超音频脉冲 TIG焊电源拓扑及电弧焊适用性

齐铂金 许海鹰 黄松涛 张 伟

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 研制出一台超音频直流脉冲 TIG(Tungsten Inert Gas)焊电源, 对该电源的拓扑结构及工作原理进行了介绍. 与常规直流 TIG焊电源相比, 该电源可输出不同频率、均具有陡峭的上升、下降沿的脉冲电流, 电流变化率大于 50A/μs. 该电源的基值电流、峰值电流、脉冲电流频率、占空比等焊接工艺参数调节方便, 使该电源不仅能够焊接薄板, 而且能够适用于中厚板的焊接. 通过对比常规直流 TIG焊和超音频直流脉冲 TIG焊焊接的 1Cr18Ni9Ti奥氏体不锈钢焊缝的微观组织, 发现采用超音频直流脉冲 TIG焊工艺的焊缝粗晶区变窄, 晶粒细化现象显著. 试验结果表明: 所研制的超音频脉冲 TIG焊电源具有良好的弧焊适用性.

关 键 词: 超音频脉冲; TIG焊; 细化晶粒

中图分类号: TG 444+. 74

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009) 01-0061-04

Ultrasonic frequency pulse tungsten inert gas welding power source topology and welding applicability

Qi Bojin Xu Haiying Huang Songtao Zhang Wei

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

Abstract An ultrasonic frequency pulse tungsten inert gas welding power source was developed. The power source topology and work principle were introduced. By contrast with current waves output from conventional tungsten inert gas welding power source, faster rising and falling pulse current edges were output from this power source at every ultrasonic pulse frequency. The pulse current change rate was up to 50A per microsecond. The power source was suited for welding not only sheet metal, but also medium and thick metal for base current, peak current, duty, pulse current frequency and other weld technology parameters expediently adjusted. By comparing with 1Cr18Ni9Ti austenitic stainless steel joints welded by conventional tungsten inert gas welding, these joints welded by the ultrasonic frequency pulse tungsten inert gas welding were shown grain refinement and narrow coarse grain zone in weld beads. The experiment results show that the ultrasonic frequency pulse tungsten inert gas welding power source is applicable to arc welding.

Key words ultrasonic frequency pulse; tungsten inert gas welding; grain refinement

脉冲 TIG(Tungsten Inert Gas)焊作为一种高效、优质、节能的焊接工艺, 具有独特的优越性. 当脉冲 TIG焊的焊接电流频率提高到超音频时, 电弧形态和热分布产生显著变化. 在平均电流相同的情况下, 超音频电弧比连续直流电弧的电磁收缩效应增强, 熔透性增加. 同时, 熔池受到超声波振动, 改善了焊缝物理化学冶金过程并增加了熔池流动性[1], 这与传统直流、低频脉冲 TIG焊相比明显不同. 超音频直流脉冲 TIG焊可调的规范参数多, 如: 脉冲幅比、脉冲频率、占空比等, 可根据母材特性匹配出最佳的焊接规范, 得到高质量焊缝.

鉴于超音频直流脉冲 TIG焊的显著优点, 自 20世纪 70年代中期开始, 国内外相继出现关于超音频、高频直流脉冲 TIG焊研制成果的报道. 国内对超音频、高频直流脉冲 TIG焊电源的研究起

收稿日期: 2008-02-18

作者简介: 齐铂金(1963-), 男, 湖南湘潭人, 教授, qb@buaa.edu.cn.

步较晚. 国外 20世纪 70年代高频直流脉冲 TIG焊电源的典型代表是日本大阪变压器公司采用模拟型晶体研制的 TR-800[2], 该电源输出电流的最高频率为 10 kHz. 2002年, 日本秋田省立大学(Akita Prefectural University)与日立研究中心(Hitachi Research Laboratory)采用 IGBT联合研制成功脉冲频率可达 20 kHz, 最高峰值电流可达 500A的直流脉冲 TIG焊电源, 与同等功率普通直流 TIG相比, 电弧压力、所获得熔深、焊接速度均提高了 2~3倍[3]. 然而受电源基本拓扑结构及控制原理的限制, 以及高频大电流传输技术的制约, 国内外相关研究的电源输出大电流时, 电流波形畸变大, 脉冲电流上升、下降沿变化缓慢, 电流变化率 di/dt一般在 5 A/μs以下. 以往研究表明脉冲电流跃变时, 脉冲电流前后沿越陡越好, 产生的高频效应越显著[4].

因此, 为充分发挥超音频脉冲大电流电弧的高频效应, 关键技术在于提高脉冲电流的变化率. 本文采用 IGBT构成的一种新型拓扑电路结构[5], 并结合 DSP控制技术, 研制出超音频直流脉冲 TIG焊电源. 该电源的脉冲电流频率范围为 1~30 kHz, 占空比调节范围 10%~80%, 脉冲峰值电流范围 5~250 A, 基值电流范围 5~250 A, 电流变化率 $di/dt \geqslant 50$ A/μs 不仅能够适用于不锈钢、钛、铜等薄板精密焊接, 而且能够实现对这些材料中厚板材的焊接.

1 电源主回路拓扑

常规脉冲焊接电源的拓扑及控制方式如图 1所示. 半桥或全桥逆变主电路将工频整流滤波后的直流转化为高频交流电, 该高频交流电经过主变压器降压, 再传输至输出整流电路变换成直流, 经续流电感后给电弧供电. 电流传感器采集到的电流反馈信号 I_f与给定信号 I_g进行差值比较后闭环控制输出 PWM脉冲信号, 经过驱动电路后控制全桥或半桥逆变主电路上的功率管工作.

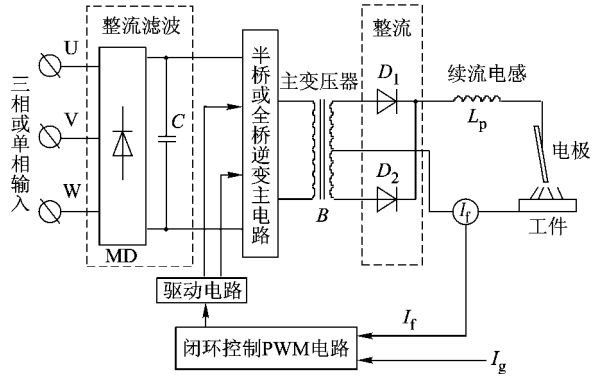


图 1 常规直流脉冲 TIG焊电源拓扑及控制方式

由于其电源主电路及其控制方法的局限, 以及焊接输出电缆电感的影响, 使得其输出脉冲电流的上升和下降速度难以满足中高频、超音频方波电流输出的要求. 焊接时电流高达上百安培, 要求实现超音频方波输出电流的关键是解决其电流脉冲的上升、下降速度的问题.

为此, 研制出如图 2所示的超音频直流脉冲弧焊电源拓扑电路. 它是由三相整流滤波电路、脉冲峰值电流产生主电路、超音频脉冲峰值电流切换电路、基值电流产生主电路、尖峰电压吸收保护电路、高频引弧电路等几部分组成. 脉冲峰值电流产生主电路部分由 IGBT构成的半桥式或全桥式逆变电路、主变压器 B_1、整流二极管 D_1和 D_2、滤波电感 L_p等构成, 其功能是产生脉冲峰值电流 I_p, 基值电流产生主电路部分由 IGBT构成的半桥

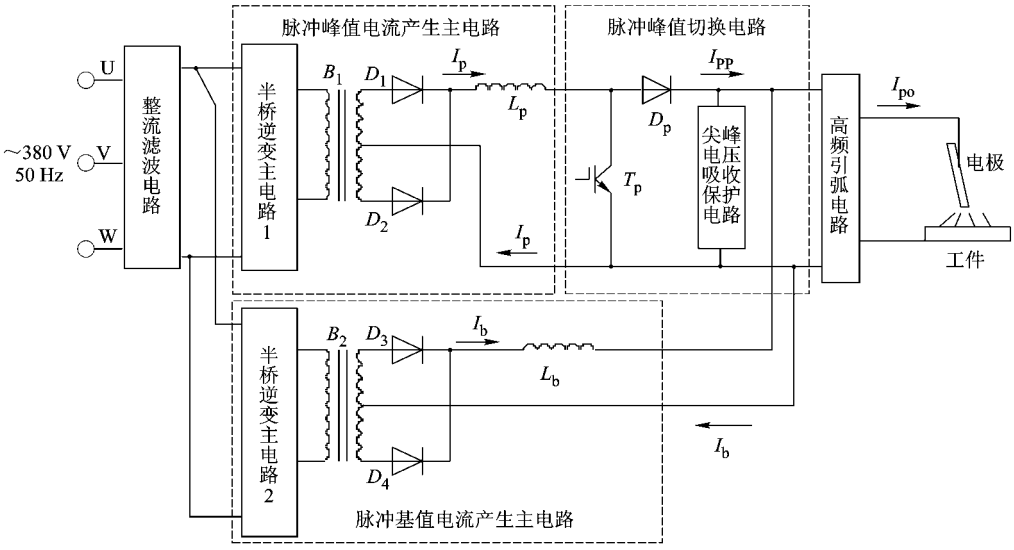


图 2 超音频直流脉冲 TIG焊电源拓扑

式或全桥式逆变电路、主变压器 B_2、整流二极管 D_3和 D_4、滤波电感 L_b等构成, 其功能是产生基值电流 I_b. 超音频脉冲峰值电流切换电路由 IGBT T_p、大功率二极管 D_p、尖峰电压吸收保护电路等组成, 用于实现脉冲峰值电流 I_{PP}的输出. 在电极与工件之间并联有尖峰电压吸收保护电路, 用于吸收电压尖峰. 高频引弧电路在焊接引弧的时候产生高频, 实现电弧的非接触高频引弧.

所研制的超音频直流脉冲弧焊电源采用相互独立的基值电流产生电路和峰值电流产生电路, 实现了超音频脉冲基值与峰值电流的独立控制与调节; 并且峰值电流产生电路所用的续流电感为 mH 级, 常规脉冲 TIG 焊电源中所用续流电感为 μH级, 续流电感的较大电感量, 使得峰值电流切换电路的功率管 T_p 开通关断时, 脉冲峰值电流 I_{PP}的波动较小. 脉冲峰值电流切换电路的功率管 T_p和大功率二极管 D_p 的快速切换, 不但能使超音频脉冲电源输出端得到具有陡峭上升、下降沿的方波脉冲电流波形, 而且该电路的采用保障了脉冲电流频率和占空比的独立可调.

2　电源工作原理

超音频直流脉冲弧焊电源的控制电路框图如图 3所示.

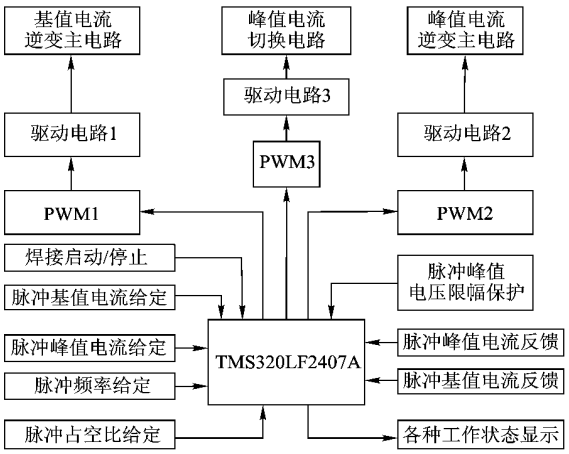


图 3　超音频直流脉冲 TIG 焊电源控制框图

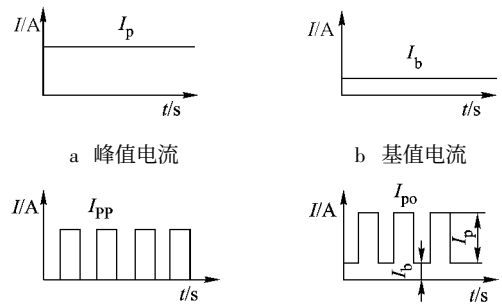
TMS320LF2407A 处理数据的速度快, 能够提供多路 PWM 信号输出, 作者选用该型 DSP作为主控芯片.

所设定脉冲基值电流、脉冲峰值电流、脉冲电流频率和占空比等工艺参数不但可以在液晶屏上显示出来, 为用户提供良好的交互界面, 而且各个工艺参数可实时调整, 可在不中断焊接操作条件下, 匹配出最佳工艺参数.

脉冲基值电流反馈值、脉冲峰值电流反馈值分别与所设定的基值、峰值电流给定值进行闭环 PID运算处理后, 输出相应的 PWM 1和 PWM 2信号, 经过驱动电路 1和驱动电路 2后, 分别控制基值电流产生逆变主电路、峰值电流产生逆变主电路的功率管开通关断时间, 从而得到稳定的脉冲基值、峰值电流.

DSP根据所设定的脉冲电流频率和占空比输出 PWM 3信号, 经过驱动电路 3后, 控制峰值电流切换电路的功率管 T_p 的开通关断. 这样峰值电流产生逆变主电路输出的电流被切换成相应频率、占空比的超音频脉冲电流.

脉冲峰值产生主电路和脉冲基值产生主电路输出的峰值电流波形 I_p和基值电流波形 I_b 分别如图 4a和 4b所示. 当超音频脉冲峰值电流切换电路部分的功率管 T_p开通时, 峰值电流通过由 L_p和 T_p构成回路, 维持稳定的 I_p; 当 T_p 关闭时, I_p流经 L_p和 D_p、焊接电弧, 给焊接电弧提供脉冲峰值电流 I_{PP}, 该电流波形如图 4c所示. 在基值和峰值电流同时给定的情况下, 脉冲基值电流和脉冲峰值电流在输出端进行叠加, 这样就在焊接电弧上得到如图 4d所示的电流波形 I_{po}. 输出脉冲电流 I_{po}的最大幅值为峰值电流 I_{PP}和基值电流 I_b 之和, 最小值为基值电流 I_b. 由于采用的拓扑结构能够实现 T_p和 D_p的快速切换, 并且峰值电流产生电路所用的续流电感的电感量足够大, 这样可在电源输出端得到频率大于等于 20 kHz, 高达上百安具有陡峭的上升、下降沿方波电流输出 (电流变化率 $di/dt \geqslant 50\,A/\mu s$).



a　峰值电流　　b　基值电流

c　峰值切换电路输出电流　　d　电源输出端电流

图 4　超音频直流脉冲电源各部分输出电流波形

峰值电压限幅保护电路检测电源输出端的电压, 一旦超出输出电压限幅值, 则关闭峰值电流和基值电流的输出, 实现对主电源电路的保护.

3　试验与结果分析

试验条件: ①试验设备特点: 所研制的超音频

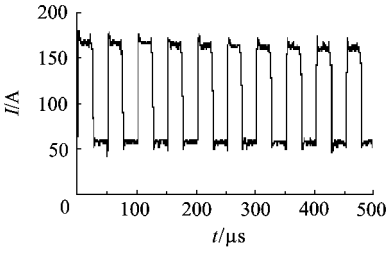
脉冲 TIG 焊电源具有恒流外特性, 其主要技术参数见表 1; ②焊接电流: 基值电流 I_b = 50 A, 峰值电流 I_p = 120 A, 占空比 50%; ③氩气流量: 15 L/min; ④焊接速度: 10 6m/h; ⑤焊接姿态: 水平焊接; ⑥钨极直径: ϕ= 2 6mm; ⑦焊接极性: 直流正接; ⑧工件材质: 5mm 厚的 1Cr18Ni9Ti不锈钢板.

表 1 超音频直流脉冲 TIG 焊电源主要技术参数

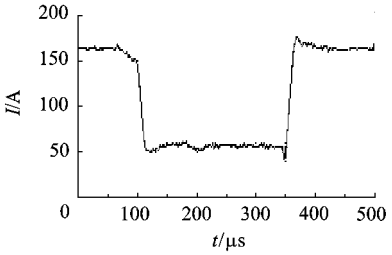
参数	空载电压 /V	I_b /A	I_p /A	脉冲频率 /kHz	占空比 /%
数值	60	5~ 250	5~ 250	1~ 30	10~ 80

3.1 焊接电弧与电流波形的特点

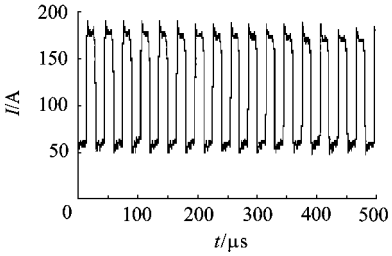
分别采用脉冲频率为 20 kHz和 30 kHz, 其它工艺参数如上所述, 焊接不锈钢. 焊接时, 用 TPS2014示波器检测电源输出的电流, 测试结果如图 5所示.



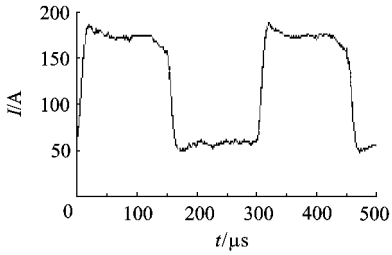
a 频率 20kHz



b 频率 20kHz 脉冲电流上升、下降沿



c 频率 30kHz



d 频率 30kHz 脉冲电流上升、下降沿

图 5 电源输出脉冲电流波形

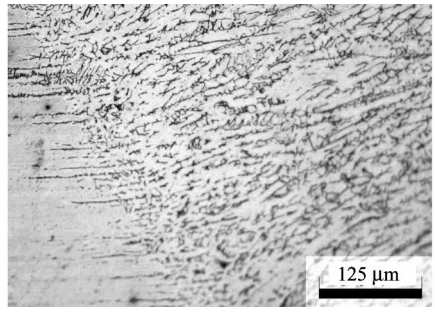
观察各频率超音频脉冲电流波形的上升、下降沿, 可以看出, 所研制的超音频直流脉冲弧焊电源可输出超音频脉冲大电流, 脉冲电流上升、下降沿的电流变化率 $di/dt \geqslant 50\ A/\mu s$, 能够满足超音频脉冲 TIG 焊大电流焊接的需求. 试验中发现, 弧长 2~ 5mm 的超音频 TIG 焊电弧呈现钟罩形, 而等效电流的直流 TIG 焊电弧呈现碟形. 表明电弧在超音频状态下, 电弧高频效应使电弧收缩, 电弧的挺度增强, 穿透力增大.

3.2 超音频直流脉冲 TIG焊接试验结果与分析

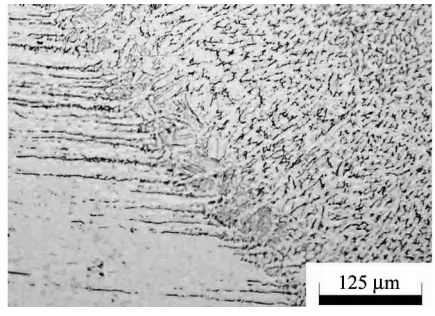
在如上所述的焊接工艺条件下, 分别采用脉冲电流频率为 30 kHz和与其等效的直流 TIG 焊, 在 1Cr18Ni9Ti不锈钢工件上重熔形成的焊缝, 观察分别采用两种工艺的焊缝显微组织.

图 6a是采用直流 TIG 焊工艺重熔接头的显微组织. 从母材到焊缝之间的组织变化为: 在母材上为沿轧制方向被拉长的奥氏体晶粒, 在熔合线附近靠近母材一侧为相互平行的板条状 δ铁素体伸入到粗大的奥氏体晶界内, 靠近焊缝一侧为粗大的奥氏体胞状树枝晶基体上分布有骨架状 δ铁素体.

图 6b是采用超音频直流脉冲 TIG 焊工艺重熔接头的显微组织. 与图 6a相比, 粗大的奥氏体胞状树枝晶所占区域较窄, 从粗晶区开始向焊缝一侧, 蠕虫状 δ铁素体分布在细小的奥氏体等轴晶基体上.



a 直流 TIG焊 (200×)



b 30kHz超音频脉冲 TIG焊 (200×)

图 6 超音频脉冲 TIG与直流 TIG的焊缝金相对比

(下转第 112页)

sults from cat cortex [J]. Neural Computation, 1990, 2(3): 293-307

[2] John J L, Ritter D. Observation of periodic waves in a pulse-coupled neural network [J]. Opt Lett, 1993, 18(15): 1253-1255

[3] Johnson J L, Padgett M L. PCNN models and applications [J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1999, 10(3): 480-498

[4] Liu X, Wang D L. Range image segmentation using a relaxation oscillator networks [J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1999, 10(3): 564-573

[5] Broussard R P, Rogers S K, Oxley M E, et al. Physiologically motivated image fusion for object detection using a pulse coupled neural network [J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1999, 10(3): 554-563

[6] 余瑞星, 朱冰, 张科. 基于PCNN的图像融合新方法 [J]. 光电工程, 2008, 35(1): 126-130
Yu Ruixing, Zhu Bing, Zhang Ke. New image fusion algorithm based on PCNN [J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(1): 126-130 (in Chinese)

[7] Kinser J M. Foveation by a pulse-coupled neural network [J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1999, 10(3): 621-625

[8] 顾晓东, 郭仕德, 余道衡. 一种基于PCNN的图像去噪新方法 [J]. 电子与信息学报, 2002, 24(10): 1304-1309
Gu Xiaodong, Guo Shide, Yu Daoheng. A new approach for noise reducing of image based on PCNN [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2002, 24(10): 1304-1309 (in Chinese)

[9] 张军英, 卢志军, 石林, 等. 基于脉冲偶合神经网络的椒盐噪声图像滤波 [J]. 中国科学 E辑, 2004, 34(8): 882-894
Zhang Junying, Lu Zhijun, Shi Lin, et al. Filtering images corrtaminated with salt and pepper noise with pulse-coupled neural networks [J]. Science in China E, 2004, 34(8): 882-894 (in Chinese)

[10] 杨行峻, 郑君里. 人工神经网络与盲信号处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 14-18
Yang Xingjun, Zheng Junli. Artificial neural network and blind signal processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 14-18 (in Chinese)

(责任编辑: 刘登敏)

(上接第 64页)

采用超音频直流脉冲TIG焊, 熔池在1 s要受到上万次脉动的等离子流力作用, 使熔池受到电弧超声波振动和强烈的机械搅拌作用[6]. 对于1Cr18Ni9Ti奥氏体不锈钢焊缝熔池, 初生的δ铁素体枝晶受到电弧超声波振动、搅拌作用, 部分正在生长的枝晶被打碎, 相当于使形核率增加, 即增加了结晶中心, 改变了结晶形态, 使得在焊缝中心出现了更多的奥氏体等轴晶, 并使粗大树枝晶所占区域变得很窄, 实现了细化晶粒、改善接头机械性能的目的.

4 结 论

1) 研制开发出新型IGBT拓扑结构超音频脉冲TIG焊电源, 结合DSP控制技术, 可实现基值电流、峰值电流、脉冲电流频率和占空比相互独立调节的超音频脉冲电流输出;

2) 所研制的超音频脉冲TIG焊电源最高脉冲电流频率30 kHz输出的脉冲上升、下降沿的电流变化率 $di/dt \geqslant 50\ A/\mu s$;

3) 超音频脉冲TIG焊工艺具有超声波振动作用, 可细化晶粒, 弧焊适用性好.

参考文献 (References)

[1] 姜焕中. 电弧焊及电渣焊 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1988: 165-168
Jiang Huanzhong. Electric arc welding & electroslag welding [M]. Beijing: China Machine Press, 1988: 165-168 (in Chinese)

[2] 赵家瑞, 司树恒. 模拟型晶体三极管焊接电源的研制 [J]. 天津大学学报, 1981(4): 71-82
Zhao Jiarui, Si Shuheng. The research and manufacture of a new transistor welding power source [J]. Journal of Tianjin University, 1981(4): 71-82 (in Chinese)

[3] Jin Onuki, Yoshisa Anazawa, Masayasu Nihei, et al. Development of a new high-frequency, high-peak current power source for high constricted arc formation [J]. Jpn J Appl Phys, 2002(41): 5821-5826

[4] 赵家瑞, 李义丹. 高频脉冲TIG焊的电弧控制及高频效应 [J]. 天津大学学报, 1989(3): 25-32
Zhao Jiarui, Li Yidan. Control over arc of pulsed high frequency tig welding and high frequency effect [J]. Journal of Tianjin University, 1989(3): 25-32 (in Chinese)

[5] 齐铂金, 许海鹰, 黄松涛. 超音频方波直流脉冲弧焊电源装置: 中国, 200710120831.2 [P]. 2007-08-27
Qi Bojin, Xu Haiying, Huang Songtao. Ultrasonic pulse TIG welding power source: Chinese, 200710120831.2 [P]. 2007-08-27 (in Chinese)

[6] 雅文萃. 高强铝合金高频脉冲钨极氦弧焊的研究 [J]. 焊接学报, 1982, 13(4): 171-178
Ya Wencui. A study of high frequency pulsed current helium gas tungsten arc welding of high-strength aluminum alloy [J]. Transactions of the China Welding Institution, 1982, 13(4): 171-178 (in Chinese)

(责任编辑: 文丽芳)