

# 钢坯加热的数值模拟

陈冠军

(首钢技术研究院,北京 100043)

**[摘要]** 借助 CFD 仿真手段,模拟蓄热式加热炉内钢坯加热的实际状况,研究了钢坯长度、宽度方向上下表面和中心温度的温度分布,提出钢坯存在上下温差、四角边缘温度高和靠近出钢口钢坯温度低等问题。同时,研究了炉内不同厚度钢坯与加热时间的基本关系,比较了仿真计算结果与实际炉内加热时间,通过数值拟合,得出钢坯厚度与加热时间的拟合公式,可在生产实际中使用。上述研究结果可为加热炉钢坯加热制度的制定和优化提供依据。

**[关键词]** 加热炉;钢坯;加热;模拟

**[中图分类号]** TF061.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2010)02-0057-05

## 1 前言

钢坯加热是热轧过程的关键步骤,其目的是提高可塑性,减少压力加工的变形抗力,加热不仅要满足达到轧制工艺要求的加热温度,并要求加热均匀、氧化烧损少。加热过程不仅涉及燃料燃烧、炉气流动、炉气对炉墙和钢坯传热、炉墙对钢坯传热及钢坯内部传热等复杂过程<sup>[1]</sup>,而且涉及钢坯成分、内部组织结构和性能的改变。加热不当会引起钢的氧化、脱碳、过热、过烧以及加热温度不均匀等加热质量问题。加热时间、温度和炉内气氛是影响钢坯加热的基本因素,不同品种的钢坯其加热时间、温度和炉内气氛要求都是不同的。掌握钢坯加热规律,对提高钢坯加热质量具有十分重要的意义。

关于特定边界条件的钢坯加热问题,可以采用有限差分法<sup>[2,3]</sup>计算出钢坯内部温度场的分布;对于集复杂的燃烧、辐射、流动等过程的炉内钢坯加热过程,其求解过程变得复杂,为达到不同的研究目标,需要对钢坯加热过程进行不同方式的简化研究<sup>[4]</sup>,并借助 CFD 软件研究钢坯加热的三维温度分布规律。

## 2 钢坯温度分布模拟研究

炉内钢坯加热是移动、停止、移动往复循环运动过程,其出钢过程是一个间歇运动,加热炉通常分两段或三段加热,各段的加热温度也不尽相同,其炉内温度分布主要受加热炉燃烧器布置和负荷分配的影响,同时炉墙还要散热损失。待研究的加热炉为端进端出连续推钢式蓄热式加热炉,炉体有效长度为 29 278 mm,炉体有效宽度为 6 960 mm,分为均热段、加热段和预热段三段,设上、下均热段和上、下加热段 4 个供热段,共 25 对烧嘴,其传热过程涉及蓄热式烧嘴的换向燃烧和炉温周期波动等问题。为此简化研究假设条件如下:假设钢坯在炉内以恒定速度移动,换向周期内烧嘴负荷保持不变,忽略氧化铁皮对钢坯的影响。钢坯的热导率、比热、密度等物性参数是随时间变化的函数,其选取见文献<sup>[5]</sup>,其中热导率  $\lambda = 69.8 - 10.12C - 16.75Mn - 33.73Si$  计算;密度  $\rho = 7\,880 + \Delta\rho x$ 。式中,C,Mn,Si 为碳、锰和硅元素含量, $\Delta\rho$ 为碳或合金元素每 1% 钢密度增加量, $x$ 为碳或合金元素成分含量。

### 2.1 研究条件和模型

根据蓄热式加热炉钢坯加热的实际情况,确定

**[收稿日期]** 2008-09-08

**[作者简介]** 陈冠军(1972-),男,浙江永康市人,首钢技术研究院高级工程师,从事钢铁冶金能源科研工作;E-mail:chenguanjun2002@yahoo.com.cn

初始条件如下:加热炉生产能力为 100 t/h,钢坯种类为 Q345dc,钢坯的长宽高分别为 2.6 m,2 m 和 0.22 m,为板坯,三维坐标方向见图 1,钢坯在炉内双排布置见图 2,钢坯长度方向与加热炉的宽度方向一致,利用 fluent 软件模拟钢坯加热时间为 140 min,保温 30 min。

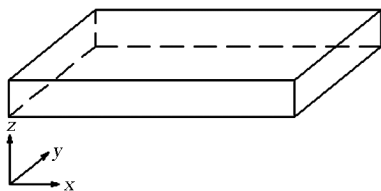


图 1 钢坯的三维坐标方向  
Fig. 1 Three dimension coordinate direction of billet

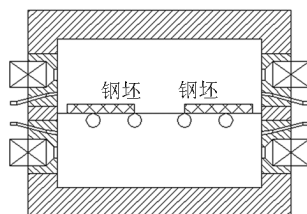


图 2 炉内钢坯布置示意图  
Fig. 2 Position of billet in furnace

边界条件采用煤气、空气的速度流量入口,压力出口为固定常压,具体见表 1。采用 UDF 函数,将蓄热燃烧后形成的温度场随时作为钢坯加热的初始条件耦合于求解过程,其炉内温度分布见图 3。

表 1 边界条件

Table 1 Boundary conditions

名称	数值	名称	位置	数值
煤气热值/(kJ·m <sup>-3</sup> )	6 270		均热上	3 870
煤气入口温度/℃	20	煤气流量	均热下	5 808
煤气压力/Pa	2 800	/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	加热上	4 514
空气压力/Pa	5 000		加热下	5 808
助燃空气温度/℃	1 000		均热上	5 147
钢坯入炉温度/℃	50	空气流量	均热下	7 725
钢坯出炉温度/℃	1 150	/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	加热上	6 003
水冷管温度/℃	200		加热下	7 725
炉子压力出口/Pa	1 500		尾部	911 (30%)
燃烧换向时间/s	60	排烟温度	侧墙	150 (70%)
		/℃		

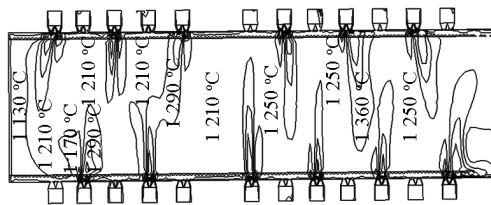


图 3 炉内温度分布

Fig. 3 Temperature distributing in furnace

物理模型主要采用标准的 K-ε 紊流模型,壁面函数采用标准壁面函数,燃烧模型采用非绝热的 PDF 模型。针对钢坯加热过程,附加能量方程和辐射模型。其中能量方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_i}(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h_j J_j + u_j(T_{ij})_{eff}) + S_h \quad (1)$$

式中, $k_{eff}$ 是有效传导系数( $k + k_t$ ,其中 $k_t$ 是湍流导热系数,由湍流模型确定), $J_j$ 表示成分 $j'$ 的扩散流量。方程右端的前三项分别表示由热传导、流体扩散和黏度扩散引起的能量损失。 $S_h$ 包含化学反应热和其他用户定义的体积功热源。

在上面的方程中,其中:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_i^2}{2}$$

其中显焓 $h$ 由理想气体定义为:

$$h = \sum_j m_j h_j$$

对于不可压缩流体,则

$$h = \sum_j m_j h_j + \frac{p}{\rho}$$

式中, $m_j$ 是成分 $j'$ 的质量百分含量,而且有 $h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT$ ,其中, $T_{ref}$ 为 298.15 K。

其辐射模型采用 Discrete Ordinates 模型,模型基本方程如下, $\frac{d(IS_i)}{dx_i} + (\alpha + \sigma_s)I(r,s) = \alpha n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(r,s') \Phi(s \cdot s') d\Omega'$  (2)

式中, $r$ 为位置矢量, $s$ 为方向矢量, $s'$ 为发散方向矢量, $s$ 为路径长度, $\alpha$ 为吸收系数, $n$ 为折射率, $\sigma_s$ 为散射系数, $\sigma$ 为 Stefan-Boltzmann 常数( $5.672 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ ), $I$ 为辐射强度总量, $T$ 为温度, $\Phi$ 为相函数, $\Omega'$ 为固相角。

## 2.2 模拟结果分析

取其中一块钢坯分析,钢坯长度方向和宽度方

向的温度分布见图4和图5,由图可知无论长度还是宽度方向钢坯的上表面温度最高,大于下表面温度,钢坯中心温度最低,其中上表面温度为1127~1130℃,下表面温度为1120~1123℃,中心温度为1100~1113℃。由图4可以看出,钢坯长度方向无论是上表面、下表面还是中心位置,均存在两边温度高,中间温度低,温差小于20℃,由图5可以看出,钢坯宽度方向温度随坐标值增加温度升高,温差小于10℃。由此可知钢坯在炉内加热,在加热炉的宽度方向,钢坯靠近炉墙和炉子中心的位置钢坯温度较高,靠近出钢口的位置钢坯温度由于均热作用,有所回落,由于热流由外向钢坯内部传热,故钢坯外表面温度均大于钢坯中心温度,钢坯的四角由于热交换面积最大,故其温度最高。造成炉内钢坯上表面温度大于下表面温度主要原因有:a. 钢坯放置在滑轨上下有汽化冷却的水冷管吸热降低钢坯温度;b. 高温热流向上流动,导致上部炉膛温度比下部炉膛温度高所致。通过调整加热炉的上下负荷的分配关系,可减少钢坯的上下表面温差,进一步提高钢坯温度的均匀性。

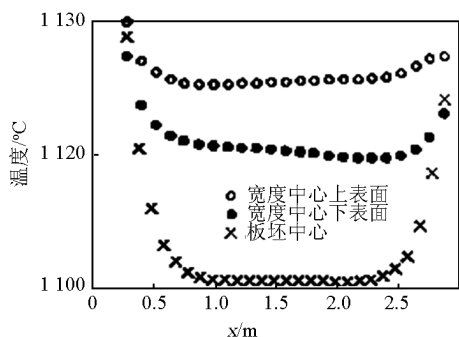


图4 钢坯长度方向温度分布  
Fig. 4 Temperature distribution of billet in length

### 3 钢坯厚度与加热时间的研究

由于加热炉尺寸较大,模拟时需要建立的网格数和计算量较多,针对不同厚度的钢坯需重复建立炉体模型,占用机时较多,调试过程复杂,因此有必要对模型进行简化。通过研究加热炉整体运行情况的仿真结果发现,炉内钢坯附近的温度场比较均匀,加热段温度稳定在1360℃左右,均热段温度基本保持1270℃,因此可以对钢坯周围的流场进行简

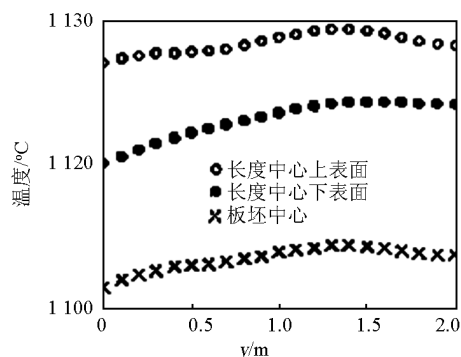


图5 钢坯宽度方向温度分布  
Fig. 5 Temperature distribution of billet in width

化,假定加热炉内烟气温度的1300℃,流速15 m/s。边界条件:进口采用速度进口,温度1300℃,速度15 m/s。出口为固定常压压力出口。采用非定常计算,计算步长为60 s,计算时间为150 min。选择钢坯的长和宽为2.6 m和2 m,厚度为150~250 mm,钢坯初始温度为50℃。

#### 3.1 不同厚度钢坯温度分布

厚度分别为150,180,220,250 mm的钢坯在1300℃的炉温加热150 min过程中钢坯中心温度变化曲线见图6。可以看出,钢坯厚度越薄,钢坯中心的升温速度越快,随着钢坯温度与炉温的差距减小,钢坯的升温速度减慢,不同厚度的钢坯升温速度趋于一致。图7~图10为加热过程中不同厚度的钢坯表面和中心的温度变化曲线,可以看出,钢坯表面开始时的升温速度较快,钢坯表面和中心的温差较大,加热30 min后,表面和中心的温差达到最大值,随着钢坯表面升温速度的下降,钢坯内部温差开始减小,135 min后温差小于30℃。

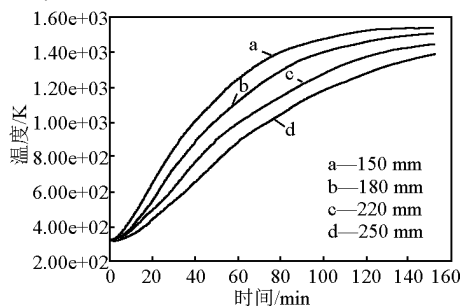


图6 不同厚度钢坯中心温度变化  
Fig. 6 Center temperature of billet in thickness

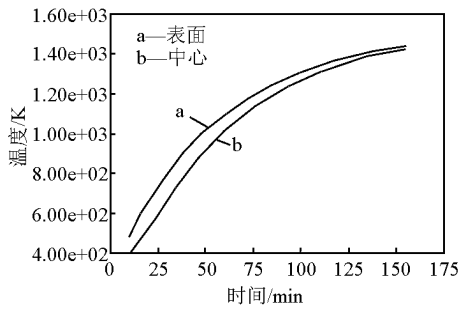


图7 150 mm厚钢坯表面与中心温度变化

Fig. 7 Surface and center temperature of billet in 150 mm thickness

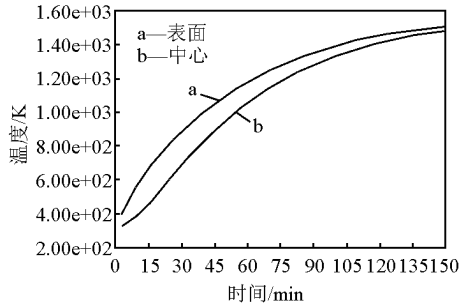


图8 180 mm厚钢坯表面与中心温度变化

Fig. 8 Surface and center temperature of billet in 180 mm thickness

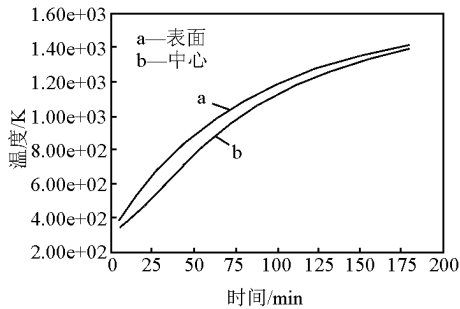


图9 220 mm厚钢坯表面与中心温度变化

Fig. 9 Surface and center temperature of billet in 220 mm thickness

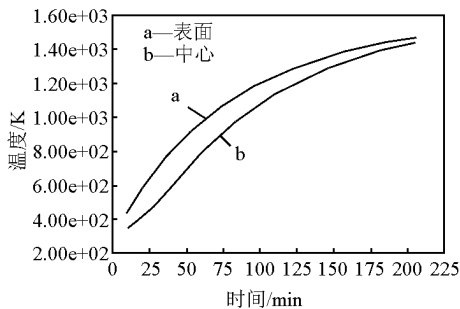


图10 250 mm厚钢坯表面与中心温度变化

Fig. 10 Surface and center temperature of billet in 250 mm thickness

现场生产中,对部分钢种而言钢坯表面温度达到1 100 ℃,钢坯内外温差小于30 ℃时即可达到出钢要求。表2是不同厚度钢坯表面温度达到1 100 ℃和内外温差小于30 ℃时的加热时间,可以看出,在保持1 300 ℃恒定加热的条件下,当钢坯表面温度达到出钢要求时,随着钢坯厚度的增加使钢坯内外温差小于30 ℃的继续加热时间越长。

表2 钢坯厚度与加热时间表

Table 2 Thickness and heating time of billet

钢坯厚度/mm	表面达到1 100 ℃的加热时间/min	内外温差小于30 ℃的加热时间/min	实际停留时间/min
150	115	105	147
180	130	150	210
220	155	165	231
250	155	225	315

需要指出的是,表2中的时间是钢坯在加热炉中的实际加热时间,即经过均热段和加热段的时间,钢坯在加热炉中的时间还应包括钢坯入炉后经过预热段的一段时间。

### 3.2 钢坯厚度与炉中停留时间的公式研究

根据不同厚度钢坯的加热模拟结果,有必要对上述结果进行总结,得出钢坯厚度与停留时间间的经验公式,有利于生产时间的操作优化。

由能量守恒和传热定律得:

$$C_p M \cdot (T_2 - T_1) = Q = Q_{\text{传}} + Q_{\text{辐}}$$

式中,  $Q_{\text{传}}$  为钢坯通过热传导接受的热量,  $Q_{\text{辐}}$  为钢坯通过热辐射接受的热量,  $C_p$  为钢坯的热容,  $M$  为钢坯的质量,  $T_1$  和  $T_2$  分别为钢坯的初始温度和出钢温度,将  $Q$  对时间  $t$  多项式展开得:

$$Q = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + \dots$$

$$\text{又 } M = \rho \cdot S \cdot h$$

其中,  $\rho$  为钢坯密度,  $S$  为钢坯表面积,  $h$  为钢坯厚度。

$$\text{则有, } h = \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + \dots}{C_p \rho S \cdot (T_2 - T_1)},$$

$$\text{令 } C_i = \frac{c_i}{C_p \rho S \cdot (T_2 - T_1)},$$

$$\text{则, } h = C_0 + C_1 t + C_2 t^2 + \dots$$

截取多项式前三项,得到钢坯厚度  $h$  (mm) 与在加热炉中停留时间  $t$  (min) 的关系式:

$$h = C_0 + C_1 t + C_2 t^2$$

代入数据,得:

$$C_0 = 7.75, C_1 = 1.11, C_2 = -0.001$$

根据求根公式整理得:

$$t = 555 - 100 \sqrt{31.58 - \frac{h}{10}} \quad (3)$$

图 11 是钢坯厚度与加热时间的关系曲线。表 3 是公式预测数据与现场实测数据的比较,误差小于 5%,可以看出公式的可信度较高,有利于现场加热制度的优化操作。

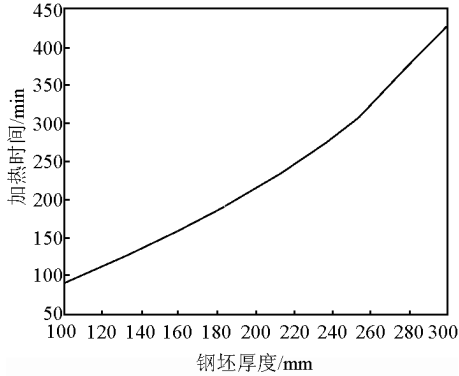


图 11 钢坯厚度与加热时间关系曲线

Fig. 11 Thickness and heating time of billet

表 3 经验公式与实测数据比较

Table 3 Contrast of formula and data in test

钢坯厚度 /mm	实测钢坯停留时间 /min	计算钢坯停留时间 /min
220	234	245

因为加热炉产量  $R$  (t/h) 与单个钢坯在加热炉内停留时间  $t$  (min) 存在下列关系:

$$R = C_{P\text{钢}} \cdot s \cdot \frac{L}{T} \cdot \frac{60}{1\,000} \cdot 2 \quad (4)$$

式中,  $s$  为钢坯纵截面面积(钢坯厚度  $h \times$  钢坯长度),  $L$  为加热炉长。由式(3)和(4)可以得到钢坯厚度与加热炉产量的关系,由此可以确定加热不同厚度钢坯情况下的加热炉生产能力。

## 4 结论

1) 在炉内加热的钢坯,由于受钢坯由外向内传热、炉内水冷管、滑轨及频繁换向等因素的影响,钢坯存在上下温差,四角边缘温度高,钢坯靠近出钢口位置的温度低等问题。

2) 合理调整加热炉的上下负荷的分配关系,可进一步改善钢坯温度的均匀性。

3) 钢坯在开始加热时升温较快,到一定温度后,升温渐缓。不同厚度钢坯的加热时间的研究表明:钢坯越厚,其加热时间越长。

4) 由数值拟合得出的钢坯厚度与加热时间的公式,可在实际中预测不同厚度的钢坯加热时间,为加热炉钢坯加热制度的制定和优化提供参考。

## 参考文献

- [1] 蒋受宝,蒋绍坚,彭锐,等. 钢坯加热温度特性数学解析[J]. 工业炉,2008,30(1):23-25
- [2] 杨世铭. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,1987:113-122
- [3] 刘显军,徐光,熊俊伟. 钢坯加热升温曲线优化[J]. 热加工工艺,2006,35(17):57-60
- [4] 欧剑平,詹树华,马爱纯,等. 蓄热式连续推钢加热炉内钢坯加热过程动态数值模拟[J]. 过程工程学报,7(2):209-215
- [5] 王秉铨. 工业炉设计手册[M]. 北京:机械工业出版社,1996:105-132

# Numerical simulation of billet heating

Chen Guanjun

(Shougang Research Institute of Technology, Beijing 100043, China)

[Abstract] According to the case of billet heating in a regenerative type heating furnace, the temperature distributing of billet about upper surface, undersurface and center surface in length and width is studied by computational fluid dynamics (CFD) in this article, and the questions of billet such as different temperature of upper surface and undersurface, the higher temperature of foursquare margin and the lower temperature of tapping orifice are put forward. The relation of different thick billet and the heating time is simulated and studied, the result of simulation and the heating time in the actual heating furnace is compared, and the expressions of thickness and heating time is educed by numerical suit, and put into production. The above result of study can offer foundation for the establishment and optimizing of billet heating system.

[Key words] heating furnace; billet; heating; simulation