

B427-B432

熔透情况下三维 TIG 焊接熔池
流场与热场的数值分析*

武传松 曹振宁 吴林

TG444.74

(哈尔滨工业大学)

摘要 建立了熔透情况下三维运动TIG焊接熔池中流体动力学状态及传热过程的数值分析模型。该模型考虑了试件全熔透情况下液态金属熔池表面的变形,采用贴体曲线坐标系处理熔池曲面,利用SIMPLER方法对不锈钢焊接试件熔池中的流场与热场进行了数值分析,并进行了焊接工艺试验对模型加以验证。结果表明,根据该模型得出的计算结果与实验值吻合情况良好。

关键词 TIG熔透熔池, 流场, 热场, 数值分析, 计算方法, TIG焊,

近年来,一些研究者分别采用不同的方法建立了描述焊接熔池中的流体流动及传热过程的数学模型^[1-3]。但是,所有这些模型都没有涉及到焊接试件熔透情况下熔池流场与热场的数值分析。在实际焊接生产中,熔透是非常重要的焊接质量指标,本文主要工作就是建立熔透情况下TIG焊接熔池中的流场与热场数值分析模型。

1 模型的建立

不加填充焊丝的TIG焊接系统如图1所示。在熔池内部,由于温度分布不均匀将产生自然对流;焊接电流通过斑点进入熔池后将造成电流场的发散而产生电磁力;电弧力作用于熔池表面则使其产生下凹变形。因此,熔池中液态金属会发生激烈的运动。传热过程,在熔池内部以对流为主,在熔池外部以导热为主。

1.1 坐标系的选择

试件熔透时,在电弧压力作用下,熔池上下表面都将产生变形。由于试件背面熔化区域较小,假设熔池下表面没有变形。我们提出了适合于熔池表面变形的贴体曲线坐标系:

$$x = x, \quad y = y, \quad z^* = \frac{z}{F(x, y)} \quad (1)$$

式中 $F(x, y)$ 是焊件上表面的曲面方程。这种变换的坐标系仅在焊件的上表面采用,而在焊件的其它部分仍采用直角坐标系。这样既能很好地处理熔池边界,又能提高计算速度。

* 本工作是国家自然科学基金资助项目

1992年1月22日收到初稿,1992年6月18日收到修改稿。

本文通讯联系人:武传松,教授,哈尔滨(150006)哈尔滨工业大学焊接教研室



图 1 原理图

Fig. 1 Schematic sketch (a) arc welding system, (b) front view of weld pool

1.2 控制方程组

在曲线坐标系中, 准稳态时的热能方程、动量方程及连续性方程分别为:

$$\rho c_p \left[(u - u_0) \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z^*} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S \frac{\partial}{\partial z^*} \left(k \frac{\partial T}{\partial z^*} \right) + C_1 \quad (2)$$

$$\rho \left[(u - u_0) \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z^*} \right] = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + S \frac{\partial^2 u}{\partial z^{*2}} + C_1 \right) + X - \left(\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial z^*} \frac{\partial z^*}{\partial x} \right) \quad (3)$$

$$\rho \left[(u - u_0) \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z^*} \right] = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + S \frac{\partial^2 v}{\partial z^{*2}} + C_2 \right) + Y - \left(\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial z^*} \frac{\partial z^*}{\partial y} \right) \quad (4)$$

$$\rho \left[(u - u_0) \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z^*} \right] = \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + S \frac{\partial^2 w}{\partial z^{*2}} + C_3 \right) + Z - \frac{\partial p}{\partial z^*} \frac{\partial z^*}{\partial z} \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z^*} \frac{\partial z^*}{\partial z} + C_4 = 0 \quad (6)$$

其中:

$$C_1 = 2 \left(\frac{\partial z^*}{\partial x} \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial z^*} + \frac{\partial z^*}{\partial y} \frac{\partial^2 T}{\partial y \partial z^*} \right)$$

$$C_2 = 2 \left(\frac{\partial z^*}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z^*} + \frac{\partial z^*}{\partial y} \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial z^*} \right)$$

$$C_3 = 2 \left(\frac{\partial z^*}{\partial x} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial z^*} + \frac{\partial z^*}{\partial y} \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial z^*} \right)$$

$$\begin{aligned}
C_3 &= 2 \left(\frac{\partial z^*}{\partial x} \frac{\partial^2 w^*}{\partial x \partial z^*} + \frac{\partial z^*}{\partial y} \frac{\partial^2 w^*}{\partial y \partial z^*} \right) \\
C_4 &= \frac{\partial u}{\partial z^*} \frac{\partial z^*}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z^*} \frac{\partial z^*}{\partial y} \\
w_i &= (u - u_0) \frac{\partial z^*}{\partial x} + v \frac{\partial z^*}{\partial y} + w \frac{\partial z^*}{\partial z} - \frac{k}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 z^*}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z^*}{\partial y^2} \right) \\
w_i &= (u - u_0) \frac{\partial z^*}{\partial x} + v \frac{\partial z^*}{\partial y} + w \frac{\partial z^*}{\partial z} - \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 z^*}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z^*}{\partial y^2} \right) \\
S &= \frac{\partial^2 z^*}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z^*}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 z^*}{\partial z^2}
\end{aligned}$$

式中 u, v, w 分别是 x, y, z 方向的流速分量, T 是温度, ρc_p 为容积比热, k 为导热系数, X, Y, Z 分别是 x, y, z 方向的体积力分量, p 为压力, ρ 为密度, μ 为粘度系数。

当在焊件内部采用直角坐标系时, (1) 式的坐标变换改为 $z^* = z$ 。

1.3 体积力

TIG 焊时, 熔池中的体积力包括电磁力和自然对流项(浮力):

$$\vec{F}_b = (\vec{J} \times \vec{B}) - \rho \beta \vec{g} \Delta T$$

它在 x, y, z 三个方向上的分量分别为(详细推导见〔5〕):

$$X = -\frac{\mu_0 I^2}{4\pi^2 \sigma_j^2 r} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right) [1 - \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right)] \left(1 - \frac{z}{L}\right)^2 \frac{x}{r} \quad (7)$$

$$Y = -\frac{\mu_0 I^2}{4\pi^2 \sigma_j^2 r} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right) [1 - \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right)] \left(1 - \frac{z}{L}\right)^2 \frac{y}{r} \quad (8)$$

$$Z = -\frac{\mu_0 I^2}{4\pi^2 L r^2} [1 - \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right)]^2 \left(1 - \frac{z}{L}\right) - \rho g \beta \Delta T \quad (9)$$

式中, J 为电流密度, B 为磁感应强度, β 为液态金属的体积膨胀系数, g 为重力加速度, μ_0 为磁介质常数, I 为焊接电流, σ_j 为焊接电流分布参数, L 为试件厚度, $r^2 = x^2 + y^2$ 。

1.4 边界条件

准稳态时, 在熔池的自由表面存在着电弧压力、熔池重力和表面张力三者的平衡〔4〕:

$$p_a - \rho g \Phi + C = -\gamma \frac{(1 + \Phi_x^2) \Phi_{xx} - 2\Phi_x \Phi_y \Phi_{xy} + (1 + \Phi_y^2) \Phi_{yy}}{(1 + \Phi_x^2 + \Phi_y^2)^{3/2}} \quad (10)$$

这里 Φ 为熔池表面形状函数, $\Phi_x = \frac{\partial \Phi}{\partial x}$, $\Phi_{xx} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2}$, $\Phi_y = \frac{\partial \Phi}{\partial y}$, $\Phi_{yy} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2}$, $\Phi_{xy} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y}$, C

是待定常数, γ 是表面张力, p_a 是电弧压力, 根据文献〔1〕中的方法计算 p_a 。

工件表面上的热边界条件为:

$$q(r) = \frac{\eta I u_w}{2\pi \sigma_q} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_q^2}\right), \quad r \leq \sigma_q \quad (11)$$

$$-k\left(\frac{\partial T}{\partial z}, \frac{\partial z}{\partial z} \vec{n}_b\right) = h(T - T_f), r > \sigma_q \quad (12)$$

其中 $\vec{n}_b$ 代表工件上表面的法向单位矢量, η 为电弧功率有效利用系数, u_w 为电弧电压, σ_q 为电弧热流分布参数, h 为试件表面换热系数, T_f 为环境温度.

工件上表面的流动边界条件为:

$$-\mu\left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial z}{\partial z} \vec{n}_b\right) = \frac{\partial \gamma}{\partial T}\left(\frac{\partial T}{\partial x} \vec{t}_{bx}\right) \quad (13)$$

$$-\mu\left(\frac{\partial v}{\partial z}, \frac{\partial z}{\partial z} \vec{n}_b\right) = \frac{\partial \gamma}{\partial T}\left(\frac{\partial T}{\partial y} \vec{t}_{by}\right) \quad (14)$$

$$(w \vec{n}_b) = 0 \quad (15)$$

其中 $\vec{t}_{bx}$, $\vec{t}_{by}$ 分别表示工件上表面沿 x 和 y 方向的切向单位矢量.

$$\text{底表面的热边界条件为: } -k\frac{\partial T}{\partial z} = h(T - T_f) \quad (16)$$

$$\text{底表面的流动边界条件为: } -\mu\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial \gamma}{\partial T}\frac{\partial T}{\partial x}, -\mu\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial \gamma}{\partial T}\frac{\partial T}{\partial y}, w = 0 \quad (17)$$

$$\text{在熔合面上和固体中: } u = v = w = 0 \quad (18)$$

2 求解方法

将控制方程和边界条件转换为有限差分方程. 在对试件进行离散化处理时, 电弧作用下的附近区域采用细分网格, 其它部位采用相对较粗的网格, 以便加快收敛速度, 同时也能保证计算精度. 利用 SIMPLER 方法求解. 计算过程一开始, 根据初始温度分布确定出材料热物性参数. 首先用迭代法求解固态时的热传导方程, 一旦出现液体区, 便停止迭代. 此时的液体区 LA_0 与在相应的焊接热输入值作用下应当出现的焊接熔池 wp 相差甚远. 将 LA_0 作为初始迭代的设定值, 计算熔池表面变形, 确定出固液边界. 在液体区 LA_0 求解流场与热场. 得出新的温度分布后, 重新确定固液边界, 得到液体区 LA_1 . 根据此时的温度分布重新确定出材料热物性, 计算出熔池表面形状, 继续计算 LA_1 内的流场与热场, …… 一次次迭代下去, 不断得出新的固液界面、熔池表面形状和液体区 LA_2 、 LA_3 、…… 直至满足流场与热场收敛条件为止. 此时的液体区 LA_n 就是在相应的焊接热输入参数作用下应当出现的熔池 wp , 此时的热场与流场即为所求.

3 结果和讨论

利用所建立的模型对不锈钢(1Cr18Ni9Ti)试件熔透时熔池中的流场和热场进行了数值计算. 试件尺寸为 $150 \times 80 \times 3(\text{mm})$. 材料热物理性能参数及其它参数见文献〔5〕.

熔透情况下三维 TIG 焊接热场的等温线见图 2 中 a, b, c. 标有数字 2 的曲线为熔池边界线. 电弧中心线与试件上表面交点的坐标为(0, 0, 3). 从图中可以看出, 电弧中心线下面的熔池表面下凹最大, 而在运动电弧后面液态金属产生局部的表面隆起, 这与实际情况是相符合的. 图 2 中 d, e, f 为熔透情况下三维 TIG 焊接熔池中流场的计算结果. 不锈钢试件熔

透时熔池内液态金属流动方式如图 3 所示。这是由于 1Cr18Ni9Ti 试件液态金属熔池中的表面张力温度系数($\partial\gamma/\partial T$)为负值, 这一数值模拟结果验证了 Heiple^[6]提出的观点。Heiple 认为, 熔池中的某些微量元素, 影响到 $\partial\gamma/\partial T$ 的符号, 而 $\partial\gamma/\partial T$ 的符号和大小对熔池中液态金属的流动方式有着重要影响。计算结果说明熔池中液态金属会激烈流动, 最大流速为 0.84 m/s。

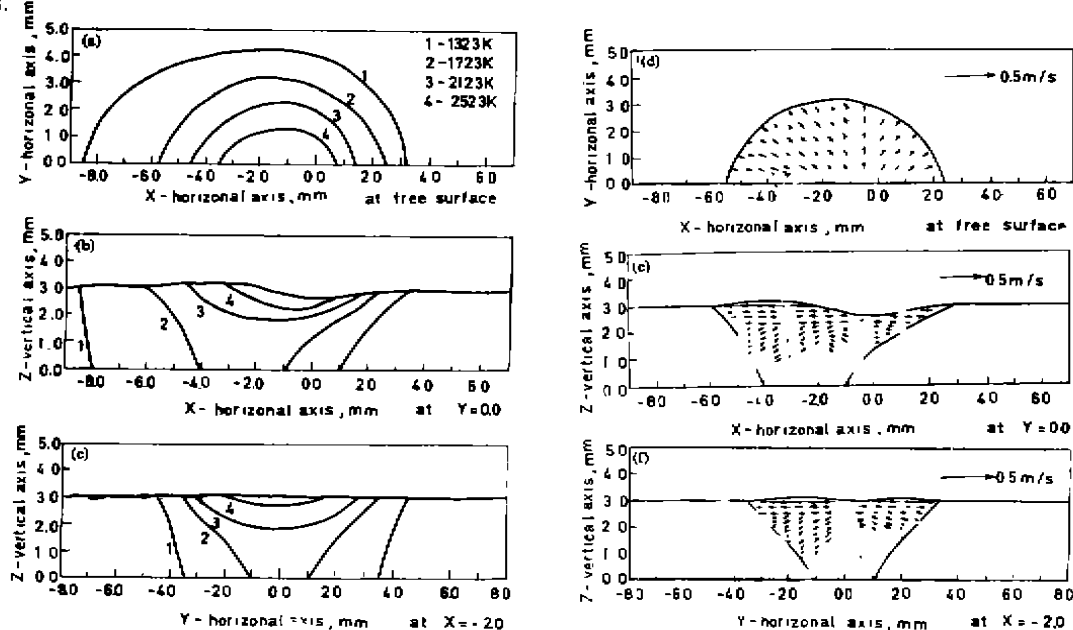


图 2 三维 TIG 焊接热场等温线和熔池内流场数值计算结果

Fig. 2 Three-dimensional TIG welding thermal isotherms (a,b,c) and calculated results of fluid flow field in weld pools (d,e,f)

(a),(d) upper surface, (b),(e) longitudinal, (c),(f) cross section, welding parameters: 100A, 20V, 2 mm/s

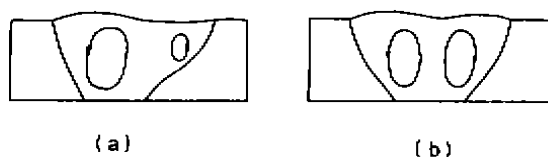


图 3 熔池内液态金属流动方式

Fig. 3 Motion mode of molten metal in full-penetration weld pool on stainless steel workpiece (a) longitudinal, (b) cross section

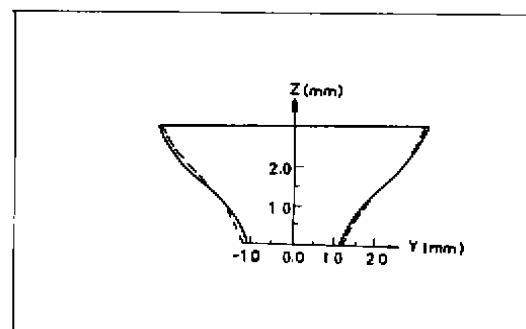


图 4 计算的与实测的熔合线的比较

Fig. 4 Comparison of calculated and experimental lines of fusion

— calculated, — measured

4 实 验 验 证

为了验证本文模型,进行了 TIG 焊接工艺试验。试件材料为 1Cr18Ni9Ti, 试件尺寸为 $150 \times 80 \times 3(\text{mm})$, 电极为钨钨极, 直径 3.0 mm, 氩气流量为 10 L/min, 焊接规范: $I=100\text{A}$, $u_w=10\text{V}$, $u_0=2\text{ mm/s}$ 。焊接之后,在焊缝长度方向不同位置上,分别截取焊缝的横断面,制成宏观金相照片,利用读数显微镜测定焊缝几何形状。图 4 比较了根据模型得出的熔合线数值计算结果与实验测试结果。可见,两者吻合程度良好。

参 考 文 献

- 1 Lin M L, Eagar T W. *Weld J*, 1985; 64: 163-s
- 2 Choo R T C, Szekely J, Westhoff R C. *Weld J*, 1990; 69: 346-s
- 3 Zacharia T, Eraslan A H, Aidun D K, David S A. *Metall Trans*, 1989; 20B: 645
- 4 Ohji T, Nishiguchi K. *International Institute of Welding Document*, 1983; 1:212-555
- 5 武传松. 焊接热过程数值分析. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1990: 116
- 6 Heiple C R, Roper J R. *Weld J*, 1982; 61: 97-s

NUMERICAL ANALYSIS OF THREE-DIMENSIONAL FLUID FLOW AND HEAT TRANSFER IN TIG WELD POOL WITH FULL-PENETRATION

WU Chuansong, CAO Zhenning, WU Lin (Harbin Institute of Technology)

(Manuscript received 22 January, 1992; revised manuscript 18 June, 1992)

ABSTRACT A model is established to analyze three-dimensional fluid dynamics and heat transfer in TIG weld pools with full-penetration. It considers the deformation of molten pool surface at the condition of full-penetrated workpieces, takes the arc pressure as the driving force of weld pool surface depression, and determines the surface configuration of weld pool based on the dynamic balance of weld pool gravity, arc pressure and surface tension. The fluid flow and temperature fields in weld pools of stainless steel workpieces are analyzed by using SIMPLER algorithm. TIG welding experiments are made to verify the validity of the model. It shows that the predicted results by the model are in good agreement with experimental ones.

KEY WORDS TIG weld pool, fluid flow, heat transfer, numerical analysis

Correspondent: WU Chuansong, Professor, Department of Welding Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006