

铝合金焊前激光清洗的等离子体光谱在线检测

佟艳群¹, 陆勤慧¹, 周建忠¹, 姚红兵¹, 叶云霞², 任旭东^{1*}

1. 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

2. 江苏大学微纳光电子与太赫兹技术研究院, 江苏 镇江 212013

摘要 铝合金焊接技术在工业生产、制造和维修等领域有广泛的应用, 焊缝内存在气孔导致焊接质量降低是铝合金焊接技术的常见问题。由于铝合金表面金属氧化物是导致气孔生成的主要来源, 对激光清洗过程进行在线检测, 不但可以实时分析表面氧化物的清洗状态, 而且可以避免基体表面因为过度清洗造成损伤或二次氧化。提出采用激光诱导等离子体光谱(LIBS)在线检测铝合金焊前激光清洗过程, 表征清洗后铝合金基体的表面状态。LIBS技术可以对多元素成分同时检测, 拥有较低的检出限和较高的准确性。搭建基于 Andor Mechelle 5000 光谱仪的铝合金焊前激光清洗在线检测系统, 剔除空气环境对实验结果的影响, 测试 6061 铝合金表面氧化物和铝合金基体的 LIBS 光谱, 分析两者独特的元素特征谱线, 采用 X 射线能谱(EDS)测试结果验证元素特征谱线的准确性, 并探讨激光清洗过程 LIBS 技术在线检测的可行性。实验测试等离子体光谱谱线强度与激光能量密度之间的关系, 获得单次脉冲激光去除铝合金表面氧化物的损伤阈值, 结合 X 射线能谱的检测结果研究激光损伤阈值的成因及影响。研究激光清洗过程等离子体光谱特征谱线与脉冲次数之间的关系, 提出基于 O/Al 特征谱线强度比值作为在线检测清洗效果及二次氧化损伤的评判依据。为验证该评判依据的准确性, 将 O/Al 特征谱线强度比值随清洗次数的变化趋势与 X 射线能谱测试获得的氧元素原子百分比变化趋势进行对比。实验结果表明: 采用 200~700 nm 范围内激光诱导等离子体谱线特征分析激光清洗状态, 可以剔除空气环境的影响; 氧元素和铝元素特征谱线准确反映出表面氧化膜与铝合金基体的成分差异; X 射线能谱检测元素成分和含量表明氧元素含量随着激光清洗能量密度先减后增, 单次清洗铝合金的二次氧化损伤的激光能量阈值为 $11.46 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$, 小于损伤阈值的激光能量密度对铝合金基体的多次清洗未造成损伤, 等离子体光谱特征谱线强度与表面清洗状态相关, $656.5 \text{ nm}(\text{O II})/396.2 \text{ nm}(\text{Al I})$ 谱线强度比值 $\leq 1.5\%$ 为激光清洗干净的依据。研究结果有利于铝合金的激光清洗实时控制技术和焊接装置集成化。

关键词 激光清洗; 铝合金; 等离子体光谱; 在线检测

中图分类号: O433.4

文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)01-0255-06

引言

铝合金在汽车、航空航天等领域被广泛应用, 铝合金焊接技术常见缺陷之一焊缝内存在气孔降低焊接质量, 氧化物为气孔主要来源之一^[1], 采用激光清洗技术对铝合金进行焊前预处理可有效去除氧化物减少气孔生成。相对传统机械清洗或化学清洗方式^[2], 激光清洗具有高效、精密、安全等优

点, 但激光清洗技术本身也存在导致基体损伤的风险^[3], 因此在线检测激光清洗过程有利于实时判断激光清洗效果, 也可促进铝合金焊接与预处理装置的集成化。

激光诱导等离子光谱(LIBS)具有检测速度快、检测精度高、多元素同时检测等优点, 在环境、冶金、食品等领域得到了广泛应用^[4-8]。LIBS 技术应用于合金成分检测时拥有较低的检出限和较高的准确性^[9], Yang^[10] 等对不同样本采用迭代权重调整方法校准了高温环境下钢材的 LIBS 光谱, 证

收稿日期: 2018-11-30, **修订日期:** 2019-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51405200, 51479082, 51775253), 国家水泵工程技术研究中心开放课题(NRCP201606), 江苏省产业前瞻关键技术重点项目(BE2017001-2), 中国博士后科学基金面上项目(2015M580395), 江苏大学高级人才科研启动项目(14JDG172), 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项目(2017SLKL005)资助

作者简介: 佟艳群, 女, 1981年生, 江苏大学机械工程学院副教授 e-mail: tongyanqun@163.com

* 通讯联系人 e-mail: renxudong@163.com

明了 LIBS 在工业在线测量中的潜力。Ahmed^[11]等利用 X 射线能谱及飞行时间质谱验证了 LIBS 在黄铜成分检测时的准确性。Lei^[12]等利用 LIBS 光谱对 TC11 钛合金中 5 种元素进行定量分析, 并采用 T 检验法与 GB/T 4698 数据进行比较, 结果表明 LIBS 是一种快速准确的钛合金成分定量分析方法。有研究采用 SVM 算法处理钢铁合金 LIBS 光谱, 验证了 LIBS 应用于复杂样品定量分析的可行性。Boué-Bigne^[13]研究了钢材表面氧化物 LIBS 光谱, 确定了一种快速判别钢材表面清洁度的方法。采用 LIBS 技术在线检测铝合金焊前的激光清洗过程, 可用于判断清洗效果, 确定是否清洗干净或过度清洗。

本实验研究铝合金焊前激光清洗的等离子体光谱在线检测方法。对比分析氧化膜及铝合金基体的光谱成分, 采用 X 射线能谱仪(EDS)检测成分从而验证方法的准确性, 测试出铝合金基体的损伤阈值, 分析激光能量和脉冲次数等参数对激光诱导等离子体元素特征谱线特性的影响。

1 实验部分

采用调 Q Nd:YAG 倍频激光器, (脉冲频率设置为 1 Hz, 输出脉宽 12 ns, 波长 1 064 nm), 输出高斯光束, 由焦距为 15 cm 的凸透镜聚焦至 6061 铝合金表面, 光斑直径为 1 mm。激光与材料相互作用, 由于激光能量密度高, 激光焦点产生等离子体。ME-OPT 光信号收集器收集等离子体信号, 通过光纤传输至光谱仪(型号为 Andor Mechelle 5000, 分辨率为 0.1 nm, 探测范围为 200~975 nm)进行分析处理, 光谱仪由光电二极管检测到等离子体后触发工作。

实验材料为 6061 铝合金(表面有约 10 μm 氧化膜), 其主要成分如表 1。

表 1 6061 铝合金主要成分^[14]

Table 1 Main components of 6061 aluminum alloy			
元素	比重/%	元素	比重/%
Cr	0.04~0.35	Si	0.4~0.8
Cu	0.15~0.4	Fe	0.7
Ti	0.15	Mg	0.8~1.3
Mn	0.15	Al	余量
Zn	0.25		

为了验证激光等离子体光谱技术能有效检测激光清洗效果, 采用电子扫描显微镜(日本日立公司 S-3400N 型, 附带 X 射线能谱仪)进行样品材料表面微观形貌观测, 对测试样品元素成分进行对比。

2 结果与讨论

2.1 激光诱导等离子体光谱

由于实验环境为空气, 为了剔除空气对实验结果的影响, 实验中采用激光直接击穿空气获得激光诱导等离子体光谱, 如图 1(a)所示。根据实验理论和研究结果, 选取激光能

量密度范围 6.38~12.73 $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$, 共采集 15 组激光等离子体光谱数据, 激光能量密度选 6 个, 每个能量下谱线强度统计 3 次, 具体谱线数据值如图 1(b)所示。

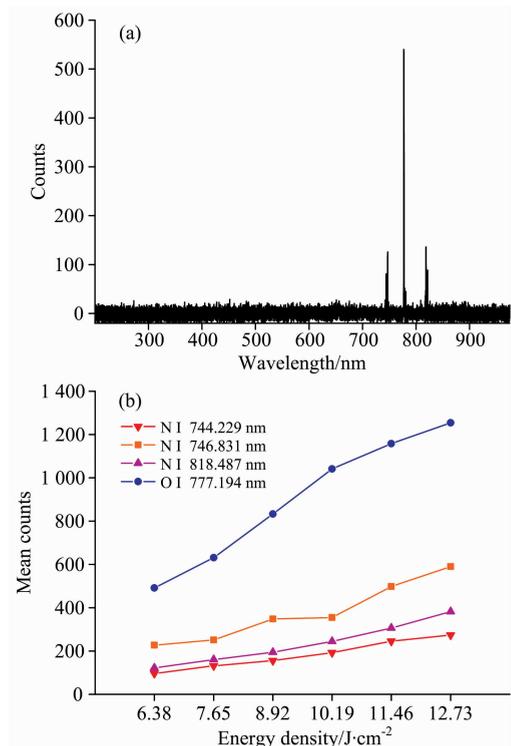


图 1 激光击穿空气的光谱特性

(a): 空气等离子光谱图; (b): 不同激光能量的特征谱线平均强度
Fig. 1 Laser break down air (a) plasma spectrogram of air; (b) average intensity of characteristic spectrum under different energy

由图 1(a)可知, 空气的 LIBS 光谱中包含多条氮(N)元素和氧(O)元素原子谱线, 光谱谱线主要集中在 700~900 nm。为了剔除空气环境对激光与材料相互作用研究结果的影响, 实验只分析 200~700 nm 范围内的谱线。同时观察图 1(b), 随着激光能量增大, 元素的光谱线均呈现增强趋势。

将激光聚焦到待测试样表面, 材料表面吸收激光能量产生等离子体, 等离子体冷却过程中产生特定频率光子即元素特征谱线。如图 2 为表面氧化物和铝合金基体的激光诱导等离子体光谱图。

依据原子光谱数据库^[15]对上述主要特征谱线进行标定。如表 2 所示, 实际测得相关谱线与数据库标准谱线相比存在误差, 可能由光谱仪分辨率及实验环境导致。

镁(Mg)、铁(Fe)、铬(Cr)等均为 6061 铝合金成分, 根据表 1 可知, 6061 铝合金中, Mg 元素含量高于 Fe 和 Cr 等元素仅次于 Al 元素, 因此 Mg 元素灵敏谱线峰值强度高于 Fe 和 Cr 元素。在 300~700 nm 间, 氧化膜及铝合金基体的 LIBS 光谱中包含多条 Fe 元素谱线, 但强度均低于 Mg 元素谱线, 而铝合金基体以铝元素为主, 故图 2(b)中 Fe 元素谱线强度相比图 2(a)中进一步降低。

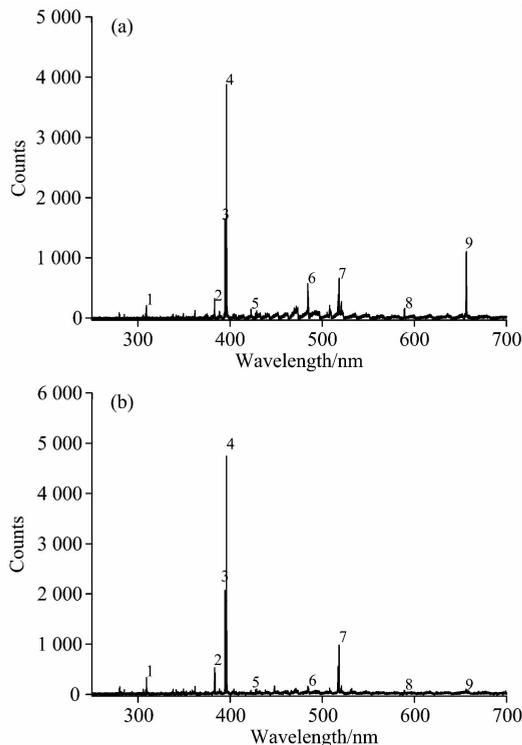


图 2 激光诱导等离子体光谱图

(a): 氧化膜; (b): 铝合金基体

Fig. 2 Laser induced plasma spectroscopy

(a): Oxide film; (b): Aluminum alloy substrate

表 2 6061 铝合金主要特征谱线

Table 2 Main characteristic spectra of 6061 aluminum alloy

标号	特征谱线	相关谱线	原子	标号	特征谱线	相关谱线	原子
1	309.299	309.32	Mg I	6	484.337	484.31	O II
2	383.230	383.26	Mg I	7	518.360	518.40	Mg I
3	394.400	394.40	Al I	8	589.050	589.06	Fe I
4	396.152	396.20	Al I	9	656.528	656.51	O II
5	422.675	422.70	Cr I				

根据图 2 和表 2 对照分析,氧化膜中氧(O)元素的离子谱线特征峰主要为 484.3 及 656.5 nm。与图 2(a)相比,图 2 (b)中这两条氧元素离子谱线接近消失,考虑到存在仪器暗电流噪声及 Al 在空气中极易氧化等因素,484.3 及 656.5 nm 处谱线未完全消失,但 656.5 nm 谱线的强度对比变化较为明显,因此 656.5 nm 谱线强度可以作为判断铝合金表面氧化膜清洗是否彻底的一个参量。

为了检验 LIBS 光谱成分分析准确性,采用 X 射线能谱测试样品元素成分,获得结果如图 3 所示。

对比图 3(a)和图 3(b)X 射线能谱数据,图 3(b)中 Al 和 Mg 元素特征谱线强度提升,Fe 和 O 元素特征谱线消失。因 X 射线能谱检测环境为真空,排除了空气中 O 元素干扰,所以该数据中所有 O 元素均来自氧化膜层。理论上,Al₂O₃ 中 O 元素原子百分比理论值为 60%,使用摩尔质量换算,得出 Al₂O₃ 中 O 元素比重值为 47.06%,如图 3(a)的实验数据,

未清洗的氧化膜表面 O 元素初始原子百分比为 62%,比重为 49.32%,其他合金成分的氧化物产生一定误差,X 射线能谱中元素数据接近理论数值。

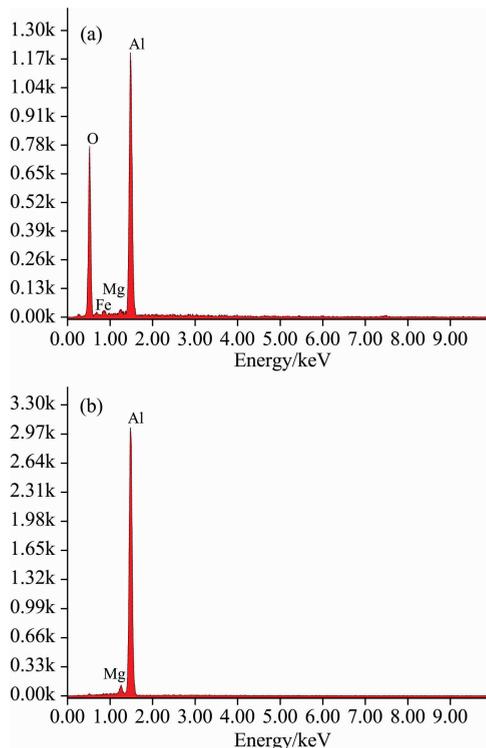


图 3 X 射线能谱图

(a): 氧化膜; (b): 铝合金基体

Fig. 3 X-ray energy spectrum

(a): Oxide film; (b): Aluminum alloy substrate

图 2 中 LIBS 光谱数据所得结论与图 3 中 X 射线能谱数据相同,即 6061 铝合金基体与氧化膜相比 Al 和 Mg 元素含量较高,O 元素来自于氧化膜层。而相对 X 射线能谱,LIBS 光谱检测具有快速,无需预处理等优点,采用 LIBS 光谱检测,对 O 元素谱线强度分析即可实现对铝合金清洗效果在线检测。

2.2 激光清洗损伤阈值

为研究不同能量密度对氧化膜层的清洗效果,选取 6.38 ~12.73 J·cm⁻² 区间内 6 个能量密度的激光对材料表面进行清洗,每个能量密度采集 6 组光谱数据并取平均值,所得平均强度与能量密度关系如图 4 所示。

图 4 中,396.2 nm(Al I)谱线在 6.38~11.46 J·cm⁻² 区间内逐渐增大,与能量密度呈近似线性关系,对实验数据进行线性拟合,该谱线强度变化拟合直线方程为

$$I_{Al} = 385.23H - 5.82 \quad (1)$$

656.5 nm(O II)具有相同的变化趋势,谱线强度变化拟合直线方程为

$$I_O = 115.10H - 15.43 \quad (2)$$

拟合直线(1)和(2)中 I 为谱线强度, H 为激光能量密度。实验数据基本符合 Scheibe-Lomakin 公式^[16],见式(3)

$$I = ac^b \quad (3)$$

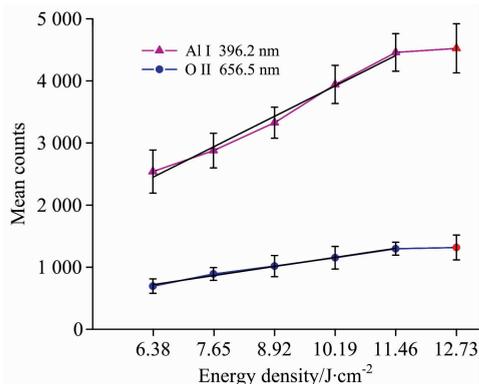


图 4 LIBS 谱线特征峰强度与能量密度关系

Fig. 4 Relationship between characteristic peak intensity and energy density of laser induced spectral line

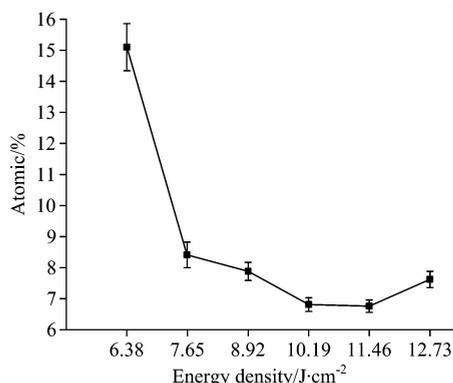


图 5 激光清洗后材料表面氧元素原子百分比

Fig. 5 Percentage of oxygen atoms on material surface after pulsed laser cleaning

式(3)中, a 是一个与待测物元素构成、光源类型、光源电学参数、环境气氛相关的综合影响因子, 当材料成分稳定, 实验条件不变时, a 仅与激发能量相关, c 为对应元素含量, c 为自吸收系数, 当材料成分在一定深度内稳定时, c 与 b 均为定值。随激光能量密度增大, 氧化膜层上更多的 Al_2O_3 在气化机制作用下形成等离子体, 在 LIBS 光谱中谱线强度也随之增大。

然而线性规律在能量密度大于 $11.46 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时不再成立, 当能量密度上升至 $12.73 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, Al 元素原子谱线强度未出现符合之前线性关系的明显提升。当能量密度为 $11.46 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, 光斑直径内氧化膜层已基本去除, 增大相应能量密度不会烧蚀对应量的 Al_2O_3 , 存在部分激光能量作用于铝合金基体的可能。此时式(3)不再适用, 谱线强度不再呈线性增强。656.5 nm 处 O 元素离子谱线强度具有与 Al 元素原子谱线强度基本一致的变化。Al 和 O 元素谱线强度变化说明了过高的激光能量密度存在损伤基体的可能。

检测不同能量密度下激光清洗后凹坑中心位置 X 射线能谱, 获得 O 元素原子百分比如图 5 所示, 当激光能量密度在 $6.38 \sim 11.46 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 区间内逐渐增大时, 凹坑中心氧元素原子百分比逐渐降低, 在激光能量密度为 $11.46 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$

时达到最小值, 而能量密度进一步提升时, O 元素原子百分比反而上升。

凹坑中心氧元素原子百分比与 LIBS 谱线强度变化规律相反, 说明当激光能量密度达到 $11.46 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 后, 一部分激光能量与表面氧化物相互作用, 另一部分激光能量与铝合金基体相互作用, 导致二次氧化现象发生。因此, 铝合金焊前激光清洗的损伤阈值为 $11.46 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

2.3 激光清洗在线检测

为了将铝合金表面氧化物去除干净, 采用小于损伤阈值的激光能量密度多次清洗, 实验中采集能量密度为 6.38 和 $10.19 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 多次激光脉冲作用的 LIBS 光谱进行分析。

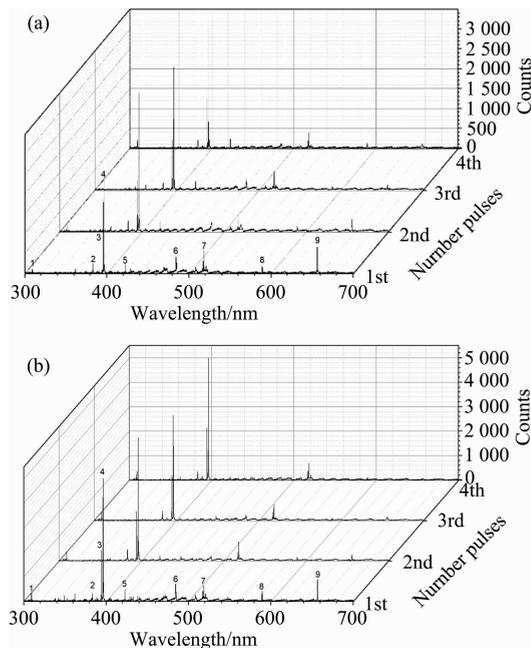


图 6 多次脉冲清洗的 LIBS 光谱

(a): 激光能量密度为 $6.38 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$;

(b): 激光能量密度为 $10.19 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$

Fig. 6 LIBS spectra of multiple pulse cleaning

(a): Laser energy density of $6.38 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$;

(b): Laser energy density of $10.19 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$

如图 6(a)所示, 当激光能量密度为 $6.38 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, 第一次激光作用的 LIBS 谱线直接反映了氧化膜元素构成, 包含了强度较高的氧元素离子谱线(484.3 和 656.5 nm 即特征峰 6 和 9), 在第二次激光清洗时, 氧元素离子谱线强度出现明显下降, 特别是在 656.5 nm 灵敏特征谱线处, 因此 656.5 nm(O II)可反映清洗效果。第四次激光清洗后, 656.5 nm 处谱线强度已十分微弱, 表面氧化物已经清洗干净。此后激光多次作用的 LIBS 谱线与第四次分布基本一致, 656.5 nm 谱线强度并未升高, 表明在此能量密度下, 多次清洗不会造成铝合金基体二次氧化。

当激光能量密度为 $10.19 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, 656.5 nm 谱线强度随激光脉冲次数的变化规律类似, 如图 6(b)所示。与图 6(a)不同的是, 在第二次激光清洗时, 采集到的 656.5 nm 谱线强度已十分微弱, 说明不存在氧元素, 表面氧化物已被清

洗干净。在第三次和第四次激光清洗采集 656.5 nm 谱线强度没有出现上升,表明此能量下激光清洗未发生二次氧化,铝合金基体没有损伤。

为了更准确描述谱线的变化趋势,统计这两个能量密度下 656.5 nm(O II)/396.2 nm(Al I)特征谱线强度比值,如图 7。结果表明:随清洗次数增加,O/Al 元素特征谱线强度比值逐渐降低,降低至 1.5%附近后稳定,因此采用 O/Al 元素特征谱线强度比值为清洗效果表征参数,当强度比值小于等于 1.5%时判定为清洗效果好。

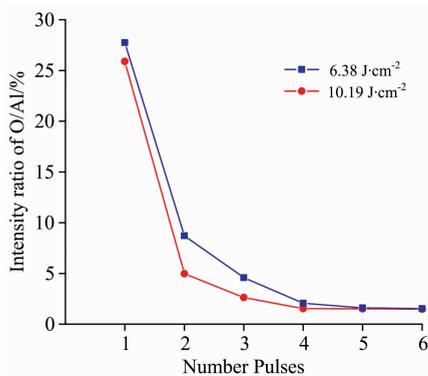


图 7 O/Al 特征谱线强度比值

Fig. 7 Characteristic spectrum intensity ratio of O/Al

为验证检测方法的准确性,对凹坑中心位置进行 X 射线能谱测试,获得氧元素原子百分比与清洗次数关系如图 8。当激光能量小于损伤阈值时,多次清洗铝合金基体未发生二次氧化。随着脉冲次数的增加,氧元素原子百分比呈下降的趋势,表明激光清洗后,表面氧化物含量降低。不同的是,表面氧化物含量下降幅度不同。当激光能量密度为 6.38 J·cm⁻²时,氧元素原子百分比在初次清洗后下降至 15.1%,氧元素原子百分比随脉冲次数持续降低,三次清洗后下降至 3.97%,清洗效率较低;当激光能量密度为 10.19 J·cm⁻²时,氧元素原子百分比在初次清洗后即下降至 6.76%,该能量下氧元素去除效率较高,且清洗次数增加时 O 元素原子百分比未升高。因此,激光能量密度小于损伤阈值时,多次激

光清洗后氧元素并未增加,表明铝合金基体未发生二次氧化,这与 LIBS 的研究结果是相同的。

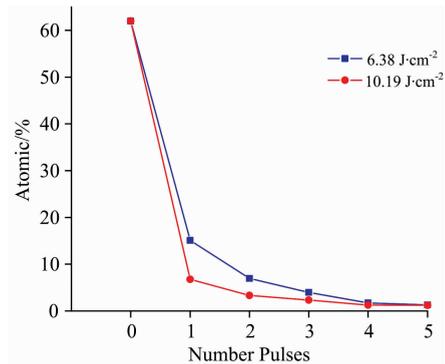


图 8 氧元素原子百分比与清洗次数关系

Fig. 8 Relationship between atomic percentage of oxygen element and cleaning times

3 结 论

采用激光清洗对 6061 铝合金进行焊前预处理可有效去除表面从而减少焊接缺陷产生,对清洗效果在线检测可有效减少基体损伤及二次氧化。本文采用激光诱导等离子体光谱在线检测激光清洗效果,在剔除空气光谱影响的基础上分析氧化膜及铝合金基体 LIBS 光谱,采用 X 射线能谱仪进行成分检测验证特征谱线的准确性;研究了不同能量密度下单次脉冲清洗的 LIBS 光谱特性,结合 X 射线能谱成分检测分析损伤阈值及其成因;研究了不同脉冲次数下 LIBS 光谱特性变化。研究表明:LIBS 光谱能准确反映氧化膜与铝合金基体成分区别;单次激光清洗的损伤阈值为 11.46 J·cm⁻²,小于该能量密度时多次清洗不会造成二次氧化;特征谱线强度受表面清洗状态影响,O/Al 特征谱线强度比值可作为在线检测清洗效果的检测标准,考虑仪器及自然氧化造成的误差,选定 656.5 nm(O II)/396.2 nm(Al I)谱线强度比值为激光清洗干净的标准。以上实验结果可对 6061 铝合金焊前激光清洗预处理在线检测提供理论依据及数据参考。

References

- [1] Alshaer A W, Li L, Mistry A. Optics & Laser Technology, 2014, 64(4): 162.
- [2] XIONG Jin-ping, ZHAO Yi-ge, ZHOU Yong(熊金平, 赵艺阁, 周 勇). Plating & Finishing(电镀与精饰), 2013, 35(11): 15.
- [3] Tan D, Lu D. Laser & Optronics Progress, 1997, 34(7): 17.
- [4] Amanda M Tadinia, Gustavo Nicolodelli, Bruno S Marangoni, et al. Microchemical Journal, 2018, (144): 454.
- [5] Markiewicz-Keszycka M, Cama-Moncunill X. Trends in Food Science & Technology, 2017, (7): 80.
- [6] Theriault G A, Bodensteiner S, Lieberman S H. Field Analytical Chemistry & Technology, 2015, 2(2): 117.
- [7] ElFaham M M, Okil M, Mostafa A M. Optics & Laser Technology, 2018, (108): 634.
- [8] Wang Z, Yuan T B, Hou Z Y, et al. Frontiers of Physics, 2014, 9(4): 419.
- [9] Yang B, Jiang L, Wang S, et al. Applied Optics, 2018, 57(5): 1267.
- [10] Yang J, Li X, Lu H, et al. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2018, 33(7): 1184.
- [11] Ahmed N, Abdullah M, Ahmed R, et al. Laser Physics, 2018, 28(1): 016002.
- [12] Lei T, Zhang Y, Liu Y, et al. Chinese Journal of Rare Metals, 2018, 13(7): 90.
- [13] Boué-Bigne F. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2016, 119: 25.

- [14] WANG Zhu-tang, TIAN Rong-zhang(王祝堂, 田荣璋). Aluminum Alloy and Its Processing Manuals(铝合金及其加工手册). Changsha: Central South University Press(长沙: 中南大学出版社), 2000, 25.
- [15] KE Yi-kan, DONG Hui-ru(柯以侃, 董慧茹). Handbook of Analytical Chemistry-Spectral Analysis(分析化学手册-光谱分析). Beijing: Chemical Industry Press(北京: 化学工业出版社), 2000, 39.
- [16] Boumans P W J M. Variables in Spectrochemistry and Spectral-Line Intensity. Springer US, 1966, 1.

On-Line Plasma Spectrum Detection of Laser Cleaning of Aluminum Alloy Before Welding

TONG Yan-qun¹, LU Qin-hui¹, ZHOU Jian-zhong¹, YAO Hong-bing¹, YE Yun-xia², REN Xu-dong^{1*}

1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. Research Institute of Micro Electronics and Terahertz Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

Abstract The technology of aluminum alloy welding is widely used in industrial production, manufacturing and maintenance. Porosity in welding seam leads to the decrease of welding quality, which is a common problem in aluminum alloy welding technology. The metal oxide on the surface of aluminum alloy is the main source of pore formation, therefore, on-line detection of laser cleaning process can analyze the cleaning status of surface oxides in real time and avoid damage or secondary oxidation of matrix surface caused by excessive cleaning at the same time. In this paper, laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) was used to detect the laser cleaning process of aluminum alloy before welding and to characterize the surface state of aluminum alloy after cleaning. LIBS technology can simultaneously detect multi-element components, with a lower detection limit and higher accuracy. In this paper, an on-line detection system for laser cleaning of aluminum alloy before welding based on AdorMechelle 5000 spectrometer was built, eliminated the influence of air environment on the experimental results, the LIBS spectra of 6061 aluminum alloy surface oxide and aluminum alloy matrix were measured, analyzed their elemental characteristic spectra, verified the accuracy of elemental characteristic spectra by using EDS test results, and explored the feasibility of LIBS technology in on-line detection of laser cleaning process. The relationship between spectral line intensity of plasma and laser energy density was tested experimentally. The damage threshold of single pulse laser for removing oxide on aluminum alloy surface was obtained. The cause and effect of laser damage threshold were researched by combining the results of X-ray energy spectrum. The relationship between the characteristic spectral lines of plasma spectra and the number of pulses in laser cleaning process was researched. Based on the intensity ratio of O/Al characteristic spectral lines, a criterion for on-line detection of cleaning effect and secondary oxidation damage was proposed. To verify the accuracy of the criterion, the trend of the intensity ratio of O/Al characteristic lines with cleaning times was compared with that of oxygen atom percentage obtained by X-ray energy spectra. The experimental results showed that the influence of air atmosphere can be eliminated by analyzing the laser cleaning state with the spectral characteristics of laser-induced plasma in the range of 200~700 nm; The characteristic spectra of oxygen and aluminum elements accurately reflect the composition difference between the oxide film on the surface and the aluminum alloy substrate; The element composition and content detected by X-ray energy spectrum showed that the oxygen content first decreased and then increased with the laser cleaning energy density, and the laser energy threshold of secondary oxidation damage of single cleaning aluminum alloy is $11.46 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$. The laser energy density less than the damage threshold does not cause damage to the aluminum alloy matrix after multiple cleaning, and the intensity of plasma spectral characteristic lines is correlated with surface states; The ratio of 656.5 nm (O II)/396.2 nm (Al I) spectral line intensity ($\leq 1.5\%$) is the criterion of laser cleaning. The research results are beneficial to the real-time control technology of laser cleaning of aluminum alloy and the integration of welding devices.

Keywords Laser cleaning; Aluminum alloy; Plasma spectrum; On-line detection

(Received Nov. 30, 2018; accepted Mar. 28, 2019)

* Corresponding author