

激光与光电子学进展

纳秒脉冲激光清洗 2024 铝合金表面油漆涂层
特性研究邱太文¹, 易俊兰¹, 程程¹, 孙浩然², 田泽², 雷正龙^{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 采用不同脉冲频率和脉冲宽度的纳秒激光开展了 2024 铝合金表面 150 μm 厚环氧基底漆涂层的激光清洗研究, 分析了激光清洗试样表面的宏观和微观形貌, 探讨了不同激光参数下的除漆效果以及基材表面的损伤情况, 并计算得到了在脉冲宽度为 60 ns、脉冲频率为 20 kHz 下的基材损伤阈值为 556.17 W。试验结果表明: 当激光功率、脉冲宽度和脉冲频率分别为 500 W、60 ns 和 20 kHz 时, 试样表面的油漆涂层被完全去除, 且基材表面未发生熔化; 在该参数下清洗后, 试样表面氧元素的质量分数为 43.44%, 与原始基材表面氧元素的质量分数(42.51%)接近, 说明基体表面的阳极氧化膜在激光清洗过程中未受损伤; 在激光功率为 500 W、脉冲宽度为 60 ns、脉冲频率为 20 kHz 的激光参数下除漆后, 基材表面的显微硬度为 168.34 HV, 接近原始基材表面显微硬度的 99.1%, 说明采用该参数清洗未影响基材表面的显微硬度。

关键词 激光技术; 激光清洗; 铝合金; 油漆; 损伤; 表面形貌

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0514001

Characteristics of Nanosecond Pulse Laser Cleaning Paint Coatings on
2024 Aluminum Alloy SurfaceQiu Taiwen¹, Yi Junlan¹, Cheng Cheng¹, Sun Haoran², Tian Ze², Lei Zhenglong^{2*}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, nanosecond laser with different pulse frequencies and pulse widths was used to remove 150 μm thick epoxy coatings from a 2024 aluminum alloy surface. The macro and microsurface morphologies of the sample cleaned by laser were analyzed, and the paint removal effect and damage to the substrate under different laser parameters were discussed. The substrate damage threshold was calculated to be approximately 556.17 W under the pulse width and frequency of 60 ns and 20 kHz, respectively. Results show that the paint coating on the sample surface is completely removed, and the substrate surface is not melted when the laser power, pulse width, and pulse frequency are set to 500 W, 60 ns, and 20 kHz, respectively. The oxygen content in the sample surface cleaned under the above parameters is 43.44%, while that in the original substrate surface is 42.51%, which are close to each other. The oxygen content in the cleaned sample surface and original substrate surface is approximately equal, suggesting that the anodized film on the substrate surface is not damaged during the cleaning process. After removing the paint by the above laser parameters, the

收稿日期: 2020-05-11; 修回日期: 2020-06-09; 录用日期: 2020-08-03

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

microhardness of the cleaned sample surface is 168.34 HV, which is 99.1% of the microhardness of the original substrate surface, indicating that the microhardness of the substrate surface is unaffected by the laser cleaning paint process.

Key words laser technique; laser cleaning; aluminum alloy; paint; damage; surface morphology

OCIS codes 140.3390; 140.3538; 140.3510; 140.3470

1 引言

飞机每隔一段时间(5年左右)就需要进行一次大修,因为蒙皮表面的油漆涂层会由于光照、温度、湿度等因素而产生老化、龟裂、局部脱落等现象,失去对蒙皮的保护作用^[1]。为了重新在蒙皮表面喷涂油漆以及检测铝合金蒙皮和结构件中的裂纹与缺陷^[2],在大修时需要除去原有的漆层。飞机蒙皮表面的除漆在飞机大修过程中是一个重要环节^[3]。传统的脱漆方法主要有机械打磨法、抛丸喷砂法和脱漆剂除漆法^[4-5]。其中:机械打磨法工作效率低,成本高,工作环境恶劣,容易损伤基底表面;喷砂法的气体、粉尘排放量高,噪声污染大,容易产生二次污染;除漆剂脱漆法是目前最常用的飞机蒙皮脱漆方法,该方法的除漆效果较好,但脱漆剂大多有毒有害,且成本高昂。激光清洗技术是一种新型的表面污染物去除技术,具有绿色高效、自动化程度高、基体损伤可控等优点^[5],在脱漆^[6]、除锈^[7]等领域得到了广泛应用。

近年来,随着激光器技术的进步,尤其是大功率纳秒脉冲激光器的出现,激光除漆技术得到了越来越多的关注。Jasim等^[8]采用脉冲宽度为250 ns的脉冲光纤激光对铝合金表面进行了除漆试验,并通过光谱仪采集光发射光谱实现了对激光加工深度的快速在线监测。D'Addona等^[9]采用纳秒激光对船用碳钢板进行了焊前脱漆处理,通过提高激光平均功率的方法提高了激光清洗效率。Chen等^[10]采用激光清洗方法去除了低碳钢板表面的油漆涂层,并认为激光功率密度是影响表面加工质量的最关键因素。Daurelio等^[11]采用不同的激光光源对多种材料表面的涂层进行了清洗,结果发现,涂层种类会影响激光的清洗效率。Shi等^[12]研究了纳秒激光清洗过程对基材表面组织和元素分布的影响。Li等^[13]采用纳秒激光去除了钢结构表面的油漆涂层,并进行了重新喷漆试验,重新喷涂的油漆涂层的黏着强度达到20 MPa,激光除漆的表面处理质量远高于ISO 8501标准的要求。朱伟等^[14]研究了纳秒脉冲激光除漆对铝合金表面显微硬度的影响,结果发现,激光清洗可以提高基材表面的力学性能。目前,针对

纳秒脉冲激光除漆质量以及除漆过程对基材影响的研究已有很多,但大部分研究针对的是几十微米厚的油漆涂层,且未考虑激光对基材表面氧化膜的影响。飞机蒙皮表面油漆涂层的厚度通常可达100 μm 以上,且铝合金基材表面覆盖有一层阳极氧化膜^[15],在除漆的同时要对氧化膜进行保护。

基于上述背景,本文使用纳秒脉冲激光对铝合金表面厚度为150 μm 左右的油漆涂层进行去除试验,通过改变脉冲宽度和脉冲频率优化激光除漆工艺,并对纳秒激光除漆后基材表面的性能以及成分进行了分析,研究了纳秒激光除漆过程对铝合金基材表面的影响。

2 试验设计

本文使用纳秒脉冲激光对铝合金基材表面的环氧基底漆涂层进行了清洗试验,试样表面的涂层厚度约为150~200 μm 。铝合金基材为2024铝合金,在涂漆前表面经过阳极氧化处理。未涂漆的基材表面如图1所示,由于阳极氧化处理过程中氧化膜发生局部溶解,基材表面出现了较多细小的微孔。

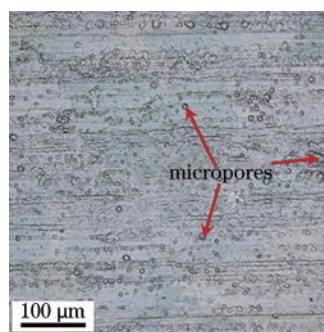


图1 未涂漆基材的表面形貌

Fig. 1 Surface morphology of unpainted substrate

试验中使用的激光清洗系统是IPG纳秒激光器,其激光波长为1064 nm,最大平均输出功率为1000 W,脉冲频率在2~100 kHz范围内可调,脉冲持续时间在30~100 ns之间可调。激光器发出的激光可通过光纤进行传输,激光经过准直镜后变为平行光束,经扫描振镜系统反射后,在场镜的聚焦作用下垂直照射到试样表面,如图2所示。场镜的焦

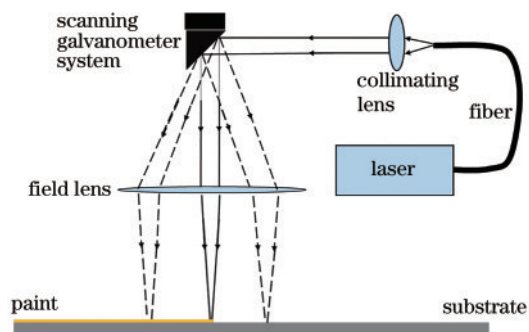


图 2 纳秒激光清洗光路示意图

Fig. 2 Schematic of nanosecond laser cleaning optical path

距为 183 mm, 焦点处的光斑直径为 $960\ \mu\text{m}$ 。激光光斑可以通过扫描振镜的摆动在工件表面实现高速移动。在本试验中, 激光以“弓”字形轨迹进行扫描, 清洗区域为 $80\ \text{mm} \times 40\ \text{mm}$ 的矩形, 激光扫描速度为 $3000\ \text{mm/s}$, 扫描行间距为 $0.2\ \text{mm}$ 。

在清洗试验中, 保持扫描速度及行间距不变, 采用不同的脉冲频率 (5, 10, 20 kHz) 以及脉冲持续时间 (30, 60, 100 ns) 在相同的激光平均功率下进行激光清洗工艺试验, 通过观察清洗后试样表面的宏观形貌分析除漆效果。使用 Olympus DX510 数码

显微镜观察试样表面的微观形貌并测量清洗厚度, 通过表面微观形貌初步判断激光除漆过程对基材表面的影响, 根据测得的清洗厚度计算除漆阈值与基材损伤阈值。为了更准确地分析激光清洗后试样表面的阳极氧化膜是否发生了损伤, 采用扫描电镜 HELIOS NanoLab 600i 及其附带的能谱仪对除漆后试样表面的元素成分进行分析, 并采用显微硬度计测试基材表面的显微硬度。

3 试验结果与讨论

3.1 纳秒激光清洗铝合金表面油漆涂层的工艺试验

在激光清洗过程中, 激光功率是影响清洗效果的最主要参数, 脉冲频率和脉冲宽度对清洗效果也有较为显著的影响: 脉冲宽度会影响清洗过程中激光能量的热扩散深度, 脉冲频率则会影响脉冲激光峰值功率和作用在同一区域的激光脉冲数。

在激光平均功率为 $500\ \text{W}$ 的条件下, 本文通过改变脉冲宽度和脉冲频率开展了铝合金表面油漆涂层激光清洗试验, 试验参数如表 1 所示。

表 1 激光清洗试验工艺参数表

Table 1 Technological parameters of laser cleaning test

Number	Average laser power /W	Pulse frequency /kHz	Pulse width /ns	Scanning speed /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Line space /mm
1#		5	30		
2#		5	60		
3#		5	100		
4#		10	30		
5#	500	10	60	3000	0.2
6#		10	100		
7#		20	30		
8#		20	60		
9#		20	100		

清洗试样表面的宏观形貌如图 3 所示。可以看出: 5#、8# 和 9# 试样表面的油漆涂层已全部脱离, 其他试样表面的涂层仍有残留, 8# 试样清洗后的基材表面颜色较为暗淡, 其表面可能被氧化膜覆盖。由上述试验结果可知, 较大的脉冲频率和脉冲宽度更有利于去除较厚的油漆涂层。这是由于纳秒激光的加热时间短, 峰值功率高, 且油漆的导热性差, 激光能量难以通过油漆涂层向下传递。单次脉冲能够去除的油漆涂层的厚度有限, 过高的单脉冲激光能量容易使基材表面的油漆涂层过热并快速气化, 带走一部分激光能量, 造成能

量损失。适当提高激光脉冲频率可以增加激光脉冲次数, 通过多次脉冲逐层去除油漆, 从而提高除漆效率。增加脉冲宽度可以提高激光能量在涂层中的扩散深度, 增加单个激光脉冲去除油漆涂层的厚度, 在去除较厚油漆涂层的同时可以有效提高除漆效率。

基于上述试验结果, 采用 5#、8# 和 9# 试样对应的脉冲频率与脉冲宽度, 通过改变激光功率进行清洗试验, 清洗后的试样表面如图 4 所示。可见: 三组激光参数在激光平均功率为 $500\ \text{W}$ 时均能有效去除试样表面的油漆涂层; 当激光功率增加至 $600\ \text{W}$

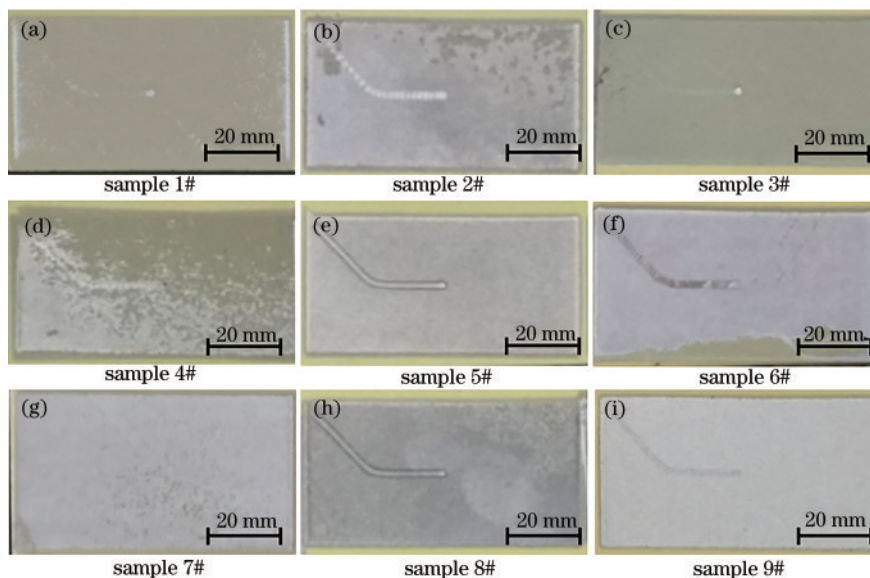


图 3 不同脉冲频率与脉冲宽度下纳秒脉冲激光的清洗效果

Fig. 3 Cleaning effect of nanosecond pulse laser with different pulse frequencies and pulse widths

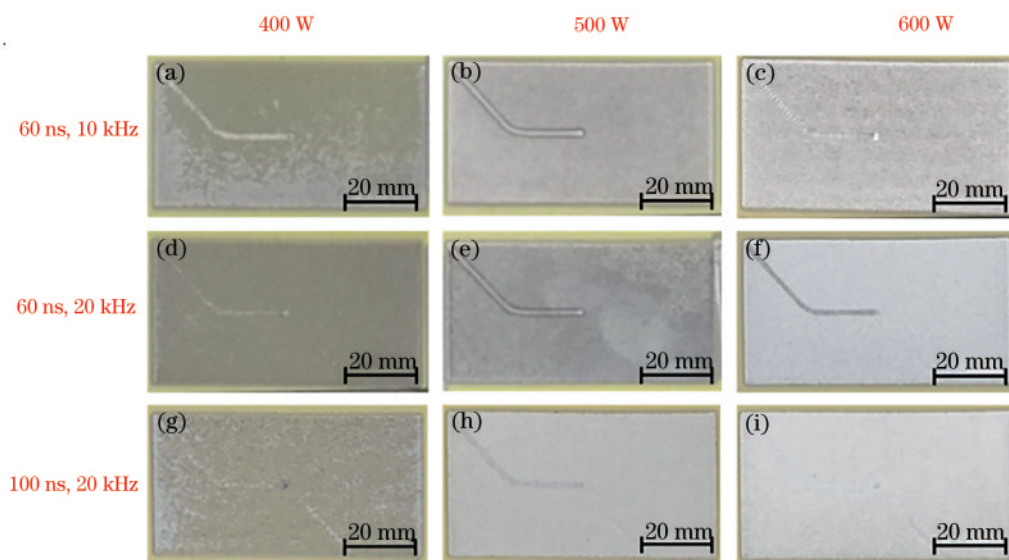


图 4 不同激光平均功率下的纳秒脉冲激光清洗效果

Fig. 4 Cleaning effect of nanosecond pulse laser with different average laser powers

时,在脉冲宽度为 60 ns 和脉冲频率为 20 kHz 的条件下,试样表面较 500 W 时更有金属光泽,这可能是由于较高的激光能量去除了试样表面的氧化膜,使铝合金基材露出。

3.2 纳秒激光清洗铝合金表面油漆涂层对基材表面微观形貌的影响

通过对试样表面的微观形貌进行观察可以判断基材表面在激光清洗过程中是否发生了熔化,若基材发生熔化,则说明激光清洗过程中过剩的激光能量对基材造成了损伤。基材表面由于阳极氧化

处理原本就存在凹坑缺陷,若清洗后基材表面的凹坑尺寸与深度增加,则认为基材表面发生了损伤。

纳秒脉冲激光除漆试样(5#、8#、9#试样)表面放大 500 倍后的微观形貌如图 5 所示。5#试样的基材表面总体来说较为平整,表面的凹坑分布相较原始基材更加密集,且凹坑边缘在激光清洗过程中发生了熔化并重新凝固,在凹坑周围形成了侧壁结构,凹坑与侧壁组合形成了陨石坑形貌。8#试样基材的表面形貌接近原始基材的表面形貌,基材表面未发生重熔。9#试样的基材表面出现了较为密集的陨石

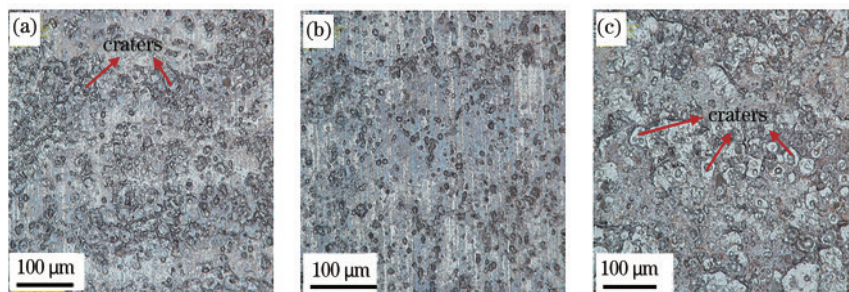


图 5 纳秒脉冲激光清洗试样的表面微观形貌。(a) 5#试样;(b) 8#试样;(c) 9#试样

Fig. 5 Surface morphologies of samples cleaned by nanosecond pulse laser. (a) Sample 5#; (b) sample 8#; (c) sample 9#

坑形貌,说明在清洗过程中基材表面发生了比较严重的熔化现象。

为了观察不同试样表面缺陷的尺寸,将5#、8#、9#试样除漆后的表面在数码显微镜下放大至2000倍,并对试样表面形貌曲线进行测量,然后基于该曲线测量凹坑的深度(将凹坑周围较高一侧顶点的高度减去凹坑最低点的高度,作为凹坑的深度),通过凹坑尺寸的变化分析激光清洗过程对试

样表面的影响。

图6展示了不同试样表面的形貌曲线以及凹坑深度的测量方法。在5#和9#试样基材表面能明显观察到陨石坑形貌,在8#试样基材表面只能观察到由阳极氧化处理产生的凹坑,凹坑周围没有侧壁结构,凹坑的深度与尺寸比5#和9#试样更小。综合上述分析可知,5#和9#试样基材表面可能均在激光作用下发生了熔化现象,8#试样表面比较平整,未发生熔化。

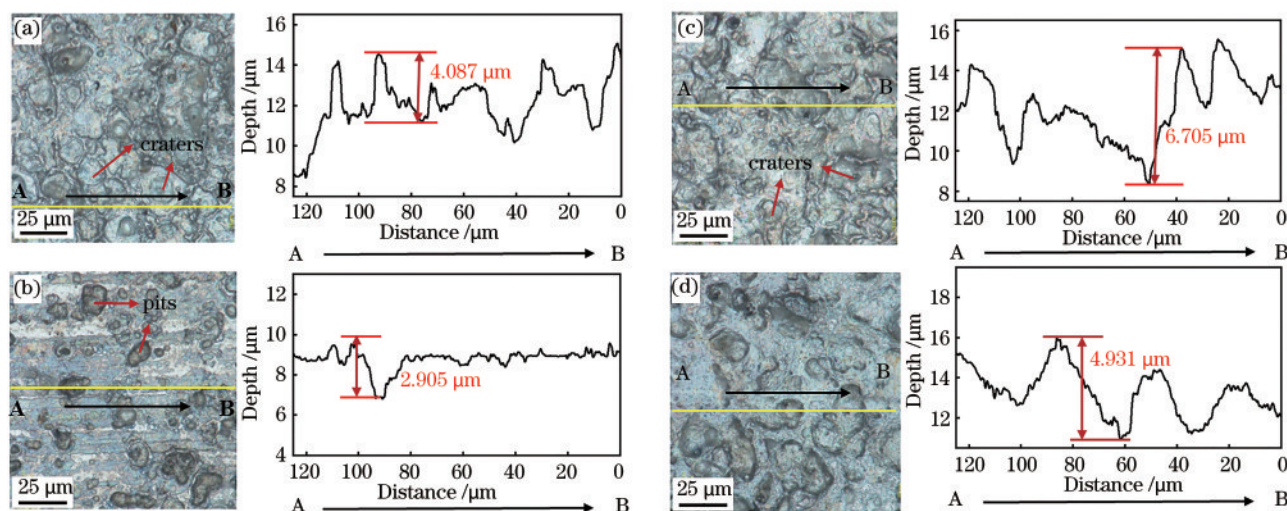


图 6 纳秒脉冲激光清洗试样表面的缺陷尺寸。(a) 5#试样;(b) 8#试样;(c) 9#试样;(d) 在激光功率为 600 W、脉冲宽度为 60 ns 和脉冲频率为 20 kHz 条件下清洗后的试样

Fig. 6 Defect size on the surface of samples cleaned by nanosecond laser. (a) Sample 5#; (b) sample 8#; (c) sample 9#; (d) sample cleaned under the conditions of laser power of 600 W, pulse width of 60 ns, and pulse frequency of 20 kHz

使用8#试样对应的脉冲频率和脉冲宽度,将激光功率增至600 W,观察试样表面的微观形貌,如图6(d)所示。在该参数下,试样表面在激光作用下发生了较为严重的熔化现象,基材表面的熔融金属快速冷却并凝固收缩形成凹凸不平的表面形貌,试样表面凹坑的直径明显增大,深度也有所增加(与8#试样相比)。

使用数码显微镜对不同参数下清洗后的试样

表面的凹坑尺寸与表面粗糙度进行测量,并将测量结果与原始基材表面的测量结果进行对比。由于清洗后试样的表面微观形貌并不均匀,为确保试验结果的准确性,测量时在每个试样表面取三个不同的区域,测量每个区域的表面粗糙度以及区域内所有凹坑的深度,计算每个试样表面粗糙度(R_a)与凹坑深度的平均值,结果如图7所示。

试样表面粗糙度与表面凹坑深度的变化趋势基

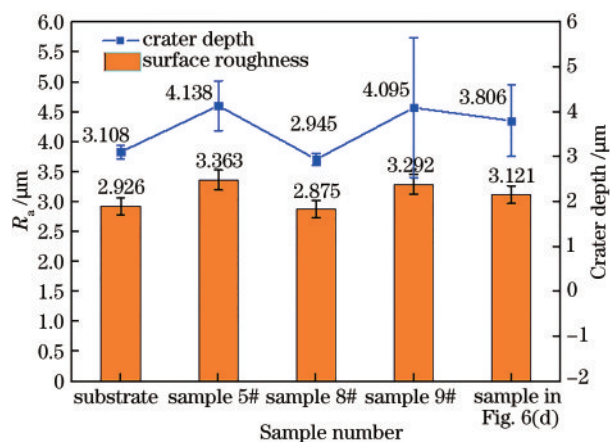


图 7 在不同激光功率下清洗后的试样与原始基材的表面粗糙度及凹坑深度

Fig. 7 Surface roughness and crater depth of samples cleaned by laser at different laser powers and original substrate

本保持一致。5#和9#试样表面凹坑的平均深度较大,导致试样的表面粗糙度相对于原始基材均略有增加。8#试样表面由于未发生损伤,凹坑深度和表面粗糙度与原始基材较为接近。在相同的脉冲宽度及脉冲频率下,将功率增大至 600 W 清洗后的试样,

即图 6(d)中的试样,在过剩的激光能量作用下,其基材表面的凹坑缺陷加深扩大,表面粗糙度略有增加。

根据上述试验结果,从除漆效果以及激光除漆过程对基材的损伤两方面考虑,最优的激光除漆工艺参数为激光平均功率 500 W,脉冲宽度 60 ns,脉冲频率 20 kHz。

3.3 纳秒激光清洗铝合金表面油漆涂层后的表面成分分析

通过对基材表面微观形貌进行分析可知,8#试样基材表面未发生熔化,且其表面微观形貌接近原始基材,故对清洗后的8#试样与原始基材表面进行能谱分析,以进一步通过试样表面的氧元素含量更准确地分析基材表面的阳极氧化膜是否发生了损伤。能谱分析结果如图 8 所示。8#试样表面氧元素的质量分数为 43.44%,与原始基材表面的 42.51% 较为接近,说明在纳秒激光除漆后该试样表面仍有一定厚度的阳极氧化膜存在。这可能是由于激光清洗过程中基材表面的氧化膜未被破坏,但无法排除基材表面氧化膜被破坏后,基材表面的铝在较高温度下与空气接触发生二次氧化的可能。因此,接下来通过分析基材的损伤阈值对 8#试样表面氧化膜的损伤情况进行更准确的判断。

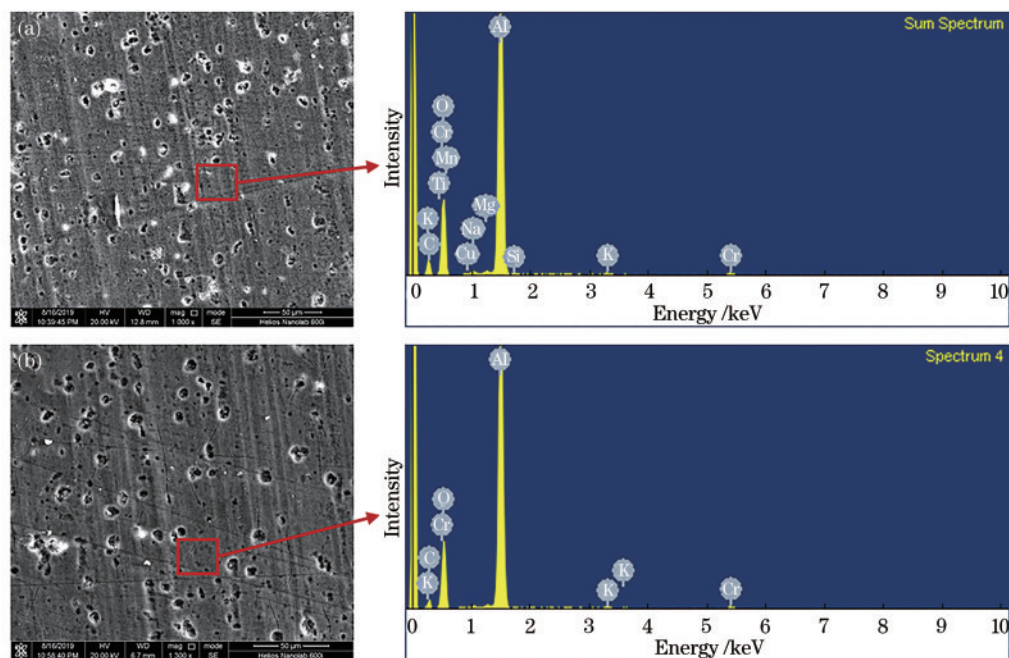


图 8 原始基材与纳秒脉冲激光清洗试样表面的能谱分析。(a)原始基材;(b)8#试样

Fig. 8 EDS analysis of the surface of original substrate and sample cleaned by nanosecond pulse laser. (a) Original substrate; (b) sample 8#

3.4 纳秒激光清洗铝合金表面油漆涂层的阈值

在激光清洗油漆涂层过程中,存在一个临界激

光功率。当激光功率低于该临界值时,无法去除油漆涂层,这个临界值被称为激光清洗阈值。对于基

材而言,也存在一个临界值,当激光能量密度高于该值时,有可能对基材造成损伤,这个临界值被称为基材损伤阈值。

在脉冲宽度为 60 ns、脉冲频率为 20 kHz 的条件下,使用不同功率的激光分别对带有油漆涂层的试样和原始基材进行清洗试验。试验结束后,采用数码显微镜测量清洗区域和未清洗区域的表面高度差,即可得到不同功率下油漆涂层的去除厚度以及基材损伤厚度,如图 9 所示。

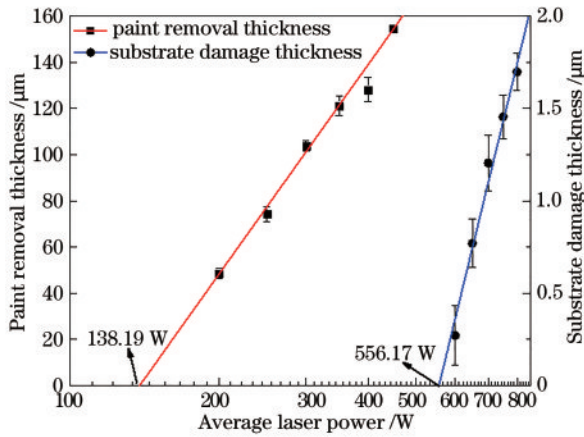


图 9 当脉冲宽度为 60 ns、脉冲频率为 20 kHz 时,不同激光功率下油漆涂层的去除厚度及基材损伤厚度

Fig. 9 Paint removal thickness and substrate damage thickness under different laser powers with pulse width of 60 ns and pulse frequency of 20 kHz

根据(1)式将油漆去除厚度和基材损伤厚度与激光功率的对数进行线性拟合,所得直线的 x 轴截距即为对应的阈值。

$$h = \frac{1}{\alpha} \lg \left[\frac{P}{P_{th}} \right], \quad (1)$$

式中: h 为油漆涂层的去除厚度; P 为激光功率; P_{th} 为激光清洗阈值; α 为材料对激光的吸收系数,仅与激光波长和材料本身相关。

由图 9 中的拟合曲线可以看出,当脉冲宽度为 60 ns、脉冲频率为 20 kHz 时,激光清洗阈值为 138.19 W,基材损伤阈值为 556.17 W,与前文中的试验结果相符。当激光功率低于该阈值时,基材不会发生损伤。因此,当激光除漆工艺参数为激光功率 500 W,脉冲宽度 60 ns,脉冲频率 20 kHz 时,可以完全去除油漆涂层,且不会损伤基材表面的氧化膜。

3.5 纳秒激光清洗铝合金表面油漆涂层对基材表面显微硬度的影响

铝合金表面的阳极氧化膜能够起到提高表面

显微硬度的作用。尽管 8# 试样表面未发生损伤,但激光清洗过程仍会对其基材表面起到加热作用,可能会影响基材表面的性能。为了研究激光清洗过程对试样表面氧化膜是否产生了影响,本文对 8# 试样进行表面显微硬度测试,以研究激光清洗过程对基材表面力学性能的影响。在 8# 试样与原始基材表面分别取 5 个不同的区域,每个区域取 9 个点进行测试,样本点呈田字格点阵分布,相邻两点间距为 100 μm,计算不同区域内对应位置点的显微硬度的平均值,计算结果如图 10 所示。显微硬度测试试验中使用的硬度计为维氏硬度计,加载载荷为 1.96 N,保载时间为 10 s。

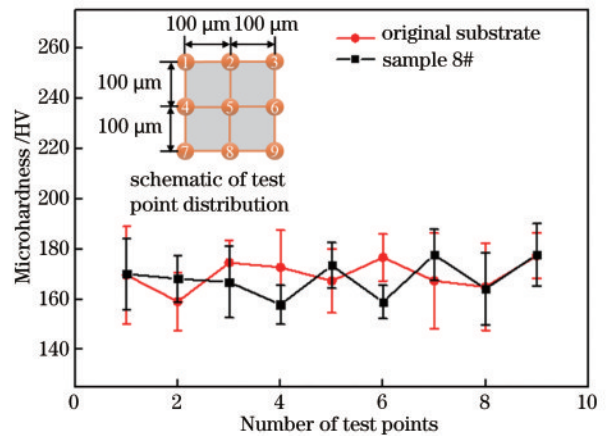


图 10 原始基材与纳秒激光清洗试样的表面显微硬度
Fig. 10 Surface microhardness of original substrate and sample cleaned by nanosecond pulse laser

由图 10 可以看出,8# 试样表面的显微硬度为 168.34 HV,原始基材表面的显微硬度为 169.95 HV,二者显微硬度较为接近(前者约为后者的 99.1%),说明激光清洗过程并未影响试样的表面硬度,阳极氧化膜产生的表面硬化效果未被削弱。

4 结 论

本文采用不同参数的纳秒脉冲激光对表面带有厚约 150 μm 油漆涂层的铝合金试样进行了激光清洗试验,通过观察试样的表面宏观和微观形貌、微观结构、涂层去除厚度、表面元素成分及显微硬度变化,分析了表面除漆效果以及基材的表面损伤情况,得到如下结论:

1)通过观察清洗后基材表面的宏观与微观形貌,对除漆效果以及激光对基材表面的影响进行了分析,获得了 2024 铝合金表面油漆涂层的最佳激光除漆参数(激光功率 500 W,脉冲宽度 60 ns,脉冲频率 20 kHz),在

此参数下可以完全去除试样表面的油漆涂层,且基材表面未发生熔化,微观形貌接近原始基材。

2)对采用优化参数进行激光清洗后的试样进行 EDS 分析,结果发现其表面氧的质量分数为 43.44%,与原始基材表面的氧含量(42.51%)较为接近,这表明在该参数下进行激光除漆的试样表面仍有一定厚度的氧化膜存在。进一步对脉冲宽度为 60 ns、脉冲频率为 20 kHz 条件下的激光除漆阈值与基材损伤阈值进行了计算,得到激光除漆阈值为 138.19 W,基材损伤阈值为 556.17 W。这表明上述试验得到的最优除漆参数不会对基材表面的氧化膜造成损伤。

3)采用最优激光参数清洗后,试样表面的显微硬度为 168.34 HV,与原始基材表面的显微硬度(169.95 HV)比较接近,表明该参数下的激光除漆过程对表面显微硬度的影响较小。

参 考 文 献

- [1] Wang Z J. Study on the corrosion of civil aviation aircraft skin [J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2011, 22(1): 31-34.
王在俊. 民用飞机蒙皮腐蚀研究[J]. 中国民航飞行学院学报, 2011, 22(1): 31-34.
- [2] Jin S, Wang J X, Yuan X D, et al. Laser paint removal technology for aircraft metal skin and composite materials[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(17): 63-70.
靳森, 王静轩, 袁晓东, 等. 飞机金属蒙皮以及复合材料表面激光除漆技术[J]. 航空制造技术, 2018, 61(17): 63-70.
- [3] Huang S M. Corrosion analysis of LY12 aluminum alloy long truss parts during paint removal[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1991(4): 41-42.
黄世民. LY12 铝合金长桁零件退漆过程腐蚀现象分析[J]. 航空制造技术, 1991(4): 41-42.
- [4] 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.
- [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] 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.
- [7] 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钢表面锈蚀层的去除研究[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0702003.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Chen G X, Kwee T J, Tan K P, et al. Laser cleaning of steel for paint removal [J]. Applied Physics A, 2010, 101(2): 249-253.
- [11] Daurelio G, Chita G, Cinquepalmi M. Laser surface cleaning, de-rusting, de-painting and de-oxidizing [J]. Applied Physics A, 1999, 69(1): S543-S546.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Zhu W, Meng X W, Dai Z C, et al. Research on the laser de-painting process of carbon steel surface [J]. Electric Welding Machine, 2015, 45(11): 126-128.
朱伟, 孟宪伟, 戴忠晨, 等. 铝合金平板表面激光除漆工艺[J]. 电焊机, 2015, 45(11): 126-128.
- [15] Yan L. Study on the high solid aircraft dope [J]. Shanghai Coatings, 2010, 48(8): 5-8.
晏莉. 高固体分飞机蒙皮涂料的研制[J]. 上海涂料, 2010, 48(8): 5-8.