

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2019.12.006

铝合金漆层与氧化层激光清洗应用研究

元泉¹, 邱媛^{1*}, 刘洋¹, 张骆²

(1. 沈阳飞机工业(集团)有限公司, 辽宁 沈阳 110034;

2. 武汉金顿激光科技有限公司, 湖北 武汉 430068)

摘要: 通过对激光的单脉冲能量、光斑搭接率、离焦量等参数的对比研究发现, 过高的激光能量不仅能清洗掉漆层与氧化层, 还会对铝合金表面造成明显的热损伤; 过高的光斑搭接率会降低清洗效率; 适当的离焦量有助于非均匀漆层的清洗去除。研究结论是, 对于铝合金漆层与氧化层的激光清洗, 最佳的组合参数为单脉冲能量 0.45 mJ、光斑搭接率 33% 和离焦量 1 mm。

关键词: 激光; 清洗; 铝合金; 漆层; 氧化层

中图分类号: TG17 **文献标识码:** A

Research on Laser Cleaning Application for Coating and Oxide Layer of Aluminum Alloy

YUAN Quan¹, QIU Yuan^{1*}, LIU Yang¹, ZHANG Luo²

(1. Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110034, China;

2. Wuhan JINDUN Laser Technology Co. Ltd., Wuhan 430068, China)

Abstract: By comparing the parameters of laser single pulse energy, spot overlap rate and defocusing amount, it is found that too high laser energy can not only clean the lacquer layer and the oxide layer, but also cause obvious thermal damage to the aluminum alloy surface; excessive spot overlap rate reduces cleaning efficiency; proper defocusing amount helps to clean non-uniform lacquer layers. The conclusion is that for the laser cleaning of aluminum alloy lacquer layer and oxide layer, the best combination parameters are single pulse energy 0.45 mJ, spot overlap rate 33%, and defocus amount 1 mm.

Keywords: laser; cleaning; aluminum alloy; lacquer layer; oxide layer

铝合金零件表面进行阳极氧化并涂覆涂料, 目的在于将铝合金包覆起来与环境介质隔离起到防腐作用。有时需要去除表面的漆层和氧化层, 例如蒙皮补涂漆时先将周边区域的漆层也去除, 或是零件在装配前将电搭接部位的漆层与氧化层去除提高导电性。传统的方法是以手工打磨去除漆层与氧化层, 但是该方法有一定的缺点, 例如因用力

不均匀导致漆层与氧化层去除不完全, 影响电搭接部位的导电性, 或者工作效率偏低, 对于空间狭小或形状不规则部位操作不便, 而对于一些特殊形状, 手工打磨更是无法精准控制。

近些年激光技术不断发展并逐渐应用于表面清洗领域中^[1]。激光清洗技术主要集中在文物清洗^[2]、管道清洗^[3]、模具清洗^[4]和半导体清洗等方

面^[5],航空制造业中激光清洗应用也偶有报道^[6],但总体上还处于探索阶段,并没有实现大规模的工业化应用。通过研究不同参数下激光对铝合金漆层和氧化层的清洗效果,确定既不损伤铝合金表面又能清洗干净的激光参数。

1 试验材料与方法

选用2A12铝合金作为基体材料,将铝合金切割成适当大小的试片后进行阳极氧化,氧化层厚度约为5 μm。然后在氧化层上喷涂一层黄色底漆,底漆厚度约为50 μm。使用脉冲式激光,激光参数见表1。

表1 激光参数

参数	技术指标
波长/nm	1064
单脉冲能量/mJ	0.10~0.50
输出功率/W	30
扫描宽度/mm	10

使用OLUMPUS GX51金相显微镜观察微观形貌和显微组织;使用TESTO 875-1i热成像仪观测激光清洗时的温度分布;使用INSTRON 5982拉力机测试激光清洗前和清洗后试片的力学性能;使用UNI-T UT89X万用表测试激光清洗后试片的电阻值。

2 试验结果与分析

2.1 光斑搭接率对铝合金表面的热影响

激光清洗时在材料表面留下许多光斑痕迹,用光斑搭接率来描述两个光斑的重叠情况。当光斑搭接率不同时激光清洗效率是不同的,搭接率越高则清洗效率越低,在不同的搭接率下材料受到的激光热影响也存在差异。为了研究搭接率对材料的热影响程度以及清洗次数对清洗效果的影响,选用单脉冲能量为0.50 mJ的激光,将光斑搭接率设置为67%和33%,用高搭接率激光清洗两次,用低搭接率激光清洗四次,并观察清洗表面及其微观形貌。

图1是涂覆底漆的试片以及激光清洗效果的照片。激光对铝合金表面产生的热影响与光斑搭接率有直接关系,因此分别测试了高搭接和低搭接时激光清洗过程中铝合金表面的温度,结果显示高

搭接时表面温度为50℃,而低搭接时表面温度仅为30℃。从图1可知,无论是在高搭接率下清洗两次还是在低搭接率下清洗四次,铝合金表面的漆层和氧化层都被全部清洗掉,表面呈现出金属光泽,说明对于清洗效果光斑搭接率与清洗次数之间是负相关的,光斑低搭接时需要多次清洗。

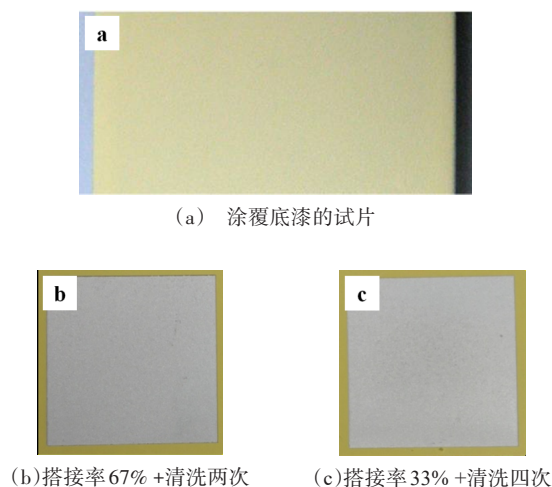


图1 激光清洗试片及清洗后表面照片

观察了激光清洗部位的微观形貌,如图2所示。高搭接时铝合金表面形成岛状熔融区,说明铝合金表面被激光瞬间熔化再凝固^[7],而低搭接时铝合金表面没有明显的局部差异,呈现出均匀的表面微观形貌。以上观察结果表明,光斑搭接率越高则铝合金表面受到的激光热影响就越明显。

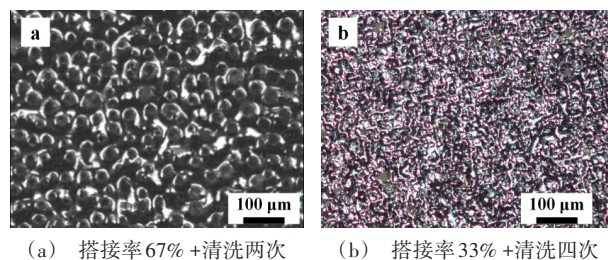


图2 激光清洗试片的表面微观形貌

2.2 激光能量和光斑搭接率对清洗效果的影响

激光能量的大小对污染物的能量吸收和脱落产生影响,在能量不变的前提下光斑搭接率决定能量在污染物上累积的效果。为了研究不同的激光

能量和光斑搭接率所产生的清洗效果,设计了以单脉冲能量和搭接率为自变量的正交试验。其中单脉冲能量设定在 0.50~0.10 mJ 之间,变化间隔为 0.05 mJ,搭接率分别设置为 0%、33%、50%、60% 和 67%,清洗次数设定为四次。

图 3 是铝合金表面清洗效果照片,其中红色区域内方块的漆层和氧化层清洗的较为彻底。当单脉冲能量小于 0.30 mJ 时,无论光斑搭接率为多少都无法将铝合金表面清洗干净,而当光斑搭接率大于 67% 时清洗效率过低且容易造成铝合金的热损伤,因此可以推断铝合金漆层和氧化层的激光清洗能量最低值为 0.30 mJ。单脉冲能量达到 0.40 mJ 时即使光斑之间不搭接,宏观上观察可知仍然可以将表面清洗干净,而零搭接可以有效提高激光清洗的效率,说明“快速”清洗所需的最低能量值为 0.40 mJ。

从表面上看红色区域内方块的漆层和氧化层都已清洗干净,但是不同的单脉冲能量和搭接率的清洗效果及热影响是有差别的。为了避免过高的

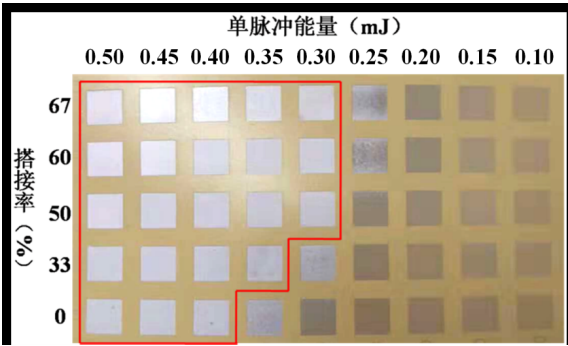


图 3 正交试验清洗效果

激光能量累积对基体产生热影响,应避免选择红色区域内高搭接率的组合参数(例如搭接率为 67% 时铝合金表面被熔融,如图 2 所示),而为了将铝合金表面的漆层和氧化层更加全面彻底地清洗干净,应避免选择红色区域内零搭接率的组合参数。所以合适的激光清洗组合参数区间应为单脉冲能量 0.35~0.50 mJ 和搭接率 33%~50% 的参数矩阵。观察(0.50 mJ, 50%)方块和(0.35 mJ, 33%)方块的微观形貌可知,铝合金表面的漆层和氧化层已经清洗干净且没有出现明显的热影响区,如图 4 所示。

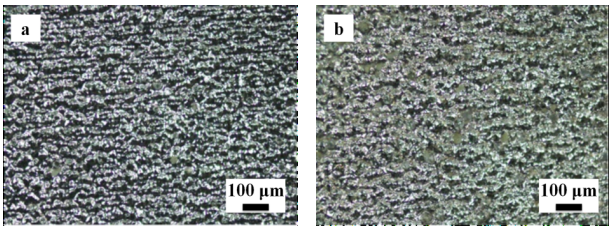


图 4 不同的组合参数清洗的铝合金表面微观形貌

2.3 单脉冲能量、光斑搭接率和离焦量的最优化参数组合

前文分析了激光焦点的清洗效果,然而焦点附近的激光也可以清洗掉污染物且不损伤基体^[8]。本节将研究分析离焦激光的清洗效果和热影响,分别选择离焦量 0 mm(焦点)、1 mm、2 mm 和 3 mm 做对比试验,单脉冲能量设置为 0.35~0.50 mJ,光斑搭接率选择 33% 和 50%。将不同离焦量的清洗效果列于表 2。

表 2 离焦激光清洗效果

单脉冲能量/mJ	离焦量/mm							
	0		1		2		3	
	33%	50%	33%	50%	33%	50%	33%	50%
0.50	洁净	洁净	洁净	洁净	洁净	洁净	洁净	洁净
0.45	洁净	洁净	洁净	洁净	洁净	洁净	洁净	洁净
0.40	洁净	洁净	洁净	洁净	洁净	洁净	残留	洁净
0.35	洁净	洁净	洁净	洁净	残留	洁净	残留	洁净

在 33% 的光斑搭接率下,当单脉冲能量较低(0.35 mJ)时只有在焦点以及离焦量 1 mm 的激光才能将漆层和氧化层清洗掉,离焦量超过 1 mm 则表面上有明显的底漆残留。当单脉冲能量增加至 0.40 mJ 时,只有离焦量 3 mm 的激光不能彻底去除

漆层和氧化层,而当单脉冲能量增加至 0.45 mJ 时即使离焦量达到 3 mm 仍然可以将铝合金表面清洗干净。对于 50% 的光斑搭接率,由于光斑重叠程度较高能量累积效果明显,即使单脉冲能量较低且离焦 3 mm 仍然可以将铝合金表面的漆层和氧化层全

部去除。

图5是单脉冲能量0.45 mJ、光斑搭接率33%的激光分别在离焦0 mm、1 mm和2 mm情况下得到的表面微观形貌。当离焦量为0 mm和1 mm时铝合金表面没有任何漆层残留,但焦点清洗的表面不如离焦1 mm的表面均匀平整,而离焦2 mm的清洗表面宏观上观察为洁净,微观下观察发现仍然有残留的漆层未被清洗掉。对比分析表2和图5的结果可知,当激光能量较低时只有接近焦点的激光才能清洗干净,而随着激光能量逐渐增加,距离焦点稍远处的激光也能够将铝合金表面清洗干净。对于一组能够清洗干净的激光参数组合,显然焦点处的激光能量最高,也最容易对铝合金表面产生热影响,随着离焦量的增加这种热影响也将逐渐降低。基于以上分析并考虑到漆层厚度不均匀以及聚焦误差等因素,激光清洗铝合金表面漆层和氧化层的最优化参数组合为单脉冲能量0.45 mJ、光斑搭接率33%和离焦量1 mm,并且需要清洗四次。

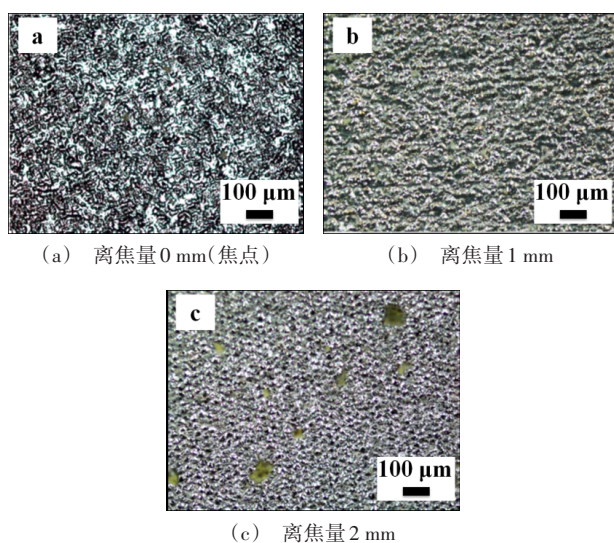


图5 不同离焦量清洗效果表面微观形貌

2.4 激光清洗对铝合金基体性能的影响

2.4.1 激光清洗的热影响

用优化后的参数组合清洗铝合金表面四次,用热成像仪观测了铝合金试片的温度分布情况,如图6所示。无论是第一次清洗还是第四次清洗,铝合金表面温度都不超过32℃。第一次清洗时热量主要集中在铝合金试片上,而第四次清洗时铝合金试

片温度较低,试片周围的温度较高。这是因为在第一次清洗时激光照射在漆层上,漆层吸收大部分能量并从铝合金表面脱落,而第四次清洗时已经没有残留的漆层,基体呈现出光亮的金属光泽将激光反射,表面吸收的激光能量较少。

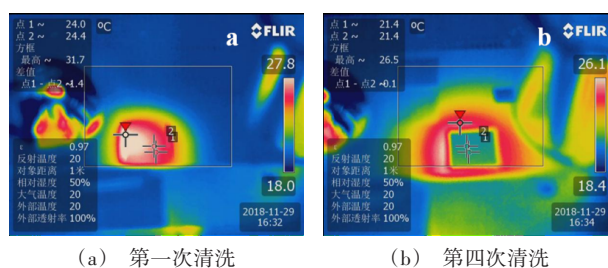


图6 激光清洗过程温度分布

用金相显微镜观察清洗四次的试片横截面,如图7所示。从图7(a)中可以清晰地看到已清洗部位没有任何覆盖,铝合金基体直接暴露在外,而未清洗部位有明显的氧化层和漆层,说明激光已将漆层和氧化层清洗干净。图7的(b)和(c)分别为激光清洗区和非清洗区的微观形貌,对比观察铝合金基体界面可以看出,激光清洗区的界面与非清洗区无任何区别,界面附近没有激光导致的过烧痕迹,说明该组合参数的激光既能将漆层和氧化层清洗干净,又不会对铝合金基体造成明显的热影响。

2.4.2 激光清洗对铝合金力学性能的影响

制备了三种不同表面状态的试样,测试了抗拉

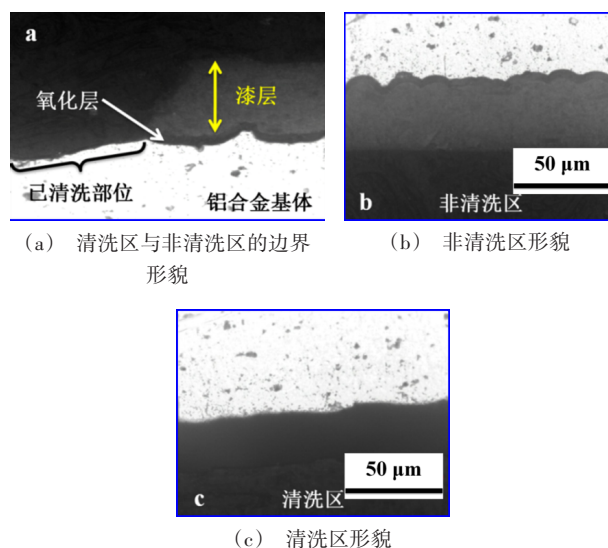


图7 激光清洗金属横截面的微观形貌

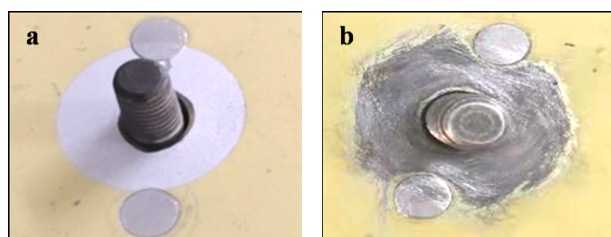
强度、屈服强度和延伸率,测试结果见表3。分析表3可知,经表面氧化和涂漆的拉伸试样的抗拉强度和屈服强度均小于未经表面处理的铝合金的力学性能值,这是因为铝合金表面的金属氧化层属于脆性材料,在一定程度上降低了拉伸试样的力学性能。而手工打磨的拉伸试样的力学性能值有所提升。激光清洗试样的力学性能与手工打磨试样近似,并且各项性能指标略高于手工打磨试样,这是因为激光对铝合金表面起到略微的强化作用导致的^[9]。

表3 力学性能对比试验结果

样件处理条件	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	延展率/%
未经表面处理	470	325	12.0
双面氧化涂漆	438	318	18.5
双面手工打磨	480	347	19.0
双面激光清洗	482	348	20.0

2.4.3 激光清洗与手工打磨的对比分析

图8是激光清洗与手工打磨的对比照片。从图中可以看出,激光清洗部位轮廓清晰,与未清洗部位间界限分明,对周边区域也没有造成任何污染。而手工打磨部位有明显的划痕,打磨形状也不够精准,打磨掉的金属屑容易污染周边区域。此外相比于手工打磨用时5~10 min,激光清洗只需30 s,大幅度提高了工作效率。



(a) 激光清洗

(b) 手工打磨

图8 激光清洗与手工打磨的对比照片

为了对比去除效果,分别测试了激光清洗和手工打磨部位的电阻值。激光清洗部位的最大电阻值不超过30 $\mu\Omega$,而手工打磨部位的电阻值为60 $\mu\Omega$ 。金属氧化物的导电性能低于金属,说明手工打磨部位氧化层去除不彻底,而激光可以将表面的漆层和氧化层全面彻底地清洗掉。

3 结论

通过铝合金漆层和氧化层的激光清洗应用研究,得出以下几点结论:

(1)单脉冲能量小于0.30 mJ的激光不能去除铝合金表面漆层和氧化层,能量介于0.30~0.40 mJ之间的激光需要调节光斑搭接率才能将铝合金表面清洗干净,能量大于等于0.40 mJ的激光可以将铝合金表面清洗干净;

(2)通过调节光斑搭接率可以控制激光能量在铝合金表面的累积清洗效果,对于能量较高的激光,过高的光斑搭接率会对铝合金表面造成热损伤;

(3)尽管激光在焦点处的能量最高,但焦点附近的激光更适合于铝合金表面漆层和氧化层的清洗去除;

(4)对于铝合金表面的氧化层和漆层,最佳的激光清洗参数组合为单脉冲能量0.45 mJ、光斑搭接率33%、离焦量1 mm,并且需要清洗四次。

参考文献

- [1] 章春来,姚春梅. 355nm脉冲激光清洗溶胶-凝胶膜面颗粒污染[J]. 中国科学(技术科学), 2016, 46(9): 926-930.
- [2] 张鑫,陈玉华. 各类型激光器在激光清洗技术应用中发展现状及展望[J]. 热加工工艺, 2016, 45(8): 37-40.
- [3] 陈国星,陆海峰,赵滢,等. 激光功率对不锈钢表面清洗效果影响的研究[J]. 光电工程, 2017, 44(12): 1217-1224.
- [4] 周桂莲,孙海迎,汪传生. 橡胶模具激光清洗的工艺研究[J]. 特种橡胶制品, 2008, 29(6): 34-36.
- [5] 吴东江,许媛,王续跃,等. 激光清洗硅片表面 Al_2O_3 颗粒的试验和理论分[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5): 764-770.
- [6] 占小红,范喜祥,高川云,等. 脉冲激光清洗碳纤维增强树脂基复合材料表面研究[J]. 航空制造技术, 2017, 20: 38-42.
- [7] 任志国,吴昌忠,陈怀宁,等. 低碳钢的激光除锈机理及表面性能研究[J]. 光电工程, 2017, 44(12): 1210-1216.
- [8] 倪加明,朱迅强,徐爱杰,等. 铝合金阳极氧化膜激光清洗工艺研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(16): 164-167.
- [9] 朱伟,孟宪伟,戴忠晨,等. 铝合金平板表面激光除漆工艺[J]. 电焊机, 2015, 45(11): 126-128.