

# 不同进口形式方形分离器的试验研究

郑安桥, 苏亚欣, 万 鑫

(东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620)

**摘 要:** 通过改变分离器进气形式, 对方形分离器的性能进行了试验研究。结果表明: 各分离器的切割粒径, 随进口风速的增大而减小(见图 5), 随进口颗粒浓度的增大先减小后增大(见图 7、图 9); 各分离器的阻力, 随进口风速的增大而增大(见图 6), 随进口颗粒浓度的增大而减小(见图 8、图 10)。在分离特性方面, 正切向单进口形式优于正切向双进口, 在斜切向双进口形式优于斜切向单进口, 正切向进气形式优于斜切向进气。在阻力方面, 正切向双进口形式优于正切向单进口, 斜切向单进口形式优于斜切向双进口, 斜切向进气形式优于正切向进气。研究结果为方形分离器结构的优化设计提供了依据。

**关 键 词:** 循环流化床; 分离器; 方形旋风分离器; 分离机理; 分离效率

中图分类号: TK223.2 文献标识码: A

## 引 言

循环流化床燃烧技术是近几十年来发展起来的一种高效低污染的燃烧技术<sup>[1]</sup>, 具有燃料适应性强、负荷调节范围大、灰渣可综合利用的特点, 它有效地解决了节能与环保两方面的问题, 是燃烧技术发展中的一大进步<sup>[2]</sup>。气固分离器是循环流化床锅炉的关键部件之一, 其性能直接影响着整台锅炉的总体设计、系统布置及运行性能, 对锅炉的高效、清洁、稳定运行起着十分重要的作用。旋风分离器因其结构简单、分离效率高, 在循环流化床锅炉上得到普遍的应用。但是, 常规旋风分离器的圆形横截面使其存在许多自身无法克服的缺点, 如: 高温旋风分离器热惯性大, 无法实现锅炉紧凑布置, 冷却式圆形旋风分离器制造加工困难、成本高等。

为此, Ahlstrom Pyropower 公司开发了水冷方形旋风分离器, 并将它用于紧凑型循环流化床锅炉的设计中。通过把圆形的旋风分离器改成方形截面的分离器, 分离器的壁面上就便于安装水冷壁, 简化了制造和安装工艺<sup>[3]</sup>。浙江大学开发了方形冷却型下

排气旋风分离器<sup>[4~5]</sup>, 并用于 75 t/h 的循环流化床锅炉, 在煤泥和废弃物的燃烧上取得了很好的效果。清华大学研制了方形上排气的冷却型旋风分离器, 并成功地应用于 75 t/h、220 t/h、116 MW 循环流化床锅炉上<sup>[6~7]</sup>。

到目前为止, 科研人员对方形分离器进行了大量的研究<sup>[8~10]</sup>。但不同结构因素对分离器分离效率和阻力的影响方面的研究还相对不足, 需要进一步明确不同结构因素对于分离器的分离效率和阻力的影响, 从而进一步优化分离器的结构, 提高分离器的分离效率、减小其阻力, 使其在较小的能耗下取得较高分离效率。本文通过冷态试验, 研究了入口形式、入口风速及含尘浓度对分离器分离效率和阻力的影响。

## 1 试验装置与方法

### 1.1 试验物料

测试分离效率时采用的物料为电厂灰。其堆积密度为 807.8 kg/m<sup>3</sup>, 真密度为 1 989.7 kg/m<sup>3</sup>。通过 LS13320 激光粒度仪分析测其中粒径为 22.79 μm, 其粒径分布如图 1 所示。

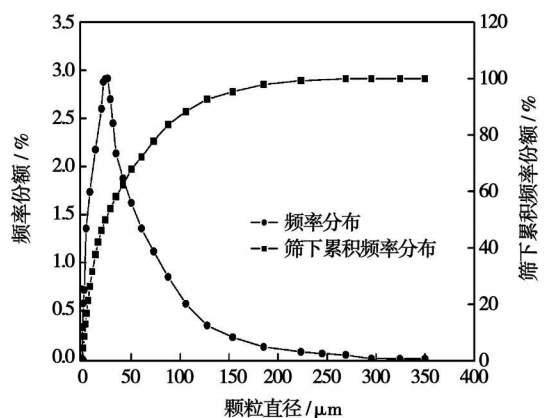


图 1 试验物料粒径分布

收稿日期: 2007-07-06; 修订日期: 2007-08-20

作者简介: 郑安桥(1978-)男, 山东省临沂市人, 东华大学硕士研究生, 现工作在上海蓝鸟环境科技发展有限公司。

### 1.2 试验段

试验段为具有 4 种不同入口形式的方形分离器,其主要结构参数有:入口宽度为 40 mm,单进口的入口高度为 150 mm 双进口的入口高度为 75 mm,直段高度为 400 mm,总高度为 800 mm,直段截面边

长为 200 mm,出口管直径为 100 mm,出气管插入深度为 240 mm,排灰口边长为 50 mm。4 种进口形式分别为:正切向单进口、正切向双进口、45°斜切向单进口、45°斜切向双进口,如图 2 所示。

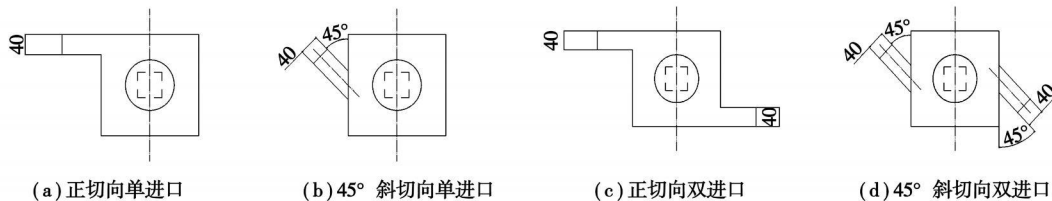


图 2 方形分离器进口形式示意图

每个分离器具有相同的直段边长、总高度、出气管直径、出气管插入深度和排尘口边长。为了避免因进口尺寸变化而引起进口流速及流量的变化,每个分离器均设计为具有相同的总进口面积,以此来消除运行条件的变化引起的分离器性能的变化。

更能真实地反映分离器的分离特性,因此,在研究和工程应用中人们通常用分级分离效率表示分离性能。研究表明,分级分离效率可以表示成对应于分离效率为 50% 的颗粒粒径  $d_{50}$  的函数,  $d_{50}$  是分离器分离效率的标志,并将  $d_{50}$  称为切割粒径。

### 1.3 试验装置

试验装置主要由进气管段、料斗、分离器、灰斗、出气管段、引风机和排气管段组成,如图 3 所示。为了使颗粒物有一定的加速的时间,在分离器进口前设置了一段比较长的进气管段。进口风速由 SwemaAir50 型热线风速仪在风速测量断面处测得,分离器进出口的静压差通过 SwemaMan80 型数字微压计测量。通过调节出气管段上的风阀、风速、风量达到设定值,固体颗粒(物料)由料斗经较长的进气管段加速后进入分离器。系统采用引风机,以形成负压环境使得粉尘颗粒比较容易进入测试系统。

分离器的分级分离效率为分离器分离下的某一粒径范围的物料质量与加入的某一粒径范围的物料质量的百分比,通过质量法计算分离器的分级分离效率  $\eta_i$ :

$$\eta_i = \frac{f_{1i} \times m_{后}}{f_{2i} \times m_{前}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $\eta_i$ —粒径  $d_i$  的颗粒分级分离效率, %;  $f_{1i}$ —收集的分离所得灰中平均粒径为  $d_i$ 、粒径范围为  $\Delta d_i$  颗粒的质量频率, %;  $f_{2i}$ —加入灰中平均粒径为  $d_i$ 、粒径范围为  $\Delta d_i$  颗粒的质量频率, %;  $m_{前}$ —加入灰的质量, g;  $m_{后}$ —收集分离下的灰的质量, g。

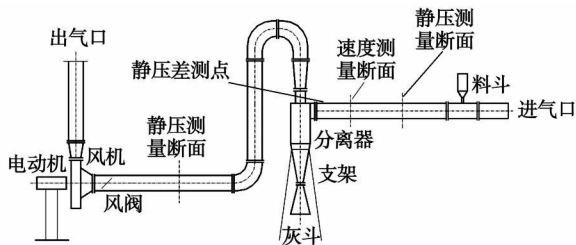


图 3 试验装置系统图

分离器的阻力是指分离器进、出口处的全压之差。由于分离器进气口和出气口的垂直高度差比较小,分离器的阻力可按进出口的动、静压之差,因此,分离器的阻力可计算为:

$$\Delta P = \Delta P_s + \Delta P_d \quad (2)$$

式中:  $\Delta P_s$ —分离器进出口的静压差。

在漏风率很小的情况下,分离器进出口的动压差  $\Delta P_d$  的计算:

$$\Delta P_d = \frac{1}{2} \rho (v_{in}^2 - v_{out}^2) \quad (3)$$

式中:  $v_{in}$ —分离器进口处气体流速, m/s;  $v_{out}$ —分离器出口处气体流速, m/s;  $\rho$ —空气密度, kg/m<sup>3</sup>。

### 1.4 试验方法

分离效率和流动阻力是分离器的两个主要技术指标。由于分离器的总分离效率受进口物料颗粒粒度大小及粒度分布影响很大,以总分离效率作为性能评价指标缺乏一般性。而分级分离效率是按粒径的不同分别表示分离器对该类粒子的分离效率,并

## 2 试验结果及分析

根据试验数据,由式(1)可计算得出各工况下各

分离器的分级分离效率。图4为正切向单进口分离器在进口速度为20.21 m/s、分离器进口颗粒浓度为8.8 g/m<sup>3</sup>工况下的分级分离效率曲线图。各种进口形式分离器在各工况下的分级分离曲线的趋势与图4所示的分级分离效率曲线的趋势大致相同, 将以试验所得各分离器在各工工况下的切割粒径为依据来分析各分离器的性能。

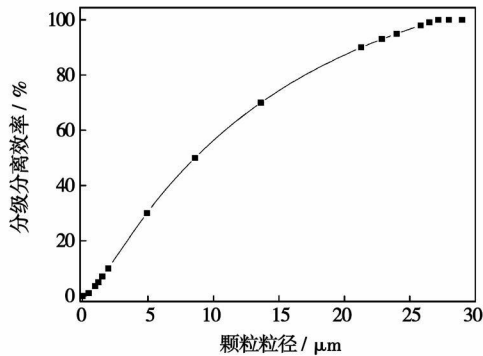


图4 正切向单进口 ( $u_{in}=20.21\text{ m/s}$ ,  $C=8.8\text{ g/m}^3$ )分离器

## 2.1 不同进口形式对分离器性能的影响

### 2.1.1 进口形式对分离性能的影响

在相同工况下(常温常压, 颗粒浓度  $C$  为  $8.8\text{ g/m}^3$ ), 不同进口形式的分离器在进口风速变化时的切割粒径曲线如图5所示。

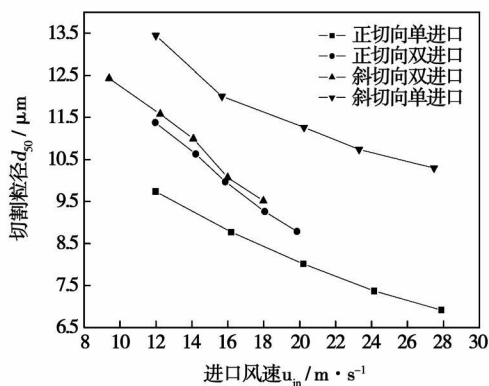


图5 不同进口形式的分离器切割粒径与进口风速的关系曲线

对比曲线可以发现, 进口形式对分离性能的影响较大, 正切向进口的切割粒径明显小于斜切向进口形式, 正切向单进口的切割粒径小于正切向双进口的, 而且斜切向单进口的切割粒径大于斜切向双进口的。

方形分离器内主要有外旋下行流, 内旋上行流

和局部的二次流(如局部的旋涡流)。内部上行流为流速较大的强旋流, 强旋流有利于将颗粒物甩向外部下行流, 进而被捕集; 外部下行流为旋流强度较低的流动, 它对颗粒物(尤其是较大的颗粒物)的携带作用相对较弱, 有利于颗粒物在壁面附近被捕集。

斜切向进口的进口气流速度与分离器壁面成一定角度碰撞, 将在分离器的四个直角处引起较大的局部旋涡, 局部旋涡将干扰外旋下行流, 对其局部产生扰动并使其远离壁面, 不利于颗粒物的分离。因此, 正切向进口分离器的分离性能要优于斜切向进口分离器。

正切向双进口由于两个进口是垂直于壁面对称布置, 它们将对已形成的外旋下行旋流施加垂直于壁面方向的速度影响, 不利于旋流流场的形成, 从而影响分离性能; 另外, 由直段过渡到台体段气流将被加速, 直段高度越小, 则对气流的加速作用就越明显, 也就越有利于颗粒物的分离。在由直段过渡到台体段时, 正切向双进口分离器加速影响没有单进口明显。因此, 正切向单进口分离器的分离性能要优于正切向双进口。

斜切向双进口的两个进口是与壁面成  $45^\circ$  角对称布置的。斜切向双进口因直段高度比较大, 在由直段过渡到台体段时的气流加速作用没有单进的明显。但其进口的倾斜对称布置形式将减小分离器4个直角除局部旋涡, 进而减小对旋转分离流场的干扰。并且进口倾斜对称的布置形式对整个流场影响要大于因直段高度较大带来的影响。所以, 斜切向双进口分离器的分离性能要优于单进口。

### 2.1.2 进口形式对阻力特性的影响

在相同工况下(常温常压, 颗粒浓度为  $8.8\text{ g/m}^3$ ), 不同进口形式的分离器在进口风速变化时的阻力曲线如图6所示。曲线表明进口形式分离器阻力的影响较大, 正切向进口的阻力明显大于斜切向进口形式, 正切向单进口的阻力大于双进口的, 而斜切向单进口的阻力小于倾斜双进口的。

分离器阻力主要是由分离器内气流、颗粒物与壁面的碰撞、摩擦及颗粒物之间的相互碰撞、流场中的旋流等消耗能量而引起。

正切向进口形式由于进口气流及颗粒几乎垂直和壁面发生碰撞, 在碰撞过程中其能量损失比较大, 因而其阻力比较大。正切向双进口因其进口的对称布置, 入口气流与旋转流场的相互作用使得气流及颗粒与壁面间碰撞时的能量损失减小, 因此, 其阻力小于单进口的阻力。斜切向双进口分离器因其进口为

对称布置形式, 加强了流场旋流强度, 因此而消耗的能量比较多, 所以, 斜切向单进口阻力大于单进口。

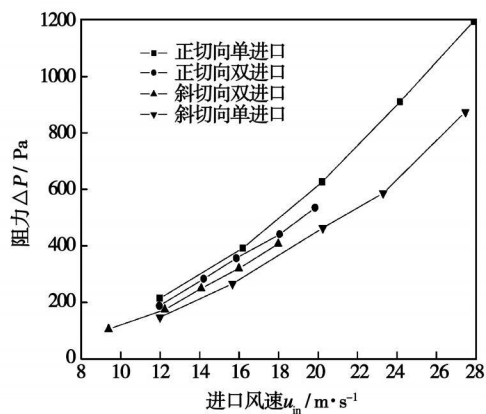


图 6 不同进口形式的分离器阻力与进口风速的关系曲线

### 2.2 进口风速对分离器性能的影响

#### 2.2.1 进口风速对分离性能的影响

由图5可知: 4种进口形式的分离器的切割粒径随着进口风速的增大均在减小。进口风速对分离器分离性能的影响比较大, 在进口风速不是很高的情况下, 分离器的分离性能随着进口风速的提高而提高。

对于方形分离器, 提高进口风速将使分离器内两相旋转运动增强, 颗粒离心力增加, 更多的颗粒将被甩到流动转向的边角区域, 并同壁面及颗粒相互之间发生碰撞, 除跟随性较好的小颗粒将继续被旋转流夹带或卷吸外, 许多颗粒将因此而被捕集; 但当进口风速增大到某一个值后, 湍流和颗粒间、颗粒与壁面的碰撞等因素的影响使已分离的颗粒重新被卷起, 灰斗返气夹带颗粒增多, 分离效率将会下降。

#### 2.2.2 进口风速对阻力特性的影响

由图6可知: 4种进口形式的分离器的阻力随着进口风速的增大均在增大。进口风速对分离器分离性能的影响比较大, 分离器的阻力随着进口风速的提高而增大。

提高进口风速将使分离器内两相旋转运动增强, 颗粒离心力增加, 更多的颗粒将被甩到流动转向的边角区域, 并于壁面及颗粒相互之间发生碰撞, 这样, 必将增加能量的消耗, 从而使得分离器的阻力增大。

### 2.3 进口气流含尘浓度对分离器性能的影响

#### 2.3.1 进口气流粒含尘浓度对分离性能的影响

在相同工况下(常温常压, 风速 20.22 m/s), 正

切向、斜切向单进口分离器切割粒径与进口含尘浓度的关系曲线如图7所示; 在相同工况下(常温常压, 风速为 18.02 m/s), 正切向、斜切向双进口分离器切割粒径与进口处含尘浓度的关系曲线, 如图9所示。

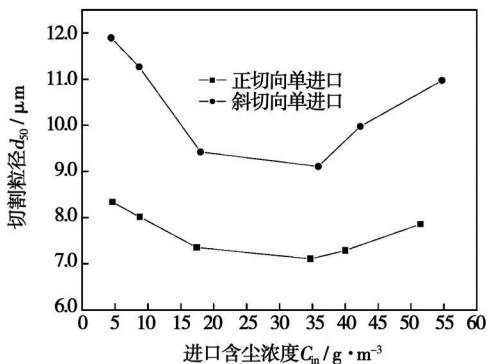


图 7 正切向、斜切向单进口分离器切割粒径与进口含尘浓度的关系曲线

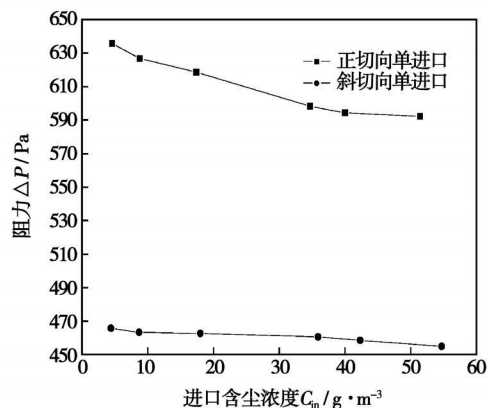


图 8 正切向、斜切向单进口分离器阻力与进口含尘浓度的关系曲线

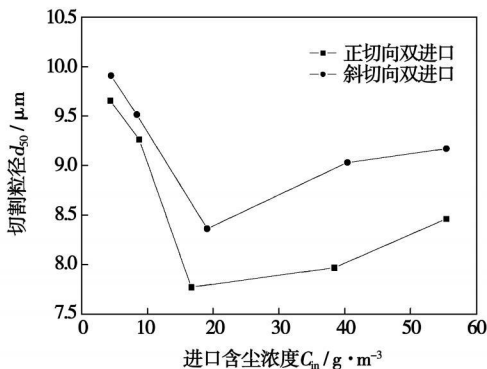


图 9 正切向、斜切向双进口分离器切割粒径与进口含尘浓度的关系曲线

由图7和图9可知,各进口形式方形分离器的进口含尘浓度对分离器切割粒径的影响均存在一个临界值。浓度小于此临界值时,随着浓度的增大切割粒径减小;当浓度大于此临界值时,随着浓度的增大切割粒径增大。

在含尘浓度增大时,大颗粒对小颗粒的携带作用加强,使得一些原来较难分离的小颗粒粉尘得到分离,同时,由于粉尘凝聚和团聚性的提高,使较小颗粒凝聚在一起而被捕集。但当浓度增大到一定数值后,由于颗粒间的相互作用,携带作用及颗粒的凝聚、团聚性的影响将开始减弱。因此,分离器的切割粒径随着浓度的增大先减小后增大。

### 2.3.2 进口气流颗粒浓度对阻力特性的影响

由各进口形式分离器的阻力与进口含尘浓度的关系曲线可知,各进口形式分离器的阻力随进口含尘浓度的增大均减小,但减小的趋势比较缓慢。随着含尘浓度的增加,气流内摩擦力增大,流场旋流速度降低,能耗较少,所以阻力减小,如图8和图10所示。

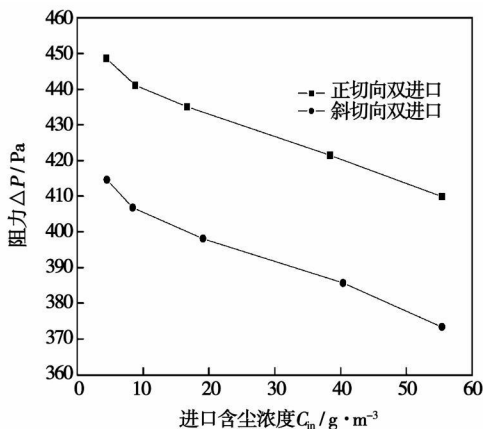


图10 正切向、斜切向双进口分离器阻力与进口含尘浓度的关系曲线

## 3 结论

通过对4种不同进口形式的方形分离器在变风速和变含尘浓度的工况的试验,得出如下结论:

(1) 正切向进口形式分离器的分离性能优于斜

切向进口形式分离器;正切向单进口分离器分离性能优于正切向双进口;斜切向双进口分离器分离性能优于斜切向单进口分离器。

(2) 正切向进口形式分离器的阻力明显大于斜切向进口形式分离器,正切向单进口分离器的阻力大于正切向双进口分离器,而斜切向单进口分离器的阻力小于斜切向双进口分离器阻力。

(3) 进口风速对4种进口形式分离器的分离特性和阻力均有较大影响;分离性能均随进口风速的增大而提高;阻力均随进口风速的增大而增大。

(4) 进口含尘浓度对4种进口形式分离器的分离性能和阻力有一定影响;分离性能均随含尘浓度的增大先提高后降低;阻力均随含尘浓度的增大而减小,但减小的趋势比较缓慢。

## 参考文献:

- [1] 岑可法,倪明江,骆仲泱,等.循环流化床锅炉里路设计与运行[M].北京:中国电力出版社,1998.
- [2] FENG JUNKAI, YUE GUANGXI. New achievements of development of CFBC boilers in china // Proceedings of the international conference on energy and environment [C]. Shanghai, 1998; 505-510.
- [3] GAMLE R, HYPPANEN T, KAURANEN T. Pyroflow, compact a second generation CFB boiler by ahlstrom pyro-power // Proceeding of the 12th International Conference on Fluidized Bed Combustion [C]. USA: San Diego California, 1993; 751-760.
- [4] 王东,程乐鸣,周强,等.卧式热交换式方形分离器分离性能的试验研究[J].热能动力工程,2003,18(3):229-333.
- [5] 岑可法.方形下排气热交换分离器.实用新型专利[P].ZL专利号:94223276.3,浙江大学,1996.
- [6] 岳光溪,张绪炜,李岩登.带加速段的水冷方形旋风分离器[P].ZL专利号93235842.X,清华大学,1995.
- [7] 吕俊复,刘青,张建胜,等.220 t/h水冷方形分离器循环流化床锅炉的设计及运行[J].中国机电工程学报,2003,25(8):178-182.
- [8] 王玉召,吕俊复,张建胜,等.220 t/h水冷方形分离器循环流化床锅炉的性能[J].动力工程,2005,25(3):343-347.
- [9] 余战英,魏铜生,陈晓宇,等.不同结构因素下方形旋风分离器分离性能的试验研究[J].动力工程,2004,24(1):147-151.
- [10] YAXIN SU, YURU MAO. Experimental study on the gas-solid suspension flow in a square cyclone separator [J]. Chemical Engineering Journal, 2006, 121: 551-58.

(编辑 滨)

Acoustic monitoring of leakage from HP steam pipelines of utility-boiler heat exchangers is an important means for early fault detection and is of major significance for the rational arrangement of maintenance schedule and the enhancement of equipment availability. A theoretical analysis and experimental study were conducted of the jet flow noise from a relatively small leakage hole. A spectrum analysis and characteristics pick-up were performed of the jet flow noise signal actually measured. The analytic results show that the self-correlated power spectrum density distribution of the jet flow noise exhibits an obvious peak-value phenomenon and the peak-value frequency will decrease with an increase of the jet-flow hole diameter. For an under-expanded small hole jet flow at a pressure ratio below the critical one, when the jet-flow hole diameter increases from 1 mm to 4 mm, the peak value of the noise power spectrum Sr number will go up from 0.05 to 0.13. Such a feature can be used to estimate the leakage hole size. In the meanwhile, a proposal has been made for signal-wave filtering on the basis of the power spectrum distribution of high-temperature steam small-hole jet-flows.

**Key words:** acoustic monitoring, jet flow noise, spectrum analysis, power spectrum

火电机组辅助汽水强度矩阵的研究及其应用 = **A Study of Auxiliary Steam-water Intensity Matrix in a Thermal Power Plant and its Applications** [刊, 汉] / YAN Shun-lin, WANG Jun-you, LI Yong-hua (College of Energy Source and Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding, China, 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(3). — 288 ~ 292

An auxiliary steam-water system is an important integral part of the thermodynamic system in a thermal power plant. It is of major realistic significance to analyze the influence of the system in question on the coal consumption rate in power generation. However, the traditional thermal-economy calculation methods all have its limitations to some extent. In the light of the shortcomings of the currently prevailing calculation methods, an auxiliary steam-water intensity matrix for thermal power plants has been proposed. Through specific case calculations of typical thermal power plants with different installed capacities, it can be shown that the calculation model does not need to establish an energy conservation and mass balance equation for the thermodynamic system, enjoying such specific features as small calculation work load, simple and quick calculation, high calculation accuracy and great versatility. The model can provide a new tool for attaining energy savings and energy consumption reduction of thermal power plants, especially for performing a quantitative analysis and calculation of the auxiliary steam-water system. **Key words:** auxiliary steam-water, intensity matrix, coal consumption rate, energy saving and consumption reduction

不同进口形式方形分离器的试验研究 = **Experimental Study of a Square-shaped Separator with Different Inlet Forms** [刊, 汉] / ZHENG An-qiao, SU Ya-xin, WAN Xin (College of Environment Science and Engineering, Donghua University, Shanghai, China, 201620) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(3). — 293 ~ 297

By changing the steam inlet forms of a separator, an experimental study has been conducted of the performance of a square-shaped separator. The results of the study indicate that the cut particle diameter of various separators decreases with an increase of inlet air speed (see Fig. 5) and with an increase of the particle concentration at the inlet, the particle diameter first decreases and then increases (see Fig. 7 and 9). The drag forces of various separators increase with an increase of the inlet air speed (see Fig. 6) and decrease with an increase of the inlet particle concentration (see Fig. 8 and 10). With respect to separation characteristics, the single inlet form of tangential direction is better than the double inlet form of the said direction; the double inlet form of oblique tangential direction is superior to the single inlet form of the said direction. The inlet form of the tangential direction is better than the inlet of the oblique tangential direction. As for the drag forces, the double inlet form of the tangential direction is better than the single inlet form of the aforementioned direction; the single inlet form of the oblique tangential direction is superior to the double inlet form of the said direction and the gas inlet form of the oblique tangential direction is better than that of the tangential direction. The research results can provide an underlying basis for the structural optimization design of square-shaped separators. **Key words:** circulating fluidized bed, separator, square-shaped cyclone separator, separation mechanism, separation efficiency