

正交法分析激光切割高温合金钢工艺参数

陈宇翔 高亮

辽宁科技大学应用技术学院, 辽宁 鞍山 114000

摘要 研究了使用 Nd:YAG 激光切割牌号为 GH3128 的高温合金钢过程中的工艺参数。采用正交法进行了 18 次试验。研究了影响激光切割质量的因素,包括氧气气压、离焦量、加工速度、输入电流、脉宽、频率及误差项。观测切割后的挂渣厚度、切缝宽度,并得到综合评价结果;采用直观分析法分析了各个工艺参数对切割质量的影响程度,得到最优工艺参数,并根据最优工艺参数进行验证试验。采用方差分析法分析了各个因素之间的交互作用及区组间差异,并研究交互作用及区组间差异对切割质量的影响。结果表明,正交法可以优化挂渣厚度和综合评价,但对切缝宽度无优化作用。

关键词 激光技术; 激光切割; 切割质量; 工艺参数; 挂渣厚度; 切缝宽度

中图分类号 TG485 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.111403

Analysis of Processing Parameters for Laser Cutting High-Temperature Alloy Steel by Orthogonal Method

Chen Yuxiang Gao Liang

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

Abstract The processing parameters for cutting the high-temperature alloy steel (the mark is GH3128) by Nd:YAG laser are studied. Eighteen experiments are conducted by the orthogonal method. The factors which influence the quality of laser cutting, including oxygen pressure, defocusing distance, cutting speed, input current, pulse width, frequency and error, are studied. The slag thickness and the kerf width are observed after laser cutting, and the comprehensive assessment is worked out. The influence of processing parameters on the cutting quality is studied by the intuitive analysis method. The optimal parameters are obtained, and verification experiments are conducted based on these optimal parameters. Interaction effect and block-group difference among these factors are studied by the variance analysis method, and the influence of interaction effect and block-group difference on the cutting quality is studied. The results show that the orthogonal method can optimize the slag thickness and the comprehensive assessment, but cannot optimize the kerf width.

Key words laser technique; laser cutting; cutting quality; processing parameters; slag thickness; kerf width

OCIS codes 140.3390; 140.3460; 160.3900

1 引言

牌号为 GH3128 的合金钢是我国自主研发的、可以在 950 °C 高温下长期工作的一种固溶强化型镍基高温合金钢,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^[1-3]。高温合金钢具有耐腐蚀、持久寿命、高可塑性、较高的持久蠕变强度、良好的抗氧化性等优异的高温力学性能^[4]。因此,高温合金钢成为我国航空制造业一种不可或缺、性能优越的材料。

激光切割的优点包括:1) 精度高,切缝窄,热影响区域小,切割钢片边缘不易变形,特别适合切割易碎脆性材料;2) 效率高,无需复杂的准备工序,工件表面无机械应力;3) 柔性好,切口平滑洁净,表面粗糙度小,激光光束可控性强,易与数控和计算机设备相结合,实现大批量可重复性加工^[5-7]。

收稿日期: 2016-07-15; 收到修改稿日期: 2016-07-22; 网络出版日期: 2016-10-27

作者简介: 陈宇翔(1988—),男,硕士,助教,主要从事激光加工技术方面的研究。

E-mail: 491208485@qq.com

Dubey 等^[8]使用脉冲 YAG 激光切割镍基高温合金钢,运用田口方法和主要成分分析法预测最佳工艺参数,并且在试验上得到验证。近年来,张威等^[9-10]使用光纤激光器和 CO₂ 激光器,并运用正交试验法优化激光工艺参数。因此,理论上可以使用脉冲 YAG 激光切割牌号为 GH3128 的高温合金钢并运用正交法优化得到最佳工艺参数。

实际中,激光切割牌号为 GH3128 的高温合金钢时背面挂渣情况严重,这些挂渣直接影响航空发动机燃烧室火焰筒内部气流走向,为后期研磨工艺带来大量繁杂的工作。因此,采用上述方法优化工艺参数具有实际意义。研究激光切割工艺参数对挂渣厚度、切缝宽度及切割综合评价的影响程度,并以正交法为指导找出最佳工艺参数。

2 激光切割质量评价标准

2.1 激光切割质量一般评定指标

切割质量好的标准为无缺陷、切缝窄、表面粗糙度小。激光切割质量的评定标准大致可以分为两类:1)切割缺陷,即切割过程中产生的缺陷,直接影响产品质量;2)可量化的切割质量指标,按切割产品不同,这些指标的值也不同^[11]。

切割缺陷包括:1)过烧,加工速度过慢或激光功率密度过高产生热积累过多,使工件熔融范围过大,以致辅助气体无法完全吹除而过烧;2)挂渣,辅助气流未能彻底吹除切割产生的熔化材料,导致在板材背面残留熔渣,称为挂渣^[11]。

可量化的切割质量指标包括:1)切缝宽度,切缝宽度主要受到激光功率、脉宽、频率、离焦量、加工速度等工艺参数的影响;2)表面粗糙度,切割面表面粗糙度为反映切割质量的重要指标。

2.2 切割质量综合评价

由于 11 号件出现未完全切开现象,结合上述一般评定指标,根据实际切割现状制定切割质量综合评价。仅分析指标挂渣厚度及切缝宽度,并不能完整地体现整体切割质量,因此定义综合评价。根据经验,设挂渣厚度 $a=0 \mu\text{m}$ 为最佳值,切缝宽度 $b=100 \mu\text{m}$ 为最佳值。切割质量综合评价的目的是对挂渣厚度、切缝宽度以及切割完整度进行综合研究。切割质量综合评价公式为

$$C = \left[\left(50 - \frac{a}{100} \times 2 \right) + \left(50 - \frac{b - 100}{10} \right) \right] \times \frac{l}{L}, \quad (1)$$

式中 l 为切开长度, L 为切割全长。

3 试验材料及方法

3.1 试验材料

试验材料为镍基高温合金钢 GH3128,基体组织为奥氏体,主要成分如表 1 所示^[4]。试样尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ 。试验设备为 JHM-1GY-300B 切割机,具体参数为:激光波长为 $1.06 \mu\text{m}$,激光额定平均功率为 300 W ,激光脉冲频率为 $1 \sim 200 \text{ Hz}$ (可调),激光脉冲宽度为 $0.1 \sim 20 \text{ ms}$ (可调),聚焦镜焦距 $f=75 \text{ mm}$,聚焦光斑直径为 $0.3 \sim 0.6 \text{ mm}$ 。辅助气体为氧气。

表 1 GH3128 的化学成分

Table 1 Chemical composition of GH3128

Composition	Ni	Cr	W	Mo	Al	Ti	Fe	B	Zr	Ce
Mass fraction / %	Balance	19.0-22.0	7.5-9.0	7.5-9.0	0.4-0.8	0.4-0.8	1.0	0.005	0.04	0.05

3.2 试验方法

影响激光切割质量的因素较为复杂,包括辅助气体压力、离焦量、加工速度、输入电流、脉宽及频率^[12]。选用正交法 $L_{18}(3)^7$ 进行研究。正交表中含有 7 列容纳试验研究内容的的数据,包括 6 个影响激光切割质量的因素及误差项。正交试验利用数理统计学的正交性原理,从大量点中挑选出具有代表性的试验点^[13]。以正交典型性试验点参数为指导,利用计算机和 CNC2000 系统切割 18 条平行切缝,切缝间距为 6 mm ,单个切缝长度为 12 mm ^[14]。该正交试验采用 6 个因素试验,每个因素具有 3 个水平。试验重复 2 次,随机区组

设计。正交试验的工艺参数如表 2 所示^[5]。

试验完成后,使用光学显微镜观察切割缺陷,使用精度为 0.02 mm 的游标卡尺测量挂渣厚度,并使用塞尺测量切缝间距。

表 2 正交试验的工艺参数

Table 2 Processing parameters of orthogonal experiment

Symbol	Factor	Level 1	Level 2	Level 3
A	Gas pressure /MPa	0.2	0.3	0.4
B	Defocusing distance /mm	-0.25	-0.5	-1
C	Cutting speed /($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	100	200	300
D	Input current /A	190	200	210
E	Pulse width /ms	0.8	0.9	1.0
F	Frequency /Hz	70	75	80

4 试验结果与分析

4.1 正交试验结果

根据正交表 $L_{18}(3)^7$ 进行 18 次试验,测量的挂渣厚度为 S ,切缝宽度为 K ,综合评价为 C ,整个试验过程重复 2 次, y_1 、 y_2 分别为两次试验的结果,如表 3 所示^[9]。表 3 中 A、B、C、D、E、F 对应的数字分别为各个因素的水平 1(1)、水平 2(2)、水平 3(3)。

表 3 正交试验结果

Table 3 Results of orthogonal experiments

Orthogonal experiment number(ABCDEF)	Slag thickness / μm				Kerf width / μm				Comprehensive assessment			
	y_1	y_2	Total	Average	y_1	y_2	Total	Average	y_1	y_2	Total	Average
1(111111)	880	860	1740	870	150	180	330	165	77.4	74.8	152.2	76.1
2(122222)	480	540	1020	510	160	170	330	165	84.4	82.2	166.6	83.3
3(133333)	400	480	880	440	140	160	300	150	88.0	84.4	172.4	86.2
4(211223)	840	900	1740	870	180	190	370	185	75.2	73.0	148.2	74.1
5(222331)	500	480	980	490	170	180	350	175	83.0	82.4	165.4	82.7
6(233112)	280	200	480	240	150	150	300	150	89.4	91.0	180.4	90.2
7(312132)	640	500	1140	570	160	180	340	170	81.2	82.0	163.2	81.6
8(323213)	240	180	420	210	140	150	290	145	91.2	91.4	182.6	91.3
9(331321)	700	780	1480	740	150	160	310	155	81.0	78.4	159.4	79.7
10(113322)	280	300	580	290	130	140	270	135	91.4	90.0	181.4	90.7
11(121133)	860	880	1740	870	120	120	240	120	67.3	63.7	131.0	65.5
12(132211)	540	500	1040	520	130	140	270	135	86.2	86.0	172.2	86.1
13(212313)	380	400	780	390	140	160	300	150	88.4	86.0	174.4	87.2
14(223121)	420	380	800	400	130	150	280	140	88.6	87.4	176.0	88.0
15(231232)	780	760	1540	770	120	150	270	135	82.4	79.8	162.2	81.1
16(313231)	360	300	660	330	140	150	290	145	88.8	89.0	177.8	88.9
17(321312)	900	780	1680	840	150	170	320	160	77.0	77.4	154.4	77.2
18(332123)	260	280	540	270	130	140	270	135	91.8	90.4	182.2	91.1

从试验结果可以看出,最大挂渣厚度 $S_{\max}=870\ \mu\text{m}$,最小挂渣厚度 $S_{\min}=210\ \mu\text{m}$;最宽切缝宽度 $K_{\max}=185\ \mu\text{m}$,最窄切缝宽度 $K_{\min}=120\ \mu\text{m}$;最高综合评价 $C_{\max}=91.3$,最低综合评价 $C_{\min}=65.5$ 。最大挂渣厚度对应的试验号为 1 号、4 号、11 号,其中 11 号为所有试验号中唯一没有完全切开钢板的试验号,全长 12 mm,仅切开 10 mm 左右,综合评价最低(65.5)。11 号试验对应的切缝宽度最窄,说明其参数切割钢板能力不足。4 号试验对应的挂渣厚度及切缝宽度都为最大值,说明其参数切割能力过大,综合评价除 11 号外最低。1 号试验的挂渣厚度最大,切缝宽度较高,综合评价除 4 号、11 号外最低。

4.2 正交试验直观分析

正交试验的 18 次试验结果中,将因素 A(气压)的水平 1 对应的所有试验值累加后求平均值 k_{1A} ,同理,将各因素各水平的试验值累加后求平均值,结果如表 4 所示^[9]。表 4 中 R 为同一因素不同水平之间 k_i 的最大值与最小值之差,即极差。极差 R 值越大的因素随水平变化对试验结果的影响越大;反之,极差 R 值越小的因素随水平变化对试验结果的影响越小。

表 4 正交试验直观分析结果

Table 4 Intuitive analysis results of orthogonal experiments

Target	Statistic average	Factor					
		Gas pressure (A)	Defocusing distance (B)	Cutting speed (C)	Input current (D)	Pulse width (E)	Frequency (F)
Slag thickness / μm	k_1 (Level 1)	583.33	553.33	826.67	536.67	511.67	558.33
	k_2 (Level 2)	526.67	553.33	458.33	535.00	513.33	536.67
	k_3 (Level 3)	493.33	496.67	318.33	531.67	578.33	508.33
	R	90.00	56.67	508.33	5.00	66.67	50.00
Kerf width / μm	k_1 (Level 1)	145.00	158.33	153.33	146.67	150.83	152.50
	k_2 (Level 2)	155.83	150.83	155.00	151.67	152.50	152.50
	k_3 (Level 3)	151.67	143.33	144.17	154.17	149.17	147.50
	R	10.83	15.00	10.83	7.50	3.33	5.00
Comprehensive assessment	k_1 (Level 1)	81.32	83.10	75.62	82.08	84.68	83.58
	k_2 (Level 2)	83.89	81.33	85.33	84.13	84.48	84.02
	k_3 (Level 3)	84.97	85.73	89.22	83.95	81.00	82.57
	R	3.65	4.40	13.6	2.05	3.68	1.45

表 4 中 R 值反映 6 个因素对挂渣厚度的影响程度从大到小的顺序为:加工速度、气压、脉宽、离焦量、频率、输入电流。6 个因素对切缝宽度的影响程度从大到小的顺序为:离焦量、气压(加工速度)、输入电流、频率、脉宽。6 个因素对综合评价的影响程度从大到小的顺序为:加工速度、离焦量、脉宽、气压、输入电流、频率。

为了方便直观分析,作出试验结果与因素水平的折线关系图,如图 1 所示。仅考虑单一试验结果的最佳值,由图 1 可知,最薄挂渣厚度对应的因素水平为 A3B3C3D3E1F3(气压为 0.4 MPa,离焦量为 -1 mm,加工速度为 300 mm/min,输入电流为 210 A,脉宽为 0.8 ms,频率为 80 Hz);最窄切缝宽度对应的因素水平为 A1B3C3D1E3F3(气压为 0.2 MPa,离焦量为 -1 mm,加工速度为 300 mm/min,输入电流为 190 A,脉宽为 1 ms,频率为 80 Hz);最高综合评价对应的因素水平为 A3B3C3D2E1F2(气压为 0.4 MPa,离焦量为 -1 mm,加工速度为 300 mm/min,输入电流为 200 A,脉宽为 0.8 ms,频率为 75 Hz)。根据以上 3 种最优工艺参数进行验证试验,结果如表 5 所示。

表 5 3 种最优工艺参数试验结果

Table 5 Experimental results based on three optimal processing parameter combinations

Factor level	Slag thickness / μm	Kerf width / μm	Comprehensive assessment
A3B3C3D3E1F3	100	150	93.0
A1B3C3D1E3F3	260	140	90.8
A3B3C3D2E1F2	60	120	96.8

由表 5 可得,当工艺参数为 A3B3C3D3E1F3 时,有效减小了挂渣厚度,虽然切缝宽度未得到最佳优化,但综合评价高于表 3 中的 18 组试验结果,因此直观分析法在优化挂渣厚度方面具有一定的指导意义。当工艺参数为 A1B3C3D1E3F3 时,挂渣厚度高于表 3 中 6 号和 8 号试验结果,切缝宽度宽于表 3 中 10,11,12,15,18 号试验结果,综合评价低于表 3 中 8 号和 18 号试验结果。因此,直观分析法在优化切缝宽度方面不具有指导意义,切缝宽度受因素间交互作用更显著。当工艺参数为 A3B3C3D2E1F2 时,无论是挂渣厚度还是综合评价都优于表 3 中的 18 组试验结果,切缝宽度也为表 3 中的最优试验结果。因此,直观分析法在优化综合评价方面具有指导意义。

图 2、3 为表 5 中 3 种工艺参数的切割样品宏观图,图 4 为 3 种工艺参数的切割样品微观图(放大倍数为

100 倍的 CCD 监视图像)。图 2~4 中, (a)~(c) 分别对应的工艺参数为 A3B3C3D3E1F3、A1B3C3D1E3F3、A3B3C3D2E1F2。正交数据分析法在优化挂渣厚度及综合评价方面具有明显效果。(a)、(c) 的切割效果较好, 挂渣较少; (c) 中切割效果优于(a), 挂渣更少, 过烧现象不严重; (b) 中采用正交分析法优化切缝宽度, 无明显优化效果, 因此需要进一步研究(a)、(c) 中切割得到优化的原因。采用方差分析法研究交互作用对切割质量的影响。

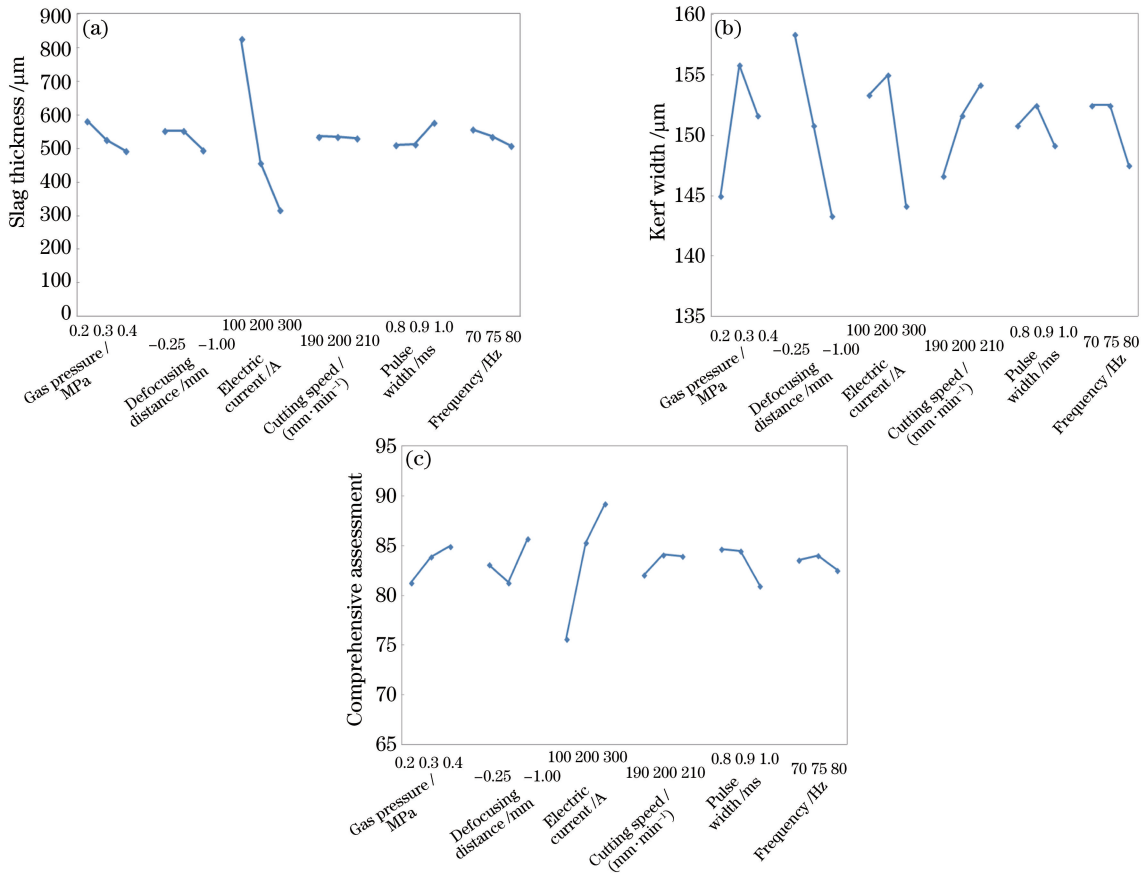


图 1 (a) 挂渣厚度, (b) 切缝宽度和 (c) 综合评价与 6 个因素之间的折线关系
Fig. 1 Broken lines relationships of (a) slag thickness, (b) kerf width and (c) comprehensive assessment versus six factors

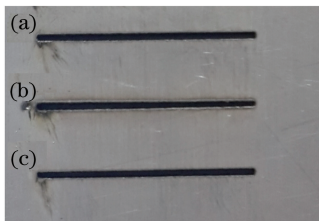


图 2 切割样品正面宏观图。(a) A3B3C3D3E1F3;
(b) A1B3C3D1E3F3; (c) A3B3C3D2E1F2
Fig. 2 Macro figures of front side of cutting samples.
(a) A3B3C3D3E1F3; (b) A1B3C3D1E3F3;
(c) A3B3C3D2E1F2



图 3 切割样品背面宏观图。(a) A3B3C3D3E1F3;
(b) A1B3C3D1E3F3; (c) A3B3C3D2E1F2
Fig. 3 Macro figures of back side of cutting samples.
(a) A3B3C3D3E1F3; (b) A1B3C3D1E3F3;
(c) A3B3C3D2E1F2

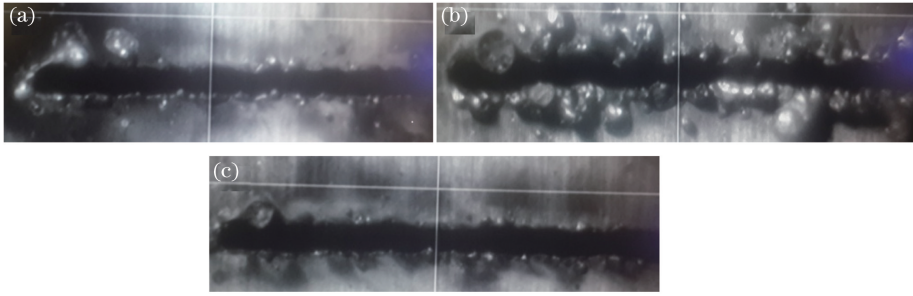


图4 切割样品微观图。(a) A3B3C3D3E1F3; (b) A1B3C3D1E3F3; (c) A3B3C3D2E1F2

Fig. 4 Micro figures of cutting samples. (a) A3B3C3D3E1F3; (b) A1B3C3D1E3F3; (c) A3B3C3D2E1F2

4.3 重复观测值正交试验方差分析

直观分析法简单明了,但不能说明因素之间的交互作用,因此需要进行方差分析。以往常用的单个观测值正交试验方差分析的误差由空列估计。实际上空列并不空,被未考察的交互作用占据。这种误差既包含试验误差,也包含交互作用,称为模型误差。若交互作用不存在,使用模型误差估计试验误差是可行的;若因素间存在交互作用,模型误差会夸大试验误差,有可能掩盖考察因素的显著性。因此,采用重复观测值正交试验方差分析试验。

对于重复观测值方差计算,总方差平方和 V_T 分为处理间平方和 V_t 、区组间平方和 V_r 以及试验误差平方和 V_{e2} ;处理间平方和 V_t 由各个因素平方和 $V_A, V_B, V_C, V_D, V_E, V_F$ 及模型误差平方和 V_{e1} 组成。 V_T 和 V_t 的表达式分别为

$$V_T = V_t + V_r + V_{e2}, \quad (2)$$

$$V_t = V_A + V_B + V_C + V_D + V_E + V_F + V_{e1}. \quad (3)$$

矫正数可表示为

$$G = Q^2 / kn, \quad (4)$$

式中 Q 为所有试验指标之和,区组数 $k=2$,试验次数 $n=18$ 。

由矫正数得到各项平方和表达式为

$$V_T = \sum_{i=1}^{18} (y_{1i}^2 + y_{2i}^2) - G, \quad (5)$$

$$V_r = \sum Q_k^2 / n - G, \quad (6)$$

$$V_t = \sum Y_i^2 / k - G, \quad (7)$$

$$V_A = \sum T_A^2 / k_A k - G \text{ (同理可得 } V_B, V_C, V_D, V_E, V_F), \quad (8)$$

$$V_{e1} = V_t - V_A - V_B - V_C - V_D - V_E - V_F, \quad (9)$$

$$V_{e2} = V_T - V_t - V_r, \quad (10)$$

式中 y_{1i}^2, y_{2i}^2 分别为第 i 次试验对应的第一组、第二组指标数值的平方, Y_i 为 y_{1i} 和 y_{2i} 之和, Q_k 为区组 k 中所有值之和, T_A 为 A 因素所有水平指标之和, A 因素各水平重复数 $k_A=6$,同理可得其他因素的各水平重复数。

总自由度 $f_T = rn - 1 = 35$,区组间自由度 $f_r = r - 1 = 1$,处理间自由度 $f_t = n - 1 = 17$, A 因素自由度 $f_A = a - 1 = 2$,模型误差自由度 $f_{e1} = f_t - 6f_A = 5$,试验误差自由度 $f_{e2} = f_T - f_r - f_t = 17$ 。

根据以上计算,得到挂渣厚度的方差分析如表6所示。表6中 S 为偏差平方和, f 为自由度, M_s 为均方差 ($M_s = S/f$)。在显著水平 $\alpha=0.01$ 条件下进行 F 检验。由表6可知,加工速度对挂渣厚度的影响尤为显著,气压、脉宽以及离焦量对挂渣厚度都具有一般显著性影响。方差分析各因素对挂渣厚度影响的大小顺序与直观分析法的结论一致。同时,发现模型误差为试验误差的10.48倍,也具有一般显著性,说明因素之间存在一定的交互作用。但是,此交互作用并未掩盖因素的主效应(如加工速度、气压等),同时也说明了直观分析法对挂渣厚度具有一定指导意义的原因。表中各因素对挂渣厚度的影响程度用1,2,3表示,数值1,2,3表示影响程度依次增大。

表6 挂渣厚度的方差分析
Table 6 Variance analysis of slag thickness

Factor	S	f	M_S	F	F_{α}	Influence
Gas pressure	49689	2	24844.5	12.00	$F_{0.01}(2, 17) = 6.11$	1
Defocusing distance	25689	2	12844.5	6.20		1
Cutting speed	1654689	2	827344.5	399.57		3
Input current	156	2	78.0	0.04		
Pulse width	34689	2	17344.5	8.38		1
Frequency	15089	2	7544.5	3.64		
Block group	1600	1	1600.0	0.77	$F_{0.01}(1, 17) = 8.40$	
Model error	108489	5	21697.8	10.48	$F_{0.01}(5, 17) = 4.34$	1
Test error	35200	17	2070.6			
Total	1925290	35				

如表7所示,在显著水平 $\alpha=0.01$ 条件下进行F检验,切缝宽度具有的一般显著性从高到低的顺序依次为离焦量、加工速度、气压。方差分析各因素对切缝宽度影响程度大小的顺序与直观分析法得到的顺序总体趋势一致。直观分析中,加工速度与气压的极差对切缝宽度的影响是相同的;方差分析中,加工速度对切缝宽度的影响大于气压对切缝宽度的影响。方差分析中的区组间差异性较为显著,模型误差为试验误差的33.37倍,交互作用影响也较为显著。在交互作用及区组间差异作用的共同影响下,因素各水平之间的差异未真正反映因素的主效应,这也是直观分析法对切缝宽度不具有指导意义的原因。表中各因素对切缝宽度的影响程度用1,2,3表示,数值1,2,3表示影响程度依次增大。如表8所示,各因素对切割质量综合评价影响的显著性从高到低的顺序依次为加工速度、离焦量、脉宽、气压、输入电流。该方差分析法得到的各因素对综合评价影响大小的顺序与直观分析法得到的结论一致。与表7相同,表8中区组间差异、模型误差与试验误差之比都具有显著性。不同之处在于,交互作用及区组间差异并未掩盖显著因素的主效应,这是直观分析法具有提高切割质量综合评价指导意义的原因。表中各因素对综合评价的影响程度用1,2,3表示,数值1,2,3表示影响程度依次增大。

表7 切缝宽度的方差分析
Table 7 Variance analysis of kerf width

Factor	S	f	M_S	F	F_{α}	Influence
Gas pressure	716.67	2	358.33	9.92	$F_{0.01}(2, 17) = 6.11$	1
Defocusing distance	1350.00	2	675.00	18.69		1
Cutting speed	816.67	2	408.33	11.31		1
Input current	350.00	2	175.00	4.85		
Pulse width	66.67	2	33.33	0.92		
Frequency	200.00	2	100.00	2.77		
Block group	1736.11	1	1736.11	48.08	$F_{0.01}(1, 17) = 8.40$	2
Model error	6025.00	5	1205.00	33.37	$F_{0.01}(5, 17) = 4.34$	3
Test error	613.89	17	36.11			
Total	11875.00	35				

比较表6~8中同一因素的3个 F_{α} 值,得到表8中激光切割工艺参数的6个因素的 F_{α} 值都明显得到提高,且 F 值对综合评价具有显著影响。对于区组间差异及模型误差,表8中的 F 值比表6中对应的 F 值大且比表7中对应的 F 值小。定义的切割质量综合评价可有效将挂渣厚度、切缝宽度及切割完整度结合起来,提高了各工艺参数因素的 F 值并适当减小了区组间差异及模型误差,使得各工艺参数的不同水平可以真实地反映因素的主效应,对切割质量的整体效果具有指导作用。

5 结论

研究了使用Nd:YAG激光切割牌号GH3128高温合金钢的工艺参数,得到以下结论。

表 8 综合评价的方差分析
Table 8 Variance analysis of comprehensive assessment

Factor	S	f	M_s	F	F_{α}	Influence
Gas pressure	84.34	2	42.17	35.44	$F_{0.01}(2,17)=6.11$	1
Defocusing distance	117.66	2	58.83	49.44		1
Cutting speed	1177.82	2	588.91	494.88		3
Input current	30.88	2	15.44	12.97		1
Pulse width	102.96	2	51.48	43.26		1
Frequency	13.30	2	6.65	5.59		
Block group	15.21	1	15.21	12.78	$F_{0.01}(1,17)=8.40$	1
Model error	120.16	5	24.03	20.19	$F_{0.01}(5,17)=4.34$	1
Test error	20.21	17	1.19			
Total	1682.54	35				

1) 正交试验直观分析法对挂渣厚度及综合评价具有指导意义,可以有效提高切割质量,但是对切缝宽度不具有指导意义,不能有效提高切割质量。

2) 直观分析法中,综合评价方法得到的最佳工艺参数为:气压为 0.4 MPa,离焦量为 -1 mm,加工速度为 300 mm/min,输入电流为 200 A,脉宽为 0.8 ms,频率为 75 Hz。在最佳工艺参数条件下,挂渣厚度可降低为 60 μm ,切缝宽度可达到 120 μm ,综合评价为 96.8。

3) 重复观测值正交试验方差分析得到激光切割工艺参数之间存在一定的交互作用及区组间差异。在挂渣厚度及综合评价的方差分析中,交互作用及区组间差异并不能掩盖各因素主效应;但是,在切缝宽度方差分析中,交互作用及区组间差异作用严重掩盖了各因素主效应。

4) 切割质量综合评价将挂渣厚度、切缝宽度及切割完整度进行综合评价。在方差分析中,综合评价提高了各因素的 F 值,并中和了一些区组间差异及模型误差,使得各因素主效应更加显著,对提高整体切割质量起到了积极作用。

参 考 文 献

- Feng Weiqi, Zhang Yunfeng, Tao Wang, *et al.* Dissimilar metals combination of superalloy/stainless steel in T-shape by laser penetration welding[J]. Chinese J 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.
- Luo Deng, Lu Yuanyuan, Guo Xixi, *et al.* Laser repairing processing of V-groove in single-crystal superalloy[J]. Chinese J 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.
- Ming Xianliang, Chen Jing, Tan Hua, *et al.* Research on persistent fracture mechanism of laser forming repaired GH4169 superalloy[J]. Chinese J 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.
- Zhou Chunyang, Wu Shikai, Xiao Rongshi. Experimental investigation on fiber laser welding stainless steel 304 to super alloy CH3128[J]. Applied Laser, 2012, 32(2): 108-111.
周春阳, 吴世凯, 肖荣诗. 高温合金-不锈钢异种金属光纤激光焊接试验研究[J]. 应用激光, 2012, 32(2): 108-111.
- Tong Ming, Wang Wei, Yang Guang, *et al.* Do experiments to research affecting factors of laser cutting surface of the materials[J]. Machinery Design & Manufacture, 2010(10): 121-123.
佟明, 王维, 杨光, 等. 板材激光切割表面质量影响因素的试验研究[J]. 机械设计与制造, 2010(10): 121-123.
- Yan Cuo, Li Lijun, Li Juan, *et al.* Review of surface quality study on laser sheets cutting[J]. Laser Technology, 2005, 29(3): 270-274.
鄢铨, 李力钧, 李娟, 等. 激光切割板材表面质量研究综述[J]. 激光技术, 2005, 29(3): 270-274.
- Chen Cong, Gao Ming, Gu Yunze, *et al.* Study on fiber laser cutting of aluminum alloy sheet[J]. Chinese J 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 Dubey A K, Yadava V. Multi-objective optimization of Nd:YAG laser cutting of nickel-based superalloy sheet using orthogonal array with principal component analysis[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2008, 46(2): 124-132.
- 9 Zhang Wei, Li Guozhu, Wang Chunming, *et al.* Processing optimization and design of fiber laser cutting aluminium-lithium alloy[J]. Chinese J 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.
- 10 Chen X Y, Li T C, Zhai K, *et al.* Using orthogonal experimental method optimizing surface quality of CO₂ laser cutting processing for PMMA microchannels[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 6: 1-7.
- 11 Hou Peihong. Technology of laser cutting of thin silicon steel sheet[J]. Journal of Shanghai Dianji University, 2015, 18(2): 77-81, 94.
- 侯培红. 激光切割薄硅钢片的工艺研究[J]. 上海电机学院学报, 2015, 18(2): 77-81, 94.
- 12 Li Shuyu, Tian Xinguo, He Jingdi, *et al.* Study on laser cutting processing of thin-walled stainless steel tube and fixture design[J]. Applied Laser, 2011, 31(3): 248-250.
- 李淑玉, 田新国, 贺敬地, 等. 薄壁不锈钢圆管激光切割工艺研究及夹具设计[J]. 应用激光, 2011, 31(3): 248-250.
- 13 Han Zhiren, Sun Wei. Optimum laser cutting parameters for titanium alloy based on orthogonal experiment [J]. Machinery Design & Manufacture, 2010(2): 211-213.
- 韩志仁, 孙 伟. 基于正交试验钛合金激光切割工艺参数优化[J]. 机械设计与制造, 2010(2): 211-213.
- 14 Li Xiangyou, Zeng Xiaoyan, Liu Yong, *et al.* Study of YAG laser cutting processing with stainless steel sheet [J]. Chinese J Lasers, 2001, 28(12): 1125-1129.
- 李祥友, 曾晓雁, 刘 勇, 等. 激光精密切割不锈钢薄板的工艺研究[J]. 中国激光, 2001, 28(12): 1125-1129.