

基于 TIG 焊电弧—熔池统一模型 分析焊接电弧*

芦凤桂 姚 舜 钱伟方

(上海交通大学焊接研究所 上海 200030)

摘要: 以 TIG 焊电弧为研究对象, 建立了电弧—熔池的统一模型, 并在此模型的基础上对焊接电弧进行了分析。建立此模型就避免了对阳极表面温度的假定, 使得对焊接电弧的分析与实际情况更近了一步, 从而也为将焊接电弧和熔池作为一个整体来进行分析奠定了基础。采用 ANSYS 软件分析并得到了阳极表面温度的变化情况, 阳极表面电流密度的分布状况, 得出热流密度与电流密度分布规律的一致性。并从电磁力和流体流动的角度揭示了电弧压力产生的原因, 并通过试验验证了电流密度和电弧压力的分布情况。

关键词: TIG 焊 电弧—熔池 统一模型 ANSYS

中图分类号: TG403

符 号

ρ ——密度	μ ——粘度	J_r, J_z ——径向、轴向电流密度
p ——压力	μ_0 ——真空磁导率, 为 $4\pi \times 10^{-7}$	v_r, v_z ——径向、轴向速度
T ——温度	c_p ——比定压热容	I ——焊接电流
T_∞ ——环境温度	γ ——电导率	r ——钨棒半径
B ——磁感应强度	λ ——热导率	h ——由对流和传导引起的传热系数
V ——电势	k_b ——波尔兹曼常数	e ——电子电量
S ——单位面积辐射能		

0 前言

目前对焊接电弧的研究大都是以 TIG 焊电弧为对象^[1-5]。但是以往的文献在对焊接电弧研究的过程中存在着以下不足: ①假定阴极表面电流密度分布。②假定近阴极区最高温度。③对电弧阴极区和阳极区还没有形成统一的认识。④假定阳极表面温度分布。尽管前两个不足现在已经得到解决, 但是对阴极区和阳极区的研究还在继续。阳极的表面温度是随着时间而变化的, 假定恒定的阳极表面温度与实际情况还是存在着一定的差距。将焊接电弧和熔池统一起来建模并进行分析, 这样就避免了对阳极表面温度的假定, 使对焊接电弧的研究与实际情况更近了一步。从而也为将焊接电弧和熔池作为一个整体进行研究奠定了基础。

以焊接电弧的特征为主要研究内容, 分析了电弧阳极表面温度与时间的变化关系、电流密度和热

流密度的分布情况, 电弧压力产生的原因及其分布。为模拟焊接熔池提供了可靠的边界条件。

1 数学模型

直流 TIG 焊接电弧与熔池的数学模型如图 1 所示, 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。

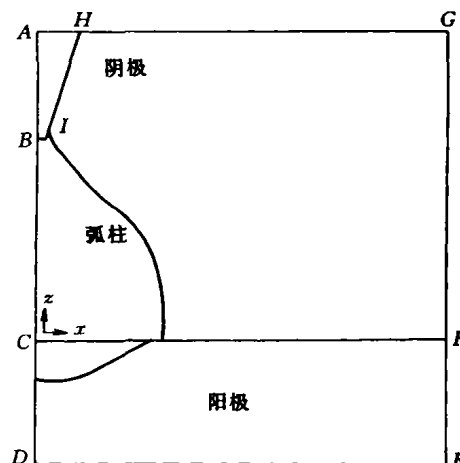


图1 电弧—熔池统一模型

* 上海汽车工业科技发展基金资助项目(0222)。20030414 收到初稿, 20030610 收到修改稿

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。

(4) 整个系统是轴对称的, 流动是处于层流态的。

1.1 控制方程

质量守恒方程

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

轴向动量守恒方程

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

径向动量守恒方程

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

能量守恒方程

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

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

$$\frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} \left(x \gamma \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma \frac{\partial V}{\partial z} \right) = 0 \quad \text{电流连续方程}$$

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

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

1.3 边界条件

(1) BD 边界

$$v_x = 0 \quad \partial v_z / \partial x = 0 \\ \partial V / \partial x = 0$$

(2) DE 边界

$$v_x = 0 \quad v_z = 0 \\ V = 0 \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = h(T - T_\infty)$$

(3) EG 边界

$$v_x = 0 \quad v_z = 0 \\ \partial V / \partial x = 0 \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = h(T - T_\infty)$$

(4) GH 边界

$$v_x = 0 \quad v_z = v_{gas} \\ \partial V / \partial z = 0$$

(5) BI、HI 边界

$$v_x = 0 \quad v_z = 0 \\ T = 3000$$

(6) AH 边界

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

氩气的热物理参数是随着温度而变化的引自参考文献[6]; 针对不同的阳极材料, 取用不同的材料物理参数, 这里采用的是 AISI—304 不锈钢, 其物理参数引自参考文献[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 0; 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、热和流场的耦合计算。如此反复, 直至收敛。在流场中计算时, 阴极钨棒的单元认为是 NULL, 即钨棒不参与流体计算, 并且在流场中将焊接金属和电弧一样, 作为流体, 只不过是流体的粘度不同, 由粘度的大小可分为流动体和非流动体。

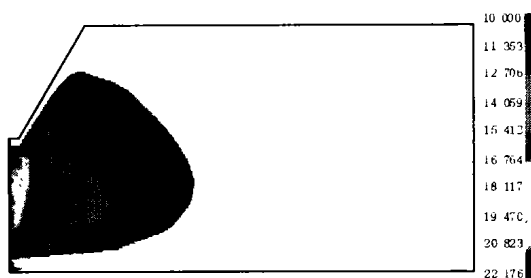
3 计算结果与分析

计算所采用的焊接参数为电流 200 A, 弧长 3 mm, 钨棒锥角为 60°, 直径 3.2 mm, 氩气流量是 10 L/min。焊接金属为 AISI—304 不锈钢, 厚度为 3 mm。

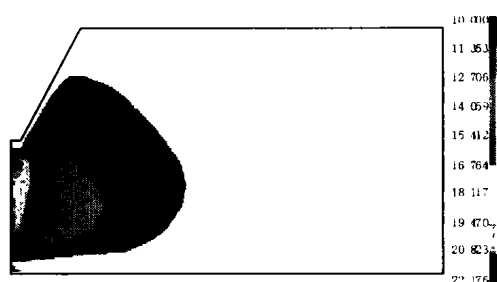
3.1 温度分布

电弧区域的整体温度分布见图 2a 和 b。在时间为 0.1 s 和 2 s 时, 温度场的分布基本保持不变, 这说明了焊接电弧在引燃后的瞬间便进入稳定状态, 随着时间的延长, 整个弧柱区的温度分布基本保持不变, 可以近似地认为焊接电弧在焊接过程中

是稳定不变的。也就是说在焊接过程中电弧是稳态的。



(a) 0.1 s 电弧区域的整体温度分布



(b) 3 s 电弧区域的整体温度分布

图 2 电弧区域的整体温度分布

阳极金属的温度分布见图 3a 和 b。可知在不同时刻阳极的温度分布是在发生变化的。这是因为阳极金属在焊接过程中不断吸收来自电弧的热量, 从而温度不断升高直至熔化。1 723 K 是 AISI—304 不锈钢的熔点。



(a) 0.1 s 阳极金属的温度分布



(b) 3 s 阳极金属的温度分布

图 3 阳极金属的温度分布

由图 4 中可以看出阳极表面的温度是随着时间发生变化的, 故而将阳极表面认为是不变的同一的温度是不正确的。从所采用的焊接金属的熔点来看, 在 0.1 s 时阳极表面温度没有达到熔点, 也就是说焊接金属还没有形成熔池, 在 0.5 s 时阳极表

面的最高温度已经达到熔点, 有一部分金属已经熔化形成熔池, 随着时间的延长熔池越来越大。如果按照以往文献中假定的阳极表面温度为 5 000 K 或者 1 000 K 稳定不变, 这就意味着被焊金属全部熔化或者一点也没有熔化, 这与实际情况是不相符合的。而且阳极表面温度的分布直接影响着阳极表面电流密度的分布情况。

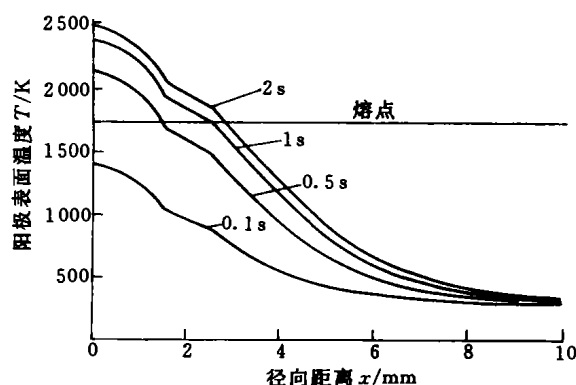


图 4 不同时刻阳极表面温度分布

3.2 阳极表面电流密度和热流密度分布

电弧电流密度分布如图 5 所示, 可以看出电流离开阳极表面通过阴极斑点进入电极。由于阴极斑点面积小, 温度高, 故而电流密度在阴极斑点处达到最大值。也就是说在电弧轴向上, 距离阴极斑点越近, 电流密度越大, 越靠近阳极电流密度越小。在电弧径向方向上, 距离电弧中心越远, 电流密度越小。

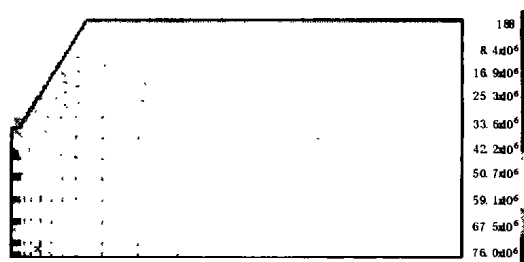


图 5 电弧电流密度分布矢量图

由图 6 可知电流密度的计算结果与用探针法^[8]测得的阳极的电流密度分布是相当符合的。

阳极表面电流密度的分布最终决定热流密度的分布情况。从图 7 中可以看出热流密度的分布规律和电流密度的分布规律是一致的。用高斯曲线拟和热流密度分布, 可以用高斯曲线表示, 但是其中心位置拟和误差偏大。用双面曲线拟和效果良好, 如图 7 所示。

以往文献在模拟熔池时, 认为熔池表面的电流密度是高斯分布, 事实上如果在缺乏试验数据或者模拟电弧所得结果的情况下可以近似地按高斯分布来处理。

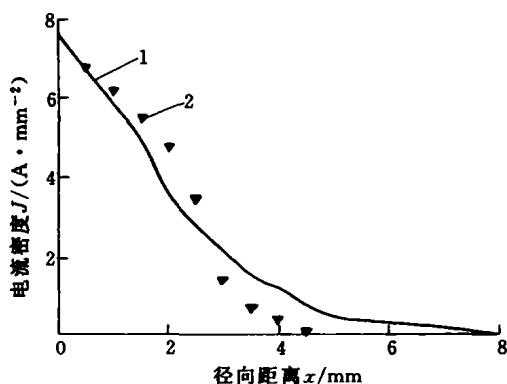


图 6 电流密度计算值与试验值

1. 计算值 2. 试验值

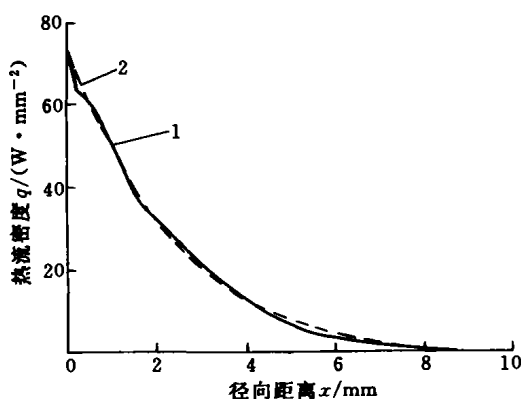


图 7 热流密度计算值

1. 计算值 2. 拟和值

3.3 阳极表面电弧压力的产生与分布

由图 8 可以看出电磁力的分布是向内向下的, 这也就说明电磁力有一个电弧轴向分量和一个电弧径向分量, 径向分量使等离子体收缩, 而轴向分量使等离子体流向阳极流动。在电弧轴线附近电磁力非常小, 几乎为零。这是因为在电弧轴线附近的磁感应强度几乎为零的原因。在阳极附近电流密度非常小, 从而导致阳极附近的电磁力也很小。电磁力在阴极尖端表面达到最大值, 这就使得电弧等离子流在阴极尖端以最大的加速度流动。

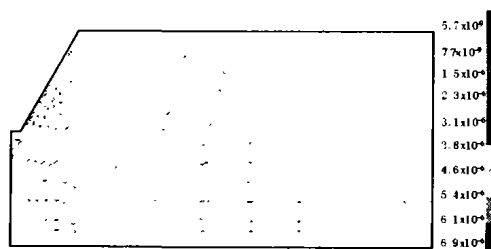


图 8 电磁力分布矢量图

到达阳极时, 高速运动的粒子将其动能传递给阳极, 从而对阳极表面产生冲击力也就是电弧压力。

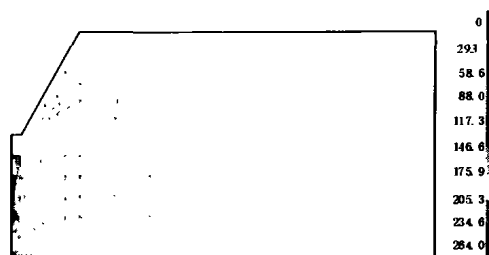


图 9 速度分布矢量图

从图 10 中可以看到, 电弧压力计算值与用气压计法^[9]测得的试验值还是相当接近的。用高斯曲线对电弧压力分布进行曲线拟和, 可以看出电弧压力的分布符合高斯分布规律。

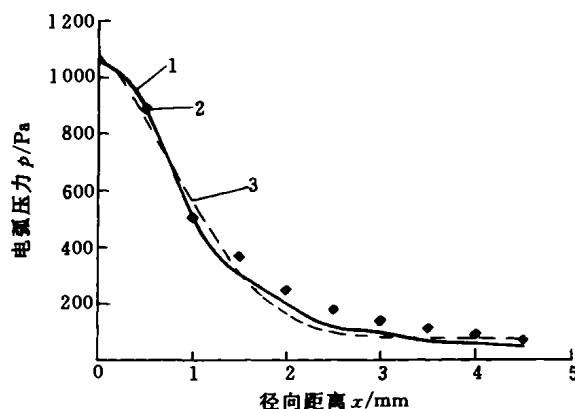


图 10 电弧压力计算值与试验值

1. 计算值 2. 试验值 3. 拟和值

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、热和流场的多场耦合计算。

(3) 阳极表面的温度是随着时间不断发生变化的, 这就否定了恒定阳极表面温度的假定。

(4) 电弧阳极表面的电流密度计算值与试验值吻合较好, 并且阳极表面的热流密度与电流密度分布规律是一致的。

(5) 分析了电弧压力产生的原因, 电弧压力计算值与试验值是比较接近的。

参 考 文 献

- 1 Hsu K C, Etemadi K, Pfender E. Study of the free-burning high-intensity argon arc. J. Appl. Phys., 1983, 54(3):

电弧等离子体速度场的分布情况如图 9。从图中可以看出等离子体在电磁力的作用下沿轴向由阴极向阳极高速流动形成高速等离子流。当等离子流

1 293~1 299

- 2 Mckelliget J, Szekely J. Heat transfer and flow in the welding arc. Metall. Trans. A, 1986(7), 17A: 1 139~1 148
- 3 Tsai M C, Sindo Kou. Heat transfer and fluid flow in welding arcs produced by sharpened and flat electrodes. Int. J. Heat Mass Transfer, 1990, 33(10): 2 089~2 098
- 4 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. Metallurgical and Materials Transactions B, 1997(8), 28B: 679~686
- 5 Lee J H, Na S J. An analysis of volumetric radiation heat flux and experimental comparison with arc light sensing in GTA welding process. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 110: 104~110
- 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. Metall. Trans. B, 1992, 23B: 357~369
- 7 Oreper G M, Szekely J. Heating and fluid-flow phenomena in weld pools. J. Fluid Mech, 1984, 147(1): 53~79
- 8 贾昌申, 肖克民, 刘海侠, 等. 直流 TIG 电弧的电流密度研究. 西安交通大学学报, 1994, 28 (7): 33~38
- 9 Fan H G, Shi Y W. Numerical simulation of the arc pressure in gas tungsten arc welding. J. Materials Processing Technology, 1996, 61: 302~308

SIMULATION ON TIG WELDING ARC BASING ON ARC-WELD POOL UNI- FORM MODEL

Lu Fenggui Yao Shun Qian Weifang
(*Welding Research Institute, Shanghai Jiaotong*
University, Shanghai 200030)

Abstract: TIG welding is chosen as the studied object. Arc-weld pool uniform model is established and welding arc is analyzed basing on this model. This model avoided the assumption that anode surface temperature is constant which made simulation on arc more near to real situation and also made the foundation for combining welding arc and weld pool together. ANSYS software is adopted and achieved the varied anode surface temperature with time and current density distribution on anode surface. The distribution of heat flux was in accordant with current density distribution. The main reason causing arc pressure by magnetic force and fluid flow is revealed. Current density and arc pressure distribution are proved by experiments.

Key words: TIG Arc-weld pool Uniform model
ANSYS

作者简介: 芦凤桂, 女, 1975 年出生, 博士研究生。主要从事虚拟工程与制造技术研究, 发表论文 3 篇。

E-mail: guifenglu@eyou.com