

方形分离器结构优化试验研究

王玉召¹, 杨海瑞², 岳光溪²

(1. 承德石油高等专科学校热能工程系, 河北承德 067000; 2. 清华大学热能工程系, 北京 100084)

摘要:在冷态试验台上对特征尺寸 $D=300\text{ mm}$ 的入口带加速段的方形分离器进行结构优化研究。结果表明:分离效率随着芯筒直径(d)、芯筒插入深度(s)的增大均呈先增大后减小的趋势;入口高宽比(a/b)与直段高度(h)对分离效率的影响存在交互作用;随着 a/b 的增大,分离效率先增大后减小;不同入口高宽比时,分离效率随直段高度的变化趋势不同,当 $a/b > 5.92$ 时,随着直段高度的增大,分离效率先减小后增大,在 $h/D=2.3$ 时最低;当 $a/b < 5.92$ 时,分离效率随着直段高度的增大而减小;分离器阻力随着入口高宽比的增大而增大,随着直段高度的增大而减小。4 个参数的最优值分别为: $d=0.4D$ 、 $s=0.6D$ 、 $a/b=8$ 和 $h=1.8D$, 此时对应的分离器阻力为 1.22 kPa 。

关键词:循环流化床锅炉;方形分离器;结构优化;试验研究

中图分类号:TK223.4 文献标识码:A

引言

循环流化床(CFB)是一种高效低污染的燃烧技术,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,20 多年来得到迅速的发展^[1]。分离器作为 CFB 锅炉物料循环的核心部件,其性能直接影响 CFB 锅炉的燃烧及传热,其结构决定着 CFB 锅炉的整体布置。在 CFB 锅炉的发展过程中,分离器型式也在发生着不断的变化。早期一些锅炉公司开发的 CFB 锅炉,为了实现锅炉的紧凑布置,多采用体积较小的二维分离器,如槽型分离器、百叶窗分离器、平面流分离器等。长期的运行实践发现,采用二维分离器的 CFB 锅炉均在性能上存在一些问题。旋风筒分离器由于具有良好的分离性能能够很好满足 CFB 锅炉运行的需要,因此国际上以圆形绝热旋风筒为分离装置的 CFB 锅炉发展很快,但也存在着体积庞大、热惯性大的缺点。水(汽)冷旋风分离器的出现克服了高温绝热旋风筒存在的问题,但也带

来了制造成本的加大削弱了其商业竞争力。无论是绝热旋风筒还是水(汽)冷旋风分离器,均不能实现锅炉的紧凑布置^[2-3]。

20 世纪 90 年代出现的方形分离器能够很好地解决圆形旋风分离器存在的问题,不仅降低了加工制造成本,而且能够实现锅炉的紧凑布置^[4]。方形分离器结构上的优势,引起人们广泛的关注,如何进一步提高方形分离器的分离效率,以改善主循环回路的性能,进而提高燃烧效率,是一个不断进行研究的内容^[5-8]。商业应用实践表明,方形分离器的分离性能能够满足 CFB 锅炉物料循环的需要^[10-12]。但由于研究的不足,其结构还有待于进一步改进和优化,以进一步提高其性能。本文在冷态试验台上,对入口带加速段的方形分离器进行结构优化研究^[9]。

1 试验

分离效率和阻力是分离器两个重要性能指标。一方面分离器内的流场特性、颗粒浓度等因素对分离器的效率和阻力有着至关重要的影响;另一方面,流场特性本身又取决于分离器几何结构设计和运行风速等因素。运行工况相同时,分离器的性能仅取决于分离器的几何设计。本文在相同的运行工况下,采用连续加料一次通过的方法测试不同结构参数的方形分离器的分离效率及阻力,研究结构参数对方形分离器性能的影响,进而对其结构参数进行优化。

分离效率按下式计算:

$$\eta = G_c / G_{in} \quad (1)$$

式中: G_c 、 G_{in} —收集物料和入口物料的重量。

通过测量分离器进、出口静压差后,计算得出分离器阻力,计算公式如下:

$$\Delta p_r = \Delta p_s + \frac{\rho_g}{2} v_{in}^2 \left[1 - \left(\frac{4ab}{\pi d_c^2} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中: ΔP_s —分离器进、出口静压差; ρ_g —空气密度; v_{in} —分离器入口速度; a 、 b —分离器入口高度和宽度; d_e —芯筒内径。

1.1 试验装置

试验装置如图 1 所示, 由送、引风机、提升段及试验段组成。整个系统为一开口系统, 风量由孔板流量计测量, U 型管 B 监测提升段内的静压, 通过调节送、引风管道上的风阀使风量达到设定的运行风量, 同时使提升段内监测点的静压达到设定值。固体颗粒由料斗经提升段下部的进料口进入系统。试验时, 将事先称好重量的物料加入料斗, 调整风量、风压, 待稳定后打开进料口的阀门, 使物料连续的进入提升段, 经分离器分离。试验完毕打开取料口, 取出分离下来的固体物料并称重, 进而计算出分离器的分离效率。用 U 型管 A 测量分离的静压差。

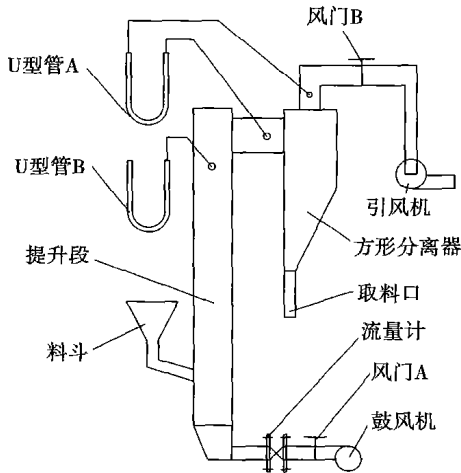


图 1 试验装置

1.2 试验段结构参数

试验段为入口带加速段的方形分离器, 有 8 个主要结构参数(见图 2), 分别是: 入口高度(a)和宽度(b)、特征尺寸(D)、直段高度(h)、总高度(H)、芯筒直径(d)、芯筒插入深度(s)和排灰口宽度(B)。

1.3 试验物料

测试分离器效率时, 固体物料采用空心玻璃珠, 密度为 $1\ 200\ \text{kg}/\text{m}^3$, 最大粒径为 $180\ \mu\text{m}$, 平均粒径为 $32\ \mu\text{m}$, 其粒径分布见图 3。该物料粒径分布主要集中在 $15\sim 40\ \mu\text{m}$, 是分离效率比较敏感的粒径段。与实际工作过程中的物料相比, 试验采用的物料粒径分布范围窄, 这会使测得的总分离效率与实际工作过程存在差异。但由于本文旨在通过对比不同分离器的分离效率进而对分离器结构参数进行优化,

因此只要各个分离器的分离效率均在相同的物料下测得, 颗粒粒径的分布范围不会影响试验的目的。

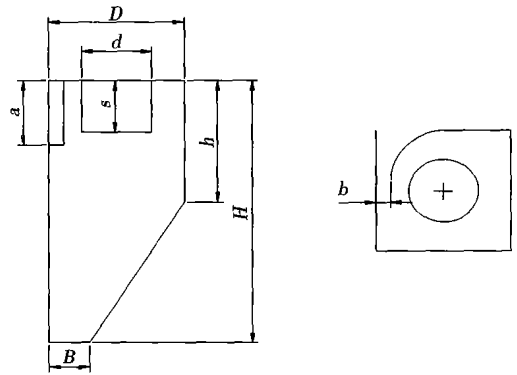


图 2 入口带加速段的方形分离器结构参数

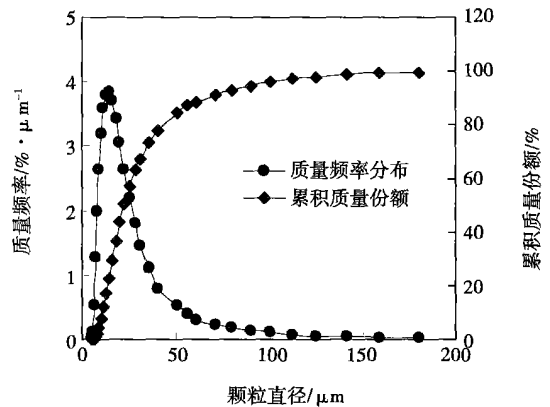


图 3 物料粒径分布

2 试验结果分析

拟对 4 个主要结构参数入口高宽比(a/b)、直段高度(h)、芯筒直径(d)、芯筒插入深度(s)进行优化, 各参数取值见表 1。这是一个 4 参数 3 水平的试验, 在事先不知道参数间是否存在交互作用的情况下, 进行全面试验需要 81 组试验。为了提高试验效率, 减少试验次数, 首先进行正交试验。考虑参数间一级交互作用, 正交试验需要进行 27 组试验。

表 1 结构参数取值

| a/b | s/mm | d/mm | h/mm | D/mm |
|-------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 10.56 | 150 | 84 | 840 | |
| 5.92 | 180 | 120 | 690 | 300 |
| 3.8 | 210 | 150 | 540 | |

按正交试验要求设计了 27 个不同结构尺寸的分离器。每个分离器都具有相同的特征尺寸 D 、总

高度 H 和排灰口宽度 B 。为了避免入口尺寸变化时分离器入口流速以及进入分离器的风量发生变化, 每个分离器设计都具有相同的入口面积, 以此来消除运行条件的变化引起分离器性能的变化。

在图 1 所示试验装置上分别测试了 27 个分离器的分离效率, 并进行正交分析, 得到各参数及参数间交互作用对分离效率的效应, 如图 4~图 11 所示。

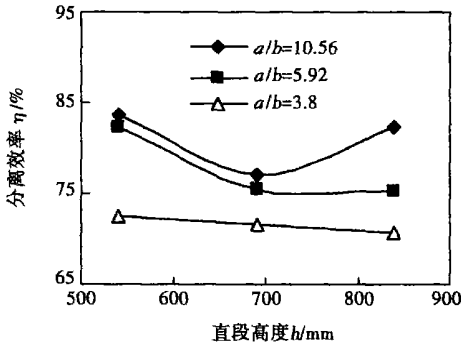


图 4 直段高度与入口高宽比交互作用效应

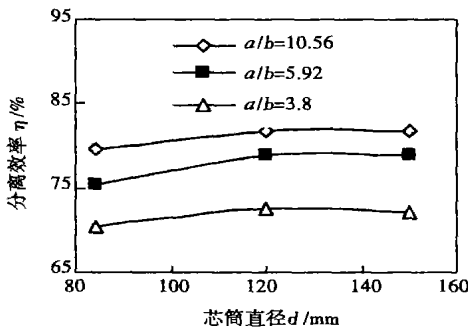


图 5 芯筒直径与入口高宽比交互作用效应

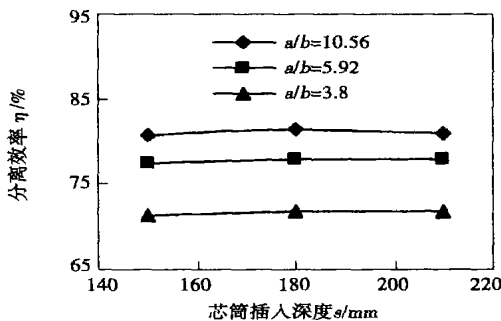


图 6 芯筒插入深度与入口高宽比交互作用效应

为:9.4%、7.8%、2.4%和 0.5%。极差的大小反映了各参数对分离效率的影响程度。图 4~图 9 是参数间两两交互作用对分离效率的效应, 图中曲线的平行程度反映参数间的交互作用情况。从图 4 可以看出入口高宽比与直段高度之间存在较强的交互作用, 因此正交试验结果不能得到入口高宽比与直段高度对分离效率影响的真实规律, 但极差的大小表明这两个参数对分离效率影响很大。图 5~图 11 中曲线的平行程度均较好, 说明其它参数之间交互作用很弱, 可以忽略。因此, 图 10 芯筒对分离效率的效应反映了芯筒直径对分离效率的影响规律, 图 11 芯筒插入深度对分离效率的效应反映了芯筒插入深度对分离效率的影响规律。

从图 10 看出, 分离效率随着芯筒直径的增大先增大后减小, 在 $d=120\text{ mm}$ (即 $d=0.4D$) 最高, 由此得到芯筒直径的最优值为 $d=0.4D$ 。从图 11 看出, 分离效率随芯筒插入深度逐渐增大, 但深度在 180 mm 后, 效率增加幅度相对变缓, 可见, 芯筒插入深度的最优值为 $s=180\text{ mm}$, 即 $s=0.6D$ 。同时也发现芯筒插入深度对分离效率的影响很小。

由于入口高宽比与直段高度之间存在交互作用, 正交试验不能直接得到两参数对分离效率的影响规律及它们的优化值。为了对两参数进行优化, 需要重新安排试验。考虑到入口高宽比对分离效率影响最大, 为了使优化值更加精确, 重新试验时其取值由原来的 3 个增加到 5 个, 分别为 10.56、7.88、5.92、4.61 和 3.8。直段高度取值与表 1 中相同, 芯筒直径与芯筒插入深度分别取前面得到的最优值。

按照上面的参数取值重新设计了 15 个分离器, 这 15 个分离器除入口高宽比及直段高度不同外, 其它参数包括入口面积均取相同的值。在相同的运行工况下, 分别测试了它们的分离效率及阻力, 测试结果见图 12~图 14。

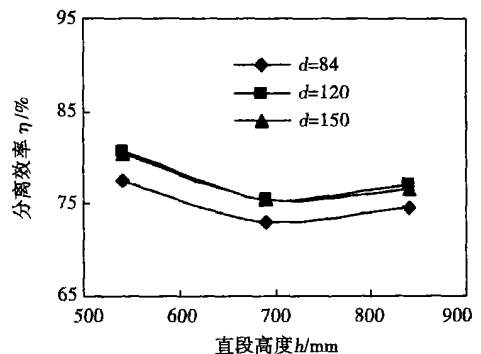


图 7 直段高度与芯筒直径交互作用效应

正交试验结果得出, 入口高宽比、直段高度、芯筒直径、芯筒插入深度对分离效率影响的极差分别

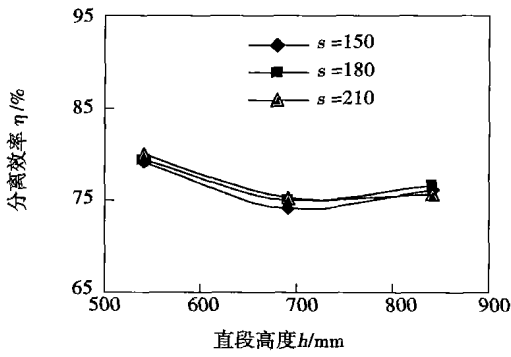


图 8 直段高度与芯筒插入深度交互作用效应

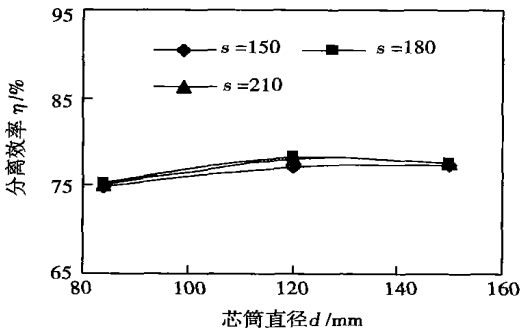


图 9 芯筒直径与芯筒插入深度交互作用效应

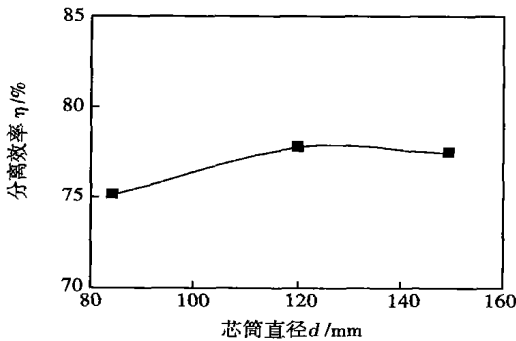


图 10 芯筒直径效应

从图 14 看出, 随着入口高宽比的增大, 分离效率先增大后减小; 不同的直段高度, 分离效率对入口高宽比的敏感程度不同, 极值点出现的位置也不同。不同入口高宽比时, 分离效率随直段高度的变化趋势不同; 当入口高宽比大于 5.92 时, 随着筒体高度的增大, 分离效率先减小后增大, 在 $h/D=2.3$ 附近最低; 当入口高宽比小于 5.92 时, 分离效率随着直段高度的增大而减小。分离器阻力随着入口高宽比的增大而增大, 随着直段高度的增大而减小。

由于入口高宽比与直段高度之间存在交互作用, 两参数的优化需同时考虑。从图 13 看出直段高度 $h=540$ mm 时分离效率最高, 在图 12 中对应于 $h=540$ mm 曲线的效率最高值对应的入口高宽比为 $a/b=8$ 因此得到二者的最优值为: $a/b=8$ $h=540$ mm (即 $h=1.8D$), 对应的分离器阻力为 1.22 kPa。

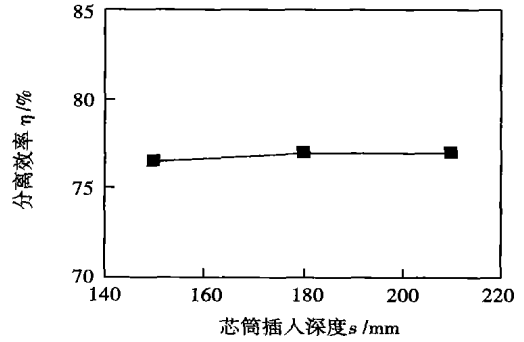


图 11 芯筒插入深度效应

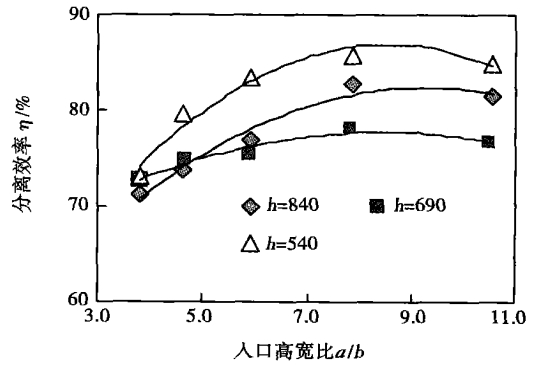


图 12 入口高宽比与分离效率的关系

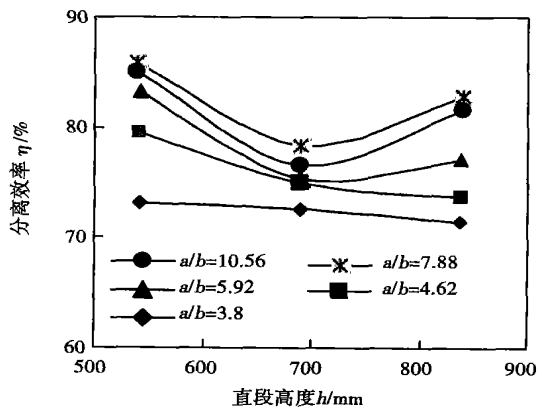


图 13 直段高度与分离效率的关系

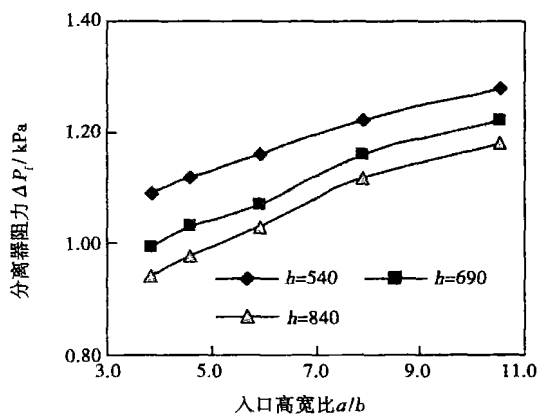


图 14 入口高宽比、直段高度与分离器阻力的关系

3 结 论

(1) 在对多参数进行优化时, 采用正交试验方法, 可以提高试验效率, 减少试验次数;

(2) 不同的结构参数对方形分离器的性能影响程度不同, 入口高宽比、直段高度对方形分离器的分离性能影响很大, 芯筒直径、芯筒插入深度对分离性能影响较小;

(3) 分离器效率随芯筒直径、芯筒插入深度的变化均呈先增大后减小的趋势。入口高宽比与直段高度对分离效率的影响存在交互作用。随着入口高宽比的增大, 分离效率先增大后减小; 不同入口高宽比时, 分离效率随直段高度的变化趋势不同, 当入口高宽比大于 5.92 时, 随着直段高度的增大, 分离效率先减小后增大, 在 $h=2.3D$ 时最低; 当入口高宽比小于 5.92 时, 分离效率随着直段高度的增大而减小。

(4) 分离器阻力随着入口高宽比的增大而增大, 随着直段高度的增大而减小。

(5) 入口高宽比、直段高度、芯筒直径和芯筒插

入深度的最优值分别为: $a/b=8$ 、 $h=1.8D$ 、 $d=0.4D$ 和 $s=0.6D$, 对应的分离器阻力为 1.22 kPa。

参 考 文 献:

- [1] FENG JUNKAI, YUE GUANGXI. New achievements of development of CFBC boilers in China // In: Chen K, Santos G, Tong T W. Proceedings of the International Conference on Energy and Environment [C]. Beijing: China Machine Press, 1998. 505-510.
- [2] 张建胜, 吕俊复, 岳光溪, 等. 循环流化床锅炉的发展现状及前景 [J]. 锅炉制造, 1999(3): 4-8.
- [3] 孙献斌. 循环流化床锅炉大型化技术问题初探 [J]. 电站系统工程, 1995, 11(3): 1-5.
- [4] GAMBLE R, HYPPANEN T, KAURANEN T. Pyroflow, 1993. Compact a second generation CFB boiler by Ahlstrom Pyroflow // Proceeding of the 12th International Conference on Fluidized Bed Combustion [C]. USA: San Diego California ASME, 1993. 751-760.
- [5] 吕俊复, 白玉刚, 岳光溪, 等. 方形分离器入口加速段宽度 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2000, 4: 67-70.
- [6] YUE GUANGXI, LI YAN, ZHAO XIAOXING, et al. The first pilot compact CFB boiler with water cooled separator in China // Kay J H. Proceedings of the 14th International Conference on Fluidized Bed Combustion [C]. Canada: Air Products and Chemical, INC, 1997. 497-506.
- [7] YOU CHANGFU, JENS DOERK, YUE GUANGXI et al. Investigation on 3-D gas flow in a square shaped Separator // Proceedings of the 3rd International symposium on Coal Combustion [C]. Beijing: Science press, 1995.
- [8] BAI YUGANG, LU JUNFU, LIU QING, et al. Investigation on velocity of square cyclone with curved inlet [J]. Journal of Basic science and Engineering, 1999, 7(4): 288-292.
- [9] 岳光溪. 带加速段的水冷方形旋风分离器 [P]. 中国专利: ZL 93235842, 1993.
- [10] 吕俊复, 岳光溪, 刘青, 等. 75 t/h 异型水冷分离循环流化床锅炉的设计运行 [J]. 中国电力, 1999, 32(4): 61-64.
- [11] 吕俊复, 岳光溪, 刘青, 等. 130 t/h 水冷方形分离循环流化床锅炉的运行经验 [J]. 中国电力, 2001, 34(10): 19-23.
- [12] 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.

(编辑 何静芳)

升级改进

升级改进的 GT26 燃气轮机

据《Gas Turbine World》2006 年 5-6 月号报道, 在未增加其燃烧温度的情况下, Alstom 的 GT26 燃气轮机设计的升级改进已增加了简单循环输出功率和联合循环性能。主要通过增加压气机的质量流量使装置的输出功率增加 7.3 MW, 达到 288 MW, 这时燃烧温度没有任何变化 (1 251 °C 级)。

基于 GT26 的单轴联合循环发电装置的净输出功率从 410 MW 增加到 424 MW。以天然气作为燃料, 多轴 2+1 联合循环装置的额定净输出功率为 858 MW, 热效率为 59%。

(吉桂明 供稿)

tion, coal gasification, CO₂ separation, ASPEN PLUS

煤气化半焦增压流化床燃烧特性中试试验研究 = **An Experimental Study of the Combustion Characteristics of Coal Gasification Semi-coke in a Pilot-scale Pressurized Fluidized Bed** [刊, 汉] / XIONG Yuan-quan, JIN Bao-sheng, XIAO Rui (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology, Thermal Energy Engineering Research Institute under the Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096), ZHENG Shou-zhong (China State Water Conservancy and Hydropower Materials Co. Ltd., Beijing, China, Post Code: 100053) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(2). — 154 ~ 157

On the pilot-scale test run device of a pressurized fluidized bed with a thermal input of 1 MW, an experimental study of pressurized combustion has been conducted of the semi-coke obtained from the partial gasification of coal. The test results show that various sub-systems in the pilot-test run device for the coal gasification semi-coke are rational in design and the whole system can ensure a harmonious and reliable operation. Under the condition featuring a pressure of 0.5 MPa in the combustion chamber, a combustion temperature of 900 °C, excess air ratio of 1.2 to 1.3 and fluidized speed of 1.1 to 1.2 m/s, the combustion efficiency of the semi-coke can exceed 99% with the carbon content of fly ash being below 2%. In addition, it has been also found that properly raising the bed temperature for semi-coke combustion and employing a suitable excess air ratio will contribute to a complete and steady combustion of the semi-coke while the circulation of the fly ash can be very beneficial to enhancing semi-coke combustion efficiency. **Key words:** semi-coke, combustion, pressurized fluidized bed, partial coal gasification, bed temperature

方形分离器结构优化试验研究 = **An Experimental Study of the Structural Optimization of Square Shaped Cyclone Separators** [刊, 汉] / WANG Yu-zhao (Thermal Energy Engineering Department, Chengde Petroleum School, Chengde, China, Post Code: 067000), YANG Hai-rui, YUE Guang-xi (Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(2). — 158 ~ 162

On a cold-state test rig, a structural optimization study has been conducted of a square shaped cyclone separator having an inlet of characteristic dimension $D=300$ mm with an acceleration section. The study results show that with an increase in core tube diameter (d) and core tube inserting depth (s), the separation efficiency tends to go up at the beginning followed by a decrease. The inlet height-width ratio (a/b) and straight section height (h) have an interactive impact on the separation efficiency. With an increase in inlet height-width ratio a/b , the separation efficiency goes up first and then decrease. When the inlet height-width ratio undergoes a change, the separation efficiency tends to change differently with a change in straight section height. When a/b is above 5.92, the separation efficiency will go down first with an increase in straight section height and then rise, attaining a minimum value at $h/D=2.3$. When a/b is below 5.92, the above efficiency will decrease with an increase in straight section height. The resistance of the cyclone separator will increase with an increase in the inlet height-width ratio and decrease with an increase in straight section height. The optimized values of the four parameters can be given as follows respectively: $d=0.4D$, $s=0.6D$, $a/b=8$ and $h=1.8D$. In such a case, the corresponding resistance of the cyclone separator will be 1.22 kPa. **Key words:** circulating fluidized bed boiler, square shaped cyclone separator, structural optimization, experimental study

锅炉“内爆”的动态模拟和预测 = **Dynamic Simulation and Forecast of “Boiler Implosion”** [刊, 汉] / ZHAO Zhen-zhou, JIN Bao-sheng, XIONG Yuan-quan (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology, Thermal Energy Engineering Research Institute under the Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096), SUN Ke-qin (Jiangsu Suyuan Environmental Protection Project Stock Co. Ltd., Nanjing, China, Post Code: 210024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(2). — 163 ~ 167

The pressure fluctuations caused by a boiler implosion can affect the whole boiler flue gas and air system. Up to now, no relevant literature concerning three-dimensional numerical simulation of boiler flue gas and air systems has been found in China. To study the boiler implosion, a dynamic mathematical model has been established. Based on a CFD (computa-