

激光清洗 2A12 铝合金复合漆层的技术研究

刘伟军, 赵子铭, 李强*, 王蔚, 卞宏友, 张栋

沈阳工业大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870

摘要 采用脉冲激光器对 2A12 铝合金基体表面涂覆的环氧树脂底漆与丙烯酸聚氨酯面漆进行激光清洗试验, 针对激光清洗表面的形貌、粗糙度及元素含量进行分析。结果表明: 在激光能量密度和激光扫描速度分别为 4.45 J/cm^2 和 8 mm/s 时, 能完全去除面漆且底漆保留完好, 并获得了最接近底漆层原始厚度的残余漆层; 在此激光能量密度下, 当激光扫描速度为 5.5 mm/s 时, 能完全去除复合漆层, 且此时阳极氧化膜层的微观形貌完好, 氧元素质量分数约为 40% , 清洗表面的粗糙度 $R_a = 1.138 \mu\text{m}$ 。当参数组合为 3.56 J/cm^2 和 6 mm/s 时, 也能完全去除面漆且底漆保留较好; 当激光能量密度为 4 J/cm^2 和激光扫描速度为 5 mm/s 时, 能完全去除复合漆层, 此时阳极氧化膜表面上氧元素的质量分数约为 34% 。本研究证明了通过选择合适的激光工艺参数组合能够调控激光清洗质量, 验证了激光分层清洗的可行性。

关键词 激光技术; 激光清洗; 铝合金; 复合漆层; 表面形貌; 工艺参数

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0802013

1 引言

2A12 铝合金具有良好的塑性成形能力和机械加工性能, 已被广泛应用于航空、航天等领域^[1], 主要用于制造飞机骨架零件、蒙皮等高负荷零件和构件。为延长零部件的使用寿命, 防止其腐蚀, 常在其表面涂覆漆层, 但在服役过程中, 铝合金材料表面漆层会出现龟裂、老化、起皮、脱落等不同类型的损伤^[2], 需要将表面原有漆层去除后重新涂覆漆层。传统的漆层去除方法主要为机械打磨、化学清洗与喷砂去除^[3-4], 这些方法不仅易损伤基体, 还会产生废液, 对环境不友好。激光清洗技术具有绿色、清洗效果佳、应用范围广、非接触等突出优势^[5], 已在相关领域实现了实际应用^[6-8]。

激光清洗工艺参数会直接影响激光清洗效果, 参数的合理配置是激光完全去除漆层和影响清洗后表面质量的重要因素。Brygo 等^[9]指出, 激光除漆过程中漆层的变化十分复杂, 激光能量密度对清洗效果有很大影响。Mateo 等^[10]发现, 通过合理配置

激光能量和脉冲频率能够实现漆层清洗且不损伤基体。胡太友等^[11]研究后发现, 激光清洗可以改善基材的表面质量。Jasim 等^[12]指出, 改变激光功率和频率会影响清洗表面的形貌和凹槽深度, 从而得到最优表面粗糙度。Razab 等^[13]针对两种不同漆层进行激光清洗后发现, 涂层中的元素对去除效果有很大影响。施曙东等^[14]指出, 增大峰值功率密度可以提高清洗效率, 合适的激光搭接率能够完全清除漆板表面的油漆而不损伤基体。Li 等^[15]研究后发现, 采用脉冲激光对船用钢板漆层进行多次清洗时, 通过改变参数可以在不引起基体损伤的情况下实现漆层的彻底去除。杨嘉年等^[16]指出, 在对不锈钢基体表面的丙烯酸树脂漆进行激光清洗过程中, 光斑搭接率对激光清洗表面成分的影响最为显著, 其次为激光功率。赵海朝等^[17]发现, 扫描速度、激光功率等工艺参数均会不同程度地影响激光除漆质量。江国业等^[18]发现, 激光清洗既能满足除漆要求又能在清洗后对表层起到强化作用。李鑫炎等^[19]研究后发现, 通过调整扫描速度可以获得较好的激光清

收稿日期: 2021-08-18; 修回日期: 2021-09-10; 录用日期: 2021-10-12

基金项目: 辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1802038)

通信作者: *qlee77@163.com

洗效果。邱太文等^[20]发现,激光除漆后能够获得与原始表面相近的表面硬度和元素含量。以上主要研究的是激光参数对单层漆的影响规律,而复合漆层的激光清洗工艺以及分层清洗后的表面状态也值得深入探究。

基于上述背景,本课题组利用激光清洗设备对表面涂覆复合漆层的铝合金样片进行激光清洗试验,分析激光能量密度与激光扫描速度对激光去除复合漆层的影响以及不同激光参数组合对清洗效果的影响,通过清洗表面的形貌与元素含量分析不同清洗参数下的表面特性,从而确定了清洗复合漆层的合理参数。

2 试验条件与方法

2.1 试验材料

图 1 所示为试验用 2A12 铝合金平板样片,其表面的阳极氧化膜厚度为 $12\ \mu\text{m}$,氧化膜表面涂覆有厚度约为 $30\ \mu\text{m}$ 的灰色环氧树脂底漆以及厚度约为 $100\ \mu\text{m}$ 的深灰色丙烯酸聚氨酯面漆,样片尺寸为 $20\ \text{mm} \times 20\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$ 。2A12 铝合金的化学成分如表 1 所示。

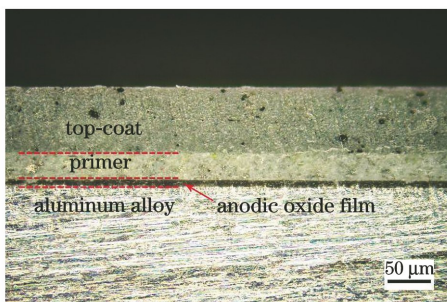


图 1 铝合金表面的复合漆层

Fig. 1 Composite paint layer on aluminum alloy surface

表 1 2A12 铝合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of 2A12 aluminum alloy

Element	Mass fraction / %
Si	0.5
Fe	0.5
Cu	3.8-4.9
Mn	0.3-0.9
Mg	1.2-1.8
Ni	0.1
Zn	0.3
Ti	0.15
Al	Balance

2.2 激光清洗装置与试验方法

图 2 为激光清洗装置示意图,该清洗系统主要由 IPG 脉冲激光器、扫描振镜、自动工作台以及自动控制系统等组成。该装置由控制端输出信号,脉冲激光器发出的激光通过光纤传输再经准直透镜后变为平行光束,然后经激光扫描振镜系统反射后通过场镜聚焦垂直照射到待清洗表面。焦点处光斑呈边长为 $1.5\ \text{mm}$ 的正方形。正方形光斑通过扫描振镜系统实现在清洗表面上的移动。

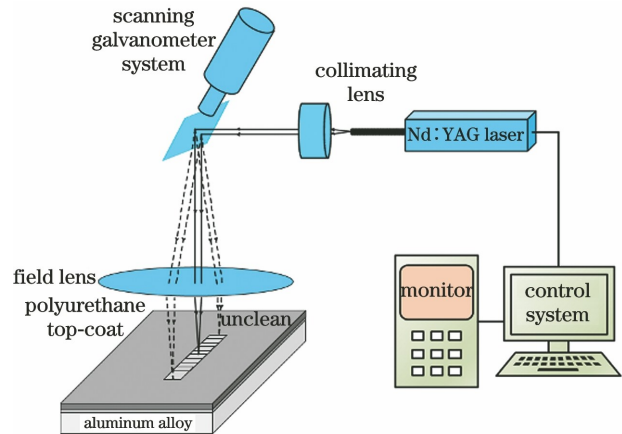


图 2 激光清洗装置示意图

Fig. 2 Schematic of laser cleaning device

激光清洗的主要工艺参数见表 2。激光波长为 $1064\ \text{nm}$,试验过程中采用脉冲频率为 $5\ \text{kHz}$ 、脉宽为 $70\ \text{ns}$ 、激光扫描振镜速度为 $3000\ \text{mm/s}$ 、激光能量密度为 $1.78\sim 4.45\ \text{J/cm}^2$ 以及激光扫描速度为 $3\sim 10\ \text{mm/s}$ 的工艺参数对样片进行激光清洗工艺试验。试验过程中均采用单次激光清洗。清洗结束后,采用 OLYMPUS OLS5000 激光共聚焦显微镜检测清洗表面的粗糙度和形貌,采用 TESCAN MIRA4 扫描电子显微镜(SEM)及其附带的能谱仪(EDS)检测清洗表面的微观形貌与元素含量,采用 CT-800 便携式涡流测厚仪测量清洗后试样表面残余漆层和阳极氧化膜的厚度(以下简称“残余厚度”)。

表 2 激光清洗的主要工艺参数

Table 2 Main process parameters of laser cleaning

Main parameter	Value
Laser energy density $/(J \cdot \text{cm}^{-2})$	1.78-4.45
Repetition rate /kHz	5
Pulse width /ns	70
Spot size /mm	1.5
Scanning speed $/(mm \cdot \text{s}^{-1})$	3-10
Galvanometer scanning speed $/(mm \cdot \text{s}^{-1})$	3000

3 试验结果与讨论

激光除漆的本质是激光能量作用到漆层表面使其发生升华、熔化、燃烧及弹性振动剥离等,从而达到除漆的目的。作用于漆层表面的能量越多,漆层的变化越剧烈。影响激光清洗效果的参数有很多,但其中的激光能量密度 E 与激光扫描速度 V 对清洗效果有较大影响。激光能量密度 E 可以表示为^[21]

$$E = \frac{P}{f \cdot L^2}, \quad (1)$$

式中: f 为重复频率; L 为光斑边长; P 为激光平均功率。由此可见,当脉冲重复频率、光斑边长不变时,漆层单位面积承受的激光能量与激光扫描速度 V 、激光能量密度 E 的参数组合相关。因此,本课题

组通过改变激光能量密度、激光扫描速度和参数组合进行激光除漆效果分析。

为验证清洗后的表面质量,先对面漆层、底漆层以及阳极氧化膜层进行 EDS 元素分析,分析结果如图 3 所示。由图 3(a)可知,面漆层中的元素为 C 和 O,且 C 元素的占比较高。由图 3(b)可知,底漆层中的元素较多,主要元素为 C、O 和 Ti, Ti 元素的质量分数约为 5%。由图 3(c)可知,阳极氧化膜层中的元素主要以 Al 和 O 为主,其中 O 元素的质量分数约为 42%。通过观察图 3 可以发现面漆与底漆中的 Ti 元素含量有较为明显的差异,因此将 Ti 元素作为面漆层与底漆层的示踪元素。漆层与阳极氧化膜层中的元素含量差异较大,若清洗表面的元素含量与阳极氧化膜层中的含量相近时,可认为漆层已经彻底去除。

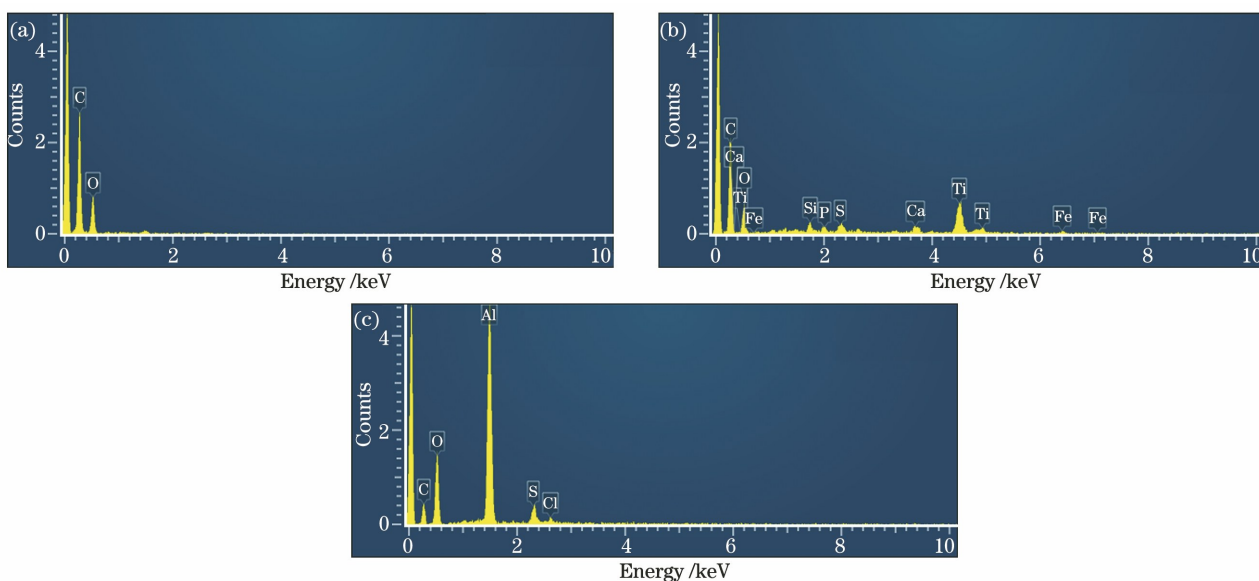


图 3 元素含量。(a)面漆;(b)底漆;(c)阳极氧化膜层

Fig. 3 Element content. (a) Top-coat; (b) primer; (c) anodic oxide film layer

3.1 激光能量密度对清洗效果的影响

为分析激光能量密度对激光清洗效果的影响,将激光扫描速度固定为 5.5 mm/s 进行清洗试验,清洗表面的二维和三维形貌分别如图 4 和图 5 所示。由图 4(a)~(c)可以看出:在 1.78、2.22、2.67 J/cm² 的激光能量密度下清洗后,表面上存在大量无规则分布且大小不一的凹坑,凹坑尺寸随着激光能量密度的增加逐渐减小,而且表面上仍有大量的残余面漆。由图 4(d)可以看出,在 3.11 J/cm² 的激光能量密度下清洗后,表面为底漆颜色,说明在此激光能量密度下实现了面漆层的去除。由图 4(e)可以看出,在 3.56 J/cm² 的激光能量密度下清洗后,底漆层已有部分被去除,表面厚度不均匀,有金

属基材表面显露出来。由图 4(f)可以看出,在 4 J/cm² 的激光能量密度下清洗后,试样基材已经显露,且残留有较薄的底漆。由图 4(g)可以看出,在 4.45 J/cm² 的激光能量密度下清洗后,样片表面已无漆层残留,可明显观察到阳极氧化膜层表面的凹坑与条状沟壑。

由图 5(a)、(b)可以看出,在 1.78、2.22 J/cm² 的激光能量密度下清洗后,漆层表面的陨坑较为圆润且边缘光滑,多呈圆弧形。由图 5(c)可以看出,在 2.67 J/cm² 的激光能量密度下清洗后,漆层表面凹凸不平,犹如山脉连绵起伏,凸起位置较多且尺寸较大。由图 5(d)可以看出,在 3.11 J/cm² 的激光能量密度下清洗后,表面的尖峰密集,峰边缘锐利,

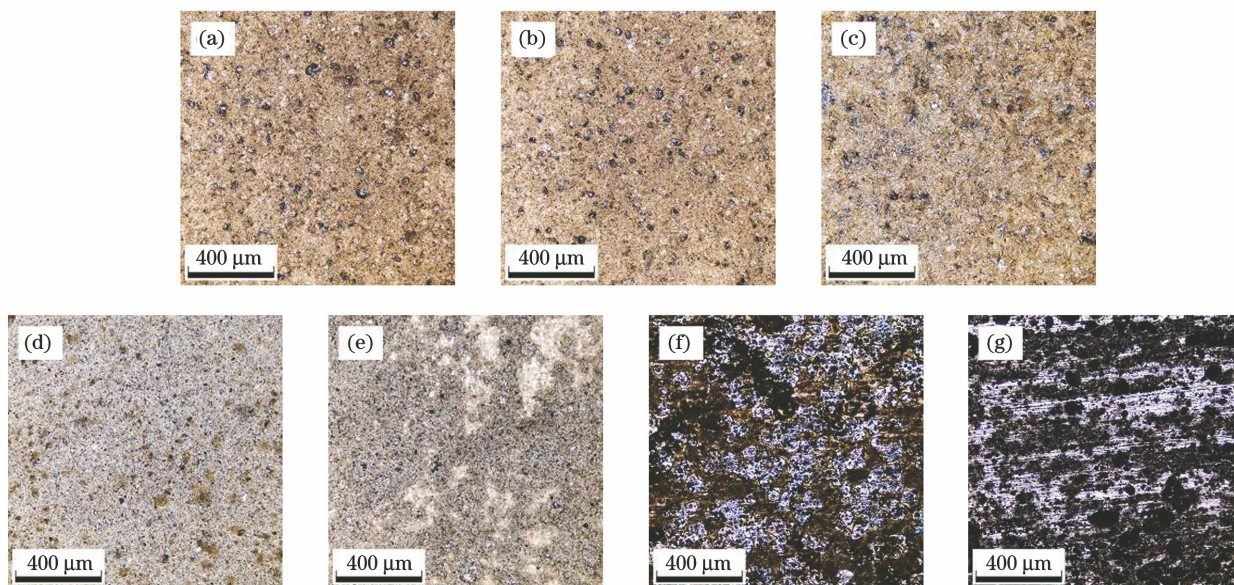


图 4 不同激光能量密度下清洗表面的二维形貌。(a) 1.78 J/cm^2 ; (b) 2.22 J/cm^2 ; (c) 2.67 J/cm^2 ; (d) 3.11 J/cm^2 ; (e) 3.56 J/cm^2 ; (f) 4 J/cm^2 ; (g) 4.45 J/cm^2

Fig. 4 Two-dimensional morphologies of cleaned surface at different laser energy densities. (a) 1.78 J/cm^2 ; (b) 2.22 J/cm^2 ; (c) 2.67 J/cm^2 ; (d) 3.11 J/cm^2 ; (e) 3.56 J/cm^2 ; (f) 4 J/cm^2 ; (g) 4.45 J/cm^2

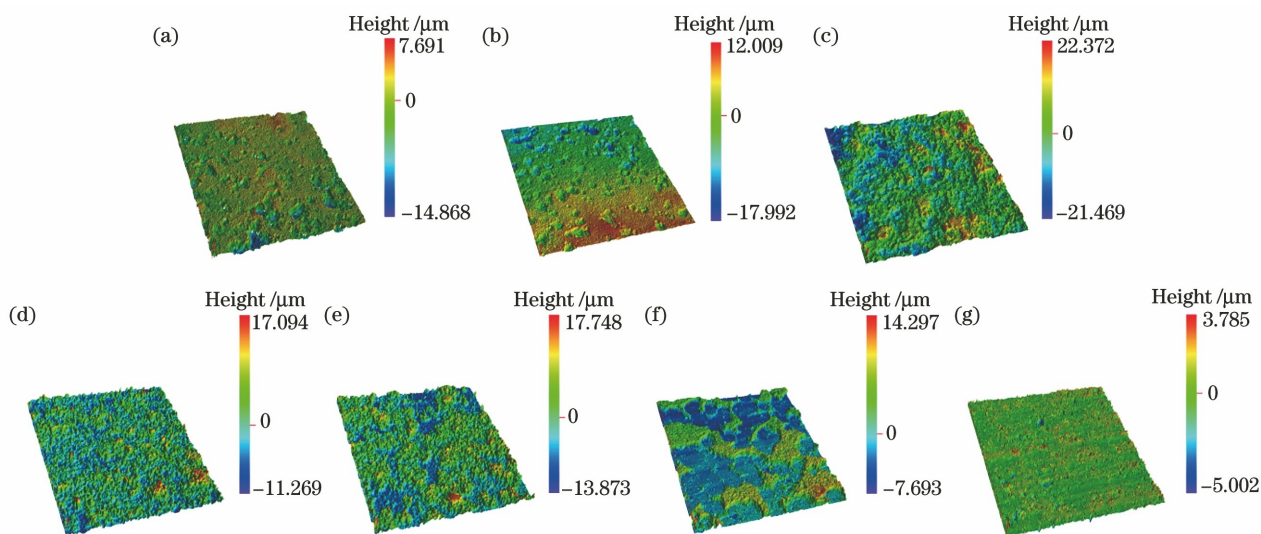


图 5 不同激光能量密度下清洗表面的三维形貌。(a) 1.78 J/cm^2 ; (b) 2.22 J/cm^2 ; (c) 2.67 J/cm^2 ; (d) 3.11 J/cm^2 ; (e) 3.56 J/cm^2 ; (f) 4 J/cm^2 ; (g) 4.45 J/cm^2

Fig. 5 Three-dimensional morphologies of cleaned surface at different laser energy densities. (a) 1.78 J/cm^2 ; (b) 2.22 J/cm^2 ; (c) 2.67 J/cm^2 ; (d) 3.11 J/cm^2 ; (e) 3.56 J/cm^2 ; (f) 4 J/cm^2 ; (g) 4.45 J/cm^2

偶有较高凸起,结合图 4(d)可知此时底漆表面形成的熔融层区域较大,但流动性较小。随着激光能量密度继续增大,漆层表面出现了区域较大且无规律分布的凹坑,如图 5(e)所示。由图 5(f)可以看出,在 4 J/cm^2 的激光能量密度下清洗后,表面残留有面积大小不一的底漆,且残余底漆的边缘形貌为圆弧形。由图 5(g)可以看出,在 4.45 J/cm^2 的激光能量密度下清洗后,表面漆层完全去除,阳极氧化膜

层的表面较为光滑。

在图 5(e)、(f)中发现残余漆层的凹坑边缘有不规则的圆弧痕迹。分析认为表面形貌中的凹坑主要包括:1)漆层表面吸收激光能量形成熔融流动而产生的熔坑;2)漆层表面在等离子体冲击作用下形成的变形凹坑;3)基材中的热积累作用导致漆层发生弹性振动剥离而形成的凹坑。由图 5 可知:随着激光能量密度增加,漆层表面的凹坑逐

渐增多,且凸起的尺寸逐渐变小,表面形貌变化十分剧烈;激光能量密度越大,激光清洗效果越好,当激光能量密度足够大时,单次激光可以完全去除复合漆层。

表 3 给出了不同激光能量密度下清洗表面的粗糙度。由表 3 可知:清洗表面的粗糙度随着激光能量密度的增加而先增大后减小。结合图 5 所示的清洗表面的三维形貌可知:当激光能量密度为 3.11 J/cm^2 时,清洗后露出了底漆,表面粗糙度为 $R_a=2.878 \mu\text{m}$;当激光能量密度为 4.45 J/cm^2 时,清洗表面获得了最小的粗糙度, $R_a=1.138 \mu\text{m}$ 。

表 3 不同激光能量密度下清洗表面的粗糙度

Table 3 Roughness of cleaned surface at different laser energy densities

Laser energy density / ($\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$)	$R_a/\mu\text{m}$
1.78	1.436
2.22	1.784
2.67	4.326
3.11	2.878
3.56	3.606
4.00	2.651
4.45	1.138

3.2 扫描速度对清洗效果的影响

为研究激光扫描速度对漆层清洗效果的影响,固定激光能量密度为 4.45 J/cm^2 ,在不同的激光扫描速度下进行激光清洗试验,清洗表面的二维形貌和三维形貌分别如图 6 和图 7 所示。由图 6(a)可以看出,在 10 mm/s 的激光扫描速度下清洗后,面漆层依然存在,且表面分布有较大的凹坑。由图 6(b)可以看出,在 8 mm/s 的激光扫描速度下清洗后,试样表面的面漆被去除且露出底漆颜色,底漆表面分布着尺寸较小且大小相近的凹坑。由图 6(c)、(d)可以看出,在 6.5 、 6 mm/s 的激光扫描速度下清洗后,底漆逐步被去除,露出基材表面,残余底漆边缘为圆弧形。由图 6(e)可以看出,在 5 mm/s 的激光扫描速度下清洗后,复合漆层已经被完全去除,清洗后的表面发亮,且存在网状裂纹。由图 6(f)可以看出,在 4 mm/s 的激光扫描速度下,阳极氧化膜层已经明显损伤,表面网状裂纹的长度和宽度都增加。分析图 6 可以看出:随着激光扫描速度的降低,激光能量作用在漆层表面的时间增多,漆层因吸收更多能量而迅速升温,进而被去除;激光扫描速度越低,漆层去除量越大,但过低的扫描速度会导致基材出现损伤。

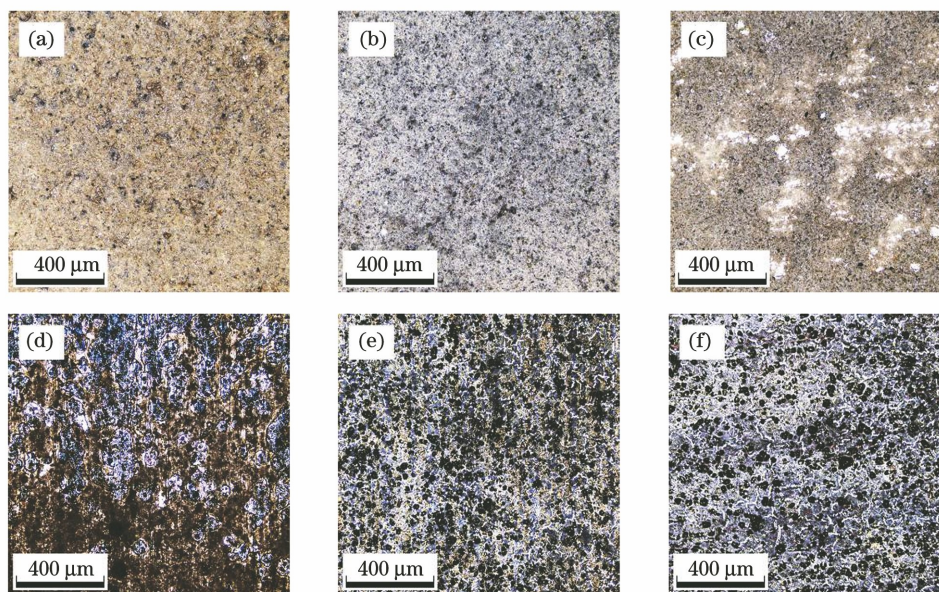


图 6 不同激光扫描速度下清洗表面的二维形貌。(a) 10 mm/s ;(b) 8 mm/s ;(c) 6.5 mm/s ;(d) 6 mm/s ;(e) 5 mm/s ;(f) 4 mm/s

Fig. 6 Two-dimensional morphologies of cleaned surface at different laser scanning speeds. (a) 10 mm/s ; (b) 8 mm/s ; (c) 6.5 mm/s ; (d) 6 mm/s ; (e) 5 mm/s ; (f) 4 mm/s

由图 7(a)可以看出,当激光扫描速度为 10 mm/s 时,面漆层有残留且表面上分布着大量的凸起与凹坑,表面有很多连绵的、位置相邻的凸起。

这说明漆层受热发生熔化形成了熔融层。结合图 7(b)与图 6(b)可知,当激光扫描速度为 8 mm/s 时,激光清洗质量最高,此时完全露出底漆,表面偶

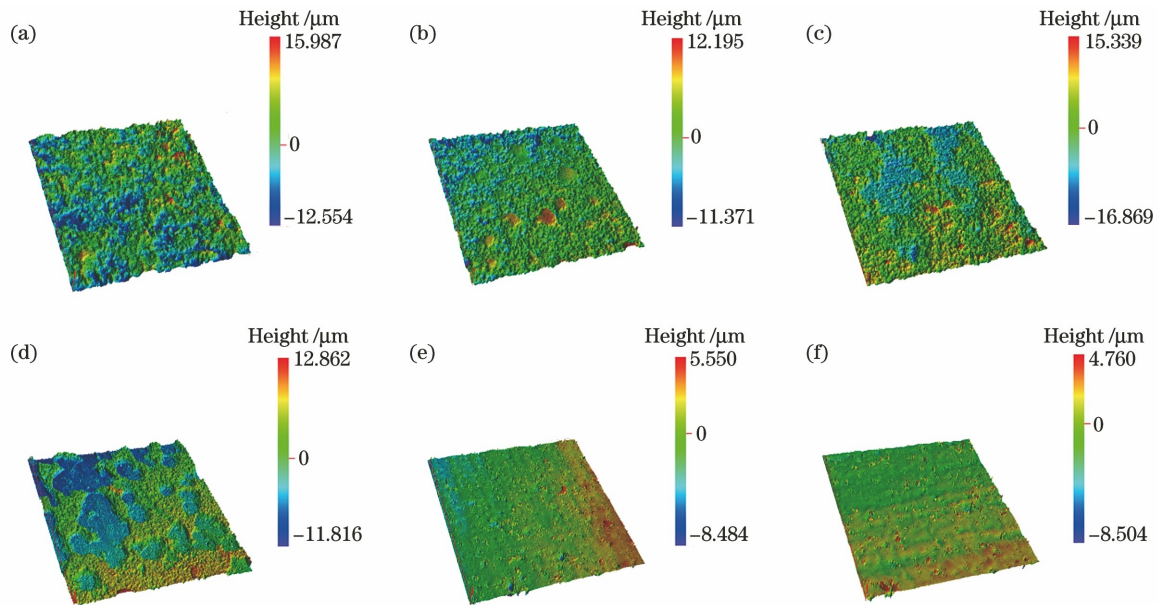


图 7 不同激光扫描速度下清洗表面的三维形貌。(a)10 mm/s;(b)8 mm/s;(c)6.5 mm/s;(d)6 mm/s;(e)5 mm/s;(f)4 mm/s
Fig. 7 Three-dimensional morphologies of cleaned surface at different laser scanning speeds. (a) 10 mm/s; (b) 8 mm/s; (c) 6.5 mm/s; (d) 6 mm/s; (e) 5 mm/s; (f) 4 mm/s

有凸起,但总体形貌较为均匀,此时清洗表面的粗糙度 $R_a = 1.917 \mu\text{m}$ 。由图 7(c)~(e)可以看出,随着激光扫描速度的降低,激光作用在底漆层上的时间延长,漆层熔化蒸发,基体在热积累的影响下使漆层发生弹性振动而剥离^[22],漆层上方的蒸气密度增加,燃烧效应减少,底漆层清洗量增加,残留漆层逐渐减少,直至彻底露出氧化膜层。结合图 7(e)、(f)与图 6(e)、(f)可以看出,随着激光扫描速度的降低,清洗表面的孔隙之间出现了亮色条纹增大、增粗以及坑深减小的现象。图 7 的结果表明,随着激光扫描速度的减小,基材表面漆层的清洗质量逐渐提高。

图 8 给出不同参数组合下激光清洗表面的粗糙度。由图 8 可知,当激光能量密度为 4.45 J/cm^2 时,随着激光扫描速度的减小,表面粗糙度逐渐降

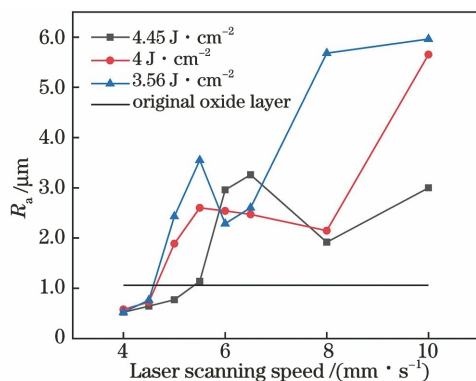


图 8 激光扫描速度对清洗表面粗糙度的影响
Fig. 8 Effect of laser scanning speed on roughness of cleaned surface

低。这与图 7 所示的三维形貌对应。从图 8 中还可发现,在 4 J/cm^2 和 3.56 J/cm^2 激光能量密度下清洗后,清洗表面的粗糙度与在 4.45 J/cm^2 激光能量密度下清洗后的变化趋势有所不同,但表面的粗糙度有集中在两个位置点的趋势:一是完全去除面漆露出底漆时表面粗糙度相近;二是完全去除复合漆层且激光扫描速度较低时,不同激光能量密度下的粗糙度基本一致,且都低于原始膜层的粗糙度。

另外,由图 8 还可以看出,在不同的激光能量密度下清洗后,粗糙度的变化速率随着激光扫描速度的减小而不同。这是因为激光作用在漆层时,激光能量密度与激光扫描速度的不同导致漆层吸收的能量不同,进而漆层升温的速度以及激光对漆层的冲击能量与作用时间不同,因此清洗漆层的机理不同。这说明激光清洗是多种清洗机理耦合的过程^[22]。

3.3 不同参数组合下的清洗效果分析

在不同的激光能量密度与激光扫描速度组合下进行试验,结果发现参数组合为 4 J/cm^2 和 6.5 mm/s 以及 3.56 J/cm^2 和 6 mm/s 时可完全去除面漆露出底漆,并获得较好的漆层厚度。由图 9(a)可以看出,在 4 J/cm^2 和 6.5 mm/s 这一参数组合下,清洗表面上的凹坑较少,另有部分尖峰。由图 9(b)可以看出,在 3.56 J/cm^2 和 6 mm/s 这一参数组合下,清洗表面上存在较多的陨坑与较高的尖峰。可见,在不同的参数组合下清洗后,清洗表面的形貌不同。

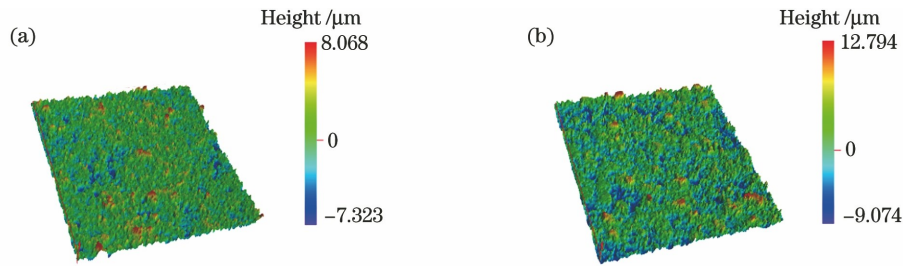


图 9 不同参数组合下的清洗效果。(a) $4 \text{ J/cm}^2, 6.5 \text{ mm/s}$; (b) $3.56 \text{ J/cm}^2, 6 \text{ mm/s}$

Fig. 9 Cleaning effects under different parameter combinations. (a) $4 \text{ J/cm}^2, 6.5 \text{ mm/s}$; (b) $3.56 \text{ J/cm}^2, 6 \text{ mm/s}$

针对完全露出底漆的参数组合下的清洗表面进行能谱(EDS)分析与厚度检测,并求取平均值,结果如图 10 所示。可见:在不同的参数组合下清洗面漆

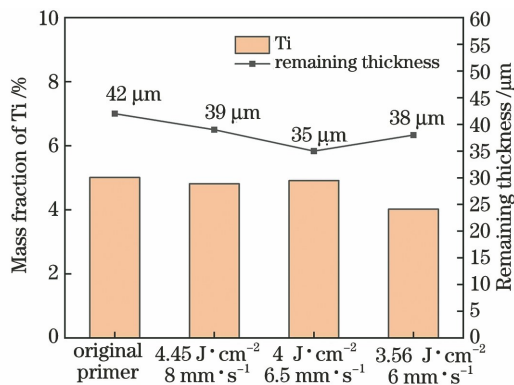


图 10 不同参数组合下清洗表面的元素分布与残余厚度

Fig. 10 Element distribution of cleaned surface and remaining thickness after cleaning with different parameter combinations

后,表面的 Ti 元素含量与原始底漆层中的 Ti 元素含量接近,残余漆层的厚度与原始底漆厚度相近。这说明此参数组合下激光已经去除了面漆层,底漆层完全暴露。

试验中发现,在 4 J/cm^2 和 5 mm/s 以及 3.56 J/cm^2 和 4.5 mm/s 的参数组合下复合漆层能被完全去除,与 4.45 J/cm^2 和 5.5 mm/s 参数组合下的试验结果相似。为验证完全清洗复合漆层后的表面状态,对这三组参数组合下的清洗表面进行微观形貌观察与元素分析。图 11 是激光清洗复合漆层后露出的阳极氧化膜层的表面 SEM 图。图 11 (a)为原始阳极氧化膜层的表面形貌。图 11(b)是在 4.45 J/cm^2 和 5.5 mm/s 参数组合下清洗后的阳极氧化膜层形貌,可见,阳极氧化膜层凹坑表面轻微泛白,凹坑边缘出现了轻微熔化。图 11(c)是在 4 J/cm^2 和 5 mm/s 参数组合下清洗后的阳极氧化膜层形貌,可见,阳极氧化膜层表面聚集有较多的轻

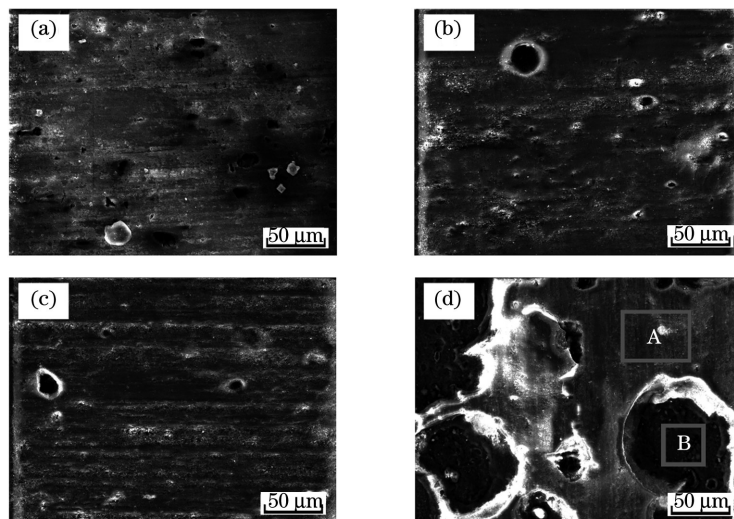


图 11 阳极氧化膜层表面的 SEM 形貌。(a) 原始阳极氧化膜层; (b) 在 4.45 J/cm^2 和 5.5 mm/s 参数组合下清洗后的阳极氧化膜层; (c) 在 4 J/cm^2 和 5 mm/s 参数组合下清洗后的阳极氧化膜层; (d) 在 3.56 J/cm^2 和 4.5 mm/s 参数组合下清洗后的阳极氧化膜层

Fig. 11 SEM morphologies of anodic oxide film surface. (a) Original anodic oxide film; (b) anodic oxide film cleaned at parameter combination of 4.45 J/cm^2 and 5.5 mm/s ; (c) anodic oxide film cleaned at parameter combination of 4 J/cm^2 and 5 mm/s ; (d) anodic oxide film cleaned at parameter combination of 3.56 J/cm^2 and 4.5 mm/s

微凸起,且条纹痕迹明显增加。图 11(d)是在 3.56 J/cm^2 和 4.5 mm/s 参数组合下清洗后的阳极氧化膜层形貌,可见,阳极氧化膜层出现了明显破损,且破损的氧化膜边缘为圆弧形。氧化膜呈圆弧形破损的原因是阳极氧化膜层与基材之间的热膨胀系数差异较大,在激光的热作用下,基材发生弹性变形,弹性变形产生的振动导致氧化膜层发生弹性振动而从基体上剥离^[23]。

图 12 所示为在不同参数组合下清洗后阳极氧化膜层表面的 EDS 分析结果。由图 3(c)和图 12 可以看出清洗表面上碳、氧和铝等元素的含量均与原始阳极氧化膜层表面的元素含量十分相近,说明清

洗后的表面上并无漆层残留。当激光能量密度与激光扫描速度分别为 4.45 J/cm^2 和 5.5 mm/s 时,表面上氧元素的质量分数约为 40% ,与原始阳极氧化膜中氧元素的含量十分接近,说明在此参数下清洗后氧化膜层的损伤极小。当激光能量密度与激光扫描速度分别为 4 J/cm^2 和 5 mm/s 时,表面上氧元素的质量分数约为 34% ,说明此时阳极氧化膜已经受到损伤。图 11(d)中 A、B 两处的元素含量如图 12(c)、(d)所示,可见,当激光能量密度和激光扫描速度分别为 3.56 J/cm^2 和 4.5 mm/s 时,A 处氧元素的质量分数约为 34% ,B 处氧元素的质量分数约为 13% 。

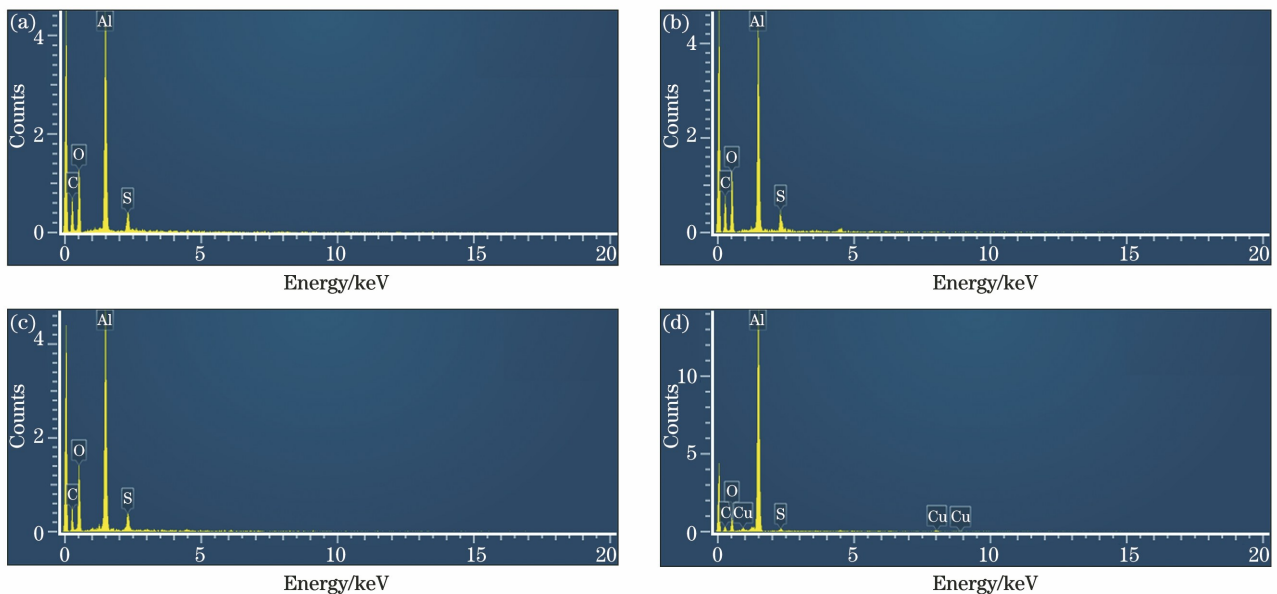


图 12 在不同参数组合下清洗后阳极氧化膜层表面的 EDS 分析。(a) 4.45 J/cm^2 , 5.5 mm/s ; (b) 4 J/cm^2 , 5 mm/s ; (c) 3.56 J/cm^2 , 4.5 mm/s , A 处; (d) 3.56 J/cm^2 , 4.5 mm/s , B 处

Fig. 12 EDS analysis of anodic oxide film cleaned at different parameter combinations. (a) 4.45 J/cm^2 , 5.5 mm/s ; (b) 4 J/cm^2 , 5 mm/s ; (c) 3.56 J/cm^2 , 4.5 mm/s , position A; (d) 3.56 J/cm^2 , 4.5 mm/s , position B

4 结 论

本课题组对 2A12 铝合金表面的复合漆层进行了激光清洗试验,研究了激光能量密度和激光扫描速度对激光单次清洗复合漆层的影响,分析了清洗表面的形貌、元素含量以及残余厚度,主要得到以下结论:

1) 激光能量密度与激光扫描速度对清洗质量的影响均较大,随着激光能量密度增加或激光扫描速度减小,清洗质量逐渐变好。

2) 在激光能量密度不变的条件下,随着激光扫描速度减小,激光清洗表面粗糙度的变化程度不同,但总体趋势相似,均为先减小后增大再减小。

3) 激光清洗面漆层保留底漆层的最优参数组合为 4.45 J/cm^2 和 8 mm/s 。在此参数下清洗后,底漆示踪元素钛的质量分数约为 5% ,残余厚度为 $39 \mu\text{m}$,清洗表面的粗糙度 $R_a = 1.917 \mu\text{m}$ 。激光清洗复合漆层的最优参数组合为 4.45 J/cm^2 和 5.5 mm/s ,在此参数组合下清洗后,清洗表面上氧元素的质量分数约为 40% ,清洗表面的粗糙度 $R_a = 1.138 \mu\text{m}$ 。

4) 彻底去除漆层后的阳极氧化膜表面存在损伤。在 4 J/cm^2 和 5 mm/s 的参数组合下清洗后,清洗表面上氧元素的质量分数约为 34% ;在 3.56 J/cm^2 和 4.5 mm/s 的参数组合下清洗后,阳极氧化膜层在弹性振动的作用下剥离,剥离区域氧

元素的质量分数约为 13%。

参 考 文 献

- [1] Zhang W, Wei G, Xiao X K. Constitutive relation and fracture criterion of 2A12 aluminum alloy[J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(3): 276-282.
张伟, 魏刚, 肖新科. 2A12 铝合金本构关系和失效模型[J]. *兵工学报*, 2013, 34(3): 276-282.
- [2] Li B, Sun X J. Brief survey of paint remover and paint removal techniques for aircraft[J]. *Cleaning World*, 2010, 26(1): 30-34.
李斌, 孙秀娟. 飞机脱漆剂及脱漆技术[J]. *清洗世界*, 2010, 26(1): 30-34.
- [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] 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.
- [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钢表面锈蚀层的去除研究[J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0702003.
- [7] Xie Y F, Liu H W, Hu Y X. Determining process parameters for laser derusting of ship steel plates[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(4): 0403008.
解宇飞, 刘洪伟, 胡永祥. 船舶板材激光除锈工艺参数确定方法研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0403008.
- [8] Yu H B, Wang C M, Zhang W, et al. Present status and outlook of laser cleaning application development[J]. *Electric Welding Machine*, 2014, 44(10): 80-84.
俞鸿斌, 王春明, 张威, 等. 激光清洗应用发展现状及展望[J]. *电焊机*, 2014, 44(10): 80-84.
- [9] Brygo F, Dutouquet C, le Guern F, et al. Laser fluence, repetition rate and pulse duration effects on paint ablation[J]. *Applied Surface Science*, 2006, 252(6): 2131-2138.
- [10] Mateo M P, Ctvrtnickova T, Fernandez E, et al. Laser cleaning of varnishes and contaminants on brass[J]. *Applied Surface Science*, 2009, 255(10): 5579-5583.
- [11] Hu T Y, Qiao H C, Lu Y, et al. Effects of laser de-painting on microstructure and properties of Ti17 alloy[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(3): 7-12.
胡太友, 乔红超, 陆莹, 等. 激光除漆对 Ti17 合金表面组织性能的影响[J]. *表面技术*, 2018, 47(3): 7-12.
- [12] 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.
- [13] Razab M K A A, Jaafar M S, Abdullah N H, et al. Influence of elemental compositions in laser cleaning for automotive coating systems[J]. *Journal of Russian Laser Research*, 2016, 37(2): 197-206.
- [14] 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.
- [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] Yang J N, Zhou J Z, Sun Q, et al. Laser paint removal process parameter optimization via response surface methodology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(23): 231402.
杨嘉年, 周建忠, 孙奇, 等. 基于响应面分析的激光除漆工艺参数优化[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(23): 231402.
- [17] Zhao H C, Qiao Y L, Du X, et al. Research on paint removal technology for aluminum alloy using pulsed laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(6): 0602121.
赵海朝, 乔玉林, 杜娴, 等. 脉冲激光清洗铝合金表面漆层的技术研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(6): 0602121.
- [18] 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.
- [19] Li X Y, Li C Y, Wang D, et al. Effect of laser

- scanning speeds on cleaning quality of rusted layer on Q345 steel surface [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1002010.
- 李鑫炎, 李灿阳, 王丹, 等. 激光扫描速度对 Q345 钢表面锈层清洗质量的影响 [J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1002010.
- [20] Qiu T W, Yi J L, Cheng C, et al. Characteristics of nanosecond pulse laser cleaning paint coatings on 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.
- [21] Liu P F, Wang S J, Yin F S, et al. Process and mechanism of laser removal of paint on 2024 aluminum alloy [J]. Materials Reports, 2020, 34(24): 24121-24126.
- 刘鹏飞, 王思捷, 殷凤仕, 等. 2024 铝合金表面激光除漆工艺及机理 [J]. 材料导报, 2020, 34(24): 24121-24126.
- [22] Lei Z L, Sun H R, Tian Z, et al. Effect of laser at different time scales on cleaning quality of paint on Al alloy surfaces [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0602103.
- 雷正龙, 孙浩然, 田泽, 等. 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 [J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0602103.
- [23] Xia P Y, Yin Y H, Cai A J, et al. Laser cleaning process of 2219 aluminum alloy anodic oxide film before welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0102005.
- 夏佩云, 尹玉环, 蔡爱军, 等. 2219 铝合金阳极氧化膜焊前激光清洗工艺研究 [J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0102005.

Laser Cleaning Technology of 2A12 Aluminum Alloy Composite Paint Layer

Liu Weijun, Zhao Ziming, Li Qiang*, Wang Wei, Bian Hongyou, Zhang Dong
School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China

Abstract

Objective A paint layer can be applied to metals to enhance their surface characteristics and service life. To detect the internal defects of key structural components or repaint the damaged paint layer, the original paint layer needs to be removed from the metal surface. Compared with traditional technologies, such as mechanical or chemical cleaning, laser cleaning technology has the advantages of being environmentally friendly and highly efficient, thus attracts immense attention in the recent years. The influence of different parameters on the cleaning effect was discussed in the published literature, including the effect of laser power on the cleaning efficiency and the state of the metal surface after cleaning. In this study, the effects of different laser energy densities and scanning speeds on the cleaning effect of the composite paint layer on the surface of 2A12 aluminum alloy were studied. The effects of different combinations of laser process parameters on layer-by-layer cleaning and post-cleaning damage were explored, and the results can help in understanding the feasibility of layer-by-layer cleaning via laser.

Methods In this work, the 2A12 aluminum alloy was anodized, followed by the paint layers of epoxy primer and acrylic polyurethane top-coat. The pulsed laser exhibited the wavelength, pulse width, and laser scanning galvanometer speed of 1064 nm, 70 ns, 3000 mm/s, respectively. A laser paint-cleaning test was conducted using a single pulsed laser with the laser energy density between 1.78 and 4.45 J/cm², and the laser scanning speed of 3–10 mm/s. In the experiment, the side length of the square spot was about 1.5 mm. The cleaning process is completely automatic, and the schematic diagram of the cleaning device is shown in Figure 2. The surface roughness, two-dimensional and three-dimensional topographies of the sample were observed using the laser confocal microscope after experiment. Scanning electron microscope was used to observe the microscopic morphology. The microscopic morphology, surface element content after cleaning, and residual thickness were detected by scanning electron microscope, energy spectrum analyzer, and portable eddy current thickness gage, respectively.

Results and Discussions Laser cleaning can remove the composite paint layer-by-layer. The quality of laser cleaning gradually increases with an increase in the laser energy density (Fig. 4, Fig. 5), and the surface roughness

first increases and then decreases (Table 3). The quality of laser cleaning gradually increases with the decrease of the laser scanning speed, but too low scanning speed will lead to an increase in the time of laser acting on the surface of the paint layer. Conversely, if the impact energy generated by the laser is too much, it will lead to excessive cleaning, with net cracks appearing on the surface (Fig. 6, Fig. 7). In the cleaning process, it can be found that the top-coat is gradually removed to expose the primer, which is then gradually removed to expose the metal substrate. Different laser energy densities lead to different degrees of sample surface roughness. The surface roughness first decreases, then increases, and finally decreases with the increase in the laser scanning speed (Fig. 8). Comparing the elements of the cleaned surface and the original paint layer, it is found that under different parameter combinations, the three-dimensional morphology of the primer after complete top-coat removal is different (Fig. 9), with the thickness of the primer layer well retained (Fig. 10). Compared with the original anodic oxide film, the anodic oxide film is well preserved after cleaning, but there is an oxide film damage (Fig. 11). The element content analysis shows that the anodic oxide film on the surface after cleaning has no paint residue (Fig. 12).

Conclusions Both the laser energy density and scanning speed have a greater impact on the cleaning quality. The cleaning quality of the laser gradually becomes better with an increase in the laser energy density or decrease in the laser scanning speed. When the laser energy density and scanning speed are 4.45 J/cm^2 and 8 mm/s , respectively, the top-coat can be completely removed and the primer remains intact, with the effect closest to the original thickness of the paint layer. When the laser energy density and laser scanning speed are 4.45 J/cm^2 and 5.5 mm/s , respectively, the composite coating can be completely removed with the perfect microstructure of the anodic oxide film. Similar to those of the original anodic oxide film, the oxygen content of about 40% and the surface roughness $R_a = 1.138 \mu\text{m}$ are observed. When the parameter combination is 3.56 J/cm^2 and 6 mm/s , the top-coat can also be completely removed, with the primer retained well. When the laser energy density and scanning speed are 4 J/cm^2 and 5 mm/s , respectively, the composite paint layer can be completely removed, and the oxygen content of the anodic oxide film is about 34% . When the combination of parameters is 3.56 J/cm^2 and 4.5 mm/s , the anodic oxide film produces elastic vibration stripping.

Key words laser technique; laser cleaning; aluminum alloy; composite paint layer; surface morphology; process parameters