

粉末性质对同轴送粉激光熔覆中 粉末流场的影响规律

刘昊 虞钢 何秀丽 李少霞

(中国科学院力学研究所先进制造工艺力学重点实验室, 北京 100190)

摘要 在同轴送粉激光熔覆过程中,粉末流是影响熔覆质量的重要因素。为了提高粉末流的汇聚性,考察粉末性质对粉末流场的影响,建立了同轴送粉激光熔覆粉末流数值模型。模拟计算了 NiCoCrAlY、ZrO₂、W 三种典型粉末的粉末流形貌,并进行了粉末流的验证实验,实验结果与计算结果趋势吻合,说明模型具备合理性与可靠性。基于该模型,深入研究了粉末粒径、形状、密度和碰撞弹性恢复系数对粉末流汇聚的影响规律,在特定送粉工艺参数下,在粉末粒径增大时,汇聚焦距减小,汇聚浓度在一定粒径范围内达到最大值;在粉末形状系数或者密度增大时,汇聚焦距减小、汇聚浓度增大;在粉末颗粒的恢复系数减小时,汇聚焦距与汇聚浓度都增大。

关键词 激光技术;激光熔覆;数值模拟;粉末流

中图分类号 TG456.7; TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0503008

Effect of Powder Properties on the Convergence of Powder Stream in Coaxial Laser Cladding

Liu Hao Yu Gang He Xiuli Li Shaoxia

(Key Laboratory of Mechanics in Advanced Manufacturing, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract The powder stream has an important influence on the quality of coating in coaxial laser cladding. In order to improve the convergence of powder stream, a numerical model of powder stream in coaxial laser cladding is developed based on a given coaxial nozzle. Simulations of three kinds of powder stream, including NiCoCrAlY, ZrO₂ ceramic powder and W powder, are calculated and validated by the experimental results. The effect of powder properties, including particle diameter, shape, density and restitution coefficient, on the convergence of powder stream is investigated. According to the calculated results with the same powder feeding parameters, as the particle diameter increases, the powder flow focal distance decreases, and the powder concentration reaches a maximum within some particle diameter scale. The powder concentration gets bigger and the powder flow focal distance becomes shorter with the powder shape factor or powder density increasing. As restitution coefficient decreases, both powder flow distance and powder concentration increase.

Key words laser technique; laser cladding; numerical simulation; powder stream

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 240.6700

1 引言

在材料表面制备耐腐蚀、抗氧化、耐磨损和耐热冲击的高性能涂层,激光熔覆技术与其他表面改性

技术相比,具有结合强度高、涂层组织致密、稀释率低、基体的热影响区和加工应力变形小、环境污染小等优点,因此激光熔覆技术的研究和发展近年来受

收稿日期: 2013-01-04; 收到修改稿日期: 2013-02-18

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(10832011)和面上项目(10972222)资助课题。

作者简介: 刘昊(1985—),男,博士研究生,主要从事激光熔覆热防护涂层工艺等方面的研究。

E-mail: leonardo2008LH@163.com

导师简介: 虞钢(1958—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光与材料相互作用和激光制造工艺学等方面的研究。

E-mail: gyu@imech.ac.cn(通信联系人)

到了广泛的重视^[1~3]。激光熔覆根据送粉方式的不同可以分为预置粉末、侧向送粉和同轴送粉等几种不同加工方式,其中同轴送粉具有参数调整灵活、无方向性的特点,易于实现激光熔覆的自动化控制^[3~5]。

在同轴送粉激光熔覆中,粉末流场的分布对输送到熔池的粉末质量与激光能量的衰减有重要的影响^[5~7],是决定熔覆涂层质量的关键因素。同轴喷嘴的结构参数、送粉工艺参数、粉末性质和环境条件是影响粉末流场的主要因素。路桥潘等^[8]利用喷嘴模型研究了送粉喷嘴腔隙和粉腔锥角两个喷嘴结构参数对粉末流汇聚的影响规律。付伟等^[9]研究了在不同的中路气、载粉气、外层保护气的工艺参数组合下粉末的汇聚特性,找出了各工艺参数的取值范围。朱刚贤等^[10]应用气固两相流理论研究了粉末汇聚焦点的浓度及汇聚焦距与沉积层结构之间的关系。Zekovic 等^[11]采用气-粉两相流模型研究了送粉过程中平板基底和薄壁状基底对粉末颗粒的碰撞与反弹作用。谭华等^[12,13]在研究粉末输送过程中分别发现了粉末粒径、恢复系数对粉末流分布有一定的影响。

根据所制备涂层的用途不同,激光熔覆所选用的粉末材料也各不相同。目前一般常用的粉末有铁基、镍基、钴基合金粉末或复合粉末、陶瓷粉末和钨、钼、钽等难熔金属粉末^[14]。这些粉末由于本身材料属性与制备工艺的不同,在粉末颗粒的形貌、密度等性质方面具有较大的差别。由于在送粉过程中,粉末颗粒的飞行轨迹是与喷嘴腔壁面碰撞、送粉气流场与重力相互作用的结果,不同粉末受到这些作用的影响也不相同,因此研究粉末性质与粉末流汇聚特性之间的规律,对根据不同的粉末设计合理的送粉工艺参数及保证激光熔覆过程的稳定性具有重要意义。

粉末性质在工程实践中按化学成分、物理性能和工艺性能来进行划分和测定,但其中一些性质(熔点、电磁性质和表面活性等)对粉末颗粒的飞行轨迹的影响不大。本文建立了激光熔覆同轴送粉粉末流场的数值模型,通过实验验证了模拟结果,研究了粉末的粒径、形状、密度、碰撞恢复系数等性质对粉末流场的影响规律,为根据特定粉末的性质优化送粉工艺参数提供了依据。

2 同轴送粉模型的建立

典型的同轴送粉过程如图 1 所示。在同轴送粉

喷嘴中有三路气体,外环气体为保护气体,主要作用是在粉末流的外侧形成气体保护氛围,这对一些易氧化的金属粉末尤为重要;中环气体为载粉气体,主要在起承载运输粉末颗粒的作用,与粉末颗粒形成气固两相流;中路激光腔内为内环保护气体,主要起抑制粉末反弹与保护镜片的作用。

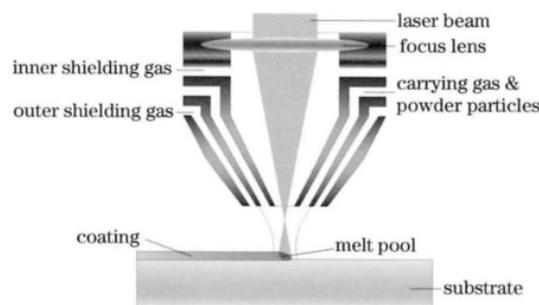


图 1 同轴送粉激光熔覆示意图

Fig. 1 Schematic of coaxial laser cladding

将同轴送粉过程中的载粉气体和保护气体作为不可压缩连续相处理,由流体力学中的连续方程和动量方程求解。由于单位时间内进入同轴喷嘴的粉末颗粒体积与气体体积比远小于 10%,将粉末颗粒视为气固两相流中的离散相处理,采用离散相模型描述粉末颗粒的行为^[15]。

2.1 气流场模型

气相的基本控制方程包括质量守恒和动量守恒方程。在典型送粉工艺参数下,气流表现为稳定、不可压缩和恒温的湍流,因此引入标准 $k-\epsilon$ 湍流模型求解^[11]。标准 $k-\epsilon$ 湍流模型具有稳定性、经济性和计算精度比较高的特点。

湍流动能方程为

$$\frac{\partial(\rho k \mu_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon. \quad (1)$$

湍流耗散率方程为

$$\frac{\partial(\rho \epsilon \mu_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} (G_k + G_b) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \quad (2)$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j}, \quad (3)$$

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho P_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}, \quad (4)$$

式中 k 是湍流动能, ϵ 是湍流耗散率, $i, j = 1, 2, 3$, $\mu = \mu_0 + \mu_t$ (μ_0 是分子粘度, μ_t 是紊流粘度, $\mu_t = \rho C_u k^2 / \epsilon$)。 G_k 表示由平均速度梯度产生的湍流动能, G_b 表示由浮力产生的湍流动能, P_t 为湍流普朗特数,其中常数 $\sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3, C_1 = 1.44, C_2 =$

1.92, $C_\mu = 0.09$ 。

2.2 粉末轨迹模型

对于粉末颗粒,采用基于欧拉-拉格朗日模拟方法中的离散相模型描述,颗粒在拉格朗日坐标下的受力平衡方程为^[15]

$$\frac{du_{p_i}}{dt} = F_D(u_i - u_{p_i}) + \frac{g_i(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_i, \quad (5)$$

式中 u_{p_i} 为颗粒速度, ρ_p 为颗粒密度, F_i 为附加力, $F_D(u_i - u_{p_i})$ 为颗粒的单位质量拽力:

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24}, \quad (6)$$

式中 d_p 为颗粒直径, C_D 为拽力系数, Re 为颗粒相对雷诺数, 定义为

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu}. \quad (7)$$

对于亚观尺度(直径为 $1 \sim 10 \mu\text{m}$)的颗粒,则遵循斯托克斯拽力公式,拽力定义为

$$F_D = \frac{18\mu}{d_p^2 \rho_p C_c}, \quad (8)$$

式中的系数 C_c 为斯托克斯拽力公式的 Cunningham 修正,其计算公式为

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} \left\{ 1.257 + 0.4 \exp \left[- \left(\frac{1.1 d_p}{2\lambda} \right) \right] \right\}, \quad (9)$$

式中 λ 为气体分子平均自由程。

采用随机轨道模型模拟湍流对颗粒的影响。在颗粒轨道积分计算的过程中,流体速度为瞬时速度与脉动速度之和,用这种方法计算足够多的代表性颗粒的轨道,来确定湍流对颗粒的随机性影响。

2.2.1 粉末颗粒的粒径及分布

粉末的粒径和粒径分布主要与粉末的制备方法和工艺有关。一般机械粉碎粉末较粗,气相沉积粉末极细,而还原粉末和电解粉末则可以通过还原温度或电流密度在较宽的范围内变化。严格地讲,粒径仅指单个颗粒而言,而粒径分布则指整个粉末体,这里讲的粉末粒径包含有粉末平均粒径的意义,即粉末的某种统计性平均粒径。

粉末冶金用的金属粉末的粒径范围很广,大致为 $0.1 \sim 500 \mu\text{m}$ 。实际粉末颗粒形状一般不对称,仅用一维的几何尺寸不能精确地表示颗粒的真实大小,这里采用显微镜投影几何学原理测得颗粒三个互成 60° 方向的投影径,以其算术平均值表征粉末粒径。粉末体的粒径分布采用 Rosin-Rammler 分布拟合。Rosin-Rammler 分布假定在颗粒直径 d 与大于此直径的颗粒的质量分数 Y_d 之间存在指数关系:

$$Y_d = \exp[-(d/\bar{d})^n], \quad (10)$$

式中 \bar{d} 为中位径, n 为分布指数。

2.2.2 粉末颗粒的形状

一般来说,准确描述粉末颗粒的形状是很困难的,这里引入形状系数 Φ 来描述非球形颗粒的形状,形状系数 Φ 的定义如下:

$$\Phi = \frac{s}{S}, \quad (11)$$

其中 s 为与实际颗粒具有相同体积的球形颗粒的表面积, S 为实际颗粒的表面积。 Φ 的取值范围为 $(0, 1)$, 颗粒形状越不规则越复杂,形状系数就越小。颗粒的形状对气流场中颗粒所受拽力影响显著,对于非球形颗粒,拽力系数 C_D 表示为^[16]

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + b_1 Re b_2) + \frac{b_3 Re}{b_4 + Re}, \quad (12)$$

$$b_1 = \exp(2.3288 - 6.4581\Phi + 2.4486\Phi^2), \quad (13)$$

$$b_2 = 0.0964 - 0.5565\Phi, \quad (14)$$

$$b_3 = \exp(4.905 - 13.8944\Phi + 18.422\Phi^2 - 10.2599\Phi^3), \quad (15)$$

$$b_4 = \exp(1.4681 - 12.258\Phi - 20.7322\Phi^2 + 15.8855\Phi^3). \quad (16)$$

2.2.3 粉末颗粒的恢复系数

粉末颗粒在进入同轴喷嘴后,在喷嘴内部的环腔内经历多次碰撞反弹作用,颗粒在反弹过程中发生动量变化,这种变化由恢复系数确定:

$$e_n = \frac{V_{2n}}{V_{1n}}, \quad (17)$$

式中 V_{1n} , V_{2n} 分别为颗粒碰撞前、后垂直壁面的法向速度分量。同理,切向恢复系数由碰撞前后切向速度分量之比确定。完全弹性碰撞的恢复系数等于 1.0,表示碰撞前后没有动量损失。当恢复系数等于 0 时表示颗粒在碰撞后损失了所有动量。粉末颗粒的恢复系数与壁面条件、入射速度、材料属性等均有一定的关系,经相关研究表明,粉末颗粒的取值范围一般为 $0.91 \sim 0.99$ ^[17]。为便于研究,本文在粉末与壁面条件一定的情况下将恢复系数作为常数处理。

2.3 模型描述与主要计算参数

经送粉器送出的粉末分为 4 路进入同轴喷嘴,内环保护气与外环保护气各分为两路进入同轴喷嘴,各入口与喷嘴的环腔相连,粉末与气体经环腔的环形出口离开喷嘴,在环腔锥角的作用下汇聚于喷嘴下方。假设在进入同轴喷嘴之前,载粉气和粉末混合充分,粉末颗粒在进入喷嘴入口时与载粉气速度相同,并且垂直入口平面。本研究所用的同轴喷

嘴主要结构参数如表 1 所示。

建立的三维几何模型包括喷嘴结构和喷嘴下方的圆柱形计算区域。采用贴体坐标系方法分区划分网格,较为复杂的喷嘴结构采用四面体和六面体单元的非结构化网格划分,喷嘴下方的区域采用六面体单元结构化网格划分。模型结构与网格划分如

表 1 同轴送粉喷嘴主要结构参数

Table 1 Main structural parameters of the coaxial nozzle

Inner gas inlet diameter /mm	Carrier gas inlet diameter /mm	Outer gas inlet diameter /mm	Middle cone ring gap (mm)/angle(°)	Outer cone ring gap (mm)/angle(°)
6	4	2	2.2/60	1.2/50

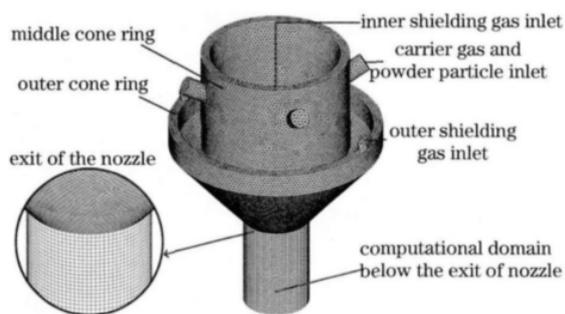


图 2 三维几何模型及网格划分

Fig. 2 Meshed geometry of the coaxial nozzle

图 2 所示。对于气相,气体及粉末入口设置为速度入口边界,喷嘴的内外壁设置为壁面边界,喷嘴下方的圆柱区域的侧面及地面设置为压力边界出口。对于离散相,将喷嘴内外壁设置为反弹边界,将喷嘴下方的圆柱区域的侧面及底面设置为逃逸边界,即粉末颗粒到达此类边界后不再参与轨道的计算。

本研究所采用的载粉气体和保护气体均为氩气。在研究中主要采用 NiCoCrAlY、ZrO₂、W 粉三种典型粉末。这三种粉末在扫描电镜下的微观形貌如图 3 所示。NiCoCrAlY 粉末颗粒成分较复杂,多呈近似球形或椭球形,粒径范围在 48.7~127.8 μm; ZrO₂ 陶瓷粉末颗粒的形状主要为板状,粒径范围在 11.8~83.8 μm; W 粉末颗粒呈不规则的多面体形貌,致密细小,粒径在 0.8~2.13 μm 的范围,属亚观尺度的颗粒。这三种粉末的主要计算性能参数如表 2 所示,为研究方便,粉末颗粒的形状系数和恢复系数等参数取其统计平均值。



图 3 粉末颗粒形貌。(a) NiCoCrAlY 粉末; (b) ZrO₂ 陶瓷粉末; (c) W 粉末

Fig. 3 Powder particle morphology. (a) NiCoCrAlY powder; (b) ZrO₂ ceramic powder; (c) W powder

表 2 粉末性能参数

Table 2 Property parameters of powders

Powder	Density / (kg/m ³)	Size / μm	Shape factor	Restitution coefficient
NiCoCrAlY	8350	48.7~127.8	0.9	0.93
ZrO ₂	5846	11.8~83.8	0.6	0.91
W	19350	0.8~2.13	0.8	0.92

3 计算结果验证与分析

3.1 同轴送粉模型的实验验证

为了验证数值计算结果的合理性与可靠性,设计了粉末流场 CCD 相机拍摄实验。实验在暗箱中进行,暗箱的侧面通过狭缝射入强光光源,CCD 相机通过暗箱正面的小孔拍摄粉末流图像。由于粉末

颗粒反射光线,粉末流图像灰度与粉末浓度成比例关系。

NiCoCrAlY 粉末流形貌的计算结果与实验对比如图 4 所示。图 4(a)显示粉末颗粒飞行轨迹与粉末浓度计算结果,采用的送粉工艺参数为内环保护气流量为 8.5 L/min、载粉气流量为 3 L/min、外

环保护气流量为 4 L/min、送粉速率为 4.2 g/min；图 4(b)是在相同参数下的粉末流的实验结果。为了分辨粉末颗粒的飞行轨迹，计算结果图仅显示了部分粉末颗粒计算轨迹，由轨迹点上的颜色区分该位置的粉末浓度。计算结果和实验结果的粉末流形貌基本相同，粉末流的汇聚位置、浓度分布的大体趋势基本对应，说明了同轴送粉粉末流模型的合理性。计算结果图中有部分粉末颗粒的飞行轨迹汇聚趋势较差，与实验图像有略微差异，产生这种结果的主要原因是：NiCoCrAlY 粉末由多种不同成分的颗粒构成，而在计算中密度和形状系数等粉末性质的设置是取统计平均值，使个别颗粒的性质可能与实际相差较大，导致其飞行轨迹的偏差较大。

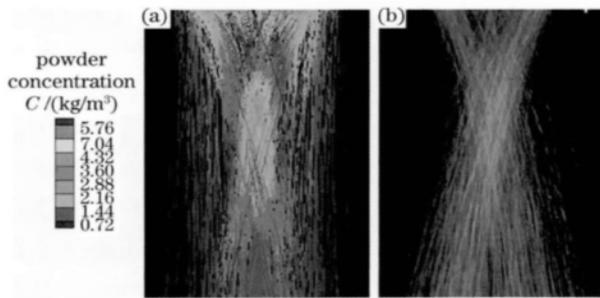


图 4 NiCoCrAlY 粉末流场计算结果与实验结果对比

Fig. 4 Comparison between simulated and experimental results of NiCoCrAlY powder flow

在同轴喷嘴下方的粉末浓度分布可以看出，粉末流在三路气体的协调作用下呈现出束腰型的汇聚特点，从上到下可以分为三个典型的区域：过渡区、汇聚区和发散区。过渡区的粉末浓度在水平面上呈环状分布，越向下环状越向中心移动。当中心浓度达到最高时进入汇聚区，粉末浓度在汇聚区焦点处达到最高，汇聚区的高度可认为是粉末流的汇聚焦深。最后，在水平速度的作用下，部分颗粒飞出中心区域，在汇聚区下方形成发散区。

图 5 为在相同送粉工艺参数下的 ZrO_2 粉末流形貌的计算结果与实验结果对比。可以看出， ZrO_2 粉末流形貌结构实验结果与计算结果基本一致。与 NiCoCrAlY 粉末流相似，在同轴喷嘴下方的 ZrO_2 粉末流也明显地分为过渡区、汇聚区和发散区。

W 粉粉末流形貌的计算结果与实验对比如图 6 所示。与 NiCoCrAlY 粉末流与 ZrO_2 粉末流相比，W 粉粉末流的结构有较大不同，其粉末流的汇聚区范围较大，不存在明显的发散区，这与 W 粉粉末流受气流场影响较大有关。粉末性质与气流场影响之间的关系将在下一节详细讨论。从对比图中也可以

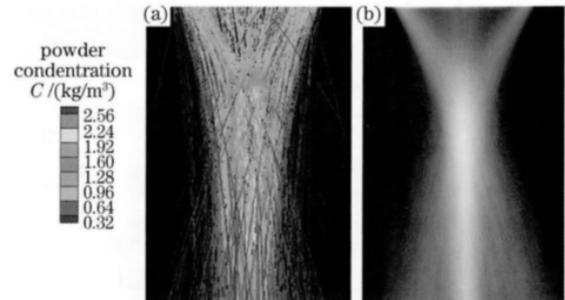


图 5 ZrO_2 粉末流场计算结果与实验结果对比

Fig. 5 Comparison between simulated and experimental results of ZrO_2 powder flow

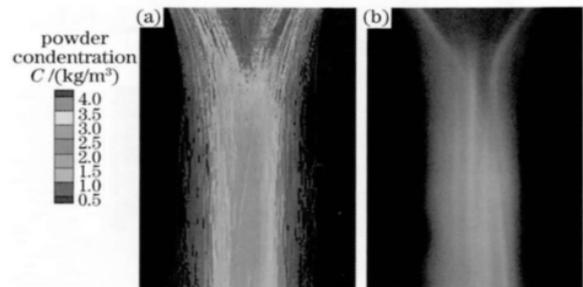


图 6 W 粉粉末流场计算结果与实验结果对比

Fig. 6 Comparison between simulated and experimental results of W powder flow

看出，W 粉末流形貌的计算结果与实验结果比较吻合。

利用同轴送粉模型计算出的 3 种典型粉末的粉末流，在粉末流的形貌、汇聚位置和浓度分布的趋势上与实验结果基本一致，说明了该模型对计算不同粉末性质的粉末流具备一定的可靠性。

3.2 粉末性质对粉末流的影响

对于特定的粉末，其颗粒飞行轨迹主要取决于在同轴喷嘴中与粉末环腔的碰撞作用、重力场与气流场。不同性质的粉末，受这三者的影响程度不同，粉末流的汇聚也会表现出明显的不同。下面以 NiCoCrAlY 粉末为例，研究粉末粒径、形状、密度和恢复系数等性质对粉末流汇聚作用的影响。

在内环保护气流量、载粉气流量和外环保护气流量分别为 8.5 L/min、3 L/min、4 L/min 情况下，送粉喷嘴下方纵截面气流速度场如图 7 所示。从气流速度场可以看出，在三路气体的共同作用下喷嘴下方产生一个锥形的强气流区域，这个区域的大小主要由内环保护气流速控制。当喷嘴下方存在基体时，强气流有效抑制了粉末颗粒碰撞基体后的向上反弹作用，防止反弹后的熔融颗粒粘结在喷嘴出口造成堵粉现象。另外，强气流对粉末流的汇聚具有

重要影响。一方面,粉末颗粒进入强气流区域汇聚,必须具备一定的速度和惯性;另一方面,强气流区域内的粉末颗粒在气流与重力的作用下向下的速度迅速增大,有利于形成一定的汇聚焦深。

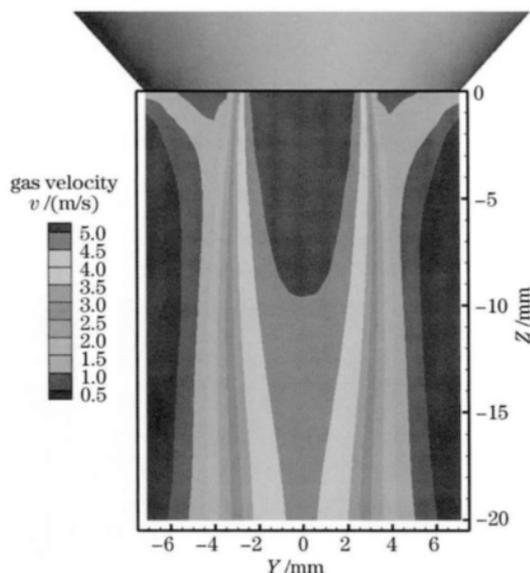


图 7 送粉喷嘴下方纵截面气流速度场

Fig. 7 Gas velocity distribution below the coaxial nozzle

3.2.1 粉末粒径对粉末流的影响

NiCoCrAlY 粉末粒径分别在 100 目 (150 ~ 180 μm)、140 目 (106 ~ 150 μm)、200 目 (75 ~ 106 μm)、270 目 (53 ~ 75 μm)、325 目 (45 ~ 53 μm) 时,喷嘴下方粉末浓度分布如图 8 所示。图 8(a)是在不同目数下粉末沿喷嘴出口中心轴线的浓度分布,粉末汇聚焦距在 100 目时为 8 mm,在 325 目时为 13 mm,粉末汇聚焦距随着粉末粒径的减小有增大的趋势,这是因为粉末的粒径小,则相应的惯性小,受气流场分布的影响就越大,其进入锥形强气流区域的位置也就靠下,因而其汇聚焦距变大。在 100 目、140 目、270 目时的粉末汇聚焦距相差不大,分布也近似,其中 100 目的粉末其分布呈现出明显的双峰特征,其第一个峰主要是由一部分较大粒径的粉末沿环腔锥角的延线汇聚于喷嘴下方而形成的。图 8(b)是不同目数下在其汇聚平面上水平方向的粉末浓度分布,从图中可以看出,汇聚平面水平方向上的粉末浓度分布具有相似的趋势,距喷嘴中心线距离增大则粉末浓度逐渐减低。随着粉末粒径的减小,在半径 2 mm 的范围内其分布越趋于高斯分布。在 270 目的粉末汇聚焦距最大,粉末焦距为 8.4 mm,并具有合适的汇聚焦深,说明在当前送粉工艺条件下,对 270 目的 NiCoCrAlY 粉末汇聚效果最好。

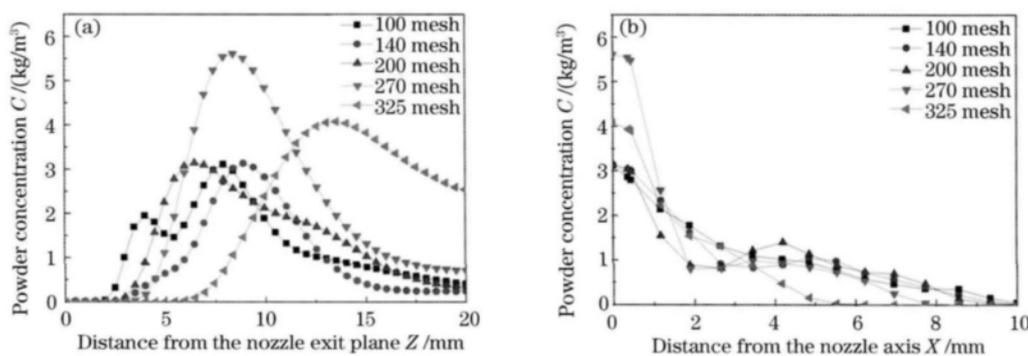


图 8 不同粒径下的粉末浓度分布。(a)沿喷嘴出口中轴线方向;(b)沿汇聚平面上的轴线方向

Fig. 8 Powder concentration with different powder sizes. (a) Along nozzle axis; (b) along radial axis in focal plane

3.2.2 粉末形状对粉末流的影响

在其他条件不变的情况下,不同粉末形状系数下的粉末汇聚焦距和汇聚焦距的变化如图 9 所示,可见同轴喷嘴下的粉末流汇聚特性对粉末的形状比较敏感。随着粉末颗粒形状从非球形向完全规则球形变化的过程中,粉末流汇聚浓度呈逐渐上升的趋势,尤其在形状系数在 0.3 ~ 0.5 之间的上升趋势最为明显;而粉末流的汇聚焦距则从 16.0 mm 呈双曲线型下降到 7.4 mm。

粉末形状对粉末流的汇聚作用的影响主要体现在对拽力的影响上,粉末形状越不规则,其颗粒表面越复杂,单位质量粉末受到气流场的拽力也就越大,即粉末颗粒受到气流场的带动作用越大,其飞行轨迹就越趋近于气流场的迹线。由于在图 7 所示的气流场下,中路强气流的作用使载粉气流的迹线并不汇聚于喷嘴中心,所以粉末颗粒形状越不规则,其汇聚焦点距离喷嘴就越远,汇聚浓度也越小。根据以上分析,对于形状不规则的粉末,可以通过降低中路

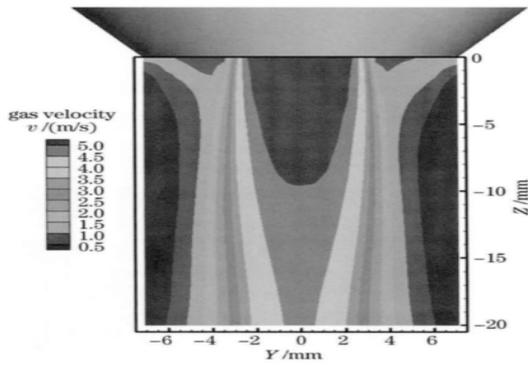


图 9 粉末流汇聚浓度与汇聚焦距随粉末颗粒形状系数的变化

Fig. 9 Variation of maximum powder concentration and focal distance with shape factor

保护气流量和提高载粉气流量的方式来改善粉末流的汇聚特性。

3.2.3 粉末密度对粉末流的影响

粉末密度对粉末流汇聚浓度与汇聚焦距的影响如图 10 所示。随着粉末密度的增加,粉末流汇聚浓度逐渐上升,并且上升趋势逐渐趋缓。粉末汇聚焦距则随着粉末密度的增加而减小。这是因为粉末流在从同轴喷嘴的粉末环腔喷出后,密度越大,因而惯性大,粉末颗粒沿环腔锥角方向飞行的能力越强。根据同轴喷嘴的结构参数(如表 1 所示),环腔锥角沿线的交点在喷嘴下方 6.8 mm 处。所以随着密度增大到 14500 kg/m³,粉末汇聚焦点沿喷嘴轴线逐渐上移到距离喷嘴 9.9 mm 处。同时,在单位时间内进入强气流区域汇聚的颗粒数目增多,所以汇聚浓度也升高。但密度大的粉末颗粒,中路强气流对其形成汇聚深的作用也就越小,粉末颗粒飞行至会

聚区后很快沿原方向飞出,进入发散区。这是粉末汇聚浓度增长趋势减缓的原因。

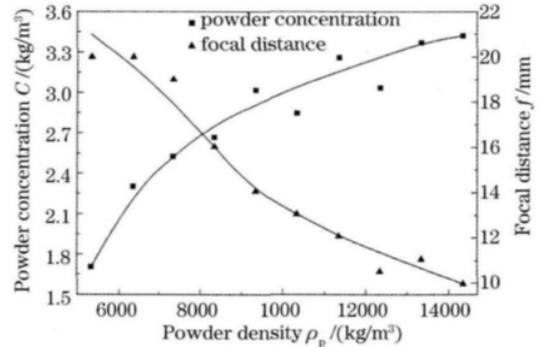


图 10 粉末流汇聚浓度与汇聚焦距随粉末颗粒密度的变化

Fig. 10 Variation of maximum powder concentration and focal distance with powder density

3.2.4 粉末恢复系数对粉末流的影响

粉末恢复系数分别为 0.91、0.95、0.99 的情况下,粉末浓度分布情况如图 11 所示。不同恢复系数下的粉末流汇聚特性有很大差异,在弹性系数为 0.91 时粉末流的汇聚浓度是弹性系数为 0.99 的 2 倍,粉末汇聚焦距也从 7.4 mm 减小到 4.5 mm,显然弹性系数较小的粉末其汇聚特性更好。图 12 显示了弹性系数为 0.91 与 0.99 的两种情况下,从同轴喷嘴粉末入口处某一点进入的粉末颗粒在随机轨道模型下计算出的 600 条飞行轨迹,可见弹性系数较小的粉末颗粒在粉末环腔中经过多次反弹作用后,其动量损失较大,在同轴喷嘴出口处的速度方向性较为集中,径向速度分量也较小,颗粒飞行轨迹在喷嘴下方较为相近,所以粉末流的汇聚浓度与汇聚焦距都比较大。

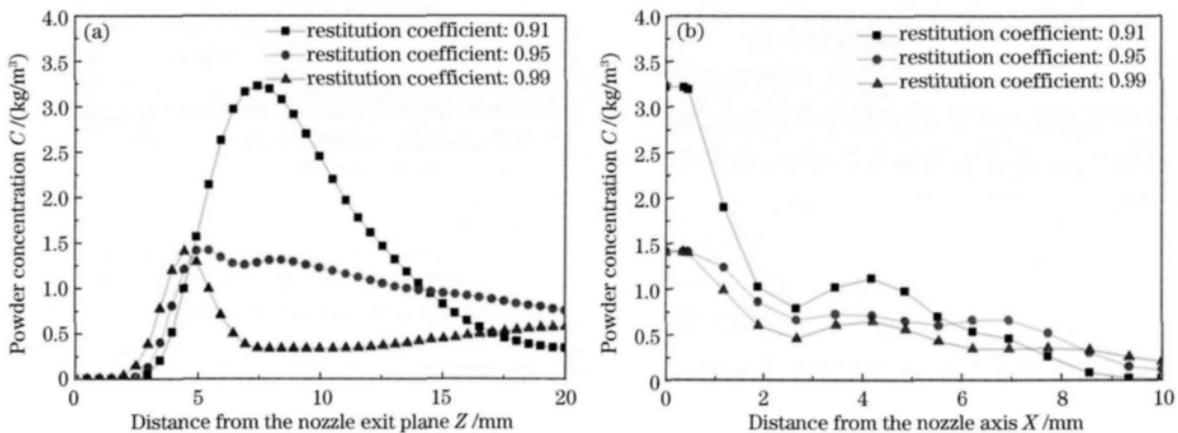


图 11 不同恢复系数下的粉末浓度分布。(a)沿喷嘴出口中轴线方向;(b)沿汇聚平面上的轴线方向

Fig. 11 Powder concentration with various restitution coefficients. (a) Along nozzle axis; (b) along radial axis in focal plane

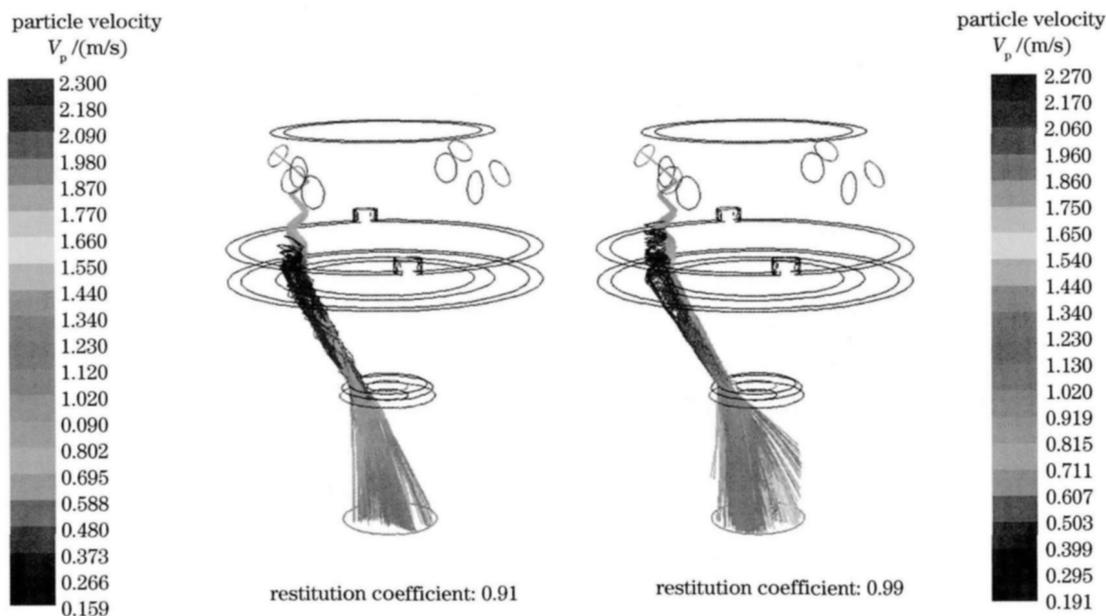


图 12 不同恢复系数下的粉末颗粒飞行轨迹

Fig. 12 Trajectory of powder particles with two different restitution coefficients

综上所述,气流场对粉末的汇聚作用有重要的影响,粉末粒径越小、形状越不规则以及密度越小的粉末颗粒的飞行轨迹与气流场的迹线越相近。由于气流场主要由载粉气流量和内外环保护气流量等送粉工艺参数决定,所以应根据不同粉末材料的粒径、形状、密度及恢复系数,合理地设定送粉工艺参数,使喷嘴下形成的气流场利于特定粉末流的汇聚。

5 结 论

采用离散相模型建立了同轴送粉粉末流数值计算模型,对比了 NiCoCrAlY、ZrO₂ 和 W 粉三种典型粉末流的模拟计算结果和实验结果,两者趋势一致,说明了模型具备合理性和可靠性。研究了粉末的粒径、形状、密度和恢复系数对粉末流汇聚的影响规律。在特定的内环保护气流量、载粉气流量以及外环保护气流量条件下,随着粉末粒径增大,粉末汇聚焦距减小,汇聚浓度先增大后减小,粉末粒径在 270 目时 NiCoCrAlY 粉末汇聚特性最好;粉末形状系数从 0.3~1.0 的变化过程中,汇聚浓度增大,其中在形状系数为 0.3 到 0.5 间的增幅最大,粉末汇聚焦距则从 16.0 mm 下降到 4.4 mm;随着粉末密度的增大,汇聚浓度增大,粉末汇聚焦点沿喷嘴轴线逐渐上移到距离喷嘴 9.9 mm 处;弹性系数为 0.91 的粉末流的汇聚浓度是弹性系数为 0.99 的 2 倍,汇聚焦距也从 7.4 mm 减小到 4.5 mm。在送粉过程中,粉末颗粒的飞行轨迹主要由喷嘴腔壁面上的碰

撞、送粉气流场与重力所决定。不同性质的粉末受到这三者的作用程度不同,所以粉末流表现出不同的汇聚特性。在同轴送粉激光熔覆中,应根据粉末性质,合理地优化送粉工艺参数,以提高粉末流的汇聚性与粉末利用率。

参 考 文 献

- 1 L. Dubourg, J. Archambeault. Technological and scientific landscape of laser cladding process in 2007 [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2008, **202**(24): 5863~5869
- 2 Huang Yongjun. Characterization of dilution action in laser-induction hybrid cladding [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2011, **43**(5): 965~973
- 3 Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour, Stephen Corbin. *Laser Cladding* [M]. Florida: CRC Press, 2005. 1~40
- 4 Jin Xiaoshu, Yang Xichen, Feng Liwei *et al.*. Numerical simulation of coaxial powder flow with carrying gas in laser manufacturing [J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2007, **43**(5): 161~166
靳晓曙, 杨洗陈, 冯立伟 等. 激光制造中载气同轴送粉粉末流场的数值模拟[J]. *机械工程学报*, 2007, **43**(5): 161~166
- 5 Jin Shaowei, He Xiuli, Wu Yang *et al.*. Laser power attenuation by powder flow in coaxial laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 67~72
靳绍巍, 何秀丽, 武 扬 等. 同轴送粉激光熔覆中粉末流对光束能量的衰减作用[J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 67~72
- 6 I. Tabernero, A. Lamikiz, S. Martinez *et al.*. Modelling of energy attenuation due to powder flow-laser beam interaction during laser cladding process [J]. *J. Materials Processing Technology*, 2012, **212**(2): 516~522
- 7 Andrew J. Pinkerton. An analytical model of beam attenuation and powder heating during coaxial laser direct metal deposition [J]. *J. Phys. (D)*, 2007, **40**(23): 7323~7334
- 8 Lu Qiaopan, Zhang Anfeng, Li Dichen *et al.*. Numerical simulation and experimental research on gas-carrier coaxial

- powder nozzle [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3162~3167
- 路桥潘, 张安峰, 李涤尘等. 载气式同轴送粉喷嘴的数值模拟及实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 3162~3167
- 9 Fu Wei, Zhang Anfeng, Li Dichen *et al.*. Influence of three-route gas flows on powder converging behavior in coaxial powder feeding nozzles [J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, **22**(2): 220~226
- 付 伟, 张安峰, 李涤尘等. 同轴送粉喷嘴三路气流对粉末汇聚特性的影响[J]. *中国机械工程*, 2011, **22**(2): 220~226
- 10 Zhu Gangxian, Li Dichen, Zhang Anfeng *et al.*. Influence of deposited layer's structure on flow field of coaxial powder feeding nozzle [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1636~1642
- 朱刚贤, 李涤尘, 张安峰等. 沉积层结构对同轴送粉喷嘴粉末流场的影响规律[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1636~1642
- 11 Srdja Zekovi, Rajeev Dwivedi, Radovan Kovacevic. Numerical simulation and experimental investigation of gas-powder flow from radially symmetrical nozzles in laser-based direct metal deposition [J]. *International J. Machine Tools & Manufacture*, 2007, **47**(1): 112~123
- 12 Tan Hua, Zhang Fengying, Wen Rujun *et al.*. Numerical simulation of powder feed of laser solid forming [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 46~53
- 谭 华, 张凤英, 温如军等. 激光立体成形粉末流输送的数值模拟研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 46~53
- 13 Balu Prabu, Leggett Perry, Kovacevic Radovan. Parametric study on a coaxial multi-material powder flow in laser-based powder deposition process [J]. *J. Materials Processing Technology*, 2012, **212**(7): 1598~1610
- 14 Wu Yang. Microstructure and Properties of Refractory Alloy Coatings by Laser Cladding Technology [D]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2011. 13~18
- 武 扬. 难熔金属激光熔覆工艺及涂层组织性能研究[D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2011. 13~18
- 15 I. Tabernero, A. Lamikiz, E. Ukar *et al.*. Numerical simulation and experimental validation of powder flux distribution in coaxial laser cladding [J]. *J. Materials Processing Technology*, 2010, **210**(15): 2125~2134
- 16 A. Haider, O. Levenspiel. Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles [J]. *Powder Technology*, 1989, **58**(1): 63~70
- 17 Du Wei, Bao Xiaojun, Xu Jian *et al.*. Computational fluid dynamics(CFD) modeling of spouted bed: influence of frictional stress, maximum packing limit and coefficient of restitution of particles [J]. *Chemical Engineering Science*, 2006, **61**(14): 4558~4570

栏目编辑: 宋梅梅