

· 系统与装置 ·

热轧带钢粗轧区在线温度模型研究及应用

马 涛, 彭燕华

(中冶赛迪工程技术股份有限公司 自动化事业部, 重庆 400013)

摘要:通过对轧件在粗轧区内的传热分析, 考虑辐射散热、除鳞水、工作辊与轧件热传导以及轧制过程中变形热, 建立了在线温度模型, 并采用有限差分法进行求解。将该温度模型应用于某厂 1 750 mm 热连轧机, 应用结果表明, 温度模型计算值与实测值吻合良好。

关键词:热轧; 粗轧; 温度模型; 有限差分

中图分类号: TG334.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7059(2009)01-0044-03

Study on on-line temperature model in rough rolling zone of hot rolling strip and its application

MA Tao, PENG Yan-hua

(Automation Division, CISO Engineering Co., Ltd., Chongqing 400013, China)

Abstract: Based on analysis of heat transfer of rolled piece in rough rolling zone, considering radiation, descaling, heat conduction between work roll and rolled piece, and deformation in rolling process, an on-line temperature model was established, and solved by use of finite difference method. The model has been applied to 1 750 mm hot rolling mill in a certain factory. Application results show that the value calculated by the model is identical with measured value.

Key words: hot rolling; rough rolling; temperature model; finite difference

0 引言

在轧制过程中, 金属的应力、应变与温度密切相关。对热轧带钢而言, 温度是影响金属变形抗力的最主要因素。因此, 准确预报轧制过程中各环节轧件的温度, 是实现热连轧计算机控制的一个重要前提。国内外许多学者采用不同的方法对轧制过程中轧件及轧辊的温度场进行了研究, 经常使用的方法为有限元法或有限差分法。本文利用有限差分法开发出了实时性好、计算结果精度高的在线温度预报模型, 并在某厂 1 750 mm 热连轧机进行了在线应用。

1 热传导基本方程及其求解

根据能量守恒定律和傅里叶传递定律可以得到无内源热的三维导热微分方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中, λ 为轧件导热系数; T 为轧件温度; t 为时间; x, y, z 分别为坐标轴的 3 个方向; ρ 为轧件密度; c 为轧件比热容。

在热轧带钢生产工艺中, 由于板坯或轧件的长度和宽度远大于其厚度, 可以把板坯或轧件简化为无限大的平板^[1], 因此可以将板坯或轧件内部温度看作时间与厚度的函数, 将式 (1) 简化为一维的导热微分方程, 同时令 $a = \lambda / \rho c$, 可得:

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2)$$

式中, a 为热扩散率; $T(x, t)$ 为轧件的温度, 即在 t 时刻 x 位置处的温度; $x \in [-x_0, x_0]$ 为厚度变量,

收稿日期: 2008-04-18; 修改稿收到日期: 2008-10-08

作者简介: 马 涛 (1979-), 男, 湖北随州人, 工程师, 主要从事热轧模型软件开发工作。

$x=0$ 时表示带钢厚度方向中心处, $x=x_0$ 时表示带钢的上表面, $x=-x_0$ 表示带钢的下表面; $t \in [t_0, t_0 + \Delta t]$ 为时间变量。

求解导热方程的方法很多,本文采用有限差分法,将轧件在厚度方向上分成 n 层,利用泰勒级数展开法,可以将式 (2) 表示为差分方程的形式:

$$\frac{d}{dt} T_i = a \frac{1}{\Delta x^2} (T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}) \quad (3)$$

其中, $\Delta x = \frac{2x_0}{n}$, $0 < i < n$

则上下表面的差分边界条件可以表示为^[2]:

$$\frac{d}{dt} T_0 = a \frac{1}{\Delta x^2} \left(-2T_0 + 2T_1 - \frac{2\Delta x}{\lambda} \cdot q_w \right) \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} T_n = a \frac{1}{\Delta x^2} \left(2T_{n-1} - 2T_n + \frac{2\Delta x}{\lambda} \cdot q_w \right) \quad (5)$$

式中, T_0 为轧件下表面温度; T_n 为轧件上表面温度; q_w 为边界上热流密度。

2 热轧过程中粗轧区轧件温度模型

在典型热轧粗轧区生产工艺过程中,引起轧件温度变化的主要因素为:热辐射、除鳞水、工作辊与轧件接触造成的温降,以及轧制过程中金属塑性变形引起的温升。针对热轧过程中的这些传热特点,可以把粗轧区轧件温度模型划分成如下 4 个子模型:辐射散热引起的温度变化模型;除鳞水引起的温度变化模型;工作辊与轧件的热传导引起的温度变化模型;轧制过程中金属塑性变形产生的热量引起的温度变化模型。

2.1 辐射散热引起的温度变化模型

在辊道运送过程中,轧件通过表面辐射与外界进行热交换,辐射热交换符合电磁学中的 Stefan-Boltzmann 定律,根据一维传热方程 (2) 和 Stefan-Boltzmann 定律的边界条件,此时的热传导规律可用下式表示:

$$\begin{cases} T(x, t_0) = T_0(x) \\ \frac{\partial T}{\partial x}(-x_0, t) = \frac{\varepsilon_- \sigma}{\lambda} [T^4(-x_0, t) - T_{\text{amb}}^4] \\ \frac{\partial T}{\partial t}(x, t) = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x, t) \\ \frac{\partial T}{\partial x}(x_0, t) = \frac{\varepsilon_+ \sigma}{\lambda} [T^4(x_0, t) - T_{\text{amb}}^4] \end{cases} \quad (6)$$

式中, $T_0(x)$ 为轧件的初始化温度,即 t_0 时刻 x 位置处的温度; $\varepsilon_{\pm}$ 为上下表面辐射系数; σ 为 Stefan-Boltzmann 常量; T_{amb} 为上下表面环境温度。

将上述辐射温度模型方程根据式 (3)、(4)、

(5) 进行离散化,用有限差分方程组表示如下:

$$\begin{cases} T_i|_{t=t_0} = T_0(-x_0 + ih), & 0 \leq i \leq n \\ \frac{d}{dt} T_0 = \frac{2a}{h^2} \left[-T_0 + T_1 - h \frac{\varepsilon_- \sigma}{\lambda} (T_0^4 - T_{\text{amb}}^4) \right] \\ \frac{d}{dt} T_i = \frac{a}{h^2} (T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}), & 1 \leq i \leq n-1 \\ \frac{d}{dt} T_n = \frac{2a}{h^2} \left[T_{n-1} - T_n - h \frac{\varepsilon_+ \sigma}{\lambda} (T_n^4 - T_{\text{amb}}^4) \right] \end{cases} \quad (7)$$

其中, $T_i = T_i(t) = T(-x_0 + ih, t)$, $h = 2x_0/n$

2.2 除鳞水引起的温度变化模型

在除鳞过程中,由于大量高压水流与轧件表面接触将使轧件产生温降,这种热量损失属于强迫对流形式。强迫对流交换过程比较复杂,它不但与轧件温度、介质温度以及钢的物理性质有关,还与流体的流动状态(流速、水压等)有关,因此要从理论上写出各种影响因素比较困难,目前一般采用牛顿公式来计算。此时的热传递规律可用下列方程表示:

$$\begin{cases} T(x, t_0) = T_0(x) \\ \frac{\partial T}{\partial x}(-x_0, t) = \frac{\alpha_-}{\lambda} [T(-x_0, t) - T_{\text{water}}] \\ \frac{\partial T}{\partial t}(x, t) = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x, t) \\ \frac{\partial T}{\partial x}(x_0, t) = \frac{\alpha_+}{\lambda} [T(x_0, t) - T_{\text{water}}] \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\alpha_{\pm}$ 为轧件上下表面与除鳞水的热交换系数; T_{water} 为上下表面除鳞水的温度。

同理可以获得除鳞水冷却模型的有限差分方程组为:

$$\begin{cases} T_i|_{t=t_0} = T_0(-x_0 + ih), & 0 \leq i \leq n \\ \frac{d}{dt} T_0 = \frac{2a}{h^2} \left[-T_0 + T_1 - h \frac{\alpha_-}{\lambda} (T_0 - T_{\text{water}}) \right] \\ \frac{d}{dt} T_i = \frac{a}{h^2} (T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}), & 1 \leq i \leq n-1 \\ \frac{d}{dt} T_n = \frac{2a}{h^2} \left[T_{n-1} - T_n - h \frac{\alpha_+}{\lambda} (T_n - T_{\text{water}}) \right] \end{cases} \quad (9)$$

2.3 工作辊与轧件热传导引起的温度变化模型

在板坯轧制过程中,轧件和轧辊的温度差很大,轧件和轧辊在接触面上发生热量交换。此时表现为热流连续、温度不连续的热阻问题,可以按下式计算热损失:

$$\begin{cases} T(x, t_0) = T_0(x) \\ \frac{\partial T}{\partial x}(-x_0, t) = \frac{k_-}{\lambda} [T(-x_0, t) - T_{WR}] \\ \frac{\partial T}{\partial t}(x, t) = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x, t) \\ \frac{\partial T}{\partial x}(x_0, t) = \frac{k_+}{\lambda} [T(x_0, t) - T_{WR}] \end{cases} \quad (10)$$

式中, $k_{\pm}$ 为轧件上下表面与上下轧辊的热交换系数; T_{WR} 为上下轧辊的表面温度。

同理可以获得工作辊与轧件热传导温度模型的有限差分方程组为:

$$\begin{cases} T_i|_{t=t_0} = T_0(-x_0 + ih), & 0 \leq i \leq n \\ \frac{d}{dt} T_0 = \frac{2d}{h^2} \left[-T_0 + T_1 - h \frac{k_-}{\lambda} (T_0 - T_{WR}) \right] \\ \frac{d}{dt} T_i = \frac{a}{h^2} (T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}), & 1 \leq i \leq n-1 \\ \frac{d}{dt} T_n = \frac{2d}{h^2} \left[T_{n-1} - T_n - h \frac{k_+}{\lambda} (T_0 - T_{WR}) \right] \end{cases} \quad (11)$$

2.4 轧制过程中金属塑性变形产生的热量引起的温度变化模型

当轧件在轧机中轧制时,轧件发生塑性变形,在塑性变形的过程中相当一部份塑性功转换成热能,从而引起轧件温度的升高。根据热平衡方程可以得到轧制过程产生的温度变化计算公式为^[3]:

$$\Delta T_{\text{def}} = \frac{F \ln(h_1/h_2)}{w l_0 \rho c J} \cdot \eta$$

式中, F 为轧制力; h_1, h_2 为入、出口厚度; w 为轧件宽度; l_0 为接触弧的长度; J 为热功当量; η 为吸收效率,即变形热转化为轧件发热的部分占总变形热的百分比。

3 模型的调用及验证

在预报粗轧出口中间坯料的温度过程中,根据粗轧区的布局和轧制过程划分成不同的区域,然后根据每个区域热传递的特点调用不同温度传热子模型。表 1 为我国某厂 1 750 mm 热轧粗轧区采用本粗轧区在线温度预报模型时,其粗轧区布局及各区域调用的温度子模型的情况。

为了验证本模型的实用性,对实际生产时模型计算的轧件表面温度和实测轧件的表面温度进

行了大量的采集和比较,表 2 是对 2008 年 3 月某段时间生产数据的采样分析。

表 1 粗轧区温度子模型调用

Table 1 Call of temperature submodel for rough rolling zone

粗轧区布局	应用的温度子模型
加热炉	
加热炉输出辊道	辐射散热引起的温度变化模型
除磷机	除磷水引起的温度变化模型
粗轧输入辊道	辐射散热引起的温度变化模型
机架内除磷机	除磷水引起的温度变化模型
粗轧机	工作辊和轧件的热传导温度模型
	轧制过程中金属塑性变形产生的热量引起的温度变化模型
粗轧输出辊道	辐射散热引起的温度变化模型
粗轧出口高温计	辐射散热引起的温度变化模型

表 2 生产数据的采样分析对比表

Table 2 Production data analysis

$\Delta T_{\text{offset}} = T_{\text{modelcalc}} - T_{\text{mea}} $	在偏差范围内轧件的数量/块	偏差范围内占总采样的百分比/%
$\Delta T_{\text{offset}} > 20$	9	1.19
$12 \leq \Delta T_{\text{offset}} \leq 20$	111	14.66
$\Delta T_{\text{offset}} < 12$	673	84.15

$T_{\text{modelcalc}}$ —模型计算的粗轧出口轧件上表面温度的平均值;

T_{mea} —高温计实际测量的轧件上表面温度平均值

从表 2 中的粗轧出口温度模型计算值和实测值的对比分析可以看出,该温度模型具有较高的温度预报精度,能够很好地满足工程实际的要求。

4 结论

通过分析热轧过程中轧件热传递的变化规律,针对热轧粗轧过程不同的传热阶段,采用不同传热学方程,建立了热轧过程轧件温度模型,并采用有限差分法对轧件温度场进行求解。通过计算结果和实测数据的比较,此温度预报模型与实际粗轧出口轧件的温度吻合良好。

参考文献:

- [1] 杨世铭,陶文铨. 传热学 [M]. 北京:高等教育出版社, 1998
- [2] 徐萃薇. 计算方法引论 [M]. 北京:高等教育出版社, 1985: 256-265
- [3] 孙一康. 带钢热连轧的模型与控制 [M]. 北京:冶金工业出版社, 2002: 109

[编辑:沈黎颖]

欢迎订阅《冶金自动化》杂志