

y 向搭接率对铝合金表面复合漆层激光清洗的影响

张天刚, 段俊杰, 刘天翔, 侯晓云, 张志强*

中国民航大学航空工程学院, 天津 300300

摘要 采用纳秒脉冲光纤激光器对 2A12 铝合金基材表面丙烯酸聚氨酯复合漆层进行了激光清洗实验, 研究了不同 y 向搭接率(η_y)对除漆效果的影响。结果表明, 当 η_y 为 0 和 20% 时, 面漆全部去除, 底漆部分去除; 当 $\eta_y=40\%$ 时, 仅少量底漆残留, 大部分氧化膜被破坏, 基材显露; 当 $\eta_y=60\%$ 时, 复合漆层全部去除, 基材烧损。研究发现, 随着 η_y 值逐渐增大, 清洗表面烧蚀现象明显增加, 漆层烧蚀气化将导致面漆着色剂和功能氧化粒子脱漆沉积于烧蚀凹坑表面; 清洗表面残余漆层形成了凹坑-间隔-凹坑的清洗特征, 表明清洗过程中烧蚀-等离子冲击(屏蔽)-烧蚀交替进行, 烧蚀与等离子冲击作用均会对清洗表面产生热影响, 导致残余漆层丙烯酸树脂链段自由基发生位置重排, 同时诱发残余漆层产生热应力除漆机制; 激光等离子冲击和热应力破坏是导致清洗表面残余漆层碎裂分层或物理剥离的主要原因。

关键词 激光技术; 激光清洗; 铝合金; 复合漆层; y 向搭接率; 除漆机制

中图分类号 TN249 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221339

1 引言

民用飞机服役环境复杂多变, 其蒙皮表面复合漆层在紫外线辐射、盐雾腐蚀、滑油侵蚀和砂粒冲蚀等多重因素的综合影响下, 极易出现龟裂、脱色和粉化等失效问题^[1-3]。因此, 蒙皮表面复合漆层的局部或整体清除换装被列入了民航机务常规维修的 C 检和 D 检环节。C 检除漆的维修周期为 3400 个飞行循环, 主要针对机身或发动机局部区域展开; D 检除漆维修主要为飞行时长超 10000 h 以上的民用飞机, 内容主要涉及大面积或整机除漆^[4-5]。目前, 人工打磨褪漆和化学药剂褪漆为以上修理环节采用的主要技术手段。人工打磨褪漆方式虽然便捷灵活, 但效率低、精度低、易损伤蒙皮; 化学药剂褪漆效率明显高于手工打磨, 但操作步骤繁杂, 实施成本较高, 且除漆液污染已经无法满足日益严苛的环保排放标准^[6]。

随着现代激光技术的不断完善和发展, 高效、绿色、非接触的激光除漆技术走入了人们的视野, 并逐渐发展成为传统除漆方式的有效替代技术之一, 被广泛应用于航空航天、国防军工和石油化工等重要领域^[7-9]。激光除漆技术独特的烧蚀、等离子冲击和应力振动交互耦合除漆工作模式是独立于其他传统除漆方式的一个重要特征, 也是研究热点之一^[10-11]。王德良等^[12]对纳秒脉冲激光除漆后的清洗碎片形貌及成分进行了研究分析, 认为清洗过程包含了应力振动和热烧

蚀两种除漆机制; 雷正龙等^[13]分别采用毫秒与纳秒激光对铝合金表面环氧树脂漆层进行了清洗实验, 研究发现毫秒激光清洗以烧蚀气化除漆为主, 纳秒激光清洗以应力振动除漆方式为主; Ansari 等^[14]研究认为, 激光除漆机制主要包括热应力振动、气化压力冲击、等离子冲击和热烧蚀等, 但并未对上述机制的耦合行为进行研究和说明; Roberts^[15]认为激光除漆作用机制主要包括烧蚀和热应力振动, 漆层厚度及其与激光吸收长度的量化关系是决定激光除漆机制的核心因素。通过上述研究可以发现, 尽管广大专家学者多维度、多角度阐释了激光除漆机制的特点, 但未就上述机制的交互影响及耦合关系展开详细探究。

综上所述, 本文针对由 2A12 航空铝合金表面 Al_2O_3 氧化膜、底漆和面漆组成的复合漆层系统, 以 y 向搭接率为参考变量, 采用高重复频率脉冲光纤激光器进行了激光除漆实验。利用光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、X 射线能谱仪(EDS)、傅里叶红外光谱仪(FT-IR)和 X 射线光电子能谱仪(XPS)等多种技术手段, 对比研究了不同 y 向搭接率对复合漆层激光清洗效果的影响, 通过分析清洗表面残留物的形貌特征和成分变化, 阐明了残余漆层的热降解机理, 揭示了不同除漆作用机制的交互、耦合作用行为, 为民用飞机蒙皮激光除漆的工业化进程提供了一定的实验和理论指导。

收稿日期: 2022-10-19; 修回日期: 2022-11-28; 录用日期: 2022-12-12; 网络首发日期: 2022-12-22

基金项目: 国家自然科学基金(U2033211)、中央高校基本科研业务费重点项目(3122022104)

通信作者: *zqzhang@cauc.edu.com

2 实验材料与方案

2.1 实验材料

将实验用 2A12 铝合金基材切制为长、宽和厚度分别为 3 cm、3 cm 和 0.4 cm 的待加工试块,其主要成分如表 1 所示。

漆层系统由面漆、底漆和氧化膜构成,其中面漆、底漆均为双组分丙烯酸聚氨酯漆,氧化膜为铝

合金基材经硫酸阳极氧化法生成,主要成分是 Al_2O_3 ,厚度约为 $10\ \mu m$ 。漆层系统的 EDS 检测结果如图 1 和表 2 所示(激光清洗前、后表面均进行蒸镀铂金处理),面漆、底漆的主要组分和相关参数如表 3 所示。由图 1 和表 2 可以看出,面漆、底漆的主要成分及比例基本相同, Al_2O_3 氧化膜受硫酸阳极氧化过程中亲水分子的影响^[16], Al、O 原子数比约为 1:2。

表 1 2A12 铝合金化学成分

Table 1 Chemical compositions of 2A12 aluminum alloy

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Mass fraction /%	0.06	0.18	4.73	0.63	1.65	0.02	0.22	0.04	Bal.

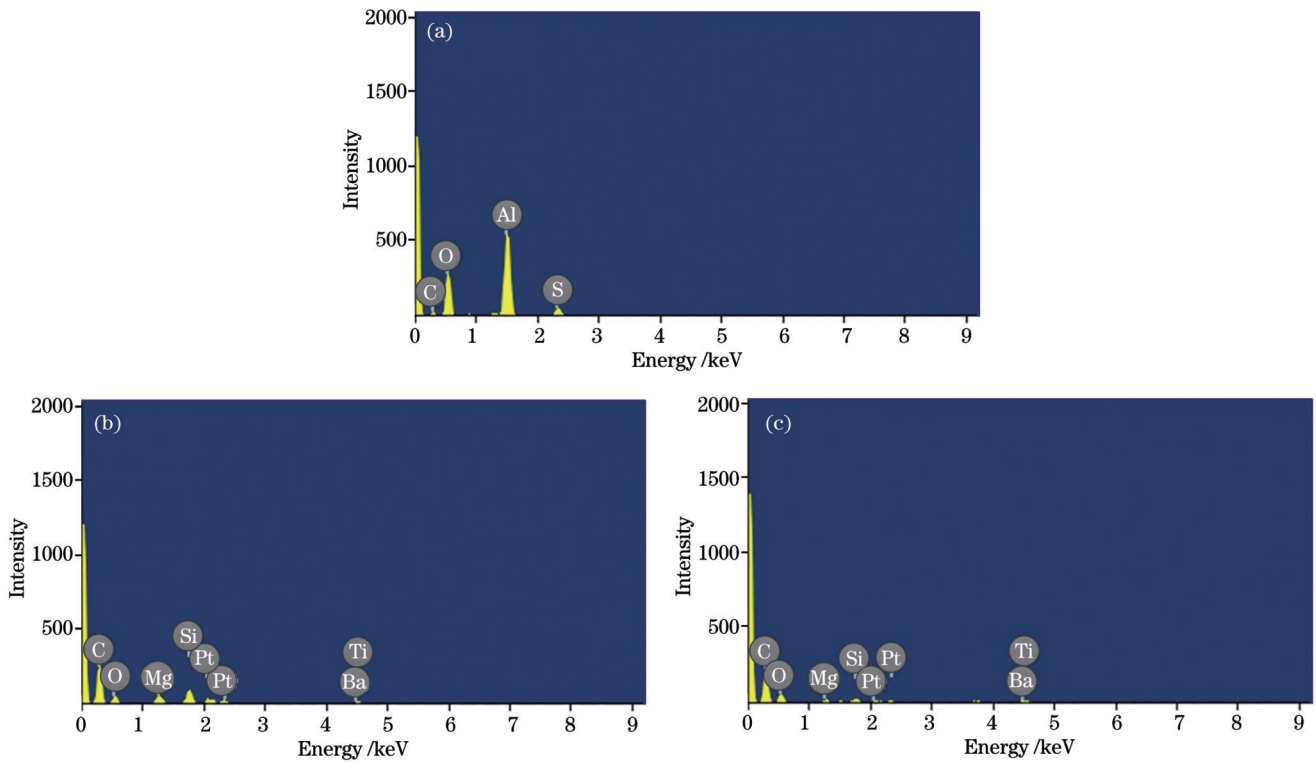


图 1 漆层系统 EDS 检测结果。(a)氧化膜;(b)底漆;(c)面漆

Fig. 1 EDS test results for paint layer systems. (a) Oxide film; (b) primer; (c) topcoat

表 2 面漆、底漆和氧化膜的 EDS 成分(原子数分数,%)

Table 2 EDS compositions of topcoat, primer, and oxide film (atomic fraction, %)

Sample	C	O	Ti	Si	Mg	Ba	Pt	Al	S
Topcoat	79.01	19.00	0.13	0.63	0.38	0.35	0.50	-	-
Primer	79.14	19.05	0.45	0.29	0.35	0.08	0.64	-	-
Anodic oxide film	4.73	61.70	-	-	-	-	-	30.22	3.35

表 3 复合漆层主要组分和相关参数

Table 3 Main components and related parameters of composite paint layer

Sample	Base 1	Base 2	Functional oxide particle	Color	Film thickness
Topcoat	Hydroxy acrylate resins	Hexamethylene diisocyanate diurea	MgO, SiO ₂ , TiO ₂ , BaSO ₄ , etc.	Navy blue (β -type copper phthalocyanine)	65 μm
Primer	Polyacrylate resins	Polyisocyanate		Milky yellow (ZnCrO ₄)	55 μm

待除漆样品的 OM 截面形貌如图 2(a) 所示,可以看出,面漆、底漆厚度均匀,结合界面清晰平直,无气孔、开裂等缺陷生成; Al_2O_3 氧化膜在底漆与铝合金基

材之间形成了明显的分界线特征,其表面 SEM 形貌如图 2(b) 所示。

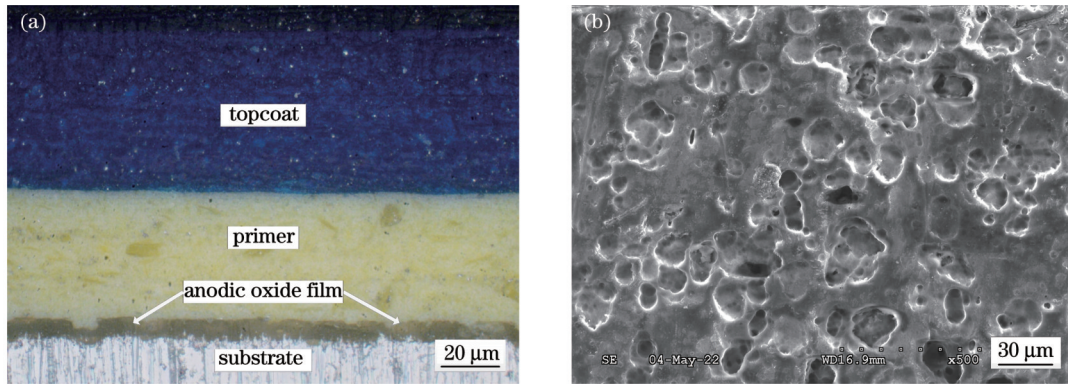


图 2 复合漆层系统截面 OM 形貌及氧化膜表面 SEM 形貌。(a) 复合漆层系统截面 OM 形貌; (b) 氧化膜表面 SEM 形貌
Fig. 2 Cross-section OM morphology of composite paint layer system and SEM morphology of oxide film surface. (a) Cross-section OM morphology of composite paint layer system; (b) SEM morphology of surface of oxide film

2.2 实验方案与设备

实验采用的激光清洗设备为高重复频率纳秒脉冲光纤激光器(激光波长 $\lambda=1024\text{ nm}$),清洗路径按照首、尾相连的“弓”形设计,如图 3 所示,其中 V_x 为 x 方

向的扫描速度。整体详细实验参数如表 4 所示;实验检测设备及检测内容如表 5 所示。

表 4 实验参数

Table 4 Experimental parameters

Parameter	Value
Power (P)	30 W
Pulse width	200 ns
Frequency (f)	30 kHz
Spot diameter (D)	30 μm
Scanning speed (V)	720 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
x -direction overlap rate (η_x)	20%
y -direction overlap rate (η_y)	0%, 20%, 40%, 60%

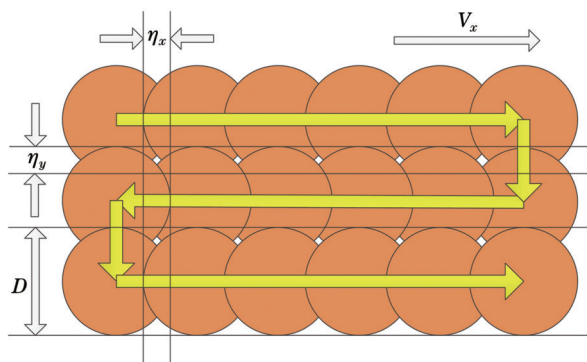


图 3 激光扫描路径示意图
Fig. 3 Schematic of laser scanning path

表 5 实验设备及检测内容

Table 5 Experimental equipments and test contents

Equipment	Detect content
OM	Macro-morphologies of surface and cross section before and after laser cleaning
SEM	Surface microstructure characteristics after laser cleaning
EDS	Compositions of surface elements before and after laser cleaning
FT-IR	Changes in polymer functional groups before and after laser cleaning
XPS	Changes in surface compositions and contents before and after laser cleaning

3 实验分析

3.1 除漆后表、截面形貌分析

烧蚀是激光清洗常见的作用机制之一^[17],针对本文制备的丙烯酸聚氨酯复合漆层来说,烧蚀主要指在 高能脉冲激光辐照作用下,漆层气化、分解从而脱离铝

合金基材的过程^[18]。

图 4(a)、(c)、(e)、(g) 分别为四种不同 y 向搭接率工艺条件下除漆后的截面 OM 形貌,图 4(b)、(d)、(f)、(h) 为对应的表面 OM 形貌。经测量,图 4(a) 中残余漆层厚度为 10~40 μm ,已经小于原始底漆厚度,说明 y 向搭接率为 0 时,面漆已经全部清洗去除,底漆部分去

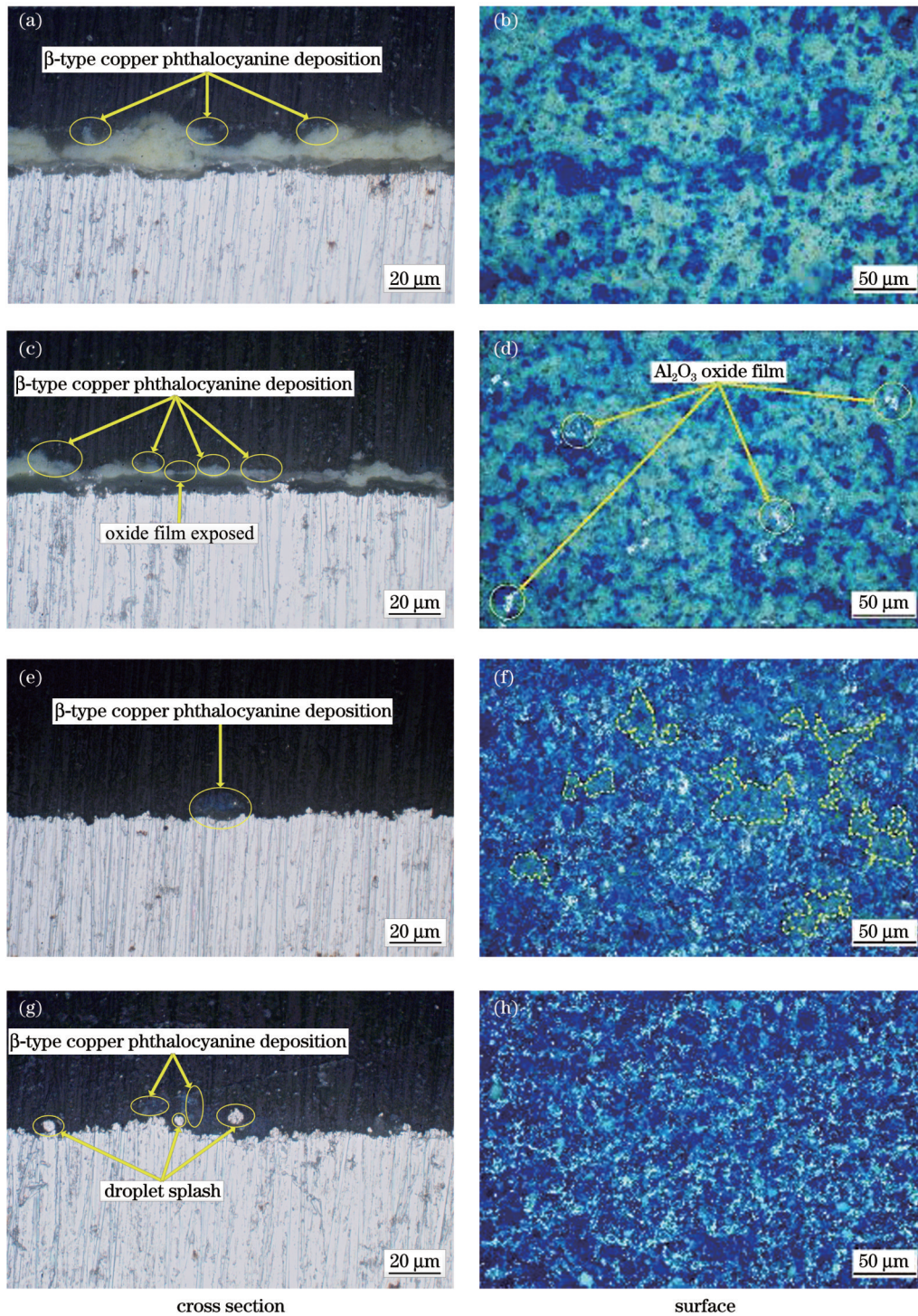


图 4 不同 η_y 下除漆后表、截面 OM 形貌。(a)(b) $\eta_y=0\%$; (c)(d) $\eta_y=20\%$; (e)(f) $\eta_y=40\%$; (g)(h) $\eta_y=60\%$
 Fig. 4 OM morphologies of surface and cross section after paint removal under different η_y . (a)(b) $\eta_y=0\%$; (c)(d) $\eta_y=20\%$; (e)(f) $\eta_y=40\%$; (g)(h) $\eta_y=60\%$

除;同时可以看出,残余底漆表面部分区域出现了少量蓝色残留物。这主要是因为蓝色面漆颜料的主要成分是光、热稳定性较高,且气化点高于丙烯酸聚氨酯漆的 β 型铜酞菁,所以当高能激光使面漆烧蚀气化时,出现了部分 β 型铜酞菁脱离面漆向下沉积的实验现象^[19]。

图 4(c)、(d)为 y 向搭接率等于 20% 时清洗截面 OM 形貌,图 5(a)、(b)分别为 $\eta_y=0\%$ 和 $\eta_y=20\%$ 时 y

向搭接面积变化情况,其中 V_y 为 y 方向的扫描速度。图 4(c)表明, y 向搭接率为 20% 时,清洗后残余漆层厚度已接近氧化膜厚度,且部分区域氧化膜已经外露;从图 4(d)可以看出,清洗表面除了蓝色 β 型铜酞菁和黄色底漆外,出现了少许银白色区域,结合图 4(c)可断定其为 Al_2O_3 氧化膜。值得一提的是,对比图 4(b)发现,图 4(d)中铜酞菁分布面积有所减少。原因分析如下:当 y 向搭接率由 0 变为 20% 时,激光在沿 x 方向移

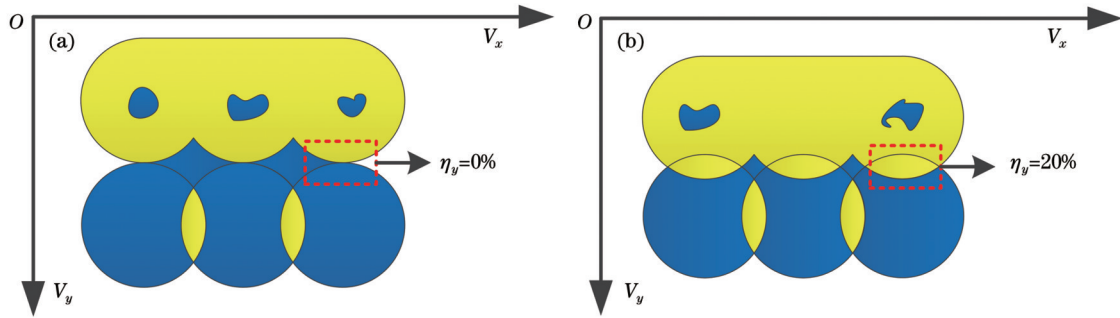


图5 y 向搭接面积变化情况。(a) $\eta_y=0\%$;(b) $\eta_y=20\%$

Fig. 5 Change in y -direction overlap area. (a) $\eta_y=0\%$;(b) $\eta_y=20\%$

动的过程中, y 向光斑在清洗区域出现了叠加现象,导致各道烧蚀光斑的 y 向蓝色面漆面积比首道光斑小20%[图5(b)],致使面漆烧蚀后的脱漆 β 型铜酞菁沉积量降低,最终引起了铜酞菁面积减小。

从清洗截面图4(e)、(g)可以看出,当 y 向搭接率分别达到40%和60%时,在清洗截面上已经无法观察到残余底漆;当 y 向搭接率为60%时,图4(g)显示清洗表面出现了颗粒飞溅现象。产生这种现象的原因可能为:在激光作用下,清洗表面形成了液态熔池,在激光等离子(激光电离漆层气化后形成的气体)快速膨胀挤压和冲击作用下产生了喷溅,导致部分飞溅熔滴冷却后凝固于清洗表面^[20]。图4(f)、(h)是 y 向搭接率分别为40%和60%时的清洗表面OM形貌。从图4(f)可以看出, y 向搭接率为40%时的清洗表面银白色区域有所增大,说明氧化膜显露面积增加,同时发现还存在少量浅黄色底漆,此时从对应的截面OM形貌[图4(e)]中已无法观察到底漆,这说明清洗表面残余底漆厚度很薄;图4(h)显示 y 向搭接率为60%时的清洗表面白色区域较 y 向搭接率为40%时有所减小,结合截面图[图4(g)]颗粒飞溅现象分析,可能是大部分氧化膜已经烧蚀。

需要强调的是,结合图4(f)、(h)可以看出,在 y 向搭接率大于20%后,随着 y 向搭接率的不断提高,清洗表面蓝色覆盖面积逐步增大,这一方面说明清洗过程中的烧蚀程度逐步加强;另一方面则说明 y 向搭接率继续提高引发的面漆 y 向有效清洗面积减少,并未使 β 型铜酞菁的脱漆沉积量继续降低,具体原因还需要进一步分析。

3.2 除漆后表面组织分析

研究指出,在激光除漆过程中,清洗表面形成的圆形或近圆形凹坑为烧蚀机制形成的显著特征^[21]。四种 y 向搭接率工艺条件下清洗表面低倍SEM形貌如图6(a)、(c)、(e)、(g)所示,对应的高倍局部SEM形貌如图6(b)、(d)、(f)、(h)所示,所有SEM图片已标出激光扫描方向。从图6(a)可以看出,清洗表面在 x 方向上出现了间隔不一的烧蚀凹坑。这里要注意的是,如果按照图3中的激光清洗理论路径,激光沿 x 方向移动时,激光光斑应在清洗表面形成20%面积叠加的

连续烧蚀凹坑,并不会在凹坑之间形成间隔,这说明激光除漆过程中的烧蚀行为受到了间断性阻隔。因此,本文结合激光等离子屏蔽和冲击机制,对上述实验现象进行说明:当高能激光作用于漆层系统且温度超过其气化点时,烧蚀凹坑开始形成,漆层开始分解为 CO_2 、脂类和醇类气体^[22-23];随着烧蚀凹坑逐渐形成,漆层热解气体蒸腾量不断增大,与此同时,激光辐照加热并电离不断升腾的气体,等离子屏蔽层逐步形成,烧蚀现象逐渐终止;随着等离子对激光能量的持续吸收,等离子不断被加速并向外膨胀喷射,继而对清洗表面形成等离子冲击;当激光热输入被屏蔽至漆层无法气化时,烧蚀凹坑不再形成,清洗表面在激光等离子冲击作用下形成凹坑间隔区域,由于此时漆层烧蚀气化行为已经终止,漆层气化蒸腾气体无法持续供给,故激光等离子粒子数密度不断下降,激光等离子屏蔽和冲击作用逐步消失,烧蚀作用再次被激发,从而重复上述过程。以上结果说明,激光除漆过程中形成了烧蚀-等离子屏蔽(冲击)-烧蚀的循环清洗工作模式,这也合理地解释了图6(a)中清洗表面出现凹坑-间隔-凹坑的实验现象。

对图6(b)中两个点进行EDS检测,结果如表6所示。可以看出,相比于原始底漆,A1点显示凹坑内清洗表面的O、Mg、Si、Ti和Ba含量显著上升,这主要与漆层气化后高熔点 MgO 、 SiO_2 、 TiO_2 和 BaSO_4 等功能性氧化粒子的脱漆沉积密切相关^[24]。此外,漆层气化后残留的烧蚀产物[灰分(ash)和固定碳]也将引起凹坑清洗表面组成元素的变化,凹坑内清洗表面成分结构如图7所示。相比于烧蚀凹坑,A2点显示凹坑间隔区域的清洗表面成分与底漆成分基本相同,说明此区域漆层未受到烧蚀气化作用,即烧蚀凹坑间隔区域等离子冲击产生的热作用或穿透等离子屏蔽层的部分激光热作用并未使漆层气化。既然凹坑间隔未受到烧蚀作用,那么图6(b)中凹坑间隔区域残余漆层出现的碎裂和分层现象,则与激光等离子冲击和热应力作用密切相关^[25-26]。

这里对上文提到的清洗表面“热应力作用”分两种情况进行说明。第一种情况:结合图7可以看出,凹坑清洗表面烧蚀气化行为结束后产生了热作用,形成了

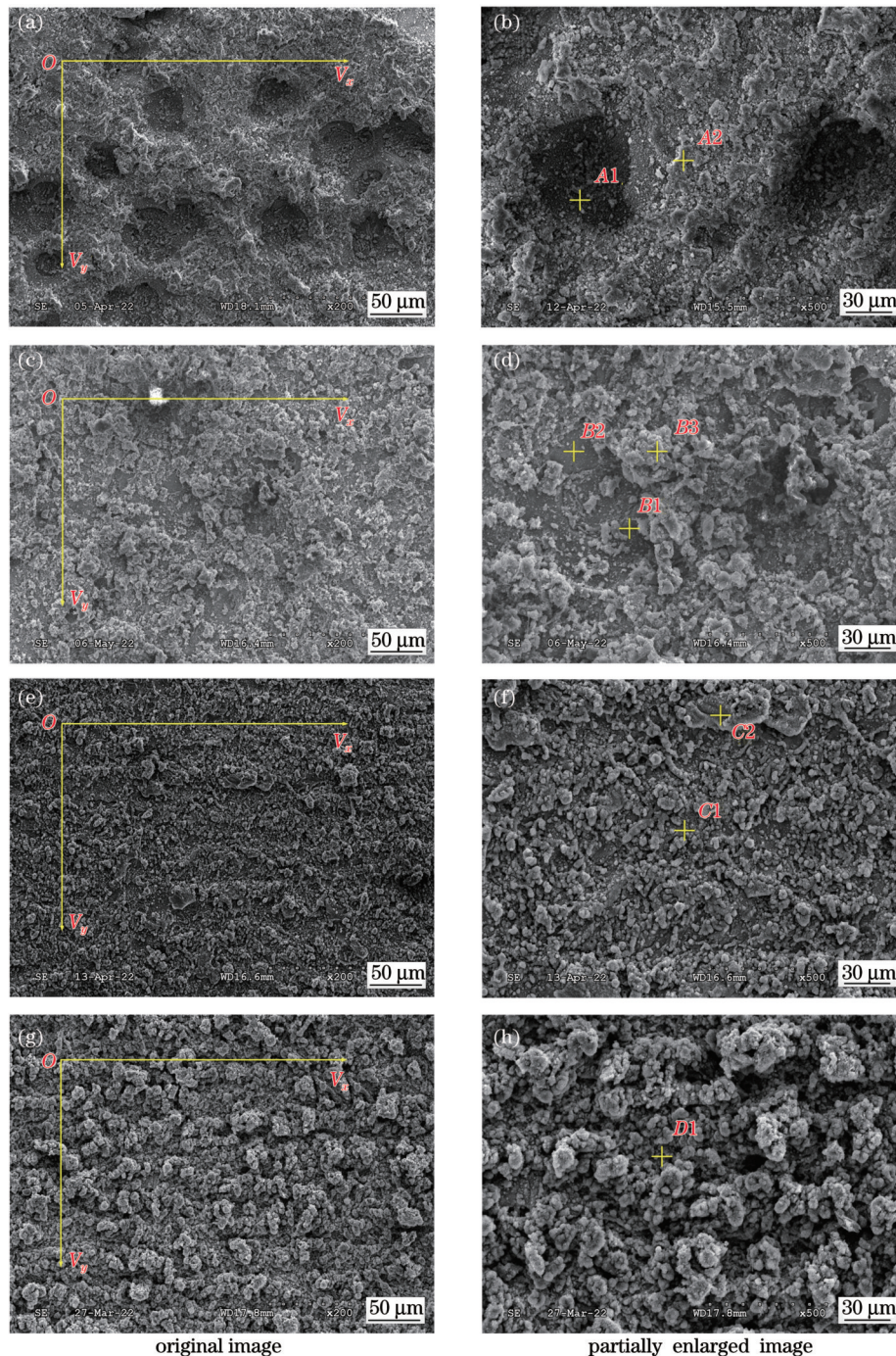


图 6 不同 η_y 下除漆后表面宏观形貌。(a)(b) $\eta_y=0\%$; (c)(d) $\eta_y=20\%$; (e)(f) $\eta_y=40\%$; (g)(h) $\eta_y=60\%$

Fig. 6 Macro-microscopic topographies of surfaces after paint removal under different η_y . (a)(b) $\eta_y=0\%$; (c)(d) $\eta_y=20\%$; (e)(f) $\eta_y=40\%$; (g)(h) $\eta_y=60\%$

热影响区,产生了热应力;第二种情况:由于等离子冲击或穿透屏蔽层的激光入射,凹坑间隔区域也会受到热作用^[21],形成热影响区,同样产生了热应力。当以上两种情况下产生的热应力达到并超过漆层剪切应力时,漆层将发生碎裂分层和物理剥离的清洗特征。

随着 y 向搭接率升高至 20%,图 6(c)显示清洗表面凹坑数量明显减少,取其中较为明显的两个凹坑[图 6(d)]进行 EDS 检测,结果如表 6 所示,结合 B1 点可以看出,凹坑内平坦处为氧化膜,氧化膜表面附着的

残余底漆呈碎片化分布,B2 点显示残余底漆中 O、Mg、Si、Ti 和 Ba 含量相比原始底漆明显上升,且同时出现了 Al、S 元素,说明此时烧蚀产物和残余底漆已无法有效覆盖氧化膜;对比 y 向搭接率为 0 时,图 6(d)显示 y 向搭接率为 20% 时 y 向搭接凹坑间距减小,相比于原始底漆,B3 点显示间隔区域残余漆层中的 O、Mg、Si、Ti 和 Ba 等元素含量升高。可能原因是:在 20% y 向搭接率下,激光辐照漆层面积减少[图 4(d)],蒸腾气体量下降,激光电离蒸腾气体产生的等离子粒

表 6 不同 η_y 下除漆后清洗表面的 EDS 检测结果
Table 6 EDS test results for cleaned surfaces after paint removal under different η_y

Point No.	Atomic fraction / %										
	C	O	Mg	Si	Ti	Ba	Pt	S	Al	Cu	Mn
A1	65.29	28.8	1.11	1.32	1.19	1.57	0.72	-	-	-	-
A2	79.27	18.90	0.20	0.52	0.34	0.13	0.64	-	-	-	-
B1	29.90	40.02	1.82	1.84	1.26	1.70	0.59	2.00	20.87	-	-
B2	50.46	30.37	1.79	1.83	1.57	1.89	0.73	0.59	10.77	-	-
B3	70.82	24.57	0.99	1.01	0.97	1.03	0.61	-	-	-	-
C1	17.07	11.73	1.87	3.43	2.43	1.45	0.74	0.34	58.90	1.74	0.30
C2	37.46	38.43	1.70	2.36	2.07	0.95	0.82	0.63	15.58	-	-
D1	13.34	5.73	1.16	0.36	0.43	0.41	0.65	0.09	74.40	2.97	0.46

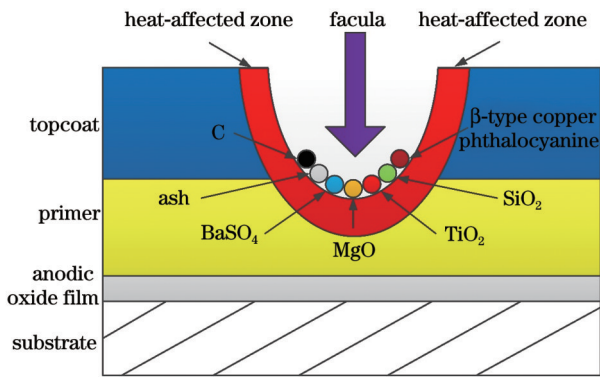


图 7 烧蚀凹坑表面成分结构图

Fig. 7 Composition structure diagram of surface of ablation pit
子数密度降低,从而导致等离子屏蔽效果减弱,穿透等
离子云的剩余激光热量引起凹坑间隔区域残余漆层部
分气化或溶剂、水分蒸发,最终引起了清洗表面 O 和
Mg 等元素含量升高。

当 y 向搭接率达到 40% 和 60% 时,图 6(e)~(h) 显示清洗表面已经无凹坑出现,从上述分析可知,这种实验现象与激光辐照漆层面积持续减少,从而引起等
离子屏蔽效果不断减弱密切相关。对 y 向搭接率为
40% 时除漆表面少量片层状物质进行 EDS 检测,结果
显示 C2 处为残余底漆,与 OM 检测结果[图 4(h)]一
致;C1 处经检测,Al 含量已经远超 Al_2O_3 氧化膜中 Al
元素含量,且出现了 Mn 和 Fe 等基材特征元素,说明
 Al_2O_3 氧化膜已经烧损,铝合金基材显露。当 y 向搭
接率为 60% 时,EDS 检测结果表明除漆表面各点成分基
本一致,且 Al 的原子数分数大于 74%,结合 OM 显示
的清洗表面熔滴飞溅现象,说明铝合金基材已经烧损。
以上分析结果进一步说明,当 y 向搭接率达到 40% 和
60% 时,由于激光除漆过程中的等离子屏蔽现象逐步
减弱,烧蚀机制占据了主导地位,这也解释了 y 向搭
接率为 40% 和 60% 时,光、热稳定性较高的 β 型铜酞菁
因面漆烧蚀气化而大面积脱漆沉积于清洗表面的实验
现象[图 4(f)、(h)]。

3.3 除漆后表面傅里叶红外光谱分析

除漆前原始漆层与不同 y 向搭接率工艺条件下清洗
表面傅里叶变换红外光谱分析结果如图 8 和表 7 所示。
结合原始漆层谱线分析可以得出,高频谱带出现的
 3362 cm^{-1} O—H 伸缩振动吸收峰和低频谱带 1066 cm^{-1}
C—OH 伸缩振动吸收峰,表明漆层中存在未被异氰酸
酯完全固化的羟基(—OH)自由基;紧邻 3362 cm^{-1} 峰
位,从右向左依次出现的 2925 cm^{-1} 峰位 CH_2 反对称伸
缩振动和 2855 cm^{-1} 峰位 CH_2 对称伸缩振动,表明漆层
含有异氰酸酯; $2275\sim 2255\text{ cm}^{-1}$ 谱带未出现 $N=C=O$
振动吸收峰,说明异氰酸酯交联固化反应完全; 1725 cm^{-1}
峰位 C=O 伸缩振动、 1449 cm^{-1} 峰位 CH_3 不对称变角
振动以及 1163 cm^{-1} 和 1017 cm^{-1} 峰位 C—O—C 伸缩
振动,表明漆层含有丙烯酸树脂; 1118 cm^{-1} 峰位 C—N
伸缩振动和 756 cm^{-1} 峰位 N—H 面外弯曲振动,表明
漆层中的丙烯酸树脂和异氰酸酯交联合成了氨基甲酸
酯结构单元;低频谱带 876 cm^{-1} 和 701 cm^{-1} 吸收峰对

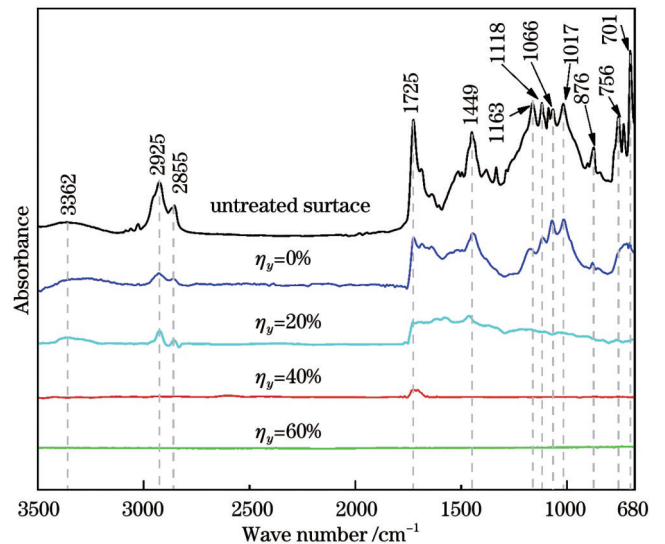


图 8 除漆前及不同 η_y 下除漆后表面红外光谱分析
Fig. 8 Surface infrared spectroscopy analysis before paint
removal and after paint removal under different η_y

应的 CH 面外弯曲振动,表明漆层含有未完全挥发的芳烃溶剂。

结合图 8 可以看出,60% η_y 向搭接率工艺条件下的官能团特征峰全部消失,说明此时清洗表面漆层已经全部被除净;40% η_y 向搭接率条件下谱线仅在 1725 cm^{-1} 峰位(对应 C=O 伸缩振动)有微弱振动信号,其余峰位吸收峰全部消失,表明漆层已经基本除净,出现的 C=O 微弱振动信号主要与清洗表面 OM、SEM 和 EDS 检测出的极少量残余底漆有关;相比除漆前,图 8 显示官能团峰强随着 η_y 向搭接率的升高(从 0 升高到 20%)而逐步降低,官能团峰强降低代表单位面积内残余漆层原子被红外光激发的电子数量下降,即清洗表面单位面积内的残余漆层质量分数下降,但 OM 检测结果显示 0% 和 20% η_y 向搭接率条件下清洗表面基本均被残余漆层完全覆盖,并未出现铝合金基材逐渐显露的情况。因此产生这种实验现象的主要原因为: 1) 0% 和 20% η_y 向搭接率下清洗表面除残余漆层外,脱漆沉积的功能性金属氧化物粒子附着引起了残余漆层质量分数的下降; 2) 漆层烧蚀后产生的灰分、固定碳和 β 型铜酞菁等造成了残余漆层质量分数的下降; 3) 残余漆层表面形成了热影响区,导致丙烯酸树脂部分 C—C、C—H 键断裂,部分活性基团位置发生了置换和重排,引起了清洗表面部分官能团峰强下降。除此之外,图 8 中 0% 和 20% η_y 向搭接率下 876 cm^{-1} 和 701 cm^{-1} 吸收峰强的明显下降,主要是残余漆层溶剂挥发所致。

表 7 除漆前及不同 η_y 下除漆后表面红外光谱分析结果

Table 7 Surface infrared spectroscopy analysis results before paint removal and after paint removal under different η_y

Wave number / cm^{-1}	Band assignment	Chemical compound
3362	OH	Acrylates
2925	CH ₂	Isocyanate
2855	CH ₂	Isocyanate
1725	C=O	Acrylates
1449	CH ₂	Acrylates
1163	C—O—C	Acrylates
1118	C—N	Isocyanate, associated urethane
1066	C—OH	Acrylates
1017	C—O—C	Acrylates
876	C—H	Xylene(solvent)
756	N—H	Associated urethane
701	C—H	Xylene (solvent)

3.4 除漆后表面 X 射线光电子能谱分析

复合漆层激光清洗前、后 X 射线光电子能谱如图 9 所示。可以看出, C 1s 光电子峰强随 η_y 向搭接率的升高而减弱, η_y 向搭接率小于 60% 时 O 1s 光电子峰强随 η_y 向搭接率的升高而增强。以上两种现象的主要原因是: 漆层气化后清洗表面金属氧化物沉积量不断增加, 残余底漆不断减少, 氧化膜显露面积不断增大, 导致 C 元素质量分数不断下降, O 元素质量分数不断上升。当 η_y 向搭接率等于 60% 时, SEM 和 EDS 结果显示铝合金基材发生了明显的熔融现象, 但由漆层气化后生成的 CO₂、脂类和醇类气体构成的贫氧环境不易使清洗表面熔池氧化, 且铝合金基材熔化将稀释清洗表面沉积氧化物和氧化膜, 因此最终引起了 O 1s 峰强下降。

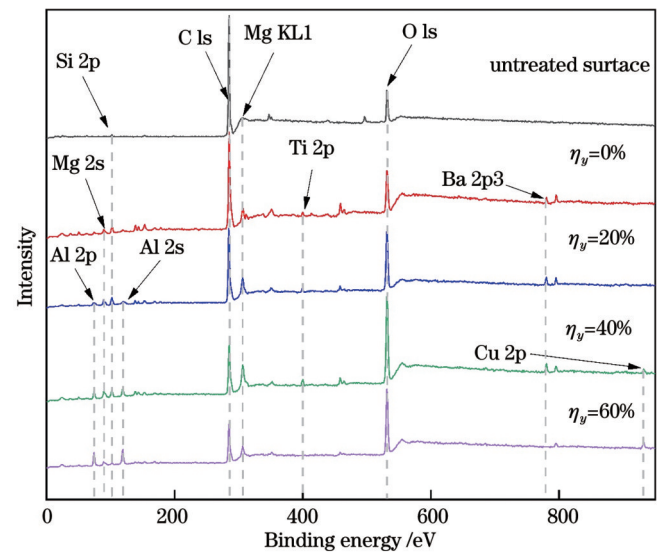


图 9 除漆前及不同 η_y 下除漆后表面 XPS 分析结果

Fig. 9 Surface XPS analysis results before paint removal and after paint removal under different η_y

从图 9 同时可以看出, 当 η_y 向搭接率等于 20% 时, 谱图中出现了 Al 2p 和 Al 2s 峰位信号, 且峰强随着 η_y 向搭接率的不断升高而增大。这主要是因为 η_y 向搭接率等于 20% 时氧化膜显露, 且随着 η_y 向搭接率的继续升高, 铝合金基材显露(40%)和烧损(60%), 最终清洗表面 Al 元素质量分数不断提高。由于 Cu 是铝合金基材的特征元素, 因此当 η_y 向搭接率等于 40% 和 60% 时, 谱图中出现的 Cu 2p 峰位信号, 也说明清洗表面已出现铝合金基材, 这与上文中 OM 和 EDS 分析结果一致。此外, 图 9 显示, 随着 η_y 向搭接率($\eta_y < 60%$)不断增大, Si 2p、Mg 2s、Mg KL1、Ti 2p 和 Ba 2p3 峰强不断提高, 主要是 η_y 向搭接率增加导致清洗表面漆层烧蚀气化逐渐加强, 促使清洗表面漆层氧化物粒子沉积量不断增多; 当 η_y 向搭接率等于 60% 时, Si 2p、Mg 2s、Mg KL1、Ti 2p 和 Ba 2p3 等峰强由强变弱, 主要是因为铝合金基材烧损形成的熔池稀释了氧化粒子。

为了进一步分析除漆表面主要成分, 图 10 给出了

除漆前与 y 向搭接率为 20% 时清洗表面 C、O 和 Al 元素的结合能谱, 表 8 列出了图 10 中亚峰代表的主要成分及其结合能等参数, 其中 n 表示高聚物的聚合度, i 表示与甲基相连的任意元素。结合图 10 和表 8 中 C 元素的变化可以看出, 除漆后清洗表面新增了石墨 C、C、 $[-CH_2CH(C(O)OCH_3)-]_n$ 、 $[-CH_2CH(C(O)OCH_2CH_3)-]_n$ 、 $[-CH_2CH(C(O)OCH_3)-]_n$ 、 $[-CH_2C(CH_3)(C(O)OCH_2CH_3)-]_n$ 、 $[-CH_2C(CH_3)(C(O)OC(CH_3)_3)-]_n$ 等物质。石墨 C 和 C 为漆层烧蚀气化后形成的典型烧蚀产物; $[-CH_2CH(C(O)OCH_3)-]_n$ 等高分子聚合物出现的原因主要为: 热影响下的残余漆层丙烯酸树脂链段 α 位和 β 位的 C—C、C—H 键断裂, 使氢自由基和甲基自由基等活性基团发生了位置置换和重排。激光清洗前后 O—C=O、O=C—N、C—N 并未发生改变, 说明热影响并未破坏残余漆层的氨基甲酸酯结构单元。此外, 相比除漆前, 除漆后残余漆层中少了 C_6H_6 , 这可能与芳烃溶剂 (二甲苯) 挥发和 β 铜酞菁减少有关。

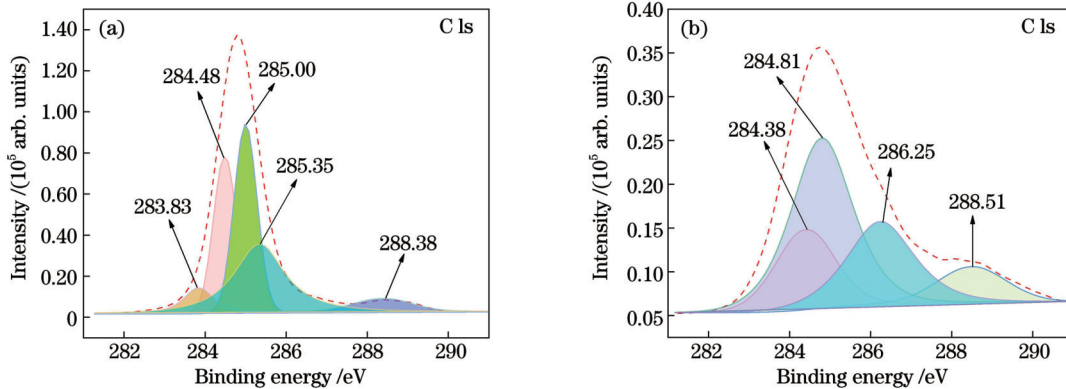


图 10 C 元素 XPS 结合能谱。(a) 除漆前; (b) $\eta_y=20\%$ 时除漆后

Fig. 10 C element XPS binding energy spectra. (a) Before paint removal; (b) after paint removal when $\eta_y=20\%$

表 8 除漆前及 $\eta_y=20\%$ 时除漆后 XPS C 1s 分峰结果及相对含量

Table 8 XPS C 1s peak decomposing results and relative contents before paint removal and after paint removal when $\eta_y=20\%$

Condition	Binding energy /eV	Composition	Spectral peak area ratio /%
Before paint removal	283.83	C—H, C—C	8.73
	284.48	$-CH_2-$, C—C, C_6H_6	26.12
	285.00	$(-CH_2C(CH_3)(C(O)OH)-)_n$, $(-CH_2C(CH_3)(C(O)OCH_3)-)_n$ $(-CH_2C(CH_3)(C(O)OCH_2CH_2OH)-)_n$	28.94
	285.35	$(-CH_2C(CH_3)(C(O)OCH_3)-)_n$	30.58
	288.38	O—C=O, O=C—N, C—N	5.63
After paint removal when $\eta_y=20\%$	284.38	$i-CH_3$, C—H, $-CH_2-$	22.74
	284.81	C graphite, C, C—C, C—H, $(-CH_2C(CH_3)(C(O)OH)-)_n$, $(-CH_2C(CH_3)(C(O)OCH_3)-)_n$, $(-CH_2CH(C(O)OCH_3)-)_n$	40.57
	286.25	$(-CH_2CH(C(O)OCH_2CH_3)-)_n$, $(-CH_2CH(C(O)OCH_3)-)_n$, $(-CH_2C(CH_3)(C(O)OCH_2CH_3)-)_n$	25.43
	288.51	$(-CH_2C(CH_3)(C(O)OCH_2CH_3)-)_n$, $(-CH_2C(CH_3)(C(O)OC(CH_3)_3)-)_n$	11.26

从激光除漆后 O 元素的成分变化 (图 11 和表 9) 来看, 清洗表面新增了 Al_2O_3 、 TiO_xS_b 、 $TiO_{1.65}$ 、 $SiO_2(Al_2O_3)_{0.22}$ 、 SiO_2/Si 、 $SiO_2(Al_2O_3)_{2.1}$ 和 $SiO_2(Al_2O_3)_{0.55}$ 等物质, 这一方面说明清洗表面氧化膜已经显露 (与上

文 SEM 和 EDS 检测结果一致); 另一方面则说明在漆层气化形成的贫氧环境中, 沉积功能性氧化粒子与氧化膜在高能激光作用下发生了一系列复杂的化学反应。

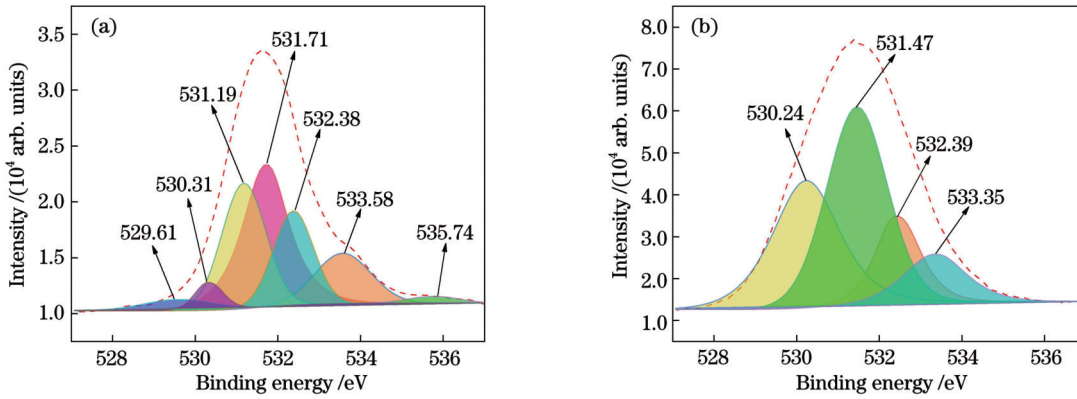


图 11 O 元素 XPS 结合能谱。(a)除漆前;(b) $\eta_y=20\%$ 时除漆后

Fig. 11 O element XPS binding energy spectra. (a) Before paint removal; (b) after paint removal when $\eta_y=20\%$

表 9 除漆前及 $\eta_y=20\%$ 时除漆后 XPS O 1s 分峰结果及相对含量

Table 9 XPS O 1s peak decomposing results and relative contents before paint removal and after paint removal when $\eta_y=20\%$

Condition	Binding energy /eV	Composition	Spectral peak area ratio /%
Before paint removal	529.61	TiO ₂ , MgO	4.73
	530.31	TiO ₂ , MgO, SiO ₂	7.98
	531.19	MgO, TiO ₂ , SiO ₂	7.02
	531.71	(-CH ₂ C(CH ₃)(C(O)OCH ₃)-) _n , C-O, -OH, BaSO ₄	33.70
	532.38	(-CH ₂ C(CH ₃)(C(O)OCH ₃)-) _n (-CH ₂ C(CH ₃)(C(O)OCH ₂ CH ₂ OH)-) _n (-CH ₂ C(CH ₃)(C(O)OH)-) _n	25.95
	533.58	-C=O, -COOC-, SiO ₂	19.20
	535.74	-C=O	1.42
After paint removal when $\eta_y=20\%$	530.24	TiO ₂ , MgO, SiO ₂ , Al ₂ O ₃	21.05
	531.47	TiO _{1.65} , Al ₂ O ₃ , SiO ₂ (Al ₂ O ₃) _{0.22} , C-O, -OH, TiO _n S _b (-CH ₂ C(CH ₃)(C(O)OCH ₃)-) _n (-CH ₂ C(CH ₃)(C(O)OCH ₂ CH(CH ₃) ₂)-) _n	42.15
	532.39	SiO ₂ /Si, SiO ₂ , SiO ₂ (Al ₂ O ₃) _{2.1} , BaSO ₄ , SiO ₂ (Al ₂ O ₃) _{0.55} (-CH ₂ CH(C(O)OCH ₃)-) _n , (-CH ₂ CH(C(O)OH)-) _n (-CH ₂ C(CH ₃)(C(O)OH)-) _n	21.06
	533.35	(-CH ₂ CH(C(O)OCH ₂ CH ₃)-) _n (-CH ₂ C(CH ₃)(C(O)OCH ₂ CH ₃)-) _n (-CH ₂ C(CH ₃)(C(O)OCH ₂ CH ₂ OH)-) _n	15.75

4 结 论

利用纳秒脉冲光纤激光清洗机,在四种不同 y 向搭接率 ($\eta_y=0\%, 20\%, 40\%, 60\%$) 工艺条件下,对铝合金表面由面漆、底漆和阳极氧化膜构成的复合漆层系统进行了激光除漆实验,通过多种表征技术手段研究了不同 η_y 对除漆效果的影响。研究发现,随着 η_y 逐步增加,漆层去除效果逐渐加强,当 $\eta_y=60\%$ 时,漆层和氧化膜完全消失,铝合金基材发生了严重的烧熔现象。在激光除漆过程中,主要存在烧蚀、等离子冲击和热应力作用三种除漆机制;烧蚀主要气化分解漆层,同

时致使面漆着色剂和漆层功能性氧化粒子脱漆沉积;等离子冲击和热应力作用主要对漆层产生物理破坏。除漆过程存在明显的烧蚀-等离子冲击(屏蔽)-烧蚀循环清洗的作用特点,随着 η_y 逐步增加,等离子屏蔽、冲击现象减弱,烧蚀气化特征逐渐加强。烧蚀和等离子冲击均会对除漆表面产生热影响,一方面耦合了热应力除漆机制,另一方面导致残余漆层丙烯酸树脂链段自由基发生位置置换和重排。

参 考 文 献

[1] 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.
- Zheng G. Study on laser paint stripping of aircraft surface[D]. Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [2] 王蔚, 李相锦, 刘伟军, 等. 激光清洗 7075 铝合金阳极氧化膜的工艺参数对表面质量的影响[J]. 中国激光, 2022, 49(16): 1602020.
- Wang W, Li X J, Liu W J, et al. Effect of laser cleaning process parameters on surface quality of 7075 aluminum alloy anodic oxidation film[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(16): 1602020.
- [3] 高辽远, 周建忠, 孙奇, 等. 激光清洗铝合金漆层的数值模拟与表面形貌[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0502002.
- Gao L Y, Zhou J Z, Sun Q, et al. Numerical simulation and surface morphology of laser-cleaned aluminum alloy paint layer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0502002.
- [4] 左洪福, 蔡景, 吴昊. 航空维修工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 15-28.
- Zuo H F, Cai J, Wu H. Aviation maintenance engineering[M]. Beijing: Science Press, 2011: 15-28.
- [5] 杨健. 空客 A320 系列飞机 C 检维修控制点分析[J]. 科技风, 2016(18): 6.
- Yang J. Analysis of C inspection and maintenance control points of airbus A320 series aircraft[J]. Technology Trend, 2016(18): 6.
- [6] 赵海朝, 乔玉林, 杜娟, 等. 脉冲激光清洗铝合金表面漆层的技术研究[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0602121.
- Zhao H C, Qiao Y L, Du X, et al. Research on paint removal technology for aluminum alloy using pulsed laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0602121.
- [7] 刘鹏飞. 基于脉冲激光清洗技术的飞机蒙皮除漆工艺及其表面完整性控制研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2020.
- Liu P F. Study on paint removal technology and surface integrity control of aircraft skin based on pulse laser cleaning technology[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2020.
- [8] 陈晓奎. 石化设备激光清洗工艺及应用研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2020.
- Chen X K. Study on technology and application of petrochemical equipment by laser cleaning[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020.
- [9] 陈一鸣, 周龙早, 闫飞, 等. 铝合金激光清洗机理与质量评估[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1202005.
- Chen Y M, Zhou L Z, Yan F, et al. Mechanism and quality evaluation of laser cleaning of aluminum alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1202005.
- [10] 张天刚, 黄嘉浩, 侯晓云, 等. 激光清洗铝合金表面复合漆层作用机制研究[J/OL]. 航空学报, 2022: 1-15[2022-10-16]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20220831.1749.018.html>.
- Zhang T G, Huang J H, Hou X Y, et al. Research on mechanism for composite paint layer on aluminum alloy surface cleaned by laser[J/OL]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022: 1-15 [2022-10-16]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20220831.1749.018.html>.
- [11] 孙浩然. 铝合金表面油漆涂层激光复合清洗工艺及去除机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- Sun H R. Research on technology and mechanism of laser composite cleaning paint coating from aluminum alloy surface[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [12] 王德良, 冯国英, 邓国亮, 等. 基于颗粒形貌及成分分析的激光除漆去除机理研究[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1003007.
- Wang D L, Feng G Y, Deng G L, et al. Study of mechanism on laser paint removal based on the morphology and element composition of ejected particle[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(10): 1003007.
- [13] 雷正龙, 孙浩然, 田泽, 等. 不同时间尺度的激光对铝合金表面油漆层清洗质量的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0602103.
- Lei Z L, Sun H R, Tian Z, et al. Effect of laser at different time scales on cleaning quality of paint on Al alloy surfaces[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0602103.
- [14] Ansari I A, Watkins K G, Sharp M C, et al. Modification of anodised aluminium surfaces using a picosecond fibre laser for printing applications[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2012, 12(6): 4946-4950.
- [15] Roberts D E. Pulsed laser coating removal by detachment and ejection[J]. Applied Physics A, 2004, 79(4/5/6): 1067-1070.
- [16] Patermarakis G, Karayannis H S. The mechanism of growth of porous anodic Al_2O_3 films on aluminium at high film thicknesses[J]. Electrochimica Acta, 1995, 40(16): 2647-2656.
- [17] 廖大松, 汪倩, 王非森, 等. 纳秒脉冲激光清洗扫描速度对 TC4 钛合金表面氧化膜清洗质量的影响[J]. 中国激光, 2023, 50(4): 0402020.
- Liao D S, Wang Q, Wang F S, et al. Effect of nanosecond pulsed laser cleaning scanning speed on cleaning quality of oxide films on TC4 titanium alloy surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(4): 0402020.
- [18] 张长生, 王建华, 石耀刚, 等. 聚氨酯耐热降解性能的研究进展[J]. 合成材料老化与应用, 2005, 34(2): 28-32.
- Zhang C S, Wang J H, Shi Y G, et al. Research advance in thermal-degradation resistance of polyurethanes[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2005, 34(2): 28-32.
- [19] 于富强. 铜酞菁的溶解性调控与应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- Yu F Q. Study on the solubility control and application of copper phthalocyanine[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [20] Dhiman R, Chandra S. Freezing-induced splashing during impact of molten metal droplets with high Weber numbers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(25/26): 5625-5638.
- [21] 杨文锋, 林德惠, 钟勉, 等. 激光单脉冲作用下的漆层凹坑形貌模拟研究[J]. 中国激光, 2023, 50(4): 0402016.
- Yang W F, Lin D H, Zhong M, et al. Simulation of crater morphology of paint at laser single pulse[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(4): 0402016.
- [22] Passauer L. A case study on the thermal degradation of an acrylate-type polyurethane wood coating using thermogravimetry coupled with evolved gas analysis[J]. Progress in Organic Coatings, 2021, 157: 106331.
- [23] Jiao L L, Xiao H H, Wang Q S. Thermal degradation characteristics of rigid polyurethane foam and the volatile products analysis with TG-FTIR-MS[J]. Polymer Degradation and Stability, 2013, 98(12): 2687-2696.
- [24] 栾世梁, 张帅, 任科, 等. 多组元 BaO—SrO—CaO—MgO— Al_2O_3 — SiO_2 环境障涂层的制备与抗 CaO—MgO— Al_2O_3 — $2SiO_2$ 腐蚀性能[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(6): 1456-1462.
- Luan S L, Zhang S, Ren K, et al. Fabrication and CaO—MgO— Al_2O_3 — SiO_2 corrosion resistance of multi-component BaO—SrO—CaO—MgO— Al_2O_3 — $2SiO_2$ environmental barrier coatings[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2022, 50(6): 1456-1462.
- [25] 佟艳群, 陆勤慧, 周建忠, 等. 铝合金焊前激光清洗的等离子体光谱在线检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(1): 255-260.
- Tong Y Q, Lu Q H, Zhou J Z, et al. On-line plasma spectrum detection of laser cleaning of aluminum alloy before welding[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(1): 255-260.
- [26] 吴先前, 段祝平, 黄晨光, 等. 激光冲击强化过程中蒸气等离子体压力计算的耦合模型[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(1): 1-7.
- Wu X Q, Duan Z P, Huang C G, et al. A coupling model for computing plasma pressure induced by laser shock peening[J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(1): 1-7.

Effect of *y*-direction Overlap Rate on Laser Cleaning of Composite Paint Layer on Aluminum Alloy Surface

Zhang Tiangang, Duan Junjie, Liu Tianxiang, Hou Xiaoyun, Zhang Zhiqiang*
School of Aviation Engineering, China Civil Aviation University, Tianjin 300300, China

Abstract

Objective The service environment of composite paint layer on civil aircraft skin is severe, making local and overall paint removal become necessary steps for routine maintenance of civil aircraft. Currently, manual grinding and chemical stripping are main technical means for paint removal of civil aircraft. Manual grinding is inefficient and easy to damage aircraft skin. Although chemical stripping has higher efficiency, the serious waste pollution can not meet increasingly stringent environmental protection requirements. Therefore, laser cleaning technology with low cost, high efficiency and minimal pollution has entered vision fields of researchers. However, the interaction and coupling effects among ablation, plasma shock (shielding), and thermal stress mechanisms during the cleaning have not been deeply understood at present. In this paper, effects of different laser overlap rates in *y* direction on cleaning quality are investigated using high-repetition-rate pulsed fiber laser cleaning system. By analyzing macro-micro morphological characteristics and composition changes of cleaned surface, mutual effect and coupling behaviors of different paint removal mechanisms and thermal degradation principle of residual paint layer are elucidated. We hope that the above researches can provide theoretical and experimental support for industrial application of laser-cleaned aluminum alloy composite paint layer.

Methods In this paper, the laser cleaning experiment of composite paint layers of 2A12 aircraft aluminum alloy is performed using the high-repetition-rate pulsed fiber laser complete processing equipment under process conditions of four different laser overlap rates in *y* direction ($\eta_y=0\%$, 20% , 40% , 60%). Firstly, optical microscope (OM) is used to observe the states of cleaned surfaces and sections. Then, morphological characteristics of macro- and micro-structures as well as compositions and element contents on cleaned surface are further investigated by scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive spectrometer (EDS). Furthermore, Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) is adopted to study the change of functional groups in acrylic-polyurethane composite paint layer. At last, the composition change and content of cleaned surface are analyzed by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS).

Results and Discussions Laser cleaning experiments are carried out with *y*-direction overlap rates as variables, in which composite paint layer systems exhibit various removal degrees. Overall, with the *y*-direction overlap rate increases, effects of laser plasma shock and shielding are weakened and the ablation and gasification of composite paint layer are strengthened (Figs.4 and 6). Obviously, there are ablation-plasma shock and shielding-ablation circular paint removal mechanisms during the cleaning process [Figs.6(a) and (b)]. Main components of the crater surface formed by ablation include thermal degradation product of paint layer, ash, fixed carbon, topcoat colorants, and functional oxide particles (Fig.7). By analyzing the action characteristics of different paint removal mechanisms, it is found that the residual paint layer appears delamination and fragmentation, which is mainly caused by plasma shock and thermal stress [Figs.6(a)-(d)]. The changes of functional groups and components in residual paint layer show that the free radicals in acrylic resin chain segments are replaced and rearranged (Fig.8 and Table 8), which is due to the thermal effect of ablation and plasma shock.

Conclusions Laser paint removal experiments on 2A12 aluminum alloy surfaces are performed under different laser overlap rates in *y* direction. Results demonstrate that the topcoat is removed completely and the primer is removed partially when the overlap rate is 20% ; the residual primer exists barely with the destroyed oxide film and exposed aluminum alloy substrate when the overlap rate is 40% ; the paint layer is completely removed and the substrate is damaged when the overlap rate is 60% . The research shows that there are three paint removal mechanisms of ablation, plasma shock (shielding), and thermal stress during the paint removal, in which the ablation leads to the stripping and deposition of the β -type copper phthalocyanine in primer and functional oxidation particles in composite paint layer and plasma and thermal stress cause physical damage of the paint layer. The appearance of crater-spacing-crater cleaning feature on cleaned surface demonstrates that the paint removal mechanisms of ablation and plasma shock (shielding) occur alternatively. At the same time, the heat affected zone forms on the surface of residual paint layer, which induces thermal stress paint removal during the cleaning. The thermal degradation mechanism is revealed by analyzing the changes of functional groups and components in residual paint layer.

Key words laser technique; laser cleaning; aluminum alloy; composite paint layer; *y*-direction overlap rate; paint removal mechanism