

# 步进梁式加热炉钢温预报的数学模型<sup>\*</sup>

巢 海<sup>①</sup> 王 伟<sup>②</sup> 李小平  
(东北大学自动化研究中心, 沈阳 110006)

**摘 要** 以机理分析与现场实验为基础, 开发了一种步进梁式加热炉钢坯温度预报的动态数学模型. 该模型具有结构简单、计算量小等优点, 且仿真结果表明它能满足精度需要, 能够实现对加热炉内钢坯温度分布的在线预报.

**关键词** 步进梁式加热炉, 钢温预报, 数学模型.

**分类号** TP 13

步进梁式加热炉中钢坯温度及其分布是衡量钢坯加热质量以及实现加热炉自动控制的重要依据之一. 合理地控制钢温可以提高钢坯加热质量, 降低燃料消耗. 因此钢温预报数学模型便成为加热炉实现模型化最优控制的关键<sup>[1, 2]</sup>.

目前, 加热炉钢温预报模型基本上有两类: 一类是以工艺理论为基础的多元回归模型<sup>[3]</sup>, 另一类是工艺理论与现代控制理论相结合的模型<sup>[4]</sup>. 这些模型在实际生产中起到了一定作用, 但由于它们大都较为复杂, 计算精度不高, 且修改困难, 适应性差, 所以难以推广.

本文从工程实际出发, 以加热炉实时计算机控制为目的, 通过对步进梁式加热炉过程机理的分析研究, 推导了一种步进梁式加热炉钢坯温度预报的动态数学模型. 仿真实验及工程应用均表明该模型结构简单, 计算量小, 适合于在线运行, 且能满足精度需要, 易于工程推广.

## 1 炉温模型

根据机理和试验建立钢坯温度预报数学模型, 若想将其应用于在线计算, 则尽可能地要求该模型简单且能满足精度需要, 因而对加热炉生产过程作以下基本简化假设.

(1) 炉温只是时间和炉长坐标的函数, 并且在炉长方向按一维空间分段线性关系分布.

(2) 忽略钢坯与固定梁、步进梁之间的传热(即按绝热处理).

(3) 在同一炉段内的总括热吸收率系数假设

为一个常数.

(4) 假设钢坯上、下表面在炉内受热均匀, 即认为钢坯上下表面温度相同.

由基本简化假设可知炉温分布为沿炉长方向的一维空间分段线性分布, 且由  $t$  时刻对应炉温各检测点的温度  $T_{fi}(t)$  来决定, 并认为在其它方向上炉温均匀分布, 用式(1)表示为:

$$T_f = T_f(x, \tau) \tag{1}$$

其中钢坯在炉内的位置  $x$  则是由步进梁的平均步进速度  $u(t)$  来决定的:

$$x(\tau) = \int_0^\tau u(t) dt, 0 \leq \tau \leq t_f \tag{2}$$

$$u(t) = L_0 / TT(t) \tag{3}$$

式中,  $T_f$  ——炉膛温度;  $x$  ——钢坯在炉内的位置;  $u(t)$  ——步进梁平均运动速度;  $L_0$  ——步距;  $TT(t)$  ——步进周期;  $t_f$  ——钢坯在炉内总的加热时间.

## 2 钢坯内部导热模型

所谓钢坯内部导热模型是指跟踪炉内某一钢坯的加热过程, 并描述它的整个加热过程中温度变化规律的模型. 某一具体钢坯在炉内的位置是随时间变化的, 因而本文考虑采用移动坐标系, 即认为坐标系与钢坯同步地移动, 这样钢坯所处的边界条件就转化为一个时变的温度场问题.

在推钢式加热炉内的钢坯是紧密排列的, 可以认为温度传递是从钢坯上下表面向中心进行的, 而在步进梁式加热炉内的钢坯之间有一定的

<sup>\*</sup> 1998-01-24 收到.   ① 男, 24, 硕士研究生; ② 男, 42, 博士, 教授.

原冶金部基础研究和沈阳市科学技术计划项目资助(编号: B196-01-06).

间距,是6个表面同时进行加热的,因而下面从三维的角度来研究钢坯在炉内加热的数学模型.

考虑加热炉内的任意一块钢坯,假设它的温度分布为  $T(x,y,z,t)$ ,其中有  $0 \leq x \leq b, 0 \leq y \leq l, 0 \leq z \leq h$ ,分别代表钢坯的宽度、长度与高度(钢坯为长方体),则其内部传热可用三维的不稳定导热偏微分方程加以描述:

$$\left(-\frac{\partial q_x}{\partial x}-\frac{\partial q_y}{\partial y}-\frac{\partial q_z}{\partial z}\right) \cdot d x \cdot d y \cdot d z=\rho c_p \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} \cdot d x \cdot d y \cdot d z \quad (4)$$

$$\boldsymbol{q}(x, y, z)=q_x \boldsymbol{i}+q_y \boldsymbol{j}+q_z \boldsymbol{k} \quad (5)$$

式中,  $\rho, c_p$  分别为钢坯的体积质量和定压比热容;  $\boldsymbol{q}(x, y, z)$  为钢坯表面热流密度,而  $q_x, q_y, q_z$  则分别为  $\boldsymbol{q}(x, y, z)$  在各坐标方向的分量.

由于钢坯在任一时刻  $t$  的平均温度  $T_m(t)$  可以表示为

$$T_m(t)=\frac{1}{V} \iiint_{\Omega} T(x, y, z, t) d x \cdot d y \cdot d z \quad (6)$$

其中,  $V$  为钢坯的体积,所以由(4),(5),(6)各式可以推导<sup>[5]</sup>得到:

$$\frac{d T_m(t)}{d t}=\frac{k_m \cdot q}{\rho c_p} \cdot\left(\frac{2}{l}+\frac{P}{A}\right) \quad (7)$$

其中,  $q=|\boldsymbol{q}(x, y, z)|$  为钢坯表面热流密度的大小;  $k_m$  为计算平均温度的模型参数;  $l$  为加热钢坯的长度,  $P=2 b+2 h$  为加热钢坯的截面周长,  $A=b \cdot h$  为钢坯的截面面积.

此外,根据热流密度的定义 $q_z=-\lambda \frac{\partial T}{\partial z}$ ,其中  $0 \leq z \leq h$  ( $h$  为钢坯厚度),  $\lambda$  为钢坯的导热系数,则对应平均温度与中心温度分别有如下关系<sup>[5]</sup>:

$$T_s=T_m+\frac{h}{k_s} \cdot \frac{q}{\lambda}, T_c=T_s-\frac{h}{k_c} \cdot \frac{q}{\lambda} \quad (8)$$

式中,  $T_m, T_s, T_c$  分别表示钢坯的平均温度、表面温度和中心温度;  $k_m, k_s, k_c$  分别是计算钢坯  $T_m, T_s, T_c$  用的模型参数,需要经过实验调试来确定.

由于是冷坯加热,钢坯温度分布的初始条件可设为常温:

$$T(x, y, z, 0)=T_m(0)=T_s(0)=T_c(0)=T_0, \\ T_0-\text { 环境温度} \quad (9)$$

根据总括热吸收率法<sup>[6]</sup>,钢坯的表面热流密度为

$$q \stackrel{\text { 定义 }}{=} \sigma \cdot \Phi \cdot\left[\left(T_f+273\right)^4-\left(T_s+273\right)^4\right]^{(3)} \quad (10)$$

式中,  $\sigma=5.67 \times 10^{-8} \mathrm{W} /\left(\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{K}^4\right)$  为斯蒂芬-玻尔兹曼常数;  $\Phi$  为钢坯表面总括热吸收率系数,在同一炉段内视为常数;  $T_f$  为加热钢坯所在处的炉膛温度;  $T_s$  为钢坯的表面温度.

综上所述,炉内钢坯的温度预报模型为:

$$\left\{\begin{array}{l} \frac{d T_m(t)}{d t}=\frac{k_m}{\rho c_p}\left\{\frac{2}{l}+\frac{P}{A}\right\} \sigma \Phi\left\{\left[T_f(x, \tau)+273\right]^4-\left[T_s(t)+273\right]^4\right\} \\ T_s(t)=T_m(t)+\frac{h}{k_s \lambda} \sigma \Phi\left\{\left[T_f(x, \tau)+273\right]^4-\left[T_s(t)+273\right]^4\right\} \\ T_c(t)=T_s(t)-\frac{h}{k_c \lambda} \sigma \Phi\left\{\left[T_f(x, \tau)+273\right]^4-\left[T_s(t)+273\right]^4\right\} \end{array}\right. \text { 如} \quad (11)$$

### 3 参数估计

从模型方程中可以看出,在计算炉内钢温前需要确定总括热吸收率系数  $\Phi$  和模型参数  $k_m, k_s, k_c$ .为了估计这些模型参数,进行了多次现场实验,获取了钢坯在加热过程中升温<sup>受热</sup>和相应炉温的数据序列.

采用元体热平衡法<sup>[7]</sup>,对式(10)作离散化处理,可得如下差分方程:

$$\sigma \Phi\left\{\left[T_f(k)+273\right]^4-\left[T_s(k)+273\right]^4\right\} \times \rho^2-\lambda \frac{T_s(k)-T_c(k)}{\frac{1}{2} h} \times l^2=\rho c_p\left\{\frac{h}{2} \times \frac{T_s(k+1)-T_s(k)}{\Delta \tau}\right\} \quad (12)$$

由于钢坯的密度  $\rho$ ,比热  $c_p$  和导热系数  $\lambda$  均随着温度的变化而变化,因而有:

$$\Phi(k)=\frac{\rho(k) c_p(k) \frac{h}{4} \frac{T_s(k+1)-T_s(k)}{\Delta \tau}+\left\{\left[T_f(k)+273\right]^4-\left[T_s(k)+273\right]^4\right\} \frac{T_s(k)-T_c(k)}{2 \lambda(k) \frac{h}{2}}}{\left\{\left[T_f(k)+273\right]^4-\left[T_s(k)+273\right]^4\right\}} \quad (13)$$

根据实验检测到的钢温数据,利用相应的经验公式计算出对应的钢坯密度  $\rho$ ,比热  $c_p$  和导热系数  $\lambda$ ,然后把相关数据代入式(13)中即可求出

炉内各采样时刻(即位置)的总括热吸收率系数  $\Phi(k)$  , 同时利用钢温预报模型可以反推出模型参数  $k_m, k_s, k_c$  , 进而便可求得加热炉各段的平均总括热吸收率系数  $\Phi$  和平均参数  $\bar{k}_m, \bar{k}_s, \bar{k}_c$  , 以减小误差.

4 仿真结果

本文以规格为 240 mm×240 mm×3 500 mm 的 40 号碳素钢钢坯为例. 该钢坯在加热炉内的加热时间为  $t_f=1.7\text{ h}=6\,120\text{ s}$  , 钢坯初始温度为 20 °C , 其目标出炉温度按照工艺要求为 1 130 °C . 根据炉子产量  $G=60\text{ t/h}$  可以确定钢坯出炉的时间间隔为 90 s . 为了计算简单, 假设该种钢坯的物理参数在炉内加热期间不随温度变化, 分别为: 体积质量  $\rho=7\,810\text{ kg/m}^3$  , 导热系数  $\lambda=26.53\text{ W/(m}\cdot^\circ\text{C)}$  , 比热  $c_p=591.8\text{ J/(kg}\cdot^\circ\text{C)}$  . 由参数估计得到的总括热吸收率  $\Phi$  分别为: 预热段 0.65, 加热 I 段 0.65, 均热 II 段 0.60, 均热段 0.55; 调整参数为:  $k_m=0.85, k_s=10, k_c=6$  . 用现场测试的数据对模型进行仿真实验, 结果如图 1, 图 2 所示. 其中图 1 为钢温预报计算结果, 而图 2 为钢坯表面温度的计算值与实测值进行比较, 结果表明预报值与实验数据吻合很好.

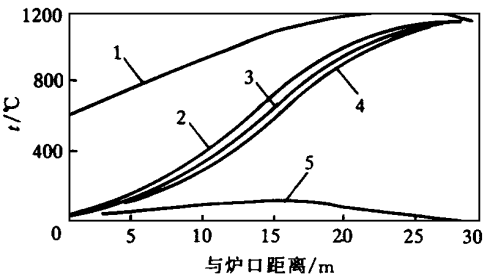


图 1 钢坯温度预报计算结果

1—炉温; 2—表面温度; 3—平均温度;  
4—中心温度; 5—断面温差.

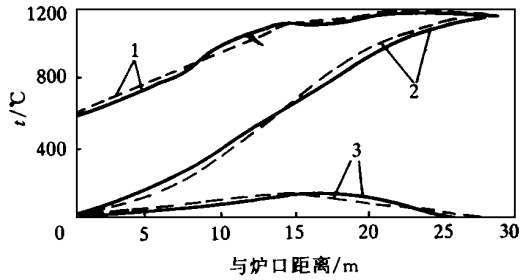


图 2 模型预报与实测温度的比较

1—炉温, 2—钢坯表面温度, 3—钢坯断面温差.  
——计算值; .....实测值.

5 结 论

- (1) 采用机理分析与实验相结合的方法, 建立了步进梁式加热炉钢坯温度预报的数学模型.
- (2) 利用总括热吸收率法, 使模型得到简化, 便于在线计算.
- (3) 仿真和实验表明模型预报的精度满足要求.

参考文献

- 1 Fred Shenvar. Walking beam furnace supervisory control at Inland's 80-in hot strip mill. Iron and Steel Engineer, 1994 (7): 25 ~ 34
- 2 Timothy A. Veslocki. Development and verification of a slab reheating furnace mathematical model. Iron and Steel Engineer, 1982(4): 46 ~ 51
- 3 陈南岳. 现代加热炉过程控制技术及其数学模型. 冶金自动化, 1985, 3: 12 ~ 22
- 4 杨永耀, 吕勇哉. 钢坯加热炉计算机控制动态数学模型的开发. 自动化学报, 1987, 13(4): 257 ~ 264
- 5 巢海. 步进梁式加热炉炉温优化控制的研究: [学位论文]. 沈阳: 东北大学, 1998
- 6 康国仁. 加热炉计算机控制数学模型: [学位论文]. 沈阳: 东北大学, 1989
- 7 徐用懋, 谢洪. 连续加热炉数学模型的建立与计算机仿真. 控制与决策, 1988, 4: 36 ~ 39

Billet Temperature's Prediction Model for Walking Beam Furnace

Chao Hai, Wang Wei, Li Xiaoping

**ABSTRACT** A dynamic mathematical model of billet temperature's prediction on-line for walking beam furnace is developed based on the mechanistic analysis and the field test. The advantages of this model are that it has a simple structure and few computations. Simulation results show that the model can meet the control requirements and can on-line predict the billet temperature distribution.

**KEY WORDS** walking beam furnace, billet temperature prediction, mathematical model.

(Received February 24, 1998)