

定向能量沉积 TC4 钛合金温度与应力场建模及其在体育器材制造中的应用

刘 敏¹ 陈明威² 尤 佳¹

1. 武汉体育学院, 湖北 武汉 430079

2. 华中科技大学, 湖北 武汉 430074

[摘要] 钛合金定向能量沉积过程中, 复杂移动热源、高冷却速率及多次热循环显著影响温度场、残余应力场及多尺度微观组织演变, 导致成形构件微观组织和力学性能的不均匀性。本文聚焦增材制造 TC4 钛合金中热历史驱动的微观组织演变, 建立了基于有限元的温度-应力模拟框架, 系统研究了不同热源模式及工艺参数对温度场和应力场的影响。利用 ABAQUS 建立了振荡激光+电弧复合热源及纯电弧热源下的三维瞬态热分析及顺序耦合热-力有限元模型。结果表明, 引入振荡激光使熔池宽度增加、长度和熔深减小, 增强横向热再分布, 使多层热循环峰值分布更集中, 并降低整体等效应力峰值。所建立的温度-应力模拟框架可为钛合金定向能量沉积中的组织均匀化及性能优化提供理论依据, 尤其对高性能体育器材 (如竞赛自行车架、高尔夫球杆头、网球拍及运动康复假肢) 的轻量化、高耐久性制造具有重要指导价值。

[关键词] 定向能量沉积; TC4 钛合金; 体育器材; 运动装备

DOI: 10.33142/nsr.v3i2.19995

中图分类号: TG665

文献标识码: A

Modeling of Temperature and Stress Fields in TC4 Titanium Alloy by Directed Energy Deposition and Its Application in Sports Equipment Manufacturing

LIU Min¹, CHEN Mingwei², YOU Jia¹

1. Wuhan Sports College, Wuhan, Hubei, 430079, China

2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei, 430074, China

Abstract: During the directional energy deposition process of titanium alloys, complex moving heat sources, high cooling rates, and multiple thermal cycles significantly affect the temperature field, residual stress field, and multi-scale microstructure evolution, resulting in uneven microstructure and mechanical properties of the formed components. This article focuses on the microstructure evolution driven by thermal history in additive manufacturing of TC4 titanium alloy, establishes a finite element based temperature stress simulation framework, and systematically studies the effects of different heat source modes and process parameters on temperature and stress fields. A three-dimensional transient thermal analysis and sequential coupled thermo mechanical finite element model were established using ABAQUS for oscillating laser+arc composite heat source and pure arc heat source. The results indicate that the introduction of oscillating laser increases the width of the melt pool, reduces its length and depth, enhances lateral thermal redistribution, concentrates the peak distribution of multi-layer thermal cycles, and reduces the overall equivalent stress peak. The established temperature stress simulation framework can provide theoretical basis for tissue homogenization and performance optimization in titanium alloy directional energy deposition, especially for the lightweight and high durability manufacturing of high-performance sports equipment such as competition bike frames, golf club heads, tennis rackets, and sports rehabilitation prosthetics.

Keywords: directed energy deposition; TC4 titanium alloy; sports equipment; sports equipment

引言

定向能量沉积 (DED) 是一种利用电弧^[1]、激光^[2]或等离子体^[3]等热源熔化金属并逐层堆积构件的增材制造技术。近年来, 该技术逐渐成为工业制造的重要手段, 在

航空航天^[4]、汽车^[5]、医疗^[6]、模具^[7]以及高性能运动装备等领域得到广泛应用。与传统制造方法相比, DED 具有复杂结构近净成形^[8]、材料利用率高^[9]和生产周期短^[10]等优势。钛合金具有高比强度、优异的耐腐蚀性、良好的疲劳

性能,因此逐渐成为高端体育器材的理想材料,例如竞赛自行车车架、高尔夫球杆头、网球拍以及运动康复假肢等。

本文以 TC4 钛合金振荡激光-电弧 DED 为对象,开展成形过程中热行为及残余应力演化/分布的模拟研究,为高端体育器材的高质量成形提供理论基础。

1 实验方法

1.1 几何模型构建

采用 ABAQUS 软件进行金属 DED 有限元数值模拟。单道模型的几何尺寸和工艺参数依据特定工艺参数下的实验打印结果确定,多层模型基于单道模型的焊道宽度和高度参数构建。

1.2 控制方程与边界条件

对于温度场,基于瞬态热传导微分方程描述传热过程。材料内部能量扩散考虑为热传导,忽略流体流动(如熔池对流)的影响,其对散热的贡献通过等效对流和辐射边界条件表征。移动热源通过等效热源模型施加。温度场求解控制方程为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v \quad (1)$$

其中 ρ 为材料密度, c 为比热容(均为温度相关), λ 为热导率, T 为瞬态温度, q_v 为体积热源项。

包含三类边界条件:

第一类 (Dirichlet): 定义边界温度:

$$T_B = T_0 \quad (2)$$

其中 T_B 为边界温度, 设为初始温度 $T_0=298K$ 。

第二类 (Neumann): 定义热流边界:

$$-k \nabla T \cdot \mathbf{n} = q_v(x, y, z, t) \quad (3)$$

其中 ∇T 为界面法向温度梯度, $\mathbf{n}$ 为单位法向量, q_v 为外部热流密度。采用等效热流分布模型描述电弧和激光。

第三类 (Robin): 定义对流和辐射边界:

$$-k \nabla T \cdot \mathbf{n} = h(T - T_\infty) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_\infty^4) \quad (4)$$

其中 h 为对流换热系数(简化气流对流), σ 为 Stefan-Boltzmann 常数 [$5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$], ε 为发射率, T_∞ 为环境温度。

为表征多轴应力状态下的屈服倾向, 采用 Von Mises 等效应力作为评价指标(基于第三强度理论)。

$$\sigma_{\text{mises}} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2]} \quad (5)$$

其中 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为 x, y, z 方向主应力。除等效应力外, 还分析各主应力分量以评估开裂风险。

对于振荡激光, 采用高斯分布热流模型并结合实际振荡轨迹修正热源分布。

$$\begin{cases} q_f(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f \eta_1 U I}{\pi^{3/2} a_f b c} \exp\left(-3\left(\frac{(x-vt)^2}{a_f^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right)\right) \\ q_r(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_r \eta_1 U I}{\pi^{3/2} a_r b c} \exp\left(-3\left(\frac{(x-vt)^2}{a_r^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right)\right) \end{cases} \quad (6)$$

其中 q_f 和 q_r 分别为前半椭球和后半椭球的热流分布, 描述热源移动时的拖尾效应。 f_f 和 f_r 为热源分配系数, 满足 $f_f + f_r = 2$; η_1 为电弧热效率; U 为电压, I 为电流; a_f, a_r, b, c 为双椭球热源形状参数; v 为行进速度。

材料参数参考 TC4 力学特性。

2 结果与讨论

2.1 振荡激光对温度场的影响

在振荡激光-电弧复合热源下, 熔池峰值温度显著降低, 高温区主要集中在电弧与激光能量重叠交互区域。纯电弧模式下, 热分布更为分散, 高温区较小, 且其位置较复合模式更靠后。对比熔池几何尺寸, 复合热源熔池长度 13.24mm、宽度 7.60mm、深度 3.25mm; 纯电弧分别为 14.20mm、7.11mm、3.59mm。需指出, 较大的深度与热源在无沉积基板上行进导致的热积累有关。总体而言, 复合热源使熔池长度减少约 7.25%, 宽度增加约 6.45%, 深度减少约 10.46%, 如图 1 所示。

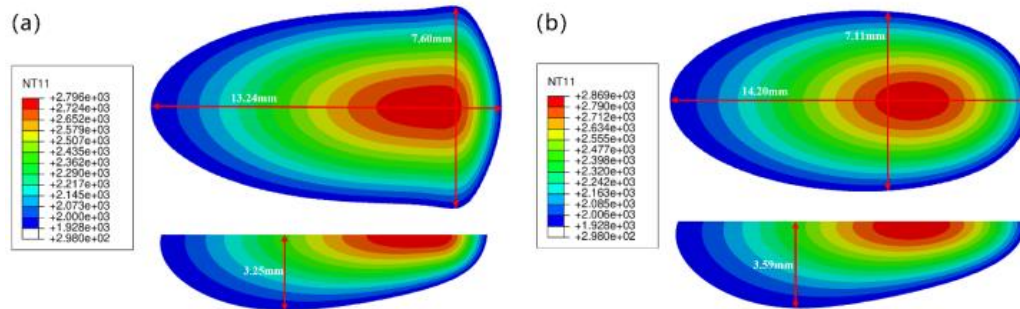


图 1 不同热源模式下熔池尺寸: (a) 振荡激光+电弧; (b) 纯电弧

2.2 多层温度场热循环曲线分析

复合模式下,各层热循环特征与纯电弧模式基本一致。不同之处在于,当相邻层进入下一加热阶段(即第二次加热)时,各层峰值温度差异显著减小,峰值分布更为集中。这一现象可归因于激光在电弧热输入之外提供了穿透加热效应,使得高度方向温度梯度有所平缓,层间热循环波动减弱,热应变非均匀性降低。这总体上有利于减小因陡峭温度梯度引起的局部热应力集中,并促进层间残余应力更均匀分布。总体而言,通过激光的穿透加热效应,复合热源降低了层间热响应差异,使多层沉积过程中的热循环波动比纯电弧模式更加均衡。

2.3 振荡激光对应力场的影响

引入振荡激光后峰值等效应力约 514.77MPa, 低于纯电弧模式的 563.40MPa, 降幅约 8.6%。同时, 高效应力区域更清晰地局限于沉积体根部和熔合线附近, 沉积体上部应力水平较低, 表明振荡激光通过改变热输入空间分布和热循环模式, 在一定程度上削弱多轴应力集中, 缩小高应力区域。

对于 x 方向正应力, 沉积层以拉应力为主, 基板呈现压应力。与纯电弧相比, 引入振荡激光后峰值应力从 626.32MPa 降至 564.09MPa, 降幅约 9.9%。对于 y 方向正应力, 两种热源模式总体分布规律相似, 起/止端和根部应力集中更显著。复合模式峰值应力略有增加, 从 445.42MPa 升至 466.90MPa, 增幅约 4.8%, 如图 2 所示。这是因为激光横向周期性振荡改变了横向温度场和熔池宽度, 增强了横向热收缩和约束效应, 从而局部提高横向拉应力水平。对于 z 方向正应力, 其幅值显著小于其他两个方向; 引入振荡激光后峰值应力从 297.07MPa 降至 190.75MPa, 降幅约 35.8%, 表明振荡激光在一定程度上减小了高度方向温度梯度, 从而显著削弱该方向应力集中。

综上所述, 引入振荡激光的主要作用是通过横向周期性振荡改变热输入分布和热循环模式, 引起残余应力空间再分布。整体等效应力峰值降低, 扫描方向和高度方向应

力集中得到缓解, 但横向应力分量可能局部增加。这一结果表明振荡激光在增大熔池尺寸、改善温度场均匀性和道间结合质量方面具有优势。

在分析整体残余应力场分布后, 为定量比较不同层和不同高度处的应力差异, 选取沿高度方向和沿各层宽度方向的路径进行对比。由于网格较粗, 原始路径数据存在一定波动, 为突显残余应力随高度变化的总体趋势, 对结果进行适度平滑处理。

两种热源模式下, 应力均随高度先减小后增大。这种分布反映过程中底部区域因基板约束和多次热循环更易产生应力集中; 中部区域约束减弱, 部分应力得以松弛; 顶部区域因自由表面效应和冷却收缩引起的拉应力, 残余应力出现反弹。除纯电弧模式残余应力总体较高外, 两种模式明显差异在于应力反弹发生的高度不同。这是因为激光引入增加了熔深, 增强了对前一层的加热效应, 导致反弹高度降低。

为揭示两种热源模式下残余应力的产生和松弛行为, 进一步分析代表位置处应力随时间演化。为捕捉完整热循环历史的影响, 选取基板起始端附近中心区域的一个代表性单元, 提取其在连续热循环过程中的应力-时间历程。

应力随工艺时间呈现明显周期性波动。每次沉积加热后, 应力水平显著下降; 随后在冷却过程中, 由于材料在基板约束下收缩, 应力逐渐增加, 并在冷却结束时达到局部峰值。前两次骤降主要发生在热源再次经过该位置附近时, 导致弹性模量降低和热软化, 应力快速下降。随着新层沉积, 后续下降不仅受再加热影响, 还受新层逐步堆叠的影响。新层的添加改变了构件几何构型和约束刚度, 新层冷却收缩对下层施加附加载荷, 引起进一步松弛。

这种行为表明残余应力并非一次性形成, 而是在多次热循环中逐步积累、松弛和再分布, 最终被锁定。对比两种热源模式, 纯电弧模式在大部分循环阶段应力水平略高, 最终平台值也高于复合模式, 表明振荡激光的引入降低了该位置应力积累程度。

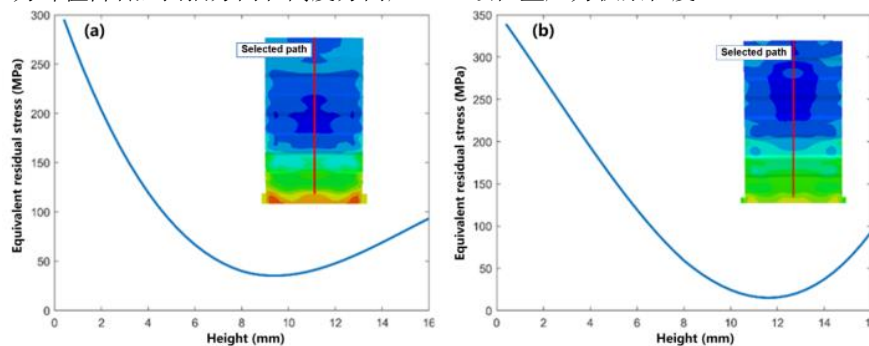


图2 等效应力随高度变化: (a) 振荡激光+电弧模式; (b) 纯电弧模式

3 结论

利用有限元法建立了振荡激光-电弧复合热源下 TC4 钛合金单道及单道多层沉积的热-力耦合模型,系统研究了热源模式和工艺参数对瞬态温度场、熔池几何特征、热循环行为及残余应力分布的影响。通过单层熔覆实验标定和验证了热源参数,为后续微观组织演化模拟提供了可靠温度历史输入。上述结果对于优化钛合金增材制造工艺、改善高性能运动器材(如轻量化、高耐久性体育装备)的成形质量和性能一致性具有参考价值。

(1) 利用 ABAQUS 建立了单层单道和单道多层沉积的三维瞬态热分析模型,并基于顺序耦合策略进行热-力分析。热源方面,电弧采用 Goldak 双椭球体积热源描述前后半椭球非对称能量分布,振荡激光采用修正高斯分布热流等效表征横向周期性振荡。单道模拟结果表明,在相同总热输入下,复合热源能够改变熔池内能量再分布:横向热扩散增强,熔池宽度略有增加;沿扫描方向拖尾效应减弱,熔池长度减小;厚度方向能量集中程度降低,熔深一定减小。

(2) 多层沉积热循环分析表明,与纯电弧模式相比,振荡激光的穿透加热效应降低了层间热响应差异,减小了高度方向温度梯度,削弱了横向温差,使整体温度场更均匀。同时,在凝固前沿附近形成更集中的局部温度下降区,表现为厚度方向温度梯度相对增强,有利于稳定凝固前沿并促进定向热传导。

(3) 残余应力方面,两种热源模式下高应力区主要分布在熔合线附近、沉积体根部及起/止端等强约束和几何不连续处。与纯电弧相比,复合热源降低了整体等效应力峰值并缩小了高应力区域。对各应力分量,扫描方向和厚度方向峰值应力总体减小,而横向应力可能局部略有增加,反映振荡带来的横向收缩约束效应。沿高度和横向的路径统计进一步表明,残余应力随高度呈阶梯变化并在上层趋于稳定,横向边缘更易产生应力集中。复合热源下层间应力差异减小,分布更均匀。

[参考文献]

[1]Y. Bao,H. Sun,X. Cai,S. Lin,C. Chen.Effect of external magnetic field on the forming, microstructure and property of TC4 titanium alloy during the directed energy deposition arc additive manufacturing[J].Crystals,2023,13(2):235.
[2]J. A. Narayanan,F. Kaji,M. Zimny,E. Toyserkani.Laser directed energy deposition-based additive manufacturing of Fe20Cr5.5AlY from single tracks to bulk structures:statistical analysis, process optimization,and characterization[J].Machines,2023,11(1):58.

[3]P. Rodríguez-González,E. Neubauer,E. Ariza,L. Bolzoni,E. Gordo,E. M. Ruiz-Navas.Assessment of plasma deposition parameters for DED additive manufacturing of AA2319[J].Journal of Manufacturing and Materials Processing,2023,7(3):113.
[4]N. D'Souza,S. Ravichandran,S. Donovan,P. Daum,R. Morrell,Z. Nye,et al.On the design optimisation of direct energy deposited support structures to repair aero-engine turbine segments[J].Additive Manufacturing,2022(55):102905.
[5]N. M. Ferreira,M. V. Pouca,C. Fernandes,J. Seabra, G. Lesiuk,M. Parente,et al.Direct energy deposition parametric simulation investigation in gear repair applications[J].Materials,2023,16(9):3549.
[6]D. J. Ryu,A. Jung,H. Y. Ban,T. Y. Kwak,E. J. Shin, B. Gweon,et al.Enhanced osseointegration through direct energy deposition porous coating for cementless orthopedic implant fixation[J].Scientific Reports,2021(11):22317.
[7]R. E. Petrusse,M.-C. Langa.Enhancing metal forging tools and moulds: advanced repairs and optimisation using directed energy deposition hybrid manufacturing[J].Applied Sciences,2024,14(2):567.
[8]H. Lin,W. Z. Zhai,Z. Z. Li,M. T. Wang,Q. Y. Chen,R. H. Zhou,Y. H. Fu,J. W. Huang,M. X. Liu,G. Zhao,G. L. Wang,R. S. Li,A. M. M. Ibrahim,H. O. Zhang.Enhanced fabrication and microstructure-property optimization of IN718 superalloy via laser rolling-assisted wire-arc directed energy deposition[J].Materials Science and Engineering:A, 2025(944):148890.
[9]H. Lin,C. L. Dai,W. Z. Zhai,G. Zhao,Y. H. Fu,R. S. Li,J. W. Huang,M. B. Zhang,L. Zeng,M. X. Liu,M. T. Wang,G. L. Wang,H. O. Zhang.Additively manufactured Inconel 718 plus superalloy with heterostructures and high mechanical properties[J].Materials Science and Engineering:A,2025 (924):147683.
[10]X. H. Yang,R. Li,K. L. Hu,A. D. Sun,X. Y. Ma,M.X. Liu,M. T. Wang,R. S. Li,G. Zhao,W. Z. Zhai,H. Song,Z. L. Li,H. O. Zhang.Intelligent control of additively manufactured beads on the basis of target morphologies and thermal field[J].Frontiers of Mechanical Engineering,2024(19):42.
作者简介:刘敏(1999—),女,汉族,江西赣州人,在读研究生,就读于武汉体育学院体育教育专业,研究方向为运动器材先进制造。