

# 双金属复合过程非稳态温度场的研究

刘清梅, 吴振卿, 关绍康, 曹文博

( 郑州大学材料工程学院, 河南 郑州 450002 )

摘 要 :应用数值模拟技术对双金属复合过程中的非稳态温度场进行计算. 由于外材和芯材在凝固过程温度变化的不同特点, 选择不同的权系数计算温度. 同时, 在温度的计算中, 考虑了双金属复合结合界面热阻、凝固过程中释放潜热以及导热系数等各方面因素的影响. 通过热电偶对不同位置的温度值进行采集, 将采集到的温度曲线和模拟的温度曲线进行对比, 结果表明模拟的温度曲线比较能够反映实际温度的变化.

关键词 :双金属 ; 复合 ; 温度场 ; 数值模拟

中图分类号 :TG 142. 72 文献标识码 :A

为了充分发挥两种金属各自的性能特点, 人们往往把两种金属复合在一起, 使复合后的材料在耐磨性、耐腐蚀性等方面有很大的提高<sup>[1]</sup>. 在双金属复合工艺中, 首要的问题就是金属的传热问题. 因此, 有必要对金属复合过程中的温度场进行计算和模拟. 但在实际生产中, 人们却是凭经验进行浇注试验, 而未能从理论上对双金属界面的凝固过程进行模拟. 本文对双金属的凝固过程中的关键问题进行了研究, 为确定双金属复合工艺提供了基础.

## 1 计算模型的建立

### 1.1 数学方程的推导

在双金属复合过程中, 铸件的传热主要以不稳定导热方式进行, 依据傅立叶定律采用微积分方法在直角坐标系推导的基本的数学方程为<sup>[2]</sup>

$$\rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (1)$$

如果考虑铸件在凝固过程中凝固潜热的作用, 则式(1)可以写成

$$\rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q'. \quad (2)$$

其中,  $Q' = \rho L \frac{df_s}{d\tau}$ .

式中:  $\rho$  为密度,  $\text{kg}/\text{cm}^3$ ;  $\lambda$  为导热系数,  $\text{cal}/\text{cm} \cdot \text{s}$ ;  $C_p$  为比热,  $\text{cal}/\text{kg}$ ;  $L$  为潜热,  $\text{cal}/^\circ\text{C}$ ;  $f_s$  为固相率,  $\text{s} \cdot \text{cm}^3/\text{kg}$ ;  $T$  为凝固温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $\tau$  为凝固时间,  $\text{s}$ .

### 1.2 区域离散化处理

所谓离散化, 就是把几何上连续的区域用一系列网格线把它划分开. 图 1(a) 为双金属复合锤头的试验模型, 图 1(b) 是局部的网格图, 在母材与芯材的结合面处, 由于温度的变化剧烈, 所以网格的划分要细.

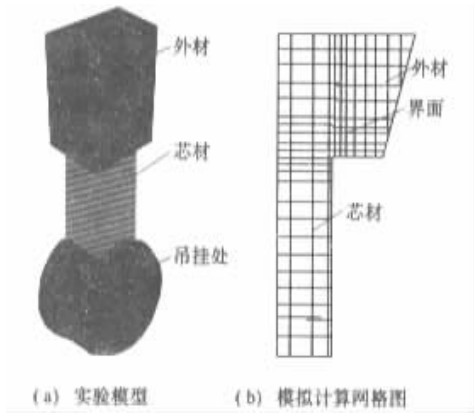


图 1 复合锤头模型

Fig.1 The model of composite hammerhead

离散化后有:  $\Delta x = x_i - x_{i-1}$ ,  $\Delta y = y_i - y_{i-1}$ , 时间轴可以理解为垂直于  $x - y$  轴平面, 也将它离散化,  $\tau = \tau_n = n \Delta \tau$  ( $n$  为正整数). 区域内节点  $(i, j)$  在  $\tau_n$  时刻的温度记为  $T_{ij}^n$ . 式(1)应用于节点  $(i, j)$  写成

$$\mu \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)_{i,j}^{n+1} + (1 - \mu) \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \right)$$

收稿日期 2002 - 06 - 10, 修订日期 2002 - 08 - 07

基金项目 河南省自然科学基金资助项目(0111032300)

作者简介: 刘清梅(1979 - ), 女, 江西省赣州市人, 郑州大学硕士研究生.

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right)_{i,j}^n = \frac{\rho \cdot C_p}{\lambda} \left(\frac{\partial T}{\partial \tau}\right)_{i,j}^n. \quad (3)$$

其中  $\mu$  是一种权系数  $\mu \in [0, 1]$ .

相应的差分方程为

$$\left[\frac{T_{i+1,j}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1} + T_{i-1,j}^{n+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j+1}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1} + T_{i,j-1}^{n+1}}{(\Delta y)^2}\right] +$$
$$(1-\mu) \left[\frac{T_{i+1,j}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i-1,j}^n}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j+1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j-1}^n}{(\Delta y)^2}\right] =$$
$$\frac{\rho \cdot C_p}{\lambda} \cdot \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta \tau}. \quad (4)$$

当  $\mu = 0$  时,为显式格式:

$$\frac{T_{i+1,j}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i-1,j}^n}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j+1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j-1}^n}{(\Delta y)^2} =$$
$$\frac{\rho \cdot C_p}{\lambda} \cdot \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta \tau}. \quad (5)$$

应用显式格式进行计算时,为保证解的稳定性,必须要求

$$\frac{\lambda \Delta \tau}{\rho C_p (\Delta x)^2} \leq \frac{1}{4}, \quad \frac{\lambda \Delta \tau}{\rho C_p (\Delta y)^2} \leq \frac{1}{4}.$$

当  $\mu = 1$  时,为完全隐式格式

$$\frac{T_{i+1,j}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1} + T_{i-1,j}^{n+1}}{(\Delta x)^2} +$$
$$\frac{T_{i,j+1}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1} + T_{i,j-1}^{n+1}}{(\Delta y)^2} = \frac{\rho \cdot C_p}{\lambda} \cdot \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta \tau}. \quad (6)$$

在进行两种材料温度的计算时,由于外层材料的初始温度是已知的,选择  $\mu$  的值为 0 进行显式的计算就可以达到需要的准确程度;而对于芯材,由于要通过前一点的温度来计算出下一点的温度,才可以使得计算的准确程度提高,所以选择  $\mu$  为 1.

2 温度计算中应注意的几个问题

2.1 界面复合层差分方程的建立

在双金属复合过程中,由于两种金属的导热系数不同,在界面结合过程中分界面上存在接触热阻,在计算中要把它考虑到.在如图 2 所示的复合界面网络扩大示意图中,接触热阻用等效换热系数  $h_i$  表示,节点 1、2、4 的温度分别等于节点 3、6、8 的温度,此时在交界面上节点 1 的差分方程为

$$(\lambda_1 + \lambda_2) \left(\frac{\Delta y}{2\Delta x}\right) (T_2 - T_1) + \lambda_2 \left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right) (T_7 -$$
$$T_1) + (\lambda_1 + \lambda_2) \left(\frac{\Delta y}{2\Delta x}\right) (T_4 - T_1) + \lambda_1 \left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right) (T_5 -$$
$$T_1) = 0, \quad (7)$$

如果存在接触热阻,同一节点的差分方程变为

$$\lambda_1 \left(\frac{\Delta y}{2\Delta x}\right) (T_2 - T_1) + h_i (\Delta x) (T_3 - T_1) +$$
$$\lambda_1 \left(\frac{\Delta y}{2\Delta x}\right) (T_4 - T_1) + \lambda_1 \left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right) (T_5 - T_1) = 0. \quad (8)$$

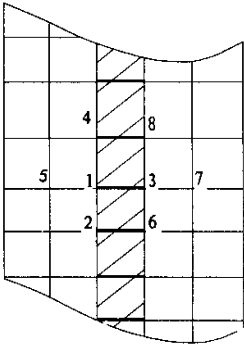


图 2 复合界面网络扩大示意图

Fig.2 Amplification gridding figure of composite interface

2.2 双金属复合过程中潜热的处理

液态金属在冷却过程中应释放潜热而减缓铸件的冷却,从而改变温度场的分布.因此,要获得准确的模拟结果,就必须对结晶潜热进行适当的处理.处理潜热释放的方法有多种,在此主要介绍等价比热法<sup>[3]</sup>.考虑的比热包括两部分:物体真正的比热和潜热引起的比热的增加.将导热数学模型式(2)整理可得到

$$\rho \left( C_p - L \frac{\partial f_s}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) +$$
$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (9)$$

式中:  $C_p - L \frac{\partial f_s}{\partial T}$  称为等价比热,在数值计算过程中,当温度变化处于潜热释放区域内时,采用等价比热代替  $C_p$  进行温度计算.

2.3 导热系数的处理

对温度场有直接影响的物性是导热系数,在温度差别比较大的区域,导热系数实际上是变化的.本文给出了计算导热系数的方法.

节点  $i$  与  $j$  两点间的热导为  $K_{ij}$ ,表示为

$$K_{i,j} = \frac{k(T_i) + k(T_j)}{2} \cdot \frac{A_{i,j}}{L_{i,j}}. \quad (10)$$

式中:  $k(T_i)$  与  $k(T_j)$  为节点  $i, j$  在温度  $T_i, T_j$  下的导热系数;  $L_{ij}$  为节点  $i$  与  $j$  的距离;  $A_{ij}$  为热流在  $i$  到  $j$  的平均垂直面积.为了便于计算,通常将导热系数随温度的变化规律  $k(T)$  整理成函数关系(用最小乘法得到离散实验点拟合曲线,进而写出函数关系).

从式(10)中可以看到,  $K_{i,j}$  计算依赖于  $k(T_i)$  和  $k(T_j)$ ,也就是依赖于温度场.因此,可以采用

迭代运算. 计算步骤如下:

- (1) 假定温度分布, 给未知温度的节点赋以一定的值作为零次近似值  $T_i^{(0)}$ ,  $K=0$ ;
- (2) 根据  $T_i^{(0)}$ , 由导热系数随温度的关系计算  $k$  的分布  $k_i^{(K)}$ ,  $K=0$ ;
- (3) 按式 (10) 计算热导的分布  $K_{i,j}$ ;
- (4) 由差分格式的代数方程组计算温度分布的新值  $T_i^{(K+1)}$ ;
- (5) 判别温度分布的新值与旧值之差是否达到小于收敛指标  $e_1$  的要求, 用迭代法运算直到  $T_i^{(K)}$  收敛,  $K$  为正整数;
- (6) 用  $T_i^{(K+1)}$  重复第 (2) 步, 计算新的  $k$  分布  $k_i^{(K+1)}$ ,  $K=0$ ;
- (7) 重复步骤 (3) 至 (4), 直到  $k_i^{(K+1)}$  与  $k_i^{(K)}$

达到小于收敛指标  $e_2$  的要求,  $K$  为正整数.

### 3 温度场模拟

实验过程为: 双金属材料分别为高铬铸铁和中碳钢, 高铬铸铁作为外材, 芯材为中碳钢. 高铬铸铁的浇注温度为  $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 中碳钢进行预热, 预热温度为  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 在母材和芯材里间隔一定的位置放置铂-铑热电偶进行各点温度的采集. 图 3 (a) 和图 3 (b) 分别为浇注  $1\text{ min}$  和  $5\text{ min}$  时的温度曲线. 曲线  $a$  为实际采集到的温度曲线, 曲线  $b$  为考虑各个影响因素的模拟温度曲线, 曲线  $c$  为不考虑各个影响因素的模拟温度曲线,  $x$  为从外材表面到芯材中心的等分点.

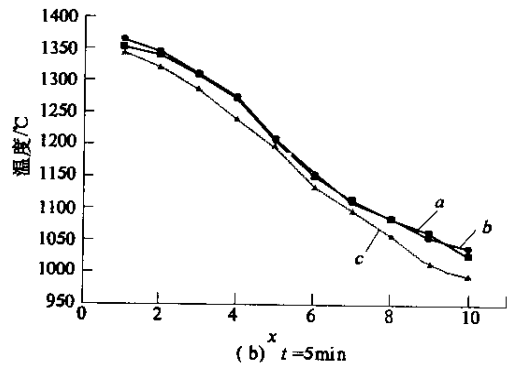
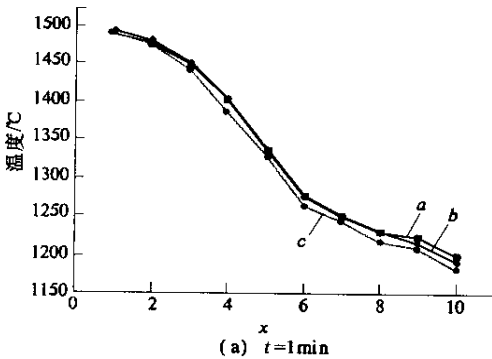


图 3 实际温度曲线与模拟温度曲线的比较

Fig.3 The compare of actual temperature curve and simulating temperature curve

由图 3 (a) (b) 可以看出, 通过模拟可以预测温度的变化, 得出不同时刻的温度曲线. 比较图 (a) 和图 (b), 温度曲线  $a$  和  $b$  比较接近, 而对于不考虑各个影响因素的曲线  $c$ , 温度误差随着时间的增加而加大, 所以在温度场的模拟中, 对于各个不同的影响因素给以考虑会使结果和实际更加接近.

### 4 结束语

本文总结了双金属复合过程中温度场数值模拟的数学模型和相应的数值计算方法. 而且对在双金属复合过程中不同材料间温度的推导、金属冷却过程中潜热的处理以及温度变化中导热系数

的处理等影响因素进行了相应的考虑, 提出了在复合层计算温度值的方法. 将经过采集的温度曲线和模拟的温度曲线进行对比, 以及对双金属复合过程温度场进行模拟可以为实际生产提供提前预知温度分布.

### 参考文献:

- [1] 荆涛, 柳百成. 微机在铸造工艺与设备中的应用 [J]. 中国铸造装备与技术, 1997 (2): 34-36.
- [2] 朱安贞, 高义民. 镶铸铸件数值模拟及其热裂倾向性的判定 [J]. 热加工工艺, 1999 (5): 3-4.
- [3] 王寿彭. 铸件形成理论及工艺基础 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1994.

## Unstable Temperature Field Simulation of Bimetallic Composite Casting Process

( College of Materials Engineering ,Zhengzhou University ,Zhengzhou 450002 ,China )

**Abstract :** This paper uses numerical simulation technique to simulate unstable temperature field in the process of bimetallic composite casting. Choosing different coefficient to calculate temperature changing in the process of solidification to outer – material and inner – material. At the same time ,various kinds of influencing factors such as heating hinder ,latent heat and conduct coefficient during calculate temperature are taken into account .Temperature at different positions are taken and a comparison is made with simulation temperature curves .The simulation curves of temperature can display the actual changes of temperature .

**Key words :** bimetal ; composite ; temperature field ; numerical simulation

( 上接第 29 页 )

参考文献 :

[ 1 ] 魏文光 . 金属的力学性能测试 [ M ]. 北京 : 科学出版社 ,1980 .

[ 2 ] SURESH S . 材料的疲劳 [ M ]. 王中光 ,译 . 北京 : 机械工业出版社 ,1993 .

[ 3 ] 美国金属学会 . 金属手册( 第八卷 ) [ M ]. 第九版 . 北京 : 机械工业出版社 ,1994 .

[ 4 ] 程育仁 ,廖龙秀 ,侯炳麟 . 疲劳强度 [ M ]. 北京 : 中国铁道出版社 ,1990 .

[ 5 ] CASTILLO E ,CAMTELI A F , HADI A S . On fitting a fatigue model to data [ J ]. International Journal of Fatigue , 1999 21( 2 ) :97-106 .

[ 6 ] 中国航空研究院 . 军用飞机疲劳、损伤容限、耐久性设计手册 [ M ]. 北京 : 中国航空研究院出版社 ,1994

[ 7 ] 赵少汴 ,王忠保 . 抗疲劳设计——方法与数据 [ M ]. 北京 : 机械工业出版社 ,1997 .

[ 8 ] 丁遂栋 . 结构钢光试样非对称循环疲劳极限的估算 [ J ]. 机械强度 ,1997 ,19( 1 ) :45-47 .

[ 9 ] 丁遂栋 ,张 兰 . 铝合金缺口试样非对称循环疲劳极限的估算 [ J ]. 机械强度 ,1999 21( 4 ) :292-295 .

[ 10 ] 丁遂栋 ,董汉丽 . 铝合金光试样的  $R - S - N$  曲线和等寿命图 [ J ]. 机械强度 2000 22( 2 ) :139-141 .

[ 11 ] 丁遂栋 ,丁海川 . 结构钢光试样的  $R - S - N$  曲线和等寿命图 [ J ]. 机械强度 2000 22( 4 ) :319-320 .

[ 12 ] 丁遂栋 ,丁海川 . 结构钢缺口试样  $R - S - N$  曲线和等寿命图 [ J ]. 机械强度 2001 23( 1 ) :123-124 .

Estimating Formula of Fatigue Limits for Metallic Materials

LI Hai – mei , SONG Gang , LIU Yong – zhi

( College of Material Engineering ,Zhengzhou University , Zhengzhou 450002 ,China )

**Abstract :** A convenient numeration for fatigue limit is presented based on confirming the value of the parameter about estimating formula of fatigue limits for metallic materials , which is given by DING Sui-dong in reference [ 8 ~ 12 ]. The figure for metal life contour lines has also been made by AUTOLISP. The calculations with the formula are in agreement with the experiments data very well , which are useful in engineering applications .

**Key words :** fatigue limit ;  $S - N$  curves ; estimating formula