中国科技论文在线 http://www.paper.edu.cn

第 28 卷第 6 期 煤 炭 学 报 Vol. 28 No. 6
2003 年 12 月 JOURNAL OF CHINA COAL SOCIETY Dec. 2003

文章编号:0253－9993(2003)06－0622－04

飞灰快速水化团聚颗粒在流化床中的冷态磨耗研究

李登新[1,2]，姬 冲[1]，徐 猛[1]，吕俊复[1]，刘 青[1]，张建胜[1]，岳光溪[1]

(1. 清华大学 热能工程系，北京 100084；2. 东华大学 环境科学与工程学院，上海 200051)

摘 要：将流化床飞灰与 363 K 的水均匀混合，利用泥浆泵和喷嘴将该混合物喷入流化床燃烧室，在热烟气的作用下，飞灰迅速水化并发生团聚，团聚颗粒粒度比原飞灰大. 团聚得到的颗粒在振动筛上筛分，根据筛分各粒级重量分布可以计算团聚分灰的冷态磨耗速率. 研究表明，添加剂用量、流化速度是影响飞灰团聚颗粒磨耗速率大小的关键因素. 随着流化速度的降低、添加剂用量的提高，团聚颗粒的磨耗速率降低，在流化床中停留时间相对较长，飞灰碳降低幅度和自由氧化钙利用率较大.

关键词：飞灰；水化；团聚；流化床；磨耗速率

中图分类号：TQ051.13 **文献标识码**：A

流化床飞灰中氧化钙含量高，但活性氧化钙含量不高，有的飞灰中碳含量在 20％以上. 为提高飞灰钙利用率和飞灰碳燃尽度，传统上采取飞灰水化活化技术[1~4]. 实践证明，飞灰水化或蒸汽活化工艺需建立一套独立工艺流程，该工艺水活化时间长，需要在较高温度下（623～723 K）用水蒸气活化，且大多与流化床运行不连续，工艺实现有一定难度，水化后烘干飞灰在返回流化床后较原飞灰粒度分布没有较大的改观[5]，因在流化床中停留时间短，活性钙利用率仍较低，未燃碳含量降低不明显. 造粒工艺复杂，该工艺一方面与流化床运行不连续，另一方面制得的颗粒硬度大，飞灰燃烧和吸附硫的速度慢[6]. 因此提出飞灰快速水化活化造粒团聚工艺，以便同时实现飞灰水化和造粒，提高飞灰利用率和碳燃尽度. 笔者提出利用振筛试验台研究团聚飞灰冷态磨耗的特征，以判断团聚条件与飞灰碳降低和氧化钙利用率之间的关系.

1 飞灰快速水化团聚的原理和装置

飞灰快速水化团聚的原理和装置如图 1 所示. 飞灰快速水化流化床及工艺包括氮气瓶 1、流化床本体 2（该流化床是一种鼓泡流化床，流化床直径 50 mm，高 460 mm，流化床的床温控制系统由硅碳棒、温控仪和热电偶构成，床料为 100～150 目石英），设置在流化床外部的由气固分离器 3、灰浆池 6 以及能将灰浆池中的物料直接送入流化床中的给料装置. 飞灰团聚原理为新鲜的氮气通入流化床底部，经过布风板进入流化床，使床料处于流化状态，废气沿流化床上升经过废气出口排出床外. 与此同时，飞灰浆体经过喷嘴喷入流化床，液滴落入流化床，经过与热气体接触，将水分带走；固体颗粒形成团聚体落在床料上. 飞灰与水混合后，其中的氧化钙发生水化反应，生成氢氧化钙. 反应后的飞灰在流化床内的高温烟气作用下，水分迅速挥发，内部气压变小，飞灰颗粒在外压和范德华力作用下团聚成球. 团聚飞灰颗粒体积变大，有一定的耐磨性，在流化床内停留时间变长. 同时，飞灰与烟气中的

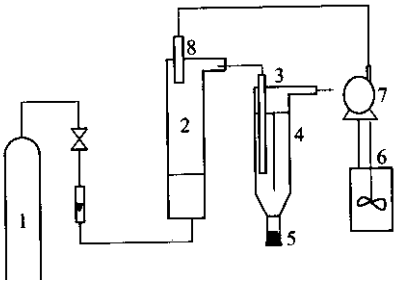

图 1 飞灰快速水化和团聚工艺

Fig. 1 Processing drawing of agglomeration and fast hydration of fly ash

1——氮气瓶；2——流化床；3——分离器；4——过滤板；5——软木塞；6——灰浆池；7——泥浆泵；8——喷嘴

转载

收稿日期：2003－03－23
基金项目：国家 973 项目（G1999022204）；中国博士后科学基金资助项目（中博基［2002］11）

中国科技论文在线　　http://www.paper.edu.cn

二氧化硫和氧气反应时间延长，提高飞灰的脱硫及燃烧效率.

2　试　　验

2.1　飞灰水化和快速团聚

飞灰按一定比例与 90 ℃水或含有一定量添加剂的 90 ℃水混合并均匀搅拌，将物料喷入流化床燃烧室内（图 1），流化介质为氮气，选择合适的流化速度，将床温加热到一定的温度. 高温氮气将混合物的水分带走，细粒的飞灰团聚成颗粒状，即可获得飞灰团聚体.

2.2　飞灰团聚后颗粒的磨耗实验研究

（1）团聚体的粒度分布. 将团聚体放入一系列标准筛，称量筛上物的质量，根据筛上物质量计算平均粒径.

（2）团聚体的磨耗研究. 两个飞灰样分别取自苏州电厂和河北热电厂，其碳含量分别为 3.7%，24%；总钙含量分别为 4.59%，3.70%；游离钙含量分别为 0.98%，0.16%；平均粒径分别为 12，50 μm，试验用添加剂组成为 70%的 SiO_2，15%的 Al_2O_3，10%的 CaO，2%的 Na_2O 和 3%的挥发分. 在流化床中获得飞灰团聚颗粒，取出放入磨耗试验台中（振筛试验台由电磁振筛机和标准筛组成. 标准筛由 0.020，0.040，0.065，0.090，0.125，0.154，0.200 和 0.275 mm 组成. 振筛机的震动频率为 50 Hz，振幅在 0.5～3.0 mm 之间连续变化），开动振筛机，震动一定的时间，团聚颗粒就发生磨耗，产生的小颗粒进入下一粒级，称量每个粒级的飞灰质量，计算团聚颗粒的磨耗速率[7]，即

$$K = -\frac{1}{W}\frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t}, \tag{1}$$

式中，K 为某一时间团聚颗粒的磨耗速率；W 为某一时间特定尺寸颗粒的质量.

3　结果和讨论

3.1　试验条件对团聚颗粒的影响

在上述条件下制成的苏州团聚颗粒为圆形，表面光滑，而河北飞灰的团聚体表面较粗糙，试验条件对团聚颗粒粒径大小有影响. 从表 1 看出，气流速度越小，温度越低，飞灰团聚的粒度越大，甚至成块的可能性越大，在 1 123 K 下，气流速度达 0.03 m/s 时，团聚颗粒为 0.5 mm，气流速度达 0.07 m/s 时，团聚颗粒为 0.1 mm. 原因在于流化床温度低，水分蒸发得慢，颗粒间的团聚力低，团聚体就大. 流速快，团聚颗粒间受到的气体冲力大，颗粒会变小. 如果在制浆时加入添加剂，团聚体的光滑程度和强度都增加.

表 1　流化条件对飞灰团聚颗粒体大小的影响

Table 1　Effect of fluidized conditions on agglomerated particles of fly ash

项　目	温度/ K							
	1 123		773		573		403	
流速/m·s^{-1}	0.03	0.07	0.03	0.07	0.03	0.07	0.03	0.07
平均粒度/mm	0.5	0.1	3	1	10	4	块状	11

3.2　团聚颗粒的磨耗研究

（1）团聚颗粒的磨耗试验方法　飞灰团聚颗粒在流化床中形成后，如果停留一段时间，会发生磨耗现象，由较大的团聚颗粒重新变为小的颗粒成为飞灰. 磨耗是一个非稳态的过程，可以用冷态磨耗表示飞灰在流化床中的磨耗特征[7]. 研究表明，颗粒在振筛机中不同的时刻对应的磨耗程度是不一样的. 图 2 给出了在不同振幅下添加剂用量为 3%的团聚颗粒累计质量分布随时间的变化. 从图 2 看出，振幅和振动时间对颗粒的粒径分布是有影响的. 一般振动初期，颗粒粒径分布变化明显，到一定时间后，其变化进入一个稳定期，表明颗粒的磨耗进入一个稳定的过程. 对应振幅分别为 0.5，1.0，1.5 和 2.5 mm，达到稳定磨

中国科技论文在线 http://www.paper.edu.cn

耗过程的时间分别约为 840，380，240 和 120 s. 为了比较不同团聚条件下团聚颗粒的磨耗过程和磨耗速率，振筛机的振幅选择应该以能够区分不同条件下团聚颗粒达到稳定磨耗的时间为前提. 研究发现，在 1.5 mm 振幅下，能够区分不同团聚条件下团聚颗粒达到稳定磨耗的时间，如添加剂用量从 0～3%，团聚颗粒达到稳定的时间分别为 90，180，240 s，可根据式（1）计算不同条件下颗粒的磨耗速率. 而 2.5 mm 以上的振幅很难准确地得到不加添加剂条件下原飞灰团聚颗粒的磨耗参数.

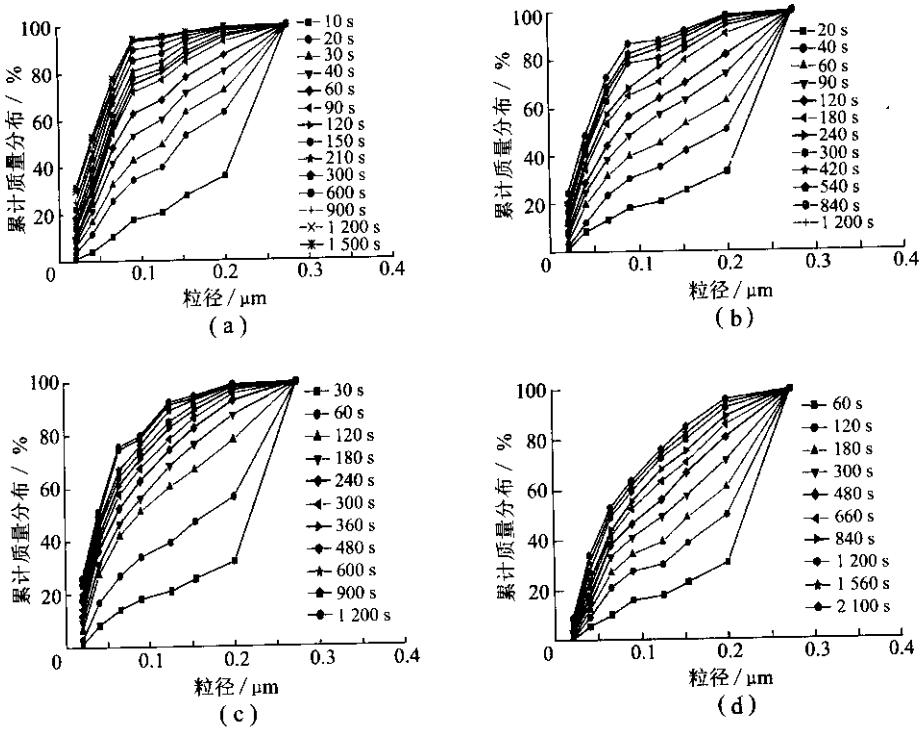

图 2 不同振幅下飞灰不同颗粒粒径累计质量分布随时间的变化

he change of the mass accumulating distribution of agglomerated fly ash with the time under different amplitude

(a) ～ (d) **振幅分别为** 2.5，1.5，1.0，0.5 mm；**团聚条件**：1 123 K，0.07 m/s

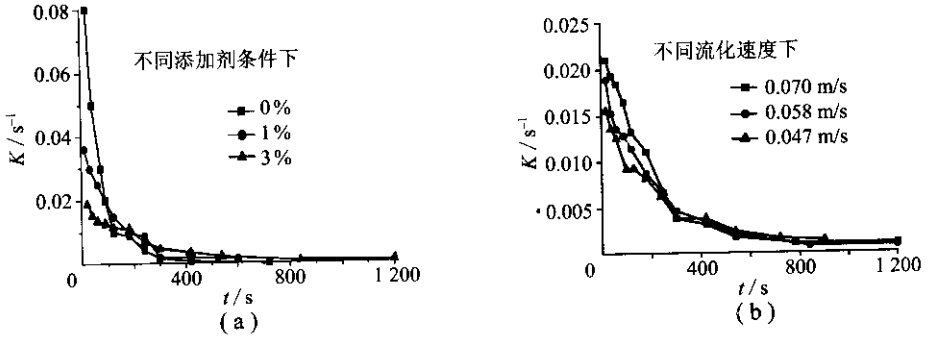

图 3 不同流化条件下团聚颗粒磨耗速率随时间的变化

The change of rate wear of agglomerated fly ash with the time under different fluidization ratio

（2）**团聚条件与团聚飞灰的磨耗** 以氮气为介质，在 1 123 K、选定的流化速度和添加剂用量下制备团聚颗粒，收集大于 0.275 mm 的颗粒，然后利用（1）的方法，测量团聚颗粒在 1.5 mm 振幅下不同时间大于 0.275 mm 颗粒的质量，再根据公式（1）计算不同条件下随时间变化的磨耗速率（图 3）.

从图 3（a）可以看出，颗粒在达到稳定磨耗以前，添加剂用量越大，其磨耗速率越小，团聚颗粒的耐磨能力越好，在流化床中的停留时间相对越长，飞灰的脱硫能力和碳燃尽度越高. 从图 3（b）可以看

中国科技论文在线　　http://www.paper.edu.cn

出，颗粒在达到稳定磨耗以前，流化速度越大，其磨耗速率越大，团聚颗粒的耐磨能力越差，在流化床中的停留时间越短，飞灰的脱硫能力和碳燃尽度越低.

4 结　论

高温热烟气或经过加热的热烟气作为流化介质，其温度在 403～1 123 K，水化飞灰直接在高温下快速脱水并实现团聚；随着添加剂用量的增加和流化速率的降低，团聚飞灰的磨耗速率降低，在流化床中相对停留时间提高.

参考文献：

[1] Marquis D L. Reactivation of spent CFB limestone by hydration [D]. New Brunswick: University of New Brunswick, 1992.

[2] Sheerer J A, Smith G W. Hydration process for reactive spent limestone and dolomite sorbents for reuse in fluidized bed coal Combustion [A]. 6th International Conference on Fluidization Combustion [C]. Atlanta: ASME, 1980. 1 135～1 140.

[3] Jozewicz L R, Brown C A. Fly ash recycle in dry scrubbing [J]. Environment Progress, 1986 (5): 234～243.

[4] Behr A, Christina B. Characterization and use of fluidized bed combustion coal ash [J]. Journal of Environmental Engineering, 1994, 120 (6): 1 488～1 506.

[5] Anthony E J. Agglomeration and strength development of deposits in CFBC boilers firing high-sulfur fuels [J]. Fuel, 2000, 79 (15): 1 933～1 942.

[6] 黄信仪，张　绪. 具有复燃及脱硫功能的流化床锅炉 [P]. 中国专利：CN92233887, 1992 - 09 - 24.

[7] 唐　治. 流化床燃烧条件下煤的成灰特性 [D]. 北京：清华大学，2001. 6.

作者简介：

李登新 (1965－)，男，山东邹城人，2000 年毕业于华东理工大学化学工艺专业，获博士学位，现从事固体废弃物和洁净煤技术的研究工作，发表论文 40 余篇. Tel：021－62373803，E－mail：cmfl@263.net

Wear of flash hydrated and agglomerated CFB fly ash

LI Deng-xin[1,2], JI Chong[1], XU Meng[1], LÜ Jun-fu[1], LIU Qing[1], ZHANG Jian-sheng[1], YUE Guang-xi[1]

(1. *Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing* 100084, *China*; 2. *College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai* 200051, *China*)

Abstract: CFB fly ash from separators was mixed with water of 363 K by using of a blender. Then, this compound of fly ash and water was pumped into combustion chamber of CFB by sludge pump. Because the temperature of flume gas is higher in CFB, the fly ash was hydrated fast and agglomerated at the same time. Through this process, the size of agglomerating fly ash is larger than that of the original particle. Agglomerated fly ash was sieved by screen vibrator. According to the mass accumulating distribution of agglomerated fly ash, the wear rate of agglomerated fly ash is calculated. It is obvious that attrition of agglomerated fly ash increases because of hydration and agglomeration according to cold sieving test. The effect of agglomerated conditions, such as amount of additive, fluidization ratio, on wear rate of agglomerated fly ash was also studied. With the rise of amount of additive and the decrease of fluidization ratio, wear rate of agglomerated decreases. So, the relative residence time of agglomerated fly ash in CFB become long. Therefore, the utility rate of calcium in fly ash improves and the content of carbon in fly ash decreases. This results in a low Ca/S and low operating cost for CFB.

Key words: fly ash; hydration; agglomeration; CFB; wear rate