

变极性 TIG 焊电弧负载特性及换向控制策略

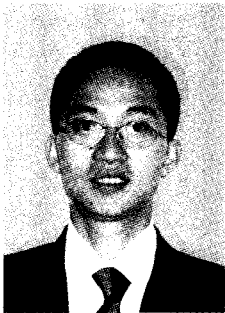
丁 坤^{1,2}, 姚河清¹, 范兴辉¹, 王守艳¹

(1. 河海大学 机电工程学院, 江苏 常州 213022; 2. 河海大学 电气工程学院, 南京 210098)

摘 要: 通过对变极性 TIG 焊电弧负载特性试验研究,发现 EN(钨极接负)时电弧的等效电阻小于 EP(钨极接正)时电弧的等效电阻,而且随着电流的增大电弧等效电阻都减小,当从 EP 切换到 EN 时刻电弧等效电阻急剧减小。对电弧等效电阻的形成机理进行了分析,指出电弧等效电阻与阴极区、弧柱区、阳极区在不同电流条件下的工作机理有关,着重分析了阴极区电子发射和阳离子发射的机理。针对从 EP 切换到 EN 时刻电弧等效电阻急剧减小引起的电流冲击问题,提出一种变参数 PI 控制结合超前控制降低切换极性时的电弧冲击电流的控制策略。结果表明,控制策略既保证了焊接电弧的稳定,又显著降低了切换极性过程中电流冲击的峰值。

关键词: 变极性; 等效电阻; 电子发射; 超前控制

中图分类号: TG456 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 360X(2008)09 - 0031 - 04



丁 坤

0 序 言

随着科学技术的发展,轻质量、高强度金属材料越来越多地得到应用,尤其是以铝合金为代表的有色金属合金以其密度小、强度高、抗腐蚀性能强等优点,已被广泛地应用在航空航天、国防、汽车和民用工业中。然而铝合金的自身特性对焊接技术提出了有别于普通金属焊接的更高要求。铝合金导热性好,高温时强度低,表面有氧化膜,导致焊接时必须首先去除表面氧化膜以保证焊接质量。为兼顾这类有色金属的焊接质量和生产效率,变极性焊接方法得到了广泛应用^[1,2]。

变极性焊接方法利用工件为阴极的控制周期里的“阴极雾化”作用清除熔池表面的氧化膜。在钨极为阴极的控制周期里冷却钨极,同时可以发射足够的电子,稳定电弧,使得焊接质量和钨极烧损都能兼顾^[3]。但是由于电极和母材的电、热物理性能和几何尺寸上存在明显差异,造成不同极性时电弧的弧柱区电导率、电场强度、电弧电压及电流的不同,从而造成不同极性,不同电流以及在极性切换情况下电弧负载特性都会不同。因此研究变极性焊接过程中电弧负载特性等效电阻的变化规律以及相对应控制策略对于稳定焊接过程、提高焊接质量,保证焊接电源的可靠性都具有非常重要的意义。

1 电弧负载试验现象及机理分析

1.1 电弧负载试验

为了研究变极性 TIG 焊电弧负载的变化情况,配置了如图 1 的试验系统。示波器将采集到的电弧电压和电流信号传送到电脑进行分析。焊接试验的工艺参数见表 1,工件是铝合金。

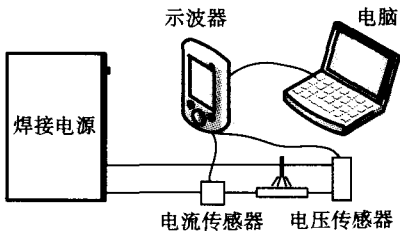


图 1 试验系统配置图
Fig.1 Configuration of test system

表 1 焊接工艺参数
Table 1 Welding parameters

钨棒直径	氩气流量	焊接电流	焊接速度	正/负极性时间比
D/mm	$q/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	I/A	$v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	a
4	8	20 ~ 200	2	7/3

试验以 EN 电流为基准,从 25 A 开始,每增加 15 A 做一组试验,测量电弧电压和焊接电流,并计算等效电阻。

图 2 是 EN 和 EP 在不同电流下,工作稳定时的电弧等效电阻。从图中可知 EN 和 EP 电弧等效电阻都随着电流的增大而减小,而且在电流小于 60 A 的区段电弧等效电阻随电流变化较快。EP 的电弧等效电阻大于 EN 的电弧等效电阻,且当电流大于 100 A 后,二者相差两倍以上。

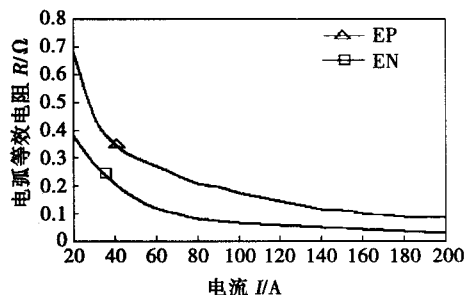


图 2 电弧等效电阻

Fig.2 Equivalent resistance of arc

图 3 是正极性电流 I_+ 为 50 A,反极性 I_- 为 100 A 时的电流电压波形图。由 EP 向 EN 转换时的电流尖峰 $I_{+,max}$ 为 140 A,而 EN 的稳态电流仅为 50 A,冲击电流峰值接近 3 倍。从图 3 可观察到,当从 EP 转 EN 时电流尖峰非常大,此刻电弧等效电阻很小。

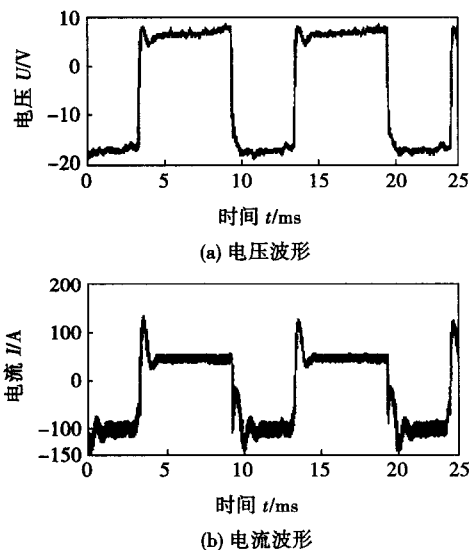


图 3 电流电压波形

Fig.3 Waves of current and voltage

根据图 3 试验获得的数据可得到如图 4 的电弧动态等效电阻。EP 时电弧等效电阻约为 0.19 Ω, EN 时电弧等效电阻约为 0.13 Ω。由 EP 向 EN 转换时电弧等效电阻降低至 0.05 Ω,经过约 0.8 ms 后等

效电阻稳定至 0.13 Ω。由 EN 向 EP 转换时电弧等效电阻迅速降低至 0.55 Ω,经过约 1.5 ms 后等效电阻稳定至 0.19 Ω。图 4 表明变极性 TIG 焊在极性切换时电弧负载等效电阻存在突变的现象。

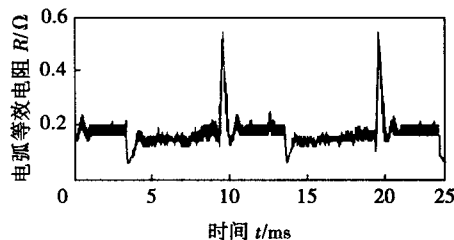


图 4 电弧动态等效电阻

Fig.4 Dynamic equivalent resistance of arc

1.2 电弧负载动态等效电阻分析

从图 3 可以看出电弧电压不存在突变,而电弧电流存在突变,因此分析电弧电流的形成机理就可解释电弧负载动态等效电阻的变化。

电弧电流由电子流和阳离子流组成,其关系式为

$$I = I_e + I_i \quad (1)$$

式中: I 为电弧电流; I_e 为电子流; I_i 为阳离子流。

一般认为阴极的电子发射主要有两种机制^[4]。一种是热电子发射,其电流密度可用道舒曼(Dushman)公式,表示为

$$j_e = AT^2 e^{-e\phi_w/kT} \quad (2)$$

式中: j_e 为电流密度; A 为热电子发射常数; T 为温度; ϕ_w 为功函数; k 为波尔兹曼常数。

另一种是肖脱基效应(Schottky effect),其电流密度可表示为

$$j_e = AT^2 e^{-e(\phi_w - \sqrt{eX})/kT} \quad (3)$$

式中: X 为电位梯度。

阳离子的发射机制的电流密度可由下式表示为

$$j_i = \frac{1}{9\pi} \sqrt{\frac{2eV_k}{M}} \frac{V_k^{3/2}}{d} \quad (4)$$

式中: j_i 为阳离子电流密度; M 为阳离子原子量; V_k 为阴极区压降; d 为阴极区长度。

式(3),式(4)表明它们的电流密度与阴极区压降 V_k 和电位梯度 X 有关, V_k , X 越大电流密度越大。

从图 3 可以观察到,当从 EP 转为 EN 时焊接电流冲击非常大,电流峰值大大超过了 EN 稳定时的电流,如果冲击电流严重会导致开关器件过流损坏。

当从 EP 转为 EN 时很大的焊接电流冲击主要是由于钨电极极性转换后电子发射能力的变化造成的。一般认为阴极区的产热表达式为

$$P_k = I(U_k - U_w - U_T) \quad (5)$$

式中: P_k 为阴极区总能量; I 为电弧电流; U_k 为阴极区压降; U_w 为功函数; U_T 为弧柱温度的等效电压。

阳极区的产热表达式为

$$P_A = I(U_A - U_w - U_T) \quad (6)$$

式中: P_A 为阳极区总能量; V_A 为阳极区压降。

由式(5),式(6)可知当钨极做阳极时温度要大大高于做阴极时的温度,有数据表明小电流时钨做阳极其温度可达 4 200 K^[3]。当从 EP 转变为 EN 时,由于热惯性钨极还保持很高的温度,以 4 200 K 代入式(2),可得热发射电流密度为 3 789 A/cm²,对直径为 4 mm 的钨极仅热发射电流就可高达 476 A。因此在从 EP 转为 EN 时电弧电流很大,随着时间的推移由式(5)可知钨极发射电子吸收能量使钨极温度迅速的下降,热发射电流急剧减小,电弧电流随之减小,当达到能量平衡时电弧电流稳定不变。同时电弧电压基本稳定,因此这样的电流变化使得从 EP 转变为 EN 时电弧的等效电阻出现了突然变小的现象。

当从 EN 转变为 EP 时,钨极从阴极转变为阳极,开始时刻钨极温度较低,阳极区的热电离很低,阳极区主要是以式(4)的机理实现阳离子发射,因此需要很高的电场强度,导致阳极区压降 V_A 很高,所以此刻电弧的等效电阻突然增大。

当随着钨极受电子轰击被加热,其温度迅速上升,甚至能达到其熔点,此刻阳极区的热电离能力也随之迅速增大,导致阳极区压降 U_A 下降,最后趋近于零。另一方面文献[4]指出,弧柱区的电导率为

$$\sigma \propto \frac{n_e \sqrt{T}}{Q_n} \quad (7)$$

式中: σ 为电导率; n_e 为电子密度; Q_n 为中性离子的有效截面。

随着钨极迅速升温电弧温度也迅速上升,由式(7)可知电弧的电导率也迅速上升,当达到式(6)的能量平衡状态时电弧温度保持稳定,弧柱区的电导率不再上升。综合两方面的原因,在这一过程中电弧等效电阻迅速减小至稳定状态。变极性焊接在极性切换过程中电弧等效电阻的突变会对焊接电源的开关器件以及电弧稳定性造成影响。

2 焊接电源控制策略

试验中一次逆变采用的是全桥硬开关电路拓扑,属于 Buck 类降压拓扑。二次逆变采用半桥形式的二次拓扑。其主电路等效电路如图 5。

根据状态空间平均法可以得到焊接电源的主回路输出电流与 PWM 占空比的传递函数^[5]为

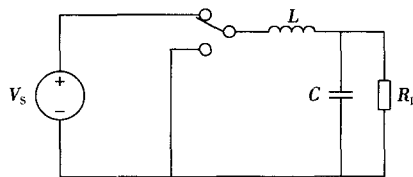


图5 等效电路

Fig.5 Equivalent circuit

$$G_{id}(s) = \frac{U_s}{R_L} \cdot \frac{1}{1 + \frac{L}{R_L}s + LCs^2} \quad (8)$$

式中: U_s 为等效输入电压; L 为电路等效电感; C 为电弧等效电容; R_L 为电弧等效电阻。

对于试验所采用电路的主要参数 $L = 8 \mu\text{H}$, $C = 200 \text{ pF}$ (等效电容), $U_s = 67.5 \text{ V}$ 。对等效电阻为 0.5Ω 和 0.07Ω 情况下传递函数的特性进行研究。如图 6,虚线是等效电阻为 0.07Ω 的波特图,实线是等效电阻为 0.5Ω 的波特图。可以观察到二者的相位裕量基本相同,但是增益裕量不同。

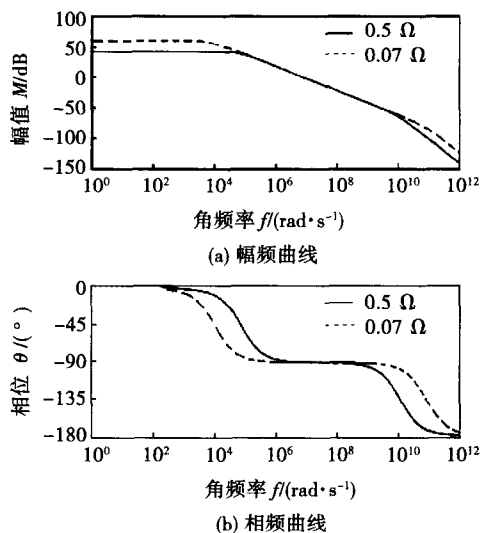


图6 波特图

Fig.6 Bode diagram

对于恒流输出 TIG 焊电源,通常都采用如图 7 的控制框图进行控制,选择合适的补偿网络 $G_c(s)$ (s 是传递函数的复变量,在拉普拉斯变换中定义为 $s = \sigma + j\omega$) 即可实现恒流输出,又可保证系统稳定。但是在不同的负载或者极性时电弧的等效电阻是变化的,因此主电路的传递函数也是变化的,如果采用相同补偿网络 $G_c(s)$ 显然不能在全负载范围内满足系统稳定性的要求。

针对 EP 转变为 EN 时电弧等效电阻突变小的

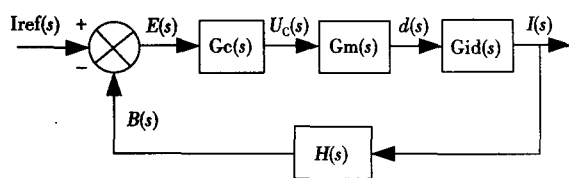
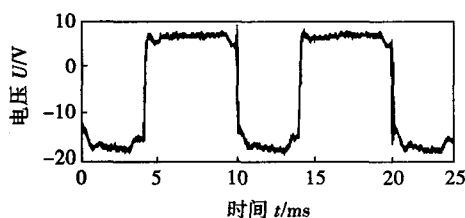


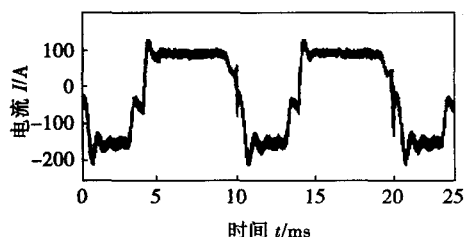
图 7 恒流控制系统框图

Fig. 7 System diagram of constant current control

现象,文中采用了变参数 PI 控制与超前控制相结合的控制策略。在从 EP 切换至 EN 之前,先降低电弧电流,再切换极性。降低电弧电流是为了降低阳极和阳极区的温度,这样当进行极性切换后钨极由于温度的降低其热电子发射能力下降,可使得冲击电流大大缓解。电弧电流的降低以保证电弧稳定为前提,试验取降低后的电弧电流为 50 A。采用了这样的控制策略后形成了三段不同电弧电流:正常的 EP 电流、过渡区的 EP 电流、正常的 EN 电流。自然此三段对应的等效电阻也是不同的,在 PI 控制中采用三套不同的 PI 参数。图 8 是采用了该策略后 100 A 的电流电压波形(EP 电流为 150 A),其冲击电流峰值仅为 120 A,很大程度上降低了冲击电流,可以避免电力电子器件冲击受损。



(a) 电压波形



(b) 电流波形

图 8 采用控制策略的电流电压波形

Fig. 8 Waves of current and voltage using control strategy

观察图 8 的电流波形可发现,不论是 EP 切换至 EN 还是 EN 切换至 EP,焊接电流都可以迅速的稳定到设定值,其在电流稳定阶段电流波动非常小,这些都可保证电弧稳定,有利于保证焊接质量。

针对 EN 转变为 EP 时电弧等效电阻突变大的现象,文中也采用了如前述的变参数 PI 控制与超前

控制相结合的控制策略。图 9 是采用了该控制策略从 EN 转为 EP 时电流的变化。图中可看出,焊接电流从 +50 A 下降至 -100 A 仅需约 25 μ s,且电流为零的时间约为 5 μ s。可见采用了该控制策略后当从 EN 转变为 EP 时焊接电流的下降速度达 6 A/ μ s,且过零的时间非常短,因此不会存在熄弧的现象,有利于保证极性切换过程中的焊接电弧的稳定性。

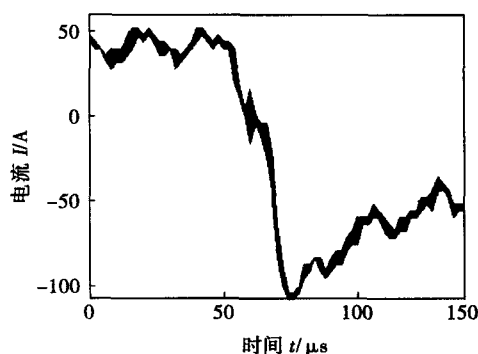


图 9 从 EN 到 EP 的焊接电流波形

Fig. 9 Wave of welding current during EN to EP

3 结 论

(1) 采用变参数 PI 控制策略,能确保在不同情况下焊接电流的稳定性。

(2) 变参数 PI 控制与超前控制相结合的控制策略,降低从 EP 切换至 EN 时钨极的温度,降低钨极的热发射电流密度以减少电流冲击。

(3) 从 EN 切换至 EP 时焊接电流下降速度快,确保不熄弧。在极性切换时焊接电流响应速度快、超调小。

参考文献:

- [1] Tomsic M, Barhosi S. Keyhole plasma arc welding of aluminum with variable polarity power[J]. Welding Journal, 1984, 63(2): 25-32.
- [2] Nunes A C, Bayless E O, Jones C O, et al. Variable polarity plasma arc welding on the space shuttle external tank[J]. Welding Journal, 1984, 63(9): 27-35.
- [3] 姜焕中. 电弧焊及电渣焊[M]. 北京:机械工业出版社, 1995.
- [4] 安藤宏平, 长谷川光雄. 焊接电弧现象[M]. 施雨湘, 译. 北京:机械工业出版社, 1985.
- [5] 刘 嘉. 弧焊逆变电源的数字化控制[D]. 北京:北京工业大学, 2002.

作者简介:丁 坤,男,1975 年出生,讲师,博士研究生。主要研究方向为电力电子技术、焊接电源。发表论文 16 篇。

Email: dingkun@hhuc.edu.cn