

超音频脉冲 TIG 焊电源关键技术及拓扑分析

北京航空制造工程研究所 高能束加工技术重点实验室(100024) 许海鹰

北京航空航天大学机械工程与自动化学院(100083) 齐铂金 张伟

摘要 对常用的脉冲 TIG 焊电源主回路拓扑结构进行了深入的分析,指出常用脉冲 TIG 焊电源拓扑结构的不足之处。归纳总结出超音频脉冲电流实现的关键技术,提出了能够输出陡峭的上升、下降沿超音频脉冲电流的主回路拓扑结构,对基值电流、峰值电流、脉冲电流的产生过程进行了分析。对超音频脉冲 TIG 焊电源输出的电流波形进行了检测。结果表明:该电源可以输出上百安培的脉冲电流,脉冲电流频率 ≥ 20 kHz,并且具有陡峭上升、下降沿的超音频脉冲电流,电流变化率达到 $50 \text{ A}/\mu\text{s}$ 以上,满足了超音频大电流脉冲 TIG 焊的需求。

关键词: TIG 焊 拓扑 电源 超音频 大电流脉冲

中图分类号: TG434.5

0 前言

随着电力电子技术的发展,脉冲 TIG 焊技术的研究工作得以继续深入,上世纪 80 年代以后,国内外相继研制出脉冲频率大于 20 kHz ^[1,2] 超音频直流脉冲 TIG 焊电源。无论是早期的脉冲 TIG 焊电源,还是后来研制出的脉冲电流频率 $\geq 20 \text{ kHz}$ 的超音频直流脉冲 TIG 焊电源,都不可避免地受到当时电力电子器件发展的制约和电源控制基本原理的限制,使得早期研制出的脉冲 TIG 焊电源输出的脉冲电流波形畸变严重,脉冲电流上升、下降沿变化缓慢,电流变化率 di/dt 一般在 $5 \text{ A}/\mu\text{s}$ 以下。

相关研究表明:脉冲电流跃变时,脉冲电流前、后沿越陡峭,产生的高频效应越显著^[3]。电弧的“高频效应”会增强焊接熔池金属的流动性和机械搅拌作用,改善熔池凝固过程及焊缝微观组织,提高焊接质量。

1 常用脉冲 TIG 焊电源拓扑结构

根据脉冲电流的生成方式,可以将国内外常用的脉冲 TIG 焊电源拓扑电路结构分为:逆变整流式^[5]、直流斩波式^[6,7]、直流电源并联斩波电源式^[8,9]。早期国内外常用脉冲 TIG 焊电源拓扑结构如图 1 所示。

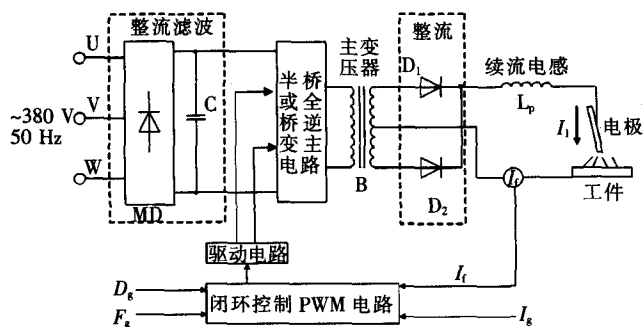
图 1a 所示的逆变整流式脉冲 TIG 焊电源拓扑结构包括整流滤波电路、逆变电路、输出整流电路及反馈控制系统等。三相工频电经过整流滤波电路后转化成直流电,逆变电路将其转化成高频交流电,经过整流电

路、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的 PWM 脉冲信号,经过驱动电路后控制逆变主电路上功率管开通/关断。脉冲电流频率、占空比的给定值 F_g 和 D_g 均通过闭环控制 PWM 电路来实现。因此,脉冲电流频率的调节与电流大小调节将会相互制约。流过电弧的电流 I_t 波形如图 2a 所示。一般通过逆变整流式拓扑结构获得脉冲电流的方式主要应用于较低频率的脉冲 TIG 焊。

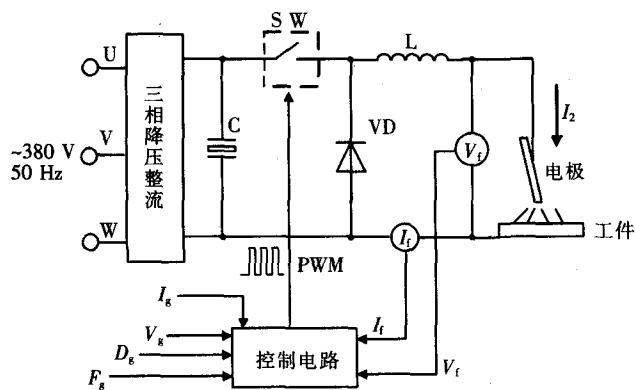
如图 1b 所示的直流斩波方式脉冲 TIG 焊电源拓扑主要由三相降压整流电路、功率开关 SW、电感 L 、续流二极管 VD、控制电路等构成。三相交流电经过降压整流滤波后得到直流电,当功率开关 SW 根据所设定的脉冲电流频率与占空比开通时,电流流过电弧;在 SW 关断时,电感 L 储存的能量与电弧、续流二极管 VD 形成回路,维持电弧稳定燃烧。SW 开通与关断时间不但由所设定的脉冲电流频率 F_g 与占空比 D_g 决定,而且会受到电流 I_t 、电压 V_f 闭环反馈控制的影响。给定电流 I_g 、给定电压 V_g 与相应采样反馈值之间的差值经过控制电路后,会调整驱动脉冲宽度,影响所设定脉冲电流的占空比。在不发生过流、过压的情况下,功率开关 SW 可根据设定的脉冲电流频率、占空比进行开通/关断。将功率开关 SW 的驱动脉冲频率设定在超音频段,在电弧上便得到与 SW 开通/关断等频的超音频脉冲电流,由于受到续流电感、输出回路电缆上寄生电感的影响,电弧上流过的超音频脉冲电流波形一般为三角波,电流波形畸变。流过电弧的电流如图 2b 所示。

采用直流电源并联斩波电源的方式获得脉冲电流

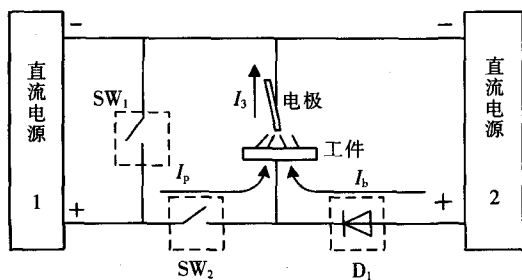
的拓扑结构如图 1c 所示。直流电源 1 输出的电流 I_p 经过功率开关组 SW_1 和 SW_2 相互交替开/关切换后, 变成脉动电流, 该电流与直流电源 2 输出的电流 I_b 叠加后, 使流过电弧的电流 I_3 成为如图 2c 所示的具有基值电流和峰值电流的脉冲电流。



(a) 逆变整流式



(b) 直流斩波式



(c) 直流电源并联斩波电源式

图 1 常用脉冲 TIG 焊电源拓扑电路

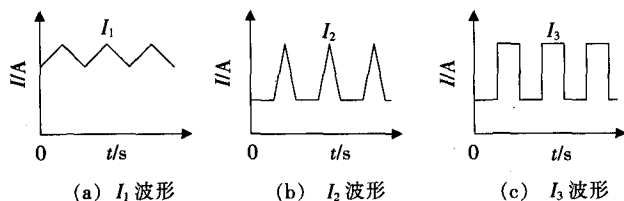


图 2 不同拓扑结构电源通过电弧的电流波形

与其它二种获得脉冲电流的拓扑结构相比, 直流电源 1 和直流电源 2 相互独立, 使脉冲峰值电流和基值电流可相互独立调节, 只要选择直流电源的功率足够大, 则电源输出的脉冲电流可达上百安培。然而受到早期电力电子技术发展的制约, 所选用的直流电源通常采用工频降压整流的方式获得直流电, 电源自身损耗大。并且斩波电路部分所选用控制脉冲电流的功率开关管最高工作频率与容量受到限制, 使得早期采用该拓扑结构研制出的脉冲 TIG 焊电源的工作频率较低 (≤ 20 kHz), 输出脉冲电流波形严重畸变。难以满足特殊材料焊接中需要大电流、高频率, 进一步提高焊接质量的需求。

由于以上不利因素的存在, 使得早期研制出的超音频脉冲 TIG 焊电源很难使电弧的“高频效应”得到充分发挥, 超音频脉冲 TIG 焊的优点难以得到充分体现。

2 超音频大电流脉冲电源关键技术

完善的超音频直流脉冲 TIG 焊电源不仅需要高可靠性的控制系统做保障, 而且需要设计独特的主回路拓扑结构, 才能实现上升、下降沿陡峭的脉冲电流输出。

2.1 超音频大电流脉冲 TIG 电源拓扑

选用的超音频大电流脉冲 TIG 焊电源拓扑电路如图 3 所示。其主要包括脉冲峰值电流产生主电路、脉冲基值电流产生主电路、峰值电流切换电路、三相整流滤波电路及各种控制、保护电路; 脉冲峰值电流产生主电路由逆变整流主电路 1、滤波电感 L_p 等构成, 其功能是产生脉冲峰值电流; 脉冲基值电流产生主电路由逆变整流主电路 2、滤波电感 L_b 等构成, 其功能是产生脉冲基值电流; 峰值电流切换电路由功率管 T_p 、大功率二极管 D_p 构成。

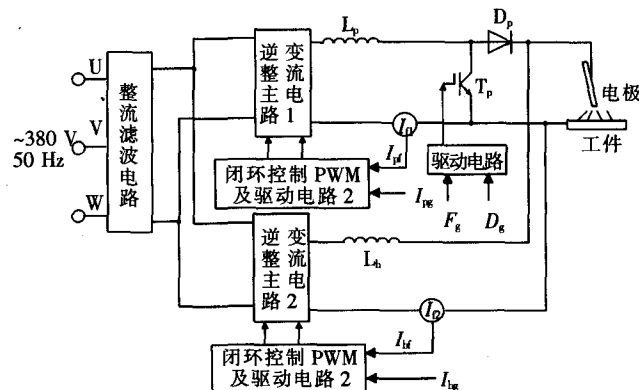


图 3 超音频大电流脉冲 TIG 焊电源拓扑

2.2 关键电路设计及器件的选型

为降低直流电源的体积质量,减小铁损、铜损,逆变整流主电路1与逆变整流主电路2选用半桥式逆变功率变换电路。半桥式逆变电路既能满足数百安培大电流输出的需求,而且抗电路不平衡能力较强。半桥式逆变电路功率开关管选用大功率IGBT模块,工作频率在20 kHz,降压变压器的磁芯为非晶材料,输出整流二极管采用快恢复整流二极管模块。

为保证流经电弧的脉冲电流具有陡峭上升、下降沿,则在设计脉冲峰值切换电路时,所选用的功率开关管 T_p 和二极管 D_p 的开关速度要足够快。功率开关管选用的是高速IGBT模块,二极管 D_p 选用大容量快恢复二极管模块, D_p 与 T_p 要具有同样的电流容量、耐压值和开关速度。为使脉冲峰值电流的波动较小,峰值电流产生电路所用的续流电感 L_p 设计为mH级,而常规脉冲TIG焊电源中所用续流电感为 μ H级,较大电感量的续流电感,使得峰值电流切换电路的功率管 T_p 开通关断时,脉冲峰值电流波动很小。

3 工作状态分析

3.1 直流电源工作状态分析

图4是峰值电流产生主电路中半桥式逆变电路及其工作状态示意图,基值电流产生主电路中的半桥式逆变主回路的工作状态与图4类似。

以下将对峰值电流产生主电路的工作状态进行分析:当 T_1 导通, T_2 截止时, C_1 通过 T_1 与变压器 B_1 原边放电,同时三相工频交流电经过整流滤波后的直流电压 V_{in} 通过变压器原边为电容 C_2 充电,电流流动方向如图4实线箭头所示;当 T_1 截止, T_2 导通时,电容 C_2 放电, C_1 充电,流过变压器原边的电流反向,电流流动方向如图4虚线箭头所示。 T_1 、 T_2 在连续PWM驱动信号作用下,交替开通、关断,使变压器原边的交替流过大小相等、方向相反的电流,经过变压器降压、二极管 D_1 、 D_2 全波整流、电感 L_p 滤波后,得到与设定峰值电流相一致的直流电。

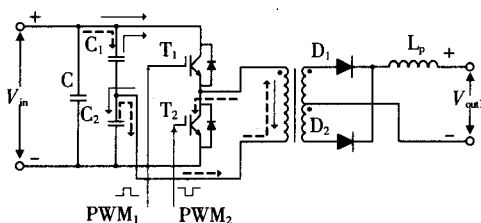


图4 峰值电流产生主电路的工作状态

3.2 脉冲生成部分的工作状态分析

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 分别见图5a, 5b。

如图5d所示,流过电弧的脉冲电流 I_{po} 由二部分组成,一部分是基值电流产生部分产生的维弧电流 I_b ,另一部分是经过脉冲峰值切换电路切换后的峰值电流 I_p ,其波形是如图5c所示的 I_{pp} 。

脉冲生成电路的工作状态如图6所示,控制系统根据所设定的脉冲电流频率和占空比确定的一路PWM信号,经过驱动电路后,控制峰值电流切换电路的功率管 T_p 的开通关断。当 T_p 关断时,峰值电流 I_p 通过二极管 D_p ,与维弧电流 I_b 叠加后,共同流过电弧,当 T_p 开通时,峰值电流 I_p (如图中虚线箭头所示)流过 T_p 、 T_p 、续流电感、变压器副边形成回路,维持稳定的峰值电流 I_p 。此时二极管 D_p 没有峰值电流流过,流过电弧的电流只有维弧电流 I_b 。

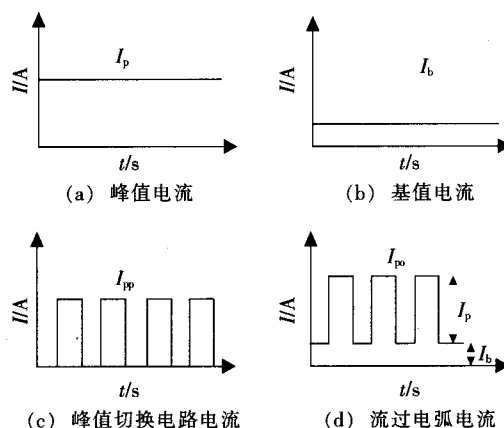


图5 超音频直流脉冲电源各部分输出电流波形

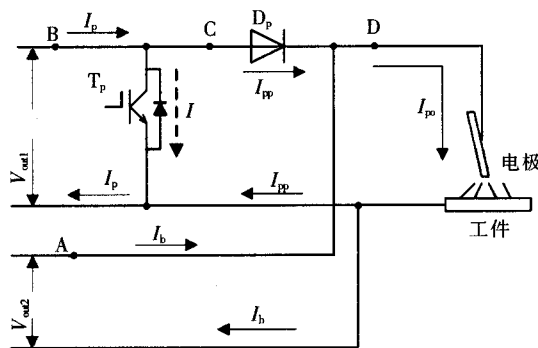


图6 脉冲生成电路工作状态

图7是在脉冲频率20 kHz、占空比20%、峰值电流80 A时,检测到的 T_p 栅-源之间PWM驱动脉冲(图

7a,经过反相)与 T_p 漏-源之间电压(图7b)波形。可以看出,所设计电路能够快速开通、关断。

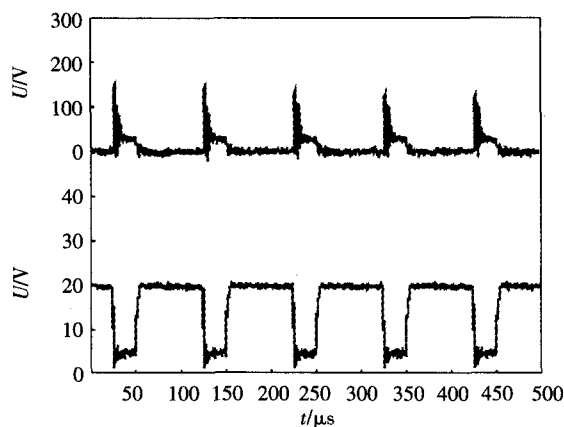
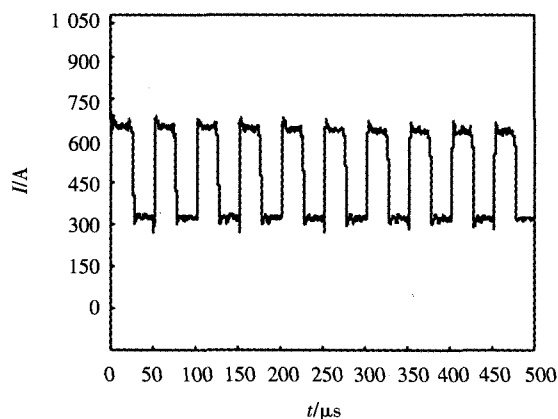
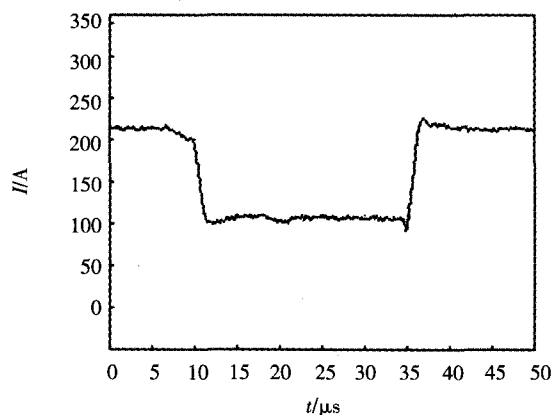


图7 驱动 T_p 的PWM脉冲及其漏-源之间电压波形



(a) 20 kHz 脉冲电流



(b) 20 kHz 脉冲电流的上升、下降沿

图8 20 kHz 脉冲电流波形

焊接过程中,基值电流给定值、峰值电流给定值与其相应的电流反馈值的差值经过PID处理后,分别输入到基值电流、峰值电流控制电路,调整基值电流、峰值电流控制电路输出的PWM占空比,控制各自主电路

上IGBT开通/关断,维持稳定的基值电流、峰值电流;超音频脉冲电流频率与占空比的实现则是由控制系统根据给定的脉冲电流频率与占空比输出一路PWM信号经过高速隔离驱动电路后控制峰值电流切换电路IGBT开通/关断而得到。基值电流、峰值电流及脉冲电流频率、占空比参数的调节相互独立,互不影响。

基于以上技术研制出了一台超音频大电流脉冲TIG焊电源。

在脉冲电流频率为20 kHz、占空比50%、基值电流50 A、峰值电流120 A时进行焊接试验,用TDS3012示波器检测电源输出的焊接电流波形,测试结果如图8所示。由图可见,所研制的超音频直流脉冲TIG焊电源可输出超音频脉冲大电流,电流变化率 $di/dt \geq 50 \text{ A}/\mu\text{s}$ 。

4 结 论

采用新型拓扑电路结构及先进的控制技术研制出的超音频大电流脉冲TIG焊电源,可输出脉冲电流频率 $\geq 20 \text{ kHz}$,最大电流上百安培,并具有陡峭的上升、下降沿的超音频脉冲电流,电流变化率 $di/dt \geq 50 \text{ A}/\mu\text{s}$,满足了超音频大电流脉冲TIG焊的需求,这对于深入研究超音频大电流脉冲TIG焊技术具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 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]. 材料科学与工艺,1987,6(4):97-106.
- [2] Onuki J, Anazawa Y, Nihei M, et al. Development of A new high-frequency, high-peak current power source for high constricted arc formation[J]. Japanese Journal of Applied Physics. 2002(41):5821-5826.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 黄石生,吴宪平,王志强,等. 高频脉冲弧焊逆变器原理与工艺性能的研究[J]. 电焊机,1989,19(5):1-4.
- [6] 胡仁华,俞尚知. 开关型晶体管弧焊电源的研究[J]. 焊接学报,1989,10(4):235-244.
- [7] 贾贵忱,吴执中,邱小明,等. 开关式高频脉冲晶体管TIG焊接电源[J]. 吉林工业大学学报,1995,25(3):100-105.
- [8] 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.
- [9] 雅文萃. 高强铝合金高频脉冲钨极氩弧焊的研究[J]. 焊接学报,1982,13(4):171-178.

作者简介: 许海鹰,1973年出生,博士。从事高能束加工技术及特种焊接技术的研究。