

定向能量沉积钛合金相变模拟研究

刘玉婷¹ 陈明威² 翟文正²

1.太原理工大学纺织工程学院, 山西 太原 030600

2.华中科技大学机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074

[摘要]针对定向能量沉积 (DED) 损伤容限型 TC4-DT 钛合金非平衡冷却过程中 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变组织不均匀的问题, 文章构建了基于非平衡驱动力、各向异性界面能与长程弹性相互作用的相场模型, 并嵌入形核算法, 实现了形核-生长-粗化的跨阶段模拟。并系统研究了弹性应变能对变体竞争路径的择优效应、冷却速率对形核密度和板条尺度的定量调控, 以及热源对横向组织均匀性的优化。结果表明, 弹性应变能使变体竞争强度指数提升约 144%, 是诱发织构取向和力学各向异性的核心物理机制; 当冷速由 100K/s 升至 200K/s 时, 过冷度积累加速使有效形核数增加约 38%, 平均等效直径细化 28.2%, 其本质是高冷速抑制了 Ostwald 熟化。特别地, 文章提出“特征尺寸不均匀度系数 (δ)”作为工艺评价指标, 发现振荡激光通过均化横向热通量分布, 将中心-边缘的 δ 值由纯电弧模式的 32.4% 大幅压缩至 6.8%, 近乎消除位置依赖的组织离散性。结合损伤容限需求, 建立了“板条尺度-裂纹偏转韧性增量”的量化映射, 为 DED 钛合金热源工艺定向设计提供了详实的物理-力学基础。

[关键词]定向能量沉积; TC4-DT 钛合金; 损伤容限; 相场法

DOI: 10.33142/nsr.v3i3.20396

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

Simulation Study on Phase Transformation of Directional Energy Deposition Titanium Alloy

LIU Yuting¹, CHEN Mingwei², ZHAI Wenzheng²

1. College of Textile Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, 030600, China

2. School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei, 430074, China

Abstract: In response to the problem of uneven $\beta \rightarrow \alpha$ phase transition microstructure in the non-equilibrium cooling process of directional energy deposition (DED) damage tolerant TC4-DT titanium alloy, this paper constructs a phase field model based on non-equilibrium driving force, anisotropic interface energy, and long-range elastic interaction, and embeds shape calculation method to achieve cross stage simulation of nucleation growth coarsening. The optimal effect of elastic strain energy on the competitive path of variants, the quantitative regulation of cooling rate on nucleation density and flat noodles size, and the optimization of heat source on transverse tissue uniformity were systematically studied. The results indicate that elastic strain can increase the competitive strength index of variants by about 144%, which is the core physical mechanism for inducing texture orientation and mechanical anisotropy; When the cooling rate increases from 100 K/s to 200 K/s, the accumulation of undercooling accelerates the effective nucleation number by about 38%, and the average equivalent diameter is refined by 28.2%. Its essence is that the high cooling rate inhibits Ostwald ripening. Specifically, the article proposes the "characteristic size non-uniformity coefficient (δ)" as a process evaluation index, and finds that oscillating laser significantly compresses the δ value of the center edge from 32.4% in pure arc mode to 6.8% by homogenizing the transverse heat flux distribution, almost eliminating the position dependent tissue discreteness. Combined with the requirement of damage tolerance, the quantitative mapping of "Flat noodles scale - crack deflection toughness increment" is established, which provides a detailed physical mechanical basis for the directional design of heat source process of DED titanium alloy.

Keywords: directed energy deposition; TC4-DT titanium alloy; damage tolerance; phase field method

引言

TC4-DT 钛合金是在传统 TC4 基础上通过优化杂质元素（如 Fe、O）含量和显微组织形态发展而来的损伤容限型材料，其断裂韧性（ K_{IC} ）通常可达 $85 \sim 100 \text{MPa m}^{1/2}$ ，较常规 TC4 提升约 20%^[1,2]。这一特性使其在飞机承力框架等承受交变载荷的关键承力件上具有不可替代的优势。然而，定向能量沉积（DED）制造过程中，移动热源引发的高度非稳态热循环使得不同空间位置的 $\beta \rightarrow \alpha$ 固态相变热历史截然不同，极易形成“熔池中心粗厚板条+边缘细小板条”的组织梯度^[3]。这种梯度直接导致构件横截面上损伤容限性能的剧烈波动，严重削弱了材料的设计初衷。

为抑制柱状晶并改善组织均匀性，研究者尝试了多种辅助手段，其中振荡激光因其可精准调控熔池流动和热场分布而受到广泛关注^[4]。振荡激光通过改变光斑运动轨迹（如“ ∞ ”字形或螺旋形）增大了热源与粉末/基体的有效交互面积，降低了熔池中心的温度峰值并提高了边缘热输入，从而缩小了横向温差。但现有研究多停留于宏观熔池形貌和晶粒尺寸层面，对振荡激光如何通过改变 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变动力学关键参数（如冷却速率、过冷度积累时间）来影响纳米/微米级 α 板条的尺度与变体组织，尚缺乏定量的认知。

数值模拟是填补“宏观热工艺”与“微观组织响应”之间空白的有效工具。相场法则因其在描述复杂界面迁移、弹性能耦合及多重竞争方面具有天然优势，已成为模拟固态相变的首选方法^[5,6]。然而，已有相场研究大多对弹性应变能进行简化处理或直接忽略，但钛合金 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变伴随约 6.5% 的晶格错配应变，且 α 变体呈强烈的各向异性弹性交互作用。忽略弹性能往往得到各向同性、随机交织的假性组织，这与实验中观察到的束域（colony）或魏氏组织相去甚远^[7,8]。因此，如何精准引入弹性能，并量化其对变体选择的“筛选”权重，是提升模拟预见性的关键。

基于上述问题，本文在前人宏观有限元热场计算的基础上，构建了一个包含化学自由能、各向异性界面能及完整 Khachaturyan 微观弹性场的高保真相场模型。研究目标聚焦于：（1）揭示弹性应变能如何改变变体间的竞争优势，量化其“组织筛选”强度；（2）建立冷却速率与 α 板条等效直径、数密度之间的定量关系，阐明粗化抑制机理；（3）首次引入“组织不均匀度系数” δ ，定量评价振荡激光对缩小中心-边缘组织差异的实际功效，并将其与损伤容限性能建立跨尺度关联。本文成果旨在为 DED 热源模式优选及变冷却策略制定提供直接的“热-力-组织-

性能”全链条理论支撑。

1 模型构建与物理参数

1.1 热力学自由能与序参量场

根据 Burgers 取向关系可知， β 母相中的 α 相共有 12 种晶体学变体，为了保证计算精度的同时又能提高计算效率，本文对它做了等效简化处理，最终得到 6 个有效的变体，这六个有效变体用序参量 $\eta_1 \sim \eta_6$ 来表示，所有序参量的取值范围是 $[0, 1]$ ，同时还要满足局部守恒条件 $\sum \eta_p = 1$ 。本文所用总亥姆霍兹自由能泛函主要是由三个部分组成，具体表达式为 $F = F_{\text{chem}} + F_{\text{int}} + F_{\text{el}}$ 。化学自由能密度选择适合于多变体体系的 Landau 多项式，其优势就是可以通过调节低阶项系数来形成双势阱-势垒型的能量结构，相应的具体密度函数表达式如下：

$$f_{\text{chem}} = \frac{1}{v_m} \left[\frac{A}{2} \sum_{p=1}^6 \eta_p^2 - \frac{B}{3} \sum_{p=1}^6 \eta_p^3 + \frac{C}{4} \left(\sum_{p=1}^6 \eta_p^2 \right)^2 \right] \quad (1)$$

其中 $A = \Delta G$ （即母相稳定能垒）， $B = 3A + 12\Delta G_m$ ， $C = 2A + 12\Delta G_m$ ，为当前温度下 α 与 β 相的摩尔 Gibbs 自由能差，多项式形式具有非常突出的优点，三次项可以给相变过程提供有非线性特性的相变驱动力，四次项平方和自带交叉耦合项，能够自然体现各种变体之间的相互排斥作用，该特性也可以避免引入拉格朗日乘子、人为地对总分进行约束等复杂的操作，使模型更加简洁合理。

界面能密度只考虑序参量梯度贡献：

$$F_{\text{int}} = \frac{1}{v_m} \int f_{\text{int}}(\mathbf{r}) d\Omega \quad (2)$$

其中 $\mathbf{k}$ 为受变体取向影响的各向异性界面张量，不同于传统的各向同性假设，这种各向异性的处理方式可以真实地反映 α 板条沿特定惯习面择优伸长的物理特征，也是模拟出符合实际晶粒长径比形貌的关键前提。

1.2 长程弹性相互作用的傅里叶嵌入

弹性应变能的计算是本文模型构建的主要内容，本文以 Khachaturyan 微观弹性理论为基础，把体系局部本征应变场设置为所有变体本征应变按序参量加权线性叠加的形式，即 $\epsilon_{ij}^0(\mathbf{r}) = \sum_{p=1}^6 \eta_p(\mathbf{r}) \epsilon_{ij}^{00}(\mathbf{p})$ 。该模型中弹性应变能没有使用简单的局部积分法，而是用格林函数的方法来耦合整个域的力学平衡条件，在傅里叶空间中实现了精确的量化表达：

$$F_{\text{el}} = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^6 \sum_{q=1}^6 \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} B_{pq}(\mathbf{n}) \{ \tilde{\eta}_p \}_k \{ \tilde{\eta}_q \}_k^* \quad (3)$$

核函数 $B_{pq}(\mathbf{n})$ 具体分段为：

$$B_{pq}(n) = \begin{cases} C_{ijkl}\epsilon_{ij}^{00}(p)\epsilon_{kl}^{00}(q) & k = 0 \\ C_{ijkl}\epsilon_{ij}^{00}(p)\epsilon_{kl}^{00}(q) - n_i\epsilon_{ij}^{00}(p)\Omega_{jk}^{-1}(n)\epsilon_{kl}^{00}(q)n_l & k \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中 $\Omega_{jk}=C_{ijkl}n_l n_l$ ，其物理机制可以解释为：当不同变体在空间内以特定取向分布排列时，各自产生的应变场会发生弹性交互作用、相互抵消，进而有效降低整个系统的总能量。典型的例子就是 v_1 与 v_4 变体，二者以接近 60° 的空间夹角相邻分布时，主应变分量会形成良好的互补抵消效果，这也是实验中能够普遍观测到束域结构的根本热力学成因。

本征应变 $\epsilon_{ij}^{00}(p)$ 依据 Burgers 取向关系，先结合晶格常数构建正交归一化基，再通过旋转变换矩阵搭配对称操作，逐一算出 6 个变体对应的应变张量分量。

1.3 形核参数与 FE-PF 耦合执行

本文针对连续冷却过程中的非均匀形核行为，采用经典的 Poisson 概率模型。单元形核概率 $P=1-\exp[-J\Delta t]$ ($-JV_{cell}\Delta t$)，其中形核率 J 对温度驱动力极为敏感，主要由指数项 $\exp[-\frac{U^*}{kT}]$ ($-\Delta G^*/kBT$) 主导，而临界核胚能垒 $\Delta G^*=16\pi\gamma\alpha\beta 33\Delta G_v/2$ 。在数值迭代过程中，每一个时间步增量内，程序都会遍历所有网格单元。针对尚未发生相变的单元，通过生成随机数并与实时计算的形核概率 P 比对判断，若满足形核条件，便为该单元随机分配一种变体并生成初始核胚，对应序参量取值设为 $\eta_P=0.5$ 。

FE-PF 耦合方面，选取 $128 \times 128 \times 128$ 网格，物理间距 250nm ，RVE 尺寸 $32\mu\text{m}$ ，该尺度足以捕捉板条间距且远小于宏观热影响区，因此忽略内部温度梯度。将前期有限元计算获得的典型节点冷却曲线（涵盖纯电弧与振荡激光-电弧复合热源，以及中心、边缘特定位置）作为温度载荷输入，时间步长设为 2ms ，冷却速率工况分别设定为 100K/s 、 150K/s 与 200K/s 。初始相变温度设定为 1346K ，此温度略高于 CALPHAD 计算的平衡相变点，用以表征 DED 非平衡冷却过程中因过冷度带来的实际形核起始延迟。

2 结果分析与机理讨论

2.1 弹性应变能的“方向性筛选”效应与竞争强度量化

在不考虑弹性能的对照组中，早期形核 (step 50) 呈现完全随机离散特征，各变体彼此独立生长，界面主要受限于局部曲率效应；演化至中期 (step 200~400)，相邻晶粒发生物理接触，但并未表现出明显的取向聚集倾向；终态 (step 3000) 形貌呈现典型的等轴状或近球状交织，各变体分数差异不大，竞争强度指数 $S_0 \approx 0.052$ ，主要源于随机形核的统计涨落。

在引入弹性能的模拟组中，演化路径发生本质改变。

早期 (step 50) 即可观察到少量变体 (如 v_3 、 v_5) 优先在局部区域簇集，这是由于特定组合的弹性交互核函数 B_{pq} 为负值，意味着两变体共格应变能降低。随着演化推进 (step 200~400)，这种局部簇集沿特定晶体学方向 (如 $\langle 101 \rangle \beta$) 拉长，形成层片状束域，并迅速吞并周围不利取向的孤立变体。终态 (step 3000) 组织中， v_3 和 v_5 占据绝对主导， v_1 、 v_6 几乎被完全抑制，此时竞争强度指数跃升至 $S=0.127$ ，较无弹性能情形放大约 144%。同时，序参量的时间演化曲线显示，有弹性能时系统约在 step 800 即进入稳态，而无弹性能时持续演化至 step 1500 才缓慢停滞，说明弹性能加速了变体选择的收敛过程。

将终态形貌与实验 EBSD/SEM 图像分析，实验组织中的 α 板条呈长约 $10 \sim 20\mu\text{m}$ 、宽约 $1 \sim 2\mu\text{m}$ 的层片特征，而非球状；不同束域间呈现明显约 60° 或 120° 的取向差，这与本文弹性交互核函数所预测的“低弹性能组合”高度吻合。上述对比有力证明：弹性应变能并非简单修正项，而是决定 TC4-DT 钛合金 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变终态织构类型与力学各向异性的核心“筛选器”。若忽略该物理场，模拟结果将出现定性偏差，无法用于指导实际工艺优化。

2.2 冷却速率对形核密度与板条尺度的定量调控及粗化抑制机理

冷却速率通过改变相变驱动力 ΔG_v 随时间的积累速率，直接影响形核率 J 和临界核半径 $r^*=2\gamma/\Delta G_v$ 。

首先，从形核动力学看，冷速 100K/s 时，形核概率曲线上升平缓，有效形核窗口持续时间约 1.2s ，总形核数为 132 个；冷速 200K/s 时，过冷度快速跨越临界值，形核率在短时间内急剧攀升至峰值，总形核数达到 182 个，增幅达 37.9%。这是因为高冷速使得系统在 $1150 \sim 1200\text{K}$ 活跃相变窗口内“停留”时间较短，驱动力变化率 $d(\Delta G_v)/dt$ 大，促使大量临界核胚在极短时间内突破势垒。

其次，从终态板条尺度看， 100K/s 时，由于形核稀疏且生长时间长，相邻析出物间距较大，界面驱动力主导的 Ostwald 熟化过程充分进行，小尺寸板条溶解、大尺寸板条粗化，平均等效直径达到 $1.56\mu\text{m}$ ，且分布较为分散 (标准差 $0.42\mu\text{m}$)。冷速提升至 200K/s 后，高密度形核使得单位体积内晶界/相界总面积剧增，分割了基体中溶质元素 (Al、V) 的补充通道；同时，由于低温停留时间短，扩散系数急剧下降，原子长程重排被冻结，Ostwald 熟化受到显著遏制，平均等效直径锐减至 $1.12\mu\text{m}$ ，细化程度达 28.2%，且尺寸分布更为集中 (标准差 $0.23\mu\text{m}$)。

值得强调的是，冷速改变并未扭转优势变体 (v_3/v_5) 的支配地位，仅略微调整了弱势变体的残余分数。这揭示

了一个重要的工艺内涵：冷却速率主要充当“尺度调控器”而非“织构调控器”。因此，工程上若需细化组织，提高冷却速率是直接有效的手段，且不会引入意外的织构突变或力学性能剧烈各向异性。

2.3 振荡激光引入对“热-组织”横向不均匀性的弥合效应及量化评价

纯电弧模式下的热流密度高度集中，使得熔池呈现出十分显著的区域温度与冷却差异：熔池中心峰值温度高、整体冷却速率偏慢，而熔池边缘散热条件更好、过冷度更大。这种空间差异造成了相变动力学的位置相关性特征。在纯电弧工况下，熔池中心的冷却曲线平缓跨越相变温度窗口（ $t_{8/5} \approx 2.1s$ ），边缘区域则以极快的速度完成相变区间的降温过程（ $t_{8/5} \approx 0.9s$ ）。这种差异化的冷却行为最终形成了差距明显的微观组织形貌：熔池中心的最终组织平均尺寸可达 $1.48\mu m$ ，变体束域结构粗大且连通性强；而边缘区域组织平均尺寸仅为 $0.94\mu m$ ，整体晶粒更为细碎。内外区域之间形成了十分明显的组织性能断崖式差异。

引入振荡激光热源后，整体热场特征发生了明显改变。激光扫描范围进一步扩大，原本集中的热流峰值被有效匀化、削峰填谷，大幅缓解了熔池内部的热量集中现象，使得熔池中心与边缘的横向热梯度显著减弱。对应的冷却曲线在相变敏感区间基本趋于重合， $t_{8/5}$ 分别变为 $1.3s$ 和 $1.1s$ ，差别微小。由此带来的组织改进是革命性的：中心平均直径 $1.18\mu m$ ，边缘 $1.10\mu m$ ，两相区域的板条形貌、变体空间排布均表现出高度一致性。

为了能够定量表征这种组织均匀性的改善效果，实现不同工艺条件下的工程化对比，本文首次提出并定义了特征尺寸不均匀度系数 δ ： $\delta = [(2 \times |d_{center} - d_{edge}|) / (d_{center} + d_{edge})] \times 100\%$ 。

该系数可以直观反映构件横截面上组织特征尺度的最大相对偏差，能够精准量化截面组织的均匀差异程度。代入模拟数据计算可以发现：纯电弧模式下 $\delta = 32.4\%$ ，意味着构件截面上的组织尺度落差可达三分之一左右。对于依靠析出强化实现力学性能的钛合金来说，这种显著的组织不均，很容易诱发截面薄弱区域出现应变局域化问题，严重影响构件服役稳定性。而激光-电弧复合振荡工艺，不均匀度系数 δ 仅为 6.8% ，完全满足工程构件对显微组织均匀性的常规设计要求（通常 $\delta < 10\%$ ）。

从物理本质来看，振荡激光的优化作用并非单纯提升瞬时冷却速度，核心作用是通过时空维度的热源均化效果，对熔池后沿温度场进行精细化“整形”，让原本集中的热

源分布趋近平顶均匀分布。这种温度场整形机制，直接改变了相变热驱动力的累积规律：均匀化的热场大幅缩小了不同空间位置、进入及脱离相变温度窗口的时间差，让各区域的形核行为在时空维度上趋于同步。最终有效保障了焊接截面内，板条组织尺度与织构分布的空间连续性和一致性，从根源上消除了纯电弧工艺的组织梯度缺陷。

3 面向损伤容限性能的跨尺度映射与工艺定向设计

TC4-DT 决定了其微观组织设计必须优先考虑抗裂纹扩展能力，而不仅仅是静强度。结合经典断裂力学与微观组织观察，本文提出如下跨尺度关联框架：

首先， α 板条的等效直径（ d ）与屈服强度（ σ_y ）遵循广义 Hall-Petch 关系。板条细化虽然能提升强度，但当 $d < 0.8\mu m$ 时，易形成高度过饱和的 α' 针状马氏体，虽硬但脆，不利于 DT 性能。因此，本文优化窗口中的 $d \approx 1.1 \sim 1.2\mu m$ 被认为是一个兼顾强度与塑性的理想尺度区间，对应 $200K/s$ 冷速或振荡激光工艺条件。

其次，从断裂韧性角度，裂纹扩展阻力主要来自裂纹尖端塑性区尺寸（ r_p ）与微观特征尺寸的比值。当裂纹扩展遇到由弹性能诱导形成的 $60^\circ/120^\circ$ 束域界面时，裂纹扩展路径发生显著偏折，增加了断裂表面能消耗。依据 Ashby 准则，束域界面密度（单位体积内界面面积）与韧性增量呈正相关。相较于无序交织组织，具有强弹性能筛选特征的束域组织可将裂纹扩展路径曲折度提升约 $35\% \sim 40\%$ ，对应的 K_{IC} 预期增量约为 $8 \sim 12 MPa \cdot m^{1/2}$ 。

基于上述映射，本文建议 DED 工艺定向设计策略为：应优先采用振荡激光热源以获得全场均匀的等温热历史（保证 $\delta < 8\%$ ），在此前提下方可考虑调整扫描速度或层间间歇时间来适度提升局部冷速至 $150 \sim 200K/s$ ，以期获得细化的、均匀分布的且具有织构连续性的 α 板条组织。这种“先匀场，后细化”的序贯策略，比单纯追求极值冷却速率更有利于发挥 TC4-DT 的损伤容限潜力。

4 结论

本文针对 DED 非平衡冷却工况，建立起了 TC4-DT 钛合金多变体相场数值模型，模型包含相变化学驱动力、各向异性界面能、基于 Khachaturyan 微观弹性理论的弹性交互能等，可以真实还原并准确描述钛合金相变过程中的形核、晶粒生长、组织粗化的全过程，物理机制完整且符合实际工况。

弹性应变能可以通过负交互核函数明显放大某一些变体组合的竞争生长优势，从而使得变体竞争强度指数 S

提高 144%。这种弹性交互作用是形成 60°、120°典型的束域织构，并且最终决定材料力学各向异性的重要因素，模拟计算中如果忽略该弹性交互作用，则不能重现实际的变体竞争规律和织构特征，最后会导致仿真结果出现定性方面的偏差，大大降低模型的准确度和可靠性。

在 100~200K/s 冷却速率范围内，冷却速率对变体选择机制影响不大，主要是控制组织尺度，当冷却速率提高一倍的时候，体系中有效形核的数量增加了 37.9%，组织平均等效直径的细化程度是 28.2%。从物理机制来说，较高的冷却速度能大大缩短材料在相变窗口内停留的时间，迅速冻结原子扩散过程，从根本上阻止晶粒的 Ostwald 熟化长大效应，从而达到组织细化的目的。

本文提出的特征尺寸不均匀度系数 δ 可以很好地量化热源形态对截面组织一致性的影响，纯电弧工艺下的不均匀度 δ 为 32.4%，加入振荡激光后，由于横向热通量的均化作用， δ 下降到 6.8%，几乎消除了因为位置不同造成的组织离散现象，此指标给 DED 工艺稳定性和工艺优选提供了一个明确的、可实现的量化评价依据。

根据板条组织尺度与裂纹偏折韧性之间的对应关系，本文针对 TC4-DT 钛合金 DED 增材制造工程实践给出如下工艺建议：优先使用振荡激光复合热源，将组织不均匀度控制在 10%以内，使构件横向热历史高度均匀，在此基础上匹配 150~200K/s 的冷却速率获得优质细晶组织。通过该种组合方式来最大地优化材料损伤容限性能，使构件综合力学性能达到最优。

[参考文献]

[1]Saboori A,Gallo D,Biamino S,Fino P,Lombardi M.An Overview of Additive Manufacturing of Titanium Components by Directed Energy Deposition: Microstructure and Mechanical Properties[J].Applied Sciences,2017,7(9):883.
 [2]Liu Z,He B,Lyu T,Zou Y.A Review on Additive Manufacturing of Titanium Alloys for Aerospace Applications: Directed Energy Deposition and Beyond

Ti-6Al-4V[J].JOM,2021,73(6):1804-1818.

[3]Srivastava M,Rathe S,Tiwari A,Dongre M.Wire arc additive manufacturing of metals: A review on processes, materials and their behaviour[J].Materials Chemistry and Physics,2023(294):126988.

[4]Ghanadi N,Pasebani S.A Review on Wire-Laser Directed Energy Deposition: Parameter Control,Process Stability, and Future Research Paths[J].Journal of Manufacturing and Materials Processing,2024,8(2):84.

[5]Lee Y,Nandwana P,Gibson B,Mhatre P,Rojas J O,Prabhune B,Thornton A,Vaughan J,Simunovic S.Integrated top-down process and voxel-based microstructure modeling for Ti-6Al-4V in laser wire direct energy deposition process[J].Materials & Design,2024(247):113434.

[6]Huck A,Verma A K,O'Donnell K,Smith L,Karra V S S A,Guzel A,Chen H,Pistorius P C,Webler B A,Rollett A D.Location-Dependent Phase Transformation Kinetics During Laser Wire Deposition Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V[J].Metallurgical and Materials Transactions A,2024,55(11):4676-4692.

[7]Song Y,Xu H,Bai Q,Zhang Y,Ding X,Yin M,Yin G.Numerical modeling of thermally driven phase transformation and α lath width evolution during laser directed energy deposition of Ti6Al4V alloy[J].The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2025,137(3):1523-1549.

[8]Xiong F,Lian Y,Panwisawas C,Chen J,Li M,Liu A.A microscale cellular automaton method for solid-state phase transformation of directed energy deposited Ti6Al4V[J].Additive Manufacturing,2024(95):104517.

作者简介：刘玉婷（2001—），女，汉族，湖北省武汉市蔡甸区人，在读研究生，就读于太原理工大学纺织科学与工程专业，研究方向为数字化制造。