

# 白口铸铁焊补温度场的数值模拟<sup>\*</sup>

邹增大 王新洪 曲仕尧  
(济南 山东工业大学)

**摘 要** 应用有限元方法建立了白口铸铁焊接接头焊补温度场的数学模型, 对白口铸铁焊补温度场和热循环进行了分析。研究表明: 焊后初期冷却速度很快(约 400℃/s); 焊补接头的温度分布极不均匀; 热影响区中特别是靠近熔合区处存在较大的温度梯度, 是焊接接头产生裂纹的重要因素。计算值与实测值进行了对比, 结果基本吻合。

**关键词:** 白口铸铁 温度场 热循环 数值模拟

## 0 序 言

白口铸铁硬、脆, 线膨胀系数大。焊补过程中, 焊补热源温度高而且集中, 焊补部位产生很大的温度梯度, 造成局部应力集中, 使接头产生很大的残余应力。焊后冷速快导致硬、脆组织的产生, 在没有特殊工艺措施的情况下, 产生焊补裂纹是不可避免的<sup>[1]</sup>。为了防止裂纹的产生, 一方面必须改善接头的组织性能; 另一方面必须从工艺上减少焊接应力。要预测焊接应力的大小和分布规律, 就必须准确地分析焊补温度场和热循环的分布。为此, 本文采用有限元法模拟白口铸铁焊补过程, 分析焊补接头的温度场变化, 为制订正确的焊补工艺、改善接头的性能提供理论依据。

## 1 有限元模型的建立

### 1.1 模型的简化

为了更好地分析白口铸铁的焊补过程, 将实际的焊补问题抽象为有限元模型。实际试件为长正方体(210mm×210mm×30mm), 由于边缘受热的影响较小, 模型简化为以边长为直径的圆盘, 采用轴对称的焊接热传导有限元模型进行分析<sup>[4]</sup>。计算几何模型如图 1 所示。

#### 1.1.1 热源模型

采用高斯正态分布的数学模型来描述焊接电弧的热流分布

$$q(r) = q_m e^{-kr^2} \cdot e^{-kv(t-\tau)} \quad (1)$$

式中

$k = \frac{3}{\bar{r}^2}$  表示热流集中程度的常数

$\bar{r}$  ——有效加热半径, 随焊接方法和焊接规范而

变

$r$  ——所研究点到热源中心的距离

$v$  ——焊接速度,  $t$  ——焊接时间,  $\tau$  ——时间间隔

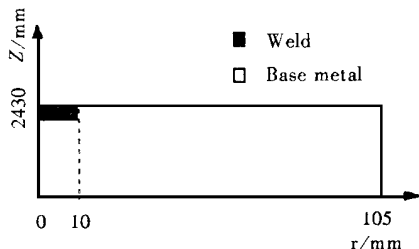


图 1 白口铸铁焊补试件几何模型

Fig 1 Geometrical model of weld-repaired white cast iron

<sup>\*</sup> 山东省自然科学基金资助项目, 编号为 Y95F0881。

$$q_m = \frac{q}{\int \int_{\Omega^e} e^{-kr^2} d\Omega}$$
 为最大比热流

$$q = 0.24 \eta IU$$
 为电弧有效功率

$I$ ——焊接电流,  $U$ ——焊接电压,  $\eta$ ——焊接热效率

由于焊补时沿直径方向的移动速度  $v$  几乎为 0, 则

$$q(r) = q_m e^{-kr^2}$$
 (2)

1.1.2 白口 铸铁物理性能参数

热物理性能比热  $C$ 、导热系数  $\lambda$  和换热系数  $\beta$  是温度的函数, 本文采用分段线性法, 即在不同温度范围内, 将  $C$ 、 $\lambda$  和  $\beta$  表示成直线(图 2)。

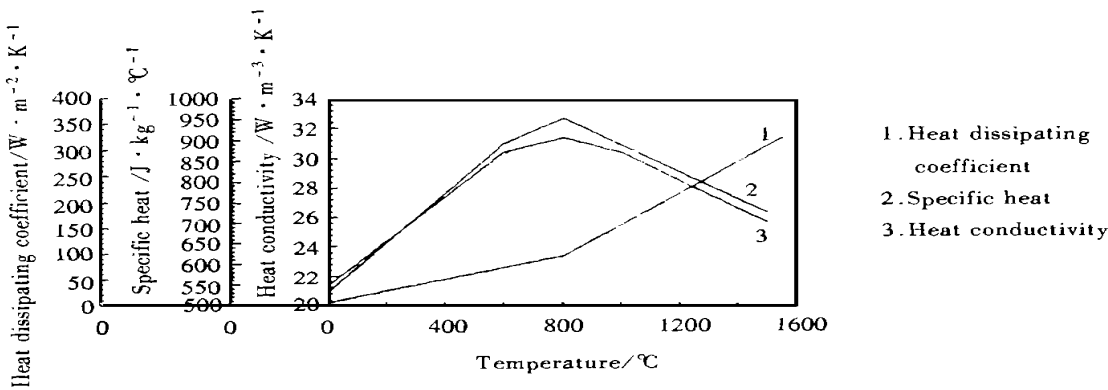


图 2 白口铸铁的  $C, \lambda, \beta$  与温度  $T$  的关系  
Fig 2 Relation between heat conductivity, specific heat, heat dissipating coefficient for white cast iron and temperature

1.1.3 熔化潜热

假定焊缝熔敷金属开始熔化与凝固温度均为材料的熔点  $T_m$ , 当节点温度达到  $T_m$  时, 将熔化潜热加入单元, 并作内热源处理。忽略固态相变潜热。

1.1.4 时间步长

根据焊补热循环的特征, 加热阶段和冷却初期的温度变化剧烈, 而冷却到低温时温度变化缓慢, 因此采用变步长处理。开始时取小的时间间隔, 冷却到一定温度以后逐渐增大。

1.2 热传导控制方程

1.2.1 热平衡方程

在空间域  $\Omega$  中, 任一点的温度  $T$  是空间坐标  $(r, z)$  和时间  $t$  的函数, 符合下列的二次微分方程, 即热传导方程:

$$\lambda \nabla(T) - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \overline{Q} = 0$$
 (3)

对于轴对称问题, 热传导方程为:

$$\lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \overline{Q} = 0$$
 (4)

式中  $\overline{Q}$  ——在域  $\Omega$  中的内热源,  $\lambda$  ——导热系数,  $c$  ——比热容,  $\rho$  ——密度

1.2.2 边界条件与初始条件

(1)边界条件

第一类边界条件为边界表面温度分布已知:

$$T=T_1 \tag{5}$$

第二类边界条件为表面热交换条件已知:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n}=-\beta(T-T_\alpha) \tag{6}$$

式中  $n$  ——边界表面外法线方向,  $\beta$  ——换热系数,  $T_\alpha$  ——周围介质温度

(2)初始条件

对于点 $(r,z)\in\Omega$  必须满足初始条件

$$T(r,z,0)=T_0(r,z) \tag{7}$$

偏微分方程式(3)和边界条件式(5)、(6)及初始条件式(7)协调,有唯一的解。

1.2.3 有限元矩阵及时间域离散

(1)白口铸铁焊接热传导有限元矩阵表达式

$$[K]\{T\}+[C]\frac{\partial\{T\}}{\partial t}=\{F\} \tag{8}$$

式中:热导矩阵 $[K]=\sum [K]^e$ ,热容矩阵 $[C]=\sum [C]^e$ ,热流矢量 $\{F\}=\sum \{F\}^e$

$$\left. \begin{aligned} [K]^e &= \int_{\Omega^e} \left( \frac{\partial [N]^T}{\partial r} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \right) \lambda \frac{\partial [N]}{\partial r} + \frac{\partial [N]}{\partial z} d\Omega + \int_{\Gamma^e} [N]^T \beta [N] d\Gamma \\ [C]^e &= \int_{\Omega^e} [N]^T \rho [N] d\Omega \\ \{F\}^e &= \int_{\Omega^e} [N]^T \bar{Q} d\Omega + \int_{\Gamma^e} [N]^T \beta T_\alpha d\Gamma \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

(2)时间域离散

采用有限差分法进行时间域上离散

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial\{T\}}{\partial t} &= \frac{\{T\}^{(t+\Delta t)} - \{T\}^{(t)}}{\Delta t} \\ \{T\} &= \frac{2}{3}\{T\}^{(t+\Delta t)} + \frac{1}{3}\{T\}^{(t)} \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

将式(10)代入式(9)可得

$$([C] + \frac{2}{3}\Delta t[K])\{T\}^{(t+\Delta t)} = \Delta t(\frac{1}{3}\{F\}\{T\}^{(t)} + \frac{2}{3}\{F\}^{(t+\Delta t)}) + ([C] - \frac{1}{3}\Delta t[K])\{T\}^{(t)} \tag{11}$$

2 计算结果与讨论

试验材料为 2C10Cr 高铬白口铸铁,采用手工电弧焊进行焊补,径向焊补速度为 0,焊补电流  $I=180A$ ,焊补电压  $U=25V$ ,热效率  $\eta=0.75$ ,电弧有效加热半径  $r=0.71cm$ ,加热时间  $t=15s$ ,采用三角单元进行离散,单元总数 540,节点总数 304。在整个计算过程中取三个不等时间步长  $\Delta t_1=0.1s$  ( $t=0\sim70s$ ),  $\Delta t_2=0.2s$  ( $t=70\sim140s$ ),  $\Delta t_3=1s$  ( $t=140s$  以上),由于步长较小,在每个时间间隔内不进行迭代已可收敛。

图 3 是试件上表面各点温度计算值与实测值的对比,从图 3 可以看出熔合线附近高温时温度的计算值与实测值之间误差较大,但在加热初期与冷却后期相对误差较小。远离焊接区处温度的

计算值与实测值相差较小, 相对误差在 15% 以内。此外, 从图还可以得到, 焊接结束初期, 熔合区附近冷却速度很大(约 400 ~ 450 °C/s)。

图 4 是 Z 轴方向各点的热循环曲线, 从图中可以看出温度沿厚度方向的分布极不均匀, 试件表面附近的焊缝处温度高且变化快。

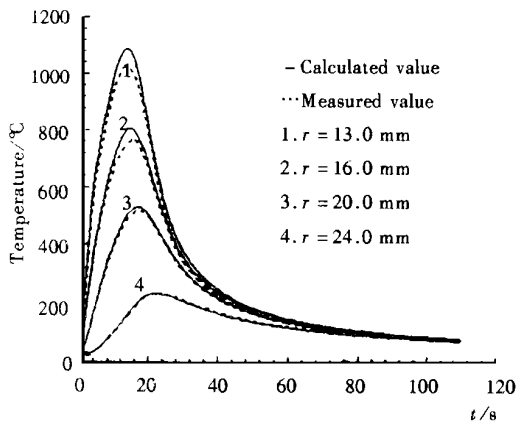


图 3 焊件上表面热循环曲线

Fig. 3 Heat cycle for top of workpiece

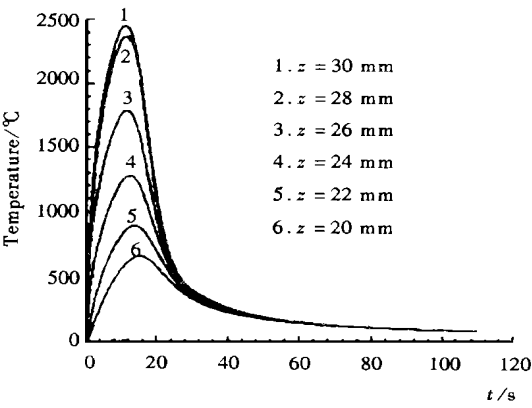


图 4 中心轴(r=0 处)各点的热循环曲线

Fig. 4 Heat cycle of symmetric axle

图 5 是焊件上表面最高温度分布图, 从图中可以看出焊接接头的温度分布是非常不均匀的, 在熔合线附近存在很大的温度梯度, 造成该区域产生很大的残余应力。

图 6 是焊件上表面温度梯度的分布图, 曲线 1 是焊缝刚恢复弹性的温度梯度, 曲线 2 是完全恢复弹性的温度梯度, 从图中可以看出在热影响区距焊缝中心约 20mm 处有最大的温度梯度, 并且变化剧烈, 因此该处在冷却过程中会产生很大的温差应力。

图 7 是焊补接头温度场分布, 焊后初期高温主要集中在焊补区域, 这将导致焊接裂纹形成。随着时间的推移, 接头各点的温度差逐步缩小并趋向相同。

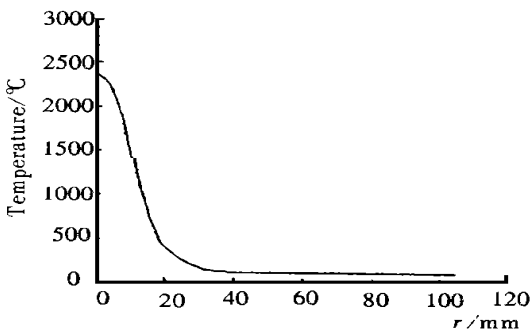


图 5 焊件上表面最高温度变化曲线

Fig. 5 Maximum temperature distribution along top of workpiece

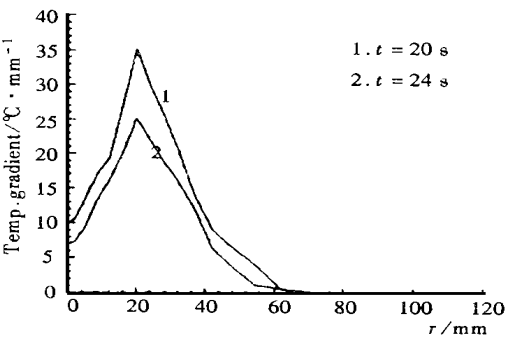


图 6 焊件上表面温度梯度分布

Fig. 6 Temperature gradient distribution along top of workpiece

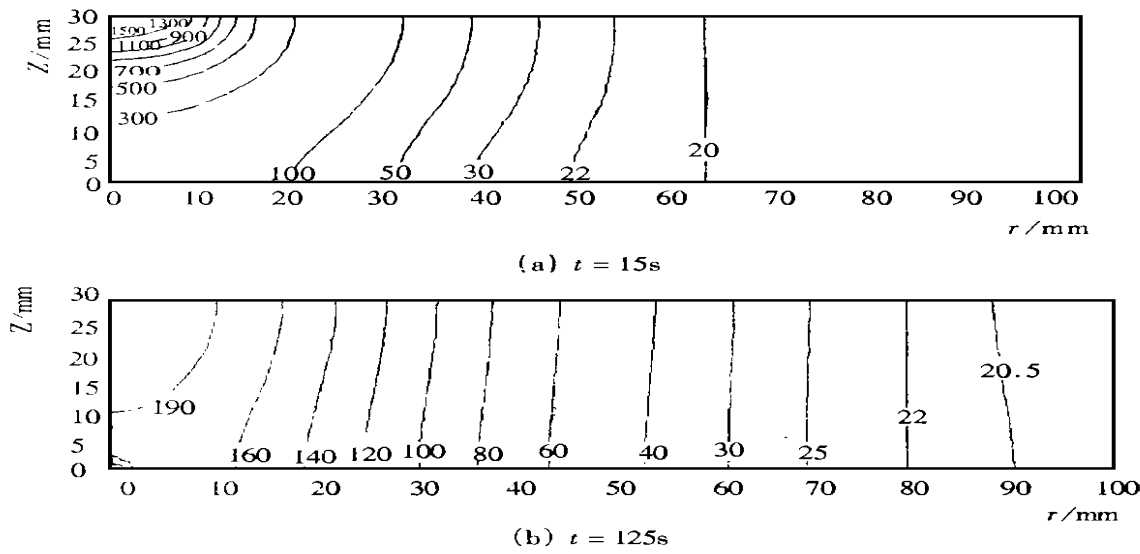


图 7 焊补接头各个时刻的温度分布  
Fig. 7 Temperature profiles in weld joint

3 结 论

- (1) 白口铸铁焊补热过程属非线性传热问题, 本研究通过数值模拟, 建立了焊补温度场的有限元计算模型。
- (2) 研究指出, 熔合区附近冷却速度很大(约  $400\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ), 温度梯度也最大。因此, 冷却后此处极易产生脆硬组织并出现很大的焊接应力, 是裂纹产生和扩展的敏感区。
- (3) 研究表明, 计算的温度场分布及变化规律与实测结果基本吻合。虽然低温区误差在  $15\%$  以下, 但由于热源的简化, 材料物理性能采用分段线性法, 热源采用内热源处理等使高温区尚有较大的误差, 因此有待于进一步深入研究。

(1998-06-23 收到初稿, 1998-11-16 收到修改稿)

参 考 文 献

1 邹增大等. 白口铸铁轧辊焊补的研究. 山东工业大学学报, 1989, 19(4): 35 ~ 43  
2 陈 楚等. 轴对称热弹性应力有限元分析在焊接中的应用. 焊接学报, 1987, 8(4): 196 ~ 204

## Numerical Simulation of Temperature Field for Weld—repaired Zone of White Cast Iron

*Zou Zengda, Wang Xinhong, Qu Shiyao*  
(*Shandong University of Technology, Jinan*)

**Abstract** Using the finite element method, a mathematical model of temperature field for weld—repaired zone of white cast iron is constructed, and temperature field and heat cycle are analyzed. It is shown that the cooling rate is fast at the beginning of cool—down (about  $400^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ), the temperature distribution of welded joint is non—uniform, and the maximum temperature gradient occurs in the area near weld fusion line, which may cause crack. In addition, the excellent agreement between the calculated and measured values is shown.

**Key words** white cast iron, temperature field, heat cycle, numerical simulation

---

**作者简介** 邹增大, 男, 教授, 博士生导师, 山东工业大学校长。1941 年出生, 1965 年毕业于山东工业大学, 主要从事焊接冶金及金属焊接性、陶瓷与金属连接等方面的研究, 曾获国家发明二等奖、国家发明三等奖。在国内外重要刊物发表论文 50 余篇。任中国机械工程学会焊接学会常务理事、山东省科协副主席、焊接学报编委会副主任。国家有突出贡献中青年专家, 山东省专业技术拔尖人才, 国务院政府特殊津贴享受者。