

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

孙兴伟^{1,2}, 张众^{1,2}, 杨赫然^{1,2*}, 董祉序^{1,2}, 刘寅^{1,2}

¹沈阳工业大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

²辽宁省复杂曲面数控制造技术重点实验室, 辽宁 沈阳 110870

摘要 为了探究激光功率、离焦量、扫描速度等工艺参数对石油管螺纹激光除锈效果的影响规律并获得最优工艺参数组合,以表面粗糙度值为指标,采用正交实验法进行石油管螺纹激光清洗实验,得出影响激光清洗效果因素的显著性排序。通过单因素实验法,得出不同工艺参数下的表面粗糙度值和氧元素含量的变化规律。以氧元素含量衡量清洗样件的表面损伤程度,以表面粗糙度为优化目标进行工艺参数优化。基于响应面法建立优化目标与激光工艺参数之间的数学模型,将数学模型与优化后的粒子群算法结合,得出优化工艺参数组合,即激光功率为 488 W,离焦量为 +3 mm,扫描速度为 3000 mm/s。在优化后的工艺参数下进行管螺纹激光清洗加工,实验结果表明,管螺纹表面锈蚀层被去除,基底表面清洗效果良好,且熔池周围无熔融物,证明了方法的有效性。

关键词 激光技术; 激光功率; 离焦量; 扫描速度; 表面粗糙度; 粒子群算法

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.2202001

1 引言

石油钻杆铺设环境恶劣,铺设的土壤中含有细菌、水分、空气等,服役期间钻杆接头内外螺纹处会出现锈蚀物,导致内外螺纹连接问题突出,整根钻杆甚至会被废弃^[1]。为提高钢材利用率,工业领域常采用除锈方法进行金属零件表面修复^[2]。传统的除锈手段以机械方法、手工、化学手段为主^[3],其中机械方法采用喷砂抛丸^[4]及高压水流^[5]。激光清洗与传统清洗方法相比具有绿色环保、高效率、非接触^[6]等特点,逐渐成为工业中常用的清洗手段。激光清洗作为一种先进的除锈技术^[7],将高能量的激光聚焦到待清洗的锈蚀层表面,表面锈蚀层吸收激光能量后出现热力耦合现象和等离子体冲击波效应,从而达到表面除锈的效果^[8-9]。

李鑫炎等^[10]采用 1064 nm 的光纤激光器对 Q345 钢进行激光清洗实验研究,研究结果表明,适当调节扫描速度能得到较好的清洗效果,经过激光清洗的 Q345 钢抗电化学腐蚀能力得到提高。童懿等^[11]对 2024 铝合金表面的厚环氧漆层进行激光清洗,分析清洗后样件表面形貌与表面粗糙度变化的原因,通过数值模拟的研究方法得到不同脉冲频率下漆层去除量和剥离机制中热应力的变化规律。李华婷等^[12]采用脉冲激光器在不同工艺参数下对 AH32 钢表面的锈蚀层进行

激光清洗,通过检测表面粗糙度、观察微观形貌与分析清洗后样件的元素含量,得到了激光除锈机制。高昆等^[13]对飞机铝合金蒙皮进行残余漆层附着力的实验研究,发现激光清洗中热力耦合现象对残余漆层具有一定的影响,得出了残余漆层附着力的变化规律。Zhu 等^[14]研究了工业 HSLA 钢板的激光清洗对焊接质量的影响,实验结果表明,激光清洗可以去除钢板表面的污染层,清洗后的表面出现波纹状微槽纹理,有效提高了表面质量。高辽远等^[15]基于有限元仿真平台,建立了 2024 铝合金表面漆层的有限元模型,探究了不同参数对清洗深度的影响,并进行了实验验证。雷正龙等^[16]研究了纳秒级与毫秒级脉冲宽度下激光清洗对 2024 铝合金表面漆层的影响,结果表明,两种情况下皆可去除表面漆层,但除漆机制有所不同。Zhang 等^[17]建立了锈蚀层的热力学模型,通过不同激光参数下的清洗实验,研究了氧化铝的激光清洗原理和等离子体的膨胀行为。朱明等^[18]对 Q345C 钢表面锈蚀层进行了激光清洗,以表面粗糙度作为衡量清洗质量的标准,以氧元素含量作为衡量损伤的标准,基于实验数据建立了激光清洗工艺参数与表面粗糙度、氧元素含量之间关系的数学模型,分析了激光工艺参数对清洗效果的交互影响,并基于响应面法得出了优化工艺参数组合,通过微观检测实验证明了清洗后的样件表面

收稿日期: 2021-12-10; 修回日期: 2022-01-07; 录用日期: 2022-01-20

基金项目: 中央引导地方科技发展专项资金(2020JH6/10500048)、国家自然科学基金(52005347, 52005346)

通信作者: *yangheran@sut.edu.cn

质量较为良好。赵海潮等^[19]采用脉冲激光对 2024 铝合金表面漆层进行了激光清洗,基于清洗后样件的表面形貌、表面粗糙度和元素含量得出了最佳工艺参数组合,基于漆层断裂横截面和元素价态分析了激光除漆机制。

上述研究针对板材类工件的激光清洗效果进行了探讨,但关于非平面工件的激光清洗研究鲜有报道。因此,本文采用脉冲激光器进行了 NC50 石油管螺纹表面锈蚀物的激光清洗,系统分析了影响激光清洗效果因素的显著程度,通过单因素实验法得出不同激光参数下表面形貌、氧元素含量和表面粗糙度的变化趋势,基于响应面法得出激光参数与表面粗糙度之间的数学模型,并利用粒子群算法对工艺参数进行优化,通过优化前后的微观检测数据对比,证明了优化工艺参数下的样件表面清洗质量较好。

研究结果为工业石油管螺纹的激光清洗提供了理论指导依据。

2 激光清洗实验

2.1 实验设备

实验样品为某油田公司提供的标准 NC50 石油管螺纹,样品基底为钢材,样品大端大径约为 128 mm,小端大径约为 114 mm,螺纹锥度长度约为 114 mm,锥度为 1:6,表面附着物为锈蚀层。激光清洗系统主要包括脉冲激光器、六自由度机械臂、机床工作台、光学传输系统和辅助装置,其中辅助装置为激光头镜片气保护装置,如图 1(a)、(b)所示。图 1(c)为扫描电子显微镜(SEM),可观察锈蚀层微观形貌,该仪器结合能谱仪(EDS)可得到清洗样件表面的特征元素种类和含量,高真空模式下分辨率可达 1.0 nm(30 kV 加速

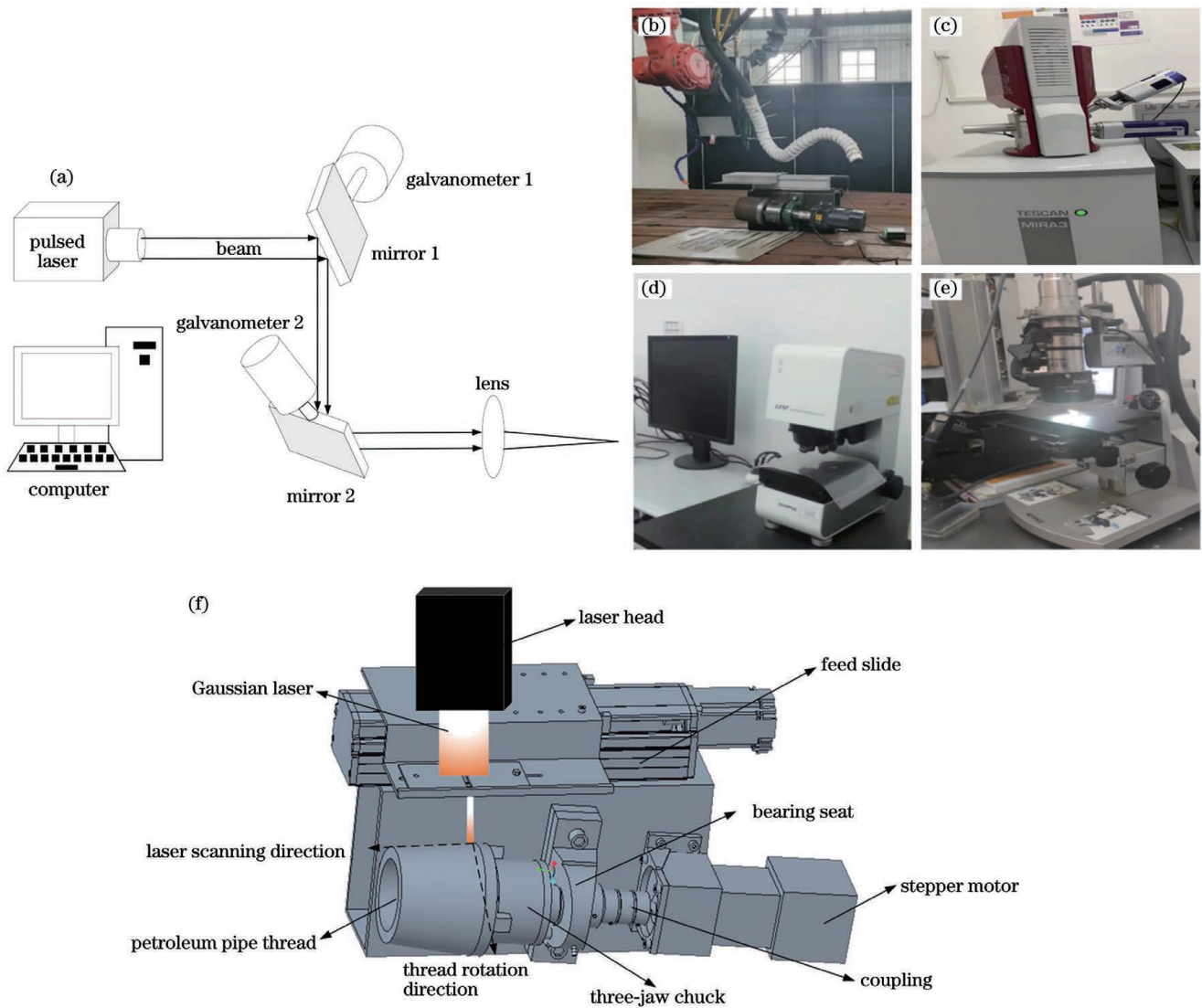


图 1 激光清洗平台。(a)激光清洗原理图;(b)激光清洗实验设备;(c)扫描电子显微镜;(d)激光共聚焦显微镜;(e)超景深显微镜;(f)管螺纹激光清洗实验台

Fig. 1 Laser cleaning platform. (a) Principle diagram of laser cleaning; (b) experimental equipment for laser cleaning; (c) scanning electron microscope; (d) confocal laser microscope; (e) ultra-depth-of-field microscope; (f) laser cleaning test bench for pipe thread

电压)。图 1(d)为激光共聚焦显微镜,该仪器通过非接触式的检测方式得到样件清洗后的表面粗糙度值,分辨率为 10 nm。图 1(e)为超景深显微镜,通过高帧率摄像机在清洗后样件表面上自动识别焦点信息,瞬时获取熔池的对焦图像。图 1(f)为管螺纹清洗实验台。管螺纹清洗实验台通过 T 型螺栓被固定在工作台上,侧面电机驱动管螺纹做旋转运动,上方的伺服电机驱动滑台做直线运动。脉冲激光器产生的激光通过实验台设置的通槽到达螺纹表面,与工件的旋转运动和滑台的直线运动相互配合,实现螺纹大径与小径表面锈蚀层的激光清洗,脉冲激光器的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 脉冲激光器的主要参数

Table 1 Main parameters of pulsed lasers

Parameter	Value
Wavelength /nm	1064
Laser power /W	≤1000
Pulse width /ns	100
Frequency /kHz	≤100
Scanning speed /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	≤3000
Spot diameter /mm	0.05

2.2 锈蚀层表面形貌

本文采用的石油管螺纹基底为钢材,表面锈蚀层在服役期间是自然氧化形成的,平均厚度约为 50 μm 。锈蚀层分布在管螺纹表面上,外层为易脱落层,表面呈现红棕色,图 2(a)所示是管螺纹表面锈蚀层的宏观形貌。图 2(b)所示是锈蚀层易脱落层的微观形貌,由“孔洞蜂窝状”(A)和“毛绒状”(B)组成,该脱落层属于疏松多孔的易脱落层。易脱落层内部的氧含量较少,随着腐蚀程度的加深,“孔洞蜂窝状”结构转变成致密的内层锈蚀物,如图 2(c)中的“蛛网状”(C)和“阶梯堆叠状”(D)结构所示, C、D 处的厚度差异较大。图 2(d)为样件表面元素含量的检测结果,可以看出,石油管螺纹表面的氧元素含量远远大于金属元素含量,氧元素的原子数分数为 54.8%,同时存在含量较少的 K、Ca、Al 三种不稳定金属元素和 S、P、Si 等非金属元素。

2.3 激光清洗实验设计

为探究激光参数对清洗效果影响的显著性,选取激光功率(P')、扫描速度(V)、离焦量(D)三个因素进行三因素五水平的正交实验,扫描次数为 1。激光清洗效果以表面粗糙度为表征量,对清洗后的样件进行微观检测,通过分析检测结果,得到激光参数影响清洗效果的显著性排序。正交实验表如表 2 所示。

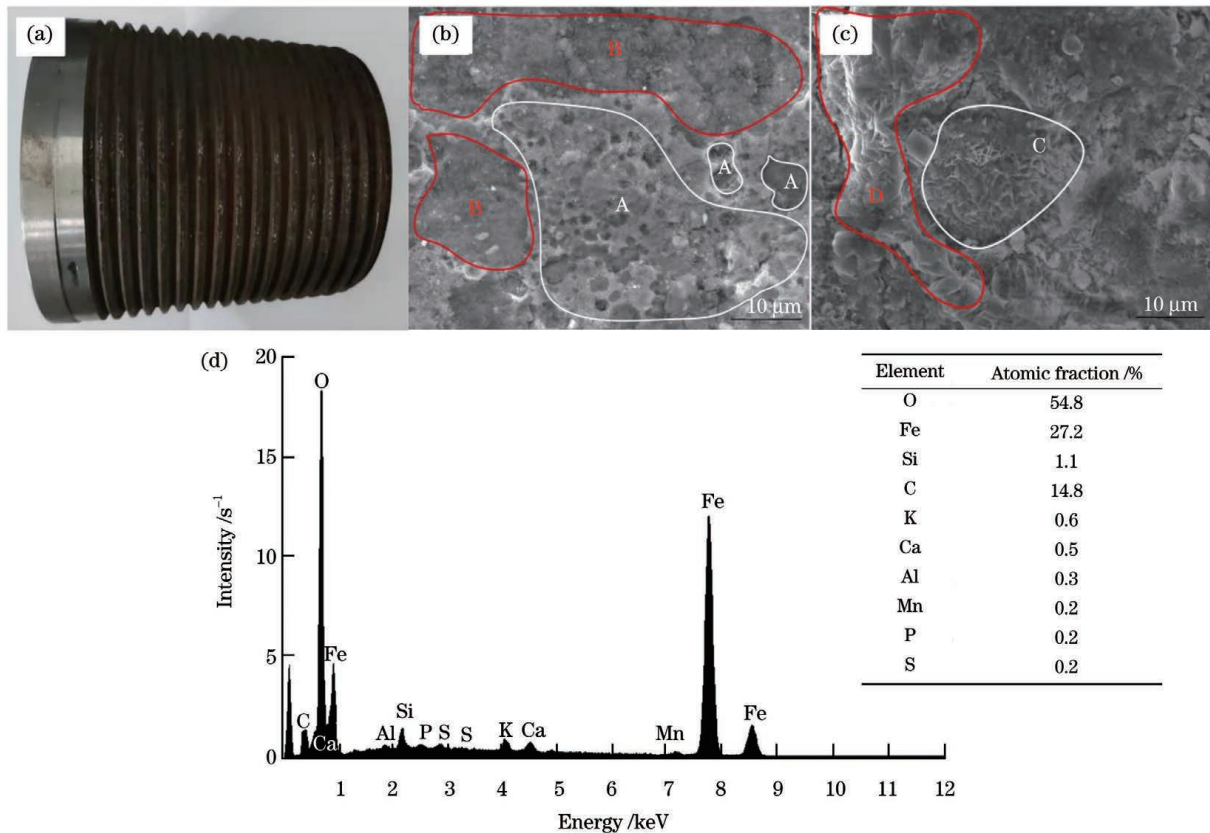


图 2 锈蚀层表面形貌。(a)石油管螺纹宏观形貌;(b)锈蚀层中易脱落层的微观形貌;(c)致密层的微观形貌;(d)锈蚀层的元素含量分布

Fig. 2 Surface morphologies of rust layer. (a) Macro-morphology of petroleum pipe thread; (b) micro-morphology of peeling layer easy to fall off in rust layer; (c) micro-morphology of dense layer; (d) element content distribution of rust layer

表 2 正交实验水平及参数

Table 2 Orthogonal test level and parameters

Level	Laser power /W	Scanning speed /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Defocusing amount /mm
Level 1	400	3000	+4
Level 2	450	2500	+3
Level 3	500	2000	+2
Level 4	550	1500	+1
Level 5	600	1000	0

以激光功率、扫描速度、离焦量为变量进行 15 组激光清洗的单因素实验,扫描次数为 1。通过检测实验,得到不同参数下的微观形貌、表面粗糙度值和氧元素含量,通过氧元素含量判断激光清洗的损伤情况。根据实验数据归纳出单因素对激光清洗效果的影响规律。

2.4 激光参数对管螺纹表面的影响

采用激光共聚焦显微镜测量激光清洗后样件的表面粗糙度,实验数据如表 3 所示。

表 3 实验数据

Table 3 Experimental data

Experiment No.	Laser power /W	Scanning speed /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Defocusing amount /mm	Surface roughness / μm
1	600	3000	+4	9.13
2	600	2500	+3	8.84
3	600	2000	+2	8.23
4	600	1500	+1	9.27
5	600	1000	0	11.82
6	550	3000	+3	8.21
7	550	2500	+2	7.62
8	550	2000	+1	8.13
9	550	1500	0	8.44
10	550	1000	+4	7.42
11	500	3000	+2	6.53
12	500	2500	+1	7.14
13	500	2000	0	7.37
14	500	1500	+4	8.83
15	500	1000	+3	5.44
16	450	3000	+1	8.25
17	450	2500	0	7.67
18	450	2000	+4	7.39
19	450	1500	+3	6.64
20	450	1000	+2	6.92
21	400	3000	+1	7.81
22	400	2500	+4	8.27
23	400	2000	+3	7.23
24	400	1500	+2	6.44
25	400	1000	0	10.41

表 3 中的表面粗糙度值是经过三次测量得到的平均值。绝对偏差是个别测量值与测量平均值之差,可作为衡量测量结果的精密度,1~25 组的绝对偏差值处于 $-0.002 \sim +0.002 \mu\text{m}$ 之间。由于实验组较多,只对实验组 1 进行具体说明,三次测量粗糙度值分别

为 9.129,9.129,9.132 μm ,平均值为 9.130 μm ,绝对偏差分别为 $-0.001, -0.001, -0.002 \mu\text{m}$ 。

根据表 4 的正交实验数据分析得出:激光功率对应的极差最大,所以该因素对实验结果的影响较为显著,清洗过程中需要优先考虑。影响石油管螺纹清洗

效果的激光参数按显著性排序(从大到小)为激光功率、离焦量、扫描速度。

表 4 极差分析表

Table 4 Range analysis table

Level	Laser power	Scanning speed	Defocusing amount
Level 1	9.458	7.986	8.208
Level 2	7.964	7.908	7.388
Level 3	7.062	7.670	7.148
Level 4	7.374	7.924	8.120
Level 5	8.032	8.402	9.142
Range	2.396	0.732	1.994

由表 4 可以看出,三组因素的均值呈现先减小后增大的趋势。若要得到较好的激光清洗效果,则应取参数的中值。激光清洗后的管螺纹表面宏观形貌如图 3 所示。

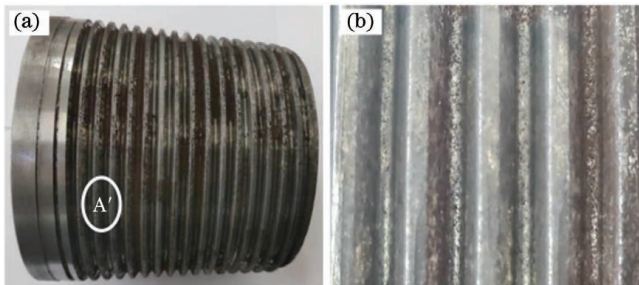


图 3 激光清洗后螺纹表面。(a)清洗后螺纹整体形貌; (b)A'处的局部放大

Fig. 3 Thread surface after laser cleaning. (a) Overall morphology; (b) local amplification at A'

3 清洗后样件微观形貌的检测分析

将管螺纹线切割为尺寸约为 8 mm×6 mm×6 mm 的样件,如图 4 所示。将样件置于激光共聚焦显微镜的载物台上,利用设备的多层模式识别样品各层上反射光强度的峰值区域(A₁),并将各层设为焦点,实现样品表面的观察与测量。对清洗后的样件表面进行面粗糙度的三次检测,取三次数据的平均值作为检测结果。

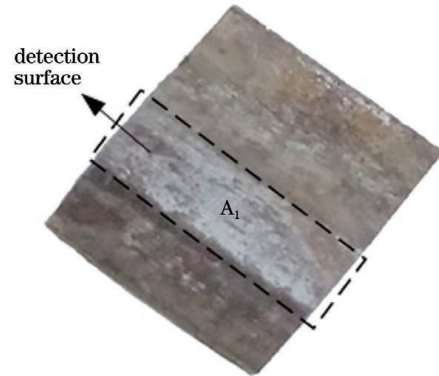


图 4 线切割后的样件

Fig. 4 Sample after wire cutting

3.1 不同激光功率下的表面粗糙度分析

为探究单因素变化对激光清洗效果的影响,设定扫描速度为 1500 mm/s,离焦量为 +1 mm,激光功率为变量,表面形貌如图 5 所示。

由图 5 可以看出,清洗表面的凹坑深度随着激光功率的减小而减小,表明随着激光功率的降低,清洗效率明显降低。锈蚀层表面吸收激光能量后,温度达到气化温度,产生金属蒸气,金属蒸气产生的反冲压力

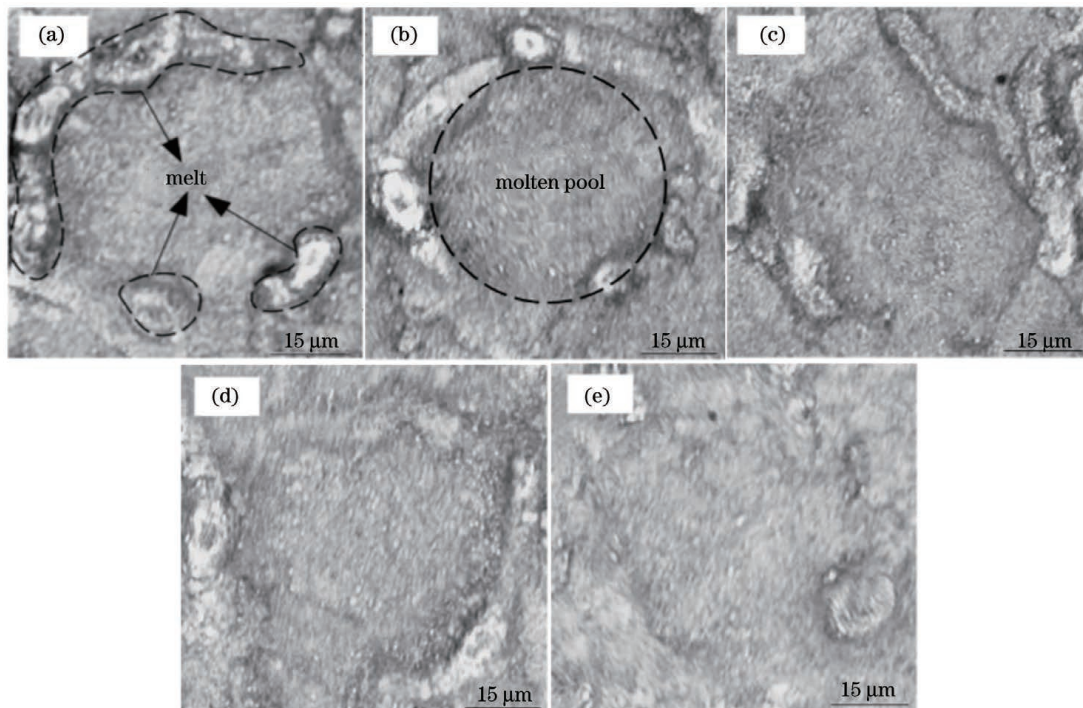


图 5 不同激光功率下的微观形貌。(a)600 W;(b)550 W;(c)500 W;(d)450 W;(e)400 W

Fig. 5 Micro-morphologies under different laser powers. (a) 600 W; (b) 550 W; (c) 500 W; (d) 450 W; (e) 400 W

作用于熔融区域,形成中间凹陷、四周凸起的“凹坑”形貌。当激光功率较小时,如图 5(e)所示,形成的熔池较浅,出现轻微熔融现象,易脱落层融化。当激光功率增大到 600 W 时,如图 5(a)所示,熔池温度较高,原有的气-液平衡被打破,金属熔融物使得熔池的宽度增大,最后凝聚在光斑周围,光斑凹坑较为明显。

对清洗后的实验组进行表面粗糙度的检测,研究不同激光功率下表面粗糙度的变化趋势,结果如图 6 所示,可以看出,表面粗糙度呈现先下降后上升的趋势。激光功率从 400 W 增加到 500 W,导致锈蚀层表面吸收的激光能量逐渐增加,锈蚀层厚度减小,钢材基底表面逐渐显露,因此激光功率为 400~500 W 时表面粗糙度值较低。当激光功率继续增加至 600 W 时,基底全部显露,过高的激光能量作用在基底表面,造成二次氧化,熔池深度加深,表面粗糙度增大。

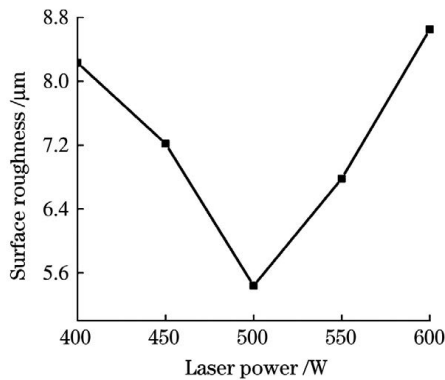


图 6 不同激光功率下的表面粗糙度

Fig. 6 Surface roughnesses under different laser powers

3.2 不同激光功率下的氧元素含量分析

图 7 所示为不同激光功率下的氧元素含量,可以看出,随着激光功率的提高,氧元素含量变化曲线呈现“V”字型。当激光功率为 400 W 时,氧元素含量较高,此时激光功率较低,不足以将锈蚀层完全去除,导致表面仍有部分锈蚀层存在。当激光功率达到 500 W 时,氧元素含量达到最低值接近于 0,证明 500 W 的激光功率最合适,基底表面并无烧蚀现象,清洗效果良好。而当激光功率增大到 600 W 时,氧元素含量呈现上升现象,说明此时基底表面出现了二次氧化现象^[20]。

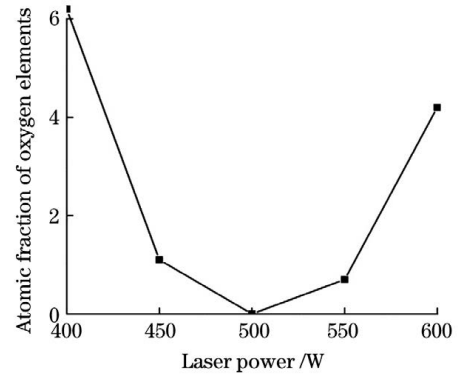


图 7 不同激光功率下的氧元素含量

Fig. 7 Contents of oxygen elements under different laser powers

3.3 不同离焦量下的表面粗糙度分析

设定扫描速度为 2000 mm/s,激光功率为 500 W,通过改变离焦量,探究离焦量变化对激光清洗效果的影响,表面形貌如图 8 所示。

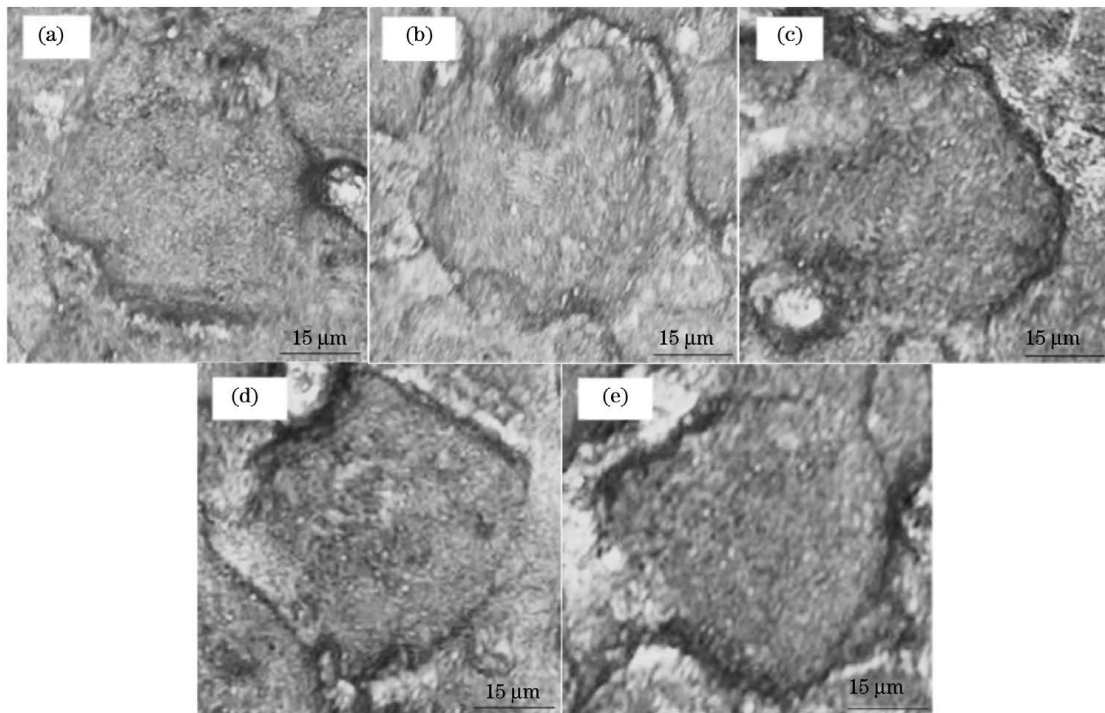


图 8 不同离焦量下的微观形貌。(a)+4 mm;(b)+3 mm;(c)+2 mm;(d)+1 mm;(e)0 mm

Fig. 8 Micro-morphologies under different defocusing amounts. (a) +4 mm; (b) +3 mm; (c) +2 mm; (d) +1 mm; (e) 0 mm

如图 8(a)所示,较低的激光能量密度不足以去除锈蚀层,所以熔池周围出现较浅的熔融物。图 8(e)所示基底表面的光斑凹坑较显著,深度明显较深,熔池周围出现较厚的熔融物。过高的激光能量密度导致内部熔池温度升高,液态金属在熔池内部逐渐沸腾,过高的金属蒸气反冲压力导致熔融物从熔池内部向外喷溅,当光斑停止辐射后,液态金属熔融物凝聚在熔池周围,表面粗糙度增大。在激光能量密度再次增大后,基底表面温度继续上升,热累积现象更为严重,导致基底损伤。

离焦量与表面粗糙度值(R_a)的关系如图 9 所示。当离焦量为 0 mm 时,锈蚀层表面的激光功率密度达到最大,过高的能量密度引起显著的热累积效应,同时蒸气反冲压力作用于熔池表面,导致强烈的熔融物喷溅,此时表面粗糙度值最大。在离焦量增加到+2 mm 的过程中,随着离焦量的增大,激光能量密度降低,热累积效应减弱,蒸气反冲压力降低,熔池内部较为稳定,所以表面粗糙度值降低。当离焦量大于+2 mm 时,随着离焦量的增加,相同激光功率下的激光能量密度降低,导致厚度较厚的锈蚀层部分未被清洗,所以在+2~+4 mm 离焦量的范围内激光清洗区域的表面粗糙度增加。

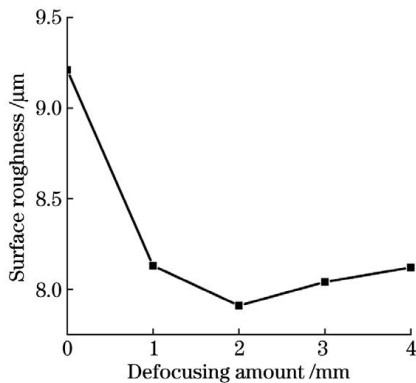


图 9 不同离焦量下的表面粗糙度

Fig. 9 Surface roughnesses under different defocusing amounts

3.4 不同离焦量下的氧元素含量分析

随着离焦量的增加,氧元素含量呈现先下降后平稳再上升的变化趋势,当离焦量为+2 mm 时清洗效果最好,氧元素含量最低,趋近于 0。当离焦量为 0 mm 时,光斑直径最小,相同参数下的激光能量密度最高,样品表面更容易实现锈蚀层的清洗。反之,当离焦量为+4 mm 时,光斑面积较大,激光能量密度较低,此时的清洗效果并不明显,即无法看到金属基底,仍有部分锈蚀层附着在基底表面。从图 10 中可知,当离焦量为 0 mm 时,过高的激光功率密度造成基底出现二次氧化现象;当离焦量为+1~+3 mm 时,氧元素含量呈现相对平稳的状态,趋近于 0;当离焦量增大到+4 mm 时,较小的激光能量密度导致部分锈蚀层未被去除,氧元素含量出现上升态势。

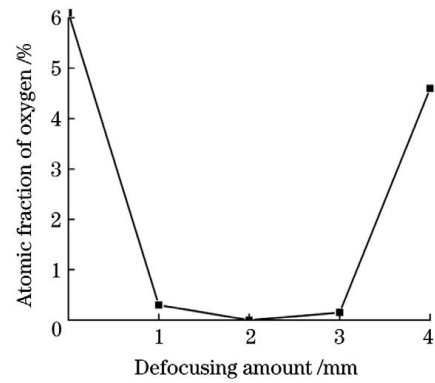


图 10 不同离焦量下的氧元素含量

Fig. 10 Contents of oxygen elements under different defocusing amounts

3.5 不同扫描速度下的表面粗糙度分析

设定激光功率为 600 W,离焦量为+2 mm,通过改变扫描速度,探究扫描速度变化对激光清洗效果的影响,表面形貌如图 11 所示。当扫描速度较大时,如图 11(a)所示,材料表面熔融物较少,基本分布在熔池周围,搭接率的降低导致光斑与光斑之间未清洗的面积增大,样件表面出现明显的波峰与波谷交错的形貌,表面粗糙度的增加。当扫描速度较小时,如图 11(e)所示,光斑搭接率较高,基底的热累积现象较严重,熔池之间相互接触,引起内部温度升高,蒸气反冲压力增大,液态金属喷溅,在熔池周围形成熔融物,说明在相同条件下,扫描速度较低时,激光作用时间较长,熔池深度较深。

图 12 为不同扫描速度下的表面粗糙度值。可以看出,基底表面的粗糙度随着扫描速度的增加呈现先减小后增大的变化趋势。当扫描速度为 1000 mm/s 时,基底表面粗糙度为 9.532 μm,由于扫描速度较低,熔融物堆积在材料表面,堆积物的波峰与波谷差值造成表面粗糙度增大。当扫描速度为 2000 mm/s 时,表面粗糙度达到最低值,说明清洗效果最好。随着扫描速度的增加,表面粗糙度值出现上升趋势。因为剩余的锈蚀层气化速度小于清洗速度,未被清洗的锈蚀层温度低于 2700 °C,不能发生气化现象,所以部分锈蚀层附着在基底表面,同时过高的扫描速度引起光斑与光斑之间未清洗的面积增大,导致表面粗糙度的增大。

3.6 不同扫描速度下的氧元素含量分析

图 13 为不同扫描速度下的氧元素含量。随着扫描速度的增加,氧含量呈现先下降后上升的变化趋势。当扫描速度为 1000 mm/s 时,氧元素含量较高,此时过低的扫描速度造成较长的激光作用时间和较高的光斑搭接率,进而造成二次氧化现象。当扫描速度从 1000 mm/s 升高到 2000 mm/s 时,氧元素的原子数分数约从 6.5%降到 1.1%。当扫描速度达到 2000 mm/s 时,氧元素含量最低。当扫描速度从 2000 mm/s 增大到 3000 mm/s 时,氧元素的原子数分数增加 1.4% 左

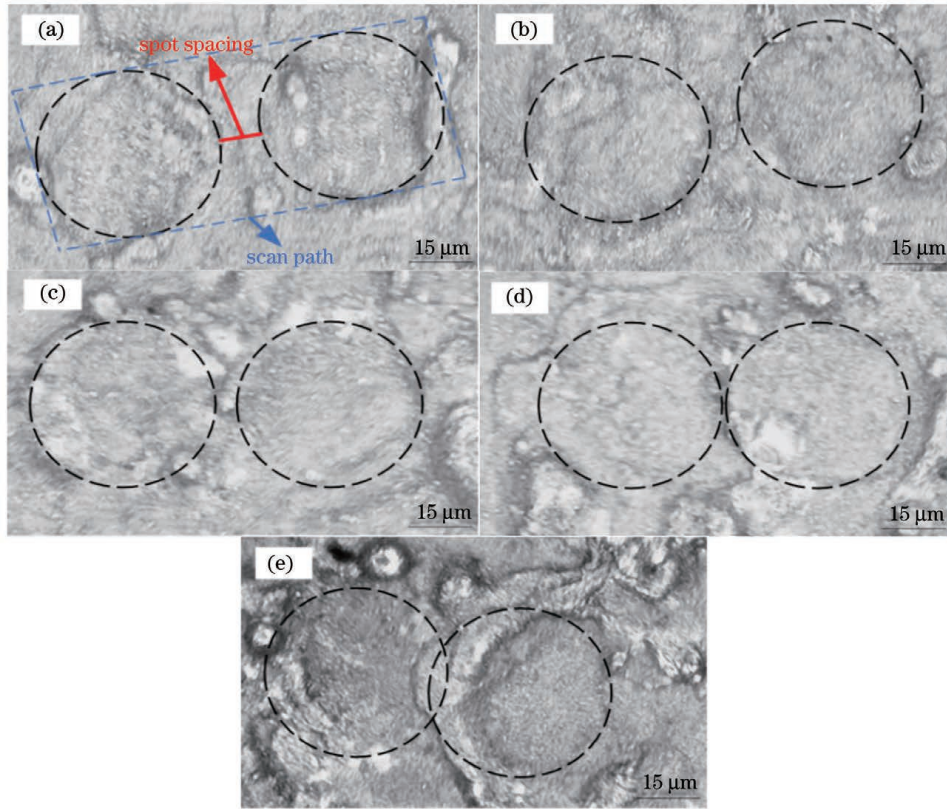


图 11 不同扫描速度下的微观形貌。(a)3000 mm/s;(b)2500 mm/s;(c)2000 mm/s;(d)1500 mm/s;(e)1000 mm/s
Fig. 11 Micro-morphologies under different scanning speeds. (a) 3000 mm/s; (b) 2500 mm/s; (c) 2000 mm/s;
(d) 1500 mm/s; (e) 1000 mm/s

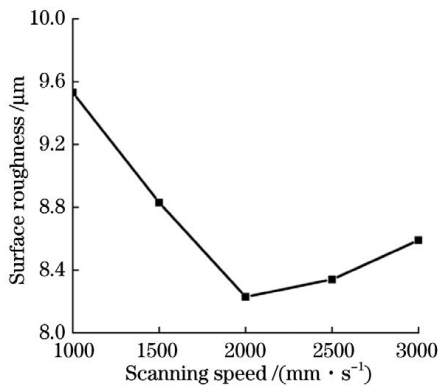


图 12 不同扫描速度下的表面粗糙度

Fig. 12 Surface roughnesses under different scanning speeds

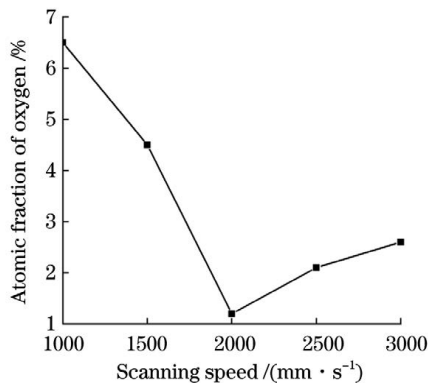


图 13 不同扫描速度下的氧元素含量

Fig. 13 Contents of oxygen elements under different scanning speeds

右。扫描速度的增大导致光斑搭接率降低,材料表面吸收的激光能量减少,表面仍有部分锈蚀层,所以出现氧元素含量上升的现象^[20]。

4 工艺参数的优化

4.1 基于响应面法建立数学模型

为了得到石油管螺纹的优化工艺参数,本文利用 Box-Behnken 实验设计方法^[20-21]得到表面粗糙度与激光参数之间关系的数学模型,确定石油管螺纹表面锈蚀层的激光清洗工艺窗口为: $450 \text{ W} \leq P' \leq 550 \text{ W}$, $+1 \text{ mm} \leq D \leq +3 \text{ mm}$, $1500 \text{ mm/s} \leq V \leq 2500 \text{ mm/s}$ 。通过数据拟合得到石油管螺纹激光清洗后表面粗糙度的响应面数学模型为

$$H = 5.83 + 0.63A - 0.78B + 0.25C + 0.032AB + 0.47AC - 0.15BC + 0.73A^2 + 0.11B^2 - 0.091C^2, \quad (1)$$

式中: H 表示表面粗糙度值; A 表示激光功率; B 表示离焦量; C 表示扫描速度。实验设计矩阵如表 5 所示。

表 5 中的表面粗糙度值是经过三次测量得到的平均值。1~17 组的绝对偏差值为 $-0.002 \sim 0.002 \mu\text{m}$ 。以数据组 1 为例,测得的平均值为 $5.77 \mu\text{m}$,三次测得的粗糙度值分别为 $5.769, 5.770, 5.771 \mu\text{m}$,平均值为 $5.770 \mu\text{m}$,绝对偏差值为 $0.001, 0, -0.001 \mu\text{m}$ 。

表 5 实验设计矩阵
Table 5 Experimental design matrix

Experiment No.	Laser parameter			Surface roughness / μm
	Laser power /W	Defocusing amount /mm	Scanning speed /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	
1	500	2	2000	5.77
2	450	2	1500	6.26
3	500	2	2000	6.36
4	450	3	2000	5.14
5	500	2	2000	5.82
6	500	2	2000	5.44
7	450	2	2500	5.61
8	500	1	1500	6.14
9	550	2	1500	6.38
10	500	1	2500	7.14
11	500	3	2500	5.25
12	550	2	2500	7.62
13	500	3	1500	4.85
14	450	1	2000	6.75
15	550	1	2000	8.13
16	500	2	2000	5.74
17	550	3	2000	6.65

4.2 模型方差分析

模型的方差分析结果如表 6 所示。F 分布检验统计量值 F 值为 15.43, 模型可靠性统计检验值 $P < 0.05$, 失拟值为 0.47, 表明模型可靠^[20]。信噪

比 R 为 $13.734 > 4$, 预测拟合系数 $R^2_{\text{PRED}} = 0.7458$ 与修正拟合系数 $R^2_{\text{ADJ}} = 0.8903$ 相差不大, 证明模型拟合度较高, 上述分析说明该模型与实际较吻合。

表 6 模型方差分析
Table 6 Analysis of model variance

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F value	P value	Reliability
Model	11.90	9	1.32	15.43	0.0008	Significant
A	3.15	1	3.15	36.75	0.0005	
B	4.91	1	4.91	27.34	0.0001	
C	0.50	1	0.50	5.78	0.0472	
AB	4.225×10^{-3}	1	4.225×10^{-3}	0.049	0.8306	
AC	0.89	1	0.89	10.42	0.0145	
BC	0.09	1	0.09	1.05	0.3396	
A^2	2.26	1	2.26	26.32	0.0014	
B^2	0.05	1	0.05	0.59	0.4679	
C^2	0.034	1	0.034	0.40	0.5460	
Residual	0.60	7	0.086			
Lack of fit value	0.16	3	0.052	0.47	0.7347	Not significant
Pure error	0.44	4	0.11			
Total	12.50	16				
$R^2_{\text{PRED}} = 0.7458$		$R^2_{\text{ADJ}} = 0.8903$				
$R = 13.734$						

观察图 14 所示的残差图,残差点较好地分布在拟合线上,证明该数学模型较为合理。

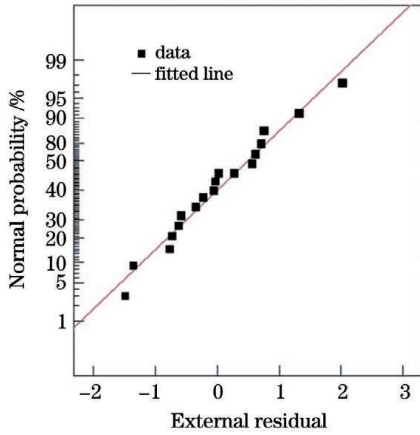


图 14 数学模型的残差图

Fig. 14 Residual plot of mathematical model

4.3 基于粒子群算法的工艺参数优化

粒子群算法中的每一个粒子具有各自的位置与速度。当开始求解时,每个粒子被随机赋予速度与位置,然后在求解阈值内搜索当前最优粒子,得出最优位置。在迭代求解中,每个粒子通过追随个体极值与全局极值的方式完成更新。 p 为粒子本身在迭代期间搜索的最优位置, g 为种群内所有粒子搜索的最佳位置,粒子更新后的速度与位置^[22]可表示为

$$v_i^{t+1} = \lambda \cdot v_i^t + c_1 r_1 (p_i^t - x_i^t) + c_2 r_2 (g_i^t - x_i^t), \quad (2)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1}, \quad (3)$$

式中: t 为迭代次数; i 为粒子数; λ 为惯性权重; v_i^{t+1} 为第 $t+1$ 次迭代时第 i 个粒子的速度; x_i^{t+1} 为第 $t+1$ 次迭代时第 i 个粒子的当前位置; r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 区间内的随机数; c_1, c_2 为学习因子。

惯性权重作为该算法中的重要参数,是描述粒子当前飞行速度对后续飞行速度影响的变量。较小的惯性权重导致局部搜索能力较强,全局搜索能力较弱;较大的惯性权重导致局部搜索能力较弱,全局搜索能力较强。为了调整全局搜索和局部搜索能力,可通过改变惯性权重值来实现。标准粒子群算法自身存在缺点,比如在迭代后期粒子寻优速度降低,易出现早熟收敛现象,粒子们容易陷入到局部最优的情况。针对上述问题,本文对惯性权重进行动态调整,平衡局部搜索能力和全局搜索能力并提高收敛速度^[22]。

惯性权重是影响全局搜索能力和局部搜索能力平衡的重要参数,选择适当的惯性权重进行搜索可以提高收敛速度。结合幂函数和学习因子,将其作为粒子群算法的改进算子,对惯性权重进行动态调整,在迭代过程中可扩大粒子搜索空间,提高种群多样性^[23]。惯性权重的动态调整可改善搜索性能和收敛速度,在迭代过程中,惯性权重也进行动态改变,表达式为

$$\lambda = (c_1 + c_2) \cdot i^2 / i^4 + 1. \quad (4)$$

相较于粒子群算法,改进后的粒子群算法实现了

惯性权重在迭代中的动态变化,平衡了全局搜索能力与局部搜索能力^[23]。基于表面粗糙度的数学模型与基于动态惯性权重的粒子群算法的结合步骤如下:

- 1) 对群体进行初始化处理,得到粒子的初始位置、速度和迭代次数,并设定数学模型的约束条件;
- 2) 计算每个粒子的适应度;
- 3) 在粒子位置更新的过程中,得出当前粒子的最优位置 p ,将下一次迭代过程中得到的新的 p 与上一个最优位置进行对比,把更优值作为全局最优位置 g ,在有限的迭代次数内或满足收敛判定条件前得到全局最优位置 g ;
- 4) 更新惯性权重 λ ,进而更新粒子的速度与位置;
- 5) 对改进算法进行判断,若达到最大迭代数或满足收敛条件,得出最优值,若未达到,则返回步骤 4)。

改进算法的流程图如图 15 所示。

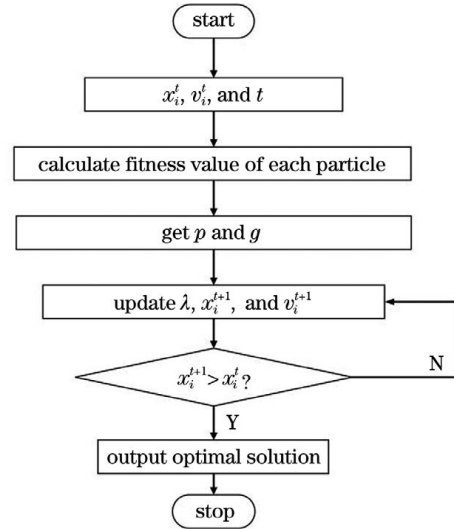


图 15 改进粒子群算法的流程图

Fig. 15 Flow chart of improved particle swarm algorithm

将改进后的粒子群算法与基于响应面法的数学模型相结合,得到工艺参数组合。收敛情况如图 16 所示,可以看出,随着迭代次数的增加,群体中的粒子慢慢靠近最优值,改进算法曲线比传统粒子群算法曲线收敛快,具有更强的求解能力。粒子群算法预测优化

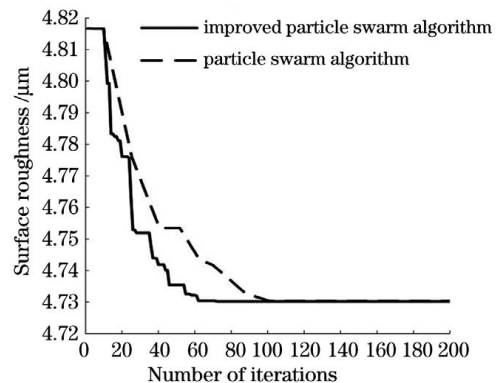


图 16 两种算法的收敛曲线

Fig. 16 Convergence curves of two algorithms

工艺参数下清洗后的表面粗糙度约为 $4.73 \mu\text{m}$ 。

4.4 优化工艺参数下的实验验证

优化算法得出的工艺参数组合为:激光功率 488 W,离焦量 +3 mm,扫描速度 3000 mm/s。在该参数组合下进行激光清洗和微观形貌检测实验,测得样件表面粗糙度约为 $4.64 \mu\text{m}$,表明改进的粒子群算法的预测较为准确。图 17 为优化工艺参数下清洗后的元素含量,可以看出氧元素被全部去除,铁元素的原子数分数为 80% 左右,清洗后未发生氧化,工件表面未发生损伤。图 18 为优化工艺参数下清洗后的熔池形貌,可以看出,熔池周围并无熔融物附着表面,熔池内部接近平滑,熔池形状接近于高斯光源形状。由此证明该参数组合下的激光清洗效果较好,为工业中管螺纹类工件的激光清洗提供了工艺参数的理论依据。

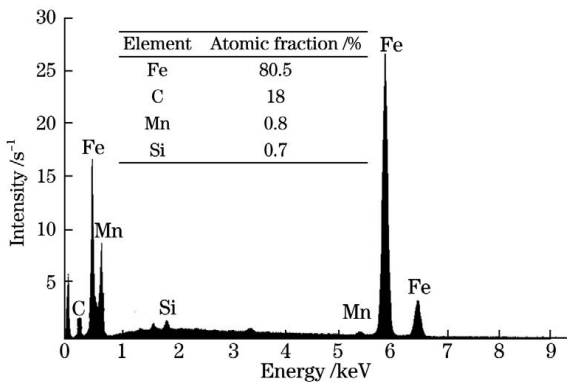


图 17 优化工艺参数下清洗后的元素含量

Fig. 17 Contents of elements after cleaning under optimized process parameters

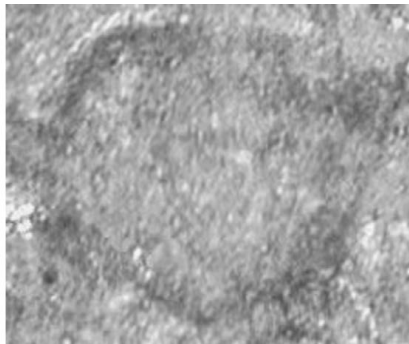


图 18 优化工艺参数下清洗后的熔池形貌

Fig. 18 Molten pool morphology after cleaning under optimized process parameters

5 结 论

通过正交实验,研究了影响石油管螺纹激光清洗效果因素(激光功率、离焦量、扫描速度)的显著性排序;基于响应面法建立了工件表面粗糙度与激光工艺参数关系的数学模型,并与优化后的粒子群算法相结合,得到了优化工艺参数组合。相关结论如下:

- 1) 影响石油管螺纹清洗效果的激光参数按显著性排序(从大到小)为激光功率、离焦量、扫描速度;
- 2) 结合幂函数和学习因子,将其作为粒子群算法

的改进算子,对惯性权重进行动态调整,改进后的算法在收敛速度上明显优于传统粒子群算法;

3) 响应面法与改进粒子群算法相结合,得到的优化工艺参数组合为:激光功率 488 W,离焦量 +3 mm,扫描速度 3000 mm/s;

4) 在优化工艺参数下进行激光清洗实验,实现结果表明,在该工艺参数组合下清洗工件后,熔池内部较为平滑,凹坑形状接近于高斯光源形状;氧元素被去除,优化效果较为明显。

参 考 文 献

- [1] 孔兰芹,陈宏伟.石油运输管道的维修与保养策略解析[J].中国石油和化工标准与质量,2013,33(13):41.
Kong L Q, Chen H W. Analysis of repair and maintenance strategy of petroleum transportation pipeline[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2013, 33(13): 41.
- [2] Liu J P, Wang J, Mazzola L, et al. Development and evaluation of poly (dimethylsiloxane) based composite coatings for icephobic applications [J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 349: 980-985.
- [3] Zhang F D, Liu H, Suebka C, et al. Corrosion behaviour of laser-cleaned AA7024 aluminium alloy [J]. Applied Surface Science, 2018, 435: 452-461.
- [4] 江胜文,陈威,刘广云,等.钢桥面喷砂除锈工艺研究[J].城市建设理论(电子版),2017(26):103-105.
Jiang S W, Chen W, Liu G Y, et al. Research on sand blasting and derusting technology of steel bridge deck [J]. Theoretical Research in Urban Construction, 2017(26): 103-105.
- [5] 梅佛全.超高压水射流除锈工艺在船舶清洗中应用前景的探讨[J].化学清洗,1995,11(4):29-36.
Mei F Q. Discussion of forecast of super high pressure jet derusting in vessel cleaning [J]. Chemical Cleaning, 1995, 11 (4): 29-36.
- [6] 刘雨佳,刘建华.激光清洗技术的现状及展望[J].航空精密制造技术,2010,46(2):60-62.
Liu Y J, Liu J H. Status and prospects of laser cleaning technology [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2010, 46(2): 60-62.
- [7] 雷正龙,田泽,陈彦宾.工业领域的激光清洗技术[J].激光与光电子学进展,2018,55(3):030005.
Lei Z L, Tian Z, Chen Y B. Laser cleaning technology in industrial fields [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 030005.
- [8] 彭伟,雷辉.能量密度对皮秒激光清洗 H13 模具钢的表面形貌与性能影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58 (17): 1714002.
Peng W, Lei H. Effect of energy density on surface morphology and properties of H13 mold steel via picosecond laser cleaning [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 1714002.
- [9] 佟艳群.激光去除金属氧化物的机理与应用基础研究[D].镇江:江苏大学,2014:47-51.
Tong Y Q. Study on mechanism and application fundamentals of laser removal of metal oxides [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2014: 47-51.
- [10] 李鑫炎,李灿阳,王丹,等.激光扫描速度对 Q345 钢表面锈层清洗质量的影响[J].中国激光,2020,47(10):1002010.
Li X Y, Li C Y, Wang D, et al. Effect of laser scanning speeds on cleaning quality of rusted layer on Q345 steel surface [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1002010.
- [11] 童懿,邱太文,易俊兰,等.脉冲频率对油漆漆层激光清洗作用机制的影响[J].激光与光电子学进展,2021,58(19):1914009.
Tong Y, Qiu T W, Yi J L, et al. Effect of pulse frequency on

- laser cleaning mechanism of paint coating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(19): 1914009.
- [12] 周建忠, 李华婷, 孙奇, 等. 基于清洗表面形貌的 AH32 钢激光除锈机制[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(8): 1754-1764. Zhou J Z, Li H T, Sun Q, et al. Laser derusting mechanism of AH32 steel based on cleaned surface topography[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(8): 1754-1764.
- [13] 高昆, 曾全胜, 张志研, 等. 飞机铝合金蒙皮激光清洗残余漆层附着力试验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(9): 0914006. Gao K, Zeng Q S, Zhang Z Y, et al. Adhesion of residual primer paint after laser cleaning aircraft aluminum alloy skin[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(9): 0914006.
- [14] Zhu L X, Sun B T, Li Z, et al. The weld quality improvement via laser cleaning pre-treatment for laser butt welding of the HSLA steel plates[J]. *Welding in the World*, 2020, 64(10): 1715-1723.
- [15] 高辽远, 周建忠, 孙奇, 等. 激光清洗铝合金漆层的数值模拟与表面形貌[J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0502002. Gao L Y, Zhou J Z, Sun Q, et al. Numerical simulation and surface morphology of laser-cleaned aluminum alloy paint layer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0502002.
- [16] 雷正龙, 孙浩然, 田泽, 等. 不同时间尺度的激光对铝合金表面油漆层清洗质量的影响[J]. *中国激光*, 2021, 48(6): 0602103. Lei Z L, Sun H R, Tian Z, et al. Effect of laser at different time scales on cleaning quality of paint on Al alloy surfaces[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(6): 0602103.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 朱明. Q345C 钢锈层的纳秒激光清洗工艺与表面质量研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020: 55-67. Zhu M. Study on cleaning technology and surface quality of Q345C steel rust layer by nanosecond laser[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020: 55-67.
- [21] 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. 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.
- [22] 张雪, 潘超, 韩笑, 等. 调谐质量阻尼器基于自适应权重粒子群算法的优化设计[J]. *烟台大学学报(自然科学与工程版)*, 2021, 34(4): 472-478. Zhang X, Pan C, Han X, et al. Optimal design of tuned mass damper based on adaptive weighted particle swarm optimization algorithm[J]. *Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition)*, 2021, 34(4): 472-478.
- [23] 王生亮, 刘根友. 一种非线性动态自适应惯性权重 PSO 算法[J]. *计算机仿真*, 2021, 38(4): 249-253, 451. Wang S L, Liu G Y. A nonlinear dynamic adaptive inertial weightparticle swarm optimization[J]. *Computer Simulation*, 2021, 38(4): 249-253, 451.

Optimization of Laser Cleaning Process Parameters for Petroleum Pipe Threads Based on Response Surface Method and Particle Swarm Algorithm

Sun Xingwei^{1,2}, Zhang Zhong^{1,2}, Yang Heran^{1,2*}, Dong Zhixu^{1,2}, Liu Yin^{1,2}

¹ School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning, China;

² Key Laboratory of Numerical Control Manufacturing Technology for Complex Surfaces of Liaoning Province, Shenyang 110870, Liaoning, China

Abstract

Objective The laying environment of petroleum drill pipe is always poor, and the laid soil contains oxidizing bacteria, moisture, air, etc. During service, rust often occurs at the internal and external threads of the drill pipe joint, resulting in unstable connection of internal and external threads. In order to improve the utilization rate of steel, derusting methods are often used to repair the surface of metal parts in industrial field. The traditional rust removal methods are mainly mechanical, manual and chemical methods, among which the mechanical methods are sand blasting and high-pressure water flow. Compared with traditional cleaning methods, laser cleaning has the characteristics of green environmental protection, high efficiency and non-contact. It has gradually become a common cleaning method in industry. As an advanced cleaning technology, laser cleaning focuses high-energy laser on the corrosion layer to be cleaned. After the surface corrosion layer absorbs laser energy, the thermal coupling phenomenon and plasma shock wave effect appear, and the effect of surface rust removal is realized. Therefore, the pulse laser is used to clean the corrosion on the surface of NC50 petroleum pipe thread, and the significance of the influence of different factors on the cleaning effect is systematically analyzed to provide theoretical guidance for the laser cleaning of industrial petroleum pipe thread.

Methods The laser cleaning experiment is carried out on the petroleum pipe thread by the orthogonal experiment method, and the orthogonal data table is analyzed with the surface roughness as the evaluation index, and the significance

order of the factors influencing the laser cleaning effect is obtained. The surface roughnesses and oxygen contents under different process parameters are obtained by the single factor experiment. The surface damage of cleaning samples is measured with oxygen contents, and the process parameters are optimized by taking surface roughness as the optimization objective. Based on the response surface methodology, the mathematical model is established to describe the relationship between the optimization objective and laser process parameters. By combining the mathematical model with the optimized particle swarm optimization algorithm, the optimized process parameters are obtained.

Results and Discussions According to the orthogonal experimental data, the influence of laser power on the experimental results is significant. On this basis, single factor experiments are carried out to analyze the variation of surface roughness and oxygen content of cleaned workpiece with laser power, scanning speed, and defocusing amount. Among them, when the scanning speed is 1500 mm/s, the defocusing amount is +1 mm and the laser power is variable, the workpiece surface roughness value (Fig. 6) and oxygen content (Fig. 7) first decrease and then increase, and both reach the lowest value when the laser power is about 500 W. With the increase of the laser power (below 500 W), the corrosion layer vaporizes obviously, the corrosion layer on the workpiece surface is removed, the surface roughness value decreases, and the oxygen content decreases. Increasing the laser power continuously causes the melt to adhere around the spot pit and increase the surface roughness. In order to expand the particle search space and improve the population diversity in the iterative process, a particle swarm optimization algorithm is proposed by using the combination of power function and learning factor as an improved operator fused into the inertia weight. The convergence speed of the curve obtained by the improved algorithm is faster than that obtained by the traditional particle swarm optimization algorithm (Fig. 16). The optimized process parameter combination is obtained by combining the improved particle swarm optimization algorithm with the mathematical model of response surface method. The particle swarm optimization algorithm predicts that the surface roughness after cleaning is about 4.73 μm . According to the optimization algorithm, the combination of process parameters is as follows: the laser power of 488 W, the defocusing amount of +3 mm and the scanning speed of 3000 mm/s. Using this parameter combination for laser cleaning and micro-morphology detection experiments, the surface roughness of the sample is about 4.64 μm . The accuracy of the prediction of the improved particle swarm optimization algorithm is improved obviously.

Conclusions In this study, the significances ranking of the factors (the laser power, defocusing amount, and scanning speed) influencing the cleaning effect of petroleum pipe threads is obtained by the orthogonal experiment. The relationship mathematical model between the workpiece surface roughness and laser process parameters is established based on the response surface method, which is combined with the optimized particle swarm optimization algorithm to obtain the optimized process parameter combination. The factors influencing the cleaning effect of petroleum pipe threads are the laser power, defocusing amount, and scanning speed according to their significances ranking from the highest to the lowest. The combination of power function and learning factor is used as the improved operator of the particle swarm optimization algorithm to dynamically adjust the inertia weight. The improved algorithm is obviously better than the traditional particle swarm optimization algorithm in convergence speed. According to the optimization algorithm, the combination of process parameters is as follows: the laser power is 488 W, the defocusing amount is +3 mm, and the scanning speed is 3000 mm/s. The laser cleaning experiment is carried out by using the optimized process parameters. The results show that the micro-morphology of the workpiece cleaned under the combination of process parameters is relatively smooth in the molten pool, and the shape of the pit is close to the shape of the Gaussian light source. The oxygen content is removed, and the optimization effect is obvious. The accuracy of the method proposed in this paper is proved, and it can provide theoretical guidance for the optimization of process parameters of laser cleaning.

Key words laser technique; laser power; defocusing amount; scanning speed; surface roughness; particle swarm algorithm