

文章编号:1000-582X(2006)02-0068-04

高效蓄热室的传热数值模拟及实验分析*

温良英,白晨光,陈登福,董凌燕,张正荣

(重庆大学材料科学与工程学院,重庆 400030)

摘要:根据蓄热室结构特性,建立了高效蓄热室传热计算的数学模型.通过数值模拟分析了蓄热体材质、换向时间、温度效率和热效率等的关联关系.比较发现,在换向初期,模拟计算结果与实验结果相差较大,但当换向7~10 s后,两者的结果基本吻合,初步验证了模拟求解的可靠性.根据模拟计算结果进一步分析了蓄热体、换向时间等对废气的排放温度和空气的预热温度的影响,得出了本研究条件下,刚玉质小球的适宜换向时间为60 s左右,高铝质和粘土质小球的适宜换向时间为20~30 s.蓄热室温度效率可达到80%以上,热效率可达到70%以上.

关键词:蓄热室;换向时间;温度效率;热效率

中图分类号:TF538.6

文献标识码:A

节能和环保是21世纪工业炉发展的主要方向,由于高温空气燃烧技术的先进性和实用性,我国应大力研究和开发,并逐步在工业炉上推广应用^[1-4].我国的工业炉与发达国家工业炉效率相比,差距很大.据统计,炉窑的大部分能耗归结为排烟损失,常规换热技术的热回收率只有50%~60%,无法充分回收烟气的余热,全国每年有超过5 000万t标准煤白白浪费.因此,从我国工业炉能耗及烟气余热的潜力来看,高温空气燃烧技术的应用将为我国工业炉行业的经济效益开辟市场.高效蓄热室是蓄热式高温空气技术的核心,本研究针对蓄热室的传热特性、温度效率、热效率和换向时间等重要参数进行理论分析和实验研究.

的总流通截面积为 $\epsilon \cdot \pi D^2/4$, ϵ 为蓄热球填充层中的空隙度;蜂窝体的小孔各截面为 $a \times a$.蜂窝体与同体积的蓄热小球比,其传热面积大、阻力损失小.

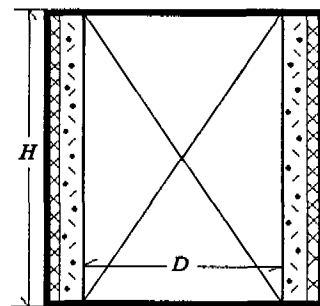


图1 蓄热室结构示意图

1 蓄热室结构

蓄热室为燃烧产生的高温烟气和助燃空气交替经过的通道.如图1,蓄热室壁由钢板、内衬绝热纤维毡和耐火浇注料制成,其高度为 H ,内径为 D .蓄热体充填蓄热室的内腔,新型的蓄热体有球状、片状、蜂窝状等,材质有粘土、高铝、碳化硅、铸铁等.英美和西欧一些国家广泛采用蓄热小球(直径为 d_s),日本却特别推崇蜂窝体,如图2中(a)和(b).蓄热球填充层中空隙

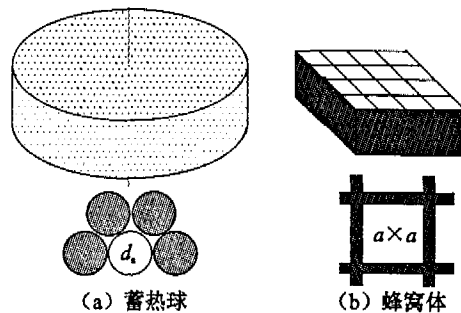


图2 蓄热体

* 收稿日期:2005-10-08

基金项目:重庆大学骨干教师计划资助项目(713411001)

作者简介:温良英(1966-),女,重庆合川人,重庆大学副教授,博士,主要从事钢铁冶金、节能环保方面的研究.

2 数学模型及求解方法

2.1 传热特性的数学描述

假设蓄热体均匀充满整个蓄热室,且蓄热期高温烟气在其入口处(热空气出口)的流量及温度恒定,释热期冷空气在其入口处(冷烟气出口)的流量及温度恒定;蓄热室壁为绝热壁.根据物质平衡及能量平衡,可以描述如下(以蓄热球填充圆柱形蓄热室为例).

2.1.1 控制方程

对流动相:

$$\begin{aligned} \varepsilon \rho_f c_f \frac{\partial t_f}{\partial \tau} + \rho_f u_z c_f \frac{\partial t_f}{\partial z} &= -\alpha_{f-s}(t_f - t_s | r_s), \\ \rho_f u_z &= G_f. \end{aligned} \quad (1)$$

对蓄热体:

$$(1 - \varepsilon) \rho_s c_s \frac{\partial t_s}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 t_s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_s}{\partial r} + \frac{\partial^2 t_s}{\partial z^2} + \alpha_{f-s}(t_f - t_s | r_s), \quad r \in (0, D/2). \quad (2)$$

对蓄热球:

$$\frac{1}{a_s} \frac{\partial t_s}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 t_s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_s}{\partial r}, \quad r \in (0, d_s/2). \quad (3)$$

2.1.2 初始条件

假设蓄热室开始工作时,温度为环境温度,即 $\tau=0$ 时,蓄热体:

$$t_s = t_0 (\text{环境温度}), 0 \leq z \leq h_s;$$

流动相:

$$\begin{aligned} t_f &= t_0 (\text{环境温度}), 0 < z \leq h_s; \\ t_{f,s} &= t_h (\text{给定值}), z = h_s. \end{aligned}$$

2.1.3 边界条件

1) 入口条件. 高温烟气入口 ($z = h_s$) 和冷空气入口 ($z = 0$) 温度恒定(如图 3).

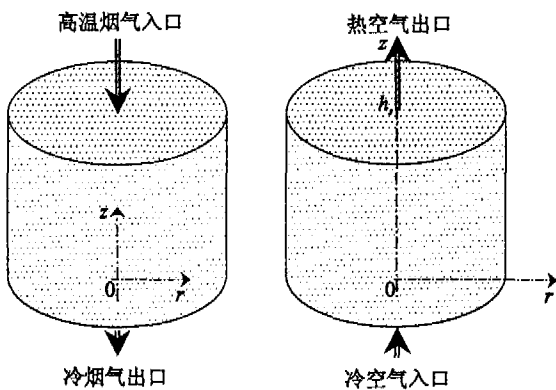


图 3 热交换流体流向示意图

蓄热期:

$$0 \leq \tau_h \leq T_h, z = h_s, t_{f,s} = t_h (\text{给定值});$$

释热期:

$$0 \leq \tau_c \leq T_c, z = 0, t_{f,a} = t_c (\text{给定值}).$$

2) 壁面条件. 蓄热室壁为绝热壁,不散失热量 $q_b = 0$.

气流与蓄热体表面处,有

$$\alpha_{f-s}(t_f - t_s | r_s) = \lambda_s \left. \frac{\partial t_s}{\partial r} \right|_{r_s}, r \in (0, d_s/2).$$

3) 对称性条件. 在蓄热室中心, $r = 0$ 处, $\frac{\partial t_s}{\partial r} = 0$.

在蓄热球中心, $\lambda_s \left. \frac{\partial t_s}{\partial r} \right|_0 = 0, r \in (0, d_s/2)$.

4) 换向平衡条件. 假设蓄热期终了蓄热体的温度即为其释热期开始温度,冷却期终了蓄热体的温度为其蓄热期开始温度,即

$$t_s(\tau_h = T_h) = t_s(\tau_c = 0), t_s(\tau_h = 0) = t_s(\tau_c = T_c).$$

蓄热体正常工作时,储存的能量为:

$$E_s = (1 - \varepsilon) \rho_s c_s \int_0^{h_s} \int_0^{2\pi} \int_0^{D/2} (t_s - t_0) r dr d\theta dz.$$

2.2 传热数学模型的数值求解

在微元控制体上,对时间项取向后差分、流动相取向向前差分、其余各项取中心差分对控制方程及定解条件进行离散求解^[3-4].在模型求解的调试过程中,气体与蓄热球之间的换热关系折算为^[5]:

$$Nu = \frac{\alpha_{f-s} \cdot d_s}{\lambda_f} = 2 + 1.8 Re_f^{1/2} Pr_f^{1/3}, \quad (4)$$

式中:雷诺数 $Re_f = \frac{u_f d_s}{\nu_f}$, $u_f = \frac{G_f}{\pi D^2 / 4}$ 为空载流速; Pr_f 为

气体的普朗特数.

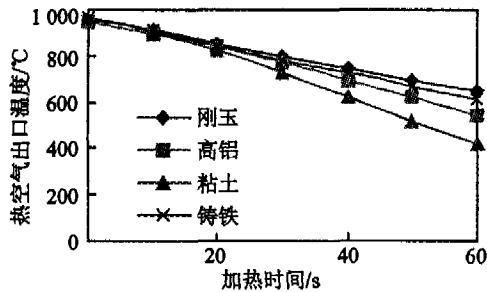
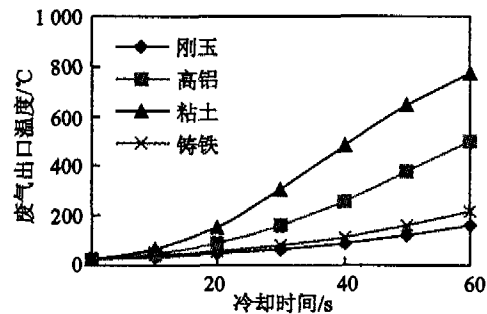
可根据需要改变结构参数^[6-7]:蓄热室 $D \times H$ 、蓄热体 $d_s \times h_s$ 、孔隙度 ε ,操作参数:换向时间 $T_h(T_c)$,高温烟气的排放量和温度及预热空气量等.输出各蓄热期或释热期蓄热体填充层的节点温度,冷烟气的排放温度,热空气的出口温度等.

3 数值模拟计算与结果分析

3.1 蓄热体材质的选择

蓄热体材质分别采用刚玉、高铝、普通粘土和铸铁.蓄热小球的直径为 $\phi 15$ mm,填充高度为 500 mm,换向时间为 60 s,烟气入口温度为 1 000 °C,冷空气入口温度为 25 °C.热空气的出口温度和废气出口温度随时间的变化曲线,如图 4 和图 5 所示.

由图 4 可见,在整个换向周期内,刚玉质和铸铁质蓄热小球填充的蓄热室,热空气出口的温度变化范围相对高铝质特别是粘土质的小而均匀.前者的废气出

图4 热空气出口温度随时间的变化 ($T_h = 60$ s)图5 废气出口温度随时间的变化 ($T_c = 60$ s)

口温度变化范围更小(图5),从最高废气出口温度来看,刚玉质的为161℃,铸铁质的为216℃,高铝质的为502℃,粘土质的为774℃。因此,在本模拟条件下,刚玉质和铸铁质小球填充的蓄热室可以实现烟气余热的极限回收,而高铝质和粘土质小球由于蓄热能力较差,致使在此实验条件下高温烟气中的大部分能量不能充分利用,但可以通过扩大蓄热室或增加蓄热室高度来增加蓄热小球量或缩短换向时间来满足换热的要求,如本模拟条件下,若换向时间缩短为20s时,粘土质小球的蓄热室废气出口温度仅为157℃,热空气出口温度达823℃,就能达到烟气余热极限回收和空气高温余热的目的。因此,蓄热体的选择使用应与蓄热室结构、换向时间等操作参数匹配。

3.2 换向时间的确定

图6是热空气和废气出口温度随换向时间的变化曲线。从图6可以看出,废气的出口温度随着换向时间的增加而增加,当加热(蓄热体蓄热)时间增加到一定程度,蓄热体达到热饱和状态不再吸收过流烟气的热量,烟气出口温度趋于稳定为其入口温度。热空气的温度随着换向时间的增加而降低,当冷却(蓄热体释热)时间增加到一定程度,蓄热体储存的热量释放殆尽,过流空气的温度接近其入口温度。换向时间越短,烟气出口平均温度越低,热空气出口平均温度越高,但换向时间缩短,意味着换向阀的工作频率越高,对换向阀和换向系统的要求越高,因此,应综合考虑确定一个合理的范围。

实验过程中发现,在换向开始的几秒钟内,实验结

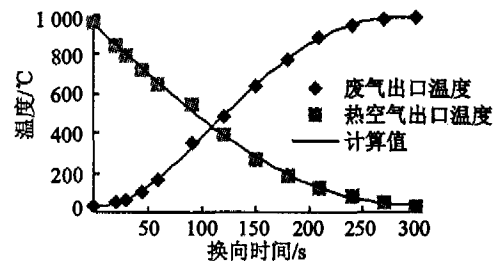


图6 热空气和废气出口温度随换向时间的变化

果^[8]与模型求解的结果相差较大。蓄热期-释热期初期废气出口实测温度低于计算值,释热期-蓄热期热空气的出口实测温度高于计算值,这主要是因为,在换向过程中,实际测得的温度受交替介质温度的影响所致。换向7~10s后,实验结果与计算结果基本吻合,初步验证了上述模型解的可靠性。目前,一方面可以通过模型进行预测,另一方面可以用所建的实验系统进行实测。

3.3 温度效率和热回收率的计算

通过高效蓄热室对高温烟气的余热回收效率用空气吸收的热量与进入蓄热室的高温废气所含热量的百分数表示,即

$$\eta = \frac{Q'_K - Q'_K}{Q'_y} \times 100\%, \quad (5)$$

温度效率表示为

$$\eta_t = \frac{t'_K - t'_K}{t'_y - t'_K} \times 100\%, \quad (6)$$

式中: Q'_K 、 Q'_K 分别为进出蓄热室空气的热量; Q'_y 为烟气进入蓄热室的热量; t'_K 、 t'_K 分别为进出蓄热室空气平均温度; t'_y 为烟气进入蓄热室的平均温度。

由图7可见蓄热室温度效率和热效率随换向时间的增加而降低,采用 $\phi 15$ mm刚玉质小球500 mm高,空气和烟气入口温度分别取25℃和1000℃,换向时间为60s时,温度效率为83.6%,热效率为72.8%;当换向时间增加至120s时,温度效率为65.8%,热效率只有59.6%,如果在延长换向时间就不能满足高效蓄热的要求。

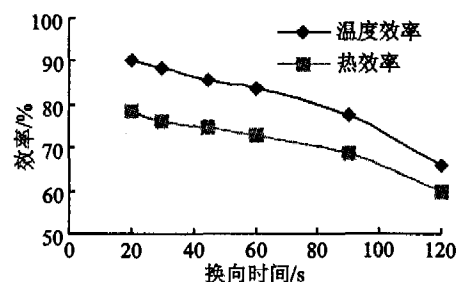


图7 温度效率和热效率随换向时间的变化

4 结 论

1) 蓄热体材质对蓄热室的换热效果有较大影响,以刚玉为佳,铸铁虽然其换热效果比高铝和粘土均好仅次于刚玉,但铸铁太重且加热温度不能太高不宜选用。

2) 换向时间应与蓄热体材质、蓄热室尺寸等参数相互匹配,才能实现烟气的余热充分回收,提高蓄热室的温度效率和热效率。本研究条件下,用刚玉质小球的适宜换向时间为 60 s 左右,用高铝质和粘土质的小球时为 20 ~ 30 s。

3) 模型计算值与实验结果基本吻合,说明模型的数值模拟是可行的。

参考文献:

[1] TOSHIKI HASEGAWA. Environmentally-compatible Regenerative Combustion Heating System[J]. *Industrial Heating*, 2000,3;111-116.

- [2] MASAO UEDE, TOSHIO SHIMADA. Simulation of Regenerative Burner System and Its Application to Walking Beam Reheat Furnaces[J]. *Iron and Steel Engineer*, 1999,4: 68-71.
- [3] 祁海鹰,徐旭常. 中国开发应用高温空气燃烧技术的前景[A]. 2000 年钢铁节能降耗技术交流暨信息发布会论文集[C]. 成都:成都华冶信息研究所, 2000. 19-30.
- [4] 温良英. 蓄热式燃烧技术的研究及应用前景[A]. 2000 年钢铁节能降耗技术交流暨信息发布会论文集[C]. 成都:成都华冶信息研究所, 2000. 1-9.
- [5] 林瑞泰. 多孔介质传热传质引论[M]. 北京:科学出版社,1995. 160.
- [6] 宋高波. 高效蓄热室特性的分析计算[D]. 重庆:重庆大学材料科学与工程学院,2001.
- [7] 王玲. 高效蓄热室阻力及传热特性实验及计算分析[D]. 重庆:重庆大学材料科学与工程学院,2003.
- [8] 温良英. 蓄热式燃烧器蓄热室传输特性试验研究[J]. *钢铁*,2002,37(7);54-57.

Heat Transfer Simulation and Experiment of Highly Efficient Regenerator

WEN Liang-ying, BAI Chen-guang, CHEN Deng-fu,
DONG Ling-yan, ZHANG Zheng-rong

(College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: On the base of regenerator configuration character, the heat transfer mathematics models are set up. The relevant relations of regenerator medium, exchange time, temperature efficiency and thermal efficiency are analyzed by numerical simulation. The results are anastomotic by numerical simulation and by experiments after exchanging 7 ~ 10 s. And it indicts reliability by simulation. The authors study effects of exhaust gas temperature and air preheat temperature influenced by regenerator medium, exchange time etc., by numerical simulation and experiment. On the case, the suitable exchange time of corundum globule is about 60s, the suitable exchange time of high aluminum and clay ceramic ball is 20 ~ 30 s. Temperature efficiency is up more than 80%, thermal efficiency is up more than 70%.

Key words: regenerator; exchange time; temperature efficiency; thermal efficiency

(编辑 李胜春)