

# 变极性 TIG 焊电弧燃烧稳定性与恒占空比控制

刘 博<sup>1</sup>, 朱志明<sup>1,2</sup>, 杨中宇<sup>1</sup>, 符平坡<sup>1</sup>

(1. 清华大学 机械工程系, 北京 100084; 2. 清华大学 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:** 电流换向的快速性和稳定性是影响变极性 TIG 焊接电弧燃烧稳定性的关键因素, 尤其是在小电流变极性 TIG 焊时, 极易出现熄弧和电弧燃烧不稳定问题. 对电流换向期间的电压/电流波形深入分析发现, 一次逆变采用基于 PID 的电流反馈控制获得恒流输出时, 在电流换向结束后易产生焊接电流回调现象, 小电流焊接时甚至降至零, 从而导致电弧熄灭, 这与 PID 控制中的  $di/dr$  项密切相关. 提出了一次逆变在电流换向期间采用恒占空比控制新方法. 结果表明, 该方法可有效提高换向电流的响应速度, 防止换向后的电流回调或超调, 增强了变极性电流换向过程的稳定性.

**关键词:** 变极性焊接; 电流换向过程; 恒占空比; 电流回调

**中图分类号:** TG 434 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400001

## 0 序 言

铝合金具有高比强度、高比模量和良好的断裂韧性、疲劳强度和耐腐蚀稳定性等优势, 是广泛应用于航天航空、船舶、汽车等国防和民用工业的重要轻金属结构材料<sup>[1]</sup>. 然而, 铝合金表面极易形成致密难熔的氧化膜, 导致其在焊接过程中容易在焊缝中形成夹杂等缺陷. 采用直流反接 (DCEP) 进行铝合金 TIG 焊接时, 工件表面的阴极斑点可有效破碎氧化膜, 但因钨电极接正而存在烧损严重问题, 从而只能采用小电流进行焊接. 变极性 TIG 焊充分利用了直流正接 (DCEN) 和直流反接 (DCEP) 的各自优势, 既能有效破碎铝合金工件表面的氧化膜, 又能大幅提高钨电极的电流负载能力、降低其烧损量, 是目前铝合金焊接的有效方法之一<sup>[2-3]</sup>.

电流极性变换的快速性和稳定性一直是变极性 TIG 焊的研究重点, 尤其是在小电流变极性 TIG 焊接铝合金时, 因电弧空间电离度和温度较低, 极易在电流换向时产生熄弧现象, 限制了变极性 TIG 焊的稳定焊接电流范围下限. 此外, 低频调制的脉冲变极性 TIG 焊, 可有效控制熔池尺寸, 实现单面焊双面成形, 防止薄壁工件烧穿, 并且较低的基值电流可进一步提高低频调制的脉冲焊接效果, 这也

对保证小电流变极性 TIG 焊的电弧燃烧稳定性提出了更高要求.

在深入分析变极性 TIG 焊的电流换向过程的基础上, 研究了变极性电流换向期间一次逆变的输出电流控制方式对电流换向过程和电弧燃烧稳定性的影响. 提出在电流换向期间采用与换向电流相关联的恒占空比控制方法, 代替基于电流反馈的恒流控制, 有效提高了小电流变极性电流换向过程和电弧燃烧的稳定性.

## 1 试验系统及二次逆变电路拓扑

试验系统在前期研发的变极性焊接电源<sup>[1]</sup>基础上进行了改进, 包括数字化控制和功率变换电路等. 数字化控制的核心为双 DSP+双口 RAM, 用以实现对一次、二次逆变、输出反馈和人机交互的协调控制, 双口 RAM 为双 DSP 提供数据共享<sup>[4-5]</sup>. 功率变换电路的核心是一次和二次逆变电路, 其中, 一次逆变采用移相控制的全桥零压零流软开关 (ZVZCS) 电路<sup>[6-7]</sup>, 以有效降低功率变换损耗、提高电源的输出能力; 二次逆变采用带耦合电感和稳压模块的半桥式逆变电路<sup>[8-9]</sup>, 在不同换向电流下均可产生稳定的再燃弧电压, 以保证电流换向的快速性和电弧燃烧的稳定性, 其电路原理和等效电路如图 1 所示.

变极性电流换向时, 选择二次逆变电路的上、下桥臂功率器件  $Q_5$  和  $Q_6$  (IGBT) 共同导通一较短

时间的控制策略. 为有效避免变极性电流波形畸变, 提高电流换向过程和电弧燃烧的稳定性, 需根

据电流和焊接回路电感值, 合理确定电流换向期间的一次逆变电路输出控制方式.

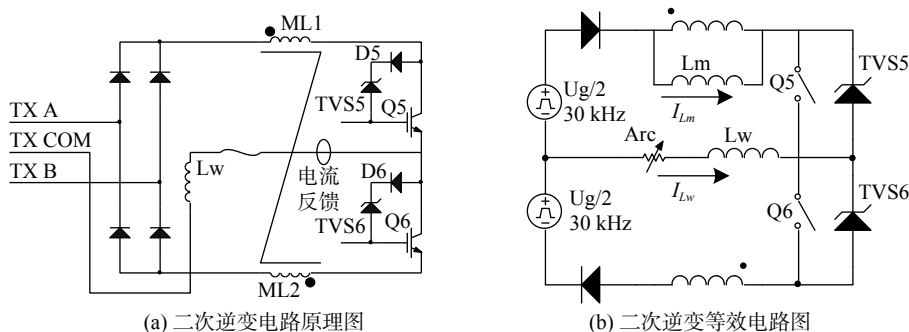


图 1 具有稳定的反向再燃弧电压的二次逆变电路

Fig. 1 Secondary inverter with capability to generate stable reverse voltage for arc re-igniting

## 2 恒流反馈控制的电流回调问题

变极性 TIG 焊接时, 直流正接 (DCEN) 和直流反接 (DCEP) 阶段的焊接电源输出电流值为焊前预置, 采用电流反馈控制一次逆变电路, 实现恒流输出, 以保证电弧燃烧稳定. 图 2 所示为采用电流反馈控制的变极性 TIG 焊接时的电流换向过程的输出电流/电压波形图 (电流设定值为 100 A). 从换流过程的局部放大电流/电压波形图 (图 2b) 可以看出: 在电流换向过程结束后, 焊接电流出现了短暂的减小和回调现象. 深入分析发现, 在换向过程结束后产生电流短暂减小和回调现象的原因, 与恒流输出所采用的一次逆变电流反馈控制策略有关.

在采用数字 PID 控制实现恒流输出时, 对于一

次逆变的控制脉冲占空比计算, 引入了与电流变化率  $di/dt$  成正比的微分控制项, 微分控制项具有预测特性, 在电源的输出电流增大或减小时, 为了防止电流出现较大波动和振荡, 微分控制项将通过负反馈使一次逆变的控制脉冲宽度快速减小或增大, 这有利于在 DCEN 和 DCEP 阶段保证焊接电流稳定. 然而, 在电流换向过程中, 在耦合电感和稳定的反向再燃弧电压的共同作用下, 电源焊接回路的输出电流会迅速增大, 使  $di/dt$  发生突变, 虽然换向结束后的电流值并未达到反向焊接电流的设定值, 但恒流输出 PID 控制中与  $di/dt$  成正比的微分控制项会使一次逆变的输出脉宽迅速减小, 过大的脉宽减小导致电流换向过程结束后的输出电流不仅没有在短时间内上升至设定值, 反而出现短暂的减小和回调.

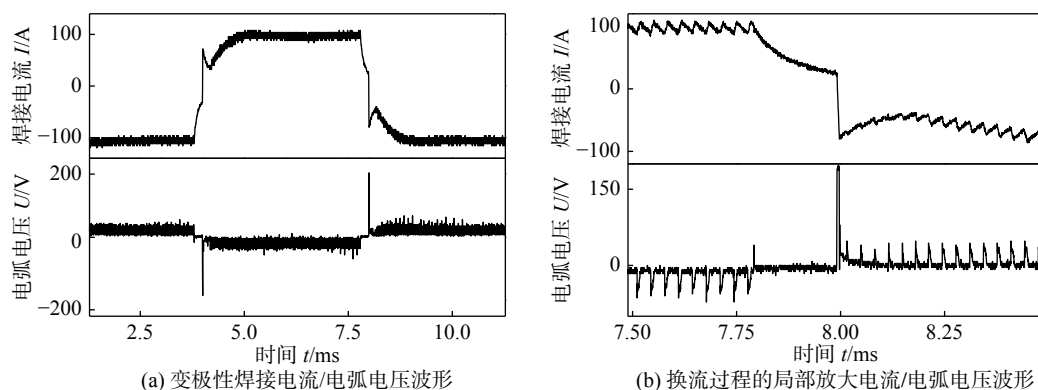


图 2 100 A 时的变极性 TIG 焊接电流/电弧电压波形

Fig. 2 Waveforms of current and voltage of variable polarity TIG welding with 100 A

在采用较大的电流进行变极性 TIG 焊接时, 换向过程结束时的电流短暂减小和回调会导致电流达到反向设定值的速度变慢, 增大电流换向过程所

需时间, 降低系统响应速度, 对焊接电流的准确控制和变极性频率的进一步提高产生不利影响, 难以实现大电流下的较高频率的变极性焊接, 但尚不至

于影响电弧燃烧的稳定性.而在采用小电流进行变极性 TIG 焊接时,换向过程结束后的电流减小和回调则可能直接导致熄弧,影响电弧燃烧的稳定性.

如图 3a 所示,对于 50 A 的变极性 TIG 焊接,电流换向后的值一度下降至接近零(图 3a 上半部分波形),从一次逆变的输出电压波形(图 3a 下半部分波形)可以看出,这一现象产生的原因是电流换向结束后的一次逆变输出的脉冲宽度(占空

比)显著减小所致,与前述分析一致.

进一步将焊接电流减小至 20 A,如图 3b 所示,可以看出:EN-EP 换向阶段的焊接电流和电弧燃烧极不稳定,多次出现熄弧(图 3b 上半部分),而 EP-EN 换向结束后则出现严重的电流超调,且整个 EN 阶段的电流一直处于调整状态.将 EN-EP 换向过程的电流波形放大后(图 3b 下半部分),则可以看出,换向结束后的电流逐渐下降至 0,进而导致电弧熄灭.

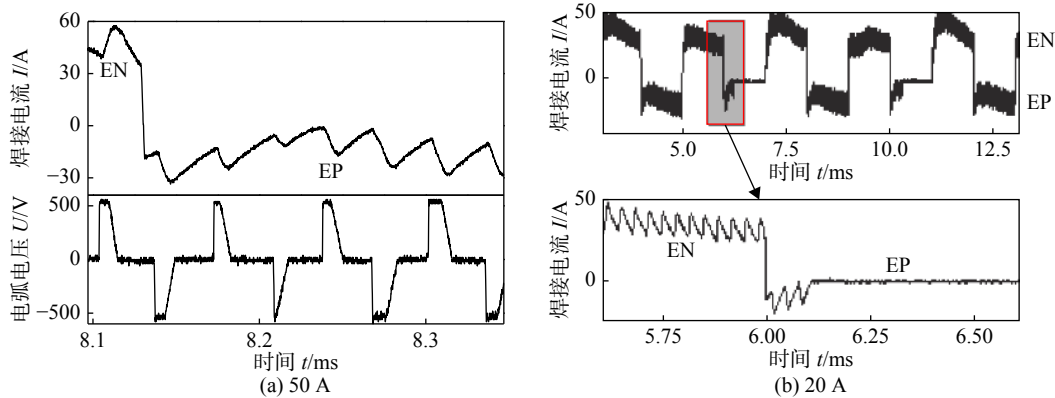


图 3 变极性 TIG 焊接电流换向过程波形

Fig. 3 Waveforms during current commutation process of variable polarity TIG welding

小电流变极性 TIG 焊接在电流极性变换过程中产生熄弧的原因,一方面是电弧空间温度较低,导致空间电离度降低,电流换向结束后的电流一旦降至 0,电弧很难重新引燃.另一方面,钨极是热阴极,电子热发射能力强,而铝合金是冷阴极,电子热发射能力弱,EN(钨极接负)阶段的电弧等效电阻小于 EP(钨极接正)阶段的电弧等效电阻<sup>[10]</sup>,因此,EN 到 EP 的极性切换过程相对于 EP 到 EN 的极性切换过程,电弧的再引燃更加困难,更容易出现熄弧现象,而 EP 到 EN 的极性切换过程则易在电流换向后形成空间电离和电流,采用同样的恒流控制策略会在等效电阻更小时产生电流超调现象.因此,在小电流变极性 TIG 焊接时,一方面要重点关注 EN 到 EP 的极性切换过程,防止电流换向结束时的一次逆变占空比减小导致输出电流下降,从而引起电弧熄灭,同时也要防止 EP 到 EN 极性切换后的电流超调问题.

### 3 恒占空比控制方法

在小电流变极性 TIG 焊接时,为了防止 EN-EP 换向结束后的电流下降导致熄弧和 EP-EN 换向

结束后的电流超调,需要对一次、二次逆变的工作状态进行协调控制,为此,提出了在二次逆变电流换向期间及结束后的较短时间内,一次逆变采用恒占空比(占空比的大小取决于实际设定的焊接电流大小)控制代替恒流反馈所确定的占空比对电源的输出电流进行控制的新方法,如图 4 所示.

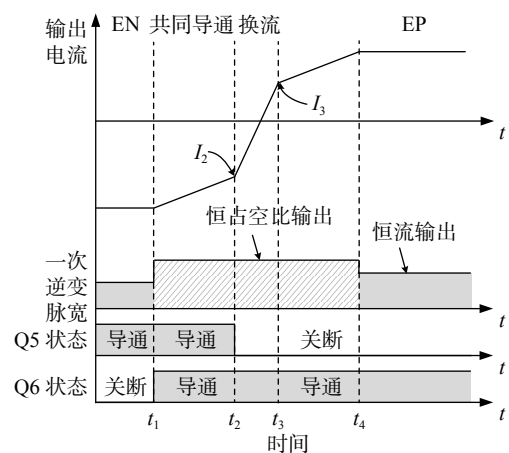


图 4 小电流变极性 TIG 焊接的换向控制策略

Fig. 4 Commutation control strategy for variable polarity TIG welding with low current value

图 4 中, Q5, Q6 为图 1 所示二次逆变电路中的上、下桥臂功率开关器件(IGBT),电流为图 1a 所示的焊接回路中的电流.恒占空比控制策略的工作过

程为:  $t_1$  之前, Q5 处于导通状态;  $t_1$  时刻, Q6 开通, Q5 和 Q6 共同导通开始, 一次逆变的脉冲占空比由电流反馈控制转换为恒占空比控制, 电弧两端 (包括焊接回路电感) 近似被短路, 电流自然下降至  $I_2$ ;  $t_2$  时刻, 关断 Q5, 结束 Q5 和 Q6 的共同导通, 耦合电感释放能量加速电流换向过程;  $t_3$  时刻, 电流换向结束, 此时反向电流达到  $I_3$ ; 短时间内, 一次逆变维持恒占空比输出不变, 直到  $t_4$  时刻, 电流达到设定值。

采用恒占空比控制策略时, 共同导通期间 ( $t_{1-2}$ ) 的恒占空比输出有利于保持或增大耦合电感储能; 电流换向期间 ( $t_{2-3}$ ) 的恒占空比输出有利于加快电流换向速度, 与耦合电感的储能共同作用, 可使换向后的电流  $I_3$  尽可能接近设定值; 电流换向结束后的调节时间 ( $t_{3-4}$ ) 内继续维持短时间的一次逆变恒占空比输出, 可使电流迅速达到稳定的设定值, 避免回调或超调。研究表明<sup>[11]</sup>, 电流换向结束时刻的电流  $I_3$  的大小受线路电感、电源输入电压、共同导通时间 ( $t_{1-2}$ )、反向再燃弧电压、换向前电流  $I_1$  等因素影响; 在其它条件一定时, 共同导通时间 ( $t_{1-2}$ ) 越长,  $I_3$  越大, 越有利于防止熄弧现象。共同导通时间 ( $t_{1-2}$ )、电流换向结束后的调节时间 ( $t_{3-4}$ ) 及恒占空比的大小需根据变极性焊接电流的设定值进行调节。且在 EN-EP 极性切换时, 宜采用较大占空比, 而在 EP-EN 极性切换时, 宜采用较小占空比。

图 5 所示为采用恒占空比控制的电流换向控制策略后的 50 A 变极性焊接电流波形 (图 5a) 及其局部电流放大图 (图 5b), 可以看出, 电流换向结束

后, 焊接电流没有出现下降和回调现象。

由此可以确定, 电流换向期间一次逆变采用恒占空比控制代替电流反馈恒流控制, 能有效提高换向过程结束后的电流响应速度, 防止电流回调或超调, 并使换向后的电流尽快达到反向电流的设定值并保持稳定, 从而保证变极性电流换向过程和电弧燃烧的稳定性。

## 4 结 论

(1) 一次逆变采用电流反馈恒流控制时, 为了防止焊接电流出现较大波动和振荡而引入了电流微分项  $di/dt$ 。在二次逆变电流换向期间, 电流在反向再燃弧电压和耦合电感的共同作用下快速变化, 导致  $di/dt$  突然增大, 使一次逆变的输出脉冲占空比大幅减小, 在 EN-EP 极性切换后, 易产生输出电流下降和回调现象, 在小电流焊接时极易导致焊接过程和电弧燃烧的不稳定。

(2) 在二次逆变的电流换向期间, 一次逆变采用与换向电流相关联的恒占空比控制, 代替基于电流反馈的恒流控制, 有效地提高了换向时的电流响应速度, 且能防止换向后的电流回调或超调, 使电流尽快达到反向电流的设定值, 提高了变极性电流换向过程和电弧燃烧的稳定性。

## 参考文献:

- [1] 刘志华, 赵 兵, 赵 青. 21 世纪航天工业铝合金焊接工艺技术展望 [J]. 导弹与航天运载技术, 2002(5): 63 - 68.  
Liu Zhihua, Zhao Bing, Zhao Qing. Prospects for welding technology of aluminum alloy in aerospace industry in 21st century [J]. Missiles and Space Vehicles, 2002(5): 63 - 68.
- [2] 柏久阳, 林三宝, 杨春利, 等. 铝合金 TIG 焊变极性参数对阴极清理及钨极烧损的影响 [J]. 焊接, 2015(5): 9 - 13.  
Bai Jiuyang, Lin Sanbao, Yang Chunli, et al. Effects of variable polarity parameters on cathode cleaning and deterioration of tungsten in TIG welding of aluminum alloy full-bridge power converter with zero-voltage and zero-current soft-switching [J]. Welding & Joining, 2015(5): 9 - 13.
- [3] Sarrafi R, Kovacevic R. Cathodic cleaning of oxides from aluminum surface by variable-polarity arc [J]. Welding Journal, 2010, 89(1): 1 - 10.
- [4] 夏铸亮. 软开关变极性埋弧焊电源数字化控制及换流策略研究 [D]. 北京: 清华大学, 2012.

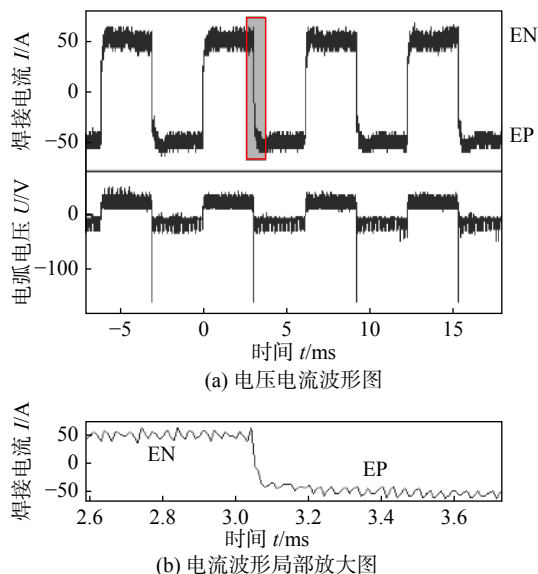


图 5 50 A 变极性 TIG 焊接的恒占空比控制效果

Fig. 5 Control effect of constant duty cycle for variable polarity TIG welding with 50 A