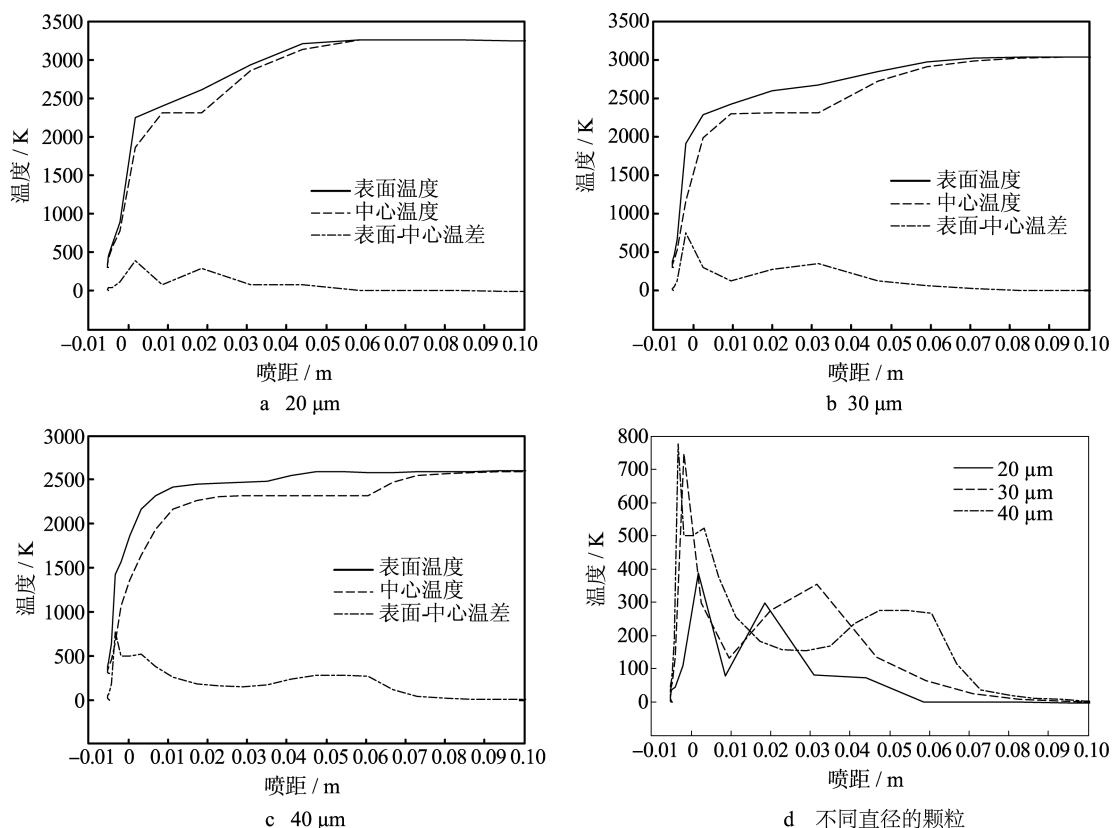


图 8 不同直径的氧化铝颗粒表面-中心温差随喷距的变化

Fig.8 Surface-center temperature difference of alumina particles with different diameters varies with standoff distance: a)20  $\mu\text{m}$ ; b) 30  $\mu\text{m}$ ; c) 40  $\mu\text{m}$ ; d) particles with different diameters

### 4.3 不同材料对颗粒加热的影响

图 9 为直径 30  $\mu\text{m}$  的氧化铝与氧化锆颗粒表面温度、中心温度随喷距的变化曲线。从图中可以看出, 在加热过程中, 氧化锆表面与中心温度都高于氧化铝, 并且氧化锆完全熔化所对应的喷距大于氧化铝。对于氧化铝颗粒, 在喷距约 35 mm 处, 颗粒内部温度超过熔点, 表明在 35 mm 之后, 颗粒完全熔化, 而对于氧化锆, 这个喷距约为 67 mm。

图 10 为直径 30  $\mu\text{m}$  的不同材料的颗粒表面-中心温差随喷距的变化曲线, 从图中可以看出, 氧化锆的表面-中心温差相对氧化铝较高, 最大表面-

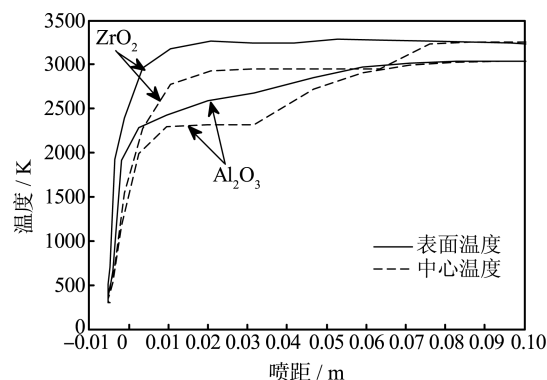


图 9 不同材料的颗粒表面温度及中心温度随喷距的变化  
Fig.9 Surface temperature and center temperature of particles with different materials vary with standoff distance

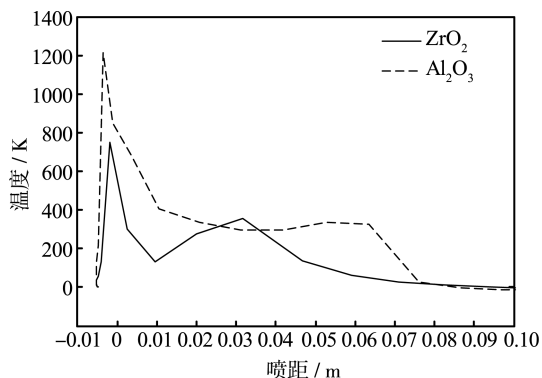


图 10 不同材料的颗粒表面-中心温差随喷距的变化

Fig.10 Surface-center temperature difference of particles with different materials varies with standoff distance

中心温差约 1200 K，而氧化铝最大表面-中心温差约为 700 K。这是由于氧化锆相对氧化铝有更低的热导率，颗粒表面的热流量更难进入颗粒内部，因此颗粒表面温度更高，表面-中心温差更大。

## 5 结论

1) 对于不同的喷距，颗粒在升温状态下，内部温度梯度较大，表面温度高于中心温度；而在降温状态下，内部温度梯度很小，中心温度高于表面温度。在颗粒升温状态下，颗粒内部存在不同的加热阶段。

2) 对于不同的直径，虽然大颗粒进入射流中心的深度比小颗粒深，但是小颗粒能得到更好的加热。三种不同直径的颗粒的表面-中心温差变化曲线都表现出相似的趋势，表面-中心温差随着颗粒直径的增大而增大。

3) 对于不同材料的颗粒，热导率越低，其表面-中心温差越高，越难以完全熔化。

## 参考文献

- [1] 陈熙. 热等离子体传热与流动[M]. 北京: 科学出版社, 2009.  
CHEN Xi. Heat Transfer and Fluid Flow of Thermal Plasma[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [2] 宋琛. 直流电弧等离子体喷涂  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的数值模拟与实验验证[D]. 湖南: 中南大学, 2014.  
SONG Chen. Numerical Simulation and Experimental Verification of DC Arc Plasma Sprayed Alumina[D]. Hunan: Central South University, 2014.
- [3] 李和平. 直流电弧等离子体发生器与射流中传热与流动的研究[D]. 北京: 清华大学, 2001.

- LI He-ping. Studies of Heat Transfer and Fluid Flow in a D.C. Arc Plasma Torch and Plasma Jet[D]. Beijing: Tsinghua University, 2001.
- [4] 韩鹏. 直流电弧等离子体发生器与射流特性的数值模拟及实验研究[D]. 北京: 清华大学, 1999.  
HAN Pen. Numerical and Experimental Studies on the Characteristics of D.C. Arc Plasma Torches and Jets[D]. Beijing: Tsinghua University, 1999.
- [5] HUANG Ren-zhong. Numerical Analysis of Arc Plasma Behavior in A Plasma Spray Torch[D]. Japan: Natural Science and Technology of Kanazawa Univesity, 2012.
- [6] ZHANG T, GAWNE D, LIU B. Computer Modeling of the Influence of Process Parameters on the Heating and Acceleration of Particles during Plasma Spraying[J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 132: 233—243.
- [7] 谭超, 魏正英, 魏培, 等. 内送粉超音速等离子喷涂颗粒飞行状态分析[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(6): 91—97.  
TAN Chao, WEI Zheng-ying, WEI Pei, et al. In-flight Particle Behavior in Internal Powder Injection Supersonic Plasma Spray[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(6): 91—97.
- [8] 范群波, 王鲁, 王富耻, 等. 离子喷涂过程中飞行颗粒熔化状态的数值仿真[J]. 兵工学报, 2005, 26(4): 510—514.  
FAN Qun-bo, WANG Lu, WANG Fu-chi, et al. Simulation of Melted State of Particles in Plasma Spray[J]. Acta Armamentarii, 2005, 26(4): 510—514.
- [9] SAMARSKII A A, MOISEYENKO B D. An Economic Coatinuous Calculation Screme for the Stefan Multidimensional Problem[J]. USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics, 1965, 5(5): 43—58.
- [10] LEE Y C, CHYOU Y P, PFENDER E. Particle Dynamics and Particle Heat and Mass Transfer in Thermal Plasmas. Part II. Particle Heat and Mass Transfer in Thermal Plasmas[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1985, 5(4): 391—414.
- [11] CHEN Xi, PFENDER E. Heat Transfer to a Single Particle Exposed to a Thermal Plasma[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1982, 2(2): 185—212.
- [12] CHEN Xi, PFENDER E. Effect of the Knudsen Number on Heat Transfer to a Particle Immersed into a Thermal Plasma[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1983, 3(1): 97—113.
- [13] CHEN Xi, PFENDER E. Behavior of Small Particles in a Thermal Plasma Flow[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1983, 3(3): 351—366.
- [14] WAN Y P, PRASAD V. Model and Powder Particle Heating, Melting, Resolidification, and Evaporation in Plasma Spraying Process[J]. Journal of Heating Transfer, 1999, 8(121): 691—699.
- [15] HONG Xiong-bing, LIN Jian-zhong. Nanoparticles Modeling in Axially Injection Suspension Plasma Spray of Zirconia and Alumina Ceramics[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2009, 18(5/6): 887—895.