

5083 铝合金阳极氧化膜激光清洗工艺研究

王蔚^{1,2}, 纪向城^{1,2}, 刘伟军^{1,2*}, 邢飞^{1,2}, 卞宏友^{1,2}¹沈阳工业大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870;²辽宁省激光表面工程技术重点实验室, 辽宁 沈阳 110870

摘要 采用纳秒脉冲光纤激光器对 5083 铝合金阳极氧化膜进行清洗,对清洗试样的表面形貌、表面粗糙度、元素组成和含量、清洗率及清洗机制等进行分析。研究表明,脉冲频率影响扫描振镜方向的光斑搭接率,激光行进速度影响清洗方向的光斑搭接率,在过高的激光能量下清除氧化膜时会造成基体二次氧化。工艺参数对表面粗糙度的影响规律不同,表面粗糙度随单脉冲能量的增加先增大后减小,随脉冲频率的增加出现两次先减小后增大,随激光行进速度的增加先增大后减小再增大。当单脉冲能量为 100 mJ、脉冲频率为 9.67 kHz、扫描振镜速度为 4000 mm/s、激光行进速度为 6.5 mm/s 时,5.27 μm 厚的氧化膜几乎被清洗干净,表面粗糙度为 $S_a=0.608 \mu\text{m}$,优于机械打磨表面粗糙度(1.18 μm),清洗率达 97.14%,与参数优化前相比清洗率提升了 2.43%。激光清除 5083 铝合金氧化膜的机制为热烧蚀、弹性振动剥离和孔洞爆破。

关键词 激光技术; 激光清洗; 5083 铝合金; 阳极氧化膜; 清洗效果优化; 清洗机制; 工艺参数

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220793

1 引言

5083 铝合金属于 Al-Mg-Si 系合金,具有良好的焊接性和抗蚀性及较高的比强度,在飞机零部件、航空航天业中得到广泛应用^[1]。飞机板焊接件及飞机油箱在长期服役后,表面氧化膜会发生开裂、磨损,为了保证航空飞行的安全性,需定期对其进行维修和保养。传统去除氧化膜的方法有机械打磨、化学试剂溶解等,但存在劳动强度大、损伤基体材料等问题,且易造成水资源浪费和环境污染。20 世纪 60 年代激光清洗技术应运而生,成为最具发展潜力的绿色清洗技术^[2-4]。激光清洗^[5-7]利用激光束较大的能量密度、高定位精度、较好的稳定性、强汇聚力、低损伤、无污染等特性,使基体表面污染物吸收激光能量后发生一系列的物理和化学反应,包括化学键断裂、内聚力破坏、裂纹扩展等^[8],最终使污染物脱离基体表面且不对基体造成损伤。激光清洗过程中涉及的机制包括孔洞爆破机制、烧蚀蒸发机制^[9]和特殊的弹性振动剥离机制^[10]。

阳极氧化膜的存在会严重影响焊接质量和涂装效果,经过激光清洗处理后铝合金表面形貌、粗糙度、元素种类和含量会发生明显改变,与此同时激光清洗过程中的去除机制也会随着工艺参数的改变而有所不

同,工艺参数的合理搭配对清洗质量的影响甚大。夏佩云等^[10]研究了清洗速度对 2219 铝合金阳极氧化膜去除效果的影响,发现过大的清洗速度会导致氧化膜残留,阳极氧化膜的去除机制主要为爆炸和气化,并存在少量的弹性振动剥离机制。Liu 等^[11-13]通过工艺参数试验发现,在合适的激光参数下清洗后,铝合金表面的粗糙度得到明显改善,但没有阐述粗糙度变化的原因。成健等^[14]研究了不同工艺参数对 5083 铝合金阳极氧化膜去除效果的影响,发现扫描速度以光斑搭接的形式影响清洗质量,脉冲宽度则基于不同的清洗机理影响清洗效果。周聪等^[15]研究了激光清洗 5A06 铝合金表面氧化膜工艺,发现过大或过小的光斑重叠率和扫描轨迹重叠率均会导致激光清洗效果变差,表面粗糙度变大。李宇强等^[16]研究了工艺参数对 6061 铝合金氧化层清洗效果的影响,发现工艺参数通过影响凹坑形貌尺寸来改变表面粗糙度。Dimogerontakis 等^[17]研究了厚层氧化物激光清洗的热烧蚀效应和机械效应,分析了激光能量密度参数与氧化膜厚度的关系。Yousaf 等^[18]发现,经过激光清洗后铝合金表面会形成“火山口”形状的凹坑形貌,凹坑的尺寸会随激光能量的升高先增大后减小。

综上所述,国内外学者仅研究分析了激光清洗前、

收稿日期: 2022-04-27; 修回日期: 2022-05-30; 录用日期: 2022-06-27; 网络首发日期: 2022-07-02

基金项目: 辽宁省教育厅 2021 年度科学研究面上项目(LJKZ0110)、辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1802038)、辽宁省揭榜挂帅科技攻关项目(2021JH1/1040077)

通信作者: *wjliu@sut.edu.cn

后铝合金表面形貌的差异,但没有系统地分析形貌和粗糙度变化的原因。本文以 5083 铝合金阳极氧化膜为研究对象开展了工艺试验,探究了激光清洗工艺参数对清洗表面形貌、粗糙度、元素组成和含量的影响规律,同时分析了清洗过程中存在的去除机制,并通过优化工艺参数对 5083 铝合金阳极氧化膜的清洗效果进行了优化。研究结果为激光清洗阳极氧化膜后的焊接、涂装等加工工艺提供了技术支持。

2 试验条件与方法

2.1 试验材料

试验材料选用飞机常用的 5083-H112 铝合金,基材的化学成分如表 1 所示。该铝合金表面镀有一层阳极氧化膜。阳极氧化流程如下:用夹持装置将 5083 铝合金板置入温度为 40~60 °C、质量分数为 10% 的 NaOH 溶液中碱处理 2 min 后,依次放入温水和冷水进行水洗,随后将工件悬挂在阳极氧化反应池的正极,使

工件表面和反应池的两侧壁保持平行,反应池的两侧壁为负极,恒定反应电压为 16 V,反应池中 H₂SO₄ 的质量分数为 18%,阳极氧化反应 30 min 后,取出工件放入中和反应池中除去工件表面残留的 H₂SO₄,紧接着用冷水水洗,最后使用高压气枪去除工件表面的水层使其干燥。试验时使用六锥度数控线切割机床将氧化板切割成 9 mm×9 mm×2 mm 的样品块。在扫描电镜 (SEM) 拍摄的微观形貌[图 1(a)、(b)]中,可以观察到样品表面存在微孔结构。图 1(c) 为使用金相显微镜获得的阳极氧化膜表面,可见其表面呈无规则且大小不一的氧化颗粒凸起形貌。使用砂纸打磨样品块的横截面,再使用金相显微镜测量几组阳极氧化膜的厚度,如图 1(d) 所示,可知阳极氧化后的 5083 铝合金表面形成了一层厚约 5.27 μm 的阳极氧化膜。使用能谱仪 (EDS) 检测阳极氧化膜的元素组成及含量,结果如表 2 所示,可见氧化膜中的氧元素含量(质量分数)达到了 25.87%。

表 1 5083 铝合金基材的化学成分

Table 1 Chemical compositions of 5083 aluminum alloy substrate

Element	Al	Mg	Mn	Si	Fe	Cr	Zn	Ti	Cu
Mass fraction /%	Bal.	4.00-4.90	0.40-1.00	≤0.40	≤0.40	0.05-0.25	≤0.25	≤0.15	≤0.10

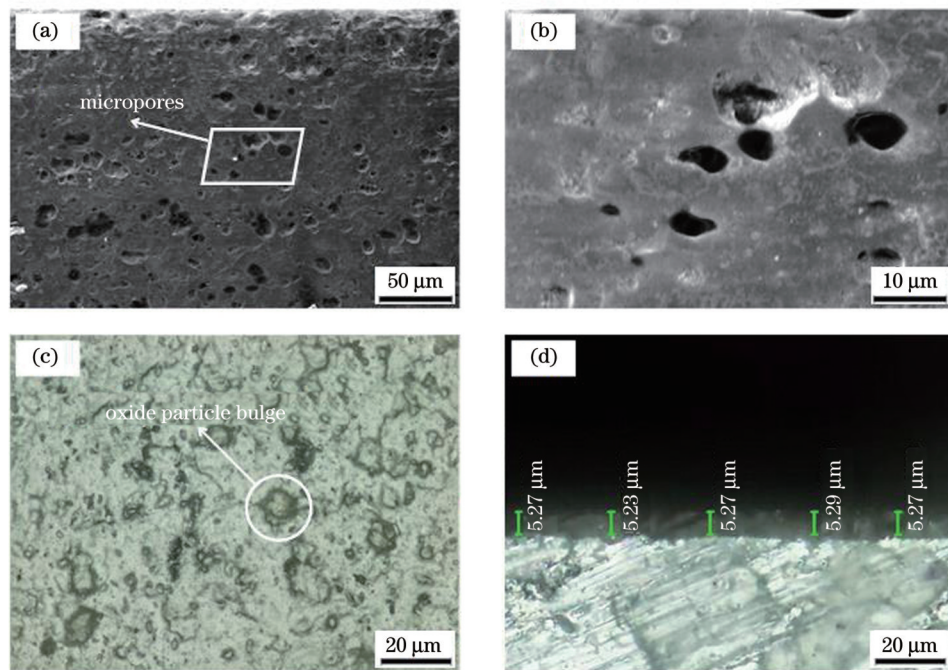


图 1 5083 铝合金阳极氧化膜形貌。(a)SEM 形貌;(b)孔洞放大形貌;(c)金相显微形貌;(d)氧化膜厚度

Fig. 1 Morphologies of anodized film of 5083 aluminum alloy. (a) SEM morphology; (b) enlarged pore morphology; (c) metallographic micrograph; (d) oxide film thickness

表 2 5083 铝合金阳极氧化膜的化学成分

Table 2 Chemical compositions of 5083 aluminum alloy anodized film

Element	Al	O	C	S	Mg	Mn	Si	Fe
Mass fraction /%	43.49	25.87	23.30	5.55	0.95	0.31	0.31	0.22

2.2 试验设备

图 2(a) 是脉冲光纤激光清洗系统的原理图, 该系统主要有计算机控制端、激光发射器、激光准直器、扫描振镜、聚焦透镜、除尘装置、移动工作平台等。清洗时激光

发射出口与待清洗试样表面的垂直距离为 39.5 cm, 输出光斑被整形为能量分布均匀的正方形光斑, 光斑边长为 1.5 mm, 激光束在水平工作台上的扫描范围设定为 150~100 mm。光斑的运行轨迹^[19-20]如图 2(b) 所示。

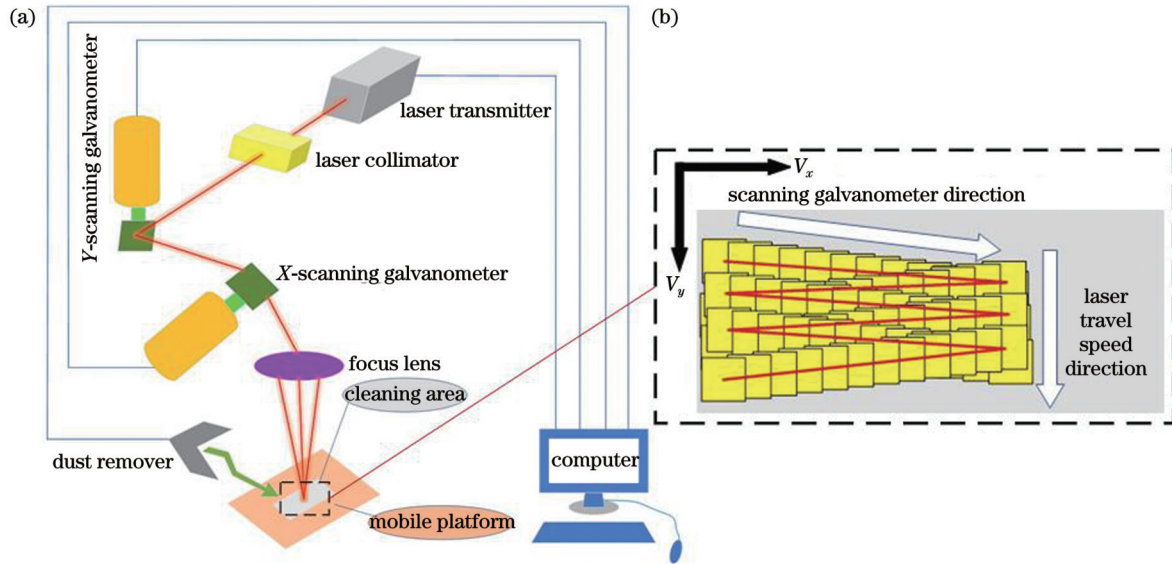


图 2 激光清洗系统。(a)原理图;(b)激光扫描轨迹

Fig. 2 Laser cleaning system. (a) Schematic; (b) laser scanning track

激光清洗主要工艺参数如表 3 所示, 试验过程中采用单次清洗。

表 3 主要工艺参数

Table 3 Main process parameters

Parameter	Value
Wavelength /nm	1064
Jump delay / μ s	500
Pulse width /ns	70
Scanning galvanometer speed /(mm/s)	4000
Spot size /mm	1.5
Monopulse energy /mJ	84-100
Pulse frequency /kHz	3.71-10.00
Laser travel speed /(mm/s)	1.0-12.5

2.3 清洗过程中的产物分析

利用金相显微镜观察 5083 铝合金阳极氧化膜清洗后表面的二维形貌, 利用激光共聚焦显微镜测试其表面三维形貌及粗糙度; 采用扫描电子显微镜拍摄清洗表面的微观形貌; 用能谱仪分析激光清洗表面的元素组成及其相对含量。测试前进行真空喷金处理以增强样品的导电性, 喷金厚度为 15 nm 左右。

3 试验结果与讨论

3.1 激光参数对清洗效果的影响

3.1.1 单脉冲能量对清洗效果的影响

为了研究单脉冲能量对激光清洗质量的影响, 选

取 84~100 mJ 的单脉冲能量 (E) 进行工艺试验, 其中脉冲频率 $F=9.33$ kHz, 扫描振镜速度 $V_x=4000$ mm/s, 激光行进速度 $V_y=7$ mm/s, 不同单脉冲能量下激光清洗后的二维形貌如图 3 所示。当单脉冲能量 $E=84$ mJ 时, 低激光功率所引起的氧化膜表面温升较小, 阳极氧化膜在孔洞处发生轻微破裂。当单脉冲能量由 $E=86$ mJ 增加到 $E=88$ mJ 时, 基体裸露面积略有增加, 但仍被氧化膜紧密包围。在单脉冲能量由 $E=90$ mJ 增加至 $E=98$ mJ 的过程中, 成片的块状氧化膜演变成氧化膜颗粒状态, 清洗效果逐渐变好。当单脉冲能量 $E=100$ mJ 时, 铝合金表面温升较高, 阳极氧化膜被完全去除, 基体表面呈现出较为平整的形貌。

铝合金表面阳极氧化膜的激光清洗过程可看作是点热源对半无限大物体进行加热, 其温升模型^[21-22]为

$$\Delta T = \frac{P \sqrt{\alpha \tau}}{0.885K}, \quad (1)$$

$$E = \frac{P}{F}, \quad (2)$$

式中: ΔT 为温度 ($^{\circ}\text{C}$) 增加量; P 为激光功率 (W); α 为材料传温系数 (cm^2/s); τ 为激光脉宽 (s); K 为材料导热系数 [$\text{W}/(\text{cm}\cdot^{\circ}\text{C})$]。

由式 (1)、(2) 可知, 铝合金表面阳极氧化膜的温升与单脉冲能量呈线性变化关系, 单脉冲能量越大, 清洗时铝合金表面阳极氧化膜的温升越大, 即更多的氧化膜被去除。

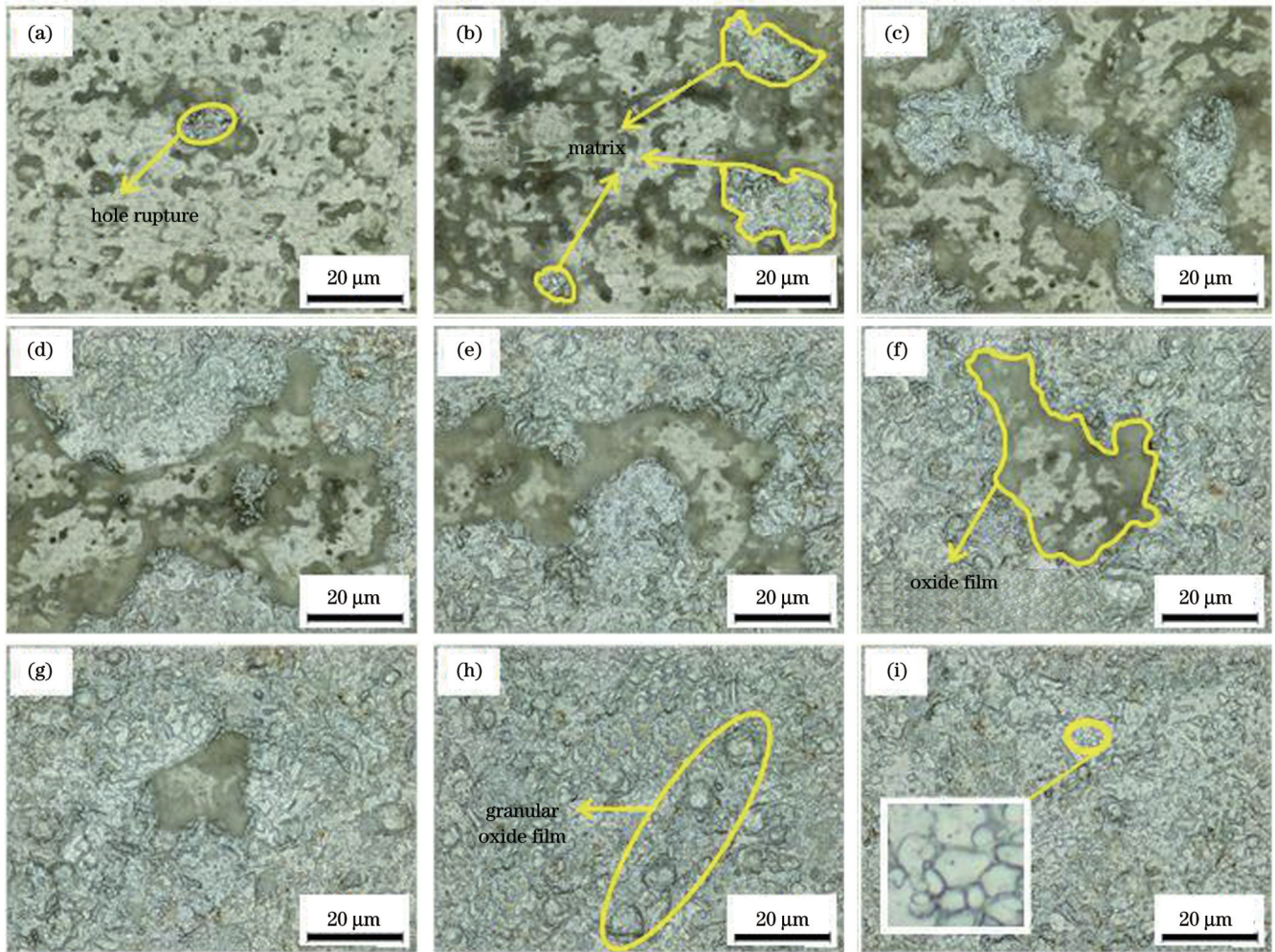


图3 不同单脉冲能量下激光清洗后的二维形貌。(a) 84 mJ; (b) 86 mJ; (c) 88 mJ; (d) 90 mJ; (e) 92 mJ; (f) 94 mJ; (g) 96 mJ; (h) 98 mJ; (i) 100 mJ

Fig. 3 Two dimensional morphologies after laser cleaning under different single pulse energies. (a) 84 mJ; (b) 86 mJ; (c) 88 mJ; (d) 90 mJ; (e) 92 mJ; (f) 94 mJ; (g) 96 mJ; (h) 98 mJ; (i) 100 mJ

当脉冲频率 $F=9.33$ kHz, 扫描振镜速度 $V_x=4000$ mm/s, 激光行进速度 $V_y=7$ mm/s 时, 不同单脉冲能量下激光清洗后的表面三维形貌如图 4 所示。结合图 5 所示的清洗表面粗糙度的变化趋势可知, 随着单脉冲能量的增加, 清洗表面的粗糙度先增大后减小。当单脉冲能量 $E=84$ mJ 时, 因激光能量密度低, 氧化膜在孔洞处只发生轻微破裂, 露出局部的无规则陨坑, 表面粗糙度为 $S_a=2.140$ μm , 明显高于阳极氧化膜的表面粗糙度 $S_a=0.856$ μm 。当单脉冲能量 $E=86$ mJ 时, 表面粗糙度升高至 $S_a=2.4$ μm 。在单脉冲能量增至 $E=98$ mJ 的过程中, 氧化膜表面的温度呈线性升高, 清洗表面形貌经历了从聚集性分布的岛屿状形貌到零星孤立的岛屿状形貌再到毛刺状凸起形貌的演变, 激光清洗效果变好且表面粗糙度逐渐减小。当单脉冲能量 $E=100$ mJ 时, 清洗表面较为平坦, 清洗表面粗糙度最低为 $S_a=0.668$ μm 。

3.1.2 脉冲频率对清洗效果的影响

为了研究脉冲频率对激光清洗质量的影响, 选取

3.71~10.00 kHz 的脉冲频率进行工艺试验, 其中单脉冲能量 $E=100$ mJ, 扫描振镜速度 $V_x=4000$ mm/s, 激光行进速度 $V_y=7$ mm/s, 不同脉冲频率下激光清洗后的二维形貌如图 6 所示。当脉冲频率由 $F=3.71$ kHz 增加到 $F=7.67$ kHz 时, 裸露出的铝合金基体的面积逐渐增加, 未去除的阳极氧化膜的面积逐渐减少。当脉冲频率由 $F=8.33$ kHz 增加到 $F=8.67$ kHz 时, 铝合金表面大块的阳极氧化膜已被去除干净, 但清洗表面残留有阳极氧化膜凸起颗粒集群。随着脉冲频率的增加, 激光光斑在扫描振镜速度方向上的重叠率变大, 如图 7 所示。光斑横向间距与脉冲频率的关系为

$$L_x = \frac{V_x}{F} \quad (3)$$

光斑重叠率与光斑横向间距的关系为

$$U_p = \frac{L - L_x}{L} \quad (4)$$

式中: L_x 为扫描振镜方向上的相邻光斑间距 (mm); V_x

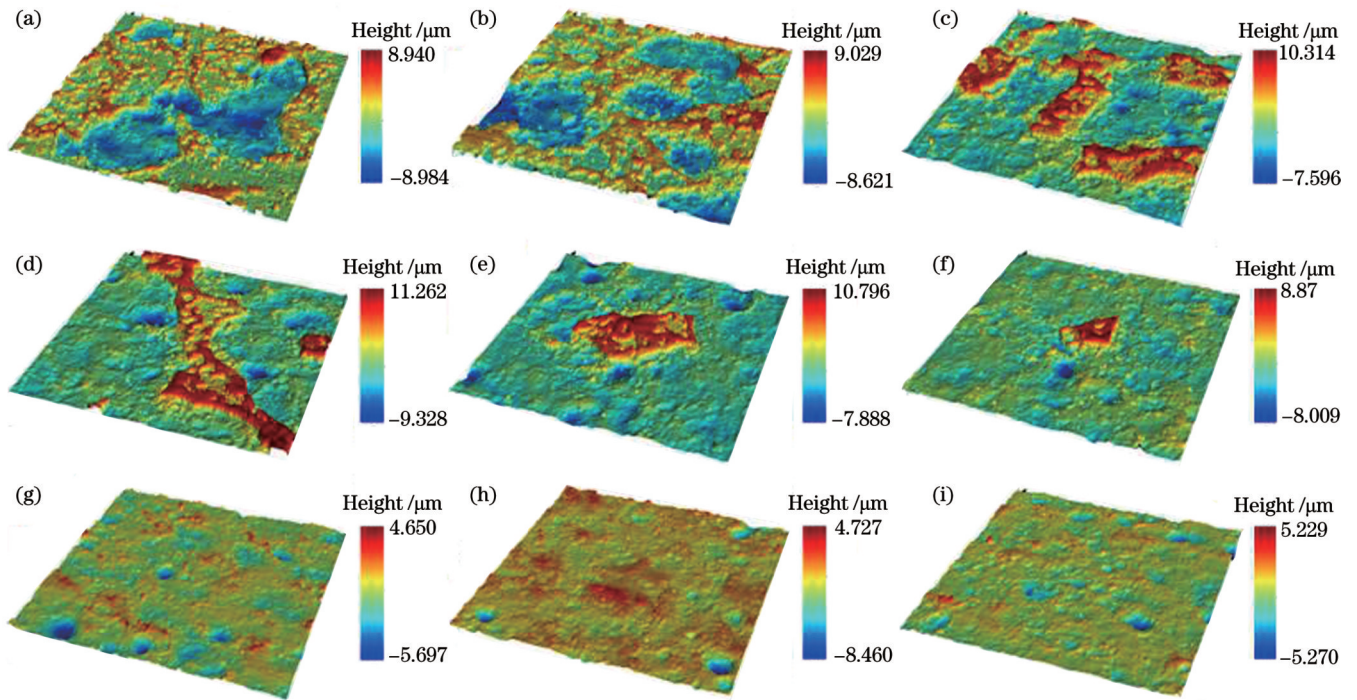


图 4 不同单脉冲能量下激光清洗后的三维形貌。(a) 84 mJ; (b) 86 mJ; (c) 88 mJ; (d) 90 mJ; (e) 92 mJ; (f) 94 mJ; (g) 96 mJ; (h) 98 mJ; (i) 100 mJ

Fig. 4 Three dimensional morphologies after laser cleaning under different single pulse energies. (a) 84 mJ; (b) 86 mJ; (c) 88 mJ; (d) 90 mJ; (e) 92 mJ; (f) 94 mJ; (g) 96 mJ; (h) 98 mJ; (i) 100 mJ

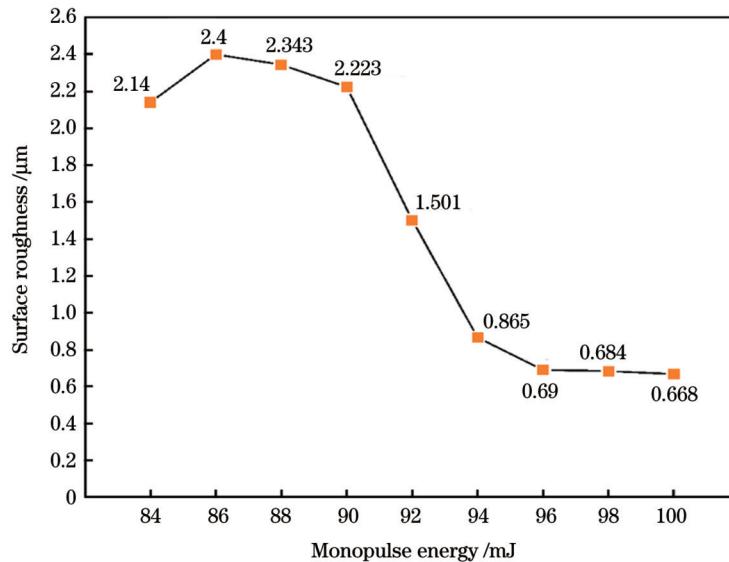


图 5 不同单脉冲能量下激光清洗后表面的粗糙度

Fig. 5 Surface roughnesses after laser cleaning under different single pulse energies

为扫描振镜速度 (mm/s); U_p 为扫描振镜方向上的光斑重叠率; L 为光斑边长 (mm)。

搭接率变大的同时单位面积阳极氧化膜吸收的脉冲个数增加,随着激光能量密度的增加,氧化膜表面温度升高,厚的阳极氧化膜基本被清除。当脉冲频率 $F=9.00$ kHz 时,在光斑重叠率、扫描轨迹重叠率以及激光参数等多种因素的作用下,光斑出现偏振,清洗轨迹出现搭接间隙,此时的铝合金表面出现大块未能去除的阳极氧化膜。当脉冲频率增至

$F=9.67$ kHz 时,阳极氧化膜凸起颗粒集群逐渐变少变小,基体表面残留的较淡的浅绿色氧化膜基本被除净,清洗表面相对较为平整。当脉冲频率为 $F=10.00$ kHz 时,光斑搭接率过大,单位面积吸收的脉冲个数较多,热积累效应高^[23],铝合金基体表面出现轻微烧蚀。

当单脉冲能量 $E=100$ mJ,扫描振镜速度 $V_x=4000$ mm/s,激光行进速度 $V_y=7$ mm/s,不同脉冲频率下激光清洗后的表面三维形貌如图 8 所示。结合

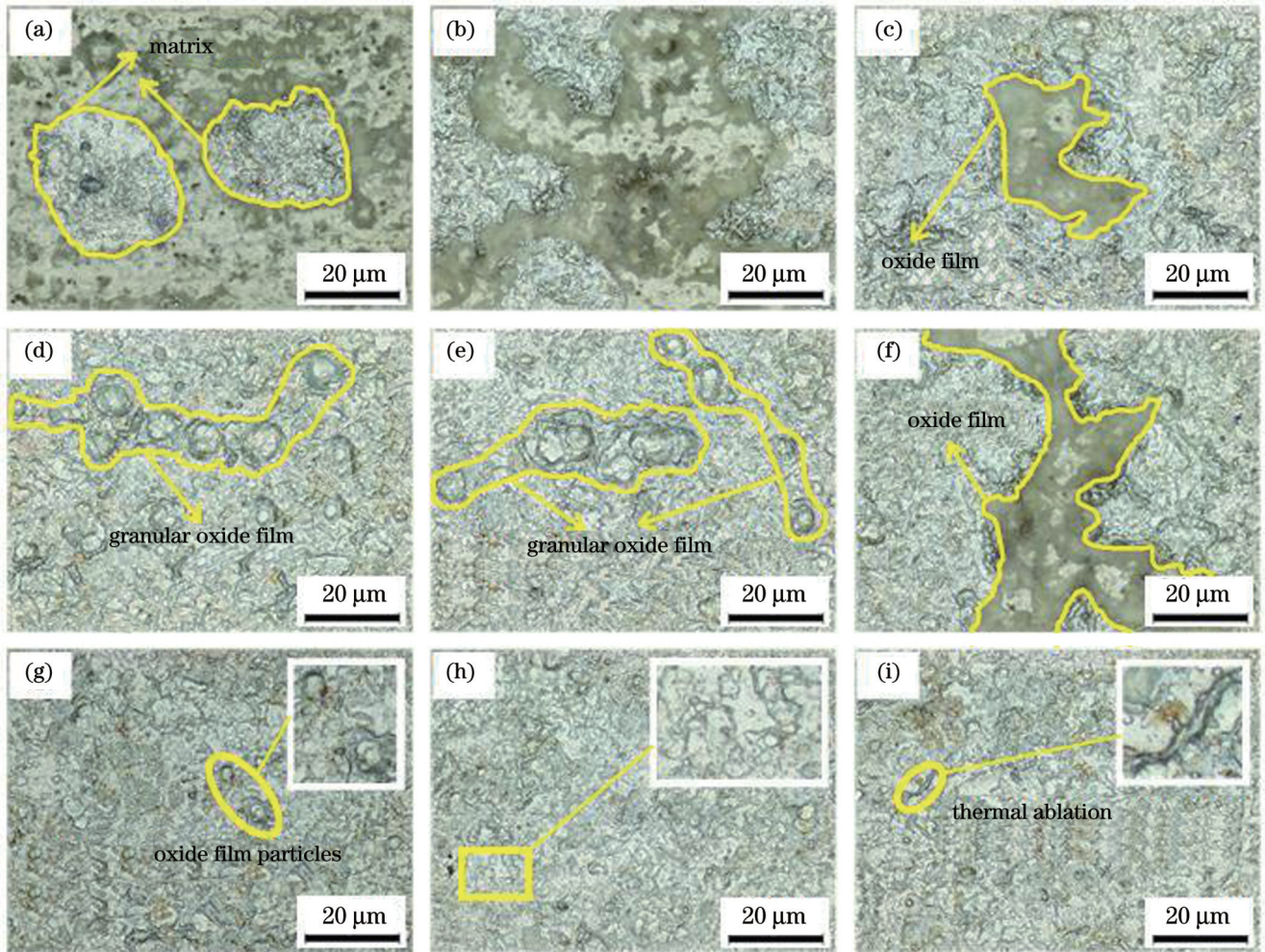


图 6 不同脉冲频率下激光清洗后的二维形貌。(a)3.71 kHz;(b)6.35 kHz;(c)7.67 kHz;(d)8.33 kHz;(e)8.67 kHz;(f)9.00 kHz;(g)9.33 kHz;(h)9.67 kHz;(i)10.00 kHz

Fig. 6 Two dimensional morphologies after laser cleaning under different pulse frequencies. (a) 3.71 kHz; (b) 6.35 kHz; (c) 7.67 kHz; (d) 8.33 kHz; (e) 8.67 kHz; (f) 9.00 kHz; (g) 9.33 kHz; (h) 9.67 kHz; (i) 10.00 kHz

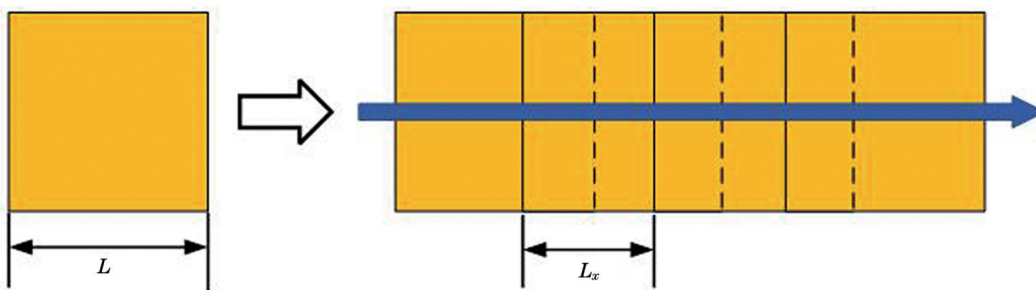


图 7 光斑搭接示意图

Fig. 7 Schematic of spot overlap

图 9 清洗表面粗糙度变化趋势可知,随着脉冲频率的增加,清洗表面粗糙度先减小后增大,之后再减小再增大。在脉冲频率由 $F=3.71$ kHz 增至 $F=8.67$ kHz 的过程中,清洗表面形貌经历了从氧化膜包围的蓝色基体陨坑形貌到红色孤立的岛屿状形貌再到毛刺状凸起形貌的演变,清洗效果有明显的提高,表面粗糙度由 $S_a=1.710 \mu\text{m}$ 呈陡坡式下降至 $S_a=0.668 \mu\text{m}$ 。当脉冲频率为 $F=9.00$ kHz 时,激光清洗效果不佳,出

现的红色孤立岛屿状形貌为未清除的氧化膜碎块,清洗表面粗糙度骤升至 $S_a=1.569 \mu\text{m}$ 。当脉冲频率为 $F=9.67$ kHz 时,清洗效果最佳且表面较为光滑平整,部分区域存在的红色毛刺状凸起形貌和脊峰形貌消失,表面粗糙度最小为 $S_a=0.660 \mu\text{m}$ 。当脉冲频率为 $F=10.00$ kHz 时,铝合金基体表面发生轻度熔融,表现出红色山脉状脊峰形貌,表面粗糙度上升至 $S_a=0.906 \mu\text{m}$ 。

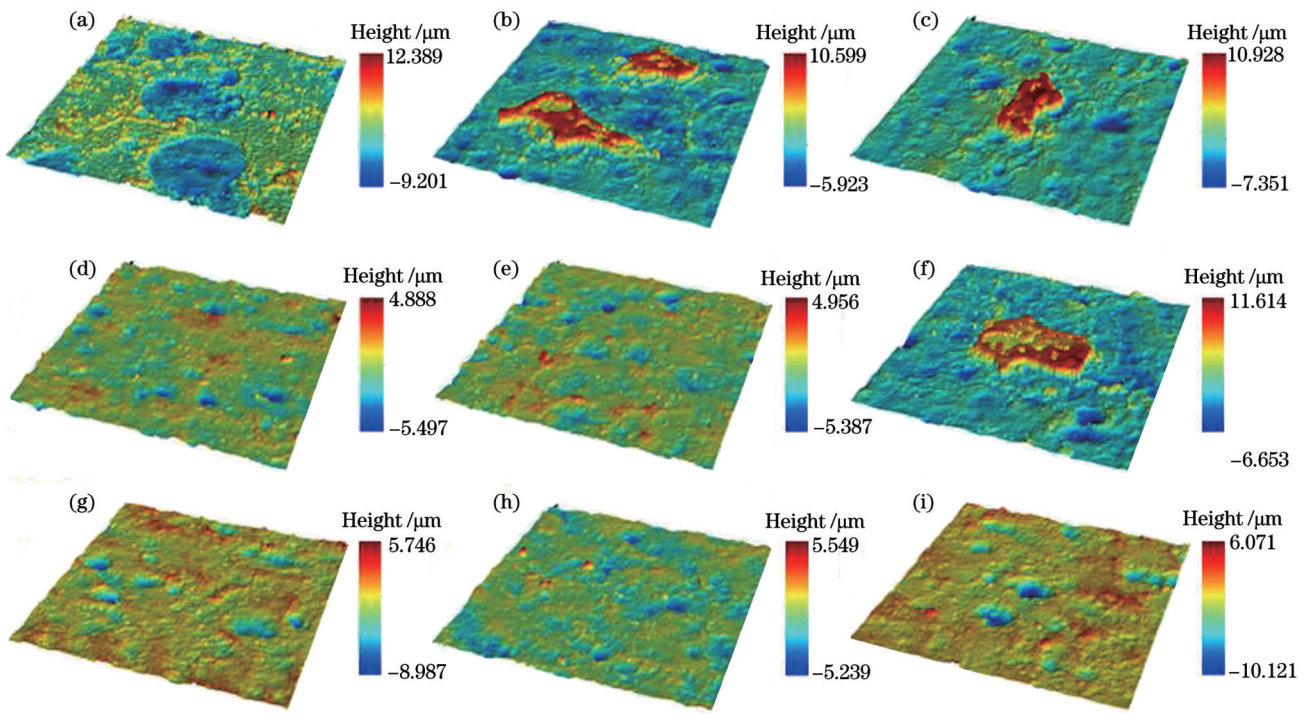


图 8 不同脉冲频率下激光清洗后的三维形貌。(a)3.71 kHz;(b)6.35 kHz;(c)7.67 kHz;(d)8.33 kHz;(e)8.67 kHz;(f)9.00 kHz;(g)9.33 kHz;(h)9.67 kHz;(i)10.00 kHz

Fig. 8 Three dimensional morphologies after laser cleaning under different pulse frequencies. (a) 3.71 kHz; (b) 6.35 kHz; (c) 7.67 kHz; (d) 8.33 kHz; (e) 8.67 kHz; (f) 9.00 kHz; (g) 9.33 kHz; (h) 9.67 kHz; (i) 10.00 kHz

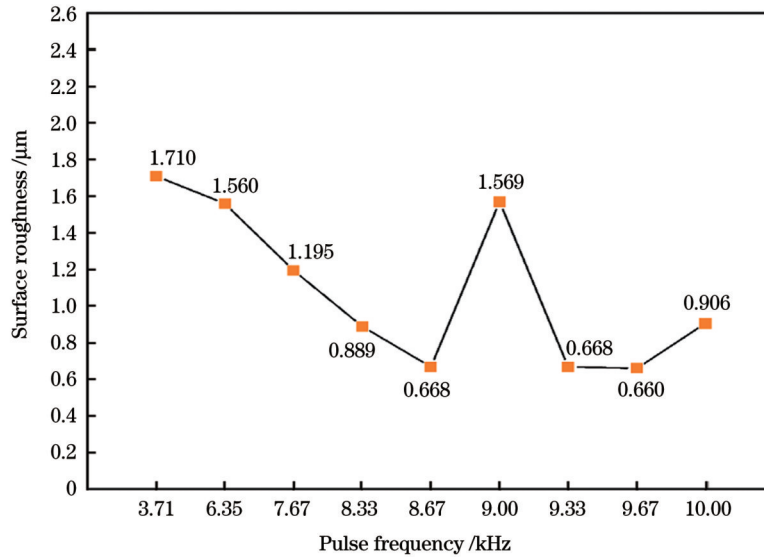


图 9 不同脉冲频率下激光清洗后的表面粗糙度

Fig. 9 Surface roughnesses after laser cleaning under different pulse frequencies

3.2 激光行进速度对清洗效果优化的影响

为了研究激光行进速度对清洗质量的影响,选取 1.0~12.5 mm/s 的激光行进速度进行工艺试验,其中单脉冲能量 $E=100$ mJ,脉冲频率 $F=9.67$ kHz,扫描振镜速度 $V_x=4000$ mm/s,不同激光行进速度下激光清洗后的二维形貌如图 10 所示。当激光行进速度 $V_y=12.5$ mm/s 时,由于激光行进速度过大,热积累效应低,热烧蚀效应减弱,氧化膜上方的蒸汽密度低,因此清洗效果不佳,表面残留大面积的阳极氧化膜。

当激光行进速度 $V_y=7.5$ mm/s 时,激光在清洗方向上的光斑搭接率变大,如图 11 所示,且单位面积氧化膜吸收的脉冲个数增多,热积累效应增加,但清洗表面仍然有连绵起伏的氧化膜凸起颗粒群。在激光行进速度由 $V_y=7.0$ mm/s 降至 $V_y=6.5$ mm/s 的过程中,激光作用在氧化膜表面上的时间延长,脉冲个数增多,从而氧化膜迅速升温后被完全去除。当激光行进速度由 $V_y=3.0$ mm/s 下降至 $V_y=1.0$ mm/s 时,光斑在激光清洗方向上的搭接率过大,单位面积氧化膜

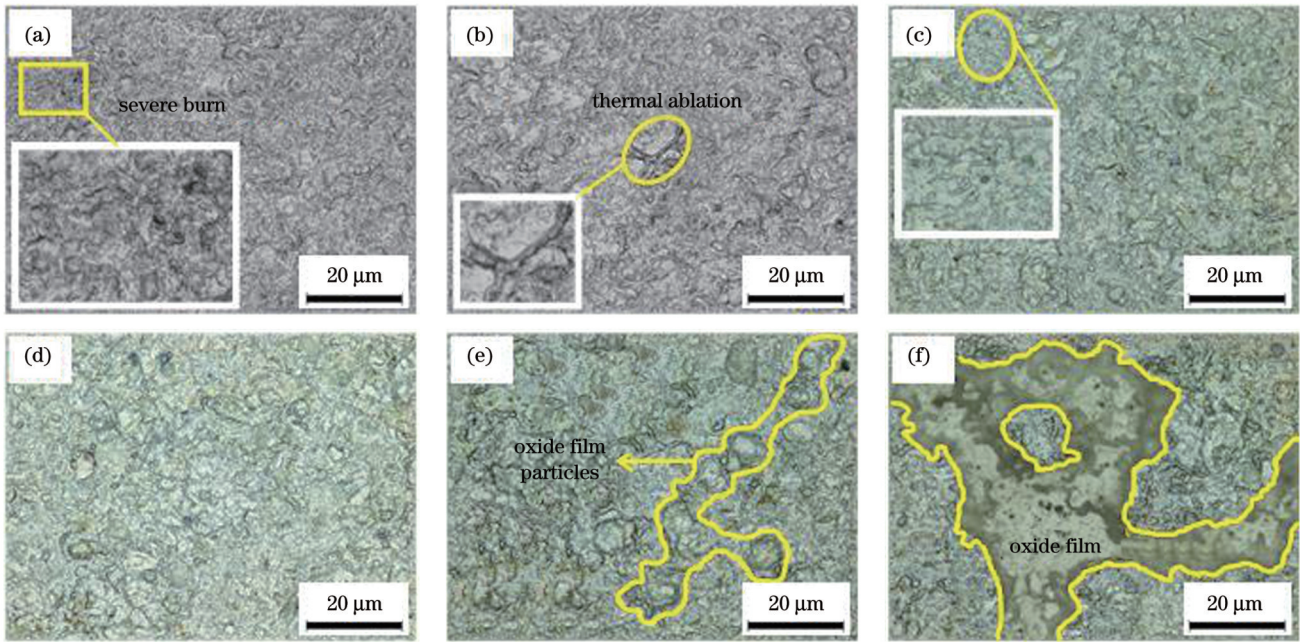


图 10 不同激光行进速度下激光清洗后的二维形貌。(a)1.0 mm/s;(b)3.0 mm/s;(c)6.5 mm/s;(d)7.0 mm/s;(e)7.5 mm/s;(f)12.5 mm/s

Fig. 10 Two dimensional morphologies after laser cleaning at different laser travel speeds. (a) 1.0 mm/s; (b) 3.0 mm/s; (c) 6.5 mm/s; (d) 7.0 mm/s; (e) 7.5 mm/s; (f) 12.5 mm/s

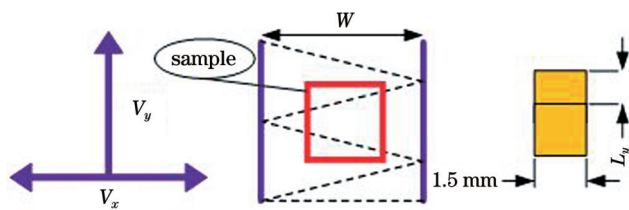


图 11 激光光斑的运行轨迹
Fig. 11 Running track of laser spot

吸收的脉冲个数较多,过高的能量在去除氧化膜的同时会烧伤铝合金基体表面,使其呈现灰黑色,当激光行进速度更低时,灼烧及二次氧化现象就愈加严重。

光斑的运行轨迹分为扫描振镜方向和激光清洗方向,实际清洗时的光斑移动路径为“Z”字形折线^[19-20],如图 11 所示。激光清洗方向上的光斑重叠率^[20]为

$$\delta = 1 - \frac{L_y}{L} = 1 - \frac{WV_y}{LV_x}, \quad (5)$$

式中: δ 为激光清洗方向上的光斑重叠率; L_y 为激光清洗行进方向上的相邻光斑间距(mm); W 为激光扫描幅宽(mm)。

当单脉冲能量 $E=100$ mJ,脉冲频率 $F=9.67$ kHz,扫描振镜速度 $V_x=4000$ mm/s 时,不同激光行进速度下清洗后的表面三维形貌如图 12 所示。结合图 13 清

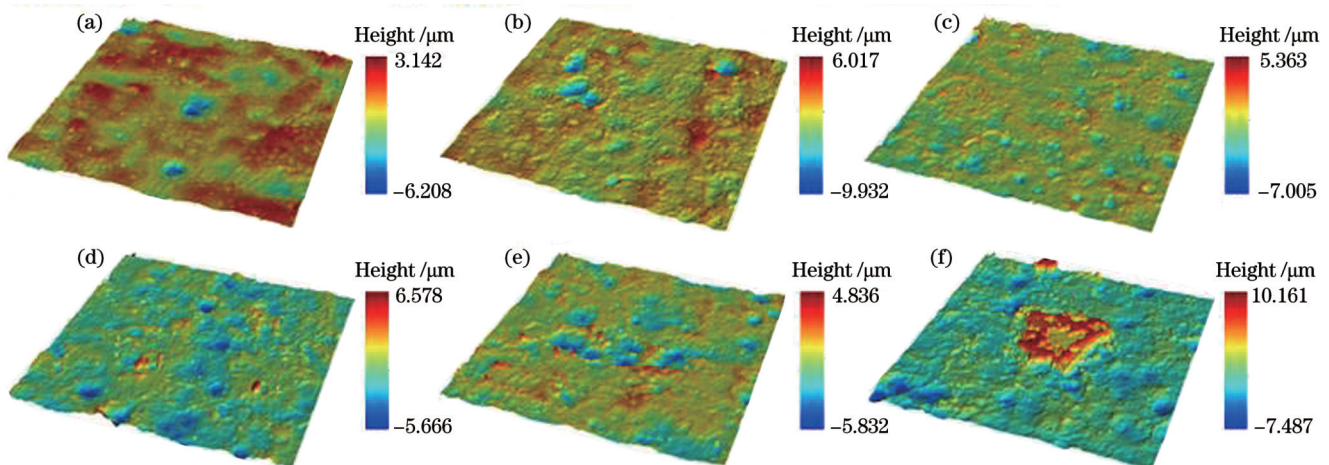


图 12 不同激光行进速度下激光清洗后的三维形貌。(a)1.0 mm/s;(b)3.0 mm/s;(c)6.5mm/s;(d)7.0 mm/s;(e)7.5 mm/s;(f)12.5 mm/s

Fig. 12 Three dimensional morphologies after laser cleaning at different laser travel speeds. (a) 1.0 mm/s; (b) 3.0 mm/s; (c) 6.5 mm/s; (d) 7.0 mm/s; (e) 7.5 mm/s; (f) 12.5 mm/s

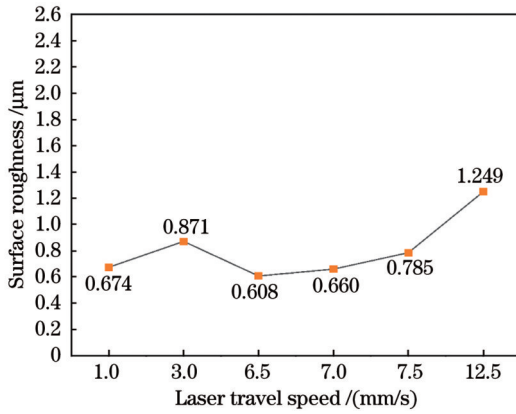


图 13 不同激光行进速度下激光清洗后的表面粗糙度

Fig. 13 Surface roughnesses after laser cleaning under different laser travel speeds

洗表面粗糙度变化趋势可知,随着激光行进速度的增加,清洗表面粗糙度先增大后减小再增大。当激光行进速度 $V_y=12.5$ mm/s 时,激光行进速度过快导致激光清洗方向上的光斑搭接率过小,清洗后表面存在面积较大的红色孤立岛屿状形貌的块状氧化膜,此参数下的清洗效果较差,表面粗糙度最大为 $S_a=1.249$ μm 。当激光行进速度下降至 7.0 mm/s 时,由式(5)可知,激光清洗方向上的光斑搭接率变大,清洗表面局部分散的红色毛刺状凸起形貌变少,清洗

效果变好。当激光行进速度 $V_y=6.5$ mm/s 时,清洗表面较为光滑平整,清洗效果最佳,表面粗糙度最小为 $S_a=0.608$ μm 。当激光行进速度 $V_y=3.0$ mm/s 时,清洗方向上的光斑搭接率过大,作用时间延长,过高的激光能量使得铝合金基体烧伤,致使红色毛刺状凸起形貌密集,火山口形貌增多,从而导致清洗表面粗糙度增大到 $S_a=0.871$ μm 。当激光行进速度 $V_y=1.0$ mm/s 时,激光对铝合金基体的烧蚀作用严重,大部分区域出现了红色高原凸起形貌,同时熔融的铝合金液体流向蜂窝状火山口形貌的坑底,表面粗糙度减小至 $S_a=0.674$ μm 。

由以上分析可以得出,脉冲光纤激光清洗的最佳工艺参数为:单脉冲能量 $E=100$ mJ,脉冲频率 $F=9.67$ kHz,激光清洗行进速度 $V_y=6.5$ mm/s,扫描振镜速度 $V_x=4000$ mm/s。在此工艺参数下,从宏观上看,清洗表面已无氧化膜残留;从二维形貌图 10(c)和三维形貌图 12(c)上看,清洗表面较为光滑平整;从表面粗糙度角度上分析,可知激光清洗后的表面粗糙度值 ($S_a=0.608$ μm) 要低于机械打磨的表面粗糙度值 ($S_a=1.18$ μm),如图 14(b)所示,机械打磨对 5083 铝合金基体表面造成了损伤。激光清洗对表面微观形貌及元素含量的影响后续将进行深入研究。

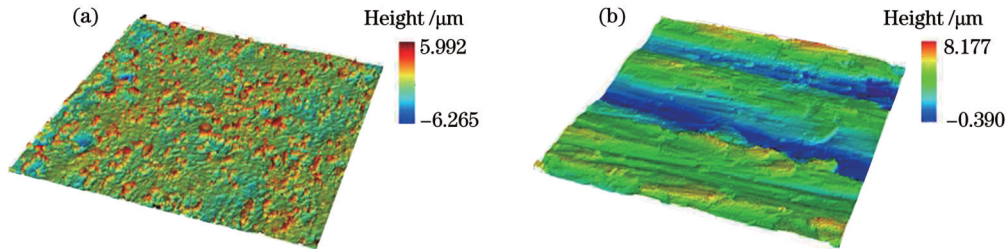


图 14 机械打磨前、后表面三维形貌的对比。(a)机械打磨前;(b)机械打磨后

Fig. 14 Comparison of three dimensional surface morphologies before and after mechanical polishing. (a) Before mechanical polishing; (b) after mechanical polishing

3.3 激光参数对微观形貌的影响

3.3.1 单脉冲能量对微观形貌的影响

当脉冲频率 $F=9.33$ kHz,扫描振镜速度 $V_x=4000$ mm/s,激光行进速度 $V_y=7.0$ mm/s,单脉冲能量 $E=84\sim 100$ mJ 时激光清洗阳极氧化膜的 SEM 形貌如图 15 所示。结合图 16 所示的 EDS 检测结果可以看出,当单脉冲能量 $E=84\sim 88$ mJ 时,由于激光功率较低,激光的热烧蚀作用较弱,氧化膜破开后的清洗表面形貌由微孔转化成大小不一的无规则凹坑形貌,基体裸露面积变大,表面 O 元素含量(质量分数)为 23.01%~11.49%。在单脉冲能量增至 $E=98$ mJ 的过程中,激光能量密度增大,热烧蚀作用增强,阳极氧化膜层的剥离效果变化明显,氧化膜由孤立的块状转变成颗粒形貌,O 元素含量(质量分数)下降至 4.25%,激光照射过程中的膜层剥离

率^[24]为

$$V = \sqrt{\frac{M}{\rho}} \times \frac{\beta E}{\rho c h}, \quad (6)$$

式中: h 是氧化膜厚度; M 是氧化膜的弹性模量; ρ 是氧化膜密度; β 是膨胀系数; c 是比热容。可以看出,随着单脉冲能量的增加,氧化膜剥离率增加,清洗效果得到提高。当单脉冲能量 $E=100$ mJ 时,激光清洗表面的微观形貌呈现出较为平整的潮水状形貌,此时的基体表面 O 元素含量(质量分数)为 4.09%,Al 元素含量(质量分数)为 78.46%,C 元素含量(质量分数)下降到了 12.13%。

3.3.2 脉冲频率对微观形貌的影响

当单脉冲能量 $E=100$ mJ,扫描振镜速度 $V_x=4000$ mm/s,激光行进速度 $V_y=7.0$ mm/s,脉冲频率 $F=3.71\sim 10.00$ kHz 时激光清洗阳极氧化膜的 SEM

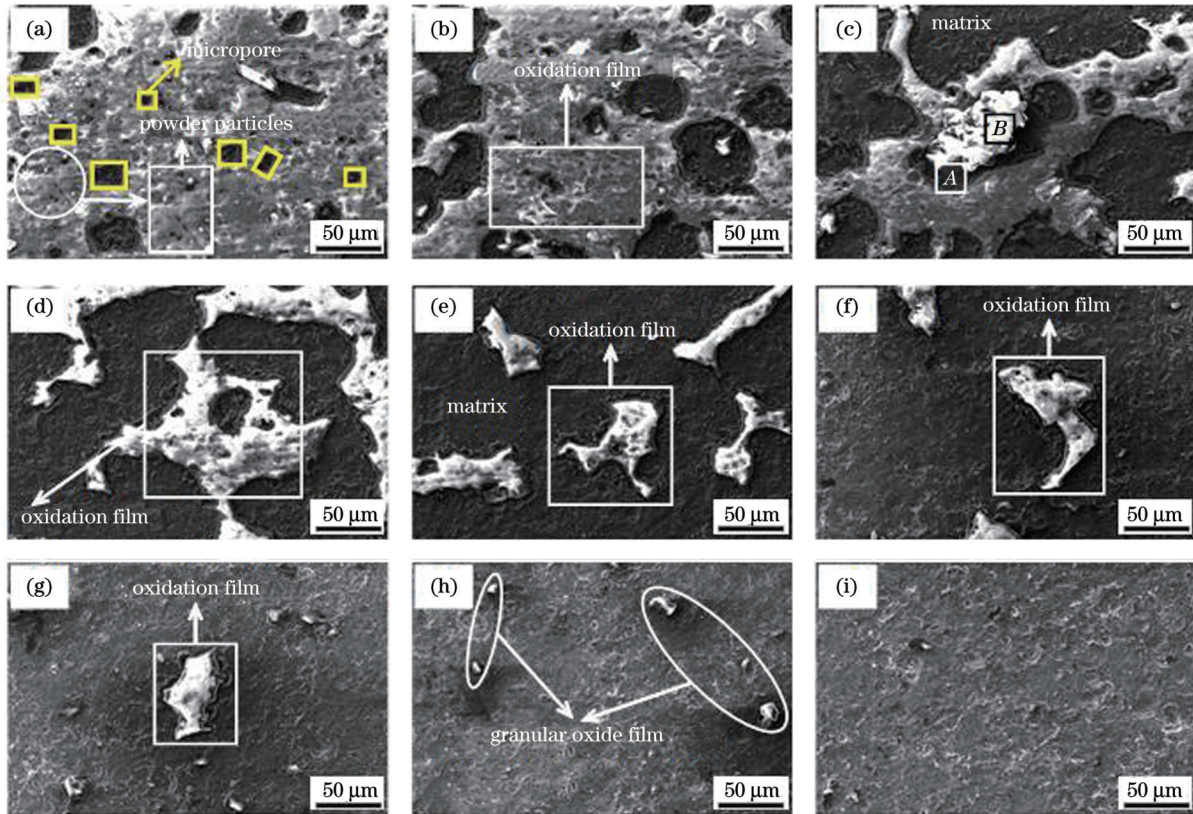


图 15 不同单脉冲能量下激光清洗后的 SEM 形貌。(a) 84 mJ; (b) 86 mJ; (c) 88 mJ; (d) 90 mJ; (e) 92 mJ; (f) 94 mJ; (g) 96 mJ; (h) 98 mJ; (i) 100 mJ

Fig. 15 SEM morphologies after laser cleaning under different single pulse energies. (a) 84 mJ; (b) 86 mJ; (c) 88 mJ; (d) 90 mJ; (e) 92 mJ; (f) 94 mJ; (g) 96 mJ; (h) 98 mJ; (i) 100 mJ

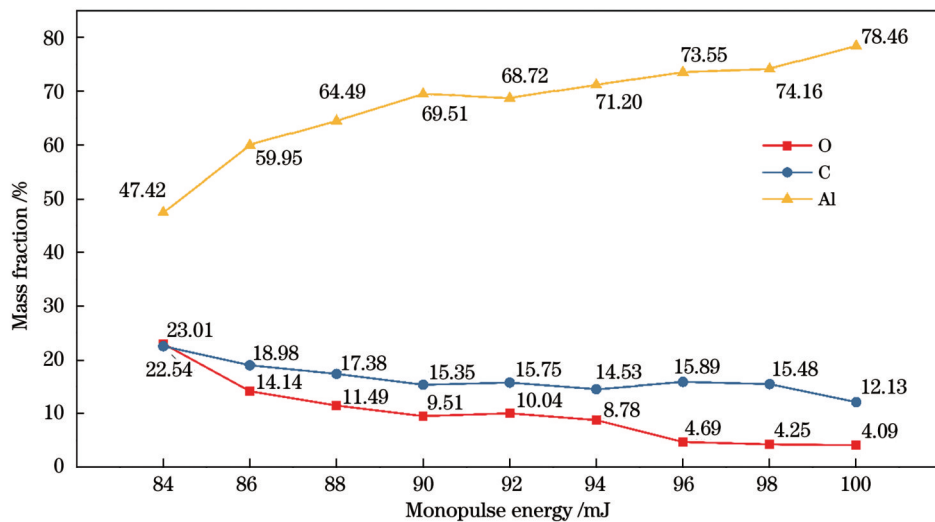


图 16 图 15 中 SEM 形貌对应的 EDS 检测结果

Fig. 16 EDS detection results corresponding to SEM morphologies in Fig. 15

形貌如图 17 所示。结合图 18 所示的 EDS 检测结果可以看出,当脉冲频率 $F=3.71$ kHz 时,光斑搭接率较大且单位面积氧化膜接收的脉冲个数少,氧化膜表面温度较低,只有局部的氧化膜发生破裂,露出形貌不规则且大小不一的铝合金基体,其表面 O 元素含量(质量分数)较高,为 23.96%。当脉冲频率增加至 $F=8.67$ kHz 时,由于激光能量密度增大,氧化膜的去除效果明显,

氧化膜由残留的块状转变成颗粒状态,O 元素含量(质量分数)下降至 4.61%。当脉冲频率 $F=9.00$ kHz 时,由 3.1.2 和 3.2 节分析可知,清洗表面出现未除尽的氧化膜块,此时基体表面的 O 元素含量(质量分数)反升至 12.02%,Al 元素含量(质量分数)由 78.19% 下降至 70.13%。当脉冲频率增至 $F=9.67$ kHz 时,基体表面阳极氧化膜几乎被完全清除,清洗表面较为平整,其

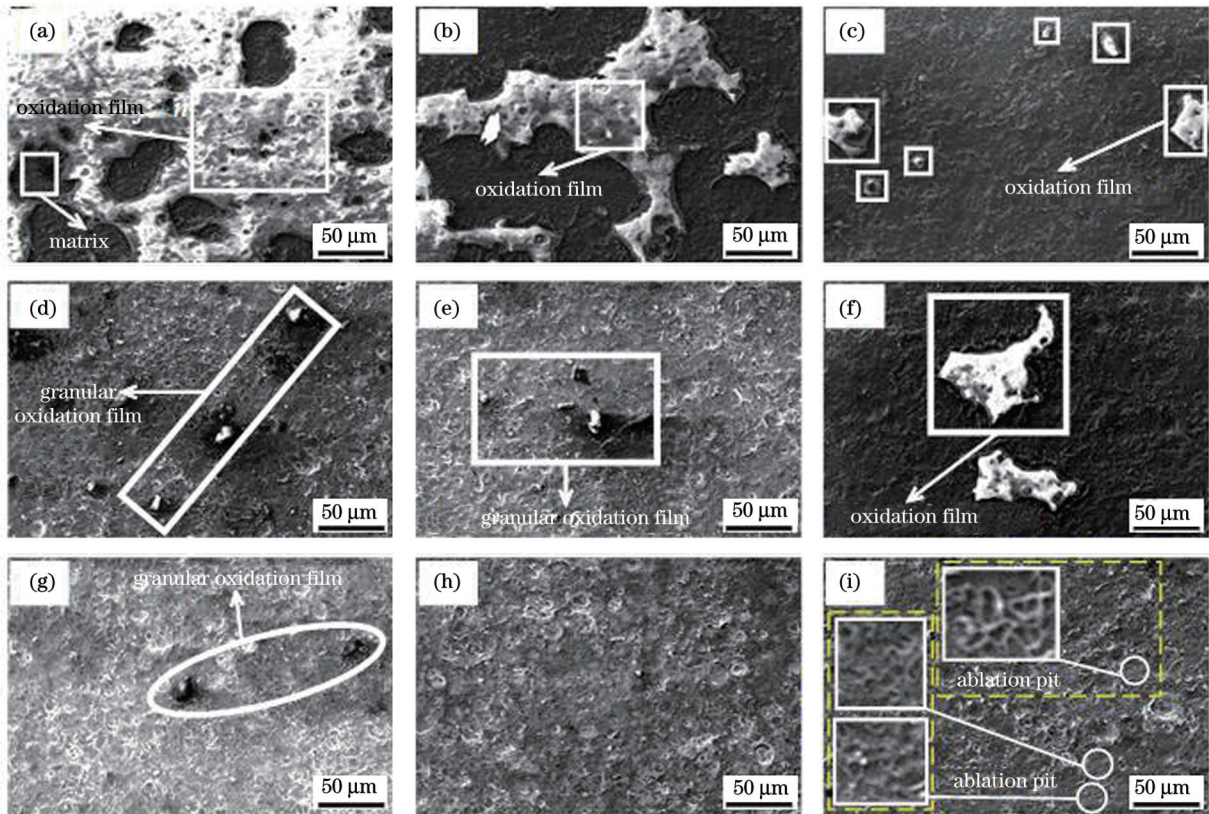


图 17 不同脉冲频率下激光清洗后的 SEM 形貌。(a)3.71 kHz;(b)6.35 kHz;(c)7.67 kHz;(d)8.33 kHz;(e)8.67 kHz;(f)9.00 kHz;(g)9.33 kHz;(h)9.67 kHz;(i)10.00 kHz

Fig. 17 SEM morphologies after laser cleaning under different pulse frequencies. (a) 3.71 kHz; (b) 6.35 kHz; (c) 7.67 kHz; (d) 8.33 kHz; (e) 8.67 kHz; (f) 9.00 kHz; (g) 9.33 kHz; (h) 9.67 kHz; (i) 10.00 kHz

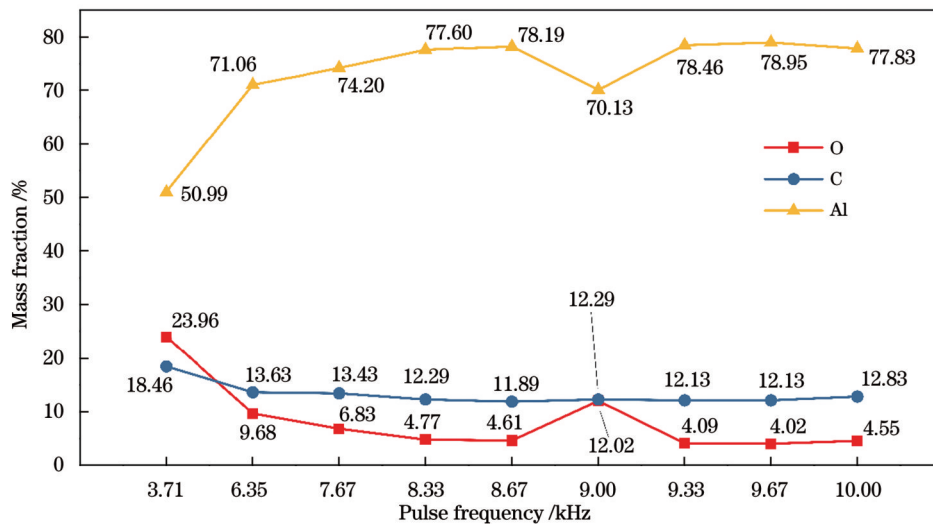


图 18 图 17 中 SEM 形貌对应的 EDS 检测结果

Fig. 18 EDS detection results corresponding to SEM morphologies in Fig. 17

表面 O 元素含量(质量分数)降至最低,为 4.02%, Al 元素含量(质量分数)升至最高,为 78.95%。当脉冲频率 $F=10.00$ kHz 时,光斑搭接率过大且单位面积氧化膜上的单脉冲数量增加,基体表面温升过高,导致基体烧伤,产生了烧蚀坑,从而使得 C 元素含量(质量分数)由 12.13% 升高至 12.83%;由于二次氧化时基体 Al 结合了空气中的氧气生成了新的氧化膜,因此基体

表面 O 元素含量(质量分数)再次升高至 4.55%, Al 元素含量(质量分数)下降至 77.83%,清洗效果反而变差。

3.4 激光行进速度对优化后表面微观形貌的影响及元素含量分析

当单脉冲能量 $E=100$ mJ,脉冲频率 $F=9.67$ kHz,扫描振镜速度 $V_x=4000$ mm/s,激光行进速度 $V_y=$

1.0~12.5 mm/s 时激光清洗阳极氧化膜的 SEM 形貌如图 19 所示。结合图 20 所示的 EDS 检测结果,当激光行进速度 $V_y=12.5$ mm/s 时,清洗后的铝合金基体表面残留有不规则的连绵状阳极氧化膜凸起,与未清洗前的阳极氧化膜相比,其 O 元素含量(质量分数)下降至 8.92%,Al 元素含量(质量分数)上升至 71.36%。当激光行进速度由 $V_y=7.5$ mm/s 下降至 $V_y=7.0$ mm/s 时,激光清洗效果得到明显提高,基体表面连绵的阳极氧化膜被清除,但局部位置仍然残留未除尽的氧化膜碎块,其 O 元素含量(质量分数)由 4.52% 下降至 4.02%,Al 元素含量(质量分数)由 76.43% 上升至 78.95%。当激光行进速度 $V_y=6.5$ mm/s 时,清洗后基体表面较为规则平整,呈轻微的潮水状形貌,其表面 O 元素含量(质量分数)降至最低,为 3.46%,

Al 元素含量(质量分数)升至最高,为 79.98%,C 元素含量(质量分数)降至 11.2%。当激光行进速度继续下降至 $V_y=3.0$ mm/s 时,激光作用期间整个光斑区域内的基体表面温度较高,达到了铝合金的最低熔点,熔融态的基体表面整体流动性好^[23],加上激光等离子体冲击波的共同作用,基体表面出现了边界圆润整齐的水滴坑状形貌;因其表面发生了轻微的二次氧化,O 元素含量(质量分数)升高至 4.19%,Al 元素含量(质量分数)下降至 78.77%,C 元素含量(质量分数)升高至 11.52%。当激光行进速度 $V_y=1.0$ mm/s 时,铝合金基体表面温升过高,烧蚀剧烈,同时巨大的激光冲击压力破坏了金属流体的水滴坑状形貌,形成了水波状形貌,此时基体表面 O 元素含量(质量分数)升高至 7.01%,Al 元素含量(质量分数)下降至 76.45%;单

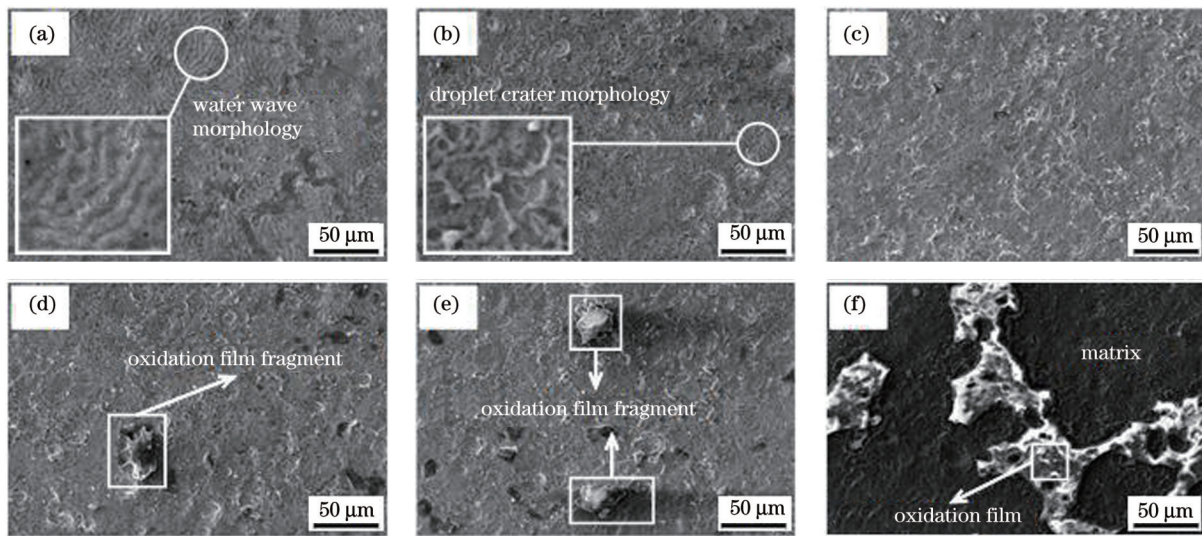


图 19 不同激光行进速度下激光清洗后的 SEM 形貌。(a) 1.0 mm/s; (b) 3.0 mm/s; (c) 6.5 mm/s; (d) 7.0 mm/s; (e) 7.5 mm/s; (f) 12.5 mm/s

Fig. 19 SEM morphologies after laser cleaning at different laser travel speeds. (a) 1.0 mm/s; (b) 3.0 mm/s; (c) 6.5 mm/s; (d) 7.0 mm/s; (e) 7.5 mm/s; (f) 12.5 mm/s

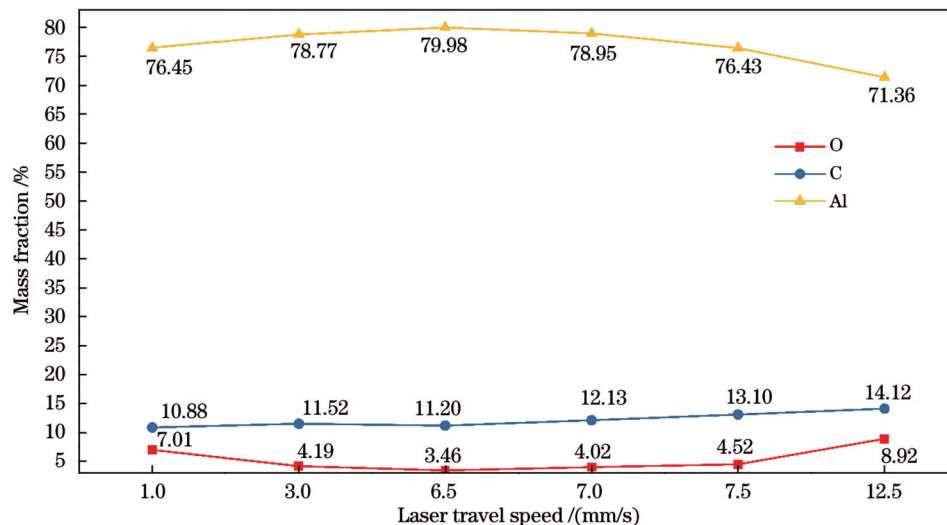


图 20 图 19 中 SEM 形貌对应的 EDS 检测结果

Fig. 20 EDS detection results corresponding to SEM morphologies in Fig. 19

位面积基体的表面温度过高,导致图 19(b)中二次氧化烧伤产生的碳化物气化,此时基体表面的 C 元素含量(质量分数)下降至 10.88%。

由图 21 可知,激光清洗能够有效地降低铝合金表面

氧含量,清除表面阳极氧化膜。在最佳清除阳极氧化膜参数组合下,即当单脉冲能量 $E=100$ mJ,脉冲频率 $F=9.67$ kHz,扫描振镜速度 $V_x=4000$ mm/s,激光行进速度 $V_y=6.5$ mm/s 时,氧化膜清洗率可达到 97.14%。

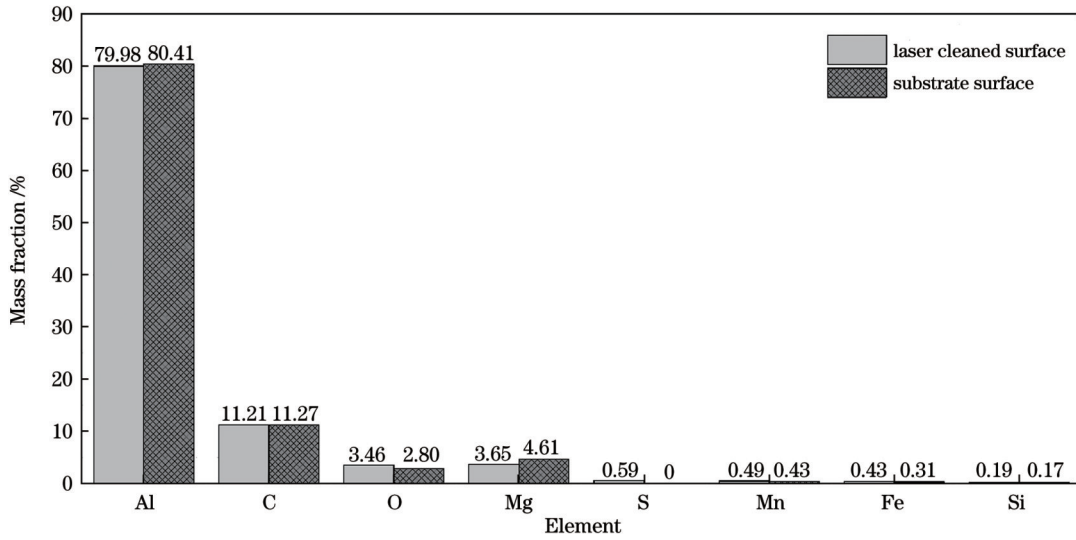


图 21 激光清洗表面与基体表面的元素含量(质量分数)

Fig. 21 Element contents (mass fractions) of laser cleaned surface and substrate surface

3.5 激光清洗去除机制分析

通过微观形貌观察,分析认为,在激光清洗氧化膜的过程中,主要存在的去除机制有三种,分别是孔洞爆破、弹性振动剥离和热烧蚀,如图 22 所示。铝合金阳极氧化膜的结构模型由 Keller 等^[25]在 1954 年提出,铝合金阳极氧化膜由阻挡层和多孔层构成,氧化

膜由内向外分别为无水氧化层、过渡层和水合氧化层,氧化膜的成分^[10]主要是 H_2O 、 Al_2O_3 、 $Al_2(SO_4)_3$ 。当脉冲频率 $F=9.33$ kHz,扫描振镜速度 $V_x=4000$ mm/s,激光行进速度 $V_y=7.0$ mm/s,单脉冲能量 $E=84$ mJ 时,图 1(b)所示孔隙中富含的空气会因温度升高而急剧膨胀,最终发生爆炸,同时氧化膜内的结晶水在高

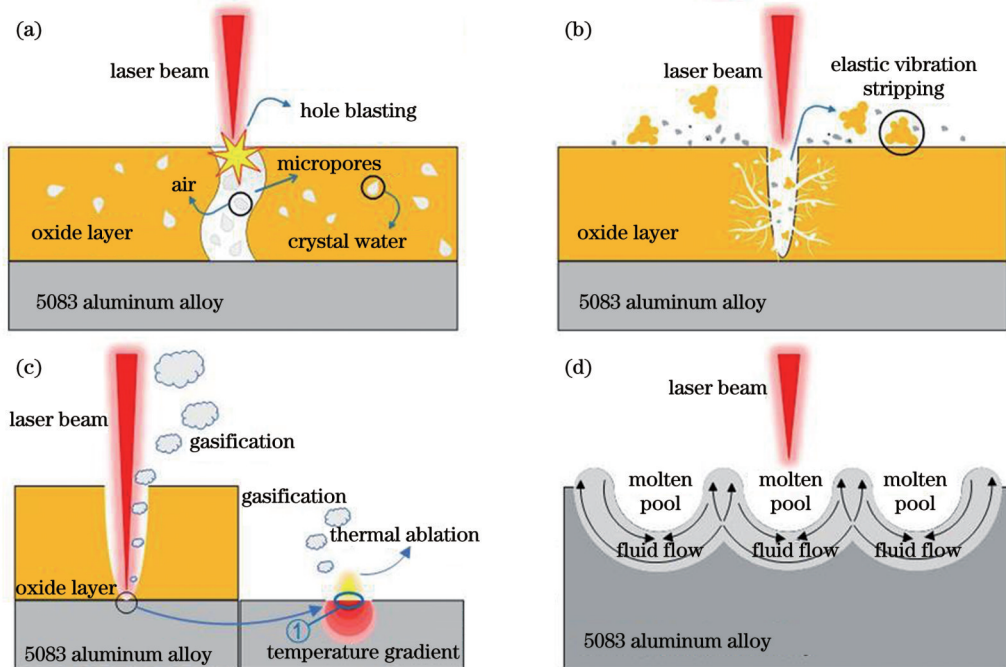


图 22 激光去除阳极氧化膜的机制。(a)孔洞爆破机制;(b)弹性振动剥离机制;(c)热烧蚀机制;(d)图 22(c)中①处熔池的流动成形形貌

Fig. 22 Mechanisms of laser removal of anodized film. (a) Hole blasting mechanism; (b) elastic vibration stripping mechanism; (c) thermal ablation mechanism; (d) flow forming morphology of molten pool at position ① in Fig. 22(c)

温下也发生爆炸,击碎周围氧化膜,产生微细颗粒,形成图 15(a)所示的口径稍大的孔形貌。对阳极氧化膜表面产生的微细粉末颗粒进行 EDS 分析,其化学成分如表 4 所示,可见其氧元素含量(质量分数)为 24.08%,与氧化后未清洗表面的氧元素含量很接近,证实了孔洞爆破机制^[10]的存在,如图 22(a)所示。当脉冲频率 $F=9.33$ kHz,扫描振镜速度 $V_x=4000$ mm/s,激光行进速度 $V_y=7.0$ mm/s,单脉冲能量 $E=88$ mJ 时,由于基体与阳极氧化膜的热膨胀系数存在较大差异,界面处形成撕裂、剥离的不规则形貌。基体材料在激光的热作用下发生弹性变形,基体变形产生的振动波与激光等离子体产生的冲击波使得破碎剥离的块状氧化膜发生近距离的弹性移动,且振动剥离的氧化块组织形貌与未清除的氧化

膜表面组织形貌相似。图 15(c)中 A、B 两个区域的 EDS 分析结果如表 5 所示,A 区域的氧元素含量(质量分数)为 5.80%,铝元素含量(质量分数)为 76.46%,证明此处为清洗不彻底的基体。而 B 区域的氧元素含量(质量分数)为 18.73%,铝元素含量(质量分数)为 57.40%,证明此处为破裂但未脱落的阳极氧化膜碎块,所以在该处的清洗过程中存在弹性振动剥离机制^[10],如图 22(b)所示。当单脉冲能量 $E=100$ mJ,扫描振镜速度 $V_x=4000$ mm/s,激光行进速度 $V_y=7.0$ mm/s,脉冲频率 $F=10.00$ kHz 时,脉冲激光的能量密度极大。

$$\Delta T = \frac{2I_0\gamma}{K} \sqrt{\frac{\alpha\tau}{\pi}}, \quad (7)$$

式中: I_0 为能量密度; γ 为激光的吸收系数。

表 4 微细粉末颗粒的化学成分

Table 4 Chemical compositions of fine powder particles

Element	Al	O	C	S	Mg	Mn	Si	Fe
Mass fraction / %	49.40	24.08	17.42	6.74	1.21	0.36	0.45	0.34

表 5 图 15(c)中 A、B 区域的元素分析结果

Table 5 Element analysis results for areas A and B in Fig. 15 (c)

Element	Al	O	C	S	Mg	Mn	Fe	Si
Mass fraction in zone A / %	76.46	5.8	12.4	0.78	3.45	0.45	0.44	0.22
Mass fraction in zone B / %	57.4	18.73	17.39	3.19	2.19	0.44	0.41	0.25

根据式(7)^[26]计算可知,阳极氧化膜瞬间被气化,在热传导的作用下,铝合金基体与阳极氧化膜接触区域的温度远远超过了 5083 铝合金的熔点(570~640℃)而发生熔化。从图 17(i)所示的表面微观形貌可以看出,基体表面产生了烧蚀坑^[18],凹坑的中心受到较强的激光等离子体的冲击,在凹坑四周形成了轻微凸起,其形成原理如图 22(d)所示。当基体表面发生烧蚀时,基材铝结合空气中的氧气发生了二次氧化,其表面铝元素含量(质量分数)由 78.95% 下降至 77.83%,氧元素含量(质量分数)由 4.02% 升高至 4.55%,所以在此参数下激光去除氧化膜的机制主要为热烧蚀,如图 22(c)所示。

4 结 论

通过对 5083 铝合金硫酸阳极氧化膜进行激光清洗试验,研究了工艺参数对铝合金表面阳极氧化膜激光清洗效果的影响规律,分析了激光清洗试样的表面形貌、表面粗糙度、元素组成和含量、清洗率及清洗机制,主要得到以下结论:

1) 脉冲频率影响扫描振镜方向上的光斑搭接率,激光行进速度影响激光清洗方向上的光斑搭接率。脉冲频率较高或激光行进速度较低均会导致二次氧化,当激光行进速度过低,为 $V_y=1.0$ mm/s 时,清洗表面

二次氧化烧伤产生的碳化物会被气化,导致 C 元素质量分数由 11.52% 下降至 10.88%。

2) 不同工艺参数对表面粗糙度的影响不同。随着单脉冲能量的升高,清洗表面粗糙度呈现先增大后减小的趋势,最小粗糙度值为 $S_a=0.668$ μm 。随着脉冲频率的升高,清洗表面粗糙度出现了两次先减小后增大,最小粗糙度值为 $S_a=0.660$ μm 。随着激光行进速度的升高,清洗表面粗糙度先增大后减小再增大,最小粗糙度为 $S_a=0.608$ μm 。

3) 当单脉冲能量 $E=100$ mJ,脉冲频率 $F=9.67$ kHz,扫描振镜速度 $V_x=4000$ mm/s,激光行进速度 $V_y=6.5$ mm/s 时,氧化膜清洗率达到 97.14%,比优化前 $V_y=7.0$ mm/s 时的清洗率 94.71% 提升了 2.43 个百分点,优化后清洗表面粗糙度为 $S_a=0.608$ μm ,且优于机械打磨基体表面的粗糙度 $S_a=1.180$ μm 。

4) 铝合金硫酸阳极氧化膜的激光去除机制以热烧蚀、孔洞爆破为主,以弹性振动剥离为辅。

参 考 文 献

- [1] Starke E A, Jr, Staley J T. Application of modern aluminium alloys to aircraft[M] // Lumley R. Fundamentals of aluminium metallurgy. Amsterdam: Elsevier, 2011: 747-783.
- [2] Schawlow A L. Lasers[J]. Science, 1965, 149(3679): 13-22.
- [3] 林乔,石敏球,张欣,等.激光清洗及其应用进展[J].广州化工, 2010, 38(6): 23-25.

- Lin Q, Shi M Q, Zang X, et al. Laser cleaning and its application progress[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2010, 38(6): 23-25.
- [4] Zhang X, Chen Y H. Research progress and prospect of application of different types laser in laser cleaning technology[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(8): 37-40.
- [5] 艾思飞, 王非森, 汪倩, 等. 高温氧化钛合金激光清洗机理与工艺[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(21): 2114012.
- Ai S F, Wang F S, Wang Q, et al. Laser cleaning mechanism and process of high-temperature-oxidized titanium alloy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(21): 2114012.
- [6] 王海将, 刘伟崑, 余跃, 等. 金属表面污染物的激光清洗研究现状与展望[J]. 内燃机与配件, 2016(8): 75-78.
- Wang H J, Liu W W, Yu Y, et al. Research status and prospect of laser cleaning of metal surface contamination[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2016(8): 75-78.
- [7] 李浩宇, 杨峰, 郭嘉伟, 等. 激光清洗的发展现状与前景[J]. 激光技术, 2021, 45(5): 654-661.
- Li H Y, Yang F, Guo J W, et al. Development status and prospect of laser cleaning[J]. Laser Technology, 2021, 45(5): 654-661.
- [8] 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.
- [9] 李华婷. 纳秒脉冲激光清洗 AH32 钢锈蚀的表面质量及耐蚀性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- Li H T. Study on surface quality and corrosion resistance of AH32 steel rust by nanosecond pulse laser cleaning[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.
- [10] 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.
- 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.
- [11] Liu B W, Mi G Y, Wang C M. Study on the morphology and microstructure of 5A06 alloy by high-pulse-frequency pulsed laser micro polishing[J]. Materials Chemistry and Physics, 2020, 255: 123500.
- [12] Liu B W, Mi G Y, Wang C M. Research on grain refinement and wear behavior of micro-remelted TA15 alloy surface by laser cleaning[J]. Materials Chemistry and Physics, 2021, 259: 124022.
- [13] Liu B W, Mi G Y, Wang C M. Study on surface state and thermophysical properties of TA15 alloy by laser ablation[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 62: 483-490.
- [14] 成健, 黄易, 董文祺, 等. 纳秒激光清洗 5083 铝合金阳极氧化膜试验研究[J]. 应用激光, 2019, 39(1): 171-179.
- Cheng J, Huang Y, Dong W Q, et al. Experimental study on nanosecond laser cleaning of anodic oxide film of 5083 aluminum alloy[J]. Applied Laser, 2019, 39(1): 171-179.
- [15] 周聪, 王刚, 陈根余, 等. 皮秒脉冲激光清洗铝合金工艺试验研究[J]. 应用激光, 2018, 38(2): 256-262.
- Zhou C, Wang G, Chen G Y, et al. Experimental study on picosecond pulse laser cleaning of aluminum alloy[J]. Applied Laser, 2018, 38(2): 256-262.
- [16] 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.
- [17] Dimogerontakis T, Oltra R, Heintz O. Thermal oxidation induced during laser cleaning of an aluminium-magnesium alloy[J]. Applied Physics A, 2005, 81(6): 1173-1179.
- [18] Yousaf D, Bashir S, Akram M, et al. Laser irradiation effects on the surface, structural and mechanical properties of Al-Cu alloy 2024[J]. Radiation Effects and Defects in Solids, 2014, 169(2): 144-156.
- [19] Li Z C, Zhang D H, Su X, et al. Removal mechanism of surface cleaning on TA15 titanium alloy using nanosecond pulsed laser[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 139: 106998.
- [20] 邓德伟, 范清华, 赵祥路, 等. 激光清洗 FV520B 钢表面氧化色工艺参数对表面粗糙度的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(21): 2114005.
- Deng D W, Fan Q H, Zhao X L, et al. Influence of processing parameters on surface roughness for laser cleaning of FV520B steel oxide layer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(21): 2114005.
- [21] 宋峰, 邹万芳, 田彬, 等. 一维热应力模型在调 Q 短脉冲激光除漆中的应用[J]. 中国激光, 2007, 34(11): 1577-1581.
- Song F, Zou W F, Tian B, et al. Model of one-dimensional thermal stress applied in paint removal by Q-switched short pulse laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(11): 1577-1581.
- [22] 罗雅, 王璇, 赵慧峰, 等. 激光清洗对 2219 铝合金表面形貌及焊接性能的影响[J]. 应用激光, 2017, 37(4): 544-549.
- Luo Y, Wang X, Zhao H F, et al. Effect of laser cleaning on the surface morphology and welding performance of 2219 aluminum alloy[J]. Applied Laser, 2017, 37(4): 544-549.
- [23] 高辽远, 周建忠, 孙奇, 等. 激光清洗铝合金漆层的数值模拟与表面形貌[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0502002.
- Gao L Y, Zhou J Z, Sun Q, et al. Numerical simulation and surface morphology of laser-cleaned aluminum alloy paint layer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0502002.
- [24] 张岩. 金属表面的激光清洗技术及应用[J]. 光机电信息, 2008, 25(8): 22-26.
- Zhang Y. Laser cleaning technology and application of metal surface[J]. OME Information, 2008, 25(8): 22-26.
- [25] Keller F, Hunter M S, Robinson D L. Structural features of oxide coatings on aluminum[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1954, 101(6): 411-419.
- [26] Steen W M, Mazumder J. Laser cleaning[M]//Laser material processing. London: Springer, 2010: 417-440.

Laser Cleaning Technology of Anodized Film of 5083 Aluminum Alloy

Wang Wei^{1,2}, Ji Xiangcheng^{1,2}, Liu Weijun^{1,2*}, Xing Fei^{1,2}, Bian Hongyou^{1,2}

¹School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning, China;

²Key Laboratory of Engineering Technology for Laser Surface of Liaoning Province, Shenyang 110870, Liaoning, China

Abstract

Objective 5083 aluminum alloy is widely used in aircraft plate weldments and fuel tanks. The presence of anodized film on this alloy strongly impacts the welding quality, making a high-quality removal technique essential. Compared with traditional cleaning methods, laser cleaning characteristically achieves high positional accuracy, strong cohesion, good

stability, and low damage. It also avoids generating unwanted residue that changes the surface appearance and roughness of the aluminum alloy, seriously affecting the follow-up welding, coating, and other processes. Differences in the surface appearance of aluminum alloys before and after laser cleaning have been widely studied but without a systematic explanation of the underlying reasons for changes in surface appearance and roughness. This study aims to explore the influence of laser-processing parameters on the cleaning surface appearance, surface roughness, elementary composition, and content changes, as well as to establish a laser cleaning process window for a 5083 aluminum alloy anodized film. Using optimized process parameters, the resulting improved cleaning can provide technical support for follow-up processing techniques.

Methods This study uses a 5083 aluminum alloy plate coated with anodized film. First, the anodized film on the alloy surface is cleaned using a pulse fiber laser with different single-pulse energies, impulse frequencies, and spot travel speeds. The changes in the alloy surface morphology and roughness after cleaning are observed using the optical microscopy, laser confocal microscopy, and scanning electron microscopy. The composition and content of the elements on the sample surface are detected using an energy spectrum analyzer equipped with a scanning electron microscope. Finally, the mechanism of the removal of the anodized film on the alloy surface, achieved via laser cleaning, is analyzed.

Results and Discussions First, it is concluded that the cleaning effect is optimized for single-pulse energy of 100 mJ and an impulse frequency of 9.67 kHz after analyzing the influence of single-pulse energy and impulse frequency on the cleaning effect. Second, under these conditions, the influence of the laser-spot travel speed on the optimization of the cleaning effect is studied. When the laser spot travels at 12.5 mm/s, the overlap rate of the light spot along the laser cleaning direction is large [Formula (5)], the residence time of the light spot on the oxide film per unit area is short, and large oxide film remains on the surface [Figs. 10(f) and 12(f)]. As the laser spot travel speed slows down to 6.5 mm/s, the overlap rate of the light spot increases, the surface after removing the oxide film is smooth and flat [Figs. 10(c) and 12(c)], the minimum roughness of the surface is $S_a=0.608 \mu\text{m}$ (Fig. 13), the oxygen content(mass fraction) decreases to a minimum of 3.46%, and the aluminum content(mass fraction) increases to a maximum of 79.98% (Figs. 19 and 20). When the laser spot moves slowly, the matrix surface is burned and the piezoglypt is formed [Fig. 19(b)]. When it moves even more slowly, the bulged overlapping appearance at the edge of the piezoglypt becomes unstable and the wave-like appearance forms [Fig. 19(a)]. The removal mechanism of oxide film depends on the laser energy and mainly includes thermal ablation and hole blasting assisted by elastic vibration peeling [Figs. 15(a), 15(c), 17(i), 18, and 23 and Table 4].

Conclusions In this study, the effects of the laser-cleaning process parameters on the surface appearance, roughness, elementary composition, and content of 5083 aluminum alloy after removing anodized film are studied. The pulse frequency affects the light-spot overlapping rate in the scanning-galvanometer direction, and the laser-spot travel speed affects its overlapping rate in the cleaning direction. We conclude that a high impulse frequency or a low laser-spot travel speed produces secondary oxidation. With increasing the single-pulse energy, the surface roughness first increases and then decreases, with a minimum value $S_a=0.668 \mu\text{m}$. With increasing the impulse frequency, the surface roughness decreases and then increases twice, with a minimum value $S_a=0.660 \mu\text{m}$. As the laser-spot travel speed increases, the surface roughness first increases, then decreases, and finally increases. The minimum roughness is $S_a=0.608 \mu\text{m}$. For single-pulse energy $E=100 \text{ mJ}$, pulse frequency $F=9.67 \text{ kHz}$, scanning galvanometer speed $V_x=4000 \text{ mm/s}$, and laser-spot speed $V_y=6.5 \text{ mm/s}$, the cleaning rate of the oxide film reaches 97.14%, and the surface roughness is $S_a=0.608 \mu\text{m}$. The roughness is lower than that of the mechanically polished oxide film $S_a=1.180 \mu\text{m}$. The laser removal mechanism of the anodized film of the 5083 aluminum alloy mainly involves thermal ablation and hole blasting assisted by elastic vibration peeling.

Key words laser technique; laser cleaning; 5083 aluminum alloy; anodized film; cleaning effect optimization; cleaning mechanism; process parameter