

## 304 不锈钢光纤激光焊接模式的影响因素

冷晓春<sup>1,2\*</sup>, 罗守一<sup>2</sup>, 李延葆<sup>1,2</sup>, 金伟芳<sup>2</sup><sup>1</sup>上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200240;<sup>2</sup>上海第一机床厂有限公司, 上海 201306

**摘要** 为研究 304 不锈钢光纤激光焊接模式的影响因素,参考均匀试验设计的思路,以激光功率、焊接速度、离焦量为变量设计了一组试验。通过分析成形的焊缝,获得了光纤激光焊接过程中热导焊和深熔焊的特征形式;定量计算了焊接模式与各焊接参数及其交互作用之间的关系,确定了焊接模式的影响因素。研究表明,304 不锈钢光纤激光焊共有四种由热输入密度决定的焊缝成形形式。当热输入密度小于  $43.04 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-3}$  时,焊缝为圆弧形,对应的焊接模式为热导焊;当热输入密度大于  $66.82 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-3}$  时,焊缝为钉头形或钉状,对应的焊接模式为深熔焊;存在一种过渡状态,对应的热输入密度处于两种焊接模式的中间值。

**关键词** 激光技术; 304 不锈钢; 光纤激光焊; 焊接模式; 影响因素

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.111402

## Influence Factors of Fiber Laser Welding Modes for 304 Stainless Steel

Leng Xiaochun<sup>1,2\*</sup>, Luo Shouyi<sup>2</sup>, Li Yanbao<sup>1,2</sup>, Jin Weifang<sup>2</sup><sup>1</sup> School of Material Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;<sup>2</sup> Shanghai No. 1 Machine Tool Works Co., Ltd., Shanghai 201306, China

**Abstract** In order to investigate the influence factors of the fiber welding modes for 304 stainless steel, a group of experiments with the laser power, welding speed and defocus distance as the variables are designed in accordance with the idea of an uniform experimental design. By the analysis of the formed welds, the characteristic forms of the heat-conduction welding and the deep-penetration welding are obtained in the fiber laser welding process. The relationships among the weld mode, each welding parameter and their interactive action are calculated quantitatively, and the influence factors of the welding modes are determined. The results show that, there are four typical weld formation forms determined by the heat input density for the 304 stainless steel fiber laser welding. The weld has an arc shape when the heat input density is smaller than  $43.04 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-3}$  and the corresponding welding mode is the heat-conduction welding. When the heat input density is larger than  $66.82 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-3}$ , the weld has a nail-head or a nail shape and the corresponding welding mode is the deep-penetration welding. Meanwhile, there exists an intermediate mode when the heat input density is between the two values for the above welding modes.

**Key words** laser technique; 304 stainless steel; fiber laser welding; welding mode; influence factors

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 140.3510; 170.6940

## 1 引言

激光焊接模式可分为热导焊和深熔焊,其中热导焊通过搅拌运动形成焊缝,熔池金属没有气化;深熔焊也称为小孔焊,小孔是在熔池金属气化所产生的金属蒸气压力下形成的<sup>[1]</sup>。

陈武柱等<sup>[2]</sup>对  $\text{CO}_2$  激光器的焊接模式进行了定性的研究,结果表明,当激光功率密度足够大时,

金属发生气化,在一定的工艺条件下,激光焊接会从稳定的热导焊变为稳定的深熔焊。除了激光功率密度外,焊接速度也是决定激光焊接模式的一个重要因素。

激光焊接模式对激光制造具有非常重要的意义。对于低熔深的焊接,需要通过热导焊来增大焊缝宽度以提高对接焊缝的容错率;对于超薄材料的封头焊,需要用尽量小的功率来获得尽量大的熔深。

收稿日期: 2018-03-21; 修回日期: 2018-04-23; 录用日期: 2018-05-28

\* E-mail: m18016355981@163.com

激光填丝焊<sup>[3]</sup>、激光粉末焊<sup>[4]</sup>、激光表面改性<sup>[5]</sup>等技术也需要对焊接模式进行精准控制。

光纤激光和碟片激光等固体激光与 CO<sub>2</sub> 激光的差异较大。冷晓春等<sup>[6]</sup>研究发现,CO<sub>2</sub> 激光对焊接速度的改变较为敏感,而光纤激光对激光功率的改变较为敏感。

目前,关于光纤激光焊接模式的研究鲜有报道。本文主要研究了 304 奥氏体不锈钢光纤激光焊接的功率密度及焊接速度对焊接模式的影响及其定量计算。

## 2 试验方法及内容

### 2.1 激光焊接模式的影响因素

激光焊接模式的主要影响因素为激光功率、作用于工件的光斑直径和焊接速度,其中激光功率和焊接速度均可直接获得,光斑直径由离焦量决定。

作用于工件的光斑直径  $D_z$  与离焦量  $z$  的关系<sup>[1]</sup>为

$$D_z = D_0 \left[ 1 + \left( \frac{4M^2 \lambda z}{\pi D_0^2} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

式中  $D_0$  为聚焦镜焦点处的光斑直径,此处为 0.7 mm;  $M^2$  为激光光束质量因子,取 31.6;  $\lambda = 1.07 \times 10^{-3}$  mm 为激光波长。

除三种单一因素外,还需考虑它们之间的交互作用对激光焊接模式的影响。常用的交互作用有激光功率密度、焊接热输入等。

计算功率密度时还需要计算光斑面积  $S$ ,其计算公式为

$$S = \pi D_z^2. \quad (2)$$

激光功率密度  $Q$  表示单位面积内的激光功率,其计算公式为

$$Q = \frac{4P}{\pi D_z^2} \times 10^5, \quad (3)$$

式中  $P$  为激光功率,单位为 kW。

焊接热输入  $E$  表示单位长度上工件接受到的总能量,其计算公式为

$$E = \frac{P}{v} \times 10^3, \quad (4)$$

式中  $v$  为焊接速度,单位为 mm/s。

激光功率密度和焊接热输入均为两个单一参数

之间的交互作用。引入三种单一参数之间的交互作用——热输入密度  $e$  来表示单位长度上光束作用于工件的激光能量密度,其计算公式为

$$e = \frac{Q}{v} = \frac{4P}{\pi D_z^2 v} \times 10^3. \quad (5)$$

### 2.2 试验参数选择

采用均匀设计法<sup>[7]</sup>设计试验参数,通过较少且分布较为均匀的试验参数点覆盖较大的焊接参数范围。均匀设计试验的试验参数只能在单一因素中选择,对于这些因素间的交互作用,可以通过试验后的回归计算等进行分析,但是其前提是各单一因素对试验结果的影响是线性的。焊接模式的变化是非线性的,故在试验参数设计时还需要考虑各交互作用对激光焊接模式的影响。

考虑三个单一因素时,均匀设计表的均匀度的偏差较小,试验次数为 10,每个因素需要取 10 个参数点。激光热导焊需要较小的激光功率密度,故激光功率应在较小的范围内选择,在 0.8~1.7 kW(设置值受焊机自身配置的影响,实际输出功率高于设置功率,下文所述均为实际输出功率)范围内选择了 10 个参数,每个参数间隔约为 0.1 kW。

焊接速度对激光模式的影响未知,故选择范围应较大,但为避免焊接速度过小使激光作用时间过度延长进而造成对激光焊接模式的影响,在 40~85 mm/s 范围内选择了 10 个数据点,每个数据点间隔 5 mm/s。

离焦量绝对值相同时,正离焦与负离焦的光斑直径相同,二者的区别有时并不明显<sup>[2]</sup>,但负离焦时焊缝内部的功率密度大于焊缝表面的,不能直接反映光斑直径对焊缝的影响,故试验均采用正离焦。均匀试验每种因素的试验点数量相同,故离焦量也有 10 个数据点,分别为 0~9 mm(间隔为 1 mm),并计算相应的光斑面积。

单因素焊接的试验方案见表 1,同时列出了每组试验参数对应的三种交互作用的计算结果。

设计试验参数时还需要考虑交互作用的影响。分别将表 1 所列的 10 组试验参数所对应的功率密度和热输入按大小进行排序,形成新的两组因素,再将它们分别和对应的焊接速度、离焦量进行比较,此时的试验点如图 1 中的圆点(“·”)所示。

表 1 单因素均匀设计试验方案

Table 1 Test plan of single-factor uniform design

Test No.	Welding parameter				Dependent variable		
	Laser power	Travel speed	Defocus distance	Spot area	Power density	Heat input	Heat input density
	$P / \text{kW}$	$v / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$z / \text{mm}$	$S / \text{mm}^2$	$Q / (10^5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2})$	$E / (\text{J} \cdot \text{mm}^{-1})$	$e / (\text{J} \cdot \text{mm}^{-3})$
1	1.27	60	6	0.492	2.58	21.17	43.04
2	1.33	85	2	0.397	3.35	15.65	39.44
3	1.42	55	9	0.625	2.27	25.82	41.28
4	1.50	80	5	0.459	3.27	18.75	40.84
5	1.54	50	1	0.388	3.97	30.80	79.42
6	1.65	75	8	0.575	2.87	22.00	38.26
7	1.74	45	4	0.432	4.02	38.67	89.43
8	1.80	70	0	0.385	4.68	25.71	66.82
9	1.84	40	7	0.530	3.47	46.00	86.73
10	1.95	65	3	0.412	4.74	30.00	72.89

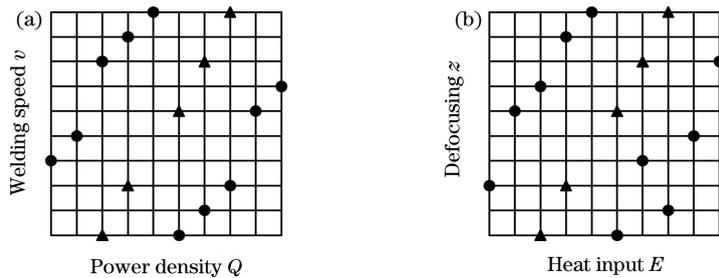


图 1 考虑交互作用的试验点分布。(a)功率密度-焊接速度;(b)热输入-离焦量

Fig. 1 Test point distribution when interactive action included. (a) Power density-welding speed; (b) heat input-defocus distance

由图 1 可知,两种试验点分布较不均匀,激光功率密度较小时,低焊接速度没有覆盖;激光功率密度较大时,高焊接速度没有覆盖。故在图 1 的两组试验点分布中各增加了 5 个试验点来提高试验的均匀性。

新增的试验点用三角(“▲”)表示,试验参数见表 2。

通过对比表 1 和表 2 发现,表 2 的焊接参数除了能增大试验的均匀性之外,还填补了表 1 中热输入密度为 43~67 J/mm 的空白区域。

表 2 考虑交互作用的试验方案

Table 2 Test plan when interactive action included

Test No.	Welding parameter				Dependent variable		
	Laser power	Travel speed	Defocus distance	Spot area	Power density	Heat input	Heat input density $e /$
	$P / \text{kW}$	$v / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$z / \text{mm}$	$S / \text{mm}^2$	$Q / (10^5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2})$	$E / (\text{J} \cdot \text{mm}^{-1})$	$(\text{J} \cdot \text{mm}^{-3})$
11	1.65	40	8	0.575	2.87	41.25	71.74
12	1.50	50	5	0.459	3.26	30.00	65.34
13	1.84	65	7	0.530	3.47	28.31	53.37
14	1.74	75	4	0.432	4.02	23.20	53.66
15	1.54	85	1	0.388	3.97	18.12	46.72
16	1.27	60	0	0.385	3.30	21.17	55.00
17	1.65	75	2	0.397	4.16	22.00	55.45
18	1.80	70	5	0.459	3.92	25.71	56.01
19	1.95	65	7	0.530	3.68	30.00	56.56
20	1.54	50	9	0.625	2.46	30.80	49.24

### 2.3 试验方法

使用的母材是 304 奥氏体不锈钢,厚度为 6 mm。为了避免焊缝间隙的影响,试验直接在平板

上进行。为了避免熔池重力的影响,焊接位置为横焊,光束垂直于试件表面。按试验方案完成焊接后,在试样中心取样并拍摄宏观金相照片,以确定焊缝

的焊接模式。

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 试验结果

20 条试验焊缝中共有 4 种焊缝类型,如图 2 所示。图 2(a)所示的焊缝为圆弧形;图 2(b)所示的焊

缝呈三角形,底部没有明显的突出部;图 2(c)所示的焊缝呈钉头状,底部开始有明显的突出;图 2(d)所示的焊缝上部呈钉头状,但底部突出较长,总体呈钉状。

各试验参数与试验结果的对照表见表 3,试验结果中的字母分别对应图 2 中的焊缝形状代号。

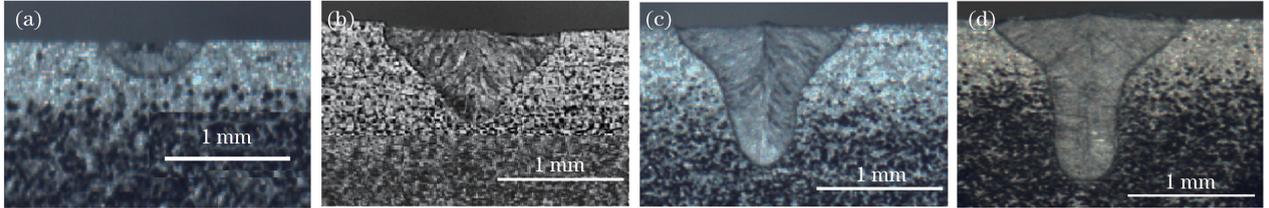


图 2 典型的焊缝形状。(a)圆弧形;(b)三角形;(c)钉头形;(d)钉状

Fig. 2 Typical weld shapes. (a) Circular arc shape; (b) triangular shape; (c) nail head shape; (d) nail shape

表 3 试验结果汇总

Table 3 Summary of test results

Test No.	Welding parameter				Dependent variable				Type of shape
	Laser power	Travel speed	Defocus distance	Spot area	Power density	Heat input	Heat input density		
	$P / \text{kW}$	$v / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$z / \text{mm}$	$S / \text{mm}^2$	$Q / (10^5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2})$	$E / (\text{J} \cdot \text{mm}^{-1})$	$e / (\text{J} \cdot \text{mm}^{-3})$		
1	1.27	60	6	0.492	2.58	21.17	43.04	Circular arc (a)	
2	1.33	85	2	0.397	3.35	15.65	39.44	Circular arc (a)	
3	1.42	55	9	0.625	2.27	25.82	41.28	Circular arc (a)	
4	1.50	80	5	0.459	3.27	18.75	40.84	Circular arc (a)	
5	1.54	50	1	0.388	3.97	30.80	79.42	Nail head (c)	
6	1.65	75	8	0.575	2.87	22.00	38.26	Circular arc (a)	
7	1.74	45	4	0.432	4.02	38.67	89.43	Nail (d)	
8	1.80	70	0	0.385	4.68	25.71	66.82	Nail head (c)	
9	1.84	40	7	0.530	3.47	46.00	86.73	Nail (d)	
10	1.95	65	3	0.412	4.74	30.00	72.89	Nail head (c)	
11	1.65	40	8	0.575	2.87	41.25	71.74	Nail head (c)	
12	1.50	50	5	0.459	3.26	30.00	65.34	Triangle (b)	
13	1.84	65	7	0.530	3.47	28.31	53.37	Triangle (b)	
14	1.74	75	4	0.432	4.02	23.20	53.66	Triangle (b)	
15	1.54	85	1	0.388	3.97	18.12	46.72	Triangle (b)	
16	1.27	60	0	0.385	3.30	21.17	55.00	Triangle (b)	
17	1.65	75	2	0.397	4.16	22.00	55.45	Triangle (b)	
18	1.80	70	5	0.459	3.92	25.71	56.01	Triangle (b)	
19	1.95	65	7	0.530	3.68	30.00	56.56	Triangle (b)	
20	1.54	50	9	0.625	2.46	30.80	49.24	Triangle (b)	

#### 3.2 焊缝成形的直观分析

图 2(a)中的焊缝呈典型的热导焊特征,这可能是由于 304 不锈钢此时已熔化但尚未沸腾,很大一部分激光被反射,激光的吸收率较小。图 2(b)中尚未出现深熔焊的特征,但已与热导焊明显不同,这一方面说明此时小孔尚未形成;另一方面说明此时的 304 不锈钢可能已经沸腾,一定程度的气化使熔池

的搅拌变得更为剧烈。图 2(c)中的焊缝已经具有较为明显的深熔焊特征,说明此时小孔已经形成。图 2(d)中的焊缝除了小孔深度较大外,钉头部分的形状并未出现明显的变化,这说明在小孔形成后,很大一部分激光能量被小孔吸收,小孔深入到焊件内部。故焊接模式由热导焊变为深熔焊(即小孔的形成)并非一个突变过程。

### 3.3 试验结果的直观分析

为了更直观地了解各单一因素及交互作用因素对焊接模式的影响,将每个因素的参数点按从小到大的顺序排列,其对应的焊接模式如图3(a)~(f)所示。可以看出,单一因素和双因素的交互作用对激光焊接模式的影响均不明显。

#### 3.3.1 激光功率密度的影响

由图3(b)可知(需结合表3数据,下同),当焊接速度相同而激光功率密度不同时,经常出现不同的焊接模式,激光功率密度更大时得到的焊接模式更偏向于深熔焊。由图3(d)可知,当功率密度较小时,激光焊接模式偏向于热导焊,当功率密度较大时,激光焊接模式偏向于深熔焊。进一步分析可知,随着焊接速度的增大,深熔焊所需的功率密度增大。

#### 3.3.2 热输入的影响

由图3(c)可知,当光斑面积相同时,热输入(即

线能量)更大时得到的焊缝更偏向于深熔焊。由图3(e)可知,当热输入较小时,激光焊模式偏向于热导焊;当热输入较大时,激光焊模式偏向于深熔焊。进一步分析可知,随着光斑面积的增大,深熔焊所需的线能量增大。

#### 3.3.3 热输入密度的影响

激光功率密度和热输入无法完全决定焊接模式,还需要分别考虑焊接速度或光斑面积的影响,这符合热输入密度的定义。由图3(f)可知,随着热输入密度的增大,激光焊接模式由热导焊向深熔焊改变。

故热输入密度是可以决定激光焊接模式的因素。当热输入密度小于  $43.04 \text{ J/mm}^3$  时,304 不锈钢的焊接模式为热导焊;热输入密度大于  $66.82 \text{ J/mm}^3$  时,304 不锈钢的焊接模式为深熔焊。

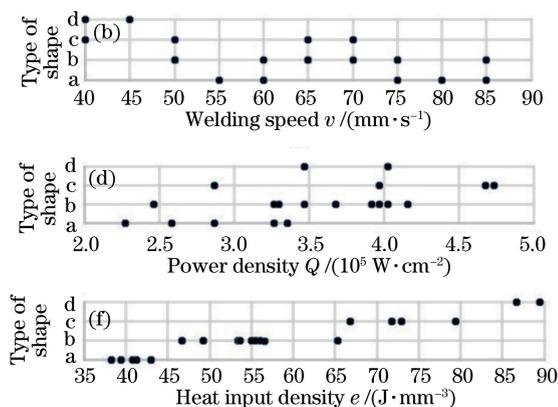
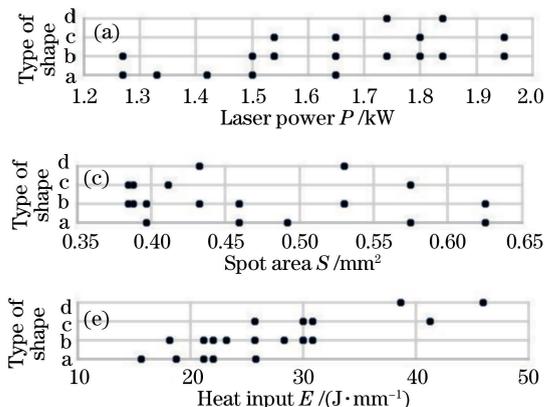


图3 各因素与试验结果间的关系。(a)激光功率  $P$ ; (b)焊接速度  $v$ ; (c)光斑面积  $S$ ;  
(d)功率密度  $Q$ ; (e)热输入  $E$ ; (f)热输入密度  $e$

Fig. 3 Relationship between each factor and test result. (a) Laser power  $P$ ; (b) welding speed  $v$ ;  
(c) spot area  $S$ ; (d) power density  $Q$ ; (e) heat input  $E$ ; (f) heat input density  $e$

### 3.4 试验结果的理论分析

由图3(d)可知,当功率密度为  $2.87 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  后(试验号6,11),焊接速度为  $75 \text{ mm/s}$  时(试验号6,焊缝类型“a”)的焊缝为热导焊,焊缝尚未沸腾(部分气化);当焊接速度为  $40 \text{ mm/s}$  时(试验号11,焊缝类型“c”),焊缝已呈较为明显的深熔焊特征,焊缝不仅出现了沸腾,而且已经形成了小孔。

当功率密度为  $4.02 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  后(试验号7,14),焊接速度为  $75 \text{ mm/s}$  时(试验号14,焊缝类型“b”)的焊缝已经开始沸腾但未形成小孔;当焊接速度为  $40 \text{ mm/s}$  时(试验号7,焊缝类型“d”),焊缝已形成了小孔,且小孔已开始深入到工件内部。

上述两个现象说明功率密度越大,焊缝吸收到的激光束能量越多;在相同的功率密度下,激光束作用的时间越长,熔池的气化程度越强。从能量的角度分析,热输入密度决定了单位长度及单位面积上金属材料接收到的总能量,能量越大,金属材料的温度越高,熔池的气化程度越强。如3.2节所述,随着熔池气化程度的增大,焊缝依次发生熔化、沸腾、小孔形成及小孔深入。故热输入密度决定了熔池的气化程度,从而决定了焊缝的焊接模式。

## 4 结 论

参考均匀试验设计的思路,以激光功率、焊接速度、离焦量为变量设计了一组试验。通过分析成形

的焊缝,获得了光纤激光焊接热导焊和深熔焊的特征形式,定量计算了焊接模式与各焊接参数及其交互作用之间的关系,得到以下结论。

1) 304 不锈钢光纤激光焊接的典型焊缝形状为圆弧形、三角形、钉头形和钉状。

2) 圆弧形焊缝有典型的热导焊焊缝特征,钉头形和钉状焊缝有典型的深熔焊焊缝特征,而三角形焊缝则是热导焊和深熔焊之间的一种过渡模式焊缝特征。

3) 当热输入密度小于  $43.04 \text{ J/mm}^3$  时,焊缝为圆弧形;当热输入密度大于  $66.82 \text{ J/mm}^3$  时,焊缝为钉头形或钉状;当热输入密度介于两者之间时,焊缝为三角形。

综上所述,激光焊接模式由热输入密度决定,即由激光功率、焊接速度和光斑面积三者共同决定。

### 参 考 文 献

- [1] Steen W M. Laser material processing[M]. Meng D Q, Zhang Y S, He J J, *et al.* Transl. 3th ed. Beijing: China Machine Press, 2012.  
斯顿. 材料激光工艺过程[M]. 蒙大桥, 张友寿, 何建军, 等, 译. 第三版. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [2] Chen W Z, Zhang X D, Ren J L, *et al.* Study on welding mode transition and stability of welding process in laser welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 1996, 23(7): 657-661.  
陈武柱, 张旭东, 任家烈, 等. 激光焊接时焊接模式转变规律及焊接过程稳定性的研究[J]. 中国激光, 1996, 23(7): 657-661.
- [3] Zhang Y W, Zhang M L, Sun Z Y, *et al.* Microstructures and properties of 50 mm thick SA508Gr.3Cl.2 steel welding joints by ultra-narrow-gap laser welding with filler wire[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 1102006.  
张益文, 张茂龙, 孙志远, 等. 50 mm 厚 SA508Gr.3Cl.2 钢超窄间隙激光填丝焊接头组织与性能[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1102006.
- [4] Yu Y Q, Ju H, Lin C X, *et al.* Property of stainless steel plates by laser welding with powder filling[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(12): 121402.  
于永清, 鞠恒, 林成新, 等. 激光填粉焊接不锈钢板的性能[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 121402.
- [5] Wang X, Zhou J Z, Huang S, *et al.* Effect of laser peening on hydrogen embrittlement resistance of TC4 titanium alloys[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(9): 0914006.  
王祥, 周建忠, 黄舒, 等. 激光喷丸对 TC4 钛合金抗氢脆性能的影响[J]. 光学学报, 2017, 37(9): 0914006.
- [6] Leng X C, Jin W F, Huang J. Study of influence factor of fibre and CO<sub>2</sub> laser welding of 304 stainless steel[J]. Modern Welding, 2015(11): 33-36.  
冷晓春, 金伟芳, 黄坚. 304 不锈钢光纤及 CO<sub>2</sub> 激光焊接影响因子的研究[J]. 现代焊接, 2015(11): 33-36.
- [7] Li Y Y, Hu C R. Experiment design and data processing[M]. 2rd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.  
李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 第二版. 北京: 化学工业出版社, 2011.