

Numerical Simulation on Regenerator Checker of Hot Blast Stove

Weiwei CHEN, Jianliang ZHANG, Dewen KONG, Weihang GUO, Yang YANG, Shanshan CHEN

School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, 100083, Beijing, China

Email: cww2008@126.com

Abstract: The model was established according to the hot stove of blast furnace in Qianan branch of Shougang Corporation, simplified the seven-hole checker into three-hole geometric model in production to simulate. Also the accuracy of the three-hole model is confirmed. The regenerator chamber's heat transfer was also simulated in 10 minutes. It was found that the high temperature part of the checker has a faster heat transfer and higher temperature gradient than the low part. At the same time, we simulated the application of magnesium aluminate spinel materials on hot blast Stove, as a result the flue gas temperature was 5~8°C higher than before. This shows the application of the magnesium aluminate spinel materials is very hot in the future.

Keywords: Numerical simulation; Hot blast stove; Regenerator

热风炉格子砖蓄热模拟

陈伟伟, 张建良, 孔德文, 郭伟行, 杨 阳, 陈杉杉

北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京, 中国, 100083

Email: cww2008@126.com

摘 要: 本文根据首钢迁安高炉热风炉建立模型, 将生产中的七孔格子砖简化成三孔的几何模型进行模拟, 并验证了三孔模型的准确性, 同时模拟了蓄热室 10 分钟的蓄热情况, 发现格子砖的高温段要比低温段蓄热快, 温度梯度更大。最后模拟了镁铝尖晶石材料在热风炉上的应用, 结果显示: 使用镁铝尖晶石材料的烟气温度比高铝砖高 5~8°C, 这说明镁铝尖晶石材料在热风炉上的应用是非常有前景的。

关键字: 数值模拟; 热风炉; 蓄热

1 引言

现代热风炉发展的方向是: 高温, 风温 >1250±50; 高效率, 总热效率 ≥85%; 长寿命, 一代热风炉寿命 >25 年^[1]。热风温度是廉价的能源, 这是用 45% 高炉煤气换来的, 是降低炼铁燃料比的工作重点 (风温每提高 100°C, 降燃料比 15~20kg/t, 允许多喷煤 35kg/t)^[2]。高炉热风炉蓄热室的仿真就是格子砖的仿真。格子砖是热风炉进行热交换的载体, 炉膛内高温热烟气通过蓄热体时将热量储存在蓄热体内, 格子砖蓄热和放热效率的高低直接影响到热风温度的高低和热风炉热效率等。本文以首钢迁安高炉热风炉为研究对象, 从数值模拟的角度优化了格子砖的物理模

型, 运用 CFX 对该模型进行模拟, 模拟了蓄热室 10 分钟的蓄热情况, 并研究了新型镁铝尖晶石耐火材料对热风炉蓄热的影响。

2 模型建立

2.1 数学模型

①能量方程:

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U H) = \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_Q \quad (1)$$

②燃烧模型

Eddy Dissipation 模型适用于快速反应, 即反应速度相对于流体速度快得多的反应, 反应速度取决于反应物的混合速度^[3]。

$$R_{fu} = -\bar{\rho} \varepsilon / k \min [C \bar{m}_{fu}, C \bar{m}_{ox} / S, D \bar{m}_{pr} / (1 + S)] \quad (2)$$

③辐射换热

P-1^[4,5]辐射模型是 P-N 模型的简化, 适用于大尺度辐射计算, 其优点在于计算量最小, 模型假设所有

项目基金: “十一五”国家科技支撑计划重大项目, 攀枝花钒钛磁铁矿高效分离与资源综合利用; 基金号: 2008BAB32B05

面为漫反射。

2.2 物理模型简化

为了使模拟的结果更加准确，本次模拟采用了三孔的几何模型，蓄热室的高度和实际高度相同。经典的蓄热室数学模型是 1960 年 Bird^[6]建立的，其中包括蓄热室的气体模型和蓄热固体模型，该模型可以模拟格子砖中一个圆孔的蓄热过程，而首钢采用的是七孔格子砖，其形状如图 1 所示。

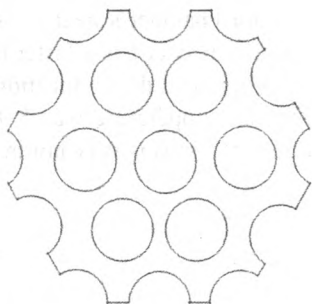


Figure 1. The real shape of the checker
图 1. 格子砖的实际形状

如果按照实体模拟整个蓄热室，计算量相当庞大；而从 Bird 模型原理来讲，将格子砖简化为一个空的圆柱，又不符合实际情况。由于蓄热过程中，每个格孔之间存在热量交换，若简化为单孔格子砖蓄热模型，则将每个格孔对应的六个边看成是绝热的，这与实际情况不符。若将相邻的三个格孔看成一个蓄热单元，那么就能够很好的反映格子砖内部格孔的蓄热情况，则庞大的格子砖蓄热体就可以简化成很多这样的三孔单元，其模型如图 2 所示。

假设该模型的外壁与相邻的格孔是绝热的，三个孔间遵循导热方程。对于流体和固体间流动和传热的最关键是换热系数的确定，下面简单分析一下该简化模型换热系数是否合理。

对流换热系数与流体和固体间的边界层以及流体的导热系数相关。几何模型经简化后，孔的直径和格

子砖的孔隙度都没有改变，如果燃烧出口的气体温度恒定，那么进入蓄热室孔的气体流速也没有改变，也就是表征流体的速度场雷诺数与未简化前相同；在流体组成不变的状态下，其导热系数不会发生改变，因此表征能量场的普朗特数与未简化前相同。所以，该简化模型是合理的。在 CFX 中其图形如图 3 所示。

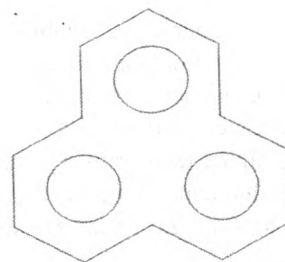


Figure 2. The simplified model
图 2. 简化后模型

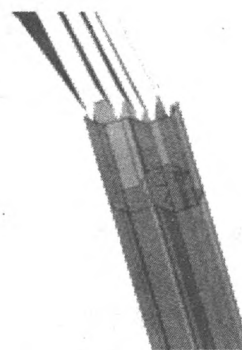


Figure 3. Model entrance drawing

图 3. 模型入口示意图

2.3 边界条件

蓄热体的几何模型高度与实际相同，烟气的流速 12m/s，初始温度为 1690K，初始组分：40%CO₂，44%N₂，16%CO，出口的平均静态压力为：1.06atm，按实际的格子砖的高度和材料来确定蓄热室的边界条件，材料参数见表 1。

Table1. The Regenerator materials parameter

表 1. 蓄热室材料参数

名称	热容(J/Kg·K) (800, 600K)		热导率(W/m·K) (800, 600K)	
高密度粘土砖	1047.2	994.6	1.256	1.152
高铝砖	1024	977.2	1.358	1.396
硅砖	994.8	944.6	1.49	1.35
镁铝尖晶石	1122.303	1064.503	5.51	6.48

模型内耐火材料的分布：硅砖，高铝砖，高密度粘土砖的高度由上至下分别为 14.85m, 9.5m, 16.55m。根据现有的材料和高度进行模拟实验，瞬态模拟蓄热室燃烧 10 分钟的蓄热情况。

3 格子砖蓄热仿真模拟

蓄热室的高度方向上的温度变化大致可分为蓄热高温区，蓄热中温区，和蓄热低温区，分别在 1200℃，900℃，600℃ 左右。当烟气从顶部格砖进入中部格砖时，由于顶部格砖的热交换速度是随时间的增加而降低，因此到达中部格砖的烟气温度是由低而高。可以用同样的理论来解释最下部的格子砖的蓄热情况。因此，这三个温度段是很有代表性的，不仅代表了随着高度变化温度场的变化，也是某一具体位置上随着时间变化温度场的变化。

3.1 三孔模型验证

对于蓄热室的蓄热能力最直接的指标就是出口的烟气温度，测得了前十分钟出口平均温度和现场的实际温度做出比较得到如下曲线：

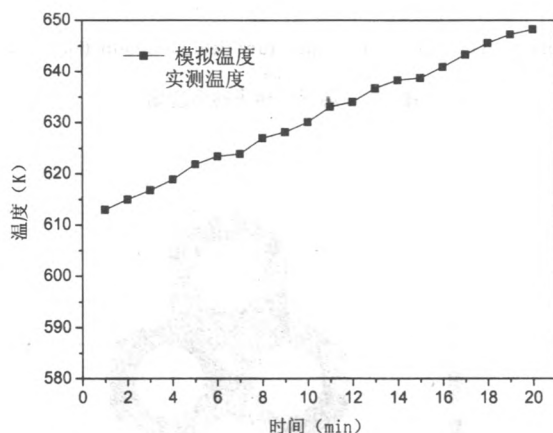


Figure 4. Compared the simulating flue gas temperature and actual gas temperature

图 4. 模拟烟气温度与实际烟气温度比较

从图中可以看出模拟的结果比较符合实际，模拟的烟气温度和实测温度相近，但比实际略高，但升温趋势相同，最后烟气温差大约 9℃，更加精确的边界条件和初始条件可以达到更好模拟效果，这说明三孔模型模拟的准确性。

3.2 不同温度段的温度分布

运用 CFX 对该模型进行模拟，对模拟结果进行处理，然后分别截取高温区、中温区、低温区的温度分布云图，如图 5 至图 7 所示

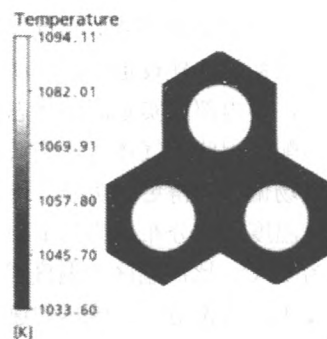


Figure 5. The checker's Temperature field on high temperature area

图 5. 高温区的格子砖温度场

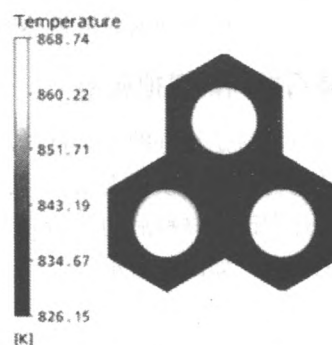


Figure 6. The checker's Temperature field on middle temperature area

图 6. 中温区的格子砖温度场

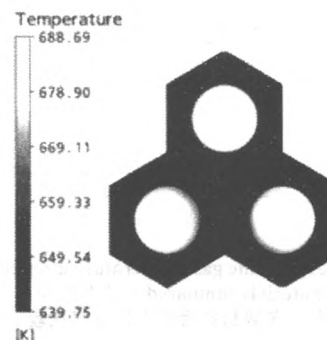


Figure 7. The checker's Temperature field on low temperature area

图 7. 低温区的格子砖温度场

从图 5 显示，高温区的温度场呈均匀中心对称的分布，格子砖中心的红色部分表示高温的烟气，低温的蓝色区域为格子砖，最高温度与最低温度差别为 60℃，温度梯度较大，传热快。中温区的温度分布也基本呈中心对称分布，但是其中左下角的格空的烟气传热中心稍有所偏移，因为在格空内气体运动中可能有旋涡存在而导致温度场的微移。在图 7 的低温区的

温度分布中这种偏移变得较明显, 中温区的偏移是气体运动了 10m 之后的出现的情况, 当气体刚刚进入格子砖后, 气体按照初始条件设定的值流动, 但是随着模拟计算的进行, 其内部的实际流动状态也在逐渐的和实际情况相匹配, 因此, 气体运行到低温区即格子砖的下部时温度场偏移变得更加明显。低温区的格子砖温度场与气体温度场的分布趋势基本相同, 注意到低温区的温差为 50°C , 比高温区的温度梯度小, 比中温区的温度梯度小, 这说明气体传热的速度增加了, 烟气在离开蓄热室之前强化了换热。这说明上部中部的格子砖蓄热达到一定程度, 下部格子砖的温度与烟气的相对梯度变大, 传热加强。低温区的温度场基本成中心对称, 但是温度明显有所降低。那是由于高温烟气在格子砖的上部的强烈的对流换热所导致。

3.3 镁铝尖晶石材料的模拟应用

镁铝尖晶石材料是很好的耐火材料, 这里, 我们把其中高铝砖的材料换成镁铝尖晶石, 其比热容增大, 比较了原始蓄热和改变材料后的蓄热前十分钟的出口烟气温度变化情况, 如图 8 所示。

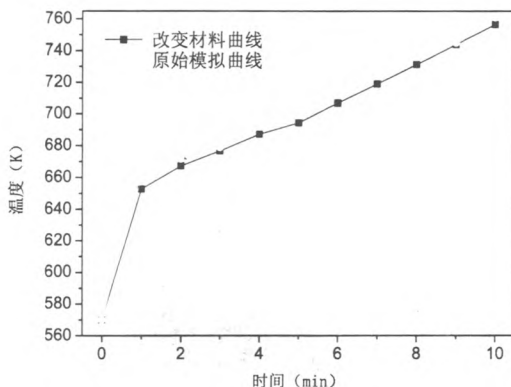


Figure 8. The export flue gas temperature after changed the materials compared with before
图 8. 改变材料后的出口烟气比较

从上图可以发现, 材料的改变对出口烟气温度的影响还是非常大的, 这种差距在上图中的最大处可达 8°C 。随着蓄热时间的增加不同曲线之间的差距还会更大, 即蓄热体能够贮存更多的烟气的热量, 烟气的利用率提高从而出口烟气温度下降较大。

同时比较了采用镁铝尖晶石材料与改变材料前 (高铝砖) 的相同高度相同位置的温度云图, 找出改变材料对于温度场的影响。图 9 至图 11 是使用镁铝尖晶石材料时的格子砖温度场。

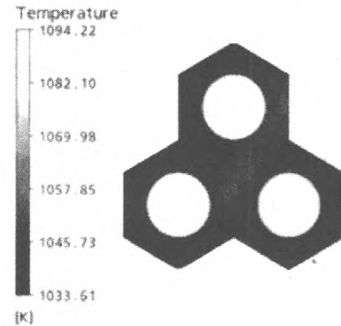


Figure 9. The checker's Temperature field on high temperature area
图 9. 高温区的格子砖温度场

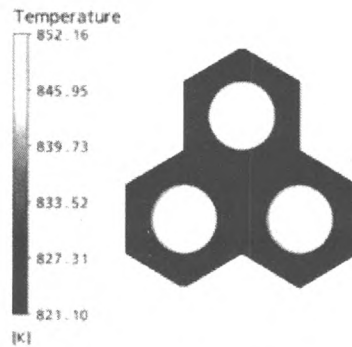


Figure 10. The checker's Temperature field on middle temperature area
图 10 中温区的格子砖温度场

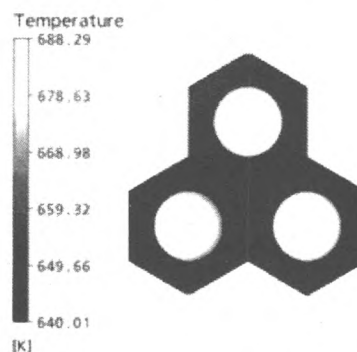


Figure 11. The checker's Temperature field on low temperature area
图 11. 低温区的格子砖温度场

通过对比改变材料后的温度场与原始蓄热的温度场, 可以发现镁铝尖晶石的蓄热能力强于其他三种耐火材料, 同样在中低温区出现了不同程度的温度场偏移。镁铝尖晶石的体积、比热容和热导率远大于上面所述的三种砖, 所以在热风炉格子砖中使用镁质耐火材料会大大提高热风炉的蓄热能力。但是镁砖在抗震性和体积稳定性方面的缺陷, 很难直接应用在热风炉蓄热室上。如果加入另一种也具有高密度, 高比热和

高热导率的材料，使二者形成以尖晶石为主的结构，其使用性能就可以大大改善。

4 结论

(1) 首钢迁安高炉热风炉的实际格子砖形状可以简化成简单三孔格子砖模型，这种三孔的单元更符合实际传热的情况，提高了模型的准确性。通过验证，模拟温度比实际出口温度高出约 9°C ，这基本说明三孔模型模拟的准确性。

(2) 通过模拟蓄热十分钟的温度曲线，发现格子砖的高温部分要比低温部分蓄热快，温度梯度更大。格孔通道内的温度场呈现出中心对称分布，中低温区的烟气传热中心较高温区有所偏移。

(3) 改变蓄热室的耐火材料，将中间高铝砖层换成了镁铝尖晶石耐火材料，其他条件不变，改变材料后的烟气温度比改变材料前高出 $5\sim 8^{\circ}\text{C}$ ，这说明镁铝尖晶石材料在热风炉上的应用是非常有前景的。对于

提高格子砖的利用率有很大的实际意义。

References (参考文献)

- [1] Yang Jun, Du Tao, Cai Jiujiu. The reviewed development of Abroad furnace, the journals of Shenyang industry institute, 2005 (1), 4: 18-20
杨俊, 杜涛, 蔡九菊. 国外热风炉发展综述, 沈阳工学院学报 2005 (1), 4: 18-20
- [2] Wang Weixin. The metal herald. 2009-7-28.
王维兴. 世界金属导报. 2009-7-28.
- [3] Denis Veynante, Luc Vervisch. Turbulent combustion modeling [J], Progress in Energy and Combustion Science, 2002, 28: 210~221.
- [4] Keramida E.P., Liakos H.H., Founti M.A., etc. Radiative heat transfer in natural gas-fired furnaces[J], International Journal of Heat Mass Transfer, 2000, 43: 1801-1809.
- [5] Kontogeorgos D.A., Keramida E.P., Founti M.A. Assessment of simplified thermal radiation models for engineering calculations in natural gas-fired furnaces[J], International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(25): 5260-5268.
- [6] Mitler, G. Computer control and optimization of a blast furnace stove operation[J]. Iron and steel engineer, 1981, (10): 43-47.