

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.05.001

铝合金蒙皮表面漆膜去除工艺对比研究

杨岭¹, 胡宇峰¹, 沈玥¹, 周强¹, 隋泽寰^{2*}, 陈亚军²

(1. 中国石油大港油田分公司赵东采油管理区, 天津 300280;

2. 中国民航大学 中欧航空工程师学院, 天津 300300)

摘要: 为对比不同工艺去除铝合金蒙皮表面漆膜的效果及对基体材料的影响, 分别采用机械打磨法、喷砂除漆法以及激光除漆法去除铝合金蒙皮表面的漆层, 使用扫描电镜、激光共聚焦显微镜、拉曼光谱仪对除漆效果进行了表征。结果表明, 机械打磨所用的SiC磨粒不仅会嵌入除漆表面, 还会破坏漆层聚合物的化学结构, 导致Si、N-H、-CH含量显著增大, 无法避免基底损伤。喷砂除漆法的喷砂压力从0.1 MPa分别增大至0.3 MPa、0.5 MPa后, 除漆表面冲击凹坑直径增大, 表面粗糙度由7.89 μm 分别增大至14.27 μm 、13.29 μm , 误差较大, 无法保证再喷漆的工艺质量。激光除漆法可以精细化控制除漆进程, 将热输入量控制为50.4 J/cm²时, 表面漆层几乎完全去除, 且基底表面未见明显损伤。本研究证明, 激光除漆作为新兴除漆工艺, 具备高效、参数可控、可实时监控等优势, 在工业领域具有一定应用价值及发展潜力。

关键词: 铝合金基体; 复合漆层; 除漆工艺; 表面形貌

Comparative study of paint removal processes for aluminum alloy skin surface

Yang Ling¹, Hu Yufeng¹, Shen Yue¹, Zhou Qiang¹, Sui Zehuan^{2*}, Chen Yajun²

(1. Zhaodong Oil Production Management Branch, Petro China Dagang Oilfield Company,

Tianjin 300280, China; 2. Sino-European Institute of Aviation Engineering,

Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to compare the effects of different processes to remove the paint film on the surface of aluminum alloy skin and the effects on the substrate material, the paint layer on the surface of aluminum alloy skin was removed by mechanical sanding, sandblasting and laser paint removal methods, respectively. Scanning electron microscope, laser confocal microscope and Raman spectrometer were used to characterize the paint removal effect. The results show that the SiC abrasive particles used in mechanical sanding not only embedded in the paint removal surface, but also damaged the chemical structure of the paint layer polymer, resulting in a significant increase in the content of Si, N-H, and -CH, which could not avoid the substrate damage. After the sandblasting pressure of sandblast paint removal method was increased from 0.1 MPa to 0.3 MPa and 0.5 MPa, the diameter of the impact crater on the surface of the paint removal increased and the surface roughness increased from 7.89 μm to 14.27 μm and 13.29 μm respectively, which resulted in a large error that could not guarantee the process quality of the repainting. The laser paint removal method could finely control the paint removal process, and when

收稿日期: 2023-10-09

修回日期: 2023-12-20

作者简介: 杨岭(1970—), 男, 大学本科, 高级经济师, 主要从事海洋工程工作, email: yangling18@petrochina.com.cn

*通信作者: 隋泽寰, 男, 中国民航大学硕士研究生, 主要从事结构与材料方向研究, email: suizehuan@foxmail.com

the heat input was controlled to be 50.4 J/cm^2 , the surface paint layer was almost completely removed and there was no obvious damage to the surface of the substrate. This study proves that laser paint removal as an emerging paint removal process has the advantages of high efficiency, controllable parameters, real-time monitoring, etc., and has certain application value and development potential in the industrial field.

Keywords: aluminum alloy matrix; composite paint layer; paint removal process; surface morphology

在民航领域内飞机的大修,基底检修及漆层修复三个阶段中,旧漆层的清除是最为重要的一道工序。传统的除漆工艺包括人工机械打磨除漆和喷砂除漆两类。人工机械打磨除漆是采用刮、擦、刷等传统手工打磨技术及高压水冲除等机械手段去除漆层,具有劳动强度大、时耗长、效率低、噪声大且极易损伤基底等技术局限性。此外,如果材料是多孔的,油漆残渣易嵌入材料内部,造成深度污染^[1-2]。喷砂除漆是在喷枪中压缩空气的作用下,颗粒状塑料被高速喷射到工件表面,在塑料丸的棱角切割和冲撞击打双重作用下,油漆表层能量的消耗使得漆层小颗粒逐渐从表面脱落,持续喷射则可使漆层发生大面积割裂和剥离,可达到高效退漆的目的^[3]。但是诸如塑料颗粒等介质的喷砂处理很容易损坏表面,产生大量固体废物,对操作人员存在潜在危害。并且该工艺对厂房和环境的要求也极为严苛,需要较高的设备投资费用。因此,研究一种高效、环保、安全、低成本的飞机除漆替代技术显得尤为重要^[4]。

作为激光应用的新领域,自1974年J. A. Fox^[5]利用激光成功去除树脂、玻璃及金属基材表面的漆层后,激光除漆工艺开始逐步受到各国科研人员的青睐。其发展可分为2个阶段:(1)自20世纪60年代中期著名物理学家Bedair^[6]提出激光清洗概念至20世纪末。该时期的研究侧重于激光清洗石像雕塑和微电子硅片,属于激光清洗技术的新兴时期。(2)从21世纪初至今。激光清洗技术已被广泛应用于除漆领域,成为国内外工程技术人员的研究热点,并在近二十年来取得了飞速发展。Han J等人^[7]结合数值模拟实验深入研究了激光除漆机理。结果表明,其涉及到的主要机制包括汽化效应、热应力效应及激光等离子效应。其中热应力效应的除漆效果最好,而汽化和激光等离子效应易造成基材损伤,应尽量避免。D'Addona D M等人^[8]借助调Q Yb:YAG光纤激光器,采用方差分析法评估激光参数对除漆

面积百分比的影响。其中扫描速度是单位面积释放能量的主要影响因素,减慢扫描速度可释放出更多能量,除漆效果更好。Li X等人^[9]针对不同激光能量密度对除漆效果的影响进行了理论研究,并对比观察了不同能量密度下金属基体上的油漆烧蚀特性和去除效果,获得了高效除漆的理想参数。可为控制激光辐照能量密度、实现全脱漆提供指导和实践参考。胡太友等人^[10]研究了脉冲激光对Ti17合金表面丙烯酸树脂哑光黑色油漆的去除效果以及基材组织性能的改善情况,发现除漆表面出现大量凹坑及白色褶皱硬化层,显微硬度大幅提高,但表面粗糙度变化不大,为亚微米级。

激光除漆工艺还具备以下独特优势:(1)自动化操作。激光脉冲可通过光纤传输的方式与工业机器人相配合,进行远距离自动化操作,从而实现待除漆部位的准确定位、工艺参数的精确控制及漆层的定量去除。针对传统除漆方法不易到达的部位,自动化激光除漆工艺则能轻松解决这一难题,同时将操作人员从繁琐复杂的重复性工作中解放出来,降低人员失误导致除漆质量下降的可能性^[11]。(2)普适性。激光除漆对于基材种类没有限制,既可应用于飞机金属蒙皮表面的漆层,也可用于复合材料部件。同时,激光除漆对于待处理表面的形状也没有特殊要求,通过选取合适的工艺参数,可以实现复杂形状表面的除漆工作,并达到很高的清洁度^[12]。

本文利用扫描电镜对除漆后基体表面的形貌进行了表征。通过激光共聚焦显微镜测量了除漆深度、表面粗糙度等除漆效果评价参数。用拉曼光谱仪分析除漆前后的光谱吸收峰位置及基团种类。对比了机械打磨法、喷砂除漆法两种传统除漆手段与激光除漆新型除漆工艺去除铝合金蒙皮表面漆膜的效果,为今后飞机蒙皮除漆工艺的发展提供了参考依据。

1 实验

1.1 试验材料

1.1.1 基底材料

目前,民机表面常采用2系或7系的铝合金蒙皮。2系当中的2024-T3是一种高强度硬铝。条件屈服强度 $\sigma_{0.2} \geq 245$ MPa,属于Al-Cu-Mg系,具备优异的比强度、耐蚀性、导电/热性、断裂韧性及损伤容限等独特优势。综合性能较好,可用作150℃以下的工作零件,也是硬铝中用量最大的型号之一,被广泛应用于飞机蒙皮、骨架、肋梁等结构。本研究选用2024-T3铝合金作为基底材料,根据试验需求,将铝合金基底材料加工成20 mm×50 mm×1.5 mm的试片。

1.1.2 漆层体系

飞机铝蒙皮表面的漆层体系主要包括表面预处理层、底漆层及面漆层。表面预处理是指在金属表面去油、除锈并经化学处理生成氧化膜。该膜层均匀且多孔,与金属表面具有很好的结合力,同时可提供优异的耐腐蚀性能及良好的涂漆表面^[13-14]。本研究采用德国汉高生产的Alodine 1200S溶液对2024-T3基底材料进行表面阳极化处理(阿洛丁处理),Alodine 1200S溶液的成分如表1^[15]所示。处理后得到表面金黄且均匀的化学转化膜层(氧化铝膜),膜层中富含的氧原子可与底漆中的羟基或羧基形成大量氢键,提高底漆层附着力。另外,阳极氧化后的试样表面出现较多细小的微孔,可进一步提高底漆层在基底表面的机械嵌合力。在完成基底切割及表面预处理后,基于油漆技术说明书中的温/湿度要求及国标GB 14444-93《喷漆室安全技术规定》,制备了不同基底/漆层体系的试样,包括铝基环氧树脂底漆试样(EP_Al)、铝基聚氨酯面漆试样(PU_Al)以及铝基环氧树脂底漆/聚氨酯面漆试样(EP/PU_Al),以进行后续漆层去除试验。

表1 Alodine 1200S溶液成分

Tab.1 Composition of Alodine 1200S solution

成分	浓度/(g·L ⁻¹)
CrO ₃	3.95~4.74
K ₃ Fe(CN) ₆	0.79~2.37
KBF ₄	0.79~2.37
NaF	0.08~0.79
K ₂ ZrF ₆	0.08~0.79

图1对应EP/PU_Al漆层体系(简称为复合漆层)的截面形貌。由图1(a)可知,将带漆膜的试样横截面放大200倍之后,复合漆层与基底之间的界限非常鲜明,且底漆和面漆之间的分界面也是如此。通过测量7个位置的厚度,其值分别为:110 μm, 110 μm, 112 μm, 112 μm, 112 μm, 111 μm, 111 μm,可以计算出整个复合漆层的平均厚度约为111.14 μm。所测数据的最大偏离程度约1.02%,符合工艺要求。图1(b)是图1(a)中白色虚线方框对应的区域放大600倍之后的电镜照片。可以看到底漆与面漆之间的分界面非常平整且清晰,且底漆和面漆的内部形貌与二者单独喷涂时相差无几,底漆内部较为粗糙,而面漆内部非常均匀。进一步观察图1(b)可以发现,底漆和面漆之间还有一条厚度较为均匀黑色条带,贯穿整个漆层体系。将其进一步放大至2k倍,如图1(c)所示,黑色条带约10 μm厚且内部非常光滑,没有颗粒物的聚集。其成因可归结为底漆和面漆之间的互溶,即漆层内部附着力的问题。相关资料表明^[16],漆层内部各层之间的附着性能主要取决于扩散作用、吸附作用、化学键结合以及静电作用,受漆层内部聚合物化学组成、分子链结构、基材的结构组成、表面状况以及施工工艺等因素的影响。由于层间作用力是高分子材料之间的作用力,不会涉及到静电作用,因此主要归结为前3种作用力。其中,扩散作用是指通过分子链的布朗运动相互扩散、贯穿及缠绕,以增加各层之间的相互作用力。吸附作用的实质是物理吸附,即通过范德华力与邻近层发生作用,增加吸附点。由于化学键的强度比范德华力高得多,化学键结合比前两种作用强。若聚合物上带有氨基、羟基或羧基时,易与相邻层表面的羟基等极性基团发生化学反应或形成氢键,形成较强的附着力。因此,在面漆施涂后,底漆中残留的很多反应基团会与面漆中的羟基、-NCO基团再反应,形成网状交联,在增加化学附着力的同时形成一条黑色条带。同时在扩散和吸附作用下,层间结合力得到进一步加强。

1.2 三种漆层去除工艺方案

三种漆层去除工艺方案如表2所示。

1.3 微观形貌及光谱分析

针对除漆效果评价,本研究采用Hitachi S-3400N扫描电子显微镜对激光除漆后的二维表面微观形貌进行观察。同时利用OLYMPUS 4100激光

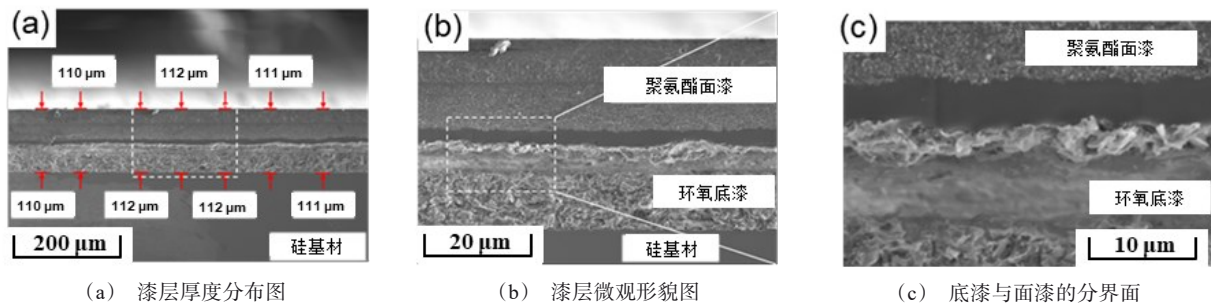


图1 试样表面复合漆层的SEM图

Fig.1 SEM images of composite paint layer on the surface of the specimen

表2 漆层去除工艺方案

Tab.2 Solutions of paint removal process

机械除漆法	砂纸打磨		
喷砂除漆法	喷砂压力/MPa		
	0.1/0.3/0.5		
激光除漆法	能量密度/(J·cm ²)	扫描速度/(mm·s ⁻¹)	脉冲频率/kHz
	11.9/16.1/19.9/44.6/50.4	200	20

共聚焦显微镜进行除漆表面的三维形貌表征与测试。采用超精细扫描模式,针对面积为1280 μm×1280 μm的区域进行除漆表面三维形貌测试,获得除漆表面的三维形貌激光图、色彩图及表面粗糙度等数据。使用RENISHAW MKI2000型拉曼光谱仪对除漆前后试样的官能团种类进行表征。基于除漆前后官能团种类的变化情况,辅助分析除漆机理,并对除漆后试样的拉曼光谱进行甄别,选取主峰在线追踪,以此作为除漆进程的判断依据之一。

2 结果与讨论

2.1 机械打磨除漆表面微观形貌及拉曼光谱分析

图2为EP/PU_Al试样经机械打磨后的宏观形貌图。经观察可知,该试片表面可大体分为白色的聚氨酯面漆区、黄色的环氧底漆区和具有金属光泽的铝合金基体区3个区域。为分析机械打磨后漆膜和基体表面的微观形貌及损伤程度,依照面漆-底漆-基体的顺序,依次对A、B、C、D、E、F6个区域进行重点观察。

图3为A区微观形貌,对应未被打磨的原始面漆。图3(a)中面漆漆面大体上比较均匀细腻,但仍存在较为明显的凸起,如圆形虚线框所示。图3(b)为图3(a)中方形虚线框区域,得益于喷枪良好的雾化性能,PU漆面的主体基调为细腻的颗粒感,但仍

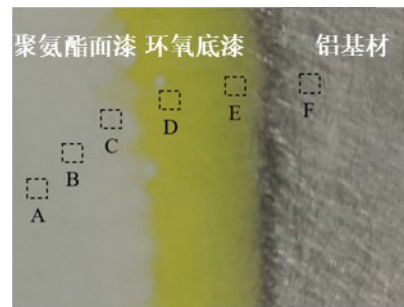


图2 EP/PU_Al试样机械打磨后的宏观形貌图

Fig.2 Macroscopic morphology of EP/PU_Al specimen after mechanical grinding

零散分布一些粒径较大的颗粒。这可能由以下四个原因造成:(1)基底表面的不平整性以及未清理干净的污物造成基底张力不一,影响漆面光滑性。(2)漆膜还未干燥时,喷漆车间的风压、过滤层等环节造成的粉尘,以及喷枪、喷漆服、手套和棉布等带来的杂质和污物附在漆膜表面,待其干燥后形成粗糙的颗粒物。(3)该试片在广州喷漆,较高的环境温度和较小的空气湿度使得喷漆过程中的溶剂挥发过快,漆膜很快封闭,流平性大为降低,从而在面漆浅表面形成了局部粗糙的结构。

图4为B区和C区微观形貌。图4(a)显示B区漆面出现了轻微划痕(浅划痕)。图4(b)显示该划痕内部与面漆原始形貌无异,表现为细腻的颗粒感,

说明此时面漆还未被划破,但个别部位仍旧存在大尺寸颗粒。可能是基底表面的不平整性、喷漆过程的粉尘以及喷漆气候条件使得漆料流平性降低所造成的。对该部位进行拉曼光谱测试(表3),发现打磨前后的基团种类没有较大变化,但含量略有差异。其中 445.409 cm^{-1} 峰强度的变化可归因于 SiC 砂纸,其磨粒的切削作用会导致漆面破损且向体系内嵌入部分磨粒,使得 Si 含量增加。 610.229 cm^{-1} 峰强度的变化可能是由于 N-H 键一般位于漆层内部

而非表面,略微打薄后会导致其含量上升。 $-\text{CH}_2$ 和 C-C 含量基本不变,但 $-\text{CH}$ 含量变化幅度较大,说明机械打磨初期主要破坏聚合物中的 $-\text{CH}$ 而非其骨架结构。图4(c)显示 C 区漆面的划痕增多且更为深入。图4(d)显示该划痕侧壁上方(虚线上方)为细腻颗粒物,但划痕侧壁下方和底部(虚线下方)形貌较为粗糙,存在大量大尺寸颗粒物,如圆形虚线框所示。初步判断面漆已被划破,部分底漆开始显露。

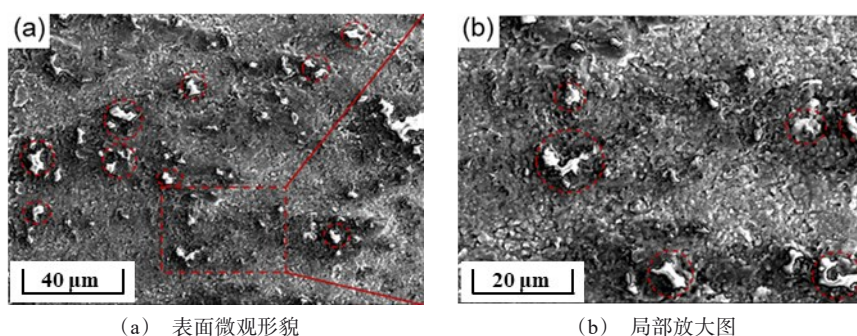


图3 EP/PU_Al试样机械打磨后A区的SEM图

Fig.3 SEM images of EP/PU_Al specimen in zone A after mechanical grinding

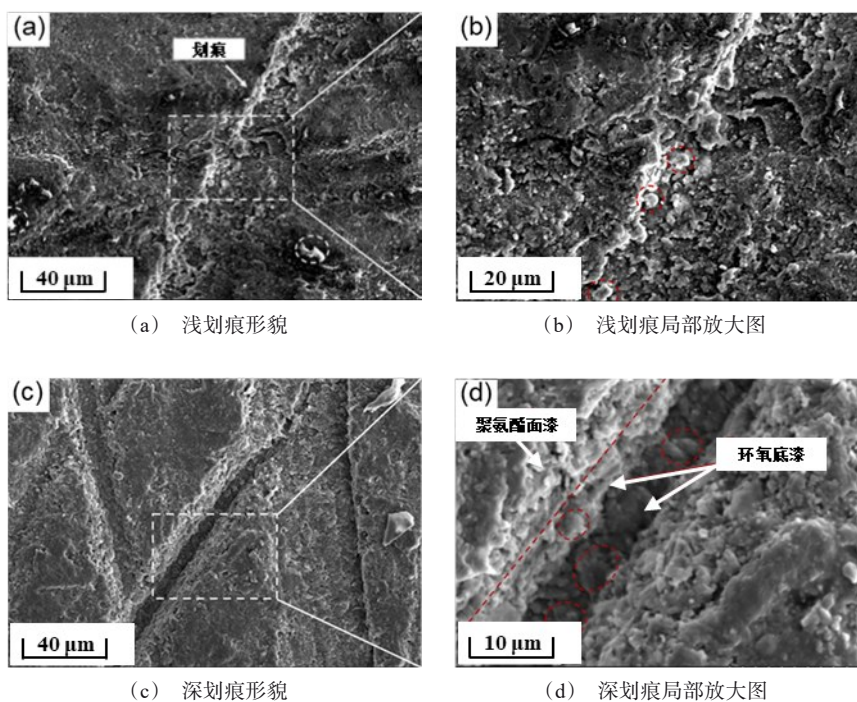


图4 EP/PU_Al试样机械打磨后B区和C区的SEM图

Fig.4 SEM images of EP/PU_Al specimen in zones B and C after mechanical grinding

表3 EP/PU_Al试样机械打磨前后拉曼光谱吸收峰及其基团

Tab.3 Absorption peaks and their groups in Raman spectra of EP/PU_Al specimens before and after mechanical sanding

吸收峰_打磨前/cm ⁻¹	吸收峰_打磨后/cm ⁻¹	化学基团
445.409	445.409	Si-O-Si
610.229	610.229	N-H
1440.440	1443.240	-CH ₂
1756.790	1591.960	C-C
2856.360-2931.390	2861.000-2924.500	-CH

图5为D区和E区微观形貌。图5(a)显示D区漆面出现轻微划痕且其周围较为平整,不同于底漆原始粗糙形貌。这是底漆质软且易打磨,漆面大尺寸颗粒物在切削作用下被磨平所造成的。图5(b)为图5(a)中方形虚线框区域,发现划痕内部仍旧包含圆形虚线框所示的大尺寸颗粒物,说明此时底漆

还未被划破。图5(c)显示E区漆面大尺寸颗粒物被磨平后的平整表面,此时漆层出现了较为严重的破损及成片脱落,基底初步显露。图5(d)为图5(c)中方形虚线框区域,发现显露的基底平整、光滑且几乎没有残漆颗粒,进一步证实了基底裸露且无损。但在图5(c)右上方区域观察到了基底划痕。

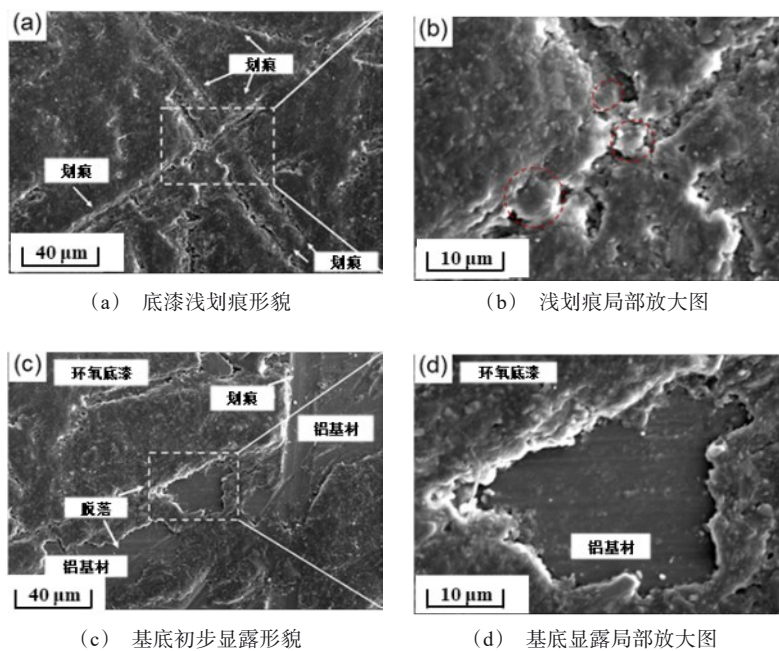


图5 EP/PU_Al试样机械打磨后D区和E区的SEM图

Fig.5 SEM images of EP/PU_Al specimen in zones D and E after mechanical grinding

图6为F区微观形貌,图6(a)显示基底表面存在残漆颗粒(圆形虚线框)及多向划痕,图6(b)为图6(a)中方形虚线框区域。在图6(b)中发现大小划痕密集排布,纵横交错,基底损伤严重,甚至还有部分残漆颗粒嵌入基底内部,造成深度污染。由此可见,机械打磨除漆法很难用肉眼判断除漆终点。当打磨到出现金属光泽的基底表面时,可能基底已损伤严重,而真正能露出无损基底形貌的则对应底漆

区,很难界定打磨除漆的操作终点。因此,机械打磨除漆法在技术上的不可控性使得其对基底表面造成一定损伤。

2.2 喷砂除漆表面三维形貌及基底性能表征分析

针对EP/PU_Al试样进行不同压力下的喷砂除漆,其表面三维形貌如图7所示,喷砂后的表面粗糙程度如图8所示。图7的三维形貌显示,喷砂除漆表面均布着大量冲击所形成的凹坑,其所构成的粗糙

表面可以为再喷漆提供多个漆层结合位点,强化化学键及分子间作用力,或形成类似机械锚固的作用。随着喷砂压力的增加,除漆表面冲击凹坑的直径增大且分布逐渐散乱。这是由于喷砂颗粒的冲击能量随压力的增大而增大,在连续冲击作用下,单一颗粒的破坏力显著上升,从而使EP/PU_Al试样表面产生的凹坑加深且相邻凹坑贯穿联通。此外,过大的冲击压力可能造成体系过度损伤。0.5 MPa压力对应的喷砂表面出现了明显翘曲,表明体系残余应力过大,可能会影响基底力学性能及其作为构件的服役寿命。喷砂表面的粗糙程度显示,粗糙度 Sa 和峰谷高度差(PVH)均随喷砂压力先快速增大而后慢速减小。当压力低于0.3 MPa时,压力的增大会

导致喷砂颗粒破坏力增强,所产生的冲击凹坑深度加深且直径增大,从而表面逐渐粗糙。当压力高于0.3 MPa时,相邻冲击凹坑贯穿联通,逐步扩大,最终表现为宏观表面整体下凹(如0.5 MPa压力所对应的试样出现明显翘曲),所测得凹面内部的粗糙度下降。此外,三个喷砂压力所对应的表面粗糙程度(7.89 μm ~14.27 μm)均远大于阿洛丁表面,使得再喷漆时漆面无法覆盖基底表面波峰,其平整性无法保证。而且漆层下方易残留气泡,造成结合力大幅降低,影响再喷漆工艺质量。同时,过于粗糙的基底也会导致漆料用量过多,经济成本大幅上升。因此,喷砂除漆法在除漆表面粗糙度上的不可控性大大降低了试样的工业再应用价值,并增加了经济成本。

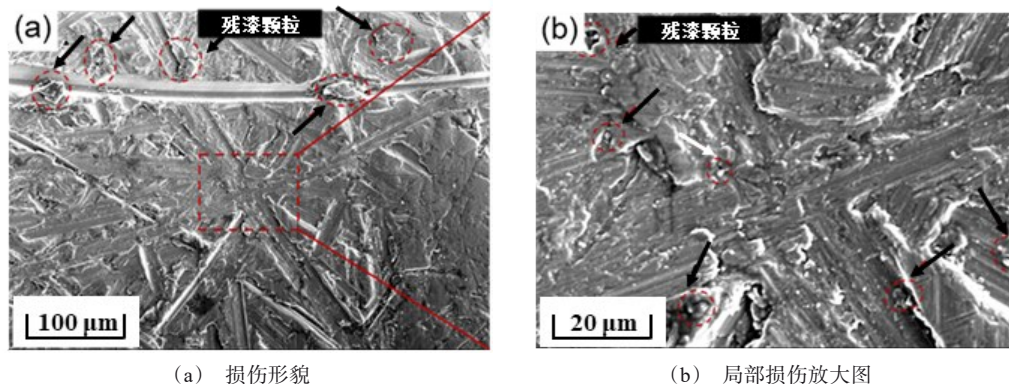


图6 EP/PU_Al试样机械打磨后F区的SEM图

Fig.6 SEM images of EP/PU_Al specimen in zone F after mechanical grinding

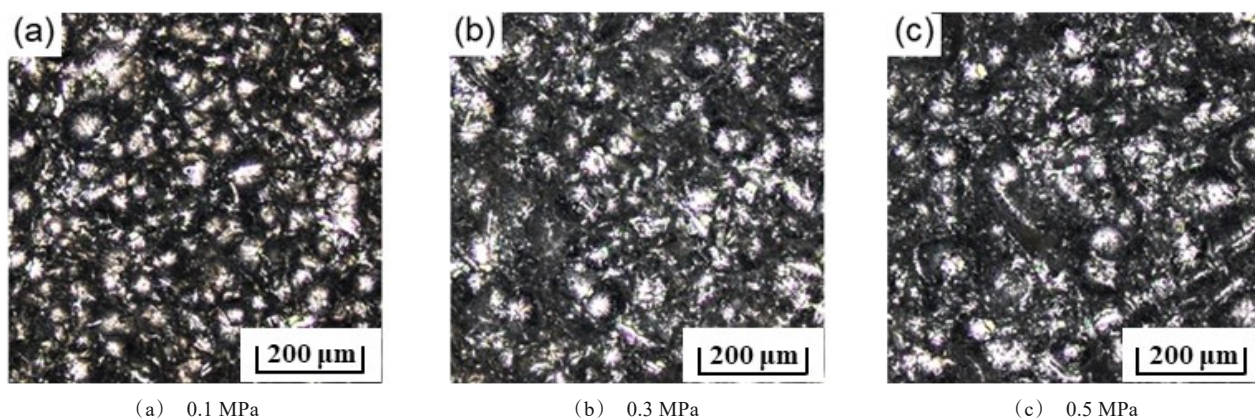


图7 喷砂除漆表面的三维形貌

Fig.7 Three-dimensional morphology of sandblasted paint removal surfaces

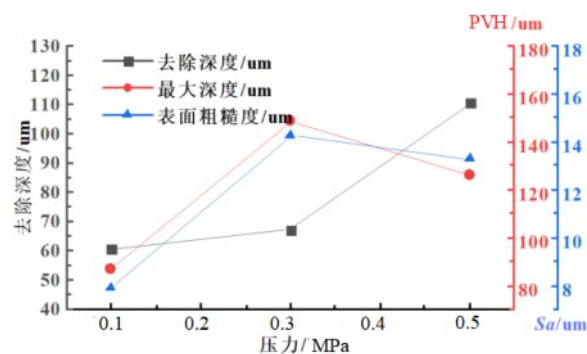


图8 喷砂除漆表面的粗糙程度

Fig.8 Surface roughness of sandblasted paint removal

2.3 激光除漆表面微观形貌及拉曼光谱分析

图9为EP_Al试样在不同热输入下的除漆表面微观形貌,分别代表5种除漆程度。图9(a)的热输入量为 11.9 J/cm^2 , 所示表面接近于原始漆面形貌, 仅有个别区域可见极其微小的脉冲激光烧蚀坑。表明此时体系所吸收的能量不足以引起漆层的大面积去除。图9(b)的热输入量为 16.1 J/cm^2 , 所示表面均布大量漆层烧蚀坑, 且单坑直径小于光斑直径 $20 \mu\text{m}$ 。这是由于激光光束能量呈高斯分布, 能量分布的不均匀性使得只有接近光束中心的部位才会达到漆层烧蚀温度, 产生边缘清晰的烧蚀凹坑, 标记为热

烧蚀区1。1区凹坑内壁和底部较为粗糙, 且存在大量漆层熔融重凝所形成的微纳米颗粒物。表明光斑中心部位的漆层承受激光超高峰值功率, 发生剧烈烧蚀反应, 且产生了大量裂解及烧蚀产物。从热烧蚀区向光斑边缘处过渡, 依次为热影响区2及未影响区3。2区对应烧蚀坑周围的堆状突起物, 这是脉冲冲击加载将坑内物质挤压至边缘所致。此处漆层结构已在激光热影响作用下而改变, 但所吸收的能量还不足以支撑漆层继续烧蚀、裂解及汽化, 故而呈疏松状与周围原始漆层继续结合。待激光再次辐照时, 则直接破坏二者之间的微弱结合。2区漆层最先被去除, 3区漆层则保留原始漆面形貌及结构, 未受激光辐照影响。热输入量为 19.9 J/cm^2 时的除漆表面如图9(c)所示。此时几乎所有烧蚀单坑相互贯通, 除漆表面凹凸不平, 表层薄漆已被去除。图9(d)的热输入量为 44.6 J/cm^2 , 此时基底大面积显露且未观察到明显的基底损伤。进一步增大热输入量至 50.4 J/cm^2 , 如图9(e)所示, 表面漆层几乎完全去除, 且基底表面未见明显的蜂窝状激光损伤, 但依稀可见激光光斑的搭接痕迹及清洗路径。这是基底轻微熔融形成熔坑, 熔融基底在脉冲冲击作用下发生塑性形变而留下的光斑痕迹。

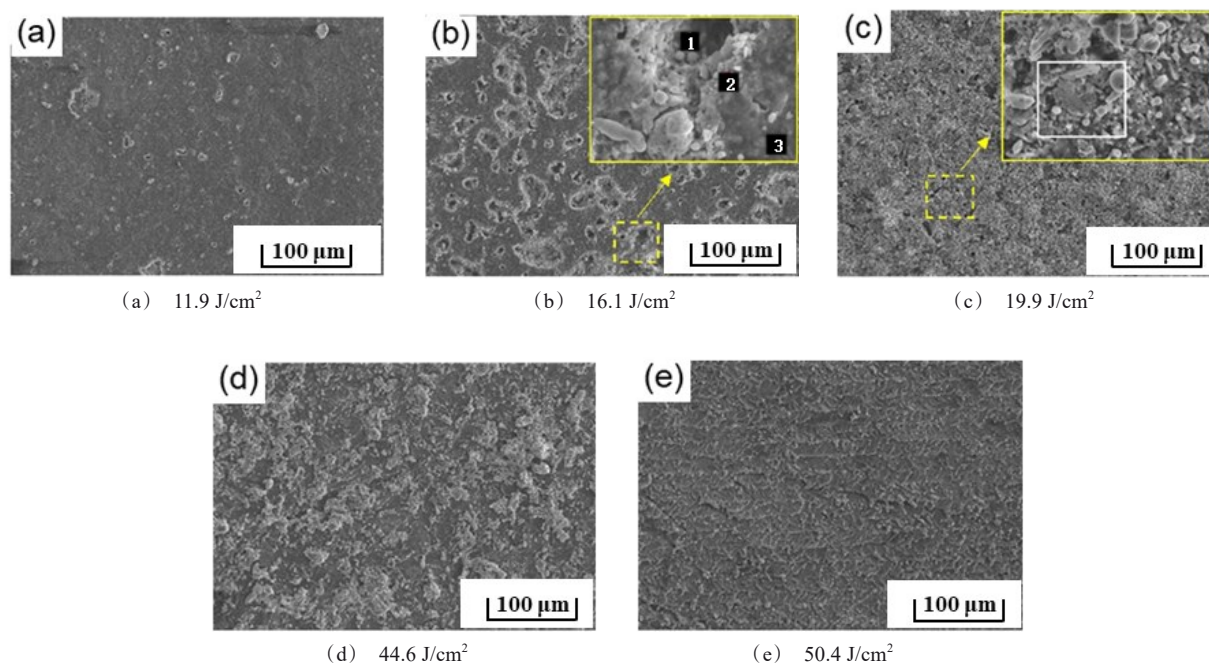


图9 EP_Al试样除漆表面的微观形貌

Fig.9 Microstructure of EP_Al specimen with paint removal

此外,对图 9(a)~9(e)所示除漆表面进行元素分析(表 4),发现随漆层损伤程度的加深,C、O 元素含量降低且 Al 元素含量上升。这是由于激光辐照使得漆层聚合物化学键断裂而发生不可逆降解,主链 C 原子以小分子气体和可凝挥发物的形式损失^[17],Al 基底逐步显露。

表 4 EP_Al 试样不同除漆阶段的表面元素含量

Tab.4 Surface element content of EP_Al specimens at different stages of paint removal

除漆阶段	C 含量/ wt. %	O 含量/ wt. %	Al 含量/ wt. %	Si 含量/ wt. %
原始漆面	52.53	28.98	0.12	7.01
初始除漆	49.13	25.40	7.14	6.68
基底显露	43.24	21.96	21.15	5.69
完全除漆	18.16	9.02	69.16	0.61

图 10 为不同除漆程度的拉曼光谱测试结果。由图 10 可见,不同阶段对应不同强度的吸收峰及荧光背景,完全除漆表面的吸收峰及荧光背景几乎消

失,可作为除漆进程的判断依据之一。由于原始漆层中的 C 元素以 C-C 或 C-H 及 C-O-C 等形式存在,激光辐照损伤会使得化学键断裂(吸收峰强度降低),严重损伤甚至会导致其完全消失。同时,部分吸收峰红移,表明分子链中 C-O 等吸电子基团的减少使得电子云发生移动^[18]。此外,基团断键还受以下因素影响:(1)激光等离子体的形成、电子及离子抛射所形成的表面电场均会影响聚合物裂解及断键活化能。(2)聚合物分子链或侧基的裂解会导致激光辐射体积增大,产生的内部压力会降低断键活化能,从而降低除漆阈值^[19]。由此可见,激光除漆过程中存在漆层烧蚀及聚合物裂解,产生“坑周外翻”的烧蚀凹坑。待其贯穿联通后,形成了结构疏松且内聚力降低的待除漆表面,该表面极易在激光诱导力作用下被清除。因此,激光除漆法在基底无损以及除漆进程的精细化控制等方面具有无可比拟的优势,大大提高了这一新型除漆技术在工业应用上的可操作性及推广价值^[20]。

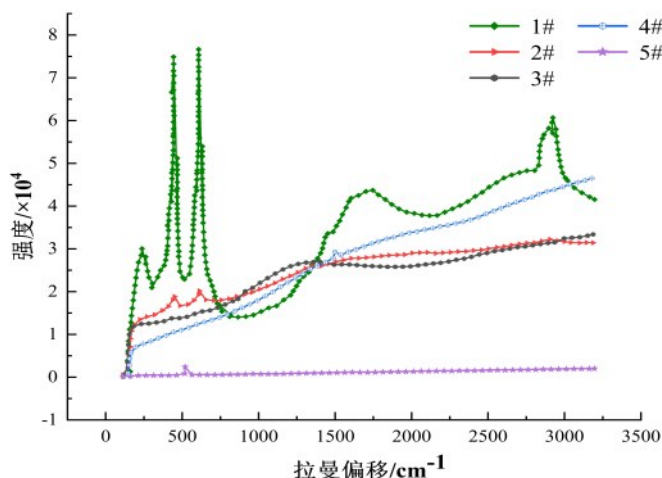


图 10 拉曼光谱测试结果

Fig.10 Raman spectroscopy test results

3 结论

(1)环氧底漆厚约 34.88 μm ,呈粗糙颗粒感。聚氨酯面漆厚约 56.53 μm ,呈细腻质感。复合漆层厚约 111.14 μm ,底漆粗糙,面漆细腻,且二者分界鲜明。漆层中主要包含 C-O-C、C-C、N-H 等化学键,其吸收峰强度可用来判断除漆进程。

(2)机械打磨除漆法很难界定除漆终点,无法避

免基底损伤。经过机械打磨法后,基团种类维持不变,但 Si、N-H、-CH 含量显著增大。这是因为机械打磨所用的 SiC 磨粒在打磨过程中嵌入除漆表面,使得漆层内部的 N-H 键显露出来,并破坏破坏聚合物中的 -CH 链。

(3)喷砂除漆法会在除漆表面留下大量冲击凹坑,其直径随喷砂压力的增大而明显提高,导致基体表面粗糙度的误差较大,无法保证再喷漆的工艺质

量。此外,过大的冲击压力可能造成过大的残余应力以及体系过度损伤,可能会影响基底力学性能及其作为构件的服役寿命。

(4)合理设置激光参数可保证在不损伤基体材料的前提下完全去除漆层,并且可通过除漆表面的吸收峰及荧光背景实时反馈除漆进程。

参考文献

- [1] Chen Y, Deng G L, Zhou Q, et al. Acoustic signal monitoring in laser paint cleaning[J]. *Laser Physics*, 2020, 30(6): 066001.
- [2] Kim J E, Han M S, Kim J D. Removal characteristics of shop-primer paint by laser energy density in Q-switching fiber laser cleaning[J]. *Modern Physics Letters B*, 2020, 34(7): 2040042.
- [3] Gomes V, Dionisio A, Pozo-Antonio J S, et al. Mechanical and laser cleaning of spray graffiti paints on a granite subjected to a SO₂-rich atmosphere[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 188: 621-632.
- [4] 张光星, 华学明, 李芳, 等. 激光除锈、除漆的研究与应用现状[J]. *热加工工艺*, 2019, 48(18): 1-8.
- [5] Autric M L, Oltra R. Basic processes of pulsed laser materials interaction: applications to laser cleaning of oxidized surfaces[C]//Jarmila Kodymova. XV International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers. The United States: SPIE, 2005, 5777: 982-985.
- [6] Bedair S M, Smith H P. Atomically clean surfaces by pulsed laser bombardment[J]. *Journal of Applied Physics*, 1969, 40(12): 4776-4781.
- [7] Han J, Cui X, Wang S, et al. Laser effects based optimal laser parameter identifications for paint removal from metal substrate at 1064nm: a multi-pulse model[J]. *Journal of Modern Optics*, 2017, 64(19): 1-13.
- [8] D'Addona D M, Genna S, Giordano A, et al. Laser ablation of primer during the welding process of iron plate for shipbuilding industry[J]. *Procedia Cirp*, 2015(33): 464-469.
- [9] Li X, Zhang Q, Zhou X, et al. The influence of nanosecond laser pulse energy density for paint removal[J]. *Optik*, 2018(156): 841-846.
- [10] 胡太友, 乔红超, 陆莹, 等. 激光除漆对 Ti17 合金表面组织性能的影响[J]. *表面技术*, 2018, 47(3): 7-12.
- [11] Fecsik P W, Miller B T. Carbon dioxide pulsed gas laser-based paint decoating at raytheon missile systems: stripping method offers viable alternative to other options[J]. *Metal Finishing*, 2006, 104(9): 10-16.
- [12] Madhukar Y K, Mullick S, Shukla D K, et al. Effect of laser operating mode in paint removal with a fiber laser [J]. *Applied Surface Science*, 2013(264): 892-901.
- [13] 杨文锋, 李庆, 李绍龙, 等. 激光除漆对铝合金飞机蒙皮微观组织影响 [EB/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1083.TG.20230927.1724.022>, 2023-09-28.
- [14] 李强, 赵子铭, 刘伟军, 等. 激光除漆对铝合金基材表面质量的影响 [EB/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1083.TG.20230815.0848.004>, 2023-08-15.
- [15] 田野, 赵永岗, 刘春伟, 等. 阿洛丁 1200S 化学氧化膜耐腐蚀性影响因素探讨[J]. *航空科学技术*, 2014(1): 51-53.
- [16] 王志兴. 激光除漆对铝合金蒙皮重涂性能的影响研究 [D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2023.
- [17] 吴丽雄, 叶锡生, 刘泽金. 聚氨酯黑漆的红外激光损伤机理研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(3): 13-17.
- [18] Zhao H C, Qiao Y L, Du X, et al. Paint removal with pulsed laser: theory simulation and mechanism analysis [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(24): 5500.
- [19] Bäuerle D. *Laser Processing and Chemistry*[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [20] 江茫, 徐进军, 刘珂嘉, 等. 飞机蒙皮激光除漆技术工程化应用的现状与展望(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(2): 69-82.