

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.08.004

# 基于响应面粒子群优化算法的低碳钢板 激光切割参数优化

潘冬旺<sup>1,2</sup>, 田晓青<sup>1,2</sup>, 王宰宇<sup>1,2</sup>, 刘钊<sup>1,2</sup>, 宋术丰<sup>3</sup>

(1. 合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省智能数控技术及装备工程实验室, 安徽 合肥 230009; 3. 安徽东海裕祥智能装备科技有限公司, 安徽 马鞍山 243131)

**摘要:** 为了获得良好的低碳钢板激光切割质量, 得到最佳的激光切割工艺参数, 文章以 3 mm 厚的 Q235 低碳钢板为研究对象, 应用 Box-Behnken 方法进行实验设计, 以切面粗糙度  $R_a$ 、 $R_z$  以及零件宽度尺寸误差表征切割面质量, 系统地研究激光功率、切割速度、辅助气体压力和焦点位置对切割质量的影响规律。实验结果表明: 切割面粗糙度的大小主要取决于切割速度和焦点位置; 尺寸误差的大小主要取决于激光功率和焦点位置; 焦点位置是影响切割面质量的主要因素。根据实验测量结果得到响应面模型, 结合粒子群多目标优化算法求得最佳工艺参数为激光功率 2 048 W、切割速度 3.64 m/min、辅助气体压力 0.81 bar、焦点位置 7.26 mm, 并获得粗糙度和尺寸误差的预测值; 该参数组合下切割零件的实际测量粗糙度和尺寸误差均在预测值的波动范围内, 且切割面质量较好, 证明了优化结果的准确性和有效性。

**关键词:** 激光切割; 工艺参数; 响应面法; 粒子群优化

**中图分类号:** TG485 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2025)08-1032-07

## Optimization of laser cutting parameters of mild steel plates based on particle swarm optimization combined with response surface methodology

PAN Dongwang<sup>1,2</sup>, TIAN Xiaqing<sup>1,2</sup>, WANG Zaiyu<sup>1,2</sup>, LIU Zhao<sup>1,2</sup>, SONG Shufeng<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Engineering Laboratory of Intelligent CNC Technology and Equipment, Hefei 230009, China; 3. Anhui Donghai Yuxiang Intelligent Equipment Technology Co., Ltd., Ma'anshan 243131, China)

**Abstract:** In order to achieve good quality of laser cutting of mild steel plates, the best laser cutting process parameters are established. This paper takes 3 mm thick Q235 mild steel plate as the research object, applies Box-Behnken method to design the experiment, and characterizes the quality of the cutting surface by the roughness of the cutting surface,  $R_a$  and  $R_z$ , and the dimensional error of the width of the parts. The effects of laser power, cutting speed, auxiliary gas pressure and focal point position on the cutting quality were systematically investigated. The experimental results show that the size of the cutting surface roughness mainly depends on the cutting speed and the focal point position, the size of the dimensional error depends on the laser power and the focal point position, and the focal point position is the main factor affecting the quality of the cutting surface. According to the experimental measurement results, the response surface model is obtained, and then combined with the particle swarm multi-objective optimization algorithm to find the optimal process parameters: laser power 2 048 W, cutting speed 3.64 m/min, auxiliary gas pressure 0.81 bar, focal point position 7.26 mm, and the predicted values of roughness and dimensional error are obtained. The actual

**收稿日期:** 2023-08-17; **修回日期:** 2023-11-30

**基金项目:** 安徽省重点研究与开发计划资助项目(202003a05020042)

**作者简介:** 潘冬旺(2000—), 男, 河北秦皇岛人, 合肥工业大学硕士生;

田晓青(1987—), 女, 河北石家庄人, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师, 通信作者, E-mail: tianxiaqing@hfut.edu.cn.

measured roughness and dimensional error of the cutting parts under this parameter combination are within the fluctuation range of the predicted values, and the quality of the cutting surface is better, which proves the accuracy and effectiveness of the optimization results.

**Key words:** laser cutting; process parameters; response surface methodology; particle swarm optimization

## 0 引 言

激光切割是一种高精度、高效率的切割技术,在航空航天、船舶、汽车、机械等行业得到了广泛应用。激光切割将激光束聚焦在工件上,通过材料的熔化、气化或燃烧来实现切割目的。然而,在实际应用中,激光切割参数的选择对切割质量和效率至关重要。

激光切割参数包括激光功率、切割速度、焦点位置、占空比、激光频率、气体类型和压力等,这些参数之间的选择和优化直接影响切割边缘质量、切割精度以及材料损伤程度等。因此,对激光切割参数进行合理优化,可以提高切割效率和质量,减少能源消耗和材料损失。

文献[1-5]以 304 不锈钢薄板、Q235 低碳钢薄板和碳纤维复合材料为研究对象,通过响应面法进行实验设计,探究了切割参数对切缝宽度、挂渣量、表面纹理最大峰值以及热影响区域宽度的影响,得到其响应指标的预测模型,并运用 Design-Expert 软件目标优化方法对切割工艺参数进行了优化求解;文献[6]探究了激光功率、切割速度、激光频率、激光占空比和气体压力等工艺参数对切口粗糙度的影响,并运用遗传算法对响应面模型进行优化,得到最佳工艺参数;文献[7]、文献[8]分别以铝合金和不锈钢板为实验对象,通过正交试验的方法设计实验,根据实验结果建立反向传播(back propagation, BP)神经网络模型,以此来预测最佳的加工参数。

分析发现,目前切割参数的优化方法主要依赖于实验设计软件自带的优化功能,这些方法对于多目标优化问题尚不能得出理想的结果。此外,学者们对于焦点位置对切割面质量影响规律的研究还较欠缺。

本文以 3 mm 厚的 Q235 低碳钢板为研究对象,采用粒子群多目标优化算法得到最佳工艺参数,研究对象 Q235 低碳钢薄板被广泛应用于建筑、汽车和船舶等行业。本文将重点讨论激光功率、切割速度、气体压力和焦点位置这 4 个关键参数对低碳钢板切面粗糙度和零件尺寸误差的影响因素。

## 1 实 验

### 1.1 实验设备及材料

本文实验采用金属激光切割机 4015,该激光切割机的系统采用柏楚 HypCut 激光切割控制系统,机床部件主要包括机床床身、运动机构、激光头、工作台以及辅助机构。该切割机最大加工范围为 4 000 mm×1 500 mm, X、Y 轴重复定位精度可达 0.02 mm,最大定位速度 100 m/min,工作台最大载重 950 kg。

实验材料选用 3 mm 厚 Q235 低碳钢板,采用同轴吹气的方式,辅助气体为高纯度的氧气,喷嘴高度 0.8 mm。

光纤激光切割机 4015 实物图如图 1 所示。

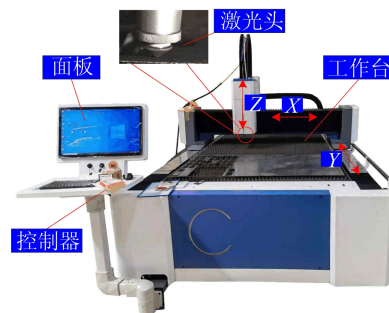


图 1 光纤激光切割机 4015 实物图

### 1.2 实验方案

激光切割的工作原理如图 2 所示。

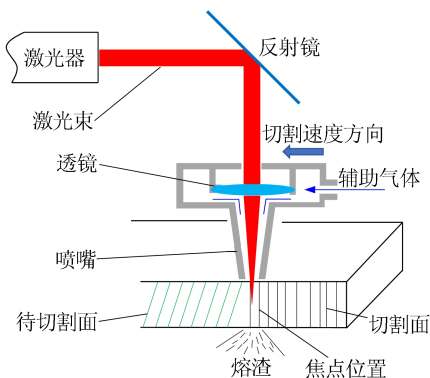


图 2 激光切割工作原理

首先通过激光器产生高能激光束,经过一系列镜头和透镜的聚焦系统,使激光束的能量能够

被高度集中到一个非常小的区域上,形成所谓的焦点;当焦点位置在材料表面上时,材料表面温度急剧升高,从而局部熔化和蒸发,形成小孔,激光束沿着切割路径迅速切割材料。辅助气体通常用于加速切割过程和清除熔融物质。

激光功率、切割速度、辅助气体压力、焦点位置是影响切割质量的主要因素,因其对切割质量的影响是相互关联的,为了进行实验方案的设计,本文采用响应面法中的 Box-Behnken 方法,并借助 Design-Expert 软件完成实验方案设计。

实验选取激光功率、切割速度、辅助气体压力、焦点位置 4 个因素,分别设为因素 A、因素 B、因素 C、因素 D,每个因素选取 3 个水平,以(-1,0,1)进行编码,选择粗糙度和零件宽度尺寸误差作为响应目标。因为各个因素的取值范围直接影响响应面模型的显著性,所以其取值范围需要通过前期的单因素实验确定,各因素水平编码见表 1 所列。

采用 Box-Behnken 方法共生成 29 组实验,响应面实验设计及结果见表 2 所列。

表 1 因素水平编码表

水平	因素			
	激光功率/ W	切割速度/ (m/min)	辅助气体压力/ bar	焦点位置/ mm
-1	2 000	3.0	0.8	7.00
0	2 400	3.6	0.9	8.25
1	2 800	4.2	1.0	9.50

表 2 响应面实验设计及结果

组号	因素				$Y_1$ / $\mu\text{m}$	$Y_2$ / $\mu\text{m}$	$Y_3$ / mm
	A	B	C	D			
1	-1	-1	0	0	0.448	2.126	0.51
2	0	-1	0	1	0.472	2.923	0.54
3	1	0	0	-1	0.937	4.692	0.42
4	0	0	0	0	0.683	3.215	0.48
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
26	0	0	0	0	0.452	2.218	0.50
27	1	0	1	0	0.606	3.018	0.50
28	1	-1	0	0	0.686	2.876	0.52
29	-1	1	0	0	0.766	3.343	0.42

### 1.3 切割实验参数的测量

切割实验完成后,采用白光干涉仪测量切割表面粗糙度,采用电子数显游标卡尺测量零件实际的宽度尺寸。

#### 1.3.1 切面粗糙度的测量

激光切割试件表面形貌如图 3 所示,可以看出,切口处有明显的条纹,切口纹理的分布在厚度上有明显的分层,靠近下表面处切口的粗糙度更大。因此本实验选择靠近下表面 1/3 处的表面粗糙度作为评价指标,取样长度为 1.8 mm。对于激光切割这种精密加工工艺,为了更好地描述切割表面的质量和粗糙度,选取轮廓算术平均偏差  $R_a$  以及轮廓最大高度  $R_z$  2 个粗糙度评定参数作为检测切割面质量的依据。

$R_a$  值反映切割面的光滑程度,在高温切割的过程中,高温激光束会熔化和蒸发材料,同时气体喷射将熔化的材料从切割槽中吹走,可能会在切割边缘留下不均匀的熔融痕迹和粗糙表面; $R_a$  值的评估可以帮助确定切割后的表面光滑度以及其对材料的影响,尤其在需要精确配合或表面质量要求较高的应用中。

$R_z$  值表示表面上最高的凸起与最低的凹陷之间的垂直距离平均值,能够提供有关表面不平整度和粗糙度的更为详细的信息;在激光切割中, $R_z$  可以用来评估切割过程中产生的最大熔融或氧化边缘以及可能的裂纹等表面缺陷; $R_z$  值较大可能会影响材料的疲劳性能和耐腐蚀性能,因此  $R_z$  的评估也至关重要。

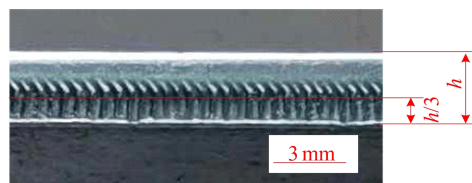


图 3 粗糙度测量示意图

#### 1.3.2 尺寸误差的测量

采用电子数显游标卡尺测量零件实际宽度尺寸,为保证测量结果的准确性,测量 3 次,算出其平均值,则理论宽度与测量结果的差值即尺寸误差的大小。

#### 1.3.3 实验结果

按照上述测量方法,得到的实验测量结果见表 2 所列。表 2 中: $Y_1$  表示切面粗糙度的  $R_a$  值; $Y_2$  表示切面粗糙度的  $R_z$  值; $Y_3$  表示零件宽度尺寸误差。

## 2 实验结果讨论与分析

### 2.1 响应面分析

针对表 2 的测量结果,通过 Design-expert 软

件可以求得粗糙度  $R_a$ 、 $R_z$  和尺寸误差的二次回归模型  $Y_1$ 、 $Y_2$ 、 $Y_3$ , 即

$$Y_1 = 0.5531 + 0.0012A + 0.1834B + 0.0887C - 0.3432D - 0.0506AB + 0.001AC + 0.184AD - 0.0406BC - 0.2573BD - 0.259CD + 0.0217A^2 + 0.0798B^2 - 0.02C^2 + 0.3357D^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = 2.84 + 0.0283A + 0.4158B + 0.3841C - 1.5D - 0.0035AB + 0.33AC + 0.1657AD - 0.051BC - 1.27BD - 1.21CD - 0.0927A^2 + 0.3682B^2 - 0.418C^2 + 1.23D^2 \quad (2)$$

$$Y_3 = 0.484 + 0.0175A - 0.015B - 0.0058C + 0.0533D + 0.0025AB - 0.0025AC + 0.0375AD + 0.0175BD + 0.0126A^2 + 0.0088B^2 - 0.0024C^2 - 0.0287D^2 \quad (3)$$

为了验证该模型的可靠性,需要对模型进行显著性检验。

粗糙度  $R_a$  和粗糙度  $R_z$  应用二次回归模型方差分析的结果见表 3 和表 4 所列;尺寸误差应用二次回归模型方差分析的结果见表 5 所列。

表 3~表 5 中: $F$  值表示组内均方与组间均方的比值,其值越大,表示模型越显著; $P$  值表示在原假设成立的情况下,观察到的统计量或更极端情况发生的概率,若  $P$  值小于 0.05,则说明模型是显著的。

表 3 粗糙度  $R_a$  二次回归模型方差分析

来源	平方和	自由度	均方值	F 值	P 值
模型	3.390 0	14	0.242 1	6.020 0	0.000 9
A	0	1	0	0.000 4	0.983 8
B	0.403 7	1	0.403 7	10.040 0	0.006 8
C	0.094 4	1	0.094 4	2.350 0	0.147 7
D	1.410 0	1	1.410 0	35.170 0	< 0.000 1
AB	0.010 2	1	0.010 2	0.254 5	0.621 7
AC	4.20E-6	1	4.20E-6	0.000 1	0.992 0
AD	0.135 4	1	0.135 4	3.370 0	0.087 8
BC	0.006 6	1	0.006 6	0.163 6	0.691 9
BD	0.264 9	1	0.264 9	6.590 0	0.022 4
CD	0.268 4	1	0.268 4	6.680 0	0.021 6
A <sup>2</sup>	0.003 1	1	0.003 1	0.075 9	0.787 0
B <sup>2</sup>	0.041 3	1	0.041 3	1.030 0	0.327 9
C <sup>2</sup>	0.002 6	1	0.002 6	0.064 4	0.803 4
D <sup>2</sup>	0.730 9	1	0.730 9	18.180 0	0.000 8
残差	0.562 7	14	0.040 2		
标准差	0.051 1	4	0.012 8		
总模型	3.950 0	28			
R <sup>2</sup>			0.857 6		

表 4 粗糙度  $R_z$  二次回归模型方差分析

来源	平方和	自由度	均方值	F 值	P 值
模型	57.090 0	14	4.080 0	4.050 0	0.006 7
A	0.009 6	1	0.009 6	0.009 5	0.923 7
B	2.080 0	1	2.080 0	2.060 0	0.173 3
C	1.770 0	1	1.770 0	1.760 0	0.206 3
D	26.900 0	1	26.900 0	26.690 0	0.000 1
AB	0	1	0	0	0.994 5
AC	0.435 6	1	0.435 6	0.432 1	0.521 6
AD	0.109 9	1	0.109 9	0.109 0	0.746 2
BC	0.010 4	1	0.010 4	0.010 3	0.920 5
BD	6.410 0	1	6.410 0	6.360 0	0.024 4
CD	5.840 0	1	5.840 0	5.800 0	0.030 4
A <sup>2</sup>	0.055 8	1	0.055 8	0.055 3	0.817 5
B <sup>2</sup>	0.879 2	1	0.879 2	0.872 2	0.366 2
C <sup>2</sup>	1.130 0	1	1.130 0	1.120 0	0.307 0
D <sup>2</sup>	9.820 0	1	9.820 0	9.740 0	0.007 5
残差	14.110 0	14	1.010 0		
标准差	1.850 0	4	0.463 2		
总模型	71.200 0	28			
R <sup>2</sup>			0.801 8		

表 5 尺寸误差二次回归模型方差分析

来源	平方和	自由度	均方值	F 值	P 值
模型	0.056 2	14	0.004 0	6.730 0	0.000 5
A	0.003 7	1	0.003 7	6.150 0	0.026 4
B	0.002 7	1	0.002 7	4.520 0	0.051 8
C	0.000 4	1	0.000 4	0.683 7	0.422 2
D	0.034 1	1	0.034 1	57.150 0	< 0.000 1
AB	0	1	0	0.041 9	0.840 8
AC	0	1	0	0.041 9	0.840 8
AD	0.005 6	1	0.005 6	9.420 0	0.008 3
BC	6.94E-18	1	6.94E-18	1.16E-14	1.000 0
BD	0.001 2	1	0.001 2	2.050 0	0.174 1
CD	0	1	0	0	1.000 0
A <sup>2</sup>	0.001 0	1	0.001 0	1.720 0	0.210 8
B <sup>2</sup>	0.000 5	1	0.000 5	0.847 4	0.372 9
C <sup>2</sup>	0	1	0	0.063 4	0.804 8
D <sup>2</sup>	0.005 3	1	0.005 3	8.920 0	0.009 8
残差	0.008 4	14	0.000 6		
标准差	0.001 7	4	0.000 4		
总模型	0.064 6	28			
R <sup>2</sup>			0.870 6		

从表 3、表 4、表 5 可以看出,3 个模型中的显著性水平  $P$  值均小于临界值 0.05,说明模型是显著的。

表 3~表 5 中的决定系数  $R^2$  代表模型对观测数据的拟合程度,其值越接近 1,表示模型越能很好地适应数据,预测能力越强。从表 3~表 5 可以看出,粗糙度  $R_a$ 、粗糙度  $R_z$  和尺寸误差的决

定系数  $R^2$  分别为 0.857 6、0.801 8、0.870 6，均接近于 1，说明粗糙度  $R_a$ 、 $R_z$  和尺寸误差的回归模型具有较高的可靠性。

### 2.2 工艺参数对粗糙度的影响

切割工艺参数对切面粗糙度  $R_a$  的影响规律如图 4 所示。

切割工艺参数之间的交互作用对粗糙度  $R_a$  和粗糙度  $R_z$  的影响规律分别如图 5、图 6 所示。

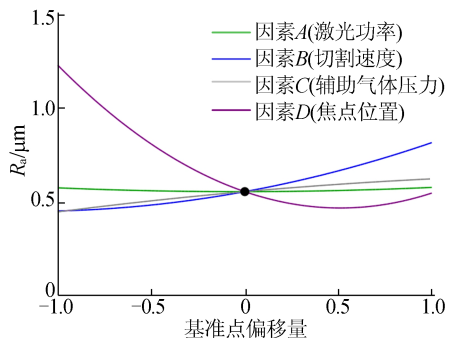
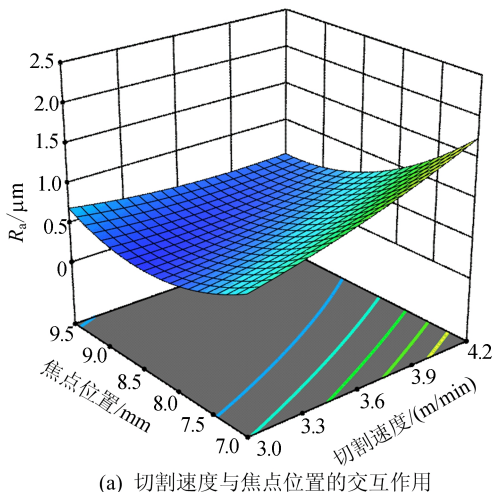
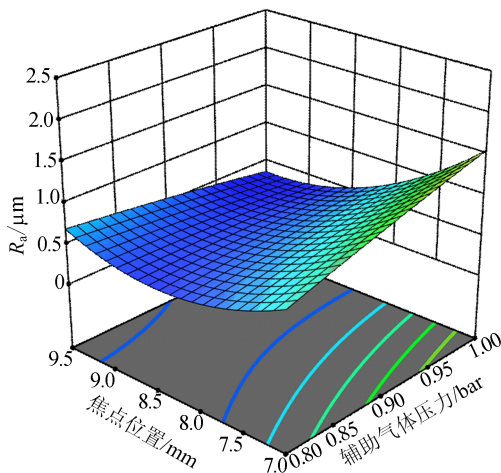


图 4 工艺参数对粗糙度  $R_a$  的影响



(a) 切割速度与焦点位置的交互作用



(b) 焦点位置与辅助气体压力的交互作用

图 5 交互作用对粗糙度  $R_a$  的影响

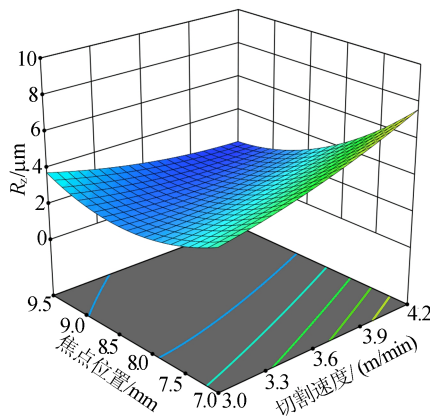


图 6 交互作用对粗糙度  $R_z$  的影响

由表 3 数据可知，切割速度和焦点位置的  $P$  值小于 0.05，切割速度与焦点位置的交互作用以及辅助气体压力与焦点位置交互作用的  $P$  值均小于 0.05，说明切割速度和焦点位置对于切面粗糙度  $R_a$  的影响非常显著；由表 4 数据可知，焦点位置和切割速度与焦点位置交互作用的  $P$  值均小于 0.05，说明切割速度和焦点位置对切面粗糙度  $R_z$  的影响非常显著。由此可见，影响切割面粗糙度的主要因素是切割速度和焦点位置的大小。

从图 4、图 5、图 6 可以看出：随着切割速度的增大，切面粗糙度也随之增大；而焦点位置的距离增大时，切面粗糙度呈现先减小后增大的趋势。

由于随着切割速度的增加，激光束在单位时间内切割的钢板长度增加，导致激光与钢板的相互作用时间减少，使得熔化和蒸发的材料无法完全被辅助气体吹出，从而形成了较粗糙的切面。而焦点位置对于粗糙度的影响是由于激光束在焦点位置处的能量最大，当焦点位置增大时，激光束在钢板处的能量密度降低，导致激光与钢板之间的相互作用变得不充分，材料的熔化和蒸发过程缓慢，从而减小了切割表面的粗糙度；当进一步增大焦点位置时，激光束在钢板位置处的能量密度不足以充分与材料相互作用，导致切割表面上的熔化和蒸发过程变得不稳定，从而使切割表面出现不均匀的熔化和蒸发，增加了切割表面的粗糙度。

### 2.3 工艺参数对尺寸误差的影响

切割工艺参数对尺寸误差的影响规律如图 7 所示。

由表 5 中的数据可知，激光功率和焦点位置的  $P$  值以及焦点位置与激光功率交互作用的  $P$  值均小于 0.05，说明切割速度和焦点位置对于尺

寸误差的影响非常显著。交互作用对尺寸误差的影响如图 8 所示。

从图 7、图 8 可以看出:随着激光功率的增大,尺寸误差呈现缓慢增大的趋势;而焦点位置变大时,尺寸误差增大的更为剧烈。这是由于激光功率增大时,激光束的能量密度也增大,使得板材在激光作用下熔化的区域增大,辅助气体吹除熔化的熔渣,使得切缝宽度增大,尺寸误差也随之变大;当焦点位置增大时,会使激光束与钢板的接触面积增大,热能分布更加分散,热影响区域增大,导致切缝宽度增大,尺寸误差也增大。

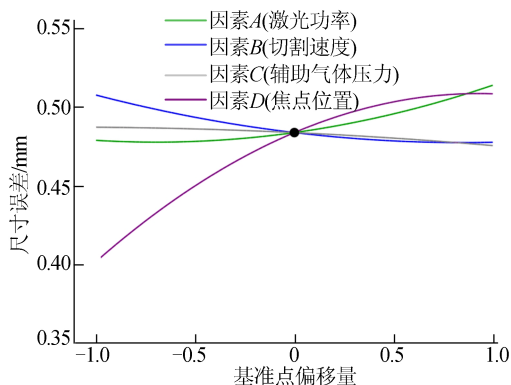


图 7 工艺参数对尺寸误差的影响规律

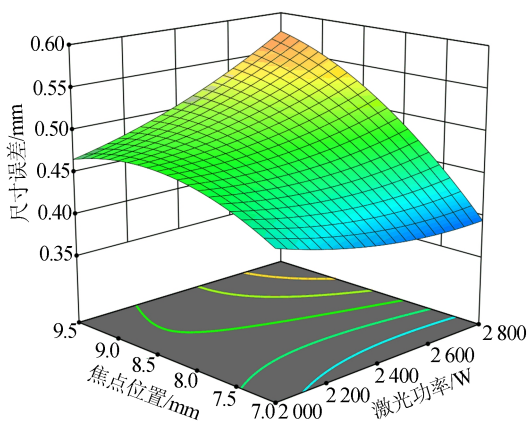


图 8 交互作用对尺寸误差的影响

#### 2.4 粒子群优化工艺参数

本实验使用一款基于数学软件的多目标优化平台对激光切割工艺参数进行优化。优化的目标为使粗糙度  $R_a$ 、 $R_z$  和尺寸误差最小,优化算法为粒子群优化算法。

粒子群优化算法是一种基于群体智能的优化算法,算法流程如图 9 所示。

首先,在初始化阶段,设置粒子的初始位置和速度;然后,通过目标函数计算每个粒子的适应度,以评估其优劣程度;接着,更新每个粒子的历

史最优位置和整个群体的全局最优位置,获得个体极值历史最优解( $p_{best}$ )和全局最优解( $g_{best}$ )<sup>[9]</sup>;在更新粒子的速度和位置时,利用历史和全局最优位置信息来引导粒子向更优解的方向移动;算法将持续迭代直至满足预定的终止条件,这可以是达到预设的迭代次数或是适应度值达到设定的阈值;一旦满足终止条件,算法将停止计算,并返回最终的优化结果。

通过上述步骤,粒子群优化算法能够在复杂的搜索空间中找到潜在的近似最优解,从而有效地解决多种优化问题。

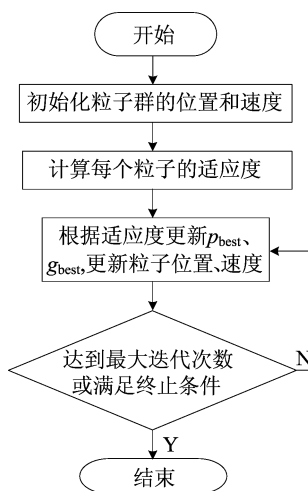


图 9 粒子群优化算法流程

用 MATLAB 软件进行编程,设置激光功率的范围为 2 000~2 800 W,切割速度的范围为 3.0~4.2 m/min,辅助气体压力的范围为 0.7~9.5 bar,焦点位置的上下限范围为 7.0~9.5 mm;设置初始粒子数为 1 000,迭代次数为 100 次;则得到的最佳工艺参数为激光功率 2 048 W、切割速度 3.64 m/min、辅助气体压力 0.81 bar、焦点位置 7.26 mm,在该参数组合下预测的粗糙度  $R_a$  为 0.574 2  $\mu\text{m}$ ,粗糙度  $R_z$  为 2.574 6  $\mu\text{m}$ ,尺寸误差为 0.468 1 mm。

为了保证预测结果的准确性,对优化后的参数进行切割实验验证,切割 2 次,并对每个切割件的 3 个不同位置进行粗糙度和尺寸误差的测量,计算其平均值,得到的数据见表 6 所列,切割质量如图 10 所示。

从表 6 和图 10 可以看出,预测值与测量值的相对误差均在 10% 以内,且切割面效果良好,证实了预测模型与优化结果的准确性,也证实了粒子群优化算法具有较好的寻优能力。

表 6 实验验证数据

试件	$R_a/\mu\text{m}$		相对误差/%	$R_z/\mu\text{m}$		相对误差/%	尺寸误差/mm		相对误差/%
	测量值	预测值		测量值	预测值		测量值	预测值	
试件 1	0.587	0.574 2	2.23	2.518	2.574 6	2.20	0.45	0.468 1	3.87
试件 2	0.601	0.574 2	4.67	2.774	2.574 6	7.74	0.43	0.468 1	8.14

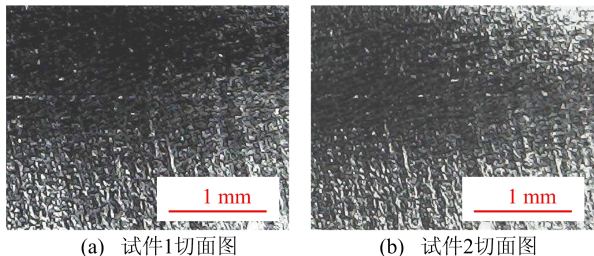


图 10 参数优化后的切割面

### 3 结 论

本文采用 Box-Behnken 方法设计实验,并完成了四因素三水平的实验设计,通过对 3 mm 厚的 Q235 低碳钢板进行光纤激光切割实验得到了切面粗糙度和零件宽度尺寸误差的响应面模型,对模型的分析得到以下结论:

1) 切割速度和焦点位置对粗糙度  $R_a$  和  $R_z$  值具有显著影响;激光功率和焦点位置对尺寸误差有显著影响。焦点位置是影响切割面质量的一个主要因素。

2) 使用粒子群优化算法对激光切割工艺参数进行优化,得到最佳工艺参数为激光功率 2 048 W、切割速度 3.64 m/min,辅助气体压力 0.81 bar,焦点位置 7.26 mm。切割验证实验的结果表明,粗糙度和尺寸误差的预测值与测量值之间的相对误差均在 10%以内,证实了该方法预测模型及预测结果的准确性。

3) 本研究为激光切割 3 mm 厚 Q235 低碳钢板提供了工艺调试和质量优化依据,可以缩短调试及质量提升周期;研究的结果对激光切割工艺

的优化和应用具有重要意义,为工业制造和材料加工提供了技术支持,促进了相关领域的发展和进步。

### [参 考 文 献]

- [1] 李永亮,王敬,梁强. 响应面分析法优化不锈钢激光切割工艺参数[J]. 材料科学与工艺,2020,28(4):65-72.
- [2] 陈博,宫静. 响应面法优化 304 不锈钢激光切割工艺参数[J]. 模具技术,2021(5):55-61.
- [3] 王晓兵,李学梅,岳智,等. 响应曲面分析法优化车身激光切割工艺参数[J]. 应用激光,2020,40(6):1080-1085.
- [4] 杨韩,王洪建,罗登成,等. 响应面分析法优化低碳钢板激光切割工艺参数[J]. 激光杂志,2023,44(1):188-193.
- [5] 侯红玲,郝海凌,吕瑞虎,等. 基于响应面法碳纤维复合材料激光切割工艺参数优化及性能试验[J]. 激光与光电子学进展,2022,59(13):307-314.
- [6] 向亮,谢晖,付山. 基于响应面遗传算法的低碳钢激光切割工艺分析及参数优化[J]. 材料科学与工艺,2022,30(1):14-20.
- [7] 伍文进,徐中云,滕凯,等. 基于正交实验与 BP 神经网络的 2A12 激光切割工艺参数优化[J]. 机床与液压,2018,46(10):13-17.
- [8] 张伟博,舒林森. 基于正交试验与 BP 神经网络的 304 不锈钢激光切割工艺参数优化[J]. 应用激光,2021,41(4):780-786.
- [9] 周云鹏,赵韩,江昊. 基于粒子群优化的电动汽车再生制动模糊控制[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2014,37(7):769-772.

(责任编辑 胡亚敏)