

## 声光复合的激光清洗飞机蒙皮实时监测 (特邀)

李世杰<sup>1</sup>, 张丽君<sup>1</sup>, 何佳<sup>2</sup>, 何长涛<sup>1</sup>, 韩敬华<sup>1\*</sup>

(1. 四川大学电子信息学院, 四川成都 610065;  
2. 东莞飞创激光智能装备有限公司, 广东东莞 523000)

**摘要:** 飞机蒙皮的老化油漆去除是飞机保养维修的重要步骤。较传统的化学清洗方法, 采用激光进行清洗具有效率高, 污染小等优势, 但较高能量的激光存在过度清洗导致基底损伤的问题, 所以对清洗过程的实时监控以便及时对激光器做出反馈非常重要。针对此问题提出了基于声光复合法的实时监控方式, 在清洗过程中分别对光和声信号进行采集分析。其中对于光谱检测法, 采用了激光诱导击穿光谱对不同漆层的差异元素的不同特征峰进行标定, 实现不同漆层的反演; 声信号检测法是通过对比分析激光烧蚀不同漆层所产生声信号的强度和频率, 进行对应漆层的确定, 再通过两种方法的结合对比反推回漆层的清洗情况与去除效果, 研究表明声光复合法可以实现激光除漆过程的准确实时监控。

**关键词:** 飞机蒙皮; 激光清洗; 激光诱导击穿光谱检测; 声信号检测

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220821

## Real-time monitoring of laser cleaning aircraft skin based on acousto-optic composite method (*invited*)

Li Shijie<sup>1</sup>, Zhang Lijun<sup>1</sup>, He Jia<sup>2</sup>, He Changtao<sup>1</sup>, Han Jinghua<sup>1\*</sup>

(1. School of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;  
2. Dongguan Feechuang Laser Intelligent Equipment Co., Ltd., Dongguan 523000, China)

**Abstract:** The aging paint removal of aircraft skin is an important step in aircraft maintenance and repair. Compared with traditional chemical cleaning methods, laser cleaning has the advantages of high efficiency and low pollution, but the problem of substrate damage caused by excessive cleaning of high-energy laser exists, so it is very important to monitor the cleaning process in real time so as to give feedback to the laser in time. Aiming at this problem, a real-time monitoring method based on acousto-optic composite method is proposed, and the optical and acoustic signals are collected and analyzed respectively in the cleaning process. For the spectral detection method, the laser-induced breakdown spectrum is used to calibrate the different characteristic peaks of different elements in different paint layers to realize the inversion of different paint layers; The acoustic signal detection method is to determine the corresponding paint layer by comparing and analyzing the intensity and frequency of the acoustic signal generated by the laser ablation of different paint layers, and then the cleaning condition and removal effect of the paint layer can be deduced by comparing the two methods. The research shows that the acousto-optic composite method can achieve accurate real-time monitoring of the laser paint removal process.

**Key words:** aircraft skin; laser cleaning; LIBS spectrum detection; acoustic signal detection

收稿日期: 2022-11-10; 修订日期: 2022-12-21

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院联合基金 (2021YFSY0027); 四川省科技厅项目 (2021YFSY0027)

作者简介: 李世杰, 男, 硕士生, 主要研究方向为激光与物质相互作用。

导师(通讯作者)简介: 韩敬华, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为激光与物质相互作用、激光效应、激光加工、光学加工等。

## 0 引言

飞机蒙皮的油漆层的性能完好性对飞行安全有着至关重要的作用。激光除漆作为一项新兴的高效快速的清洗技术,较传统的除漆方式有着效率高、损伤小、污染少等各种优势,在工业中得到广泛应用。为保证除漆的质量与精度,需对清洗过程进行实时监测反馈,及时了解当前的去除情况,以实现闭环控制。目前,主要的监测方法是通过探测激光清洗烧蚀过程中各自效应所产生的信号,以此实时反馈清洗进展。其中激光诱导击穿光谱(Laser induced breakdown spectroscopy, LIBS)检测和声信号检测借由其高效、准确、实时等优点受到了国内外学者的青睐<sup>[1-2]</sup>。

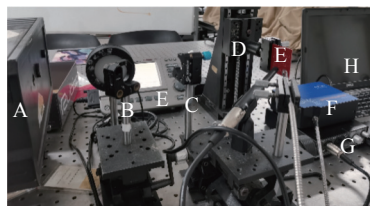
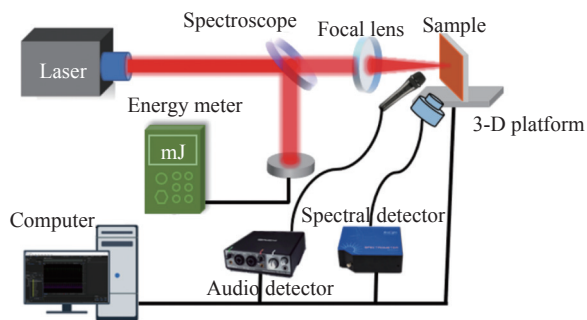
2001年, Bregar<sup>[3]</sup>等利用准分子和Q开关Nd:YAG激光器从基板上去除液体或固体,发现清洗过程中伴有可检测的声学信号。2016年, Giorgio<sup>[4]</sup>等利用LIBS与激光清洗工艺相结合的方式,应用于意大利巴里Castello Svevo的石灰岩中去除和表征黑色结壳沉积物。同年, Villarreal-Villela<sup>[5]</sup>等对激光去除油漆过程中对激光烧蚀引起的光声(PILA)信号快速傅里叶变换来分析光谱,从而识别金属表面上的油漆成分,提出该方法可用于清洁过程的监控。2019年,周琼花<sup>[6]</sup>等通过LIBS光谱研究了油漆和基材的LIBS光谱元素峰的时间分辨特征。该方法具有快速、准确、实时监测的潜力。2020年, Papanikolaou<sup>[7]</sup>等提出了一种用于在线监测激光清洁程序的混合光声(PA)和光学监控系统。这种方法可以精确确定消除结壳层所需的激光脉冲的临界数量。2021年, Li Xing<sup>[8]</sup>等采用LIBS对清洗过程进行实时监测,得到了一个通过射线进行定量的方法。国内外研究人员针对激光清洗

声光监测技术开展了广泛研究,证明了其监测的有效性和实时性。

现有研究主要集中于对单层油漆清洗监测,而飞机蒙皮属于多层油漆机构,其光声信号更为复杂多样,需要进一步分析和改进。文中分别对多层漆结构进行光信号及声信号的收集和分析,再通过对不同漆层的信号差异,获得了相应的标定方式,并最终达到了实时准确监测的目的。文中研究成果为飞机蒙皮高质量的可控清洗提供了支撑和参考。

## 1 实验装置

实验检测装置如图1所示,532 nm脉冲激光器发出频率为1 Hz,功率密度为3.82 J/cm<sup>2</sup>,光斑大小为1200 μm的激光后通过一个2:8分光镜,将激光分为两束,功率较低的一束激光打入功率计,以实时监控激光功率;功率较高的激光束通过焦距为150 mm的聚光透镜后汇聚于放在三维平台上的样品表面。样品基底选用厚度为1 mm的金属铝板,表面为24 μm红色热塑性丙烯酸树脂油漆,制样时漆层的厚度由喷涂的速度来控制,将喷涂完成的样品置于清洁通风的环境中干燥。同时通过bim-66系列等离子体光谱探测装置和RUBIX22声信号探测装置分别得到除漆时的光谱和声波。在实验时,通过电脑实时控制三维平台移动基底为Al表面涂漆层的样品已得到1、2、8等脉冲次数作用下的样品点,分别对应于除漆过程中的不同阶段。同时通过作用时光谱探测头和声探测麦克风,实时接收作用点的光和声信号,再通过各自相应的处理装置在电脑上实时得到两种信号的曲线图,用于实时监控和后续研究。



A: 532 nm laser  
 B: 2:8 spectroscop  
 C: 150 mm focal lens  
 D: 3-D platform  
 E: Sample  
 F: Spectral detector  
 G: Audio detector  
 H: Computer

图 1 监测实验装置图

Fig.1 Monitoring experimental device

## 2 LIBS 光谱监测法

当激光作用于油漆时,油漆会迅速发生相变,电离等效效应,使得油漆发生熔化,气化甚至产生等离子体。由于激光脉冲能量属于瞬时沉积,这样使得等离子体具有高温高压特性,会以各种形式进行扩散,从机械能方面,向外迅速扩张,形成冲击波;从热能方面,会向周围进行热传导;从原子发光能方面,会通过对外辐射的方式向外辐射能量,形成 LIBS。

LIBS 属于连续宽谱,其间叠加线状光谱,连续谱是各原子中电子跃迁形成的,表现宽范无特征峰;线状谱是元素原子电离辐射形成的,由于元素电子能级分布一定,决定于元素本身,所以对应线状光谱的也

是特定的。反之,通过特征光谱便可以推断出其中的元素,通过元素的不同便可以确定当前激光作用的区域以及去除进度,此外该方法对激光的参数无要求,激光的属性不会干扰检测结果,因此选用该方法用于去除过程中的实时监测。

### 2.1 分层油漆的元素成分

根据 EDS 测试结果,面漆中含有 C、O、Cl、Ba 等元素,选取 Ba 为面漆的主要特征元素;底漆中含有 C、O、Si、Ti 等元素,选取 Si 和 Ti 为底漆的主要特征元素;化学转化涂层中含有 C、O、Cr 等元素,选取 Cr 为底漆的主要特征元素。图 2 中所取光谱范围为 380~540 nm。

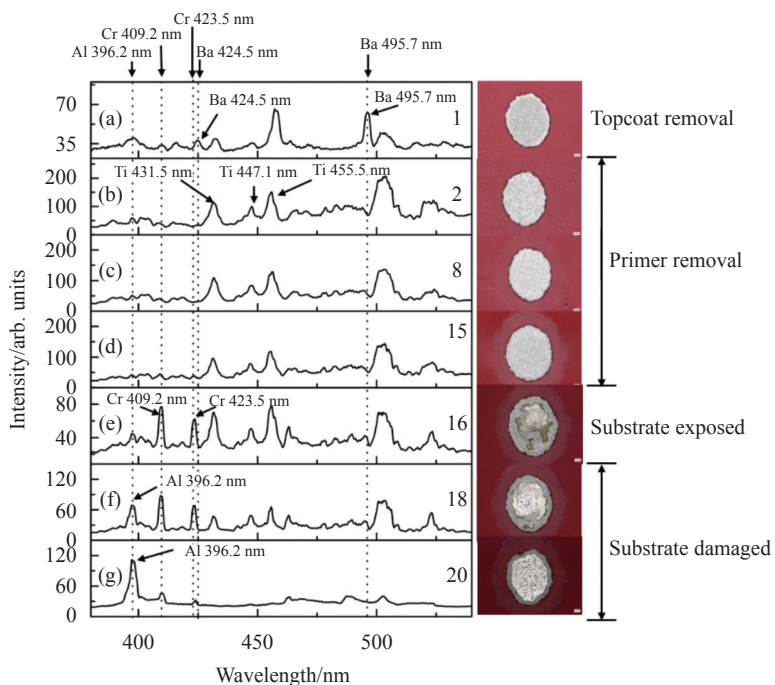


图 2 漆层在不同脉冲数目下的等离子体光谱。(a) 1 个脉冲;(b) 2 个脉冲;(c) 8 个脉冲;(d) 15 个脉冲;(e) 16 个脉冲;(f) 18 个脉冲;(g) 20 个脉冲  
Fig.2 Plasma spectrum of paint layer under different pulse numbers. (a) 1 pulse; (b) 2 pulses; (c) 8 pulses; (d) 15 pulses; (e) 16 pulses; (f) 18 pulses; (g) 20 pulses

激光除飞机表面漆层时分为四个阶段:第一个阶段为单脉冲激光去除面漆;第二个阶段为多脉冲去除底漆;第三个阶段为露出金属基底;第四个阶段为漆层被完全去除,金属基底出现熔融现象。图 2 为这四个阶段的 LIBS 光谱图。查询 NIST 数据库对 LIBS 光谱图中的特征峰谱线进行了元素标定。

图 2(a) 为激光垂直作用于面漆表面的第一个脉

冲采集到的光谱图,此时面漆已被去除,但由于透过面漆的光被底漆吸收后温度瞬间升高也发生了电离,所以不仅采集到 Ba 特征峰,还有底漆所含的 Ti 的特征峰。当面漆被去除后,图 2(b) 为作用第 2 个脉冲时底漆的光谱图,这时可以观察到特征峰 Ba (424.5、495.7 nm) 已经消失,此时面漆已被完全去除,第二发脉冲的光直接作用于底漆,故只有底漆中的 Ti 元素

特征峰, 特征峰 Ba (424.5、495.7 nm) 的出现与消失证明激光正在清除面漆和激光开始清洗底漆, 因此可以选择 Ba 元素的特征峰来监控面漆去除过程。在第 2、8 和 15 个脉冲垂直作用于底漆后, LIBS 光谱仍保持不变, 如图 2(b)~(d) 所示, 这表明激光仍在作用底漆, 且激光作用的深度继续增加。当脉冲数为 16 时, 图 2(e) 出现了 Cr (409.2、423.5 nm) 的特征峰, 其他特征峰与底漆相同, 可以看到这时激光作用至底漆和化学转换涂层, 但未出现 Al 元素证明此时基底没有发生明显损伤。当脉冲数为 18 时, 图 2(f) 出现了 Al (396.2 nm) 的特征峰, Ti 和 Cr 的特征峰保持不变。发生电离的光作用于底漆和基底及化学涂层以此出现了三种元素的同时存在, 说明此时激光刚刚作用于铝合金基板。继续作用 2 个脉冲后, 采集到的光谱图如图 2(g) 所示, 这时 Al (396.2 nm) 的特征峰增强, Ti 和 Cr 的特征峰全部消失。这是由于漆层被完全去除, 激光持续作用于金属基底。因此, Cr (409.2、423.5 nm) 和 Al (396.2 nm) 处的光谱强度可以被选择作为用于评估在清除面漆后底漆是否被完全清洗的参数。

根据上述结果, 前 2 发脉冲, 面漆被迅速去除, 导

致脉冲光中有部分光也作用于底漆导致电离, 故此时候可以找到 Ba 以及 Ti 元素的 LIBS 特征峰; 当后续 8~15 个脉冲作用后, 由于面漆的完全去除, 故只接收到了底漆的 Ti 元素 LIBS 特征峰。因此 Ba 元素的 LIBS 特征峰的存在表明激光正在清洗面漆, 消失表明面漆已完全去除并开始去除底漆。随着脉冲次数增加至 16 发, 同时出现底漆和化学涂层的 Ti, Cr 元素 LIBS 特征峰, 同时出现两种特征元素特征峰表面此时激光正作用于膜层的交界处。因此 Cr 元素的 LIBS 特征峰的出现表明底漆清洗完毕并开始作用于涂层。最后第 18~20 发脉冲时, Al 元素 LIBS 特征峰的出现, 表明激光已经作用于基底后电离, 此时已经开始损伤基底。

### 2.2 多脉冲去除底漆的监测

由于底漆是由多脉冲去除, 可以根据 LIBS 光谱图对去除底漆过程进行监测分析。将单脉冲激光聚焦在底漆样品表面, 每隔一个激光脉冲采集一次等离子体光谱, 直到第 20 个脉冲, 选择光谱在 380~480 nm 范围内进行分析。光谱如图 3 所示。

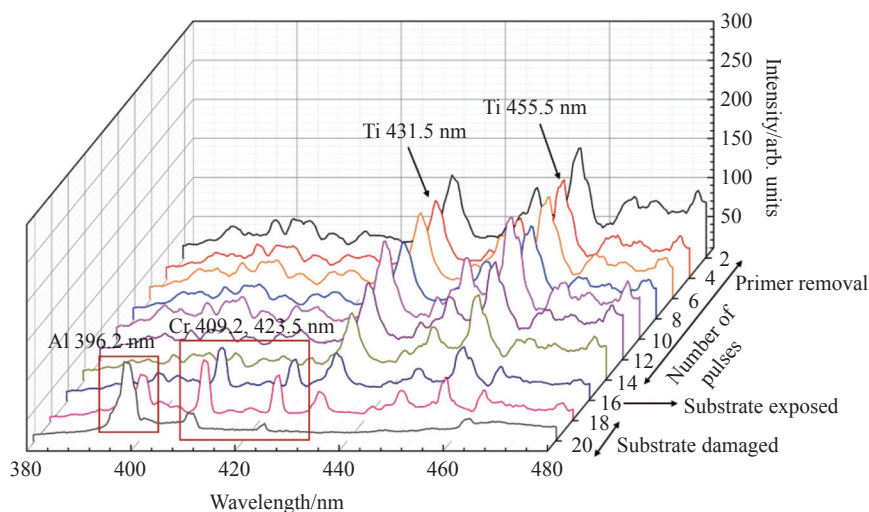


图 3 特征峰强度与脉冲数目的关系

Fig.3 Relation between characteristic peak intensity and pulse number

选择底漆的 LIBS 光谱图中 Ti (431.5、455.5 nm) 的特征峰, Al (396.2 nm) 的特征峰, 这 3 个特征峰的峰值相对强度随激光作用在样品上的脉冲数目的变化如图 4 所示。由图 4 可知, 在前 14 个脉冲, 底漆的特征峰 Ti (431.5、455.5 nm) 相对强度较强, 金属基底中

Al 的特征峰 396.2 nm 的相对强度较弱, 且相对强度近似趋于稳定状态, 第 16 个脉冲开始, Ti 的特征峰强度开始变弱, 而 Al 的特征峰强度逐渐增大。表明第 16 个脉冲时漆层几乎被清洗干净, 但基底还未发生损伤, 在第 16 个脉冲作用后, 底漆被完全去除, 同时随



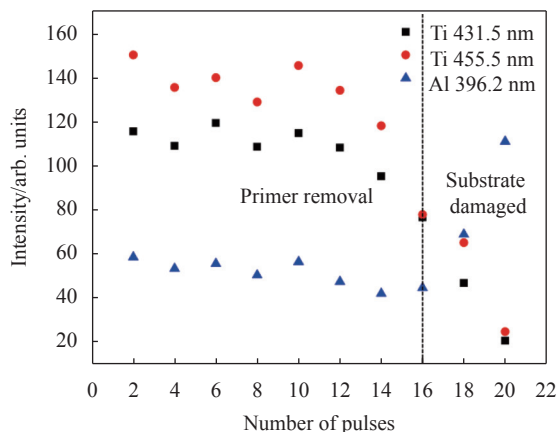


图 4 特征峰 Ti (431.5、455.5 nm) 和 Al(396.2 nm) 的相对强度

Fig.4 Relative intensities of characteristic peaks Ti (431.5, 455.5 nm) and Al (396.2 nm)

着脉冲数目的增加基底损伤程度逐渐增大。

漆层吸收激光能量发生电离时,原子和离子会碰撞和自吸收,这时元素谱线展宽。在对等离子体的分析过程中,谱线展宽分外重要,对等离子体谱线增宽有影响的包括 Stark 展宽、自由展宽、多普勒展宽以及自吸收展宽<sup>[9-12]</sup>。其中影响最大的 Stark 展宽,由等离子体光谱元素的 Stark 展宽和谱线的位移,可由公式 (1) 得到该元素的电子密度<sup>[13-14]</sup>:

$$w_{total} \sim [1 + 1.75A(1 - 0.75r)](n_e/10^{16})w \quad (1)$$

式中:  $w_{total}$  为所测元素等离子体光谱的半高全宽 (FWHM);  $A$  为离子贡献参数;  $w$  为元素的 Stark 展宽, 可以由 Stark-b 数据库查得;  $n_e$  为电子密度;  $r$  为离子之间德拜半径的平均距离。由于几乎没有离子贡献,  $A$  可视为 0。结合实验所测元素特征光谱的 FWHM 和 Stark 展宽便能够计算得到所选元素的等离子体电子密度。

若要计算底漆等离子体的电子温度,需先得到元素的光谱线强度。假设激光辐照底漆时生成的等离子体处于局部热力平衡状态,而且原子或离子的束缚态符合玻尔兹曼分布时,便可以得到等离子体特征谱线强度为<sup>[15-16]</sup>:

$$I = hvAN = (hcN_0gA/4\pi\lambda Z)\exp[-E/kT] \quad (2)$$

式中:  $h$  为普朗克常数;  $\nu$  为特征谱线频率;  $A$  为爱因斯坦系数;  $g$  为统计权重;  $\lambda$  为等离子体发光谱线的波长;  $Z$  表示分区函数;  $E$  为激发能;  $k$  为玻耳兹曼常数;  $gA$  可通过 NIST 数据库<sup>[17]</sup> 进行查询。利用相同元素

的两个不同特征谱线强度之比可算出底漆的等离子体电子温度,表达式为:

$$I_1/I_2 = (\lambda_2g_1A_1/\lambda_1g_2A_2)\exp[-(E_1 - E_2)/kT] \quad (3)$$

根据图 3 的等离子体光谱图,选择特征峰 Ti (455.5 nm) 得到的等离子体发光谱线的电子密度、选择特征峰 Ti (431.5、455.5 nm) 得到的发光谱线等离子体的电子温度结果如图 5 所示。由图可见,在前 14 个脉冲作用时,等离子体的电子密度和电子温度未发生显著变化,随着激光脉冲数目的增加,在此后的 16、18 和 20 个脉冲作用时,电子密度和电子温度逐渐降低,电子密度从  $9.65 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  下降到  $7.44 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , 电子温度从  $1.226 \times 10^3 \text{ K}$  下降到  $1.108 \times 10^3 \text{ K}$ 。这是由于脉冲数目增加时,激光作用的漆层越来越少,金属基底逐渐显露出来,所以底漆的等离子体电子密度和电子温度也逐渐降低。

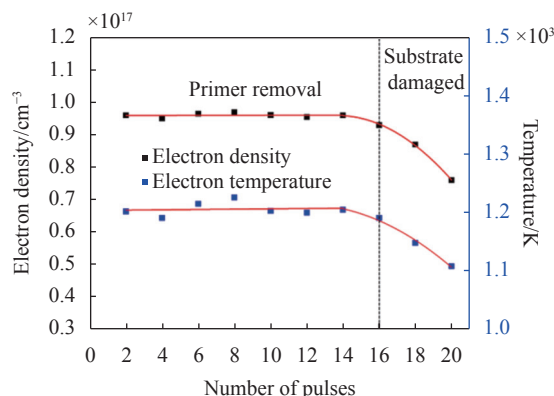


图 5 等离子体密度与温度随脉冲数目的变化关系

Fig.5 Variation of plasma density and temperature with the number of pulses

通过对底漆的 LIBS 光谱强度、等离子体电子温度和密度的分析可得,去除底漆时,随着脉冲数目增加,底漆中特征元素 Ti 的信号强度也发生相应的变化,在底漆开始脱离金属基底后,信号强度开始大幅度下降;而且通过对等离子体的电子密度和电子温度计算,其变化趋势与信号强度类似。因此可根据底漆中 Ti 元素的特征峰峰值强度变化来监测底漆去除情况。

因此, LIBS 光谱法可用来分层监测飞机蒙皮除漆过程。

### 3 声信号监测法

激光击穿空气释放的冲击波在传输过程中衰减

成声波。该声波的频率与激光的参数相关,及特定的激光参数下会有特定的声波频率。同时由于油漆的漆层的材料对声波的吸收反射的不同,以及去除过程中会在油漆表面形成凹坑对声波进行漫反射等影响,导致去除过程中的声波幅值会随着除漆阶段的不同参数变化。根具特定的声波频率,再对比其振幅的变化就可以推断出此时激光的去除情况,激光的参数也只会对检测的信号的数值做出改变而不会变动其检测的趋势,因此声信号监测法也可以实时的反应除漆情况。

### 3.1 声信号特征

图 6 为激光能量密度为  $3.82 \text{ J/cm}^2$  时,激光除漆过程中产生的声信号时域分布随脉冲数的变化。由图可直观的看到,第一个脉冲作用时产生的声信号振幅较低,2~15 个脉冲作用时产生的声信号振幅变高,且幅度几乎保持同一水平,第 16 个脉冲开始振幅减弱,之后越来越低减小为微弱的信号,直至趋于稳定。面漆主要是由于面漆和底漆的接触面产生较大的温度梯度,引起面漆和底漆发生形变并产生热弹性应力波,该应力波穿过面漆从底漆传播出去,当应力大于面漆的底漆的黏附力时,面漆被去除,所以去除面漆时采集到的声信号振幅较小。底漆相比于面漆

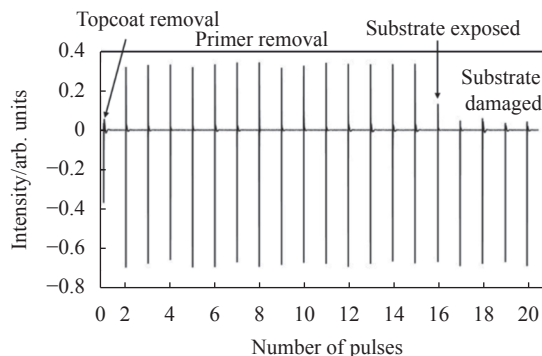


图 6 1~20 个激光脉冲时域声音信号

Fig.6 1-20 laser pulse time domain sound signals

对激光的吸收高,主要是由于烧蚀去除,烧蚀过程中底漆发生电离产生冲击波,所以底漆未清除干净时,声信号振幅高。当作用至第 16 个脉冲时,最后一层薄薄的底漆被热应力去除,所以这时信号幅度稍有下降。16 个脉冲以后,激光脉冲直接作用至金属基底,由于金属的反射率较高,对激光的吸收较少,故采集到的声信号幅度较小。

将声信号进行傅里叶变换后,得到第 1~20 个脉冲时,频率范围为 1~20 kHz 的频域分布变化图,如图 7 所示。面漆、底漆和基底频域的信号强度变化与声信号时域信号增强时频域信号的整体强度

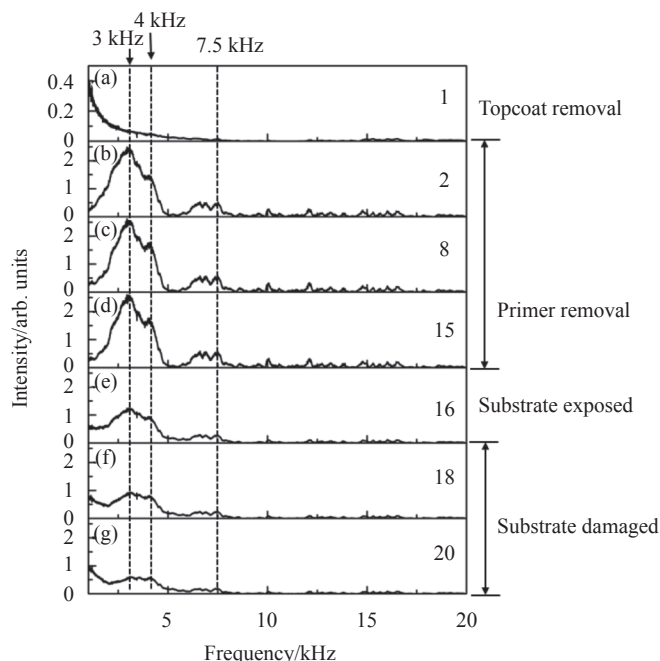


图 7 声信号频域分布随脉冲数目的变化。(a) 1 个脉冲; (b) 2 个脉冲; (c) 8 个脉冲; (d) 15 个脉冲; (e) 16 个脉冲; (f) 18 个脉冲; (g) 20 个脉冲  
Fig.7 Variation of frequency domain distribution of acoustic signal with pulse number. (a) 1 pulse; (b) 2 pulses; (c) 8 pulses; (d) 15 pulses; (e) 16 pulses; (f) 18 pulses; (g) 20 pulses

也增强。通过对比下图 7 可以发现,激光清洗面漆、底漆和作用至基底时的频谱有明显差异。分段来看,信号主要分布在 1~8 kHz 频率范围内,清洗面漆时(第 1 个脉冲)信号曲线光滑且很微弱,没有特征频率的信号,清洗底漆时(第 2~15 个脉冲)该范围内的信号增大,将底漆去除露出基底时(第 16 个脉冲),信号开始减弱且整体变得平坦没有明显尖峰,清洗至基底时(第 17~20 个脉冲),该范围内信号随着作用脉冲数增加,信号越来越低。8~20 kHz 频率范围内与 1~8 kHz 范围内信号相比始终只有微弱信号,与 1~8 kHz 范围内信号变化趋势类似,从清洗面漆至底漆最后到基底过程中,该范围内信号先增大后降低。

选取声信号频率在 3 kHz、4 kHz 和 7.5 kHz 的强度随脉冲作用的变化关系分析除漆过程,如图 8 所

示。这三处频率强度随脉冲数目增加的变化趋势几乎一致。第 2 个脉冲强度迅速增大,且在第 2~14 个脉冲强度比较稳定,第 16 个脉冲之后开始减弱,到约第 20 个脉冲作用时,声信号频率强度减小至稳定状态。第 16 个脉冲作用时,激光通过热应力效应去除最后一层薄薄的底漆,故第 16 个脉冲,在这几个频率处的强度均开始降低。第 16 个脉冲作用后,在激光辐照区域,漆层逐渐减少最后被清洗干净,故这几个频率处的强度逐渐减弱直至趋于稳定。入射激光光强呈高斯分布,光斑中心激光能量高,边缘的能量弱,除漆过程中光斑中间漆层清洗干净所需的脉冲数目较少,边缘的漆层则需要更多的激光脉冲作用,随着漆层越来越少,频率强度越来越低,当激光完全作用于金属基底上时,强度趋于稳定。

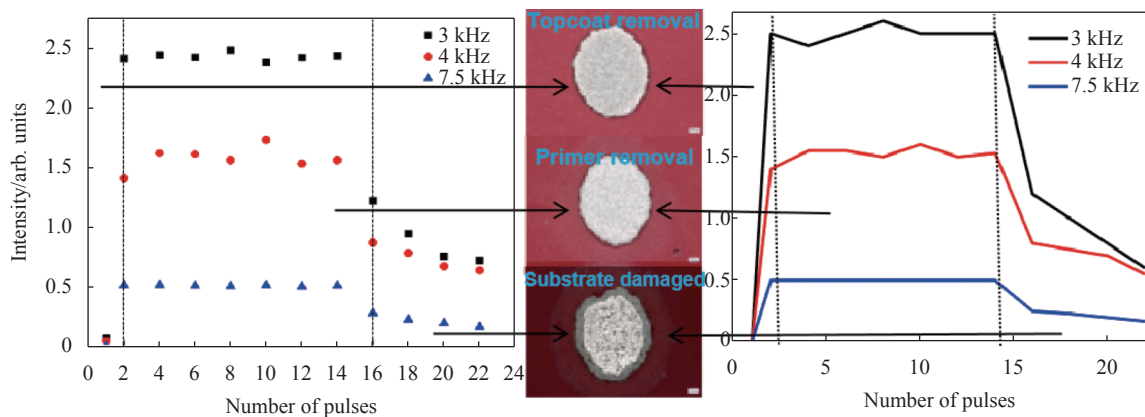


图 8 不同频率强度随脉冲数的变化

Fig.8 Variation of different frequency intensities with the number of pulses

### 3.2 理论分析

光击穿空气产生等离子体释放冲击波,其传播衰减后变成声波。单个激光声信号的数学模型是:

$$P(t) = P_m \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) u(t) + \sum_j P_{Bj} \exp\left(-\frac{t-T_{Bj}}{\tau_{Bj}}\right) u(t-T_{Bj}) \quad (4)$$

式中:  $P_m$  表示激光等离子体声波峰值声压;  $t$  为激光等离子体声波的衰减系数;  $u(t)$  表示阶跃函数;  $P_{Bj}$  表示激光空泡第  $j$  次溃灭时辐射声波的峰值声压;  $\tau_{Bj}$  表示激光空泡第  $j$  次溃灭时辐射声波的衰减系数;  $T_{Bj}$  表示激光等离子体声波和激光空泡第  $j$  次溃灭时辐射声波的时间间隔。对其进行傅里叶变换,得到其频谱的表达式,在理想条件下,声波是由多此激光的作用下叠

加而成的,故其频谱表达式为:

$$|P_N(f)| = \left| \frac{\sin(N\pi f T_R)}{\sin(\pi f T_R)} \right| \left| \frac{P_m \tau}{1 + j2\pi f \tau} + \sum_j \frac{P_{j\tau Bj}}{1 + j2\pi f \tau_{Bj}} \exp(-j2\pi f T_{Bj}) \right| \quad (5)$$

由图 9 可以看出,在激光产生的声波主要集中于 0~10 kHz,其中包含了文中可用于标定的声波频段 3、4、7.5 kHz,证明此波段有明显的幅度变化正是因为激光等离子产生的声波也主要集中于该波段。

同时再使用 Comsol5.5 软件对除漆过程中的声波射线进行仿真,采用射线声学模块,通过设定激光等离子体在漆层正上方爆炸,并向四周发射出 5000 条声波射线,漆层与基底的声波根据其材料参数设

置其吸收与反射比,同时设置为漫反射条件。四周除顶部边界设置为声波全冻结外,其余边界对声波均直接吸收。模拟的时间为 0.01 s,最后统计全局的总冻结声波数,以此表明了在接受屏所

能接收到的声波射线数。同时随着脉冲次数的增加,漆层中会出现凹坑增加了声波的漫反射。

最后接收等离子体正上方的声波射线条数。

图 10 下方是 3 个典型的去除过程的仿真图。第一发脉冲去除面漆时,漆层表面光滑平整,故对声波的吸收和反射也是均匀的,接受屏也只能接受部分声波;当第 8 发脉冲去除底漆时,由于面漆的去除,在漆层中已经形成了一个凹坑,声波在凹坑中会漫反射,同时底漆对声波的吸收较小,故基底部分的射线明显减少,同时大量的射线在凹坑中反射后正向射出,接受屏中接受了大量的射线;当第 18 发脉冲损伤基底时,基底的主要成分是铝为金属,对声波吸收较多,故透过漆层的射线数量增多,接收屏所接收到的射线数量减少。统计不同脉冲情况下的射线数量后得到图 10 上方的曲线图。可以看见第 1 发脉冲时,射线数较少;然后迅速增大,并维持一个稳定的趋势;直到第 16 发后底漆去除完毕,损伤基底时,射线数量又迅

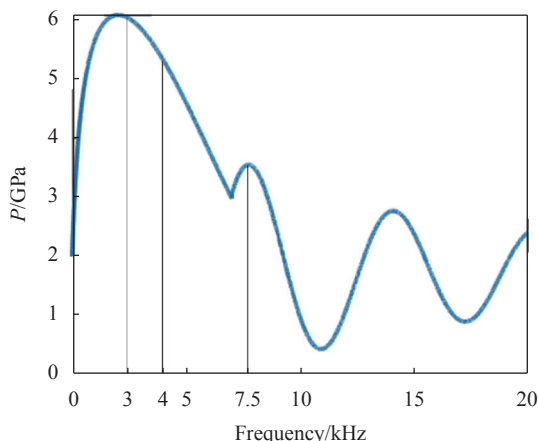


图 9 激光等离子声波频谱

Fig.9 Spectrum of laser plasma acoustic wave

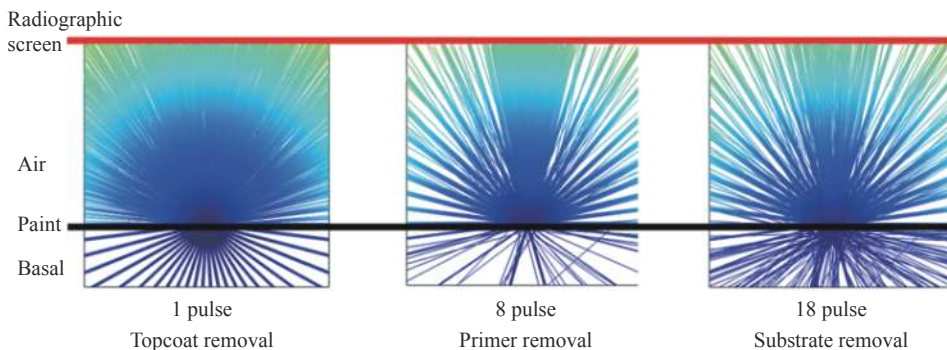
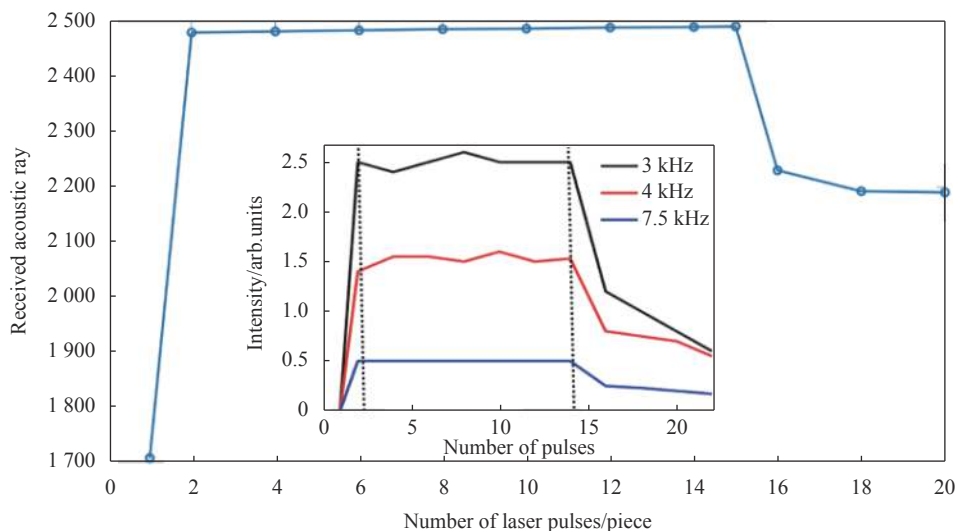


图 10 声波射线仿真结果

Fig.10 Acoustic ray simulation results



速下降。由于声波作为一种机械波,其叠加原理遵循线性叠加,声波射线的数量和总声波的振幅成正比。由此可得,仿真结果与实验得到的声波振幅变化基本吻合,均是在去除面漆阶段时,声波强度较小;去除底漆时,急速增大,然后保持不变;最后在快要去除完毕底漆时,会有一个振幅的下降,此时便可以立刻关闭激光器,以防止过度清洗;后续的振幅会持续下降但下降幅度较小。

因此,在 1~8 kHz 范围内的声信号与时域信号强度相比较后,显示了激光清洗飞机蒙皮表面漆层的过程,验证了声信号有可用于激光分层清洗飞机蒙皮表面漆层的在线监测反馈的潜力。而由于声波检测本身具有一定的滞后性,这是由于声波的传输速度,以及设备对数据的处理速度照成的,一般为 ms 量级。此次实验中激光的重频为 1 Hz,在去除过程中,当检测到达到去除临界点时,只要在下一发脉冲到来前,关闭激光便可以有效防止过度清洗导致基底损伤。而对于 1 s 1 发的脉冲激光,ms 量级的滞后几乎可以忽略不计,故声检测法同样也具备实时性。

## 4 结 论

文中针对飞机蒙皮多层漆结构进行了声光复合地实时监测。分别用 LIBS 光谱监测法和声信号法对激光清洗飞机蒙皮表面多层漆结构进行研究。研究表明,LIBS 监测法下,Ba 元素的 LIBS 特征峰的存在与消失分别代表激光正在清洗面漆和底漆;Cr、Ti 元素的 LIBS 特征峰的增加表明激光已清洗完成底漆;Al 元素的 LIBS 特征峰出现时,表明激光开始损伤基底。另外声信号检测法下,根据时域分布和频域分布来分层监测,发现清洗面漆、底漆和金属基底时对应的频率信号分布情况明显不同,同时在 1~8 kHz 范围内的声信号在对激光分层清洗飞机蒙皮漆层的在线监测应用中表现出更优的性能。

两种方法在信息反馈上,均为 ms 量级的延迟,对于 1 Hz 的脉冲激光清洗而言可以忽略不记,因此两种方法的监测均为实时监测,同时监测得到两种结果还可以相互对比验证以降低误差增加判断的准确性。在实际应用中,当信号给出此时油漆已经去除完毕后,即可立刻更换点位以防止激光过度辐损伤基

底。因此声光复合法在监测过程中具有实时性和准确性,为后续工程应用提供了理论基础。

## 参考文献:

- [1] Ayed Mejwal Binzowaimil. Application of laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) to the expansion of strontium (Sr) analysis options and to used engine oil[D]. US: Mississippi State University, 2021.
- [2] Song Yanxing, Wang Jing, Feng Qibo, et al. Influence of laser parameters and laser ultrasonic detection method on ultrasonic signals [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1433-1437. (in Chinese)
- [3] Bregar B V, Mozina J L. Optodynamic characterization of a laser cleaning process[C]//SPIE, 2001, 4402: 82-92.
- [4] Senesi G, Carrara I, Nicolodelli G, et al. Laser cleaning and laser-induced breakdown spectroscopy applied in removing and characterizing black crusts from limestones of Castello Svevo, Bari, Italy: A case study [J]. *Microchemical Journal*, 2016, 124: 296-305.
- [5] Villarreal-villela A E, Cabrera L P. Monitoring the laser ablation process of paint layers by PILA technique [J]. *Open Journal of Applied Sciences*, 2016, 6(9): 626-635.
- [6] Zhou Q, Deng G, Chen Y, et al. Laser paint removal monitoring based on time-resolved spectroscopy [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(34): 9421-9425.
- [7] Papanikolaou A, Jtserevelakis G, Melessanaki K, et al. Development of a hybrid photoacoustic and optical monitoring system for the study of laser ablation processes upon the removal of encrustation from stonework [J]. *Journal of Landscape Research*, 2020, 3(2): 11.
- [8] Li X, Guan Y. Real-time monitoring of laser cleaning for hot-rolled stainless steel by laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Metals*, 2021, 11(5): 790.
- [9] Griem H R, Peach G. Spectral line broadening by plasmas [J]. *Physics Today*, 1975, 28(2): 61-62.
- [10] Yang Chongrui, Wang Jiasheng, Sheng Xinzhi, et al. Technique to improve quality of LIBS spectrum signal based on multiple data processing methods [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3807-3812. (in Chinese)
- [11] Wright L A, Kindel B C, Pilewskie P, et al. Below-cloud atmospheric correction of airborne hyperspectral imagery using simultaneous solar spectral irradiance observations [J]. *IEEE*

- Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(2): 1392-409.
- [12] 张国威, 王兆民. 激光光谱学: 原理与技术[M]. 北京理工大学出版社, 1989.
- [13] Pasquini C, Cortez J, Silva L, et al. Laser induced breakdown spectroscopy [J]. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 2007, 18(3): 463-512.
- [14] Chen Shihe, Lu Jidong, Zhang Bo, et al. Controllable factors in detection of pulverized coal flow with LIBS [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(7): 1651-1658. (in Chinese)
- [15] Han J H, Feng G Y, Yang L M, et al. Emission spectrum analysis of laser ablated silicon surface [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(4): 869-873.
- [16] Liu P L, Yen R, Bloembergen N, et al. Picosecond laser-induced melting and resolidification morphology on Si [J]. *Applied Physics Letters*, 1979, 34(12): 864-866.
- [17] National Institute of Standards and Technology. Atomic spectral database[DB/OL].[2022-11-12].[https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines\\_form.html](https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html).