

# 卧式热交换式方形分离器分离性能的试验研究

王东, 程乐鸣, 周强, 骆仲泐

(浙江大学 能源清洁利用与环境教育部实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 对卧式热交换式方形分离器在不同风速和不同入口浓度下分离效率和阻力进行试验研究, 并分析了运行工况分离性能。为了进行优化设计, 对不同的结构方案进行了优化试验。结果表明, 排气管直径和伸入长度分别为分离器特征尺寸的 1/3 和 1/15 的分离器具有高效、低阻等优点; 对于粒径大于 100 $\mu\text{m}$  的固体颗粒, 其分离效率在 90% 以上, 阻力小于 1500 Pa。

**关键词:** 分离器; 方形分离器; 卧式分离器

中图分类号: TK224 文献标识码: A

## 1 前言

循环流化床燃烧技术已是商业化的燃烧技术, 具有高效、低污染、燃料适应性强等优点<sup>[1]</sup>。气固分离装置是循环流化床锅炉的关键部件, 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。

在将旧锅炉(如煤粉炉、链条炉)改造成循环流化床锅炉时, 需要在原来有限的布置空间中增设分离器, 同时要求尽量少的对原设备做改动以降低改造成本, 这就要求开发一种能充分利用原旧锅炉有限空间, 满足分离要求, 同时又能作为一部分受热面的分离器。针对这种情况, 程乐鸣等<sup>[2]</sup>提出的一种体积较小, 而分离效率相对较高的气固分离器, 即卧式热交换式方形分离器。

文献[3~4]对该分离器进行了初步的研究, 其试验主要在 10~20 m/s 的低风速下进行。Saha<sup>[5]</sup>等人的研究侧重于高风速(15~55 m/s)下该分离器的分离效率, 风速对分离器阻力的影响未予报道。本文对该种新型的分离器的分离性能进行了较为全面的冷态试验研究, 并进行了初步的结构优化试验, 为理论分析和工业应用打下了基础。

## 2 试验装置及方法

本试验是在气固多相流冷态试验台(见图 1)上进行的。为保证给料量测量的准确性, 驱动及给料装置均放置在电子台秤上。试验系统运行在正压条件下, 在进风管上用翼形测速装置测量进口风速。固体物料由料斗落下, 经螺旋给料机送入风道。在进风管与给料机料斗之间加装气流平衡管, 以保证试验物料的顺利下落。固体物料经过高速气体加速后通过 6.5 m 长的加速段一同进入分离器, 分离下来的物料由下料口汇集于分离器底部的料仓中, 经过分离器分离后的气流再经布袋除尘器除尘后由排气管排入大气。

试验中分离器的分离效率  $\eta$  由下面的公式求得:

$$\eta = G_i / G_e \quad (1)$$

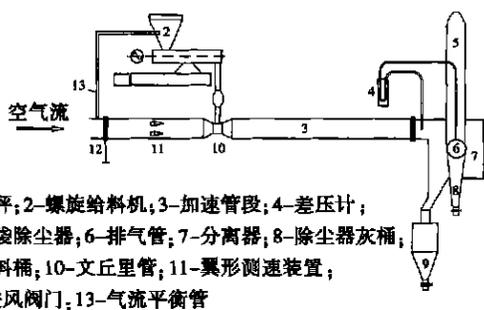
式中:  $G_i$ —已分离物料重量, kg;

$G_e$ —待分离物料重量, kg。

分离器的阻力  $\Delta P$  由 U 型管差压计测量其进、出口压差得到。

本试验的工况范围为入口风速: 10~30 m/s, 颗粒入口浓度: 0.5~1.2 kg/m<sup>3</sup>, 考察的性能参数有分离器的分离效率、阻力和分级效率。试验所用的石英砂, 真实密度为 2319 kg/m<sup>3</sup>, 堆积密度为 1461 kg/m<sup>3</sup>, 算术平均粒径为 439.1  $\mu\text{m}$ 。另外, 本试验还对取自某循环流化床锅炉 L 阀后和空气预热器后的电厂灰进行了试验研究, 电厂灰算术平均粒径分别为 309.6  $\mu\text{m}$  和 202.3  $\mu\text{m}$ , 试验物料颗粒粒度分布见图 2。

对于结构参数, 本试验主要考察了分离器排气管伸入长度  $e$  和排气管的直径  $D$  两个因素。各型号



1-磅秤; 2-螺旋给料机; 3-加速管段; 4-差压计; 5-布袋除尘器; 6-排气管; 7-分离器; 8-除尘器灰桶; 9-回料桶; 10-文丘里管; 11-翼形测速装置; 12-进风阀门; 13-气流平衡管

图1 试验装置示意图

分离器的结构尺寸见表1和图3。

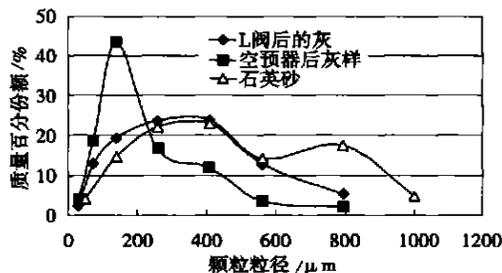


图2 试验物料筛分曲线

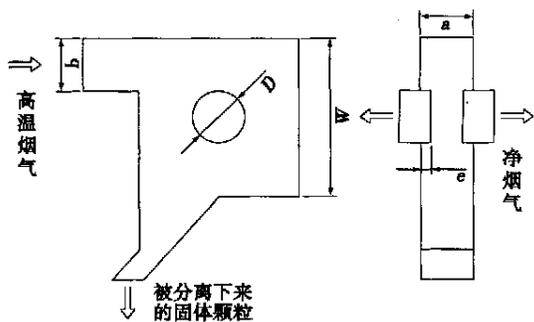


图3 卧式热交换式分离器结构示意图

表1 分离器设计结构尺寸

	I型	II型(K2型)	III型	KI型	K3型
进口截面/mm <sup>2</sup>	100×100	100×100	100×100	100×100	100×100
分离器高 W*/mm	300	300	300	300	300
排气管伸入长度与特征尺寸的比值 e/W	1/15	1/15	1/15	1/30	1/10
排气管相对直径 D/W	3/10	1/3	11/30	1/3	1/3

\*分离器高 W 为该分离器的特征尺寸。

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 结构参数对分离性能的影响

##### 3.1.1 排气管直径 D

对 I、II、III型分离器分别进行分离效率和分离器阻力的试验研究, 得到图4和图5。从图中可以看出, 在排气管相对直径  $D/W$  由  $3/10$  增大到  $11/30$  的过程中, 分离效率有下降的趋势, 尤其在  $14\text{ m/s}$  低风速下分离效率下降幅度接近  $1\%$ 。在此过程中阻力也有下降, 但在排气管相对直径从  $3/10$  增大到  $1/3$  时, 阻力下降  $500 \sim 1000\text{ Pa}$ , 而在  $1/3$  增大为  $11/30$  的过程中, 阻力变化甚微。结果表明, 排气管相对直径  $D/W$  为  $1/3$  的分离器兼具高效低阻的优点。

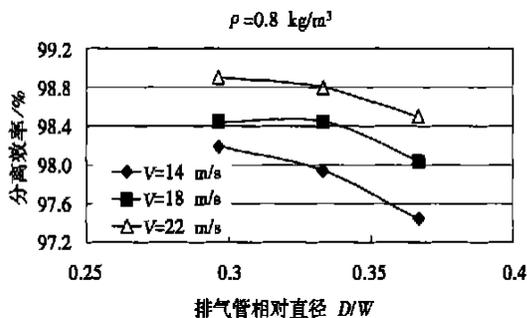


图4 排气管直径对分离效率的影响

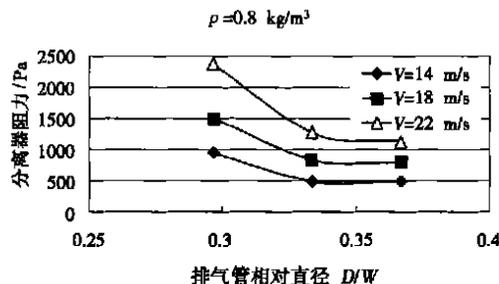


图5 排气管直径对分离器阻力的影响

##### 3.1.2 排气管伸入长度 e

图6和图7为 K1、K2、K3型分离器的分离效率和分离器阻力在不同风速下的变化曲线。从图6可以看出, 排气管伸入的过长或过短都会导致分离效率的下降。结果表明, 当伸入长度与分离器特征尺寸的比值  $e/W$  为  $1/15$  时, 分离效率最高, 而排气管深入和长度  $e$  对分离器阻力的影响不是很大(见图7), 这与文献[3]的试验结果一致。

#### 3.2 运行因素对分离性能的影响

为了进一步研究分离器的性能, 经过结构优化后, 选择 II 型(K2型)分离器进行了变浓度、变风速等工况的试验研究。

##### 3.2.1 进口风速 V

保持颗粒浓度  $\rho$  为  $0.8\text{ kg/m}^3$ , 入口风速  $V$  对分

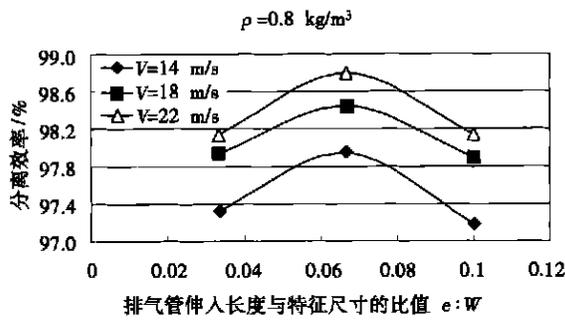


图 6 排气管伸入长度对分离效率的影响

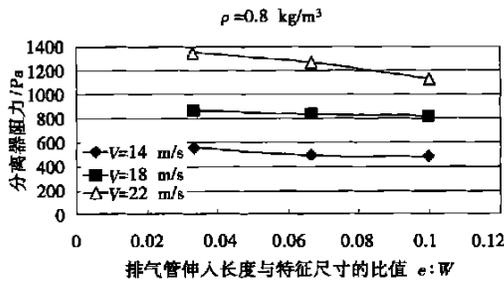


图 7 排气管伸入长度对分离器阻力的影响

力损失减小。

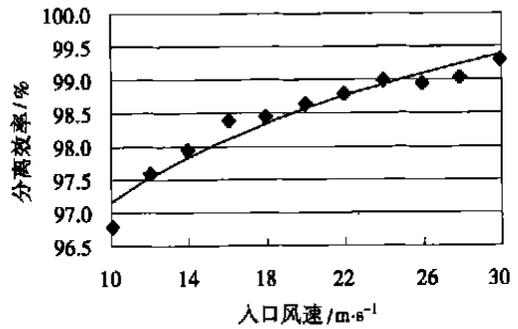


图 8 入口速度对分离效率的影响

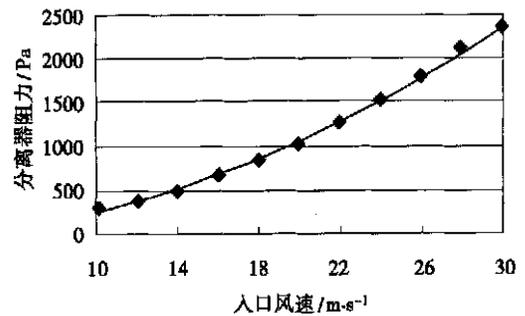


图 9 入口速度对分离器阻力影响

离效率  $\eta$  和分离器阻力  $\Delta P$  的影响如图 8 和图 9 所示。从图中可以看出, 入口风速对分离性能的影响显著, 当速度由 10 m/s 增加到 30 m/s 时, 分离效率由 96.78% 提高到 99.30%, 而分离器阻力则增加了近 7 倍, 由 304 Pa 增大到 2 352 Pa。这是由于随着风速的提高, 分离器内部的气流旋转强度增大, 气固两相的旋转运动增强, 使得颗粒的离心力增加, 更多的颗粒被甩在流动转向的边角等区域, 并与壁面及颗粒之间发生碰撞。结果除了跟随性很好的小颗粒将继续被旋转气流卷吸和夹带外, 其余颗粒因此被捕集。但是过高的风速导致分离器阻力的急剧增大, 同时也增加了对分离器本体的磨损, 冷态试验得出的最佳运行风速为 20 m/s 左右。

### 3.2.2 颗粒浓度 $\rho$

颗粒浓度对分离器分离性能的影响如图 10 ~ 图 11 所示。保持入口风速  $V$  为 18 m/s, 当颗粒浓度由 0.5 kg/m<sup>3</sup> 到 1.2 kg/m<sup>3</sup> 的变化过程中, 分离效率随着颗粒浓度的 97.69% 增加到 98.95%, 同时, 分离器阻力有了明显的下降, 由 960 Pa 降到了 657 Pa。这是由于在低浓度时, 随着颗粒浓度的增大, 粗、细颗粒碰撞而产生团聚, 从而携带细颗粒甩向器壁, 有利于分离。同时气体内摩擦力增大, 分离到壁面的颗粒产生摩擦, 使旋流强度降低, 减小了离心力, 因而阻

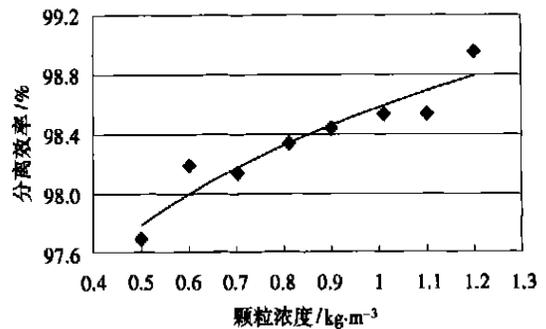


图 10 颗粒浓度对分离效率的影响

### 3.3 不同工况下的分级效率

图 12 是 II 型(K2 型)分离器在几个不同工况下的分级效率, 试验物料是石英砂。由图中可以看出, 对于颗粒粒径  $d_p$  大于 100  $\mu m$  的颗粒, 分离效率高 90%, 对于大于 200  $\mu m$  的颗粒, 分离效率在 98% 以上。

### 3.4 电厂灰的试验结果

图 13 和图 14 分别为两种灰介质在变风速工况下的试验曲线。试验所用的分离器仍为 II 型(K2 型)分离器。保持颗粒浓度  $\rho = 0.8 kg/m^3$ , 由图中可以

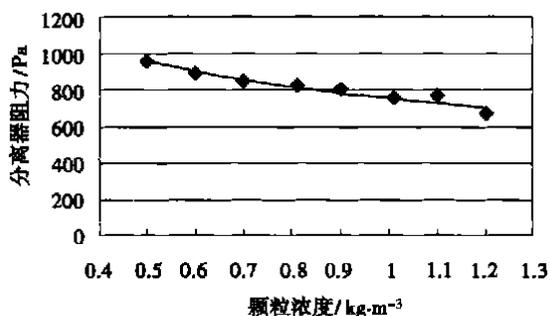


图 11 颗粒浓度对分离器阻力的影响

左右。这是因为其试验系统为循环系统，试验物料在封闭的空间中经重复分离，使得最终分离效率较高。

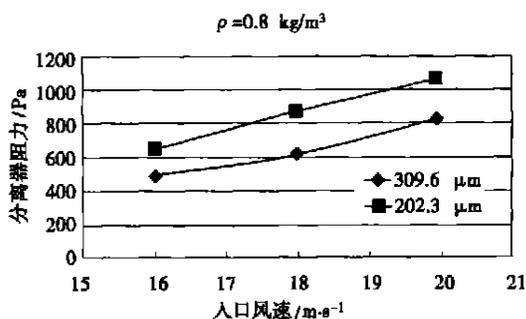


图 14 灰介质的速度—阻力曲线

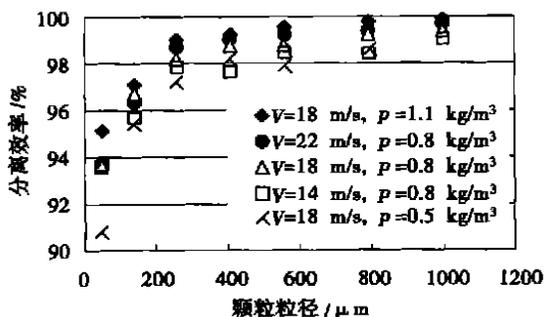


图 12 几个典型工况下的分级效率

看出，对于平均粒径  $d_p$  分别为 309.6 μm 和 202.3 μm 的灰介质，其分离效率在 93 ~ 98% 之间，分离器的阻力在 1 000 Pa 以下。

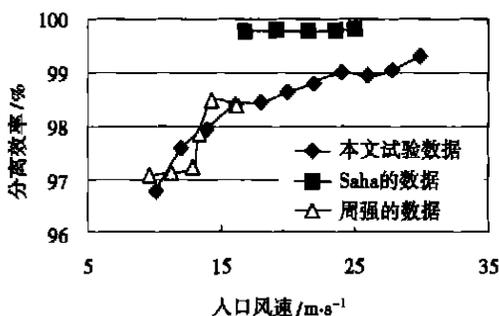


图 15 不同试验者的数据曲线

### 4 结 论

经过试验和分析讨论，可得出如下结论：

(1) 对于颗粒粒径  $d_p$  在大于 100 μm 的颗粒，分离效率高于 90%；而对于大于 200 μm 的颗粒，本分离器的分离效率在 98% 以上；

(2) 入口风速对分离性能影响显著，在 15 ~ 30 m/s 的范围内，提高入口风速，分离效率明显增大，同时分离器阻力急剧增大，通过冷态试验得出的最佳运行风速为 20 m/s 左右；

(3) 当分离器入口颗粒浓度低于 1.2 kg/m<sup>3</sup> 时，分离器的分离效率随着风速的增加而增大，而分离器阻力随之减小；

(4) 在结构参数中，排气管的伸入长度过长或过短都会导致分离效率的下降，但是对分离器阻力的影响不是很大；而排气管直径过小会导致分离器的阻力增大，过大导致分离效率的下降。结果表明，满足排气管深入长度与特征尺寸之比  $e/W$  为 1/15 和排气管相对直径  $D/W$  为 1/3 的分离器兼具高效、低阻的优点。

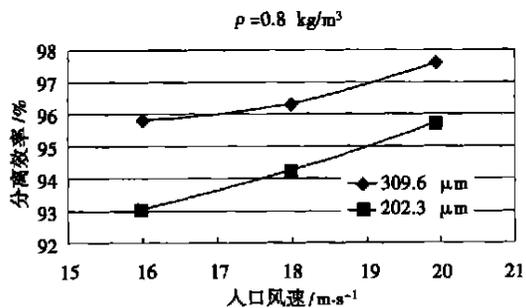


图 13 灰介质的速度—效率曲线

### 3.5 与其他研究者试验数据的比较

以下分别为周强<sup>[3]</sup>、Saha<sup>[5]</sup>及本试验的部分试验数据。试验物料均为石英砂，其平均粒径分别为 250.0 μm、226.0 μm 和 439.1 μm。周强<sup>[3]</sup>的试验与本试验中的物料颗粒浓度分别为 1.0 kg/m<sup>3</sup> 和 0.8 kg/m<sup>3</sup>，Saha<sup>[5]</sup>试验中的颗粒浓度未予报道。从图 15 中可以看出，这两组数据比较接近，分离效率都随入口风速增大而增大。而 Saha<sup>[5]</sup>的试验中，在风速从 15 ~ 25 m/s 的范围内，分离效率一直保持在 99.8%

# 热力系统综合评价模型研究

刘 卫 华, 昂 海 松

(南京航空航天大学 宇航学院, 江苏 南京 210016)

**摘 要:** 提出一种综合评价模型, 它采用分层评价体系, 将社会环境对热力系统各方面的要求作为评价模型的第一层, 而对各方面要求的具体评价指标作为模型的第二层, 应用模糊综合评价方法, 将两层因素结合在一起, 评价结果通过模糊运算隶属度的大小来反映。文中还通过对具体实例的应用, 证实该模型的可行性及合理性。

**关 键 词:** 热力系统; 综合评价; 模型; 经济; 环境; 模糊数学

中图分类号: TK515 文献标识码: A

## 1 前 言

任何热力系统都具有多种属性, 除了反映系统在物理环境下的工作能力、性能参数, 在经济环境下的运行费用、制造成本等定量指标外, 还有反映系统在工程环境下的劳动安全程度、对生态环境的污染和侵蚀等定性指标, 因此, 评价热力系统必须综合考虑经济、环境、管理等多方面因素。特别是随着我国把环境保护和可持续发展列入国家发展目标的重中之重, 再单纯强调系统的经济性而忽视环境、节能要求的评价方法已不能适应社会发展需要, 必须改进。

人类社会文明进步对热力系统综合评价表现出一定的约束力, 而这些约束力大小, 单纯用能量和热经济学分析都难以直接反映, 因而需要对现行的

分析方法进行拓展。本文所提出的评价模型就是这方面的探索。

## 2 现行评价方法的缺陷

现行评价方法可分为两类: 一是单纯从经济性要求出发<sup>[1~2]</sup>; 二是综合考虑经济、环保等多方面的要求<sup>[3~4]</sup>。在可持续发展的要求下, 第一类评价方法的缺陷是不言而喻的。就第二类评价方法而言, 由于对环境因素考虑的出发点不同, 它又有两种形式: 一是从环保所需的治污费出发, 如文献[3]所述。该评价方法就是将对环境的定性要求转化为治污费用多少来定量表达, 它的主要缺陷在于: 选择热力系统时, 人们首先是希望该热力系统不造成环境污染, 这是用治污费无法反映的; 同时限于当前的技术水平, 某些热力系统对环境的污染也不是多用一点治污费就能解决的事情。也就是说, 治污费用并不能全面地反映环境对热力系统的要求, 它仅反映问题的一个方面。事实上, 这也是一种经济性的评价方法。文献[4]介绍了另一种综合评价模型, 它的基本做法是: 设某一热力体系优化决策的论域  $U$  是评价系统方案的集合, 选择对热力系统起着重要影响作用的因素指标, 建立因素指标集合  $V$ , 通过研究各热

收稿日期: 2002-07-04

作者简介: 刘卫华(1965-), 男, 湖南衡阳人, 南京航空航天大学教授。

## 参考文献:

- [1] 岑可法, 倪明江, 骆仲决, 等. 循环流化床锅炉理论设计与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [2] 程乐鸣, 骆仲决, 方梦祥, 等. 卧式热交换式方形分离器[P]. 中国专利: ZL 00201914. 0.
- [3] 周 强, 程乐鸣, 骆仲决, 等. 方型卧式分离器的试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), (已录用).
- [4] CHENG LEMING, ZHOU QIANG, LUO ZHONGYANG, *et al.* De-

velopment of a horizontal heat-exchanger square cyclone[A]. **Circulating Fluidized Bed Technology VII Proc of the 7<sup>th</sup> Inter Conf on Circulating Fluidized Beds**[C]. Canada: Niagara Falls, Ontario, 2002. 551-558.

- [5] SAHA S K, BASU P, DYTIA A. Performance of a novel horizontal gas-solid separator in a circulating fluidized bed riser[A]. **Circulating Fluidized Bed Technology VII Proc of the 7<sup>th</sup> Inter Conf on Circulating Fluidized Beds**[C]. Canada: Niagara Falls, Ontario, 2002. 567-574.

( 辉 编 辑 )

非线性鲁棒控制方法的新进展 = **New Developments in Robust Control Methods for Nonlinear Systems** [刊, 汉] / LI Da-zhong, WANG Xiao-hui, ZHANG Ai-ping (Power Engineering Department, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3). — 220 ~ 223

Main methods of nonlinear robust control are described. In the light of various types of uncertainty specific to controlled objects of a nonlinear system the authors have expounded recent advances in nonlinear robust control methods, such as an improved version of Lyapunov and  $H^\infty$  method as well as an innovative method involving a combination of the above improved version with an intellectualized method. On this basis some new research results in the above area of study are analyzed. **Key words:** nonlinearity, robust control, uncertainty, intellectualized method

四角切圆空气分级燃烧技术及应用 = **Graded Air Feeding-based Tangential Corner Firing Technology and Its Applications** [刊, 汉] / ZHANG Hui-juan, SONG Hong-peng, HUI Shi-en (Institute of Energy & Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3). — 224 ~ 228

The theory and technology of tangential corner firing with graded air feeding are described, and axial and radial air feeding-based combustion processes separately explained. The technical merits and demerits of these two processes are discussed. On the basis of investigating copious relevant literature available in China the authors give a comprehensive account of the current situation about the use of the above-cited technology at Chinese power plants. **Key words:** pulverized coal-fired boiler, graded firing, NO emissions reduction

卧式热交换式方形分离器分离性能的试验研究 = **Experimental Study of the Separation Performance of a Square Separator Assuming a Horizontal Heat Exchange Mode** [刊, 汉] / WANG Dong, CHENG Le-ming, ZHOU Qiang, et al (Thermal Engineering Institute under the Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3). — 229 ~ 233

An experimental study was conducted of the separation efficiency and separator resistance of a horizontal heat exchange mode-based square separator under different air speeds and inlet concentrations. The influence of operating conditions on separation performance was analyzed. To achieve an optimized design, the authors have carried out optimization tests with respect to various construction schemes. The test results indicate that a separator incorporating an exhaust pipe with a diameter and insertion length equal respectively to 1/3 and 1/15 of separation characteristic size will offer high efficiency and low resistance, etc. For solid particles with a diameter greater than  $100\mu\text{m}$  the separation efficiency will be in excess of 90% and the resistance less than 1.5 kpa. **Key words:** separator, square separator, horizontal separator

热力系统综合评价模型研究 = **The investigation of a Comprehensive Evaluation Model for a Thermodynamic System** [刊, 汉] / LIU Wei-hua, ANG Hai-song (College of Aerospace Engineering under the Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, China, Post Code: 210016) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3). — 233 ~ 236

A comprehensive evaluation model is proposed. By using a stratified evaluation system the requirements of social environment on various aspects of a thermodynamic system are assumed to be the first layer of an evaluation model, while specific evaluation indexes are taken as the second layer of the model. With the use of a fuzzy comprehensive evaluation method the factors of the two layers were joined together. The results of evaluation may be reflected through the magnitude of subordination degree of fuzzy operations. The feasibility and rationality of the model has been substantiated by its use on some specific cases. **Key words:** thermodynamic system, comprehensive evaluation, model, economy, environment,