

激光表面改性技术

7050 铝合金阳极氧化后表面激光清洗参数优化

姜远茂, 王守仁*, 王高琦, 肖振, 李沛凝, 张路雨

(济南大学 机械工程学院, 济南 250022)

摘要: **目的** 明确激光清洗 7050 铝合金阳极氧化膜的工艺参数。**方法** 采用高斯脉冲光纤激光器对 7050 铝合金阳极氧化后表面进行激光清洗, 通过改变激光功率以及扫描次数来探究去除阳极氧化膜的最佳参数, 并对不同参数激光清洗后表面的各项性能进行研究, 同时分析激光清洗铝合金阳极氧化膜的清洗阈值以及机理。**结果** 经过合理激光参数清洗的样品, 表面氧化膜被完全去除, 对基体没有明显损伤。单次扫描最佳与 2 次扫描最佳的样品的显微硬度分别提升到 182.86HV、187.36HV, 相对于基体分别提升了 7.9%、10.6%。单次扫描最佳与 2 次扫描最佳样品的自腐蚀电流密度量级相对于基体均从 10^{-4} 减小到 10^{-5} , 两者差值仅有 10^{-6} 。单次扫描最佳与两次扫描最佳样品的磨痕深度相对于基体分别减少 6.3、6.8 μm , 摩擦因数均小于 0.3。激光清洗前后试样的磨损机制均是磨粒磨损、黏着磨损以及氧化磨损相结合的混合磨损, 区别可能在于三者所占比重以及发生的时间和位置不同。**结论** 激光清洗 7050 铝合金阳极氧化膜的清洗阈值在 150~180 W, 最佳参数是 170 W 扫描 2 次。在合适的激光清洗参数下, 材料的各项性能优于基体。高斯脉冲激光清洗 7050 铝合金阳极氧化膜的机理是以振动为主, 烧蚀为辅。

关键词: 激光清洗; 铝合金; 阳极氧化膜; 工艺参数优化; 性能研究; 机理分析

中图分类号: V252; TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2025)01-0191-14

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2025.01.018

Optimization of Surface Laser Cleaning Parameters of 7050 Aluminum Alloy after Anodizing

JIANG Yuanmao, WANG Shouren*, WANG Gaoqi, XIAO Zhen, LI Peining, ZHANG Luyu

(School of Mechanical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China)

ABSTRACT: Traditional surface cleaning methods such as physical method, chemical method, etc., have various problems in efficiency, damage, pollution, etc. The new laser cleaning technology can improve the performance on the basis of solving these problems. However, the premise of achieving the above advantages is the use of appropriate laser process parameters. If the parameters are not set up, it is impossible to remove pollutants and even damage components, so it is necessary to optimize the parameters to reduce the impact of laser on the matrix. In order to determine the process parameters of laser cleaning 7050 aluminum alloy anodic oxide films. The surface of 7050 aluminum alloy after anodizing was cleaned by Gaussian pulse fiber laser. The optimal parameters of removing anodized films were investigated by changing the laser power and scanning times. Roughness measuring instrument, scanning electron microscope, friction and wear testing machine, white light interferometer,

收稿日期: 2024-09-03; 修订日期: 2024-11-08

Received: 2024-09-03; Revised: 2024-11-08

基金项目: 泰山学者工程专项基金 (2022-2027)

Fund: Taishan Scholar Engineering Special Funding (2022-2027)

引文格式: 姜远茂, 王守仁, 王高琦, 等. 7050 铝合金阳极氧化后表面激光清洗参数优化[J]. 表面技术, 2025, 54(1): 191-204.

JIANG Yuanmao, WANG Shouren, WANG Gaoqi, et al. Optimization of Surface Laser Cleaning Parameters of 7050 Aluminum Alloy after Anodizing[J]. Surface Technology, 2025, 54(1): 191-204.

*通信作者 (Corresponding author)

Vickers hardness tester, X-ray residual stress analyzer, electrochemical workstation and other instruments were used to analyze and study the properties of different parameters after laser cleaning of aluminum alloy anodic oxide films. The experimental results showed that the oxide film on the surface of the sample cleaned by reasonable laser parameters was completely removed, and there was no obvious damage to the matrix. Only when the laser power reached the cleaning threshold for removing the anodized film, could the anodized film be removed. When the cleaning threshold was not reached, the laser could only act on the surface of the oxide film. Excessive cleaning would destroy the matrix. The sample performance of low power multiple scanning was better than that of high power single scanning. At the same time, it was found that excessive laser scanning should be avoided as far as possible in the process of laser cleaning, with a maximum of two scans and the power should be reduced. The microhardness of the samples with the best single scan and the best double scans was increased to 182.86HV and 187.36HV, respectively, which were increased by 7.9% and 10.6% compared with the matrix. The self-corrosion current density of the samples with the best single scan and the best double scans was from 10^{-4} to 10^{-5} relative to the matrix, and the difference between the two was only 10^{-6} . The wear depth of the samples with the best single scan and the best double scans was reduced by 6.3 μm and 6.8 μm respectively, and the friction coefficient was less than 0.3. The wear mechanism of the samples before and after laser cleaning was the mixed wear of abrasive wear, adhesive wear and oxidation wear, and the difference may lie in the proportion of the three and the time and location of the occurrence. The cleaning threshold of 7050 aluminum alloy anodic oxide films is between 150 W and 180 W, and the best parameter is 170 W scanning twice. Under suitable laser cleaning parameters, the properties of the material are better than the matrix. The mechanism of Gauss pulse laser cleaning of 7050 aluminum alloy anodic oxide films is mainly vibration mechanism, and ablation mechanism is auxiliary.

KEY WORDS: laser cleaning; aluminum alloy; anodic oxide film; process parameter optimization; performance study; mechanism analysis

为了在不降低强度的基础上减轻航天器质量,大部分构件会应用铝合金材料。7050 铝合金^[1]因其具备的良好性能^[2-5]是目前国内外部分航天器的主要结构材料^[6],如前机身货舱门框、中机身加强框、翼梁等部位^[7-8]。铝合金在空气中容易氧化,产生的氧化膜薄,且不均匀,无法对构件进行有效的保护。为了提高构件的使用寿命,会在构件表面镀有一层阳极氧化膜^[9]。构件在服役期间,表面受到划伤、磕碰、摩擦等情况时,表面的氧化膜容易被破坏。氧化膜破损后,其防护作用失效,基体易受腐蚀,需重新对构件进行阳极氧化处理,形成新的氧化膜。因原有氧化膜的存在,在进行阳极氧化处理前,需要完全清除旧氧化膜^[10]。目前,传统的表面清洗方法如物理法、化学法等^[11-14],在效率、损伤、污染等方面存在各种问题^[15]。新型激光清洗技术^[16]可以在解决这些问题的基础上对部分性能进行增幅,该技术也被广泛应用于航空领域。但实现上述优势的前提是采用合适的激光工艺参数,参数设置不合理会出现无法去除污染物,甚至损伤构件的情况,所以需要对参数进行优化,减少激光对基体的影响。

随着激光清洗技术的发展,激光清洗参数对表面清洗质量和基体性能的影响受到了极大的关注。Wang 等^[17]采用脉冲激光对铝合金表面阳极氧化膜进行了清洗,研究了能量密度对基体性能的影响。激光清洗可以微量提升材料的硬度,同时材料疏水性显著提高。Zhu 等^[18]研究了能量密度对飞机蒙皮性能的影响,

结果表明,蒙皮的耐磨性、硬度和耐腐蚀性没有下降。He 等^[19]研究了激光清洗对铝合金性能的影响,发现激光清洗会增大材料的残余应力。Zhang 等^[20]研究了激光清洗对 AA7024 铝合金抗腐蚀性能的影响,发现在合适的参数下进行激光清洗后,材料的抗腐蚀性提高。李庆^[21]对飞机蒙皮进行了激光清洗,发现在合理能量密度下进行激光清洗,表面形貌、粗糙度接近基体,磨损量减少 42.9%。李强^[22]研究了激光功率与扫描速度对铝合金基体的影响,发现过高的功率或过低的速度会发生过度清洗,采用合适的激光工艺参数进行激光清洗,材料的硬度未受到明显的影响。Song 等^[23]通过激光清洗与机械清洗相结合的方法对 7B04 铝合金表面进行了清洗,发现当扫描速度为 5 650 mm/s、重叠率为 80%时,氧化膜被完全去除,且不损伤基体,同时表面硬度和耐腐蚀性有所提高。Zhu 等^[24]研究了激光功率和清洗速度对 5A12 铝合金性能的影响,发现当功率为 98 W,清洗速度为 4.1 mm/s 时,表面氧化膜的去除效果最好。Wang 等^[25]研究了能量密度对铝合金显微硬度和耐蚀性能的影响,发现在合适的参数下进行激光清洗,材料的显微硬度和耐腐蚀性能得到提高。

根据上述研究,可以发现,合适的激光清洗参数对清洗表面的性能有不同程度的提高,由此可知合理工艺参数在激光清洗中的重要性。目前,对于激光清洗 7050 铝合金阳极氧化膜的工艺参数及对基体性能影响的研究较少。因此,本文研究了光纤高斯脉冲激

光对 7050 铝合金阳极氧化膜的清洗效果, 以及对基体性能的影响。通过改变激光功率以及扫描次数, 来探究去除 7050 铝合金阳极氧化膜的最佳参数实现参数优化。研究了不同激光功率和扫描次数对基体性能的影响, 并分析了阳极氧化膜的去除机理、磨损机理以及清洗阈值。同时, 探索低功率的多次扫描与高功率的单次扫描对清洗效果的影响, 为复合激光清洗的研究提供参考。

1 试验

1.1 材料准备

试验材料选用 7050 铝合金板, 其主要成分见表 1。7050 铝合金板基体的形貌如图 1a 所示, 表面存在大量条纹以及自然氧化的氧化膜。对材料进行阳

极氧化处理: 先将 7050 铝合金用无水乙醇清洗, 然后经过 (40 g/L 的 NaOH 溶液) 碱蚀、(氢氟酸、硝酸和水的体积比为 1 : 1 : 1 的溶液) 中和、(电解液为 180 g/L 的 H₂SO₄ 溶液、电压为 16 V、时间为 30 min) 阳极氧化处理后, 在材料表面形成一层氧化膜, 阳极氧化后的试样表面出现较多细小的微孔以及微裂纹, 这是阳极氧化膜的最上层 (疏松层), 其在扫描电镜下的微观形貌如图 1b 所示。材料被切成大小为 10 mm×10 mm×6 mm 的试样, 以便进行相关的性能测试试验。

表 1 7050 铝合金化学成分
Tab.1 Chemical composition of 7050 aluminum alloys
wt. %

Mg	Cu	Mn	Si	Cr	Ti	Zn	Fe	Al
2.7	1.52	0.17	0.28	0.22	0.1	5.59	0.31	Allowance

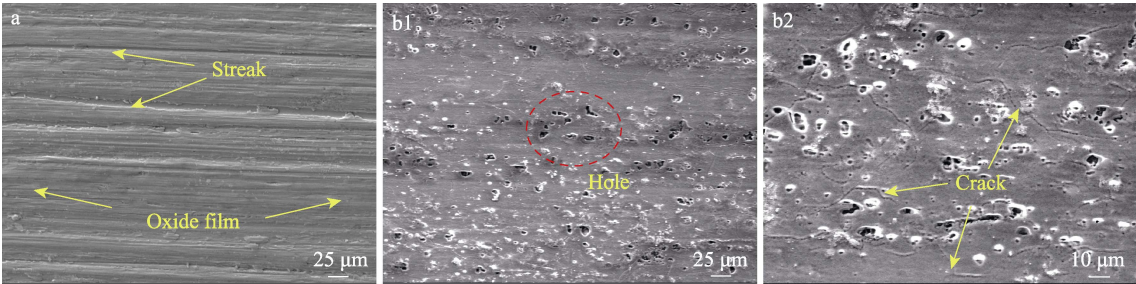


图 1 7050 铝合金基体 (a) 和阳极氧化后样品 (b) 的微观形貌
Fig.1 Microstructure of 7050 aluminum alloy matrix (a) and anodized sample (b)

1.2 激光清洗试验

试验设备采用光纤高斯脉冲激光清洗设备 (QYCL-FP200, 山东强远激光, 中国)。激光清洗的示意图如图 2 所示, 激光器的主要参数见表 2。激光由激光发生器发出, 经光纤传至准直镜校准, 经 x、y 振镜反射后, 通过场镜传出。激光清洗光斑路径如图 3 所示, 激光光斑先沿 x 方向形成线, 激光光线再沿 y 方向移动, 激光光斑路径总体呈现 “之” 字形。

表 2 激光器的主要参数
Tab.2 Main parameters of laser

Characteristic	Value
Wavelength λ /nm	1 064
Maximum average power P /W	200
Pulse frequency F /kHz	10-4 000
Maximum pulse energy P_e /mJ	1.8
Output spot size d /mm	4-6
Scan line width l /mm	1-100
Laser pulse width w /ns	10-500

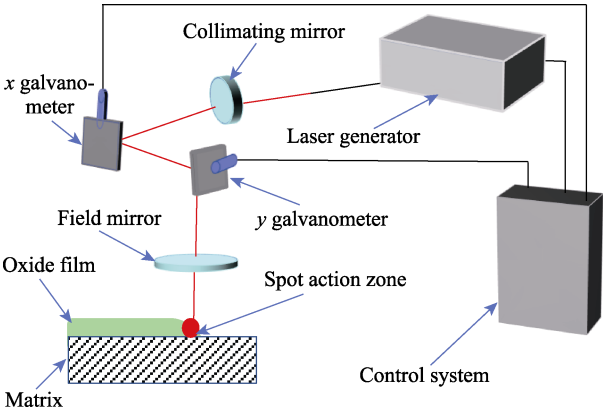


图 2 激光清洗示意图
Fig.2 Schematic diagram of laser cleaning

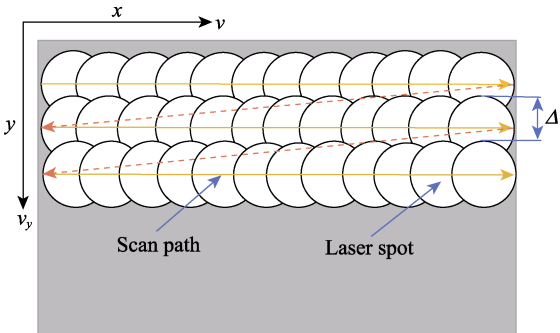


图 3 激光清洗光斑路径
Fig.3 Diagram of laser cleaning spot path

激光清洗所选的相关参数见表 3。根据试样尺寸以及设备使用手册,选择脉冲宽度为 500 ns,扫描宽度为 20 mm,重复频率为 110 kHz,振镜扫描速度为 2 000 mm/s。同时,为了保证光斑均匀分布在清洗区域,同时也可以减少热应力在同一区域累积,需要保持 2 个方向的重叠率相同^[26],横向为振镜扫描速度方向,纵向为清洗速度方向,具体公式如下:

$$\phi_x=1-\frac{v}{f\times d}$$

(1)

$$\phi_y=\frac{d-\Delta}{d}$$

(2)

$$\Delta=\frac{L\times v_y}{v}$$

(3)

式中: ϕ_x 为横向重叠率; ϕ_y 为纵向重叠率; d 为光斑直径; v 为振镜扫描速度; f 为重复频率; Δ 为清洗方向的扫描间距; L 为扫描线宽; v_y 为清洗速度。

表 3 激光清洗所选相关参数
Tab.3 Relevant parameters selected for laser cleaning

Parameter	Value
Laser pulse width w/ns	500
Scan line width l/mm	20
Repetition frequency f/kHz	110
Scanning speed $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	2 000
Cleaning speed $v_y/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	108
Power p/W	130, 150, 170, 180, 200
Scanning times	1, 2, 3

通过计算得出,清洗速度为 108 mm/min。对于功率的选择,因前期做过测试性试验,阳极氧化膜在 150 W 时开始破损,170 W 时大量去除,180 W 时完全去除,200 W 时损伤表面,故选择 130、150、170、180、200 W 这几个功率参数来表达功率对于清洗效果的影响。选择扫描 1、2、3 次,来探讨扫描次数对于清洗效果的影响,以及低功率的多次扫描与高功率的单次扫描对清洗效果的影响。

1.3 性能测试试验

采用粗糙度测量仪 (SJ-410, Mitutoyo, Japan) 对试样进行粗糙度测试,每个样品测量 20 次取平均值。采用扫描电子显微镜 (JSM-7610F, JEOL, Tokyo, Japan) 观察试样的微观形貌,并利用附带的能谱仪进行元素分析,通过比较含氧量来确定清洗效果。采用 RTEC 摩擦磨损试验机 (MFT-50, San-Jose, CA, USA) 进行摩擦磨损性能测试 (对磨球: 直径为 6.35 mm、硬度为 650HV 的 GCr15 轴承钢球,加载力: 10 N,磨损时间: 30 min,位移幅值: 4 mm,工作频率: 2 Hz)。采用白光干涉仪 (MFT-4000, Lanzhou Huahui Instrument Technology Co Ltd, Lanzhou,

China) 对磨损形貌进行采集,并测量出磨损体积及摩擦因数。采用显微维氏硬度计 (402-MVD, Wilson, Norwood, USA) 进行显微硬度测试 (加载力: 500 g),对同一试样不同位置测量 5 次取平均值。采用 X 射线残余应力分析仪 (iXRD COMBO, Proro, Canada) 进行残余应力测试 (辐射类型: Cr_K-Alpha, 衍射 bragg 角: 139.0°, 波长: 0.229 1 nm)。采用电化学工作站 (CHI604E, 上海晨华仪器有限公司, 上海, 中国) 进行耐腐蚀性测试 (参比电极: 饱和甘汞, 辅助电极: 铂板, 工作电极: 试样, 电解质: 3.5% 的 NaCl 溶液)。

2 结果

2.1 表面形貌及元素变化

2.1.1 微观形貌表征

各参数激光清洗后试样的微观形貌如图 4 所示。当功率达到 130 W 时,如图 4a 所示,孔洞依然存在,区别在于孔洞的数量与大小。这是因为 130 W 的能量未达到去除氧化层的能量阈值,即便多次扫描,能量也只能作用于氧化层表层,使氧化层变得相对均匀,无法去除氧化层。如图 4b1 所示,150 W 扫描 1 次,氧化层产生了烧蚀,但未将氧化层去除。如图 4b2、b3 所示,氧化层开始被去除,且去除量随着扫描次数而变化,去除的形状基本为圆形,未去除部分有明显的烧蚀痕迹。如图 4c1 所示,170 W 扫描 1 次,阳极氧化膜被大量去除,有少量残留,残留的形状为片状。如图 4c2 所示,170 W 扫描 2 次,氧化膜被完全去除,表面有较浅的冲击坑以及少量的小球,小球的出现与冲击溅射有极大的关系。Nie 等^[27]在研究激光清洗去除无机涂层的时候也发现了这个现象。由图 4c3 可见,随着扫描次数的增加,浅的冲击坑因能量的作用而发生融化流动现象,导致冲击痕迹显著减少。同时发现表面存在细小裂纹。如图 4d1 所示,180 W 扫描 1 次,氧化膜被完全去除,表面较为平整,没有冲击坑,但有少量烧蚀痕迹,同样存在溅射的小球。如图 4d2 所示,随着扫描次数的增加,注入的能量也相应的增多,但因激光冷却速度快的特点,熔融的金属不能均匀流动,不规则的熔融痕迹变多,溅射产生的小球数量也增多。如图 4d3 所示,随着更多能量注入,表面出现裂纹,形成较大的熔融坑,且溅射的小球的直径更大。如图 4e 所示,因更多能量的烧蚀且伴随应力的变化,随着扫描次数的增多,裂纹逐渐增多,最终裂纹纵横表面。通过对各功率之间不同扫描次数的对比发现,在 170 W 时,随着扫描次数的变化,表面越来越平整,而其他的功率的情况却是各种痕迹越来越多。170 W 扫描 3 次的形貌与 180 W 扫描 1 次的形貌相差不大,但 170 W 扫描 3 次时有细小裂纹产生。

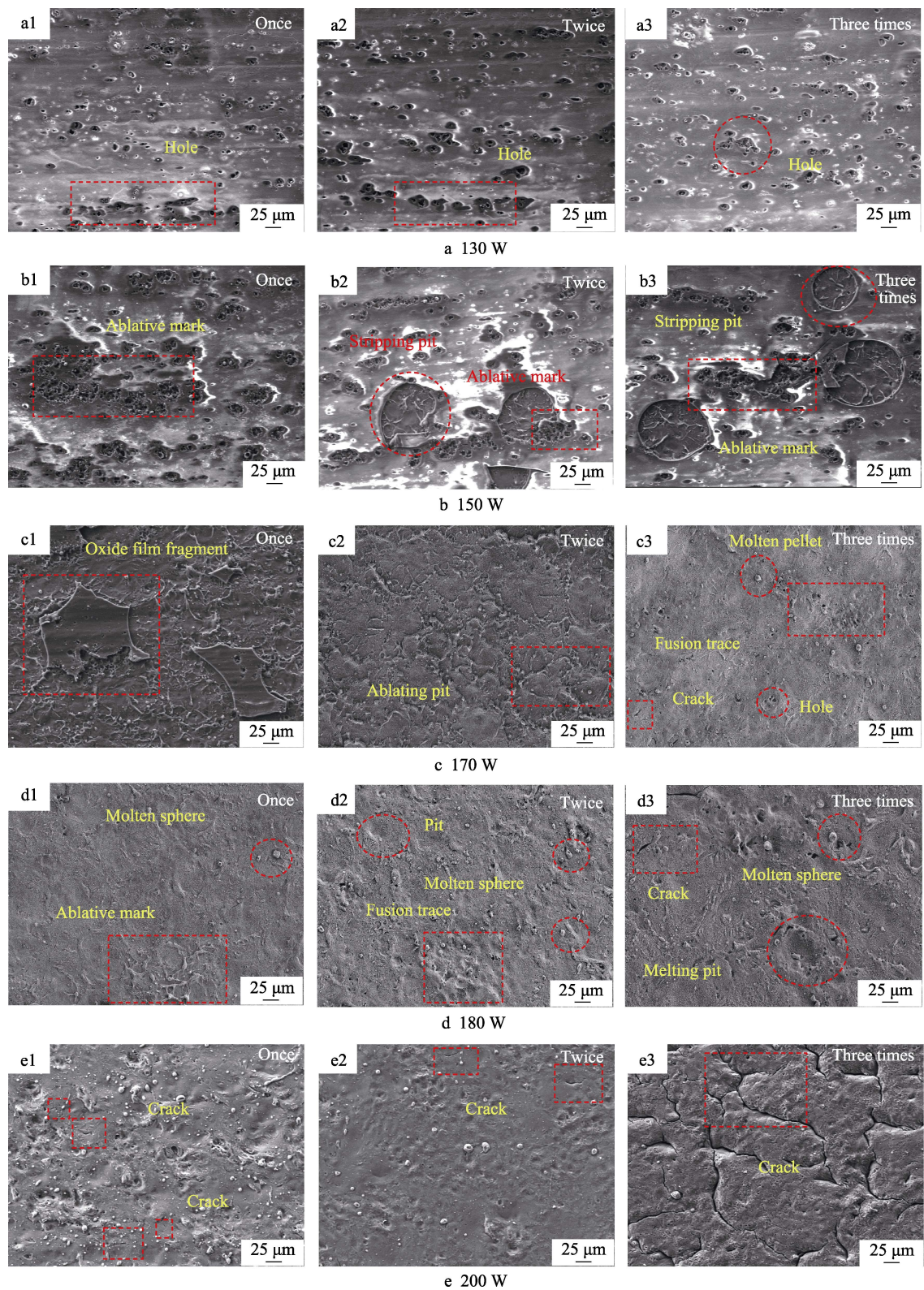


图 4 各参数下激光清洗前后样品的微观形貌

Fig.4 Microstructure of samples before and after laser cleaning under different parameters

2.1.2 元素分析

为判断激光清洗去除氧化膜的效果,对清洗前后的样品进行元素分析,结果见表 4~6。阳极氧化膜与基体之间主要的区别在于氧元素含量,因此主要是以

氧元素含量来衡量清洗阳极氧化膜的效果。样品在各参数下激光清洗前后的氧元素含量对比如图 5 所示。可以看出,在不同扫描次数下,相对于未清洗样品,氧含量随着功率的变化趋势基本为先降低、再增加,只在 200 W 时有所不同。在相同功率下,不同扫描次

表 4 扫描 1 次时不同功率清洗后样品元素含量
Tab.4 Element content of sample after cleaning with
different power during scanning once

	wt. %						
Power/W	C	O	Mg	Al	S	Cu	Zn
Matrix	10.10	8.09	2.38	72.56	—	1.72	5.14
Uncleaned	6.83	49.06	0.52	37.09	3.93	0.07	2.5
130	5.58	48.93	0.46	38.12	4.13	0.14	2.49
150	5.51	47.68	0.54	39.53	4.01	0.17	2.55
170	5.94	15.62	1.78	69.19	0.84	1.40	5.23
180	4.46	9.05	2.24	76.10	0.64	1.67	5.84
200	6.38	12.78	2.05	71.24	0.30	1.53	5.39

表 5 扫描 2 次时不同功率清洗后样品元素含量
Tab.5 Element content of sample after cleaning with
different power during scanning twice

	wt. %						
Power/W	C	O	Mg	Al	S	Cu	Zn
Matrix	10.10	8.09	2.38	72.56	—	1.72	5.14
Uncleaned	6.83	49.06	0.52	37.09	3.93	0.07	2.5
130	5.23	48.65	0.43	38.83	4.12	0.18	2.55
150	5.84	44.80	0.67	41.99	3.63	0.31	2.75
170	4.96	7.02	2.09	78.20	0.47	1.61	5.64
180	4.01	13.61	2.26	72.47	0.65	1.57	5.43
200	4.75	12.61	2.35	72.79	0.27	1.74	5.49

表 6 扫描 3 次时不同功率清洗后样品元素含量
Tab.6 Element content of sample after cleaning with
different power during scanning three times

	wt. %						
Power/W	C	O	Mg	Al	S	Cu	Zn
Matrix	10.10	8.09	2.38	72.56	—	1.72	5.14
Uncleaned	6.83	49.06	0.52	37.09	3.93	0.07	2.5
130	5.14	48.84	0.50	38.84	4.15	0.16	2.38
150	5.47	42.86	0.74	43.86	3.36	0.61	3.09
170	4.40	11.14	2.32	74.27	0.58	1.60	5.69
180	3.90	14.82	2.73	70.30	0.71	1.91	5.64
200	4.93	11.57	2.92	71.53	0.19	2.28	6.29

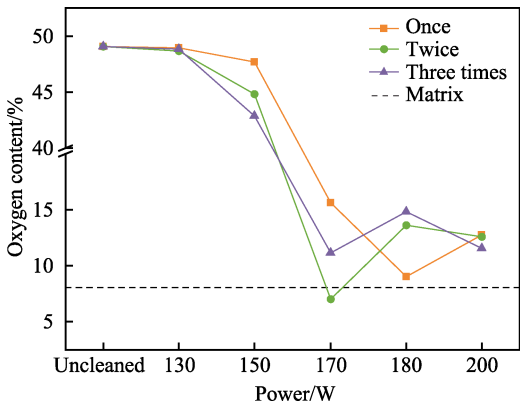


图 5 各参数下激光清洗前后的氧元素含量对比
Fig.5 Comparison of oxygen content before and after laser
cleaning under each parameter

数之间的规律却是各有不同。在未完全清洗前，氧含量主要集中在氧化膜上。只有当功率达到清洗阈值（150 W）时，激光才能将氧化膜剥离基体，且随着能量的增加去除量逐渐增多，从未完全清洗状态到完全清洗状态（170 W 扫描 2 次、180 W 扫描 1 次），氧含量逐渐减少到最低。随着功率的进一步提升或者扫描次数的增加，表面接收到的能量超过了完全清洗所需的能量，多余的能量会在去除氧化膜后，将基体融化，对表面进行烧蚀，发生热氧化现象，氧含量有所升高，且剩余能量越多，氧含量提高越多。当激光功率过大时（200 W），后一次扫描产生的能量先将前次扫描产生的氧化的表面去除，消耗掉了大部分能量，只剩余的小部分能量对表面进行烧蚀，氧含量反而有所下降。经过激光清洗后，只有 170 W 扫描 2 次的氧含量低于基体。Al 元素性质活泼，易于氧气反应，存在一定量的氧这是不可避免的，同时根据基体、未清洗以及各参数清洗后的氧含量，也说明了激光清洗可以完全去除阳极氧化膜。

未清洗、未完全清洗和完全清洁的样品表面的元素分布如图 6 所示。清洗前，样品表面氧的质量分数为 49.06%，氧元素均匀致密地分布在表面，且含有大量的硫元素。未完全清洗的样品（170 W 扫描 1 次）表面氧元素含量明显下降，氧的质量分数为 15.62%。同时可以发现，氧元素以及硫元素主要集中在残留的氧化膜碎片上，这表明硫元素是氧化膜引进的，硫元素的剩余量也可以作为清洗效果的辅助指标。完全清洗的表面氧元素分布相对分散，其中明显可以看出，170 W 扫描 2 次比 180 W 扫描 1 次的氧含量更少，氧质量分数分别为 7.02%、9.05%。通过表 4~6 中的数据观察到，激光清洗对样品表面的各元素含量产生了影响，这可能会对铝合金的其他性能有潜在影响。因此，本文还进行了其他性能的测试，以评估激光清洗对基体本身的影响，验证激光清洗的可靠性以及参数优化的可信度。

2.1.3 表面粗糙度

试验所得粗糙度的结果如图 7 所示。可以看出，在扫描 1 次时，相对于未清洗样品，粗糙度随着功率的增加呈先增加、后减少、再增加的趋势；扫描 2 次时，相对于未清洗样品，粗糙度随功率的上升而上升；扫描 3 次时，相对于未清洗样品，随功率的增加，粗糙度呈现先下降、再上升、再下降、再上升的波动趋势。在同一功率下，不同扫描次数之间的规律各有不同。粗糙度是微观形貌的宏观表现，粗糙度的变化与微观形貌的变化息息相关。在功率（130 W）对氧化膜没有实质影响时，激光只能作用在表层，将表面变得相对平整。当功率达到清洗阈值（150 W）时，氧化膜在激光的作用下开始剥落，随着去除量的增加，表面越来越凹凸不平，粗糙度升高，最终上升到 0.996 9 μm。当完全清洗后，表面相对平整，粗糙度

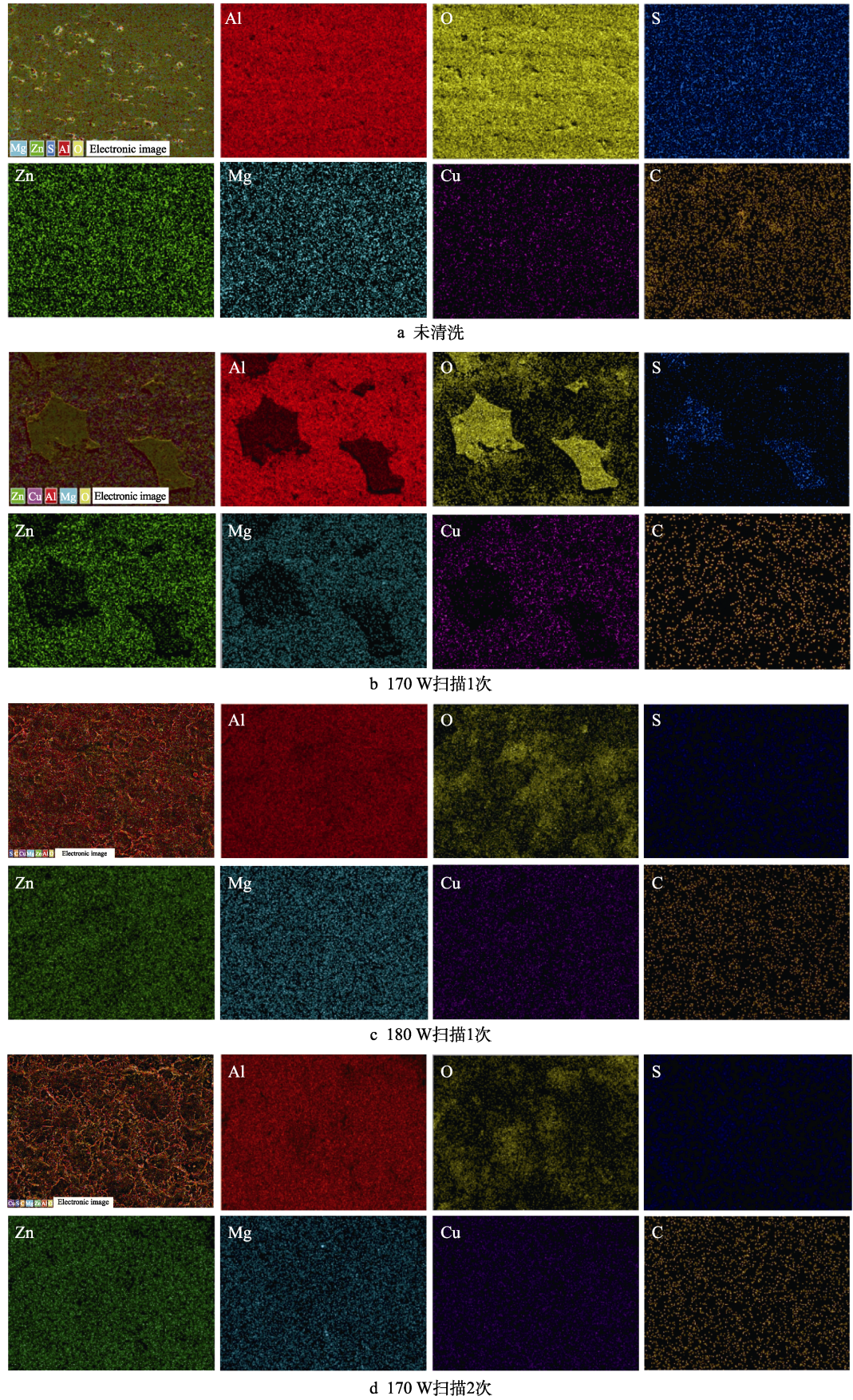


图 6 各参数下激光清洗前后样品表面的元素分布

Fig.6 Elemental distribution on sample surfaces before and after laser cleaning under various parameters:
a) uncleaned; b) 170 W scanning once; c) 180 W scanning once; d) 170 W scanning twice

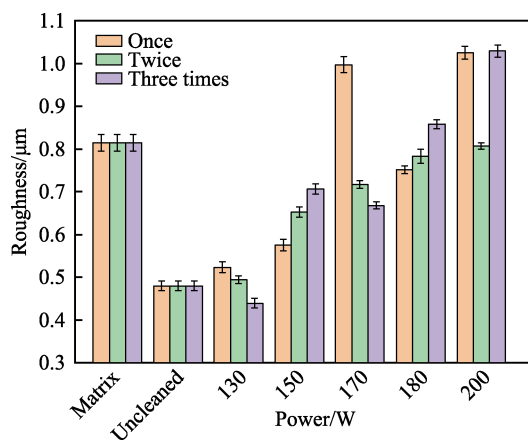


图7 各参数下激光清洗前后的粗糙度对比

Fig.7 Roughness comparison before and after laser cleaning under each parameter

有所降低 (170 W 扫描 2 次为 0.716 4、180 W 扫描 1 次为 0.751 0、170 W 扫描 3 次为 0.667 3 μm)。当激光功率较大时,产生的大量能量在去除氧化膜后将表面重熔,又因激光快速冷却形成熔融痕迹,甚至产生裂纹,表面的熔融痕迹和裂纹越多,粗糙度越高。

2.2 表面显微硬度

为探究激光清洗对基体的影响,将未完全和完全清洗的样品与基体进行对比,各参数激光清洗前后试样的维氏硬度值如图 8 所示。铝合金阳极氧化膜为硬质氧化膜,其硬度较高 (260.11HV),可以提供更好的防护作用。在各扫描次数下,均随着功率的增加,硬度 (相对于基体) 先增加再降低。除 170 W 外,在其他功率下的硬度随着扫描次数增加依次降低,且只有在 170 W 功率清洗时所得的硬度均高于基体。170 W 扫描 1 次时,氧化层有少许残留,且激光对表面产生轻微冲击,硬度相对于基体有所提高 (178.80HV); 扫描 2 次时完全去除氧化膜,且激光对表面有一定的冲击强化作用,基体表面形成硬化层^[18],从而使硬度值进一步提高 (187.36HV)。扫描次数过多时,铝合金表面接

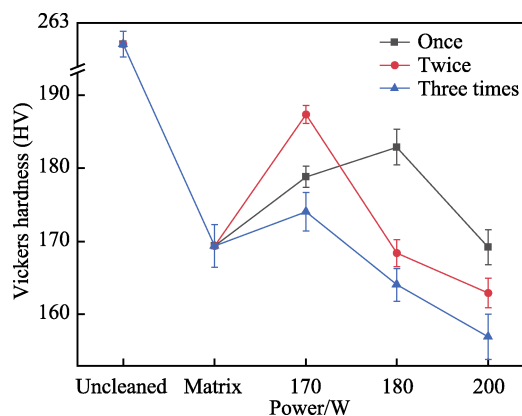


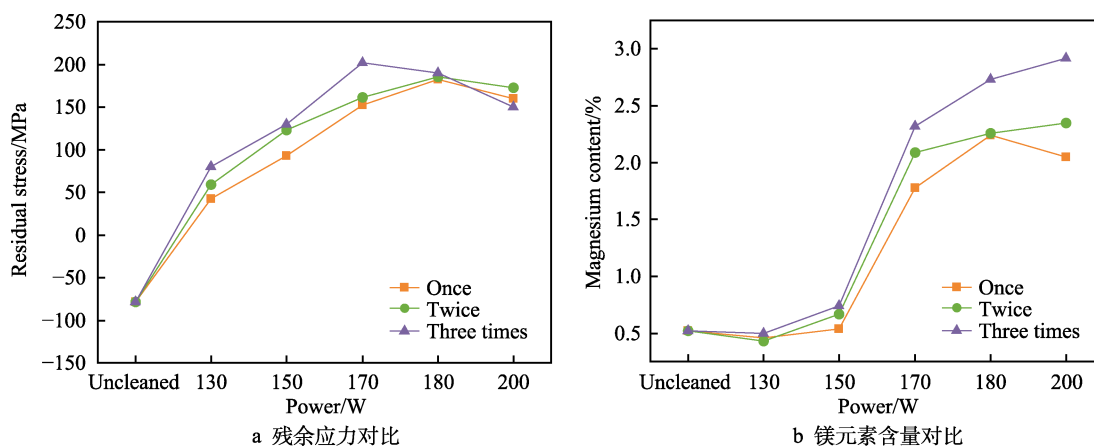
图8 各参数下激光清洗前后试样的维氏硬度对比

Fig.8 Vickers hardness comparison diagram of samples before and after laser cleaning under each parameter

收到更多的能量导致硬化层部分熔化,从而硬度有所降低 (174.13HV)。180 W 单次扫描的情况与 170 W 扫描 2 次的情况类似,硬度同样有所提高 (182.86HV)。180 W 多次扫描时和 200 W 扫描时,产生的能量过多导致激光冲击形成的硬化层熔化,同时表面受到的能量和热量达到了激光退火的温度^[28],硬度降低,甚至低于基体硬度 (169.4HV)。

2.3 残余应力性能分析

各参数激光清洗前后试样的残余应力值如图 9a 所示。激光清洗前,样品有残余压应力,清洗后变为残余拉应力,且残余应力明显增大。Zhu 等^[18]在研究激光清洗飞机蒙皮时也发现了这个现象,重新涂覆氧化膜前需要一定的表面处理,消除残余应力再进行下一步工序。在 3 种扫描次数下,随着功率的增加,残余应力先增加、后减少,且在 180 W 前的从高到低排序均为 3 次、2 次、1 次,200 W 时为 2 次、1 次、3 次。在相同功率下,随着扫描次数的增加,除 200 W 时残余应力先增加、再减少外,其余均逐渐增加。同时,在元素分析中, Mg 元素含量的变化曲线 (如



a 残余应力对比

b 镁元素含量对比

图9 各参数下激光清洗前后对比

Fig.9 Comparison before and after laser cleaning under each parameter: a) comparison of residual stress; b) comparison of magnesium content

图 9b 所示)与残余应力的变化曲线基本类似,这表明镁元素含量变化与残余应力的变化有极大的关系。对于基体的镁元素含量与残余应力无法对应的原因,与基体是通过冷轧预先存有残余应力有关。镁元素在铝合金中以固溶体形式存在,对强度、硬度等有明显的提高^[24]。激光束含有大量的能量,在进行清洗的过程中,激光束作用于铝合金表面,能量被铝合金吸收转化为热量使得镁元素析出,使得原本的强化相被破坏,残余应力发生改变,导致残余拉应力提高。当镁元素析出到一定程度,残余拉应力过大时,铝合金表面无法承受,产生裂纹,残余应力得到部分释放,残余

应力下降。

2.4 激光清洗后摩擦磨损性能分析

根据上述各功率扫描 3 次的表面形貌以及性能分析,发现扫描 3 次的样品中完全去除氧化膜的样品表面均存在裂纹,且各方面的性能也均不如前 2 次扫描,后续的性能分析也不再考虑扫描 3 次的情况。对不同参数下激光清洗前后的试样进行摩擦磨损试验,各试样表面的磨痕形貌如图 10 所示。不同激光参数清洗下的摩擦因数曲线如图 11 所示,磨损量及平均摩擦因数如图 12 所示。

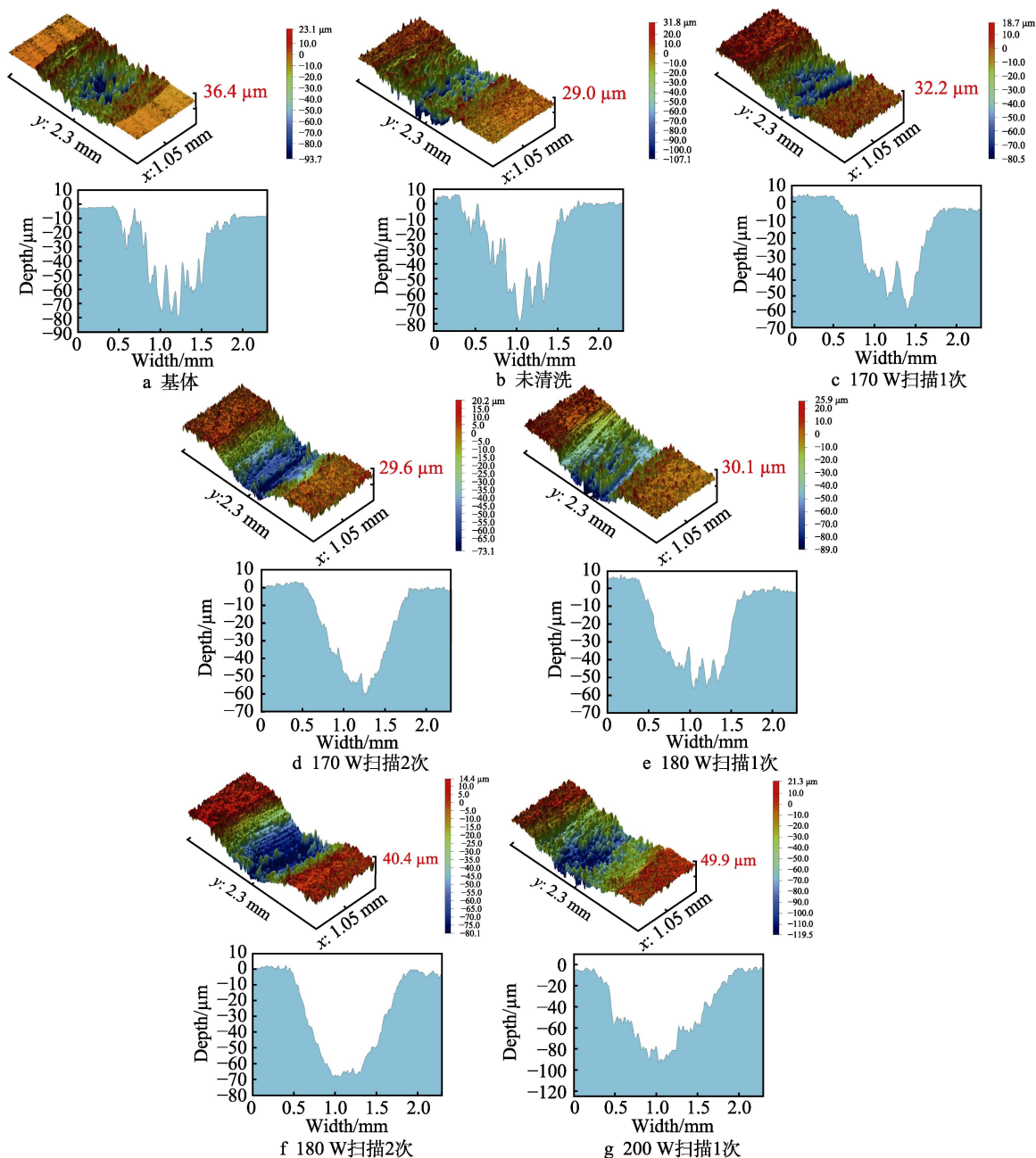


图 10 不同激光参数清洗下基体的表面磨痕形貌

Fig.10 Surface wear morphology under different laser parameters: a) matrix; b) uncleaned; c) 170 W scanning once; d) 170 W scanning twice; e) 180 W scanning once; f) 180 W scanning twice; g) 200 W scanning once

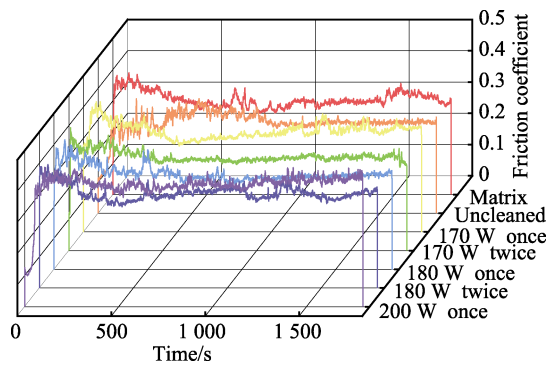


图 11 不同激光参数清洗下的摩擦因数
Fig.11 Friction coefficient of cleaning under different laser parameters

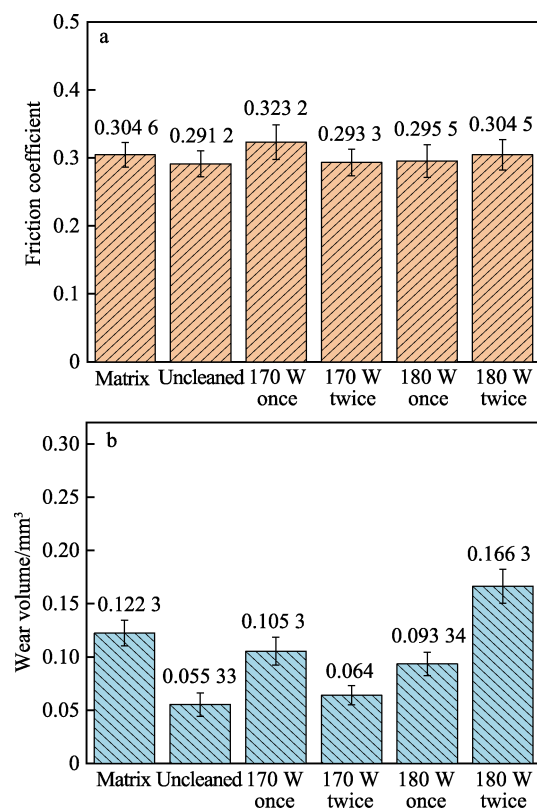


图 12 不同激光参数清洗下表面平均摩擦因数 (a) 和表面磨损量 (b)

Fig.12 Average friction coefficient (a) and surface wear amount (b) under different laser parameters

磨痕深度可以初步表现出材料的耐磨性,但要结合磨损量等因素综合判断。基体的磨痕深度为 36.4 μm ,未清洗为 29.0 μm ,170 W 扫描 1 次为 32.2 μm ,170 W 扫描 2 次为 29.6 μm ,180 W 扫描 1 次为 30.1 μm ,180 W 扫描 2 次为 40.4 μm ,200 W 扫描 1 次为 49.9 μm ,总体 (相对于基体) 呈先下降、再上升的趋势。

平均摩擦因数总体 (相对于基体) 呈现先上升、后下降、再上升的趋势。磨损量总体 (相对于基体) 呈现先下降、再上升的趋势。基体表面平均摩擦因数为 0.304 6,磨损量为 0.122 3 mm^3 ;未清洗表面平均

摩擦因数为 0.291 2,磨损量为 0.055 33 mm^3 。摩擦磨损性能主要与表面粗糙度^[29-30]和硬度^[31]有关。未清洗时粗糙度较低,但摩擦因数降幅不大、磨损量降幅较大的原因是,未清洗时表面的氧化膜硬度较大,可以抵抗一定的磨损。随着磨损时间的增加,氧化膜形成的碎片在摩擦过程中形成一定的阻力,使摩擦因数相对刚开始磨损时有一定的提高。170 W 扫描 1 次时,未完全去除氧化膜,表面粗糙度很大,平均摩擦因数上升到 0.323 2,而硬度相对较高,对于磨损有一定的抵抗,磨损量降低到 0.105 3 mm^3 。170 W 扫描 2 次与 180 W 扫描 1 次时,两者粗糙度与硬度相差不大,完全去除氧化膜且没有过度清洗,故两者平均摩擦因数相近 (0.293 3、0.295 5),但磨损量相差较大 (0.064、0.093 34 mm^3),其原因可能主要与硬度以及不同磨损机理的占比不同有关。黏着磨损较多时,黏附的磨屑更易于被堆积挤压,使部分已磨损区域变成未磨损去除区域,磨损量相对较少。随着能量的增加 (180 W 扫描 2 次、200 W),达到过度清洗状态时,表面重熔严重,粗糙度大幅提高,硬度降低幅度较大,平均摩擦因数以及磨损量大幅提高,耐磨性下降。在一定参数下进行激光清洗可以提高铝合金表面耐磨性,但过度清洗时耐磨性下降。

2.5 激光清洗后抗腐蚀性能分析

基体以及激光清洗后试样的 Tafel 极化曲线如图 13 所示,电化学参数见表 7。主要观察腐蚀电位 (E_{corr}) 和腐蚀电流密度 (J_{corr}) 的变化,以此来判断材料抗腐蚀性能^[32-33]。腐蚀电流密度越小,其抗腐蚀性越好;腐蚀电位越大,抗腐蚀性越好。

由图 13 和表 7 可以看出,在扫描 1 次的情况下,随着激光功率的不断提高,自腐蚀电位呈现先减小、后增大、再减小的趋势,自腐蚀电流密度呈现先增大、后减小的趋势。在扫描 2 次的情况下,随着激光功率的不断提高,自腐蚀电位呈现增大的趋势,自腐蚀电流密度呈现先增大、后减小的趋势。在相同功

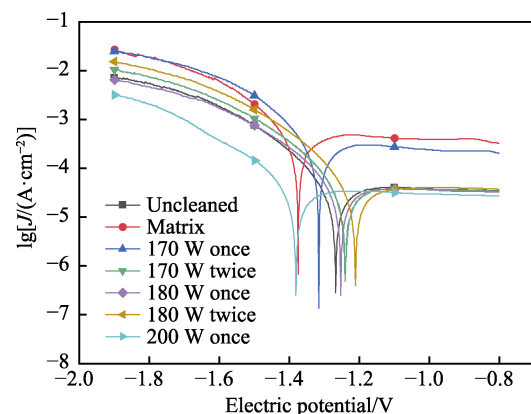


图 13 各参数下激光清洗前后的 Tafel 极化曲线
Fig.13 Tafel polarization curves of samples before and after laser cleaning under each parameter

表 7 各参数下激光清洗前后样品的电化学参数
Tab.7 Electrochemical parameters of samples
before and after laser cleaning

Power/W	E_{corr}/V	$J_{\text{corr}}/$ ($10^{-5}\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$)	$B_a/$ ($\text{mV}\cdot\text{dec}^{-1}$)	$B_c/$ ($\text{mV}\cdot\text{dec}^{-1}$)
Matrix	-1.375±0.06	36.89	2.434	7.362
Uncleaned	-1.268±0.06	3.427	1.850	7.919
170(once)	-1.316±0.06	22.98	2.145	7.896
170(twice)	-1.240±0.06	3.736	1.552	7.650
180(once)	-1.253±0.06	3.857	1.615	7.279
180(twice)	-1.211±0.06	3.607	1.678	7.964
200(once)	-1.382±0.06	3.838	1.637	6.367

率下,随着扫描次数的增加,自腐蚀电位均逐渐增大,自腐蚀电流密度均逐渐减少。基体的腐蚀电位为-1.375 V,腐蚀电流密度为 $36.89\times 10^{-5}\text{A}/\text{cm}^2$ 。未清洗的铝合金腐蚀电位为-1.268 V,腐蚀电流密度为 $3.427\times 10^{-5}\text{A}/\text{cm}^2$ 。随着清洗的进行,样品表面的阳极氧化膜被剥离,氧化膜的防护作用失效,基体直接接触电解液,腐蚀电位下降(-1.316 V),腐蚀电流密度升高($22.98\times 10^{-5}\text{A}/\text{cm}^2$),抗腐蚀性能下降。在完全去除氧化膜时,样品表面所受到的能量不仅将表面的氧化膜去除还会对基体产生影响,在基体表面生成一层新的氧化膜,使得试样的抗腐蚀性能提高。抗腐蚀性能的好坏,不仅与氧化膜的厚度和质量有关,还与表面的粗糙度有关,表面越粗糙,抗腐蚀性能越差^[34-35]。由表 4、5 和图 7 中相应的氧元素含量和粗糙度可知,相对于 180 W 扫描 1 次的氧含量(9.05%)以及粗糙度(0.751 μm),170 W 扫描 2 次的氧含量(7.02%)较少,但粗糙度(0.716 4 μm)也相对较低,综合因素下,抗腐蚀性能相对提高(-1.253 V、 $3.857\times 10^{-5}\text{A}/\text{cm}^2$; -1.240 V、 $3.736\times 10^{-5}\text{A}/\text{cm}^2$)。180 W 扫描 2 次的氧含量(质量分数为 13.61%)更高,形成的氧化膜厚度也会相应提高,故抗腐蚀性能最好(-1.211 V、 $3.607\times 10^{-5}\text{A}/\text{cm}^2$)。200 W 扫描 1 次的氧含量(质量分数为 12.61%)相对 180 W 扫描 1 次有所提高,但粗糙度(1.024 6 μm)也同样提高,综合因素下,其抗腐蚀性能有所提高,但幅度不大(-1.382 V、 $3.838\times 10^{-5}\text{A}/\text{cm}^2$)。

激光清洗目的在于去除基体表面的阳极氧化层,失去阳极氧化膜,其抗腐蚀性能出现下降这是正常现象,而且各参数的抗腐蚀性能皆优于基体本身。虽然在 180 W 扫描 2 次的参数下可以使铝合金的抗腐蚀性能有很大的提高,但是对于基体的损伤较大,且氧含量更高,违背了去除氧化膜的初衷,不适用于工程应用。因此,综合考虑,170 W 扫描 2 次的抗腐蚀性能相对更好。

综合前文的各种性能的对比,170 W 扫描 2 次的各方面性能相对比较突出,故可以得出激光清洗 7050 铝合金的相对最佳参数为 170 W 扫描 2 次。同时发现,低功率的多次扫描相对优于高功率的单次扫描,可以

为后续复合清洗提供参考。通过激光清洗后样品性能与基体的对比,发现合适激光参数清洗后表面性能相对基体更好,这表明了激光清洗可以完全去除阳极氧化膜,并提高基体性能,以及在去除氧化膜而未重新涂覆的工序等待期时表面有一定的防护能力。通过激光清洗后样品的性能与阳极氧化样品对比发现,阳极氧化样品的各方面性能相对更好,这也表明了对构件进行阳极氧化处理的必要性以及当阳极氧化膜破损时去除原有氧化膜进行重新阳极氧化的迫切性。

3 讨论

3.1 清洗阈值

传统确定清洗阈值方法是按照从刚开始去除氧化膜的功率到过度清洗的功率作为阈值范围,以其中达到完全清洗状态的功率作为最佳。其中,功率也可通过公式转换成能量密度。当进行非单次扫描清洗时,原本的清洗阈值不一定适用。例如,本研究中若按照传统确定清洗阈值的方法,清洗阈值为 150~200 W,最佳在 180 W 左右。在非单次扫描时,情况却有所不同。如在 180 W 多次扫描时,基体是被明显损伤的,并不符合原本的清洗阈值规律。因此,在确定清洗阈值时,不仅要考虑氧化膜的能量阈值,也需要考虑材料的阈值。从本研究中对各种性能的分析(图 4~13)中可以看出,在 170 W 时前 2 次扫描,并没有损伤材料,其各方面性能基本优于基体甚至优于最佳参数所得的结果。在 180 W 时,仅扫描 1 次的性能较好,多次扫描时损伤基体,且性能不如基体。因此,高斯激光清洗 7050 铝合金阳极氧化膜的清洗阈值在 150~180 W,扫描次数少于 3 次。

3.2 磨损机理分析

基体以及一定参数下激光清洗后试样的微观磨痕形貌如图 14 所示。可以看出,各试样的磨痕中均存在犁沟,且发现细小的磨粒嵌在表面,表明存在磨粒磨损。同时也均发现磨损产生的磨屑颗粒黏附在磨损表面,形成黏附层,材料转移和黏附层的存在表明存在黏着磨损。为了明确氧化磨损的存在,对试样磨痕进行能谱分析,如图 15 所示。从图 15 中可以看到各试样表面均有大量的氧元素,结合微观形貌可以明确看到氧化层的存在,表明存在氧化磨损。在氧化层、黏附层以及材料转移区域同样可以看到犁沟的存在,黏附层也含有大量的氧元素。这也表明了这 3 种磨损同时都在发生。通过图 10 的 3D 形貌以及图 12 的磨损量数据可以看出,黏着剥落的磨屑在磨痕中的堆积量有所不同,所堆积的位置也有所不同。综上所述,激光清洗前后试样的磨损机制均是磨粒磨损、黏着磨损以及氧化磨损的混合磨损,区别可能在于三者所占比重以及发生的时间和位置不同。

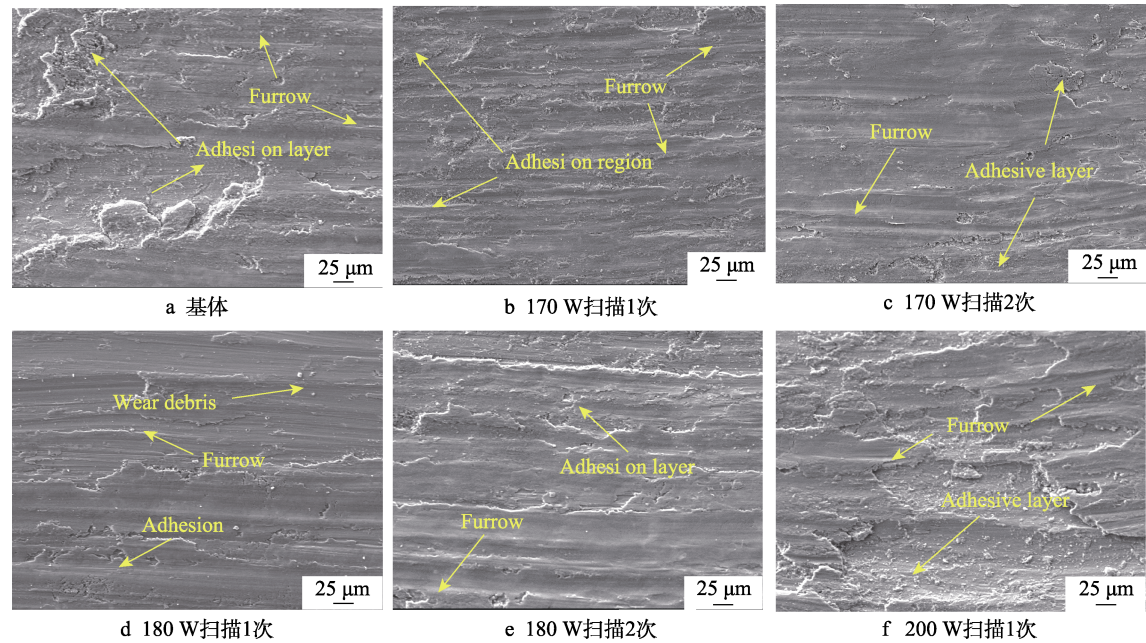


图 14 各参数下激光清洗前后的磨痕形貌

Fig.14 Wear morphology before and after laser cleaning under each parameter: a) matrix; b) 170 W scanning once; c) 170 W scanning twice; d) 180 W scanning once; e) 180 W scanning twice; f) 200 W scanning once

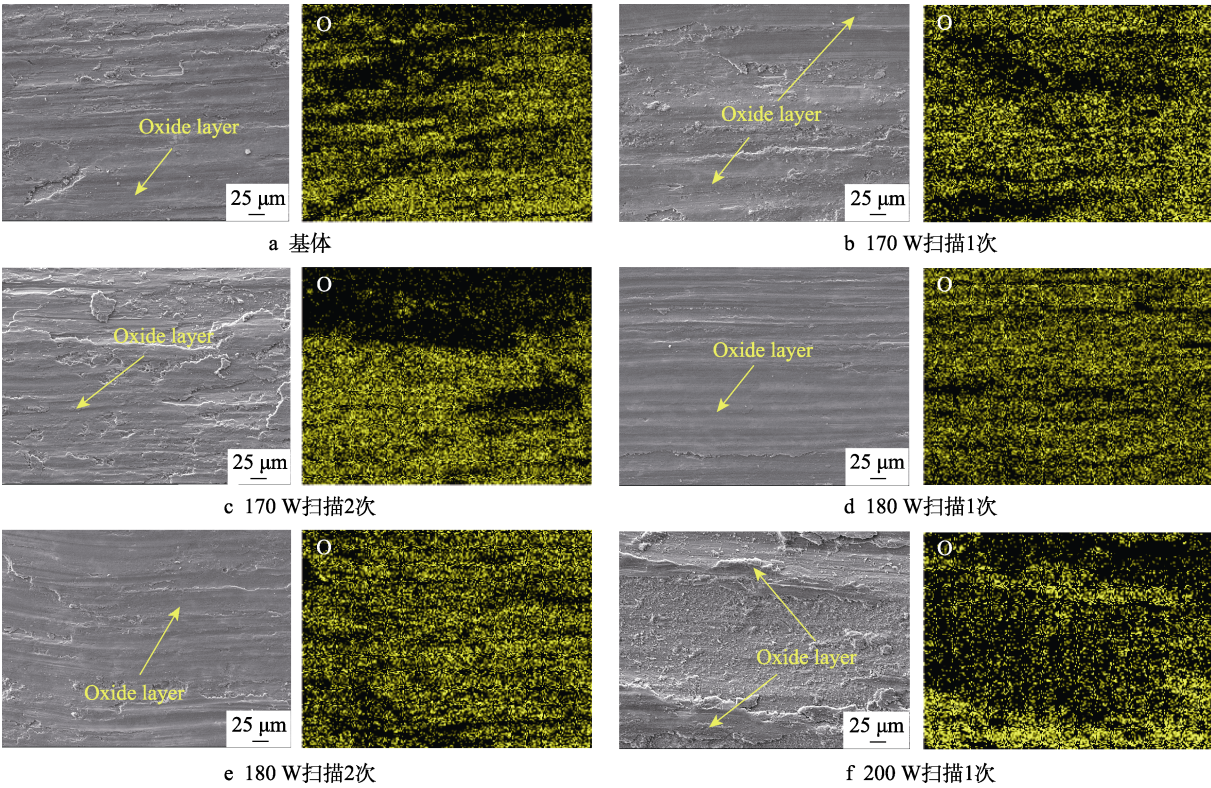


图 15 各参数下激光清洗前后的磨痕形貌及 O 元素分布；

Fig.15 Wear morphology and O distribution before and after laser cleaning: a) matrix; b) 170 W scanning once; c) 170 W scanning twice; d) 180 W scanning once; e) 180 W scanning twice; f) 200 W scanning once

3.3 激光清洗阳极氧化膜的机理

激光清洗的原理是当激光照射到需要清除的位置时，材料吸收激光能量，引起熔化、气化、振动等一系列物理化学变化^[36]，最终使得需要去除的部分如

氧化层、污染层等脱离基体表面，达到清除的目的。激光清洗的机理是多种机理的组合，主要包括烧蚀、振动、冲击等^[36]。激光清洗及其机理如图 16 所示。激光作用在氧化膜表面，当功率达到清洗阈值时，激光产生的热量达到氧化膜的熔点，甚至是沸点，对氧

化膜产生烧蚀^[37], 逐层去除氧化膜。同时因氧化膜和基体吸收大量的热量, 在其交界处因热膨胀而产生的应力, 克服两者之间相互结合的力^[36], 将氧化膜从基体上剥离。激光在气体中穿过时, 诱导产生的等离子体向外扩张, 产生一定的冲击波作用在表面, 从表面向内部传播时产生一定的弹性振动, 破坏了氧化膜与基体之间的连接, 使氧化膜与基体分离。

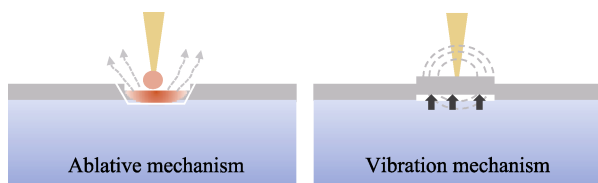


图 16 激光清洗机理

Fig.16 Laser cleaning mechanism

从图 4b1~b3 中可以看到, 氧化层表面有明显的烧蚀痕迹, 但烧蚀区域集中在孔所在位置, 大部分没有到达基体, 还可以看到氧化膜被去除的区域为圆形或者近似于圆形。这是光斑作用于氧化膜上, 将光斑覆盖区域的氧化膜剥离基体。从图 4c1 中发现, 残留的氧化膜形状为片状, 这是光斑未覆盖到的区域, 其边缘可以看到明显的光斑的形状。通过上述分析可以表明, 在激光清洗过程中发生了烧蚀现象, 但烧蚀机理产生的影响在氧化膜上表现相对较弱, 振动机理发挥大部分作用, 这可能与氧化膜厚度、激光器的类型以及激光功率有关。综合分析得出, 高斯脉冲激光清洗去除阳极氧化膜的机理是以振动机理为主, 烧蚀机理为辅。

4 结论

本文通过高斯脉冲激光对 7050 铝合金试样表面阳极氧化层进行激光清洗, 研究 7050 铝合金阳极氧化后表面激光清洗工艺及参数优化, 并对不同参数激光清洗后的铝合金表面的各项性能进行研究, 得出以下结论:

1) 高斯脉冲激光可以有效去除 7050 铝合金阳极氧化膜, 清洗阈值在 150~180 W, 扫描次数少于 3 次, 在激光功率为 170 W、扫描 2 次时清洗效果更好, 过度清洗对基体影响较大。

2) 在合适的激光参数下进行激光清洗对材料表面产生冲击, 表面形成硬化层, 硬度有所提升。表面所受能量达到损伤阈值会破坏产生的硬化层, 且发生激光退火, 基体硬度下降。激光清洗后铝合金表面的残余应力从压应力转变为拉应力, 主要与激光的高热量使镁元素析出有关。在工程应用中, 激光清洗后需要进行一定的表面处理, 消除残余应力的影响。激光清洗后因去除阳极氧化膜导致抗腐蚀性有所降低, 但优于基体。

3) 在合适的激光参数下进行激光清洗可以提高耐磨性, 随着能量的增加达到过度清洗阈值时, 对材料影响较大, 耐磨性下降。激光清洗前后试样的磨损机制均是磨粒磨损、黏着磨损以及氧化磨损相互结合的混合磨损, 区别可能在于三者所占比重以及发生的时间和位置不同。高斯脉冲激光清洗 7050 铝合金阳极氧化膜的机理是以振动为主, 烧蚀为辅。

参考文献:

- [1] BEURA V K, SHARMA A, KARANTH Y, et al. Corrosion Behavior of 7050 and 7075 Aluminum Alloys Processed by Reactive Additive Manufacturing[J]. *Electrochimica Acta*, 2023, 470: 143357.
- [2] WANG M T, WANG L W, YANG W D, et al. Study on the Roles of Bisulfite in the Stress Corrosion Cracking of 7050-T7451 Aluminum Alloy in the Thin Electrolyte Layer Environment[J]. *Corrosion Science*, 2023, 215: 111030.
- [3] JIA D S, HE T, SONG M, et al. Effects of Equal Channel Angular Pressing and Further Cold Upsetting Process to the Kinetics of Precipitation during Aging of 7050 Aluminum Alloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 26: 5126-5140.
- [4] SHIH T S, CHIU Y W. Corrosion Resistance and High-Cycle Fatigue Strength of Anodized/Sealed AA7050 and AA7075 Alloys[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 351: 997-1003.
- [5] YUE T M, YAN L J, CHAN C P. Stress Corrosion Cracking Behavior of Nd: YAG Laser-Treated Aluminum Alloy 7075[J]. *Applied Surface Science*, 2006, 252(14): 5026-5034.
- [6] CARVALHO A L M, RENAUDIN L B, ZARA A J, et al. Microstructure Analysis of 7050 Aluminum Alloy Processed by Multistage Aging Treatments[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 907: 164400.
- [7] DAI H F, XU G F, LI Y, et al. Effects of Electropulsing Frequency on Mechanical Properties, Corrosion Behavior and Microstructure of a Creep-Aged 7050 Aluminum Alloy[J]. *Materials Characterization*, 2022, 194: 112386.
- [8] GUO W, WANG H, HE G Z, et al. Comparison of Mechanical and Corrosion Properties of 7050 Aluminum Alloy after Different Laser Shock Peening[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 151: 108061.
- [9] HUANG Y S, SHIH T S, CHOU J H. Electrochemical Behavior of Anodized AA7075-T73 Alloys as Affected by the Matrix Structure[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 283: 249-257.
- [10] DONG H, SUN Z X, LI J Y, et al. Study on Removal of Aluminum Alloy Oxide Film by Continuous-Nanosecond Combined Laser with Different Pulse Delays[J]. *Optics Communications*, 2024, 552: 130112.
- [11] TIAN Z, LEI Z L, CHEN X, et al. Evaluation of Laser Cleaning for Defouling of Marine Biofilm Contamination

- on Aluminum Alloys[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 499: 144060.
- [12] TANG Q H, ZHOU D, WANG Y L, et al. Laser Cleaning of Sulfide Scale on Compressor Impeller Blade[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 355: 334-340.
- [13] JAFARI ESKANDARI M, KARIMI M, ARAGHCHI M, et al. Laser Cleaning Process of High-Pressure Turbine Blade: Characterization and Removal of Surface Contaminants[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2023, 470: 129885.
- [14] WANG W, JIANG Q Y, LIU W J, et al. Effect of Galvanometer Scanning Speed on the Cleaning Quality of Anodic Oxide Film on TC2 Titanium Alloy Surface in Laser Cleaning[J]. *Optik*, 2023, 287: 171055.
- [15] BI S Y, YANG S, LIU H B, et al. Removal Mechanism of Hydrides Fouling on High-Strength Steel in the Marine Environment during Nanosecond Pulsed Laser Cleaning[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 27: 2912-2921.
- [16] ZHU G D, WANG S R, ZHANG M Y, et al. Application of Laser Cleaning in Postwelding Treatment of Aluminum Alloy[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(34): 10967-10972.
- [17] WANG W, LI X J, LIU W J, et al. Experimental Study on Hydrophobic Properties and Corrosivity of Laser Cleaned 7075 Aluminum Alloy Anodized Film Surface[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 166: 109615.
- [18] 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.
- [19] HE Z R, SHEN Y Z, XIONG W B, et al. Uncovering the Roles of Laser Action Modes in Surface Mechanical Properties of 2024 Aluminum Alloy[J]. *Applied Surface Science*, 2023, 613: 156032.
- [20] ZHANG F D, LIU H, SUEBKA C, et al. Corrosion Behaviour of Laser-Cleaned AA7024 Aluminium Alloy[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 435: 452-461.
- [21] 李庆. 激光除漆对铝合金飞机蒙皮基体微观组织演变与磨损特性影响[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2024.
- LI Q. Effect of Laser Paint Removal on Microstructure Evolution and Wear Characteristics of Aluminum Alloy Aircraft Skin Matrix[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2024.
- [22] 李强, 赵子铭, 刘伟军, 等. 激光除漆对铝合金基材表面质量的影响[J]. *表面技术*, 2024, 53(3): 200-209.
- LI Q, ZHAO Z M, LIU W J, et al. Effect of Laser Paint Removal on Surface Quality of Aluminum Alloy Substrate[J]. *Surface Technology*, 2024, 53(3): 200-209.
- [23] SONG Y H, ZHANG T F, FAN W J, et al. Effect of the Overlap Ratio on Surface Properties of 7B04 Aluminum Alloy for Aviation during Laser Derusting[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 20: 1495-1511.
- [24] ZHU G D, WANG S R, CHENG W, et al. Investigation on the Surface Properties of 5A12 Aluminum Alloy after Nd: YAG Laser Cleaning[J]. *Coatings*, 2019, 9(9): 578.
- [25] WANG W, SHEN J, LIU W J, et al. Effect of Laser Energy Density on Surface Physical Characteristics and Corrosion Resistance of 7075 Aluminum Alloy in Laser Cleaning[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 148: 107742.
- [26] 黄旭东, 王涛, 胡少武, 等. 基于正交试验和响应面法的激光抛光参数优化[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(11): 1114004.
- HUANG X D, WANG T, HU S W, et al. Parameter Optimization of Laser Polishing Based on Orthogonal Experiment and Response Surface Method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(11): 1114004.
- [27] NIE J H, ZHANG H, ZHANG D H, et al. Removal Mechanism of Laser Cleaning for Inorganic Thermal Control Coatings on Aluminum Alloys[J]. *Applied Surface Science*, 2023, 633: 157578.
- [28] PICCININNI A, PALUMBO G. Numerical Modelling of the Annealing Determined by Short-Term Laser Treatment Using a Physical Simulation-Based Approach[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2023, 45: 210-224.
- [29] WANG P, LIANG H, JIANG L, et al. Effect of Nanoscale Surface Roughness on Sliding Friction and Wear in Mixed Lubrication[J]. *Wear*, 2023, 530: 204995.
- [30] MA Q, XU X, YAN C P, et al. Extremely Low Friction and Wear Enabled by 4-Dodecylphenol Functionalized Magnesium Oxide Nanolubricant for Steel Tribopairs[J]. *Wear*, 2024, 538: 205213.
- [31] LIU M J, XU L J, ZHU C H, et al. Research Progress of High Entropy Alloy: Surface Treatment Improves Friction and Wear Properties[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 28: 752-773.
- [32] CHEN Y Y, DUVAL T, HUNG U D, et al. Microstructure and Electrochemical Properties of High Entropy Alloys—A Comparison with Type-304 Stainless Steel[J]. *Corrosion Science*, 2005, 47(9): 2257-2279.
- [33] DA SILVA F S, CINCA N, DOSTA S, et al. Corrosion Behavior of WC-Co Coatings Deposited by Cold Gas Spray Onto AA 7075-T6[J]. *Corrosion Science*, 2018, 136: 231-243.
- [34] SEO M J, SHIM H S, KIM K M, et al. Influence of Surface Roughness on the Corrosion Behavior of Alloy 690TT in PWR Primary Water[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2014, 280: 62-68.
- [35] YOO B, SHIN K R, HWANG D Y, et al. Effect of Surface Roughness on Leakage Current and Corrosion Resistance of Oxide Layer on AZ91 Mg Alloy Prepared by Plasma Electrolytic Oxidation[J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(22): 6667-6672.
- [36] ZHU G D, XU Z H, JIN Y, et al. Mechanism and Application of Laser Cleaning: A Review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 157: 107130.
- [37] ZHANG D H, XU J, LI Z C, et al. Removal Mechanism of Blue Paint on Aluminum Alloy Substrate during Surface Cleaning Using Nanosecond Pulsed Laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 149: 107882.