

步进式加热炉内板坯温度场模拟分析

金 明¹, 倪红卫¹, 张 华¹, 孔勇江², 郭满平²

(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. 武汉钢铁股份有限公司炼钢总厂, 湖北 武汉, 430083)

摘要:以某公司热轧带钢厂的三段步进式加热炉为研究对象, 通过建立三维数学模型, 运用 ANSYS 软件分析板坯在炉内加热过程中的温度分布, 并研究炉内均热段的温度和保温时间及氧化铁皮厚度对板坯温度场的影响。结果表明, 板坯加热后最高温度分布在板坯端面角部, 最低温度位于板坯中心部位, 在设定的加热制度下, 板坯经炉内加热后, 其出炉温度、断面温差分别为 1273.48、12.91 °C, 板坯温度分布比较均匀, 满足轧制要求; 随着均热温度的下降, 板坯的出炉温度随之降低, 而断面温差变化较小; 随着保温时间的缩短, 板坯的出炉温度变化不大, 而断面温差明显增大; 随着板坯表面氧化铁皮厚度的增加, 板坯中心部位的温度明显降低、断面温差明显增大; 在设定的加热制度下, 适当降低均热段的温度和缩短保温时间, 并控制板坯表面氧化铁皮的厚度, 有利于提高板坯加热质量和节能降耗。

关键词:加热炉; 板坯; 温度场; 均热温度; 保温时间; 氧化铁皮; 温度模拟

中图分类号: TG307 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3644(2016)04-0248-05

板坯加热在钢铁材料生产过程中占有很重要的地位。不少研究者对板坯加热过程进行了模拟研究, 文献[1-2]针对推钢式加热炉建立了一维数学模型, 用有限差分法离散了板坯的导热微分方程, 得到了板坯的温度场; 青格勒等^[3]建立三段步进式加热炉内板坯加热过程的二维数学模型, 分析了板坯在加热炉内的温度变化情况; 冯亮花等^[4]建立了加热炉内板坯加热过程的二维数学模型, 采用有限容积法对模型进行离散, 模拟了板坯的温度场; 有研究者开发了一套加热炉内火焰图像在线检测系统, 为步进式加热炉内三维温度场的检测提供了可视化手段^[5-7]。目前对板坯加热过程的一维和二维温度场模拟研究较多, 对三维温度场的模拟研究有待深入, 同时应考虑板坯表面氧化铁皮对其温度分布的影响。为此, 本文以某公司热轧带钢厂的三段步进式加热炉为研究对象, 通过建立三维数学模型, 运用 ANSYS 软件分析板坯在加热过程中的温度分布, 并研究炉内均热段的温度和保温时间及氧化铁皮厚度对板坯温度场的影响, 为优化步进式加热炉内板坯的加热工艺提供参考。

1 数学模型

1.1 模型假设

某公司热轧带钢厂步进式加热炉的炉体有效长度为 43.6 m, 板坯在炉内加热过程中依次经过预热段、加热段和均热段, 其中加热段又分加热一段和加热二段^[8]。由于板坯在炉内加热是一个复杂的物理化学变化过程, 建立模型时做如下简化和假设^[9]: ①忽略板坯加热过程的内热源; ②同一时刻板坯各节点的热物性参数相同; ③不考虑板坯传热的端部效应; ④所研究截面传热是对称的; ⑤板坯与辊道的接触传热忽略不计; ⑥炉墙热特性和炉气黑度不随时间和温度变化; ⑦不考虑步进梁与板坯之间的传热, 认为板坯周围全是炉气; ⑧板坯与炉气的对流、辐射传热视为与无限大环境的传热。

1.2 导热微分方程

基于上述假设, 在直角坐标系下建立板坯的导热微分方程:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

收稿日期: 2016-02-29

基金项目: 湖北省自然科学基金资助项目(2015CFA128)。

作者简介: 金 明(1990-), 男, 武汉科技大学硕士生。E-mail: 506112846@qq.com

通讯作者: 倪红卫(1967-), 男, 武汉科技大学教授, 博士生导师。E-mail: nihongwei320@sohu.com

式中: λ 为板坯的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; C_p 为板坯的比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T 为板坯的温度, K ; ρ 为板坯的密度, kg/m^3 ; x, y 和 z 分别为板坯长度、宽度和厚度方向的坐标, m 。

1.3 加热板坯的热物性参数

加热板坯的钢种为 DX51D+Z, 其化学成分

表1 DX51D+Z 钢的化学成分($w_B/\%$)

Table 1 Chemical compositions of DX51D+Z steel

C	Si	Mn	P	S	Al	S
0.020~0.060	≤0.040	0.10~0.40	≤0.020	≤0.020	0.020~0.060	≤0.0060

表2 不同温度下 DX51D+Z 钢的导热系数及比热
Table 2 Thermal conductivity and specific heat of DX51D+Z steel at different temperatures

温度/ $^{\circ}\text{C}$	导热系数/ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	比热/ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$
200	59.24	517.63
300	52.78	560.63
400	46.97	614.96
500	42.10	684.29
600	38.12	781.49
700	35.03	926.38
800	32.81	849.22
900	30.29	1326.61
1000	29.15	625.58
1100	30.35	645.28
1200	31.56	654.34
1300	32.76	673.35

1.4 初始条件和边界条件

初始条件为:板坯入炉温度为 190°C 。

边界条件包括对流、辐射边界和绝热边界。板坯外表面与炉气接触,是对流、辐射边界,板坯对称面是绝热边界。

当炉气流过钢坯表面时,钢坯表面不仅通过对流方式从炉气中得到热量,而且依靠炉气的辐射得到热量,总热流量的计算公式为^[8]:

$$q = \partial_c(t_g - t_m) + C \left[\left(\frac{T_g}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right] \quad (2)$$

变形后得:

$$\begin{aligned} q &= \partial_c(t_g - t_m) + \partial_r(t_g - t_m) \\ &= \partial_{\Sigma}(t_g - t_m) \end{aligned} \quad (3)$$

其中:

$$C = \frac{\epsilon_g \epsilon_m [1 + \varphi_m(1 - \epsilon_g)]}{\epsilon_g + \varphi_m(1 - \epsilon_g) [\epsilon_m + \epsilon_g(1 - \epsilon_m)]} \quad (4)$$

上述式中: q 为总热流量; t_g, t_m 分别为炉气和钢坯表面温度, $^{\circ}\text{C}$; C 为气体对固体表面辐射的导来辐射系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ∂_c 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; ∂_r 为辐射换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; ∂_{Σ} 为综合换热系数 ($\partial_{\Sigma} = \partial_c + \partial_r$), $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; ϵ_g

见表1、导热系数和比热见表2。板坯规格为 $0.23 \text{ m} \times 1.30 \text{ m} \times 8.80 \text{ m}$, 板坯的密度为 $7850 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。板坯表面氧化铁皮的导热系数为 $3.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、比热为 $725 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 、密度为 $3950 \text{ kg}/\text{m}^3$ ^[10]。

为实际炉气黑度,取 0.213 ; ϵ_m 为板坯黑度,取 0.79 ; σ 为斯蒂芬玻耳兹曼常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; φ_m 为炉壁对钢坯表面的角系数,其值为 1 。

1.5 几何模型和网格划分

运用 ANSYS 软件,取板坯的 $1/8$ 进行建模,选定建模尺寸(单位: m),设定建模比例为 $1:1$ 。采用手动划分的方式对所建模型进行网格划分,长度方向进行 50 等分,宽度方向进行 20 等分,厚度方向进行 10 等分,网格划分如图1所示。

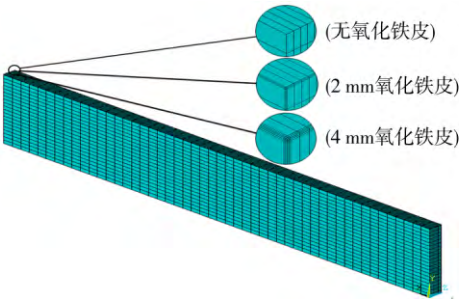


图1 板坯的网格图

Fig. 1 Grid graph of the slab

2 模拟结果与分析

2.1 板坯的温度分布

某公司热轧带钢厂板坯的加热制度如表3所示。板坯的出炉温度要求在 $1000 \sim 1300^{\circ}\text{C}$ 范围内,断面温差控制在 25°C 以内。在此加热制度下,板坯的角部、表面(取板坯长度 $1/2$ 位置横断面)、中心部位的温度分布曲线如图2所示,板坯出炉后的温度分布如图3所示。从图2中可以看出,在加热过程中,板坯中心部位与板坯表面、角部的温差先增大后减小,这是因为,在预热段和加热一段,板坯的初始温度与环境温差大,板坯表面的升温速率明显高于中心部位,进入加热二段和均热段,板坯表面温度不断上升,与环境温差逐渐缩小,加热热量主要用于板坯内部升温,此时板坯中心部位的升温速率迅速超过板坯表面的升温速率。经计算得到,在炉内预热段、加热一段、加

热二段和均热段,板坯表面升温速率分别为 4.59、8.99、6.49、0.96 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,而板坯中心部位的升温速率分别为 2.59、7.16、8.05、2.49 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,板坯表面和中心部位的最大温差分别为 124.97、296.57、329.56、158.26 $^{\circ}\text{C}$ 。从图 3 中可以看出,板坯经炉内加热后,其出炉温度为 1273.48 $^{\circ}\text{C}$,角部和中心部位的温差为 14.25 $^{\circ}\text{C}$,断面温差为 12.91 $^{\circ}\text{C}$,表明板坯的温度分布相对

均匀,满足轧制的要求。从图 3 中还可看出,板坯的最高温度分布在板坯端面的角部,最低温度位于板坯的中心部位,这是因为,板坯角部与炉气直接接触,其加热条件最好,致使板坯角部温度最高,而板坯中心部位的热量需要先通过炉气的对流和辐射综合传热给板坯表面,再由板坯表面通过热传导传热到板坯中心部位,因此板坯中心部位的温度最低。

表 3 板坯的加热制度

Table 3 Heating system of the slab

入炉温度/ $^{\circ}\text{C}$	预热段		加热一段		加热二段		均热段	
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/min	温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/min	温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/min	温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/min
190	700	60	1045	50	1240	45	1280	80

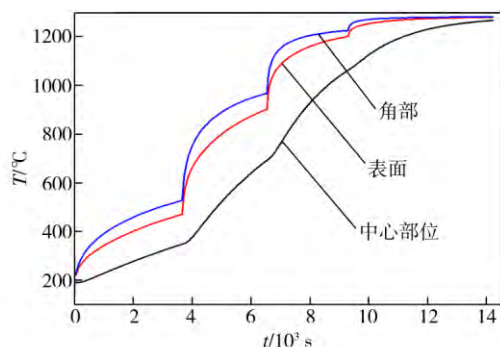


图 2 加热过程中板坯不同部位的温度分布曲线

Fig. 2 Temperature distribution curves in different parts of the slab during reheating process

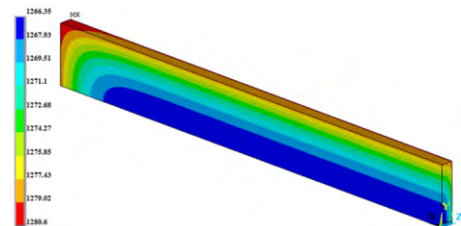


图 3 板坯出炉后的温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of the slab after tapping

2.2 板坯温度分布的影响因素

2.2.1 均热温度

当保温时间为 80 min 时,不同均热温度下板坯的出炉温度和断面温差如表 4 所示。从表 4 中可以看出,随着均热温度的下降,板坯的出炉温度随之降低,断面温差逐渐缩小。与现有加热制度下设定的均热温度(1280 $^{\circ}\text{C}$)相比,均热温度降低 30 $^{\circ}\text{C}$ 时,板坯的出炉温度降低 28.87 $^{\circ}\text{C}$,断面温差减小 1.91 $^{\circ}\text{C}$;均热温度降低 60 $^{\circ}\text{C}$ 时,板坯出炉温度降低 57.94 $^{\circ}\text{C}$,断面温差减小 3.50 $^{\circ}\text{C}$;而当均热温度升高 30 $^{\circ}\text{C}$ 时,板坯出炉温度升高 29.6 $^{\circ}\text{C}$,断面温差增大 0.8 $^{\circ}\text{C}$ 。由此表明,均热温度对板坯出炉温度影响较大,而对断面温差影响较小。因此,在满足板坯最低出炉温度的条件下,可以适当降低均热温度,达到节能降耗的目的。

表 4 不同均热温度下板坯的出炉温度和断面温差(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Table 4 Tapping temperature and temperature difference in cross section of the slab at different soaking temperatures

均热温度	出炉温度	断面温差
1220	1215.54	9.41
1250	1244.61	11.00
1280	1273.48	12.91
1310	1303.08	13.70

2.2.2 保温时间

在 1280 $^{\circ}\text{C}$ 的均热温度下保温不同时间后板坯的出炉温度和断面温差如表 5 所示。从表 5 中可以看出,随着保温时间的缩短,板坯出炉温度逐渐降低,断面温差明显增大。与现有加热制度下设定的保温时间(80 min)相比,当保温时间缩短 10 min 时,板坯的出炉温度降低 3.08 $^{\circ}\text{C}$,断面温差增大至 18.08 $^{\circ}\text{C}$;保温时间缩短 20 min 时,出炉温度降低 7.39 $^{\circ}\text{C}$,断面温差增大至 25.27 $^{\circ}\text{C}$,已高出板坯所要求的出炉断面温差;而当均热时间延长 10 min 时,出炉温度升高 2.18 $^{\circ}\text{C}$,断面温差减小至 9.20 $^{\circ}\text{C}$ 。由此表明,均热段的保温时间对板坯断面温差影响较大,而对出炉温度影响较小。因此,在满足板坯断面温差要求时,可以适当缩短保温时间,达到节能降耗的目的。

表 5 不同保温时间下板坯的出炉温度和断面温差

Table 5 Tapping temperature and temperature differences in cross section of the slab at different soaking times

保温时间/min	出炉温度/ $^{\circ}\text{C}$	断面温差/ $^{\circ}\text{C}$
60	1266.09	25.27
70	1270.40	18.08
80	1273.48	12.91
90	1275.66	9.20

2.2.3 氧化铁皮厚度

不同厚度氧化铁皮的板坯的温度分布曲线如图 4 所示。从图 4 中可以看出,虽然板坯表面氧化铁皮厚度不同,但板坯各部位的温度变化趋势

基本一致,板坯表面温度变化不大,但中心部位的温度变化较为明显。与无氧化铁皮的板坯相比,当氧化铁皮厚 2 mm 时,板坯出炉时的表面温度降低了 0.61 ℃,中心部位温度降低了 8.86 ℃;而当氧化铁皮厚 4 mm 时,板坯出炉时的表面温度降低了 1.35 ℃,中心部位温度降低了 21.05 ℃。由此表明,随着板坯表面氧化铁皮厚度的增加,板坯中心部位的温度明显降低。

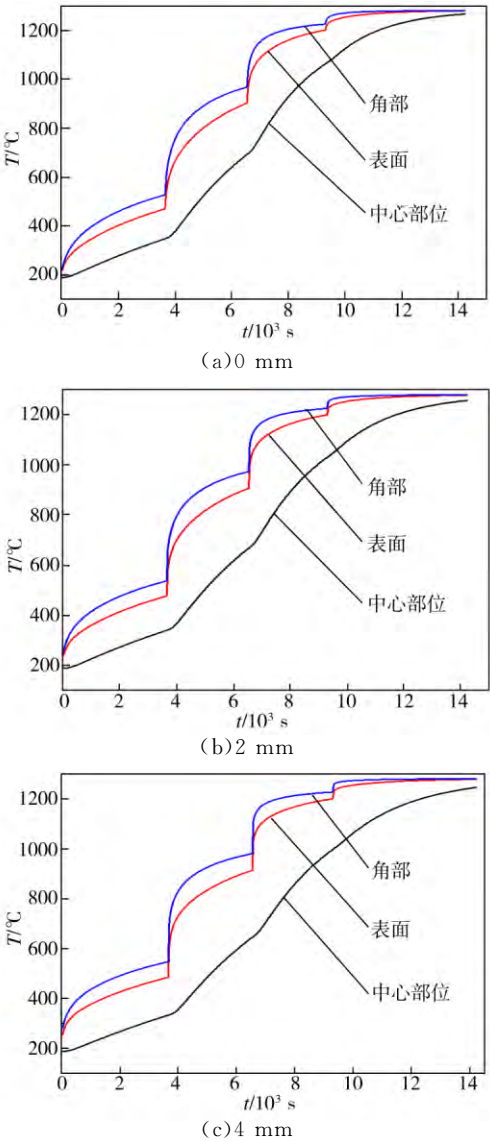


图 4 不同厚度氧化铁皮的板坯的温度分布曲线
Fig. 4 Temperature distribution curves of the slab at different thicknesses of oxide scale

氧化铁皮的厚度对板坯出炉温度及断面温差的影响如表 6 所示。从表 6 中可以看出,随着板坯表面氧化铁皮的增厚,板坯出炉温度略有降低,但断面温差明显增大。与无氧化铁皮的板坯相比,当氧化铁皮厚 2 mm 时,板坯出炉温度降低了 4.48 ℃,断面温差增大至 21.16 ℃;而当氧化铁皮厚 4 mm 时,板坯出炉温度降低了 10.63 ℃,断面温差已增大至 32.61 ℃,大于板坯所要求的出

炉断面温差。由此可见,板坯表面氧化铁皮的厚度对板坯加热质量影响较大,对于易生成氧化铁皮的钢种在确定其加热制度时,适当降低加热温度和缩短加热时间,以减少板坯的氧化烧损,从而控制板坯表面氧化铁皮的厚度。

表 6 氧化铁皮厚度对板坯出炉温度及断面温差的影响
Table 6 Effects of thicknesses of oxide scale on the tapping temperature and temperature difference in cross section of the slab

氧化铁皮厚度/mm	出炉温度/℃	断面温差/℃
0	1273.48	12.91
2	1269.00	21.16
4	1262.85	32.61

3 结论

(1)板坯在炉内加热后最高温度分布在板坯端面角部,最低温度位于板坯中心部位,在设定的加热制度下,板坯经炉内加热后,其出炉温度、断面温差分别为 1273.48、12.91 ℃,板坯温度分布比较均匀,满足轧制要求。

(2)随着均热温度的下降,板坯的出炉温度随之降低,而断面温差变化较小;随着均热段保温时间的缩短,板坯的出炉温度变化不大,而断面温差明显增大;随着板坯表面氧化铁皮厚度的增加,板坯中心部位的温度明显降低、断面温差明显增大。

(3)在设定的加热制度下,适当降低均热段的温度和缩短保温时间,并控制板坯表面氧化铁皮的厚度,有利于提高板坯加热质量和节能降耗。

参 考 文 献

[1] 陈海耿,杨泽宽,张卫军,等.太钢一轧厂加热炉数学模型优化控制[J].冶金能源,1995,14(4):39-43.
[2] 李明.钢坯加热过程中氧化传热模型的研究[D].包头:内蒙古科技大学,2013.
[3] 青格勒,程素森,杨天钧,等.步进梁式加热炉内的板坯温度场数值模拟[J].北京科技大学学报,2004,26(2):164-168.
[4] 冯亮花,刘坤,康小兵,等.步进式加热炉板坯温度场数值模拟[J].辽宁科技大学学报,2011,34(1):39-43.
[5] 姜春,周怀春,程强,等.工业炉内火焰图像在线检测系统及其试验[J].工业加热,2005,34(3):32-34.
[6] 程强,周怀春,姜春,等.工业炉三维温度场可视化试验研究[J].工业加热,2005,34(1):19-23.
[7] 邹敢,杨承志.加热炉钢坯温度场的预报模型[J].青岛科技大学学报:自然科学版,2007,28(3):250-252.
[8] 蔡乔方.加热炉[M].北京:冶金工业出版社,2007.
[9] 王良刚.步进式加热炉内重轨钢坯温度场与应力场

- 的数值模拟[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2012.
- [10] Martín Torres, Rafael Colás. A model for heat conduction through the oxide layer of steel during hot rolling[J]. *Materials Processing Technology*, 2000, 105(3): 258-263.

Simulation analysis of temperature field of the slab in the walking beam reheating furnace

Jin Ming¹, Ni Hongwei¹, Zhang Hua¹, Kong Yongjiang², Guo Manping²

- (1. Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;
2. General Steelmaking Plant, Wuhan Iron and Steel Co., Ltd., Wuhan 430083, China)

Abstract: With the 3-zone walking beam reheating furnace as the research object, the 3D mathematical model was established and the temperature field of the slab during the reheating process was analyzed by ANSYS. The effects of the temperature, the holding time of the soaking zone in the reheating furnace and the thickness of oxide scale on the temperature field of the slab were investigated. The results show that the highest temperature of the hot slab is located at the corner of the end face, and the lowest temperature is found at the central region of the hot slab. Under the given heating system, the tapping temperature and temperature difference in cross section of the slab after reheating are 1273.48 and 12.91 °C, respectively. The temperature distribution of the slab is relatively uniform, which meets the requirements of rolling process. With the decrease of the soaking temperature, the tapping temperature of the slab decreases and temperature difference in cross section of the slab shows little change. With the decrease of the soaking time, the tapping temperature of the slab has little change while temperature difference in cross section of the slab is increased obviously. With the increase of the thickness of oxide scale, the central region temperature of the slab is dramatically decreased, and temperature difference in cross section of the slab increases significantly. Under the given heating system, by reducing the soaking temperature and soaking time and controlling the thickness of oxide scale properly at the same time, the reheating quality of the slab can be improved and energy consumption can be reduced.

Key words: reheating furnace; slab; temperature field; soaking temperature; soaking time; oxide scale; temperature simulation

[责任编辑 张惠芳]