

航空铝合金表面涂层无损激光清洗研究

王 凯¹, 李多生^{1*}, 叶 寅¹, 罗军明¹, 龙思海², 官冀原¹, 谢非彤¹, 姜苏航¹, 王明娣³, 吴 宁²

(1. 南昌航空大学材料科学与工程学院, 江西南昌 330063;

2. 江西洪都航空工业集团有限责任公司, 江西南昌 330063;

3. 苏州大学机电学院, 江苏苏州 215000)

摘要: 激光清洗以绿色、安全、便于控制等优点, 在航空航天、电子、交通等领域有着重要的应用价值。采用纳秒脉冲激光清洗航空 2A12 铝合金表面 TB06-9 涂层, 研发了一种新型的两步法无损激光清洗工艺。运用扫描电子显微镜、能谱仪, 超景深三维显微镜和万能电子实验机等分析激光清洗涂层。结果表明, 第一步采用单次激光清洗, 随激光功率的增加, 试样表面涂层逐渐减少裸露出氧化层及基材。激光功率为 40 W 时氧化层保留完好, 功率为 45 W 时氧化层开始出现损伤, 随着功率的增加, 损伤逐渐增多。最终确定第一步优化参数为激光的频率为 20 kHz, 功率为 40 W, 扫描速度为 1 040 mm/s, 线间距为 0.052 mm。第二步在第一步的基础上进行多次清洗, 获得的优化参数为激光频率为 1 000 kHz, 功率为 80 W, 扫描速度为 690 mm/s, 线间距为 0.034 5 mm。两步法激光清洗试样的表面与原始试样表面形貌相似, 表面显微硬度及抗拉强度基本保持一致, 较好地保留了材料的原有力学性能。

关键词: 激光除漆; 铝合金; 涂层; 氧化层; 无损

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210936

Study on nondestructive laser cleaning of aviation aluminum alloy surface coating

Wang Kai¹, Li Duosheng^{1*}, Ye Yin¹, Luo Junming¹, Long Sihai², Guan Jiyuan¹,
Xie Feitong¹, Jiang Suhang¹, Wang Mingdi³, Wu Ning²

(1. School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. Jiangxi Hongdu Aviation Industry Co., Ltd. Nanchang 330063, China;

3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou 215000, China)

Abstract: The laser cleaning has some advantages as non-pollution, safety and controllability, which has significant applications in aerospace, electronic field and transportation. The nanosecond pulsed laser was used to clean TB06-9 coating on the surface of aviation 2A12 aluminum alloy. A novel two-step nondestructive laser cleaning process was developed. Scanning electron microscope, energy dispersive spectrometer, ultra depth of field three-dimensional microscope and universal electronic testing machine are applied to investigate laser cleaning coating. The results show that, the first step is to use a laser cleaning, with the increase of the power, the

收稿日期:2021-12-06; 修订日期:2022-02-12

基金项目:国家自然科学基金(51562027, 12062016); 江西省重点研发计划重点项目(20201BBE51001); 江西省省级优势科技创新重点团队项目(20181BCB24007); 江苏省重点研发计划(产业前瞻与关键核心技术)(BE2021055)

作者简介:王凯,男,硕士生,主要从事激光加工以及数值分析方面的研究。

通讯作者:李多生,教授,博士,主要从事激光加工及表面与界面工程、金属材料、数值模拟研究等工作。

coating on the sample surface decreases gradually, and the oxide layer and substrate are exposed. When the laser power is 40 W, the oxide layer is well preserved. When the laser power is increased to 45 W, the oxide layer begins to be damaged, with increase of the laser power, the damage of oxide layer gradually increased. The optimization parameters of the first step are the laser frequency of 20 kHz, power of 40 W, scanning speed of 1 040 mm/s and line spacing of 0.052 mm respectively. The second step is to carry out multiple cleaning based on the first step. The second parameters are laser frequency of 1000 kHz, power of 80 W, scanning speed of 690 mm/s, line spacing of 0.034 5 mm respectively. The surface morphology of sample by two-step laser cleaning samples is similar to that of the original samples, and the surface microhardness and tensile strength of the samples remain consistent. The mechanical properties of the material are well maintained.

Key words: laser coating removing; aluminum alloy; coating; oxide layer; nondestructive

0 引言

铝合金由于密度小,强度高,易加工,耐腐蚀性好等优点,在航空领域都有着广泛的应用。目前,我国飞行器在脱漆的过程中主要采用化学脱漆或机械打磨的方式,化学脱漆具有成本高、效率低,对环境的污染大的缺点,机械打磨耗时耗力,难以控制打磨精度。

激光除漆是利用激光与涂层之间的相互作用克服涂层与基材之间的附着力从而去除涂层的技术。激光除漆的主要机理包括振动效应和烧蚀效应。振动效应是指因为涂层及基材的热膨胀系数的不同,在激光的照射下材料迅速升温膨胀,致使涂层与基材产生巨大的应力差从而达到去除涂层的目的。烧蚀作用是因为当激光照射涂层致使材料在吸收能量后温度急剧上升,当温度上升到材料的气化温度时,材料会气化从而脱离试样表面。近年来,激光技术不断蓬勃发展,激光加工技术在激光强化、激光熔覆、激光切割、激光清洗等方向得到了广泛的研究^[1-5],激光清洗作为激光加工的一个重要的应用,以绿色、精密、便于控制等突出特点,在船舶、航空航天、车辆等领域有着重要的应用价值^[6-14]。李鑫炎等^[15]研究了激光扫描速度对 Q345 钢表面锈蚀层的影响,研究表明激光清洗后材料表面的电化学腐蚀性能有所提高。陈国星等^[16]研究了激光功率对不锈钢表面清洗效果的影响,结果表明多次清洗可以使清洗效果达到最佳。高辽远等^[17]进行了铝合金表面漆层的数值模拟及实验研究,表明激光能量密度为 25 J/cm²,搭接率为 50% 的工艺参数下能够获得良好的符合涂装工艺表面的要求。王德良等^[18]通过对激光清洗过程中颗粒成分进行分析,研究了激光清洗的机理,为激光清

洗的研究提供了新的思路和方法。Guodong Zhu 等^[10]人研究了激光清洗后飞机蒙皮的腐蚀磨损性能,证明激光清洗不会降低飞机蒙皮的硬度及耐腐蚀性。Cong Zhou 等^[19]的研究表面激光清洗预处理能很好地提高焊接的质量。Tianyi Shi 等^[20]的研究表面激光清洗工艺可快速清洗铝合金表面的氧化层,有效地改善铝合金的拉伸性能。Guangxing Zhang 等^[21]研究了激光清洗对铝合金表面粗糙度的影响。方世超等^[22]研究了激光清洗在船舶领域的应用,对比了激光清洗与手工打磨两种清洗方式对材料性能的影响,结果表明激光清洗后的材料性能优于手工打磨后材料性能。

国内外不少学者在激光清洗的过程、应用、机理、效果等方面做了大量的研究^[23-28],但是在工业生产中通常会对铝合金包铝、阳极氧化处理,使得金属表面生成一层很薄的氧化膜,该氧化层对基材产生明显的保护效果^[29],然而在目前的研究中,如何在激光清洗涂层的同时保证氧化层完整性的研究较少。文中采用纳秒脉冲激光器对航空合金表面涂层进行了系统性的研究,分析了不同激光功率对激光清洗效果的影响,探究了一种无损的激光清洗方法,并对激光清洗后试样的力学性能进行了研究。

1 实验方法

1.1 实验材料

2A12 铝合金作为一种高强度铝合金,常被作为飞机重要部件的材料,在现今的工业加工中,常利用硫酸将其阳极氧化后喷涂涂层的方式提高耐蚀性、耐磨性。此次实验的试样如图 1 所示,其中图 1(a)为硫酸阳极氧化后得到氧化层的表面形貌,图 1(b)为试样

经 TB06-9 涂层喷涂后的表面形貌, 图 1(c) 为试样的截面图。试样基材为 2A12 铝合金, 然后进行硫酸阳极氧化、喷涂 TB06-9 涂层处理, 最终得到如图 1(c) 所

示的结构, 其中最上层为 30 μm 厚的锌黄色涂层, 中间层为 3~5 μm 厚的氧化层。涂层及氧化层的主要元素原子数占比如表 1 所示。

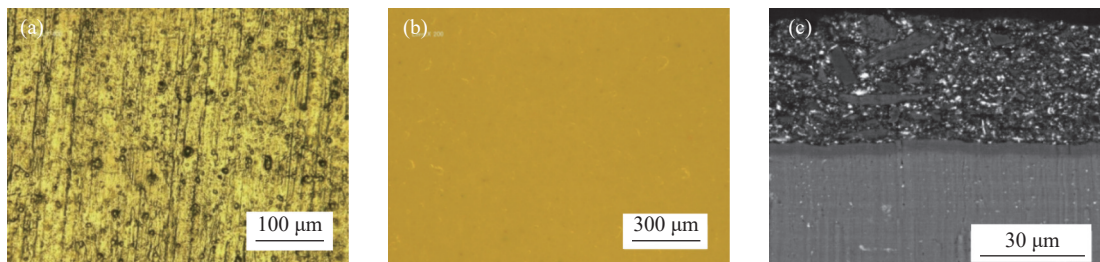


图 1 (a) 样品氧化层的表面形貌图; (b) 样品涂层的表面形貌图; (c) 截面图

Fig.1 (a) Surface topography drawing of oxide layer of the sample; (b) Surface topography drawing of coating of the sample; (c) Cross section

表 1 涂层及氧化层的主要元素原子数占比

Tab.1 Atomic fraction of the major elements in coating and oxide layer

Element	O	C	Si	Ti	Mg	Al	S
TB06-9	37.81%	49.88%	5.9%	4.93%	1.47%	-	-
Oxide layer	67.07%	-	-	-	-	30.79%	2.14%

1.2 清洗方法

采用 YDFLP 系列 100 W 脉冲激光器进行激光清洗实验, 该激光器采用高斯光源, 波长为 1064 nm, 焦点处的光斑直径为 130 μm。采用 X/Y 轴双振镜控制系统对光斑运动路径进行控制, 实验平台及激光清洗系统示意图如图 2 所示。

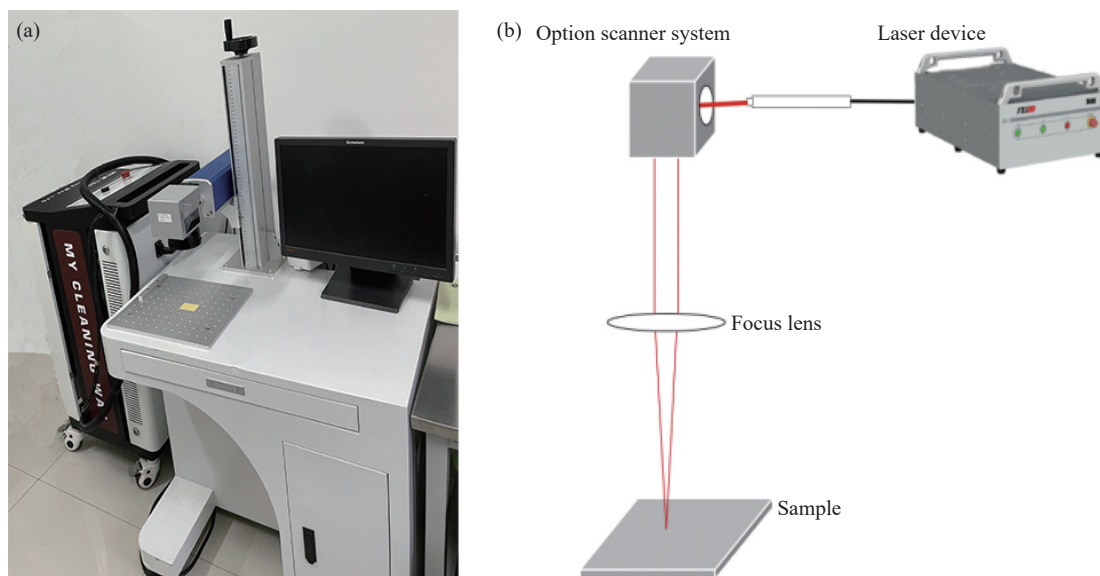


图 2 (a) 实验平台和 (b) 激光清洗系统示意图

Fig.2 (a) Test platform and (b) Schematic diagram of laser cleaning system

激光清洗路径如图 3 所示, 采用“之”字形的扫描方式, 其中图 3(a) 为第一步激光清洗的扫描路径示意图, 图 3(b) 为在第一步清洗的基础上进行第二步激光清洗的扫描路径示意图, 图 3 中圆形区域为光斑位置, 箭头方向为激光运行方向。激光清洗时设定清洗

区域恒为 14 mm×14 mm。

激光单光斑的平均能量密度^[30]为:

$$E = \frac{P}{fs} \quad (1)$$

式中: P 为激光平均功率; f 为激光的频率; s 为光斑的

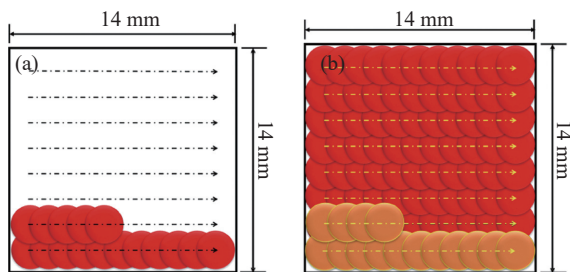


图 3 (a) 第一步激光清洗路径示意图; (b) 第二步激光清洗路径示意图

Fig.3 (a) Schematic diagram of the first step laser cleaning path; (b) Schematic diagram of the second step laser cleaning path

面积。激光在扫描过程中的搭接率包含光斑搭接率和路径重叠率,其示意图如图 4 所示。光斑搭接率如图 4(a) 所示,描述的是同一条直线路径上,前一个光斑与后一个光斑之间的搭接情况,与激光扫描速度、频率、光斑直径有关,其计算关系^[30]为:

$$\eta = \frac{a}{b} = \left(1 - \frac{v}{fd}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式中: v 为激光的扫描速度; d 为光斑直径。路径重叠率如图 4(b) 所示,描述的是两条激光轨道的重叠情况,与激光线间距、光斑直径有关,其计算关系^[30]为:

$$\xi = \frac{c}{d} = \left(1 - \frac{D}{d}\right) \times 100\% \quad (3)$$

式中: D 为激光路径线间距。

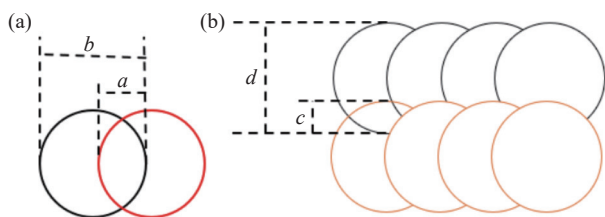


图 4 (a) 光斑搭接率示意图; (b) 路径重叠率示意图

Fig.4 (a) Schematic diagram of spot overlap ratio; (b) Schematic diagram of path overlap ratio

由公式 (1) 与公式 (2) 可知,激光的脉冲频率是一个重要参数,与单光斑的能量密度成反比,与光斑搭接率成正比。因为在此次研究中,氧化膜的厚度仅有 $4 \mu\text{m}$ 左右,单次清洗容易对氧化膜造成损伤,同时涂层也难以清洗干净,所以文中设计了一种两步法激光清洗工艺对试样进行激光清洗。第一步是在低频率

的条件下,利用高光斑能量对试样进行初步清洗去除大部分涂层,第二步是在高频率的条件下,利用低光斑能量密度对试样进行多次清洗减少对氧化膜的损伤。

2 分析与讨论

2.1 第一步激光清洗

首先以激光功率为唯一变量对试样进行第一步激光清洗。开展了多组实验研究,发现激光频率为 20 kHz , 光斑搭接率为 60% 时,能够达到较好的清洗效果,此时根据公式 (2) 和公式 (3) 分别计算得出扫描速度为 1040 mm/s , 线间距为 0.052 mm 。

图 5 为在不同激光功率清洗后试样表面形貌图。从图 5(a) 中可以看出,当激光功率为 30 W 时,此时激光能量不会对试样造成明显的影响,表面仅出现微小的凹坑,氧化层仍旧全部被涂层覆盖。从图 5(b) 与图 5(c) 可以看出,当激光功率为 35 W 和 40 W 时,试样表面部分涂层被清洗去除裸露出氧化层。对比图 5(b) 与图 5(c) 激光清洗后的试样表面可知,当激光功率为 40 W , 试样表面涂层有明显的减少,清洗的效果更好。从图 5(a)~图 5(c) 可以看出,当激光功率小于等于 40 W 时,试样表面均未清洗干净,同时也未发现氧化层损伤区域,随着激光功率的提高,激光清洗涂层的效果逐渐变好。从图 5(d)~图 5(f) 中可以看出,当激光功率增大到 45 W 时,由于激光的能量密度较大,试样表面涂层几乎被清洗去除干净,但是可以看到部分区域氧化层被高强度激光束清洗去除裸露出基材,同时在裸露出的基材区域能够明显地看出金属重熔的迹象,这就说明基材在清洗过程中的瞬间温度已经达到基材的熔点,材料经历了融化后再凝固的过程。对比图 5(d)~图 5(f) 可以看出,随着激光功率的逐渐增加,试样表面涂层逐渐减少,但是氧化膜的损伤也随着激光功率的增加而增多。

图 6 为激光清洗后试样表面元素的含量图。由图可以看出,随着激光功率的增加, TB06-9 涂层的特有元素 (碳、钛、硅、镁) 含量逐渐减少,氧化层及基材特有的铝元素含量逐渐增加,这说明随着激光功率的增大,试样表面的涂层逐渐减少,裸露的氧化层或基材逐渐增多。硫元素是氧化层特有的元素,可以反

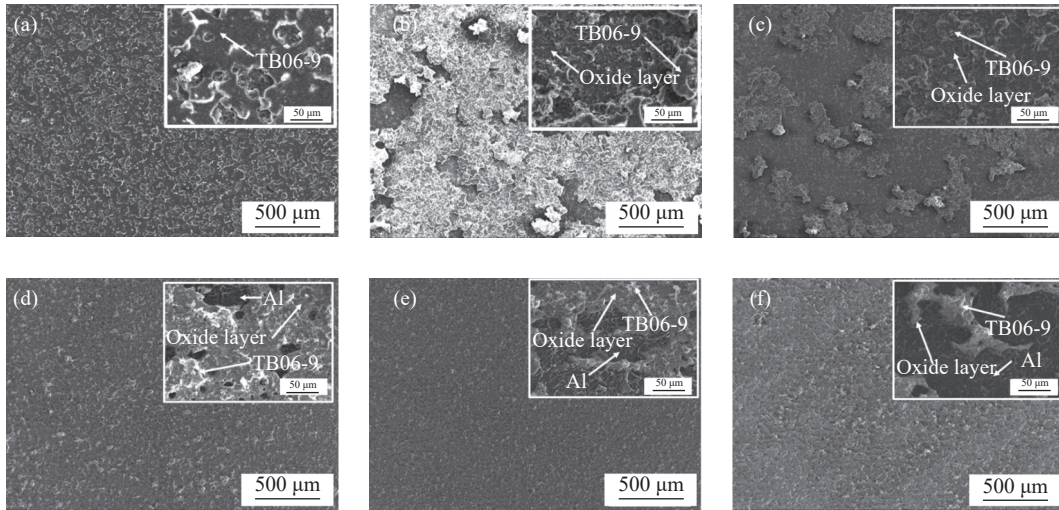


图 5 不同激光功率清洗后试样的扫描电镜图。(a) 30 W; (b) 35 W; (c) 40 W; (d) 45 W; (e) 50 W; (f) 60 W

Fig.5 SEM of samples cleaned at different laser powers. (a) 30 W; (b) 35 W; (c) 40 W; (d) 45 W; (e) 50 W; (f) 60 W

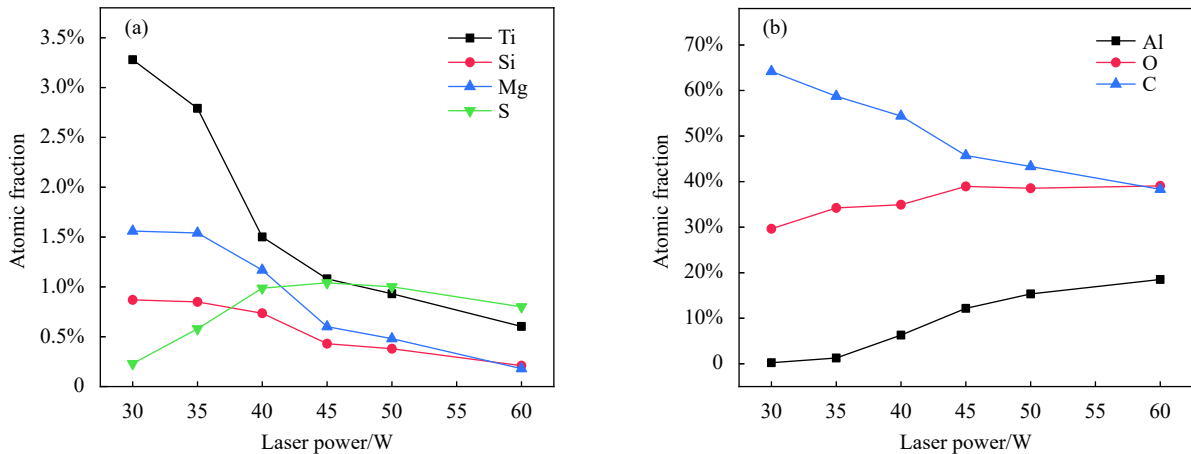


图 6 (a) 激光清洗后试样钛、硅、镁、硫元素的含量; (b) 激光清洗后试样铝、氧、碳元素的含量

Fig.6 (a) The contents of Ti, Si, Mg and S in the sample after laser cleaning; (b) The contents of Al, O and C in the sample after laser cleaning

应激光清洗效率,从图 6(a)中可以看出,硫元素含量呈先增加后降低的趋势,这是因为当激光功率较低时,脱落涂层的面积较小,随着激光功率的增加,越来越多的涂层被清洗去除从而裸露氧化层。当激光功率达到 50 W 时,氧化层受到严重破坏裸露出基材,硫含量出现明显的降低。

激光功率小于 35 W 时,试样表面仅留下微小的凹坑,试样表面依旧有大量的涂层残留;激光功率大于 45 W 时,试样氧化层出现了明显的损伤;当激光功率为 40 W 时,试样表面有部分涂层未被清洗,观察试样表面氧化层未出现损伤。最终确定激光的频率为 20 kHz,功率为 40 W,光斑搭接率为 60% (1040 mm/s, 0.052 mm) 时,可以保证在不损伤氧化层的前提下激

光清洗的效果较好,并将此工艺标定为 G1。

2.2 第二步激光清洗

涂层有一定的清洗阈值 (T_1),氧化层同样有一定的清洗阈值 (Y_1),由于涂层与氧化层的颜色、对激光的吸收率、密度、熔点、分子间结合力等参数存在较大的差距,所以 T_1 与 Y_1 必要存在一定的差值。图 7 为在激光频率为 1000 kHz,功率为 30 W,线速度为 100 mm/s 的相同参数下激光对涂层及氧化层进行单轨道清洗的效果图,其中图 7(a) 为激光照射氧化层后的效果图,可以看出在该工艺下氧化层表面未受影响。图 7(b) 为激光照射涂层后的效果图,图 7(c) 为图 7(b) 中 AB 两点之间利用 VHX-600E 型超景深三维显微镜测得的表面轮廓图,可以看出,在

同样的参数下涂层出现了宽度为 107 μm, 深度为 26.2 μm 的凹痕, 由此可推断出 $T_1 < Y_1$, 即存在能够

有效清洗涂层并且不会对氧化层造成损伤的工艺参数。

以第一步工艺参数 G1 为前提, 探究第二步激光的清洗工艺参数。根据公式 (1) 可知, 激光单脉冲能量密度随着激光频率的增加而减少, 为避免单脉冲能量过高对氧化层造成的损伤, 第二步清洗将频率设定为激光器的最大值 1000 kHz 进行多次清洗实验。开展了多组实验, 发现当扫描速度为 690 mm/s, 线间距为 0.0345 mm 能够达到较好的清洗效果, 通过改变激光功率、控制激光清洗次数探究最佳的清洗工艺。表 2 所示为不同激光功率下激光清洗的效果, 图 8 为不同激光功率下试样的表面形貌图。从表 2、图 8 可以看出, 当激光功率为 40 W 时, 经过 10 次的激光清

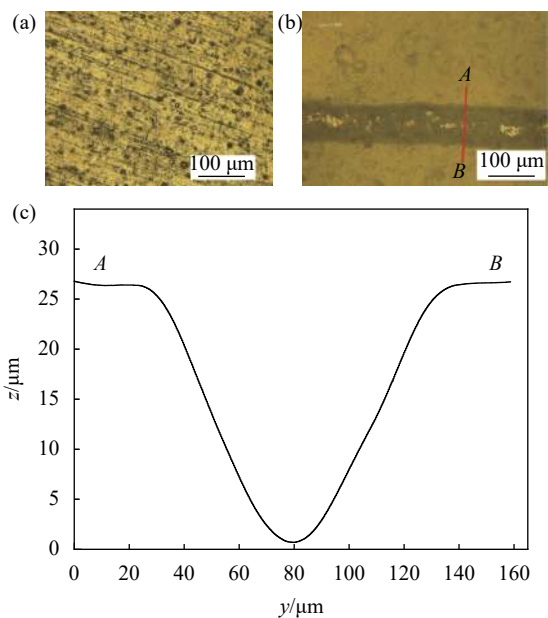


图 7 相同工艺参数下激光对 (a) 氧化层及 (b) 涂层的影响; (c) 涂层上 AB 两点间的表面轮廓图

Fig.7 Effect of laser on (a) oxide layer and (b) coating under the same process parameters; (c) Profile between two points AB in (b)

表 2 不同激光功率下激光清洗效果

Tab.2 Laser cleaning effect under different laser

powers				
Laser power/W	40	60	80	100
Number of cleaning	10	5	2	-
Effect	Dirty	Clean	Clean	Fire

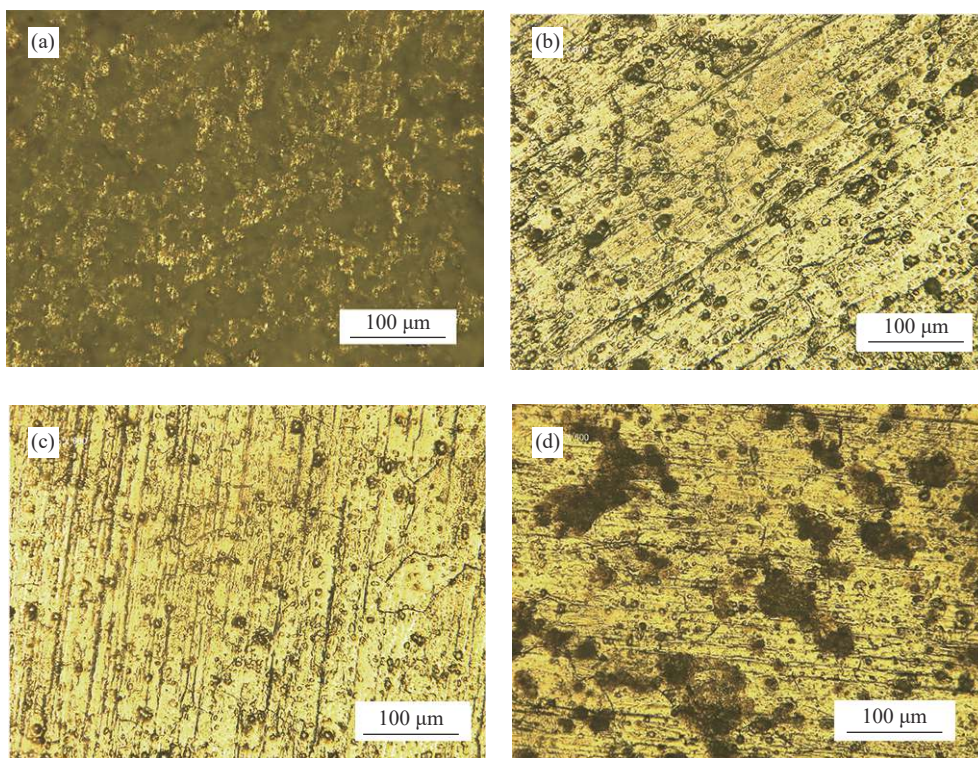


图 8 激光清洗后试样的表面形貌图。(a) 40 W; (b) 60 W; (c) 80 W; (d) 100 W

Fig.8 Surface topography of the sample after laser cleaning. (a) 40 W; (b) 60 W; (c) 80 W; (d) 100 W

洗仍未将涂层清洗干净,当激光功率为 60 W、80 W 时,激光清洗后表面未观察到涂层残留,可以看到试样表面经硫酸阳极氧化后的黑色斑点及条纹。激光功率为 60 W 时,需要激光清洗 5 次才能将涂层清洗干净,激光功率为 80 W 时,只需清洗 2 次。当激光功率为 100 W 时,在激光清洗的过程中涂层受热燃烧,致使试样表面的温度急剧升高,对试样造成损伤。最终得出,当扫描速度为 690 mm/s,线间距为 0.0345 mm,激光功率为 80 W 时,可以保证在经过多次清洗后,能够有效地去除表面涂层并且不会损伤基材,将该参数标定为 T1。

以第一次清洗采用工艺 G1,第二次及之后采用工艺 T1 进行清洗。在每一次清洗后利用高精度电子天平(精度 0.0001 g)测量试样的质量,计算出每次清洗前后试样的质量差值,如图 9 所示。从图 9 中可以看出,第 4 次清洗仅仅去除 0.0001 g 左右的物质,同时在激光清洗过程中未观察到音爆和高亮现象,即可以认为未能再清洗掉涂层^[24],清洗去除涂层的总质量为 0.0091 g。经过 4 次激光清洗后,用酒精对试样进行擦拭后得到如图 8(c) 所示的试样表面,与图 1(a) 氧化层表面对比可知,试样表面形貌相似,氧化层保留完好。清洗后试样表面的扫描电镜图及能谱图如图 10 所示,结合表 1 可知,激光清洗后试样表面的主要元素及其占比与氧化层相近,并且没有发现涂层特有的元素(碳、钛、硅、镁)存在,即表明涂层已被完全清洗干净。

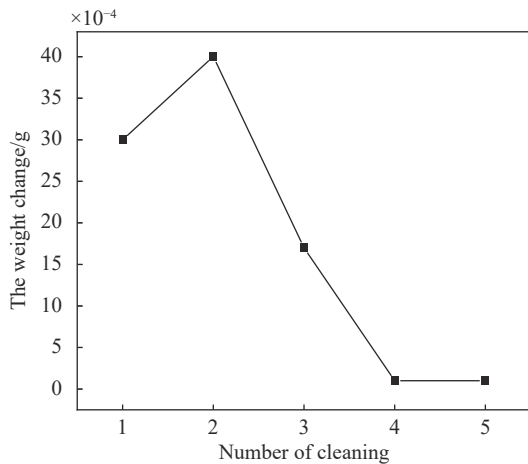


图 9 同一试样在每次清洗前后的质量差值

Fig.9 Weight change of the same sample before and after each cleaning

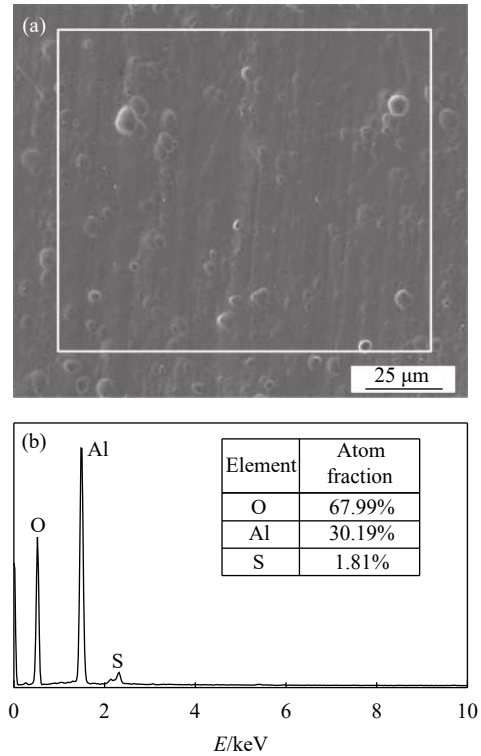


图 10 激光清洗后试样的 SEM 图 (a) 及试样的 EDS 能谱分析图 (b)

Fig.10 (a) SEM diagram and (b) EDS diagram of the sample after laser cleaning

2.3 力学性能分析

试样清洗后的力学性能是判断清洗效果的重要参数之一,对试样的显微硬度、拉伸性能进行研究。利用维氏硬度计(精度 0.1 HV)和万能实验机将清洗后试样与未进行喷涂涂层的原始试样进行对比研究。图 11(a) 为激光清洗后试样与原始试样的表面显微硬度,在激光清洗后,试样与原始氧化层表面以试样中心位置为 5 号点取点进行测试,计算得出氧化层的显微硬度平均为 44.84 HV,激光清洗后试样的显微硬度平均为 45.14 HV,硬度值为原始试样的 100.66%;图 11(b) 为激光清洗后试样与原始试样通过拉伸实验得到的应力应变曲线,可以看出原始试样的抗拉强度为 414.291 MPa,经激光清洗后试样的抗拉强度为 413.957 MPa,试样的抗拉强度为原始试样的 99.92%。激光清洗后试样与原始试样的表面显微硬度、抗拉强度几乎保持不变,这是因为文中研究是采用纳秒激光对涂层进行清洗,激光作用的时间很短,高能脉冲光束的能量大部分被涂层所吸收,通过控制功率、搭接率等参数能够较为精确地控制激光清洗效果,同时采

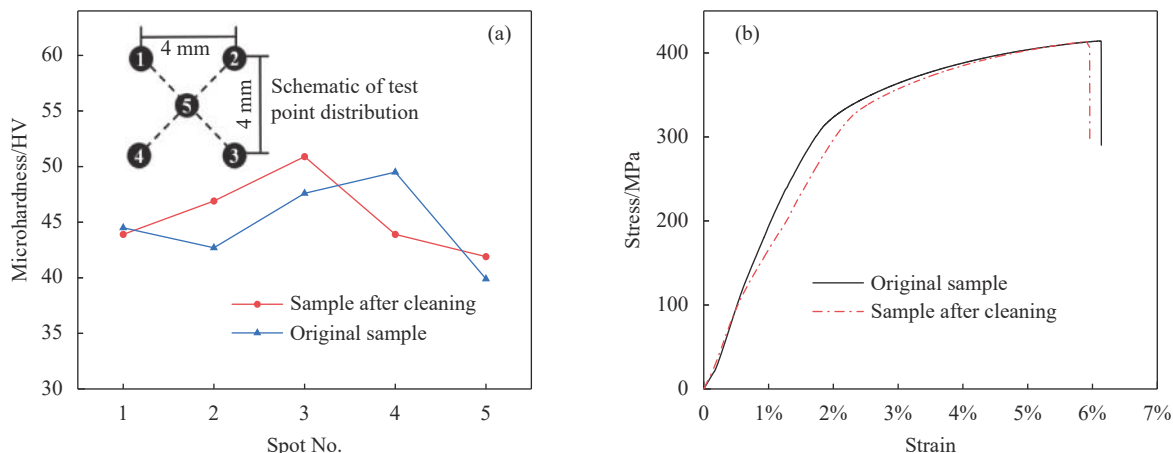


图 11 激光清洗后试样与原始试样的力学性能。(a) 显微硬度; (b) 应力应变曲线

Fig.11 Mechanical properties of sample after laser cleaning and original sample. (a) Microhardness; (b) Stress-strain curves

用两步法的激光清洗工艺能够在一定程度上减少激光热效应对基材的影响。结果表明该两步法激光清洗工艺实现了对基材的无损清洗,较好地保证了原性能不变。

3 结 论

文中研发了一种新型的纳秒激光清洗航空铝合金表面的涂层技术,并对激光清洗后试样的表面形貌、显微硬度、拉伸性能等力学性能进行研究,得出以下主要结论:

(1) 采用两步法对试样进行清洗,第一步清洗时采用较低的激光频率,在频率为 20 kHz,光斑搭接率为 60% (1040 mm/s, 0.052 mm),激光功率为 40 W 时,可以保障在不损伤氧化层的前提下激光的清洗效果较好。在第一步的基础上采用激光频率为 1000 kHz,扫描速度为 690 mm/s,线间距为 0.0345 mm,激光功率为 80 W 进行第二步清洗,可以保证在多次清洗后将涂层清洗干净并且不会对试样造成损伤。

(2) 在对涂层进行第一步激光清洗时,随着激光功率的增加,TB06-9 涂层的特有元素(碳、钛、硅、镁)第含量逐渐减少,氧化层及基材特有的铝元素含量逐渐增加,硫元素含量呈先增加后降低的趋势。

(3) 激光清洗后试样表面与氧化层表面形貌相似,主要元素相同,原子数占比相近,激光清洗后试样表面未发现涂层特有的元素存在,即表明涂层已经完全清洗干净。

(4) 激光清洗后试样的显微硬度提高了 0.67%,抗

拉强度减少了 0.08%,即激光清洗后试样仍能保持较好的显微硬度及抗拉强度等力学性能。

文中研究设计了一种新型的无损激光除漆技术,为激光清洗去除锈蚀、油脂、氧化层及涂层等提供了参考。

参考文献:

- [1] Hong Juan, Kuai Yuan, Cheng Kun, et al. Numerical simulation and experimental study of multi-pulse laser cladding of B doped nano-film [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(10): 20210023. (in Chinese)
- [2] Zhang Xingquan, Ji Kankan, Wang Huiting, et al. Numerical simulation of residual stresses induced by laser shock on the circumference surface of round rod [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(7): 0706004. (in Chinese)
- [3] Liu T, Min X, Zhang S, et al. Microstructures and mechanical properties of Ti-Al-V-Nb alloys with cluster formula manufactured by laser additive manufacturing [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2021, 31(10): 3012-3023.
- [4] Zeng Shoujin, Wu Qirui, He Jiachen, et al. Design and performance prediction of Voronoi porous structure by selective laser melting [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(5): 1059-1071. (in Chinese)
- [5] Hou Suxia, Luo Jijun, Xu Jun, et al. Laser cleaning technology application of military equipment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(z1): 625-628. (in Chinese)
- [6] Zhang Shuangyin, Lin Xin, Chen Jing, et al. Effect of solution temperature and cooling rate on microstructure and mechanical

- properties of laser solid forming Ti-6Al-4V alloy [J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(6): 498-501.
- [7] Kumar A, Biswas D J. Particulate size and shape effects in laser cleaning of heavy metal oxide loose contamination off clad surface [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 106: 286-293.
- [8] Zhang Ruonai, Wei Pengyu, Jiang Ze, et al. Research and application status of laser derusting technology in shipbuilding field [J]. *Laser Journal*, 2021, 42(5): 1-9. (in Chinese)
- [9] Lu Y, Ding Y, Wang M L, et al. An environmentally friendly laser cleaning method to remove oceanic micro-biofoulings from AH36 steel substrate and corrosion protection [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 314: 127961.
- [10] Zhu Guodong, Wang Shouren, Cheng Wei, et al. Corrosion and wear performance of aircraft skin after laser cleaning [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 132: 106475.
- [11] Maharjan N, Zhou W, Zhou Y, et al. Femtosecond laser cleaning for aerospace manufacturing and remanufacturing [C]//2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR). IEEE, 2017: 1-4.
- [12] Qiao Yulin, Huang Kening, Liang Xiubing, et al. Effect of cleaning speed on morphology and composition of carbon deposition surface of titanium alloy cleaned by laser [J]. *Applied Laser*, 2017, 37(6): 859-864. (in Chinese)
- [13] Dai Huixin, Zheng Yunhao, Luo Rui, et al. Research on base material properties of rail vehicle after laser cleaning paint coating [J]. *Welding Technology*, 2020, 49(5): 45-48. (in Chinese)
- [14] Hai Xiaohui, Qi Xiansheng. Engineering application and prospect of high efficiency and high quality laser cleaning technology for rail cars [J]. *MW Metal Forming*, 2020(3): 11-14. (in Chinese)
- [15] Li Xinyan, Li Canyang, Wang Dan, 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. (in Chinese)
- [16] Chen Guoxing, Lu Haifeng, Zhao Ying, et al. Effect of power on laser cleaning result of stainless steel surface [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(12): 1217-1224,1245. (in Chinese)
- [17] Gao Liaoyuan, Zhou Jianzhong, Sun Qi, et al. Numerical simulation and surface morphology of laser cleaning aluminum alloy paint [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0502002. (in Chinese)
- [18] Wang Deliang, Feng Guoying, Deng Guoliang, et al. Study on mechanism on laser paint removal based on the morphology and element composition of ejected particle [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(10): 1003007. (in Chinese)
- [19] Zhou Cong, Li Honggeng, Chen Genyu, 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.
- [20] Shi Tianyi, Wang Chunming, Mi Gaoyang, et al. A study of microstructure and mechanical properties of aluminum alloy using laser cleaning [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 42: 60-66.
- [21] Zhang Guangxing, Hua Xueming, Li Fang, et al. Effect of laser cleaning process parameters on the surface roughness of 5754-grade aluminum alloy [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 105(5): 2481-2490.
- [22] Fang Shichao. Application research on laser cleaning of epoxy-paint from ship plates [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [23] Chen Yiming. Research on pre-welding laser cleaning of aluminum alloy and evaluation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [24] Zou Wanfang, Song Feng, Luo Ying. Characteristics of audible acoustic signal in the process of laser cleaning of paint on metal surface [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 144(3): 107388.
- [25] Thayawat Uthaijunyawong, Suwit Siritwattanayotin, ChotikaViriyarattanasak, et al. Laser cleaning performance and PAHs formation in the removal of roasting marinade stain [J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2017, 102: 81-89.
- [26] 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.
- [27] Ye Y, Yuan X, Xiang X, et al. Laser cleaning of particle and grease contaminations on the surface of optics [J]. *Optik*, 2012, 123(12): 1056-1060.
- [28] Zheng Y W, Luk Yanchuk B S, Lu Y F, et al. Dry laser cleaning of particles from solid substrates: experiments and theory [J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, 90(5): 2135-2142.
- [29] Yang Jianjun, Wang Bowei, Chen Tianou, et al. Study on anodizing and properties of 2 A96 aluminum alloy surface [J]. *Packaging Journal*, 2019, 11(5): 16-23. (in Chinese)
- [30] Wang Gang. Study on effect of pulse laser cleaning on surface morphology and welding quality of aluminum alloy [D]. Changsha: Hunan University, 2018. (in Chinese)