

# 基于计算流体力学-离散单元法的激光粉末床熔融过程中熔池-飞溅耦合动力学行为

曹流 姚权鸿

(广州大学 机械与电气工程学院 广州 510006)

**摘要** 激光粉末床熔融(LPBF)通过逐层加工为精密金属零件创新设计提供了制造自由度,但所伴随的飞溅会污染粉末床、引入冶金缺陷,并影响工艺稳定性。本工作采用基于计算流体力学-离散单元法(CFD-DEM)的开源平台 CFDEM 开展了 LPBF 熔池-飞溅耦合动力学行为数值模拟研究。再现了金属颗粒的三种典型行为(热飞溅、受激光加热作用熔入熔池以及未受激光加热作用掉入熔池),预测了不同工艺参数下的飞溅喷射方向,并与实验结果进行了对比验证。研究了工艺参数对熔池-飞溅耦合动力学行为的影响,结果表明,各工艺参数对热飞溅数目影响的重要性顺序为:粉末厚度>扫描速率>激光功率。本工作的开源代码网址为 <https://github.com/caoliu0706/7-CFD-DEM-LPBF-Molten-Pool-Splatter>。

**关键词** 激光粉末床熔融, 飞溅, 熔池, CFD-DEM, Euler-Lagrange 方法, 数值模拟

中图分类号 TG111.3

文章编号 0412-1961(202×)×-××-×

## Coupled Dynamic Behavior of Molten Pool-Spatter During Laser Powder Bed Fusion Based on Computational Fluid Dynamics-Discrete Element Method

CAO Liu, YAO Quanhong

*School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China*

Correspondent: CAO Liu, Tel: (020)39366930, E-mail: [caoliu@gzhu.edu.cn](mailto:caoliu@gzhu.edu.cn)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.52405348) and Guangdong Provincial Natural Science Foundation (No.2025A1515010876)

Manuscript received 2025-10-27, in revised form 2025-12-29

**ABSTRACT** Laser powder bed fusion (LPBF) offers manufacturing freedom for innovative designs of precision metal parts via layer-by-layer processing. However, the accompanying spatter during manufacturing contaminates the powder bed, introduces metallurgical defects, and compromises overall stability. To address these issues, this study numerically simulates the coupled dynamic behavior of LPBF molten-pool spatter based on the computational fluid dynamics-discrete element method (CFD-DEM) framework implemented the CFDEM open-source platform. The CFD calculation distinguishes between the liquid-metal, solid-metal, and gas phases using the volume of fluid and multiphase models, while the DEM calculation addresses metal particles, accounting for the influence of metal-vapor recoil force on particle motion. Employing a semianalytical CFD-DEM approach, this coupling framework

**资助项目** 国家自然科学基金项目 No52405348 及广东省自然科学基金项目 No.2025A1515010876

**收稿日期** 2025-10-27, **定稿日期** 2025-12-29

**作者简介** 曹流,男,1991年生,博士

**通讯作者** 曹流, [caoliu@gzhu.edu.cn](mailto:caoliu@gzhu.edu.cn), 主要从事材料成形过程数值模拟和基于物理的机器学习研究

**引用格式** 曹流,姚权鸿. 基于计算流体力学-离散单元法的激光粉末床熔融过程中熔池-飞溅耦合动力学行为研究 [J]. 金属学报, 202x, 6x: xx

Cao L, Yao Q H. Coupled dynamic behavior of molten pool-spatter during laser powder bed fusion based on computational fluid dynamics-discrete element method [J]. Acta Metall. Sin., 202x, 6x: XX. DOI: 10.11900/0412.1961.2025.00343

circumvents the limitation imposed by the CFD mesh size. The simulation reproduced three typical behaviors of metal particles (thermal spatter, melting into the molten pool under laser heating, and falling into the molten pool without laser heating) and predicted the spatter-ejection directions under different process parameters. The numerical results were verified through comparisons with the experimental results. Finally, the influence of process parameters on the coupled dynamic behavior of molten-pool spatter was investigated, revealing that powder bed thickness dominantly affects the number of hot spatters, followed by scanning speed and laser power. The open-source code of this paper is available at <https://github.com/caoliu0706/7-CFD-DEM-LPBF-Molten-Pool-Splatter>.

**KEYWORDS** laser powder bed fusion, spatter, molten pool, CFD-DEM, Euler-Lagrange method, numerical simulation

激光粉末床熔融(laser powder bed fusion, LPBF)工艺能够直接制造具有高度复杂几何特征与优异综合性能的精密金属零件,其通过逐层精确加工,为实现轻量化、功能集成化的零部件创新设计提供了前所未有的制造自由度<sup>[1]</sup>。然而,LPBF 成形过程往往伴随着飞溅,可能导致粉末床污染、冶金缺陷引入以及工艺稳定性下降等危害。飞溅形成的主要机理为:当高能量激光束照射粉末床时,光斑中心的金属粉末急速熔化、气化,产生高温、高压的金属蒸气流,一方面,当金属蒸气反冲压力超过熔池表面张力与重力的共同作用时,熔池内的液态金属受到剧烈挤压而发生溅射,形成液滴飞溅;另一方面,在激光和金属蒸气的加热作用下,金属颗粒受热但未熔化,进而在金属蒸气反冲力的影响下发生喷射,形成热飞溅;另外,喷射而出的金属蒸气因 Bernoulli 效应在熔池周围引发环形气流,进而将熔池周围的金属颗粒吹飞,形成粉末飞溅<sup>[2]</sup>。可见,探明熔池-飞溅耦合动力学行为规律,对有效调控 LPBF 飞溅具有重要意义。

为直接观测和记录 LPBF 成形过程中熔池-飞溅耦合动力学行为,已有学者通过搭建 X 射线成像系统<sup>[3]</sup>、光学高速成像系统<sup>[4]</sup>以及声学数据采集系统<sup>[5]</sup>等实验设备,重点研究了激光<sup>[6]</sup>、保护气体<sup>[7]</sup>以及粉床<sup>[8]</sup>对 LPBF 飞溅的影响。例如,Guo 等<sup>[9]</sup>借助高速原位 X 射线成像手段,研究了 LPBF 成形 Al-Fe-Zr 合金过程中飞溅与熔池凹陷的动态联系,发现了新的飞溅形成机制:金属蒸气反冲压力、Kelvin-Helmholtz 不稳定性和 Marangoni 对流共同作用于熔池小孔后缘,从而形成后缘液滴飞溅。该研究<sup>[9]</sup>进一步指出,采用较高的扫描速率和适当的激光功率可有效降低有害飞溅的产生频率。已有研究为揭示熔池-飞溅耦合动力学行为规律提供了直接依据,对认识飞溅形成机理起到了重要作用,但受限于实验表征手段,目前难以定量获取高温、高速、高压环境下 LPBF 熔池和飞溅的三维状态信息。

近年来,Euler-Lagrange 法<sup>[10,11]</sup>作为一类适用于描述连续流体相与离散颗粒相耦合作用的数值模拟方法,已被逐渐用于预测 LPBF 熔池-飞溅的耦合动力学行为<sup>[12]</sup>。其中,计算流体力学-离散单元法(computational fluid dynamics-discrete element method, CFD-DEM)<sup>[13,14]</sup>作为 Euler-Lagrange 法的典型代表,受到的重视程度最高。LPBF 熔池-飞溅耦合动力学行为的 CFD-DEM 研究主要分为两个阶段:第一阶段,未考虑熔池,只考虑气体和金属颗粒,通过施加高速气流边界条件以等效金属蒸气的作用,主要用于分析粉末飞溅、粉床剥蚀现象以及保护气体的作用<sup>[15,16]</sup>;第二阶段,综合考虑熔池-气体-金属颗粒的耦合作用,完整地再金属颗粒的熔化、熔池的形成/凝固、粉末/液滴飞溅的产生/运动等过程,能够系统描述熔池-飞溅耦合动力学行为<sup>[17,18]</sup>。例如,Zhang 等<sup>[19]</sup>借助 CFD-DEM 方法,实现了 LPBF 熔池流动与金属颗粒运动的双向耦合,发现 70%的热飞溅源自金属蒸气射流区,并提出了缺陷生成判据,为改善 LPBF 零件质量的一致性提供了宝贵的理论指导和仿真工具。综上所述,CFD-DEM 方法是定量获取极端环境下 LPBF 熔池与飞溅三维状态信息的有效手段,但目前针对工艺参数对熔池-飞溅耦合动力学行为的影响缺乏系统性研究。

为此,本工作采用基于 CFD-DEM 的 CFDEM 开源平台<sup>[20]</sup>,开展了 LPBF 熔池-飞溅耦合动力学行为研究,重点关注了飞溅的产生/运动及其与熔池状态的关联,分别研究了激光功率、扫描速率、粉床厚度等工艺参数对熔池-飞溅耦合动力学行为的影响规律,以期科学调控 LPBF 飞溅提供理论和数据支撑。

## 1 物理模型及数值求解

### 1.1 流体相物理模型

流体相的物理行为是在连续体假设下进行描述的。流体相包括金属相(金属液相和金属固相)和气相,

其中, 金属相与气相通过流体体积(volume of fluid, VOF)模型进行区分, 金属液相与金属固相通过混合相模型进行区分, VOF 方程表达式如下<sup>[21]</sup>:

$$\frac{\partial(\theta\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (\theta\alpha\mathbf{U}) = 0 \quad (1)$$

式中,  $\theta$  为流体相在单元中所占体积比,  $\alpha$  为金属相在流体相中所占体积比,  $t$  为时间,  $\mathbf{U}$  为流体相速度。质量守恒方程表达式如下:

$$\frac{\partial(\theta\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\theta\rho\mathbf{U}) = 0 \quad (2)$$

式中,  $\rho$  为流体相密度。

动量守恒方程表达式如下:

$$\frac{\partial(\theta\rho\mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\theta\rho\mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = \nabla \cdot [\mu(\nabla\mathbf{U} + \nabla\mathbf{U}^T)] - \nabla p + \rho\mathbf{g} + \mathbf{F}_{\text{interface}} - \rho K_c \frac{(1-f_{\text{liquid}})^2}{f_{\text{liquid}}^3 + C_K} \mathbf{U} - \mathbf{F}_{\text{particle}} \quad (3)$$

式中,  $\mu$  为流体相黏度,  $p$  为流体相压强,  $\mathbf{g}$  为重力加速度,  $\mathbf{F}_{\text{interface}}$  为界面作用力,  $K_c$  和  $C_K$  为糊状区拖拽系数,  $f_{\text{liquid}}$  为金属液相率(体积分数),  $\mathbf{F}_{\text{particle}}$  为颗粒对流体作用力。式(3)右端各项分别代表影响因素为黏性、压强、重力、界面力、糊状区拖拽力和颗粒作用力。需要说明的是, 为保证流场计算的稳定性, 本工作未直接预测金属蒸气, 而是人为施加界面反冲力以表征金属蒸气对熔池运动的影响。 $\mathbf{F}_{\text{interface}}$  和  $\mathbf{F}_{\text{particle}}$  表达式分别为:

$$\mathbf{F}_{\text{interface}} = \left\{ \sigma \kappa \mathbf{n} + \frac{d\sigma}{dT} [\nabla T - \mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \nabla T)] + 0.54 p_0 \exp \left[ \frac{mL_{\text{vapour}}}{k_B} \left( \frac{1}{T_{\text{vapour}}} - \frac{1}{T} \right) \right] \mathbf{n} \right\} |\nabla \alpha| \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_{\text{particle}} = \frac{1}{\theta V_{\text{cell}}} \sum_{i=1}^n (\mathbf{F}_{\text{drag}, i} + \mathbf{F}_{\text{Magnus}, i} + \mathbf{F}_{\text{virtual}, i}) \quad (5)$$

式中,  $\sigma$  为表面张力系数,  $\kappa$  为界面曲率;  $\mathbf{n}$  为界面单位法向量,  $T$  为流体相温度,  $d\sigma/dT$  为表面张力随温度变化系数,  $p_0$  为环境压强,  $m$  为金属分子质量,  $L_{\text{vapour}}$  为金属气化潜热,  $T_{\text{vapour}}$  为金属气化温度,  $k_B$  为 Boltzmann 常数,  $V_{\text{cell}}$  为单元体积,  $n$  为单元所包含的颗粒个数,  $\mathbf{F}_{\text{drag}, i}$  为颗粒拖拽作用力,  $\mathbf{F}_{\text{Magnus}, i}$  为 Magnus 力,  $\mathbf{F}_{\text{virtual}, i}$  为虚拟质量力。

能量守恒方程表达式如下:

$$\frac{\partial(\theta\rho c_e T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\theta\rho c_e T\mathbf{U}) = \nabla \cdot (\theta k \nabla T) - Q_{\text{interface}} + \theta |\nabla \alpha| Q_{\text{laser}} - Q_{\text{particle}} \quad (6)$$

式中,  $c_e$  为流体相等效比热容,  $k$  为流体相导热系数,  $Q_{\text{interface}}$  为界面换热量,  $Q_{\text{laser}}$  为激光热源项,  $Q_{\text{particle}}$  为颗粒与流体相换热量。式(6)右端各项分别代表影响因素为热传导、界面散热、激光加热作用以及与颗粒间换热。 $Q_{\text{interface}}$ 、 $Q_{\text{laser}}$  和  $Q_{\text{particle}}$  的表达式分别为:

$$Q_{\text{interface}} = \theta |\nabla \alpha| \left\{ h_{\text{con}} (T - T_{\text{con}}) + \sigma_s \varepsilon (T^4 - T_{\text{rad}}^4) + 0.82 \frac{mL_{\text{vapour}}}{\sqrt{2\pi m k_B T}} p_0 \exp \left[ \frac{mL_{\text{vapour}}}{k_B} \left( \frac{1}{T_{\text{vapour}}} - \frac{1}{T} \right) \right] \right\} \quad (7)$$

$$Q_{\text{laser}} = \frac{2\eta P_{\text{laser}}}{\pi R^2} \exp\left(-2 \frac{(x-x_0-U_{\text{laser}}t)^2 + (y-y_0)^2}{R^2}\right) \quad (8)$$

$$Q_{\text{particle}} = \frac{I}{V_{\text{cell}}} \sum_{i=1}^n A_i \left[ \sigma_s \varepsilon (T_i^4 - \bar{T}^4) + h_i (T_i - \bar{T}) \right] \quad (9)$$

式中,  $h_{\text{con}}$  为界面对流换热系数,  $T_{\text{con}}$  为外界对流温度,  $\sigma_s$  为 Stefan-Boltzmann 常数,  $\varepsilon$  为辐射率,  $T_{\text{rad}}$  为外界辐射温度,  $\eta$  为金属的激光吸收率,  $P_{\text{laser}}$  为激光功率,  $R$  为光斑半径,  $x$ 、 $y$  为单元中心的水平坐标,  $x_0$ 、 $y_0$  为光斑中心的初始水平坐标,  $U_{\text{laser}}$  为激光扫描速度,  $A_i$  为颗粒表面积,  $T_i$  为颗粒温度,  $\bar{T}$  为背景流体的温度;  $h_i$  为颗粒与流体间的对流换热系数。

## 1.2 颗粒相物理模型

颗粒相的物理行为是在离散体假设下进行描述的。本工作采用的线动量守恒方程和角动量守恒方程的表达式分别为:

$$m_i \frac{dU_i}{dt} = F_{\text{buoyant},i} + F_{\text{interface},i} + F_{\text{vapour},i} + m_i g + F_{\text{fluid},i} + F_{\text{contact},i} \quad (10)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = T_{\text{contact},i} \quad (11)$$

式中,  $m_i$  为颗粒质量,  $U_i$  为颗粒速度,  $F_{\text{buoyant},i}$  为浮力对颗粒的作用力,  $F_{\text{interface},i}$  为熔池界面对颗粒的作用力(表面张力和 Marangoni 力),  $F_{\text{vapour},i}$  为金属蒸气对颗粒的作用力,  $F_{\text{fluid},i}$  为流体对颗粒的作用力(拖拽力、Magnus 力和虚拟质量力),  $F_{\text{contact},i}$  为颗粒间的相互作用,  $I_i$  为颗粒转动惯量,  $\omega_i$  为颗粒角速度,  $T_{\text{contact},i}$  为颗粒受到的转动力矩。式(10)右端各项分别表征浮力、熔池界面、金属蒸气、重力、流体以及周围颗粒对颗粒运动的影响。需要说明的是, 由于流体相物理模型不能直接预测金属蒸气的形成及运动, 式(10)中通过对颗粒单独施加金属蒸气反冲力, 以间接表征金属蒸气对颗粒运动的影响。式(10)和(11)中各项的具体表达式及物理含义可参考文献[17,22]。

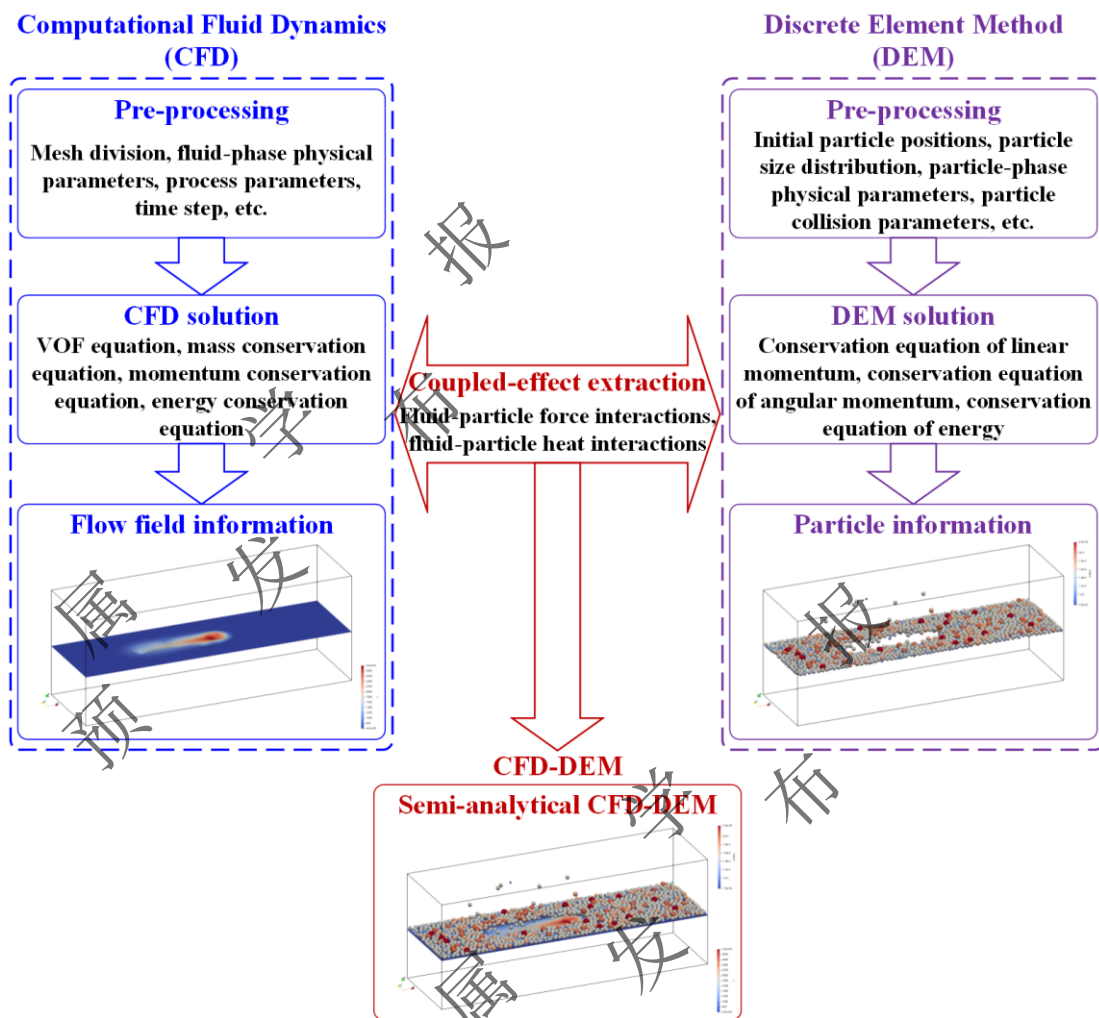
能量守恒方程表达式如下:

$$m_i c_{e,i} \frac{dT_i}{dt} = Q_{\text{convection},i} + Q_{\text{radiation},i} + Q_{\text{laser},i} + Q_{\text{contact},i} \quad (12)$$

式中,  $c_{e,i}$  为颗粒等效比热容,  $Q_{\text{convection},i}$  为对流换热量,  $Q_{\text{radiation},i}$  为辐射换热量,  $Q_{\text{laser},i}$  为激光的加热作用项,  $Q_{\text{contact},i}$  为颗粒间的换热量。其右端项分别表征对流、辐射、激光、周围颗粒对颗粒换热的影响。式(12)中各项的具体表达式及物理含义可参考文献[17]。

## 1.3 CFD-DEM 耦合方法

基于上述的流体相和颗粒相物理模型, 本工作开展了 LPBF 熔池-飞溅耦合动力学行为的数值模拟研究。所采用的 CFD-DEM 耦合平台为 CFDEM<sup>[20]</sup>, 其中, 描述离散颗粒相运动的平台为开源离散单元法框架 LIGGGHTS<sup>[23]</sup>, 描述连续流体相运动的平台为开源有限体积法框架 OpenFOAM<sup>[24]</sup>。图 1 为 LPBF 熔池-飞溅耦合动力学行为仿真流程。为划分精细的流场网格, 以准确描述熔池动力学行为, 本工作采用 Wang 等<sup>[25]</sup>提出的半解析式 CFD-DEM 方法, 即利用可放大作用区域的核函数来收集颗粒附近的流场信息, 从而避免了流场网格必须大于 3 倍颗粒直径的限制。为描述颗粒受热熔化的过程, 当颗粒温度超过金属熔点后, 颗粒所在单元将转变为流体单元, 原先的颗粒将被撤销。另外, 本工作所采用的计算资源为 6\*Intel Xeon Gold 5120 CPU。本工作的开源代码网址为 <https://github.com/caoliu0706/7-CFD-DEM-LPBF-Molten-Pool-Splatter>。



Color online

图 1 LPBF 熔池-飞溅耦合动力学行为仿真流程

Fig.1 Simulation process for the coupled dynamic behavior of LPBF molten pool-spatter (VOF—volume of fluid)

## 2 结果与讨论

### 2.1 参数设置

本工作选择的 LPBF 成形材料为 316L 不锈钢, 保护气体为 Ar 气。表 1<sup>[17]</sup>为 DEM 计算所需的材料参数。其他参数及要求包括: 颗粒直径分布符合正态分布, 粒径分布范围 15~45  $\mu\text{m}$ , 平均粒径 30  $\mu\text{m}$ ; 时间步长  $2.5 \times 10^{-8}$  s; 重力加速度(0, 0,  $-9.81$ )  $\text{m/s}^2$ 。表 2<sup>[21]</sup>为 CFD 计算所需的材料参数, Ar 气的物性参数参见文献[26]。其他参数包括: 激光半径  $2.5 \times 10^{-5}$  m; 初始温度为 600 K; 计算域尺寸( $2 \times 10^{-3}$ ,  $6 \times 10^{-4}$ ,  $8 \times 10^{-4}$ ) m; 网格尺寸  $2.8 \times 10^{-5}$  m; 时间步长  $5 \times 10^{-10}$  s。

表 1 DEM 计算所需的材料参数<sup>[17]</sup>Table 1 Material parameters required for DEM calculation<sup>[17]</sup>

| Parameter                  | Value           | Unit                           |
|----------------------------|-----------------|--------------------------------|
| Young's modulus            | $5 \times 10^7$ | Pa                             |
| Poisson's ratio            | 0.45            | —                              |
| Coefficient of restitution | 0.1             | —                              |
| Coefficient of friction    | 0.5             | —                              |
| Coefficient of wear        | 1               | —                              |
| Cohesive energy density    | $1 \times 10^6$ | $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$ |

表 2 CFD 计算所需的材料参数<sup>[21]</sup>Table 2 Material parameters required for CFD calculation<sup>[21]</sup>

| Parameter                              | Value               | Unit                                |
|----------------------------------------|---------------------|-------------------------------------|
| Surface tension coefficient            | 1.6                 | N·m <sup>-1</sup>                   |
| Marangoni coefficient                  | $-8 \times 10^{-4}$ | N/(m·K)                             |
| Dynamic viscosity                      | 0.00345             | Pa·s                                |
| Density                                | 7980                | kg·m <sup>-3</sup>                  |
| Thermal conductivity of liquid phase   | 35.845              | W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>  |
| Thermal conductivity of solid phase    | 34.87               | W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>  |
| Specific heat capacity of liquid phase | 649.225             | J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> |
| Specific heat capacity of solid-phase  | 644.35              | J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> |
| Solidus temperature                    | 1658                | K                                   |
| Liquidus temperature                   | 1723                | K                                   |
| Vaporization temperature               | 3090                | K                                   |
| Latent heat of vaporization            | $7.45 \times 10^6$  | J·kg <sup>-1</sup>                  |
| Latent heat of melting                 | $2.7 \times 10^5$   | J·kg <sup>-1</sup>                  |
| Molar mass                             | 0.05599             | kg·mol <sup>-1</sup>                |
| Laser absorption coefficient           | 0.6                 | —                                   |

为系统性研究工艺参数对 LPBF 熔池-飞溅耦合动力学行为的影响,表 3 给出了不同工艺参数下的仿真方案,所涉及的具体工艺参数有激光功率、扫描速率以及粉末床厚度。另外,所有计算方案的激光作用起点均为 $(5 \times 10^{-4}, 0)$  m, 终点均为 $(1.5 \times 10^{-3}, 0)$  m, 激光扫描方向均为  $X$  正向。

表 3 不同工艺参数下的仿真方案

Table 3 Simulation schemes under different process parameters

| Simulation scheme | Laser power / W | Scanning speed / (m·s <sup>-1</sup> ) | Powder bed thickness / $\mu$ m |
|-------------------|-----------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| 1                 | 200             | 1.0                                   | 30                             |
| 2                 | 300             | 1.0                                   | 30                             |
| 3                 | 400             | 1.0                                   | 30                             |
| 4                 | 100             | 0.5                                   | 30                             |
| 5                 | 200             | 0.5                                   | 30                             |
| 6                 | 300             | 0.5                                   | 30                             |
| 7                 | 50              | 0.1                                   | 30                             |
| 8                 | 100             | 0.1                                   | 30                             |
| 9                 | 200             | 1.0                                   | 50                             |
| 10                | 200             | 1.0                                   | 70                             |

## 2.2 熔池-飞溅耦合动力学行为分析

图 2 为方案 1 下不同时刻的金属相-气相界面以及金属颗粒分布仿真结果。可见,当激光束作用于粉床后,金属颗粒和基板受热熔化,产生熔池,与此同时,金属颗粒在气化作用下形成飞溅;随着激光束的移动,粉床中形成一道空白区域,所消失的金属颗粒一部分成为了飞溅,另一部分并入熔池形成了熔道。图 3 给出了方案 1 下金属颗粒的三种典型行为。这三种行为分别为:(1) 金属颗粒在气化作用下受到反冲力,形成热飞溅(图 3a1~a3);(2) 金属颗粒受激光的直接加热作用,熔入熔池(图 3b1~b3);(3) 金属颗粒虽然未受到激光的直接加热作用,但在重力作用下掉入熔池(图 3c1~c3)。

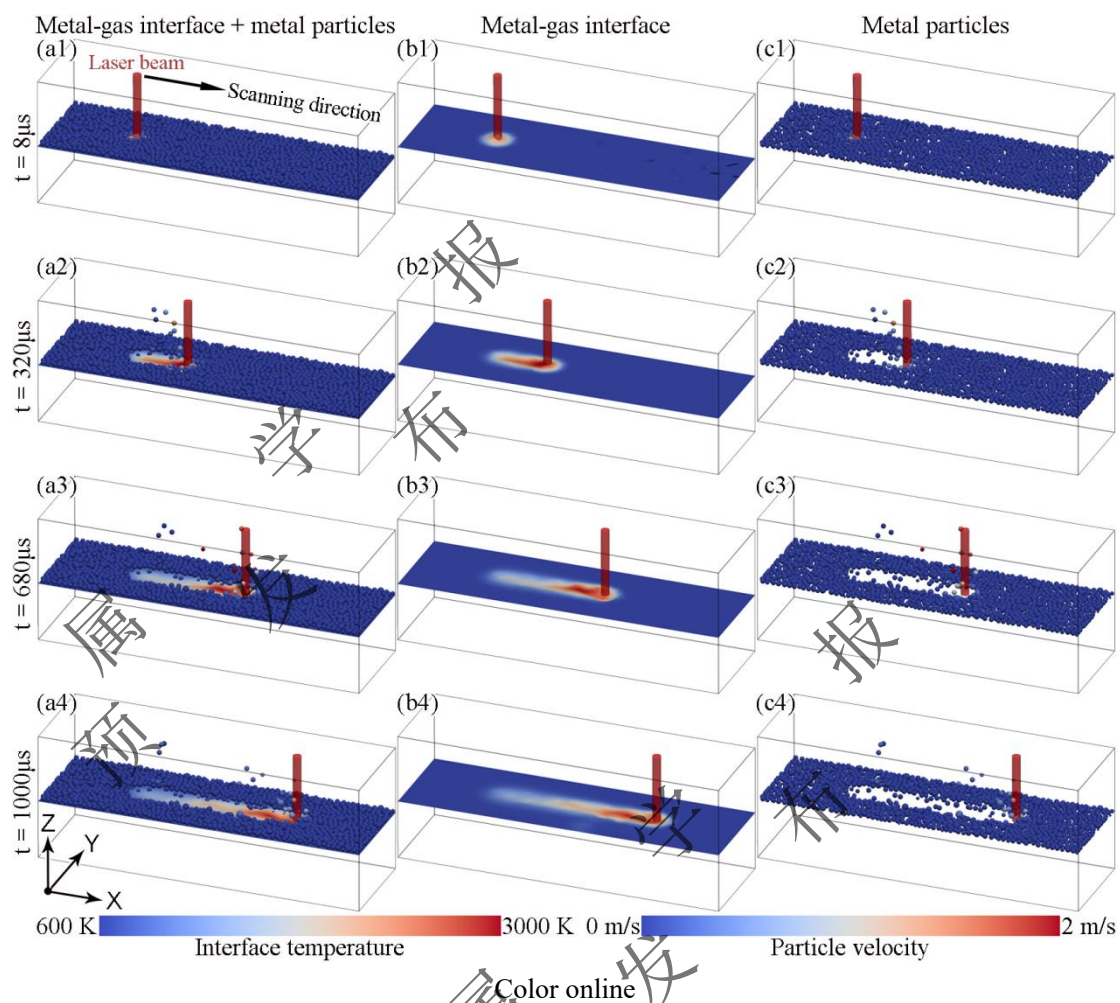


图2 方案1下不同时刻的金属相-气相界面和金属颗粒分布、金属相-气相界面以及金属颗粒分布  
 Fig.2 Metal-gas interface and metal particle distribution (a1–a4), metal-gas interface (b1–b4), and metal particle distribution (c1–c4) at different times under Scheme 1 ( $t$ —time)

(a1–c1)  $t = 8 \mu\text{s}$       (a2–c2)  $t = 320 \mu\text{s}$       (a3–c3)  $t = 680 \mu\text{s}$       (a4–c4)  $t = 1000 \mu\text{s}$

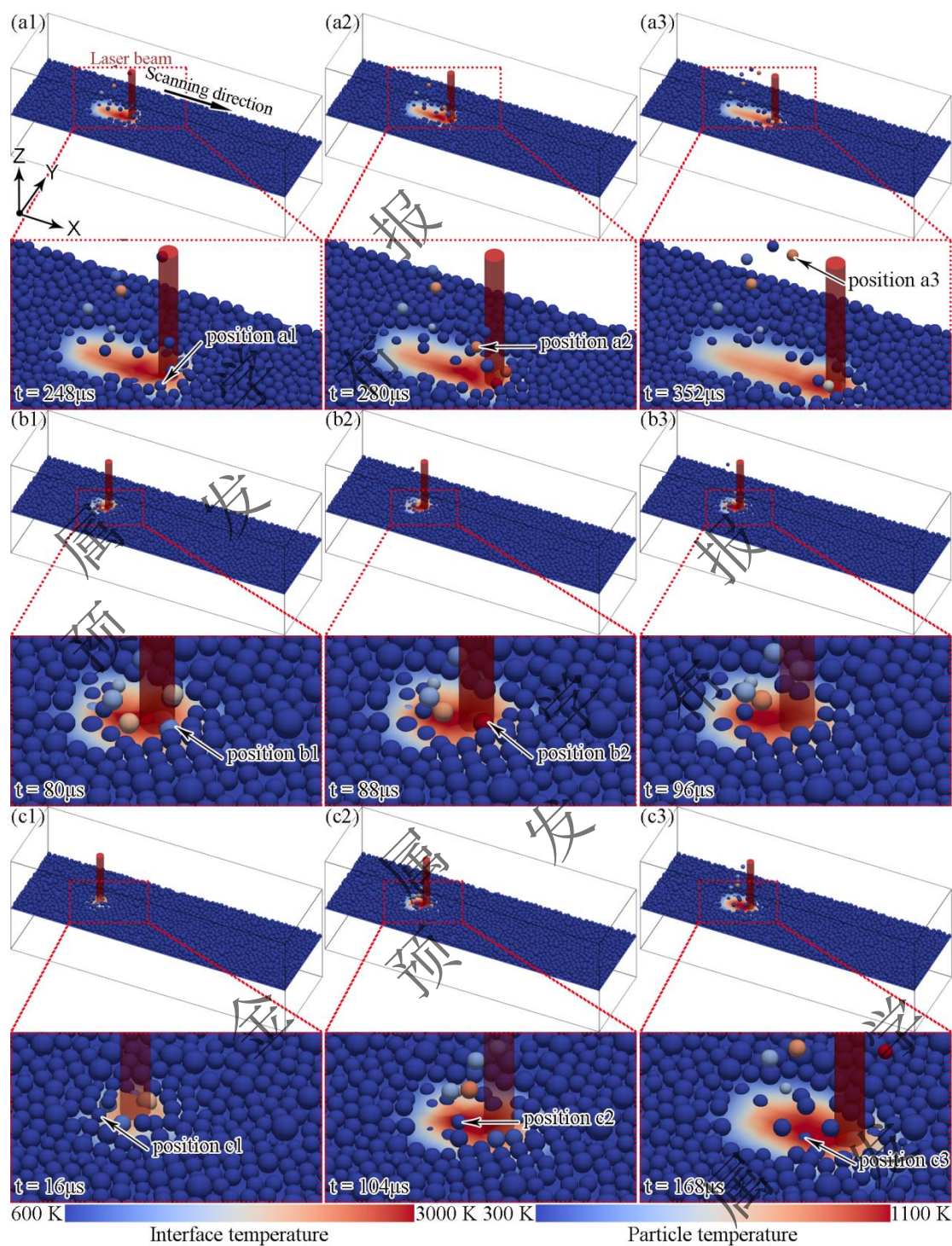


图3 方案1下金属颗粒的三种典型行为：热飞溅，金属颗粒受激光加热作用熔入熔池，及金属颗粒未受激光加热作用掉入熔池

Fig.3 Typical behaviors of metal particles at different times under Scheme 1 and corresponding enlarged views (Positions a1–a3 refer to the positions of hot spatter, positions b1 and b2 refer to the positions of metal particle melted into the molten pool, positions c1–c3 refer to the positions of metal particle falling into the molten pool)

(a1–a3) hot spatter caused by vaporization-induced recoil force

(b1–b3) metal particle melted into the molten pool due to laser heating

(c1–c3) metal particle falling into the molten pool without laser heating

为验证仿真结果的准确性，将不同工艺参数下的仿真结果与实验结果<sup>[27]</sup>进行对比，结果如图4所示。

由对比结果可知,在各工艺参数下仿真所获得的飞溅喷射方向与实验中的飞溅喷射方向基本一致,故本工作仿真结果的准确性得到了验证。飞溅喷射方向受工艺参数的影响的原因是,不同工艺参数下熔池形貌和激光作用位置存在差异,进而使得金属蒸气的喷射方向存在差异,从而影响飞溅喷射方向。在方案7(激光功率 50 W、扫描速率 0.1 m/s)下,由于线能量密度(其值为激光功率 / 扫描速率)较大,单位长度上施加的能量较多,熔池前方的金属颗粒得以快速熔化并融入熔池,使得金属蒸气的喷射方向主要集中在熔池前方,进而形成向前喷射的飞溅(图 4c1 和 c2)。在方案1(激光功率 200 W、扫描速率 1 m/s)和方案4(激光功率 100 W、扫描速率 0.5 m/s)下,由于线能量密度较小,单位长度上施加的能量较少,熔池前方金属颗粒的熔化速率较慢,使得金属蒸气的喷射方向主要集中在熔池上方或者后方,进而形成向上(图 4b1 和 b2)或者向后(图 4a1 和 a2)喷射的飞溅。

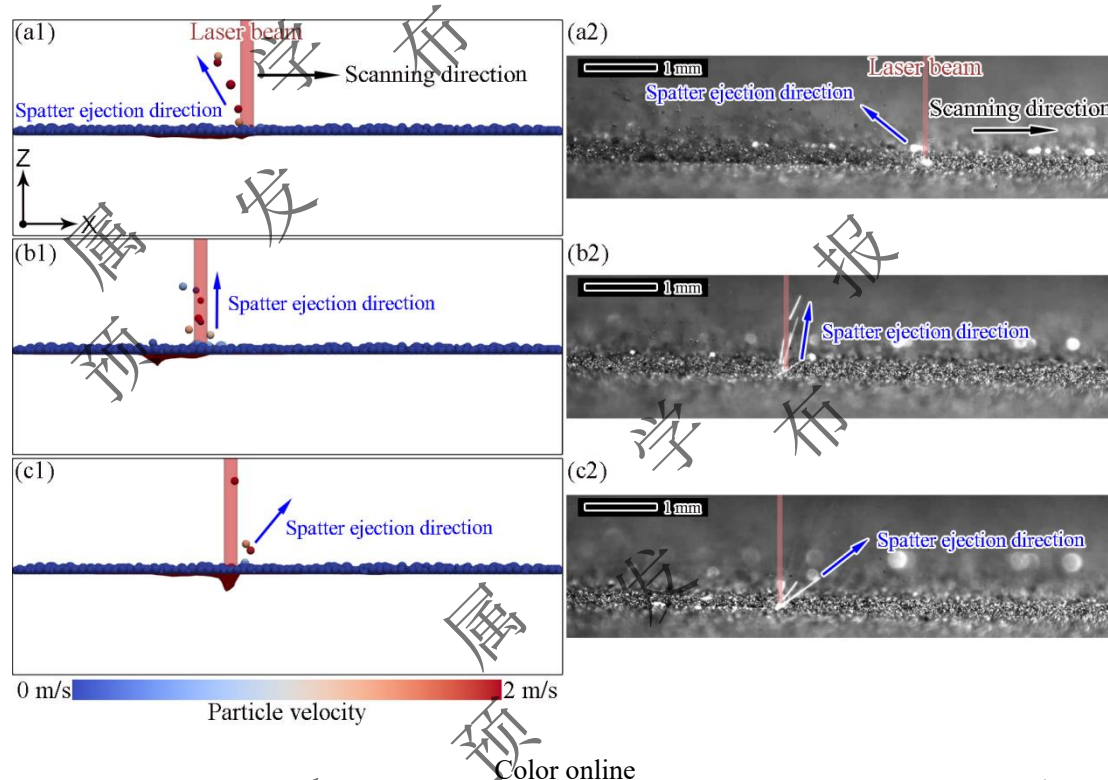


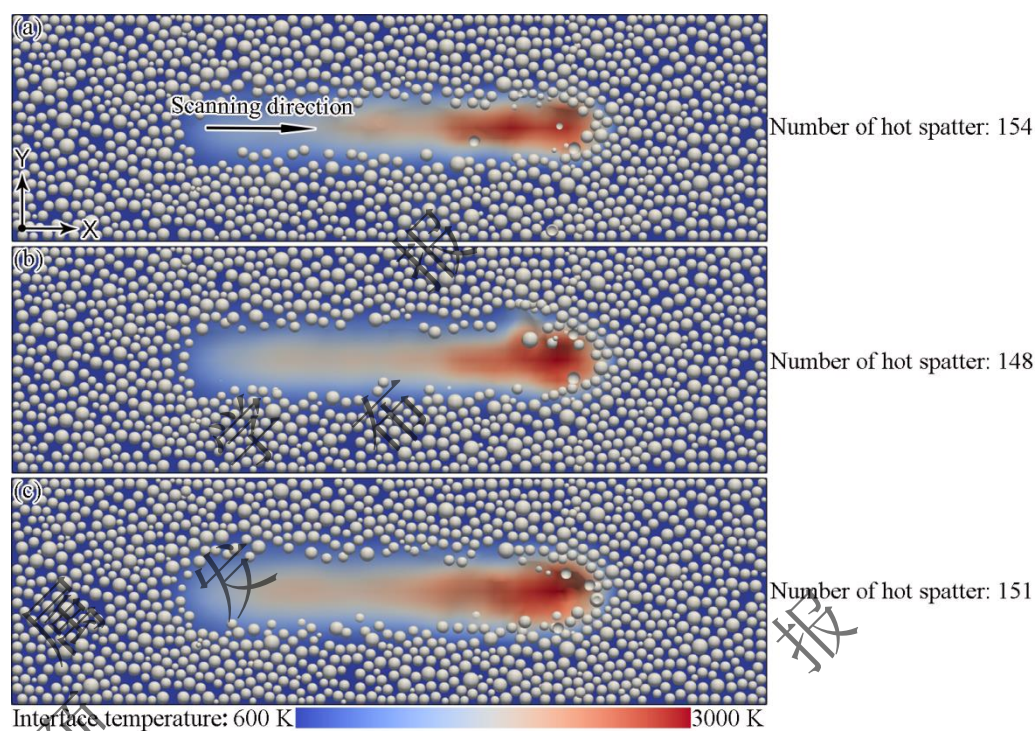
图4 不同工艺参数下飞溅喷射方向的仿真结果与实验结果<sup>[27]</sup>

Fig.4 Simulation results (a1–c1) and experimental results<sup>[27]</sup> (a2–c2) of spatter ejection direction under different time, lase powers, and scanning speeds

- |                                             |                                                 |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| (a1) 352 $\mu$ s, 200 W, 1 m/s (Scheme 1)   | (a2) 0.007 s, 200 W, 1 m/s <sup>[27]</sup>      |
| (b1) 368 $\mu$ s, 100 W, 0.5 m/s (Scheme 4) | (b2) 0.006625 s, 100 W, 0.5 m/s <sup>[27]</sup> |
| (c1) 2936 $\mu$ s, 50 W, 0.1 m/s (Scheme 7) | (c2) 0.02025 s, 50 W, 0.1 m/s <sup>[27]</sup>   |

### 2.3 工艺参数对熔池-飞溅耦合动力学行为的影响

为研究激光功率对熔池-飞溅耦合动力学行为的影响,图5给出了不同激光功率下的熔池-飞溅仿真结果。由图可知,随着激光功率的提高,熔池尺寸增大,熔池温度升高,但统计出的热飞溅数目基本不变。其原因是,激光功率虽然能影响熔池尺寸及温度,但无法影响激光作用粉床的时间,所以热飞溅金属颗粒的数目基本不变。需要说明的是,本工作研究的飞溅类型为热飞溅。



Color online

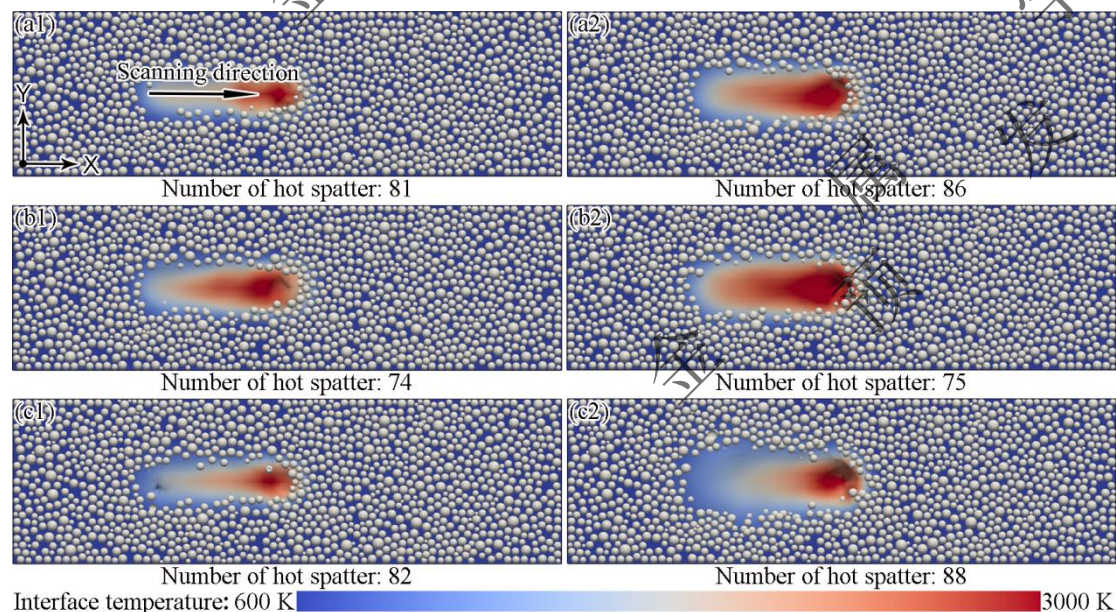
图 5 不同激光功率下扫描 1000  $\mu\text{m}$  后粉床颗粒分布以及热飞溅数目Fig.5 Particle distributions in the powder bed and numbers of hot spatter after 1000  $\mu\text{m}$  of laser scanning under different laser powers

(a) 200 W (Scheme 1)

(b) 300 W (Scheme 2)

(c) 400 W (Scheme 3)

为研究扫描速率对熔池-飞溅耦合动力学行为的影响,图6给出了不同扫描速率下的熔池-飞溅仿真结果。需要说明的是,由于粉床的平面尺寸为  $2000\mu\text{m} \times 600\mu\text{m}$ ,初始的颗粒数目仅为 1302,且所选取的激光扫描长度仅为  $500\mu\text{m}$ ,因此图6中三组方案下热飞溅数目相差不大,但均呈现相同趋势(热飞溅数量略微增加),故认为仿真结果仍具备一定的参考性。由图6可知,随着扫描速率的减小,熔池尺寸增大,熔池温度增高,而且统计出的热飞溅数目出现一定程度的增加。这是由于扫描速率不仅能影响熔池尺寸及温度,也能影响激光作用于粉床的时间,从而使得受影响的金属颗粒增多。



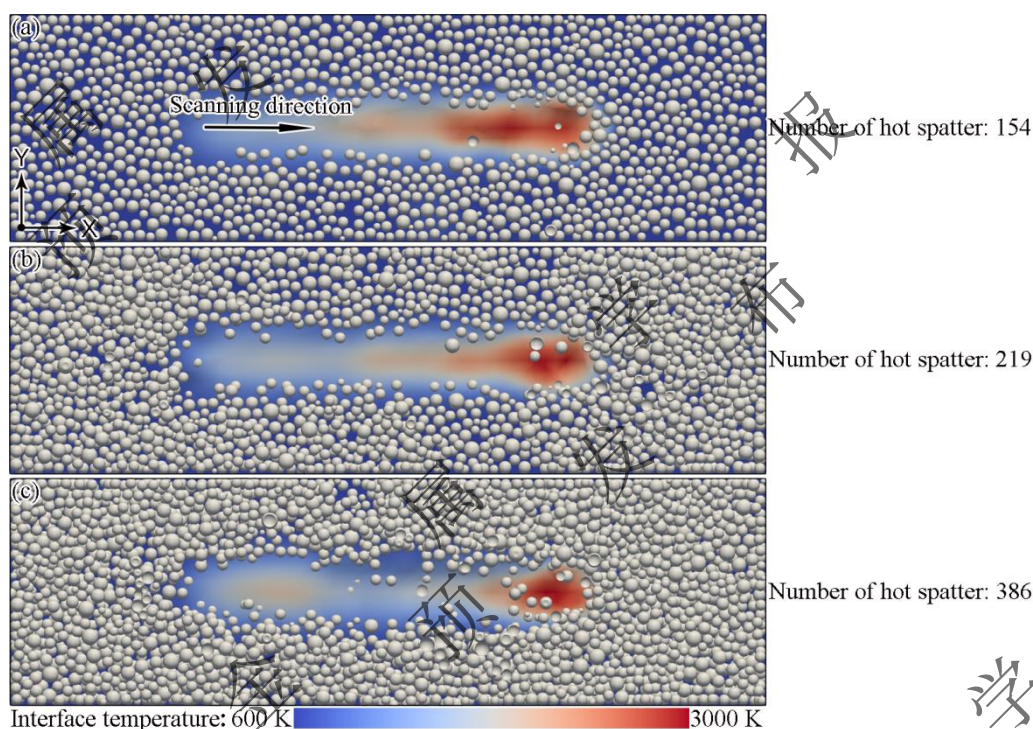
Color online

图6 不同工艺参数下激光扫描 500  $\mu\text{m}$  后粉床颗粒分布以及热飞溅数目

Fig.6 Particle distributions in the powder bed and numbers of hot spatter after 500  $\mu\text{m}$  of laser scanning under different laser powers scanning speeds (Laser scanning length was selected as 500  $\mu\text{m}$  to avoid excessive computation time for Scheme 8)

- (a1) 200 W, 1 m/s (Scheme 1)      (a2) 200 W, 0.5 m/s (Scheme 5)  
 (b1) 300 W, 1 m/s (Scheme 2)      (b2) 300 W, 0.5 m/s (Scheme 6)  
 (c1) 100 W, 0.5 m/s (Scheme 4)      (c2) 100 W, 0.1 m/s (Scheme 8)

为研究粉床厚度对熔池-飞溅耦合动力学行为的影响, 对不同粉床厚度下熔池-飞溅进行仿真, 结果如图7所示。由对比结果可知, 随着粉床厚度的增大, 熔池尺寸减小, 熔池温度降低, 但统计出的热飞溅数目出现明显的增加。其原因是, 当粉床厚度较大时, 激光所作用的金属颗粒明显增多, 进而使得热飞溅数目增加; 与此同时, 热飞溅携带的能量增多, 熔池所获得的能量减少, 从而使得熔池尺寸减小, 熔池温度降低。



Color online

图7 不同粉床厚度下激光扫描 1000  $\mu\text{m}$  后粉床颗粒分布以及热飞溅数目

Fig.7 Particle distributions in the powder bed and numbers of hot spatter after 1000  $\mu\text{m}$  of laser scanning under different powder bed thicknesses

- (a) 30  $\mu\text{m}$  (Scheme 1)      (b) 50  $\mu\text{m}$  (Scheme 9)      (c) 70  $\mu\text{m}$  (Scheme 10)

表4列出了不同工艺参数对热飞溅的影响。由不同工艺参数下的热飞溅数目变化率可知, 各工艺参数对热飞溅数目影响的重要性顺序为: 粉床厚度>扫描速率>激光功率。

表4 不同工艺参数对热飞溅的影响

Table 4 Effects of different process parameters on hot spatter

| Process parameter    | Change of parameter                                                            | Change of hot spatter number               | Rate of change in hot spatter number |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------|
| Powder bed thickness | 30 $\mu\text{m}$ $\rightarrow$ 50 $\mu\text{m}$ $\rightarrow$ 60 $\mu\text{m}$ | 154 $\rightarrow$ 219 $\rightarrow$ 386    | 59.3%                                |
| Scanning speed       | 0.5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ $\rightarrow$ 1 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  | 86 $\rightarrow$ 81<br>75 $\rightarrow$ 74 | 4.65%                                |

88→82

|             |                   |             |       |
|-------------|-------------------|-------------|-------|
| Laser power | 200 W→300 W→400 W | 154→148→151 | 0.95% |
|-------------|-------------------|-------------|-------|

Note: Rate of change in hot spatter number equals to absolute value of the rate of change in hot spatter number under typical process parameter increments

需要说明的是, 由于本工作通过对颗粒单独施加金属蒸气反冲力, 以间接表征金属蒸气的影响, 而并未直接预测金属蒸气的形成及运动, 故本工作针对的飞溅类型为热飞溅, 且无法描述粉床剥蚀。本工作研究暂时只支持对 LPBF 热飞溅的工艺调控, 无法支持粉末飞溅及粉床剥蚀场景。后续研究将侧重于直接预测金属蒸气。同时, 后续将以飞溅数量、速度等关键参数为依据, 系统验证模型准确性。

### 3 结论

(1) 基于 CFDEM 开源平台开展了 LPBF 熔池-飞溅耦合动力学行为数值模拟研究, 其中, CFD 计算针对金属液相、金属固相和气相, 借助 VOF 模型和混合相模型进行相区分; DEM 计算针对金属颗粒, 考虑了金属蒸气反冲力对颗粒运动的影响; 耦合方法采用半解析式 CFD-DEM 方法, 以避免对流场网格尺寸的限制。本工作的开源代码网址为 <https://github.com/caoliu0706/7-CFD-DEM-LPBF-Molten-Pool-Splatter>。

(2) 通过仿真再现了金属颗粒的三种典型行为: 热飞溅、受激光加热作用熔入熔池以及未受激光加热作用掉入熔池。预测了不同工艺参数下的飞溅喷射方向, 各工艺参数情形下仿真所获得的飞溅喷射方向与实验中的飞溅喷射方向基本一致。

(3) 研究了工艺参数对熔池-飞溅耦合动力学行为的影响, 基于本工作的仿真结果, 各工艺参数对热飞溅数目影响的重要性顺序为: 粉床厚度>扫描速率>激光功率。

### 参考文献

- [1] Archaryagie K C S, Tang Y L. Enhancing powder bed quality in laser powder bed fusion: A review of monitoring, data processing, and adaptive control strategies [J]. *J. Manuf. Process.*, 2025, 149: 276
- [2] Yuan J D, Guo Q L, Clark S J, et al. Revealing mechanisms of processing defect mitigation in laser powder bed fusion via shaped beams using high-speed X-ray imaging [J]. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2025, 204: 104232
- [3] Young Z A, Guo Q L, Parab N D, et al. Types of spatter and their features and formation mechanisms in laser powder bed fusion additive manufacturing process [J]. *Addit. Manuf.*, 2020, 36: 101438
- [4] Wang D, Dou W H, Ou Y H, et al. Characteristics of droplet spatter behavior and process-correlated mapping model in laser powder bed fusion [J]. *J. Mater. Res. Technol.*, 2021, 12: 1051
- [5] Luo S Y, Ma X Q, Xu J, et al. Deep learning based monitoring of spatter behavior by the acoustic signal in selective laser melting [J]. *Sensors*, 2021, 21: 7179
- [6] Slodczyk M, Ilin A, Kiedrowski T, et al. Spatter reduction by multi-beam illumination in laser powder-bed fusion [J]. *Mater. Des.*, 2021, 212: 110206
- [7] Pauzon C, Hoppe B, Pichler T, et al. Reduction of incandescent spatter with helium addition to the process gas during laser powder bed fusion of Ti-6Al-4V [J]. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, 2021, 35: 371
- [8] Zhang W H, Ma H L, Zhang Q, et al. Prediction of powder bed thickness by spatter detection from coaxial optical images in selective laser melting of 316L stainless steel [J]. *Mater. Des.*, 2022, 213: 110301
- [9] Guo D, Lambert-Garcia R, Hocine S, et al. Correlative spatter and vapour depression dynamics during laser powder bed fusion of an Al-Fe-Zr alloy [J]. *Int. J. Extrem. Manuf.*, 2024, 6: 055601
- [10] Cao L, Meng R F, Zhang Q D, et al. Eulerian-lagrangian numerical simulation of powder bed denudation and spatter behavior during powder bed fusion process [J]. *Metall. Mater. Trans.*, 2023, 54A: 2771
- [11] Cao L, Zhang Q D, Meng R F. CFD-DPM simulation study of the effect of powder layer thickness on the SLM

- spatter behavior [J]. *Metals*, 2022, 12: 1897
- [12] Wang J Y, Zhu Y W, Li H, et al. Numerical study of the flow field and spatter particles in laser-based powder bed fusion manufacturing [J]. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.–Green Technol.*, 2022, 9: 1009
- [13] Chen H, Zhang Y J, Giam A, et al. Experimental and computational study on thermal and fluid behaviours of powder layer during selective laser melting additive manufacturing [J]. *Addit. Manuf.*, 2022, 52: 102645
- [14] Chien C Y, Le T N, Lin Z H, et al. Numerical and experimental investigation into gas flow field and spattering phenomena in laser powder bed fusion processing of Inconel 718 [J]. *Mater. Des.*, 2021, 210: 110107
- [15] Zhang X B, Cheng B, Tuffile C. Simulation study of the spatter removal process and optimization design of gas flow system in laser powder bed fusion [J]. *Addit. Manuf.*, 2020, 32: 101049
- [16] Chen H, Yan W T. Spattering and denudation in laser powder bed fusion process: Multiphase flow modelling [J]. *Acta Mater.*, 2020, 196: 154
- [17] Wang Z K, Liu M B, Luo Z W, et al. Simultaneous modeling of powder rigid motion and molten pool evolution for powder-based additive manufacturing [J]. *Powder Technol.*, 2023, 415: 118118
- [18] Li X X, Zhao C, Sun T, et al. Revealing transient powder-gas interaction in laser powder bed fusion process through multi-physics modeling and high-speed synchrotron X-ray imaging [J]. *Addit. Manuf.*, 2020, 35: 101362
- [19] Zhang Y M, Wu S W, Guo Z X, et al. Defects caused by powder spattering and entrainment in laser powder bed fusion process: High-fidelity modeling of gas, melt pool and powder dynamics [J]. *Acta Mater.*, 2025, 288: 120816
- [20] Goniva C, Kloss C, Deen N G, et al. Influence of rolling friction on single spout fluidized bed simulation [J]. *Particuology*, 2012, 10: 582
- [21] Cao L. Numerical investigation on molten pool dynamics during multi-laser array powder bed fusion process [J]. *Metall. Mater. Trans.*, 2021, 52A: 211
- [22] Sun X S, Sakai M. Three-dimensional simulation of gas-solid-liquid flows using the DEM-VOF method [J]. *Chem. Eng. Sci.*, 2015, 134: 531
- [23] Kloss C, Goniva C, Hager A, et al. Models, algorithms and validation for opensource DEM and CFD-DEM [J]. *Prog. Comput. Fluid Dyn. Int. J.*, 2012, 12: 140
- [24] Cao L. Mesoscopic-scale numerical simulation including the influence of process parameters on SLM single-layer multi-pass formation [J]. *Metall. Mater. Trans.*, 2020, 51A: 4130
- [25] Wang Z K, Teng Y J, Liu M B. A semi-resolved CFD-DEM approach for particulate flows with kernel based approximation and Hilbert curve based searching strategy [J]. *J. Comput. Phys.*, 2019, 384: 151
- [26] Flint T F, Robson J D, Parivendhan G, et al. laserbeamFoam: Laser ray-tracing and thermally induced state transition simulation toolkit [J]. *SoftwareX*, 2023, 21: 101299
- [27] Bidare P, Bitharas I, Ward R M, et al. Fluid and particle dynamics in laser powder bed fusion [J]. *Acta Mater.*, 2018, 142: 107