

激光液态填充焊与常规激光填丝焊特性的对比研究

彭 进¹ 李福泉¹ 李俐群¹ 林尚扬^{1,2} 邓 洲¹ 张芙蓉¹

¹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

²哈尔滨焊接研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 针对激光填丝焊过程中的焊丝对入射激光能量的反射、匙孔不稳定、光丝对中精度要求高等问题,以铝合金为材料,对比研究了激光液态填充焊与激光填丝焊的填材熔化与填充特性。结果表明,激光液态填充焊中焊丝依靠电弧的作用熔化,液态金属依托底部固态焊丝的导向流入到熔池中,填充过程连续稳定,降低了焊丝对入射激光能量的反射。相比激光填丝焊,熔化的焊丝端部距离匙孔边缘较远,避免了填材对匙孔的直接冲击,而且熔池尺寸较大有利于气泡逸出,降低了铝合金气孔率,明显提高了高速焊、送丝精度的适应性。

关键词 激光技术; 激光焊接; 液态填充焊; 电弧熔丝; 铝合金

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0103003

Comparative Study on Laser Welding with Pre-Melting Liquid Filler and Conventional Filler Wire

Peng Jin¹ Li Fuquan¹ Li Liqun¹ Lin Shangyang^{1,2} Deng Zhou¹ Zhang Furong¹

¹State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China

²Harbin Welding Institute, Harbin, Heilongjiang 150080, China

Abstract The laser welding with pre-melting liquid filler is developed to solve the problems, such as the reflection of incident laser energy by filler wire, and unstable keyhole in the process of laser welding with filler wire. The melting and filling characteristics of aluminum alloy filler material about laser welding with pre-melting liquid filler and filler wire are comparatively investigated. The results show that, in laser welding with pre-melting liquid filler, the filler wire is melt by arc, the filling stage is continuous and stable due to liquid metal wire relying on the guide role of the solid-state wire on the bottom inflow to the weld pool. It reduces the reflection of incident laser welding energy. Compared with laser welding with filler wire, the liquid filling material is far from keyhole edge so that it avoids the direct impact of fill material to the keyhole and the molten pool has a big size for the escape of bubbles. So it will help reducing the aluminum porosity. Stability of keyhole is improved in high speed welding. And it significantly improves the adaptability about the high-speed welding and wire feeding accuracy.

Key words laser technique; laser welding; pre-melting liquid filler; filler wire melted by arc; aluminum alloy

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

收稿日期: 2014-06-20; 收到修改稿日期: 2014-07-22

基金项目: 国家自然科学基金(51175115)

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

导师简介: 林尚扬(1932—),男,教授,博士生导师,中国工程院院士,主要从事激光焊接、水下焊接技术及焊接自动化等方面的研究。E-mail: sylin2020@163.com

* 通信联系人。E-mail: liliquan@hit.edu.cn

1 引 言

目前,激光填丝焊广泛应用于拼板对接、T型接头构件的角焊缝焊接、厚板焊接等领域^[1]。激光填丝焊不仅可以提高间隙的适应性,改变焊缝合金成分,还能改善激光与工件的能量耦合性。其焊缝表面比激光自熔焊更光滑、均匀,尤其是在焊接铝合金时^[2-4]。

不过,激光填丝焊对焊丝的对中精度和方向性要求较为严格,如Yang等^[5]通过对铝合金激光填丝焊的稳定性研究,指出只有采用前送丝方式,且焊丝在激光束前0.5~2.0 mm范围内时,才可获得稳定焊缝成型。此外,焊丝与熔滴对激光的反射作用也不容忽视,Orozco等^[6-8]研究了焊丝对激光能量及效率的影响,发现送丝方向、送丝角度和送丝位置均对入射激光有一定的反射,由焊丝反射带来的激光能量波动对焊接过程稳定性的影响不容忽视。

为了改善上述问题,杜汉斌等^[9-10]采用热丝激光焊来减少消耗在焊丝上的能量,提高焊接过程的稳定性,降低焊缝的不合格率,提高焊接速度。在微连接领域,Fuerschbach等^[11]采用微弧能量来预先熔化0.25 mm的焊丝,并利用振动方式辅助熔滴过渡到熔池里。

为了解决激光填丝焊中焊材的稳定熔化和填充问题,提出了激光液态填充焊的思想,采用电弧提前预熔焊丝,让填材以液态方式流入熔池中,以避免熔化焊丝对激光能量的影响,减小填材对熔池和匙孔的直接冲击,提高焊接稳定性。实验选择高反射率的铝合金为研究对象,对比研究了激光液体填充焊与激光填丝焊的焊丝预熔与液态填充行为,以及两种工艺对高速焊、送丝精度的适应性。

2 实验条件

2.1 实验材料

实验材料为6156铝合金,为Al-Mg-Si系,其化学成分如表1所示。填充焊丝采用与母材相匹配的ER4047铝硅焊丝,直径为1.0 mm。试板尺寸为200 mm×50 mm×2.0 mm、200 mm×50 mm×1.5 mm,焊前对工件表面进行严格的化学清洗。

表1 母材6156铝合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of base metal Al6156 (mass fraction, %)

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

2.2 实验方案

实验原理如图1所示,利用钨极惰性气体保护焊(TIG)在工件与电极之间建立微弧,在激光前方预先熔化焊丝,激光能量则主要用于建立熔池,高速摄像系统对激光液态填充焊和激光填丝焊过程中焊丝的熔化、填充行为进行实时监测。

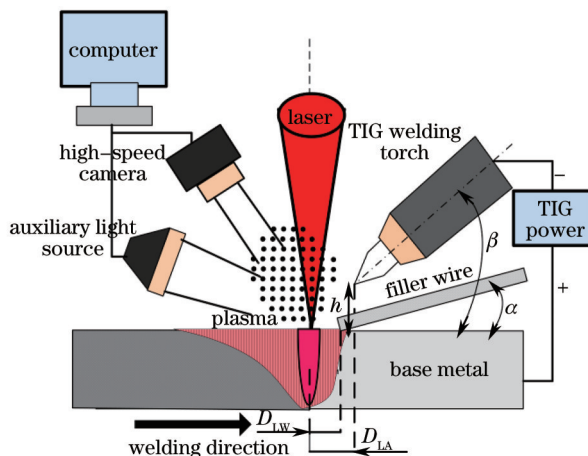


图1 焊接系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of welding system

实验采用德国 IPG 公司生产的光纤激光器,最大输出功率为 10 kW,波长为 1.06 μm ,焦距为 192 mm;采用奥地利 Fronius 公司的 TIG 焊机预熔焊丝;高速摄像系统,型号为 Camrecord 5000 \times 2,采集频率为 5000 frame/s;配波长 808 nm 的 CAVIL UX HF 半导体激光为辅助光源。焊接过程中激光加工头和摄像机位置固定,焊接工件随行走机构移动,摄像中心始终位于熔池和电弧之间。为减小熔化后的液态填材对熔池的冲击,采用较小的送丝角度($\alpha < 30^\circ$)送进,使得液态填材从焊丝端部顺畅流入熔池,而非逐滴射入熔池。实验的工艺参数如表 2 所示。

表 2 实验工艺参数

Table 2 Technologic parameters of welding experiment

Welding parameters	Values
Laser power /W	1600 ~ 5000
Welding current /A	30 ~ 130
Welding speed V_w /(m/min)	2 ~ 15
Wire feeding speed V_f /(m/min)	2 ~ 10
Filler wire-base metal angle α /($^\circ$)	20
TIG welding torch-base metal angle β /($^\circ$)	70
Tungsten height h /mm	3
Laser-filler wire distance D_{LW} /mm	2.0
Laser-TIG welding torch distance D_{LA} /mm	3

3 实验结果与分析

3.1 填材的熔化填充特性

3.1.1 填材的熔化特性

图 2(a)为常规激光填丝焊,在没有电弧预熔的条件下,焊丝以固态形式直接送入到激光匙孔边缘,在激光束能量 P_L 、激光等离子体热辐射 P_P 以及熔池的热传导和对流 P_M 作用下直接熔化。

图 2(b)为激光液态填充焊,在电弧的能量 P_A 作用下,焊丝的上部熔化,下部依然保持固态,液态金属依托底部固态焊丝的导向流入到熔池中,焊丝以这种模式进行填充,过程较为稳定、连续,但需要借助熔池的热传导和对流 P_M 来熔化焊丝的底部。

常规激光填丝焊的预熔状态实物图如图 3(a)所示。激光液态填充焊的预熔状态实物图如图 3(b)所示。

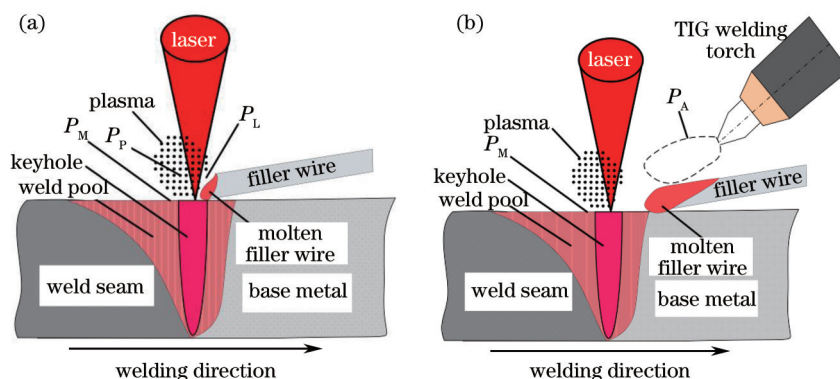


图 2 焊丝预熔状态示意图。(a) 激光填丝焊; (b) 激光液态填充焊

Fig.2 Schematic diagram of filler wire pre-melting. (a) Laser welding with filler wire; (b) laser welding with pre-melting liquid filler

3.1.2 填材填充对熔池和匙孔的影响

图 4 分别为焊接速度为 2 m/min 时的激光液态填充焊和激光填丝焊的熔池的尺寸。激光液态填充焊,由于焊丝依靠电弧的能量熔化,而且液态填材流入熔池后也带给熔池一部分热量,因此熔池的尺寸大于常规激光填丝焊的熔池尺寸,这样有利于匙孔稳定及气泡的排出。

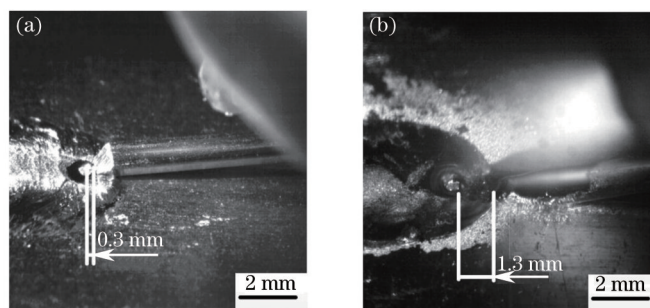


图3 焊丝预熔状态。(a) 激光填丝焊; (b) 激光液态填充焊($P=1.8\text{ kW}$, $I=50\text{ A}$, $V_w=2\text{ m/min}$, $V_f=2\text{ m/min}$)
Fig.3 State of filler wire pre-melting. (a) Laser welding with filler wire; (b) laser welding with pre-melting liquid filler
($P=1.8\text{ kW}$, $I=50\text{ A}$, $V_w=2\text{ m/min}$, $V_f=2\text{ m/min}$)

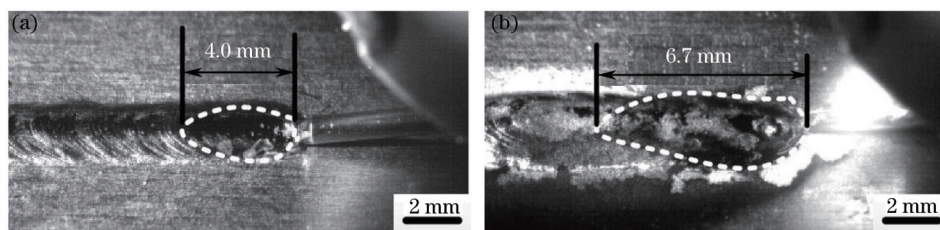


图4 两种填充模式的熔池尺寸。(a) 激光填丝焊; (b) 激光液态填充焊($P=1.8\text{ kW}$, $I=50\text{ A}$, $V_w=2\text{ m/min}$, $V_f=2\text{ m/min}$)
Fig.4 Molten pool size by two kinds of filling mode. (a) Laser welding with filler wire; (b) laser welding of pre-melting liquid filler
($P=1.8\text{ kW}$, $I=50\text{ A}$, $V_w=2\text{ m/min}$, $V_f=2\text{ m/min}$)

经测量,激光液态填充焊中填材距激光束轴线的距离较激光填丝焊远(激光液态填充焊为1.3 mm,激光填丝焊为0.3 mm,如图3所示),减低了填材对匙孔的直接冲击,提高了激光匙孔稳定性。而且填材以液态形式填充进熔池,降低了激光能量因反射损失造成的不稳定性,亦提高了激光匙孔稳定性。

激光匙孔的大小直接影响着焊缝气孔率的高低,从而影响焊缝的质量。为了对比激光液态填充焊和激光填丝焊匙孔大小,测量了足够长时间内两种工艺条件下填材填充过程中匙孔尺寸大小随时间的变化,绘成折线,如图5所示。填充过程中,随时间变化,激光液态填充焊的匙孔始终处于张开状态,这表明匙孔很稳定,这样有利于气泡逸出,进而能够降低气孔率。而常规激光填丝焊过程中,随着时间的变化,匙孔出现了闭合。图6(a)和(b)分别为常规激光填丝焊匙孔闭合、激光液态填充焊匙孔张开的图像。

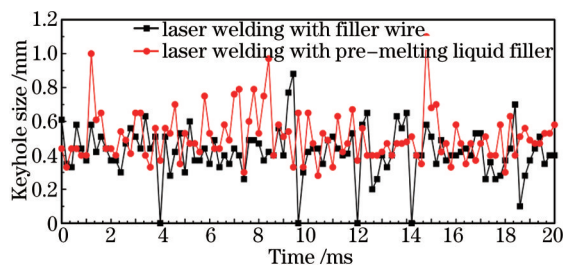


图5 匙孔尺寸随时间变化图($V_w=2\text{ m/min}$)
Fig.5 Keyhole size variation with time ($V_w=2\text{ m/min}$)

光纤激光焊接一般要满足高速焊接($V_w>3\text{ m/min}$)的条件,图7和图8分别为激光高速焊不同焊接速度下,激光填丝焊、激光液态填充焊的熔池的尺寸。两种工艺下的熔池尺寸变化如图9所示。可见,随着焊接速度的提高,激光液态填充焊、激光填丝焊的熔池的尺寸都变大,但高速焊相同工艺参数下,激光液态填充焊的熔池尺寸要比激光填丝焊的熔池尺寸大,这主要是因为液态填充焊利用电弧熔化焊丝,降低了激光因熔化焊丝造成的激光能量的损耗以及固态焊丝对激光能量的反射,而且焊丝熔化成液态金属本身也带有热量,流入熔池后增加了熔池的热输入。

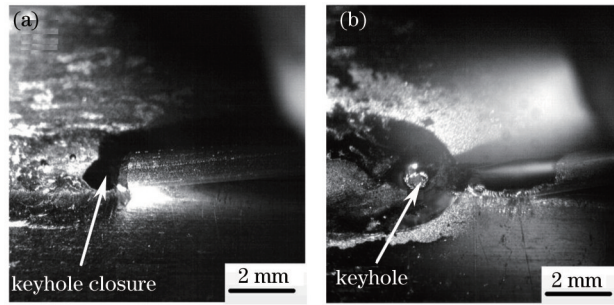


图6 匙孔状态。(a) 激光填丝焊; (b) 激光液态填充焊

Fig.6 State of keyhole. (a) Laser welding with filler wire; (b) laser welding of pre-melting liquid filler

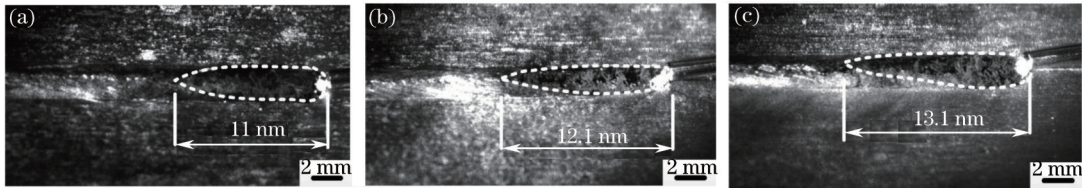


图7 激光填丝焊高速焊熔池形貌。(a) $V_w=6$ m/min, $P=3.6$ kW, $V_f=6.0$ m/min; (b) $V_w=8$ m/min, $P=4.0$ kW, $V_f=7.0$ m/min; (c) $V_w=10$ m/min, $P=4.2$ kW, $V_f=8.0$ m/min

Fig.7 Molten pool appearances of high-speed welding by laser welding with filler wire. (a) $V_w=6$ m/min, $P=3.6$ kW, $V_f=6.0$ m/min; (b) $V_w=8$ m/min, $P=4.0$ kW, $V_f=7.0$ m/min; (c) $V_w=10$ m/min, $P=4.2$ kW, $V_f=8.0$ m/min

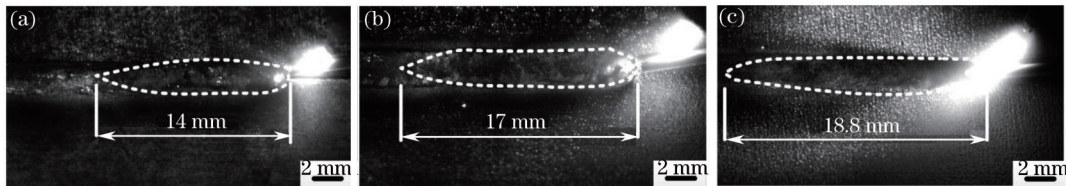


图8 激光液态填充焊高速焊熔池形貌。(a) $V_w=6$ m/min, $P=3.6$ kW, $V_f=6.0$ m/min, $I=90$ A; (b) $V_w=8$ m/min, $P=4.0$ kW, $V_f=7.0$ m/min, $I=100$ A; (c) $V_w=10$ m/min, $P=4.2$ kW, $V_f=8.0$ m/min, $I=110$ A

Fig.8 Molten pool appearances of high-speed welding by laser welding of pre-melting liquid filler. (a) $V_w=6$ m/min, $P=3.6$ kW, $V_f=6.0$ m/min, $I=90$ A; (b) $V_w=8$ m/min, $P=4.0$ kW, $V_f=7.0$ m/min, $I=100$ A; (c) $V_w=10$ m/min, $P=4.2$ kW, $V_f=8.0$ m/min, $I=110$ A

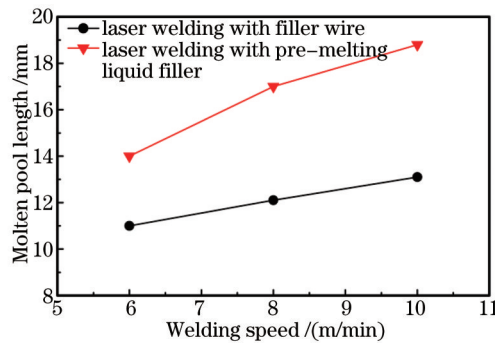


图9 不同焊接速度下的熔池尺寸

Fig.9 Molten pool size of different welding speeds

为了分析高速焊情况下匙孔的稳定性,对比分析了焊接速度为 10 m/min 时,激光填丝焊、激光液态填充焊匙孔尺寸随焊接时间变化,如图 10 所示。填充过程中,随时间变化,激光填丝焊、激光液态填充焊的匙孔都出现了不同程度的波动,但匙孔始终处于张开状态,这表明匙孔很稳定。而且由 Katayama 等^[12]的研究证明:尽管小孔在多数焊接条件下总是振荡的,但是在焊接速度很高时,小孔是能够稳定且不塌陷的。结合本实验研究结果可知,高速焊时由于匙孔的稳定性提高,填材在送过程中对匙孔的影响减弱。

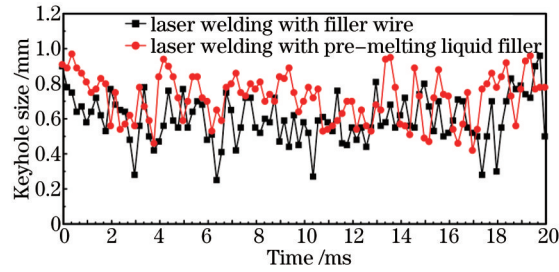


图 10 高速焊匙孔尺寸随时间变化图($V_w=10$ m/min)

Fig.10 Keyhole size variation with time by high speed welding ($V_w=10$ m/min)

图 11 为焊接速度为 10 m/min 时,激光填丝焊焊丝熔化、填充过程。焊接开始时,激光斑点和焊丝的送入方向在一条直线上,随着焊接时间的进行,焊丝在激光的能量作用下,开始熔化,但由于送丝速度较高,焊丝在连续送入过程出现轻微的波动就容易造成焊丝偏离焊接方向,如图 11(c)所示。可见对高速焊时,激光填丝焊对焊丝的波动适应性较差,虽然焊接开始时激光和焊丝已经对中,但极易出现焊接过程的光丝偏离的现象,严重时会引起焊接缺陷。为了对比分析激光液态填充焊对高速焊接的适应性,实时监测了高速焊相同工艺参数下的电弧熔化焊丝、液态金属填充进入熔池的过程,如图 12 所示。在焊接的初始阶段,焊丝在电弧的作用下熔化,随着焊接时间的进行,当接触到熔池边缘后,依靠表面张力,液态金属能稳定地流入熔池中,整个焊接过程比较稳定。对于光纤激光焊接高速焊接,利用激光吸引压缩电弧的作用,可实现电弧稳定的熔化焊丝,从而提高热效率。

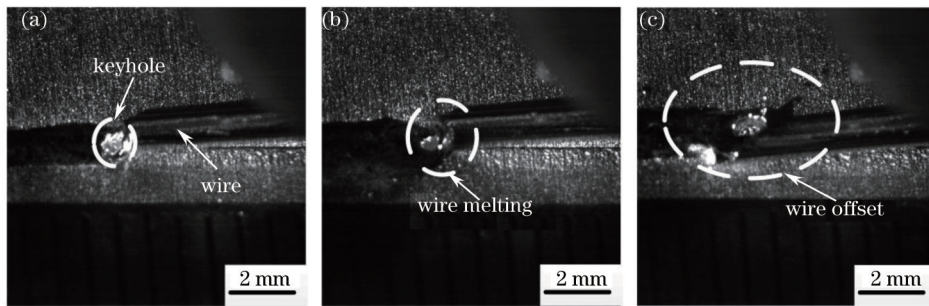


图 11 激光填丝焊。(a) T_0+0 ms; (b) T_0+4 ms; (c) T_0+15 ms ($V_w=10$ m/min, $P=4.2$ kW, $V_f=8.0$ m/min)

Fig.11 Laser welding with filler wire. (a) T_0+0 ms; (b) T_0+4 ms; (c) T_0+15 ms ($V_w=10$ m/min, $P=4.2$ kW, $V_f=8.0$ m/min)

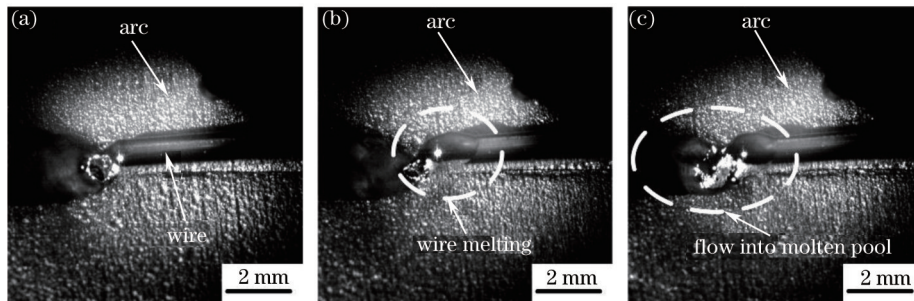


图 12 激光液态填充焊。(a) T_0+0 ms; (b) T_0+4 ms; (c) T_0+15 ms ($V_w=10$ m/min, $P=4.2$ kW, $V_f=8.0$ m/min, $I=110$ A)

Fig.12 Laser welding of pre-melting liquid filler. (a) T_0+0 ms; (b) T_0+4 ms; (c) T_0+15 ms

($V_w=10$ m/min, $P=4.2$ kW, $V_f=8.0$ m/min, $I=110$ A)

分析认为,常规激光填丝焊,焊丝需要激光的能量来熔化,因此激光高速焊时,随着焊接速度的增大,送丝速度也增大,这样激光熔丝消耗的能量必然增加,此时焊接过程就可能变得不稳定;激光液态填充焊,由于激光的能量主要用来形成熔池,电弧的能量主要用来熔化焊丝,即焊丝熔化和焊接形成熔池是相对独立的两个过程,随着焊接速度的增大,送丝速度、熔丝电流也将增大,因此焊丝不会损耗激光的能量,焊丝在电弧能量的作用下熔化,液态金属与熔池接触后,表面张力是促进液态金属过渡到熔池的力,能实现稳定的填充,因此不会对焊接过程的稳定性造成影响。

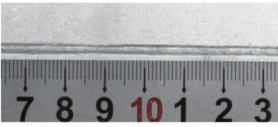
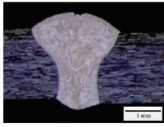
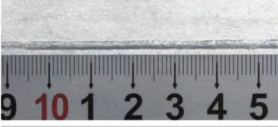
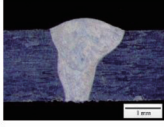
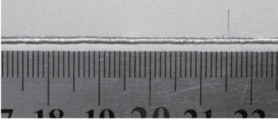
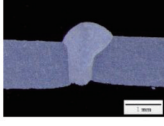
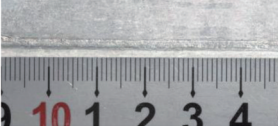
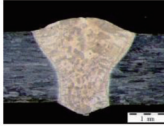
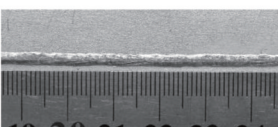
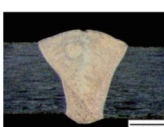
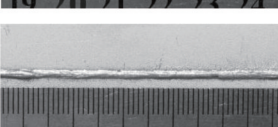
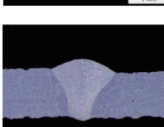
3.2 填材填充的工艺特性比较

3.2.1 高速焊焊缝成形特性

激光填丝焊时,由于激光熔化焊丝会消耗一部分激光的能量,而且随着送丝速度的增加,对光丝的对中精度要求更加苛刻。为了分析激光液态填充焊对高速焊的适应性,对比分析了激光填丝焊和激光液态填充焊焊接高反射率铝合金的焊缝成形。焊缝横截面形貌和焊缝表面成形可以体现焊接过程的稳定性,焊接过程越稳,则焊缝成形越美观,焊缝横截面越对称。通过对比不同焊接速度下的焊缝表面、横截面形貌(见表3)可以看出,焊缝的表面成形良好,但随着焊接速度的增加,激光液态填充焊的焊缝截面面积是成规则比例减小的,其形貌变化不大;而激光填丝焊,当焊接速度大于10 m/min时,由于送丝波动等原因,激光填丝焊容易偏丝,焊缝成形不良,出现焊缝不对称的现象。而且到15 m/min焊接速度时,出现焊缝背面咬边和余高不足的缺陷。

表3 不同焊接速度下的焊缝表面与截面形貌

Table 3 Weld appearances and cross sections of different welding speeds

Filling modes	Parameters	Appearances	Cross sections
Laser welding with filler wire	$V_w=8$ m/min, $P=4.0$ kW, $V_f=7.0$ m/min		
Laser welding with filler wire	$V_w=10$ m/min, $P=4.2$ kW, $V_f=8.0$ m/min		
Laser welding with filler wire	$V_w=15$ m/min, $P=4.9$ kW, $V_f=9.5$ m/min		
Laser welding of pre-melting liquid filler	$V_w=8$ m/min, $P=4.0$ kW, $V_f=7.0$ m/min, $I=100$ A		
Laser welding of pre-melting liquid filler	$V_w=10$ m/min, $P=4.2$ kW, $V_f=8.0$ m/min, $I=110$ A		
Laser welding of pre-melting liquid filler	$V_w=15$ m/min, $P=4.9$ kW, $V_f=9.5$ m/min, $I=130$ A		

3.2.2 对气孔的改善

气孔问题是铝合金激光填丝焊的主要问题^[13-14],对焊接速度为2 m/min成形良好的焊缝进行X射线气孔探伤,用Matlab软件编制程序,对X射线获得的结果进行图像处理,计算气孔总面积占焊缝面积的百分比 f ,其计算方法为

$$f = \frac{\sum S_a}{S_w} \times 100\% \quad (1)$$

式中 S_a 为气孔面积, S_w 为焊缝面积。单道焊缝的气孔率如表4所示,可知激光液态填充焊的焊缝气孔率较激光填丝焊的焊缝气孔率低,分析认为激光液态填充焊时,填材以液态沿熔池边缘填入,而且与匙孔边缘的距离较大,因此对激光形成的匙孔冲击小,从而提高匙孔稳定性,有利于熔池中气泡的浮出;而且激光液态填充焊时,熔池尺寸较大,从而降低了焊缝的冷却时间,有利于气泡在焊缝凝固前有充足的时间逃逸。

表4 不同熔丝模式下的气孔率

Table 4 Porosity rate by different fuse mode

Filling modes	X-ray inspection and image analysis	f/%
Laser welding with filler wire		0.52
Laser welding with pre-melting liquid filler		0.08

3.2.3 对送丝精度的适应性

激光填丝焊过程,由于激光束的光斑直径很小(0.2 mm),本实验的焊丝直径为1.2 mm,因此容易造成焊丝与激光错位不对中的情况,影响激光对焊丝的熔化及稳定填充,当焊丝依靠电弧预熔时,可大大改善对填送精度的要求。图13为光丝对中偏移的示意图。当光丝偏置为1.0 mm时,如图14(a)所示,激光液态填充焊缝,成形良好;由于电弧预熔成液态的焊丝端部直径大,液态填充容易接触过渡到熔池,且黏度小、流动性好,在熔池中铺展均匀,焊缝成形美观。而激光填丝焊中,焊丝主要依靠激光束的能量熔化,而激光束的光斑直径很小,光丝偏置稍大时,焊丝便熔化不充分,所得焊缝成形差。图14(b)左半部分为偏置0.5 mm激光填丝焊焊缝,焊缝表面成形差,焊缝边缘焊丝未完全熔化。因此,激光液态填充焊较激光填丝焊对光丝偏移适应性好,降低了对送丝精度的要求。

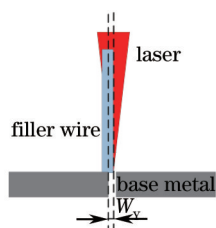


图13 光丝对中偏移示意图

Fig.13 Schematic of laser and wire offset

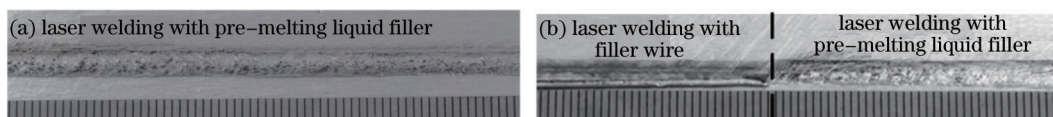


图14 光丝偏置焊缝成型。(a) $W_y=1.0$ mm; (b) $W_y=0.5$ mm ($V_w=2$ m/min, $P=1800$ W, $V_f=2$ m/min, $I=50$ A)

Fig.14 Shape of laser beam and wire offset. (a) $W_y=1.0$ mm; (b) $W_y=0.5$ mm ($V_w=2$ m/min, $P=1800$ W, $V_f=2$ m/min, $I=50$ A)

4 结 论

1) 基于激光液态填充焊方法,焊丝依靠电弧的作用熔化,液态金属依托底部固态焊丝的导向流入到熔池中,填充过程连续稳定,降低了焊丝对入射激光能量的反射。

2) 通过对比分析电弧预熔焊丝激光焊和激光填丝焊熔池、匙孔特性发现,相比激光填丝焊,熔化的焊丝端部距离匙孔边缘较远避免了填充对匙孔的直接冲击,而且熔池尺寸大,有利于提高匙孔稳定性及气泡逸出,降低了铝合金气孔率,高速焊时匙孔的稳定性提高,匙孔一直处于张开状态。

3) 激光液态填充焊能稳定地熔化焊丝,很好地满足高效率、高速度焊接的要求,当焊接速度为15 m/min时焊缝成形良好,而激光填丝焊出现焊缝背面咬边和余高不足的缺陷。此外降低了光丝的对中精度,允许的最大光丝对中偏移为1.0 mm。

参 考 文 献

1 Chen Yanbin, Yang Zhibin, Tao Wang, et al.. Microstructure characteristics and mechanical properties of double-sided laser beam

- welded aluminum alloy T-joints[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0503009.
- 陈彦宾, 杨志斌, 陶 汪, 等. 铝合金 T 型接头双侧激光同步焊接组织的特征及力学性能[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0503009.
- 2 Zhai Yufeng, Huang Jian, Li Min, *et al.*. Research on high speed high power CO₂ laser welding of 6061-T6 Aluminum with filler wire[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0503001.
- 翟玉峰, 黄 坚, 李 敏, 等. 6061-T6 铝合金高速高功率 CO₂ 激光填丝焊接性研究[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0503001.
- 3 U Dilthey, D Fuest, W Scheller. Laser welding with filler wire[J]. Optical and Quantum Electronics, 1995, 27(12): 1181-1191.
- 4 Yang Zhibin, Tao Wang, Liu Shen, *et al.*. Study on the characteristics of double-sided laser beam welding for T-joints[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0503007.
- 杨志斌, 陶 汪, 刘 申, 等. T 型接头双侧激光同步焊接特性研究[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0503007.
- 5 J Yang, X Y Li, S L Gong, *et al.*. Study on the stability of laser welding process with filler Wire[C]. The 4th Pacific International Conference on Applications of Lasers and Optics, 2010, 34:14-18.
- 6 N J Orozco, P A Blomquist, R B Rudy. Real-time control of laser-hybrid welding using weld quality attributes[C]. The 23rd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, 2004. 1-10.
- 7 A Salminen. The filler wire-laser beam interaction during laser welding with low alloyed steel filler wire[J]. Mechanika, 2010, 4(84): 67-74.
- 8 A Salminen. Effect of welding parameters on the efficiency and energy distribution during laser welding with filler wire[C]. The 20th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, 2001, 10: 409-418.
- 9 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.
- 10 Liu Yajing, Song Bingxin, Fan Guanghui. Optimization analysis and experimental study of laser hot wire welding technology parameters[J]. Applied Laser, 2013, 33(6): 606-611.
- 刘雅静, 宋丙新, 范光辉. 激光热丝焊接工艺参数的优化分析与实验研究[J]. 应用激光, 2013, 33(6): 606-611.
- 11 P W Fuerschbach, D L Duck, L E Bertram, *et al.*. Laser Assisted Micro Wire GMAX and Droplet Welding [R]. New Mexico: Sandia National Laboratories, 2002.
- 12 S Katayama, Y Kawahito. Elucidation of phenomena in high power fiber laser welding, development of prevention procedures of welding defects[C]. SPIE, 2009, 7195: 71951.
- 13 J Xie. Dual beam laser welding[J]. Welding Journal, 2002, 81(10): 223-230.
- 14 A Haboudou, P Peyre, A B Vannes, *et al.*. Reduction of porosity content generated during Nd:YAG laser welding of A356 and AA5083 aluminium alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 363(1): 40-52.

栏目编辑: 张 雁