

# 交互作用优化激光切割镍基合金工艺参数

于天驰, 陈宇翔, 岳鑫, 梁志军, 金家成

辽宁科技大学应用技术学院, 辽宁 鞍山 114000

**摘要** 正交法优化激光切割镍基合金的切缝宽度不是最优方案, 应考虑交互作用即因素间联合作用对实验指标的影响。正交实验设计包括: 确定切割质量评价指标、确定因素水平、交互作用表头设计。为了规避实验偶然性进行两组交互作用正交实验, 分别采用  $L_8(2^7)$  正交表分析气压、离焦量与切速以及三者间两两交互作用对切割质量的影响, 采用  $L_{16}(2^{15})$  正交表分析切速、电流、脉宽、频率以及四者间两两交互作用对切割质量的影响。根据实验结果进行直观分析与交互作用分析对比可得: 交互作用分析可以在全面实验中准确找出最优方案。总结了激光切割镍基合金时存在的、显著影响切割质量的交互作用, 两组实验得出的最佳工艺参数以及实验中重要的影响因素。

**关键词** 激光技术; 激光切割; 交互作用; 正交分析法; 工艺参数

中图分类号 TG485

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.021413

## Parameters of Laser Cutting Ni-Based Alloy Steel with Factors Interaction

Yu Tianchi, Chen Yuxiang, Yue Xin, Liang Zhijun, Jin Jiacheng

College of Applied Technology, University of Science and Technology Liaoning, Anshan, Liaoning 114000, China

**Abstract** It is not an optimal solution to optimize kerf width of laser cutting Ni-based alloy steel by orthogonal method, so it is suggested to take effects of interaction, which is a combination of factors, into consideration. Design of orthogonal test include evaluation index determination of cutting quality, levels determination of each factor, interaction table top design. After that, in order to avoid test contingency, two groups of orthogonal experiments are performed.  $L_8(2^7)$  table is used to analyze the effects of gas pressure, defocusing distance, cutting speed and the interaction between the factors on cutting quality, and  $L_{16}(2^{15})$  table is used to analyze the effects of cutting speed, current, pulse width, frequency and the interaction between the factors on cutting quality. Finally, according to the test results, We can get a conclusion that interaction analysis can accurately find the optimal solution in a comprehensive experiment by a contrast of intuitive analysis and interaction analysis. The significant interaction that impacts on quality of laser cutting Ni-based alloy steel is summarized. The optimum technological parameters of the two groups and important factors are obtained.

**Key words** laser technique; laser cutting; interaction; orthogonal method; process parameter

**OCIS codes** 140.3390; 140.3460; 160.3900

## 1 引言

镍基合金 GH3128 是我国自主研发的航空行业不可缺少的重要金属材料, 主要应用于航空发动机燃烧室火焰筒、动力燃烧室壳体、调节片及其他高温零部件<sup>[1-3]</sup>。激光切割该合金的工艺参数研究对航空制造业具有现实意义。

Madic 等<sup>[4]</sup>采用优先选择指标法通过田口正交

阵列测定  $\text{CO}_2$  激光器切割的工艺参数并进行评价。Deng 等<sup>[5]</sup>利用模糊逻辑的田口方法优化  $\text{CO}_2$  激光器加工木材工艺参数, 并验证其有效性。赵晋平等<sup>[6]</sup>通过正交实验极差和方差分析得出激光切割 2A12 硬铝合金的合理工艺参数, 并运用 Matlab 神经网络与遗传算法进行最佳工艺参数的预测。陈聪等<sup>[7]</sup>系统研究了光纤激光切割铝合金工艺特性并得出最优工艺参数, 通过线性回归法建立数学模型, 预

收稿日期: 2017-08-04; 收到修改稿日期: 2017-08-25

基金项目: 辽宁科技大学大学生创新创业训练计划国家级项目经费(201710146000152)

作者简介: 于天驰(1995—), 男, 本科生, 主要从事镍基合金激光切割方面的研究。E-mail: 1506661470@qq.com

导师简介: 陈宇翔(1988—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事激光加工工艺方面的研究。E-mail: 491208485@qq.com(通信联系人)

测实验数值吻合良好。张威等<sup>[8]</sup>采用 1 kW 光纤激光器切割铝锂合金进行正交实验,通过直观分析、方差分析、信噪比分析对工艺参数进行优化设计,得出良好的切割质量。欧长劲等<sup>[9]</sup>建立激光非垂直切割模型,通过求解阈值能量方程,得出切缝宽度和热影响区宽度随光线能量、入射角和离焦量的变化规律,采用正交实验得出最优参数且与模型预测吻合良好。赵洪刚等<sup>[10-11]</sup>用激光切割木材进行正交实验,通过方差分析及多重比较分析得出合理参数。

以上研究结果说明:正交实验法可以对激光切割进行有效的指导并得出最优工艺参数,但正交实验直观分析得出的最优因素水平并不一定是最佳工艺参数,正交法对优化激光切割镍基合金切缝宽度并不适用<sup>[12]</sup>,进行方差分析只能得出各个因素之间的交互作用和区组间差异,并未给出解决方法。除了单个因素对实验指标产生影响外,因素间还会联合起来影响实验指标,这种联合作用的影响被称为交互作用。国内外有关正交实验交互作用的研究报道较为鲜见,交互作用的研究可弥补直观分析的不足,并找到合理的工艺参数,所以分析正交实验交互作用对激光切割镍基合金的影响具有重要的研究意义。

本文采用具有交互作用的正交表进行实验,分析交互作用对实验指标的影响程度,交互作用不明显时采用直观分析可以找到最优的工艺参数,交互作用明显时无法通过直观分析找到合理的工艺参数,采用因素搭配表来考虑交互作用影响才能得出最优工艺参数。并且通过实验得出的显著交互作用,可以为重复实验简化交互作用正交表的设计。

## 2 正交实验设计

### 2.1 评价指标

一般通过量化激光切割评价指标来反映切割质量。量化的切割质量评价指标有:挂渣厚度和切缝宽度。辅助气流未能彻底吹除的熔化材料残留在板材背面的熔渣称为挂渣。熔化材料的量受激光功率、离焦量、加工速度等工艺参数的影响。切缝宽度主要受激光功率、离焦量、加工速度等工艺参数的影响。综上,认为切割质量最好的评价指标为:挂渣厚度 0  $\mu\text{m}$ ,切缝宽度 100  $\mu\text{m}$ ,完全切开。设计两组实验,其中第 2 组实验出现未完全切开现象。根据实践经验采用加权综合评分法可得

$$S_c = [(50 - S/20) + (60 - K/10)] \times l/L, \quad (1)$$

式中, $S_c$  为综合评分, $S$  为挂渣厚度, $K$  为切缝宽

度, $l$  为切开长度, $L$  为切缝全长。将最好评价指标代入(1)式则为 100 分。

### 2.2 确定因素水平

影响切割质量的因素:辅助气压、离焦量、切割速度、输入电流、脉冲宽度、发射频率。焦点设置为激光点射钢板最大火花处,切割速度由两轴联动 X-Y 数控平台控制,输入电流为提供抽运源的电流,脉冲宽度为激光功率维持一定值所持续的时间,发射频率为激光在单位时间内发射次数。以上因素水平的选择如表 1 所示。

表 1 正交实验因素水平

Table 1 Levels of each factor in the orthogonal test

Symbol	Factor	Level 1	Level 2
A	Gas pressure /MPa	0.3	0.4
B	Defocusing distance /mm	-0.5	-1.0
C	Cutting speed /( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	200	300
D	Electric current /A	200	210
E	Pulse width /ms	0.8	0.9
F	Frequency /Hz	75	80

根据文献[12],在较好水平上下浮动确定水平值。为方便交互作用分析,仅选择两个水平。

### 2.3 正交实验表头设计

根据表 1 所示,影响激光切割的因素主要有 6 个,将这些因素一起分析太过繁琐,所列表头除 6 个因素占据 6 列外,还须考虑 6 个因素两两之间的交互作用(共  $C_6^2 = 15$  个),那么所列的表头中交互作用必然出现 2~3 次的重叠,这样分析不够直观,所以将 6 个因素分为两部分进行交互作用分析,第 1 组为 ABC,第 2 组为 CDEF。

自由度即偏差平方和中独立平方的数据个数,用  $f$  表示<sup>[13]</sup>。 $f_A$  表示 A 因素的自由度, $f_{A \times B}$  表示 A 与 B 因素交互作用的自由度。 $A \times B$  表示 A 因素与 B 因素的交互作用。

$L_n(r^m)$  为正交符号,其中  $L$  为正交表代号, $n$  为正交表横行数(实验次数), $r$  为因素水平数, $m$  为正交表纵列数(因素个数)。

第 1 组实验考虑因素为:A、B、C、 $A \times B$ 、 $A \times C$  和  $B \times C$ 。单个因素自由度为: $f_A = f_B = f_C = m - 1 = 2 - 1 = 1$ ;水平用  $m = 2$  表示。交互作用自由度为: $f_{A \times B} = f_A \times f_B = 1$ ;  $f_{A \times C} = f_A \times f_C = 1$ ;  $f_{B \times C} = f_B \times f_C = 1$ ;第 1 组实验总自由度: $f_T = f_A + f_B + f_C + f_{A \times B} + f_{A \times C} + f_{B \times C} = 6$ ;实验次数: $n \geq f_T + 1 = 7$ 。所以选择为 8 次实验的  $L_8(2^7)$  正交表安排 3 个因素 A、B、C,并考虑存在  $A \times B$ 、 $A \times C$  和  $B \times C$  交互作用。表头设计安排 A、B、C、 $A \times B$ 、 $A \times C$  和

B×C 具体列号规则如表 2 所示,表中所有数字代表列号,最上面一行和括号中数字分别代表两因素所在列号,其余数字均为交互作用列号。若安排 A 和 B 分别为第 1 列和第 2 列,就从(1)横着自左向右看,从最上面一行中 2 自上向下看,交叉点为 3,则第 3 列即 A×B<sup>[13]</sup>。根据以上规则,进行第 1 组实验表头设计,如表 3 所示。其中空白列作为误差项。

第 2 组实验考虑因素为:C、D、E、F、C×D、C×E、C×F、D×E、D×F 和 E×F。同理,按照第 1 组自由度计算:总自由度为  $f_T = 10$ ,总实验数  $n \geq f_T + 1 = 11$ ,选择 16 次实验的  $L_{16}(2^{15})$  正交表可以满足自由度要求。按照表 2 所示规则安排因素及交互作用列号得出表头设计如表 4 所示,其中所有空白列之和作为误差项。

表 2  $L_8(2^7)$  二列间交互作用列表Table 2 List of  $L_8(2^7)$  interaction between two columns

Number	1	2	3	4	5	6	7
(1)	(1)	3	2	5	4	7	6
(2)		(2)	1	6	7	4	5
(3)			(3)	7	6	5	4
(4)				(4)	1	2	3
(5)					(5)	3	2
(6)						(6)	1
(7)							(7)

表 3 第 1 组表头设计

Table 3 Top design of the first group

Factor	A	B	A×B	C	A×C	B×C	Blank
Column	1	2	3	4	5	6	7

表 4 第 2 组表头设计

Table 4 Top design of the second group

Factor	C	D	C×D	E	C×E	D×E	Blank	F	C×F	D×F	Blank	E×F	Blank	Blank	Blank
Column	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

## 3 正交实验

### 3.1 实验设备与材料

实验设备为 JHM-1GY-300B 激光切割机,具体参数为:激光波长  $1.06 \mu\text{m}$ ,激光额定平均功率 300 W,激光脉冲频率  $1 \sim 200 \text{ Hz}$ (可调),激光脉冲宽度  $0.1 \sim 20.0 \text{ ms}$ (可调),聚焦镜焦距  $f = 75 \text{ mm}$ ,聚焦光斑直径  $0.3 \sim 0.6 \text{ mm}$ 。辅助气体为氧气。实验材料为镍基合金 GH3128,其基体组织为奥氏体,规格为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 0.9 \text{ mm}$ ,主要成分如表 5 所示。

表 5 GH3128 化学成分(质量分数,%)

Table 5 Chemical composition of GH3128 (mass fraction, %)

Ni	Cr	W	Mo	Al	Ti	Fe	B	Zr	Ce
Bal.	19.0-	7.5-	7.5-	0.4-	0.4-				
	22.0	9.0	9.0	0.8	0.8	1.0	0.005	0.04	0.05

### 3.2 实验方法

实验采用表 3、表 4 所示的  $L_8(2^7)$  正交表和  $L_{16}(2^{15})$  正交表进行两组实验,分别为因素 ABC(气压、离焦量、切速)与 CDEF(切速、电流、脉宽、频率)。第 1 组实验次数是 8 次,而其全面实验次数也为  $2^3 = 8$  次,第 2 组实验次数为 16 次,而其全面实验次数同样是  $2^4 = 16$  次,两组实验进行全面实验是为了可以全面观察交互作用,以分析如何规避错误,找到全实验中最佳工艺参数,这样既证明了分析交互作用的价值,又省去了验证实验。做两组实验的

目的是规避偶然性,确保实验规律的准确性。实验测量:使用分辨率为  $0.01 \text{ mm}$  的数显高度卡尺测量挂渣厚度,使用金相显微镜测量切缝宽度。

### 3.3 实验结果

通过表 3 所示的  $L_8(2^7)$  正交表进行的第 1 组实验结果如表 6 所示。表 6 中最佳实验号为 6 号,最差实验号为 3 号,其宏观图片如图 1 所示。图 1 中数字代表实验样本号,从宏观图可以看出,1、3、5、7 号样本切割缺陷严重,存在大量挂渣堆积、过烧现象和挂渣飞溅,其中 3 号样本最为严重。6 号样本切割质量最好,其切割缺陷不严重,不存在过烧现象,挂渣厚度较小,飞溅较少。图 1 所示宏观图片与表 6 中数据是相互符合的。

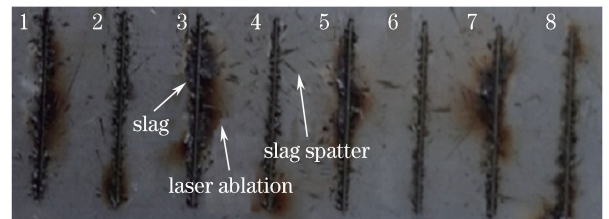


图 1 第 1 组实验宏观图

Fig. 1 The first group test macrograph

挂渣厚度取 5 次测量的平均值,切缝宽度取最大和最小切缝宽度的均值,如图 2 所示。从图 2 可以看出,4 号样本切缝最窄,3 号样本切缝最宽,6 号表面缺陷较少,4 号和 8 号次之。

表6 第1组正交实验结果  
Table 6 Results of the first orthogonal test

Number	A	B	A×B	C	A×C	B×C	Blank	Average slag thickness / $\mu\text{m}$	Average kerf width / $\mu\text{m}$
1	1	1	1	1	1	1	1	434	175.0
2	1	1	1	2	2	2	2	254	165.0
3	1	2	2	1	1	2	2	690	217.5
4	1	2	2	2	2	1	1	258	137.5
5	2	1	2	1	2	1	2	466	200.0
6	2	1	2	2	1	2	1	198	157.5
7	2	2	1	1	2	2	1	418	187.5
8	2	2	1	2	1	1	2	254	172.5

Note: electric current is 200 A, pulse width is 0.8 ms, and frequency is 75 Hz.

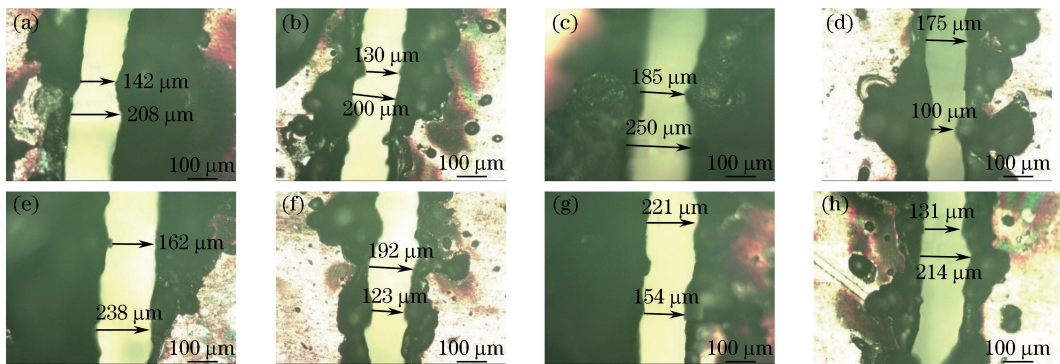


图2 第1组实验金相图。(a) 1号;(b) 2号;(c) 3号;(d) 4号;(e) 5号;(f) 6号;(g) 7号;(h) 8号

Fig. 2 The first group test metallography. (a) No. 1; (b) No. 2; (c) No. 3; (d) No. 4; (e) No. 5; (f) No. 6; (g) No. 7; (h) No. 8

通过表4所示的 $L_{16}(2^{15})$ 正交表表头进行第2组实验,由于存在4个样本未完全切开,采用(1)式计算综合评分作为实验指标。因为因素列号较多,所以简化因素水平的表现方式得出实验结果如表7所示。表7中挂渣厚度取3次测量值

的均值,切缝宽度为最大和最小切缝宽度的均值。从表7可以看出,15号样本评分最高,14号样本评分最低,如果抛开未切开比例因素,9~16号样本优于1~8号样本。图3结果可以证明这一点。

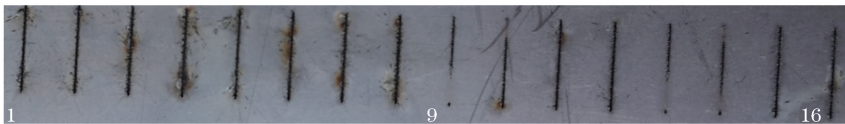


图3 第2组实验宏观图

Fig. 3 The second group test macrograph

图3中的数字代表样本号,从左至右依次增加。从图3可以看出,9、10、13、14号样本均未完全切开,其未切开的位置是激光切割的初期和末期,未切开的原因是数控工作平台存在起始阶段的加速过程和停止阶段的减速过程,这些速度的变化导致激光比能量分布不均匀,此时如果设置的激光比能量近似于切割临界值,就可能受到速度变化的影响导致激光比能量低于切割临界值,出现未完全切开现象。9~16号实验相比,1~8号实验的工艺参数更接近切开钢板的临界值,

而越接近该临界值得出的挂渣越少,且切缝越窄。

图4中9、10、13、14号是未完全切开的样本。图2和图4均为切缝中间部位的金相图,图中所示图像的切缝宽度均小于激光光斑大小,这是由于切缝宽度虽然依赖于激光光斑大小,但也受激光功率的影响。如果忽略热影响区,那么切缝宽度能否达到切缝宽度的上限(即激光光斑大小)主要看激光功率,激光功率不足导致未切开,那么切缝宽度是零;激光功率过大导致材料熔化严重,那么切缝宽度就

是激光光斑大小;激光功率适中,那么切缝宽度小于激光光斑。这是由于使用的激光模式是基模,激光光束属于高斯光束,高斯光束光强分布中心能量最

大,外围能量逐渐减小,当激光功率满足光斑中心能量可以切开板材,而周围能量不足以切开板材时,切缝宽度小于激光光斑大小。

表7 第2组正交实验结果

Table 7 Results of the second orthogonal test

Number	Factor	Slag / $\mu\text{m}$	Kerf / $\mu\text{m}$	Percentage /%	Score
1	1111111111111111	323.33	137.5	100	80.08
2	1111111222222222	293.33	162.5	100	79.08
3	1112222111122222	316.67	165.0	100	77.67
4	1112222222211111	360.00	180.0	100	74.00
5	1221122112211222	406.67	155.0	100	74.17
6	1221122221122111	326.67	155.0	100	78.17
7	1222211112222111	330.00	155.0	100	78.00
8	1222211221111222	450.00	157.5	100	71.75
9	2121212121212121	273.33	105.0	65	55.79
10	2121212212121212	323.33	125.0	80	65.07
11	2122121121221212	196.67	160.0	100	84.17
12	2122121212112121	226.67	167.5	100	81.92
13	2211221122112211	223.33	125.0	65	56.12
14	2211221211221121	120.00	115.0	60	55.50
15	2212112122121121	200.00	150.0	100	85.00
16	2212112211212211	213.33	145.0	100	84.83

Note: gas pressure is 0.4 MPa; defocusing distance is  $-1$  mm.

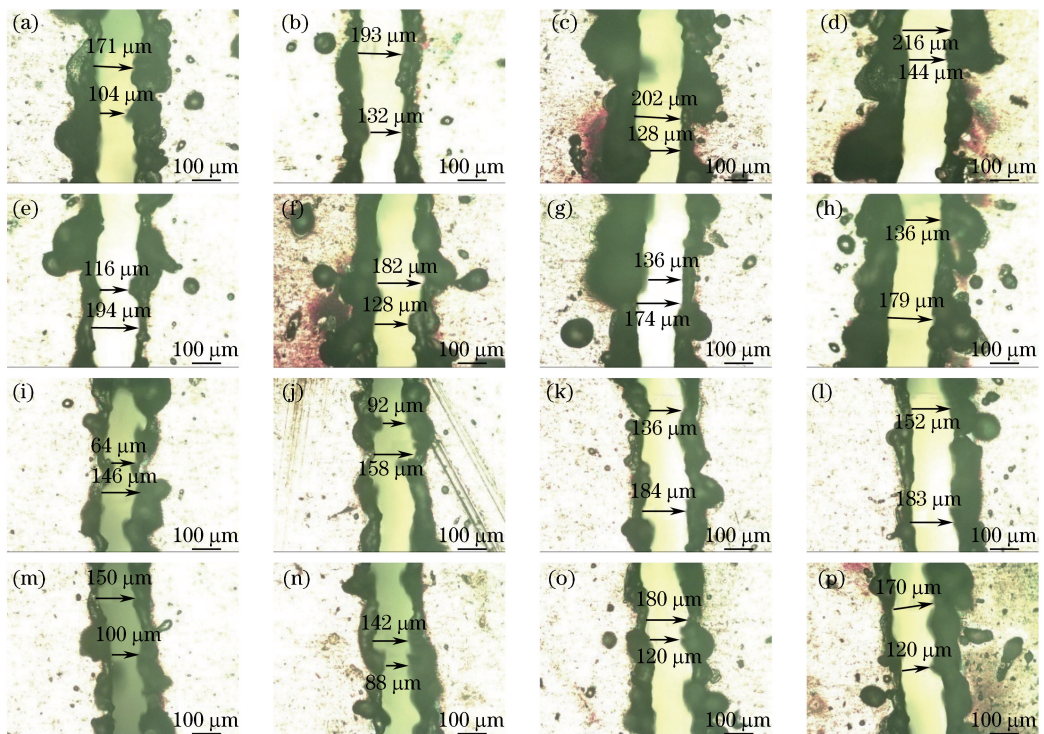


图4 第2组实验金相图。(a) 1号;(b) 2号;(c) 3号;(d) 4号;(e) 5号;(f) 6号;

(g) 7号;(h) 8号;(i) 9号;(j) 10号;(k) 11号;(l) 12号;(m) 13号;(n) 14号;(o) 15号;(p) 16号

Fig. 4 The second group test metallography. (a) No. 1; (b) No. 2; (c) No. 3; (d) No. 4; (e) No. 5; (f) No. 6;

(g) No. 7; (h) No. 8; (i) No. 9; (j) No. 10; (k) No. 11; (l) No. 12; (m) No. 13; (n) No. 14; (o) No. 15; (p) No. 16

## 4 正交实验分析

### 4.1 第 1 组实验交互作用直观分析

根据表 6 中数据进行两水平间直观分析可知, 由于水平较少, 只采用水平之和  $K_1$ 、 $K_2$  进行分析,

表 8 第 1 组正交实验交互作用分析

Table 8 Visual analysis of the first orthogonal experimental interaction

Test index	Statistic average	Interaction factor						
		A	B	A×B	C	A×C	B×C	Blank
Slag thickness / $\mu\text{m}$	$K_1$	1636	1352	1360	2008	1576	1412	1308
	$K_2$	1336	1620	1612	964	1396	1560	1664
	R	300	268	252	1044	180	148	356
Kerf width / $\mu\text{m}$	$K_1$	695.0	697.5	700.0	780.0	722.5	685.0	657.5
	$K_2$	717.5	715.0	712.5	632.5	690.0	727.5	755.0
	R	22.5	17.5	12.5	147.5	32.5	42.5	97.5

表 8 中挂渣厚度极差值 R 的大小顺序为:  $R_C > R_{\text{Blank}} > R_A > R_B > R_{A \times B} > R_{A \times C} > R_{B \times C}$ 。该实验数据误差较大, 只有 C 因素(切速)极为显著。A、B、C 3 个因素的极差值均大于 3 者之间的两两交互作用, 那么因素水平的选择可以忽略交互作用, 只看 3 个因素自身的最佳水平即可。由于挂渣厚度越小切割质量越好, 因此选择  $A_2 B_1 C_2$ , 该工艺参数即表 6 中挂渣厚度最小的 6 号样本, 证明交互作用不明显时, 直观分析对选择激光切割钢板最小挂渣厚度具有指导作用。

表 8 中切缝宽度极差值 R 的大小顺序为:  $R_C > R_{\text{Blank}} > R_{B \times C} > R_{A \times C} > R_A > R_B > R_{A \times B}$ 。可以得出只有 C 因素(切速)最显著, B 与 C、A 与 C 的交互作用均比 A、B 单因素更显著, 此时不能直接选择 A、B 单因素的最佳水平, 否则依然按照 3 因素自身最佳水平进行直观分析, 得出的工艺参数为  $A_1 B_1 C_2$ , 此工艺参数下查表 6 可知实验结果为  $165 \mu\text{m}$ , 并非最小切缝宽度, 所以单因素直观分析对激光切缝宽度无指导意义。应优先考虑 B 与 C、A 与 C 的交互作用, 如表 9 所示。

表 9 是根据表 6 中 B、C 水平搭配得出的指标数据, 由于切缝宽度越小越好, 所以根据表 9 选择最小实验指标的参数为  $B_2 C_2$ 。同理, 选择 A 与 C 的最小实验指标参数为  $A_1 C_2$ 。通过考虑交互作用选择的工艺参数为  $A_1 B_2 C_2$ , 经查表 6 得出, 其实验指标为  $137.5 \mu\text{m}$ , 是全面实验中最小切缝宽度, 证明通过交互作用分析可以找出全面实验中最小切缝宽度, 说明交互作用分析对优化激光切缝宽度的工艺参数具有指导意义。

得出结果如表 8 所示。表 8 中:  $K_1$  表示表 6 中任一列水平号为 1 时所对应的实验结果之和;  $K_2$  同理; R 为  $K_1$  和  $K_2$  之差的绝对值, 称为极差值。R 值越大代表其所在列因素实验效应越明显, 对实验结果影响越显著。

表 9 B、C 搭配表

Table 9 B match C table

Match	$C_1, B_1$	$C_2, B_1$	$C_1, B_2$	$C_2, B_2$
R / $\mu\text{m}$	375.0	322.5	405.0	310.0

### 4.2 第 2 组实验交互作用直观分析

表 7 中数据的直观分析结果如表 10 所示。表 10 中 7、11、13、14、15 为空白列, 将这些空白列的 R 值之和 44.12 作为误差项。表 10 中所示的极差值 R 的大小顺序为:  $R_{C \times E} > R_E > R_C > R_{\text{Blank}} > R_{E \times F} > R_{D \times E} > R_D > R_{C \times F} > R_{D \times F} > R_{C \times D} > R_F$ , 说明切速与脉宽的交互作用(C×E)极显著, 其次是脉宽(E)和切速(C)。因此直观分析首先要考虑 C×E, 如表 11 所示。又因为脉宽与频率的交互作用(E×F)、电流与脉宽的交互作用(D×E)大于电流(D)、频率(F)单因素作用, 因此也须考虑 E×F 和 D×E 搭配。

表 11 是根据表 7 数据按照 C、E 水平搭配得出的指标数据, 因为指标为加权综合评分, 所以指标值越大, 代表切割质量越好。根据表 11 中指标数据得出, 最佳工艺参数为  $C_2 E_2$ 。

同理, 得出 E、F 最佳工艺水平为  $E_2 F_1$ ; D、E 最佳工艺水平为  $D_2 E_2$ , 所以第 2 组实验最佳工艺参数为  $C_2 D_2 E_2 F_1$ 。查表 7 可以得出, 该工艺参数综合评分指标为 85 分, 是全面实验中最高分数, 证明交互作用分析对优化激光切割工艺参数具有指导意义。如果不考虑交互作用, 直观分析各主因素(CDEF)最高水平得出工艺参数为  $C_1 D_1 E_2 F_1$ , 查表 7 得其分数为 77.67, 并非最优参数。因此在优化激光切割工艺参数时, 首先要进行交互作用分析, 如果交互作用不明显, 可通过直观分析直接得出最佳参数, 否则应该由交互作用因素搭配表得出最佳工艺参数。

表 10 第 2 组正交实验交互作用分析

Table 10 Visual analysis of the second orthogonal experimental interaction

Statistic average	C	D	C×D	E	C×E	D×E	7	F	C×F	D×F	11	E×F	13	14	15
$K_1$	612.92	597.78	592.28	543.98	647.42	599.6	586.62	591	597.24	587.96	595.78	578.66	589.74	588.46	600.44
$K_2$	568.40	583.54	589.04	637.34	533.90	581.72	594.70	590.32	584.08	593.36	585.54	602.66	591.58	592.86	580.88
$R$	44.52	14.24	3.24	93.36	113.52	17.88	8.08	0.68	13.16	5.40	10.24	24.00	1.84	4.40	19.56

Note:  $R_7 + R_{11} + R_{13} + R_{14} + R_{15} = R_{\text{Blank}}$ .

表 11 C、E 搭配表

Table 11 C match E table

Match	$E_1, C_1$	$E_2, C_1$	$E_1, C_2$	$E_2, C_2$
$R / \mu\text{m}$	311.50	301.42	232.48	335.92

## 5 结 论

1) 正交法优化激光切割镍基合金应首先进行交互作用分析,交互作用不明显时可通过直观分析得出最优参数,交互作用明显时应由交互作用因素搭配表得出最佳工艺参数。

2) 第 1 组实验对于切缝宽度有影响的交互作用为:离焦量与切速、气压与切速的交互作用。第 2 组实验须考虑的交互作用有:切速与脉宽、脉宽与频率、电流与脉宽的交互作用。通过实践知道优先考虑的交互作用可以简化交互作用表头设计。

3) 第 1 组实验最优挂渣工艺参数为:气压 0.4 MPa,离焦量 -0.5 mm,切速 300 mm/min。第 1 组切缝宽度最优工艺参数为:气压 0.3 MPa,离焦量 -1 mm,切速 300 mm/min。第 1 组固定工艺参数为:电流 200 A,脉宽 0.8 ms,频率 75 Hz。

4) 第 2 组加权综合评分最优工艺参数为:切速 300 mm/min,电流 210 A,脉宽 0.9 ms,频率 75 Hz。固定工艺参数为:气压 0.4 MPa,离焦量 -1 mm。

5) 通过两组实验分析得出:在所选定因素水平范围内,切速与脉宽对激光切割质量影响显著,气压、离焦量、电流与频率对切割质量影响较小。

## 参 考 文 献

- [1] Feng W Q, Zhang Y F, Tao W, *et al.* Dissimilar metals combination of superalloy/stainless steel in T-shape by laser penetration welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(10): 1003003.  
冯威琦, 张云丰, 陶汪, 等. 高温合金/不锈钢异种材料 T 型接头激光穿透焊工艺研究 [J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1003003.
- [2] Luo D, Lu Y Y, Guo X X, *et al.* Laser repairing process of V-groove in single-crystal superalloy [J].

Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0503001.

罗登, 路媛媛, 郭溪溪, 等. 单晶高温合金 V 槽的激光修复工艺研究 [J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0503001.

- [3] Ming X L, Chen J, Tan H, *et al.* Research on persistent fracture mechanism of laser forming repaired GH4169 superalloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(4): 0403005.  
明宪良, 陈静, 谭华, 等. 激光修复 GH4169 高温合金的持久断裂机制研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0403005.
- [4] Madi M, Antucheviciene J, Radovanovic M, *et al.* Determination of laser cutting process conditions using the preference selection index method [J]. Optics & Laser Technology, 2017, 89: 214-220.
- [5] Deng C S, Hsia K L. Analysis of the optimization of parameters for the laser machining of timber [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 89(9): 3721-3729.
- [6] Zhao J P, Peng Y H, Nan Y B, *et al.* Analysis and prediction of 2Al2 aluminum alloy cutting process parameter [J]. Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 33(2): 28-33.  
赵晋平, 彭玉海, 南永博, 等. 2Al2 铝合金切割工艺参数分析与预测 [J]. 陕西理工学院学报(自然科学版), 2017, 33(2): 28-33.
- [7] Chen C, Gao M, Gu Y Z, *et al.* Study on fiber laser cutting of aluminum alloy sheet [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(6): 0603004.  
陈聪, 高明, 顾云泽, 等. 光纤激光切割铝合金薄板工艺特性研究 [J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0603004.
- [8] Zhang W, Li G Z, Wang C M, *et al.* Process optimization and design of fiber laser cutting aluminium-lithium alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(2): 0203003.  
张威, 李国柱, 王春明, 等. 铝锂合金光纤激光切割的工艺优化与设计 [J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0203003.
- [9] Ou C J, Qin C B, Jiang X F, *et al.* Study on energy

- distribution of non-vertical laser cutting[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(4): 041407.
- 欧长劲, 秦才宝, 姜献峰, 等. 非垂直激光切割能量分布研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(4): 041407.
- [10] Zhao H G, Liu Y L, Sun Y X, *et al.* Effects of parameters of laser cutting on the cutting seam efficiency of *Pinus sylvestris* wood [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2016, 40(6): 203-206.
- 赵洪刚, 刘彦龙, 孙耀星, 等. 激光切割工艺参数对切割樟子松切割效率的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2016, 40(6): 203-206.
- [11] Zhao H G, Le L, Liu M L, *et al.* Laser cutting preparation technology of solid wood parquet laminate flooring[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2016, 38(6): 110-115.
- 赵洪刚, 乐磊, 刘明利, 等. 拼花实木复合地板激光切割制备工艺研究[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(6): 110-115.
- [12] Chen Y X, Gao L. Analysis of the process parameters of laser cutting the superalloy steel with the orthogonal method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(11): 111403.
- 陈宇翔, 高亮. 正交法分析激光切割高温合金钢工艺参数[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(11): 111403.
- [13] Qiu Y B. *Test design and data processing* [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2008: 6-10.
- 邱轶兵. *试验设计与数据处理*[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008: 6-10.