

## CFB 锅炉内物料停留时间的模型研究

杨海瑞<sup>1</sup>, M. Wirsum<sup>2</sup>, 吕俊复<sup>1</sup>, 岳光溪<sup>1</sup>

(1. 清华大学 热能工程系, 北京 100084; 2. 德国 Siegen 大学 热工研究所, Siegen D57076)

**摘要:** 提出了颗粒停留时间概念, 将物料进行粒径和年龄的分档, 并通过模型计算出各个粒径档的停留时间分布。推导的停留时间与用床存量除以物料给进率所得的停留时间概念上相符合, 但更深刻地反映了同一粒度的物料在床内的停留时间并不相同, 并以此为基础对 CFB 锅炉内的物料停留时间分布进行了模型计算, 模型同时研究了不同运行参数对颗粒停留时间的影响。

**关键词:** 停留时间; 磨耗; 年龄

中图分类号: TQ021.1 文献标识码: A

## 符号说明

$A$	燃烧室截面积, $m^2$	$\dot{m}$	流率, $kg/s$
Bed	颗粒质量份额	$M_{tot}$	床料量, $kg$
$d$	颗粒粒径, $\mu m$	$t$	颗粒年龄, $s$
$D$	排渣飞灰流率, $kg/s$	$u$	速度, $m/s$
$E$	颗粒时的夹带率, $kg/(m^2 \cdot s)$	$\alpha$	衰减指数
$g$	重力加速度, $m/s^2$	$\eta_{cy}$	分离器效率
$H$	燃烧室高度, $m$	$\eta_{dmin}$	选择性排渣系数
$k_a$	磨耗常数, $1/s$	$\rho$	密度, $kg/m^3$
		$\mu_g$	动力粘度, $kg/(ms)$

## 下标

att	磨耗量	g	空气
ele	炉膛出口流率	shift	磨耗引起的颗粒 净质量的变化率
fa	飞灰		
fc	给灰	$t_j$	年龄档
drain	排渣	t	退档

## 1 前言

循环流化床锅炉的性能很大程度上取决于床内物料特性, 例如炉膛内颗粒粒径分布, 沿床高的质量分布等等。因此采用数学模型方法研究物料平衡, 如燃烧室物料循环流率随主床风速、入炉物料流率及其颗粒分布、分离器效率以及排渣方式的变化规

律具有重要的意义。

以往关于循环床物料平衡和循环的计算模型大多忽略了床内的磨耗过程对物料平衡的影响。Blinichev 等人认为, 磨耗是因为颗粒间以及颗粒与床内壁、燃烧器之间的摩擦导致的从母体颗粒上剥落出细小颗粒的现象。磨耗结果通常一个煤灰颗粒是生成一组细小灰颗粒和一个相对较大的母体灰颗粒。在使用某些煤种的情况下, 磨耗造成的灰量损失可能会与理想无磨耗情况下分离器排灰量相当, 这时就必须考虑磨耗对床内灰平衡造成的影响。

在实际循环床锅炉里面, 不同粒径的颗粒在床内历经的磨耗时间会有很大的不同, 细粉颗粒可能直接穿过主床从分离器逸出, 粗大颗粒可能沉降至炉膛底部直接从排渣器脱离系统而不参与循环。这点可以通过不同粒径的颗粒在床内的不同停留时间得以反映。颗粒在 CFB 中的停留时间将直接影响颗粒在床内的磨耗量。颗粒停留时间的计算迄今为止还是难点之一。

对于颗粒在床内停留时间的计算, J. M. Bursi 等人提出一种基于经验的计算方法<sup>[1]</sup>。图 1 展示了 J. M. Bursi 等人的计算结果。可以看出, 循环流化床系统的两个出口—分离器出口和排渣口分别控制着细粉颗粒和大颗粒的逸出, 而构成循环灰的中间段(100~200 $\mu m$ )颗粒在床内的停留时间最长。

得到停留时间后, 便可以计算出不同粒径的灰粒由于磨耗产生的质量迁移, 把这个质量迁移当成是由于磨耗导致的该档颗粒质量减损率。

在 CFB 锅炉中, 颗粒不仅仅有粒径上的区别, 还应具有年龄上的区别, 即不同粒径的颗粒具有不同的停留时间; 同一粒径的颗粒也应该具有不同停留时间。

本文提出了一新的颗粒停留时间概念, 并以此为基础对 CFB 锅炉内的停留时间分布进行了模型

计算。

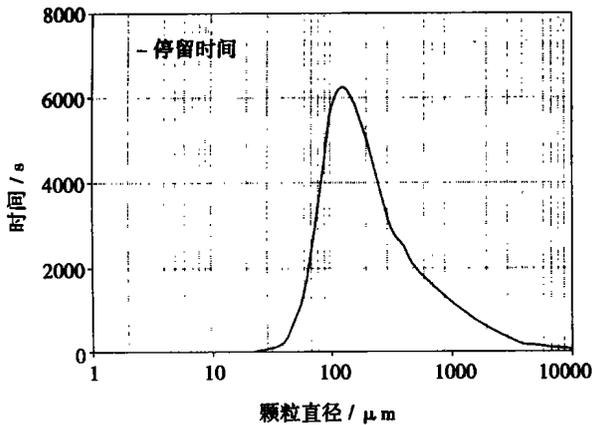


图 1 CFB 内颗粒典型停留时间分布

## 2 停留时间

关于颗粒的停留时间,笔者提出了一种概念,即在考虑将灰颗粒按粒径分档的同时,将颗粒按时间(Age)进行分档,灰按一定的流率给入,  $m_{in}(d_i, t_0)$ , 在  $t_0$  时间档内进行磨耗,磨耗产生的退档和超细颗粒分别进入下一档和最小档,经过  $t_1 - t_0$  的时间,剩余的颗粒自动转为  $t_1$  时间档,依次类推。如图 2 所示。

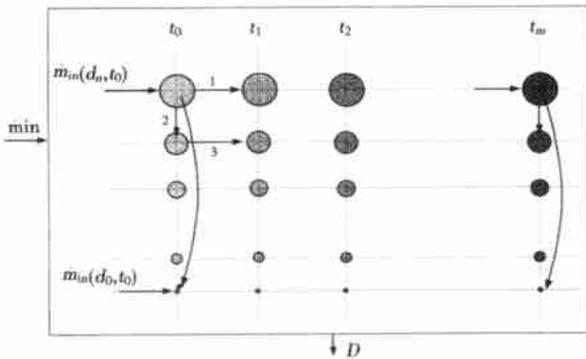


图 2 灰年龄演变示意图

其中:

$m_{j \rightarrow j+1}$  —— 经过  $t_{j+1} - t_j$  后,从时间档  $t_j$  转变为  $t_{j+1}$  档颗粒的流率, kg/s;

$m_i(d_i, t_j)$  —— 颗粒退档进入同一时间档,下一粒径档的流率<sup>[3]</sup>, kg/s;

$m_{at}(d_i, t_j)$  —— 磨耗生成的细颗粒的流率, kg/s;

$D$  —— 排渣和飞灰的总流率, kg/s。

其中:

$$m_{at}(d_i, t_j) = k_a \times [u_0 - u_{mf}(i)] \times m(d_i, t_j) \quad (1)$$

$$m_i(d_i, t_j) = \frac{d_i}{3 \times \Delta d_i} m_{at}(d_i, t_j) \quad (2)$$

$$m_{j \rightarrow j+1} = \frac{m(d_i, t_j)}{t_{j+1} - t_j} \quad (3)$$

采用上述停留时间概念将床料按粒度大小和颗粒的年龄进行分档,并解出床料粒度分布。由于模型中存在时间步长,计算运行到一定时间后计算结果趋于稳定,这时将某一粒度不同年龄的颗粒做一统计,其年龄对数量的平均就是该粒度的物料平均停留时间。平均停留时间与用床存量除以物料给进率所得的停留时间概念上相符合,比如,当床料量为 10 000 kg,给灰流率为 5 kg/s,所有颗粒的平均停留时间近似等于 2 000 s,但更深刻地反映了同一粒度的物料在床内的停留时间并不相同。

## 3 CFB 模型计算

将灰颗粒按照其粒径分为  $N$  档,按年龄分为  $M$  档。在静态运行的条件下,对于  $(d_i, t_j)$  颗粒来说,参考图 3,其质量平衡应该满足下式:

$$m_{fc}(d_i, t_j) - m_{fa}(d_i, t_j) - m_d(d_i, t_j) + m_{shift}(d_i, t_j) + m_{j-1 \rightarrow j} - m_{j \rightarrow j+1} = 0 \quad (4)$$

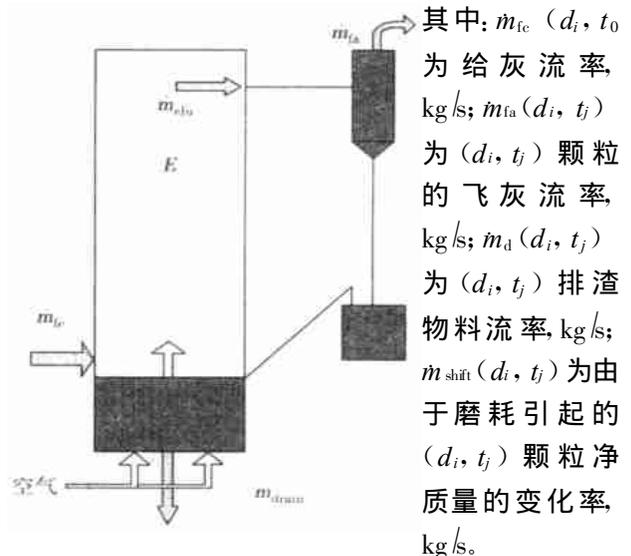


图 3 模型简图

其中:  $m_{fc}(d_i, t_0)$  为给灰流率, kg/s;  $m_{fa}(d_i, t_j)$  为  $(d_i, t_j)$  颗粒的飞灰流率, kg/s;  $m_d(d_i, t_j)$  为  $(d_i, t_j)$  排渣物料流率, kg/s;  $m_{shift}(d_i, t_j)$  为由于磨耗引起的  $(d_i, t_j)$  颗粒净质量的变化率, kg/s。

用  $\eta_{yc}(d_i)$

代表分离器对第  $(d_i, t_j)$  颗粒的分级分离效率,这样可以写出下面的式子:

$$m_{fa}(d_i, t_j) = (1 - \eta_{yc}(d_i)) m_{eh}(d_i, t_j) \quad (5)$$

其中:  $m_{eh}(d_i, t_j)$  为第  $(d_i, t_j)$  档颗粒在炉膛出口的

物料流率。

假设物料颗粒在床内均匀混合, 则第  $(d_i, t_j)$  档颗粒排渣流率可以用主床中的第  $(d_i, t_j)$  档组分  $Bed(d_i, t_j)$  表示:

$$m_d(d_i, t_j) = (1 - \eta_{\text{drain}}(d_i))m_{\text{drain}} \times Bed(d_i, t_j) \quad (6)$$

其中:  $\eta_{\text{drain}}(i)$  为考虑选择性排渣后的排渣加权系数, 其数值应该由试验确定。  $m_{\text{drain}}$  为总排渣流率,  $\text{kg/s}$ 。

假定流化床内物料完全由某  $i$  档颗粒组成时, 密相区表面的无穷远处及炉膛出口的夹带率为<sup>[4]</sup>:

$$E_{0,i} = 3.07 \times 10^{-9} Ad_{B,i} \frac{\rho^{3.5} g^{0.5}}{u_g} (u - u_{mf})^{2.5} \quad (7)$$

$$E_{\infty,i} = 23.7 \rho_g u_0 \exp(-5.4 u_{t,i} / u_0) \quad (8)$$

$$E_{w,i} = E_{\infty,i} + (E_{0,i} - E_{\infty,i}) \exp[-\alpha(H - H_{\text{den}})]$$

$$m_{\text{ch}}(d_i, t_j) = Bed(d_i, t_j) \cdot E_{w,i} \cdot A \quad (9)$$

其中:  $u_0$  为气体的表观速度,  $\text{m/s}$ ;  $u_{t,i}$  为气体的终端速度,  $\text{m/s}$ ;  $A$  为燃烧室截面积;  $H, H_{\text{den}}$  炉膛高度和密相床高度。

对于由于磨损引起的第  $i$  档颗粒净质量变化率  $m_{\text{shift}}(d_i, t_j)$ , 其计算式为:

$$m_{\text{shift}}(d_i, t_j) = \begin{cases} \dot{m}_1(d_2, t_j) + \sum_{m=2}^N \dot{m}_{\text{at}}(d_m, t_j) & i = 1 \\ \dot{m}_1(d_{i+1}, t_j) - \dot{m}_1(d_i, t_j) - \dot{m}_{\text{at}}(d_i, t_j) & i = 2, \dots, N-1 \\ -\dot{m}_1(d_N, t_j) - \dot{m}_{\text{at}}(d_N, t_j) & i = N \end{cases} \quad (10)$$

其中:  $\dot{m}_1(d_i, t_j)$  为第  $(d_i, t_j)$  档颗粒中较小的颗粒发生磨损后退档落入下一档的质量流率,  $\dot{m}_{\text{at}}(d_i, t_j)$  则为第  $(d_i, t_j)$  档颗粒的磨损质量流率。

这样式(4)可以写成:

$$m_{\text{tc}}(d_i, t_j) - (1 - \eta_{\text{cyc}}(d_i))Bed(d_i, t_j) \times E_{w,i} - \dot{m}_{\text{drain}}Bed(d_i, t_j)(1 - \eta_{\text{drain}}(d_i)) + m_{\text{shift}}(d_i, t_j) + \dot{m}_{j-1 \rightarrow j} - \dot{m}_{j \rightarrow j+1} = 0 \quad (11)$$

式(11)中除了  $Bed(d_i, t_j)$  和  $\dot{m}_{\text{drain}}$  以外均为已知量, 同时主床内粒径分布还应该满足:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M Bed(d_i, t_j) = 1 \quad (12)$$

此模型共包含  $MN + 1$  个未知数, 应用 Power Station IMSL 软件包可迭代求解上述方程组。

### 4 模型计算结果

表 1 给出模型的输入参数和输出结果。

图 4 给出了典型工况下,  $U_g = 5.0 \text{ m/s}$ ,  $d_{50} = 30 \mu\text{m}$ ,  $d_{99} = 120 \mu\text{m}$ ,  $k_a = 1e-61 \text{ m}$  时, 分离器的分离效率和排渣综合分离效率。

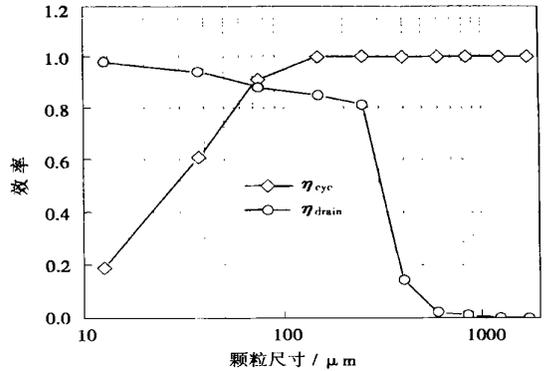


图 4 分离器及排渣效率

图 5 给出典型工况下床内颗粒、飞灰粒径和排渣的粒径分布曲线。

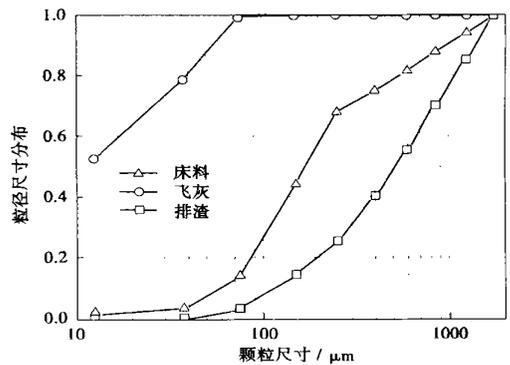


图 5 飞灰、床料、排渣的粒径分布曲线

表 1 给出了不同工况时的床料、飞灰、排渣的平均粒径和飞灰量及排渣量的变化情况。从表 1 中可以看出, 风速加大后导致更多的较大颗粒被携带, 在分离器分离效率一定的情况下, 飞灰的平均粒径增加; 同时使饱和携带量增大, 飞灰量增大; 在稳态平衡的条件下, 排渣量相应减小, 较大的颗粒被排渣的量降低, 细颗粒被飞灰携带走量增大, 从而使床内的大颗粒份额增加, 所以床料的平均粒径增大, 排渣的平均粒径加大, 而改变分离器效率, 磨损系数都将影响灰渣比, 影响粒径变化。

表 1 模型输入和输出计算结果

输	给灰粒径分布 $\mu_m$	25 ~ 2 000 均匀分布			
入	$m M_{tot}$	给灰流率 5 kg/s 床料量 10 000 kg			
变	磨耗计算间隔 /s	500			
量	流化风速 $U_g / m \cdot s^{-1}$	5.0	3.0	7.0	
	分离器效率 $d_{50}, d_{99} / \mu_m$	30 120	30 200	30 120	
	$k_a / m^{-1}$	0	$1e-6$		
结	$M_{fl} / \%$	27.5	37.5	43.7	28.5 43.5
	$M_{dmin} / \%$	72.5	62.5	56.3	71.5 56.5
果	床平均粒径 $\mu_m$	381.3	414.9	503.4	333.7 464.1
	飞灰平均粒径 $\mu_m$	39.38	32.9	47.1	28.8 33.7
	排渣平均粒径 $\mu_m$	726.2	766.7	820.9	711.1 796.3

图 6 和图 7 给出了不同工况下床内不同尺寸颗粒的平均停留时间分布。由图 6 可以看出,大颗粒的停留时间随风速的增加而增大,这是因为风速增大,飞灰量增大,从而使得排渣量降低,导致更多的大颗粒留在床内。

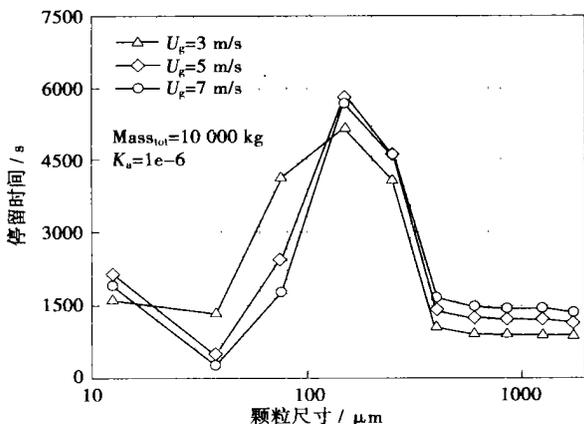


图 6 平均停留时间分布

超细颗粒的平均停留时间先减少后增大,风速增大,一方面增加了细颗粒的携带量,同时又加大了磨耗力度,使细颗粒的生成量增大,在两方面因素的共同作用下,停留时间呈现此种变化。

在相同风速下,增大灰颗粒的磨耗常数  $k_a$ ,单位时间内将生成更多的超细颗粒,且完全被携带出炉膛,同时导致更多的颗粒退档。磨耗的存在,使得床料中细颗粒的份额和飞灰量加大,飞灰平均粒径降低。同理,飞灰量增大,从而使得排渣量降低,更多的大颗粒留在床内。床料的平均粒径和排渣的平均粒径也相应增大。

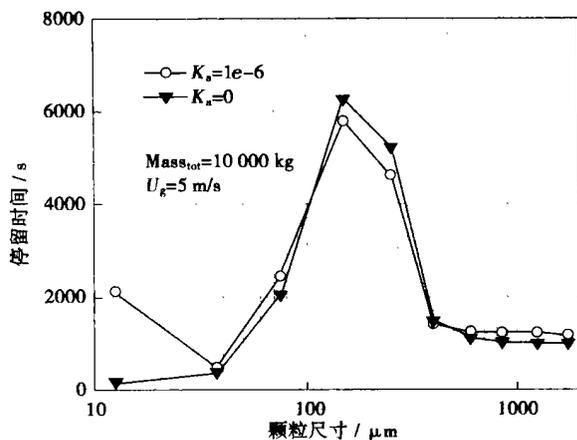


图 7 磨耗常数对停留时间的影响

### 5 结 论

本文提出了一计算 CFB 锅炉中颗粒停留时间的新概念,并通过模型计算研究流化风速、磨耗速率和分离器效率等不同运行参数颗粒停留时间的影响。

采用停留时间模型将床料按粒度大小和颗粒的年龄进行分档,将某一粒度不同年龄的颗粒做一统计,其年龄对数量的平均就是该粒度的物料平均停留时间,这样推导出来的停留时间与用床存量除以物料给进率所得的停留时间概念上相符合,但更深刻地反映了同一粒度的物料在床内的停留时间并不相同。

### 参 考 文 献:

[ 1 ] BURSI JM, LAFANECHERE L, JESTIN L. Basic design studies for a 600 MWe CFB boiler (270 b, 2 × 600 °C) [ A ]. *Proceedings of the 15th International Conference on Fluidized Bed Combustion* [ C ]. Georgia; Savannah, 1999, 16—19.

[ 2 ] 李 政. 循环流化床锅炉通用整体数学模型、仿真与性能预测 [ D ]. 北京:清华大学, 1994.

[ 3 ] GELDART D, CULLINAN J, GEORGHIADES S. *et al.* The effect of fines on entrainment from gas fluidized beds [ J ]. *Trans Inst Chem Engrs*, 1979, 57: 269—275.

[ 4 ] WEN C Y, CHEN L H. Fluidized bed freeboard phenomena: entrainment and elutriation [ J ]. *AIChE Journal*, 1982, 28(1): 117—128.

(何静芳 编辑)

局域波法在转子系统多故障监测中的应用研究 = **Applied Research of a Local Wave Method Used for the Monitoring of Multiple Faults in a Rotor System** [刊, 汉] / WANG Feng-li, MA Xiao-jiang (Mechanical Engineering Institute under the Dalian University of Science & Technology, Dalian, China, Post Code: 116024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 139—142

Based on the local characteristics of signals, a local wave method (LWM) can be employed to obtain the instantaneous frequency of signals and the Hilbert time-frequency spectrum composed of an energy-time-frequency three-dimensional distribution. The LWM was used to analyze the vibration characteristics, which emerge during the coupling of a crack and a rub-friction fault in a rotor system. It has been discovered that the LWM is especially suited for the analysis of nonlinear and non-steady signals, and capable of clearly describing the time-frequency characteristics of vibration signals. This can provide in engineering practice a helpful basis for the monitoring and diagnosis of faults in a rotor system. **Key words:** rotor system, local wave method, Hilbert time-frequency spectrum, fault diagnosis

CFB 锅炉内物料停留时间的模型研究 = **Modeling Research of Residence Time of Materials in a Circulating Fluidized Bed Boiler** [刊, 汉] / YANG Hai-rui, LU Jun-fu, et al (Thermal Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) WIRSUM M (Thermal Energy Engineering Institute under the Siegen University, Siegen, Germany, D57076) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 143—146

During a model study of bed material balance in a circulating fluidized bed (CFB) boiler the effect of attrition process on that balance should be taken into account. In this connection the authors have come up with a new concept of the residence time of materials by grading the latter according to their particle diameter and age. With the help of a model calculated was the residence time profile of material particles of various sizes. The residence time thus derived agrees conceptually with that obtained as a result of dividing a total bed inventory by material feed rate. However, this also profoundly reflects that materials of a same particle size may not have the same residence time in a fluidized bed. On the basis of this understanding a model calculation was conducted of the residence time profile of the materials in the CFB bed boiler. Furthermore, with the help of the model also studied was the influence of different operating parameters on the residence time of the particles. **Key words:** residence time, attrition, age

水煤膏冷态雾化试验装置和测量系统的研究 = **The Study of a Cold-state Atomization Test Rig and a Measurement System for Coal-water Paste** [刊, 汉] / LU Ping (Power Engineering Institute under the Nanjing Normal University, Nanjing, China, Post Code: 210042), LU Yong, ZHANG Ming-yao (Education Ministry Key Lab on Clean Coal Combustion and Power Generation Technology and Thermal Engineering Institute under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 147—150

A vertical test rig for the atomization study of coal-water paste has been set up and a method proposed for measuring the particle average diameter and distribution of water-coal paste atomized particles with the use of a PIV (particle image velocimetry) technique and a newly developed image-processing software. All factors, which may have an impact on the measurement of the coal-water paste atomized particles, are analyzed, creating a solid basis for the further research of the nozzle atomization properties of the coal-water paste. **Key words:** coal-water paste, atomization, test rig, particle size measurement, particle image velocimetry

切向炉内多组小屏尾部分离涡的研究 = **An Experimental Study of Separated Vortices at the Tail Section of Multi-platenlets in a Tangentially Fired Furnace** [刊, 汉] / DIAO Yong-fa, HE Bo-shu (National Key Lab on Clean Coal Combustion under the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084), XU Jin-yuan, et al (Institute of Energy and Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 151—154