飞灰快速水化团聚颗粒在流化床中的热态磨耗研究

李登新[1,2] 姬冲[2] 徐猛[2] 吕俊复[2] 刘青[2], 张建胜[2], 岳光溪[2]

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

摘 要:利用热态磨耗试验台研究快速水化团聚颗粒在流化床中热态条件下的磨耗特征。研究表明，飞灰团聚用水量、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。飞灰团聚用水量在 40%左右时，团聚颗粒磨耗速率最低。亦即在上述条件下团聚颗粒在流化床中停留时间相对较长，进而飞灰碳降低的幅度和自由氧化钙的利用率可能较大。

关键词:飞灰; 流化床; 水化;团聚; 磨耗速率 **中图分类号：**TQ053, TQ52.7

1 前言

虽然流化床飞灰中氧化钙含量高，但活性氧化钙的含量并不高，有的飞灰中碳含量在 20%以上。为了提高飞灰中钙的利用率和碳的燃尽度，传统的飞灰水化活化技术包括飞灰水化或蒸汽活化后再返送流化床工艺、飞灰和氧化钙混合后造粒再送入流化床工艺等[1-12]。实践证明，飞灰水化或蒸汽活化工艺需要建立一套独立工艺流程，且水活化时间长或需要在较高的活化温度（623-723K）下用水蒸气活化，水活化工艺大多与流化床运行不连续，工艺实现有一定的难度，而且水化后烘干的飞灰在返回流化床后较原飞灰粒度分布没有较大的改观[4, 6]，因而在流化床中停留时间短，活性钙的利用率仍较低，未燃碳的含量降低不明显；造粒工艺复杂，该工艺一方面与流化床运行不连续，另一方面造出的颗粒硬度大，飞灰燃烧和吸附硫的速度慢[10]。为此提出飞灰快速水化活化造粒团聚工艺，以便同时实现普通飞灰水化和飞灰造粒，提高飞灰利用率和碳燃尽度。其中团聚颗粒的热态强度，或者说其热态磨耗是关系到团聚颗粒能否在流化床中增加停留时间的关键因素，为此提出了团聚颗粒的热态磨耗特征研究。本文重点利用热台磨耗试验研究团聚飞灰在流化床中热态条件下的磨耗特征，以判断团聚颗粒在流化床中停留时间的相对高低，优化团聚条件，使飞灰碳降低的幅度最大，自由氧化钙的利用率提高最大。

2 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。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。与之同时，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。飞灰快速水化流化床及快速水化工艺流程包括气源 1, 流化床本体 2 (该流化床是一种鼓泡流化床, 流化床直径 50mm, 高 460mm，流化床的床温控制系统由硅碳棒、温控仪和热电耦构成，床料为 75-100 目石英)，设置在流化床外部的由气固分离器 3 及过滤板 4，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 。飞灰送入灰浆池 6，在一定的温度下，按一定比例与水充分混合，用搅拌机均匀搅拌后，用泥浆泵 7 经输

[1] 国家 973 项目国家 973 项目 G1999022204,
中国博士后基金：中博金（2002）11
电话：02162378838；lidengxin@dhu.edu.cn
作者简介：李登新（1965-），男，山东人，东华大学副教授，博士，主要从事固体废弃物处理方面的研究。

送管及设置在燃烧室内的喷嘴8将物料喷入流化床燃烧室内（见图1），即可实现飞灰快速水化团聚。这是由于流化床飞灰中含有未燃尽的碳及氧化钙，将水与飞灰混合后，飞灰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，其中水分迅速挥发，内部气压变小，因而飞灰颗粒在外压和范德华力作用下团聚成球。因而飞灰颗粒体积变大，在流化床内停留时间变长，同时，飞灰与烟气中的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。

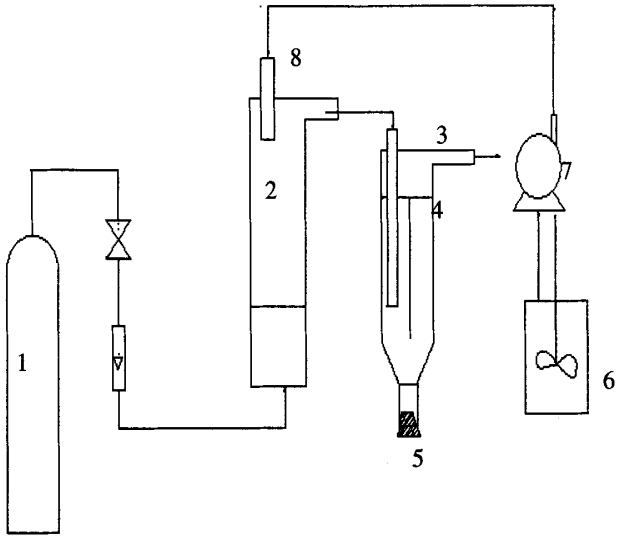


图1 飞灰快速水化和团聚工艺示意图

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

1— 氮气平；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

3 试验

3.1 飞灰水化和快速团聚

称量一定量的飞灰送入灰浆池5，按一定比例与90℃水混合，或者加入含一定量添加剂的90℃热水，然后用搅拌机均匀搅拌，用泥浆泵6经输送管及设置在燃烧室内的喷嘴8将物料喷入流化床燃烧室内（见图1），流化介质为氮气，选择合适的流化速度，用将床温加热到一定的850℃。高温氮气将混合物的水分带走，细粒的飞灰团聚成颗粒状，即可实现飞灰快速水化团聚,获得飞灰团聚体。

3.2 飞灰团聚后颗粒的磨耗实验研究

飞灰样取自河北热电厂，其碳含量为24%， 总钙含量为4.59%；游离钙含量为0.98%；平均粒径分别为50μm，试验用添加剂组成70%SiO_2, 15%Ai_2O_3, 10%CaO, 2%Na_2O 和3%挥发份。按照3.1的方法制备团聚颗粒，该团聚颗粒不从流化床中取出，继续在流化床中进行流化，由于团聚颗粒之间、颗粒与床料之间、颗粒与床内壁之间的碰撞和摩擦将会导致从母体颗粒上剥落出细小的颗粒，产生磨耗过程。由较大的团聚颗粒重新变为小的颗粒，成为飞灰，析出流化床，利用气固分离器分离出飞灰，称量一定时刻析出灰的质量，利用质量平衡计算团聚颗粒在流化床中残留量，利用下面的公式计算团聚颗粒的磨耗速率，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。

$$K=-\frac{1}{W}\frac{dw}{dt} \quad \text{----------(1)}^{[12]}$$

在公式（1）中，K 代表某一时间团聚颗粒的磨耗速率，W 代表某一时间特定尺寸颗粒的质量。

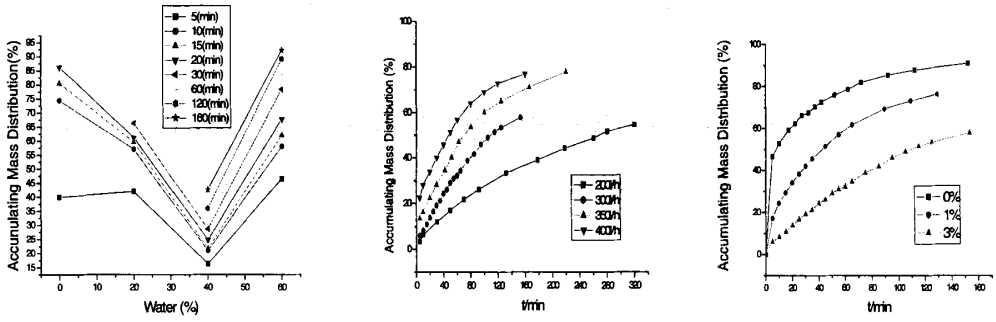
4 结果和讨论

4.1 团聚颗粒的热态磨耗研究

为了研究团聚颗粒在热态流化床中的耐磨能力，我们开发了带有气固分离器的流化床，如图 1 所示。在流化床中，因为颗粒之间、颗粒与床内壁之间的碰撞和摩擦将会导致从母体颗粒上剥落出细小的颗粒，这个过程称为磨耗。飞灰团聚颗粒在流化床中形成后，也会发生磨耗过程。由较大的团聚颗粒重新变为小的颗粒成为飞灰，进而从流化床中析出。颗粒耐磨能力不同，析出量随时间而变化。下面讨论不同团聚条件下团聚颗粒磨损析出规律。

4.2 团聚条件对团聚颗粒的磨损析出的影响

在流化速度为 3001/h，温度 850℃，不加添加剂的条件下制备不同用水量的团聚颗粒，研究用水量对团聚颗粒磨耗的影响。图 2（a）给出了在不同用水量条件下团聚颗粒累计质量分布随时间的变化。从图 2（a）可以看出，较多的用水和较少的用水对飞灰团聚都不利，40%用水量下制备的团聚颗粒随时间变化的累计析出量最低，说明其耐磨能力强，强度最高。



(a) (b) (c)

图 2 不同团聚条件下团聚颗粒磨损析出累计质量分布随时间的变化

Fig.2 the mass accumulating distribution of agglomerated fly ash under different time

注: (a)—水用量对团聚颗粒磨损析出累计质量的影响; (b)—流化速度团聚颗粒磨损析出累计质量的影响; (c)—添加剂用量团聚颗粒磨损析出累计质量的影响;

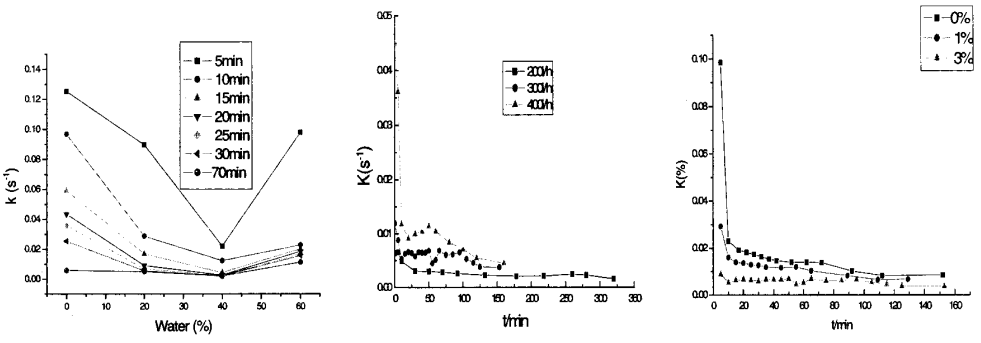
在 60%用水量，温度 850℃，加入 3%添加剂的条件下制备团聚颗粒；研究流化速度对团聚颗粒磨耗的影响。图 2（b）给出了在不同流化速度下团聚颗粒累计质量分布随时间的变化。从图 2（b）可以看出，随着流化速度提高，团聚颗粒的累计析出量提高，团聚颗粒的磨耗增加，亦即流化速度越高越对飞灰团聚不利。

在流化速度为 300l/h，温度 850℃，用水量为 60%，加入不同量添加剂的条件下制备团聚颗粒，研究添加剂用量对团聚颗粒磨耗的影响。图 2（c）给出了添加剂用量对团聚颗粒累计质量分布的影响。从图 2（c）可以看出，随着添加剂用量的提高，团聚颗粒的累计析出量降低，团聚颗粒的磨耗降低，亦即添加

剂用量越多越对飞灰团聚有利。

4.3 团聚条件对团聚飞灰的磨耗速率的影响

磨耗速率代表大颗粒在流化床中受到磨损、碰撞等作用变成细小颗粒甚至飞灰的一个指标。同样利用此概念也可以表示团聚颗粒在热态流化床中受到磨损的过程，它是团聚颗粒与非团聚颗粒在流化床停留时间长短的标志。以氮气为介质，在 850℃、选定的流化速度和添加剂用量下制备团聚颗粒，然后利用 3.2 的方法，测量团聚颗粒析出的质量，计算流化床中剩余的团聚颗粒的质量，然后根据公式（1）计算不同条件下随时间变化的磨耗速率，见图 3（a）、(b)、(c)。



(a) (b) (c)

图 3 不同团聚条件下团聚颗粒磨耗速率随着时间的变化

Fig.3 rate of wear of agglomerated fly ash under different agglomerated conditions

注：(a)—水用量对团聚颗粒磨耗速率的影响; (b)—流化速度团聚颗粒磨耗速率的影响；(c)—添加剂用量对团聚颗粒磨耗速率的影响;

在流化速度为 3001/h，温度 850℃，不加添加剂的条件下制备不同用水量的团聚颗粒，研究用水量对团聚颗粒磨耗速率的影响。图 3（a）给出了在不同用水量条件下团聚颗粒磨耗速率随时间的变化。从图 3（a）可以看出，较多的用水和较少的用水获得的团聚颗粒磨耗速率都高，40%用水量下制备的团聚颗粒随时间变化的磨耗速率最低，说明其耐磨能力强，强度最高。原因在于水化飞灰时，用水量较低时，飞灰因较强的吸水活性而将水完全吸附，颗粒内部表面前没有水，颗粒间还没有形成水桥，也没形成作用力，飞灰在进入流化床时仍然是分散的颗粒，或形成聚集体较小，因而在流化床中形成团聚颗粒小，强度弱，磨耗速率大。当水分达到 40%左右时，水化后飞灰的密度达到最大，混合物的粘度达到 2000 厘泊以上，颗粒间由于水化形成的水泥活性物质将飞灰颗粒粘结在一起，在流化床中快速吸水后，由范德化力等作用将颗粒粘合在一起，形成较大的颗粒，其强度也大。如果水分在增加，混合物的粘度大大降低，60%水与飞灰混合物的粘度降到 50 厘泊，飞灰颗粒间将充满水，颗粒间距离太大，在流化床中失水后不能形成大的颗粒，强度也就不会高，磨耗速率因而低。在 60%用水量，温度 850℃，加入 3%添加剂的条件下制备团聚颗粒，研究流化速度对团聚颗粒磨耗的影响。图 3（b）给出了在不流化速度下团聚颗粒磨耗速率随时间的变化。从图 3（b）可以看出，随着流化速度提高，团聚颗粒的磨耗速率提高，团聚颗粒的磨耗增加，亦即流化速度越高越对飞灰团聚不利。在流化速度为 3001/h，温度 850℃，用水量为 60%，加入不同量添加剂的条件下制备团聚颗粒，研究添加剂用量对团聚颗粒磨耗速率的影响。图 3（c）给出了添加剂用量对团聚颗粒磨耗速率的影响。从图 3（c）可以看出，随着添加剂用量的提高，团聚颗粒的磨耗速率降低，团聚颗粒的磨耗降低，亦即添加剂用量越高越对飞灰团聚有利。

5 结论：

（1）团聚飞灰的耐磨性可以用热态试验研究获得的磨耗速率表示；

（2）随着添加剂用量的增加、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。40%水用量最有利于飞灰团聚。

致谢：清华大学开放实验室资助

参考文献：

[1]于光辉，路霁鸽，郭庆杰等，循环流化床锅炉飞灰残碳生成机理，煤炭转化[J]，2000，23（3）：19-25

[2]岑可法，倪明江，骆仲泱等，循环流化床锅炉理论设计与运行[P]，北京：中国电力出版社，1997

[3]杨文，谢晓闻，黄羽雕等，循环流化床锅炉飞灰的综合利用，工业锅炉，1999，57（1）:52-53.

[4]Robert B R, Hydration of partially sulfated lime with water, 15th international conference on fluidization Combustion, Sponsored by ASME, 1999:620-640

[5]Donald W, Geiling P E, reburning of pelletized fly ash in fluidized bed incinerator for dioxlin decompositions and ash disposal, 16th international conference on fluidization Combustion, Sponsored by ASME, 2001:1020-1035

[6]Marquis D L. Reactivation of Spent CFB Limestone by Hydration [D]. New Brunswick: University of New Brunswick, 1992. 45–99.

[7] 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. 1135–1140.

[8] Jozewicz L R, Brown C A. Fly Ash Recycle in Dry Scrubbing [J]. Environment progress,1986, 5: 234–243.

[9] Behr A, Christina B, Characterization and Use of Fluidized Bed Combustion Coal Ash [J]. Journal of Environmental Engineering, 1994, 120 (6) : 1488–1506.

[10] Anthony E J. Agglomeration and Strength Development of Deposits in CFBC Boilers Firing High-sulfur Fuels [J]. Fuel, 2000, 79(15): 1933–1942.

[11] 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.

[12] 唐治，流化床燃烧条件下煤的成灰特性[D]，清华大学硕士论文，2001、6

Wear of Flash Hydrated and Agglomerated CFB Fly Ash in Hot Rig

Li Dengxin1,2 Ji Chong2 Xu Meng2 Lu Junfu2 Liu Qing2 Zhang Jiangsheng2 Yue Guangxi2

(1Department of Environmental Engineering, Donghua University,Shanghai,200051; 2 Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084)

Abstract: Wear of flash hydrated and agglomerated cfb fly ash in hot rig was studied. It is obvious that attrition of agglomerated fly ash decreases because of hydration and agglomeration according to the hot test result. The effect of agglomerated conditions, such as amount of additive, fluidization ratio, and amount of water on rate of wear of agglomerated fly ash was also studied. When fly ash was hydrated by 40% water, rate of wear of agglomerated fly ash is the lowest. With the rise of amount of additive and the decrease of fluidization ratio, rate of wear of agglomerated decreases. So, the relative residence time of agglomerated fly ash in CFB become long. Therefore, the rate of utility 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.

Keywords: Fly ash; CFB; Hydration; Agglomeration; rate of wear