

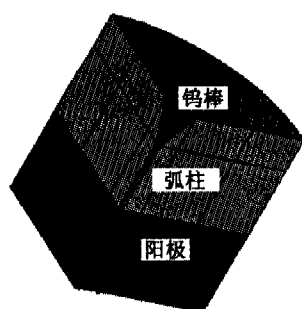


图1 电弧-熔池统一模型

Fig. 1 United arc-weld pool model

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。

2.1 柱面坐标下的控制方程

连续方程

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

轴向动量方程

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho u_r u_z) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z u_z) = -\frac{\partial P}{\partial z} + j_r B_\theta \\ + \frac{\partial}{\partial z}[2\mu \frac{\partial u_z}{\partial r}] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}[r\mu(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r})] + G \end{aligned} \quad (2)$$

对于电弧 $G = \rho g$

对于熔池 $G = -\rho g \beta (T - T_l)$

径向动量方程

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho u_r u_r) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z u_r) - \rho \frac{u_\theta^2}{r} = -\frac{\partial P}{\partial r} - j_z B_\theta \\ + \frac{\partial}{\partial z}[2\mu r \frac{\partial u_r}{\partial r}] - 2\mu \frac{u_r}{r^2} + \frac{\partial}{\partial z}[\mu(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r})] \end{aligned} \quad (3)$$

方位角动量方程

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

能量守恒方程

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho u_r T) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z T) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\frac{rk}{c_p} \frac{\partial T}{\partial r}) \\ + \frac{\partial}{\partial z}(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z}) + \psi + S_s \end{aligned} \quad (5)$$

粘性扩散项

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

对焊接电弧

$$S_s = \frac{5k_b}{2e} (j_r \frac{\partial T}{\partial r} + j_z \frac{\partial T}{\partial z}) + \frac{j_r^2 + j_z^2}{\sigma} - S$$

式中 ρ 为气体或金属密度; P 为压力; u_r, u_z, u_θ 分别为径向、轴向、角速度; B_θ 为磁感应强度; j_r, j_z 分别为径向、轴向电流密度; T 为温度; T_l 为液相线温度; β 为热膨胀系数; μ 为粘度; c_p 为等容热容; σ 为电导率; k 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。

2.2 电弧与熔池的电磁微分方程

为了得到电磁力以及焦耳热采用以下方程:

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

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

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

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

2.3 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为^[4]:

$$\begin{aligned} \gamma = \gamma_m - A_r(T - T_l) \\ - RT\Gamma_i \ln[1 + k_1 \alpha_i \exp(-\Delta H_0/RT)] \end{aligned} \quad (9)$$

则表面张力温度梯度为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \gamma}{\partial T} = -A_r - R\Gamma_i \ln[1 + k_1 \alpha_i \exp(-\Delta H_0/RT)] \\ - \frac{k_1 \alpha_i \Gamma_i \Delta H_0 \exp(-\Delta H_0/RT)}{[1 + k_1 \alpha_i \exp(-\Delta H_0/RT)]T} \end{aligned} \quad (10)$$

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

2.4 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。

$$\text{对流热损失 } q_{\text{conv}} = h_c(T - T_\infty) \quad (11)$$

$$\text{辐射热损失 } q_{\text{rad}} = \epsilon \sigma_0(T^4 - T_\infty^4) \quad (12)$$

$$\text{蒸发热损失 } q_{\text{evap}} = wH_v \quad (13)$$

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 是 Stefan-Boltzmann 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:

$$\lg w = 2.52 + (6.121 - 18836/T) - 0.5 \lg T \quad (14)$$

3 有限元分析

3.1 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 $H = \int p c(T) dT$, 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 $C_E = C + C^*$ 。

3.2 固液界面的处理

在分析熔池成形时,将未熔化的固体区和液态区视为统一区,也即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。

3.3 电弧与工件的物理参数

采用的焊接电流为 200 A,弧长 5 mm,钨棒锥角为 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的^[2];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[5]。

3.4 有限元模型网格

有限元模型的网格划分情况见图 2。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。

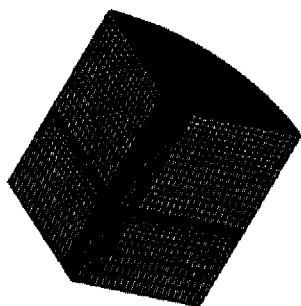


图 2 电弧-熔池模型有限元网格

Fig. 2 Grid mesh of computational domain

采用有限单元软件 ANSYS 对电弧-熔池模型进行分析。在电场中对电流密度的分布进行计算,阳极金属在焊接过程中接地;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在电弧中的分布;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,耦合计算温度、速度和压力的分布;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。

4 计算结果与分析

电弧与工件区的电流密度分布见图 3。从图中可以看出电流通过工件集中穿过电弧中心区进入阴

极区,并在阴极附近达到最大值。

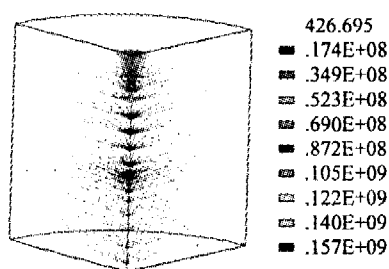


图 3 电弧-熔池统一模型中的电流密度分布

Fig. 3 Current density distribution in arc-pool model

由图 4 可见,电流密度的计算值与试验值在阳极表面的分布规律是一致的。

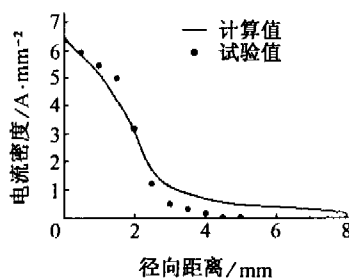


图 4 阳极电流密度计算值与试验值的比较

Fig. 4 Comparison between calculated and experimental current density at anode

由图 5 可见,在阴极和阳极附近都存在较大温度梯度,最高温度出现在阴极附近,越靠近阳极电弧温度越低,且距离电弧轴心越远,电弧温度越低。

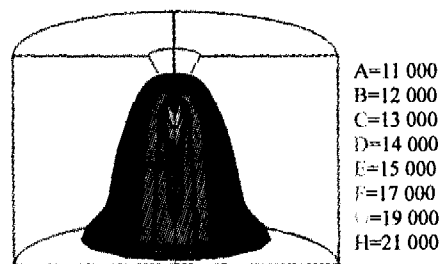


图 5 三维电弧等温线分布($I=200$ A, $L=10$ mm)

Fig. 5 3D arc plasma isotherms

由图 6 可见,电弧温度场的计算值和试验^[6]测得的温度等温线分布规律基本上是一致的。

由图 7 可见,应用电弧-熔池统一模型计算出来的熔池形状与实际试验测得的熔池形状相吻合,同时也证明了所建模型的可靠性。

5 结论

(1) 建立了三维 TIG 焊接电弧-熔池统一数学模型,避免了对电弧以及熔池界面条件的假定,使得

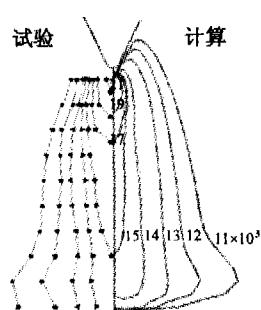
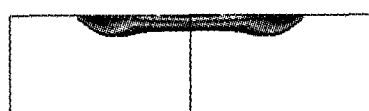
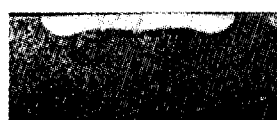


图 6 电弧等温线计算值与试验值的比较

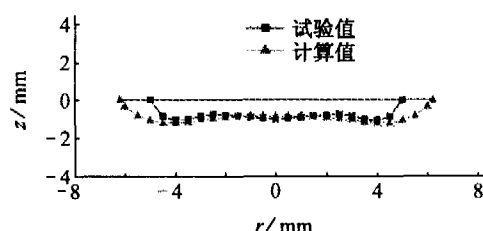
Fig. 6 Comparison between calculated and experimental arc isotherms



(a) 计算所得的熔池形状



(b) 试验所得的熔池形状



(c) 计算值与试验值

图 7 熔池形状计算值与试验值的比较

Fig. 7 Calculated and experimental weld pool shape

对焊接电弧与熔池行为的分析与实际情况更近了一步。

(2) 应用 ANSYS 软件对电弧-熔池进行有限单元分析,形成电弧与熔池的电、磁、热、流场等多场耦合计算。

(3) 应用电弧-熔池统一模型计算所得的电弧行为特征以及熔池形状与实际试验结果相吻合。

参考文献:

- [1] McKelliget J, Szekely J. Heat transfer and flow in the welding arc[J]. Metallurgical Transaction A, 1986, 17A(7): 1139—1148.
- [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 I. modeling the welding arc[J]. Metall Trans B, 1992, 23B: 357—369.
- [3] 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]. Metall Trans B, 1992, 23B: 371—384.
- [4] 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: 417—428.
- [5] Wu C S. Computer simulation of three-dimensional convection in traveling MIG weld pool[J]. Engineering Computations, 1992, 9: 529—537.
- [6] 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.

• 纳米与粉体新闻 •

超细煅烧高岭土项目在宜昌 开发区开工

国家“863 计划”课题之一的超细煅烧高岭土项目,9 月 27 日在宜昌开发区亭园区开工建设。

煅烧高岭土产品具有良好物理性能,广泛运用于造纸、涂料、橡胶、塑料等行业和领域。中国地质大学(武汉)与五峰土家族自治县投资 1 亿元,以中国地质大学“煤工业废弃物制备超细高岭土”科研成果为依托,利用五峰已探明的 2 000 多万 t 煤系高岭土资源,建成后每年可生产 5 万 t 煅烧高岭土系列产品。

国家纳米科学中心协作实验室 多相反应重点实验室成立

11 月 7 日上午,国家纳米科学中心协作实验室多相反应重点实验室揭牌仪式在中国科学院过程工程所举行。

国家纳米科学中心定位于纳米科学的基础研究和应用研究,重点在具有前瞻性的和重要应用前景的纳米科学与技术基础研究。基于过程工程所在纳米材料研究方面的深厚基础和技术优势,纳米中心自成立以来,就积极同过程工程所进行合作。此次两家单位合作,正式建立协作实验室,标志着在纳米研究领域的合作步入了更高的台阶。