

34-39

第32卷 第2期

机 械 工 程 学 报

Vol. 32 No. 2

1996年4月 CHINESE JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING Apr. 1996

TIG焊接温度场的有限元分析

蔡洪能 唐慕尧

(西安交通大学 710049)

摘要 建立了运动电弧作用下三维焊接温度场的计算机数值分析模型, 分析中引入了热焓的概念和表面双椭圆分布热源模型, 研制了相应的程序, 具有较高的计算精度。用该模型对TIG焊接温度场进行了分析计算, 得出了TIG焊接熔池的形状、尺寸和热影响区的温度分布。计算结果与试验结果吻合较好。

关键词: TIG焊 温度场 数值模拟

0 前言

焊接热过程的准确计算和测量是焊接冶金分析、焊接应力应变弹塑性分析和焊接过程自动化控制的前提。焊接热过程取决于外加热源的分布形式、材料的热物理性能以及材料与周围的换热。经典的雷卡林公式以点、线、面或高斯分布热源来模拟各种焊接热源^[1], 有一定的局限性。材料在加热和冷却过程中有潜热的吸收和放出, 在精确分析焊接热过程时必须计及潜热部分^[2]。本文建立了运动电弧作用下三维焊接温度场的计算机数值分析模型。

1 控制方程

温度 $T(x, y, z, t)$ 作为空间坐标 (x, y, z) 与时间 t 的函数, 在区域 Ω 中的任何点均满足下列微分方程

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \bar{Q} \quad (1)$$

式中 $\bar{Q}$ ——区域 Ω 中的热源, W/m^3

k ——热导率, $W/(m \cdot K)$

ρ ——材料密度, kg/m^3

c ——比热容, $J/(kg \cdot K)$

因为 k 、 c 和 ρ 均是温度 T 的函数, 所以方程式 (1) 是非线性的。在区域 Ω 的边上界有两种边界条件:

等温边界条件

19931220收到初稿

$$T(x, y, z, t) = T_i(x, y, z, t) \quad (2)$$

换热边界条件

$$k \frac{\partial T}{\partial n} + \alpha(T - T_0) + \varepsilon \sigma_0(T^4 - T_0^4) = 0 \quad (3)$$

2 有限元算法的分析

有限元方法的出发点是每个单元用一个多项式来近似处理单元中的温度分布

$$T(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^n N_i(x, y, z) T_i(t) \quad (4)$$

式中 N_i ——随单元类型、大小、形状而变化的基本函数

$T_i(t)$ —— t 时刻节点的温度值

采用 8 节点等参元 Galerkin 有限元法, 如图 1 a、b 所示。形函数 N_i 的表达式为

$$\begin{aligned} N_1 &= (1 + \xi)(1 + \eta)(1 + \zeta) \\ N_2 &= (1 - \xi)(1 + \eta)(1 + \zeta) \\ N_3 &= (1 - \xi)(1 - \eta)(1 + \zeta) \\ N_4 &= (1 + \xi)(1 - \eta)(1 + \zeta) \\ N_5 &= (1 + \xi)(1 + \eta)(1 - \zeta) \\ N_6 &= (1 - \xi)(1 + \eta)(1 - \zeta) \\ N_7 &= (1 - \xi)(1 - \eta)(1 - \zeta) \\ N_8 &= (1 + \xi)(1 - \eta)(1 - \zeta) \end{aligned} \quad (5)$$



图 1

(a) 用笛卡尔坐标表示的子单元 (b) 用相对坐标表示的母单元

Galerkin 法是求解线性或非线性方程的近似方法, 要求节点的误差 ϵ 在整个区域, 包括边界在某种加权平均的考虑下为零。

$$\int_{\Omega} \epsilon N_i d\Omega = 0 \quad (6)$$

利用控制方程式 (1) 把上式展开后并积分可得到

$$[K]\{T\} + [C]\frac{\partial}{\partial t}\{T\} = \{P\} \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
\text{式中 } [K] &= \sum_e [K_i]^e + [K_r]^e \\
[C] &= \sum_e [C]^e \\
[P] &= \sum_e (\{P_q\}^e + \{P_r\}^e + \{P_r a\}^e) \\
[K_i]^e &= \iiint \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} k \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} k \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} k \frac{\partial [N]}{\partial z} \right) \\
[K_r]^e &= \iiint a [N]^T [N] dS \\
[C]^e &= \iiint [N]^T \rho c [N] dx dy dz \\
\{P_q\}^e &= \iiint [N]^T \bar{Q} dx dy dz \\
\{P_r\}^e &= \iiint [N]^T q dS \\
\{P_r a\}^e &= \iiint [N]^T a T_0 dS
\end{aligned}$$

并对时间进行离散

$$\left(\frac{1}{\Delta t} [C^e] + \theta [K^e] \right) \{T\}^{(i+\Delta t)} = \left(\frac{1}{\Delta t} [C^e] - (1-\theta) [K^e] \right) \{T\}^{(i)} + \theta \{P\}^{(i+\Delta t)} \quad (8)$$

上式中角标 θ 表示矩阵 $[C^e]$ 、 $[K^e]$ 是由 $t + \theta \Delta t$ 时刻的温度 $\{T\}^{(i+\Delta t)}$ 代入而计算出来的。按照 Galerkin 法取 $\theta = 2/3$ 。经过以上步骤，就将一个非线性方程组化为代数方程组。

3 利用热焓求解温度场

焊接过程中，材料会发生相变。相变时会吸收或放出潜热，即相变潜热。它在一定程度上影响着冷却速度和冶金组织。如钢铁的熔化和铁素体向奥氏体的转变，严格分析相变潜热是比较困难的。相变界面，如液固边界，存在温度梯度的不连续性，熔化时吸收潜热，凝固时释放潜热，钢的潜热是 2.1 GJ/m^3 。

处理相变的一种方法是将潜热的影响以比热容在熔化范围内的突变来处理。当熔化过渡区较大时，这一点比较好处理。而实际上熔化发生在很小的范围内，在计算时就易错过熔化区。为此引入热焓的概念，其数学定义为

$$\Delta H(T) = \int_0^T \rho c(\tau) d\tau \quad (9)$$

热焓是一个连续函数，当某一节点的温度跨过相变温度时，可以判断出该节点是冷却还是加热，把与该节点相关的体积或质量联系起来，就可以计算出相变热。

热焓是温度的函数，反过来知道了热焓也可以知道温度。将式 (9) 两边对 x 求导

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \rho c \frac{\partial T}{\partial x} \quad (10)$$

同理可得

$$\frac{\partial H}{\partial y} = \rho c \frac{\partial T}{\partial y} \quad \frac{\partial H}{\partial z} = \rho c \frac{\partial T}{\partial z} \quad \frac{\partial H}{\partial t} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

把式 (10) 代入式 (1), 可以得到求热焓的有限元算法。

4 对流和辐射

焊件边界与周围介质进行换热, 热量的损失主要通过辐射换热和对流换热。温度越高则辐射换热作用越强烈, 而对流作用相对较小。由于辐射换热与对流换热的计算方法不同, 为了计算方便, 采用总的换热系数 α 。这样因边界换热而损失的热能可表示为

$$q_s = \alpha(T - T_s) \quad (11)$$

5 焊接热源的热分布

对于熔深较浅的焊缝, Pavelic^[3], Friedman^[4]的圆盘热源模型是相当成功的, 但它们是在二维计算时取得的, 实际上焊接速度不可能很高, 因此三维计算才能真实体现焊接热过程, Goldak^[5]提出了双椭圆体模型。对于 TIG 焊由于熔深较浅, 可以对双椭圆体模型进行简化, 采用表面分布双椭圆模型, 对于该模型熔池前半部分的能量密度分布可以写成

$$q(x, z, t) = \frac{3f_1 Q}{a_1 b \pi} \exp\left[-\frac{3x^2}{a_1^2}\right] \exp\left[-\frac{3(z+v(\tau-t))^2}{b^2}\right] \quad (12)$$

式中 f_1 ——总的输入热功率在熔池前半部分的分配指数

τ ——初始时刻电弧的滞后因子

熔池的后半部分能量密度分布可以写成

$$q(x, z, t) = \frac{3f_2 Q}{a_2 b \pi} \exp\left[-\frac{3x^2}{a_2^2}\right] \exp\left[-\frac{3(z+v(\tau-t))^2}{b^2}\right] \quad (13)$$

式中 f_2 ——总的输入功率在熔池后半部分的分配指数

熔池前半部分的 a_1 , b 与后半部分的 a_2 , b 是独立的, 可以取不同的值, 如图 2。图 2 中 ξ 是动坐标。

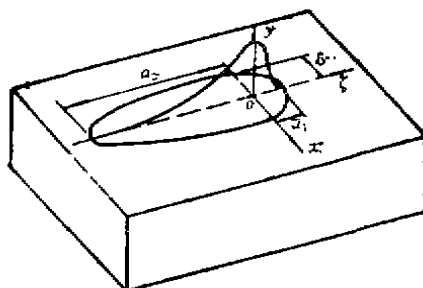


图 2 表面双椭圆分布热源模型

6 三维TIG焊接温度场

利用所建立的三维焊接热传导过程的数学模型,对低碳钢板的焊接热过程进行了分析计算,计算的网格划分见图3。同时进行了试验研究,其工艺参数为

试件尺寸: $240\text{mm} \times 120\text{mm} \times 5\text{mm}$

电极材料: 钍钨极, $\phi 4\text{mm}$

氩气流量: $10\text{L}/\text{min}$

焊接规范: 焊接电流 $I = 175\text{A}$, 焊接电压 $U = 13.2\text{V}$, 焊接速度 $v = 3.42\text{mm}/\text{s}$

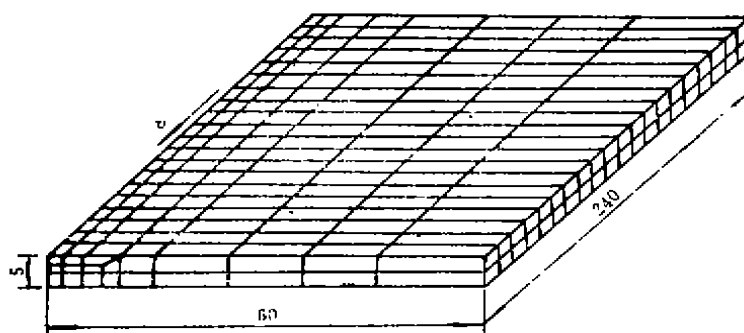


图 3 计算构件网格划分

通过计算得出焊接熔合区及热影响区的形状,如图4所示。从图4可以看出,计算与试验形状相差很少,特别是上表面附近,由于热源分布参数是根据上表面焊缝形状参数确定的,所以靠近上表面处的形状符合很好。对于热影响区测点的焊接热循环的理论分析值与试验值进行了比较,如图5所示,加热时和高温时数值吻合较好,冷却时最大误差小于8%。

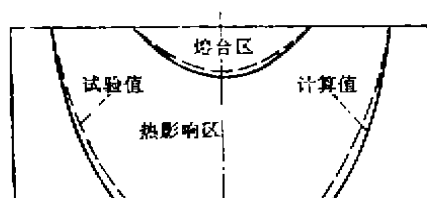


图 4 焊缝横截面图

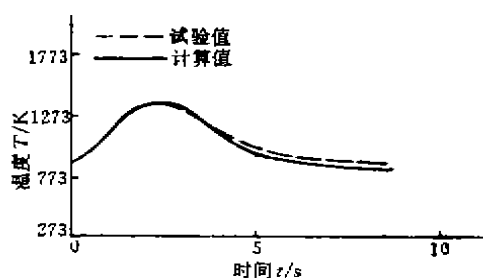


图 5 热影响区测点焊接热循环比较

7 结论

(1) 建立了运动电弧作用下TIG焊接的表面双椭圆分布热源模型。该模型具有较大的可变性,当取模型参数比熔池尺寸小8%时,可以取得很好的计算精度。

(2) 研制了分析三维瞬态非线性热传导问题的有限元程序。利用分析节点热焐的方法对TIG焊接温度场进行了分析计算, 得出了熔池的形状和尺寸及热影响区的温度分布, 结果表明计算值与试验值符合较好。

参 考 文 献

- 1 雷卡林 H. H. 焊接过程热计算。北京: 机械工业出版社, 1958.
- 2 陈楚. 数值分析在焊接中的应用。上海: 上海交通大学出版社, 1985.
- 3 Pavelic V, et al. Experimental and computed temperaure histories in GAS tungsten arc welding of thin plates. *Welding Journal*, 1959, 48(7):295~305
- 4 Friedman E. Thermo mechanical analysis of the welding process using the finite element method. *Trans. ASME, Journal of Pressure Vessel Technology*, 1975, 48(7):206~213
- 5 Goldak J A, et al. A new finite element model for welding heat sources. *Trans. ASME, Metallurgical Transaction*, 1984, 15B(6):299~305

FEM ANALYSIS ON TIG WELDING TEMPERATURE FIELD

Cai Hongneng Tang Muyao
(*Xi'an Jiaotong University*)

Abstract Computational model is established for analysis of 3D welding temperature field caused by moving welding arc, in the model the concept of enthalpy and surface double ellipse distribution heat source are adopted. Relevant software is compiled for the model, which possesses higher precision. The model is employed to analyze TIG welding temperature field to obtain the shape and size of welding pool and tempeature distribution in HAZ. It shows that the agreement is well between computational result and experiment result.

Key words: TIG welding Temperature field Numerical simulation

作者简介 蔡洪能, 男, 1967年1月出生。先后在西安交通大学攻读硕士学位, 博士学位。现任西安交通大学讲师。曾在^{*}美国和韩国的刊物和学术会议上发表过论文。主要成果: 重型机械减速机系列CAD获1992年国家科学技术进步三等奖。