

## 单脉冲激光褪漆形貌的多物理场仿真与验证

刘国春\*, 周宏飞, 杨文锋, 林德惠, 陈光澳

中国民用航空飞行学院航空工程学院, 四川 广汉 618307

**摘要** 为精准还原单脉冲激光褪漆过程,建立了单点褪漆有限元计算模型,分析了激光褪漆的温度场和热应力场变化规律,通过生死单元技术实现了漆层形貌仿真还原,并完成了不同功率的激光试验对比验证。结果表明:单脉冲激光褪漆过程中,温度判据决定最大烧蚀形貌深度,热应力判据决定最大烧蚀形貌宽度。所提多物理场分析模型获得的褪漆形貌与试验的平均贴合度达到 93.3%,较传统单温度场的仿真形貌精度提高 6.5%,该研究对实际激光褪漆工艺具有较好的指导与应用价值。

**关键词** 激光技术; 单脉冲激光; 多物理场; 生死单元; 褪漆形貌

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221860

## Simulation Analysis and Verification of Single Pulse Laser Paint Removal Morphology with Multi Physics Field

Liu Guochun\*, Zhou Hongfei, Yang Wenfeng, Lin Dehui, Chen Guang'ao

Aviation Engineering Institute, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, Sichuan, China

**Abstract** In order to accurately restore the single pulse laser paint removal process, a finite element model for single pulse laser paint removal was established and the temperature field and thermal stress field of laser paint removal were analyzed. The simulation and restoration of the paint layer morphology were realized through the birth and death unit technology, and the comparative verification of different power laser experiments was completed. The results show that the maximum ablation depth is determined by the temperature criterion, and the maximum ablation width is determined by the thermal stress criterion. The average fitting degree between the paint removal morphology obtained by the multi physical field analysis model and the test is 93.3%, which is 6.5% higher than that of traditional single temperature criterion. This research has good guidance and application value for the actual laser paint removal process.

**Key words** laser technique; single pulse laser; multi physics field; birth and death unit; ablation morphology

## 1 引言

激光清洗作为一种绿色、高自动化、高精度的新型清洗技术,逐渐扩展到飞机蒙皮褪漆领域<sup>[1-2]</sup>。大量针对激光褪漆工艺的研究确定了激光褪漆的技术可行性<sup>[3-4]</sup>,而激光褪漆过程中,漆层与基底受到激光辐射能量后会产生动态变化,该动态变化过程很难通过试验设备捕捉,一般采用有限元计算对此进行分析。施曙东<sup>[5]</sup>通过试验验证了有限元方法模拟激光清洗技术的可行性。刘彩飞等<sup>[6]</sup>通过模拟分析了不锈钢基底的激光褪漆仿真,研究了基于漆层表面温度的不同时刻动态变化,分析得出不同的激光参数对激光褪漆效率

的影响。Yang 等<sup>[7]</sup>对脉冲激光褪漆过程进行点、线、面的仿真分析并基于温度判据对烧蚀形貌进行还原,获得激光褪漆的能量密度、扫描速度和搭接率等理论参数,与试验对比发现,仿真的平均误差在 10% 以内。高辽远等<sup>[8]</sup>采用 COMSOL 软件对脉冲激光清洗 2024 铝合金表面丙烯酸聚氨酯漆层过程进行模拟分析,研究了激光参数对清洗效率的影响,结果表明扫描速度越慢热积累效应越高,搭接率选择 50% 时具有较好的清洗效率。李志超等<sup>[9]</sup>通过改变激光加载特征,模拟仿真激光清洗后材料表面温度变化,结果表明在相同激光能量密度下平顶光斑表面温度高于高斯光斑。童懿等<sup>[10]</sup>采用二维简化模型仿真研究了脉冲频率对激光

收稿日期: 2022-05-23; 修回日期: 2022-06-24; 录用日期: 2022-06-30; 网络首发日期: 2022-07-12

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目(2021YFSY0025)

通信作者: liuguochun@cafuc.edu.cn

清洗的影响,结果表明随着脉冲频率增大,漆层烧蚀量有所下降。Zhang 等<sup>[11]</sup>模拟了纳秒脉冲激光在低能量密度下清洗不锈钢,利用二维有限元模型模拟单脉冲烧蚀形貌,三维模型模拟多脉冲烧蚀形貌,所得仿真结果与试验结果吻合良好。邵壮等<sup>[12]</sup>通过 ANSYS 软件搭建激光褪漆计算模型,以漆层与基底交界面为基准提取漆层的温度与应力值,将脉冲激光褪漆过程的温度场与应力场进行可视化分析,并通过试验验证理论模型的准确性。

但上述激光褪漆仿真分析与形貌还原的研究主要考虑温度场对激光褪漆的作用,而热应力对褪漆的影响分析较少,并且一般是温度云图范围间接模拟烧蚀形貌为主,直接仿真出漆层形貌的研究较少。而实际激光褪漆原理较为复杂,以热烧蚀与热振动为主,包含温度场与热应力的多重作用,因此本文研究了温度与热应力对于单脉冲激光褪漆效果的综合影响,建立了高精度有限元分析模型,精确还原褪漆形貌,为实际激光褪漆工艺参数提供更优的理论指导。

## 2 激光清洗原理分析

### 2.1 激光清洗原理

脉冲激光清洗原理如图 1 所示,以热烧蚀与热振动为主<sup>[13-14]</sup>。热烧蚀原理是指激光脉冲能量辐射到漆层平面,漆层表面温度瞬间升高达到气化温度,从而达到褪漆效果。热振动原理是指脉冲激光辐射到漆层表面产生热量,由傅里叶定律与能量守恒的热传导方程将热量传到各层级之间,由于传导过程中存在时间差,层内以及各层之间具有较大温度梯度,以及漆层与基底热物性参数的不同导致热应力的产生,从而在层间产生剥离应力,当剥离应力大于内聚力或粘附力时,漆层剥离<sup>[15-16]</sup>。

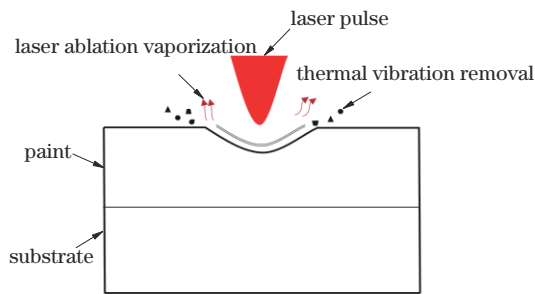


图 1 脉冲激光清洗原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pulse laser cleaning principle

### 2.2 热传导温度场分析

由于激光褪漆热传导过程满足傅里叶定律和能量守恒定律,因此激光褪漆过程的三维非线性瞬态热传导微分方程表示为

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

式中: $\lambda$ 为导热系数; $T$ 为材料瞬时温度; $\rho$ 为材料密度;

$c$ 为比热容。

根据实际激光褪漆场景,进行以下假设:1)研究模型中材料均匀且各向同性,各热物性参数为常数,不随温度变化;2)只考虑了激光辐射与材料的热传导,忽略了外界微小热辐射;3)激光热源为高斯热源,加工热源为高斯面热源。

模型初始温度,表示为

$$T(x, y, z, 0) = T_0. \quad (2)$$

模型各边界热流密度表示为

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (3)$$

式中: $n$ 为法线方向。当瞬时温度大于材料气化温度,即  $T > T_B$  ( $T_B$  为漆层材料气化温度)时,可以认为漆层材料被去除。

### 2.3 热振动应力场分析

由于脉冲激光作用时温度会剧烈变化,而漆层与基底的热物性差异较大,因此结合面处温度梯度较大,从而产生较大的热应力。本研究认为激光褪漆的热振动效应主要是由于垂直于漆层结合面( $Z$ 轴)方向的热应力作用,因此主要分析热应力  $\sigma_z$ 。

热应力方程表示为

$$\sigma_z = Y \epsilon_z, \quad (4)$$

式中: $Y$ 为杨氏模量; $\epsilon_z$ 为 $Z$ 方向应变,表示为

$$\epsilon_z = \frac{\Delta L}{L}. \quad (5)$$

材料沿 $Z$ 轴方向的膨胀改变量  $\Delta L$  表示为

$$\Delta L = L \gamma \Delta T(z, t), \quad (6)$$

式中: $\gamma$ 为热膨胀系数。从而得到  $\sigma_z$ , 表示为

$$\sigma_z = Y \gamma \Delta T(z, t). \quad (7)$$

当该热应力  $\sigma_z$  大于漆层间的破坏应力时,可以认为漆层褪去。

## 3 材料参数

本研究的漆层材料为环氧锌黄底漆,基体为铝合金 2023-T3,通过查阅资料与热重分析(TG-DTG)试验检测了材料热物性,获得测试材料的热物性参数如表 1 所示。

表 1 漆层及基体的热物性参数

Table 1 Thermal characteristic of paint and substrate

Parameter	Paint	Substrate
Density $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1062	2640
Thermal conductivity $\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1})$	0.3	238
Specific heat $c / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1})$	2510	950
Melting point / °C	151	500-640
Boiling point $T_B / \text{°C}$	165	—
Young's modulus $Y / \text{GPa}$	10	70
Poisson's ratio $\mu$	0.17	0.35
Thermal expansion $\gamma$	$1.0 \times 10^{-6}$	$2.65 \times 10^{-7}$

对样品 3 个区域进行平行拉拔试验,测得漆层平均破坏应力,结果如表 2 所示,漆层部分失效力  $\sigma_1=6.8 \text{ MPa}$ ,漆层完全失效力  $\sigma_2=9 \text{ MPa}$ ,可以认为当热应力  $\sigma_c \geq \sigma_2$  时漆层完全失效。

表 2 漆层破坏应力测试结果  
Table 2 Damage stress test results for paint

Sample number	Local failure	Complete failure
	$\sigma_1 / \text{MPa}$	$\sigma_2 / \text{MPa}$
1	6.3	8.9
2	6.5	9.4
3	7.6	8.7

## 4 单脉冲激光褪漆试验

### 4.1 试验设备与试验参数

单脉冲激光褪漆试验采用 1064 nm 红外光纤脉冲激光设备,如图 2 所示。



图 2 红外纳秒脉冲激光器  
Fig. 2 Infrared nanosecond pulse laser

为获取独立且完整的单个脉冲烧蚀形貌,设计光斑搭接率为 2,依据光斑搭接率公式<sup>[17]</sup>得到

$$\eta = 1 - \frac{v}{f \cdot D}, \quad (8)$$

式中: $\eta$ 为搭接率; $v$ 为扫描速度; $D$ 为光斑直径; $f$ 为激光重复频率。最终确定试验参数如下:光斑直径  $D=50 \mu\text{m}$ ,扫描速度  $v=3000 \text{ mm/s}$ ,激光重复频率  $f=20 \text{ kHz}$ ,脉冲宽度为 350 ns,考查了平均功率为 5.5 W、7 W、8.5 W 和 10 W 的单点褪漆状况。激光功率与激光能量密度的转换公式为

$$\varphi = \frac{E}{S} = \frac{4P}{\pi D^2}, \quad (9)$$

式中: $\varphi$ 为激光能量密度; $E$ 为单脉冲能量; $S$ 为激光光斑面积; $P$ 为激光平均功率。计算结果如表 3 所示,每种激光能量密度状况提取 3 个测试点进行分析。

### 4.2 试验结果分析

将褪漆后的测试点采用 Sneox 激光共聚焦显微镜(图 3)对漆层表面微观形貌进行坐标提取,获得不同激光能量密度的褪漆工况按序排列如表 4 所示。

根据激光共聚焦显微镜获得的表面坐标生成三维

表 3 激光能量密度计算结果

Table 3 Results of laser energy density

Parameter	Sample number			
	1	2	3	4
Average power $P / \text{W}$	5.5	7	8.5	10
Average energy density $\varphi / (\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$	14.01	17.83	21.66	25.48



图 3 激光共聚焦显微镜  
Fig. 3 Laser confocal microscopy

表 4 不同工况下的褪漆形貌特征参量

Table 4 Morphology parameters of paint removal under different working conditions unit:  $\mu\text{m}$

Number	Maximum depth	Average depth	Maximum width	Average width
P1-1	6.30		34.96	
P1-2	6.78	6.76	36.00	36.02
P1-3	7.20		37.10	
P2-1	7.60		41.13	
P2-2	8.30	8.10	42.66	42.29
P2-3	8.40		43.08	
P3-1	11.20		54.48	
P3-2	12.29	12.23	56.29	56.17
P3-3	13.20		57.74	
P4-1	14.15		60.70	
P4-2	15.00	15.15	62.28	62.08
P4-3	16.30		63.26	

Note: maximum width is defined as the maximum circumscribed circle diameter of the paint removal pit contour.

形貌图像,将各激光能量密度下中值点的形貌图像作为标准参考图像,获得不同激光能量密度下的褪漆三维标准形貌图,如图 4 所示。

可以看到,随着激光能量密度的增加,褪漆形貌的最大深度与最大宽度均不断增加,并且激光烧蚀深度与输入激光能量密度的自然对数呈线性关系<sup>[18-20]</sup>,表示为

$$d = \frac{1}{\alpha} \ln \left( \frac{F}{F_{th}} \right), \quad (10)$$

式中: $d$ 为烧蚀深度; $\alpha$ 为激光吸收系数( $\text{cm}^{-1}$ ); $F_{th}$ 为初始清洗阈值。

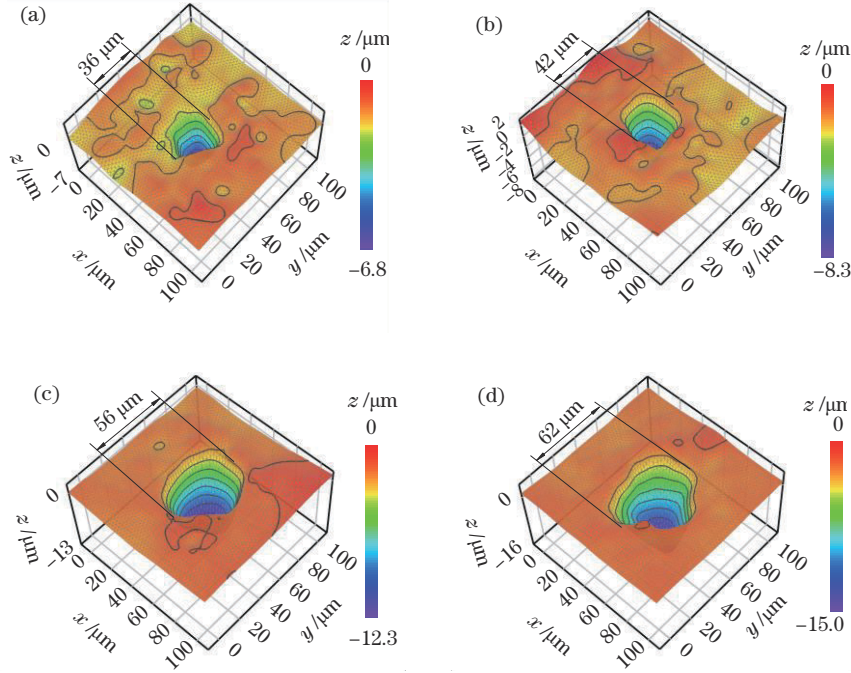


图 4 试验烧蚀形貌

Fig. 4 Experimental ablation morphology

将表 4 中不同激光能量密度取对数处理, 褪漆深度与激光能量密度对数进行拟合, 得到本次试验条件下, 褪漆深度与激光能量密度对数的拟合关系  $d = 12.82 \ln F - 27.10$ , 如图 5 所示。通过拟合线段外推, 得到本研究中的漆层材料烧蚀能量初始清洗阈值为  $8.28 \text{ J/cm}^2$ 。

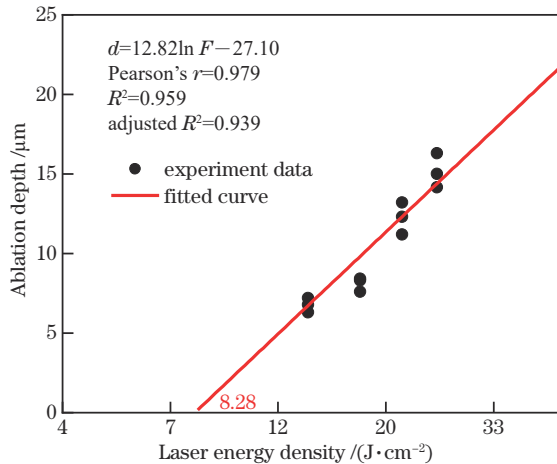


图 5 激光能量密度与褪漆深度关系曲线

Fig. 5 Relationship between laser energy density and ablation depth

褪漆形貌特征值由褪漆宽度和褪漆深度组成, 褪漆宽度直接影响激光线扫褪漆搭接率参数的选择, 由于上述激光褪漆深度与能量密度对数线性关系基于温度场分布推导<sup>[18]</sup>, 本研究也尝试采用激光温度场分布对褪漆最大宽度值进行描述。通过初始清洗阈值与高斯光束径向强度分布公式<sup>[21]</sup>, 获得脉冲激光理论烧蚀

宽度, 表示为

$$I(r, z) = I_0 \left[ \frac{\omega_0}{\omega(z)} \right]^2 e^{\left[ \frac{-2r^2}{\omega(z)^2} \right]}, \quad (11)$$

式中:  $I_0$  为高斯光束中心峰值强度;  $\omega_0$  为光束束腰半径,  $\omega_0 = 25 \mu\text{m}$  (峰值强度的 13.5% 所测直径);  $r$  为距离中心轴向距离;  $z$  为距离束腰的轴向距离。

当  $z = 0$  时,  $\omega(z) = \omega_0$ , 结合通过试验获得的漆层材料初始清洗阈值, 可以认为在漆层表面  $I(r, 0) = 8.28 \text{ J/cm}^2$ , 能够计算出不同激光能量密度下的漆层表面烧蚀半径, 从而获得褪漆理论最大宽度值, 将基于高斯能量分布的理论褪漆宽度与试验褪漆宽度对比如图 6 所示。

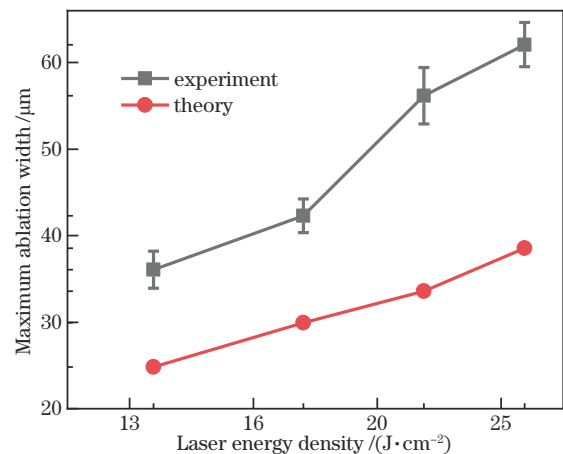


图 6 试验与理论烧蚀最大宽度对比图

Fig. 6 Comparison of experimental and theoretical maximum ablation width

由图 6 可知,通过褪漆温度场推导得到的理论褪漆宽度与试验值存在较大差异,说明决定脉冲激光单点褪漆宽度的影响因素除热烧蚀效应外,应该还存在其他重要影响因素(例如热振动效应),因此需要综合考虑褪漆时各类因素,以便能够精准还原激光褪漆形貌。

## 5 褪漆形貌的有限元模拟

### 5.1 建立仿真模型

在 ANSYS 中建立脉冲激光褪漆模型如图 7 所示,模型整体尺寸为  $80\ \mu\text{m} \times 80\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ ,漆层与基底的厚度各为  $25\ \mu\text{m}$ 。漆层网格采用六面体单元,基底

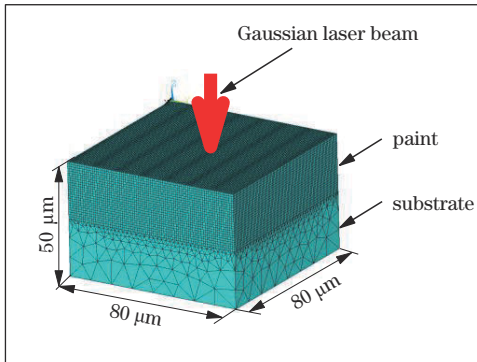


图 7 脉冲激光褪漆模型

Fig. 7 Pulse laser paint removal model

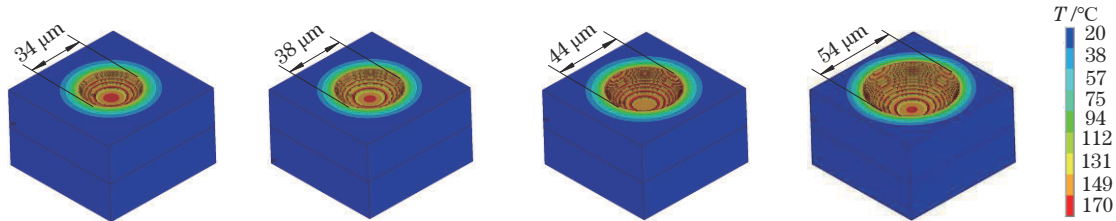


图 8 不同功率下温度判据褪漆形貌图

Fig. 8 Topography of paint removal for temperature criterion under different powers

### 2) 热应力判据形貌分析

通过热应力判据得到不同功率时激光褪漆三维形貌如图 9 所示。热应力集中区域主要是激光热源顶部周围以及漆层与基底之间,这是由于热源附近具有较高

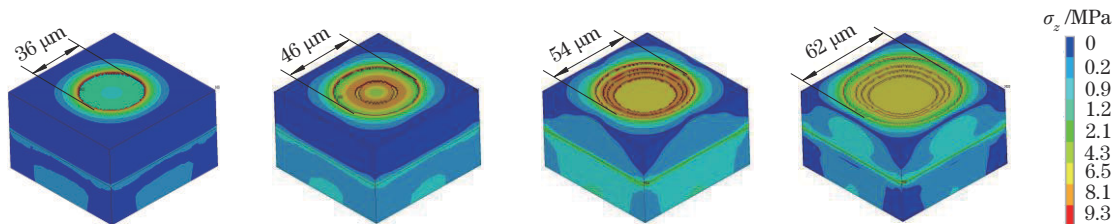


图 9 不同功率下热应力判据形貌图

Fig. 9 Topography of paint removal for thermal stress criterion under different powers

### 3) 对比分析

将不同能量密度下两种物理场判据得到的褪漆形

貌最大深度、宽度与试验结果进行对比整理,如图 10 所示。

### 5.2 载荷条件

初始温度  $T_0=20\ ^\circ\text{C}$ ,分别考查  $14.04\ \text{J}/\text{cm}^2$ 、 $17.83\ \text{J}/\text{cm}^2$ 、 $21.66\ \text{J}/\text{cm}^2$ 、 $25.48\ \text{J}/\text{cm}^2$  四种激光能量密度工况。模型中心处施加高斯热源,单个脉冲三维热流密度公式<sup>[22-24]</sup>为

$$q(r) = \frac{k\alpha P}{\pi R^2} \exp\left\{-k \frac{x^2 + y^2 + z^2}{R^2}\right\}, \quad (12)$$

式中: $R$ 为激光半径; $k$ 为热流分布形状参数; $P$ 为激光平均功率。

### 5.3 褪漆判据

本研究中采用 ANSYS“生死单元”命令模拟褪漆行为,同时考虑温度与热应力对于褪漆效果的影响,单元失效判定分为两类:1)温度判据,单元温度  $T \geq 165\ ^\circ\text{C}$ ;2)热应力判据,单元应力  $\sigma_z \geq 9\ \text{MPa}$ 。当满足上述任一失效条件时,单元被“杀死”,从而能够直接实现褪漆形貌仿真。

### 5.4 褪漆仿真结果分析

#### 5.4.1 单一判据下的褪漆形貌分析

##### 1) 温度判据形貌分析

通过温度判据得到不同功率下的激光褪漆三维形貌如图 8 所示。可以看到,温度判据获得的褪漆三维形貌呈现出上大下小倒立锥形,与高斯热源能量分布呈现高度一致性,与试验形貌呈现较大的相似性。

的温度梯度,以及漆层与基底之间热物性差异较大。从形貌上观测应力判据的褪漆总体形状的完整性低于温度判据,在同样激光能量密度条件下,应力判据获得的褪漆形貌较温度判据有着更大的宽度与更小的深度。

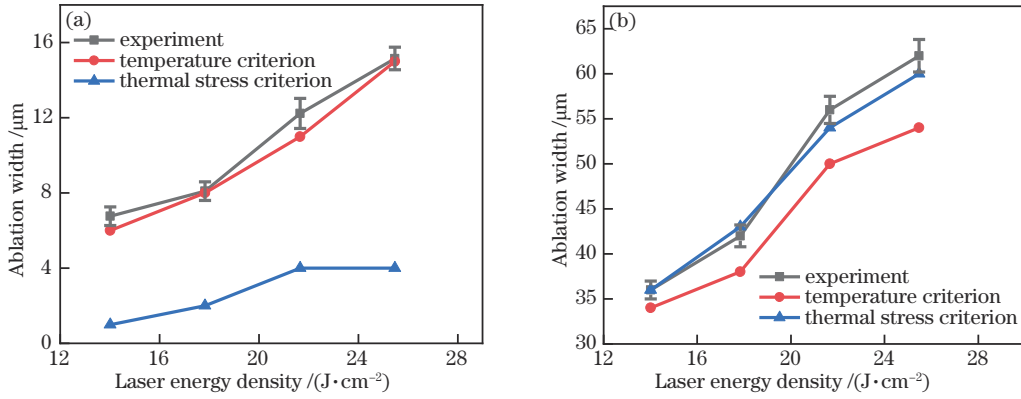


图 10 不同能量密度下两种判据得到的褪漆形貌对比。(a)烧蚀深度;(b)烧蚀宽度

Fig. 10 Comparison of paint removal morphology obtained by two criteria under different energy densities. (a) Ablation depth; (b) ablation width

由图 10 可知,基于温度判据与试验深度平均贴合度达到 94.13%,远大于热应力判据的平均贴合度 24.65%,可以认为单脉冲激光褪漆过程中热烧蚀原理对褪漆深度起着主要作用。基于温度判据获得的最大宽度与试验值的平均贴合度为 87.65%,基于热应力判据获得的最大宽度与试验值的平均贴合度达到 96.93%,说明单脉冲激光褪漆过程中热应力对褪漆形貌宽度方面有着更佳的仿真复现效果。

5.4.2 双重判据的形貌仿真分析

1) 双重判据融合仿真

褪漆形貌的最大深度与最大宽度仅能代表极限位

置的特征参量,三维形貌复现决定了对试验的精确还原程度。两种物理场判据独立获得仿真三维形貌具有明显的差异性:温度判据在深度方面符合试验情况,热应力判据对褪漆宽度显得更为贴合。为了使仿真形貌更加贴合实际试验状况,本研究采用双重判据拟合褪漆形貌,分别将温度判据与热应力判据独立获得的褪漆形貌提取节点坐标,利用布尔运算取并集获得多物理场双重判据的三维仿真形貌。为了进一步对比双重判据还原效果,图 11 选取了激光能量密度为  $21.66 \text{ J/cm}^2$  时的试验、双重判据、温度判据拟合后三维形貌进行对比分析。

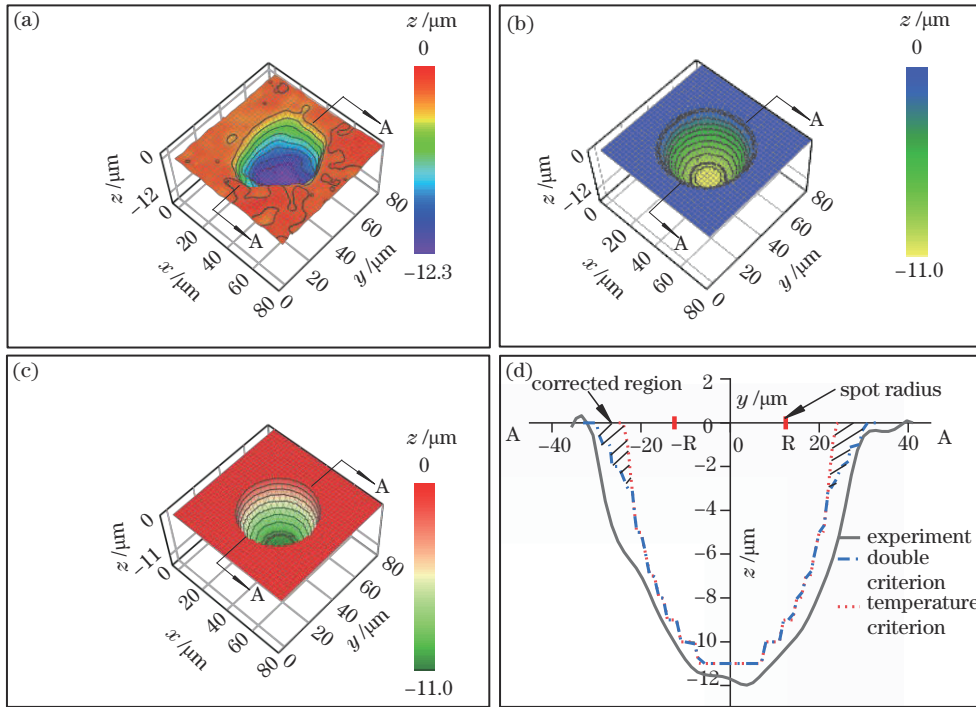


图 11 激光能量密度为  $21.66 \text{ J/cm}^2$  的单脉冲烧蚀形貌。(a)试验;(b)双重判据;(c)温度判据;(d) A-A 截面剖面图

Fig. 11 Single pulse ablation morphology at laser energy density of  $21.66 \text{ J/cm}^2$ . (a) Experiment; (b) double criteria; (c) temperature criterion; (d) section profiles of A-A

从图 11 中可以看到, 试验、双重判据与温度判据获得的形貌尺寸在三维形状上呈现高度相似性。通过图 11(d) 的三个图案在相同位置剖面对比可知, 双重判据较温度判据获得的仿真更贴合试验形貌, 热应力判据在形貌上半部分呈现出较为明显的修正作用, 剖面中出现一个拟合修正区域(图中阴影部分), 使得拟合仿真形貌更贴合试验剖面形貌。通过计算三条曲线面积发现: 基于温度判据剖面面积与试验剖面面积平均贴合度为 85.5%, 双重判据剖面面积与试验剖面面

积平均贴合度为 90.5%, 说明双重判据较温度判据能够更好地还原实际激光褪漆形貌图样。

## 2) 整体还原度分析

从特征参量与特征剖面均说明了本研究提出的双重判据还原单脉冲激光褪漆形貌的有效性, 为进一步分析三维形貌的还原度, 根据形貌坐标计算了 4 种功率下的试验、双重判据和温度判据三维形貌下的褪漆体积, 如表 5 所示。

表 5 不同激光功率下烧蚀体积

Table 5 Ablation volume at different laser powers

Number	Experiment / $\mu\text{m}^3$	Experimental average / $\mu\text{m}^3$	Double criteria / $\mu\text{m}^3$	Double criteria fitting degree / %	Temperature criterion / $\mu\text{m}^3$	Temperature criterion fitting degree / %
P1-1	3165.35					
P1-2	3300.50	3392.76	3182.24	93.8	2929.79	86.4
P1-3	3712.43					
P2-1	5328.35					
P2-2	5461.30	5534.52	5146.64	92.9	4658.62	84.2
P2-3	5813.91					
P3-1	13549.60					
P3-2	13695.80	13815.50	13055.65	94.5	12309.12	89.1
P3-3	14201.10					
P4-1	21495.40					
P4-2	22105.30	22268.69	20487.19	92.0	19461.01	87.4
P4-3	23205.37					

从表 5 可以看出, 温度判据仿真形貌体积与试验平均贴合度为 86.8%, 双重判据仿真形貌与试验平均贴合度为 93.3%, 双重判据能够将仿真精度提高 6.5%, 也说明了热烧蚀与热振动效应对激光褪漆形貌的共同作用。

## 6 结 论

本研究针对精准还原单脉冲激光褪漆形貌特征, 建立多物理场有限元分析模型, 通过生死单元技术设置温度与热应力判据, 获得了更加精准的单脉冲激光褪漆仿真三维形貌, 结合不同能量密度的脉冲激光试验验证, 获得结论如下:

1) 本研究分析了单脉冲激光褪漆形貌的特征参量, 发现最大褪漆深度以热烧蚀作用为主, 最大褪漆宽度必须要考虑热烧蚀与热振动的共同作用。

2) 本研究提出的双重判据所得仿真形貌, 较传统的单温度场判据形貌在顶部位置增加一处热应力修正区域, 认为在修正区域虽由于激光作用未达到气化温度, 但该区域存在较大的温度变化梯度, 导致该区域出现较大热应力, 从而在考虑了热应力场作用后, 将形貌仿真精度提高 6.5%, 与试验的平均贴合度能够达到 93.3%, 从而达到精确还原褪漆形貌效果。

3) 通过建立高精度仿真形貌的激光脉冲褪漆有限

元分析模型, 能够直接获取褪漆形貌, 分析实际激光褪漆过程的动态参量, 对于实际激光褪漆工艺有较好的指导作用。

## 参 考 文 献

- [1] 刘鹏飞, 王思捷, 刘照围, 等. 激光清洗技术的应用研究进展[J]. 材料保护, 2020, 53(4): 142-146.  
Liu P F, Wang S J, Liu Z W, et al. Research progress in application of laser cleaning technology[J]. Materials Protection, 2020, 53(4): 142-146.
- [2] 李兴, 管迎春. 浅述几种典型激光加工技术在航空制造领域的应用现状[J]. 航空制造技术, 2019, 62(S2): 38-45, 65.  
Li X, Guan Y C. Study on typical laser processing technologies and applications in aeronautical manufacturing [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62 (S2): 38-45, 65.
- [3] 鲜辉, 冯国英, 王绍朋. 激光透过油漆层的理论分析及相关实验[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2012, 49(5): 1036-1042.  
Xian H, Feng G Y, Wang S P. Laser transmission model in paint and related experimental[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2012, 49 (5): 1036-1042.
- [4] 蒋一岚, 叶亚云, 周国瑞, 等. 飞机蒙皮的激光除漆技术研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(12): 1206003.

- Jiang Y L, Ye Y Y, Zhou G R, et al. Research on laser paint removing of aircraft surface[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(12): 1206003.
- [5] 施曙东. 脉冲激光除漆的理论模型、数值计算与应用研究[D]. 天津: 南开大学, 2012.
- Shi S D. Researches on theoretical model, numerical simulation and application of painting removal by laser cleaning[D]. Tianjin: Nankai University, 2012.
- [6] 刘彩飞, 冯国英, 邓国亮, 等. 有限元法移动激光除漆的温度场分析与实验研究[J]. *激光技术*, 2016, 40(2): 274-279.
- Liu C F, Feng G Y, Deng G L, et al. Temperature field analysis and experiment study about paint irradiated by moving laser based on FEM[J]. *Laser Technology*, 2016, 40(2): 274-279.
- [7] Yang J N, Zhou J Z, 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.
- [8] 高辽远, 周建忠, 孙奇, 等. 激光清洗铝合金漆层的数值模拟与表面形貌[J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0502002.
- Gao L Y, Zhou J Z, Sun Q, et al. Numerical simulation and surface morphology of laser-cleaned aluminum alloy paint layer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0502002.
- [9] 李志超, 徐杰, 张东赫, 等. TA15 钛合金氧化膜激光清洗温度场有限元模拟[J]. *中国科学: 技术科学*, 2022, 52(2): 318-332.
- Li Z C, Xu J, Zhang D H, et al. Finite element simulation of temperature field in laser cleaning of TA15 titanium alloy oxide film[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2022, 52(2): 318-332.
- [10] 童懿, 邱太文, 易俊兰, 等. 脉冲频率对油漆漆层激光清洗作用机制的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(19): 1914009.
- Tong Y, Qiu T W, Yi J L, et al. Effect of pulse frequency on laser cleaning mechanism of paint coating [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(19): 1914009.
- [11] Zhang J J, Zhao L, Rosenkranz A, et al. Nanosecond pulsed laser ablation on stainless steel-combining finite element modeling and experimental work[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2019, 21(8): 1900193.
- [12] 邵壮, 王涛. 基于 ANSYS 的激光除漆技术数值模拟研究[J]. *激光与红外*, 2021, 51(10): 1294-1299.
- Shao Z, Wang T. Numerical simulation of laser paint removal technology based on ANSYS[J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(10): 1294-1299.
- [13] Autric M L, Oltra R. Basic processes of pulsed laser materials interaction: applications to laser cleaning of oxidized surfaces[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5777: 982-985.
- [14] 雷正龙, 孙浩然, 田泽, 等. 不同时间尺度的激光对铝合金表面油漆层清洗质量的影响[J]. *中国激光*, 2021, 48(6): 0602103.
- Lei Z L, Sun H R, Tian Z, et al. Effect of laser at different time scales on cleaning quality of paint on Al alloy surfaces[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(6): 0602103.
- [15] 秦哲, 高谦, 王斌, 等. 飞机蒙皮纳秒脉冲激光除漆工艺与机理研究[J]. *表面技术*, 2022, 51(7): 370-376, 396.
- Qin Z, Gao Q, Wang B, et al. Technology and mechanism of nanosecond pulse laser paint removal of aircraft skin[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(7): 370-376, 396.
- [16] 孙浩然. 铝合金表面油漆涂层激光复合清洗工艺及去除机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- Sun H R. Research on technology and mechanism of laser composite cleaning paint coating from aluminum alloy surface[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [17] Kaldos A, Pieper H J, Wolf E, et al. Laser machining in die making: a modern rapid tooling process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 155/156: 1815-1820.
- [18] Andrew J E, Dyer P E, Forster D, et al. Direct etching of polymeric materials using a XeCl laser[J]. *Applied Physics Letters*, 1983, 43(8): 717-719.
- [19] Lawrence J, Li L. Determination of the absorption length of CO<sub>2</sub> and high power diode laser radiation for a high volume alumina-based refractory material[J]. *Applied Surface Science*, 2000, 168(1/2/3/4): 71-74.
- [20] Schmidt M J J, Li L, Spencer J T. An investigation into the feasibility and characteristics of using a 2.5 kW high power diode laser for paint stripping[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 138(1/2/3): 109-115.
- [21] 朱延彬. 测量高斯光束径向强度分布及束径的新方法[J]. *中国激光*, 1983, 10(2): 90-92.
- Zhu Y B. A new method for measuring radial intensity distribution and diameter of the Gaussian beam[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1983, 10(2): 90-92.
- [22] 郭召恒. 纳秒脉冲激光除漆的数值模拟与实验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020: 38-54.
- Guo Z H. Numerical simulation and experimental research on nano-second pulse laser paint removal[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020: 38-54.
- [23] Mahmood T, Mian A, Amin M R, et al. Finite element modeling of transmission laser microjoining process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 186(1/2/3): 37-44.
- [24] 李宇强, 郭玲玉, 蒋平, 等. 铝合金激光清洗表面形貌变化的实验研究及工艺参数优化[J]. *中国激光*, 2021, 48(22): 2202016.
- Li Y Q, Guo L Y, Jiang P, et al. Experimental study on surface morphology changes of aluminum alloy using laser cleaning and optimization of process parameters[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(22): 2202016.