

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.05.020

6061 铝合金焊后氧化物的激光清洗机理和工艺研究

李 祥, 王明娣, 郭敏超, 汤子麟, 陆文渊, 王 昊

(苏州大学机电工程学院, 苏州 215021)

摘要: 采用纳秒脉冲激光器对 6061 铝合金焊后氧化物进行激光清洗实验。首先分析焊斑清洗前和清洗后的表面形貌和元素组成, 探明焊后氧化物组成成分。其次再利用前期实验所获得不同工艺参数对清洗质量的影响规律, 设计正交实验, 划定各因素区间范围, 分析参数对清洗质量的影响权重。利用正交实验法分析得到: 影响表面轮廓线峰谷值的参数主次顺序为激光功率 > 脉冲频率 > 扫描速度 > 脉冲宽度; 影响氧元素质量百分比的参数主次顺序为脉冲宽度 > 扫描速度 > 激光功率 > 脉冲频率。通过综合平衡法最终获得优化工艺参数组: 扫描速度、激光功率、脉冲频率、脉冲宽度分别为 2 950 mm/s、141 W、29 kHz、330 ns。优化后可确保铝合金焊后氧化物清洗彻底、无基材损伤、清洗效率高。

关键词: 激光清洗; 激光技术; 铝合金; 焊后氧化物; 工艺参数

中图分类号: TN249

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2023)05-0933-08

Research on Laser Cleaning Mechanism and Process of Oxides After Welding of 6061 Aluminum Alloy

LI Xiang, WANG Mingdi, GUO Minchao, TANG Zilin, LU Wenyuan, WANG Hao

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, China)

Abstract: A nanosecond pulse laser is used to conduct laser cleaning experiments on the oxide after welding of 6061 aluminum alloy. Firstly, This paper analyzes the surface morphology and elemental composition of the solder joint before and after cleaning, and determines the composition of the oxide after welding. Secondly, based on the influence of different process parameters on cleaning quality obtained from previous experiments, orthogonal experiments are designed to delineate the range of each factor interval and analyze the weight of the influence of parameters on cleaning quality. By using the orthogonal experimental method, it is found that the order of parameters affecting the peak valley values of surface contour lines is: Laser power > pulse frequency > scanning speed > pulse width. The order of parameters that affect the weight percentage of o element is: Pulse width > scanning speed > laser power > pulse frequency. The optimal process parameter group is obtained through the comprehensive balance method: Scanning speed, laser power, pulse frequency, and pulse width are 2 950 mm/s, 141 W, 29 kHz, and 330 ns, respectively. The optimal parameters can ensure thorough oxide cleaning, no substrate damage, and high cleaning efficiency of aluminum alloy after welding.

Key words: laser cleaning; laser technology; aluminium alloy; post weld oxide; process parameters

基金项目: 江苏省科技计划专项资金(BE2022066-3); 苏州市重点产业技术创新-关键核心技术研发项目(SGC2021010)。

收稿日期: 2023-04-04; **修订日期:** 2023-05-15

通信作者: 王明娣, 女, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: wangmingdi@suda.edu.cn。

引用格式: 李祥, 王明娣, 郭敏超, 等. 6061 铝合金焊后氧化物的激光清洗机理和工艺研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(5): 933-940. LI Xiang, WANG Mingdi, GUO Minchao, et al. Research on laser cleaning mechanism and process of oxides after welding of 6061 aluminum alloy[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(5): 933-940.

6系铝合金由于具有焊接性能良好、强度高、耐腐蚀程度高的优势,在新能源汽车电池托盘制造过程中,被选为最主要采纳的原材料^[1-2]。通常采用氩弧焊焊接机加工后的多个铝性材零部件,形成新能源汽车电池托盘整体。由于铝元素比较活泼,其表面易生成一层氧化膜,在焊接完成后会留下黑灰色的焊斑^[3],如不清理焊斑内的黑灰和焊渣,后续的点胶工艺将无法有效完成,造成产品的密封性下降,同时还容易引起电池包自燃,带来行车安全隐患。因此焊斑清洗工艺必不可少,且其工作效果和效率非常重要。

目前采用的焊斑清洗手段主要有手工机械打磨^[4]、喷砂或喷丸^[5]、酒精擦拭^[6]、超声波清洗^[7]和高压水射流^[8]等,这些清洗手段普遍存在效率低、成本高、操作复杂、污染严重和基材损伤大等问题。较传统清洗手段,激光清洗技术的绿色、可控性好、可在线清洗、稳定性高等优点为焊斑清洗提供了一个新的选择^[9-11]。

在激光清洗研究方面,目前国内外学者主要通过改变激光的种类和激光工艺参数,结合基材和污染物的物化特性,寻求合适的清洗参数对污染区进行去除,并与实际生产相结合。英国 Alshaer 等^[12]采用短脉冲激光清洗铝合金的焊接区域,研究表明激光清洗基于热消融的机制,有效去除了有助于形成孔隙的污染物和氧化层,显著降低了焊缝熔合区的孔隙率。法国 Grojo 等^[13]采用紫外纳秒脉冲激光辐射不同种类的透明吸收粒子,通过原位诊断研究可能涉及“激光-颗粒-表面”相互作用的各种烧蚀机制。金文涛等^[14]观察铝合金型材焊前激光清洗和焊后激光清洗效果,研究表明激光清洗对母材和焊缝表面未产生影响,性能指标满足要求,且其可以显著提高铝合金车体自动焊接设备的生产效率。李宇强等^[15]采用脉冲激光清洗 6061 铝合金表面自然氧化层,研究表明铝合金表面经清洗后表面轮廓、粗糙度发生明显变化,影响到后续加工工艺(如焊接、涂装等);王蔚^[16]等采用脉冲光纤激光器清洗 7075 铝合金阳极氧化膜,分析得出优化后的清洗工艺参数并探究该过程的清洗机制;童懿等^[17]采用纳秒脉冲激光器清洗 150 μm 厚环氧基底漆涂层,探究该过程的清洗机制和脉冲频率对烧蚀量和剥离热应力的影响。

综上所述,激光清洗的工艺参数会影响到清洗的效果、基材的表面特性和激光清洗机制,但是,目前激光清洗 6 系铝合金焊斑的机理和工艺研究相对较少。此外,脉冲激光清洗较其他类型激光用于铝合金清洗更有优势,有着更高的光束质量和光光转换效率。基于以上背景,本文通过分析新能源汽车电池托盘基材和焊后焊斑的物化参数,选择脉冲

激光器对焊斑进行清洗实验,以表面轮廓线峰谷值和氧元素质量百分比为评价指标,进行焊斑激光清洗工艺参数组的优化研究。

1 实验方案

1.1 实验材料

实验采用被广泛应用于新能源电池托盘制作的 6061-T651 铝合金型材,其所含元素组成见表 1。由表 1 可知,铝合金的主要元素为 Mg 和 Si。氩弧焊焊接铝合金后形成的焊后氧化物的元素成分预估为 C-Mg-Al 化合物,具体的物化参数见后文分析。

表 1 6061-T651 铝合金型材元素质量分数

Table 1 6061-T651 Mass fraction of elements in aluminum alloy profiles

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ti	Al
0.70	0.25	0.22	0.05	1.06	0.08	0.03	Bal.

1.2 实验方案

本试验选用的是 JPT 公司 YD-FLP-200-MM-10-100-A 型激光器,中心波长为 1 064 nm,平均输出功率为 200 W,最大脉冲能量 10 mJ,脉冲频率范围为 16~2 000 kHz,脉冲宽度为 80~500 ns。设置弓字形填充方式,光头与工件保持在 210 mm(焦距)。

首先分析焊斑清洗前和清洗后的表面形貌和元素组成,探明焊后氧化物组成成分。其次设计正交实验,以氧元素和表面轮廓峰值作为清洗质量的主要判别标准,结合前期激光工艺参数研究焊斑清洗影响规律,划定适合的激光参数区间范围,对各影响因子进行极差分析,得出优化的激光清洗参数组;最后实验验证电池托盘常见焊接位置的清洗效果。

1.3 测试分析方案

本试验选用 X 射线 EDS 元素分析仪,分析样品清洗前后元素质量分数的变化;选用日本基恩士 VHX-7000 型超景深三维显微镜和杭州雷迈 Nano-System NV-1800 3D 轮廓仪,观察焊斑的金相组织和表面轮廓;选用上海衡鹏 MOTIC SMZ16 系列低倍率显微镜,观察清洗后表面形貌变化。

2 激光清洗实验分析

2.1 焊后金属铝表面物化参数分析

通过 X 射线 EDS 元素分析仪、SEM 扫描电子显微镜、金相显微镜和 3D 轮廓测量仪等专业分析仪器,分析焊斑样品的元素组成、宏观形貌和微观形貌。实验材料为新能源电池托盘铝合金局部焊斑处,如图 1 所示。



图1 铝合金局部焊斑

Fig.1 Local weld spot of aluminum alloy

2.1.1 EDS 元素检测

利用 EDS 能谱仪分析样品的元素组成,所含元素组成如图 2、表 2 所示。由表 2 可知,焊斑的主要成分是氧化铝和氧化镁混合物。

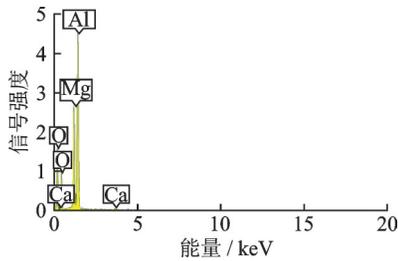


图2 焊斑主要元素质量分数

Fig.2 Mass fraction of main elements in welding spot

表 2 焊斑 EDS 元素质量分数检测结果

Table 2 EDS element mass fraction test results for weld spots

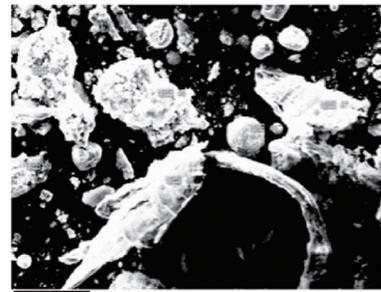
Al	O	Mg	Si	Ca	Else
54.2	38.7	6.4	0.3	0.2	0.2

2.1.2 扫描电镜分析

托盘零件焊接前工人并不会对表面的氧化物、油污等杂质进行去除,在进行焊接时,其表面的油污、水分会导致激光能量吸收不稳定,焊疤表面会产生气孔。宏观层面表现为焊斑表面不平整,焊斑附近存在黑灰,影响产品美观和点胶作业。从图 3

来看,焊接部位出现塌陷、飞溅和咬边,影响焊接质量,降低产品的密封性。

图 3 利用 SEM 观察表面微观形貌。结果显示焊斑组织整体较为致密,但焊斑颗粒的大小形状不一,呈现随机分布,且存在颗粒堆叠现象。图 3(a) 可以清楚看到焊斑颗粒大小和形状不一;而图 3 (b) 经过更大倍数的放大,可以看出颗粒分布不均,且具有颗粒堆叠现象。



(a) 100 μm



(b) 250 μm

图3 焊斑颗粒的微观形貌

Fig.3 Micro-morphology of weld spot particles

2.1.3 3D 轮廓测量

利用三维显微镜、3D 轮廓仪分析焊斑的表面精确形貌,检测结果见图 4。采取 3 点式检测法,即在靶心点、中间点和边缘点处测量焊斑的形态和厚度,清楚看到焊斑的厚度随距离焊斑中心位置向四周递减,其表面也逐渐平整。在靶心点处,最厚焊斑达 84.8 μm;在中心点位处,最厚

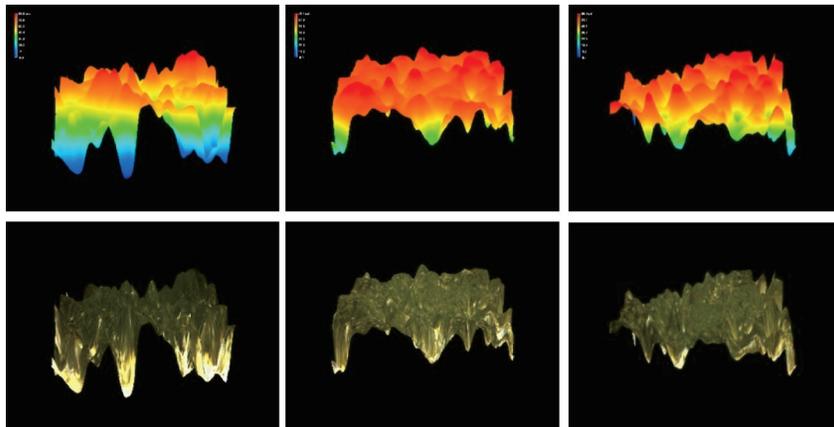


图4 不同部位的焊斑三维形貌

Fig.4 Three-dimensional morphology of weld spots at different parts

焊斑为 78.1 μm;在距离焊疤最远位置,最厚焊斑达 69.6 μm。

2.2 激光清洗焊斑的正交试验优化

2.2.1 正交实验设计及结果

结合前期单因素实验激光工艺参数对焊斑清洗影响规律研究,考虑到各个因素之间的相互影响关系,具有一定的局限性。因此对激光扫描速度(A)、功率(B)、频率(C)、脉冲宽度(D)4个影响参数划定实验区域,并进行正交实验,在4个影响因子下根据清洗后的表面轮廓线峰谷值、氧元素质量百分比来寻求最佳的清洗参数,正交实验参数见表3。

本实验为确定4个参数的影响权重,设计了16组实验,并以清洗后材料表面的轮廓线峰谷值和清

洗区域氧元素占比作为清洗效果,实验安排表及其结果分别如表4和图5所示。

表4 正交试验安排及结果

Table 4 Arrangement and results of orthogonal test

因素	A	B	C	D	表面轮廓线峰谷值	氧元素质量百分比/%
实验1	2 500	141	20	330	5.8	13.5
实验2	2 500	144	23	345	7.7	7.1
实验3	2 500	147	26	360	4.9	10.7
实验4	2 500	150	29	375	5.1	6.6
实验5	2 650	141	23	360	10.3	17.2
实验6	2 650	144	20	375	2.0	4.3
实验7	2 650	147	29	330	5.9	13.8
实验8	2 650	150	26	345	4.3	4.4
实验9	2 800	141	26	375	12.2	3.5
实验10	2 800	144	20	360	3.7	3.0
实验11	2 800	147	29	345	1.0	1.1
实验12	2 800	150	23	330	4.5	6.9
实验13	2 950	141	29	345	9.1	10.1
实验14	2 950	144	26	330	7.1	17.4
实验15	2 950	147	23	375	4.3	5.6
实验16	2 950	150	20	360	5.5	8.2

表3 正交实验水平及参数

Table 3 Level and parameters of orthogonal experiment

因素水平	扫描速度/(mm·s ⁻¹)	功率/W	脉冲频率/kHz	脉冲宽度/ns
1	2 500	141	20	330
2	2 650	144	23	345
3	2 800	147	26	360
4	2 950	150	29	375

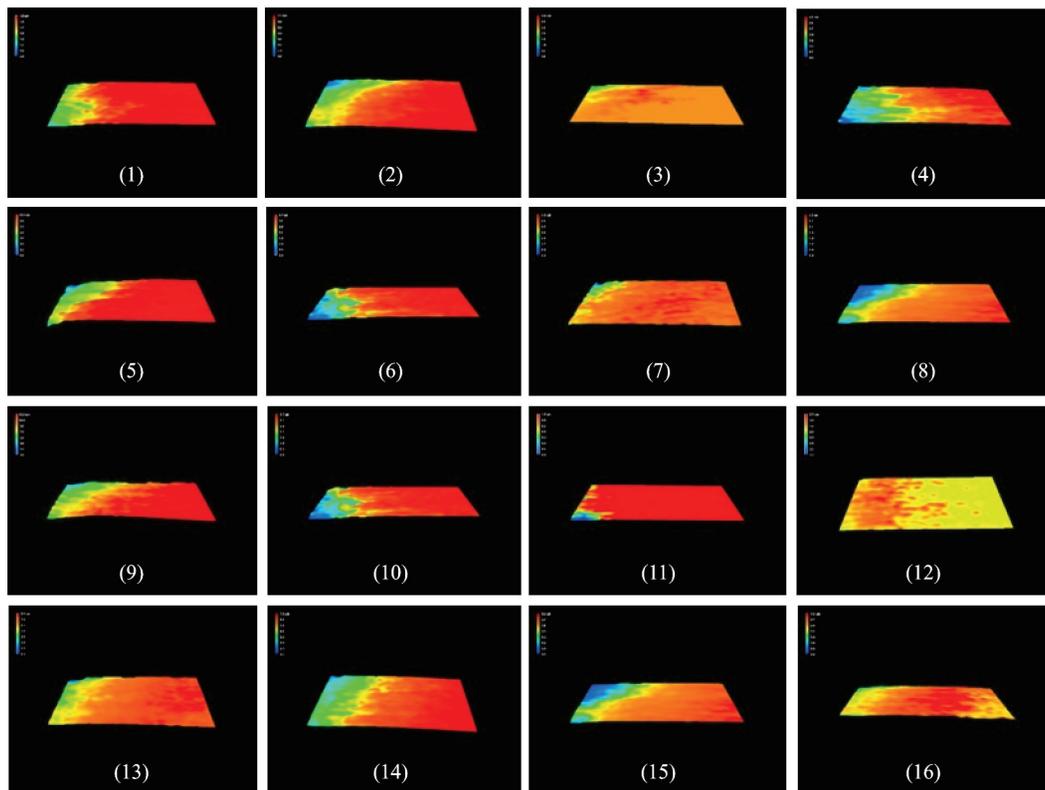


图5 各组试验基材的三维轮廓

Fig.5 Three-dimensional profile of each group of test substrates

2.2.2 正交试验优化焊斑的激光清洗参数

实验采取极差分析法,通过 $R = \max\{K_1, K_2, K_3, K_4\} - \min\{K_1, K_2, K_3, K_4\}$ 求出各

影响因子的水平极差,若差值越大则表明此因素对实验结果影响越大,反之则越小。各因素实验的极差结果如表5所示。

表 5 表面轮廓线峰谷值的平均响应度和极差
Table 5 Average responsiveness and range of peak and valley values of surface profile

表征	项目	因素			
		扫描速度/(mm·s ⁻¹)	功率/W	脉冲频率/kHz	脉冲宽度/ns
表面轮廓线峰谷值	K ₁	5.875	9.350	3.575	6.100
	K ₂	5.625	5.125	6.700	5.525
	K ₃	5.350	4.025	7.125	5.825
	K ₄	6.500	4.850	5.950	5.900
	极差 R	1.150	5.325	3.550	0.575
	优方案	A4B1C3D1			
	影响主次顺序	B>C>A>D			
氧元素质量百分比	K ₁	9.475	11.075	8.375	12.900
	K ₂	9.900	7.95	9.200	5.650
	K ₃	3.625	7.800	8.978	9.755
	K ₄	10.325	6.500	6.775	5.000
	极差 R	6.700	4.575	2.425	7.900
	优方案	A3B4C4D4			
	影响主次顺序	D>A>B>C			

从表面轮廓峰谷值结果可知,对表面轮廓影响的工艺参数权重从小到大依次为脉冲宽度(D)、扫描速度(A)、重复频率(C)、功率(B),扫描速度和脉冲宽度对清洗结果影响较小,而激光功率以及脉冲频率的影响较大,结果显示表面轮廓峰谷值在1~12.2 μm,清洗后工件表面轮廓峰谷值越小则表明激光清洗后表面越平整,清洗效果越好。激光功率和重复频率决定了激光的能量密度,当降低扫描速度,光斑的搭接率上升,从而单位面积上表面吸收了更多的激光能量,容易造成过洗现象,在表面留下较大凹坑,提高表面轮廓峰值,同时由于固、液相界面与时间之间存在某种二次方根的关系,此时清洗后表面易生成一道道斑马纹^[18],降低清洗质量。当增加激光扫描速度,光斑的搭接率下降,去除等面积的焊斑时间减少,但材料表面热积累减少,对焊斑难以去除。当采用过低激光功率或过高脉冲频率时,激光单脉冲能量太低,无法达到焊斑清洗阈值,导致激光击穿污染物产生离子爆破^[19],达不到清洗效果。从表面轮廓峰谷值来看最佳工艺组合为A4B1C3D1(扫描速度v=2 950 mm/s,功率P=141 W,脉冲频率f=26 kHz,脉冲宽度τ=330 ns)。

从氧质量分数的极差结果分析可知,工艺参数的影响权重从小到大依次为重复频率(C)、功率(B)、扫描速度(A)、脉冲宽度(D),即脉冲频率对清洗效果质量影响较小,脉冲宽度、扫描速度以及激光功率影响较大,氧元素占比在1.1%~17.4%

变换,氧元素质量分数值越小,说明焊后氧化物去除率越高,露出基材的面积越大,清洗效果越好。从实验结果可知,当脉冲宽度τ=400 ns时,此时激光峰值功率达到60 kW,氧含量最低,焊斑表面平整明亮,露出基材的底色,无明显焊渣和黑灰。当单脉冲能量一定时,降低脉冲宽度,峰值功率增大,激光输入时间过短,焊斑表面热骤冷现象非常明显,热影响区非常小,激光作用深度不够。当采用较低扫描速度或过高的激光功率时,激光光斑搭接率会提高,单位面积能量密度提高,基材易二次氧化。从氧质量分数来看,优化工艺参数组为A3B4C4D4(扫描速度v=2 800 mm/s,功率P=150 W,脉冲频率f=29 kHz,脉冲宽度τ=375 ns)。

利用综合平衡法分析,在确保基材表面不损伤以及焊斑彻底去除的前提下,本文选取优化工艺数组为:扫描速度v=2 950 mm/s,功率P=141 W,脉冲频率f=29 kHz,脉冲宽度τ=330 ns。

3 优化工艺数组验证实验

选择优化参数进行清洗时,肉眼可见4类焊接区域(套筒、凹槽、两拐角)的焊斑大部分被清洗干净,露出基材底色,具体效果见图6。从微观形貌来分析激光清洗前后基材表面效果,利用金相显微镜、EDS元素分析仪和三维轮廓测量仪等仪器,对焊斑清洗部位进行微观分析。

图7显示了激光清洗前后板件拐角的金相图,从图7中看出焊接表面的黑色基体基本去除,清洗后的板材表面会存在水波纹,这是因为在激光照射

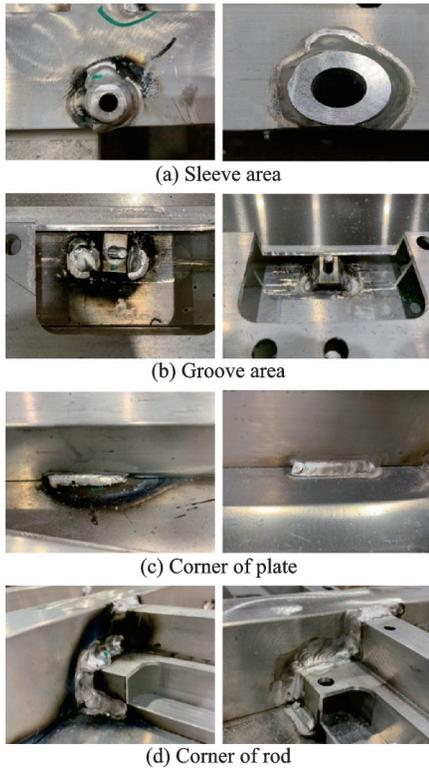


图6 优化参数组的清洗前后效果

Fig.6 Effect of optimized parameter group before and after cleaning

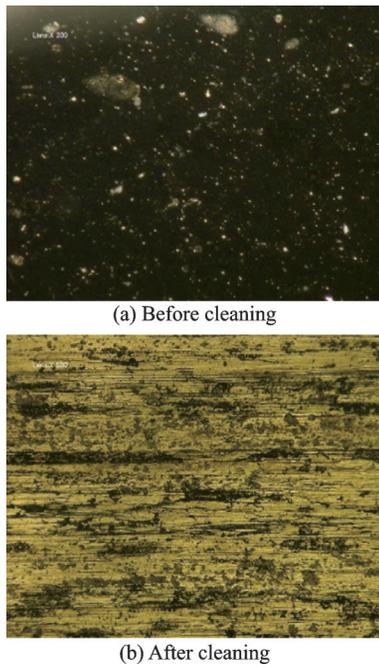


图7 焊斑清洗前后金相对比

Fig.7 Metallographic comparison before and after welding spot cleaning

时,焊斑表面材料融化速度远大于气化速度,使得熔融物快速堆积,从而呈现水波纹。

图8显示了清洗前后的焊斑表面的三维轮廓,从结果来看,经过激光优化参数实验后,焊接表面清洗后趋于平整光滑,尖状堆积物明显降低,基材

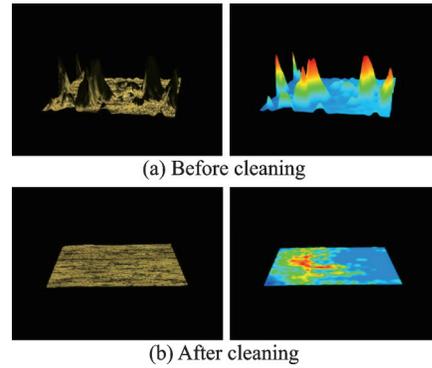


图8 清洗前后三维轮廓对比

Fig.8 Comparison of 3D contours before and after cleaning

表面的最高峰值从64 μm降为2.0 μm,这说明清洗后基材表面粗糙度降低,这对后续涂胶和电池模组的安装带来便利。

图9、表6显示了优化后激光参数组清洗前后基材表面各元素质量分数,从中可以看出Al元素质量分数从56.7%上升为92.1%,氧元素质量分数从38.3%下降为3.7%,Mg元素质量分数从3.9%上升为4.1%,这说明激光作用后,基材表面焊后氧化物基本被清除,部分氧化物可能是其温度没有达到气化温度,融化后滞留在基材表面所导致。

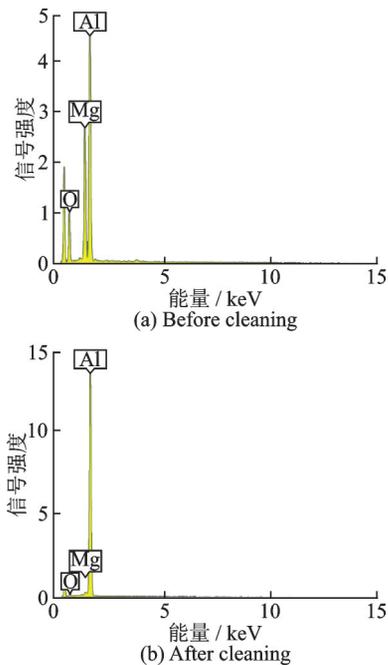


图9 优化参数组清洗前后元素质量分数对比

Fig.9 Comparison of element mass fractions before and after cleaning in the optimization parameter group

表6 优化参数组清洗前后主要元素质量分数

Table 6 Mass fraction of main elements of optimization parameter group before and after cleaning %			
焊后氧化物	Al	O	Mg
清洗前	56.7	38.3	3.9
清洗后	92.1	3.7	4.1

综上所述,优化后的工艺参数满足新能源电池托盘的焊斑清洗要求,符合企业标准,为后续点胶装工艺打下了良好基础。

4 结 论

本文对6061铝合金表面的焊后氧化物激光清洗做了研究,主要研究激光参数(激光功率、扫描速度、脉冲宽度、频率)对6061铝合金表面焊斑清洗效果的影响,实验从清洗表面的轮廓线峰谷值、氧元素质量百分比,主要得要以下结论:

(1)6061铝合金经过氩弧焊焊后,会在铝合金表面形成一层致密的氧化铝膜,氧化物主要由氧化镁和氧化铝组成,经过测试大约90%为氧化铝,且焊斑的厚度随距离焊疤越近而越厚。

(2)分析板件表面三维轮廓峰谷值的极差结果可知,工艺参数权重从小到大依次为频率、扫描速度、脉冲宽度、功率,即扫描速度和脉冲宽度对清洗结果影响较小,而激光功率以及脉冲频率的影响较大,功率和脉冲频率极大影响到激光能量密度。

(3)从氧元素质量百分比的极差结果分析可知,工艺参数的影响权重从小到大依次为脉冲频率、功率、扫描速度、脉冲宽度,即脉冲频率对清洗效果质量影响较小,脉冲宽度、扫描速度以及激光功率影响较大。

(4)从正交试验及工艺验证实验后的基材表面结果分析得出优化清洗参数。即扫描速度 $v=2\ 950\text{ mm/s}$ 、功率 $P=141\text{ W}$ 、脉冲频率 $f=29\text{ kHz}$ 、脉冲宽度 $\tau=330\text{ ns}$ 时,激光清洗能够确保有效去除焊斑且并不损伤表面基材,满足企业要求。

参考文献:

- [1] 马其华,周琪,沈丰,等.微型新能源汽车车架-电池托盘一体化设计[J].制造业自动化,2020,42(10):8-12.
MA Qihua, ZHOU Qi, SHEN Feng, et al. Integrated design of frame-battery tray for miniature new energy vehicle[J]. Manufacturing Automation, 2020, 42(10): 8-12.
- [2] 陈晓阳,段江峰.新能源汽车用电池包镁合金托盘加工工艺:CN107891248A[P].2018.
CHEN Xiaoyang, DUAN Jiangfeng. Processing technology of magnesium alloy tray for battery packs used in new energy vehicles: CN107891248A[P]. 2018.
- [3] 陈银银.新能源汽车电池外壳激光焊接工艺研究[J].轻工科技,2021(11):51-52.
CHEN Yinyin. Laser welding process for new energy vehicle battery casing[J]. Light Industry Science and Technology, 2021(11): 51-52.
- [4] 翟燕玲,宋统战.机械打磨在钢结构制作中的意义浅析[J].商品与质量,2012(2):73.
- [5] 解宏杰.谈采用喷砂法清除汽轮机设备积垢[J].山西建筑,2004,30(17):184-185.
XIE Hongjie. Talking about using sandblasting method to remove scale from steam turbine equipment[J]. Shanxi Architecture, 2004, 30(17): 184-185.
- [6] 吕晓龙,胡保安,马世虎,等.聚偏氟乙烯中空纤维膜有机污染的化学清洗研究[J].天津工业大学学报,2004,23(6):399-403.
LÜ Xiaolong, HU Baoan, MA Shihu, et al. Chemical cleaning out organic fouling of PVDF hollowfiber membranes[J]. Journal of Tiangong University, 2004, 23(6): 399-403.
- [7] 李晓东,刘传绍.超声波清洗技术的研究与应用现状[J].清洗世界,2009,25(1):28-31.
LI Xiaodong, LIU Chuanshao. Present research and development of ultrasonic cleaning[J]. Cleaning World, 2009, 25(1): 28-31.
- [8] 郑亮,刘先银.机械和高压水射流管路清洗方法的比较[J].清洗世界,2004,20(5):49-53.
ZHENG Liang, LIU Xianyin. Comparison between the tube cleaning methods of mechanical and high pressure water jet[J]. Cleaning World, 2004, 20(5): 49-53.
- [9] 王泽敏,曾晓雁,黄维玲.激光清洗工艺的发展现状与展望[J].激光技术,2000,24(2):68-73.
WANG Zemin, ZENG Xiaoyan, HUANG Weiling. Status and prospect of laser cleaning procedure[J]. Laser Technology, 2000, 24(2): 68-73.
- [10] ARNOLD N. Theoretical description of dry laser cleaning[J]. Applied Surface Science, 2003, 208(3): 15-22.
- [11] LUK' YANCHUK B S, ARNOLD N, HUANG S M, et al. Three-dimensional effects in dry laser cleaning[J]. Applied Physics A (Materials Science Processing), 2003, 77(2): 209-215.
- [12] ALSHAER A W, LI L, MISTRY A. The effects of short pulse laser surface cleaning on porosity formation and reduction in laser welding of aluminium alloy for automotive component manufacture[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 64: 162-171.
- [13] GROJO D, CROS A, DELAPORTE P, et al. Experimental investigation of ablation mechanisms involved in dry laser cleaning[J]. Applied Surface Science, 2007, 253(19): 8309-8315.
- [14] 金文涛,陆安进,戴忠晨.激光清洗技术在轨道车辆铝合金车体自动焊中的应用研究[J].金属加工,2019,9:17-20.
JIN Wentao, LU Anjin, DAI Zhongchen. Application

- research of laser cleaning technology in automatic welding of aluminum alloy body of rail vehicles [J]. *MW Metal Forming*, 2019, 9: 17-20.
- [15] 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 Yuqiang, GUO Linyu, JIANG Ping, et al. Experimental study on surface morphology changes and process parameter optimization of aluminum alloy laser cleaning[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(22): 161-171.
- [16] 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 Wei, LI Xiangjin, LIU Weijun, et al. The influence of process parameters on surface quality of laser cleaning 7075 aluminum alloy anodic oxide film [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49 (16) : 189-203.
- [17] 童懿, 邱太文, 易俊兰, 等. 脉冲频率对油漆漆层激光清洗作用机制的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(19): 275-285.
- TONG Yi, QIU Taiwen, YI Junlan, et al. Effect of pulse frequency on laser cleaning mechanism of paint coating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(19): 275-285.
- [18] 丁帅帅, 刘国东, 黎相孟, 等. 纳秒激光对金属清洗着色机理及质量的研究[J]. *表面技术*, 2021, 50(3): 183-190.
- DING Shuaishuai, LIU Guodong, LI Xiangmeng, et al. Study on the mechanism and quality of metal cleaning and coloring by nanosecond laser[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(3): 183-190.
- [19] 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 Jian, HUANG Yi, DONG Wenqi, et al. Experimental study on nanosecond laser cleaning of anodic oxide film of 5038 aluminum alloy [J]. *Applied Laser*, 2019, 39(1): 171-179.

(编辑:陈琚)