

基于 CFD-DEM 的激光熔覆粉末利用率仿真分析

范红丽^{1,2}, 齐海波^{1,3*}, 张钊¹, 韩日宏^{1,3}, 刘玉兵¹

(1. 石家庄铁道大学, 石家庄 050043; 2. 石家庄职业技术学院, 石家庄 050800;
3. 河北省交通工程与环境协同发展新材料重点实验室, 石家庄 050043)

摘要: **目的** 为准确描述激光熔覆过程中粉末与粉末、送粉管、基板之间存在碰撞的事实, 提高粉末利用率, 探究送粉量、载气量和保护气量对粉末利用率的影响规律及原因。**方法** 首先, 基于 FLUENT 有限元分析软件和 EDEM 离散元分析软件建立基于 CFD-DEM 的激光熔覆三维耦合模型, 对粉末流从喷嘴喷射到达熔池的全过程进行气固两相流模拟仿真; 然后, 采用正交方差分析法确定送粉量、载气量和保护气量对粉末利用率的影响规律; 最后, 利用粉末收集试验和单道激光熔覆试验验证模型的可靠性及准确性。**结果** 粉末利用率方差分析结果表明, 送粉量、载气量和保护气量的显著性差异评价量 F 值分别为 169.079、114.317、50.153; 粉末利用率随送粉量、载气量和保护气量的增大均先提高后降低; 在送粉电压 18 V、载气量 15 L/min、保护气量 10 L/min 和送粉电压 14 V、载气量 11 L/min、保护气量 8 L/min 2 种极端工况下进行粉末收集试验, 模拟值与试验值误差分别为 4.03%、4.54%; 在激光功率 1 100 W、扫描速度 5 mm/s 下进行单道激光熔覆试验, 模拟值与试验值误差分别为 16.13%和 16.50%, 说明该模型准确可靠。**结论** 送粉量对粉末利用率的影响最大, 载气量次之, 保护气量影响最小; 获取较高粉末利用率的最优组合参数为送粉电压 16 V、载气量 13 L/min、保护气量 10 L/min。

关键词: 激光熔覆; 粉末利用率; CFD-DEM; 碰撞; 工艺参数; 模拟仿真

中图分类号: V261.8 文献标志码: A 文章编号: 1001-3660(2024)17-0146-11

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.17.013

CFD-DEM Simulation on Powder Catchment Efficiency in Laser Cladding

FAN Hongli^{1,2}, QI Haibo^{1,3*}, ZHANG Zhao¹, HAN Rihong^{1,3}, LIU Yubing¹

(1. Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. Shijiazhuang College of Applied Technology, Shijiazhuang 050800, China; 3. Hebei Key Laboratory of
Advanced Materials for Transportation Engineering and Environment, Shijiazhuang 050043, China)

ABSTRACT: It is an advanced surface modification technology by laser cladding which has the characteristics of small heat affected zone, fast repair speed and low dilution rate. It is widely used in aerospace, iron and steel metallurgy, marine engineering equipment, engineering machinery, chemical equipment and other important metal parts repair and remanufacturing. In order to accurately describe the fact that there are collisions among powder, powder tube and substrate during powder flow transportation, and improve the powder catchment efficiency, the influence rules and reasons of powder feed rate, carrier gas

收稿日期: 2023-10-31; 修订日期: 2023-12-24

Received: 2023-10-31; Revised: 2023-12-24

基金项目: 河北省自然科学基金 (E2023210011, E2022210043)

Fund: The Nature Science Foundation of Hebei Province of China (E2023210011, E2022210043)

引文格式: 范红丽, 齐海波, 张钊, 等. 基于 CFD-DEM 的激光熔覆粉末利用率仿真分析[J]. 表面技术, 2024, 53(17): 146-156.

FAN Hongli, QI Haibo, ZHANG Zhao, et al. CFD-DEM Simulation on Powder Catchment Efficiency in Laser Cladding[J]. Surface Technology, 2024, 53(17): 146-156.

*通信作者 (Corresponding author)

flow rate and shield gas flow rate are explored.

A gas flow model was established in FLUENT finite element analysis software and particle trajectory model in EDEM discrete element analysis software. Then the coupling interface was developed to obtain the CFD-DEM three-dimensional coupling model which could be used to simulate gas-solid two-phase flow for the whole process of powder flow from nozzle to molten pool. The orthogonal table of the SPSS design center was used to conduct 9 sets of simulation to explore the complex interaction mechanism of the three process parameters of powder feed rate, carrier gas flow rate and shield gas flow rate and their influence on the powder catchment efficiency. Finally, the reliability and accuracy of the model were verified by powder collection test and single pass laser cladding experiment.

Orthogonal variance analysis of the powder catchment efficiency showed that the significance difference evaluation F of powder feed rate, carrier gas flow rate and shield gas flow rate were 169.079, 114.317, 50.153 respectively, and the powder catchment efficiency increased first and then decreased with the increase of them. When the carrier gas flow was equal to 11 L/min, the powder flow rate was small relatively, and the powder stopped moving after several near-situ collisions on the substrate, so resulting in a low powder catchment efficiency because they were not captured by the molten pool. With the increase of the carrier gas flow to 13 L/min, the rebound force of the powder after reaching the substrate was enhanced, so that the powder that did not enter the molten pool before could be captured, and the powder catchment efficiency was constantly improved. When the carrier gas flow was increased to 15 L/min, low powder convergence caused by the collisions among powder, powder tube and substrate were intensified, thus reducing the powder utilization rate. When the powder feeding voltage was 14 V to 16 V, the collisions and the powder speed changes were few, most of the powder could enter the melt pool and capture smoothly. The higher the powder feeding voltage, the higher powder catchment efficiency. When the powder feeding voltage was increased to 18 V, the powder quantity and collision increased sharply, making many powders deviate from the previous motion path, and the powder catchment efficiency decreased. When the shield gas flow rate was 8 L/min to 10 L/min, the shield gas had a certain collimation effect, which improved the powder convergence and the catchment efficiency. However, when the shield gas flow rate was greater than 10 L/min, they would cause interference to the carrier gas and reduce the powder catchment efficiency. The laser cladding powder collection test was carried out under two extreme working conditions: powder feeding voltage, carrier gas flow rate and shield gas flow rate were 18 V, 15 L/min, 10 L/min and 14 V, 11 L/min, 8 L/min. The single-pass cladding test was carried out under the laser power of 1 100 W and scanning speed of 5 mm/s. The error of the simulated value and the laser cladding collection powder test value were 4.03% and 4.54%, and the single-pass cladding test value were 16.13% and 16.50%, indicating that the model was accurate and reliable.

The CFD-DEM three-dimensional coupling model and orthogonal variance analysis of powder catchment efficiency make clear that powder feed rate has significant effect on the powder catchment efficiency, followed by carrier gas flow rate and shield gas flow rate. The optimal combination parameters of powder feeding voltage 16 V, carrier gas flow rate 13 L/min and shield gas flow rate 10 L/min are confirmed. The research results provide theoretical guidance for the selection and optimization of process parameters in laser cladding.

KEY WORDS: laser cladding; powder catchment efficiency; CFD-DEM; collision; process parameter; simulation

激光熔覆技术具有热影响区小、修复速度快、稀释率低等特点^[1-3], 广泛应用于航空航天、钢铁冶金、海工装备、工程机械、化工设备等重要金属零部件修复及再制造。基于粉末流在输送过程中粉末、送粉管、基板之间的复杂相互作用机制, 针对激光熔覆气粉耦合模拟仿真研究较多, 主要目的是优化喷嘴结构。杨洗陈等^[4-5]建立了同轴送粉激光熔覆粉气两相流场二维计算模型, 完成了粉末流的速度场和浓度场检测。Wen 等^[6]考虑粉末升温后的粉末流动规律, 利用二维轴对称模型模拟了同轴送粉喷嘴中粉末流尺寸分布及颗粒形态变化。Kovalev 等^[7-8]构建了不同同轴送粉金属粉末颗粒的气粉传输三维数学模型。

在金属激光熔覆技术中, 金属粉末作为原材料造价昂贵, 提高粉末利用率可有效降低生产加工成本。激光熔覆过程中, 可以通过实际输送粉末和最终熔覆粉末之间的比值得到粉末利用率, 但对各个因素的影响需要通过大量试验来完成, 成本高且周期长。近年来, 一些研究人员也采用粉末利用率来优化工艺参数, 郗文超等^[9]对激光熔覆铁基合金粉末中的工艺参数与粉末的有效利用率进行研究。张庆茂等^[10]根据熔覆层宏观参数提出了一种粉末利用率的计算方法。对于利用模拟仿真的方式对粉末利用率的研究较少且均采用有限元的分析方法。金晓鑫等^[11]利用三维气固两相流模型, 分析表明粉末利用率随载气量和粉末速

度的增大而增大，且粒径较小粉末有较高粉末利用率。尹千千等^[12]构建三维四通道同轴送粉喷嘴模型以提高粉末利用率。

激光熔覆工艺过程中，粉末与粉末之间、粉末与基板之间存在较大的碰撞，导致粉末利用率大幅下降。有限元模拟仿真研究中基本没有考虑粉末与粉末、粉末与送粉管壁、粉末与基板的碰撞作用，主要研究过程为粉末流从喷嘴喷射至到达基板，假设粉末从送粉管离开后完全输送到液态熔池，致使模拟仿真结果误差较大。针对以上不足，需要将有限元分析方法与离散元分析方法耦合起来进行模拟仿真。CFD-DEM 耦合是一个瞬态双向数据传递的过程，这一方法目前多应用于输运管道^[13]、流化床^[14]、等离子喷涂^[15-16]、喷丸强化^[17-18]等领域的分析，然而，鲜有将这一耦合方法运用到激光熔覆的研究中来。

因此，本文基于有限元计算流体力学和离散元运动学计算理论，充分考虑粉末与粉末、粉末与送粉管壁、粉末与基板的碰撞作用，建立了 CFD-DEM 激光熔覆三维耦合模型，探究送粉量、载气量和保护气量对熔池粉末利用率的影响规律。采用正交方差分析^[19]各工艺参数显著性水平，结合试验验证模型的准确性，确定最优参数组合，从而为激光熔覆工艺参数选取提供理论指导。

1 试验

1.1 设备

激光熔覆试验设备主要由六轴机械手臂、YC532 四路送粉熔覆喷嘴、YLS-400 光纤激光器及配套系统和 DPSF-2 送粉器组成。

1.2 材料

本文选用长沙天久金属材料有限公司提供的粒径为 38~75 μm 的 316 L 不锈钢粉末，其微观组织形貌如图 1 所示，其中粉末流动性为 16 s/50 g、松装密

度为 2.8 g/cm³、振实密度为 4.0 g/cm³，粉末的粒径分布呈近高斯分布，粒径高斯分布概率图如图 2 所示。粉末化学成分组成如表 1 所示。基体选用泰州科实金属制品提供的尺寸为 140 mm×140 mm×10 mm 的 316 L 不锈钢基板，载气和保护气选用惰性气体氩气。粉末送入送粉器之前先将其置于真空干燥箱 120 ℃干燥 12 h 以减少水分，进而增加粉末流动性，再用手动砂轮打磨基板表面清理表面的氧化层，形成部分纹理，降低激光镜面反射，增加吸光度，最后用无水乙醇清洗并在 100 ℃的真空烘箱中放置 8 h 后使用。

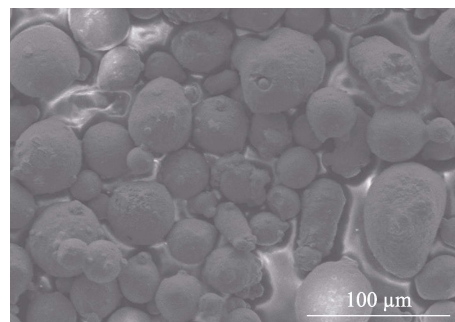


图 1 316L 不锈钢粉末微观形貌
Fig.1 Microscopic morphology of 316L

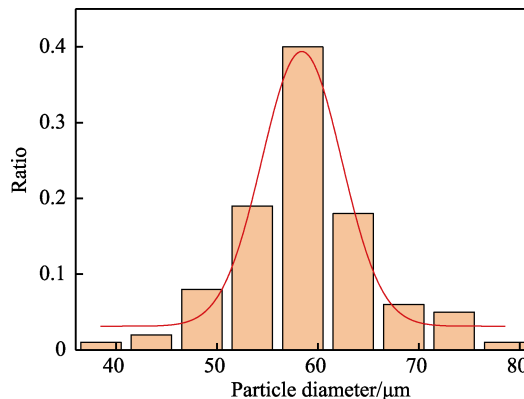


图 2 粒径高斯分布概率
Fig.2 Probability graph of particle size
Gaussian distribution

表 1 316L 不锈钢粉末化学成分

Tab.1 Chemical composition of 316 L stainless steel powder and substrate

									wt. %
Cr	Ni	Mo	Si	Mn	C	P	S	O	Fe
16.67	11.88	2.509	0.552	0.171	0.022	0.010	0.001	0.248	Bal.

1.3 方案

激光熔覆试验中，送粉量的大小与送粉电压有关，为标定送粉量，对送粉电压为 14~18 V 下的粉末连续出粉 60 s 并称量，重复试验 5 次取平均值^[20]，送粉电压为 14、16、18 V 分别对应送粉量 11.58、13.44、15.24 g/min。

假设载气入射速度为粉末入射速度，建立载气量

与粉末入射速度的关系^[21]：

$$V_z = \frac{Q_z}{4\pi r^2} \quad (1)$$

式中： Q_z 为载气量； r 为送粉管半径； V_z 为粉末入射速度。

建立保护气量与保护气入射速度的关系：

$$V_b = \frac{Q_b}{\pi R^2} \quad (2)$$

式中: Q_b 为保护气量; R 为保护气管半径; V_b 为保护气入射速度。

为确定激光熔覆正交试验设计因素水平, 进行 3 组激光熔覆粉末利用率单因素试验: 1) 固定载气量为 13 L/min, 保护气量为 10 L/min, 研究不同送粉电压下的粉末利用率; 2) 固定送粉电压为 16 V, 保护气量为 10 L/min, 研究不同载气量下的粉末利用率; 3) 固定送粉电压为 16 V, 载气量为 13 L/min, 研究

不同保护气量下的粉末利用率, 结果见图 3。可以看出, 改变单一因素变量, 粉末利用率的变化趋势均呈现先升高后降低的趋势, 为研究激光熔覆过程中送粉量、载气量和保护气量 3 种工艺参数对粉末利用率的影响程度及最优组合, 探究其影响机理, 根据单因素试验结果, 确定设计因素三水平, 如表 2 所示。采用 SPSS 设计中心正交表^[22]进行 9 组模拟仿真, 假设各因素之间无相互交互作用, 试验方案见表 3。

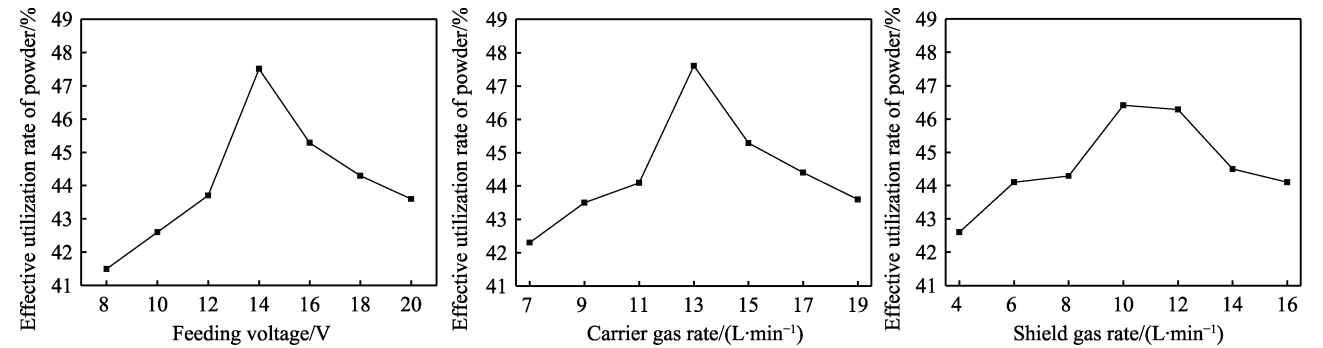


图 3 单因素试验结果
Fig.3 Single factor experiment results

表 2 设计因素水平表
Tab.2 Design factor level

Level	Feeding voltage/V	Carrier gas rate/(L·min ⁻¹)	Shield gas rate/(L·min ⁻¹)
1	14	11	8
2	16	13	10
3	18	15	12

表 3 试验方案
Tab.3 Experimental scheme

No.	Feeding voltage/V	Carrier gas rate/(L·min ⁻¹)	Shield gas rate/(L·min ⁻¹)	Blank column
1	14	11	8	1
2	14	13	10	2
3	14	15	12	3
4	16	11	10	3
5	16	13	10	1
6	16	15	8	2
7	18	11	12	2
8	18	13	8	3
9	18	15	10	1

2 理论基础

2.1 流体控制方程

在激光熔覆过程中, 将喷嘴内部气体流动理想化并视为连续相, 用 Navier-Stokes 方程描述流体流动^[22]。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m \quad (3)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (4)$$

$$\tau_{ij} = (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (5)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

式中: i, j 为坐标矢量方向; u_i, u_j 为 i, j 方向上的气体速度; ρ 为气体密度; S_m 为质量源项; P 为气体压力; g 为重力加速度; F_i 为自定义源项; τ_{ij} 为应力张量; μ 为气体黏度系数; μ_t 为湍流黏度系数; δ_{ij} 为 Kronecker 数, 当 i, j 相等时为 0; C_μ 取经验常数 0.09, k 为湍动能, ε 为耗散率。

载气和保护气流速较快, 雷诺数大于 4 000, 为黏性不可压缩湍流, 选取标准 $k-\varepsilon$ 模型模拟分析^[23]。

k 湍流动能方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (7)$$

ε 湍流耗散方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (9)$$

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho P_{\text{rt}}} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (10)$$

式中： G_k 表示由湍流速度梯度导致的湍流动能； G_b 是由浮力导致的湍流动能； P_{rt} 是湍流能量普朗特数； g_i 是重力在*i*方向上的分量； σ_k 、 σ_ε 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为试验经验常数，取值为1.44、1.92、1.2、1.0、1.33。

2.2 颗粒运动方程

将激光熔覆粉末简化为球形颗粒，忽略其体积分数，采用欧拉法进行模拟仿真。应用牛顿第二定律，其运动方程为^[24]：

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = f_d + f_c - V_p \nabla P + mg \quad (11)$$

$$\frac{d\omega_p}{dt} = \frac{T_p}{I_p} \quad (12)$$

$$f_d = \frac{3\mu m_p}{4\rho_p d_p^2} C_D Re \quad (13)$$

$$Re = \frac{\rho d_p |v - v_p|}{\mu} \quad (14)$$

式中： m_p 为单一颗粒质量； v_p 为单一颗粒速度；

f_d 为流体对颗粒阻力； f_c 为颗粒相互碰撞力； V_p 为单一颗粒体积； ∇P 为压力梯度； ω_p 为颗粒转动角速度； T_p 为颗粒转动转矩； I_p 为转动惯量； C_D 为阻力系数； Re 为雷诺数。

2.3 CFD-DEM 耦合原理

CFD-DEM耦合的基本方法是利用FLUENT计算气体流场，EDEM计算颗粒运动轨迹，二者之间通过相互传递质量、动量和能量信息来模拟固相颗粒在气相流体中的实际受力及运动状态。

CFD-DEM耦合模型包含流体有限元模型和颗粒离散元模型。图4为CFD-DEM耦合流程图，计算开始时，通过给定初始条件，主要包括流体速度、压力、颗粒速度、位置等来进行初始化；然后，在CFD有限元模型中，FLUENT开始计算一个时间步长，求解流体控制方程，得到流体速度场和压力场，计算流体内孔隙以及流体和颗粒之间的相互作用力，将流体对颗粒的作用力传递给DEM离散元模型，EDEM开始对当前时间步进行计算，进行颗粒定位及颗粒接触识别，计算作用于颗粒上的力，通过求解颗粒运动方程，更新颗粒速度及位置，并将更新后的数据传递回CFD有限元模型；最后程序判断是否达到设定的时间，若未达到则将流体和颗粒数据传递给下一循环步进行计算，若已达到规定时间，则终止计算，程序结束。

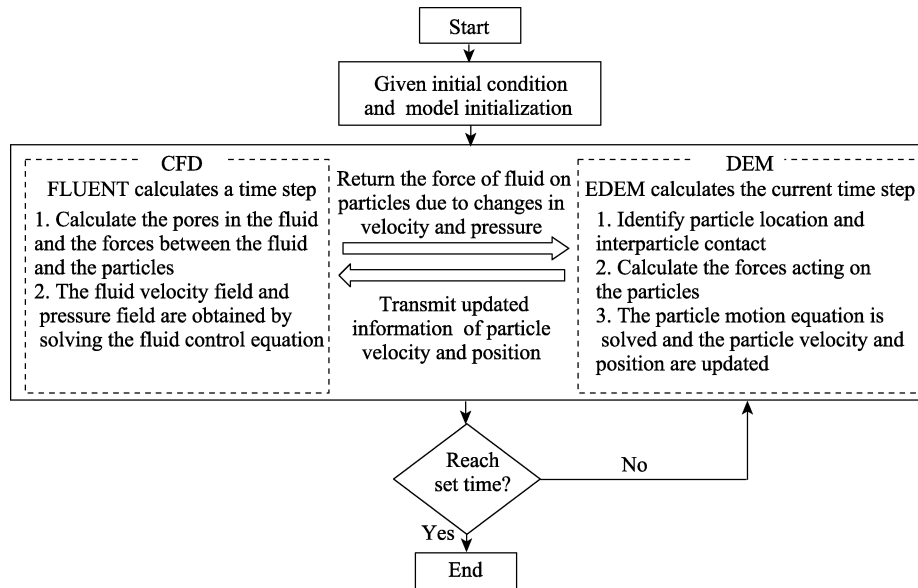


图4 CFD-DEM耦合流程图
Fig.4 CFD-DEM coupling flow chart

3 仿真模型

3.1 有限元模型

首先，根据激光熔覆头原型，在Solidworks中构建三维模型并输出.txt文件，然后导入ICEM中进行

网格划分，如图5所示，采用八叉树法进行非结构四面体网格划分，设置四路送粉管网格最大尺寸为0.4 mm；载气和保护气入口网格最大尺寸为0.2 mm；其余边界网格最大尺寸为0.5 mm，对粉末汇聚输出部分进行局部加密，网格最大尺寸为0.1 mm，最后输出.msh文件导入FLUENT中并进行边界条件设置，

将气体入口设置为速度入口, 管壁和基板设置为壁面, 出口为标准压力出口。重力加速度为 -9.81 m/s^2 , 初始温度为 300 K 。采用压力基求解器, 瞬态仿真时间步长为 $1\times 10^{-4}\text{ s}$ 。

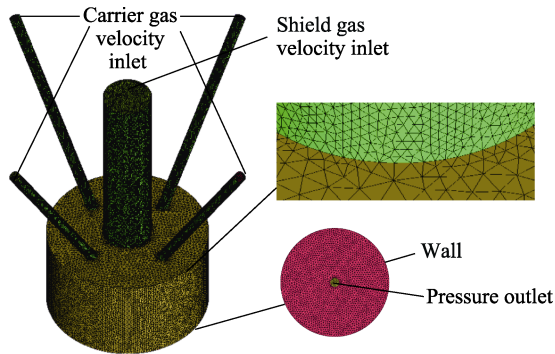


图 5 激光熔覆头三维模型
Fig.5 3D model of laser cladding head

3.2 离散元模型

在 EDEM 中进行材料属性设置, 颗粒材料为 316L 不锈钢粉末, 基板为 316L 不锈钢钢板, 送粉管和保护气管为青铜, 选取 Hertz-Mindlin 接触模型和标准滚动摩擦模型^[25], 材料间接触模型系数如表 4~5 所示。采用 DEM 耦合接口, 时间步长为 $5\times 10^{-6}\text{ s}$,

表 4 材料属性
Tab.4 Material properties

Attribute	Poisson ratio	Shear modulus/MPa	Density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
Copper	0.320	4.48×10^5	9 620
316L powder	0.300	7.62×10^5	7 980
316L substrate	0.276	7.73×10^5	8 000

表 5 材料接触系数
Tab.5 Material contact coefficient

Contact model	Coefficient of restitution	Coefficient of static friction	Coefficient of rolling friction
316L powder-Copper	0.30	0.60	0.50
316L powder-316L powder	0.42	0.40	0.30
316L powder-316L substrate	0.27	0.61	0.52

数据每 0.01 s 保存 1 次, 仿真总时间为 1 s 。
对激光熔覆粉末颗粒模型进行简化, 假设颗粒为标准球形颗粒, 符合高斯函数分布。如图 6 所示, 颗粒粒径范围为 $38\sim 75\text{ }\mu\text{m}$, 平均尺寸设定为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 。颗粒生成位置选择 random()函数随机生成, 颗粒初始速度与载气量速度一致, 开始耦合接口, 进行 CFD-DEM 耦合仿真。

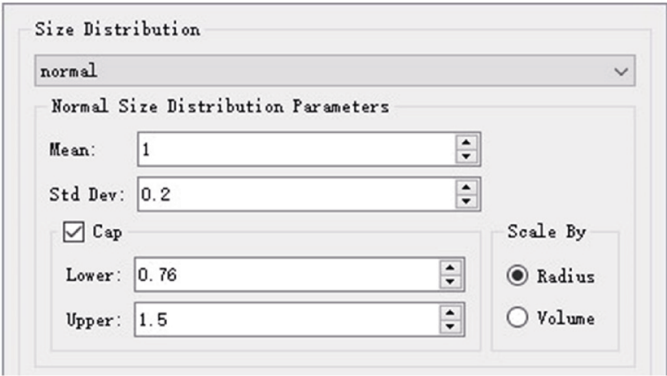
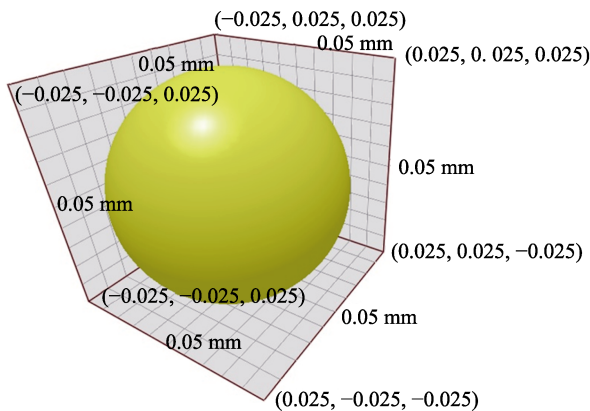


图 6 颗粒设置
Fig.6 Particle setting

3.3 模型验证

设定送粉压力为 16 V , 载气流量为 13 L/min , 保护气量为 10 L/min , 进行试验验证, 利用高速摄像机、强光手电筒、吸黑幕布等工具拍摄粉末束汇聚图像, 如图 7 所示, 四路粉束均匀出粉并汇聚。
为计算模拟结果中粉末汇聚焦点距离喷嘴的距离, 图 8 为轴向粉末浓度分布云图, 以竖直方向喷嘴出口处中心点为原点绘制粉末浓度分布曲线。可以看出, 最大粉末浓度出现在距离喷嘴约 16 mm 处, 试验与模型仿真结果一致, 可充分验证模型的正确性。

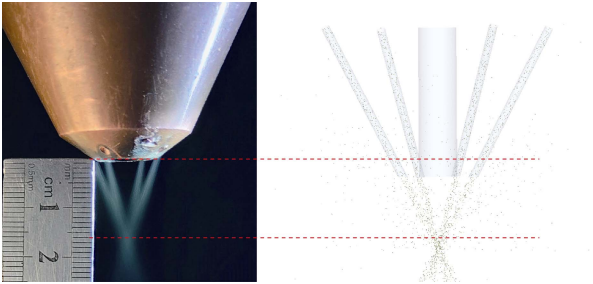


图 7 模型验证
Fig.7 Model validation

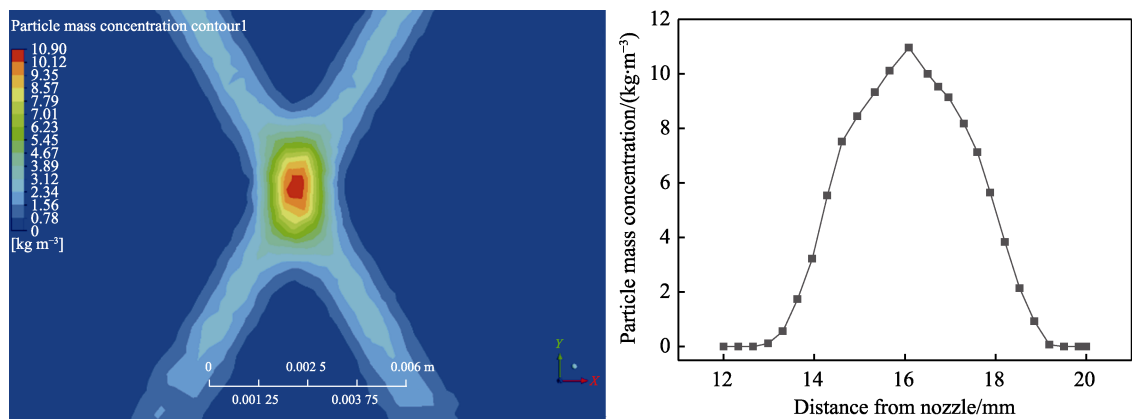


图 8 轴向粉末浓度分布
Fig.8 Axial powder concentration distribution

4 结果及分析

图 9 为 0.1 s 时激光熔覆粉末的运动状态，可以看出粉末颗粒碰撞到基板后会有明显的反弹，粉末颗粒速度迅速降低，一部分反弹后离开，一部分多次反弹后重新进入熔池。激光熔覆过程中粉末利用率受到激光功率、扫描速度、载气量、送粉量和保护气量等工艺参数的影响，对于激光功率和扫描速度，两者的交互作用直接决定熔池形态的分布，故可将激光功率和扫描速度对粉末利用率的影响转变为模型中熔池形状的变化。试验中激光光斑直径为 2.5 mm，因基板与四路送粉器垂直分布，模型中设熔池为 2.5 mm 圆形，假设进入该部分的粉末全部被熔池捕获。

为研究激光熔覆过程中载气量、送粉量和保护气量对粉末利用率的影响，利用 C++编程语言使用 API 功能在几何接触模型中添加出口质量统计变量，得到出口粉末总质量 m_{out} ，根据仿真时间 t 与单位时间送粉量 m_{powder} 确定总送粉量 M ，故模拟仿真中粉末利用率的计算公式见式（15）~（16），基于正交试验方案，

$$\eta = \frac{m_{out}}{m_{powder}t} \times 100\%$$

(15)

$$M = m_{powder}t$$

(16)

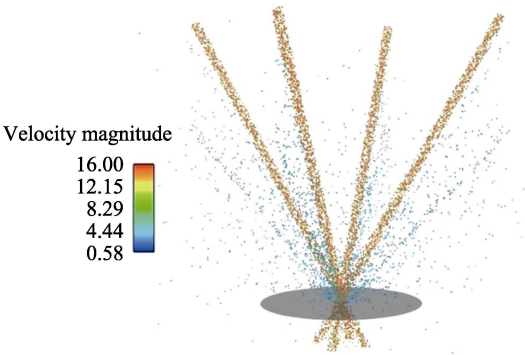


图 9 0.1 s 时激光熔覆粉末的运动
Fig.9 Movement of cladding powder at 0.1 s.

所得模拟仿真结果如表 6 所示。

表 6 仿真结果
Tab.6 Simulation result

No.	The catchment efficiency of powder/%
1	40.62
2	46.34
3	44.13
4	47.36
5	50.43
6	46.21
7	44.28
8	46.05
9	45.52

利用正交方差分析粉末利用率结果如表 7 所示。当根据试验数据进行曲线拟合时，可用 R^2 表示试验结果与拟合曲线之间的吻合程度， R^2 的值介于 0~1 之间，越接近于 1 时代表吻合程度越高。本模型中 $R^2=0.995$ ，说明因变量的可变性的 99.5%可以由回归模型解释，可信度较高。校正后 R^2 可判定模型中是否存在样本数量过少所导致的过度拟合，本模型中 $Adj\ R^2=0.980$ ，说明拟合曲线对模型的可信度高达 98.0%。综上，本模型的粉末利用率方差分析结果真实可靠。

为分析激光熔覆过程中送粉量、载气量和保护气量对粉末利用率的影响显著性，对仿真结果进行正交方差分析来确定 F 值。 F 值可以用来检验自变量对因变量的影响程度，是对自变量和因变量之间统计显著性差异的有效评价指标。自变量的 F 值越大，代表该自变量对因变量的影响越显著。方差平方和及各因素的 F 值计算公式为：

$$Q_T = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} T^2$$

(17)

$$Q_G = \sum_{i=1}^m \frac{T_i^2}{n_i} - \frac{1}{n} T^2$$

(18)

表 7 粉末利用率方差分析结果
Tab.7 Analysis of variance result of powder catchment efficiency

Source of variance	Square of deviance	Freedom	Mean square	Value of <i>F</i>	Significance
Modified model	56.058	6	9.343	111.183	0.009
Feeding voltage/V	28.416	2	14.208	169.079	0.006
Carrier gas rate/(L·min ⁻¹)	19.213	2	9.606	114.317	0.009
Shield gas rate/(L·min ⁻¹)	8.429	2	4.215	50.153	0.020
Error	0.168	2	0.084		
Sum	18 819.747	9			

Note: $R^2=0.995$, Adj $R^2=0.980$.

$$T = \sum_{i=1}^m x_i \tag{19}$$

$$F_j = \frac{Q_G}{f_G} \cdot \frac{f_g}{Q_g} \tag{20}$$

$$f_G = m - 1 \tag{21}$$

$$f_g = \sum_{i=1}^m n_i - m \tag{22}$$

式中： Q_T 、 Q_G 分别为总方差平方和和因素效应方差平方和； m 为因素水平总数； n 为试验总数； n_i 为各因素水平试验总数； T 为各因素水平结果总和； T_i 为各因素水平试验结果总和； f_G 、 f_g 分别为因素和误差的自由度。

根据显著性分析准则，将各水平因素 F 值与 F 检验临界值表进行分析对比确定显著性，则有：

$$F_s > F_z > F_{0.01}(2, 2) > F_b > F_{0.05}(2, 2) \tag{23}$$

式中： F_s 、 F_z 、 F_b 分别为送粉量、载气量和保护气量的 F 值； $F_{0.01}(2, 2)=99.01$ ，代表显著性水平为 0.01，具有 99%的可信度； $F_{0.05}(2, 2)=19.00$ ，代表显著性水平为 0.05，具有 95%的可信度。

综上，可知送粉量对粉末利用率的影响最大，载气量次之，保护气量影响最小。

4.1 载气量对粉末利用率的影响

各因素水平对因变量的影响如图 10 所示。随着载气量的增加，粉末利用率由 44.09%提高至 47.61%

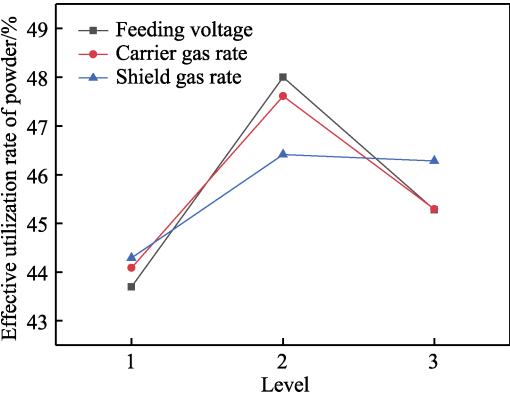


图 10 各因素水平对粉末利用率的影响
Fig.10 Effects of various factors on powder catchment efficiency

后降低至 45.29%，粉末利用率先升高后降低。

图 11 为不同载气量下的典型粉末流速随时间的变化曲线，当载气量等于 11 L/min 时，粉末初始流速相对较小，为 14.3 m/s，当粉末撞击到送粉管后开始减速，直到被后面进来速度比它高的粉末撞击后又再次加速，0.1~0.7 s 粉末出现连续碰撞，粉末速度不断变化，但由于受重力场影响，粉末在送粉管内整体速度呈加速趋势，直达到最大值 16.2 m/s，之后粉末受惯性力继续向下直到撞击到基板，速度急剧下降，粉末在基板上进行几次近原位碰撞反弹后停止运动而未被熔池捕捉，导致粉末利用率较低；单位时间内随着载气量增大至 13 L/min 时，粉末流速增大，粉末到达基板后的反弹力增大，使得之前未能进入熔池的粉末得以被熔池捕获，粉末利用率不断提高；当载气量等于 15 L/min 时，粉末流速继续提升，粉末到达基板时速度还很大，可使得粉末反弹力较大，同时粉末与粉末之间的碰撞加剧，粉末汇聚性降低，进入熔池的粉末数量减少，从而降低了粉末利用率。

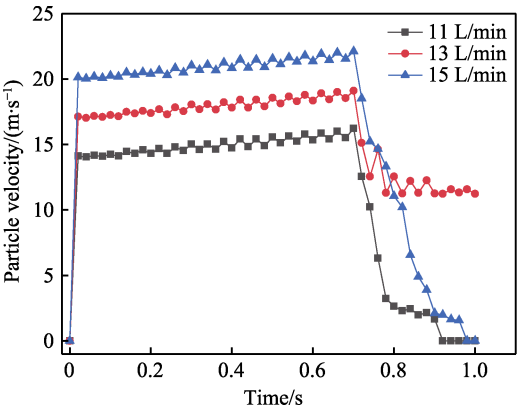


图 11 不同载气量下的典型粉末流速图
Fig.11 Typical powder velocity at different carrier gas rate

4.2 送粉量对粉末利用率的影响

随着送粉量的增加，粉末利用率由 43.70%提高至 48.00%后降低至 45.28%，粉末利用率先升高后降低。图 12 为不同送粉电压下的粉末碰撞次数统计图，当送粉电压为 14 V 时，粉末总量较低，粉末与粉末

之间的碰撞相对较少,粉末速度变化较小,大部分可顺利进入熔池并捕获,随着送粉电压的增大,粉末利用率不断提高,在送粉电压达到 16 V 后,继续提高送粉电压至 18 V,粉末数量剧增,粉末之间的碰撞显著增加,使得很多粉末偏离之前的运动轨迹并导致不能被熔池捕获,粉末利用率下降。

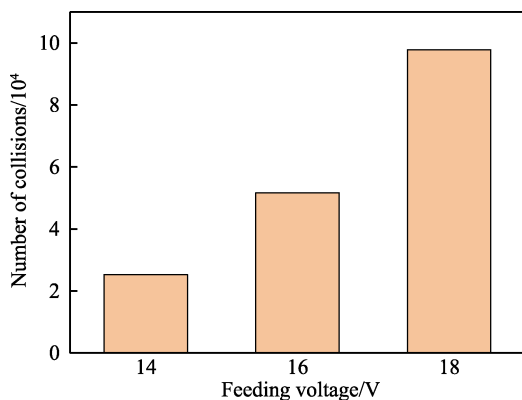


图 12 不同送粉电压下的粉末碰撞次数

Fig.12 Number of collisions between particles-particles at different feeding voltage

4.3 保护气量对粉末利用率的影响

随着保护气量的增加,粉末利用率由 44.29%提高至 46.61%后降低至 46.28%,粉末利用率先升高后降低。这是因为当保护气量小于 10 L/min 时,随着保护气量的增大,保护气流速增大,保护气具有一定的准直作用,使得粉末汇聚性提升,粉末利用率提高;但当保护气量大于 10 L/min 后,保护气流速继续增大会对载气造成干涉,降低粉末利用率。

综上,确定激光熔覆提高粉末利用率的最优参数组合为送粉电压 16 V,载气量 13 L/min,保护气量 10 L/min。

5 试验验证

5.1 粉末收集试验

选取送粉电压 18 V、载气量 15 L/min、保护气量 10 L/min (试验号 1) 和送粉电压 14 V、载气量 11 L/min、保护气量 8 L/min (试验号 2) 2 种极端工况进行试验。试验前,首先标定送粉电压所对应的送粉量 m_s ,用千分精度电子天平称量空烧杯并记为 m_a ,然后在基板中间用激光切割机出一个直径为 2.5 mm 的圆,如图 13 所示,将粉末汇聚点对焦至圆心处,收集从圆出口至烧杯中的粉末,进行连续出粉 60 s 后称量记为 m_b ,则激光熔覆粉末收集试验的粉末利用率计算公式见式 (24),重复以上试验 5 次并取平均值确定粉末收集试验粉末利用率。

$$\eta_2 = \frac{m_b - m_a}{m_s t} \times 100\% \quad (24)$$

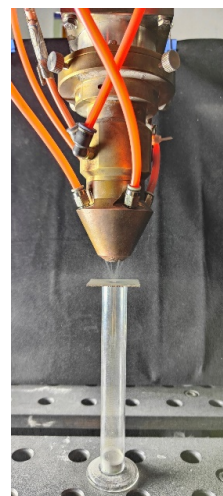


图 13 粉末收集试验

Fig.13 Powder collection test

5.2 单道激光熔覆试验

为探究考虑激光作用下的粉末利用率,进行单道激光熔覆试验。以激光功率 1 100 W、扫描速度 5 mm/s,其余参数采用与粉末收集试验相同的工艺参数进行试验,结果如图 14 所示。试验前用千分精度电子天平对基板称量并记为 m_1 ,在基板上标定扫描长度为 30 mm,因设定扫描速度为 5 mm/s,则单道激光熔覆的总时长为 6 s,激光熔覆结束后,待基板冷却后用刷子清理熔覆层后称量记为 m_2 ,则粉末利用率的计算公式为:

$$\eta_3 = \frac{m_2 - m_1}{m_s t} \times 100\% \quad (25)$$

第一道试验结束后,再进行下一道试验,重复以上操作并称量记为 m_3 ,则第二道试验的粉末利用量为 $m_3 - m_2$,依次类推,每道试验进行 3 次取平均值来确定粉末利用率。



图 14 单道激光熔覆试验

Fig.14 Single pass laser cladding experiment

粉末收集试验和单道激光熔覆试验结果与模拟结果对比见表 8。激光熔覆粉末收集试验中,粉末在输送过程中,输送气压不稳定、输送管壁静电力、外界环境干扰以及测量误差等诸多因素均会对粉末利用率的计算产生影响。激光熔覆粉末收集试验与模拟值结果相对误差分别为 4.03% 和 4.54%,均低于 5%,

误差在合理范围之内。单道激光熔覆试验中，粉末在
高能激光束的照射下会出现黏结现象，相对较多的粉
末颗粒可进入熔池并生成熔覆层，致使粉末利用率提
高，单道激光熔覆试验与模拟值结果相对误差分别为
16.13%和 16.50%，均低于 17%，误差在合理范围之
内。综上，基于 CFD-DEM 的激光熔覆三维耦合模型
对粉末利用率具有较准确的描述性，可信度高。

表 8 试验结果与模拟结果对比分析表
Tab.8 Comparison and analysis between experiment and
simulation

No.	The catchment efficiency of powder/%			Error/%	
	η	η_2	η_3	Error 1	Error 2
1	42.58	44.37	50.77	4.03	16.13
2	40.62	42.55	48.65	4.54	16.50

6 结论

1) 建立了 CFD-DEM 激光熔覆三维耦合模型，
模型既考虑了气体作为连续介质的有限单元，又考虑
了粒子作为个体的离散单元，从而可以分析粉末与粉
末、粉末与送粉管壁、粉末与基板的碰撞作用。

2) 采用正交方差分析方法探究了送粉量、载气
量和保护气量对粉末利用率的影响，粉末利用率随载
气量、送粉量和保护气量的增大均先提高后降低，送
粉量对粉末利用率的影响最大，载气量次之，保护气
量影响最小。

3) 本试验条件下获取较高粉末利用率的最优组
合参数为：送粉电压 16 V，载气量 13 L/min，保护气
量 10 L/min。

4) 基于 CFD-DEM 的激光熔覆三维耦合模型对
粉末利用率的仿真结果与粉末收集试验和单道激光
熔覆试验结果误差均在合理范围内，模型准确有效。

参考文献：

[1] 狄飞, 李晶莹, 吴进军, 等. 面向增材制造产品的全生
命周期绿色设计平台研究[J]. 机电产品开发与创新,
2022, 35(1): 20-24.
DI F, LI J Y, WU J J, et al. Research on Full Life Cycle
Green Design Platform for Additive Manufacturing
Products[J]. Development & Innovation of Machinery &
Electrical Products, 2022, 35(1): 20-24.
[2] 陈珂玮, 陈永雄, 孔令超, 等. 环形激光熔覆技术研究
现状及展望[J]. 表面技术, 2022, 51(7): 1-10.
CHEN K W, CHEN Y X, KONG L C, et al. Research
Progress and Perspective in the Annular Laser Cladding
Technology[J]. Surface Technology, 2022, 51(7): 1-10.
[3] 陈冠秀, 安立周, 王硕, 等. 激光熔覆技术的研究概况
及其发展趋势[J]. 机电产品开发与创新, 2022, 35(5):

15-18.
CHEN G X, AN L Z, WANG S, et al. Research Overview
and Development Trend of Laser Cladding Technology
[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical
Products, 2022, 35(5): 15-18.
[4] 杨洗陈. 激光制造中同轴粉末流动量和质量传输[J].
中国激光, 2008, 35(11): 1664-1679.
YANG X C. Momentum and Mass Transferences of Coaxial
Powder Stream in Laser Manufacturing[J]. Chinese Journal
of Lasers, 2008, 35(11): 1664-1679.
[5] 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.
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.
[6] WEN S Y, SHIN Y C, MURTHY J Y, et al. Modeling of
Coaxial Powder Flow for the Laser Direct Deposition
Process[J]. International Journal of Heat and Mass
Transfer, 2009, 52(25/26): 5867-5877.
[7] 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.
[8] 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 De-
position[J]. Journal of Materials Processing Technology,
2017, 249: 118-127.
[9] 郗文超, 宋博学, 王钊, 等. 表面熔覆工艺的成形特征
及粉末有效利用率研究[J]. 表面技术, 2019, 48(3):
211-218.
XI W C, SONG B X, WANG Z, et al. Forming
Characteristics and Powder Effective Utilization Research
of Surface Cladding Process[J]. Surface Technology,
2019, 48(3): 211-218.
[10] 张庆茂, 刘喜明, 孙宁, 等. 送粉式宽带激光熔覆——
搭接基础理论的研究[J]. 金属热处理, 2001, 26(2):
25-28.
ZHANG Q M, LIU X M, SUN N, et al. Fundamental
Investigation on Overlapping Coating Formed by Broad
Beam Powder Feeding Cladding[J]. Heat Treatment of
Metals, 2001, 26(2): 25-28.
[11] 金晓鑫, 乌日开西·艾依提. 多通道激光熔覆喷嘴的粉
末汇聚特性模拟研究[J]. 热加工工艺, 2023, 52(6):
116-119.
JIN X X, AIYITI W. Simulation Study on Convergence
Properties of Powder Flow in Multi-Channel Laser
Cladding Nozzle[J]. Hot Working Technology, 2023,
52(6): 116-119.
[12] 尹千千. 激光熔覆四通道同轴送粉喷嘴外流场仿真与
试验研究[D]. 郑州: 中原工学院, 2021.
YIN Q Q. Simulation and Experimental Study on External
Flow Field of Laser Cladding Four-Channel Coaxial

- Powder Feeding Nozzle[D]. Zhengzhou: Zhongyuan University of Technology, 2021.
- [13] 武锦涛, 陈纪忠, 阳永荣. 模拟颗粒流动的离散元方法及其应用[J]. 现代化工, 2003, 23(4): 56-58.
WU J T, CHEN J Z, YANG Y R. Method and Application of Discrete Element Model for Granular Flow[J]. Modern Chemical Industry, 2003, 23(4): 56-58.
- [14] 唐天琪, 夏靖达, 孙珊珊, 等. 基于 DEM 模型湿颗粒鼓泡流化床传热传质特性模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(11): 3011-3019.
TANG T Q, XIA J D, SUN S S, et al. Investigation on Heat and Mass Transfer Characteristics in Bubbling Fluidized by DEM Numerical Simulation[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(11): 3011-3019.
- [15] 周大鹏, 马学东, 杜昱霖, 等. 喷砂工艺的 EDEM-Fluent 耦合模拟喷嘴结构参数的研究[J]. 表面技术, 2022, 51(1): 192-201.
ZHOU D P, MA X D, DU Y L, et al. Study on EDEM-Fluent Coupling Simulation of Nozzle Structure Parameters in Sandblasting Process[J]. Surface Technology, 2022, 51(1): 192-201.
- [16] 熊威, 谭海兵. 粉末热等静压的离散元-有限元混合模拟[J]. 锻压技术, 2018, 43(10): 103-110.
XIONG W, TAN H B. Simulation on Hot Isostatic Pressing of Power by Discrete Element Method and Finite Element Method[J]. Forging & Stamping Technology, 2018, 43(10): 103-110.
- [17] 任旭东, 汪舟, 卢伟, 等. 基于 FEM-DEM 的空心稳定杆内壁喷丸仿真分析[J]. 表面技术, 2023, 52(1): 410-420.
REN X D, WANG Z, LU W, et al. FEM-DEM Simulation on Inner Wall Shot Peening of Hollow Stabilizer Bar[J]. Surface Technology, 2023, 52(1): 410-420.
- [18] 洪滔, 王志伟, 袁巨龙. 喷丸强化过程的有限元和离散元模拟[J]. 中国机械工程, 2008, 19(11): 1321-1325.
HONG T, WANG Z W, YUAN J L. Numerical Simulation of Shot Peening Process Using Finite Element and Discrete Element Method[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(11): 1321-1325.
- [19] 王代懿, 孙大方, 陈冬华. SPSS 在有交互作用正交试验结果方差分析中的应用[J]. 焦作师范高等专科学校学报, 2021, 37(4): 73-76.
WANG D Y, SUN D F, CHEN D H. Application of SPSS in Variance Analysis of Orthogonal Test Results with Interaction[J]. Journal of Jiaozuo Teachers College, 2021, 37(4): 73-76.
- [20] 褚梦雅, 练国富, 姚明浦, 等. 斜面激光熔覆粉末流场及光粉耦合机理研究[J/OL]. 表面技术: 1-22.
CHU M Y, LIAN G F, YAO M P, et al. Research on Powder Flow Field and Light-Powder Coupling Mechanism of Inclined Plane Laser Cladding[J/OL]. Surface technology: 1-22.
- [21] 郭昊. 激光增材再制造喷嘴粉流集聚性规律分析[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2020.
GUO H. Analysis of Agglomeration Law of Nozzle Powder Flow in Laser Additive Remanufacturing[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2020.
- [22] 陈茹, 虞钢, 何秀丽, 等. 宽带激光熔覆送粉喷嘴的结构设计与粉末流场研究[J]. 中国科学院大学学报, 2019, 36(5): 614-619.
CHEN R, YU G, HE X L, et al. Structure Design of Power Feeding Nozzle for Wide-Band Laser Cladding and Investigation of Powder Flow[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2019, 36(5): 614-619.
- [23] 赵陈敏, 练国富, 冯美艳, 等. 基于激光光斑直径的激光熔覆粉末汇聚特性数值模拟[J]. 激光与红外, 2021, 51(6): 727-733.
ZHAO C M, LIAN G F, FENG M Y, et al. Numerical Simulation of Convergence Characteristics of Laser Cladding Powder Based on Laser Spot Diameters[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(6): 727-733.
- [24] 董敢, 刘继常, 李媛媛. 激光熔覆中同轴送粉气体-粉末流数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(8): 1951-1955.
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.
- [25] 蔡国庆, 刁显锋, 杨芮, 等. 基于 CFD-DEM 的流-固耦合数值建模方法研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(1): 17-32.
CAI G Q, DIAO X F, YANG R, et al. Research Progress of Fluid-Solid Coupling Model Based on CFD-DEM Coupling[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(1): 17-32.