

基于 PLS 的飞机 CFRP 激光除漆 LIBS 监测判据研究

李绍龙,高韶华,林德惠,胡月,杨翌锴,郑鑫,杨文锋
(中国民用航空飞行学院航空工程学院,四川广汉 618307)

摘要:激光分层除漆的可靠性与可控性依赖于有效的在线监测技术,采用激光诱导击穿光谱(LIBS)技术能有效监控激光除漆过程。本文采用激光去除飞机碳纤维复合材料(CFRP)表面漆层,并基于高重复频率激光除漆 LIBS 在线监测平台,在线采集除漆过程所激发的面漆和底漆 2 类光谱共 60 组。分别建立了基于主成分分析(PCA)和偏最小二乘法(PLS)的判别和预测模型,研究了激光分层除漆过程中 LIBS 光谱的分类判别。PCA 模型前两个主成分累计贡献率达到了 79.2%,PLS-DA 模型前两个主成分累计贡献率达到了 85.5%。PLS 回归模型校正标准差(RMSEE)为 0.142923,均方根误差(RMSE_{cv})为 0.152053,模型的预测标准差(RMSEP)为 0.142421,对 20 组激光清洗面漆和底漆的混合数据集进行预测,预测准确率达 100%。结果表明 PLS 判别模型比 PCA 模型分类判别效果更好,PLS 预测模型实时评估和自动分类漆层具有较好的预测精度。本研究可为 LIBS 在线监测激光除漆过程,实现自动化、智能化的激光除漆提供技术支持。

关键词:激光除漆;在线监测;激光诱导击穿光谱;偏最小二乘法

中图分类号:TN249 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2023.05.010

Study on LIBS monitoring criterion of aircraft CFRP laser paint removal based on partial least squares method

LI Shao-long, GAO Shao-hua, LIN De-hui, HU Yue, YANG Yi-kai, ZHENG Xin, YANG Wen-feng
(Aviation Engineering Institute, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

Abstract:The reliability and controllability of laser delamination paint removal depend on effective online monitoring technology. The laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) technology can effectively monitor the laser paint removal process. In this paper, laser is used to remove the paint layer on the surface of aircraft carbon fiber composite (CFRP). Based on the high repetition frequency laser paint removal LIBS online monitoring platform, 60 groups of two kinds of spectra of topcoat and primer excited by the paint removal process are collected online. The discrimination and prediction models based on principal component analysis (PCA) and partial least squares (PLS) were established respectively, and the classification discrimination of LIBS spectrum in laser delamination paint removal process was studied. The cumulative contribution rate of the first two principal components of PCA model reached 79.2%, and the cumulative contribution rate of the first two principal components of PLS-DA model reached 85.5%. The correction standard deviation (RMSEE) of the PLS regression model was 0.142923, the root mean square error (RMSE_{cv}) was 0.152053, and the prediction standard deviation (RMSEP) of the model was 0.142421. The prediction

基金项目:中央高校基本科研业务费基金项目(No. ZJ2022-006);四川省科技计划项目(No. 2022NSFSC1903);德阳市科技计划项目(No. 2022GZ011);大学生创新创业训练计划项目(No. S202110624004)资助。

作者简介:李绍龙,主要从事航空材料性能与应用研究。E-mail:zlishaolong@163.com

通讯作者:杨文锋,主要从事飞机复合材料结构维修与适航验证研究。E-mail:ywfcyy@163.com

收稿日期:2022-12-20; **修订日期:**2023-01-26

accuracy was 100 % for 20 groups of mixed data sets of laser cleaning topcoat and primer. The results show that PLS discrimination model is better than PCA model in classification discrimination, and PLS prediction model has better prediction accuracy in real-time evaluation and automatic classification of paint layers. This research can provide technical support for LIBS to monitor the laser paint removal process online and realize automatic and intelligent laser paint removal.

Keywords: laser paint removal; online monitoring; laser induced breakdown spectroscopy; partial least squares

1 引言

国内的飞机维修去除表面漆层普遍采用化学除漆剂^[1]与物理打磨^[2]相结合的方法,存在污染严重、损害健康、成本高昂等不足。而激光除漆作为一种新型清洗技术,具有高效、高精度、“绿色”、智能、可控等优点,未来有望部分甚至完全替代传统除漆方法^[3]。由于飞机表面漆层体系复杂、漆层厚度不一,并且激光除漆过程涉及众多工艺参数,因此为保证最可靠的清洗质量,针对飞机表面多漆层系统实现安全可靠的分层可控清洗,还需对激光除漆过程与效果进行在线监测研究。

目前,主要的在线监测技术如图像识别^[4]和声学监测^[5]存在实时性差、准确度低等局限性,而激光诱导击穿光谱^[6](Laser Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)技术,通过高温等离子体电子能级跃迁所辐射的特征谱线区分不同漆层元素种类和含量,适合多漆层的激光清洗监测。将其应用于飞机激光除漆领域,为实现在线监测分层可控除漆效果和保障除漆质量提供可能。

针对激光清洗的 LIBS 离线监测研究, Angel Costela 等^[7]利用 LIBS 分析激光清洗城市建筑物涂鸦的元素发射光谱,将其作为激光清洗的原位诊断技术。针对激光清洗的 LIBS 在线监测研究, Stefan Kleina 等^[8]将 LIBS 应用于在线监测激光清洗结壳砂岩的元素发射峰相对强度。Chen Lin 等^[9]基于 LIBS 技术分析激光去除油漆过程等离子体的发射光谱,研究油漆特征元素对应的光谱特征峰强度随时间的变化情况,可用于实时判断油漆去除情况。杨文锋等^[10]采用激光去除飞机铝合金蒙皮表面的底漆与面漆,通过 LIBS 技术对不同漆层、不同厚度时漆层特征元素进行光谱成分分析,建立了漆层去除层数、去除厚度与 LIBS 光谱变化的联系。孙兰香等^[11]结合 LIBS 技术并通过 Na(I) 原子谱线实时监测激光清洗碳纤维表面环氧树脂膜层的清洗质量。

然而激光除漆的 LIBS 光谱数据量巨大,因此进

行在线监测的过程中,需要减少 LIBS 光谱的分析数据量,提取其关键信息。JianfengShangGuan 等^[12]采用有监督的 K-最近邻算法结合 LIBS 特征谱线实时评估和自动分类除漆样品表面的清洁程度。当 $K = 3$ 时,区分不同清洁级别的分类准确率为 100%。冯中琦等^[13]将 6 种航空合金 LIBS 全光谱数据和特征谱线数据建立 PLS-DA 模型,可以快速准确识别航空合金牌号。偏最小二乘判别分析(Partial Least-Squares Discrimination Analysis, PLS-DA)是一种有监督的线性判别方法,能够在低维空间用较少的成分数描述样品的差异的同时凸显样品组间差异,利于识别分类。基于 PLS-DA 方法结合 LIBS 技术实现激光除漆 LIBS 光谱混合数据集的准确快速识别,有利于 LIBS 技术监测激光除漆的工程应用。

本文针对 A320 飞机复合材料尾翼漆层,基于高重频激光除漆 LIBS 在线监测平台,采取激光单次扫描清洗面漆和底漆,实时采集底漆和面漆去除过程中的 2 类 LIBS 光谱。通过构建 PCA 模型和 PLS-DA 模型,对激光除漆过程开展 LIBS 光谱监测研究,实现激光分层除漆 LIBS 光谱的分类和识别。对激光清洗面漆样本和激光清洗底漆样本的混合数据集进行分类,建立快速鉴别模型,为激光除漆在线监测提供一种新方法,实现飞机复合材料尾翼的激光分层可控除漆。

2 实验部分

2.1 实验材料

根据 A320 SRM 51-23-11 规定的尾翼漆层体系喷涂 CFRP 层合板,使用砂纸打磨 30 mm × 30 mm × 2 mm CFRP 层合板,并依次喷涂约 30 μm 的 PPG N5911 黑色防静电底漆、约 30 μm 的 PPG PR143 黄绿色环氧底漆和约 45 μm 的 PPG CA8000 白色聚氨酯面漆,将其编号为 Tc (Topcoat)。为方便对照实验,未喷涂白色面漆的试样编号为 Pr (Primer)。A320 飞机尾翼 CFRP 漆层示意图如图 1。

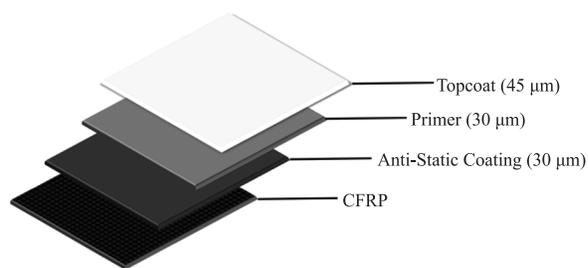


图 1 A320 飞机尾翼 CFRP 漆层示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CFRP paint layer on tail wing of A320 aircraft

根据 A320 SRM 51-75-12 规定,尾翼 CFRP 表面除漆时仅需去除全部白色面漆,暴露黄色底漆,且禁止破坏黑色防静电功能底漆(避免遭受雷击酿成灾难性后果)。因此本文主要针对完整漆层体系的 Tc 样品和未喷涂白色面漆的 Pr 样品在激光清洗过程中的 LIBS 光谱进行分析。

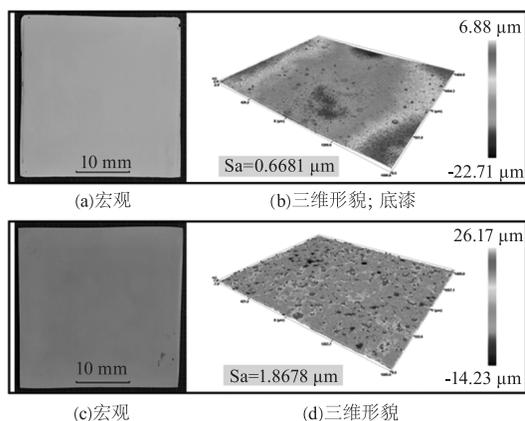


图 2 面漆与底漆宏观及三维形貌

Fig. 2 Macroscopic and 3D morphology of topcoat and primer

采用 S neox 型 3D 光学表面轮廓仪表征 Tc 样品和 Pr 样品的表面三维微观形貌。如图 2(b), Tc 样品白色面漆 S_a (面粗糙度)为 $0.6681 \mu\text{m}$,粗糙度相对较小,具有良好的光滑度。如图 2(d), Pr 样品黄色底漆 S_a 为 $1.8678 \mu\text{m}$,粗糙度较大同时具备良好的附着力。根据 A320 飞机标准化喷漆工艺喷涂,粗糙度达到手册要求。

2.2 实验装置

图 3 为激光除漆 LIBS 在线监测平台示意图,由脉冲光纤激光器、扫描振镜、场镜、光纤光谱仪、LIBS 采集探头和主控计算机组成。

MFPT-120P 型脉冲光纤激光器和 AvaSpec-ULS2048CL-4-EVO 型光纤光谱仪的技术参数如表 1 所示。

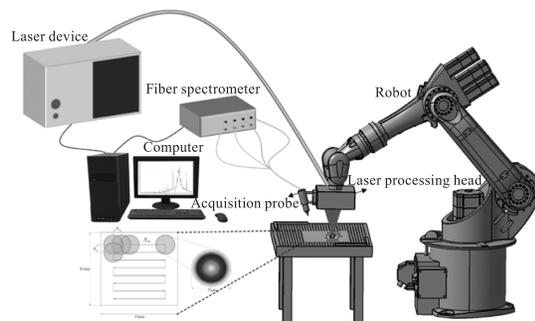


图 3 激光除漆 LIBS 在线监测平台

Fig. 3 LIBS online monitoring platform for laser paint removal

表 1 脉冲光纤激光器和光纤光谱仪的技术参数
Tab. 1 Technical parameters of pulsed fiber laser and fiber spectrometer

Pulse fiber laser		Fiber spectrometer	
Parameter	Value	Parameter	Value
Wavelength/nm	1064	Number of channels	4
Average power/W	12 ~ 120	Wavelength range/nm	194 ~ 830
Pulse width/ns	60 ~ 350	Spectral resolution/nm	0.10 ~ 0.16
Frequency/kHz	1 ~ 1000	Integration time	30 μs ~ 59 s
Flare mode	Gaussian	Signal to noise ratio	300 : 1
Spot diameter/ μm	50	Detector	2048 pixel CMOS

激光清洗启动信号发出后,光纤激光器发射的激光束入射到扫描振镜,经聚焦透镜作用于清洗样品。光谱仪采集信号与激光器输出信号同步触发,在线采集等离子体光谱。激光除漆区域为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,以激光平均功率为单因素开展实验,固定激光输出参数脉宽 350 ns、扫描速度 2800 mm/s、线间距 0.04 mm、激光扫描 1 次,重复频率 90 kHz,调整激光平均功率,设置光谱仪积分时间为 10 ms 并实时采集 LIBS 光谱。分别采集面漆、底漆去除过程中各 30 组 LIBS 光谱数据,共 60 组,用于模型训练及预测。

2.3 光谱预处理

由于光谱信号是高重频激光除漆过程中采集,因此会受到杂散光、噪声等因素的干扰,从而影响到 LIBS 光谱信号的定性分析,因此需要对原始光谱进行预处理。迭代自适应加权惩罚最小二乘法 (Adaptive Iterative Re-weighted Penalized Least Squares, airPLS) 基线校正是为了扣除基线漂移对光谱信号的影响。使用 Savitzky-Golay (SG) 滤波器来平滑数据,降低光谱信号中的随机噪声并提高 PLS 模型的性能^[14],且保留原始谱图中峰高和峰型,提高谱线信噪比。最大最小归一化可以把光谱统一到相同的尺度进行数据分析,有利于数据分析。如图 4 为原

始光谱依次进行基线校正、SG 平滑处理和最大最小归一化预处理后的光谱图。

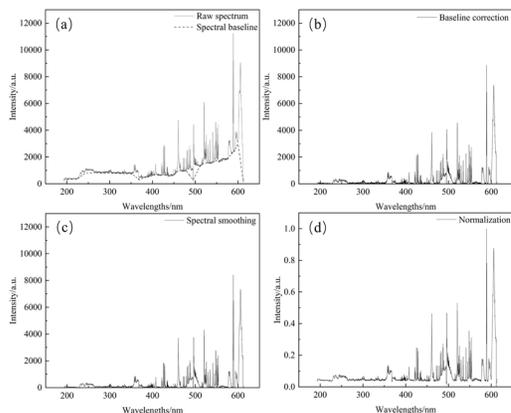


图4 光谱预处理

Fig. 4 Spectral preprocessing

3 结果与讨论

3.1 激光除漆光谱的 PCA 聚类分析

激光除漆的 LIBS 光谱数据量巨大,因此其进行分类识别的过程中,需要减少 LIBS 谱线的分析数据量。主成分分析 (Principal Components Analysis, PCA) 是一种无监督的线性判别方法,能够在低维空间用较少的成分数描述样品的差异。激光清洗面漆和底漆的各 20 组光谱数据作为训练集,进行光谱预处理后,作为输入变量进行 PCA 聚类分析。由图 5 可知,PC1、PC2、PC3、PC4、PC5、PC6、PC7 的主成分贡献率及累计贡献率。

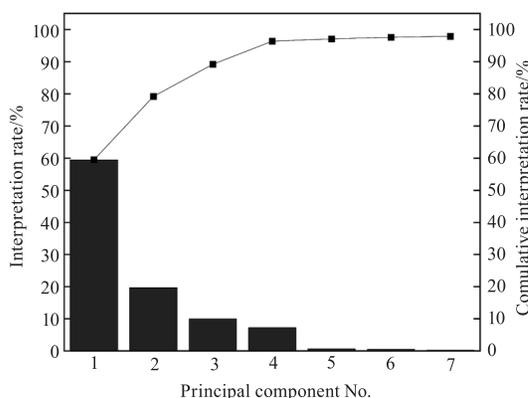


图5 主成分贡献率及累计贡献率

Fig. 5 Principal component contribution rate and cumulative contribution rate

PC1、PC2、PC3、PC4、PC5、PC6、PC7 累计贡献率达到了 97.9%,其中 PC1 为 59.5%,PC2 为 19.7%,两个主成分累计贡献率达到了 79.2%,基本能够表征激光清洗面漆和底漆 LIBS 光谱的主要信息,图 6 为前两个主成分下激光清洗面漆和底漆 LIBS 光谱 PCA 得分散点图。

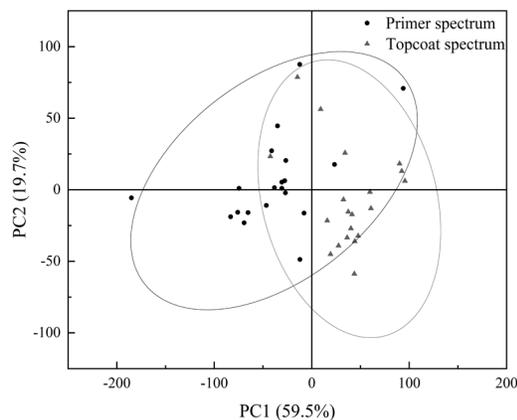


图6 PCA 得分散点图

Fig. 6 PCA score scatter chart

图 6 主要展示样本分布情况,通过 PCA 建模的得分散点图可知,激光清洗面漆和底漆的 LIBS 光谱在二维的主成分图主要集中在两个不同的区域,呈现出聚类特征,但组间差异不明显,难以区分,因此需要一种更好的方法去实现对样品类别的分类,更进一步的通过构建的模型去预测样品的归属。

3.2 激光除漆光谱的 PLS-DA 聚类分析

偏最小二乘判别分析 (PLS-DA) 是一种有监督的线性判别方法,能够凸显样品的组间差异,利于分组。采用 PLS-DA 识别激光清洗面漆和底漆时的 LIBS 光谱。激光清洗样品的 60 组 LIBS 光谱数据进行光谱预处理,然后将激光清洗面漆和底漆时的各 20 组光谱数据作为训练集,各 10 组光谱数据作为模型测试集。利用 SIMCA-P 14.1 统计软件进行偏最小二乘判别分析 (PLS-DA),建立激光分层除漆 LIBS 光谱的 PLS-DA 模型,获取得分图,并对其进行置换检验以证明模型的可靠性。

图 7 为前两个主成分下激光清洗面漆和底漆 LIBS 光谱的 PLS-DA 得分散点图,PC1 为 56.2%,PC2 为 29.3%,所使用的两个主成分累计贡献率达到了 85.5%,样品分布集中在两个不同的区域,呈现出明显的聚类特征,组间差异较大,因此可采用 PLS-DA 模型对激光清洗面漆和底漆 LIBS 光谱样品进行分类判别。

由于有监督的 PLS-DA 模式识别方法会扩大组间差异,易导致模型过拟合,因此需要借助置换检验 (Permutation test) 来证明模型的有效性,使激光除漆光谱的分类结果获得较高的可信度。由图 8 可知,左侧纵轴相交 ($R^2 - \text{Intercepts} = 0.002$; $Q^2 - \text{In-}$

tercepts = -0.239), 两条回归线的斜率较大, 且左边随机排列产生的 R_2 、 Q_2 实验值均小于右侧原始值, 表明 PLS-DA 模型的预测能力大于任何一次随机排列 y 变量的预测能力, 证明该模型是可靠的, 并未出现过拟合。

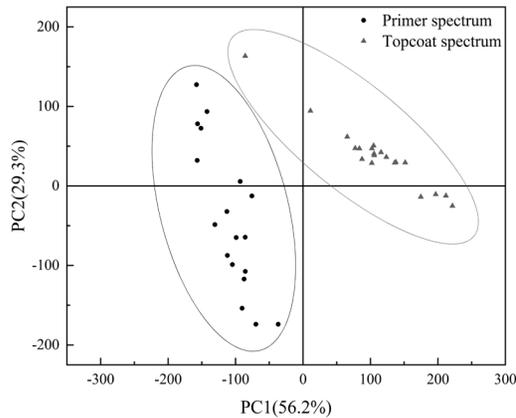


图 7 PLS-DA 得分散点图

Fig. 7 PLS-DA score scatter chart

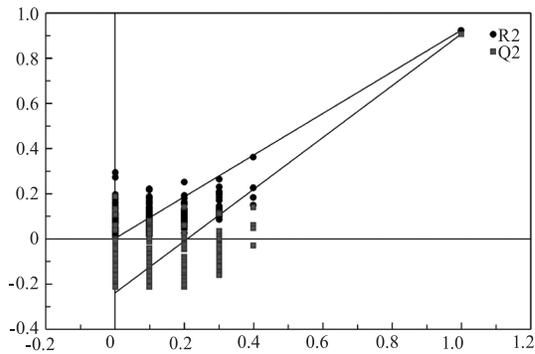


图 8 PLS-DA 置换检验图

Fig. 8 PLS-DA Replacement Inspection Chart

如图 9(a) 所示, 激光清洗面漆和底漆的各 20 组 LIBS 光谱数据作为训练集, 即包含 40 组光谱数据。拟合的 PLS 回归模型校正标准差 (RMSEE) 为 0.142923, 均方根误差 (RMSE_{cv}) 为 0.152053, 表明该模型具有良好的拟合关系, 建立的模型质量较好。但为了判断模型拟合的可靠性, 需对模型进行验证, 预测模型如图 9(b) 所示, 10 组激光清洗面漆样本 LIBS 光谱数据和 10 组激光清洗底漆样本的 LIBS 光谱混合数据作为模型测试集, 模型的预测标准差 (RMSEP) 为 0.142421, 模型的预测值与真实值相互吻合得较好, 由图 9(b) 20 组 LIBS 光谱的混合测试集能正确判别, 所示模型预测准确率为 100%, 模型具有较好的预测精度。说明基于偏最小二乘法的模型可实现面漆和底漆 LIBS 光谱数据的快速分类判别和预测。

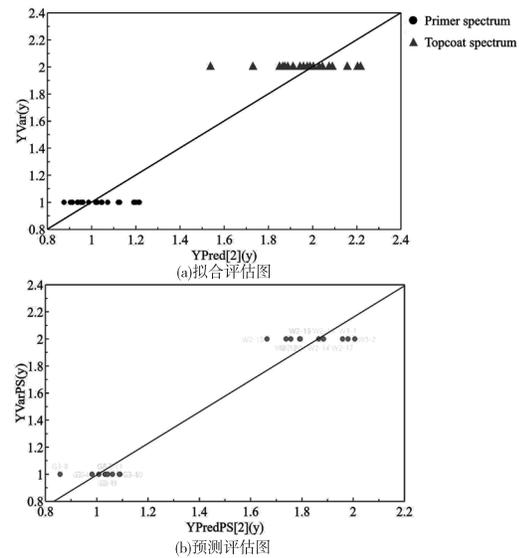


图 9 PLS 模型拟合与预测评估图

Fig. 9 PLS model fitting and prediction assessment diagram

4 结论

本文采用高重频激光除漆 LIBS 在线监测平台, 对激光清洗 CFRP 表面漆层进行了 LIBS 在线监测, 构建激光清洗面漆和底漆 LIBS 光谱的 PCA 模型和 PLS-DA 模型。PCA 模型前两个主成分累计贡献率达到了 79.2%, PLS-DA 模型前两个主成分累计贡献率达到了 85.5%, 所建立的 PLS-DA 模型通过外部测试集验证, 具有较强的预测能力。PLS 回归模型校正标准差 (RMSEE) 为 0.142923, 均方根误差 (RMSE_{cv}) 为 0.152053, 表明模型具有良好的拟合关系, 模型的预测标准差 (RMSEP) 为 0.142421, 预测准确率达 100%。利用偏最小二乘法进行 LIBS 数据降维和特征提取相比于手动筛选特征光谱更加的简便省时, LIBS 技术结合 PLS-DA 模型既能提高所提取的特征光谱的利用价值, 也可以节约分析时间, 为激光除漆过程与效果在线监控多重判据的确定提供依据。

参考文献:

- [1] Yang Wenfeng, Li Zuo, Liu Chang, et al. Laser paint stripping and thermal effect research on aircraft aluminum alloy skin[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(7): 795 - 802. (in Chinese)
杨文锋, 李佐, 刘畅, 等. 飞机铝合金蒙皮激光除漆及其热影响研究[J]. 激光与红外, 2020, 50(7): 795 - 802.
- [2] Edwin Irwin, Streilein Kristin. Use of field-based motion capture to augment observational data in ergonomic as-

- essment of aircraft maintenance[J]. *Procedia Manufacturing*, 2015, 3:4501 – 4508.
- [3] Xuan Shanyong. Study on laser paint stripping technology for aircraft composite parts[J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2016, (8):15 – 18. (in Chinese)
宣善勇. 飞机复合材料部件表面激光除漆技术研究进展[J]. *航空维修与工程*, 2016, (8):15 – 18.
- [4] Shi Tianyi, Zhou Longzao, Wang Chunming, et al. Machine vision-based real-time monitor system for laser cleaning aluminum alloy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, (4): 83 – 89. (in Chinese)
史天意, 周龙早, 王春明, 等. 基于机器视觉的铝合金激光清洗实时检测系统[J]. *中国激光*, 2019, (4): 83 – 89.
- [5] Wan fangzou, Song Feng, Luo Ying. Characteristics of audible acoustic signal in the process of laser cleaning of paint on metal surface[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 144(3):107388.
- [6] Jagdish-P Singh, Thakur Surya-N. Laser-induced breakdown spectroscopy[M]. London; Elsevier, 2007:3 – 9.
- [7] Costela A, Garcia-Moreno I, Gomez C, et al. Cleaning graffiti on urban buildings by use of second and third harmonic wavelength of a Nd : YAG laser: a comparative study[J]. *Applied Surface Science*, 2003, 207(1 – 4): 86 – 99.
- [8] Stefan Klein, Hildenhagen Jens, Dickmann Klaus, et al. LIBS-spectroscopy for monitoring and control of the laser cleaning process of stone and medieval glass[J]. *Journal of cultural heritage*, 2000, 1(2):S287 – S292.
- [9] Chen Lin, Deng Guoliang, Feng Guoying, et al. Study on the mechanism of laser paint removal based on LIBS and time resolved characteristic signal[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, (2):367 – 371. (in Chinese)
陈林, 邓国亮, 冯国英, 等. 基于 LIBS 及时间分辨特征峰的激光除漆机理研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, (2):367 – 371.
- [10] Yang Wenfeng, Qian Ziran, Cao Yu, et al. Research on the controllability of aircraft skin laser paint remove based on laser-induced breakdown spectrum and composition analysis[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(10):3233 – 3239. (in Chinese)
杨文锋, 钱自然, 曹宇, 等. 基于 LIBS 光谱与成分分析的飞机蒙皮激光除漆可控性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(10):3233 – 3239.
- [11] Wenju Wang, Sun Lanxiang, Lu Ying, et al. Laser induced breakdown spectroscopy online monitoring of laser cleaning quality on carbon fiber reinforced plastic[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 145:107481.
- [12] Shangguan J, Tong Y, Yuan A, et al. Online detection of laser paint removal based on laser-induced breakdown spectroscopy and the K-nearest neighbor method[J]. *Journal of Laser Applications*, 2022, (2):34.
- [13] Feng Zhongqi, Zhang Dacheng, Cui Minchao, et al. Recognition of aerial alloy grades by laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Metallurgical Analysis*, 2020, 40(12): 99 – 104. (in Chinese)
冯中琦, 张大成, 崔敏超, 等. 激光诱导击穿光谱技术识别航空合金牌号[J]. *冶金分析*, 2020, 40(12): 99 – 104.
- [14] Yang Y, Li C, Liu S, et al. Classification and identification of brands of iron ores using laser-induced breakdown spectroscopy combined with principal component analysis and artificial neural networks[J]. *Analytical Methods*, 2020, 12(10):1316 – 1323.