

基于能量最小原理的熔化极气体保护电弧焊 短路过渡液桥形状动态模型*

何建萍¹ 吴毅雄² 焦馥杰¹

(1. 上海工程技术大学材料工程学院 上海 200336;

2. 上海交通大学焊接工程研究所 上海 200030)

摘要: 基于能量最小原理,建立了熔化极气体保护电弧焊(Gas metal arc welding, GMAW)短路过渡液桥形状动态变化的模型。在一定的假设条件下,以电磁力、表面张力、重力共同作用下的液桥某体积元上具有的能量(势能)最小,建立 GMAW 短路过渡液桥形状动态变化的模型,结合焊接回路的动态模型,对液桥形状动态变化进行仿真计算,并在此基础上进一步进行模型的试验验证和模型的误差分析。研究表明,建立的 GMAW 短路过渡液桥形状模型所描述的液桥轮廓动态变化趋势与试验结果比较吻合,实际焊接过程中的液桥形状还受到磁偏吹、焊接运动过程、熔池作用、保护气体流动等的影响,这些影响是造成液桥形状模型误差的主要因素。

关键词: 熔化极气体保护电弧焊 短路过渡液桥 能量最小原理 动态模型

中图分类号: TG403 TG444

Dynamic Model of Liquid Bridge Profile in Gas Metal Arc Welding by Principle of Minimizing Energy

HE Jianping¹ WU Yixiong² JIAO Fujie¹

(1. College of Material Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620;

2. Institute of Welding Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

Abstract: Dynamic liquid bridge profile in gas metal arc welding (GMAW) based on principle of minimizing energy is modeled. The energy of a small unit in liquid bridge tends to be minimizing under surface tension force, electromagnetic force, and gravity force, so a dynamic liquid bridge profile in GMAW is modeled. Dynamic behavior of liquid bridge is analyzed when dynamic model of GMAW welding circuit in short circuit period is associated. Deviations of model are discussed. The results show that the dynamic development tendency of liquid bridge profile is about the same in simulation and experiment. The factors that cause calculation deviations are arc blow, welding movement, welding pool action, shielded gas lugging.

Key words: Gas metal arc welding(GMAW) Liquid bridge of short circuit transfer Minimizing energy principle Dynamic model

0 前言

短路过渡是一个复杂的焊接过程,存在飞溅和焊缝成形不好两个缺陷。由于焊接过程理论研究的不足,在每采用一种新的焊接材料或新的控制方法时,要得到良好的焊接质量和焊缝成形,需要进行大量的试验以确定合适的工艺参数。这种试验成本高、周期长,并要求技术人员有丰富的经验^[1-2]。

由于短路过渡过程涉及电场、磁场、机械力、宏观和微观运动等许多物理问题,且有固-液-气相,各参数之间相互影响,因此增加了短路过渡过程的复杂性,限制了关于这方面理论研究的深入开展。

在短路过渡过程中,短路期液桥轮廓的动态变化直接影响到液桥电阻的变化,作为短路期焊接回路电阻的主要组成部分,直接影响到焊接回路响应过程的时间常数,即焊接回路的动态特性,因此,液桥电阻是短路期焊接电流变化率的重要影响因素之一,关系到短路过渡的稳定性。而目前关于短路过渡液桥形状的两个主要研究流量理论(Volume of

* 国家自然科学基金(50775135)、上海市科委攻关(061111034)和上海市教委重点(06zz79)资助项目。20070302 收到初稿,20071012 收到修改稿

fluid, VOF)^[3]和标记元理论(Marker and cell, MAC)^[4]则假设电流不变、液桥高度保持不变、不考虑焊接回路串联电感对动态过程的影响、不考虑焊丝熔化对液桥体积的影响。因此,从动态角度对熔化极气体保护电弧焊(Gas metal arc welding, GMAW)短路过渡液桥形状模型的理论研究意义重大。

本文以能量最小原理,从动态的角度建立了短路过渡液桥形状的动态模型,仿真计算了液桥形状的动态变化,并进行了试验验证和模型的误差分析。

1 能量最小原理的液桥形状动态模型建立

在短路过渡过程中,短路期的液桥形状变化主要受到作用在液桥上的力的作用,因此,本文研究的基于能量最小原理的液桥形状模型建立基于以下几个条件:①液桥为轴对称,不考虑磁偏吹及焊接小车行走所引起的液桥形状的轴向不对称。②熔池表面是平的,不考虑熔池中液态金属的流动性及液态金属在熔池表面的溢出。③不考虑保护气体的作用力。④液态金属的物理参数不变。

本文的模型是在等速送丝、恒压外特性电源、焊枪导电嘴端部到工件表面的距离保持不变的情况下建立的。

在如图1a所示液桥流体上,作用在液桥上的力有电磁力、重力和表面张力。径向断面在无其他外力的情况下为圆形,如图1b所示。

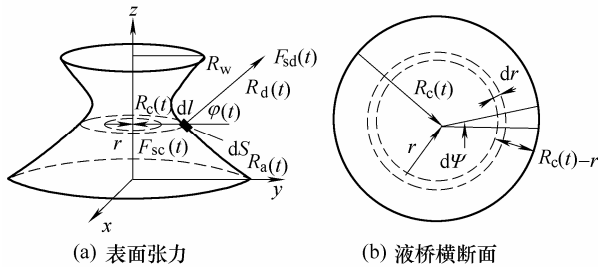


图1 液桥坐标系

在能量最小原理^[5]下,液桥上每个断面dl长度下的体积单元中的能量应该为最小。式(1)为该体积单元中具有的能量(总势能) $E(t)$,要使该能量最小,必须满足式(2)、(3)。其中, $R_c(t)$ 为液桥某处断面半径, dz 为 dl 在 z 轴上的投影, $F_r(t)$ 、 $F_z(t)$ 是半径为 $R_c(t)$ 断面、长度为 dl 的单元体积上的总的径向力和轴向力。

$$E(t) = F_r(t)R_c(t) + F_z(t)dz \tag{1}$$

$$\frac{\partial E(t)}{\partial R_c(t)} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial E(t)}{\partial z} = 0 \tag{3}$$

式(1)中的 $F_r(t)$ 、 $F_z(t)$ 由式(4)、(5)计算,其中, $F_{sr}(t)$ 、 $F_{sz}(t)$ 是 dl 长度液桥表面的表面张力 $F_{sc}(t)$ 、 $F_{sd}(t)$ 的总径向表面张力和轴向表面张力; $\bar{F}_{emr}(t)$ 、 $\bar{F}_{emz}(t)$ 是作用在 dl 长度液桥上的径向平均电磁力和轴向平均电磁力; $\bar{F}_{gz}(t)$ 为轴向平均重力。本文推导了 $F_{sr}(t)$ 、 $F_{sz}(t)$ 、 $\bar{F}_{emr}(t)$ 、 $\bar{F}_{emz}(t)$ 、 $\bar{F}_{gz}(t)$ 的计算公式,与 $I_f(t)$ 、 $R_d(t)$ 、 $R_c(t)$ 、 $\varphi(t)$ 、 z 有关,分别为式(6)~(10),其中, $I_f(t)$ 为焊接电流, $\varphi(t)$ 为 $F_{sd}(t)$ 与 y 轴夹角, $R_d(t)$ 为 dS 处液桥轴切后曲线的曲率半径, z 为 dl 处的轴向坐标。

$$F_r(t) = F_{sr}(t) + \bar{F}_{emr}(t) \tag{4}$$

$$F_z(t) = F_{sz}(t) + \bar{F}_{emz}(t) + \bar{F}_{gz}(t) \tag{5}$$

$$F_{sr}(t) = G_{sr}(R_c(t), R_d(t), \varphi(t)) \tag{6}$$

$$F_{sz}(t) = G_{sz}(R_c(t), R_d(t), \varphi(t)) \tag{7}$$

$$\bar{F}_{emr}(t) = G_{emr}(I_f(t), R_c(t), \varphi(t)) \tag{8}$$

$$\bar{F}_{emz}(t) = G_{emz}(I_f(t), R_c(t), \varphi(t)) \tag{9}$$

$$\bar{F}_{gz}(t) = G_{gz}(R_c(t), z, \varphi(t)) \tag{10}$$

2 焊接回路动态模型

根据电源输出的戴维南等效原理,将电源等效为开路输出电压和入端等效内阻的串联。进一步考虑焊丝伸出长度、熔滴和液桥部分电阻,得到等效焊接回路原理图如图2所示,据此建立的焊接回路动态模型如式(11),短路期电弧电压如式(12)。

$$U_s - U_f(t) = L \frac{dI_f(t)}{dt} + R_i I_f(t) \tag{11}$$

$$U_f(t) = I_f(t)R_{exp}(t) + I_f(t)R_{exd}(t) \tag{12}$$

式中, U_s 为电源输出的开路电压, L 为焊接回路串联电感, R_i 为电源等效内阻及回路电缆线电阻的合成, $U_f(t)$ 为电弧电压, $R_{exp}(t)$ 为焊丝伸出长度上的电阻, $R_{exd}(t)$ 为液桥上的电阻。

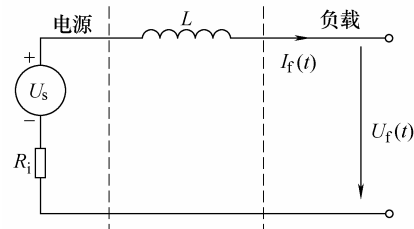


图2 等效焊接回路原理图

液桥和焊丝伸出长度的电阻作为焊接回路电

阻的一部分,对焊接回路的动态响应有较大的影响。本文采用的焊丝伸出长度电阻和液桥电阻的动态模型分别如式(13), (14)^[6]。

$$R_{\text{exp}}(t) = \frac{1}{\pi R_w^2} \int_0^{l_{\text{exp}}(t)} \xi(T) dl \quad (13)$$

$$R_{\text{exd}}(t) = \int_0^{l_{\text{exd}}(t)} \frac{\xi(T_0)}{S(l_0)} dl_0 \quad (14)$$

式中, $\xi(T)$ 为电阻率, T 为焊丝伸出长度上某处温度, T_0 为液桥温度, l_0 为距液桥底部的距离, $S(l_0)$ 为 l_0 处液桥的断面面积。

3 液桥形状动态变化的仿真计算

基于第 1 节建立的液桥形状动态模型,在电源输出电压 $U_s=21.2\text{ V}$,送丝速度 $v_f=4.926\text{ m/min}$,焊丝直径 $d=1.2\text{ mm}$,焊枪导电嘴端部到熔池表面距离 $d_1=1.5\text{ cm}$,回路串联电感 $L=100\text{ }\mu\text{H}$ 的条件下,计算短路期熔滴金属在熔池中的铺展、液桥建立和液桥缩颈的动态变化过程。

图 3 为计算的液桥形状动态变化。图 3 中 0~1.35 ms 为短路前期熔滴铺展、建立液桥的过程。从图 3 中看到,缩颈位置(液桥最小断面处)最早发生在熔滴和熔池接触部分,重合一段时间(小于 0.50 ms)后,缩颈位置逐步上移,缩颈半径增大;熔滴的初始铺展速度较快(1.05 ms 之前),形成液桥后,铺展速度趋于变缓,当熔滴铺展到一定程度,缩颈半径基本保持不变,只是缩颈位置上移(0.85~1.15 ms 之间);在铺展过程中,熔滴上面部分的轮廓基本保持不变,但随着缩颈位置的上移,保持轮廓基本不变的熔滴上面部分的位置也在上移,一直到焊丝固-液态的交界处,这时建立稳定的液桥。

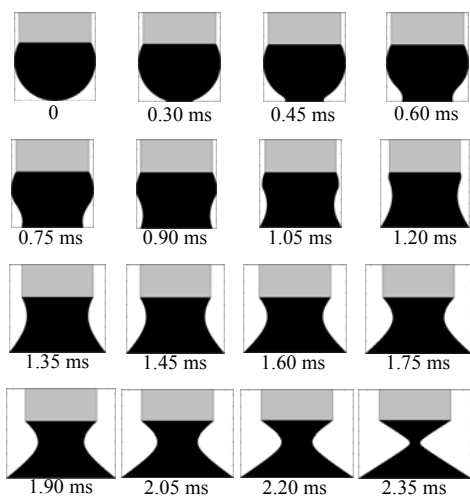


图 3 计算的液桥形状动态变化

图 3 中 1.45~2.35 ms 为短路后期液桥缩颈过

程。从图 3 中看到,该过程的后期液桥缩颈速度明显增大,这是因为短路后期液桥缩颈处电流和电流密度均大于前期的电流和电流密度;伴随着缩颈过程,液态金属继续向熔池铺展,但铺展速度较慢。

图 3 的短路后期液桥缩颈过程中,缩颈位置不论是相对于焊丝固-液态交界处的距离还是相对于熔池表面的距离均在变化,如图 4 所示。缩颈位置相对于焊丝固-液态交界处的距离 $y_{11}(t)$ 在增大,相对于熔池表面的距离 $y_{12}(t)$ 在减小。这是因为在短路后期电流已增加到一定值,焊丝熔化速度比较大,不断新增液态金属,进入缩颈位置的上面部分,虽然在重力及表面压力的作用下,缩颈位置上面部分的液态流体质点会流向缩颈位置下面部分,但由于电磁收缩力的作用,缩颈断面的流体质点受到挤压,向两个方向均有流动,阻碍了在缩颈断面处流体质点向熔池方向的流动,同时缩颈处的断面面积也在减小,也限制了该处流体质点的流动;另一方面,在缩颈位置的下面部分,流体质点向熔池表面铺展,并向熔池内部流动。

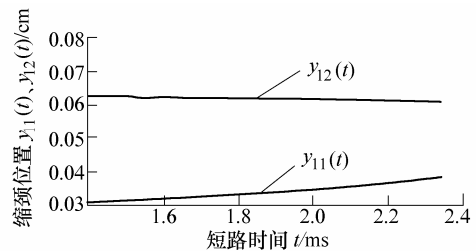


图 4 计算的缩颈位置变化

图 3 液态金属在铺展、建立液桥和液桥缩颈过程形状的动态变化进一步表现为图 5a,该图是轴对称的半形状动态变化过程,缩颈位置先沿着 x 方向发展,缩颈半径逐步增大,缩颈位置逐步上升;再沿 y 方向发展,这时的缩颈半径基本不变,只是缩颈位置继续上升,最后沿 z 方向发展,缩颈半径迅速减小,缩颈位置略微下降。图 5a 中缩颈半径的变化对液桥径向断面面积的影响很大,并直接影响到液桥的电阻变化呈 U 形,如图 5b,图 5b 中的 A、B、C 三段分别对应于图 5a 的 x 、 y 、 z 三个过程。

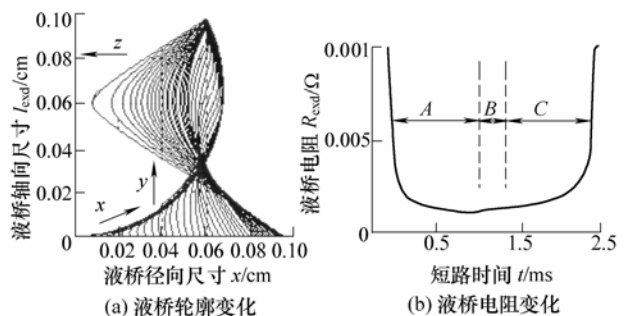


图 5 计算的液桥轮廓和液桥电阻变化

4 高速摄影试验和误差分析

在相同条件下, 本文研究通过高速摄影, 试验拍摄的 GMAW 短路过渡液桥形态动态变化过程如图 6 所示, 其中, 1、2 号照片为液态金属的铺展, 3 号照片已形成液桥, 4~7 照片液桥缩颈, 8 号照片液桥爆断。

比较图 3、6 可知, 理论计算和试验结果所显示的短路过渡时, 液态金属在熔池中的铺展、液桥建立、缩颈过程的动态液桥形状变化趋势相似, 但尚存在一定误差。这是因为本文研究的基于能量最小原理短路过渡液桥形状动态模型是在一定的假设条件下(第 2 节)完成的, 而实际存在以下情况。

(1) 焊接电源到工件的接入位置所造成的磁偏吹现象、焊接小车的行走使焊丝端部的液态金属相对于焊枪移动所具有的惯性、熔池表面过渡金属对阴极斑点的影响均使得液桥形状的动态变化具有非轴向对称的趋势。

(2) 短路过渡燃弧期的电弧压力对熔池的作用, 及其随短路过渡的周期性变化对熔池产生周期性的搅拌作用; 并且液态熔滴金属在熔池表面的短路、铺展, 及液桥缩颈、爆断过程的周期性变化, 使得熔池表面的形状比较复杂。这是在本文基于能量最小原理的短路过渡液桥形状动态模型研究之后将进一步开展的工作。

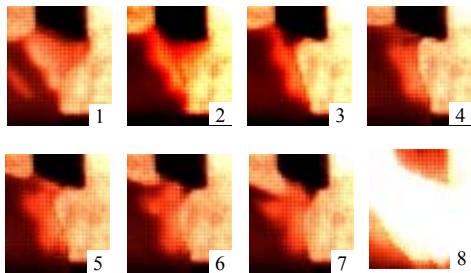


图 6 实拍的液桥形状的动态变化

5 结论

(1) 熔滴短路时, 缩颈位置最早发生在熔滴和熔池接触部分, 然后逐步上移; 随着熔滴的铺展, 缩颈半径在增大, 当熔滴铺展到一定程度, 缩颈半径基本保持不变, 只是缩颈位置在上移; 上述过程中, 熔滴上面部分的轮廓基本保持不变, 随着缩颈

位置的上移, 保持轮廓基本不变的熔滴上面部分的位置也在上移, 一直到焊丝固-液态的交界处, 这时建立稳定的液桥; 然后液桥缩颈, 直到发生爆断。

(2) 熔滴的初始铺展速度较快, 形成液桥后, 铺展速度趋于变缓, 伴随着缩颈过程, 液态金属继续向熔池铺展, 但铺展的速度较慢。

(3) 实际的短路过渡焊接过程中的磁偏吹、焊接小车的行走、熔池表面液态金属的堆高、熔池表面的复杂形状对液桥形状的动态变化有很大的影响。

参 考 文 献

- [1] JONSSON P G, SZEKELY J, CHOO R T C, et al. Mathematical models of transport phenomena associated with arc-welding processes: a survey[J]. *Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 1994, 2(5): 995-1 016.
- [2] 王方, 侯文考, 胡仕新. 熔化极气体保护焊仿真系统[J]. *焊接学报*, 2003, 24(1): 35-39.
WANG Fang, HOU Wenkao, HU Shixin. Research on simulation systems of MIG welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2003, 24(1): 35-39.
- [3] CHOI S K, KO S H, YOO C D, et al. Dynamic simulation of metal transfer in GMAW, Part 2: Short-circuit transfer modes[J]. *Welding Journal*, 1998, 77(1): 45-51.
- [4] MARUO H, HIRATA Y, GOTO N. Bridging transfer phenomena of conductive pendent drop: The effects of electromagnetic pinch force on bridging transfer[J]. *Quarterly Journal of JWS*, 1992, 10(2): 43-50.
- [5] CHOI S K, LEE K H, YOO C D, et al. Analysis of metal transfer through equilibrium shape of pendent drop in GMAW[J]. *Quarterly Journal of Japan Welding Society*, 1996, 14(2): 243-247.
- [6] ORSZAGH P, YOU C K, KOHSUKE H. Short-circuiting transient phenomena in GMA/CO₂ welding: Through-the-wire sensor for feedback torch height control[J]. *Transactions of JWRI (Journal Welding Research Institute of Osaka University)*, 1997, 26(1): 49-67.

作者简介: 何建萍, 女, 1964 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为数字化焊接电源、焊接过程动态数值模拟等。

E-mail: janejphe@yahoo.com.cn