

激光与光电子学进展

飞机铝合金蒙皮激光清洗残余漆层附着力 试验研究

高昆^{1,2}, 曾全胜^{1,2*}, 张志研³, 林学春³

¹湖南省飞机维修工程技术研究中心, 湖南 长沙 410124;

²空军航空维修技术学院, 湖南 长沙 410124;

³中国科学院半导体研究所, 北京 100083

摘要 为将激光分层清洗应用于飞机结构维修和漆层修复中, 分析了激光热烧蚀和热膨胀对残余漆层的影响, 设计并开展了飞机铝合金蒙皮的激光分层清洗试验研究, 揭示了激光清洗后残余漆层附着力的变化规律。试验表明: 激光分层清洗获得的残余漆层的漆面平整易清洁, 烧蚀“匙孔”可增大接触面, 有利于提高新漆再涂覆时漆层的附着力; 残余漆层的厚度在 24.8 μm 以上时, 激光的热烧蚀不会对残余漆层的附着力产生影响, 而当残余漆层厚度较小时, 漆层的附着力将会在残余底漆的热膨胀作用下降低。

关键词 激光技术; 激光清洗; 飞机蒙皮除漆; 分层剥落; 残余漆层附着力

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0914006

Adhesion of Residual Primer Paint After Laser Cleaning Aircraft Aluminum Alloy Skin

Gao Kun^{1,2}, Zeng Quansheng^{1,2*}, Zhang Zhiyan³, Lin Xuechun³

¹Hunan Aircraft Maintenance Engineering Technology Research Center, Changsha, Hunan 410124, China;

²Airforce Aviation Repair Institute of Technology, Changsha, Hunan 410124, China;

³Institute Semiconductor, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

Abstract In order to apply laser layering cleaning for aircraft structure and paint repair purposes, the effects of laser thermal ablation and thermal expansion on residual primer paint were analyzed, and a laser layering cleaning test on aluminum alloy skin was designed and carried out to reveal adhesion change of the residual primer paint after laser cleaning. The results show that the residual primer paint surface obtained by laser layering cleaning is smooth and easy to clean. The ablation "keyhole" can increase the contact surface, which can improve the adhesion of the paint film when recoating the new paint. When the thickness of the residual primer paint is over 24.8 μm , the thermal ablation effect of the laser will not affect the adhesion of the residual primer paint; and when the thickness of the primer is small, the adhesion will be reduced due to the thermal expansion effect of the residual primer paint.

Key words laser technique; laser cleaning; aircraft skin paint removal; delamination peeling; adhesion of residual primer paint

OCIS codes 140.3390; 140.3330; 140.3538

收稿日期: 2020-09-07; 修回日期: 2020-09-27; 录用日期: 2020-10-12

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405105)、湖南高新技术产业科技创新引领计划(2020SK2027)

*E-mail: zqs_csgx@163.com

1 引言

目前,我军飞机机体在翻新涂装前主要采用化学脱漆或机械打磨等传统脱漆方法进行处理^[1],这些方法不仅对环境污染大,而且效率低,已经无法适应我国不断提高的环保标准^[2]和我军快速发展的武器装备维修要求^[3]。激光清洗以其绿色、精密两大突出特点^[4],有望成为替代飞机机体蒙皮传统脱漆的技术途径^[5-6]。激光清洗利用高能量脉冲激光形成的热烧蚀^[7]和热振动效应^[8],使漆层发生瞬间气化蒸发和热振动脱落而脱离基体,具有非接触、无机械损伤、绿色环保、适用于多种基材等特点^[9-10]。

早在 20 世纪 80 年代,美国、德国等国家^[11]就尝试使用 CO₂ 激光器清洗飞机蒙皮漆层,并取得了良好的应用效果。随着激光器技术的发展,国内外学者发现脉冲激光^[12]更适合用于清洗。Han 等^[7]、施曙东等^[13]结合数值模拟和试验,研究了脉冲激光除漆中烧蚀反应的基本机理,并认为激光清洗去除效应主要包括烧蚀效应、振动效应和激光等离子体效应等,其中的振动效应最为明显,故脉冲激光可避免清洗损伤。郑光^[5]通过试验发现,合理选择脉冲激光参数对飞机蒙皮进行脱漆,不会影响铝合金蒙皮的力学性能,即不会导致结构发生安全隐患。近年来,国产高功率全固态脉冲激光器的发展^[14]为激光清洗技术在航空修理工程上的应用提供了装备基础。上述研究主要集中于清洗阈值条件下的完全脱漆^[5,15]技术,较少涉及油漆分层剥落的研究;而且在热烧蚀和热冲击作用下,残余底漆附着力能否满足再次涂装要求尚不明确,直接影响了激光清洗在除面漆的飞机首翻^[1]和飞机特种涂层^[3]局部损伤修复中的应用。鉴于此,本研究团队采用国产高功率全固态脉冲激光器开展了激光清洗试验,探明了激光热效应对残余漆层附着力的影响规律,为激光清洗在飞机结构修理和涂层修复上的实际应用奠定技术基础。

2 激光清洗对残余漆层附着力的影响分析

涂料通过化学、物理和机械等方式^[16]与基材结合形成涂层。若仅考虑激光清洗因素,残余漆层与再涂覆漆层之间的附着力取决于两个方面的影

响:漆层的裸露漆面与新漆之间的机械结合情况以及漆层底部与基材的化学、物理结合情况是否发生变化。本文主要考虑清洗热对残余漆层与基材之间结合力的影响。

2.1 热烧蚀对残余漆层化学结合稳定性的影响

激光热烧蚀过程的数值仿真表明:当漆面初始温度为 293 K (即 20 °C) 时,在高能重复脉冲激光作用下,漆层温度分布呈现为以光斑照射为中心,沿漆面深度方向分布的高斯曲线^[17],光斑中心区域漆层的瞬时温度高达近 731 K (即 448 °C),导致该部位漆材被烧蚀气化去除。如图 1 所示,烧蚀部位周边会生成与烧蚀形状类似的热影响区域^[18],其温度梯度和范围与激光脉冲能量、漆材的热导率有关。飞机蒙皮上通常涂覆环氧聚酰胺或聚氨酯类等底漆,其厚度一般为 15~30 μm。由于化学结合方式对漆层附着力的影响最大,而化学键结合的稳定性又受到温度的影响,若热烧蚀的影响范围及热影响程度对残余漆层与基材化学键的结合稳定性产生影响,就会降低漆层与基材之间的结合力。

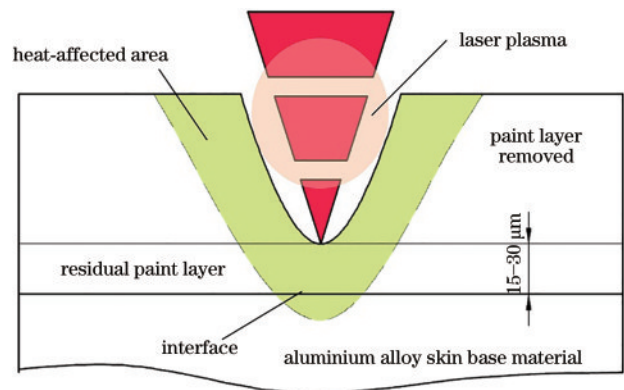


图 1 热烧蚀影响区域

Fig. 1 Area affected by thermal ablation

2.2 热膨胀对底漆物理结合稳定性的影响

如图 2 所示,在热烧蚀的同时,漆层和基材都会吸收激光能量而发生热膨胀,由于脉冲宽度非常短,材料的受热和冷却都在极短的时间内完成^[7],因此漆层和基材中分别出现了大小不同的热应力 τ_1 和 τ_2 。又因为环氧聚酰胺或聚氨酯类底漆与铝合金的热膨胀系数相差较大,所以二者的结合面上会出现一个剪切应力 $\Delta\tau$,该应力会破坏漆层与基材的正负电子相互吸附形成的物理结合力,进而影响残余漆层的结合力。残余漆层的厚度 ξ 越小,漆层升温越高,剪切应力 $\Delta\tau$ 就越大,对结合力的影响

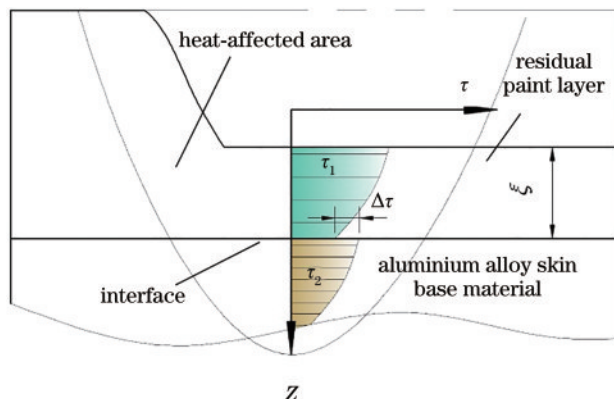


图 2 热膨胀产生的剪切应力

Fig. 2 Shear stress due to thermal expansion

也就越大。

综上,在脉冲激光能量的作用下,热烧蚀和热膨胀都有可能影响残余漆层与基材的结合力。根据 GJB 4439—2002《军用飞机喷漆通用标准》,当漆层附着力的降低程度超过规定值(≥ 2 MPa)的 10% 时,就会引起新漆再涂覆后出现漆膜起泡、龟裂、脱落等问题,需重新喷涂底漆。

3 激光清洗试验

3.1 试验与检测设备

如图 3 所示,激光清洗试验采用的激光器为中科院半导体研究所研制的全固态准连续激光器(IS-0604QCW),其最高输出功率为 600 W,聚焦光斑直径约为 0.8 mm。二维运动平台可沿 X、Y 方向移动,其直线运动精度为 10~20 μm 。采用德国尼克斯漆膜测厚仪对漆层厚度进行检测,该仪器的量程为 0~3000 μm ,精度为 $\pm(3\%$ 读数 $+2 \mu\text{m})$;采用英国 Elcometer Adhesion Tester 拉拔式测量仪检测漆层的附着力;采用 VHX-7000 型基恩士数码显微系统观察清洗表面的微观形貌。

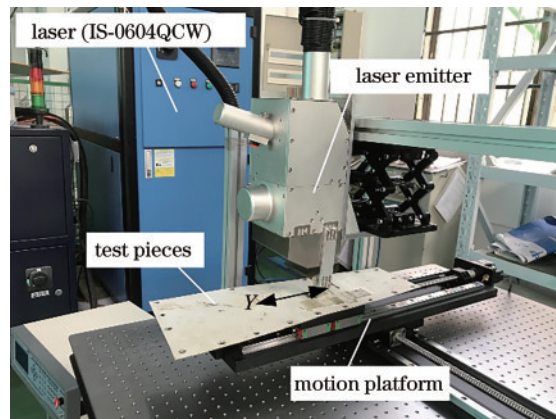


图 3 激光清洗试验系统

Fig. 3 Laser cleaning test system

3.2 试验材料

如图 4 所示,试验样品(基材)为 2024 铝合金,其厚度为 1.2 mm;漆层为树脂基涂漆材料,其热物理属性如表 1 所示。其中:样品 1 的底漆是厚度为 $(25 \pm 3) \mu\text{m}$ 的黄色环氧聚酰胺底漆,面漆是厚度为 $(55 \pm 3) \mu\text{m}$ 的灰色环氧聚酰胺面漆;样品 2 的底漆是黄色环氧聚酰胺底漆(加厚单层喷涂),厚度为 $(120 \pm 3) \mu\text{m}$ 。

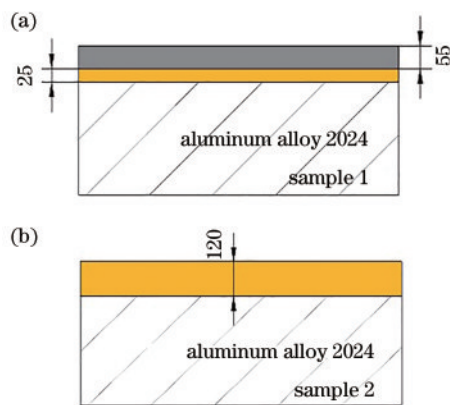


图 4 试验样品。(a)样品 1;(b)样品 2

Fig. 4 Samples. (a) Sample 1; (b) sample 2

表 1 树脂基漆层的热物理属性

Table 1 Thermophysical properties of resin base paint

Density $\rho / (10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Thermal conductivity $\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	Specific heat capacity $c / (10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	Boiling point $t / ^\circ\text{C}$	Absorption coefficient β
1.45	0.3	2.5	> 300	0.3

3.3 试验方法与参数

方案 1: 改变 Y 向扫描速度 v , 获得不同能量密度的激光, 检测同等厚度漆层的附着力, 探明热烧蚀对漆层附着力的影响规律。方案 2: 采用同等能量密度的激光逐层清洗, 检测不同厚

度残留漆层的附着力, 探明热膨胀对附着力的影响规律。残余漆层附着力检测方法采用 GB/T 5210—2006《色漆和清漆拉开法附着力试验》, 激光清洗试验方法和工艺参数如表 2 所示。

表 2 激光清洗试验工艺参数及试验方法
Table 2 Technical parameters of laser cleaning test

Plan	Sample	Laser power P/W	Scanning speed $v/(mm \cdot s^{-1})$	Clean method
1	1#	500	12-28	Clean the finish and keep the primer paint
2	2#	500	16	Cleaning step by step

4 试验结果与分析

4.1 残余漆层表面形貌对再涂覆漆层附着力的影响

采用两种方案清洗后,漆面均会存在少量粉

尘,采用毛刷或普通吸尘器即可快速清洁表面。图 5(a)~(c)所示为采用试验方案 1 获得的清洗后的漆面形貌:面漆基本已被清除,只残留有少量面漆,从微观形貌上可以看到激光烧蚀的“匙孔”^[17],表面粗糙度为 30~40 μm (通过颜色判定)。

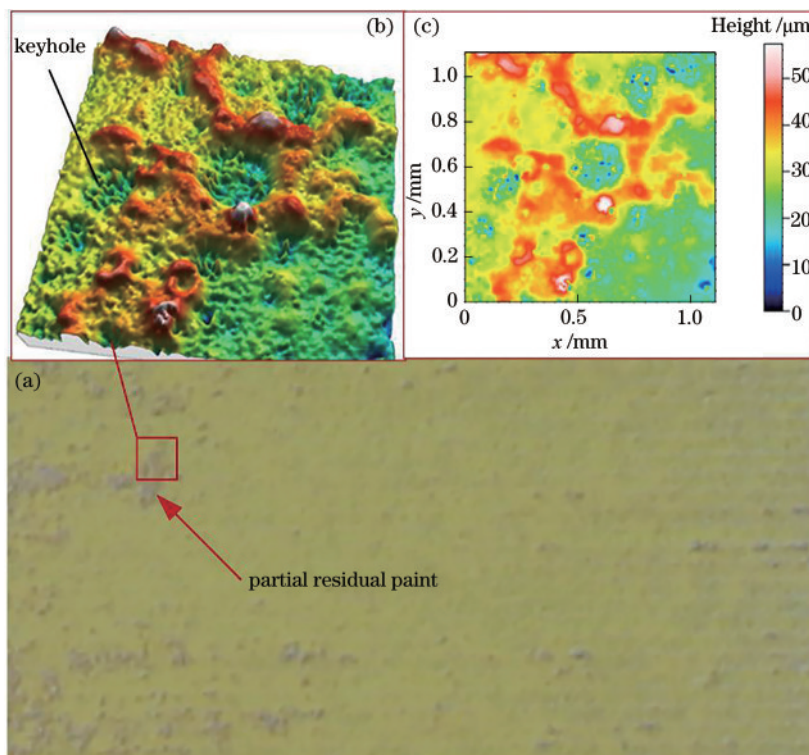


图 5 按方案 1 清洗后残余漆层的表面形貌。(a)宏观表面形貌;(b)三维合成的表面微观形貌;(c)漆层的表面粗糙度
Fig. 5 Residual primer paint after cleaning with plan 1. (a) Macro surface morphology ;(b) three-dimensional synthetic surface morphology;(c) surface roughness of the paint

图 6 为采用方案 2 对原漆层采用同等能量密度的激光逐层清洗后所获得的漆层形貌。对比可知,在激光烧蚀过程中,环氧聚酰胺底漆颜色略有加深,并呈现并一定的烧灼痕迹。由于激光的能量密度相同,因此烧蚀后呈现的颜色相近。

清洗后裸露出来的漆层表面将会再次喷涂新面漆,虽然漆层的附着力主要与漆材之间的结合方式相关,但清洗后,漆面的清洁度和粗糙度也会影响漆层的附着力。在激光清洗过程中,漆面被脉冲激光烧蚀形成的众多“匙孔”可以增大漆层间的接触面积,有助于提高漆层的附着力。另外,气化材

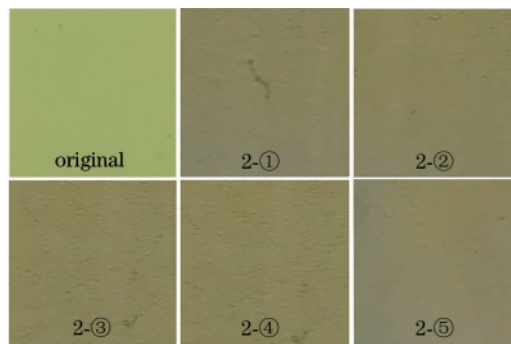


图 6 按方案 2 清洗后残余漆层的表面形貌
Fig. 6 Surface appearances of residual primer paint after cleaning with plan 2

料在热冲击作用下“飞溅”脱离,不易形成难以清理的污物,降低了漆层的附着力。金属基材较适合喷涂的表面粗糙度范围为 30~50 μm ^[16],因此可推断出分层清洗后的残余漆层表面能满足再涂覆的要求。

4.2 激光热烧蚀对漆层附着力的影响

表 3 所示为采用试验方案 1 清洗后统计的残余

漆层实测附着力,其中,能量密度(W/cm^2)为最后一次清洗的能量密度(本文未给出具体值),它是通过改变清洗件的平移速度 v 获得的。残余漆层厚度 ξ 的平均值为 24.8 μm ,与原底漆漆层相比,厚度略有减小。试验测得的残余漆层的拉拔力 F 分布在 2.2~2.7 MPa 范围内。

表 3 试验方案 1 的实测附着力统计表

Table 3 Statistical table of actual adhesion of test plan 1

Process	Power P / W	Scanning speed $v / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	Residual paint thickness $\xi / \mu\text{m}$	Average drawing force F / MPa
Original			28.3	2.5
1-①	500	28	26.1	2.4
1-②	500	24	22.3	2.6
1-③	500	20	24.5	2.3
1-④	500	16	27.8	2.2
1-⑤	500	12	23.6	2.7

试验结果显示,在本试验条件下,当残余漆层厚度 ξ 近似(平均厚度为 24.8 μm)时,残余漆层拉拔力 F 与清洗使用的激光能量密度无关联。这一结果可解释为:在非清洗阈值条件下的分层清洗过程中,热烧蚀效应为主要的清洗机理,脉冲激光能量虽然将“匙孔”内的温度提升到漆材气化温度以上,但漆层材料的热导率 λ 低(如表 1 所示),激光能量转化为热能的过程又为脉冲形式,所以高温区域只出现在靠近“匙孔”处,周边热影响区域不足以深入到漆层与基材结合面处,或者结合面处的温升不剧烈,无法影响漆层与基材结合的稳定性,因而残余

漆层拉拔力 F 与清洗使用的激光能量密度无关联。这一结果表明,在分层清洗工艺中,可使用较大功率的激光器,以提高飞机蒙皮的脱漆效率。

4.3 激光热膨胀对附着力的影响

表 4 所示为采用试验方案 2 获得的残余漆层实测附着力的统计结果,原始漆面经过①~⑤工序同等能量密度的激光逐层清洗后,不同厚度漆层拉拔力 F 的分布范围为 1.1~2.7 MPa。其中,2-①和 2-②工序获得的漆层的拉拔力 F 较大,分别为 2.6 MPa 和 2.7 MPa,拉拔力最小值出现在底漆厚度 ξ 为 11.2 μm 时,最小拉拔力为 1.1 MPa。

表 4 试验方案 2 的实测附着力统计表

Table 4 Statistical table of actual adhesion of test plan 2

Process	Power P / W	Scanning speed $v / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	Residual paint thickness $\xi / \mu\text{m}$	Average drawing force F / MPa
Original			123.3	2.4
2-①	500	16	95.7	2.6
2-②	500	16	78.2	2.7
2-③	500	16	57.5	2.2
2-④	500	16	32.4	2.3
2-⑤	500	16	11.2	1.1

工序 2-①和 2-②清洗后的拉拔力较高,分别为 2.6 MPa 和 2.7 MPa,这是漆层表面张力因素导致的升高。因为样件 2 的漆层较厚,表面张力大,会降低漆层的附着力,而激光清洗减小了漆层厚度,加之热效应和拉块胶粘后需 24 h 后才可拉拔测试,有效释放了漆层的表面张力,减小了其对漆层附着力的影响,故而工序 2-①和 2-②清洗后的拉拔力略

有增大。工序 2-③和 2-④的检测结果及其分析与方案 1 类似。工序 2-⑤的拉拔力最低,仅为 1.1 MPa,只有原始漆层附着力的 45.8%,必然会对再涂覆新漆的附着力产生影响。产生的原因可以解释为:当漆层厚度较小时,漆层与铝合金基材的温升都较大,而漆层和铝合金基材的膨胀系数差别较大,漆层沿基材表面产生了较大的剪切应力,

破坏了漆层的物理结合稳定性,导致工序 2-⑤清洗后残余漆层的附着力降低。虽然漆层与基材的结合面处聚集了较多热量,会影响化学结合键的稳定性,但当残余漆层厚度越薄时,其容热散热能力就越差,温升越高,热膨胀越剧烈,故可以认为热膨胀因素主导了残余漆层附着力的降低。试验结果表明,在进行激光分层清洗时,应控制残余漆层的厚度,过小的厚度会降低漆层的附着力,从而影响再涂装的质量。

5 结 论

采用国产激光器对激光分层清洗残余漆层的附着力进行了试验研究,得到的主要结论为:

1) 进行激光分层清洗后,残余漆层的漆面平整易清洁,其上分布有大量“匙孔”,有利于增加漆层的接触面积,从而提高了再涂覆漆层的附着力,能满足飞机新漆再涂覆的要求。

2) 在本试验条件下,当环氧聚酰胺漆层的平均厚度为 24.8 μm 以上时,激光热烧蚀效应不影响漆层的附着力,故可用大功率激光器进行高效清洗。

3) 在本试验条件下,当环氧聚酰胺漆层厚度减小到 11.2 μm 时,漆层与基材之间的热膨胀系数差异会降低漆层的附着力,应在分层清洗时控制残余漆层的厚度。

本试验结论和工艺参数可为激光分层清洗在飞机涂装维修中的应用提供参考。

参 考 文 献

- [1] Liang H F. Process for repainting external surface of aircraft and its implementation[J]. *Electroplating & Finishing*, 2016, 35(22): 1183-1187.
梁海峰. 飞机表面涂层重新喷涂的工艺与实施[J]. *电镀与涂饰*, 2016, 35(22): 1183-1187.
- [2] Ren X H. Formulate methods and cost-benefit analysis on typical industrial emission standards[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2011.
任晓辉. 典型工业污染物排放标准制订方法及其成本-效益分析研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2011.
- [3] Xu Z X. Quality detection and maintenance technology research for stealth aircraft[J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2012(1): 68-70.
许占显. 隐身飞机的质量探测与维修技术研究[J]. *航空维修与工程*, 2012(1): 68-70.
- [4] Tam A C, Park H K, Grigoropoulos C P, et al. Laser cleaning of surface contaminants[J]. *Applied Surface Science*, 1998, 127/128/129: 721-725.
- [5] Zheng G. Study on laser paint stripping of aircraft surface[D]. Beijing: Institute of Electrics, Chinese Academy of Sciences, 2005.
郑光. 飞机蒙皮激光脱漆技术研究[D]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2005.
- [6] Schlett J. Laser paint removal takes off in aerospace [Z/OL]. [2020-09-07]. <https://www.photonics.com/Article.aspx?AID=61353&PID=20&VID=144&IID=924>.
- [7] Han J H, Cui X D, Wang S, et al. Laser effects based optimal laser parameter identifications for paint removal from metal substrate at 1064 nm: a multi-pulse model[J]. *Journal of Modern Optics*, 2017, 64(19): 1947-1959.
- [8] Garbacz H, Fortuna E, Marczak J, et al. Laser cleaning of copper roofing sheets subjected to long-lasting environmental corrosion[J]. *Applied Physics A*, 2010, 100(3): 693-701.
- [9] Jia B S, Tang H P, Su C Z, et al. Removal of surface coating of resin matrix composites by pulsed laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1202010.
贾宝申, 唐洪平, 苏春洲, 等. 脉冲激光去除树脂基复合材料表面涂层[J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1202010.
- [10] Jin S, Wang J X, Yuan X D, et al. Laser paint removal technology for aircraft metal skin and composite materials[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(17): 63-70.
靳森, 王静轩, 袁晓东, 等. 飞机金属蒙皮以及复合材料表面激光除漆技术[J]. *航空制造技术*, 2018, 61(17): 63-70.
- [11] Wang X D, Yu J, Mo Z Q, et al. Research progress on laser paint stripping technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(5): 050005.
王晓东, 余锦, 莫泽强, 等. 激光脱漆技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(5): 050005.
- [12] Kearns A, Fischer C, Watkins K G, et al. Laser removal of oxides from a copper substrate using Q-switched Nd:YAG radiation at 1064 nm, 532 nm and 266 nm [J]. *Applied Surface Science*, 1998, 127/128/129: 773-780.
- [13] Shi S D, Du P, Li W, et al. Research on paint removal with 1064 nm quasi-continuous-wave laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(9): 0903001.
施曙东, 杜鹏, 李伟, 等. 1064 nm 准连续激光除漆

- 研究[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0903001.
- [14] Wang Y B, Wang B H, Zhang Z Y, et al. 7 kW fiber coupled output all solid state laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(1): 108003.
王奕博, 王宝华, 张志研, 等. 7 kW 级光纤耦合输出全固态激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 108003.
- [15] Tam A C, Leung W P, Zapka W, et al. Laser-cleaning techniques for removal of surface particulates[J]. Journal of Applied Physics, 1992, 71(7): 3515-3523.
- [16] Li H J, Wu L X. Based on the analysis and research of paint adhesion of shot blasting steel plate [J]. Journal of Hubei University of Science and Technology, 2015, 35(9): 60-62.
- 李慧娟, 吴丽霞. 基于抛丸钢板油漆附着力分析与研究[J]. 湖北科技学院学报, 2015, 35(9): 60-62.
- [17] Zhang Z Y, Wang Y B, Liang H, et al. Removal of low thermal conductivity paint with high repetition rate pulse laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 102009.
张志研, 王奕博, 梁浩, 等. 高重复频率脉冲激光去除低热导率涂漆[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 102009.
- [18] Zhao H C, Qiao Y L, Du X, et al. Effect and mechanism of energy density on the aluminum alloy paint cleaned by laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 131403.
赵海朝, 乔玉林, 杜娴, 等. 能量密度对激光清洗铝合金漆层的影响及作用机理[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 131403.