

弧焊逆变电源动态性能的提高及其对 短路过渡焊接过程的影响

吴文楷 朱志明 罗小锋 陈 强 张人豪
(北京 清华大学)

摘 要 采用可饱和输出电感大幅度提高了弧焊逆变电源的动态性能。在此基础上,研究了电源动态特性对 CO_2 短路过渡焊接过程的影响规律。研究结果表明,增大短路后期电流的下降速度可以有效地减小焊接飞溅,而提高短路中期电流上升速度则有利于短路过渡焊接过程的规则性与稳定性。

关键词: 可饱和电感 动态特性 短路过渡焊接

0 序 言

短路过渡焊接过程对焊接电流的调节速度有很高的要求^[1]。采用逆变技术提高电流的调节速度被公认为是行之有效的方法。

在逆变式焊接电源中,影响其电流调节速度的主要因素是输出电感 L 。 L 的大小受制于逆变频率、焊接电流调节范围以及输出电流纹波的要求。对于工作于 25kHz 的逆变电源,为保证小电流焊接时电流的连续性, L 通常取值数十微亨,这对于短路电阻 R_s 仅 $20\text{ m}\Omega$ 左右的短路过渡焊接过程,焊接电源输出回路的时间常数 ($\tau=L/R_s$) 已达 ms 级,接近整个短路过程的持续时间,难以满足对短路过程的快速控制。

采用谐振软开关技术提高逆变频率,可以减小输出电感的大小而提高逆变电源电流的调节速度。然而目前研制的采用相移脉宽调制技术 (SP—PWM) 的零压、零流、零压—零流 PWM 软开关逆变式焊接电源,逆变频率大都低于 50 kHz ^[2],而且需要较大的输出电感来保证领先臂的软开关工作状态,因而尚不能够大幅度提高电源电流的调节速度。

本文在高可靠性的双管正激逆变电路中,采用可饱和输出电感大幅度提高电流的调节速度。在此基础上,研究了电源动态性能对 CO_2 短路过渡焊接过程的影响规律。

1 采用可饱和输出电感提高逆变电源的动态性能

1.1 可饱和电感设计

磁芯材料的 $B-H$ 曲线呈 S 形特征,适当选取输出电感 L 的结构及参数,可以使 L 具有摆动电感的特征,即在大电流时,电感磁芯工作于磁化曲线的饱和区段, L 的电感值较小;而在小电流时,电感磁芯工作于磁化曲线的线性区段, L 的电感值较大以保证小电流的连续性。

对于气隙为 2Δ 、绕组匝数为 N 的电感为

$$B = \frac{\mu_0 IN}{2\Delta + \frac{1}{\mu_r}}, \quad L = \frac{\mu_0 N^2 S}{2\Delta + \frac{1}{\mu_r}}$$

式中 B 为磁通密度, μ_0 为真空导磁率, μ_r 为磁芯材料的相对导磁率。

若电感磁芯选 MXO-2000/E36, $N=5$ 匝, $2\Delta=1\text{ mm}$, $\mu_r=200$, 则

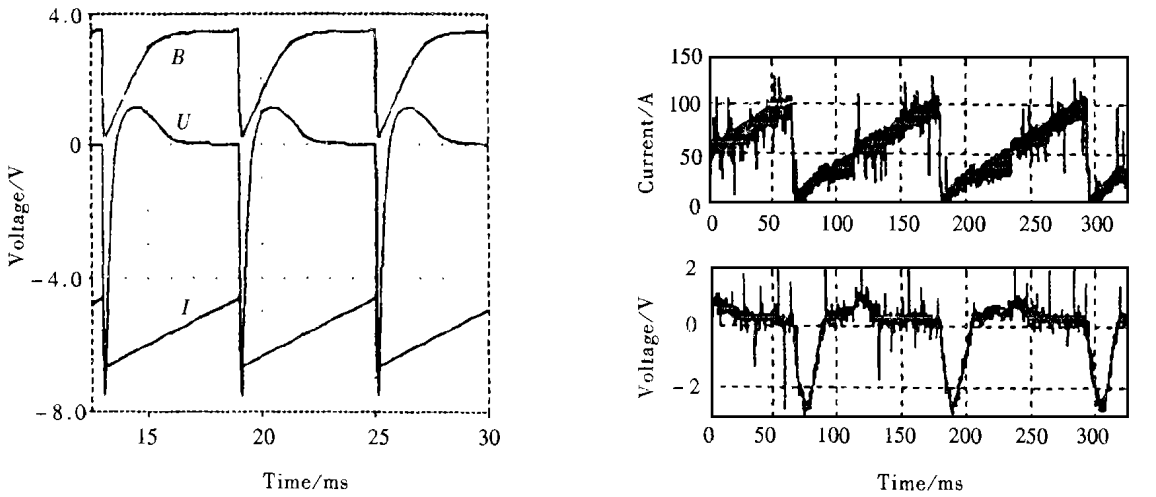
$$L=35.45(\mu\text{H})$$

取饱和磁通密度 $B_s=0.43\text{ T}$, 可得电感饱和的临界电流为

$$I=\frac{B_sNS}{L}=78.63(\text{A})$$

1.2 可饱和电感的工作特性

为了检验电感参数选择是否达到设计指标, 可以根据法拉弟定律 $U=L\frac{di}{dt}$, 实测可饱和电感 L 的工作特性。若电感的激励电流为 $\frac{di}{dt}=\text{Const}$ 的锯齿波, 则电感两端的电压 U 可以反映 L 的电感值大小。图 1(a)为激励电流、电感两端的电压 U 及磁芯磁感应强度 B 的仿真波形。可以看出, 当激励电流达到一定数值时, 电感两端的电压 U 接近于零, 电感 L 趋近饱和。图 1(b)为激励电流及电感两端电压的实测波形, 电感的饱和临界电流约在 80A 处, 与设计数值吻合。



(a) Simulation of stimulative current and inductor voltage (b) Practical waveform of stimulative current and inductor voltage

图 1 可饱和电感工作特性
Fig. 1 Saturable inductor operation characteristics

采用可饱和电感的双管正激逆变电源输出电流阶跃变化时的仿真波形如图 2 所示。输出电流较小时, 电感磁芯工作于磁化曲线的线性区域, 电感值较大, 输出电流纹波较小, 电流上升速率较慢; 随着电流的增加, 电感磁芯进入饱和和工作区域, 电流上升速率加快, 电流纹波增加。采用可饱和电感后电流达到稳态值的时间比采用线性电感 ($L=20\mu\text{H}$) 时 (图 2b) 显著减少, 大幅度提高了电源电流的调节速度。

当负载电阻为 0.05Ω , 电流给定阶跃变化时, 采用可饱和输出电感的双管正激逆变电源 (逆变频率 25 kHz) 电流调节速度的实测结果如图 3 所示 (采集频率为 250 kHz/通道)。可以看出, 输出电流的上升及下降速度 di/dt 均接近 3000 A/ms 。表明采用可饱和输出电感, 能够大幅度提高电源的电流调节速度, 为研究电源的动态性能对短路过渡焊接过程的影响规律提供了基础。

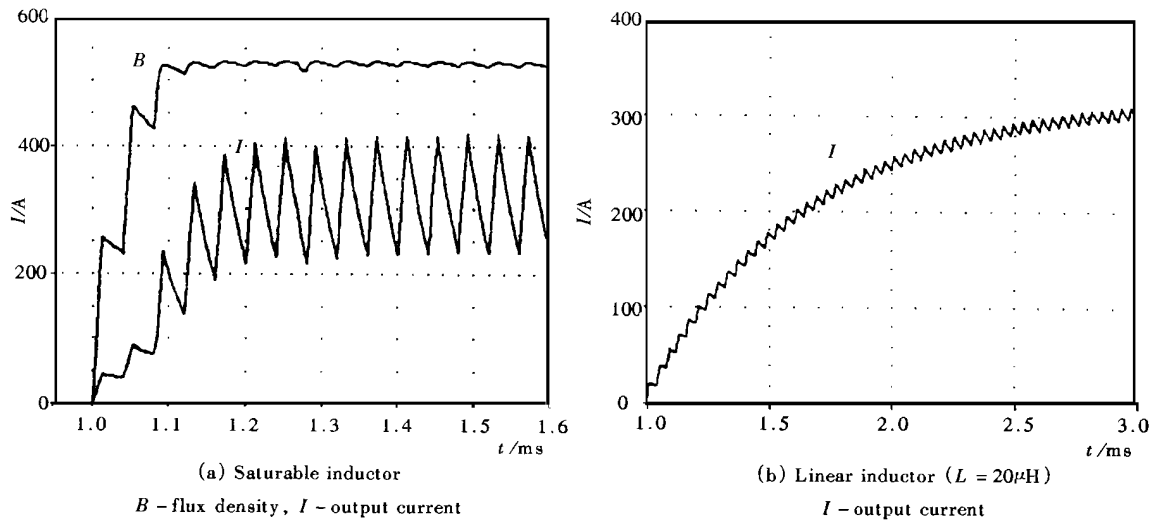


图 2 输出电流阶跃变化时的仿真曲线

Fig. 2 Simulation to step response of output current
(Invert frequency: 25kHz Load: 0.05Ω)

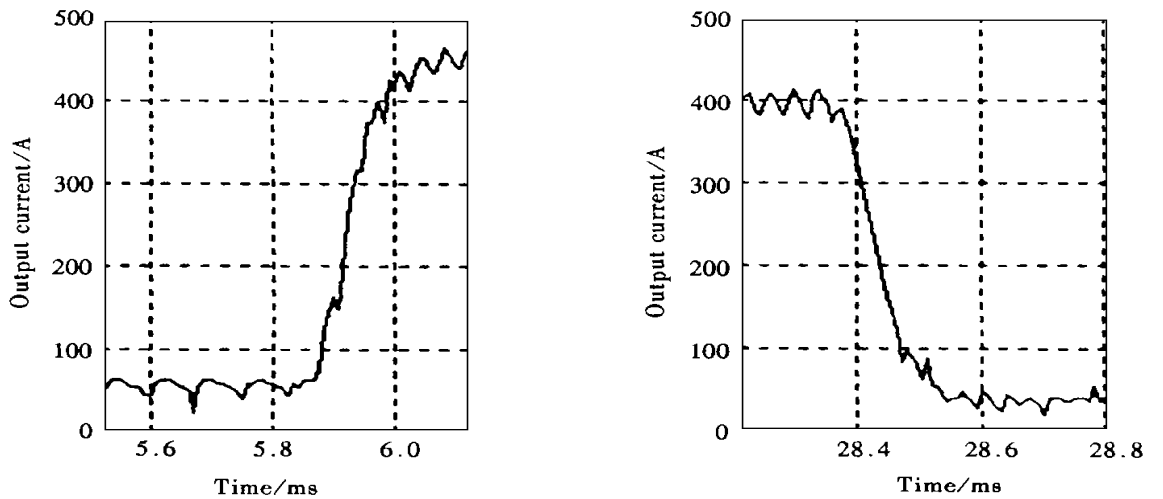


图 3 实测输出电流的调节速度

Fig. 3 Practical dynamic characteristics of developed power source

2 电源动态性能对波形控制短路过渡焊接过程的影响

2.1 短路过渡焊接过程的控制电流波形

短路过渡焊接过程的控制电流波形如图 4 所示。短路开始后, 电源输出 0.8 ms 的小电流使熔滴与熔池柔顺融合, 避免瞬时短路的发生; 然后迅速将短路电流提高到一个适当的峰值, 促使熔滴向熔池过渡; 在短路后期液桥缩颈开始时刻电源输出电流迅速减小, 使液桥在小电流下完成破断, 减小可能产生的飞溅; 再燃弧后, 电源提供确定时间的脉冲大电流以形成一定尺寸的熔滴及增加焊

缝熔深。然后电流逐渐衰减至较小电流等待下一次短路过渡过程。

2.2 电源动态性能对短路后期焊接飞溅的影响

短路后期,电磁力与表面张力的正反馈作用使得液桥颈部断面加速减小,液桥电阻迅速增加。此时如果液桥流经较大的电流,颈部附近将产生强烈的电磁收缩力及电阻热(均正比于 I^2),出现导致飞溅的“电爆炸”现象。因此在缩颈后期,减小焊接电流,使液桥在小电流下完成破断,可以减小可能产生的飞溅。

从图5中电源输出电阻的变化曲线可以看出,液桥从颈缩开始至破断只有约150 μ s,要在如此短的时间内将焊接电流降至较低的数值,要求焊接电源具有较高的动态性能。

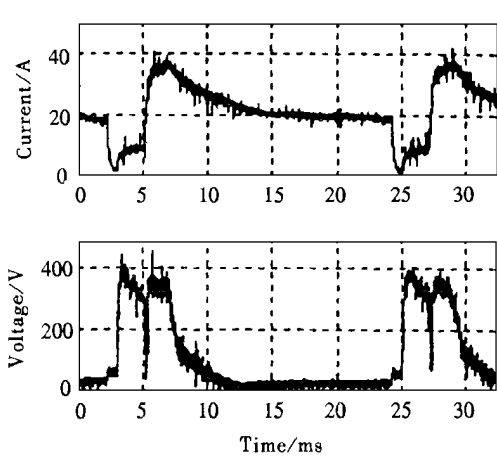


图4 短路过渡焊接过程的控制电流波形
Fig.4 Control waveform
of short-circuiting arc welding

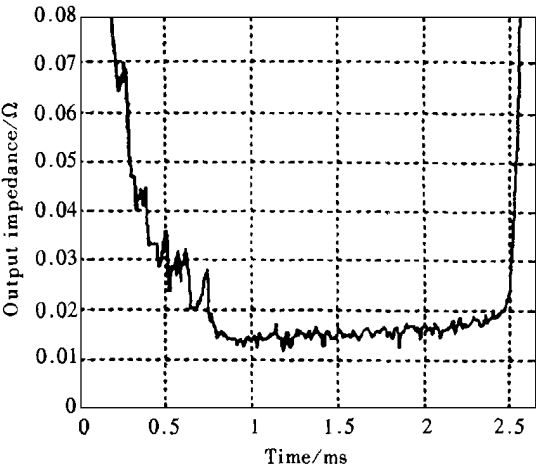


图5 短路阶段电源输出阻抗的变化曲线
Fig.5 Output impedance
variation during short-circuiting period

图4为采用电压微分方法,即通过检测短路电阻的变化率来判断液桥收缩状态,在液桥开始缩颈后减小电流来抑制焊接飞溅的实验波形。可以看出,电源在接收到缩颈信号后,能够迅速将焊接电流降低至50A以下,使金属液桥在小电流下完成破断。实验结果表明,采用电压微分方法后,120A以下焊接时飞溅能减小到0.6%以下,200A以下焊接时焊接飞溅小于1%。与传统平特性CO₂短路过渡焊接相比,短路后期的焊接飞溅得到大幅度减小。

2.3 短路电流上升速度对短路过渡过程的影响

从图5可以看出,短路开始0.8ms以后,熔滴在熔池表面已铺展开来,液桥电阻相对稳定。此时电源应迅速将短路电流提高到一个适当的峰值,促使熔滴向熔池过渡。试验结果表明,短路峰值电流的上升速度对液体金属向熔池的过渡行为会产生明显影响。

图6为不同电流上升速度下连续128个短路过渡过程的统计分析结果。图6中a、b、c分别是不同电流上升速度下短路持续时间的直方图。 T_s 为短路持续时间的平均值, $\sigma(T_s)$ 为短路持续时间的标准差不匀率, $\sigma(T_s) = \sqrt{\frac{1}{128} \sum_{i=1}^{128} (T_s(i) - T_s)^2}$ 。可以看出,随着短路电流上升速度的增加,短路平均电流及液桥所受的电磁收缩力有所增大, T_s 相应减小。值得注意的是,由 $\sigma(T_s)$ 反映的短路持续时间的分散性随短路电流上升速度的增加呈单调减小的趋势。

图6中d、e、f分别为不同电流上升速度下连续128个短路过渡周期的频谱图。随着短路电流上升速度的增加,短路过渡周期的一致性也大幅度增加。

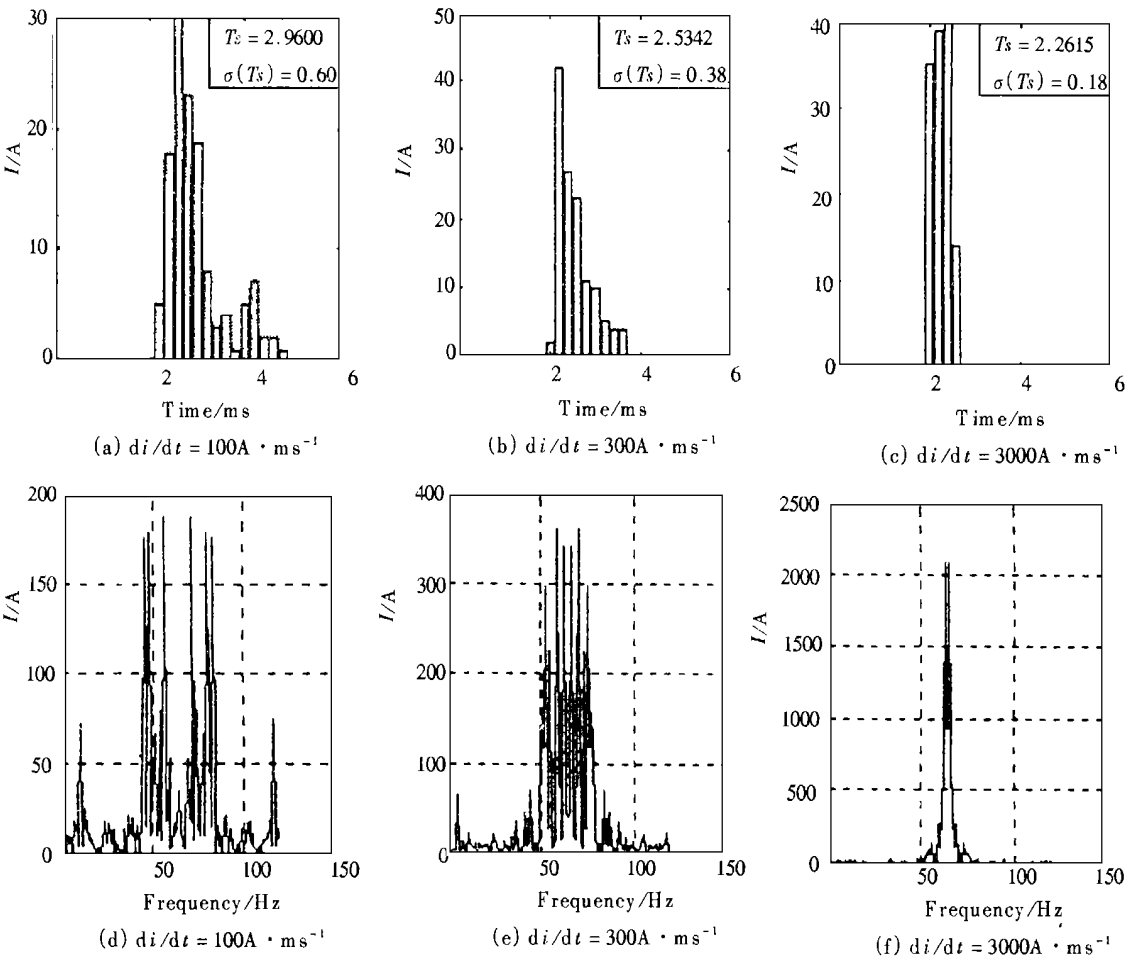


图 6 不同电流上升速度下短路过渡过程的统计分析结果

Fig. 6 Statistical analysis of short-circuiting transfer characteristic under different current rising speed

上述结果表明, 熔滴在熔池中柔顺铺展后, 液桥金属受阶跃电磁收缩力的作用, 有利于形成规则的向熔池过渡的短路行为, 降低短路过渡焊接过程的随机特性。传统的 250A 恒压平特性 CO₂ 焊接电源, 串联在输出回路的电感通常为 0.25~0.5mH, 短路电流上升速率约为 35A/ms~65 A/ms^[3]; 而对于一般的模拟式晶体管电源, 短路电流上升率不超过 800A/ms^[4], 大大低于图 3 中的 3000A/ms。可见, 利用可饱和电感改善焊接电源的动态性能, 有利于提高短路过渡焊接过程的规则性和均匀性。

采用如图 4 所示的控制电流波形, 可以完全抑制瞬时短路情况的发生。而增大短路后期焊接电流的下降速度可以有效地减小液桥桥断对电弧特性地扰动。提高短路中期的电流上升速度可以大幅度提高短路过渡焊接过程的规则性和均匀性, 从而为进一步控制短路过渡焊接过程奠定了基础。

3 结 论

- (1) 采用可饱和输出电感可以大幅度提高双管正激逆变电源的动态性能;
- (2) 提高电源的动态性能可以有效抑制短路过渡焊接过程的飞溅;
- (3) 提高短路电流上升速度能够提高短路过渡焊接过程的规则性。

(1998—11—24 收到初稿, 1999—03—22 收到修改稿)

参 考 文 献

1 Euiott K. Stava. A new low—spatter arc welding machine. Welding J., 1993 (1): 25 ~ 29.
2 Wu wenkai, et al. ero—voltage and zero—current switching full bridge PWM inverter—based power source for arc welding. China Welding. 1997(2): 156~ 160.
3 殷树言等. 气体保护焊工艺. 哈尔滨工业大学出版社, 1992.
4 黄勇. CO₂ 短路过渡焊接电弧的复合电源外特性控制: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 1997.

Improvement of Inverter’s Dynamic Properties and Its Influence
on Short—circuiting Arc Welding

Wu Wenkai, Zhu Zhiming, Luo Xiaofeng, Chen Qiang, Zhang Renhao
(Tsinghua University)

Abstract By adopting saturable inductor, an inverter—based arc welding power source with very good dynamic properties has been developed. Using the power source, the influence of dynamics properties on short—circuiting arc welding is evaluated in this paper, the results indicate that increasing the current falling speed at the later period of short—circuit will help to get fewer spatter, and increasing the current rising speed at the mid—period of the short—circuit will make the welding process more stability and regularity .

Key words saturable inductor, dynamic properties, short—circuiting arc welding

作者简介 吴文楷, 男, 1968 年 10 月生, 汉族。1990 年获西安交通大学焊接工艺及设备专业学士学位。同年进入清华大学焊接专业学习, 1993 年 3 月获工学硕士学位。1996 年 3 月至今攻读清华大学工学博士学位。自 1990 年以来, 一直从事弧焊电源及焊接工艺控制等相关领域的研究。作为主要研究人员完成了电流型 IGBT 逆变弧焊电源、功率因数校正环、零压零流软开关逆变弧焊电源、单片机控制的恒频短路过渡焊接电源、全自动电渣压力焊机的研究。对逆变电源的建模、仿真、分析与优化设计也有较深入的研究。已发表论文十余篇。