

# CO<sub>2</sub>气保焊表面张力过渡的建模及仿真

张光先, 邹增大, 陈仁富, 尹海\*

(山东大学 材料科学与工程学院, 济南 250061)

摘 要: 表面张力过渡(也称 STT)是 CO<sub>2</sub> 气保焊中一种极低飞溅的过渡形式, 它是基于熔滴过渡理论和电子化的焊接电源基础上发展起来的。该技术已应用于西气东输的管线打底焊接。作者在对 CO<sub>2</sub> 气保焊表面张力过渡理论研究的的基础上, 利用 Matlab 软件建立了电源—电弧非线性系统模型, 和电流型逆变器系统模型, 对表面张力过渡过程中的燃弧、短路等各个阶段进行了仿真, 研究了燃弧阶段熔滴长大对弧长的影响, 液桥分断阶段输出电感对电流下降率的影响。研究表明液桥分断时, 输出电感的大小是控制飞溅量的关键条件。将仿真波形与实际波形相比较, 二者基本吻合。

关键词: 表面张力过渡; Simulink 仿真; 电流型逆变器; 熔滴过渡; CO<sub>2</sub> 气保焊

中图分类号: TG444 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2003)04-68-05



张光先

## 0 序 言

对 CO<sub>2</sub> 气保焊动态过程的计算机仿真已进行了许多研究<sup>[1, 2]</sup>, 但大多数是针对普通的 CO<sub>2</sub> 气保焊的, 由于普通 CO<sub>2</sub> 气保焊飞溅大、成形差, 许多学者从各方面提出了解决方案。其中, 表面张力过渡的方法是解决 CO<sub>2</sub> 气保焊飞溅大的较好的方法, 表面张力过渡实际上是对传统的焊接过渡进行精细控制, 创造熔滴表面张力过渡的条件, 对焊接电源的动

态特性有特殊要求。利用 Matlab(矩阵实验室)中 Simulink 工具建立了电源—电弧非线性系统并对整个系统进行了仿真研究, 为表面张力过渡的研究及其动态分析提供了一种方法。

## 1 仿真模型的建立

总的系统仿真模型如图 1 所示, 图中, a 子模块是燃弧/短路信号及电压上升率  $dU/dt$  信号产生部分; b 子模块是控制规律产生部分; c 子模块是电源

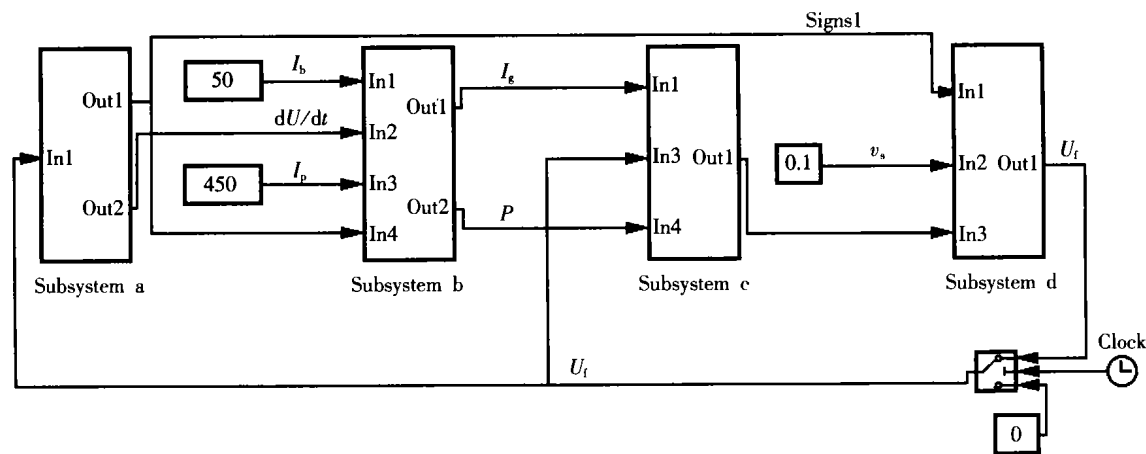


图 1 系统仿真模型

Fig. 1 Simulation of mode of system

部分; d 子模块是 CO<sub>2</sub> 气保焊过程部分。

表面张力过渡的系统模型框图如图 2 所示。图

中,  $U_s$  为设定燃弧与短路电压判定值;  $U_t$  为焊接电压;  $P$  为输出电流斩波脉冲;  $I_g$  为焊接电源的电流给定;  $I$  为焊接电流。

### 1.1 表面张力过渡电源的模型

收稿日期: 2003-01-06

\* 参加此项研究工作的还有刘明志



1.2.2 初始弧长  $l_0$  的确定

假设熔化的金属在每次过渡过程中, 完全转移至熔池, 并忽略熔池平面的振荡的影响。如图 3 所示, 短路时  $l=0$ , 刚短路瞬间未熔化的焊丝端离熔池的距离为熔滴直径, 经过一个短路过程, 在电弧重新燃烧时的电弧长度为

$$l_0 = l_2 - \int_0^{t_s} (v_s - v_m) dt,$$

式中:  $t_s$  是短路时间。

1.2.3 短路状态

在试验条件是  $\phi 1.2\text{ mm}$  焊丝,  $100\% \text{CO}_2$  气体, 焊接电流  $150\text{ A}$  时, 利用表面张力过渡测得短路电阻变化曲线如图 5 所示。其中  $t_1 \sim t_2$  短路开始段, 液柱与熔池接触面积较小, 因而液桥电阻较大;  $t_2 \sim t_3$  完全短路, 液桥接触面积较大, 短路电阻较稳定;  $t_3 \sim t_4$  液桥明显收缩阶段, 电阻上升很快, 液柱进入失稳状态。整个回路电阻可分为液桥电阻  $R_1$  和其它电阻  $R_2$ 。

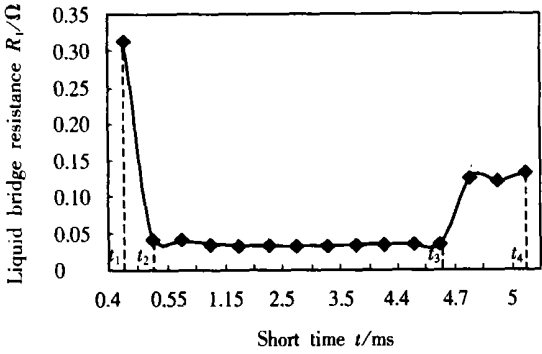


图 5 液桥电阻试验曲线  
Fig. 5 Cure of liquid resistance

$t_1 \sim t_3$  段: 设液桥半径为  $r$ , 液桥失稳的最小半径为  $r_{\min}$ , 液桥初始半径为  $r_0$ , 忽略  $t_1 \sim t_2$  的影响,  $t_1 \sim t_3$  段称为  $t_s$ , 同一种材料及直径的熔滴, 在恒定电流作用下, 液桥半径收缩率  $\frac{dr}{dt}$  基本为定值<sup>[3]</sup>, 如图 6 所示,  $I_1, I_2, I_3$  分别是短路电流。

则 
$$r = r_0 - \frac{dr_1}{dt} \cdot t, \tag{5}$$

式中:  $\frac{dr_1}{dt}$  是失稳前液桥半径收缩率, 为  $\frac{r_0 - r_{\min}}{t_{s1}}$ 。

根据式(4)近似取值,  $r_0 \approx \frac{1}{2} l_2$ , 液桥电阻  $R_1$  近似为常值。

$t_3 \sim t_4$  段: 液桥进入明显收缩状态。如图 7 所示, 取出一段对电阻贡献最大的液柱, 假设柱体电阻值约为

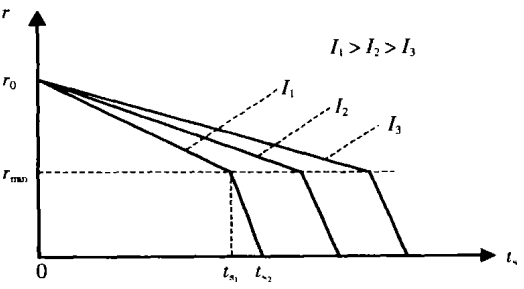


图 6 短路时间液桥初始半径及短路电流关系图  
Fig. 6 Relation among initial bridge radium, short-current time and current

$$R_1 = \rho \frac{l_k}{\pi r^2},$$

式中:  $l_k$  为柱体长度;  $\rho$  为电阻率。

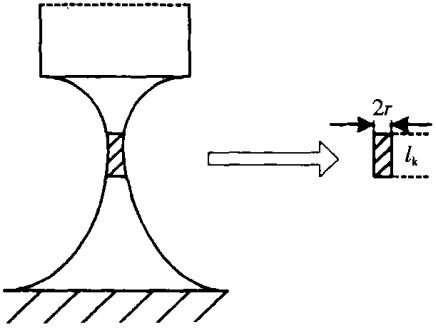


图 7 液柱取样图  
Fig. 7 Liquid bridge

液桥的半径为

$$r = r_{\min} - \frac{dr_2}{dt} \cdot t,$$

式中:  $\frac{dr_2}{dt}$  是  $t_3 \sim t_4$  间的液桥半径收缩率, 为

$\frac{r_{\min}}{t_s - t_{s1}}$ 。可得短路时电压为

$$U = I [ R + \rho \frac{l_k}{\pi (r_{\min} - \frac{dr_2}{dt} \cdot t)^2} \cdot \text{signs}_2(t - t_s) ] .$$

短路电压的 Simulink 模块如图 1 中所示的 d 子模块。

1.3 控制规律的模型

STT 电源是分段恒流源, 输出电流波形如图 8 所示<sup>[4]</sup>。电流表达式为

$$I_g = \begin{cases} I_{\min}, & t_1 > t_0, & U < U_s; \\ I_{p_1} + k_p t, & t_2 > t_1, & U < U_s; \\ I_{p_2}, & t_2, & U < U_s; \\ I_{\min}, & t_3 > t_2, & U < U_s; \\ I_p, & t_4 > t_3, & U > U_s; \\ I_b = (I_p - I_b) e^{-\alpha t}, & t_5 > t_4, & U > U_s; \\ I_b, & t > t_5, & U > U_s; \end{cases}$$

式中:  $I_b, I_p$  分别为基值电流, 峰值电流;  $k_p$  为短路电流上升率;  $I_{\min}$  为最小输出电流;  $\tau$  为燃弧电流衰减常数;  $p$  是缩颈爆破前  $dV/dt$  判定点。其 Simulink 模块如图 1 中所示的 b 子模块。

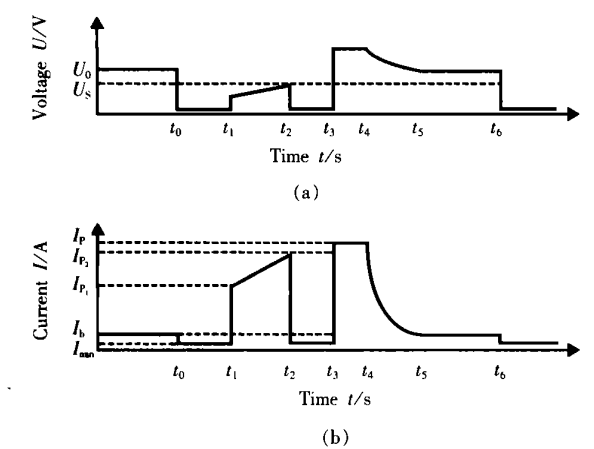


图 8 给定电流波形  
Fig. 8 Waveform of given current

2 仿真计算

2.1 仿真结果及试验结果的对比

试验及仿真条件为  $\phi 1.2\text{ mm}$  焊丝,  $100\% \text{ CO}_2$  气体, 流量  $15\text{ mL/min}$ ,  $I_p = 450\text{ A}$ ,  $I_b = 40\text{ A}$ ,  $v = 4\text{ m/min}$ 。

2.1.1 仿真的试验验证

试验曲线与仿真曲线如图 9 和图 10 所示。

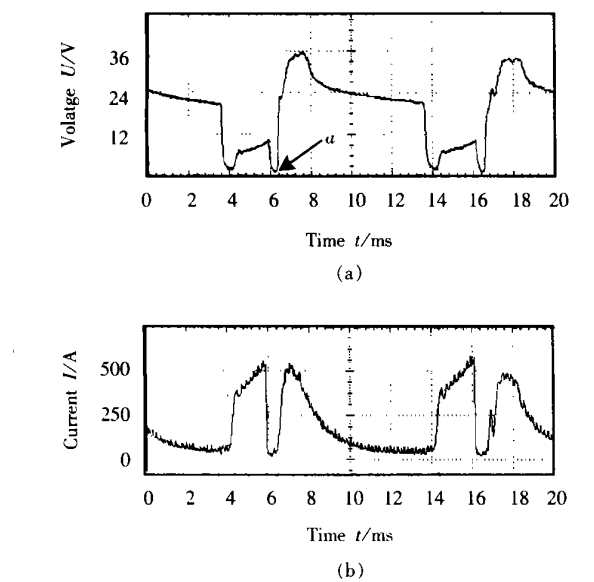


图 9 焊接电流电压实测波形  
Fig. 9 Measured waveforms of welding current and voltage

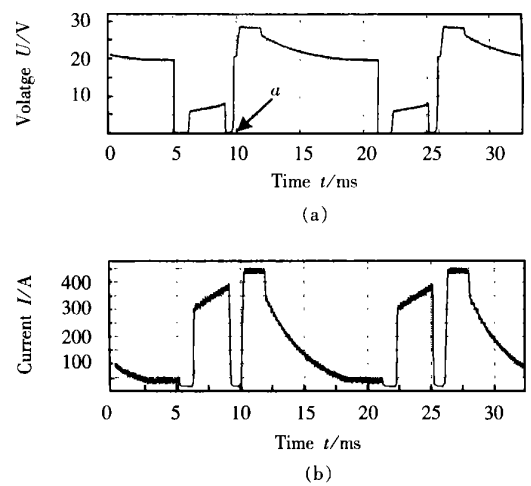


图 10 焊接电流电压仿真波形  
Fig. 10 Simulation waveforms of welding current and voltage

选择输出电感为饱和电感时, 饱和值为  $50\text{ A}$ , 饱和后电感量为  $40\text{ }\mu\text{H}$ 。

2.1.2 输出电感增大对液桥分断时电流及电压波形的影响

输出电感选择线性电感, 电感值  $L = 100\text{ }\mu\text{H}$ , 试验曲线与仿真曲线如图 11 和图 12 所示。图中  $a$  点是液桥分断点, 分断前液桥能量已有较大积累, 飞溅增加。由于电感较大, 燃弧电流波形已变形, 焊接过程稳定性变差。

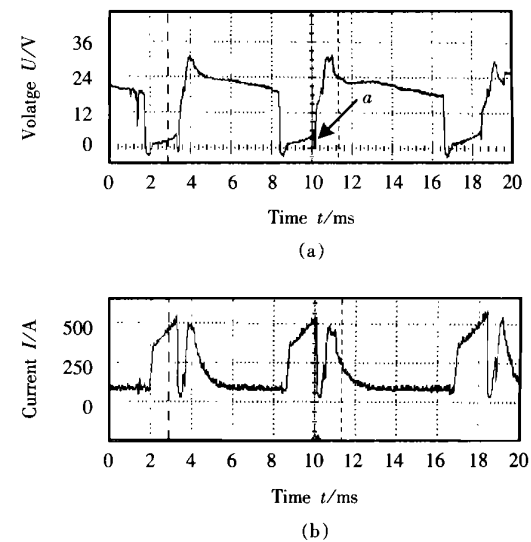


图 11 电感值为  $100\text{ }\mu\text{H}$  时的电流电压实测波形  
Fig. 11 Measured waveforms of current and voltage in  $L = 100\text{ }\mu\text{H}$

2.2 结果讨论

(1) 仿真结果与试验结果基本一致, 但燃弧峰值电流对应的燃弧电压, 实测值比仿真值高, 原因是

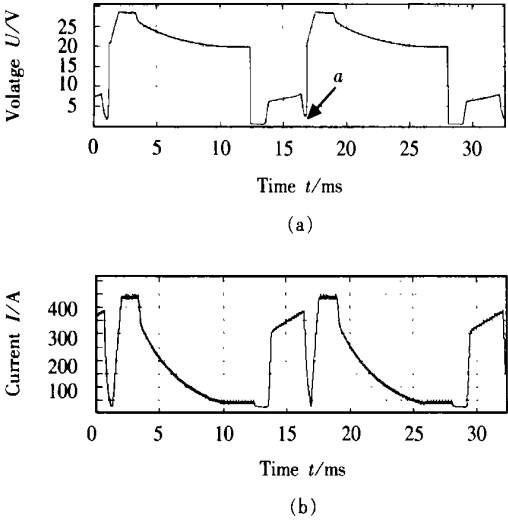


图 12 电感值为 100  $\mu\text{H}$  时的电流电压仿真波形  
Fig.12 Simulation waveforms of current  
and voltage in  $L = 100 \mu\text{H}$

实际的伸长电阻及回路电路电阻比仿真模型值大。

(2) 在短路区,短路电流与短路时间的持续值与实测值有较大误差,原因是从文献[2]中得到的式(5)对这一过程的描述过于简化,对短路期间熔滴过渡的精确描述模型还需进一步研究。

(3) 由图 9、10 的仿真波形与实测波形对比可见,采用饱和电抗器,在液桥分段之前,电流下降率很高。在液桥分段时图 9、10 的  $a$  点,电流已下降至很低,且持续了一段时间了,熔滴基本上是在表面张力下过渡的。从图 11、12 的仿真波形与实测波形来看,由于输出电感较大,电流上升率、下降率都明显降低,电压回路时间变长。此时,液桥分断的  $a$  点,

刚刚达到电流的最小值,实际在  $a$  点之前,液桥处通过较大电流,因而飞溅较大。

由图 9、10、11、12 比较可见,图 11、12 的电流波动明显小于图 9、10,这是由于图 9、10 采用的是饱和电感,而饱和后电感量较小的缘故。

3 结 论

- (1) 利用 Matlab 中的 Simulink 软件初步建立了电源 - 电弧的系统模型,并对表面张力过程进行仿真,仿真结果与实测波形基本一致。
- (2) 输出回路中的电感值是影响实现表面张力过渡的最重要因素。

参考文献:

- [1] 朱六妹,杜宪昌,王 伟. 电弧焊动态特性的仿真研究[J]. 电焊机,2001,31(11):14 ~ 16.
- [2] 张军红. 熔滴短路过渡动态过程的数学建模与仿真[J]. 焊接学报,2001,22(4):81 ~ 83.
- [3] Chol BYJ H, Lee J Y, Yoo C D. Simulation of dynamic behavior in a GMAW system [ J ]. Welding Journal, 2001, 80 ( 10 ): 239s ~ 245s.
- [4] 林肯电学公司. 控制短路型焊接系统的方法和装置[P]. 中国专利:B23K9/09,1987 - 04 - 10.

作者简介: 张先生, 男, 1965 年出生, 副教授, 博士研究生。主要从事逆变弧焊电源的开发与应用。获省级科技进步奖 5 项, 发表论文 20 余篇。  
Email: zgx @sch. edu. cn