

激光与光电子学进展

脉冲频率对油漆漆层激光清洗作用机制的影响

童懿¹, 邱太文¹, 易俊兰¹, 冯俊华², 田泽², 雷正龙^{2*}, 孙浩然²

¹上海飞机制造有限公司, 上海 201324;

²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

摘要 针对表面涂有 150 μm 厚环氧基底漆涂层的 2024 铝合金, 采用不同脉冲频率的纳秒脉冲激光进行激光清洗试验, 分析了激光清洗后试样的表面形貌、表面粗糙度、清洗厚度以及清洗机理等。试验结果表明: 表面粗糙度 (R_a) 受频率的影响较小且在 3 μm 左右。计算了不同脉冲频率下的清洗深度, 结果发现, 当频率为 10 kHz 时, 清洗深度约为 130 μm 。通过数值模拟分别研究了激光清洗过程中脉冲频率对烧蚀机制中烧蚀量和剥离机制中热应力的影响。数值模拟结果表明: 烧蚀量随着频率的增大而降低, 在 5~25 kHz 范围内烧蚀量的最大降幅超过 9%; 通过最大热应力与脉冲能量密度的线性拟合计算得到剥离机制的触发阈值约为 1.64 J/cm²; 在脉冲能量密度高于 1.64 J/cm² 的条件下, 频率越高, 越难积热, 从而使得烧蚀机制越弱; 越大的频率使得热应力超过结合力的频次更多, 剥离机制增强, 能获得更好的清洗效果。

关键词 激光技术; 激光清洗; 脉冲频率; 有限元分析; 物理机制

中图分类号 V267; TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1914009

Effect of Pulse Frequency on Laser Cleaning Mechanism of Paint Coating

Tong Yi¹, Qiu Taiwen¹, Yi Junlan¹, Feng Junhua², Tian Ze²,

Lei Zhenglong^{2*}, Sun Haoran²

¹Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201324, China;

²State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract Herein, a 2024 aluminum alloy coated with a 150 μm epoxy primer was cleaned using a nanosecond pulsed laser with different pulse frequencies. Moreover, the surface morphology, surface roughness, cleaning thickness, and cleaning mechanism were analyzed. Experimental results show that the surface roughness (R_a) was slightly affected by the pulse frequency and was about 3 μm . Furthermore, the cleaning depth was calculated under different pulse frequencies; the results show that the cleaning depth reached about 130 μm at a pulse frequency of 10 kHz. The effect of the laser frequency on the ablative amount and thermal stress was studied during laser cleaning via numerical simulations. Numerical simulation results show that the ablative amount decreased with the increase in the frequency and the maximum decrease in ablative amount was >9% when the pulse frequency was 5–25 kHz. The trigger threshold of the peeling mechanism was approximately 1.64 J/cm² based on the linear fitting calculation of the maximum thermal stress and pulse energy density. When the pulse energy density was greater than 1.64 J/cm², it was difficult to accumulate heat as the frequency increased, which weakened the ablation mechanism.

收稿日期: 2020-11-25; 修回日期: 2020-12-31; 录用日期: 2021-03-02

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

通信作者: *leizhenglong@hit.edu.cn

However, as the frequency increased, the peeling mechanism was enhanced; thus, a good cleaning effect could be obtained.

Key words laser technique; laser cleaning; pulse frequency; finite element analysis; physical mechanism

OCIS codes 140.3390; 140.3538; 140.3510; 140.3470

1 引言

飞机在服役期间需要定期大修。飞机蒙皮等的服役环境复杂且极端,为了检测蒙皮是否产生了缺陷,需要将机身的油漆涂层去除^[1-2]。目前常用机械磨削、抛丸喷砂和化学处理等方法除漆^[3-4],但 these 方法或有毒有害或成本高昂,且效果差,还容易损伤基材。

激光清洗是一种先进的清洗技术,被誉为“21世纪最具潜力的绿色清洗技术”。与传统的清洗技术相比,激光清洗技术具有绿色环保无污染、可达性好、易于自动化、效率高、质量好、可控等优势,在航空航天^[5]、核工业^[6]、微电子^[7]、海洋^[8]等领域已有广泛应用。激光束可分为连续激光和脉冲激光。连续激光的热输入大且更容易积热,会对基材造成较大损伤且效率不高,故多采用脉冲激光束进行激光清洗。随着激光技术的进步和大功率超短脉宽激光器的成熟,纳秒脉冲激光在激光清洗领域得到了广泛关注。

Shi等^[9]研究了纳秒脉冲激光清洗对基材表面组织和元素分布的影响。孙浩然课题组^[10]使用IPG纳秒激光器对2024铝合金表面的漆层进行了清洗,结果发现,在60 ns脉宽、20 kHz频率下基材的损伤阈值为556.2 W。谭荣清等^[11]采用高频TEA CO₂激光对飞机蒙皮表面漆层进行了激光清洗,结果发现,激光清洗前后基材的力学性能没有发生明显变化。杜鹏课题组^[12]认为,在激光功率密度达到清洗阈值或在超出清洗阈值不大的情况下,清洗机理主要为振动效应,而激光峰值功率密度较高时,清洗机理是振动效应和烧蚀效应共同起作用。万壮等^[13]在研究中用烧蚀去除质量占去除总质量的比例来反映激光清洗过程中的清洗机理,结果发现,随着激光频率增大,烧蚀机制减弱。高辽远^[14]建立了纳秒脉冲激光清洗铝合金表面漆层的有限元模型,研究了激光扫描速度和激光能量密度对温度场的影响。刘彩飞等^[15]通过数值模拟和试验相结合的方法研究了激光扫描参数对除漆量的影响。施曙东^[16]提出了一种三层吸收界面烧蚀振动干式激光清洗理论模型,采用有限元模拟计算的方法,研

究了平顶激光和高斯激光在干式激光清洗过程中温度场、应力场的区别。高辽远^[14]认为激光清洗的作用机制可分为基于材料气化和燃烧的烧蚀机制、基于热振动和蒸气压力等效应的剥离机制以及基于化学变化的光分解机制,且烧蚀机制和剥离机制通常起主要作用。目前,已有大量针对纳秒脉冲激光清洗过程中清洗机制的研究,但大部分研究仅是针对清洗机制的理论进行深入探索以及对各清洗机制的特性进行研究,而且对清洗工艺的研究仅限于获得更好的清洗效果,并未深入研究工艺参数影响清洗效果的本质。清洗机制对清洗效果起决定作用,深入研究各参数对清洗效果的影响就需要先研究其对清洗机制的影响。

在烧蚀机制中,烧蚀可能会激发大量等离子体而影响激光能量的传播,从而影响清洗效率。在剥离机制中,材料的不均匀加热会导致热应力产生,这种应力足够大时可以破坏油漆涂层/基体的结合力,并将破碎的油漆碎片带离基材,此过程激发的等离子体较少;当激光能量过大时,还可能发生逆韧致剥离效应,此过程可能激发较多的等离子体。当烧蚀机制占据主导地位时,清洗后的表面可能会被油漆燃烧产物覆盖;当剥离机制占据主导地位时,清洗后的表面一般较为洁净。综上所述,在激光清洗过程中,应尽可能使剥离机制占据主导地位,以提升清洗效果。

脉冲频率是脉冲激光的一个重要参数,脉冲频率越低,脉冲能量和峰值功率越高,脉冲间隔时间越长。脉冲能量、峰值功率和脉冲间隔时间对激光清洗过程有着巨大影响,决定着各清洗机制的地位。当剥离机制占据主导地位时可获得较好的清洗效果,所以如何通过控制脉冲频率来提升剥离机制的作用是值得研究的。基于以上背景,本文将表面涂有厚度为150~200 μm漆层的2024铝合金作为研究对象,通过试验的方法研究脉冲频率对清洗效果的影响,并通过数值模拟分别研究了清洗过程中脉冲频率对烧蚀机制中的烧蚀体积和剥离机制中的热应力的影响,之后对如何改善剥离机制进行了讨论。

2 试验材料和方法

本次试验采用的基材是 2024 铝合金,其元素成分如表 1 所示。基材经过了阳极氧化处理,以提升油漆的附着力。基材表面氧化膜的微观形貌如图 1 所示。基材表面涂有厚度为 150~200 μm 的环氧聚

表 1 2024 铝合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of 2024 aluminum alloy

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Others	Al
Mass fraction / %	0.50	0.50	3.8-4.9	0.3-0.9	1.2-1.8	0.10	0.30	0.15	0.10	Bal.

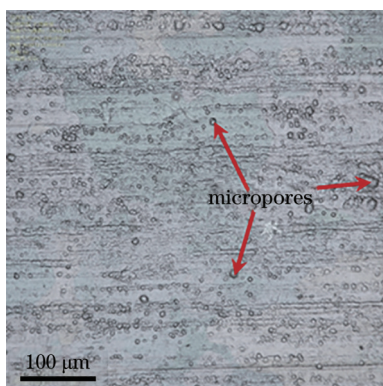


图 1 基材表面氧化膜的微观形貌

Fig. 1 Morphology of oxidation film on the aluminum alloy substrate

保持扫描参数、脉宽和平均功率不变,在不同频率(5, 10, 20 kHz)下开展激光清洗工艺试验,使用

表 2 部分工艺参数

Table 2 Partial process parameters

Parameter	Laser power / W	Pulse width / ns	Scanning speed / ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	Overlap ratio	Spot diameter / μm
Value	300, 500	60	3000	80%	960

分别建立烧蚀机制有限元模型和热应力有限元模型,并分别加载不同频率(5, 10, 15, 20, 25 kHz)的纳秒脉冲激光进行计算,通过计算不同频率下漆层的烧蚀量来研究频率对烧蚀机制的影响,通过不同频率下漆层与基材结合处的热应力来研究频率对剥离机制的影响。

3 试验结果与讨论

3.1 不同频率下的纳秒脉冲激光清洗

脉冲频率会影响脉冲峰值功率、脉冲间隔时间和某区域加载的脉冲次数,对表面热循环的影响较大,进而会显著影响清洗效果。在激光平均功率为 500 W、脉宽为 60 ns 的条件下,采用不同的脉冲频率(5, 10, 20 kHz)进行了 2024 铝合金表面漆层的激

酰胺油漆,这是常用的飞机蒙皮涂料,其在潮湿和盐雾等腐蚀环境中具有良好的耐蚀性和力学性能,与基材上的多种氧化膜均具有较好的结合力^[17-18]。本文采用 IPG 纳秒级脉冲光纤激光器进行激光清洗试验,该激光器的最大平均功率可达到 1 kW,其配备的振镜可使激光在二维平面上高速扫描。

数码显微镜分析试样表面的微观形貌和清洗厚度。部分清洗工艺参数如表 2 所示。

清洗后采用 OLS3000 激光共聚焦扫描显微镜进行放大观察和表面粗糙度测量,该设备将通过共聚焦技术逐层获取的二维图像和焦面上的纵向坐标合成三维形貌,达到测量表面粗糙度的目的。采用数码显微镜对清洗和未清洗界面进行三维观测,最终计算清洗深度。

将高能激光束加载于漆层表面进行清洗的过程中伴随着温度小范围的急剧升高和下降、剧烈升华和烧蚀、等离子体爆发等现象,同时伴随着复杂且急剧变化的应力场,使得无法通过试验测量的方式获得基材的温度场分布;同时,在激光清洗过程中激光的持续时间极短,无法对清洗过程进行监控,因此采用有限元计算分析研究激光清洗过程是目前唯一有效的手段。

光清洗试验。清洗后基体表面的宏观形貌如图 2 所示。

由图 2 可以看出:当激光脉冲频率为 5 kHz 时,基材绝大部分露出,右上部和右下部尚有底漆残留;随着激光频率增大到 10 kHz,基材完全露出,表面涂层基本清除干净,表面有局部金属光泽,基材有轻微损伤;随着脉冲频率继续增大至 20 kHz,基材表面残留有大量底漆。

通过观察试样表面的微观形貌可以准确判断表面漆层的清洗程度和基材表面的损伤程度。图 3 为放大 500 倍的激光除漆后试样表面的微观形貌。激光作用于基材后改变了基材的表面状态,导致其在显微镜下观察时出现了色差:图 3(a)、(c)中红色与蓝色区域为基材,而残留的油漆呈黄色小颗粒

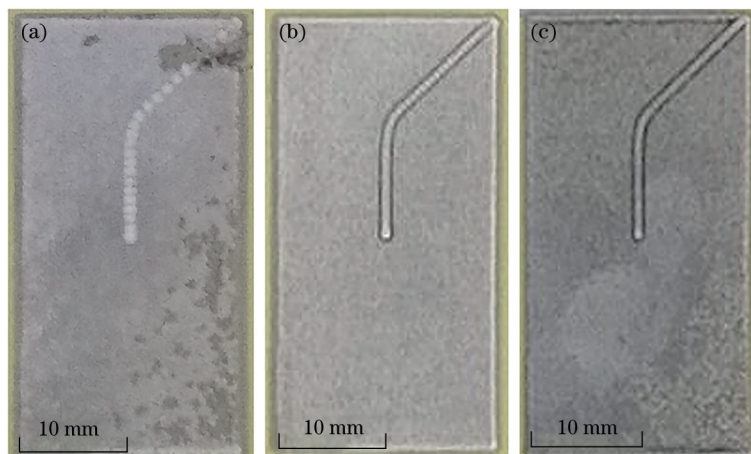


图 2 不同频率的纳秒脉冲激光清洗后基材表面的宏观形貌。(a) 5 kHz; (b) 10 kHz; (c) 20 kHz
Fig. 2 Macro appearances of the substrate cleaned by nanosecond pulse laser with different frequencies.
(a) 5 kHz; (b) 10 kHz; (c) 20 kHz

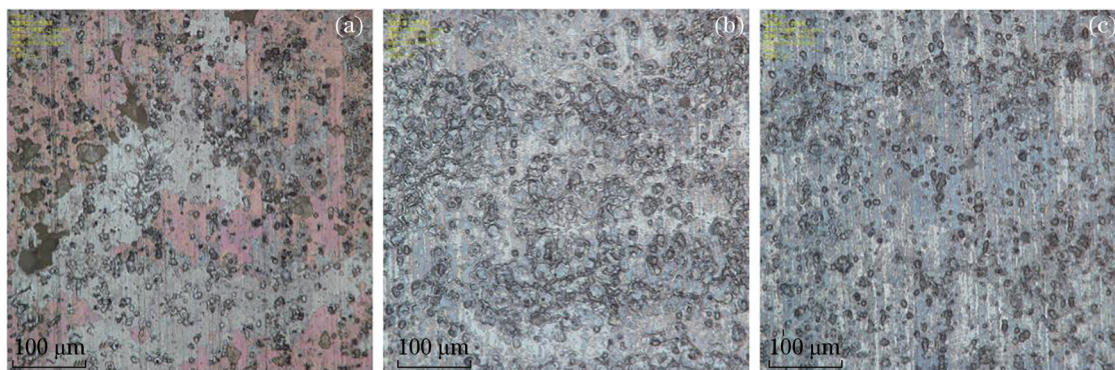


图 3 放大 500 倍的基材表面微观形貌。(a) 5 kHz; (b) 10 kHz; (c) 20 kHz
Fig. 3 Surface morphologies of the substrate observed at 500 times magnification. (a) 5 kHz; (b) 10 kHz; (c) 20 kHz

状。在功率为 500 W 以及脉冲频率为 5 kHz 时, 基材表面仍然有少许漆层残留, 表面粗糙度 R_a 值为 $2.919 \mu\text{m}$; 脉冲频率提升至 10 kHz 时, 基材表面无底漆残留, 但是出现了较多表面微熔化和气化留下的缺陷, 缺陷大体沿着扫描方向分布, 表面粗糙度 R_a 值为 $3.363 \mu\text{m}$; 脉冲频率提升至 20 kHz 时, 表面损伤程度减轻, 表面粗糙度 R_a 值为 $2.875 \mu\text{m}$ 。

在清洗相同厚度的漆层后, 基材表面的损伤程度可以从侧面反映该参数的清洗效果, 损伤越严重, 清洗效率就越高。在一定范围内提升脉冲频率虽然有利于涂层的去除, 但同时也会使基材更容易受损; 超过最佳脉冲频率后, 清洗效果下降。

为了更直接地研究脉冲频率对清洗效率的影响, 本课题组在功率为 300 W、脉宽为 60 ns 的条件下, 采用不同的频率 (5, 10, 20 kHz) 进行了激光清洗试验; 然后采用数码显微镜扫描清洗区域和未清洗区域的界面处, 通过界面两侧平均高度的差异计算油漆涂层的去除厚度, 计算结果如图 4 所示 (右图是

根据左图横线处的高度绘制的横截面示意图)。

经过计算可得: 脉冲频率为 5 kHz 时, 油漆涂层的清洗厚度约为 $60 \mu\text{m}$; 脉冲频率为 10 kHz 时, 油漆涂层的清洗厚度约为 $130 \mu\text{m}$; 脉冲频率为 20 kHz 时, 油漆涂层的清洗厚度约为 $40 \mu\text{m}$ 。对于 $150 \sim 200 \mu\text{m}$ 厚环氧聚酰胺油漆的激光清洗来说, 脉冲频率在 $5 \sim 20 \text{kHz}$ 范围内存在最佳值。

3.2 不同频率下纳秒脉冲激光清洗的数值模拟研究

3.2.1 有限元模型

本节采用 COMSOL Multiphysics 软件建立二维脉冲激光清洗漆层的去除模型。与其他有限元分析软件相比, 该软件中的各物理场通过定义偏微分方程的方式进行耦合, 可以实现多物理场的耦合分析。为了使模拟结果更加准确, 作出了以下适当的假设和简化: 1) 假设激光束为理想的高斯光束, 其能量呈均匀的高斯分布, 且在工作时间内能量分布不随时间变化; 2) 假设基材成分均匀且各向

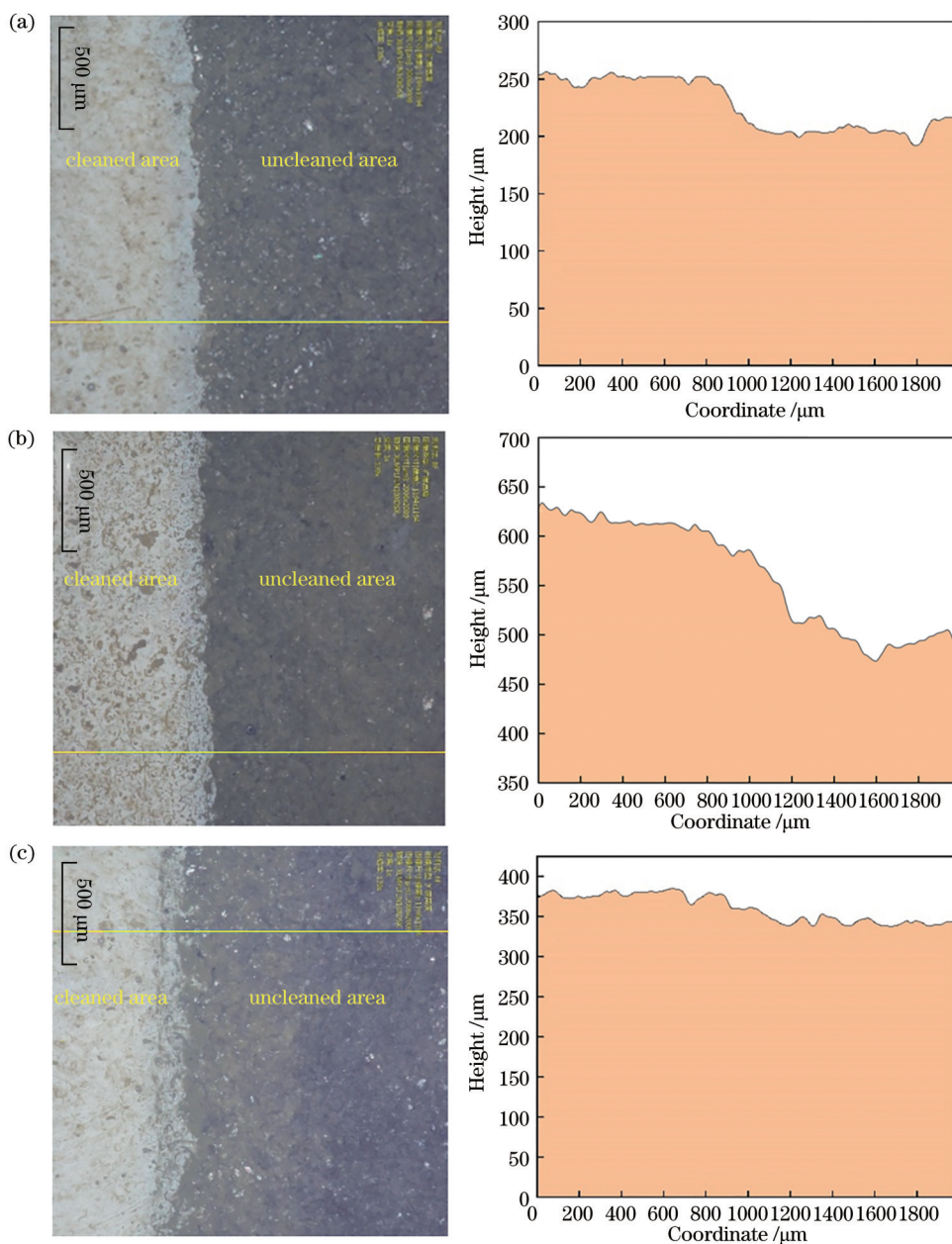


图 4 不同脉冲频率下的清洗界面。(a)5 kHz;(b) 10 kHz;(c) 20 kHz

Fig. 4 Cleaned interface with different pulse frequencies. (a) 5 kHz; (b) 10 kHz; (c) 20 kHz

同性;3)忽略涂层材料的熔化过程,只考虑其升华过程;4)假设浴池内流体的流动符合层流模型,且为不可压缩的牛顿流体;5)材料对激光的吸收率为常数;6)材料只存在相变过程,不发生化学反应。所建模型使用固体传热模型和动网格机制,以较为准确地计算烧蚀机制下的激光清洗过程。

在模型中选择 2024 铝合金基材的厚度为 1 mm,漆层厚度为 150 μm,漆层与基材设置为联合体。漆层的热导率较小,其内部的温度梯度远大于基材,为了满足计算需要,采用区域过渡的自由四边形网格进行网格划分,漆层网格最细,最大网格

尺寸为 60 μm,基材区域的网格尺寸随着与漆层距离的增大而逐渐变大,如图 5 所示。材料参数设置如表 3 所示。

脉冲激光清洗的传热过程遵循傅里叶定律,即单位体积内的热通量与其温度梯度成正比,其微分表达式为

$$q = -k\nabla T, \quad (1)$$

式中: q 为单位体积内的热通量; T 为热力学温度; k 为热导率。

将激光视为作用在涂层表面的表面热源,移动激光热源在试样表面的空间分布表达式为

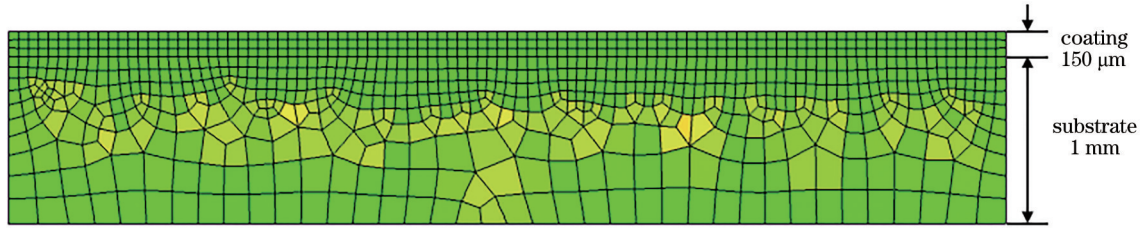


图 5 几何模型与网格划分

Fig. 5 Geometric model and mesh generation

表 3 材料的物理性质

Table 3 Physical properties of materials

Symbol	Unit	Value	Describe
C_1	$W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	201	Thermal conductivity of substrate
C_2	$W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	0.3	Thermal conductivity of coating
rho_1	$kg \cdot m^{-3}$	2700	Material density
rho_2	$kg \cdot m^{-3}$	1300	Coating density
D_1	$J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$	900	Heat capacity of substrate
D_2	$J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$	2528	Heat capacity of coating
Hs_1	$J \cdot kg^{-1}$	2.2×10^7	Sublimation heat of substrate
Hs_2	$J \cdot kg^{-1}$	2×10^5	Sublimation heat of coating
T_1	K	2680	Sublimation temperature of substrate
T_2	K	400	Sublimation temperature of coating

$$p(x, t) = \frac{P}{\pi r^2} \exp\left[-\frac{(x - vt)^2}{r^2}\right] \frac{1}{f\omega}, \quad (2)$$

式中： P 为激光平均功率； r 为光斑半径； ω 为脉宽； t

为时间； v 为激光扫描速度； f 为激光脉冲频率。

5 kHz 脉冲激光平均功率的时间分布如图 6 所

示，脉冲激光的其他参数设置如表 4 所示。

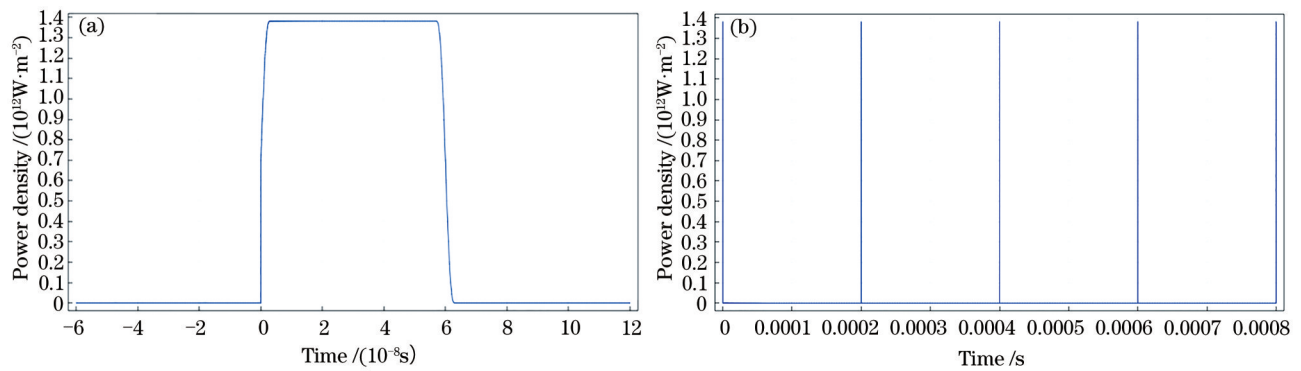


图 6 脉冲激光功率密度的时间分布

Fig. 6 Power density-time distribution of pulse laser

表 4 部分脉冲激光参数

Table 4 Partial pulse laser parameters

Symbol	Unit	Value	Describe
P	W	300	Laser power
v	$m \cdot s^{-1}$	3	Scanning speed
r	mm	0.48	Spot radius
ω	ns	60	Laser pulse width

涂层表面的边界条件为

$$-k \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \Big|_r = I(x, t). \quad (3)$$

模型上表面与侧表面通过热对流与外界发生热交换，边界条件为

$$-k \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \Big|_r = h(T_{\text{ext}} - T), \quad (4)$$

基材底部设置为热绝缘,边界条件为

$$-k \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \Big|_r = 0, \quad (5)$$

式中: T 为边界条件; \mathbf{n} 为模型边界外法线方向; k 为热导率; h 为对流换热系数; T_{ext} 为外部环境温度,设置为 20 °C。各边界上的温度场边界条件如图 7 所示。

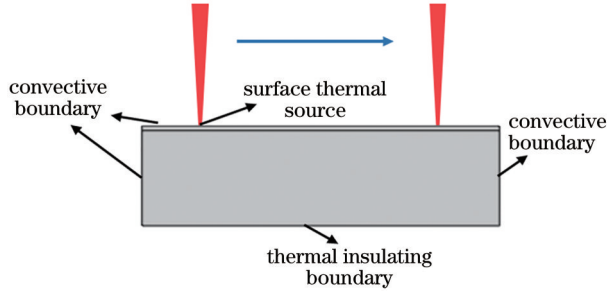


图 7 热边界条件示意图

Fig. 7 Schematic of thermal boundary conditions

涂层材料的升华会导致材料质量和体积的减少,因此需要模拟计算相关区域涂层材料质量和体积去除。在激光清洗过程中,不需要对被烧蚀材料的蒸气进行研究,只需要研究剩余固体材料的温度和形状轮廓等,故只添加变形几何物理场即可。当涂层被烧蚀时,固体材料边界会移动,故在涂层上表面施加一个指定网格的法向速度,此时固体边界的烧蚀速率可以表示为

$$V = \frac{q}{\rho H_s}, \quad (6)$$

式中: V 为材料的烧蚀速率; ρ 表示材料的密度; H_s 表示升华热; q 表示对流换热过程中材料温度超过升华点时的热通量。

在激光加热过程中,由于材料内部产生了温度梯度,涂层与基材的热膨胀系数存在差异,从而导致了热应力的产生;二系统无外部施加的应力,则有

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - E \frac{\partial \epsilon_{\text{th}}}{\partial z}, \quad (7)$$

式中: E 为弹性模量; u 为位移; ϵ_{th} 为热应变; t 为时间。热应变可由热弹性膨胀公式计算得出,即

$$\epsilon_{\text{th}} = \alpha(T - T_{\text{ref}}), \quad (8)$$

式中: α 为材料的热膨胀系数; T_{ref} 为初始温度。则联立(7)、(8)式可得

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - E\alpha \frac{\partial T}{\partial z}. \quad (9)$$

系统边界条件如图 8 所示,基材底部为固定约束,其他边界均为自由边界,系统无初始应力与位移。

根据两个平行平面之间的黏附力公式计算涂

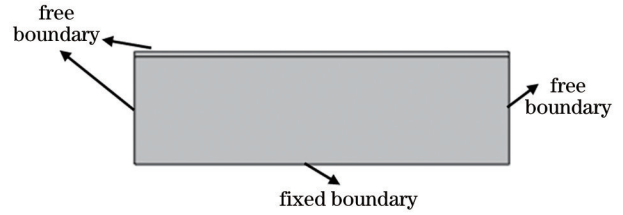


图 8 固体力学模块边界条件示意图

Fig. 8 Schematic of boundary conditions of solid mechanics module

层与基材间的结合力,黏附力 F 计算公式为^[19]

$$F = \frac{h}{8\pi^2 z^3}, \quad (10)$$

式中: h 为 Lifshitz-van der Waals 常数; z 为层间间距。经计算可得油漆与基材间的结合力约为 350 MPa。

3.2.2 烧蚀机制的有限元计算结果

进行有限元计算使用的工艺参数包括脉冲频率(5, 10, 15, 20, 25 kHz)、激光平均功率(300 W)、脉宽(60 ns)。因为脉宽极短,在 3000 mm/s 的扫描速度下,激光单脉冲光斑的形状仍可视作圆形,故单脉冲激光能量密度的计算公式为

$$\Psi = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{\pi r^2} = \frac{P}{f\pi r^2}, \quad (11)$$

式中: Q 为单脉冲激光能量(J); S 为光斑面积(cm^2); P 为激光功率(W); f 为激光脉冲频率(Hz); r 为激光光斑半径(cm)。由脉冲激光能量密度计算公式计算可得 5, 10, 15, 20, 25 kHz 频率下激光单脉冲能量密度分别为 5.53, 2.76, 1.84, 1.38, 1.11 J/ cm^2 。

在不同频率的纳秒脉冲激光清洗过程中,某时刻的温度场和烧蚀形貌如图 9 所示。

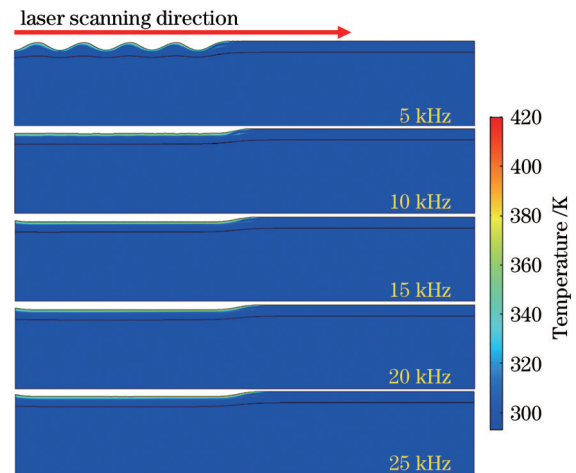


图 9 不同频率下的温度场和烧蚀形貌($t=0.001 \text{ s}$)

Fig. 9 Temperature fields and ablation morphologies at different frequencies ($t=0.001 \text{ s}$)

在扫描速度为 3000 mm/s 的条件下,当频率低至 10 kHz 时,由于脉冲间隔时间过长,各激光脉冲烧蚀形成的凹坑之间开始无法平滑地衔接,导致清洗后的表面起伏不平,这种情况在脉冲频率低至

5 kHz 时更为明显。这种表面的起伏对表面粗糙度的影响非常大,还可能使基材出现严重损伤。在激光功率为 300 W、脉宽为 60 ns 的条件下,不同频率纳秒脉冲激光清洗深度的对比如图 10 所示。

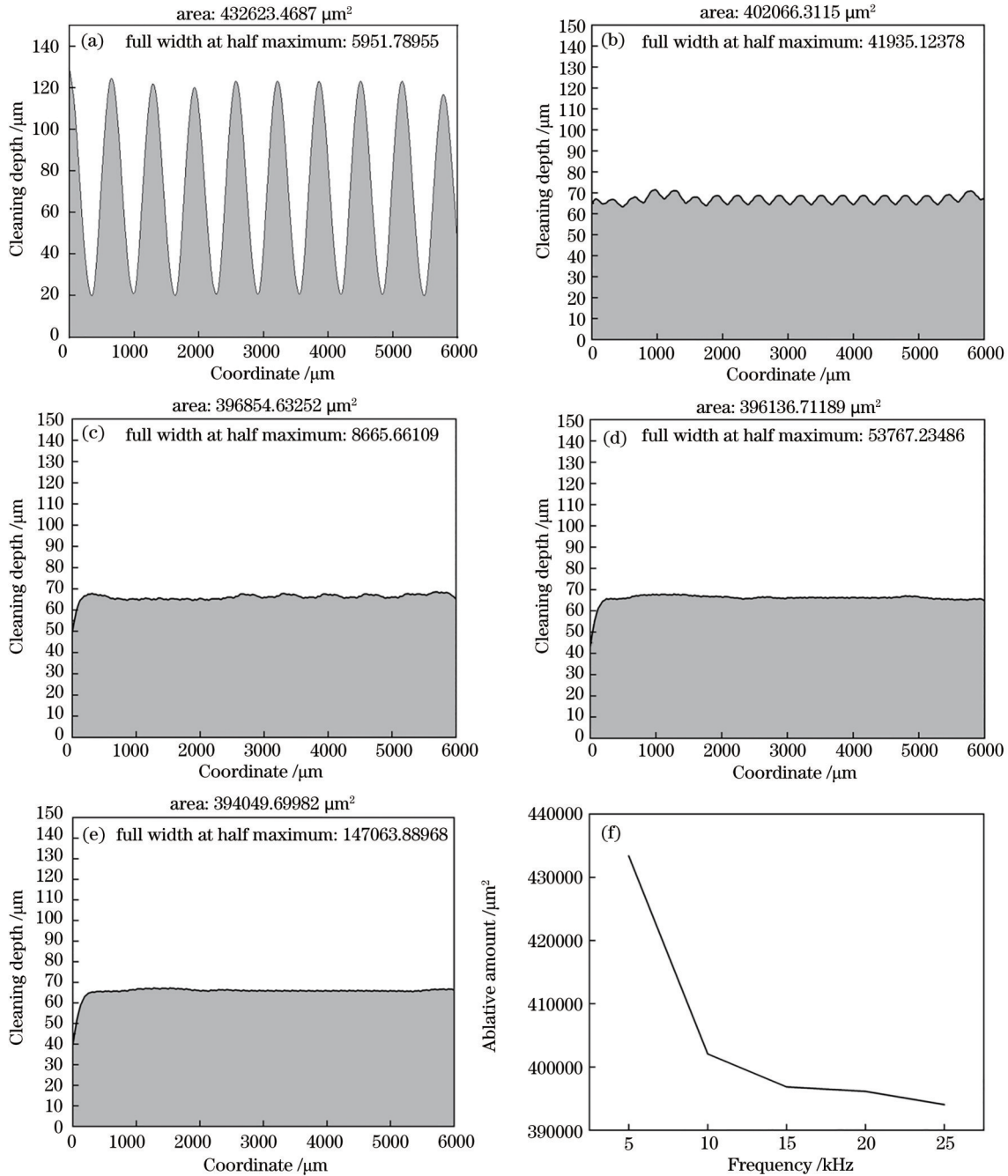


图 10 不同频率下的激光清洗深度和烧蚀量。(a) 5 kHz; (b) 10 kHz; (c) 15 kHz; (d) 20 kHz; (e) 25 kHz; (f) 漆层清洗体积随频率的变化

Fig. 10 Laser cleaning depth and ablative amount at different frequencies. (a) 5 kHz; (b) 10 kHz; (c) 15 kHz; (d) 20 kHz; (e) 25 kHz; (f) change of paint ablative amount with frequency

本节采用的是二维简化模型,由模型表面各处的烧蚀深度对模型长度进行积分即可得到烧蚀体积。采用积分的方法计算了不同频率下的烧蚀量

(烧蚀体积),如图 10(f)所示,脉冲频率在 5~25 kHz 范围内,烧蚀量随着频率的增大而下降(最大降幅超过 9%),在频率超过 15 kHz 后,这种变化趋势趋

于缓和。当频率低至 5 kHz 时,脉冲间隔时间过长,使得激光脉冲烧蚀形成的凹坑无法衔接,凹坑最大深度可达 108.4 μm ,基体表面极不平整。将脉冲频率加大到 10 kHz 时,最大凹坑深度可降低至 8.12 μm ,相比 5 kHz 频率时下降了 92.51%,表面平整度大幅上升,但代价是清洗效率下降了 7.22%。

从数值模拟结果来看,脉冲频率虽然对单脉冲能量有很大影响,但对清洗效率的影响不大。频率越小,单个脉冲能量越大,脉冲时间间隔越大。激光脉冲加载结束后,被照射材料的表面温度从烧蚀温度(升华点)呈 e 的负指数曲线形式迅速下降;当第二个脉冲加载时,需要先将表面温度提升到烧蚀温度(升华点)之后才能继续烧蚀涂层。随着频率的增加,清洗过程中热循环次数增多,热量损失增加,导致热量难以积累,因此清洗效果下降。但是只有在一定的频率范围内,频率才会对清洗效率有显著影响,而这个频率范围与涂层材料的属性、清洗环境有很大关系。

3.2.3 剥离机制的有限元计算结果

选取 $x=0.5\text{ mm}$ 处漆层与基材的结合点为域点探针的测试点,如图 11 中圆点所示,计算该点的应力值。

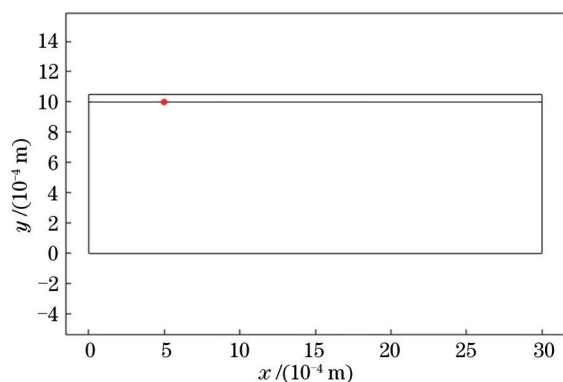


图 11 域点探针位置

Fig. 11 Location of domain probe

在功率为 300 W、脉宽为 60 ns 的条件下,油漆涂层与基材结合处的最大热应力随脉冲频率的变化如图 12 所示,图中虚线为漆层与基材的结合力。可见,在脉冲频率达到 15 kHz 时,热振动效应产生的热应力低于漆层与基材的结合力,即无法将漆层从基材表面剥离。

将各脉冲频率下的最大应力与脉冲能量密度进行拟合,拟合结果如图 13 所示。可见,最大应力值与脉冲能量密度呈线性正相关关系,这说明最大

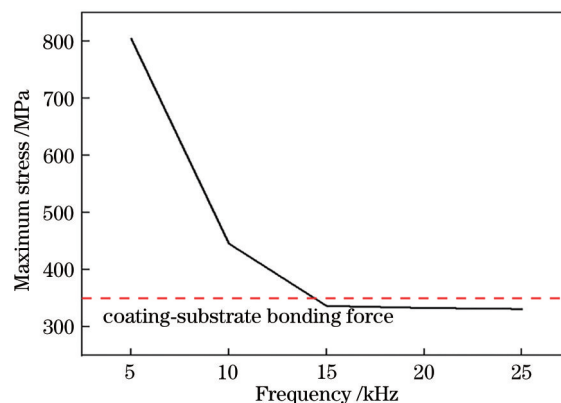


图 12 漆层与基材结合处最大应力随频率的变化

Fig. 12 Maximum stress versus frequency for the interface between coating and substrate

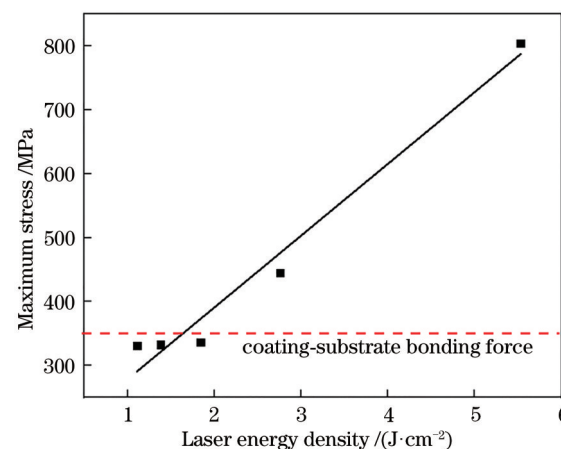


图 13 最大热应力随脉冲能量密度的变化

Fig. 13 Variation of maximum thermal stress with pulse energy density

应力值随脉冲频率变化的主要原因是脉冲能量密度在变化。图中虚线为漆层与基材的结合力。可见,要想获得较好的剥离效果,就要保证最大应力值高于结合力,因此,脉冲能量密度至少要达到 1.64 J/cm^2 。

不同频率的纳秒光纤激光清洗油漆涂层的应力场数值模拟结果如图 14 所示,图中虚线对应的是由(10)式计算得到的漆层与基材的结合力。脉冲频率为 5 kHz 和 10 kHz 时,最大应力值均超过了漆层与基材之间的结合力,均能将漆层剥离;而且当脉冲频率为 10 kHz 时,应力值超过漆层结合力的次数更多,在实际清洗过程中,能将漆层剥离得更彻底。激光清洗试板试验中 10 kHz 脉冲频率下的清洗深度较 5 kHz 时提升了 116.67% 的结果证实了这一点。

虽然脉冲频率为 5 kHz 时采用数值模拟计算得

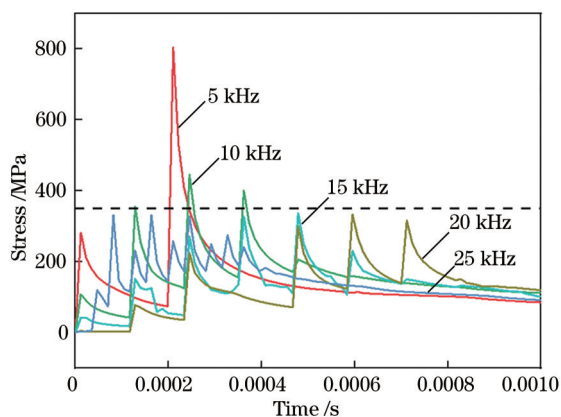


图 14 不同频率下探点的应力

Fig. 14 Stress of probe point at different frequencies

出的最大应力值超过了 800 MPa,但随着激光脉冲的加载,应力超过漆层结合力时漆层将被剥离,其应力也会被释放,此时剩余的脉冲能量加载在游离的油漆碎片上没有意义,即油漆涂层在实际清洗过程中不会产生明显超过结合力的热应力,且该频率下应力值超过漆层结合力的次数大幅减少,因此漆层的剥离效果变差。

脉冲频率继续增加至 15 kHz 及以上时,单脉冲能量的降低使得热应力大幅减弱,虽然出现了更多次的应力峰,但其峰值均低于漆层结合力,使得油漆难以被剥离基材表面,导致清洗效果出现断崖式下降。激光清洗试板试验中 20 kHz 脉冲频率下的清洗深度比 10 kHz 时下降了 69.23% 的结果证实了这一点。

4 结 论

本文采用不同脉冲频率的纳秒脉冲激光对表面涂有 150 μm 厚油漆涂层的铝合金开展了激光清洗试验,观察了表面的宏观和微观形貌,并计算了漆层的去除厚度。之后结合数值模拟,讨论了脉冲频率对激光除漆过程的影响,得出如下结论:

1) 通过观察清洗后试样表面的宏观、微观形貌以及测量试样的表面粗糙度,对不同频率下漆层的清洗深度进行了分析;在激光功率为 300 W、脉宽为 60 ns 的条件下,当脉冲频率为 10 kHz 时,可以获得最大清洗深度(约为 130 μm)。

2) 通过激光清洗过程中烧蚀机制的数值模拟研究发现,在单一烧蚀机制下的纳秒脉冲激光清洗中,随着脉冲频率增大,漆层的烧蚀量有所下降,但当频率超过 15 kHz 后,这种变化趋势趋于缓和,在 5~25 kHz 频率范围内烧蚀量的最大降幅超过

了 9%。

3) 通过剥离机制的数值模拟研究发现,5 kHz 脉冲频率下的最大热应力值可超 800 MPa,但超过漆层结合力 350 MPa 的应力峰只有一个;相比之下,10 kHz 脉冲频率下的有效应力峰达到了三个,剥离效果更好,与试验结果相符。

4) 对于表面涂有 150 μm 厚环氧基底漆涂层的 2024 铝合金来说,在保证单脉冲能量密度高于 1.64 J/cm² 的条件下,提升脉冲频率将获得更好的清洗效果。

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] Wang Z M, Zeng X Y, Huang W L. Status and prospect of laser cleaning procedure[J]. *Laser Technology*, 2000, 24(2): 68-73. 王泽敏, 曾晓雁, 黄维玲. 激光清洗工艺的发展现状与展望[J]. *激光技术*, 2000, 24(2): 68-73.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [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] 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.
- [10] Qiu T W, Yi J L, Chen C, et al. Characteristics of nanosecond pulse laser cleaning paint coatings from 2024 aluminum alloy surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0514001.
邱太文, 易俊兰, 程程, 等. 纳秒脉冲激光清洗 2024 铝合金表面油漆涂层特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0514001.
- [11] Tan R Q, Zheng G, Zheng Y J, et al. The effect of laser paint stripping on the mechanical properties of the substrate[J]. Laser Journal, 2005, 26(6): 83-84.
谭荣清, 郑光, 郑义军, 等. 激光除漆对基材力学性能的影响[J]. 激光杂志, 2005, 26(6): 83-84.
- [12] 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.
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.
- [13] 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.
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.
- [14] Gao L Y. Numerical simulation and experimental study of aluminum alloy paint layer cleaned by nanosecond laser[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.
高辽远. 纳秒脉冲激光清洗铝合金表面漆层数值模拟与实验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- [15] 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.
- [16] Shi S D. Researches on theoretical model, numerical simulation and application of painting removal by laser cleaning[D]. Tianjin: Nankai University, 2012.
施曙东. 脉冲激光除漆的理论模型、数值计算与应用研究[D]. 天津: 南开大学, 2012.
- [17] Zhou R D. Surface treatment and coating process of aircraft skin[J]. Coating and Protection, 2018, 39(6): 51-54, 62.
周如东. 飞机蒙皮表面处理和涂层选择及涂装工艺[J]. 涂层与防护, 2018, 39(6): 51-54, 62.
- [18] Lu W M, Ji J X, Zhao B H, et al. The pretreatment and coating of aircraft skin surface[J]. Shanghai Coatings, 2016, 54(4): 13-18.
陆文明, 季建霞, 赵宝华, 等. 飞机蒙皮表面的预处理及涂装[J]. 上海涂料, 2016, 54(4): 13-18.
- [19] 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.