

激光清洗对铝合金表面后续涂胶效果的影响规律研究

丁尧臣, 王明娣*, 罗贵峰, 章轩, 汤雨晴

(苏州大学 机电工程学院, 江苏 苏州 215000)

摘要: **目的** 研究激光清洗的工艺参数调整对表面后续涂胶效果的影响规律。**方法** 采用 100 W 脉冲激光器对 5754 铝合金板进行表面清洗, 研究并分析激光频率、扫描速度对铝合金表面性能的影响。采用达因液检测试样表面能, 并测量接触角、表面粗糙度及胶黏剂附着力。**结果** 在选定 100 W 功率的情况下, 当激光清洗频率在 50~200 kHz 时, 满足达因液检测要求, 铝合金板呈亲水性, 粗糙度明显增大, 胶黏剂附着力大于原基材。当激光频率在 300~1 000 kHz 时, 不满足达因液要求, 表面接近疏水性, 粗糙度变化不明显。扫描速度对铝合金板后续涂胶效果影响不大, 试验结果均能满足达因液要求, 且亲水角变化不明显, 粗糙度均明显增大, 胶黏剂附着力均大于原基材。**结论** 在功率一定的情况下, 激光频率是影响铝合金后续涂胶效果的主要因素, 其原因主要是改变了表面粗糙度, 增大其润湿性。激光扫描速度的变化可以增大铝合金表面能, 使其表面具有亲水效果, 对于铝合金后续涂胶效果的变化影响较小。

关键词: 激光清洗; 铝合金; 达因液; 接触角; 粗糙度

中图分类号: TG176 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)13-0198-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.13.019

Effect Law of Laser Cleaning on the Subsequent Gluing Effect of Aluminum Alloy Surface

DING Yaochen, WANG Mingdi*, LUO Guifeng, ZHANG Xuan, TANG Yuqing

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Jiangsu Suzhou 215000, China)

ABSTRACT: Laser cleaning is an efficient and environmentally friendly cleaning method. In order to meet the effective adhesion of the adhesive in the ISO 10365 fracture test, the aluminum alloy plate is required to have a certain surface energy after cleaning. In this work, the laser cleaning method was selected to carry out the test. The surface energy, contact angle, roughness and bonding force of aluminum alloy plate after laser cleaning were measured, and the effect of the adjustment of laser cleaning process parameters on the subsequent gluing effect was studied. 100 W pulsed laser was used to clean the surface of 5754 aluminum alloy plate, 44# Dyne pen was used to detect the surface tension of the sample, professional contact angle measuring instrument was used to measure the contact angle, confocal microscope was used to measure the surface roughness,

收稿日期: 2023-06-02; 修订日期: 2023-09-26

Received: 2023-06-02; **Revised:** 2023-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(52375459); 江苏省科技计划专项(BE2022066-3); 苏州市重点产业技术创新-关键核心技术研发(SGC2021010)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (52375459); Jiangsu Provincial Science and Technology Plan Special Project (BE2022066-3); Suzhou Key Industry Technology Innovation-Key Core Technology Research and Development (SGC2021010)

引文格式: 丁尧臣, 王明娣, 罗贵峰, 等. 激光清洗对铝合金表面后续涂胶效果的影响规律研究[J]. 表面技术, 2024, 53(13): 198-206.

DING Yaochen, WANG Mingdi, LUO Guifeng, et al. Effect Law of Laser Cleaning on the Subsequent Gluing Effect of Aluminum Alloy Surface[J]. Surface Technology, 2024, 53(13): 198-206.

*通信作者 (Corresponding author)

and tensile testing machine was used to test the adhesion. Combined with the previous research on aluminum alloy cleaning, only the effect of laser frequency and scanning speed on the subsequent gluing effect of aluminum alloy was analyzed.

The measurement results revealed that the surface energy of the original aluminum alloy plate was small, the contact angle was 93.736° , and the roughness Ra was $0.243\ \mu\text{m}$. In the case under a certain power of 100 W, when the laser cleaning frequency was between 50 and 200 kHz, to meet the requirements of Dyne pen detection, the aluminum alloy plate was hydrophilic, the contact angle was about 25° , and the roughness significantly increased. When the cleaning frequency was 300~1 000 kHz, it did not meet the requirements of Dyne pen, and the contact angle and roughness were close to the original. The scanning speed had little effect on the surface energy of the aluminum alloy plate, and the test results met the requirements of Dyne pen, and the surface was hydrophilic, and the rough friction significantly increased. It could be seen from the tensile test that the surface adhesive tensile force after laser cleaning was higher than the original surface tensile force. The aluminum alloy under the action of laser low-frequency cleaning could improve the adhesion of the adhesive, and changing the laser scanning speed could improve the adhesive adhesion of the aluminum alloy surface.

The reason for the reduction of the contact angle after cleaning is that the wetting state of the aluminum alloy after laser cleaning is not stable and in order to reduce the surface system energy after cleaning, the solid-liquid interface area is reduced. The contact angle is reduced accordingly. Roughness is the main factor of the subsequent gluing effect of aluminum alloy. In the low-frequency cleaning state, the greater the roughness, the larger the surface contact area, the smaller the contact angle. In the laser cleaning frequency of 50~200 kHz, the contact angle change is not obvious, and the roughness has a change trend, due to the different spot overlap rate, resulting in different energy absorbed by the laser pit. When the cleaning frequency is 300~1 000 kHz, the laser energy density is reduced, which is not enough to change the surface energy and roughness of the aluminum alloy. The change of laser scanning speed on the wettability of aluminum alloy is not obvious. When the laser energy is large enough, the surface energy of aluminum alloy increases, and the surface is hydrophilic, and the roughness change is not obvious.

Finally, it is concluded that the laser frequency is the main factor affecting the subsequent gluing effect of aluminum alloy when the laser power is fixed. The laser scanning speed has less effect.

KEY WORDS: laser cleaning; aluminum alloy; Dyne pen; contact angle; roughness

某汽车零件企业在制造过程中,需对产品进行满足 ISO 10365 的黏结试验。主要工艺为在铝合金板表面涂胶黏剂,并与另一块铝合金板粘连形成组件,而后进行机械分离。为确保铝合金有足够高的黏附性能,表面需要洁净清洗。金属表面常被一些有机物或无机物所污染,致使金属表面能发生改变。假如污染物是一种表面能低的物质,则金属表面能随之下降,胶黏剂在金属上的润湿性变差,黏接强度变低。因此,必须在进行黏接前清理金属表面,才能使其获得相应的黏接效果。传统清洗方法为超声波清洗,但是由于超声波清洗后续烘干的效率较低,且不能保证达到一定的表面能及润湿性。激光清洗具有清洗效果好、工作环境友好、清洗精度高等特点,是能够取代传统物理打磨及超声波清洗的方法^[1]。激光清洗技术是指采用能量较高的激光束照射工作表面,激光发射的光束被所需处理工作表面上的污染层所吸收,激光与污染层之间的相互作用导致的光物理反应,表面的氧化膜发生瞬间蒸发或者剥离,从而达到清洗表面氧化膜的作用^[2]。因此,激光清洗后铝合金板是否达到所需的表面能、影响其表面润湿性的因素成为激光清洗铝合金板的研究热点。

王蔚等^[1,3-4]研究了振镜扫描速度对钛合金表面

氧化层和 7075 铝合金表面质量的影响,选用波长为 1 064 nm 的脉冲激光器,当平均功率 $P=250\ \text{W}$,扫描速度 $v=2\ 500\ \text{mm/s}$,脉冲频率 $f=2.5\ \text{kHz}$ 时,用能量密度为 $4.44\ \text{J/cm}^2$ 的激光清洗 7075 铝合金表面时,此时试样表面粗糙度最小为 $0.45\ \mu\text{m}$ 。当平均功率为 110 W,重复频率为 20 kHz,选用扫描速度为 $3\ 500\ \text{mm/s}$ 时,7075 铝合金表面不会发生熔融和热氧化,粗糙度 Ra 相比于原始表面减小了 $0.12\ \mu\text{m}$ 。当扫描速度为 $2\ 500\ \text{mm/s}$ 时,清洗表面发生严重烧蚀,并出现明显光斑凹坑。采用 200 W 脉冲激光器清洗钛合金表面,重复频率为 20 kHz,扫描速度在 $7\ 000\sim9\ 000\ \text{mm/s}$ 时,表面大部分氧化层和油污基本可以被去除,去除机制主要为气化和相爆炸机制。金诗评等^[5]通过纳秒激光加工 6061 铝合金,得出最优加工参数,激光功率为 12 W,扫描速度为 $200\ \text{mm/s}$,填充间距为 $0.01\ \text{mm}$,可以保持超亲水时间 20 d,并验证粗糙度越大,铝合金的亲水性越好。Jiwhan Noh 等^[6]采用波长为 532 nm 的皮秒激光器在金属模具表面加工微尖结构,最大功率为 3.5 W,重复频率为 50 kHz,测量其表面亲水性,得出具有微刺表面的亲水性会进一步增强。李涛^[7]使用波长为 1 064 nm 的纳秒光纤激光刻蚀法制备了陶瓷超疏水表面,在 40 kHz 的脉冲重复率和 $200\ \text{mm/s}$

的扫描速度下,扫描间距为 100 μm ,扫描次数 10 次,功率为 100%时,可以获得较为理想的陶瓷超疏水表面的样品,获得的水滴接触角最大可达到 158°。李艳丽等^[8]用波长 515 nm 的飞秒激光制备硅表面超亲水结构,在单脉冲能量密度为 0.14 J/cm²,扫描速度为 2 mm/s 条件下,得出提高材料表面粗糙度及孔隙率可以使表面达到超亲水效果的结论。邓德伟等^[9]研究了 1 064 nm 脉冲光纤激光清洗 FV520B 钢表面对表面粗糙度的影响,在脉冲频率为 20 kHz,功率低于 120 W 时,清洗后粗糙度无明显变化,当功率为 120~200 W 时,随着激光功率的增大,粗糙度逐渐减小;当激光功率为 120 W 时,不同频率下清洗试样的粗糙度变化不明显。

激光加工后的金属表面会呈亲水性,但也有研究表明^[10-12],激光加工后,表面氧化、环境改善、热处理等均会改变表面润湿性。目前,针对激光清洗改变金属表面润湿性的研究较多,而对于激光清洗影响铝合金后续涂胶性能的研究较少。本文采用脉冲激光器清洗铝合金板表面,根据实际生产中图纸技术条件要求,选择 44[#]达因液测量表面能,并测量表面接触角、表面粗糙度及胶黏剂附着力,研究不同激光工艺参数对铝合金后续涂胶效果影响。

1 试验

1.1 材料

试验材料为 5754 铝镁合金板,主要化学成分见表 1。

表 1 5754 铝合金板化学成分

Tab.1 Chemical composition of 5754 aluminum alloy plate

wt. %					
Si	Mg	Mn	Cr	Fe	Al
0.40	2.6-3.6	0.50	0.30	0.40	Bal.

1.2 设备

本试验采用波长为 1 064 nm 的 IPG 脉冲激光器 SP-100P-W-EP-Z-F-Y,主要由电脑控制件、激光器、扩束镜和可三轴运动的工作平台组成。其中,激光器的功率最大可以达到 100 W,场镜焦距为 225 mm,光斑直径为 20 μm ,单脉冲能量为 1 mJ。扫描方式为沿 x 轴的方向,激光通过振镜的作用在 y 轴方向上不断往复摆动^[2],试验设备的原理及设备如图 1 所示。

1.3 方法

用酒精擦拭铝合金板表面。根据铝合金板实际尺寸,为确保达因笔检验的有效性,选择激光清洗多个 40 mm×10 mm 矩形试样进行试验,并进行对比检验。首先调整激光器和工作台面距离,根据铝合金板的厚

度,计算出适用的焦距进行试验。选择单因素试验法,在 MarkingMate 软件中设置工艺参数。

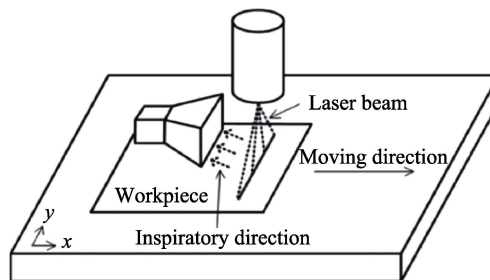


图 1 激光清洗原理^[2]
Fig.1 Schematic diagram of laser cleaning^[2]

1.4 检验

1) 表面能检测。本文采用达因液检测,此分析方法简单且高效,只需要在基材表面上划一道划痕就能马上知道准确结果,是专为生产线的测试而设计的^[13-14]。达因液有数十种不同的达因值,常见值为 28~72 mN/m,数值越高,代表固体表面能越大。本次试验选用德国 Arcotest 44[#]达因液,将达因液在被测物表面均匀地画上一条直线(5~10 cm),2~3 s 后,观察滴液是否发生收缩,并凝聚成水珠点^[15]。表面张力评判标准见表 2。

表 2 表面张力判断标准
Tab.2 Criteria for judging surface tension

Number	Basis	Result
1	The line is evenly distributed without any bead points	Above or equal to the Dyne pen
2	The line is slowly shrinking, with a bead point trend	Slightly below the Dyne pen value
3	The lines shrink immediately and form quickly	Well below the Dyne pen value

2) 接触角检测^[16]。表面润湿性是固体表面的重要特征之一,通常用接触角来表征液体对固体的浸润程度。亲水性一般是指水滴能够在材料表面完全铺展开,使接触角小于或等于 90°,疏水性则相反。本文采用座滴法检验清洗区域的表面接触角,接触角测量仪设备选用晟鼎精密 SDC-200S,接触角测量范围 0°~180°,液滴量为 5 μL ,测量 3 次后取其平均值为记录结果。

3) 粗糙度检测。采用蔡司 ZEISS LSM-900 共聚焦显微镜进行清洗前后的粗糙度及表面形貌检测。

4) 胶黏剂附着力测试。采用济南时代试金电子万能试验机 WDW100。根据 GB/T 2790《胶黏剂 180°剥离强度试验方法 挠性材料对刚性材料》制样,胶黏剂选用卡夫特 704 有机硅密封胶,铝合金清洗面积为 20 mm×20 mm,涂胶面积为 20 mm×2 mm×3 mm,涂胶固化 12 h 后进行试验。

2 结果与分析

2.1 不同参数下的清洗效果

用达因液测试铝合金板初始表面, 水珠很快收缩, 表明未清洗前, 表面能不满足达因液要求。接触角测量结果为 93.736° , 表面粗糙度为 $Ra=0.243\text{ }\mu\text{m}$, 如图 2 所示。

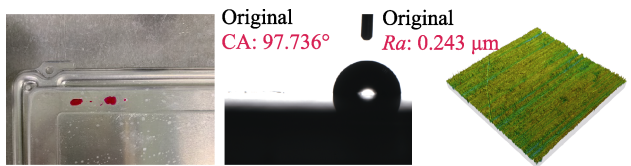


图 2 未清洗铝合金表面达因液测试及接触角测量结果
Fig.2 Results of Dyne pen test and contact angle measurement on aluminum alloy plate surface

本文采用重复频率 f 、扫描速度 v 两个工艺参数对 7075 铝合金板进行单因素试验。由于激光功率对表面粗糙度及表面能的影响较大, 根据以往激光清洗经验及考虑清洗效率, 优先选定激光器功率 100 W、脉宽 30 ns 进行试验。由于铝板厚度较薄, 防止清洗表面时热量集中, 产生二次氧化, 影响最后试验效果, 因此优先选择较快扫描速度清洗。

2.1.1 不同清洗频率

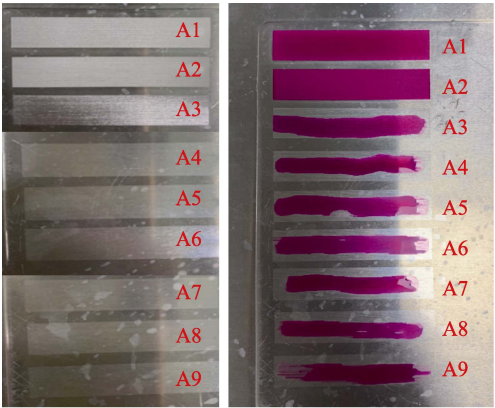
根据能量密度计算公式^[1]:

$$F = \frac{P}{F \cdot L^2}$$
 (1)

式中: F 为能量密度; P 为平均功率; f 为脉冲频率;

可以看出, 在激光功率一定的情况下, 激光能量密度的大小与激光频率的大小成反比。脉冲激光器功率选取范围为 1~1 000 kHz。分别采用不同的频率对铝合金板进行清洗, 由图 3 可见, 频率越小, 清洗效果越明显。当频率在 200 kHz 以下时, 清洗表面呈银

白色。检验后, 水珠均匀平铺, 表面能远大于达因液数值。当频率达到 500 kHz 时, 达因液水珠呈现略微收缩趋势, 不满足表面张力要求。具体分析见表 3。



a 清洗前的铝合金表面 b 清洗后达因液检测结果

图 3 清洗频率对清洗效果的影响分析试验
Fig.3 Analysis and test of the impact of cleaning frequency on cleaning effect: a) aluminum alloy surface before cleaning; b) Dyne pen test results

接触角测量仪的检验结果和粗糙度变化趋势如图 4 所示。可以看出, 原材料表面呈微疏水性 (接触角 93.736°), 采用频率 50~200 kHz 激光清洗后, 铝合金板表面能变大 (满足达因液要求), 表面呈现出亲水性 (A1~A3), 接触角随着频率的增加而提高。采用 300~1 000 kHz 的激光清洗后, 表面能变化较小 (不满足达因液要求), 由于机器视觉检测存在一定误差, 因此数据交替变化, 但可以发现接触角与原表面接近。可见激光频率较高时, 不能改变铝合金板表面性能。

2.1.2 不同扫描速度

扫描速度的快慢对应着每个位置脉冲数的多少, 选取脉冲激光器的扫描速度范围为 0~6 000 mm/s。根据 2.1.1 试验, 实际生产中要求清洗铝合金板后表面

表 3 改变激光频率的清洗结果
Tab.3 Cleaning results after change of laser frequency

Number	Scanning speed/ (mm·s ⁻¹)	Power/W	Pulse width/ ns	Frequency/ kHz	Compare with Dyne pen	Average contact angle/(°)	Surface roughness/ μm
A1	5 000	100	30	50	The line is evenly distributed without any bead points	21.463	3.16
A2				100		22.841	9.653
A3				200		30.02	6.114
A4				300	The line is slowly shrinking, with a bead point trend	94.134	0.441 9
A5				500		87.493	0.330 6
A6				600		94.543	0.406 7
A7				700	The lines shrink immediately and form quickly	91.716	0.316 3
A8				800		84.902	0.284
A9				1 000		97.74	0.226 7

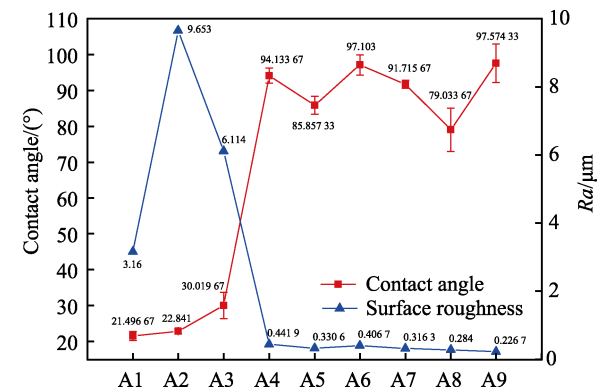
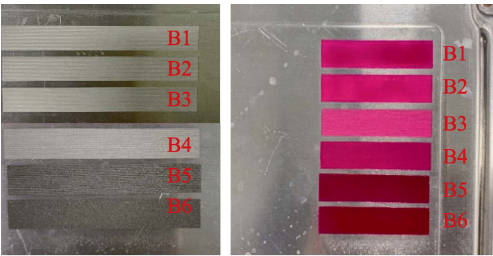


图 4 接触角及粗糙度变化趋势
Fig.4 Contact angle and surface roughness trend

不能有明显色差,因此选择 100、200 kHz 的激光清洗频率,以下先选定 100 kHz 频率的试验。扫描速度与激光光斑搭接率成反比,扫描速度过小会增大光斑搭接率,光斑搭接率大小可能影响铝合金的清洗效果。从图 5 和表 4 可以看出,扫描速度从高到低,清洗效果明显,达因液检验均符合要求。B4 试验结果显露铝合金基材,表面有所损伤,B5、B6 试验结果已经使铝合金表面严重氧化。



a 清洗后的铝合金表面 b 清洗后达因液检测结果

图 5 扫描速度对清洗效果的影响分析试验
Fig.5 Analysis and test of the impact of scanning speed on cleaning effect: a) aluminum alloy surface after cleaning; b) Dyne pen test results

接触角测量仪的检验结果和粗糙度变化趋势如图 6 所示。可以看出,随着激光扫描速度的降低,光斑搭接率在增加,但是对于接触角变化并不明显,清洗后的铝合金板表面均呈亲水性。另外,选用 200 kHz 的激光频率在不同扫描速度下接触角试验结果如图 7 所示,达因液测试均满足要求。可见频率为 100、200 kHz

时的接触角变化趋势是相似的,因此本文主要选择频率 100 kHz 进行分析。

2.1.3 胶黏剂拉力试验

原铝合金表面胶黏剂拉力为 0.096 kN。基于重复频率变化的试验,选择满足 44#达因液要求的 A1~A3 数据,并选择一组不满足达因液要求的数据(A4)对比即可。A1~A4 的胶黏剂拉力分别为 0.121、0.132、0.122、0.111 kN。可见,经激光清洗后,表面胶黏剂拉力均比原表面拉力高,表明激光低频清洗作用下的铝合金能提升胶黏剂附着力。基于扫描速度变化的胶黏剂附着力测试分别为 0.129、0.119、0.123、0.117、0.114、0.123 kN,由结果可见,改变激光扫描速度清洗铝合金表面能提高铝合金表面胶黏剂的附着力。

2.2 不同参数对清洗效果的影响

铝合金表面接触角减小,呈亲水性有以下几个原因^[17]:激光加工过程中,激光能量迅速聚集于铝合金表面,使其表面自由能增大。根据相似相溶原理,具有较高表面自由能的固体表面对同样具有较高自由能的水分子具有极强的相容性,因此诱发水分子的扩散铺展;基材表面粗糙度增大,使毛细吸附力增大,固体表面与水分子之间的范德瓦尔斯力得到增强,诱使水分子吸附铺展。

2.2.1 清洗频率

铝合金板在低频清洗后,表面粗糙度明显增加,如图 8 所示。在 A1~A3 的试验中,粗糙度由原来的 0.243 μm 分别增加至 3.16、9.653、6.114 μm。由 Wenzel 模型^[18]可知,粗糙度的增大导致接触角减小,而具有较大表面能的固体表面会使表面分子对液滴产生较大的作用力,导致表面较为亲水。但是其接触角的减小不仅与粗糙度有关,还与表面能有关。因此,接触角变化趋势应是由粗糙度和表面能的增大共同导致的结果。

由图 8c 可以看出,表面出现火山坑形貌,部分区域粗糙度峰值较高。这是由于激光能量较大时,部分氧化物飞溅至凹坑边缘,且激光凹坑重叠区域不断吸收能量,使得基底更深^[19-21],因此粗糙度最大。

A1 数据下因为频率较低,根据公式^[1]:

表 4 改变扫描速度后的清洗结果
Tab.4 Cleaning result after change of scanning speed

Number	Scanning speed/ (mm·s ⁻¹)	Power/ W	Pulse width/ ns	Frequency/ kHz	Compare with Dyne pen	Average contact angle/(°)	Surface roughness/μm
B1	5 000	100	30	100	The line is evenly distributed without any bead points	29.368	8.665
B2	4 000					31.202	10.33
B3	3 000					28.503	16.96
B4	2 000					30.863	19.39
B5	1 000					19.883	22.04
B6	500					22.229	23.8

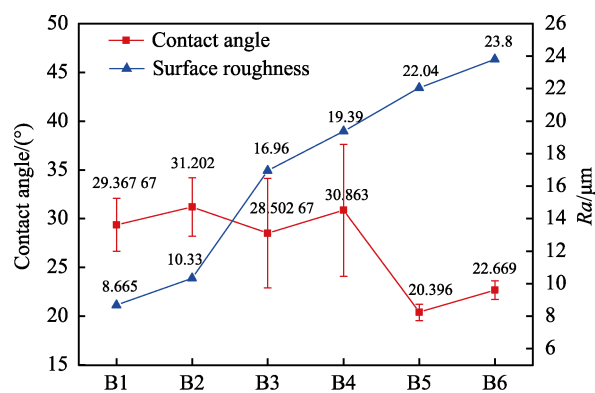


图 6 接触角及粗糙度变化趋势
Fig.6 Contact angle and surface roughness trend

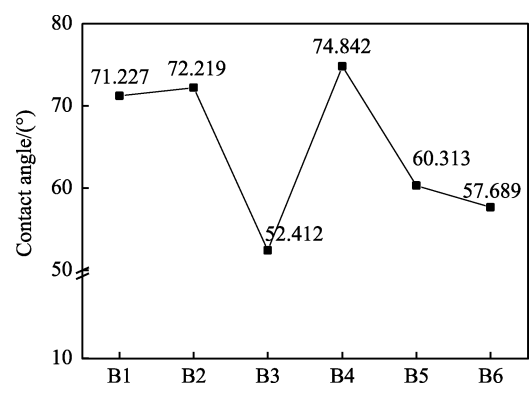


图 7 频率 200 kHz 下的接触角变化趋势
Fig.7 Contact angle trend in 200 kHz frequency

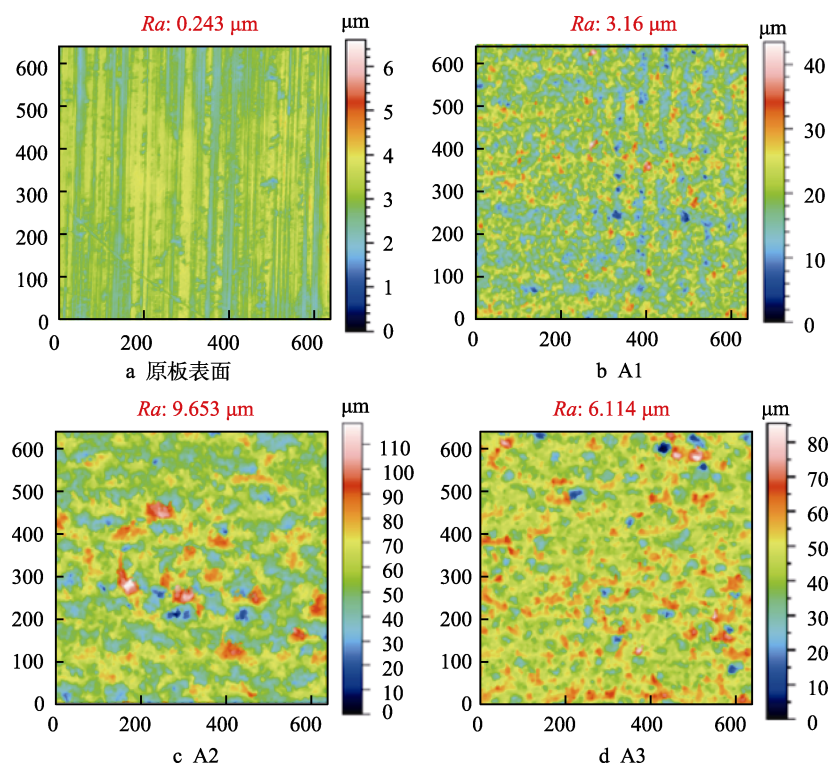


图 8 原板表面和 A1~A3 数据下的粗糙度高度图
Fig.8 Primary surface and roughness height map for A1 to A3 data: a) original; b) A1; c) A2; d) A3

$$U = \left(1 - \frac{v}{Lf}\right) \times 100\% \quad (2)$$

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。此时能量密度大，且光斑搭接率小，表面形貌转变为条纹形貌^[22]，能量分布较为平均，因此粗糙度会低于 A2 数据。

由图 8d 可以看出，中部高度数值与 A2 较为接近，表明此时清洗表面与其大致相同，虽然能量降低，但由于光斑搭接率增大，激光能量使边缘处融化，填补基底，使其粗糙度有所降低^[23-24]。

在上述数据下，铝合金板粗糙度均明显增大，表面呈亲水性，润湿性较好，后续涂胶能实现很好的铺展效果^[25]，胶黏剂附着力测试也较原基材表面

有一定的提高。

由 A4~A9 的粗糙度高度图（图 9）可以看出，在频率较高时，激光能量密度变低，对于表面粗糙度变化没有明显效果。因此，较高的激光清洗频率不能明显改变铝合金表面性能。

2.2.2 扫描速度

由图 10 可以看出，随着扫描速度的降低，铝合金表面粗糙度逐渐增大，峰值高度及其分布区域均逐渐变大。可见，随着光斑能量密度的增大，凹坑基底加深和边缘区域融化堆叠更加明显。此数据下铝合金板表面能是逐渐增大的，达因液测试均满足要求，且胶黏剂拉力测试结果均大于原基材表面，因此扫描速度对于铝合金后续涂胶性能的影响较小。

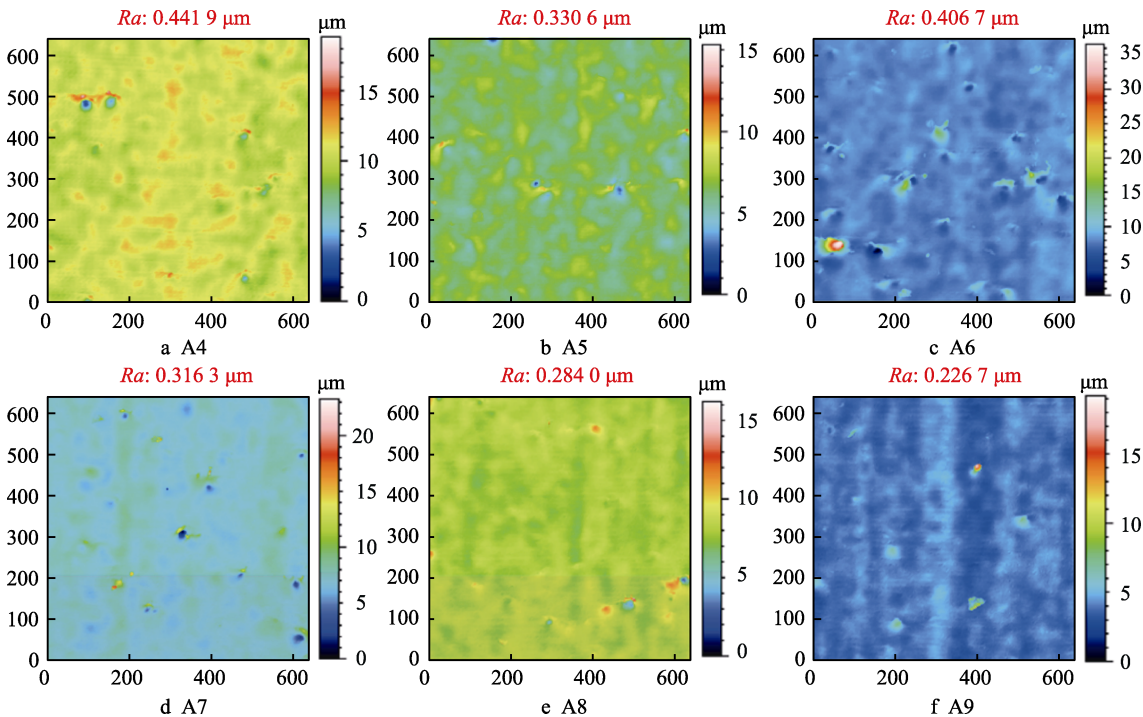


图 9 A4~A9 数据下的粗糙度高度图
Fig.9 Roughness height map for A4 to A9 data

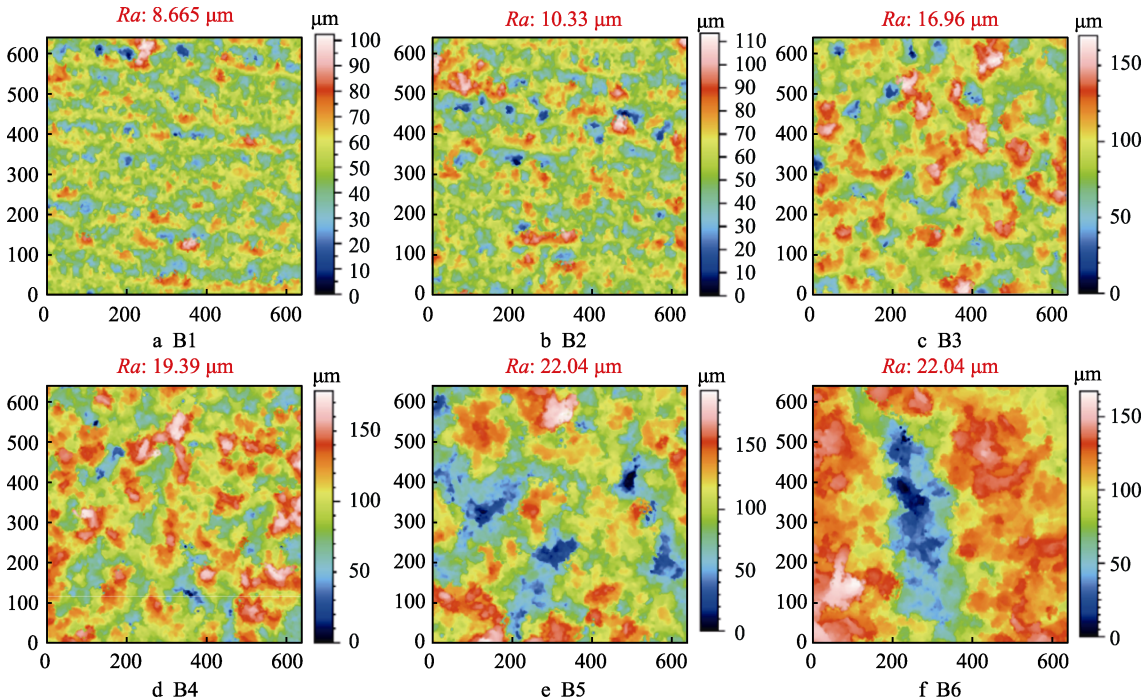


图 10 B1~B6 数据下的粗糙度高度图
Fig.10 Roughness height map for B1 to B6 data

3 结论

1) 激光频率是影响铝合金后续涂胶效果的主要参数。在选定 100 W 功率下,采用频率为 50~200 kHz 的激光清洗后,由于表面粗糙度增大,铝合金板表面能变大,接触角随着频率的增加而增大,润湿性均较

好,表面能大于 44 mN/m。采用频率为 300~1 000 kHz 的激光清洗后,表面能变化较小,接触角和粗糙度与原表面接近,润湿性较差,表面能小于 44 mN/m。

2) 激光扫描速度对铝合金后续涂胶效果的影响不大。即使用较高的扫描速度清洗铝合金后,表面能均大于 44 mN/m,且胶黏剂拉力测试均大于原基材。

不同扫描速度清洗铝合金板后, 接触角都接近 30° 。

3) 当选择功率为 100 W, 脉宽为 30 ns, 频率在 100~200 kHz, 扫描速度大于 3 000 mm/s 的参数清洗铝合金板, 清洗效率高, 铝合金涂胶的附着力大, 适用于实际生产。

参考文献:

- [1] 王蔚, 李相锦, 刘伟军, 等. 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[J]. 中国激光, 2022, 49(16): 189-203.
WANG W, LI X J, LIU W J, et al. Effect of Laser Cleaning Process Parameters on Surface Quality of 7075 Aluminum Alloy Anodic Oxidation Film[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(16): 189-203.
- [2] 王贤宝, 王明娣, 郭敏超, 等. 100W 脉冲激光器冷轧钢板表面氧化膜清洗[J]. 激光与红外, 2021, 51(6): 734-741.
WANG X B, WANG M D, GUO M C, et al. Cleaning of Oxide Film on Cold Rolled Steel Plate with 100W Pulse Laser[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(6): 734-741.
- [3] 王蔚, 沈杰, 刘伟军, 等. 激光清洗中振镜扫描速度对 7075 铝合金表面质量和摩擦特性的影响[J/OL]. 兵工学报, 2022: 1-11. (2022-10-27). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20221026.1736.002.html>.
WANG W, SHEN J, LIU W J, et al. Effect of Galvanometer Scanning Speed on Surface Quality and Friction Characteristics of 7075 Aluminum Alloy in Laser Cleaning[J/OL]. Acta Armamentarii, 2022: 1-11. (2022-10-27). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20221026.1736.002.html>.
- [4] 王蔚, 沈杰, 刘伟军, 等. 脉冲激光清洗过程中振镜扫描速度对 TA15 钛合金表面氧化层的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(18): 40-48.
WANG W, SHEN J, LIU W J, et al. Effect of Scanning Speed of Galvanometer on Surface Oxide Layer of TA15 Titanium Alloy in Pulsed Laser Cleaning[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(18): 40-48.
- [5] 金诗评, 李一全. 纳秒激光加工铝合金表面润湿性转变研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2022, 45(2): 49-57.
JIN S P, LI Y Q. Study on the Wettability Transition of Aluminum Alloy Surface Processed by Nanosecond Laser[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 45(2): 49-57.
- [6] NOH J, LEE J H, LEE S Y, et al. Fabrication of Random Microspikes on Mold Metal by Ultrashort Laser Ablation for Hydrophilic Surface[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2010, 49(10R): 106503.
- [7] 李涛. 基于激光刻蚀超疏水/亲水表面制备自组装石墨烯基电容器研究[D]. 温州: 温州大学, 2020.
LI T. Research of Preparation of Self-Assembled Graphene-Based Capacitors Based on Laser Etching Superhydrophobic/Hydrophilic Composite Surface[D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2020.
- [8] 李艳丽, 贾鑫, 曹凯强, 等. 飞秒激光双光束干涉高效率地制备硅表面超亲水结构[J]. 光子学报, 2021, 50(6): 108-115.
LI Y L, JIA X, CAO K Q, et al. Highly Efficient Fabrication of Superhydrophilic Structures on Silicon Surface by the Interference of Two Femtosecond Laser Beams[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(6): 108-115.
- [9] 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): 171-180.
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): 171-180.
- [10] 郑重, 张恒超, 黄刚, 等. 飞秒激光加工对铝合金表面浸润性的影响[J/OL]. 热加工工艺, 2023: 1-8[2023-02-28]. DOI:10.14158/j.cnki.1001-3814.20212129.
ZHENG Z, ZHANG H C, HUANG G, et al. Effect of Femtosecond Laser Processing on Wettability of Aluminum Alloy Surface[J/OL]. Hot Working Technology, 2023: 1-8[2023-02-28]. DOI:10.14158/j.cnki.1001-3814.20212129.
- [11] NGO C V, CHUN D M. Control of Laser-Ablated Aluminum Surface Wettability to Superhydrophobic or Superhydrophilic through Simple Heat Treatment or Water Boiling Post-Processing[J]. Applied Surface Science, 2018, 435: 974-982.
- [12] CHUN D M, NGO C V, LEE K M. Fast Fabrication of Superhydrophobic Metallic Surface Using Nanosecond Laser Texturing and Low-Temperature Annealing[J]. CIRP Annals, 2016, 65(1): 519-522.
- [13] 李艳红, 王升宝, 常丽萍. 表(界)面张力测定方法的研究进展[J]. 日用化学工业, 2007, 37(2): 102-106.
LI Y H, WANG S B, CHANG L P. Research Progress on Methods for Measurement of Surface(Interfacial) Tension[J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics, 2007, 37(2): 102-106.
- [14] 王庆国. 达因笔测试表面张力的方法[J]. 塑料包装, 2008, 18(5): 49-50.
WANG Q G. Method for Testing Surface Tension with

- Dyne Pen[J]. *Plastics Packaging*, 2008, 18(5): 49-50.
- [15] 杨宏伟, 费逸伟, 佟丽萍, 等. 基于达因测试法的 HDPE 表面张力的研究[J]. *当代化工*, 2012, 41(10): 1034-1035.
- YANG H W, FEI Y W, TONG L P, et al. Research on Surface Tension of High-Density Polyethylene Based on Dyne Test[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2012, 41(10): 1034-1035.
- [16] 隋涛, 汪家道, 陈大融. Cassie 状态到 Wenzel 状态转换的能量分析[J]. *化工学报*, 2011, 62(5): 1352-1357.
- SUI T, WANG J D, CHEN D R. Energy Analysis for Transition from Cassie State to Wenzel State[J]. *CIESC Journal*, 2011, 62(5): 1352-1357.
- [17] 李杰, 王超磊, 刘玉德, 等. 激光微织构与自组装对铝合金表面润湿性的影响[J]. *材料工程*, 2018, 46(1): 53-60.
- LI J, WANG C L, LIU Y D, et al. Wettability of Surface on Aluminum Alloy Based on Laser Micro-Textured and Self-Assembled Technique[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2018, 46(1): 53-60.
- [18] 张明池, 刘子源, 潘宁, 等. 飞秒激光制备不锈钢微纳结构表面的润湿机制研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(18): 7-16.
- ZHANG M C, LIU Z Y, PAN N, et al. Wetting Mechanism of Stainless Steel Micro-Nano Structure Surface Prepared by Femtosecond Laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(18): 7-16.
- [19] ZHANG G X, HUA X M, LI F, 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.
- [20] 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): 161-171.
- 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): 161-171.
- [21] WANG Q H, WANG H X. Laser Surface Functionalization to Achieve Extreme Surface Wetting Conditions and Resultant Surface Functionalities[J]. *Journal of Central South University*, 2022, 29(10): 3217-3247.
- [22] 张贺, 张成国, 张风东, 等. 铝合金焊前激光清洗工艺研究及接头性能评估[J]. *焊接技术*, 2022, 51(7): 71-76.
- ZHANG H, ZHANG C G, ZHANG F D, et al. Study on Laser Cleaning Process before Welding of Aluminum Alloy and Evaluation of Joint Performance[J]. *Welding Technology*, 2022, 51(7): 71-76.
- [23] 杨紫璠, 王涛, 李道齐, 等. 脉冲光纤激光毛化 H13 模具钢的实验研究[J]. *激光与红外*, 2023, 53(3): 339-345.
- YANG Z F, WANG T, LI D Q, et al. Experimental Study of Pulsed Fiber Laser Grossing of H13 Die Steel[J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(3): 339-345.
- [24] 叶云霞, 贾子扬, 符昊, 等. 脉冲激光作用下 45#钢表面微凸起形貌演变规律的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(3): 154-163.
- YE Y X, JIA Z Y, FU H, et al. Study on Evaluation Law of Manufacturing Micro-Convex Points on 45# Steel Surface by Pulse-Width Laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(3): 154-163.
- [25] 李喜乐, 许文然, 张攀. 表面张力法判断亲水性的研究[J]. *信息记录材料*, 2018, 19(5): 17-20.
- LI X L, XU W R, ZHANG P. Research on the Determination of Hydrophilicity by Surface Tension Method[J]. *Information Recording Materials*, 2018, 19(5): 17-20.