

熔池表面变形对电弧行为特征的影响

芦凤桂，姚舜，楼松年，张毓新

(上海交通大学 焊接研究所，上海 200030)



芦凤桂

摘要 在电弧与熔池统一模型的基础上研究熔池上表面变形对电弧行为特征的影响。用本模型计算出的平坦熔池表面电流密度和热流密度的分布与试验结果显示了很好的一致性。而变形熔池表面的电流密度和热流密度分布则不再符合近似的高斯分布。这就为下一步研究电弧和熔池的工作提供了基础。

关键词：电弧；熔池；界面变形；统一模型

中图分类号：TG444 文献标识码：A 文章编号：0253-360X(2004)02-57-04

0 序 言

焊接电弧和熔池作为焊接过程的两大部分一直被广泛的研究着^[1-5]。许多学者在对电弧的研究时，一般认为熔池表面是平坦的且具有恒定的温度。而对熔池的研究则认为熔池表面的电流密度和热流密度是近似为高斯分布。但是事实上，在电弧压力的作用下，熔化的工件表面会发生变形，也就是说熔池表面不再是平坦的，而是具有一定形状的曲面。电弧与熔池表面之间的界面变形是焊接电弧与熔池模拟中的关键问题。熔池上表面的变形直接影响焊接电弧的行为特征，而电弧行为特征又会影响到熔池的流体流动以及焊缝成形。该文则是在电弧与熔池统一模型的基础上研究熔池表面变形对电弧行为特征的影响，熔池表面电流密度和热流密度的分布状况。用以确定焊接电弧随时间的变化状况。为下一步模拟电弧和熔池奠定基础。

1 数学模型

直流TIG焊接电弧与熔池的数学模型见图1。从图1中可以看出将阴极（钨棒）、弧柱和阳极（焊接金属）统一起来建模。所采用的数学模型基于以下假定条件：(1)假定电弧是处于局部热动态平衡(LTE)状态的；(2)电弧区为纯氩气体；(3)电弧连续的并且是光学薄的，即辐射的重新吸收和总的辐射损失相比可以忽略不计；(4)整个系统是轴对称的，流动是处于层流状态的。

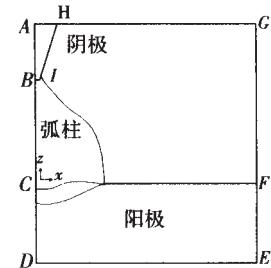


图1 电弧-熔池统一模型
Fig.1 Unified arc-weld pool model

1.1 控制方程

质量守恒方程为

$$\frac{1}{x} \frac{\partial (\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v_z)}{\partial z} = 0 .$$

轴向动量守恒方程为

$$\frac{\partial (\rho v_z)}{\partial t} + p v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + \rho v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = - \frac{\partial p}{\partial z} + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) +$$

$$\frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} \left(x \mu \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} \left(x \mu \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + J_z B + \rho g .$$

径向动量守恒方程为

$$\frac{\partial (\rho v_x)}{\partial t} + p v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} + \rho v_x \frac{\partial v_x}{\partial z} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(2 \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} \left(x \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) - 2 \frac{v_x}{x^2} \right) - J_x B .$$

能量守恒方程为

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \left(v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{x} \left(x \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{5k_b}{2e} \left(J_x \frac{\partial T}{\partial x} + J_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{J_x^2 + J_z^2}{\sigma} - S ,$$

式中 ρ 为气体密度 v_x, v_z 分别为径向、轴向速度 g 为重力加速度 μ 为粘度 p 为气体压力 J_x, J_z 分别为径向、轴向电流密度 T 为温度 S 为单位面积辐射能 c_p 为等容热容 e 为电子电量 λ 为热导率； k_b 为波尔兹曼常数。

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

$$\frac{I}{x} \frac{\partial}{\partial x} \left(x \sigma \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial z} \right) = 0, \text{ 电流连续方程;}$$

$$J_x = -\sigma \frac{\partial V}{\partial x}; \quad J_z = -\sigma \frac{\partial V}{\partial z}, \quad \text{欧姆定律;}$$

$$B = \frac{\mu_0}{x} \int_0^x x J_z dx, \quad \text{安培环流定律;}$$

式中 V 为电势 σ 为电导率 B 为磁感应强度 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 为真空磁导率。

1.3 边界条件

1.3.1 BD 边界

$$\begin{aligned} v_x &= 0; \quad \partial v_z / \partial x = 0; \\ \partial V / \partial x &= 0. \end{aligned}$$

1.3.2 DE 边界

$$\begin{aligned} v_x &= 0; \quad v_z = 0; \quad V = 0; \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} &= h(T - T_\infty). \end{aligned}$$

1.3.3 EG 边界

$$\begin{aligned} v_x &= 0; \quad v_z = 0; \quad \partial V / \partial x = 0; \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} &= h(T - T_\infty). \end{aligned}$$

1.3.4 GH 边界

$$\begin{aligned} v_x &= 0; \quad v_z = v_{\text{gas}}; \\ \partial V / \partial z &= 0. \end{aligned}$$

1.3.5 BI、HI 边界

$$\begin{aligned} v_x &= 0; \quad v_z = 0; \\ T &= 3000 \text{ K}. \end{aligned}$$

1.3.6 AH 边界

$$J_z = \frac{I}{\pi r^2},$$

式中 T_∞ 为环境温度 h 为由对流和传导引起的传热系数 I 为焊接电流 r 为钨棒半径。

1.4 熔池界面变形的处理

在电弧压力的作用下，液态熔池表面会发生变形，则变形后的熔池表面的总的能量可表示为三部分：表面能、势能和电弧压力所做的功。

$$E_t = \int_0^x 2\pi x \left(\gamma \sqrt{1+z_x^2} + \frac{1}{2} \rho g z^2 - p_a z \right) dx,$$

式中 γ 为表面张力系数 p_a 为阳极表面电弧压力。要使得熔池表面总能量达到最小，也就是求泛函 E_t 的极值。变分问题就是求解能使某一个量的积分所表示的目标函数达到极小值的未知函数问题。变分方法就是把变分问题转化为欧拉-拉格朗日微分方

程求解的一种方法。

E_t 的变分问题的泛函表达式为

$$E(z(x)) = \int_0^x F(r, z, z_x) dx.$$

泛函的解用欧拉-拉格朗日微分方程表示为 $\frac{\partial F}{\partial z} = \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F}{\partial z_x} \right)$, 通过变分原理, 可以推出

$$\gamma \left[\frac{z_x (1+z_x^2) + X z_{xx}}{x (1+z_x^2)^{3/2}} \right] = \rho g z - p_a + C,$$

$$\text{式中: } z_x = \frac{\partial z}{\partial x}, \quad z_{xx} = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}.$$

又因为液态金属的体积是不变的, 故而 $\int_0^x 2\pi x dx = 0$ 。用此式可以确定参考压力 C 值。

氩气的热物理参数是随着温度而变化的^[6], 针对不同的阳极材料, 取用不同的材料物理参数, 文中采用的是 AISI-304 不锈钢, 其物理参数见文献 [7]。

2 有限元分析

采用有限单元软件 ANSYS 对电弧-熔池模型进行分析。ANSYS 软件特有的多场耦合功能使得在模拟焊接电弧时更为便利。根据氩气在温度高于 5 000 K 才开始导电的特性, 在电场计算时给定电弧区初始温度 10 000 K 以使得氩气电离导电, 从而对电流密度的分布进行计算, 阳极金属在焊接过程中接地, 故而可将阳极电势认为恒定值零, 将电流密度的计算结果代入磁场, 耦合计算电磁力和焦耳热的分布; 最后把电磁力和焦耳热的计算结果作为体积力和体积生热代入流场中, 耦合计算速度和温度分布; 再将流场中计算出的温度分布代入电场计算电流密度分布。这样就形成了电、磁、热、流场的耦合计算。如此反复, 直至收敛。

3 计算结果与分析

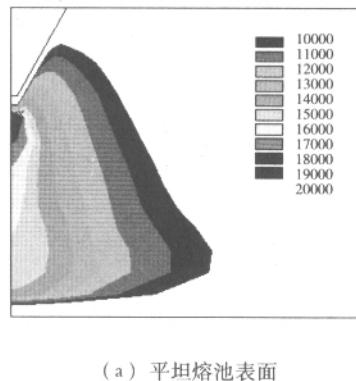
计算所采用的焊接参数为电流 200 A, 弧长 6.3 mm, 钨棒锥角为 60°, 直径 Φ3.2 mm, 氩气流量是 10 L/min。工件厚度为 5 mm。

文中的小变形是在熔池的熔宽为 4 mm 时, 电弧压力为平坦熔池表面计算出的阳极表面电弧压力, 由熔池表面变形公式计算出的变形值。大变形是熔宽在 9 mm 时, 电弧压力为上次变形时计算出的

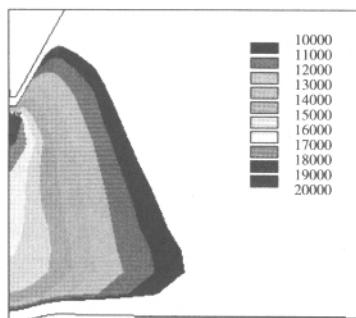
阳极表面电弧压力,再由熔池表面变形公式计算出的变形值。所计算得出的变形下凹最大的深度小于1 mm,这与试验^[8]所得的值是一致的。

事实上,由于阳极表面电弧压力不是恒定不变的,而是随着熔池表面变形的变化不断发生变化,而且熔池的熔宽也不断的发生变化。这几个因素最终确定了熔池表面的形状。文中仅以两种变形来讨论熔池表面变形对焊接电弧特征的影响大小。

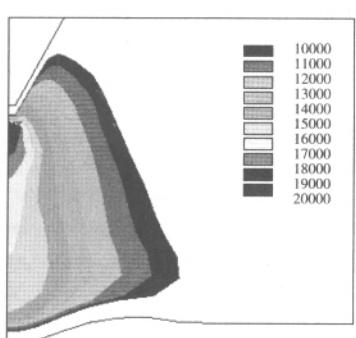
图2a、b、c是在平坦表面、小变形和大变形状态下的电弧温度分布。可以看出电弧的最高温度分布基本保持不变,但是随着熔池表面变形的增大,电弧的高温区却向轴向逐渐收缩。整个电弧温度场的分布特征就发生了一些变化。



(a) 平坦熔池表面



(b) 小变形熔池表面



(c) 大变形熔池表面

图2 不同熔池表面下的电弧温度分布

Fig.2 Arc isotherms under different surface

图3和图4是在熔池表面变形的情况下电弧区

等离子体电流密度和速度场的矢量图。从图3中可以比较直观的看出电流离开阳极进入阴极,电流密度在阴极附近达到最大值。由图4中则可以看出等离子体的流动方向是向内向下的,最大值可达到228 m/s,到达阳极后则沿径向向外流动,对阳极的冲击力则是导致熔化金属表面变形的原因。

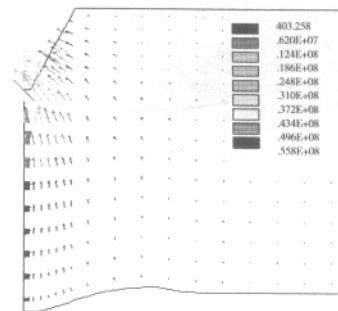


图3 变形熔池表面下的电弧电流密度分布

Fig.3 Current density distribution under deformed surface

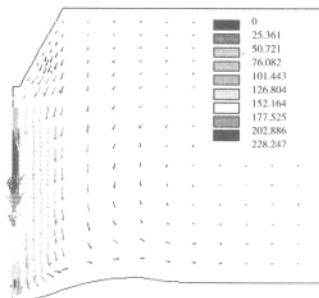


图4 变形熔池表面下的电弧等离子体速度场

Fig.4 Vector distribution of arc plasma velocity under deformed surface

图5和图6是在焊接金属尚未熔化的状态下(此时熔池表面为平坦表面)电流密度和热流密度计算值与试验值的比较。可以看出用此模型计算出的值与试验还是比较近似的。

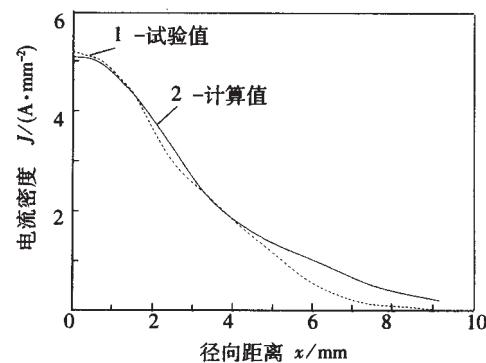


图5 电流密度计算值与试验值的比较

Fig.5 Comparison of current density between calculation and experiment

阳极表面的电流密度和热流密度的分布情况是由电弧数学模型决定的,由上面计算得到的结果可

以看出文中所建的电弧数学模型是可行的。

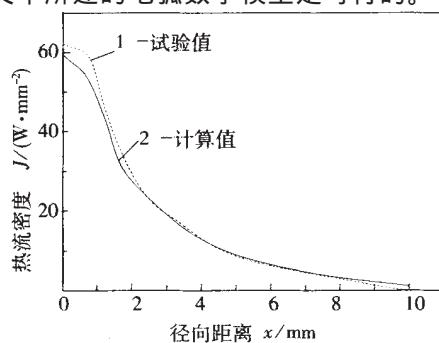


图 6 热流密度计算值与试验值的比较

Fig.6 Comparison of heat flux between calculation and experiment

图 7 和图 8 是在熔池表面小变形和大变形下电流密度和热流密度的分布情况。可以看出电流密度和热流密度的分布已经不再是单纯的高斯分布了，而是出现了峰值偏离电弧中心，且峰值要比平坦表面时的峰值要小，这些都是由于熔池上表面变形引起的变化。如果此时再假定熔池表面的电流密度和热流密度为高斯分布，则就不符合实际情况了。这也说明了在模拟熔池时应该将电弧特征的变化考虑进去。

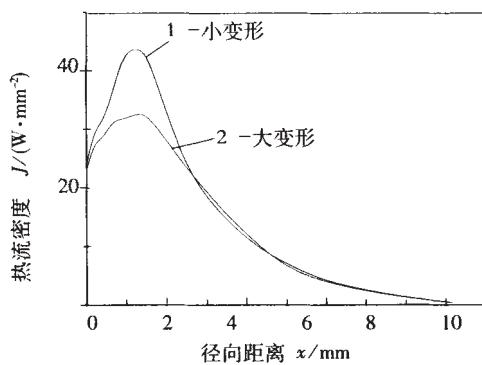


图 7 变形熔池表面下的热流密度分布

Fig. 7 Heat flux distribution under deformed surface

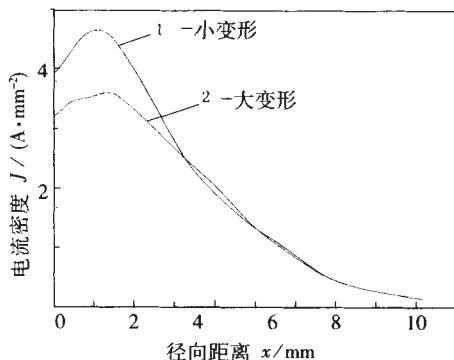


图 8 变形熔池表面下的电流密度分布

Fig.8 Current density distribution under deformed surface

由以上分析可以看出，熔池上表面的变形使得焊接电弧温度场的分布特征发生了变化。尤其是对熔池上表面的电流密度和热流密度的影响最大。故

而在对熔池分析时将焊接电弧认为是稳态的或准稳态的就忽略了焊接电弧随时间的变化，这是与实际情况不相符合的。由于焊接过程是一个动态的过程，将焊接电弧和熔池动态结合起来分析则会更为真实的反映实际情况。这也是下一步要研究的内容。

4 结 论

(1) 建立包括阴极、电弧和熔池在内的整体的统一模型。避免了对阳极表面温度的假定，从而能更为真实的对焊接电弧进行研究。

(2) 用 ANSYS 有限单元软件分析所建模型，形成对电、磁、热、流场的多场耦合计算。

(3) 随着熔池表面变形的增大，焊接电弧的高温区向轴向逐渐收缩。阳极表面的电流密度和热流密度也不再是近似的高斯分布。

(4) 将焊接电弧与熔池动态结合起来进行分析则成为焊接电弧和熔池模拟的发展方向。

参考文献：

- [1] Hsu K C, Etemadi K, Pfender E. Study of the free-burning high-intensity argon arc [J]. *J. Appl. Phys.*, 1983, 54(3): 1293~1299.
- [2] Tsai M C, Sindo Kou. Heat transfer and fluid flow in welding arcs produced by sharpened and flat electrode [J]. *Int.J. Heat Mass Transfer*, 1990, 33(10): 2089~2098.
- [3] Lee J H, Na S J. An analysis of volumetric radiation heat flux and experimental comparison with arc light sensing in GTA welding process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 110(1): 104~110.
- [4] 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 comparision with experiment [J]. *Metall. Trans. B*, 1992, 23B(6): 371~384.
- [5] 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*, 2000, 44(2): 417~428.
- [6] 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]. *Metall. Trans. B*, 1992, 23B(6): 357~369.
- [7] Oreper G M, Szekely J. Heating and fluid-flow phenomena in weld pool [J]. *J. Fluid Mech.*, 1984, 147(1): 53~79.
- [8] M B Y, Lin L, Eagar T W. Influence of arc pressure on weld pool geometry [J]. *Journal Welding*, 1985, 64 (6): 163s~169s.

作者简介：芦凤桂，女，1975年出生，博士研究生。主要研究虚拟工程与制造技术，发表论文5篇。

Email: guifenglu@eyou.com