

# 铝合金电弧预熔丝激光焊工艺特性研究

彭进<sup>1,2</sup>, 李俐群<sup>2</sup>, 张瑞珠<sup>1</sup>, 严大考<sup>1</sup>

<sup>1</sup>华北水利水电大学机械学院, 河南 郑州 450045;

<sup>2</sup>哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

**摘要** 提出了基于电弧预熔丝的激光焊方法,研究了入射能量对焊丝熔化状态以及焊缝成形的影响,进一步对焊接过程的工艺适应性进行了分析。结果表明,当焊接电流较小时,焊丝能稳定地熔化、填充进熔池中,增大焊接电流有利于增加焊丝前端的熔化长度;增加激光功率对焊丝熔化量无影响。电弧预熔丝激光焊方法可降低焊缝气孔率,对装配间隙具有很好的适应性。

**关键词** 激光技术; 激光焊接; 电弧预熔丝; 铝合金; 高速摄像

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.061404

## Study on Aluminum Alloy Laser Welding with Pre-Melted Liquid Filler by Arc

Peng Jin<sup>1,2</sup>, Li Liqun<sup>2</sup>, Zhang Ruizhu<sup>1</sup>, Yan Dakao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Mechanical Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450045, China;

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

**Abstract** The method of laser welding with pre-melted liquid filler by arc is proposed, and the influence of incident energy on the melting state of the filler wire and the weld appearance is studied. The process adaptability of the welding process is further analyzed. The results show that, when the welding current is relatively low, the filler wire can be stably melted and filled into the molten pool, and the increase of the welding current is beneficial to increasing the melting length of the front-end filler wire. The increase of the laser power has no effect on the melting amount of the filler wire. The method of laser welding with pre-melted liquid filler by arc can reduce the porosity of weld and significantly improve the adaptability to assembly clearance.

**Key words** laser technique; laser welding; pre-melted liquid filler by arc; aluminum alloy; high-speed camera

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3850

## 1 引言

激光填丝焊技术的应用领域越来越广泛,如航空、航天<sup>[1]</sup>以及汽车<sup>[2]</sup>领域,它可以降低激光自熔焊对装配间隙的苛刻要求<sup>[3]</sup>,可利用较小的激光功率实现中、厚板的多层多道焊接<sup>[4-5]</sup>;通过调节焊丝的化学成分及送丝速度、送丝角度等工艺参数,实现焊缝组织性能等的冶金调节<sup>[6]</sup>。

然而,激光填丝焊也存在一些问题:1) 焊丝主要依靠激光热源来熔化,从而造成固态焊丝送入过程中,会将入射的激光热源的一部分能量反射消耗掉,进而影响激光能量传输的稳定性<sup>[7]</sup>;2) 焊接过程中,焊丝一般是填送到匙孔边缘,这样会造成对匙孔的冲击,影响焊接过程的稳定性<sup>[8]</sup>。对于铝合金而言,其具有高反

**收稿日期:** 2016-11-25; **收到修改稿日期:** 2017-01-22

**基金项目:** 国家自然科学基金(51175115)、水利部科技推广计划项目(TG1420)、华北水利水电大学高层次人才科研启动基金项目

**作者简介:** 彭进(1984—),男,博士,讲师,主要从事激光焊接方面的研究。E-mail: pengjin1985120@163.com

射率、低粘度的特性,易形成气孔的缺陷。

为了提高激光填丝焊的稳定性,Syed 等<sup>[9]</sup>研究了焊丝送进方向对焊缝成形的影响,认为焊接过程中采用前置送丝的方式时,焊接过程比较稳定,能获得较好的焊缝成形。梅汉华等<sup>[10]</sup>研究了铝合金激光填丝焊的焊接工艺,发现焊丝直径在 0.8~1.6 mm 时可获得良好的焊缝成形,并且给出了焊接速度与送丝速度的匹配关系。Salminen<sup>[11]</sup>研究了焊接过程中,不同送丝参数对激光热源损耗的影响,研究结果表明,当送丝参数选择不当时,损失的能量为入射激光能量的 50%。杜汉斌等<sup>[12]</sup>发现,激光填丝焊可以降低焊丝对激光能量的损耗,提高焊接过程的稳定性。彭进等<sup>[13]</sup>对比分析了激光液态填充焊与常规激光填丝焊的熔池与匙孔的物理特性。

基于上述情况的分析,本文提出了基于电弧预熔丝的激光焊方法,固态焊丝送入熔池前,依靠较小的电弧能量预先熔化成液态,进而以液态的形式流入熔池中。试验以具有高反射率的铝合金为研究对象,研究了入射能量对焊丝熔化状态的影响以及工艺适应性。

## 2 试验条件

### 2.1 试验材料

试验材料采用 Al-Mg-Si 系的 6156 铝合金,表 1 为 6156 铝合金化学成分。焊丝采用 ER4047 铝硅焊丝,直径为 1.0 mm。试板尺寸 200 mm×50 mm×2.0 mm,在焊接试验之前对待焊工件进行相应的表面擦拭、去除氧化膜等相关处理。

表 1 焊接工件的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of welding workpiece (mass fraction, %)

Composition	Mg	Si	Cu	Mn	Zn	Fe	Al
Content	0.72	0.86	0.83	0.56	0.37	0.12	Bal.

### 2.2 试验方案

图 1 所示为铝合金电弧预熔丝激光焊的焊接系统,其中  $\alpha$ 、 $\beta$  分别表示焊丝送丝角度和钨极稀有气体保护焊(TIG)焊枪与焊接工件之间的角度, $D_{LA}$ 为激光束与电弧热源之间的距离。在 TIG 焊枪与工件之间建立电弧,焊丝送入熔池之前,可以通过电弧的能量熔化,激光的能量则熔化母材形成相应的熔池、匙孔。试验通过建立高速摄像系统实时监测焊接过程中焊丝的熔化行为。在电弧预熔丝激光焊过程中,由于 TIG 焊枪提供的焊接电流较小,不足以熔化母材,只是用来熔化焊丝,因此主要是采用激光热源的能量形成熔池;而激光电弧复合焊接方法中,电弧的电流较大,能够熔化母材形成熔池,即激光和电弧的能量共同熔化母材形成熔池,因此电弧预熔丝激光焊与激光电弧复合焊接方法有一定的区别。

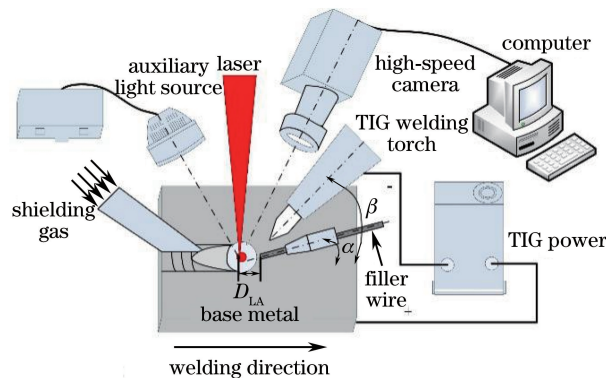


图 1 铝合金电弧预熔丝激光焊的焊接系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of aluminum alloy laser welding with pre-melted liquid filler by arc

焊接试验采用的激光器为德国 IPG 光纤激光器(最大输出功率为 10 kW),焦距为 192 mm;焊机为 Fronius 公司生产的 Magic Wave 4000 TIG 焊机,焊机工作电流的范围为 3~450 A;高速摄像机采集频率为 5000 frame/s;并配备波长为 808 nm 的半导体激光器对焊接区域进行照亮。试验过程中,光丝间距  $D$  为

2.0 mm, 钨极与焊接工件表面的距离为 3 mm, 其他工艺参数如表 2 所示。

表 2 铝合金电弧预熔丝激光焊的工艺参数

Table 2 Process parameters of aluminum alloy laser welding with pre-melted liquid filler by arc

Parameter	Content
Laser power ( $P$ )	1600-3000 W
Welding current ( $I$ )	30-100 A
Welding speed ( $V_w$ )	2 m/min
Wire feeding speed ( $V_F$ )	2 m/min
$\alpha$	20°
$\beta$	70°
$D_{L.A}$	3 mm

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 焊丝的熔化状态

图 2(a) 为电弧预熔丝激光焊的预熔状态实物图。焊丝在送入过程中主要依靠电弧热源的能量熔化, 焊丝上部熔化, 焊丝的底部保持固态。随着焊丝的不断送进, 熔化的金属可以舒畅、连续地流入激光形成的熔池之中。而当焊丝接触到熔池边缘时, 焊丝的底部可以借助熔池的热传导、热对流作用熔化成液态金属。

图 2(b) 为常规激光填丝焊的焊丝熔化状态图。焊丝在送入过程中主要是依靠激光热源的能量熔化, 因此焊丝一般是送到匙孔的边缘位置, 焊接过程中等离子体的热辐射效应、熔池的热传导效应对填充焊丝的熔化起到一个辅助熔化的作用。

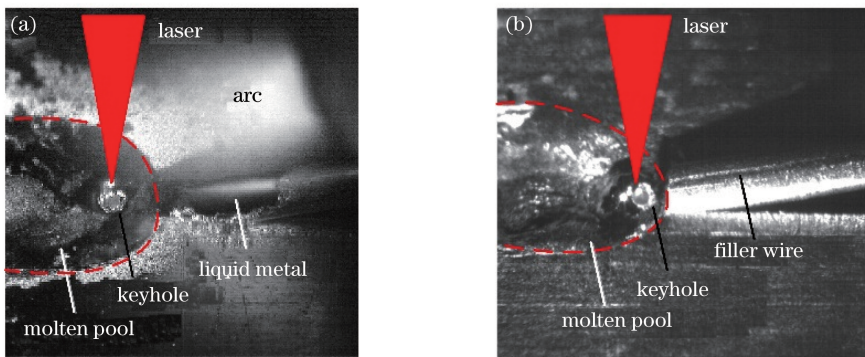


图 2 焊丝熔化状态。(a) 电弧预熔丝激光焊; (b) 常规激光填丝焊

Fig. 2 Melting state of filler wire. (a) Laser welding with pre-melted liquid filler by arc;

(b) conventional laser welding with filler wire

#### 3.2 入射能量对焊丝熔化状态的影响

##### 3.2.1 焊接电流

焊接电流的大小对填材熔化长度有很大的影响。当焊接速度为 2.0 m/min、激光功率为 1800 W 时, 不同焊接电流下的焊丝熔化长度如图 3 所示。通过试验得知, 当焊接电流为 30~80 A 时, 电弧预熔丝激光焊过程可实现焊丝稳定的熔化、填充, 焊缝成形良好。

在电弧预熔丝激光焊接过程中, 当焊接电流小于 30 A 时, 电弧的能量无法熔化焊丝的端部, 只是起到预热的作用, 因此无法满足焊丝提前预先熔化成液态金属的要求。不同焊接电流下的焊缝形貌如表 3 所示, 当焊接电流为 20 A 时, 焊缝表面成形良好, 但焊缝背面未焊透, 可见在焊接电流过小情况下, 无法实现熔化焊丝达到稳定的液态填充的效果。

随着焊接电流的增加, 焊接电流由 30 A 逐渐变为 80 A 的时候, 在电弧热量的作用下焊丝前端的熔化量逐渐增加, 焊丝上部熔化成液态金属, 焊丝底部为固态, 当焊丝送到熔池边缘时, 焊丝底部依靠熔池的热对流和热辐射来熔化, 液态金属可以不断流入熔池中。由表 3 可知, 焊缝表面成形良好, 无焊接缺陷的形成, 焊缝

背面焊透,可见当焊接电流大于 30 A 时,电弧的能量可以熔化焊丝,实现稳定的液态填充的效果。

当焊接电流大于 80 A 时,电弧的热量足以将焊丝前端全部熔化成液态金属,但由于母材表面的温度与液态金属的温度相差较大,表面张力会影响液态金属流向熔池。当焊接电流为 90 A 时,焊缝表面成形较差,出现驼峰。不同焊接电流下的焊丝熔化长度统计图如图 4 所示,可见随着焊接电流的增大,焊丝端部的熔化长度逐渐增加。

焊丝进入熔池边缘时,在电弧热的作用下其已经形成液态,这避免了激光因熔化填材产生的能量损耗,进而增大了激光的能量利用率。

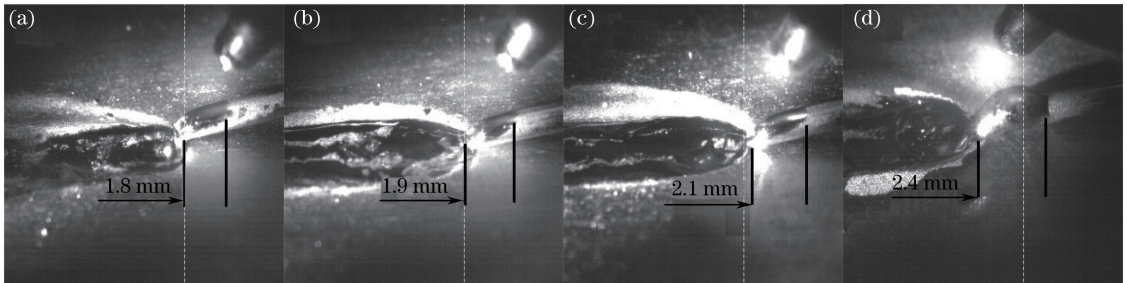


图 3 不同焊接电流下焊丝的熔化状态。(a)  $I=30\text{ A}$ ; (b)  $I=50\text{ A}$ ; (c)  $I=80\text{ A}$ ; (d)  $I=90\text{ A}$

Fig. 3 Wire melting states under different welding currents. (a)  $I=30\text{ A}$ ; (b)  $I=50\text{ A}$ ; (c)  $I=80\text{ A}$ ; (d)  $I=90\text{ A}$

表 3 不同焊接电流下铝合金电弧预熔丝激光焊的焊缝表面形貌

Table 3 Weld appearance under different welding currents in aluminum alloy laser welding with pre-melted liquid filler by arc

Parameter	Front surface	Back surface
$I=20\text{ A}$ $P=1800\text{ W}$		
$I=50\text{ A}$ $P=1800\text{ W}$		
$I=80\text{ A}$ $P=1800\text{ W}$		
$I=90\text{ A}$ $P=1800\text{ W}$		

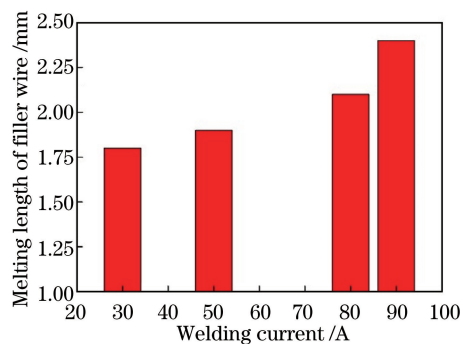


图 4 不同焊接电流下焊丝的熔化长度

Fig. 4 Wire melting lengths under different welding currents

### 3.2.2 激光功率

进一步分析激光功率对焊丝前端熔化长度及焊缝成形的影响。图 5 为不同激光功率条件下焊丝前端的熔化状态。焊接工艺参数如下:焊接速度 2.0 m/min,焊接电流 50 A。从图中可以看出,对于电弧预熔丝激光焊,随着激光功率的增加,填材前端熔化的液态金属尺寸基本上没有发生变化。图 6 为不同激光功率下的

焊丝熔化长度统计图。不同激光功率下的焊缝表面及背面成形如表 4 所示。可以看出,当激光功率由 1600 W 增加到 2500 W 时,由于作用于焊接工件的激光热输入增加,焊缝背面熔宽也逐渐增加。从上述的分析可以得出,增大激光功率对焊丝前端的熔化量基本没有影响。这也间接证明,电弧预熔丝激光焊中激光的能量主要用来形成熔池与匙孔,不参与焊丝熔化。

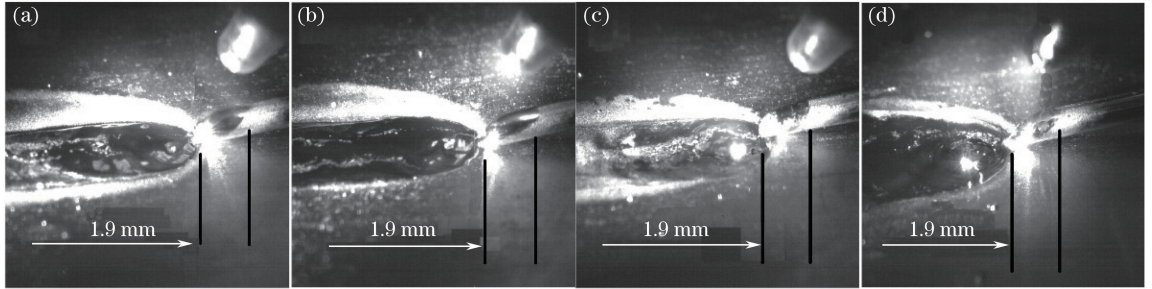


图 5 不同激光功率下焊丝的熔化状态。(a)  $P=1600$  W; (b)  $P=1800$  W; (c)  $P=2300$  W; (d)  $P=2500$  W

Fig. 5 Wire melting states under different laser powers.

(a)  $P=1600$  W; (b)  $P=1800$  W; (c)  $P=2300$  W; (d)  $P=2500$  W

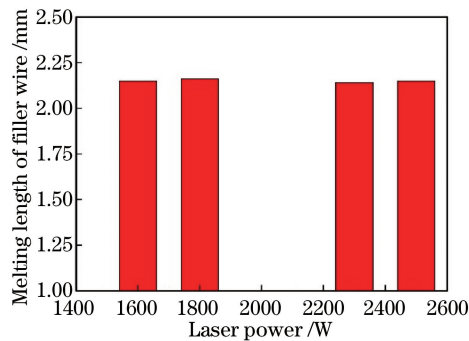


图 6 不同焊接激光功率下焊丝的熔化长度

Fig. 6 Wire melting lengths under different laser powers

表 4 不同激光功率下的铝合金电弧预熔丝激光焊的焊缝表面形貌

Table 4 Weld appearance under different laser powers in aluminum alloy laser welding with pre-melted liquid filler by arc

Parameter	Front surface	Back surface
$P=1600$ W $I=50$ A		
$P=1800$ W $I=50$ A		
$P=2300$ W $I=50$ A		
$P=2500$ W $I=50$ A		

### 3.3 对焊缝气孔缺陷的改善作用



相关研究表明,由于铝合金有较高的热导率、较低的表面张力,因此铝合金激光填丝焊的焊缝气孔缺陷较为严重。因此,当焊接速度为 2 m/min 时,分别对电弧预熔丝激光焊以及常规激光填丝焊条件下的对接焊缝进行 X 射线气孔缺陷检测。之后借助 Matlab 软件对气孔缺陷进行图像处理,进而计算焊缝气孔率:

$$f = \frac{\sum S_1}{S_2} \times 100\%, \quad (1)$$

式中  $S_1$  为焊缝的气孔面积,  $S_2$  为焊缝的总面积。表 5 为得到的气孔探伤图像以及焊缝气孔率。由表可知, 铝合金常规激光填丝焊的焊缝气孔率要明显高于铝合金电弧预熔丝激光焊的, 这主要是因为后者焊丝提前熔化, 并以液态的形式沿熔池边缘流入, 所以液态金属与匙孔之间的距离较远, 且降低了焊丝对匙孔的直接冲击。

表 5 两种方法下的气孔图像和焊缝气孔率

Table 5 Pore images and weld porosity under two methods

Method	Pore image	$f / \%$
Laser welding with filler wire		0.52
Laser welding with pre-melted liquid filler by arc		0.08

### 3.4 对装配间隙的适应性

在实际激光填丝焊工艺条件下, 往往会存在一定的间隙。电弧预熔丝激光焊的装配间隙示意图如图 7 所示。图 8 和图 9 分别为不同装配间隙  $W_{\text{gap}}$  下的对接焊缝成形, 可见随着装配间隙的增大, 焊缝宽度增大。当装配间隙分别为 0.2 mm 和 0.5 mm 时, 焊缝表面及截面成形良好。

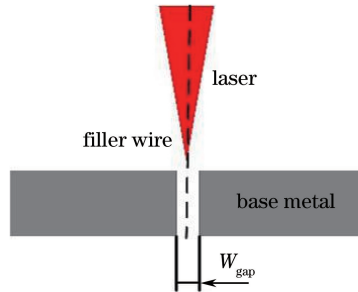
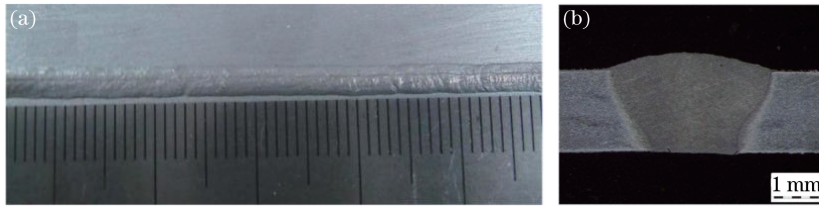
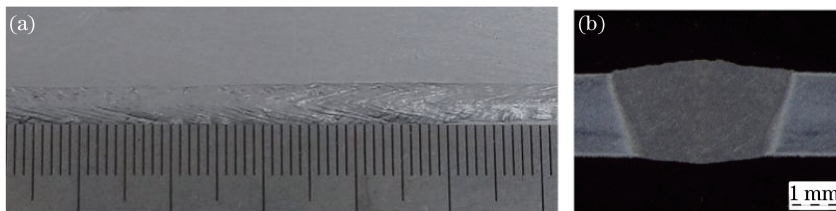


图 7 装配间隙示意图

Fig. 7 Schematic diagram of assembly clearance

图 8  $W_{\text{gap}} = 0.2 \text{ mm}$  时的焊缝形貌。(a) 焊缝表面; (b) 焊缝横截面Fig. 8 Weld appearance when  $W_{\text{gap}} = 0.2 \text{ mm}$ . (a) Weld surface; (b) weld cross-section图 9  $W_{\text{gap}} = 0.5 \text{ mm}$  时的焊缝形貌。(a) 焊缝表面; (b) 焊缝横截面Fig. 9 Weld appearance when  $W_{\text{gap}} = 0.5 \text{ mm}$ . (a) Weld surface; (b) weld cross-section

## 4 结 论

提出了基于电弧预熔丝的激光焊方法, 研究了入射能量对焊丝熔化状态的影响以及工艺适应性, 得到以

下结论:

1) 实现了基于电弧预熔丝的激光焊方法, 焊丝被送入熔池前, 较小的电弧能量将其熔化成液态, 降低了固态焊丝对激光能量的损耗, 提高了激光能量利用率。

2) 当焊接电流较小时(30~80 A), 焊丝能稳定地熔化、填充进熔池中, 焊缝表面成形良好, 增大焊接电流有利于增加焊丝前端的熔化长度; 在电弧预熔丝激光焊中, 激光的能量主要用来形成熔池, 增加激光功率对焊丝熔化量无影响。

3) 电弧预熔丝激光焊的焊缝气孔率明显低于常规激光填丝焊的, 且对 0.5 mm 的装配间隙具有很好的适应性。

### 参 考 文 献

- [1] Yang Z B, Tao W, Li L Q, *et al.* Double-sided laser beam welded T-joints for aluminum aircraft fuselage panels: Process, microstructure, and mechanical properties[J]. *Materials & Design*, 2012, 33: 652-658.
- [2] Park Y W, Yu J, Rhee S. A study on the weld characteristics of 5182 aluminum alloy by Nd:YAG laser welding with filler wire for car bodies[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2010, 11(5): 729-736.
- [3] Sun Z, Kuo M. Bridging the joint gap with wire feed laser welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 87(1): 213-222.
- [4] Zhao Yong, Wang Qingzhao, Huang Jian, *et al.* Microstructures and properties of ultra-narrow-gap multi-pass welded joint of 50 mm turbine rotor steel by laser welding with filler wire[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(2): 0203007.  
赵 勇, 王清瑛, 黄 坚, 等. 50 mm 转子钢超窄间隙激光填丝焊接接头组织与性能[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0203007.
- [5] Wei Jing, Wang Huan, Shi Shaojian, *et al.* Microstructure and properties of fiber laser wire welded joints of 10CrSiNiCu high strength shipbuilding steel[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(3): 0303003.  
魏 菁, 王 欢, 石少坚, 等. 10CrSiNiCu 船用高强度钢光纤激光焊接接头组织和性能[J]. *中国激光*, 2016, 43(3): 0303003.
- [6] Wu Y, Cai Y, Wang H, *et al.* Investigation on microstructure and properties of dissimilar joint between SA553 and SUS304 made by laser welding with filler wire[J]. *Materials & Design*, 2015, 87: 567-578.
- [7] Salminen A S, Kujanpaa V P, Moisio T J I. Interactions between laser beam and filler metal[J]. *Welding Journal*, 1996, 75(1): 9s-13s.
- [8] Yu Yangchun. Study on the technology and filler wire melting dynamics during the laser welding with filler wire[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010: 67-83.  
余阳春. 激光填丝焊的焊丝熔入行为及工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010: 67-83.
- [9] Syed W U H, Li L. Effects of wire feeding direction and location in multiple layer diode laser direct metal deposition [J]. *Applied Surface Science*, 2005, 248(1): 518-524.
- [10] Mei Hanhua, Xiao Rongshi, Zuo Tiechuan. The study on laser welding with filler wire[J]. *Journal of Beijing Polytechnic University*, 1996, 22(3): 38-42.  
梅汉华, 肖荣诗, 左铁钊. 采用填充焊丝激光焊接工艺的研究[J]. *北京工业大学学报*, 1996, 22(3): 38-42.
- [11] Salminen A. The filler wire-laser beam interaction during laser welding with low alloyed steel filler wire [J]. *Mechanika*, 2010, (4): 67-74.
- [12] Du Hanbin, Hu Lunji, Hu Xiyuan. Technology of laser filler wire welding[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2002, 11: 60-63.  
杜汉斌, 胡伦骥, 胡席远. 激光填丝焊技术[J]. *航空制造技术*, 2002, 11: 60-63.
- [13] Peng Jin, Li Fuquan, Li Liqun, *et al.* Comparative study on laser welding with pre-melting liquid filler and conventional filler wire[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 0103003.  
彭 进, 李福泉, 李俐群, 等. 激光液态填充焊与常规激光填丝焊特性的对比研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0103003.