

文章编号: 1002-1582(2026)02-0148-08

激光清洗 7075 铝合金环氧树脂漆层数值模拟研究

刘首辰¹, 李隆^{1,2*}, 陈俊廷¹, 张博乐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: 为了提升激光清洗 7075 铝合金表面环氧树脂漆层的效率并降低材料损耗, 基于热传导理论和有限元分析方法, 模拟高斯激光辐照过程并建立激光清洗的数值模型。通过调整脉冲激光平均功率、脉冲宽度及光斑搭接率, 分析其对材料温度场与清洗效果的影响, 并首次引入敏感性参数进行定量分析。研究表明, 材料表面温度及清洗厚度与激光脉冲宽度、平均功率密度正相关, 与光斑搭接率负相关。当激光平均功率为 40W、脉冲宽度 20ns、光斑搭接率 70% 时, 铝合金基体温度超过熔点且受损; 而当激光平均功率为 25W、脉冲宽度 20ns、光斑搭接率 80% 的条件下, 漆层可被彻底去除且基体无损。其中光斑搭接率对清洗效果影响最显著。本研究明确了激光参数对清洗效果的量化影响, 为 7075 铝合金表面漆层的高效绿色清洗提供了部分工艺参数指导。

关 键 词: 7075 铝合金; 环氧树脂漆层; 激光清洗; 数值模拟; 激光参数优化

中图分类号: TN249

文献标识码: A

A numerical study on laser cleaning of epoxy resin paint layers from 7075 Aluminum Alloy surfaces

LIU Shouchen¹, LI Long^{1,2*}, CHEN Juntao¹, ZHANG Bole¹, ZHANG Chunling^{1,2}

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

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

Abstract: In order to enhance the efficiency of laser cleaning epoxy resin paint layers from 7075 aluminum alloy surfaces and reduce material loss, In this study, a numerical model was developed using the COMSOL Multiphysics simulation platform. The Gaussian laser beam irradiation process was investigated based on the principles of Fourier heat transfer theory and finite element analysis. By adjusting the influences of key parameters—including energy density, pulse duration, and spot overlap ratio—on the transient temperature field and the resultant cleaning efficacy were systematically examined, and the sensitivity parameter was introduced for the first time for quantitative analysis. The results demonstrate that both the surface temperature and the cleaning depth increase monotonically with pulse duration and mean power density, whereas they exhibit an inverse relationship with the laser spot overlap ratio. Specifically, when the laser has an average power of 40 W, a pulse length of 20 ns, and laser overlap rate of 70%, the temperature of the aluminum alloy substrate exceeds its molten temperature, resulting in sustained. In contrast, under conditions of 25W power, 20 ns pulse length, and 80% laser overlap rate, the coating can be completely eliminated with no damage to the substrate. This study clarifies the quantitative impact of laser parameters on cleaning efficiency and provides guidance for optimizing the process parameters for efficient and eco-friendly cleaning of paint layers from 7075 aluminum alloy surfaces.

Keywords: 7075 Aluminum Alloy; epoxy resin paint layer; laser cleaning; numerical simulation; laser parameter optimization

收稿日期: 2025-10-11; 收到修改稿日期: 2026-01-06

基金项目: 国家自然科学基金 (11705136)

作者简介: 刘首辰 (2002—), 男, 硕士研究生, 从事激光物理及应用研究。liu200219@sina.com

李隆 (1972—), 男, 教授, 博士, 从事激光物理及应用研究。

* 通讯作者: lilong@xauat.edu.cn

0 引言

近年来,激光以其定位准确、高效灵活、污染小等特点衍生出激光加工技术。激光清洗作为激光加工技术的典型应用,利用激光光束定向性与高能量的特性直接照射需要处理的材料表面,通过光与物质相互作用的分解、剥离等原理即可清除污染物^[1],其作为一种高效、绿色的清洗技术被越来越多的学者所关注^[2]。

7075铝合金以其高强度、高硬度、抗疲劳和抗腐蚀性等优点而被广泛应用于航空航天领域的航空结构件、高端自行车车架等^[3]。为延长铝合金构件的服役寿命,工业处理常常采用表面涂装工艺对其加以防护,常见的表层工艺即涂漆处理,而随着使用时间的增加,部分漆层可能会出现一定程度的损伤、脱落情况,此时就需要对漆层进行清洗、重新喷涂而保证使用中的可靠性。传统的清洗方法往往通过机械打磨、高压水枪冲洗、有机溶剂清洗以及碱液清洗等方法^[4],这些方法清洗效率低且过程繁琐^[5],而激光清洗技术则可以发挥其特点,对漆层进行非接触、无研磨、精准的去除^[6]。

目前也有不少学者使用有限元模拟的方法对激光与物质的相互作用进行研究,并探索最优的激光加工参数。胡少武^[7]等以2219铝合金/环氧聚酰胺底漆体系为对象,建立三维有限元模型,采用高斯脉冲热源表征激光清洗瞬态热载荷,定量研究激光工艺参数对涂层温度场时空演化行为的作用机制,以及清洗参数变化对烧蚀深度的影响情况。刘滕超等^[8]通过建立三维有限元模型与实验分析对激光清洗TC4钛合金氧化层进行了研究,研究得出了激光参数对清洗温度场及深度的影响,并通过实验验证了模拟的结果。姜永霞等^[9]利用COMSOL软件对激光作用于TC4材料时的热效应进行了数值模拟分析,结果表明在光斑半径为0.3mm,激光功率为1500W,脉宽为5000ns时取得的加工效果更佳。此研究为下一步有限元模拟和实验研究钛合金表面激光加工提供了理论依据。Qin等^[10]建立了脉冲激光去除氧化铝层后的AlSi10Mg(Fe)铝合金复合材料的物理模型,模拟与实验结果一致表明,氧化铝去除效率在激光能量密度为15J/cm²时达到最高。Yang等^[11]以ANSYS为平台建立除漆有限元模型,研究了能量密度、扫描速度和扫描间隔等参数对除漆过程的影响。Li等^[12]对纳秒激光去除铝合金表面环氧树脂漆膜的机理进行了理论和实验研究,得出纳秒激光除漆的主要机理是热

应力剥离。

相关研究中关于铝合金的表层物质清洗大多以试验研究为主,有限元仿真往往仅应用于分析材料的温度场分布,激光参数设定对清洗效果影响的研究也相对较少。若在实际清洗工作前模拟仿真出清洗漆层的最佳工艺参数组合,那么对于实际的激光清洗研究具有指导意义,这样也能通过减少试验次数,从而降低试验成本。为了探究实际清洗过程激光对漆层的清洗效果,本文以7075铝合金为基体,环氧树脂漆层为待清洗层,通过COMSOL Multiphysics有限元分析软件进行三维建模,以热传导理论为基础,模拟高斯脉冲激光辐照环氧树脂漆层,分析脉冲激光平均功率、脉冲宽度以及光斑搭接率对温度场和清洗效果的影响,并使用敏感性系数量化各参数对清洗效果的影响,为激光清洗7075铝合金环氧树脂漆层提供一定的理论基础。

1 模型的建立与有限元分析

1.1 模型假设

激光清洗设备在去除7075铝合金表面环氧树脂漆层时的示意图如图所示。激光去除漆层过程中,光经过光学谐振腔的多次反射和放大,当光强达到一定程度后激光从谐振腔的一个端面射出,通过振镜的反射改变其光路并最终照射在待处理的漆层表面。在使用波长为1064nm的激光清洗设备对表面环氧树脂漆层清洗时,由于脉冲激光能量足够大,因此在清洗过程中仅考虑烧蚀作用。而对流效应和辐射效应会使漆层最终受到的能量小于原本激光的能量,造成激光能量的部分损失,环氧树脂漆层最终吸收大约80%的激光能量^[12],随着激光在漆层表面的热积累,漆层温度瞬间达到汽化点而汽化或蒸发,从而起到清洗的目的。激光去除效果受多方面因素的共同影响,物理过程相对比较复杂。本文针对激光去除环氧树脂漆层的模拟,做出以下假设^[11]:

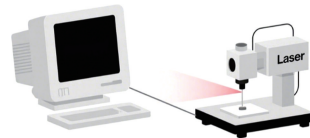


图1 激光清洗设备示意图

- (1) 未进行清洗前,漆层与基体的温度为298.15K;
- (2) 基体与漆层为各向同性材料,各个方向上的物理性质一致且不会随着清洗时间的变化而发生材料性质的改变;
- (3) 基体与漆层之间完全热传导;

- (4) 忽略温度对材料热物性的影响；
- (5) 激光束在空间分布满足理想高斯分布；
- (6) 环氧树脂在高温下不发生分解。

基于上述假设，在激光去除漆层的过程中，遵循傅里叶热传导定律和能量守恒定律，则热传导方程为^[13]

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

式中

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2)$$

式中， ρ 表示材料密度， c 为比热容， T 为激光辐照下的瞬态温度； t 为热传导时间； κ 为热导率， V_x, V_y, V_z 分别表示材料沿不同方向与周围介质的热传导速率。

仿真模拟中初始条件和热边界条件如下^[14,15]

模型与外界发生热对流，其边界条件为

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial n} \bigg|_{\Gamma} = \sigma \epsilon (T_0^4 - T^4) \quad (3)$$

模型与外界的热交换为

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial n} \bigg|_{\Gamma} = h(T_0 - T) \quad (4)$$

模型在激光辐照下，各个边界的热辐射为

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial n} \bigg|_{\Gamma} = Q - h(T_0 - T) - \sigma \epsilon (T_0^4 - T^4) \quad (5)$$

式中， $(\partial T)/(\partial n)$ 为温度在边界上的正向梯度； Q 为激光功率密度； σ 为玻尔兹曼常数； Γ 为边界条件； h 为空气的对流换热系数； ϵ 为表面辐射系数； T_0 为材料的初始温度 298.15K。

1.2 理论模型建立

在材料上表面施加广义内向热通量用于模拟激光辐照效应。在研究过程采用瞬态模拟的方法，因此可以分析材料任意时刻、任意位置的温度场与清洗情况。基于以上方法建立了如图 2 的 COMSOL 有限元仿真模型，包括尺寸大小为 $0.65\text{mm} \times 0.55\text{mm} \times 0.085\text{mm}$ 的 7075 铝合金基体，以及厚度 $65\mu\text{m}$ 尺寸为 $0.65\text{mm} \times 0.55\text{mm} \times 0.065\text{mm}$ 的环氧树脂漆层，形成联合体。并定义残留漆层厚度不超过 $1\mu\text{m}$ 时视为可以彻底去除。在激光作用漆层的过程中，光斑直接照射在材料表面，因此会在作用区域产生较大的温度梯度，若对模型的网格分布未进行合理优化，极可能会出现计算不收敛、结果不准确的情况，因此需要对模型的网格进行更为细致的划分如图 2 所示。漆层网格以上表面为源面进行扫掠，生成由浅至深逐渐加密

的正六面体网格，此部分最大单元大小为 0.017mm ；在清洗过程中主要对漆层进行处理，而基体对计算影响较小，因此基体网格由 COMSOL 自动生成自由四面体网格，预定义为超细网格。

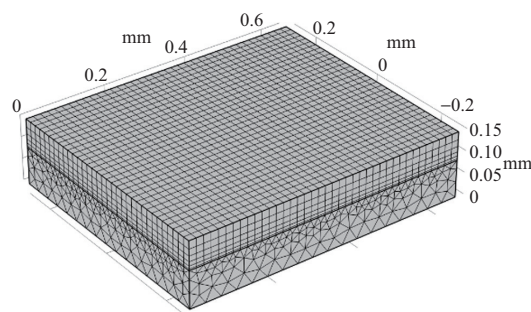


图2 模型网格划分图

图3为经典三维高斯分布热源的示意图，热源沿 x 轴正向移动，下式为高斯热源分布函数与功率密度 Q

$$Q = \frac{0.8P}{\pi r^2 \tau f} \cdot \exp\left(-\frac{\sqrt{(x - v_1 t)^2 + y^2}}{r^2}\right) \cdot \varphi(t) \quad (6)$$

式中， P 为激光平均功率； r 为光斑半径， τ 为激光的脉冲宽度， f 为激光重复频率； v_1 为激光沿 x 轴的扫描速度。

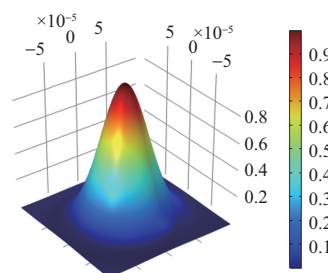


图3 归一化后的经典三维高斯分布热源图

脉冲激光载荷为

$$\varphi(t) = \begin{cases} 1, & (n-1)/f < t < (n-1)/f + \tau \\ 0, & (n-1)/f + \tau < t < n/f \end{cases} \quad (7)$$

式中， n 为1到 N 的整数。

激光在烧蚀材料的过程中，漆层会因气化而使表面存在清洗凹坑，在COMSOL中使用“变形几何”模拟漆层凹坑的产生，指定法向网格速度的设定如下式

$$v_n = \frac{q_a}{\rho H_s} \quad (8)$$

式中， v_n 为指定法向网格速度； q_a 为材料由于烧蚀而带走的热量； ρ 为材料密度； H_s 为材料升华热。

COMSOL软件的物理场耦合是由传热模块先计算出材料瞬态温度 $T(x, y, z, t_1)$ ，再利用“变形几何”模块“指定法向速度”实现烧蚀边界随时间移动；采用任意拉格朗日-欧拉方法更新网格，

确保凹坑边界光滑；最后根据新的网格计算域继续计算瞬态温度 $T(x,y,z,t_2)$ ，即可得到有效解。

有限元建模过程中，需为环氧底漆与 7075 铝合金分别定义可靠的热物性参数。通过系统梳理已有文献^[12,16,17]，将两者在室温（ $\approx 298.15\text{K}$ ）下的典型值汇总于表 1。

表 1 7075 铝合金与环氧树脂漆层的热物性参数表

项目	7075 铝合金	环氧树脂漆层
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2800	1800
比热容 $C/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	921	1800
热导率 $\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	156	0.2
熔点 T_m/K	733.3	415
汽化潜热 $L_v/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	/	296

为了量化单因素改变对除漆厚度的敏感性，引入敏感性系数

$$S=\frac{\Delta H}{H_0}/\frac{\Delta P}{P_0}$$

(9)

式中， ΔH 为某参数的清洗厚度的变化， H_0 为最小厚度； ΔP 为某参数的变化， P_0 为基准参数值。

2 有限元仿真以及结果分析

2.1 7075 铝合金表面的温度场仿真

激光能量密度公式如下

$$F=\frac{E}{S}=\frac{4E}{\pi d^2}=\frac{4P}{f\pi d^2}$$

(10)

式中， E 为单个脉冲的激光能量， d 为光斑直径。

激光光斑搭接率 η 的定义

$$\eta=1-\frac{v_1}{2rf}\times 100\%$$

(11)

由式（10）可知，当激光重复频率与光斑直径保持恒定时，激光的平均功率会影响能量密度，进一步会影响激光清洗材料时材料温度场的分布和清洗效果的改变。参考常用的激光清洗器参数，采用平均功率 30W，重复频率为 100kHz，光斑半径为 $100\mu\text{m}$ ，脉冲宽度为 30ns，功率密度为 $3.82\text{J}/\text{cm}^2$ ，光斑搭接率为 70% 的激光参数使激光光斑沿 x 清洗样本。由于仿真建模过程中采用瞬态模拟，因此可以对模型任意时刻任意位置进行分析，图 4 为模型表面环氧树脂漆层在不同时刻的温度分布情况，仿真结果表明温度场呈现高斯分布，温度平均位于激光光斑中心，越远离光斑中心的位置温度越低。当激光光斑以 $3000\text{mm}/\text{s}$ 的扫描速度清洗时，激光光斑在材料表面划过类似“流星”的轨迹如图 4，出现这种情况的原因是：脉冲激光在材料表面辐照时，材料温度具有快速加热和快速冷却的温度场特点，而当一个脉冲的激光辐照结束

后，材料还未充分冷却就被下一个脉冲激光进行辐照，因此扫描轨迹越靠近激光辐照点的温度较高，从而导致温度场图像呈现“流星”拖尾的样式。在高频激光脉冲的作用下，环氧树脂漆层温度立即达到其沸点，表面积的热量一部分通过升华带走，而保留的热量根据 Fourier 传热定律传递到 7075 铝合金基材内部。

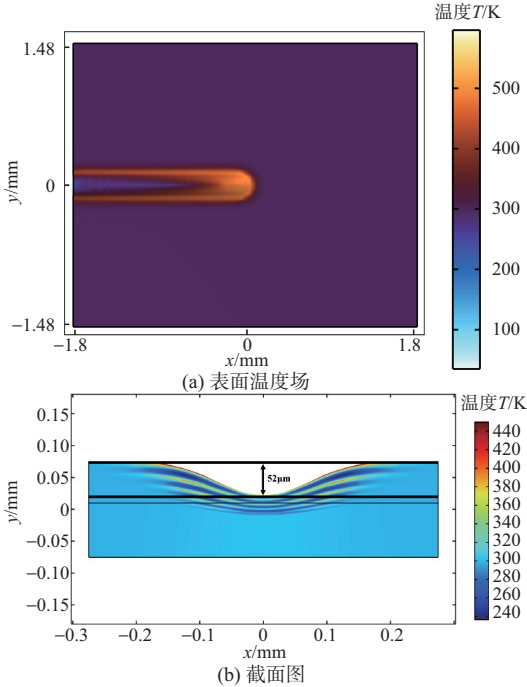


图 4 激光光斑作用材料时表面温度场以及截面图

激光能量密度为 $3.82\text{J}/\text{cm}^2$ 时模型横截面温度场如图 4，考虑到激光烧蚀过程中漆层材料被去除，变形几何模块会根据去除掉漆层使原本水平的扫描网格具有法向的网格移动，因此演化为“波纹状”网格，求解器计算“波纹状”网格层各个节点的温度，最终使仿真输出的温度场截面图呈现类“波纹状”的梯度分布特征，可以看到环氧树脂漆层已经得到明显的去除。

2.2 激光脉冲宽度对模拟结果的影响

由式（6）激光高斯热源表达式可得，若保持平均功率和频率不变，激光脉冲宽度的增加会导致激光峰值功率密度降低，同时也会增加激光热源在材料表面的热积累时间，因此激光脉冲参数的改变会影响清洗的效果。

选取平均功率 30W，重复频率 100kHz，光斑搭接率 70%，脉冲宽度分别为 20ns、30ns、60ns、200ns 的激光参数进行有限元模拟。模拟结果表明激光的脉冲宽度会影响材料表面的峰值温度，图 5 为不同脉冲宽度下的环氧树脂底漆的温度变化曲线，符合脉冲激光作用在材料表面温度急速上升后迅速下降的特点。如图当激光脉冲宽度为 20ns

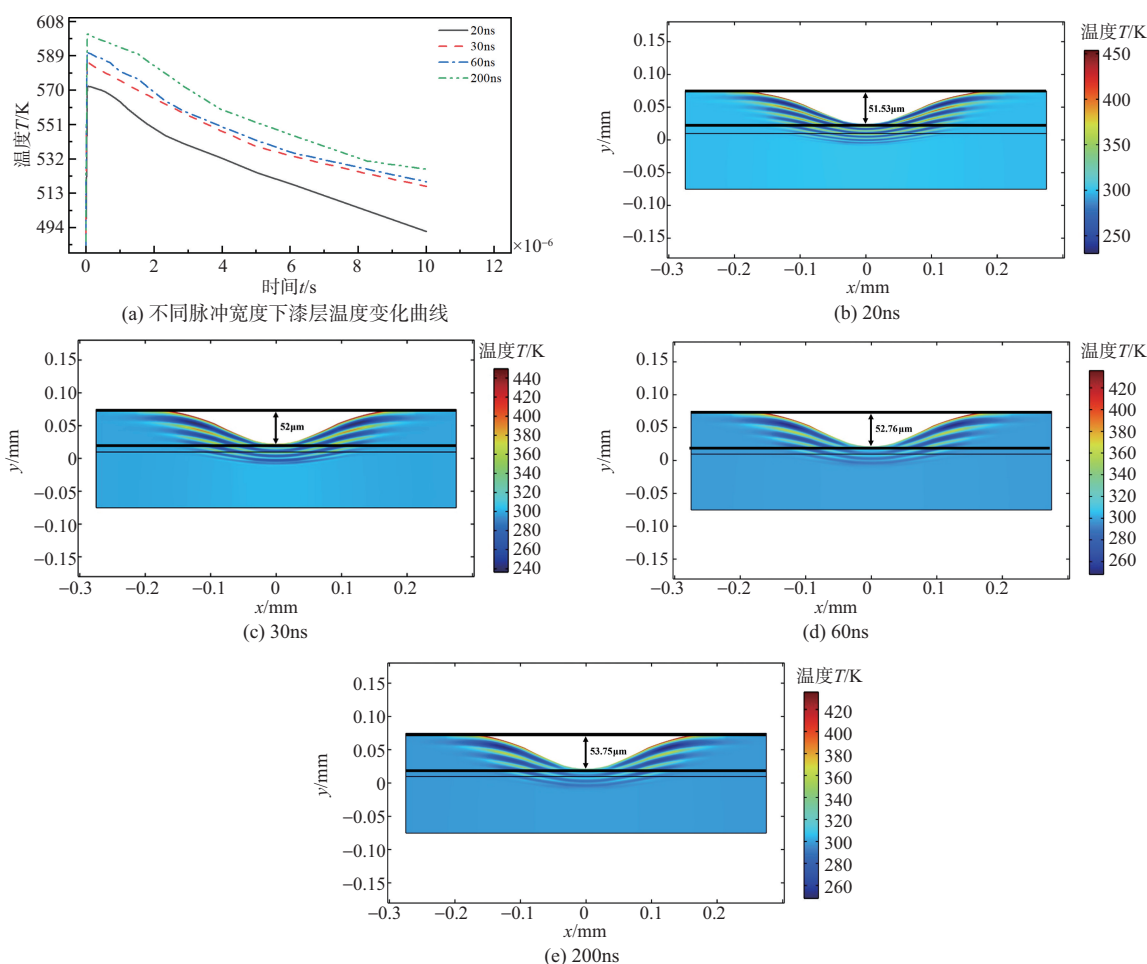


图5 不同脉冲宽度下的烧蚀结果

时, 漆层表面峰值温度为 572.17K, 去除厚度为 51.53 μm 。继续增加脉宽到 30~60ns 可以发现峰值温度可以达到 591.11K, 去除厚度达到 52.76 μm 。当脉冲宽度继续增加到 200ns 时, 峰值温度达到 601.13K, 去除厚度为 53.75 μm 。在控制平均功率与光斑搭接率不变时, 影响峰值温度的因素主要有两方面: 一方面由式 (6), 脉宽与激光功率密度成反比, 增加脉宽使激光功率密度降低, 可能会抑制温升; 另一方面, 增加脉宽会使激光热源在漆层表面作用时间延长, 促进热量累积, 又可能促进温升。图 5 (a) 不同脉宽的漆层峰值温度变化曲线表明, 增加激光脉宽会导致材料表面峰值温度升高。其根本原因在于: 在低脉宽条件下, 尽管峰值功率密度高, 但激光能量作用时间较短, 部分热量经由热辐射与对流而损耗, 未能实现有效的温升; 而随着脉宽增加, 虽然峰值功率密度降低, 但激光作用时间延长, 表层热量积累更充分, 从而使峰值温度升高, 温度更容易超过漆层气化阈值 (463.15K), 从而实现除漆效率的提升。正如图 5, 去除厚度随着脉宽的增大而增大。由此可见, 在本实验参数范围内, 脉宽对峰值温度的

正向贡献显著高于其负向效应, 且随着脉冲宽度的增加, 清洗漆层的厚度也得到了相应的增加。在基于激光清洗环氧树脂漆层的前提下, 适当增加激光脉冲宽度有利于提升激光清洗效率。计算得到脉宽对清洗厚度的敏感系数 $S \approx 0.005$ 。

2.3 激光能量密度对模拟结果的影响

由式 (9) 的激光能量密度表达式可以得出, 当激光重复频率与光斑直径一致时, 平均功率直接决定激光的能量密度, 进而影响激光清洗漆层的深度变化。根据以往激光清洗实验参数, 选择激光重复频率为 100kHz, 光斑半径为 100 μm , 脉冲宽度为 20ns, 光斑搭接率为 70% (3000mm/s) 的条件下, 分别模拟 20W、25W、30W、40W 不同激光平均功率对温度场和清洗深度的影响。

图 6 是不同激光平均功率下的环氧树脂漆层峰值温度变化曲线: 漆层温度随着激光功率的增大而升高, 且变化趋势大致相似, 都是先急速上升后迅速下降。这是由于激光脉冲能量在作用时间内, 漆层会受到短时而强烈的辐照从而吸收大量的激光能量, 温度迅速上升到达峰值温度, 伴随激光功率的增大, 辐照更为强烈且漆层温度进一步

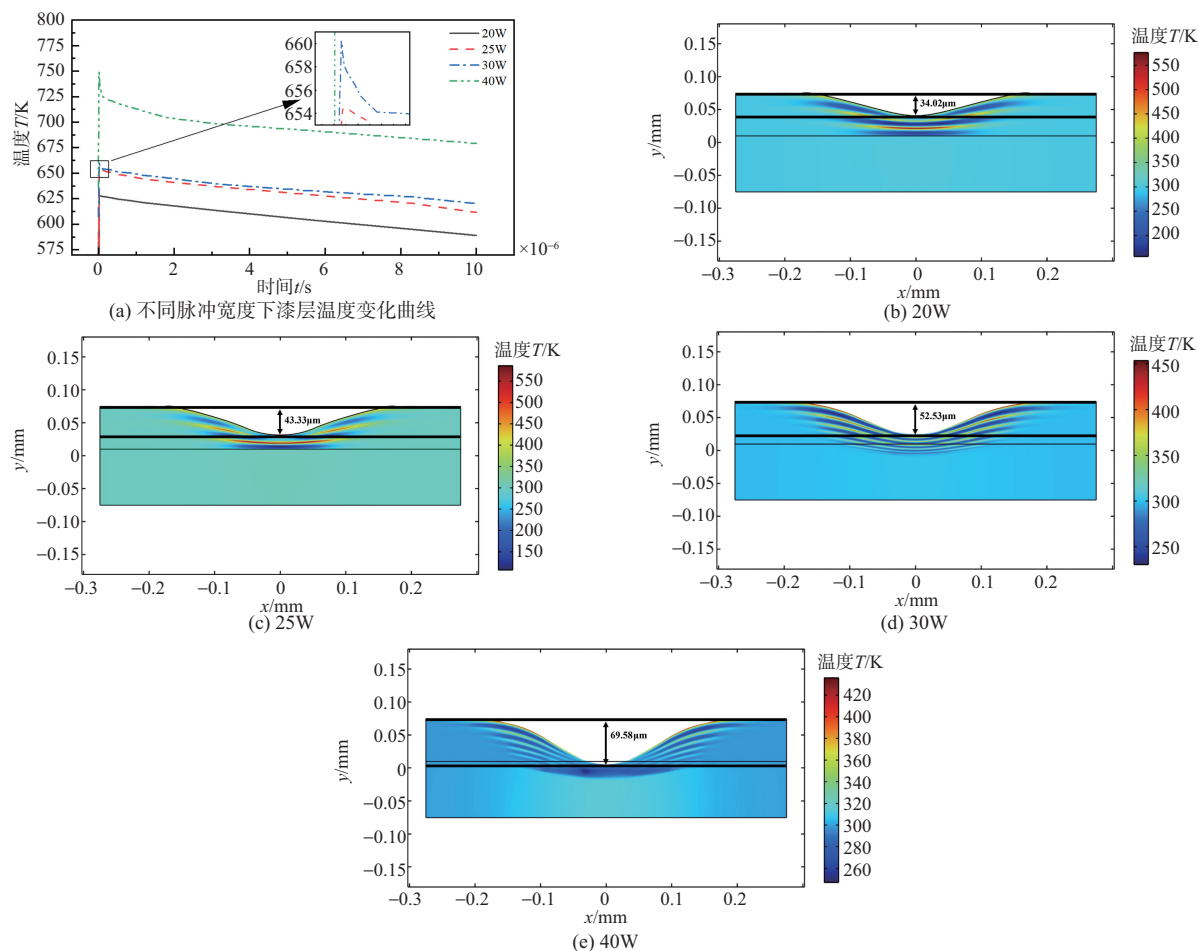


图6 不同平均功率下的烧蚀结果

升高,同时热量向 z 轴负方向传递从而使基体温度也相应逐渐提高。激光脉冲能量停止加载后,漆层热量依然会沿烧蚀方向进行热传导,同时向四周以对流换热的形式进行扩散,温度快速下降。当激光平均功率在20~25W时,环氧树脂漆层表面峰值温度已高于其气化阈值(463.15K),但基体温度并未到达其熔化温度(733.00K),说明漆层已经被气化,清洗过程并未破坏基体。但由于峰值温度较低,基体表面可能仍有漆层残留。

当激光平均功率为30W时,去除厚度52.53 μm 左右,漆层基本被去除,而根据仿真结果,基体峰值温度为660.21K,并未超过基体熔点(733.30K),达到理想清洗效果。当激光平均功率增加到40W时,由于激光功率过大,激光的烧蚀作用更进一步加剧,漆层被去除的同时剩余热量传递至基材表面,如图6(a)温度为748.48K且超过基材熔点,7075铝合金此刻受到热损伤。因此可以得出,在基于激光清洗环氧树脂漆层的前提下,激光平均功率与材料表面烧蚀温度、深度也呈正相关,适当提高激光平均功率有利于提升除漆的效率。计算得到平均功率对清洗厚度的敏感系数 $S \approx 1.050$ 。

2.4 光斑搭接率对模拟结果的影响

由式(10)的光斑搭接率表达式可以得出,光斑搭接率越高时,扫描速度越慢,光斑间重叠率增加,激光辐照在材料表面的能量积累效应增强。当光斑搭接率越低时,扫描速度越快,光斑间重合率减少,激光辐照材料的能量积累效应减弱。因此,当光斑搭接率较高时,清洗过程中可能会对基体造成损伤;光斑搭接率较低时,基体上方覆盖的漆层可能由于热积累过少而去除效果不佳。如果在仿真模拟时设置合适的光斑搭接率,就能在实际实验中大大减少材料损耗。

根据不同激光参数的模拟结果,选择激光平均功率为25W,脉冲宽度为20ns,设置50%、60%、70%、80%四种光斑搭接率进行有限元模拟。不同光斑搭接率下环氧树脂漆层和7075铝合金表面峰值温度曲线如图7所示。当光斑搭接率为50%和60%时,正如此前分析:由于激光光斑移动速度较快,导致热影响区减小。其光斑峰值温度均小于光斑搭接率为70%时的峰值温度,漆层表面温度也均能达到清洗的最低温度要求463.15K,

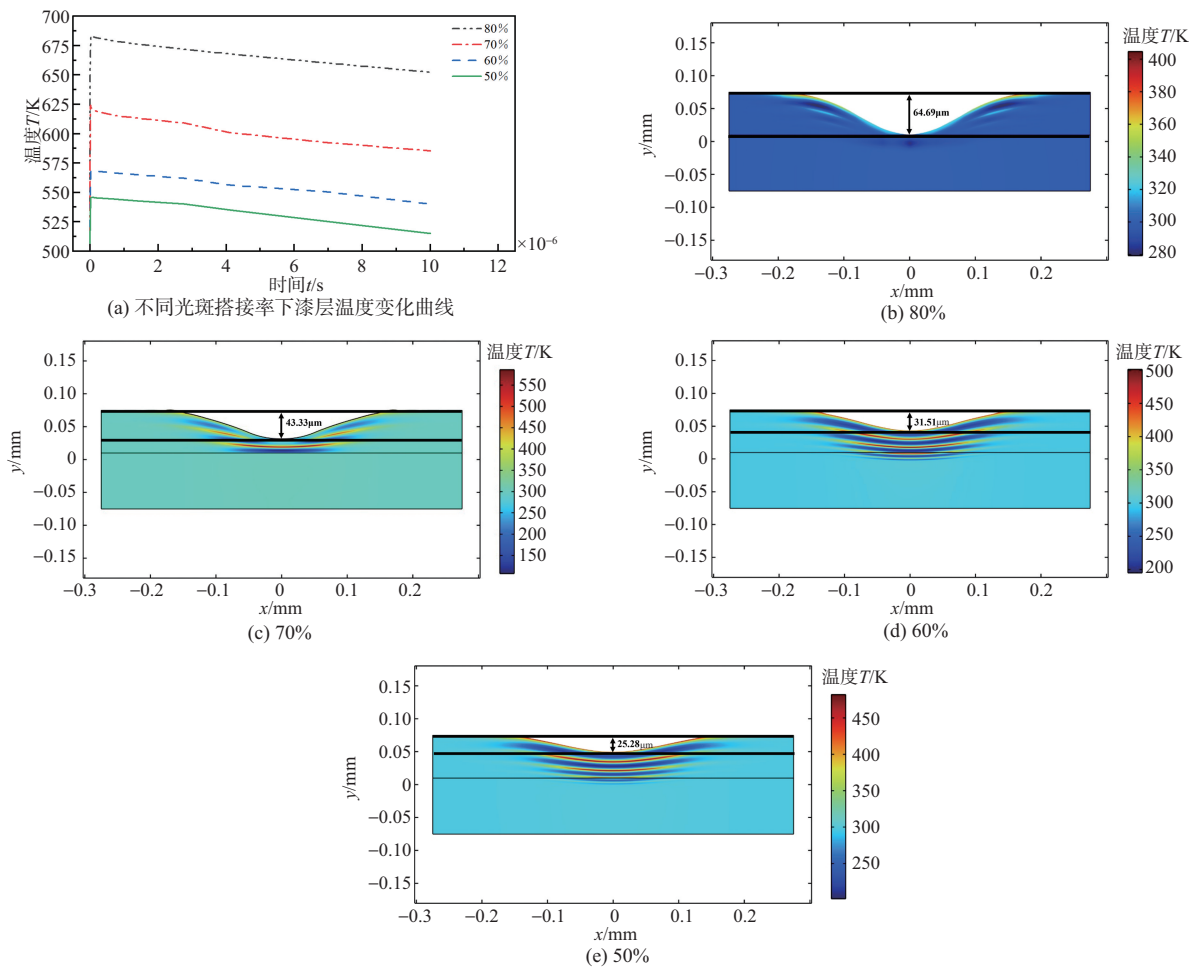


图 7 不同光斑搭接率下的烧蚀结果

图 7 (c) 为模拟结果的剖面图，从图中可以看出去除部分漆层的可行性，但无法完全去除整个漆层。图 7 (b) 为光斑搭接率为 80% 的剖面图，随着光斑搭接率增大，扫描速度相应降低，热累积效应愈发显著，漆层表面峰值温度继续升高达到 683.29K，并未超过 7075 铝合金熔点 (733.30K)。

图 8 为光斑搭接率为 80% 的三维清洗图，与图 7 (b) 截面图结合观察，可得出清洗后基体表面光滑，未出现漆层残留也未对基体表面造成损伤。因此 80% 的光斑搭接率已经可以完整的去除基体表面漆层。计算得到光斑搭接率对清洗厚度的敏感系数 $S \approx 2.612$ 。

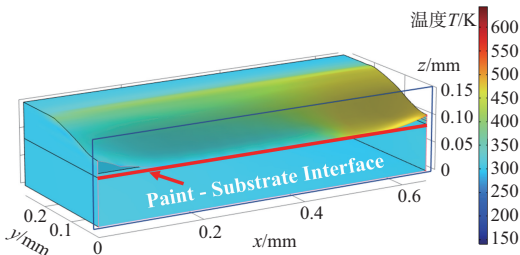


图 8 平均功率密度为 25W 脉宽 20ns 光斑搭接率为 80% 的清洗三维效果图

3 结 论

本文通过 COMSOL Multiphysics 仿真软件建立脉冲激光去除 7075 铝合金表面环氧树脂漆层的三维有限元模型，将激光平均功率、脉宽、光斑搭接率对实验结果的影响设计单因素轮换实验，量化分析了被清洗材料的温度场分布和最佳清洗参数。经过对激光参数的合理调整可以有效提升清洗效果并得出以下结论：

仿真结果表明，使用相同参数进行激光清洗仿真时，材料表面温度和清洗厚度与激光脉冲宽度、激光平均功率呈正相关，光斑搭接率与材料表面温度和清洗深度呈负相关，适当增加或减小其参数在不损伤基体的前提下可以提升激光清洗效果；结合敏感系数，光斑搭接率的变化对清洗深度影响最显著，脉宽敏感性最低。在实际参数设定时应首要考虑光斑搭接率对于清洗效果的影响；

当激光平均功率为 40W，脉冲宽度为 20ns，光斑搭接率为 70% 时，铝合金温度达到 748.48K 且超过其熔点，因此基体已经出现损伤；当激光

平均功率为25W, 脉冲宽度为20 ns, 光斑搭接率为80%时激光辐照区漆层可以很好被去除, 因此该参数为清洗最佳参数。

参考文献:

- [1] 佟艳群, 马健, 上官剑锋, 等. 航空航天材料的激光清洗技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(11): 48—56+69.
Tong Yanqun, Ma Jian, Shangguan Jianfeng, et al. Research progress on laser cleaning technology for aeronautical and astronautical materials[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2022, 65(11): 48—56+69.
- [2] 金文涛, 张洪逵, 王强, 等. 脉冲激光作用下铝合金氧化膜去除的物化行为研究[J]. 应用激光, 2025, 45(03): 94—103.
Jin Wwntao, Zhang Hongkui, Wang Qiang, et al. Study on physicochemical behavior of aluminum alloy oxide film removal under pulsed laser[J]. Applied Laser, 2025, 45(03): 94—103.
- [3] 丁智超, 张树国, 肖晓春, 等. 半固态7075铝合金搅拌摩擦焊接头晶间腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2025, 45(04): 1089—1097.
Ding Zhichao, Zhang Shuguo, Xiao Xiaochun, et al. Study on intergranular corrosion behavior of friction stir welded joints of semi-solid 7075 aluminum alloy[J]. Chinese Journal of Corrosion and Protection, 2025, 45(04): 1089—1097.
- [4] 王阿明, 冯爱新, 顾新华, 等. 不同脉宽激光对不锈钢清洗工艺研究[J]. 应用激光, 2024, 44(03): 71—86.
Wang Aimin, Feng Aixin, Gu Xinhua, et al. Research on stainless steel cleaning process with different pulse width lasers[J]. Applied Laser, 2024, 44(03): 71—86.
- [5] Zhang F D, Liu H, Suebka C, et al. Corrosion behaviour of laser-cleaned AA7024 aluminium alloy[J]. Applied Surface Science, 2018, 435: 452—461.
- [6] 杜蓉, 张志强, 张天刚, 等. 铝合金表面复合漆层连续激光清洗的机理[J/OL]. 中国表面工程, 1—11[2025-07-02].
Du Rong, Zhang Zhiqiang, Zhang Tiangang, et al. Mechanism of continuous laser cleaning of composite coating on aluminum alloy surface [J/OL]. China Surface Engineering, 1—11[2025-07-02].
- [7] 胡少武, 王涛, 黄旭东, 等. 基于COMSOL的激光清洗2219铝合金漆层工艺研究[J]. 激光与红外, 2022, 52(07): 970—979.
Hu Shaowu, Wang Tao, Huang Xudong, et al. Research on laser cleaning process of 2219 aluminum alloy coating based on COMSOL [J]. Laser & Infrared, 2022, 52(07): 970—979.
- [8] 刘滕超, 马新强, 朱永梅, 等. 基于COMSOL的TC4表面氧化层激光清洗工艺研究[J]. 激光杂志, 2025, 46(05): 203—211.
Liu Tengchao, Ma Xinqiang, Zhu Yongmei, et al. Research on laser cleaning process of TC4 surface oxide layer based on COMSOL[J]. Laser Journal, 2025, 46(05): 203—211.
- [9] 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. Analysis and research on thermal effects of Gaussian pulsed laser ablation of titanium alloy[J]. Optical Technique, 2025, 51(02): 189—195.
- [10] Qin R, Yang H. Numerical Simulation of Temperature Field for Laser Removal of Oxide Layer of AlSi10Mg (Fe) Aluminum Alloy[J]. Integrated Ferroelectrics, 2022, 229(1): 158—172.
- [11] Yang J, Zhou J, Sun Q, et al. Digital analysis and prediction of the topography after pulsed laser paint stripping[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 62: 685—694.
- [12] Li Y, Li J, Zhang W, et al. Application of pulsed laser ablation thermal model in nanosecond pulsed laser removal of the epoxy resin paint film[J]. Optics & Laser Technology, 2024, 175: 110806.
- [13] Palomar T, Oujja M, Llorente I, et al. Evaluation of laser cleaning for the restoration of tarnished silver artifacts[J]. Applied Surface Science, 2016, 387: 118—127.
- [14] Raza M S, Das S S, Tudu P, et al. Excimer laser cleaning of black sulphur encrustation from silver surface[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 113: 95—103.
- [15] ahyari E, Nivas J J J, Oscurato S L, et al. Laser surface texturing of copper and variation of the wetting response with the laser pulse fluence[J]. Applied Surface Science, 2019, 470: 817—824.
- [16] 卢珊漫. 激光清洗7075铝合金表面氧化膜特性研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2024.
Lu Shanman. Study on laser cleaning characteristics of surface oxide film on 7075 aluminum alloy[D]. Changchun University of Science and Technology, 2024.
- [17] Kumar M, Bhargava P, Biswas A K, et al. Epoxy-paint stripping using TEA CO₂ laser: Determination of threshold fluence and the process parameters[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 46: 29—36.