

文章编号 :1005 - 7854(2003)03 - 0041 - 05

格子砖热工特性对蓄热室内换热的影响

邢改兰¹, 刘应书², 吴启常³

(1. 华东理工大学, 上海 200237 ; 2. 北京科技大学, 北京 100083 ;
3. 北京钢铁设计研究总院, 北京 100053)

摘要: 分析了热风炉蓄热室内各时期的基本传热形式, 建立了其传热过程的数学模型。针对首钢 2 号高炉 1# 热风炉进行了实例计算, 通过对模型计算值与实测值的比较分析, 表明本模型具有较好的适用性。对比分析了几种不同几何参数的格子砖的换热情况, 结果说明, 在新建和改造的热风炉上采用十九孔格子砖将可获得良好的热工指标。

关键词: 传热; 数学模型; 热风炉; 蓄热室; 格子砖

中图分类号: TK02 ; TK172 ; TP391.9 **文献标识码:** A

EFFECT OF CHECKERBRICK'S THERMAL CHARACTERISTICS ON HEAT TRANSFER IN CHAMBER OF HOT BLAST STOVE

XING Gai-lan¹, LIU Ying-shu², WU Qi-chang³

(1. East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China ;
2. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China ;
3. Beijing Iron & Steel Research Institute, Beijing 100053, China)

ABSTRACT: The basic heat transfer process in the chamber of hot blast stove is discussed. The heat transfer model is developed to simulate the real conditions of No. 1 hot blast stove for No. 2 blast furnace at the Capital Steel facility. The predicted temperatures are in good agreement with the measured results. Also, the heat transfer conditions of three checkers with different geometric parameters are compared. The results show that the good thermal indexes can be achieved when employing the checker with nineteen holes in new and modified stoves.

KEY WORDS: Heat transfer; Mathematical model; Hot blast stove; Chamber; Checker

1 引言

蓄热式热风炉是 Cowper^[1] 1857 年提出用来代替热式热风炉而发展起来的一种高炉鼓风加热装置。其蓄热室内充满着格子砖, 这些格子砖是热风炉进行热交换的载体, 承担着将煤气燃烧所产生的热量传递给高炉鼓风的任务。早在 20 世纪 30 年代, Hausen 就提出了描述热风炉蓄热室格砖与流过格孔的气体间的换热模型, 并先后采用特征函数法、

热极法对模型进行了解析求解。到了 60 年代, Butterfield^[2] 和 Willmott^[3] 等人采用数值积分的方法对该问题进行了数值求解, 开创数值求解该问题的先河。在我国, 对热风炉蓄热室内传热过程的研究与应用方兴未艾。早期, 张宗诚^[4] 等利用 Hausen 理论, 建立了热风炉蓄热室内传热过程的数学模型, 并结合“二烧一送”、“助燃空气自身预热”、“交错并联”三种操作制度, 以鞍钢 4 号高炉为例, 对模型进行了求解。之后, 刘泉兴^[5] 等结合热风炉的自身预热工艺, 建立了自身预热热风炉系统的三维数学模型。张胤、贺友多等^[6] 在国内首次研究了热风炉全过程的数学模型, 在热风炉燃烧期燃烧过程计算机模拟

和热风炉冷风分配过程计算机模拟研究的基础上 ,开发了蓄热室内传热过程的三维数学模型 ,并以方孔格子砖为计算原型 ,进行了热风炉开炉升温过程的模拟计算。

本文采用二维的不稳态导热方程描述格砖内部的传热过程 ,与气体在格子砖通道内的换热进行了耦合求解 ;同时以首钢 2 号高炉的 1# 热风炉为实例 ,将二维数值模拟的结果与实测值进行了对比分析 ;并结合格子砖的新发展 ,对比分析了几种不同几何参数的格子砖的换热情况。

2 物理模型和数学模型

2.1 物理模型

将整个蓄热室^[7-9]视为由一族流管组成 ,由此形成的物理模型如图 1 所示。若格子砖为圆形孔道 ,则流管内径为格子砖孔道直径 ,否则其内径为格孔的水力学当量直径。管子的外半径 (r_o) 通过格子砖的质量计算得到^[7]

$$r_o = \sqrt{\frac{m_s}{\pi \rho_s N_c L_n} + r_i^2} \quad (1)$$

式中 : m_s 为热风炉格子砖的总质量 kg ; ρ_s 为格子砖的密度 kg/m^3 ; N_c 为格子砖通道的个数 ; L_n 为格子砖的高度 m ; r_i 为管道内半径 m 。

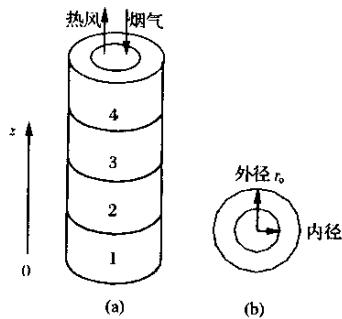


图 1 蓄热室格子砖通道物理模型

Fig.1 Stove model geometry

2.2 模型假设

为建立蓄热室格子砖通道换热过程的数学模型 ,引入如下假设 :

(1) 气体(包括鼓风和烟气)在整个蓄热室内流量分布均匀 ,且在每个格孔通道内传热相同 相邻格孔之间相互绝热 ;

(2) 燃烧期烟气的入口温度和送风期鼓风的入口温度 都保持稳定 ;

(3) 在格孔通道的任一高度处 ,气体速度分布均匀 ; 万方数据

(4) 气体为理想气体 ;

(5) 冷热气体在换向期间不发生混合 ,且忽略冷、热气体换向期间在蓄热室内的滞留 ;

(6) 气体和格子砖体的物性参数都是温度的函数。

2.3 数学模型

(1) 格子砖内部不稳态导热方程 :

$$\frac{\partial(\rho_s C_{p,s} T_s)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}(k_s \frac{\partial T_s}{\partial z}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(k_s r \frac{\partial T_s}{\partial r}) \quad (2)$$

(2) 气体(包括鼓风和烟气)换热的控制方程 :

$$\frac{\partial(\rho_g C_{p,g} T_g)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_g v_g C_{p,g} T_g)}{\partial z} + v_g \frac{\partial p}{\partial z} =$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(k_g \frac{\partial T_g}{\partial z}) + \frac{2h}{r_i}(T_s - T_g) \quad (3)$$

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{f}{2} \cdot \frac{\rho_g v_g^2}{D_h}, \quad \rho_g = \frac{M_g p}{R T_g} \quad (4)$$

式中 : ρ_s, ρ_g 分别为格砖和气体的密度 kg/m^3 ; $C_{p,s}, C_{p,g}$ 分别为格子砖和气体的比热容 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{°C})$; D_h 为格孔的水力学当量直径 m ; k_s, k_g 分别为格子砖和气体的导热系数 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$; h 为气固换热系数 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$; T_g, T_s 分别为气体和格子砖的温度 °C ; v_g 为气体速度 m/s ; p 为气体压力 Pa ; f 为阻力系数 ; M_g 为气体的平均摩尔质量 , kg/kmol ; r_i, r_o 分别为管道的内半径和外半径 m ; R 为通用气体常数 ,且 $R = 8314.3 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

2.4 定解条件

(1) 初始条件 :对于格子砖 ,由于热风炉蓄热室的工作过程是周期性的 ,即格子砖的温度在送风期不断降低 ,经过燃烧期又上升回复到原来的水平 ,且上一周期送风结束时格子砖的温度分布是下一周期燃烧期的开始温度。因此在计算过程中 ,先设定一初始的温度场^[4, 6, 10] ,即

$$T_s = T_{s0} \quad (T_{s0} \text{ 为假设的格子砖温度初值}) \quad (5)$$

在此基础上 ,进行多个周期循环计算 ,直到前后两次送风期结束时 ,热风出口温度相差不超过 5°C 。然后通过燃烧和送风相结合来给出燃烧期初始时刻格子砖的温度分布。

(2) 边界条件 :对格子砖 ,其进出口截面及外壁 ($r = r_o$) 处均按绝热边界条件处理 ,即

$$\left. \frac{\partial T_s}{\partial z} \right|_{z=0} = \left. \frac{\partial T_s}{\partial z} \right|_{z=L} = \left. \frac{\partial T_s}{\partial r} \right|_{r=r_o} = 0 \quad (6)$$

在内壁面 ($r = r_i$) 处 ,按对流换热边界条件处理 ,即

$$k_s \frac{\partial T_s}{\partial r} \Big|_{r=r_i} = \frac{2h}{(r_o^2/r_i^2 - 1)} (T_g - T_s|_{r=r_i}) \quad (7)$$

对气体(包括鼓风和烟气)其进口温度为定值,出口按充分发展条件考虑,即

$$T_g = T_{g0}, \quad \partial T_g / \partial z|_{z=0 \text{ 或 } z=L} = 0 \quad (8)$$

式中 T_{g0} 为鼓风或烟气的进口温度值。

3 计算条件

3.1 原始数据

计算以首钢 2 号高炉新投产的 1# 热风炉为例,其原始数据如下:

热风炉座数	3	燃气种类	高炉煤气
蓄热室截面积	35.8m ²	煤气预热温度	200℃
蓄热室高度	31.7m	助燃空气预热温度	600℃
蓄热室段数	4	空气过剩系数	1.1
冷风入口温度	150℃	送风操作制度	单独送风

烟气成分 CO_2 23.74%、 H_2O 9.47%、 N_2 66.96%、 O_2 0.82%。

为七孔格子砖,孔径 43mm,活面积(表示单位格子砖截面上格孔所占的通道面积) $0.409\text{m}^2/\text{m}^2$,加热面积 $38.06\text{m}^2/\text{m}^3$ 。蓄热室高度方向蓄热材料种类与高度为:普密度黏土砖 14.3m、高密度黏土砖 4.5m、红柱石高铝砖 3.3m、硅砖 9.6m。

燃烧期 高炉煤气流量以 1# 热风炉在某一燃烧周期内的实际高炉煤气流量为计算依据。图 2 为某日 1# 热风炉在燃烧期内高炉煤气的消耗量变化曲线。

3.2 网格划分

采用 B 类网格划分法,生成计算网格。由于沿着蓄热室高度方向蓄热材料发生了变化,采用此类网格划分法可以方便地将控制容积界面安置在材料性质发生变化的地方。为了精确考虑导热系数的急剧变化,在物性参数急剧变化的邻近区域采用比较

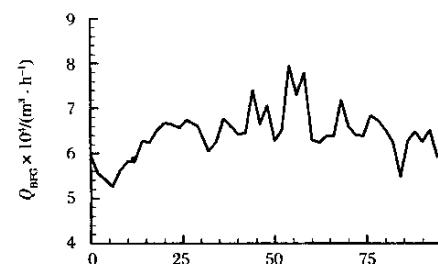


图 2 热风炉在燃烧期内煤气流量的变化

Fig. 2 Fuel flow rate for No. 1 stove

精细的网格。本计算采用网格如图 3 所示。由于气固温度场需耦合计算,气体通道网格划分与格子砖在高度方向的网格划分相一致。

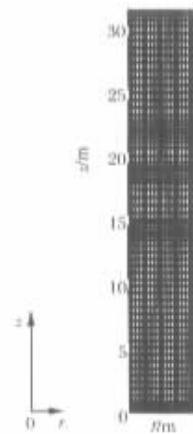


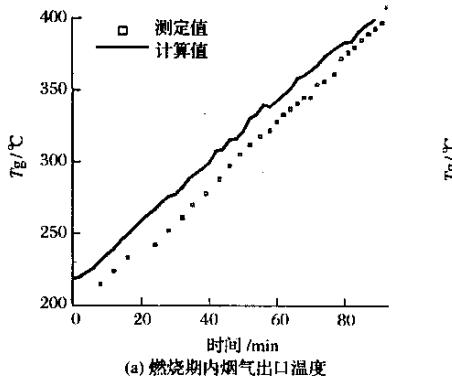
图 3 网格划分示意图

Fig. 3 Grid system

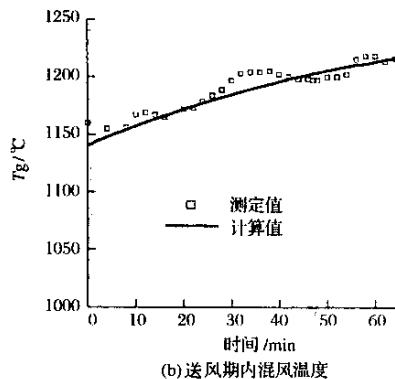
4 结果及分析

4.1 计算结果与实测值的比较

图 4(a)(b) 分别为燃烧期内烟气出口温度和送风期内混风温度的计算值与实测值的比较,图中离散点代表测得的实际温度,实线代表模型计算值。



(a) 燃烧期内烟气出口温度



(b) 送风期内混风温度

图 4 烟气出口温度与混风温度的测定值与计算值的比较

由图4可以看出,烟气出口温度、混风温度的计算值与实测值吻合较好。图4(a)中烟气出口温度的计算值比实测值相对偏高,原因是:①在模型中忽略了蓄热室炉壳的散热损失;②烟气温度的测点距蓄热室出口有一定的距离,在测温点和烟气出口断面间存在散热损失,烟气有温降。图4(b)中混风温度的实测值波动较大,而计算值相对平稳,是因为在实际的热风炉操作中,冷热风之间的比例是随着高炉对热风温度的要求在随机波动,在模型计算中,为简化计算假设了冷热风的比例为线性变化,因而模型计算值较实测值变化平稳。

4.2 格子砖的几何尺寸对烟气和热风温度的影响

图5、图6分别为蓄热室为五孔、七孔、十九孔格子砖结构时,烟气和热风温度沿炉高及随时间的变化。这三种格子砖的几何参数^[11]见表1。

由图5、6可以看出,燃烧末期烟气和送风末期

表1 格子砖几何参数

Table 1 Geometrical parameters of checkerbrick

砖型	孔径 /m	活面积 $/(\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2})$	加热面积 $/(\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3})$
五孔格子砖	0.0583	0.434	29.75
七孔格子砖	0.0430	0.409	38.06
十九孔格子砖	0.0300	0.360	48.00

鼓风沿着蓄热室高度方向温度逐渐升高。在烟气和鼓风的入口端附近,烟气和鼓风温度变化比较平缓。这主要是因为在燃烧初期,烟气入口端附近格子砖的温度首先由低而高上升,随着格子砖温度升高,此处格子砖与烟气之间的温差越来越小,热交换量越来越小,到燃烧期结束时,烟气在其入口附近几乎没有温降。送风期鼓风的温升原因与烟气类似。燃烧期内烟气出口温度随时间呈递增变化;送风期内鼓风出口温度随时间作递减变化。

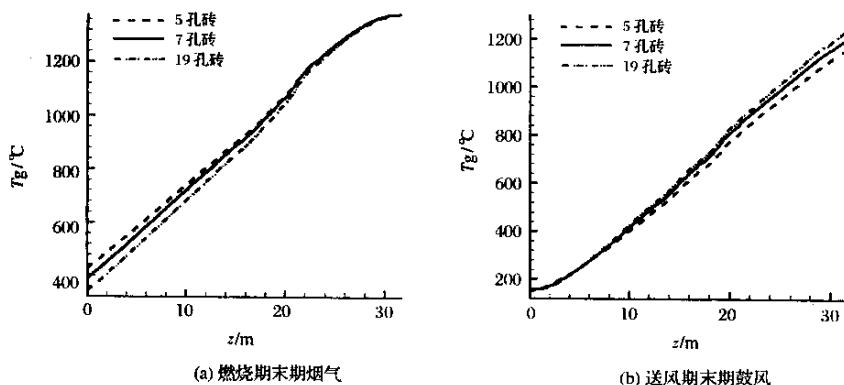


图5 沿蓄热室高度方向的烟气(a)鼓风(b)的温度分布

Fig.5 Temperature variation of gas(a) and blast(b) along the stove length

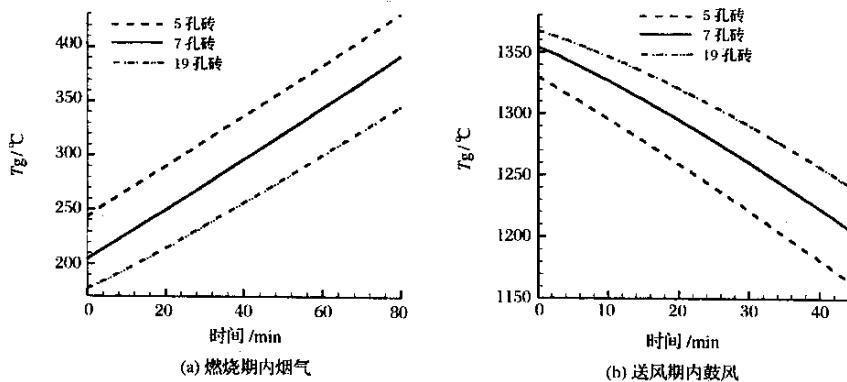


图6 烟气(a)和鼓风(b)出口温度随时间的变化

Fig.6 Variation of the exit temperatures of gas(a) and blast(b) with time

从三种格子砖的对比可以看出,在蓄热室几何尺寸、切换周期、热风流量、燃料流量相同的条件下,十九孔格子砖由于孔径减小,换热面积增加、换热系

数增大、热交换量增加,从而导致燃烧期烟气沿炉高的温降与送风期热风沿炉高的温升都比七孔、五孔砖的要快;而排烟温度更低,热风温度则更高。十

九孔砖在燃烧期的最高排烟温度为 340℃ 左右 , 比七孔砖低约 45℃ 、比五孔砖低约 75℃ ; 周期平均排烟温度为 255℃ 左右 , 比七孔砖低约 40℃ 、比五孔砖低约 80℃ 。周期平均风温比七孔砖提高约 45℃ , 比五孔砖提高约 90℃ 。相对七孔、五孔砖 , 十九孔砖的最高排烟温度和周期平均排烟温度都偏低 , 说明在计算的切换周期及燃料燃烧量条件下 , 十九孔砖具有较强的热交换能力 , 热风温度高 , 排烟温度低 , 蓄热室热效率高。

5 结 论

(1) 分析了热风炉蓄热室内各时期的基本传热形式 , 建立了描述传热过程的数学模型。

(2) 针对首钢 2 号高炉 1# 热风炉进行了实例计算 , 通过模型计算值与实测值的比较分析 , 表明本模型具有较好的适用性。

(3) 对比分析了五孔、七孔、十九孔三种不同几何参数的格子砖的换热情况。结果表明 , 采用十九孔格子砖的蓄热室与七孔、五孔格子砖的蓄热室相比 , 具有较强的热交换能力 , 它的热风温度高 , 供热能力强。在新建和改造的热风炉上采用十九孔格子砖将可获得更好的热工指标。

致 谢 : 首钢炼铁厂的马金芳工程师和蔡景春工程师等在实测数据的采集方面给予了热情的帮助 , 在此深表谢意。

(上接第 63 页)

综上所述 , 就本试验研究所用的氨性溶液而言 , 采用 LIX54-100 更为适宜。

5 结 论

(1) 用 LIX984N 和 LIX54-100 从氨性溶液中萃取分离铜、钴 技术上都是可行的。

(2) 用 10% LIX984N 作萃取剂 , 经一级萃取铜的萃取率达 99.62% ; 用 180g/L 的硫酸溶液对该有机相进行二级逆流反萃 , 铜反萃率达 99.05% 。

(3) 用 6% LIX54-100 作萃取剂 , 经四级逆流萃取 , 铜的萃取率达 99.53% ; 用 30g/L 的硫酸溶

参考文献 :

- [1] 项钟庸 , 郭庆弟 . 蓄热式热风炉 [M]. 北京 : 冶金工业出版社 , 1985.
- [2] SCHOFIELD J , BUTTERFIELD P , YOUNG P A. Hot Blast Stoves [J]. Journal of the Iron and Steel Institute , 1961 , 199(39) 229 - 240.
- [3] WILLMOTT A J , HINCHCLIFFE C. The Effect of Gas Heat Storage Upon the Performance of the Thermal Regenerator [J]. Int. J. Heat Mass Transfer , 1976 , 19(8) 821 - 826.
- [4] 张宗诚 , 苏辉煌 . 热风炉不稳定态传热的数学模型及其求解 [J]. 化工冶金 , 1982(1) 19 - 30 , 32.
- [5] 刘泉兴 , 钟良才 . 蓄热式热风炉蓄热室传热计算机数值模拟 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 1998 , 19(2) 160 - 163.
- [6] 张胤 , 刘中兴 , 贺友多 . 热风炉蓄热室传热过程计算 [J]. 包头钢铁学院学报 , 2001 , 20(1) 4 - 7.
- [7] MUSKE K R , HOWSE J W , HANSEN G A , et al. Hot Blast Stove Process Model and Model-based Controller [J]. Journal of Iron and Steel Institute , 1999 , 76(6) 56 - 62.
- [8] MUSKE K R , HOWSE J W , HANSEN G A. Model-Based Control of A Thermal Regenerator Part 1 : Dynamic Model [J]. Computers and Chemical Engineer , 2000 , 24(11) : 2519 - 2531.
- [9] ЩКЛЯР Ф Р. ДОМЕННЫЕ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛИ [M]. МОСКВА : МЕТАЛЛУРГИЯ , 1982.
- [10] 李伟 , 其海鹰 , 徐旭常 , 等 . 峰巢蓄热体传热性能的数值研究 [J]. 工程热物理报 , 2001 , 22(5) 657 - 660.
- [11] 炼铁设计参考资料编写组 . 炼铁设计参考资料 [M]. 北京 : 北京冶金工业出版社 , 1975.

液对负载有机相进行反萃 , 经一级反萃 , 铜的反萃率达 99.9% 以上。

(4) 就本试验研究而言 , 由于后续铜产品为硫酸铜 , 用 LIX54-100 作萃取剂更为适宜。

参考文献 :

- [1] 蒋训雄 , 尹才硚 , 周冰毅 , 等 . 从大洋多金属结核氨浸液中萃取分离铜、镍、钴 [J]. 有色金属 (冶炼部分) , 1997 (1) 7 - 11.
- [2] 王成彦 . 氨性溶液中铜镍钴的萃取分离 [J]. 有色金属 (季刊) , 2002(1) 23 - 26.