

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

雷正龙^{1*}, 孙浩然¹, 田泽¹, 邱太文², 程程², 富双超², 李凯³

¹哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

²上海飞机制造有限公司, 上海 201324;

³中车长春客车轨道股份有限公司, 吉林 长春 130062

摘要 分别采用毫秒级和纳秒级脉冲宽度的激光对 2024 铝合金表面环氧油漆涂层进行激光清洗实验, 使用高速摄像机对激光清洗过程进行监测, 分析了清洗后试样表面的宏观与微观形貌。结果表明这两种激光在合适的工艺参数下均能有效去除涂层, 获得清洁的基材表面, 但二者的除漆特性有较大区别。纳秒脉冲激光除漆的能量效率远高于毫秒脉冲激光。经毫秒级 CO₂ 激光清洗后试样表面残留一层黑色炭灰, 该物质为油漆涂层的燃烧产物, 清洗过程中基材表面不容易发生熔化。纳秒脉冲激光清洗过程中产生了较强的等离子体, 有大块的漆层碎片从基材表面剥离, 当激光功率高于 250 W 时基材表面发生明显重熔。结合热弹性振动模型与热传导模型, 对两种激光除漆过程的物理机制进行了探讨, 发现毫秒脉冲激光除漆的主要机制为气化与燃烧效应, 而纳秒脉冲激光除漆的主要机制为热弹性振动效应。

关键词 激光技术; 激光清洗; 脉宽; 油漆涂层; 表面形貌; 清洗质量; 物理机制

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0602103

1 引言

在飞机服役过程中, 人们需要定期对其进行大修。为了通过重新喷漆获得全新美观的涂层并检测飞机外壳或其他关键结构部件的内部缺陷, 必须将漆层从机身上去除^[1-2]。飞机机身漆层的去除在维修中起着重要的作用。目前常用的除漆方法有机械磨削和脱漆剂清洗^[3], 这些方法可能造成基材的损伤和环境污染^[4], 且工作环境对工人的健康有害。激光清洗技术以其污染小、自动化程度高、基体损伤可控等优点, 近年来受到广泛关注^[5-6], 其在航空航天、海洋、核电、半导体等诸多领域均得到广泛的应用^[7-10]。

在 20 世纪 90 年代中期, 激光除漆系统刚被提出时, 人们多采用连续的或毫秒级脉冲激光,

Schmidt 等^[11-12] 分别使用连续波射频 CO₂ (RF-CO₂) 和半导体激光成功去除了混凝土表面的白色氯化橡胶涂层, 但去除涂层后, 表面残留有易碎的灰烬层。Madhukar 等^[13] 使用掺 Yb 光纤激光器研究了连续波 (CW) 光束和毫秒脉冲激光去除涂层的行为, 发现脉冲为毫秒级时激光能量效率随脉宽的增加而降低。随着激光技术的进步, 超短脉冲激光在除漆领域逐渐受到关注。目前, 千瓦级纳秒脉冲激光器的出现使纳秒脉冲激光在激光除漆领域得到了广泛的应用。Shi 等^[14] 讨论了纳秒激光清洗工艺对表面组织和元素分布的影响。Li 等^[15] 使用脉冲宽度为 100 ns 的 Nd:YAG 激光去除钢结构表面的漆层, 并在激光清洗后重新喷漆, 其黏着强度远高于船体标准。Kuang 等^[16] 提出了一种利用适当的激

收稿日期: 2020-06-24; 修回日期: 2020-08-11; 录用日期: 2020-08-21

基金项目: 国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金 (COMAC-SFGS-2019-331)、国家重点研发计划 (2017YFB1105000)

*E-mail: leizhenglong@hit.edu.cn

光功率和稀有气体氩气进行保护的激光除漆技术,该方法可以有效地抑制清洗过程中产生的火焰和火花。Shamsujjoha 等^[17]用纳秒激光去除了船用钢板表面的环氧油漆涂层,经清洗后基材性能未发生明显改变。激光清洗过程可能包含烧蚀、热弹性膨胀、相爆炸等多种机制^[18],激光参数不同,激光与物质的相互作用机制也会有很大的差别。Roberts^[19]研究了激光清洗不同厚度漆层的机制及效率,涂层较薄时激光清洗主要基于脱附力作用,去除较厚涂层时激光清洗主要基于表面烧蚀。Han 等^[20]研究了激光去除铝合金表面油漆的机制,认为激光脱漆过程中主要存在汽化效应、热应力效应和等离子体效应三种机制。其中,热应力效应能够最有效地去除涂层。王斌^[21]建立了毫秒与纳秒激光损伤光学薄膜的物理模型,认为纳秒和毫秒激光对金属薄膜造成损伤的机制均以热效应为主。高辽远等^[22]建立了纳米激光清洗铝合金表面丙烯酸聚氨酯漆层的有限元模型,计算结果表明当搭接率为 50% 时可得到合适的清洗效率,当激光能量密度为 25 J/cm^2 时 $100 \mu\text{m}$ 厚的漆层材料被完全去除。郭召恒等^[23]认

为清洗速度会影响除漆机制,随着清洗速度的减小,除漆机制由振动和烧蚀机制向烧蚀机制为主进行过渡。江国业等^[24]开展了激光清洗 X65 管线钢表面环氧树脂防腐漆层的研究,结果发现激光清洗除了满足除漆要求以外,还可以实现钢材表面的强化。

综上所述,虽然目前有许多关于利用不同类型的激光进行除漆的研究报道,但是关于除漆中毫秒激光与纳秒激光的除漆效果以及激光清洗机制的对比研究报道较少。本文分别用毫秒 CO_2 激光和纳秒光纤激光去除铝合金表面的涂层,从除漆效果、除漆效率和主要机理等方面讨论了两者的差异。

2 实验设计

本文实验中采用的基材为 2024 铝合金,其合金元素成分如表 1 所示,表面漆层的傅里叶红外光谱分析结果如图 1 所示,在 909.75 cm^{-1} 处可观察到环氧基团的吸收峰,在 1606.61 cm^{-1} 和 1507.25 cm^{-1} 处可观察到苯环的吸收峰。根据红外光谱中出现的官能团,可知漆层成分主要为环氧树脂漆。涂层厚度平均值约为 $50 \mu\text{m}$ 。除漆前基材的表面微观形貌如

表 1 2024 铝合金化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of 2024 Al alloy (mass fraction)

| Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Ni | Zn | Ti | Others | Al |
|------|------|-----------|-----------|-----------|------|------|------|--------|---------|
| 0.50 | 0.50 | 3.80-4.90 | 0.30-0.90 | 1.20-1.80 | 0.10 | 0.30 | 0.15 | 0.10 | Balance |

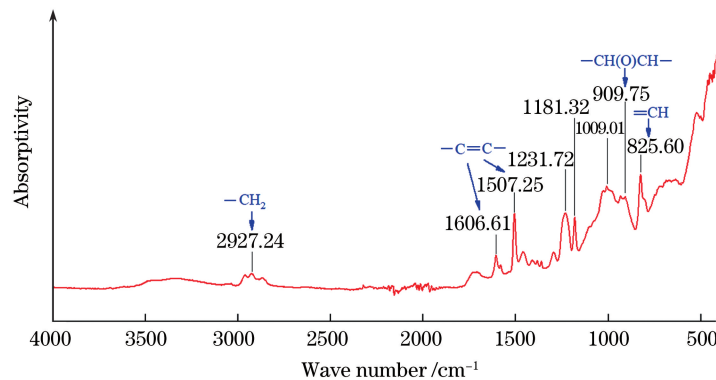


图 1 油漆涂层傅里叶红外吸收光谱分析

Fig. 1 Fourier infrared absorption spectrum analysis for paint coatings

图 2 所示,在涂漆前,铝合金基材经过阳极氧化处理,其表面附着一定厚度的氧化膜。由于在阳极氧化过程中发生了电化学腐蚀,基材表面存在一些微小的孔洞。

为了对比不同时间尺度的激光除漆的特性,分别采用了 CO_2 激光器和纳秒脉冲激光器对铝合金表面的油漆涂层进行了清洗实验。 CO_2 激光器的波长为 $10.6 \mu\text{m}$,最高脉冲频率为 5 kHz ,激光功率最高可达 2000 W 。毫秒级 CO_2 激光通过反射镜传

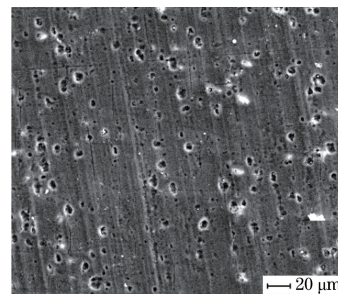


图 2 涂漆前基材表面微观形貌

Fig. 2 Surface morphology of substrate before painting

输到激光头,经聚焦后照射到材料表面。激光头在随智能加工平台的运动中实现对光斑的扫描,其最大扫描速度为 5 m/min,纳秒脉冲器的波长为 1064 nm,脉冲频率为 2~50 kHz,脉宽为 30~100 ns,最大单脉冲能量为 100 mJ。纳秒脉冲激光通过光纤传输到振镜,靠振镜的摆动实现对光斑在试样上的快速扫描,其最大扫描速度为 5 m/s。实验中采用的两种激光除漆的工艺参数

表 2 毫秒脉冲 CO₂ 激光与纳秒脉冲激光的清洗实验参数

Table 2 Experimental parameters of millisecond pulsed CO₂ laser and nanosecond pulsed laser for cleaning

| Millisecond pulsed laser | | | Nanosecond pulsed laser | | |
|--------------------------|--------|-------------------------------------|-------------------------|--------|---------------------------------------|
| Physical quantity | Symbol | Value | Physical quantity | Symbol | Value |
| Laser power | P_c | 400–600 W | Average laser power | P_n | 150–300 W |
| Pulse frequency | f_c | 500 Hz | Pulse frequency | f_n | 5000 Hz |
| Pulse width | t_c | 6×10^3 ns | Pulse width | t_n | 60 ns |
| Scanning speed | v_c | $2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ | Scanning speed | v_n | $180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ |
| Line spacing | h_c | 1 mm | Line spacing | h_n | 0.2 mm |
| Spot diameter | d_c | ~3.5 mm | Spot diameter | d_n | 0.96 mm |

3 实验结果

3.1 不同时间尺度下激光清洗漆层效果分析

使用不同时间尺度的激光清洗 2024 铝合金表面漆层时得到的清洗效果不同。使用毫秒激光去除铝合金表面的漆层时,清洗后铝合金表面会形成一层如图 3(a)所示的黑色物质,该物质结构疏松,并

如表 2 所示,使用的参数均已经过优化,因此两种激光均能够有效地去除基材表面的涂层。在激光清洗过程中,使用高速摄像机进行实时的监测,观察涂层去除中涉及的物理现象。为增加高速摄像图像的亮度,采用辅助光源进行照明,辅助光的波长为 808 nm。使用电子扫描显微镜 (SEM, HELIOS NanoLab 600i) 观察激光清洗后试样表面的微观形貌。

未与基材形成强有力的结合,通过使用酒精冲洗该物质,即可将其从试样表面清除。使用纳秒脉冲激光去除铝合金表面的漆层时,并未在试样表面发现黑色的烧蚀产物, $P_n = 150$ W 时,清洗后的试样如图 3(b)所示,油漆涂层整块从基材表面剥离,其接近基材表面的漆层虽然并未发生烧蚀,但其与基材间的结合力被破坏,导致油漆涂层被剥离。

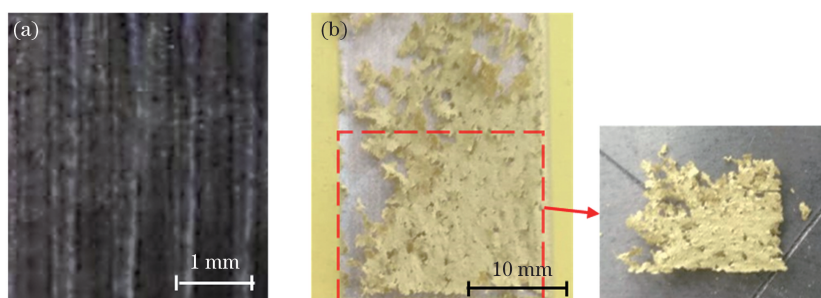


图 3 经毫秒与纳秒脉冲激光清洗后的表面残留物。(a)经毫秒脉冲激光 $P_c = 400$ W 清洗后的表面残留物;(b)纳秒脉冲激光功率 $P_n = 150$ W 时整块剥离的油漆涂层

Fig. 3 Surface residues after millisecond and nanosecond pulse laser cleaning. (a) Surface residues after millisecond laser cleaning for $P_c = 400$ W; (b) stripped paint coating when nanosecond pulse laser power $P_n = 150$ W

图 4 为经毫秒和纳秒脉冲激光清洗后的表面宏观形貌。激光功率的增加可以更有效地去除铝合金表面的涂层,但过高的激光能量会对基材表面产生一定的损伤,如 $P_c = 600$ W 时试样表面在烧蚀作用下形成条纹。纳秒脉冲激光功率 $P_n = 200$ W 时,试样表面的涂层基本没有残留,随着激光能量的增加,试样表面的宏观形貌并无明显的变化,试样表面呈

现银灰色,该颜色接近铝合金基材的颜色。

使用 X 射线能谱分析 (EDS) 得到的经毫秒脉冲激光清洗后表面黑色残留物的元素成分如图 5 所示,可以看出残留物结构较为疏松,表面有大量空隙。能谱分析结果表明,残留物中的主要元素成分为 C,其他元素含量较少,使用 X 射线衍射技术 (XRD) 对两种激光清洗后的试样进行分析,并将分

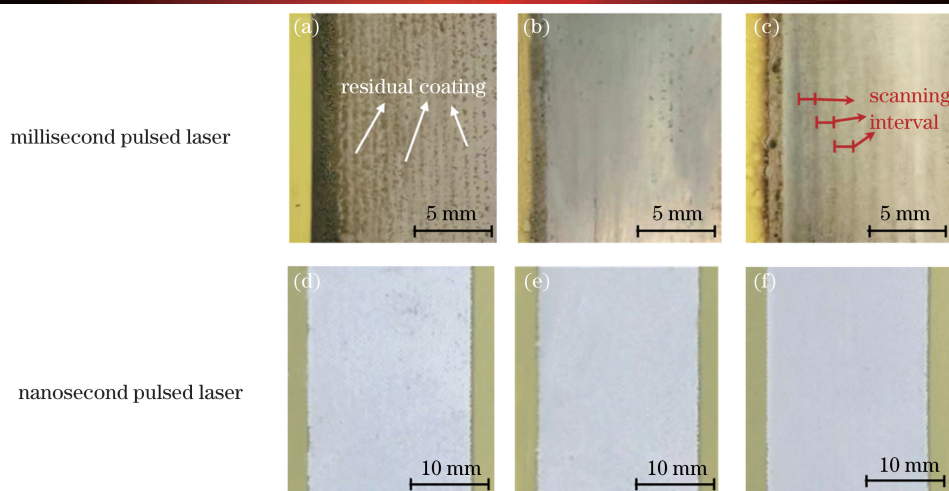


图 4 经毫秒和纳秒脉冲激光清洗后的表面宏观形貌。(a) $P_c = 400\text{ W}$; (b) $P_c = 500\text{ W}$; (c) $P_c = 600\text{ W}$; (d) $P_n = 200\text{ W}$; (e) $P_n = 250\text{ W}$; (f) $P_n = 300\text{ W}$

Fig. 4 Macro morphologies of surface after millisecond and nanosecond pulsed laser cleaning. (a) $P_c = 400\text{ W}$; (b) $P_c = 500\text{ W}$; (c) $P_c = 600\text{ W}$; (d) $P_n = 200\text{ W}$; (e) $P_n = 250\text{ W}$; (f) $P_n = 300\text{ W}$

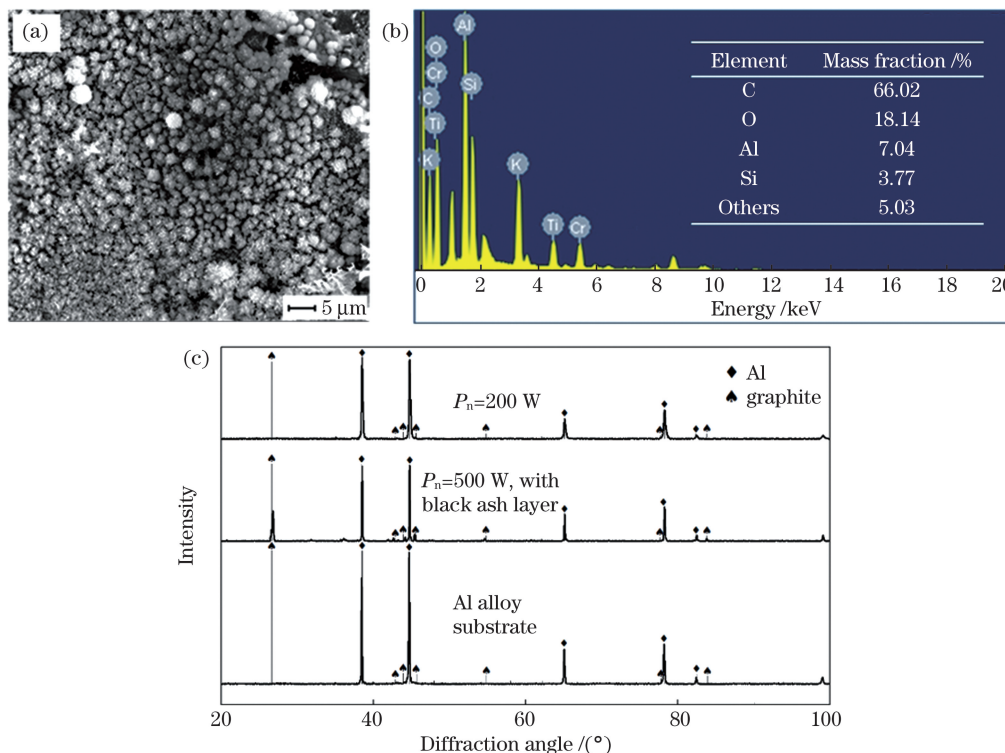


图 5 经毫秒脉冲激光除漆后试样表面的残留物成分分析。(a) 残留物微观形貌; (b) 残留物能谱分析结果; (c) XRD 得到的残留物衍射峰

Fig. 5 Composition analysis of sample surface residue after paint removal by millisecond pulsed laser. (a) Micro morphology of residue; (b) residue energy spectrum analysis; (c) diffraction peak of residue obtained by XRD

析结果与标准 PDF 卡片进行对照,结果如图 5(c) 所示。根据元素成分分析与 XRD 衍射峰结果,可知燃烧产物中含有以石墨形式存在的碳,但不排除其中含有残留的有机物及少量其他杂质的可能性。纳秒脉冲激光在 $P_n = 200\text{ W}$ 时基本可以将铝合金表面的涂层完全去除,从而露出铝合金基材,且表面

未残留反应产物。

3.2 不同时间尺度下激光清洗漆层过程的等离子体分析

在实验过程中,使用高速摄像机分别对毫秒脉冲激光和纳秒脉冲激光除漆中的物理现象进行了观察,观察到的结果如图 6 所示。毫秒激光除漆过程

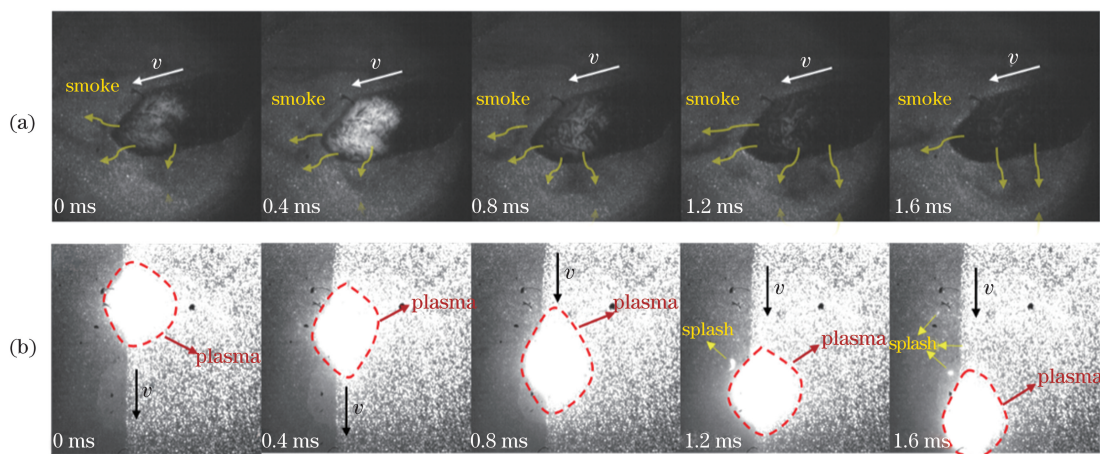


图 6 采用高速摄像机得到的激光清洗涂层过程。(a) 毫秒脉冲激光清洗过程, $P_c = 500\text{ W}$; (b) 纳秒脉冲激光清洗过程, $P_n = 200\text{ W}$

Fig. 6 Laser coating removal process obtained by high-speed camera. (a) Millisecond pulse laser cleaning process, $P_c = 500\text{ W}$; (b) nanosecond pulse laser cleaning process, $P_n = 200\text{ W}$

中有大量的黑烟产生, 光斑边缘处漆层涂层发生熔化, 清洗过的区域呈较深的颜色; 在纳秒脉冲激光的除漆过程中, 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, 清洗过的区域露出比较明亮的基材颜色, 在此过程中未观察到有燃烧产物生成, 这说明在纳秒脉冲激光清洗过程中, 油漆涂层几乎未发生燃烧反应。

3.3 不同时间尺度下激光清洗漆层后表面微观形貌

利用扫描电子显微镜观察不同激光清洗后试样的表面微观形貌(图 7), 可以发现在毫秒脉冲激光清洗后的基材表面未观察到重熔现象, 激光功率为 400 W 时, 原始基材表面的微孔并未完全露出, 基材

表面仍有较薄的漆层覆盖着。激光功率为 500 W 时, 清洗后的基材表面接近清洗前的表面。激光功率为 600 W 时, 表面微孔尺寸扩大, 并开始出现微裂纹, 在试样表面未观察到重熔现象。这是由于在毫秒脉冲激光清洗过程中, 脉冲持续时间较长, 激光能量比较容易向基材厚度方向扩散, 这使基材底部温度较高, 清洗区域的基材热膨胀受到周围未清洗区域基材的限制, 导致清洗后的基材中产生热应力与热变形, 基材表面在原有的微孔和残留的拉应力作用下出现微裂纹。

随着纳秒脉冲激光能量密度的提高, 基材表面重熔现象逐渐明显, 当激光功率为 200 W 时, 清洗

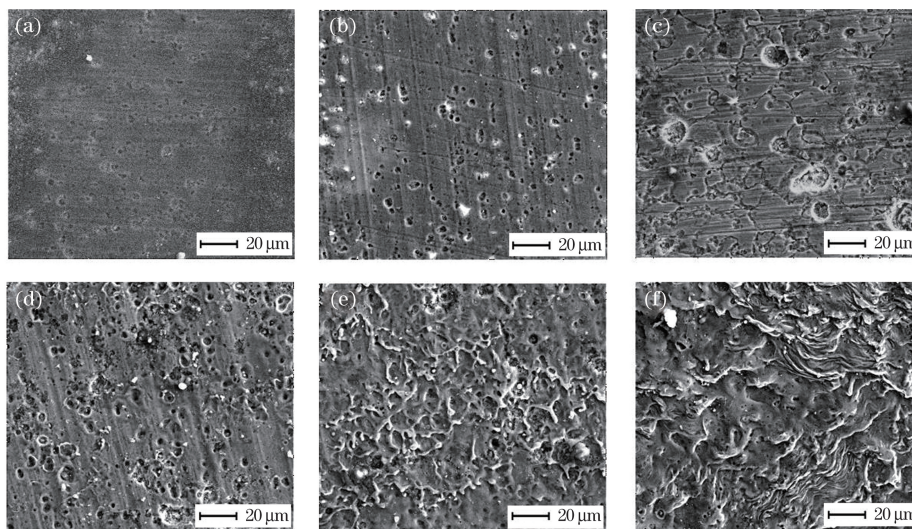


图 7 激光清洗后的表面微观形貌。(a) $P_c = 400\text{ W}$; (b) $P_c = 500\text{ W}$; (c) $P_c = 600\text{ W}$; (d) $P_n = 200\text{ W}$; (e) $P_n = 250\text{ W}$; (f) $P_n = 300\text{ W}$

Fig. 7 Micro-morphologies of surface after laser cleaning. (a) $P_c = 400\text{ W}$; (b) $P_c = 500\text{ W}$; (c) $P_c = 600\text{ W}$; (d) $P_n = 200\text{ W}$; (e) $P_n = 250\text{ W}$; (f) $P_n = 300\text{ W}$

后的基材表面在微孔边缘处发生了轻微的重熔,但总体来说表面较为平整。当激光功率为 250 W 时,表面出现环形薄壁结构,这是由熔融的基材迅速冷却凝固形成的。当激光功率为 300 W 时,基材表面发生了较严重的重熔,形成了云层状的形貌,这些表面微观结构的产生与快速的冷却过程有关,在纳秒激光的作用下,基材表面温度迅速达到熔点,形成一层较薄的熔融金属,由于冷却速度很快,液态金属存在时间很短,未来得及在表面铺展就发生凝固,形成图 7 中所示的表面形貌。

3.4 不同时间尺度下激光清洗漆层的清洗效率

对两种激光清洗去除油漆涂层的效率进行对比,当清洗面积远大于光斑面积时,可以将光斑看作一个点,清洗面积如图 8 所示,当每一行的长度 l 足够大时,则可忽略扫描过程中行间切换消耗的时间。单位时间内清洗的涂层面积(即清洗效率 ϵ)可表示为

$$\epsilon = \frac{S}{t} = \frac{(n-1)l_{c(n)}h_{c(n)}}{(n-1)\frac{l_{c(n)}}{v_{c(n)}}} = h_{c(n)}v_{c(n)}, \quad (1)$$

式中: S 为清洗面积; t 为清洗时间; n 为扫描行数; $v_{c(n)}$ 为扫描速度; $h_{c(n)}$ 为扫描间距; $l_{c(n)}$ 为每一行的长度,其中,下角标 c 和 n 分别代表毫秒脉冲激光清洗和纳秒脉冲激光清洗。由(1)式可得,清洗效率仅与扫描间距和扫描速度有关,采用本文实验中使用的参数并根据(1)式进行计算,毫秒脉冲激光的清洗效率为 $0.33 \text{ cm}^2/\text{s}$,而纳秒脉冲激光的清洗效率为 $6 \text{ cm}^2/\text{s}$ 。纳秒脉冲激光的清洗效率远高于毫秒脉冲激光。

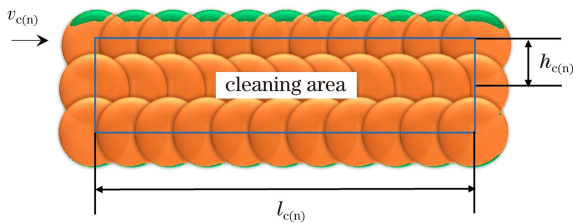


图 8 清洗面积计算示意图

Fig. 8 Calculation diagram of cleaning area

通过同时增大激光功率、扫描间距和扫描速度可以提高清洗效率,因此清洗效率实际上受到激光功率的制约。为了更准确地反映纳秒脉冲激光与毫秒脉冲激光去除油漆的效率的差异,对比了两种激光除漆的能量效率 $\epsilon(E)$,即去除单位体积油漆涂层所需的激光能量,能量效率 $\epsilon(E)$ 可表示为

$$\epsilon(E) = \frac{Pt}{SD} = \frac{P}{\epsilon D}, \quad (2)$$

式中: D 为涂层厚度; P 为激光平均功率; ϵ 为清洗效率。根据实验结果,毫秒和纳秒脉冲激光分别在 500 W 和 150 W 时可完全去除油漆涂层,将其代入(2)式,得到毫秒激光清洗漆层的能量效率为 $300 \text{ J}/\text{mm}^3$,而纳秒脉冲激光清洗油漆涂层的能量效率为 $5 \text{ J}/\text{mm}^3$,纳秒脉冲激光除漆的能量效率远高于毫秒脉冲激光。

4 讨 论

当激光照射材料时,若激光光斑的尺寸大于激光脉冲作用时间内热量的传播深度,则可近似地按一维热传导问题进行处理,并可把材料视为被激光加热的半无限大物体^[25]。根据一维非稳态导热的微分方程,可得热扩散深度^[26]为

$$D = 6.8\sqrt{\alpha t_0}, \quad (3)$$

式中: α 为热扩散率; t_0 为加热时间。根据(3)式,可知热扩散深度受加热时间的影响,当激光作用在铝合金表面的涂层上时,纳秒脉冲激光在基材上的热影响层仅为接近表面的较薄区域,高能量密度激光照射在基材表面会导致最表层基材熔化,但基材内部仍保持较低的温度。而毫秒激光产生的热影响层厚度较大,其能量在时间尺度上较为分散,加热速度较小,不容易使基材达到熔点温度。从热扩散深度的角度考虑,纳秒级的脉冲激光的热扩散深度较小,因此短脉冲激光能够一次性去除的涂层的厚度是十分有限的,不适用于去除较厚的涂层。

激光作用在油漆涂层表面时,光能会被转化为热能,使涂层的温度升高并发生气化,从而使涂层从基材表面剥离,这种去除机制被称为烧蚀效应。另外,激光对涂层与基材界面处的快速加热使界面处涂层与基材温度迅速升高,不同的热膨胀系数下,涂层与基材产生的应变不同,这导致基材与涂层间形成较大的分离应力,当该应力足以克服基材与涂层间的结合力时,涂层就会从基材表面剥离,这种去除机制被称为热弹性振动效应。根据热弹性膨胀原理与牛顿第二定律,计算在基材与涂层界面处产生的脱附力^[27]:

$$\delta = \delta_f + \delta_s = k_f \alpha_f \frac{A_f I dt}{\rho_f c_f} + k_s \alpha_s \frac{A_s I dt}{\rho_s c_s}, \quad (4)$$

$$F = m \frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} = m \left(k_f \frac{A_f \alpha_f}{\rho_f c_f} + k_s \frac{A_s \alpha_s}{\rho_s c_s} \right) \frac{dI}{dt}, \quad (5)$$

$$F \propto \frac{dI}{dt}, \quad (6)$$

式中:下标 f 代表涂层, s 代表基材; δ 为材料层总位

移; α 为材料的线膨胀系数; A 为材料的有效吸收系数; ρ 为材料的密度; c 为材料的比热容; I 为激光能量密度。基于热弹性振动机制产生的脱附力 F 与功率密度成正相关,毫秒脉冲激光的平均功率为 500 W 时,其峰值功率密度为 0.43 W/cm^2 ,纳秒脉冲激光的平均功率为 150 W 时,其峰值功率密度为 $3.47 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$,这两个峰值功率密度相差 4 个数量级,因此纳秒脉冲激光通过热弹性振动机制产生的脱附力远高于毫秒脉冲激光,更容易通过该机制去除油漆涂层。而毫秒脉冲激光的功率密度很难达到脱附阈值。

从上述的分析与实验结果可以看出,两种激光的清洗方法去除油漆涂层的主要机制是不同的(图 9)。纳秒脉冲激光的除漆过程主要基于热弹性振动机制,但纳秒脉冲激光的峰值功率密度很

高,不可避免地会使涂层温度迅速升高并使涂层发生气化,因此纳秒脉冲激光的除漆过程也包含烧蚀机制。毫秒脉冲激光由于难以触发热弹性膨胀机制,因此主要靠激光产生的热量在涂层内部的累积进行除漆,当涂层的温度足够高时,涂层在空气中发生燃烧反应,燃烧热可以进一步加热涂层,使涂层继续燃烧或者发生气化,从而将涂层从基材表面去除。

毫秒脉冲激光除漆过程中,漆层发生了化学反应,油漆分子的结构被破坏,而纳秒脉冲激光可以通过热弹性振动机制直接破坏基材与涂层间形成的结合力,因此所需的能量更低。另外,两种激光在基材上的热扩散深度不同,毫秒脉冲激光通过基材的热传导损失了更多的能量,因此纳秒脉冲激光除漆的能量效率高于毫秒脉冲激光。

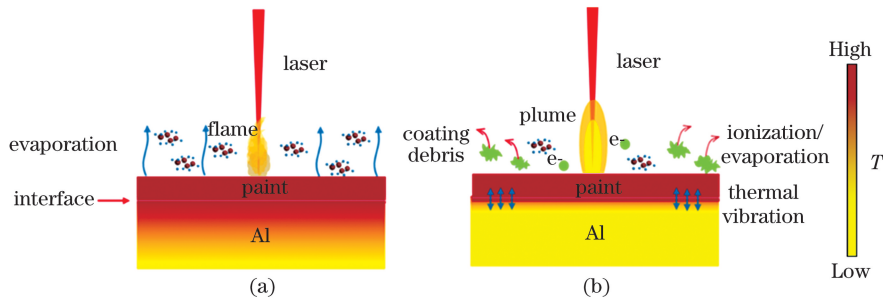


图 9 不同激光清洗铝合金表面的油漆涂层的示意图。(a)毫秒脉冲激光;(b)纳秒脉冲激光

Fig. 9 Schematic diagrams of laser cleaning paint coated on aluminum alloy surface by different laser. (a) Millisecond pulsed laser; (b) nanosecond pulsed laser

5 结 论

对毫秒级脉冲激光与纳秒脉冲激光去除铝合金表面 $50 \mu\text{m}$ 厚的油漆涂层进行了研究,对两种激光除漆的效果、对基材的影响以及主要机制进行了分析,并得出以下结论:

1)不同时间尺度的激光清洗油漆涂层的优化参数为:毫秒激光脉冲频率为 500 Hz、脉冲持续时间为 0.6 ms、激光功率为 500 W 时可以将漆层基本去除;纳秒激光脉冲频率为 5 kHz、脉冲持续时间为 60 ns、激光功率为 200 W 时可去除涂层。

2)由于毫秒脉冲激光能量的热扩散深度更大,铝合金基材的导热能力强,基材表面不易发生熔化,纳秒脉冲激光的能量则集中在涂层与基材表面,当表面的涂层被去除后,高功率的激光脉冲容易使基材表面发生重熔。

3)两种激光在去除油漆涂层的机制上有很大区别,纳秒脉冲激光除漆的主要机制为热振动效应,毫

秒脉冲激光除漆的主要机制为漆层的气化与燃烧。二者去除油漆涂层的机制的差别是由二者脉宽不同、产生的振动应力相差很大导致的。采用毫秒脉冲激光除漆后,基材表面残留有一层燃烧产物。

4)纳秒脉冲激光除漆的能量效率为 300 J/mm^3 ,而毫秒脉冲激光除漆的能量效率为 5 J/mm^3 ,远低于纳秒脉冲激光,这是由二者的热扩散深度与除漆机制的差异导致的。

参 考 文 献

- [1] Yang G, Liu H H, Zhou J P, et al. Research on laser deposition repair aircraft vertical tail beam [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46 (2): 0206004.
杨光, 刘欢欢, 周佳平, 等. 激光沉积修复某型飞机垂尾梁研究 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(2): 0206004.
- [2] 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.

- 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.
- [3] Uang S N, Shih T S, Chang C H, et al. Exposure assessment of organic solvents for aircraft paint stripping and spraying workers [J]. Science of the Total Environment, 2006, 356(1/2/3): 38-44.
- [4] Tangestanian P, Papini M, Spelt J K. Starch media blast cleaning of artificially aged paint films [J]. Wear, 2001, 248(1/2): 128-139.
- [5] Lei Z L, Tian Z, Chen Y B. Laser cleaning technology in industrial fields [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 030005.
雷正龙, 田泽, 陈彦宾. 工业领域的激光清洗技术 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 030005.
- [6] Lei Z L, Sun H R, Chen Y B, et al. Elimination of rusting layer from high-strength steel surface using different laser cleaning methods [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0702003.
雷正龙, 孙浩然, 陈彦宾, 等. 不同激光清洗方法对高强度表面锈蚀层的去除研究 [J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0702003.
- [7] D'Addona D M, Genna S, Giordano A, et al. Laser ablation of primer during the welding process of iron plate for shipbuilding industry [J]. Procedia CIRP, 2015, 33: 464-469.
- [8] Zhou F, Sheppard J C, Vecchione T, et al. Establishing reliable good initial quantum efficiency and *in situ* laser cleaning for the copper cathodes in the RF gun [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, 783: 51-57.
- [9] Kim T G, Yoo Y S, Lee S H, et al. Effects of size, humidity, and aging on particle removal from Si wafers [J]. Microelectronic Engineering, 2009, 86(2): 145-149.
- [10] Zhu H Z, Lu J, Ni X W, et al. Experimental investigation on cleaning of corroded ancient coins using a Nd: YAG laser [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10173: 101730F.
- [11] Schmidt M J J, Li L, Spencer J T. Removal of chlorinated rubber coatings from concrete surfaces using a 120-W high power diode laser [J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 141(1): 40-47.
- [12] Schmidt M J J, Li L, Spencer J T. Removal of chlorinated rubber coatings from concrete surfaces using an RF excited CO₂ laser [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 114(2): 139-144.
- [13] Madhukar Y K, Mullick S, Shukla D K, et al. Effect of laser operating mode in paint removal with a fiber laser [J]. Applied Surface Science, 2013, 264: 892-901.
- [14] Shi T Y, Wang C M, Mi G Y, et al. A study of microstructure and mechanical properties of aluminum alloy using laser cleaning [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 42: 60-66.
- [15] Li X G, Huang T T, Chong A W, et al. Laser cleaning of steel structure surface for paint removal and repaint adhesion [J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(3): 340-344, 368.
- [16] Kuang Z, Guo W, Li J N, et al. Nanosecond fibre laser paint stripping with suppression of flames and sparks [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 266: 474-483.
- [17] Shamsujjoha M, Agnew S R, Melia M A, et al. Effects of laser ablation coating removal (LACR) on a steel substrate: part 1: surface profile, microstructure, hardness, and adhesion [J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 281: 193-205.
- [18] Qi Y, Ye Y Y, Wang H J, et al. Mechanisms of laser cleaning of contamination on surface of stonework [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(6): 0603001.
齐扬, 叶亚云, 王海军, 等. 激光清除石质文物表面污染物的作用机制 [J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0603001.
- [19] Roberts D E. Pulsed laser coating removal by detachment and ejection [J]. Applied Physics A, 2004, 79(4/5/6): 1067-1070.
- [20] Han J H, Cui X D, Wang S, et al. Laser effects based optimal laser parameter identifications for paint removal from metal substrate at 1064 nm: a multi-pulse model [J]. Journal of Modern Optics, 2017, 64(19): 1947-1959.
- [21] Wang B. Research on damage characteristics and mechanisms of optical film components irradiated by pulsed lasers with different durations [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013: 74-93.
王斌. 不同脉宽激光致光学薄膜元件损伤特性和机理分析 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013: 74-93.
- [22] 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.
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.
- [23] Guo Z H, Zhou J Z, Meng X K, et al. Nanosecond-pulsed-laser paint stripping of HT250 gray cast iron [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10):

1002012.
郭召恒, 周建忠, 孟宪凯, 等. HT250 灰铸铁纳秒脉冲激光除漆工艺研究[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1002012.
- [24] Jiang G Y, Lei P, Liu Y P, et al. Laser removal of coating on oil and gas pipelines: effects on microstructure and hardness of substrate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0302009.
江国业, 雷璞, 刘宇平, 等. 油气管道激光除漆对基材组织和硬度的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0302009.
- [25] Lu J, Ni X W, He A Z. Physics of laser and material interaction [M]. Beijing: China Machine Press, 1996: 26-29.
陆建, 倪晓武, 贺安之. 激光与材料相互作用物理学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996: 26-29.
- [26] Ji Z S, Zhu R K, Li D. Transmission principle[M]. 2nd ed. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2005: 91-114.
吉泽升, 朱荣凯, 李丹. 传输原理[M]. 2 版. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005: 91-114.
- [27] Chen H. Process of basic research on laser cleaning technology of car body surface paint [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018: 13-15.
陈浩. 车体表面油漆激光清洗工艺基础研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018: 13-15.

Effect of Laser at Different Time Scales on Cleaning Quality of Paint on Al Alloy Surfaces

Lei Zhenglong^{1*}, Sun Haoran¹, Tian Ze¹, Qiu Taiwen², Cheng Cheng²,
Fu Shuangchao², Li Kai³

¹ State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

² Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201324, China;

³ CRRC Changchun Railway Vehicals Co., Ltd., Changchun, Jilin 130062, China

Abstract

Objective Aircraft must be regularly overhauled during service. To repaint and obtain a new and beautiful coating and detect internal defects in the aircraft body or other key structural components, the original paint layer must be removed from the fuselage. The removal of paint from the aircraft fuselage plays an important role in maintenance. As a green and highly efficient technique, laser depainting has garnered considerable attention in recent years. The process and mechanism of laser depainting both require further investigation. The most commonly used lasers for depainting include CO₂ and nanosecond lasers, and they have been discussed and analyzed with respect to cleaning efficiency and removal mechanism. In this study, the effect of laser at different time scales on the cleaning quality of laser paint removal from Al alloy surfaces was explored. The research results lay the foundation for the laser depainting of homemade large C919 aircraft body.

Methods Millisecond and nanosecond pulsed lasers were used to clean the epoxy paint coating on the 2024 Al alloy surface. The millisecond laser has a wavelength, maximum pulsed frequency, and maximum laser power of 10.6 μm, 5 kHz, and 2 kW, respectively. The nanosecond laser has a wavelength, pulsed frequency, pulse width, and maximum single pulse energy of 1064 nm, 2–50 kHz, 30–100 ns, and 100 mJ, respectively. During the cleaning process, the laser cleaning physical phenomenon was monitored online using a high-speed camera and a secondary light source with a wavelength of 808 nm. After the laser cleaning experiment, the macroscopic and microscopic morphologies of the sample were observed and investigated using the camera and scanning electron microscopy. Lastly, the physical mechanism of two types of laser paint removal was discussed by combining the thermoelastic vibration and heat conduction models.

Results and Discussions Both lasers can effectively remove the coating and obtain a clean substrate surface with appropriate process parameters. However, the paint removal characteristics of the two lasers were quite different. Nanosecond laser paint removal showed considerably higher energy efficiency than millisecond laser paint removal. A layer of charcoal ash remained on the sample surface after millisecond CO₂ laser cleaning, which was a combustion product of paint coating. The substrate surface did not melt during the cleaning process. In the case of millisecond

laser depainting, a significant amount of black smoke was generated and the paint layer was melted during the cleaning process. During the nanosecond pulse laser cleaning process, strong plasma was observed and large pieces of paint were stripped from the substrate surface. After cleaning a paint layer using millisecond laser depainting, the substrate maintained a state of unmelted surface. However, some defect micropores and microcracks appeared on the surface, which were induced by the thermal stress of the substrate. In the case of nanosecond laser depainting, the substrate surface was completely remelted when the laser power was higher than 250 W. The microstructure formation on the surface was related to a fast cooling process. Under the action of the nanosecond laser, the temperature of the substrate increased to the melting point, thus yielding a thin melting metal. Because of the large cooling velocity, the existence time of the molten pool was short. Hence, the molten pool instantaneously solidified and did not have sufficient time to spread, finally forming the microstructure. The main mechanism of millisecond laser paint removal is vaporization and combustion reaction, while that of nanosecond laser paint removal is the thermoelastic vibration effect.

Conclusions To clean a 50- μm -thick paint layer using the millisecond laser, the optimized process parameters include pulse frequency, pulse duration, and laser power of 500 Hz, 0.6 ms, and 500 W, respectively. The optimized process parameters of the nanosecond laser for cleaning a 50- μm -thick paint layer include pulse frequency, pulse duration, and laser power of 5 kHz, 60 ns, and 200 W, respectively. Compared with the nanosecond laser, the millisecond laser induces lesser remelting owing to the deeper thermal diffusion after cleaning of the paint layer. The main mechanism of millisecond laser paint removal is vaporization and combustion reaction, while that of nanosecond laser paint removal is the thermoelastic vibration effect. The energy efficiency of nanosecond and millisecond laser depainting is 300 and 5 J/mm³, respectively. The difference in the energy efficiency is attributed to thermal diffusion depths and cleaning mechanisms of the two lasers.

Key words laser; laser cleaning; pulse duration; paint coating; surface morphology; cleaning quality; physical mechanism

OCIS codes 140.3390; 140.3538; 140.3510; 140.3470