# 超快变换复合脉冲方波变极性 TIG 电弧行为

从保强 齐铂金 周兴国

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191)

**摘 要**：基于一种新型超快变换复合脉冲变极性电路变换拓扑，在正极性电流持续期间，叠加超音频直流脉冲方波电流，获得了过零无死区时间且具有快速电流上升沿和下降沿变化速率的复合超音频脉冲变极性方波电流，将其应用于铝合金的变极性 TIG 焊接过程，试验研究复合超音频脉冲方波变极性 TIG 电弧电学特性及其对铝合金焊缝成形等行为的变化规律. 研究结果表明：超音频脉冲方波电流对变极性 TIG 电弧具有显著的收缩效应，电弧径向尺寸明显减小，在一定范围内提高脉冲电流频率，减小脉冲占空比，增加脉冲电流幅值，可提高铝合金焊缝熔透率，有利于改善和提高铝合金的焊接质量.

**关 键 词**：超快变换；超音频脉冲电流；变极性；电弧行为；收缩效应

**中图分类号**：TG 403

**文献标识码**：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)08-1013-05

# Ultrafast-convert hybrid pulse square-wave variable polarity TIG arc behavior

Cong Baoqiang Qi Bojin Zhou Xingguo

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract**: Based on a novel ultrafast convert hybrid pulse variable polarity main circuit topology, the ultrasonic pulse current which had a frequency of more than 20 kHz was superposed in the positive current duration to achieve the hybrid pulse variable polarity current which crossed zero with no dead time and with fast rising and falling edge. The effect of pulse current parameters on the arc characteristics and the behavior of aluminum alloy weld noted by the weld depth and width were studied. The experiment results show that the ultrasonic pulse current has a significant influence on the pinch effect of hybrid pulse variable polarity TIG arc, resulting in the obvious reduction of arc radial dimension. Increasing the pulse current frequency and amplitude as well as decreasing the pulse current duty cycle in special ranges, the weld melt rate is enhanced which may be beneficial to improve the weld quality of aluminum alloy obviously using hybrid pulse variable polarity TIG arc welding technique.

**Key words**: ultrafast convert; ultrasonic pulse current; variable polarity; arc behavior; pinch effect

铝合金以其优良的物理化学性能和良好的加工成形工艺性能，广泛应用于航空、航天、舰艇以及装甲车辆等诸多领域. 焊接加工工艺作为其关键制造工艺之一，焊接质量的高低将直接影响和制约我国相关技术领域的发展和应用水平. 积极开展铝合金材料的新型先进焊接技术研究是我国国防军事以及航空航天等诸多领域发展的必然要求.

高频脉冲焊接是一种先进的焊接工艺方法，在自由电弧的基础上加入高频脉冲电流的调制作用，可提高电弧的稳定性，增强电弧的挺度和能量密度，有利于改善和提高焊接质量. 变极性电弧焊也是近些年发展起来的一种新型焊接技术，主要应用于钨极氩弧焊和等离子弧焊等. 相比较其它焊接方法，变极性电弧焊在有效清除铝合金表面氧化膜的同时可最大限度地减少钨电极的损耗，

**收稿日期**：2008-08-05

**作者简介**：从保强(1979 - )，男，安徽砀山人，博士生，congbq@ me. buaa. edu. cn.

获得满意的焊接质量. 若将高频脉冲焊接与变极性电弧焊接相结合,就可能实现一种新型高效的复合高频脉冲变极性电弧焊接工艺. 有学者对这种复合脉冲变极性电弧的压力及其焊接性能开展了初步的探索研究[1-2]. 近些年来的研究结果表明,高频脉冲电流参数(电流幅值、频率和占空比等)以及脉冲电流上升沿和下降沿的变化速率将会对高频脉冲电弧形态及其稳定性等产生重要作用[3-4]. 同时,变极性电流沿变化速率和过零速度的快慢也将会对电弧的电学特性及稳定性等方面产生影响,电流过零速度和沿变化速率越快,电弧稳定性越高[5]. 受电源硬件电路设计原理等方面的制约,目前变极性电流和高频脉冲电流的上升沿和下降沿变化速率一般仅能达到 5 ~ 10 A/μs,且脉冲频率≤20 kHz,因此,实现过零无死区时间且具有超快速电流上升沿和下降沿变化速率(≥50 ~ 100 A/μs)的复合超音频脉冲(≥20 kHz)变极性方波电流,试验研究超音频条件下复合脉冲变极性电弧的行为规律及其对铝合金焊接过程的影响,将具有重要理论意义和应用价值.

## 1 复合超音频脉冲变极性电源

基于先进电源变换理论,研究开发出了一种新型超快变换复合超音频脉冲方波电流变极性电路变换拓扑[6-7],见图 1. 区别于目前研究较多的常规变极性电源采用的二次逆变电路结构,后级桥式电流极性变换电路两个桥臂之间不需要设置任何死区保护时间,并允许功率开关管 $T_1$,$T_2$ 和 $T_3$,$T_4$ 存在一定的共同开通时间,实现变极性方波电流过零无死区时间的超快速极性变换. 高频直流脉冲切换电路可实现具有超快速电流上升沿和下降沿变化速率的超音频直流脉冲方波电流. 辅助并联吸收保护电路一方面保证功率开关管 $T_1$,$T_2$,$T_3$ 和 $T_4$ 工作的安全和可靠,另一方面可加快电流上升沿和下降沿的变化速率.

以铝合金 TIG 电弧为电路输出端负载,输出回路采用普通电缆连接,通过数字式示波器和霍尔电流传感器采集获得输出回路中实际复合超音频脉冲变极性方波电流波形,见图 2. 电流特征参数为正极性基值电流 $I_b$ = 20 A,脉冲电流 $I_P$ = 80 A;脉冲频率 $f_H$ = 20 kHz;脉冲占空比 $D$ = 50%;变极性电流频率 $f_L$ = 500 Hz;反极性电流 $I_N$ = 120 A;正反极性电流持续时间比 $t_p$: $t_N$ = 4: 1.

从图 2 中电流的变化曲线可明显看出,在电源输出回路传输电缆不采取任何特殊措施的条件下,实现了具有超快速电流上升沿和下降沿变化

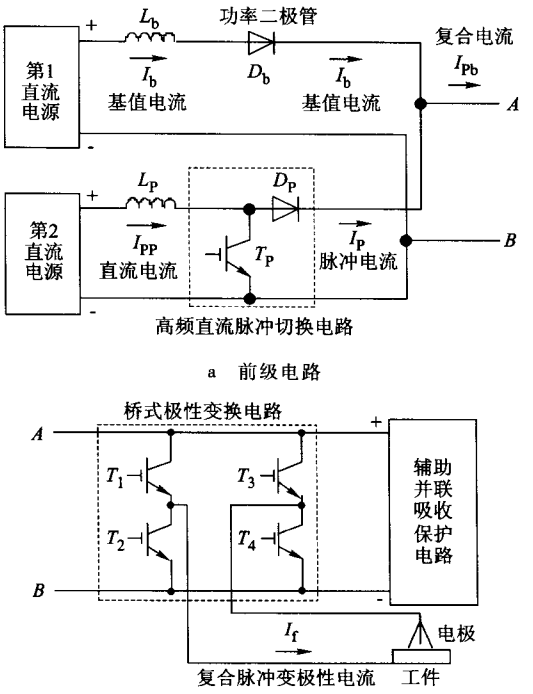



图 1 电源主电路拓扑

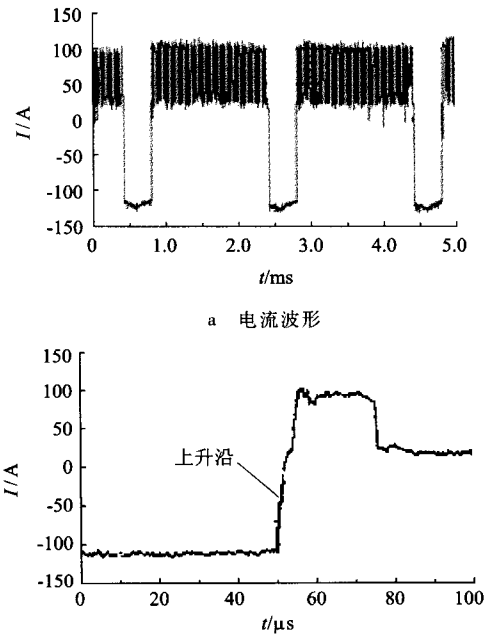



图 2 复合超音频脉冲变极性方波电流波形

速率(≥50 ~ 100 A/μs)的复合超音频脉冲变极性方波电流,且过零无死区时间. 另外,基于数字控制技术,实现了脉冲电流频率和占空比的精确控制,频率最高达 40 kHz,脉冲占空比 0 ~ 100% 独立调节,并且脉冲电流幅值可达上百安培,完全满足铝合金实际电弧焊接试验需要.

## 2　复合脉冲变极性电弧特性

### 2.1　电弧电学特性

试验条件:铝合金 5A06-O 平板,厚度 3 mm,钨电极规格 $\phi$3.2 mm WC 20,电极距离试件表面 3 mm,保护气体 Ar 流量 15 L/min,焊接速度 200 mm/min. 焊接电流 $I_b$ = 60 A, $I_P$ = 70 A, $I_N$ = 120 A, $f_L$ = 100 Hz, $t_P$: $t_N$ = 4: 1.

脉冲电流频率 $f_H$ 分别取 10,20,30 和 40 kHz 4 个水平,占空比 $D$ 分别选取 20%,50% 和 70% 3 个水平. 保持其它焊接工艺参数不变,试验测得正极性电弧脉冲峰值电压 $U$ 随 $f_H$ 和 $D$ 变化的关系曲线,见图 3.

为了降低焊接电流输出回路分布电感等因素对实际测量正极性电弧高频脉冲峰值电压 $U$ 的干扰,从钨电极和工件两端直接获得的电弧电压信号经过一个一阶 RC 低通滤波电路后,再由数字式示波器采集获得脉冲峰值电压信号,用该脉冲峰值电压值来表征实际复合脉冲变极性 TIG 电弧峰值电压 $U$ 的大小. 从图 3 中 $U$ 的变化曲线可明显看出,电流幅值等参数基本保持不变,$f_H$ 由 10 kHz 增加至 40 kHz, $U$ 随之明显升高;保持 $f_H$ 不变,脉冲电流占空比 $D$ 由 70% 减小至 20%, $U$ 也随之显著提高. 这是因为在正极性电流持续期间加入具有超快速上升沿和下降沿变化速率的高频脉冲电流,将会使电弧产生明显的高频压缩效应, $f_H$ 越高,脉冲电流持续时间越短,即 $D$ 越小,电弧的压缩效应就越明显,相应地 $U$ 也就越高.

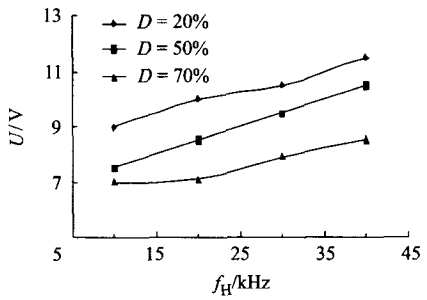
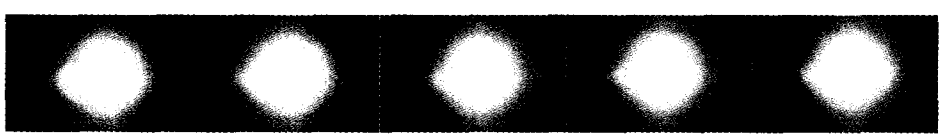



图 3　峰值电压与脉冲频率及占空比关系曲线

### 2.2　电弧形态分析

试验条件与 2.1 节中相同,其中焊接电流以保证正极性持续时间内的平均电流 $I_{avg}$ 基本相等进行选取(波动范围 ±3 A). 加入超音频脉冲电流后, $I_{avg} = I_b + I_P D$.

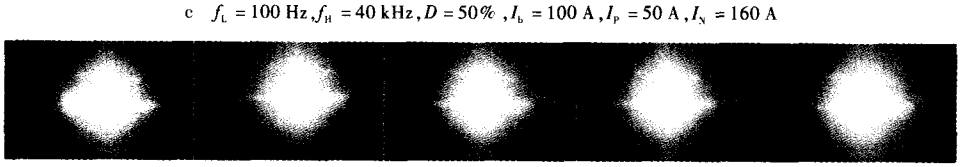
为了重点考察超音频脉冲电流对焊接过程中电弧工作形态的影响,采用由数码摄像机(30 幅/s)和滤光系统组成的电弧形态拍摄系统对电弧工作形态进行对比和分析. 保持其它焊接工艺参数不变,分别采集不同 $f_H$ 和 $D$ 条件下变极性 TIG 电弧的工作形态,见图 4.



a　$f_L$ = 100 Hz, $f_H$ = 0, $D$ = 0, $I_b$ = 125 A, $I_N$ = 160 A

b　$f_L$ = 100 Hz, $f_H$ = 20 kHz, $D$ = 50%, $I_b$ = 100 A, $I_P$ = 50 A, $I_N$ = 160 A

c　$f_L$ = 100 Hz, $f_H$ = 40 kHz, $D$ = 50%, $I_b$ = 100 A, $I_P$ = 50 A, $I_N$ = 160 A



d　$f_L$ = 100 Hz, $f_H$ = 20 kHz, $D$ = 20%, $I_b$ = 100 A, $I_P$ = 100 A, $I_N$ = 160 A

图 4　复合超音频脉冲方波变极性 TIG 电弧形态

由图4在焊接工作过程中电弧形态的变化可明显看出，保持 $I_{avg}=123\pm3$ A，与常规变极性TIG电弧（图4a）相比，复合超音频脉冲变极性TIG电弧发生了明显的收缩效应，$f_H$ 越高，$D$ 越小，电弧收缩越明显，电弧径向尺寸越小. 这是因为在正极性持续期间超音频脉冲电流产生了显著的高频压缩效应，使得电弧沿径向收缩，电弧形态随之发生变化. 当引入高频脉冲电流时，电弧电流密度将发生高频的脉动变化，而脉冲频率越高，持续时间越短，电弧电流密度的脉动变化也就越明显，根据电磁学理论，电弧的收缩作用也就更为明显[8-9]. 电弧收缩而使得电弧挺度及其能量密度提高，同时复合脉冲方波变极性TIG电弧的挺度增强，电弧稳定性也就越好.

## 3 复合脉冲变极性电弧适用性

### 3.1 电弧对焊缝熔深和熔宽的影响

试验材料选用铝合金5A06-O平板，焊接试件尺寸 100 mm × 50 mm × 3 mm，钨电极规格 $\phi$3.2 mm WC 20，电极与铝合金试件之间距离3 mm，保护气体Ar流量15 L/min，焊接速度200 mm/min，焊接电流 $I_b=70$ A，$I_P=50$ A，$I_N=130$ A，$f_L=100$ Hz，$t_P:t_N=4:1$.

为减少其它因素干扰，采用不填充焊丝焊接工艺，每个试件上只焊一道，在电弧起弧并稳定燃烧约5 s后TIG焊枪开始匀速移动，在铝合金平板上获得焊缝的横截面如图5所示，使用游标卡尺在焊缝长度方向的中间位置附近分别测量焊缝正面宽度 $W_{th}$ 和焊缝底部与焊缝背面之间的距离 $B$，测量3次并取平均值，$W_{th}$ 为焊缝熔宽，试件厚度 $B_m$ 与距离 $B$ 之间的差值即可表示为熔深 $D_{th}$，即 $D_{th}=B_m-B$.

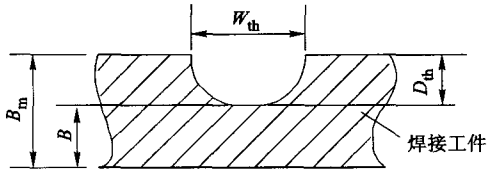
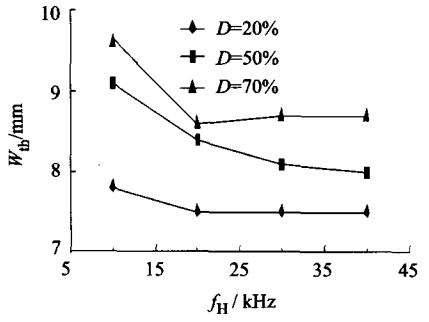
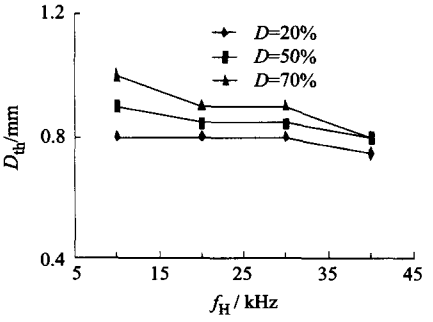



图5 焊缝熔深和熔宽测量示意图

采用上述测量方法分别获得5A06铝合金焊缝 $W_{th}$ 和 $D_{th}$ 随 $f_H$ 和 $D$ 变化的关系曲线，见图6. 由图6中可以看出，在电流幅值不变的条件下，提高 $f_H$，降低 $D$，有利于减小焊缝熔宽，尽管 $I_{avg}$ 大幅减小（由 $D=70\%$ 的105 A减小至 $D=20\%$ 的80 A），但焊缝熔深变化不大. 保持 $D=50\%$，$f_H$ 由10 kHz增大至40 kHz，$W_{th}$ 由10 kHz时的9.1 mm减小至40 kHz时的8 mm；在相同的正极性平均电流条件下，常规变极性电弧焊接焊缝 $W_{th}=10$ mm，$D_{th}$ 仅为0.5 mm；保持 $f_H=40$ kHz，$D$ 由70%减小至20%，$W_{th}$ 由70%时的8.7 mm减小至20%时的7.5 mm，$D_{th}$ 基本保持不变. 初步分析认为，提高复合脉冲电流频率，电弧径向收缩现象增强，但电弧的轴向压力并没有因此而发生明显变化，从而使得焊缝熔宽减小而熔深并未发生显著的变化. 另外，复合超音频脉冲变极性TIG电弧的高频压缩效应使得电弧径向尺寸明显减小，电弧的挺度和能量密度增强，从而有利于获得满意的焊缝熔宽和熔深[10-11].




a 焊缝熔宽变化曲线




b 焊缝熔深变化曲线

图6 熔深熔宽与脉冲电流的关系曲线

### 3.2 电流特征参数的优化匹配

比较和分析以上试验测试数据可知，在一定范围内提高 $f_H$，降低 $D$，同时增加超音频脉冲电流幅值，可增强复合超音频脉冲变极性TIG电弧的收缩作用，从而减小铝合金焊缝熔宽，缩小焊缝的热影响区范围，有利于改善和提高铝合金材料的焊接质量. 保持 $f_H=20$ kHz，$D=50\%$，$f_L=100$ Hz，$t_p:t_N=4:1$，$I_N=130$ A不变，其它焊接工艺参数同3.1节. $I_b=70$ A，$I_P=50$ A时，$W_{th}=8.4$ mm；$I_b=50$ A，$I_P=70$ A时，$W_{th}=7.9$ mm，而 $D_{th}$ 均为0.8 mm左右. 复合脉冲电流幅值由50 A增大至70 A时，$W_{th}$ 减小了0.5 mm，而 $D_{th}$ 基本保持不变. 由上述试验数据可知，恰当选择和优化匹配复合超音频脉冲变极性方波电流特征参数，可实现改善和提高铝合金焊接质量的目的.

## 4 结　论

1) 具有超快速电流上升沿和下降沿变化速率(≥50 ~ 100 A/μs)的复合超音频脉冲变极性方波 TIG 电弧可产生显著的收缩效应,电弧径向尺寸明显减小;

2) 提高超音频脉冲电流频率,降低脉冲占空比,增大脉冲电流幅值,有利于增强电弧的收缩效应,提高电弧挺度,增强电弧的稳定性;

3) 合理选择和优化匹配复合超音频脉冲变极性方波电流特征参数,在获得一定熔深尺寸的同时,可减小焊缝熔宽,缩小焊缝的热影响区范围,有利于改善和提高铝合金的焊接质量.

### 参考文献 (References)


[1] 邱灵,范成磊,林三宝,等. 高频脉冲变极性焊接电源及电弧压力分析[J]. 焊接学报,2007,28(11):81 - 85
Qiu Ling, Fan Chenglei, Lin Sanbao, et al. High-frequency pulse modulated variable polarity welding power and its arc pressure[J]. Transactions of the China Welding Institute, 2007, 28(11): 81 - 85(in Chinese)

[2] 邱灵,杨春利,林三宝. 高频脉冲变极性焊接工艺性能研究[J]. 焊接,2007(7):35 - 38
Qiu Ling, Yang Chunli, Lin Sanbao. Technology properties of variable polarity arc welding with high frequency pulsed current [J]. Welding & Joining, 2007(7): 35 - 38(in Chinese)

[3] 赵家瑞. 电流脉冲频率对 TIG 焊电弧影响机理的研究[J]. 电焊机,1993(2):16 - 18
Zhao Jiarui. Mechanism of pulse current frequency effect on TIG arc[J]. Electric Welding Machine, 1993(2): 16 - 18(in Chinese)

[4] 殷树言,王其隆,何景山,等. 小电流高频 TIG 焊电弧稳定性的研究[J]. 金属科学与工艺,1987,6(4):97 - 106
Yin Shuyan, Wang Qilong, He Jingshan, et al. A study of the arc stability in low-current and high-pulsed TIG welding[J]. Metal Science & Technology, 1987, 6(4): 97 - 106(in Chinese)

[5] Zeng X M, Lucas J, Ren Y Y, et al. Welding with high-frequency square-wave AC arcs[J]. IEE Proceedings A, 1990, 137(4): 193 - 198

[6] 齐铂金,从保强. 超快变换方波复合脉冲电流变极性弧焊电源装置:中国,200710120834.6[P]. 2008 - 02 - 20
Qi Bojin, Cong Baoqiang. Ultrafast-convert square-wave complex-pulse-current variable polarity arc welding power supply: China, 200710120834.6[P]. 2008 - 02 - 20(in Chinese)

[7] 齐铂金,从保强. 新型超快变换复合脉冲变极性弧焊电源拓扑[J]. 焊接学报,2008,29(11):57 - 60
Qi Bojin, Cong Baoqiang. A novel ultrafast-convert complex-pulse variable-polarity arc welding power topology[J]. Transactions of the China Welding Institute, 2008, 29(11): 57 - 60(in Chinese)

[8] 赵家瑞,孙栋,胡绳荪,等. 高频脉冲 TIG 焊电弧的阳极行为[J]. 焊接学报,1992,13(1):59 - 66
Zhao Jiarui, Sun Dong, Hu Shengsun, et al. Arc behavior of high frequency pulse TIG welding arc[J]. Transactions of the China Welding Institute, 1992, 13(1): 59 - 66(in Chinese)

[9] Ghosh P K, Dorn L, Hübner M, et al. Arc characteristics and behavior of metal transfer in pulsed current GMA welding of aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 194: 163 - 175

[10] Cook G E, Eassa E H. The effect of high-frequency pulsing of a welding arc[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1985, 1A-21(5): 1294 - 1299

[11] Palani P K, Murugan N. Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 172(1): 1 - 10


(责任编辑:文丽芳)