

# 焊接过程瞬态组织预示的计算机模拟

张 初 冬

(大连铁道学院)

**摘 要** 焊接过程瞬态组织预示程序是在先前的焊接热传导程序基础上设计而成的。利用状态图和相变动力学中的计算公式,该程序可以给出整个接头中任一点瞬态各组织的体积百分数,并绘出各组分的等值分布图。与最终接头中的观测值相比,相对差值约 $\pm 10\%$ 。应用这一程序,对低合金钢实际管线环焊缝手工焊进行了计算模拟,进一步验证了该程序的可行性和可靠程度。

**关键词** 相变模拟; 焊接接头; 计算机模拟

## 0 序 言

随着焊接力学的不断发展,现在已经可以对焊接瞬态温度场和应力应变场进行数值计算。但要综合考虑各种复杂因素对整个焊接过程的影响,瞬态组织预示是关键的一环。因为一方面相变中的热效应和体积变化对焊接热传导和瞬态应力分析有较大的影响,另一方面,瞬态的组织分布也对元素的扩散(包括氢扩散)起着控制作用。关于金属相变的计算模拟方面的研究,在近十年内,已得到许多有关专家的重视。但是有关焊接过程中瞬态显微组织预示方面的研究工作做得很少。D. F. Watt<sup>[1]</sup>和C. Henwood<sup>[2]</sup>首次提出了Watt/Coon模型,并在此基础上对板上堆焊焊道的情况进行了模拟计算。但其原始条件与工程实际并不符合。因此,有必要编制一个程序并对实际工件进行计算模拟,来考核此类程序的可行性和可靠程度。

## 1 编制预示程序的先导工作

为了预示焊接过程的瞬态组织,程序必须首先能计算得到瞬态温度场。与一般的热传导问题不同的是,焊接热源是移动的,并伴随着相变。热传导的基本方程是:

$$k \nabla^2(T) - C_p \frac{\partial T}{\partial t} + Q = 0 \quad (1)$$

式中,  $k$  为导热系数,  $C_p$  是材料的体积比热,  $Q$  为产生的热量。对于瞬态热流的有限元计算的矩阵表达式为:

$$[K]\{T\} + [C]\frac{\partial}{\partial t}\{T\} = \{P\} \quad (2)$$

式中  $[K]$  为热导矩阵,  $[C]$  为热容矩阵,  $\{P\}$  为热流矢量,  $\{T\}$  为温度阵。本文与文献〔3〕中所介绍的不同, 热流矢量里不含  $\{P_0\}$  项。这是因为对焊接热源的考虑方法不同。本研究中, 热量是瞬间赋给熔池, 而熔池拟定为能量按高斯分布的半双椭圆柱体。本研究所用的热传导部分的程序块是 J. Goldak 等人建立的〔4〕, 有关熔池的计算模型参见文献〔5〕。使用这一模型时, 是把输入热量在一个时间步长之内赋予一个半双椭圆柱体的“设定熔池”的各个单元。随“熔池”的移动, 其中单元在每一步长中所得的热量不同。

另外, 程序中考虑了材料热物理特性的温度依赖关系。相变潜热的作用, 用在反应过程的时间间隔内  $C_p$  的突变来考虑。

本研究是以移动热源情况下的三维问题为对象。有关热传导部分程序块的细节参照文献〔4〕。适用材料为低合金钢。

## 2 相变温度与相变动力学

### 2.1 相变特征温度的计算

通常, 对于低合金钢, 某一温度下的组织成分可由修正了的 Fe-C 相图来确定。而对于焊接过程, 相变的特征温度则由钢材的 CCT 曲线确定。这包括液相线温度  $TL$ ; 固相线温度  $TS$ ; 共析线以上铁素体溶解度线所决定的温度  $TF$ ; 奥氏体化温度  $AE_3$ ; 珠光体相变起始温度  $PS$ ; 贝氏体相变起始温度  $BS$ ; 马氏体相变起始温度  $MS$ 。对于低合金或微合金钢, 这些特征温度可由下列的经验公式计算〔1〕:

$$TL = 1530.0 - 80.581C \quad (3)$$

$$TS = \frac{B}{A - \lg[C_m^a C_c^b]} \quad (4)$$

$$TF = 912 - 8486C \quad (5)$$

$$AE_3 = 912 - 203\sqrt{C} - 15.2Ni + 44.7Si + 104V + 31.5Mo + 13.1W \\ - 30Mn - 11Cr - 20Cu + 700P + 400Al + 120As + 400Ti \quad (6)$$

$$PS = 723 - 10.7Mn - 16.9Ni + 29Si + 16.9Cr + 290As + 6.4W \quad (7)$$

$$BS = 656 - 58C - 35Mn - 75Si - 15Ni - 34Cr - 41Mo \quad (8)$$

$$MS = 561 - 474C - 33Mn - 17Ni - 17Cr - 21Mo \quad (9)$$

式中  $C$  为钢中碳含量 (wt-%), 其余元素符号也代表其含量。 $A, B, a$  和  $b$  为常数, 此研究中分别取 3.11, 7520.0, 1.0 和 1.0。  $C_m$  和  $C_c$  分别为沉淀物中金属和非金属的浓度 (wt-%)。对所研究的钢, 沉淀物为 NbC。

### 2.2 关于相变动力学

对于升温时奥氏体化的过程, 以及固-液区中固体和液体的体积份数, 均近似按平衡状态图用杠杆定律来确定。对于连续冷却过程中奥氏体的分解, 其反应速度用式 (10) ~ 式

(15) 来确定<sup>[6]</sup>。

对于  $\gamma \rightarrow \alpha$  转变:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{2^{(G-1)/2} \Delta T^3 X^{2(1-X)/3} (1-X)^{2X/3}}{59.6Mn + 1.45Ni + 67.7Cr + 24.4Mo} \exp(-23000/RT) \quad (10)$$

式中  $G$  为按 ASTM 计的奥氏体晶粒尺寸号;  $\Delta T$  为过冷度,  $\Delta T = AE, -T$ ;  $X$  为形成中的铁素体体积份数,  $X = X_F/X_{FE}$ ,  $X_F$  和  $X_{FE}$  分别是已形成的和平衡时的铁素体含量。对于  $\gamma \rightarrow P$  反应:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{2^{(G-1)/2} \Delta T^3 DX^{2(1-X)/3} (1-X)^{2X/3}}{1.79 + 5.42(Cr + Mn + 4MoNi)} \quad (11)$$

式中  $X$  及  $X_P$  和  $X_{PE}$  与式 (10) 相同, 珠光体的份数  $X = X_P/X_{PE}$ 。  $\Delta T = PS - T$ 。  $D$  是扩散参量, 可由下式求得:

$$\frac{1}{D} = \exp(27500/RT) + (0.01Cr + 0.52Mo) \exp(37000/RT) \quad (12)$$

对于  $\gamma \rightarrow B$  转变:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{2^{(G-1)/2} \Delta T^2 X^{2(1-X)/3} (1-X)^{2X/3}}{Z(2.34 + 10.1C + 3.8Cr + 19Mo) 10^{-4}} \exp(-27500/RT) \quad (13)$$

式中  $X = X_B/X_{BE}$ , 为贝氏体的份数,  $\Delta T = BS - T$ ,

$$Z = \exp[X^2(1.9C + 2.5Mn + 9Ni + 1.7Cr + 4Mo - 2.6)] \quad (14)$$

对于  $\gamma \rightarrow M$  转变, 不计算反应速度, 在温度  $T$  时形成的马氏体体积份数  $X_M$  由下式确定:

$$X_M = 1 - \exp[-k_{1M}(MS - T)] \quad (15)$$

这里,  $k_{1M}$  为常数。对所研究的钢, 取  $0.011^\circ\text{C}^{-1}$ 。

使用下式估算升温时奥氏体晶粒长大速度:

$$\frac{dg}{dt} = \frac{k_g}{2g} \exp(-Q_3/RT) \quad (16)$$

式中  $g$  为以  $\mu\text{m}$  计的晶粒尺寸,  $k_g$  为晶粒长大常数, 它与钢材成分和温度变化速率有关; 本研究中取  $k_g = 7 \times 10^5 \text{mm}^2 \text{s}^{-1}$ 。  $Q_3$  为晶粒长大的活性能, 取  $2.41 \times 10^5 \text{Jmol}^{-1}$ 。

### 3 计算模拟程序的设计及计算实例

图 1 给出了焊接过程瞬态组织预示分析程序流程的示意框图。其中热传导部分的程序块参照了文献〔4〕的方案。把此程序块与上节中的计算公式相连接就构成组织预示程序的主体。

在程序中, 对每一时间步长  $\Delta t$  之始的时刻  $t$ , 要先计算出瞬态温度场, 再由 2.1 节中的公式判断各单元是否进入某一相变区间。再根据 2.2 节中相应的公式确定该相变进行的速度, 并算出在  $\Delta t$  时间间隔中反应进行的程度, 即得出该

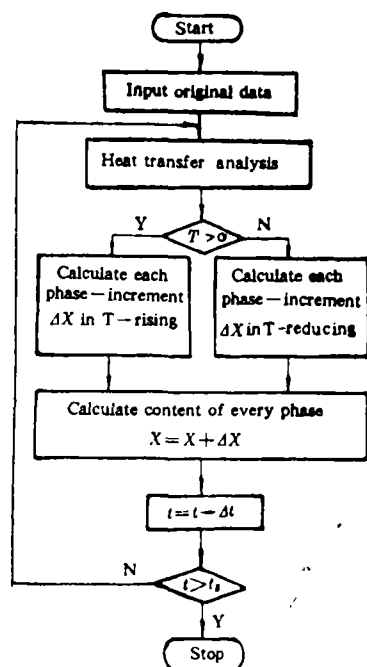


图 1 瞬态显微组织预示程序流程简图

Fig.1 A flow chart for transient microstructure-predicting analysis

步长终了时焊件各处各类组织的体积百分数  $X^t$ 。而后进行下一时间步长  $\Delta t^{t+1}$  的计算。如此循环,直至计算到所要求的时刻  $t_E$ 。

本研究计算实例为一个低碳微合金钢的手工焊管线环焊接头。管壁厚10mm,内径533mm。取长为122mm的弧段,宽122mm,中间设置一段长61mm的环缝。图2示出了该焊件一半的几何形状。钢材成分和施焊规范列在表1中。设定焊缝成分与母材相同。钢材原始组织为铁素体(F)+珠光体(P),体积比为  $F:P=0.9:0.1$ 。焊后在近缝区中出现的组织的份数用定量金相观测,用来与计算结果相比较。

对这个三维问题的计算,采用的是20节点块体等参元,1744个节点。采用渐增的时间步长(从0.01~5000s不等),计算至施焊开始后  $t=t_E$ (48h)的时刻。

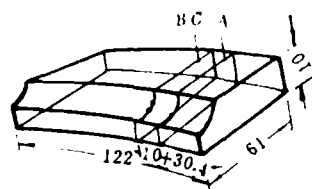


图2 焊件半部的几何形状  
Fig.2 Geometry of the weldment

表1 钢材的化学成分

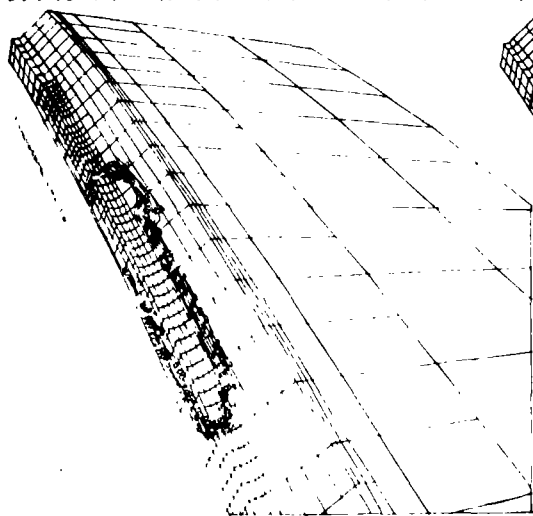
Table 1 Chemical composition of the material

Composition	C	Si	Mn	S	P	Al	Nb	N
(wt-%)	0.12	0.16	0.91	0.005	0.002	0.04	0.021	0.01

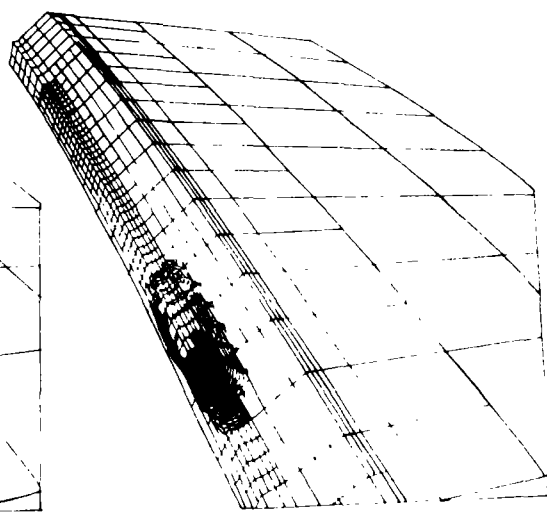
Welding condition: Heat input 1.5kJ/mm, Effectivity 0.75, Welding speed 6.67mm/s

#### 4 计算结果及讨论

程序计算可给出任一时刻任一点的各组织的份数,并可自动绘出瞬态显微组织的等值组分图。图3给出了这种图的两个例子。此程序还可以给出任一点处的热循环曲线和组织份数



(a) Contours of ferrite-fraction at 25th sec after welding start



(b) Contours of martensite-fraction at 25th sec after welding start

图3 焊件瞬态显微组织的等值组分图

Fig.3 Contours of transient microstructure of weldment

随时间的变化曲线。为了验证计算模拟的结果,解剖了实际焊件,对断面 $BC$ 和 $A$ 两面上的 $A, B, C$ 3点进行了定量金相观测。 $A$ 面距焊件端部 $30.5\text{mm}$ (即始焊处), $BC$ 面距 $A$ 面 $10\text{mm}$ 。观测表明, $A, B$ 两点处于靠熔合线的外侧,而 $C$ 点处于过热区。 $A, B$ 处主要生成马氏体,加少量贝氏体和铁素体,而 $C$ 点处为铁素体加马氏体,以及少量贝氏体。以马氏体的组分为例, $A, B$ 和 $C$ 3点处相应的观测值为 $0.8243, 0.7661$ 和 $0.3260$ ,而其计算值为 $0.875, 0.840$ 和 $0.375$ 。计算与实测值相对偏差则为 $+5.8\%, +8.8\%$ 和 $-14.2\%$ 。这种相差,对 $90\%$ 的观测值来说,在 $\pm 10\%$ 之内。

文献〔2〕的板上焊道的计算表明,当峰值温度低于 $1137^\circ\text{C}$ 时不产生马氏体,其作者也发现这与实际不符。前述3点中 $C$ 点的峰值温度约为 $1100^\circ\text{C}$ ,计算得到相当数量的马氏体。虽然偏差较大,但与观测值大体相当。这种差异与时间步长的选取和网格疏密有关。另外,定量观测的精度差也是重要原因。

组织份数变化曲线上的转折点对应了相变点。做为一个例子,图4给出了 $C$ 点处的组织份数的变化。可以看到,当温度升到 $718^\circ\text{C}$ ( $PS$ )时,奥氏体开始形成。这相应于铁素体( $F$ )份数线(相组分)由水平变倾斜的转折点。而升温到 $846.5^\circ\text{C}$ ( $AF_3$ )时,奥氏体化的速度大大加快,奥氏体组份线( $A$ )迅速上升。可以类似地找出冷却时奥氏体分解过程中铁素体,马氏体,贝氏体的组份变化曲线(对应于图4中用 $F, M, B$ 标志的线)。程序中做了如下的规定:当 $T \geq T_L$ 时,全部组分设定为奥氏体。奥氏体的组份线在高温区段时,保持有 $X_A = 1.0$ 的平台,这样的处理对随后冷却过程中的相变没有影响。

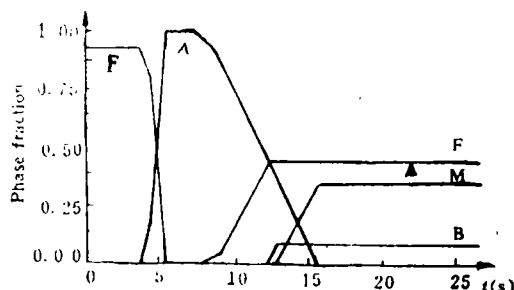


图4 热影响区中一点C的瞬态显微组织变化  
Fig.4 Transient microstructural changes for spot C in HAZ

## 5 结 论

(1) 利用计算机,以三维FEM为基础的焊接过程瞬态显微组织预示的计算模拟设计原理已得到完善。连接了热传导程序块,依据低合金钢相变动力学的经验公式,设计了计算程序。

(2) 已知钢材成分,焊接条件和焊件几何形状,该程序可以算出低合金钢接头,在焊接过程中及焊后的任一瞬间、任一点处,各显微组织的体积份数。

(3) 利用该程序,对手工焊低合金钢一段管线环焊缝的底层焊道进行了试算。计算与实测的结果基本吻合。其间的相对偏差,除个别值外,均在 $\pm 10\%$ 以下。从而验证了这种程序的可靠程度。

(1991年12月23日收到修改稿)

## ● 考 文 献

- 1 Watt, D F et al. An algorithm of modelling microstructural development in weld heat-affected zones (Part A). *Acta Metallurgy*, 1988, 36 (11), 3029~3035
- 2 Henwood C et al. Coupled transient heat transfer—micro structure weld computations (Part B). *Acta Metallurgy*, 1988, 36 (11), 3037~3046
- 3 陈 楚. 数值分析在焊接中的应用. 上海交通大学出版社, 1985.
- 4 Goldak J A et al. Computational heat transfer for weld Mechanics, Proceedings of an Int. Conf. on Trends in Welding Technology, Tennessee, USA, May 18-22, 1986, 15~20
- 5 Goldak J A et al. A new finite element model for welding heat sources. *Metallurgical Transactions B*, 1984, 15B (6), 299~305
- 6 Khorai P. Coupling microstructure to heat transfer computation in weld analysis. A master thesis, Dept of M & A Engineering, Carleton University, Canada, Oct. 1989

**Computer simulation of transient microstructure  
prediction of welding process**

*Zhang Chudong*  
(*Dalian Railway Institute*)

**Abstract** In this research, a transient microstructure-prediction program was designed on the basis of coupling a previous heat transfer program. With the calculation equations for phase change point in the phase diagram and transformation kinetics, it can provide the volume fraction of each kind of possible microstructure at any location in the whole welded joint plus iso-volumetric fraction contours. In comparison with the measured values, the relative difference is about 10%. With this program a practical example, in which a circumferential weld was performed with SMAW, was computed. The material concerned was a low-alloy steel used for pipeling construction. This research verified the realizability and reliability of the program.

**Key words** phase-change simulation; welded joint; computer simulation