

# 基于多尺度模拟的选区激光熔化金属件 疲劳性能预测

周金宇<sup>1\*</sup> 陈逸飞<sup>2,3</sup>

1. 金陵科技学院机电工程学院, 南京, 211199

2. 江苏理工学院机械工程学院, 常州, 213000

3. 江苏沙钢集团有限公司, 苏州, 215625

**摘要:**为研究金属选区激光熔化(SLM)工艺参数、成形件微结构及疲劳性能之间的关系,建立了“工艺-微结构-性能”三元多尺度数值模型。为了分析不同工艺参数下温度场、速度场和气孔缺陷的演化过程,研究了考虑反冲力等多物理场耦合现象的介观熔池动力学过程。利用熔池温度场数据,基于元胞自动机模型得到代表性体积元(RVE)的微观结构分布,并由此阐述了工艺参数对晶粒尺寸和缺陷特征的影响。利用应力强度因子评价了不同工艺参数下缺陷的危险程度,并预测了相应RVE的宏观疲劳强度。研究表明,所建立的多尺度模型有效预测了不同工艺参数下SLM金属构件的疲劳性能,可为SLM工艺参数优化提供参考。

**关键词:**选区激光熔化;气孔缺陷;熔池动力学;元胞自动机;疲劳性能

**中图分类号:**TH162;TH114

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.09.021

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Prediction of Fatigue Property of SLM Metal Parts Based on Multi-scale Simulations

ZHOU Jinyu<sup>1\*</sup> CHEN Yifei<sup>2,3</sup>

1.School of Mechanical and Electrical Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing, 211199

2.School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou, Jiangsu, 213000

3.Jiangsu Shagang Group Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu, 215625

**Abstract:** A multi-scale ternary numerical model of “process-microstructure-properties” was proposed to investigate the relationships of the processing parameters of metal SLM, the microstructure of the formed parts and the fatigue properties. In detail, to analyze the evolution processes of temperature field, velocity field, and pore defects under different processing parameters, the meso dynamics process of the molten pool was studied with consideration of multiple physical field coupling phenomena such as recoil force. Using the temperature field data, the microstructure distribution of the representative volume element(RVE) was obtained based on cellular automaton model, and the effects of processing parameters on grain sizes and defect characteristics were investigated. Finally, the hazard levels of defects were evaluated under different processing parameters by stress intensity factors, and the macro fatigue strength of corresponding RVE was predicted. The results show that the proposed multi-scale model may effectively predict the fatigue properties of SLM metal parts under different processing parameters. This work provides a reference for optimizing SLM processing parameters.

**Key words:** selective laser melting(SLM); pore defect; molten pool dynamics; cellular automata; fatigue property

### 0 引言

增材制造作为在数字技术驱动下回归自然界“生长造物”的新方法,可利用充分的时空窗口对

结构的物性进行细粒度主动控制,它输出的三维实体既承载了高密度几何形状信息,又附加了高分辨率的材质物性信息,便于构件跨尺度参数变量的协同优化,从而充分发挥最大效能<sup>[1-2]</sup>。选区激光熔化(selective laser melting, SLM)是最具代表性的金属增材制造技术之一,通常采用高功率激光逐层沿设定路径扫描熔化金属粉末,从而成

收稿日期:2024-09-24

基金项目:国家自然科学基金(52075232);江苏省自然科学基金(BK20201112)

构构件。一方面,SLM成形过程中粉末与激光的作用时间极短,难以直接观测。另一方面,SLM工艺参数调控离不开大量试验参数交叉组合的实验,效率低,成本高,工艺参数开发周期长。此外,由于SLM构件普遍存在气孔等缺陷,导致疲劳强度降低,并使疲劳寿命呈现显著分散性,为增材制造金属构件的普及应用带来极大挑战<sup>[3-4]</sup>。数值模拟便于观测不同工艺参数组合下的成形过程细节,具有成本低、数据量大以及可视化程度高等优点,可用于不同工艺参数下SLM构件的疲劳性能预测,从而节省试错成本、缩短开发周期。

增材制造的数值模拟可分为三个尺度,分别是针对熔池热行为模拟的介观尺度,针对材料微观组织演化模拟的微观尺度,以及针对宏观力学性能模拟的宏观尺度<sup>[5]</sup>。从介观尺度看,SLM熔池温度场常采用有限单元法(FEM)和有限体积法(FVM)进行建模和模拟<sup>[6]</sup>。FEM在考虑多种物理过程的相互作用(如热传递、流体运动等)时存在局限性,而FVM便于对熔池中缺陷形成机理进行多场耦合的动态分析。从微观尺度看,模拟凝固过程组织演变的最常用数值算法是相场(PF)法和元胞自动机(CA)<sup>[7]</sup>。PF法能够较为全面地描述凝固组织演变过程中各物理场的变化,但它消耗的计算资源大,而CA仅针对晶粒结构特征进行分析,并不深入到枝晶的复杂模拟上,计算成本小。从宏观尺度看,由于SLM微结构导致了明显的各向异性<sup>[8]</sup>,为定量研究增材构件的疲劳性能,可采用多晶体有限元和Murakami系列模型进行分析和评估<sup>[9]</sup>。

尽管目前已有许多关于增材制造温度场、微观组织和力学性能的研究,但从工艺参数到力学性能全视域的模拟仿真还不够完备。近年来,金属SLM数值模拟向涉及微观机制的多尺度方向发展。多尺度数值模拟是实现SLM金属构件组织性能预测和成形工艺优化的重要工具。SLM过程中产生的气孔和未融合等缺陷具有跨尺度特点,包含熔化和凝固两个过程,有必要建立“工艺-微结构-性能”三元多尺度数值模型。针对上述问题,本文通过构建SLM介观熔池仿真模型、微观组织演化模型和宏观疲劳预测模型,实现从成形工艺到力学性能的全视域模拟,从而揭示工艺参数、微结构特征与宏观性能之间的定量关系。

## 1 模型描述

本文以钛合金 Ti-6Al-4V 为研究对象构建

SLM多尺度数值模拟模型,材料热物性参数详见文献[10]。多尺度建模主要包含以下几个方面:

1)选择激光功率 $P$ 和扫描速度 $v$ 作为工艺参数变量,在FLOW-3D中使用有限体积法和离散元法构建介观熔池仿真模型,得到温度场相关信息。

2)在MATLAB中导入熔池温度场数据,基于CA构建微观组织演化模型,得到代表性体积单元(RVE)的凝固组织分布。

3)在ABAQUS中,利用多晶体有限元法计算RVE气孔缺陷处最大应力,构建宏观疲劳预测模型来评估气孔缺陷危险系数并预测RVE疲劳强度。

### 1.1 介观熔池仿真模型

联合采用EDEM软件和FLOW-3D软件构建介观熔池仿真模型。在EDEM中,使用离散元法(DEM)对刚性三维球状颗粒组成的粉末床进行建模;在FLOW-3D软件中,使用FVM与DEM相结合的方式,基于计算流体力学构建SLM熔池动力学模型,有助于分析激光作用过程中熔池形成的物理现象和介观机理。计算域尺寸设为 $1000\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m} \times 250\ \mu\text{m}$ ,如图1所示。

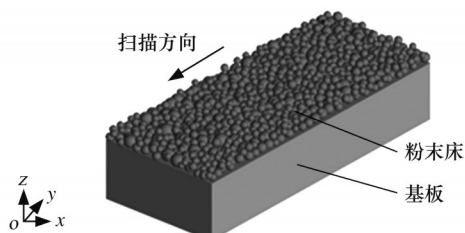


图1 介观熔池仿真的计算域

Fig.1 Computational domain of meso melt pool simulation

为了使SLM过程易于数值模拟,需对相关物理现象进行简化:①假设熔池的流体是层状和不可压缩的牛顿流体;②粉末颗粒形状设为球形,粉末直径设为高斯分布;③固相和液相界面处的流动设为糊状区;④使用Boussinesq近似法考虑动量方程中的浮力项的熔池密度变化<sup>[11]</sup>。基于FVM多相流计算原理<sup>[12]</sup>对液相和气相界面进行捕获,其质量、动量、能量的控制方程<sup>[13]</sup>可表达为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} + F_D + F_S + F_M + F_P \quad (2)$$

式中: $\nabla$ 、 $\nabla \cdot$ 和 $\nabla^2$ 分别为梯度、散度、拉普拉斯算子; $\rho$ 、 $\mathbf{u}$ 、 $\mathbf{g}$ 、 $p$ 、 $\mu$ 分别为流体密度、速度、重力加速度、压力、黏度; $F_D$ 、 $F_S$ 、 $F_M$ 、 $F_P$ 分别为与糊状区能量耗散、表面张力、Marangoni力和反冲压力相关的阻尼力项。

$F_D$ 表示为

$$F_D = -K_C \frac{(1-f_L)^2}{f_L^3 + \epsilon_0} \mathbf{u} \quad (3)$$

式中： $K_C$ 为渗透系数； $f_L$ 为金属液体体积分数； $\epsilon_0$ 为避免分母为零的小常数。

$F_S$ 表示为

$$F_S = \varphi kn |\nabla \alpha| \frac{2\rho}{\rho_{\text{metal}} + \rho_{\text{gas}}} \quad (4)$$

式中： $\varphi$ 为表面张力系数； $n$ 为固体和气体交界处的单位法向量； $k$ 为固体和气体交界处曲率； $\nabla \alpha$ 为由单位面积界面力转换而得的体积表面力<sup>[14]</sup>； $\rho_{\text{metal}}$ 、 $\rho_{\text{gas}}$ 分别为金属和气体的密度。

$F_M$ 表示为

$$F_M = \frac{d\varphi}{dT} [\nabla T - n(n \cdot \nabla T)] |\nabla \alpha| \frac{2\rho}{\rho_{\text{metal}} + \rho_{\text{gas}}} \quad (5)$$

式中： $T$ 为熔池温度，K。

$F_P$ 表示为

$$F_P = 0.54 p_0 \exp\left(\frac{\Delta H_V}{\delta} \left(\frac{1}{T_V} - \frac{1}{T}\right) n |\nabla \alpha| \frac{2\rho}{\rho_{\text{metal}} + \rho_{\text{gas}}}\right) \quad (6)$$

式中： $p_0$ 为环境压力； $T_V$ 为蒸发温度； $\delta$ 为通用气体常数。蒸发引起的反冲压力取液体表面平衡蒸气压的0.54。 $\Delta H_V$ 为液体的蒸发潜热，定义为

$$\Delta H_V = L_V M \quad (7)$$

式中： $L_V$ 为汽化潜热； $M$ 为摩尔质量。

热源模型的传导方程为三维高斯体热源模型<sup>[15]</sup>，表达式如下：

$$Q_{\text{laser}}(x, y, z) = \frac{2P\lambda}{\pi\omega^2\eta} \exp\left(-\frac{2r_0^2}{\omega^2}\right) \exp\left(-\frac{|z|}{\eta}\right) \quad (8)$$

$$r_0 = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} \quad (9)$$

式中： $P$ 、 $\lambda$ 分别为激光束标称功率和激光吸收率； $\omega$ 、 $\eta$ 分别为激光半径和激光穿透深度； $r_0$ 、 $(x_0, y_0, z_0)$ 分别为光斑半径和激光中心位置； $x$ 、 $y$ 分别为激光扫描方向及其水平垂直向坐标； $z$ 为增材方向坐标。

## 1.2 微观组织演化模型

基于MATLAB软件，使用Moore型CA元胞构建RVE微观组织演化模型，对不同SLM工艺参数下的晶粒尺寸和缺陷特征进行分析。组织演化模拟所需的原始温度场数据通过弱耦合方式由FLOW-3D软件输入元胞空间中，并根据时间步不断更新。

为简化CA计算模型，作如下假设：①由离散的正方体元胞组成仿真空间；②元胞的邻居定义遵循Moore邻接规则；③每个元胞的状态包括液态、界面态及固态。

元胞的初始状态为液态。当某个液态元胞的过冷度超过临界值时，认为该元胞为潜在形核位置，满足条件时发生形核，其状态从液态变为界面态。形核后，计算该元胞与周围元胞的温度梯度，

按照温度梯度最大方向确定晶粒取向。随着温度场的迭代，晶粒不断长大，当晶粒尖端触及周围液态邻胞且该邻胞的过冷度小于临界过冷度时，则该邻胞被晶粒捕获，赋予相同晶粒取向，并改变元胞状态为界面态。在晶粒生长过程中，当晶粒内部某元胞不存在液态邻胞时，则该元胞状态从界面态转变为固态。图2显示了某一时刻的元胞状态。

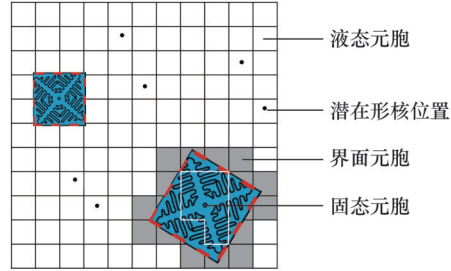


图2 元胞自动机网格(二维)

Fig.2 Cellular automata grids(two-dimension)

微观组织演化模拟主要关注形核、枝晶生长以及晶粒的捕获和状态转变。采用基于高斯分布的连续形核模型<sup>[16]</sup>，形核速率可表示为

$$R_N = \frac{n_{\text{max}}}{\sqrt{2\pi} \Delta T_{\text{std}}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta T - \Delta T_{\text{ave}}}{\Delta T_{\text{std}}}\right)^2\right) \quad (10)$$

式中： $n_{\text{max}}$ 为最大形核密度； $\Delta T$ 、 $\Delta T_{\text{std}}$ 和 $\Delta T_{\text{ave}}$ 分别为过冷度、过冷度标准差和过冷度均值。

在元胞空间中，单位时间步长中形核的晶粒数量表示为

$$N = R_N q a^3 dt \quad (11)$$

式中： $q$ 为空间元胞总数； $a$ 为元胞边长。

CA模型使用三个Euler角来确定晶粒的生长方向<sup>[17]</sup>。形核元胞满足形核条件时，计算形核位置与周围邻胞的温度梯度，根据最大温度梯度方向获得Euler角。随着过冷度的增大，晶体持续增长。当晶体的尖端触及仍处于液态的元胞，而这个元胞的过冷度未达到临界点时，该元胞转变为界面元胞。若晶体尖端触及气孔，则晶体在该处停止生长，而选择其他邻胞进行生长。枝晶生长物理建模的关键是建立枝晶生长速率与过冷度的关系。一部分枝晶沿平行于热流方向生长速率较快，会抑制相邻枝晶生长，成为枝晶主干并淘汰取向不利的晶粒，即枝晶择优生长。合理确定枝晶尖端的生长速率和枝晶尖端的生长方向对微观组织演化模拟非常重要<sup>[18]</sup>。

KURZ等<sup>[19]</sup>根据固液界面稳定性原理建立了过冷度和枝晶尖端生长速率的枝晶生长动力学(KGT)模型：

$$v = a_1 \Delta T + b_1 \Delta T^2 + c_1 \Delta T^3 \quad (12)$$

式中： $\Delta T$ 为过冷度； $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$ 为增长系数。

一旦元胞开始形核,就会以生长速率 $v$ 向其近邻长大,使近邻元胞的状态发生转变,单位时间中形核元胞向邻近未结晶元胞生长的距离为

$$l = vdt \quad (13)$$

如果 $l \geq a$ 则认为该近邻元胞转变为再结晶元胞。

模拟开始前,初始化元胞空间为液态,利用插值法将温度场数据映射到元胞空间中,逐一对元胞空间中的元胞进行计算。

模拟过程中,首先判断当前元胞是否已经形成晶粒。如果已经形成晶粒,则跳过当前元胞位置。如果没有形成晶粒则计算当前元胞的过冷度和形核率,并生成一个0到1的均匀分布随机数。若归一化后的形核率大于该随机数则进行形核,并将该元胞视为晶粒的初始形核位置;否则,跳过此元胞,继续计算下一个元胞。当元胞被捕获后,开始计算其温度梯度最大值方向,并据此生长枝晶。

所有元胞都被计算后,更新元胞空间内所有元胞状态,加载下一个时间步的温度场数据。重复上述过程,直至所有元胞均从液相转变为固相。

### 1.3 宏观疲劳预测模型

增材制造过程中,普遍存在气孔和未完全熔合等缺陷。SLM缺陷分布广泛,形态各异,尺寸不一,且形成机制复杂<sup>[20-21]</sup>。这些缺陷往往作为应力集中的源头,诱发疲劳裂纹的产生。缺陷的几何特征(比如位置、大小、形状和方向)对增材件的疲劳性能影响显著,其中影响力按照位置、大小到形状的顺序递减<sup>[22-23]</sup>。因此,可利用关键缺陷的特征数据来评估SLM构件的疲劳强度及寿命。

加载方向上投影面积 $a_{\text{rea}}$ 最大的缺陷极易导致疲劳主裂纹的形成,可使用Murakami参数 $(a_{\text{rea}})^{1/2}$ 表征缺陷大小<sup>[24]</sup>。然而,尺寸大小并非判定危险缺陷的唯一标准<sup>[25]</sup>。研究表明,缺陷位置也是影响疲劳性能的关键因素,即便只有内部缺陷十分之一大小的表面缺陷,也会显著增大构件疲劳失效概率<sup>[22]</sup>。因此,考虑缺陷在SLM构件中的位置对风险判定十分必要,需对表面或亚表面缺陷设置更高的风险系数。

针对1000  $\mu\text{m}$ 以内的微小缺陷,裂纹扩展的驱动力可由应力强度因子 $K$ 表征:

$$K = \sigma Y (\pi (a_{\text{rea}})^{\frac{1}{2}})^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

式中: $\sigma$ 为应力变程; $Y$ 为裂纹系数<sup>[26]</sup>, $Y$ 的取值可按照缺陷位置进行划分。

MURAKAMI等<sup>[27]</sup>提出了按照缺陷中心至样品表面的距离 $h$ 与缺陷等效圆半径 $r$ 之比的经验条件来区分(亚)表面缺陷和嵌入裂纹:对于

(亚)表面缺陷, $Y=0.65$ ;对于嵌入或大块裂纹, $Y=0.5$ 。即

$$Y = \begin{cases} 0.65 & \frac{h}{r} \leq 1.25 \\ 0.5 & \frac{h}{r} > 1.25 \end{cases} \quad (15)$$

其中,缺陷等效圆半径 $r$ 可通过下式计算:

$$r = \sqrt{\frac{a_{\text{rea}}}{\pi}} \quad (16)$$

应力强度因子 $K$ 是断裂力学中的一个关键参数,表示缺陷尖端处的应力场强度。式(14)~式(16)不仅可反映材料在外力作用下的局部应力集中情况,还能通过裂纹系数定量体现缺陷大小和位置的影响。

Murakami模型重点关注缺陷大小的影响,基于实验数据得到含缺陷构件疲劳强度的预测公式:

$$\sigma_F = \sigma_{F0} - c [(a_{\text{rea}})^{\frac{1}{2}}]^m \quad (17)$$

式中: $\sigma_F$ 为疲劳强度; $\sigma_{F0}$ 为无缺陷材料的疲劳强度; $c$ 、 $m$ 为材料常数。

为考虑应力比的影响,可引入Walker因子<sup>[28]</sup>。任意应力比 $R$ 下的构件疲劳强度表示为

$$\sigma_F(R) = \frac{C(H_V + 120)}{[(a_{\text{rea}})^{\frac{1}{2}}]^{\frac{1}{\beta}}} \left(\frac{1-R}{2}\right)^{-\beta} \quad (18)$$

式中: $C$ 为几何修正因子,体现缺陷位置的影响(对于表面缺陷, $C=1.41$ ;对于近表面缺陷, $C=1.43$ ;对于内部缺陷, $C=1.56$ );指数 $\beta$ 与材料的维氏硬度 $H_V$ 之间满足 $\beta = 0.226 + H_V \times 10^{-4}$ 。

根据SLM金属构件RVE微观组织演化的模拟结果,将晶体和缺陷的特征数据通过Python脚本导入ABAQUS软件,生成多晶体有限元模型。施加载荷后求解,可获得RVE应力场。将缺陷特征数据和缺陷邻域最大应力代入式(14)~式(16),计算各缺陷的应力强度因子。根据应力强度因子最大值标定最危险缺陷,最终运用式(18)评估该缺陷位置的疲劳强度,从而实现RVE宏观疲劳强度的预测。

## 2 计算结果分析

针对SLM钛合金构件,以激光功率和扫描速度为分析变量,依次应用上文所述的介观熔池仿真模型、微观组织演化模型和宏观疲劳预测模型,通过数值模拟分别获得熔池温度场、微结构分布和RVE疲劳强度,相关结果分析如下。

### 2.1 熔池动力学分析

对比不同激光功率下的SLM熔池仿真结果(图3)可发现熔池温度场的显著变化。熔池呈现

类似彗星的拖尾形态,该特征主要与熔化过程中的潜热释放相关。在潜热释放过程中,熔池会在温度不变的情况下释放热量,从而使得熔池尾部呈现拖尾形态。熔化潜热导致熔池尾部出现“重燃”效应,使得尾部区域的冷却和凝固过程相较于其他位置较为缓慢。此外,在熔池前端,材料以固态粉末形式存在,因此热量传递不如尾部高效。

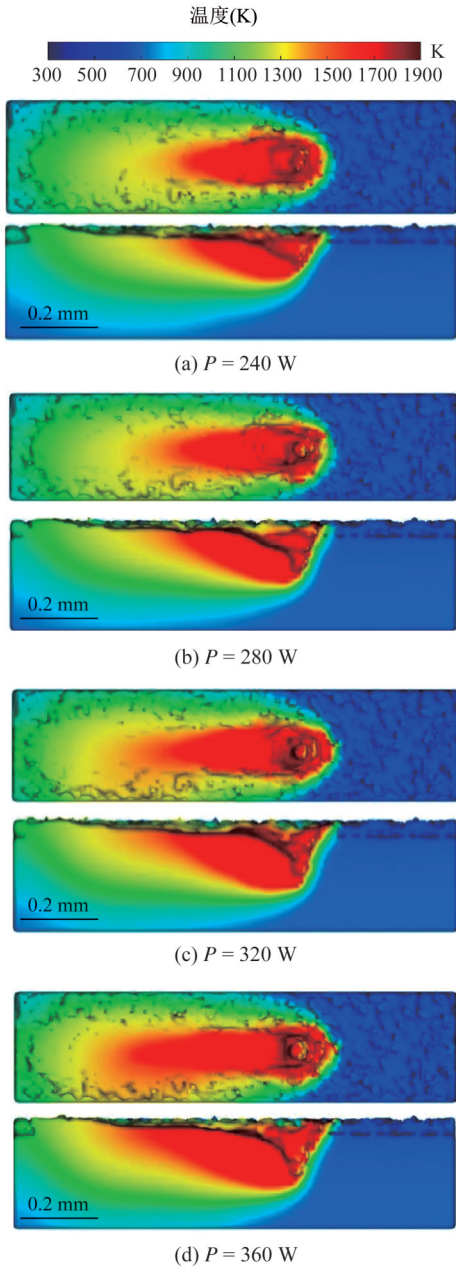


图3 不同激光功率下的温度场( $v=80\text{ mm/s}$ )

Fig.3 Temperature fields under different laser powers

( $v=80\text{ mm/s}$ )

通过温度场仿真得出熔池在三个维度上的几何尺寸,长度通常大于深度和宽度。由于激光扫描过程中,熔池沿着激光移动的方向延展,因此长度最大。热能输入越多,熔化的材料越多,形成的熔池也更大。从图4中可以清楚看出,激光功率

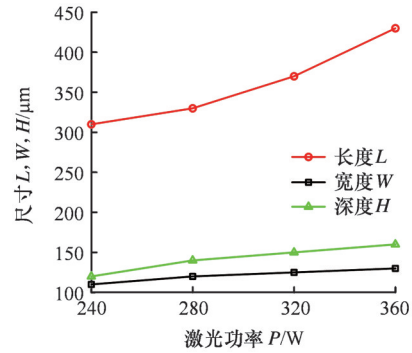


图4 熔池尺寸随激光功率的变化

Fig.4 Change of molten pool size with laser power

的提高与熔池体积增大之间存在正向关系。

取熔池中线上某点为固定观测点(如图5所示的“+”位置),在不同激光功率和扫描速度下对该观测点的温度变化情况进行全面观测。图6显示了不同激光功率下观测点的温度曲线,可见熔池温度随激光功率的变化而发生显著变化。

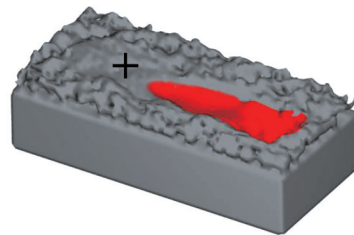


图5 冷却速率观测点

Fig.5 Cooling rate monitoring point

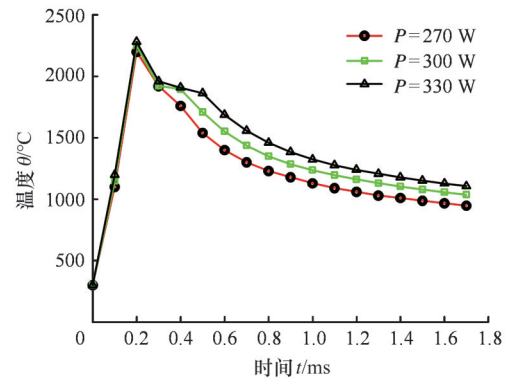


图6 不同激光功率下观测点的温度曲线

Fig.6 Temperature curves of the monitoring point under different laser powers

激光热源与粉末床作用时,熔池内部最高温度和平均温度迅速升高并在0.2 ms时到达峰值。当激光功率从270 W增至330 W时,熔池最高温度从2198.26 °C升至2282.41 °C。图7所示为不同时刻下固定观测点的冷却速率,可见,在0.2 ms时冷却速率最大,而在0.3 ms时冷却速率快速下降,这是由于熔池内部热量较高,需要通过粉末颗粒散发热量,而激光热源持续加热周围粉末减缓了冷却速率。

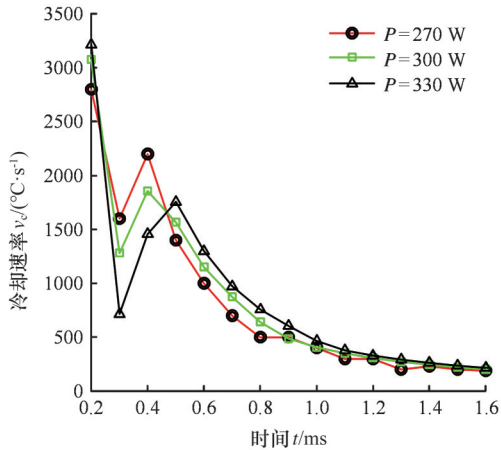


图7 不同激光功率下观测点的冷却速率  
Fig.7 Cooling rates of the monitoring point under different laser powers

图8所示为不同激光功率下熔池的速度场,可以观察到在激光作用下,熔池明显形成了凹面,这主要是熔池蒸发产生的推力和高温液态金属向较冷区域流动时引起的 Marangoni 效应所致。从图中可以看出,熔池底部的金属流动更为迅速,这促使在熔池的尾部形成环流,并持续向凹陷处补充材料。但是,由于金属的快速融化和凝固,熔池内气体来不及溢出,会残留在凝固组织内部形成规则状的气孔<sup>[29]</sup>。

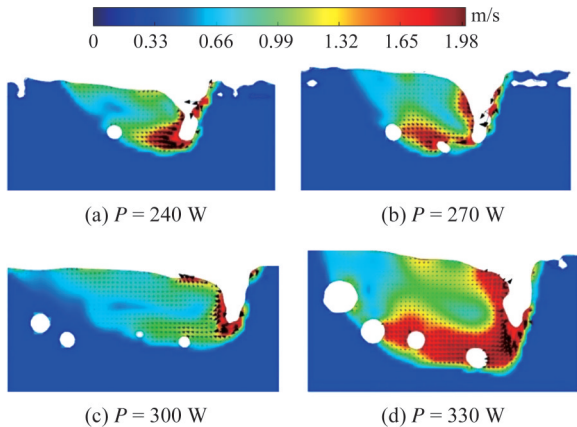


图8 不同激光功率下熔池的速度场  
Fig.8 Velocity fields of molten pool under different laser powers

当激光功率为 240 W 时,熔池在反冲力和 Marangoni 对流的作用下形成了环流,使得后方熔体对凹陷区域不完全填充从而产生气泡。熔池前端和底部流速达到最大流速 10.7 m/s,如图 8a 所示。随着激光功率的提高,热量的累积使温度进一步升高,熔池深度以及沿扫描方向的长度越来越大,致使反冲压力增大,从而使凹陷程度进一步加深,熔池中更多的气泡被环流带至熔池尾部。如图 8d 所示,当激光功率从 240 W 增至 330

W 时,熔池内部最高流速从 10.7 m/s 升至 16.3 m/s。通过对载荷垂直方向进行切片可以近似计算出孔隙率和最大气孔投影面积。图 9 所示为激光功率对孔隙率和最大气孔投影面积的影响。

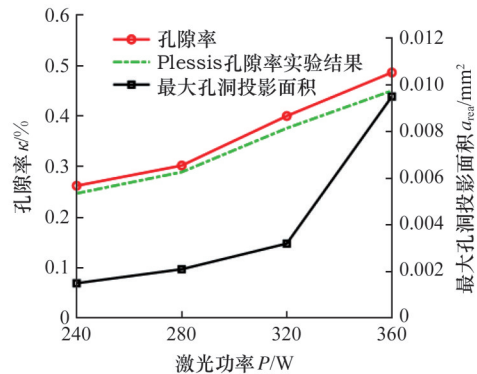


图9 激光功率对孔隙率和最大气孔投影面积的影响  
Fig.9 Effects of laser power on porosity and maximum pore projection area

可以看出,孔隙率和最大气孔投影面积随着激光功率的增加均呈增长趋势。通过数值模拟可以发现,孔隙率随着激光功率的提高呈上升趋势,这是由于热流密度的增大导致材料反冲力加剧,该仿真结果在与文献[30]的实验结果对比中得到了很好的验证。传统缺陷统计完全依赖现场检测,成本较高,难度较大,而仿真模拟有助于减少检测成本、缩短开发周期。通过上述研究可全面获取气孔缺陷的数量、位置、大小、形状等信息,有助于深入了解缺陷形成机理、合理提取缺陷关键特征。

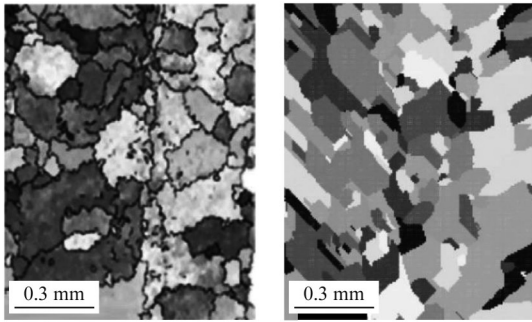
## 2.2 组织凝固分析

利用二维 CA 模型对 Ti-6Al-4V 熔池凝固过程进行数值模拟,获得 SLM 构件 RVE 的微观组织形貌,并与文献[31]的实验结果进行了对比,如图 10a 所示。

由图 10a 可见,熔池中线位置易于生成细小的等轴晶,抑制了柱状晶的外延生长。原因是对于小范围快速升温的钛合金 SLM 熔池,熔池中线处温度高、与周围环境之间温差大,根据热导率随温度变化规律和牛顿冷却定律,可判定此处具有较小温度梯度和较高冷却速率,有利于高密度均匀形核。这一分析在本文数值模拟中得到了证实,如图 10b 所示。

图 11 所示为忽略直径小于 2 μm 晶粒后,实验与仿真得到的晶粒尺寸对比。可以看出,晶粒尺寸分布基本一致,微观组织演化模拟的二维 CA 模型能够有效地复现 Ti-6Al-4V 微观组织,输出组织形貌、晶粒尺寸与取向分布等信息。

在计算域中选取边长为 150 μm 的正方体作



(a) 实验所得微观组织<sup>[31]</sup> (b) 本文模拟所得微观组织

图 10 模拟结果与实验对比

Fig.10 The result comparison between numerical simulations and experiments

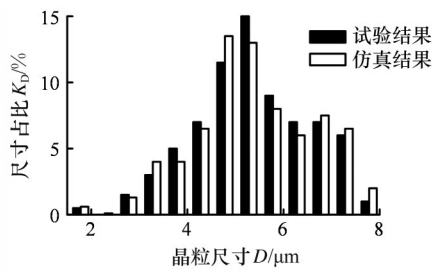


图 11 晶粒尺寸对比

Fig.11 Comparison of the grain size

为 RVE, 将 RVE 划分为  $50 \times 50 \times 50$  个单元格的三维元胞空间(如图 12 所示)。将介观熔池仿真得到的温度场数据按照时间步导入 MATLAB, 再通过线性插值映射到元胞空间中。

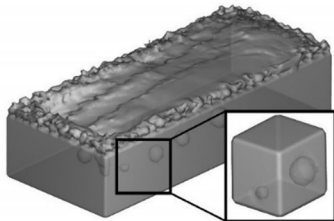


图 12 RVE 的选取

Fig.12 Selection of the RVE

选择激光功率分别为 270 W、300 W、330 W, 扫描速度为 800 mm/s, 层厚为  $60 \mu\text{m}$ , 扫描间距为  $90 \mu\text{m}$ , 对 RVE 晶粒尺寸和缺陷特征进行统计。激光功率为 330 W 时, 微观组织演化过程如图 13 所示。所建三维 CA 模型可模拟出构件 RVE 的晶粒尺寸分布, 得到最大、最小以及平均晶粒尺寸, 晶粒尺寸随激光功率的变化情况如图 14 所示, 可以看出, 随着激光功率的增大, 晶粒尺寸呈减小趋势。

晶粒尺寸随激光功率的增大而减小, 可归因于过冷度的增大。增大激光功率使得熔池凝固时的冷却速率显著提高(图 7), 导致过冷度增大, 更容易提高形核率。大量晶核在短时间内形成并快

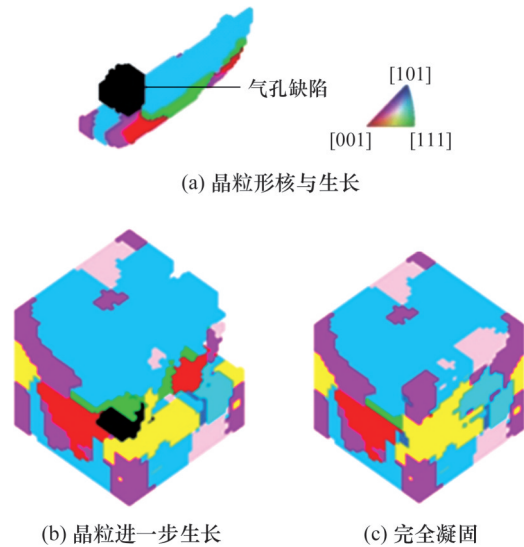


图 13 微观组织演化过程

Fig.13 Microstructure evolution process

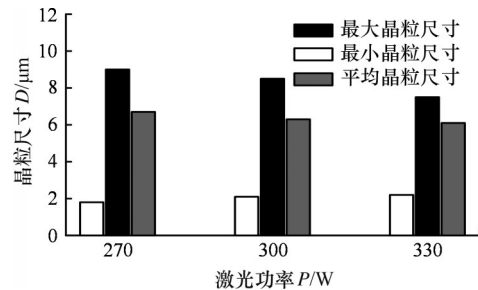


图 14 晶粒尺寸随激光功率的变化

Fig.14 Change of grain size with laser power

速长大到一定尺寸后停止生长, 最终形成细小的晶粒结构。相反, 减小激光功率则导致熔池凝固时冷却速率降低、形核率低, 为每个晶体的生长提供了更多时间和能量, 从而导致晶粒尺寸增大。

### 2.3 疲劳性能分析

多晶体应力有明显的差异性, 晶界处容易出现应力集中。无论是钛合金的  $\alpha$  相(HCP 晶格)还是  $\beta$  相(BCC 晶格), 均呈现各向异性, 在择优取向上弹性模量大从而表现为“硬”晶粒, 而在不利取向上弹性模量小从而表现为“软”晶粒。在加载条件下, 由于多晶体的局部软硬不均匀特征导致敏感部位高应力集中, 特别是在硬软晶粒的交界处, 更易导致微裂纹的萌生<sup>[32]</sup>。通过 RVE 应力应变分布可以判定构件微裂纹形核位置。

根据微观组织演化的模拟结果建立 RVE 多晶体有限元模型, 以扫描方向为横向, 以增材方向为纵向, 分别在各方向施加 1% 拉伸位移并求解, 可获得相应的 Mises 应力分布。激光功率 330 W、扫描速度 80 mm/s、横向拉伸下的 RVE 应力分布如图 15 所示, 气孔缺陷处的应力分布如图 16 所示。

在软硬晶粒交界处, 硬晶粒区出现高应力, 软

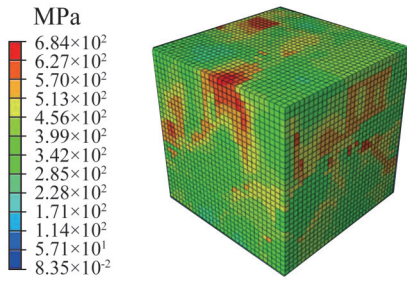
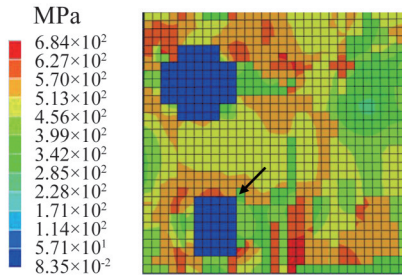
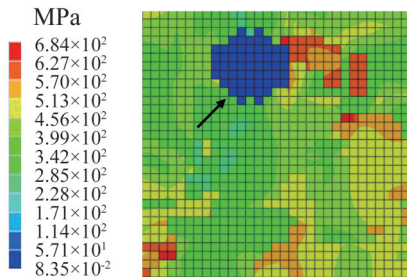


图15 横向拉伸下的RVE应力场

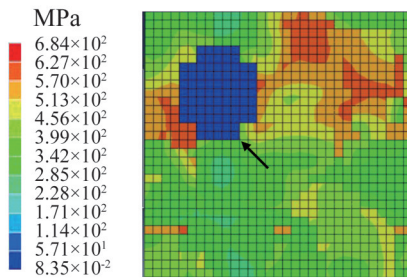
Fig.15 RVE stress field under transverse tensile



(a) 295 μm²气孔处的应力分布



(b) 310 μm²气孔处的应力分布



(c) 415 μm²气孔处的应力分布

图16 横向拉伸下气孔缺陷处应力分布

Fig.16 Stress distribution at the pore defects under transverse tensile

晶粒区出现低应力。RVE最大应力达684 MPa, 位于投影面积295 μm²的气孔附件。横向、纵向加载下不同气孔处的最大Mises应力如表1所示。

根据表1数据和气孔位置信息,利用式(14)~式(16)评估各缺陷的几何修正因子Y并计算应力强度因子,结果如表2所示。

由表2数据可见,纵、横向加载下最危险缺陷均为1号气孔。针对该缺陷,设定应力比R=0,采用式(18)对激光功率分别为270 W、300 W、330 W、360 W以及扫描速度分别为70 mm/s、80

表1 拉伸加载下气孔缺陷附近的最大Mises应力

Tab.1 Maximum Mises stresses near pore defects under tensile loading

气孔序号	气孔投影面积/μm²		最大Mises应力/MPa
	横向加载	纵向加载	
1	295		684
		295	678
2	310		627
		275	565
3	415		627
		405	621

表2 气孔缺陷的应力强度因子

Tab.2 Stress intensity factors of pore defects

气孔序号	气孔投影面积/μm²	缺陷至表面距离/μm	应力强度因子/(MPa·m <sup>1/2</sup> )
1	295(横向加载)	30	103.2
	295(纵向加载)	30	102.4
2	310(横向加载)	37	95.9
	275(纵向加载)	34	83.8
3	415(横向加载)	40	103.1
	405(纵向加载)	40	101.5

mm/s、90 mm/s时SLM钛合金构件RVE进行疲劳强度预测,得到工艺参数与疲劳强度之间的定量关系,如图17所示。

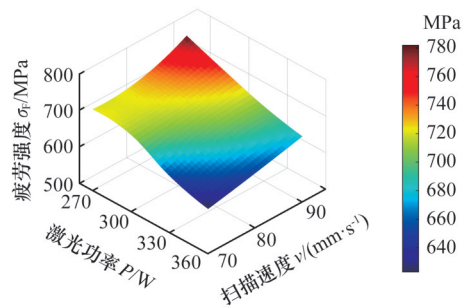


图17 工艺参数与疲劳强度之间的关系

Fig.17 Relationship between process parameters and fatigue strength

可以看出,随着激光功率的提高以及扫描速度的下降,熔池热流密度变大,材料疲劳极限呈下降趋势,这与所形成的孔隙率及最大气孔投影面积成正相关,与所形成气孔至表面距离成负相关。结合不同工艺参数下熔池速度场可以发现,金属的快速融化与凝固,导致熔池内气体来不及溢出,残留在凝固组织内部形成气孔。改变工艺参数增大熔池热流密度时,熔池底部的金属流动更为迅速,可能将更多气体携带到熔池尾部或底部并将其捕获于固化区域,使得缺陷尺寸增大、疲劳强度降低。

### 3 结论

为研究选区激光熔化(SLM)工艺参数与成形

件微结构、疲劳性能之间的关系构建了多尺度模型,具体包括介观熔池仿真、微观组织演化、宏观性能预测三个环节;针对SLM钛合金Ti-6Al-4V构件进行了数值模拟和计算分析。得到以下结论:

1) 基于有限体积法(FVM)和离散元法(DEM)构建熔池动力学模型,能够有效模拟出气孔缺陷演化过程。仿真结果表明,激光功率的提高会导致温度梯度和表面张力梯度显著降低,加剧了Marangoni效应从而使孔隙率和最大气孔投影面积增大。

2) 采用连续形核模型和基于过冷度与生长速率关系的枝晶生长模型,基于元胞自动机(CA)能够有效模拟出代表性体积单元(RVE)微观组织演化过程。模拟结果表明,激光功率的增大有助于细化晶粒尺寸。

3) 根据微观组织演化的仿真结果,通过多晶有限元分析得到内部气孔附近的应力分布,进一步计算应力强度因子评估不同缺陷的危险等级,从而对宏观疲劳性能进行预测,可为SLM工艺优化和数字孪生提供参考。

#### 参考文献:

[1] 吴圣川, 胡雅楠, 杨冰, 等. 增材制造材料缺陷表征及结构完整性评定方法研究综述[J]. 机械工程学报, 2021, 57(22):3-34.  
WU Shengchuan, HU Yanan, YANG Bing, et al. Review on Defect Characterization and Structural Integrity Assessment Method of Additively Manufactured Materials[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(22):3-34.

[2] 宋波, 张金良, 章媛洁, 等. 金属激光增材制造材料设计研究进展[J]. 金属学报, 2023, 59(1):1-15.  
SONG Bo, ZHANG Jinliang, ZHANG Yuanjie, et al. Research Progress of Materials Design for Metal Laser Additive Manufacturing[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2023, 59(1):1-15.

[3] GONG Haijun, RAFI K, GU Hengfeng, et al. Influence of Defects on Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Components Produced by Selective Laser Melting and Electron Beam Melting[J]. Materials & Design, 2015, 86:545-554.

[4] HU Y N, WU S C, WU Z K, et al. A New Approach to Correlate the Defect Population with the Fatigue Life of Selective Laser Melted Ti-6Al-4V Alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 136:105584.

[5] 张涛. 基于元胞自动机的BGA锡铅焊球凝固过程模拟研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2020.

ZHANG Tao. Simulation Study of Solidification Process of BGA Tin-lead Solder Ball Based on Cellular Automaton[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2020.

[6] 王岩, 刘雨萌, 刘江伟, 等. 金属增材制造数值模拟研究进展[J]. 粉末冶金技术, 2022, 40(2):179-192.  
WANG Yan, LIU Yumeng, LIU Jiangwei, et al. Research Progress on Numerical Simulation of Metal Additive-manufacturing Process[J]. Powder Metallurgy Technology, 2022, 40(2):179-192.

[7] 陶攀, 李怀学, 许庆彦, 等. 激光选区熔化工过程数值模拟的国内外研究现状[J]. 铸造, 2017, 66(7):695-701.  
TAO Pan, LI Huaixue, XU Qingyan, et al. Research Status of Numerical Simulation of Selective Laser Melting Process at Home and Abroad [J]. Foundry, 2017, 66(7):695-701.

[8] 周辉. 镍基焊缝中高温失塑裂纹产生机制的晶体塑性研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2019.  
ZHOU Hui. Crystal Plasticity Analysis of the Mechanism of Ductility Dip Cracking in Ni-based Weld Metal[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.

[9] HERZOG D, SEYDA V, WYCISK E, et al. Additive Manufacturing of Metals[J]. Acta Materialia, 2016, 117:371-392.

[10] 张云舒, 邵丹丹, 丁东红, 等. 层间强制冷却对电弧熔丝增材制造钛合金温度场和应力场的影响[J]. 电焊机, 2023, 53(2):111-116.  
ZHANG Yunshu, SHAO Dandan, DING Donghong, et al. Effect of Active Interpass Cooling on Temperature and Thermal Stress Evolution of Wire Arc Additively Manufactured Ti6Al4V Alloy [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(2):111-116.

[11] PRIBE J D, RICHTER B, LESER P E, et al. A Process-structure-property Simulation Framework for Quantifying Uncertainty in Additive Manufacturing: Application to Fatigue in Ti-6Al-4V[J]. Integrating Materials and Manufacturing Innovation, 2023, 12(3):231-250.

[12] KÖRNER C, MARKL M, KOEPF J A. Modeling and Simulation of Microstructure Evolution for Additive Manufacturing of Metals: a Critical Review[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2020, 51(10):4970-4983.

[13] GETLING A V. Rayleigh-Bénard Convection: Structures and Dynamics[M]. Singapore: World Scientific, 1998.

[14] KING W E, ANDERSON A T, FERENCZ R M, et al. Laser Powder Bed Fusion Additive Manufac-

- turing of Metals; Physics, Computational, and Materials Challenges [J]. Applied Physics Reviews, 2015, 2(4):041304.
- [15] 申梦清, 苗秉希, 牛晓峰. 316L不锈钢的激光选区熔化多道成形数值模拟研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(7):894-897.  
SHEN Mengqing, MIAO Bingxi, NIU Xiaofeng. Numerical Simulation of Multi-pass Laser Selective Melting Forming of 316L Stainless Steel[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(7):894-897.
- [16] THÉVOZ P, DESBIOLLES J L, RAPPAZ M. Modeling of Equiaxed Microstructure Formation in Casting[J]. Metallurgical Transactions A, 1989, 20(2):311-322.
- [17] 许林, 郭洪民, 杨湘杰. 元胞自动机法模拟铝合金三维枝晶生长[J]. 铸造, 2005, 54(6):575-578.  
XU Lin, GUO Hongmin, YANG Xiangjie. Simulating the Three-dimensional Dendritic Growth of Al Alloy Using the Cellular Automata Method [J]. Foundry, 2005, 54(6):575-578.
- [18] 支颖, 王振范, 刘相华. 元胞自动机在金属材料研究中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2020.  
ZHI Ying, WANG Zhenfan, LIU Xianghua. Application of Cellular Automata in Research on Metal Materials[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [19] KURZ W, GIOVANOLA B, TRIVEDI R. Theory of Microstructural Development during Rapid Solidification [J]. Acta Metallurgica, 1986, 34(5):823-830.
- [20] HU Y N, WU S C, WITHERS P J, et al. The Effect of Manufacturing Defects on the Fatigue Life of Selective Laser Melted Ti-6Al-4V Structures [J]. Materials & Design, 2020, 192:108708.
- [21] OLIVEIRA J P, SANTOS T G, MIRANDA R M. Revisiting Fundamental Welding Concepts to Improve Additive Manufacturing: from Theory to Practice [J]. Progress in Materials Science, 2020, 107:100590.
- [22] SERRANO-MUNOZ I, BUFFIERE J Y, MOKSO R, et al. Location, Location & Size: Defects Close to Surfaces Dominate Fatigue Crack Initiation [J]. Scientific Reports, 2017, 7:45239.
- [23] DEZECOT S, MAUREL V, BUFFIERE J Y, et al. 3D Characterization and Modeling of Low Cycle Fatigue Damage Mechanisms at High Temperature in a Cast Aluminum Alloy [J]. Acta Materialia, 2017, 123:24-34.
- [24] WALKER K F, LIU Q, BRANDT M. Evaluation of Fatigue Crack Propagation Behaviour in Ti-6Al-4V Manufactured by Selective Laser Melting [J]. International Journal of Fatigue, 2017, 104:302-308.
- [25] LE V D, PESSARD E, MOREL F, et al. Fatigue Behaviour of Additively Manufactured Ti-6Al-4V Alloy: the Role of Defects on Scatter and Statistical Size Effect [J]. International Journal of Fatigue, 2020, 140:105811.
- [26] MURAKAMI Y. Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions [M]. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2019.
- [27] MURAKAMI Y, BERETTA S. Small Defects and Inhomogeneities in Fatigue Strength: Experiments, Models and Statistical Implications [J]. Extremes, 1999, 2(2):123-147.
- [28] WU S C, SONG Z, KANG G Z, et al. The Kitagawa-Takahashi Fatigue Diagram to Hybrid Welded AA7050 Joints via Synchrotron X-ray Tomography [J]. International Journal of Fatigue, 2019, 125:210-221.
- [29] KHAIRALLAH S A, ANDERSON A T, RUBENCHIK A, et al. Laser Powder-bed Fusion Additive Manufacturing: Physics of Complex Melt Flow and Formation Mechanisms of Pores, Spatter, and Denudation Zones [J]. Acta Materialia, 2016, 108:36-45.
- [30] Du PLESSIS A. Effects of Process Parameters on Porosity in Laser Powder Bed Fusion Revealed by X-ray Tomography [J]. Additive Manufacturing, 2019, 30:100871.
- [31] ANTONYSAMY A A, MEYER J, PRANGNELL P B. Effect of Build Geometry on the B-grain Structure and Texture in Additive Manufacture of Ti6Al4V by Selective Electron Beam Melting [J]. Materials Characterization, 2013, 84:153-168.
- [32] 廉艳平, 王潘丁, 高杰, 等. 金属增材制造若干关键力学问题研究进展 [J]. 力学进展, 2021, 51(3):648-701.  
LIAN Yanping, WANG Panding, GAO Jie, et al. Fundamental Mechanics Problems in Metal Additive Manufacturing: a State-of-art Review [J]. Advances in Mechanics, 2021, 51(3):648-701.

(编辑 王旻玥)

作者简介: 周金宇\*(通信作者), 男, 1973年生, 教授。研究方向为机械可靠性、增材制造、现代设计方法。E-mail: yu-hangyuan888@sina.com。

#### 本文引用格式:

周金宇, 陈逸飞. 基于多尺度模拟的选区激光熔化金属件疲劳性能预测 [J]. 中国机械工程, 2025, 36(9):2087-2096.

ZHOU Jinyu, CHEN Yifei. Prediction of Fatigue Property of SLM Metal Parts Based on Multi-scale Simulations [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(9):2087-2096.