

文章编号: 1002-2082 (2026) 02-0411-09

引用格式: 姜永霞, 李隆, 余天锡, 等. 激光烧蚀 TC4 熔池行为数值模拟 [J]. 应用光学, 2026, 47(2): 411-419.

JIANG Yongxia, LI Long, YU Tianxi, et al. Numerical simulation of laser ablation TC4 melting pool behavior[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(2): 411-419.



在线阅读

激光烧蚀 TC4 熔池行为数值模拟

姜永霞¹, 李 隆^{1,2}, 余天锡¹, 程雨露², 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: 激光加工金属材料的过程涉及复杂的物理现象, 其内在机理涵盖多个学科和领域。本研究基于 Level Set 方法, 在有限元仿真软件中构建了激光加工 TC4 钛合金形成熔池的数值模型, 系统深入地探究了温度场、速度场及金属相变的动态行为。该模型采用 Level Set 方法精确追踪气/液相变界面, 并利用热焓-孔隙法处理液/固混合糊状区, 从而在有限元仿真软件中实现了高精度的数值模拟。揭示了激光参数 (功率、光斑半径) 对熔池温度场、速度场及相变行为的影响规律。研究表明: 高功率密度和小光斑半径能够显著提高熔池的流速和温度, 加速材料的相变过程, 但也可能导致液体飞溅和表面粗糙度增加。这些结果为优化激光加工工艺参数、提高加工质量提供了重要的理论依据。

关键词: 激光加工; TC4; Level Set; 相变; 数值模拟

中图分类号: TN249

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202647.0207002

Numerical simulation of laser ablation TC4 melting pool behavior

JIANG Yongxia¹, LI Long^{1,2}, YU Tianxi¹, CHENG Yulu², 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: The process of laser processing of metallic materials involves complex physical phenomena, and its internal mechanism covers multiple disciplines and fields. In this study, based on the Level Set method, a numerical model of the molten pool formed by laser processing of TC4 titanium alloy was constructed in the finite element simulation software, and the dynamic behavior of temperature field, velocity field and metal phase transition was systematically explored. The model uses the Level Set method to accurately trace the gas/liquid phase transition interface, and uses the enthalpy-pore method to treat the liquid/solid mixed paste region, so as to achieve high-precision numerical simulation in the finite element simulation software. The influence of laser parameters (power, spot radius) on the temperature field, velocity field and phase transformation behavior of the melt pool is revealed. The results show that the high power density and small spot radius can significantly increase the flow rate and temperature of the molten pool, accelerate the phase transformation process of the material, but may also lead to liquid splashing and increased surface roughness. These results provide an important theoretical basis for optimizing laser processing process parameters and improving processing quality.

收稿日期: 2025-03-26; 修回日期: 2025-07-02

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

第一作者: 姜永霞, E-mail: jiangyongxia@xauat.edu.cn

通信作者: 李隆, E-mail: lilong@xauat.edu.cn

Key words: laser processing; TC4; level set; phase change; numerical simulation

引言

钛合金以其优异的综合性能,高比强、高断裂韧性以及优良的耐腐蚀性和生物相容性等特点,广泛应用于航空航天、船舶、汽车、化工、电力、医疗等领域^[1-2]。然而钛合金的硬度较低、摩擦系数大、易磨损,在常温下长期放置易生成较厚的表面氧化膜等,降低了其使用性能。为了弥补这些表面性能缺陷,钛合金的表面加工研究一直备受关注。

相比于传统的金属加工,激光加工金属材料是材料加工方面一种更为优良的加工方式,其具有高质量、高精度、高效和高灵活性等显著优势^[3]。在高能激光束的照射下,材料表面温度升高。该过程通常作用时间较为短暂,热过程却很复杂,一般包括激光的反射与吸收、金属熔化、液体金属汽化、液体金属喷射和液体金属凝固等。但其本质都是激光与材料发生传热、传质的过程。一般熔池的温度场演变决定温度梯度和凝固速度,温度梯度和凝固速度共同决定熔池凝固组织形态和尺寸^[4];熔池的几何参数(如大小和形状)也会反过来影响熔池凝固行为^[5]。熔池内部传热、传质过程对微观凝固组织和宏观缺陷的形成有重要影响^[6]。掌握激光材料加工熔池流动行为机制,并采取有效的调控手段是获得高质量激光材料加工成形件的关键^[7]。这方面研究涵盖激光与材料相互作用、熔池形成与演化、凝固行为、激光参数影响、数值模拟与实验验证、表面形貌关系、材料特性影响、工艺优化、多物理场耦合及特殊现象等多个方面,旨在全面理解熔池行为并优化加工工艺^[8-13]。激光材料加工过程中,熔池内部的熔体流动不仅影响着材料的熔化、凝固过程,还直接决定了最终加工质量。然而,由于熔池的尺寸通常在微米至毫米量级,且其形成和演化过程仅在毫秒甚至更短的时间尺度内完成,传统的实验手段难以实时捕捉和精确表征熔池内部的动态行为。因此,数值模拟成为研究熔池流动行为的重要手段。

本文基于有限元仿真软件,对激光烧蚀钛合金过程中的熔池行为进行了系统的数值模拟研究。通过建立高精度的数值模型,深入探讨了激光烧蚀过程中熔池的形成机制、流动特性及其演化规律。研究重点关注了熔池内部的温度场、速度场分布,以及熔体流动对材料相变的影响。通过模

拟不同激光参数(如功率、光斑半径)下的熔池行为,揭示了熔池流动的作用机理及其在激光加工中的表现形式,为优化激光加工工艺参数,提高加工质量提供了理论依据,为进一步理解激光加工过程中的多物理场耦合机制提供了新的视角。

1 模型建立

激光加工主要涉及热传递和力的相互作用。热传递包括激光能量在材料内部的热传导,与空气的热对流,表面的热辐射,在熔化和蒸发过程中的相变潜热;力的相互作用包括达西力、反冲压力、表面张力等^[14]。本文研究烧蚀现象,针对毫秒激光的功率密度量级为 10^7 W/cm^2 量级,整个过程材料先熔化,紧接着液化金属材料剧烈汽化膨胀,产生的反冲压力将熔融材料抛出,然后形成烧蚀凹坑。从能量传输来看,固/液界面产生固/液相变,烧蚀表面形成液/气相变,因此,在数值求解时,需要建立固、液、气三相统一的数学模型。本文基于三大守恒方程,在建模过程中,对于固/液相变采用热焓-孔隙法,气/液界面中采用 Level Set 法追踪,基于有限元分析软件,对激光加工钛合金材料形成烧蚀熔池现象进行理论分析和影响因素探讨。

1.1 理论模型

材料内部的传热方式为热传导,基材与空气接触的边界采用热对流方式,同时考虑金属材料的相变,建立温度场模型^[15]。温度场的控制热传导方程为

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q \quad (1)$$

式中: ρ 为密度; c_p 为比热容; k 为热传导系数; Q 为总热源项,包含激光能量输入、相变潜热等综合热效应。

在激光加工过程中,随着材料温度的升高,金属材料逐渐熔化,烧蚀过程中,不仅会产生相变潜热,而且金属材料的导热系数、比热容以及密度等参数也会随温度变化,为了得到较为准确的温度场,对一些重要的参数做了如下处理。

金属材料在熔化过程中的比热容 c_p 可表示为

$$c_p = \theta_s c_{ps} + \theta_l c_{pl} + L_m \frac{d\theta_m}{dT} \quad (2)$$

式中: θ_s 为金属材料的固相质量分数; θ_l 为液相质量分数; θ_m 为质量分数; c_{ps} 为固相比热容; c_{pl} 为液

相比热容; L_m 为熔化潜热。 θ_s 和 θ_l 满足关系 $\theta_s + \theta_l = 1$; 金属材料的质量分数 θ_m 可以表示为 $\theta_m = \frac{\theta_l - \theta_s}{2}$ 。

材料在熔化过程中的导热系数 k 和材料密度 ρ 可以表示为

$$k = \theta_s k_s + \theta_l k_l \quad (3)$$

$$\rho = \theta_s \rho_s + \theta_l \rho_l \quad (4)$$

式中: k_s 为金属材料的固相导热系数; k_l 为液相导热系数; ρ_s 为固相密度; ρ_l 为液相密度。质量分数 θ_s 和 θ_l 都是温度 T 的函数, 即 Heaviside 函数, 其随温度变化的情况如图 1 所示^[14]。

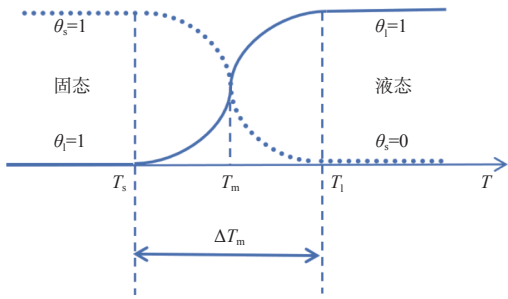


图 1 质量分数的变化

Fig. 1 Variation of mass fraction

液态金属材料的质量分数 θ_l 的表达式为

$$\theta_l = \begin{cases} 0, T \leq T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s}, T_s \leq T \leq T_l \\ 1, T \geq T_l \end{cases} \quad (5)$$

本文将激光能量看作面热源, 空间呈高斯分布, 可以表示为

$$I(x) = \frac{2P_r}{\pi r_b^2} \exp\left(\frac{-2x^2}{r_b^2}\right) \quad (6)$$

式中: P_r 为激光功率; r_b 为光斑半径。

边界条件如下:

1) 热对流边界(材料与空气接触面)

$$-k \nabla T = h(T - T_0) \quad (7)$$

式中: h 为对流系数; T_0 为环境温度。

2) 热绝缘边界

$$-k \nabla T = 0 \quad (8)$$

相变过程中, 采用 Level Set 方法追踪气/液追踪的界面, 限制汽化仅发生在气/液交界面附近的薄层区域内; 引入 $\delta(\phi)$ 函数, $\phi = 0$ 为气相, $\phi = 0 \sim 1$ 为气液交界, $\phi = 1$ 为液体区(包括: 固体、固液混合糊状区、液相区); 用热焓-孔隙法追踪固/液追踪界面, 把固/液共存糊状区作为多孔介质模型处理,

多孔性定义为液相体积分数。

基于水平集方程修正后的守恒方程, 质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程表达式如下:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \dot{m} \delta(\phi) \left(\frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_l} \right) \mathbf{n} \quad (9)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = \nabla \cdot \left[-P \mathbf{I} + \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \right] - \rho (1 - \beta(T - T_l)) \mathbf{g} + \mathbf{F}_{\text{Darcy}} + \mathbf{F}_r + \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_m \quad (10)$$

$$\rho C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right] = \nabla \cdot (k \nabla T) + \alpha I(x) g(t) - Q_{\text{loss}} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{u}$ 为速度矢量; ρ 为密度; $\mathbf{n}$ 为曲面法向量; C_p 为比热容; μ 为动力学黏度; P 为压强; I 为单位矩阵; β 为热膨胀率; T_m 为熔化温度; g 为重力加速度; Q_{loss} 为自由表面因蒸发、对流和辐射所导致的热量损失; $\delta(\phi)$ 为水平集方程, 表达式为 $\delta(\phi) = 6|\phi(1-\phi)||\nabla\phi|$ 。

式(10)为考虑烧蚀过程中力的相互作用基础上建立的动量守恒方程: 等式左边第2项为重力, $\mathbf{F}_{\text{Darcy}}$ 为达西力, $\mathbf{F}_r$ 为反冲压力, $\mathbf{F}_s$ 为表面张力, $\mathbf{F}_m$ 为马兰戈尼力。

式(11)从左到右依次为热的累积项、对流项、热传导项、高斯热源项、潜热项。

此外, 在液/气交界区域的质量守恒考虑蒸发带走的传质问题, 这部分基于水平集方程修正的质量守恒方程为

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u}_{\text{int}} \cdot \nabla \phi - m \delta(\phi) \left(\frac{\phi}{\rho_v} - \frac{1-\phi}{\rho_l} \right) = \gamma K \left(\varepsilon |\nabla \phi| - \phi(1-\phi) \cdot \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) \quad (12)$$

$\dot{m}$ 的表达式如下:

$$\dot{m} = (1-\beta) \sqrt{\frac{m}{2\pi k_b T}} P_0 \exp \left[\frac{L_v}{k_b} \left(\frac{1}{T_v} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (13)$$

式中: ε 为边界层厚度; γ 为函数初始值; $\mathbf{u}_{\text{int}}$ 为气/液界面速度; K 为交界面的曲率; α 为常数; $\dot{m}$ 为蒸发率; m 为金属工件材料的原子质量; k_b 为玻尔兹曼常数; P_0 为标准大气压; L_v 为蒸发潜热。

1.2 构建模型的选择及材料性能

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 $6 \text{ mm} \times 1.8 \text{ mm}$ 的空气层。下层构建 $6 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的钛合金材料模型液体(固体)层, 进行熔池的数值模拟时, 为了保证计算的精度和效率, 对数学几何模型进行合理的自由三角形网格划分, 如图 2 所示。中间 $2 \text{ mm} \times 4.8 \text{ mm}$ 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,保证计算效率;整个计算区域共计 16 094 个自由度,最大单元大小为 0.1 mm,最大单元增长率为 1.25,曲率因子为 0.25,平均单元质量为 0.941 5。

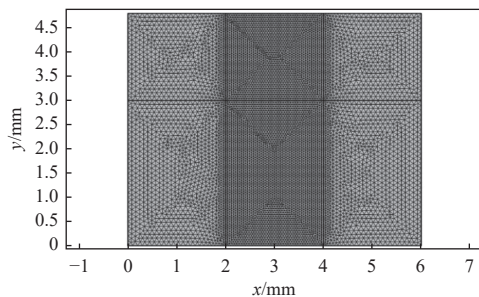


图2 模型网格划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of model meshing

模型中添加的材料为 TC4 钛合金,材料的热物理性质见表 1^[16]。

表1 TC4 的热物理性质

Table 1 Thermophysical properties of TC4

热物理性质	符号	数值
固相线温度/K	T_s	1 877
液相线温度/K	T_l	1 923
熔化温度/K	T_m	1 900
蒸发温度/K	T_v	3 315
固体密度/(kg/m ³)	ρ_s	4 420 ~ 0.154($T - 298$ K)
液体密度/(kg/m ³)	ρ_l	4 000
烧蚀潜热/(J/kg)	L_m	2.86×10^5
汽化潜热/(J/kg)	L_v	2.84×10^7
固相比热容/(J/(kgK))	C_{ps}	670
液相比热容/(J/(kgK))	C_{pl}	730
固相热导率/(W/(mK))	k_s	21
液相热导率/(W/(mK))	k_l	29
材料吸收率	α	0.24
对流传热系数/(W/(m ² K))	h	10
热膨胀系数/K ⁻¹	β	8×10^{-6}
表面张力系数/(N/m)	σ	$1.557 \sim 1.5 \times 10^{-4} \times (T - T_m)$

2 仿真结果与分析

基于有限元仿真软件对激光加工钛合金进行数值模拟,可以得到材料瞬态温度场、速度场、体积分数变化情况,如图 3 所示。在此基础上展开激光功率和光斑半径对激光加工钛合金形成熔池过程的影响探究。

2.1 温度场分布特征及原因

图 4 为 $P=2\ 000$ W, $R=0.4$ mm 时,不同时间熔

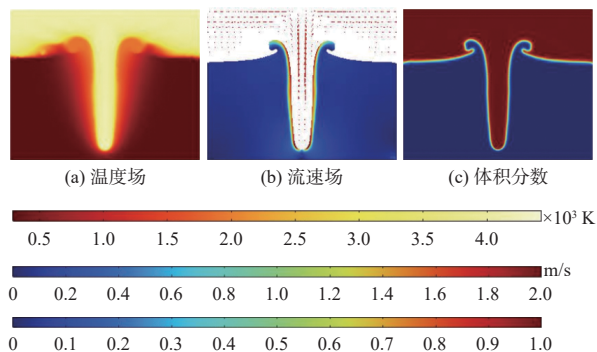
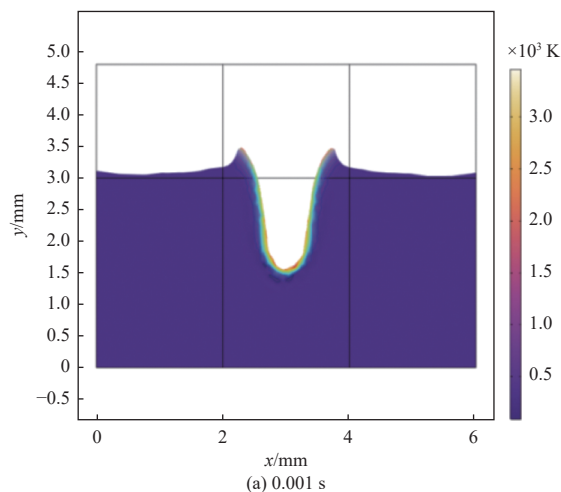


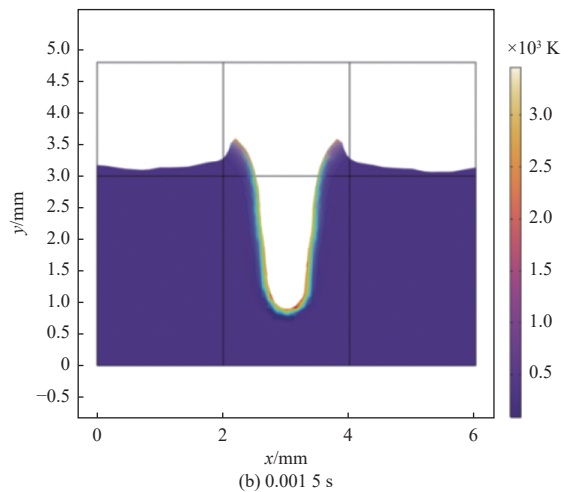
图3 材料温度场、速度场、体积分数瞬态变化

Fig. 3 Transient changes in material temperature field, velocity field, and volume fraction

池的温度场分布。从图 4(c) 可观察到熔池有液体飞溅现象,且各图中温度场分布最高达到 3 000 K 左右,由此可知图中温度场分布浅层表面为液体流动熔池区域。由图 4 可知,高温集中在熔池底部及气/液界面处,这是因为激光能量以高斯分布形式输入,中心能量密度最高,导致熔池中心温度迅速升高。由于钛合金导热系数较低(固相 21 W/(m·K)),热量不易扩散,形成局部高温区。同时,气/液界面



(a) 0.001 s



(b) 0.001 5 s

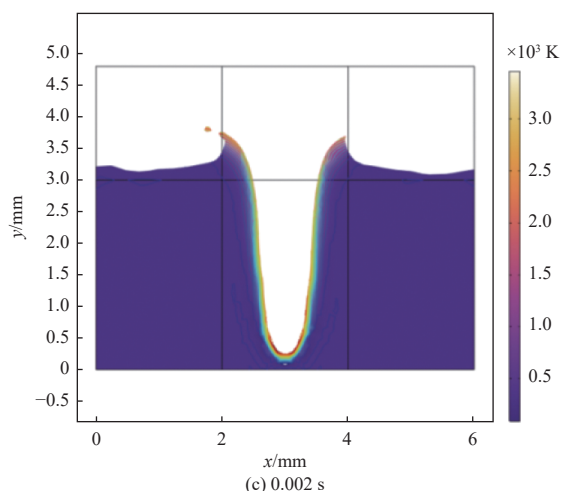


图4 熔池温度分布

Fig. 4 Molten pool temperature distribution

处因蒸发吸热(汽化潜热 $L_V = 2.86 \times 10^5 \text{ J/kg}$)和反冲压力作用,热量积累更显著。此外,温度梯度向外递减,由热传导方程式(1)可知,热量从高温区向低温区传递,但钛合金的低导热系数限制了传递范围,导致温度梯度陡峭。等温线扩展缓慢,符合式(3)中导热系数随温度变化的非线性特性。

图5为 $P=2000 \text{ W}$, $R=0.3 \text{ mm}$ 、 0.4 mm 、 0.5 mm 时烧蚀钛合金基材的温度场随时间的变化。由图5可知,随着作用时间的增加,材料温度快速升高,在达到气相线温度后材料温度趋于稳定且不再增加;并且升温速率随光斑半径的减小而加快,光斑半径对激光烧蚀过程中温度场的演变有显著影响。较小的光斑半径导致更快的温度升高和更短的熔池形成时间,图6为 $R=0.4 \text{ mm}$,选取激光功率分别为 1250 W 、 1500 W 、 2000 W 时材料烧蚀点温度随时间变化曲线。结果显示:随着激光作用时间的延续,材料温度升高,最终达到气相线温度值以上,有明显烧蚀发生,材料发生明显形变;

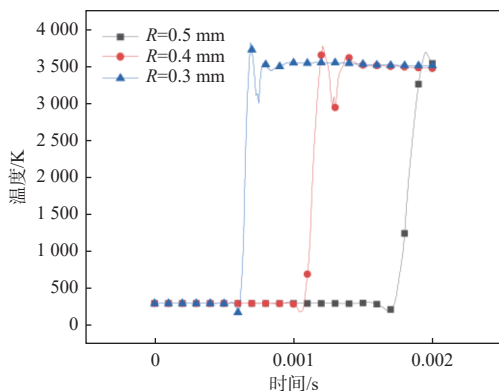


图5 光斑半径对于温度场的影响

Fig. 5 Effect of spot radius on temperature field

功率越大,热效应越明显,温度升高更为迅速。总的来说,小光斑半径(如 0.3 mm)能量密度高,单位面积热输入大,温度快速升至气相线温度(图5);高功率(如 2000 W):热源强度增加(式(7)),加速材料升温(见图6),但受蒸发潜热限制,温度最终稳定在 $T=3500 \text{ K}$ 附近,熔池温度位于汽化线温度以上,分析这部分原因为本文采取激光为连续激光,激光功率密度在模拟过程中未完全被蒸发冷却效应抵消,单位面积能量输入远超汽化所需的能量,导致多余热量积累,使温度超过 T_V 。

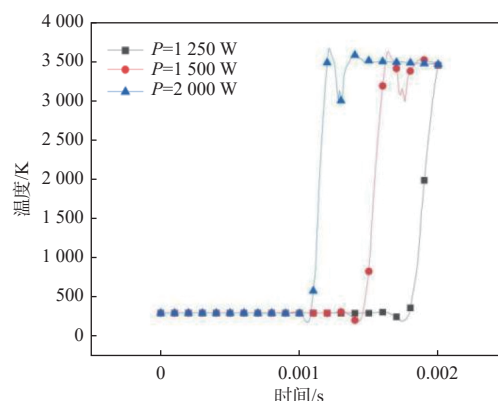
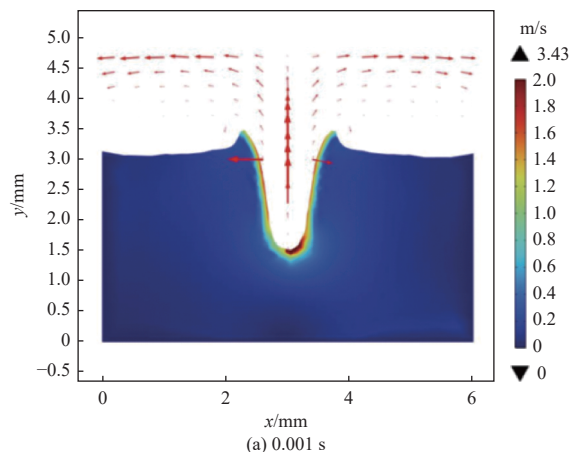


图6 激光功率对于温度场的影响

Fig. 6 Effect of laser power on temperature field

2.2 流速场动态行为及机理

图7为 $R=0.4 \text{ mm}$, $P=2000 \text{ W}$ 下激光加工钛合金材料的熔池流体速度场随时间的变化。由图7可以看出,激光烧蚀钛合金形成熔池时,熔池流体速度方向在气/液界面下在材料内部向四周流动,熔池最大流速为 3.43 m/s 。位置处于气/液界面:由剧烈汽化产生的反冲压力推动熔融金属向外喷射,形成高速流动,马兰戈尼力因温度梯度引起表面张力变化,驱动熔体从高温(低表面张力)向低温区(高表面张力)流动。



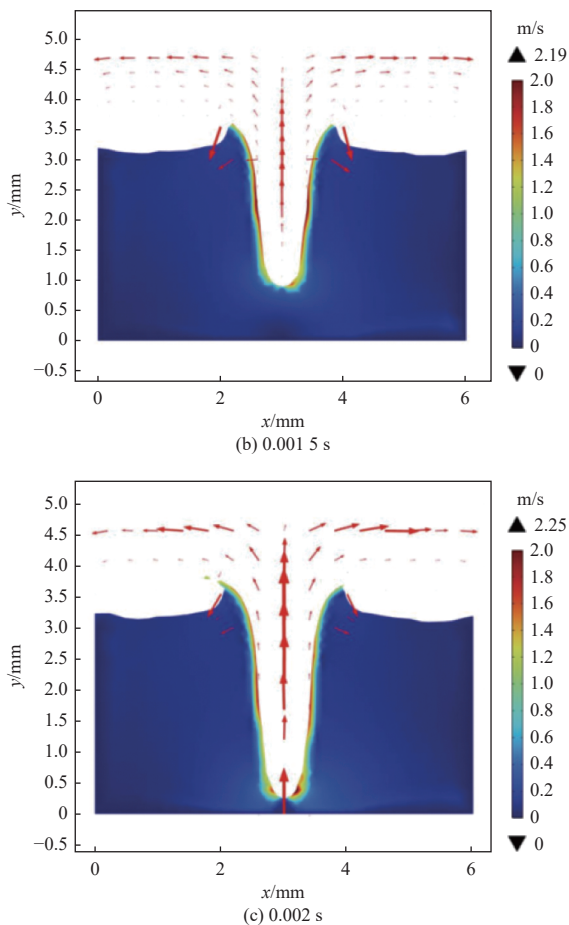


图7 熔池速度分布

Fig. 7 Molten pool velocity distribution

图8为 $P=2\,000\text{ W}$ 时,不同光斑半径下基材熔池流速随时间的变化。从图8中可以发现,相同时间,熔池的流速随光斑半径的增大而增大,流速的增长趋势也随着光斑半径的增大而增大。在 R 分别为 0.3 mm 、 0.4 mm 、 0.5 mm 时,流速最终分别达到了 34.506 m/s 、 17.81 m/s 、 7.508 m/s ,小光斑能量集中,蒸发速率高,反冲压力大,流速大;大光斑能

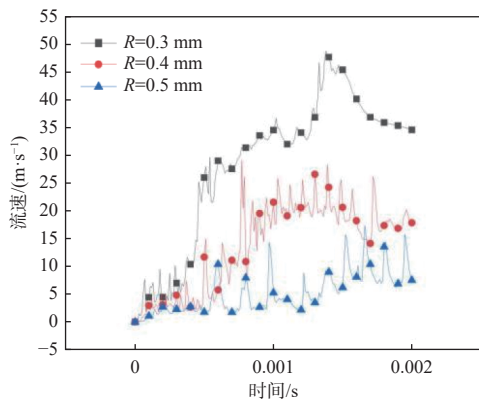


图8 光斑半径对熔池流速的影响

Fig. 8 Effect of spot radius on molten pool flow rate

量分散,蒸发温和,流速较低。图9为光斑半径固定于 0.4 mm 时,激光功率对熔池流速场的影响,展示了不同激光功率时,熔池内流体最大流速的变化。从图9中可以发现,在同一时间,激光功率越大,熔池流速越大,同时,熔池内流体流速随激光功率的增大,整体上也呈增大趋势。随着激光功率的增大,最终的流速分别为 4.562 m/s 、 11.059 m/s 、 17.942 m/s ,高功率提供更多的能量用于相变和动能转化,流速显著提升,符合动量守恒方程中能量与速度的耦合关系。

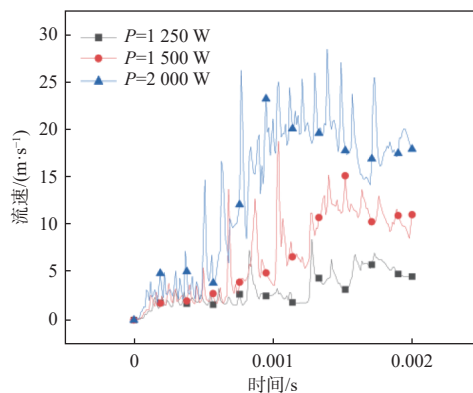


图9 激光功率对熔池流速的影响

Fig. 9 Effect of laser power on molten pool flow rate

2.3 相变行为分析

体积分数为气液相变的设置,体积分数等于0为固相区,等于1为气相区,0~1之间为固/液混合区。这部分是为了利用热焓-孔隙法来处理有限元软件求解固相区、液相区以及糊状区的问题,将固液混合区看作混有小孔的多孔区域,其孔隙率等于液体分数。体积分数与域中的每个单元相关联,根据焓平衡,在每次迭代时计算体积分数,从而得到材料的相状态。

图10为激光功率为 $2\,000\text{ W}$,光斑半径为 0.4 mm 时的体积分数变化图。从图10中可以发现,随着激光工作的进行,固体材料发生明显固液相变,气液相变,同时出现了液体飞溅现象,高功率密度下,蒸发速率剧增,反冲压力使熔体飞溅,表面张力与马兰戈尼力的不平衡加剧飞溅,导致表面粗糙度增加。在这个过程中,重力影响熔池形状,达西力抑制糊状区流动,减缓固相区变形。熔池中的液态金属在反冲压力为主,外加马兰戈尼对流效应的驱动下,沿熔池边缘向两侧流动,导致在烧蚀区域的起始和终止位置形成次生的凸起和凹陷特征。这些特征与主烧蚀区域的粗糙表面共同构成了复杂的表面形貌。

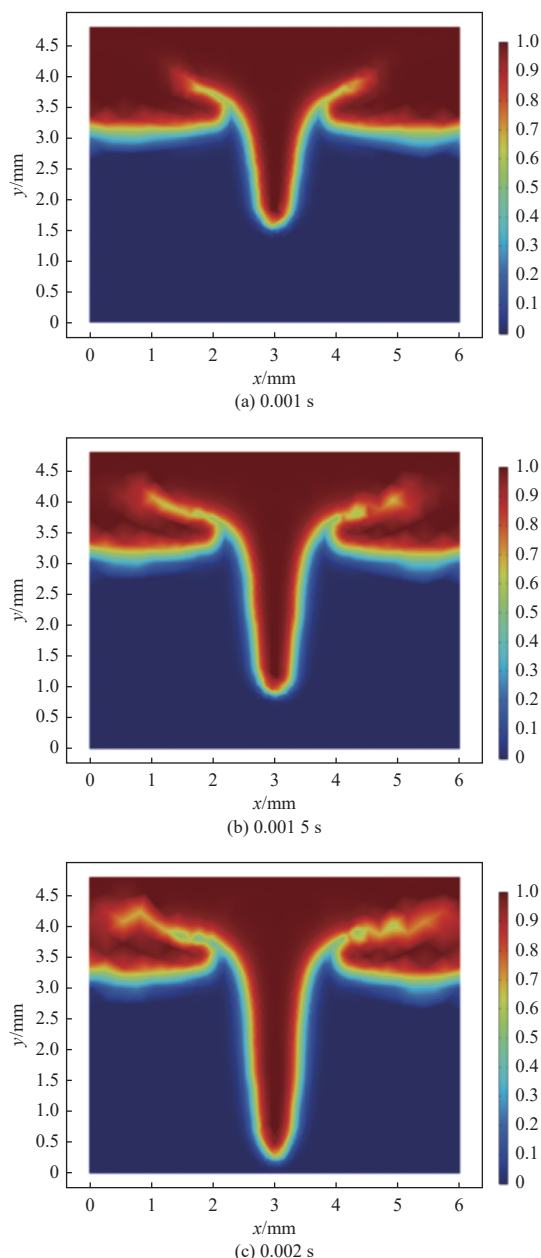


图 10 体积分数变化

Fig. 10 Volume fraction change

图 11 为 $P=2\,000\text{ W}$ 时光斑半径对于相变的影响。从图 11 中可以发现, 光斑半径越大, 材料越快融化, 由于激光能量较高, 材料瞬时间内紧接着发生汽化, 在光斑半径分别为 0.3 mm 、 0.4 mm 、 0.5 mm 时产生熔化的时间点分别为 0.0006 s 、 0.00105 s 、 0.0017 s ; 其中光斑半径在 0.3 mm 、 0.4 mm 时达到汽化的时间点为 0.00081 s 、 0.00141 s , 而 $R=0.5\text{ mm}$ 的情况下, 基材仅处于融化状态, 尚未相变为气态, 即小光斑因能量密度高所以熔化时间短, 大光斑因热量累积慢, 未达到 T_v , 汽化现象延迟。图 12 为 $R=0.4\text{ mm}$ 时激光功率对于相变的影响。

从图 12 中可以发现, 材料融化用时随激光功率的增高而加快, 紧接着材料瞬时间内发生汽化; 在激光功率分别为 $1\,250\text{ W}$ 、 $1\,500\text{ W}$ 、 $2\,000\text{ W}$ 时产生熔化的时间点分别为 0.00171 s 、 0.00142 s 、 0.00105 s , 其中光斑半径在 $1\,500\text{ W}$ 、 $2\,000\text{ W}$ 时达到汽化的时间点为 0.00188 s 、 0.00139 s ; 而 $P=1\,250\text{ W}$ 的情况下, 基材仍处于固液混合状态。激光功率的增加和光斑半径的扩大会显著加速材料的相变过程, 同时伴随液体飞溅现象。这种现象可归因于气体反冲压力的作用, 促使熔融金属在气体流动场的影响下向周围空间飞散。

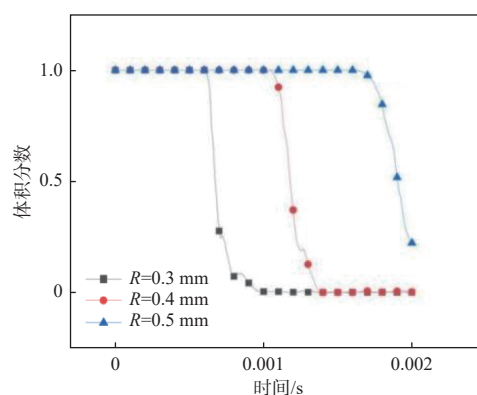


图 11 光斑半径对材料相变的影响

Fig. 11 Effect of spot radius on phase transition of materials

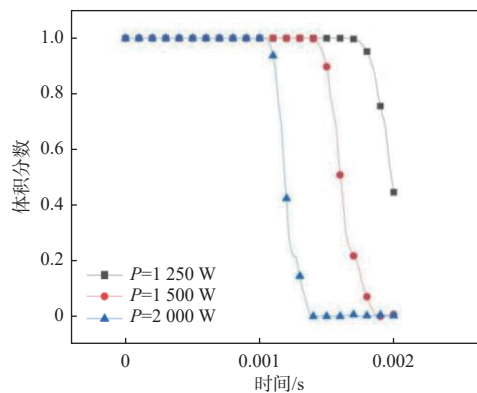


图 12 激光功率对材料相变的影响

Fig. 12 Effect of laser power on phase transition of materials

3 结论

本文基于激光加工中的传热和相变机制, 建立了二维瞬态数值模型, 考虑激光与金属材料相互作用过程中的复杂物理现象, 以 Level-Set 方法和热焓孔隙法及热传导方程为基础, 对激光烧蚀钛合金形成熔池现象进行研究, 通过理论探讨和数

值模拟发现激光参数的调整可以使材料熔融。以TC4钛合金为研究对象,基于激光烧蚀原理开展激光加工机理研究,对Level-Set方法与热熔孔隙法在材料相变界面追踪及相变问题分析中的应用原理进行了详细的理论探讨。通过理论探讨和数值模拟,发现激光参数的调整可以使材料熔融主要取决于热源分布,并对于高功率的激光功率注入和毫米尺寸光斑激光进行了分类对比探讨,得到如下结论。

1) 仿真结果方面

在温度场分布方面,随着能量密度的提升,材料烧蚀点的温度呈现出更为急剧的瞬时变化特征,由于钛合金基材的热传导系数相对较低,其内部温度场仅在小范围内缓慢扩散,未引发显著的全局温升现象。在熔池流速场分布方面,随着激光功率的提升和光斑半径的缩小,熔池流速显著加快,其内部形成了由外向内的循环流动模式,并在固液界面处呈现放射状扩散分布。关于相变影响的研究表明,激光功率的增加和光斑半径的减小会显著加速材料的相变过程,同时伴随液体飞溅现象。这种现象可归因于气体反冲压力的作用,促使熔融金属在气体流动场的影响下向周围空间飞散。熔池中的液态金属在马兰戈尼对流效应的驱动下,沿熔池边缘向两侧流动,导致在烧蚀区域的起始和终止位置形成凹陷和次生的凸起特征。这些特征与主烧蚀区域的粗糙表面共同构成了复杂的表面形貌。本文仿真模型尚有局限性,过于理想化,未将环境参数等变化引入考虑范畴,且激光热源为单一连续激光,后续研究可扩展至脉冲激光、多参数变量等进行相关探讨。本文也为相关研究提供了一定的参考思路和比对结果。

2) 机制探讨方面

激光功率和光斑半径通过高斯热源决定能量密度,直接影响温度场和相变速率;钛合金的低导热性、高相变潜热及表面张力温度敏感性,共同调控熔池动态行为;反冲压力、马兰戈尼力与达西力的竞争,决定了熔体流动模式(放射状扩散)及飞溅倾向。相变能量的消耗是由于潜热吸收延缓温升,而蒸发引起的传质过程进一步复杂化热-质耦合效应。这些机制的综合作用,解释了高功率/小光斑下熔池的高温、高速、快速相变及表面缺陷现象,为工艺优化(如平衡能量密度以减少飞溅)提供了理论依据。

参考文献:

- [1] XIE R Z, LIN N M, ZHOU P, et al. Surface damage mitigation of TC4 alloy via micro arc oxidation for oil and gas exploitation application: characterizations of microstructure and evaluations on surface performance[J]. Applied Surface Science, 2018, 436: 467-476.
- [2] ZHAO Z Y, LI L, BAI P K, et al. The heat treatment influence on the microstructure and hardness of TC4 titanium alloy manufactured via selective laser melting[J]. Materials, 2018, 11(8): 1318.
- [3] 杨毅然, 余立冬, 查榕威, 等. 激光清洗汉白玉表面油漆层的实验研究[J]. 应用光学, 2022, 43(2): 352-358.
YANG Yiran, YU Lidong, ZHA Rongwei, et al. Experimental study on laser cleaning of paint layer on white marble surface[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(2): 352-358.
- [4] LUO W, HUI J Z, WANG J J, et al. Study on the influence of selective laser melting temperature on the melting bath[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2791(1): 012024.
- [5] CHENG M P, XIAO X F, LUO G Y, et al. Integrated control of molten pool morphology and solidification texture by adjusting pulse duration in laser additive manufacturing of Inconel 718[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 142: 107137.
- [6] 钦兰云, 徐丽丽, 杨光, 等. 激光沉积成形熔池尺寸分析与预测[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(11): 80-86.
QIN Lanyun, XU Lili, YANG Guang, et al. Analysis and prediction of melt pool size in laser deposition manufacturing[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(11): 80-86.
- [7] 付艳恕, 卢聪, 叶小军, 等. 激光材料加工熔池流动行为实验研究进展[J]. 机械工程学报, 2023, 59(5): 291-306.
FU Yanshu, LU Cong, YE Xiaojun, et al. Review of experimental study on melt pool flow dynamics during laser material processing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(5): 291-306.
- [8] 王志坚, 王宗园, 宋鸿武, 等. TC4钛合金激光熔覆熔池凝固传热研究[J]. 机械设计与制造, 2018(10): 85-88.
WANG Zhijian, WANG Zongyuan, SONG Hongwu, et al. Study on heat transfer of molten pool in laser cladding of titanium alloy TC4[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(10): 85-88.
- [9] 钦兰云, 徐丽丽, 杨光, 等. 钛合金激光沉积制造热累积

- 与熔池形貌演化[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(9): 2645-2650.
- QIN Lanyun, XU Lili, YANG Guang, et al. Correlations of thermal accumulation and melt pool geometry during laser deposition manufacturing of titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(9): 2645-2650.
- [10] 李子帆, 蔡振华, 刘琦, 等. TC17 钛合金激光熔覆熔池实时监测算法研究[J]. 航空制造技术, 2024, 67(4): 110-117.
- LI Zifan, CAI Zhenhua, LIU Qi, et al. Research on real-time monitoring algorithm of TC17 titanium alloy laser cladding melting pool[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(4): 110-117.
- [11] 熊安辉, 丁洁琼, 刘延辉, 等. 钛合金表面激光熔覆熔池的数值模拟[J]. 应用激光, 2019, 39(3): 381-386.
- XIONG Anhui, DING Jieqiong, LIU Yanhui, et al. A numerical simulation for the molten pool of laser cladding on titanium alloy[J]. Applied Laser, 2019, 39(3): 381-386.
- [12] 周翔, 江五贵, 李琦, 等. 选区激光熔化过程熔池缺陷的形成机理研究[J]. 计算力学学报, 2024, 41(5): 816-821.
- ZHOU Xiang, JIANG Wugui, LI Qi, et al. Study on formation mechanism of molten pool defects during selective laser melting process[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2024, 41(5): 816-821.
- [13] 薛九天, 曾超, 黄芳. 扫描速度对激光选区熔化 Ti₆Al₄V 熔池流动行为的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2024, 47(4): 15-22.
- XUE Jiutian, ZENG Chao, HUANG Fang. Effect of scanning speed on flow behavior of laser selective melting Ti₆Al₄V molten pool[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2024, 47(4): 15-22.
- [14] 陈大卫. 基于 Level-Set 的高能密度焊接熔池行为数值模拟[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2023.
- CHEN Dawei. Numerical simulation of weld pool behavior in high energy density welding based on level-set[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2023.
- [15] 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 the mechanism of melt ejection, recast layer and micro crack formation in millisecond laser drilling[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [16] ZHANG C, ZHOU J, SHEN H. Role of capillary and thermocapillary forces in laser polishing of metals[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2017, 139(4): 041019.