

热源角度对 6A01 铝合金激光-MIG 复合焊成形及气孔的影响

韩晓辉¹, 张志毅¹, 马国龙¹, 吴来军^{2,3}, 宋晓国^{2,3}, 王厚勤², 檀财旺^{2,3*}

¹中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111;

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;

³哈尔滨工业大学(威海)山东省特种焊接技术重点实验室, 山东 威海 264209

摘要 采用激光-MIG 复合焊接对轨道交通铝合金型材进行焊接研究,从焊接成形、气孔缺陷和熔池行为等方面研究了热源与焊接方向的夹角对于焊接特性的影响。结果表明,增大激光与焊接方向的夹角可使熔深、熔宽降低,当激光夹角从 82.5°增加至 110°时,熔深下降了 50%,熔宽下降了 25%,增大热源角度有利于焊缝中气孔逸出,当激光角度由 82.5°增大至 97.5°时,焊缝气孔率由 3%下降至 0%,增大电弧角度也有利于减少气孔。不同热源角度下熔滴过渡方式均为射滴过渡,增大激光和电弧与焊接方向的夹角会促使熔池变长。Fluent 模拟结果说明热源夹角影响能量传播,增大激光角度会减弱能量向深度方向的传播,增大电弧角度会扩大其加热范围,进而增加熔池长度,提升熔池存在时间,有利于气孔排除。

关键词 激光技术; 高速列车; 铝合金型材; 激光-MIG 复合焊; 热源角度; 焊接特性

中图分类号 TG 456.7

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0202020

1 引言

6A01 铝合金属于 Al-Mg-Si 热处理强化铝合金,它兼具 4xxx 和 5xxx 系列铝合金的优点,具有良好的焊接性、耐腐蚀性、成型性和强度,被广泛应用于轨道列车、航空航天及船舶等领域^[1-2]。传统熔化极惰性气体保护焊(MIG)是轨道交通领域铝合金构件的主要连接方法,但因其热输入大、焊接速度低,存在焊接变形大、接头软化和生产效率低等缺点^[3]。近年来,新兴的激光焊接技术能量密度高、焊接速度快、焊后变形小,相对 MIG 焊接有一定优势,但是其搭桥能力差,对焊接装配要求极高。激光-MIG 复合焊兼具激光焊和 MIG 焊的优点,同时弥补了各自的不足,正逐渐成为一种优质高效的制造铝合金车体技术^[4]。

目前,激光-电弧复合焊技术在工业领域内已有许多应用实例,尤其是在轨道列车和船舶制造领域。

为了在实际应用中获得高质量的复合焊接头,国内外学者对于激光-MIG 复合焊工艺及接头性能开展了大量研究。雷正龙等^[5]研究了热源先导方式对复合焊接头的影响,结果发现,激光先导时气孔大而少,电弧先导时许多小气孔聚集在焊缝底部,激光先导有利于气孔逸出。赵昕等^[6]研究了工艺参数对 6082 铝合金激光复合焊气孔缺陷的影响,结果表明光丝间距过大或过小都会增加焊缝中的气孔数量,光丝间距为 3 mm 时焊缝中无气孔。Faraji 等^[7]对比分析了 2198 铝合金激光焊与激光-电弧复合焊成形。激光与电弧热源的耦合作用有效解决了铝合金高反射率问题,熔深大大增加,并且随着激光占比增加,热影响区明显缩小。何双等^[8]探究了保护气体成分对 A7N01 铝合金激光-MIG 复合焊的影响。实验表明使用氦-氩混合保护气可以抑制焊缝气孔缺陷,当氦气比例超过 50% 以后焊缝气孔率低于 1%。王红阳等^[9]开展了 6061 铝合金激光-电弧复

收稿日期: 2021-06-15; 修回日期: 2021-07-07; 录用日期: 2021-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(52074097, 52005132)

通信作者: *tancaiwang@hitwh.edu.cn

合焊接成形方面的研究。规律显示,增加焊接电流在一定程度上增强匙孔稳定性,从而减少焊缝中的工艺型气孔。Casalino 等^[10]研究激光与电弧的能量比例对 5754 铝合金复合焊的影响规律。研究发现通过增加激光的能量占比,在一定范围内可以有效地减少焊缝气孔率并增大熔深,获取更稳定的焊接过程。Zhao 等^[11]开展了 5A06 铝合金激光-电弧复合焊,激光功率提高可以增加匙孔的稳定性从而减少工艺型气孔,但可能导致合金元素烧损增加冶金型气孔。白利兵等^[12]研究了 6082 铝合金激光复合焊接头性能,分析认为焊缝的熔宽随着激光功率的提高先增加后降低且逐渐出现下塌,导致接头强度下降,各参数之间存在最佳匹配,优化后的接头抗拉强度超过母材强度的 80%。王灿等^[13]研究了 7204 铝合金激光复合焊接头性能,复合焊接头母材由于元素烧损硬度较低,热影响区形成软化强度下降,成为断裂失效区。

综合上述可知,目前针对铝合金激光-电弧复合焊的研究集中分析了激光功率、焊接电流、光丝间距等工艺参数对复合焊接头成形与组织性能的影响,但是关于改变热源角度影响的还未见相关报道。因

此,本文以 6A01 铝合金型材作为研究对象,研究了激光-MIG 复合焊中不同热源角度设置对接头成形、气孔缺陷以及熔池行为等的影响,并基于 Fluent 模拟对试验进行验证,为优化复合焊工艺参数提供理论依据。

2 试验材料及方法

试验采用的材料是由中车青岛四方机车车辆股份有限公司提供的 6A01 铝合金型材,如图 1(a)所示,型材壁厚度为 2.5 mm,采用的填充焊丝为 ER5356,母材及填充金属的化学成分如表 1 所示。焊接前将两块型材对接装配,并用激光-MIG 复合焊连接对接处,如图 1(b)所示。装配前使用丙酮清理型材表面,去除加工过程中的油污等。

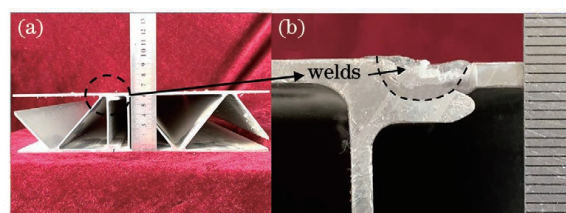


图 1 铝合金型材。(a)宏观形貌;(b)装配焊接处
Fig. 1 Aluminum extrusions. (a) Appearances; (b) welds

表 1 铝型材及填充金属的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of used materials (mass fraction, %)

Materials	Si	Mn	Mg	Zn	Fe	Cr	Ti	Al
6A01	0.60	0.40	0.68	0.10	0.25	0.20	0.08	Balance
ER5356	0.25	0.20	5.50	0.10	0.40	0.20	0.20	Balance

试验中采用自行设计的旁轴激光-MIG 复合焊系统,试验示意如图 2 所示。试验所用激光器为 IPG 公司 YLS-6000 连续型输出光纤激光器,其最大输出功率 6 kW,波长为 1.07 μm ,光束直径为

0.26 mm。弧焊电源为 Fronius 的 Power Wave 系列 R350 自动化焊机,该焊机具有多种焊接模式,并内置工艺数据库。试验中设置焊机为脉冲模式,模式代号 102。焊接过程中采用 ix Cameras 高速摄像

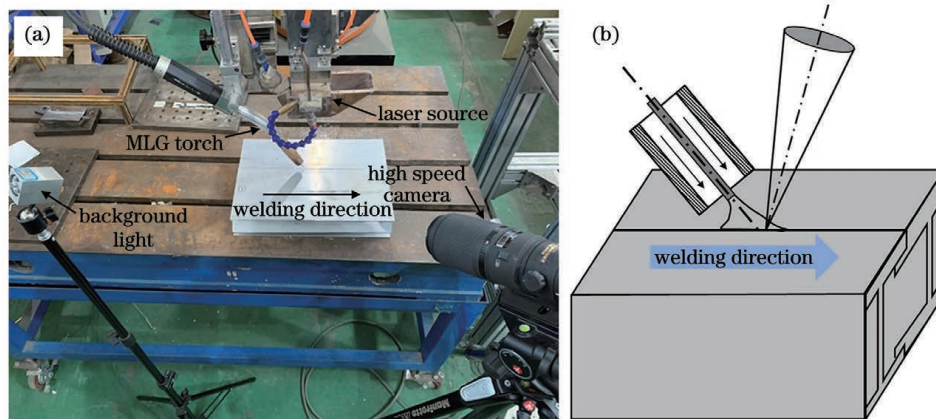


图 2 复合焊接过程示意图
Fig. 2 Laser-MIG hybrid welding processing

机(型号为 i-SPEED 221)实时观察熔滴过渡、熔池与等离子体,数据采集频率为 2000 frame/s。在焊缝侧面设置波长为 850~1100 nm 的半导体激光作为照明光源,摄像机镜头前加装波长为 808 nm 的窄带滤光片与 1/32 的减光片以滤掉焊接过程中的

多余、过量的反射光。试验以激光与电弧热源与焊接方向的夹角作为主要变量,依据生产工况设计了 6 种角度布置方式,定义激光与焊接方向的夹角为 α ,电弧与焊接方向的夹角为 β ,如图 3 所示。采用 99.9% 的纯 Ar 作为保护气体,具体参数如表 2 所示。

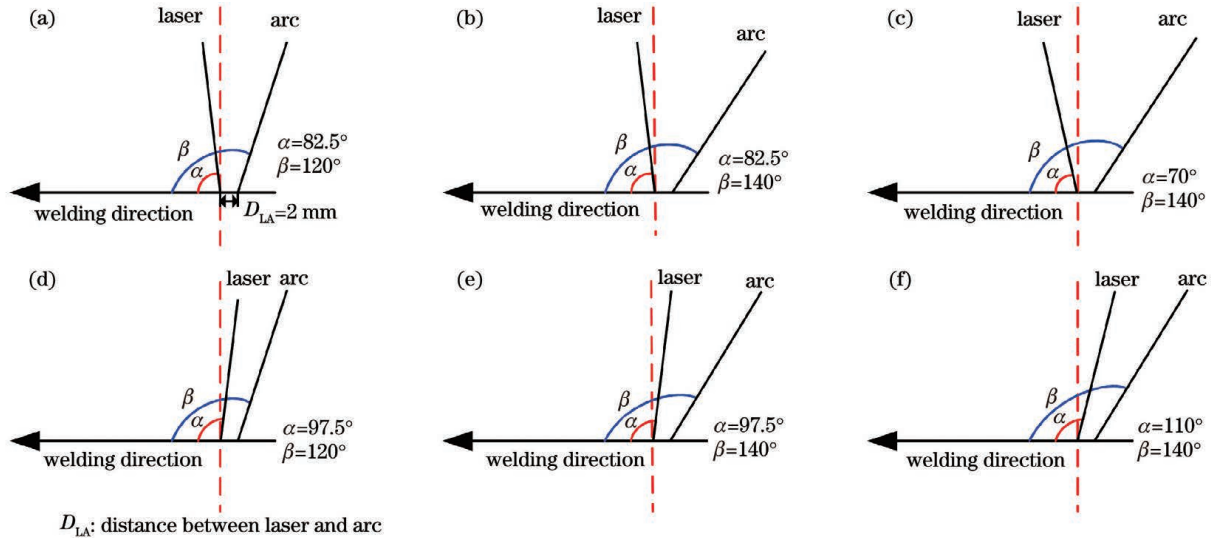


图 3 6 次试验中复合焊热源角度设置。(a) 试验 1; (b) 试验 2; (c) 试验 3; (d) 试验 4; (e) 试验 5; (f) 试验 6

Fig. 3 Angle settings of the heat source in six tests. (a) Test 1; (b) test 2; (c) test 3; (d) test 4; (e) test 5; (f) test 6

表 2 激光-MIG 复合焊接工艺参数

Welding parameters	Value
Laser power /kW	4
Welding speed / (m · min ⁻¹)	1.8
Welding current /A	180
Welding voltage /V	23
Wire feeding speed / (m · min ⁻¹)	8.1
Distance between laser and arc /mm	2
Protect gas flow rate / (L · min ⁻¹)	20

3 试验结果及分析

3.1 焊缝成形

图 4 为不同热源角度下铝合金型材激光-MIG 复合焊缝的宏观形貌与对应横截面形貌。可以发现,焊缝表面成形比较优良,可见连续鱼鳞纹,无明显飞溅。

焊缝熔深、熔宽如图 5 所示。在试验 1~2 中,激光夹角 $\alpha = 82.5^\circ$,此时熔深约为 4 mm。试验 3 中将激光夹角 α 减小至 70° ,熔深略微下降到

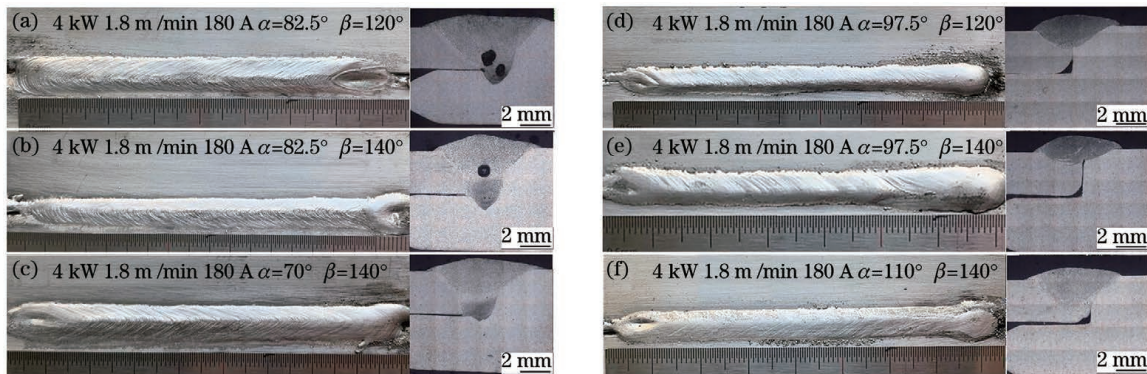


图 4 不同热源角度设置下焊缝宏观成形与横截面形貌。(a) 试验 1, $\alpha = 82.5^\circ, \beta = 120^\circ$; (b) 试验 2, $\alpha = 82.5^\circ, \beta = 140^\circ$; (c) 试验 3, $\alpha = 70^\circ, \beta = 140^\circ$; (d) 试验 4, $\alpha = 97.5^\circ, \beta = 120^\circ$; (e) 试验 5, $\alpha = 97.5^\circ, \beta = 140^\circ$; (f) 试验 6, $\alpha = 110^\circ, \beta = 140^\circ$

Fig. 4 Weld appearances and cross-sections under different angle settings. (a) Test 1, $\alpha = 82.5^\circ, \beta = 120^\circ$; (b) test 2, $\alpha = 82.5^\circ, \beta = 140^\circ$; (c) test 3, $\alpha = 70^\circ, \beta = 140^\circ$; (d) test 4, $\alpha = 97.5^\circ, \beta = 120^\circ$; (e) test 5, $\alpha = 97.5^\circ, \beta = 140^\circ$; (f) test 6, $\alpha = 110^\circ, \beta = 140^\circ$

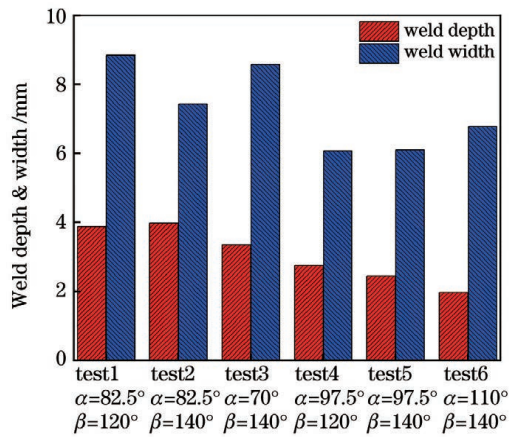


图 5 不同热源角度设置下焊缝熔深与熔宽

Fig. 5 Weld depth and width under different angle settings

3.7 mm。在试验 4~6 中,激光夹角 $\alpha > 90^\circ$,此时熔深明显下降。复合焊的熔深主要取决于激光作用^[10]。在试验 1~2 中,激光夹角 α 为 82.5° ,激光接近垂直入射,能量向深度方向传播,熔深很大,接近 4 mm。在试验 3 中激光夹角 α 为 70° ,激光倾斜入射向熔池后方,深度方向上能量减弱,熔深略微下降。在试验 4~5 中,激光夹角 α 增大到 97.5° ,激光向焊接方向倾斜,能量向匙孔前方传播,因此熔深减小,仅为 2.5 mm。试验 6 中 α 增大到 110° ,熔深仅为 2 mm。此外, α 角度增大后,焊缝熔宽也有所减小。当激光夹角 α 在 $70^\circ \sim 82.5^\circ$ 之间时,熔宽约为 8 mm。当激光夹角 α 增大到 $97.5^\circ \sim 110^\circ$ 之间时,熔宽降低至 6 mm 左右。对于试验 1 和 2、试验 4 和 5 可知,电弧角度改变对熔深熔宽的影响较小。以上结果说明激光热源角度对于复合焊缝熔深有显著影响。在激光夹角 $\alpha < 90^\circ$ 时,能量主要向深度方向和匙孔后方传播,此时激光与垂直方向夹角越小,越有利于激光能量向深度方向传播。因此在试验 1~2 中, $\alpha = 82.5^\circ$,此时熔深最大。在试验 3 中 $\alpha = 70^\circ$,

更多激光能量向匙孔后方传播,熔深下降。当 α 增大超过 90° 后,能量向焊接方向传播,深度方向上能量集中程度降低,导致熔深明显下降。在试验 6 中, α 增大至 110° ,此时熔深仅为 2 mm,相比试验 1 下降了约 50%。

3.2 焊缝气孔率

把不同热源角度设置下得到的接头沿着焊缝中心切开,经过打磨抛光和腐蚀后得到焊缝纵向截面形貌,分析焊缝气孔率变化,并基于图像软件 ImageJ 计算焊缝气孔率。首先对原始图像实施二值化处理,使其只被两个灰度等级表征,然后采用阈值分割算法提取气孔轮廓,并计算气孔区域的面积占比得到气孔率,具体过程如图 6 所示。焊缝纵向截面形貌及对应的二值化处理如图 7 所示。可以发现,在试验 1、2 和 3 中,横截面上出现了较多气孔,且基本集中在焊缝中下部,说明此时熔池凝固过快,气孔来不及逸出而留在焊缝中^[7-8]。在试验 4、5 和 6 中,焊缝横截面上几乎没有气孔。试验 1~6 中焊缝气孔率的计算结果如图 8 所示。试验 1~3 中焊缝的气孔率较高,均在 1% 以上,最高在试验 1 中达到了 3%。在试验 4~6 中,仅有试验 4 焊缝有少量气孔,气孔率为 1.1%,试验 5 和试验 6 中气孔率均为 0%。以上结果表明,增加激光热源与电弧热源与焊接方向的夹角有利于促使焊缝中的气孔逸出,减小气孔率^[11]。在试验 1~3 中,激光与焊接方向的夹角 α 都小于 90° ,介于 $70^\circ \sim 82.5^\circ$ 之间,此时焊缝根部气孔较多,说明焊缝凝固时气孔逸出困难。在试验 4~6 中,激光夹角 $\alpha > 90^\circ$,介于 $97.5^\circ \sim 110^\circ$ 之间,此时焊缝纵向截面几乎观察不到气孔,焊接质量高。此外,对于试验 1 和 2、试验 4 和 5 可以发现,增大电弧夹角 β 也有利于减少焊缝中的气孔。



图 6 焊缝纵截面气孔提取流程。(a) 焊缝纵截面;(b) 灰度图像;(c) 阈值分割

Fig. 6 Steps for calculating weld porosity. (a) Cross-sections; (b) gray level image; (c) threshold segmentation

3.3 熔滴过渡与熔池行为

复合焊过程中熔滴过渡与熔池行为是影响焊接质量的重要因素^[3]。测量不同热源角度设置下的熔

滴过渡电信号并采用高速摄像系统观察熔滴过渡与熔池行为,结果如图 9 所示。可以发现,由于焊机为脉冲模式,所有试验中的电信号都呈现脉冲式变化,



图 7 不同热源角度焊缝纵向截面形貌与二值化图像。(a) 试验 1, $\alpha=82.5^\circ, \beta=120^\circ$; (b) 试验 2, $\alpha=82.5^\circ, \beta=140^\circ$; (c) 试验 3, $\alpha=70^\circ, \beta=140^\circ$; (d) 试验 4, $\alpha=97.5^\circ, \beta=120^\circ$; (e) 试验 5, $\alpha=97.5^\circ, \beta=140^\circ$; (f) 试验 6, $\alpha=110^\circ, \beta=140^\circ$

Fig. 7 Cross-sections and binary images of welds under different angle settings. (a) Test 1, $\alpha=82.5^\circ, \beta=120^\circ$; (b) test 2, $\alpha=82.5^\circ, \beta=140^\circ$; (c) test 3, $\alpha=70^\circ, \beta=140^\circ$; (d) test 4, $\alpha=97.5^\circ, \beta=120^\circ$; (e) test 5, $\alpha=97.5^\circ, \beta=140^\circ$; (f) test 6, $\alpha=110^\circ, \beta=140^\circ$

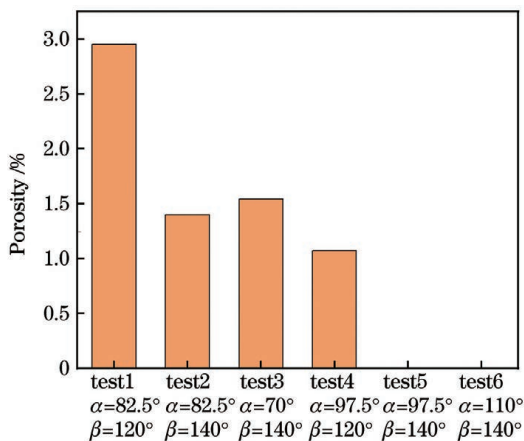


图 8 不同热源角度设置下焊缝气孔率

Fig. 8 Porosity of welds under different angle settings

其中基值电流约为 100 A, 峰值电流约为 280 A。高速摄像结果表明, 在试验 1~3 中, 熔池呈椭圆状, 熔滴脱离后迅速飞入熔池。在试验 4~6 中, 熔池长度明显增加。这是由于试验 1~3 中激光夹角 $\alpha < 90^\circ$, 激光束倾斜射向熔池后方, 激光能量向匙孔后方传播, 与电弧能量集中在一起, 熔池呈椭圆状。在

试验 4~6 中, 由于 $\alpha > 90^\circ$, 激光束倾斜射向焊接方向, 更多能量向熔池前方传播, 使原本椭圆状的熔池被拉长。此外, 对比试验 1 和 2、试验 4 和 5 可知, 电弧夹角对熔滴过渡与熔池行为同样有重要影响。本研究中电弧轴线夹角 β 设定为 120° 或 140° 。在试验 1 和 4 中 $\beta=120^\circ$, 熔滴在峰值电流作用下迅速进入熔池, 电弧位置在基值电流和峰值电流时基本保持不变, 没有明显的偏转。然而, 当 $\beta=140^\circ$ 时, 焊丝角度增加导致熔滴初速度水平分量增大, 熔滴沿焊接方向飞行距离增加, 导致熔池向前延伸。进一步观察电弧形态可知, 在电流基值阶段, 激光匙孔喷发产生的金属蒸气对电弧产生吸引作用, 电弧明显向匙孔偏转。在电流峰值时刻, 电弧形态扩张, 偏向焊丝下方的液态金属^[14]。当电弧角度 $\beta=120^\circ$ 时, 在基值时刻同样产生偏转, 但对比可知其偏转程度小, 电弧被限制在母材表面较小的区域内, 因此熔池面积较小。电弧的偏转使其加热范围增加, 有利于维持更长的熔池。以上结果表明, 在试验范围内, 增大激光热源与电弧热源与焊接方向的夹角能增大

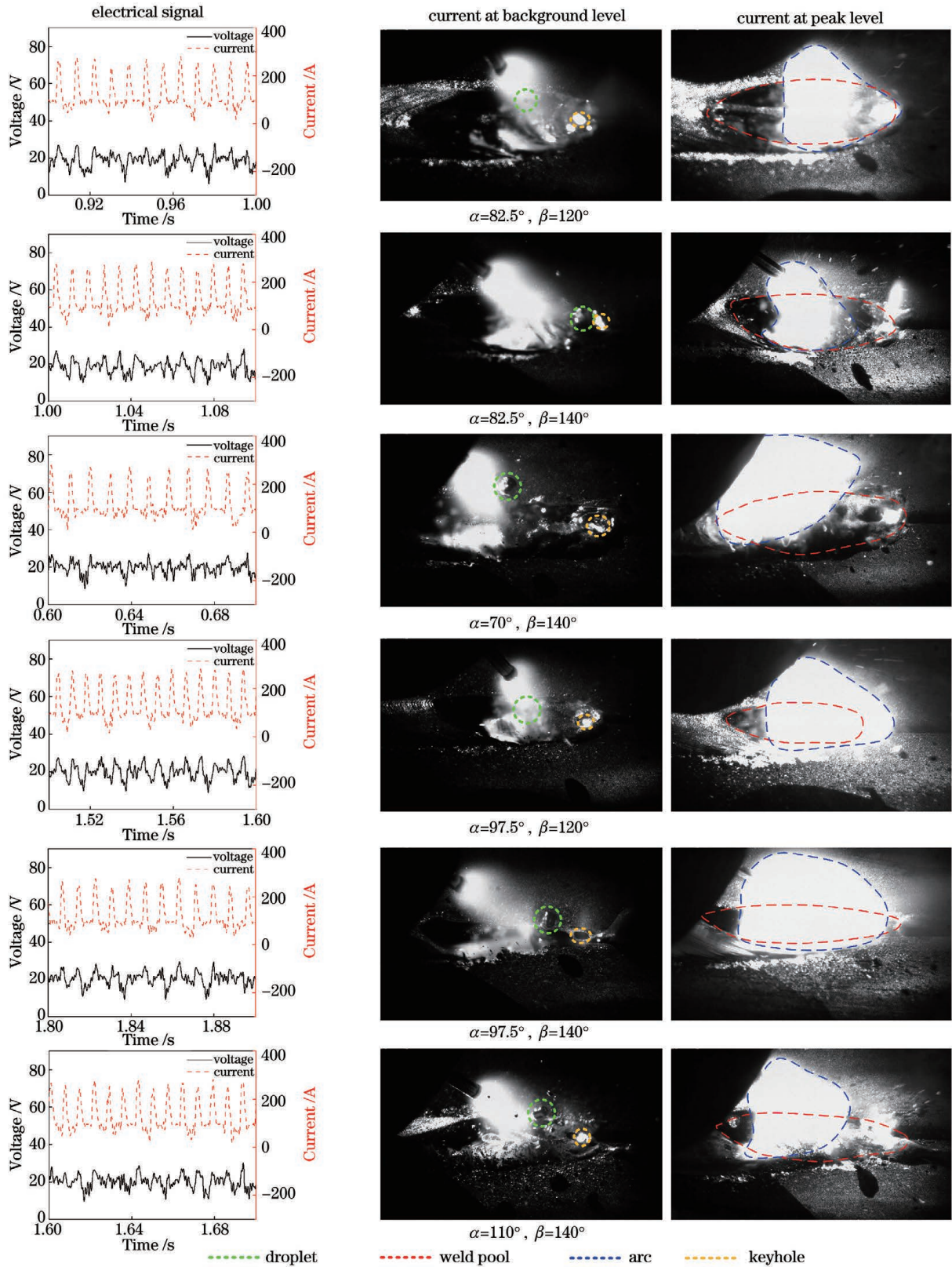


图 9 不同热源角度设置下焊接电信号、熔滴过渡与熔池形貌。(a) 试验 1, $\alpha=82.5^\circ, \beta=120^\circ$; (b) 试验 2, $\alpha=82.5^\circ, \beta=140^\circ$; (c) 试验 3, $\alpha=70^\circ, \beta=140^\circ$; (d) 试验 4, $\alpha=97.5^\circ, \beta=120^\circ$; (e) 试验 5, $\alpha=97.5^\circ, \beta=140^\circ$; (f) 试验 6, $\alpha=110^\circ, \beta=140^\circ$

Fig. 9 Electricity signals, metal transfer and weld pool of welds under different angle settings. (a) Test 1, $\alpha=82.5^\circ, \beta=120^\circ$; (b) test 2, $\alpha=82.5^\circ, \beta=140^\circ$; (c) test 2, $\alpha=70^\circ, \beta=140^\circ$; (d) test 4, $\alpha=97.5^\circ, \beta=120^\circ$; (e) test 5, $\alpha=97.5^\circ, \beta=140^\circ$; (f) test 6, $\alpha=110^\circ, \beta=140^\circ$

熔池长度。一方面,更长的熔池能延长凝固时间,促使焊缝中的气孔逸出。另一方面,热源角度的改变使得熔深有所降低,减少了激光匙孔坍塌的几率,工艺型气孔减少。这两方面使得试验 4~6 中气孔率大大降低。

3.4 基于 Fluent 的模拟验证

前文研究了激光-MIG 复合焊不同热源角度设置对于焊缝成形、熔滴过渡以及熔池行为等的影响。本节通过 Fluent 数值模拟软件再现复合焊接过程,并改变模型中热源与焊接方向的夹角 α 与 β 对试验结果进行验证。为了减少计算难度,只截取型材装配焊接部分作为计算域,计算区域总体尺寸为 $17.1\text{ mm} \times 31.5\text{ mm} \times 10.5\text{ mm}$,采

用均匀的六面体网格,网格尺寸为 0.15 mm ,网格数量为 1675800 个。网格区域 Mesh block 采用连续性边界条件,采用最外围两层网格的温度梯度计算试板与环境之间的散热量。计算域的工件上方预留 4.22 mm 空间,作为熔滴生成及余高区域,工件下方预留 0.28 mm 空间,保证熔化金属不会与计算区域的边界接触或流出计算区域。熔滴半径取 0.61 mm ,熔滴于焊接进行 0.001 s 后开始生成,生成位置位于 Z 方向坐标 9.494 mm 、工件上表面 3.214 mm 处,6A01 型材复合焊接的几何模型、网格划分及熔滴生成如图 10 所示。焊接时型材固定不动,熔滴与焊接热源以相同的速度沿 y 方向移动。

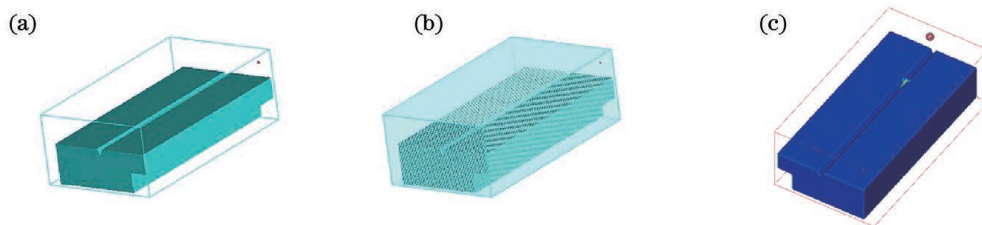


图 10 Fluent 有限元模拟分析建模过程。(a) 焊件模型;(b) 网格划分;(c) 熔滴设置

Fig. 10 Fluent finite element simulation analysis modeling process. (a) Welding model; (b) meshing; (c) droplet settings

不同热源角度设置下铝型材复合焊模拟熔池俯视及纵截面形貌如图 11 所示。在试验 1 中,激光夹角 $\alpha = 82.5^\circ$,电弧夹角 $\beta = 120^\circ$,如图 11(a)所示,最大熔深可达 3.95 mm ,熔池上表面最大长度为 10.30 mm ,最大宽度为 7.27 mm 。在复合热源的热输入下,母材金属最高温度能够达到金属的沸点,形成金属蒸气,由于此时激光接近垂直方向,激光能量沿深度方向传播,金属蒸气反作用力向下,形成深而窄的小孔^[15]。

在试验 2 中,激光夹角 $\alpha = 82.5^\circ$,电弧夹角 $\beta = 140^\circ$,如图 11(b)所示,最大熔深可达 4.08 mm 。激光-MIG 复合焊的熔深主要由高能量密度的激光热源决定,试验 2 激光夹角 α 不变,复合热源深穿能力基本不变,因此熔深没有明显变化。熔池上表面最大长度为 10.50 mm ,最大宽度为 7.13 mm ,熔池表面尺寸相比试验 1 宽度减小而长度增加。其原因如前述所说,电弧夹角增加导致在电流和峰值阶段电弧偏转程度更明显,电弧加热范围增加,有利于形成更长更窄的熔池。

在试验 3 中,激光夹角 $\alpha = 70^\circ$,电弧夹角 $\beta = 140^\circ$,如图 11(c)所示。最大熔深可达 3.57 mm ,熔池上表面最大长度为 10.08 mm ,最大宽度为 7.38 mm 。试验 3 的熔深小于前两组,激光夹角减

小,与垂直方向夹角增大,在熔深方向上热源能量集中程度相比前两组更小,激光能量向熔池后方传播,使得激光热源深穿入能力降低。

在试验 4 中,激光夹角 $\alpha = 97.5^\circ$,电弧夹角 $\beta = 120^\circ$,如图 11(d)所示,最大熔深可达 2.89 mm ,熔池上表面最大长度为 11.63 mm ,最大宽度为 6.45 mm 。试验 4 的熔深小于前三组,熔池长度大于前三组而宽度减小。激光夹角大于 90° ,虽然激光束方向仍接近垂直方向,在熔深方向上热源能量比较集中,但是部分能量向熔池前进侧传播,导致复合热源的深穿能力略微下降,相应地,熔深降低,但是熔池被拉长。

在试验 5 中,激光夹角 $\alpha = 97.5^\circ$,电弧夹角 $\beta = 140^\circ$,如图 11(e)所示,最大熔深可达 2.48 mm ,熔池上表面最大长度为 12.24 mm ,最大宽度为 6.64 mm 。试验 5 的熔深小于前四组,激光热源深穿能力与第四组几乎相同,但是电弧夹角的增加使熔深方向上热源能量的集中程度进一步减弱,因此熔深降低。电弧夹角增大同时使电弧更发散,加热区域增加,形成更长的熔池。

在试验 6 中,激光夹角 $\alpha = 110^\circ$,电弧夹角 $\beta = 140^\circ$,如图 11(f)所示最大熔深 2.05 mm ,熔池上表面最大长度为 11.89 mm ,最大宽度为 6.16 mm 。

试验 6 激光夹角进一步增大,熔深方向上热源的能量集中程度很低,激光在大于 90° 的方向倾斜入射,

更多能量向熔池前进侧传播,熔深进一步降低,熔池较长。

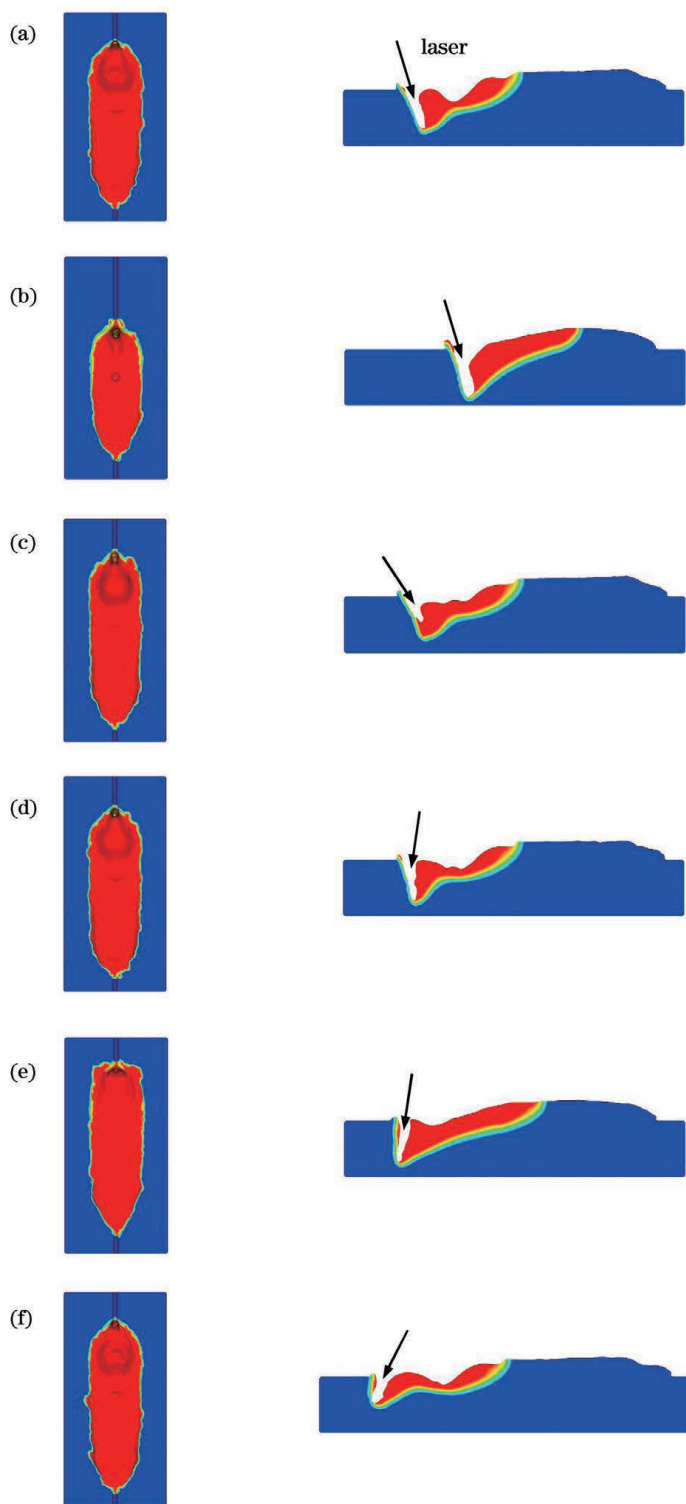


图 11 不同热源角度设置下铝型材复合焊模拟焊缝俯视及熔池纵截面形貌。(a) 试验 1, $\alpha=82.5^\circ, \beta=120^\circ$; (b) 试验 2, $\alpha=82.5^\circ, \beta=140^\circ$; (c) 试验 3, $\alpha=70^\circ, \beta=140^\circ$; (d) 试验 4, $\alpha=97.5^\circ, \beta=120^\circ$; (e) 试验 5, $\alpha=97.5^\circ, \beta=140^\circ$; (f) 试验 6, $\alpha=110^\circ, \beta=140^\circ$

Fig. 11 Simulation results of the cross-sections and weld pool of welds under different angle settings. (a) Test 1, $\alpha=82.5^\circ, \beta=120^\circ$; (b) test 2, $\alpha=82.5^\circ, \beta=140^\circ$; (c) test 3, $\alpha=70^\circ, \beta=140^\circ$; (d) test 4, $\alpha=97.5^\circ, \beta=120^\circ$; (e) test 5, $\alpha=97.5^\circ, \beta=140^\circ$; (f) test 6, $\alpha=110^\circ, \beta=140^\circ$

焊缝熔深熔宽的模拟结果与实际测量结果的对比如图 12 所示,可见基于 Fluent 的模拟分析与试验结果很接近,说明了模拟结果的可靠性,也证实了复合热源夹角改变对焊缝成形与熔池行为的影响。激光夹角 α 接近 90° 时,此时复合热源在熔深方向集中程度大,容易形成较深的匙孔,如图 11(a)~(c)所示,从而获取较大的熔深。当 $\alpha < 90^\circ$ 并减小至 70° 时,匙孔向熔池后方倾斜,激光能量

向后方液态金属传播,导致熔深有所下降。当 $\alpha > 90^\circ$ 并增大至 110° ,如图 11(d)~(f)所示,匙孔向熔池前方倾斜,激光能量在熔深方向上集中程度减弱,并且激光能量向熔池前进侧传播,熔深进一步下降,并且熔池被拉长,长度增加而宽度减小。此外,电弧夹角 β 从 120° 增加至 140° 后,在电流基值阶段和峰值阶段其前后偏转程度更大,电弧作用范围更大,从而有利于形成更长的熔池。

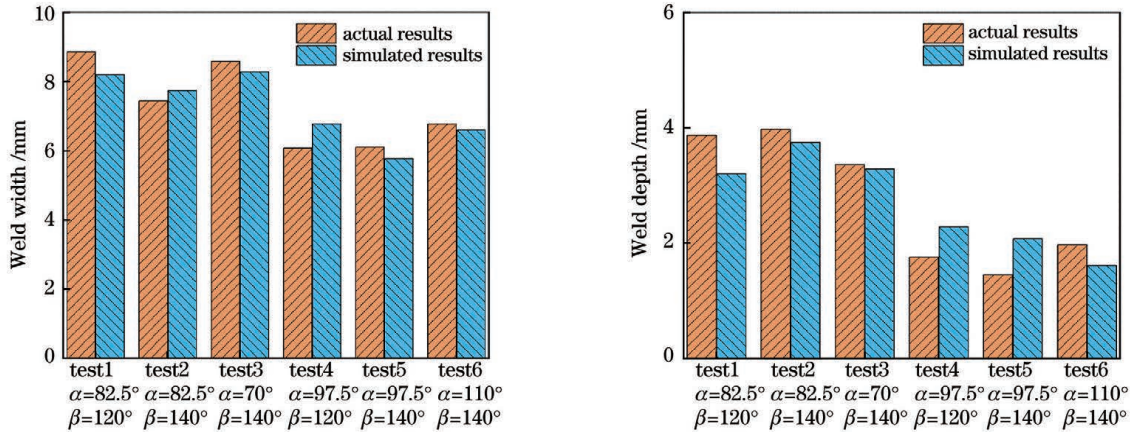


图 12 铝型材复合焊缝熔深与熔宽的模拟与实测结果对比。(a)焊接熔宽;(b)焊接熔深

Fig. 12 Comparison of simulation results and measured results of the weld depth and width. (a) Weld width; (b) weld depth

4 结 论

研究了激光-MIG 复合焊接 6A01 铝合金型材过程中热源角度设置对焊缝成形、熔滴过渡以及熔池行为的影响。主要结论如下:

1) 在文中试验条件下,激光夹角 α 为 82.5° 时,复合焊熔深达到 4 mm。随着激光夹角 α 的增加,超过 90° 后焊缝熔深下降, α 为 110° 时熔深为 2.5 mm,下降了 40%。

2) 激光夹角 α 介于 $70^\circ \sim 82.5^\circ$ 时,焊缝中下部存在连续气孔,气孔率达到 3%。激光夹角 α 介于 $97.5^\circ \sim 110^\circ$ 时,气孔数量减少。增大电弧角度也有利于减少焊缝气孔。

3) 受脉冲电源控制,不同热源角度设置下熔滴过渡模式均为射滴过渡。在激光夹角 α 介于 $70^\circ \sim 82.5^\circ$ 时,激光能量向匙孔后方传播,熔深大,熔池小,不利于气孔逸出。激光夹角 α 介于 $97.5^\circ \sim 110^\circ$ 时,激光能量向匙孔前方传播,熔深下降,熔池变长,存在时间增加,有利于气孔逸出。

4) Fluent 模拟结果与试验吻合。激光夹角 α 接近 90° 时,复合焊匙孔深,能量集中于深度方向,熔深可达 4.08 mm。 α 减小到 70° ,激光偏向熔池后

方,匙孔深度减小,熔深减小至 3.57 mm。 α 增大到 110° ,激光偏向熔池前方,匙孔浅,熔深降低到 2.05 mm,但熔池长度显著增加。

参 考 文 献

- [1] Zhang T H, Yang Z B, Zhang Z Y, et al. Effects of MIG welding superposition on microstructure and property of 6A01-T5 FSW joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(9): 81-88, 96, 101.
张铁浩, 杨志斌, 张志毅, 等. MIG 焊叠加对 6A01-T5 铝合金 FSW 焊接头组织及性能的影响[J]. 焊接学报, 2020, 41(9): 81-88, 96, 101.
- [2] Wen P, Li Z X, Zhang S, et al. Investigation on porosity, microstructures and performances of 6A01-T5 aluminum alloy joint by oscillating fiber laser-CMT hybrid welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0802003.
温鹏, 栗忠秀, 张松, 等. 摆动光纤激光-CMT 复合焊接 6A01-T5 铝合金型材接头的气孔特征及组织性能研究[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0802003.
- [3] Liu L M, Shi J P, Hou Z L, et al. Effect of distance between the heat sources on the molten pool stability and burn-through during the pulse laser-GTA hybrid welding process [J]. Journal of Manufacturing

- Processes, 2018, 34: 697-705.
- [4] Yang T, Chen L, Zhuang Y, et al. Arcs interaction mechanism in Plasma-MIG hybrid welding of 2219 aluminium alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56: 635-642.
- [5] Lei Z L, Li B W, Zhou H, et al. Analysis of droplet transfer and porosity characteristics in laser-MAG hybrid welding of edge joint[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0302007.
雷正龙, 黎炳蔚, 周恒, 等. 端接接头激光-MAG 复合焊熔滴过渡与气孔特征分析[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0302007.
- [6] Zhao X, Xin Z B, Zhao H, et al. Study on influence rule of porosity defects of laser-MIG hybrid welding of aluminum alloy [J]. Hot Working Technology, 2021: 1-4 [2021-07-13]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20202230>.
赵昕, 辛志彬, 赵函, 等. 铝合金激光-MIG 复合焊气孔缺陷影响规律研究[J]. 热加工工艺, 2021: 1-4 [2021-07-13]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20202230>.
- [7] Faraji A H, Moradi M, Goodarzi M, et al. An investigation on capability of hybrid Nd: YAG laser-TIG welding technology for AA2198 Al-Li alloy[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 96: 1-6.
- [8] He S, Chen H, Cai C, et al. Influence of He-Ar mixed shielding gas on laser-MIG hybrid welding characteristic of aluminum alloys[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1202005.
何双, 陈辉, 蔡创, 等. 氦-氩混合保护气体对铝合金激光-MIG 复合焊接特性的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1202005.
- [9] Wang H Y, Sun J, Liu L M. Formation and controlling mechanism of pores in laser-TIG hybrid welding of 6061-T6 aluminum alloys at high speed [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(3): 0302001.
王红阳, 孙佳, 刘黎明. 6061-T6 铝合金激光-电弧复合高速焊气孔形成及控制机制[J]. 中国激光, 2018, 45(3): 0302001.
- [10] Casalino G, Mortello M, Leo P, et al. Study on arc and laser powers in the hybrid welding of AA5754 Al-alloy[J]. Materials & Design, 2014, 61: 191-198.
- [11] Zhao Y Q, Zhou X D, Liu T, et al. Investigate on the porosity morphology and formation mechanism in laser-MIG hybrid welded joint for 5A06 aluminum alloy with Y-shaped groove[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 57: 847-856.
- [12] Bai L B. Study on the technology and performance of fiber laser-MIG hybrid welding of aluminum alloy sheet[J]. Welding Technology, 2020, 49(4): 1-2, 29-34.
白利兵. 薄板铝合金光纤激光-MIG 复合焊工艺与性能研究[J]. 焊接技术, 2020, 49(4): 1-2, 29-34.
- [13] Wang C, Lü J X, Zhang J C, et al. Effects of filler wires on A7204 aluminum alloy joint by fiber laser-VPTIG hybrid welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(3): 0302002.
王灿, 吕俊霞, 张建超, 等. 填充焊丝对 A7204 铝合金光纤激光-VPTIG 复合焊接头的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(3): 0302002.
- [14] Zhang C, Gao M, Zeng X Y. Influences of synergy effect between laser and arc on laser-arc hybrid welding of aluminum alloys [J]. Optics & Laser Technology, 2019, 120: 105766.
- [15] Chen X, Mu Z Y, Hu R Z, et al. A unified model for coupling mesoscopic dynamics of keyhole, metal vapor, arc plasma, and weld pool in laser-arc hybrid welding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 41: 119-134.

Effects of Heat Source Angle on Weld Formation and Porosity Defects of Laser-MIG Hybrid Welding of 6A01 Aluminum Alloy

Han Xiaohui¹, Zhang Zhiyi¹, Ma Guolong¹, Wu Lajun^{2,3}, Song Xiaoguo^{2,3},
Wang Houqin², Tan Caiwang^{2,3*}

¹ CRRC Qingdao Sifang Co., LTD., Qingdao, Shandong 266111, China;

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

³ Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai, Shandong 264209, China

Abstract

Objective Recently, lightweight materials have been undergoing advancements and are widely used in industrial manufacturing. The use of advanced aluminum alloys in new generations of trains is a significant step to meet the increasing demand for lightweight materials. 6005A is a type of aluminum alloy used in Chinese G-series high-speed trains. The train frame is mainly composed of 6005A aluminum extrusions with a low density, high strength, and high corrosion resistance. However, the welding of 6005A aluminum alloys is difficult. Owing to the high reflectivity of aluminum alloys, laser welding usually fails. Moreover, arc welding is unsuitable for connecting aluminum alloys owing to high heat input and severe deformation occurrence. Thus, laser-MIG hybrid welding was proposed as an improved technique for welding 6005A aluminum alloys. The arc source can significantly decrease laser reflectivity and improve aluminum alloy weldability. Furthermore, the laser source can increase the processing speed and reduce the heat input. So far, most studies on the laser-MIG hybrid welding of aluminum alloys have focused on optimizing the welding processing parameters. The effects of laser power, weld current, the distance between the laser and arc, and weld speed on the welding quality have been analyzed and discussed comprehensively. However, the effects of the heat source angle on weld formation and porosity remain unclear. In this study, different heat source angles were adopted and the welding processes were compared. The influence of the heat source angle on laser-MIG hybrid weld formation and porosity defects were discussed.

Methods 6005A aluminum alloy extrusions and an ER5356 welding wire were selected to perform single-pass laser-arc hybrid welding. The welding equipment was developed using a 6-kW fiber laser system (IPG YLS-6000) and a welding machine (Lincoln Power Wave R350). A laser-guided hybrid welding method was adopted. The welding processing parameters were optimized using the single factor variable method. The tensile strength and porosity defects of the welding joints with different heat source angles were tested. The electrical signals in the welding process were measured. The droplet transfer and weld pool characteristics were analyzed using high-speed cameras. Hybrid welding was simulated using Ansys 2021 software based on computational fluid dynamics methods.

Results and Discussions High-quality welded joints with good appearances were obtained with different heat source angles (Figs. 1, 2, 3 and 4). When the laser source angle is 82.5° or 70°, the weld depth reaches approximately 4 mm. However, when the laser source angle exceeds 90° and reaches 120° and 140°, the weld depth decreases to 2 mm. Furthermore, the weld width decreases with increasing laser source angle (Fig. 5). The decreased weld depth improves the stability of the laser keyhole as well as contributes to the floating out of weld pores. Consequently, the porosity of the welds decreases from 3% to 0% when the laser source angle is varied from 82.5° to 97.5° (Figs. 7 and 8). Regarding the weld pool, the increased heat source angle leads to the elongation of the weld pool, which also promotes the reduction of the weld pores (Fig. 9). Simulation results, which matched with experimental results, imply that the increased laser source angle suppressed the propagation of laser power along the depth direction, thus changing the weld formation (Figs. 11 and 12).

Conclusions Aluminum alloy profiles based on laser-MIG hybrid welding were studied for high-speed trains, and the influence of different heat source angles on the welding characteristics, including appearance, pores and melt flowing, was investigated. Results show that the weld depth decreases with an increase in the angle between the laser and the welding direction. When the laser source angle is increased from 82.5° to 110°, the penetration depth

and weld width decrease by 50% and 25%, respectively. Moreover, increasing the heat source angle is conducive for reducing the weld pores. When the laser source angle is increased from 82.5° to 97.5°, the weld porosity decreases from 3% to 0%. Moreover, the droplet transfer mode was observed under different heat source angles and the length of the molten pool was promoted by increasing the angle between the laser and the welding direction. Fluent simulation results suggested that the heat source angle has significant effects on energy propagation. With an increase in the angle between the laser and the welding direction, the propagation of energy in the depth direction will decrease. The heating range increases with increasing arc angle, which is beneficial for prolonging the solidification time of molten pools and the eliminating weld pores.

Key words laser technique; high speed trains; aluminum alloy profile; laser-MIG hybrid welding; heat source angle; welding characteristics