

同轴送粉工艺参数对激光增材再制造喷嘴粉流流场的影响规律

郭辰光^{1,2}, 郭昊^{1,2}, 李强¹, 岳海涛¹, 王闯¹

(1. 辽宁工程技术大学 机械工程学院, 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学 辽宁省大型工矿装备重点实验室, 阜新 123000)

摘要: 激光增材再制造同轴送粉喷嘴粉流汇聚特性是影响零件成形质量和成形效率的重要因素, 基于 DEM-CFD 耦合方法, 开展三维同轴送粉喷嘴粉-气流场仿真分析, 依据表征粉流汇聚特性的喷嘴中心轴向粉流分布浓度、焦点距离、上焦点截面粉流分布浓度和单位距离粉流分布浓度等参数, 设计单因素试验, 在喷嘴结构不变的条件下, 分析输粉气流速度、送粉速率和中心光路保护气速度对粉流分布的影响规律。结果表明: 输粉气流速度越大, 焦点距离越小, 轴向粉流分布浓度越小, 上焦点截面粉流浓度分布直径越小, 单位距离粉流分布浓度越大, 粉流的集聚性越好; 中心光路保护气速度对粉流焦点浓度影响较小, 保护气速度越大, 焦点距离越大, 上焦点截面粉流浓度分布直径越小, 单位距离粉流分布浓度增加, 粉流的集聚性越好; 送粉速率对焦点距离影响较小, 送粉速率越大, 喷嘴轴向粉流分布浓度越大, 上焦点截面粉流浓度分布直径越大, 单位距离粉流分布浓度出现先增大后减小的趋势。

关键词: 激光增材再制造; 同轴送粉喷嘴; 离散单元法-计算流体力学 (DEM-CFD); 粉流分布

中图分类号: TN249

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2020)02-0136-13

Effects Law of Coaxial Powder Feeding Process Parameters on Flow Field of Laser Additive Remanufacturing Nozzle

GUO Chenguang^{1,2}, GUO Hao^{1,2}, LI Qiang¹, YUE Haitao¹, WANG Chuang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Liaoning Provincial Key Laboratory of Large-scale Industrial and Mining Equipment, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Powder flow convergence of coaxial powder feeding nozzle was an important factor that affects the forming quality and efficiency in laser additive remanufacturing. The powder-gas flow field simulation analysis of coaxial powder feeding nozzle was carried out based on DEM-CFD coupling method. According to the parameters such as nozzle center axial powder flow distribution concentration, focal distance, powder flow concentration distribution at upper focal section and concentration of powder flow per unit distance, a single-factor experiment was designed to analyze the influence of carrier gas flow, powder feeding rate and shielding gas velocity on the powder flow distribution under the nozzle structure remained unchanged. Results show that, with the increased of the carrier gas flow, the focal distance, nozzle center axial powder flow distribution concentration and diameter of powder flow concentration distribution at upper focal section decreases gradually, concentration of powder flow

收稿日期: 2019-10-24; 修回日期: 2020-02-01

通信作者: 李强(1986—), 男(汉), 讲师, 博士; 研究方向: 难加工材料增减材实验及机理研究; E-mail: neulqiang@163.com

基金项目: 辽宁省自然科学基金(20180550167); 辽宁省教育厅重点攻关项目(LJ2019ZL005, LJ2017ZL001); 辽宁省高水平创新团队国际(境)外培养项目(2018LNGXGJWPY-ZD001)

Fund: Supported by Natural Science Foundation of Liaoning Province (20180550167), Key Projects of Education Department of Liaoning Province (LJ2019ZL005, LJ2017ZL001) and Oversea Training Project of High Level Innovation Team of Liaoning Province (2018LNGXGJWPY-ZD001).

引用格式: 郭辰光, 郭昊, 李强, 等. 同轴送粉工艺参数对激光增材再制造喷嘴粉流流场的影响规律[J]. 中国表面工程, 2020, 33(2): 136-148.

GUO C G, GUO H, LI Q, et al. Effects law of coaxial powder feeding process parameters on flow field of laser additive remanufacturing nozzle[J]. China Surface Engineering, 2020, 33(2): 136-148.

per unit distance increases, the powder flow convergence become excellent. The shielding gas velocity has few influence on the focal concentration. The higher the shielding gas velocity is, the smaller the diameter of powder flow concentration distribution at upper focal section is, while the focal distance, concentration of powder flow per unit distance and the powder flow convergence become larger and better. The effect of powder feeding rate on the focal distance is not significant, with the increased of powder feeding rate, the nozzle center axial powder flow distribution concentration and the diameter of powder flow concentration distribution at upper focal section also increase, concentration of the powder flow per unit distance increases first and then decreases.

Keywords: laser additive remanufacturing; coaxial powder feeding nozzle; Discrete element method-computational fluid dynamics (DEM-CFD); powder flow distribution

0 引言

激光增材再制造技术是近年来兴起的一种表面修复技术,采用该技术对缺损的零件进行再制造修复,能够极大地降低生产成本^[1-2]。同轴送粉法是同步送粉式激光熔覆最为先进和应用最多的一种送粉方式,此种送粉方式能够满足各向同性的要求^[3-5],并能在加工过程中形成方向不受限制的均匀熔覆层,适用于增材修复^[6]。同轴送粉喷嘴引导粉流均匀送入激光强作用区域并与基体同时熔化形成熔覆层,其工作性能直接影响毛坯再制造后的成形质量^[7-8]。现阶段增材再制造的主要缺陷之一在于粉末输送稳定性差、粉末使用率低,因此研究同轴送粉喷嘴粉流流场对优化同轴送粉喷嘴结构、改善零部件再制造后的成形质量具有重要的指导意义^[9-11]。

目前,国内外学者的大量研究与试验发现气固两相流理论对粉末输运流场的研究具有较高的准确性和可靠性。Pan等^[12]研究了重力驱动送粉模式的粉流与粉末特性、喷嘴形状和保护气设置对粉流流场的影响,建立三维喷嘴数值模型来预测粉流浓度变化;Kovaleva等^[13]开发出用于不同同轴喷嘴的气粉输送三维物理和数学模型,通过数值模拟获得了基体上的粉流质量和定量流动特性;Zhang等^[14]使用CFD理论建立了同轴送粉三维数值模型,研究环境压力和喷嘴尺寸对激光熔覆粉末颗粒速度和分布的影响;Tan等^[15]使用粒子成像系统拍出的粉流图像分析送粉工艺参数和喷嘴距基体表面距离对粉流流场的影响;Zhu等^[16]应用FLUENT2-D离散相模型计算同轴送粉粉流场分布情况;靳晓曙等^[17]建立了粉流简化物理模型并采用欧拉双流体方法对同轴送粉粉流流场进行数值

分析。上述对同轴送粉喷嘴粉-气流场研究的分析计算模型主要为DPM模型和Euler双流体模型,依照上述方法虽能通过计算得到粉流场大致变化规律,但此类方法忽略颗粒自身物性及碰撞问题,并不能准确描述粉流在实际情况下的空间分布。

离散单元法将不连续体分散为刚性元素的集合,分散后的每一个单元都作为独立的个体计算它的运动方程,颗粒系统的模拟需要对颗粒位移增量与接触力增量进行循环计算^[18]。研究采用DEM-CFD耦合方法来模拟同轴送粉气固两相流流场分布及颗粒运动情况的数值方法,并应用Navier-Stokes方程计算气相流动信息,通过DEM接触模型计算粉体颗粒的运动、碰撞、受力等信息^[19]。以喷嘴中心轴向粉流浓度分布、焦点距离、上焦点截面粉流浓度分布、单位距离粉流分布浓度等参数作为衡量指标,探究输粉气流速度、中心光路保护气速度、送粉速率对粉流分布的影响,结合EDEM-FLUENT软件进行模拟仿真,以输粉气流速度为4 m/s、中心光路保护气速度为1.5 m/s、送粉速率20 g/min作为基础参数,设计单因素试验。通过数值模拟,可以清晰直观地观察气-粉两相的流场分布以及颗粒在喷嘴内部的运动情况,实现了粉流流场的可视化,提高了对同轴送粉过程模拟的准确性,对同轴送粉粉流输运流场的研究具有重要的指导意义。

1 气粉流场理论模型

1.1 颗粒受力模型

当颗粒在气相中运动时,颗粒边界层存在法向速度梯度,当气体流经颗粒表面并与颗粒产生相对运动时,会形成压差阻力,因此颗粒在气流

中运动时的运动阻力主要由黏性摩擦阻力和涡流压差阻力两部分组成,运动阻力方程如式(1)所示:

$$F_R = \frac{1}{8} \pi C \rho d_p^2 v_p^2 \quad (1)$$

式中: C 是绕流阻力系数; ρ 是流体密度, kg/m^3 ; d_p 是球状颗粒直径, m ; v_p 是颗粒的速度, m/s 。

除此之外,颗粒在流体中以一定速度运动时,沿颗粒边界层法向的速度梯度会发生剪切效应,出现颗粒表面的压力差并形成了如式(2)所示 Saffman 升力;气流中颗粒与颗粒之间、颗粒与壁面之间发生碰撞后会产生如式(3)所示 Magnus 螺旋升力^[14]:

$$F_{\text{Saff}} = 1.61 d_p^2 (\rho \mu)^{\frac{1}{2}} |\omega_f|^{-\frac{1}{2}} (v_p - v_f) \omega_f \quad (2)$$

式中: v_f 是流体的速度, m/s ; μ 是流体动力黏度, $\text{N} \cdot \text{s/m}^2$; ω_f 是沿颗粒边界层法向的速度梯度, $\omega_f = \nabla \cdot v_f$ 。

$$F_{\text{Mag}} = \frac{1}{4} \pi d_p^3 \rho (v_p - v_f) \omega_f [1 + O(R_e)] \quad (3)$$

式中: $O(R_e)$ 表示未明确写出的级数余数。

金属粉末颗粒粒径范围为 $50 \sim 500 \mu\text{m}$, 属于介观尺度范围,材料密度大,属于低速气固两相流动,因此只考虑碰撞接触力、重力、曳力等对颗粒的作用,其他力暂不考虑。此外,粉末存在不规则表面形态,颗粒基本为不同直径大小的球形颗粒,以球当量径来描述颗粒直径,采用平均体积粒径方法统计粒度分布情况。可求得平均体积粒径 d_{av} 。

$$d_{av} = \sqrt[3]{\frac{\sum n d_p^3}{\sum n}} \quad (4)$$

1.2 颗粒接触模型

离散单元法把分析对象看成充分多的离散单元,根据全过程中的每一时刻各颗粒间的相互作用计算接触力,再用牛顿运动定律计算单元的运动参数,实现颗粒对象运动情况的预测。根据处理问题的不同,颗粒模型可分为硬球模型和软球模型两类,硬球模型颗粒之间的碰撞是瞬时的且不会发生显著的塑性变形,在计算

时只需考虑颗粒的同时碰撞。软球模型把颗粒间的法向力简化为弹簧 k_n 和阻尼器 β_n ,切向力简化为弹簧 k_t 、阻尼器 β_t 和滑动器 μ ,依据颗粒间法相重叠量和切向位移计算接触力,颗粒接触力简化模型如图 1(a) 所示。由于同轴送粉喷嘴喷粉时,粉体颗粒之间会产生相互碰撞,且能够发生弹塑性变形,产生小尺度重叠量,因此采用软球模型。如图 1(b) 所示,当颗粒 i 与颗粒 j 在相互接触时,存在一法向的重叠量 α ,其中 v 为粒子速度、 F_n 为颗粒法向力、 F_t 为颗粒切向力、 ω 为颗粒角速度、 g 为重力加速度。对于颗粒接触模型,应用 EDEM 中的 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型来描述颗粒间的力作用关系。

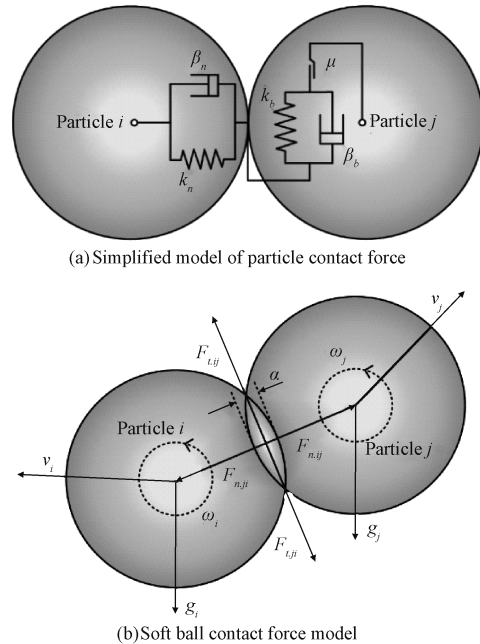


图1 软球模型颗粒间接触受力模型

Fig. 1 Simplified model of contact forces between particles

假设粉体颗粒运输的过程,颗粒间的碰撞均为弹性碰撞,不考虑颗粒之间的其他作用因素。两个球状颗粒在空间发生接触碰撞,半径分别为 R_1, R_2 , 则两颗粒间的法向接触力 F_n 计算公式为:

$$F_n = \frac{4}{3} E' (R')^{\frac{1}{2}} \varepsilon^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

式中: E' 为等效弹性模量, MPa ; R' 为等效颗粒半径, m ; ε_n 为碰撞时法向重叠量, m 。据下述公式求出。

$$\frac{1}{R'} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \quad (6)$$

$$\frac{1}{E'} = \frac{1 - \mathcal{G}_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mathcal{G}_2^2}{E_2} \quad (7)$$

$$\varepsilon = R_1 + R_2 - |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2| \quad (8)$$

式中: $\mathcal{G}_n$ 为颗粒泊松比; E_n 为弹性模量, MPa; $\mathbf{r}_n$ 为球心位置矢量。

两颗粒间的切向接触力 F_t 计算公式为:

$$F_t = -S_t \varepsilon_t \quad (9)$$

式中: ε_t 是颗粒碰撞时切向重叠量, m; S_t 是切向接触刚度, N/m; 可根据下式求出:

$$S_t = 8G' \sqrt{R' \varepsilon} \quad (10)$$

式中: G' 是等效剪切模量, MPa。

$$\frac{1}{G'} = \frac{2 - \mathcal{G}_1^2}{G_1} + \frac{2 - \mathcal{G}_2^2}{G_2} \quad (11)$$

1.3 气相控制方程

激光熔覆同轴送粉过程中,在常规送粉工艺参数下,输粉气流、保护气均体现为温度恒定、不可压缩、稳定的湍流流动,粉流输运期间不考虑激光发出的热量及气流、颗粒之间的热传递,即不考虑能量方程。粉末颗粒在同轴送粉中所占体积分数小于 10%,为了更加准确描述粉末运动状态,考虑粉末颗粒体积对流场的影响,采用 Eulerian 多相流模型分析气-粉流场的特性。为了显示颗粒体积对流体的影响,在气相控制方程里引入颗粒体积分数 ε 作为影响因子,其连续性方程如式(12)所示:

$$\frac{\partial \varepsilon \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \varepsilon \mathbf{v}_f = 0 \quad (12)$$

式中: ρ 为气体密度, kg/m³; ε 为颗粒的体积分数。

动量守恒方程如下所示:

$$\frac{\partial \varepsilon \rho \mathbf{v}_f}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \varepsilon \mu \mathbf{v}_f = -\nabla \rho + \nabla \cdot (\varepsilon \mu \cdot \nabla \mathbf{v}_f) + \sum_i^n (F_R + F_{\text{Mag}} + F_{\text{saff}}) \quad (13)$$

式中: μ 为气体的运动黏度, N·s/m²; g 为重

力加速度,取 9.81 m/s²; V 为 CFD 流体网格单元的体积。

1.4 颗粒相控制方程

$$m_p \frac{du_p(t)}{dt} = m_p g + F_R(t) + F_{\text{Mag}}(t) + F_{\text{saff}}(t) - C u_p(t) \quad (14)$$

$$I_p \frac{d\omega_p(t)}{dt} = T_p(t) - C \omega_p(t) \quad (15)$$

式中: m_p 为颗粒的质量, kg; $u_p(t)$ 为 t 时刻颗粒运动速度, m/s; $T_p(t)$ 为 t 时刻由颗粒间接触力而产生的合力矩, N·s; I_p 为颗粒转动惯量, kg·m²; $\omega_p(t)$ 为颗粒在 t 时刻颗粒转动速度, rad/s; $F_R(t)$ 、 $F_{\text{Mag}}(t)$ 、 $F_{\text{saff}}(t)$ 分别为 t 时刻气体作用在颗粒上的运动阻力、Magnus 升力、Saffman 剪切力。

2 DEM-CFD 耦合方法模拟验证

2.1 喷嘴计算域模型建立

分析同轴送粉喷嘴粉流空间形貌,了解粉流的空间分布特征,是研究喷嘴粉流场分布的基础。因此在已有试验研究基础上构建如图 2(a) 所示的二维同轴送粉粉流分布特征模型,图中 f_1 表示粉流上焦点距离喷嘴出口的位置,即上焦距; f_2 表示粉流上、下焦点之间的距离,即焦距长; 下焦距为 $f_1 + f_2$; f_3 表示激光离焦量, d_1 、 d_2 分别表示粉流上焦点直径和光斑直径。

运用三维建模软件 Solidworks 构建了同轴送粉喷嘴粉流管道计算模型如图 2 所示。从图 2(b) 可以看出同轴送粉喷嘴计算域主要分为 3 个部分,上部为圆环型送粉通道;中部为内、外壁不同倾角的漏斗状环型通道,下部为圆柱形粉流分布计算域,粉流从四个均布在喷嘴上方的粉流入口射入,经过内、外壁成一定角度的漏斗状渐缩环形通道聚拢,从出口喷出进入圆柱形粉流分布计算域。二维计算域如图 2(c) 所示,为了描述同轴送粉喷嘴计算域几何特征,如表 1 所示,设置以下参数变量: d 为粉流入口直径, h_1 、 h_2 分别为喷嘴整体与圆环型粉流通道的高度, α 为漏斗状渐缩环型通道内外壁夹角, β 为漏斗状渐缩环型通道外壁夹角, δ 为喷嘴出口宽度, m 为中心光路保护气圆环通道高度, w 、 r 分别为为中心光路保护气入、出口半径, b 、 h 分别为圆柱形计算区域的长和宽。

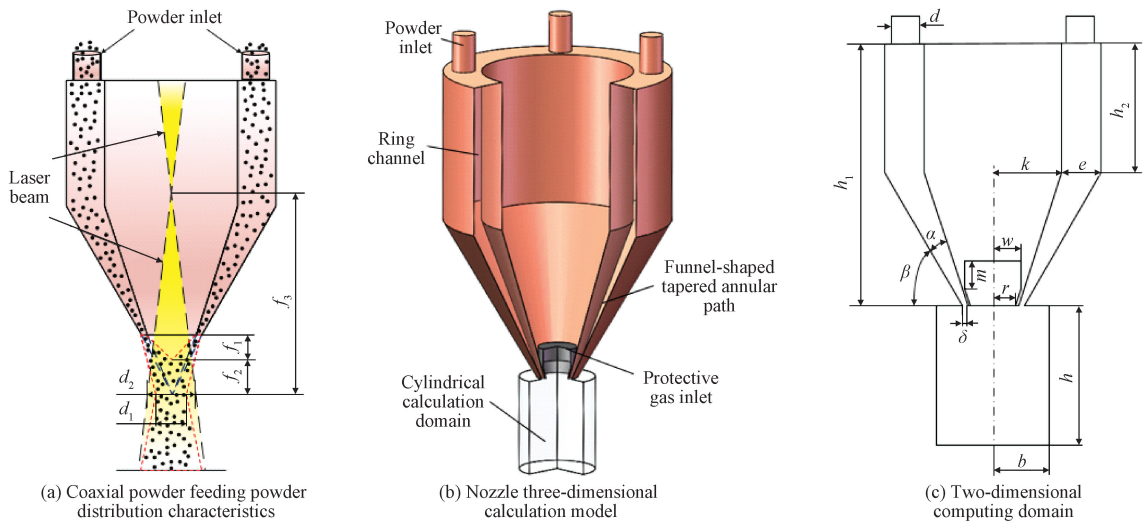


图 2 同轴送粉喷嘴粉流分布特征及模型计算域

Fig. 2 Nozzle powder flow distribution characteristics and model calculation domain of coaxial powder feeding

表 1 计算域特征参数初始值

Table 1 Initial values of characteristic parameters of the calculation domain

Parameter	$\alpha/(^{\circ})$	$\beta/(^{\circ})$	δ/mm	w/mm	m/mm	r/mm	d/mm
Value	10	60	1	5	5	4	6
Parameter	k/mm	e/mm	b/mm	h/mm	h_1/mm	h_2/mm	
Value	20	10	10	25	72	30	

2.2 网格划分

通过 ICEM 网格前处理软件进行同轴送粉喷嘴计算域网格划分,为提高计算网格质量及计算效率,选择六面体结构化网格。相关网格划分如图 3 所示。由于粉末汇聚区域运动变化情况明显,需对其网格进行加密,其余部分网格设定适当稀疏,设定喷嘴入口处网格大小为 0.8 mm,保护气域及圆柱计算域网格大小为 0.75 mm,喷嘴

环形通道计算域网格大小为 1.5 mm,由于 3 个计算域相接触部分为计算核心域,设定该计算域网格大小为 0.2 mm,并对划分后的网格进行优化,选取 Quality 在 0.4 及其以上的网格,Aspect Ratio 控制在 0~1 内,Determinant 控制在 0~1 内,划分后的网格总数量为 377 959 个。定义喷嘴出口圆环中心点为基准坐标点,y 轴沿圆柱计算域轴向中心线方向,x 轴沿圆柱计算域径向分布。

2.3 耦合仿真模拟参数设置

DEM-CFD 耦合方法可以使流体与颗粒在更能发挥本身优势计算领域中进行受力与运动的求解,通过耦合的曳力模型来实现两相之间力、位移等数据的互相传输。

2.3.1 FLUENT 相关求解参数设置

同轴送粉喷嘴气流场属于低速、连续、不可压缩的湍流流动,对于多相流的仿真不能是恒稳态,必须设置一个依赖于时间的仿真,仿真选择 Pressure-Based 求解器,时间类型选择 Transient,重力加速度设置为 $Y=9.81\text{ m/s}^2$,方

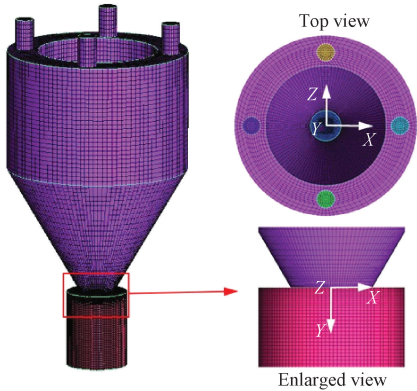


图 3 同轴送粉喷嘴结构化计算网格

Fig. 3 Structured grids of coaxial feeding nozzle

向应与 EDEM 中所设置的重力方向一致,进行数值模拟的参数设定。由于仅涉及气固流场问题,因此不考虑壁面传热及激光与颗粒之间的能量交换。FLUENT 具体参数设置如表 2 所示。FLUENT 在求解同轴送粉喷嘴气-粉两相流场时会表现出的非线性特征通过松弛因子来控制收敛与变化情况,在满足同轴送粉喷嘴流场稳定的前提下确定出同轴送粉流场模拟求解的松弛因子具体参数数值,其中 pressure 为 0.3、density 为 1、body forces 为 1。

表 2 FLUENT 仿真参数设置

Table 2 FLUENT simulation parameters setting

Simulation parameters	Model and value
Turbulence model	Standard k-e, standard wall function
Multiphase flow model	Eulerian
Fluid material	N ₂
Powder inlet boundary condition/(m/s)	Velocity-inlet;4
Protective gas inlet boundary condition/(m/s)	Velocity-inlet;1.5
Wall boundary condition	Wall
Export boundary conditions/Pa	Pressure-outlet;0
Solution method	Phase Coupled SIMPLE
Convergence residual	0.001
Automatic data retention interval	Time step of 50
Time step/s	8×10 ⁵
Number of time steps	1250
Maximum number of iterations per step	60

2.3.2 EDEM 求解模型及参数设置

采用超景深显微镜观察 Ni60 A 粉末颗粒的细观真实形貌,粉末颗粒形状大多为形状相对均匀且基本为球状,假设粉末颗粒为均匀的、等直径的球形颗粒,由公式(4)可求得平均体积粒径为 0.06 mm,将喷嘴的 4 个入口处分别设置颗粒工厂,粒径为 0.06 mm,每个颗粒工厂设置质量流率为 5 g/min,依次设置粉末相关参数以及仿真求解参数,EDEM 中的参数设置如表 3 所示。在耦合模块中采用 Eulerian 耦合方法,曳力模型选用 Freestream Equation,升力模型选用 Magnus Lift 及 Saffman Lift,进行耦合仿真。

表 3 EDEM 仿真参数设置

Table 3 EDEM simulation parameters setting

Simulation parameter	Model and value
Particle contact model	Hertz-Mindlin(no slip)
Gravity acceleration/(m/s ²)	Y = 9.81
Particle material	Ni60 A
Particle Poisson's ratio	0.25
Particle shear modulus/(N/m ²)	8×10 ⁹
Particle density/(kg/m ³)	8000
Geometry material	Cu
Geometric Poisson's ratio	0.36
Geometric shear modulus/(N/m ²)	3.9×10 ¹⁰
Geometric density/(kg/m ³)	8800
Particle generation rate/(g/min)	20
Particle incident velocity/(m/s)	4
Time step/s	1×10 ⁻⁶
Data retention interval/s	0.0005
Calculate the domain grid size	4×R

2.4 试验验证

试验激光头配有 Fraunhofer 公司的同轴送粉喷嘴 IWS-COAX8,送粉器为德国 GTV 公司的 PF2/2 送粉器,保护气为 N₂,设定总颗粒生成速率为 20 g/min、颗粒入射速度为 4 m/s、保护气速度为 1.5 m/s 的条件下,验证 DEM-CFD 耦合方法对同轴送粉喷嘴流场数值模拟的准确性,如图 4(a)(b)所示,分别为同轴送粉喷嘴粉末速度迹线图与 DEM-CFD 耦合方法的仿真速度迹线图,试验结果与仿真结果对比如表 4 所示。从表 4 中可以看出,仿真模拟结果的粉流上焦距、下焦距、焦柱直径相较于试验结果准确度均达到了 90%以上,焦柱长也达到了 75%,这说明使用 DEM-CFD 耦合方法来模拟同轴送粉喷嘴粉流流场与试验结果极为接近,仿真模拟分析结果具有较高的准确性,对粉流流场模拟具有较大的参考价值。

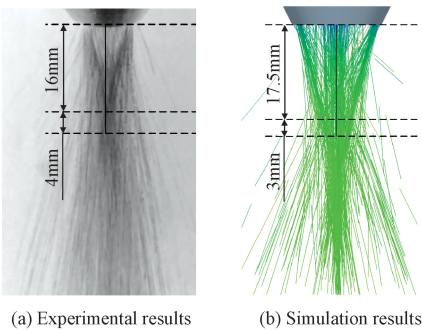


图 4 试验与仿真结果对比图

Fig. 4 Comparison chart of experimental and simulation results

表 4 试验结果与仿真结果对比
Table 4 Comparison of experimental and simulation results

Data	Experimental result	Simulation results	Accuracy/%
Upper focus distance/mm	16.0	17.5	90.6
Lower focal length/mm	20.0	20.5	97.5
Focus column length/mm	4.0	3.0	75.0
Focus cylindrical diameter/mm	2.5	2.26	90.4

3 送粉参数对粉流流场的影响分析

送粉参数是决定激光再制造质量与效率的重要影响因素之一,也是决定同轴送粉分流集聚效果好坏的主要凭据。本节中,以喷嘴中心轴向粉流分布浓度、焦点距离、上焦点截面粉流分布浓度、单位距离粉流分布浓度等参数为衡量指标,探究输粉气流速度、送粉速率、中心光路保护气速度对粉流分布的影响。

3.1 粉末集聚性衡量指标

粉末的集聚性是影响增材再制造成形质量、成形效率和粉末利用率的重要指标,粉末集聚性依据喷嘴中心轴向粉流分布浓度和上焦点截面粉流分布浓度来判断,同时,为了量化表示粉末集聚性,考虑单位尺度上粉末的分布浓度,引入单位距离粉流分布浓度 ψ_i 为衡量指标,其计算如式(16)所示:

$$\psi_i = \frac{Q_c}{D} \tag{16}$$

式中: Q_c 为截面粉流浓度, D 为粉流浓度分

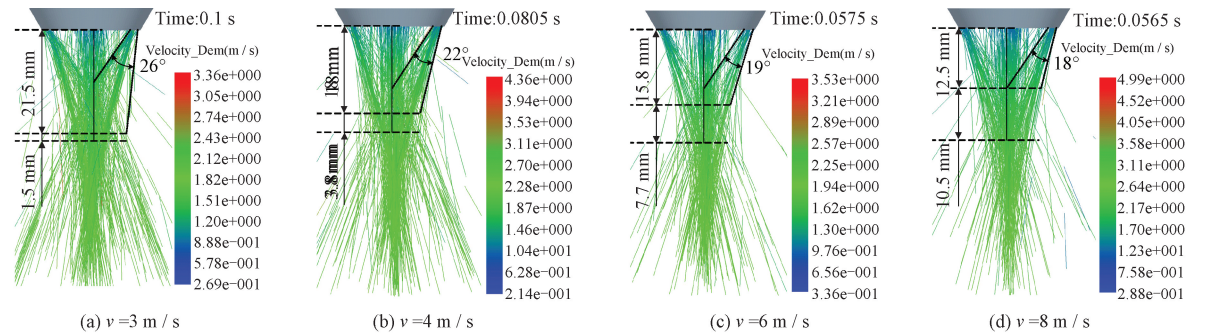


图 5 不同输气速度下粉流速度迹线

Fig. 5 Distribution of powder flow velocity traces under different carrier gas velocities

布直径, m。以参数化描述粉末集聚性,单位距离粉流分布浓度数值越大,粉末集聚性越好。

3.2 输粉气流速度的影响

在中心光路保护气速度为 1.5 m/s、送粉速率 20 g/min 不变的条件下分别对 $v=3、4、6、8$ m/s 的输粉气流速度下同轴送粉喷嘴粉流流场进行数值模拟。图 5 为不同输粉气流速度下粉末颗粒速度迹线图。令发散角 θ 为粉流由喷嘴喷出后的发散范围。当输粉气流速度 $v=3$ m/s 时,粉末由于受到气流的曳力作用较小,粉末喷出后的动能也小,因此粉末受到重力及其他阻力的影响比较严重,粉流具有较大的发散角为 26° ,发散性较大,上焦点位置距离喷嘴口较远,焦柱长度小;随着输粉气流速度的增大,由于气流对颗粒的曳力作用和颗粒本身的惯性越来越大,受到重力等因素的影响变小,使得粉流在集聚区域的集聚性得以改善,粉流发散性逐渐变小;当输粉气流速度 $v=8$ m/s 时,发散角减小至 18° ,粉流集聚性增强,上焦点位置距离喷嘴口较近,形成了较长的焦柱长度。

不同输气速度下的喷嘴中心轴向粉流分布浓度情况如图 6 所示。从整体上看,不同输粉气流速度下的喷嘴中心轴向粉流浓度在沿 Y 轴方向均存在两个极大值、一个极小值,说明粉流在喷出后形成了一个上焦点和一个下焦点,且二者总体趋势大致相同。当输粉气流速度取最小值 $v=3$ m/s 时,粉流受到输粉气流的曳力作用较小且受到重力因素作用较大,粉流焦点位置会向下移动,总体粉流浓度最大,在 $Y=21.5$ mm 处的上焦点位置粉流浓度达到最大值 0.0145,在下焦点位置 $Y=23$ mm 处,粉流浓度为 0.0051;当输粉气流速度取最大值 $v=8$ m/s 时,整体的粉流浓度相

较于其他输气速度下的浓度最低,上焦点距离喷嘴出口最近,上焦点位置上移至 $Y = 12.5$ mm,浓度为 0.0068,下焦点在 $Y = 23$ mm 处,浓度为 0.0042。

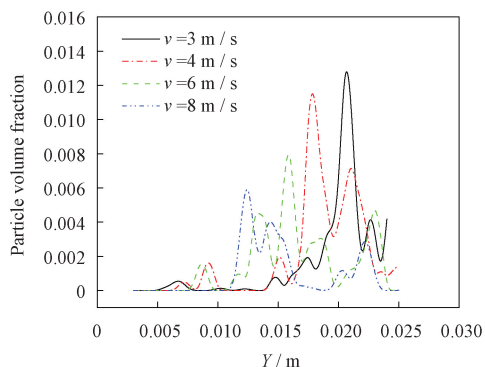


图6 不同输气速度下喷嘴中心轴向粉流浓度分布
Fig. 6 Concentration distribution of axial powder flow in the center of the nozzle under different carrier gas velocities

图7给出了粉流上焦点浓度与焦点距离随输粉气流速度的变化曲线,从图中见,随着输粉气流速度的不断增大,粉流的上焦点浓度逐渐减小,焦点位置迅速上移,这是由于随着输粉气流速度变大,粉流受到输粉气流的曳力作用也就越

大,同时粉流的惯性也越大,粉末从喷嘴喷出后受到重力、空气阻力等其他因素的影响就越小,粉流的运动准直性较好,聚焦效果明显,因此焦点位置会随着输粉气流速度的增大而向上移动。

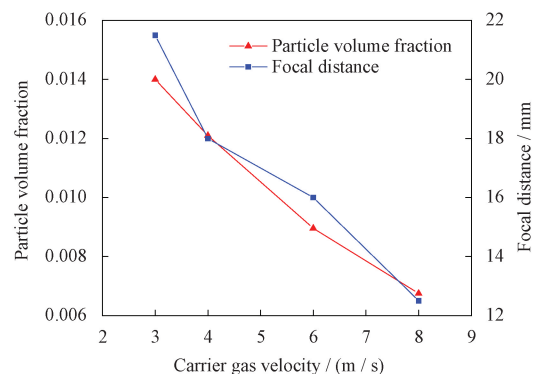


图7 粉流上焦点浓度与焦点距离随输粉气流速度变化
Fig. 7 Variation of upper focus concentration of powder flow and focal distance with carrier gas velocities

图8为不同输气速度下上焦点截面粉流浓度分布情况。从整体上看,焦点截面浓度基本呈中心对称分布,汇聚点中心浓度最高,粉流浓度沿径向逐渐降低至0。经计算,输粉气流速度从小到大的顺序下,上焦点截面粉流浓度分布直径

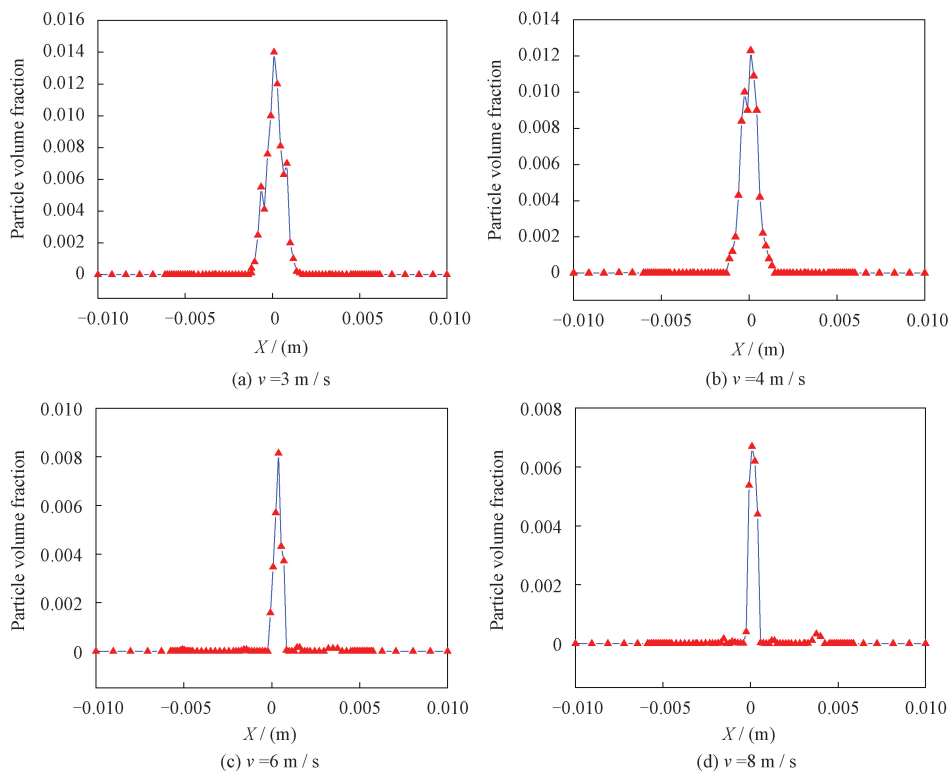


图8 不同输气速度下上焦点截面粉流浓度分布
Fig. 8 Concentration distribution of powder flow in upper focal section under different carrier gas velocities

分别为 2.52、2.26、1.3 和 1.0 mm。同时,由式(16)计算单位距离粉流分布浓度分别为 5.57、5.66、6.53 和 6.80 kg/m⁴。可见,随着输粉气流速度的不断增大,焦点中心浓度不断减小,粉流焦点浓度分布直径不断缩小,单位距离粉流分布浓度增加,粉末的集聚效果增强。

根据上述分析可以得出,输粉气流速度对粉流的集聚特性有非常明显的影响,随着输粉气流速度的不断增大,整体粉流分布浓度逐渐减小,焦点逐渐上移,粉流焦点浓度分布直径越来越小,粉末集聚性明显。较大的输粉气流速度会使得颗粒的惯性增大,粉末颗粒在碰撞基体后会产生强烈的反弹,产生飞溅,降低粉末的使用率,高速气流也会冲击熔池,对熔覆层成形质量产生很大的影响。因此,在调节输粉气流速度时,应在满足熔覆要求和质量的前提下适当加大输粉气流速度,有利于改善粉末的集聚性,提高粉末的使用率。

3.3 中心光路保护气速度的影响

同轴送粉喷嘴中心光路保护气是防止激光熔覆时产生的熔渣或烟气进入中心光路从而导致光路镜片受到损坏和污染的有效手段。在输粉气流速度为 4 m/s、送粉量为 20 g/min 不变的条件下分别对 $v_1 = 1$ 、1.5、2 和 3 m/s 的中心光路保护气速度下的同轴送粉喷嘴粉流流场进行数值仿真模拟。

如图 9 所示,为不同中心光路保护气速度下的轴向粉流浓度分布曲线。从整体上看,当中心光路保护气速度取最小值 $v_1 = 1$ m/s 时,粉流浓

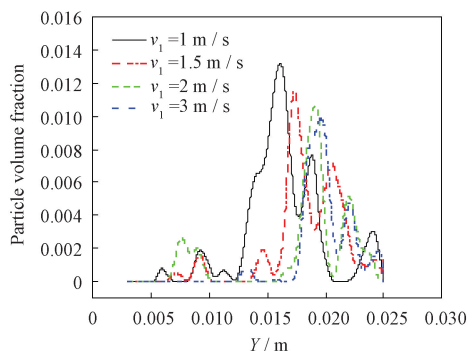


图 9 不同中心光路保护气速度下喷嘴中心轴向粉流浓度分布

Fig. 9 Concentration distribution of axial powder flow in the center of the nozzle at different central optical path shielding gas velocities

度最大,焦点距离喷嘴出口也最近,在 $Y = 16$ mm 的上焦点处的粉末浓度流为 0.0137,在 $Y = 19$ mm 处下焦点的浓度为 0.0085;当中心光路保护气速度取最大值 $v_1 = 3$ m/s 时,整体粉末浓度最低,焦点距离喷嘴出口也最远,上焦点位置在 $Y = 19.5$ mm 处,浓度为 0.0101,下焦点的位置在 $Y = 22$ mm 处,浓度为 0.0055。

如图 10 所示,为粉流上焦点浓度与焦点距离随中心光路保护气速度的变化曲线,从图中可以看出,随着中心光路保护气速度不断提高,粉流上焦点浓度不断减小,粉流上焦点距离喷嘴出口越来越远,这是由于粉流在输粉气流的曳力带动下向喷嘴中心轴线集聚时,受到中心光路保护气垂直向下的曳力作用,随着中心光路保护气速度的不断提高,粉末颗粒受到向下的曳力也就越大,因此粉末焦点会逐渐向下移动;随着保护气速度的增大,粉流的运动由于受到垂直向下力的作用越来越大,部分颗粒不再向中心集聚,因此粉末颗粒向中心集聚的数量越来越少,粉流上焦点浓度随着中心光路保护气的速度增大而越来越小。中心光路保护气速度 $v_1 = 2 \sim 3$ m/s 时,粉流焦点浓度的下降趋势和焦点下移趋势开始平缓,这是由于粉末喷出后的速度是一定的,当施加给颗粒的竖直速度分量到达某一个值后,再继续增加竖直速度分量大小,随着粉流速度的增大,水平速度分量减小的就越来越慢,因此,粉末颗粒向中心集聚的数量减小的越来越慢,粉流焦点浓度的下降趋势和焦点的下移趋势也就渐趋平缓。

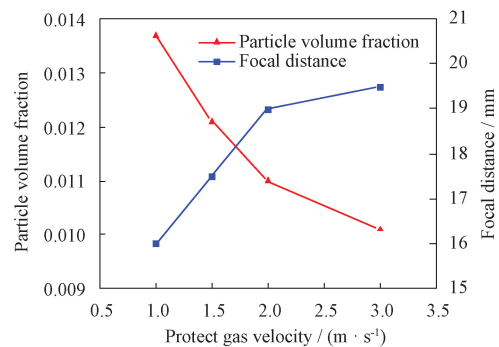


图 10 粉流上焦点浓度与焦点距离随中心光路保护气速度的变化

Fig. 10 Variation of upper focus concentration of powder flow and focal distance with protection gas velocities at center laser path

如图 11 所示,为不同中心光路保护气速度下粉流焦点浓度分布直径情况。通过计算,这四种不同中心光路保护气速度下的粉末浓度分布直径分别为 2.56、2.26、1.96 和 1.26 mm,其单位距离粉流分布浓度分别为 5.35、5.66、6.00 和 8.01 kg/m⁴。由此可见,随着中心光路保护气速度的提高,粉流焦点浓度分布直径逐渐缩小,这

是由于中心光路保护气的提高,中心气流速度与输粉气流速度之间的速度梯度会越来越小,喷嘴外整个流场区域会逐渐向理想的层流状态趋近,整个气流场也会越来越稳定,因此,粉末喷出后不会受到其他不稳定因素的影响,浓度分布直径也会越来越小,单位距离粉流分布浓度增加,粉末向中心集聚的效果越好。

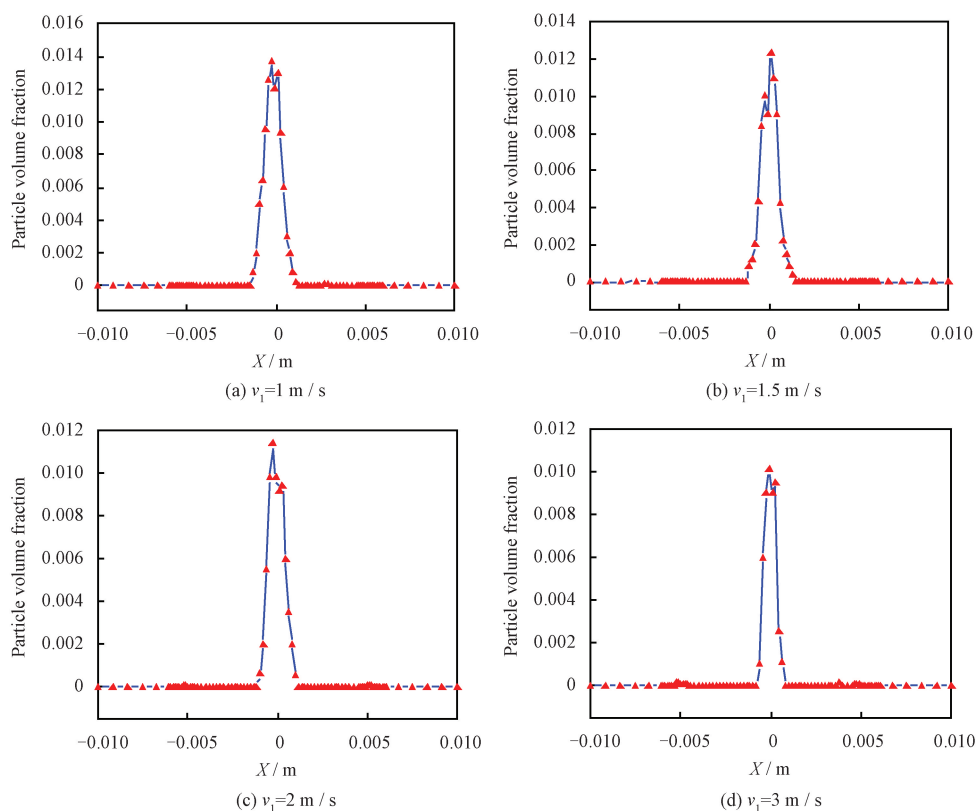


图 11 不同中心光路保护气速度下上焦点截面粉流浓度分布

Fig. 11 Concentration distribution of powder flow at upper focal cross section under different central optical path shielding gas velocities

根据以上分析可以得出,中心光路保护气速度对同轴送粉喷嘴粉流流场的稳定性有较大影响。较小的保护气速度会与输粉气流速度形成较大的速度梯度,使流场变得不稳定而出现紊流区域,影响粉流的流动;随着中心光路保护气速度的不断提高,速度梯度越来越小,流场也会变得愈加稳定,粉流焦点直径越来越小,单位距离粉流分布浓度不断增大,粉流集聚性越来越好。因此,在调节中心光路保护气速度时,应该充分考虑其与输粉气流速度的关系,通过以上分析,当中心光路保护气喷出的速度与输粉气流喷出的速度基本一致时,流场最稳定,此时粉末的集聚特性最好。

3.4 送粉速率的影响

送粉速率作为送粉工艺参数中影响熔覆效率和质量的一个重要指标,它对粉流流场分布浓度有着重要的影响。在中心光路保护气速度为 1.5 m/s、输粉气流速度 4 m/s 不变的条件下分别对 $v_f = 5, 10, 15$ 和 20 g/min 的送粉速率下同轴送粉喷嘴粉流流场进行了数值仿真模拟。

如图 12 为不同送粉速率下喷嘴轴向粉流浓度分布情况。从整体上看,当送粉速率取最小值 $v_f = 5$ g/min 时,沿喷嘴轴向粉末浓度相较于其他送粉速率下的浓度最低,焦点距离喷嘴出口距离最远,在 $Y = 19$ mm 处的上焦点浓度为 0.0067,在

$Y=22.5\text{ mm}$ 处的下焦点浓度为 0.005 ; 当送粉速率取最大值 $v_f=20\text{ g/min}$ 时, 沿喷嘴中心轴向的整体粉末浓度最大, 焦点距离喷嘴出口距离最近, 在 $Y=17.5\text{ mm}$ 处的上焦点浓度为 0.0121 , 在 $Y=20.5\text{ mm}$ 处的下焦点浓度为 0.0076 。

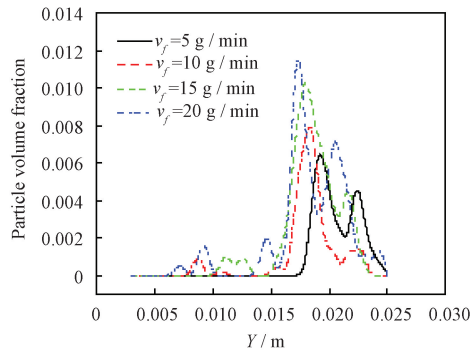


图 12 不同送粉速率下喷嘴中心轴向粉流浓度分布
Fig. 12 Concentration distribution of axial powder flow in the center of the nozzle at different powder feeding rates

粉流上焦点浓度与焦点距离随送粉速率的变化曲线如图 13 所示, 可以发现, 随着送粉速率的逐渐增大, 粉流整体的分布浓度就会越大, 焦点距离

虽然在逐渐减小但下降幅度很小。出现以上两种现象的原因是, 一方面在粉末颗粒密度不变的情形下, 增大送粉速率, 粉流的颗粒数量也会随之增多, 因此粉流上焦点浓度会随着送粉速率的增大而增大; 另一方面, 粉流浓度增大, 粉流受到中心光路保护气向下的曳力作用也就越小, 因此焦点距离会随着送粉速率的增大而逐渐减小。

如图 14 所示, 为不同送粉速率下粉流焦点浓度分布直径情况。在送粉速率为 $v_f=5、10、15、$

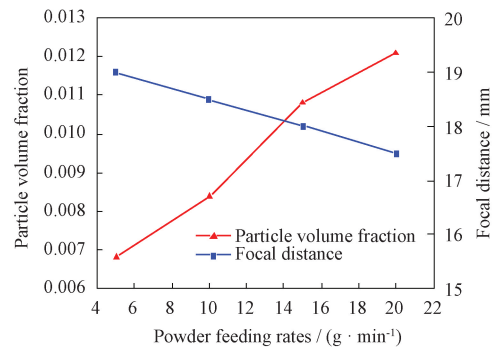


图 13 粉流上焦点浓度与焦点距离随送粉速率的变化
Fig. 13 Variation of upper focus concentration of powder flow and focal distance with powder feeding rates

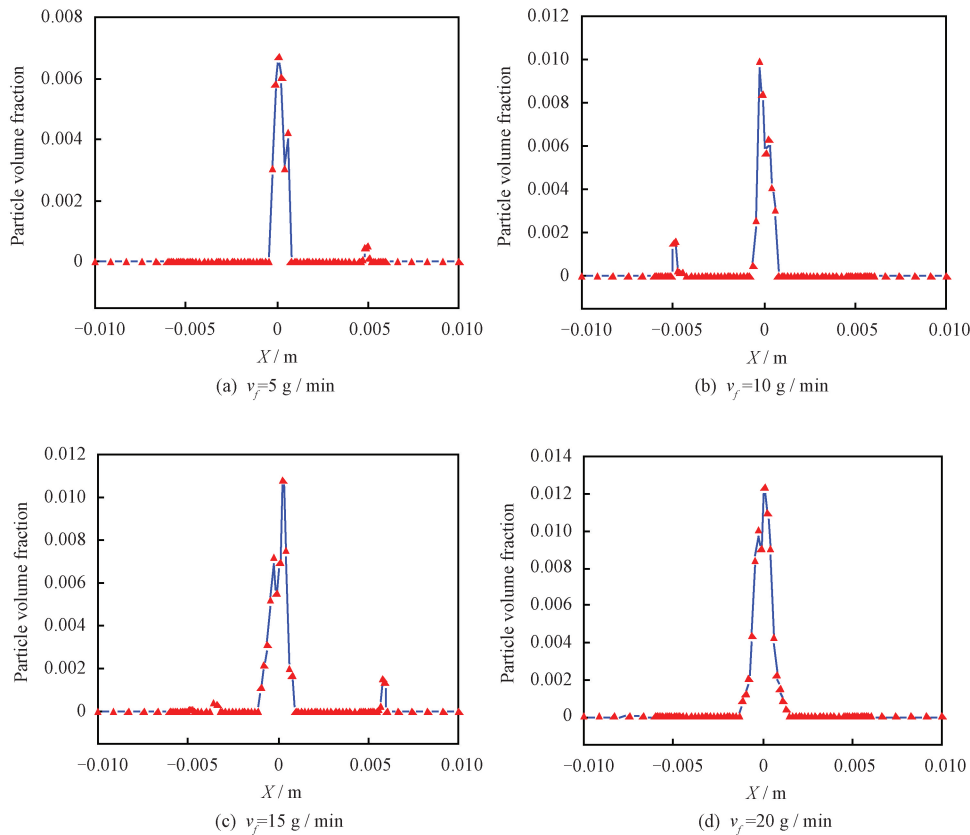


图 14 不同送粉速率下上焦点截面粉流浓度分布

Fig. 14 Concentration distribution of powder flow in upper focal section at different powder feeding rates

20 g/min 的情况下粉流浓度分布直径分别为 0.92, 1.25, 1.58, 2.26 mm。单位距离粉流分布浓度分别 7.28、8.00、6.96、5.35 kg/m⁴。随着送粉速率的逐渐增大,粉流焦点浓度分布直径也会增大,但单位距离粉流分布浓度并非呈线性关系,反而出现了先增大后减小的趋势。在增材再制造时,为了提高粉末的使用率和避免熔化状态下的粉末喷溅到喷嘴造成喷嘴烧损和堵塞,应在满足熔覆要求的前提下,适当减小粉流浓度,加大粉流焦点距离,减小粉流对激光强度的衰减作用,使焦点截面直径小于激光的光斑直径,提高粉末的使用率。

4 结 论

(1) 输粉气流速度对粉流集聚性影响效果明显,随着输粉气流速度的增大,粉流上焦点距离由 22.5 mm 逐渐减小至 12.5 mm,喷嘴中心轴向粉流上焦点浓度由 0.0145 减小至 0.0068,上焦点截面粉流浓度分布直径由 2.52 mm 减小至 1.0 mm,单位距离粉流分布浓度由 5.57 kg/m⁴ 增大至 6.80 kg/m⁴,粉流的集聚性得到明显增强。

(2) 中心光路保护气速度对同轴送粉喷嘴粉流流场的稳定性有较大的影响。随着中心光路保护气流速度的不断提高,粉流上焦点距离由 16 mm 增至 19.5 mm,喷嘴中心轴向粉流上焦点浓度由 0.0137 减小到 0.0101,上焦点截面粉流浓度分布直径由 2.56 mm 减小至 1.26 mm,单位距离粉流分布浓度由 5.35 kg/m⁴ 增至 8.01 kg/m⁴,粉末的集聚性越来越好,但较小的保护气速度会在中心光路保护气出口处出现紊流,使流场变得不稳定,影响粉末的运动。

(3) 送粉速率主要影响粉流的浓度,对粉流焦点距离的影响不大。随着送粉速率增大,喷嘴中心轴向粉流上焦点浓度由 0.0067 增大至 0.0121,上焦点截面粉流浓度分布直径由 0.92 mm 增大至 2.26 mm,单位距离粉流分布浓度出现先增大后减小的趋势。

参考文献

- [1] 朱胜,周超极. 面向“中国制造 2025”的增材再制造技术[J]. 热喷涂技术, 2016, 8(3): 1-4.

ZHU S, ZHOU C J. Additive remanufacturing for “Made in

China 2025”[J]. Thermal Spray Technology, 2016, 8(3): 1-4 (in Chinese).

- [2] 刘金城. 关于增材制造的 15 个要点[J]. 铸造, 2019, 68(2): 221-222.
- LIU J C. 15 Points about additive manufacturing [J]. Modern Casting, 2019, 68(2): 221-222 (in Chinese).
- [3] 赵维义,顾蕴松,易德先,等. 同轴送粉喷嘴保护气体流场研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(2): 198-203.
- ZHAO W Y, GU Y S, YI D X, et al. Shielding gas flow field on coaxial powder feeder nozzle[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(2): 198-203 (in Chinese).
- [4] 张琦. 多通道同轴送粉喷嘴气流汇聚特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- ZHANG Q. Gas-powder flow for laser coaxial nozzle with Multi-Channels[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018 (in Chinese).
- [5] 赵维义,胡芳友,易德先. 三通道激光熔覆同轴送粉喷嘴气体速度场试验[J]. 中国表面工程, 2012, 25(1): 51-55.
- ZHAO W Y, HU F Y, YI D X. Experiment of shielding gas flow field on a three tunnels coaxial powder feeding nozzle [J]. China Surface Engineering, 2012, 25(1): 51-55 (in Chinese).
- [6] 肖鱼,路媛媛,郭溪溪,等. 激光增材制造薄壁结构件工艺及性能的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 356-363.
- XIAO Y, LU Y Y, GUO X X, et al. Study on process and properties of thin-walled structure part by laser additive manufacturing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 356-363 (in Chinese).
- [7] 赵宗仁,田虎成,袁自钧,等. 激光近净成形工件边缘凸起的数值模拟[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(7): 928-933.
- ZHAO Z R, TIAN H C, YUAN Z J, et al. Numerical simulation of edge embossment in laser engineered net shaping work piece[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2018, 41(7): 928-933 (in Chinese).
- [8] 姚燕生,汪俊,陈庆波,等. 激光增材制造产品缺陷及其处理技术研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2019(10): 45-56.
- YAO Y S, WANG J, CHEN Q B, et al. Research status of defects and processing technology of laser additive manufacturing products[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019(10): 45-56 (in Chinese).
- [9] 李方义,李振,王黎明,等. 内燃机增材再制造修复技术综述[J]. 中国机械工程, 2019, 30(9): 1119-1127, 1133.
- LI F Y, LI Z, WANG L M, et al. Review on ICE remanufacture with additive repair technology[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(9): 1119-1127, 1133 (in Chinese).
- [10] 徐滨士. 新时代中国特色再制造的创新发展[J]. 中国表面工程, 2018, 31(1): 1-6.
- XU B S. Innovation and development of remanufacturing with Chinese characteristics for a new era[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(1): 1-6 (in Chinese).

- [11] 蒲以松, 王宝奇, 张连贵. 金属 3D 打印技术的研究[J]. 表面技术, 2018, 47(3): 78-84.
PU Y S, WANG B Q, ZHANG L G. Metal 3D printing technology[J]. Surface Technology, 2018, 47(3): 78-84 (in Chinese).
- [12] PAN H, SPARKS T, THAKAR Y D, et al. The investigation of gravity-driven metal powder flow in coaxial nozzle for laser-aided direct metal deposition process [J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2006, 128(2): 541-553.
- [13] 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(30): 870-872.
- [14] ZHANG B, CODDET C. Numerical study on the effect of pressure and nozzle dimension on particle distribution and velocity in laser cladding under vacuum base on CFD [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 23: 54-60.
- [15] TAN H, ZHANG F Y, WEN R J, et al. Experiment study of powder flow feed behavior of laser solid forming[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2012, 50(3): 391-398.
- [16] ZHU G, LI D, ZHANG A, et al. Numerical simulation of metallic powder flow in a coaxial nozzle in laser direct metal deposition[J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43(1): 106-113.
- [17] 靳晓曙, 杨陈, 冯立伟, 等. 激光制造中载气式同轴送粉粉流场的数值模拟[J]. 机械工程学报, 2007, 43(5): 161-166.
JIN X S, YANG C, FENG L W, et al. Numerical simulation of coaxial powder flow with carrying gas in laser manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(5): 161-166 (in Chinese).
- [18] 王国强, 郝万军, 王继新. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010.
WANG G Q, HAO W J, WANG J X. Discrete element method and its practice on EDEM [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2010(in Chinese).
- [19] KOVALENKO V, YAO J, ZHANG Q, et al. Development of multichannel gas-powder feeding system coaxial with laser beam[J]. Procedia Cirp, 2016, 42: 96-100.