

文章编号: 1001-3806(2015)02-0145-07

光内送粉喷头空间变姿态粉气流场数值模拟

姜付兵, 石世宏*, 傅戈雁

(苏州大学 机电工程学院, 苏州 215021)

摘要: 光内送粉喷头是一种新型的激光熔覆同轴送粉喷头, 具有空心光束、单根粉末指向性好、无干涉、光粉气一体同轴等优势。为了分析喷头倾斜角度和外层准直气流速对粉末汇聚特性的影响, 采用 FLUENT 软件进行模拟计算, 对喷头在空间变姿态作业过程中单喷嘴出口粉末的汇聚特性进行了理论分析和实验验证。结果表明, 喷嘴出口粉末质量浓度分布沿 x 方向服从高斯分布, 对称轴上沿 $-y$ 方向质量浓度先基本保持恒定, 后逐渐下降为 $0\text{kg}/\text{m}^3$; 随喷头倾斜角度的增大, 粉末汇聚长度 h 不断减小, h 变化范围为 $11\text{mm} \sim 17\text{mm}$, 偏移量 Δx 大致呈增大趋势, Δx 变化范围为 $0.0\text{mm} \sim 0.4\text{mm}$; 随外层准直气速度增加, 汇聚长度 h 呈轻微上升趋势, h 上升幅度为 $1\text{mm} \sim 2\text{mm}$, 而偏移量 Δx 在不同倾斜角度范围内呈现出不同变化趋势, Δx 变化幅度为 $0.05\text{mm} \sim 0.15\text{mm}$; 实验数据与模拟结果变化趋势基本吻合。所建模型和模拟结果对于选择和优化实验工艺参量具有参考价值。

关键词: 激光技术; 气固两相流; 数值模拟; 光内同轴送粉

中图分类号: TG156.99; TN249

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.02.001

Numerical simulation of powder-gas flow field of inside-beam powder feeding nozzle with changing attitude

JIANG Fubing, SHI Shihong, FU Geyan

(School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, China)

Abstract: Inside-beam powder feeding nozzle is a new laser cladding coaxial powder feeding nozzle, which has the advantages of hollow beam, good directivity, no interference and co-axis of light, powder and gas. In order to analyze the influence of nozzle's inclination angle and outer collimating gas velocity on the focusing characteristics of powder, FLUENT software was used for numerical simulation. The focusing characteristics of powder out of a single nozzle with changing attitude were analyzed in theory and verified in experiments. The results show that mass concentration distribution of powder nozzle is consistent with Gaussian distribution along the x direction and it remains constant firstly and then decreases to zero gradually along the $-y$ direction of the symmetry axis. When the inclination angle of the head increases, the powder focusing length h decreases in the range of $11\text{mm} \sim 17\text{mm}$ and the deviation Δx increases in the range of $0.0\text{mm} \sim 0.4\text{mm}$ substantially. When the outer collimating gas velocity increases, the powder focusing length h increases slightly in the range of $1\text{mm} \sim 2\text{mm}$ and the deviation Δx presents different trend in the range of $0.05\text{mm} \sim 0.15\text{mm}$. The experimental data and simulation results are basically consistent. The built model and the simulation results have reference value for the selection and optimization of experimental parameters.

Key words: laser technique; gas-solid two-phase flow; numerical simulation; inside-beam coaxial powder feeding

引 言

金属零构件空间修复和 3 维自由成形在工程与

国防领域具有很好的应用前景^[1], 而光粉耦合工艺是实现激光直接成形的关键技术之一, 对送粉喷头喷嘴出口流场特性进行数值模拟分析, 对于优化喷嘴结构和工艺参量具有重要意义。JEHNING 和 ZEKOVIC 等人建立了模拟粉末流场的 FLUENT 有限元模型^[2-3], 研究了同轴送粉喷嘴粉末的流场特性; 天津工业大学 YANG 等人建立了同轴送粉喷嘴金属粉末流的浓度场理论模型, 并应用气固两相流理论对载气式同轴送粉喷嘴的粉末流场进行 2 维数

基金项目: 江苏省科技支撑计划重点资助项目 (BE2012068); 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2012183)

作者简介: 姜付兵 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光熔覆再制造方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: shishihong@suda.edu.cn

收稿日期: 2014-07-03; 收到修改稿日期: 2014-07-14

值模拟^[4]。西安交通大学 ZHANG 和 ZHU 等人研究了同轴送粉喷嘴在不同结构设计下对粉末 2 维浓度场的影响^[5-6]。现有光外同轴送粉方式采用多路倾斜送粉,多粉束在熔池处有一汇聚点,发散较大、粉末利用率低,特别对于空间变基面/变姿态激光熔覆,由于多粉束倾斜喷射和受重力影响,多路粉束在空间更难以汇聚,导致空间熔池难以生成和稳定。

针对上述问题,参考文献[7]和参考文献[8]中设计了中空光内单粉管同轴送粉喷头,该设计通过光学变换将圆形实心激光变成环锥形中空激光,单根粉管置于中空激光内部,并垂直于成形面送粉。该送粉方式由于其光束中空、光内单粉管送粉的特点使其在空间变姿态激光熔覆成形过程中具有指向性好、无干涉,光、粉、气一体同轴等优势。本文中针对本课题组研制的光内同轴送粉喷头,重点研究倾斜基面成形中喷头空间倾斜角度和外层准直气流速对粉末流场汇聚特性的影响,应用 FLUENT 软件进行计算,分析粉末流场质量浓度的分布规律,最后通过试验来验证数值分析结果。

1 气粉流数值模型理论

对于激光熔覆过程中气、粉两相流进行数值模拟计算,运用 FLUENT 软件中的离散相模型(discrete phase model, DPM)对粉末流的行为进行描述,运用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型对气相进行计算,并通过建立颗粒轨迹模型和求解颗粒运动学方程计算出离散相动力学特征。

在 FLUENT 软件计算过程中做如下假设:(1)离散相模型中颗粒运动是稳态的,气、粉具有相同速率和均匀流场;(2)由于采用负离焦作业,故不考虑激光束对颗粒的热影响,即忽略传热计算;(3)只考虑惯性力和重力影响;(4)不考虑颗粒之间的相互碰撞。

1.1 气相湍流控制方程

在离散相模型中,压缩气体为理想气体,忽略激光束对颗粒的热影响,湍流基本控制方程包括连续性方程和动量方程^[9]。湍流模型采用标准模型,该模型由 LAUNDER 和 SPALDING^[10]于 1972 年提出,在模型中, k 方程和 ε 方程分别如下式所示:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \mu_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon \mu_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

式中, μ_t 是湍流粘度; μ_i 是 i 方向上的流体动力粘度; G_k 是由于平均速度梯度而引起的湍流动能的产生项; G_b 为浮力引起的湍流动能的产生项; Y_m 代表可压缩流中脉动扩张的贡献; σ_k 和 σ_ε 分别为湍流动能 k 和耗散率 ε 对应的湍流普朗数; C_1 和 C_2 为经验常数; ρ 为压缩气体的密度; μ 为流体的动力粘度; ε 为湍流耗散率;下标 i 和 j 为采用张量指标形式表示的时均连续方程。根据 LAUNDER 等人的推荐值,其值分别为 $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$ 。

1.2 颗粒相轨迹计算方程

在 FLUENT 软件中,通过积分拉格朗日坐标系下颗粒作用力微分方程来求解离散相颗粒的轨迹,颗粒作用力平衡方程在笛卡尔坐标系下的形式沿 x 方向为:

$$\frac{du_p}{dt} = F_d(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (3)$$

式中, u_p 为粉末的速率; u 为环境速率; F_d 为粉末的单位质量拽力; ρ_p 为粉末的密度; F_x 为其它作用力,计算过程中忽略热传导引起的热泳力,处理亚微观尺寸颗粒时的布朗力和 Saffman 升力^[9]。

2 光内送粉喷头喷嘴流场数值模型

2.1 模型描述

根据本课题组研制的光内同轴送粉喷头(如图 1 所示)结构参量,建立如图 2 所示的 2 维轴对称模型,几何尺寸及边界条件设置见图 2。其中, θ 为喷头轴线方向与大地坐标系中 z 轴负方向的夹角,粉末颗粒由载气经粉管送出,速率为 u_1 ,两侧准直气速率为 u_2 ,且载气和准直气均为氮气,不仅对

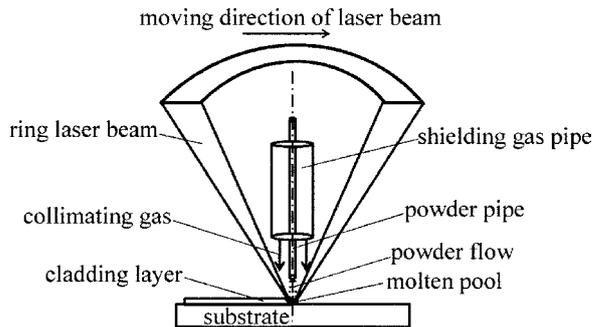


Fig. 1 Schematic of the inside-beam coaxial powder feeding nozzle

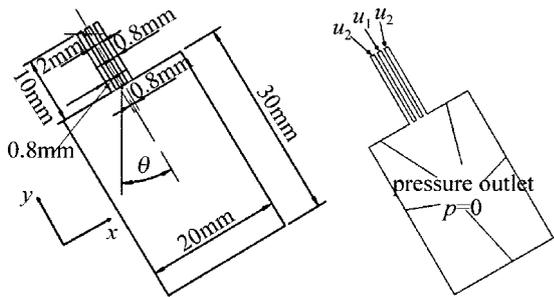


Fig. 2 2-D model and conditions

粉末起准直作用,还对熔池起保护作用。根据实验观察确定计算区域大小为 20mm × 30mm,边界处设置压力出口。

2.2 网格划分

由于本计算模型为 2 维模型,且形状相对规则,故采用网格大小为 0.06mm × 0.06mm 的正方形网格进行均匀划分,经多次计算表明,该网格划分方法满足计算精度和计算效率的要求,划分好的网格如图 3 所示。

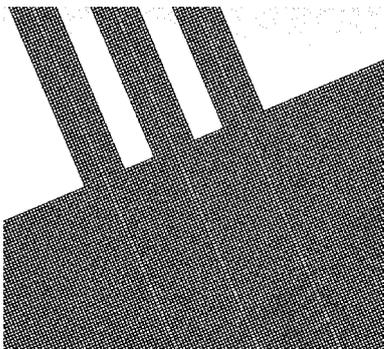


Fig. 3 Grid generation for nozzle and boundary computational domain

3 模拟结果及分析

3.1 参量设定

根据实验室具体实验工艺参量,在保持粉末颗粒直径($d = 50\mu\text{m}$)、单位时间送粉量($m_p = 0.1\text{g/s}$)及载气入口速率($u_1 = 2.5\text{m/s}$)一定的情况下,改变喷嘴倾斜角度 θ 和外层准直气入口速率 u_2 ,分析喷嘴出口粉末流场的汇聚特性,主要包括粉末汇聚长度(即中心轴线上粉末浓度基本保持恒定的最大深度,简称汇聚长度 h),最大深度处粉斑中心偏移对称轴的距离(简称偏移量 Δx)等。倾斜角度及外层准直气速度等参量设置见表 1,由于目前激光熔覆主要在 θ 为 $\pm 120^\circ$ 范围内进行,故选取以下倾斜角度作为参考。针对每个倾斜角分别采用 3 组速率值进行计算,共计算 15 组数据。

Table 1 Simulation parameters

parameter	value
inclination angle $\theta/(^\circ)$	0,30,60,90,120
collimating gas velocity $u_2/(m \cdot s^{-1})$	3,4,5

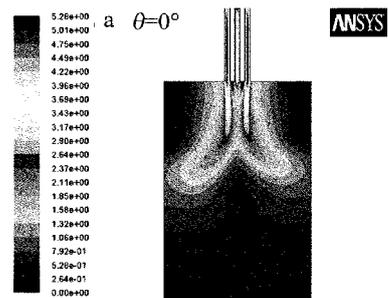
3.2 倾斜角度对粉末汇聚特性的影响

选取准直气速率 $u_2 = 4\text{m/s}$ 、喷嘴倾斜角度 θ 分别为 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 和 120° 时的计算结果进行研究,其喷嘴出口速率云图、沿 x 轴方向粉末质量浓度分布图和对称轴上沿 y 轴负方向粉末质量浓度分布图分别如图 4、图 5 和图 6 所示。由速率云图可看出,喷嘴出口两侧速率先保持相对稳定,后因受到空气阻力速率迅速降低并向两侧扩散。速率稳定阶段准直气对粉末束缚作用明显,随准直气速率降低,粉末逐渐扩散。对比各倾斜角度速率云图,随倾斜角度增大速率分布无较大差异,倾斜趋势略有增加。对图 5 分析可得,沿 x 方向粉末质量浓度分布呈高斯分布,且随倾斜角度增大和距离喷嘴出口长度增加,高斯分布曲线不断向 x 轴负方向平移。对图 6 分析可得,对称轴上沿 y 轴负方向粉末质量浓度先基本保持稳定,后逐渐降低,且随倾斜角度增大,汇聚长度 h 越短。

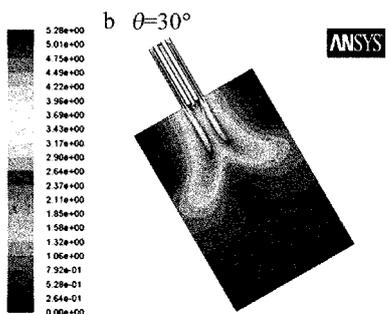
倾斜角度变化对粉末汇聚特性的影响如图 7 和图 8 所示。经分析可得,受重力作用影响,随喷嘴倾斜角度增大,粉末汇聚长度 h 不断减小,偏移量 Δx 大致呈增大趋势。且 h 变化范围为 $11\text{mm} \sim 17\text{mm}$, Δx 变化范围为 $0.0\text{mm} \sim 0.4\text{mm}$ 。进行激光熔覆实验时,送粉喷嘴与熔覆层间的距离应不大于对应准直气速率及喷嘴倾斜角度范围内的最小汇聚长度,如当 $u_2 = 4\text{m/s}$,倾斜角度范围 $0^\circ \sim 90^\circ$,则喷嘴与基板的距离应不大于 12mm 。另外,考虑到喷嘴与基板距离越近会导致喷嘴受热烧损,故喷嘴与基板的距离还应大于最小临界距离(本实验室最小临界值为 8mm)。

3.3 准直气速率对粉末汇聚特性的影响

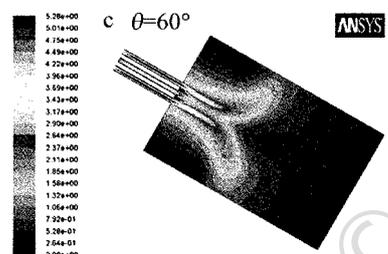
准直气速度对粉末汇聚特性的影响如图 9 和图 10 所示,由图 9 可以看出,随着准直气速度增加,对粉末束缚作用增强,粉末汇聚长度 h 呈轻微上升趋势,上升幅度为 $1\text{mm} \sim 2\text{mm}$;图 10 反映出当倾斜角度在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 范围内时,增大准直气速度,随着粉末汇聚长度的增加其对应的偏移量相对减小;当倾斜角度在 $30^\circ \sim 120^\circ$ 范围内时,增大准直气速度,随着粉末汇聚长度的增加其对应的偏移量相对增大。无论增大或减小,其变化幅度为 $0.05\text{mm} \sim 0.15\text{mm}$ 。



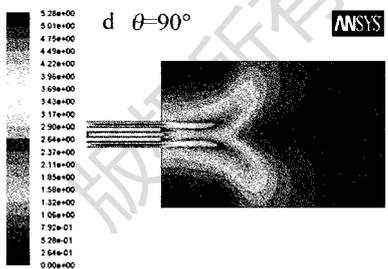
Contours of Velocity Magnitude (m/s) ANSYS FLUENT 12.1 (2d, pbns, ske)



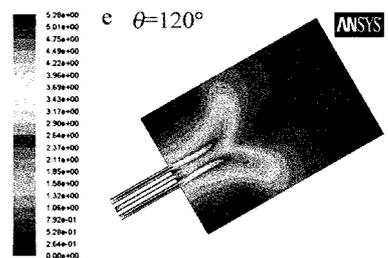
Contours of Velocity Magnitude (m/s) ANSYS FLUENT 12.1 (2d, pbns, ske)



Contours of Velocity Magnitude (m/s) ANSYS FLUENT 12.1 (2d, pbns, ske)



Contours of Velocity Magnitude (m/s) ANSYS FLUENT 12.1 (2d, pbns, ske)



Contours of Velocity Magnitude (m/s) ANSYS FLUENT 12.1 (2d, pbns, ske)

Fig. 4 Cloud picture of speed ($u_2 = 4\text{m/s}$)

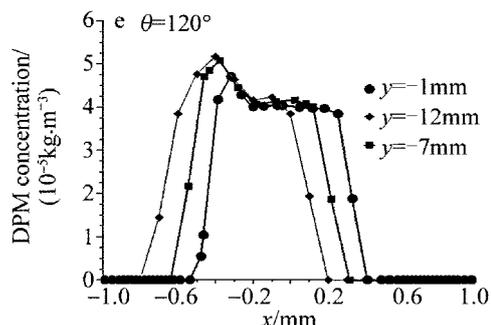
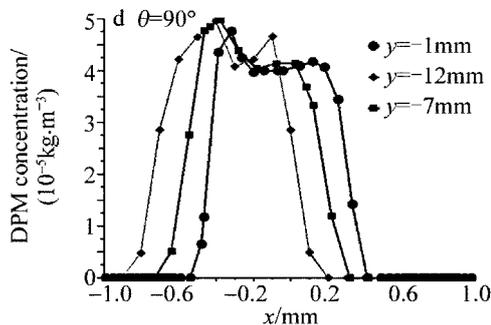
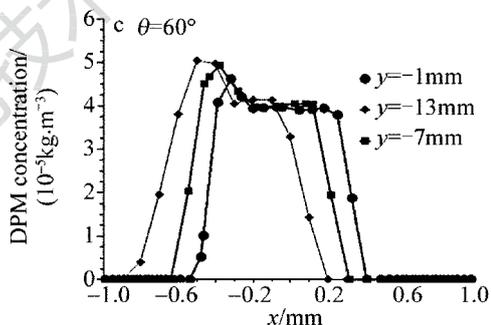
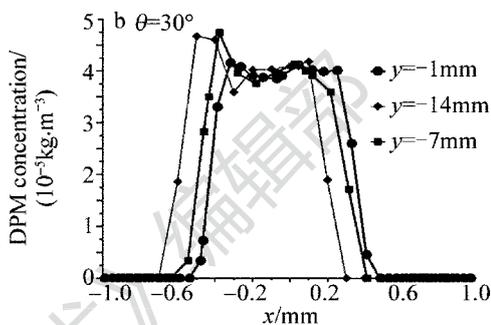
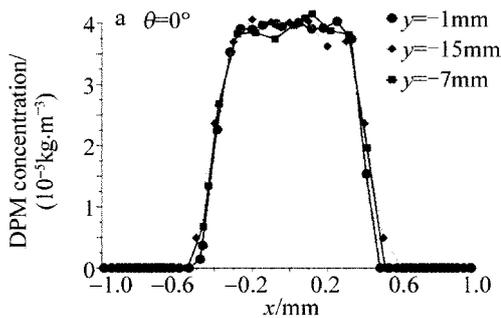


Fig. 5 Concentration distribution along x direction ($u_2 = 4\text{m/s}$)

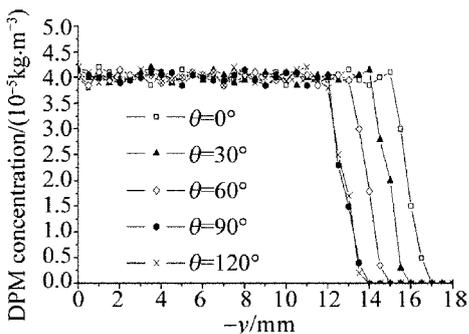


Fig. 6 Concentration distribution along $-y$ direction ($u_2 = 4\text{m/s}$)

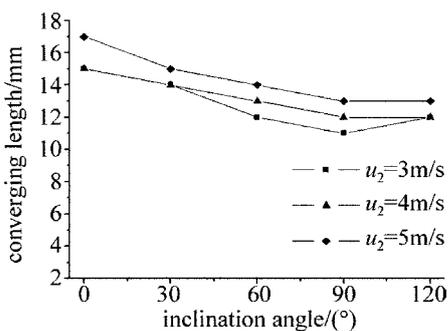


Fig. 7 Influence of inclination angle on converging length

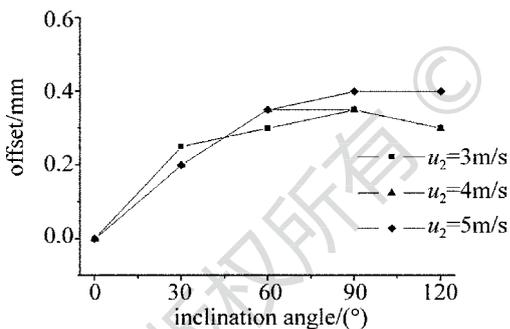


Fig. 8 Influence of inclination angle on deviation

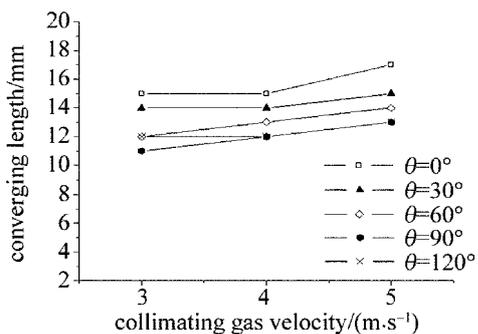


Fig. 9 Influence of collimating gas velocity on converging length

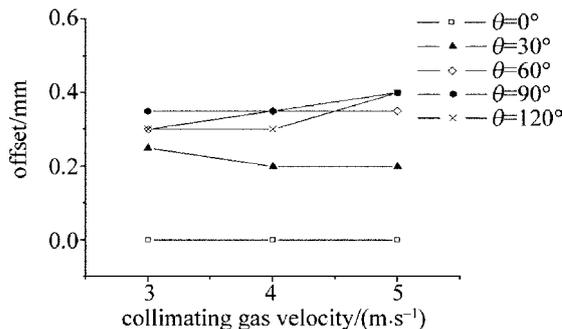


Fig. 10 Influence of collimating gas velocity on deviation

考虑到较大的准直气速度会对液态熔池产生扰动,影响熔池稳定性,因此,激光熔覆实验过程中,在汇聚长度 h 和偏移量 Δx 满足工艺要求的前提下,应尽量降低准直气速率。

4 实验分析

4.1 倾斜角度对粉末汇聚特性的影响实验

选择粉末颗粒直径 ($d = 50\mu\text{m}$), 设置送粉器单位时间送粉量 $m_p = 0.1\text{g/s}$, 载气入口速率 $u_1 = 2.5\text{m/s}$ 及外层准直气速率 $u_2 = 4\text{m/s}$, 调节喷嘴倾斜角度, 观察粉末汇聚情况, 并测量粉末汇聚长度 h (如图 11 所示), 与模拟结果的对比分析见图 12。经分析可知, 实验结果中汇聚长度随倾斜角度增加呈下降趋势, 其变化范围为 $11.0\text{mm} \sim 14.0\text{mm}$, 与模拟结果基本一致, 但由于实验过程中存在不稳定因素(包括载气速率和准直气速率不稳定, 粉末颗粒不均匀, 颗粒之间的相互碰撞等), 导致实验结果略小于模拟结果。



Fig. 11 Changes of powder converging length ($u_2 = 4\text{m/s}$) from left to right $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$

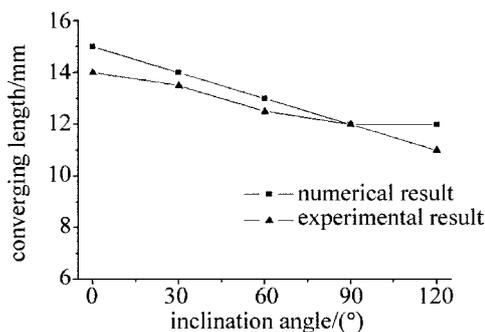


Fig. 12 Influence of inclination angle on converging length ($u_2 = 4\text{m/s}$)

4.2 准直气速率对粉末汇聚特性的影响实验

设置送粉器单位时间送粉量 $m_p = 0.1\text{g/s}$, 载气入口速率 $u_1 = 2.5\text{m/s}$, 喷嘴倾斜角度 $\theta = 90^\circ$, 调节外层准直气速率, 观察粉末汇聚情况, 并测量粉末汇聚长度 h (如图 13 所示), 与模拟结果的对比分析见图 14。经分析可知, 实验结果中汇聚长度随准直气速率增加也呈上升趋势, 上升幅度为 1.5mm , 与模拟结果基本一致, 但由于实验过程中存在上述不稳定因素导致实验结果略小于模拟值。

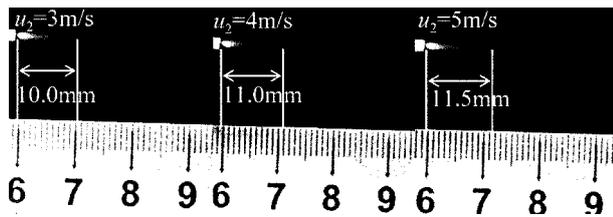


Fig. 13 Changes of powder converging length ($\theta = 90^\circ$)

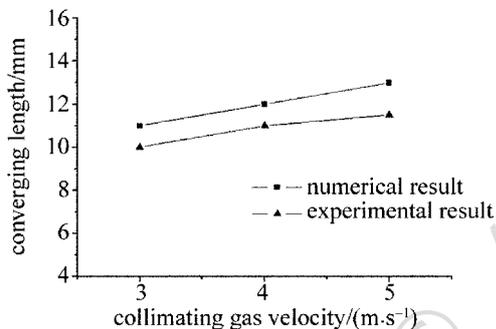


Fig. 14 Influence of collimating gas velocity on converging length ($\theta = 90^\circ$)

4.3 空间单道扫描试验及立面实体成形试验

设置准直气速率为 4m/s , 以喷头在各倾斜角度 ($0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$) 下实验测得的粉末汇聚长度 ($14.0\text{mm}, 13.5\text{mm}, 12.5\text{mm}, 12.0\text{mm}, 11.0\text{mm}$) 作为加工距离进行单道扫描实验 (如图 15 所示), 实验结果如图 16a 所示, 单道表面光亮平整, 未出现明显偏移和下垂, 成形质量良好。将加工距离均增

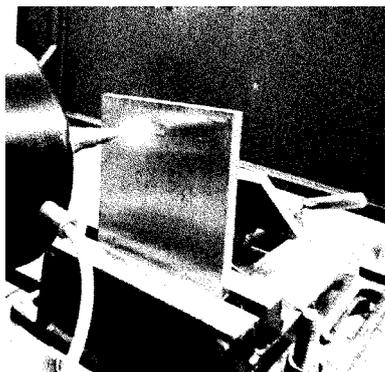


Fig. 15 Facade single-channel experiment

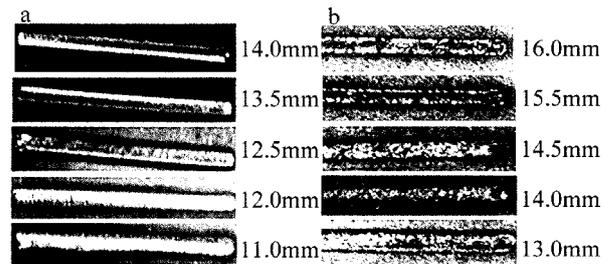


Fig. 16 Single-channel morphology of different inclination angles in space

加 2mm , 即变为 $16.0\text{mm}, 15.5\text{mm}, 14.5\text{mm}, 14.0\text{mm}, 13.0\text{mm}$ 。单道形貌如图 16b 所示, 由于粉末发散偏移, 进入熔池的粉末减少, 导致右侧单道表面凹凸不平且伴有粘粉现象, 成形高度偏低, 熔道难以形成。因此, 在进行空间变姿态激光熔覆过程中, 应针对不同的准直气速率, 选择喷头倾斜角度范围内汇聚长度最小值作为加工距离, 既保证了粉末良好的汇聚特征和成形单道的质量, 又避免对送粉喷头造成损害。

为进一步验证试验结果的准确性, 选取上述倾斜角为 90° 时的工艺参量, 在立面 (90°) 进行多道搭接多层堆积实体成形试验, 所建实体模型尺寸为 $20\text{mm} \times 8\text{mm} \times 5\text{mm}$, 试验成形实体尺寸为 $20.2\text{mm} \times 8.3\text{mm} \times 5.3\text{mm}$ (如图 17 所示), 基本满足成形精度要求。

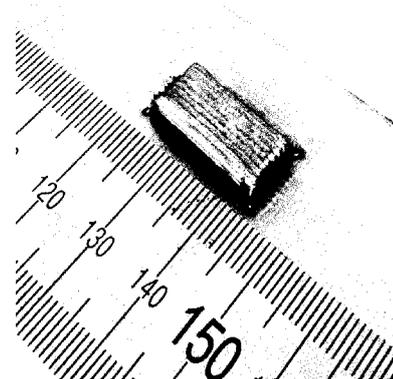


Fig. 17 Facade forming entity

5 结 论

针对本课题组研制的光内同轴送粉喷头, 运用 FLUENT 软件对送粉喷头中的粉气喷嘴出口粉、气流场进行模拟分析, 重点研究了喷头空间不同倾斜角和准直气速率对粉末汇聚特性的影响, 最后结合实验数据, 有效验证了本数值模型的合理性与可行性。

(1) 运用光内同轴送粉技术进行空间变姿态激

光熔覆,粉束受重力作用会产生一定的偏移量,且空间汇聚长度有所降低,但熔道仍能形成,故光内送粉对于空间变姿态激光熔覆具有较好效果。

(2)喷嘴出口粉末质量浓度分布沿 x 方向服从高斯分布,对称轴上沿 $-y$ 方向质量浓度先基本保持稳定,后逐渐下降为 $0\text{kg}/\text{m}^3$,受重力作用影响,随喷头倾斜角度增大,粉末汇聚长度 h 不断减小,偏移量 Δx 大致呈增大趋势,且 h 变化范围为 $11\text{mm} \sim 17\text{mm}$, Δx 变化范围为 $0.0\text{mm} \sim 0.4\text{mm}$ 。

(3)随外层准直气速率增加,汇聚长度 h 呈轻微上升趋势,而偏移量 Δx 在不同倾斜角度范围内呈现出不同变化趋势,且 h 上升幅度为 $1\text{mm} \sim 2\text{mm}$, Δx 变化幅度为 $0.05\text{mm} \sim 0.15\text{mm}$ 。

(4)试验数据与模拟结果变化趋势基本一致,实验值与模拟值相比,汇聚长度 h 略微降低,在进行空间变姿态激光熔覆过程中,可通过增大外层准直气速率来增加粉末汇聚长度并减小熔道顶点偏移量,提高粉束汇聚质量。

参 考 文 献

[1] YANG S, ZHONG M L, ZHANG Q M, *et al.* Directly rapid fabrication of metal components by laser cladding[J]. Powder Metallurgy Technology, 2002,20(4):234-238(in Chinese).
[2] JEHNMING L. Numerical simulation of the focused powder streams in coaxial laser cladding[J]. Journal of Materials Process-

ing Technology, 2000,105(1):17-23.

[3] ZEKOVIC S, DWIVEDI R, KOVACEVIC R. Numerical simulation and experimental investigation of gas flow from radially symmetrical nozzles in laser-based direct metal deposition[J]. International Journal of Machine Tool & Manufacture, 2007,47(1):112-123.
[4] YANG X Ch, LEI J B, LIU Y W, *et al.* Experimental measurement of metal powder stream concentration field in laser manufacturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006,33(7):993-997(in Chinese).
[5] ZHANG A F, ZHOU Zh M, LI D Ch, *et al.* Numerical simulation of gas-solid two-phase flow field on coaxial powder nozzle in laser metal direct manufacturing[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008,42(9):1169-1173(in Chinese).
[6] ZHU G X, LI D Ch, ZHANG A F, *et al.* Influence of deposited layer's structure on flow field of coaxial powder feeding nozzle[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010,37(6):1636-1642(in Chinese).
[7] SHI Sh H, FU G Y. Forming the inside-laser coaxial powder feeding laser cladding and inside-laser coaxial powder feeding nozzle: China, 200610116413.1[P]. 2006-09-22(in Chinese).
[8] FU G Y. A coaxial delivery device of light, powder and gas for laser cladding manufacturing: China, 201020022781.1[P]. 2010-09-08(in Chinese).
[9] WANG F J. Computational fluid dynamics analysis-principles and application of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2004:62-89(in Chinese).
[10] LAUNDER B, SPALDING D. Lectures in mathematical models of turbulence[M]. London, UK:Academic Press,1972:49-57.