

# 脉冲电流波形对 Tandem 双丝 MIG 焊力学性能影响

薛家祥<sup>1</sup>, 林方略<sup>1</sup>, 金礼<sup>2</sup>, 胡昱<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学, 广州 510641; 2. 贵州民族大学, 贵阳 550025)

**摘 要:** 双丝脉冲 MIG 焊作为高效化的不锈钢焊接方法, 是目前焊接行业研发的热点之一, 但是如何选择和调节双丝 MIG 焊的电流波形参数依旧是一个难点. 为了优化不锈钢焊接的焊接方法, 提高焊接效率, 文中以双相不锈钢为焊接工件, 通过电流波形参数对比试验, 研究了双丝梯形波双脉冲焊, 双丝矩形波双脉冲焊以及双丝单脉冲焊对焊接质量的影响. 结果表明, 在相同热输入的条件下, 双丝梯形波双脉冲焊焊接稳定性好于双丝矩形波双脉冲焊和双丝单脉冲焊, 且前者的焊接成形质量更高, 可看到更多的鱼鳞纹, 同时使不锈钢接头的拉伸强度和硬度以及韧性显著提高.

**关键词:** 脉冲 MIG 焊; 晶粒细化; 拉伸强度; 脉冲电流波形调制

**中图分类号:** TG 434

**文献标识码:** A

**doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400305

## 0 序 言

双丝脉冲 MIG 焊作为高效化的不锈钢焊接方法, 是目前焊接行业研发的热点之一. 实现高效焊接, 针对薄板焊接来说主要是提高焊接速度. 目前常规的脉冲焊接速度较低, 如果不改变焊接方法, 单纯地提高焊接速度会产生一些焊接缺陷, 其中最主要的是焊缝成形差<sup>[1-2]</sup>, 无法满足实际需要. 而使用单丝脉冲 MIG 焊, 一般最多可将焊接速度提高到 1.5 m/min; 而采用双丝高速脉冲 MIG 焊, 改善了对于熔池的作用方式, 可以大幅度提高焊接速度, 改善焊缝成形.

在双丝焊中脉冲电流波形参数的选择和调节依然是一个难点, 不同的波形参数对于焊缝成形的效果, 焊缝的力学性能影响很大. 其中, 在双丝单脉冲焊接方面, 牛永等人<sup>[3]</sup>对双丝脉冲 MIG 焊进行研究, 证明过高的前丝脉冲峰值电压会导致焊缝表面质量恶化; 文元美等人<sup>[4]</sup>进行了双丝电源系统的开发并研究了相位对成形的影响; 而姚屏等人<sup>[5]</sup>研

究了双丝单脉冲 MIG 焊, 发现对称过渡波形控制方法能使焊缝较为美观; 在双丝矩形波双脉冲 (DPMIG) 方面, 吴开源等人<sup>[6]</sup>对双丝脉冲 MIG 焊的双脉冲焊接方法进行研究, 证明双丝脉冲 MIG 焊中应用双丝矩形波双脉冲相对于单脉冲有一定优化作用; Wang 和 Mathivanan 等人<sup>[7-8]</sup>研究了双脉冲电弧焊, 证明其焊缝成形及性能优于单脉冲电弧焊; 而对于双丝梯形波双脉冲焊 (TPMIG) 的研究依然较少, 而且对于采用什么样的脉冲电流波形参数能够获得较好的焊缝质量仍然缺少足够的研究. 因此文中综合考虑焊接的电信号、接头的成形及力学性能等, 在相同的热输入条件下, 通过电流波形对比试验, 研究了单脉冲、矩形波以及梯形波三种焊接波形对 Tandem 双丝 MIG 焊的影响.

## 1 试验方法

文中通过双丝单脉冲焊、双丝矩形波双脉冲焊、双丝梯形波双脉冲焊三种焊接方法的进行对接焊对比试验, 通过改变强弱脉冲群的脉冲个数<sup>[9]</sup>, 控制输入能量进行试验研究. 试验结果从三个方面, 即焊缝形貌、微观组织及力学性能来分析焊接过程的稳定性. 试验均采用实验室自行开发的一体数字化双丝焊接电源和小波分析仪、丝杠焊接

收稿日期: 2019-07-07

**基金项目:** 国家自然科学基金资助 (51875213); 广东省省科学院 2016 年度引进人才专项资金项目 (2016-GDASRC-0106); 福建省自然科学基金项目 (2018J01503) 龙岩市科技计划项目 (2017LY68); 2015 东莞市引进第三批创新科研团队项目 (2017360004004)

平台、松下公司的送丝机等. 所采用的焊丝直径为 1.2 mm, 前导丝和跟随丝的送丝速度 1.8 m/min, 保护气体为纯度为 99.99% 的氩气, 气流量为 18 L/min. 主要焊接工艺参数如表 1 所示, 整个试验过程保持相同的焊接热输入.

试验所用母材为 2205 双相不锈钢钢板, 尺寸为 250 mm × 100 mm × 3 mm, 采用丝径为 1.2 mm 的 ER2209 焊丝. 小波分析仪用于焊接进程中焊接

电流及电压参数的实时采样. 焊后试样采用线切割的方法沿着焊缝横向截面截取金相, 先后打磨、抛光, 用王水试剂腐蚀 45 s, 酒精冲洗吹干后, 拍摄微观金相. 利用显微维氏硬度仪测试金相试样横截面中心线的硬度, 施加压力为 0.98 N, 测试时间是 15 s. 拉伸测试按照 GB/T228—2002《金属材料室温拉伸方法》进行, 并对拉伸试样的断口进行扫描电镜分析<sup>[10]</sup>.

表 1 主要焊接工艺参数  
Table 1 Main welding process parameters

试样序号	脉冲电流波形	强弱脉冲个数比 a:b	峰值电流 $I_p/A$	强脉冲基值电流 $I_{bs}/A$	弱脉冲基值电流 $I_{bw}/A$	基值时间 $t_b/ms$	峰值时间 $t_p/ms$
a	单脉冲	—	440	—	120	5	3
b	矩形波双脉冲	21:21	390	180	120	5	3
c	梯形波双脉冲	21:21	390	180	120	5	3

## 2 试验结果与分析

### 2.1 双丝脉冲 MIG 焊电信号结果分析

图 1 所示为小波分析仪采集的单脉冲、矩形波双脉冲、梯形波双脉冲三种焊接方式下的前导丝与跟随丝的原始电流电压波形. 通过对波形参数数据的分析可得, 单脉冲的跟随丝电压存在少

量零伏特电压值, 说明其焊接过程存在一定的不稳定性. 后两种焊接电流方式的强弱脉冲群的电流幅值比较接近, 一致性好. 而且梯形波双脉冲在强脉冲到弱脉冲与弱脉冲到强脉冲两种过渡阶段周期性有强弱过渡或者弱强过渡脉冲群, 过渡阶段波形更加平滑, 无杂波, 说明焊接过程稳定性良好.

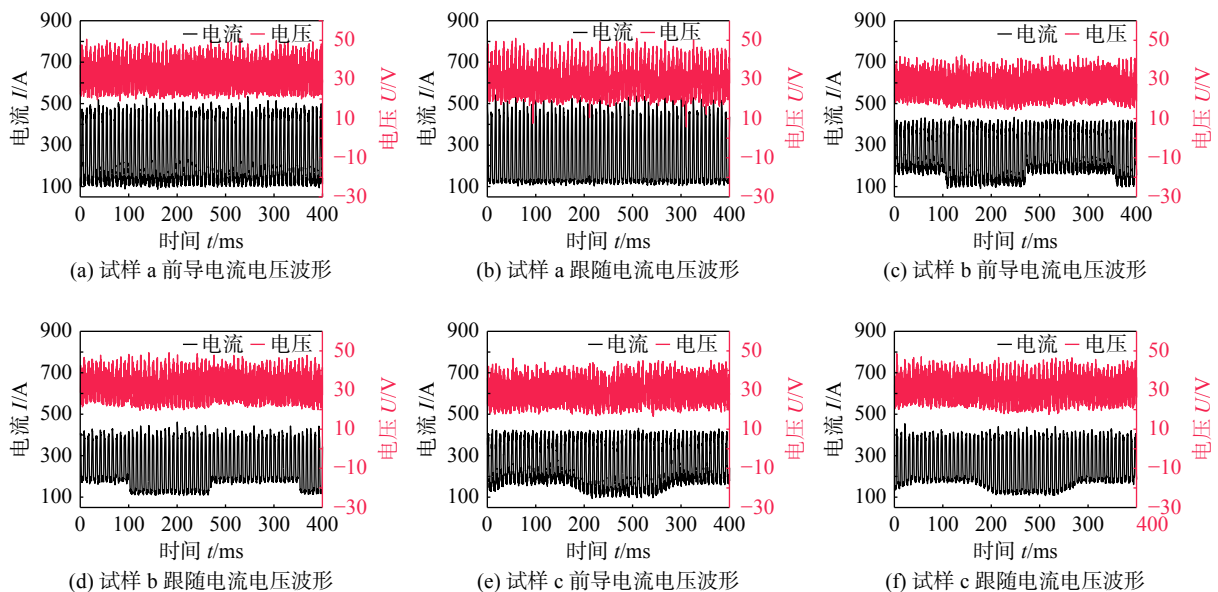


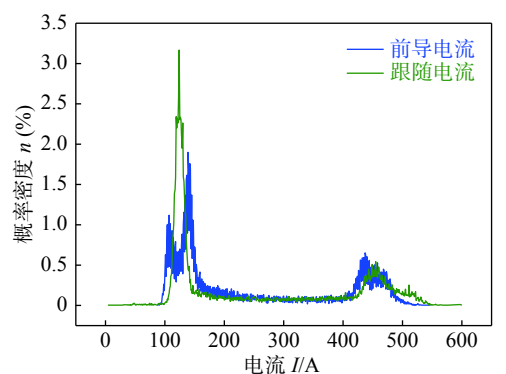
图 1 不同波形调制下电压电流波形

Fig. 1 Voltage and current waveforms under different waveform modulation

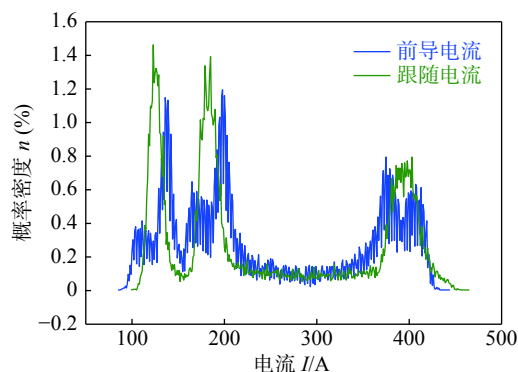
图 2 是单脉冲、矩形波双脉冲、梯形波双脉冲三种波形调制下的概率密度分布, 电流的概率

密度是对于焊接过程稳定性分析的一个重要的衡量指标. 在焊接条件相同的情况下, 电流分布

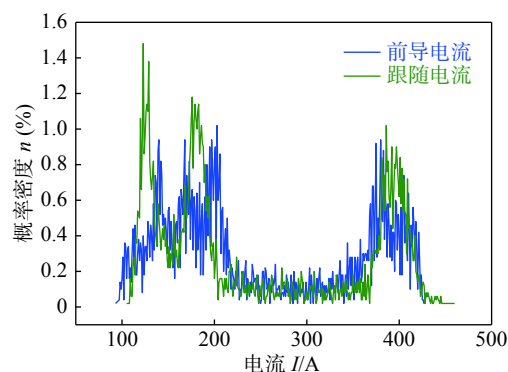
密度越集中,说明焊接过程的稳定性越好. 电流在峰值的密度大,说明熔滴在峰值阶段过渡的概率大,焊接过程相对更稳定. 由图中数据统计可知,试样 a, b, c 的电流都主要集中在 100~200 A 及 300~400 A 区间. 电流概率密度均一性高,且没有出现零电流值,试验的平稳性均较好. 前导电流的概率密度分布比较分散,跟随电流的概率密度分布相比更加集中<sup>[11]</sup>,所以跟随电流的稳定性要好于前导电流.



(a) 试样a 试验概率密度



(b) 试样b 试验概率密度



(c) 试样c 试验概率密度

图 2 三种不同波形的电流概率密度分布图

Fig. 2 Current probability density distribution of three different waveforms

## 2.2 焊缝形貌分析

三种不同电流波形的焊接试验过程都很流

畅,电弧稳定,一次成形,几乎没有断弧的现象,表 2 中展示了单脉冲、矩形波双脉冲、梯形波双脉冲三组波形参数对应的焊缝外观. 对比分析可知,相应的焊缝整体外观状况都良好,焊缝没有出现不均匀或者裂纹的现象;焊缝平均熔宽分别为 6.92, 7.31, 7.67 mm.

表 2 焊缝形貌

Table 2 Weld joints surface

试样序号	熔宽D/mm	焊缝形貌
a	6.92	
b	7.31	
c	7.67	

## 2.3 硬度分析

硬度的测量方法是以焊缝中心线与母材水平方向中心线的交汇点为零点,沿着接头母材水平方向中心线的正方向和负方向分别测 6 个点(即 6, 5, 4, 3, 2, 1, -1, -2, -3, -4, -5, -6). 图 3 是接头的显微硬度曲线图,该曲线图显示这三种波形调制下焊缝熔合区的维氏显微硬度变化情况,可得出以下结论,硬度由大到小顺序依次为试样 c, 试样 b, 试样 a, 根据霍尔-佩奇公式,细小的晶粒意味着更高的硬度,说明梯形波双脉冲波形下的焊接方法能够使晶粒细化,进而提升焊缝硬度. 而且其搅拌作用也较矩形波双脉冲和单脉冲波明显,从而提升焊缝性能.

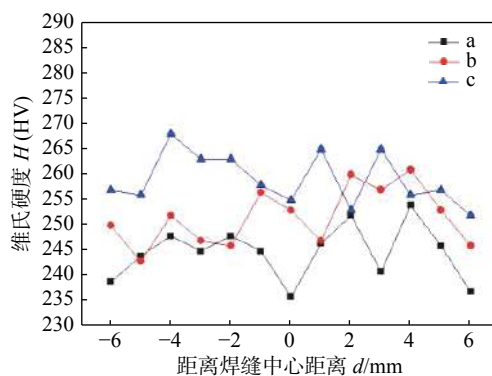


图 3 焊缝熔合区的维氏硬度

Fig. 3 Vickers hardness of weld fusion zone

## 2.4 抗拉强度分析

接头的抗拉强度结果见图 4 所示,单脉冲、矩形波双脉冲、梯形波双脉冲对应的焊接接头抗拉强度分别为 754, 794, 796 MPa, Tandem 双丝梯形波双脉冲焊接接头的抗拉强度略高于 Tandem 双丝矩形波双脉冲焊接接头的抗拉强度,且明显高于 Tandem 双丝单脉冲焊接接头的抗拉强度.三组试样拉伸断裂位置均发生在母材,该结果证明焊缝的抗拉强度高于 2205 母材.

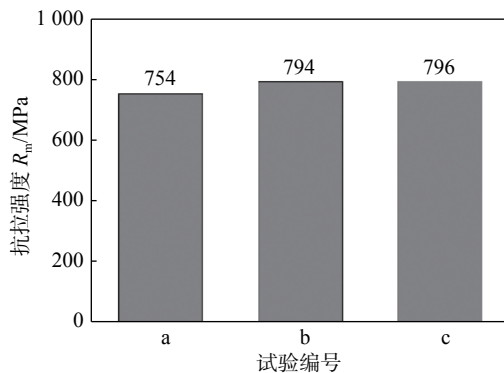


图 4 不同波形下的焊缝拉伸结果比较图

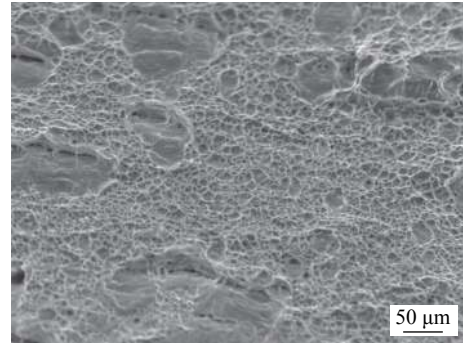
Fig. 4 Comparison of weld joint tensile results under different waveforms

## 2.5 拉伸断口扫描电镜分析

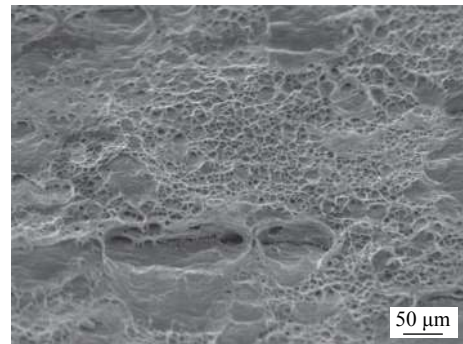
接头拉伸试验后的断口扫描电镜形貌如图 5 所示,单脉冲焊、矩形波双脉冲焊、梯形波双脉冲焊接头对应的断口形貌都是由大小不一的韧窝组成,该结果显示三种电流波形得到的接头的拉伸断裂形式都是韧性断裂.其中 Tandem 双丝单脉冲焊接头断口重要由小而浅的韧窝组成,而 Tandem 双丝梯形波双脉冲焊和 Tandem 双丝矩形波双脉冲焊接头的断口中存在较多的大而深的韧窝,这也印证了 Tandem 双丝梯形波双脉冲焊和 Tandem 双丝矩形波双脉冲焊接头的抗拉强度优于 Tandem 双丝单脉冲焊接头的抗拉强度.

## 2.6 冲击试验

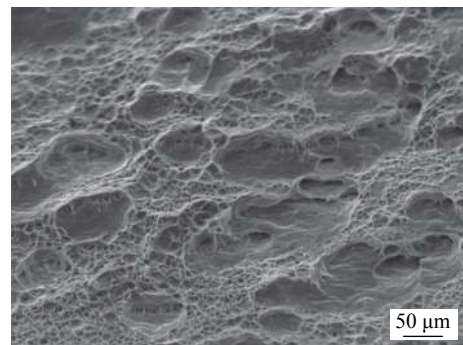
接头与母材的夏比冲击试验结果如表 3 所示,对比可得,母材的冲击吸收能量为 54 J,单脉冲、矩形波双脉冲、梯形波双脉冲三种波形调制下,接头的冲击吸收能量分别为 17.0, 19.8, 20.2 J.在相同的线能量条件下,梯形波双脉冲焊接头具有更高的冲击吸收能量,从而具有更好的韧性.



(a) 试样a 试验断口形貌



(b) 试样b 试验断口形貌



(c) 试样c 试验断口形貌

图 5 不同波形下的断口扫描电镜图

Fig. 5 Scanning electron micrograph of the fracture under different waveforms

表 3 接头与母材的夏比冲击试验结果

Table 3 Charpy impact test results of joints and base metals

序号	冲击吸收能量 $Q/J$			
	1	2	3	平均值
母材	53.5	53.8	54.7	54
试样a	16.6	17.1	17.3	17.0
试样b	19.7	20.1	19.6	19.8
试样c	20.2	20.1	20.3	20.2

## 3 结 论

(1)Tandem 双丝 MIG 焊的电流波形为单脉

冲、矩形波双脉冲和梯形波双脉冲时,跟随丝的焊接稳定性都优于前导丝的焊接稳定性。

(2) 显微硬度测试结果显示,电流波形为梯形波双脉冲时,接头的显微硬度最好,其次是矩形波双脉冲,最后是单脉冲。

(3) 单脉冲、矩形波双脉冲和梯形波双脉冲三种 Tandem 双丝电流波形得到的接头断裂模式皆为韧性断裂,后两者的抗拉强度优于单脉冲接头的抗拉强度。梯形波双脉冲焊接头相对于单脉冲焊接头和矩形波双脉冲焊接头具有更高的冲击吸收能量,具有更好的韧性。

#### 参考文献:

- [1] Cui S W, Shi Y H, Sun K, *et al.* Microstructure evolution and mechanical properties of keyhole deep penetration TIG welds of S32101 duplex stainless steel[J]. *Materials Science Engineering*, 2018, 709: 214 – 222.
- [2] Yao P, Zhou K, Zhu Q. Quantitative evaluation method of arc sound spectrum based on sample entropy[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 92: 379 – 390.
- [3] 牛 永, 薛海涛, 李 桓, 等. 脉冲电压峰值对双丝脉冲 MIG 焊熔滴过渡及焊缝成形的影响 [J]. *焊接学报*, 2010, 31(1): 50 – 54.  
Niu Yong, Xue Haitao, Li Huan, *et al.* Influence of pulse voltage peak on double-filament pulse MIG welding droplet transfer and weld formation[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, 31(1): 50 – 54.
- [4] 文元美, 黄石生, 吴开源, 等. 脉冲双丝 MAG 焊接电流相位关系对成形的影响 [J]. *焊接学报*, 2010, 31(9): 17 – 20.  
Wen Yuanmei, Huang Shisheng, Wu Kaiyuan, *et al.* The influence of phase relationship of pulsed double wire MAG welding current on forming[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, 31(9): 17 – 20.
- [5] 姚 屏, 薛家祥, 朱 强, 等. 基于概率密度分布图的双丝脉冲焊稳定性定量评价 [J]. *焊接学报*, 2014, 35(7): 51 – 54.  
Yao Ping, Xue Jiaxiang, Zhu Qiang, *et al.* Quantitative evaluation of double wire pulsed welding stability based on probability density distribution[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35(7): 51 – 54.
- [6] 吴开源, 何祖伟, 梁焯永, 等. 双丝脉冲 MIG 焊的双脉冲焊接方法 [J]. *焊接学报*, 2017, 38(5): 53 – 57.  
Wu Kaiyuan, He Zuwei, Liang Chaoyong, *et al.* Double-pulse welding method for MIG welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2017, 38(5): 53 – 57.
- [7] Wang L L, Heng G C, Chen H, *et al.* Methods and results regarding sinusoid modulated pulse gas metal arc welding[J]. *Scripta Materialia*, 2016, 86: 1841 – 1851.
- [8] Mathivanan A, Devakumaran K, Senthil Kumar A. Comparative study on mechanical and metallurgical properties of AA6061 aluminum alloy sheet weld by pulsed current and dual pulse gas metal arc welding processes[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2014, 29(8): 941 – 947.
- [9] Emami S, Saeid T, Khosroshahi R A. Microstructural evolution of friction stir welded SAF 2205 duplex stainless steel[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 739: 678 – 689.
- [10] Shi Y H, Cui S W, Zhu T, *et al.* Microstructure and intergranular corrosion behavior of HAZ in DP-TIG welded DSS joints[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 256: 254 – 261.
- [11] Du C C, Wang X, Hu L. Microstructure, mechanical properties and residual stress of a 2205DSS/Q235 rapidly formed LBW joint[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 256: 78 – 86.

---

**第一作者简介:**薛家祥,男,1962 年出生,博士,教授,博士研究生导师。主要从事数字化电源以及铝合金脉冲焊接机理研究等。发表研究论文 170 篇。Email: [mejiaxue@scut.edu.cn](mailto:mejiaxue@scut.edu.cn)