

TIG 焊接熔池中的流体流动 及传热过程的数值模拟

武传松讲师 陈定华教授 吴 林教授

(哈尔滨工业大学)

摘 要

本文建立了运动电弧作用下三维 TIG 焊接熔池中的流体流动及传热过程的数学模型。该模型同时考虑熔池内部液态金属的对流、传导和熔池外部的固体导热,克服了雷卡林公式和纯导热数值解将焊接热过程当作纯粹固体热传导问题的局限性,扩展了电弧固定时的二维熔池传热模型。根据该模型得出的计算结果和实验测试结果吻合程度良好。

liu	chuan	shu	
主题词	流体流动	传热过程	数值模拟

符 号 意 义

B ——磁感应强度, T	T_0 ——初始温度, K
C_p ——比热, J/kg·K	u, v, w —— x, y, z 方向的速度, m/s
F_b ——体积力, N/m ³	u_0 ——焊接速度, m/s
g ——重力加速度, m/s ²	u_w ——电弧电压, V
h ——换热系数, W/m ² ·s·K	X, Y, Z ——体积力分量, N/m ³
I ——焊接电流, A	x, y, z ——坐标, m
j ——电流密度, A/m ²	ΔT ——温差, K
K ——导热系数, W/m·K	μ ——粘度, kg/m·s
L ——板厚, m	μ_0 ——磁导率, H/m
P ——压力, N/m ²	ρ ——密度, kg/m ³
q ——热流密度, J/s·m ²	β ——体积膨胀系数, K ⁻¹
r ——径向距离, m	σ ——表面张力, N/m
T ——温度, K	σ_j, σ_q ——电流和热流分布参数, m ²
T_m ——熔点, K	η ——电弧功率有效系数

0 序 言

焊接热过程的准确计算和测量是焊接冶金分析、焊接热弹塑性分析和对焊接过程进行计算机控制的前提。按照传热机理,焊接热过程分为两个部分:其一是熔池内部高温过热液态金属以对流为主的传热。其二是熔池外部热影响区和母材区域中的固体热传导。这两部分的传热过程是相互联系和相互影响的。然而,无论是雷卡林公式还是70年代发展起来的有限元和差分数值分析法,都没有考虑熔池内部的流体对流^[1~6]。为了更准确地计算焊接热过程,必须深入研究熔池中液态金属的对流传热过程。Oreper^[7,8]建立了描述固定电弧作用下熔池中流体对流和温度分布的二维模型。本文从TIG焊接过程实际出发,建立运动电弧作用下三维熔池中的流体动力学状态和传热过程的数值分析模型。

1 三维模型的建立

TIG焊接(不加填充焊丝)系统如图1所示。

电弧以恒速 u_0 沿 x 轴移动,其热量使被焊金属熔化并形成熔池。在准稳态时,从电弧传入焊件的总的热能等于通过熔合面传入母材的热量加上从熔池表面散失的热量。因此,熔池具有恒定形状并以和电弧相同的速度沿 x 轴移动。在熔池内部,由于温度分布不均匀而产生自然对流;由于焊接电流通过斑点进入熔池后在熔池中造成电流场的发散而产生电磁力;由于熔池表面温度梯度不均匀而引起表面张力梯度,这就使熔池中的液体金属产生对流。

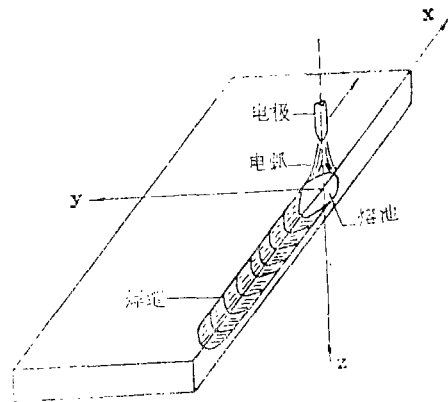


图1 TIG焊接过程示意图

1.1 控制方程组

准稳态时的热能方程为:

$$\rho C_p [(u-u_0) \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z}] = \frac{\partial}{\partial x} (K \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K \frac{\partial T}{\partial z}) \quad (1)$$

方程(1)的求解区域包括液态熔池和其周围固体。

对于熔池中的流体,应满足动量方程和连续性方程:

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

$$\rho [(u-u_0) \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}] = Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu (\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}) \quad (3)$$

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

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

1.2 体积力

TIG焊时, 熔池中的体积力包括电磁力和自然对流项:

$$\vec{\Gamma}_b = (\vec{j} \times \vec{B}) - \rho g \beta \Delta T \quad (6)$$

它在 x, y, z 三个方向上的分量分别为 (详细推导见〔9〕):

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

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

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

1.3 边界条件

$$q(r) = \frac{\eta I u_w}{2\pi \sigma_q^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_q^2}\right), \quad r^2 = x^2 + y^2, \quad \text{当 } z=0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad \text{当 } y=0. \quad T = T_m, \quad \text{在熔合面上} \quad (11)$$

$$-K \frac{\partial T}{\partial z} = h(T - T_0), \quad \text{当 } z=0, \quad z=L \quad (12)$$

$$u = v = w = 0, \quad \text{在熔合面上和固体中} \quad (13)$$

$$\mu \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad \mu \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial y}, \quad \text{在熔池表面上} \quad (14)$$

方程组 (1) — (14) 被离散于三维有限差分网格上, 采用特殊的数值方法进行求解。计算机程序框图见图 2。

2 三维流场与热场的计算结果

利用所建立的模型对低碳钢 (A3) 和不锈钢 (1Cr18Ni9Ti) 两种焊接试件 (尺寸均为 $200 \times 100 \times 5 \text{ mm}$) 进行了计算。对于低碳钢, $\rho = 7860 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $T_m = 1773 \text{ K}$, 对于不锈钢, $\rho = 7830 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $T_m = 1713 \text{ K}$ 。导热系数、比热和粘度都是温度的函数, 在每一个计算步上都要根据当时的温度分布重新确定其取值。这些参数随温度变化的函数关

系以及其他参数取值见^[9]。

图3表示出了两种计算方法(纯导热数值解和本文三维模型)所得出的TIG焊接熔池的三个断面形状。可见,两种方法得出的熔池断面形状是不同的,尤其是在焊缝的纵、横两个断面上。纯导热数值解虽然避免了雷卡林公式的若干不合理假设条件,但它也不考虑熔池中的流体对流传热,根据它计算出来的熔池比实际的浅。

图4是根据本文模型计算出来的三个断面上的等温线图。该模型同时考虑运动电弧作用下三维TIG熔池内液态金属区和熔池外固体区的传热问题,能够提供熔池

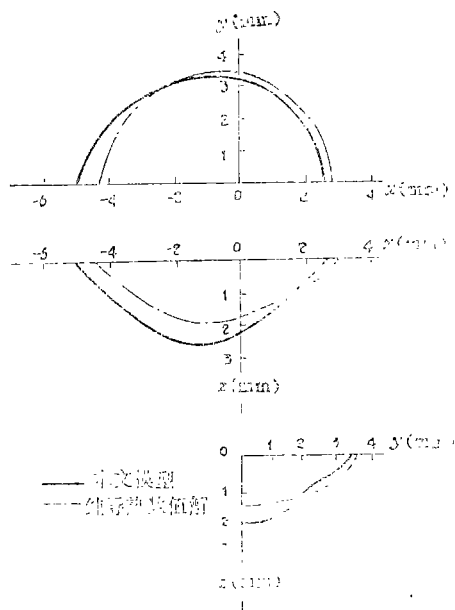


图3 两种方法得出的TIG熔池的三个断面形状
低碳钢试件 180A 14V 120mm/min

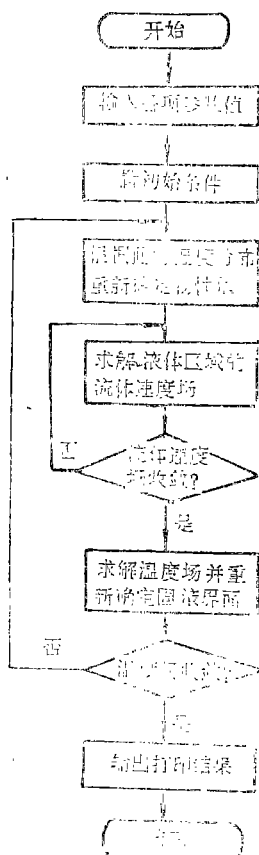


图2 计算程序框图

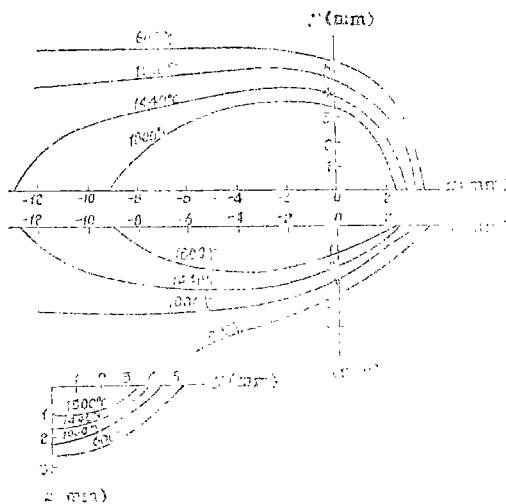


图4 三维TIG焊接温度场的三个断面
不锈钢试件 200A 20V 10mm/s

内和熔池外两区域中的温度分布。

图 5 给出了熔池中平行于 x 轴的三条线上的流体速度分布。熔池前部的流速大于熔池后部,这是因为电弧位于熔池前部,此处的温度值和电磁力值都较大。

3 实验验证

我们进行了TIG焊接工艺试验,将实验测试结果分别与三种计算方法(即经典理论雷卡林公式、纯导热数值解、本文三维模型)得出的数值结果进行了比较。

TIG焊接工艺试验条件如下:

工件材料:低碳钢 A3

工件尺寸: $100 \times 60 \times 5$ (mm)

电 极: 钍钨极, $\phi 3.0$ mm

电弧长度: 3.5mm, 不填充焊丝

氩气流量: 10L/min

焊接规范: 焊接电流180A, 电弧电压14V, 焊接速度120mm/min

第一批试验测量熔池的几何形状参数。TIG焊接过程中,在熄弧的同时,用氩气流吹击熔池,将一部分未凝固的液体金属吹击熔池,就可测量熔池长度。在工件长度方向不同位置上,分别取焊缝的横断面,制成宏观金相照片后,利用读数显微镜测定熔深、熔宽及焊缝横截面积进行大量工艺试验后,多次反复测量,取若干次的平均值作为实验测试结果。表 1 列出了三种计算方法得出的熔池几何参数与实测值。

表 1 TIG 熔池形状参数的比较

项 目	熔池深度 (mm)	熔池半宽 (mm)	熔池长度 (mm)	焊缝横截面积 (mm ²)
实 验 测 试	2.61	3.35	8.20	13.62
本 文 模 型	2.50	3.30	8.15	12.95
纯导热数值解	1.85	3.48	8.00	10.11
雷 卡 林 公 式	3.15	3.15	7.70	15.59

(低碳钢A3, 180A, 14V, 120mm/min)

第二批试验测定试件上、下表面上某些点的温度分布曲线。采用铂铑热电偶,通过 x - y 函数记录仪记录热电偶的电势,利用热电偶分度表换算成温度。图 6 表示出了工件下表面中心线上的温度分布。图中也表示出了三种计算结果与实验测试结果的比较情况。

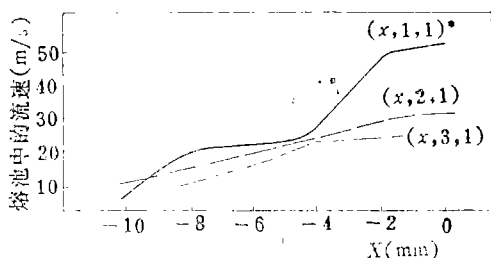


图 5 TIG熔池中的流体速度分布

不锈钢试件 200A 20V 10mm/s

* $(x,1,1) = (x,1\text{mm},1\text{mm})$

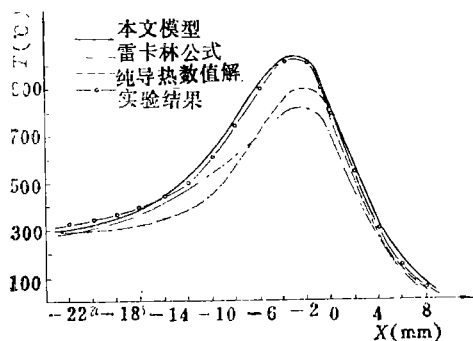


图6 温度分布计算值与实测值的比较

条件: 低碳钢试件工件下表面中心线上 180A 14V 120mm/min

4 结 论

1. 建立了运动电弧作用下三维TIG焊接熔池中流体流动及传热过程的数值分析模型。该三维模型的特点如下: ①同时考虑熔池内部液态金属的对流、传导和熔池外部的固体导热, 把熔池中流体动力学状态和传热过程的研究紧密结合起来。②综合考虑了使熔池中液态金属发生运动的主要原因。③焊接电弧作为热源向工件输入的热流, 按分布热源处理。④材料的热物性系数随温度而变化。⑤考虑工件表面通过对流与辐射向周围的热损失。

2. 进行了焊接工艺试验, 测出了TIG熔池几何形状参数、热影响区某些点的温度分布曲线。将实验测试结果同本文三维模型、雷卡林公式、纯导热数值解三种方法给出的计算结果进行了比较。结果表明: 三维模型的计算结果与实测值吻合程度良好, 最接近于实验测试值。

(1988年4月9日收到)

参 考 文 献

- 1 Rosenthal D. Trans. ASME. 1946, 68(11): 849~866
- 2 雷卡林 H H. 焊接热过程计算. 北京: 中国工业出版社, 1958
- 3 Paley Z. Welding Journal. 1975, 54(11): 385s~392s
- 4 Krutz G W. Welding Journal. 1978, 57(7): 211s~216s
- 5 Kou S. Modeling of Casting and Welding Processes. 1980.
- 6 Kou S. Welding Journal. 1982, 61(6): 175s~181s
- 7 Oreper G M. Welding Journal. 1983, 62(11): 307s~312s
- 8 Oreper G M. J Fluid Mech. 1984, 147: 53~57
- 9 武传松. 工学博士学位论文. 哈尔滨工业大学, 1987.
- 10 Tsao K C and Chuansong Wu. Welding Journal. 1988, 67(3): 70s~75s

NUMERICAL SIMULATION OF THE FLUID FLOW
AND HEAT TRANSFER IN TIG WELDING MOLTEN POOLS

Lecturer Wu Chuansong,

Professor Chen Dinghua, Professor Wu Lin

(Harbin Institute of Technology)

Abstract

It is of considerable practical interest to understand quantitatively the heat and fluid flow phenomena in welding molten pools. The purpose of this paper is to develop a mathematical model to evaluate the three-dimensional fluid flow and temperature profile in a moving TIG welding molten pool. The model considers both the fluid convection-conduction heat flow in the pool and the conduction heat transfer in the surrounding solid material so that the limitations of the application of Rykalin's formula and the numerical method of pure conduction could be avoided and the scope of the previous two-dimensional method for stationary arc extended. The theoretical predictions based on this model are found to be in good agreement with the experimental measurements.

Key words Fluid flow Heat transfer Numerical simulation