

引用格式: 王岩, 刘雨萌, 刘世锋, 等. 激光粉末床熔融温度场模拟研究[J]. 中国材料进展, 2024, 43(11): 1035-1042.

WANG Y, LIU Y M, LIU S F, *et al.* Simulation Study on Temperature Field of Laser Powder Bed Fusion[J]. Materials China, 2024, 43(11): 1035-1042.

激光粉末床熔融温度场模拟研究

王 岩¹, 刘雨萌¹, 刘世锋¹, 刘江伟², 魏瑛康¹, 王建勇¹, 张亮亮¹

(1. 西安建筑科技大学冶金工程学院, 陕西 西安 710055)

(2. 山东大学能源与动力工程学院, 山东 济南 250061)

摘 要: 激光粉末床熔融具有不受结构限制、近净成形和效率高等优点, 广泛应用于航空航天、医疗以及核电领域。其成形过程中涉及多种复杂的且对构件质量有较大影响的物理现象, 对材料加工参数的探索建立在高成本和低效率的大量的试错实验上。为了解决上述问题, 提出了一种介观尺度物理模型, 联合使用 EDEM、Gambit 以及 FLOW-3D 软件对激光粉末床熔融成形过程中离散粉末床和粉末熔融进行介观尺度温度场模拟, 探究扫描速率对温度场的影响规律、熔池形貌和尺寸的影响, 阐明了温度场演变规律。结果表明: 激光功率 $P=215$ W 下, 扫描速率 $V=900$ mm·s⁻¹ 为最优工艺参数, 熔道较为平直均匀, 颈缩和球化缺陷最不明显, 成形过程中未发生飞溅和过熔等对构件质量产生不利影响的现象。采用实验对模型进行验证, 得到了良好的一致性。模拟结果可为激光粉末床熔融成形过程中工艺参数的探索提供一定的理论支撑。

关键词: 激光粉末床熔融; 介观尺度; 数值模拟; 温度场; 熔池尺寸

中图分类号: TP391.73; TG146 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2024)11-1035-08

Simulation Study on Temperature Field of Laser Powder Bed Fusion

WANG Yan¹, LIU Yumeng¹, LIU Shifeng¹, LIU Jiangwei², WEI Yingkang¹,
WANG Jianyong¹, ZHANG Liangliang¹

(1. College of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

(2. School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Laser powder bed fusion is widely used in aerospace, medical and nuclear power fields. The forming process involves a variety of complex physical phenomena that have a great impact on the quality of components, also the exploration of material processing parameters is based on a large number of trial experiments with high cost and low efficiency. In order to solve the above problems, this paper proposes a mesoscopic physical model, the use of EDEM, Gambit and FLOW-3D software for discrete powder bed and powder melting during the laser powder bed fusion forming process for mesoscopic temperature field simulation, explore the influence of scanning speed on the temperature field. The influence of the morphology and size of the molten pool clarifies the evolution of the temperature field. The results show that under the laser power $P=215$ W, the scanning speed $V=900$ mm·s⁻¹ is the optimal process parameter, the melting channel is relatively straight and uniform, the necking and spheroidization defects are the least obvious, and there is no phenomenon that adversely affects the quality of components such as splashing and overmelting during the forming process. The model was verified by experiments, and good consistency was obtained. The simulation results can provide some theoretical support for the exploration of process parameters in the process of laser powder bed fusion.

The simulation results can provide some theoretical support for the exploration of process parameters in the process of laser powder bed fusion.

Key words: laser powder bed fusion; mesoscopic scale; numerical simulation; temperature field; molten pool size

收稿日期: 2023-04-11 修回日期: 2023-06-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52104341, 51905306);
国家重点研发计划资助项目(2021YFB370193-03,
2021YFB3701802-03); 西安市先进制造业技术攻关
项目(2121XJZZ0034)

第一作者: 王 岩, 男, 1987 年生, 副教授, 硕士生导师

通讯作者: 刘江伟, 女, 1987 年生, 副研究员, 硕士生导师,

Email: jiangwei.liu@sdu.edu.cn

刘世锋, 男, 1978 年生, 教授, 博士生导师,

Email: liushifeng66@126.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202304010

1 前言

数值模拟是一种灵活且经济高效的物理过程定量分析工具,已广泛用于激光增材制造中预测温度场^[1]、熔池行为^[2]、微观结构^[3]和其他方面^[4,5]。目前对工艺参数的探索停留在高成本、低效率的大量试错实验之上。在激光粉末床熔融成形中,数值模拟可分为 2 个部分:粉末床建模和激光熔化建模。早期对粉末床的研究忽略了扩散过程,直接将粉末颗粒视为均匀分布^[6]。为了更贴近实际生产中的粉末床,以一种离散元方法来模拟真实的粉末床分布,该方法考虑了随机分布的粉末层对成形质量的影响^[7]。在激光熔化建模中,有限体积法因在有效求解控制方程方面的固有优势而被广泛使用。通过引入适当的移动激光热源和材料物性参数,可以模拟粉末颗粒的熔化和凝固,进一步用于研究瞬态温度场^[8]。激光粉末床熔融增材制造^[9,10]能够以逐层方式制造三维金属部件。该过程涉及粉末原料的局部输送、激光热源的选择性熔化,以及随后熔融材料的凝固。不合适的工艺参数会使熔池的流动行为不稳定,最终导致包括球化^[11,12]和飞溅^[13-15]等制造缺陷。主要的影响参数是激光功率、扫描速率和扫描策略,以及粉末粒度分布和粉末床厚度的选择^[16,17]。因此,本研究对激光粉末床熔融成形过程进行数值模拟,探究扫描速率对温度场和熔池尺寸的影响规律,阐明温度场的演变过程。

2 介观尺度模型的建立

2.1 基本假设

本研究基于离散元法的粉末床建模以及流体动力学的介观尺度,激光粉末床熔融过程中涉及复杂的物理现象,为了简化模拟,做出以下假设。

(1) 假设熔池中的液相金属为不可压缩的、层流的牛顿流体,液体与温度无关,具有恒定的动态粘度,将固相和液相之间的流体定义为糊状区域^[18]。

(2) 把所有的粉末颗粒看成是标准球形颗粒,粉末为球形刚体、表面粗糙度恒定不变,粉末之间无粘滞力和范德华力效应,忽略粉末碰撞引起的能量耗散,粉末之间以及它与壁面之间为线性弹簧接触。粉末床中的粉末颗粒随机分布。

(3) 粉末颗粒在受到激光能量源的加载熔化后受热发生固相至液相转变,形成熔池,忽略金属蒸发造成的质量损失,以及熔池中发生的化学反应。

将同样的假设广泛应用于激光焊接^[19]、激光切割^[20]、激光粉末床熔融过程^[21]的仿真中,其合理性和适

用性得到了很好的证明。

2.2 控制方程

在激光熔化金属粉末材料后,液相金属发生流动现象,该过程属于流体动力学范畴。因此,在建立模型进行激光粉末床熔融成形过程模拟时需要遵守最基本的三大守恒定律:质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律。质量和动量守恒从 Navier-Stokes 方程简化而来。

(1) 质量守恒定律公式如下:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (1)$$

式中: \vec{v} ——速度矢量/(m·s⁻¹)。

(2) 动量守恒定律公式为:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) = \mu \nabla^2 \vec{v} - \nabla P + \rho \vec{g} - \rho \vec{g} \beta (T - T_L) + \vec{S}_m \quad (2)$$

式中: ρ ——密度/(kg·m⁻³);

t ——时间/s;

μ ——流体粘度/(m²·s⁻¹);

P ——压力/Pa;

\vec{g} ——重力加速度矢量/(m·s⁻²);

β ——体膨胀系数;

T ——局部温度/K;

T_L ——液相线温度/K;

\vec{S}_m ——剩余的动量源项。

(3) 能量守恒定律

激光粉末床熔融成形过程热交换很频繁,因此必须满足能量守恒定律。能量守恒方程可以用焓 h 表示为^[22]:

$$\rho \left(\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla h \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \vec{S}_h \quad (3)$$

式中: k ——热导率;

\vec{S}_h —— X, Y, Z 这 3 个方向上能量方程源项。

在进行求解计算过程中,需要将激光输入热源以源项的形式加入到能量方程上。但需要注意的是,能量方程(式(3))只适用于牛顿流体。

(4) 由于金属池区域有一个自由表面,因此需要一个额外的方程来跟踪蒸汽界面。Flow-3D 软件中使用传统的流体体积方法,遵循以下守恒方程^[23]:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \vec{u}) = 0 \quad (4)$$

式中: \vec{u} ——流速/(m·s⁻¹);

t ——时间/s;

α ——液相的体积分数。

(5) 对于相变计算,假设液态和固态温度 T_L 和 T_S 之间液相的体积分数 α 呈线性变化^[24]:

$$\alpha(T) = \begin{cases} 0(T < T_s) \\ \frac{T - T_s}{T_L - T_s}(T_s \leq T \leq T_L) \\ 1(T > T_L) \end{cases} \quad (5)$$

2.3 熔池驱动力

表面张力会影响液体界面的曲率和液体内部孔隙的形状。部分熔化的粉末床内的毛细管力被认为是熔体运动和凝聚的重要因素。熔池表面的 Marangoni 效应是液体流动的主要驱动力之一^[25]。液态金属表面张力随温度线性变化:

$$\gamma = \gamma_0 + \frac{d\gamma}{dT}(T - T_0) \quad (6)$$

式中: γ_0 ——在室温 T_0 材料的表面张力。

在成形过程中, 当熔池达到或超过材料的蒸发点时, 反冲压力会施加在熔池上, 从而影响制造零件的形貌和性能。反冲压力为^[11]:

$$P_R = 0.54P_0 \exp\left(L_v \frac{T - T_b}{RTT_b}\right) \quad (7)$$

式中: P_R ——在气-液界面处的蒸汽压力/Pa;

P_0 ——大气压力/Pa;

L_v ——材料的蒸发潜热/(J·kg⁻¹);

R ——气体常数;

T ——材料的温度/K;

T_b ——材料的沸点/K。

2.4 激光热源

根据打印设备中使用的为 IPG500W 光纤激光器, 激光光源选择高斯分布面热源, 由此给出其表达式如下^[26]:

$$q(r) = \frac{2\eta P}{\pi r^2} \exp\left(-2 \frac{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}{r^2}\right) \quad (8)$$

式中: $q(r)$ ——高斯激光束半径范围内热流量密度;

P ——激光功率/W;

η ——粉末对光能的吸收率;

r ——移动高斯热源分布的外半径/m;

$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2$ ——到激光光斑中心位置 (x_c, y_c) 处的距离/m²。

在激光增材制造中, 激光是沿着 x 轴方向进行扫描, 这导致激光光斑中心位置随时间发生变化:

$$(x - x_{c0} - v_s t, y_{c0}) \rightarrow (x_c, y_c) \quad (9)$$

式中: (x_{c0}, y_{c0}) ——激光光斑中心位置/m;

v_s ——激光扫描速率/(m·s⁻¹)。

将式(8)改写为:

$$q(r) = \frac{2\eta P}{\pi r^2} \exp\left(-2 \frac{(x - x_{c0} - v_s t)^2 + (y - y_c)^2}{r^2}\right) \quad (10)$$

2.5 粉末床的设置

本研究中采用了最初由 Cundall 等^[27]提出的应用于岩土等颗粒的运动及力学问题的离散元法进行粉末床的建模, 使用 EDEM 中的颗粒工厂和 Gambit 软件中的命令语句实现粉末床的建立, 本文在介观尺度展开研究, 因此模型的计算域相对较小, 如图 1, 计算域尺寸为 1 mm×0.4 mm×0.23 mm。综合考虑计算时长和精度, 选取的网格尺寸为 5 μm, 模拟所使用的工作站型号为 DELL Precision7920, 处理器为 4.0 GHz Turbo, 8C, 9.6 GT/s 2UPI, 11 MB 缓存, HT(130 W)DDR4-2400 2nd。内存为 128 GB。

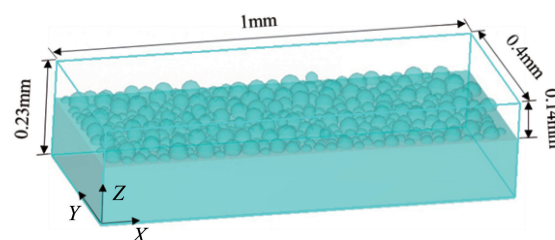


图 1 随机分布的 316L 粉末床模型

Fig. 1 Model of randomly distributed 316L powder bed

2.6 材料热物性参数

激光粉末床熔融过程属于三维瞬态非线性热传导过程, 在成形加工过程粉末材料的热物性属性参数如密度、热导率、比热容、表面张力等都将随着温度的变化而变化, 非恒定值。本研究使用的数据结合了 FLOW-3D 软件材料库和文献^[28]。在模拟过程中使用的 316L 不锈钢粉末的物性参数如表 1 所示, 密度随温度的变化如图 2 所示, 热导率随温度的变化如图 3 所示。

表 1 316L 不锈钢粉末的物性参数

Table 1 Physical parameters of 316L stainless steel powder

Parameter	Value
Melting latent heat/(J·kg ⁻¹)	2.7×10 ⁵
Evaporation latent heat/(J·kg ⁻¹)	7.45×10 ⁶
Surface tension coefficient/(N·m ⁻¹)	1.76
Specific heat capacity/(J·(kg·K) ⁻¹)	755(1600 K) 502(298 K)
Solid temperature/K	1493
Liquid temperature/K	1723
Gasification temperature/K	3090

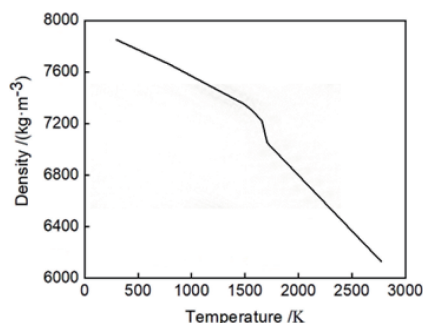


图2 316L 不锈钢粉末密度随温度变化曲线

Fig. 2 316L stainless steel powder density curve with temperature

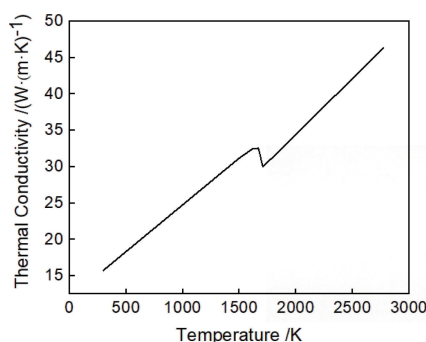


图3 316L 不锈钢粉末热导率随温度的变化曲线

Fig. 3 316L stainless steel powder thermal conductivity curve with temperature

3 单次温度场模拟

3.1 扫描速率对温度场的影响规律

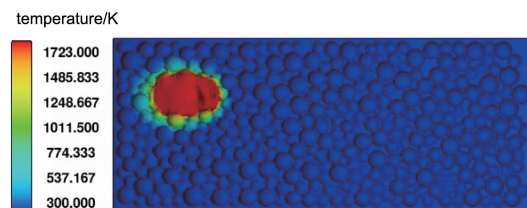
扫描速度对激光能量和热输入有很大的影响,在激光功率保持在 215 W 恒定条件下,激光的扫描速度及其他数值模拟中的参数如表 2 所示。

表 2 不同扫描速度下的模拟参数

Table 2 Simulation parameters at different scan speeds

No.	Laser power/ W	Scan speed/ (mm·s ⁻¹)	Layer thickness/μm	Laser diameter/μm
V1	215	800	30	80
V2	215	850	30	80
V3	215	900	30	80
V4	215	1000	30	80
V5	215	1100	30	80
V6	215	1200	30	80
V7	215	1350	30	80

在激光功率为 215 W,扫描速度为 900 mm·s⁻¹ 的工艺参数之下,110 μs 时粉末床状态如图 4 所示,可看出激光源加载在粉末床表面的状态,粉末受到激光照射之后温度可以达到材料的液相线温度 1723 K,金属粉末吸收能量开始熔化形成熔池,如图 4 中红色圆斑所示。

图4 $t = 110 \mu\text{s}$ 下的粉末床状态Fig. 4 Powder bed state at $t = 110 \mu\text{s}$

对该时刻的熔池温度分布进行检测绘制出如图 5 所示的曲线图,由图可知整个曲线左右对称,符合前文所加载的高斯热源分布规律,熔池中心的最高温度可以达到 2630 K,大于 1723 K。

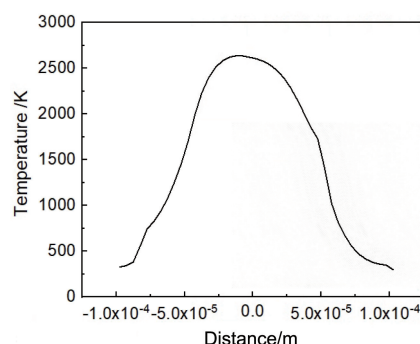


图5 熔池表面温度分布图

Fig. 5 Temperature distribution of the surface of the melting pool

在激光功率恒定为 215 W 时,将扫描速度从 800 增加到 1350 mm·s⁻¹,获得不同扫描速度下模拟结束时的熔池状况如图 6 所示。图 6a 中,扫描速度为 800 mm·s⁻¹,结合截面图可知,在激光扫描的时候发生了熔池内熔体向外飞溅的现象,有少量液体被抛在空中,熔池的液面呈现凹陷状态,这是因为速度较低,激光在金属表面停留的时间相对来说较长,激光的能量输入增大,并且在熔体的中部较热区的温度高到足以直接让熔池中的液体发生沸腾,此时有部分液体飞溅而出。图 6b 中,扫描速度为 900 mm·s⁻¹,整个熔道较为均匀,无显著的球化现象产生,总体上显示出较好的润湿效果,液体金属在熔池的底部更易于在衬底上扩展开来,并且在二维 X-Z 截面视图下更为平坦。观察图 6c 可知,在扫描速度逐渐增大到 1350 mm·s⁻¹ 时,在单一路径成形中,存在着一些球化现象,这是由熔体润湿和铺展不良引起的。这种不均匀的熔道,会严重影响最终成形表面质量。该现象是由于没有足够的输入能量,并且在粉床的底部存在一些未熔融的粉末,并且熔融液体没有在衬底上产生很好的湿润作用^[29]。另外,高速扫描会产生大的温度梯度,使金属在自重和表面张力的影响下容易发生收缩而产生球状。此外,熔道还会出现颈缩,导致两个侧面和整个表面材料分布不均匀,影响成形构件表面的粗糙度。

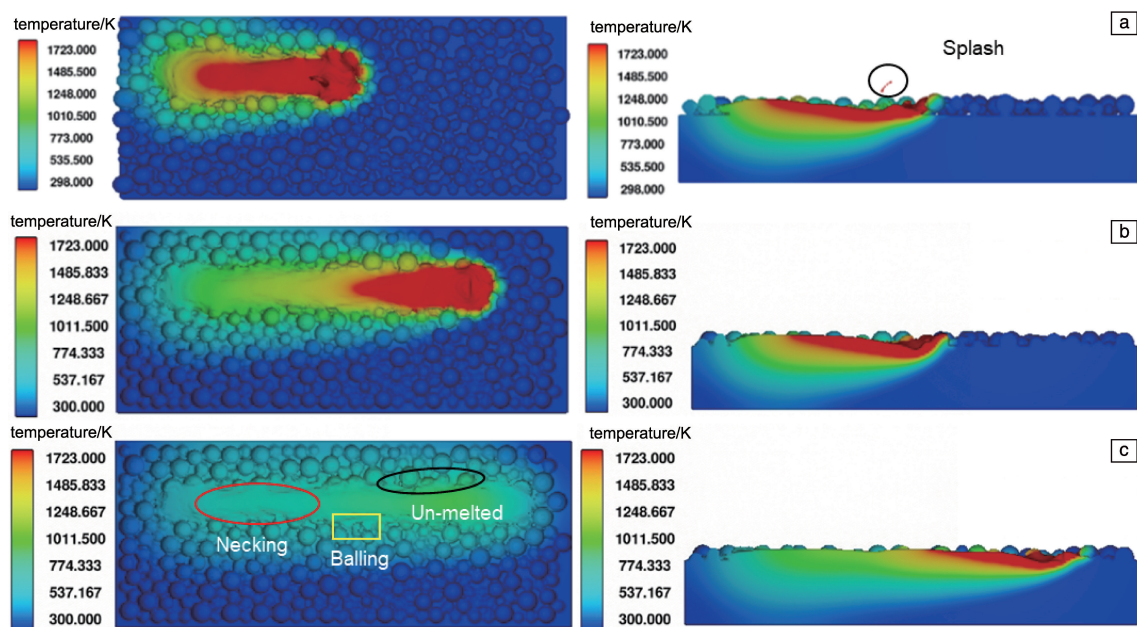


图 6 不同扫描速率下的温度场以及 X-Z 截面图: (a) $800 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, (b) $900 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, (c) $1350 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 6 Temperature field at different scanning speeds and X-Z cross-section images: (a) $800 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, (b) $900 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, (c) $1350 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

3.2 温度场的演变规律

对激光功率为 215 W, 扫描速率为 $900 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 粉末层厚度为 $30 \mu\text{m}$, 激光光斑直径选择为 $80 \mu\text{m}$ 工艺参数组合下, 不同时刻熔池形态和表面温度场分布如图 7 所示。

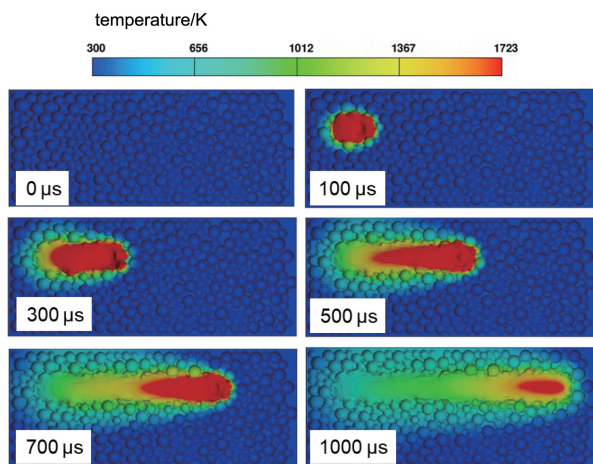


图 7 不同时刻下熔池的状态及形貌

Fig. 7 The state and morphology of the molten pool at six different moments

在扫描期间, 当激光直接作用在粉末床上时, 所述金属粉末立刻被加热并开始熔融。100 μs 时, 熔池温度为 1723 K 左右, 即发生了粉末的熔化; 在 300 μs 时, 激光照射范围逐渐扩大, 扫描区已经有了固化的迹象; 而 500 μs 时, 熔池的两侧温度更高, 中间温度更低, 推测在该时刻, 熔池的温度梯度最大, 由表面张力引起的

Marangoni 作用导致熔池液态金属的流动, 导致高温局部区域向低温区域转移。在 700 μs 后, 熔融金属的形状趋于稳定, 而熔融金属的中心温度则会继续改变。1000 μs 时, 主要发生的是散热, 温度逐渐下降至室温。此外, 可以看到, 在各时间点上, 熔池的表面形貌呈椭圆形, 长度比宽度大, 这就是熔池拖尾效应^[30]。

3.3 成形参数对熔池尺寸的影响规律研究

扫描速度和激光功率对熔池的深度和宽度有一定的影响。由图 8 知, 熔池的宽度和深度随着激光功率的增加或扫描速率的降低而增加, 其中熔池宽度的变化率略大于熔池深度的变化率。这是因为激光功率增加或扫描速率降低时, 能使得熔池内部达到的最高温度增加。因此, 有更多的能量向周围粉末和已成形部分传递; 此外, 激光能量密度增大时, 熔融区域会随之增大, 在宏观上表现出来的是熔池宽度和深度均增加。与扫描方向垂直处, 粉末床底部颗粒优先凝固成形, 与未熔融粉层相比, 该部分成形的固体具有更强的对热量传导能力。因此, 在宽度方向上比深度方向上更多地受到熔池温度变化的影响。也就是宽度对温度的变化率比深度对温度的变化率大。

由图 8a 知, 随着激光功率的增加, 熔池宽深比先增加后减小。在实际的成形工艺中, 如果激光能量过大, 则会加剧熔池的蒸发、液滴的飞溅、保护性气体的干扰等现象; 如果能量过小, 则无法充分熔化粉末床上铺的颗粒。因此选择合适的能量是十分必要的。当激光功率为 215 W 时, 熔池的宽深比适中且较为稳定, 为最佳激光功率参数。由图 8b 知, 随着扫描速度的增加, 熔池宽

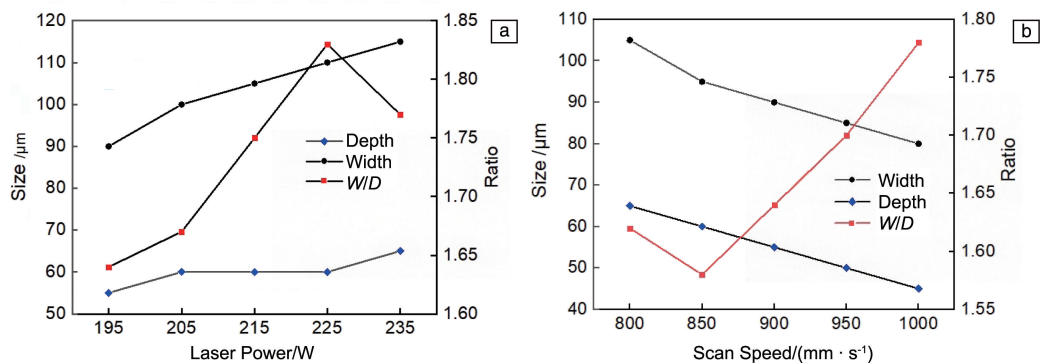


图 8 不同激光功率和不同扫描速率下熔池宽度和深度及宽深比

Fig. 8 Width and depth of molten pool and the width-depth ratio with different laser power, different scan speeds

深比先降低之后紧接着升高，考虑到熔池宽深比对熔池稳定性的影响，随着扫描速度的增加熔池越来越不稳定。在实际生产中，为了提高生产率，在确保熔池稳定性的前提下，要尽可能选择相对较大的扫描速度。在激光功率恒定为 215 W 时，综合考虑成形过程中产生的其他缺陷，扫描速度为 900 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 为较优的扫描速度参数。

4 实验验证

4.1 实验材料及方法

本实验以亚洲新材材料科技有限公司生产的气雾化 316L 不锈钢粉末为原料，其微观形貌如图 9 所示，可看出 316L 不锈钢粉末具有良好的球形度，颗粒直径范围为 15~53 μm ，化学成分如表 4 所示，主要物理性能如表 5

中所示。实验进行前，将实验所用的 316L 不锈钢粉末放入真空烘干箱中以 60 $^{\circ}\text{C}$ 烘干 8 h，以去除金属颗粒表面的水分，提高其流动性，保证成形质量。

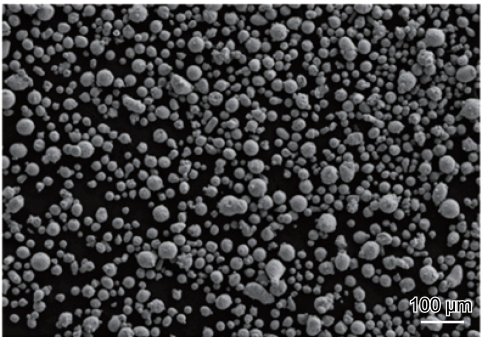


图 9 316L 不锈钢粉末 SEM 照片

Fig. 9 SEM image of the 316L stainless steel powder

表 4 316L 不锈钢粉末颗粒的化学成分

Table 4 Chemical composition of 316L stainless steel powder granules($w/\%$)

Element	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	O	C	S	P	Fe
Content	16. 87	10. 54	2. 43	0. 88	0. 50	0. 041	0. 007	0. 003	0. 010	Bal.

表 5 316L 不锈钢粉末物理性能

Table 5 Physical properties of 316L stainless steel powder

Parameter	Value
Particle size / μm	D_{10} : 23. 10; D_{50} : 36. 77; D_{90} : 55. 87
Sphericity	0. 89
Fluidity /($\text{s} \cdot 50\text{g}^{-1}$)	22. 78
Loose density /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	4. 03
Vibration density /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	4. 53

本实验使用的设备为德迪 3D 打印金属机 DLM-280，如图 10 所示。该设备有高效率，金属激光熔融设备拥有输出稳定的 IPG500W 光纤激光器，SCANLAB 高精度三维扫描系统，20bit 高分辨率扫描路径控制，确保优异的

成型精度和制品性能，主要性能参数如表 6 所示。



图 10 3D 打印金属机 DLM-280

Fig. 10 3D printing metal machine DLM-280

表 6 DLM-280 的主要参数

Table 6 Main parameters of DLM-280

Parameter	Value
Minimum spot diameter/mm	≤ 0.08
Powder diameter/ μm	15~53
Forming accuracy/mm	0.05
Powder thickness/mm	0.025~0.1
Powder feeding method	Upwards
Powdering method	Two-direction powdering
Preheat temperature/ $^{\circ}\text{C}$	20~200
Molding material support	Superalloys, stainless steel, and mold steel, etc.

实验采用的基板尺寸为 $280\text{ mm} \times 280\text{ mm}$, 初始温度设置为 300 K , 激光光斑直径选择 $80\text{ }\mu\text{m}$, 打印层厚为 $30\text{ }\mu\text{m}$, 先在基板上打印 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 的试样块作为单道打印的基体, 该部分的打印参数是光斑直径为 120 mm 、扫描速度为 $500\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、扫描功率为 100 W , 扫描策略为 S 形, 待其冷却至室温后在基体的上表面进行间隔为 6 mm 的单道成形实验, 如图 11 所示, 实验参数如表 7。

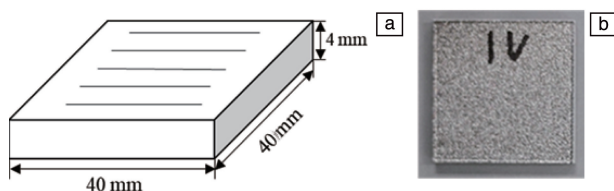


图 11 实验示意图(a), 从基板上分离的试样块(b)

Fig. 11 Schematic of the experiment (a), sample detached from the substrate (b)

4.2 实验制样及表征

首先将打印好的试样使用线切割机完成从基板上的分离, 然后将通过 3D 打印金属机 DLM-280 制备好的试

表 7 实验参数

Table 7 Experimental parameters

No.	Laser power/W	Scan speed/ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Layer thickness/ μm	Laser diameter/ μm
1	215	800	30	80
2	215	900	30	80
3	215	1000	30	80
4	215	1100	30	80
5	215	1200	30	80

样垂直于激光扫描方向进行线切割, 再对该截面使用 400#、800#、1200#、2000#水磨 SiC 砂纸打磨, 最后使用 W2.5 和 W1.5 的金刚石抛光膏进行高速抛光, 使得试样呈镜面。采用 OLYMPUS 型金相显微镜(OM)对完成制样的 316L 不锈钢的 Y-Z 截面进行观察, 以得到截面熔池的形貌以及尺寸。

4.3 实验验证

激光功率为 215 W , 扫描速率分别为 $800, 900, 1000, 1100$ 和 $1200\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 条件下单道熔池的形貌及尺寸与模拟结果对比分析如图 12 所示。从图中可以看出, 在 5 组不同的扫描速度参数之下, 实验所得的熔池形貌与模拟所得的熔池形貌均表现出良好的一致性。同时, 对熔池的深度进行了测量, 并与模拟中测得的数据进行对比分析, 可以得出图 13 所示的折线图, 由图可知在不同扫描速度之下, 熔池的深度的误差保持在允许范围以内。在一定误差范围内, 激光粉末床熔融数值模拟进行探究分析具有一定的可靠性和正确性。

5 结 论

本文构建介观尺度激光粉末床熔融过程数值模型, 研究扫描速度和激光功率对熔池尺寸和温度场的影响规律, 并进行实验验证, 得出以下结论。

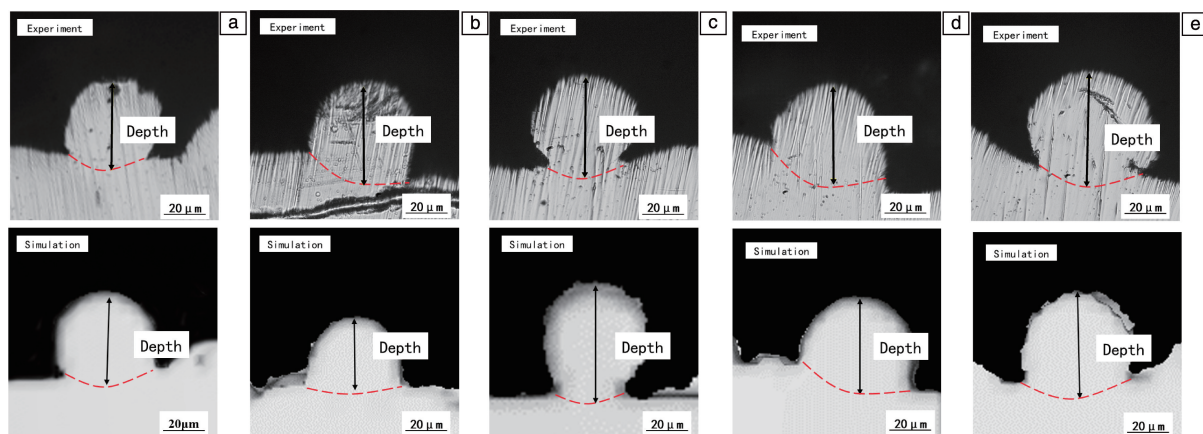


图 12 不同扫描速度的熔池形貌图实验和模拟对比: (a) $800\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (b) $900\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (c) $1000\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (d) $1100\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (e) $1200\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 12 Experimental and simulation comparison of molten pool topography diagram with different scanning speeds: (a) $800\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (b) $900\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (c) $1000\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (d) $1100\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (e) $1200\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

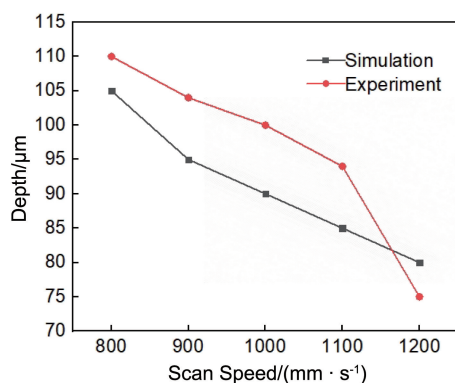


图 13 熔池宽度与扫描速度之间的关系

Fig. 13 The relationship between the depth of the molten pool and the scanning speed

(1) 不同扫描速度和激光功率下的温度场分布形状具有一致性：沿着激光扫描的方向，随着时间的推移呈现出前端大，后端小的特点，大致呈现椭圆形。

(2) 在恒定的激光功率下，随着扫描速度的增加，球化成程度越明显，熔池的宽度和深度均减小，熔池的状态越不稳定，熔池中心最高温度越低；在恒定的扫描速度下，随着激光功率的增加，熔池的宽度和深度均增加，熔池最高温度降低，熔池的稳定性越好。当激光功率 215 W，扫描速度 $900 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时，熔道均匀平直，没有明显的球化以及颈缩缺陷，熔池最稳定。

(3) 采用激光粉末床熔融技术制备 316L 不锈钢单道打印，对比分析在相同参数下实验和模拟结果中的单道熔池形貌和尺寸，发现数值模拟结果与实验结果具有较好的一致性，验证了模型的可靠性。

参考文献 References

- [1] TANG Q, CHEN P, CHEN J, *et al.* Optik [J], 2019, 201: 163336.
- [2] WU Y C, SAN C H, CHANG C H, *et al.* Journal of Materials Processing Technology[J], 2018, 254: 72–78.
- [3] NARASIMHARAJU S R, ZENG W, SEE T L, *et al.* Journal of Manufacturing Processes[J], 2022, 75: 375–414.
- [4] AHMAD B, van der VEEN S O, FITZPATRICK M E, *et al.* Additive Manufacturing[J], 2018, 22: 571–582.
- [5] LI J, ZHOU X, BROCHU M, *et al.* Additive Manufacturing[J], 2020, 31: 100989.
- [6] QIU C, PANWISAWAS C, WARD M, *et al.* Acta Materialia[J], 2015, 96: 72–79.
- [7] CHEN H, SUN Y, YUAN W, *et al.* Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers [J], 2022, 1 (1): 100017.
- [8] WANG L, WANG K, LIU L J, *et al.* Biomedical and Environmental Sciences[J], 2022, 35(1): 22–34.

- [9] HERZOG D, SEYDA V, WYCISK E, *et al.* Acta Materialia[J], 2016, 117: 371–392.
- [10] DEBROY T, WEI H L, ZUBACK J S, *et al.* Progress in Materials Science[J], 2018, 92: 112–224.
- [11] LÖBER L, SCHIMANSKY F P, KÜHN U, *et al.* Journal of Materials Processing Technology[J], 2014, 214(9): 1852–1860.
- [12] KÖRNER C, ATTAR E, HEINL P. Journal of Materials Processing Technology[J], 2011, 211(6): 978–987.
- [13] ANWAR A B, PHAM Q C. Additive Manufacturing[J], 2018, 22: 86–97.
- [14] YOUNG Z A, GUO Q, PARAB N D, *et al.* Additive Manufacturing [J], 2020, 36: 101438.
- [15] WANG Z, WANG X, ZHOU X, *et al.* CMES – Computer Modeling in Engineering and Sciences[J], 2020, 124(1): 243–263.
- [16] COLLINS P C, BRICE D A, SAMIMI P, *et al.* Annual Review of Materials Research[J], 2016, 46: 63–91.
- [17] COLLINS P C, HADEN C V, GHAMARIAN I, *et al.* The Minerals, Metals & Materials Society[J], 2014, 66(7): 1299–1309.
- [18] VOLLER V R, PRAKASH C. International Journal of Heat and Mass Transfer[J], 1987, 30(8): 1709–1719.
- [19] PANWISAWAS C, PERUMAL B, WARD R M, *et al.* Acta Materialia[J], 2017, 126: 251–263.
- [20] AMARA E H, KHELOUFI K, TAMSAOUT T, *et al.* Applied Physics A[J], 2015, 119(4): 1245–1260.
- [21] MAYI Y A, DAL M, PEYRE P, *et al.* Journal of Laser Applications[J], 2021, 33(2): 029902.
- [22] COOK P S, MURPHY A B. Additive Manufacturing[J], 2020, 31: 100909.
- [23] HIRT C W, NICHOLS B D. Journal of Computational Physics[J], 1981, 39(1): 201–225.
- [24] COOK P S, RITCHIE D J. Optics and Laser Technology[J], 2023, 162: 109247.
- [25] LEE Y S, ZHANG W. Additive Manufacturing[J], 2016, 12: 178–188.
- [26] YUAN W, CHEN H, CHENG T, *et al.* Materials and Design[J], 2020, 189: 108542.
- [27] CUNDALL P A, STRACK O D L. Geotechnique[J], 1979, 29: 47–65.
- [28] LIU C. Computers and Mathematics with Applications[J], 2021, 96: 209–228.
- [29] 张国会, 郭绍庆, 黄帅, 等. 激光与光电子学进展[J], 2020, 57 (3): 163–169.
ZHANG G H, GUO S Q, HUANG S, *et al.* Laser & Optoelectronics Progress[J], 2020, 57(3): 163–169.
- [30] 赵德金. 不锈钢激光选区熔化增材制造的介观模拟及工艺研究 [D]. 天津: 天津大学, 2018.
ZHAO D J. Mesoscopic Simulation and Parametric Analysis of Selective Laser Melting Process of Stainless Steel [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.

(编辑 张雨明)