

激光与光电子学进展

激光熔覆粉末汇聚特性对熔覆层高的影响研究

郭钢, 赵冬梅, 乌日开西·艾依提*, 贾儒

新疆大学智能制造现代产业学院(机械工程学院), 新疆 乌鲁木齐 830017

摘要 为研究不同载气流量和不同送粉量下激光熔覆粉末流场的汇聚特性对熔覆层高的影响,采用 Fluent 软件建立了气固两相流模型,对不同载气流量和不同送粉量下粉末流场的汇聚特性进行了模拟,并对模型进行了试验验证。结果表明,随着载气流量增大,喷嘴出口粉末流场的发散程度增大,粉末汇聚浓度降低。随着送粉量的增大,喷嘴出口粉末浓度场增大,粉末汇聚浓度增大,两种情况汇聚位置均无变化,在试验参数中载气流量和送粉量分别为 7 L/min 和 1.2 r/min 时粉末汇聚最好,熔覆层高最高。最后通过试验验证,模拟结果和试验结果相一致,说明了该模型的准确性。

关键词 激光熔覆; 数值模拟; 气固两相流; 汇聚特性; 粉斑直径; 工艺参数优化

中图分类号 TG456.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222931

Influence of Convergence Characteristics of Laser Cladding Powder Flow Field on Cladding Layer Height

Guo Gang, Zhao Dongmei, Wurikaixi Aiyiti*, Jia Ru

School of Intelligent Manufacturing Modern Industry (School of Mechanical Engineering),
Xinjiang University, Urumqi 830017, Xinjiang, China

Abstract This study investigates the impact of powder flow field convergence characteristics on layer height under different carrier gas flow rates and powder feeding amounts. A gas-solid two-phase flow model was developed using Fluent software and used to simulate the convergence characteristics of the powder flow field under different carrier gas flow rates and powder feeding amounts. The model was validated through experimental testing. The results show that as the carrier gas flow rate increases, the dispersion of the powder flow field at the nozzle outlet also increases and the powder convergence concentration decreases. In addition, as the powder feeding amount increases, the powder concentration field at the nozzle outlet and convergence concentration increase, while the convergence position remains unchanged. The model was found to be accurate as the simulation results were consistent with the experimental results.

Key words laser cladding; numerical simulation; gas-solid flow; convergence characteristics; powder spots; process parameter optimization

1 引言

激光熔覆是一种先进的表面改性技术^[1-3],它可获得与基材呈良好冶金结合、稀释率低、热影响区小,以及具有高硬度、高耐磨耐腐蚀的表面熔覆层,被广泛应用于航空航天、汽车工业等其他领域^[4-7]。激光熔覆技术又是一个复杂的物理化学冶金过程,涉及激光、粉末、基体之间的相互作用^[8-9]。在同轴送粉激光熔覆粉末输运中,熔覆质量很大程度上受粉末汇聚的影响^[10-11]。目前,研究粉末汇聚特性对熔覆质量的影响

一方面是改善工艺方法^[12-13]:通过大量的单因素试验和正交试验优化工艺参数,确定激光功率、光斑直径、粉末运输的最优工艺参数,但这些方法的试验研究成本较高。另一方面是通过数值模拟的方法^[14-16]:通过数值模拟分析粉末流场中信息,比较多组工艺参数和影响因素,为研究人员提供参考,减少试验成本。但是,建立激光熔覆过程中粉末流场的数值模型,研究不同送粉量和载气流量对熔覆层形成的影响,需要与试验相结合才具有说服力^[17-19]。

本文采用数值模拟与试验相结合的方法,研究了

收稿日期: 2022-10-31; 修回日期: 2022-11-16; 录用日期: 2022-11-28; 网络首发日期: 2022-12-08

基金项目: 新疆维吾尔自治区高校科研计划自然科学基金项目(XJEDU2021I008)

通信作者: *wurikaixi@sina.com

激光熔覆粉末流场的汇聚特性对熔覆层高的影响。通过 Fluent 软件分析了不同载气流量和送粉量下的速度场和浓度场对粉末汇聚特性的影响规律,建立了粉末汇聚焦点水平截面上粉末颗粒的实际分布,直观地反映了粉末汇聚的发散程度和汇聚程度,同时计算出了粉斑直径,实现了粉斑与光斑的匹配,并结合试验对模型的可靠性进行了验证。

2 同轴送粉激光熔覆数值模拟

同轴送粉激光熔覆载气流场和粉末流场的耦合作用为气固两相流的数值模拟的范畴,原理如图 1 所示。本文采用 Fluent 软件对同轴送粉激光熔覆的粉末流场进行分析,采用标准 $k-\epsilon$ 模型求解连续相,选择拉格朗日坐标系下的离散相模型来模拟计算颗粒运动,载气流量为氮气(N_2),粉末为 316L 不锈钢粉末,粒径为 $53\sim 150\ \mu\text{m}$ 呈正态分布,取平均粒径 $110\ \mu\text{m}$ 进行模拟计算。气固两相流动的有限元模型基于以下假设条件建立: 1) 载气和颗粒具有相同速度,都是均匀流场且为定常流动; 2) 只考虑惯性力和重力对颗粒运动的影响; 3) 由于离散相的体积分数小,忽略了颗粒间的碰撞,颗粒间不存在颗粒黏度; 4) 忽略了颗粒与激光辐射的换热; 5) 颗粒流动为垂直入口边界方向; 6) 颗粒分布为均匀分布。

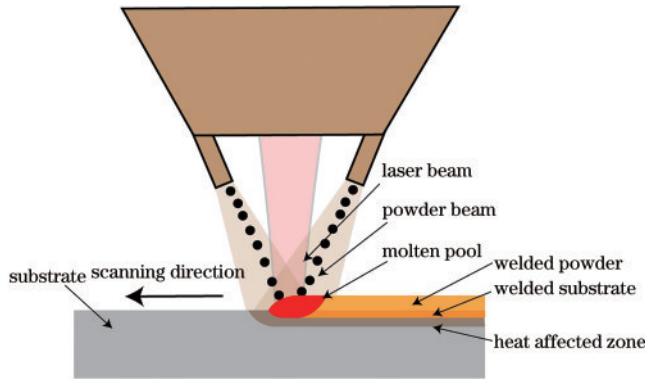


图 1 同轴送粉激光熔覆示意图

Fig. 1 Diagram of coaxial powder feeding laser cladding

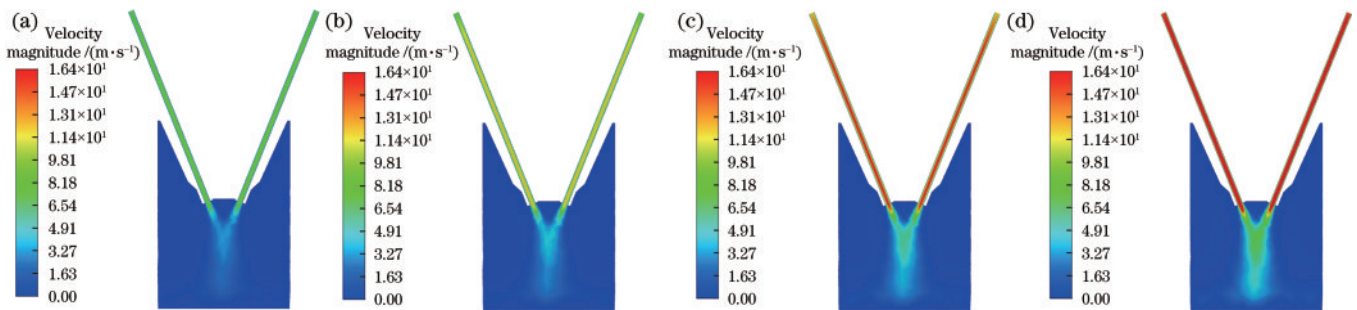


图 3 不同载气流量下喷嘴出口速度云图。(a) 5 L/min; (b) 7 L/min; (c) 9 L/min; (d) 11 L/min

Fig. 3 Cloud diagrams of nozzle exit velocity at different carrier gas flow rates. (a) 5 L/min; (b) 7 L/min; (c) 9 L/min; (d) 11 L/min

3.1.2 不同载气流量对粉末浓度场的影响

图 4(a) 和 (c) 为不同载气流量下粉末在垂直计算域截面的粉末浓度对比曲线图和粉末汇聚焦点水平

图 2(a) 是根据实验室现有喷嘴建立的分析模型。载粉气流在垂直入口方向以一定的速度驱动粉末进入计算域。同时粉末会与壁面发生一定碰撞,计算时需要引入一个恢复系数来提高模拟计算的精度,本文将恢复系数设置为 $0.91^{[10]}$ 。网格划分采用四面体法,建立如图 2(b) 所示的三维网格有限元模型。

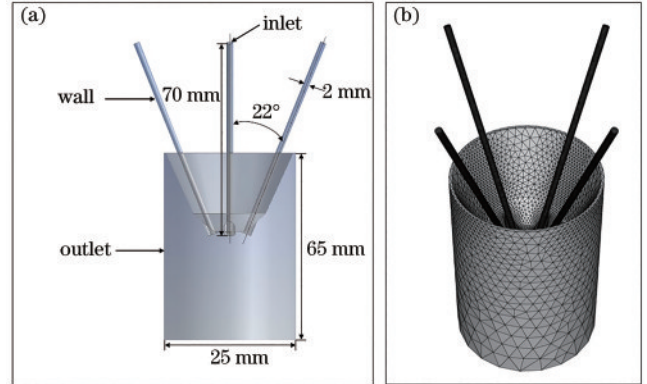


图 2 计算模型。(a) 边界条件; (b) 网格模型

Fig. 2 Computational model. (a) Boundary condition; (b) mesh generation

3 数值计算结果分析与讨论

3.1 不同载气流量对粉末流场的影响

根据实验室送粉器载气流量的可调节范围,同时为了保证送粉的连续与稳定,在送粉量一定的情况下,对载气流量分别为 $5\sim 11\ \text{L/min}$ 时的气体速度场和粉末浓度场进行模拟。

3.1.1 不同载气流量对气体速度场的影响

不同载气流量下的气流速度场分布云图如图 3 所示,可以看出,当载气流量增大时,气流速度随之增大,相同速度下的汇聚区域也随之增大。这说明随着载气流量的增加,流场的发散程度增大,汇聚处的粉末发散程度也随之增大,将直接影响熔覆质量。

截面浓度对比云图,随着载气流量的增大,粉末汇聚焦点处的浓度随之降低,质量浓度由 $10.80\ \text{kg/m}^3$ 下降至 $5.01\ \text{kg/m}^3$,而汇聚位置无变化,均在距离喷嘴

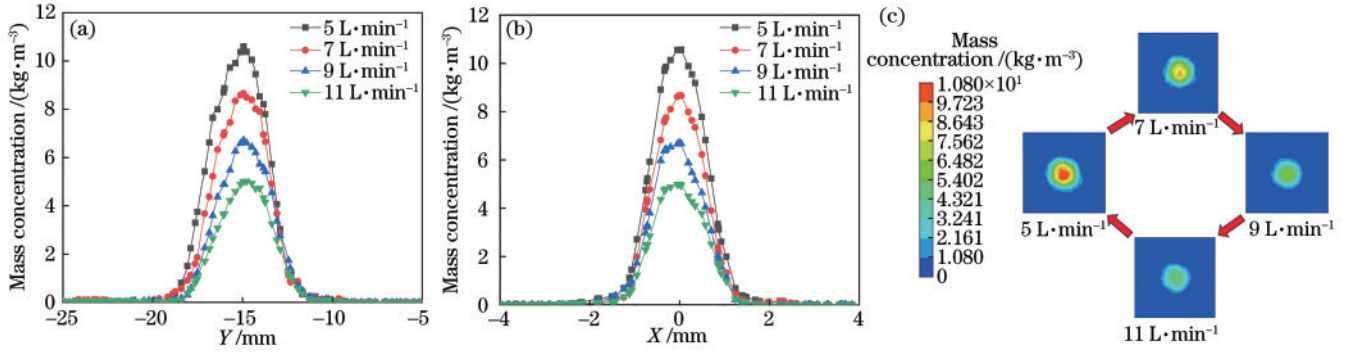


图 4 不同载气流量下的粉末浓度场。(a)垂直截面粉末浓度对比曲线;(b)汇聚焦点水平截面粉末浓度对比曲线;(c)汇聚焦点水平截面粉末浓度对比云图

Fig. 4 Powder concentration fields at different carrier gas flow rates. (a) Comparison curve of powder concentration in vertical section; (b) comparison curve of powder concentration in horizontal section of convergence focus; (c) comparison cloud of powder concentration in horizontal cross-section at the focus of convergence

下方 15 mm 处。图 4(b)为不同载气流量下粉末汇聚焦点水平截面浓度对比曲线图,四种载气流量下的粉斑直径分别为 4.0、3.8、4.2、4.7 mm。当载气流量为 5 L/min 时,由于气体曳力不足和重力的作用,粉斑直径较大,在载气流量达到 7 L/min 后随着载气流量的增加,粉斑直径略有增大。而在实际的熔覆过程中,粉斑直径过大,粉末汇聚性差,熔覆层表面会有严重的黏粉现象,并且也会浪费粉末。因此,良好的粉末汇聚特性和粉斑与光斑匹配是保证熔覆质量的前提。

3.1.3 不同载气流量下粉末在焦点水平截面上的实际分布

在实际熔覆中,粉末的聚焦范围与激光束的有效加热范围相接近时,熔覆质量最好。为了直观反映汇聚处粉末的实际分布,用 Fluent 软件对汇聚焦点水平截面粉末的实际分布进行了分析,结果如图 5 所示。由图可知,当载气流量为 7 L/min 时,粉末汇聚相比载气流量为 5 L/min 时的发散程度低,粉末汇聚相对集中,相比载气流量为 9 L/min 时的汇聚浓度却较高。同时,载气流量为 7 L/min 时,相较于其他工艺参数,

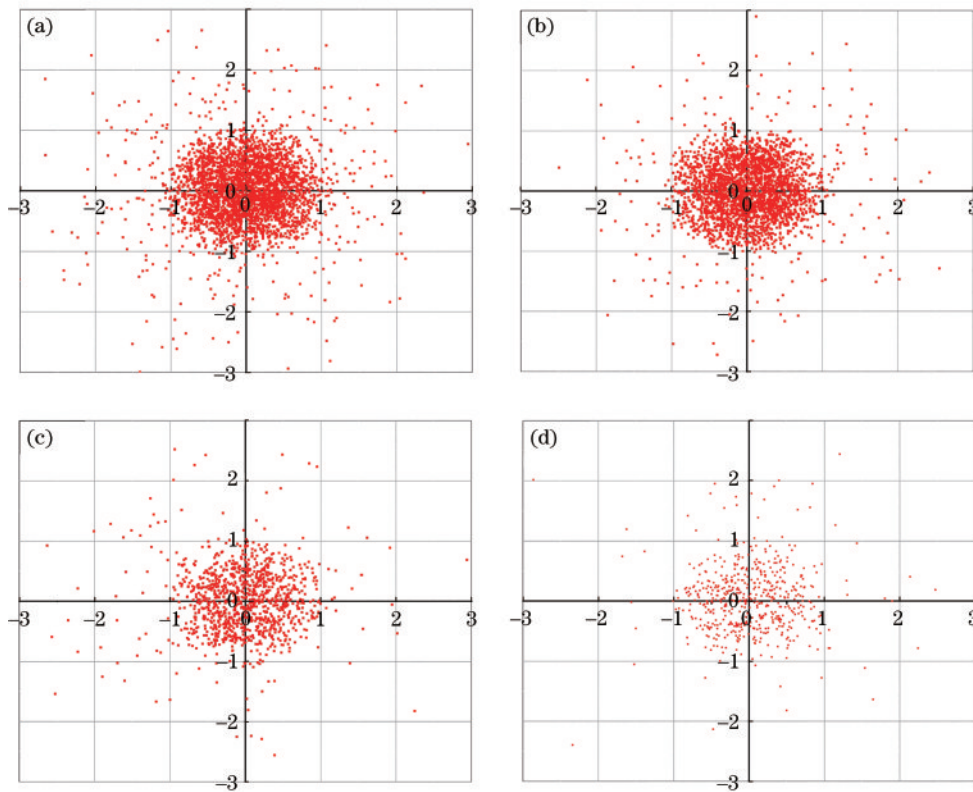


图 5 不同载气流量下汇聚焦点的颗粒分布。(a) 5 L/min; (b) 7 L/min; (c) 9 L/min; (d) 11 L/min

Fig. 5 Particle distribution at the convergence focus at different carrier gas flow rates. (a) 5 L/min; (b) 7 L/min; (c) 9 L/min; (d) 11 L/min

粉斑直径最小为 3.8 mm, 与光斑直径 2 mm 最为匹配, 故载气流量为 7 L/min 时粉末汇聚效果较好。

3.2 不同送粉量对粉末流场的影响

根据本课题组的工作总结, 本实验室送粉器在 0.8~1.4 r/min 时送粉较为稳定, 因此模拟的送粉量也在该范围内进行。在保证载气流量一定的条件下, 分别对送粉量为 0.8~1.4 r/min 的浓度场进行模拟。

3.2.1 不同送粉量对粉末浓度场的影响

图 6 和图 7(c) 为不同送粉量下垂直截面和汇聚焦

点水平截面粉末浓度对比云图, 随着送粉量的增大, 粉末在汇聚焦点的汇聚浓度逐渐增大, 质量浓度由 3.1 kg/m³ 上升至 8.48 kg/m³。图 7(a) 为不同送粉量下垂直截面粉末浓度对比曲线图, 可以看出, 粉末汇聚位置均无变化, 均在距离喷嘴下方 15 mm 处。图 7(b) 为不同送粉量下粉末汇聚焦点水平截面浓度对比曲线图, 由图可知, 4 种送粉量下的粉斑直径分别为 5.8、5.2、4.0、5.0 mm, 随着送粉量的增加, 粉斑直径略有减小, 而送粉量为 1.4 r/min 时, 由于气体曳力不足和重力的作用, 粉斑直径较大。

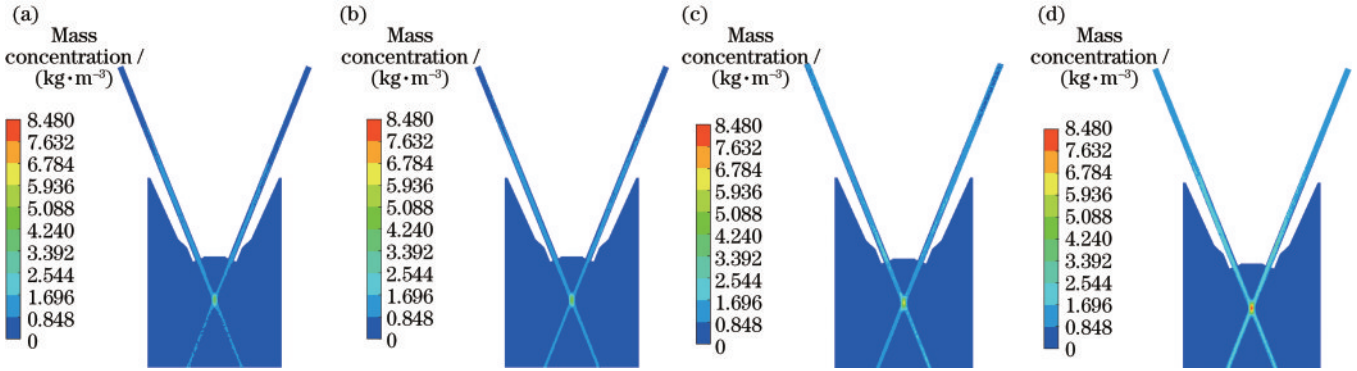


图 6 不同送粉量下粉末浓度云图。(a) 0.8 r/min; (b) 1.0 r/min; (c) 1.2 r/min; (d) 1.4 r/min

Fig. 6 Cloud diagrams of powder concentration under different powder feeding amounts. (a) 0.8 r/min; (b) 1.0 r/min; (c) 1.2 r/min; (d) 1.4 r/min

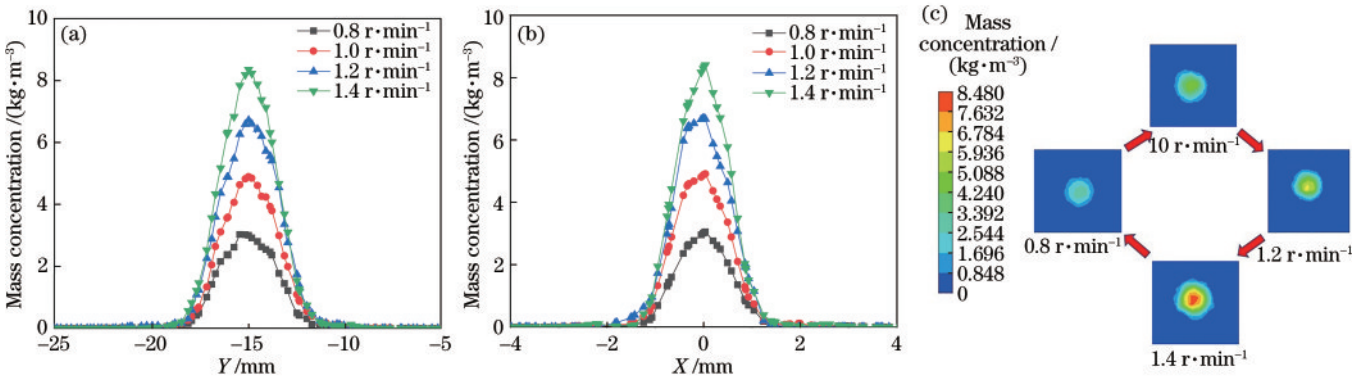


图 7 不同送粉量下的粉末浓度场。(a) 垂直截面粉末浓度对比曲线; (b) 汇聚焦点水平截面粉末浓度对比曲线; (c) 汇聚焦点水平截面粉末浓度对比云图

Fig. 7 Powder concentration field under different powder feeding amounts. (a) Comparison curve of powder concentration in vertical section; (b) comparison curve of powder concentration in horizontal section of convergence focus; (c) comparison cloud of powder concentration in horizontal cross-section at the focus of convergence

3.2.2 不同送粉量下粉末在焦点水平截面上的实际分布

在实际的熔覆过程中, 粉斑直径过大会导致粉末利用率低和表面黏粉等缺陷, 因此良好的粉末汇聚特性和粉斑与光斑的匹配时熔覆效果较好。为了直观反映汇聚处粉末的实际分布, 用 Fluent 软件对汇聚焦点水平截面粉末的实际分布进行了分析, 结果如图 8 所示。由图可知, 当送粉量为 1.2 r/min 时, 粉末汇聚相比送粉量为 1.4 r/min 时的发散程度低, 粉末汇聚相对

集中, 相比送粉量为 1.0 r/min 时的汇聚浓度却较高。同时, 送粉量为 1.2 r/min 时, 相较于其他工艺参数, 粉斑直径最小为 4.0 mm, 与光斑直径 2 mm 最为匹配, 故送粉量为 1.2 r/min 时粉末汇聚效果较好。

4 试验结果分析与讨论

4.1 粉末汇聚特性试验分析

图 9(a) 为粉末汇聚特性试验验证方法示意图, 用开有 2 mm 直径的器皿对 60 s 内不同载气流量和不同

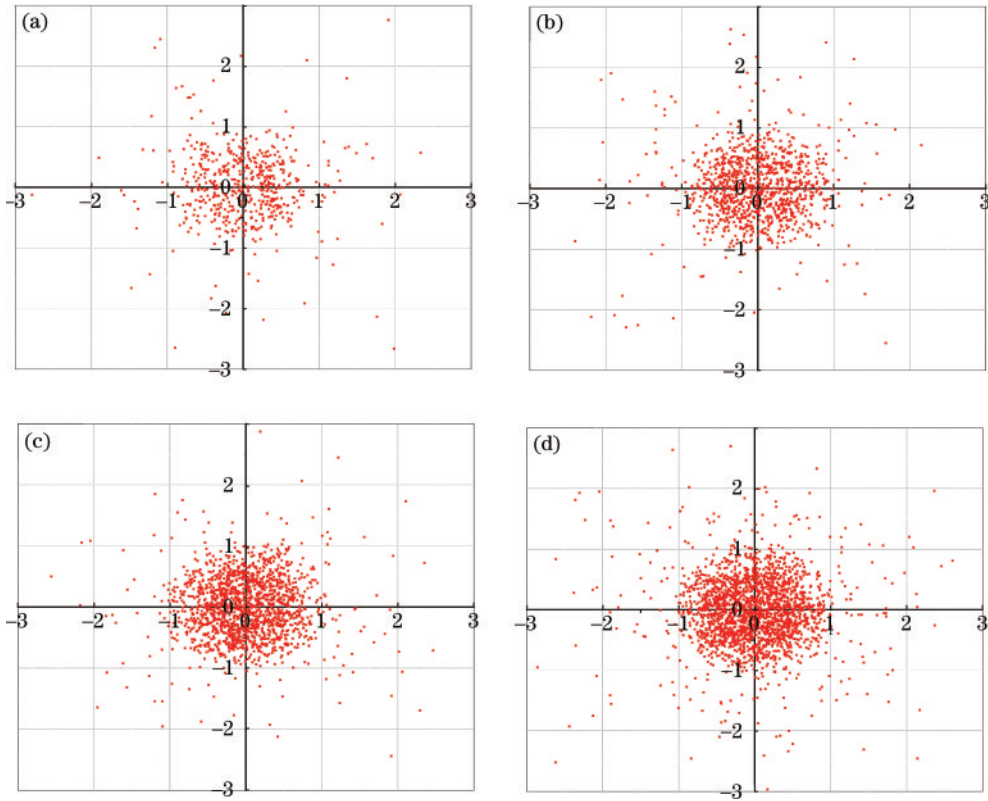


图 8 不同送粉量下汇聚焦点的颗粒分布。(a) 0.8 r/min; (b) 1.0 r/min; (c) 1.2 r/min; (d) 1.4 r/min

Fig. 8 Particle distribution at the convergence focal point with different powder feeding amounts. (a) 0.8 r/min; (b) 1.0 r/min; (c) 1.2 r/min; (d) 1.4 r/min

送粉量下落入器皿的粉末量进行称量,落入器皿中的粉末量为实际熔覆中进入熔池的粉末量,称量到的粉末量越多说明粉末汇聚越好。熔覆粉末选用 316L 不锈钢粉末,试验前将粉末在电热鼓风干燥箱中进行 105 °C 240 min 烘干处理。为减少误差,多次测量求平均的结果如图 9(b)和(c)所示。由图可知,图 9(b)中称量到的粉末量变化趋势并没有图 9(c)的变化趋势明显,这是因为图 9(b)在保持送粉量为 1.2 r/min 条件下,进行的不同载气流量粉末汇聚试验,由于送粉量的限制只改变载气流量,称量到的粉末量没有大的变化趋势。图 9(c)变化趋势大的原因是,保持载气流量恒

定只改变送粉量条件下,送粉量是影响汇聚浓度的主要因素,即随着送粉量的改变,称量到的粉末量会有明显的变化。同时,在载气流量为 7 L/min 和送粉量为 1.2 r/min 时落入器皿中的粉末量最大,分别为 1.412 g 和 1.342 g。这是因为,在载气流量为 7 L/min 和送粉量为 1.2 r/min 时,粉斑直径分别为 3.8 mm 和 4 mm,粉末汇聚优于其他试验参数,粉末利用率较高。

4.2 激光熔覆层高试验分析

采用控制变量法进行了熔覆试验,试验工艺参数如表 1 所示。在一块喷砂处理后,材料为 80 mm × 80 mm × 8 mm 的 Q235 基板上进行熔覆,载气和保护

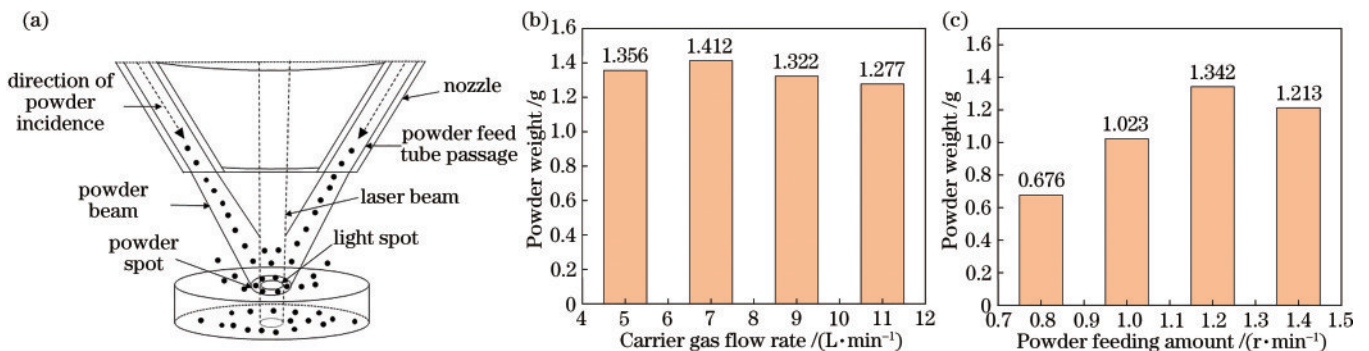


图 9 粉末汇聚验证试验。(a)粉末汇聚试验方法示意图;(b)不同载气流量下进入熔池的粉末量;(c)不同送粉量下进入熔池的粉末量
Fig. 9 Powder convergence validation experiments. (a) Schematic diagram of the experimental method of powder convergence; (b) amount of powder entering the melt pool at different carrier gas flow rates; (c) amount of powder entering the melt pool at different powder feeding amounts

气均为氮气(N₂)。试验结果如图 10 所示,由图可知,载气流量为 7 L/min 和送粉量为 1.2 r/min 时,熔覆层

熔高较高,说明了此时粉末汇聚优于其他工艺参数,验证了模型的可行性。

表 1 工艺参数

Table 1 Process parameters

Laser power P / W	Powder feeding amount v / (r·min ⁻¹)	Scanning speed v_s / (mm·s ⁻¹)	Carrier gas flow rate v_c / (L·min ⁻¹)	Laser beam D / mm
1000	1.2	10	5,7,9,11	2
1000	0.8, 1.0, 1.2, 1.4	10	9	2

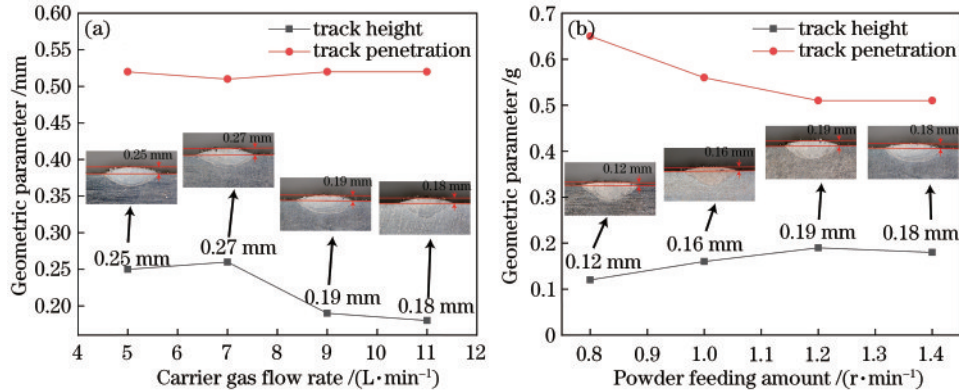


图 10 熔覆层几何形貌。(a)不同载气流量下熔覆层的几何形貌;(b)不同送粉量下的熔覆层几何形貌

Fig. 10 Cladding layer geometry. (a) Geometry of the cladding layer at different carrier gas flow rates; (b) geometry of cladding layers with different powder feeding amounts

5 结 论

本文通过数值模拟与试验相结合的方法,研究了不同载气流量和不同粉送量下粉末流场汇聚特性对熔覆层高的影响,分析了不同载气流量和不同送粉量下的速度场和浓度场,粉末汇聚的焦点位置、焦点的汇聚浓度和实际分布情况,并结合试验对模型进行了验证,具体结论如下:

1) 同轴送粉激光熔覆粉末汇聚特性受载气流量和送粉量的影响,汇聚焦点的粉末浓度与载气流量呈负相关、与送粉量呈正相关。在 5~11 L/min 载气流量中,载气流量为 7 L/min 时粉末汇聚最好,在 0.8~1.4 r/min 送粉量中,送粉量为 1.2 r/min 时粉末汇聚最好。

2) 通过试验与模拟相结合可知,在载气流量为 7 L/min 和送粉量为 1.2 r/min 时粉末汇聚性最好,熔覆层高最高,熔覆效果最好。

参 考 文 献

- [1] Luo X X, Zhang K, Cao J, et al. Effect of line energy density of the laser beam on the microstructure and wear resistance properties of the obtained Fe₃Al laser cladding coatings[J]. Optik, 2022, 261: 169256.
- [2] Liu H, He X L, Yu G, et al. Numerical simulation of powder transport behavior in laser cladding with coaxial powder feeding[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2015, 58(10): 104701.
- [3] Xue P S, Zhu L, Xu P, et al. CrCoNi medium-entropy alloy thin-walled parts manufactured by laser metal deposition: Microstructure evolution and mechanical anisotropy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 817: 141306.
- [4] Zhu L D, Xue P, Lan Q, et al. Recent research and development status of laser cladding: a review[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 138: 106915.
- [5] Li M Y, Han B, Song L, et al. Enhanced surface layers by laser cladding and ion sulfurization processing towards improved wear-resistance and self-lubrication performances [J]. Applied Surface Science, 2020, 503: 144226.
- [6] Montoya-Zapata D, Creus C, Moreno A, et al. Computational minimization of over-deposition at corners of trajectories in laser metal deposition[J]. Manufacturing Letters, 2021, 29: 29-33.
- [7] 裴明源, 乌日开西·艾依提, 王胜权. 激光熔覆扫描路径对薄板变形的影响研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(17): 171403.
- [8] Pei M Y, Aiyiti W, Wang S Q. Influence of the laser-cladding scanning path on thin-plate distortions[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(17): 171403.
- [9] Yang J H, Aiyiti W, Jiang H, et al. Evolution of molten pool morphology and prediction of inclined cladding layer morphology[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 142: 107164.
- [10] Artur V, Konstantin B, Anton K, et al. Development of laser metal deposition process for a large IN625 part using small trial samples[J]. Procedia CIRP, 2020, 94: 310-313.
- [10] Guo S R, Yin Q Q, Cui L J, et al. Simulation and experimental research based on carrier gas flow rate on

- the influence of four-channel coaxial nozzle flow field[J]. *Measurement and Control*, 2020, 53(9/10): 1571-1578.
- [11] Bedenko D V, Kovalev O B, Sergachev D V. Numerical study of the gas-particle flows with the two-way coupling formed by coaxial nozzles for laser cladding[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2022, 445: 128700.
- [12] Chang L, Yanpeng Y, Zhaotai L, et al. Differential analysis of the influence mechanism of ultrasonic vibrations on laser cladding[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2022, 38: 16-37.
- [13] Doubenskaia M, Kulish A, Sova A, et al. Experimental and numerical study of gas-powder flux in coaxial laser cladding nozzles of Precitec[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 406: 126672.
- [14] Kovaleva I, Kovalev O, Zaitsev A V, et al. Modeling and numerical study of light-propulsion phenomena of particles acceleration in coaxial laser powder cladding[J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 439-449.
- [15] Guan X Y, Zhao Y F. Numerical modeling of coaxial powder stream in laser-powder-based Directed Energy Deposition process[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 34: 101226.
- [16] Song Y Y, Li X, Hu C, et al. Study on powder dynamics of ultrahigh-speed laser cladding[J]. *Journal of Laser Applications*, 2021, 33(3): 032019.
- [17] Gao X, Yao X X, Niu F Y, et al. The influence of nozzle geometry on powder flow behaviors in directed energy deposition additive manufacturing[J]. *Advanced Powder Technology*, 2022, 33(3): 103487.
- [18] 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.
- [19] Chai Q, Wang Z, Fang C, et al. Numerical and experimental study on the profile of metal alloys formed on the inclined substrate by laser cladding[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 422: 127494.