

引用格式:李志勇,王学礼,李朋,等.脉冲参数对6061铝合金MIG焊熔滴过渡及焊缝成形的影响[J].热加工工艺,2025,54(17):64-68.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20232905  
<http://www.rjggy.net> [rjggy@vip.163.com](mailto:rjggy@vip.163.com)

# 脉冲参数对6061铝合金MIG焊熔滴过渡及焊缝成形的影响

李志勇<sup>1,2</sup>, 王学礼<sup>2</sup>, 李朋<sup>2</sup>, 张杰<sup>2</sup>, 王世路<sup>2</sup>, 张光先<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(华东)材料科学与工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 山东奥太电气有限公司, 山东 济南 250101)

**摘要:**搭建由焊接系统、高速摄像及同步波形信息采集设备的试验系统,研究不同脉冲波形参数对6061铝合金脉冲MIG焊熔滴过渡、焊缝成形及气孔率的影响规律。结果表明,在平均输出电流200 A与300 A的条件下,相比一脉一滴过渡形式的标准脉冲波形,通过增大脉冲波形峰值时间、降低脉冲频率的方式,熔滴过渡变为射滴+射流的混合过渡形式,此时液柱对熔池的冲击强度和持续时间增大,能够显著增大焊缝熔深,200 A与300 A时的焊缝熔深相较于一脉一滴过渡分别提高16.2%和38.8%。此外,在混合过渡形式下,熔滴对熔池的冲击震荡使得熔池中气体更易逸出,气孔率相对减小。

**关键词:**铝合金;MIG焊;脉冲参数;熔滴过渡;焊缝成形;气孔率

中图分类号: TG444.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2025)17-0064-05

## Effect of Pulse Parameters on Droplet Transfer and Weld Formation in MIG Welding of 6061 Aluminum Alloy

LI Zhiyong<sup>1,2</sup>, WANG Xueli<sup>2</sup>, LI Peng<sup>2</sup>, ZHANG Jie<sup>2</sup>, WANG Shilu<sup>2</sup>, ZHANG Guangxian<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China; 2. Shandong Aotai Electric Co., Ltd., Jinan 250101, China)

**Abstract:** The test system which consists of welding system, high-speed camera system and synchronous waveform information acquisition equipment was built. The effects of different pulse waveform parameters on the droplet transfer, weld formation and porosity in pulsed MIG welding of 6061 aluminum alloy were studied. The results show that under the condition of average current of 200 A and 300 A, compared with the standard pulse waveform of one-pulse-one-drop transition form, the droplet transition changes into a mixed transition form of droplet+jet by increasing the peak time of pulse waveform and reducing the pulse frequency, and the impact strength and duration of the liquid column on the molten pool increase, which can significantly increase the weld penetration. The weld penetration at 200 A and 300 A is 16.2% and 38.8% higher than that of one-pulse-one-drop transition, respectively. In addition, in the mixed transition mode, the gas in the molten pool is more likely to escape due to the impact and oscillation of molten droplets on the molten pool, and the porosity is relatively reduced.

**Key words:** aluminum alloy; MIG welding; pulse parameters; metal droplet transition; weld forming; porosity

随着科技及制造业的发展,人工智能在工业、教育、医学等领域发挥了重要作用<sup>[1]</sup>,智能焊接机器人系统代替人工进行生产制造也越来越广泛,开发高

效、高质的专用焊接工艺成为金属材料加工领域亟待解决的关键问题。脉冲熔化极惰性气体保护焊(melt inert-gas welding-Pulse,脉冲MIG)的可控性好,焊缝成形美观,被广泛应用于铝及铝合金的焊接制造。提高中厚板脉冲MIG焊接生产效率,通常采用增大焊接电流的方法,但热输入增大导致接头性能下降,焊接气孔现象明显<sup>[2-4]</sup>;还可以采用增加焊缝熔深,进而缩小坡口角度、减小焊缝金属填充量的方法。传统铝合金脉冲MIG工艺存在熔透能力有限,电弧挺度差、熔敷效率低等问题,在大厚度铝合金焊

收稿日期:2023-12-07 修回日期:2025-04-09

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFB4601900);山东省重点研发计划项目(2020CXGC010207)

作者简介:李志勇,男,工程师,博士研究生,从事先进焊接工艺的研发;  
E-mail: lizhiyong1991@126.com

通讯作者:李朋,男,正高级工程师,硕士,从事先进焊接工艺与装备的研发;  
E-mail: lipengtime@163.com

接时易出现未熔合、气孔缺陷,严重制约了其在大型工程制造业的应用。

脉冲电流的波形参数决定熔滴尺寸及过渡行为,而过渡行为影响电弧的形态及稳定性,进而影响焊缝成形。张世欣等<sup>[5-7]</sup>研究结果表明,与传统脉冲 MIG 工艺相比,超射流工艺的焊缝熔透能力更大,屈服强度、抗拉强度及伸长率均有所提高;同时,电弧力的改变使熔池产生振荡,熔池中气体容易逸出,减少气孔。李洪亮等<sup>[8]</sup>研究结果表明,与常规 MIG 焊相比,超声电弧的引入可以增加焊缝熔深,焊缝金属晶粒得到细化,焊缝金属中的析出相更加弥散分布。李超凡<sup>[9]</sup>研究表明,协调配合峰值送丝速度、峰值电流持续时间、峰值电流大小可有效拓宽铝合金 CMT 焊接工艺窗口。采用概率统计的方法,分析了不同波形参数对铝合金 CMT 焊接过程中各阶段持续时间概率分布的影响规律。但关于不同脉冲参数控制对铝合金中厚板脉冲 MIG 焊的研究较少。本文利用高速摄像系统及脉冲波形同步采集系统,通过调节焊接电源不同的脉冲波形输出参数,研究不同脉冲参数对熔滴过渡行为、焊缝成形及气孔率的影响规律,为开发铝合金中厚板大熔深、高效率及高质量的焊接电源及工艺提供理论基础。

## 1 试验材料及方案

图 1 为铝合金脉冲 MIG 焊接试验系统示意图,包括焊接系统、高速摄像系统及波形数据同步采集系统,可精确分析高速焊接动态过程和实时焊接电参数间的关系。焊接系统采用山东奥太电气的逆变式脉冲 MAG-500ProMax 焊接电源,该设备具备波形参数开放调节的功能;高速摄像系统包括 Fastcasm Mini AX-100 型高速工业相机,波长为 808 nm 的激光背部光源及 808 nm 滤光片,可屏蔽环境噪声,试验采用的拍摄频率为 10000 fps。波形数据同步采集系统采用 NI 公司的 USB-6361BNC,对高速摄像及焊接波形信息进行同步采集,采集频率为

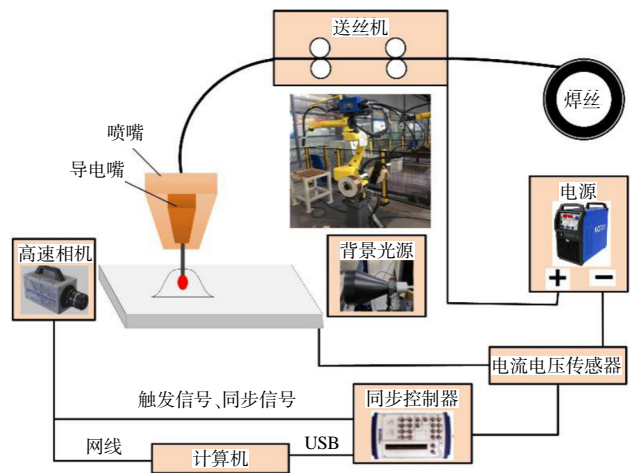


图 1 试验设备系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the test equipment system

10 kHz。

工件采用尺寸为 150 mm×100 mm×6 mm 的 6061 铝合金,焊丝采用直径 1.2 mm 的 ER4043,保护气体采用纯度为 99.99wt% 的氩气。试验材料的主要化学成分见表 1。

表 1 工件及焊丝的化学成分(质量分数,%)  
Tab.1 Chemical composition of workpiece and welding wire (wt%)

材料	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ti	Al
6061	0.782	0.239	0.116	0.016	1.098	0.0015	0.0138	余量
ER4043	5.35	0.65	0.23	0.30	0.02	0.01	0.10	余量

焊接试验采用平板堆焊方式,平均输出电流为 200 A 和 300 A,在标准脉冲基础上,增大脉冲时间等参数,保证热输入不变,观察熔滴过渡状态。脉冲 MIG 工艺及波形参数如表 2 所示。

焊后利用 X 射线对焊缝进行无损探伤,对焊缝的气孔缺陷进行检测。采用电火花数控线切割设备沿垂直于焊缝方向截取试样,制备标准金相试样。采用的腐蚀剂为 HF:HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O 按照 1:1:10 比例配制的腐蚀剂,腐蚀时间为 10 s。将腐蚀后的试样用酒精清洗并吹干,采用尼康 SMZ18 体视显微镜观察焊缝横截面的宏观形貌。

表 2 铝合金脉冲 MIG 工艺及波形参数  
Tab.2 Pulse MIG process and waveform parameters of the aluminum alloy

编号	焊接电流 /A	焊接速度 / (m·min <sup>-1</sup> )	送丝速度 / (m·min <sup>-1</sup> )	焊接电压 /V	峰值电流 /A	峰值时间 /ms	基值电流 /A	频率 /Hz
1	200	0.6	9	20.4	310	1.8	135	210
2	200	0.6	9	20.4	310	3.2	135	130
3	300	0.8	12	22.6	360	2.1	150	298
4	300	0.8	12	22.6	360	3.2	150	195

## 2 试验结果与分析

### 2.1 波形参数对熔滴过渡行为的影响分析

图2为输出电流200 A,峰值时间1.8 ms脉冲工艺焊接过程的波形参数及对应的熔滴过渡状态。图2中(1)~(4)分别对应波形中虚线位置处的熔滴状态,此波形参数下熔滴过渡形式为一脉一滴的射滴过渡,焊接过程稳定且无飞溅。(1)位置处为基值结束时刻,此时在135 A基值电流作用下维持电弧燃烧,焊丝端部液态金属呈半球状,此时熔滴受到重力、表面张力、电磁力与气体吹力的作用。其中促进熔滴过渡的力为重力与气体吹力,抑制熔滴过渡的力为表面张力与电磁力,气体吹力影响较小,可忽略不计。当电流上升至(2)位置时,电流约为310 A,电流由基值上升至接近峰值时刻,电压相比基值时刻升高,此时电弧跳跃至熔滴上方,焊丝端部液态金属在电磁力作用下产生明显缩颈,熔滴直径略小于焊丝直径,通过与焊丝直径的对比,经过图片处理计算,判断熔滴直径约为1 mm。当电流升至(3)位置时,在电磁力及重力的综合作用下熔滴过渡至熔池,焊丝端部呈尖状液柱;熔滴过渡完成前,电流已经开始下降,避免了液桥受高电流密度的作用而产生飞溅。最终,熔滴过渡完成,如图2(4)所示。

在保持平均输出电流、峰值电流与基值电流不

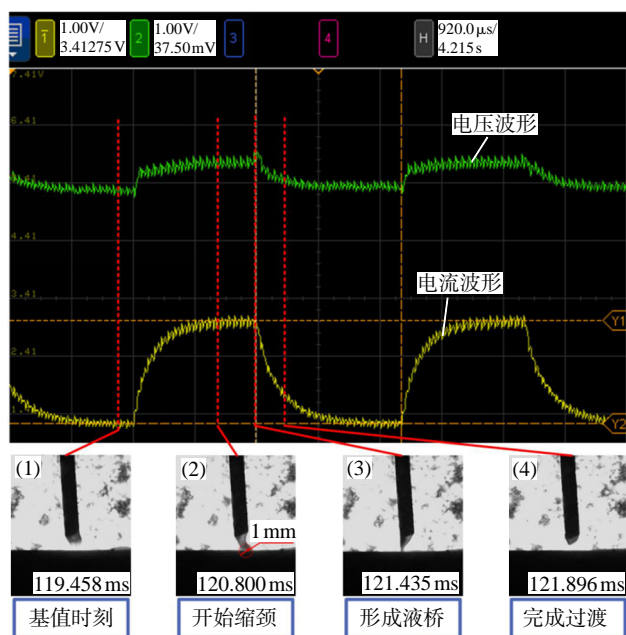


图2 输出电流200 A,峰值时间1.8 ms的波形参数及熔滴过渡状态

Fig.2 Waveform parameters and droplet transition state under output current of 200 A, peak time of 1.8 ms

变的前提下,将峰值时间提升至3.2 ms,脉冲频率降低至130 Hz,其焊接过程波形参数及熔滴过渡状态如图3所示。在(1)位置时,焊丝端部形态相比第一组变化不大,形成的液态熔滴较小;同样在位置(2)在电磁力的作用下产生缩颈,并在(3)位置时完成了熔滴的过渡,焊丝端部液态金属回弹,由电压波形中间位置可以看出熔滴的过渡时刻;滴状过渡时的熔滴直径相比峰值时间为1.6 ms时的较大,约等于焊丝直径,即1.2 mm,这是因为频率减小,为保证电弧高度保持不变,焊丝在周期时间内熔化量增大。在完成过渡之后,此时电流仍为峰值阶段,在(4)位置时,焊丝端部液态金属持续受热熔化,形成了射流过渡,呈细尖的锥状垂直射入熔池,射流状态持续至(7)位置,此时电流降至基值附近,在(8)位置时完成过渡。此波形参数下的熔滴过渡形式呈稳定的滴状+射流的混合过渡。

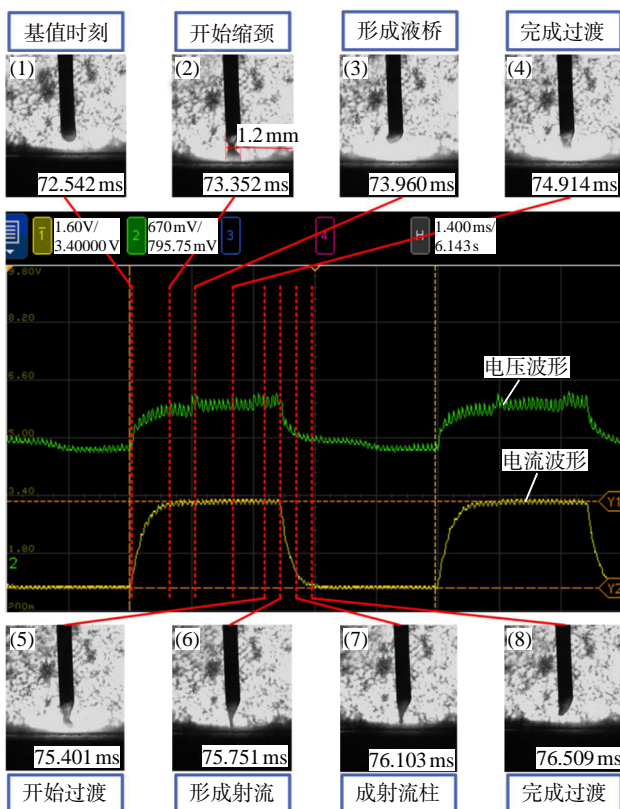


图3 输出电流200 A,峰值时间3.2 ms的波形参数及熔滴过渡状态

Fig.3 Waveform parameters and droplet transition state under output current of 200 A, peak time of 3.2 ms

对300 A输出电流不同峰值时间进行了试验和拍摄。当峰值时间为2.1 ms时,熔滴过渡形式呈射流过渡,如图4所示,在(2)位置时焊丝端部开始缩颈过渡;由于热输入较大,电弧下方的熔池出现下

凹,因此高速摄像图片呈现的电弧高度较低;此外,由于频率较大,基值时间较短,液流柱持续至基值结束阶段,并且液流柱直径逐渐减小,如图4中(3)所示,最终在(4)位置时完成一个周期的过渡;焊接过程稳定且无飞溅。

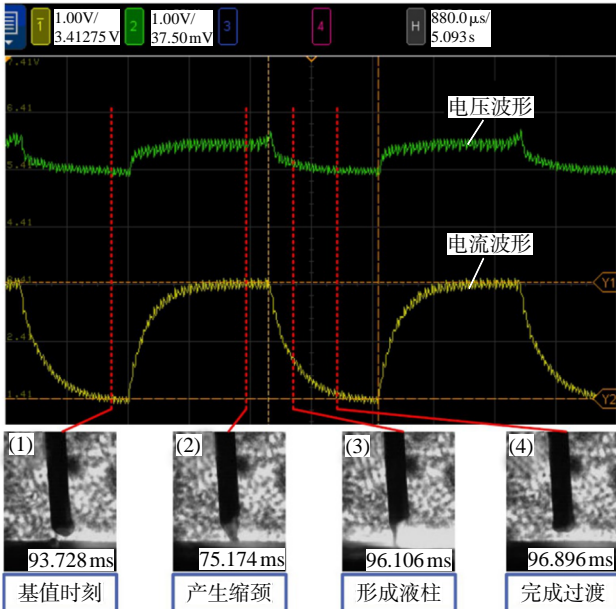


图4 输出电流 300 A,峰值时间 2.1 ms 的波形参数及熔滴过渡状态

Fig.4 Waveform parameters and droplet transition state under output current of 300 A, peak time of 2.1 ms

在保持平均输出电流、峰值电流与基值电流不变的前提下,将峰值时间提升至 3.2 ms,脉冲频率降低至 195 Hz,保证送丝速度与熔化速度匹配,焊接电弧稳定一致,如图5所示。在基值阶段至峰值中间阶段,完成了—个熔滴的射滴过渡,如图5中(2)~(5)所示;射滴完成后,焊丝端部存在尖状的液态金属对熔池产生持续的冲击;在峰值中间时刻后期,产生了一次射流过渡,同样因频率减小,周期金属熔化量增大,液流柱直径较峰值时间为 2.1 ms 时更大,对熔池产生较大且持续时间更长的冲击,如图5中(6)和(7)所示;直至基值后半阶段完成过渡,液流柱逐渐消失,如图5中(8)所示,至此完成了熔滴的射滴+射流的混合过渡。由于此波形参数下液态金属对熔池的持续冲击时间较长,电弧潜入熔池而观察到此参数下的电弧高度较低。

## 2.2 波形参数对焊缝成形和缺陷的影响

图6为不同工艺的焊缝表面和横截面形貌。可以看出,焊缝表面成形美观、均匀,表面无气孔缺陷和飞溅产生。由横截面形貌可以看出,相同输出电流

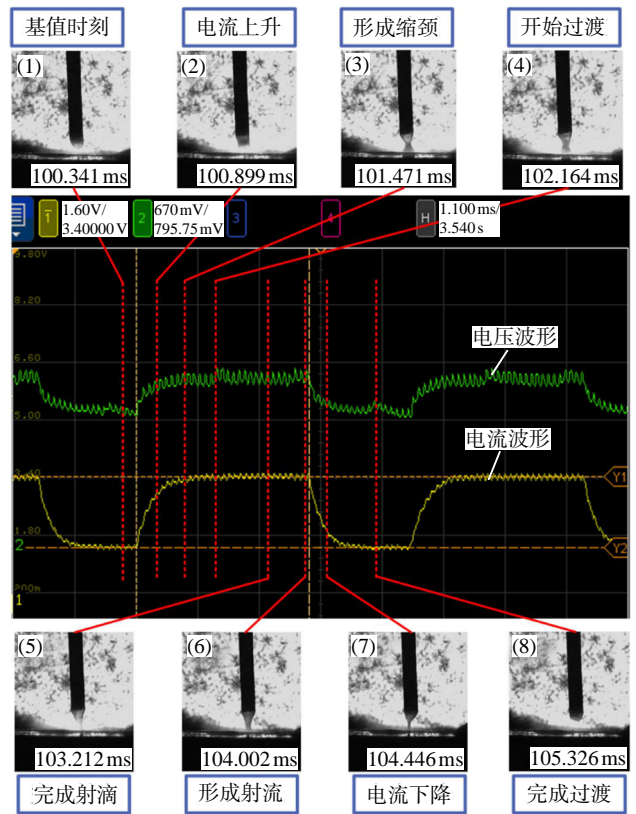


图5 输出电流 300 A,峰值时间 3.2 ms 的波形参数及熔滴过渡状态

Fig.5 Waveform parameters and droplet transition state under output current of 300 A, peak time of 3.2 ms

1	(a)	(b)
2	(c)	(d)
3	(e)	(f)
4	(g)	(h)
试验号	表面成形	截面形貌

图6 不同工艺的焊缝表面和横截面形貌

Fig.6 Weld appearance and cross sectional morphologies under different processes

下,脉冲时间较大时所对应熔深更大,余高略有增加,熔宽减小。这是由于脉冲峰值时间增大,电弧挺度大,熔池受热面面积小,导致熔宽减小,余高略有

增加。此外,大电流下熔深增加更明显,并且没有形成指状熔深。

为分析形貌变化规律,做不同输出电流下脉冲波形参数对焊缝形貌的影响规律柱状图,如图7所示。可以看出,在200A和300A输出电流下,峰值时间增大时所对应熔深分别增大了16.2%和38.8%,这是由于增大峰值时间,峰值前半阶段以滴状过渡进入熔池,紧跟的射流过渡对熔池产生较大且持续的冲击<sup>[10-11]</sup>,热量更有利于向板厚方向传递,使熔深增大。大电流时熔深提升效果更明显,这是因为大电流时液态金属对熔池的冲击持续时间更长且更剧烈。在200A和300A输出电流下,焊缝熔宽分别减小11.4%和8.4%;但300A电流下的余高明显减小,这是由于热输入高,熔池铺展性提升造成的。因此,通过设置合适的波形参数,在保证熔滴过渡稳定及焊缝成形较好的情况下,可以大幅提高焊缝熔深。

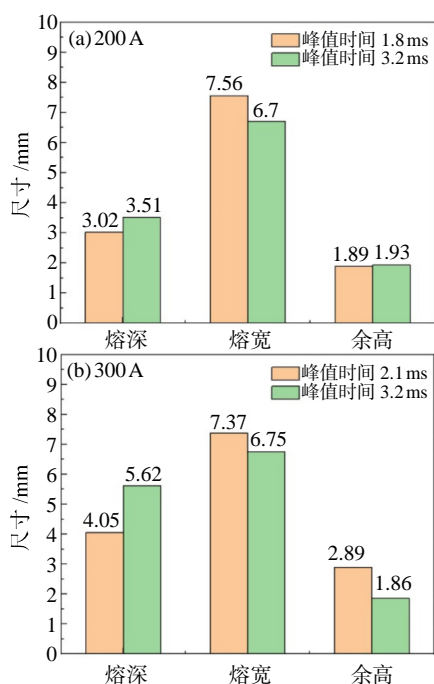


图7 不同输出电流下脉冲波形参数对焊缝尺寸的影响  
Fig.7 Influence of pulse waveform parameters on weld sizes under different output currents

图8为焊缝X射线检测结果图。通过ArcGIS软件对结果进行二值化处理,计算检测结果中气孔面积占焊缝面积的比例来得到气孔率。通过检测图像对比可知,相同输出电流下,峰值时间较大时气孔明显较少,且没有普通峰值时间下所形成的密集气孔分布特征。200A时,通过增大峰值时间,气孔率

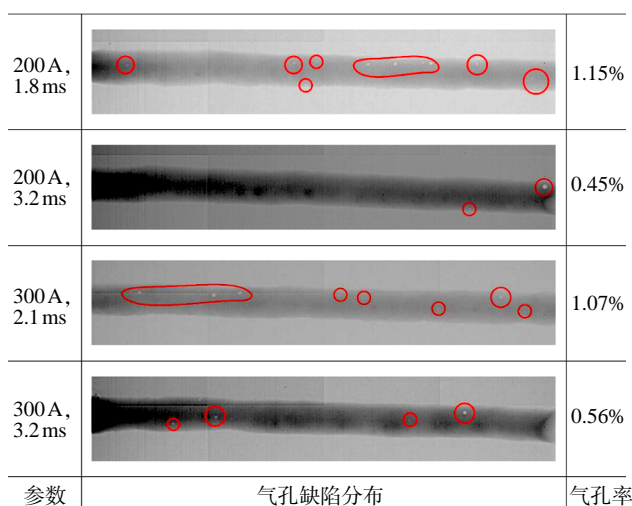


图8 焊缝的X射线检测结果  
Fig.8 X-ray test results of welds

由1.15%减小至0.45%;300A时,气孔率由1.07%减小至0.56%。气孔率的减小是由于峰值时间较长,单个周期热输入较高,虽然熔池温度高时对氢气等气体的溶解度增大,但熔池冷却慢,增加了气体逸出时间<sup>[12]</sup>。此外,较大的峰值时间其熔滴过渡为混合过渡形式,前期滴状过渡能起到打开熔池的作用,虽然对熔池的冲击较小,但紧随的射流过渡对熔池产生了较大的冲击,熔池震荡更剧烈,这更利于气体的逸出,气孔率显著减小。

### 3 结论

(1) 搭建由焊接系统、高速摄像及同步波形信息采集设备的试验系统,研究不同脉冲波形参数对6061铝合金脉冲MIG焊熔滴过渡、焊缝成形及气孔率的影响规律。在合适的波形参数下,焊接过程可达到稳定的一脉一滴的射滴过渡,过程稳定无飞溅;在保证输出电流、峰值与基值电流不变的情况下,通过增加峰值时间、降低脉冲频率的方式,熔滴过渡形式转变为射滴+射流的混合过渡。

(2) 射滴+射流混合过渡形式时,持续的射流过渡产生较大的电弧压力,能够对熔池产生显著的冲击,使热量向工件的厚度方向传递。在200A和300A输出电流下,峰值时间增大时所对应熔深分别增大了16.2%和38.8%


(3) 射滴+射流的混合过渡形式对熔池产生了较大的冲击,熔池震荡更剧烈,这更利于气体的逸出,可有效地抑制气孔缺陷,有利于提高焊缝质量。

(下转第73页)

高,但韧性也明显下降。碳钢基材硬度普遍高于不锈钢覆层的硬度。调质处理后,不锈钢覆层和碳钢基材的硬度都得到提高。

(3) 热轧态复合板不锈钢覆层和碳钢基材均具有良好的韧性,能够保证复合板的安全使用。但经过调质处理后,复合板中不锈钢覆层和碳钢基材的韧性均发生不同程度的下降,碳钢基材韧性下降最为明显;同时发现不锈钢覆层经过调质处理后产生了较为严重的晶间敏化现象。

#### 参考文献:

- [1] 谢广明,骆宗安,王光磊,等. 真空轧制不锈钢复合板的组织和性能[J]. 东北大学学报(自然科学版),2011,32(10):1398-1401.
- [2] Pan S C, Huang M N, Tzou G Y, et al. Analysis of asymmetrical cold and hot bond rolling of unbounded clad sheet under constant shear friction[J]. Journal of Materials Processing Technology,2006,177(1/3):114-120.
- [3] 倪红卫,高娟,唐利民. 不锈钢复合板制备技术的发展[J]. 特殊钢,2002(3):4-6.
- [4] Takeuchi E, Zeze M, Tanaka H, et al. Novel continuous casting process for clad steel slabs with level dc magnetic field [J]. Ironmaking & steelmaking,1997,24(3):257-263.
- [5] Harumoto T, Yamashita Y, Ohashi O, et al. Influence of cold rolling on diffusion bondability of SUS316L stainless steel sheets[J]. Materials Transactions,2014,55(3):633-636.
- [6] Li X, Zu G, Ding M, et al. Interfacial microstructure and mechanical properties of Cu/Al clad sheet fabricated by asymmetrical roll bonding and annealing [J]. Materials Science and Engineering A,2011,529:485-491.
- [7] Lee K S, Yoon D H, Kim H K, et al. Effect of annealing on the interface microstructure and mechanical properties of a STS-Al-Mg 3-ply clad sheet [J]. Materials Science and Engineering A,2012,556:319-330.
- [8] 郭秀斌,何毅,张心金,等. 热轧不锈钢/碳钢复合板结合界面的组织性能[J]. 一重技术,2015(5):52-55.
- [9] 代响林,刘宝玺,马久乐,等. 真空热轧法制备不锈钢复合板组织和力学性能[J]. 钢铁,2017,52(2):65-70.
- [10] 任晶波,王殿祥,王晓旭,等. 不锈钢等复合钢板热处理状态对各项性能的影响[J]. 石油和化工设备,2012,15(6):16-19.
- [11] Liu B X, Yin F X, Dai X L, et al. The tensile behaviors and fracture characteristics of stainless steel clad plates with different interfacial status [J]. Materials Science and Engineering A, 2017,679:172-182.
- [12] 郭崇晓,张燕飞,吴泽. 双金属复合管在强腐蚀油气田环境下的应用分析及其在国内的发展 [J]. 全面腐蚀控制,2010,24(2):13-17.
- [13] 孙育禄,白真权,张国超,等. 油气田防腐用双金属复合管研究现状[J]. 全面腐蚀控制,2011,25(5):10-12.
- [14] 聂海亮,马卫锋,赵新伟,等. 双金属复合管在油气管道的应用现状及分析[J]. 金属热处理,2019,44(S1):515-518.
- [15] Song H, Shin H, Shin Y. Heat-treatment of clad steel plate for application of hull structure[J]. Ocean Engineering,2016,122:278-287. 

(上接第 68 页)

#### 参考文献:

- [1] Zhang Y, Aghajan Z M, Ison M, et al. Decoding of human identity by computer vision and neuronal vision [J]. Scientific Reports,2023,13:651.
- [2] Zhao Y Q, Zhan X H, Zhou X D, et al. Effect of heat input on macro morphology and porosity of laser-MIG hybrid welded joint for 5A06 aluminum alloy [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2021,115:4035-4045.
- [3] Wang Y C, Li M N, Yang X Y, et al. Effect of P-MIG and CMT on microstructure and properties of 6082-T6 joints [J]. Materials Science and Technology,2023,39:2074-2089.
- [4] Cui S W, Yu Y H, Ma R, et al. Study on morphology, microstructure and properties of 6063-T6 aluminum alloy joints in MIG welding[J]. Materials,2023,16:4886.
- [5] 张世欣,汪认,谢旭,等. 转向架用 SMA490BW 耐候钢超射流过渡焊接工艺试验[J]. 电焊机,2017,47(10):40-45.
- [6] 张世欣,汪认,谢旭,等. SMA490BW 耐候钢超射流过渡焊接接头残余应力与疲劳性能 [J]. 热加工工艺,2018,47(19):85-89.
- [7] 曹益,梁志敏,汪殿龙. 铝合金超射流过渡焊接工艺研究[J]. 热加工工艺,2016,45(17):164-167.
- [8] 李洪亮,崔展祥,刘世雄,等. 6061 铝合金超声电弧 MIG 焊声电特性和工艺[J]. 航空学报,2022,43(2):185-194.
- [9] 李超凡. 波形参数对铝合金 CMT 高速焊接稳定性及焊缝成形影响的研究[D]. 济南:山东大学,2019.
- [10] 姜伟雁,张九海,赵崇仪. MIG(MAG)脉冲焊熔滴的过渡行为 [J]. 焊接学报,1994,15(1):54-55.
- [11] 孟捷. GMAW-P 脉冲参数与熔滴过渡及焊缝成形关系建模及分析研究[D]. 上海:上海交通大学,2008.
- [12] 黄绍服,曹鑫,茅卫东,等. 热输入对铝合金双脉冲 MIG 焊气孔缺陷的影响 [J]. 安徽理工大学学报(自然科学版),2020,40(5):8-12. 