

## 民机铝合金蒙皮表面漆层激光清洗仿真与实验研究

张天刚<sup>1</sup>, 李昱<sup>1</sup>, 邹俊豪<sup>1</sup>, 张志强<sup>1\*</sup>, 刘亚楠<sup>2</sup><sup>1</sup>中国民航大学航空工程学院, 天津 300300;<sup>2</sup>哈尔滨工业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

**摘要** 为了进一步阐明铝合金表面丙烯酸聚氨酯漆层的激光清洗机制,揭示扫描速度对激光除漆的影响规律,首先采用万能试验机测定了漆层强度极限,结合多种技术手段分析研究了单脉冲热-力耦合 COMSOL 仿真与清洗实验结果,探究了四种扫描速度(1000、900、800、700 mm/s)下除漆表面宏微观形貌及成分变化。结果显示:单脉冲除漆凹坑内存在明显分层与碎裂,除漆最大深度和宽度分别为 34.3  $\mu\text{m}$  和 125  $\mu\text{m}$ ;漆层强度极限为  $2.68 \times 10^7$  Pa,与热应力仿真结果接近;随着扫描速度逐步降低,漆层去除深度不断增大,氧化膜逐步显现,面漆着色剂( $\beta$ 型铜酞菁)与漆层功能性氧化粒子的沉积量逐渐增加。研究表明:单脉冲激光除漆过程主要包括烧蚀、热应力和等离子体冲击三种除漆机制;随着扫描速度的逐渐降低,烧蚀除漆效果逐渐增强,等离子体冲击除漆效果逐步减弱,热应力除漆效果保持不变。

**关键词** 激光技术; 激光清洗; 铝合金; 丙烯酸聚氨酯漆层; 扫描速度; 除漆机制

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL231079

## 1 引言

丙烯酸聚氨酯漆因其良好的耐候性和耐腐蚀性<sup>[1]</sup>,常被喷制于民机铝合金蒙皮表面以起到改善气动性能、防腐及美观等功效<sup>[2]</sup>。但民机服役环境苛刻,其蒙皮表面漆层极易出现剥落、开裂、分层和粉化等各类失效问题<sup>[3]</sup>,从而引发民机飞行安全隐患,因此蒙皮表面漆层局部或整体的去除翻新被列入了民机机务维修的 C 检和 D 检环节<sup>[4]</sup>。目前,民机蒙皮表面传统除漆方法主要包括手工机械打磨和化学溶剂褪漆两种方式<sup>[5]</sup>,结合目前民航一线维修现状来看,手工除漆精度差、易损伤蒙皮,化学褪漆操作步骤繁复、环境污染严重,已经严重制约了行业的绿色、高效、科学发展,亟需一种精度高、污染小且易于智能控制的新型可替代技术来突破传统除漆技术的瓶颈。

激光清洗作为一种非接触、无污染、精度高的新型表面加工技术,广泛应用于航空航天<sup>[6-8]</sup>等行业。激光除漆作为激光清洗的一个重要亚分支,具有独特的多机制耦合除漆特性,因此受到了国内外专家学者的一致青睐。目前,激光除漆研究主要集中于工艺方案优化、清洗效果评估和机理机制探究等多个方面。Zhao 等<sup>[9]</sup>分别研究了能量密度、扫描速度以及频率对激光除漆的影响规律,设计了最优除漆工艺。Shamsujjoha 等<sup>[10]</sup>采用固体激光器对高强度造船钢表面环氧树脂漆

层进行了激光清洗实验,结果表明,在漆层完全去除的前提下,基材的力学性能未受影响。Sun 等<sup>[11]</sup>研究发现,在激光除漆过程中存在烧蚀、热应力以及等离子体冲击等多种除漆机制。此外,不同类型激光器对除漆效果的影响也是近年来重点研究方向之一。Jasim 等<sup>[12]</sup>认为,在相同激光工艺参数条件下,CO<sub>2</sub>激光器的除漆效率高于光纤激光器。

在上述研究工作中,基于实验工艺优化探究除漆机理机制是一个重要的研究分支。杨文锋等<sup>[13]</sup>研究了能量密度对单脉冲激光除漆的影响,结果表明,等离子体冲击和热辐射为主要除漆机制,但未就热应力除漆行为展开研究。张天刚等<sup>[14]</sup>研究了 Y 向搭接率对激光除漆的影响规律,证明在激光除漆过程中,存在烧蚀、热应力和等离子体冲击三种除漆机制的交互作用。秦哲等<sup>[15]</sup>认为,烧蚀和热应力振动是激光除漆的主要作用机制。Kittiboonanan 等<sup>[16-17]</sup>认为,热应力是除热烧蚀外主要的激光除漆作用机制,但未就等离子体冲击除漆展开深入探究。不难看出,国内外学者并未就激光除漆过程中的漆层去除机制形成统一观点,关于单脉冲热应力除漆量化行为和等离子体冲击除漆特点也缺少深入研究。

综上所述,本文以 LY12 硬质铝合金表面的丙烯酸聚氨酯漆层为研究对象,通过热失重与应力-应变实验测定了漆层气化点和强度极限,建立了

收稿日期: 2023-08-01; 修回日期: 2023-09-05; 录用日期: 2023-10-11; 网络首发日期: 2023-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(U2033211)、中国民航大学研究生科研创新项目(2022YJS033)

通信作者: \*zqzhang@cauc.edu.com

COMSOL 单脉冲激光烧蚀-应力除漆瞬态模型,采用纳秒脉冲激光器分别进行了单脉冲和四种扫描速度条件下的多道面扫描激光除漆实验,使用光学显微镜(OM)、白光干涉仪(WLI)、电子扫描显微镜(SEM)和 X 射线能谱仪(EDS)对除漆表面的宏微观组织以及成分变化进行表征,分析研究了单脉冲激光除漆过程中的热应力除漆行为,揭示了不同扫描速度对激光除漆效果的影响规律,阐明了除漆机制,旨在为我国机蒙皮激光除漆技术的应用与推广提供一定的实

验和理论参考。

## 2 实验材料与方案

### 2.1 实验材料

实验用加工漆层系统由基材、氧化膜、底漆与面漆组成,如图 1 所示。基材为航空用铝合金,牌号为 LY12<sup>[18]</sup>,厂家提供的成分如表 1 所示。基材表面氧化膜由铝合金通过硫酸阳极氧化法生成,厚度( $H$ )约为 10  $\mu\text{m}$ ,EDS 检测结果如表 2 所示。

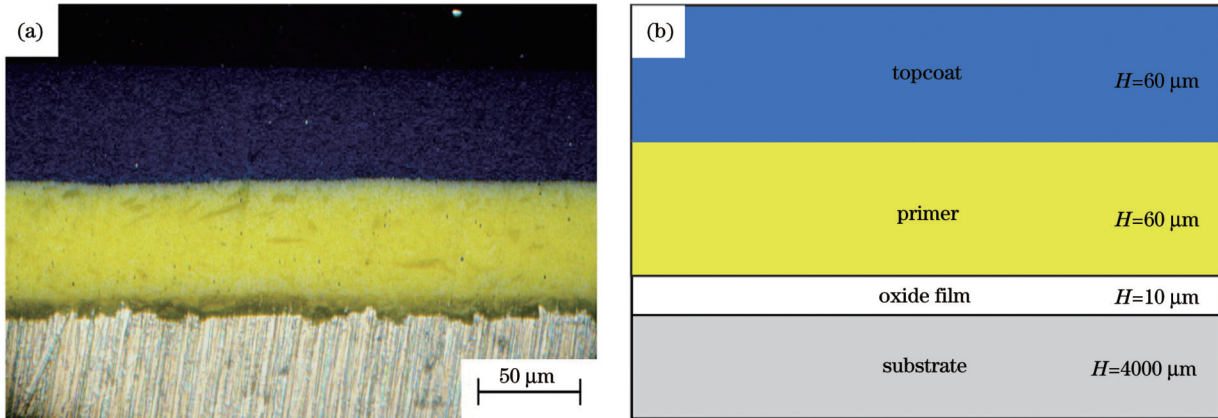


图 1 复合漆层截面 OM 形貌图及示意图。(a)OM 形貌;(b)示意图

Fig. 1 Cross-section OM topography and diagram of composite paint layer. (a) OM topography; (b) diagram

表 1 LY12 铝合金的化学成分

Table 1 Chemical compositions of LY12 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.

表 2 氧化膜的 EDS 结果

Table 2 EDS results of oxide films

Element	C	O	Al	Si
Atomic fraction / %	17.23	53.18	25.22	4.37

氧化膜表面底漆、面漆使用的是天津灯塔涂料公司生产的双组分丙烯酸聚氨酯漆,漆层总厚度为 120  $\mu\text{m}$ ,其中面漆与底漆的厚度均为 60  $\mu\text{m}$  左右,面漆(蓝色)与底漆(黄色)的成分如表 3 所示,EDS 检测结果如表 4 所示。

表 3 双组分丙烯酸聚氨酯漆的主要成分

Table 3 Main components of two-component acrylic polyurethane paint

Component	Topcoat	Primer
First component	Hydroxy acrylic resin	Acrylic resin
Second component	Hexamethylene diisocyanate biuret	Polyisocyanate

表 4 面漆与底漆的 EDS 结果

Table 4 EDS results of primer and topcoat

Sample	Atomic fraction / %					
	C	O	Ti	Si	Mg	Pt
Topcoat	78.42	20.32	0.23	0.29	0.15	0.59
Primer	78.36	20.35	0.26	0.31	0.12	0.60

从表 4 可以看出,底漆、面漆的主要成分、比例基本相同,经过与厂家确认,漆层中会加入微量 MgO、

SiO<sub>2</sub> 和 TiO<sub>2</sub> 等功能性氧化粒子以增强漆层耐光、耐热和防腐等性能。

### 2.2 实验方案

实验用激光除漆系统的工作原理如图 2 所示,其中纳秒脉冲光纤激光器的波长为 1064 nm,频率可调范围为 1~4000 kHz,脉冲宽度可调范围为 2~500 ns,光斑直径可调范围为 10~5000  $\mu\text{m}$ 。

实验分为单脉冲与多脉冲面扫描激光除漆两部分。图 3 为激光加工路径示意图,其中图 3(a)为单脉

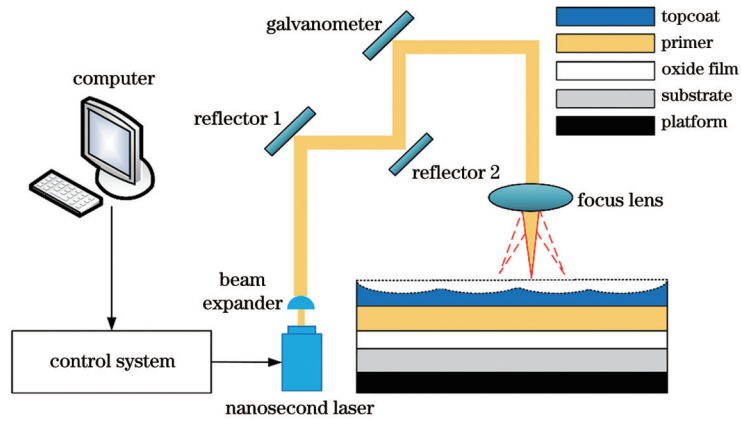


图 2 激光除漆系统的工作原理图

Fig. 2 Working principle of laser paint removal system

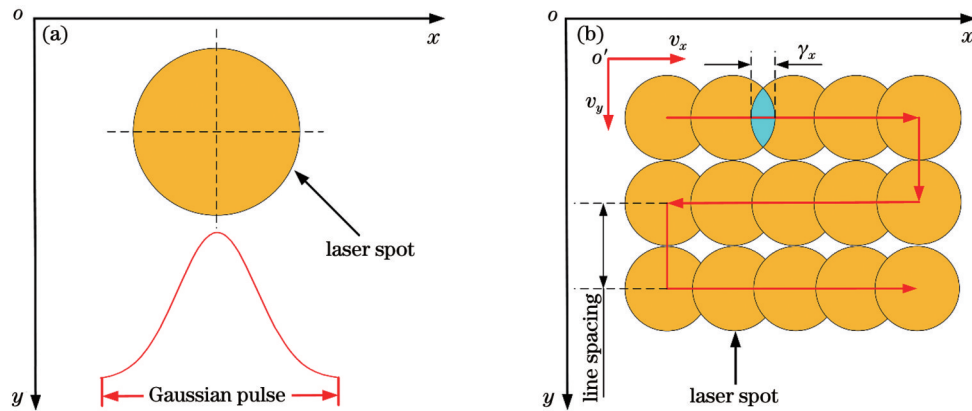


图 3 激光加工示意图。(a)单脉冲除漆光斑；(b)多脉冲面扫描除漆路径

Fig. 3 Schematics of laser processing. (a) Spot for single-pulse paint removal; (b) paint removal path by multi-pulse surface scanning  
 冲除漆光斑,图 3(b)为多脉冲面扫描除漆路径,其中  $v_x$  和  $v_y$  分别为  $x$  和  $y$  方向的扫描速度,  $\gamma_x$  为  $x$  方向的搭 接率。经过前期探索性实验,最终确定的激光除漆工 艺参数如表 5 和表 6 所示。

表 5 复合漆层系统单脉冲激光除漆实验工艺参数

Table 5 Process parameters of single-pulse laser paint removal experiment for composite paint layer system

Parameter	Value
Average power ( $P$ ) /W	100
Pulse width ( $\tau$ ) /ns	200
Repetition frequency ( $f$ ) /kHz	10
Spot diameter ( $D$ ) / $\mu\text{m}$	50

表 6 复合漆层系统多脉冲面扫描激光除漆实验工艺参数

Table 6 Process parameters of multi-pulse surface scanning laser paint removal experiment for composite paint layer system

Parameter	Value
Average power ( $P$ ) /W	100
Pulse width ( $\tau$ ) /ns	200
Repetition frequency ( $f$ ) /kHz	10
Spot diameter ( $D$ ) / $\mu\text{m}$	50
Scanning speed ( $v$ ) /( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	1000, 900, 800, 700
Line spacing ( $\gamma$ ) / $\mu\text{m}$	0

### 2.3 检测设备

本研究涉及的主要检测设备包括：热失重仪 (TGA)、万能试验机 (UTM)、光学显微镜、白光干涉

仪、扫描电子显微镜与 X 射线能谱仪,设备的检测表征内容如表 7 所示。

表 7 检测内容与表征设备

Table 7 Detection contents and characterization devices

Content	Equipment
Gasification point of paint layer	Thermal gravimetric analyzer (TGA)
Strength limit of paint layer	Universal testing machine (UTM)
Surface and cross-section appearances before and after paint removal	Optical microscope(OM) White light interferometer (WLI)
Microstructure of surface after paint removal	Scanning electron microscope (SEM)
Composition of surface after paint removal	Energy dispersive spectroscopy (EDS)

## 3 单脉冲激光除漆分析研究

### 3.1 漆层气化点测定

实验用双组分丙烯酸聚氨酯面漆的热失重实验结果如图 4 所示,可以看出,当加热温度由 500 K 继续上升时,质量损失率 (TG) 开始下降,质量损失速度 (DTG) 绝对值开始增加,表明漆层质量开始减少,说明漆层气化点 ( $T_d$ ) 为 500 K。采用相同实验对本研究使用的丙烯酸聚氨酯底漆进行了气化点测定,结果与面漆相同。

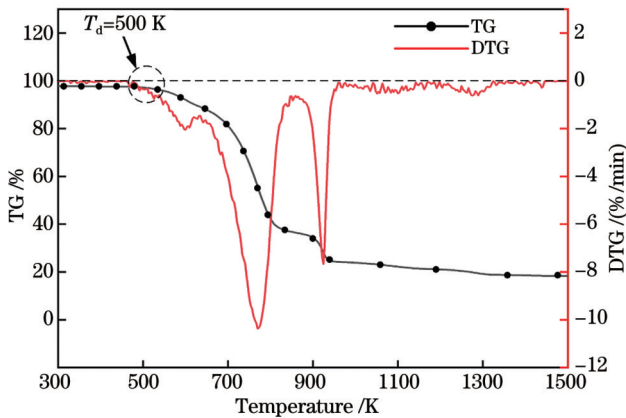


图 4 面漆热失重实验结果

Fig. 4 Thermal weight loss experiment result of topcoat

### 3.2 单脉冲激光除漆仿真分析

采用 COMSOL6.0 对单脉冲激光烧蚀-热应力除漆过程进行仿真,使用高斯热源对实际激光热源进行等效处理,高斯热源项 ( $Q_s$ ) 表达式<sup>[19]</sup>为

$$Q_s = 2 \times (1 - R) \times I_p \exp\left(-\frac{2r^2}{D_s^2}\right) \times T_p(t), \quad (1)$$

式中:  $R$  为反射系数;  $I_p$  为激光功率密度;  $r$  为光斑位置坐标;  $D_s$  为光斑位置坐标;  $T_p(t)$  为时间脉冲序列, 表达式<sup>[19]</sup>为

$$T_p(t) = (t - 2\tau) \exp\left(-\frac{2t^2}{\tau^2}\right), \quad (2)$$

式中:  $t$  为时间。

$I_p$  的表达式<sup>[11]</sup>为

$$I_p = \frac{P}{\pi \cdot r_0^2 \cdot f}, \quad (3)$$

式中:  $r_0$  为激光光斑半径。

由于底漆与面漆的成分和热物性能参数基本一致<sup>[20]</sup>,因此在烧蚀除漆建模过程中不再进行分层处理,建立的单脉冲激光除漆有限元网格模型如图 5 所示,漆层的热物性能参数如表 8 所示<sup>[21]</sup>。

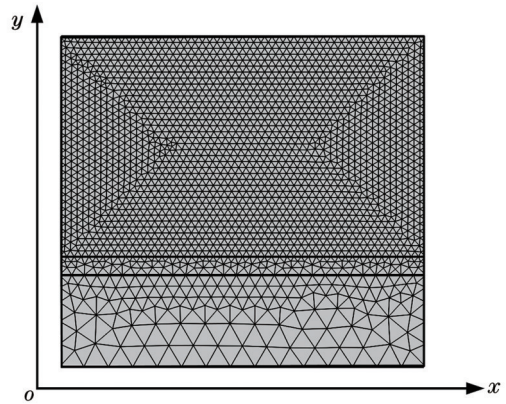


图 5 单脉冲激光除漆有限元网格模型

Fig. 5 Finite element mesh model for single pulse laser paint removal

表 8 漆层热物性能参数

Table 8 Thermophysical property parameters of paint layer

Parameter	Value
Density ( $\rho$ ) / (kg·m <sup>-3</sup> )	1450
Specific heat ( $C_p$ ) / [J·(kg·K) <sup>-1</sup> ]	2500
Thermal conductivity ( $k$ ) / [W·(m·K) <sup>-1</sup> ]	0.3
Absorption coefficient ( $A$ )	0.8
Young modulus ( $E$ ) / Pa	1 × 10 <sup>10</sup>
Thermal expansion coefficient ( $\alpha$ ) / K <sup>-1</sup>	6 × 10 <sup>-6</sup>
Poisson ratio ( $\mu$ )	0.17

模型顶部添加高斯热源,上边界与两侧边界设置为空气与材料对流换热,热传导方程为

$$Q_0 = h(T_{\text{ext}} - T), \quad (4)$$

式中: $Q_0$ 为对流热流量; $h$ 为材料表面对流换热系数; $T_{\text{ext}}$ 为外部环境温度; $T$ 为材料表面温度。材料内部的热量传递遵循傅里叶定律与能量守恒定律,其热传导方程<sup>[22]</sup>为

$$k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q(x, y, t) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (5)$$

式中: $Q$ 为材料吸收的热量。漆层吸收激光能量升温后,内部产生的热应力<sup>[23]</sup>为

$$\sigma = E\alpha(T - T_{\text{ext}}). \quad (6)$$

由于实际激光除漆过程受激光器效率、光斑能量分布以及材料热物性能参数等诸多因素的影响,故为了简化计算,对模型作出以下假设:

- 1) 激光输入能量不发生衰减且分布严格遵循理想的高斯热源模型;
- 2) 不考虑基材底部边界与外界的能量交换;
- 3) 忽略材料各表面上热辐射导致的能量损失;
- 4) 材料各组成部分为均质体,各向同性且热物性参数不随时间、温度变化。

图 6 为  $t=200$  ns 时(激光辐照结束)除漆表面的温度场分布云图,可以看出,此时漆层表面中心区域

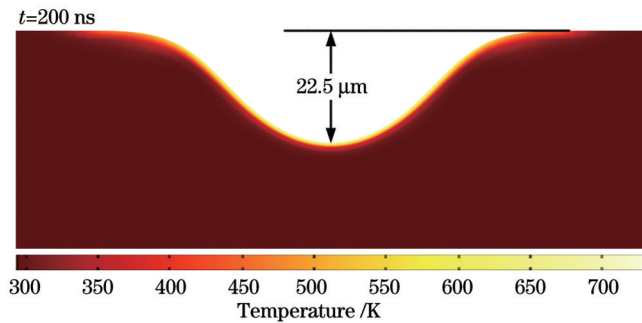


图 6  $t=200$  ns 时除漆表面温度场云图

Fig. 6 Temperature field cloud map of paint removal surface at  $t=200$  ns

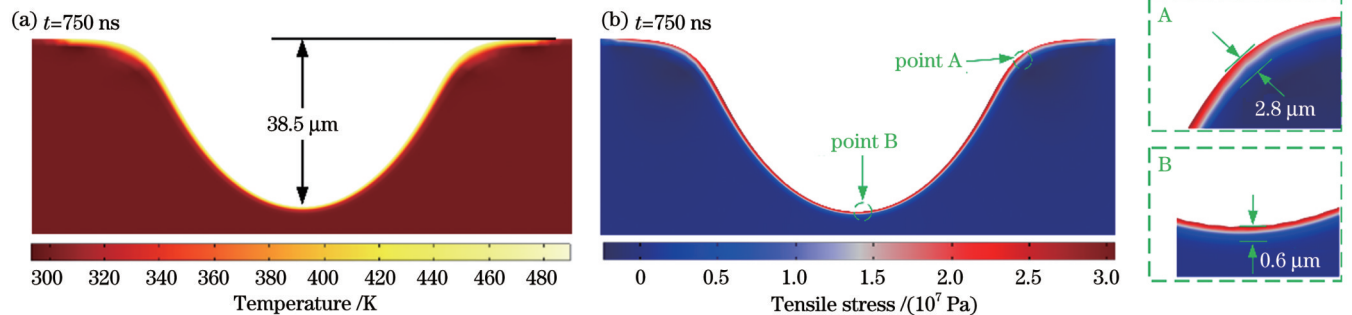


图 8  $t=750$  ns 时除漆表面的温度场、热应力场云图。(a)温度场云图;(b)热应力场云图

Fig. 8 Temperature and thermal stress field cloud maps for paint removal surface at  $t=750$  ns. (a) Temperature field cloud map; (b) thermal stress field cloud map

的最高温度为 728 K(对应的烧蚀深度为 22.5  $\mu\text{m}$ ),仍超过漆层气化点,表明激光烧蚀行为并未随激光辐照结束而终止。上述原因可以结合图 7 进行说明:由于丙烯酸聚氨酯漆的热导率较低<sup>[24]</sup>,除漆表面积热无法及时向下传递,温度进一步升高,当  $t=300$  ns 时,除漆表面温度达到最大值(900 K),此后开始下降;直至  $t=750$  ns 时,除漆表面温度降至漆层气化点,烧蚀除漆行为终止。

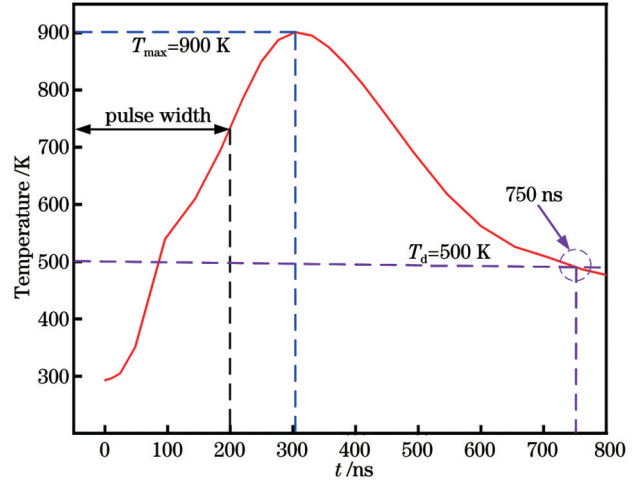


图 7 除漆表面的温度变化

Fig. 7 Temperature change of paint removal surface

图 8 为烧蚀行为终止时( $t=750$  ns)除漆表面的温度场、热应力场分布云图。从图 8(a)可以看出,此时对应的除漆凹坑深度为 38.5  $\mu\text{m}$ 。图 8(b)为通过温度场[图 8(a)]耦合得到的热应力场云图,其中除漆凹坑底部(B点)的热应力值最大(最大热应力  $\sigma_{\text{max}}=2.7 \times 10^7$  Pa,深度  $h=0.6$   $\mu\text{m}$ ),底部向上接近凹坑顶部侧壁处(A点)的热应力作用深度最大(热应力  $\sigma=2 \times 10^7$  Pa,最大深度  $h_{\text{max}}=2.8$   $\mu\text{m}$ )。图 9 为烧蚀行为终止时除漆表面的热应力大小与作用深度的变化规律,其中  $\sigma_{\text{min}}$ 为最小热应力, $h_{\text{min}}$ 为最小深度。可以看出,热应力数值由 B 点沿凹坑斜面向 A 点方向逐步降低,作用深度由 B 点向 A 点方向逐步增大。

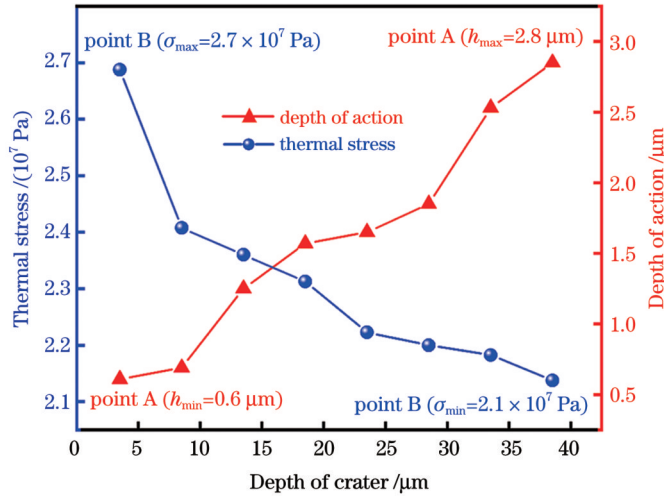


图 9  $t=750 \text{ ns}$  时除漆表面的热应力与作用深度

Fig. 9 Thermal stress and depth of action of paint removal surface at  $t=750 \text{ ns}$

3.3 激光除漆仿真、实验结果的对比分析

为了验证单脉冲激光烧蚀除漆结束后,温度场耦合生成的热应力对残余漆层的去除效果,需要对

丙烯酸聚氨酯漆进行应力-应变实验,图 10 展示了万能试验机及对应的漆层实验样品,实验参数如表 9 所示。

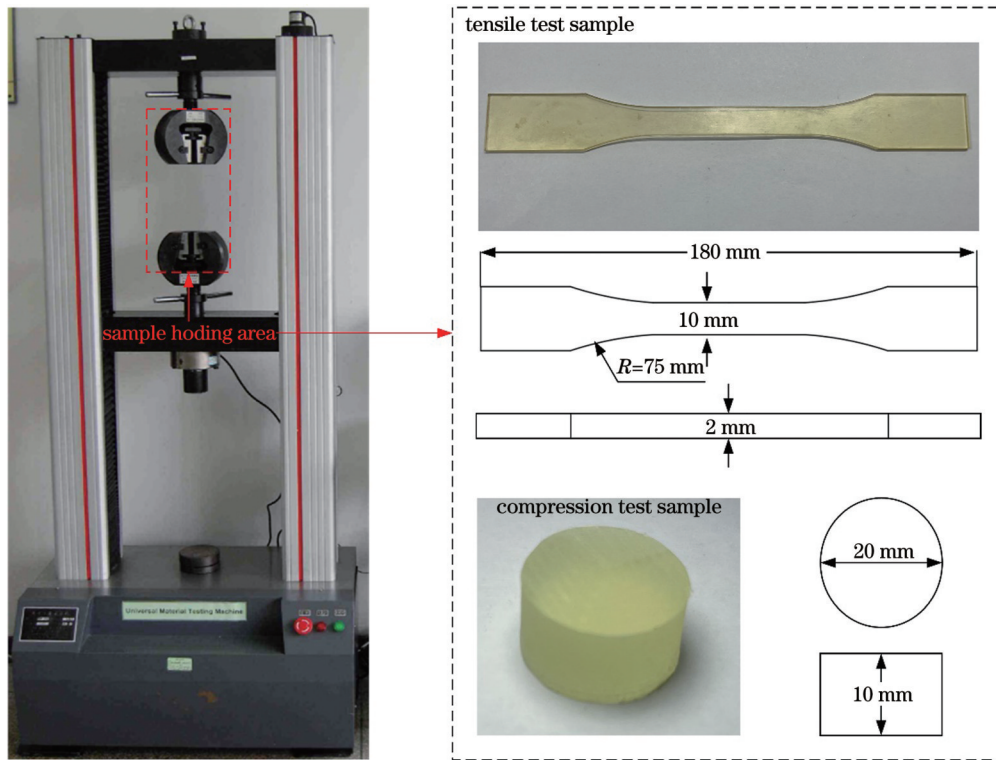


图 10 实验设备及试件

Fig. 10 Experimental equipment and specimens

表 9 应力-应变实验参数

Table 9 Stress-strain experimental parameters

Parameter	Value
Tensile and compressive speed / $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	10
Experimental temperature / $^{\circ}\text{C}$	22

图 11 为丙烯酸聚氨酯漆的应力-应变实验结果。图 11(a)为材料拉伸应力-应变实验结果,可以看出,随

着拉伸应力不断增加,材料出现了拉伸变形,当实验拉应力超过 322.72 N 时,已无法检测到应力-应变数据,

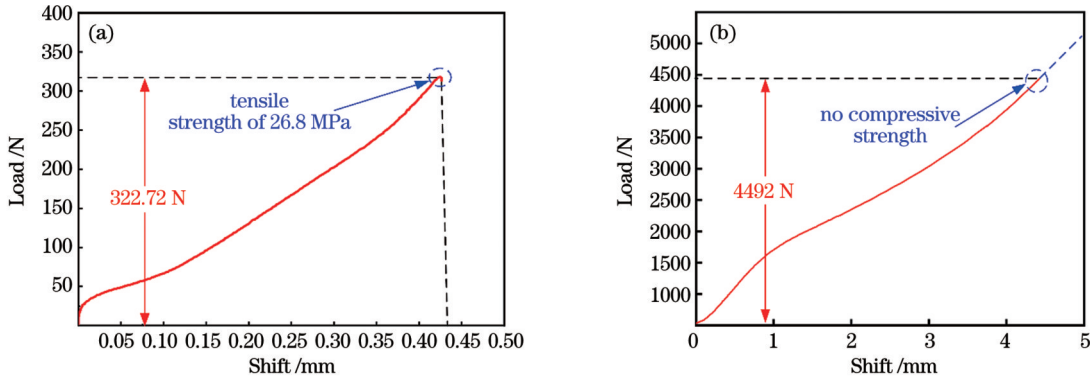


图 11 丙烯酸聚氨酯漆的应力-应变实验结果。(a)拉伸实验曲线;(b)压缩实验曲线

Fig. 11 Stress-strain test results of acrylic polyurethane paint. (a) Tensile test curve; (b) compression test curve

说明此时漆层已经发生断裂失效,即最大拉应力为 322.72 N,试验机此时给出的拉伸强度极限为  $2.68 \times 10^7$  Pa,对应的拉伸变形量仅为 0.43 mm。图 11(b)为压缩实验测试结果,可以发现,当实验压力为 4492 N (约为拉力的 14 倍)时,漆层样品仍未出现压溃现象,由此可以判断,丙烯酸聚氨酯漆层具备脆性材料特征<sup>[25]</sup>,断裂、崩损、分层和剥落是其常见的失效形式<sup>[26]</sup>。

结合图 11 和图 8 可以看出,温度场耦合产生的最大热应力略大于丙烯酸聚氨酯漆层的拉伸极限,说明热应力能够使烧蚀表面的残余漆层产生剥落、分层和开裂现象。因此,图 12 给出了烧蚀凹坑表面的热应力作用区域,可以看出,烧蚀行为结束后残余漆层表面将形成一个深度为  $0.6 \sim 2.8 \mu\text{m}$  的 U 形应力破坏层。

图 13 为单脉冲激光除漆凹坑表面的 SEM 形貌及截面轮廓对比结果。从图 13(a)可以看出,实验中单脉冲激光除漆凹坑表面存在明显的分层与碎裂现象,与图 12 的仿真预测分析结果一致。从图 13(b)可以看

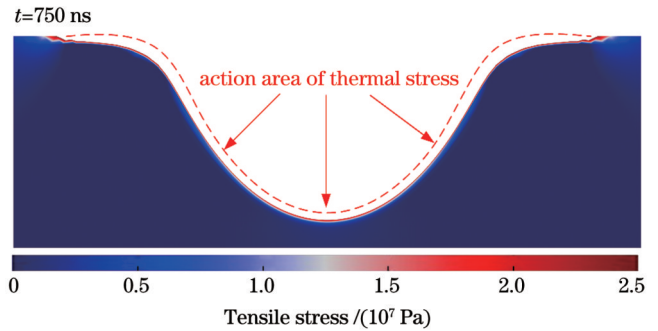


图 12 烧蚀凹坑表面热应力的作用区域示意图

Fig. 12 Schematic of action area of thermal stress on surface of ablation pit

出,实验中除漆凹坑的深度明显低于模拟结果,凹坑宽度相比模拟结果存在两个变化阶段:第一阶段,当实验除漆深度小于  $25 \mu\text{m}$  时,凹坑宽度明显大于模拟结果;第二阶段,当实验除漆深度到达  $25 \mu\text{m}$  时,凹坑宽度值突然变小,与模拟结果一致,并随着除漆深度的增大而继续减小。

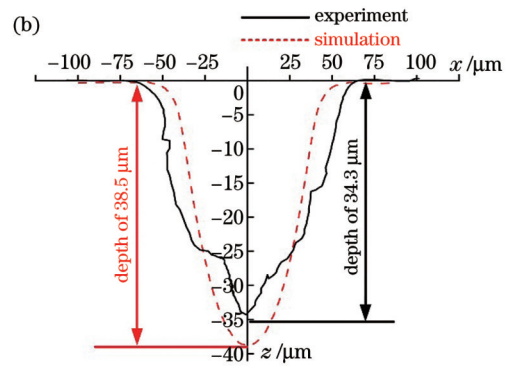
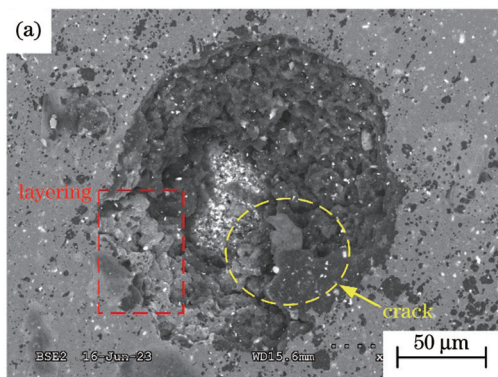


图 13 单脉冲激光除漆凹坑表面的 SEM 形貌及截面轮廓对比结果。(a)凹坑表面的 SEM 形貌;(b)截面轮廓对比结果

Fig. 13 Comparison result of cross-section profile and SEM morphology of single-pulse laser paint removal crater surface. (a) SEM morphology of crater surface; (b) comparison result of cross-section profile

### 3.4 单脉冲激光除漆机理、机制分析

实验除漆凹坑深度低于模拟值、宽度存在阶段变化的具体原因要结合激光除漆机理进行说明,单脉冲激光除漆机理如图 14 所示。从图 14(a)可以看出,在纳秒脉冲激光辐照漆层并使其气化后,蒸腾的酯类、醇

类和  $\text{CO}_2$  等漆层分解气体被高能激光电离,在除漆表面形成了等离子体云团<sup>[27]</sup> [图 14(b)],入射激光穿过等离子体云团后,能量衰减,导致实验除漆深度低于模拟结果。由激光等离子体的形成和作用特点<sup>[28]</sup>可知,激光气化漆层后,等离子体即刻形成,随着激光持续辐

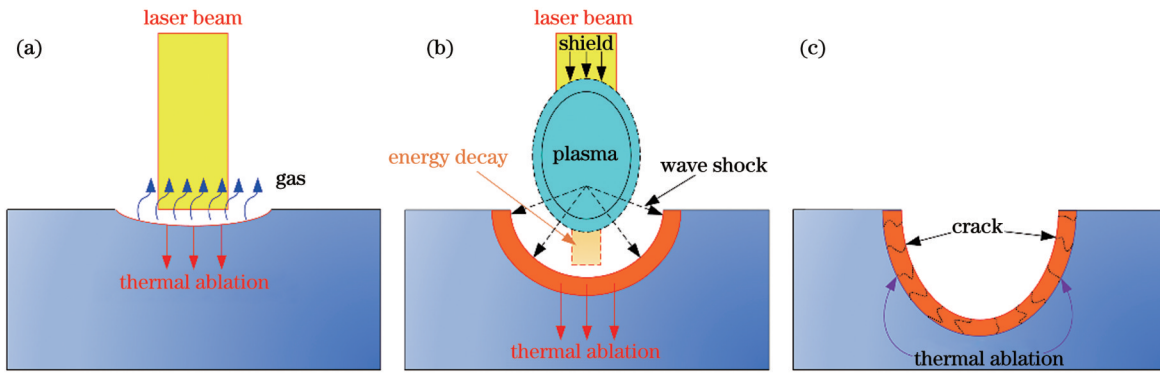


图 14 单脉冲激光除漆机理。(a)辐射气化;(b)烧蚀、等离子体清洗;(c)热应力作用

Fig. 14 Mechanism of single-pulse laser paint removal. (a) Irradiation and gasification; (b) ablation and plasma cleaning; (c) thermal stress effect

照,等离子体不断膨胀,一方面形成等离子体云屏蔽层,吸收激光入射能量,另一方面向外高速喷射,在清洗表面形成高压冲击波,使漆层内部产生弹性振动,从而使漆层出现开裂、分层和剥落等现象。因此,结合图 6 和图 14(b)可知:在激光辐照的一个脉冲周期内,烧蚀凹坑四周将同时受到等离子体冲击波作用,致使实验除漆深度在  $22.5\ \mu\text{m}$  (辐照结束对应凹坑深度) 范围内,对应凹坑宽度始终大于模拟结果;在模拟除漆深度大于  $22.5\ \mu\text{m}$  后,虽然激光辐照作用已经结束,但激光等离子体并不会立刻消散<sup>[29]</sup>,其冲击作用仍将延续一段时间,但强度逐步减弱,因此在  $22.5\sim 25.0\ \mu\text{m}$  的除漆深度范围内,凹坑四周漆层仍将受到等离子体的冲击破坏作用,致使对应的凹坑实际宽度仍大于模拟结果,但呈现出逐步减小的趋势;当实验除漆深度等于  $25\ \mu\text{m}$  时,图 13(b) 显示对应的凹坑宽度与模拟结果一致,由此可断定等离子体作用已经基本消失,由于激光能量受到等离子体的屏蔽作用,故最终除漆深度大于  $25\ \mu\text{m}$  后,对应凹坑宽度均小于模拟结果。图 14(c) 为烧蚀行为终止后除漆表面的状态示意图,可以看出,此时残余漆层表面仅存在热应力作用。

综合上述分析可以得出,在单脉冲激光除漆过程中,激光除漆机制随激光辐照时间的变化呈现出了不同的作用特点:当激光开始作用于漆层表面并持续辐照时,漆层不断气化、清洗表面的积热不断增加、温度不断升高,烧蚀除漆效果随激光的持续作用而逐步增加;激光完成一个脉冲周期后,辐照停止,但清洗表面的积热使烧蚀除漆行为继续进行,当残余漆层表面温度降至漆层气化点时,烧蚀行为终止,除漆机制由烧蚀转变为热应力。激光辐照气化漆层的同时激发了等离子体冲击除漆机制,随着激光能量的持续输入,等离子体不断膨胀爆炸,对清洗表面形成了冲击波破坏,在激光辐照停止后,等离子体逐步消散,冲击波作用逐步减弱直至消失。总的来看,在单脉冲激光除漆过程中,烧蚀除漆和等离子体冲击除漆效果呈现出先增大后减小的变化趋势,由于触发热应力作用的温度始终低于漆

层气化点,故其效果保持不变。

## 4 多脉冲面扫描激光除漆分析研究

### 4.1 除漆表面和截面的 OM 形貌分析

图 15(a)、(c)、(e)、(g) 分别为  $\nu=1000, 900, 800, 700\ \text{mm/s}$  时多脉冲面扫描激光除漆截面的 OM 形貌,图 15(b)、(d)、(f)、(h) 为截面对应的表面 OM 形貌。结合图 15(a)、(b) 可以看出,当  $\nu=1000\ \text{mm/s}$  时,部分区域的面漆已经去除,底漆暴露且出现了轻微损伤,残留面漆最大厚度约为  $10\ \mu\text{m}$ ,清洗表面总体呈现出面漆、底漆交替出现的形貌特征。这里有两方面问题值得注意:首先是图 15(a) 中的残留面漆已和底漆在结合面处分离,主要原因是激光清洗过程中,残余面漆受到的高压等离子体冲击作用使其内部产生了弹性振动,由于底漆、面漆的结合力低于漆层拉伸极限<sup>[30]</sup>,故最终面漆自底漆结合区处崩裂或脱离。其次是除漆厚度大于单脉冲除漆结果,这需要结合模拟和实际的激光光斑搭接率(图 16)进行说明。从图 16(a) 可以看出,在  $\nu=1000\ \text{mm/s}$  的多脉冲面扫描激光除漆过程中,虽然  $x, y$  向的理论搭接率( $\eta_{xt}=100\%, \eta_{yt}=0\%$ ) 显示激光清洗区域(理论清洗区域直径  $d_t=50\ \mu\text{m}$ ) 并未出现重叠,但实际激光除漆区域(实际清洗区域直径  $d_a=125\ \mu\text{m}$ ) 却出现了明显的叠加现象(实际  $x$  方向搭接率  $\eta_{xa}=20\%$ , 实际  $y$  方向搭接率  $\eta_{ya}=50\%$ )。根据激光烧蚀除漆特点<sup>[31]</sup> 可知,当清洗区域出现叠加导致激光光斑辐照漆层的面积减小时,对应的除漆深度将显著增大。当  $\nu=900\ \text{mm/s}$  时,从图 15(c) 可以看出,面漆已全部除净,底漆部分去除,除漆深度增加的原因仍然与扫描速度降低致使实验除漆搭接面积继续增大[图 16(b),  $\eta_{xa}=28\%$ ] 有关。此外,残余底漆表面出现了厚度约为  $15\ \mu\text{m}$  的块状开裂现象,经上文分析可知,这仍然是等离子体冲击诱使漆层产生弹性振动破坏所致。图 15(d) 显示清洗表面出现了大面积黄色残留底漆,与图 15(c) 所示结果保持一致,但局部区域出现了蓝色斑点,这一点要结合蓝色面漆着色剂( $\beta$  型铜酞



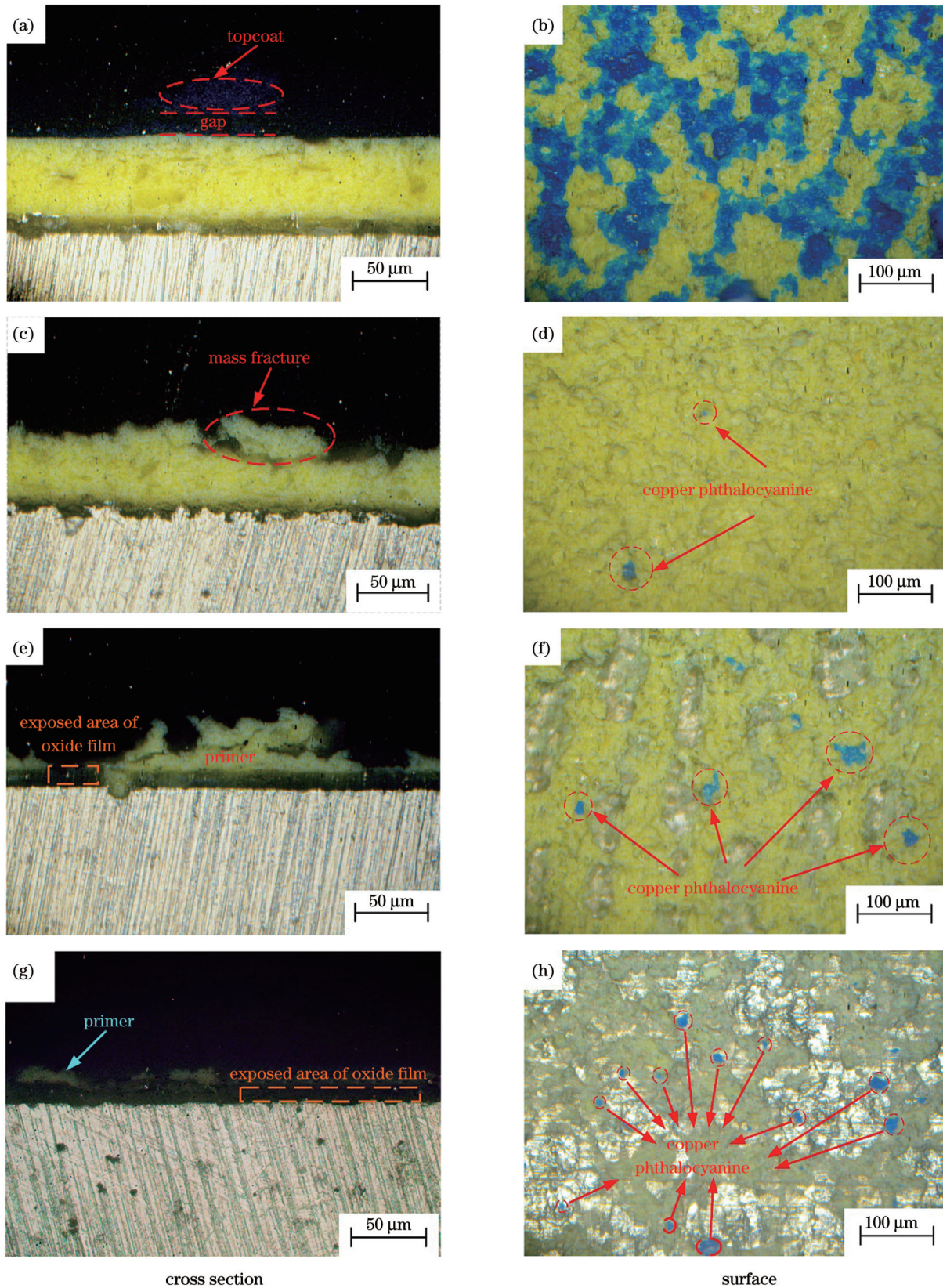


图 15 不同扫描速度下多脉冲冲面扫描激光除漆表面的 OM 形貌。(a)(b)  $\nu=1000$  mm/s; (c)(d)  $\nu=900$  mm/s; (e)(f)  $\nu=800$  mm/s; (g)(h)  $\nu=700$  mm/s

Fig. 15 OM morphology of paint removal surface by multi-pulse surface scanning laser at different scanning speeds. (a)(b)  $\nu=1000$  mm/s; (c)(d)  $\nu=900$  mm/s; (e)(f)  $\nu=800$  mm/s; (g)(h)  $\nu=700$  mm/s

菁)的物理化学特性进行分析。 $\beta$ 型铜酞菁呈蓝色,属于热稳定性较高的有机化合物,当面漆发生烧蚀气

时, $\beta$ 型铜酞菁一般不会随面漆一同分解<sup>[31]</sup>,因此,当 $\beta$ 型铜酞菁作为面漆着色剂时,可以将其看作是烧蚀

除漆行为发生的典型产物。当 $\nu$ 继续降至 800 mm/s 和 700 mm/s 时,由图 16(c)、(d)可知,对应的实际除漆区域的搭接率分别继续增大至 $\eta_{xa}=36\%$ 和 $\eta_{xa}=44\%$ ,对应的除漆深度将进一步增加;当 $\nu=800$  mm/s 时,图 15(e)、(f)显示残余底漆进一步减少,部分氧化膜外露, $\beta$ 型铜酞菁的沉积斑点数量增加;当 $\nu=700$  mm/s 时,图 15(g)、(h)表明残余底漆最大厚度约为 5  $\mu\text{m}$ ,氧化膜显露面积进一步增加, $\beta$ 型铜酞菁的沉积量进一

步增大, $\beta$ 型铜酞菁沉积量增大说明烧蚀除漆效果增强。对于烧蚀、等离子体冲击两种除漆机制来说,由于扫描速度逐步降低,实际清洗区域的搭接率则逐渐增大,即单脉冲激光光斑辐照气化漆层的面积减小,故蒸腾气体量减少,等离子体冲击除漆和屏蔽效果将随着扫描速度的降低而减弱,屏蔽减弱使漆层表面的激光热量输入增加,这再次说明烧蚀除漆效果将随着扫描速度的降低而逐步增强。

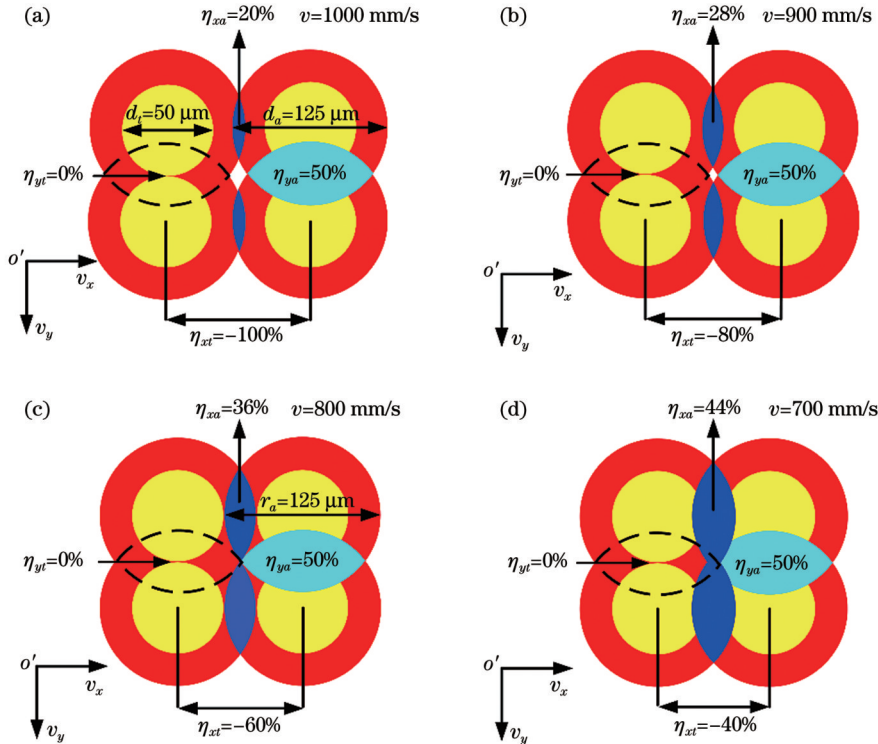


图 16 不同扫描速度下理论与实验激光辐照区域的对比。(a)  $\nu=1000$  mm/s; (b)  $\nu=900$  mm/s; (c)  $\nu=800$  mm/s; (d)  $\nu=700$  mm/s

Fig. 16 Comparison of theoretical and experimental laser irradiated areas at different scanning speeds. (a)  $\nu=1000$  mm/s;

(b)  $\nu=900$  mm/s; (c)  $\nu=800$  mm/s; (d)  $\nu=700$  mm/s

#### 4.2 除漆表面的微观组织分析

图 17 为四种扫描速度下激光除漆表面的背散射 SEM 形貌。从图 17(a)、(b)可以看出,当 $\nu=1000$  mm/s 时,剩余面漆与底漆边界清晰,呈交错状态分布,残余面漆的分层、碎裂特征明显,暴露底漆存在局部分层和裂纹,表明部分面漆已经去除,局部底漆受损,上述结果与图 15(a)、(b)的 OM 检测结果一致。此外,对底漆表面白色微粒团聚的高亮区(A')进行 EDS 检测(表 10),发现该区域主要分布有  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$  和  $\text{TiO}_2$  等漆层功能性氧化物。结合图 17(b)、(d)、(f)、(h)可以判断,随扫描速度的降低,清洗表面逐渐增多的白色微粒为沉积的漆层功能性氧化粒子。在漆层烧蚀气化过程中,由于漆层功能性氧化粒子的气化点明显高于漆层<sup>[32]</sup>,故脱漆沉积的漆层功能性氧化粒子是除 $\beta$ 型铜酞菁以外,另一种典型的漆层烧蚀气化产物。由此可以得出,随着扫描速度逐渐降低,漆层烧蚀气化效果是逐步增强的,这也进一步印证了等离子体作用随扫描

速度的降低而逐渐减弱。图 17(c)、(d)为 $\nu=900$  mm/s 时激光除漆表面的 SEM 形貌,可以看出,此时面漆已经被完全去除,残余底漆表面存在着与图 17(a)中的面漆类似的分层、开裂现象,综上分析,这主要与热应力作用及等离子体冲击造成的漆层物理破坏有关。当 $\nu=800$  mm/s 时,分别对图 17(e)、(f)所示的清洗表面的 B1 点进行 EDS 检测,结果表明,残余底漆中的 C 元素含量相较于原始底漆出现了显著下降,说明漆层出现了烧蚀气化现象<sup>[33]</sup>。从图 17(f)中 B2 点的检测结果可以看出,清洗表面显露的块状开裂区域为氧化膜。以上结果与图 16(e)、(f)的 OM 表征结果相同。当 $\nu=700$  mm/s 时,结合图 17(g)、(h)可以看出,随着扫描速度继续降低,残余底漆面积进一步减小,氧化膜暴露面积进一步增大。对图 17(g)所示清洗表面的 C1 点的残余底漆进行 EDS 检测,结果中出现了 Al、S 元素,说明残余底漆厚度很薄,已无法有效覆盖氧化膜。对图 17(h)所示显露氧化膜(C2 点)进行 EDS 检测,结

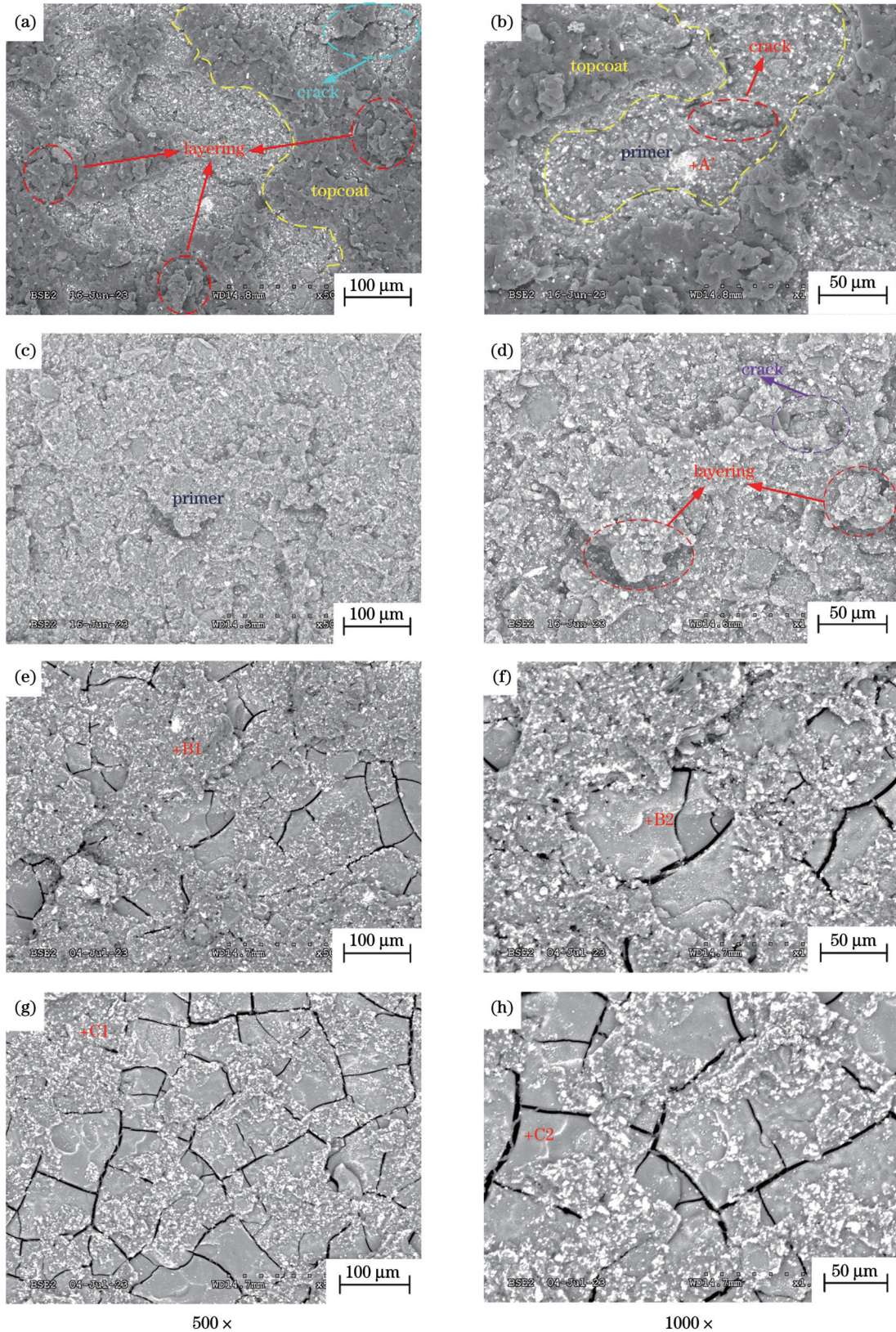


图 17 不同扫描速度下除漆后表面背散射 SEM 微观形貌。(a)(b)  $\nu=1000$  mm/s; (c)(d)  $\nu=900$  mm/s; (e)(f)  $\nu=800$  mm/s; (g)(h)  $\nu=700$  mm/s  
 Fig. 17 Backscatter SEM microscopic morphology of surface after paint removal at different scanning speeds. (a)(b)  $\nu=1000$  mm/s; (c)(d)  $\nu=900$  mm/s; (e)(f)  $\nu=800$  mm/s; (g)(h)  $\nu=700$  mm/s

果显示, Al、O 元素比例与除漆前基本相同, 这表明氧化膜并未发生熔融损伤, C 元素含量显著增加, 原因可

能是漆层烧蚀气化形成的固定碳和灰分等物质在清洗表面产生了沉积残留<sup>[15]</sup>。

表 10 不同扫描速度下除漆后表面各区域 EDS 检测结果

Table 10 EDS test results of different surface areas after paint removal at different scanning speeds

Point	Atomic fraction /%							
	C	O	Mg	Si	Ti	S	Pt	Al
A'	26.75	43.51	12.94	8.81	7.04	—	0.95	—
B1	54.60	36.88	2.29	2.07	1.98	—	0.56	—
B2	28.92	42.71	0.70	1.05	1.00	4.06	0.78	20.36
C1	53.12	25.87	3.34	2.97	3.02	2.78	0.65	8.25
C2	41.42	33.28	0.79	0.70	1.01	4.51	1.12	17.17

## 5 结 论

采用 COMSOL 模拟了单脉冲纳秒激光烧蚀-热应力(热-力耦合)除漆瞬态过程,结果表明,一个脉冲周期( $\tau=200$  ns)结束后,烧蚀气化除漆行为并未完全结束,清洗表面积热使漆层烧蚀过程延长了 550 ns,漆层模拟烧蚀深度和宽度分别为 38.5  $\mu\text{m}$  和 100  $\mu\text{m}$ ;残余漆层表面热应力略大于漆层拉伸极限,可使清洗表面产生深度为 0.6~2.8  $\mu\text{m}$  的物理破坏层;激光等离子体冲击与屏蔽是单脉冲实验除漆过程中产生的典型现象,在等离子体冲击作用下,实际凹坑除漆宽度大于模拟结果,在等离子体屏蔽作用下,实际凹坑除漆深度小于模拟结果;在单脉冲激光除漆过程中,烧蚀和等离子体除漆作用在激光辐照结束前逐步增强,辐照结束后逐步减弱,热应力除漆效果保持不变。随着扫描速度逐步降低,烧蚀除漆逐步增强,等离子体作用逐步减弱,漆层去除厚度逐渐增加, $\beta$ 型铜酞菁和漆层功能性氧化粒子沉积量逐渐增加;当 $\nu=1000$  mm/s 时,面漆部分去除,底漆微损;当 $\nu=900$  mm/s 时,面漆除净,底漆部分去除;当 $\nu=800, 700$  mm/s 时,残余底漆面积、深度随扫描速度降低继续减少,氧化膜显露。

## 参 考 文 献

- [1] Mapari S, Mestry S, Mhaske S T. Developments in pressure-sensitive adhesives: a review[J]. *Polymer Bulletin*, 2021, 78(7): 4075-4108.
- [2] Peltier F, Thierry D. Review of Cr-free coatings for the corrosion protection of aluminum aerospace alloys[J]. *Coatings*, 2022, 12(4): 518.
- [3] 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.  
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.
- [4] 杨文锋, 常学东, 胡月, 等. 飞机蒙皮激光除漆对基材表面完整性的影响[J]. *中国激光*, 2023, 50(8): 0802206.  
Yang W F, Chang X D, Hu Y, et al. Effect of laser paint removal of aircraft skin on surface integrity of substrate[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(8): 0802206.
- [5] 陈亚军, 鲁文婷, 杨雅婷. 基于响应面分析的碳纤维复合材料基体激光除漆工艺优化[J]. *中国激光*, 2023, 50(12): 1202208.  
Chen Y J, Lu W T, Yang Y T. Optimization of laser paint removal process for carbon fiber composite substrate based on response surface analysis[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(12): 1202208.
- [6] Gu J Y, Su X, Jin Y, et al. Towards low-temperature laser paint stripping by photochemical mechanism on CFRP substrates[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 85: 272-280.
- [7] Zhu G D, Wang S R, Cheng W, et al. Corrosion and wear performance of aircraft skin after laser cleaning[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 132: 106475.
- [8] 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): 20220780.  
Jiang M, Xu J J, Liu K J, et al. Current status and prospect of engineering application of laser paint removal technology for aircraft skin (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(2): 20220780.
- [9] Zhao H C, Qiao Y L, Chen S Y, et al. Stripping polyacrylate paint with a pulsed laser: process development and mechanism analysis[J]. *Physica Scripta*, 2021, 96(12): 125103.
- [10] Shamsujjoha M, Agnew S R, Melia M A, et al. Effects of laser ablation coating removal (LACR) on a steel substrate: part 1: surface profile, microstructure, hardness, and adhesion[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2015, 281: 193-205.
- [11] Sun Q, Zhou J Z, Meng X K, et al. Mechanism and threshold fluence of nanosecond pulsed laser paint removal[J]. *Rare Metals*, 2022, 41(3): 1022-1031.
- [12] Jasim H A, Demir A G, Previtali B, et al. Process development and monitoring in stripping of a highly transparent polymeric paint with ns-pulsed fiber laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 93: 60-66.
- [13] 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.
- [14] 张天刚, 段俊杰, 刘天翔, 等. Y 向搭接率对铝合金表面复合漆层激光清洗的影响[J]. *中国激光*, 2023, 50(16): 1602204.  
Zhang T G, Duan J J, Liu T X, et al. Effect of y-direction overlap rate on laser cleaning of composite paint layer on aluminum alloy surface[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(16): 1602204.
- [15] 秦哲, 高谦, 王斌, 等. 飞机蒙皮纳秒脉冲激光除漆工艺与机理研究[J]. *表面技术*, 2022, 51(7): 370-376, 396.  
Qin Z, Gao Q, Wang B, et al. Technology and mechanism of nanosecond pulse laser paint removal of aircraft skin[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(7): 370-376, 396.
- [16] Kittiboonanan P, McWilliams J, Taechamaneesatit P, et al. Effects of laser pulse overlap using nanosecond fiber lasers for structuring of AA6061-T6 surfaces[J]. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2023, 10(1): 190-203.
- [17] Arif S, Armbruster O, Kautek W. Pulse laser particulate separation from polycarbonate: surface acoustic wave and thermomechanical mechanisms[J]. *Applied Physics A*, 2013, 111(2): 539-548.
- [18] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 变形铝及铝合金化学成分: GB/T 3190—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.

- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Chemical composition of wrought aluminium and aluminium alloys: GB/T 3190—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [19] 王一飞, 虞宙, 李康妹, 等. 纳秒激光烧蚀钛合金微坑形貌的数值模拟分析[J]. 中国激光, 2022, 49(8): 0802008.  
Wang Y F, Yu Z, Li K M, et al. Numerical simulation of micro-pit morphology of titanium alloy ablated by nanosecond laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(8): 0802008.
- [20] Chattopadhyay D K, Raju K V S N. Structural engineering of polyurethane coatings for high performance applications[J]. Progress in Polymer Science, 2007, 32(3): 352-418.
- [21] Yang J N, Zhou J Z, Sun Q, et al. Digital analysis and prediction of the topography after pulsed laser paint stripping[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 62: 685-694.
- [22] Zhao W Q, Mei X S, Yang Z X. Simulation and experimental study on group hole laser ablation on  $Al_2O_3$  ceramics[J]. Ceramics International, 2022, 48(4): 4474-4483.
- [23] Lu Y, Yang L J, Wang M L, et al. Simulation of nanosecond laser cleaning the paint based on the thermal stress[J]. Optik, 2021, 227: 165589.
- [24] Das A, Mahanwar P. A brief discussion on advances in polyurethane applications[J]. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2020, 3(3): 93-101.
- [25] 范钦珊, 殷雅俊. 材料力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 1-109.  
Fan Q S, Yin Y J. Mechanics of materials[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 1-109.
- [26] Yan C Z, Wang X, Huang D R, et al. A new 3D continuous-discontinuous heat conduction model and coupled thermomechanical model for simulating the thermal cracking of brittle materials[J]. International Journal of Solids and Structures, 2021, 229: 111123.
- [27] Zhang J F, Ma R, Zuo W L, et al. Ellipticity-dependent ionization/dissociation of carbon dioxide in strong laser fields[J]. Chinese Physics B, 2015, 24(3): 033302.
- [28] Munafò A, Alberti A, Pantano C, et al. A computational model for nanosecond pulse laser-plasma interactions[J]. Journal of Computational Physics, 2020, 406: 109190.
- [29] Krueer W L. The physics of laser plasma interactions[M]. Boca Raton: CRC Press, 2019.
- [30] 邵壮, 王涛. 激光除漆技术数值模拟与实验研究[J]. 激光与红外, 2021, 51(11): 1417-1424.  
Shao Z, Wang T. Numerical simulation and experimental study of laser cleaning paint technology[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(11): 1417-1424.
- [31] 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[J]. 航空学报, 2023, 44(11): 316-329.  
Zhang T G, Huang J H, Hou X Y, et al. Mechanism for composite paint layer on aluminum alloy surface cleaned by laser[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(11): 316-329.
- [32] Xu C H, Yuan K K, Jin X T, et al. High-temperature stable electrospun MgO nanofibers. formation mechanism and thermal properties[J]. Ceramics International, 2017, 43(18): 16210-16216.
- [33] 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.

## Simulation and Experimental Study on Laser Cleaning of Surface Paint Layer of Aluminum Alloy Skin for Civil Aircraft

Zhang Tiangang<sup>1</sup>, Li Yu<sup>1</sup>, Zou Junhao<sup>1</sup>, Zhang Zhiqiang<sup>1\*</sup>, Liu Yanan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*School of Aviation Engineering, China Civil Aviation University, Tianjin 300300, China;*

<sup>2</sup>*School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China*

### Abstract

**Objective** Civil aircrafts operate under severe conditions, leading to issues such as peeling and cracking in the aircraft paint layer. This makes localized or comprehensive paint removal and surface maintenance pivotal during C-check or D-check procedures. Current paint removal methods, such as manual grinding and chemical stripping, are widely used. However, they have significant shortcomings. Manual grinding often lacks precision and can damage the aircraft surface, while chemical stripping is complicated and environmentally detrimental. These challenges hinder sustainable and efficient advancements in the civil aviation industry. Laser paint removal has emerged as a promising solution, offering high precision, reduced pollution, and automation possibilities. It is rapidly gaining global attention. However, a knowledge gap exists in understanding the exact mechanism of paint removal during laser ablation, particularly regarding the impacts of single-pulse thermal stress and plasma-induced removal. This study bridges this gap by first determining the vaporization point and strength limit of the paint layer. Then, single-pulse laser ablation simulations are compared with experimental results to better understand thermal stress paint removal during laser cleaning. This research sheds light on paint removal mechanisms and evaluates the impacts of varying scanning speeds on laser paint removal efficiency. Hence, the aim is to offer valuable insights and references for enhancing the use and development of laser paint removal techniques on civil aircraft skin.

**Methods** In this study, the vaporization point and strength limit of the paint layer are first determined via thermogravimetry and stress-strain experiments. Subsequently, a finite element analysis of the single-pulse laser ablation-thermal stress paint removal process is conducted using the COMSOL software. Experiments on laser paint removal, both single-pulse and multi-pulse, at varying

scanning speeds ( $\nu=1000, 900, 800,$  and  $700$  mm/s), are performed on the composite paint system of the LY12 aluminum alloy substrate using nanosecond pulsed fiber lasers. Then, a white light interferometer (WLI) is employed to inspect and analyze the crater profile created by the single-pulse laser. An optical microscope (OM) is used to characterize the resulting surface and cross-sectional morphology from the multi-pulse line scanning laser paint removal. Additionally, a scanning electron microscope (SEM) and an energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) are utilized to analyze the microstructure and compositional changes on the cleaned surface after the paint is removed.

**Results and Discussions** After the completion of single-pulse laser irradiation ( $t=200$  ns), the paint ablation process does not cease. The accumulated heat causes the surface temperature of the residual paint layer to further increase until  $t=750$  ns. When the temperature falls below its vaporization point, the ablation paint removal process concludes (Figs. 6 and 7). At this moment, the action depth of thermal stress generated by the coupling of the temperature field on the surface of the residual paint layer gradually increases from the bottom to the edge of the crater, while the corresponding values progressively decrease (Fig. 9). The maximum value (Fig. 9,  $\sigma_{\max}=2.7\times 10^7$  Pa) approaches the strength limit of the paint layer [Fig. 11(a),  $\sigma=2.68\times 10^7$  Pa], leading to a U-shaped stress-damage zone on the surface of the residual paint layer (Fig. 12). This results in physical damage, such as delamination and fragmentation of the residual paint layer (Fig. 13). During the laser ablation process, both plasma impact and shielding effects coexist. The plasma impact causes the actual width of the ablated crater to be larger than the simulated results, while the shielding effect results in the experimental ablation depth of the crater being smaller than the simulated results (Fig. 14). In the process of single-pulse laser paint removal, the ablation and plasma paint removal effects gradually intensify before the laser irradiation ends and then gradually weaken after the irradiation completes. However, the thermal stress paint removal effect remains unchanged (Fig. 15). In the multi-pulse surface scanning laser paint removal experiments, the actual spot overlap rate is higher than the theoretical value (Fig. 17), resulting in the removal depth of the paint layer being greater than that of the single-pulse results. As the scanning speed gradually reduces, the removal effect of the paint layer gradually enhances due to ablation, the plasma effect gradually weakens, and the depth of paint removal and the deposition amount of  $\beta$ -type copper phthalocyanine along with the functional oxidized particles gradually increase [Figs. 16(a), (c), (e), and (g), and Table 10].

**Conclusions** In this study, the single-pulse nanosecond laser thermo-mechanical coupling paint removal transient process is simulated using the COMSOL software. The results show that the behavior of ablative removal of paint layers does not finish at the end of one pulse cycle, and the heat accumulated on the cleaning surface extends the ablation process by 550 ns. The simulated thermal stress value is slightly larger than the experimentally determined tensile limit of the paint layer. This causes the residual paint layer on the cleaning surface to produce a delamination and cracking zone ranging from  $0.6\ \mu\text{m}$  to  $2.8\ \mu\text{m}$ . The laser ablation paint removal process triggers plasma impact and shielding. This makes the experimental crater paint removal width larger and the depth smaller than the simulation results. In the single pulse laser paint removal process, the ablation and plasma paint removal effects gradually intensify before the laser irradiation ends and then gradually weaken after the irradiation ends, but the thermal stress paint removal effect remains unchanged. As the scanning speed gradually decreases, the ablative paint removal effect strengthens, the plasma effect weakens, the thickness of the paint layer removal increases, and the amount of functionally oxidized particles deposited on the paint layer also increases. When  $\nu=1000$  mm/s, the topcoat is partially removed and the primer is slightly damaged. The topcoat is removed cleanly, and the primer is partially removed when  $\nu=900$  mm/s. However, for  $\nu=800$  mm/s and  $700$  mm/s, the area and depth of the residual primer continue to decrease with the reduction in the scanning speed, and the oxidized film is exposed.

**Key words** laser technique; laser cleaning; aluminium alloy; acrylic polyurethane lacquer coating; scanning speed; paint removal mechanism