

基于 LIBS 光谱与成分分析的飞机蒙皮激光除漆可控性研究

杨文锋^{1*}, 钱自然¹, 曹宇², 魏桂明¹, 朱德华², 王峰³, 付婵媛¹

1. 中国民用航空飞行学院航空工程学院, 四川 广汉 618307

2. 温州大学机电工程学院, 浙江 温州 325035

3. LTB-CHINA, CHENGDU OFFICE, 四川 成都 610000

摘要 激光除漆作为激光清洗技术的分支, 有望替代传统打磨及化学除漆工艺, 实现飞机蒙皮表面漆层的可控清除, 但除漆过程及质量的可控性依赖于有效的原位、在线监测技术。针对飞机铝合金蒙皮表面多漆层结构, 采用 LIBS 技术对不同漆层、不同厚度时漆层特征元素进行光谱与成分分析, 在信号解译基础上建立漆层去除层数、去除厚度与 LIBS 光谱变化的内在关联, 实现除漆过程质量的实时监测与反馈控制。结果表明, 分层除漆过程中面漆、底漆完全清除后, 漆层特征元素(Fe, Ti)的光谱峰消失。LIBS 监测到面漆的特征元素 Fe 在 501.494 1 和 521.517 9 nm 处 Fe I 的光谱特征峰消失时, 判定面漆完全清除。监测到底漆特征元素 Ti 在 498.173 0, 499.107 0 和 521.039 0 nm 处 Ti I 的光谱特征峰消失时, 判定底漆完全清除。厚度除漆时, 随漆层厚度降低或激光脉冲作用次数增加, 漆层特征元素(Ca)的光谱峰强相应降低, 至漆层厚度为 0 时(完全去除), 漆层特征元素光谱峰消失, 同时基体特征元素(Al)光谱峰出现。LIBS 监测 616.217 0, 643.907 0 和 422.673 0 nm 处 Ca I 的光谱信号强度变化能够监测激光除漆时剩余漆层厚度, 实现对激光除漆厚度的可控清除监测。另外, 结合 EDS 与 SEM 测试分析, 验证了 LIBS 用于飞机蒙皮激光除漆过程与效果监测、分层与厚度控制的可行性, 表明在不损伤基体氧化层的前提下, 通过监测对应波长位置的面漆、底漆特征元素光谱与成分变化规律能够实现激光分层可控、厚度可控除漆。

关键词 飞机蒙皮; 激光除漆; 激光诱导击穿光谱; 可控性; 监测与反馈

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)10-3233-07

引言

飞机蒙皮表面为复杂的多漆层结构, 维修、维护时表面漆层的清除须满足分层可控或厚度可控要求, 以保证其固有可靠性与安全性。目前工程上广泛采用的化学溶剂、人工打磨及喷丸除漆方法, 一般采用厚度测量统计, 并结合工程经验作为除漆程度判断的依据, 在质量可控性与除漆精度方面难以满足应用需求, 也不能实现对除漆过程与效果的实时监测与反馈。

激光除漆作为一种新型清洗技术, 因其无接触、环境友好、可控性强, 且可实现自动化等优点, 对于飞机铝合金与复合材料蒙皮除漆具有巨大应用价值^[1]。激光诱导击穿光谱(laser-induced breakdown spectroscopy, LIBS)可以样品表面的等离子体发射光谱确定其元素成分及含量, 是光谱与成分

分析领域一种前沿性技术, 目前已开展的研究领域包括金属^[2]、煤炭^[3]、文物保护^[4]等。

NASA 的 Palmieri 和 Ledesma 等^[5-6]采用低脉冲能量 LIBS(μ LIBS)深入研究了航空碳纤维复合材料粘接处理前的表面质量控制新方法。Yin 等^[7]使用 LIBS 技术对敦煌壁画涂层进行研究, 结合主成分分析法, 建立孔雀石和氯铜矿石的分类模型, 成功运用于古壁画三种不同色调绿色颜料的在线识别与分类, 结果与 X 射线衍射分析吻合。孙兰香^[8]等结合 LIBS 技术, 设计激光清洗在线监测系统, 发现波长在 588.819 与 589.411 nm 处 Na I 原子谱线可以表征碳纤维复合材料清洗的效果。辛勇^[9]等自主研制了 LIBS 液态金属成分在线分析仪, 工业现场的长期在线测试结果已证明其对 Si, Fe, Cu, Mn 和 Ti 元素的在线分析结果满足工厂精度要求, 能够实现高温、震动、粉尘等环境下 LF6 系列铝合金熔炼过程的化学成分在线监测。在激光除漆的在线监测与反馈

收稿日期: 2020-10-09, 修订日期: 2021-02-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1233202, 51375348), 四川省科技厅重点研发项目(2021YFSY0025), 中国民航飞行学院成果转化项目(CJ2019-03)资助

作者简介: 杨文锋, 1979 年生, 中国民用航空飞行学院教授 e-mail: ywfcyy@163.com * 通讯作者

方面, 冯国英^[10]等研究了铝合金基体表面单层油漆特征元素对应的光谱特征峰强度随时间演变的规律, 提出基于 LIBS 技术及油漆去除过程的时间分辨特征峰对激光除漆效果进行实时判断的方法。邓国亮^[11]等基于 LIBS 技术和特征元素的时间分辨光谱, 报道了通过监测油漆与基体的元素特征峰强度和比值实时监测激光除漆过程的方法。

以上针对单一漆层或微-介观尺度污染物激光清洗的研究, 表明 LIBS 技术应用于激光清洗实时监测与反馈、在线检测方面的潜力, 将其应用于飞机蒙皮激光除漆, 有望实现在线识别漆层表面物质成分, 实时监测激光除漆过程及效果。针对飞机蒙皮激光除漆的可控需求, 基于 LIBS 技术快速、无损、多元素同步在线检测的特点, 研究飞机铝合金蒙皮表面不同漆层、漆层不同厚度处的特征元素在除漆过程中的 LIBS 光谱与成分变化规律, 建立 LIBS 特征元素光谱信号与激光分层除漆、厚度除漆的内在关联, 获得飞机蒙皮激光

分层、厚度可控除漆的实时监测与反馈控制方法。

1 实验部分

1.1 测试样品制备

采用电光调 Q 的 Nd:YAG 脉冲光纤激光除漆系统(波长 1 064 nm, 输出脉宽 0.35 μs , 脉冲频率 90 kHz, 扫描速度 2 000 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)制备 LIBS 测试样品, 输出的高斯光束由透镜、透镜聚焦至漆层表面, 光斑直径为 50 μm 。通过改变激光功率这一单一变量, 结合涂层测厚仪(型号 Defelsko PosiTector 6000 FS1)的平均值结果, 获得分层及厚度除漆的 LIBS 测试样品, 其示意图及编号如图 1。其中深灰色为面漆层(top coating, Tc), 浅灰色为底漆层(primer, Pr), 青色为铝合金蒙皮阳极氧化层, 蓝色为铝合金基体层(aluminum substrate, As), 红色虚线框外为待清除的漆层。

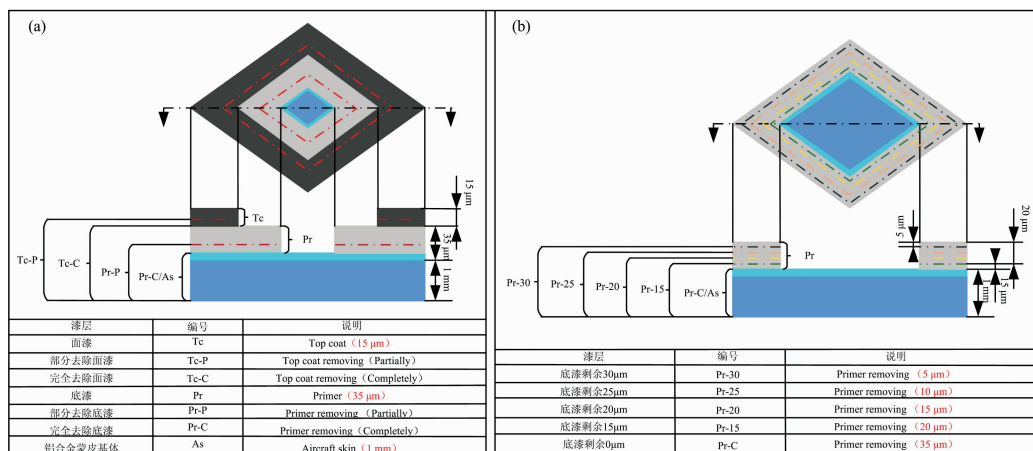


图 1 激光除漆样品示意图及编号

(a): 分层除漆样品; (b): 厚度除漆样品

Fig. 1 Schematic diagram and serial number of laser paint remove sample

(a): Paint remove sample of different layers; (b): Paint remove sample of different thickness

不同样品的激光除漆功率值如表 1, 由于单层底漆剩余 15 μm (Pr-15)左右时, 可通过改变一次激光功率去除干净, 故不研究单层底漆厚度在 0~15 μm 之间的 LIBS 光谱变化。

表 1 激光除漆样品功率参数表

Table 1 Power parameter of laser paint remove sample

样品	编号	功率/%	样品	编号	功率/%
分层除漆样品	Tc-P	20	厚度除漆样品	Pr-30	10
	Tc-C	25		Pr-25	12
	Pr-P	30		Pr-20	14
	Pr-C	35		Pr-15	16
			Pr-C	18	

1.2 LIBS 测试

LIBS 检测系统如图 2, 由激光器(脉宽 39 ps, 波长 1 064 nm, 单脉冲能量 11.5 mJ, 脉冲频率 1 Hz)、透镜、移动式载物台、光纤探头、中阶梯光栅光谱仪(型号 ARYELLE 200, 全波段探测范围 380~880 nm, EMCCD 增益 1000)和主控计

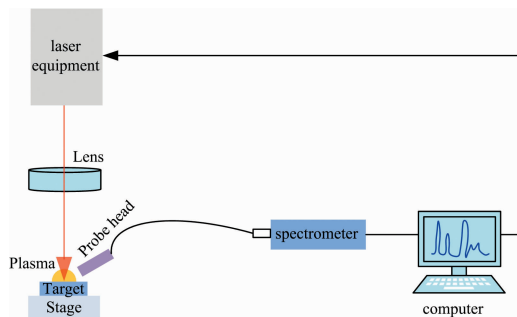


图 2 LIBS 在线测试系统示意图

Fig. 2 System diagram for on-line detection of LIBS

算机组成, 对分层、厚度除漆样品进行测试, 并在线收集光谱信号。激光经透镜聚焦在漆层表面产生等离子体, 光纤探头收集等离子体后传输至光谱仪, 输出的光谱图在计算机端显示。保持室内 25 $^{\circ}\text{C}$ 温度和 50% 湿度, 避免 LIBS 信号稳定性受温湿度波动影响。

2 结果与讨论

2.1 LIBS 光谱图滤波和环境因素预处理

LIBS 系统采集等离子体光谱的过程中由于激光能量波动等原因, 会引入不可避免的光谱误差与干扰信息, 参考文献[12-14]的方法, 基于滑动窗口方法, 使用 MATLAB 对原始 LIBS 光谱图进行求均值、数据平滑、基线校准、峰值保留等滤波预处理。滤波后光谱图的背景信息明显减少, 特征峰

突出, 便于对结果的分析, 如图 3(a)和(b)。

另外, 由于测试在大气环境中进行, 采集的 LIBS 光谱中包含空气的特征谱线, 需排除空气谱线对结果分析的影响。为获得空气的等离子体光谱图, LIBS 系统直接击穿空气, 与样品的曝光时间保持一致, 每次随机击穿 5 个点, 进行滤波预处理后获得的空气等离子体光谱图如图 3(c)。图中显示, 空气谱线主要分布在 740~880 nm 波段。而且, 空气的成分与含量, 通常是固定的。所以认为 740~880 nm 为本研究中空气干扰波段。

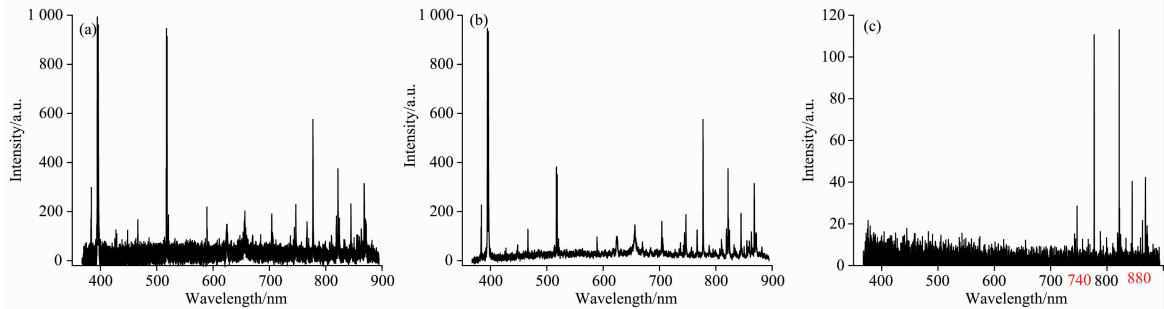


图 3 LIBS 光谱图

(a): 滤波前; (b): 滤波后; (c): 滤波后空气

Fig. 3 LIBS spectra

(a): Before filtering; (b): After filtering; (c): After filtering of air

参考美国国家标准与技术研究院 (National Institute of Standards and Technology, NIST) 的原子光谱数据库 (atomic spectra database, ASD) 进行光谱的元素分析, 发现试样成分的 C, O, Al, Si, Ca, Ti, Mg, Fe 和 Ni 元素在 380~740 nm 波段均有明显的特征峰分布。因此, 排除 740~880 nm 波段的环境因素不会对结果分析产生影响。

2.2 LIBS 监测特征元素的确定

为了证明激光除漆过程中 LIBS 监测元素光谱能够反映漆层表面状态, 采用原始漆层样品和漆层被去除不同程度的样品, 将扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 和能谱仪 (energy dispersive spectroscopy, EDS) 测试结

果与 LIBS 光谱结果进行对比分析。

完全去除面漆 (Tc-C) 与底漆 (Pr) 的 SEM 测试结果如图 4(a)和(b), 其表面颗粒大小及形貌保持一致, 但 Tc-C 存在明显的孔洞和小块状的材料脱落。这是由于漆层受到激光辐照时, 二者之间的光-热、光-力作用导致漆层材料烧蚀、开裂及脱落^[15], 说明 LIBS 测试样品的可靠性。

EDS 测试结果表明, Tc 的主要特征元素为 Fe, Mg 和 Ni, Pr 的主要特征元素为 Ca 和 Ti, 如图 4(c)和(d)。结合 LIBS 测试结果, 分层除漆时选取 Fe, Ti 和 Ca 元素, 厚度除漆时选取 Ti 和 Ca 元素作为 LIBS 监测的特征元素。

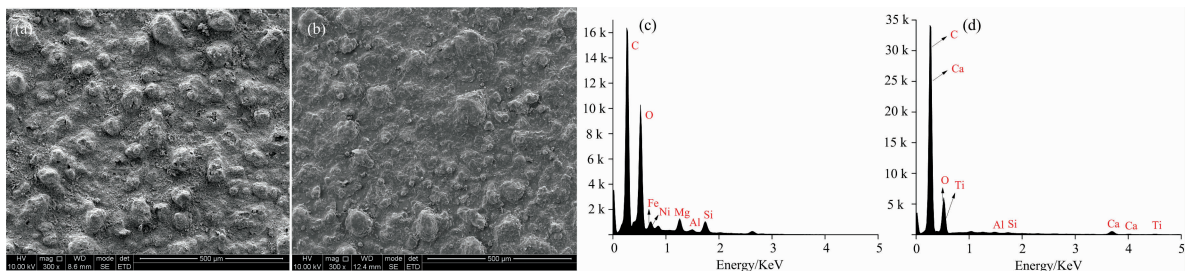


图 4 漆层表面形貌和 EDS 能谱图

(a): Tc-C 的 SEM; (b): Pr 的 SEM; (c): Tc 的 EDS; (d): Pr 的 EDS

Fig. 4 Morphology and energy dispersive spectroscopy (EDS) images of paint surface

(a): SEM of Tc-C; (b): SEM of Pr; (c): EDS of Tc; (d): EDS of Pr

2.3 分层可控除漆

激光除漆前, 面漆 (Tc) 的 LIBS 广谱图如图 5(a), 标定了面漆成分的所有元素。激光去除部分面漆 (Tc-P) 的 LIBS

光谱图如图 5(b), 光谱图的峰强均低于 Tc。激光完全去除面漆 (Tc-C) 的 LIBS 光谱图如图 5(c), 已不同于图 5(a)和(b)。

图 5(a)和(b)中的特征峰 1, 2 和 3 是 Tc(面漆)中 Fe 元素在所选波段的特征峰, 由于 Fe I 是采集到的原子态粒

子, Fe III 是采集到的二次电离态粒子, 没有原子态稳定, 所以选取 Fe I 的特征峰(特征峰 2 和 3)进行分析。

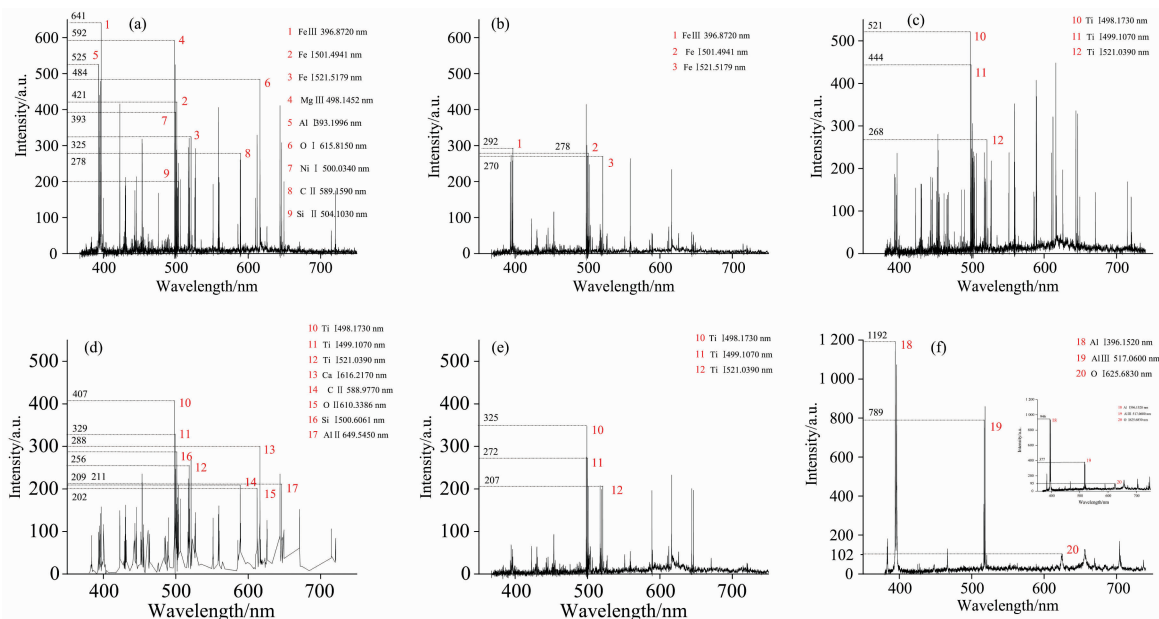


图 5 LIBS 光谱图

(a): Tc; (b): Tc-P; (c): Tc-C; (d): Pr; (e): Pr-P; (f): Pr-C

Fig. 5 LIBS spectra

(a): Top coating; (b): Top coat removing(Partially); (c): Top coat removing(Completely);
(d): Primer; (e): Primer removing(Partially); (f): Primer removing(Completely)

从 Tc(面漆)到 Tc-P(部分去除面漆): 特征峰 2(501.494 1 nm)和特征峰 3(521.517 9 nm)Fe I 强度分别由 421 a. u. 和 325 a. u. 降低为 278 a. u. 和 270 a. u.; 从 Tc-P 到 Tc-C(完全去除面漆): 特征峰 2 和 3 消失, 出现了与 Pr(底漆)成分元素 Ti 元素相同的特征峰 10(498.173 0 nm), 11(499.107 0 nm), 12(521.039 0 nm)。说明随漆层的去除, 漆层成分的元素强度降低。当漆层被去除干净后, 成分元素的谱峰消失, 下层成分元素的谱峰出现。首先, 在不变的 LIBS 参数组合下, 特征元素光谱谱峰强度稳定。另外, 随漆层变薄, 漆层表面激发的等离子体密度和温度逐渐减小, 导致光谱图的强度降低。

对底漆去除过程进行特征元素 Ti 元素的光谱分析, 可得到类似的结论: 从 Pr(底漆)到 Pr-P(部分去除底漆): 特征峰 10(498.173 0 nm), 11(499.107 0 nm)和 12(521.039 0 nm)处 Ti I 强度分别由 407 a. u., 329 a. u. 和 256 a. u. 降低为 325 a. u., 272 a. u. 和 207 a. u.; 从 Pr-P 表面到 Pr-C(完全去除底漆)表面: 其峰强均降为 0, 并且 Pr-C 表面出现了与基体氧化层成分元素 O, Al 元素相同的特征峰 18(396.152 0 nm), 19(517.060 0 nm), 20(625.683 0 nm)。

分层除漆过程中面漆、底漆特征元素的峰强变化如图 6。激光除漆过程中, 通过监测面漆的特征元素 Fe 元素在 501.494 1 nm(特征峰 2)和 521.517 9 nm(特征峰 3)处 Fe I 的峰强变化, 能够实现仅去除面漆保留底漆的激光分层可控除漆。当 Fe 元素的特征峰消失时, 表明面漆被去除干净。通过监测底漆特征元素 Ti 元素在 498.173 0 nm(特征峰 10)、

499.107 0 nm(特征峰 11)和 521.039 0 nm(特征峰 12)处 Ti I 特征峰强度变化, 能够实现面漆去除之后在不损伤铝合金基体的条件下去除底漆。另外, 由于面漆成分中不含 Ti 元素, 所以, 通过监测 Ti 元素的峰强也能够实现整体去除面漆和底漆且不损伤基体。当 Ti 元素的特征峰消失时, 表明底漆被去除干净, 应即刻停止除漆, 避免铝合金基体阳极氧化层被损伤。

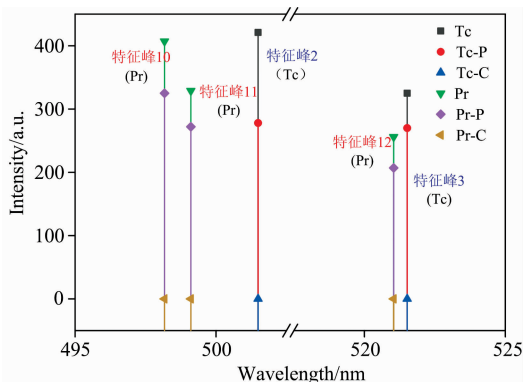


图 6 分层除漆过程中面漆、底漆特征元素的峰强变化

Fig. 6 The LIBS spectra peak intensity changes of the characteristic elements of topcoat and primer in the process of layered laser paint remove

2.4 厚度可控除漆

由于分层可控除漆只能确定不同漆层的监测边界, 不能

监测每一层漆的去除过程,所以对单层漆的去除过程进行厚度可控除漆研究。

2.4.1 不同厚度漆层的 LIBS 光谱信号变化

分析不同厚度漆层(Pr, Pr-30, Pr-25, Pr-20, Pr-15 和 Pr-0)的 LIBS 光谱图,发现 Ti I 和 Ca I 的信号变化规律相同,选择变化更为明显的 Ca I 信号进行分析。如图 7 为

616.217 0 和 643.907 0 nm 处 Ca I 的光谱图变化,发现底漆厚度越薄, Ca I 信号强度越低。当底漆厚度为 0 时, Ca I 强度也为 0。这与多层油漆去除过程中 Fe 和 Ti 元素的变化规律相互验证。说明特征峰强度的不同值对应漆层的不同厚度,特征峰消失时,漆层被去除干净。

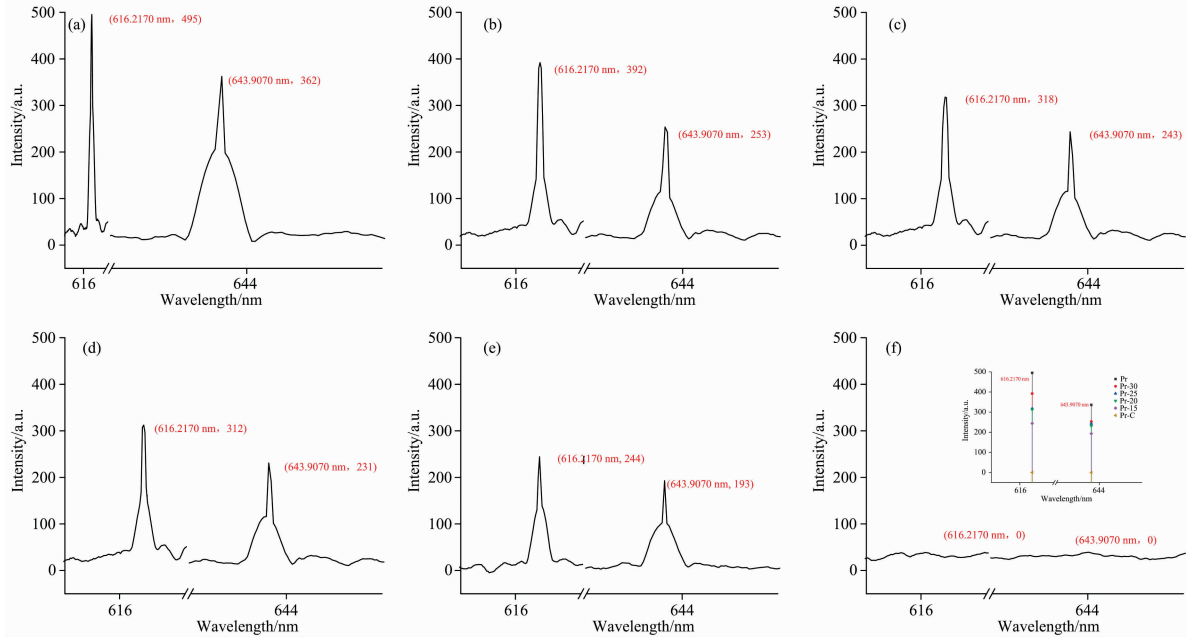


图 7 LIBS 光谱图

(a): Tc; (b): Pr-30; (c): Pr-25; (d): Pr-20; (e): Pr-15; (f): Pr-0

Fig. 7 LIBS spectra

(a): Primer; (b): Primer removing (5 μm); (c): Primer removing (10 μm);

(d): Primer removing (15 μm); (e): Primer removing (20 μm); (f): Primer removing (35 μm)

所以,通过监测底漆的特征元素 Ca 元素在 616.217 0 和 643.907 0 nm 处 Ca I 的特征峰强度变化能够实现激光厚度可控除漆。

2.4.2 不同脉冲次数时漆层对 LIBS 光谱信号影响

为了建立漆层厚度与元素的 LIBS 峰强之间的关系,研究不同脉冲次数作用原始漆层表面时漆层的 LIBS 光谱信号变化。因为随聚焦在漆层表面激光脉冲次数的增加,激发等离子体光谱的漆层厚度在变薄,所以由此能够获得激光厚度可控除漆的 LIBS 监测方法和漆层厚度与元素的特征峰强度之间的关系。

将 LIBS 系统的单脉冲激光聚焦在 Pr(单层底漆)表面,每两个脉冲在线采集一次光谱图,选取特征峰强度变化明显的 380~500 nm 波段的光谱图进行光谱与成分分析,如图 8 为光谱图随脉冲次数的演变过程。

对比 Ti 和 Ca 元素随激光脉冲次数变化的等离子体光谱图,发现 Ti I 在特征峰强度明显的 498.173 0, 499.107 0 和 499.951 0 nm 处的信号强度随脉冲次数的增加逐渐减弱,分别在 14, 10 和 8 次激光脉冲作用时,信号完全消失。而此时铝合金蒙皮基体的特征元素 Al 元素的特征峰未出现,如图 9(a)。所以 Ti 元素的等离子体信号随脉冲个数增加消失

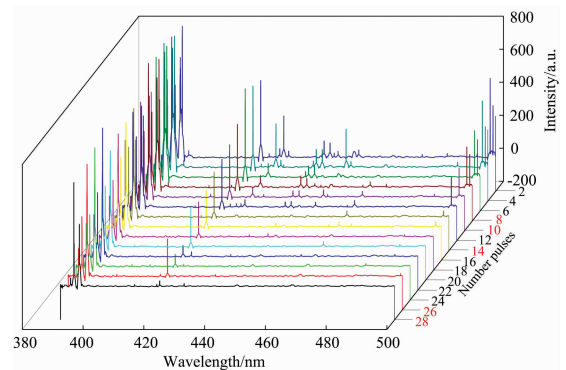


图 8 不同脉冲次数作用单层底漆时的 LIBS 光谱图

Fig. 8 LIBS spectra of single primer at different laser pulse

过早,不适合作为监测元素。Ca II 在 393.366 0 nm 处的信号,在 2~24 次激光脉冲作用过程中,信号强度逐渐减弱,在 26 次激光脉冲作用时,信号强度消失,但此时仍未见 Al 元素的特征峰,如图 9(b)。而 Ca I 在波长较长的 422.673 0 nm 处的特征峰,在 2~26 次激光脉冲作用过程中,信号强度逐渐减弱,在 28 次激光脉冲作用时,信号强度消失,并在 396.152 0 nm 处出现了 Al I 的特征峰,如图 9(c)和(d)。

Al 元素特征峰的出现说明此时激光已作用到铝合金基底层。

所以,通过监测底漆的特征元素 Ca 元素在 422.673 0 nm 处 Ca I 的特征峰强度变化也能够实现激光厚度可控除

漆。

关于激光分层、厚度可控除漆过程中 LIBS 监测光谱与成分总结如表 2。

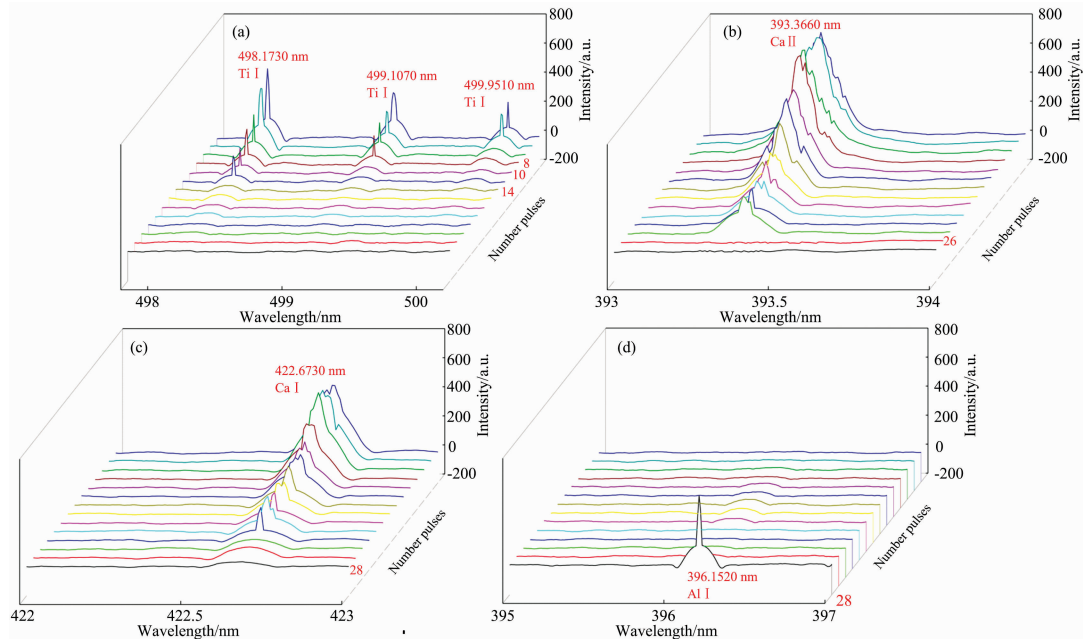


图 9 不同脉冲次数作用单层底漆后 Ti, Ca, Al 元素的 LIBS 光谱图

(a): Ti I; (b): Ca II; (c): Ca I; (d): Al I

Fig. 9 LIBS spectra of Ti, Ca and Al elements irradiated by different laser pulse numbers

(a): Ti I; (b): Ca II; (c): Ca I; (d): Al I

表 2 基于 LIBS 光谱与成分分析的飞机蒙皮激光分层、厚度可控除漆监测

Table 2 Monitor on laser controllable paint remove of layer and thickness of aircraft skin based on laser-induced breakdown spectrum and composition analysis

可控除漆	漆层	特征元素	对应波长/nm
分层可控	面漆	Fe I	501.494 1
			521.517 9
			521.039 0
厚度可控	底漆	Ca I	422.673 0
			616.217 0
			643.907 0

3 结 论

采用 LIBS 技术对表面涂覆有两层油漆的 2024-T3 铝合

金激光除漆不同程度表面、只涂覆单层油漆的铝合金漆层不同厚度表面进行了 LIBS 测试分析,通过滤波和环境因素预处理光谱图后,分析特定漆层所含特征元素所对应某一波长位置的电离状态时的元素光谱与成分变化规律,结论如下:

(1)LIBS 谱峰强度与不同除漆表面存在关联性,说明了 LIBS 用于激光除漆在线监测与反馈的可行性。

(2)通过监测面漆的特征元素 Fe 元素在 501.494 1 和 521.517 9 nm 处 Fe I 的特征峰强度变化能够实现仅去除面漆保留底漆的激光分层可控除漆;通过监测底漆特征元素 Ti 元素在 498.173 0, 499.107 0 和 521.039 0 nm 处 Ti I 的特征峰强度变化能够实现仅去除底漆或整体去除面漆和底漆且不损伤基体的激光分层可控除漆。

(3)通过监测底漆的特征元素 Ca 元素在 422.673 0, 616.217 0 和 643.907 0 nm 处 Ca I 的信号强度变化能够实现激光厚度可控除漆。

(4)EDS 的成分检测结果与 SEM 的微观形貌对比验证了 LIBS 监测方法的准确性与激光除漆的效果。说明在飞机蒙皮的激光除漆过程中,基于 LIBS 技术的光谱与成分分析,能够实现激光分层、厚度可控除漆。

References

- [1] WANG Xiao-dong, YU Jin, MO Ze-qian, et al(王晓东, 余锦, 豹泽强, 等). Laser & Optoelectronics Progress(激光与光电子学进展), 2020, 57(5): 59.

- [2] Shakeel H, Haq S U, Aisha G, et al. *Physics of Plasmas*, 2017, 24(6): 063516.
- [3] Sheta S, Afgan M S, Hou Z, et al. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2019, 34(6): 1047.
- [4] Botto A, Campanella B, Legnaioli S, et al. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2019, 34(1): 81.
- [5] Palmieri F L, Ledesma R I, Dennie J G, et al. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 175: 107155.
- [6] Ledesma R, Palmieri F, Connell J. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2020, 98: 102528.
- [7] Yin Y, Sun D, Su M, et al. *Optics & Laser Technology*, 2019, 120: 105689.
- [8] SUN Lan-xiang, WANG Wen-ju, QI Li-feng, et al(孙兰香, 王文举, 齐立峰, 等). *Chinese Journal of Lasers(中国激光)*, 2020, 47(11): 299.
- [9] XIN Yong, LI Yang, CAI Zhen-rong, et al(辛 勇, 李 洋, 蔡振荣, 等). *Metallurgical Analysis(冶金分析)*, 2019, 39(1): 15.
- [10] CHEN Lin, DENG Guo-liang, FENG Guo-ying, et al(陈 林, 邓国亮, 冯国英, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2018, 38(2): 367.
- [11] Zhou Qionghua, Deng Guoliang, Chen Yin et al. *Applied Optics*, 2019, 58(34): 9421.
- [12] Li An, Guo Shuai, Wazir Nasrullah, et al. *Optics Express*, 2017, 25(22): 27559.
- [13] WANG Xian-shuang, GUO Shuai, XU Xiang-jun, et al(王宪双, 郭 帅, 徐向君, 等). *Chinese Optics(中国光学)*, 2019, 12(4): 888.
- [14] ZHANG Rui, SUN Lan-xiang, CHEN Tong, et al(张 蕊, 孙兰香, 陈 彤, 等). *Acta Geologica Sinica(地质学报)*, 2020, 94(3): 991.
- [15] GAO Liao-yuan, ZHOU Jian-zhong, SUN Qi, et al(高辽远, 周建忠, 孙 奇, 等). *Chinese Journal of Lasers(中国激光)*, 2019, 46(5): 335.

Research on the Controllability of Aircraft Skin Laser Paint Remove Based on Laser-Induced Breakdown Spectrum and Composition Analysis

YANG Wen-feng^{1*}, QIAN Zi-ran¹, CAO Yu², WEI Gui-ming¹, ZHU De-hua², WANG Feng³, FU Chan-yuan¹

1. Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China

3. LTB-CHINA, CHENGDU OFFICE, Chengdu 610000, China

Abstract Laser paint removal, as a branch of laser cleaning technology, will replace the traditional polishing and chemical paint removal technology to achieve the controlled paint removal of the aircraft skin surface. However, the process and quality of controlled paint removal depend on effective in-situ online monitoring technology. For the multi-paint layer on the surface of the aircraft aluminum alloy skin, LIBS technology is used to analyze the spectral and the component of characteristic elements of different paint layers and different paint thicknesses during laser paint removal. Based on signal interpretation, to establish the relationship between the paint layer and paint thicknesses of laser paint removal and the change of LIBS spectrum. And to realize the real-time monitoring and feedback control of the paint removal process and quality. The results show that the spectral peak of the characteristic elements (Fe, Ti) of the layer disappears when the topcoat or primer is completely removed in the process of layered removal. Once LIBS monitors the characteristic element Fe of topcoat at 501.494 1 and 521.517 9 nm Fe I spectral characteristic peak disappears, the topcoat has been completely removed at the same time. And when the characteristic element Ti of primer at 498.173 0, 499.107 0 and 521.039 0 nm Ti I spectral characteristic peak disappears, determine primer has been completely removed. When the paint is removed in different thicknesses, the spectral peak strength of the paint characteristic element (Ca) decreases correspondingly with the decrease of the paint thickness or the increase of laser pulse. Until the paint thickness is 0 (completely removed), the spectral peak of the paint characteristic element disappears, and the matrix characteristic element (Al) appears. By applying the LIBS spectral signal intensity changes of Ca I at 616.217 0, 643.907 0 and 422.673 0 nm, the remaining paint thicknesses during laser paint removal could be monitored and further realizes Laser-based Thickness Controlled Paint Removal. In addition, combined with EDS and SEM testing and analysis, the feasibility of LIBS for aircraft skin laser paint removal process and effect monitoring, Laser-based Layered Controlled Paint Removal and Laser-based Thickness Controlled Paint Removal are verified. It shows that under the premise of not damaging the oxide layer of the substrate, by monitoring the characteristic element spectrum and composition change law of the topcoat and primer at the corresponding wavelength position, Laser-based Layered Controlled Paint Removal and Laser-based Thickness Controlled Paint Removal can be achieved.

Keywords Aircraft skin; Laser paint remove; Laser-induced breakdown spectroscopy; Controllability; Monitoring and feedback

* Corresponding author

(Received Oct. 9, 2020; accepted Feb. 12, 2021)