

基于响应面分析的激光除漆工艺参数优化

杨嘉年^{1**}, 周建忠^{1*}, 孙奇¹, 孟宪凯¹, 朱明¹, 郭召恒¹, 付强²

¹江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013;

²南京先进激光技术研究院, 江苏 南京 210038

摘要 为了研究激光除漆工艺规律并优化工艺参数,采用纳秒脉冲激光器对 304 不锈钢基体表面的丙烯酸树脂漆进行激光清洗实验。采用扫描电子显微镜与 X 射线能谱仪分别对激光除漆后的表面微观形貌与成分进行分析,并使用激光共聚焦显微镜对除漆后的表面粗糙度进行测量。基于响应面分析法,使用 Design-Expert 软件研究激光功率、扫描次数和光斑搭接率对激光除漆后表面微观形貌、成分和表面粗糙度的影响规律,并对除漆工艺参数进行优化。研究发现:光斑搭接率对表面成分的影响最为显著,而激光功率对表面粗糙度的影响最为显著;优化结果显示,当激光功率为 19.18 W、光斑搭接率为 46%、扫描次数为 3 次时,激光除漆的效果最佳。采用合适的工艺参数进行激光除漆,可以获得较好的清洗效果。

关键词 激光技术; 激光除漆; 响应面分析; 工艺参数优化; 304 不锈钢; 丙烯酸树脂漆

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.231402

Laser Paint Removal Process Parameter Optimization via Response Surface Methodology

Yang Jianian^{1**}, Zhou Jianzhong^{1*}, Sun Qi¹,
Meng Xiankai¹, Zhu Ming¹, Guo Zhaoheng¹, Fu Qiang²

¹ School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

² Nanjing Institute of Advanced Laser Technology, Nanjing, Jiangsu 210038, China

Abstract To study the laser cleaning process and optimize process parameters, a nanosecond pulse laser was used to perform laser cleaning experiments on the acrylic resin paint on the surface of a 304 stainless steel substrate. The surface morphology and elemental composition after paint removal were analyzed by using the scanning electron microscopy and X-ray energy dispersive spectroscopy, and the surface roughness was measured by using a laser confocal microscope. Based on the response surface methodology, a Design-Expert software was used to analyze the effects of laser power, number of scans, and spot overlap rate on the surface morphology, elemental composition, and surface roughness after laser paint removal, and the paint removal process parameters were optimized. The results denote that the spot overlap rate considerably affects the surface composition and that the laser power considerably affects the surface roughness. The optimization results denote that the optimal laser paint removal results can be achieved when the laser power is 19.18 W, the spot overlap rate is 46%, and the number of scans is 3. The experiments show that improved cleaning results can be obtained by selecting suitable process parameters.

Key words laser technique; laser paint removal; response surface methodology; process parameter optimization; 304 stainless steel; acrylic resin paint

OCIS codes 140.3330; 140.3390; 160.3900; 350.3390

收稿日期: 2019-05-08; 修回日期: 2019-05-14; 录用日期: 2019-05-23

基金项目: 江苏省重点研发计划(产业前瞻与共性关键技术)项目(BE2017001-2, BE2017001-1)

* E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn; ** E-mail: yangjianian1997@126.com

1 引言

丙烯酸树脂漆具有良好的保光保色性及耐水耐化学性,通常被用于高强度耐腐蚀性设备与零部件的表面,可显著增强设备各方面的性能,且能起到美化作用。但在零件维修、维护时,需要将零件表面的油漆除去并重新喷涂。传统的除漆方式,如机械除漆、化学除漆等,不仅费时费力,还会对基体造成损伤,降低零件的使用寿命^[1-2]。相比于传统的除漆方式,纳秒脉冲激光清洗工艺具有清洗速度快、自动化程度高及污染小等优点,已被广泛应用于汽车、轮船和航空航天等关键零件的除漆方面^[3-5]。

针对激光清洗工艺,现有研究都是围绕激光清洗机理及理论模型开展的^[6-9],但在工艺规律与参数优化方面仅有少量公开报道。2006年, Brygo等^[10]使用纳秒脉冲激光器研究了激光脉冲的重复频率、能量密度和脉宽对烧蚀涂料效率的影响,发现在能量密度为 1.5 J/cm^2 、最高重复频率为 10 kHz 时,能获得最佳的烧蚀效率。2015年, D'Addona等^[11]研究了扫描速度、脉冲功率和扫描道之间的距离对船用碳钢板焊前表面性能的影响,并用方差分析评估了清洗质量,结果表明,通过增大激光功率可将清洗速度提高至 1000 mm/min 。2017年, Jasim等^[12]采用脉冲光纤激光对铝合金表面 $20\text{ }\mu\text{m}$ 厚的高透明聚合物漆进行了清洗,发现材料去除深度与激光强度相关,且较小的光束可以实现较高的清洗质量。2017年,陈国星等^[13]研究了激光功率对不锈钢材料

表面氧化层激光清洗效果的影响,得到了激光清洗厚度随激光功率变化的规律。乔玉林等^[14]研究了不同清洗速度下激光清洗钛合金表面积碳的形貌、元素组成及其含量的变化,发现清洗速度对钛合金清洗表面的形貌有显著影响。目前,激光除漆工艺参数的研究主要集中在单一因素对清洗质量的影响上,针对激光除漆多参数的工艺规律及优化的研究鲜有报道。响应面分析法(RSM)能直观地反映多因素的交互影响,是目前常用的多参数优化方法^[15],可用于激光除漆工艺参数的研究。

本文基于RSM的Box-Behnken统计进行实验设计,分别对激光清洗后不锈钢表面的微观形貌、成分以及粗糙度进行检测与分析,建立激光除漆工艺参数与表面成分、表面粗糙度之间的数学模型,研究激光功率、光斑搭接率和扫描次数对304不锈钢表面漆层清洗效果的影响,并分析获得了较优的工艺参数。

2 实验方案

2.1 试样与实验设备

实验所用试样为 1 mm 厚的304不锈钢板,其主要成分如表1所示。使用线切割机将不锈钢切割成 $40\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 的长方体试样。使用碳化硅砂纸和金刚石膏对试样表面进行打磨、抛光至表面粗糙度约为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 。在试样表面喷涂丙烯酸树脂漆,其分子式为 $(\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_2)_n$,漆层厚度为 $(100\pm 5)\text{ }\mu\text{m}$,在环境温度下放置 24 h 。

表1 304不锈钢的主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of 304 stainless steel

Element	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	N	Fe
Mass fraction /%	≤ 0.08	≤ 1.0	≤ 2.0	18.0-20.0	8.0-10.5	≤ 0.03	≤ 0.035	≤ 0.1	Bal.

采用IPG公司YLP-HP-1-100-100-100型号的纳秒光纤激光器进行激光除漆实验,如图1所示,实验系统主要包括激光器、振镜控制系统以及辅助设备。表2为激光除漆系统的主要参数。

2.2 实验方法

响应面优化法是一种利用数理统计优化的科学方法,主要用于研究系统中各参量的交互作用,并优选出达到较优响应值时各参量所对应的最佳水平。本实验采用多元二次回归方程来拟合因子和响应值之间的函数关系,最后实现变量的优化和响应值的预测。

假设有 k 个独立变量,所有独立变量均可测、可控,则响应函数可表示为^[16]

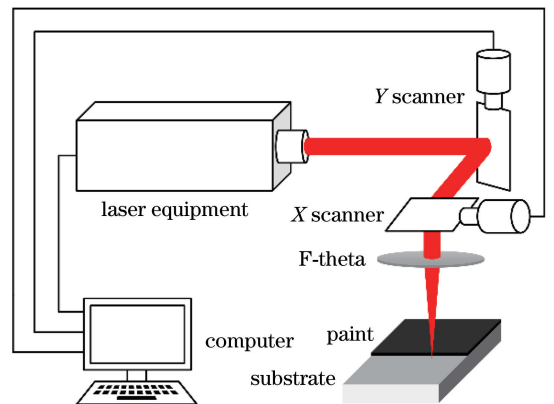


图1 激光除漆示意图

Fig. 1 Diagram of laser paint removal

表2 激光除漆系统的主要技术参数

Table 2 Main technical parameters of laser paint removal system

Parameter	Value
Wavelength /nm	1064
Power /W	≤ 100
Pulse width /ns	100
Frequency /kHz	10-100
Scan speed / (mm · s ⁻¹)	≤8000
Focal length /mm	160
Waist diameter /mm	0.05

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} x_i x_j + \epsilon, \quad (1)$$

式中:Y 为预测响应值;x_i 为考察因素;b₀、b_i、b_{ii} 和 b_{ij} 为回归系数;ε 为噪声或误差项。使用期望方法可以简单、灵活地实现多响应值的优化和误差分析,并能借助于三维图形技术直观地将函数关系显示出来,使实验者凭借观察即可选择实验设计中的最优参数^[17]。

通过三因素三水平 Box-Behnken 实验方法进行实验设计,取激光功率 P、光斑搭接率 γ 以及扫描次数 N 为独立变量,实验水平编码如表 3 所示。其中光斑搭接率 γ、扫描速度 v 和重复频率 f 之间的表达式为

$$\gamma = 1 - \frac{v}{f \cdot D} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:D 为光斑直径。在本实验中,控制重复频率 f 为 80 kHz,通过调节扫描速度来调节光斑搭接率,并控制扫描道间搭接与光斑间搭接一致。

表3 实验因素和水平设计

Table 3 Experimental factors and level design

Factor	Extreme value		
	Low(-1)	Medium(0)	High(+1)
Power P /W	15	20	25
Spot overlap rate γ /%	25	50	75
Number of scans N	2	3	4

2.3 激光除漆及检测

实验设计矩阵如表 4 所示,依次在试样表面清洗 5 mm × 5 mm 的区域,采用扫描电子显微镜 (SEM) 观察试样的表面形貌,采用 X 射线能谱仪 (EDS) 测量试样表面的成分,采用激光共聚焦显微镜测量试样的表面粗糙度。选取表面成分评价 S 及表面粗糙度 S_a 为实验响应值,其中 S 以碳含量 (w_C, 质量分数) 和氧含量 (w_O, 质量分数) 进行综合评分。考虑到本研究主要用于再制造,对于表面氧

化的敏感程度高于残余漆层,故对表面成分进行如下加权表征:

$$S = 100 - w_C \times 500 - w_O \times 1000, \quad (3)$$

即 S 随碳含量与氧含量的增加而减小。实验结果见表 4。

表4 实验设计矩阵与实验结果

Table 4 Design matrix and experimental results

No.	Parameter			Result	
	P /W	γ /%	N	S	S _a /μm
1	25	25	3	50	0.6966
2	25	50	2	60	0.8036
3	25	75	3	20	1.1528
4	25	50	4	30	1.5258
5	15	50	2	40	1.5620
6	20	50	3	85	0.5980
7	20	50	3	85	0.6330
8	15	50	4	85	1.0620
9	20	50	3	80	0.7070
10	20	75	4	10	1.0588
11	20	50	3	80	0.7860
12	20	75	2	20	1.0844
13	20	50	3	75	0.5900
14	20	25	2	30	0.8038
15	20	25	4	65	0.8788
16	15	25	3	40	0.9316
17	15	75	3	60	0.9498

3 数学模型与方差分析

利用 Design-Expert 软件对表 4 所得实验结果的显著性、拟合精确度、多元相关系数及可信度进行误差统计分析。表面成分模型方差分析 (ANOVA) 如表 5 所示,其中 Probability 为由于噪声产生错误的概率,代表相关系数的显著性,一般认为小于 0.0500 表示该模型要素较为显著^[17]。表面成分模型显著性检验 P 值为 0.0006,即由噪声产生错误的概率仅为 0.06%。模型中一次项 P、γ,二次项 γ²、N²,交叉项 Pγ、PN、γN 的 P 值均小于 0.05,即认为这些项在模型中是显著的。最终获得的数学模型为

$$S = 81.4 - 8.13P - 9.38\gamma - 12.50P\gamma - 18.75PN - 11.25\gamma N - 30.70\gamma^2 - 19.45N^2. \quad (4)$$

表面粗糙度模型方差分析 (ANOVA) 结果如表 6 所示。通过 F 值检验、R² 检验以及信噪比检验可知:上述所获得表面粗糙度的数学模型在样本数据的偏离状态、方差波动性以及噪声检验等方面体现出了相关一致性。模型中的显著项为一次项 γ,交叉项

表5 表面成分模型的方差分析结果

Table 5 ANOVA for surface composition model

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F	Probability
Model	10321.99	9	1146.89	16.62	0.0006
<i>P</i>	528.13	1	528.13	7.65	0.0278
γ	703.13	1	703.13	10.19	0.0152
<i>P</i> γ	625.00	1	625.00	9.06	0.0197
<i>P</i> <i>N</i>	1406.25	1	1406.25	20.38	0.0027
γ <i>N</i>	506.25	1	506.25	7.34	0.0303
γ^2	3968.38	1	3968.38	57.52	0.0001
<i>N</i> ²	1592.85	1	1592.85	23.09	0.0020
Lack of fit	393.75	3	131.25	5.89	0.0599

Note: residual-square $R^2 = 0.9553$; adjusted residual-square $R^2_{Adj} = 0.8978$; predicted residual-square $R^2_{pred} = 0.4040$; adeq precision $A_p = 11.479$.

表6 表面粗糙度模型的方差分析结果

Table 6 ANOVA for surface roughness model

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F	Probability
Model	1.30	9	0.14	25.26	0.0002
γ	0.11	1	0.11	19.17	0.0032
<i>P</i> γ	0.048	1	0.048	8.42	0.0230
<i>P</i> <i>N</i>	0.37	1	0.37	65.52	<0.0001
<i>P</i> ²	0.32	1	0.32	56.24	0.0001
<i>N</i> ²	0.38	1	0.38	66.34	<0.0001
Lack of fit	0.012	3	0.004	0.60	0.6484

Note: $R^2 = 0.9701$, $R^2_{Adj} = 0.9317$, $R^2_{pred} = 0.8196$, $A_p = 15.336$.

P γ 、*P**N* 以及二次项 P^2 、 N^2 。最终获得的数学模型为

$$S_a = 0.66 + 0.12\gamma + 0.11P\gamma + 0.31PN + 0.28P^2 + 0.30N^2 \quad (5)$$

4 激光参数对表面质量的影响

4.1 激光参数对表面成分的影响

激光功率、光斑搭接率以及扫描次数三因素交互作用对表面成分评价的影响如图2所示,可见,激光功率对表面成分的影响不大,光斑搭接率与扫描次数具有峰值效应,光斑搭接率对表面成分的影响最为显著。

不同搭接率下清洗表面的微观形貌如图3所示。光斑搭接率包括光斑间搭接率与扫描道间搭接率,并需保持两者一致,故而搭接率的增大包括横向和纵向两个维度上的增大,必将导致单位面积上激光能量的热积累呈平方倍增加,因此光斑搭接率对表面成分的影响最为显著。从图3中不同搭接率下的表面形貌来看,熔池中两者元素成分较为相似,均接近不锈钢基底的元素成分。当搭接率为75%时,重铸层的氧含量明显高于搭接率为50%时的氧含

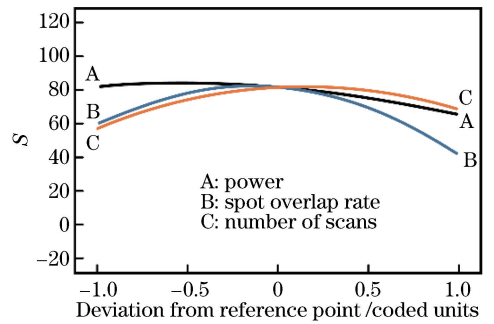


图2 各因素交互作用对表面成分的影响

Fig. 2 Effect of interaction of all factors on surface composition

量,表明过高的搭接率会导致材料表面过烧蚀,使基体发生氧化,导致氧含量增加。此外,当搭接率为75%时,重铸层碳含量明显增高,也说明仍存在残余漆层。即,过大的搭接率会导致基体表面温度超过其熔点,表面漆层在气化前被熔浆包裹,导致重铸层碳含量增加。可见,过高的搭接率不利于获得较高的表面清洗质量。

扫描次数为3次时,光斑搭接率和功率对表面成分的影响如图4所示。图4(a)中的等高线图呈椭圆形,表明光斑搭接率和功率之间的交互作用较

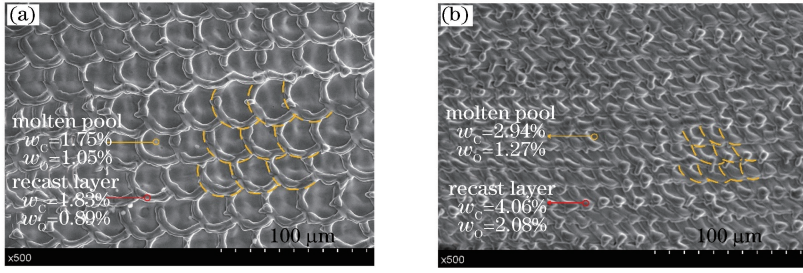


图3 不同搭接率下清洗表面的微观形貌与元素成分。(a) 50%;(b) 75%

Fig. 3 Cleaning surface micromorphology and elemental composition under different overlap rates. (a) 50%; (b) 75%

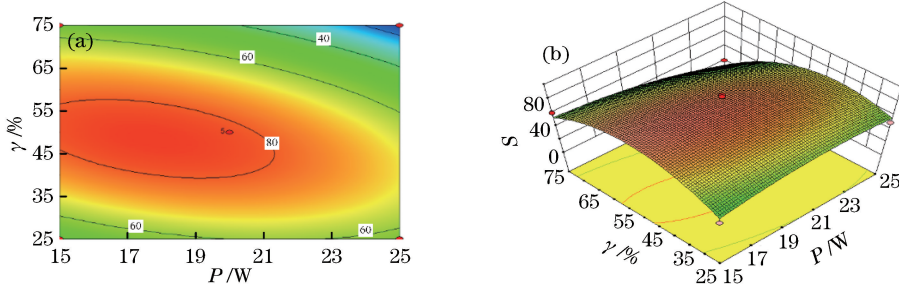


图4 光斑搭接率和功率对表面成分的影响。(a) 等高线图;(b) 响应曲面图

Fig. 4 Effects of spot overlap rate and power on surface composition. (a) Contour graph; (b) response graph

为明显,在获得同样表面成分的情况下,光斑搭接率的细微变化将导致功率大幅变化。等高线中部为表面成分评分大于70的长带状区域,表明光斑搭接率为35%~60%时,均能获得较高的表面质量,此时功率的可调幅度较大。图4(b)为响应曲面图,其沿搭接率方向的梯度远大于沿功率方向的梯度,表明光斑搭接率对表面质量的影响远大于激光功率对表面质量的影响。在光斑搭接率为50%、功率为18 W时,能够取得较高的表面质量。

功率为20 W时,光斑搭接率和扫描次数对

表面成分的影响如图5所示。图5(a)中的等高线呈圆形,表明光斑搭接率和扫描次数之间的交互作用不明显。表面成分评分等高线呈同心圆状,数值逐渐降低。图5(b)为响应曲面图,其沿搭接率和扫描次数方向有着相近的梯度,说明两者对表面成分有着同阶的影响力。表面成分随着光斑搭接率和扫描次数的增加均先增加而后减小,且变化趋势一致。考虑到扫描次数存在离散性,在扫描次数为3次、光斑搭接率为45%时,表面成分的评分最高。

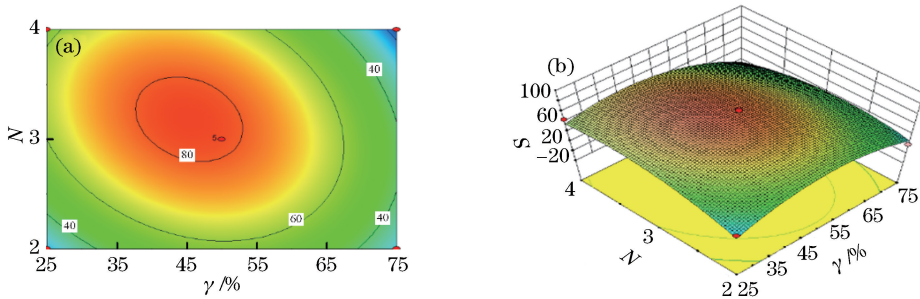


图5 光斑搭接率和扫描次数对表面成分的影响。(a) 等高线图;(b) 响应曲面图

Fig. 5 Effects of spot overlap rate and number of scans on surface composition. (a) Contour graph; (b) response graph

4.2 激光参数对表面粗糙度的影响

图6反映了各因素交互作用对表面粗糙度的影响,可知:功率和扫描次数具有峰值效应,表面粗糙度随着搭接率的增大而增大,影响表面粗糙度的最

主要因素为功率。材料表面粗糙度是除漆后表面微观形貌的主要评价指标之一,且主要受熔池深度与重铸层厚度的影响,并取决于激光脉冲功率对材料表面的作用。

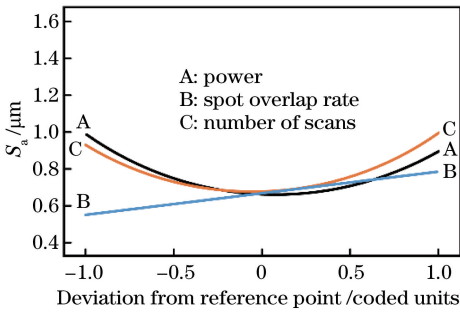


图6 各因素交互作用对表面粗糙度的影响
Fig. 6 Effect of interaction of all factors on surface roughness

从图7可以看出:在激光功率为20 W时,激光烧蚀形成的熔池直径约为25 μm,熔浆较少且无流动性,堆积在熔池周围形成了直径约为35 μm、高度约为1.5 μm的环形重铸层,此时测得光斑间的线粗糙度 R_a 为0.414 μm;当功率增大至25 W时,熔浆不再包围在凹坑周围,而是向四周溅散,形成一个重新凝固的水滴状物,单个光斑形成的熔池直径约

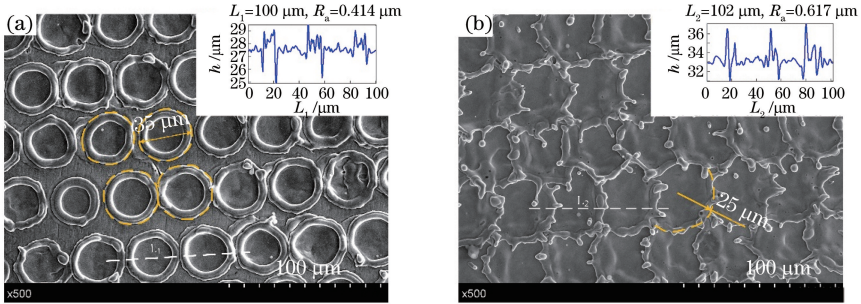


图7 不同功率下清洗表面的微观形貌与线粗糙度。(a) 20 W;(b) 25 W

Fig. 7 Cleaning surface micromorphology and line roughness at different powers. (a) 20 W; (b) 25 W

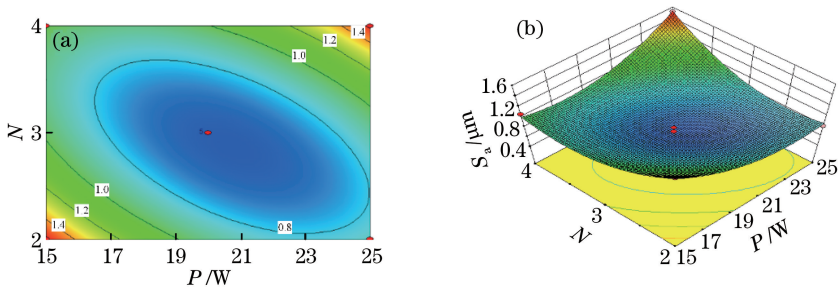


图8 功率和扫描次数对表面粗糙度的影响。(a)等高线图;(b)响应曲面图

Fig. 8 Effects of power and number of scans on surface roughness. (a) Contour graph; (b) response graph

当扫描次数为3次时,功率和光斑搭接率对表面粗糙度的影响如图9所示。图9(a)中的等高线图呈椭圆形,表明功率和光斑搭接率的交互影响较为明显。表面粗糙度随光斑搭接率的降低而降低,且在25%搭接率以下没有封闭,在光斑搭接率小于25%的情况下,可以获得更小的表面粗糙

为50 μm,重铸层的高度约为3 μm,此时测得光斑间的线粗糙度 R_a 为0.617 μm。激光功率是表面粗糙度的最主要影响因素。

光斑搭接率为50%时,功率和扫描次数对表面粗糙度的影响如图8所示。图8(a)中的等高线图呈椭圆形,表明功率和扫描次数有着较明显的交互作用,且为负相关。图8(b)为响应曲面图,当功率为20 W、扫描次数为3次时,除漆表面具有较小的粗糙度。从小功率、较少次扫描到大功率、多次扫描,响应曲面的梯度较大。在较低能量、较少扫描次数的情况下,材料表面吸收的激光辐照较少,不足以完全烧蚀整个漆层,表面粗糙度较大。随着激光功率和扫描次数小幅增加,漆层逐渐被全部烧蚀,为完全清洗漆层;而在基体表面产生的微小熔池在可接受的范围内,获得的粗糙度较小。随着激光功率和扫描次数继续增加,材料吸收更多的能量,使得基体开始烧蚀并形成较大的熔池,粗糙度显著增大。

度。当激光功率确定时,坡度较为平缓,表明搭接率对表面粗糙度的影响不明显。当光斑搭接率确定时,表面粗糙度随激光功率的增大而先减小后增大。图9(b)为响应曲面图,其在沿搭接率方向的梯度最小,搭接率是影响表面粗糙度最弱的因素。

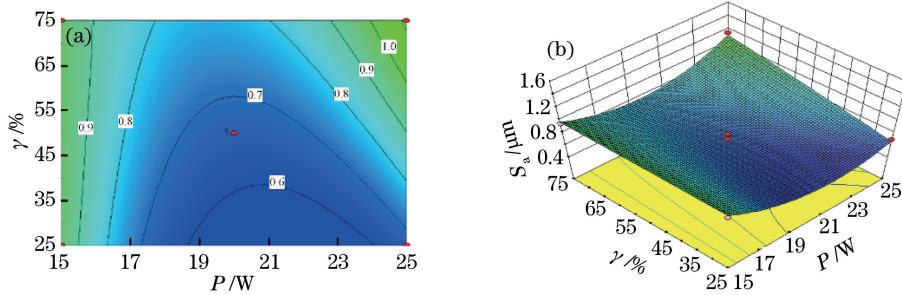


图9 功率和光斑搭接率对表面粗糙度的影响。(a)等高线图;(b)响应曲面图

Fig. 9 Effects of power and spot overlap rate on surface roughness. (a) Contour graph; (b) response graph

5 参数优化

利用 Design-Expert 软件对最佳工艺参数组合进行求解^[18],优化目标为:表面成分评分取较高值,表面粗糙度取较低值。优化准则及权重如表 7 所示。

表 7 优化准则和权重

Table 7 Optimization criteria and weight

Name	Criteria			Weight
	Goal	Lower	Upper	
P	In range	15	25	1
γ	In range	25	75	1
N	Equal to 3	2	4	1
S	Maximize	75	100	1
S_a	Minimize	0	1	1

表 8 为部分优化结果,可知:在激光功率为 19.18 W,光斑搭接率为 46.06%,扫描次数为 3 次时,理论上表面成分的评分为 82.9 分,表面粗糙度 S_a 为 0.661 μm ,激光清洗表面质量最佳。为了检验响应面优化法的可靠性,在较优解情况下开展实验,实验结果表明:表面粗糙度 S_a 为 0.743 μm ,表面上 C 和 O 的质量分数均不超过 2%,与优化结果较为相近。

表 8 优化结果

Table 8 Optimization results

Number	P/W	$\gamma/\%$	N	S	$S_a/\mu\text{m}$
1	19.18	46.06	3	82.9	0.661

6 结论

本文基于响应面分析建立了激光除漆工艺参数与除漆后表面成分、表面粗糙度之间的数学模型,该模型可用于表面形貌预测及工艺参数优化。光斑搭接率对激光清洗表面成分的影响最为显著,且具有峰值效应;其次为激光功率,且其与表面成分呈负相关。对于表面粗糙度,功率与扫描次数具有峰值效

应,表面粗糙度随着搭接率的减小而降低。当激光功率为 19.18 W,光斑搭接率为 46.06%,扫描次数为 3 次时,激光清洗 304 不锈钢漆层的效果最佳,其表面粗糙度 S_a 为 0.743 μm ,清洗表面上 C、O 的质量分数均不超过 2%。

参考文献

- [1] Chillman A, Ramulu M, Hashish M. Waterjet and water-air jet surface processing of a titanium alloy: a parametric evaluation [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2010, 132(1): 011012.
- [2] Ren G C, Yu F H, Chen H L. Present situation and development trend of green remanufacturing cleaning technology [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2014, 42(3): 158-161.
任工昌, 于峰海, 陈红柳. 绿色再制造清洗技术的现状及发展趋势研究 [J]. 机床与液压, 2014, 42(3): 158-161.
- [3] 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.
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.
- [4] Shamsujjoha M, Agnew S R, Melia M A, *et al.* Effects of laser ablation coating removal (LACR) on a steel substrate: surface profile, microstructure, hardness, and adhesion [J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 281: 193-205.
- [5] Wang Z M, Zeng X Y, Huang W L. Parameters and mechanisms of laser cleaning rubber layer on a tyre mould [J]. Chinese Journal of Lasers, 2000, 27(11): 1050-1054.
王泽敏, 曾晓雁, 黄维玲. 激光清洗轮胎模具表面橡胶层的机理与工艺研究 [J]. 中国激光, 2000, 27(11): 1050-1054.

- [6] Shi S D, Du P, Li W, *et al.* Research on paint removal with 1064 nm quasi-continuous-wave laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(9): 0903001.
施曙东, 杜鹏, 李伟, 等. 1064 nm 准连续激光除漆研究[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0903001.
- [7] Zhang H, Liu W W, Dong Y Z, *et al.* Experimental and mechanism research on paint removal with low frequency YAG pulsed laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(12): 121401.
章恒, 刘伟嵬, 董亚洲, 等. 低频 YAG 脉冲激光除漆机理和实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(12): 121401.
- [8] 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.
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.
- [9] Li F, Chen X G, Lin W H, *et al.* Nanosecond laser ablation of Al-Si coating on boron steel [J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 319: 129-135.
- [10] Brygo F, Dutouquet C, Le Guern F, *et al.* Laser fluence, repetition rate and pulse duration effects on paint ablation [J]. Applied Surface Science, 2006, 252(6): 2131-2138.
- [11] D'Addona D M, Genna S, Giordano A, *et al.* Laser ablation of primer during the welding process of iron plate for shipbuilding industry [J]. Procedia CIRP, 2015, 33: 464-469.
- [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] Chen G X, Lu H F, Zhao Y, *et al.* Effect of power on laser cleaning result of stainless steel surface [J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(12): 1217-1224, 1245.
陈国星, 陆海峰, 赵滢, 等. 激光功率对不锈钢表面清洗效果影响的研究[J]. 光电工程, 2017, 44(12): 1217-1224, 1245.
- [14] Qiao Y L, Huang K N, Liang X B, *et al.* Effect of laser cleaning speed on morphology and composition of carbon-deposited surface of titanium alloy [J]. Applied Laser, 2017, 37(6): 859-864.
乔玉林, 黄克宁, 梁秀兵, 等. 清洗速度对激光清洗钛合金积碳表面的形貌与组成的影响[J]. 应用激光, 2017, 37(6): 859-864.
- [15] Ruggiero A, Tricarico L, Olabi A G, *et al.* Weld-bead profile and costs optimisation of the CO₂ dissimilar laser welding process of low carbon steel and austenitic steel AISI₃₁₆ [J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43(1): 82-90.
- [16] Olabi A G, Alsinani F O, Alabdulkarim A A, *et al.* Optimizing the CO₂ laser welding process for dissimilar materials [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(7): 832-839.
- [17] 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.
李莉, 张赛, 何强, 等. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(8): 41-45.
- [18] 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.
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.