

文章编号: 1002-1582(2026)02-0156-08

## 超快激光加工不锈钢流动传热特性研究

蒋志凯<sup>1</sup>, 施舜泽<sup>2</sup>, 何志强<sup>1</sup>, 杨东翰<sup>1</sup>, 李凌<sup>1\*</sup>

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

(2. 上海船舶设备研究所, 上海 200031)

**摘 要:** 超快激光加工金属过程中, 金属表面相变引发的熔体流动对加工质量具有显著影响。研究采用双温度模型耦合流体动力学的方法, 模拟研究了皮秒激光作用下不锈钢表面的温度场、熔体流动特性及形貌演变, 并分析了激光能量、激光移动速度等工艺参数对烧蚀效应的影响。结果表明: 熔体流动显著影响烧蚀效应。相比于不考虑熔体流动的传统模型, 考虑熔体流动的模拟结果与实验数据吻合良好, 平均相对误差仅为7.5%, 预测精度得到了显著提升。熔体流动主要受反冲压力与热毛细力的作用, 并决定了最终的熔池形貌。在移动激光多脉冲作用下, 熔体流动会导致中间凸起结构的形成。此外, 随激光能量从 $1\text{J}/\text{cm}^2$ 增至 $5\text{J}/\text{cm}^2$ , 烧蚀坑深度由8.2nm增至34.6nm; 激光移动速度从 $0.15\mu\text{m}/\text{ps}$ 提升至 $0.25\mu\text{m}/\text{ps}$ 时, 热影响区宽度增加了约30%。研究结果为优化激光加工参数和提升微纳结构加工质量提供了理论依据。

**关 键 词:** 激光技术; 双温度模型; 传热特性; 流速分布; 表面形貌

中图分类号: TN249

文献标识码: A

## Investigation of flow and heat transfer characteristics in ultrafast laser processing of stainless steel

JIANG Zhikai<sup>1</sup>, SHI Shunze<sup>2</sup>, HE Zhiqiang<sup>1</sup>, YANG Donghan<sup>1</sup>, LI Ling<sup>1\*</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

(2. Shanghai Marine Equipment Research Institute, Shanghai 200031, China)

**Abstract:** Ultrafast laser processing of metals induces surface phase change and melt flow, significantly impacting processing quality. A numerical model coupling the two-temperature model with fluid dynamics was developed to investigate the transient temperature field, melt flow, and morphology evolution of stainless steel under picosecond laser irradiation. The influence of laser fluence and moving speed on ablation characteristics was systematically evaluated. The results indicate that melt flow is critical to the ablation effect. Compared with traditional models neglecting hydrodynamics, the simulation results considering melt flow show good agreement with experimental data, with an average relative error of only 7.5%, indicating a significant improvement in prediction accuracy. The melt flow is primarily driven by recoil pressure and thermocapillary forces, which predominantly determine the final melt pool morphology. For moving multi-pulse processing, the melt flow leads to a central peak. Additionally, as the laser fluence increases from  $1\text{J}/\text{cm}^2$  to  $5\text{J}/\text{cm}^2$ , the ablation depth grows from 8.2 nm to 34.6 nm. Increasing the moving speed from  $0.15\mu\text{m}/\text{ps}$  to  $0.25\mu\text{m}/\text{ps}$  causes an approximately 30% expansion in the width of the heat-affected zone. These findings provide valuable insights for optimizing ultrafast laser processing parameters and improving micro/nano-scale surface fabrication quality.

**Keywords:** laser techniques; two-temperature model; heat-transfer character; velocity distribution; Surface morphology

收稿日期: 2025-11-25; 收到修改稿日期: 2026-01-26

基金项目: 国家自然科学基金 (52476156)

作者简介: 蒋志凯 (2001—), 男, 硕士研究生, 从事超快激光加工方面的研究。lejiangzk@163.com

李凌 (1976—), 女, 教授, 博士, 从事微尺度传热方面的研究。

\* 通讯作者: liling@usst.edu.cn

## 0 引言

不锈钢具有高韧性、高塑性、良好生物相容性及优异耐腐蚀性,广泛应用于核电、医疗设备、汽车与航空航天等重要领域<sup>[1,2]</sup>。在微纳尺度器件和功能表面制造中,由于不锈钢硬度高且热导率较低,传统机械加工易在高温条件下产生积屑与严重刀具磨损,难以兼顾加工效率与表面质量<sup>[3]</sup>。相比之下,超快激光微纳加工具有热影响区小、特征尺寸可控与加工精度高等优势,已成为高性能表面加工的重要技术手段。但由于激光加工过程的瞬时性,采用红外测温仪或其他硬件设备很难实现对瞬时温度场分布的实时测量。数值模拟则可有效预测温度分布与凹坑形貌演变,为工艺优化提供理论支持,并显著降低试错成本<sup>[4,5]</sup>。

双温度模型(Two-Temperature Model, TTM)由Anisimov提出,是研究超快激光作用下电子-晶格非平衡传热行为的经典理论模型<sup>[6]</sup>。Qiu和Tien使用TTM研究了超快激光加热金属过程中的微观辐射相互作用<sup>[7]</sup>。并且进一步扩展了该模型,以研究超快激光加热多层金属时的能量沉积和传输<sup>[8]</sup>。之后,Luis等通过TTM研究了飞秒激光烧蚀铝膜的动态过程,结合实验验证了模型的准确性,并揭示了超快激光加工的热力学机制<sup>[9]</sup>。上述研究主要聚焦于非平衡传热机制,但在实际加工中,激光照射会引发金属熔化,熔体在反冲压力、热毛细力(Marangoni力)等多种力共同作用下产生复杂流动。这些流动现象不仅直接影响传热过程,还决定了烧蚀坑的形貌演化与表面微结构的质量。Vora等构建了多步计算模型,揭示熔体流动在氧化铝表面演化中的作用<sup>[10]</sup>。Sharma等则通过实验手段证实了在长脉冲激光中反冲压力与热毛细力对熔池形态与金属再分布过程的关键影响<sup>[11]</sup>。然而,这些工作多集中于长脉冲尺度,而在超快激光领域,现有研究仍主要关注电子-晶格非平衡过程,熔池流动的影响往往被忽略。此外,现有模型大多针对单脉冲作用过程,对移动激光多脉冲条件下因光斑重叠所产生的热积累效应、熔体流动与形貌演化的关系往往探索不足。

本文构建了考虑温度相关材料特性的热-流耦合模型,结合优化的变形网格(ALE)实现材料去除与自由表面演化的动态追踪<sup>[12]</sup>。模型同时考虑反冲压力及热毛细力等主导驱动力<sup>[13]</sup>,模拟了不锈钢材料在单脉冲皮秒激光作用下的流动传热特性。在此基础上,深入探讨了移动激光多脉冲加工中的表面演化过程,并分析了激光能量、激光移动速度等工艺参数对传

热特性及表面形貌的影响。研究为多脉冲条件下的形貌调控与工艺参数优化提供了理论支撑。

## 1 数值模拟

### 1.1 物理模型

图1(a)展示了超快激光加工不锈钢所采用的几何模型,一束超快脉冲激光沿上表面从左侧垂直照射不锈钢材料,并以速度 $v_L$ 向右移动。本研究基于有限元软件COMSOL Multiphysics构建了激光加工过程的模拟模型,计算流程如图1(b)所示。所选用的模型尺寸为 $50\mu\text{m}\times 1\mu\text{m}$ ,初始环境温度设置为300K,左右表面和下表面设置为绝热条件。假设不锈钢材料各向同性,忽略不锈钢材料表面划痕及内部材质不均对烧蚀效果的影响。

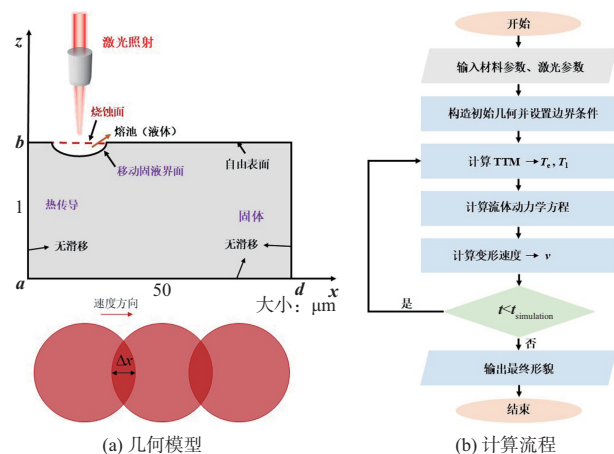


图1 超快激光加工示意图

### 1.2 计算方法

当超快激光照射材料时,激光能量首先通过光子-电子相互作用被电子系统吸收,然后热量通过电子-晶格耦合传递给晶格。由于电子和晶格之间存在非热平衡,通常采用TTM来描述超快激光与金属之间的相互作用<sup>[14]</sup>

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \nabla \cdot (k_e \nabla T_e) - G(T_e - T_l) + S \quad (1)$$

$$C_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = \nabla \cdot (k_l \nabla T_l) + G(T_e - T_l) \quad (2)$$

式中, $C_e$ 和 $C_l$ 分别为电子和晶格热容; $k_e$ 和 $k_l$ 分别是电子和晶格热导率; $T_e$ 和 $T_l$ 分别为电子和晶格温度; $G$ 是电子-晶格耦合系数, $S$ 为激光热源。

根据朗伯-比尔定律,材料对激光的吸收遵循指数衰减规律,因此材料吸收的激光热源 $S$ 可以表示为<sup>[15]</sup>

$$S = \frac{\alpha(1-R)2E}{\pi\omega_0^2\tau_p} \left\{ \exp \left[ -2.77 \left( \frac{t-2\tau_p}{\tau_p} \right)^2 \right] + \dots + \exp \left[ -2.77 \left( \frac{t-2\tau_p-n\Delta t}{\tau_p} \right)^2 \right] \right\}.$$

$$\exp(-\alpha z) \exp\left[-2 \times \left(\frac{x - v_1 t}{w_0}\right)^2\right] \quad (3)$$

式中,  $\alpha$  和  $R$  分别为材料的吸收系数和反射率;  $E$  是单脉冲能量;  $w_0$  是高斯激光光斑半径;  $\tau_p$  是脉冲宽度;  $\Delta t$  是脉冲间隔时间;  $v_1$  是激光移动速度;  $n$  的值则与脉冲数有关。模拟所采用的不锈钢参数如表 1 所示。

表 1 不锈钢的材料参数<sup>[15]</sup>

| 热物理性质                                          | 数值    |
|------------------------------------------------|-------|
| 固相晶格密度 $\rho_s/(\text{kg}/\text{cm}^3)$        | 7874  |
| 液相晶格密度 $\rho_l/(\text{kg}/\text{cm}^3)$        | 8500  |
| 熔化温度 $T_m/\text{K}$                            | 1811  |
| 液相晶格动态粘度 $\mu_l/(\text{Pa}\cdot\text{s})$      | 0.016 |
| 固相晶格热导率 $k_s/(\text{W}/\text{m}/\text{K})$     | 79.5  |
| 液相晶格热导率 $k_l/(\text{W}/\text{m}/\text{K})$     | 38.6  |
| 固相晶格比热容 $C_{ps}/(\text{J}/\text{kg}/\text{K})$ | 475   |
| 液相晶格比热容 $C_{pl}/(\text{J}/\text{kg}/\text{K})$ | 748   |
| 汽化潜热 $L_v/(\text{kJ}/\text{g})$                | 6088  |

流体动力学方程对于描述晶格吸收电子能量后材料熔体流动至关重要。随着晶格温度超过熔点, 材料发生相变并形成熔池。本文基于不可压缩纳维-斯托克斯 (Navier-Stokes) 方程对熔池内部的动力学演化进行模拟, 其表达式为<sup>[16]</sup>

$$\rho_L \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho_L (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot (-P\mathbf{I} + \mu_L (\nabla \mathbf{u}) + \mu_L (\nabla \mathbf{u})^T) + F_{\text{Darcy}} + F_r + F_\sigma \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (5)$$

式 (4) 表示动量守恒, 式 (5) 表示质量守恒。式中  $\mathbf{u}$  和  $P$  分别表示流速与压力;  $F_{\text{Darcy}}$  表示达西力;  $F_r$  表示材料汽化烧蚀时产生的反冲压力;  $F_\sigma$  表示由表面张力梯度引起的马兰戈尼效应 (热毛细力)<sup>[17]</sup>。同时基于能量守恒原理, 将方程 (2) 修改为

$$\rho C_L \left[ \frac{\partial T_l}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T_l \right] = \nabla \cdot (k_L \cdot \nabla T_l) + G(T_e - T_l) \quad (6)$$

为了处理固-液相变界面, 引入达西力  $F_{\text{Darcy}}$ 。当材料处于固相时, 达西力通过较大的阻尼系数来抑制流速; 当熔池形成的时候, 达西力则随着液相分数的增加而迅速减少。其表达式为

$$F_{\text{Darcy}} = -C \frac{(1 - f_l)^2}{(f_l^3 + b)} \mathbf{u} \quad (7)$$

式中,  $C$  是一个较大的数字, 用于指定糊状区形态;  $f_l$  为液相分数。

当材料发生剧烈汽化, 所产生的反冲压力成为驱动熔融材料流动的关键动力。该反冲压力大

小可由克劳修斯-克拉佩龙关系式进行描述<sup>[17]</sup>

$$F_r = 0.54 P_{\text{atm}} \exp \left[ \frac{M_u L_v}{k_B} \left( \frac{1}{T_v} - \frac{1}{T_l} \right) \right] \quad (8)$$

式中,  $T_v$  是蒸发温度;  $M_u$  是不锈钢的原子质量;  $k_B$  是玻尔兹曼常数;  $P_{\text{atm}}$  为环境压力。此外, 热毛细力  $F_\sigma$  数学表达式如下所示<sup>[17]</sup>

$$F_\sigma = \sigma \kappa \cdot \mathbf{n} - \nabla_t \sigma \quad (9)$$

$$\sigma = 1.93 - 3 \times 10^{-4} \cdot (T_l - T_m) \quad (10)$$

式中,  $\sigma$  为与温度相关的表面张力;  $\mathbf{n}$  为法向表面向量;  $\kappa$  为表面曲率。

为了提高模拟的精度, 本文采用任意拉格朗日-欧拉 (ALE) 方法对材料去除过程进行动态追踪, 同时将表面张力和其他力边界条件直接应用于变形表面。忽略了表面上方气流对熔池形貌演化的影响, 在该模型中采用的变形速度为<sup>[12]</sup>

$$v = \frac{F_{\text{vap}}}{\rho_l \cdot L_v} \quad (11)$$

式中  $L_v$  为蒸发潜热;  $F_{\text{vap}}$  为烧蚀热通量。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 模型验证

为了验证模型的正确性, 论文模拟了飞秒激光加工不锈钢材料的电子和晶格温度变化情况, 并将模拟结果与文献[16]中的数据进行了对比。其中, 飞秒激光能量为  $0.25 \text{ J}/\text{cm}^2$ , 光斑半径为  $15 \mu\text{m}$ , 脉冲持续时间为  $30 \text{ fs}$  (激光波长  $800 \text{ nm}$ ) 和  $170 \text{ fs}$  (激光波长  $516 \text{ nm}$ )。图 2 展示了在不同激光脉宽和波长  $\lambda$  照射下中心点处  $T_e$  和  $T_l$  随时间的演化, 结果显示两者变化趋势和数值表现出了较高的一致性。同时本研究在激光波长  $\lambda$  为  $800 \text{ nm}$  时模拟的最终烧蚀深度约为  $4.47 \text{ nm}$ , 与文献[16]报道的烧蚀深度  $4.5 \text{ nm}$  基本吻合, 从而证实了使用模型的可靠性。

### 2.2 激光加工中流动传热特性研究

在超快激光加工作用下, 不锈钢表面在极短时间内经历熔化、蒸发及相爆炸等剧烈过程, 其最终形貌受熔体流动及传热行为的共同影响。因此有必要对其形成过程进行深入分析, 图 3 展示了单脉冲皮秒激光能量为  $6 \text{ J}/\text{cm}^2$ 、脉冲持续时间为  $10 \text{ ps}$  的条件下晶格温度场及流速场随时间的演变过程。由图中可以观察到, 单脉冲作用后晶格温度在极短时间内迅速升高并发生熔化与材料去除, 熔池呈现由中心向外的径向流动特征。当  $t = 15 \text{ ps}$  时, 晶格温度迅速升高至  $6795 \text{ K}$ , 材料已熔化但尚未达到相爆炸温度阈值 ( $0.9 T_e$ ), 此时在反冲压力驱动下熔体沿径向向外流动, 并伴随部分向下运

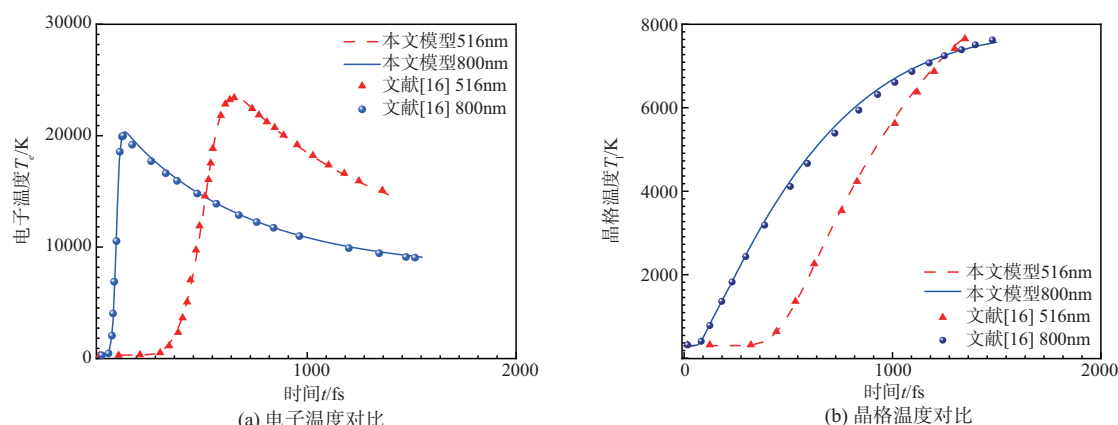


图2 模拟结果验证

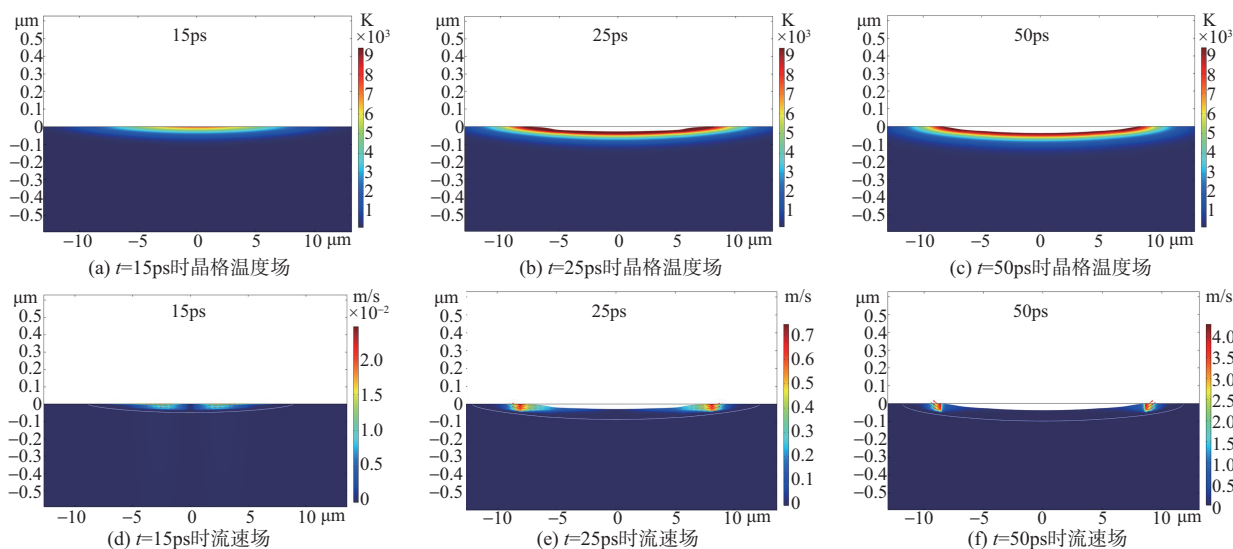


图3 不同时刻的晶格温度分布及流速分布。

动。当  $t=25ps$  时, 在相爆炸材料去除的作用下, 烧蚀深度达到 28nm, 热量同时向材料内部传导。同时, 流速从 15ps 时的 0.02m/s 剧增至 50ps 时的 4m/s。观察到图 3 (f) 可以发现, 流动区域基本在烧蚀坑边缘且速度矢量呈向外溅射状态。由于反冲压力与马兰戈尼效应持续作用, 熔池进一步扩大, 但在烧蚀坑中心区域流速极低, 基本无熔体流动。这是因为该区域强烈的材料汽化产生强大的蒸汽流, 其反作用力显著抑制了熔体的流动, 迫使熔体向烧蚀坑边缘堆积。最终加工结束, 形成一个半径为 8.9 $\mu m$ 、深度为 41nm 的凹坑。

图 4 展示了 50ps 后熔池半径与深度随时间的演化过程。模拟结果显示, 熔池深度随时间呈单调递增趋势, 由 113.2nm 增长至 194.9nm。这反映了材料内部在超短脉冲作用后仍存在剧烈的温度梯度, 热量通过热传导效应不断向材料内部扩散。与此同时, 熔池半径则表现出显著的径向收缩, 从初始的 11.7 $\mu m$  逐步缩小至 10.27 $\mu m$ 。这一现象本质上是加工过程中多种驱动力动态竞争的结果: 在加工初期, 强烈的相爆炸与蒸汽反冲压力占据

主导, 迫使熔体克服表面张力向外流动, 形成了较大的瞬时熔池; 随后在冷却阶段, 表面温度下降, 反冲压力迅速衰减, 物理机制转由表面张力与马兰戈尼效应主导。由于边缘区域表面张力较高, 马兰戈尼效应驱动熔体产生向中心的回流, 促进了熔体的重新分布并导致熔池边缘回缩, 最终形成了较小尺寸的烧蚀坑<sup>[18]</sup>。

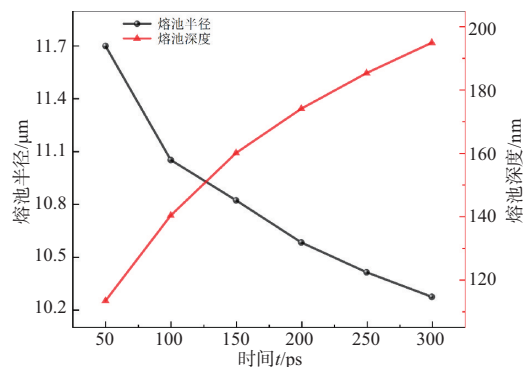


图4 熔池深度和半径随时间的变化

图 5 展示了冷却阶段不同时刻反冲压力和热毛细力沿径向方向的变化规律。结果表明, 两种力在熔池不同区域相互竞争并共同影响熔体流动。在

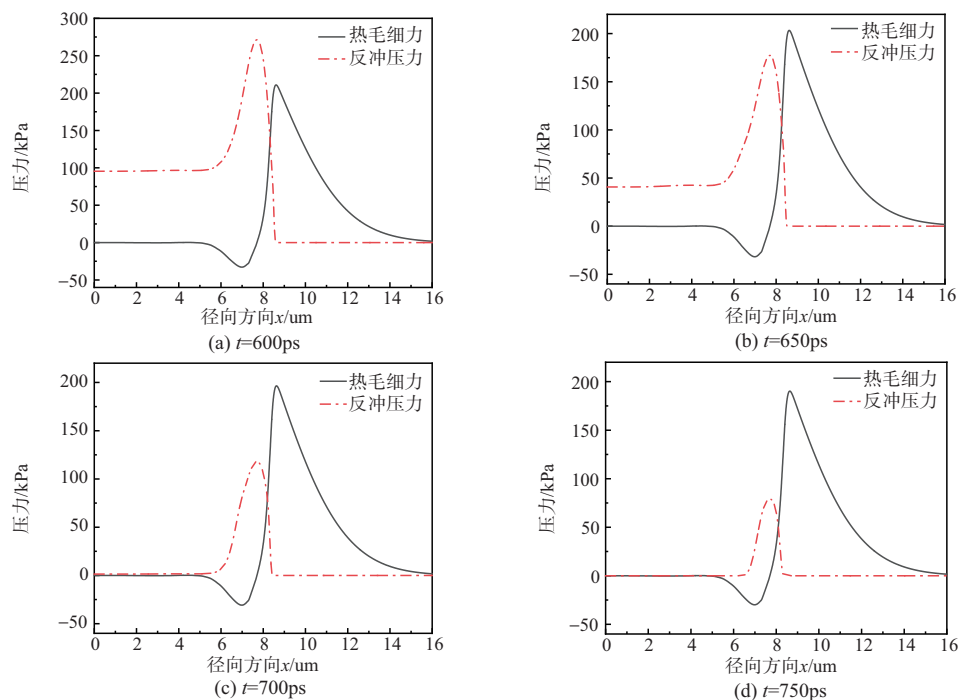


图5 反冲压力和热毛细力随径向方向的分布

600ps时,反冲压力在约 $8\mu\text{m}$ 处达到峰值(270kPa),此时其作为主导力,驱动熔体向外流动。同时,热毛细力在 $5\mu\text{m}$ 到 $8\mu\text{m}$ 处为负值,峰值约为-35kPa,表明由表面张力梯度驱动的回流已经出现;然而,由于此时热毛细力在量级上远低于反冲压力,其对整体流场的调控作用尚不显著。随着冷却过程推移(650ps至750ps),反冲压力迅速衰弱,至750ps时其峰值降至约60kPa,对熔体的推动作用显著弱化。与之形成对比的是,热毛细力在平衡中逐渐占据主导地位,开始驱动熔池边缘的熔体向中心形成再分布。这证明了马兰戈尼效应在超快激光加工后期形貌演变的关键作用。

随后采用考虑熔体流动和不考虑熔体流动的模型,对皮秒激光照射下的烧蚀深度进行了模拟,并将结果与文献[19]中的实验结果进行了对比,如图6所示。图6展示了皮秒激光能量范围为6至 $16\text{J}/\text{cm}^2$ 、脉冲持续时间10ps条件下的烧蚀深度。观察发现,考虑熔体流动的模型模拟得到的烧蚀深度结果与实验数据更为吻合,传统TTM模型模拟的结果则普遍偏高。这个现象可以通过材料的过热机制和其快速导热性解释。在传统TTM模型中,激光照射区域的材料温度升高,由于不锈钢具有较高的热导率,过热区域会非现实地扩展,从而导致烧蚀深度的过高估计。这说明,在皮秒激光加工金属过程中,熔体流动的影响不可忽视。

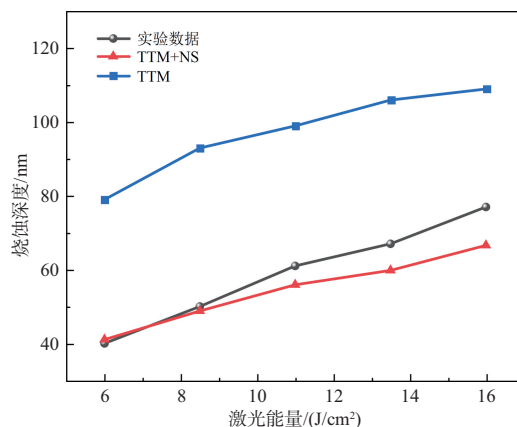


图6 通过不同方法计算的烧蚀深度

### 2.3 移动激光多脉冲作用下的形貌演变

单脉冲研究揭示了超快激光加工时不锈钢流动传热的基本特性。然而在实际加工中,表面形貌是由多个脉冲共同作用的结果。为了研究移动激光条件下多脉冲所带来的热积累效应及熔池流动特性,对激光能量为 $3\text{J}/\text{cm}^2$ 、脉冲间隔50ps、激光移动速度 $0.2\mu\text{m}/\text{ps}$ 的皮秒激光加工不锈钢过程进行了模拟研究,共施加了三个脉冲。图7为不同时刻晶格温度场随时间的演化过程。从图中可以看出,随着时间推进,烧蚀宽度不断增加,并在中间出现凸起结构,这主要归因于脉冲光斑部分重叠以及熔体流动。在20ps时材料开始烧蚀;至50ps时,烧蚀坑宽度已显著超过其光斑直径。在随后的100ps到150ps区间内,由于光斑尺寸存在部分重叠,相邻脉冲中心产生指向相反的压力梯度,驱动各自熔池内的熔融材料沿相反方向流

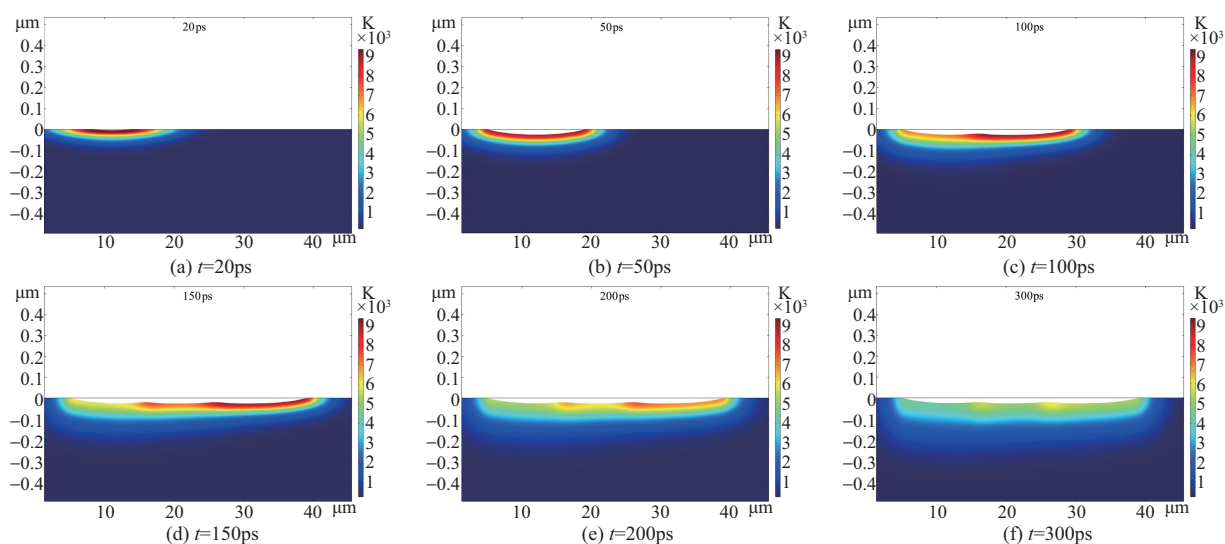


图7 移动激光多脉冲下不同时刻晶格温度云图

动。这导致熔体在重叠中心区域发生挤压与堆积,并形成中间凸起结构<sup>[20]</sup>。随后,形貌趋于稳定。该演化过程表明多脉冲下的表面形貌调控依赖于脉冲间的熔体流动与能量沉积分布。

图8展示了不锈钢表面下 $0.3\mu\text{m}$ 深度处沿径向方向不同位置电子和晶格温度随时间的变化规律。可以看出,随着激光束的移动,不同点温度仅呈现单

一峰值特征。这一现象本质在于单个皮秒脉冲的作用时间极短,而晶格热扩散过程存在显著的滞后性,导致空间位置的能量响应具有局部性,使得该点仅对与其最邻近的脉冲产生温升响应。同时,在多脉冲作用中存在明显的热积累效应,这使得后续脉冲作用点的电子与晶格温度峰值均显著高于首次脉冲,从而有效降低材料的烧蚀阈值并提升了加工效率。

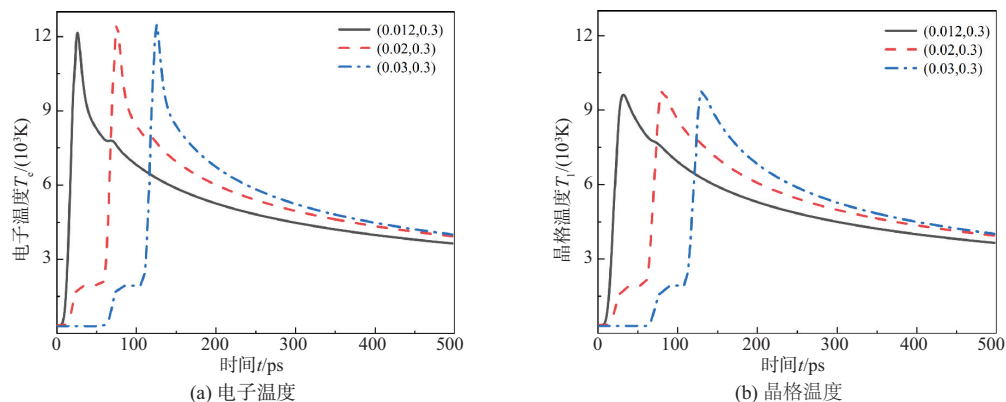


图8 不同位置电子和晶格的温度变化

图9展示了不同时间下烧蚀形貌和表面温度沿径向方向的演化规律。可以看出,烧蚀形貌受多脉冲烧蚀与熔体流动的共同影响。在20ps时,烧

蚀刚开始,凹坑深度较浅,表面形貌变化不明显;随着时间推进至130ps,凹坑处于持续烧蚀阶段,受光斑重叠及熔体流动的影响,凹坑不断加深并

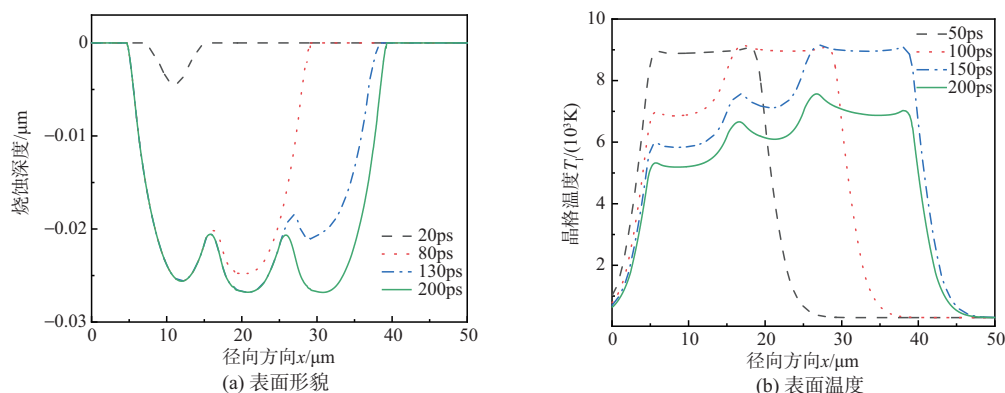


图9 不同时刻表面形貌和温度的演变

在底部出现局部凸起；到  $t=200\text{ps}$  时，脉冲作用结束，熔体逐渐冷却凝固，表面形貌趋于稳定。与此同时，图 9 (b) 显示表面温度峰值随时间的变化规律。在反冲压力与热毛细力的相互作用下，温度峰值始终集中在中间区域，而凹坑中间的凸起结构与温度峰值所在位置相对应。这表明主导驱动力不断将熔体持续推向中心区域，使熔融材料在此堆积并形成凸起结构。

激光能量的变化显著影响材料的温度分布以及熔体流动，进而决定最终的加工质量。图 10 显示了不同激光能量下三个脉冲作用后的烧蚀形貌。可以看出，随着激光能量的提高，烧蚀深度

和宽度都随之增加。当激光能量从  $1\text{J}/\text{cm}^2$  提升至  $5\text{J}/\text{cm}^2$ ，深度由  $8.2\text{nm}$  增加到  $34.6\text{nm}$ ，宽度由  $28.19\mu\text{m}$  增至  $36.9\mu\text{m}$ 。这是因为更高的激光能量会使材料温度迅速升高。这种剧烈的温升加剧了材料的熔化和烧蚀过程，使得在激光移动的同时更多的材料被快速去除，从而形成更深、更大的烧蚀坑。由于移动速度保持不变，激光光斑重叠率恒定，因此底部粗糙度（烧蚀坑底部最高点和最低点之间的绝对垂直距离）随着能量的增加而增大<sup>[21]</sup>。由此可见，在激光光斑重叠率相同的情况下，坑底粗糙度与激光能量呈正相关。

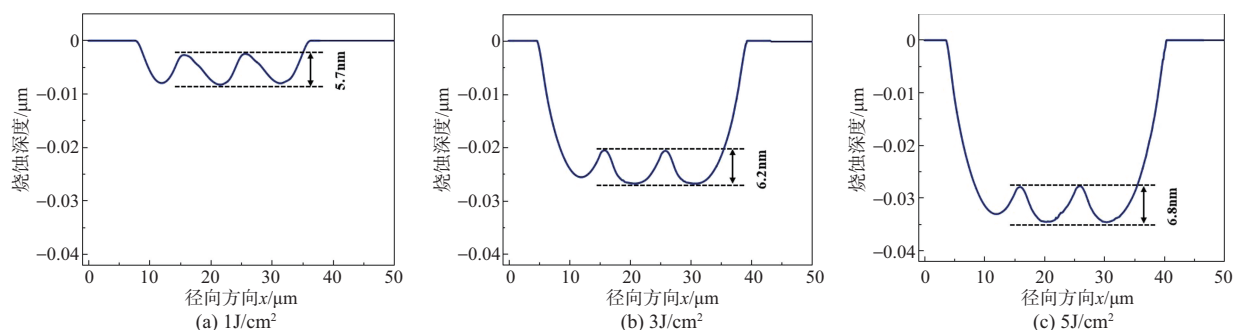


图 10 不同激光能量下烧蚀形貌的变化

图 11 给出了不同激光能量下沿径向表面温度的演变趋势。结果表明，材料的热响应特性与脉冲能量高度相关。当激光能量较低 ( $1\text{J}/\text{cm}^2$ ) 时，瞬态温升相对平缓，且高温区域主要集中于在光斑中心附近；随着能量提升至  $3\text{J}/\text{cm}^2$  与  $5\text{J}/\text{cm}^2$ ，表面温度峰值显著升高，高温区域在径向方向的

分布范围也显著扩大。表明在高能量密度下，光斑中心区域接收能量远超相变所需潜热，多余热量在产生剧烈烧蚀的同时，向材料内部发生显著的热扩散。激光能量的提升不仅增强材料去除效应，更由于径向热传导的加剧，改变了热影响区范围。

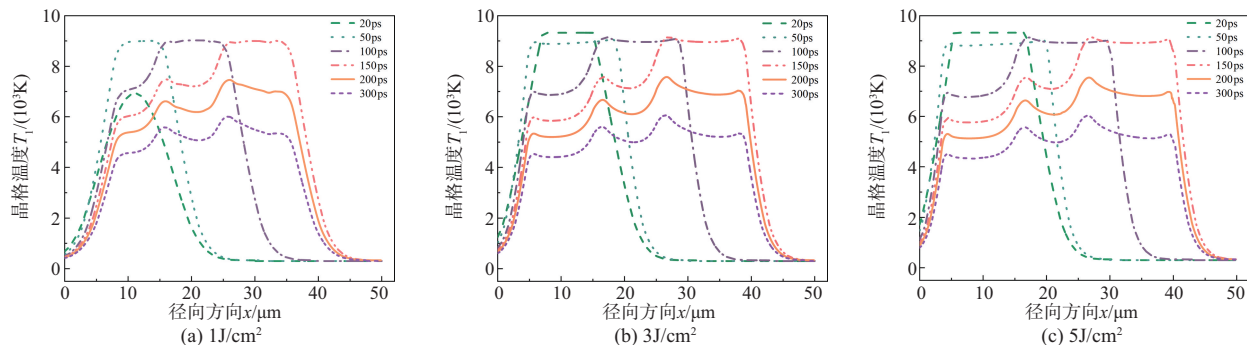


图 11 不同激光能量下沿径向表面温度的演变

图 12 显示了不同激光移动速度下三个脉冲作用后的烧蚀形貌。从图中可以发现，烧蚀深度随着激光移动速度的增加而减小，而烧蚀宽度则逐渐增大。较低的移动速度延长了激光在单位面积上的停留时间，导致局部能量高度集中，增强了材料的熔化与去除能力；反之，高速移动缩短了单点作用时间，使能量在径向分布更为平缓，从而促进了热影响区径向方向的变化。此外，底部粗糙度随着激光移动速度的增加而增大，这主要

归因于光斑重叠率的降低。在移动速度为  $0.15\mu\text{m}/\text{ps}$  的情况下，光斑重叠率较高，热积累效应显著增强，使后续脉冲能够在已有熔池基础上进一步加深烧蚀，其烧蚀量明显高于首个脉冲。这说明高重叠率与热积累条件有利于加大烧蚀深度并降低其底部粗糙度，而较高移动速度则因重叠率不足导致底部起伏更加明显。

图 13 展示了在不同激光移动速度条件下，表面温度沿径向方向随时间的演化规律。模拟结果

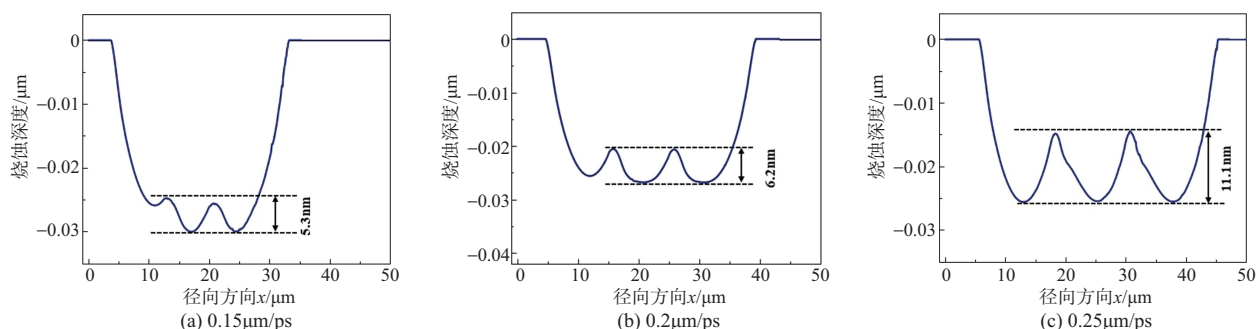


图12 不同激光移动速度下烧蚀形貌的变化

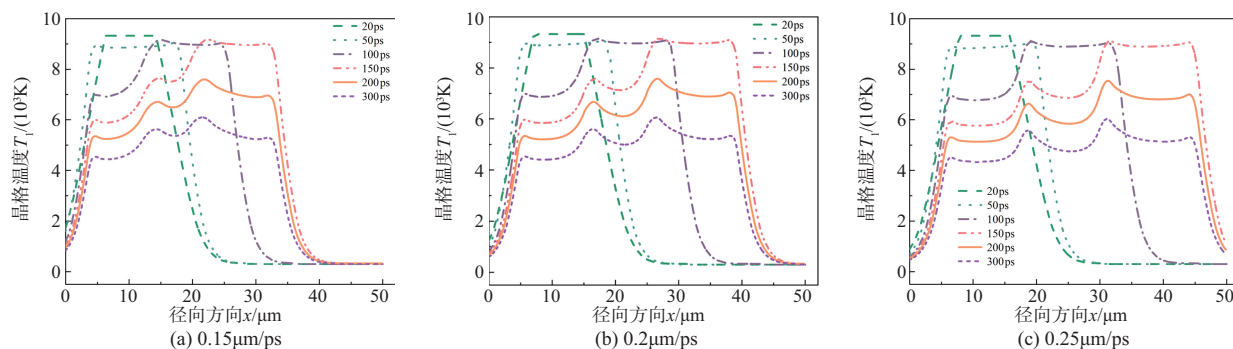


图13 不同激光移动速度下沿径向表面温度的变化

表明, 激光移动速度对烧蚀宽度以及温度峰值的位置具有显著影响。在较低的移动速度下, 局部能量密度剧增, 热积累效应显著增强。此时, 热量主要沿深度方向传导, 使得高温区域集中在光斑中心附近, 形成的径向热影响区相对较窄。当移动速度提升至 $0.20\mu\text{m}/\text{ps}$ 和 $0.25\mu\text{m}/\text{ps}$ 时, 虽然峰值温度略有下降, 但晶格高温区域在径向方向上的覆盖范围却呈现出显著扩张的趋势, 导致热影响区明显拓宽。这表明在较高移动速度下, 高速移动的热源在径向产生的能量梯度更为平缓, 使得热量在尚未向深层扩散前, 便随热源的快速移动在径向方向上实现了更大范围的“扫描”与沉积。

### 3 结论

本文基于双温度模型与流体动力学耦合建立了数值模型, 分析了皮秒激光加工不锈钢过程中熔体流动对烧蚀效应的影响, 并探究了不同激光能量、激光移动速度下烧蚀坑形貌的演化规律, 研究发现:

(1) 熔体流动在皮秒激光加工过程中不可忽略, 考虑熔体流动的模拟结果与实验数据更吻合。其显著影响了传热过程, 使得熔池半径呈现出先增大后减小的趋势。

(2) 熔体流动主要受反冲压力与热毛细力的作用。激光加工前中期, 反冲压力主导熔体向外流动, 并影响流速分布; 随着时间推移, 热毛细力在冷却阶段逐渐占主导地位, 促使熔体再分布。

(3) 在多脉冲条件下, 热积累与光斑重叠效

应会引发熔体竞争流动并产生凸起结构。激光参数对烧蚀效应具有显著影响, 提高激光能量会加深烧蚀并增强熔体流动, 而提高激光移动速度则会增大热影响区并改变烧蚀坑底部粗糙度。

### 参考文献:

- [1] Geng Z, Bi X, Shi J. Corrosion resistance of AISI 304 stainless steel in belitic calcium sulfoaluminate cement[J]. Cement and Concrete Composites, 2025, 162: 106154.
- [2] 王迎春, 杨彬, 万程, 等. 冷处理对低碳马氏体不锈钢组织性能的影响[J]. 北京理工大学学报, 2025, 45(02): 213—218.  
Wang Yingchun, Yang Bin, Wan Cheng, et al. Cryogenic treatment effect on microstructure and tensile properties of a low-carbon martensite stainless steel[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2025, 45(02): 213—218.
- [3] Pang X, Zhang B, Li S, et al. Machining performance evaluation and tool wear analysis of dry cutting austenitic stainless steel with variable-length restricted contact tools[J]. Wear, 2022, 504: 204423.
- [4] 苏天颜, 刘超, 全宏升, 等. 熔融石英玻璃飞秒激光微纳加工研究[J]. 光学技术, 2023, 49(06): 664—672.  
Su Tianyan, Liu Chao, Quan Hongsheng, et al. Research of femtosecond laser micronano processing of fused quartz glass [J]. Optical Technology, 2023, 49(06): 664—672.
- [5] 姜永霞, 李隆, 程雨露, 等. 高斯脉冲激光烧蚀钛合金热效应分析研究[J]. 光学技术, 2025, 51(02): 189—195.  
Jiang Yongxia, Li Long, Cheng Yulu, et al. Analytical study of the thermal effect of Gaussian pulsed laser ablation on titanium alloys[J]. Optical Technology, 2025, 51(02): 189—195.
- [6] Anisimov S I, Kapeliovich B L, Perelman T L. Electron emission from metal surfaces exposed to ultrashort laser pulses[J]. Zh. Eksp. Teor. Fiz., 1974, 66(2): 375—377.

(下转第172页)