

# 等离子喷涂过程中飞行颗粒熔化状态的数值仿真

范群波, 王鲁, 王富耻  
(北京理工大学 材料科学与工程学院, 北京 100081)

**摘要:** 利用数值仿真方法, 针对  $ZrO_2$  陶瓷颗粒, 分析讨论了等离子喷涂过程中飞行颗粒的表面温度变化过程, 以及不同直径颗粒内部的受热状态、温度梯度变化以及相变过程。并在此基础上, 进一步对喷涂距离进行了分析, 确定了在何种情况下, 才能达到理想的喷涂效果。研究方法的结果对于实际的喷涂工艺生产具有指导意义。

**关键词:** 热学; 数值仿真; 等离子喷涂; 飞行颗粒熔化状态

**中图分类号:** TG 174. 442      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-1093(2005)04-0510-05

## 0 引言

等离子喷涂过程中, 原料颗粒随载气横向喷入等离子射流后, 将首先受到焰流的加热与加速。之后, 具有一定速度的熔滴和基体发生碰撞, 熔滴迅速变形并急速冷却凝固, 从而形成满足不同需求的涂层。如图 1 所示, 颗粒在飞行过程中, 一方面通过对流与辐射和射流场发生热交换; 另一方面在其内部还存在热传导, 尤其是对于热传导系数比较低的非金属材料, 还存在一定的温度梯度。此外, 颗粒在飞行过程中, 将发生“固态—液态—固态”的相变过程, 但只有完全熔化的液态颗粒作用在基体表面方能形成性能良好的涂层。因此, 研究颗粒在不同飞行距离的熔化状态具有非常积极的意义。

目前, 关于模拟等离子体射流场与颗粒相互作用已有不少相关报道。H Nishiyama 等人<sup>[1]</sup> 计算了不同直径  $Al_2O_3$  颗粒在不同工况下的飞行轨迹及表面温度变化; P Nylen 等人<sup>[2]</sup> 模拟了射流场的温度及速度分布, 并分析了一定轴向距离处,  $ZrO_2$  颗粒表面温度的分布状况; E Pfender 等人<sup>[3]</sup> 则在射流场湍流模型及化学反应模型的基础上, 计算了不锈钢颗粒沿飞行轴向距离的平均温度变化, 并与实验吻合良好。这些方法虽然都取得了一定的成果, 但都未涉及颗粒内部的热作用及颗粒内部可能存在的相变问题。本文以  $ZrO_2$  陶瓷颗粒为研究对象, 在模拟颗粒表面受热过程的基础上, 分析了不同直径颗粒在飞行过程中内部的热传导以及颗粒的“固态—液

态”相变, 并讨论了相应喷涂距离的影响及选择。

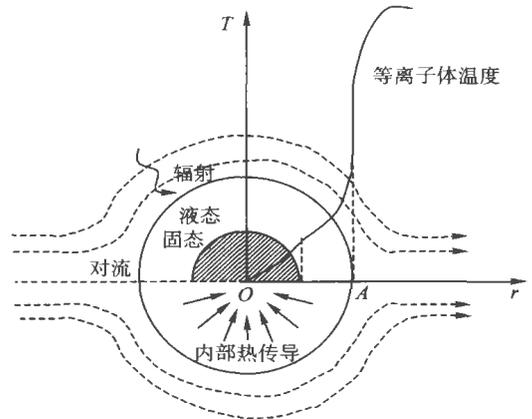


图 1 颗粒与射流场热交换及颗粒内部热作用示意图  
Fig1 Sketch of interior thermal effect and heat transfer between particle and spray field phenomena

## 1 数学模型

### 1.1 颗粒运动方程

图 2 为等离子喷涂示意图。如图 2 所示, 喷枪采用外部送粉, 喷枪与基体的距离为 100 mm, 送粉初始位置与喷枪的水平距离为 4 mm。在 Lagrangian 坐标系中, 根据颗粒的受力平衡, 可建立起  $x$  方向单颗粒的运动方程为

$$\frac{dv_{px}}{dt} = F_D(v_p'x - v_{px}) + F_{th}, \quad (1)$$

式中:  $v_{px}$  与  $v_p'x$  分别为颗粒与等离子体射流在  $x$  方向的速度;  $F_{th}$  为单位颗粒质量因存在射流场温度梯

度而受到的热泳力;  $F_D(v_{p'y} - v_{py})$  表示单位颗粒质量受到的粘性阻力。

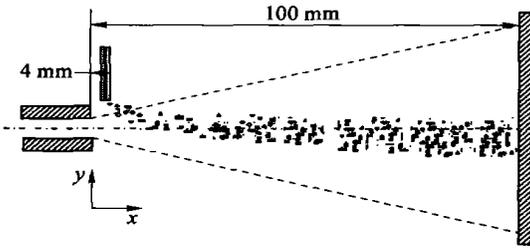


图 2 等离子喷涂示意图

Fig. 2 Sketch of plasma spray

在  $y$  方向, 颗粒受力规律与(1)式相似, 但因射流场速度梯度的存在, 还将受到重力及 Saffman 升力  $F_s$  的作用<sup>[4]</sup>, 其表达式为

$$\frac{dv_{py}}{dt} = F_D(v_{p'y} - v_{py}) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_{th} + F_s, \quad (2)$$

式中:  $v_{p'y}$  为等离子体射流在  $y$  方向的速度;  $g$  为重力加速度;  $\rho_p$  与  $\rho$  分别为颗粒与等离子体的密度;  $F_s$  按下式计算:

$$F_s = 1.62D_p^2 \sqrt{\rho\mu} (v_{p'y} - v_{py}) \sqrt{\left| \frac{dv_{p'y}}{dy} \right|}, \quad (3)$$

其中:  $D_p$  为颗粒直径;  $\mu$  为射流粘度。

### 1.2 热量交换方程

颗粒在飞行过程中, 将与等离子体射流场发生热量交换, 所涉及的主要热交换形式为对流与辐射, 可用方程表示为

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = hA_p(T_\infty - T_p) + \epsilon_p A_p \sigma (T_a^4 - T_p^4), \quad (4)$$

式中:  $m_p$  为颗粒质量;  $c_p$  为颗粒比热;  $T_\infty$  为颗粒所在位置的射流温度;  $T_p$  为颗粒表面温度;  $h$  为对流换热系数;  $\epsilon_p$  为颗粒的辐射率;  $A_p$  为颗粒的表面积;  $\sigma$  为 Boltzmann 常数;  $T_a$  为环境温度。

颗粒内部的热传导形式为热传导, 对于球形轴对称颗粒, 颗粒内部热传导方程可由傅立叶方程表述为

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( k_p r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (5)$$

式中:  $r$  为距离颗粒几何中心的径向距离;  $H$  和  $k_p$  分别为颗粒的焓与热传导率;  $T$  为温度。

颗粒在飞行过程中, 受射流热作用, 将发生“固态—液态”相变, 而随着逐渐远离射流场, 又会发生“液态—固态”相变。相变问题作为一种非线性的瞬态热分析问题, 需要考虑相变过程中吸收或释放的

潜热  $\Delta H$  即焓变<sup>[5]</sup>。本文通过计算  $\Delta H$  来模拟颗粒内部的相变。 $\Delta H$  由下式获得:

$$\Delta H = \int \rho_p c_p(T) dT, \quad (6)$$

式中颗粒的比热  $c_p$  为温度的函数。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 颗粒表面温度随轴向距离的变化

本文计算了  $30 \mu\text{m}$  与  $70 \mu\text{m}$  2 种不同直径  $\text{ZrO}_2$  颗粒在飞行过程中的受热状态(电流 950 A, 氩气流量 28.3 L/min, 氦气流量 9.4 L/min)。图 3 为 2 种颗粒的表面温度随轴向距离的变化情况, 其进入射流场的初始温度均为 300 K。

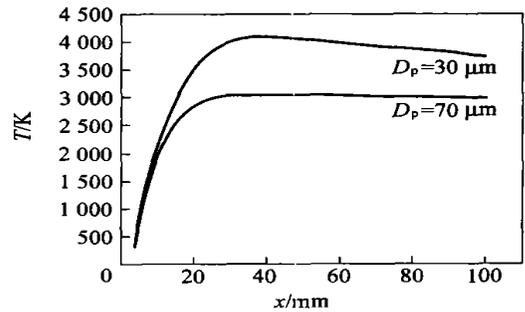


图 3 2 种不同直径  $\text{ZrO}_2$  颗粒表面温度随轴向距离的变化

Fig. 3 Surface temperature variation of  $\text{ZrO}_2$  particle of two different sizes in diameter with axial

由图 3 可见, 随着颗粒进入高温高速的射流场, 其表面温度首先迅速攀升至一定值, 之后随着轴向距离的增加, 呈缓慢下降趋势; 在相同轴向位置, 直径较大的颗粒其表面温度也较低; 在颗粒到达基体形成涂层位置时 ( $x=100 \text{ mm}$ ), 直径为  $30 \mu\text{m}$  的颗粒表面温度为 3730 K, 高于其熔点温度 2983K, 而直径为  $70 \mu\text{m}$  的颗粒表面温度仅为 2990 K, 仅略高于其熔点。

### 2.2 颗粒内部的熔化状态

图 4 与图 5 以彩色等值图形式分别表示了直径为  $30 \mu\text{m}$  和  $70 \mu\text{m}$  的  $\text{ZrO}_2$  颗粒在飞行过程中, 颗粒内部温度变化, 反映了颗粒内部的熔化状态。不同颜色深浅, 表示了温度值的高低。

图 4 及相应计算结果表明, 当直径为  $30 \mu\text{m}$  的颗粒刚进入射流场时 ( $x=4 \text{ mm}$ ), 其内部与表面温度相同, 均为 300 K; 当飞行至 10 mm 处, 随着等离子体射流与颗粒热相互作用的进行, 颗粒内部温度明显上升, 中心温度为 1061 K, 表面温度已达到

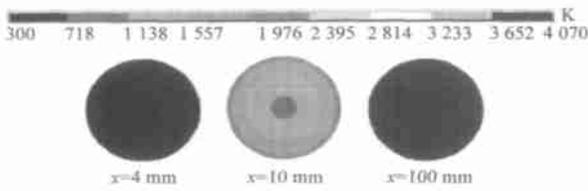


图 4 飞行过程中  $ZrO_2$  颗粒内部的熔化状态  
( $D_p = 30 \mu m$ )

Fig. 4 Interior temperature variation of flying  $ZrO_2$  particle of  $30 \mu m$  in diameter

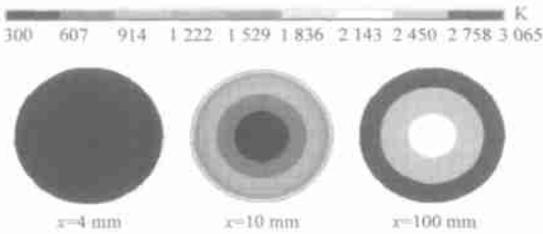
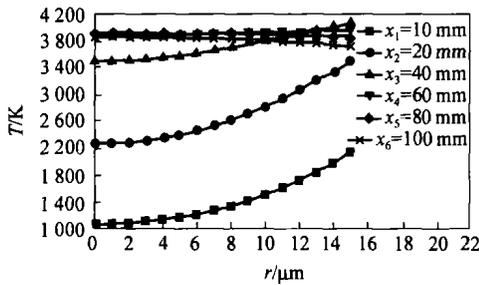
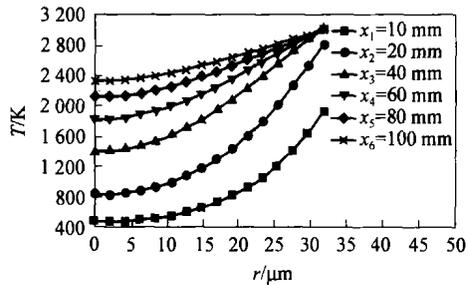


图 5 飞行过程中  $ZrO_2$  颗粒内部的熔化状态  
( $D_p = 70 \mu m$ )

Fig. 5 Interior temperature variation of flying  $ZrO_2$  particle of  $70 \mu m$  in diameter



(a)  $D_p = 30 \mu m$



(b)  $D_p = 70 \mu m$

图 6 不同轴向距离、颗粒内部不同位置的温度变化

Fig. 6 Interior temperature of  $ZrO_2$  particle temperature vs. radial position at different axial distance

图 6(a) 与图 6(b) 的计算结果表明, 随着轴向距离的增大, 陶瓷颗粒中心与表面之间开始出现一定的温度梯度, 并逐渐增大。但随着轴向距离的进一步增大以及颗粒内部热传导作用的继续进行, 这种温度梯度因颗粒内部的受热升温而逐渐减小。直径越大, 温度梯度也越明显。图 6(a) 中, 表面与中心的最大温差  $\Delta T_{\max} = 1048 \text{ K}$ ; 而图 6(b) 中,  $\Delta T_{\max} = 2012 \text{ K}$ 。导致颗粒内部出现温度梯度的原因是陶瓷颗粒的热导率低, 颗粒内部的热传导作用缓慢, 且直径越大, 越缓慢。

在本文给定的工况条件下, 直径为  $30 \mu m$  的颗粒抵达基体附近时, 颗粒中心与表面的温差已几乎

接近于 0 (见图 6(a) 曲线  $x_6 = 100 \text{ mm}$ ), 而直径为  $70 \mu m$  的颗粒抵达基体附近时, 颗粒中心与表面之间仍然存在一定的温差 (见图 6(b) 曲线  $x_6 = 100 \text{ mm}$ ), 这使得大直径颗粒作用在基体表面时可能在整体上表现为部分熔化。

此外, 图 6(a) 与图 6(b) 均反映出, 在所计算的距离范围内, 颗粒中心的温度一直呈上升趋势, 而颗粒表面的温度则呈先上升后下降的趋势, 甚至开始低于中心温度 (如图 6(a) 所示), 这与图 3 的结果是一致的。这是因为颗粒首先与射流场发生热相互作用, 故整体温度升高, 但随着颗粒远离射流场的高温区, 又开始由外向内逐渐冷却。

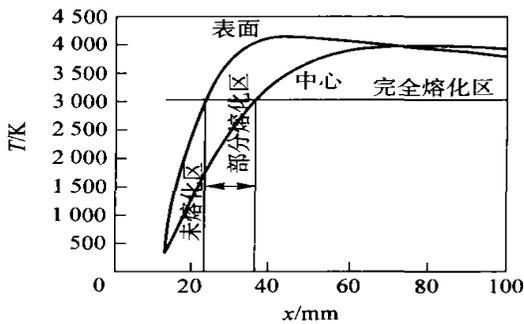
2 139 K, 中心与表面之间存在一定的温度梯度; 当到达基体位置处时, 颗粒中心与表面温度均高于其熔点 2 983 K, 即颗粒已由最初的固态完全转变为液态。

图 5 及其计算结果表明, 当直径为  $70 \mu m$  的颗粒刚进入射流场时 ( $x = 4 \text{ mm}$ ), 颗粒内部与表面温度相同, 均为 300 K; 当飞行至 10 mm 处, 随着等离子体射流与颗粒热相互作用的进行, 颗粒温度开始上升, 但温度上升速度低于直径为  $30 \mu m$  的颗粒, 表面温度达到了 1931 K, 而中心温度仅为 464 K; 当到达基体位置处时, 颗粒表面温度为 2 992 K, 略高于其熔点, 而中心温度为 2 332 K, 低于熔点 2 983 K, 表明颗粒尚未完全熔化。

图 6(a) 与图 6(b) 分别表示了直径为  $30 \mu m$  和  $70 \mu m$  的  $ZrO_2$  颗粒沿半径方向不同位置的温度变化情况, 进一步表示了颗粒内部的熔化情况。横坐标  $r$  表示从颗粒中心点  $O$  出发, 沿半径方向到颗粒表面点  $A$  (如图 1 所示) 的不同位置, 纵坐标表示了不同位置的温度值, 各条曲线对应着颗粒在不同的轴向距离, 分别为  $x_1 = 10 \text{ mm}$ 、 $x_2 = 20 \text{ mm}$ 、 $x_3 = 40 \text{ mm}$ 、 $x_4 = 60 \text{ mm}$ 、 $x_5 = 80 \text{ mm}$ 、 $x_6 = 100 \text{ mm}$ 。

### 2.3 颗粒飞行距离的影响

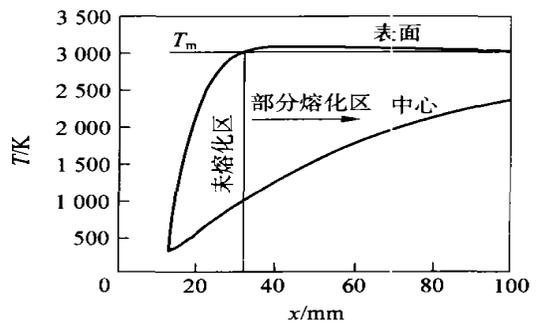
只有当颗粒以完全熔融形式高速撞击在基体表面才能形成致密的涂层,而颗粒受热状态除与等离子射流场以及其自身直径有关外,在很大程度上还取决于喷涂距离。因此从颗粒中心与表面是否达到其熔点出发,来研究喷涂距离与颗粒的熔化状态关系具有重要的意义。图7(a)表示了直径为 $30\mu\text{m}$ 的 $\text{ZrO}_2$ 颗粒中心与表面温度随轴向距离的变化情况。由图可知,当 $x=15\text{mm}$ 时,颗粒表面达到其熔点,表明颗粒表面开始熔化;当 $x=29\text{mm}$ 时,颗粒中心也达到熔点,表明颗粒已完全熔化。因此,针对直径为 $30\mu\text{m}$ 的 $\text{ZrO}_2$ 颗粒,可定义 $x<15\text{mm}$ 为未熔化区,  $15\text{mm}\leq x<29\text{mm}$ 为部分熔化区,  $x\geq$



(a)  $D_p=30\mu\text{m}$

29 mm 为完全熔化区。只有颗粒进入完全熔化区,才有可能得到理想的致密涂层。但在实际喷涂过程中,喷涂距离不宜过长,否则颗粒表面温度开始降低,以至于再次凝固,反而不利于涂层的形成。

图7(b)表示了直径为 $70\mu\text{m}$ 的 $\text{ZrO}_2$ 颗粒中心与表面温度随轴向距离的变化情况。由图可知,当 $x=25\text{mm}$ 时,颗粒表面达到其熔点,表明颗粒表面开始熔化;而颗粒中心温度始终未达到熔点,表明颗粒只是部分熔化。因此,针对直径为 $70\mu\text{m}$ 的 $\text{ZrO}_2$ 颗粒,可定义 $x<25\text{mm}$ 为未熔化区,  $x\geq 25\text{mm}$ 为部分熔化区。要使颗粒完全熔化,只能通过改变喷涂工艺参数,增加射流场的温度,或者增加喷枪与基体之间的距离来实现,以保证颗粒能够充分熔化。



(b)  $D_p=70\mu\text{m}$

图7 不同直径 $\text{ZrO}_2$ 颗粒中心与表面两点温度同轴向距离的关系

Fig. 7 Surface and center temperature of the  $\text{ZrO}_2$  particles of two different sizes in diameter vs. axial distance

图7(a)与图7(b)表明,在相同工况条件下,直径越小颗粒越容易熔化。但直径不应过小,否则可能因为过热而出现蒸发<sup>9</sup>,导致涂层沉积率降低。此外,图7(a)与图7(b)还清楚地表明颗粒内部的最大温度梯度出现在颗粒表面温度达到最大值时。

### 3 结论

1) 对于同一直径的颗粒,随着轴向距离的增加,其表面温度呈先迅速增加,后缓慢降低的趋势;在相同轴向距离处,直径较小的颗粒,其表面温度较高。

2) 随着轴向距离的增加,颗粒整体温度升高,表面与中心存在一定的温度梯度;随着轴向距离的进一步增加,这种温度梯度又会逐渐减小;直径越大,温度梯度也越大。最大温度梯度出现在颗粒表面温度达到最大值时。

3) 颗粒直径越小,其中心温度上升越快,因而更容易熔化,有利于最终致密涂层的形成;相反,颗粒直径越大,其中心温度上升越慢,以至于抵达基体

处时尚未完全熔化。

4) 根据颗粒在飞行过程中的熔化状态以及相变过程,可将飞行距离划分为未熔化区,部分熔化区以及完全熔化区。颗粒直径不同,其部分熔化区以及完全熔化区的范围也有所不同。只有颗粒进入完全熔化区,才有可能获得理想的涂层。

### 参考文献

- [1] Nishiyama H, Kuzuhara M, Sobnenko O P, Kamiyama S. Numerical modeling of an impinging dusted plasma jet controlled by a magnetic field in a low pressure [C]. Thermal Spray: Meeting the Challenges of the 21st Century. France: ASM International, 1998: 451-456.
- [2] Nylen P, Wigren J, Pejryd, Hansson M O. The modeling of coating thickness, heat transfer, and fluid flow and its correlation with the thermal barrier coating microstructure for a plasma sprayed gas turbine application [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1999, 8(3): 393-398.
- [3] Pfender E, Chang C H. Plasma spray jets and plasma particulate interaction: modeling and experiments [C]. Thermal Spray:

Meeting the Challenges of the 21st Century. France: ASM International, 1998; 315—327.

- [4] 刘大有. 二相流体动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- [5] Dantzig J A. Modeling liquid-solid phase changes with melt convection[J]. International Journal Numerical Methods in Engineer-

ing, 1989, 28: 1769—1785.

- [6] Westhoff R, Trapaga, Szekeley J. Plasma particle interactions in plasma spraying systems[J]. Metallurgical Transactions B, 1992, 23B: 683—693.

## Simulation of Melted State of Particles in Plasma Spray

FAN Qun-bo, WANG Lu, WANG Fu-chi

(School of Material Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Melted state of flying  $ZrO_2$  ceramic particles in plasma spray has been investigated in this paper by employing numerical simulation methods. Calculations are carried out for two kinds of single particle with diameters of  $30\ \mu\text{m}$  injected in typical plasma spraying conditions. Surface temperature histories of the flying particles, inner thermal state, temperature gradient as well as phase change of the particles of various sizes during their flight are successfully predicted. Based on these results, the spraying distance is discussed also, which can be classified into three regions, such as no melted, partially melted and completely melted zones. Only if the particles enter into completely melted zone, it is possible to form dense and idea coatings. These methods and results will bring insight into the practical thermal spray operations.

**Key words:** thermology; numerical simulation; plasma spray; flying particles; melted state