

## 激光与光电子学进展

## 激光入射角度对去除 2024 铝合金表面油漆的影响

刘世光<sup>1</sup>, 孙树峰<sup>1\*</sup>, 王萍萍<sup>2,3</sup>, 张兴波<sup>1</sup>, 王津<sup>1</sup>, 王海涛<sup>1</sup>, 刘纪新<sup>3</sup><sup>1</sup>青岛理工大学机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266525;<sup>2</sup>青岛理工大学信息与控制工程学院, 山东 青岛 266525;<sup>3</sup>青岛黄海学院机电工程学院, 山东 青岛 266427

**摘要** 研究了激光不同入射角度对油漆去除深度、表面形貌与粗糙度的影响。通过改变激光束与样品的夹角完成不同角度的激光除漆试验,以 2024 铝合金为研究对象,检测分析表面油漆去除效果。相同条件下,油漆去除深度随激光入射角度的减小呈先增加后减小的趋势,当激光入射角为 70°时,达到最大油漆去除深度。在激光能量密度为 5 J/cm<sup>2</sup>时,激光入射角 70°相比于 40°情况下,油漆去除深度增加 160.57 μm,这种差值会随着油漆厚度的增加而更加显著。同时,激光入射角度会改变样品的表面粗糙度,当激光入射角为 70°时,获得最小的表面粗糙度,仅比初始表面粗糙度增大 0.438~0.812 μm。改变激光入射角可以降低烟羽在激光传输方向的长度与烟羽粒子浓度,减小激光能量损失。当激光能量密度为 0.5~2 J/cm<sup>2</sup>时,除漆机理主要是烧蚀效应,当激光能量密度大于 2 J/cm<sup>2</sup>时,则是烧蚀效应与热膨胀效应共同发挥作用。

**关键词** 激光光学; 激光除漆; 激光入射角度; 表面形貌; 油漆去除深度; 表面粗糙度; 2024 铝合金

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1714009

## Effect of Laser Incident Angle on Paint Removal of 2024 Aluminum Alloy Surface

Liu Shiguang<sup>1</sup>, Sun Shufeng<sup>1\*</sup>, Wang Pingping<sup>2,3</sup>, Zhang Xingbo<sup>1</sup>,  
Wang Jin<sup>1</sup>, Wang Haitao<sup>1</sup>, Liu Jixin<sup>3</sup><sup>1</sup>School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology,  
Qingdao 266525, Shandong, China;<sup>2</sup>School of Information and Control Engineering, Qingdao University of Technology,  
Qingdao 266525, Shandong, China;<sup>3</sup>School of Electromechanical Engineering, Qingdao Huanghai University, Qingdao 266427, Shandong, China

**Abstract** In this paper, the effects of different incident angles of laser on paint removal depth, surface morphology, and roughness are studied. By changing the angle between the laser beam and the sample, the laser paint removal test at different angles is completed, and the 2024 aluminum alloy is used as the research object to detect and analyze the surface paint removal effect. Under the same conditions, the paint removal depth increases first and then decreases with the decrease of the laser incident angle. When the laser incident angle is 70°, the maximum paint removal depth is reached. When the laser energy density is 5 J/cm<sup>2</sup>, the paint removal depth at the inflection point increases by 160.57 μm compared to 40°, and this difference increases as the paint thickness increases. In addition, the incident angle of the laser will alter the surface roughness of the sample. Similarly, the minimum surface roughness is obtained at 70°, which is increased by 0.438~0.812 μm when compared to the initial surface roughness. The laser incident angle can also reduce the length of the smoke plume in the laser transmission direction and the concentration of plume particles. When the laser energy density is 0.5~2 J/cm<sup>2</sup>, the paint removal mechanism is the main ablation effect, but when it exceeds 2 J/cm<sup>2</sup>, it becomes a combined effect of ablation and thermal expansion.

**Key words** laser optics; laser paint removal; laser incident angle; surface morphology; paint removal depth; surface roughness; 2024 aluminum alloy

收稿日期: 2021-08-18; 修回日期: 2021-09-06; 录用日期: 2021-09-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51775289)、高等学校学科创新引智计划(D21017)、山东省重点研发计划项目(2019GGX104097, 2019JZZY010402)、青岛西海岸新区 2020 年度科技源头创新专项项目(2020-103)

通信作者: \*shufeng2001@163.com

## 1 引言

油漆喷涂是工业领域中保护、装饰机器设备的常用方法,当油漆老化或对设备进行检查维修时需要去除油漆。除漆的质量与效果直接影响到设备的使用和性能。激光因具有方向性好、相干性高、亮度高等优点而广泛应用于激光打孔<sup>[1]</sup>、激光焊接<sup>[2]</sup>、激光熔覆<sup>[3]</sup>和激光清洗<sup>[4-5]</sup>等领域。激光清洗始于20世纪70年代,经过几十年的研究探索,激光清洗已经发展到可以除漆<sup>[6]</sup>、锈<sup>[7]</sup>、氧化物<sup>[8-9]</sup>、微细颗粒<sup>[10]</sup>等多种污染物。激光除漆更是在航空航天、交通运输、机械加工等领域得到广泛应用。

激光除漆是利用激光作用于油漆表面,经过一系列的物理化学反应,实现油漆从基体表面脱离的技术。相比传统的机械、化学除漆,激光除漆具有灵活可控、定位精确、绿色环保的优点。激光除漆的关键是不损伤基体表面且能高效准确地去除油漆。当前大多数研究主要集中于以下两个方面来提高除漆质量。一方面是调节激光功率<sup>[11-12]</sup>、能量密度<sup>[13-14]</sup>、光斑搭接率<sup>[15]</sup>、激光频率<sup>[16-17]</sup>等工艺参数改善除漆效果。Wan等<sup>[11]</sup>研究了激光功率对清洗机理和表面性能的影响,结果表明,90 W是最佳清洗功率,当激光功率为100 W时,基体表面有轻微的损伤。Zhu等<sup>[13]</sup>研究了不同能量密度对激光除漆后飞机蒙皮铆钉孔的微动摩擦磨损性能影响,证明了激光除漆不降低飞机蒙皮的硬度和耐腐蚀性能。Zhang等<sup>[15]</sup>探究了激光清洗工艺参数对5754级铝合金表面粗糙度的影响。结果表明,样品表面粗糙度与能量密度呈线性正相关,随光斑重叠率的增加先增大后减小。万壮等<sup>[16]</sup>探究了激光频率对激光干式清洗机理及表面性能的影响,结果表明,当激光脉冲频率为150 kHz时电化学耐腐蚀性最好。另一方面是优化激光除漆工艺,包括激光水射流清洗<sup>[18-19]</sup>、激光与溶剂结合清洗法<sup>[20-21]</sup>、改变激光除漆光源<sup>[22-24]</sup>、改善光斑形状<sup>[25]</sup>等。Madhukar等<sup>[18]</sup>提出一种水射流辅助激光除漆工艺,实现了一次性去除涂料。Hellen<sup>[20]</sup>初步研究了激光与溶剂两步法除漆。Zhou等<sup>[22]</sup>探讨了皮秒和100纳秒脉冲激光对铝合金表面清洗的影响,结果表明,相比纳秒激光,皮秒激光清洗能得到更高的表面质量。Hasegawa等<sup>[25]</sup>演示了线型飞秒脉冲激光剥离钢锡氧化膜。试验发现线型光束清洗效果更好、效率更高。然而关于改变激光入射角进行除漆的研究却鲜有报道,仅2000年, Lee等<sup>[26]</sup>通过改变试验中激光的入射角度,实现了激光去除金属表面微颗粒。

研究激光除漆的不同入射角度,对提高复杂形状表面的除漆质量有着重要意义。本文进行了不同激光入射角度去除2024铝合金表面油漆的试验研究,探究了不同激光入射角度对油漆去除深度、表面形貌和表面粗糙度的影响,结合试验结果分析了激光入射角度对除漆机理的影响,本文研究内容可以为改进激光除漆工艺与完善激光除漆机理提供参考。

## 2 试验设备与除漆机理

### 2.1 试验材料与设备

试验材料采用长宽高分别为30 mm×20 mm×3 mm的2024铝合金,其主要用于制作各种高负荷的零件和构件,但因为耐腐蚀性差需要采用涂漆的方法来提高其耐腐蚀能力。涂装油漆主要从两方面提高材料的耐腐蚀性,一方面是隔绝油漆外部的腐蚀性物质与材料接触,另一方面是油漆内部的防腐物质起到抑制腐蚀的作用。图1是试验材料的结构示意图,试验中油漆由底层黄色磷化底漆和顶层白色聚氨酯面漆组成,试验中采用共聚焦显微镜测得磷化底漆厚度为 $(80\pm 5)\mu\text{m}$ ,聚氨酯面漆厚度为 $(130\pm 5)\mu\text{m}$ ,因此油漆总厚度为 $(210\pm 10)\mu\text{m}$ 。

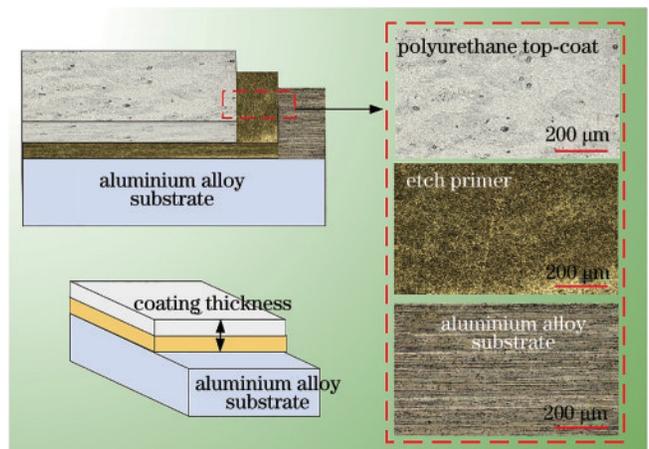


图1 2024铝合金表面油漆结构示意图

Fig. 1 2024 aluminum alloy surface paint diagram

如图2所示,采用光纤纳秒脉冲激光器进行试验,激光器输出光束经光纤传输到扩束与准直系统,经过振镜反射、聚焦透镜聚焦后照射到油漆表面。激光波长为1064 nm,脉冲宽度为100 ns,功率可调范围为2~200 W,激光脉冲频率可调范围为20~2000 kHz,扫描速度可调范围 $\leq 7000\text{ mm/s}$ 。激光扫描路径采用“Z”字形来回扫描,相邻两激光束间距为50  $\mu\text{m}$ 。试验中确保激光聚焦在油漆表面,激光束经过聚焦透镜后焦距为0.65 mm,聚焦光斑半径为33.9  $\mu\text{m}$ 。采用激光共聚焦显微镜(基士恩VK-X1000系列)进行表面形貌观测和油漆去除深度的测量,使用扫描电子显微镜和能谱分析仪(ZMISS公司Sigma300)进行微观形貌观测与除漆后基体表面元素分析。

采用激光干式除漆法清洗2024铝合金表面油漆,可倾斜平头钳带动样品倾斜保证激光束与样品的不同夹角。如图3(a)所示,样品水平放置时激光入射角为90°,随着样品的倾斜,夹角不断减小。如图3(b)所示,在试验中每块样品都划分等大小的若干区域进行不同参数的加工,每次加工区域长宽分别为5 mm×3 mm,每组参数重复3次以减少试验中出现的误差。

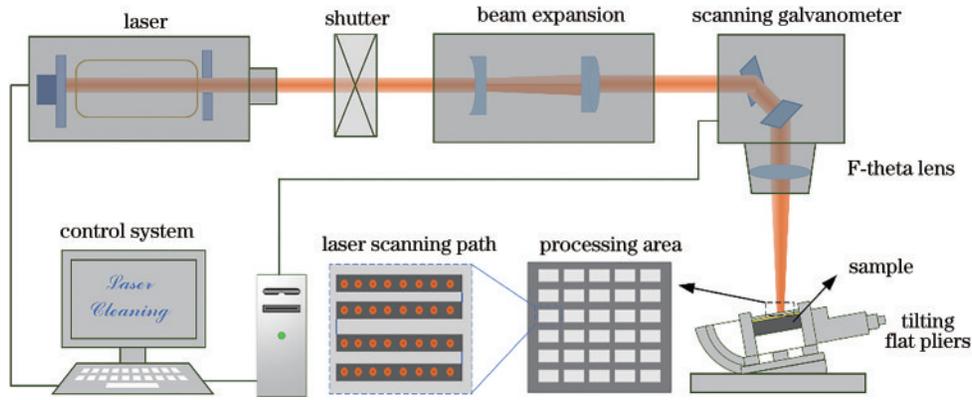


图 2 试验设备原理图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental equipment

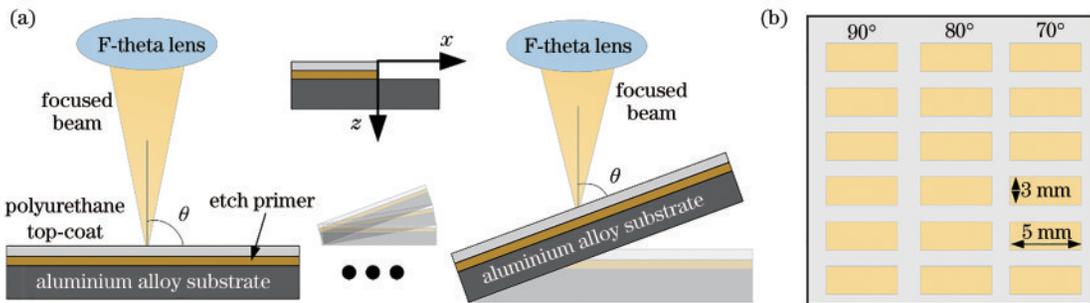


图 3 激光角度入射原理图。(a)不同激光入射角示意图;(b)加工区域划分图

Fig. 3 Schematic diagram of laser angle incidence. (a) Schematic diagram of different laser incidence angles;

(b) processing area division diagram

### 2.2 除漆原理

为了保证激光除漆的高效性,油漆应该有效地吸收激光能量。激光照射到油漆表面的能量主要分为三部分:表面反射、油漆吸收、透射到油漆内部。油漆是一种介电材料,它们不像金属材料那样有相对自由的电子,也不是所有波长的激光辐射都可以吸收,通常在红外和近紫外辐射中分别存在吸收带<sup>[27-28]</sup>。除了激光波长以外,激光脉冲宽度对油漆去除机制也至关重要。纳秒激光除漆主要靠热膨胀效应与烧蚀效应。当脉冲激光能量被油漆和基体吸收时,油漆和基体两者都发生快速热膨胀,产生一个热膨胀力抵消油漆与基体的附着力,从而导致油漆去除。根据潜在机制不同烧蚀效应可以分为两种类型。一种是光热烧蚀,油漆电子吸收光能,电子通过吸收光子能量迅速升高表面温度,电子碰撞并将能量转移到晶格中,电子晶格松弛导致电子能量损失,吸收的能量转化为热量,从而提高了局部的温度,导致物质相变,熔化或气化,甚至电离。当激光照射吸收的光子能量足以打破油漆材料化学键时,就会发生光化学烧蚀,此时会产生各种物质,从团簇或碎片到分子和离子随机从表面飞溅出来<sup>[29]</sup>。高温等离子体的高速膨胀,在油漆表面产生强烈的反冲击压力,这可能导致油漆断裂和破碎,并将其从基体中剥离出来。因此机械应力可以由热膨胀产生的热弹性应力引起,也可以由光化学烧蚀

的中低产物产生的体积增加引起。总之,激光除漆过程相当复杂,包括热膨胀、气化、挥发、燃烧和烧蚀等各种机制<sup>[28]</sup>。

根据文献中报道的各种试验结果,烧蚀速率与激光通量的关系如图4<sup>[30]</sup>所示,烧蚀速率随激光通量变化可分为低、中、高三块区域。在低通量范围内,热降解、蒸发和烧蚀是除漆的主要机制。在中通量范围内,较短的激光脉冲持续时间和较高的激光能量密度条件下,烧蚀速率的斜率较高,这是由于聚合物更有效地分解以及可忽略热传导损失,聚合物放

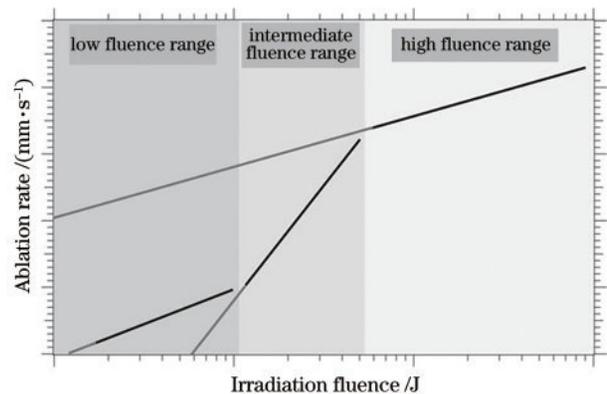


图 4 烧蚀速率与激光通量的关系示意图<sup>[30]</sup>

Fig. 4 Schematic of relationship between ablation rate and laser flux<sup>[30]</sup>

热分解释放的能量也能提高烧蚀速率。在高通量范围内,入射激光束被固体和气体的烧蚀产物以及激光产生的等离子体屏蔽,将对烧蚀效率产生不利影响<sup>[18, 30]</sup>。

描述聚合物烧蚀的主要参数是烧蚀速率 $d_F$ ,定义为每个脉冲在激光能量 $F$ 下的材料去除厚度。根据朗伯定律,激光强度在材料内部沿深度 $z$ 衰减传播。

$$I(z) = (1 - R)I_0 \exp(-Az), \quad (1)$$

式中: $I_0$ 和 $I(z)$ 分别表示激光入射到表面与深度 $z$ 处的激光强度; $R$ 表示表面反射率; $A$ 表示材料对激光的有效吸收系数。激光能量被油漆吸收,从而提高油漆的温度,由于纳秒激光作用时间短,激光能量的传播深度与激光光斑尺寸相比要小很多,并且假设在激光照射

过程中材料的物理性质不变,因此将激光作为一种表面热源进行温升计算,且假设材料为同性均匀材料(材料密度为 $\rho$ ,材料比热容为 $C$ ,材料热导率为 $K$ ),则一维热传导方程<sup>[31]</sup>可以表示为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{\alpha_t} \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

式中: $T$ 表示油漆表面温度; $\alpha_t = \frac{K}{\rho C}$ 表示热扩散率; $z$ 和 $t$ 分别表示激光除漆时热传递深度和激光作用时间。若能满足边界条件,当 $z \rightarrow \infty$ 时, $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$ ,当 $t = 0$ 时, $T = T_0$ ,并且假设激光在试验过程中光斑均匀分布且平均功率恒定不变,则可得解析式<sup>[32]</sup>为

$$T(z, t) = \begin{cases} T_0 + \frac{2P(1-R)}{KS} \left\{ \sqrt{\alpha_t t} \cdot \text{ierfc} \left[ \frac{z}{2\sqrt{\alpha_t t}} \right] \right\}, & t \leq t_p \\ T_0 + \frac{2P(1-R)}{KS} \left\{ \sqrt{\alpha_t t} \cdot \text{ierfc} \left[ \frac{z}{2\sqrt{\alpha_t t}} \right] \right\} - \frac{2P(1-R)}{KS} \left\{ \sqrt{\alpha_t (t-t_p)} \cdot \text{ierfc} \left[ \frac{z}{2\sqrt{\alpha_t (t-t_p)}} \right] \right\}, & t > t_p \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $t_p$ 表示激光脉冲宽度; $S$ 表示激光光斑面积; $P$ 表示激光平均功率; $T_0$ 为油漆初始温度;ierfc为互补误差函数。当温度超过烧蚀阈值 $T_{th}$ (热降解和烧蚀开始时的阈值)时,油漆将从表面被烧蚀,则烧蚀速率 $d_F$ <sup>[18]</sup>表示为

$$d_F = \frac{[(1-R)I_0 t_p]}{\rho C T_{th}} = \frac{F}{\rho C T_{th}}. \quad (4)$$

根据式(4)可以得出,在材料密度 $\rho$ 、材料比热容 $C$ 、烧蚀阈值 $T_{th}$ 保持不变的情况下,烧蚀速率 $d_F$ 与激光能量 $F$ 呈线性正相关。激光能量越高油漆烧蚀越快,油漆去除深度逐渐增加。在已知油漆去除深度受激光能量高低影响的基础上,本文探究了激光入射角度对油漆去除深度的影响。

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 激光入射角度对油漆去除深度的影响

首先进行了激光入射角度和激光能量密度对油漆去除深度的影响研究。试验中采用激光能量密度为2~5 J/cm<sup>2</sup>、扫描速度为1000 mm/s、扫描次数为10次、脉冲频率为200 kHz、填充间距为0.06 mm的激光工艺参数。图5(a)表示激光入射角度对油漆去除深度的影响变化规律,可以看出油漆的去除深度随着激光能量密度的增加而逐渐增加,从2 J/cm<sup>2</sup>时只有十几微米的去除深度增加到5 J/cm<sup>2</sup>时的一百多微米,油漆去除深度随着激光能量密度的增大而明显增加。不同激光入射角度时,油漆去除深度呈先增加后减小的趋势,在激光入射角70°时达到油漆去除深度的最大

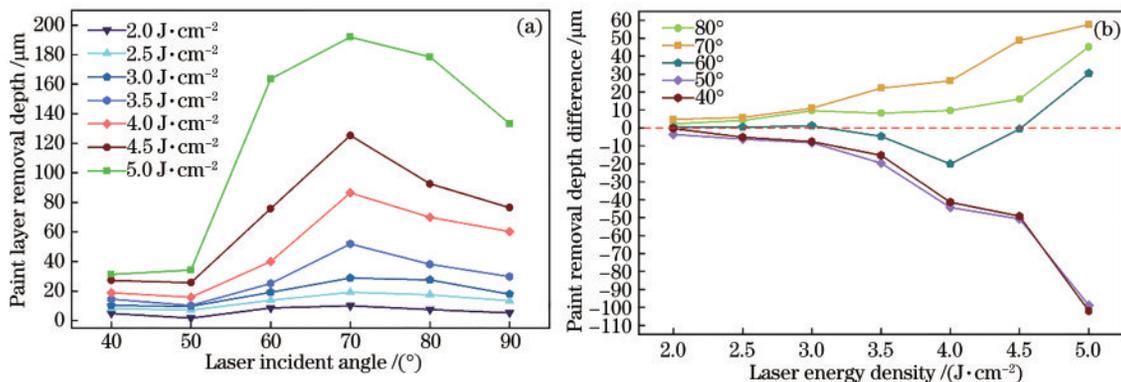


图5 油漆去除深度变化规律。(a)不同激光入射角度下的油漆去除深度;(b)各角度与垂直入射时的油漆去除深度对比  
Fig. 5 Change law of paint removal depth. (a) Paint removal depth at different laser incidence angles; (b) comparison of paint removal depth at various angles and at normal incidence

值。当激光能量密度  $5 \text{ J/cm}^2$ ，激光入射角  $70^\circ$  时，得到最大去除深度为  $191.867 \mu\text{m}$ ，当激光入射角  $40^\circ$  时，去除深度仅有  $31.3 \mu\text{m}$ 。图 5(b) 表示激光不同入射角度的油漆去除深度减去激光垂直入射时油漆去除深度的差值变化规律。红色虚线以上表示比激光垂直入射时油漆去除深度大，红色虚线以下表示比激光垂直入射时油漆去除深度小。在激光能量密度低于  $3.5 \text{ J/cm}^2$  时，不同激光入射角度的油漆去除深度差值变化较小。当激光能量密度高于  $3.5 \text{ J/cm}^2$  后，不同激光入射角度的油漆去除深度差值增大。试验中油漆去除深度最大差值是在激光能量密度  $5 \text{ J/cm}^2$  时，激光入射角  $70^\circ$  相比垂直入射时的油漆去除深度增加  $57.73 \mu\text{m}$ 。激光入射角  $40^\circ$  相比垂直入射时的油漆去除深度减少  $101.97 \mu\text{m}$ 。在能量密度  $4.0 \text{ J/cm}^2$ ，激光入射角  $60^\circ$  条件下，图形出现明显拐点，分析试验现象可知，当能量密度高于  $4.0 \text{ J/cm}^2$  后，油漆燃烧火焰增大，说明此时激光能量进入中通量范围，烧蚀速率明显加快，更多的油漆被烧蚀去除，因此油漆去除深度加深，图形出现拐点。受限于样品表面的油漆厚度，激光能量密度只试验到  $5 \text{ J/cm}^2$ 。综上可知，改变激光入射角度会改变油漆的

去除深度。在实际应用中，如果油漆层较厚，则建议采用  $70^\circ$  激光入射角度进行油漆去除，可以节约激光能量，提高清洗效率。

图 6 表示能量密度为  $4.5 \text{ J/cm}^2$ 、扫描速度为  $1000 \text{ mm/s}$ 、扫描次数为 10 次、脉冲频率为  $200 \text{ kHz}$ 、填充间距为  $0.06 \text{ mm}$  时，不同激光入射角度的样品三维形貌图，从图 6 可以看出：激光入射角度不同，油漆去除厚度也随着变化。分析试验现象可知，激光干式除漆主要是激光在极短时间内直接照射油漆，造成油漆瞬间气化冷却，冷却后的油漆颗粒重新凝固在水平放置的样品表面，在倾斜一定角度后冷却油漆颗粒在重力作用下脱离样品表面。激光聚焦存在区域性，若激光入射角度过大，则导致照射到油漆表面的激光强度  $I_0$  减小，由式(1)可知， $I_0$  减小激光强度  $I(z)$  降低，根据朗伯定律，激光在材料内部衰减传播，激光强度降低会造成激光能量传播距离缩短，出现去除深度不够、清洗效果差等现象。因此激光入射角度选择  $70^\circ$  左右既可保证冷却的油漆颗粒不会留在样品表面，且又有足够激光能量可以烧蚀油漆。因此在相同的能量密度下，采用  $70^\circ$  激光入射角度会有更高的除漆效率。

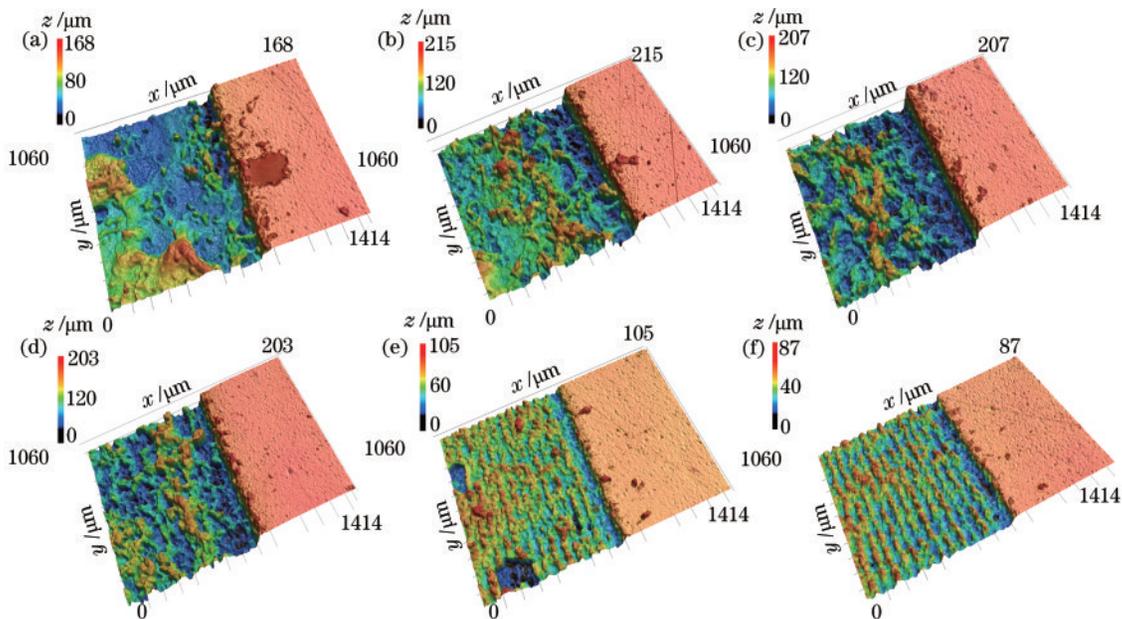


图 6 能量密度  $4.5 \text{ J/cm}^2$ ，不同激光入射角度时样品三维形貌图。(a)  $90^\circ$ ；(b)  $80^\circ$ ；(c)  $70^\circ$ ；(d)  $60^\circ$ ；(e)  $50^\circ$ ；(f)  $40^\circ$

Fig. 6 Three-dimensional morphology of the sample at different laser incidence angles, when energy density is  $4.5 \text{ J/cm}^2$ . (a)  $90^\circ$ ; (b)  $80^\circ$ ; (c)  $70^\circ$ ; (d)  $60^\circ$ ; (e)  $50^\circ$ ; (f)  $40^\circ$

### 3.2 激光入射角度对表面形貌的影响

表面洁净度是衡量激光除漆质量的重要指标之一。在进行样品表面形貌与粗糙度检测时需要保证基体无残留油漆，采用扫描电子显微镜与能谱分析仪进行基体微观形貌观测与元素分析。图 7 表示激光入射角度为  $90^\circ$ ，激光能量密度分别为  $5 \text{ J/cm}^2$ 、 $6 \text{ J/cm}^2$  时，样品表面元素分布以及微观形貌图。当激光能量密度为  $5 \text{ J/cm}^2$  时，样品表面主要元素为碳元素，碳元素均匀分布在样品表面，说明此时清洗效果不佳，表面布满

熔融冷却的油漆。当激光能量密度为  $6 \text{ J/cm}^2$  时，铝元素为含量最多的元素，基本符合铝合金化学成分组成，从微观形貌图可以看出，基体表面比较平整，但虚线区域有油漆颗粒残留。因此为保证油漆去除干净，需要更高的激光能量密度。

采用激光能量密度为  $7 \text{ J/cm}^2$ 、扫描速度为  $1000 \text{ mm/s}$ 、脉冲频率为  $200 \text{ kHz}$ 、扫描次数为 10 次的加工参数进行激光除漆，并采用共聚焦显微镜观测除漆后样品表面形貌。图 8 表示不同激光入射角度除漆后

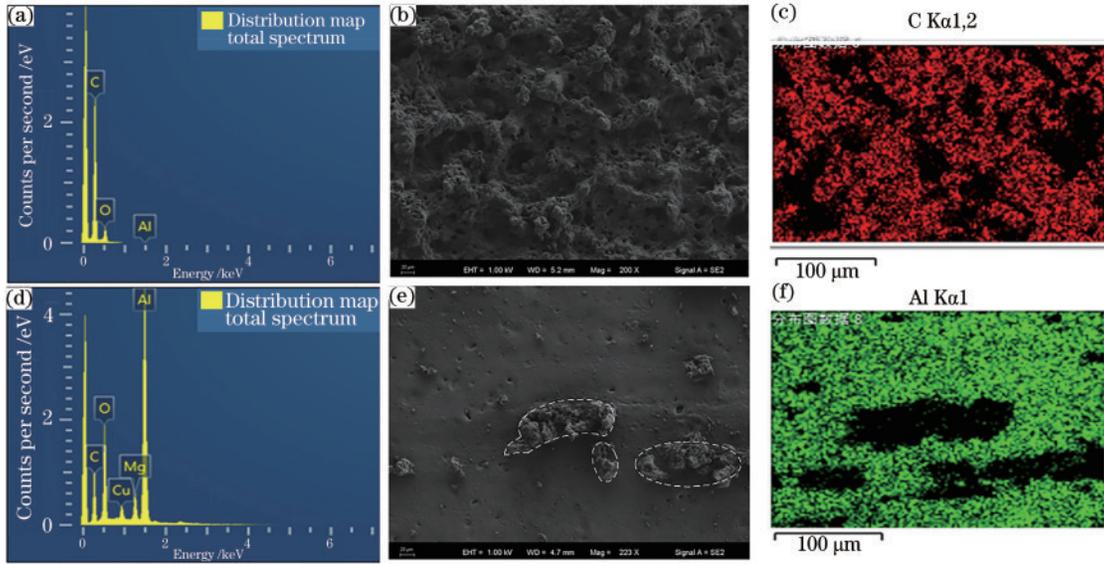


图 7 激光能量密度分别为  $5 \text{ J/cm}^2$ 、 $6 \text{ J/cm}^2$  时, 样品表面的能谱分析与微观形貌图。(a)  $5 \text{ J/cm}^2$  能谱分析图; (b)  $5 \text{ J/cm}^2$  微观形貌图; (c)  $5 \text{ J/cm}^2$  碳元素分布图; (d)  $6 \text{ J/cm}^2$  能谱分析图; (e)  $6 \text{ J/cm}^2$  微观形貌图; (f)  $6 \text{ J/cm}^2$  铝元素分布图

Fig. 7 Energy spectrum analysis and micromorphology of sample surface, when laser energy density is  $5 \text{ J/cm}^2$  and  $6 \text{ J/cm}^2$ , respectively. (a) Energy spectrum analysis diagram at  $5 \text{ J/cm}^2$ ; (b) microtopography at  $5 \text{ J/cm}^2$ ; (c) carbon distribution map at  $5 \text{ J/cm}^2$ ; (d) energy spectrum analysis diagram at  $6 \text{ J/cm}^2$ ; (e) microtopography at  $6 \text{ J/cm}^2$ ; (f) aluminum distribution diagram at  $6 \text{ J/cm}^2$

的样品表面形貌图, 当激光入射角为  $40^\circ \sim 50^\circ$  时, 表面仍有清晰可见的熔融油漆残留。从图 8 可以看出, 当激光入射角为  $60^\circ \sim 90^\circ$  时, 表面无油漆残留, 实现了油漆的完全去除。样品表面形貌均呈现高低起伏的沟壑状, 因此

改变激光入射角不会影响样品的表面形貌。试验中采用的光纤纳秒激光器, 输出光束为类高斯光束。能量分布呈现中间高、边缘低的特点。因此完全去除油漆后, 能量高的区域将会对基体造成一定损伤。

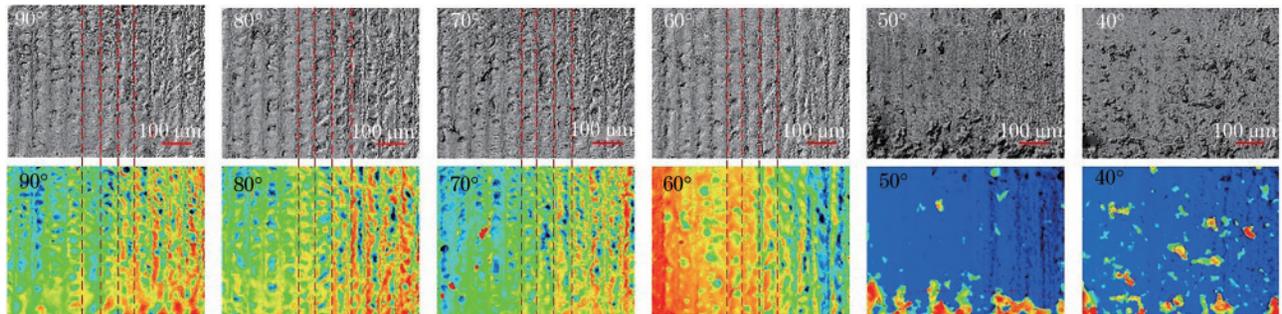


图 8 不同激光入射角度下的样品表面形貌

Fig. 8 Surface topography of samples at different laser incidence angles

### 3.3 激光入射角度对表面粗糙度的影响

经过激光除漆后, 激光的强能量会熔融一定厚度的基体表面, 并且因为光束能量分布特性, 留下排布规则的沟壑条纹。虽然改变激光入射角度对基体表面形貌无影响。但是激光入射角度不同, 沟壑条纹的高低也不同, 导致基体表面粗糙度发生改变。表面粗糙度采用  $S_a$  表示,  $S_a$  为表面算术平均高度, 对规定区域内的高低起伏, 轮廓变化表达更为准确。图 9 表示不同激光入射角下的样品表面粗糙度, 三块样品原始表面粗糙度分别为  $2.120 \mu\text{m}$ 、 $2.021 \mu\text{m}$ 、 $2.231 \mu\text{m}$ , 采用三块样品进行试验, 观察每块样品的粗糙度变化趋势是否一致, 减小试验的偶然误差。粗糙度影响油漆与基体表面黏附力, 三块样品原始粗糙度不同, 可判断不同

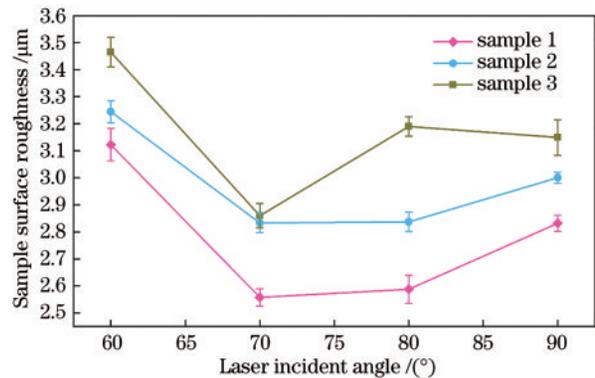


图 9 不同激光入射角度下的样品表面粗糙度

Fig. 9 Surface roughness of samples at different laser incidence angles

黏附力情况下,激光入射角度对粗糙度的影响。随着激光入射角度的减小,表面粗糙度值总体呈现先减小后增大的趋势。激光除漆后基体表面粗糙度比原始表面粗糙度均有增加,若粗糙度过大则会导致基体损伤,因此激光除漆时采用70°入射角最适宜,与样品原始表面粗糙度相比仅增加0.438~0.812 μm,适度增加粗糙度可以增大油漆与基体表面的接触面积,加强油漆与基体之间的黏附力。

### 3.4 激光入射角度对除漆机理的影响

像油漆这种混合聚合物材料,在与激光相互作用的过程中,会不可避免地产生强烈的烟羽,导致激光能量的损失,激光损失的能量取决于烟羽中粒子的密度以及沿激光传播方向烟羽的长度,激光能量的损失<sup>[18]</sup>可以表示为

$$P_z = P_l \exp(-\alpha l), \quad (5)$$

式中: $P_l$ 、 $P_z$ 分别表示激光入射到烟羽和油漆表面的激光功率; $\alpha$ 、 $l$ 分别表示烟羽在激光束方向上的吸收系数和长度。吸收系数和烟羽长度分别取决于烟雾粒子浓度和激光相互作用时间。因此,改变除漆时激光入射角度,一定程度上可以改变烟羽粒子浓度,也改变了烟羽在激光传输方向上的长度。图10是分别采用激光垂直入射和激光入射角70°时,拍摄到的油漆表面上方烟羽烧蚀现象,拍摄位置为激光除漆表面斜上方20 cm,每次除漆激光扫描10次,拍摄时间为激光第5次扫描时。从图10可以看出,激光垂直入射时烟羽长度较长,因此激光能量损失较大。根据试验现象推断,从光热烧蚀到光化学烧蚀的过程中,大量的油漆颗粒、分子和离子从基体表面飞溅出来,改变激光入射角度可以减少垂直飞溅的粒子数量,从而减少激光能量损失,因此70°激光入射角时油漆去除深度最深。

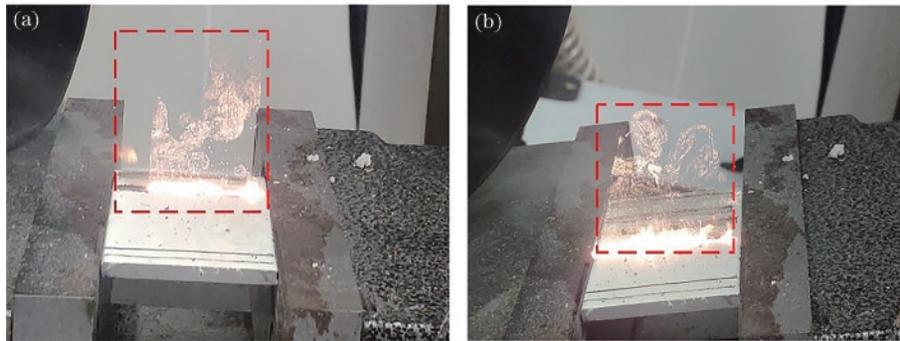


图10 试验中不同激光入射角度的烟羽燃烧现象。(a) 90°激光入射角;(b) 70°激光入射角

Fig. 10 Phenomenon of plume combustion at different laser incidence angles in the experiment. (a) Laser incidence angle is 90°; (b) laser incidence angle is 70°

激光除漆的主要机理相当于烧蚀效应和热膨胀效应。根据之前结果可知,激光入射角度在90°~70°时可以将油漆从基体表面烧蚀或热膨胀克服黏附力去除。在激光能量密度小于0.5 J/cm<sup>2</sup>时,油漆受热膨胀却不能脱离基体。在激光能量密度为0.5~2 J/cm<sup>2</sup>时,激光除漆的主要机理是烧蚀效应,此时激光照射在油漆表面导致温度升高达到油漆燃点,试验中可以看到丝丝白色烟雾,说明油漆被烧蚀气化。当激光能量密

度高于2 J/cm<sup>2</sup>时,温度达到了油漆的燃点且热膨胀力大于油漆与基体黏附力,导致油漆从基体表面脱落。图11表示在激光能量密度为4.5 J/cm<sup>2</sup>下,单晶硅片收集的飞溅出的油漆颗粒,从图11可以发现,既有圆圈中的熔融状的油漆颗粒又有椭圆圈中平整截面的油漆颗粒,说明此时激光除漆的机理是烧蚀效应和热膨胀效应共同发挥作用。

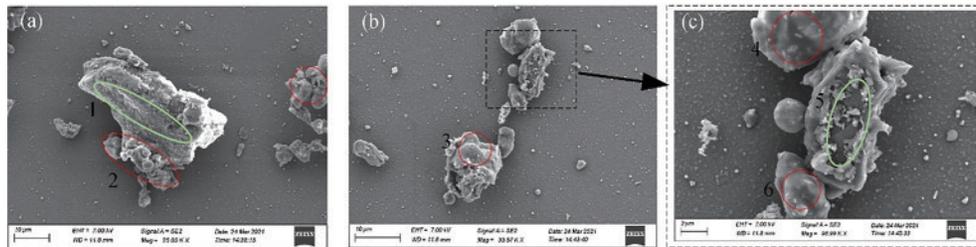


图11 能量密度4.5 J/cm<sup>2</sup>时,单晶硅片收集的油漆颗粒扫描电镜图

Fig. 11 Scanning electron microscope images of paint particles collected by monocrystalline silicon sheets, when energy density is 4.5 J/cm<sup>2</sup>

## 4 结 论

本文研究了不同激光入射角度对 2024 铝合金表面油漆去除深度、表面形貌与粗糙度的影响,并分析了激光入射角度对除漆机理的影响。

在激光能量密度相同时,激光入射角  $70^\circ$  可以实现最大的油漆去除深度;在激光能量密度为  $5 \text{ J/cm}^2$  时,相比激光垂直入射时,其去除深度增加  $57.73 \mu\text{m}$ 。且随着油漆厚度的增加,油漆去除深度的差值增大,采用激光入射角  $70^\circ$  进行除漆优势更加显著。

不同激光入射角度下基体表面形貌均呈现出高低起伏的沟壑状,激光入射角度  $70^\circ$  时得到最小的表面粗糙度,虽然比原始表面粗糙度增大  $0.438 \sim 0.812 \mu\text{m}$ ,但不会影响基体的使用。

激光除漆过程中伴随着烟羽的产生,激光穿过烟羽导致激光能量损失,改变激光入射角度,可以改变烟羽在激光传输方向上的长度和烟羽粒子浓度,减少激光能量损失。激光除漆机理主要是烧蚀效应和热膨胀效应,当激光能量密度在  $0.5 \sim 2 \text{ J/cm}^2$  时,除漆机理主要是烧蚀效应,当能量密度大于  $2 \text{ J/cm}^2$  时,是烧蚀效应和热膨胀效应共同发挥作用。

### 参 考 文 献

- [1] 张云龙, 孙树峰, 王茜, 等. 激光加工微孔质量的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1900002.  
Zhang Y L, Sun S F, Wang X, et al. Research on quality of micro-holes fabricated by laser drilling[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1900002.
- [2] 张成竹, 陈辉. B950CF 高强度超窄间隙激光焊接头组织对残余应力的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0602101.  
Zhang C Z, Chen H. Effect of microstructures of ultranarrow gap laser welded B950CF steel joints on residual stress distribution[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0602101.
- [3] 陈滋鑫, 周后明, 徐采星. 激光熔覆裂纹研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 0700006.  
Chen Z X, Zhou H M, Xu C X. Cladding crack in laser cladding: a review[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 0700006.
- [4] Liu H T, Li J C, Yang Y, et al. Automatic process parameters tuning and surface roughness estimation for laser cleaning[J]. IEEE Access, 2020, 8: 20904-20919.
- [5] 高昆, 曾全胜, 张志研, 等. 飞机铝合金蒙皮激光清洗残余漆层附着力学试验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 0914006.  
Gao K, Zeng Q S, Zhang Z Y, et al. Adhesion of residual primer paint after laser cleaning aircraft aluminum alloy skin[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 0914006.
- [6] Giusti C, Colombini M P, Lluveras-Tenorio A, et al. Graphic vandalism: multi-analytical evaluation of laser and chemical methods for the removal of spray paints[J]. Journal of Cultural Heritage, 2020, 44: 260-274.
- [7] Li W, Du P, Zhang J, et al. Passivation process in quasi-continuous laser derusting with intermediate pulse width and line-scanning method[J]. Applied Optics, 2014, 53(6): 1103-1109.
- [8] Zhang S L, Suebka C, Liu H, et al. Mechanisms of laser cleaning induced oxidation and corrosion property changes in AA5083 aluminum alloy[J]. Journal of Laser Applications, 2019, 31(1): 012001.
- [9] 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.
- [10] Kumar A, Biswas D J. Particulate size and shape effects in laser cleaning of heavy metal oxide loose contamination off clad surface[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 106: 286-293.
- [11] Wan Z, Yang X F, Xia G F, et al. Effect of laser power on cleaning mechanism and surface properties[J]. Applied Optics, 2020, 59(30): 9482-9490.
- [12] Wang X, Xu M Y, Wang Z W, et al. Properties of jet-plated Ni coating on Ti alloy ( $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ ) with laser cleaning pretreatment[J]. Metals, 2019, 9(2): 248.
- [13] Zhu G D, Wang S R, Cheng W, et al. Corrosion and wear performance of aircraft skin after laser cleaning[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 132: 106475.
- [14] 李畅, 庞向阳, 孙明营, 等. 纳秒激光辐照铝合金诱致颗粒物产生规律[J]. 中国激光, 2021, 48(14): 1402015.  
Li C, Pang X Y, Sun M Y, et al. Particles generation of aluminum alloy induced by nanosecond laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 1402015.
- [15] Zhang G X, Hua X M, Li F, et al. Effect of laser cleaning process parameters on the surface roughness of 5754-grade aluminum alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105(5/6): 2481-2490.
- [16] 万壮, 杨学锋, 夏国峰, 等. 激光频率对激光干式清洗机理及表面性能的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(5): 70-77.  
Wan Z, Yang X F, Xia G F, et al. Effect of laser frequency on the mechanism and performance of laser dry cleaning[J]. Surface Technology, 2021, 50(5): 70-77.
- [17] 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.
- [18] Madhukar Y K, Mullick S, Nath A K. Development of a water-jet assisted laser paint removal process[J]. Applied Surface Science, 2013, 286: 192-205.
- [19] Mainusch N, Pflugfelder C, Ihlemann J, et al. Plasma jet coupled with Nd: YAG laser: new approach to surface

- cleaning[J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2007, 4 (S1): S33-S38.
- [20] Hellen R. Preliminary study into the reduction and removal of naturally aged varnishes from painted surfaces using an Er:YAG laser in a two-step cleaning process with solvents[J]. *Journal of the Institute of Conservation*, 2020, 43(1): 79-93.
- [21] Alabone G, Carvajal M S. The removal of bronze paint repairs from overgilded picture frames using an Erbium: YAG laser[J]. *Journal of the Institute of Conservation*, 2020, 43(1): 107-121.
- [22] Zhou C, Li H G, Chen G Y, et al. Effect of single pulsed picosecond and 100 nanosecond laser cleaning on surface morphology and welding quality of aluminium alloy[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 127: 106197.
- [23] Ortiz P, Antúnez V, Ortiz R, et al. Comparative study of pulsed laser cleaning applied to weathered marble surfaces[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 283: 193-201.
- [24] Zhang Z Y, Zhang J Y, Wang Y B, et al. Removal of paint layer by layer using a 20 kHz 140 ns quasi-continuous wave laser[J]. *Optik*, 2018, 174: 46-55.
- [25] Hasegawa S, Shiono K, Hayasaki Y. Femtosecond laser processing with a holographic line-shaped beam[J]. *Optics Express*, 2015, 23(18): 23185-23194.
- [26] Lee J M, Watkins K G, Steen W M. Angular laser cleaning for effective removal of particles. from a solid surface[J]. *Applied Physics A*, 2000, 71(6): 671-674.
- [27] 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.
- [28] Pouli P, Nevin A, Andreotti A, et al. Laser assisted removal of synthetic painting-conservation materials using UV radiation of ns and fs pulse duration: morphological studies on model samples[J]. *Applied Surface Science*, 2009, 255(9): 4955-4960.
- [29] Phipps C. *Laser ablation and its applications*[M]. Boston: Springer, 2007.
- [30] Lippert T. *UV Laser ablation of polymers: from structuring to thin film deposition*[M]//Miotello A, Ossi P M. *Laser-surface interactions for new materials production*. Springer series in materials science. Heidelberg: Springer, 2010, 130: 141-175.
- [31] 佟艳群, 任旭东. *纳秒脉冲激光清洗理论与技术*[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- Tong Y Q, Ren X D. *Theory and technology of nanosecond pulse laser cleaning*[M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [32] Kumar A, Gupta M C. Surface preparation of Ti-3Al-2.5V alloy tubes for welding using a fiber laser[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(11): 1259-1265.