

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2022.1218

TC11 钛合金单道选区激光熔化成形机理与工艺参数影响规律

郑智予^{1,2}, 束学道^{1,2*}, 陈思远^{1,2}, 陆翔奔^{1,2}, 杜李伟^{1,2}

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211;

2. 宁波大学 浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为探明 TC11 钛合金选区激光熔化成形规律, 以获得高质量 TC11 钛合金增材制造参数, 本文基于离散单元法建立粒径呈高斯分布的粉末层, 并将其通过 UDF 导入到 Fluent 软件, 建立介观尺度下的选区激光熔化 CFD 模型, 对不同工艺参数下的单道形貌缺陷以及熔池演变过程进行模拟, 阐明 TC11 钛合金单道选区激光熔化成形机理, 并结合实验验证仿真模型的准确性. 结果表明: 当能量密度较小时, 部分粒径较大或较为集中的粉末无法吸收足够的能量后熔化, 故易产生球化或单道不平直等缺陷; 在相同线能量密度下, 过高扫描速度也会导致缺陷形成, 且实验和仿真误差在 15% 以内. 研究结果可为提高 TC11 增材制造质量和工艺参数优化提供依据.

关键词: 选区激光熔化; 工艺参数; 熔池形态; 熔池尺寸

中图分类号: TG146.2+3

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2023) 05-0018-06

TC11 钛合金是一种马氏体 $\alpha+\beta$ 型两相钛合金, 名义化学成分为 Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.25Si. TC11 在两相热强钛合金中, 是 500 °C 以下热强性最好的合金, 具有优良的比刚度、比强度、耐蚀性、抗蠕变性及热稳定性, 兼具优良的综合力学性能. 目前已被广泛用于航空关键部件以及飞机结构件, 如压气机盘、叶片、环形件和紧固件等^[1]. 但钛合金作为一种难加工材料, 当以传统塑性成形方式加工时, 存在耗能大、生产周期长、复杂零件制造困难等问题^[2].

选区激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)利用热源呈高斯分布的激光, 将逐层铺设的粉末熔化后, 凝固成实体的一种增材制造技术^[3-4]. SLM 具有成形速率快、精度高、内部孔隙少等特点, 可以实现结构复杂的零件近净成形. 因此对于钛合金选区激光熔化成形进行研究具有重要的实际工程意义.

目前对选区激光熔化制备钛合金的研究主要

集中于 TC4 合金^[5-6], 国内外对于 TC11 钛合金选区激光熔化研究较少. 谢琰军等^[7]研究了激光参数和扫描策略对 TC11 合金选区激光熔化成形性能的影响; 陈浩然^[8]使用 TC11 钛合金球形粉末作为试验材料, 研究参数对激光粉末床熔合(Laser Powder Bed Fusion, LPBF)技术成形 TC11 钛合金熔道及块体微观组织、力学性能及断裂形式等性能的作用规律; 窦恩慧等^[9]研究了退火温度和保温时间对激光选区熔化成形 TC11 钛合金组织性能及断裂机制的影响; Zhang 等^[10]通过 TC11 钛合金 LPBF 成形实验和仿真, 对表面重熔和逐层打印重熔两种激光重熔方法进行了评估.

综上所述, 关于 TC11 钛合金选区激光熔化成形的数值模拟相关研究较少, 而通过大量实验的方法来研究 TC11 钛合金成形机理和工艺性能, 需要大量的时间、人力、物力成本. 为探明 TC11 钛合金选区激光熔化成形规律, 获得高质量 TC11 钛合金增材制造参数, 本文以 TC11 合金粉末作为成

收稿日期: 2022-12-20.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省自然科学基金(LZ22E050002); 国家自然科学基金(51975301); 宁波市重大科技专项(2022Z064, 2022Z009, 2022Z015).

第一作者: 郑智予(1996-), 男, 浙江慈溪人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 金属选区激光熔化成形. E-mail: 253533237@qq.com

*通信作者: 束学道(1968-), 男, 安徽舒城人, 教授, 主要研究方向: 金属塑性成形与装备. E-mail: shuxuedao@nbu.edu.cn

形材料, 采用数值模拟与实验相结合的方法, 研究 TC11 合金 SLM 成形的基础单元, 建立介观尺度的三维模型, 探究单道成形过程中工艺参数对成形熔道以及熔池界面形貌的影响, 可再现离散粉末的受热—熔化—流动—凝固等一系列复杂的演化过程, 较全面地考虑互相影响的多种物理现象. 本文也同样揭示了 SLM 的成形机理, 可为合理地制定工艺参数提供参考.

1 有限元模型

1.1 基本假设

本文采用流体动力学软件(ANSYS FLUENT)建立仿真模型, 模拟 SLM 过程中保护气体、激光及粉末间的相互作用. 仿真模型的建立基于3个基本假设^[11]: (1)熔池内的流动为层流, 且为牛顿流体; (2)不考虑蒸发时的热损失; (3)忽略熔池中等离子体效应.

1.2 激光热源

由于在激光加工中, 激光能量呈现高斯分布, 因此相关的仿真研究多数采用高斯面热源模型. 但若要在将激光热源考虑到能量方程中, 需将高斯面热源转化为体热源, 故采取式(1)激光沿 Z 向逐渐衰减的高斯体热源^[12]:

$$q = \frac{2np}{\pi r_0^2 \delta} \exp\left(-2\frac{r^2}{r_0^2}\right) \exp\left(-\frac{|z - z_s|}{\delta}\right), \quad (1)$$

式中: q 为激光热源; n 为激光吸收率; p 为激光功率; r_0 为激光半径; δ 为热源深度, 本次模拟中取深度为 $90\ \mu\text{m}$ 的铺粉层厚度; r 为距离激光中心点的距离; z_s 为激光照射高度; z 为激光 Z 向坐标.

1.3 TC11 粉末及仿真热物性参数

本实验的 TC11 钛合金粉末由中国兵器科学研究院提供, 采用型号为日立 SU5000 的扫描电镜对粉末形貌进行观测, 具体粉末形貌如图 1 所示. 从图 1 可知, 实验所用粉末整体为球形, 符合实验设备的要求.

仿真所用 TC11 钛合金材料热物性参数见表 1, 其中, 密度、热导率、比热容采取与温度相关的分段函数形式, 并在 UDF 中进行编译^[10,13]. 对于材料的黏度而言, 当材料处于熔化阶段时, 材料黏度采用表中参数, 而其固态在固相线以下时, 需采用足够大的黏度值表示^[13].

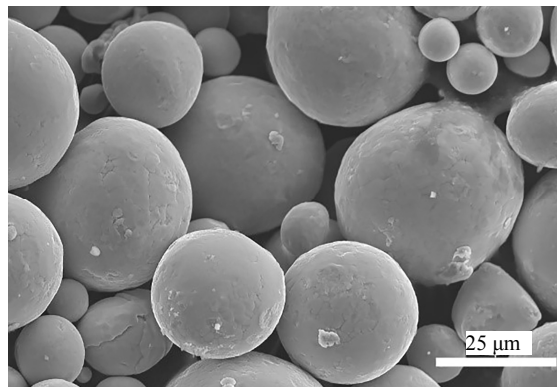


图 1 实验所用粉末

表 1 TC11 钛合金热物性参数

参数	数值
固相线 T_s/K	1 844
液相线 T_l/K	1 914
气相线 T_v/K	3 494
熔化潜热 $L_m/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2})$	2.86×10^5
蒸发潜热 $L_v/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2})$	9.8×10^6
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	4 480
热导率 $H/(\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1})$	随温度变化
黏度 $(\text{Pa}\cdot\text{s})$	0.004
比热容 $c/(\text{J}\cdot(\text{K}\cdot\text{kg})^{-1})$	随温度变化
表面张力温度系数	0.000 26

1.4 模型的建立

为与实验所用粉末保持一致, 在离散元软件 EDEM 中, 生成最终粒径须满足高斯分布的粉末颗粒, 并根据设备设定成型层厚为 $30\ \mu\text{m}$. 为确保成形面的均匀性以及稳定性, 最终建立的铺粉层如图 2 所示.

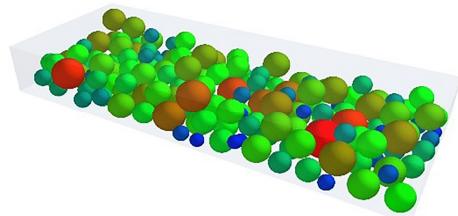


图 2 铺粉层的建立

1.5 边界条件

本文所建立的仿真模型同时也考虑了选区激光熔化过程中重力、表面张力以及反冲压力的影响. 其中, 重力可在软件中直接设置, 而表面张力会随温度的变化呈线性变化, 具体算式如下:

$$\sigma = \sigma_0 - \frac{d\sigma}{dT}(T - T_0), \quad (2)$$

式中: σ 为温度在 T 时的表面张力; T_0 为金属的熔化温度; σ_0 为温度 T_0 时的表面张力; $d\sigma/dT$ 为表面张力温度系数. 选用 CSF 模型^[14]来处理表面张力, 并将其由表面力转化为可添加到能量分成源项中的体积力^[15].

随着金属所受温度不断升高, 当熔化金属达到沸点时, 金属蒸气就向着远离粉末层的方向逃逸, 此时会对粉末层表面施加一个方向垂直向下的反冲压力. 由于反冲压力即为表面力, 则将其转化为体积力后的表达式如下:

$$P_r = 0.54P_0 \exp\left(L_{lv} \frac{T - T_{lv}}{RTT_{lv}}\right) |\nabla F_1| \frac{2\rho}{\rho_1 + \rho_2}, \quad (3)$$

$$\rho = \rho_1 F_1 + \rho_2 (1 - F_1), \quad (4)$$

式中: P_0 为标准大气压; L_{lv} 为蒸发潜热; T_{lv} 为气相线; R 为理想气体常数; F_1 为金属相体积分数; ρ_1 为金属相密度; ρ_2 为氩气密度; ρ 为混合区域的平均密度. $|\nabla F_1|$ 表示金属相的体积分数梯度; $2\rho/(\rho_1 + \rho_2)$ 则用于消除密度相差过大的两相可能造成的计算不稳定问题; $|\nabla F_1| 2\rho/(\rho_1 + \rho_2)$ 项的意义是采用等效体积力方法将反冲压力转化为体积力.

图 3 为最终建立的选区激光熔化仿真模型示意图, 激光从距离原点 X 方向 $100 \mu\text{m}$ 处开始, 沿图示激光扫描方向运动 $450 \mu\text{m}$ 的长度后停止. 粉末在激光运动过程中快速受热熔化, 随后快速凝固形成完整的熔道.

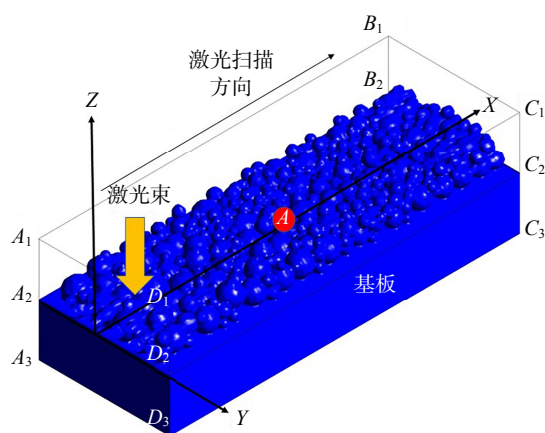


图3 选区激光熔化单道仿真模型

$A_1B_1C_1D_1$ 及其余上半部 3 个侧面设定为压力出口边界条件, $A_3B_3C_3D_3$ 设置为恒温壁面, 下半部

4 个侧面设定为散热壁面, 对流换热系数为 60, 外部辐射率为 0.4^[16].

1.6 初始条件及仿真参数

设置初始温度 T_0 为 300 K, 采用如表 2 所示的仿真参数进行模拟.

表2 仿真参数

实验序号	激光功率/W	扫描速度/(m·s ⁻¹)
1	100	1、1.5、2
2	100、150、200	1.5

2 仿真分析与讨论

2.1 SLM 粉末熔化凝固过程

图 4 为功率 200 W, 扫描速度为 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 下, 计算域中点 Y 、 Z 截面的粉末熔化凝固过程, 时间为 130~350 μs . 当时间为 130 μs (图 4(a)) 时, 激光与该区域粉末相距较远, 粉末仍保持原有形状. 当时间为 140 μs (图 4(b)) 时, 该处粉末周围的粉末在激光作用下, 通过热传导方式传递热量, 导致部分粉末开始熔化. 随着时间在 150 μs (图 4(c)) 和 170 μs (图 4(d)) 时, 激光中心位置逐渐扫描至该区域粉末上方, 粉末所受温度逐渐升高, 当部分粉末超过气相温度后, 在产生金属蒸气所导致的反冲压力及重力作用下, 熔池向下塌陷, 液态金属流向周围的粉末孔隙间. 如图 4(e) 和图 4(f) 所示, 在随后的时间内, 熔池温度逐渐下降, 最终凝固形成总体呈椭圆形的熔道.

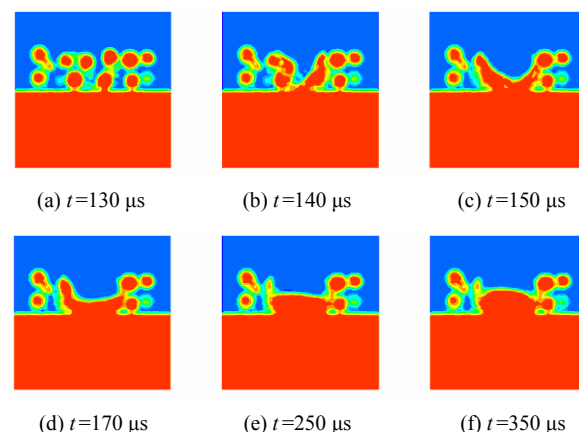
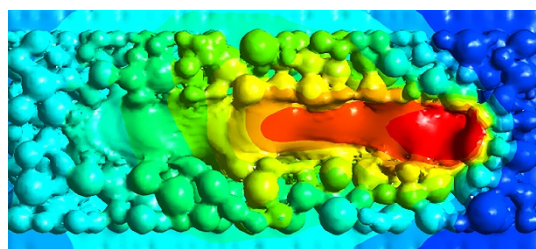


图4 选区激光内的粉末熔化凝固过程模拟

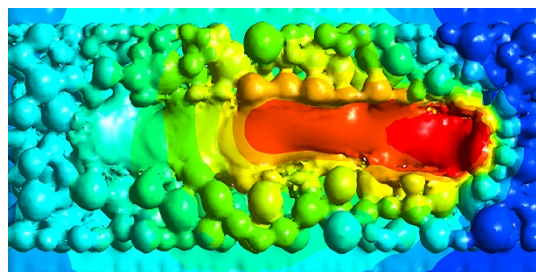
2.2 工艺参数对熔池温度场及形貌的影响

图 5 所示为扫描速度 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 不同激光功率作用下的熔池温度场及形貌. 随着激光功率的逐

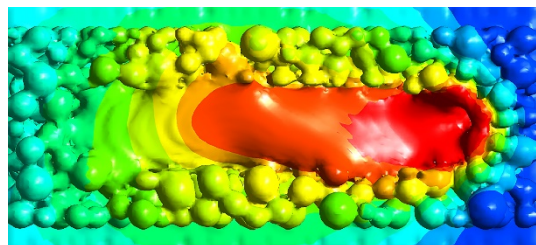
渐增大, 热源中心处的热流密度迅速增大, 因而沿半径方向的热流密度也会相应增大, 致使周围粉末吸收热量增加, 导致熔池尺寸不断扩大.



(a) 激光功率 100 W



(b) 激光功率 150 W



(c) 激光功率 200 W

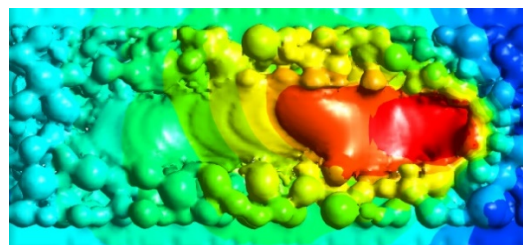
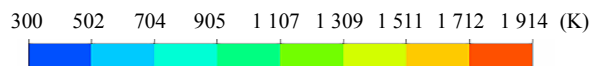
图5 不同激光功率下的熔池形貌及温度场

图6为激光功率为100 W, 不同扫描速度下的熔池温度场及形貌. 由图可见, 当扫描速度为 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 熔池仍可保持一定的连续性; 而在扫描速度为 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 熔池呈现不均匀性, 且逐渐形成球化现象; 当扫描速度为 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 由于能量输入不够, 没有在底板上铺展成连续的熔池, 因而展现为相互分离的球形.

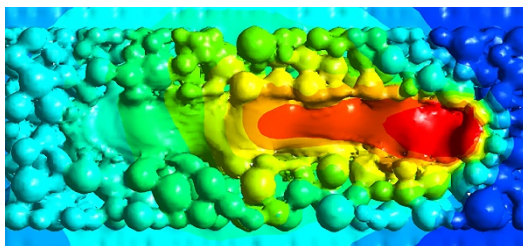
3 选区激光熔化单道实验与分析

3.1 单熔道实验

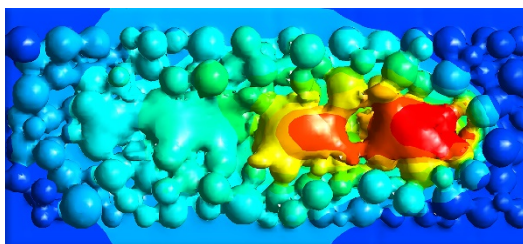
在成型室内通入惰性气体(氩气), 以保证实验过程中将氧气含量控制在 500×10^{-6} 以下. 根据仿真选用的不同工艺参数, 对铺展在金属基板上厚度



(a) 扫描速度 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



(b) 扫描速度 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



(c) 扫描速度 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

图6 不同扫描速度下的熔池形貌及温度场

为 $90 \mu\text{m}$ 的粉末层进行单道扫描, 将成形熔道及基板经线切割成厚度为 5 mm 样件(图7), 利用光学金相显微镜来观察熔道形貌, 并进行宽度的测量.

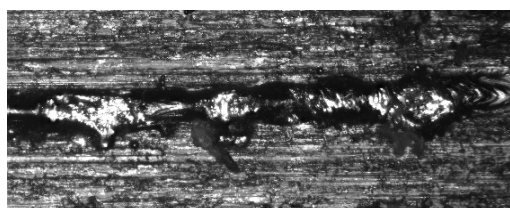


图7 单熔道实验样件

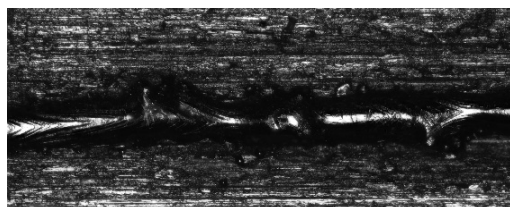
3.2 实验结果分析与验证

图8为采用光学显微镜对实验样件上所成形熔道的观测结果. 与图6的仿真结果对比可知, 仿真结果与实验结果保持一致的趋势, 体现了所建立仿真模型的准确性. 当激光功率 100 W , 扫描速

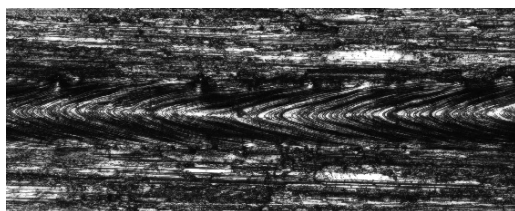
度 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 粉末所吸收的热量较少, 导致热量并没有很好地传导至底层粉末, 产生了严重的球化现象; 当扫描速度为 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 熔道中的球化现象有所减弱; 而在扫描速度为 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 熔道较为完整连续. 由实验结果可知, 过快的扫描速度会导致熔道产生球化现象, 致使成形质量下降, 甚至有可能令刮刀在铺设粉末时造成损伤.



(a) 扫描速度 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



(b) 扫描速度 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



(c) 扫描速度 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

图8 不同扫描速度下的实验熔道形貌

除存在球化现象的试样外, 还对剩余实验样品进行了单道宽度测量, 并与仿真模拟所得实验样品的单道宽度进行对比. 如图9所示, 尺寸误差值大约在15%以内, 产生该误差的原因包括: 由于仿真模型未考虑蒸发损失、热浮力, 且材料热物理仅作为温度相关函数等; 而随着工艺参数的变化, 两者变化规律保持高度一致.

4 结论

基于离散单元法及有限体积法, 建立 TC11 钛合金选区激光熔化在基板上加工首层粉末的介观仿真模型, 并通过试验验证得到如下主要结论:

(1) 以激光功率及扫描速度为单一变量, 得到在 $100\sim 200 \text{ W}$ 激光功率以及扫描速度为 $1\sim 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

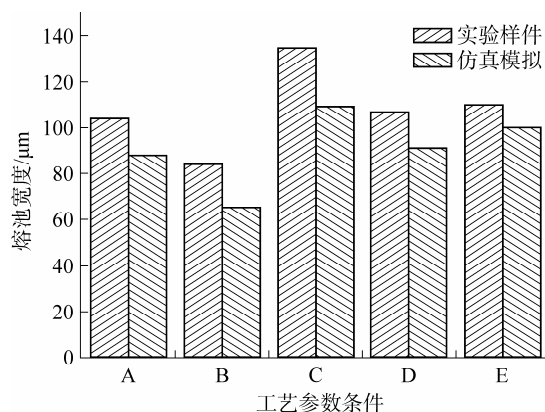


图9 实验样品与仿真模拟熔池宽度对比

条件下, 两者的扫描单道几何形貌. 当能量密度较小时, 熔道易产生球化, 对后续铺粉及加工过程会产生影响, 导致成形质量下降. 而在能量输入较大时, 熔池总体连续性较好, 没有出现球化现象.

(2) 在不同工艺参数下的熔道形貌, 其实验与仿真结果保持一致性, 且宽度误差在15%以下, 说明本文建立模型是可靠的, 研究结果能为提高 TC11 增材制造质量和工艺参数优化提供理论依据.

参考文献:

- [1] Banerjee D, Williams J C. Perspectives on titanium science and technology[J]. Acta Materialia, 2013, 61(3): 844-879.
- [2] 田宗军, 顾冬冬, 沈理达, 等. 激光增材制造技术在航空航天领域的应用与发展[J]. 航空制造技术, 2015, 58(11):38-42.
- [3] 张海洲, 白洁, 马瑞, 等. 激光选区熔化成形技术在航空航天发动机制造领域的研究与应用现状[J]. 推进技术, 2023, 44(3):6-21.
- [4] Wong K V, Hernandez A. A review of additive manufacturing[J]. ISRN Mechanical Engineering, 2012, 2012:1-10.
- [5] 柯林达, 殷杰, 朱海红, 等. 钛合金薄壁件选区激光熔化应力演变的数值模拟[J]. 金属学报, 2020, 56(3):374-384.
- [6] 汪豪杰, 杨芳, 郭志猛, 等. 3D 打印钛及钛合金的发展现状及挑战[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(2):709-716.
- [7] 谢琰军, 杨怀超, 王学兵, 等. 激光参数和扫描策略对选择性激光熔化 TC11 合金成形性能的影响[J]. 粉末冶金工业, 2018, 28(2):18-24.

- [8] 陈浩然. 激光粉末床熔融 TC11 钛合金成形工艺研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
- [9] 窦恩惠, 肖美立, 柯林达, 等. 热处理对激光选区熔化成形 TC11 钛合金组织性能的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(6):207-215.
- [10] Zhang L, Liao W H, Liu T T, et al. In situ elimination of pores during laser powder bed fusion of Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si titanium alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2022, 35(3):439-452.
- [11] 谢印开. 激光选区熔化 Ti-6Al-4V 温度场与流场的数值模拟[D]. 北京: 北京工业大学, 2018.
- [12] 冯一琦, 谢国印, 张璧, 等. 激光功率与底面状态对选区激光熔化球化的影响[J]. 航空学报, 2019, 40(12): 229-238.
- [13] 宫新勇. 激光熔覆沉积修复 TC11 钛合金叶片的基础问题研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2014.
- [14] Shrestha S, Chou K. A build surface study of powder-bed electron beam additive manufacturing by 3D thermo-fluid simulation and white-light interferometry[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 121: 37-49.
- [15] 袁伟豪. 激光选区熔化单道熔池热动态演变模拟与实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [16] 向羽, 张树哲, 李俊峰, 等. Ti_6Al_4V 的激光选区熔化单道成形数值模拟与实验验证[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(11):2102-2109; 2117.

Mechanism and influence of process parameters on single track selective laser melting forming of TC11 titanium alloy

ZHENG Zhiyu^{1,2}, SHU Xuedao^{1,2*}, CHEN Siyuan^{1,2}, LU Xuben^{1,2}, DU Liwei^{1,2}

(1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Zhejiang Provincial Key Laboratory of Part Rolling Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to find out the law of selective laser melting forming of TC11 titanium alloy and obtain high quality additive manufacturing parameters of TC11 titanium alloy, a powder layer with Gaussian particle size distribution is established based on discrete element method and imported into Fluent software through UDF to establish a mesoscopic selective laser melting CFD model. The morphology defects of single track and the evolution process of molten pool with different process parameters are simulated, and the forming mechanism of single track selective laser melting of TC11 titanium alloy is clarified. The accuracy of the simulation model is verified by experiments. The results show that when the energy density is small, some powders with larger or more concentrated particle size cannot absorb enough energy and melt, so it is easy to produce defects such as spheroidization or single channel irregularity. Under the same linear energy density, high scanning speed will also lead to the formation of defects and experimental and simulation errors within 15%. The results provide a basis for improving the additive manufacturing quality of TC11 and optimizing the process parameters.

Key words: selective laser melting; process parameters; molten pool morphology; molten pool size

(责任编辑 章践立)