

## 同轴送粉激光熔覆气-粉耦合传输行为数值模拟

冯校飞<sup>1</sup>, 韩日宏<sup>1,2\*</sup>, 高昱<sup>3</sup>, 武姜汝<sup>1</sup>, 齐海波<sup>1,2</sup><sup>1</sup>石家庄铁道大学材料科学与工程学院, 河北 石家庄 050043;<sup>2</sup>河北省交通工程材料重点实验室, 河北 石家庄 050043;<sup>3</sup>山东大学材料科学与工程学院山东省现代焊接工程技术研究中心, 山东 济南 250014

**摘要** 针对同轴送粉激光熔覆气-粉耦合传输过程, 提出了一种等效模型。该等效模型考虑粉末与喷嘴壁、粉末之间复杂碰撞行为对粉末出射角度和速度的影响。并建立了喷嘴外部的气-粉传输模型。对粉末瞬态位置、运动轨迹及连续分布的平均密度进行模拟, 研究工作表面状态和压缩气流速对上述变量的影响规律。结果表明: 粉末整体形貌、聚集位置及轨迹线密度的模拟结果均与实验结果吻合较好; 熔池未形成时对粉末的反弹在距离工件约 10 mm 高度的粉末中心区域较为显著, 该区域的粉末密度最大提升了约 1 倍, 而随着距离工件的高度增加, 粉末密度的提升效果逐渐减弱; 压缩气流速提高至 2.5 m/s 时, 粉末中心轴线上粉末密度增加至约 5.2 kg/m<sup>3</sup>, 而压缩气流速继续提高至 5.0 m/s 时, 中心线上粉末密度则下降了约 8%。

**关键词** 激光光学; 激光熔覆; 气-粉耦合传输; 粉末密度; 数值模拟

中图分类号 TG456.7 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0714006

## Numerical Simulation for Gas-powder Coupled Transmission of Coaxial Powder-Feeding Laser Cladding

Feng Xiaofei<sup>1</sup>, Han Rihong<sup>1,2\*</sup>, Gao Yu<sup>3</sup>, Wu Jiangru<sup>1</sup>, Qi Haibo<sup>1,2</sup><sup>1</sup>School of Materials Science and Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;<sup>2</sup>Hebei Key Laboratory of Traffic Engineering Materials, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;<sup>3</sup>Shandong Engineering & Technology Research Center for Modern Welding, School of Materials Science & Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250014, China

**Abstract** Targeting the gas-powder coupled transmission process of coaxial powder feeding laser cladding, an equivalent model is proposed to consider the influence of the complex collision behavior between the powder and nozzle wall and the powder on the exit angle and speed of the powder. In addition, the gas-powder transmission model outside the nozzle is established. Key variables, e. g., transient position of the powder, trajectory of motion, and average density of the continuous distribution of the powder, were simulated, and the influence of the surface state of the workpiece and flow rate of compressed gas on the above variables was studied. The results demonstrate that the simulation results are in good agreement with experimental results from the overall shape of the powder beam, gathering position, and track line density. The rebound of powder when the molten pool is not formed is more significant in the center of the powder beam (about 10 mm from the workpiece), the powder density in this

收稿日期: 2020-08-27; 修回日期: 2020-09-06; 录用日期: 2020-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(51705345, 51775359)、河北省重点研发计划(18211813D)、河北省自然科学基金(E2017210054)、河北省教育厅青年拔尖项目(BJ2018034)

\*E-mail: rhhan@stdu.edu.cn

area increased by approximately one times at the maximum, and as the height from the workpiece increased, the effect of increasing the powder density gradually weakened. The compressed gas flow rate increased to 2.5 m/s, the powder density on the central axis of the powder beam increased to approximately 5.2 kg/m<sup>3</sup>, the compressed gas flow rate continued to increase to 5.0 m/s, and powder density on the centerline was reduced by approximately 8%.

**Key words** laser optics; laser cladding; gas-powder coupling transmission; powder density; numerical simulation

**OCIS codes** 140.3390; 350.3390; 240.6700

## 1 引言

激光熔覆是一种新型零件制备及表面处理技术,以快速成型、灵活多变、节省材料等优点在材料加工领域的应用日益广泛<sup>[1-3]</sup>。该技术利用高能激光束在基材表面形成熔池,同时喷嘴向熔池提供粉末,粉末经过熔化凝固实现与基材的冶金结合,获得完全致密、力学性能良好的零件<sup>[4-8]</sup>。其中金属粉末传输特性直接决定粉末与激光的交互行为,进而决定粉末进入熔池时的温度分布和固液状态,最终对熔池的传热传质行为、熔覆层成形及微观组织形貌演变、熔覆层力学性能产生重要影响<sup>[9-11]</sup>。因此,精准预测熔覆过程中粉末传输轨迹和密度分布对实现熔覆层组织和性能调控具有重要意义。然而粉末传输是一个高度动态且随机性强的复杂过程,涉及复杂紊流与粉末的交互作用,更为关键的是喷嘴内部粉末与壁面、粉末之间的碰撞行为会显著改变粉末出射角度及速度分布,单纯通过实验手段进行研究并准确预测不同工艺下粉末传输行为是十分困难的。

随着计算机和数值模拟技术的快速发展,国内外研究者已经实现了对激光熔覆过程中复杂气流及粉末传输过程的模拟并开展了相关研究工作。Kovalev 等<sup>[12-15]</sup>针对激光熔覆粉末传输行为开展了较为细致的研究,分析了不同喷嘴结构、工艺参数对粉末传输特性的影响。Liu 等<sup>[16]</sup>研究了一种镍基合金粉末在传输过程中的空间密度分布特征,模型中假设粉末形状均为球形。Kovaleva 等<sup>[17]</sup>模拟了不同结构喷嘴对粉末运动轨迹的影响。Smurov 等<sup>[18]</sup>针对同轴喷嘴结构模拟了不同碰撞条件下粉末束的形状,考虑了颗粒形状和尺寸影响,但模拟结果与实际存在较大差异。在国内,Dong 等<sup>[19]</sup>建立了激光熔覆气粉传输的二维模型,研究了保护气流量和送粉量对粉末空间密度和速度场的影响。杨楠等<sup>[20-21]</sup>建立了二维气体流动和粉末轨迹模型,模拟了不同工艺下气流及粉末传输行为。综上所述,已有研究重点关注了不同工艺条件下粉末与气体交

互作用及粉末的运动规律,研究结果有助于揭示不同工艺参数对粉末传输过程的影响规律。然而,喷嘴内载气通道狭窄,粉末碰撞行为及出射状态受粉末材料和形状、壁面材料、壁面粗糙度等诸多因素影响,在考虑复杂因素条件下直接对喷嘴内粒子碰撞行为进行建模时求解难度很大,且模拟结果精度难以保证。

本文在已有工作基础上基于同轴环形喷嘴结构提出了一种等效模型来考虑粉末与喷嘴壁、粉末之间复杂碰撞行为对粉末出射角度和速度的影响,并采用相同粉末及喷嘴条件下粉末轨迹实验结果对等效模型的关键参数进行拟合。该等效模型为工程应用中预测粉末轨迹提供了一种新的方法。在此基础上,建立气粉传输模型,模拟不同工艺条件下粉末传输过程,并通过对不同时刻离散的粉末位置进行统计,得到连续分布的粉末平均密度结果。本研究结果能够更直观地揭示粉末束的整体分布规律,为后续研究粉末束与激光能量的交互作用提供数据基础。

## 2 模型描述

### 2.1 气体动力学模型

由于同轴环形喷嘴为轴对称结构,黏性不可压缩气体动量方程<sup>[15]</sup>可以表示为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho V_{ky}}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho V_{ky}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} (\rho V_{gx} V_{ky}) = -\frac{\partial P'}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu_{\text{eff}} \left( \frac{\partial V_{gx}}{\partial y} + \frac{\partial V_{ky}}{\partial x} \right) \right], \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} [V_{ky} (\rho E + P)] = \tau_y \frac{\partial V_{gx}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (3)$$

式中: $x, y$ 为坐标; $V_{gx}, V_{ky}$ 为气体速度沿 $x, y$ 方向分量; $\rho$ 为气体密度; $T$ 为温度; $P$ 为压力; $k$ 为热导率; $P'$ 为经过修正后的压力; $E$ 为单位质量气体的总能量; $\tau_y$ 为黏度应力张量大小; $t$ 为时间。

$$P' = P + \frac{2}{3} \rho s + \frac{2}{3} \mu_{\text{eff}} \frac{\partial V_{\text{gy}}}{\partial y}, \quad (4)$$

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t, \quad (5)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{s^2}{\epsilon}, \quad (6)$$

式中:  $s$  为湍流动能;  $\mu_{\text{eff}}$  为有效黏度;  $\mu$  为气体黏度;  $\mu_t$  为湍流黏度; 经验常数  $C_\mu$  为 0.09;  $\epsilon$  为损耗率。

$$E = c_v T + V_{\text{gx}} V_{\text{gy}} \delta_{ij} / 3, \quad (7)$$

$$\tau_{ij} = \mu_t \left( \frac{\partial V_{\text{gx}}}{\partial y} + \frac{\partial V_{\text{gy}}}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial V_{\text{gx}}}{\partial y} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho s \delta_{ij}, \quad (8)$$

式中:  $c_v$  为比热容;  $\delta_{ij}$  为克罗内克积增量。

激光熔覆喷嘴内气流本质上是湍流。因此, 使用  $k-\epsilon$  湍流模型求解动量守恒方程。

湍流动能表达式为

$$\frac{\partial(\rho s)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} (\rho V_{\text{gy}} s) = \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial s}{\partial y} \right] + G_k - \rho \epsilon, \quad (9)$$

湍流动能耗散表达式为

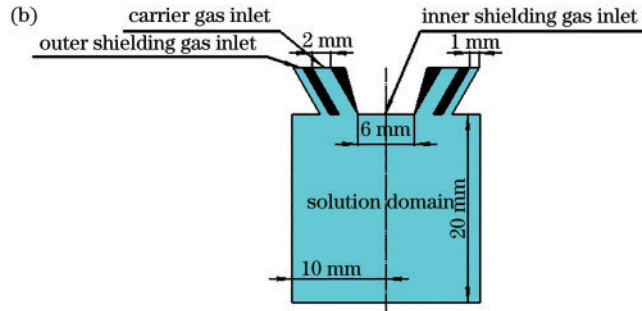
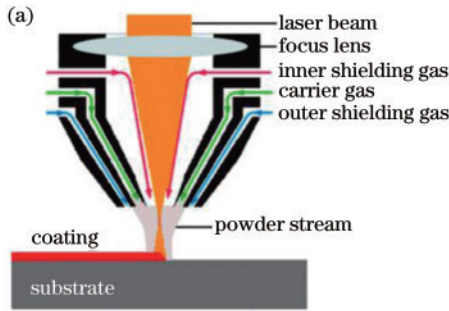


图 1 激光熔覆及模型求解域示意图。(a) 同轴激光熔覆; (b) 求解域纵截面

Fig. 1 Schematic of laser cladding and solution domain of model. (a) Coaxial laser cladding; (b) longitudinal section of solution domain

## 2.2 粉末轨迹模型

粉末轨迹取决于气体与粉末的相互作用、粉末碰撞等因素。模型设置的基本假设有: 粉末由热物性连续均匀的材料组成; 不考虑粉末对气流的影响; 粉末与壁面的碰撞机制为非弹性; 粉末为非球形, 取形状因子  $\Phi=0.8$ 。

### 2.2.1 气-粉传输模型

粉末初始位置在载气通道出口环形截面, 随机分布。其运动轨迹计算过程如下<sup>[12,15]</sup>。

粉末速度矢量求解:

$$\frac{d\mathbf{X}_p}{dt} = \mathbf{V}_p, \quad (12)$$

$$\frac{d\mathbf{V}_p}{dt} = \frac{3}{8} \frac{\rho C_{\text{dp}}}{\rho_p r_p} |\mathbf{V}_g - \mathbf{V}_p| (\mathbf{V}_g - \mathbf{V}_p) + \mathbf{g} \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p}. \quad (13)$$

雷诺系数求解:

$$Re_p = \frac{2r_p \rho |\mathbf{V}_g - \mathbf{V}_p|}{\mu}. \quad (14)$$

粉末形状和流场阻力系数求解:

$$C_{\text{dp}} = \frac{24}{Re_p} (1 + b_1 Re_p^{b_2}) + b_3 \frac{Re_p}{(b_4 + Re_p)}, \quad (15)$$

$$b_1 = \exp(2.3288 - 6.4581\Phi + 2.4486\Phi^2), \quad (16)$$

$$b_2 = 0.0964 + 0.5565\Phi, \quad (17)$$

$$b_3 = \exp(4.905 - 13.8944\Phi + 18.4222\Phi^2 - 10.2599\Phi^3), \quad (18)$$

$$b_4 = \exp(1.4684 + 12.2584\Phi - 20.7322\Phi^2 + 15.8855\Phi^3), \quad (19)$$

式中:  $\mathbf{X}_p$  为粉末质心的坐标向量;  $\mathbf{V}_g$  为气体速度矢量;  $\mathbf{V}_p$  为粉末速度矢量;  $r_p$  为粉末半径;  $\rho_p$  为粉末密度;  $\mathbf{g}$  为重力加速度。

### 2.2.2 工件表面粉末反弹模型

粉末与工件发生非弹性碰撞,既损失能量,又改变运动方向。因此,粉末与基材碰撞机制采用  $\tau$  法向恢复系数  $k_n = \mathbf{V}_p \cdot \mathbf{n}$  和切向恢复系数  $k_\tau = \mathbf{V}_p \cdot \boldsymbol{\tau}$  表示,求解过程<sup>[12]</sup>分别为

$$\mathbf{V}_{p,n_2} = -k_n \cdot \mathbf{V}_{p,n_1}, \quad (20)$$

$$\mathbf{V}_{p,\tau_2} = k_\tau \cdot \mathbf{V}_{p,\tau_1}, \quad (21)$$

式中:  $\mathbf{V}_{p,n_1}$  为粉末撞击前的法向速度;  $\mathbf{V}_{p,n_2}$  为粉末撞击后的法向速度;  $\mathbf{V}_{p,\tau_1}$  为粉末撞击前的切向速度;  $\mathbf{V}_{p,\tau_2}$  为粉末撞击后的切向速度。

$$k_n = 1 - 0.4158\alpha + 0.4994\alpha^2 - 0.292\alpha^3, \quad (22)$$

$$k_\tau = 1 - 2.12\alpha + 3.0775\alpha^2 - 1.1\alpha^3, \quad (23)$$

式中:  $\alpha$  为撞击前粉末速度与撞击表面之间的夹角,如图 2 所示。

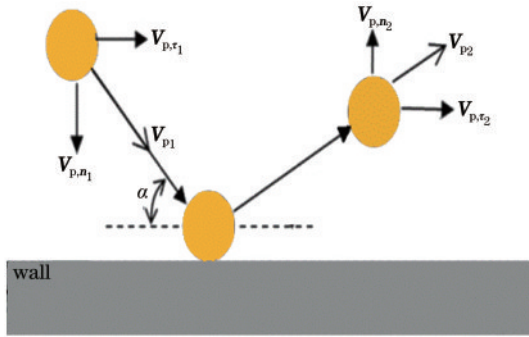


图 2 粉末碰撞示意图

Fig. 2 Schematic of particle collision

### 2.2.3 粉末碰撞等效模型

由于粉末与喷嘴壁碰撞过程十分复杂,受粉末种类、撞击角度、壁面粗糙度等诸多因素影响,相关实验数据较少,很难进行精确的建模和数值模拟。因此,本文提出一种等效算法简化喷嘴内粉末的复杂碰撞过程,直接对粉末的出射速度损失和角度偏转进行预测,采用相同粉末及喷嘴条件的实验结果对模型关键参数进行校核,从而探索一种在工程实际中具有一定应用价值的粉末轨迹预测方法。具体模型描述如下。

初始位置处,在笛卡儿坐标系下,气体速度在  $X$  方向的分量和在  $XY$  截面上的总分量之间的夹角为

$$\beta = \arctan \frac{|\mathbf{V}_{gr}|}{|\mathbf{V}_{gy}|}. \quad (24)$$

初始位置处,粉末速度  $\mathbf{V}_p$  及其在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的分量分别为

$$\mathbf{V}_p = \mathbf{V}_g \cdot (1 - q_i), \quad (25)$$

$$V_{px} = |\mathbf{V}_p| \cdot \cos h_i \cdot \sin \beta, \quad (26)$$

$$V_{py} = |\mathbf{V}_p| \cdot \cos h_i \cdot \cos \beta, \quad (27)$$

$$V_{pz} = |\mathbf{V}_p| \cdot \sin h_i, \quad (28)$$

式中:  $q_i (i=1, 2, \dots, n)$  为第  $i$  个粉末颗粒碰撞后的速度损失率;  $h_i$  为第  $i$  个粉末离开喷嘴前相对于中心轴线的偏转角度,其数值沿  $X$  坐标系正方向为正。

算法核心在于将喷嘴内粉末的复杂碰撞过程等效为粉末在喷嘴出口处速度大小的损失和角度偏转,分别由速度衰减函数  $q_i$  和角度偏转函数  $h_i (\mu_2, \sigma_2^2)$  控制,其参数主要取决于喷嘴结构和粉末种类。已有研究表明,粉末出射速度损失主要取决于喷嘴结构且较为平均,对于同轴环形喷嘴结构,粉未经喷嘴内碰撞后离开喷嘴时的速度大小比碰撞前的速度初始值损失了约 20%<sup>[21]</sup>。粉末颗粒离开喷嘴时的偏转角度决定了粉末后续运动方向,是影响粉末束整体形貌的主要因素,研究表明不同粉末角度偏转相差较大且在统计上呈 Gaussian 分布<sup>[12]</sup>。本模型粉末计算位置在喷嘴出口截面呈随机分布,且单个粉末的出射角度和速度损失按照函数分布规律随机赋予,不考虑粉末对气流的影响。根据粉末出射角度偏转特性,设计了一种基于实验过程中拍摄的粉末束整体形貌图片,通过提取粉末的特征来拟合粉末角度偏转模型核心参数的方法,得到每个粉末在计算中的偏转角度,具体步骤如下。

1) 根据实验图像确定单侧通道粉末束最大偏转

角度  $\theta_1$  和集中区域角度  $\theta_2$ , 确定标准值  $C = \frac{\theta_2}{\theta_1}$ 。

2) 模拟粉末束形貌,确定单侧通道粉末束最大偏转

角度  $\theta_3$  和集中区域角度  $\theta_4$ , 确定测试值  $C_1 = \frac{\theta_4}{\theta_3}$ 。

3) 估算误差  $\frac{|C_1 - C|}{C} \times 100\%$ 。若超出误差允许范围,则执行步骤 4), 否则停止  $\sigma_2$  值迭代计算,执行步骤 5)。

4) 调整  $\sigma_2$  值。若  $C_1 < C, \sigma_2 = \sigma_0 + \frac{C - C_1}{C_1}$ , 若

$C_1 > C, \sigma_2 = \sigma_0 - \frac{C - C_1}{C_1}$ , 更新  $\sigma_2$  值, 执行步骤 2) 进行迭代。

5) 估算误差  $\frac{|\theta_3 - \theta_1|}{\theta_1} \times 100\%$ 。若超出误差允许范围,则执行步骤 6), 否则停止计算。

6) 调整  $\mu_2$  值。若  $\theta_3 < \theta_1, \mu_2 = \mu_0 + (\theta_1 - \theta_3)$ ,

若  $\theta_3 > \theta_1, \mu_2 = \mu_0 - (\theta_3 - \theta_1)$ , 更新  $\mu_2$  值。

需要说明的是, 由于粉末在喷嘴内部的碰撞过程十分复杂, 上述等效模型并不能精确量预测每一个粉末在喷嘴内部的碰撞行为, 但是可以用于预测粉束整体形态和空间密度分布。此外, 粉末出射角度偏转行为主要受喷嘴结构和粉末参数的影响, 其他工艺条件影响相对较小。因此, 针对同一种喷嘴结构及粉末参数只需要完成一次校核, 即可用于研究不同条件下粉末传输行为及粉束空间密度分布。例如, 不同工件表面形貌、喷嘴与工件距离、激光扫描速度和压缩气流速等参数变化时导致粉束形貌及空间密度发生变化。在此基础上, 还可以给进一步研究激光能量参数改变时激光与粉末束交互作用提供合理的粉末束密度参数。

### 3 模拟结果与讨论

#### 3.1 气体流场及粉末轨迹

粉末与基材碰撞后的反弹轨迹会影响粉末束空间分布, 首先对工件距离喷嘴足够远的情况进行研究, 以排除粉末反弹的影响。压缩气流速为 1 m/s, 载气流速为 1.9 m/s, 保护气流速为 1.6 m/s, 送粉量为 48 g/min。针对本文的喷嘴结构与粉末材质, 采用相同参数下的粉末轨迹实验结果对等效模型参数进行校核<sup>[12]</sup>, 确定  $\mu_2 = 20^\circ, \sigma_2 = 15$ 。图 3 为喷嘴距工件足够远条件下喷嘴下方 20 mm 范围内的流场。保护气、载气和压缩气离开喷嘴后向中心轴会聚, 最大速度出现在离中心轴一定距离的环形区域内, 而中心区域气体受高速载气影响在离开喷嘴后向下速度逐渐增加后趋于稳定。对喷嘴外粉末轨

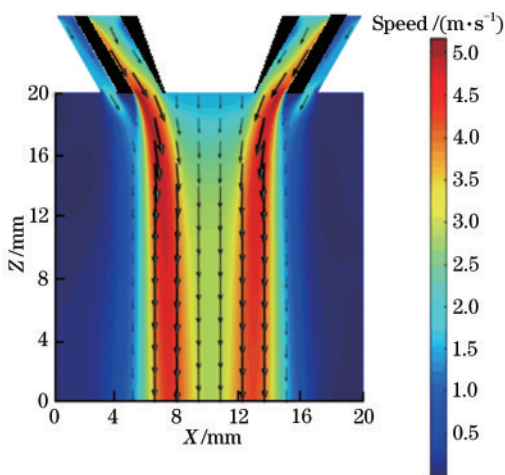


图 3 气体流场模拟结果

Fig. 3 Simulated results of the gas flow field

迹计算结果与相同条件下实验结果<sup>[16]</sup>进行比较, 结果如图 4 所示, 由结果可知, 粉束整体形貌、聚集位置及轨迹线密度均吻合较好。

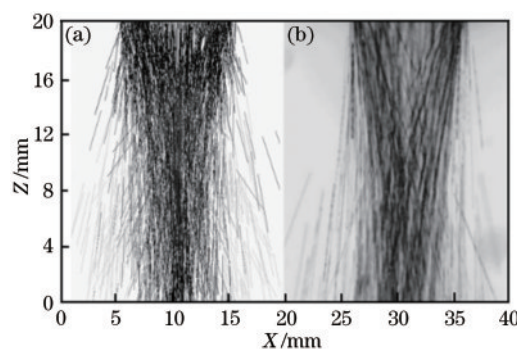


图 4 粉末轨迹对比。(a)模拟结果;(b)实验结果<sup>[16]</sup>

Fig. 4 Powder trajectory comparison. (a) Simulation results; (b) experimental results<sup>[16]</sup>

本模型还可计算任意时刻粉末的空间分布状态。图 5 为  $t = 0.1$  s 时空间粉末的瞬态分布, 可知, 粉末离开喷嘴后, 在向下运动过程中大部分能够向中心会聚, 轴线附近粉末密度升高。同时, 受粉末与喷嘴壁碰撞的影响, 少部分粉末在向下运动过程中向四周发散, 造成粉束整体分布范围不断扩大。需要注意的是, 从数量与比例上看, 大部分粉末还是会在中心轴线附近区域中。

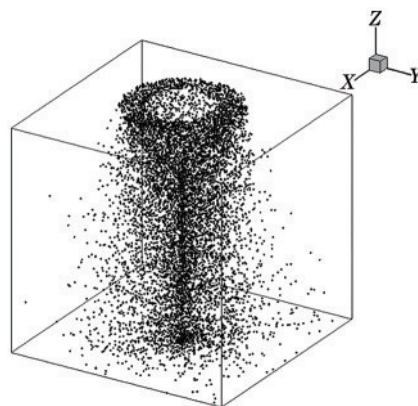


图 5 粉末空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of powder

为更直观地揭示粉末空间分布规律, 解决粒子轨迹图和粒子位置图不连续的问题, 对一段时间内多个连续时刻的粉末分布数据进行统计并计算均值, 得到图 6 所示的粉末密度云图。由图 6 可知, 粉末刚离开喷嘴时, 最大密度出现在载气通道出口附近区域并呈现出向中心会聚的趋势, 完成会聚后, 最大粉末密度出现在中心轴线上并一直保持。从整体来看, 中心轴线上的最大粉末密度远高于喷嘴

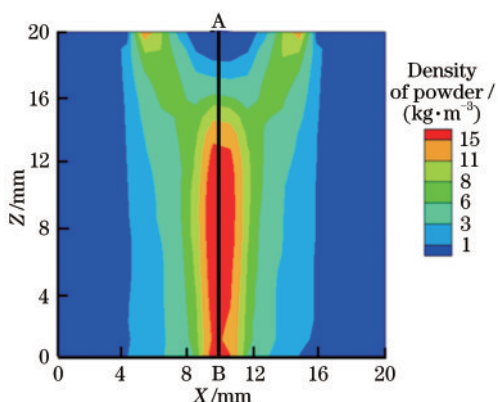


图 6 纵截面粉末密度分布

Fig. 6 Powder density distribution on longitudinal section

出口附近的最大粉末密度值,表明粉末会聚效果明显。图 6 所示的密度云图可以为后续进一步研究激光能量与粒子束相互作用打下基础。

图 7 为沿求解域中心线 AB 上(如图 6 所示)的粉末密度分布,粉末远离喷嘴后,粉末密度开始快速上升,在距离喷嘴 12 mm 处,粉末密度达到峰值 23.2 kg/m<sup>3</sup>,这是因为粉末的快速会聚。之后粉末密度缓慢下降,主要有两方面原因,其一是粉末在焦点之下会聚效果减弱,其二是越靠近底部,粉末运动速度越快,空间中粉末密度下降。

### 3.2 工件表面状态对粉末密度影响

工件表面状态会影响粉末的反弹行为,从而改变空间粉末的密度分布。熔覆开始时熔池尚未形成,此时工件表面为完全刚性壁面,而熔池逐渐扩大并达到稳定尺寸时,熔池内部区域不会反弹粉

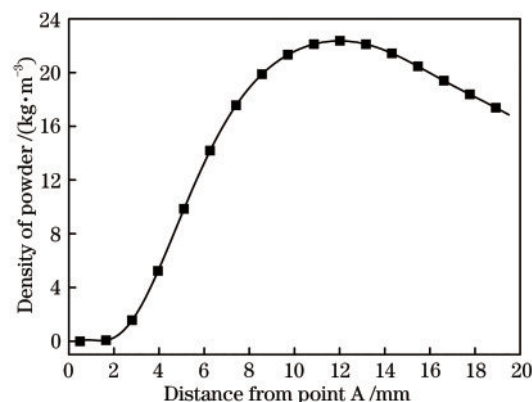


图 7 粉末密度沿轴向 AB 的分布

Fig. 7 Powder density along the axial line AB

末,而熔池周围的固态表面依然对粉末进行反弹。为更好地理解上述过程,对比研究了熔池形成前和熔池形成稳定尺寸后的工件表面对粉末密度的影响。计算时,熔池半径为 1.5 mm、保护气流速为 1.6 m/s、载气流速为 1.9 m/s、压缩气流速为 1 m/s、送粉量为 10.6 g/min。

图 8(a)和图 8(b)分别为熔池未形成和熔池已达到稳定尺寸时的粉末密度分布。由图 8 可知:工件表面状态对喷嘴附近粉末密度和粉末会聚过程影响不大,但对工件表面附近区域的粉末密度影响较为明显;熔池未形成时,工件表面对粉末的反弹显著增加了工件附近区域尤其是中心线周围的粉末密度;熔池形成后部分粉末进入熔池,虽然熔池周边区域仍可反弹粉末,但外围粉末密度相对较低,所以工件附近粉末密度并无显著增加。

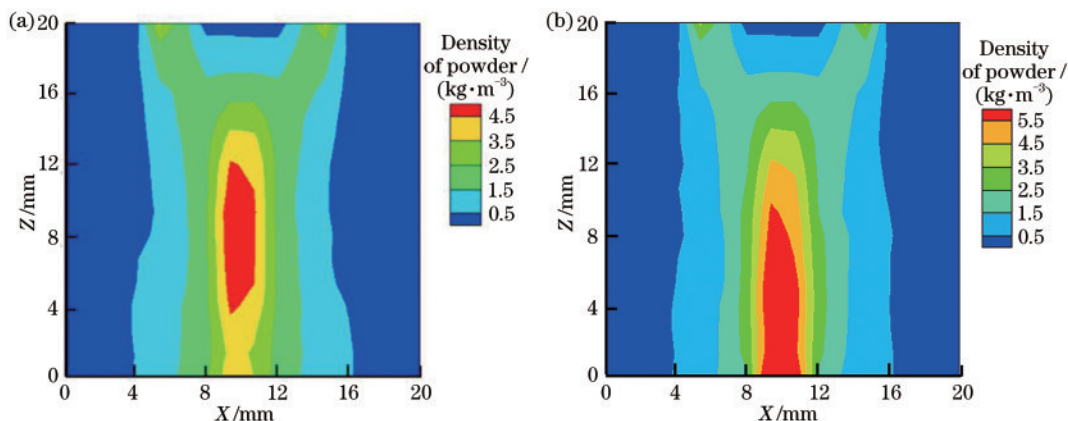


图 8 纵截面粉末密度分布。(a)熔池形成前;(b)熔池稳定后

Fig. 8 Powder density on longitudinal section. (a) Before the molten pool formation; (b) after the molten pool formation

对比两种情况下中心轴线上的粉末密度,如图 9 所示。熔池未形成时,工件表面对粉末的反弹显著增加了工件表面约 10 mm 高度区域沿中心轴

线上的粉末密度,最大提升了约 1 倍。而熔池逐渐形成并达到稳定状态的过程中,工件表面对粉末的反弹作用逐渐减小,原因是熔池未形成时,工件对

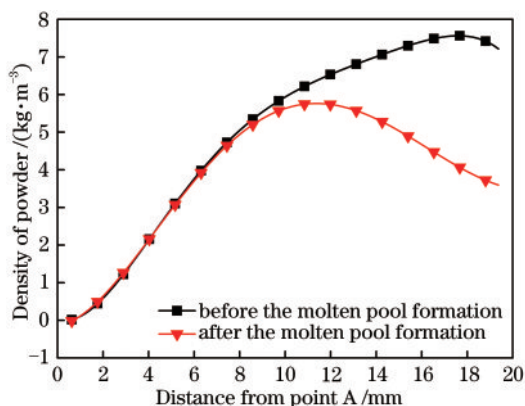


图9 熔池形成前与形成后沿轴向的粉末密度

Fig. 9 Powder density along the axial line before and after the molten pool formation

粉末的反弹显著增加了中心线上的粉末密度;熔池形成后部分粉末进入熔池不发生反弹,而外围粉末密度相对较低,反弹效果相对较弱,所以工件附近粉末密度并无显著增加。

### 3.3 压缩气流速对粉末密度影响

压缩气的作用是抑制粉末的发散并提高粉末利用率。图 10 为压缩气流速分别为 0, 2.5, 5 m/s 时中心轴线上的粉末密度分布,计算时送粉量为 10.6 g/min,载气流速为 2 m/s,保护气流速为 5 m/s。由图 10 可知,随着压缩气流速从 0 增加至 2.5 m/s,中心轴线上的粉末密度显著增加至约 5.2 kg/m<sup>3</sup>,这表明压缩气能够抑制粉末发散。随着流速进一步增加,中心轴线上的粉末密度出现小幅度下降,约 8%,这说明压缩气的压缩效果存在最优区间,如果流速过大反而会减小粉末密度。

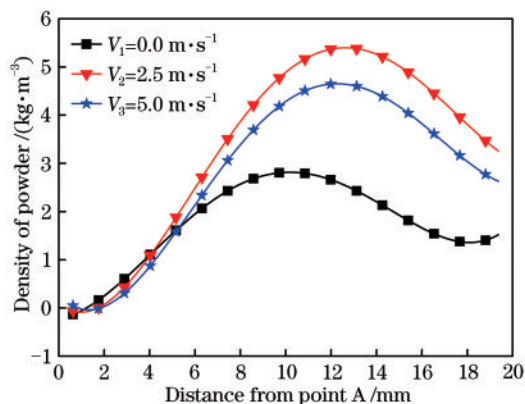


图 10 压缩气流速对轴向粉末密度的影响

Fig. 10 Effect of compressed gas flow rate on powder density along the axial line

## 4 结 论

对同轴送粉激光熔覆气-粉耦合传输过程开展研究工作。提出一种以粉末离开喷嘴时出射角度和速度分布为基础的等效模型来考虑喷嘴内粉末的复杂碰撞行为,建立了喷嘴外部气-粉传输模型。预测不同工艺条件下粉末瞬时位置、运动轨迹及连续分布的平均密度,粉末整体形貌、聚集位置以及轨迹线密度的模拟结果与实验结果吻合较好。工件表面尚未形成熔池时,对粉末的反弹作用在距离工件约 10 mm 高度的粉末束中心区域较为明显,相对于形成的半径为 1.5 mm 熔池,该区域的粉末密度最大提升了约 1 倍,而随着距离工件的高度增加,粉末密度的提升效果逐渐减弱。随着压缩气流速从 0 增加至 2.5 m/s,粉末会聚效果增强,中心轴线上粉末密度增加至约 5.2 kg/m<sup>3</sup>,当压缩气流速增加至 5.0 m/s 时,中心线上粉末密度则下降了约 8%。

### 参 考 文 献

- [1] Zhang S Y, Wang B B, Zheng K Q. A study on laser cladding of WC-TiN-SiC-Co hard alloy and their strengthening mechanism [J]. Acta Physica Sinica, 1994, 43(4): 678-682.  
张思玉, 王必本, 郑克全. 激光熔敷 WC-TiN-SiC-Co 高硬质合金及机理初探 [J]. 物理学报, 1994, 43(4): 678-682.
- [2] Feng X T, Lei J B, Gu H, et al. Effect of scanning speeds on electrochemical corrosion resistance of laser cladding TC4 alloy [J]. Chinese Physics B, 2019, 28(2): 026802.
- [3] Liu J L, Yu H J, Chen C Z, et al. Research and development status of laser cladding on magnesium alloys: a review [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 93: 195-210.
- [4] Guo W, Li K K, Chai R X, et al. Numerical simulation and experiment of dilution effect in laser cladding 304 stainless steel [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(5): 051402.  
郭卫, 李凯凯, 柴蓉霞, 等. 激光熔覆 304 不锈钢稀释效应的数值模拟与实验 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(5): 051402.
- [5] Wang X J, Yan Y L. Microstructure and properties of laser cladding 316L stainless steel coating via magnetic field assisted [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(23): 231401.  
王新军, 闫迎亮. 磁场辅助激光熔覆 316L 不锈钢涂

- 层的组织及性能[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(23): 231401.
- [6] Ren Z H, Wu M P, Cui C, et al. Effects of temperature field and  $\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$  on material phase transition in laser cladding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0802006.  
任仲贺, 武美萍, 崔宸, 等. 激光熔覆温度场和  $\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$  对材料相变的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0802006.
- [7] Wang J S, Shu L S. Laser cladding remanufacturing and repair of agricultural tractor spindle [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 071404.  
王家胜, 舒林森. 农业拖拉机主轴激光熔覆再制造修复研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 071404.
- [8] Wang T, Qiao W L, Wang N, et al. Effect of scanning speed on microstructure and properties of laser cladding NiCoCrAlY coating [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(21): 211403.  
王涛, 乔伟林, 王宁, 等. 扫描速度对激光熔覆 NiCoCrAlY 涂层组织及性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 211403.
- [9] Tamanna N, Crouch R, Naher S. Progress in numerical simulation of the laser cladding process [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 122: 151-163.
- [10] Wirth F, Arpagaus S, Wegener K. Analysis of melt pool dynamics in laser cladding and direct metal deposition by automated high-speed camera image evaluation [J]. Additive Manufacturing, 2018, 21: 369-382.
- [11] Chen Y, Lu F G, Zhang K, et al. Dendritic microstructure and hot cracking of laser additive manufactured Inconel 718 under improved base cooling [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 670: 312-321.
- [12] Kovalev O B, Zaitsev A V, Novichenko D, et al. Theoretical and experimental investigation of gas flows, powder transport and heating in coaxial laser direct metal deposition (DMD) process [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011, 20(3): 465-478.
- [13] Bedenko D V, Kovalev O B, Smurov I, et al. Numerical simulation of transport phenomena, formation the bead and thermal behavior in application to industrial DMD technology [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 95: 902-912.
- [14] Kovalev O B, Kovaleva I O, Smurov I Y. Numerical investigation of gas-disperse jet flows created by coaxial nozzles during the laser direct material deposition [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 249: 118-127.
- [15] Kovalev O B, Bedenko D V, Zaitsev A V. Development and application of laser cladding modeling technique: from coaxial powder feeding to surface deposition and bead formation [J]. Applied Mathematical Modelling, 2018, 57: 339-359.
- [16] Liu H, Hao J B, Yu G, et al. A numerical study on metallic powder flow in coaxial laser cladding [J]. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2016, 9(7): 2247-2256.
- [17] Kovaleva I, Kovalev O, Zaitsev A, et al. Numerical simulation and comparison of powder jet profiles for different types of coaxial nozzles in direct material deposition [J]. Physics Procedia, 2013, 41: 870-872.
- [18] Smurov I, Doubenskaia M, Zaitsev A. Comprehensive analysis of laser cladding by means of optical diagnostics and numerical simulation [J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 220: 112-121.
- [19] Dong G, Liu J C, Li Y Y. Numerical simulation of gas-powder flow in laser cladding with coaxial powder feeding [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(8): 1951-1955.
- [20] Yang N, Yang X C. Numerical simulation of flow field of nozzle in laser cladding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(3): 452-455.  
杨楠, 杨洗陈. 激光熔覆中粉嘴流场的数值模拟 [J]. 中国激光, 2008, 35(3): 452-455.
- [21] Yang N, Yang X C. Model of interaction between metal powder particle and laser beam in laser cladding [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(9): 1745-1750.  
杨楠, 杨洗陈. 激光熔覆中金属粉末粒子与激光相互作用模型 [J]. 光学学报, 2008, 28(9): 1745-1750.