

粉煤流化床燃烧(PC-FBC)炉膛烟温试验研究

(华北电力大学, 河北 保定 071003) 陈鸿伟 丁常富 闫顺林 吕玉坤

摘要: 针对新型高效、清洁煤燃烧方式, 即粉煤流化床(PC-FB), 在一座0.3 MW的试验台上, 系统而详细地研究了PC-FB炉膛空间烟气温度的分布特性。主要研究内容包括: PC-FB炉膛空间内烟流的稳定性与均匀性; 床层温度、流化速度、床料的平均粒径、二次风率、二次风的投入位置对炉膛内烟温分布的影响, 并总结出合理的炉膛烟温分布。

关键词: 煤粉; 流化床; 燃烧; 温度分布

中图分类号: TK229.6⁺6; TK224.1⁺1 文献标识码: A

1 引言

随着人类对全球生态环境和大气环境污染的日益严重, 高效、清洁的燃煤技术已成为动力工程领域开发研究的重点与前沿。基于此背景, 我们首先提出了单烧煤粉的粉煤流化床(PC-FB)这一高效、低污染的煤利用方法^[1]。

作为进一步研究PC-FB的燃烧特性, 污染物生成与控制规律的基础, 从而指导PC-FB锅炉的设计、运行, 在原热态试验研究的基础上, 对其悬浮空间烟气温度的分布特性进行了系统而详细的实验研究。本文所使用的试验台, 测点布置、测量系统以及燃用煤种见文献^[1]。

PC-FB 燃烧试验台炉内烟温测点布置

标高/m	1.4	1.81	2.145	2.59	3.7	4.7	5.7
烟温测点	T_4	T_{f1}	T_{f2}	T_{f3}	T_{f4}	T_{f5}	T_{f6}

本文主要介绍PC-FBC悬浮空间(FCZ)烟温的稳定性与均匀性, 以及床层温度, 流化速度, 床料的平均粒径, 二次风率, 二次风的投入位置对FCZ内烟温分布的影响, 并总结出合理的FCZ烟温分布。此研究对PC-FBC的工业应用有着重要意义。

2 炉膛空间烟温的稳定性与均匀性

粉煤流化床床温、流化速度、静止床层高度一定时, 整个粉煤流化床炉膛内温度分布具有良好的稳

定性。

另外, 通过调整各层二次风的风量, 调节煤粉在各悬浮空间区段的燃烧份额, 从而把粉煤流化床炉膛空间的温度分布控制在一个合理的、相对均匀的水平。所谓合理, 指的是就某个煤种而言, 保证粉煤流化床具有高燃烧效率的同时, 具有低的污染物排放特性。均匀则指的是沿炉膛空间轴向温度分布均匀, 在整个炉膛内均形成适合低污染燃烧的温度场。

图1表示的是I、II两个煤种某个相近的工况下, 粉煤流化床悬浮空间沿轴向各烟气温度的测点的温度值随时间的变化规律。由此可以看出, 各点烟气温度的值基本不随时间发生变化, 其值只在 $\pm 20^\circ\text{C}$ 的范围内波动, 并且, 沿炉膛高度方向烟气温度的最高值与最低值相差仅为 200°C 左右。

由于煤种II的灰分高于煤种I, 且其挥发分与发热量均低于煤种I, 为了使PC-FB燃用煤种II时同样具有高的燃烧效率, 就必须相应提高其燃烧的温度水平。从图1可以看出, 燃用煤种II时 T_{f1} 温度值高于燃用煤种I时的 T_{f1} , 并且整个FCZ的平均烟温有所提高。实现这一温度变化时, 包括二次风率 $R_2(\%)$ 、床温 $T_b(^\circ\text{C})$ 在内的其它参数基本不变, 而只是调节增大了第一层二次风流量, 即二次风的投入位置较燃用煤种I时略有下移。

PC-FBC悬浮空间烟气温度的稳定性和均匀性特点, 可以大大减轻沿炉膛高度的热偏差, 及炉内的结渣, 对水冷壁工作的稳定性及寿命都是有益的。

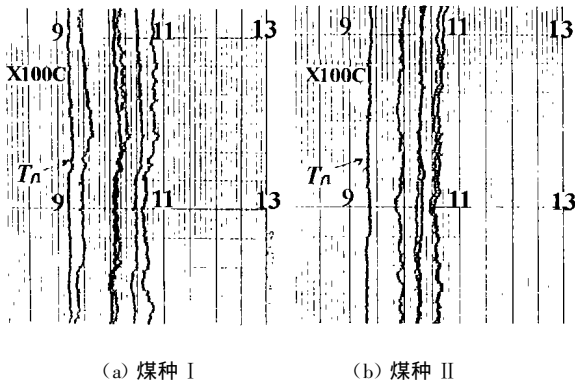
3 炉膛空间烟温分布的影响因素

3.1 床层温度 T_b

图2是 $R_2 = 50\%$ (其中 $R_{21} = 25\%$ 、 $R_{22} = 15\%$ 、 $R_{23} = 10\%$)、床料平均粒径 $d_p = 0.7\text{ mm}$ 的条件下, 不同床温下悬浮空间烟气温度的分布曲线。从图中可以看出, (a)随着床温的升高, 悬浮空间的烟温水平随之上升; (b)床温越高, T_{f2} 、 T_{f3} 点烟气温度的上升幅度增大, 而其各点烟气温

收稿日期: 1999-01-28; 修订日期: 1999-06-15

作者简介: 陈鸿伟(1965-), 男, 华北电力大学副教授, 博士, 热能教研室副主任。



(a) 煤种 I (b) 煤种 II

图 1 粉煤流化床的 FCZ 内各点烟温的稳定分布度的上升幅度减小。现象 (b) 的主要原因是床温越高, 生成的 CO 等可燃气体越多, 这些气体成分较容易地与一、二层二次风发生燃烧反应释放热量促使 T_{f2} 、 T_{f3} 的升高, 而使得进入后续区段的煤灰中可燃物含量减少, 燃烧所放出的热量也相应减少, 因而减弱了 T_{f4} 、 T_{f5} 的升高。

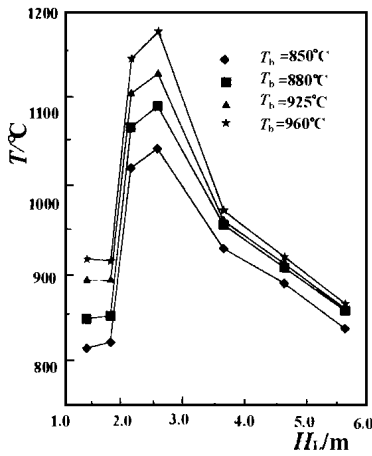


图 2 不同床温 T_b °C 下 FCZ 内轴向温度分布

从图 2 还观察到一个有趣的现象, 即对于流化床燃烧区出口过渡段的烟温 T_4 和悬浮空间进口烟温 T_{f1} 当床温在 925 °C 以下时, T_4 和 T_{f1} 都较 T_b (°C) 有所提高, 当床温在 960 °C 时, T_{f1} 和 T_4 却较之有所下降。究其原因, 作者以为在流化床燃烧区内残留于气泡中的那部分氧,

随着气泡在床面发生破裂而释放出来与煤灰及烟气中的可燃质燃烧放出部分热量。当床温较低时, 此残余氧较多, 该放热量大于床层出口至 T_{f1} 区段的散热, 因而 T_4 、 T_{f1} 较 T_b 有所升高; 而当床温较高时, 此残余氧较少, 该放热量不足以平衡这一区段的散热损失, 因而 T_4 、 T_{f1} 较床温 T_b 有所降低。

3.2 流化床速度 U_0 (m/s)

在粉煤流化床 (PC-FB) 炉膛出口氧浓度和二次风率 R_2 (%) 不变的条件下, 增大其流化床燃烧区 (FBCZ) 的流化速度 U_0 , 就必须相应增大煤粉螺旋给料器转速以增加给煤量, 因而 U_0 的提高实质上是增大了 PC-FBC 的容积热强度。床层高度保持不变, 流化速度的提高使细粉颗粒在 FBCZ 中的扬折速率常数迅速增大, 煤粉在 FBCZ 中的停留时间迅速缩短, 在其中的燃烧份额则相应减少。但是, 给粉

量的增大使得 FBCZ 中燃烧煤粉的绝对量增加, 相应的放热量增大, 所以, 流化床燃烧区的烟气温度随流化速度的加快而提高。另外, 流化速度的提高, 进入粉煤流化床悬浮空间的煤灰浓度和可燃物浓度相应增大, 该空间内的燃烧强度加剧, 放热速率加快, 放热量增加。通过上述两方面的作用, 流化速度的提高使得粉煤流化床悬浮空间的温度水平得以全面提高。如图 3 所示, 当 PC-FBC 流化速度从 1.5 m/s 升至 3.1 m/s 时, 其流化床燃烧区的烟温从 820 °C 变为 960 °C, 悬浮空间的平均烟温提高了 300 °C。

3.3 静止床高 H_{mf} (m)

静止床高 H_{mf} 的升高, 使煤粉在 PC-FBC 的流化床燃烧区内的燃烧份额增加。如果保持床温、二次风率、给粉量、流化速度等其它因素不变, 粉煤流化床悬浮空间的烟气温度会因此而有所下降。如图 4 所示, 当静止床高从 0.30 m 提高至 0.52 m 时, 粉煤流化床悬浮燃烧空间的平均烟气温度从 955 °C 降至 934 °C。

3.4 床料的平均粒径 d_p (mm)

在给煤量、流化速度、床层烟温都一定的条件下, 床料粒径越小, 床内乳化相中流化风的份额就越小, 此相区中的氧浓度越低, 不利于煤粉的燃烧氧化反应, 因而生成较多的 CO、CH₄ 等可燃气体进入悬浮空间。因此当床料的粒径变小时, 由流化床燃烧区进入其悬浮空间的可燃物增多。它们与 FCZ 内的二次风混合燃烧释放热量从而提高 FCZ 的烟气温度。图 5 中的两条曲线 a、b 分别对应于 $d_p = 0.70$ mm、1.30 mm 时 FCZ 的烟温分布。两种床料粒径下 FCZ 的平均烟气温度相差 24 °C 左右。采用小粒径颗粒床料时高于采用大粒径床料。

3.5 二次风率 R_2 (%)

试验时保持 PC-FBC 流化床燃烧区的床温、静止床层高度、总风量、总给粉量不变。二次风率的增大, 一次风率越小, 最终导致煤粉颗粒在流化床燃烧区的停留时间延长以及该区乳化相内还原气氛严重, 造成更多的可燃气体随烟气、煤灰一起进入过渡段、悬浮空间, 在悬浮空间二次风形成的强旋流场作用下发生强烈燃烧与烧尽过程。从而使 PC-FB 悬浮空间的烟气温度随着二次风率的增大而提高。图 6 是床层烟温 $T_b = 850$ °C、床层高度 $H_{mf} = 0.3$ m、各层二次风按 $R_{21} : R_{22} : R_{23} : R_{24} = 5 : 3 : 2 : 0$ 分配的条件下, PC-FB 悬浮燃烧区内烟气温度分布与二次风率的关系。由此可以看出, 随着二次风率从 25% 增大到 70%, 悬浮空间的平均烟气温度则由 920 °C 升至 1109 °C。

从图 6 还可以看出, T_4 和 T_{f1} 这两点烟气温度值随着 R_2 的增加而降低, 并且当 $R_2 \geq 70\%$ 时还低

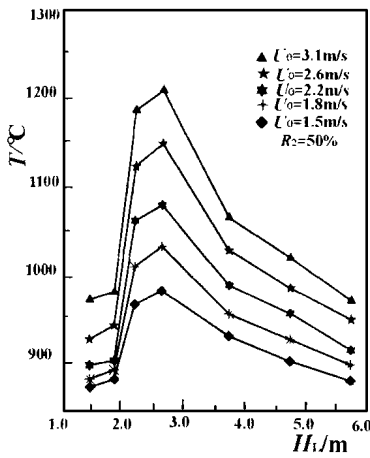


图 3 流化速度 U_0 (m/s) 对 FCZ 轴向温度分布的影响

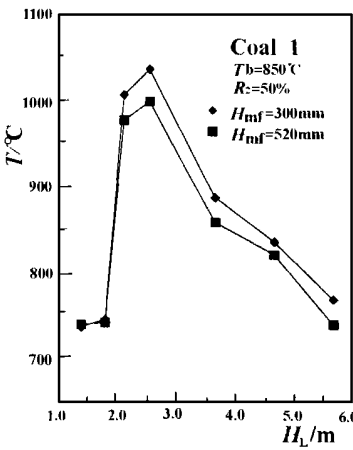


图 4 不同静止床高下 FCZ 轴向温度分布

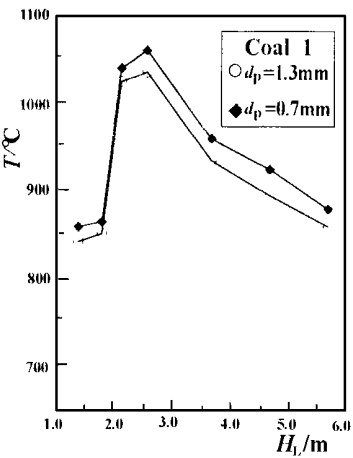


图 5 对应不同粒径的 FCZ 轴向温度分布

于流化床燃烧区的温度 T_b 。这是因为 R_2 的增大, 上段开头的两个效应加强, FBCZ 出口氧浓度减少, 可燃物在此区段的燃烧份额下降, 放热量随之减少, 所以 T_4 、 T_{II} 随 R_2 的增大而下降。当 R_2 增至某程度, FBCZ 出口氧浓度小至某程度, 该区间燃烧放热不足以弥补散热损失时, T_4 、 T_{II} 就会低于床温。

3.6 二次风的投入位置

图 7 是 $T_b = 850\text{ }^\circ\text{C}$, $R_2 = 60\%$ 时, 几种各层二次风的分配比例所对应的 PC-FB 炉膛空间不同的温度分布曲线。当 $R_{21} = 30\%$ 时, FCZ 的最高烟温 $T_B = 1090\text{ }^\circ\text{C}$, 平均烟气温度为 $1000\text{ }^\circ\text{C}$; 当 $R_{23} = 30\%$ 时, FCZ 的最高烟温 $T_{II} = 1045\text{ }^\circ\text{C}$, 平均烟气温度为 $957\text{ }^\circ\text{C}$ 。所以, 随着上层二次风流量的增大, 即二次风投入位置向上偏移粉煤流化床悬浮空间的最高温度区位置上移, 最高和平均烟气温度都降低。

综合考虑粉煤流化床燃烧效率、石灰石脱硫效率、NO 和 N_2O 排放、炉膛结渣等因素后, 对于试验的特定煤种, 图

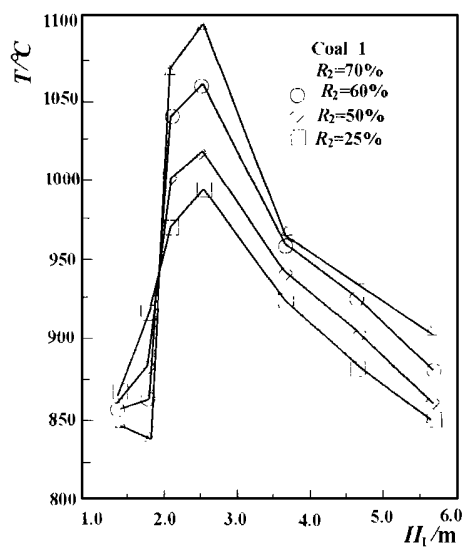


图 6 不同二次风率 R_2 下 FCZ 内轴向温度分布

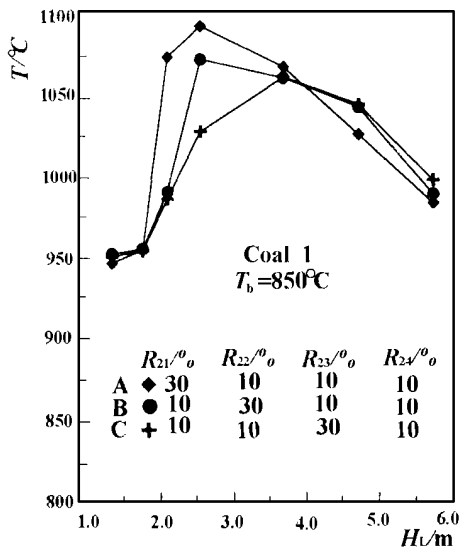


图 7 二次风投入位置对 FCZ 轴向温度分布的影响

7 曲线 B 的温度分布最为合理, 对应的二次风投入位置亦为最佳。值得注意的是, 燃用不同的煤种时, 应有不同的最佳二次风投入位置。

7 曲线 B 的温度分布最为合理, 对应的二次风投入位置亦为最佳。值得注意的是, 燃用不同的煤种时, 应有不同的最佳二次风投入位置。

4 结论

(1) 粉煤流化床 (PC-FB) 炉内具有合理的烟气温度水平和分布, 即 FBCZ 内 $850\text{ }^\circ\text{C}$ 左右的床层温度和 FCZ 内烟温不超过 $1100\text{ }^\circ\text{C}$, 有利于石灰石的炉内脱硫和 NO 、 N_2O 排放;

(2) 在 FCZ 中下区段出现最高烟气温度有利于煤的燃尽。

(3) PC-FBC 内各点烟气温度值基本不随时间发生变化, 而且沿高度方向 FCZ 内烟气温度最高值与最低值相差仅在 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 以内。

(4) 对粉煤流化床的 FCZ 中轴向烟气温度分布的研究表明, 提高床层温度、加快流化速度、减小床料粒径、增大二次风率都将使 FCZ 内的烟气温度升高; 相反, 增高静止床层高度、提高二次风的投入位置则会降低 FCZ 内的烟气温度。

参考文献

[1] 陈鸿伟等. 粉煤流化床燃烧 (PC-FBC) 的热态试验研究. 动力工程, 1996, 16(2): 31~39.

(复 编)

粉煤流化床燃烧(PC—FBC)炉膛烟温试验研究= **Experimental Study of the Flue-gas Temperature Distribution in a Pulverized Coal-fired Fluidized Bed Furnace** [刊, 汉] / Chen Hongwei, Ding Changfu, Yan Shunling, et al (North China Electric Power University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2000, 15(2). —128 ~ 130

Pulverized-coal fluidized-bed (PC—FB) combustion pertains to a new type of efficient clean-coal combustion method. Presented in this paper are the results of a study concerning the flue-gas temperature distribution characteristics in a PC—FB furnace. The main contents of the study include: the stability and uniformity of flue-gas flow in the PC—FB furnace, the bed temperature, fluidized speed, the particle average diameter of the bed material, secondary air flow rate, the effect of the secondary-air feed location on the flue-gas temperature distribution in the furnace. In addition, a rational furnace flue-gas temperature distribution is also given on the basis of the above study. **Key words:** pulverized-coal, fluidized bed, combustion, temperature distribution.

铜冶炼厂余热锅炉的设计特点= **Design Features of a Copper Smeltery Heat-recovery Boiler** [刊, 汉] / Xiao Pinhua (Nanchang Non-ferrous Metallurgical Design Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2000, 15(2). —131 ~ 133

On the basis of proven engineering practice summed up are the general principles and specific features of a steel smeltery heat-recovery boiler. With the aim of changing the present situation of having to use imported heat-recovery boilers for copper smelteries there exists a real urgency to develop heat-recovery boilers based on domestic design for use in such smelteries. **Key words:** copper smeltery, heat recovery boiler, design features

火力发电厂细粉分离器改进= **An Improvement on Thermal Power Plant Fine Pulverized-coal Separators** [刊, 汉] / Lu Tai (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2000, 15(2). —134 ~ 136

The general situation of the use and evolution of fine pulverized-coal separators for thermal power plants since the founding of the People's Republic of China was reviewed and the test data and use-effectiveness of a novel dual-stage finely-pulverized coal separator described in detail. **Key words:** thermal power plant, pulverized-coal preparation system, separation efficiency, separator

船用汽轮循环泵的改进设计= **Improved Design of a Marine Steam Turbine Circulating Pump** [刊, 汉] / Qiu Zufa, Gao Lei, Qin Xiaocheng (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2000, 15(2). —137 ~ 139

The design and production technology of a marine steam turbine circulating pump has been improved on to resolve a whole range of problems. The circulating pump following such an improvement has undergone a land-based test and seafaring verification inspection and been found to have fully met the preset target concerning its performance. **Key words:** turbine circulating pump, improvement, design

火电厂空气干燥器 PLC 控制系统的设计与实现= **Design and Implementation of the PLC Control System of a Thermal Power Plant Air Dryer** [刊, 汉] / Li Dazhong, et al (North China Electric Power University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2000, 15(2). —140 ~ 141

A modification design was conducted of the control system of a thermal power plant boiler air-dryer through the addition of a OMRON PLC controller. The on-site commissioning tests show that the PLC-based control system has promoted a safe and reliable operation with powerful functions and a high flexibility in conducting operation changes. As a result, all design targets have been attained. **Key words:** PLC controller, air dryer, operating time-sequence, control logic