

## 高碳钢连铸坯加热脱碳的有限元模拟

黄 灿 杭乃勤 张细菊 刘 丹 熊建良 董素梅 欧阳标  
(武汉科技大学材料与冶金学院, 武汉 430081) (武汉钢铁(集团)公司, 武汉 430083)

**摘 要** 进行了 0.72% C-1.30% Mn U71Mn 高碳钢 250 mm × 280 mm × 6 000 mm 连铸坯加热时的传热有限元模拟和通过非线性回归分析, 得出钢坯在加热后钢坯脱碳深度  $d$  (mm) 与加热前脱碳深度  $d_0$  (mm)、钢坯表面温度  $T$  (K) 和加热时间  $t$  (min) 之间关系的数学模型:  $d = d_0 + (2.132 \times 10^{-7} T^2 - 0.000 2 T + 0.016 3) \cdot (0.208 \sqrt{t} - d_0)$ 。实测结果表明, 模型的相对预报误差  $\leq 3.2\%$ 。根据模型计算得出铸坯的优化工艺为预热段 1 150 °C 86 min, 加热段 1 250 °C 131 min, 均热段 1 230 °C 68 min。检验结果表明, 采用优化工艺, 成品脱碳深度可降低 20% 左右。

**关键词** 有限元模拟 铸坯 温度分布 脱碳深度 预报模型

## Finite Element Simulation on Decarburization of Concasting Billet of High Carbon Steel during Reheating

Huang Can, Hang Naiqin, Zhang Xiju and Liu Dan  
(School of Materials Science and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Xiong Jianliang, Dong Sumei and Ouyang Biao  
(Wuhan Iron and Steel (Group) Co, Wuhan 430083)

**Abstract** The finite element simulation of heat transfer during heating of 250 mm × 280 mm × 6 000 mm concasting billet of 0.72C-1.30Mn high carbon steel U71Mn has been carried out and by non-linear regression analysis, the mathematical model for relation between decarburization depth  $d$  (mm) of steel billet with decarburization depth  $d_0$  (mm) before reheating, surface temperature  $T$  (K) of billet and reheating time:  $d = d_0 + (2.132 \times 10^{-7} T^2 - 0.000 2 T + 0.016 3) \cdot (0.208 \sqrt{t} - d_0)$  is obtained. The measured results showed that the relative prediction error was  $\leq 3.2\%$ . Based on calculation by the model, it is obtained that the optimum reheating procedure is 1 150 °C for 86 min at preheating zone, 1 250 °C for 131 min at heating zone and 1 230 °C for 68 min at soaking zone. The examination results showed that using optimum reheating procedure the decarburization of products decreased about 20%.

**Material Index** Finite Element Method, Casting Billet, Temperature Distribution, Decarburization Depth, Prediction Model

高碳钢在加热时具有脱碳倾向, 表面脱碳会使产品硬度、强度降低, 从而影响钢材的耐疲劳及耐磨性能<sup>[1]</sup>。

本文对加热过程中连铸坯断面温度场进行 FEM 模拟, 得到坯料在加热炉中表面温度变化规律及断面温度场。通过试验研究, 追踪连铸坯在加热过程中脱碳层的变化, 弄清脱碳层深度与原始脱碳深度、加热时间和加热温度之间的定量关系, 为改进工艺制度提供可靠的理论依据。

### 1 连铸坯加热温度的 FEM 模拟

#### 1.1 钢坯加热时的传热模型

在步进式加热炉内, 连铸坯靠炉气、炉墙的辐射和炉气的对流来加热。可认为钢坯沿长度方向温度均匀, 且无内热源, 因此传热视为二维非稳态导热。导热方程为<sup>[2]</sup>:

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

式中:  $T$ -钢坯的瞬态温度;  $t$ -加热时间;  $\rho$ -钢坯的密度;  $c$ -钢坯的比热;  $\lambda$ -钢坯的导热系数;  $x, y$ -分别为钢坯宽度和厚度方向的坐标。

$$\text{初始条件: } t = 0, T(0, x, y) = T_0 \quad (2)$$

式中:  $T_0$  为钢坯加热的初始温度场。

边界条件:  $t > 0$ , 作为对称轴的边界为绝热边界。上下边界为辐射、对流传热:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = q_f + q_r \quad (3)$$

$$q_f = h_f \cdot (T_g - T) \quad (4)$$

$$q_r = \sigma_{\text{gsm}} \cdot \left[ \left( \frac{T_g}{100} \right)^4 - \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right] \quad (5)$$

式中:  $q_f$  和  $q_r$  分别为对流和辐射的热流密度,  $h_f$  是对流换热系数,  $T_g$  为炉气温度,  $\sigma_{\text{gsm}}$  是辐射系数。

钢坯的侧面边界:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = (q_f + q_r) \cdot \frac{c}{h} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 + \left( \frac{h}{c} \right)^2} + \frac{h}{c} \right] \quad (6)$$

式中:  $h$ - 钢坯的厚度;  $c$ - 炉内钢坯之间的间隙。

### 1.2 FEM 模拟计算结果

矩形连铸坯的尺寸为 250 mm × 280 mm × 6 000 mm, 考虑到钢坯受热的对称性, 取横截面的 1/4 为研究对象, 用三角形单元离散, 如图 1(a) 所示。时间步长取总加热时间的 1/100, 用有限元法计算出上述方程的数值解<sup>[3]</sup>。坯料断面的瞬态温度场如图 1(b) 所示, 由图 1(b) 可知, 钢坯表面的圆角部位温度最高, 钢坯圆角部位的脱碳深度应最大, 这与检验结果相符。

钢坯加热时表面温度随时间的变化曲线如图 2 所示, 加热的最初阶段表面温度几乎呈线性增加, 后面阶段则呈渐近线逐渐趋近出炉温度。

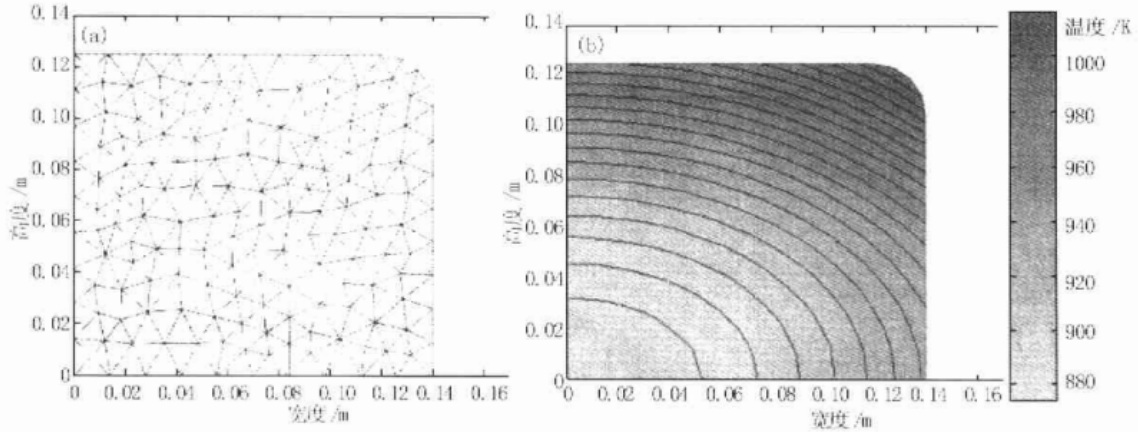


图 1 钢坯断面的有限单元划分(a)和瞬态温度分布(b)

Fig.1 Finite meshes (a) and calculated transient temperature (b) at section of steel billet

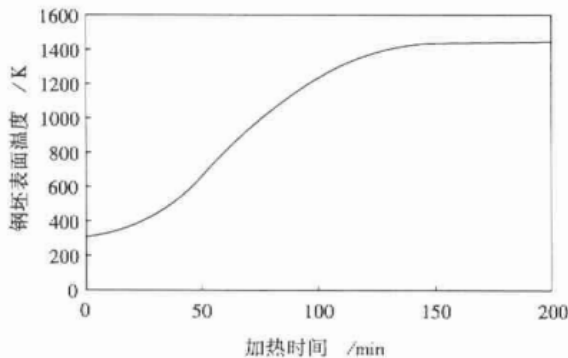


图 2 钢坯表面温度随时间的变化

Fig.2 Change of surface temperature of billet with heating time

试验所用试样取自 U71Mn 连铸坯, 化学成分如表 1 所示。为研究其表面脱碳的情况, 试样沿连铸坯断面的表面截取。

表 1 试样的化学成分/%  
Table 1 Chemical compositions of specimen /%

C	Si	Mn	P	S
0.72	0.25	1.30	0.02	0.02

加热试验在电阻式加热炉中进行, 根据加热炉中钢坯表面温度变化的模拟结果, 将加热过程划分为 3 个阶段, 每个阶段的炉温随时间按线性关系连续升高。表 2 给出具体试验参数, 试样编号中的 x 表示多个试样。

### 2.2 实验结果分析

在加热后的试样上, 选择一个垂直于脱碳面

## 2 脱碳模型的实验研究

### 2.1 坯料加热实验

表2 加热实验的实验方法  
Table 2 The plan of heating experiment

试样 编号	第1阶段		第2阶段		第3阶段	
	温度/°C	时间/min	温度/°C	时间/min	温度/°C	时间/min
1-x	20~500	60	500~1 000	100	1 150	60
2-x	20~700	70	700~1 050	120	1 200	60
3-x	20~900	80	900~1 100	140	1 250	60

且没有卷边和倒角的面,将其磨成金相面并抛光,用4%硝酸乙醇溶液腐蚀大约5 s。按照“GB224-1978钢的脱碳层深度测定法”,分别用显微组织法和硬度法来测定试样的脱碳层深度<sup>[4]</sup>。

显微组织法是将吹干了的试样置于 ZEISS Axioplan2 imaging 金相显微镜下,观察磨光面的显

微组织,测定其脱碳层深度。测定时观察试样的脱碳边,以存在铁素体组织的最大深度作为脱碳层深度;维氏硬度法用 Akashi HM-114 硬度计,选用500 g的负荷,由试样边缘起间隔0.5 mm连续测量试样磨光面的显微维氏硬度,以硬度变化趋于平缓的起始点作为脱碳层深度。

由图3可看出,加热前后 U71Mn 连铸坯的脱碳层都由全脱碳层和部分脱碳层两部分组成,全脱碳层全部为铁素体组织,是由试样边缘至最初发现有珠光体或其他组织的部分;部分脱碳层是和基体组织有差异的区域,是从发现珠光体或其他组织开始至钢的基体组织的部分。

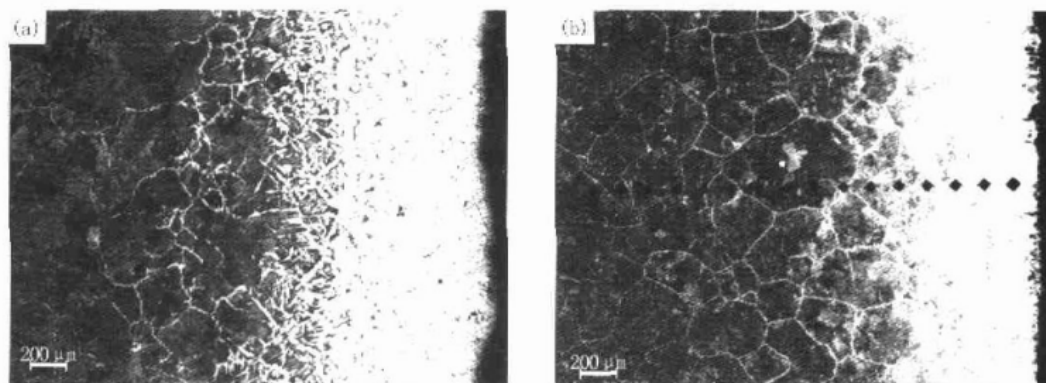


图3 U71Mn 钢连铸坯的脱碳组织 ×50:(a) 加热前;(b) 加热后  
Fig.3 Morphology of decarburization structure of steel U71Mn ×50: (a) before heating; (b) after heating

由于连铸坯加热前具有原始脱碳层,因此开始加热阶段表面脱碳层有一个缓慢减少的过程,之后才随着加热温度的升高和加热时间的延长而逐渐增加,并且全脱碳层增加不明显而部分脱碳层增加明显。这是因为加热过程中钢坯表面脱碳可分解为脱碳和氧化两个彼此独立的过程,脱碳层深度的变化反映出这两个过程作用的强弱<sup>[5]</sup>。

### 2.3 脱碳深度计算模型

根据上述加热实验所得的实验数据,进行非线性回归分析,得到钢坯在加热时表面脱碳深度的数学模型如下:

$$d = d_0 + (2.132 \times 10^{-7} \cdot T^2 - 0.0002 T + 0.0163) \cdot (0.208 \sqrt{t} - d_0) \quad (7)$$

式中: $d_0$ 和 $d$ 分别为加热前和加热后的钢坯脱碳深度/mm; $T$ -钢坯的表面温度/K; $t$ -加热时间/min。

式(7)给出钢坯表面脱碳与原始脱碳层、加热

温度、加热时间的关系,实际验证结果如图4所示,模型的相对预报误差 $\leq 3.2\%$ 。

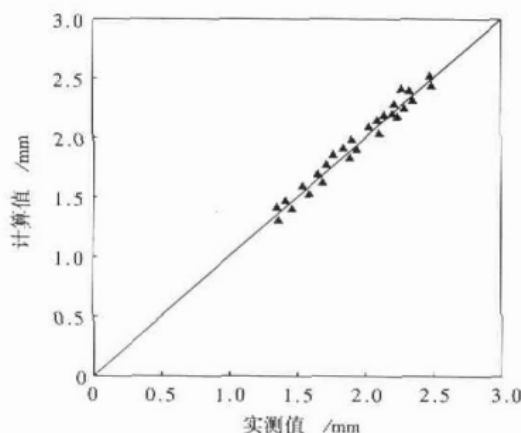


图4 U71 钢脱碳层深度的实测值与计算值比较  
Fig.4 Comparison between measured value and calculated value of decarburization depth of steel U71Mn

### 3 加热工艺制度优化

#### 3.1 坯料加热时的脱碳模拟

由图 2 可知,加热过程中钢坯表面温度呈二次曲线规律变化,即钢坯表面温度  $T$  为时间  $t$  的函数:

$$T = f(t) \quad (8)$$

由于加热炉中钢坯表面温度随时间变化而变化,但式(7)给出的脱碳模型表示的是某一温度下不同持续时间所对应的脱碳深度。因此,为模拟加热过程中钢坯表面脱碳,根据叠加原理进行分段叠加计算。

将总加热时间分成  $n$  段,式(8)可表示为:

$$T_i = f(t_i) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (9)$$

脱碳模型式(7)表示为:

$$\Delta d = f(T_i, t_i) \quad (10)$$

钢坯加热过程的总脱碳深度计算公式为:

$$d = \sum \Delta d = \sum_{i=1}^n f(T_i, t_i) \quad (11)$$

将钢坯断面温度场的有限元模拟与脱碳模型结合应用,构建钢坯表面脱碳层的计算机模拟系统,采用分段叠加的计算方法预报加热过程中钢坯表面脱碳层变化。取时间步长为 5 min,以时间步长内的平均温度计算钢坯表面脱碳深度,得到加热后的钢坯脱碳深度与实验结果的平均值比较,相对预报误差  $\leq 3.8\%$ 。

#### 3.2 加热制度的优化

对重轨钢连铸坯的加热要求主要有以下两点:(1)加热后连铸坯表面脱碳层深度小;(2)加热后连铸坯的表面温度与心部温度一致。

加热制度优化以表面脱碳层最小为优化目标,以加热后连铸坯的表面温度与心部温度一致为约束条件。由于优化目标和约束条件都无法以函数形式给出,因此实际优化计算是以钢坯表面脱碳层的计算机模拟系统为实验平台,通过改变加热炉各段的加热温度和加热时间,反复进行计算比较,分析钢坯表面脱碳层的变化规律,得到满足坯料加热要求的工艺制度。

优化后的加热工艺制度如表 3 所示,其中预热段温度比优化前有所提高,总加热时间有所缩

表 3 加热炉的热工制度

Table 3 Heating schedule of reheating furnace

加热区域	温度/℃	时间/min
预热段	1 150	86
加热段	1 250	131
均热段	1 230	68

短。经脱碳检验,成品重轨轨头踏面的脱碳深度可降低 20% 左右。

### 4 结论

(1) 通过温度场的有限元模拟,得到钢坯断面温度变化规律,加热的最初阶段表面温度几乎呈线性增加,后面阶段则呈渐近线逐渐趋近出炉温度。

(2) 加热过程中钢坯表面脱碳层深度随加热温度、加热时间的增加而增加,但由于连铸坯具有原始脱碳层,因此开始加热阶段表面脱碳层有一个缓慢减少的过程,之后才随着加热温度的升高和加热时间的延长而逐渐增加,并且全脱碳层增加不明显而部分脱碳层增加明显。

(3) 将钢坯断面温度场的有限元模拟与脱碳模型结合应用,构建钢坯表面脱碳层的计算机模拟系统,对加热工艺制度进行优化,使成品重轨轨头踏面的脱碳深度降低 20% 左右。

#### 参考文献

- Tomoya Masuyama, Katsumi Inoue, Masashi Yamanaka. Evaluation of Bending Strength of Caburized Gears Based on Inferential Denti-fication of Principal Surface Layer Defects. JSME International Journal, 2002, 45(6): 794
- Jong Gyu Kim, Kang Y Huh. Prediction of Transient Slab Temperature Distribution in the Re-heating Furnace of a Walking-beam Type for Rolling of Steel Slabs. ISIJ International, 2000, 40(11): 1115
- Roas S. The Finite Element Method in Engineering. Pergamon Press, 1987.
- 陈步龙. 钢脱碳层深度测定法的简介及应用. 冶钢科技, 1997 (2): 51
- Masahiro Nomura, Hiroyuki Morimoto, Masao Toyama. Calculation of Ferrite Decarburizing Depth, Considering Chemical Composition of Steel and Heating Condition. ISIJ International, 2000, 40(6): 619

黄 灿(1980-),女,在读硕士研究生,从事材料加工过程仿真研究。

收稿日期:2005-01-26