

## 激光与光电子学进展

## 基于响应面分析的飞机蒙皮激光除漆可控性研究

杨文锋<sup>1\*</sup>, 林德惠<sup>1</sup>, 钟勉<sup>1</sup>, 李绍龙<sup>1</sup>, 钱自然<sup>1</sup>, 刘国春<sup>1</sup>, 曹宇<sup>2</sup>, 徐艺<sup>1</sup>, 张赛<sup>1</sup>, 李果<sup>1</sup><sup>1</sup>中国民用航空飞行学院民机复合材料维修研究中心, 四川 广汉 618307;<sup>2</sup>温州大学激光与光电智能制造研究院, 浙江 温州 325035

**摘要** 随着飞机蒙皮“部分褪漆”维修理念的提出,多漆层结构激光除漆的可控性值得关注。基于响应面分析方法,建立了激光参数(光斑搭接率、激光功率及扫描次数)与可控性指标(漆层去除厚度、表面粗糙度)间的数学模型,分析了激光多参数耦合作用对可控性指标的影响规律。结果表明:激光参数对漆层去除厚度的影响顺序依次为扫描次数、激光功率、光斑搭接率,且均为正相关;表面粗糙度随光斑搭接率的增大而减小,随激光功率的增大而增大,扫描次数对表面粗糙度的影响具有峰值效应。验证试验结果表明:响应面模型可为厚度精度为 $\pm 5 \mu\text{m}$ 的激光可控除漆提供参考。基于响应面分析方法建立的多漆层结构激光可控清除数学模型,可为飞机蒙皮漆层的激光可控清除提供方法指导与理论支撑。

**关键词** 激光技术; 激光除漆; 多漆层结构; 耦合作用; 可控性; 响应面分析

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221882

## Controllability of Laser Removal of Aircraft Skin Paint Layer Based on Response Surface Analysis

Yang Wenfeng<sup>1\*</sup>, Lin Dehui<sup>1</sup>, Zhong Mian<sup>1</sup>, Li Shaolong<sup>1</sup>, Qian Ziran<sup>1</sup>, Liu Guochun<sup>1</sup>,  
Cao Yu<sup>2</sup>, Xu Yi<sup>1</sup>, Zhang Sai<sup>1</sup>, Li Guo<sup>1</sup><sup>1</sup>Civil Aircraft Composites Maintenance Research Center, Civil Aviation Flight University of China,  
Guanghan 618307, Sichuan, China;<sup>2</sup>Laser and Optoelectronic Intelligent Manufacturing Research Institute, Wenzhou University,  
Wenzhou 325035, Zhejiang, China

**Abstract** Maintenance of aircraft skin with partially faded paint requires multipaint layer laser removal controllability. Based on the response surface analysis method, a mathematical model between laser parameters (spot lap rate, laser power, and number of scans) and the key indicators of controllable paint layer removal (paint layer removal thickness and surface roughness) is established, and the influence of laser multiparameter coupling on key indicators is analyzed. The results show that the influence of laser parameters on paint layer removal thickness is in the order of number of scans, laser power, and spot lap rate, wherein all are positively correlated. Meanwhile, surface roughness decreases with an increase in spot lap rate, increases with an increase in laser power, and has a peak effect with number of scans. Therefore, the response surface model provides a reference for laser controllable paint removal with the thickness accuracy of  $\pm 5 \mu\text{m}$ , providing method guidance and theoretical support for laser controllable aircraft skin paint layer removal.

**Key words** laser technique; laser paint removal; multi-paint layer structure; coupling effect; controllability; response surface analysis

## 1 引言

考虑到维修成本及安全性,飞机蒙皮漆层“一除到底”维修理念逐步被“部分褪漆”维修理念所替代,多漆层结构清除的可控性值得关注<sup>[1]</sup>。漆层清除的可控性主

要体现为:精度可控性及厚度均匀性、可用漆层去除厚度精度及表面粗糙度进行表征。传统除漆方式普遍存在低效高耗、漆层去除厚度精度不足、表面均匀性差等缺点,无法满足飞机蒙皮漆层的可控清除要求。激光在准确的工艺参数调控下能够快速去除指定厚度的油漆,

收稿日期: 2022-05-22; 修回日期: 2022-06-29; 录用日期: 2022-07-07; 网络首发日期: 2022-07-17

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目(2021YFSY0025)

通信作者: \*ywfcy@163.com

同时获得较高的表面质量,是一种极具工程应用价值的除漆新技术<sup>[2]</sup>。目前,该技术在飞机蒙皮除漆的工程应用方面还处于研发阶段,现有研究主要面向“一除到底”维修理念,集中于单层漆的整体清除。而针对“部分褪漆”维修需求,还应更多关注多漆层结构清除的可控性。

张殊伦<sup>[3]</sup>以均匀涂覆双层漆的铝合金样品为试验对象,研究了不同激光能量密度下漆层去除厚度的变化规律,结果表明激光能量密度与残余漆层厚度关系符合一阶衰减指数函数。李佐<sup>[4]</sup>以均匀涂覆聚氨酯面漆、环氧底漆及弹性腻子层的复合材料为试验对象,分别研究了扫描速度、激光功率、扫描次数、激光频率对漆层去除厚度的影响规律。郭召恒等<sup>[5]</sup>、刘鹏飞<sup>[6]</sup>、李宇强等<sup>[7]</sup>研究了激光清洗后样品表面粗糙度随激光功率、扫描速度及能量密度的变化规律。以上研究均采用单因素试验方法,探究了单个激光参数对漆层去除厚度、表面粗糙度的影响规律,为漆层的激光可控清除提供了参考。而激光除漆参数众多且关系复杂,漆层去除厚度及表面粗糙度是激光多参数共同作用下漆层材料的综合体现,参数间的耦合作用对激光除漆可控性的影响亟待进一步研究。

响应面分析法(RSM)以试验设计为基础,综合运用数学、统计学的知识进行试验数据的处理与分析,建立响应值与各试验因子的数学模型,可反映多个变量对响应值的耦合作用规律,并实现响应值的精准预测与优化<sup>[8]</sup>。近年来,学者们将响应面分析方法运用于304不锈钢表面漆层、石油管螺纹锈蚀层<sup>[9]</sup>、Q345C钢表面锈蚀层<sup>[10]</sup>等的激光清洗方面,实现了表面粗糙度的预测及优化。上述研究主要针对单层漆或锈蚀层的

整体去除,重点关注了激光参数间的耦合作用对表面粗糙度的影响规律及表面粗糙度预测与优化。但对于飞机蒙皮多漆层结构的可控清除,还需同时关注漆层去除厚度这一关键指标,系统建立激光除漆过程中激光参数与漆层去除厚度之间的关联。

本文以飞机蒙皮“部分褪漆”的实际工程应用需求为导向,以响应面分析为理论基础,建立可控性指标(漆层去除厚度 $T$ 、表面粗糙度 $S_a$ )与激光参数(光斑搭接率 $\alpha$ 、激光功率 $P$ 及扫描次数 $N$ )的响应面模型。研究激光参数对可控性指标的耦合作用规律,实现可控性指标的精准预测及耦合优化。该研究可获得多漆层结构激光可控清除的方法,为飞机蒙皮激光除漆的工程应用提供方法指导与理论支撑。

## 2 材料与方法

### 2.1 试样与试验设备

基体为飞机蒙皮常用的2024-T3态Al-Cu-Mg系硬铝合金,厚度约为2 mm。按波音常用的喷漆系统进行阳极氧化处理后,均匀喷涂 $(30\pm 3)\ \mu\text{m}$ 白色环氧面漆及 $(30\pm 3)\ \mu\text{m}$ 绿色环氧底漆,切割为 $50\ \text{mm}\times 50\ \text{mm}\times 2\ \text{mm}$ 的试样大小。环氧底漆及面漆由环氧树脂、体质颜料及固化剂组成,其主要化学成分为碳、钙、硅、氧和钛元素。

激光设备主要由光纤脉冲激光器、机器人控制系统及激光加工头等组成,其中激光器采用MFPT-100H型1064 nm调Q脉冲光纤激光器,光束能量服从高斯分布。表1为激光器主要参数,图1为激光设备及工艺示意图。

表1 激光器主要参数

Table 1 Main parameters of the laser

Average power $P/W$	Pulse frequency $f/\text{kHz}$	Beam diameter $D/\mu\text{m}$	Scan speed $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	Pulse duration $\tau_p/\text{ns}$
0—120	1—200	50	0—8000	60—350

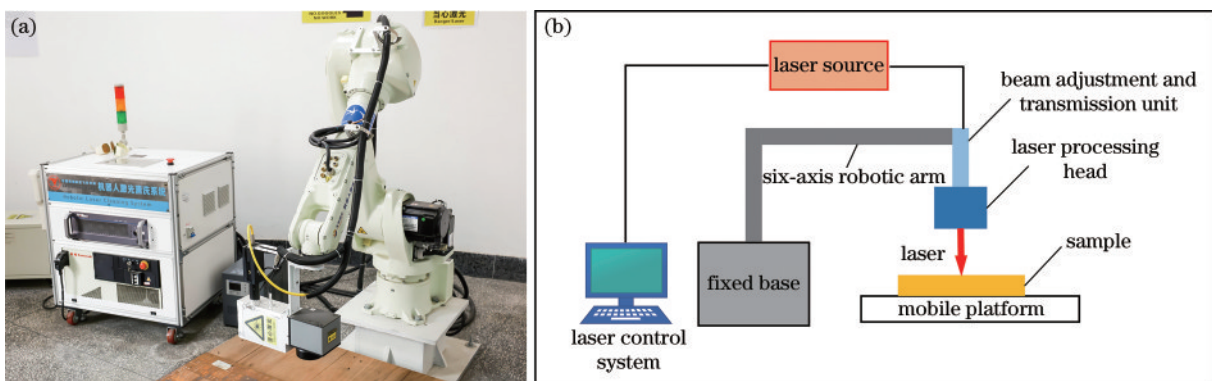


图1 激光加工设备及工艺示意图。(a)激光加工设备;(b)工艺示意图

Fig. 1 Laser processing equipment diagram and process diagram. (a) Laser processing equipment; (b) schematic diagram of the process

对试样进行平面扫描,扫描区域为 $10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}$ ,如图2(a)所示。扫描路径为“之”字型,如

图2(b)所示。图中, $s$ 为光斑搭接距离, $d$ 为扫描间距。光斑搭接率 $\alpha$ 为

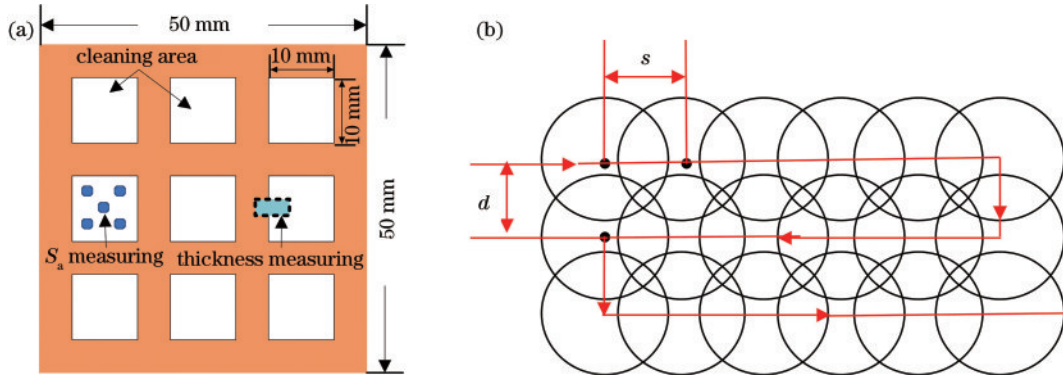


图 2 激光清洗示意图。(a)清洗区域;(b)光斑扫描路径

Fig. 2 Schematic of laser cleaning. (a) Cleaning area; (b) path of spot scanning

$$\alpha = 1 - v / (f \cdot D) \quad (1)$$

光斑搭接距离  $s$  可表示为  $s = (1 - \alpha) \cdot D$ , 通过调整扫描间距  $d$ , 保持横纵向搭接率一致。

采用精度为  $0.10 \mu\text{m}$  的西班牙 S neox 三维光学表面轮廓仪 (以下简称三维轮廓仪) 测量漆层去除厚度  $T$ 、表面粗糙度  $S_a$ , 进行 5 次测量取其平均值作为最终结果。 $T$  的测量方式如图 2(a) 所示, 测量区域同时包含除漆前、后表面。测量结果如图 3 所示, 剖面轮廓可分为除漆前、过渡区及除漆后三个部分, 将除漆前、后表面的平均高度差定义为漆层去除厚度  $T$ 。 $S_a$  的测量方式如图 2(a) 所示, 将 5 组测量区域均匀分布在样品中, 以提高测量结果的准确性。

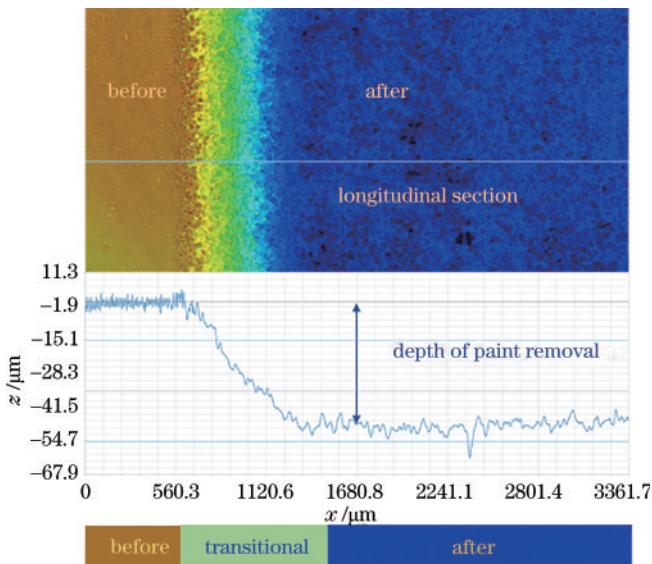


图 3 漆层去除厚度测量方法说明

Fig. 3 Description of paint removal thickness measurement method

## 2.2 试验设计

单因素试验结果表明: 光斑搭接率  $\alpha$ 、激光功率  $P$  及扫描次数  $N$  对  $T$ 、 $S_a$  存在显著影响<sup>[3-7]</sup>。本文将其作为试验因子, 采用三因素三水平的 Box-Behnken 响应

面方法进行试验设计。该设计的图解如图 4 所示, 图中正方体代表试验空间, 球体代表所需进行的试验点, 其中正方体中心的球体也称为中心点。由图 4 可知, 中心点与其余试验点的距离均相等, 即该设计具有旋转性, 可从试验领域获得稳定的预测分散以提高效应变量预测的信赖性<sup>[11]</sup>。

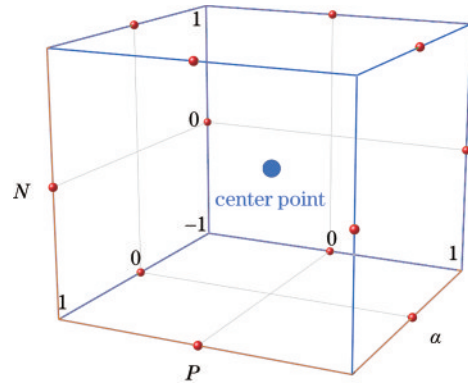


图 4 三因素三水平的 Box-Behnken 试验设计图解

Fig. 4 Illustration of the Box-Behnken experimental design with three factors and three levels

为使漆层厚度取值范围较大 (尽量涵盖  $0 \sim 60 \mu\text{m}$ ), 且表面粗糙度较大, 确定各因子的水平编码如表 2 所示。基于响应面分析方法设计的试验矩阵及试验结果如表 3 所示。结果表明: 在该水平空间内, 漆层去除厚度范围约为  $6.85 \sim 65.5 \mu\text{m}$ , 表面粗糙度范围约为  $2.10 \sim 4.16 \mu\text{m}$ , 可尽量使可控除漆要求在该水平空间内存在可行解。

表 2 试验因子及水平编码表

Table 2 Test factor and level coding table

Factor	Extreme value		
	Low (-1)	Medium (0)	High (1)
Power $P$ / W	24	30	36
Spot overlap rate $\alpha$ / %	60	70	80
Number of scans $N$	1	2	3

表 3 响应面试验设计矩阵及试验结果

Table 3 Response surface experimental design matrix and experimental results

No.	Parameter			Result	
	$P/W$	$\alpha/\%$	$N$	$T/\mu\text{m}$	$S_a/\mu\text{m}$
R1	24	60	2	11.59	3.13
R2	36	60	2	24.39	4.16
R3	30	60	1	9.82	2.10
R4	30	60	3	29.94	3.02
R5	24	70	1	6.85	2.21
R6	36	70	3	16.74	2.47
R7	24	70	3	18.53	2.43
R8	36	70	2	65.50	2.99
R9	30	70	2	23.05	3.34
R10	30	70	2	24.93	3.31
R11	30	70	2	27.61	3.16
R12	30	70	2	27.59	3.00
R13	30	70	2	23.30	3.87
R14	24	80	2	18.09	2.95
R15	36	80	2	53.84	3.50
R16	30	80	1	15.93	2.31
R17	30	80	3	60.86	2.15

表 4 漆层去除厚度模型方差分析

Table 4 Analysis of variance for paint removal thickness model

Source	Sum of square	Degree of freedom	Mean square	$F_{\text{value}}$	$\text{Prob}>F$	Significant
Model	4652.43	6	775.40	121.09	<0.0001	Yes
A- $\alpha$	665.76	1	665.76	103.97	<0.0001	—
B- $P$	1388.91	1	1388.91	216.90	<0.0001	—
C- $N$	1968.47	1	1968.47	307.41	<0.0001	—
AB	131.68	1	131.68	20.56	0.0011	—
AC	153.88	1	153.88	24.03	0.0006	—
BC	343.73	1	343.73	53.68	<0.0001	—
Residual	64.03	10	6.40	—	—	—
Lack of fit	44.25	6	7.38	1.49	0.3640	No
Pure error	19.78	4	4.94	—	—	—
Cor total	4716.46	16	—	—	—	—

Notes:  $R^2 = 0.9864, R_{\text{Adj}}^2 = 0.9783, R_{\text{Pre}}^2 = 0.9590, A_{\text{Pre}} = 35.549$ .

### 4 多参数耦合作用对激光除漆可控性的影响

#### 4.1 多参数耦合作用对漆层去除厚度 $T$ 的影响

激光参数间的耦合作用对漆层去除厚度的影响如图 5 所示。3 个因素对漆层去除厚度的影响顺序依次为扫描次数、激光功率、光斑搭接率,且均为正相关。扫描次数越多,光斑搭接率越大,功率越大意味着单位

### 3 响应面模型建立与方差分析

通过比较模型的显著性及复杂程度,分别采用 2F1 模型和平方模型建立可控性指标( $T, S_a$ )与激光参数( $\alpha, P, N$ )的响应面模型。漆层去除厚度  $T$ 、表面粗糙度  $S_a$  的响应面模型分别表示为

$$T = 26.97 + 9.12\alpha + 13.18P + 15.69N + 5.74\alpha P + 6.20\alpha N + 9.27PN, \quad (2)$$

$$S_a = 3.34 - 0.19\alpha + 0.30P + 0.19N - 0.12\alpha P + 0.27\alpha N + 0.075PN - 0.015\alpha^2 + 0.11P^2 - 0.93N^2. \quad (3)$$

方差分析如表 4、表 5 所示。其中“ $\text{Prob}>F$ ”(以下简称  $P$  值)表示由于噪声产生错误的概率,可反映相关系数的显著性,一般认为  $P$  值小于 0.05 时模型要素较为显著<sup>[12]</sup>。 $T, S_a$  模型的显著性检验  $P$  值均小于 0.05,即由噪声产生的错误概率小于 5% 时,模型较为显著。失拟项  $P$  值均大于 0.05,表明非试验因素对  $T, S_a$  的影响不显著,可以忽略。进一步验证了前人的研究结论:光斑搭接率  $\alpha$ 、激光功率  $P$  及扫描次数  $N$  对  $T, S_a$  存在显著影响。拟合度  $R^2$  分别为 0.9864 和 0.9128,接近 1,表明模型较为显著。预测拟合系数( $R_{\text{Adj}}^2$ )及修正拟合系数( $R_{\text{Pre}}^2$ )二者接近,表明模型显著。信噪比( $A_{\text{Pre}}$ )远大于 4,表明模型满意。以上分析表明,响应面模型可为漆层去除厚度  $T$ 、表面粗糙度  $S_a$  的精准预测及耦合优化提供有力支撑。

面积、单位时间内漆层吸收的能量越多,将导致更多的漆层脱离表面,从而漆层去除厚度增加<sup>[13]</sup>。

当搭接率取 0 水平(70%)时,扫描次数和激光功率对漆层去除厚度的影响规律如图 6 所示。如图 6(a) 中等高线所示:当激光功率在 24~36 W 范围内可调,扫描次数分别为 1、2、3 次时,获得的漆层去除厚度范围分别约为 5~15  $\mu\text{m}$ 、15~40  $\mu\text{m}$ 、20~65  $\mu\text{m}$ ;当扫描次数在 1~3 次范围内可调,激光功率为 24、30、36 W

表 5 表面粗糙度模型方差分析

Table 5 Analysis of variance for surface roughness model

Source	Sum of square	Degree of freedom	Mean square	$F_{value}$	Prob> $F$	Significant
Model	5.29	9	0.59	8.14	0.0057	Yes
A- $\alpha$	0.280	1	0.280	3.89	0.0890	—
B-P	0.720	1	0.720	9.96	0.0160	—
C-N	0.280	1	0.280	3.89	0.0892	—
AB	0.058	1	0.058	0.80	0.4017	—
AC	0.290	1	0.290	4.03	0.0846	—
BC	0.022	1	0.022	0.31	0.5943	—
A <sup>2</sup>	$1.012 \times 10^{-3}$	1	$1.012 \times 10^{-3}$	0.014	0.9092	—
B <sup>2</sup>	0.055	1	0.055	0.76	0.4112	—
C <sup>2</sup>	3.610	1	3.610	49.89	0.0002	—
Residual	0.510	7	0.072	—	—	—
Lack of fit	0.076	3	0.025	0.24	—	No
Pure error	0.430	4	0.110	—	—	—
Cor total	5.800	16	—	—	—	—

Notes:  $R^2 = 0.9128, R^2_{Adj} = 0.8006, R^2_{Pre} = 0.6738, A_{Pre} = 9.359$ .

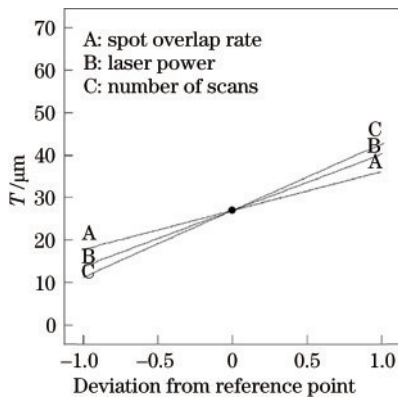


图 5 激光多参数耦合作用对  $T$  的影响

Fig. 5 Effect of laser multiparameter coupling on  $T$

时,获得的漆层去除厚度范围分别约为  $5 \sim 20 \mu\text{m}$ 、 $15 \sim 40 \mu\text{m}$ 、 $18 \sim 65 \mu\text{m}$ 。如图 6(b) 中响应曲面所示,其

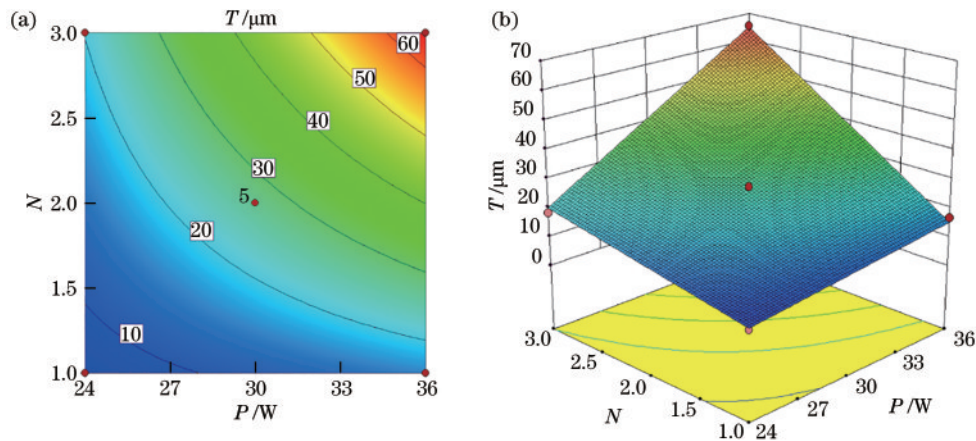


图 6 激光功率和扫描次数对漆层去除厚度的交互影响。(a)等高线图;(b)响应曲面图

Fig. 6 Interaction of laser power and number of scans on the thickness of paint removal. (a) Contour graph; (b) response graph

沿扫描次数方向的梯度远大于沿功率方向的梯度,表明扫描次数对漆层去除厚度的影响远大于激光功率。

#### 4.2 多参数耦合作用对表面粗糙度的影响

激光参数间的耦合作用对表面粗糙度的影响如图 7 所示。扫描次数具有峰值效应,表面粗糙度随光斑搭接率的增大而减小,随激光功率的增大而增大。

这与激光清洗过程中相邻凹坑的搭接形貌有关。如图 8 所示,激光作用后,会在表面留下间隔相等的“波浪式”形貌,其中表面微区内的“波谷”轮廓由凹坑深度决定,“波峰”轮廓由光斑搭接处的高度决定,“波峰”和“波谷”间的不平度将直接影响表面粗糙度大小<sup>[14]</sup>。当光斑搭接率增大时,“波峰”降低,漆层表面形貌高低起伏间距减小,  $S_a$  减小;当激光功率增大时,凹坑深度增加,“波谷”加深,漆层表面形貌高低起伏间距

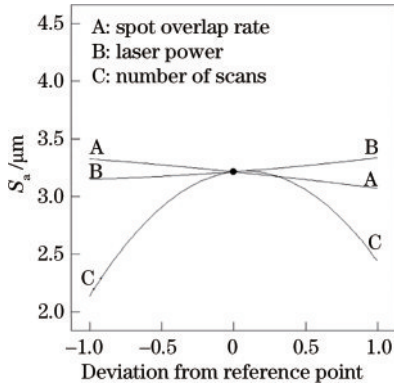


图 7 激光多参数耦合作用对  $S_a$  的影响

Fig. 7 Effect of laser multiparameter coupling on  $S_a$ .

增大,  $S_a$  增大。

取搭接率为 0 水平 (70%) 时, 激光功率和扫描次

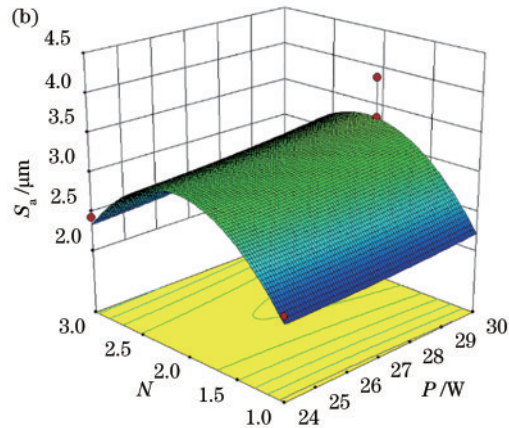
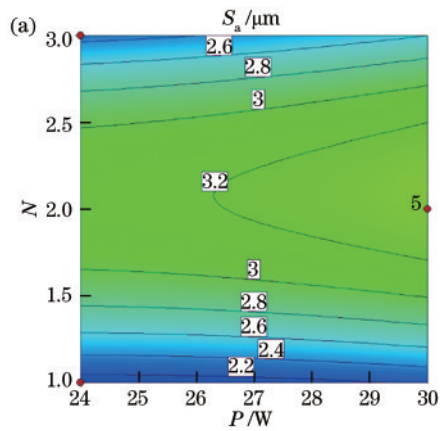


图 9 激光功率和扫描次数对表面粗糙度的交互影响。(a)等高线图;(b)响应曲面图

Fig. 9 Interaction of laser power and number of scans on  $S_a$ . (a) Contour graph; (b) response graph

## 5 工艺参数耦合优化及可控性效果验证

考虑到飞机蒙皮激光除漆的实际需求, 设定如下可控性目标: 1) 漆层去除厚度为分别为  $30 \mu\text{m}$  (实现分层可控除漆, 即仅去除面漆)、 $50 \mu\text{m}$  (面漆完全去除, 底漆部分去除); 2) 表面粗糙度取较大值 (由机械连接理论可知, 增加表面粗糙度可增加涂料与基材的界面面积, 进而增大涂料与基材间的附着力, 利于重新喷涂新漆<sup>[15]</sup>)。

利用 Design-Expert 软件对漆层去除厚度、表面粗糙度模型进行多目标优化求解<sup>[16]</sup>, 优化准则及权重如表 6 所示, 获得如下优化方案:

1) 漆层去除厚度为  $30 \mu\text{m}$  时, 光斑搭接率为 63.17%, 激光功率为 36 W, 扫描次数为 2; 2) 漆层去除厚度为  $50 \mu\text{m}$  时, 光斑搭接率为 76.63%, 激光功率为 36 W, 扫描次数为 2。

每种方案分别进行 3 组验证试验, 试验编号分别为  $L_1 \sim L_3$ 、 $T_1 \sim T_3$ 。试验样品宏观效果及测量结果如图 10、图 11 所示。如图 10(a) 所示, 样品表面存在少量白

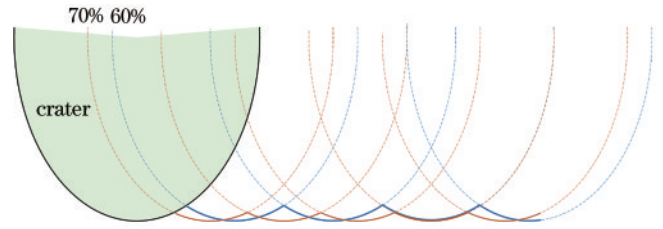


图 8 凹坑搭接形貌示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the lap joint shape of the crater

数对表面粗糙度的交互影响如图 9 所示。如图 9(a) 所示, 等高线呈椭圆形, 表明激光功率和扫描次数的交互作用较为明显。如图 9(b) 所示, 响应曲面关于平面  $N=2$  对称, 固定激光功率, 表面粗糙度随扫描次数的增加呈先增加后减小趋势。当扫描次数为 2 时, 可获得较大的表面粗糙度。

表 6 优化准则和权重

Table 6 Optimization criteria and weight

Name	Criteria			Weight
	Goal	Lower	Upper	
Spot overlap rate $\alpha / \%$	In range	60	80	1
Power $P / \text{W}$	In range	24	36	1
Number of scans $N$	Equal to 2	1	3	1
Paint layer removal thickness $T / \mu\text{m}$	Target (30/50)	6.85	65.50	1
Surface roughness $S_a / \mu\text{m}$	Maximize	2.10	4.16	1

色面漆, 露出大面积底漆, 可判定基本实现分层除漆; 如图 10(b) 所示, 漆层去除厚度为  $29.55 \mu\text{m}$ , 除漆厚度精度为  $0.45 \mu\text{m}$ ; 如图 10(c) 所示, 表面粗糙度为  $3.68 \mu\text{m}$ , 表面粗糙度较大。如图 11(a) 所示, 样品表面呈绿色, 面漆完全去除, 底漆部分去除; 如图 11(b) 所示, 漆层去除厚度为  $46.91 \mu\text{m}$ , 除漆厚度精度为  $3.09 \mu\text{m}$ ; 如图 11(c) 所示, 表面粗糙度为  $3.66 \mu\text{m}$ , 表面粗糙度较大。

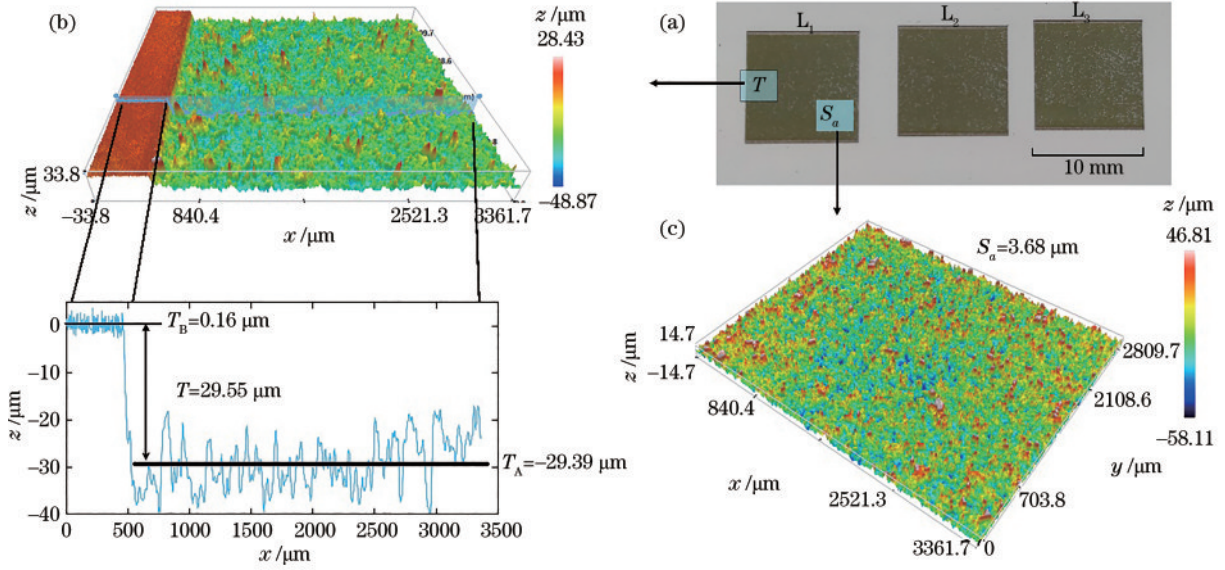


图 10 方案 1 样品宏观效果及测量结果。(a)宏观效果;(b)漆层去除厚度;(c)表面粗糙度

Fig. 10 Macro effect and measurements of the samples obtained in scheme 1. (a) Macro effect; (b) thickness of the paint layer removal; (c) surface roughness

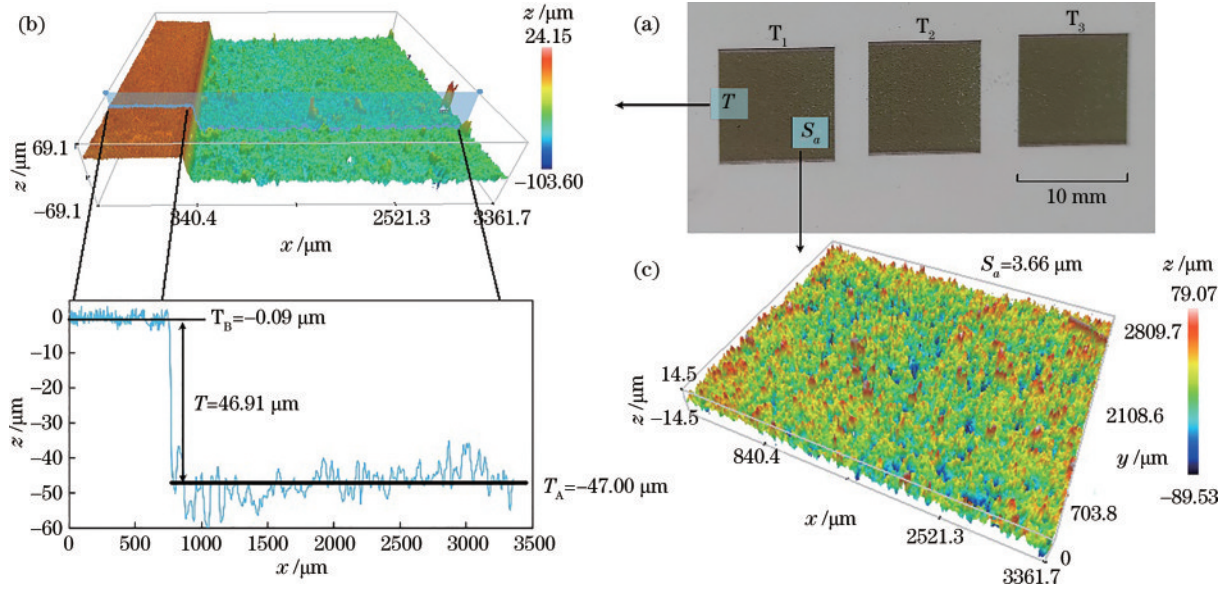


图 11 方案 2 样品宏观效果及测量结果。(a)宏观效果;(b)漆层去除厚度;(c)表面粗糙度

Fig. 11 Macro effect and measurements of the samples obtained in scheme 2. (a) Macro effect; (b) thickness of the paint layer removal; (c) surface roughness

每个样品的除漆厚度及表面粗糙度指标均进行 5 次测量,取其均值作为验证试验结果。模型预测结果及验证试验结果对比如表 7 所示。

结果表明:漆层去除厚度误差小于 5  $\mu\text{m}$ ,表面粗糙度在 3~4  $\mu\text{m}$  范围内,与可控性目标吻合良好,可实现厚度精度为  $\pm 5 \mu\text{m}$  的分层及厚度可控除漆。

表 7 参数耦合优化结果及试验验证

Table 7 Optimization results of parameter coupling and experimental verification

Target	No.	$T/\mu\text{m}$	Error/ $\mu\text{m}$	$S_a/\mu\text{m}$	Error/%	Target	No.	$T/\mu\text{m}$	Error/ $\mu\text{m}$	$S_a/\mu\text{m}$	Error/%
30 $\mu\text{m}$	$P_{re}$	30.00	—	3.95	—	50 $\mu\text{m}$	$P_{re}$	50.00	—	3.54	—
	$L_1$	29.06	0.94	3.58	0.37		$T_1$	45.54	4.46	3.37	0.17
	$L_2$	27.50	2.50	3.78	0.17		$T_2$	48.18	1.82	3.67	0.13
	$L_3$	28.37	1.63	3.64	0.31		$T_3$	51.88	1.88	3.45	0.09

## 6 结 论

本文针对飞机蒙皮“部分褪漆”的实际工程应用需求(精度可控性、厚度均匀性),基于响应面分析建立了激光参数(光斑搭接率、激光功率及扫描次数)与可控性指标(漆层去除厚度、表面粗糙度)间的数学模型。方差分析结果进一步验证了光斑搭接率、激光功率及扫描次数对漆层去除厚度、表面粗糙度存在显著影响。激光参数对漆层去除厚度的影响顺序依次为扫描次数、激光功率、光斑搭接率,且均为正相关。表面粗糙度随光斑搭接率的增大而减小,随激光功率的增大而增大,扫描次数对表面粗糙度的影响具有峰值效应。基于响应面分析方法建立的多漆层结构激光可控清除数学模型,可实现厚度精度为 $\pm 5 \mu\text{m}$ (目前民航除漆水平为 $\pm 15 \mu\text{m}$ ),以及较高表面质量的多漆层结构激光可控清除,为飞机蒙皮漆层的激光可控清除提供了方法指导与理论支撑。

### 参 考 文 献

- [1] 王振良,李锋,黄锋.浅析空客飞机外部褪喷漆工艺[J].航空维修与工程,2020(9):79-82.  
Wang Z L, Li F, Huang F. Brief analysis on exterior stripping and paint process of airbus aircraft[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2020(9): 79-82.
- [2] 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. Study on technology and mechanism of nanosecond pulse laser paint removal of aircraft skin[J]. Surface Technology, 2022, 51(7): 370-376, 396.
- [3] 张殊伦.飞机铝合金蒙皮红外激光除漆可控性与效率研究[D].广汉:中国民用航空飞行学院,2020:22-25.  
Zhang S L. Study on the controllability and efficiency of infrared laser paint removal of aircraft aluminum alloy skin [D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2020: 22-25.
- [4] 李佐.民航复合材料蒙皮激光除漆分层可控研究[D].广汉:中国民用航空飞行学院,2021:17-24.  
Li Z. Research on controllable layer of laser painting stripping for civil aircraft composite skin[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2021: 17-24.
- [5] 郭召恒,周建忠,孟宪凯,等.HT250灰铸铁纳秒脉冲激光除漆工艺研究[J].中国激光,2019,46(10):1002012.  
Guo Z H, Zhou J Z, Meng X K, et al. Nanosecond-pulsed-laser paint stripping of HT250 gray cast iron[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1002012.
- [6] 刘鹏飞,王思捷,殷凤仕,等.2024铝合金表面激光除漆工艺及机理[J].材料导报,2020,34(24):24121-24126.  
Liu P F, Wang S J, Yin F S, et al. Process and mechanism of laser removal of paint on 2024 aluminum alloy[J]. Materials Reports, 2020, 34(24): 24121-24126.
- [7] 李宇强,郭玲玉,蒋平,等.铝合金激光清洗表面形貌变化的试验研究及工艺参数优化[J].中国激光,2021,48(22):2202016.  
Li Y Q, Guo L Y, Jiang P, et al. Experimental study on surface morphology changes of aluminum alloy using laser cleaning and optimization of process parameters[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(22): 2202016.
- [8] Palanikumar K. Modeling and analysis for surface roughness in machining glass fibre reinforced plastics using response surface methodology[J]. Materials & Design, 2007, 28(10): 2611-2618.
- [9] 孙兴伟,张众,杨赫然,等.基于响应面法与粒子群算法的石油管螺纹激光清洗工艺参数优化[J].中国激光,2022,49(22):2202001.  
Sun X W, Zhang Z, Yang H R, et al. Optimization of laser cleaning process parameters of petroleum pipe threads based on response surface method and particle swarm optimization[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(22): 2202001.
- [10] 朱明,周建忠,孟宪凯,等.基于响应面的Q345C钢锈层激光清洗工艺参数优化[J].表面技术,2019,48(11):381-391.  
Zhu M, Zhou J Z, Meng X K, et al. Optimization of laser cleaning process parameters for Q345C steel rust layer based on response surface[J]. Surface Technology, 2019, 48(11): 381-391.
- [11] 杜双奎,杨海花,彭帮柱,等.试验优化设计与统计分析[M].2版.北京:科学出版社,2020:262-270.  
Du S K, Yang H H, Peng B Z, et al. Experimental design and statistical analysis[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2020: 262-270.
- [12] 李莉,张赛,何强,等.响应面法在试验设计与优化中的应用[J].试验室研究与探索,2015,34(8):41-45.  
Li L, Zhang S, He Q, et al. Application of response surface methodology in experiment design and optimization [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2015, 34(8): 41-45.
- [13] 唐秦汉.离心压缩机叶轮叶片表面硫化变性层激光清洗机理与试验研究[D].合肥:合肥工业大学,2016:42-45.  
Tang Q H. Laser cleaning of sulfide scale on compressor impeller blade[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016: 42-45.
- [14] 解宇飞,刘洪伟,胡永祥.船舶板材激光除锈工艺参数确定方法研究[J].中国激光,2016,43(4):0403008.  
Xie Y F, Liu H W, Hu Y X. Determining process parameters for laser derusting of ship steel plates[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 0403008.
- [15] Maroofi A, Navab S N, Ghomi H. Atmospheric air plasma jet for improvement of paint adhesion to aluminium surface in industrial applications[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020, 98: 102554.
- [16] 褚振涛,于治水,张培磊,等.基于响应面分析的T型接头激光深熔焊缝形貌预测及工艺参数优化[J].中国激光,2015,42(2):0203006.  
Chu Z T, Yu Z S, Zhang P L, et al. Weld profile prediction and process parameters optimization of T-joints of laser full penetration welding via response surface methodology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(2): 0203006.