

# 焊前激光预处理的铝合金表面氧含量的分布及影响

佟艳群<sup>1\*</sup>, 张昂<sup>1</sup>, 黄建宇<sup>1</sup>, 李瑞峰<sup>2</sup>, 周建忠<sup>1</sup>, 陈小明<sup>3</sup>, 任旭东<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013;

<sup>2</sup>江苏科技大学材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013;

<sup>3</sup>浙江省水利水电装备表面工程技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310012

**摘要** 为提高 6061 铝合金的焊缝质量, 采用纳秒脉冲激光预处理 6061 铝合金表面, 利用扫描电子显微镜观察其表面形貌, 研究了不同激光参数下氧元素的线、面含量及分布; 为了验证清洗效果, 进行了焊接实验。结果表明: 最优的激光预处理参数为: 激光功率 15 W, 清洗 5 次。在最优的加工参数下, 表面氧元素的质量分数为 3.23%, 氧主要分布在光斑搭接处, 铝合金焊缝平滑均匀, 无明显的缺陷存在; 激光预处理后, 铝合金表面的氧元素含量越低, 焊缝质量越高; 分布于光斑周围的少量氧元素不影响焊接效果。

**关键词** 激光技术; 激光清洗; 面能谱; 焊缝质量; 6061 铝合金; 氧化膜

中图分类号 TG441.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0202003

## Distribution and Influence of Oxygen Content of Laser Pretreated Aluminum Alloy Surface Before Welding

Tong Yanqun<sup>1\*</sup>, Zhang Ang<sup>1</sup>, Huang Jianyu<sup>1</sup>, Li Ruifeng<sup>2</sup>, Zhou Jianzhong<sup>1</sup>,  
Chen Xiaoming<sup>3</sup>, Ren Xudong<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

<sup>2</sup>School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology,  
Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

<sup>3</sup>Key Laboratory of Surface Engineering Technology for Water Resources and Hydropower Equipment in  
Zhejiang Province, Hangzhou, Zhejiang 310012, China

**Abstract** In order to improve the welding quality of 6061 aluminum alloy, we utilize the nanosecond pulse laser to pretreat 6061 aluminum alloy, and then observe its surface morphology with scanning electron microscope. The contents and distribution of oxygen at different laser parameters are studied by line analysis and surface analysis. In order to verify the laser cleaning effect, we carry out the welding experiments. The research results show that the optimal laser pretreatment parameters is cleaning the aluminum alloy surface 5 times with 15 W pulse laser power, which makes the mass fraction of oxygen is 3.23%, and oxygen is mainly distributed in the overlapping place of the spot. The weld is smooth and uniform, and without any obvious defects after pretreatment with laser optimum process parameters. The lower surface oxygen content, the higher weld quality. The small amount of oxygen distributed around the spot does not affect the welding quality.

**Key words** laser technique; laser cleaning; surface energy spectrum; weld quality; 6061 aluminum alloy; oxide film

**OCIS codes** 140.3390; 140.3510; 160.2120

收稿日期: 2018-08-06; 修回日期: 2018-08-27; 录用日期: 2018-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(51405200, 51479082)、中国博士后科学基金面上项目(2015M580395)、国家水泵及系统工程技术研究中心开放课题(NRCP201606)、浙江省水利水电装备表面工程技术研究重点实验室开放基金(2017SLKL005); 江苏大学高级人才项目(14JDG172)、江苏省产业前瞻与共性关键技术重点项目(BE2017001-2)

\* E-mail: tongyanqun@163.com; \*\* E-mail: renxudong@163.com

# 1 引 言

铝合金属于轻质合金,其应用范围涉及多个领域。铝合金在空气中易被氧化而在表面生成一层致密的氧化膜,在焊接过程中,这层氧化膜会阻碍母材熔化并形成熔渣,降低焊接质量<sup>[1-2]</sup>。为了获得高质量的焊缝,焊前需要彻底清除铝合金表面的氧化层及其他污染物<sup>[3]</sup>。传统的处理方法主要包括机械清洗法和化学清洗法<sup>[4-5]</sup>;机械清洗法效率低下,氧化膜清除不彻底;化学清洗法会对环境产生污染,且无法对大尺寸部件进行清洗。

激光清洗技术的出现为铝合金焊前预处理提供了一种新型、高效、无损的方法,该方法将是激光光束聚焦在材料表面,使表面物质发生物理或化学反应后脱离表面,从而达到对铝合金表面进行预处理的目的<sup>[6-7]</sup>。激光预处理铝合金表面具有清除范围大、不损伤基材、无污染等优势。Meja 等<sup>[8]</sup>采用不同波长的激光对厚度为 20 mm 的铝合金氧化膜(黑色)进行激光清洗后发现,氧化膜对激光能量的吸收效果较好,因此,氧化膜的去除效果较好。Rechner 等<sup>[9]</sup>采用 Nd:YAG 激光器去除铝合金表面的 TiZr 涂层,然后采用 X 射线光电子能谱分析(XPS)检测技术对铝合金表面进行检测,结果表明,激光能够去除铝合金表面大量的 Fe、C、Si、O 等元素,而且铝合金的拉伸强度得以提高。罗雅等<sup>[10]</sup>采用激光清洗工艺对 2219 铝合金板材进行预处理,研究了清洗速度与表面形貌的关系,结果发现,当清洗速度为 3.5 m/min

时,清洗效果最佳,且铝合金的焊接性能得到了明显改善。为了提高 3 mm 厚 5A06 铝合金的焊接质量,Wang 等<sup>[11]</sup>采用 Nd:YAG 激光器对铝合金进行清洗,结果发现,激光预处理可使铝合金表面的氧含量明显下降,且气孔率也有所下降。陈一鸣等<sup>[12]</sup>研究了铝合金光纤激光清洗的机理以及激光参数对铝合金表面状态的影响,认为激光清洗可以提高焊缝的成形质量和焊接接头的力学性能。Haboudou 等<sup>[13]</sup>采用化学脱脂、金刚砂纸(P220,P800)打磨、喷砂以及激光清洗方法对 A5083 铝合金表面进行预处理,结果发现,激光预处理可以显著降低铝合金的气孔率(气孔率低于 2%)。国内外学者的研究表明:焊接前对铝合金表面进行激光预处理是有效的。

激光预处理后,铝合金表面的氧元素含量、分布会直接影响其焊接质量,本文采用扫描电子显微镜观察铝合金的表面形貌,采用 X 射线能谱技术获得氧元素的线分布和面分布,分析激光参数的影响规律,利用 X 射线无损探伤机探测未处理表面和激光预处理表面的焊接效果,同时观察激光处理后的焊接接头的形貌,分析氧元素含量及分布对焊缝质量的影响,为 6061 铝合金的预处理、焊接工艺提供参考依据。

## 2 实验方法与仪器

### 2.1 实验材料

实验材料选用 6061 铝合金,其尺寸为 6 mm×6 mm×3 mm,主要化学成分如表 1 所示。

表 1 6061 铝合金的主要化学成分<sup>[14]</sup>

Table 1 Main chemical composition of 6061 aluminum alloy<sup>[14]</sup>

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Mass fraction /%	0.4-0.8	0.7	0.15-0.4	0.15	0.8-1.2	0.04-0.35	0.25	0.15	Bal.

### 2.2 实验仪器

实验使用的激光器为 IPG-HP-100 脉冲式光纤激光器(最大功率为 100 W,脉冲宽度为 100 ns,波长  $\lambda=1064$  nm,聚焦光斑直径  $D=50$   $\mu\text{m}$ )。激光清洗系统示意图如图 1 所示:激光器通过光纤与扫描振镜相连,控制激光光斑的运行轨迹;计算机及控制系统用于控制激光器输出的光束以及振镜的扫描区域;二维移动平台置于激光器扫描振镜和聚焦透镜的下方,以方便样品的移动以及保证振镜的扫描区域能覆盖整个工作区;水冷设备用来抑制激光器工作时产生的大量的热,稳定光束的输出质量。

焊接系统采用 ABB 机器人和机器人控制箱控

制激光的输出以及激光焊接路径,焊接用激光器采用 IPG YLS-6000 连续出光式光纤激光器,激光的输出功率为 6.0 kW(可调),波长为 1064 nm,聚焦光斑的直径为 0.29 mm。采用 S-3400N 型扫描电子显微镜(SEM)观察铝合金的表面形貌,采用扫描电子显微镜附带的 X 射线能谱仪(EDS)测试铝合金表面氧的质量分数(简称“氧含量”)和分布;采用 XY-1504/4 型 X 射线无损探伤仪检测铝合金的焊缝质量。

### 2.3 实验方法

激光清洗系统设置重复频率  $f=100$  kHz,激光功率  $P$  选取 10~25 W。清洗路径及搭接方式如图 2 所示。

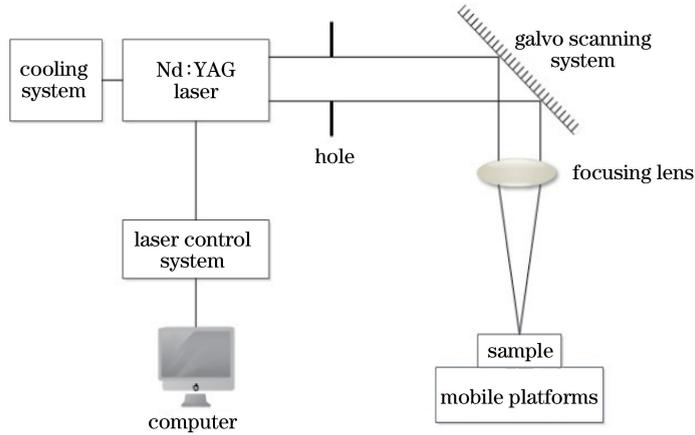


图 1 激光清洗系统示意图

Fig. 1 Schematic of laser cleaning system

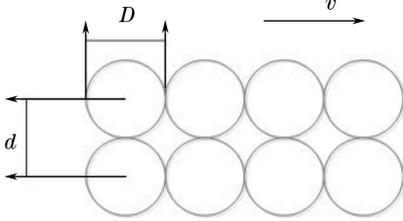


图 2 光斑搭接示意图

Fig. 2 Schematic of spots overlapping

光斑左右搭接率的表达式为

$$\eta_{\text{left-right}} = 1 - \frac{v}{D \cdot f}, \quad (1)$$

式中： $\eta_{\text{left-right}}$  为光斑的左右搭接率； $D$  为光斑直径， $\mu\text{m}$ ； $f$  为重复频率， $\text{Hz}$ ； $v$  为扫描速率， $\text{mm/s}$ 。

光斑上下搭接率的表达式为

$$\eta_{\text{up-down}} = 1 - \frac{d}{D}, \quad (2)$$

式中： $\eta_{\text{up-down}}$  为激光光斑的上下搭接率； $d$  为上下两个激光光斑圆心间的距离。实验中保持两个方向的

搭接率一致，因此，在文中统一用  $\eta$  表示光斑搭接率。

采用图 3(a)所示的对接焊的形式进行焊接，采用激光自熔焊，不添加任何助剂或填充材料。实验用铝合金材料的表面具有较高的反射率，为避免激光束被铝合金反射至谐振腔内，造成激光器损坏，在满足能量输入的要求下，设置激光偏角  $\alpha = 10^\circ$ 。激光焊接示意图如图 3(b)，实验采用氩气为保护气，氩气从铝合金底部向上吹出，且无旋涡出现，外界空气不易卷入氩气保护区，严密的层流能很好地保护熔池，确保焊接过程熔池的稳定。焊接激光功率设置为 2.75 kW，运行速率为 25 mm/s。

采用线切割方式截取焊缝横截面，然后采用冷镶嵌的方法对切割样品进行镶嵌，对镶嵌样品进行打磨、抛光、腐蚀后进行显微观察，腐蚀液的体积配比为：2.5%  $\text{HNO}_3$  + 1.5%  $\text{HCl}$  + 1%  $\text{HF}$  + 95%  $\text{H}_2\text{O}$ ，腐蚀时间为 50 s，采用 S-3400N 型扫描电子显微镜观察样品的形貌。

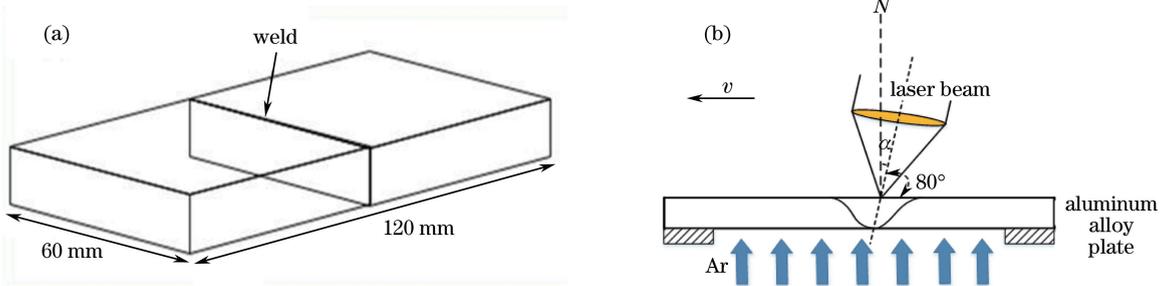


图 3 示意图。(a)焊接方式；(b)激光焊接示意图

Fig. 3 Schematics. (a) Welding form; (b) laser welding

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 单次清洗后的表面氧含量

为获得激光单次清洗 6061 铝合金氧元素含量随激光功率的变化,分别采用 10~25 W 的激光功率作用于材料表面,光斑搭接率为 0。利用 X 射线能谱仪获得的氧元素含量变化如图 4 所示:对于未进行任何处理的铝合金表面,由于氧化膜的存在,氧元素含量很高;当采用低能量激光进行清洗时,表面氧化膜在热烧蚀的作用下分解去除,氧元素含量降低;当激光功率低于 15 W 时,氧化膜没有完全去除,氧含量较高;当激光功率为 20 W 时,氧含量最低,为 7.72%;当功率增加到 25 W 时,氧元素含量出现回升的趋势,说明激光功率达到 20 W 时,铝合金表面已经过度清洗,而且再次被氧化。

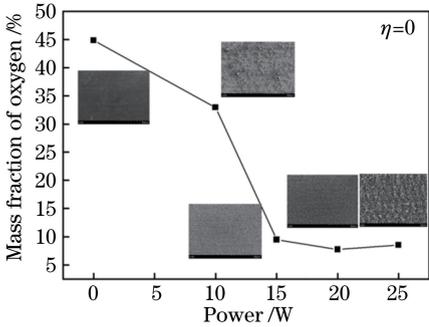


图 4 单次激光清洗下铝合金表面的氧含量

Fig. 4 Oxygen content of aluminum alloy surface at single laser cleaning

#### 3.2 多次清洗后的表面氧含量

为获得良好的表面清洗质量,根据激光单次清洗分析结果选取 10、15、20 W 的激光功率多次清洗铝合金表面,搭接率为 0,重复频率为 100 kHz。采用 X 射线能谱分析技术对铝合金表面进行能谱分析,统计结果如图 5 所示:增加清洗次数  $N$ ,能降低铝合金表面的氧含量,但氧含量随清洗次数增加出现了先降后升的趋势。随着清洗次数增加,铝合金表面的氧化膜逐层被激光去除,氧含量降低,但热烧蚀效果增强,出现二次氧化,故氧含量再次上升。a、b、c 三点分别为 10、15、20 W 激光功率作用下铝合金表面氧含量的最低值,15 W 激光功率清洗后的氧含量最低。

由图 6 可知:当激光功率 15 W 时,铝合金的表面氧含量仅为 3.23% (与未经激光作用的相比下降了 92.8%),铝合金表面形貌粗糙,形成了沟槽结构,均匀分布的沟槽有利于吸收焊接激光的能量;当激

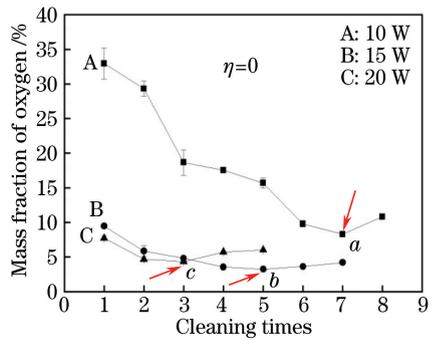


图 5 多次激光清洗下铝合金表面的氧含量

Fig. 5 Oxygen content of aluminum alloy surface at multiple laser cleaning

光功率为 20 W 时,氧含量为 4.33%,铝合金表面形貌比较粗糙,但与 15 W 激光功率作用的表面相比,沟槽结构不明显;当激光功率为 10 W 时,氧化膜的去除效果很差,表面仍留有少许氧化层,此时的氧含量为 8.29%。可见,选用功率为 15 W 的激光清洗 5 次的效果优于其他参数。

#### 3.3 氧元素的分布

设置光斑搭接率为 0,使用功率为 15 W 的激光作用于 6061 铝合金表面进行单次清洗,铝合金的表面形貌和元素能谱分析如图 7。由图 7(a)可以清晰地观察到光斑作用的痕迹与氧化膜区域。选择铝合金表面一条特定的路径 E-F, (F 点为激光光斑的中心),分析该路径下氧、镁、铝元素含量的变化,结果如图 7(b)所示。

由图 7 可知,氧元素主要分布在氧化膜区,在激光光斑作用区域,铝和镁元素的含量较高。氧元素为表面氧化膜的主要成分,铝和镁元素为铝合金基体的主要成分。图 7(b)虚线位置为激光光斑的边缘,在激光作用区域内,表面氧化膜全部去除,说明氧化膜吸收激光能量后完全脱离表面,露出铝合金基底,铝和镁元素含量增加。值得注意的是,在激光边缘出现了氧元素的极大值。由图 7(a)可知,激光烧蚀去除的边缘物质为熔融物质,与空气中的氧气结合后,使得氧元素含量大大增加。由于激光能量服从高斯分布,在光斑边缘区域,激光能量较低,铝和镁元素含量在虚线位置附近出现较小的过渡区。

图 8 为不同功率激光清洗不同次数后铝合金的表面形貌图及对应的氧元素分布。由图 8(a1)、(a2)可见:当激光功率为 10 W,清洗次数为 7 次时,铝合金表面未清洗干净,氧元素的分布没有规律。这些氧元素主要有两个来源:一是残余的氧化层,根据前面的分析可知,当激光功率为 10 W 时,通过增

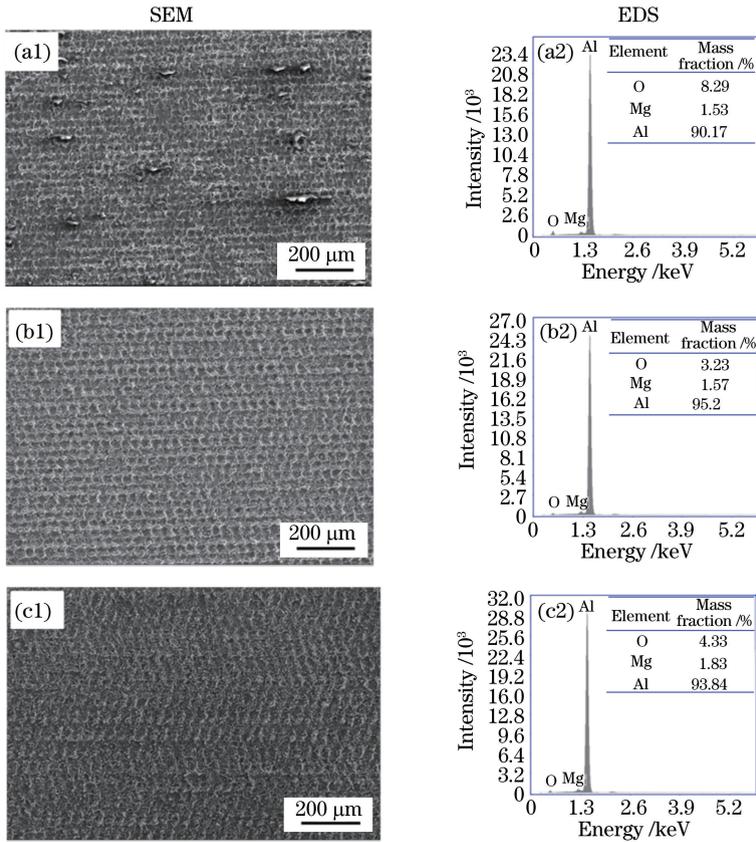


图 6 不同功率激光多次清洗后 6061 铝合金的表面形貌及面能谱分析。

(a)  $P=10\text{ W}, N=7$ ; (b)  $P=15\text{ W}, N=5$ ; (c)  $P=20\text{ W}, N=3$

Fig. 6 Surface morphology (SEM) and surface energy spectrum analysis (EDS) of 6061 aluminum alloy surface after multiple laser cleaning. (a)  $P=10\text{ W}, N=7$ ; (b)  $P=15\text{ W}, N=5$ ; (c)  $P=20\text{ W}, N=3$

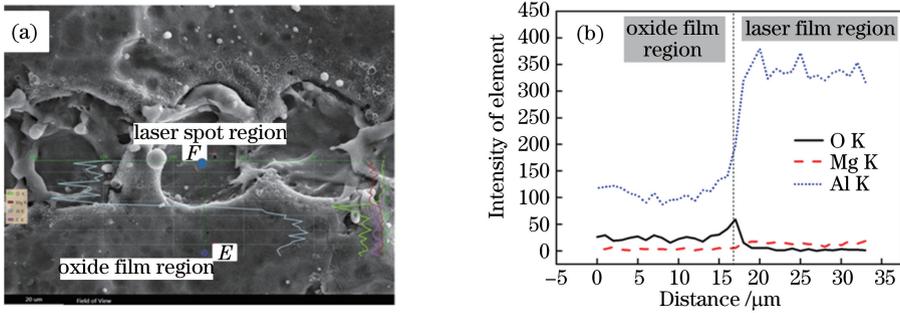


图 7  $P=15\text{ W}, N=5$  时的线扫描能谱分析结果。(a) 表面形貌; (b) 各元素含量沿路径 E—F 的变化

Fig. 7 Line scan energy spectrum analysis ( $P=15\text{ W}, N=5$ ). (a) Surface morphology; (b) oxygen, magnesium, aluminum elements change curves along the path E—F

加清洗次数不能完全去除氧化膜层,这是因为能量过低,激光未能使氧化膜层完全气化,只是去除了部分氧化;二是部分清洗区域产生了烧蚀现象,随着清洗次数增加,在已清除氧化层的地方,激光能量反复作用,热积累过度,表面材料与空气发生反应,导致铝合金表面发生再次氧化。由图 8(b1)、(b2)可以发现:当激光功率为 15 W,清洗次数为 5 次时,铝合金表面呈明显的孔状阵列,氧元素主要分布在光斑搭

接处,而且较为稀疏,表明大部分区域的氧化膜已被去除干净。粗糙的孔状形貌有利于激光焊接过程中激光能量的吸收以及熔池的稳定。光斑边缘有细小的球状颗粒,这是激光作用引起的熔融飞溅物,探测到的氧元素主要出现在这些位置。由图 8(c1)、(c2)可知,当激光功率为 20 W,清洗次数为 3 次时,细小的球状颗粒大都分布在表面,这表明在激光能量作用过程中有较多的熔融飞溅物,因为飞溅的缘故,所以

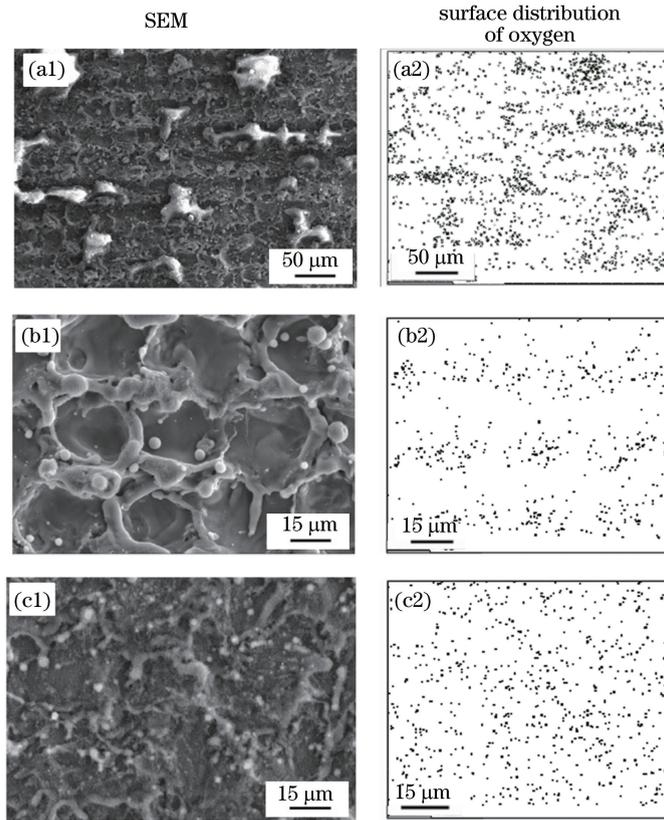


图 8 经不同功率的激光多次清洗后 6061 铝合金的表面形貌及氧元素面分布。

(a)  $P=10\text{ W}, N=7$ ; (b)  $P=15\text{ W}, N=5$ ; (c)  $P=20\text{ W}, N=3$

Fig. 8 Surface morphology (SEM) and surface distribution of oxygen of 6061 aluminum alloy after multiple laser cleaning with different laser powers. (a)  $P=10\text{ W}, N=7$ ; (b)  $P=15\text{ W}, N=5$ ; (c)  $P=20\text{ W}, N=3$

氧元素分布于表面各处。

### 3.4 搭接率对氧元素含量的影响

为了在高能量激光下获得较好的表面清洗效果,降低氧化率,设置搭接率  $\eta = -5\%$ ,图 9 为 15, 20, 25 W 激光分别作用于材料表面的结果。据前面多次激光清洗对氧含量影响的分析可知,高能量激光清洗多次容易使铝合金表面发生二次氧化,因此,考虑高能量搭接率时只考虑单次清洗。从图 9 中可以发现:随着激光功率增加,氧含量逐渐降低,当激光功率增至 25 W 时,光斑边缘位置的光强随之增加,相邻光斑之间的氧化层逐渐被清除,但区域氧含量最低为 14.28%(质量分数),这表明,高激光功率低搭接率的激光预处理效果不理想。

为解决激光清洗过程中能量过高或多次清洗造成的材料表面的二次氧化问题,设置光斑搭接率  $\eta = 5\%$ ,研究低能量去除效果。由图 10 可知,采用 10 W 激光清洗 3 次后,氧的质量分数最低为 3.82%,而且铝合金表面形成了孔状阵列形貌,与搭接率为 0、激光功率为 15 W、清洗 5 次的结果相近。据图 5 所述搭接率为 0,激光功率为 10 W 清洗多次

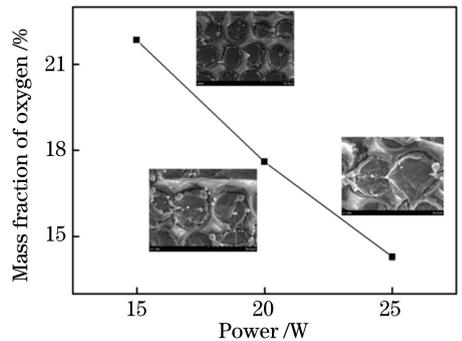


图 9 当  $\eta = -5\%$  时,单次激光清洗下铝合金表面的氧含量  
Fig. 9 Oxygen content of aluminum alloy surface at single laser cleaning with overlap rate of  $-5\%$

后的氧含量依然很高可知,在低能量下增加搭接率可以获得较好的清洗效果。此外,由图 10 还可以看出,与 10 W 的激光功率相比,15 W 激光功率作用的材料表面质量更差,氧的质量分数最低为 8.52%。这是因为,增大激光能量和光斑重叠区域,会增大铝合金被再次氧化的概率,因此,低能量时调整搭接率清洗,不仅可以提高清洗质量,还可以提升清洗效率。

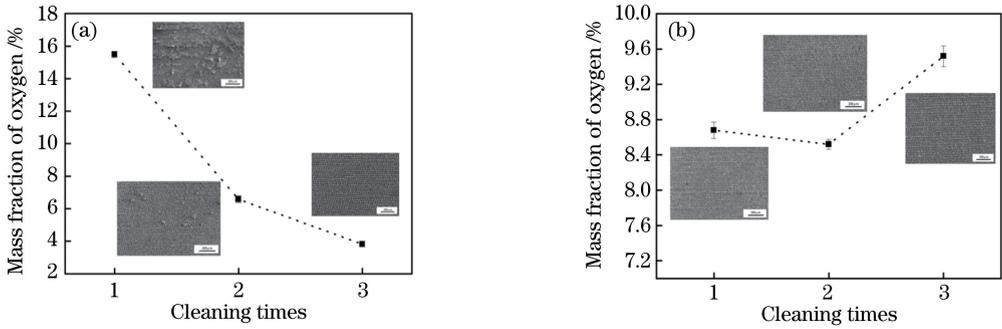


图 10 当  $\eta=5\%$  时,不同参数下清洗后铝合金表面的氧含量。(a)  $P=10\text{ W}$ ; (b)  $P=15\text{ W}$

Fig. 10 Oxygen content of aluminum alloy surface after cleaning with different parameters and overlap ratio of 5%.

(a)  $P=10\text{ W}$ ; (b)  $P=15\text{ W}$

### 3.5 焊接效果分析

选取未处理的铝合金以及经激光处理后表面氧质量分数分别为 16.2%、9.56%、3.23% 的 3 种铝合金进行激光焊接实验。若氧含量差异过小,则焊接效果难以分辨,故选取氧质量分数的间隔约为 6%。对应的激光参数分别为: $P=10\text{ W}$ ,  $N=5$ , 重复频率

为 100 kHz, 搭接率为 0;  $P=15\text{ W}$ ,  $N=1$ , 重复频率为 100 kHz, 搭接率为 0;  $P=15\text{ W}$ ,  $N=5$ , 重复频率为 100 kHz, 搭接率为 0。通过 X 射线探伤机检测焊缝内部的质量, 如图 11 所示。从图 11(d) 可以看到探测到的线型像质计的条数显示为 7, 表明影像图符合评价标准。

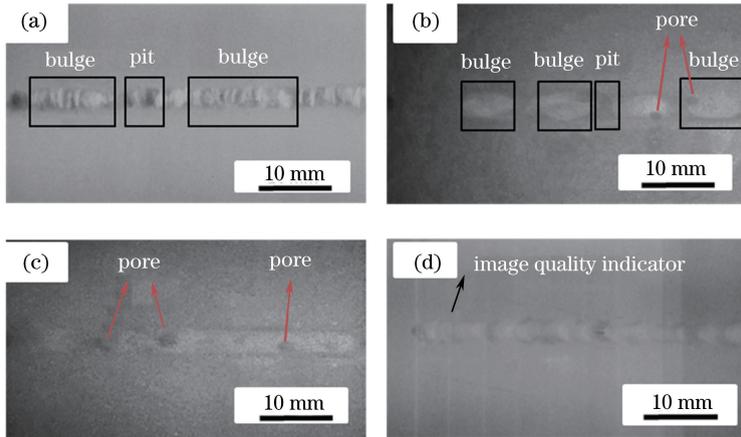


图 11 X 射线探伤机的探测结果。(a) 表面未预处理的铝合金的焊缝; (b) 表面氧质量分数为 16.2% 的铝合金的焊缝; (c) 表面氧质量分数为 9.56% 的铝合金的焊缝; (d) 表面氧质量分数为 3.23% 的铝合金的焊缝

Fig. 11 Detection results of X-ray non-destructive detector. (a) Weld of the aluminum alloy without pretreatment; (b) weld of the aluminum alloy with oxygen mass fraction of 16.2%; (c) weld of the aluminum alloy with oxygen mass fraction of 9.56%; (d) weld of the aluminum alloy with oxygen mass fraction of 3.23%

图 11(a) 为表面未预处理的铝合金的焊缝, 其内部凹凸不平, 这是因为未经预处理的铝合金表面的氧化膜熔点很高 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 熔点为  $2060\text{ }^\circ\text{C}$ ), 在焊接时需要输入较高的能量才能维持熔化状态, 在激光束向前行进的过程中, 高能量的激光容易引发熔池不稳定, 使熔化物飞溅至各处, 焊缝内部呈现出沟壑状, 导致焊后出现气孔、裂纹等缺陷, 降低了焊缝质量。图 11(b) 为表面氧质量分数 16.2% 的铝合金的焊缝, 焊缝凹凸不平, 有明显的焊瘤存在, 且伴随有氢气孔, 这是氧化膜残留较多所致。图 11(c)

为表面氧质量分数为 9.56% 的铝合金的焊缝, 焊缝中有一些氢气孔存在, 但焊缝质量整体优于氧质量分数为 16.2% 的铝合金。图 11(d) 所示焊缝内部光滑平整, 没有明显的气孔产生, 这表明, 去除表面氧化膜的铝合金可形成质量良好的焊缝, 降低了气孔产生的概率。

图 12 是氧含量不同的铝合金的焊接接头经过打磨、抛光和腐蚀后, 采用扫描电镜观察的显微照片。皮下气孔会严重降低焊缝的力学性能<sup>[15]</sup>。从图 12 所示的氧质量分数分别为 16.2%、9.56% 和

3.23%的铝合金焊缝的横截面可以看出,随着氧含量降低,焊缝区的气孔明显减少,当氧质量分数为3.23%时,无气孔存在。从图12所示的焊缝局部显微照片可以观察到,因为进行激光焊接时采用的激光焊接参数相同(激光功率2.75 kW,焊接速度

25 mm/s),故三种焊缝的局部显微形貌没有明显的不同,只是在气孔数量上有所差异,而气孔的差异主要源于表面氧含量的不同。结合X射线探伤数据可以发现,铝合金表面的氧元素含量越低,焊缝的质量越高。

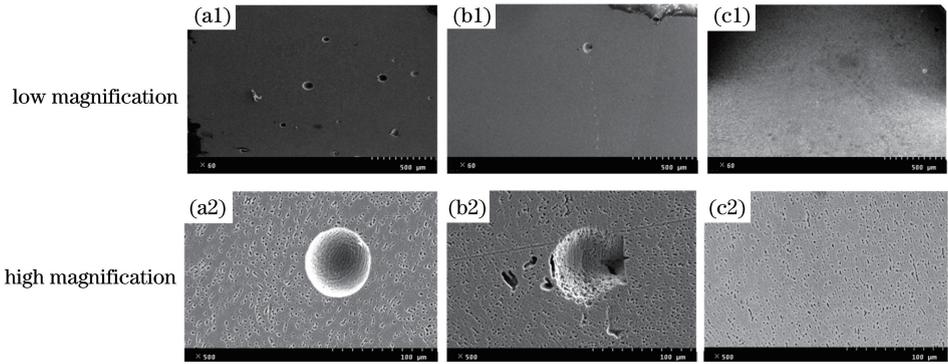


图12 焊缝横截面形貌及局部放大图。(a)氧质量分数为16.2%的铝合金的焊缝;  
(b)氧质量分数为9.56%的铝合金的焊缝;(c)氧质量分数为3.23%的铝合金的焊缝

Fig. 12 Micrographs of cross-section of weld and corresponding to local enlarged detail. (a) Weld of the aluminum alloy with oxygen mass fraction of 16.2%; (b) weld of the aluminum alloy with oxygen mass fraction of 9.56%; (c) weld of the aluminum alloy with oxygen mass fraction of 3.23%

采用砂纸高程度打磨铝合金表面直至基体完全露出,表面几乎没有氧元素,然后对焊缝横截面进行显微观察,结果如图13所示,可以看出:与激光处理后氧质量分数为3.23%的铝合金的焊缝横截面显微形貌[图12(c1)、(c2)]相比较,两者的局部显微形貌相近,表面没有气孔和其他裂纹缺陷出现,焊接效果相近似。

图8(b1)、(b2)为激光清洗后氧质量分数为3.23%的铝合金的表面形貌及氧元素分布,由于激光光斑呈高斯分布,故而铝合金表面形成了高斯圆形凹坑,在EDS图中可观察到凹坑边缘有少量氧元素分布。采用激光清洗时,因激光光斑形状呈高斯分布,理论上很难避免边缘残留有氧化物,但这不会影响焊接效果。

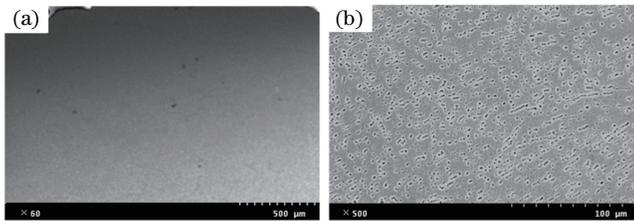


图13 铝合金无氧表面的焊缝形貌。(a)横截面形貌;(b)局部放大形貌

Fig. 13 Weld morphology of aluminum alloy with oxygen free surface. (a) Cross-sectional morphology; (b) local enlarged detail

## 4 结 论

采用激光清洗技术对6061铝合金进行预处理,研究了不同激光参数下氧元素的线、面含量及分布,得到以下结论:单次激光作用功率为20 W时,铝合金表面的氧质量分数最低,为7.72%;单次激光功率高于25 W时,铝合金表面的氧含量出现回升,这是因为铝合金表面已经过度清洗,会造成清洗区域再

次氧化;增加清洗次数可以降低材料表面的氧含量,将表面的氧化膜去除干净;调整搭接率进行清洗不仅可以提高清洗质量,还可以提升清洗效率;激光预处理表面的氧元素含量越低,焊接质量越高;采用最优的激光参数进行预处理后,铝合金焊缝平滑均匀,无明显缺陷存在;分布于光斑周围的少量氧元素不影响焊接效果。实验结果为铝合金焊前的激光预处理技术研究提供了参考。

## 参 考 文 献

- [1] Xiao R. Laser beam welding of aluminum alloys [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6825: 682505.
- [2] Dong S Y, Song C Q, Yan S X, *et al.* Effect of laser cleaning pretreatment on laser weld forming quality of 7A52 aluminium alloy [J]. Journal of Armored Forces Engineering College, 2017, 31 (4): 100-105.  
董世运, 宋超群, 闫世兴, 等. 激光清洗预处理对 7A52 铝合金激光焊缝成形质量的影响 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2017, 31(4): 100-105.
- [3] 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.
- [4] Li H X, Liu J, Shi Y, *et al.* Study on the influence of different pretreatment methods on the welding quality of aluminum alloy surface [J]. Applied Laser, 2016, 36(5): 559-565.  
栗红星, 刘佳, 石岩, 等. 铝合金表面不同预处理方式对其焊接质量影响研究 [J]. 应用激光, 2016, 36 (5): 559-565.
- [5] Xiong J P, Zhao Y G, Zhou Y, *et al.* Research progress of removal for oxide films on aluminum alloy [J]. Plating & Finishing, 2013, 35(11): 15-19.  
熊金平, 赵艺阁, 周勇, 等. 铝合金表面氧化膜去除方法研究进展 [J]. 电镀与精饰, 2013, 35(11): 15-19.
- [6] Wang H J, Liu W W, Yu Y, *et al.* Research status and prospect of laser cleaning of metal surface contamination [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2016(8): 75-78.  
王海将, 刘伟崑, 余跃, 等. 金属表面污染物的激光清洗研究现状与展望 [J]. 内燃机与配件, 2016(8): 75-78.
- [7] Zhu H, Xue S B, Sheng Z. Mechanism of CsF-AlF<sub>3</sub> and KF-AlF<sub>3</sub> fluxes reacting with oxide films of 6063 aluminum alloy [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(9): 13-16, 20.  
朱宏, 薛松柏, 盛重. 6063 铝合金氧化膜与 CsF-AlF<sub>3</sub> 及 KF-AlF<sub>3</sub> 钎剂的反应机制 [J]. 焊接学报, 2009, 30(9): 13-16, 20.
- [8] Meja P, Autric M, Delaporte P, *et al.* Dry laser cleaning of anodized aluminium [J]. Applied Physics A: Materials Science & Processing, 1999, 69(7): S343-S346.
- [9] Rechner R, Jansen I, Beyer E. Influence on the strength and aging resistance of aluminium joints by laser pre-treatment and surface modification [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010, 30(7): 595-601.
- [10] Luo Y, Wang X, Zhao H F, *et al.* Effect of laser cleaning on the surface morphology and welding performance of 2219 aluminum alloy [J]. Applied Laser, 2017, 37(4): 544-549.  
罗雅, 王璇, 赵慧峰, 等. 激光清洗对 2219 铝合金表面形貌及焊接性能的影响 [J]. 应用激光, 2017, 37 (4): 544-549.
- [11] Wang Q, Guan Y C, Cong B Q, *et al.* Laser cleaning of commercial Al alloy surface for tungsten inert gas welding [J]. Journal of Laser Applications, 2016, 28(2): 022507.
- [12] Chen Y M, Zhou L Z, Yan F, *et al.* Mechanism and quality evaluation of laser cleaning of aluminum alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44 (12): 1202005.  
陈一鸣, 周龙早, 闫飞, 等. 铝合金激光清洗机理与质量评估 [J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1202005.
- [13] Haboudou A, Peyre P, Vannes A B. Influence of surface preparation and process parameters on the porosity generation in aluminum alloys [J]. Journal of Laser Applications, 2004, 16(1): 20-24.
- [14] Wang Z T, Tian R Z. Aluminum alloy and its processing manual [M]. 2nd ed. Changsha: Changsha Central South University Press, 2000.  
王祝堂, 田荣璋. 铝合金及其加工手册 [M]. 2 版. 长沙: 中南大学出版社, 2000.
- [15] Qiao J Y, Wang W Q, Ruan Y, *et al.* Effects of temperature and humidity on porosity and mechanical properties of aluminum alloy MIG joints [J]. Materials Review, 2018, 32(2): 254-258.  
乔建毅, 王文权, 阮野, 等. 环境温湿度对铝合金焊缝气孔和力学性能的影响 [J]. 材料导报, 2018, 32 (2): 254-258.