

研究简报

CFB 锅炉内成灰特性的实验研究方法

杨海瑞 肖显斌 吕俊复 岳光溪
(清华大学热能工程系, 北京 100084)QIAN Min and JAUD Phillipe
(EDF (Electricité de France), France)

关键词 成灰特性 磨耗 振筛 实验室研究方法

中图分类号 TQ 536.4

文献标识码 A

文章编号 0438-1157 (2003) 08-1183-05

EXPERIMENTAL TECHNIQUE ON COAL ASH
FORMATION IN CFB COMBUSTION

YANG Hairui, XIAO Xianbin, LÜ Junfu and YUE Guangxi

(Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

QIAN Min and JAUD Phillipe

(EDF (Electricité de France), France)

Abstract The material balance in CFB furnace is important for the performance of the boiler. The bed inventory consists of coal ash and desulfurizing agent. In order to design properly the boiler and auxiliary, the engineers need to know the ash formation characteristics. Generally, the most reliable method to get ash formation data of a coal is to burn it in the real industrial CFB boiler. Due to the high cost and difficulties in sampling in such a test, people have to present other simple method on ash formation. The present investigation is proposing a simple laboratory test procedure to study ash formation by static combustion and sieving. Validation of the method is given.

Keywords ash formation, attrition, sieving, laboratory method

引 言

流化床锅炉的最基本特征是有一定量的床料在系统内进行循环。床料来自于给煤中的灰和脱硫剂。流化床的运行性能主要依赖于床料的品质, 诸如颗粒粒径分布、沿炉膛的浓度分布等。物料的循环率、床料的粒径分布等参数对于流化床的运行极其重要, 因为它们直接影响燃烧效率和脱硫效率, 并决定燃烧室内的热负荷分布。由于灰在床料中份额达到 90% 以上, 为了合理地进行锅炉本体和附属设备的设计, 设计者有必要了解燃煤的成灰特性。

给煤颗粒在进入 CFB 锅炉之后将经历一系列的尺寸变化^[1,2]。在煤粒进入炉膛时, 煤粒被迅速

加热, 煤中的挥发分开始释放出来, 热解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颗粒将发生破裂。由于循环流化床中的燃烧温度较低, 低于煤灰的灰熔点, 所以煤粒中的富灰灰核在这一过程中并不改变形状^[3]。但是, 颗粒之间以及颗粒和床壁之间的碰撞将会导致煤灰颗粒尖角边缘的脱落, 这一现象称为磨耗。磨耗可以分成两个过程: 伴随破裂的前期磨耗和碳燃尽后的后期磨耗。

得到特定煤种成灰特性的最可靠的方法是在工业锅炉中进行热态测试, 采集成灰数据。但成本昂贵以及数据采集的困难严重限制了此方法的实际应用。对于循环床内煤的成灰过程, 通常认为煤颗粒

2002-05-30 收到初稿, 2002-08-28 收到修改稿。

联系人及第一作者: 杨海瑞, 男, 30 岁, 博士。

基金项目: 法国 EDF 合作项目。

Received date: 2002-05-30.

Corresponding author: Dr. YANG Hairui. E-mail: yangh-roo@mails.tsinghua.edu.cn

的碎裂和磨耗是相互耦合的一个过程,在煤颗粒热解和燃烧全过程中始终存在着磨耗现象,而且两类过程相互会发生影响。在流化床燃烧条件下的实验研究表明,煤颗粒的碎裂过程对颗粒前期的磨耗并没有什么影响,磨耗和碎裂对最后成灰的粒径分布影响相互独立。正是基于这一点,清华大学提出了静态燃烧和冷态振筛磨耗进行煤种成灰实验研究^[4]。

(1) 将特定煤样分成 6 档,每一档煤样在 800 ℃ 温度的马弗炉内进行燃烧,用静态燃烧替代 CFB 内燃烧过程;

(2) 将收集的灰样用振筛机振筛来模拟流化床内的磨耗过程。

本文主要介绍研究煤种成灰特性的静态燃烧和冷态振筛磨耗方法,并通过对比振筛磨耗实验数据和流化床磨耗数据对此种方法的可靠性进行论证。

1 实验研究

1.1 实验设备

燃烧系统包括电加热马弗炉和炉膛温控系统,通过热电偶记录炉内温度变化。振筛系统包括振筛机和一系列标准筛,振筛机由德国 Fristch 公司生产,振幅和振动频率可调。

冷态流化床床体由透明有机玻璃管组成,床径 100 mm,床高 4000 mm。床体底部使用孔径 40 μm 的筛网作布风板。携带出炉膛的灰粒通过旋风分离器分离,用布袋除尘器捕捉从分离器中逃逸的细颗粒。实验设备的详细描述见文献 [4]。

1.2 煤种分析

实验用的煤种来自法国 Gardanne 250 MW CFB 电厂。表 1 给出了煤种的工业分析和元素分析。

Table 1 Proximate and ultimate analysis of coal sample

Moisture ^① /%	Ash ^① /%	Volatile ^① /%	Fixed Carbon ^① /%	C ^② /%
5.78	25.03	41.30	27.89	51.39
H ^② /%	N ^② /%	S ^② /%	O ^② /%	Net calorific value /MJ · kg ⁻¹
3.17	1.14	3.30	10.19	18.49

Note: ① air dry basis; ② dry ash free basis.

1.3 实验过程

煤样经过振筛实验台进行燃前筛分,每次实验将煤样筛分成 6 个筛分档。表 2 给出了筛分粒径及相应的煤样粒径分布。将煤样颗粒送入马弗炉(800 ℃)充分燃尽,燃尽的时间取决于煤种和煤

样的粒径。将得到的灰样同时送入振筛实验台和冷态流化实验台进行灰样的磨耗实验,以得到成灰的粒径分布和颗粒磨耗的规律。研究目标是找出这两种实验方法的联系,以便得到相对更为简单合理的煤成灰实验方法。在振筛磨耗实验中,通过测量不同振筛时间、不同振幅条件下的灰分粒径变化来研究灰颗粒的磨耗速率。冷态流化实验中主要研究了流化时间和流化风速对颗粒磨耗的影响。

Table 2 Size cuts and size distribution of coal sample

Size cuts $d_p/\mu\text{m}$	Mass fraction/%
0—450	29.108
450—1000	15.708
1000—2000	20.584
2000—3200	8.349
3200—6000	6.905
>6000	19.345

2 实验结果及讨论

2.1 振筛磨耗实验

图 1 给出了不同振动时间时灰颗粒的粒径分布变化。如图所示,经过约 50 min 的振筛,各折线间距变得微小而均匀,这表明灰颗粒的磨耗进入了一个稳定阶段,称此阶段为稳定磨耗阶段。

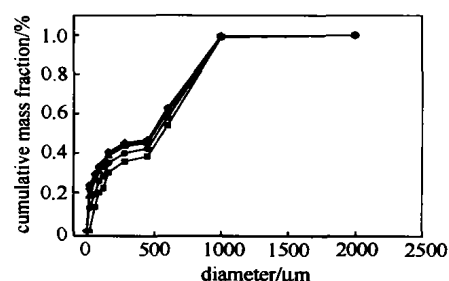


Fig. 1 Cumulative particle size distribution of burnt ash at different sieving time

(sample of size cut 1000—2000 μm, sieving amplitude 2.0 mm)

sieving time/min: ■ 5; ● 15; ▲ 30; ▼ 50; ◆ 70

图 2 中标注为 Baseline 的线是在振幅 3.0 mm、振动时间 70 min 时得到的灰粒粒径分布,此分布可以近似认为是灰粒稳定磨耗后期的筛分分布。由图 2 所示,振幅越大的数据越接近稳定磨耗后期的筛分分布。这说明实验时选用较大的振幅可以使磨耗过程更快地进入稳定磨耗阶段。

2.2 冷态流化磨耗

冷态流化磨耗实验重点研究了流化时间、流化

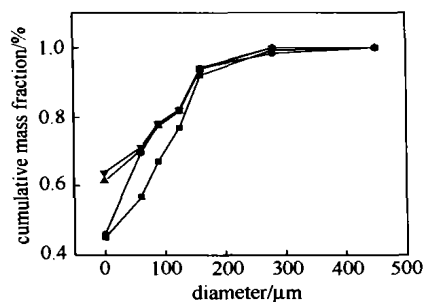


Fig. 2 Cumulative particle size distribution of ash at different sieving amplitude

(sample size cut 0—450 μm, sieving time 50 min)

sieving amplitude/mm: ■ 0.5; ● 1.5; ▲ 3.0; ▼ Baseline

风速对颗粒磨耗特性的影响。进行流化实验的目的是验证振筛磨耗方法的合理性。

同振筛实验一样,在流化过程中颗粒的磨耗过程同样有一个初始的快速衰减阶段,如图3所示。在此阶段(大约50 min),颗粒减损很快,然后便进入一个减损相对缓慢的区域,称这一区域为稳定磨耗区。

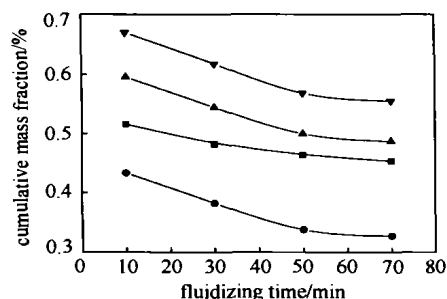


Fig. 3 Cumulative mass fraction ash (>280 μm) at different gas velocity as function of fluidizing time

(sample of size cut 1000—2000 μm)

$U/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$: ■ 3; ● 4; ▲ 5; ▼ 6

关于流化风速对颗粒磨耗的影响,不同的学者对此存在不同的看法。Kono^[5]等人指出,磨耗速率与流化速度的立方(U^3)成线性关系。可是Vaux等人^[6]却指出,颗粒的磨耗速率与过剩流化速度($U-U_{mf}$)成线性关系。其中最小流化速度 U_{mf} 定义如下

$$U_{mf} = \frac{\mu_g}{d_p \rho_k} \left[\sqrt{(33.7)^2 + 0.0408 \frac{d_p \rho_k}{\mu_g} (\rho_s - \rho_k) g} - 33.7 \right] \quad (1)$$

对于颗粒介于1000~2000 μm的法国 Gardanne 煤种得到的灰颗粒,其最小流化速度为0.8098 m·s⁻¹。

从图4和图5可以看出,磨耗速率与过剩流化速度的线性关系更好一点。尽管从现有的实验数据

还无法得出颗粒磨耗速率和流化速度的具体关系,但可以确定,流化速度直接反应了赋予流化系统的能量激励大小,激励水平越高,颗粒的磨耗速率也越快。在后文中将用过剩流化速度直接和颗粒的磨耗速率进行关联,因为流化速度直接反映了流化系统的能量水平。

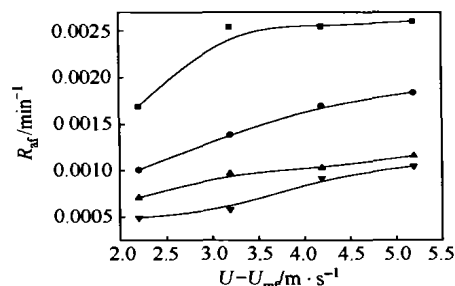


Fig. 4 Relation between attrition rate and $U-U_{mf}$

(sample of size cut 1000—2000 μm)

fluidizing time/min: ■ 10; ● 30; ▲ 50; ▼ 70

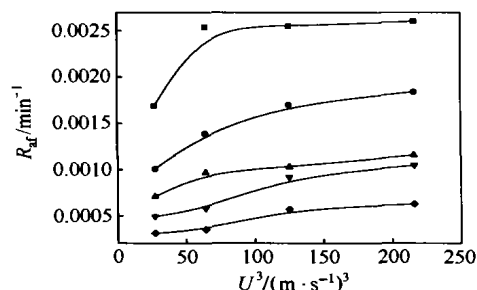


Fig. 5 Relation between attrition rate and U^3

(sample of size cut 1000—2000 μm)

fluidizing time/min: ■ 10; ● 30; ▲ 50; ▼ 70

3 两种系统的比较

前期的研究^[7]表明,振筛磨耗过程和流化磨耗过程具有相似的行为,但后者更接近工业流化床中的磨耗过程。影响磨耗过程的因素除了流化、振筛时间外还和环境提供的能量激励有关,系统的能量水平直接影响了颗粒的磨耗特性。振筛幅度、过剩流化速度分别反映了振筛系统和流化系统对固体颗粒的能量激励。

3.1 磨耗速率

由文献[5]可知,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如下

$$R = - \frac{dm}{m dt} \quad (2)$$

式中 m 是某一时刻特定粒径颗粒的质量。在下面的分析中选取 280 μm 以上的颗粒为特定粒径颗粒。

图 6 和图 7 表明, 磨损速率是符合指数衰减的时间函数, 振筛开始阶段磨损速率衰减很快, 之后达到稳定值. 因此, 可以用指数衰减模型式 (3) 来拟合振筛和流化磨损速率. 表 3 给出了相应的拟合参数.

$$R=R_{\infty}+ae^{-at} \quad (3)$$

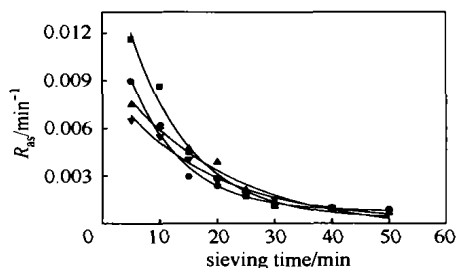


Fig. 6 Changes of attrition rate with sieving time at different sieving amplitude
(sample of size cut 1000—2000 μm)
sieving amplitude/mm: ■ 1.0; ● 1.5; ▲ 2.0; ▼ 2.5

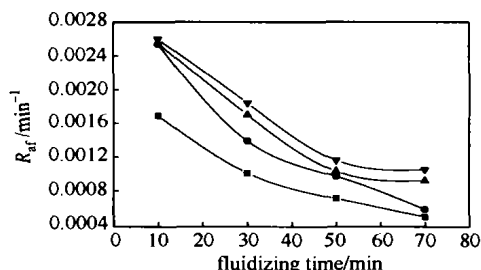


Fig. 7 Changes of attrition rate with fluidizing time at different gas velocity
(sample of size cut 1000—2000 μm)
 $U/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$: ■ 3; ● 4; ▲ 5; ▼ 6

Table 3 Correlation results of constants in attrition models

Sieving attrition			
A/mm	$R_{\infty}/\text{min}^{-1}$	a/min^{-1}	b/min^{-1}
1.0	0.00029	0.01887	0.09513
1.5	0.00031	0.00789	0.09098
2.0	0.00032	0.0091	0.07436
2.5	0.00035	0.00616	0.06849
Fluidizing attrition			
$U/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$R_{\infty}/\text{min}^{-1}$	a/min^{-1}	b/min^{-1}
3	0.00031	0.00191	0.03282
4	0.00035	0.00308	0.03466
5	0.00057	0.00273	0.03139
6	0.00063	0.00264	0.02826

3.2 能量关联

如前所述, 大多数磨损模型都是将颗粒的尺寸或者质量变化与输入该特定系统的能量进行关联. Merrick 和 Highley^[8] 基于 Rittinger 准则发展了一

个磨损模型, 该模型认为流化床中灰的磨损率与过流化速度 ($U-U_{mf}$)、磨损速率常数 k_{af} 成正比

$$R_{af}=k_{af}(U-U_{mf}) \quad (4)$$

式中 k_{af} 是时间的函数.

对于振动系统, 系统的能量水平和系统振幅的平方呈线性关系, 可以用下式来简化颗粒磨损和振筛系统能量水平的关系

$$R_{as}=k_{as}A^2 \quad (5)$$

式中 k_{as} 是时间的函数.

图 8 和图 9 给出了两种系统中磨损速率常数随时间的变化率 (流化系统中的流化速度、振筛系统中的振幅). 由图可见, 系统的能量激励越大, 达到稳态磨损阶段所需的时间越短. 在研究颗粒磨损的层面上使用振筛方法完全可以模拟在流化床内进行颗粒磨损实验. 在流化系统中系统对颗粒的激励来自流化介质向固体颗粒提供的能量, 而在振动系统中系统对颗粒的激励则来自于机械振动向固体颗粒提供的能量, 这两种激励对于颗粒的磨损特性影响是一致的.

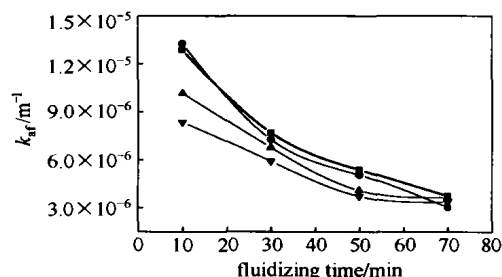


Fig. 8 Relation between k_{af} and fluidizing time at different gas velocity
(sample of size cut 1000—2000 μm)
 $U/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$: ■ 3; ● 4; ▲ 5; ▼ 6

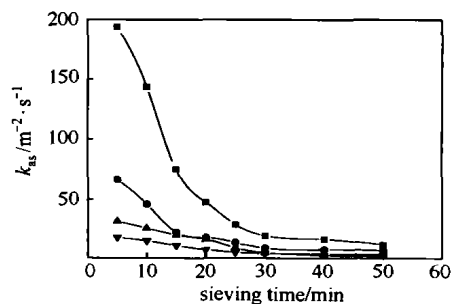


Fig. 9 Relation between k_{as} and sieving time at different sieving amplitude
(sample of size cut 1000—2000 μm)
sieving amplitude/mm: ■ 1.0; ● 1.5; ▲ 2.0; ▼ 2.5

Table 4 Transform parameters between sieving amplitudes and fluidizing velocity

$U/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	π_1/π_2			
	$A=1.0 \text{ mm}$	$A=1.5 \text{ mm}$	$A=2.0 \text{ mm}$	$A=2.5 \text{ mm}$
3	0.10866/0.23728	0.2562/0.26244	0.22546/0.30278	0.32498/0.36358
4	0.16978/0.2788	0.40028/0.30848	0.35127/0.35172	0.50475/0.45016
5	0.16062/0.2111	0.35955/0.21088	0.33332/0.26801	0.47879/0.32089
6	0.16063/0.18593	0.37735/0.20378	0.33335/0.23606	0.47728/0.28031

振筛磨耗速率常数和流化磨耗速率常数具有相似的衰减规律，因此可以通过规范化处理振筛数据找出二者的联系。联立公式（4）和公式（5），用两个转换系数 π_1 、 π_2 通过下式关联

$$\pi_1 k_{as} (\pi_2 t) A^2 = R'_{as} \Rightarrow R_{af} = k_{af} (U - U_{mf})$$
$$\pi_1 k_{as} (\pi_2 t) A^2 / (U - U_{mf}) \Rightarrow k_{af}$$

图 10 给出了规范化得到的磨耗常数和流化磨耗常数间的比较。

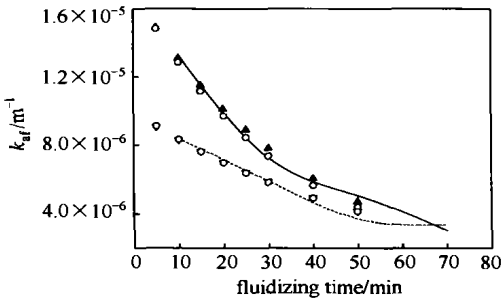


Fig. 10 Comparison of fluidized k_{af} and results from modification of k_{as}
sieving amplitude/mm: $\blacktriangle$ 1.0; $\circ$ 2.5
 $U/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$: — 4; 6

表 4 给出了不同振幅与不同流化速度间的转换系数。对于同一流化速度，振幅越大，其控制时间的转换系数 π_2 越大。这说明，振幅增大，系统的能量激励增大，因此达到流化速度提供能量激励水平的时间越短。

4 结 论

（1）冷态流化床和振筛两种系统中进行煤灰颗粒的磨耗实验结果表明，流化和振筛的成灰特性呈现出相似的表现行为。

（2）影响磨耗过程的因素除了流化、振筛时间外还和环境提供的能量激励有关，系统的能量水平直接影响了颗粒的磨耗特性。

（3）在流化系统中系统对颗粒的激励来自流化介质向固体颗粒提供的能量，而在振动系统中系统对颗粒的激励则来自于机械振动向固体颗粒提供的能量。这两种激励对于颗粒的磨耗特性影响是一致的。

（4）通过系统能量概念分别提出了振筛系统和流化系统中的磨耗速率常数。振筛磨耗速率常数

和流化磨耗速率常数具有相似的指数衰减规律，通过规范化处理振筛数据可以找出二者的联系。

在今后的成灰特性研究中，可以利用简单而可靠的振筛法得到不同煤种的成灰数据，为物料平衡模型提供初始数据。

符 号 说 明

- A ——振动振幅，mm
- a, b ——拟合参数
- d_p ——固体颗粒直径， μm
- k_{af} ——磨耗速率常数， m^{-1}
- k_{as} ——振筛速率常数， $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
- m ——颗粒质量，kg
- R ——颗粒磨耗速率， min^{-1}
- t ——时间，min
- U ——流化气速， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
- U_{mf} ——最小流化速度， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
- μ_g ——流化气体动力黏度， $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
- ρ_g ——流化气体密度， $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- ρ_s ——固体颗粒密度， $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

References

1 Chirone R, Massimilla L, Salatino P. Communion of Carbons in Fluidized Bed Combustion. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 1991, 17: 297—326

2 Tang Z, Lu J F, Cao Y. A Simple Method to Investigate the Ash Size Distribution and Its attrition. In: The 5th International Conference on Measurement and Control of Granular Materials, MCGM2000, Xi'an, China, 2000. 118—122

3 Yue G X, Wang L, Li Y. Ash Size Formation Characteristics in CFB Coal Combustion. In: 4th International Conference on Fluidized Bed Combustion, USA, 1993. 110—115

4 Tang Zhi (唐治). Experimental Study on the Ash Formation Behavior of Coal under the Condition of Fluidized Bed Combustion; [thesis] (学位论文). Beijing: Tsinghua University, 2001

5 Kono K. Attrition Rates of Relatively Coarse Solid Particles in Various Types of Fluidized Beds. *AIChE Symp. Ser.*, 1981, 77 (205): 96—106

6 Vaux W G, Schruben J S. Kinetics of Attrition in the Bubbling Zone of a Fluidized Bed. *AIChE Symp. Ser.*, 1983, 79 (222): 97—102

7 Cao Yan (曹延). Ash Formation Behavior of Coal in CFB Boiler; [thesis] (学位论文). Beijing: Tsinghua University, 1999

8 Merrick D, Highley J. Particle Size Reduction and Elutriation in a Fluidized Bed Process. *AIChE Symp. Ser.*, 1974, 70 (137): 366—378