

文章编号:1005-3026(2005)12-1161-03

# 中厚板热轧过程中的温度场模拟

周晓光<sup>1</sup>, 吴迪<sup>1</sup>, 赵忠<sup>1</sup>, 王平吉<sup>2</sup>

(1. 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110004; 2. 石横特钢有限公司, 山东 肥城 271600)

**摘 要:** 针对中厚板轧制过程中温度场不易精确确定, 普通温度计算模型计算误差较大或计算较为繁琐的问题, 以传热学基本理论为基础, 建立了热平衡方程, 采用完全隐式差分法对首钢中厚板轧制及冷却过程中的板坯中心温度和表面温度变化进行了模拟, 可以得到以下结论: ①在轧制过程中, 中厚板上表面温度急剧下降, 道次间歇期间又有回升的趋势; 在层冷过程中, 板坯上表面温度迅速下降; ②计算的板坯表面温度与实测的表面温度吻合较好, 表明该模型可以用来模拟中厚板轧制过程中的温度变化。

**关 键 词:** 中厚板; 有限差分; 温度场; 轧制; 数学模型

**中图分类号:** TG 333.71 **文献标识码:** A

在中厚板生产过程中, 温度是影响产品组织性能状况的重要参数<sup>[1]</sup>, 它为中厚板轧制实现计算机控制并为中厚板组织性能预测系统提供必要的数据库支持, 因此提供更实用、更精确的温度场演变模型具有十分重要的意义。目前, 轧件温度场数值模拟主要采用有限元和有限差分法<sup>[2~4]</sup>, 然而对中厚板轧制全过程进行温度模拟却极其少见。本文采用有限差分的方法, 对首钢中厚板生产过程中的轧制部分进行温度场模拟, 计算出轧件心部和上表面温度随时间的变化。

## 1 中厚板轧制及冷却过程中温度场的数学模型

由于轧制过程中热传导过程相当复杂, 对热平衡方程进行理论求解是很困难的, 因此在这里采用有限差分法解决温度计算问题。在温度计算时做如下假设: 存在具有内热源的二维非稳态热流; 考虑钢材纵向的热传导; 内热源为塑性应变热; 忽略因摩擦力引起的钢材表面散热; 钢材与工作辊接触时, 工作辊中心温度保持不变。

在热轧过程中, 其边界条件可以归纳为第三类边界条件, 考虑二维非稳态导热问题, 该问题的数学描述为<sup>[5]</sup>:

$$\left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \right] + \frac{q_s}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial \theta}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\lambda \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} l_x + \frac{\partial \theta}{\partial y} l_y \right) + h(\theta - \theta_\infty) = 0, \quad (2)$$

$$a = \lambda / \rho c. \quad (3)$$

式中,  $\rho$  为板坯的密度;  $c$  为板坯的比热容;  $\lambda$  为导热系数;  $a$  为热扩散率;  $q_s$  为单位时间单位面积内热源的生成热;  $l_x, l_y$  为边界法向上的方向余弦;  $h$  为边界上物体与周围流体间的换热系数;  $\theta$  为温度;  $\theta_\infty$  为周围流体的温度;  $t$  为时间。

## 2 总体热交换系数的确定

### (1) 空冷阶段

轧件自由表面在空冷过程中, 主要有热辐射和热对流两种传热方式, 空冷期间的综合热交换系数可表示为

$$h_a = (\theta_{i,j} - \theta_0)^{1/3} + \varepsilon \sigma (\theta_{i,j}^2 + \theta_0^2)(\theta_{i,j} + \theta_0). \quad (4)$$

其中,  $\theta_{i,j}$  为节点  $(x_i, y_j)$  处温度;  $\varepsilon$  为钢材的辐射率;  $\sigma$  为斯蒂芬-玻尔兹曼常数;  $\theta_0$  为室温。

### (2) 除鳞阶段

对于热轧除鳞过程, 轧件的表面温度以及水量密度  $\bar{\omega}$  对其热交换系数  $h_w$  的影响较大。文献[6]根据大量数据, 回归出喷水冷却在各温度区间的换热系数:

$$\begin{aligned} \theta > 500^\circ\text{C}, 100 < \bar{\omega} < 2000 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2), \\ h_w = 107.2 \bar{\omega}^{0.663} \times 10^{-0.00147\theta_{i,j}} \times 1.163. \end{aligned} \quad (5)$$

### (3) 轧制道次间隔阶段

在轧制道次间隔时间内, 钢材的表面上会同

收稿日期: 2005-03-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50334010, 50474086)。

作者简介: 周晓光(1978-), 男, 辽宁辽中人, 东北大学博士研究生; 吴迪(1952-), 男, 辽宁绥中人, 东北大学教授, 博士生导师。

时出现传导、对流、辐射等复杂传热现象,热交换系数  $h$  可通过式(6)确定<sup>[7]</sup>:

$$h = a_k + \epsilon \sigma (\theta_{i,j}^2 + \theta_0^2)(\theta_{i,j} + \theta_0). \quad (6)$$

式中  $a_k$  的确定方法参照文献[8].

(4) 轧制过程

在轧制过程中,水平表面与轧辊表面接触,垂直表面则通过对流和辐射而冷却.在钢材表面与轧辊发生接触时,总的热交换系数可通过式(7)来计算:

$$h_R = 2\lambda \sqrt{t_r K a \pi}. \quad (7)$$

其中  $t_r$  为轧件与轧辊接触时间,单位时间、单位体积内因塑性应变产生的热量,取决于钢材的瞬时屈服应力和应变.单位体积的塑性变形功  $W_p$  为

$$W_p = \int_0^\epsilon \sigma_f d\epsilon_f. \quad (8)$$

其中  $\sigma_f$  为变形抗力; $\epsilon_f$  为轧件发生的应变.这样中厚板在轧制过程中单位体积塑性变形功转化成热的部分可表示为

$$Q_p = \eta \cdot W_p, 0 < \eta < 1. \quad (9)$$

(5) 冷却过程

用于热轧中厚板上部冷却的层流冷却系统的水冷能力一般可用式(10)求出:

$$h_w = \frac{9.72 \times 10^5 \omega^{0.355}}{\theta - \theta_w} \times \left\{ \frac{(2.50 - 1.5 \lg \theta_w) D}{p_1 p_c} \right\}^{0.645} \times 1.163. \quad (10)$$

式中  $\omega$ 、 $\theta_w$ 、 $p_1$ 、 $p_c$  和  $D$  分别为水流密度、水温、轧制线方向喷嘴间距、与轧制线方向垂直的喷嘴间距以及喷嘴直径.

3 轧制过程温度场计算的有限差分法

假设轧件对称,可在轧件的二分之一断面上划分单元.单元划分如图1所示,其中  $B$  为板带宽度, $H$  为板带厚度,对称轴  $AD$  为绝热边界.如用  $i$  表示  $x$  方向的坐标位置,用  $j$  表示  $y$  方向的坐标位置, $x \leq n$ , $y \leq m$ ,本文取  $n = 16$ , $m = 20$ ,

则在  $x$  方向上  $x_i + \Delta x = x_{i+1}$  在  $y$  方向上  $y_j + \Delta y = y_{j+1}$ .

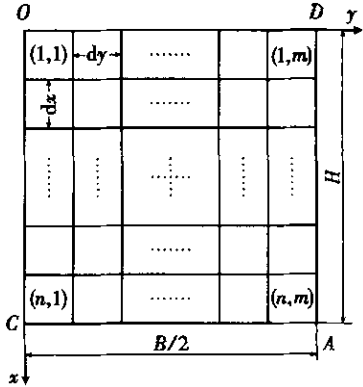


图 1 中厚板横截面网格划分示意图  
Fig. 1 Rectangular grid of plate cross-section

从数学观点出发,在求解区域网格各节点处,用差商近似代替微商,使原导热微分方程转化为差分方程.代入含内热源的二维非稳态导热方程(1)再经过积分中值定理的变换,得到导热微分方程的有限差分近似表达为

$$a_{i-1,j} \theta_{i-1,j}^k + a_{i,j-1} \theta_{i,j-1}^k + a_{i,j} \theta_{i,j}^k + a_{i,j+1} \theta_{i,j+1}^k + a_{i+1,j} \theta_{i+1,j}^k + a_{q,v} \Delta t K (\rho c) = a_{i,j} \theta_{i,j}^{k-1}. \quad (11)$$

其中  $a_{i-1,j} = f_x$ ,  $a_{i,j-1} = f_y$ ,  
 $a_{i,j} = -[\chi(f_x + f_y) + 1]$ ,  
 $a_{i+1,j} = f_x$ ,  $a_{i,j+1} = f_y$ ,

而  $f_x = \frac{a \Delta t}{(\Delta x)^2}$ ,  $f_y = \frac{a \Delta t}{(\Delta y)^2}$ .

将方程(11)与边界条件方程(2)和初始温度条件的近似差分方程联立,构成相应的代数方程组,即可求出任意时刻任意位置的温度场  $\{\theta_{i,j}\}$ .

4 实验及结果分析

用于本文温度场计算的主要工艺参数如下:钢种为 Q345B,化学成分略;初始板坯厚度为 220 mm,轧制后板厚度为 25 mm;出加热炉温度为 1 150 ℃;工作辊半径为 514 mm,除鳞时间为 3 s;冷却时间为 17 s,在第 4 道次后翻钢,第 9 道次后待温.所计算的中厚板的轧制工艺制度见表 1.

表 1 轧制工艺制度  
Fig. 1 Rolling pass schedule

道次	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15
间隔时间/s	9	6	6	20	10	9	8	8	238	9	10	9	11	11	11
出口厚度/mm	205	190	175	161	137	115	95	77	63	52	43	36	31	27	25
轧辊转速/(r·min <sup>-1</sup> )	40	40	40	40	40	40	40	40	50	50	50	50	60	60	60

图 2 给出了板坯心部和上表面的温度随时间的变化规律.可以看出,板坯出炉后的表面温度开始下降,尤其是除鳞阶段温度下降较快,但前几道次心部温度基本没有变化.在轧制过程中,由于轧

辊表面温度较低,造成中厚板表面温度急剧下降,随后又有回升的趋势.这说明接触热传导可以散失较多的热量,且在轧制间歇期间心部温度对表面温度进行补偿.在层冷过程中,由于冷却水的热

交换系数很大,造成板坯表面温度迅速下降。

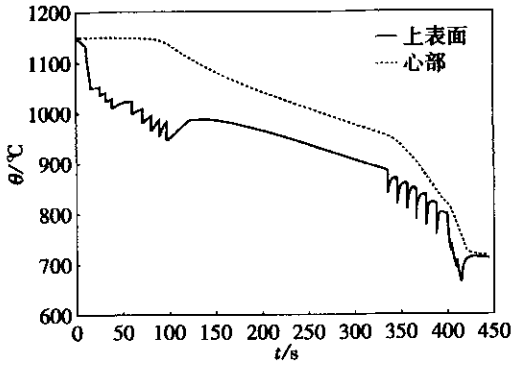


图 2 板坯温度分布的演变

Fig. 2 Evolution of temperature distribution of slab

图 3 给出了各道次轧制时板坯上表面温度实测值与计算值的对比情况。从图 3 可以看出：大部

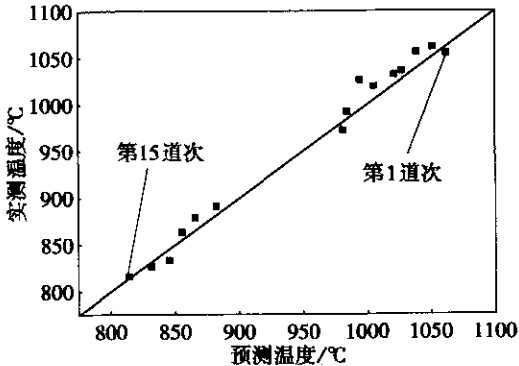


图 3 各道次轧制温度预测值与实测值的比较

Fig. 3 The comparison of rolling temperature each pass between calculated and measured

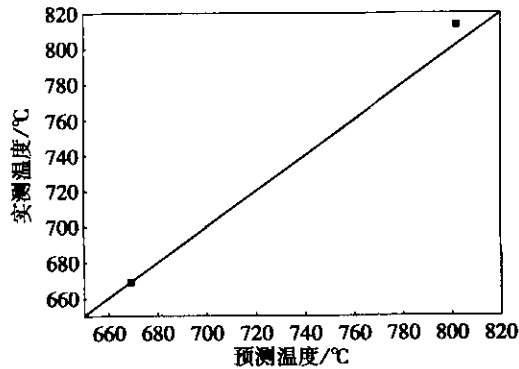


图 4 开冷温度与终结温度预测值与实测值的比较

Fig. 4 The comparison of starting cooling temperature and final cooling temperature between calculated and measured

分计算偏差在 10 °C 以内,只有第 7 道次计算的轧制温度偏差相对较大。图 4 给出了板坯上表面开冷温度和终冷温度实测值与计算值的对比。从图 4 可以看出：开始冷却的温度偏差为 10 °C,终冷温度基本吻合。

## 5 结 语

采用有限差分法模拟了中厚板轧制和冷却过程中的温度场。通过与实际测量得到的板坯表面温度进行对比,计算的表面温度与实测的表面温度取得了较好的一致。证明该方法可以用来计算中厚板轧制过程中的温度变化。

## 参考文献：

- [1] Wells M A, Lloyd D J, Samarasekera I V, et al. Modeling the microstructural changes during hot tandem rolling of AA5XXX aluminum alloys[J]. *Metall Mater Trans*, 1998, 29(3): 709-719.
- [2] 胡贤磊, 矫志杰, 李建民, 等. 中厚板精轧过程的高精度温度预测模型[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2003, 24(1): 71-74.  
(Hu X L, Jiao Z J, Li J M, et al. High-precision temperature prediction model for plate finishing rolling process[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2003, 24(1): 71-74.)
- [3] Jaklic A, Glogovac B, Kolenko T, et al. A simulation of heat transfer during billet transport[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2002, 22(7): 873-883.
- [4] Yoneyama T, Asaoka H, Kimura H, et al. Heat transfer and roll surface temperature in the hot rolling of aluminum sheet[J]. *Journal of Tribology (Transactions of the ASME)*, 1999, 121(4): 753-760.
- [5] Jahanian S, Mosleh M. The mathematical modeling of phase transformation of steel during quenching[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1999, 8(1): 75-82.
- [6] 日本钢铁协会. 板带轧制理论与实践[M]. 王国栋, 吴国良, 译. 北京: 中国铁道工业出版社, 1990. 181, 194.  
(Japanese Iron and Steel Association. *Rolling theory and experience of the flat* [M]. Translated by Wang G D, Wu G L. Beijing: Chinese Railway Press, 1990. 181, 194.)
- [7] Gierulski B, Clerniak M. Temperature field on strip cross-section during hot rolling[J]. *Steel Research*, 1989, 60(5): 208-214.
- [8] 刘振宇, 许云波, 王国栋. 热轧钢材组织-性能演变的模拟和预测[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2004. 53.  
(Liu Z Y, Xu Y B, Wang G D. *Simulation and prediction of the evolution of microstructure and properties of hot rolled steel* [M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2004. 53.)

## Simulation of Temperature Field During Hot Plate Rolling

ZHOU Xiao-guang<sup>1</sup>, WU Di<sup>1</sup>, ZHAO Zhong<sup>1</sup>, WANG Ping-ji<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Shiheng Special Steel Limited Company, Feicheng 271600, China. Correspondent: ZHOU Xiao-guang, E-mail: xiaoguangzhou@126.com)

**Abstract:** It is difficult to determine precisely the temperature field in plate rolling process to which the error of calculated result is too great with tiresome calculating procedure if using conventional temperature models. So, based on the heat transfer theory, a thermal balance equation as model is developed using the implicit difference method to simulate the temperature variation of plate core/surface in hot rolling and cooling processes for plate production. Some conclusions are thus reached: ① the plate surface temperature decreases sharply during rolling, but it tends to increase in the interval between intermittent rolling passes. During cooling, the plate surface temperature decreases quickly. ② The calculated plate surface temperature is in agreement with that measured and, therefore, the model is available to simulate the temperature variation in plate rolling process.

**Key words:** plate; finite difference; temperature field; rolling; mathematical model

(Received March 8, 2005)