

## 激光单脉冲作用下的漆层凹坑形貌模拟研究

杨文锋<sup>1\*</sup>, 林德惠<sup>1</sup>, 钟勉<sup>1</sup>, 李绍龙<sup>1</sup>, 钱自然<sup>1</sup>, 刘国春<sup>1</sup>, 曹宇<sup>2</sup>, 徐艺<sup>1</sup>, 李果<sup>1</sup>, 张赛<sup>1</sup><sup>1</sup>中国民用航空飞行学院民机复合材料维修研究中心, 四川 广汉 618307;<sup>2</sup>温州大学激光与光电智能制造研究院, 浙江 温州 325035

**摘要** 研究激光单脉冲作用后漆层表面的凹坑形貌可以有效抑制激光多参数叠加效应及脉冲重叠的光热与光力效应,有助于揭示激光与材料的作用机制,同时可为激光参数优化提供依据。本团队利用实验凹坑形貌数据获得漆层去除深度 $d$ 及能量密度 $F$ 的关系式,并基于烧蚀机制建立了高斯激光单脉冲作用后模拟漆层凹坑形貌的数学模型,采用MATLAB对13.58~27.16 J/cm<sup>2</sup>能量密度下的凹坑形貌进行了模拟与验证。结果表明:低能量密度(13.58~16.98 J/cm<sup>2</sup>)下,凹坑深度和直径误差均小于5%,凹坑表面近似为旋转抛物面,凹坑剖面轮廓近似为抛物线;高能量密度(20.37~27.16 J/cm<sup>2</sup>)下,凹坑深度误差小于5%,但凹坑直径误差高达40%,模拟结果与实验结果存在显著差异。误差分析表明,在高能量密度下,等离子冲击与热辐射机制对凹坑形貌具有显著影响。基于上述分析对模型进行修正,修正模型对凹坑深度和直径的模拟误差均控制在5%以内,显著提高了模型模拟的准确性。基于凹坑形貌实验数据建立的形貌模型以及该模型的验证,不仅揭示了不同能量密度下激光与材料主要作用机制的差异,还为高、低能量密度下除漆效果的精确控制及激光参数优化提供了参考。

**关键词** 激光技术; 激光除漆; 单脉冲; 凹坑形貌; 模拟与验证

中图分类号 TN249 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220627

## 1 引言

激光除漆因具有高效、可控等一系列优势而成为一种潜在的绿色清洗技术,已在汽车、轮船和飞机除漆等领域获得应用<sup>[1-3]</sup>。为了改善激光除漆效果,提升除漆效率,进一步促进激光除漆的实际工程应用,有必要对不同能量密度下的激光与漆层材料作用机制进行澄清,从而为工艺参数优化与控制提供依据。激光除漆是一个多参数(能量密度、扫描速度、扫描次数、脉冲重叠率、脉冲宽度、脉冲重复频率等)共同作用的光热、光力,甚至光化学过程。除漆效果是多参数共同作用的结果,单个参数对除漆效果的影响受多参数的叠加干扰,并不能反映其对漆层的真实影响。激光辐照后,漆层材料的损伤或脱落既受单个脉冲的光热与光力作用,也受相邻脉冲热扩散、热积累,以及垂直冲击力、水平剪切力的共同作用。在一定的能量密度及搭接率下,单个脉冲作用在漆层表面会形成单个凹坑,其损伤形式及形貌特征不受相邻脉冲的干扰,更能揭示特定激光束与漆层材料的作用机制。

近年来,许多研究人员基于热传导理论及烧蚀机制建立了纳秒激光单脉冲作用时凹坑形貌的分析模型,并采用有限元分析软件进行了模拟。Lim等<sup>[4]</sup>和

Lee等<sup>[5]</sup>进行了纳秒激光单脉冲烧蚀铜和铝的有限元模拟,研究了激光参数对烧蚀深度和烧蚀形状的影响。Wu等<sup>[6]</sup>进行了多晶金刚石单脉冲激光烧蚀过程的有限元模拟,研究了烧蚀过程中的温度演变以及材料去除过程和去除机制。郭召恒<sup>[7]</sup>进行了纳秒脉冲激光单脉冲作用和线性扫描后漆层三维形貌的有限元模拟,揭示了激光诱导热/力作用下漆层的烧蚀汽化及振动分离演变机制。Yang等<sup>[8]</sup>进行了激光作用后漆层表面形貌的有限元模拟,预测了单个凹坑、沟槽及平面扫描后漆层表面的三维形貌,并对激光除漆参数进行了优化。Zhang等<sup>[9]</sup>采用有限元模拟方法研究了纳秒激光在低能量密度下对不锈钢的烧蚀行为,结果显示:凹坑烧蚀宽度的模拟值与实验值吻合良好,误差在10%以内。

上述有限元模型为低能量密度下激光烧蚀过程中的温度演变和材料去除研究提供了新方法,有利于澄清激光-材料作用机理。纳秒脉冲激光具有较高的峰值功率密度(可达10<sup>9</sup> W/m<sup>2</sup>),加工过程通常伴随着低温等离子体的形成<sup>[10]</sup>,尤其是在高能量密度下,产生的等离子体将吸收相当一部分激光能量并产生热辐射和冲击波<sup>[11]</sup>,这会对漆层材料的损伤与清除产生一定影响,导致模型的预测精度下降。故,不同能量密度下脉冲激光

收稿日期: 2022-03-04; 修回日期: 2022-04-07; 录用日期: 2022-04-27; 网络首发日期: 2022-05-15

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目(2021YFSY0025)

通信作者: \*ywfcyy@163.com

作用时漆层材料损伤与清除过程模型的建立值得关注。

本研究旨在建立不同能量密度下高斯纳秒激光单脉冲作用时漆层损伤形式及清除过程的模型。实际的凹坑形貌是复杂的激光-材料作用机制的直接体现,凹坑形貌数据携带着丰富的信息。本团队基于凹坑形貌的实验数据分析以及烧蚀机制,建立了模拟低能量密度下凹坑形貌的数学模型。在高能量密度下,本团队考虑了等离子冲击和热辐射机制,对模型进行了修正。通过对比实验与模拟得到的凹坑深度、直径以及对模型进行误差分析,进一步澄清了不同能量密度下的激光-材料主要作用机制。所建立的数学模型在高、低能

量密度下均具有较高的准确度,可为高、低能量密度下激光除漆效果的准确控制及参数优化提供参考。

## 2 材料与方 法

### 2.1 实验材料

基体为 2024-T3 态硬铝合金,将其切割成大小为 15 mm×15 mm×1 mm 的试样。在基体表面均匀涂覆 H06-2 锌黄环氧底漆,漆层厚度约为 40 μm,漆层的主要成分为环氧酯料(45.30%,质量分数,下同)、滑石粉(18.30%)及锌黄(11.97%)。2024-T3 铝合金和环氧底漆的热物性参数见表 1。

表 1 2024-T3 铝合金和环氧底漆的热物性参数

Table 1 Thermophysical parameters of 2024-T3 aluminum alloy and epoxy primer

Material	Density / (kg·m <sup>-3</sup> )	Specific heat / (J·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	Heat conductivity / (W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	Melting point / °C	Boiling point / °C
2024-T3 aluminum alloy	2640	950	238	500-640	
Epoxy primer	1062	2510	0.3	151	165

### 2.2 实验设计

激光除漆设备由激光控制系统、光纤脉冲激光器、

扫描振镜、激光加工头等组成。激光除漆设备及除漆工艺示意图如图 1 所示。

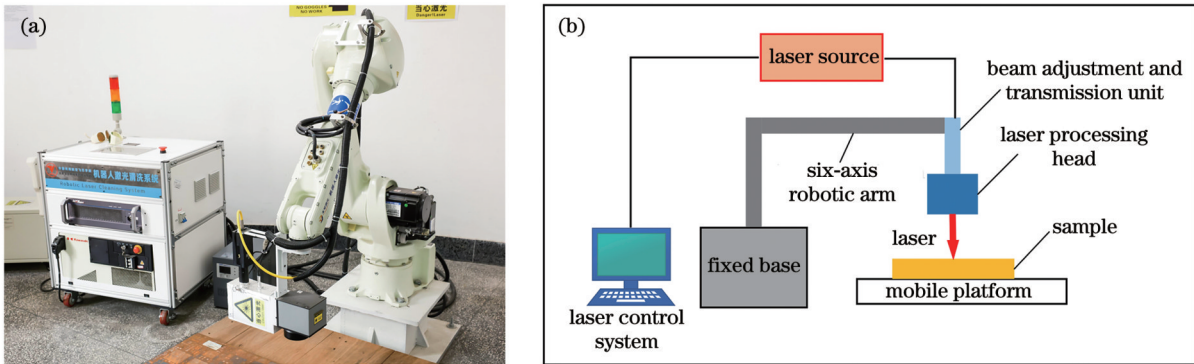


图 1 激光除漆设备及除漆工艺示意图。(a)激光除漆设备;(b)除漆工艺示意图

Fig. 1 Laser paint removal equipment and diagram of paint removal. (a) Laser paint removal equipment; (b) diagram of paint removal

光纤脉冲激光器的光束能量服从高斯分布,该激光器的主要参数如表 2 所示。

为避免脉冲间相互影响,设计光斑搭接率为-1。光斑搭接率计算公式<sup>[12]</sup>为

表 2 实验用激光器主要参数

Table 2 Main parameters of laser in experiment

Parameter	Value
Wavelength / nm	1064
Average power $P$ / W	0-120
Pulse frequency $f$ / kHz	1-200
Beam diameter $D$ / μm	50
Scan speed $v$ / (mm·s <sup>-1</sup> )	0-8000
Pulse duration $\tau_p$ / ns	60-350

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

式中: $\gamma$ 为光斑搭接率; $v$ 为扫描速度; $f$ 为脉冲频率; $D$ 为光斑直径。由光斑搭接率可以确定扫描速度和激光频率分别为 3000 mm/s 和 30 kHz。激光光斑扫描方式如图 2 所示。

通过调整激光功率来改变能量密度,激光功率从 8 W 开始,以 2 W 为梯度递增,共进行 5 组实验。根据

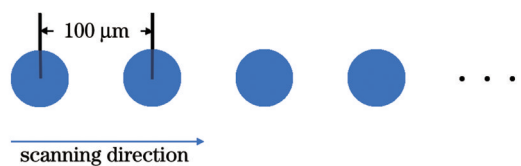


图 2 激光光斑扫描方式示意图

Fig. 2 Schematic of laser spot scanning mode

式(2)计算平均能量密度( $E_D$ ),计算结果如表 3 所示。

$$E_D = \frac{P}{f\pi\omega_0^2}, \quad (2)$$

式中: $\omega_0$ 为光斑半径; $P$ 为激光功率。

表 3 单脉冲实验的平均能量密度

Table 3 Average energy density in single pulse experiment

No.	Average power $P$ / W	Average energy density $E_D$ / ( $J \cdot cm^{-2}$ )
1	8	13.58
2	10	16.98
3	12	20.37
4	14	23.77
5	16	27.16

### 2.3 测试与表征

采用西班牙 S neox 3D 光学表面轮廓仪(以下简称“3D 轮廓仪”,该仪器采用的是共聚焦测量技术,其横向分辨率可达  $0.10 \mu m$ )对凹坑深度和凹坑直径进行测量。每组激光参数下获取 10 个凹坑的深度和直径,每组数据的均值及离散系数如表 4 所示。可见,凹坑深度及直径数据的离散系数均在 10% 以内。这表明凹坑深度和直径数据的离散程度较小,均值的代表性较强。本文以凹坑深度及直径的均值作为模拟效果的评价标准。

表 4 凹坑深度和直径的均值及离散系数

Table 4 Mean value and dispersion coefficient of crater depth and diameter

No.	Depth		Diameter	
	Mean value / $\mu m$	Dispersion coefficient / %	Mean value / $\mu m$	Dispersion coefficient / %
1	8.92	5.63	31.79	9.68
2	11.61	7.57	38.43	7.93
3	13.64	4.38	66.07	7.87
4	15.31	5.12	69.08	9.35
5	17.59	5.60	70.36	6.35

## 3 模型假设及模型建立

### 3.1 模型假设

为使模型易于计算和实现,且具有较高的准确度,这里仅考虑主要因素,忽略次要及偶然因素。本模型的假设条件如下:

- 1) 漆层和基体均匀且各向同性;
- 2) 激光束能量密度服从理想的高斯分布;
- 3) 激光束为理想垂直入射,即激光束与漆层表面垂直,入射角偏移量忽略不计;
- 4) 漆层表面各处均在激光束的焦深范围内,不考

虑离焦量对凹坑形貌的影响。

### 3.2 模型建立

在以烧蚀为主要机制的激光加工过程中,材料的去除深度  $d$  与单脉冲激光能量密度  $F$  之间的关系<sup>[13-15]</sup>为

$$d = \frac{1}{\alpha} \ln(F/F_{th}) = \frac{1}{\alpha} \ln F - \frac{1}{\alpha} \ln F_{th}, \quad (3)$$

式中: $\alpha$ 为漆层对激光的吸收系数( $cm^{-1}$ ); $F_{th}$ 为初始清除阈值( $J/cm^2$ )。由式(3)可知, $d$ 与 $F$ 的自然对数存在线性关系。

使用 3D 轮廓仪测量各能量密度下的凹坑深度,并将其作为去除深度  $d$  的序列。采用式(4)所示的高斯激光束的能量密度分布公式进行计算,获得对应的  $F$  序列。

$$F(r) = \frac{2P}{f\pi\omega_0^2} \cdot \exp\left(\frac{-2r^2}{\omega_0^2}\right), \quad (4)$$

式中: $r$ 为漆层表面上的点到光斑中心的距离,此处取  $r=0$ 。

将上述  $d$  与  $F$  序列进行拟合,结果如图 3 所示。 $d$  与  $F$  的关系为

$$d = 12.18 \ln F - 31.42. \quad (5)$$

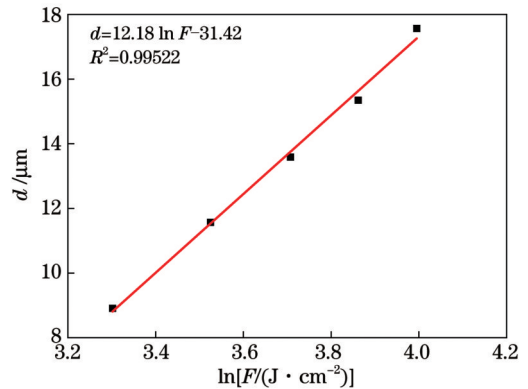


图 3  $d$  与  $\ln F$  的拟合结果

Fig. 3 Fitting result of  $d$  and  $\ln F$

由式(3)和式(5)可知,初始清除阈值  $F_{th}$  为  $13.19 J/cm^2$ 。

为进一步讨论凹坑的表面形貌,以光斑中心为原点,以激光光束入射方向的反方向为  $z$  轴正方向,以漆层表面为  $xOy$  平面,建立如图 4 所示的直角坐标系。

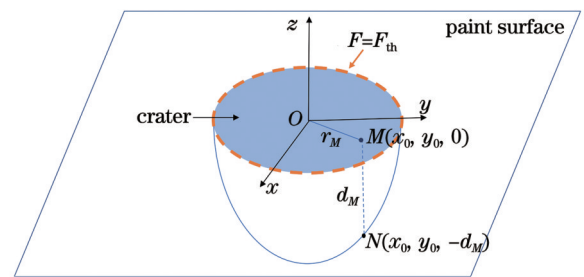


图 4 直角坐标系示意图

Fig. 4 Schematic of Cartesian coordinate system

图 4 中,  $M(x_0, y_0, 0)$  为漆层表面任意一点,  $r_M$  为该点到光斑中心的距离,  $d_M$  为该点处漆层的去除深度。由初始清除阈值  $F_{th}$  的定义可知: 当该点处的能量密度小于或等于  $F_{th}$  时, 漆层的去除深度  $d_M$  为零, 如图 4 中虚线及虚线以外部分所示; 当该点处的能量密度大于

$F_{th}$  时, 漆层去除深度  $d_M = 12.18 \ln F_M - 31.42$ 。由式(4)可知漆层表面任意一点  $M$  处的能量密度为

$$F_M = \frac{2P}{f\pi\omega_0^2} \cdot \exp\left[\frac{-2(x_0^2 + y_0^2)}{\omega_0^2}\right] \quad (6)$$

从而, 凹坑曲面方程  $H(x, y)$  可表示为

$$H(x, y) = \begin{cases} 0, F(x, y) \leq 13.19 \\ -12.18 \ln \left\{ \frac{2P}{f\pi\omega_0^2} \cdot \exp\left[\frac{-2(x^2 + y^2)}{\omega_0^2}\right] \right\} + 31.42, F(x, y) > 13.19 \end{cases} \quad (7)$$

凹坑剖面方程  $H(r)$  可表示为

$$H(r) = \begin{cases} 0, F(x, y) \leq 13.19 \\ -12.18 \ln \left[ \frac{2P}{f\pi\omega_0^2} \cdot \exp\left(\frac{-2r^2}{\omega_0^2}\right) \right] + 31.42, F(x, y) > 13.19 \end{cases} \quad (8)$$

式(7)和式(8)即为所建立的模拟凹坑形貌的数学模型。利用 MATLAB 编写程序, 即可模拟不同能量密度下的凹坑形貌。模拟结果将在 4.1 节进行展示并讨论。

为进一步分析凹坑的表面形貌, 将式(7)和式(8)整理为

$$H(x, y) = \begin{cases} 0, F(x, y) \leq 13.19 \\ a(x^2 + y^2) + b, F(x, y) > 13.19 \end{cases} \quad (9)$$

$$H(r) = \begin{cases} 0, F(x, y) \leq 13.19 \\ ar^2 + b, F(x, y) > 13.19 \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $a = 24.36/\omega_0^2$ ;  $b = 31.42 - 12.18 \ln[2P/(f\pi\omega_0^2)]$ 。

对于固定的激光器参数,  $a, b$  均为常数。从而, 由式(9)可知凹坑表面近似为旋转抛物面, 由式(10)可知凹坑剖面轮廓近似为抛物线。这与薛建伟等<sup>[16]</sup>对  $9.3 \mu\text{m}$   $\text{CO}_2$  高斯激光辐照后牙硬组织凹坑形貌的描述一致。本文的理论推导进一步解释了该形貌的形成原因。

## 4 模拟结果与误差分析

### 4.1 模拟结果

图 5 为不同能量密度下, 实际凹坑与模拟凹坑的三维形貌及剖面轮廓对比。在低能量密度 ( $13.58 \sim 16.98 \text{ J/cm}^2$ ) 下, 模拟凹坑与实际凹坑的大小一致, 且剖面轮廓吻合良好; 在高能量密度 ( $20.37 \sim 27.16 \text{ J/cm}^2$ ) 下, 模拟凹坑远小于实际凹坑, 且在凹坑近表面处实际凹坑的剖面轮廓明显较宽。

### 4.2 误差分析及机理探讨

由图 6(a)、(b)可以看出: 在所讨论的能量密度范围内, 凹坑深度模拟值与实验值之间的误差较小, 在 5% 以内; 在低能量密度下, 凹坑直径模拟值与实验值之间的误差较小, 在 10% 以内, 但在高能量密度下, 误差高达 40% 左右。

利用剖面轮廓图对高能量密度下直径误差加大的

原因进行分析。如图 6(c) 所示, 凹坑近表面漆层的实际去除深度 ( $d_A$ ) 远大于模拟值 ( $d_s$ ), 而且在模拟去除深度为零处 (图中长虚线内), 实际上却存在漆层材料的去除。这是实际凹坑轮廓在近表面变宽、直径误差较大的直接原因。

不同能量密度下激光与材料的主要作用机制不同。在低能量密度下, 激光与材料的主要作用机制为热烧蚀; 在高能量密度下, 激光与材料的主要作用机制为激光等离子体冲击和热辐射<sup>[11,17]</sup>。

激光等离子体冲击和热辐射机理的原理如图 7 所示。当激光照射到漆层表面后, 漆层剧烈吸收能量, 如图 7(a) 所示。由于漆层的热导率很低, 热量在漆层表面不断积累, 漆层表面温度迅速升高, 达到漆层的熔点、沸点, 甚至超过燃点, 导致漆层瞬间发生汽化挥发或燃烧。凹坑上方较大区域内形成了大量蒸气, 蒸气中共存的大量电子、离子和激发的中性粒子吸收激光, 从而在漆层上方形成等离子体云, 如图 7(b) 所示。温度和压强极高的等离子体在激光辐射下产生的热辐射和冲击波向凹坑及周围区域传递, 使凹坑近表面漆层被去除, 如图 7(c) 所示。故, 与以烧蚀机制为主的模型结果相比, 在高能量密度下, 凹坑近表面的实际轮廓明显变宽, 凹坑直径明显增大。

以上机理分析与雷正龙、陈康喜、王佳敏等的实验研究结果一致。雷正龙等<sup>[18]</sup>使用高速摄像机观察  $1064 \text{ nm}$  纳秒激光除漆过程中的物理现象时发现, 在除漆过程中, 激光光斑周围有较强的等离子体, 并且有较大的漆层碎片飞溅。陈康喜等<sup>[19]</sup>基于发射光谱和成分分析研究了激光除漆机理, 结果发现脉冲激光对材料的损伤可分为热影响损伤和等离子体冲击损伤, 并将损伤区域分为等离子体冲击区和热影响区; 他们认为, 在高能量密度下, 激光与材料的主要作用机制为等离子效应, 等离子冲击可去除凹坑近表面材料, 使凹坑直径增大。王佳敏等<sup>[20]</sup>的研究表明, 随着激光能量密度增加, 等离子体的体积、电子密度不断增大, 电子温

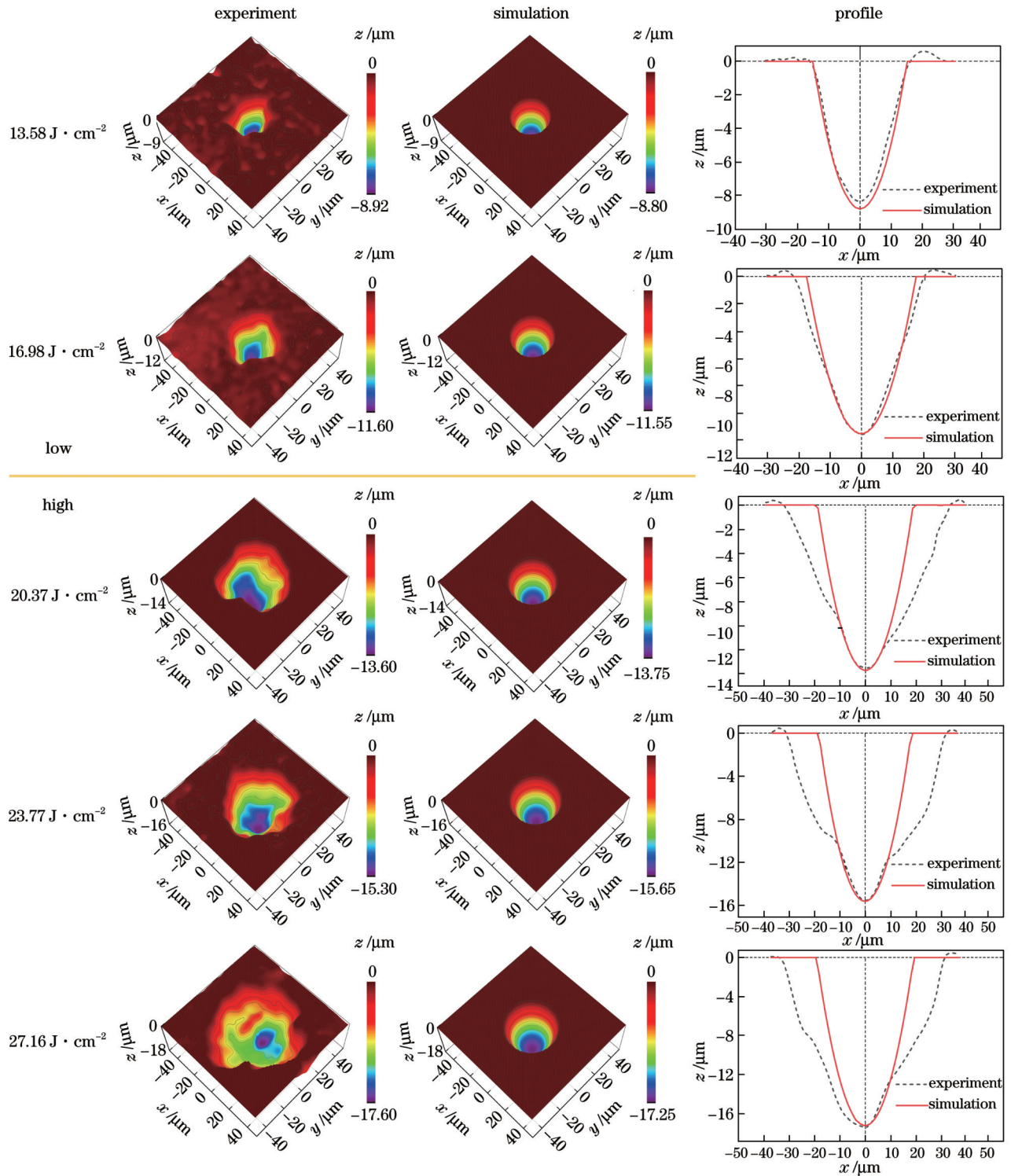


图 5 凹坑三维形貌和剖面轮廓的实验结果与模拟结果对比

Fig. 5 Comparison between experimental and simulated three-dimensional morphologies and profiles of crater

度不断升高,使得更大区域内的电子密度和电子温度达到油漆的损伤阈值,从而导致凹坑烧蚀面积增大。

## 5 模型修正与结果展示

### 5.1 模型修正

上述模型主要是基于热烧蚀机制建立的,无法反映激光等离子体冲击和热辐射对凹坑形貌的影响,这

也是高能量密度下凹坑直径误差较大(约为40%)的原因。为进一步实现除漆效果的精确控制,须对模型进行修正。

选取能量密度为  $27.16 \text{ J/cm}^2$  时所得的凹坑,利用3D轮廓仪测量其剖面数据,获得相应的  $d$  与  $F$  序列。将  $d$  与  $F$  序列进行拟合,拟合结果如图8所示。拟合得到的  $d$  与  $F$  之间的关系为

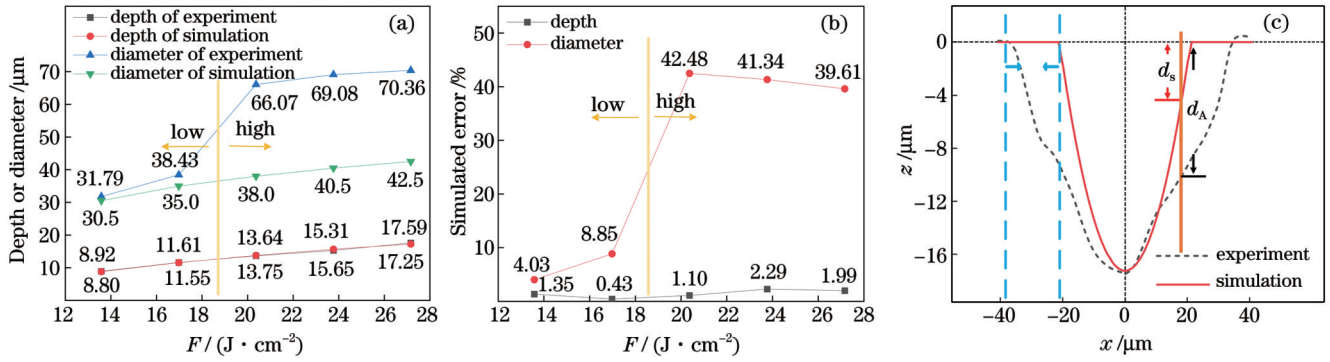


图 6 误差分析。(a)直径和深度对比；(b)直径和深度的误差；(c)剖面轮廓的对比分析图

Fig. 6 Error analysis. (a) Comparison of diameter and depth; (b) error in diameter and depth; (c) comparative analysis diagram of profiles

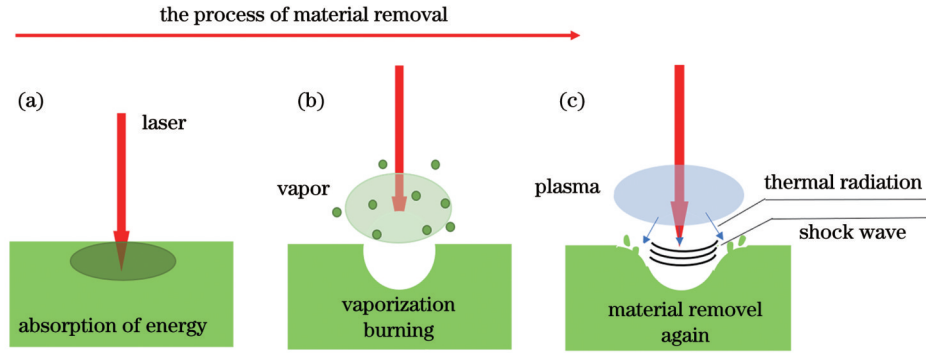


图 7 激光等离子体冲击和热辐射机制示意图。(a)吸收能量；(b)汽化与燃烧；(c)材料的再次去除

Fig. 7 Schematic of laser plasma shock and thermal radiation mechanism. (a) Absorption of energy; (b) vaporization and burning; (c) material removal again

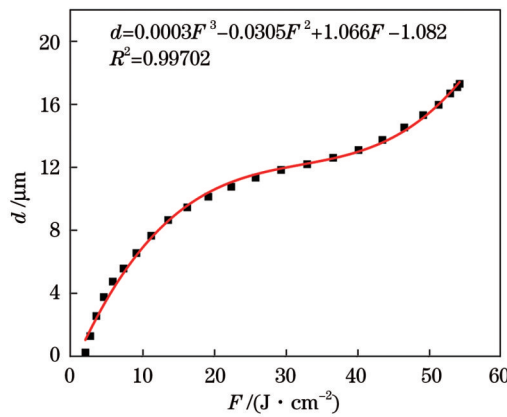


图 8 高能量密度下  $d$  与  $F$  的拟合结果

Fig. 8 Fitting result of  $d$  and  $F$  at high energy density

$$d = 0.0003F^3 - 0.0305F^2 + 1.066F - 1.082. \quad (11)$$

由式(11)可得到高能量密度下的初始清除阈值  $F_{th}$  为  $1.50 \text{ J/cm}^2$ 。此时,凹坑曲面方程  $H'(x, y)$  可以表示为

$$H'(x, y) = \begin{cases} 0, & F(x, y) \leq 1.50 \\ -0.0003 \cdot \left\{ \frac{2P}{f\pi\omega_0^2} \cdot \exp\left[\frac{-2(x^2 + y^2)}{\omega_0^2}\right] \right\}^3 - 0.0305 \cdot \left\{ \frac{2P}{f\pi\omega_0^2} \cdot \exp\left[\frac{-2(x^2 + y^2)}{\omega_0^2}\right] \right\}^2 + \\ 1.066 \cdot \frac{2P}{f\pi\omega_0^2} \cdot \exp\left[\frac{-2(x^2 + y^2)}{\omega_0^2}\right] - 1.082, & F(x, y) > 1.50 \end{cases}, \quad (12)$$

凹坑剖面方程  $H'(r)$  可表示为

$$H'(r) = \begin{cases} 0, F(x, y) \leq 1.50 \\ 0.0003 \cdot \left\{ \frac{2P}{f\pi\omega_0^2} \cdot \exp\left(\frac{-2r^2}{\omega_0^2}\right) \right\}^3 - 0.0305 \cdot \left\{ \frac{2P}{f\pi\omega_0^2} \cdot \exp\left(\frac{-2r^2}{\omega_0^2}\right) \right\}^2 + \\ 1.066 \cdot \frac{2P}{f\pi\omega_0^2} \cdot \exp\left(\frac{-2r^2}{\omega_0^2}\right) - 1.082, F(x, y) > 1.50 \end{cases} \quad (13)$$

式(12)和式(13)即为修正后凹坑形貌的数学模型。利用上述模型模拟高能量密度下的凹坑形貌,模拟结果将在 5.2 节进行展示并讨论。

为进一步分析凹坑的表面形貌,将式(12)和式(13)整理为

$$H'(x, y) = \begin{cases} 0, F(x, y) \leq 1.50 \\ a_1 \cdot \exp\left[\frac{-(x^2 + y^2)}{2c_1^2}\right] + a_2 \cdot \exp\left[\frac{-(x^2 + y^2)}{2c_2^2}\right] + a_3 \cdot \exp\left[\frac{-(x^2 + y^2)}{2c_3^2}\right] + b_1, F(x, y) > 1.50 \end{cases} \quad (14)$$

$$H'(r) = \begin{cases} 0, F(x, y) \leq 1.50 \\ a_1 \cdot \exp\left(\frac{-r^2}{2c_1^2}\right) + a_2 \cdot \exp\left(\frac{-r^2}{2c_2^2}\right) + a_3 \cdot \exp\left(\frac{-r^2}{2c_3^2}\right) + b_1, F(x, y) > 1.50 \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $a_1 = 0.0003 \cdot [2P/(f\pi\omega_0^2)]^3$ ;  $a_2 = -0.0305 \cdot [2P/(f\pi\omega_0^2)]^2$ ;  $a_3 = 1.066 \cdot 2P/(f\pi\omega_0^2)$ ;  $b_1 = -1.082$ ;  $c_1 = \sqrt{3} \omega_0/6$ ;  $c_2 = \sqrt{2} \omega_0/4$ ;  $c_3 = \omega_0/2$ 。对于固定的激光器参数,  $a_i, c_i, b_i (i=1, 2, 3)$  均为常数。从而,由

式(14)和式(15)可知凹坑表面可以看作是多个正态分布曲面的组合,凹坑截面可以看作是多个正态分布曲线的组合。

### 5.2 修正模型的模拟结果展示

图 9 为实际凹坑与修正模型模拟的凹坑的三维形

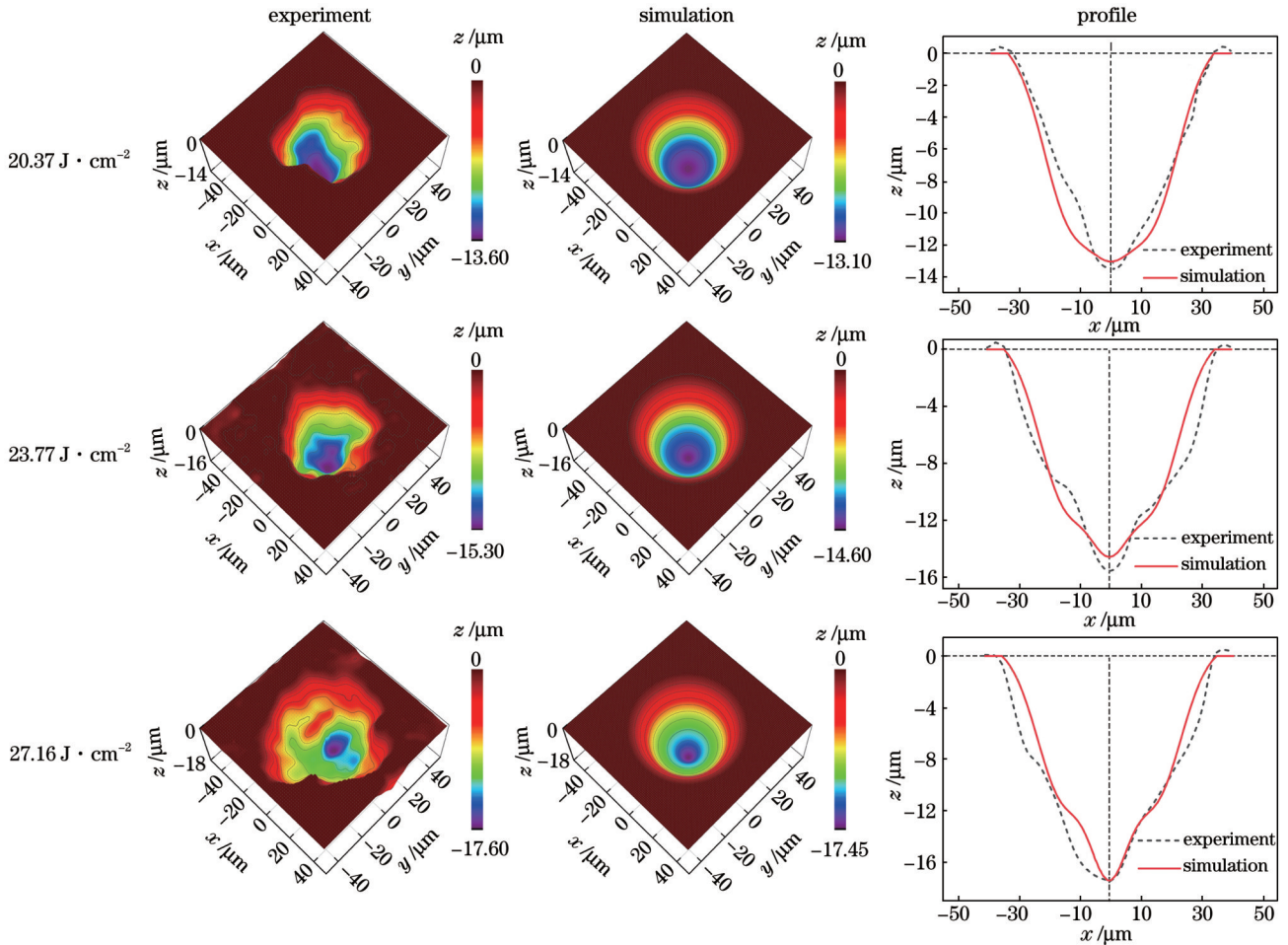


图 9 凹坑三维形貌和剖面轮廓的实验及修正模型模拟结果对比

Fig. 9 Comparison between experimental and corrected model simulated three-dimensional morphologies and profiles of crater

貌及剖面轮廓对比。如图 9 中的三维形貌图所示,实际与模拟的凹坑大小一致。由图 9 中剖面轮廓对比图可以看出,实际与模拟的凹坑轮廓吻合良好,而且凹坑的直径、深度误差均控制在 5% 以内。这一结果表明,基于等离子体冲击和热辐射机制对模型进行修正有效提高了模型的模拟精度,可为高能量密度下激光除漆效果的准确控制及参数优化提供参考。

## 6 结 论

基于烧蚀机制及实验采集的凹坑形貌数据进行初步建模,模型的模拟结果表明:凹坑表面近似为旋转抛物面,凹坑剖面轮廓近似为抛物线。实际与模拟凹坑直径、深度的对比验证结果表明:在所讨论的能量密度范围内,凹坑深度误差均可控制在 5% 以内,但高能量密度下凹坑直径误差可达 40%。针对模型误差进行分析后认为:高能量密度下,等离子体冲击和热辐射机制是直径误差的主要来源,该机制通过去除凹坑近表面周围漆层使凹坑直径增大,并使凹坑近表面轮廓变宽。基于等离子体冲击和热辐射机制对模型进行修正后,凹坑深度、直径的模拟误差均在 5% 以内。修正后的模型可为高、低能量密度下激光除漆过程的准确控制及除漆参数优化提供参考。

### 参 考 文 献

- [1] 张光星, 华学明, 李芳, 等. 激光除锈、除漆的研究与应用现状[J]. 热加工工艺, 2019, 48(18): 1-4, 8.  
Zhang G X, Hua X M, Li F, et al. Research and application status of laser de-rusting and de-painting[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(18): 1-4, 8.
- [2] 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.
- [3] 施曙东, 杜鹏, 李伟, 等. 1064 nm 准连续激光除漆研究[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0903001.  
Shi S D, Du P, Li W, et al. Research on paint removal with 1064 nm quasi-continuous-wave laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(9): 0903001.
- [4] Lim H S, Yoo J. FEM based simulation of the pulsed laser ablation process in nanosecond fields[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2011, 25(7): 1811-1816.
- [5] Lee J, Yoo J, Lee K. Numerical simulation of the nano-second pulsed laser ablation process based on the finite element thermal analysis[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(5): 1797-1802.
- [6] Wu Q, Wang J, Huang C Z, et al. Temperature evolution and material removal mechanisms in nanosecond-pulsed laser ablation of polycrystalline diamond[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2015, 229(8): 1357-1372.
- [7] 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: 29-45.  
Guo Z H. Numerical simulation and experimental research on nanosecond pulse laser paint removal[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020: 29-45.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Vasantgadkar N A, Bhandarkar U V, Joshi S S. A finite element model to predict the ablation depth in pulsed laser ablation[J]. Thin Solid Films, 2010, 519(4): 1421-1430.
- [11] 赵海朝, 乔玉林, 杜烟, 等. 能量密度对激光清洗铝合金漆层的影响及作用机理[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 131403.  
Zhao H C, Qiao Y L, Du X, et al. Effect and mechanism of energy density on the aluminum alloy paint cleaned by laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 131403.
- [12] 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.
- [13] Kumar M, Bhargava P, Biswas A K, et al. Epoxy-paint stripping using TEA CO<sub>2</sub> laser: determination of threshold fluence and the process parameters[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 46: 29-36.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 薛建伟, 吴灵锦, 石晓卫, 等. 9.3 μm 脉冲 CO<sub>2</sub> 激光牙硬组织消融特性研究[J]. 中国激光, 2022, 49(15): 1507001.  
Xue J W, Wu L J, Shi X W, et al. Study on the ablation characteristics of hard tooth tissue with 9.3 μm CO<sub>2</sub> laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(15): 1507001.
- [17] 刘世光, 孙树峰, 王萍萍, 等. 激光入射角度对去除 2024 铝合金表面油漆的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(15): 1514005.  
Liu S G, Sun S F, Wang P P, et al. Effect of laser incident angle on paint removal of 2024 aluminum alloy surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(15): 1514005.
- [18] 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.
- [19] 陈康喜, 冯国英, 邓国亮, 等. 基于发射光谱及成分分析的激光除漆机理研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(9): 2956-2960.  
Chen K X, Feng G Y, Deng G L, et al. Study on the mechanism of laser paint removal based on emission spectrum and composition analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(9): 2956-2960.
- [20] 王佳敏, 季艳慧, 梁志勇, 等. 532 nm 皮秒脉冲激光对单晶硅的损伤特性研究[J]. 中国光学, 2022, 15(2): 242-250.  
Wang J M, Ji Y H, Liang Z Y, et al. Damage characteristics of a 532 nm picosecond pulse laser on monocrystalline silicon[J]. Chinese Optics, 2022, 15(2): 242-250.



# Simulation of Crater Morphology of Paint at Laser Single Pulse

Yang Wenfeng<sup>1\*</sup>, Lin Dehui<sup>1</sup>, Zhong Mian<sup>1</sup>, Li Shaolong<sup>1</sup>, Qian Ziran<sup>1</sup>, Liu Guochun<sup>1</sup>,  
Cao Yu<sup>2</sup>, Xu Yi<sup>1</sup>, Li Guo<sup>1</sup>, Zhang Sai<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Civil Aircraft Composites Maintenance Research Center, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, Sichuan, China;*

<sup>2</sup>*Laser and Optoelectronic Intelligent Manufacturing Research Institute, Wenzhou University, Wenzhou 325035, Zhejiang, China*

## Abstract

**Objective** Understanding the crater morphology on the surface of a paint layer after a single laser pulse can effectively suppress the superposition effects of multiple laser parameters and the photothermal and photomechanical effects of a pulse overlap. This helps reveal the laser-material interaction mechanism and provides a basis for the optimization of laser parameters. In recent years, many scholars have simulated the morphology of craters on the surface of a paint layer with the help of finite element software after nanosecond pulsed laser action based on the ablation mechanism. The laser parameters are then optimized based on the simulation results. For nanosecond pulsed lasers, the main mechanism of the laser-material interaction varies at different energy densities (the main mechanism is the ablation mechanism at low energy density, and the plasma shock and thermal radiation mechanism at high energy density). The ablation mechanism, plasma shock, and thermal radiation mechanism have different effects on the morphology of the crater. This study aims to establish a model of the damage form and the removal process of the paint layer during a single pulse of a nanosecond laser under different energy densities, to reveal the differences in the influence of the laser-material mechanism on the morphology of craters under different energy densities, and to provide a reference for the precise control and parameter optimization of the paint removal effect at high and low energy densities.

**Methods** A nanosecond pulsed laser with a wavelength of 1064 nm and beam energy following a Gaussian distribution was applied to the epoxy primer surface. The diameter, depth, and three-dimensional morphology data of the craters on the surface of the paint layer were measured using a 3D optical surface profiler after the laser pulse. A simulation model of crater morphology was established based on the ablation mechanism and the fitting relationship between the depth ( $d$ ) of the craters and energy densities ( $F$ ). MATLAB was used to simulate the morphology of the craters in the energy density range of 13.58–27.16 J/cm<sup>2</sup>, and an experimental verification was carried out. Error analysis of the experimental and simulation results under a high density revealed the influence of the plasma shock and thermal radiation mechanism on the morphology of the crater. The model correction and experimental verification were carried out based on the plasma shock and thermal radiation mechanisms.

**Results and Discussions** The simulation model of crater morphology based on the ablation mechanism has an error of less than 5% for crater depth and diameter at a low energy density (13.58–16.98 J/cm<sup>2</sup>), less than 5% for crater depth error at a high energy density (20.37–27.16 J/cm<sup>2</sup>), and up to 40% for diameter error (Fig. 5). The error analysis shows that at a high energy density, the plasma shock and thermal radiation mechanisms are the main reason for the diameter error (Fig. 7). After the model was corrected based on the above analysis, the diameter and depth errors of the craters under a high energy density were controlled within 5%, which significantly improved the accuracy of the model (Fig. 9). The model shows that at a low energy density, the surface of the crater is approximately rotated paraboloid, and the profile of the crater is similar to a parabola; at a high energy density, the surface of the crater can be regarded as a combination of multiple normally-distributed surfaces, and the crater profile as a combination of multiple normal distribution curves.

**Conclusions** At different energy densities, differences in the laser-material mechanism are noted; the ablation mechanism at a low energy density and the laser plasma shock and thermal radiation mechanisms at a high energy density are the main interaction mechanisms. Differences in the laser-material interaction mechanisms cause damage to the paint layer. Compared to the ablation mechanism, the plasma shock and thermal radiation mechanisms lead to an increase in the amount of paint removed near the surface of the crater and a wider profile near the crater surface. A simulation model of crater morphology is established for different laser-material mechanisms, thereby effectively improving the model accuracy. The study results provide a reference for the accurate control of the laser paint removal process and the optimization of paint removal parameters under high and low energy densities.

**Key words** laser technique; laser paint removal; single pulse; crater morphology; simulation and verification