

文章编号:1671-6833(2012)04-0041-05

## CO<sub>2</sub> 气体保护焊温度场的三维数值模拟与分析

张银霞<sup>1,2</sup>, 乔向南<sup>1</sup>, 王 栋<sup>1</sup>, 覃寿同<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 卫华集团有限公司, 河南 新乡 453401)

**摘 要:** 采用商用 ANSYS 软件的二次开发语言, 选用适宜于 CO<sub>2</sub> 气体保护焊的双椭球热源模型, 建立了 Y 型坡口的两块钢板对接多层多道焊模型, 分别采用三种不同“单元生死”技术对其温度场分布规律进行数值模拟及对比分析, 验证了模拟过程中采用逐步、逐层激活焊缝单元的“单元生死”技术的必要性. 得到了模型在各时间点的温度场分布, 绘制了典型位置的热循环曲线, 据此可掌握和预测实际焊接过程以及焊接之后焊件的组织、性能以及残余应力的变化情况.

**关键词:** CO<sub>2</sub> 气体保护焊; 双椭球热源; 单元生死; 温度场

**中图分类号:** TG402

**文献标志码:** A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2012.04.010

### 0 引言

对焊接温度场的精确掌握是准确计算和预测焊接时产生的焊接应力、变形、相变等现象的前提. 20 世纪 70 年代, 有限元法首次应用于焊接过程的数值模拟, 美国 MIT 的 K. Masubuchi 用有限元法研究了水下焊接传热问题, 1981 年西安交通大学的唐慕尧等首先用有限元法计算了薄板准稳态焊接温度场<sup>[1]</sup>. 随着计算机技术和有限元技术的发展, 国内外对焊接过程的三维数值模拟研究和应用日益广泛. 山东大学材料科学与工程学院的赵明等人研究了焊接温度场模拟过程中焊缝材料的相变潜热问题<sup>[2]</sup>. 美国南卫理公会大学先进制造研究中心的 KONG 等人模拟了激光-GMA 混合焊接方式在不同焊接速度条件下的温度场、应力场分布情况, 并得出了与试验相吻合的结果<sup>[3]</sup>. 笔者利用单元生死技术模拟多层多道焊的材料逐步填充过程, 在 ANSYS 有限元分析软件的基础上, 编制了焊缝材料逐步填充以及热源移动的子程序, 对 CO<sub>2</sub> 气体保护焊焊接 Y 型坡口的多层多道焊的温度场进行了模拟与研究.

### 1 建立有限元模型

#### 1.1 焊缝及工件的几何模型

焊缝以及工件的几何模型如图 1 所示, 长

(L)、宽(W)、高(H)分别为 100 mm, 100 mm, 10 mm. A 至 F 点分别是模型上不同位置的结果的取值点, L<sub>0</sub> = 10 mm, L<sub>1</sub> = 15 mm. 焊缝坡口形状呈 Y 型.

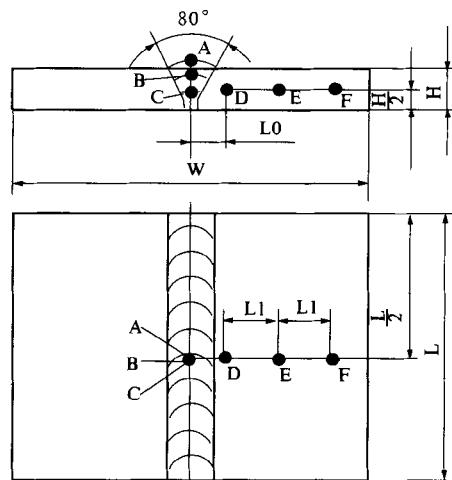


图 1 焊缝以及工件的几何模型图

Fig.1 Model of two steel plate that connected by weld bead

#### 1.2 温度场的理论模型<sup>[4]</sup>

焊接过程中温度场的传热现象属于非线性瞬态热传导. 根据 Fourier 传热定律和能量守恒定律, 三维温度场传热问题随时间变化的热量平衡方程为

收稿日期:2012-01-13;修订日期:2012-02-15

基金项目:国家科技部资助项目(2009GJD00041)

作者简介:张银霞(1974-),女,河南新乡人,郑州大学副教授,博士,主要研究方向为精密与超精密加工技术、抗疲劳制造技术、难加工材料高效加工技术,E-mail:zhangyinxia@zzu.edu.cn.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \rho Q = 0. \quad (1)$$

方程的左边第 1 项是微体升温所需要的热量,第 2,3,4 项分别是沿  $x, y, z$  向传入微体的热量,最后一项是微体内部产生的热量。

在自然对流条件或者强迫对流条件下,微体的边界条件表述如下

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z = h(T_a - T), \quad (2)$$

式中: $\rho$  为材料密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c$  为材料的比热,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $k_x, k_y, k_z$  为材料分别沿  $x, y, z$  方向的热导率,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $Q$  为微体内部的热源密度,  $\text{W}/\text{kg}$ ;  $n_x, n_y, n_z$  为边界法线的方向余弦;  $h$  为物体与周围介质的表面传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $T_a, T$  分别为外界环境温度以及微体温度。

### 1.3 热源模型

目前常用的描述焊接过程的热源模型有高斯分布的热源模型、半球状热源模型、椭球形热源模型、双椭球热源模型等。

笔者针对  $\text{CO}_2$  气体保护焊在焊接厚板时电弧与熔滴对工件共同加热的特点,采用双椭球形的热源模型。模型如图 2 所示。

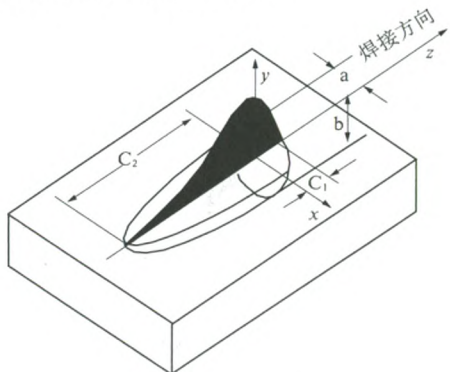


图 2 双椭球热源模型

Fig. 2 Double-ellipsoid distribution model of heat source

双椭球热源模型前半部分椭球的体热流密度表达式<sup>[5]</sup>:

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_1 Q}{abc_1 \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c_1^2}\right), \quad (3)$$

双椭球热源模型后半部分椭球的体热流密度表达式

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_2 Q}{abc_2 \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c_2^2}\right). \quad (4)$$

式中: $f_1, f_2$  为前、后椭球的热流密度分布系数,  $f_1 + f_2 = 2$ ;  $Q$  为输入模型的热源的总功率;  $a, b, c_1, c_2$

为热源形状参数, mm.

前半部的椭球模型是一个高斯分布的体热流密度,模拟电弧对工件的冲击作用.后半部分的椭球也是一个高斯分布的体热流密度,模拟熔滴对工件的加热作用。

### 1.4 仿真分析条件

实际焊接过程中,焊接熔池以及工件之间发生剧烈而且复杂的物理、化学反应.在仿真分析的过程中,做出以下假设及处理:(1)工件的初始温度为室温( $20^\circ\text{C}$ );(2)不考虑熔池内部的化学反应、搅拌、对流现象;(3)焊接以恒定速度进行,热源的体热流密度服从双椭球形热源模型的热流分布规律;(4)工件所有边界仅与空气发生对流换热,不考虑工件与试验台之间的热传导,将辐射的影响耦合到对流换热中而不做单独考虑;(5)焊缝材料和工件材料相同;(6)用热焓法处理材料的相变潜热。

焊接方式采用  $\text{CO}_2$  气体保护焊,焊接工艺参数为:电压 25 V, 电流 220 A, 焊接速度 10 mm/s, 两道焊缝之间有 10 s 的冷却时间。

### 1.5 有限元模型

由于模型是对称的,只取其中一半进行温度场的计算.由于焊接过程是一个加热非常不均匀的过程,在焊缝处的温度梯度很大,远离焊缝的位置温度梯度相对较小,因此划分网格时一般不采取均匀的网格. C. Heinze 等认为厚度方向划分网格时,距离焊缝越远网格要越稀疏,这样可以保证结果的正确性,减少计算时间,并有助于后续的力学分析<sup>[6]</sup>. 笔者模型的网格划分如下:焊缝处及焊缝附近的单元大小定为 1.4 mm 以下,远离焊缝的单元大小定为 2 mm 以上,并随着离焊缝距离的增大而按一定比例增大. 图 3 为划分网格之后的有限元模型图。

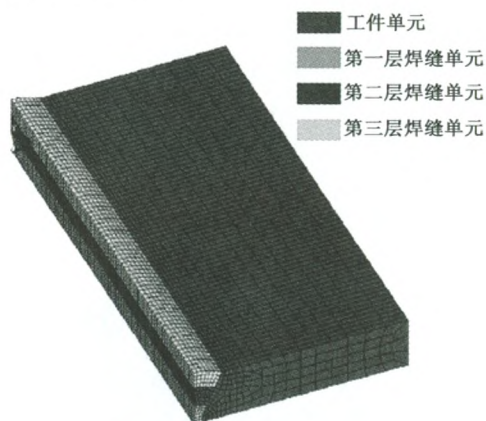


图 3 焊缝以及工件的有限元模型。

Fig. 3 Mesh of the model and the weld area



## 2 焊缝处金属填充过程的实现

实际焊接过程中,焊缝材料是随着热源的移动逐步填充的.利用商用软件 ANSYS 中的单元生死技术,编制了焊缝材料随热源移动逐步填充过程的子程序.为了考虑刚度矩阵的稳定性,建模时将焊缝的材料属性等参数建立到模型中.加载热源之前将焊缝的单元全部杀死,模拟实际焊接前坡口处无金属材料的状态.单元生死技术并不增加或者删除任何单元,只是将选定单元的热导系数、热载荷、质量和比热容设为一个极小的值.在保证刚度矩阵稳定性的前提下,将这部分单元的作用减至最小.激活单元则是把将要激活单元的各项属性恢复到原值.计算过程涉及大量的非线性运算,采用 ANSYS 自带的牛顿-拉普森非线性迭代算法进行求解计算.加载热源时的程序流程图如图 4 所示.

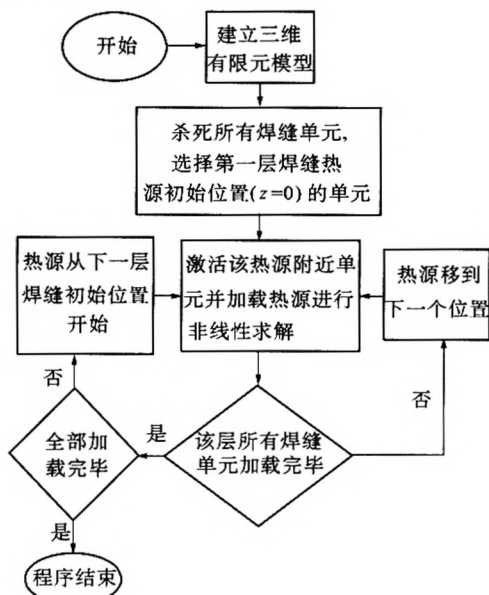


图4 仿真分析的程序流程图

Fig.4 Flowchart of numerical simulation procedure

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 单元生死技术的分析与讨论

为研究并验证单元生死技术对结果产生的影响,笔者选用2种模型.模型1参考文献[7]的单元生死技术,加载热源之前将该层焊缝全部激活,待热源在该层移动完毕时,完全激活下一层焊缝单元.模型2运行时,程序逐段、逐层激活热源中心附近的单元并加载热源,模拟实际焊接过程中焊缝材料逐步填充的过程.

图5~6是不同模型焊接5s时的温度场分

布图.由图5可知模型1热源附近的温度分布呈现规则的双椭圆形.第二、第三层焊缝保持室温,第一层焊缝上热源中心前方一段距离,即热源未作用到的地方有高于室温的温度场分布.模型2热源附近的温度分布呈现出规则的双椭圆形温度场分布.第一层焊缝上,在热源前方一定距离,热源作用范围之外温度急剧降为室温.第二、第三层焊缝保持室温,模型1第一层焊缝上热源前端那些实际尚不应参与传热的单元参与了传热过程.模型1与实际焊接情况不相符.

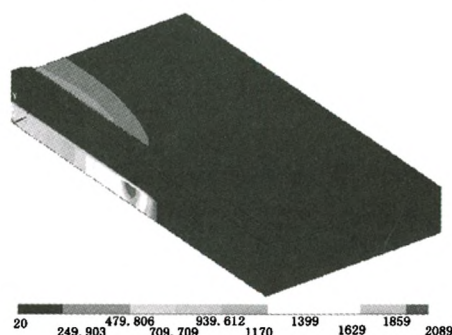


图5 模型1焊接5s时温度分布云图

Fig.5 Temperature cloud chart of Model 1 welded at the 5th second

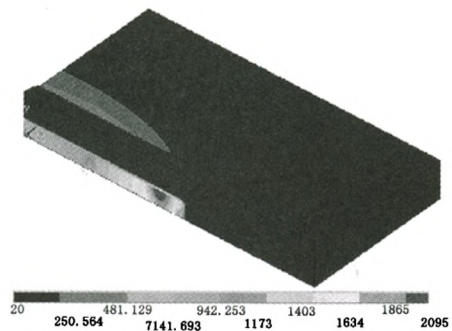


图6 模型2焊接5s时温度分布云图

Fig.6 Temperature cloud chart of Model 2 welded at the 5th second

模型2中热源未作用到的单元保持室温状态,不参与传热过程.从图5、图6可知,在模拟焊接第一层焊缝的过程中模型1、2温度场分布的差别微乎其微.但从图7、图8可知,在焊接进行到25s时,模型1第二层焊缝后半段的单元温度场的温度全部高于室温,这说明本不该参与传热的单元在焊接进行到20s时被提前激活,导致其后的温度场分布与实际情况严重不符.因此多层多道焊的温度场模拟不能采用模型1的单元生死技术.而模型2逐层、逐段激活焊缝的单元生死技术模拟的情况和结果与实际最相符.笔者采用最接

近实际模拟过程的模型 2 中的单元生死技术进行焊接温度场的数值模拟。

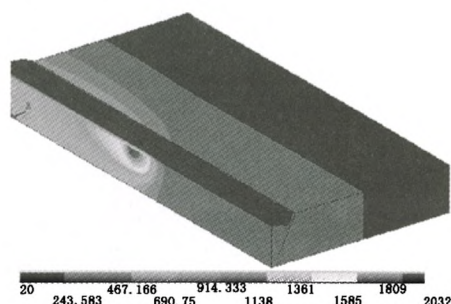


图 7 模型 1 焊接 25 s 时温度分布云图

Fig. 7 Temperature cloud chart of Model

1 at the 25th second

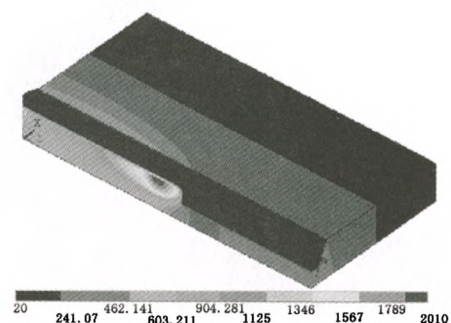


图 8 模型 2 焊接 25 s 时温度分布云图

Fig. 8 Temperature cloud chart of Model

2 welded welded at the 25th second

### 3.2 数值模拟结果分析与讨论

图 1 所示的 A 到 F 点是模型上不同位置的取值点. A、B、C 分别是热源在各层焊缝上加载 5 秒时热源中心的位置. D、E、F 点分别是工件上沿 x 方向距离焊缝 10、25、40 mm 的位置. 对多层多道焊的数值模拟结果进行讨论和分析如下.

由焊缝上 A、B、C 点的热循环曲线(见图 9)可知:热源在第一层焊缝上加载 4.12 s 时 A 点首先受到热源加热作用,然后在 4.12 s 至 5.5 s 之间迅速达到最高温度 2 050 ℃,并且随着热源逐渐远离 A 点,该点温度迅速下降至 1 500 ℃左右,直至 800 ℃左右温度下降趋势减缓,温度下降的趋势进一步减缓,然后经历两次温度升降的循环过程,第二次循环的最高温度低于前一次热循环的最高温度.这是由于 A 点的焊缝材料在 1 480 ℃以上呈液态,导热系数最大,因此在热源离开 A 点之后温度下降速度最快.800 ~ 1 480 ℃,焊缝材料呈固态以及相变状态,导热系数远低于液态, A 点在此温度区间温度下降趋势减缓.800 ℃左右时,材料的比热为最大值,物体温度变化需要的热

量增加,导致其温度下降趋势进一步减缓.当焊接进行 24 s 左右时, A 点受到第二层焊缝的加热作用,温度开始迅速上升,但由于此时 A 点不是受到热源的直接加热作用,因此其最高温度随着热源在厚度方向(y 方向)逐渐远离而逐渐降低. B、C 两点的热循环曲线变化规律与 A 点相似.

D、E、F 点的热循环曲线如图 10 所示.靠近焊缝的 D 点热循环曲线呈循环上升趋势,远离焊缝的 E、F 点温度上升趋势则趋于平坦.说明焊缝的热能逐渐传到工件上,距离焊缝越近,温度越高,温度变化幅度越大.距离焊缝越远,温度越低,温度变化幅度越小.

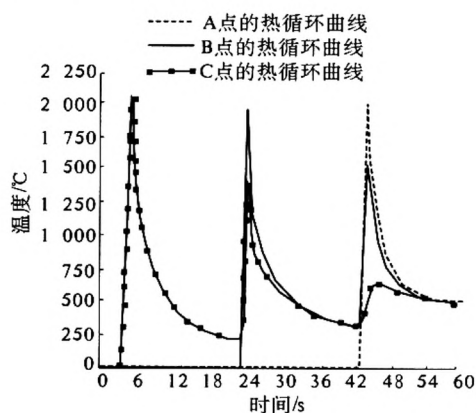


图 9 A、B、C 点热循环曲线

Fig. 9 Temperature evolution with respect to the welding time in the weld at A, B, C characteristic points

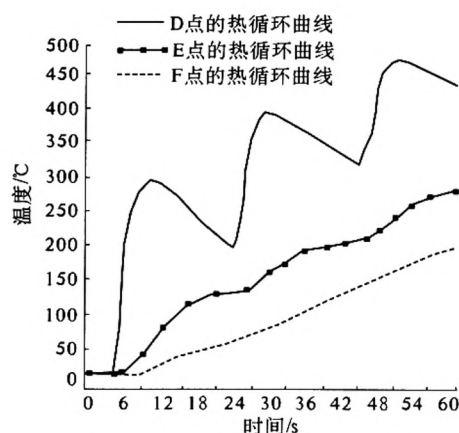


图 10 D、E、F 点热循环曲线

Fig. 10 Temperature evolution with respect to the welding time in the weld at D, E, F characteristic points

采用 CO<sub>2</sub> 气体保护焊在焊接低碳钢板时测得的实际焊缝最高温度为 1 980 ℃<sup>[8]</sup>, 笔者计算的焊接过程中焊缝最高温度理论值为 2 098 ℃, 误差为 6%, 在允许范围以内. 笔者得到的热循环曲线变化规律也与文献[9-10]的热循



环曲线变化规律相似。

#### 4 结论

(1)采用双椭球热源,对比分析了采用不同程度单元生死技术的3种模型的计算结果。结果表明,采用随热源移动,逐段、逐层激活焊缝的单元生死技术可以得到正确的CO<sub>2</sub>气体保护焊的焊接温度场分布。逐层激活焊缝的单元生死技术只能用于单层单道焊缝或第一层焊缝温度场的近似模拟。

(2)采用逐段、逐层激活焊缝的方法得到了低碳钢焊接过程中任一时间点的温度场分布情况及其分布规律,绘制了焊缝以及工件上不同典型位置的温度随时间变化的热循环曲线。结果表明,焊缝处从最高温度下降的趋势在1 500~2 095℃,800~1 500℃以及800℃以下这3个温度区间内逐步减缓。该结果为准确分析低碳钢焊接过程中及其焊接后的组织、性能及残余应力提供了参考依据。

#### 参考文献:

- [1] 陈炳森. 计算机辅助焊接技术[M]. 1版. 北京:机械工业出版社. 1999.
- [2] 赵明,武传松,陈茂爱. 焊接热过程数值分析中相变潜热的三种解决方案[J]. 焊接学报,2006,27(9): 55-58.
- [3] KONG Fan-rong, MA Jun-jie, RADOVAR K. Numerical and experimental study of thermally induced residual stress in the hybrid laser-GMA welding process [J], Journal of Materials Processing Technology, 2011,211(6): 1102-1111.
- [4] 龚曙光,黄云清. 有限元分析与ANSYS APDL编程及高级应用[M]. 第1版. 北京:机械工业出版社. 2009.
- [5] GOLDAK J, CHAKRAVARTI A P, BIBBY M. A new finite element model for welding heat sources [J]. Metallurgical Transactions B, 1984, 15B(2): 299-305.
- [6] HEINZE C, SCHWENK C, RETHMEIE M. Influences of mesh density and transformation behavior on the result quality of numerical calculation of welding induced distortion [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2011, 19(9):1847-1859.
- [7] 梁晓燕. 中厚板多道焊焊接过程中温度场和应力场的三维数值模拟[D]. 华中科技大学材料学院, 2004.
- [8] 郑振太. 短路过渡CO<sub>2</sub>气体保护焊结合型热源模型的研究[J]. 焊接技术,2010,39(12):18-20.
- [9] 孟庆国. 多道焊温度场数值模拟及其分布规律的研究[J]. 机械工程学报, 2005,41(1):124-128.
- [10] 王仓,周吉智. 焊接工艺对双相不锈钢焊接接头力学性能和组织的影响[J]. 徐州工程学院:自然科学版,2011(2):76-79.

### Three-dimensional Numerical Simulation and Research of CO<sub>2</sub> Arc Welding Temperature Field

ZHANG Yin-xia<sup>1,2</sup>, Qiao Xiang-nan<sup>1</sup>, WANG Dong<sup>1</sup>, Qin Shou-tong<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Weihua Group, Xinxiang 453400, China)

**Abstract:** With the developing language of ANSYS software and the using of the double-ellipsoid heat source model, a model of two steel plate that connected by Y groove multi-layer and multi-pass CO<sub>2</sub> arc welding seam is created. Three different kinds of element birth and death technology are used separately in the model. After the comparison of three different numerical simulation results, the correctness of the element birth and death technology which activates the welding material step by step is validated. The temperature field distribution regularities of the welding at various time points of welding progress are analyzed. The cycling curves of typical spots on different place of the model are studied. Based on the results, the component's tissue, properties and residual stress at different position of the model can be estimated.

**Key words:** CO<sub>2</sub> arc welding; double-ellipsoid heat source mode; element birth and death; temperature field