

激光填丝焊对熔池动态行为及焊缝成形的影响

彭进^{1,2}, 王星星¹, 李刚¹, 崔大田¹, 王孝虎²

¹华北水利水电大学机械学院, 河南 郑州 450045;

²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 通过 SiC 颗粒示踪法获得了焊丝填充对熔池表面流动的影响规律, 分析了不同的焊接工艺、焊丝填送模式和送丝角度对熔池表面波动行为及焊缝成形的影响。结果表明, 在激光自熔焊过程中, 熔池表面液态金属向后方及熔池另一侧流动, 熔池表面波动较剧烈, 焊缝表面出现凹陷缺陷; 在激光填丝焊过程中, 熔池表面金属全部表现为从前向后的快速流动, 熔池表面波动相对稳定, 焊缝表面成形良好。在激光填丝焊过程中, 焊丝的过渡模式对熔池表面稳定性有显著影响, 降低送丝角度有利于获得稳定的液桥过渡及减少焊缝气孔缺陷。

关键词 激光技术; 激光焊接; 激光填丝焊; 熔池; SiC 粒子示踪法

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1102004

Effect of Laser Welding with Filler Wire on Molten Pool Dynamic Behavior and Weld Formation

Peng Jin^{1,2}, Wang Xingxing¹, Li Gang¹, Cui Datian¹, Wang Xiaohu²

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

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

Abstract By the SiC particle tracer method, the effect rule of filler wire on the surface flow of molten pool is obtained, and the effects of different welding processes, wire feeding modes and wire feeding angles on the fluctuation behavior of the molten pool surface and weld formation are analyzed. The results show that, in the autogenous laser welding process, the liquid metal on the molten pool surface flows to the back and the other side of the molten pool, the molten pool surface fluctuates remarkably, and depression defects appear on the weld surface; in the laser welding process with filler wire, the molten pool surface metal flows rapidly from forward to backward, the molten pool surface is relatively stable, and the weld surface is well formed. In the process of laser welding with filler wire, the transition modes of filler wire have significant effects on the stability of the molten pool surface, and it is beneficial to obtaining a stable liquid bridge transition and reducing the weld hole defects by reducing the wire feeding angle.

Key words laser technique; laser welding; laser welding with filler wire; molten pool; SiC particle tracer method

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引言

激光焊接是一种高能束焊接技术, 具有能量密度高、热输入小、接头热影响区小等优点^[1]。与激光自熔焊相比, 激光填丝焊可以降低对装配间隙的苛刻要求^[2]。通过调节焊丝的化学成分、送丝速度及送丝角度等工艺参数, 可以实现焊缝组织性能的优化^[3]。激光填丝焊技术广泛应用于航空、航天^[4]及汽车^[5]等领域。

收稿日期: 2017-05-15; 收到修改稿日期: 2017-06-17

基金项目: 河南省自然科学基金(162300410191)、河南省高等学校重点科研项目(17A430021)、华北水利水电大学高层次人才科研启动基金(201705006)

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

关于激光填丝焊不同工艺参数对焊缝成形的影响已有大量研究。左铁钊^[6]对激光填丝焊工艺过程进行了深入研究,发现当入射激光和填充焊丝的夹角为 35°且填充焊丝位于激光束正下方时,通过激光填丝焊可以获得良好的焊缝成形。Yu 等^[7]研究指出,焊丝的稳定熔化、填充是保证激光填丝焊焊接稳定性的关键因素之一。

然而,关于激光填丝焊过程中熔池行为的相关研究鲜有报道,研究大多围绕激光自熔焊展开。Tao 等^[8]研究发现,当光-丝完全重叠时,焊丝熔化、过渡到熔池的时间较长,对熔池的冲击较大,焊缝成形不连续;当光-丝部分重叠时,焊丝能够稳定熔化并过渡到熔池中,熔池表面波动相对较小,焊缝成形良好。Matsunawa 等^[9-10]采用 X 射线透射高速摄像系统,研究了激光深熔焊过程的熔池匙孔动态行为。

在激光焊过程中,熔池的动态行为对焊缝成形及焊接缺陷有直接的影响,因此,有必要研究焊丝填充对熔池行为及焊缝表面形貌的影响。本文利用高速摄像系统,对焊接过程的熔池行为进行了实时监测,通过 SiC 颗粒示踪法获得了焊丝填充对熔池表面流动的影响规律。对比分析了激光填丝焊、激光自熔焊对熔池表面波动行为及焊缝成形的影响,并进一步分析了焊丝填送模式和送丝角度对熔池表面波动及焊缝成形的影响。

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,其化学成分见表 1。焊丝采用直径为 1.0 mm 的 ER 4047 铝硅焊丝。试板尺寸为 200 mm×60 mm×4 mm,在试验之前需对待焊工件进行表面擦拭、去除氧化膜等处理。由于铝合金熔池表面的反射率较高,无法采用 SiC 颗粒示踪法获得熔池表面流动行为,因此,粒子示踪试验的母材采用 304 不锈钢,试板尺寸为 200 mm×50 mm×4 mm,焊丝采用直径为 1.0 mm 的 316 L 焊丝。

表 1 6156 铝合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 6156 aluminum alloy (mass fraction, %)

Element	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

焊接试验采用的激光器为德国 IPG 公司生产的 YLS-10000 光纤激光器,最大输出功率为 10 kW,焦距为 192 mm。采用德国 Optronis 公司生产的 CamRecord 5000×2 型高速摄像机对焊接过程中焊丝的熔化、填充行为以及熔池动态行为进行实时监测,采集频率为 5000 frame·s⁻¹,配备波长为 808 nm 的半导体激光器对焊接区域进行照亮。焊接试验示意图如图 1 所示,焊接过程的工艺参数见表 2。

采用物理模拟-粒子示踪方法获得了激光自熔焊、激光填丝焊的熔池表面流动行为。选择直径为 120 μm、高熔点的 SiC 颗粒作为示踪粒子,将其放在焊接路径上,焊接过程中通过高速摄像系统实时跟踪熔池表面 SiC 颗粒的运动轨迹,从而获得激光自熔焊、激光填丝焊熔池表面的流动规律。

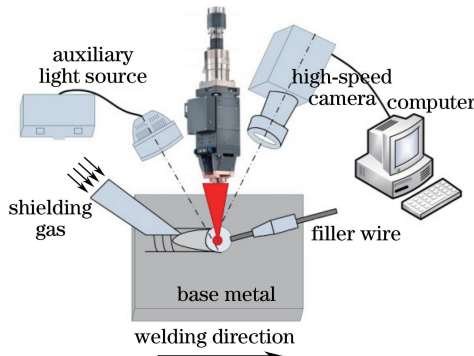


图 1 焊接试验示意图

Fig. 1 Schematic of welding experiment

表 2 焊接试验工艺参数

Table 2 Process parameters of welding experiment

Parameter	Value
Laser power /W	2700
Welding speed /($m \cdot min^{-1}$)	2
Wire feeding speed /($m \cdot min^{-1}$)	2.5
Wire feeding angle /($^{\circ}$)	15-60
Distance between laser and filler wire /mm	-1.5-0.5
Shielding gas flow rate /($L \cdot min^{-1}$)	15

3 试验结果与分析

3.1 焊丝送入对熔池表面特性的影响

3.1.1 焊丝送入对熔池表面流动行为的影响

激光自熔焊和激光填丝焊的熔池形态与流动方向的高速摄像图如图 2 所示,其相应的示踪粒子运动轨迹示意图如图 3 所示,可以看出,焊丝的加入对熔池表面的流动有比较明显的影响。在没有焊丝送入的激光自熔焊过程中,熔池表面液态金属除了向后方流动外,还有流向熔池另一侧的“回流”趋势。在激光自熔焊过程中,不锈钢表面张力的温度系数为负值,因此,在表面张力的作用下,熔池表面会出现由熔池中心向外的流动趋势。由于焊接速度较快,向外流动的液态金属在固/液界面前沿转向,液态金属重新流入到熔池的中心位置,并将表面的高温液态金属送入熔池内。熔化了的高温液态金属和冷却的高温液态金属一起被流动的液体带向熔池中心区域。因此,激光自熔焊会出现横向流动的趋势。试验结果与文献[11]的数值模拟结果一致。当在激光焊接过程中填送焊丝后,焊丝从熔池前方送进,熔化的焊丝流入熔池中,对熔池金属有冲击作用,使得熔池表面金属全部表现为从前向后的快速流动,不再有横向流动及“回流”的现象。

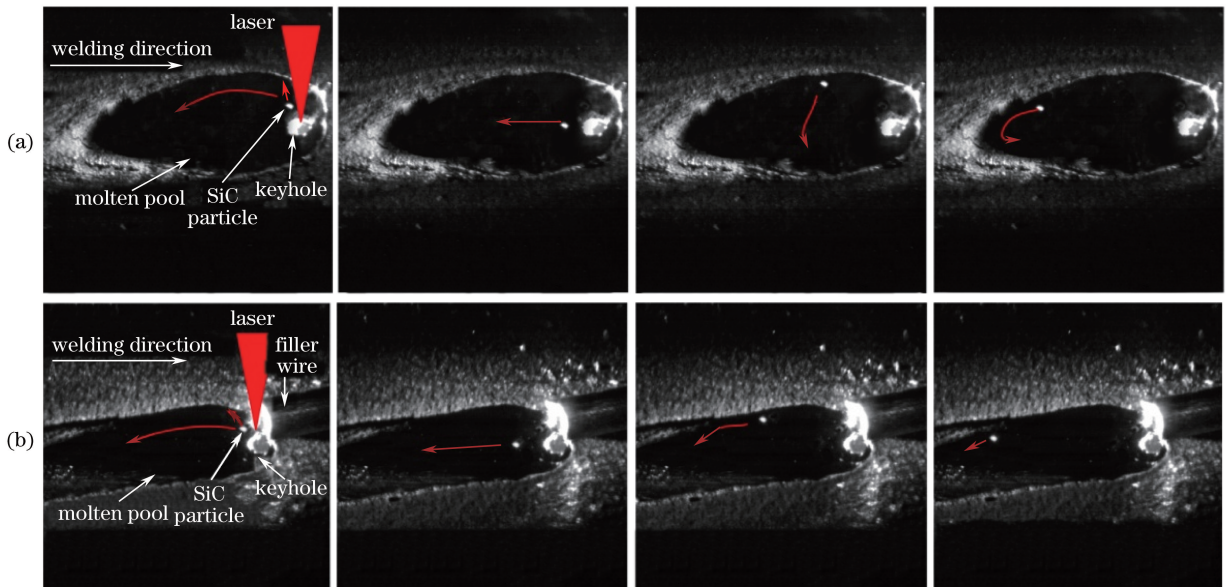


图 2 熔池表面示踪粒子运动轨迹图像。(a)激光自熔焊;(b)激光填丝焊

Fig. 2 Images of tracer particle trajectories on molten pool surface. (a) Autogenous laser welding; (b) laser welding with filler wire

3.1.2 焊丝送入对熔池表面波动状态的影响

通过高速摄像系统观察了焊丝送入对熔池表面波动状态及焊缝成形的影响。激光自熔焊熔池表面波动状态如图 4 所示。随着焊接过程的进行,匙孔后方会出现液柱,进而产生焊接飞溅。激光填丝焊的熔池表面波动状态如图 5 所示,其中焊丝与母材表面之间的夹角为 15° 。可以发现,激光填丝焊的熔池表面也会出现一定程度的波动,但与激光自熔焊的相比,熔池相对稳定。激光自熔焊和激光填丝焊的焊缝表面成形如图 6

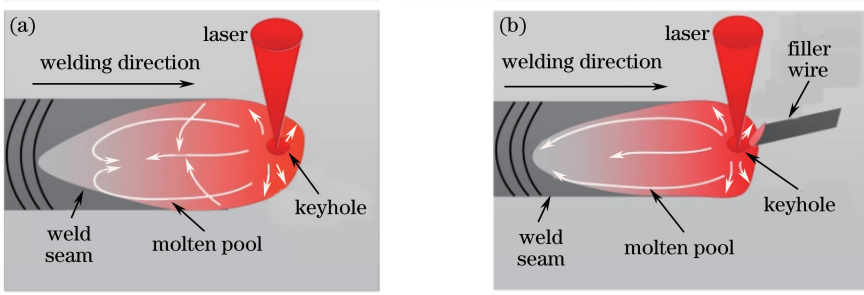


图 3 熔池表面示踪粒子运动轨迹示意图。(a)激光自熔焊;(b)激光填丝焊

Fig. 3 Schematics of tracer particle trajectories on molten pool surface. (a) Autogenous laser welding; (b) laser welding with filler wire

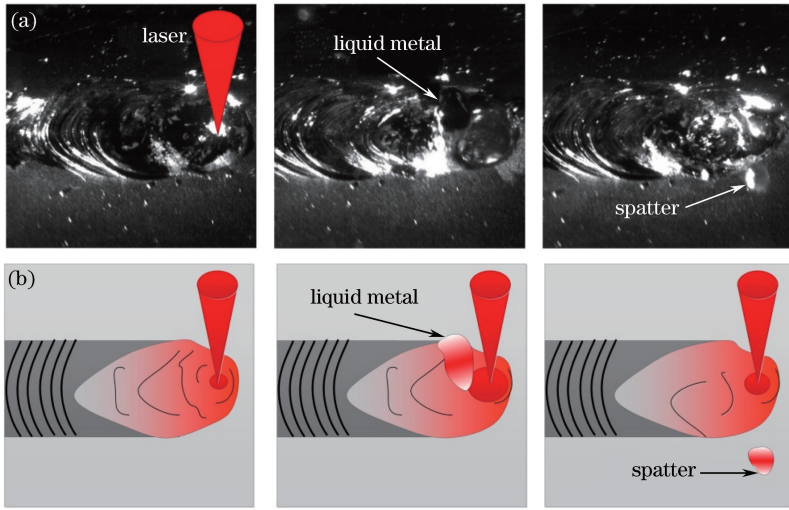


图 4 激光自熔焊熔池表面波动。(a)高速摄像图;(b)示意图

Fig. 4 Molten pool surface fluctuation in autogenous laser welding.

(a) High-speed camera image; (b) schematic

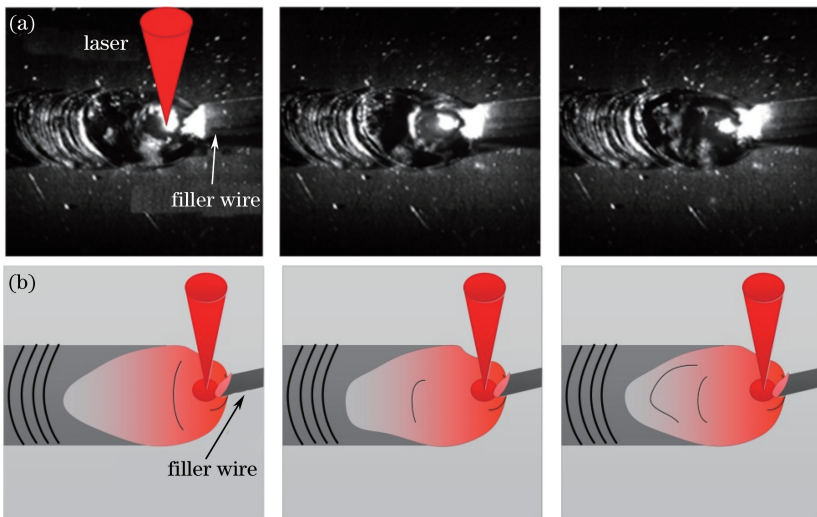


图 5 激光填丝焊熔池表面波动变化。(a)高速摄像图;(b)示意图

Fig. 5 Molten pool surface fluctuation in laser welding with filler wire. (a) High-speed camera image; (b) schematic

所示,可以发现,熔池表面的剧烈波动使激光自熔焊焊缝表面出现了凹陷缺陷;而激光填丝焊的焊缝表面成形良好,未出现焊接缺陷。

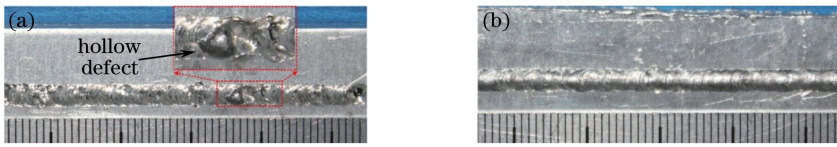


图 6 焊缝表面成形。(a)激光自熔焊;(b)激光填丝焊

Fig. 6 Weld surface appearances. (a) Autogenous laser welding; (b) laser welding with filler wire

3.2 焊丝熔化填充模式对熔池表面特性的影响

在激光填丝焊过程中,焊丝的过渡形式分为“液桥过渡”和“滴状过渡”,如图 7 所示,其光-丝间距分别为 0.5 mm 和 0.7 mm。当焊丝端部接触到母材时,熔化的焊丝在匙孔的前方不断填入熔池,此种模式称为“液桥过渡”;当焊丝端部距离母材一定距离时,焊丝端部熔化的金属不能立即填入熔池,而是在焊丝端部不断聚集,之后填入熔池中,此种模式称为“滴状过渡”。

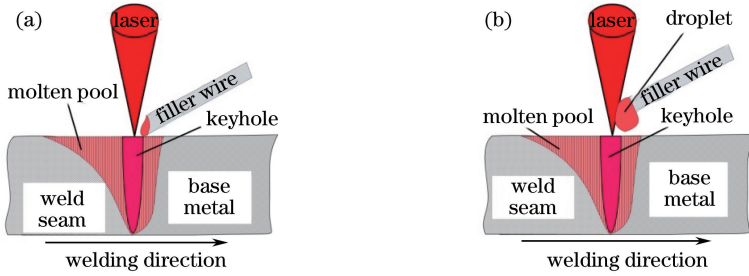


图 7 激光填丝焊焊丝过渡模式示意图。(a)液桥过渡;(b)滴状过渡

Fig. 7 Schematics of welding wire transition modes in laser welding with filler wire.

(a) Liquid bridge transition; (b) droplet transition

激光填丝焊焊丝液桥过渡的过程如图 5 所示。可以发现,在焊接过程中,焊丝熔化后送到匙孔边缘,之后以液桥过渡的形式不断地进入熔池中,熔池表面波动较小。由于铝合金的流动特性,在熔池尾部易形成成形规则、均匀的鱼鳞纹,由图 6(b)可以发现,其焊缝表面成形良好,没有出现咬边等缺陷。

激光填丝焊焊丝“滴状过渡”过程的高速摄像图像如图 8 所示。可以发现,焊丝熔化后,熔滴落入熔池中,熔池表面出现较大波动,这对焊缝的表面成形产生较大的影响。其焊缝成形如图 9 所示,可以发现焊缝表面成形不规则。

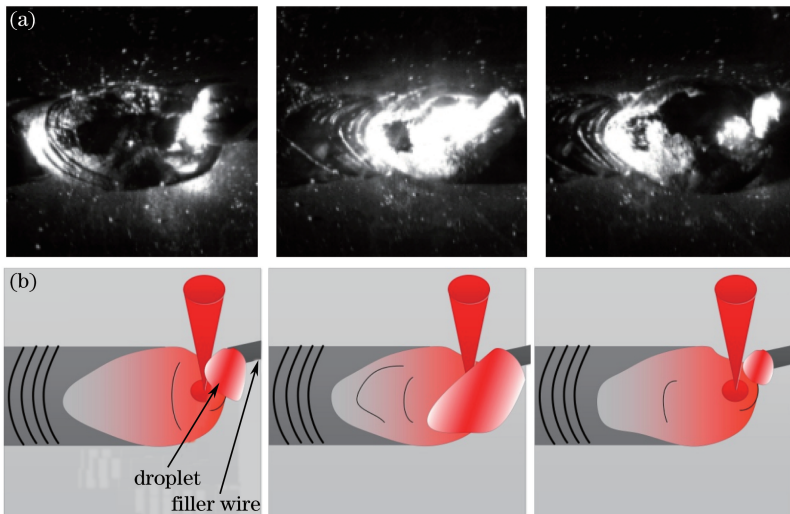


图 8 激光填丝焊滴状过渡过程。(a)高速摄像图;(b)示意图

Fig. 8 Droplet transition process in laser welding with filler wire.

(a) High-speed camera image; (b) schematic



图 9 激光填丝焊滴状过渡焊缝表面成形

Fig. 9 Weld surface appearance for droplet transition in laser welding with filler wire

3.3 焊丝送丝角度的影响

图 10、11 所示分别为送丝角度为 30° 和 60° 时焊丝填充过程的高速摄像图像, 相应的焊缝成形表面如图 12 所示。可以发现, 降低送丝角度有利于焊丝实现稳定的液桥过渡。当送丝角度为 15° 时, 熔池表面波动较小; 当送丝角度为 30° 和 60° 时, 焊丝进入熔池时, 熔池表面都会出现波动。然而, 当送丝角度为 60° 时, 随着焊丝过渡到熔池, 熔池表面波动较大, 在一定程度上影响了焊接稳定性, 由图 12 (b) 可以发现, 焊缝表面成形均匀性较差。

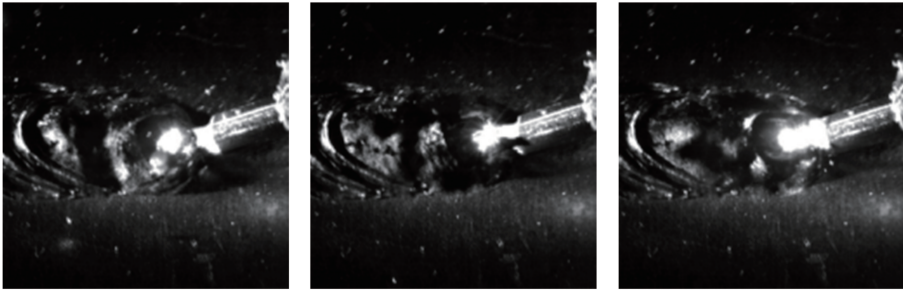


图 10 送丝角为 30° 时的熔池表面波动状态

Fig. 10 Molten pool surface fluctuation states when wire feeding angle is 30°

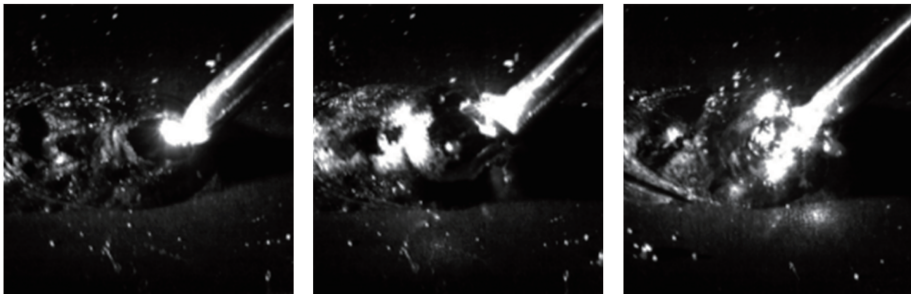


图 11 送丝角为 60° 时的熔池表面波动状态

Fig. 11 Molten pool surface fluctuation states when wire feeding angle is 60°

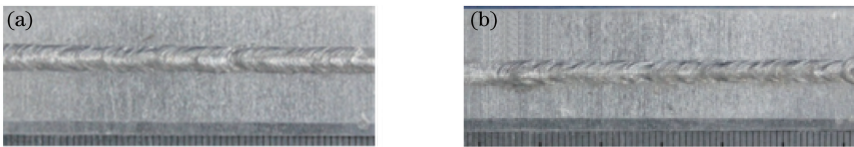


图 12 不同送丝角度下的焊缝表面成形。(a) 30° ; (b) 60°

Fig. 12 Weld surface appearances under different wire feeding angles. (a) 30° ; (b) 60°

由于铝合金具有较高的热导率、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^[12-14]。随后, 进一步对不同送丝角度下的焊缝气孔缺陷进行分析。图 13 所示为不同送丝角度下的焊缝纵截面的金相照片。可以发现, 随着送丝角度的减小, 焊缝纵截面的气孔缺陷明显减少。

通过分析可知, 在激光填丝焊过程中, 焊丝熔化、填入熔池的过程会对熔池造成一定的冲击。焊丝对熔池的冲击力 F_R 可分解为沿熔池水平方向的冲击力 F_H 和沿熔池垂直方向的冲击力 F_V , 如图 14 所示。在激光焊接过程中, 随着送丝角度的增大, 焊丝对熔池垂直方向的冲击力变强, 从而使焊接过程中熔池的表面波动更加剧烈。

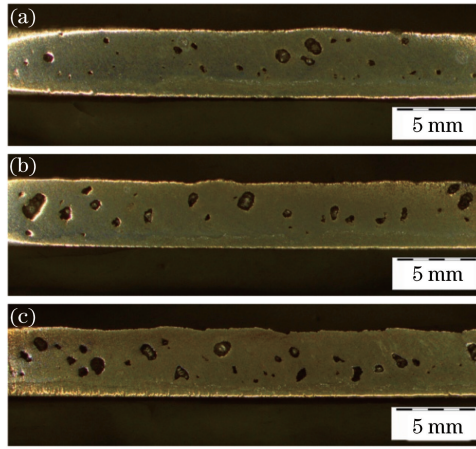


图 13 不同送丝角度下的焊缝纵截面。(a) 15°;(b) 30°;(c) 60°

Fig. 13 Longitudinal sections of welds under different wire feeding angles. (a) 15°; (b) 30°; (c) 60°

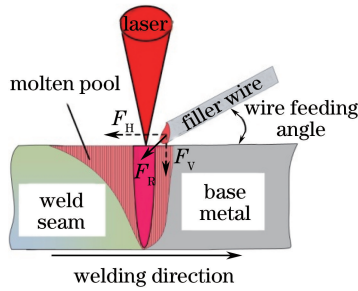


图 14 焊丝对熔池冲击力示意图

Fig. 14 Schematic of filler wire impact force on molten pool

4 结 论

利用高速摄像系统和 SiC 颗粒示踪法,研究了焊丝填充对熔池行为及焊缝表面形貌的影响,分析了焊丝填送模式和送丝角度对熔池表面波动及焊缝成形的影响规律,得到以下结论。

1) 在激光自熔焊过程中,熔池表面液态金属除了向后方流动外,还有流向熔池另一侧的趋势;激光填丝焊时,熔池表面金属全部表现为从前向后的快速流动,不再有横向流动的现象。

2) 在激光自熔焊过程中,熔池表面波动比较剧烈,焊缝表面出现了凹陷缺陷;而激光填丝焊的熔池表面波动相对稳定,焊缝表面未出现焊接缺陷。

3) 在激光填丝焊过程中,焊丝以滴状过渡形式送入熔池时,焊缝表面成形不规则;焊丝以液桥过渡的形式送入熔池时,焊缝表面成形良好;同时,降低送丝角度有利于实现稳定的液桥过渡,从而减少焊缝气孔缺陷。

参 考 文 献

- [1] Wu Shikai, Xiao Rongshi, Chen Kai. Laser welding of heavy section stainless steel plants[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(9): 2422-2425.
吴世凯, 肖荣诗, 陈恺. 大厚度不锈钢板的激光焊接[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2422-2425.
- [2] Sun Z, Kuo M. Bridging the joint gap with wire feed laser welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 87(1/2/3): 213-222.
- [3] Peng Jin, Li Liqun, Lin Shangyang, *et al.* Stability of filler melting and transfer with pre-melting liquid filler[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(7): 9-12.
彭进, 李俐群, 林尚扬, 等. 激光液态填充焊的填材熔化与过渡稳定性[J]. 焊接学报, 2016, 37(7): 9-12.
- [4] Peng J, Li L Q, Lin S Y, *et al.* High-speed X-ray transmission and numerical study of melt flows inside the molten

- pool during laser welding of aluminum alloy[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016: 1409872.
- [5] 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.
- [6] 左铁钊. 高强铝合金的激光加工[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 47-141.
- [7] Yu Y C, Huang W, Wang G Z, *et al.* Investigation of melting dynamics of filler wire during wire feed laser welding[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2013, 27(4): 1097-1108.
- [8] Tao W, Yang Z B, Chen Y B, *et al.* Double-sided fiber laser beam welding process of T-joints for aluminum aircraft fuselage panels: filler wire melting behavior, process stability, and their effects on porosity defects[J]. *Optics and Laser Technology*, 2013, 52: 1-9.
- [9] Matsunawa A, Mizutani M, Katayama S. Porosity formation mechanism and its prevention in laser welding[J]. *Welding International*, 2003, 17(6): 431-437.
- [10] Matsunawa A, Kim J D, Seto N, *et al.* Dynamics of keyhole and molten pool in laser welding[J]. *Journal of Laser Applications*, 1998, 10(6): 247-254.
- [11] Fang Junfei. Study on the mechanism of penetration mode for thin sheet laser deep penetration welding[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007: 87-100.
方俊飞. 薄板激光深熔焊接熔透模式的机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 87-100.
- [12] 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.
- [13] Xie J. Dual beam laser welding[J]. *Welding Journal*, 2002: 223-230.
- [14] Peng Jin, Li Liqun, Lin Shangyang, *et al.* Welding characteristics of aluminum alloy with pre-melting liquid filler[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35(10): 45-48.
彭进, 李俐群, 林尚扬, 等. 铝合金液态填充焊的工艺特性分析[J]. *焊接学报*, 2014, 35(10): 45-48.