

## 运行参数对粉煤流化床(PC-FB)燃烧效率的影响

陈鸿伟<sup>1</sup>, 金保升<sup>2</sup>, 徐益谦<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 动力系, 河北 保定 071003; 2. 东南大学, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 在一座 0.3 MW 热输入的 PC-FBC 试验台上进行了试验研究, 获得了不同操作参数下 PC-FB 燃烧效率的试验数据, 详细讨论了这些参数对 PC-FB 燃烧效率的影响规律。研究表明, 粉煤流化床的燃烧效率最高达 98%~99%, 可与煤粉炉相媲美。本试验研究亦首次提出, 只要燃烧温度、颗粒停留时间、火焰流度(3T)及炉内氧浓度、颗粒浓度(2C)合理匹配, 就能够实现煤粉的低温高效燃烧。

**关键词:** 流化床; 粉煤; 燃烧效率; 运行参数

中图分类号: TK229.6<sup>+</sup>6 文献标识码: A

## 1 引言

燃烧效率从宏观上反应一种燃烧方式或技术的综合性能, 是其成功与否、先进与否的主要标志。在粉煤流化床<sup>[1-2]</sup>中, 粉煤在穿过密相燃烧区的时间里完成加热, 释放大部分挥发分和炭的部分燃烧。部分燃烧后的煤粉同被夹带出床层的细颗粒一起随气流进入 PC-FB 的悬浮空间燃烧区(FCZ), 在 FCZ 下部的两层强旋四角切圆二次风射流的作用下形成强旋涡燃烧, 较大尺寸的颗粒被分离下来又落回床层形成炉内物料循环, 而细颗粒(包括煤粉)则进入悬浮空间 FCZ 的中、上部在上两层中速四角切圆二次风射流作用下完成旋流燃尽过程, 达到较高的燃烧效率。

本文在此利用研究不同操作参数(二次风射流速度、二次风率、二次风入射角度、二次风投入位置、床内温度、流化速度和烟气氧浓度)下 PC-FB 燃烧效率的试验数据, 详细讨论了这些参数对 PC-FB 燃烧效率的影响规律, 试验实现了煤粉的低温高效燃烧。

## 2 试验结果与讨论

2.1 二次风率  $R_2\%$  对  $\eta_r(\%)$  的影响

粉煤流化床的床层高度、床层温度相对恒定的

条件下, 提高二次风率  $R_2\%$  对于密相燃烧区内的煤粉燃烧, 一是流化速度下降, 煤粉颗粒在床内的停留时间增长; 二是流化床燃烧区内的烟气氧浓度降低。其结果便造成煤粉颗粒更多地转化为易于燃烧的气体可燃物。二次风率的增大还从整体上延长了煤粉颗粒在 PC-FB 内的停留时间, 增强了悬浮空间的大尺度扰动, 加速了其中各个烟气组分和氧的对流、扩散及其与煤粉颗粒间的传质过程, 从而改善气、固可燃物的燃烧环境, 促进其进一步燃尽。由此分析得出, 二次风率  $R_2\%$  的增大, 有利于 PC-FB 燃烧效率的提高。如图 1 所示, 当  $R_2\%$  从 25% 增至 70% 时, PC-FB 的燃烧效率  $\eta_r\%$  则从 92.5% 提高到 98.5%。

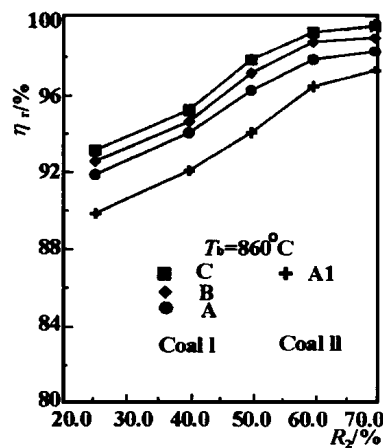


图 1 PC-FBC 燃烧效率  $\eta_r\%$  与二次风率  $R_2\%$  的关系

2.2 二次风射流速度、喷射角度对  $\eta_r\%$  的影响

二次风射流速度、喷射角度是影响四角切圆二次风作用效果较为关键的因素, 给定 PC-FB 的容积热负荷  $q_v$ 、总风量、二次风率  $R_2\%$  及各层二次风的分配比例, 各层二次

风射流速度 ( $U_{21}$  m/s) 仅与其喷口尺寸有关。喷口尺寸越小, 其射流速度越高。高的二次风射流速度 ( $U_{21}$  m/s) 使得二次风所提供的氧迅速地射入主流的中心部分, 及早地与煤灰、气体可燃物发生全面混合, 增大旋涡强度, 增强燃烧强度, 从而提高燃烧效率。图 1 中, 曲线 A、B 分别是第一层二次风喷嘴为  $7\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  和  $7\text{ mm} \times 7\text{ mm}$  时, PC-FB 燃烧效率同二次风率  $R_2\%$  的关系曲线。明显看出, 在同一个  $R_2\%$

下, 曲线 B 所对应的射流速度高于曲线 A, 相应的燃烧效率也比曲线 A 高。

二次风射流喷射角度  $\beta$  对粉煤流化床  $\eta_r\%$  的影响, 如图 1 中曲线 C 和 B 所示, 曲线 C、B 所对应的第一层二次风射流的喷射角度  $\beta$  分别为  $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 。由此看出, 该  $\beta$  减小, PCF-FB 燃烧效率反而提高。其原因可能是,  $\beta$  越小, 二次风射流速度的切向分速度越大, 加强了气流的旋转, 从而延长煤粉颗粒在炉内的停留时间。

### 2.3 二次风投入位置与 $\eta_r\%$ 的关系

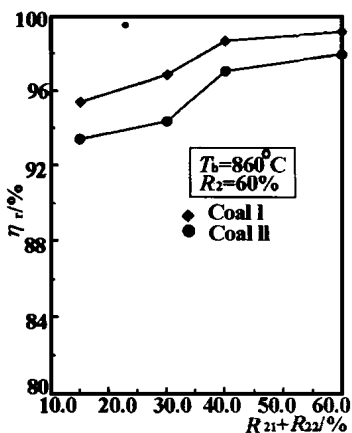


图 2 PC-FBC 下层二次风量  $R_{21} + R_{22}\%$  对其  $\eta_r\%$  的影响

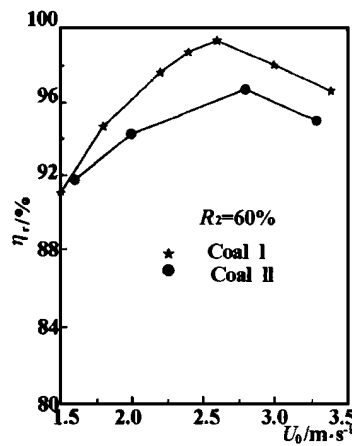


图 3 PC-FBC 流化速度  $U_0$ (m/s) 与其  $\eta_r\%$  的关系

当  $R_{21}$  和  $R_{22}$  同时分别从  $5\%$ 、 $10\%$  增加至  $20\%$ 、 $40\%$  时, PC-FB 的燃烧效率  $\eta_r$  则由  $94.9\%$  升高至  $99.2\%$ 。

要组织好煤粉在 PC-FB 中的燃烧, 不仅需要合理的高煤粉浓度, 而且需要与之相适应的烟气温度和气固混合条件。二次风投入位置与此密切相关。对于一定的二次风率  $R_2\%$ 、床层温度  $T_b$ 、悬浮空间温度水平和 PC-FB 炉膛出口过量空气系数, 二次风投入位置的高低直接影响从密相燃烧区出来的气、固可燃物与二次风空气的混合时间以及它们的停留时间。当第一、二层二次风的风量增大时, 一方面为部分燃烧的煤粉和气体可燃物即早地补充了燃烧所需的氧; 另一方面增大了此区段的旋涡强度, 延长了可燃物在此区段的停留时间, 使气、固可燃物进一步燃尽。如图 2 所示,

### 2.4 流化速度 $U_0$ 对 $\eta_r\%$ 的影响

对于普通 AFBC 来讲, 尽管流化速度升高能改善床内的流化质量, 但细颗粒在床内的停留时间明显缩短, 煤在其中的燃尽度迅速下降。粉煤流化床 (PC-FB) 的情况则有所不同。

煤粉在 PC-FB 流化床燃烧区中的燃烧过程, 反应动力控制占主要地位, 但进入该区的一次风 (流化风) 量仅为煤粉完全燃烧所需风量的  $50\%$  左右, 所以, 这里的煤粉燃烧过程同时在一定程度上受到氧扩散的作用。在二次风率  $R_2\%$ 、PC-FB 出口氧浓度基本不变的前提下, 提高  $U_0$ (m/s) 实质是增大粉煤流化床的容积热强度  $q_v$ 。当  $U_0$ (m/s) 较低时,  $q_v$  较小, 粉煤流化床整个炉内的温度水平较低, 因而其燃烧效率  $\eta_r$  也较低。若在一定的范围内提高  $U_0$ (m/s), 即适当地增大  $q_v$ , 虽灰煤粉在 PC-FB 内的停留时间有一定的缩短, 但是, 床内流化质量的改善、床温  $T_b$ ( $^\circ\text{C}$ ) 的升高、悬浮空间旋涡强度的增强及其烟温水平的提高, 仍使煤粉得以充分燃尽。在一定的范围内  $\eta_r$  随  $U_0$ (m/s) 的增大而有所提高。然而, 当  $U_0$  超过某数值再进一步提高时, PC-FB 的燃烧效率就会下降。如图 3 所示, 当  $U_0$ (m/s) 从  $1.5$  m/s 增至  $2.6$  m/s 时, PC-FB 燃烧效率略有提高; 当  $U_0$ (m/s) 再继续增大时, 其燃烧效率  $\eta_r\%$  则随之下降。

### 2.5 PC-FB 炉膛出口氧浓度 $O_2''$ (%) 与 $\eta_r\%$ 的关系

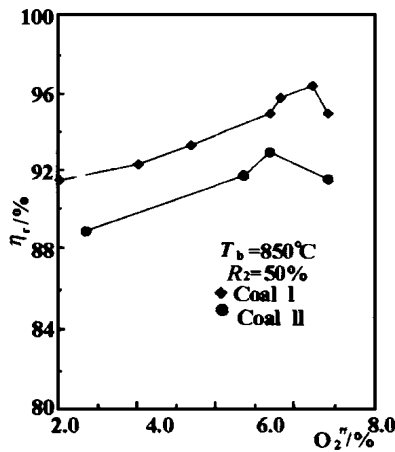


图 4 炉膛出口氧浓度  $O_2''$ (%) 对其  $\eta_r$ (%) 的影响

同其它燃烧方式一样, 烟气中保持适当的氧浓度, 有助于 PC-FB 炉内可燃气体 (CO 等) 和固定碳的燃尽。PC-FB 炉膛出口烟气氧浓度  $O_2''$ (%) 是其炉内氧浓度水平的标志。图 4 所示, 当烟气氧浓度  $O_2''$ (%) 在某个适当的范围内增加时, 粉煤流化床 (PC-FB) 的燃烧效率有所提高。但是, 当  $O_2''$  超过一定数值以后, 即过多的冷空气加入炉内, 尤其是在最上层的二次风喷嘴投入过多的风量时, 会造成炉内温度水平下降, 影

响气、固可燃物的燃尽, PC-FB 的燃烧效率则降低。

## 2.6 静止床高 $H_{mf}$ 与 $\eta_r\%$ 的关系

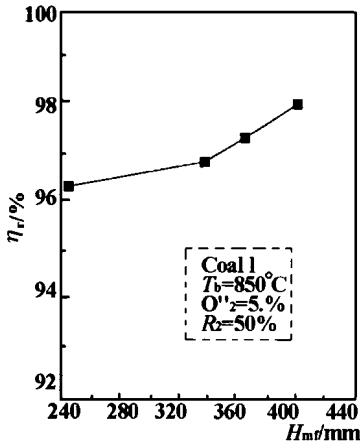


图 5 PC-FBC 静止床高  $H_{mf}$  与其  $\eta_r\%$  的关系

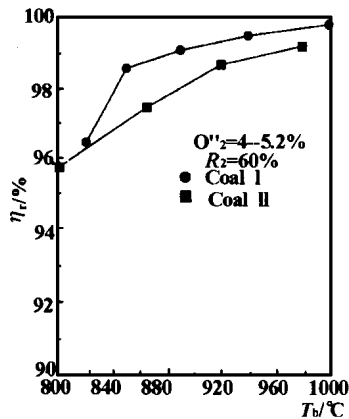


图 6 PC-FBC 床温  $T_b$  对其燃烧效率  $\eta_r\%$  的影响

为了研究 PC-FB 密相燃烧区静止床高对其燃烧效率的影响, 本文在控制床温  $T_b = 850^\circ\text{C}$ 、 $R_2 = 50\%$ 、炉膛出口氧浓度  $O_2'' = 5\%$  以及每小时给粉量为 50.5 公斤基本不变的情况下, 试验测定了几个不同静止床高  $H_{mf}$  所对应的 PC-FB 燃烧率  $\eta_r\%$ , 结果如图 5 所示。当  $H_{mf}$  从 254.3 mm 增加为 405.5 mm 时, PC-FB 的燃烧效率提高了 1.6%。由此说明, 因为煤粉颗粒良好的气流跟随特性, 所以, PC-FB 的静止床高的高低对其燃烧效率没有太大的影响。

## 2.7 床温 $T_b$ 与 $\eta_r\%$ 的关系

在粉煤流化床(PC-FB)中, 经底饲进入其密相燃烧区的煤粉平均粒径仅为  $40 \sim 50 \mu\text{m}$ , 加上此区内气-固传质过程十分强烈, 所以煤粉在密相燃烧区的燃烧过程以反应动力控制为主。提高 FBCZ 的烟气温度, 有助于加快煤粉的燃烧速度, 提高 PC-FB 的燃烧效率。图 6 是二次风率  $R_2$  为 60%, 其它参数不变的条件床温  $T_b$  对 PC-FB 燃烧效率的影响规律。当床温由  $820^\circ\text{C}$  升高至  $1000^\circ\text{C}$  时, 燃烧效率则从 96.5% 增至 99.8%。

但是, 床温的升高受到弱氧化气氛中煤灰的结渣特性、石灰石脱硫和  $\text{NO}_x$  排放的限制, 为此, PC-FB 的密相燃烧区的温度一般控制在  $830^\circ\text{C} \sim 860^\circ\text{C}$  范围内。

## 3 结论

(1) 燃烧烟煤时, 粉煤流化床 PC-FB 的燃烧效率  $\eta_r(\%)$  可达 99%, 与常规煤粉炉的最佳值一样。提高密相燃烧区内和悬浮空间的温度水平, 适当提高过量空气系数  $\alpha''$ 、增大二次风率  $R_2(\%)$  等都有利于  $\eta_r(\%)$  的提高。

(2) 总结煤粉在粉煤流化床中的燃烧特性, 最为突出的是: 煤粉在密相燃烧区发生稳定着火与部分燃烧所释放的热量, 足以维护 FBCZ 内  $800^\circ\text{C} \sim 1000^\circ\text{C}$  的床层温度; 在最高燃烧温度低于常规煤粉炉最高燃烧温度 ( $1400^\circ\text{C} \sim 1500^\circ\text{C}$ ) 近  $300^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$ 、容积热负荷  $q_v = 19.0 \text{ MJ}/\text{m}^3$  的条件下, PC-FBC 仍取得了与煤粉炉相当的燃烧效率。

(3) 虽然在粉煤流化床 PC-FB 中煤粉的燃烧温度水平低于煤粉炉, 但是, PC-FBC 中煤粉着火与初期燃烧的条件 (扰动强度、颗粒浓度、停留时间、热源的稳定性) 都优于煤粉炉; 再者, PC-FBC 悬浮空间数层二次风的切向射入, 强化了大尺度混合, 加大了气-固滑移速度, 延长了煤粉的停留时间, 有利于煤粉的燃尽。

(4) 从煤粉在 PC-FBC 的燃烧特性, 本文得以启示并提出, 只要燃烧温度、停留时间、扰动强度、颗粒浓度及氧浓度  $3T$ 、 $2C$  达到合理的匹配, 煤粉的低温、高效燃烧是能够实现的。

## 参考文献:

- [1] 陈鸿伟. 粉煤流化床燃烧(PC-FBC)的热态试验研究[J]. 动力工程, 1996 16(2): 31-39.
- [2] 陈鸿伟. 粉煤流化床燃烧(PC-FBC)热态试验研究及其气-固两相流动的数值模拟[D]. 南京: 东南大学, 1996.

(复 编辑)

## 敬告作者

《热能动力工程》是国家科委批准的科技期刊, 并为国家核心期刊。

凡向本刊所投的论文, 若属国家自然科学基金部、省级的基金项目, 或重要的科研项目, 请随稿提供项目证明, 写明名称、年度编号。

本刊对这一类的论文优先发表, 并优稿优酬。

编辑部

(Energy Source College under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(1). —33~38

Spectral data of water vapor molecules have been widely used in the fields of aerospace science, atmospheric science, astrophysics, thermal energy and power engineering. On the basis of the newest high-resolution high-temperature gas spectral data base HITEMP and by way of a rational extrapolation obtained were the water vapor spectral band-model parameters in the 300 - 3000 K temperature range. The latter include an average absorption factor, spectral line density, spectral line half-width. As a result, set up was a more up-to-date and detailed model parameter table than that promulgated by NASA in 1973. With the model parameter table serving as a basis the authors have through the use of a statistical spectral band model calculated emission spectra under various optical paths, which have been found to be in very good agreement with experimental values. **Key words:** infrared radiation, water vapor, spectral band model parameter

**N300 MW 机组振动爬升与低频振动的原因及其对策 = An Analysis of the Causes of Climbing Vibrations and Low-frequency Ones in a N300 MW Unit and Some Measures Taken for Their Elimination** [刊, 汉] / Li Lu-ping, Zhou Ke (Changsha University of Electric Power Engineering, Changsha, China, Post Code: 410077), Zhang Guo-zhong, Huang Pi-wei (Hunan Provincial Electric Power Research Institute, Changsha, China, Post Code: 410070), Hu You-ping, Gan Fu-quan (Xiangtan Electric Power Co. Ltd., Xiangtan, Hunan, China, Post Code: 411100) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(1). —39~42

On the basis of numerous test data obtained on-site the authors expounds the characteristic features of climbing and low-frequency vibrations in a Chinese-made 300 MW turbogenerator set and the causes of their emergence. Some technical measures have been recommended for their elimination. The on-site test results obtained after the implementation of these technical measures indicate that the measures adopted have been very effective in eliminating the above-mentioned vibrations. **Key words:** turbogenerator set, vibration, fault diagnosis

**运行参数对粉煤流化床(PC-FB)燃烧效率的影响 = The Effect of Operation Parameters on the Combustion Efficiency of a Pulverized-coal Fluidized Bed** [刊, 汉] / Chen Hong-wei (North China National Electric Power University, Baoding, Hebei, China, Post Code: 071003), Jin Bao-sheng, Xu Yi-qian (Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(1). —42~45

With the help of a pulverized-coal fluidized bed (PC-FB) test rig with 0.3 MW heat input test data were obtained of the PC-FB combustion efficiency under various operation parameters. A detailed discussion and study was conducted focusing on the mechanism of influence of these operation parameters on PC-FB combustion efficiency. The study results indicate that the combustion efficiency of the PC-FB can be as high as 98% - 99%, comparable with that of a pulverized-coal furnace. The authors also pointed out for the first time in the present study that under a certain set of conditions it is possible to realize a low-temperature high-efficiency combustion of the pulverized-coal. These conditions include, among others a rational matching of the following items: combustion temperature, particle residence time, flame turbulence and in-furnace oxygen concentration and particle concentration. **Key words:** fluidized bed, pulverized coal, combustion efficiency, operating parameters

**四角切向燃烧锅炉炉内气流流动特性及炉膛高度的选取 = In-furnace Flue-gas Flow Characteristics and Selection of Furnace Height for a Tangentially Fired Boiler** [刊, 汉] / Zhou Yue-gui, Zhang Ming-chuan (Energy Source Department, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030, Ai Wei-guo, Xu Tong-mo, Hui Shien (Energy Source Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(1). —46~48, 42

With a model HG-2008/18.2-YM2 tangentially fired boiler serving as a prototype a cold-state modeling test was conducted with a view to studying the gas flow characteristics in the boiler furnace and the effect of furnace height on the gas ve-