

● 设计·工艺

脉冲激光焊工艺参数对钛合金焊缝熔深的影响及研究

王小博¹ 杨凯淞² 李昊丞¹ 李明宇² 余昆³

(1. 北京新风航天装备有限公司, 北京 100854; 2. 天津大学材料科学与工程学院, 天津先进连接技术重点实验室, 天津 300350; 3. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300350)

摘要: 与连续激光焊相比, 脉冲激光焊接具有热输入精确可控的优势。围绕钛合金薄板连接需求, 本文对钛合金薄板与钛条的脉冲激光焊接进行了研究。通过设计正交试验, 探究激光功率、焊接速度、脉冲周期等工艺参数对熔深的影响规律, 同时基于极差分析与方差分析阐明影响熔深的关键工艺参数。结果表明, 在一定的熔深波动范围内, 焊接速度和激光功率是影响熔深的显著因素, 且焊接速度为最显著因素。

关键词: 钛合金; 脉冲激光焊; 工艺参数; 极差分析; 方差分析

中图分类号: TG456.7 **文献标识码:** A

The Effect of Pulsed Laser Welding Parameters on Weld Penetration of Titanium Alloy

Wang Xiaobo¹ Yang Kaisong² Li Haocheng¹ Li Mingyu² Yu Kun³

(1. Beijing Innowind Aerospace Equipment Co., Ltd., Beijing 100854; 2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350; 3. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350)

Abstract: Compared with continuous laser welding, pulsed laser welding has the advantage of precise and controllable heat input. Focusing on the connection demand of titanium alloy thin plate, this paper studied the pulsed laser welding of titanium alloy thin plate and titanium bar. By designing orthogonal experiments, the influence law of process parameters such as laser power, welding speed and pulse cycle on the melting depth was explored, and the key process parameters affecting the melting depth were clarified based on range analysis and variance analysis. The results show that in a certain range of melting depth fluctuation, welding speed and laser power are significant factors affecting the melting depth, and welding speed is the most significant factor.

Key words: titanium alloy; pulsed laser welding; process parameters; range analysis; variance analysis

1 引言

钛合金具有比强度高、耐腐蚀性好、耐热性高等特点, 在航空航天、石油化工、海洋工程和核工业等领域应用广泛^[1-2], 尤其是火箭的钛合金栅格舵, 其作为控制火箭飞行姿态并确保火箭残骸落点的装置, 对

焊接质量和接头力学性能的要求较高^[3]。

相比于传统的弧焊技术, 激光焊接具有能量密度高、热输入小、焊接效率高、焊缝热影响区小等特点, 在焊接钛合金方面具有很大的优势^[4-5]。相比于连续激光焊, 脉冲激光焊接具有热输入可控、精确的突出优势, 更适合高精度、小变形的精密焊接^[6]。

激光与材料间的相互作用涉及金属的熔化、汽化和凝固、小孔形成等一系列复杂的过程,影响因素众多^[7-8]。

脉冲激光焊接中的主要工艺参数有峰值功率、脉冲周期、焊接速度等,它们直接影响焊接热输入的大小,并在很大程度上决定了焊缝熔深和接头的焊接质量^[9-10]。Taheri 等^[11]发现通过增加脉冲频率、脉冲宽度和焊接速度可以减少液化和凝固裂纹形成的倾向,总结出了可获得全熔透且无气孔的焊缝的焊接参数最佳限值。Heydari 等^[12]通过研究表明,激光峰值功率和脉冲持续时间的交互作用对焊缝抗拉强度影响显著,熔池尺寸的变化主要受激光峰值功率和焊接速度的影响,同时焊接速度的提高会明显降低延伸率。Wen Xianhai 等^[6]研究了不同脉冲激光参数下小孔不稳定性对穿透深度的影响机理。发现随着激光功率和频率的增加,入射激光强度增加,导致小孔深度增加,倾角减小,小孔内部深度和倾角的变化对焊缝熔深有直接影响,其与实际焊缝熔深具有较高的吻合度。

焊接时产生的金属蒸汽和等离子体也会影响母材和激光之间的交互作用,影响焊接热出入和焊缝熔深,进而对接头力学性能造成影响^[13-14]。Beiranvand 等^[15]通过研究确定了增加激光脉冲能量可以增加镁的蒸发速率,当蒸发速率超出一定阈值时,镁蒸发量与激光有效吸收功率成正相关关系,焊缝熔深和激光吸收均显著增加。Gao Ming 等^[16]的研究发现在铝合金光纤激光焊接的激光功率达到 5 kW 时,会出现由逆韧致辐射引起的较强的等离子体屏蔽效应,导致焊缝熔深减小。

目前,已经有学者研究了脉冲激光焊接中工艺参数对焊缝熔深的影响规律,但并未系统地评估各个工艺参数对焊缝熔深影响的重要程度。本文设计了钛合金脉冲激光焊正交实验,采用极差和方差的数学方法对试验结果进行分析和总结,得到各个工艺参数对焊缝熔深影响的显著程度排序,为精准控制焊接热输入、优化焊接工艺、获得良好的焊缝质量和接头力学性能提供理论指导。

2 试验设备、材料与方法

2.1 试验设备

本文搭建了由激光焊接系统、运动控制系统和多源传感系统组成的激光焊接过程监测装置,具备激光

焊接过程等离子体光谱采集功能和激光焊接过程小孔-熔池图像采集功能,如图 1 所示。激光加工系统的核心是波长为 1 070~1 080 nm 的 IPG-6000 光纤激光器,运动控制系统的核心是 KUKA 机器人,等离子体光谱采集系统由光谱仪和工控机组成,小孔-熔池图像采集系统由 CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 相机和工控机组成。

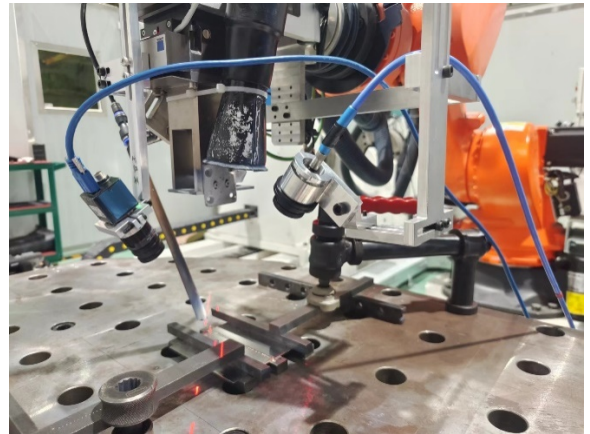


图 1 试验装置示意图

2.2 试验材料与工艺

试件采用 100 mm×100 mm×1 mm 的 TA15 钛合金薄板和 120 mm×15 mm×10 mm 的 TA15 钛条,焊接接头为穿透焊,焊缝长度为 100 mm,如图 2 所示。

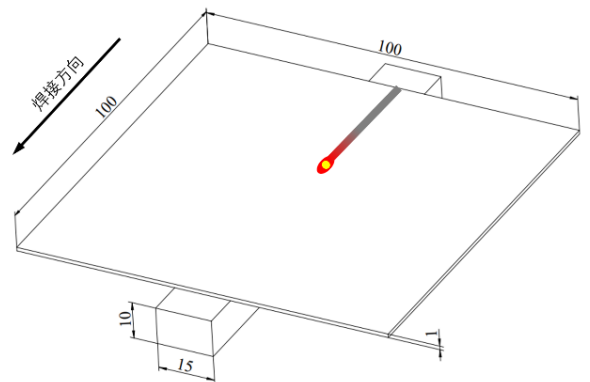


图 2 焊缝接头示意图

采用激光脉冲焊,设定激光功率的范围为 2 600~2 700 W、焊接速度的范围为 14.08~22.87 mm/s,脉冲周期的范围为 27.5~38.5 ms,保护气体为纯氩气。基于此,使用 L_9 正交表进行三因素三水平试验设计,正交表如表 1 所示。

表1 正交设计表

编号	激光功率/W	焊接速度/(mm/s)	脉冲周期/ms
1	2 600	14.08	27.5
2	2 600	16.70	38.5
3	2 600	20.87	33.0
4	2 700	14.08	38.5
5	2 700	16.70	33.0
6	2 700	20.87	27.5
7	2 800	14.08	33.0
8	2 800	16.70	27.5
9	2 800	20.87	38.5

焊接完成后在焊缝中间位置和焊缝结束前 10 mm 位置分别垂直焊缝方向切开，对焊缝切面进行打磨后用凯勒试剂腐蚀，得到有明显的焊缝-母材分界线的横截面。

2.3 试验方法

正交试验结果的常用统计分析方法有极差分析法和方差分析法 2 种^[17]。

a. 极差分析法

极差分析法又称直观分析法，通过计算各因素极差 R_j 的大小来分析因素对试验结果的影响。

极差 R_j 的计算公式为：

$$R_j = \max(\bar{K}_{j1}, \dots, \bar{K}_{jn}) - \min(\bar{K}_{j1}, \dots, \bar{K}_{jn}) \quad (1)$$

式中， $\bar{K}_{j1}, \dots, \bar{K}_{jn}$ 分别为因素 j 第 1, \dots, n 个水平的试验结果指标和的平均值，即每个因素的极差等于该因素的试验结果指标和的平均值的最大值和最小值之差。 R_j 越大，表明此因素对试验结果指标的影响程度越大。

极差分析法可通过对所有因素的主次排序得到主要因素，但无法得出主要因素对试验结果影响的显著程度；此外，引起试验数据变化的来源也存在不确定性，无法清晰地判断出数据变化是由已知因素的改变（可以解释的误差）引起的，还是由于试验的随机误差（未被解释的误差）引起的，亦或是由于二者不同程度的结合作用引起的。因此，极差分析存在一定的局限性，还需要进行方差分析。

b. 方差分析法

方差分析法是通过计算各列的平方和与自由度进而得到各因素的 F 比，并通过计算置信度和显著性水平量化各因素对试验结果指标影响程度的方法。方差分析能够精确地估计各因素对试验结果影响的重要程度，同时能分析试验误差引起的波动，弥补直观分析

的不足。

在极差分析计算基础上进行方差分析涉及到的公式如式(2)~(6)所示：

$$S_{\text{截距}} = C = K^2/N \quad (2)$$

$$S_{\text{修正后总计}} = \sum_{i=1}^N Y_i^2 - C \quad (3)$$

$$S_j = \sum_{i=1}^r n_i \times k_{ji}^2 - C \quad (4)$$

$$S_E = S_{\text{修正后总计}} - \sum_{j=1}^J S_j \quad (5)$$

$$S_{\text{修正模型}} \approx \sum_{j=1}^J S_j \quad (6)$$

式中， S 为平方和， K 为所有试验次数的试验结果指标之和， N 为试验次数， J 为因素数， C 为标准数， r 是各因素的水平数， n_i 表示各因素 i 水平参与试验的次数， k_{ji} 为因素 j 第 i 个水平的试验结果指标和的平均值。根据公式可以计算出平方和 S 并得到方差分析样表（见表 2）。

表2 方差分析样表

来源	平方和 S	自由度 f	均方 V	F	显著性水平 α
修正模型	$S_{\text{修正模型}}$	$f_{\text{修正模型}}$	$V_{\text{修正模型}}$	$F_{\text{修正模型}}$	$\alpha_{\text{修正模型}}$
截距	$S_{\text{截距}}$	$f_{\text{截距}}$	$V_{\text{截距}}$	$F_{\text{截距}}$	$\alpha_{\text{截距}}$
因素 1	S_1	f_1	V_1	F_1	α_1
因素 2	S_2	f_2	V_2	F_2	α_2
因素 3	S_3	f_3	V_3	F_3	α_3
...
因素 J	S_J	f_J	V_J	F_J	α_J
E 误差	S_E	f_E	V_E	/	/
总计	S_j+C	$f_{\text{截距}}+f_1+f_2+\dots+f_E$	/	/	/
修正后总计	$S_{\text{修正后总计}}$	$N-1$	/	/	/

表 2 中，每个因素的自由度 f_j 和误差的自由度 f_E 等于各因素水平数 r 减 1，修正模型自由度 $f_{\text{修正模型}}$ 等于各因素自由度的和，修正后总计的自由度等于试验次数 $N-1$ 。均方 V 等于平方和除以自由度， F 等于因素均方 V 除以误差均方 V_E ， α 为 SPSS 得到的最接近 F 且小于 F 的检验临界值对应的显著性水平。 F 的值越大，其相应的因素对试验的影响程度越高。通过方差分析可以得到各因素对试验的影响是否显著以及在显著性水平的具体大小，显著性水平+置信度=1。

3 试验结果与分析

表 3 所示为正交试验焊缝横截面金相图，其焊缝

熔深统计如表 4 所示。由表 4 可知，当激光功率为 2 800 W 时，其焊缝熔深平均值大于 2 600 W 和 2 700 W 激光功率的焊缝熔深，且随着激光功率的增大，焊缝熔深逐渐增大；当焊接速度为 20.87 mm/s 时，其焊缝熔深平均值小于焊接速度为 14.08 mm/s 和

17.7 mm/s 的焊缝熔深，且随着焊接速度的增大，焊缝熔深逐渐减小；当脉冲周期为 38.5 ms 时，其焊缝熔深平均值大于脉冲周期为 27.5 mm 和 33 mm 的焊缝熔深，且随着脉冲周期的增大，焊缝熔深逐渐增大。

表 3 正交试验焊缝横截面金相

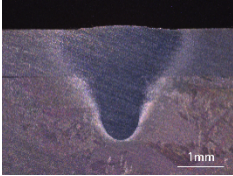
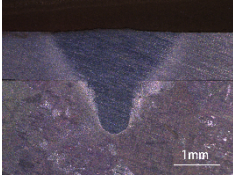
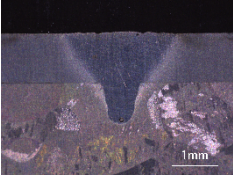
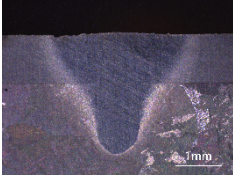
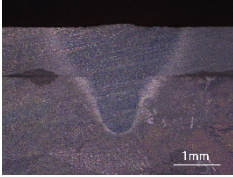
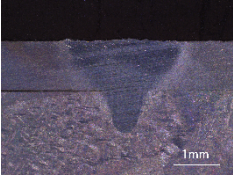
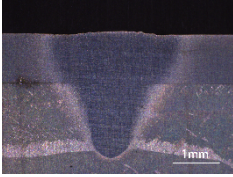
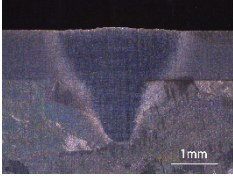
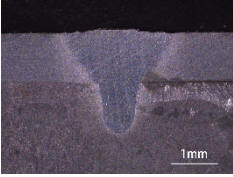
编号	1	2	3
焊缝横截面			
编号	4	5	6
焊缝横截面			
编号	7	8	9
焊缝横截面			

表 4 正交试验焊缝熔深统计表

编号	A 激光功率/ W	B 焊接速度/ (mm/s)	C 脉冲周期/ ms	Y 熔深/mm
1	2 600	14.08	27.5	2.422
2	2 600	16.70	38.5	2.229
3	2 600	20.87	33.0	1.968
4	2 700	14.08	38.5	2.606
5	2 700	16.70	33.0	2.308
6	2 700	20.87	27.5	2.010
7	2 800	14.08	33.0	2.702
8	2 800	16.70	27.5	2.432
9	2 800	20.87	38.5	2.210

焊缝熔深与单位长度焊缝的热输入量相关，当单位长度焊缝的热输入量增大时，焊缝的熔深会增大。在脉冲激光焊中，一般情况下单位长度焊缝的热输入 (P) 与激光功率 (W)、焊接速度 (V)、脉冲周期 (T) 的关系可简单描述如下：

$$P=(W \cdot T) / V \tag{7}$$

由上述公式可知，单位焊缝的热输入量与焊接速度、脉冲周期成正向关系，与焊接速度成方向关系。即当焊接速度和脉冲周期一定时，焊缝熔深随着激光功率的增大而增大；当激光功率和脉冲周期一定时，焊缝熔深随着焊接速度的增大而减小；当激光功率和焊接速度一定时，焊缝熔深随着脉冲周期的增大而增大。

下面将通过极差分析和方差分析的方法，分析焊接功率、焊接速度和脉冲周期等工艺参数对焊缝熔深影响程度的大小。

3.1 极差分析

表 5 所示为正交试验焊缝熔深的极差分析结果，表中的 K 表示所有试验次数的熔深之和， K_i 表示各因素的第 i 水平的熔深之和， k_i 是 K_i 的平均数，即各因素的第 i 水平熔深之和的平均数， R 表示因素的熔深的平均数的最大值和最小值之差，即 k_i 的极差。

表5 极差分析计算表

编号	A 激光功率/ W	B 焊接速度/ (mm/s)	C 脉冲周期/ ms	Y 熔深/mm
K_1	6.619 000	7.730 000	6.864 000	$K=20.887$
K_2	6.924 000	6.969 000	6.978 000	
K_3	7.344 000	6.188 000	7.045 000	
k_1	2.206 333	2.576 667	2.288 000	
k_2	2.308 000	2.323 000	2.326 000	
k_3	2.448 000	2.062 667	2.348 333	
R	0.241 667	0.514 000	0.060 333	

用极差分析可以较为直观地分析激光功率、焊接速度和脉冲周期等焊接参数对焊缝熔深影响的主要因素，从表5可以看出R（焊接速度）>R（激光功率）>R（脉冲周期），即焊接速度是影响焊缝熔深的主要因素，激光功率为次要因素，脉冲周期的影响最小。

但极差分析无法得出主要因素对试验结果影响的显著程度，也无法说明引起焊缝熔深变化的来源是因素水平变化引起的还是试验误差导致的，因此，还需要进行方差分析。

3.2 方差分析

表6 方差计算表

编号	A 激光功率/ W	B 焊接速度/ (mm/s)	C 脉冲周期/ ms	Y 熔深/mm
k_1^2	4.867 906 778	6.639 211 111	5.234 944 000	—
k_2^2	5.326 864 000	5.396 329 000	5.410 276 000	
k_3^2	5.992 704 000	4.254 593 778	5.514 669 444	
S	0.088 000 000	0.396 000 000	0.006 000 000	$S_{\text{修正后总计}} \approx 0.491$ $S_{\text{误差}} \approx 0.001$

表7 方差分析表

来源	平方和 S	自由度 f	均方 V	F	显著性 水平 α
修正模型	0.490 ^a	6	0.082 000	171.372	0.006
截距	48.474	1	48.474 000	101 670.186	<0.001
A 激光功率	0.088	2	0.044 000	92.642	0.011
B 焊接速度	0.396	2	0.198 000	415.619	0.002
C 脉冲周期	0.006	2	0.003 000	5.855	0.146
E 误差	0.001	2	0.000 477	—	—
总计	48.965	9	—	—	—
修正后总计	0.491	8	—	—	—

注：a. $R^2=0.998$ (调整后 $R^2=0.992$)。

在极差分析计算表基础上进行方差分析，结果如表6和表7所示。表中相应的数据计算公式和计算过

程如下：

$$S_{\text{截距}} = C = K^2/N = 20.887^2/9 = 48.474$$

$$S_{\text{修正后总计}} = \sum_{i=1}^N Y_i^2 - C = 2.422^2 + 2.229^2 + 1.968^2 + 2.606^2 + 2.308^2 + 2.010^2 + 2.702^2 - 48.474 + 2.432^2 + 2.210^2 \approx 0.491$$

$$S_A = \sum_{i=1}^r n_i \times k_{Ai}^2 - C = 3 \times (2.20633333^2 + 2.308^2 + 2.448^2) - 48.474 \approx 0.088$$

$$S_B = \sum_{i=1}^r n_i \times k_{Bi}^2 - C = 3 \times (2.57666667^2 + 2.308^2 + 2.06266667^2) - 48.474 \approx 0.396$$

$$S_C = \sum_{i=1}^r n_i \times k_{Ci}^2 - C = 3 \times (2.288^2 + 2.326^2 + 2.34833333^2) - 48.474 \approx 0.006$$

$$S_E = S_{\text{修正后总计}} - S_A - S_B - S_C \approx 0.491 - 0.088 - 0.396 - 0.006 = 0.001$$

$$S_{\text{修正模型}} \approx S_A + S_B + S_C \approx 0.088 + 0.396 + 0.006 = 0.490$$

由表7中计算的数据分析可知：

a. 修正模型：是对整个方差分析模型的检验，原假设为模型中所有因素均对熔深无影响。通过计算，修正模型的显著性水平为0.006，因而有99.4%的把握拒绝原假设，即认为模型中至少有1个因素对熔深有影响。

b. 截距：原假设为不考虑因素影响时，即因变量的平均水平为0。通过计算，截距的显著性水平为小于0.001，因而有99.9%以上的把握拒绝原假设。

c. 激光功率、焊接速度、脉冲周期：原假设为各因素对自变量无影响。通过计算，各因素中激光功率、焊接速度、脉冲周期的显著性水平分别为0.011、0.002和0.146，即这3个工艺参数对试验结果影响的置信度分别为98.9%、99.8%和85.4%；同时， F （焊接速度）> F （激光功率）> F （脉冲周期），即焊接速度对焊缝熔深的影响最显著，激光功率次之，脉冲周期的影响最小。

4 结束语

a. 在钛合金脉冲激光焊中，在一定参数范围内，焊缝熔深与激光功率、脉冲周期成正向关系，与焊接速度成反向关系。

b. 通过极差分析和方差分析，在钛合金脉冲激光焊中，焊接速度对焊缝熔深的影响最显著，激光功率次之，脉冲周期的影响最小。

参考文献

- [1] Auwal S T, Ramesh S, Yusof F, et al. A review on laser beam welding of titanium alloys[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97: 1071-1098.
- [2] Quazi M M, Ishak M, Fazal M A, et al. Current research and development status of dissimilar materials laser welding of titanium and its alloys[J]. *Optics and Laser Technology*, 2020, 126: 106090.
- [3] 徐明兴, 贾洪印, 陈功, 等. 基于栅格舵的火箭芯一级残骸落点控制问题研究[J]. *飞行力学*, 2019, 37(4): 68-72.
- [4] Huang Yiming, Xu Sai, Yang Lijun, et al. Defect detection during laser welding using electrical signals and high-speed photography[J]. *Mater Process Tech*, 2019, 271: 394-403.
- [5] Cai Wang, Wang Jianzhuang, Jiang Ping, et al. Application of sensing techniques and artificial intelligence-based methods to laser welding real-time monitoring: A critical review of recent literature[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2020, 57: 1-18.
- [6] Wen Xianhai, Wu Di, Zhang Peilei, et al. Influence mechanism of the keyhole behavior on penetration depth by in-situ monitoring in pulsed laser welding of aluminum alloy [J]. *Optik*, 2021, 246: 167812.
- [7] Huang Yiming, Hou Shuaishuai, Xu Shufeng, et al. EMD-PNN based welding defects detection using laser-induced plasma electrical signals [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 45: 642-651.
- [8] Liu Sikai, Wu Di, Luo Zhongyi, et al. Measurement of pulsed laser welding penetration based on keyhole dynamics and deep learning approach[J]. *Measurement*, 2022, 199: 111579.
- [9] Assuncao E, Williams S. Comparison of continuous wave and pulsed wave laser welding effects[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51: 674-680.
- [10] Kumar P, Sinha A N. Effect of heat input in pulsed Nd:YAG laser welding of titanium alloy (Ti6Al4V) on microstructure and mechanical properties[J]. *Welding in the World*, 2019, 63: 673-689.
- [11] Taheri M, Halvae A, Kashani-Bozorg S F. Effect of Nd:YAG pulsed-laser welding parameters on microstructure and mechanical properties of GTD-111 superalloy joint[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(7): 076549.
- [12] Heydari H, Akbari M. Investigating the effect of process parameters on the temperature field and mechanical properties in pulsed laser welding of Ti6Al4V alloy sheet using response surface methodology [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 106: 103267.
- [13] Gong Jianfeng, Peng Genchen, Li Liqun, et al. Effect of plasma plume produced by vacuum laser welding on energy transmission[J]. *Optics and Laser Technology*, 2021, 136: 106744.
- [14] Qiu Wencong, Yang Lijun, Zhao Shenbin, et al. A study on plasma plume fluctuation characteristic during A304 stainless steel laser welding[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 33: 1-9.
- [15] Beiranvand Z M, Ghaini F M, Moosavy H N, et al. The relation between magnesium evaporation and laser absorption and weld penetration in pulsed laser welding of aluminum alloys: Experimental and numerical investigations[J]. *Optics and Laser Technology*, 2020, 128: 106170.
- [16] Gao Ming, Chen Cong, Hu Ming, et al. Characteristics of plasma plume in fiber laser welding of aluminum alloy[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 326: 181-186.
- [17] 伍鹤皋, 于金弘, 石长征, 等. 基于正交试验法的埋地钢管参数敏感性分析[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(8): 97-103.