

石灰石的爆裂与磨耗特性研究

王进伟, 李少华, 杨海瑞, 吕俊复

(清华大学热能工程系, 北京 100084)

摘 要: 在小型炉下预热电加热流化床实验台上对土耳其的某石灰石的爆裂和磨耗特性进行了实验研究, 煅烧温度与流化介质中 CO_2 分压力对石灰石的爆裂有着十分重要的影响, 当 CO_2 的分压力大于石灰石分解的平衡压力时, 煅烧反应将受到抑制, 石灰石爆裂程度很小; 当 CO_2 的分压力小于石灰石分解的平衡压力时, 煅烧反应生成的 CO_2 的析出引起内部压力增大, 爆裂加大, 煅烧产物的粒径将明显小于原始石灰石的粒度, 孔隙率也有较大程度的提高, 这将有利于固硫反应的进行。该石灰石煅烧产物在流化床内的磨耗特性与煤灰相似, 磨耗速率常数基本上符合指数衰减的时间函数。

关 键 词: 石灰石; 流化床; 爆裂; 磨耗

中图分类号: X701.3 文献标识码: A

1 前 言

流化床锅炉密相床中有大量固体床料, 这些温度在 $850 \sim 900^\circ\text{C}$ 的固体物料在强烈的混合扩散条件下, 可以快速加热给入燃料使之升温燃烧。此温度为石灰石脱硫的最佳温度, 同时可以有效控制氮氧化物 NO_x 生成^[1~3]。

石灰石被送入炉膛后, 将发生煅烧反应, 其过程可分为以下 5 个阶段: (1) 从环境到石灰石颗粒表面的热量传递; (2) 从颗粒表面到颗粒内部的传热; (3) 颗粒内部的吸热热解反应; (4) 热解生成的二氧化碳通过产物层扩散到颗粒表面; (5) 二氧化碳从颗粒表面扩散到环境中^[3]。

石灰石在炉膛内发生煅烧反应和固硫反应同时, 爆裂和磨耗等过程将导致粒度的不断变化。进入炉膛后, 石灰石将被迅速加热, CO_2 气体将充斥颗粒孔隙并使内压增大, 当孔隙压力增大到足以克服颗粒本身强度时, 该颗粒将发生破裂。同时, 颗粒之间以及颗粒和床壁之间的碰撞将会导致石灰石颗粒

尖角边缘的脱落, 出现磨耗现象。

石灰石的爆裂和磨耗特性是决定石灰石脱硫效率的关键因素之一, 石灰石所经历的粒度变化及成份变化引起的密度变化将进一步影响到循环流化床锅炉的整体物料平衡, 因此有必要研究石灰石在循环流化床锅炉内的爆裂和磨耗特性。

2 实验设备

实验是在小型炉下电加热流化床综合实验台上进行的。该流化床由主反应器, 温控系统, 配气系统, 给料装置, 取样系统和数据采集系统等构成, 反应器内径 54 mm, 高 800 mm, 其结构如图 1 所示。图中反应器采用布置在石英玻璃管外围的硅碳管分上下两端加热, 下段为烟气预热段, 控制进入反应器内的热风温度; 上段为保温段, 调节整个反应器的升温速率。采用炉下预热方式进行加热可以避免炉上加热方式下冷风进入反应器导致的测量误差。反应器

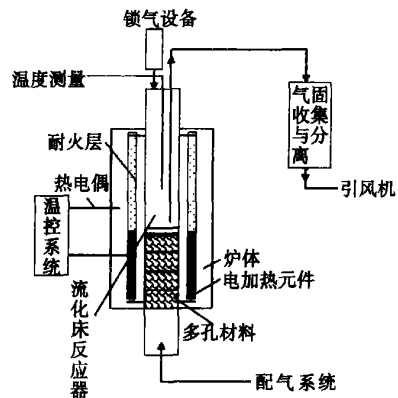


图 1 流化床综合实验台

收稿日期: 2005-08-29; 修订日期: 2006-03-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50406002); 法国 EDF 基金资助项目(4300028789)

作者简介: 王进伟(1981-)男, 河南洛阳人, 清华大学硕士研究生

内的温度由可控硅调压器控制, 控制温度的误差范围在 ± 5 K。煤颗粒和床料由反应器上部的给料口批量给进, 实验结束时, 爆裂后的颗粒连同床料一起经过一抽吸系统从上部吸出, 被收集分离器收集。

3 实验结果分析

3.1 成份分析

实验用石灰石的成份采用化学滴定方法测量, 其中: CaCO_3 : 92.95%, MgCO_3 : 0.77%, 其它: 6.28%。用真密度计和压汞仪测量不同粒径石灰石样品的真密度在 $2\ 714 \sim 2\ 742\ \text{kg}\ \text{m}^{-3}$ 之间。通过充分煅烧的方法, 可得其烧失量在 40% 左右。

3.2 爆裂特性

为对石灰石煅烧过程中的爆裂特性进行实验研究, 首先对该石灰石进行筛分, 选取粒径在 0.6 ~ 1.0 mm 之间颗粒, 恒温干燥箱内干燥 3 h 后, 投入流化床中进行煅烧。床温控制在 $856\ ^\circ\text{C}$, 空气作为流化介质条件, 流量为 $0.4\ \text{m}^3/\text{h}$, 石灰石投入量为 20 g。在相同流化条件下, 向流化床内投入同等粒度分布, 25 g 的石英砂, 记录床料温度变化, 并与石灰石煅烧温度变化进行了对比(见图 2)。由于石灰石煅烧反应属于吸热反应, 石灰石加入后, 一方面本身物理吸热, 同时分解吸热导致炉膛温度在瞬时下降后缓慢上升; 而石英砂在投入炉膛后只是物理吸热导致温度降低, 因此很快就升高回复到原有水平。

颗粒的爆裂, 而且煅烧析出 CO_2 在颗粒内部形成了很多的孔隙结构, 内部孔隙的增加将有助于增加气体成份的扩散速率, 从而提高石灰石固硫反应的速率, 在停留时间一定的情况下, 可以显著提高脱硫效率。

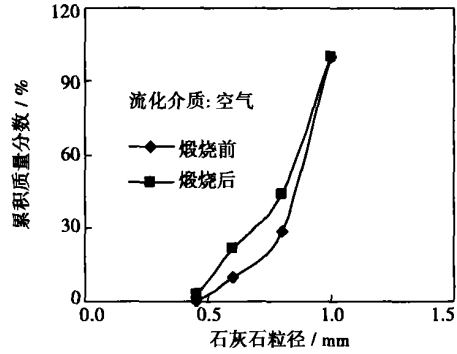


图 3 石灰石煅烧前后粒径变化

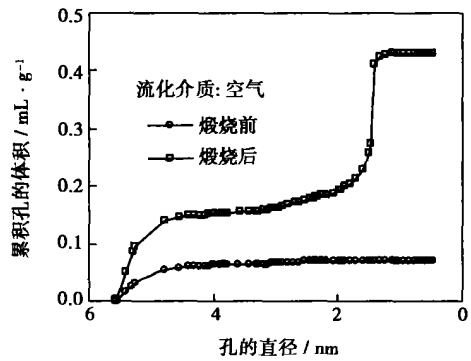


图 4 石灰石煅烧前后孔隙变化

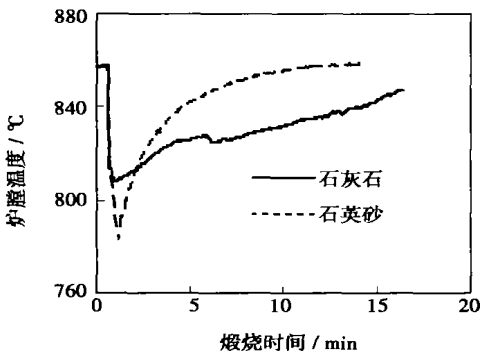


图 2 石灰石与石英砂煅烧过程温度变化

石灰石煅烧反应前后粒径变化关系见图 3。石灰石煅烧后粒径较煅烧前细的多, 小颗粒所占的份额明显增加。图 4 是用压汞仪测量的上述石灰石煅烧前后孔隙变化。结果表明, 在空气氛围下进行石灰石煅烧, 煅烧产物的孔隙率比煅烧前增加很多, 孔隙率大约由 3% 增加到 43%。煅烧反应不仅加强了

实验同时研究了不同煅烧条件对石灰石爆裂特性的影响。流化床煅烧实验与马佛炉煅烧实验前后粒径分布曲线比较如图 5 所示。流化床煅烧时, 通入 $0.2\ \text{m}^3/\text{h}\ \text{CO}_2$ 作为流化介质, 床温控温在 $850\ ^\circ\text{C}$,

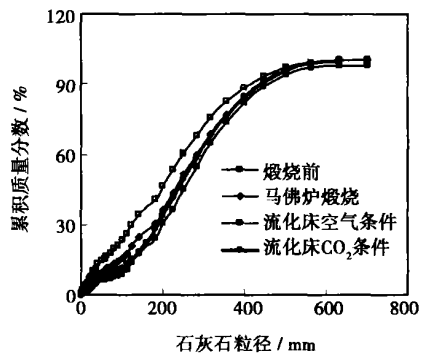


图 5 流化床煅烧与马佛炉煅烧的比较

投入石灰石后, 由于此时 CO_2 分压力大于该温度对应的热分解平衡压力, 因此石灰石基本不发生煅烧反应, 床温很快恢复到初始温度, 然后分别改用 $0.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 的空气或纯 CO_2 进行流化。马佛炉煅烧条件为 $850 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度下煅烧 30 min 。结果表明: 在空气作为流化介质条件下, 石灰石爆裂比马佛炉条件下煅烧的爆裂更为强烈, 煅烧后的粒径较马佛炉煅烧细得多; 纯 CO_2 流化介质条件下石灰石基本上不发生爆裂。

石灰石爆裂存在 3 种机理^[4], 第一种是热应力导致的颗粒碎裂; 第二种是有机质或水份挥发导致的内压力引起的碎裂; 第三种是煅烧反应过程中 CO_2 的析出导致颗粒内部压力增大而引起的碎裂。作为煅烧反应产物, CO_2 的存在将抑制煅烧反应的进行。空气与混气煅烧反应温度变化曲线如图 6 所示。实验选取石灰石粒径范围在 $0.6 \sim 1.0 \text{ mm}$ 之间, 恒温干燥 2 h 后, 先通入 $0.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 流量的 CO_2 进行流化, 控制床温在 $859 \text{ }^\circ\text{C}$, 投入石灰石约 24 g , 待温度回复后切换成 $0.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 空气或混气 ($50\% \text{ CO}_2 + 50\% \text{ 空气}$) 进行煅烧。通过温度曲线可以看出: 混气的温度变化曲线较为平坦, 表明石灰石煅烧反应速率较缓慢, 这正是由于混气中 CO_2 对煅烧反应的抑制作用所致。

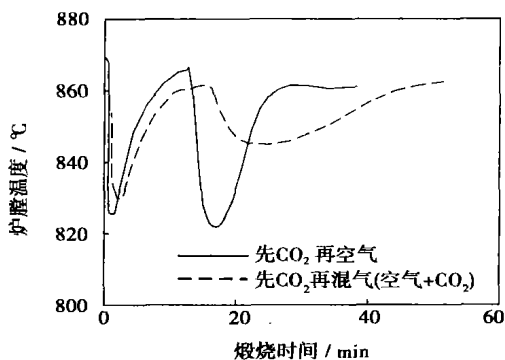


图 6 空气与混气煅烧过程温度变化

实际上在石灰石的煅烧反应中, 只有在 CO_2 的分压力低于特定温度对应热分解平衡压力时煅烧反应才会发生^[5]。同时热分解平衡压力与温度有极大的依赖关系。在一定的温度下, 当 CO_2 分压高于该温度下的平衡分解压力时, 石灰石中的 CaCO_3 将不会分解。这就是为什么纯 CO_2 流化介质条件下之所以基本不发生煅烧的原因^[6]。

3.3 磨耗特性

在流化床综合实验台上, 床温控制在 $850 \text{ }^\circ\text{C}$, 将经过马佛炉充分煅烧得到的 55 g 煅烧产物投入炉膛, 控制流化风速为 0.36 m/s , 此流化风速既可以保证物料的充分流化, 同时可以将磨耗产生的细颗粒携带出炉膛。

由于磨耗速率随时间下降并趋于一常数, 因此定义颗粒磨耗速率为:

$$R_s = dm / m dt \quad (1)$$

其中: m —某一时间时特定尺寸的颗粒的质量, kg ; R_s —磨耗速率, min^{-1} 。

基于 Merrick 等人的磨耗模型^[7], 流化床中颗粒的磨耗速率与过量气体流速 ($U - U_{mf}$) 成正比, 与磨耗速率常数 K_d 成正比:

$$R_s = K_d (U - U_{mf}) \quad (2)$$

式中: U —流化风速, m/s ; U_{mf} —最小流化风速, m/s ; K_d 的单位为 m^{-1} 。

这样, 烟气由过滤器收集, 每隔 10 min 收集一次。通过收集细颗粒量随时间的变化来研究在不同流化风速下, 不同颗粒粒度的磨耗速率及磨耗速率常数。图 7 给出了 $0.335 \sim 0.45 \text{ mm}$ 石灰石磨耗速率常数。结果表明: 和煤灰的磨耗特性相似, 该石灰石的磨耗速率常数也近似符合指数衰减的时间函数, 开始阶段磨耗很快, 之后达到稳定值。至于 40 min 后磨耗速率常数稍有上升, 可能是由于实验误差所致。

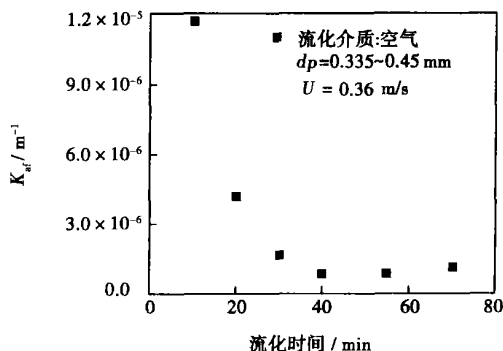


图 7 石灰石煅烧产物磨耗特性

4 结 论

通过对土耳其某石灰石的实验研究可以得出如下结论: (1)煅烧温度与流化介质中 CO_2 分压对石灰石的爆裂有着十分重要的影响, CO_2 分压越高, 爆裂越不强烈。(2)煅烧反应生成的 CO_2 析出引起内部压力增大, 爆裂加大, 煅烧产物的粒径将明显小于原

始石灰石的粒度,孔隙率也有较大程度的提高,这将有利于固硫反应的进行。(3)该石灰石煅烧产物在流化床内的磨耗特性与煤灰相似,磨耗速率常数基本上符合指数衰减的时间函数。

参考文献:

- [1] 杨海瑞,吕俊复,刘清,等.循环流化床锅炉密相区颗粒的横向扩散研究[J].热能动力工程,2001,16(4):395-398.
- [2] BASU P. Combustion of coal in circulating fluidized-bed boiler: a review[J]. *Chemical Engineering Science* 1999, 54: 5547-5557.
- [3] 谢建云,傅维标,史愿.石灰石煅烧过程等效扩散系数的测

量[J].燃烧科学与技术,2001,7(4):226-229.

- [4] HU N, SCARONI W. Fragmentation of calcium-based sorbents under high heating rate short residence time conditions[J]. *Fuel* 1995, 74(3): 374-382.
- [5] YRJAS P, IISA K, HUPA M. Comparison of SO₂ capture capacities of limestones and dolomites under pressure[J]. *Fuel* 1995, 74(3): 395.
- [6] 刘前鑫,刘柏辉.石灰石脱硫的加压热重分析试验[J].东南大学学报,1997,2(3):1-7.
- [7] MERRICK D, HIGHLEY J. Particle size reduction and elutriation in a fluidized bed process[J]. *AIChE Symp Ser*. 1974, 70: 366-378.

(辉 编辑)

设计研究

汽轮机低压通流部分成型的基本原则

据《Электрические станции》2005年10月号报道,在提高现代冷凝式汽轮机装置效率方面,改进低压通流部分,首先是改进汽轮机出口部分:末级和排汽管具有大的意义。

最近十年在俄罗斯汽轮机制造业中,首先在JIM3(列宁格勒金属工厂)汽轮机低压部分成型方面取得了很大的成就。

研究表明,在设计通流时必须考虑级的相互影响。在广泛进行的试验研究过程中也解决了与叶片装置振动可靠性有关的问题,进行了有关湿蒸汽流流动结构方面的研究,改进了工作叶片除湿和防侵蚀保护系统。

基于大量的研究,制定了现在在低压部分成型过程中广泛应用的准三维计算方法和程度。根据这个方法,研究了在实际的马赫数下以及沿喷嘴叶片和工作叶片高度参数大的变化梯度下同时在低压缸所有级内的蒸汽流动。这时,也考虑了在试验研究中发现的级彼此相互影响的重要因素。

为了确定能量损失,在程序中包含了较为完善的能量损失计算方法。按照该方法,根据叶栅的几何特性(相对节距、宽度、进口边缘和出口边缘厚度、槽道的收敛度)、冲角和气流速度、级的扇形度、子午面廓线的形状、带冠和不带冠工作叶片内的径向间隙值、是否存在拉金及其它一些因素确定损失。

进行的分析表明了低压缸前几级以及在中间级内应用马刀形叶片的合理性。这时,既依靠降低了级根截面内的端部损失,又依靠保证气流参数沿喷嘴叶片和工作叶片半径的最佳分布得到了良好的效果。

现在,在JIM3在制造所有用于热电站和核电站(我国连云港核电站的4台1000MW汽轮机组就是JIM3生产的)的新汽轮机时,都基于关于级的主要状态和几何特性的选择,其中包括喷嘴叶片马刀形弯曲的选择优化计算完成低压通流部分的设计,同时对低压缸所有级的准三维流动的方案计算进行优化。

(吉桂明 供稿)

ents, the heat exchange performance and flow resistance characteristics of a single spirally fluted pipe were first studied and a non-dimensional relationship of heat-exchange and flow-resistance characteristics was ascertained. Thereafter, a test tube bundle was made by use of the spirally fluted tubes of the most common specifications currently used on air preheaters of power plants. High temperature air flows inside the tubes, and low temperature air outside the tubes transversely sweeps across the tube bundle. By changing the transverse and longitudinal tube pitch of the staggered tube bundles, a non-dimensional relationship between the Nusselt number and Euler number of each tube bundle on the one hand and various other factors on the other can be obtained. Through an analysis, the tendency of influence exercised by the above-cited transverse and longitudinal tube pitch on the heat-exchange and flow-resistance characteristics can also be revealed. On the basis of the conclusions made from the foregoing, a comparatively rational transverse tube pitch ($S_1=66\text{ mm}$) and longitudinal tube pitch ($S_2=48\text{ mm}$) of the tube bundles may be determined, providing a design basis for the use of spirally fluted tubes in air preheaters and attaining a combined benefit of optimum heat-exchange and flow-resistance characteristics. **Key words:** spirally fluted tube, staggered tube bundle, Nusselt number, Euler number

薄壁蓄热器最大相对温度和最佳切换时间 = Maximal Relative Temperature and Optimum Switching-over Time for a Thin-wall Heat Accumulator [刊, 汉] / AI Yuan-fang, MEI Chi, HUANG Guo-dong, et al (Research Institute of Thermodynamic Equipment Simulation and Optimization under Zhongnan University, Changsha, China, Post Code: 410083) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 362 ~ 365

A study is conducted of the impact of structural parameters of a thin-wall heat accumulator on its heat transfer performance by using a single parameter perturbation-based semi-analytic numerical calculation method. The research results show that there exists a maximal relative temperature and optimum switching-over time; the maximal relative temperature is directly proportional to the air flow passage length and any change of the circumferential length in the passage can result in a change of the maximal relative temperature; the optimal switching-over time is directly proportional to partition wall thickness. When the wall thickness is 1.0 mm, the optimum switching-over cycle analytic value of 2.5 s is basically in agreement with 4 s of the high temperature gasification intermediate test and 10 s of the low oxygen dispersion-combustion industrial test. The foregoing confirms the feasibility of conducting structural design and operation-and-control optimization of honeycomb-ceramic heat accumulators by use of asymptotic analytic methods. **Key words:** thin-wall heat accumulator, honeycomb-ceramic heat accumulator, maximal relative temperature, optimum switching-over time, semi-analytic numerical method

石灰石的爆裂与磨耗特性研究 = A Study of the Explosive Cracking and Wear Characteristics of Limestone [刊, 汉] / WANG Jin-wei, LI Shao-hua, YANG Hai-ri, et al (Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 366 ~ 369

An experimental study was conducted for the explosive cracking. The wear characteristics of limestone of Turkish origin on a fluidized-bed test rig electrically preheated by a small-sized boiler. The calcination temperature and the partial pressure of CO_2 in fluidized media have a very important influence on the explosive cracking of the limestone. When the partial pressure of CO_2 is greater than the equilibrium pressure of limestone decomposition, the calcination reaction will be restrained and the limestone explosive cracking degree is very small. When the partial pressure of CO_2 is smaller than the equilibrium pressure of limestone decomposition, the precipitation of CO_2 produced in the calcination reaction will result in an increase of both the internal pressure and explosive cracking. The particle diameter of calcination products are obviously smaller than that of the original limestone. Moreover, the porosity is also increased by a relatively great degree, which will be conducive to the process of sulfur retention reaction. The calcination product of the limestone has in the fluidized bed the wear characteristics similar to those of coal ash and the wear rate constant basically conforms with the time function of an exponential attenuation. **Key words:** limestone, fluidized bed, explosive cracking, wear

石灰石煅烧过程中产物 CaO 孔隙分布变化研究 = A Study of the Change in Pore Distribution of CaO Produced in the Process of Limestone Calcination [刊, 汉] / WANG Chun-bo, LI Yong-hua, WEI Ri-guang, et al (Energy Source and Power Engineering Institute under the North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 370 ~ 372