

# 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

陈亚军\*, 鲁文婷, 杨雅婷

中国民航大学中欧航空工程师学院, 天津 300300

**摘要** 为研究激光去除复合材料基体表面漆膜的工艺规律并优化激光除漆参数,采用纳秒脉冲激光器对碳纤维复合材料表面的环氧树脂漆进行去除;基于响应面优化法,以除漆表面微观形貌、纤维暴露百分比、单脉冲除漆深度及微观不平度十点高度为指标对激光参数的影响规律进行分析并进行参数优化。结果表明:激光功率 $P$ 、重复频率 $f$ 、扫描速度 $v$ 分别对纤维暴露百分比、单脉冲除漆深度、微观不平度十点高度的影响最为显著。采用低频( $f < 25$  kHz)高功率( $P > 14$  W)激光慢速( $v < 130$  mm/s)扫描可以获得更少的漆层残留、更高的纤维暴露百分比及更高的除漆效率,采用中频( $40$  kHz  $< f < 60$  kHz)低功率( $P < 11$  W)激光快速( $v > 180$  mm/s)扫描可以获得更接近标准值( $45 \sim 55$   $\mu$ m)的微观不平度十点高度,可以保证除漆质量。最终得到最佳工艺参数组合为:激光功率 14.4 W,扫描速度 200 mm/s,重复频率 20 kHz。本研究可为今后复合材料基体除漆工艺参数的确定提供参考。

**关键词** 激光技术; 激光除漆; 碳纤维复合材料; 工艺参数; 响应面优化

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221134

## 1 引言

复合材料以其轻质、比强度和比刚度高、有效载荷大等优势被广泛应用于飞机、汽车等零部件结构中<sup>[1-3]</sup>。相关资料显示<sup>[4-5]</sup>,波音 787 使用的复合材料超过了整机质量的 50%,空客 A350 的复合材料用量已接近机体总质量的 53%。由此可见,复合材料作为制造业的重要材料,具有广阔的应用前景。飞机蒙皮、汽车车身、轮船表面的漆层可以起到装饰、防腐蚀、改善气动外形等作用<sup>[6-7]</sup>,但出于设备大修、基底检修及漆层修复等需求,需要定期去除老旧漆层并进行漆层的重新喷涂。传统的除漆工艺,如化学除漆、机械打磨除漆等,不仅费时费力,还极易造成基底损伤,大幅降低了零部件的使用寿命<sup>[8-10]</sup>。因此,新型激光除漆工艺应运而生,该工艺易于实现自动化,而且具有高效性、环保性、参数可控性及普适性等优势<sup>[11-13]</sup>,在工业领域的发展潜力不可估量。

Zhang 等<sup>[14]</sup>发现低能量密度下的主要除漆机制是激光烧蚀引起的相爆炸,高能量密度下的除漆机制除了相爆炸外还包括蒸发压力诱导的冲击效应。Oliveira 等<sup>[15]</sup>、Ligabo 等<sup>[16]</sup>对激光处理后的碳纤维复合材料进行观察后发现碳纤维表面覆盖着周期性波纹,这些周期性波纹有利于提高胶接质量,而且其周期性和方向取决于激光波长和入射角度。Li 等<sup>[17]</sup>研究了

激光扫描速度对 Q345 钢去漆后表面形貌的影响,结果发现过低的扫描速度会导致除漆表面十分粗糙,而过高的扫描速度会使漆层残余较多。Chen 等<sup>[18]</sup>利用激光诱导击穿光谱、声信号等表征了实时除漆效果,结果表明:对于单脉冲能量为 100 mJ、脉宽为 10 ns 的高斯激光,7 次脉冲扫描能够去除大部分漆层。元泉等<sup>[19]</sup>认为过高的激光能量会对基底造成明显的热损伤,适当的离焦量有利于非均匀漆层的去除。刘鹏飞<sup>[20]</sup>研究了激光能量密度及扫描速度对 2024 铝合金飞机蒙皮力学性能的影响,结果显示:激光能量密度的提高或扫描速度的降低可以提高除漆率,且除漆表面的显微硬度及弹性模量有所提高,表现出更加优异的力学性能。响应面分析法可以借助三维图形技术直观快速地确定优化参数,大幅降低复合材料中树脂损伤阈值低及导热性差造成的工艺研究的复杂性。Yan 等<sup>[21]</sup>借助响应面分析方法预测了激光除漆扫描路径的宽度,结果表明:提高激光功率、降低扫描速度可以增大激光扫描路径的宽度。周建忠课题组<sup>[22]</sup>基于响应面分析法建立了激光工艺参数与除漆表面粗糙度、成分因子之间关系的数学模型,模型的预测结果显示光斑搭接率、激光功率分别对表面成分、表面粗糙度的影响最显著。杨嘉年<sup>[23]</sup>采用响应面分析法对激光去除 AH36 船用钢表面环氧树脂漆层的参数进行优化,最终得到的最优工艺参

收稿日期: 2020-08-11; 修回日期: 2022-09-12; 录用日期: 2022-10-12; 网络首发日期: 2022-10-22

基金项目: 天津市研究生科研创新项目(航空专项)(2021YJSO2S11)

通信作者: \*yjchen@cauc.edu.cn

数组合为:激光能量密度  $45 \text{ J/cm}^2$ ,扫描速度  $4000 \text{ mm/s}$ ,扫描间距  $35 \mu\text{m}$ ,单位面积能量密度  $64.3 \text{ J/cm}^2$ 。

国内外研究人员已对金属基体表面漆层的激光去除工艺进行了大量研究,但针对复合材料基体表面激光除漆的相关研究还较为匮乏,特别是我国将复合材料应用于航空工业的时间较晚,利用激光技术进行复合材料表面除漆的研究基本处于起步阶段。此外,目前的激光除漆研究大多将残漆率、表面粗糙度作为评价指标,但实际上不仅要考虑除漆效果,还要重视除漆效率以及除漆后基体的表面质量,因此,选取能够综合反映除漆效果、除漆效率以及除漆后基体表面质量的评价指标尤为重要。

本课题组基于 3 因素 3 水平 Box-Behnken 试验设计,选取激光功率  $P$ 、脉冲重复频率  $f$  及扫描速度  $v$  为输入因子,通过构建输入因子与除漆清洁度、工艺效率及工业再应用指标间的数学模型,研究了激光参数对碳纤维复合材料表面漆层去除效果的影响规律并进行工艺参数优化,以获得除漆效果优异、效率适中且再喷漆质量有保证的工艺参数组合。

## 2 试验条件与方法

### 2.1 试样制备与试验设备

本次试验选用碳纤维复合材料为基底,将其切割成尺寸为  $20 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$  的试样,并在其表面喷涂环氧树脂漆。所用激光除漆设备型号为 YLP-SD20L,该设备的主要技术参数如表 1 所示。在试验过程中,将试样通过夹具固定在加工平台上,调整激光加工头与试样间距,激光沿“弓”字形路径进行扫描,如图 1 所示。

### 2.2 漆层成分及截面微观形貌

环氧树脂漆由漆料、稀释剂和固化剂调配而成,其中漆料的主要成分为铬酸锶  $\text{SrCrO}_4$ 、2,2'-(1-甲基亚乙基)双(4,1-亚苯基甲醛)]双环氧乙烷的均聚物  $(\text{C}_{21}\text{H}_{24}\text{O}_4)_x$ 、2-庚酮  $\text{C}_7\text{H}_{14}\text{O}$ 、苯酚与甲醛和缩水甘油醚的聚合物  $(\text{C}_6\text{H}_6\text{O} \cdot \text{CH}_2\text{O})_x$ 、甲苯  $\text{C}_7\text{H}_8$ 、苯甲醇  $\text{C}_7\text{H}_8\text{O}$

表 1 激光除漆系统的主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of laser paint removal system

Technical parameter	Numerical value
Laser wavelength $\lambda / \text{nm}$	1064
Maximum laser power $P_{\text{max}} / \text{W}$	20
Single pulse energy $e / \text{mJ}$	$< 1$
Pulse width $\tau / \text{ns}$	110–140
Repetition frequency $f / \text{kHz}$	20–80
Scanning speed $v / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$< 12000$
Focal length / mm	160
Spot diameter / $\mu\text{m}$	20
Operating voltage / V	220
Minimum line width / mm	0.02
Marking range / $(\text{mm} \times \text{mm})$	$100 \times 100$
Total power / W	$\leq 500$

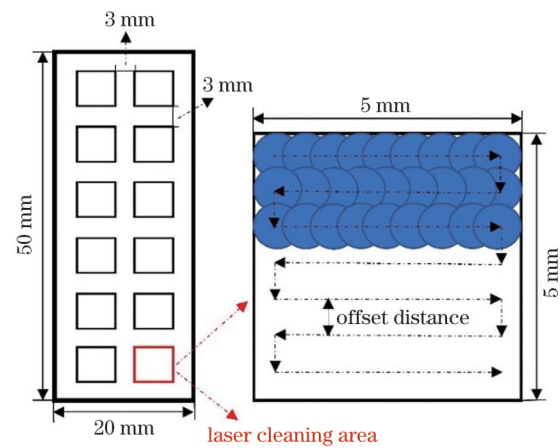


图 1 激光除漆扫描路径示意图

Fig. 1 Schematic of scanning path of laser paint removal

以及对叔丁基苯酚  $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{O}$ 。环氧底漆具有良好的力学性能及附着力,在液体介质以及潮湿、盐雾等工况下具有良好的抗腐蚀能力。图 2(a)、(b)分别为环氧漆膜横截面放大 150 倍、400 倍之后的微观形貌,可见,其与基底的界限分明且漆层厚度均匀。分别测定 5 个不同位置的漆层厚度,其值分别为  $89.8$ 、 $90.8$ 、 $91.3$ 、 $90.3$ 、

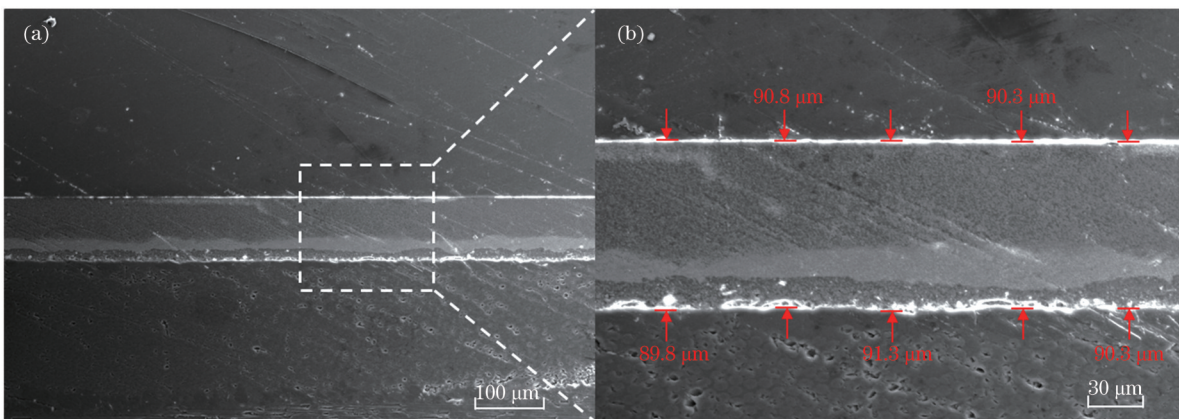


图 2 试样表面的环氧底漆。(a)漆层厚度分布图;(b)漆层微观形貌图

Fig. 2 Epoxy primer on sample surface. (a) Paint thickness distribution; (b) morphology of paint

90.3 μm, 由此可以计算出环氧底漆的平均厚度为 90.5 μm, 所测数据的最大偏离程度约为 0.88%, 符合工艺要求。

### 2.3 试验方案

作为一种操作次数少、试验周期短、结果精度高的工艺参数优化方法, 响应面分析法以数理统计优化为基础, 通过合理且次数有限的试验设计构建各因子与响应值的多元二次回归方程, 包含各显著因子的一次项、交叉项及二次项, 可以快速、准确地实现参数优化、响应值预测及误差分析。假设有  $n$  个可测、可控的独立变量(输入因子), 其与响应值之间的函数关系为

$$R = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{j=1}^n b_j x_j^2 + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n b_{kl} x_k x_l + \epsilon, \quad (1)$$

式中:  $R$  为预测响应值(考查因子);  $b$  为回归系数;  $\epsilon$  为误差项。

基于 3 因素 3 水平 Box-Behnken 试验设计(BBD), 选取  $P$ 、 $f$ 、 $v$  作为输入因子, 试验水平如表 2 所示。除漆结束后, 采用 Image Pro Plus 软件计算除漆表面碳纤维暴露百分比  $E$ , 采用激光共聚焦显微镜测定除漆深度、除漆表面微观不平度十点高度  $R_z$  以及单脉冲除漆深度  $D$ (表征漆层烧蚀速率, 即除漆效率)。最终用纤维暴露百分比  $E$ 、单脉冲除漆深度  $D$  及微观不平度十点高度  $R_z$  共同组成优化分析的响应值。试验设计矩阵及结果如表 3 所示。

表 2 响应面优化试验输入因子及水平设计

Table 2 Response surface optimization test input factors and level design

Factor	Level		
	Low	Medium	High
Laser scanning speed $v / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	130	165	200
Laser power $P / \text{W}$	11	13	15
Laser repetition frequency $f / \text{kHz}$	20	50	80

## 3 试验结果与分析

### 3.1 数学模型与方差分析

利用 Design Expert 软件对响应面优化试验所得结果的显著性、拟合精确度、多元相关系数及可信度等进行误差统计分析。纤维暴露百分比  $E$  数学模型的方差分析如表 4 所示, 表中  $p$  值代表噪声造成误差的概率, 认为  $p < 0.05$  为模型显著。表中  $F = 30.69 > F_{0.05}(8, 8) = 3.438$ , 表明模型在 95% 水平下显著成立, 而且  $p < 0.0001$ , 也能证明模型显著。同时, 决定系数  $R^2 = 0.9753$ , 接近 1; 信噪比  $A_p = 16.1355$ , 远大于 4; 预测拟合系数  $R_{\text{Pred}}^2 = 0.8783$ , 与修正拟合系数  $R_{\text{Adj}}^2 = 0.9435$  基本吻合(差异小于 0.2)。表 4 所示的  $F$  值、失拟值、决定系数、信噪比及拟合系数均表明模型显著, 拟合良好。此外, 模型的一次项( $v$ 、 $P$ 、 $f$ )、二次项( $f^2$ )、交叉项( $vP$ 、 $vf$ 、 $Pf$ )的  $p$  值均小于 0.05, 为回归方程中的显著

表 3 响应面优化试验设计矩阵及试验结果

Table 3 Response surface optimization test design matrix and test results

No.	Parameter			Result		
	$v / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$P / \text{W}$	$f / \text{kHz}$	$E / \%$	$D / (\mu\text{m} \cdot \text{pulse}^{-1})$	$R_z / \mu\text{m}$
1	200	11	50	0	3.39	40.16
2	200	13	20	0.027	41.49	42.02
3	200	15	50	0.017	11.87	40.81
4	200	13	80	0	3.21	58.63
5	130	13	20	0.185	42.20	120.12
6	165	13	50	0.007	9.86	50.33
7	165	13	50	0.003	8.06	53.97
8	130	13	80	0.012	4.71	52.43
9	165	13	50	0.005	8.40	51.15
10	165	15	80	0.015	5.84	45.03
11	165	13	50	0.027	8.61	58.80
12	165	15	20	0.163	49.98	116.73
13	165	13	50	0.042	9.24	59.20
14	165	11	20	0.019	30.71	47.76
15	165	11	80	0	1.05	45.03
16	130	11	50	0	3.47	62.03
17	130	15	50	0.148	22.78	76.91

项。得出的纤维暴露百分比  $E$  的数学模型为

$$E = 0.017 - 0.038v + 0.041P - 0.046f - 0.033vP + 0.036vf - 0.032Pf + 0.024f^2. \quad (2)$$

单脉冲除漆深度  $D$  的数学模型的方差分析如表 5 所示。该模型的  $F$  值为 220.23 [ $F = 220.23 > F_{0.05}(7, 9) = 3.293$ ], 表明模型在 95% 水平下显著成立; 该模型的  $p$  值小于 0.0001, 进一步表明模型显著。此外, 该模型的决定系数  $R^2 = 0.9965$ , 接近 1; 信噪比  $A_p = 46.5331$ , 远大于 4; 预测拟合系数  $R_{\text{Pred}}^2 = 0.9512$ , 与修正拟合系数  $R_{\text{Adj}}^2 = 0.9920$  基本吻合(差异小于 0.2), 表明模型在样本数据的偏离态、方差波动性及噪声检验等方面具有相关一致性。模型中的显著项分别为一次项( $v$ 、 $P$ 、 $f$ )、二次项( $f^2$ )以及交叉项( $vP$ 、 $Pf$ ), 最终的数学模型表达式为

$$D = 8.83 - 1.65v + 6.48P - 18.7f - 2.71vP - 3.62Pf + 12.79f^2. \quad (3)$$

微观不平度十点高度  $R_z$  的数学模型的方差分析如表 6 所示。该模型的  $F$  值为 12.22 [ $F = 12.22 > F_{0.05}(6, 10) = 3.217$ ], 表明模型在 95% 水平下显著成立; 该模型的  $p$  值为 0.0004, 表明由噪声带来误差的概率为 0.04%, 模型显著。表 6 所示的  $F$  值、决定系数及信噪比同样表明了样本数据的相关一致性, 模型中的显著项为  $v$ 、 $P$ 、 $f$ 、 $vf$ 、 $Pf$ , 最终的数学模型表达式为

$$R_z = 60.06 - 16.24v + 10.56P - 15.69f + 21.08vf - 17.24Pf. \quad (4)$$

表 4  $E$  的数学模型的方差分析

Table 4 Analysis of variance of mathematical model of  $E$

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	$F$ -value	$p$ -value
Model	0.0589	9	0.0065	30.69	<0.0001
$v$	0.0113	1	0.0113	52.87	0.0002
$P$	0.0131	1	0.0131	61.61	0.0001
$f$	0.0167	1	0.0167	78.51	<0.0001
$vP$	0.0042	1	0.0042	19.84	0.0030
$vf$	0.0053	1	0.0053	24.82	0.0016
$Pf$	0.0041	1	0.0041	19.45	0.0031
$f^2$	0.0024	1	0.0024	11.04	0.0127
Residual	0.0015	7	0.0002		
Lack of fit	0.0003	3	0.0001	0.4045	0.7585
Pure error	0.0011	4	0.0003		
Cor total	0.0604	16			

表 5  $D$  的数学模型的方差分析

Table 5 Analysis of variance of mathematical model of  $D$

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	$F$ -value	$p$ -value
Model	3946.15	9	438.46	220.23	<0.0001
$v$	21.79	1	21.79	10.95	0.0130
$P$	336.14	1	336.14	168.84	<0.0001
$f$	2796.48	1	2796.48	1404.63	<0.0001
$vP$	29.37	1	29.37	14.75	0.0064
$Pf$	52.39	1	52.39	26.32	0.0014
$f^2$	689.14	1	689.14	346.14	<0.0001
Residual	13.94	7	1.99		
Lack of fit	11.88	3	3.96	7.73	0.0386
Pure error	2.05	4	0.5128		
Cor total	3960.09	16			

表 6  $R_e$  的数学模型的方差分析

Table 6 Analysis of variance of mathematical model of  $R_e$

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	$F$ -value	$p$ -value
Model	7987.31	6	1331.22	12.22	0.0004
$v$	2108.80	1	2108.80	19.36	0.0013
$P$	892.70	1	892.70	8.20	0.0169
$f$	1968.91	1	1968.91	18.08	0.0017
$vf$	1777.00	1	1777.00	16.32	0.0024
$Pf$	1189.25	1	1189.25	10.92	0.0080
Residual	1089.07	10	108.91		
Lack of fit	1019.78	6	169.96	9.81	0.0223
Pure error	69.29	4	10.0732		
Cor total	9076.38	16			

图 3 分别为  $E$ 、 $D$ 、 $R_e$  三个评价指标的实际值与预测值对比图,可以发现数据点基本位于对角线上,说明

实际值与预测值较为接近,即所建三类模型的拟合程度较高,可用于评估除漆后的表面质量。

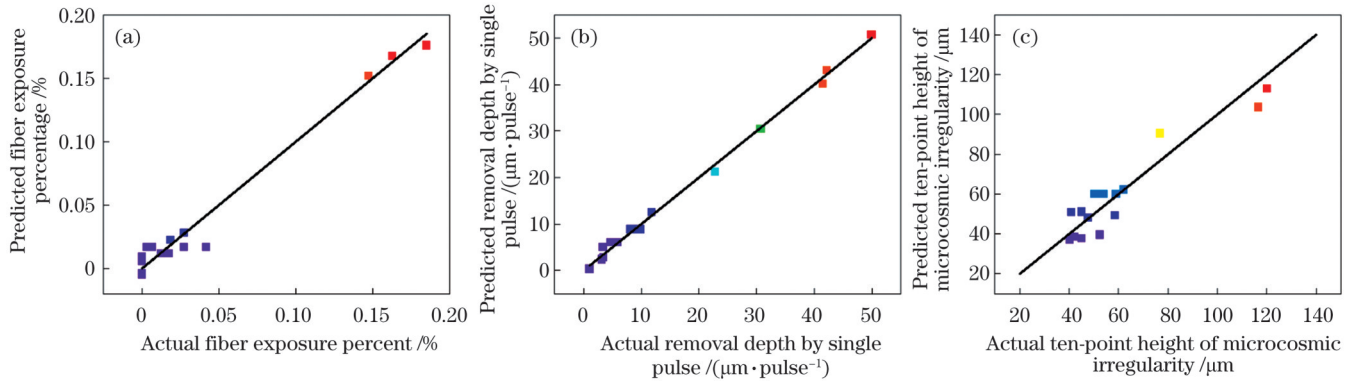


图 3 实际值与预测值的对比。(a)纤维暴露百分比  $E$ ; (b)单脉冲除漆深度  $D$ ; (c)微观不平度十点高度  $R$ 。

Fig. 3 Comparison of actual and predicted values. (a) Fiber exposure percentage  $E$ ; (b) single pulse paint removal depth  $D$ ; (c) ten-point height of microcosmic irregularity  $R$ 。

### 3.2 工艺参数对除漆质量的影响

#### 3.2.1 工艺参数对纤维暴露百分比的影响

激光功率( $P$ )、扫描速度( $v$ )及重复频率( $f$ )三因素交互作用对纤维暴露百分比 $E$ 的影响趋势如图4所示。可以发现:激光功率 $P$ 对纤维暴露百分比 $E$ 的影响最显著,且纤维暴露百分比 $E$ 随重复频率 $f$ 和扫描速度 $v$ 的升高而明显下降,但随激光功率 $P$ 正向变化。这是由于在激光除漆过程中,重复频率 $f$ 升高会导致出光质量下降,扫描速度 $v$ 加快会导致光斑搭接率减小,在上述两个因素的双重作用下,体系的热累积效应减弱,纤维暴露百分比下降;而随着激光功率 $P$ 提升,单位时间内体系吸收的激光能量增加,且漆层/基底热膨胀应力差增大,导致更多的漆层被去除,故纤维暴露百分比增大。

当扫描速度 $v=165$  mm/s时,激光功率 $P$ 、重复频率 $f$ 对指标 $E$ 的影响如图5所示。图5(a)中的等高线呈椭圆形,表明激光功率 $P$ 、重复频率 $f$ 的交互作用比较明显,且二者对指标 $E$ 的影响呈负相关。当激光功率 $P$ 固定为较低值时,指标 $E$ 随重复频率 $f$ 的变化趋势不明显,表明此时重复频率 $f$ 对指标 $E$ 的影响不显著;当 $P$ 固定为较高值时,纤维暴露百分比 $E$ 随重复频率 $f$ 升高而逐渐下降,20 kHz下的指标 $E$ 值较其他重复频

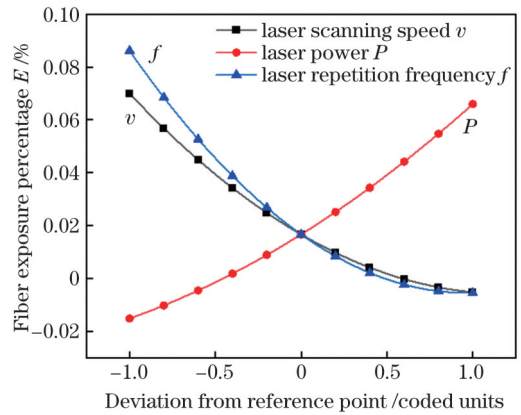


图 4 各因素交互作用对纤维暴露百分比的影响

Fig. 4 Effect of interaction of different factors on fiber exposure percentage

率下的更大。当重复频率 $f$ 确定为较高值时,指标 $E$ 的变化坡度较平缓,表明此时激光功率 $P$ 对纤维暴露百分比的影响较弱;当重复频率 $f$ 确定为较低值时,指标 $E$ 随激光功率 $P$ 的增大而增大。当激光功率大于70%  $P_{max}$ 且重复频率小于30 kHz时,可以获得更高的纤维暴露百分比。图5(b)为响应曲面图,可以发现由高频低功率到低频高功率的响应曲面梯度较大。这是由于高频低功率激光的单脉冲能量较低,且高频带来

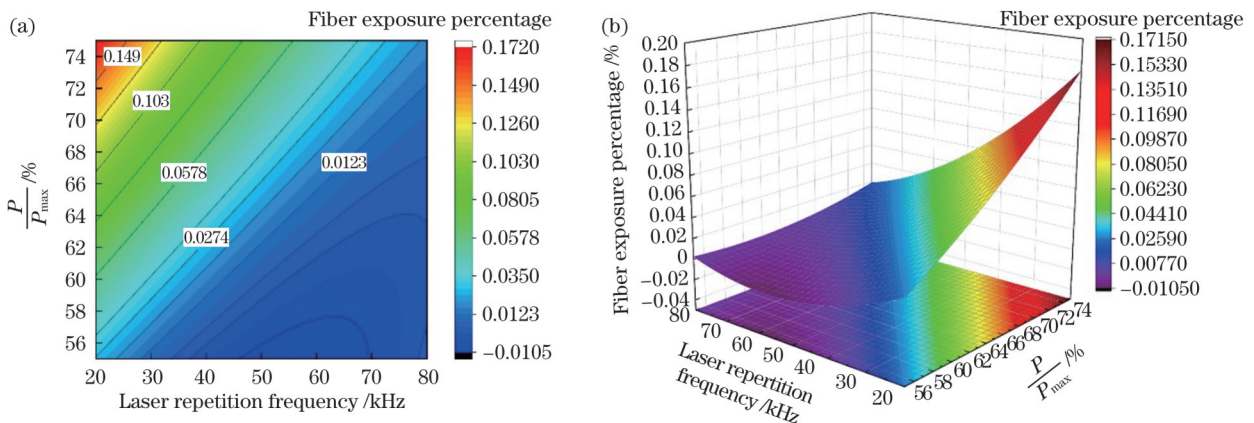


图 5 激光功率和重复频率对纤维暴露百分比的影响。(a)等高线图;(b)响应曲面图

Fig. 5 Effect of laser power and repetition frequency on fiber exposure percentage. (a) Contour plot; (b) response surface plot

的出光速度加快无法抵消出光质量下降,因此单位时间内体系吸收的激光能量较低,不足以去除漆层,纤维没有裸露;随着重复频率 $f$ 下降和激光功率 $P$ 提升,出光速度和出光质量达到平衡,单脉冲能量升高,漆层被逐步去除且纤维随之裸露。此外可以看出,指标 $E$ 在重复频率 $f$ 、激光功率 $P$ 单一方向上的梯度较为相近,但在激光功率 $P$ 方向的梯度略大,表明二者对指标 $E$ 具有同阶影响力,且 $P$ 的影响略强。

图 6 为激光功率 $P=65\%P_{\max}$ 时,扫描速度 $v$ 、重复频率 $f$ 对指标 $E$ 的影响。由图 6(a)可以看出等高线呈椭圆形,这表明重复频率 $f$ 、扫描速度 $v$ 的交互作用较明显,且二者呈正相关。当重复频率 $f$ 固定时,指标 $E$ 随扫描速度 $v$ 的降低而增加。这是由于当扫描速度减慢时,相邻光斑之间的搭接率增大,单位面积吸收的激

光能量增多,漆层更易被去除。当扫描速度 $v$ 固定时,指标 $E$ 随重复频率 $f$ 的降低而升高。这是由于低频脉冲的出光质量更好,单脉冲能量更高,对漆层结构的破坏力更强,会导致更多的纤维裸露。此外,当扫描速度 $v < 145 \text{ mm/s}$ 且重复频率 $f < 30 \text{ kHz}$ 时,可以获得更高的纤维暴露百分比。图 6(b)显示:从高频快速扫描到低频慢速扫描,指标 $E$ 的梯度较大,且后者更易获得干净的除漆表面。

重复频率 $f=50 \text{ kHz}$ 时,扫描速度 $v$ 、激光功率 $P$ 对指标 $E$ 的影响如图 7 所示,可见:激光功率 $P$ 、扫描速度 $v$ 的交互影响较为明显,且二者呈负相关;高功率慢速扫描可以获得更高的指标 $E$ 值。

结合以上分析可知,低频、高功率激光慢速扫描可以获得更高的纤维暴露百分比。

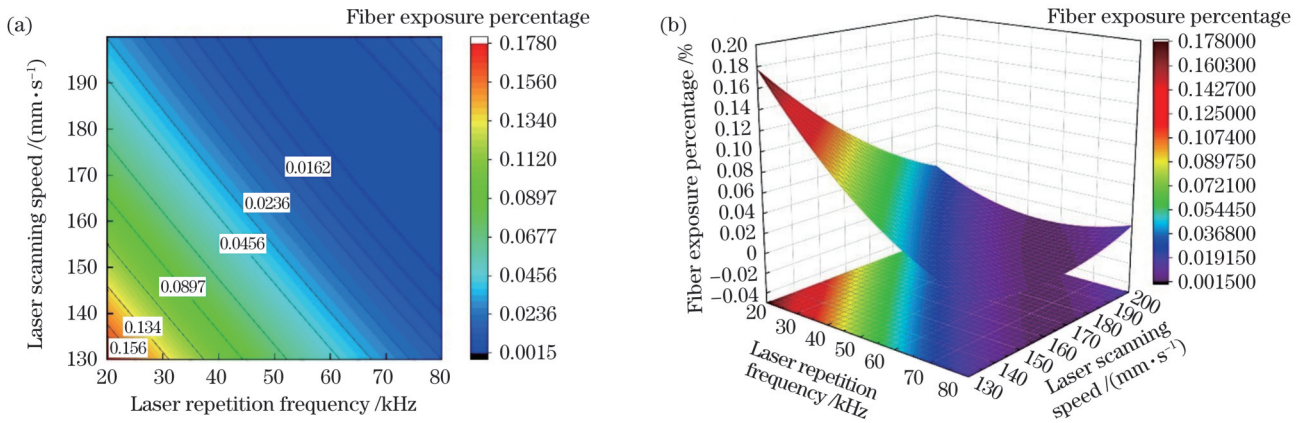


图 6 扫描速度和重复频率对纤维暴露百分比的影响。(a)等高线图;(b)响应曲面图

Fig. 6 Effect of scanning speed and repetition frequency on fiber exposure percentage. (a) Contour plot; (b) response surface plot

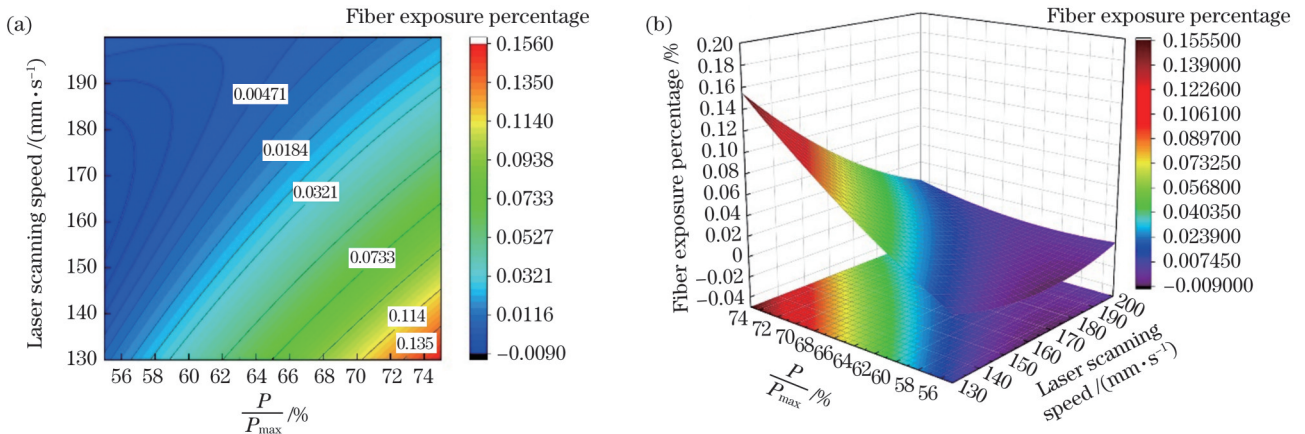


图 7 激光功率和扫描速度对纤维暴露百分比的影响。(a)等高线图;(b)响应曲面图

Fig. 7 Effect of laser power and scanning speed on fiber exposure percentage. (a) Contour plot; (b) response surface plot

### 3.2.2 工艺参数对单脉冲除漆深度的影响

激光功率 $P$ 、扫描速度 $v$ 及重复频率 $f$ 对单脉冲除漆深度 $D$ (漆层烧蚀速率)的影响趋势如图 8 所示。可以发现:扫描速度 $v$ 对指标 $D$ 的影响不大,重复频率 $f$ 对指标 $D$ 的影响最为显著,且指标 $D$ 随重复频率 $f$ 的升高而明显降低。这是由高频激光出光速度加快无法弥补出光质量下降造成的(即高频脉冲的单脉冲能量

降低,单脉冲对漆层的破坏能力随之减弱),此时,出光速度加快带来的脉冲数增多无法抵消单脉冲除漆能力的下降,因而漆层烧蚀速率降低,激光除漆整体效果下降。此外,漆层烧蚀速率随激光功率 $P$ 的增大呈线性增加,这可以通过单脉冲能量变化来解释。单脉冲能量的表达式为

$$E_{\text{pulse}} = P/f, \quad (5)$$

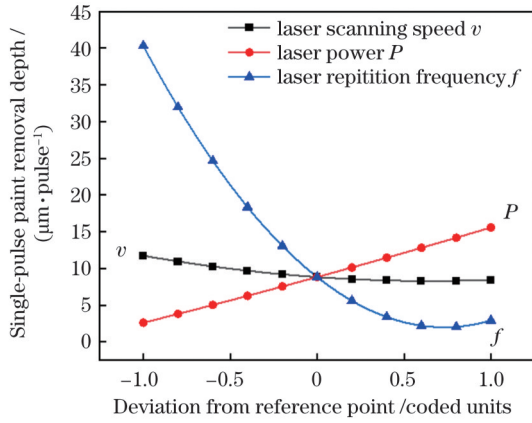


图 8 各因素交互作用对单脉冲除漆深度的影响

Fig. 8 Effect of interaction of different factors on single-pulse paint removal depth

激光功率增大使得单脉冲能量  $E_{\text{pulse}}$  增加,因此单脉冲对漆层的破坏能力增强,单脉冲烧蚀深度进一步增加。

当扫描速度  $v=165 \text{ mm/s}$  时,激光功率  $P$ 、重复频率  $f$  对指标  $D$  的影响如图 9 所示。图 9(a) 所示等高线呈椭圆状,表明重复频率  $f$  和激光功率  $P$  的交互影响比较明显且二者呈负相关。无论采用低频脉冲还是高频脉冲,指标  $D$  的变化坡度均较为平缓,表明此时激光功率  $P$  对漆层烧蚀速率的影响并不显著。当激光功率  $P$  固定时,指标  $D$  随重复频率  $f$  的增加而逐渐降低,这是由于高频脉冲的单脉冲能量和除漆能力下降,导致除漆深度减小。此外,低频 ( $f < 25 \text{ kHz}$ ) 高功率 ( $P > 70\% P_{\text{max}}$ ) 脉冲可以获得更高的除漆效率 ( $D > 30 \mu\text{m}/\text{pulse}$ )。图 9(b) 所示的响应曲面图显示功率方向上指标  $D$  的梯度较小,表明激光功率对指标  $D$  的影响较弱。

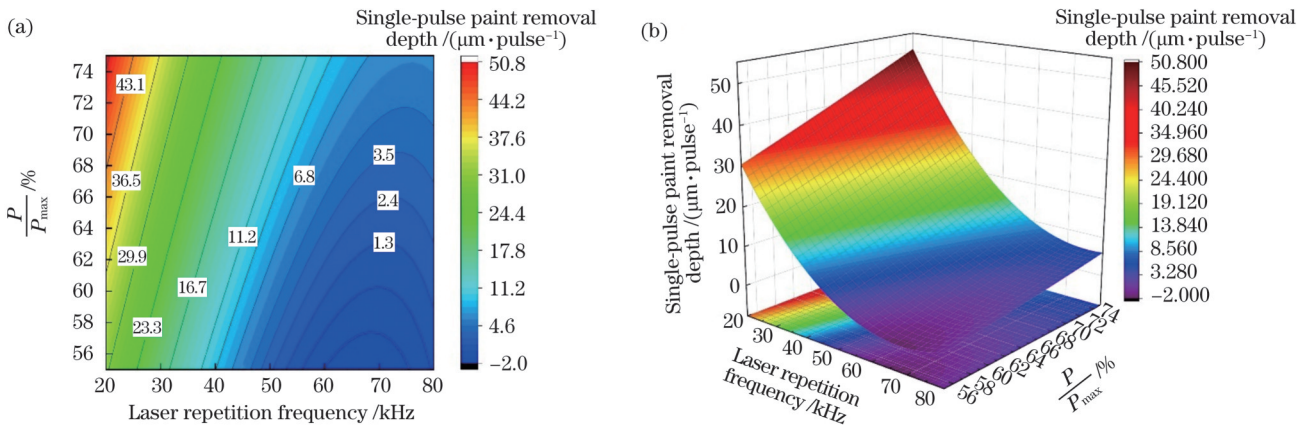


图 9 激光功率和重复频率对单脉冲除漆深度的影响。(a) 等高线图; (b) 响应曲面图

Fig. 9 Effect of laser power and repetition frequency on single-pulse paint removal depth. (a) Contour plot; (b) response surface plot

当激光功率  $P=65\% P_{\text{max}}$  时,扫描速度  $v$ 、重复频率  $f$  对指标  $D$  的影响如图 10 所示。图 10(a) 所示等高线图表明:重复频率  $f$  与扫描速度  $v$  具有明显的交互作用,且指标  $D$  随扫描速度  $v$  的变化非常平缓,表明扫描速度  $v$  对除漆效率的影响不太显著。这一点也可以通过图 10(b) 所示响应曲面图中扫描速度  $v$  方向上指标  $D$  的梯度最小来证明。此外,当扫描速度  $v$  固定时,除漆效率随重复频率  $f$  的降低而升高,并在重复频率为

20 kHz 时达到峰值,这可用单脉冲除漆能力的变化来解释。此外,等高线图左侧的竖直条带对应漆层烧蚀速率的极大值,在实际操作时保证重复频率  $f < 28 \text{ kHz}$ ,则 130~200 mm/s 之间的任一扫描速度均可以实现较高的除漆效率。当重复频率  $f=50 \text{ kHz}$  时,扫描速度  $v$ 、激光功率  $P$  对指标  $D$  的影响如图 11 所示。图 11(a) 所示等高线图意味着扫描速度  $v$  与激光功率  $P$  具有较强的交互作用。固定激光功率  $P$  后,扫描速

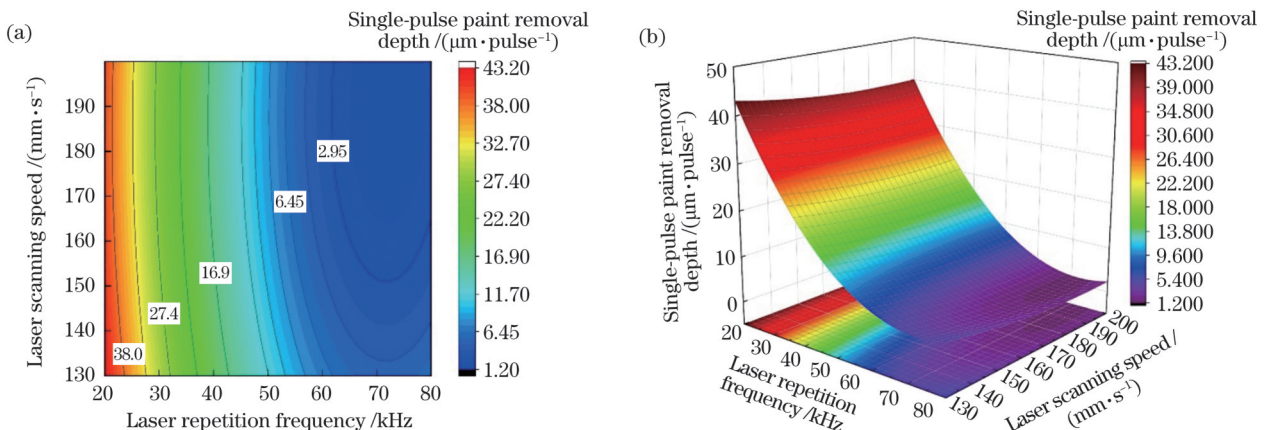


图 10 扫描速度和重复频率对单脉冲除漆深度的影响。(a) 等高线图; (b) 响应曲面图

Fig. 10 Effect of scanning speed and repetition frequency on single-pulse paint removal depth. (a) Contour plot; (b) response surface plot

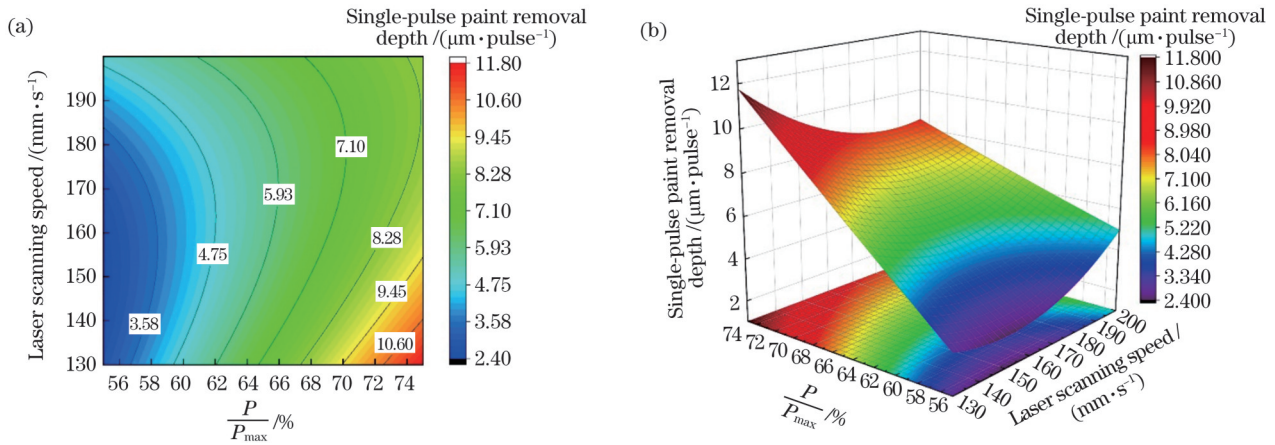


图 11 扫描速度和激光功率对单脉冲除漆深度的影响。(a)等高线图;(b)响应曲面图

Fig. 11 Effect of scanning speed and laser power on single-pulse paint removal depth. (a) Contour plot; (b) response surface plot

度  $v$  对除漆效率的影响较弱;而当固定扫描速度  $v$  后,指标  $D$  随激光功率  $P$  的升高而增大。这是由于此时体系吸收能量较多,漆层内部的热烧蚀及热振动效应加剧,除漆效率有所提升。此外,高功率激光的慢速扫描可以获得更高的除漆效率。图 11(b) 所示响应曲面图显示指标  $D$  在扫描速度  $v$  方向上的梯度小于在激光功率  $P$  方向上的梯度,说明激光功率  $P$  对指标  $D$  的影响更为显著,进一步验证了扫描速度  $v$  对指标  $D$  的影响较弱。

结合以上分析可知,低频高功率激光慢速扫描可以获得更高的除漆效率。

### 3.2.3 工艺参数对微观不平度十点高度的影响

图 12 反映的是参数交互作用对微观不平度十点高度  $R_z$  的影响,由曲线走势可知扫描速度  $v$  对指标  $R_z$  的影响最为显著。 $R_z$  随扫描速度  $v$  和重复频率  $f$  的提升而明显下降,这是由于在低频脉冲慢速扫描时,相邻光斑的搭接率很高,且低频脉冲出光质量优异,单脉冲烧蚀漆层的能力较强,因而漆面烧蚀凹坑的直径和深度增大, $R_z$  随之增加。此外, $R_z$  随激光功率  $P$  的变化规律与前述相反。这是由于在低功率下,漆面烧蚀凹坑

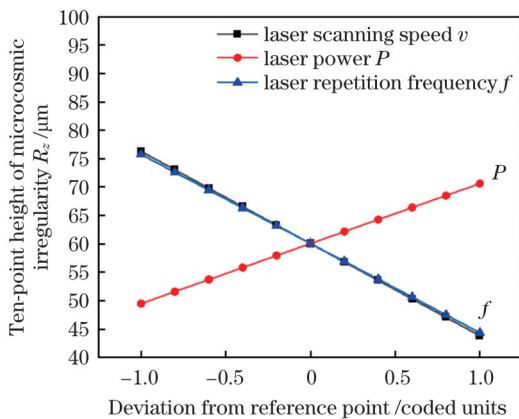


图 12 各因素交互作用对微观不平度十点高度的影响

Fig. 12 Influence of interaction of different factors on ten-point height of microcosmic irregularity

内部的熔浆较少且流动性较低,大多数熔浆堆积在烧蚀坑附近,降低了除漆表面的粗糙程度,导致  $R_z$  较低;当功率升高后,单位时间内熔浆吸收的热量增多,熔浆的流动性增强,易在激光脉冲的冲击作用下向四周溅射,导致  $R_z$  增大。

当扫描速度  $v=165 \text{ mm/s}$  时,重复频率  $f$ 、激光功率  $P$  对  $R_z$  的影响如图 13 所示。图 13(a) 所示等高线图表明重复频率  $f$ 、激光功率  $P$  的交互作用比较明显。一方面,当采用高频脉冲时,指标  $R_z$  在激光功率  $P$  方向上变化的梯度较小,表明此时的单脉冲质量较差,烧蚀漆层的能力较弱,无论如何提高激光功率也无法大幅改变  $R_z$ 。当采用低频脉冲时,激光功率  $P$  的微小改变即可导致  $R_z$  大幅变化,这是由于随着激光功率  $P$  提升,体系输入的激光能量增加,同时单脉冲质量优异且烧蚀能力较强,漆层的烧蚀及热振动效应加剧,同时承受脉冲激光的冲击作用,形成了烧蚀凹坑,导致  $R_z$  增大。另一方面,当激光功率  $P$  较低时,指标  $R_z$  随重复频率  $f$  的变化并不显著。这是由于当激光功率过低时,材料表面接收到的激光辐照不足,无论如何调整重复频率  $f$  也不足以破坏漆层结构。当激光功率  $P$  较高时,指标  $R_z$  随重复频率  $f$  的升高而逐渐减小。这是由于低频脉冲的单脉冲烧蚀能力较强,入射漆面时产生烧蚀凹坑,使得  $R_z$  增大。此外,低功率或中值频率对应的参数组合可以获得更接近标准值的  $R_z$  (45~55  $\mu\text{m}$ )。图 13(b) 所示响应曲面图显示  $R_z$  在重复频率  $f$ 、激光功率  $P$  方向上变化的梯度相近,表明这两个参数对  $R_z$  具有同阶影响力。

当激光功率  $P=65\% P_{max}$  时,扫描速度  $v$ 、重复频率  $f$  对指标  $R_z$  的影响如图 14 所示。图 14(a) 所示等高线显示两参数的交互作用较为明显。一方面,当采用高频脉冲时,指标  $R_z$  在扫描速度  $v$  方向上变化的梯度较小。这是由于高频脉冲的单脉冲质量较差,无法通过调整扫描速度来补偿激光烧蚀能力的下降。当采用低频脉冲时,指标  $R_z$  随扫描速度  $v$  的增加而降低。这是由于慢速扫描时的热累积效应更强,漆层烧蚀效应更



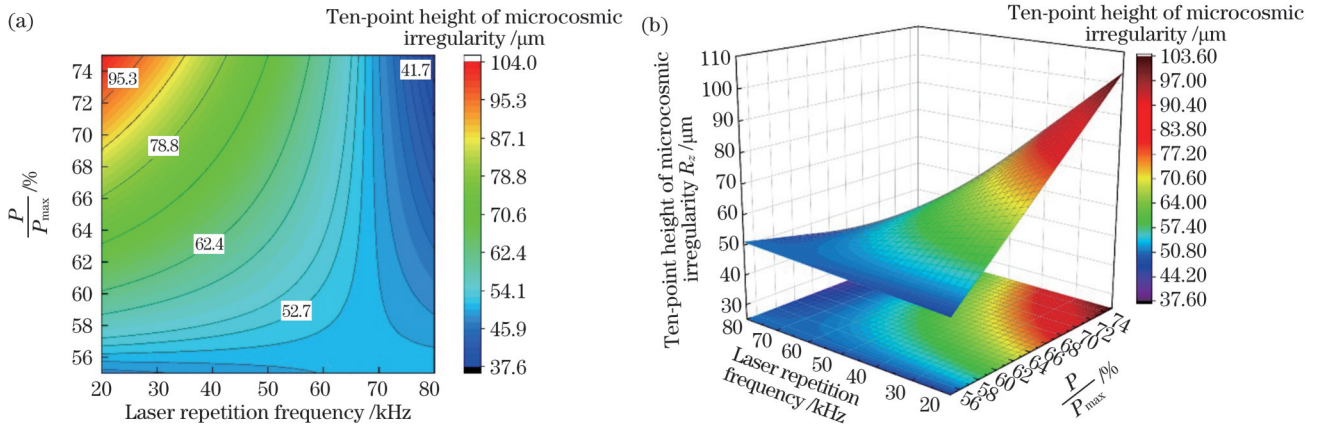


图 13 激光功率和重复频率对微观不平度十点高度的影响。(a)等高线图;(b)响应曲面图

Fig. 13 Effect of laser power and repetition frequency on ten-point height of microcosmic irregularity. (a) Contour plot; (b) response surface plot

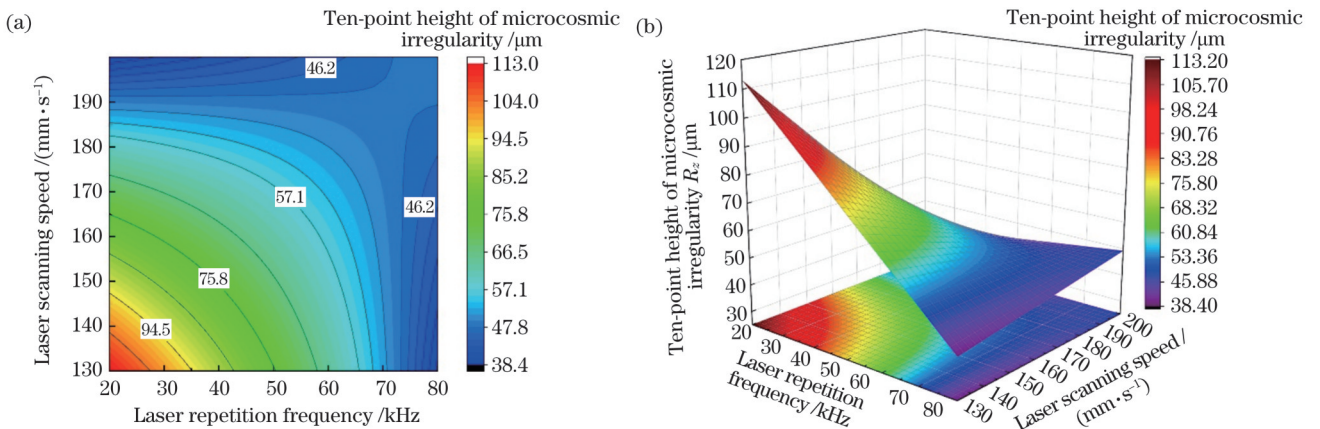


图 14 扫描速度和重复频率对微观不平度十点高度的影响。(a)等高线图;(b)响应曲面图

Fig. 14 Influence of scanning speed and repetition frequency on ten-point height of microcosmic irregularity. (a) Contour map; (b) response surface map

显著,因此漆面烧蚀凹坑增多,导致  $R_z$  增大。另一方面,当采用快速扫描时,指标  $R_z$  随重复频率  $f$  增大变化得较为平缓。这是由于快速扫描带来的光斑搭接率下降导致体系能量输入不足,无法通过调整频率大幅改善除漆现状。降低扫描速度  $v$  后,指标  $R_z$  随重复频率  $f$  增加而逐渐降低,这一点可以通过低频脉冲较优异的单脉冲烧蚀能力来解释。此外,中频激光或快速扫描对应的参数组合可以获得更接近标准值的  $R_z$  ( $45 \sim 55 \mu\text{m}$ )。图 14(b) 所示响应曲面图显示指标  $R_z$  在重复频率  $f$ 、扫描速度  $v$  方向上变化的梯度相近,这意味这两个参数对  $R_z$  的影响力同阶。重复频率  $f=50 \text{ kHz}$  时,激光功率  $P$ 、扫描速度  $v$  对指标  $R_z$  的影响如图 15 所示。图 15(a) 所示等高线图表明激光功率  $P$ 、扫描速度  $v$  具有较明显的交互作用,且高功率激光慢速扫描对漆层的烧蚀作用更强,导致  $R_z$  增大,而低功率激光快速扫描可获得更接近标准值的  $R_z$  ( $45 \sim 55 \mu\text{m}$ )。图 15(b) 所示响应曲面图同样表明指标  $R_z$  在扫描速度  $v$ 、激光功率  $P$  方向上变化的梯度相近,说明这两个参数对除漆表面的平整度具有同阶影响力。

结合以上分析可知,中频低功率激光快速扫描可

以获得接近标准值的  $R_z$  ( $45 \sim 55 \mu\text{m}$ ),可以保证除漆质量。

### 3.3 参数优化

利用 Design Expert 软件求解优化工艺参数组合,优化目标为:1) 纤维暴露百分比  $E$  和单脉冲除漆深度  $D$  取较大值,以保证除漆表面的洁净度及工艺效率;2) 微观不平度十点高度  $R_z$  的取值在  $45 \sim 55 \mu\text{m}$  范围内,以保证除漆表面具有一定粗糙度,满足工业应用要求。优化准则及权重如表 7 所示。最终的优化结果如表 8 所示,当  $v=200 \text{ mm/s}$ 、 $P=71.83\%P_{\text{max}}$  ( $14.4 \text{ W}$ )、 $f=20 \text{ kHz}$  时,除漆表面质量较好且工艺效率处于较优水平。为验证优化结果的可靠性,在较优工艺参数组合下重新进行激光除漆试验,试验结果表明:纤维暴露百分比  $E$  为  $0.073\%$ ,单脉冲除漆深度  $D$  为  $46.05 \mu\text{m/pulse}$ ,微观不平度十点高度  $R_z$  为  $55.3 \mu\text{m}$ ,与优化结果较为接近。

最后,对未除净表面及优化参数除漆表面的微观形貌进行表征,结果如图 16 所示。可以发现未除净表面上的碳纤维完整且排列整齐,没有较多结构缺陷,但表面附着了大量残漆、灰尘及杂质,其中前者是激光烧蚀漆层的裂解产物及应力振动产生的漆层碎片,后两

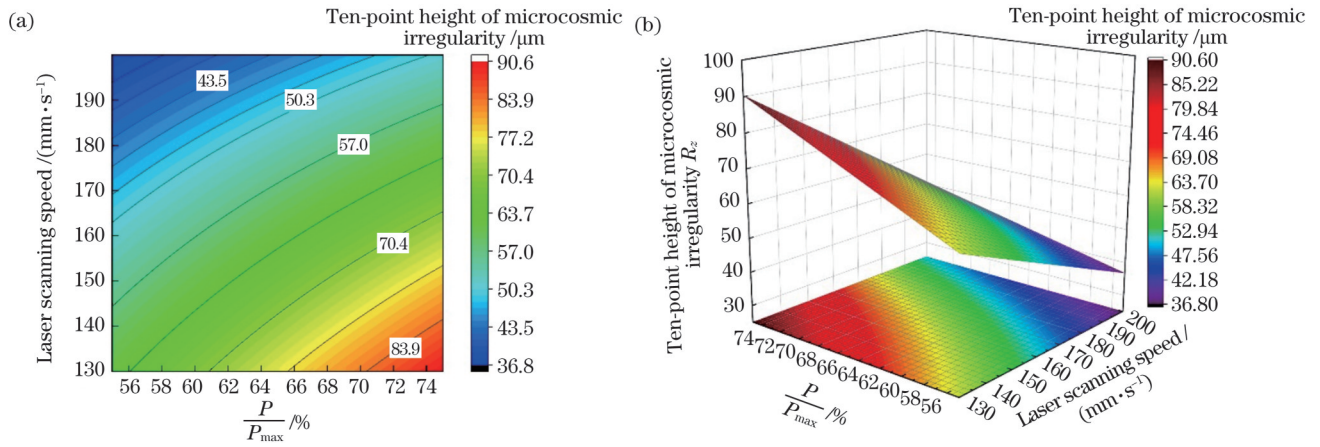


图 15 扫描速度和激光功率对微观不平度十点高度的影响。(a)等高线图;(b)响应曲面图

Fig. 15 Effect of scanning speed and laser power on ten-point height of microcosmic irregularity. (a) Contour plot; (b) response surface plot

表 7 优化准则和权重

Table 7 Optimization criteria and weight

Technical parameter	Criteria			Weight
	Goal	Lower limit	Upper limit	
Laser scanning speed $v / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	In range	130	200	1
Laser power $P / \text{W}$	In range	11	15	1
Laser repetition frequency $f / \text{kHz}$	In range	20	80	1
Fiber exposure percentage $E / \%$	Maximization	0.04	0.15	1
Single-pulse paint removal depth $D / (\mu\text{m} \cdot \text{pulse}^{-1})$	Maximization	30	50	1
Ten-piont height of microcosmic irregularity $R_z / \mu\text{m}$	In range	45	55	1

表 8 优化结果

Table 8 Optimization results

No.	$v / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$\frac{P}{P_{max}} / \%$	$f / \text{kHz}$	$E / \%$	$D / (\mu\text{m} \cdot \text{pulse}^{-1})$	$R_z / \mu\text{m}$	Desirability
1	200.00	71.83	20	0.060	45.32	55.00	0.369
2	199.27	71.49	20	0.059	45.07	54.99	0.361
3	199.99	71.68	20	0.059	45.20	54.63	0.360
4	198.31	71.04	20	0.059	44.74	55.00	0.352

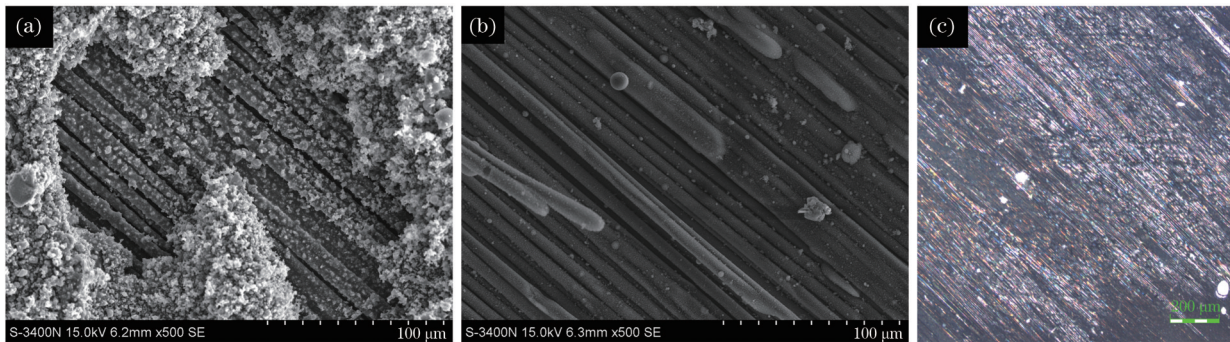


图 16 激光除漆试样。(a)未除净表面的 SEM 形貌;(b)完全除漆表面的 SEM 形貌;(c)三维形貌

Fig. 16 Laser paint removal sample. (a) SEM morphology of sample surface with residual paint; (b) SEM morphology of complete paint removal surface; (c) three-dimensional morphology

者是空气中依靠静电作用吸附于表面的颗粒物。优化参数除漆表面的纤维大面积裸露且不存在明显的纤维断裂损伤,除漆表面具有一定光泽度。这是由于激光辐照使得残漆颗粒、杂质发生裂解及烧蚀汽化,或残漆

在激光诱导的应力振动下破碎崩解,此时碳纤维表面的热效应较小且激光能量还没有达到其损伤断裂阈值。此外,可以发现仍有少量残漆颗粒附着于部分碳纤维表面及底部,这是由于:1)部分残漆颗粒在脉冲

冲击作用下被带入纤维底部,难以被后续激光及时清除;2) 试样基底为碳纤维复合材料,裸露的碳纤维底部仍为树脂,且不在激光热影响范围内,故纤维底部的树脂无法深入清洗。但此时的碳纤维几乎完全裸露,底部树脂及少量残漆颗粒的附着对其再粘接性能的影响极小,可以满足完全除漆且基底无损的工业要求。对完全除漆试样进行基底性能测试,结果发现:漆层烧蚀速率为  $21.19 \mu\text{m}/\text{pulse}$ ,单脉冲除漆能力和除漆效率适中, $R_a$  为  $56.56 \mu\text{m}$ ,  $S_a$ (除漆表面粗糙度)为  $5.98 \mu\text{m}$ ,均满足工艺要求,可以保证再喷漆漆层的结合力。

## 4 结 论

本文基于响应面分析建立了激光参数与纤维暴露百分比、单脉冲除漆深度及微观不平度十点高度之间的数学模型,该模型可用于除漆质量和工艺效率预测以及除漆参数优化。本文主要得到以下结论:

1) 对于复合材料基体,激光除漆后表面的纤维暴露百分比随激光功率的增大而明显升高,随重复频率和扫描速度的升高而降低,其中激光功率对纤维暴露百分比的影响最为显著。

2) 扫描速度对单脉冲除漆深度并无明显影响,单脉冲除漆深度随重复频率的改变而迅速变化,高频脉冲会使单脉冲激光能量降低从而使得除漆深度明显降低。

3) 激光功率、扫描速度、重复频率对微观不平度十点高度均存在一定影响,微观不平度十点高度随激光功率的增大、扫描速度和重复频率的降低而提高,且扫描速度对其影响程度更大,激光功率、重复频率的影响程度较为接近。

4) 当激光功率为  $14.4 \text{ W}$ 、扫描速度为  $200 \text{ mm/s}$ 、重复频率为  $20 \text{ kHz}$  时,除漆表面的纤维暴露百分比  $E$  为  $0.073\%$ ,微观不平度十点高度  $R_a$  为  $55.3 \mu\text{m}$ ,单脉冲除漆深度  $D$  为  $46.05 \mu\text{m}/\text{pulse}$ 。上述参数下的单脉冲除漆能力及除漆效率适中,而且可以保证再喷漆工艺质量。

## 参 考 文 献

- [1] 李丰丰,刘彦菊,冷劲松.形状记忆聚合物及其复合材料在航天领域的应用进展[J].宇航学报,2020,41(6):697-706.  
Li F F, Liu Y J, Leng J S. Progress of shape memory polymers and their composites in aerospace applications[J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(6): 697-706.
- [2] 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.
- [3] Allen A R, Przekop A. Vibroacoustic tailoring of a rod-stiffened composite fuselage panel with multidisciplinary considerations[J]. Journal of Aircraft, 2015, 52(2): 692-702.
- [4] Mohammadkhani P, Jalali S S, Safarabadi M. Experimental and numerical investigation of low-velocity impact on steel wire reinforced foam core/composite skin sandwich panels[J]. Composite Structures, 2021, 256: 112992.
- [5] 杨雅婷.激光去除飞机蒙皮表面漆膜工艺及性能影响研究[D].天津:中国民航大学,2022:62-73.  
Yang Y T. Research on process and performance effects of laser paint removal on aircraft skin[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2022: 62-73.
- [6] Giusti C, Colombini M P, Lluveras-Tenorio A, et al. Graphic vandalism: multi-analytical evaluation of laser and chemical methods for the removal of spray paints[J]. Journal of Cultural Heritage, 2020, 44: 260-274.
- [7] Gomes V, Dionisio A, Pozo-Antonio J S, et al. Mechanical and laser cleaning of spray graffiti paints on a granite subjected to a  $\text{SO}_2$ -rich atmosphere[J]. Construction and Building Materials, 2018, 188: 621-632.
- [8] 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.
- [9] 赵海朝,乔玉林,杜炯,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.
- [10] Zhang S W, Yan Q Y, Lin J, et al. Elimination of blind zone in nanoparticle removal on silicon wafers using a double-beam laser shockwave cleaning process[J]. Applied Surface Science, 2021, 539: 148057.
- [11] 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.
- [12] 戴金跃,汤发全.基于FPGA激光清洗系统的设计与实现[J].中国激光,2020,47(4):0402005.  
Dai J Y, Tang F Q. Design and implementation of laser cleaning control system based on FPGA[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0402005.
- [13] 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.
- [14] Zhang G X, Hua X M, Huang Y, et al. Investigation on mechanism of oxide removal and plasma behavior during laser cleaning on aluminum alloy[J]. Applied Surface Science, 2020, 506: 144666.
- [15] Oliveira V, Sharma S P, de Moura M F S F, et al. Surface treatment of CFRP composites using femtosecond laser radiation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 94: 37-43.
- [16] Ligabo I A, Mota de Siqueira R H, de Andrade Ferreira C C, et al. Pulsed laser damage threshold evaluation of a carbon fiber composite skin and its effects on internal substrates[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 143: 107304.
- [17] Li X Y, Wang D, Gao J M, et al. Influence of ns-laser cleaning parameters on the removal of the painted layer and selected properties of the base metal[J]. Materials, 2020, 13(23): 5363.
- [18] Chen Y, Deng G L, Zhou Q H, et al. Acoustic signal monitoring in laser paint cleaning[J]. Laser Physics, 2020, 30(6): 066001.
- [19] 元泉,邱媛,刘洋,等.铝合金漆层与氧化层激光清洗应用研究[J].电镀与精饰,2019,41(12):25-29.  
Yuan Q, Qiu Y, Liu Y, et al. Research on laser cleaning application for coating and oxide layer of aluminum alloy[J]. Plating & Finishing, 2019, 41(12): 25-29.
- [20] 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,2020:40-45.  
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: 40-45.
- [21] Yan Q, Yang K, Wang Z D, et al. Surface roughness optimization and high-temperature wear performance of H13 coating fabricated by extreme high-speed laser cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 149: 107823.

[22] 杨嘉年, 周建忠, 孙奇, 等. 基于响应面分析的激光除漆工艺参数优化[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(23): 231402.  
Yang J N, Zhou J Z, Sun Q, et al. Laser paint removal process parameter optimization via response surface methodology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(23): 231402.

[23] 杨嘉年. 纳秒脉冲激光清洗船用钢表面漆层数值模拟与实验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.  
Yang J N. Numerical simulation and experimental research of nanosecond pulse laser paint stripping on marine steel surface[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021.

## Optimization of Laser Paint Removal Process for Carbon Fiber Composite Substrate Based on Response Surface Analysis

Chen Yajun\*, Lu Wenting, Yang Yating

*Sino-European Institute of Aviation Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China*

### Abstract

**Objective** The paint layer on the surface of aircraft skin, automobile bodies, and ships adds a visual appeal and helps in corrosion prevention and improvement of aerodynamic shape. However, because of the requirements of equipment overhaul, substrate maintenances and paint layer repair, the old paint layer needs to be removed, and the surface needs to be repainted periodically. Traditional paint removal processes, such as chemical and mechanical paint removal, are laborious, easily cause substrate damage, and significantly reduce the service time of parts. Laser paint removal is an emerging paint removal technology with the advantages of high efficiency, environmental protection, controllable parameters, and automation, and it has potential for industrial applications. Response surface optimization is a process parameter optimization method that requires fewer operations, has shorter test cycles, and yields higher accuracy of results. Based on this background, we investigate the effect of laser parameters on varnish removal on the surface of carbon fiber composites using the response surface optimization method. Process parameters are also optimized to obtain a combination of process parameters with excellent paint removal effect, moderate efficiency, and guaranteed repainting quality.

**Methods** A three-factor, three-level Box-Behnken experimental design with laser power  $P$ , pulse frequency  $f$ , and scanning speed  $v$  as input factors was used for laser paint removal tests. The optimization parameters were determined using Design Expert's three-dimensional graphics technology, which significantly reduces the complexity of the technical study caused by the low damage threshold and poor thermal conductivity of the composite material. After the paint removal test, Image Pro Plus software was used to calculate carbon fiber exposure percentage  $E$ . Laser confocal microscopy was then used to determine the depth of paint removed, ten-point height of irregularities of the paint removal surface, and the single-pulse paint removal depth  $D$ , also known as the paint ablation rate. Process parameters were optimized by constructing a mathematical model between the input factors and the paint removal cleanliness, process efficiency, and industrial reapplication index to obtain a combination of process parameters with excellent paint removal, moderate efficiency, and guaranteed repainting quality.

**Results and Discussions** Laser power  $P$  has the greatest effect on carbon fiber exposure percentage, and the fiber exposure percentage increases significantly with the increase in  $P$ . This is because, during laser paint removal, the laser energy absorbed by the system per unit time increases as  $P$  increases. The most significant factor affecting the depth of single-pulse paint removal is the pulse frequency  $f$ , and  $D$  decreases rapidly with increasing  $f$ . This is because the laser quality of low-frequency pulses is superior, and the acceleration of the light output speed cannot compensate for the decrease in the laser output quality when the pulse frequency increases. The ten-point height of microcosmic irregularity,  $R_z$ , decreases significantly with the increase in laser scanning speed  $v$ . This is due to the high lap rate of adjacent spots and the increase in the diameter and depth of the ablation craters on the paint surface at slow scanning speeds. It is observed that low-frequency ( $f < 25$  kHz), high-power ( $P > 14$  W) laser slow scanning ( $v < 130$  mm/s) results in higher paint removal cleanliness, higher fiber exposure percentage, and higher paint-removal efficiency, whereas medium-frequency ( $40$  kHz  $< f < 60$  kHz), low-power ( $P < 11$  W) laser fast scanning ( $v > 180$  mm/s) results in ten-point height of microcosmic irregularity closer to the standard value ( $45\text{--}55$   $\mu\text{m}$ ), which ensures the quality of paint removal.

**Conclusions** For the composite matrix, the fiber exposure percentage on the surface after laser paint removal increases significantly with the increase in laser power but decreases with the increase in pulse frequency and scanning speed, where the laser power has the most significant effect on carbon fiber exposure percentage. The scanning speed has no significant effect on single-pulse paint removal depth, but it changes rapidly when the pulse frequency changes. The high-frequency pulse decreases the single-pulse laser energy, resulting in a significant decrease in paint removal depth. The laser power, scanning speed, and pulse frequency affect the ten-point height of microcosmic irregularity, which will increase with increasing laser power. At low scanning speeds and pulse frequencies, the scanning speed has a greater degree of influence than laser power and pulse frequency. When the laser power is 14.4 W, the scanning speed is 200 mm/s, and the pulse frequency is 20 kHz, the fiber exposure percentage  $E$  on the paint removal surface is 0.073%, the ten-point height of microcosmic irregularity is 55.3  $\mu\text{m}$ , and the single-pulse paint removal depth  $D$  is 46.05  $\mu\text{m}\cdot\text{pulse}^{-1}$ . In addition, the single-pulse paint removal capacity and efficiency are moderate, and the quality of the repainting process is guaranteed.

**Key words** lase technique; laser paint removal; carbon fiber composites; process parameters; response surface optimization