



炉膛高度对步进式轧钢加热炉性能的影响

李浩¹, 戴方钦^{1*}, 丁翠娇², 郭悦¹

(1. 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 湖北 武汉 430081;

2. 宝武钢铁集团宝钢股份中央研究院武汉分院, 湖北 武汉 430080)

摘要: 以能量平衡为基础, 采用辐射段法模型建立了炉气段、炉围段和钢坯表面段的能量方程组, 通过钢坯表面的热流与内部导热方程耦合求解, 其中炉气和炉围的温度场采用主变量修正法求解, 钢坯温度场采用隐式有限差分求解, 与现场实测板坯温度对比验证模型的准确性, 分析了上炉膛各段高度对钢坯温度场及排烟温度的影响。结果表明, 预热段高度在 0.5~0.9 m, 高度每增加 0.2 m, 钢坯出炉时上表面温度升高约 2.8℃, 排烟温度降低约 10℃; 加热一段高度在 0.9~1.9 m, 高度每增加 0.2 m, 钢坯出炉时上表面温度平均增加 2.5℃, 排烟温度平均降低 8.5℃; 加热二段和均热段高度变化对钢坯出炉时表面温度及排烟温度影响不大。合理确定预热段和加热一段高度有利于钢坯加热并节省燃料消耗。

关键词: 炉膛高度; 步进式轧钢加热炉; 段法; 水冷梁; 钢坯温度; 排烟温度

中图分类号: TG301

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2018)03-0551-06

Effect of Furnace Height on Performance of Walking-beam Reheating Furnace

Hao LI¹, Fangqin DAI^{1*}, Cuijiao DING², Yue GUO¹

(1. Key Lab for Ferrous Metallurgy and Resources, Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China;

2. Baowu Iron and Steel Group, Wuhan Branch of Baosteel Central Research Institute, Wuhan, Hubei 430080, China)

Abstract: Based on energy balance, energy-balance equations for gas volume zones, furnace surface zones and slab surface zones were set up by radiation zonal method, by the slab surface heat flow and internal thermal equations coupling solution. And the temperature profiles of gas volume zones and furnace surface zones were obtained by using the main variable correction method, the slabs temperature profiles by finite difference method. The correctness of the model was verified by comparing the slab temperature with the actual situation. The influence of the height of the upper furnace on the temperature field and the exhaust gas temperature of the slab were analyzed. The results showed that for the preheating section height of 0.5~0.9 m, with the height of each increase of 0.2 m, the upper surface temperature before the slab released increased by about 2.8℃, the exhaust temperature decreased by about 10℃. For the first heating section of height of 0.9~1.9 m, with the height of each increase of 0.2 m, the upper surface temperature before the slab released increased by about 2.5℃, the average exhaust gas temperature decreased by 8.5℃. The influence of the height on the temperature of the second heating section and the soaking section were not significant. It can be seen that it was reasonable to determine the height of the preheating section and the heating section to facilitate the heating of the slab and fuel consumption saving.

Key words: furnace height; walking-beam reheating furnace; zone method; water-cooled beam; slab temperature; exhaust temperature

1 前言

加热炉是轧钢的重要设备, 直接制约产品质量。随着能源短缺日益严重和现代消费对产品质量要求不断提高, 降低燃料消耗和提高产品质量已成为轧钢生产越来越紧迫的任务。目前, 我国工业炉窑的热效率很低,

消耗的能源约占全国能耗总量的 1/4^[1]。研究加热炉内热过程至关重要, 加热炉内热过程包括燃烧、流动及传热传质, 其中传热是炉内发生的最重要的传递过程, 主要是辐射换热。本工作用辐射换热模型研究加热炉内热过程。

目前, 辐射换热模型主要有段法^[2-6]、流法^[7]、蒙特

收稿日期: 2017-08-14, 修回日期: 2017-10-26

作者简介: 李浩(1993-), 男, 湖北省潜江市人, 硕士研究生, 冶金热能专业; 戴方钦, 通讯联系人, E-mail: daifangqin@wust.edu.cn.

引用格式: 李浩, 戴方钦, 丁翠娇, 等. 炉膛高度对步进式轧钢加热炉性能的影响. 过程工程学报, 2018, 18(3): 551-556.

Li H, Dai F Q, Ding C J, et al. Effect of Furnace Height on the Performance of Walking-beam Reheating Furnace (in Chinese).

Chin. J. Process Eng., 2018, 18(3): 551-556, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.217309.

卡洛法^[8]、有限体积法^[9,10]等。许多学者已将段法模型应用于加热炉研究。李国军等^[11]采用三维段法模型计算炉内的辐射换热,分析了钢坯表面黑度及炉气吸收系数对钢坯加热过程的影响。赫金龙^[12]对 1750 mm 热轧带钢蓄热式加热炉建立了三维段法模型,分析了钢坯冷热装、燃料热值、空气消耗系数、炉宽和炉高方向上燃料分布及换向方式等热工及操作参数对蓄热式加热炉热过程的影响,对实际的生产操作具有一定的指导意义。近年来对于加热炉热过程段法模型的研究大多忽略了水冷梁的影响,且只研究了热工操作参数对实际生产的影响,实际上水冷梁对全炉的平衡有影响且加热炉结构参数也会影响炉内的热工过程。现阶段关于连续加热炉结构参数是根据炉的生产能力、钢坯尺寸、加热制度等确定,没有严格的计算公式。采用考虑水冷梁影响的段法模型研究结构参数的影响对于炉型优化具有一定的指导意义。

本工作采用数论网格法^[13]计算辐射直接交换面积,针对某厂一步进梁式板坯加热炉建立三维段法模型,对钢坯的导热方程采用全隐式有限差分^[14,15]进行求解,在 MATLAB 7.11.0(R2010b)软件平台中开发计算程序,相互迭代求解加热炉内炉气、炉围表面和钢坯的温度场,并与现场实际数据进行对比,验证模型的准确性,并以该模型为基础,分别讨论了加热炉炉膛高度变化对加热板坯出炉温度及排烟温度的影响。

2 模型的建立

2.1 物理模型

某钢铁公司步进式加热炉炉膛结构示意图如图 1 所示,均热段长 8.87 m,上炉膛高 1.5 m;加热二段长 11.23 m,上炉膛高 1.9 m;加热一段长 13.19 m,上炉膛高 1.9 m;预热段长 10.3 m,上炉膛高 0.9 m;炉内宽 11.7 m,各段下炉膛高 2.5 m。加热板坯长宽厚分别为 9600, 1200 和 230 mm。

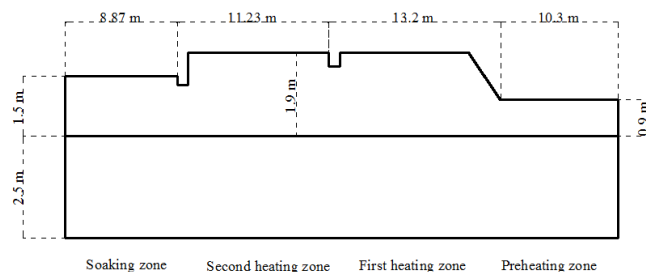


图1 加热炉炉膛示意图

Fig.1 Heating furnace schematic diagram

2.2 数学模型

加热炉内实际传热过程比较复杂,为简化计算,作如下假设:(1) 炉内的气体为灰体且充满炉膛;(2) 钢坯相邻的侧面之间无间隙,将炉内钢坯看成一个整体,认为上、下炉膛互不影响,相互完全隔离;(3) 不考虑水冷梁与钢坯之间的传热,认为水冷梁只对下炉膛高温炉气有影响;(4) 炉气段、炉围段和钢坯段温度和热物性均匀;(5) 钢坯在炉内瞬间完成步进动作;(6) 忽略钢坯的表面氧化,即忽略氧化铁皮对传热的影响。

2.2.1 气体段能量平衡方程

任意一段炉气 g_i 内既有燃料燃烧,又有炉气的流入和流出,并发生热交换。

收入项包括:(1) 燃料燃烧的化学热;(2) 燃料和助燃空气带入的物理热;(3) 流入本段的炉气带入的物理热;(4) 本段炉气的辐射热收入项。

支出项包括:(1) 炉气与钢坯、炉围的对流换热;(2) 流出本段的炉气带走的能量。

能量平衡方程为

$$\sigma \sum_{j=1, j \neq i}^{N_g} \overline{G_j G_i} (T_{g_j}^4 - T_{g_i}^4) + \sigma \sum_{j=1}^{N_w} \overline{W_j G_i} (T_{w_j}^4 - T_{g_i}^4) + \sigma \sum_{j=1}^{N_s} \overline{S_j G_i} (T_{s_j}^4 - T_{g_i}^4) + Q_{com,i} + Q_{f,i} + Q_{a,i} + Q_{mov,i} - Q_{c,i} = 0, (1)$$

式中, N_g , N_w 和 N_s 分别为气体段、炉围段和钢坯段总数, T 为温度(K), 下标 g, w, s 分别表示炉气、炉围及钢坯, 史蒂芬-玻尔兹曼常数 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$, $\overline{G_j G_i}$, $\overline{W_j G_i}$ 和 $\overline{S_j G_i}$ 为辐射全交换面积(m^2), 其中 $\overline{G_j G_i}$, $\overline{W_j G_i}$ 和 $\overline{S_j G_i}$ 分别为第 j 气体段、第 j 炉围段和第 j 钢坯段对第 i 气体段的辐射全交换面积(m^2), $Q_{com,i}$ 为燃料燃烧的化学热(W), $Q_{a,i}$, $Q_{f,i}$ 分别为预热空气、燃料所带入的物理热(W), $Q_{mov,i}$ 为烟气的流动载热(W), $Q_{c,i}$ 为炉气与钢坯表面和炉围表面的对流换热(W)。

上、下炉膛炉气的能量平衡方程不同,下炉膛炉气能量方程中支出项应包括高温炉气对水冷梁的辐射和对流换热。在稳态情况下,该项热支出等于水冷梁外表面面向内表面的导热。由能量平衡可知,沿厚度方向的导热与冷却水和汽化冷却带走的总能量相等,即:

$$Q_{g-li} = Q_{out,i-in,i} = Q_{z,i}, (2)$$

式中, Q_{g-li} 为气体段对第 i 段水冷梁的辐射换热和对流换热总和(W), $Q_{out,i-in,i}$ 为第 i 段水冷梁外表面面向内表面的导热(W), $Q_{z,i}$ 为第 i 段水冷梁中汽化冷却系统带走的能量(W)。

由于水冷梁外表面温度比炉气温度低,且水冷梁外表面有低水泥浇注料及硅酸铝纤维毯包扎,用炉围内表面的温度代替水冷梁外表面的温度,可以构造函数:

$$f(T_w) = \frac{2\pi l(T_{w,out} - T_{w,in})}{\frac{\ln(d_1/d_2)}{\lambda_1} + \frac{\ln(d_2/d_3)}{\lambda_2} + \frac{\ln(d_3/d_4)}{\lambda_3}} = \frac{Q_z}{L}, \quad (3)$$

式中, $T_{w,out}$ 为水冷梁外表面温度(K), $T_{w,in}$ 为水冷梁内表面温度(K), d_1 为低水泥浇注料外壁直径(m), d_2 为硅酸铝纤维毯外径(m), d_3 为水梁钢管外径(m), d_4 为水梁钢管内径(m), λ_1 为低水泥浇注料导热系数[W/(m·K)], λ_2 为硅酸铝纤维毯的导热系数[W/(m·K)], λ_3 为水梁管道的导热系数[W/(m·K)], Q_z 为单位时间内冷却系统带走的总能量(W), L 为水冷梁的段数。

由于炉气黑度与炉气温度有关, 尤其当加热炉使用气体燃料时, 炉气温度对炉气黑度的影响更大, 采用下式^[16,17]对炉气黑度进行修正。

$$\varepsilon_g = 1 - e^{-K_q \gamma_n p^s}, \quad (4)$$

$$K_q = \left(\frac{0.78 + 1.6\gamma_{H_2O}}{\sqrt{p_n/p_0}} - 0.1 \right) \left(1 - 0.37 \frac{T_g}{1000} \right) \times 10^{-5}, \quad (5)$$

$$s = 3.6V/A, \quad (6)$$

式中, ε_g 为炉气的黑度, γ_{H_2O} 为燃烧产物中水的容积份额, γ_n 为燃烧产物中三原子气体所占的份额, 主要为 H_2O 和 CO_2 , p_0 为大气压(Pa), p 为气体的总压力(Pa), p_n 为三原子气体的分压力(Pa), s 为平均射线行程长(m), V 为气体容积(m^3), A 为包壁面积(m^2)。

2.2.2 炉围表面段能量平衡方程

炉围内表面在炉内与其它段相互辐射, 炉气对流, 外表面与环境相接, 稳态情况下, 炉围内表面的热量收入等于其沿厚度方向的导热。

收入项包括气体段和钢坯表面段的辐射热和气体段的对流换热。

支出项为内表面向外表面方向的热传导。

能量平衡方程为

$$\sigma \sum_{j=1}^{N_g} \overline{G_j W_i} (T_{g_j}^4 - T_{w_i}^4) + \sigma \sum_{j=1, j \neq i}^{N_w} \overline{W_j W_i} (T_{w_j}^4 - T_{w_i}^4) + \sigma \sum_{j=1}^{N_s} \overline{S_j W_i} (T_{s_j}^4 - T_{w_i}^4) + h_{gwi} F_{wi} (T_{g_i} - T_{w_i}) = \frac{T_{w_i} - T_{\infty}}{\frac{1}{h_{\infty}} + \sum \frac{d_{wi}}{\lambda_i}} F_{wi}, \quad (7)$$

式中, $\overline{G_j W_i}$ 和 $\overline{W_j W_i}$ 分别为第 j 气体段和第 j 炉围段对第 i 炉围段的辐射全交换面积(m^2), $\overline{S_j W_i}$ 为第 j 钢坯段对第 i 气体段的辐射全交换面积(m^2), h_{gwi} 表示气体段与第 i 炉围段的对流换热系数[W/($m^2 \cdot K$)], F_{wi} 为第 i 段炉围的面积(m^2), T_{∞} 为环境温度(K), h_{∞} 为炉围外表面与周围空气的对流换热系数[W/($m^2 \cdot K$)], $\sum(d_{wi}/\lambda_i)$ 为第 i 段炉围各层材料的厚度与导热系数之比的总和[W/(m·K)]。

2.2.3 钢坯表面段能量平衡方程

钢坯表面能量平衡方程与炉围段相似, 但钢坯内部并非稳态, 用差分方程求解。

收入项包括气体段和炉围表面段及其它各钢坯表面段的辐射和与气体段的对流换热。

支出项为钢坯表面段沿钢坯厚度方向的热传导。

能量平衡方程为

$$\sigma \sum_{j=1}^{N_g} \overline{G_j S_i} (T_{g_j}^4 - T_{s_i}^4) + \sigma \sum_{j=1}^{N_w} \overline{W_j S_i} (T_{w_j}^4 - T_{s_i}^4) + \sigma \sum_{j=1}^{N_s} \overline{S_j S_i} (T_{s_j}^4 - T_{s_i}^4) + Q_{c1,i} = Q_{s,i}, \quad (8)$$

式中, $\overline{G_j S_i}$, $\overline{W_j S_i}$ 和 $\overline{S_j S_i}$ 分别为第 j 气体段, 第 j 炉围段和第 j 钢坯段对第 i 钢坯段的辐射全交换面积(m^2), $Q_{c1,i}$ 为炉气与钢坯表面的对流换热量(W), $Q_{s,i}$ 为钢坯沿其厚度方向的导热热量(W)。

2.2.4 钢坯加热过程

在模型段内, 沿钢坯运动方向的温度梯度远小于厚度方向的温度梯度, 即 $\partial T / \partial l \ll \partial T / \partial y$, 且由于工艺要求沿炉子宽度方向钢坯温度均匀, 将钢坯的加热过程简化为一维非稳态导热问题:

$$\rho c (\partial T / \partial \tau) = \partial (\lambda \partial T / \partial y) / \partial y, \quad (9)$$

式中, λ 为钢坯的导热系数[W/(m·K)], y 为钢坯厚度方向上的坐标(m), q_u 为钢坯上表面热流密度(W/ m^2), q'_u 为钢坯下表面热流密度(W/ m^2), δ 为钢坯的厚度(m), τ 为时间(s), τ_m 为钢坯在炉内的时间(s)。边界条件为 $-\lambda(\partial T / \partial y)|_{y=\delta} = q_u$, $-\lambda(\partial T / \partial y)|_{y=0} = q'_u$, $0 \leq \tau \leq \tau_m$;

初始条件为 $T(y, \tau)|_{\tau=0} = f(y)$, $0 \leq y \leq \delta$ 。

以 Q235 普碳钢为研究对象, 不同温度下钢坯的热物性不同, 为提高模型的精度进行变物性处理^[18]。

钢坯的导热系数如下:

$$\lambda(t) = \lambda_0 + K_1(1/100) - K_2 / \cosh\{K_3[(t-t_0)/100]\}. \quad (10)$$

其中各常数的值见表 1。

钢坯的比热可用下式表示:

$$c(t) = c_0 + a_1(t/1000)^n + a_2 \exp(-a_3/t - t_0). \quad (11)$$

其中各常数值见表 2。常数 a_3 , 当 $t < t_0$ 时取分子, 当 $t \geq t_0$ 时取分母。

3 模型求解

模型求解流程如图 2 所示。各段的辐射直接交换面积采用数论网格法求解, 能量平衡方程组用主变量修正法求解, 钢坯的热传导方程采用隐格式有限差分进行离散追赶法求解。

表 1 钢坯的导热系数参数
Table 1 Parameter of thermal conductivity of steel

Steel	$\lambda_0/[\text{kcal}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})]$	$K_1/[\text{kcal}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}^2)]$	$K_2/[\text{kcal}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})]$	$K_3/^\circ\text{C}^{-1}$	$t_0/^\circ\text{C}$
Low-carbon steel (0.05~0.2% C)	54.3	0.0	31.7	0.245	975
Medium-carbon steel (0.2~0.6% C)	48.1	0.0	26.9	0.285	935
High-carbon steel (0.6~1.3% C)	48.3	0.0	27.2	0.235	900
Low-alloy steel	42.0	0.0	18.5	0.24	950

表 2 钢坯的比热参数表
Table 2 Parameter table of specific heat capacity of steel

Steel	$c_0/[\text{kcal}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})]$	$a_1/[\text{kcal}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C}^{n+1})]$	$a_2/[\text{kcal}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})]$	$a_3/^\circ\text{C}^{-1}$	n	$t_0/^\circ\text{C}$
Carbon steel	0.115	0.0477	0.194	0.0099/0.0261	1.0	768
Low-alloy steel	0.113	0.0235	0.16	0.0047/0.0135	5.0	740

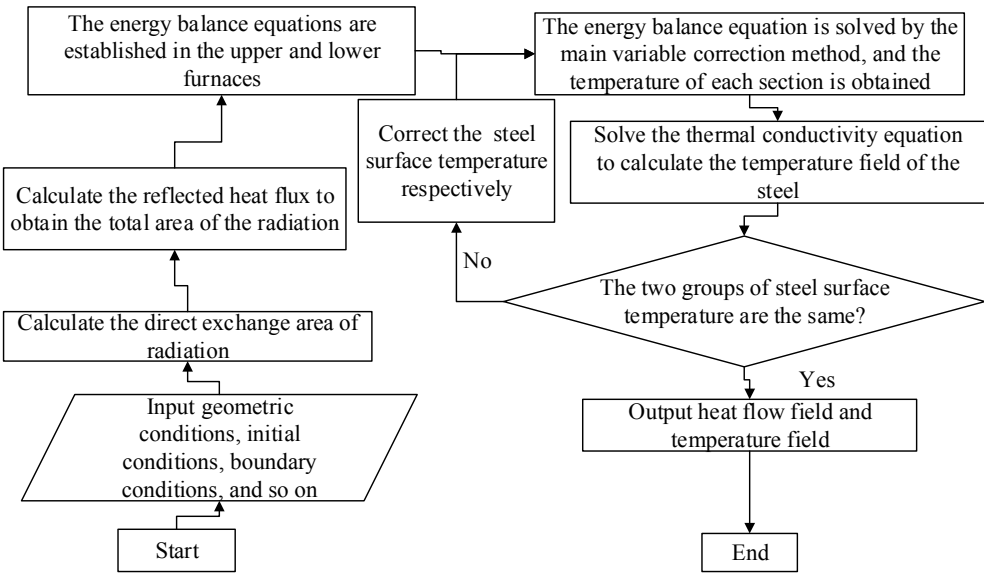


图 2 模型求解流程图
Fig.2 Model solving flowchart

当假定钢坯表面段初始温度后,可由主变量修正法求出相应的炉气和炉围温度,分别求出钢坯上、下表面的热流量,以该热流量为边界条件求解钢坯导热差分方程,可求出包括钢坯所有节点的温度场.比较分别由能量平衡方程组和导热差分方程组求出的两组钢坯上、下表面温度场,如两组温度场不相同,则将导热差分方程求得的钢坯温度场作为能量平衡方程组中钢坯表面段的温度,再进行循环迭代,直到两组钢坯表面温度在各段温度相同为止.

4 模型计算结果与分析

预热段、加热二段、加热一段和预热段总燃料消耗量分别取工况值 4681, 16632, 14112 和 0 m³/h, 燃料分配比例上炉膛约占 45%, 下炉膛约占 55%, 燃料低位发

热量 $Q_d=8778 \text{ kJ/m}^3$. 加热炉在额定工况下(冷装)的生产率为 300 t/h 时炉内温度场模拟结果如图 3 所示. 由图可知,从预热段到均热段,炉内气体的温度逐渐升高,钢坯的温度也不断升高.在预热段,一方面由于没有热负荷的输入,加上冷钢坯吸热的影响,气体的整体温度不高,钢坯的平均升温速度较慢,其厚度方向的温差相对较小;在加热段,随燃料消耗量增加,气体的整体温度不断升高,钢坯的平均升温速度加快,其厚度方向的温差变大;到均热段,随燃料消耗量减少,炉内气体温度分布较均匀,且钢坯的内外温差缩小.

炉上、下表面温度模拟值与实际值的比较见图 4. 由图可知,钢坯在加热炉内加热 2.5 h 出炉时上、下表面温度的模拟值分别为 1235.8 和 1242.3 °C, 钢坯内各节点的温差不超过 25 °C, 该工况下要求出炉钢坯温度

为 1220~1250℃, 模拟数据与现场实测数据的误差最大仅为 5.9%, 最小为 0.1%, 在允许范围内, 基本符合现

场实际, 模型吻合较好.

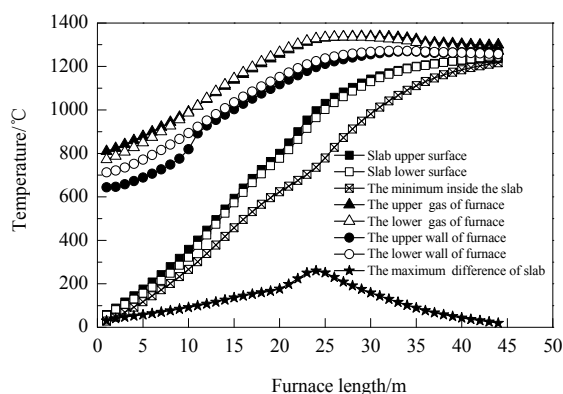


图3 炉内温度场

Fig.3 Furnace temperature field

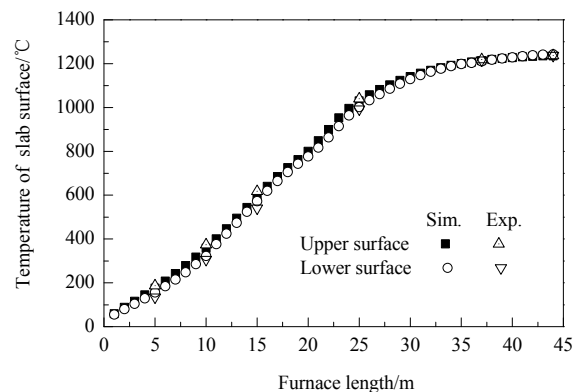


图4 炉上下表面温度模拟值与实际值的比较

Fig.4 Comparison of analog and actual values of temperature of upper and lower surface of furnace

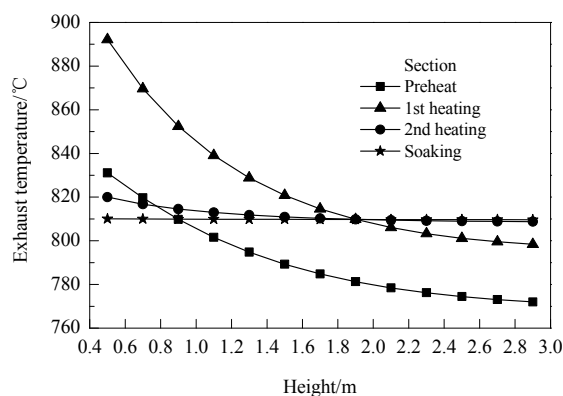
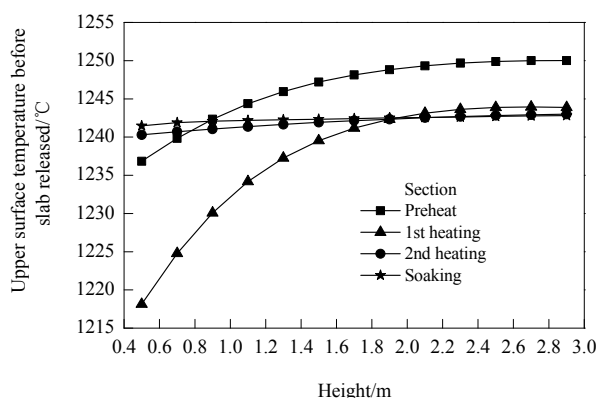


图5 上炉膛各段高度对钢坯上表面出炉温度和排烟温度的影响

Fig.5 Influence of section height of upper furnace on upper surface temperature before the slab released and exhaust temperature

上炉膛各段高度对钢坯出炉时上表面温度和排烟温度的影响见图 5。由图可知, 当炉气充满炉膛时, 随上炉膛各段高度增加, 钢坯出炉时上表面温度逐渐增加, 排烟温度逐渐降低。上炉膛预热段高度从 0.5 m 增加到 0.9 m 时, 钢坯出炉时上表面温度明显升高, 排烟温度降幅较大, 高度每增加 0.2 m, 钢坯上表面温度升高约 2.8℃, 排烟温度平均降低 10.0℃; 当高度从 0.9 m 增加到 1.9 m 时, 钢坯上表面温度升高趋势减缓, 排烟温度降幅变小, 高度每增加 0.2 m, 钢坯上表面温度平均升高约 1.3℃, 排烟温度约降低 5.7℃; 高度继续增加, 钢坯上表面出炉温度及排烟温度变化不明显。由于预热段高度增加, 钢坯与高温炉气及侧墙间的辐射交换面积会增大, 但与炉顶的辐射交换面积会减小, 同时与高温炉气的对流换热系数减小。综合考虑, 当预热段高度小于 0.9 m 时, 高度增加对辐射换热的增强效果大于对流换热的减弱效果, 有利于钢坯与炉气、炉围换热; 预热段

高度继续增加, 辐射换热的增加效果渐渐减弱, 对流换热的减弱效果反而增强, 钢坯表面温度增加趋势不明显, 同时排烟温度降幅不大。加热炉上炉膛预热段高度取 0.9 m 较合理。

加热一段高度从 0.5 m 增加到 0.9 m 时, 对钢坯出炉时上表面温度和排烟温度影响明显, 高度每增加 0.2 m, 钢坯上表面温度增加约 6.0℃, 排烟温度平均降低 19.9℃; 高度从 0.9 m 增加到 1.9 m 时, 每增加 0.2 m, 钢坯出炉时上表面温度平均升高 2.5℃, 排烟温度平均降低 8.5℃; 高度继续增加, 钢坯出炉时上表面温度和排烟温度基本不变。由于燃料加入, 加热一段炉气、炉围和钢坯表面温度均增加, 尽管钢坯温度增长更快, 但与炉气和炉围温差较大且温度的四次方之差比预热段大, 整体变化幅度比预热段大。

加热二段和均热段高度变化对钢坯出炉时上表面温度及排烟温度的影响整体趋势与预热段和加热一段

相同,但影响较小。从图3可看出,在预热段和加热一段,炉气、炉围与钢坯表面温度之差比加热二段和均热段大,对流换热强度大,由于钢坯表面温度升高比炉气和炉围快,加热二段和均热段温度的四次方之差减小。高度变化相同时,预热段和加热一段辐射换热和对流换热整体改变的强度大于加热二段和均热段。在保证炉气充满炉膛的前提下,合理地确定预热段和加热一段的高度更有利于钢坯加热和节约燃料。建造新加热炉时,在满足结构要求的前提下,适当地降低加热二段和均热段的高度不会对钢坯出炉时的表面温度和排烟温度有较大影响,可节约部分建造成本。

5 结论

以能量平衡方程为基础,采用段法模型模拟炉内辐射换热,分别给出了炉气段、炉围段和钢坯表面段的能量平衡方程,采用主变量修正法求解,得到如下结论:

(1) 模型计算结果与实际生产数据的误差最大仅为5.9%,最小为0.1%,模型可靠。

(2) 预热段和加热一段高度低于0.9 m时,随高度增加,钢坯出炉时表面温度明显升高,排烟温度明显降低,其中加热一段高度变化的影响幅度比预热段高度变化更大;预热段高度大于1.3 m后、加热一段高度大于1.9 m后,高度变化对钢坯出炉时表面温度和排烟温度影响不明显。

(3) 加热二段和均热段高度在0.5~2.9 m时对钢坯出炉时表面温度及排烟温度基本无影响。用该模型确定预热段和加热一段高度有利于钢坯加热和节省燃料。

参考文献:

- [1] Song Z P, Shi J. Discussion on Industrial Furnace Energy Saving and Environmental Protection in China [J]. *Industrial Furnace*, 2014, 36(1): 1-8.
- [2] Tan C K, Jenkins J, Ward J, et al. Zone Modelling of the Thermal Performances of a Large-scale Bloom Reheating Furnace [J]. *Appl. Therm. Eng.*, 2013, 50(1): 1111-1118.
- [3] Hu Y, Tan C K, Broughton J, et al. Development of Transient Mathematical Models for a Large-scale Reheating Furnace Using Hybrid Zone-CFD Methods [J]. *Energy Procedia*, 2015, 75: 3076-3082.
- [4] Zhou W, Qiu T. Zone Modeling of Radiative Heat Transfer in Industrial Furnaces Using Adjusted Monte-Carlo Integral Method for Direct Exchange Area Calculation [J]. *Appl. Therm. Eng.*, 2015, 81: 161-167.
- [5] Guo Y, Dai F, Yang S. A Model Study of Thermal Characteristics of Decarburization Annealing Furnace for Silicon Steel Strip [J]. *Appl. Therm. Eng.*, 2016, 99: 537-544.
- [6] Ebrahimi H, Zamaniyan A, Mohammadzadeh J S S, et al. Zonal Modeling of Radiative Heat Transfer in Industrial Furnaces Using Simplified Model for Exchange Area Calculation [J]. *Appl. Math. Modell.*, 2013, 37(16/17): 8004-8015.
- [7] Selcuk N, Siddalla R G, Beér J M. A Comparison of Mathematical Models of the Radiative Behaviour of a Large-scale Experimental Furnace [J]. *Symposium on Combustion*, 1977, 16(1): 53-62.
- [8] Howell J R, Perlmutter M. Monte Carlo Solution of Radiant Heat Transfer in a Nongrey Nonisothermal Gas with Temperature Dependent Properties [J]. *AIChE J.*, 1964, 10(4): 562-567.
- [9] Liu L H. Finite Volume Method for Radiation Heat Transfer in Graded Index Medium [J]. *J. Thermophys Heat Transfer*, 2015, 20(1): 59-66.
- [10] Han S H, Chang D, Huh C. Efficiency Analysis of Radiative Slab Heating in a Walking-beam-type Reheating Furnace [J]. *Energy*, 2011, 36(2): 1265-1272.
- [11] 李国军, 陈海耿. 三维段法数学模型在加热炉上的应用 [J]. *中国冶金*, 2010, 20(3): 7-10.
Li G J, Chen H G. Application of Three-dimensional Zone Method Mathematic Model on Reheat Furnace [J]. *China Metallurgy*, 2010, 20(3): 7-10.
- [12] 赫金龙. 蓄热式加热炉段法模型研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2010: 47-63.
He J L. Study of Zone Model on Regenerative Reheating Furnace [D]. Shenyang: Northeastern University, 2010: 47-63.
- [13] Ye G. Monte-Carlo and Number Theory Grid Method for Calculating Multiple Integrals [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2001, 41(1): 20-23.
- [14] 杨能彪. 一维非稳态导热问题的数值计算 [J]. *青海师范大学学报(自然科学版)*, 2006, (4): 24-26.
Yang N B. Non-steady State Numerical Solution about One-dimensional Heat Transmition [J]. *Journal of Qinghai Normal University (Natural Science)*, 2006, (4): 24-26.
- [15] 张亚刚, 马廷福, 王燕, 等. 求解一维非定常对流扩散反应方程的高精度紧致差分格式 [J]. *数学的实践与认识*, 2017, 47(13): 263-270.
Zhang Y G, Ma T F, Wang Y, et al. High Order Compact Difference Scheme for Solving the Unsteady Convection Diffusion Reaction Equation [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2017, 47(13): 263-270.
- [16] 赵海. 蓄热式连续加热炉数学模型的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2001: 49-52.
Zhao H. Study of the Mathematical Model for Regenerative Reheating Furnace [D]. Shenyang: Northeastern University, 2001: 49-52.
- [17] 英克鲁佩勒. 传热和传质基本原理 [M]. 葛新石, 叶宏, 译. 北京: 化学工业出版社, 2007: 517.
Incropera. Fundamentals of Heat and Mass Transfer [M]. Ge X S, Ye H. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 517.
- [18] 马科夫斯基, 拉夫连契克. 加热炉控制算法 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1985: 7-8.
Markovsky, Rafflesiank. Control Algorithm of Heating Furnace [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1985: 7-8.