

定点 TIG 焊接电弧与熔池交互耦合数值模拟

芦凤桂, 唐新华, 李少青, 姚 舜*

(上海交通大学 材料科学与工程学院, 上海 200030)

摘 要: 电弧与熔池的交互作用在两者之间形成了一个不断移动变化的自由界面, 对界面的处理是实现电弧与熔池交互耦合的关键。运用建立的三维统一数学模型对 TIG 焊接电弧与熔池进行了动态耦合数值模拟, 揭示电弧—熔池相互作用的机制以及电弧—熔池动态行为的基本规律。结果发现电弧与熔池不断交互耦合计算得出的熔池形状与试验测得的熔池形状比较吻合。

关键词: 自由界面; 交互耦合; 电弧与熔池; 数值模拟

中图分类号: TG44 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2005)09-69-05



芦凤桂

0 序 言

电弧与熔池的交互作用在两者之间形成了一个不断移动变化的界面。模拟焊接过程, 进而控制焊接质量就需要考虑电弧与熔池之间的交互作用。电弧与熔池界面是客观存在的, 将电弧与熔池分割开来, 以固定的边界条件处理^[1-3], 尽管可以简化分析过程, 但有一定的局限性。

Lin^[4]等研究了焊接电流对熔池表面压痕深度和形状的影响。曹振宁^[5]、Zhang^[6]、Fan^[7]等分析了熔池变形表面对熔池成形的影响。Li^[8]分析了电弧与熔池间的过渡现象。在分析熔池的过程中考虑了表面变形的影响。孙俊生、武传松^[9,10]分析了熔池表面形状对电弧电流密度分布的影响。

电弧与熔池间的界面变形不仅影响熔池的形状, 同时也影响了电弧的行为特征。在考虑界面变形的情况下, 耦合分析电弧与熔池行为特征, 可以更为准确地模拟分析电弧与熔池行为以及预测焊缝的形状。

作者将焊接电弧与熔池结合在一起, 建立统一的电弧与熔池数学模型进行模拟分析。揭示电弧—熔池相互作用的机制以及电弧—熔池动态行为的基本规律。这对于深入了解焊接过程, 推进电弧—熔池数值模拟分析的理论研究和焊接虚拟制造工程的应用都具有理论价值和实际意义。

1 数学模型

直流 TIG 焊电弧与熔池的统一模型如图 1 所示。由于定点焊接的对称性, 所建电弧—熔池模型为整个电弧—熔池模型的四分之一。该模型用于分析电弧与熔池的相互作用, 故所建模型包括电极区、电弧区和工件区三个部分。

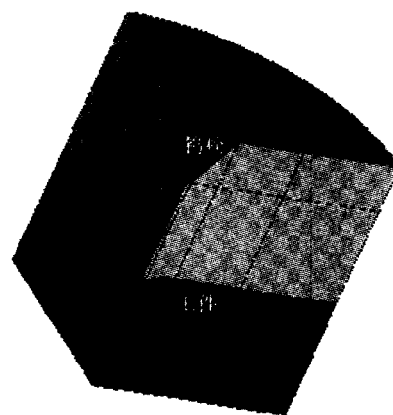


图 1 电弧—熔池统一模型

Fig. 1 Unified arc-molten pool model

所采用的数学模型基于三个假定条件: (1) 电弧和熔池整个系统是轴对称的; (2) 假定电弧是处于局部热平衡 (LTE) 状态的; (3) 氩气和液体金属是不可压缩的流体, 电弧等离子体的流动处于层流状态。

1.1 柱面坐标下的控制方程

连续方程为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho u_r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

轴向动量方程为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho u_r u_z) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z u_z) = -\frac{\partial p}{\partial z} + J_r B_\theta + \frac{\partial}{\partial z}(2\mu \frac{\partial u_z}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}[r\mu(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r})] + G. \quad (2)$$

对于电弧

$$G = \rho g.$$

对于熔池

$$G = -\rho g \alpha_l (T - \alpha_l).$$

径向动量方程为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho u_r u_r) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z u_r) - \rho \frac{u_\theta^2}{r} = -\frac{\partial p}{\partial r} - J_z B_\theta + \frac{\partial}{\partial r}(2\mu r \frac{\partial u_r}{\partial r}) - 2\mu \frac{u_r}{r^2} + \frac{\partial}{\partial z}[\mu(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r})]. \quad (3)$$

方位角动量方程为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho u_r u_\theta) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z u_\theta) + \rho \frac{u_r u_\theta}{r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}[\mu r^2 \frac{\partial}{\partial r}(\frac{u_\theta}{r})] + \mu \frac{\partial}{\partial r}(\frac{u_\theta}{r}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu \frac{\partial u_\theta}{\partial z}). \quad (4)$$

能量守恒方程为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho u_r T) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z T) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{r\kappa}{c_p} \frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\kappa}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z}\right) + \psi + S_\phi. \quad (5)$$

粘性扩散项为

$$\psi = -\frac{2}{3}\mu\left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{\partial u_z}{\partial z}\right)^2 + 2\mu\left[\left(\frac{\partial u_r}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{u_r}{r}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial z}\right)^2\right] + \mu\left[\left(\frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial z}\right)^2\right].$$

对于焊接电弧

$$S_\phi = \frac{5k_b}{2e}\left(J_r \frac{\partial T}{\partial x} + J_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) + \frac{J_r^2 + J_z^2}{\sigma} - S,$$

式中: ρ 为密度; p 为压力; u_r 、 u_z 、 u_θ 为径向、轴向、角速度; β_θ 为磁感应强度; J_r 、 J_z 为径向、轴向电流密度; T 为温度; T_l 为液相线温度; α_l 为线膨胀系数; μ 为粘度; c_p 为等容热容; σ 为电导率; κ 为热导率; k_b 为波尔兹曼常数; e 为电子电量; S 为单位面积辐射能。

1.2 麦克斯韦方程

为了得到电磁力以及焦耳热采用以下方程,即

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(r\sigma \frac{\partial \phi}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\sigma \frac{\partial \phi}{\partial z}\right) = 0. \quad (\text{电流连续方程}) \quad (6)$$

$$J_r = -\sigma \frac{\partial \phi}{\partial r}; \quad J_z = -\sigma \frac{\partial \phi}{\partial z}. \quad (\text{欧姆定律}) \quad (7)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rB_\theta) = \mu_0 J_z, \quad (\text{安培环流定律}) \quad (8)$$

式中: ϕ 为电势; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 为真空磁导率。

1.3 表面张力

在目前的研究中 Fe-S 合金的液态金属表面张力与温度的关系表达式^[7]为

$$\gamma = \gamma_m - A_\gamma (T - T_l) - RT\Gamma_s \ln[1 + k_1 a_s \exp(-\frac{\Delta H_0}{RT})]. \quad (9)$$

则表面张力温度梯度为

$$\frac{\partial \gamma}{\partial T} = -A_\gamma - RT\Gamma_s \ln[1 + k_1 a_s \exp(-\frac{\Delta H_0}{RT})] - \frac{k_1 a_s \Gamma_s \Delta H_0 \exp(-\frac{\Delta H_0}{RT})}{[1 + k_1 a_s \exp(-\frac{\Delta H_0}{RT})]T}, \quad (10)$$

式中: γ_m 为纯金属表面张力; A_γ 为表面张力常数; R 为气体常数; Γ_s 为表面过饱和参数; a_s 为合金中硫的活度; ΔH_0 为偏析焓; k_1 为表面偏聚熵常数。

1.4 熔池界面变形的处理

在电弧压力、表面张力和重力的作用下,液态熔池表面会发生凹凸变形,表面变形公式为

$$\gamma \left[\frac{z_r(1+z_r^2) + rz_{rr}}{r(1+z_r^2)^{\frac{3}{2}}} \right] = \rho g z - p_a + C, \quad (11)$$

式中: $z_r = \frac{\partial z}{\partial r}$; $z_{rr} = \frac{\partial^2 z}{\partial r^2}$; g 为重力加速度; p_a 为电弧压力。

又因为变形前后液态熔池金属的总体积是不变的,故而 $\int_0^r 2\pi r dr = 0$ 。用此式可以确定常数 C 值。

1.5 热损失

焊接电弧与工件表面的热损失分为对流、辐射和蒸发。蒸发热损失只存在于熔池区。

$$\text{对流热损失} \quad q_{\text{conv}} = h_c (T - T_\infty), \quad (12)$$

$$\text{辐射热损失} \quad q_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma_0 (T^4 - T_\infty^4), \quad (13)$$

$$\text{蒸发热损失} \quad q_{\text{evap}} = w H_v, \quad (14)$$

式中: h_c 为对流传热系数; T 为工件表面温度; T_∞ 为环境温度; ε 为表面辐射系数; σ_0 为 Stefan-Boltzman 常数; w 为蒸发率; H_v 为液—气相变潜热。

对于钢材蒸发率与温度的关系式为

$$\log w = 2.52 + (6.121 - \frac{18836}{T}) - 0.5 \log T. \quad (15)$$

2 有限元分析

2.1 熔化潜热的处理

在处理熔化潜热时采用等效比热的方法。熔化潜热焓可以表达为 $H = \int \rho c(T) dT$, 固液相的温差为 ΔT , 等效潜热比热可以近似为 $C^* = H/\rho\Delta T$, 即在熔池固相金属向液相转化的时候, 等效潜热比热可认为是恒定的, 则在金属相变过程中的等效比热 $C_E = C + C^*$ 。

2.2 固液界面的处理

在分析熔池成形时, 未熔化的固体区和液态区被认为是统一区。也就是说固体区可以被看作是液态, 当温度小于或等于固相温度时, 给一个较大的粘度系数以确保固体区速度接近为零。在液态区给定实际粘度。这样移动边界问题就得到了解决。

2.3 电弧与工件的物理参数

采用的焊接电流是 250 A, 弧长 5 mm, 钨棒锥角是 60° , 直径 3.2 mm, 氩气流量是 10 L/min。采用的是 AISI-304 不锈钢, 工件厚度为 6 mm。

氩气的热物理参数是随着温度而变化^[1]; 针对不同的阳极材料, 取用不同的材料物理参数, AISI-304 不锈钢物理参数引自文献[11]。

2.4 有限单元模型网格

有限元模型的网格划分情况如图 2 所示。为了保证计算结果的精度, 在阴极端部、电弧中心以及电弧与工件的界面等较为敏感的部位网格划分较密。采用有限单元软件 ANSYS 对电弧—熔池模型进行耦合数值分析。

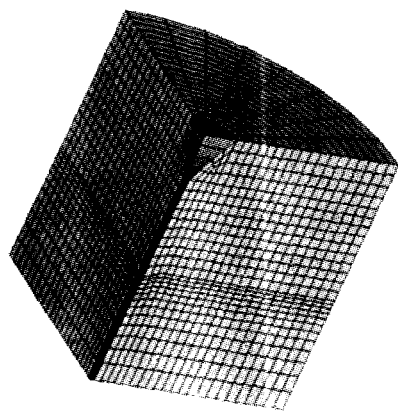


图2 电弧—熔池模型有限元网格
Fig.2 Grid mesh of computational domain

3 计算结果与分析

不同时刻电弧温度等温线的分布状况如图 3 所示。由图可以看出在熔池表面基本上没有发生变形时, 弧柱的直径较大, 随着焊接时间的延长, 熔池增大, 熔池表面发生凹凸变形时, 弧柱的直径相对变小。焊接电弧的形态发生了较为明显的变化, 这是因为在大电流情况下, 电弧压力较大, 熔池自由表面发生的变形较大, 熔池表面变形对电弧温度场的影响比小电流严重, 特别是对熔池表面附近的温度场影响最大。

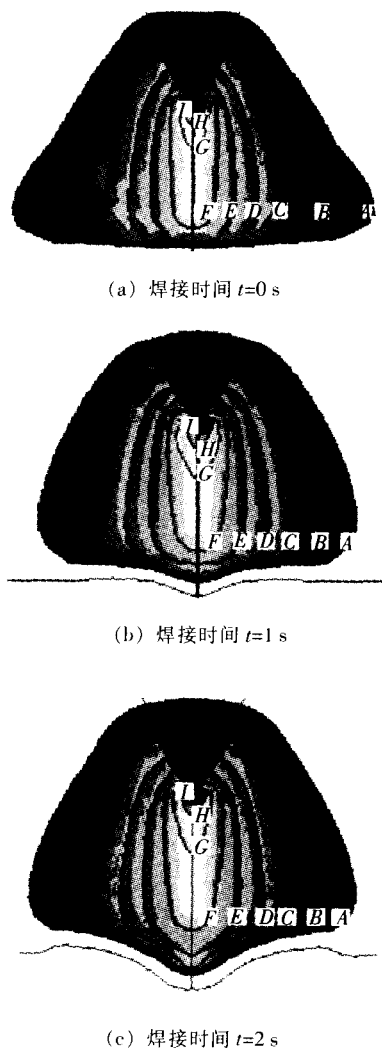


图3 不同时刻电弧等温线分布

Fig.3 Welding arc isotherm at different time

(A = 10 000 K; B = 11 500 K; C = 13 000 K; D = 14 500 K; E = 16 000 K; F = 17 500 K; G = 19 000 K; H = 20 500 K; I = 22 000 K)

不同时刻熔池表面的热流密度分布情况如图 4 所示。由图可见在开始焊接的时候熔池表面是平坦的, 工件表面的热流密度分布状况基本上是符合近

似的高斯分布,但是随着熔池的形成,电弧压力造成熔池液面的凹凸变形,此时热流密度的分布发生了改变,热流密度的最高值已不在电弧中心位置,而是偏离了电弧中心,电弧中心处出现了一个低谷。随着变形的增加,最高值出现的位置越远离中心,且最高值逐渐变小。并且随着焊接电流的增大,熔池表面变形较大,这使得电弧对熔池表面的热输入变化较大。

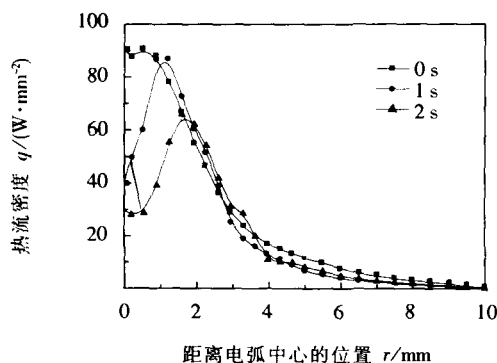


图 4 不同时刻熔池表面热流密度分布

Fig.4 Heat flux distribution under different time

不同时刻熔池内部液态金属的流动状况如图 5 所示。随着焊接时间的延长,熔池不断增大。由于焊接电流较大,熔池表面变形比较大,使得熔池内部液体金属的流动更为复杂。

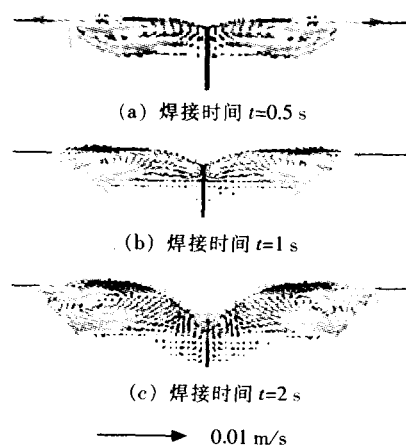


图 5 不同时刻熔池内部液态金属的流动状况

Fig.5 Fluid flow in molten pool at different time

在熔池表面不断变形,电弧作用于熔池表面的热输入不断发生变化的情况下,模拟的熔池形状如图 6a 所示。由图可见熔池在中心处的熔深较大,这是因为等离子流力对液态熔池表面强烈的挖掘作

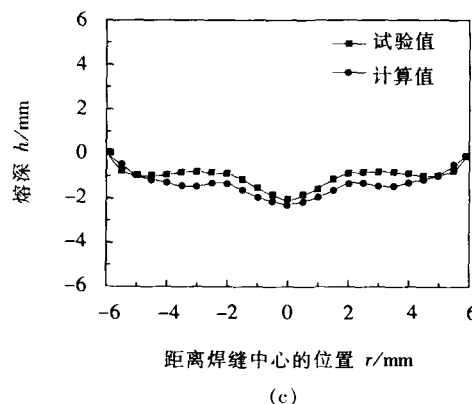
用,造成熔池表面发生了严重的凹凸变形,而电弧直接对熔池表面进行加热,凹陷越深,热源下移的距离越大;另一方面,由于热流密度在熔池中心表面的热流密度出现低谷,表面张力导致了液体金属向熔池中心流动,从而使熔深增大,是典型的中心熔深。



(a) 计算的熔池形状



(b) 试验所得的熔池形状



(c)

图 6 计算与试验所得的焊缝断面形状比较

Fig.6 Calculated and experimental cross section of weld

图 6 显示了熔池形状的计算值与试验测量值的比较。可以看出所模拟的熔池形状与实际所得的熔池形状在外形上已经非常接近。

4 结 论

(1) 建立了三维 TIG 焊接电弧—熔池统一数学模型,揭示电弧—熔池相互作用的机制以及电弧—熔池动态行为的基本规律。

(2) 运用有限元 ANSYS 软件多场耦合来求解焊接电弧与熔池的数理方程。将熔池表面变形公式作过程参数处理,解决了电弧与熔池之间界面动态变化问题。

(3) 采用等效比热作为金属在加热过程中的固态—液态相变的判据;通过粘度系数设定将液相和

[下转第 76 页]

焊接工艺确定了试样的初始温度 T_0 后,可再次利用得到的温度—时间拟合方程计算出每一道焊接后所需的冷却时间;从而为制定完整的温度控制工艺提供依据。

4 结 论

根据试验的要求,建立了符合温度实测结果的数学模型,并通过曲线拟合来获取拟合方程的各个参数,进而分析得到试样焊接参数对回归系数的影响。可以从结果发现,在试样初始温度为 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,密封圈的位置区间仍然较大($x > 80\text{ mm}$),能够满足阀体密封圈的安放要求。

参考文献:

- [1] 米力田. 油气专用阀门的现状与发展方向[J]. 天然气与石油, 1995, 13(1): 20-24.
- [2] 何德孚, 华大龙, 陈立功, 等. 单电源双丝埋弧自动焊研究[J]. 电焊机, 2004, 34(增刊): 156-160.
- [3] 吴德海, 任家烈, 陈森灿. 近代材料加工原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [4] Ramirez A J, Brandi S D. Application of discrete distribution point heat source model to simulate multipass weld thermal cycles in medium thick plates[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2004, 9(1): 72-82.

作者简介: 庞方杰,男,1981 年出生,硕士研究生。主要从事焊接测量系统的研究,发表论文 2 篇。

Email: pangfj@sjtu.edu.cn

[上接第 72 页]

固相都视为液相的办法,解决了熔池在形成过程中的熔化区和非熔化区的移动边界问题。

(4) 基于电弧—熔池统一数学模型,电弧与熔池不断交互耦合计算得出的熔池形状与试验所得的熔池形状比较吻合。

参考文献:

- [1] Choo R T C, Szekely J, Westhoff R C. On the calculation of the free surface temperature of gas-tungsten-arc weld pools from first principles: Part I. modeling the welding arc[J]. Metallurgical and Materials Transaction B, 1992, 23B(3): 357-369.
 - [2] Choo R T C, Szekely J, Westhoff R C. On the calculation of the free surface temperature of gas-tungsten-arc weld pools from first principles: Part II. modeling the weld pool and comparison with experiments[J]. Metallurgical and Materials Transaction B, 1992, 23B(3): 371-384.
 - [3] Kim W H, Fan H G, Na S J. A mathematical model of gas tungsten arc welding considering the cathode and the free surface of the weld pool[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1997, 28B(8): 679-686.
 - [4] Lin M L, Eagar T W. Influence of surface depression and convection on arc weld pool geometry[J]. Transport Phenomena in Materials Processing, ASME PED, 1983, 10(1): 63-69.
 - [5] Cao Zhengning, Wu Chuansong, Wu Lin. Mathematical modeling of TIG molten pool with full-penetration[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1996, 17(1): 62-69.
- 曹振宁, 武传松, 吴林. 等. TIG 焊接熔透熔池的数学模

型[J]. 焊接学报, 1996, 17(1): 62-69.

- [6] Zhang Y M, Cao Z N. Numerical analysis of fully penetrated weld pools in gas tungsten arc welding[J]. Proc. Instn. Mech. Engrs.: Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 1996, 210(2): 187-195.
- [7] Fan H G, Tsai H L, Na S J. Heat transfer and fluid flow in a partially or fully penetrated weld pool in gas tungsten arc welding[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(2): 417-428.
- [8] Li Z Y, Wu C S. Analysis of the transport phenomena in the interfacial region between TIG arcs and weld pools[J]. Computational Materials Science, 1997, 8(3): 243-250.
- [9] 孙俊生, 武传松. 熔池表面形状对电弧电流密度分布的影响[J]. 物理学报, 2000, 49(12): 2427-2432.
- [10] Lu Fenggui, Yao Shun, Lou Songnian, et al. Effects of weld pool surface deformation on behavior characters of welding arc[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(2): 57-60.
- 芦凤桂, 姚舜, 楼松年, 等. 熔池表面变形对电弧行为特征的影响[J]. 焊接学报, 2004, 25(2): 57-60.
- [11] Wu Chuansong. Computer simulation of three-dimensional convection in traveling MIG weld pool[J]. Engineering Computations, 1992, 9(5): 529-537.

作者简介: 芦凤桂,女,1975 年出生,工学博士,讲师。主要研究方向为焊接过程模拟及高能束加工及控制,发表论文 12 篇。

Email: lfg119@sjtu.edu.cn