

激光与光电子学进展

激光熔覆垂直及倾斜工况下粉末输运行为研究

赵豪, 杨季鑫*, 胡晓圻, 王瑞, 毕云杰

季华实验室新型增材制造研究院, 广东 佛山 528200

摘要 通过建立同轴喷嘴和粉末输运过程的数值模型,采用数值仿真模拟的方式研究了不同工艺参数下,同轴喷嘴在垂直和倾斜使用工况下粉末汇聚性的变化规律。结果表明:粉末聚焦处的粉末浓度随载粉气速度的增加而降低,而保护气速度对粉末浓度影响较小;在载粉气流量为 8 L/min,保护气流量为 20 L/min,送粉量为 15.8 g/min 时,相比于同轴喷嘴垂直使用,倾斜使用条件下粉末的聚焦高度由 19 mm 升高到 21 mm,焦点直径由 3.7 mm 增大到 4.2 mm;同轴喷嘴垂直使用时粉末分布的均匀性更好;数值模拟结果与试验结果吻合良好,可以准确反映不同送粉方式中粉末的输运特性。

关键词 激光技术; 同轴喷嘴; 数值模拟; 粉末流场; 倾斜工况

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230785

Research on Powder Transport Behavior of Laser Cladding Under Vertical and Inclined Working Conditions

Zhao Hao, Yang Jixin*, Hu Xiaoqi, Wang Rui, Bi Yunjie

Additive Manufacturing Research Institute, Ji Hua Laboratory, Foshan 528200, Guangdong, China

Abstract In this study, we developed a numerical model of the coaxial nozzle and powder transport process. Using numerical simulation we examined the effect of different processing parameters on powder convergence in the coaxial nozzle under both vertical and inclined conditions. Our results indicate that an increase in carrier gas velocity leads to a decrease in powder concentration at the powder focusing location, while the velocity of the shielding gas has little effect on the powder concentration. When the carrier gas velocity is 8 L/min, the shielding gas velocity is 20 L/min, and the powder feeding rate is 15.8 g/min, the use of the coaxial nozzle in an inclined position increases the focusing height of the powder from 19 mm to 21 mm and the focus diameter from 3.7 mm to 4.2 mm, compared to that in a vertical position. However, the uniformity of the powder distribution is much better when the coaxial nozzle is used vertically. Our numerical simulation results are consistent with the experimental results and can accurately reflect the powder transportation characteristics under different powder delivery methods.

Key words laser technique; coaxial nozzle; numerical simulation; powder flow field; inclined working condition

1 引言

增材制造工艺凭借其成形复杂构件的能力,极大拓展了传统加工方式下零件的设计维度,缩短了产品的研发周期,近年来在航空航天、汽车制造、生物医疗等领域得到了广泛应用^[1-2]。基于送粉的激光熔覆增材制造技术(DED-L)采用高能激光作为能量源,以金属粉末为原材料,根据 CAD 模型分层信息将送粉装置和粉末喷嘴同步送给的金属粉末熔化,经过逐层沉积从而实现复杂几何结构和功能构件的一体化成形^[3-4],

具有自动化程度高^[5]、稀释率可控等优点,在增减材一体化成形^[6]、微铸锻多功能集成等方面具有独特优势。

作为激光同轴送粉系统中的核心部件,激光熔覆头耦合了光学组件、送粉组件和链接组件,通过在待成形基材表面实现激光束、粉末和熔池之间的相互作用来完成基体和熔覆层的冶金结合^[7-8],其中同轴喷嘴粉末的传输特性对激光-粉末相互作用和粉末利用率起着重要作用,影响着成形质量和精度^[9-11]。研究人员采用数值模拟和试验方法研究了不同工艺条件下粉末输运特性,粉末性质^[12]、载粉气和保护气等显著影响粉末

收稿日期: 2023-03-07; 修回日期: 2023-04-01; 录用日期: 2023-04-07; 网络首发日期: 2023-04-17

基金项目: 季华实验室航空发动机关键零部件增材制造核心工艺开发与专用装备研制(X190351TM190)

通信作者: *yangjx@jihualab.com

聚焦位置^[13],而保护气、送粉速率和喷嘴几何结构影响着粉末流的直径^[14-15]。张安峰等^[16-18]利用气固两相流模型,研究了喷嘴锥角、送粉量和载气速度等参数对同轴喷嘴粉末流场的浓度分布和聚焦特性的影响,发现载气速度的增大不利于粉末汇聚。成形过程中粉末浓度与送粉速度呈正线性关系^[19],随保护气流速的增加,粉末与喷嘴出口的焦距增大,粉体的最大浓度减小,在较低的载气流速下,粉末流的汇聚位置应小于激光束聚焦位置,以提高粉末的汇聚性^[20]。此外,喷嘴内粉末通道的长度、直径和收缩角对粉末流的速度和收敛特性有不同的影响^[21],粉末与通道内壁的碰撞会导致喷嘴出口粉末流发散,通过增加通道长度和减小通道直径,可以得到更小的粉末汇聚点。粉末汇聚的焦平面位置受粉末射流发散角的影响,发散角的不同会导致焦平面位置在粉末通道中心线交点上方或下方^[22]。

前期研究主要集中在喷嘴几何结构优化设计和喷嘴垂直使用状态下粉末流场等方面,对喷嘴倾斜使用

工况下粉末流场及浓度场分布规律缺乏系统研究,限制了激光熔覆技术在增减材一体化成形、微铸锻复合成形等方面的应用。基于此,本文通过建立同轴送粉喷嘴的三维几何模型和粉末输运过程数值模型,研究了喷嘴在垂直状态和 20°侧倾状态下粉末输运特性,分析了不同工艺参数条件下粉末流场和浓度场变化规律,并对数值模拟结果进行了试验验证,该结果为后期喷嘴的结构优化设计及激光熔覆复合成形的工艺开发提供理论和技术支持。

2 试验方法

2.1 同轴喷嘴几何模型

图 1 所示为同轴喷嘴的几何模型及其截面形貌,该喷嘴为四点式喷嘴,喷嘴周围均匀布置四路送粉管,通过送粉器和外部载粉气流将粉末输送到熔池,如图 1(a)所示。喷嘴中间为保护气通道,保证熔池在打印过程中处于惰性气体环境,如图 1(b)所示。

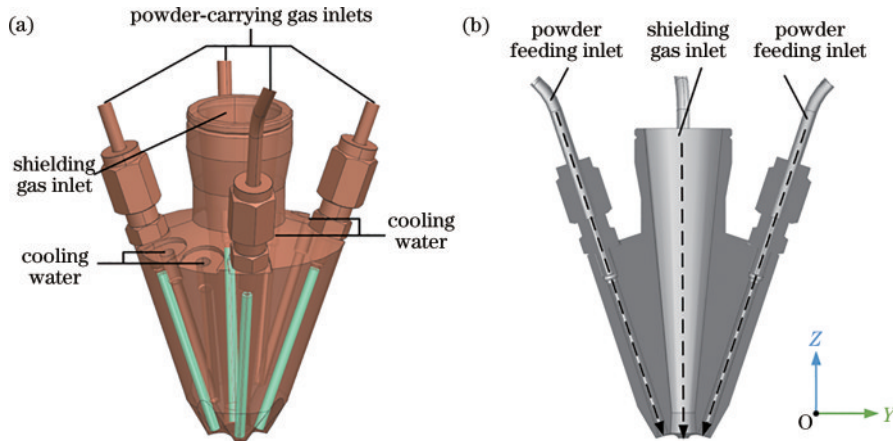


图 1 同轴喷嘴几何模型。(a) 喷嘴三维模型;(b) 喷嘴截面图

Fig. 1 Geometric model of the coaxial nozzle. (a) Three-dimensional model of the nozzle; (b) section of the nozzle

2.2 数值模型假设

为研究喷嘴的气体流场分布和粉末输运特性,建立了粉末输送过程数值仿真模型。由于粉末输送过程的复杂性,同时为提高计算效率和收敛性,需对工艺过程做出如下假设^[19,23-24]:

- 1) 气体相作为连续相,其密度和黏度等物性参数为定值;
- 2) 粉末颗粒为球形分布,服从 Rosin-Rammler 分布;
- 3) 忽略激光的热辐射对粉末颗粒的影响;
- 4) 粉末颗粒在入口处均匀分布,垂直于入口平面,且速度与载粉气速度相同;
- 5) 粉末颗粒的体积分数小于 10%,忽略颗粒之间的碰撞以简化模型;
- 6) 只考虑阻力、惯性和重力的作用,忽略压力和绕流加速度等其他附加力的作用。

2.3 连续相方程建立

设定载粉气和保护气为连续相,根据使用工况及雷诺数的计算,得出其流场为湍流分布,满足质量守恒方程和雷诺平均 Navier-Stokes 动量守恒方程。

质量守恒方程^[25]表示为

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

式中: ρ 为气体密度; u_i 和 x_i 为 i 方向上气体的速度和位置。

动量守恒方程^[26]表示为

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i, \quad (2)$$

式中: p 为压力; μ 为分子黏度; μ_t 为湍流黏度; g_i 为重力加速度。

湍流黏度 μ_t 计算公式为

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (3)$$

式中: k 为湍流动能; ε 为湍流动能耗散率; C_μ 由场变量计算获取。湍流模型选用 Realizable k - ε 方程^[27], 相比于标准 k - ε 方程^[28] 该模型考虑了湍流黏度, 湍流动能守恒方程(k 方程) 计算公式为

$$\frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \rho \varepsilon_0. \quad (4)$$

湍流动能耗散方程(ε 方程) 计算公式为

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}}, \quad (5)$$

式中: σ_k 和 σ_ε 分别为 k 和 ε 的湍流普朗特数, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.2$; ν 为运动黏度; C_2 取经验常数 1.9。 C_1 计算公式为

$$C_1 = \max \left(0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right), \quad (6)$$

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad (7)$$

式中: S 为平均应变率张量的模。其计算公式为

$$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}, \quad (8)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right). \quad (9)$$

2.4 离散相方程建立

数值模拟过程中粉末颗粒视为离散相, 将离散相颗粒加入到气体流场中进行耦合求解。通过作用在每个粒子上的力平衡方程来计算离散相颗粒的轨迹, 其在拉格朗日坐标系中的形式^[23] 为

$$\frac{du_{p,i}}{dt} = F_D(u_i - u_{p,i}) + \frac{(\rho_p - \rho) g_i}{\rho_p} + F_i, \quad (10)$$

式中: $u_{p,i}$ 为粒子速度; $F_D(u_i - u_{p,i})$ 为单位颗粒质量的曳力; ρ_p 为颗粒密度; F_i 为单位颗粒质量附加力的组合。 F_D 的计算公式为

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24}, \quad (11)$$

式中: d_p 为颗粒直径; C_D 为曳力系数, 本研究选用球形曳力系数^[29]; Re 为雷诺数。 C_D 和 Re 的计算公式为

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2}, \quad (12)$$

$$Re = \frac{\rho d_p |u_i - u_{p,i}|}{\mu}, \quad (13)$$

式中: a_1, a_2, a_3 为颗粒形状相关的经验常数。

采用 Rosin-Rammler 分布来表征粉末颗粒直径的分布, 该方法将颗粒尺寸范围划分为足够数量的离散区间, 每个区间内的尺寸都用平均值来表示。根据 Rosin-Rammler 分布, 直径大于 d 的颗粒质量分数可以表示为

$$Y_d = \exp \left[- \left(\frac{d}{d_m} \right)^n \right], \quad (14)$$

式中: d_m 为尺寸常数, 取颗粒的平均直径; n 为分散系数。

在离散随机模型中, 用颗粒的高斯分布随机速度波动 u', v', w' 和涡流时间尺度 τ_c 来模拟湍流, 计算公式为

$$u' = v' = w' = \zeta \sqrt{\frac{2k}{3}}, \quad (15)$$

$$\tau_c = 2C_L \frac{k}{\varepsilon}, \quad (16)$$

式中: ζ 为服从标准分布的随机数; C_L 为时间尺度常数, 取 0.15。

颗粒穿越涡流的时间 τ_c 计算公式为

$$\tau_c = -\tau \ln \left[1 - \left(\frac{L_c}{\tau |u - u_p|} \right) \right], \quad (17)$$

式中: τ 为颗粒松弛时间; L_c 为涡流长度尺度; $|u - u_p|$ 为相对速度的大小。

在较小的涡流寿命 τ_c 和涡流穿越时间 τ_c 内, 颗粒与流体涡流相互作用, 然后根据式(15)通过更新 ζ 值来获得新的颗粒速度。通过对力平衡方程(10)进行积分, 可以获取颗粒在运动轨迹上的速度, 进而得到颗粒的运动轨迹公式为

$$\frac{dx_i}{dt} = u_{p,i}. \quad (18)$$

2.5 计算域及边界条件

图 2 所示为喷嘴的三维数值模型计算域, 计算域包括喷嘴计算域和外流场计算域, 其中喷嘴计算域由四路送粉管以及保护气通道构成, 外流场计算域由直径为 50 mm、高度为 50 mm 的圆柱体区域构成。图 2(a)、(b) 分别为喷嘴垂直放置和喷嘴侧倾 20° 放置时的计算域网格, 网格结构为四面体单元, 网格单元数量分别为 663413 和 641968, 在送粉管路及保护气管路壁面设置三层边界层。送粉管上表面为载粉气速度入口, 保护气管路上表面为保护气速度入口, 外流场计算域为压力出口, 送粉管壁面及保护气管路壁面为无滑移壁面边界条件。

本研究在室温下进行, 载粉气和保护气体均为氩气, 粉末为 316L 不锈钢粉末, 数值模拟采用参数与实际工艺参数一致, 具体工艺参数如表 1 所示。

数值模拟过程中, 需将气体流量换算成速度格式。对于载粉气, 单根粉管的载气速度和保护气流速公式分别为

$$V_1 = \frac{Q_1}{4A_1}, \quad (19)$$

$$V_2 = \frac{Q_2}{A_2}, \quad (20)$$

式中: A_1 为单根粉管的截面积; A_2 为保护气入口处的截面积。

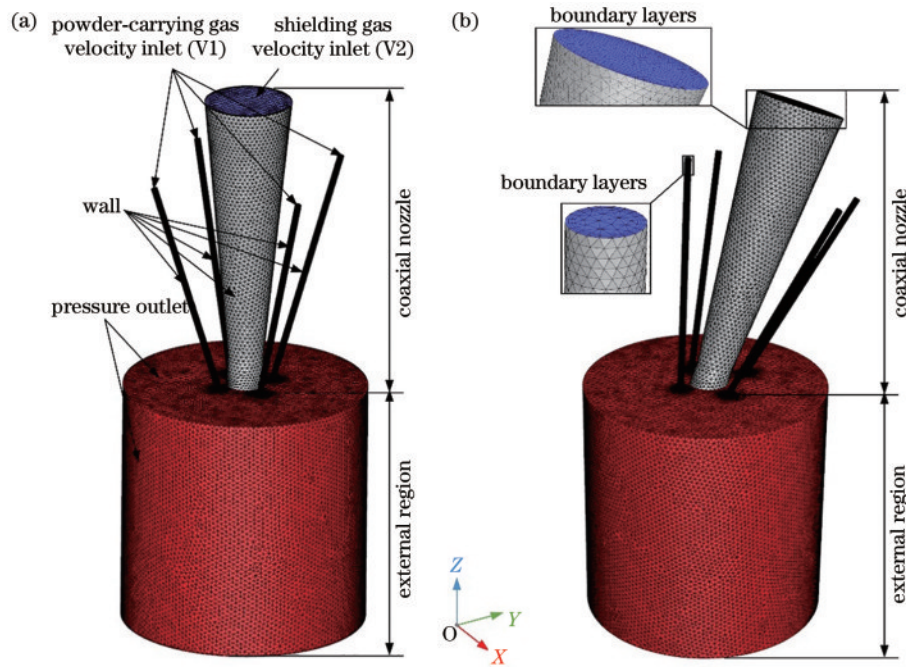


图 2 同轴喷嘴计算域。(a) 喷嘴垂直状态；(b) 喷嘴侧倾 20°

Fig. 2 Computational domain of the coaxial nozzle. (a) Vertical state of nozzle; (b) nozzle at 20° incline

表 1 数值模拟工艺参数

Table 1 Processing parameters of numerical simulation

Parameters	Value
Powder diameter $d / \mu\text{m}$	50–150
Flow rate of the carrier gas $Q_1 / (\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	4, 6, 8, 10, 12
Initial pressure of the carrier gas P_1 / MPa	0.3
Flow rate of shielding gas $Q_2 / (\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	10, 20, 30, 40, 50
Initial pressure of the shielding gas P_2 / MPa	0.1
Powder feeding rate $M_1 / (\text{g} \cdot \text{min}^{-1})$	12.3, 14.1, 15.8, 17.6, 19.4

2.6 试验设备

为了验证数值分析结果的有效性,需要进行粉末自由射流试验和激光熔覆工艺试验,具体试验设备参见表 2。

表 2 试验设备

Table 2 Experimental facility

Equipment	Model
Laser	IPG YLS 6kW
Powder feeder	PFH-DT1H06
Laser cladding head	LH-WVR-1020
Coaxial nozzle	CF-1317-01
Water cooler	TFLW-6000WDR
Robot	Comau NJ 60-2.2
Control system	Siemens PLC

3 分析与讨论

3.1 连续相气体流场分布

图 3 所示为 $Q_1=8 \text{ L/min}$ 、 $Q_2=20 \text{ L/min}$ 、 $M_1=$

15.8 g/min 条件下气体在喷嘴 $X=0$ 截面处的流场分布。喷嘴垂直状态和倾斜 20° 状态下气体流场相似,送粉管的内径远小于保护管道内径,这种内径差异导致粉管内的气体流速大于保护气的入射速度,当气体到达下方流场计算域后,载粉气和保护气开始混合,经过一段距离运动后逐渐达到汇聚收敛状态。不同流向的气体相遇后抵消了 Y 轴水平方向的一部分动能,同时气体运动截面的突然增大,使得汇聚后的最大混合气体流速小于粉管内的载粉气流速。当喷嘴倾斜 20° 时,不同粉管在水平方向截面呈非对称分布,速度方向分量均沿 Y 轴负方向和 Z 轴负方向,因此气体在向 Z 轴负方向运动的同时向 Y 轴负方向运动,使得气体沿倾斜方向汇聚,对照图 3(a) 和 (b) 可知,粉末汇聚点的位置得到延长。

3.2 离散相粉末浓度分布

图 4 所示为 $Q_1=8 \text{ L/min}$ 、 $Q_2=20 \text{ L/min}$ 、 $M_1=15.8 \text{ g/min}$ 条件下喷嘴垂直状态各截面粉末浓度场分布规律。图 4(a) 为 $X=0$ 截面处的粉末浓度分布,喷嘴

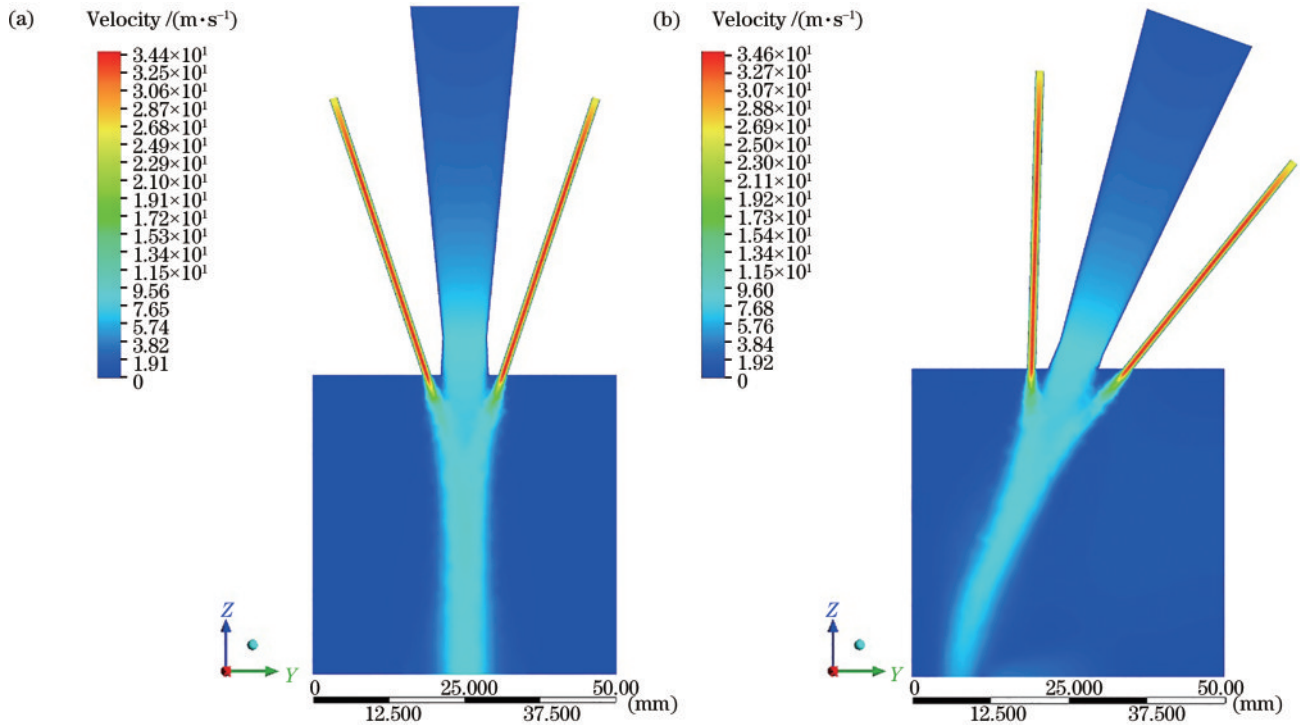


图 3 $X=0$ mm 截面处气体流场分布。(a) 喷嘴垂直状态;(b) 喷嘴侧倾 20°

Fig. 3 Distribution of gas flow field at $X=0$ mm cross section. (a) Vertical state of nozzle; (b) nozzle at 20° incline

粉管内的粉末在离开粉管后,呈向外发散和扩展的趋势,并在载粉气的驱动下继续沿喷嘴入射方向运动。各水平截面处的粉末浓度分布如图 4(b)~(f)所示:四路粉末的各自边界在 $Z=40$ mm 处有相互融合的趋势,此时局部粉末浓度较小,如图 4(b)所示;在 $Z=34$ mm 附近四路粉末开始进行汇合并融合为一个近圆形的区域,粉末浓度增加,如图 4(c)所示;在 $Z=31$ mm 截面处汇聚区域的面积有所减小,此时粉末浓度达到峰值,即该位置为粉末焦点位置,此时的焦点尺寸 $D \approx 3.7$ mm,如图 4(d)所示;在 $Z=28$ mm 处从汇聚区域开始发散并继续前进,粉末汇聚区域面积开始增大,粉末处于发散状态,最大粉末浓度降低。

喷嘴侧倾 20° 状态下各截面粉末浓度分布如图 5 所示,总体规律与图 4 中喷嘴垂直状态的结果类似,其区别主要在于粉末的流动方向和聚焦位置。由于喷嘴的侧倾,粉管的轴线指向了 Z 轴负方向和 Y 轴负方向,使得不同截面上粉末分布的位置逐渐向 Y 轴负方向偏移。在 $Z=29$ mm 截面附近,到达粉末焦点位置,此时截面局部最大粉末浓度达到峰值,焦点的尺寸 $D \approx 4.2$ mm,略大于喷嘴垂直状态下的焦点尺寸。

对比图 5 与图 4 中粉末浓度场分布可以看出,喷嘴侧倾 20° 时,粉末焦点位置高度相比垂直状态下有所下降。图 6 展示了喷嘴旋转 20° 时的几何处理方法,本研究以垂直状态下喷嘴最下端与外流场计算域接触的 A 点作为旋转点,顺时针旋转 20° ,旋转后理论上的焦点 C 运动到 C' 点,焦点高度由 D_1 增大到 D_2 。因此,在图 5 的数值仿真中,实际粉末焦点高度相比垂直状态下有

一定程度的下移。此外,由于在喷嘴侧倾状态下,不同粉管到达同一水平高度时所经历的路程不同,因此其加速距离和相遇时的动能不同,在一定程度上延长了到达粉末焦点的距离。

3.3 工艺参数对粉末分布的影响

为了研究不同工艺参数对粉末分布的影响,分别沿喷嘴轴线方向进行粉末浓度采样,喷嘴垂直状态沿图 6(a)中 BC 轴线方向采样,喷嘴侧倾 20° 状态沿图 6(b)中 $B'C'$ 方向采样。

图 7 所示为 $Q_2=20$ L/min、 $M_1=15.8$ g/min 条件下不同载粉气流速对粉末浓度的影响规律。随着载粉气流速的增加,粉末浓度逐渐降低,这是因为在送粉量一定的情况下,流速的增大使得粉末颗粒的运动加快,不同粒径颗粒之间的距离变远,粉末更加发散,因而各处的粉末浓度降低。同时可以看到,粉末焦点的位置基本保持不变,喷嘴垂直状态和喷嘴侧倾状态的粉末焦点分别维持在 $Z=31$ mm 附近和 $Z=29$ mm 附近,这与图 4 和图 5 中的结果一致。此外,对比图 7(a)和(b)可以看出,喷嘴垂直状态下,粉末焦点处的浓度略高于喷嘴侧倾状态下的浓度,而且垂直状态下粉末焦点附近的浓度过渡较为平缓,而侧倾状态下粉末焦点附近处的浓度呈现出“尖峰状态”,粉末的均匀性不如垂直状态。

从上述分析可以得知,过大的载气速度不利于粉末的汇聚,因此载气速度的选取要适宜,以增强粉末汇聚性,提高粉末利用率。在使用工况条件允许的情况下,尽量垂直放置喷嘴,以获得更好的粉末均匀性。

图 8 所示为 $Q_1=8$ L/min、 $Q_2=20$ L/min 条件下不

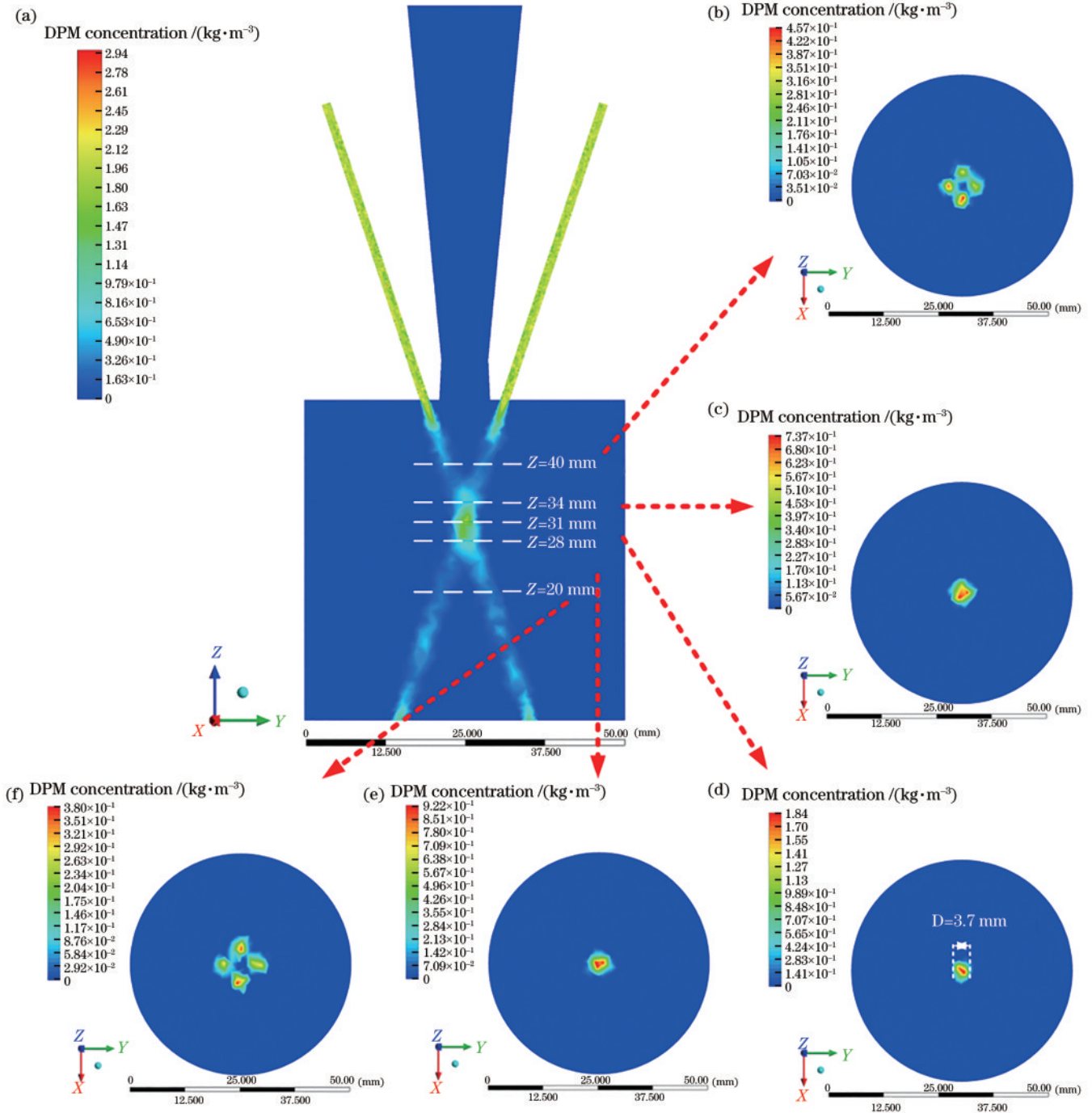


图 4 喷嘴垂直状态各截面粉末浓度分布。(a) $X=0$ mm; (b) $Z=40$ mm; (c) $Z=34$ mm; (d) $Z=31$ mm; (e) $Z=28$ mm; (f) $Z=20$ mm

Fig. 4 Powder concentration distributions in different cross sections of the nozzle in vertical state. (a) $X=0$ mm; (b) $Z=40$ mm; (c) $Z=34$ mm; (d) $Z=31$ mm; (e) $Z=28$ mm; (f) $Z=20$ mm

同送粉量对粉末浓度的影响规律。在载粉气流一定的情况下,送粉量越大,进入流场中的粉末颗粒越多,因此各位置的粉末浓度也越高,激光功率密度足够的情况下熔覆层的尺寸也越大。从图中还可以看到,不同送粉量下粉末焦点的位置基本保持不变。喷嘴侧倾状态下粉末焦点附近的浓度分布均匀性不如垂直状态。因此,可以根据不同的熔覆尺寸要求选用不同送粉量,

且喷嘴尽量垂直使用。

图 9 所示为 $Q_1=8$ L/min, $M_1=15.8$ g/min 条件下不同保护气流速对粉末浓度影响规律。保护气的速度对粉末浓度几乎没有影响,这是因为保护气主要起保护熔池和光学镜组的作用,在本研究中保护气的流速和压力都远小于载粉气,且不直接作用于粉末流,因此其对粉末浓度几乎没有影响。实际工况中,在满足熔

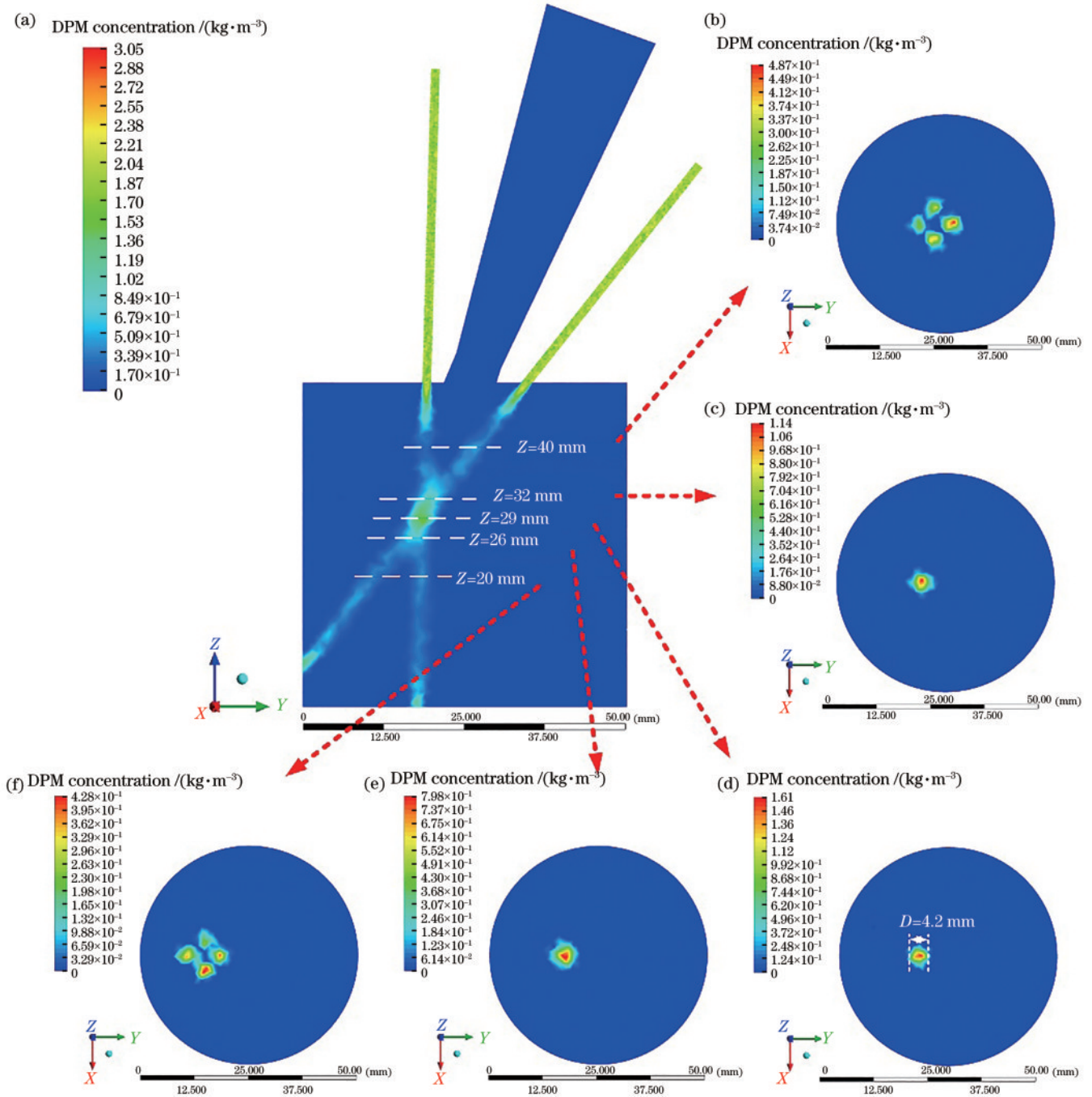


图 5 喷嘴侧倾 20°各截面粉末浓度分布。(a) X=0 mm; (b) Z=40 mm; (c) Z=32 mm; (d) Z=29 mm; (e) Z=26 mm; (f) Z=20 mm

Fig. 5 Powder concentration distributions in different cross sections of the nozzle at 20° incline. (a) X= 0 mm; (b) Z= 40 mm; (c) Z= 32 mm; (d) Z= 29 mm; (e) Z= 26 mm; (f) Z= 20 mm

覆质量和设备安全的情况下,可以选取适当小的保护气流量,以避免对粉末流的影响和资源损耗。

3.4 试验分析验证

为验证数值模型的正确性,对喷嘴流场进行测试,测试过程如图 10 所示。首先通过游标卡尺测量粉末焦点处的直径,然后通过升降台由喷嘴下平面移动到粉末焦点位置附近测量聚焦点高度。经过多次测量取平均值得到的粉末焦点直径 $D_f=3.6$ mm,粉末焦点

离喷嘴距离 $H_f=17.7$ mm。结合 3.2 节结果可知:垂直状态下仿真所得粉末焦点直径 $D=3.7$ mm,与试验结果较为接近;所得粉末焦点位置在 $Z=31$ mm 附近,即离喷嘴距离 $H=19$ mm,与试验结果较接近。结合图 4 可知,在 $Z=31$ mm 附近区域粉末均处于汇聚收敛区域,因此可以认为数值仿真结果符合试验结果。

为探究单道熔覆与多道搭接下不同倾角涂层的流动特性及其对成形形貌的影响,结合数值分析结果,以

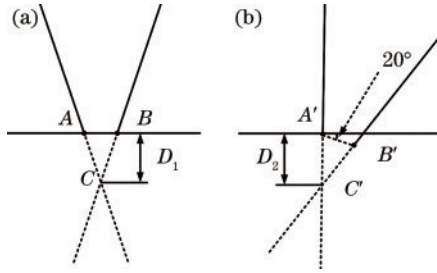


图 6 喷嘴侧倾 20° 计算域处理方法。(a) 喷嘴垂直状态; (b) 喷嘴侧倾 20°

Fig. 6 Processing methods of the computational domain of the nozzle at 20° incline. (a) Vertical state of nozzle; (b) nozzle at 20° incline

316L 不锈钢粉末 (粒径分布 53~105 μm) 为原材料, 选取载粉气流量 $Q_1=8$ L/min, 压力 $P_1=0.3$ MPa, 保护气流量 $Q_2=20$ L/min, 压力 $P_2=0.1$ MPa, 送粉量 $M_1=15.8$ g/min 时的工艺参数, 设定激光功率 $P=1.0$ kW, 扫描速度 $V=600$ mm/min, 进行激光熔覆喷嘴垂直及倾斜 20° 条件下单道次及单层四道次样品成形和构件打印, 结果如图 11 所示。喷嘴在垂直和倾斜 20° 条件下均可稳定成形, 在垂直状态下熔池呈对称分布, 随着喷嘴倾斜至 20°, 高能激光束在焦平面处能量分布不均匀, 熔池形貌呈不对称分布, 熔池深度减小, 凝固表面平整度变差, 这种情况可在熔覆辊压复合成形过程中得到改善, 如图 11(b) 和 (d) 所示。

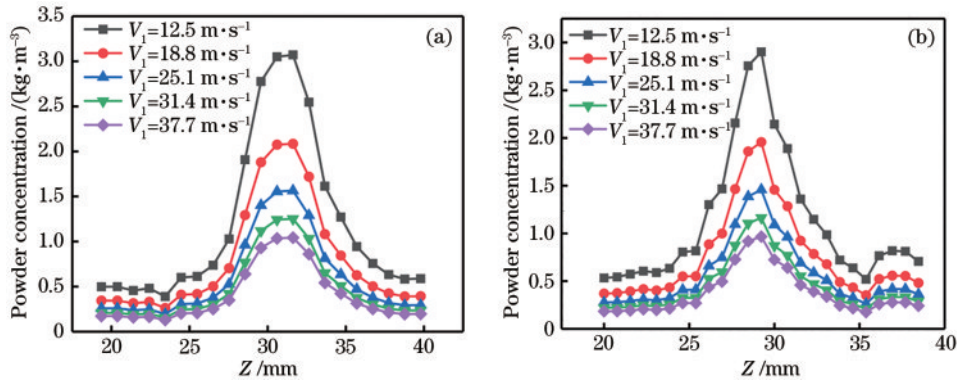


图 7 载粉气流速对粉末浓度影响。(a) 喷嘴垂直状态; (b) 喷嘴侧倾 20°

Fig. 7 Effect of carrier gas velocity on powder concentration. (a) Vertical state of nozzle; (b) nozzle at 20° incline

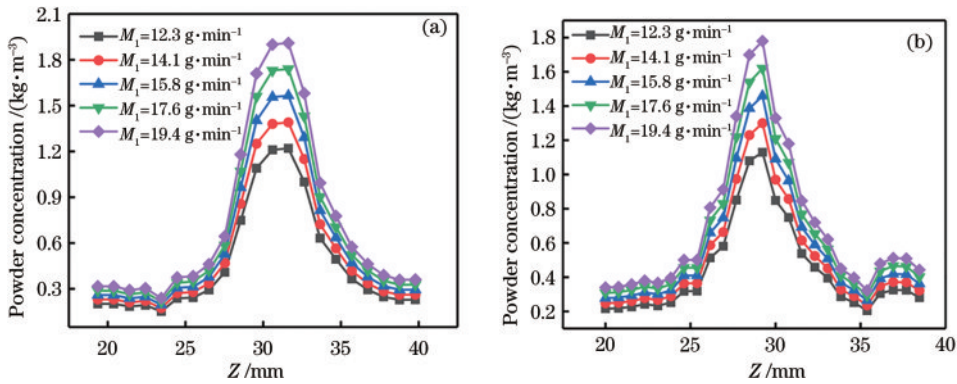


图 8 送粉量对粉末浓度影响。(a) 喷嘴垂直状态; (b) 喷嘴侧倾 20°

Fig. 8 Effect of powder feeding rate on powder concentration. (a) Vertical state of nozzle; (b) nozzle at 20° incline

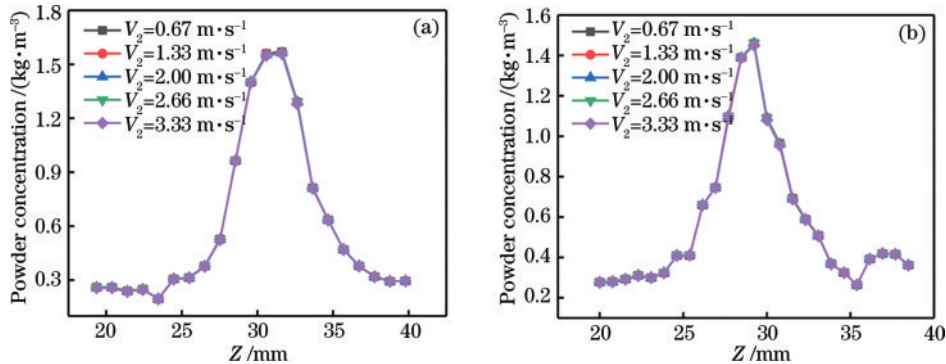


图 9 保护气流速对粉末浓度影响。(a) 喷嘴垂直状态; (b) 喷嘴侧倾 20°

Fig. 9 Effect of shielding gas velocity on powder concentration. (a) Vertical state of nozzle; (b) nozzle at 20° incline

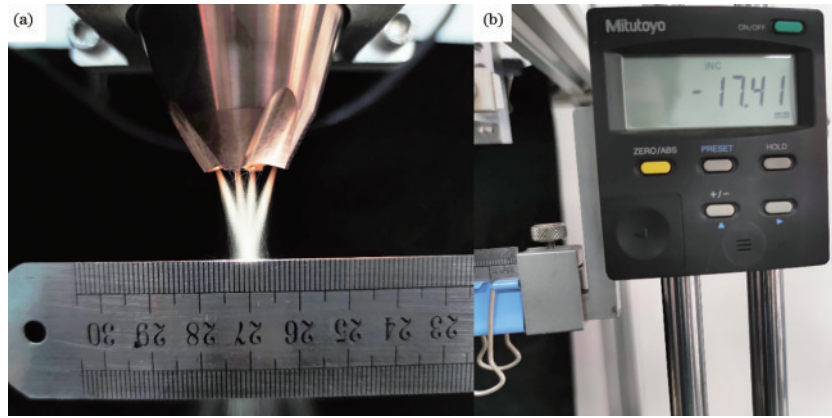


图10 喷嘴自由射流粉末流场试验。(a) 粉末焦点直径测量;(b) 粉末聚焦高度测量

Fig. 10 Experiment on powder flow field of nozzle free jet. (a) Measurement of powder focal diameter; (b) measurement of powder focusing height

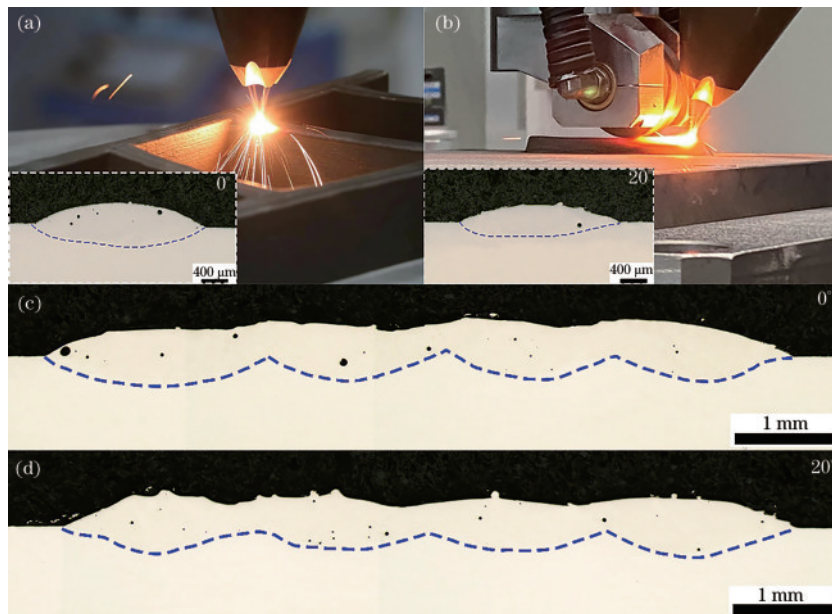


图11 不同倾角下激光熔覆成形316L合金打印单道次及四道次样品截面形貌。(a)(c) 喷嘴垂直状态;(b)(d) 喷嘴倾斜20°

Fig. 11 Cross section morphology of single pass and four pass samples printed on 316L alloy by laser cladding at different angles.

(a)(c) Vertical state of nozzle; (b)(d) nozzle at 20° incline

4 结 论

本文建立了激光同轴送粉喷嘴的数值模型,通过对连续性方程和离散相方程的求解,研究了垂直及倾斜使用工况和工艺参数对粉末汇聚性的影响,主要结论如下:

1) 在连续相流场的作用下,各粉管内离散相粉末颗粒会到达一个共同的粉末焦点位置。通过数值模拟可以获取聚焦高度 H 和粉末焦点直径 D ,例如在 $Q_1=8\text{ L/min}$ 、 $Q_2=20\text{ L/min}$ 、 $M_1=15.8\text{ g/min}$ 条件下,喷嘴垂直状态下 $H=19\text{ mm}$ 、 $D=3.7\text{ mm}$,喷嘴侧倾 20° 状态下 $H=21\text{ mm}$ 、 $D=4.2\text{ mm}$,其数值与试验结果相吻合,可以为喷嘴结构的优化设计提供参考。

2) 载粉气速度越大,粉末聚焦处的浓度越小,不

利于粉末的汇聚,因此载气速度的选取要适宜,以增强粉末汇聚性。在保护气压力较小的情况下,保护气速度对粉末浓度几乎没有影响,因此可以在保证熔覆质量的前提下选择较小的保护气流量。

3) 送粉量越大,粉末浓度越高,激光功率足够的情况下可以获得更大的熔覆尺寸,且喷嘴垂直使用时粉末分布的均匀性更好。

参 考 文 献

- [1] DebRoy T, Wei H L, Zou J S, et al. Additive manufacturing of metallic components-process, structure, and properties[J]. Progress in Materials Science, 2018, 92: 112-224.
- [2] Zhang Y, Wu L M, Guo X Y, et al. Additive manufacturing of metallic materials: a review[J]. Journal

- of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(1): 1-13.
- [3] Lee H, Lim C H J, Low M J, et al. Lasers in additive manufacturing: a review[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2017, 4(3): 307-322.
- [4] Svetlizky D, Das M, Zheng B L, et al. Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: physical characteristics, defects, challenges, and applications[J]. Materials Today, 2021, 49: 271-295.
- [5] 梁万旭, 杨勇, 金康, 等. 基于响应面法的同轴送粉多道激光熔覆层形貌预测[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(1): 0114012.
Liang W X, Yang Y, Jin K, et al. Morphology prediction of a coaxial powder feeding multichannel laser cladding layer based on the response surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(1): 0114012.
- [6] 陈峰, 宋长辉, 杨永强, 等. 送粉式激光增材和铣削减材复合制造 316L 不锈钢的表面质量及力学性能[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(1): 0114009.
Chen F, Song C H, Yang Y Q, et al. Surface quality and mechanical properties of 316L stainless steel manufactured by powder feeding laser additive and milling subtractive hybrid manufacturing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(1): 0114009.
- [7] 张安峰, 李涤尘, 梁少端, 等. 高性能金属零件激光增材制造技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2016, 59(22): 16-22.
Zhang A F, Li D C, Liang S D, et al. The development of laser additive manufacturing of high-performance metal parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(22): 16-22.
- [8] 张津超, 石世宏, 龚燕琪, 等. 激光熔覆技术研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 1-11.
Zhang J C, Shi S H, Gong Y Q, et al. Research progress in laser cladding technology[J]. Surface Technology, 2020, 49(10): 1-11.
- [9] Guner A, Bidart P, Jiménez A, et al. Nozzle designs in powder-based direct laser deposition: a review[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2022, 23(9): 1077-1094.
- [10] Su P, Li H, Yang J Y, et al. Optimal design of structure parameters of the coaxial powder feeding nozzle for laser cladding[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1798(1): 012050.
- [11] 王维, 才磊, 杨光, 等. 激光熔覆同轴送粉喷嘴研制[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0403003.
Wang W, Cai L, Yang G, et al. Research on the coaxial powder-feeding nozzle for laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(4): 0403003.
- [12] 刘昊, 虞钢, 何秀丽, 等. 粉末性质对同轴送粉激光熔覆中粉末流场的影响规律[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0503008.
Liu H, Yu G, He X L, et al. The effect of powder properties on the convergence of the powder stream in coaxial laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(5): 0503008.
- [13] 郭钢, 赵冬梅, 乌日开西·艾依提, 等. 激光熔覆粉末团聚特性对熔覆层高的影响研究[J/OL]. 激光与光电子学进展: 1-10[2023-04-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.tn.20230104.1354.047.html>.
Guo G, Zhao D M, Wurikaixi A, et al. A study of the influence of the convergence characteristics of the laser cladding powder flow field on the cladding layer height[J/OL]. Laser & Optoelectronics Progress: 1-10[2023-04-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.tn.20230104.1354.047.html>.
- [14] 张争艳, 雷焱阳, 王顺, 等. 异质材料同轴送粉系统喷嘴流场的数值模拟[J]. 机械设计, 2021, 38(11): 57-66.
Zhang Z Y, Lei Y Y, Wang S, et al. Numerical simulation of the flow field of the coaxial powder-feeding nozzle for heterogeneous materials[J]. Journal of Machine Design, 2021, 38(11): 57-66.
- [15] Ferreira E, Dal M, Colin C, et al. Experimental and numerical analyzes of gas/powder flow for different LMD nozzles[J]. Metals, 2020, 10(5): 667.
- [16] Zhang A F, Li D C, Zhou Z M, et al. Numerical simulation of the powder flow field on a coaxial powder nozzle in laser metal direct manufacturing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 49(9): 853-859.
- [17] 张安峰, 李涤尘, 张利锋, 等. 同轴送粉喷嘴粉末团聚特性三维数值模拟[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 859-863.
Zhang A F, Li D C, Zhang L F, et al. 3D numerical simulation of coaxial powder feeding nozzle powder convergence characteristics[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(5): 859-863.
- [18] 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.
Lu Q P, Zhang A F, Li D C, et al. Numerical simulation and experimental research on gas-carrier coaxial powder nozzle[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(12): 3162-3167.
- [19] Liu H, Hao J B, Yu G, et al. A numerical study of metallic powder flow in coaxial laser cladding[J]. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2016, 9(7): 2247-2256.
- [20] Takemura S, Koike R, Kakinuma Y, et al. The design of a powder nozzle for high resource efficiency in directed energy deposition based on computational fluid dynamics simulation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105(10): 4107-4121.
- [21] Li L Q, Huang Y C, Zou C Y, et al. A numerical study of the powder stream characteristics of a coaxial laser metal deposition nozzle[J]. Crystals, 2021, 11(3): 282.
- [22] Liu Q P, Yang K, Gao Y H, et al. An analytical study of powder stream geometry in laser-based direct energy deposition process with a continuous coaxial nozzle[J]. Crystals, 2021, 11(11): 1306.
- [23] Zekovic S, Dwivedi R, Kovacevic R. Numerical simulation and experimental investigation of gas-powder flow from radially symmetrical nozzles in laser-based

- direct metal deposition[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(1): 112-123.
- [24] Xia Y L, Huang Z, Chen H N, et al. Numerical simulation and experimental investigation of powder transport of a new-type annular coaxial nozzle[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 115(7): 2353-2364.
- [25] Batchelor G K. An introduction to fluid dynamics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1967.
- [26] Voller V R, Prakash C. A fixed grid numerical modeling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1987, 30(8): 1709-1719.
- [27] Shih T H, Liou W, Shabbir A, et al. A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows [J]. Computers & Fluids, 1995, 24(3): 227-238.
- [28] Lateb M, Masson C, Stathopoulos T, et al. Comparison of various types of $k-\epsilon$ models for pollutant emissions around a two-building configuration[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2013, 115: 9-21.
- [29] Jayawickrama T R, Haugen N E L, Babler M U, et al. The effect of Stefan flow on the drag coefficient of spherical particles in a gas flow[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2019, 117: 130-137.