

文章编号: 1002-1582(2026)01-0054-07

纳秒双脉冲激光加工 TC4 的温场仿真

姜永霞¹, 李隆^{1,2*}, 程雨露¹, 余天锡¹, 张春玲^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学 理学院, 陕西 西安 710055)

(2. 西安建筑科技大学应用物理研究所, 陕西 西安 710055)

摘 要: 针对 TC4 钛合金双脉冲激光加工过程中热-力耦合机制复杂、工艺参数缺乏理论指导的问题, 研究通过建立多物理场耦合有限元模型, 揭示了不同脉冲延迟时间下温度场演化与烧蚀形貌的形成规律。基于热焓-孔隙法与水平集法构建的二维模型, 模拟了纳秒双脉冲激光与 TC4 材料的相互作用过程。结果表明: 二次脉冲的温升效率相较于首次脉冲提升 1.62 倍, 表现出显著的热累积效应; 在微秒级延迟 ($1\sim 4\mu\text{s}$) 下, 双脉冲加工的热影响区较单脉冲显著减小, 且延迟时间越短, 烧蚀温度越高; 在纳秒级延迟范围内, 存在最佳参数窗口 (延迟时间 100ns), 此时烧蚀温度达到峰值 904.52K; 烧蚀直径的演化强烈依赖于延迟时间, 微秒级延迟下呈非线性扩展, 而纳秒级延迟下则呈现准线性增长模式。本研究为优化双脉冲激光加工工艺参数提供了理论依据。

关 键 词: 双纳秒脉冲; TC4 钛合金; 有限元仿真

中图分类号: TN249

文献标识码: A

Thermal field simulation of TC4 processing using nanosecond Double-pulse laser

JIANG Yongxia¹, LI Long^{1,2*}, CHENG Yulu¹, YU Tianxi¹, ZHANG Chunling^{1,2}

(1. Faculty of Science, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

(2. Institute of Applied Physics, Xi'an University & Architecture Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Addressing the complexities of thermo-mechanical coupling mechanisms and the lack of theoretical guidance for process parameters in dual-pulse laser processing of TC4 titanium alloy, this study employs a multiphysics coupled finite element model to investigate the evolution of the temperature field and ablation morphology under different pulse delay times. A two-dimensional model integrating the enthalpy-porosity and level set methods was developed to simulate the interaction between nanosecond dual-pulse laser and TC4 material. The results indicate that the secondary pulse achieves a 1.62 times higher temperature rise efficiency than the first pulse, demonstrating a significant thermal accumulation effect. At microsecond-level delays ($1\sim 4\mu\text{s}$), the heat-affected zone in dual-pulse processing is significantly smaller than that in single-pulse processing, with higher ablation temperatures observed at shorter delays. An optimal parameter window (100 ns delay) exists within the nanosecond delay range, where the ablation temperature peaks at 904.52 K. The evolution of the ablation diameter strongly depends on the delay time, exhibiting nonlinear expansion under microsecond delays and quasi-linear growth under nanosecond delays. This study provides a theoretical basis for optimizing dual-pulse laser processing parameters.

Keywords: double nanosecond pulse; TC4 titanium alloy; finite element simulation

收稿日期: 2025-09-02; 收到修改稿日期: 2025-10-30

基金项目: 国家自然科学基金 (11705136)、国家级大学生创新项目 (202310703056)

作者简介: 姜永霞 (2000—), 女, 硕士研究生, 从事激光技术研究。jiangyongxia@xauat.edu.cn

李隆 (1972—), 男, 教授, 博士, 硕士生导师, 从事激光技术研究。

* 通讯作者: lilong@xauat.edu.cn

0 引言

TC4 钛合金 (Ti-6Al-4V) 因其优异的比强度、耐腐蚀性和生物相容性, 被广泛应用于航空航天、生物医疗等领域^[1-3]。然而由于钛合金的比强度高, 导热性差, 传统机械加工方法存在刀具磨损严重、加工效率低等问题, 激光加工作为非接触、高精度的先进制造技术, 通过对材料进行高能量密度辐照实现熔化、蒸发或改性, 为钛合金加工提供了理想解决方案^[4]。

纳秒脉冲激光凭借其短脉宽、高峰值功率和低热输入特性, 能够在保证较高材料去除率的同时有效控制热影响区, 广泛应用于难加工材料的精密加工^[5]。基于精确地能量调控, 纳秒激光可以实现对难加工材料如陶瓷、玻璃、金属等的加工; 此外, 纳秒激光加工位置灵活、非接触, 具有较高的空间选择能力, 因此, 被广泛应用在切割、打孔、清洗、打标、表面结构制备等方面^[6]。然而, 单脉冲加工仍面临熔池飞溅、重铸层较厚等挑战。双脉冲激光技术通过精确调控脉冲间隔时间, 为改善加工质量提供了新思路^[7]。双脉冲激光的控制方法目前已有较多研究和实验应用, 众多结果表面双脉冲与同等能量的单脉冲相比, 可以把激光作用速率数倍提高, 同时改善激光加工质量^[8,9]。近年来, 在 TC4 钛合金的激光加工方面已有诸多研究^[10]。例如, 孟宪凯等发现双纳秒激光冲击强化可诱导 TC4 形成梯度细晶结构, 从而提升其表面显微硬度和抗拉强度^[11]。而在复合光束方面, 龙井宇等实现了近红外波段多种脉冲和连续激光的共轴发射, 为系统研究激光与物质相互作用提供了新平台^[12]。

目前, 国内外学者在激光加工仿真方面已取得一定进展, 但多数研究集中于单脉冲或超短脉冲作用机制以及双脉冲激光器调制技术及实验探究^[13,14], 对双纳秒脉冲延迟效应的多物理场耦合理论探讨仍较缺乏。此外, 现有模型往往忽略长延迟时间 (微秒级) 下熔池凝固与重熔过程的影响, 导致预测精度不足。为此, 本文基于有限元仿真平台, 建立热焓-孔隙法与水平集耦合的二维仿真模型, 重点研究不同延迟时间对 TC4 钛合金加工过程中温度场演化、熔池动力学及表面形貌的影响规律, 以期优化双脉冲激光加工工艺参数提供理论支撑。需指出, 本研究采用的二维模型旨在揭示核心物理现象的基本规律, 对三维效应的简化是后续研究需深入探讨的方向。

1 基本原理

1.1 脉冲激光辐照 TC4 钛合金传热模型

本研究针对 TC4 钛合金的纳秒双脉冲激光烧蚀过程, 分析激光能量吸收与传递机制。材料与激光相互作用时, 能量主要通过热传导方式转移。基于此建立的物理模型着重考虑固体热传导效应, 而合理忽略热辐射的影响^[15]。采用水平集方法追踪液-气相界面的动态演变过程, 探究表面形貌随烧蚀时间的演化规律。通过将有符号距离函数的零水平集与相界面重合, 实现对界面运动的精确追踪。在数值实现上, 采用固定网格系统, 将水平集函数定义于整个计算域: 气相区域赋值为 1, 液相和固相区域赋值为 0, 相界面处 (即分界面) 则定义为 0.5。通过求解 Navier-Stokes 方程获得速度场后, 将其代入水平集输运方程进行界面演化计算^[16]。水平集输运方程为

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \nabla \phi = \gamma_{ls} \nabla \cdot \left[\epsilon_{ls} \nabla \phi - \phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right] \quad (1)$$

式中, t 为时间; u 为热流速度; γ_{ls} 为初始化参数; ϵ_{ls} 为界面厚度。

表面形貌由热能传递与熔融金属流动共同决定, 其中传热过程受能量守恒方程主导

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T - \nabla \cdot (k \nabla T + q) = Q - S \quad (2)$$

式中, T 为温度; ρ 为密度, C_p 为定压比热容, k 为导热系数; q 为空气对流 q_0 和热辐射项 q_1 之和; Q 为体积热; S 为由于气化引起的能量损失项。

热源项采用高斯分布, 其表达式为

$$Q = I_p \exp\left(-\frac{2x^2}{R_0^2}\right) \quad (3)$$

S 项可表述为

$$S = L_v \dot{m} \delta(\varphi) \quad (4)$$

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{m}{2\pi\sigma}} \times \frac{P_{sat}(T)}{\sqrt{T}} \quad (5)$$

$$P_{sat}(T) = P_0 \exp\left[\frac{mL_v}{\sigma T_{vap}} \left(1 - \frac{T_{vap}}{T}\right)\right] \quad (6)$$

$$\delta(\varphi) = 6|\varphi(1-\varphi)| |\nabla \varphi| \quad (7)$$

式中, L_v 为气化潜热; $\dot{m}$ 为气化的质量通量; $P_{sat}(T)$ 为饱和蒸汽压力; P_0 为一个标准大气压; T_{vap} 为气化温度; σ 为波尔兹曼常数

激光烧蚀的熔融金属视为不可压缩牛顿流体, 其层流运动由 Navier-Stokes 方程与连续性方程共同描述

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u &= \nabla \cdot [-PI + \mu(\nabla u + \\ &(\nabla u)^T)] + \rho g - \rho_1 \beta_1 (T - T_m) g \rho \\ \rho \nabla \cdot u &= 0 \end{aligned} \tag{8}$$
$$\tag{9}$$

式中, P 是压力; I 是单位矩阵; u 为动态粘度; ρ_1 为液相密度; β_1 为液体的体积膨胀系数; g 为重力加速度; T_m 为熔点。

Marangoni 效应由高斯光束诱导的表面张力梯度引发, 产生与温度梯度相关的切向力。在有限元仿真中通过多物理场接口耦合传热与流体流动过程, 如下所示

$$\left\{ -PI + \mu[\nabla u + (\nabla u)^T] - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u)I \right\} n = \gamma \nabla_T \tag{10}$$

式中, γ 为表面张力系数。

其次, 考虑反冲压力对液相流动的影响。通过将速度源项与水平集源项分别引入连续性方程和水平集输运方程, 实现对该物理过程的数值模拟。

$$\begin{aligned} \nabla \cdot u &= m\delta(\varphi) \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_v} \right) \\ \frac{\partial \varphi}{\partial t} + u \cdot \nabla \varphi - m\delta(\varphi) \left(\frac{\varphi}{\rho_1} + \frac{1-\varphi}{\rho_v} \right) &= \\ \gamma_{ls} \nabla \cdot \left[\epsilon_{ls} \nabla \varphi - \varphi(1-\varphi) \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} \right] \end{aligned} \tag{11}$$
$$\tag{12}$$

式中 ρ_v 为气相密度。

1.2 本构模型的选择和建立

构建模型为激光烧蚀钛合金熔池两相流数学模型, 模型分为两层, 上层为厚度 $100\mu\text{m}$ 的空气层, 下层构建 $300\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$ 的钛合金材料模型液体 (固体) 层, 为保证计算的精度和效率, 对几何模型进行自由三角形网格划分。中间 $150\mu\text{m} \times 250\mu\text{m}$ 主要计算区域进行精细化处理, 保证计算精度; 其余部分网格密度较稀疏, 保证计算的效率; 整个计算区域共计 12792 个自由度, 最大单元大小为 0.1mm , 最大单元增长率为 1.1, 曲率因子为 0.2, 平均单元质量为 0.9334, 网格参数表明, 表面单元尺寸过渡平缓, 能有效抑制因网格尺寸剧烈变化引发的数值弥散问题。同时, 远高于常规标准的平均网格质量, 显著降低了因单元畸变导致的求解误差, 确保了热传导与流场仿真结果的可靠性。文中所有网格量化参数均符合有限元仿真的稳定性要求。

图 2 为激光加工的示意图, 本文基于此对激光加工的凹坑形貌和温度场进行分析。模型中添加的材料为 TC4 钛合金, 材料的热物理性质见表 1^[17]

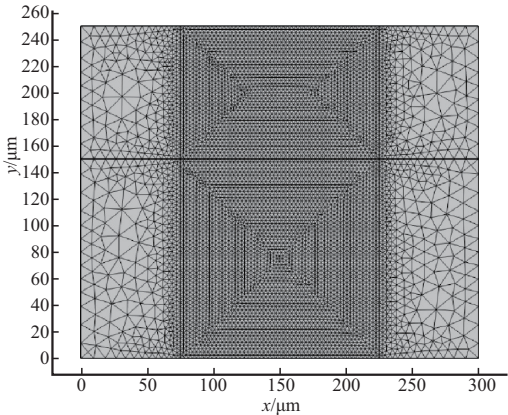


图 1 模型网格划分示意图

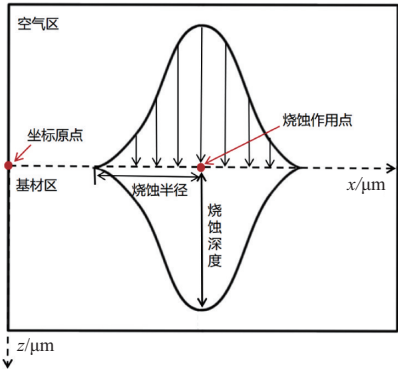


图 2 激光单点加工示意图

表 1 TC4 的热物理性质

热物理特性	符号	数值
固相线温度/K	T_s	1877.00
液相线温度/K	T_l	1923.00
熔化温度/K	T_m	1900.00
蒸发温度/K	T_v	3315.00
固体密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	ρ_s	$4420 - 0.15(T - 298\text{K})$
液体密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	ρ_l	4000.00
气化潜热/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	L_m	2.86×10^5
烧蚀潜热/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	L_v	2.84×10^7
固体比热容/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	C_{ps}	670.00
液体比热容/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	C_{pl}	730.00
固相热导率/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	k_s	21.00
液相热导率/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	k_l	29.00
材料吸收率	α	0.24
对流传热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)	h	10.00
热膨胀系数/ K^{-1}	β	8×10^{-6}
表面张力系数/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	σ	$1.56 - 1.50 \times 10^{-4} \times (T - T_m)$

本文对于双纳秒激光进行研究, 激光脉冲格式如图 3 所示, 两脉冲之间的时间间隔即为延迟时间, 延迟时间相对于高能脉冲为基准进行设置。每个激光脉冲对包含一个高能脉冲 0.03mJ 和一个低能脉冲 0.0025mJ , 设置激光脉冲对以 200kHz 的重复频率作用, 作为对比, 设置了单脉冲工况 (图 4), 其单脉冲能量 (0.0325mJ) 等于一对双脉

冲的总能量，重复频率也为 200kHz。双脉冲激光具体参数设置如表 2 所示。

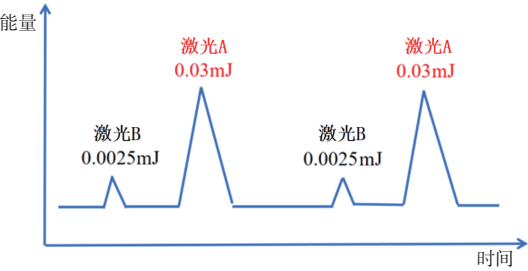


图 3 双脉冲激光烧蚀的脉冲格式示意图

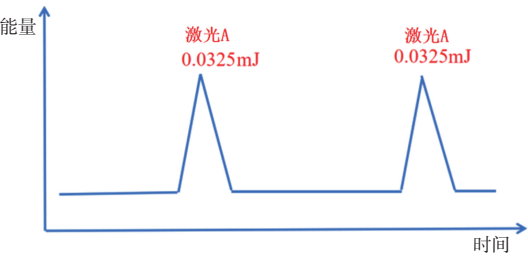


图 4 单脉冲激光烧蚀的脉冲格式示意图

表 2 双脉冲激光参数设置

参数	高能脉冲	低能脉冲
单脉冲能量/mJ	0.03	0.25×10^{-2}
脉冲宽度/ns	7.00	4.00
光斑半径/ μm	34.00	34.00

2 分析与讨论

基于有限元模型，对双脉冲激光作用于 TC4 材料进行数值模拟，图 5 展示了延迟时间为 200ns、作用两个脉冲对（总时间 10 μs ）时的温度场分布。激光烧蚀作用点坐标为（150,150），温度基于该点沿横向和径向传播，从图中可以看出，材料内部温度从烧蚀点向四周扩散，呈现均匀的温度梯度分布，表面最高温度达 $1.35 \times 10^3 \text{K}$ ；材料表面形成深度较浅、直径较大的碗状凹坑。以下将重点分析双脉冲激光加工的温度场与烧蚀形貌特征，并探讨延迟时间的影响规律。

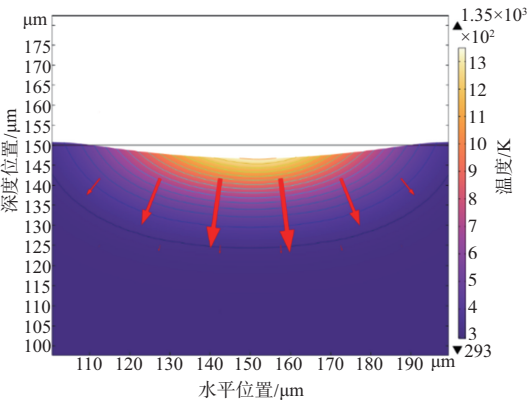


图 5 双脉冲激光加工温度场分布

（1）双脉冲激光对于材料温度场和表面形貌的影响

图 6 为双脉冲激光延迟时间为 200ns 重复频率为 200kHz，径向温度随作用时间的变化，总作用时间为 10 μs ，经历两次脉冲作用，初始双脉冲作用阶段 0~1 μs 范围之内，第一个脉冲对在 200ns 时间间隔内先后作用，产生显著的热积累效应，表面峰值温度达到 1278.05K，热穿透深度为 30.37 μm ，温度衰减呈现指数特征：随后进入热弛豫阶段（1~5 μs ），在 $\tau = 5\mu\text{s}$ 时，表面温度降至 810.52K，热影响区扩展至 41.3 μm ；第二个脉冲对作用产生温度跃升 1160.42K，由于热记忆效应，此次温升效率提高 17.8%，热扩散深度达到了 46.16 μm ，激光与材料相互作用过程中的热影响区的时空演化呈现典型的非线性扩散特征，通过瞬态热传导模型的数值求解得到如图 7 的作用结果，可以看出热影响区随作用时间的进行缓慢增加，且增长速率逐渐降低。

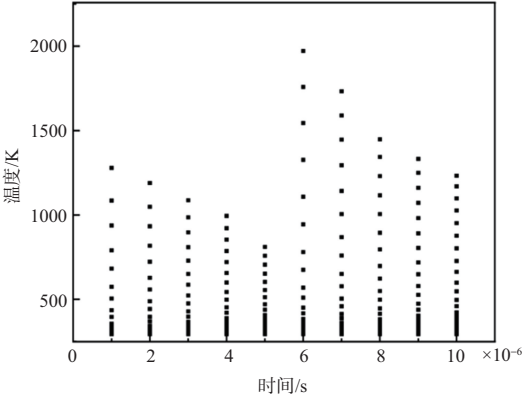


图 6 不同时间双脉冲作用于 TC4 的径向温度分布

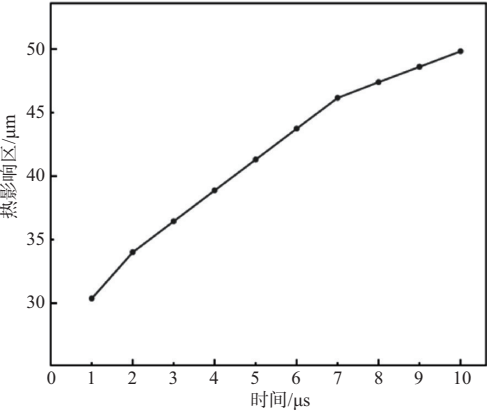


图 7 热影响区随时间的变化

图 8 和图 9 分别展示了双脉冲激光作用下温度场的空间分布特性和时间演化规律，空间上，温度沿深度方向呈现梯度递减，分布曲线符合高斯函数形式，与激光光束的能量分布特性一致。图 9 展示了深度为 8 μm 处温度随时间的变化，时间上，温度随作用时间的进行不断升高，在第一次脉冲对作用的 5 μs 内，该点温度从初始 293.15K 升至 533.385K

(温升 240.235K)，并在 5 μ s 末达到 623.995K。第二次作用后温度迅速升高，第 6 μ s 温度达到了 1013.06K，温升 389.065K，较第一次作用在 1 μ s 内的温升增长了 1.62 倍，前 5 μ s 内的总的温度梯度变化比后 5 μ s 大，且第二次末期出现温度降低，可能与材料导热系数变化导致的快速冷却有关，表明脉冲间隔时间会在瞬态热循环中引起非预期降温。

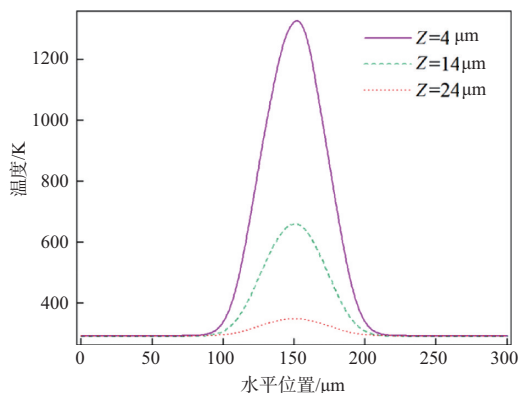


图 8 温度随深度的变化

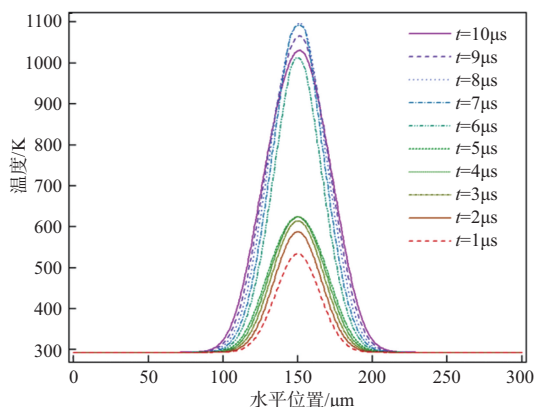


图 9 温度随时间的变化

图 10 展示了延迟时间 200 ns 条件下横向温度场的时空演变特征（注：图中直线部分示意烧蚀凹坑直径，不代表实际温度分布），由图 9 温度分布分析表明，烧蚀凹坑直径方向的温度呈现非单调变化规律，这主要源于能量主要沿轴向传递，轴向温度梯度显著大于径向梯度，烧蚀深度增加抑制了径向热扩散。烧蚀直径的动态演化如图 11 所示：前 5 μ s 阶段，直径扩展速率达 $(5.9 \pm 0.65) \mu\text{m}/\mu\text{s}$ ；后 5 μ s 阶段，速率降至 $(3.0 \pm 0.2) \mu\text{m}/\mu\text{s}$ 。二次脉冲作用时直径扩展速率降低，反映了热扩散与相变动力学的非线性耦合效应。

(2) 延迟时间对于 TC4 材料温度场及烧蚀形貌的影响

为探讨延迟时间的影响，设置长延迟时间（微妙级）和短延迟时间（纳秒级）两组参数，在长延迟时间下，保证总作用时间 5 μ s 内输入的总能量一致，重复频率 200kHz，对比单脉冲与不同延迟

时间的双脉冲作用结果。图 12 展示了作业结束时刻沿深度方向的温度分布。可见，单脉冲烧蚀点温度最高达 889.71K，热影响区范围较大（扩散范围超 25 μ m）。双脉冲中，延迟时间 1 μ s 时烧蚀点温度最高，热扩散范围较大；延迟时间 4 μ s 时烧蚀点温度最低，热影响区最小。结果表明，双脉冲相较于单脉冲能减小热影响区，且延迟时间越短，烧蚀点温度越高，热影响区越大。在短时间相同能量输入下，长延迟时间对加工深度影响较小，但根据温度变化趋势可推断，长时间作用时较短延迟时间将导致更高温升和更快加工效率，此处结论趋势与敬海军^[18]得到的纳皮秒双脉冲激光作用引起的材料温升会高于皮秒单脉冲作用时引起的材料温升一致。

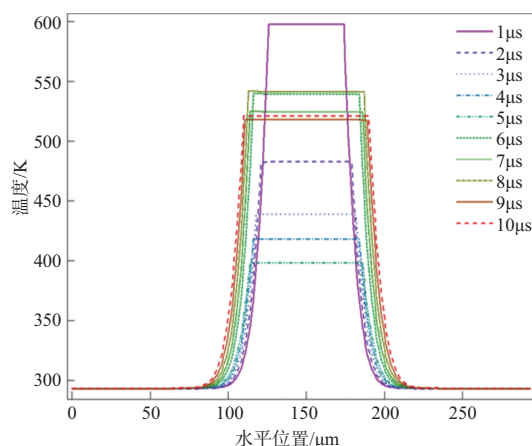


图 10 不同时间双脉冲作用于 TC4 的横向温度分布

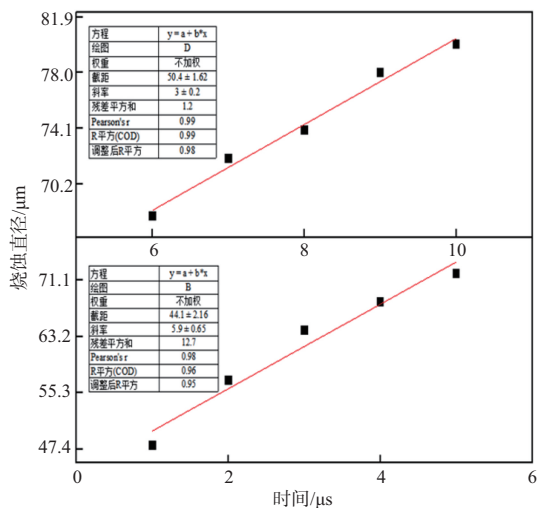


图 11 烧蚀凹坑直径随时间的变化

提取热扩散范围内温度沿深度方向的变化数据进行非线性拟合（图 13），曲线衰减满足指数衰减函数，形式 $y = A \times e^{-(x/\tau)} + B$ ；拟合参数见表 3，其中初始幅值 A 决定温度的起始下降量，时间常数 τ 是曲线衰减快慢的指标，基线值 B 是变量温度最后趋于稳定的最终值。分析可得：延迟时间越短，温度衰减越快，温度梯度越大，造成相对较少的热

影响区, 单脉冲烧蚀点温度在材料内部传播衰减速率最慢, 造成的热影响区最大; 各曲线的初始幅值存在差异, 单脉冲最高, 其余按延迟时间的增加依次降低; 所有函数长期趋势具有一致性, 最终均收敛至约 280K。即延迟时间的改变差异主要体现在短期衰减过程, 长期行为是相似的。在微秒级别的延迟时间内, 延迟时间越小作用效果越好, 造成较高较快的加工速率并且产生的热影响区相对最小。

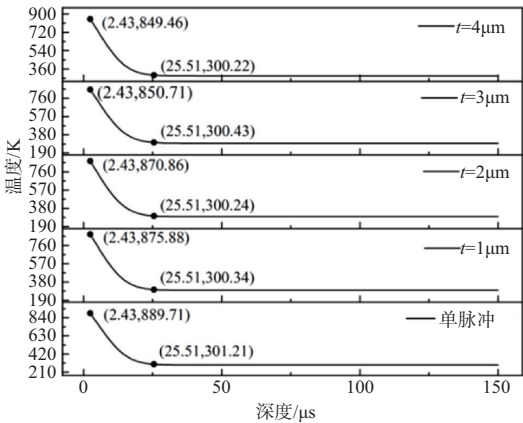


图 12 单双脉冲沿深度方向温度分布曲线

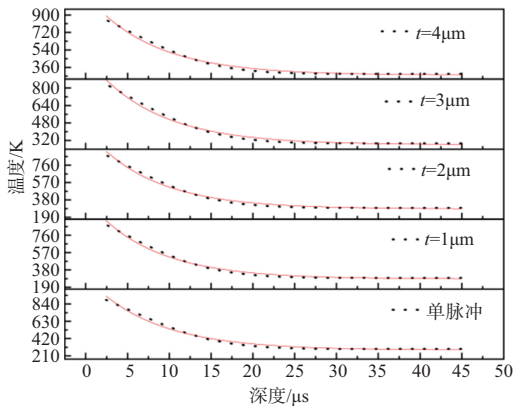


图 13 单双脉冲沿深度方向温度变化趋势

表 3 各延迟时间下的衰减函数参数

延迟时间 $t/\mu\text{s}$	初始幅值 A	时间常数 τ	基线值 B
单脉冲	887.25	8.14	278.11
1	870.44	7.79	280.42
2	863.83	7.80	280.45
3	850.29	7.89	280.05
4	829.98	7.97	279.95

短延迟时间对于激光加工材料的影响: 在纳秒尺度的延迟时间参数改变引起沿材料径向的温度场变化如图 14 所示, 延迟时间分别设定为 5ns、50ns、100ns、200ns 时, 最终达到的烧蚀点温度分别为: 847.7K、900.42K、904.52K、847.85K, 烧蚀点温度最低的是 200ns, 温度最高的是 100ns; 延迟时间在百纳秒级别以下时, 烧蚀点温度随着延迟时间的增长而增大, 在百纳秒以上时呈小幅度

减小趋势, 图中四条曲线的下降速率关系为 $100\text{ns} > 50\text{ns} > 200\text{ns} > 5\text{ns}$; 综上所述发现存在最佳延迟时间, 在短延迟时间纳秒级别, 100ns 为最佳, 即达到最高的烧蚀温度并产生最小的热影响区。

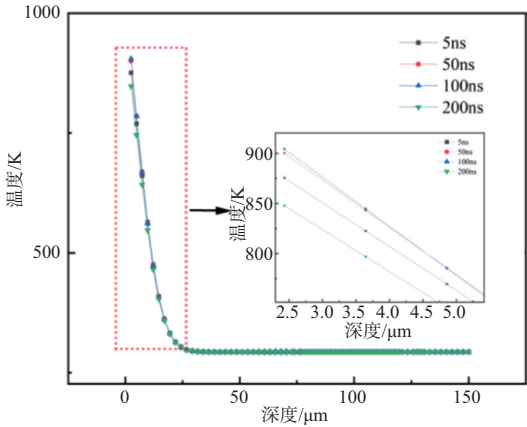


图 14 短延迟时间对于 TC4 温度场的影响

图 15 展示了总时间为 $5\mu\text{s}$ 、作用两次时, 延迟时间对于烧蚀凹坑形貌的影响, 随着作用时间进行, 凹坑直径增大, 延迟时间影响其增大速率, 短延迟时间 (纳秒级) 引起的烧蚀直径变化速率基本相同, 呈现准线性特征, 长延迟时间 (微秒级) 造成中部 ($1\mu\text{s} < t < 3\mu\text{s}$) 速率加快, 两端速率近似相等的情况。可能与热累积效应、熔体对流增强和蒸汽反冲压力有关。该结果表明延迟时间通过调控能量沉积时空分布, 改变了材料响应机制。在深度方向上由于总作用时间较短, 烧蚀深度没有明显变化, 此处对于延迟时间对于烧蚀凹坑深度的影响不加以讨论。

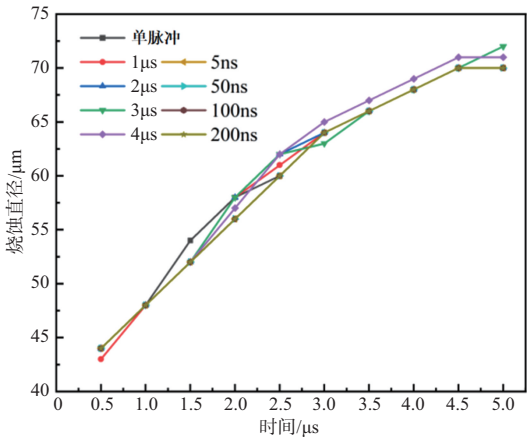


图 15 延迟时间对于烧蚀凹坑尺寸的影响

3 结 论

本文基于有限元仿真平台, 建立了热熔-孔隙法与水平集法耦合的二维模型, 对纳秒双脉冲激光加工 TC4 钛合金过程中的温度场演化与烧蚀形貌进行了多物理场耦合仿真研究, 主要结论如下

(1) 双脉冲激光加工过程中的温场演化呈现显著的热累积效应。二次脉冲作用的温升效率较首次脉冲显著提高,达1.62倍。

(2) 双脉冲激光加工的温度场时空分布呈现高斯特性,热影响区随作用时间扩展但增长速率降低。二次作用后出现的非预期温降表明脉冲间隔时间会显著影响材料热响应行为。烧蚀形貌分析表明,二次脉冲作用时直径扩展速率降低,反映了熔池动力学与热扩散的非线性耦合。

(3) 延迟时间对加工效果有重要影响。在微秒级延迟下,双脉冲加工较单脉冲能显著减小热影响区;延迟时间越短,烧蚀点温度越高,热影响区范围越大。在纳秒级延迟下,存在最佳参数窗口(100ns),此时烧蚀温度达到峰值904.52K;延迟时间偏离此值,烧蚀温度均降低。

(4) 延迟时间通过调控能量沉积的时空分布影响烧蚀形貌演化。微秒级延迟下烧蚀直径呈非线性扩展,而纳秒级延迟下则呈现准线性增长模式。

参考文献:

- [1] 杨培智,张钧,杨海欧. TC4钛合金混合制造技术的研究与进展[J]. 铸造技术, 2023, 44(11): 977—987.
Yang Peizhi, Zhang Jun, Yang Haiou. Research and progress of the hybrid manufacturing of TC4 titanium alloy[J]. Foundry Technology, 2023, 44(11): 977—987.
- [2] 夏玉峰,滕海灏,张雪,等. Ti-6Al-4V合金电弧熔丝增材的组织性能研究进展[J]. 重庆大学学报, 2022, 45(4): 87—99.
Xia Yufeng, Teng Haihao, Zhang Xue, et al. A review of the wire arc additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy: Properties, defects and quality improvement[J]. Journal of Chongqing University, 2022, 45(4): 87—99.
- [3] 高黎明,陈琦,万斌,等. 钛合金铸造的研究进展与挑战[J]. 铸造技术, 2025, 46(04): 377—390.
Gao LiMing, Chen Qi, Wan Bin, et al. Review of the progress and challenges of titanium alloys casting[J]. Foundry Technology, 2025, 46(04): 377—390.
- [4] 郝秀清,陈思敏,孟令晨,等. 航空航天领域典型材料与零件的激光加工技术及其研究进展[J]. 上海航天(中英文), 2025, 42(04): 136—157.
Hao Xiuqing, Chen Simin, Meng LingChen, et al. Laser processing technology and research advances for typical materials and components in the aerospace field[J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2025, 42(04): 136—157.
- [5] 李坚,何斌,陈国炎,等. 纳秒脉冲激光烧蚀加工碳化硅的研究[J]. 装备机械, 2025, (01): 17—23.
Li Jian, He Bin, Chen Guoyan, et al. Nanosecond pulsed laser ablation processing of silicon carbide[J]. The Magazine on Equipment Machinery, 2025, (01): 17—23.
- [6] 潘瑞,董志森,陈树君. 纳秒激光连接技术研究进展及展望[J/OL]. 机械工程学报, 1-22[2025-09-08]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2187.TH.20250325.1605.004>.
Pan Rui, Dong Zhiseng, Chen Shujun. Advance and prospects of nanosecond laser welding technology[J/OL]. Journal Of Mechanical Engineering, 1-22[2025-09-08]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2187.TH.20250325.1605.004>.
- [7] 王敬. 纳秒与毫秒双脉冲激光辐照脆性材料的损伤机理与实验研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2024.
Wang Jing. Damage mechanism and experimental study of hard brittle materials irradiated by nanosecond and millisecond double pulse laser[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2024.
- [8] 王学军,孟繁禹,李猛,等. 纳秒双脉冲激光的控制方法[J]. 中国激光, 2011, 38(02): 105—108.
Wang Xuejun, Meng Fanyu, Li Meng, et al. Nanosecond dual pulse laser controlling method[J]. Chinese Journal Of Lasers, 2011, 38(02): 105—108.
- [9] Zhang Shiheng, Fan Yunru, Huang Yun, et al. Improvement of the surface condition of laser-drilled holes via a dual-wavelength double-pulse train[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 157: 108681.
- [10] 赵兴科,徐明亮,徐帅. 钛合金激光表面加工研究进展[J]. 材料研究与应用, 2023, 17(04): 643—657.
Zhao Xingke, Xu Mingliang, Xu Shuai. Research progress in laser surface processing of titanium alloy[J]. Materials Research and Application, 2023, 17(4): 643—657.
- [11] 孟宪凯,张韩,宋福阳,等. 双脉冲激光冲击强化Ti6Al4V钛合金微观组织与拉伸性能研究[J]. 中国激光, 2024, 51(20): 51—59.
Meng Xiankai, Zhang Han, Song Fuyang, et al. Microstructure and tensile properties of Ti6Al4V titanium alloy by Dual-pulse laser shock peening[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(20): 51—59.
- [12] 龙井宇,卜英华,穆让修,等. 基于混合光束的复合激光系统[J]. 应用光学, 2024, 45(01): 26—32.
Long Jingyu, Pu Yinghua, Mu Rangxiu, et al. Compound laser system based on hybrid beam combination technology[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(01): 26—32.
- [13] Machiori T, Liu F Q, Yin Q Y, et al. Spatiotemporal variations of residual stresses during multi-track and multi-layer deposition for laser powder bed fusion of Ti-6Al-4V[J]. Computational Materials Science, 2021, 195: 110462.
- [14] Jin Yushi, Dong Yuan, Jin Long, et al. 604 nm&639 nm Dual-wavelength double pulse Pr: YLF laser[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 166: 109579.
- [15] 王一飞,虞宙,李康妹,等. 纳秒激光烧蚀钛合金微坑形貌的数值模拟分析[J]. 中国激光, 2022, 49(08): 80—96.
Wang Yifei, Yu Zhou, Li Kangshu, et al. Numerical simulation of Micro-pit morphology of titanium alloy ablated by nanosecond laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(08): 80—96.
- [16] 张廷忠. 毫秒激光打孔过程熔融飞溅、重铸层和微裂纹形成机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
Zhang Tingzhong. Study on mechanism of melt ejection, recast layer and micro crack formation in millisecond laser drilling[D]. Nanjing: Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [17] Zhang Chi, Zhou Jing, Shen Hong. Role of capillary and thermocapillary forces in laser polishing of metals[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2017, 139(4): 041019.
- [18] 敬海军. CFRP的纳秒双脉冲激光加工仿真与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022. DOI: 10.27061.
Jing Haijun. Simulation and experimental study on NANO picosecond Laser double pulses machining of CFRP[D]. Haibin: Harbin Institute of Technology, 2022.