

# SLM 成形中粉末铺展行为的动态数值模拟

葛亚琼, 李济鹏, 畅泽欣, 马明锋, 侯庆玲

(太原科技大学 材料科学与工程学院, 太原 030024)

**摘要:** 激光选区熔化中, 粉床的成形会显著影响后续的工艺及最终产品的质量. 试验采用离散元法 (DEM), 对 SLM 成形过程中的粉末铺展行为以及成形质量进行了动态数值模拟, 从致密度和均匀性两方面研究了粉床质量的影响因素. 研究表明, 铺粉速度对粉床质量的影响很明显. 铺粉速度、铺粉角度、刮板间隙高度、粉末粒度均对改善粉床的平均致密度和均匀性有着重要影响. 铺粉速度越小, 粉床质量越高, 同时工作效率也越低. 随着刮板间隙高度的增加, 粉床致密度增大, 粉床均匀性降到一个较低的值; 粉床致密度随铺粉角度的增大而增大, 然后减少, 整个粉床的结构均匀性也有类似的变化趋势. 增大粉末粒径会导致粉床致密度和粉床结构的均匀性降低. 当铺粉速度 0.1 m/s, 刮板间隙高度 90  $\mu\text{m}$ , 铺粉角度 15°, 粉末粒径 15  $\mu\text{m}$  时, 粉床成形质量最优.

**创新点:** (1) 采用离散元法 (DEM), 对 SLM 成形过程中的粉末铺展行为以及成形质量进行了动态数值模拟

(2) 从致密度和均匀性两方面研究了粉床质量的影响因素, 将对 SLM 过程中高质量粉末床的形成提供有价值的参考.

**关键词:** 激光选区熔化; 离散单元法; 数值模拟; 粉床行为

**中图分类号:** TG 409

**文献标识码:** A

**doi:** 10.12073/j.hjxb.20220212001

## 0 序言

激光选区熔化 (SLM) 作为一种有效的增材制造技术, 已广泛应用于各种零部件的生产<sup>[1-5]</sup>. 在激光打印过程中, 激光根据几何数据逐层熔化预先形成的粉末床中的颗粒. 激光功率、激光扫描速度、激光扫描策略、粉末组成等因素会影响到成型零件的质量和性能<sup>[6-9]</sup>. 在这些因素中, 粉床的成形过程十分重要, 因为它直接影响粉床的结构, 进而影响后续激光打印过程, 决定最终产品的质量. 现实 SLM 过程中, 铺粉是在较为狭小的封闭空间进行的, 而且难以通过颗粒的尺寸信息来直接了解实验变量带来的影响. 因此, 通过对粉床形成过程的数值模拟, 可以更细致地了解试验当中铺粉工艺<sup>[10-16]</sup>对粉床质量的影响.

试验采用 DEM 方法对 316L 不锈钢粉末在 SLM 增材制造中的铺展过程进行了动态数值模拟. 研究了铺粉运动速度、铺粉角度、刮板间隙高度以及粉末尺寸对粉末铺展行为和粉末床质量的影响, 所得结果不仅可以从颗粒尺度揭示粉末铺展规律, 而且可以为增材制造的改进提供有价值的参考.

## 1 数值模拟过程

试验设计了关于 316L 的 SLM 粉床成形的模拟实验, 通过分析粉床的致密度和均匀性, 得出铺粉速度、颗粒粒径、刮板间隙高度、铺粉角度四个工艺参数对粉床成形质量的影响.

### 1.1 粉床模型的建立和仿真参数的选择

用 EDEM 离散元软件建立的粉床模型, 模拟计算采用的仿真参数如表 1 所示. 模拟几何尺寸为 1.02 mm  $\times$  0.42 mm  $\times$  0.05 mm. 如图 1 所示.

### 1.2 DEM 建模

试验中粉床的成形行为采用 DEM 方法, 基于分子动力学的 DEM 方法处理相互作用下的颗粒或者粉末所表现出来的特性, 已被有效的用于球<sup>[17]</sup>.

收稿日期: 2022 - 02 - 12

**基金项目:** 山西省基础研究计划资助项目 (No.20210302124266, No.20210302124297); 山西省回国留学人员科研资助项目 (2021-139); 山西省高等学校科技创新项目 (2021L307); 太原科技大学博士启动金 (20202071); 太原科技大学大学生创新创业训练计划 (XJ2021019).

表 1 粉床的仿真参数  
Table 1 Simulation parameters

参数	泊松比 $\zeta$	理论密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	杨氏模量 $E/\text{Pa}$	恢复系数 $e$	滑动摩擦系数 $\mu_s$	表面能 $\gamma/(\text{J}\cdot\text{m}^{-2})$	直径 $D/\mu\text{m}$	扩散速度 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	刃口角度 $\beta/^\circ$
基准数	0.3	$7.8 \times 10^3$	$2.2 \times 10^8$	0.64	0.085	0.001	50	0.1	0
范围	—	—	—	—	—	—	20 ~ 100	0.01 ~ 0.15	0 ~ 75

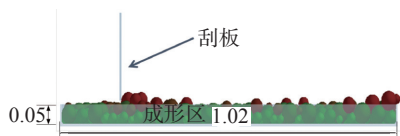


图 1 EDEM 建立的粉床模型

Fig. 1 Snapshot of powder bed during spreading

柱体<sup>[18]</sup>等粗颗粒的堆积问题. 在建模过程中, 颗粒运动包括滑动和滚动, 根据牛顿第二运动定律, 可由以下式 (1) 和式 (2) 方程控制<sup>[18-19]</sup>, 即

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_{j=1}^p (F_{ij,n} + F_{ij,s}) + m_i g \quad (1)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_j (T_{ij,s} + T_{ij,r}) \quad (2)$$

式中:  $m_i$  为质量;  $v_i$  为平动速度;  $\omega_i$  为角速度;  $I_i$  为转动惯量; 粉末  $i$  和  $j$  之间的接触力包括法向力  $F_{ij,n}$  和切向力  $F_{ij,s}$ ; 力矩  $T_{ij,s}$  由切向力产生, 力矩  $T_{ij,r}$  由滚动摩擦产生.

模拟中, 弹性接触力采用 hertz-mindlin 接触模型来描述, 通过引入附加粘聚力对 hertz-mindlin 接触模型进行修正, 从而在法向接触力中注入范德华力. 粒子之间<sup>[13, 20]</sup> 如式 (3) 和式 (4) 所示, 即

$$F_{ij,n} = \frac{4E^*}{3R^*} r^3 - 4\sqrt{\Pi r^3 \gamma E^*} \quad (3)$$

$$\alpha = r^2/R^* - \sqrt{\frac{2\Pi\gamma r}{E^*}} \quad (4)$$

式中:  $\gamma$  是表面能;  $E^*$  和  $R^*$  分别是当量杨氏模量和当量半径;  $r$  是可以从法向重叠  $\alpha$  获得的接触半径.

### 1.3 粉床质量参数

粉床致密度  $\rho$  是粉床质量的重要表征参数之一, 它是颗粒体积与其所占空间的比率, 这里给出如公式 (5) 所示, 即

$$\rho = \frac{V_p}{H \times L \times W} \quad (5)$$

式中:  $V_p$  是粉末的体积,  $W$  是成形区的宽度,  $H$  是成形区高,  $L$  是成形区的长.

粉床均匀性  $\rho_{vc}$  亦是粉床质量的重要表征参数之一, 如式 (6) 所示, 即

$$\rho_{vc} = \frac{\rho_{st}}{\bar{\rho}} \quad (6)$$

式中:  $\rho_{st}$  是密度的标准差;  $\bar{\rho}$  是  $\rho$  的平均值; 根据定义,  $\rho_{vc}$  越大, 堆积密度差异越大, 粉床结构的均匀性越差. 将  $\rho_{vc} = 0$  的粉床视为理想情况, 即内部结构完全均匀.

## 2 模拟结果的分析讨论

### 2.1 粉床的宏观成形形貌

图 2 为不同条件下的粉床形貌的俯视图, 图 2a 是在不同铺粉速度下得到的粉床形貌, 可以发现, 当铺粉速度大于某一值 (例如  $\geq 0.1 \text{ m/s}$ ) 时, 粉床形貌开始有较多的空隙. 图 2b 是在不同铺粉角度下得到的粉床形貌, 可以发现, 当铺粉角度超过一定值 (例如  $\geq 15^\circ$ ), 粉床颗粒数量逐渐减少, 有越来越多的空隙. 从图 2c 中可以发现, 随着刮板间隙高度越来越高, 粉床形貌开始变得越来越紧实. 而图 2d 是在不同粒径下得到的粉床的俯视图, 通过观察粉床形貌发现, 随着粒径的增加, 粉床变得越来越松散. 粒径最小为  $15 \mu\text{m}$  时, 致密性是最好的, 粉床几乎无空隙, 所以粉床成形的情况是最好的.

### 2.2 粉床致密度

图 3 是不同模拟条件下的粉床致密度, 图 3a 是定量的表示了不同铺粉速度对粉床致密度的影响. 理论上讲, 粉末铺展速度越低, 粉床质量越好, 但是打印速度慢. 为了兼顾铺粉效率和粉床的成型质量, 选择铺粉速度  $0.1 \text{ m/s}$  为此次模拟的基准值<sup>[4, 10-11, 14, 21]</sup>, 粉床的致密度为 0.289. 铺粉速度越快, 粒子从刮板获得的动能就越多, 这会导致颗粒在刮板刮完以后还会在成形区继续运动, 此为粉末颗粒的惯性效应. 这种效应将导致粉末层的致密度降低<sup>[22]</sup>. 图 3b 定量表示了不同铺粉角度对粉床致密度  $\rho$  的影响. 铺粉角度为  $15^\circ$  时, 粉床的致密度最

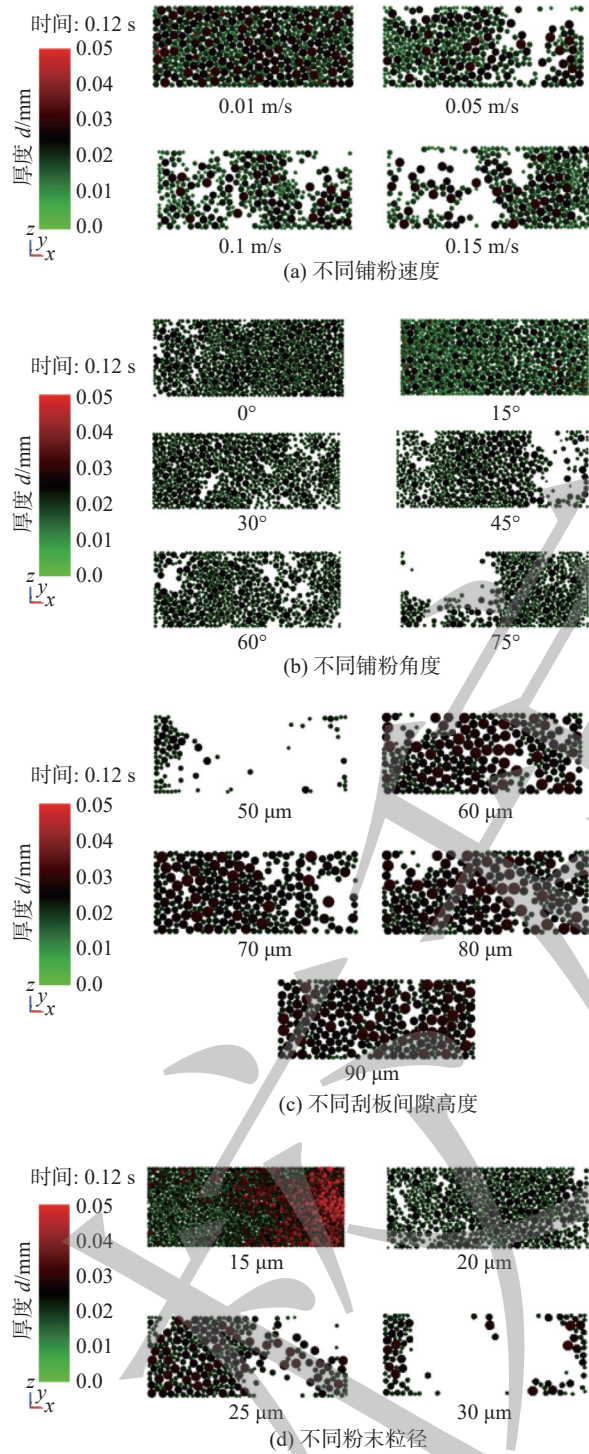
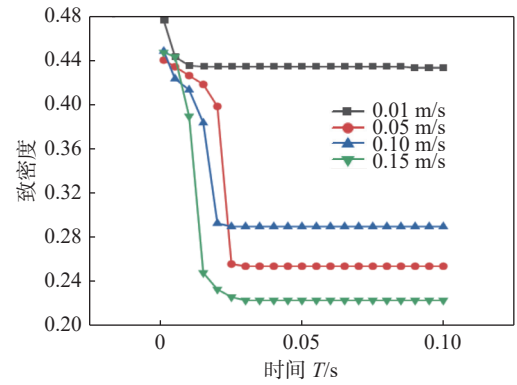


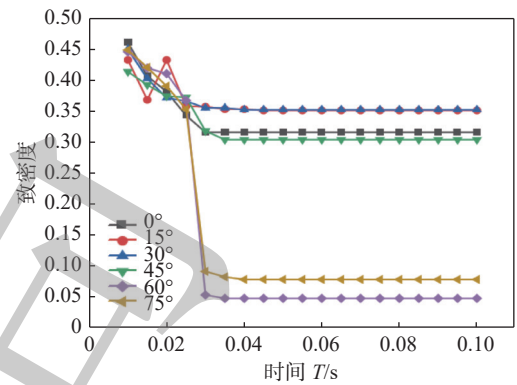
图 2 不同模拟条件下的粉床形貌的俯视图

Fig. 2 Top views of the powder bed morphologies obtained from. (a) different blade moving velocities; (b) different blade angles; (c) different gap heights; (d) different powder sizes

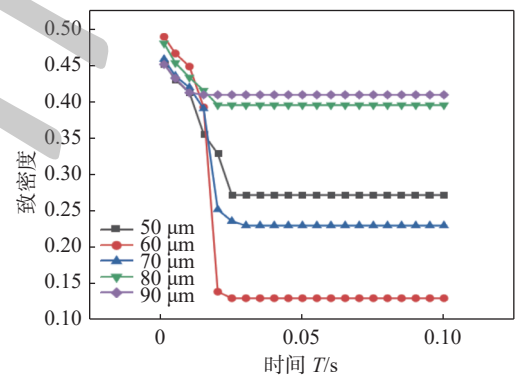
高, 为 0.36. 铺粉角度为 75° 时, 粉床的致密度几乎接近于 0, 二者的差距十分明显. 从图 3c 中分析得出, 刮板间隙越高, 粉床的致密度越高, 试验模拟刮板间隙高度最高为 90 μm, 致密度为 0.41. 而在图 3d 中, 发现粒径越大, 粉床的致密度越低. 当粒



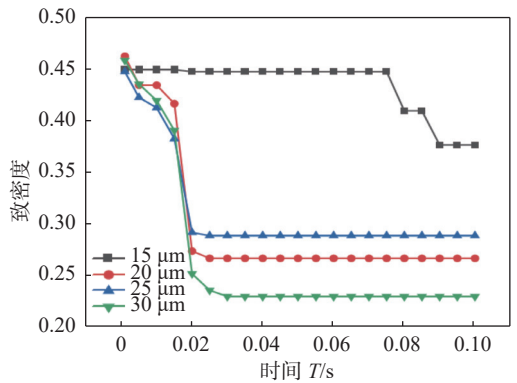
(a) 不同铺粉速度下的粉床致密度



(b) 不同铺粉角度下的粉床致密度



(c) 不同刮板间隙高度下的粉床致密度



(d) 不同颗粒粒径下的粉床致密度

图 3 不同模拟条件下的粉床致密度

Fig. 3 Density of powder bed under different simulation conditions. (a) different blade moving velocities; (b) different blade angles; (c) different gap heights; (d) different powder sizes



径最小为  $15\ \mu\text{m}$  时, 致密度最高, 为 0.377. 随着刮板间隙高度的减小或者颗粒粒径的增大, 导致粉床致密度降低, 壁面效应<sup>[21]</sup>是很重要的原因.

### 2.3 成形参数对粉床的平均致密度和均匀性的影响

图 4a 显示的是随着铺粉速度的变化粉床的平均致密度和均匀性的变化趋势, 可以看出, 随着  $v_1$  的增大, 整个区域的粉床结构均匀性变差, 堆积密度也随之降低. 松散不平的粉床会使粉料熔化程度更差, 进而会造成结球、气孔等缺陷. 为兼顾铺展效率, 铺粉速度为  $0.1\ \text{m/s}$  时是较好的选择, 粉床的

平均致密度  $\bar{\rho}$  为 0.313, 均匀性  $\rho_{vc}$  为 0.1813. 在图 4b 中, 铺粉角度为  $15^\circ$  时, 平均致密度  $\bar{\rho}$  处于最高值, 为 0.36, 均匀性  $\rho_{vc}$  相对较低, 为 0.069, 是理想的粉床状态. 从图 4c 中可以看出, 随着间隙高度的增加, 整个区域的粉床结构均匀性变好, 平均致密度也随之增加, 间隙高度最高为  $90\ \mu\text{m}$  时, 平均致密度  $\bar{\rho}$  为 0.413, 均匀性  $\rho_{vc}$  为 0.024. 而从图 4d 中分析得出, 随着粒径的增加, 整个区域的粉床结构均匀性变差, 平均致密度也随之降低. 颗粒粒径最小为  $15\ \mu\text{m}$  时, 均匀性  $\rho_{vc}$  最低, 为 0.07, 平均致密度  $\bar{\rho}$  最高, 为 0.435, 此时的粉床质量较好.

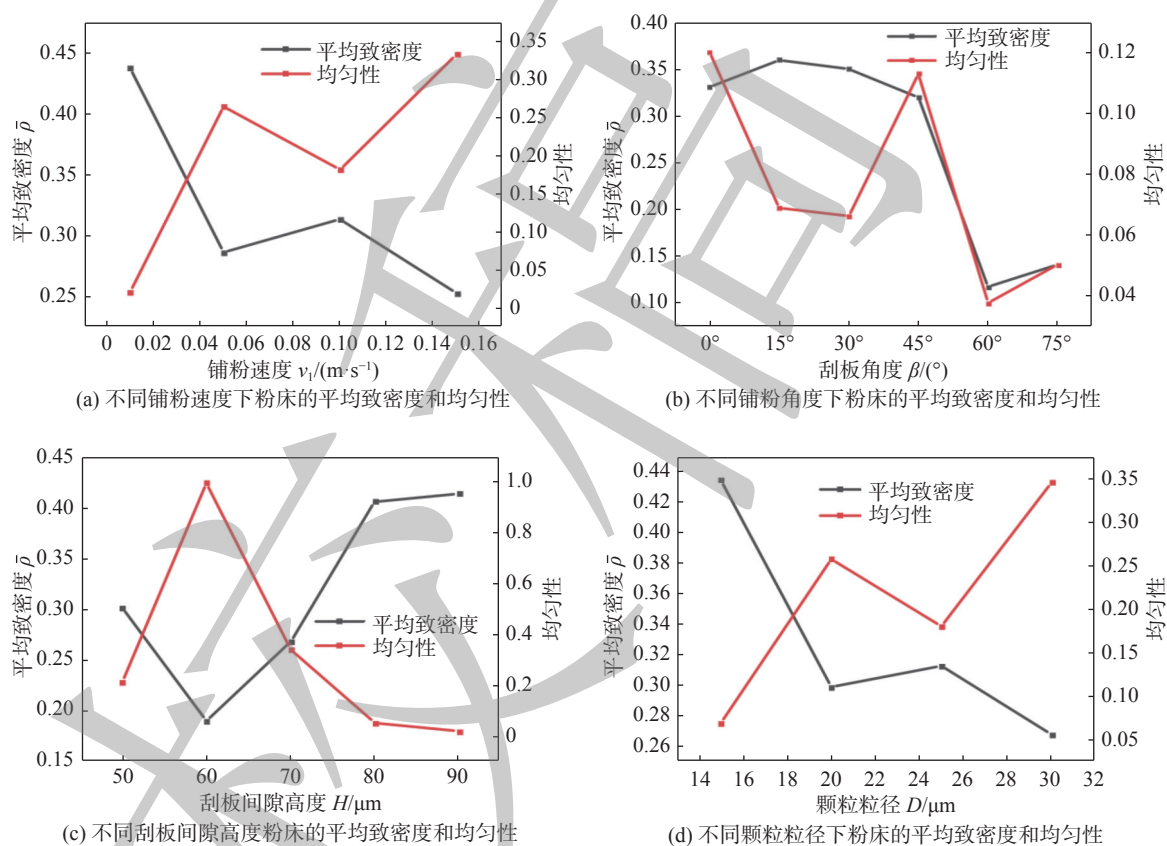


图 4 不同模拟条件下的粉床平均致密度和均匀性的变化

Fig. 4 Changes of density and uniformity of powder bed under different simulation conditions. (a) density and uniformity of powder bed at different spreading speeds; (b) density and uniformity of powder bed at different spreading angles; (c) density and uniformity of powder bed at different scraper gap heights; (d) density and uniformity of powder bed at different particle sizes

### 2.4 壁面效应和力拱

在本次模拟中, 尤其要考虑到壁面效应和力拱的影响. 图 5a 是壁面效应的示意图, 无刮板区域则可以放置红色颗粒. 也就是说, 由于刮板的原因, 颗粒无法放置, 因此壁面效应会大大降低粉床的堆积密度. 实际上, 如图 5b 所示, 壁面效应也可以用粉末铺展过程中力拱的

形成来解释. 这种效果将防止拱形上方的颗粒沉积到刮板和成形区之间的缝隙中. 较强的力拱会降低粉末流动的连续性和稳定性, 从而降低粉床的堆积密度和均匀性. 当间隙高度增加或颗粒尺寸减小时, 壁面效应减弱, 力拱形成的概率减小, 阻碍了成形粉床中大空隙的形成.

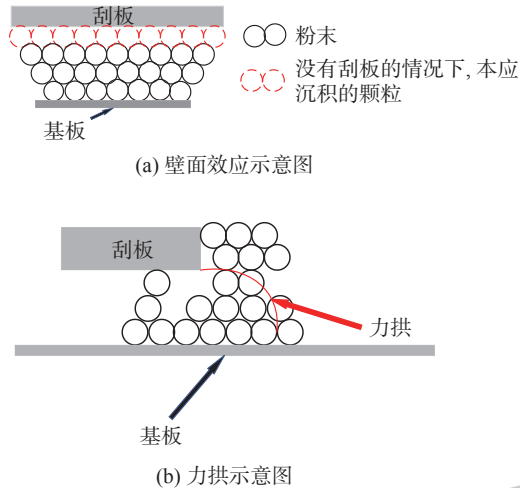


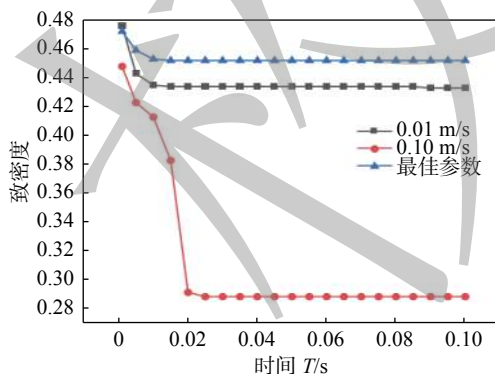
图 5 壁面效应示意图和力拱示意图

Fig. 5 Schematic illustration of wall effect and force arch. (a) schematic diagram of wall effect; (b) schematic diagram of force arch

### 3 粉床成形参数优化

综合考虑上述结果, 优化粉床成形参数为铺粉速度  $0.1 \text{ m/s}$ , 刮板间隙高度  $90 \mu\text{m}$ , 铺粉角度  $15^\circ$ , 粉末粒径  $15 \mu\text{m}$ .

优化参数与优化前的结果进行了数值模拟比较, 如图 6 所示优化参数下整个粉床的致密度高于  $v = 0.01 \text{ m/s}$  时的堆积密度. 结果表明, 通过改变其他工艺条件, 可以在保证较高铺展速度 ( $0.1 \text{ m/s}$ ) 的前提下, 提高粉床的致密度和均匀性, 最优参数下粉床致密度为  $0.453$ .

图 6 致密度演变的模拟结果比较 (刮板速度分别为  $0.01 \text{ m/s}$ ,  $0.1 \text{ m/s}$  和最佳参数)Fig. 6 Simulation results comparison of density evolution (the blade velocity of  $0.01 \text{ m/s}$ ,  $0.1 \text{ m/s}$  and the optimal parameters)

### 4 结论

(1) 刮板行为影响粉床成形质量: 刮板速度越

小, 粉床的成形质量越高, 而打印成形效率越低; 随着刮板间隙高度的增加, 粉床致密度增大, 粉床均匀性随间隙高度降低到一个较低的值; 粉床致密度随刮板倾角的增大而增大, 然后减小, 整个粉床的结构均匀性也有类似的变化趋势.

(2) 增大粉末粒径会导致致密度和粉床结构的均匀性降低.

(3) 316L 不锈钢 SLM 成形过程中粉床成形的优化工艺为: 铺粉速度  $0.1 \text{ m/s}$ , 刮板间隙高度  $90 \mu\text{m}$ , 刮板角度  $15^\circ$ , 粉末粒径  $15 \mu\text{m}$ .

### 参考文献

- [1] Zhang X C, Wang J W, Kang J W, *et al.* The dynamic arch bending mechanism of flat bridge structure of AlSi10Mg during SLM process[J]. Materials & Design, 2020, 188: 108469.
- [2] Attar H, Ehtemam-Haghighi S, Kent D, *et al.* Recent developments and opportunities in additive manufacturing of titanium-based matrix composites: a review[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture: Design, research and application, 2018, 133: 85 – 102.
- [3] Yang W L, He X J, Li H P, *et al.* A tribological investigation of SLM fabricated TC4 titanium alloy with carburization pretreatment[J]. Ceramics International, 2020, 46: 3043 – 3050.
- [4] Fouda Y M, Bayly A E. A DEM study of powder spreading in additive layer manufacturing[J]. Granul. Matter, 2019, 22: 1 – 18.
- [5] 丁宏德, 朱春明, 唐斌, 等. 316L 不锈钢 SLM 件与锻件的激光焊接接头微观组织与性能 [J]. 焊接, 2021(5): 9 – 14.  
Ding Hongde, Zhu Chunming, Tang Bin, *et al.* Microstructure and properties of laser welded joint between 316L stainless steel SLMed and forged parts[J]. Welding & Joining, 2021(5): 9 – 14.
- [6] 王凯, 焦向东, 朱加雷, 等. 激光功率密度对 SLM 成形 TC4 磨损性能的影响 [J]. 焊接学报, 2020, 41(5): 61 – 64.  
Wang Kai, Jiao Xiangdong, Zhu Jialei, *et al.* Effect of laser power density on wear resistance of TC4 alloy manufactured by SLM[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2020, 41(5): 61 – 64.
- [7] 杨立军, 燕珂, 邓亚辉, 等. 激光选区熔化 TC4 钛合金工艺参数对成形件表面质量的影响 [J]. 应用激光, 2022, 42(5): 43 – 50.  
Yang Lijun, Yan Ke, Deng Yahui, *et al.* Effect of Process Parameters on Surface Quality of TC4 Alloy by Laser Selective Melting[J]. Applied Laser, 2022, 42(5): 43 – 50.
- [8] Haeri S, Wang Y, Ghita O, *et al.* Discrete element simulation and

- experimental study of powder spreading process in additive manufacturing[J]. Powder Technology, 2017, 306: 45 – 54.
- [9] Partel E J Ri, oschel T P. Particle-based simulation of powder application in additive manufacturing[J]. Powder Technology, 2016, 288: 96 – 102.
- [10] Han Q Q, Gu H, Setchi R. Discrete element simulation of powder layer thickness in laser additive manufacturing[J]. Powder Technology, 2019, 352: 91 – 102.
- [11] Nan W G, Pasha M, Bonakdar T, *et al.* Jamming during particle spreading in additive manufacturing[J]. Powder Technology, 2018, 338: 253 – 262.
- [12] Estupinan Donoso A A , Computational study of the industrial synthesis of tungsten powders[J]. Powder Technology, 2019, 344: 773–783.
- [13] Chen H, Wei Q S, Wen S F, *et al.* Flow behavior of powder particles in layering process of selective laser melting: numerical modeling and experimental verification based on discrete element method[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 123: 146 – 159.
- [14] Ma Y F, Evans T M, Philips N, *et al.* Numerical simulation of the effect of fine fraction on the flowability of powders in additive manufacturing[J]. Powder Technology, 2020, 360: 608 – 621.
- [15] Haeri S. Optimisation of blade type spreaders for powder bed preparation in additive manufacturing using DEM simulations[J]. Powder Technology, 2017, 321: 94 – 104.
- [16] Wang L, Li E L, Shen H, *et al.* Adhesion effects on spreading of metal powders in selective laser melting[J]. Powder Technology, 2020, 363: 602 – 610.
- [17] Gou D Z, An X Z, Zhao H Y, *et al.* Dynamic characteristics of binary sphere mixtures under air impact[J]. Powder Technology, 2018, 332: 224 – 233.
- [18] Qian Q, An X Z, Zhao H Y, *et al.* Particle scale study on the crystallization of mono-sized cylindrical particles subject to vibration[J]. Powder Technology, 2019, 352: 470 – 477.
- [19] Yang R Y, Zou R P, Yu A B. Computer simulation of the packing of fine particles[J]. Physical review A, Atomic, molecular, and optical physics, 2000, 62: 3900 – 3908.
- [20] Nan W G, Pasha M, Ghadiri M. Numerical simulation of particle flow and segregation during roller spreading process in additive manufacturing[J]. Powder Technology, 2020, 364: 811 – 821.
- [21] Chen H, Wei Q S, Zhang Y J, *et al.* Powder-spreading mechanisms in powder-bed-based additive manufacturing: experiments and computational modeling[J]. Acta Materialia, 2019, 179: 158 – 171.
- [22] Meier C, Weissbach R, Weinberg J, *et al.* Critical influences of particle size and adhesion on the powder layer uniformity in metal additive manufacturing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 266: 484 – 501.
- 
- 第一作者:** 葛亚琼, 副教授, 主要从事金属材料激光加工的研究. Email: geyaqiong@tyust.edu.cn.
- 通信作者:** 畅泽欣, 讲师, 主要从事金属材料激光加工的研究. Email: czx@tyust.edu.cn.

(编辑: 张基隆)