

# 内旋流流化床燃烧系统设计研究

(中国科学院力学研究所) 田文栋 魏小林 盛宏至

**摘 要:** 根据垃圾的热值和物理成分分析, 结合流化床布风的冷态实验结果, 对内旋流流化床燃烧系统进行了研究, 设计出热态试验装置并成功地进行了生活垃圾焚烧试验。

**关键词:** 流化床; 内旋流流化床; 燃烧; 废弃物; 传热  
中图分类号: TK124

## 1 引言

只有采用现代化的处置方式才能从根本上解决城市生活垃圾的社会危害性问题, 焚烧制能是一种先进的消纳手段<sup>[1]</sup>。城市生活垃圾和其它特种燃料(如: 工业废弃物、泥煤、矸石等)类似, 由于品质低下(热值低、水分高、灰份高), 燃料特性多变(难点燃、难燃烧、难稳燃), 后处理难度大(不仅含 SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>, 而且有含氯的废物), 燃烧系统比通常的(如燃油和燃煤的系统)复杂, 因此需要发展适合城市生活垃圾及特种燃料燃烧的技术和设备。

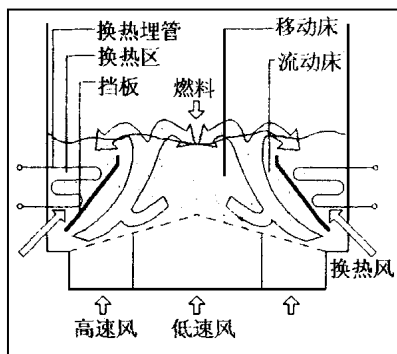


图 1 内旋流流化床原理示意图

内旋流流化床<sup>[2,3]</sup>(图 1 所示为浓相床区的原理图)燃烧系统采用几十倍于燃料量的石英砂作为床料, 利用分段非均匀布风使床料在燃烧室内进行大尺度回旋, 形成包含移动床和流动床组

合成的复合床结构, 能够迅速良好地完成燃料从进入燃烧室到燃尽的一系列干燥、预热、破碎、不燃物分离排出与可燃物燃烧过程; 同时通过控制移动床的流化速度还可以控制生活垃圾的预热、挥发份析出的速率; 并通过控制浓相床区、自由空间等各部分

的温度控制燃烧过程和减少污染物的排出, 控制焚烧过程中剧毒物质(如二噁英和呋喃)的产生。因此内旋流流化床对燃料的适应范围广, 特别适合于各种水分灰份含量高、热值低、质地不均匀、形状各异、性能随时间和地点有很大波动的燃料。

## 2 内旋流流化床设计依据

内旋流流化床燃烧系统的设计是以生活垃圾物理成分、热值的分析为依据给出了风量的大小; 以冷态试验的结果为基础决定了形成内旋流流谱的风量配置; 按照处理量的大小确定了炉体的尺寸。

### 2.1 生活垃圾的物理成分热值分析

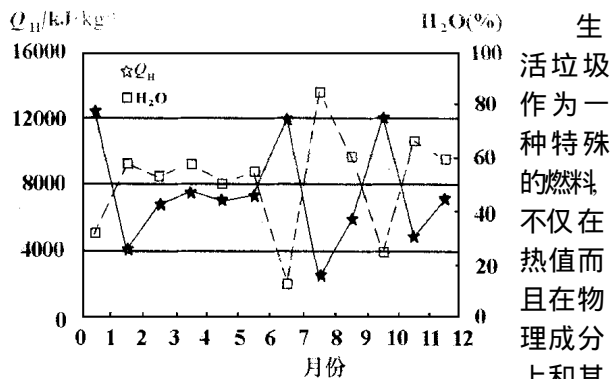


图 2 生活垃圾的高位热值和含水量

生 活 垃 圾 作 为 一 种 特 殊 的 燃 料, 不 仅 在 热 值 而 且 在 物 理 成 分 上 和 其 它 的 燃 料 有 很 大 的 不 同, 图 2 给 出 了 双 气 (暖 气、煤 气) 楼 房 区 一 年 内 城 市 生 活 垃 圾 应 用 基 高 位 热 值 和 水 分 的 变 化。经 过 对 北 京 市 四 类 典 型 地 区 (公 共 社 区、双 气 楼 房 区、单 气 楼 房 区 和 平 房 区) 共 16 个 采 样 点 的 一 年 监 测 得 到: 含 水 含 灰 量 高 的 垃 圾 的 高 位 热 值 一 般 较 低; 双 气 楼 房 区 生 活 垃 圾 高 位 热 值 一 般 在 4000 ~ 12000 kJ/kg 之 间 波 动, 平 均 为 7450 kJ/kg, 而 含 水 量 随 季 节 及 采 样 时 间 不 同 变 化 比 较 大, 一 般 处 于 25% ~ 75% 之 间, 一 年 的 平 均 值 为 50%, 含 灰 量 很 小; 公 共

收稿日期: 1998- 09- 07

基金项目: 论文研究工作得到了中国科学院重点项目(KY95T- 03- 02)和国家自然科学基金(59776023)的资助

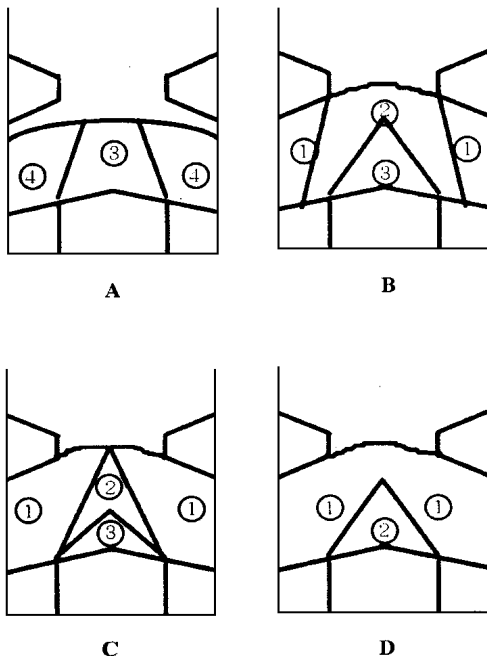
作者简介: 田文栋(1969- ), 男, 助理研究员, 工学硕士, 从事垃圾焚烧装置研究工作。通讯处: 100080 北京海淀区中关村路 15 号

社区(车站、医院、学校、旅馆、饭店等)的生活垃圾高位热值处于 6000 ~ 14000 kJ/kg 之间,含水率低于双气楼房区,平均为 40%,含灰量很小;单气区和平房区生活垃圾高位热值一般在 1000 ~ 6000 kJ/kg 之间,有时应用基的高位热值为负值,而含灰量明显高于双气楼房区和公共社区,低的在 10% 以上,高的达到了 80%。

综合考虑各类地区的特点,以城市生活垃圾的应用基平均高位热值 6000 kJ/kg 和含水率 50% 进行内旋流流化床生活垃圾焚烧处理燃烧系统的设计<sup>[4]</sup>。

### 2.2 流化倍率的选择

内旋流流化床冷态模型的外形尺寸为 400 mm (长) × 150 mm (宽) × 660 mm (高);风室高度为 100 mm,风室上方采用密孔板作为布风装置,布风板投影面积为 380 mm × 130 mm,倾斜角度为 12°;开孔率为 5%;反射板下沿距布风板 200 mm,倾斜角度为 20°;长度 90 mm。采用平均的当量粒径  $d_p = 0.5 \text{ mm}$  的河砂做床料,则初始流化速度  $u_{mf} = 0.203 \text{ m/s}$ 。



分别改变高速风和低速风的大小得到了四种典型的复合流态(图 3),在每种复合流态中都包含两种及两种以上的基本流态:

流动床区(床料被空气裹携做剧烈运动)、移动床区(床料缓慢沉降)、固定床区(床料静止不动)、鼓泡床区(床料做小尺度上下运动)。只有图 3(D)所示的流态是由流动床区和移动床区组成了大尺度的内旋流流动。

试验得到:高速风室表观流化速度在  $6u_{mf} \sim 16u_{mf}$  范围内,低速风室表观流化速度大于  $1.3u_{mf}$  时

可以形成不存在固定床的大尺度内旋流流动。内旋流流化床通常的运行范围是高速风  $4u_{mf} \sim 20u_{mf}$ ,低速风  $0.5u_{mf} \sim 2.0u_{mf}$ <sup>[4]</sup>。

### 3 燃烧系统的设计

考虑到实验室制备模拟生活垃圾或获取真实生活垃圾的能力,选取了内旋流流化床焚烧系统的处理量为:一天工作 16 小时,处理 1000 kg 高位热值为 6000 kJ/kg,含水量为 50% 的城市生活垃圾,那么理论空气量为:

$$Q_L = M Q_h \beta = 0.0314 (\text{kg/s}) \quad (1)$$

其中  $M$  (kg/s) 为每秒的垃圾处理量,  $Q_h$  (kJ/kg) 为生活垃圾的平均高位热值,  $\beta$  为燃料完全燃烧释放 1 kJ 热量时所需的空气量(根据生活垃圾中大概组分,经计算取  $\beta = 0.3008 \text{ kg/kJ}$ <sup>[5]</sup>),选取过量空气系数  $\alpha = 1.6$ ,则送入燃烧系统的总空气量为:

$$Q_m = Q_L \alpha = 0.0502 (\text{kg/s}) \quad (2)$$

由于城市生活垃圾的挥发份比例高,而挥发份通过补充二次风在浓相床区上方的自由空间燃烧,由于部分挥发份的逸出,根据垃圾的物理成分经计算得到局部过量空气系数为 0.70 时可以满足固定碳和部分挥发份在浓相床区燃烧的需要,此时可以将浓相床区的温度保持在 700 ~ 800 之间,有利于控制污染物( $\text{NO}_x$  和含氯的废气)的生成和低温点不燃物(如玻璃和轻金属)的排出。根据此确定了一次风  $Q_1$  和二次风  $Q_2$  的比例为 7 : 9,则一次风量为:

$$Q_1 = \frac{7Q_m}{16} = 0.0220 (\text{kg/s}) \quad (3)$$

燃烧系统的床料经测量其球化的平均粒径为  $d_p = 0.6 \times 10^{-3} \text{ m}$ ,则流化床床料颗粒在 800 时的初始流化速度  $u_{mf}$  为:

$$u_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_g) g}{1650 \mu} = 0.1207 (\text{m/s})$$

$$\text{此时 } Re = \frac{\rho u d}{\mu} = 0.537 < 20 \quad (4)$$

选取内旋流流化床试验台的高速一次风区和低速一次风区面积比为  $A_1 : A_2 = 1 : 1$ ,高速风区和低速风的平均流速  $v_1 = 8u_{mf}$ ,  $v_2 = 1u_{mf}$  则可以得到流化床的床层面积为:

$$A = \frac{2Q_1}{\rho_g (v_1 + v_2)} = 0.1231 (\text{m}^2) \quad (5)$$

实际所取的流化床床层面积为  $0.5 \text{ m} \times 0.24 \text{ m} = 0.12 \text{ m}^2$ 。

浓相床的深度和燃料的特性相关联,尤其对于城市生活垃圾这种热值低的燃料应该保证一定的浓

床深度,使得挥发份在逸出燃烧过程中将砂床加热,保证砂床预热垃圾和垃圾燃烧的热平衡。同时考虑供风风机的压头,选取浓相床的高度为 0.5 m。

为了彻底破坏垃圾焚烧中的有毒有害物质(如二噁英和呋喃等),应使燃烧产物在 1000 左右的温度下停留 1 秒以上的时间,根据生活垃圾的成分,按过量空气系数为 1.6 计算,燃烧 1 kg 高位热值为 6000 kJ/kg 的生活垃圾将产生  $Q_{vkg} = 3.70$  kg 的烟气体积,则烟气的流量为:

$$Q_v = \frac{M Q_{vkg}}{i \rho} = 0.229 \text{ (kg/s)} \quad (6)$$

已知布风板的有效面积  $A$ ,那么在炉体内的流速  $v$  为:

$$v = \frac{Q_v}{A} = 1.912 \text{ (m/s)} \quad (7)$$

即炉体必须存在 1 m 以上的自由空间,保证高温烟气在炉内有 1 s 以上的停留时间,破坏燃烧中生成的二噁英、呋喃等有毒有害物质。设计的内旋流流化床的高温部分高度超过 3.0 m,并且燃烧系统流通截面逐步从 0.12 m<sup>2</sup> 过渡到 0.18 m<sup>2</sup>,进一步降低烟气流动速度,增加了停留时间,而且减小了燃料和床料颗粒的扬析。

#### 4 内旋流流化床热态焚烧系统

内旋流流化床生活垃圾焚烧系统包括主体、风量控制调节系统、测量系统和辅机四部分。

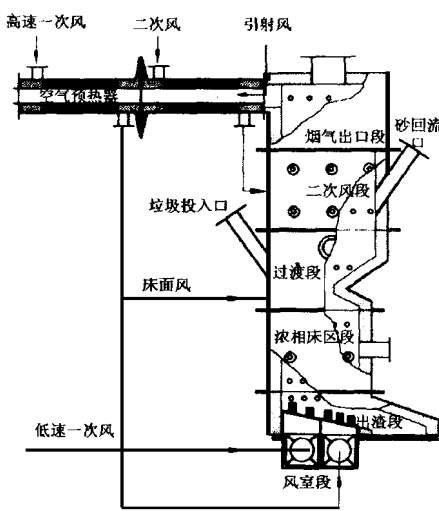


图 4 内旋流流化床试验台结构

如图 4 所示(包括空气预热器),主体部分从下到上包括风室段、出渣段、浓相床区段、过渡段、二次风段和烟气出口段。整个炉体为

一种组装式的轻型炉墙结构,每一段均由钢板焊接而成,内部衬有 20 mm 厚的隔热材料和 60 mm 厚的耐热材料。各段之间通过法兰连接。主体部分的外形

尺寸为 1200 mm (长) × 800 mm (宽) × 3600 mm (高)。风室段由风帽、花板、风室和扩压段组成,试验台的高速风区和低速风区分别安装了 6 个和 4 个风帽,它们均匀地布置在 15 °的花板上;由出渣段连续或间歇排砂,通过筛分排除不燃物,再将床料投入到浓相床区;在浓相床区段的流动床区和移动床区分别布置了换热管,用于研究内旋流流化床埋管换热问题;在过渡段炉膛尺寸逐步扩大,增加了烟气在燃烧室内的停留时间,有利于烟气中有害成分的分解,用于控制燃烧速率的床面风在过渡段被送入炉内;二次风段布置二次风的入口和砂回流口;烟气出口段延长了炉体的高度,使得烟气可以在炉体内多停留一定的时间。由于过渡段上方、二次风段以及烟气出口段补充了二次风,燃烧温度比浓相床区高,并且为气相燃烧,统称为自由空间。

试验台上共开设了 46 个温度测点和 3 个烟气取样孔,并配备了自动化程度高、灵敏度高、记录时间长的温度测量系统,该系统可以同时记录 32 路温度信号;烟气的成分分析则通过烟气采样孔取样,再利用烟气分析仪进行;为了配合床料颗粒流态和燃料的扩散混合的研究,为相对应的冷态实验台配备了粒子图象测速(DPV)系统以及气泡分析系统。

#### 5 结果及讨论

利用直接从居民楼的垃圾道中取得的生活垃圾和高位热值 4700 kJ/kg 低位热值 3500 kJ/kg 的模化垃圾(由纸张、塑料、食品、草木、织物、不燃物和水份按照一定的比例配置而成)分别进行了焚烧试验。

图 5 ~ 8 给出了实验中各个段的炉膛温度随时间的变化(包括点火、稳定运行、燃料更换、停止燃料供应和停炉的温度曲线)。

垃圾燃料从内旋流流化床的移动床区部分投入,由于该区供风量小,床料裹胁燃料缓慢下降,防止了垃圾中重物对布风装置的冲击,并且在运动过程中对垃圾进行预热和干燥;床料裹胁垃圾到达浓相床区底部,补充到流动床区,由于流动床区风速高,供风量充足,失去了部分挥发份的干燥垃圾得以迅速的燃烧;由于内旋流流化床中床料横向扩散强烈,被加热的高温床料迅速转移到移动床继续加热新投入的垃圾。图 7 上中下三条曲线分别给出了浓相床区流动床、中心线和移动床的温度;流动床区的温度明显高于移动床区,说明燃烧主要发生在流动床区,而新垃圾的预热和干燥则在移动床区进行。

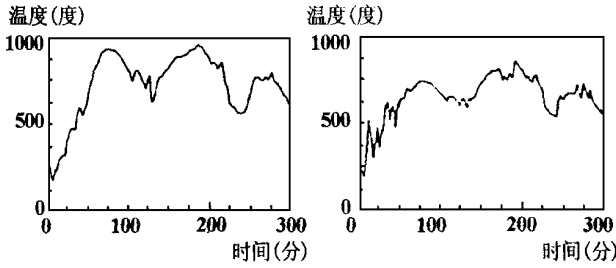


图 5 自由空间温度

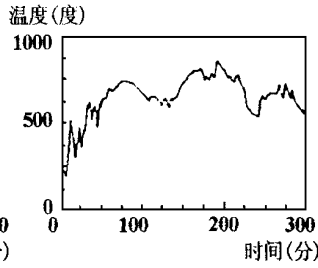


图 6 过渡段的温度

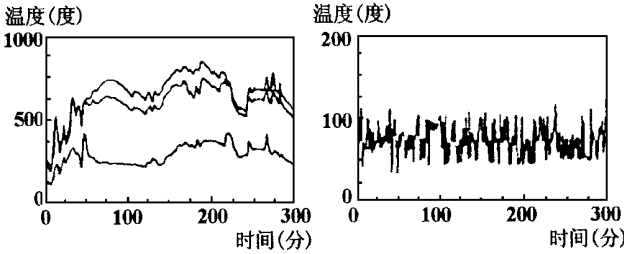


图 7 浓相床区温度

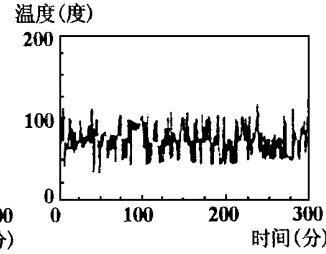


图 8 风帽附近温度

由于内旋流流化床床料颗粒的剧烈混合, 通过床料的循环, 移动床区将干燥的垃圾送入流动床区进行焚烧, 流动床区将热量送入移动床区用于垃圾预热干燥。

比较图 5 和图 7: 由于在过渡段上部增加了二次风, 挥发份继续燃烧, 使得自由空间的温度比浓相床区流动床的温度高 150 以上。较高的自由空间温度(900 ~ 1000 )保证了燃烧产物中有毒有害物质(如二噁英、呋喃)的分解; 较低的浓相床区温度(700 ~ 800 )不仅可以控制NO<sub>x</sub> 等污染物的生成, 并且便于玻璃和轻金属等易熔化物质的排出, 防止了堵塞风帽等事故的发生。

图 8 给出了风帽小孔出口的温度, 也就是空气经预热器之后的温度。较低的风帽出口温度可以有效保护风帽和布风装置。

记录温度的同时, 分析了烟气的成分: 氧的百分含量为 14%, 二氧化碳的百分含量为 7%, 并且烟气中氧和二氧化碳含量在焚烧生活垃圾和燃烧颗粒状煤时基本没有差别; 燃煤时的烟气成分折合为氧浓度为 6% 时的污染物的浓度为: [CO] = 700 mL/m<sup>3</sup>, [NO<sub>x</sub>] = 15.41 mL/m<sup>3</sup>; 在焚烧生活垃圾时 H<sub>2</sub>S、NH<sub>3</sub>、SO<sub>x</sub>、HCL 等污染物均未检出, NO<sub>x</sub> 与煤一样, [CO] 的浓度折合为氧浓度为 6% 时为 1450 mL/m<sup>3</sup>。

利用浓相床区的两根换热管, 进行了埋管换热系数的测定, 流动床区和移动床区埋管的对流换热系数分别为  $h_f = 700 \text{ W}/(\text{m}^2)$  和  $h_m = 380 \text{ W}/(\text{m}^2)$ 。图 9 给出了文献 [6] 的实验结果, 图中横坐标为流化倍率(流化速度与初始流化速度之比),

纵坐标为对流换热系数, 数据点分别代表床料和换热管内介质温差为 140 和 160 时的埋管对流换热系数, 图中的圆点为本文设计的燃烧系统运行时的对流换热数据。在较低的流化倍率情况下, 实验结果和文献基本一致。

由于空气预热器受实验室空间限制, 换热能力不足, 仅能将空气预热到 80, 浓相床区和自由空间温度稍低, 若能将空气预热到 200

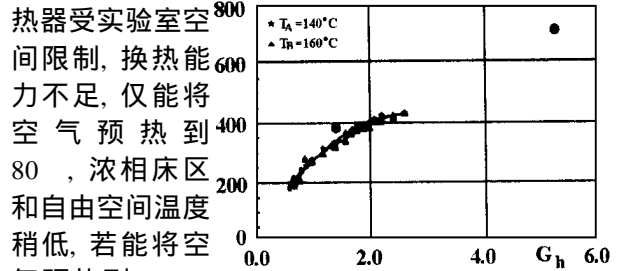


图 9 换热系数比较

左右, 内旋流流化床不仅可以较好地处理城市生活垃圾, 而且还有处理品质更为低下的垃圾的可能性。

## 6 结论

在没有辅助燃料的情况下, 成功的进行了生活垃圾焚烧试验, 并且污染气体的排放量很低。内旋流流化床具有好的温度分布状况, 保证了完全燃烧的要求, 减少了部分污染物的生成, 提供了高温环境用于二噁英和呋喃的分解, 实现了不燃物的及时分离和排出。因此, 内旋流流化床燃烧系统是一种适合于焚烧生活垃圾及其它劣质燃料的炉型。

换热系数与文献所给结果基本一致, 可以利用文献较细致的结果进行内旋流流化床燃烧系统换热部分的设计计算。

## 参考文献

- [1] 廉 仲. 我国城市废弃物的现状、处理情况及对策. 废弃物处理与管理——全国废弃物处理与管理学术讨论会论文集, 中国科学技术出版社, 1990 年 11 月, 1 ~ 4.
- [2] Nagato S, Kamisada M, Kosugiet S, et al Characteristics of the internally circulating fluidized bed boiler. *Proceeding of Fourth China-Japan Fluidization Science and Technology Symposium*, 1991 年 9 月, 56 ~ 65.
- [3] Ohshita T, Higo T, Kosugi S, et al Formation of Internally Circulating Flow and Control of Overall Heat-Transfer Coefficient in a Fluidized-Bed Boiler. *Heat Transfer Japanese Research*, 1994, (23, 4) 349 ~ 363
- [4] 田文栋. 内旋流流化床特种燃料锅炉实验研究. 中国科学院力学研究所硕士学位论文, 1997, 9 ~ 13, 30 ~ 38.
- [5] 盛宏至, 黎军, 魏小林等. 燃烧高水分煤低热值燃料的内旋流流化床燃烧技术研究. *燃烧科学与技术*, 1997, 3(3) 309 ~ 315.
- [6] 郝金华. 非均匀布风内旋流流化床埋管传热特性的实验研究. 中国科学院力学研究所硕士学位论文, 1996, 38 ~ 43.

(渠 源 编 辑)

the quantitative effect on machine unit economic performance of exhaust steam pressure variation by employing the theory of equivalent enthalpy drop. Calculation results of specific examples show that the method features simplicity of use as well as high precision and practicality. Its calculation error is lower than that of other currently available engineering methods **Key words:** exhaust pressure, quantitative method, economy, equivalent enthalpy drop

PFBC-CC 燃气轮机系统动态特性实时混合仿真研究= **A Real-time Hybrid Simulation Study of the Dynamic Characteristics of a PFBC-CC Gas Turbine System** [刊, 中]/Xiang Wenguo, Cai Ningsheng (Thermal Engineering Institute under the Southeastern University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power - 1999, 14(5). - 356~ 358

Described in this paper is a real-time hybrid simulation and control study system based on two digital computers and an analog computer. Discussed are the theory of system realization and the process structure of its interface software. A simulation study has been conducted of the gas turbine system dynamic characteristics of a coal-fired supercharged fluidized bed gas-steam turbine combined cycle. The results of the study indicate that the system under discussion enjoys ease of use and high real-time quality. **Key words:** real time, hybrid simulation, control, PFBC

热阻和回热损失对埃里克森循环性能的影响= **The Effect of Thermal Resistance and Regeneration Loss on Ericsson Cycle Performance** [刊, 中]/Lin Bihong, et al (Physics Department of Quanzhou Normal Institute) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power - 1999, 14(5). - 359~ 362

An Ericsson cycle model under the influence of thermal resistance and regeneration loss is established and a basic optimization relation of the cycle deduced, using output power as a target function. Characteristic curves of the cycle are thus obtained. A fairly detailed discussion is conducted of a series of special operating conditions with some new conclusions being obtained. **Key words:** Ericsson cycle, thermal resistance, regeneration loss, basic optimization relation, characteristics curves

内旋流流化床燃烧系统设计研究= **Design and Study of an Internal Circulating Fluidized Bed Combustion System** [刊, 中]/Tian Wendong, Wei Xiaolin, Sheng Hongzhi (Institute of Mechanics under the Chinese Academy of Sciences) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power - 1999, 14(5). - 363~ 366

Based on the calorific value of municipal solid waste, its physical composition analysis and the cold-state test results of fluidized bed air distribution the authors have conducted the study of an internal circulating fluidized bed (ICFB) combustion system. A hot-state test plant for the ICFB combustion system was designed and a combustion test of municipal solid waste successfully carried out. **Key words:** fluidized bed, internal circulating fluidized bed, combustion, municipal solid waste, heat transfer

结构参数对煤粉浓缩能力影响的试验研究= **Experimental Study of the Effect of Structural Parameters on the Concentrating Ability of Pulverized-coal Concentrators** [刊, 中]/Shi Liming, et al (Qinghua University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power - 1999, 14(5). - 367~ 368, 402

The concentrating ability of two types (i.e., brent and shutter) of pulverized-coal concentrators was investigated and tested. The test results show that it is feasible to shorten the length of guide plate in a primary air pipe duct. To achieve a bias concentration ratio satisfying the requirements of stable combustion under a proper bias air ratio, the authors have specified the variation range of the following: 1. the guide plate height for the brent and shutter; 2. the distance between the concentrator and the guide plate. **Key words:** pulverized-coal concentrator, brent, shutter, structural parameters

标准椭圆形封头螺纹烟管DZL系列锅炉设计= **Design of Threaded Flue Tube DZL Series Boilers with Standard Elliptical Heads** [刊, 中]/Chen Ming, et al (Harbin No. 703 Research Institute) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power - 1999, 14(5). - 369~ 370

Given in this paper are the basic construction form and conspicuous advantages of threaded flue tube DZL