

· 系统与装置 ·

高温下热风炉操作对蓄热室温度分布的影响

陈杉杉¹,倪萍²,国宏伟¹,张建良¹,杨天钧¹

(1. 北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2. 首钢集团)

摘要:提高风温过程中,热风炉蓄热室温度分布将产生相应的变化。本文针对首钢迁安钢铁有限责任公司2号高炉热风炉,数值模拟高温下各种热风炉操作引起的蓄热室温度分布变化。研究结果表明:烟气温度每提高10 K,蓄热室高温区(不小于1 573 K)向下扩展0.25 m;烟气速度每升高1 m/s,高温区将向下扩展0.83 m,烟气出口温度提高25 K;高温条件下应增加硅砖高度,并通过加强中温区格子砖的热容和热导率,提高中温区的蓄热量和热交换效率。

关键词:热风炉;蓄热室;格子砖;温度分布;数值模拟

中图分类号:TF325.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-7059(2012)03-0044-05

Influence of operating regulation of hot blast stove on temperature distribution of regenerator in high blast temperature

CHEN Shan-shan¹, NI Ping², GUO Hong-wei¹, ZHANG Jian-liang¹, YANG Tian-jun¹

(1. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Shougang Group)

Abstract: With increasing blast temperature, distribution of temperature in regenerative chamber of hot blast stove will be changed correspondingly. Numerical simulation of temperature change of hot blast stove of Qiangang No. 2 blast furnace, Shougang Group, was done under high temperature and various operations in the paper. As demonstrated by results, the high temperature zone ($\geq 1\,573\text{ K}$) of regenerative chamber is extended downward by 0.25 m with temperature increased by 10 K; the high temperature zone of regenerative chamber is extended downward by 0.83 m and output exhaust gas temperature is increased by 25 K with exhaust gas speed elevated by 1 m/s; the height of silica bricks should be lifted, heat capacity and heat conductivity checkered bricks in intermediate temperature zone should be strengthened in order to increase heat quantity and heat exchange efficiency under high temperature condition.

Key words: hot blast stove; regenerator; checkered bricks; temperature distribution; numerical simulation

0 引言

提高风温是实现炼铁环节节能降耗的重要措施之一^[1]。现阶段我国钢铁企业提高热风温度的主要措施有^[2-3]:(1)增加煤气和助燃空气预热温度或附加高热值焦炉煤气,提高热风炉拱顶温度;

(2)合理布置蓄热室格子砖,增强格子砖热交换,提高蓄热室蓄热能力^[4];(3)调整换炉制度,减少送风时间。但是,这些操作将引起热风炉蓄热室温度分布的变化^[5-6],必须引起注意,以确保热风炉使用寿命。

收稿日期:2011-08-03;修改稿收到日期:2012-02-08

基金项目:教育部博士点学科专项科研基金资助项目(20090006120004)

作者简介:陈杉杉(1976-),男,河南开封人,博士,主要从事热风炉仿真与模拟和专家控制系统的研究。

作者于2010年针对河北省首钢迁安钢铁有限责任公司2号高炉热风炉,数值模拟提高高温过程中各种热风炉操作手段引起的蓄热室温度分布的变化,并指出高温下合理布置热风炉格子砖,可以达到提高热风炉风温和换热效率、延长使用寿命的目的。

1 仿真模型

1.1 物理模型

根据首钢迁钢2号高炉热风炉的实际形状建立蓄热室物理模型,格子砖形状如图1所示,若按照实体模拟整个蓄热室,计算量相当庞大。考虑到格子砖为正六边形,我们假设六边形等距离孔间无热量传递,根据构成格子砖的最基本单元将其简化为由三个孔组成,简化后的形状见图2。

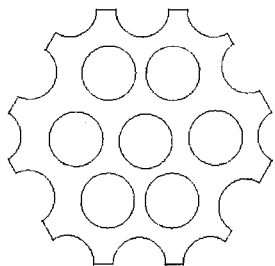


图1 实际格子砖形状

Fig. 1 Actual shape of checkered bricks

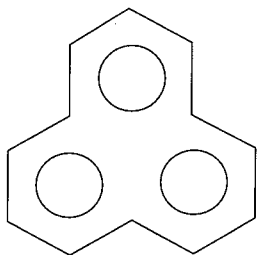
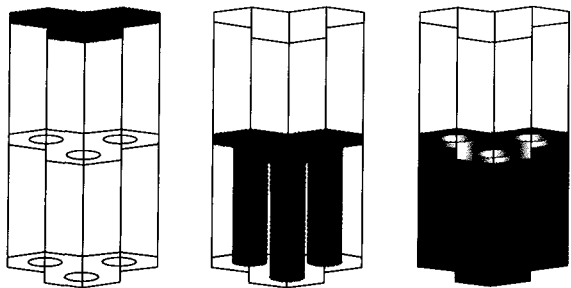


图2 简化体形状

Fig. 2 Simplified shape of checkered bricks

图3为七孔格子砖简化后的结构示意图。



(a)高温烟气入口 (b)烟气与蓄热体交接面 (c)蓄热体绝热面

图3 首钢迁钢七孔格子砖物理模型

Fig. 3 Geometry model of checkered bricks

首钢迁钢2号高炉热风炉蓄热室格子砖共分5层,我们根据模拟需要增加了高温区长度,具体设置如下:第1层硅砖 34.85~18.95 m;第2层红柱石砖 18.95~15.65 m;第3层高密度粘土砖 15.65~6.6 m;第4层粘土砖 6.6~4.65 m;第5层红柱石砖 4.65~3.55 m。蓄热室格子砖热工参数如表1所示。

表1 蓄热室耐火材料参数

Table 1 Parameters of regenerator refractory materials

材料	密度 ρ_s / (kg/m^3)	热导率 λ / [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]	比热容 C_s / [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]
硅砖	1 900	$0.93 + 0.000700T_s$	$0.795 + 0.000293T_s$
红柱石砖	2 400	$0.87 + 0.000520T_s$	$0.879 + 0.000230T_s$
高密度粘土砖	2 200	$1.52 - 0.000186T_s$	$0.837 + 0.000234T_s$
粘土砖	2 100	$0.84 + 0.000580T_s$	$0.837 + 0.000264T_s$

T_s —格子砖温度,K。

1.2 数学模型

蓄热室格子砖与烟气之间的相间传热数学模型主要用气相湍流流动控制模型、换热系数模型和固体导热模型3个数学模型表示。

1.2.1 气相湍流流动控制模型

控制方程采用 $k-\varepsilon$ 双方程模型^[7]:

$$\frac{\partial \rho_g \Phi}{\partial t} + \nabla(\rho_g U \Phi) = \nabla[\Gamma_\Phi \nabla(\Phi)] - S_\Phi \quad (1)$$

式中, ρ_g 为烟气的密度, kg/m^3 ; Φ 为烟气的速度矢量或热涵, m/s 或 J ; t 为瞬态模拟时间步长, s ; U 为烟气的速度矢量, m/s ; Γ_Φ 为扩散系数; S_Φ 为源项。

1.2.2 换热系数模型

烟气与格子砖间的换热量,即烟气源项热量,由对流量换热和辐射换热决定:

$$h = h_1 + h_2 \quad (2)$$

式中, h 为总换热系数; h_1 为对流换热系数; h_2 为辐射换热系数。

其中,湍流时

$$h_1 = 0.086 C_p^{0.8} d^{-0.333} (T_g + 273)^{0.25} \quad (3)$$

层流时

$$h_1 = C(1.116 + 0.244 \nu d^{-0.6})(T_g + 273)^{0.25} \quad (4)$$

上述式中, C 为格子砖表面粗糙度系数,取0.08; ν 为标准状态下蓄热室孔道中的烟气流速, m/s ; d 为管道直径, m ; T_g 为烟气温度,K。

辐射以双原子分子 CO_2 和 H_2O 为主,辐射换热系数为:

$$h_2 = \sigma \varepsilon_s \frac{\varepsilon(T_s + 273)^4 - A(T_g + 273)^4}{T_s - T_g} \quad (5)$$

式中, σ 为常数(辐射系数), 其值 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ε_s 为格子砖表面有效黑度, 取 0.8; ε 为烟气黑度, 为烟气中 CO_2 和 H_2O 的黑度之和; A 为烟气吸收率, 为 CO_2 和 H_2O 的吸收率之和。

1.2.3 固体导热模型

模型遵循傅里叶定律, 格子砖热量增加量与源项 S_Φ 相关:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_s C_s T_s) = \nabla(\lambda \nabla T_s) + S_\Phi \quad (6)$$

1.3 边界条件

根据首钢迁钢 2 号高炉热风炉现场条件, 假设在与实际操作相对应的 3 种边界条件下分析烟气特性。

(1) 通过增加空气物理热量提高烟气温度, 而烟气速度和成分不变;

(2) 采用混合焦炉煤气等方法提高燃气化学热量, 即提高煤气 CO 体积分数, 而烟气温度与速度不变;

(3) 通过增加煤气流量提高烟气速度, 而烟气温度和成分不变。

首钢迁钢 2 号高炉热风炉烟气特性参数如表 2 所示, 虽然实际烟气的主要成分为 N_2 和 CO_2 , 但在燃烧期煤气 CO 的体积分数对热风炉操作影响更为重要, 因此我们采用煤气 CO 的体积分数表征烟气特性, 而模拟时 CO_2 的体积分数由 CO 相应的燃烧生成量计算。表中黑体数字表示改变其他因素时不变的参数。

表 2 烟气特性参数

Table 2 Characteristic parameters of flue gas

参数	假设条件				
	1	2	3	4	5
烟气温度/K	1 653	1 663	1 673	1 683	1 693
烟气速度/(m/s)	6	8	10	12	14
煤气 CO 体积分数/%	20	22	24	26	28

2 高温条件下蓄热室温度分布

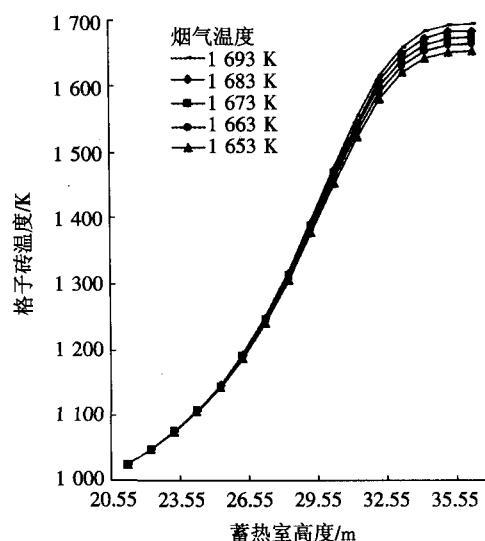
利用模型(1)~(6)瞬态模拟烟气和格子砖 90 min 的热状态, 沿蓄热室高度每隔 1 m 提取烟气和格子砖平均温度, 分析改变烟气特性参数条件下蓄热室温度的变化。

2.1 提高空气和煤气热值

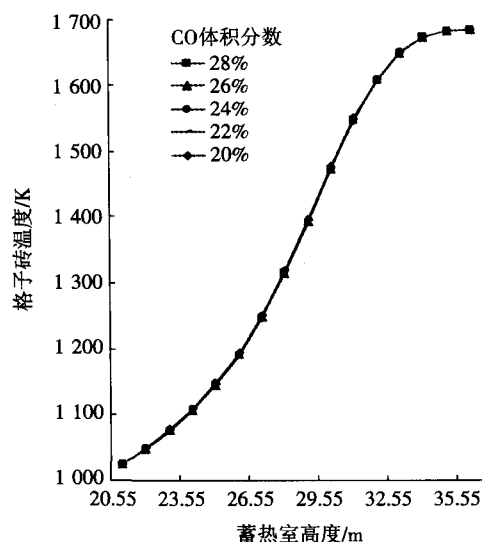
1.3 节中的假设边界条件(1)和(2)实质上是在提高空气预热温度和提高煤气热值的情况下,

研究蓄热室内格子砖温度的分布, 若格子砖温度变化大, 说明假设条件对蓄热室的蓄热能力和状态作用明显, 反之则作用不明显。

从图 4 显示的模拟结果来看, 增加空气物理热量后, 蓄热室高温区温度相差较大, 中部温度分布变化不太明显, 底部格子砖温度最大相差仅为 0.03 K; 提高煤气 CO 体积分数后, 整体蓄热室的温度分布基本不变, 底部格子砖温度最大相差仅为 1.1 K。



(a) 提高空气物理热值



(b) 提高煤气 CO 体积分数

图 4 提高空气和煤气热值条件下蓄热室顶部温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of regenerator in air and gas calorific value increased

从图 4 中可以看出, 蓄热室顶部格子砖温度曲线下落较平缓, 根据表 2 中烟气的假设温度, 该

区域内格子砖温度都接近烟气的初始温度,说明蓄热室顶部格子砖达到热量饱和。图4(a)中格子砖入口烟气温度在1 653~1 693 K范围内变化时,蓄热室顶部格子砖温度最大相差40℃,但随着高度的降低,该温度差逐渐减小;图4(b)中煤气CO体积分数在20%~28%范围内波动时,假设烟气温度与速度不变,而烟气中CO₂体积分数虽然随煤气CO体积分数增加略有提高,但这仅在提高CO₂辐射换热这一因素的条件下发生,显然对顶部格子砖温度分布影响不明显。

综上所述,烟气温度对高温区影响较为明显,烟气温度每提高10 K,蓄热室高温区(不小于1 573 K)向下扩展0.25 m,其他区域温度分布变化较小;而烟气成分变化对蓄热室温度分布影响较小。

2.2 增加煤气流量

当煤气流量增加时,如果不考虑烟气温度变化,将使烟气速度增加,从而提高烟气与格子砖对流换热的能力。例如:当煤气流量由60 000 m³/h提高到65 000 m³/h时,若不考虑烟气温度的变化,烟气速度将提高大约0.5 m/s。

煤气流量增加时蓄热室温度分布如图5所示。从图5中可以看出,当烟气速度在6~14 m/s范围内变化时,蓄热室整体温度不断上升,热量饱和区由格子砖顶部向下扩展,1 573 K以上的高温区由32 m下降到27 m;中部格子砖蓄热量增加,但温度曲线的斜率不断减小;格子砖出口温度上升159 K。

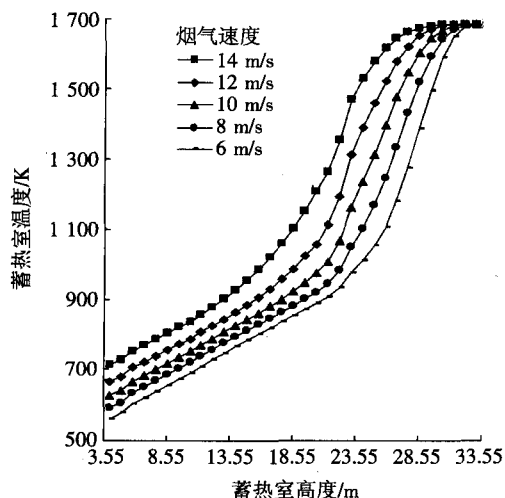


图5 加大煤气流量条件下蓄热室温度分布
Fig. 5 Temperature distribution of regenerator in gas quantity rising

下面由图6的烟气和格子砖交接面温度差值变化分析热交换效率与蓄热室温度分布的关系。由图6可知,烟气和格子砖交接面温度差值曲线有两个较为明显的峰值。当烟气速度由6 m/s提高到14 m/s时,第1个峰值出现的位置从30 m降低到20 m;而第2个峰值出现的位置始终保持在19 m处,但峰值逐渐增大。当烟气和格子砖的温度差曲线出现峰值时,表明烟气与格子砖间热交换效率降低。第1个峰值逐渐减小并向中温区移动,说明烟气速度提高有利于高温区烟气与格子砖的换热;第2个峰值是由于硅砖和中温区格子砖的热工性能不同造成的,在烟气速度提高时,应加强红柱石砖和高密度粘土砖的热传导性及热容,才能提高其热交换效率。

第1个峰值向中温区移动,说明中温区热交换效率下降,但中温区是蓄热室热量的主要蓄积区域,当增加煤气流量时,中温区格子砖蓄热量显著增加,其后果导致热交换效率不断降低;此外,中温区格子砖温度曲线的斜率不断减小,这是引起烟气出口温度上升的主要原因。因此,采用增加煤气流量提高风温时,应进一步加强中温区格子砖热传导及热容性能,在提高中温区格子砖蓄热量的同时提高烟气与格子砖热交换效率,减缓温度曲线的斜率,即减小温降速度,可有效减小顶温与风温之间的温度差。

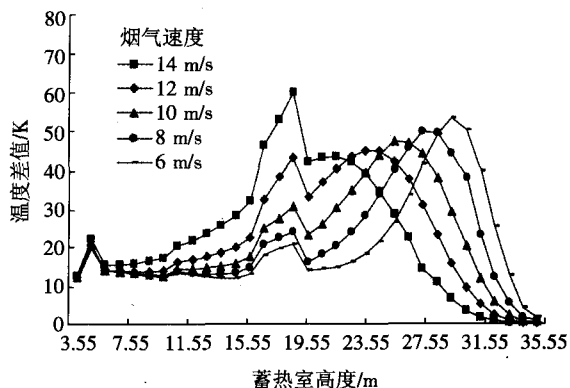


图6 烟气和格子砖交接面温度差值曲线
Fig. 6 Temperature difference curves of the interface between flue gas and checkered bricks

综上所述,增加煤气流量对蓄热室温度分布影响较大,烟气速度每升高1 m/s,高温区将向下扩展0.83 m,烟气出口温度提高25 K;烟气速度的提高能够提高高温区烟气与格子砖换热效率,但降低中温区热交换效率。

3 结果分析及应用讨论

在实际热风炉操作中,蓄热室温度分布变化可能由多种因素造成,例如增加空气和煤气热值,烟气温度和速度也将增加;在提高煤气流量提高蓄热量的同时烟气温度将上升。采用上述模型从单因素模拟蓄热室的温度分布并综合烟气特性与蓄热室的温度分布关系来看,采取热风炉操作措施提高风温的本质是:增加高温区区域范围,增加中温区蓄热能力,提高蓄热室整体温度,其产生的后果将导致高温区域向下扩展,中温区热效率降低,烟气温度上升。

因此,针对高风温下热风炉操作需要,蓄热室格子砖必须满足以下几点要求:

(1)增加高温区硅砖的高度,确保顶部格子砖热稳定性;

(2)加强中温区格子砖的热容和热导率,提高热风炉的热交换效率;

(3)提高整体格子砖的热工性能,克服出口烟气温度上升产生的不利影响。

目前,使用高辐射涂料改善格子砖辐射性能及减小格子砖格孔径提高格子砖蓄热面积等方法都可提高蓄热室蓄热量,达到高风温送风要求,但这些措施并非热风炉操作手段,本文不作讨论。

参考文献:

- [1] 吴启常,张建梁,苍大强. 我国热风炉的现状 & 提高风温的对策[J]. 炼铁,2002,21(5):1-4.
- WU Qi-chang, ZHANG Jian-liang, CANG Da-qiang. Situation of hot stove in China and ways to enhance blast tem-

perature[J]. Ironmaking,2002,21(5):1-4.

- [2] 杨天钧,左海滨. 中国高炉炼铁技术科学发展的途径[J]. 钢铁,2008,43(1):1-5.
- YANG Tian-jun, ZUO Hai-bin. Scientific development strategy of blast furnace ironmaking technology in China[J]. Iron and Steel, 2008,43(1):1-5.
- [3] 马竹梧,白凤双,庄斌,等. 高炉热风炉流量设定及控制专家系统[J]. 冶金自动化,2002,27(5):11-14.
- MA Zhu-wu, BAI Feng-shuang, ZHUANG bin, et al. Flow set and control expert system of hot stoves for blast furnace[J]. Metallurgical Industry Automation,2002,27(5):11-14.
- [4] 陈杉杉,韩丽辉,国宏伟,等. 基于热平衡的热风炉残热推断模型研究[J]. 冶金自动化,2011,35(6):51-54.
- CHEN Shan-shan, HAN Li-hui, GUO Hong-wei, et al. Residual heat inference model for hot stove based on heat balance[J]. Metallurgical Industry Automation, 2011,35(6):51-54.
- [5] 陈映明. 热风炉用耐火材料的选择[J]. 炼铁,1995,14(1):37-39.
- CHEN Ying-ming. Selection of refractories for hot blast stove[J]. Ironmaking, 1995,14(1):37-39.
- [6] 陈兰,唐恩. 热风炉蓄热室温度场分布的数值模拟[J]. 炼铁,2004,23(6):38-40.
- CHEN Lan, TANG En. Digital simulation of temperature field in regenerator of hot air stove[J]. Ironmaking,2004,23(6):38-40.
- [7] Rubin S G, Tannehill J C. Parabolized/reduced Navier-Stokes computational techniques[J]. Annual Review of Fluid Mechanics,1992(24):117-144.

[编辑:沈黎颖]

承钢自动化管控中心五级点检信息化系统上线运行

河北钢铁集团承德钢铁有限责任公司自动化管控中心于2011年开发完成五级点检信息化系统,并在中心轧钢系统设备维护中上线应用。该系统依靠现代化信息系统作支撑,固化设备管理流程、快速分析问题,新的点检方法和手段极大地提高了工作效率。

设备点检是生产管理及设备维护过程中一项重要的基础工作,通过设备点检实现信息化是现代设备管理的必然趋势。承钢自动化管控中心技术人员总结、提炼多年实践工作经验,设计开发出包括日常点检、包保点检、状态点检、检修点检及功能点检的五级点检系统,且融合了检修管理、备件管理、事故故障管理等多个系统模块,最终形成一套适合承钢自动化管控中心日常管理需要的综合性信息管理平台。

该系统在应用过程中,根据不同设备的重要等级及工况特点,设有不同的点检标准,使点检标准化;以点检仪与系统交互功能替代以手工报表为主的点检信息流转形式,使点检结果完全信息化,不仅保证了数据的准确性和有效性,而且实现了信息共享化,可以更好地对数据进行客观的统计和研究,为企业领导做出迅速、准确的判断和决策提供科学依据;将现场生产设备的运行和维护等管理真正落实到日常工作中。

(河北钢铁集团承德钢铁有限责任公司 自动化管控中心 李立红)