

# 激光清洗铝合金漆层的数值模拟与表面形貌

高辽远, 周建忠\*, 孙奇, 李华婷, 朱明, 郭召恒, 杨嘉年

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

**摘要** 采用 COMSOL Multiphysics 建立了纳秒脉冲激光清洗 2024 铝合金表面丙烯酸聚氨酯漆层的有限元模型, 分析了不同参数对激光清洗温度场和清洗深度的影响, 并进行了实验验证。结果表明: 扫描速度以搭接率的形式影响清洗效率, 扫描速度越慢, 清洗速率越小, 当搭接率为 50% 时具有合适的清洗效率; 随着激光能量密度增加, 漆层表面和基体表面的最高温度线性升高, 当激光能量密度达到  $25 \text{ J/cm}^2$  时, 激光辐照区域的漆层材料完全被去除, 铝合金基体的烧蚀深度为  $50 \mu\text{m}$ ; 在激光能量密度为  $25 \text{ J/cm}^2$ , 搭接率为 50% 的实验参数下, 基体表面沟槽峰谷高度为  $50.234 \mu\text{m}$ , 在此参数组合下可以获得良好的符合涂装工艺要求的表面。该结果可为研究纳秒脉冲激光清洗及其工艺参数的选择提供参考。

**关键词** 激光技术; 纳秒脉冲激光; 激光清洗; 2024 铝合金; 有限元模拟; 表面形貌

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0502002

## Numerical Simulation and Surface Morphology of Laser-Cleaned Aluminum Alloy Paint Layer

Gao Liaoyuan, Zhou Jianzhong\*, Sun Qi, Li Huating,

Zhu Ming, Guo Zhaocheng, Yang Jianian

School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

**Abstract** The finite element model for an acrylic polyurethane paint layer cleaned by a nanosecond pulsed laser on a 2024 aluminum alloy surface was established using COMSOL Multiphysics. The effects of different parameters on the laser cleaning temperature field and cleaning depth were analyzed, and the findings were verified by an experimental study. The results show that the scanning speed affects the cleaning efficiency in the form of an overlapping rate, where a low scanning speed corresponds to a reduced cleaning rate. A suitable cleaning efficiency is achieved with an overlapping rate of 50%. As the laser energy density increases, the maximum surface temperatures of the paint layer and the substrate increase linearly. When the laser energy density reaches  $25 \text{ J/cm}^2$ , the paint material in the laser irradiation region is completely removed and the ablation depth of the aluminum alloy substrate is  $50 \mu\text{m}$ . For a laser energy density of  $25 \text{ J/cm}^2$  and an overlapping ratio of 50%, the peak-to-valley height of the substrate surface groove is  $50.234 \mu\text{m}$ . Thus, a suitable surface that meets the coating process requirements can be obtained with these parameters. These results provide a reference for studying nanosecond pulse laser cleaning and for selecting appropriate process parameters.

**Key words** laser technology; nanosecond pulsed laser; laser cleaning; 2024 aluminum alloy; finite element simulation; surface morphology

**OCIS codes** 140.3390; 140.3538; 140.6810; 350.3390

## 1 引言

工程应用中常常要对飞机、高铁等蒙皮表面进行缺陷和疲劳裂纹检测, 因此需要去除蒙皮表面的

漆层<sup>[1]</sup>。传统的除漆方法, 如打磨、化学清洗、抛丸和喷砂等, 不仅耗时较长, 效率低下, 而且除漆后的表面质量难以控制, 容易对基体表面造成一定损伤, 给零部件的使用带来隐患<sup>[2]</sup>。激光清洗技术是一种

收稿日期: 2018-12-07; 修回日期: 2019-01-17; 录用日期: 2019-02-28

基金项目: 江苏省重点研发计划(产业前瞻与共性关键技术)项目(BE2017001-1, BE2017001-2)

\* E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

非机械接触式表面清洗技术,具有定位准确、可控性高及污染小等优点,在工业领域得到了越来越广泛的应用<sup>[3-6]</sup>。激光清洗技术主要利用高能激光束辐照漆层材料,使其在极短的时间内气化,最终达到清洗基体表面漆层的目的<sup>[7]</sup>。在激光清洗过程中,漆层和基体材料吸收激光能量后产生的温度场是影响除漆效果和表面质量的关键。但是,温度场的分布不易通过实验直接测量获得。因此,有限元分析方法成为研究激光清洗过程中激光工艺参数与材料相互作用关系的有效手段。

目前,已有部分学者对激光与材料的相互作用过程进行了有限元模拟。Marimuthu等<sup>[8]</sup>采用二维瞬态数值模拟方法建立了能够预测去除污染物所需的最佳脉冲数及激光功率的模型,并阐述了准分子激光清洗的机理。汤文辉等<sup>[9]</sup>采用光滑粒子流体动力学方法对激光辐照环氧树脂/金属铝双层靶的烧蚀效应进行了数值模拟,并得到了不同激光参数下靶材的温度场和烧蚀形貌。闫晓东等<sup>[10]</sup>利用COMSOL Multiphysics软件建立了移动纳秒脉冲激光烧蚀模型,讨论了移动速度对激光烧蚀深度的影响。刘彩飞等<sup>[11]</sup>利用ANSYS软件模拟了激光清洗过程的温度场,研究了不同时刻漆膜表面的温度场分布以及激光参量对漆膜表面温度场的影响。Lim等<sup>[12]</sup>基于热蒸发机理对单个纳秒脉冲激光烧蚀清洗过程进行了有限元模拟,并与实验结果进行比较,验证了参数变化对烧蚀过程的影响,重点讨论了激光脉冲辐照后烧蚀深度及其形状的差异。胡鹏<sup>[13]</sup>等模拟了采用不同占空比的重复频率脉冲激光辐照金属材料前后,金属材料表面的温升特性和烧蚀深度的变化规律,认为激光占空比和材料厚度均对烧蚀深度有一定影响,并认为重复频率脉冲激光更有利于金属材料的加热及烧蚀。赵伟娜等<sup>[14]</sup>模拟了高功率连续激光引起的烧蚀、热解及层间开裂行为,获得的热力损伤形貌、温度历程与实验结果吻合得较好。Yue等<sup>[15]</sup>利用ANSYS有限元软件模拟了时域矩形脉冲和高斯脉冲对锥形微槽结构进行激光清洗的温度场,并在此基础上对清洗阈值进行了预测。结果表明,矩形脉冲与高斯脉冲相比具有更高的清洗效率,在相同的激光参数下,侧壁处的清洗深度低于其他位置。上述研究主要针对单脉冲激光或连续激光与材料相互作用的温度场分布进行了数值模拟,并未涉及移动脉冲激光与清洗材料的相互作用。由于脉冲激光在清洗过程中以光斑叠加的方式向前移动,因此,前后光斑的搭接对材料热影

响的叠加是影响温度场分布的关键,同时,扫描速度和激光能量密度协同作用对清洗深度的影响也同样值得关注。

为了对纳秒脉冲激光清洗2024铝合金表面丙烯酸聚氨酯漆层过程中的温度变化规律进行系统分析,本文采用COMSOL Multiphysics软件建立了移动纳秒脉冲激光清洗的有限元模型,以探究激光参数(扫描速度、光斑搭接率、激光能量密度)对激光清洗温度场和清洗深度的影响,最后通过纳秒脉冲激光清洗实验对模拟结果进行验证,旨在为研究纳秒脉冲激光清洗及其工艺参数的选择提供参考依据。

## 2 激光清洗原理及理论模型

脉冲激光清洗试样表面漆层的原理如图1所示。激光经过光路后辐照于试样表面,除少量激光能量因热对流和热辐射而产生损失外,大部分激光能量瞬间被漆层材料吸收,在极短的时间内漆层材料温度快速升高至气化温度,漆层材料气化后从基体表面去除。影响激光清洗的因素众多,其实际的物理过程也十分复杂,因此在对其进行温度场模拟时做出如下假设:1)激光清洗过程中的所有材料为连续的且各向同性;2)激光作用于模型表面的吸收率恒定,不随时间而发生变化;3)不考虑激光清洗过程中生成的气态材料和等离子体对激光能量的吸收;4)不考虑材料表面受热变形的影响;5)漆层材料与基体间为完全热传导。

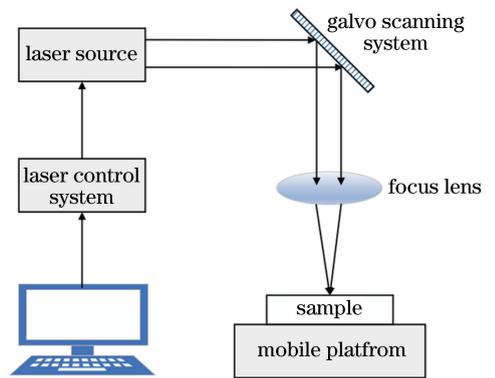


图1 激光清洗原理图

Fig. 1 Principle diagram of laser cleaning

激光清洗过程中的热传导过程遵循基于傅里叶定律和能量守恒的热传导方程,其在直角坐标系下的瞬态三维热传导控制方程<sup>[15]</sup>为

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

式中： $\kappa$  为材料的热传导系数； $T_s$  为材料的瞬时温度； $t$  为热传导时间； $\rho$ 、 $c$  分别为材料的密度和比热容。在下文的模拟中使用以下边界条件和初始条件<sup>[16-17]</sup>：

模型各边界的初始温度为

$$T|_r = T(t), \quad (2)$$

模型与边界的热对流为

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = h(T_f - T), \quad (3)$$

模型各边界处的热流密度为

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = q|_r, \quad (4)$$

模型各边界处的热辐射为

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = \sigma \epsilon (T_f^4 - T^4), \quad (5)$$

式中： $\Gamma$  为边界条件； $T$  为已知边界上的温度； $n$  为模型边界的外法线； $q$  为材料表面单位面积的热流密度； $h$  为模型与空气介质的对流换热系数； $\sigma$  为玻尔兹曼系数； $\epsilon$  为模型材料的辐射率； $T_f$  为初始温度，模拟初始温度为 25 °C。

模拟过程中使用高斯型能量分布的热源，热流密度在空间和时间上近似呈正态分布，移动的纳秒脉冲激光以热流密度的形式加载到材料表面，其功率分布函数<sup>[11]</sup>为

$$I(x, y, z, t) = \begin{cases} \alpha P (\pi R^2 \tau)^{-1} \cdot \exp\left[-2 \frac{(x - vt)^2 - y^2}{R^2}\right] \cdot \exp\left[-2 \frac{(t - \tau)^2}{\tau^2}\right], & (s - 1)t_p < t < (s - 1)t_p + \tau, \\ 0, & (s - 1)t_p + \tau < t < st_p \end{cases}, \quad (6)$$

式中： $I(x, y, z, t)$  为激光的功率密度 ( $\text{W}/\text{cm}^2$ )； $t$  为热源加载时间； $P$  为峰值激光功率 ( $\text{W}$ )； $R$  为激光光斑的半径 ( $\text{cm}$ )； $\alpha$  为材料表面对激光能量的吸收率； $\tau$  为激光脉冲的宽度 ( $\text{s}$ )； $t_p$  为脉冲激光的周期 ( $\text{s}$ )； $s$  为大于 1 的整数。

### 3 数值模拟

#### 3.1 有限元模型的建立

激光清洗试样的有限元模型如图 2 所示，模型包括尺寸为 5 mm×5 mm×2 mm 的 2024 铝合金基底和厚度为 100 μm 丙烯酸聚氨酯漆层。高速移动的脉冲激光沿  $x$  轴正向单道单次扫描试样，漆层材料在激光清洗过程中直接吸收激光能量，热量通过热传导的方式到达 2024 铝合金基体表面。选用三维模型对脉

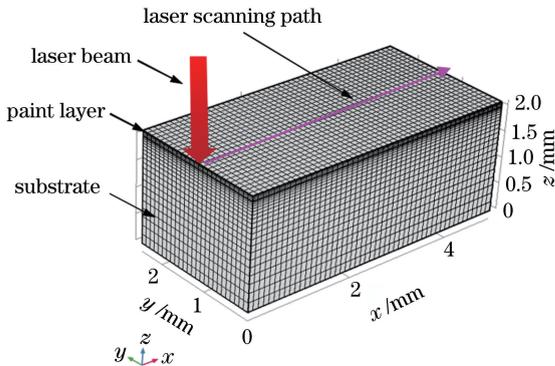


图 2 激光清洗试样的有限元模型及网格划分  
Fig. 2 Finite element model and meshing of laser cleaned samples

冲激光清洗过程进行模拟，由于激光直接作用区域的热流密度大，热梯度大，为了最大程度地提高模拟的精度，并有效节约计算资源，对模型进行渐变网格划分。其中，漆层区域的网格划分得最细。

模拟中用到的丙烯酸聚氨酯漆层和 2024 铝合金基体的热物性参数见表 1，丙烯酸聚氨酯的沸点为 141.5 °C，2024 铝合金的熔点范围为 500 ~ 635 °C。

表 1 丙烯酸聚氨酯和 2024 铝合金的热物性参数

Table 1 Thermophysical parameters of acrylic polyurethane and 2024 aluminum alloy

Parameter	Acrylic	2024
	polyurethane	aluminum alloy
Density / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1062	3900
Specific heat / ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ )	2152.8	900
Heat conductivity / ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ )	0.192	27
Melting point / °C	125	500-600
Boiling point / °C	141.5	

#### 3.2 加载和模拟

在激光清洗模拟中，利用 COMSOL Multiphysics 软件的固体传热接口将激光功率密度以广义向内热通量的形式加载至模型表面，并参数化定义激光参数和模型尺寸，对激光清洗温度场的分析属于瞬态分析，通过设置时间步，在不同时间不同位置加载激光热源，即可模拟出清洗表面的温度场。在后处理中，通过使用过滤器设置阈值逻辑表

达式,可显示材料去除后的温度场云图。

激光能量密度  $\psi$  (J/cm<sup>2</sup>) 的计算公式为

$$\psi = \frac{E}{S} = \frac{4E}{\pi D^2} = \frac{4P}{f\pi D^2}, \quad (7)$$

式中:  $E$  为单脉冲能量 (J);  $S$  为聚焦光斑面积 (cm<sup>2</sup>);  $P$  为激光平均功率 (W);  $f$  为重复频率 (kHz);  $D$  为光斑的直径 (cm)。

移动纳秒脉冲激光沿  $x$  正向单道单次扫描试样,参考前期激光预清洗实验及实验设备条件,设置激光平均功率为 10 W,光斑直径为 50  $\mu$ m,扫描速度为 2500 mm/s,激光重复频率为 100 kHz。根据激光能量密度计算公式可知模拟激光能量密度为 5 J/cm<sup>2</sup>,此时不同时刻丙烯酸聚氨酯表面的温度分布如图 3 所示。

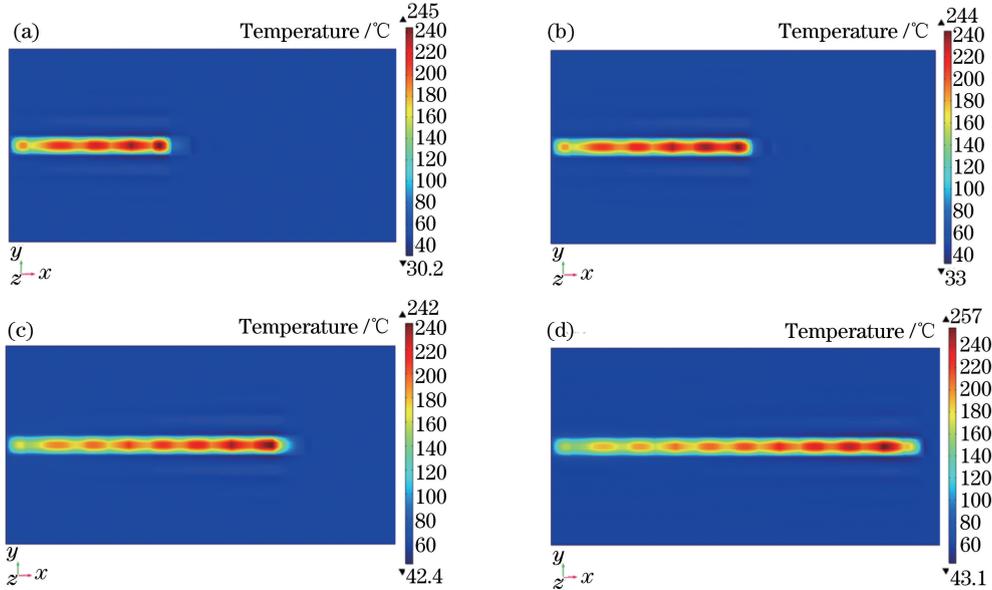


图 3 不同时刻丙烯酸聚氨酯漆层表面的温度场分布。(a)  $t=0.002$  s; (b)  $t=0.003$  s; (c)  $t=0.004$  s; (d)  $t=0.048$  s

Fig. 3 Surface temperature field distributions of acrylic polyurethane paint layer at different scanning moments.

(a)  $t=0.002$  s; (b)  $t=0.003$  s; (c)  $t=0.004$  s; (d)  $t=0.048$  s

由图 3 可以得到整个模型在激光清洗过程中温度场分布的动态变化过程,光斑中心区域的温度最高,越靠近边缘,温度越低,温度场符合高斯型分布。脉冲激光热源沿  $x$  方向高速移动,且由于脉冲激光加热材料具有急热骤冷的特点,在扫描路径上残留之前脉冲尚未冷却的温度场,故而每个脉冲形成的温度场以一定的搭接率连接。

丙烯酸聚氨酯漆层在高重复频率脉冲激光的辐照下,短时间内吸收大量的激光能量,温度迅速升高,热量遵循傅里叶定律经漆层传导至基体表面。图 4 所示为深度方向上的温度分布,通过设置过滤器将温度超过材料气化温度 (141.5  $^{\circ}$ C) 的单元屏蔽,可以看到部分漆层材料的温度已超过气化阈值,但接近基体表面的漆层材料温度尚未达到气化阈值,因此大部分丙烯酸聚氨酯油漆被去除,但仍有部分残留在基体表面,且基体表面不会产生熔融现象。

### 3.3 有限元模拟结果分析

#### 3.3.1 扫描速度对温度场分布的影响

脉冲激光在移动方向上的重复频率、扫描速度

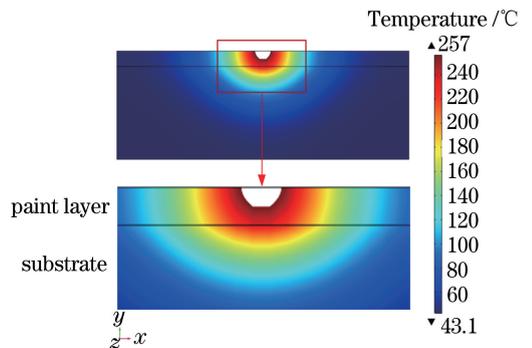


图 4 深度方向上的温度场分布

Fig. 4 Temperature field distributions in depth direction

与光斑直径之间的关系<sup>[18]</sup>为

$$\eta = 1 - \frac{v}{D \cdot f} \times 100\%, \quad (8)$$

式中:  $\eta$  为光斑搭接率;  $v$  为扫描速度。

从图 5(a)所示的温度场中可以看出,当扫描速度为 2500 mm/s,搭接率为 50% 时,多个脉冲激光的温度场通过叠加形成了条状分布,由于扫描速度较慢,因此热影响区较大,该参数下试样的最高温度

为 556 °C。由图 5(b)所示的温度场中可以看出,当扫描速度为5000 mm/s,搭接率为 0 时,光斑发生离散,热积累效应几乎消失,热影响区较小,该参数下

试样表面的最高温度为 466 °C,且在光斑之间的漆层没有受到激光能量的辐照,导致漆层材料无法完全清除。

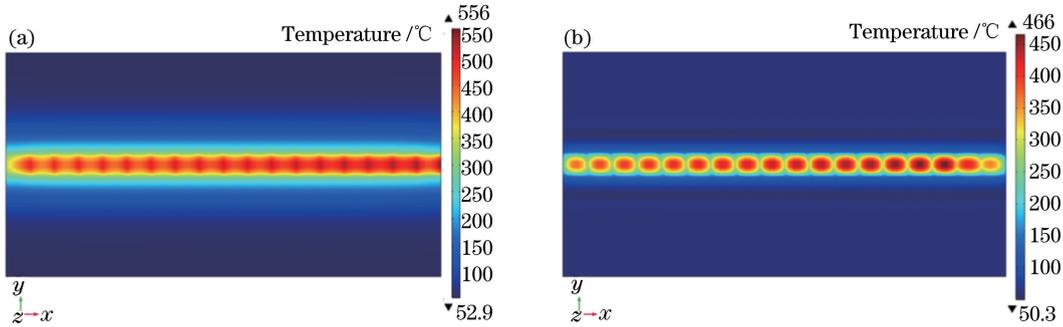


图 5 不同扫描速度下的温度场分布。(a)扫描速度 2500 mm/s,搭接率 50%;(b)扫描速度 5000 mm/s,搭接率 0  
Fig. 5 Temperature field distributions at different scanning speeds. (a) Scanning speed of 2500 mm/s and spot overlapping of 50%; (b) scanning speed of 5000 mm/s and spot overlapping of 0

当激光能量密度为 25 J/cm<sup>2</sup>,重复频率为 100 kHz,光斑直径为 50 μm 时,漆层表面和基体表面的最高温度随激光扫描速度的变化规律如图 6 所示。当扫描速度小于 2500 mm/s(光斑搭接率大于 50%)时,温度随着扫描速度的降低显著增大,这是由于搭接率在 50%左右时的搭接面积变化率较大,引起的热积累效应变化更加明显。当重复频率一定时,扫描速度越小,光斑搭接率越大,单位时间内有更多的脉冲激光辐照在试样表面,产生的热积累效应越显著,因此试样表面的温度越高。

达到 619 °C,如图 8 所示,基体表面的最高温度达到 509 °C,超过了 2024 铝合金的初熔温度 500 °C,此时基体表面会发生轻微的熔融现象;当激光能量密度为 30 J/cm<sup>2</sup>时,基体表面温度已接近完全熔融温度(635 °C),此时基体表面在激光作用区域已经产生较明显的熔融现象。随着激光功率继续增大,基体表面的烧蚀熔融现象越发严重。随着热流密度增大,激光作用区域吸收的激光能量增多,即当脉冲激光的光斑直径与重复频率一定时,随着激光能量密度增加,漆层表面和基体表面的最高温度随之线性升高。

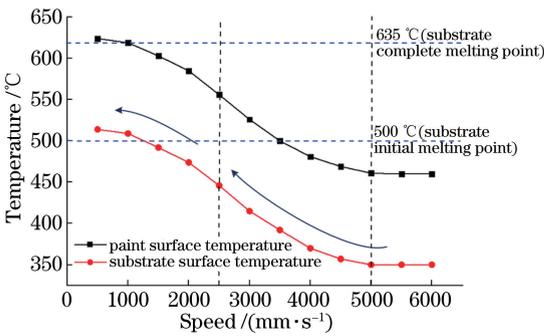


图 6 不同扫描速度下漆层表面和基体表面的最高温度曲线  
Fig. 6 Maximum surface temperature curves of paint layer and substrate at different scanning speeds

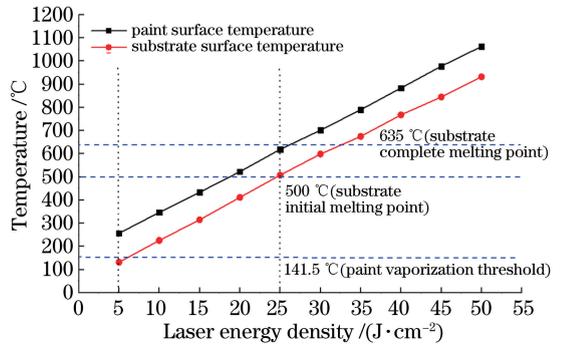


图 7 不同激光能量密度下漆层表面和基体表面的最高温度曲线

Fig. 7 Maximum surface temperature curves of paint layer and substrate at different laser energy densities

### 3.3.2 激光能量密度对温度场分布的影响

图 7 所示为激光扫描速度为 2500 mm/s,光斑搭接率为 50%时,漆层表面和基体表面最高温度随激光能量密度的变化规律。可知,当激光能量密度为 5 J/cm<sup>2</sup>时,漆层表面温度已超过其气化阈值,但基体表面温度尚未达到其熔化阈值,说明在该能量密度下,基体表面残留了部分未烧蚀的漆层材料;当激光能量密度为 25 J/cm<sup>2</sup>时,漆层表面的最高温度

### 3.3.3 激光能量密度对清洗深度的影响

在移动脉冲激光清洗过程中,单个脉冲的作用时间短,间隔时间较长,因此清洗深度由单个脉冲的能量密度决定,即清洗深度最大处位于单个脉冲温度场的截面处。图 9(a)~(d)所示为激光能量密度分别为 5, 15, 25, 40 J/cm<sup>2</sup> 时的激光清洗深度,可

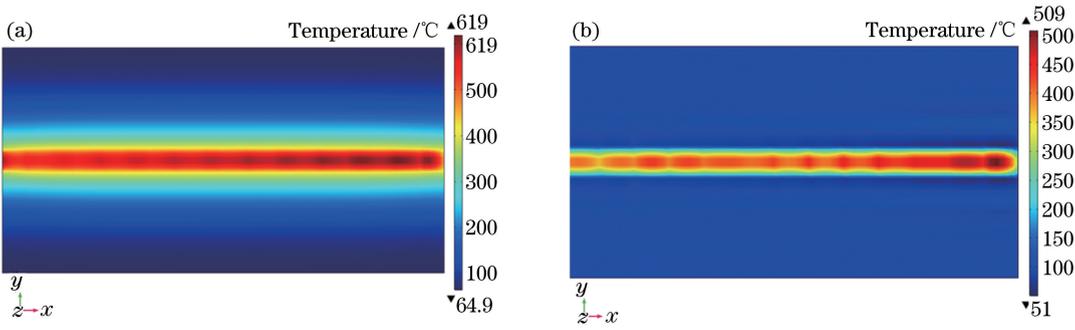


图 8 激光能量密度为  $25 \text{ J/cm}^2$  时的表面温度场分布。(a)漆层;(b)基体

Fig. 8 Surface temperature field distributions at laser energy density of  $25 \text{ J/cm}^2$ . (a) Paint layer; (b) substrate

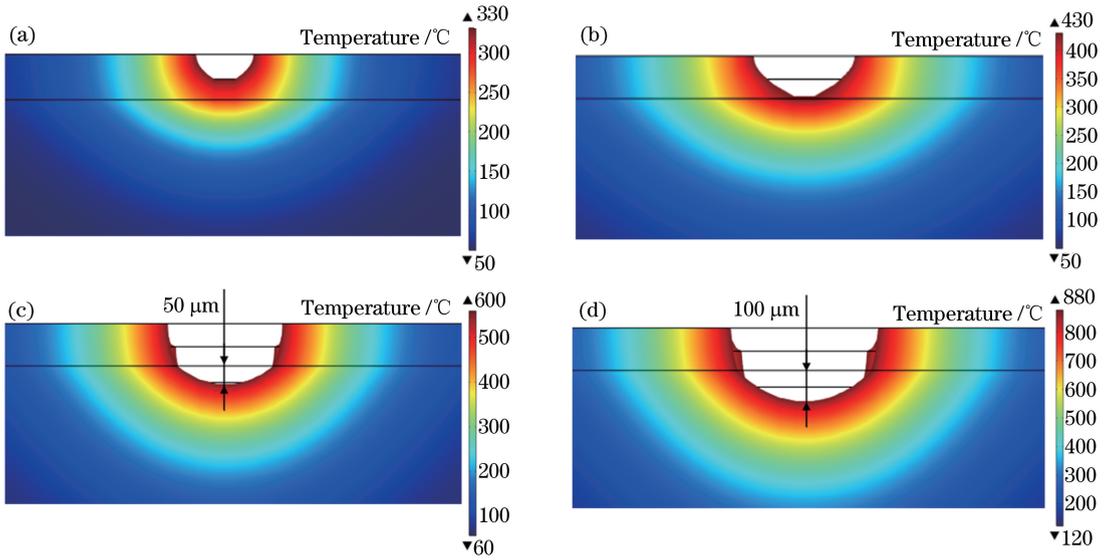


图 9 不同能量密度下的清洗深度。(a)  $5 \text{ J/cm}^2$ ; (b)  $15 \text{ J/cm}^2$ ; (c)  $25 \text{ J/cm}^2$ ; (d)  $40 \text{ J/cm}^2$

Fig. 9 Cleaning depths at different energy densities. (a)  $5 \text{ J/cm}^2$ ; (b)  $15 \text{ J/cm}^2$ ; (c)  $25 \text{ J/cm}^2$ ; (d)  $40 \text{ J/cm}^2$

见,当能量密度为  $5 \text{ J/cm}^2$  时,漆层材料未完全去除,铝合金基体表面残留有部分漆层材料;当能量密度为  $15 \text{ J/cm}^2$  时,清洗深度基本到达基体表面,但未能完全去除漆层材料;当能量密度为  $25 \text{ J/cm}^2$  时,光斑辐照范围内的漆层材料已完全去除,且铝合金基体的烧蚀深度为  $50 \mu\text{m}$ ;当能量密度为  $40 \text{ J/cm}^2$  时,基体的烧蚀深度达到  $100 \mu\text{m}$ 。由此可见,随着激光能量密度增大,漆层材料的去除量增多,当脉冲激光辐照范围内漆层材料完全被去除后,将烧蚀铝合金基体表面并产生微坑。

#### 4 激光清洗实验及结果分析

为了验证模拟结果的准确性,采用德国 Art Photonics 公司的 IPG-HP-100 脉冲式光纤激光器对 2024 铝合金表面漆层进行清洗实验,详细技术参数见表 2。试样采用尺寸为  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  的 2024 铝合金基体,其表面涂覆厚度为  $100 \mu\text{m}$  的

丙烯酸聚氨酯漆层。在上述模拟结果分析移动纳秒脉冲激光参数对材料表面温度场以及清洗深度影响的基础上,选择激光工艺参数如下:扫描速度为  $2500 \text{ mm/s}$ ,重复频率为  $100 \text{ kHz}$ ,搭接率为  $50\%$ ,激光能量密度为  $5 \sim 50 \text{ J/cm}^2$ ,光斑直径为  $50 \mu\text{m}$ 。激光清洗结束后,使用日本 Keyence 基恩士 VHX-600 超景深三维显微系统和 S-3400N 钨灯丝扫描电镜观察清洗后试样的表面形貌。

表 2 IPG-HP-100 脉冲式光纤激光器的技术参数

Table 2 Technical parameters of IPG-HP-100 pulsed fiber laser

Parameter	Value
Wavelength /nm	1064
Laser power /W	100
Pulse width /ns	100
Focused spot diameter / $\mu\text{m}$	50
Maximum scanning speed /( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	8000
Maximum repetition rate /kHz	100

#### 4.1 基体表面的三维形貌

通常情况下,在抛丸或喷砂除漆除锈后,钢材表面会形成一定的粗糙度,可提高再涂装漆膜的附着力。一般规定处理后的表面峰谷高度(PVH)应为 $40\sim 70\ \mu\text{m}$ ,最大不得超过 $100\ \mu\text{m}$ ,因为基体表面粗糙度过大会消耗过多的油漆,增大漆膜下形成气泡的可能性,甚至出现漆膜无法覆盖波峰的情况<sup>[19]</sup>。图10为采用不同能量密度的激光对铝合金表面进行清洗后试样表面的三维形貌,可见:采用能量密度为 $15\ \text{J}/\text{cm}^2$ 的激光清洗后,铝合金基体表面有少量凹凸不平的微坑,PVH为 $35.534\ \mu\text{m}$ ;采用能量密度为 $25\ \text{J}/\text{cm}^2$ 的激光清洗后,铝合金基体表

面形成了均匀的沟槽状形貌,且PVH为 $50.234\ \mu\text{m}$ ;采用能量密度为 $40,50\ \text{J}/\text{cm}^2$ 的激光清洗后,基体表面的PVH分别为 $103.045, 204.845\ \mu\text{m}$ 。由于沟槽的波峰出现不同程度的较严重的熔融现象,引起PVH增大,无法达到表面涂装工艺的要求。

通过实验发现,当激光能量密度为 $25\ \text{J}/\text{cm}^2$ ,扫描速度为 $2500\ \text{mm}/\text{s}$ ,重复频率为 $100\ \text{kHz}$ ,搭接率为 $50\%$ 时,铝合金基体表面的PVH为 $50.234\ \mu\text{m}$ ,这与模拟结果基本一致,符合涂装表面PVH在 $40\sim 70\ \mu\text{m}$ 范围内的要求,表明此参数组合可获得良好的符合涂装工艺要求的表面。

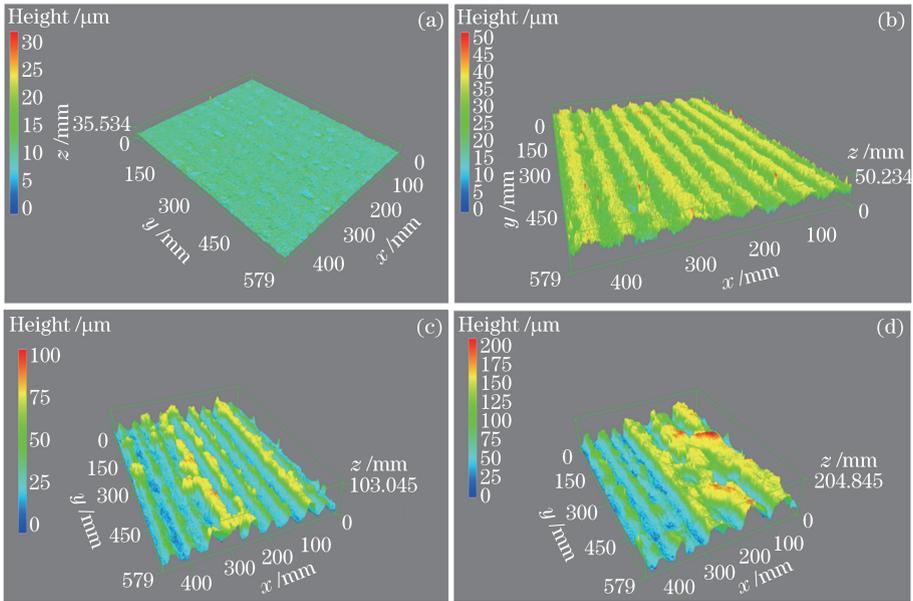


图10 不同能量密度的激光清洗后铝合金基体表面的三维形貌。(a)  $15\ \text{J}/\text{cm}^2$ ; (b)  $25\ \text{J}/\text{cm}^2$ ; (c)  $40\ \text{J}/\text{cm}^2$ ; (d)  $50\ \text{J}/\text{cm}^2$

Fig. 10 Three-dimensional surface topographies of aluminum alloy substrate after cleaning by laser with different energy densities. (a)  $15\ \text{J}/\text{cm}^2$ ; (b)  $25\ \text{J}/\text{cm}^2$ ; (c)  $40\ \text{J}/\text{cm}^2$ ; (d)  $50\ \text{J}/\text{cm}^2$

#### 4.2 基体表面的微观形貌

如图11所示为不同能量密度的激光清洗后铝合金基体的表面形貌,可见:当激光能量密度为 $5\ \text{J}/\text{cm}^2$ 时,基体表面留有一层丙烯酸聚氨酯漆层烧蚀后的残渣,此时为未完全清洗状态;当激光能量密度为 $15\ \text{J}/\text{cm}^2$ 时,在扫描路径上脉冲激光作用的中心区域被烧蚀成一个熔融的微坑,微坑尺寸并未达到光斑直径( $50\ \mu\text{m}$ ),这是由于高斯型热源的中心温度最高,使得铝合金基体部分材料达到最低熔点后产生轻微的熔融现象,在激光扫描路径两侧分布着少量的漆层材料残留碎屑,此时的清洗效果较好,但仍有漆层材料颗粒附着在基体表面,未完全清洗干净;当激光能量密度 $25\ \text{J}/\text{cm}^2$ 时,基体表面无残余的漆层材料,可以明显看到单个光斑烧蚀产生的

熔融边界与光斑直径相同,且在边界处有轻微飞溅的熔融物,这是由于激光作用期间整个光斑区域内的基体表面温度已达到铝合金的最低熔点;当激光能量密度为 $40\ \text{J}/\text{cm}^2$ 时,基体表面被完全烧蚀,呈熔融状态,可以明显观察到扫描路径两侧由于激光烧蚀而引起的熔融物飞溅以及激光扫描过后的凹槽。

先基于模拟结果分析移动纳秒脉冲激光参数对材料表面温度场的影响,在此基础上进行了相同参数的激光清洗实验,模拟和实验结果基本吻合,从而验证了所建立的有限元模型的合理性。

## 5 结 论

利用有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 建立了纳秒脉冲激光清洗 2024 铝合金表面丙烯酸

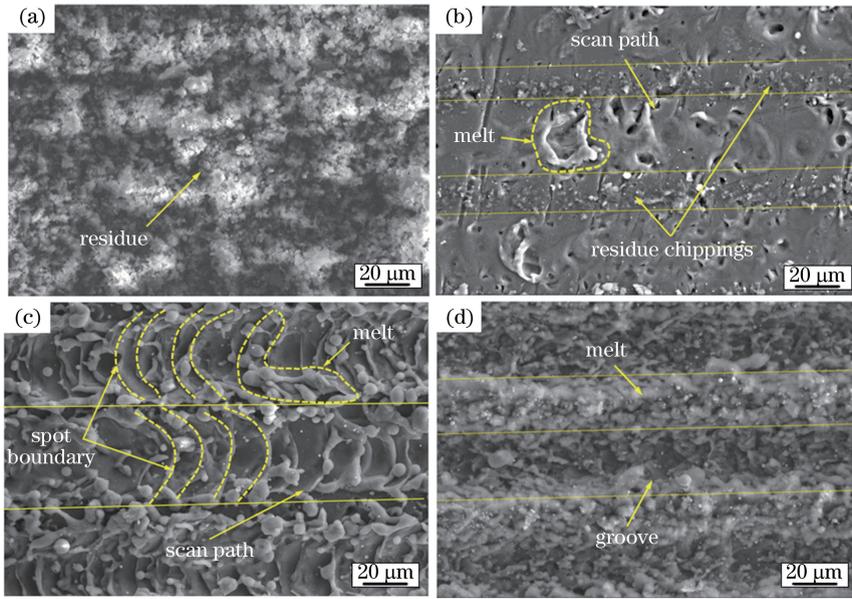


图 11 不同能量密度的激光清洗后铝合金基体的 SEM 图。(a) 5 J/cm<sup>2</sup>; (b) 15 J/cm<sup>2</sup>; (c) 25 J/cm<sup>2</sup>; (d) 40 J/cm<sup>2</sup>

Fig. 11 SEM images of aluminum alloy substrate after cleaning by laser with different energy densities.

(a) 5 J/cm<sup>2</sup>; (b) 15 J/cm<sup>2</sup>; (c) 25 J/cm<sup>2</sup>; (d) 40 J/cm<sup>2</sup>

聚氨酯漆层的有限元模型,实现了激光清洗过程温度场与位移场的同步可视化分析,研究了激光参数对激光清洗温度场和清洗深度的影响,并将纳秒脉冲激光清洗试样的表面质量与模拟结果进行对比,得到了以下结论:重复频率和光斑直径一定时,扫描速度以搭接率的形式影响清洗效率,扫描速度越慢,热积累效应越高,但清洗速率降低,搭接率为 50% 时具有合适的清洗效率;随着激光能量密度增加,漆层表面和基体表面的最高温度线性升高,当激光能量密度达到 25 J/cm<sup>2</sup> 时,激光辐照区域的漆层材料完全被去除,铝合金基体的去除深度为 50 μm。基于有限元模型分析结果可知,当使用能量密度为 25 J/cm<sup>2</sup>,搭接率为 50% 的激光清洗实验参数时,清洗后基体表面沟槽的 PVH 为 50.234 μm,此参数组合可获得良好的符合涂装工艺要求的表面。

### 参 考 文 献

[1] Yandouzi M, Gaydos S, Guo D, *et al.* Aircraft skin restoration and evaluation [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2014, 23(8): 1281-1290.  
 [2] Liu J P, Wang J, Mazzola L, *et al.* Development and evaluation of poly(dimethylsiloxane) based composite coatings for icephobic applications [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 349: 980-985.  
 [3] 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.

[4] 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.  
 [5] AlShaer A W, Li L, Mistry A. The effects of short pulse laser surface cleaning on porosity formation and reduction in laser welding of aluminium alloy for automotive component manufacture [J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 64: 162-171.  
 [6] Chen Y M, Zhou L Z, Yan F, *et al.* Mechanism and quality evaluation of laser cleaning of aluminum alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44 (12): 1202005.  
 陈一鸣, 周龙早, 闫飞, 等. 铝合金激光清洗机理与质量评估 [J]. *中国激光*, 2017, 44(12): 1202005.  
 [7] Lu Y F, Takai M, Komuro S, *et al.* Surface cleaning of metals by pulsed-laser irradiation in air [J]. *Applied Physics a Solids and Surfaces*, 1994, 59 (3): 281-288.  
 [8] Marimuthu S, Mhich A, Molchan I S, *et al.* Numerical simulation of excimer laser cleaning of film and particle contaminants [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2013, 135(12): 121301.  
 [9] Tang W H, Ran X W, Xu Z H, *et al.* Numerical simulation of high intensity laser ablation of materials [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2010, 27 (1): 32-34.  
 汤文辉, 冉宪文, 徐志宏, 等. 强激光对靶材烧蚀效应的数值模拟研究 [J]. *航天器环境工程*, 2010, 27 (1): 32-34.

- [10] Yan X D, Ren N, Tang F L, *et al.* Numerical simulation of movable nanosecond pulse laser etching of metal/polyimide[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0402001.  
闫晓东, 任妮, 汤富领, 等. 移动脉冲激光刻蚀金属/聚酰亚胺数值模拟[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0402001.
- [11] 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.  
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.
- [12] 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.
- [13] Hu P, Chen F L. Simulation of thermal effect in repetitive pulsed laser irradiation on metals [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(10): 1001006.  
胡鹏, 陈发良. 重复频率脉冲激光辐照金属材料热效应模拟分析[J]. 中国激光, 2016, 43(10): 1001006.
- [14] Zhao W N, Huang Y H, Song H W, *et al.* Multi-scale analysis model of thermal-mechanical damage effect in high-power continuous-wave laser irradiation of CFRP laminates[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0602003.  
赵伟娜, 黄亿辉, 宋宏伟, 等. 高功率连续激光辐照 CFRP 层合板热力破坏效应多尺度分析模型[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0602003.
- [15] Yue L Y, Wang Z B, Li L. Modeling and simulation of laser cleaning of tapered micro-slots with different temporal pulses [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45: 533-539.
- [16] Hu H P. Heat conduction theory[M]. Hefei: China University of Science and Technology Press, 2010.  
胡汉平. 热传导理论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010: 23-25.
- [17] Huang H C, Wang Q L. Finite element analysis of heat conduction[M]. Beijing: Science press, 2011.  
黄厚诚, 王秋良. 热传导问题的有限元分析[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 61-64.
- [18] Jasim H A, Demir A G, Previtali B, *et al.* Process development and monitoring in stripping of a highly transparent polymeric paint with ns-pulsed fiber laser [J]. Optics & Laser Technology, 2017, 93: 60-66.
- [19] Liu H W, Zhou Y M. Technology and application of optical fiber laser derusting of ship steel plates[J]. Marine Technology, 2016(6): 87-93.  
刘洪伟, 周毅鸣. 船用板材激光除锈应用技术[J]. 造船技术, 2016(6): 87-93.