

激光清洗 7075 铝合金阳极氧化膜的工艺参数对表面质量的影响

王蔚, 李相锦, 刘伟军*, 邢飞, 卞宏友

沈阳工业大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870

摘要 采用脉冲光纤激光器对 7075 铝合金阳极氧化膜进行清洗, 研究了平均功率、扫描速度和脉冲频率对清洗后试样表面形貌和微观组织的影响规律, 分析了工艺参数对粗糙度和氧含量的影响。结果表明, 随着平均功率由 175 W 增大至 250 W, 能量密度逐渐增大, 清洗率增大, 粗糙度则减小。随着扫描速度由 1500 mm/s 增大至 3000 mm/s, 光斑搭接率逐渐减小, 清洗率先增大后减小, 粗糙度则先减小后增大。随着脉冲频率由 2.5 kHz 增大至 4 kHz, 能量密度逐渐减小, 光斑搭接率逐渐增大, 清洗率逐渐减小, 粗糙度则先减小后增大。当平均功率 $P=250$ W、扫描速度 $v=2500$ mm/s、脉冲频率 $f=2.5$ kHz 时, 氧化膜几乎被清洗干净, 清洗率最高为 98.7%, 粗糙度达到最小值 ($0.45 \mu\text{m}$)。通过研究还发现, 激光清洗铝合金阳极氧化膜的清洗机制主要为气化, 部分区域存在弹性振动剥离机制。

关键词 激光技术; 激光清洗; 铝合金; 阳极氧化膜; 工艺参数; 去除机制

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1602020

1 引言

7075 铝合金材料因其质量轻、力学性能突出等优点而被广泛应用于航空工业领域^[1], 尤其是大型客机的隔框、翼梁等应力结构件, 这些结构件都镀有一层阳极氧化膜, 可以对结构件起到保护作用。大型客机每过 5~6 年都要进行一次重大检测维修^[2], 当机身的金属表面受损, 氧化层出现磨损或部分剥落时, 需要清除飞机结构件表面涂覆的氧化层以方便检测或再次涂覆氧化层。为了满足飞机零部件安全性能的要求并延长飞机零部件的服役寿命, 需要尽可能在清洗干净氧化膜的同时避免损伤铝合金基材, 这就对飞机零部件表面氧化层的清洗率和零部件表面粗糙度提出了较高的要求。激光清洗具有环境友好、适用面广、清洗精度高、清洗效果好的特点^[3], 能够取代传统物理打磨及化学试剂清洗的方法, 可提高飞机结构件的清洗质量。

激光清洗阳极氧化膜不同于金属表面除漆, 待清除层的厚度更薄, 清洗过程极易损伤 7075 铝合金基材表面, 因此合理配置工艺参数将对提高阳极氧化层的清洗率及降低铝合金基材的损伤有重要意义。李鑫炎等^[4]采用光纤激光器对 Q345 钢进行清洗, 结果发现, 扫描速度的变化对除锈效果、基体去除深度和表面耐

腐蚀性能有着显著影响。赵海朝等^[5]通过研究扫描速度、脉冲频率和激光功率对去除效果的影响, 获得了激光清洗漆层的去除机制。陈俊宏等^[6]采用 IPG 光纤激光器对 Ti6Al4V 钛合金进行清洗, 分析了不同清洗方式和工艺参数对表面形貌和粗糙度的影响规律。陈一鸣等^[7]采用脉冲光纤激光器对 5A06 铝合金进行清洗, 探究并优化了氧化膜清洗工艺, 并提出了氧化层的剥离机制。丁帅帅等^[8]通过研究能量密度对清洗效果的影响, 探明了激光清洗过程中温度场的分布和工艺参数对材料烧蚀深度的影响规律。Ma 等^[9]通过研究不同工艺参数对氧化膜清洗效果的影响, 探究了平均功率、重复频率、激光光斑重叠率对表面完整性的影响, 并获得了激光清洗工艺参数对表面性能的影响规律。Zhu 等^[10]通过研究能量密度对清洗效果的影响, 得到了激光清洗的最优参数, 获取了激光清洗对试样耐磨耐蚀性能的影响规律。Zhang 等^[11]采用脉冲光纤激光器对 5754 铝合金进行清洗, 探究了激光清洗铝合金氧化物的去除机理及等离子体行为, 并得到了激光能量清洗阈值。Jia 等^[12]通过 Nd:YAG 纳秒脉冲激光器进行激光清洗, 发现采用合适的单脉冲能量密度可以保证基材无损并达到较好的清洗效果。Lu 等^[13]用纳秒光纤激光器对 AH36 钢进行激光清洗, 研

收稿日期: 2021-11-23; 修回日期: 2021-12-22; 录用日期: 2022-01-20

基金项目: 辽宁省教育厅 2021 年度面上项目(LJKZ0110)、辽宁省揭榜挂帅科技攻关项目(2021JH1/1040077)、辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1902022)

通信作者: *wjliu@sut.edu.cn

究了不同激光强度对表面形貌的影响,获得了激光清洗对表面性能的影响规律。Zhou 等^[14]研究指出,纳秒脉冲激光器和皮秒脉冲激光器对铝合金表面清洗有不同的效果,并分析得出合适的平均功率和搭接率对清洗效果有重要影响。童懿等^[15]采用 IPG 纳秒脉冲光纤激光器进行激光清洗,发现采用合适的脉冲能量密度可以使剥离机制增强,从而获得较好的清洗效果。邱太文等^[16]通过研究不同脉冲频率和脉冲宽度对激光清洗效果的影响,探讨了不同激光工艺参数下的除漆效果以及基材表面的损伤情况,并获得了激光清洗对表面显微硬度的影响规律。

综上所述,激光清洗的工艺参数对清洗效果和表面质量有着重要影响。但是,目前关于脉冲光纤激光器清洗 7075 铝合金阳极氧化膜的工艺研究鲜有报道。脉冲光纤激光器相较于其他激光器具有光束质量高、斜率效率高、光光转换效率高和环境适应性强等优点^[17]。因此,本文采用 IPG 脉冲光纤激光器开展 7075 铝合金阳极氧化膜的清洗工艺实验研究,利用光学显微镜、扫描电子显微镜(SEM)和激光共聚焦显微镜观察清洗后的形貌,并结合 X 射线能谱仪(EDS)对试样表面的元素含量进行分析,研究了脉冲激光平均功率、扫描速度和脉冲频率对清洗后 7075 铝合金的表面形貌、微观组织、元素含量、清洗率和表面粗糙度的影响规律。

2 方法与仪器

2.1 实验仪器及材料

本文采用的激光清洗实验平台包括:IPGYLPN-

100 脉冲光纤激光器、X 方向及 Y 方向扫描振镜、可移动载物平台及控制系统,如图 1 所示。激光波长为 1064 nm,光斑直径为 1.5 mm,本文固定清洗宽度为 50 mm、脉宽为 70 ns、行进速度为 5 mm/s。本文选定平均功率范围为 175~250 W,选定脉冲频率范围为 2.5~4.0 kHz,选定扫描速度范围为 1500~3000 mm/s。

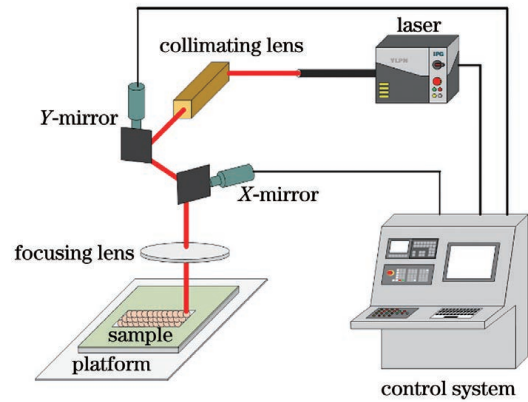


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

实验材料为 7075 铝合金板材,热处理状态为 T6 (固溶热处理后进行人工时效的状态),试样被切割成尺寸为 10 mm×10 mm×3 mm 的块体。7075 铝合金表面镀有厚度约为 3 μm 的阳极氧化膜。利用光学显微镜和扫描电镜观察,从图 2(a)中可以看出,试样表面为带有微裂纹的多孔状形貌。再结合图 2(b)的能谱分析发现,阳极氧化膜中的主要元素有 C、O、Al、S,且原始试样表面的氧含量(质量分数)为 19.05%,硫含量(质量分数)为 2.66%。

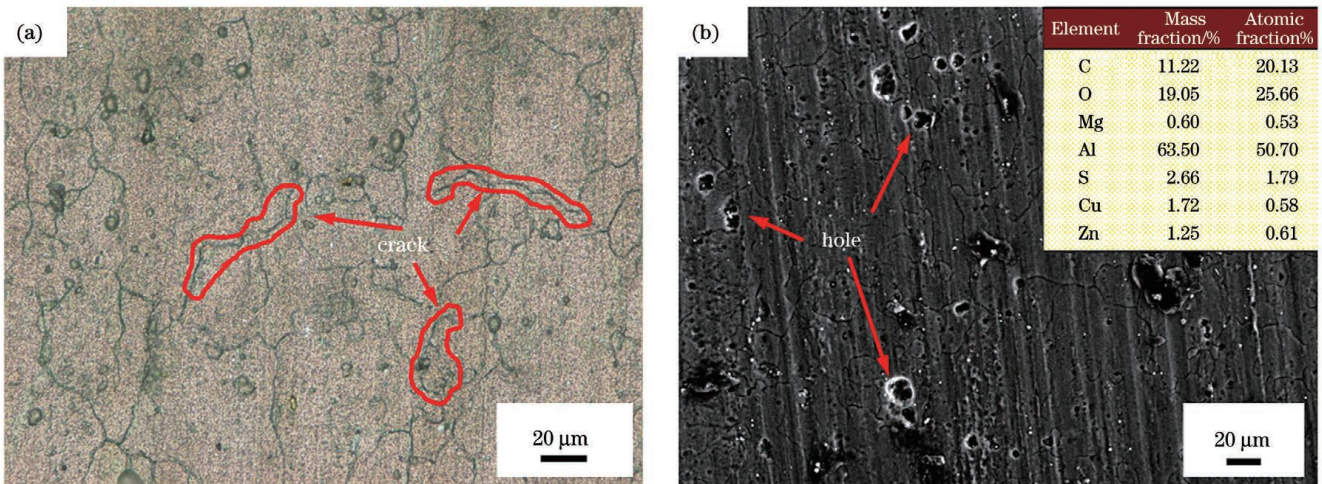


图 2 7075 铝合金阳极氧化后的原始形貌。(a) 光镜下的原始形貌;(b) 原始微观形貌及元素含量

Fig. 2 Original morphologies of 7075 aluminum alloy after anodic oxidation. (a) Original morphology under optical microscope; (b) original microscopic morphology and elemental content

2.2 实验步骤

本文采用平均功率(P)、脉冲频率(f)、扫描速度(v)三个工艺参数对 7075 铝合金试样进行单因素清洗实验,研究不同工艺参数对激光清洗效果的影响。光斑搭接率的计算公式为

$$U = \left(1 - \frac{v}{Lf}\right) \times 100\%, \quad (1)$$

式中: U 为光斑搭接率; f 为脉冲频率; v 为扫描速度; L 为光斑直径。

从式(1)可以看出,脉冲频率 f 过大会增大光斑

搭接率,脉冲频率 f 过小会减小光斑搭接率^[14]。扫描速度 v 过小会增大光斑搭接率,扫描速度 v 过大会减小光斑搭接率。光斑搭接率的大小可能影响铝合金阳极氧化膜的清洗效果。激光清洗光斑的排列示意图如图 3 所示。

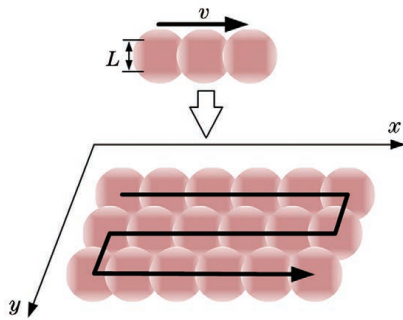


图 3 激光清洗光斑的排列示意图

Fig. 3 Arrangement diagram of laser cleaning spot

能量密度计算公式为

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

式中: F 为能量密度; P 为平均功率。由式(2)可以看出,能量密度^[18]也会影响铝合金阳极氧化膜的清洗效果,而能量密度受到脉冲频率 f 和平均功率 P 的影响,增大脉冲频率 f 会减小能量密度,减小脉冲频率 f 会增大能量密度。平均功率 P 也会影响作用在试样表面的能量大小,平均功率 P 太低会减小能量密度,平均功率 P 太高会增大能量密度。

如图 4 所示,对试样表面进行激光清洗时,高能量激光会使试样表面产生瞬时的高温,导致试样表面的阳极氧化膜发生气化。由于激光对试样表面的热影响是从光斑中心向外辐射的,温度必然会从内而外发生递减,在光斑外围温度较低的位置,激光清洗的冲击力使氧化膜发生弹性振动而剥离。因此,试样表面的温升^[19]可作为判断激光清洗机制的重要依据:

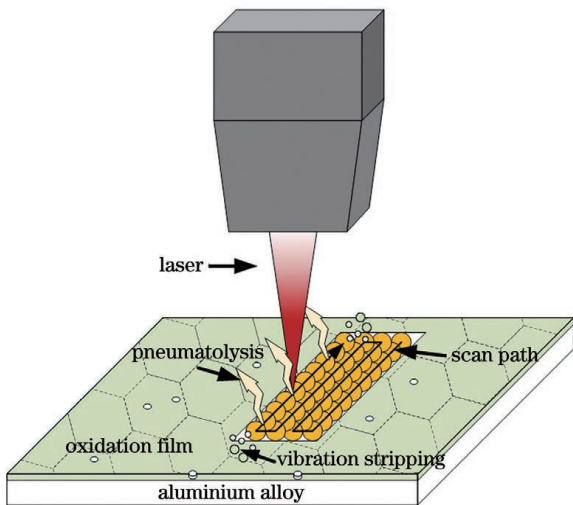


图 4 激光清洗去除阳极氧化膜的原理图

Fig. 4 Principle diagram of removing anodic oxidation film by laser cleaning

$$\Delta T = \frac{2F\gamma}{k} \sqrt{\frac{\alpha\tau}{\pi}}, \quad (3)$$

式中: ΔT 为温升; γ 为材料的吸收率; k 为材料的热导率; α 为材料的热扩散率; τ 为激光脉宽。

本文对尺寸为 10 mm×10 mm×3 mm 的 7075 铝合金试样进行激光清洗,使用光学显微镜、扫描电子显微镜和激光共聚焦显微镜观察激光清洗后试样表面的微观形貌。以激光清洗后试样表面的氧含量和硫含量为检验依据,检验铝合金阳极氧化膜的清洗效果^[20],采用 X 射线能谱仪检测试样表面的元素含量,并结合激光共聚焦显微镜对试样表面的粗糙度(S_a)进行检测。综合分析工艺参数对 7075 铝合金表面形貌、微观组织、粗糙度、清洗率和元素含量的影响规律,探究获取高清洗率与低表面粗糙度波动效果的激光清洗阳极氧化膜工艺的参数范围。

3 实验结果与分析

3.1 激光工艺参数对表面形貌和微观组织的影响

为考察平均功率对激光清洗的影响,令脉冲频率 $f=2.5$ kHz,扫描速度 $v=2500$ mm/s,采用平均功率 $P=175\sim 250$ W 清洗试样表面,利用光学显微镜观察激光清洗后试样表面的形貌,如图 5 所示。从式(2)可以看出,不同的平均功率会对激光清洗的能量密度产生影响,结合图 5(a)分析发现,当采用平均功率 $P=175$ W 对试样表面进行清洗时,部分铝合金基材裸露出来,大部分的氧化膜仍未被去除。这主要是因为激光能量以光斑为中心向外发散,光斑外围的热影响区温度不足以使氧化膜发生振动剥离,氧化膜的清洗率较低。随着平均功率的增大,能量密度增大。能量密度由 3.11 J/cm² 增加至 3.56 J/cm² 时,如图 5(b)所示,试样表面的氧化膜残留明显减少,试样表面残留的氧化膜变为浅色,颜色相较于图 5(a)中的氧化膜更浅淡,证明此处残留的氧化膜更薄。可以进一步推断,平均功率的增大使能量密度增大,并使激光单个脉冲清洗形成的熔池加深,氧化膜的清洗深度也增加,清洗效果提高。图 5(c)所示的试样表面氧化膜比图 5(b)又有进一步的减少。图 5(d)为采用 250 W 的平均功率清洗试样后的表面形貌,试样表面的铝合金基底完全露出,说明当激光平均功率达到 250 W 时,能量密度达到 4.44 J/cm²,此时单位面积内作用的激光能量较高,能够使光斑外围形成的热影响区达到较高的温度,足以去除试样表面的阳极氧化膜,因此试样表面的氧化膜被清洗干净。

为了进一步观察清洗后试样的表面微观组织的变化,采用扫描电子显微镜对试样表面微观形貌的变化进行分析。采用不同的平均功率清洗试样后表面的微观形貌如图 6 所示。当采用平均功率 $P=175$ W 清洗试样表面时,根据 Keller 等^[20]提出的铝合金阳极氧化膜结构模型,铝合金阳极氧化膜上层为疏松多孔层,下

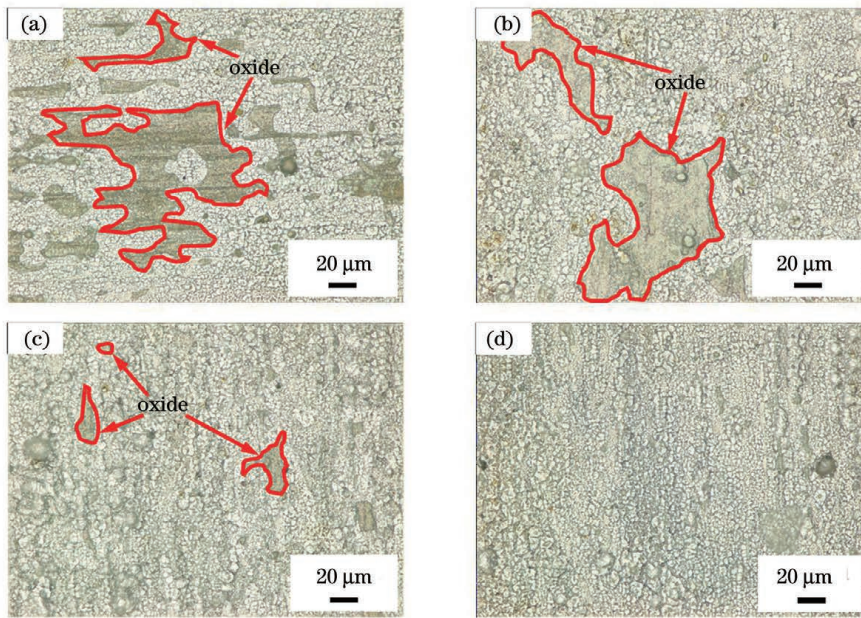


图 5 光学显微镜得到的不同平均功率下清洗后试样表面的形貌。(a)175 W;(b)200 W;(c)225 W;(d)250 W
Fig. 5 Morphologies of sample surfaces after cleaning under different average powers by optical microscope.

(a) 175 W; (b) 200 W; (c) 225 W; (d) 250 W

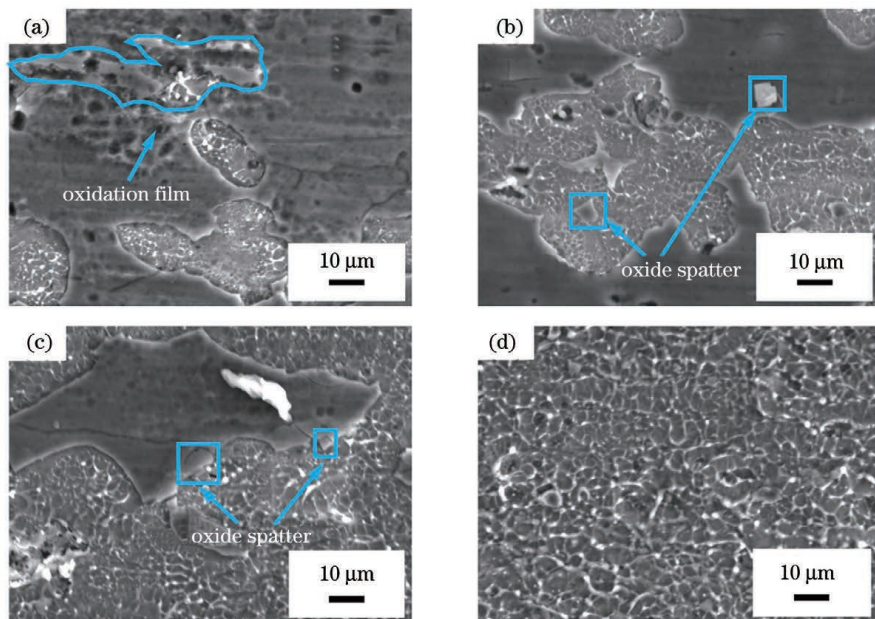


图 6 不同平均功率下清洗后试样表面的 SEM 微观形貌。(a)175 W;(b)200 W;(c)225 W;(d)250 W

Fig. 6 Microscopic morphologies of sample surfaces after cleaning under different average powers by SEM. (a) 175 W;
(b) 200 W; (c) 225 W; (d) 250 W

层为致密阻挡层。再结合图 6(a) 标记区域可以看出,氧化膜上层的疏松多孔层仍有部分残留,而其他区残留的氧化膜没有孔状结构,因此下层为致密阻挡层氧化膜,同时还有一部分区域的氧化膜已经被去除。这表明当平均功率 $P=175\text{ W}$ 时,能量密度为 3.11 J/cm^2 ,即能量密度相对较低,激光作用在试样表面形成的熔池较浅,激光能量传递到光斑外围热影响区的温度也比较低,整体的清洗深度比较浅,因此形成了图 6(a) 所示微观组织分布不均匀的表面形貌。当平均功率从 200 W 提高到 225 W 时,如图 6(b)、

(c) 所示,能量密度由 3.56 J/cm^2 增大到 4.00 J/cm^2 ,残留在试样表面的块状氧化膜的孔状结构明显减少,说明残留在试样表面的基本为下层的致密阻挡层氧化膜,证明随着能量密度的增加,氧化膜的清洗深度增加。从图 6(d) 可以看出,当平均功率 $P=250\text{ W}$ 时,表面氧化膜已经基本被清洗干净,试样表面密布着类似环形山的熔池痕迹,试样表面的熔化使大多数熔池的轮廓已经无法清晰分辨,因此当能量密度达到 4.44 J/cm^2 时,激光清洗可以使试样表面形貌比较均匀,相较于平均功率 $P=175\sim 225\text{ W}$ 时,表面微观组

织分布均匀且较为平坦。

为考察扫描速度对激光清洗的影响,令脉冲频率 $f=2.5\text{ kHz}$,平均功率 $P=250\text{ W}$,采用扫描速度 $v=1500\sim 3000\text{ mm/s}$ 对试样表面进行清洗。清洗后首先利用光学显微镜观察试样表面形貌,如图 7 所示。从式(1)可以看出,不同的扫描速度会影响激光清洗的光斑搭接率。如图 7(a)所示,当采用扫描速度 $v=1500\text{ mm/s}$ 时,光斑搭接率为 60%,虽然阳极氧化膜已经被完全清洗干净,铝合金基材已经完全露出,但是光斑搭接区域过大,作用在试样表面光斑搭接区域的能量过于密集,试样表面出现了较为严重的重熔,并因为激光清洗过程中伴随的冲击力,试样表面重熔的铝合金向激光扫描路径两侧流动,所以试样表面出现沟壑状纹路。同时,试样表面会因为密集的能量而达到非常高的温度,试样发生二次氧化,从而沟壑纹路底部颜色明显加深。如图 7(b)所示,当采用扫描速度 $v=2000\text{ mm/s}$ 时,光斑搭接率为 46.7%,

试样表面部分区域颜色浅淡的氧化膜还未被洗净,试样表面残留氧化膜的周围区域还存在烧蚀凹坑,与图 7(a)相比较,试样表面的过度烧蚀痕迹明显减少。如图 7(c)所示,当扫描速度 $v=2500\text{ mm/s}$,光斑搭接率为 33.3%,试样表面的铝合金基材已完全裸露出来,没有明显的氧化膜残留,且试样表面没有明显的过度烧蚀痕迹,证明扫描速度 $v=2500\text{ mm/s}$ 时光斑搭接合适,能够洗净试样表面的氧化膜且不会对试样表面造成烧蚀损伤。结合图 7(c)、(d)分析可知,当扫描速度从 2500 mm/s 增大至 3000 mm/s 时,光斑搭接率降低了 13.3%,随着光斑搭接率的进一步降低,只有光斑搭接的部分区域的氧化膜可以被洗净,试样表面氧化膜的残留量明显增大。图 7(d)中的部分区域存在明显的不规则形状突起,根据上文提到的铝合金阳极氧化膜分为多孔层和阻挡层^[20]可知,此处未被洗净的区域为阳极氧化膜上层的多孔层。

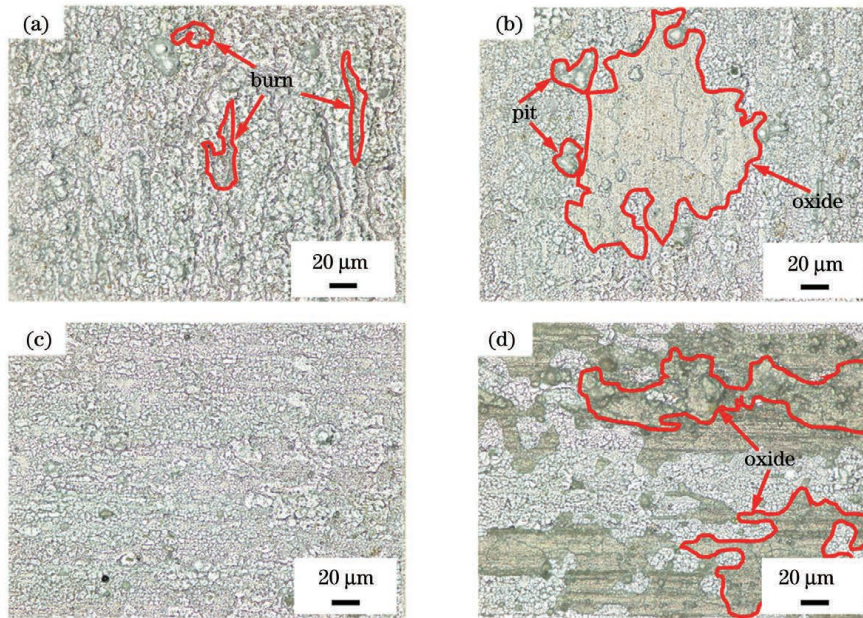


图 7 光学显微镜得到的不同扫描速度下清洗后试样表面的形貌。(a)1500 mm/s;(b)2000 mm/s;(c)2500 mm/s;(d)3000 mm/s
Fig. 7 Morphologies of sample surfaces after cleaning under different scanning speeds by optical microscope. (a) 1500 mm/s;
(b) 2000 mm/s; (c) 2500 mm/s; (d) 3000 mm/s

当扫描速度 $v=1500\sim 3000\text{ mm/s}$ 时,清洗试样表面的 SEM 微观形貌如图 8 所示。由式(1)和式(2)可以发现,扫描速度会影响光斑搭接率,但是不会影响能量密度。当采用扫描速度 $v=1500\text{ mm/s}$ 清洗试样时,根据式(1)计算,光斑搭接率为 60%,试样表面形貌如图 8(a)所示。当扫描速度 $v=1500\text{ mm/s}$ 时,试样表面有块状氧化膜残留,试样表面出现一处较大的烧蚀坑,烧蚀坑边缘出现明显的外翻,烧蚀坑边缘处的铝合金呈现出明亮的白色,这是高温使基体熔化重新凝结形成的,烧蚀坑周围还出现了龟裂状形貌,对铝合金基材的性能影响较大。采用扫描速度 $v=2000\text{ mm/s}$ 时,光斑搭接率为 46.7%,虽然光斑搭接

率相较于扫描速度 $v=1500\text{ mm/s}$ 时降低了 13.3%,但是光斑搭接区域仍然比较大,光斑搭接区域的能量过于密集,会在试样表面产生烧蚀坑,但烧蚀坑深度明显比图 8(a)所示的烧蚀坑浅,证明随着光斑搭接率从 60.0%下降至 46.7%,激光清洗能量的分布更加均匀。如图 8(c)所示,当采用扫描速度 $v=2500\text{ mm/s}$ 清洗试样时,表面氧化膜已经被清洗干净,试样表面有较浅的激光烧蚀熔化并凝结的痕迹,未出现图 8(a)、(b)中过度烧蚀的情况,试样表面光斑的痕迹重叠在一起,光斑的轮廓不明显,试样表面烧蚀形貌的分布较均匀,表面质量良好。当扫描速度 $v=3000\text{ mm/s}$ 时,光斑搭接率为 20%,由于光斑搭接率的进一步减

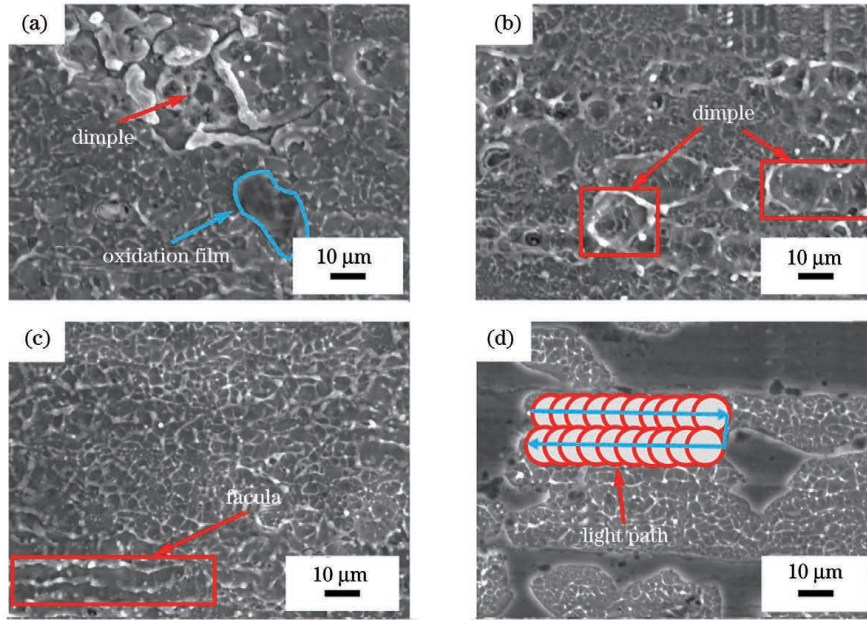


图 8 不同扫描速度下清洗后试样表面的 SEM 微观形貌。(a)1500 mm/s;(b)2000 mm/s;(c)2500 mm/s;(d)3000 mm/s
 Fig. 8 Microscopic morphologies of sample surfaces after cleaning under different scanning speeds by SEM. (a) 1500 mm/s;
 (b) 2000 mm/s; (c) 2500 mm/s; (d) 3000 mm/s

小,光斑间的重叠面积减小,而在光斑不搭接区域,激光能量导致热影响区的温度较低,不足以完全洗净氧化膜,因此在相邻两道激光轨迹间出现了细窄的条状氧化膜且未被洗净,无法达到清除氧化膜的要求。

脉冲频率 $f=2.5\sim 4.0$ kHz 时清洗试样的表面形貌如图 9 所示,由式(1)和式(2)可知,脉冲频率会影响光斑搭接率和能量密度,随着脉冲频率的增大,激光能量密度减小,光斑搭接率增大。当平均功率 $P=250$ W,扫描速度 $v=2500$ mm/s 时,只改变脉冲频率

的大小进行激光清洗实验。清洗后的试样形貌如图 9(a)所示,当脉冲频率 $f=2.5$ kHz 时,能量密度为 4.44 J/cm²,搭接率为 33.3%,此时试样的铝合金基底完全露出,铝合金基底呈现出轻微的熔化再凝固的形貌,试样表面的大部分氧化膜基本被去除干净。如图 9(b)~(d)所示,当脉冲频率从 3.0 kHz 增大至 4.0 kHz 时,搭接率从 44.4% 增大至 58.3%,能量密度从 3.70 J/cm² 减小至 2.78 J/cm²,虽然搭接率增大,但是能量密度降低,同时发现,铝合金试样表面残留的氧化膜增多,激光清洗率降低。

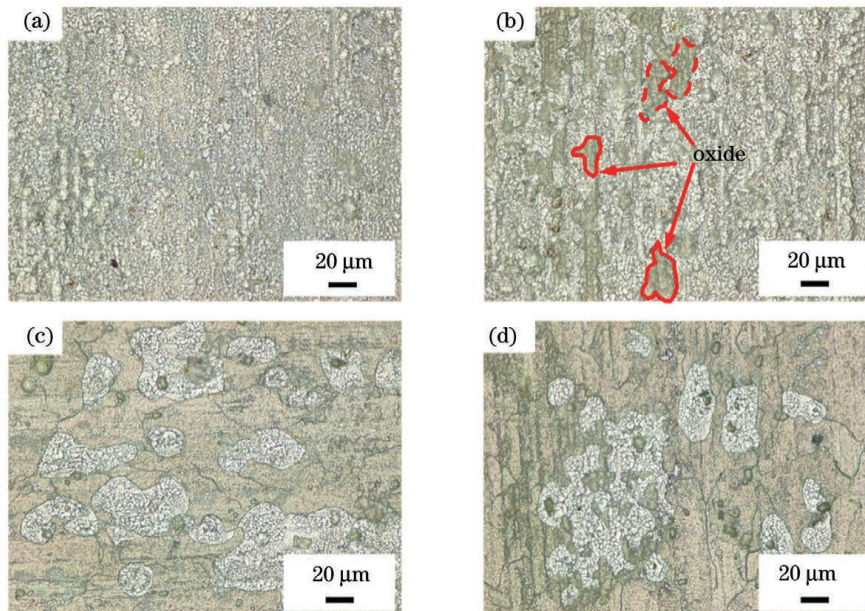


图 9 光学显微镜得到的不同脉冲频率下清洗后试样表面的形貌。(a)2.5 kHz;(b)3.0 kHz;(c)3.5 kHz;(d)4.0 kHz
 Fig. 9 Morphologies of sample surfaces after cleaning under different pulse frequencies by optical microscope. (a) 2.5 kHz;
 (b) 3.0 kHz; (c) 3.5 kHz; (d) 4.0 kHz

采用脉冲频率 $f = 2.5 \sim 4.0$ kHz 清洗试样后表面的微观形貌如图 10 所示。如图 10(a) 所示, 当脉冲频率 $f = 2.5$ kHz 时, 能量密度为 4.44 J/cm^2 , 光斑搭接率为 33.3%, 此时激光清洗的能量密度较高, 光斑间的搭接区域较小, 激光能量分布比较均匀, 因此清洗后试样表面的光斑痕迹不明显, 未出现面积较大的烧蚀坑, 且试样表面无明显氧化膜残留。如图 10(b) 所示, 当脉冲频率 $f = 3.0$ kHz 时, 能量密度为 3.7 J/cm^2 , 光斑搭接率为 33.3%, 试样表面出现小块状的未洗净氧化层, 在部分区域出现几处过度烧蚀形成的凹坑。这主要是因为清洗过程中能量密度降低, 而光斑搭接区域与光斑不搭接区域的能量分布不均匀, 光斑搭接区域积聚的能量过高, 从而使铝合金基材发生熔化, 而光斑不搭接区域积聚的激光能量不足

以将氧化膜完全洗净。随着脉冲频率增大至 3.5 kHz, 从图 10(c) 可以看出, 试样表面氧化膜仅有少部分被洗净, 被洗净区域呈现不规则圆形, 因此只有靠近光斑中心的小面积的热影响区, 氧化膜被洗掉。随着脉冲频率的增大, 由式(1)和式(2)发现, 同一区域的能量密度逐渐减小, 而光斑搭接率逐渐增大。如图 10(d) 所示, 当脉冲频率增大到 4 kHz 时, 试样表面仍残留大量氧化膜, 试样表面有多个轮廓清晰的铝合金基材裸露区域, 区域间有窄条状的氧化膜残留区域, 光斑搭接区域的能量高于光斑不搭接区域, 因此出现铝合金基材裸露区域分布不均匀的形貌。通过图 10(a)~(d) 可以发现, 当脉冲频率从 2.5 kHz 增大到 4.0 kHz 时, 能量密度减小, 阳极氧化膜的残留量增多。

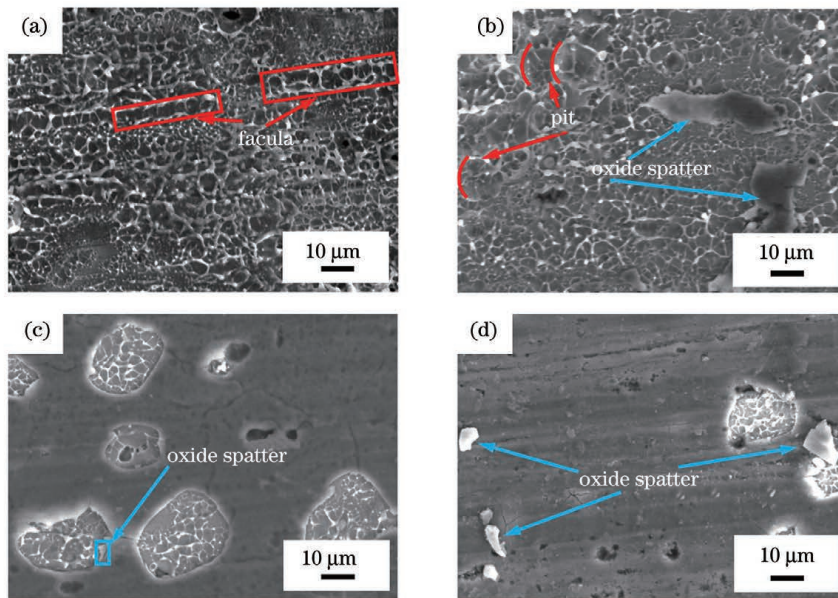


图 10 不同脉冲频率下清洗后试样表面的 SEM 微观形貌。(a) 2.5 kHz; (b) 3.0 kHz; (c) 3.5 kHz; (d) 4.0 kHz
 Fig. 10 Microscopic morphologies of sample surfaces after cleaning under different pulse frequencies by SEM. (a) 2.5 kHz; (b) 3.0 kHz; (c) 3.5 kHz; (d) 4.0 kHz

脉冲频率会影响光斑搭接率和能量密度, 进而影响试样单位面积内接收激光辐射的能量。如图 11 所示, 在靠近光斑中心的区域, 热影响区温度高于铝合金的沸点, 这些区域氧化膜的去除机制主要为气化。热影响区的温度从光斑中心向外扩散并逐渐降低, 距离

光斑中心越远, 温度越低, 当温度低于铝合金的沸点时, 激光不足以使热影响区边缘区域的氧化膜发生气化, 此时氧化膜被去除的方式主要为弹性振动剥离。从光斑中心向外形成了温度梯度, 越往外氧化膜气化区域占比越低, 弹性振动作用越强。根据式(3), 以

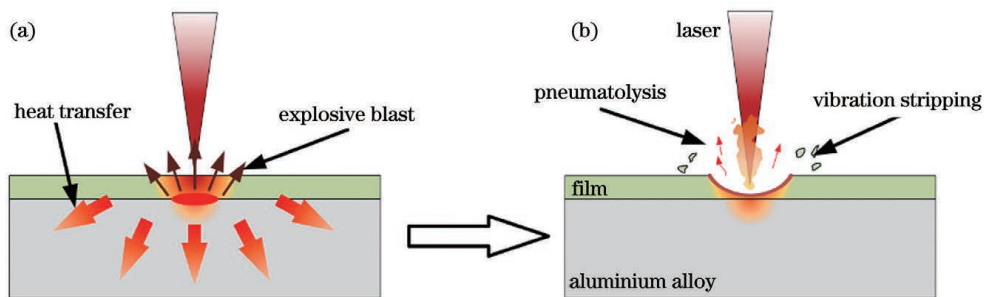


图 11 激光清洗阳极氧化膜的原理图。(a) 激光能量在试样内部的扩散示意图; (b) 试样表面氧化膜的去除机制示意图
 Fig. 11 Principle diagrams of laser cleaning of anodic oxidation film. (a) Schematic of laser energy diffusion inside sample; (b) schematic of oxide film removal mechanism on sample surface

7075 铝合金的热物性参数为计算依据^[21],当平均功率 $P=250\text{ W}$ 、扫描速度 $v=2500\text{ mm/s}$ 和脉冲频率 $f=2.5\text{ kHz}$ 时,铝合金试样表面光斑中心的温升远远高于 7075 铝合金的沸点 936.15 K ,在此参数下光斑中心的氧化膜去除机制主要为气化。

采用平均功率 $P=250\text{ W}$ 、扫描速度 $v=2500\text{ mm/s}$ 和脉冲频率 $f=3.5\text{ kHz}$ 时,激光清洗试样后的表面微观形貌如图 12 所示,从图 12(b)中可以看出,试样表面有两块不规则形状的铝合金基材裸露

区域,该区域中间已清洗位置处有白色点状的明显熔化现象,能谱分析结果显示,该位置氧含量(质量分数)为 2.5% ,硫含量(质量分数)为 0.37% ,所以此处为已经熔化的铝合金基材,证明基材上的氧化膜几乎已经被气化。而清洗区域边缘位置的熔化现象较轻微,此处区域的氧含量(质量分数)为 13.4% ,硫含量(质量分数)为 1.99% ,所以此处为破裂但未脱落的阳极氧化膜碎块,证明该区域边缘位置存在氧化膜的弹性振动剥离机制。

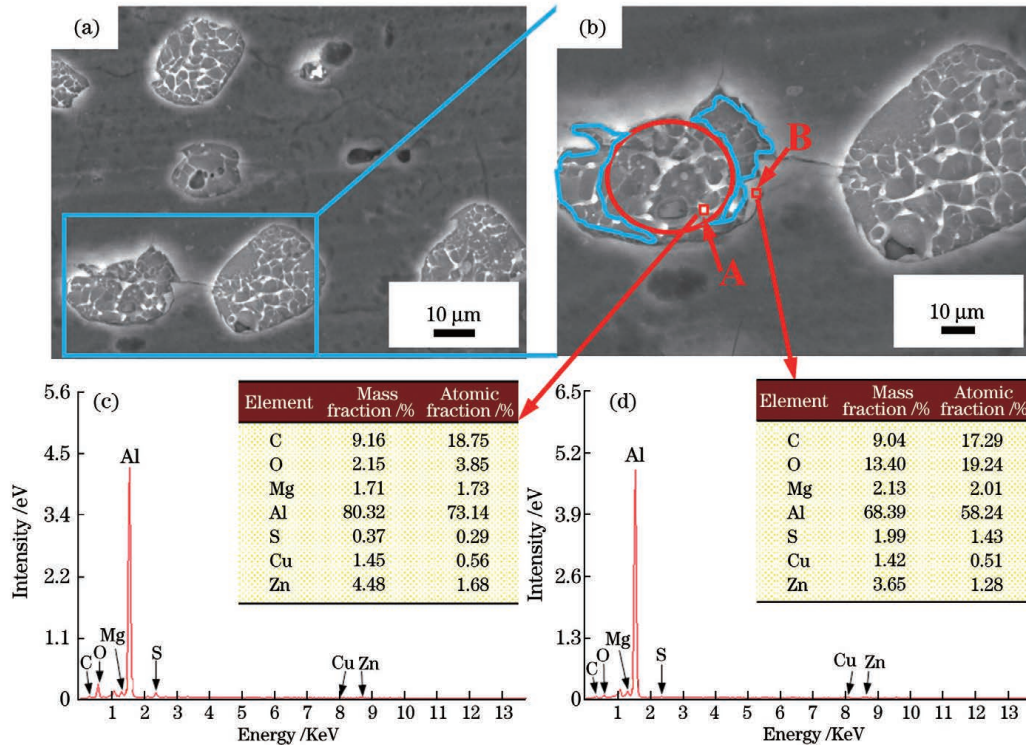


图 12 当 $P=250\text{ W}$, $f=3.5\text{ kHz}$, $v=2500\text{ mm/s}$ 时激光清洗阳极氧化膜后表面的形貌及元素含量图

Fig. 12 Morphology and elemental content of surface after laser cleaning anodic oxidation film when $P=250\text{ W}$, $f=3.5\text{ kHz}$, and $v=2500\text{ mm/s}$

如图 10(a)所示,采用平均功率 $P=250\text{ W}$ 、扫描速度 $v=2500\text{ mm/s}$ 和脉冲频率 $f=2.5\text{ kHz}$ 清洗试样表面时,试样表面的阳极氧化膜基本被洗净,裸露出来的铝合金基材表面有明显的熔化形成的熔池形貌,基材表面未出现图 8(a)、(b)所示的深度较大的烧蚀坑。从图 10(a)可以发现,铝合金基材表面搭接排列着高温熔化形成的环形山形貌,因此当平均功率 $P=250\text{ W}$ 、扫描速度 $v=2500\text{ mm/s}$ 和脉冲频率 $f=2.5\text{ kHz}$ 时,激光清洗阳极氧化膜的去除机制主要为气化爆炸。

3.2 激光工艺参数对元素含量的影响

图 13 所示为不同的平均功率下清洗试样表面的氧含量与硫含量的变化曲线。结合表 1 与图 13 可以看出,当激光清洗平均功率从 175 W 升高至 250 W 时,试样表面 EDS 分析结果显示,氧含量与硫含量都呈现出逐渐降低的趋势。当平均功率增加到 250 W 时,试样表面的氧含量与硫含量达到最低。当平均功率从 175 W

升高到 225 W 时,氧含量与硫含量的降低幅度较大;由氧含量的变化可知,氧化物的清洗率从 32.2% 升高到 96.1% ,清洗率提升了 66.5% ;在此区间内,增大平均功率可明显提升氧化膜的清洗效果。当平均功率继续升高到 250 W 时,氧含量与硫含量的变化趋于平稳,继续增大平均功率,清洗效果的提升不明显,平均功率 $P=250\text{ W}$ 时的氧化物清洗率为 98.7% ,略优于平均功率 $P=225\text{ W}$ 时的阳极氧化膜清洗率。

图 14 为不同的扫描速度下清洗试样后表面的氧含量与硫含量的变化曲线,综合分析图 14 与表 2 可知,当扫描速度从 1500 mm/s 上升到 3000 mm/s 时,试样表面的氧含量与硫含量呈现先降低后升高的趋势,试样表面的氧含量与硫含量在扫描速度 $v=2500\text{ mm/s}$ 时取最低值,此时试样表面的氧化物清洗率为 98.6% ,硫化物清洗率为 92.9% ,相较于扫描速度 $v=2000\text{ mm/s}$ 时的氧化物清洗率提升了 14.2% ,氧化膜清洗率有明显提升。

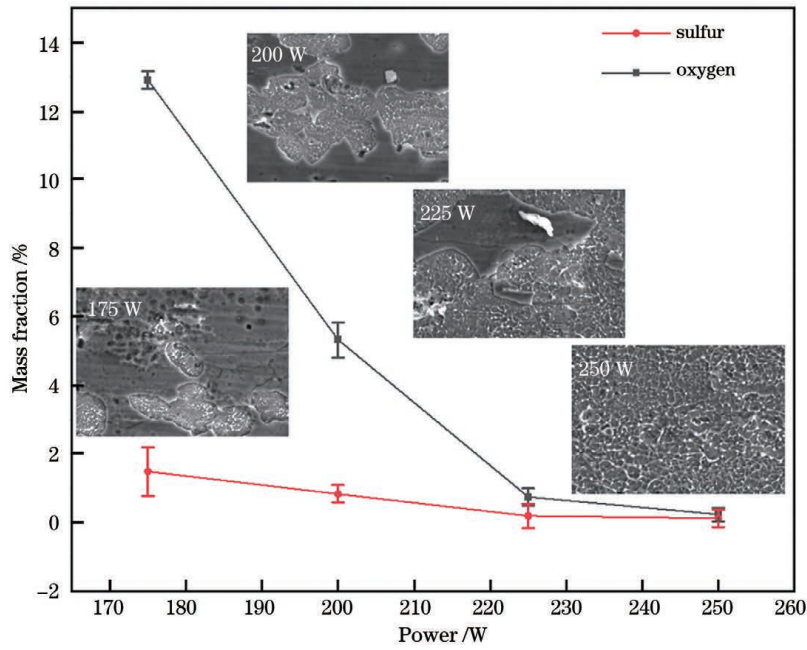


图 13 氧含量随平均功率的变化曲线

Fig. 13 Variation curves of oxygen content with average power

表 1 不同平均功率下清洗后铝合金表面的元素含量

Table 1 Elemental contents of aluminum alloy surfaces after cleaning under different average powers

Element	Average power of 175 W		Average power of 200 W		Average power of 225 W		Average power of 250 W	
	Mass fraction /%	Atomic fraction /%	Mass fraction /%	Atomic fraction /%	Mass fraction /%	Atomic fraction /%	Mass fraction /%	Atomic fraction /%
C	16.47	29.38	9.47	19.02	4.72	10.33	4.55	10.04
O	12.90	17.26	5.33	8.04	0.75	1.23	0.24	0.40
Mg	1.02	0.90	1.58	1.57	1.91	2.07	1.91	2.08
Al	62.50	49.61	76.57	68.43	85.62	83.45	86.09	84.49
S	1.49	1.00	0.84	0.63	0.20	0.17	0.13	0.10
Cu	0.97	0.33	1.69	0.64	1.84	0.76	2.01	0.84
Zn	4.65	1.52	4.50	1.66	4.96	1.99	5.07	2.05

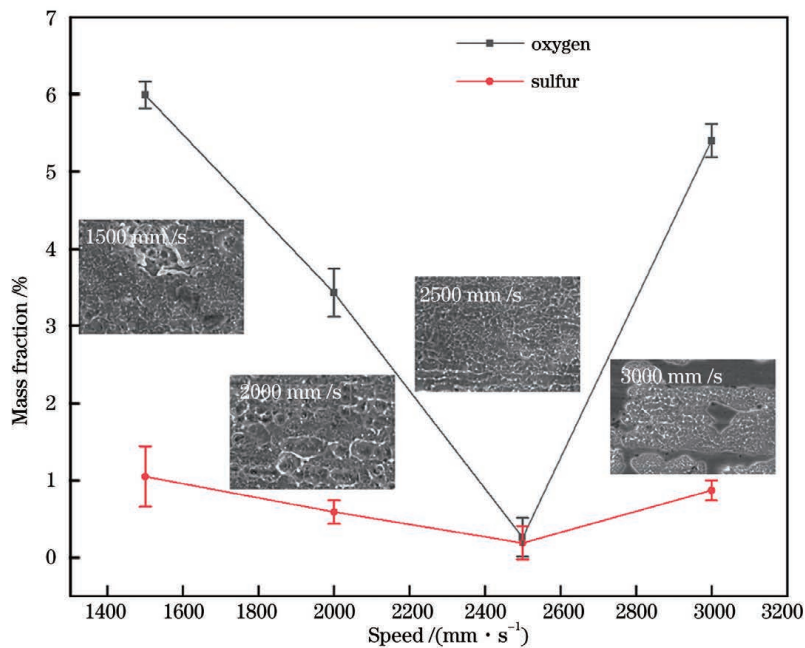


图 14 氧含量随扫描速度的变化曲线

Fig. 14 Variation curves of oxygen content with scanning speed

表 2 不同扫描速度下清洗后铝合金表面的元素含量

Table 2 Elemental contents of aluminum alloy surfaces after cleaning under different scanning speeds

Element	Scanning speed of 1500 mm/s		Scanning speed of 2000 mm/s		Scanning speed of 2500 mm/s		Scanning speed of 3000 mm/s	
	Mass fraction / %	Atomic fraction / %	Mass fraction / %	Atomic fraction / %	Mass fraction / %	Atomic fraction / %	Mass fraction / %	Atomic fraction / %
C	14.04	26.79	11.68	23.20	3.79	8.47	9.26	18.65
O	5.99	8.58	3.43	5.11	0.26	0.44	5.40	8.16
Mg	1.56	1.47	1.66	1.63	1.97	2.18	2.57	2.56
Al	70.72	60.07	75.90	67.14	85.93	85.51	75.35	67.54
S	1.05	0.75	0.59	0.44	0.19	0.16	0.87	0.66
Cu	1.54	0.55	1.44	0.54	1.80	0.76	1.46	0.56
Zn	5.11	1.79	5.31	1.94	6.07	2.49	5.09	1.88

不同脉冲频率下清洗试样后表面的氧含量变化曲线如图 15 所示,可以看出,随着脉冲频率从 2.5 kHz 增大至 4.0 kHz,试样表面的氧含量与硫含量升高。根据表 3 可知,当脉冲频率 $f=2.5$ kHz 时,试样表面的氧含量为 0.35%、硫含量为 0.14%,与脉冲频率

$f=3.0\sim 4.0$ kHz 时相比,氧含量与硫含量都已接近于 0,氧化物清洗率达到 98.2%,硫化物清洗率达到 94.7%,清洗率均已达到较高的水平。

如表 1~3 所示,当采用平均功率 $P=250$ W、扫描速度 $v=2500$ mm/s 和脉冲频率 $f=2.5$ kHz 对试

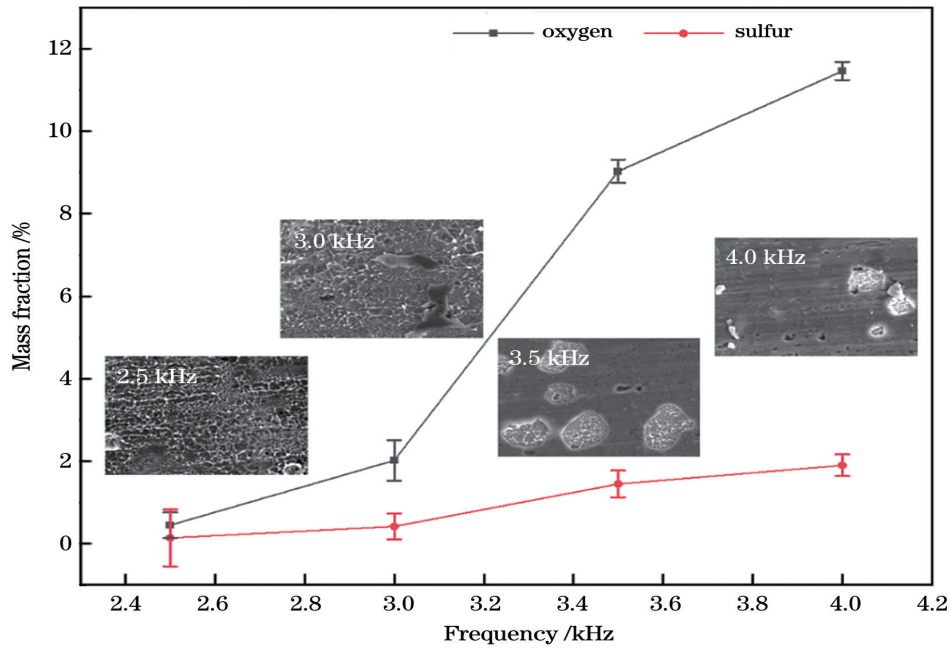


图 15 氧含量随脉冲频率的变化曲线

Fig. 15 Variation curves of oxygen content with pulse frequency

表 3 不同脉冲频率下清洗后铝合金表面的元素含量

Table 3 Elemental contents of aluminum alloy surfaces after cleaning under different pulse frequencies

Element	Pulse frequency of 2.5 kHz		Pulse frequency of 3.0 kHz		Pulse frequency of 3.5 kHz		Pulse frequency of 4.0 kHz	
	Mass fraction / %	Atomic fraction / %	Mass fraction / %	Atomic fraction / %	Mass fraction / %	Atomic fraction / %	Mass fraction / %	Atomic fraction / %
C	2.43	5.52	2.36	5.31	13.15	24.87	16.46	29.60
O	0.35	0.66	2.02	3.41	9.03	12.82	11.46	15.47
Mg	1.94	2.17	1.84	2.05	2.15	2.01	1.78	1.58
Al	87.18	88.18	85.41	85.57	67.65	56.97	62.7	50.18
S	0.14	0.12	0.42	0.36	1.45	1.03	1.90	1.28
Cu	1.85	0.80	1.76	0.75	1.68	0.60	1.22	0.41
Zn	6.11	2.55	6.19	2.56	4.89	1.70	4.47	1.48

样表面清洗时,试样表面氧化物的清洗率可以达到 98.2%~98.7%,硫化物清洗率达到 92.9%~95.1%。结合文献[22-24]的研究结果,本文以氧元素和硫元素的含量(质量分数)为清洗质量评价依据,并以氧元素的含量(质量分数)在 0.5% 以下作为指标。由图 13~15 分析可知,采用平均功率 $P=250\text{ W}$ 、扫描速度 $v=2500\text{ mm/s}$ 和脉冲频率 $f=2.5\text{ kHz}$ 对试样表面清洗时,试样表面的氧含量与硫含量均已接近于 0,因此,可以认为试样表面的阳极氧化膜已经被洗净。

3.3 激光工艺参数对表面粗糙度及三维形貌的影响

试样的表面粗糙度及表面三维形貌产生的任何细微波动都会影响铝合金材料维修后的使用安全性,故表面粗糙度数值应尽可能接近表面原始粗糙度^[25-27]。取试样表面 $1285\text{ }\mu\text{m}\times 1285\text{ }\mu\text{m}$ 大小的区域,采用激光共聚焦显微镜测试样品表面的粗糙度及三维形貌,通过测得的不同颜色信息来表征样品表面的起伏特

征。图 16 所示为不同平均功率下清洗后试样表面的三维形貌。当激光清洗平均功率 $P=200\text{ W}$ 时,如图 16(a)所示,可以看出,凹坑数量较多,被清洗部分的基材表面已损伤,还有部分区域存在红色毛刺状突起形貌,这部分区域的氧化膜未被洗净。从表 4 可以看出,平均功率 $P=200\text{ W}$ 时试样表面粗糙度为 $0.524\text{ }\mu\text{m}$ 。当平均功率增大至 225 W 时,试样表面的凹坑数量明显减少,毛刺状突起由相连的块状变为少量孤立的点状,三维形貌获得明显改善,表面粗糙度也下降至 $0.495\text{ }\mu\text{m}$ 。当平均功率分别为 225 W 和 250 W 时,试样表面的三维形貌均较为平坦,两个参数下的三维形貌差距较小。从图 16(c)中可以看出,平均功率 $P=250\text{ W}$ 时的三维形貌相较于平均功率 $P=225\text{ W}$ 时颜色也更加均匀,毛刺状突起形貌最少。当平均功率从 200 W 增大至 250 W 时,表面粗糙度也从 $0.524\text{ }\mu\text{m}$ 下降至 $0.450\text{ }\mu\text{m}$,试样表面粗糙度有所改善。

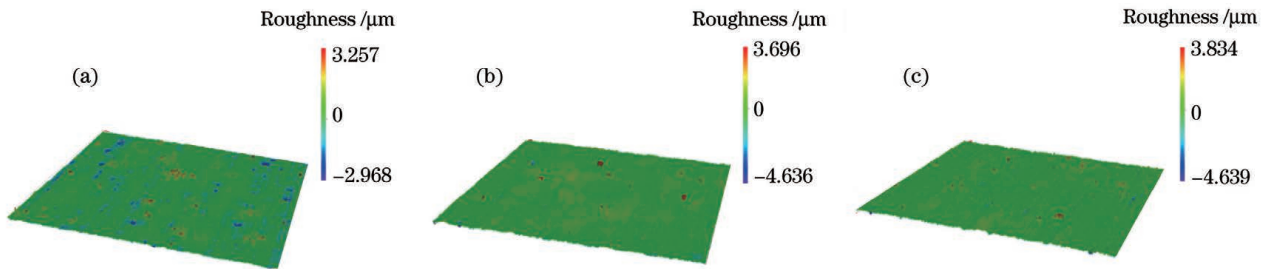


图 16 不同平均功率下清洗试样后表面的三维形貌。(a)200 W;(b)225 W;(c)250 W

Fig. 16 Three-dimensional morphologies of sample surfaces after cleaning under different average powers. (a) 200 W; (b) 225 W; (c) 250 W

表 4 不同平均功率下清洗试样后的表面粗糙度
Table 4 Surface roughnesses of sample after cleaning under different average powers

Average power /W	200	225	250
Surface roughness / μm	0.524	0.495	0.450

不同扫描速度下清洗试样后表面的三维形貌如图 17 所示。当采用扫描速度 $v=2000\text{ mm/s}$ 清洗试样时,表面粗糙度为 $0.769\text{ }\mu\text{m}$,试样表面三维形貌如图 17(a)所示,可以看出,中间位置有一块凹陷区域,并且试样表面有大量点状的尖刺状突起形貌。因此,

当扫描速度 $v=2000\text{ mm/s}$ 时,会出现未洗净区域与过度烧蚀区域共存的情况,不能满足清洗质量的要求。当采用扫描速度 $v=2500\text{ mm/s}$ 清洗试样表面时,表面粗糙度为 $0.6\text{ }\mu\text{m}$,如图 17(b)所示,除了试样表面存在一处块状突起形貌外,其他区域的颜色分布比较均匀,没有明显的尖刺状形貌,相较于扫描速度 $v=2000\text{ mm/s}$ 时,表面三维形貌有明显改善。当采用扫描速度 $v=3000\text{ mm/s}$ 清洗试样表面时,表面粗糙度为 $0.6\text{ }\mu\text{m}$,如图 17(c)所示,试样表面有许多密集的点状尖刺状突起形貌,尖刺状形貌呈沟壑状分布。光斑搭接区域的能量密集,清洗深度较深,而光斑未搭接

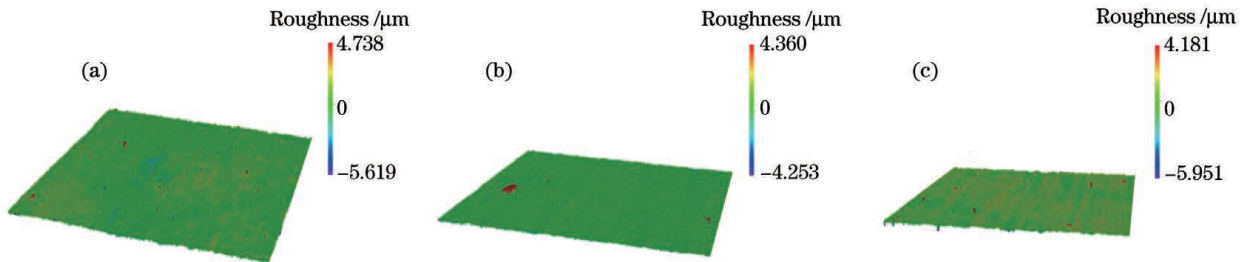


图 17 不同扫描速度下清洗试样后表面的三维形貌。(a)2000 mm/s;(b)2500 mm/s;(c)3000 mm/s

Fig. 17 Three-dimensional morphologies of sample surfaces after cleaning under different scanning speeds. (a) 2000 mm/s; (b) 2500 mm/s; (c) 3000 mm/s

区域,清洗深度相对较浅,因此在试样表面形成了规则的沟壑状形貌,从表 5 可知,当扫描速度从 2000 mm/s 增大至 3000 mm/s 时,表面粗糙度先减小后增大,扫描速度 $v=2500$ mm/s 时表面粗糙度为 $0.6 \mu\text{m}$,表面粗糙度较小。

表 5 不同扫描速度下清洗试样后的表面粗糙度
Table 5 Surface roughnesses of sample after cleaning under different scanning speeds

Scanning speed / (mm·s ⁻¹)	2000	2500	3000
Surface roughness / μm	0.769	0.600	0.749

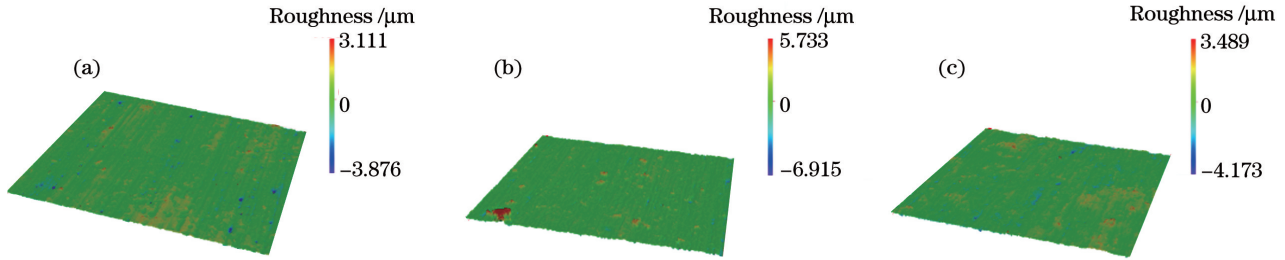


图 18 不同脉冲频率下清洗试样后表面的三维形貌。(a)2.5 kHz;(b)3.0 kHz;(c)3.5 kHz
Fig. 18 Three-dimensional morphologies of sample surfaces after cleaning under different pulse frequencies. (a) 2.5 kHz; (b) 3.0 kHz; (c) 3.5 kHz

表 6 不同脉冲频率下清洗试样后的表面粗糙度
Table 6 Surface roughnesses of sample after cleaning under different pulse frequencies

Pulse frequency /kHz	2.5	3.0	3.5
Surface roughness / μm	0.526	0.672	0.552

如图 16~18 所示,当采用平均功率 $P=250$ W、扫描速度 $v=2500$ mm/s 和脉冲频率 $f=2.5$ kHz

不同脉冲频率下清洗试样后表面的三维形貌如图 18 所示。从表 6 可以看出,当脉冲频率从 2.5 kHz 增大至 3.5 kHz 时,试样的表面粗糙度呈现先增大后减小的趋势,当脉冲频率 $f=2.5$ kHz 时,表面粗糙度最小为 $0.526 \mu\text{m}$ 。因此,在脉冲频率 $f=2.5 \sim 3.5$ kHz 的范围内,当脉冲频率 $f=2.5$ kHz 时,试样表面形貌的起伏波动最小。结合图 18(a)~(c) 可以发现,与采用脉冲频率 $f=3 \sim 3.5$ kHz 清洗试样后表面的三维形貌相比,采用脉冲频率 $f=2.5$ kHz 清洗试样后表面的毛刺状突起数量较少且高度较低,试样表面三维形貌的波动较小,与表 6 的检测结果相符。

对试样表面清洗时,试样表面的三维形貌波动较小。结合表 4~6 分析可知,试样表面粗糙度达到 $0.45 \sim 0.60 \mu\text{m}$ 。与图 19(a) 所示的原始试样对比,当平均功率 $P=250$ W、扫描速度 $v=2500$ mm/s 和脉冲频率 $f=2.5$ kHz 时,试样表面粗糙度未发生较大变化,因此,在此参数下试样清洗对表面粗糙度的影响较小,可以保证铝合金基材的表面质量。

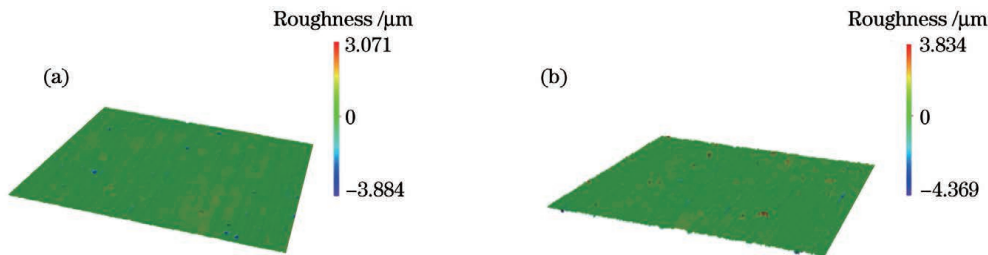


图 19 试样表面的三维形貌。(a)清洗前的原始试样表面三维形貌;(b)在 $P=225$ W, $v=2500$ mm/s, $f=2.5$ kHz 下清洗后的样品表面三维形貌

Fig. 19 Three-dimensional morphologies of sample surfaces. (a) Three-dimensional morphology of original sample surface before cleaning; (b) three-dimensional morphology of sample surface after cleaning when $P=225$ W, $v=2500$ mm/s, and $f=2.5$ kHz

4 结 论

通过对 7075 铝合金试样表面阳极氧化层进行激光清洗,研究了激光清洗平均功率、扫描速度和脉冲频率对铝合金试样清洗后的微观形貌、元素含量及表面粗糙度的影响,得出了以下结论。

1) 平均功率、扫描速度和脉冲频率均会对试样表面氧化膜的清洗率产生影响,随着平均功率的增大,能

量密度逐渐增大,清洗率增大。随着扫描速度的增大,光斑搭接率逐渐减小,清洗率则先增大又减小。随着脉冲频率的增大,光斑搭接率逐渐增大,能量密度则逐渐减小,清洗率则随之减小。

2) 平均功率、扫描速度和脉冲频率也会影响表面粗糙度。随着平均功率的增大,试样表面粗糙度逐渐减小。随着扫描速度的增大,试样表面粗糙度先减小后增大。随着脉冲频率的增大,试样表面粗糙度先增

大后减小。

3) 采用平均功率 $P = 250 \text{ W}$, 扫描速度 $v = 2500 \text{ mm/s}$, 脉冲频率 $f = 2.5 \text{ kHz}$ 时, 能量密度为 4.44 J/cm^2 , 光斑搭接率为 33.3% 。清洗率最高为 98.7% , 表面粗糙度最小为 $0.45 \mu\text{m}$, 试样表面三维形貌的波动较小。

4) 当平均功率 $P = 250 \text{ W}$, 扫描速度 $v = 2500 \text{ mm/s}$, 脉冲频率 $f = 2.5 \text{ kHz}$ 时, 激光清洗中的去除机制以气化为主要, 试样表面的氧化膜可以被洗净, 且不会在试样表面产生深度较大的烧蚀坑。

参 考 文 献

- [1] 张允康, 许晓静, 罗勇, 等. 7075 铝合金强化固溶 T76 处理后的拉伸与剥落腐蚀性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(S2): 612-615.
Zhang Y K, Xu X J, Luo Y, et al. Tensile property and exfoliation corrosion of 7075 aluminum alloy after enhanced-solid-solution and T76 aging treatment[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(S2): 612-615.
- [2] 蔡攀. 浅谈飞机 MRO 大修包研究及应用[J]. 航空维修与工程, 2021(8): 40-42.
Cai P. Brief discussion on the research and application of aircraft MRO document package[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2021(8): 40-42.
- [3] 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.
- [4] 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.
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.
- [5] 赵海朝, 乔玉林, 杜娟, 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.
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.
- [6] 陈俊宏, 温鹏, 常保华, 等. 钛合金激光清洗及其对激光焊接气孔的影响[J]. 中国机械工程, 2020, 31(4): 379-383.
Chen J H, Wen P, Chang B H, et al. Laser cleaning of titanium alloy and its effect on laser welding porosity [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(4): 379-383.
- [7] 陈一鸣, 周龙早, 闫飞, 等. 铝合金激光清洗机理与质量评估[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1202005.
Chen Y M, Zhou L Z, Yan F, et al. Mechanism and quality evaluation of laser cleaning of aluminum alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1202005.
- [8] 丁帅帅, 刘国东, 黎相孟, 等. 纳秒激光对金属清洗着色机理及质量的研究[J]. 表面技术, 2021, 50(3): 183-190, 197.
Ding S S, Liu G D, Li X M, et al. Study on the mechanism and quality of metal cleaning and coloring by nanosecond laser[J]. Surface Technology, 2021, 50(3): 183-190, 197.
- [9] Ma M L, Wang L M, Li J F, et al. Investigation of the surface integrity of Q345 steel after Nd: YAG laser cleaning of oxidized mining parts[J]. Coatings, 2020, 10(8): 716.
- [10] 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.
- [11] Zhang G X, Hua X M, Huang Y, et al. Investigation on mechanism of oxide removal and plasma behavior during laser cleaning on aluminum alloy[J]. Applied Surface Science, 2020, 506: 144666.
- [12] Jia X S, Zhang Y D, Chen Y Q, et al. Laser cleaning of slots of chrome-plated die[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 119: 105659.
- [13] Lu Y, Ding Y, Wang M L, et al. A characterization of laser cleaning painting layer from steel surface based on thermodynamic model [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 116(5/6): 1989-2002.
- [14] 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.
- [15] 童懿, 邱太文, 易俊兰, 等. 脉冲频率对油漆涂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.
- [16] 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.
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.
- [17] 孙宏. Yb 掺杂脉冲光纤激光器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 19-20.
Sun H. Research on the Yb-doped pulse fiber laser [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013: 19-20.
- [18] 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.
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.
- [19] Steen W M, Mazumder J. Laser cleaning [M] // Steen W M, Mazumder J. Laser material processing. London: Springer, 2010: 417-440.
- [20] Keller F, Hunter M S, Robinson D L. Structural features of oxide coatings on aluminum[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1953, 100(9): 411-419.
- [21] 《工程材料实用手册》编辑委员会. 工程材料实用手册[M]. 2 版. 北京: 中国标准出版社, 2001: 308-310.
Editorial Board of practical Handbook of Engineering Materials. Engineering materials practical manual [M]. 2nd ed. Beijing: Standards Press of China, 2001: 308-310.
- [22] 董文祺. 激光清洗 5083 铝合金阳极氧化膜对激光焊接质量的影响[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2018.
Dong W Q. Influence of removal of anodic oxide film from 5083 aluminum alloy by laser cleaning on the welding quality of laser welding [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2018.
- [23] 黄建宇. 6061 铝合金焊接前纳秒激光表面预处理机制与实验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
Huang J Y. Research on pretreatment mechanism and experiment of 6061 aluminum alloy by nanosecond laser before welding [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018.
- [24] 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.
- [25] 单腾, 王思捷, 殷凤仕, 等. 激光清洗的典型应用及对基体表面完整性影响的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(11): 11164-11173.
Shan T, Wang S J, Yin F S, et al. A review of the application of laser cleaning and its influences on the substrate surface integrity [J]. Materials Reports, 2021, 35(11): 11164-11173.
- [26] 彭伟, 雷辉. 能量密度对皮秒激光清洗 H13 模具钢的表面形貌与性能影响[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17):

1714002.

Peng W, Lei H. Effect of energy density on surface morphology and properties of H13 mold steel via picosecond laser cleaning [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58 (17): 1714002.

[27] 冯旺. 表面粗糙度对铝合金材料疲劳寿命的影响特性研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2020.
Feng W. Study on the effect of surface roughness on fatigue life of aluminum alloy [D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2020.

Effect of Laser Cleaning Process Parameters on Surface Quality of 7075 Aluminum Alloy Anodic Oxidation Film

Wang Wei, Li Xiangjin, Liu Weijun^{*}, Xing Fei, Bian Hongyou

School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning, China

Abstract

Objective The 7075 aluminum alloy material is widely used in stress structural parts such as the spacer frame and wing beams of a large passenger aircraft. The surface of these structural parts is coated with a protective anodic oxidation film. However, with the increase of the service life of the passenger aircraft, this anodic oxidation layer is worn or partially peeled off. Therefore, it is necessary to remove the anodic oxidation layer on these structural parts to facilitate the damage detection or apply a new anodic oxidation layer. Laser cleaning can improve the cleaning quality of aircraft structural parts because of its friendly environment, wide application, high cleaning precision, and good cleaning effect. At the same time, the process parameters for laser cleaning have an important impact on the cleaning effect and surface quality. However there is little research on the process for cleaning the anodic oxidation film of the 7075 aluminum alloy by an Yb-doped pulsed fiber laser. Therefore, the influence of process parameters on the surface morphology, elemental content, and surface roughness of the 7075 aluminum alloy after cleaning is explored here. The process parameters for cleaning the anodic oxidation film on the sample surface are obtained without influencing the surface roughness, which provides process guidance for ensuring the safety of aircraft structural parts after laser cleaning.

Methods The 7075 aluminum alloy plate coated with an anodic oxidation film is used here. First, the IPG Yb-doped pulsed fiber laser is used, and the anodic oxidation film on the 7075 aluminum alloy surface is cleaned under different average powers, scanning speeds, and pulse frequencies. Then, the surface morphology of the 7075 aluminum alloy after cleaning is observed by optical microscope, scanning electron microscope (SEM), and laser confocal microscope, and the elemental content of the sample surface is analyzed by X-ray energy spectrum (EDS). Finally, the effects of pulsed laser cleaning average power, scanning speed, and pulse frequency on the surface morphology, microstructure, roughness, and elemental content of the 7075 aluminum alloy are analyzed. At the same time, the removal mechanism of the anodic oxidation film on the 7075 aluminum alloy surface by laser cleaning is also studied.

Results and Discussions With the increase of the average power, the energy density increases, the molten pool formed by single laser pulse cleaning deepens, and the cleaning depth of the oxidation film increases (Fig. 5). When the average power increases from 175 W to 225 W, the energy density increases and the cleaning depth of the oxidation film becomes deeper. When the average power is 250 W and the energy density reaches 4.44 J/cm^2 , laser cleaning can make the morphology of the sample surface more uniform (Fig. 6). Scanning speed influences the spot bonding rate. When the scanning speed is too small, the spot bonding area is too large, the energy is too dense, and the sample surface remelts seriously and produces secondary oxidation [Fig. 7(a)]. When the scanning speed is too high, the spot overlap rate is too small, only the oxidation film in the spot lap area is cleaned, and the residual oxidation film increases [Fig. 7(d)]. When the scanning speed is 2500 mm/s, the spot overlap rate is 33.3%, and the oxidation film can be cleaned with good surface quality [Fig. 8(c)]. Pulse frequency influences the spot overlap rate and the energy density. When the pulse frequency increases, the overlap rate increases, the energy density decreases, and the cleaning rate of the oxidation film on the sample surface decreases (Fig. 9). When the pulse frequency is 2.5 kHz, the energy density is 4.44 J/cm^2 , and the spot overlap rate is 33.3%. The laser energy distribution is uniform, no large ablative pit appears after cleaning, and no obvious oxide film remains on the sample surface [Fig. 10 (a)]. Combined with the microscopic morphology of the sample surface after laser cleaning and the EDS analysis, the laser cleaning of the 7075 anodic oxidation film has the gasification mechanism and the elastic vibration peeling mechanism (Fig. 12). When the average power is 250 W, the scanning speed is 2500 mm/s and the pulse frequency is 2.5 kHz, the oxygen content on the sample surface is nearly close to 0. Therefore, it is considered that the anodic oxidation film on the sample surface has been cleaned (Figs. 13–15). When the

average power is 250 W, the scanning speed is 2500 mm/s, and the pulse frequency is 2.5 kHz, the three-dimensional topography of the sample surface fluctuates a little, and the roughness of the sample surface reaches 0.45–0.6 μm . Compared with that of the original sample, the roughness of the sample surface does not change significantly (Fig. 19).

Conclusions The effects of laser cleaning process parameters on the microstructure, element content and surface roughness of the 7075 aluminum alloy are studied. With the increase of the average power, the energy density increases gradually, and the cleaning rate increases. With the increase of the scanning speed, the spot overlap rate decreases gradually, and the cleaning rate first increases and then decreases. With the increase of the pulse frequency, the spot overlap rate increases, the energy density decreases, and the cleaning rate decreases. With the increase of the average power, the roughness of the sample surface decreases gradually. With the increase of the scanning speed, the roughness of the sample surface decreases first and then increases. With the increase of the pulse frequency, the surface roughness increases first and then decreases. When the average power $P = 250$ W, the scanning speed $v = 2500$ mm/s, and the pulse frequency $F = 2.5$ kHz, the energy density is 4.44 J/cm² and the spot overlap rate is 33.3%. The highest cleaning rate is 98.7% and the minimum surface roughness is 0.45 μm . The removal mechanism of anodic oxidation film on the 7075 aluminum alloy surface is mainly the gasification mechanism and the elastic vibration stripping mechanism.

Key words laser technique; laser cleaning; aluminum alloy; anodic oxidation film; process parameters; cleaning mechanism