

给煤对大型 CFB 锅炉床温均匀性的影响

李金晶¹, 龚 鹏¹, 吕俊复², 米子德¹

(1. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045;

2. 清华大学 热能工程系 热能动力工程与热科学教育部重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 相比传统炉型, 大型循环流化床(CFB) 锅炉炉膛宽深比大幅增加, 炉膛下部床温在沿宽度方向上的分布特性对锅炉性能的影响更加显著。为明确炉膛下部床温的影响因素, 在大型电站 CFB 锅炉上设计并完成了 5 个不同工况下的床温调节试验。试验结果表明: 炉膛出口在宽度方向上的非对称布置导致左右侧炉膛的流动状态偏差较大; 两侧墙受热面的冷却作用是侧墙附近存在明显床温梯度的主要原因; 低负荷工况下调节各播煤口给煤量的效果要优于高负荷工况; 在给煤系统设计中应考虑给两侧给煤机出力留出一定的裕度, 以满足局部床温调节的需求。

关 键 词: 循环流化床; 大型电站锅炉; 床温均匀性; 横向混合; 燃烧份额分布

中图分类号: TK224. 1

文献标识码: A

引 言

利用引进技术对国产 300 MW 等级 CFB(循环流化床) 锅炉进行了大量改进, 在炉膛设计上采用了大宽深比单炉膛单布风板结构取代原有的裤衩腿型炉膛结构, 一方面是基于简化控制和稳定运行的需要, 另一方面也是为 600 MW 等级 CFB 锅炉结构设计积累经验。相比传统炉型^[1], 由于炉膛宽深比大幅增加, 炉膛宽度方向上的运行参数分布特性对锅炉性能的影响也更加显著。

炉膛下部床温是 CFB 锅炉炉膛运行中的重要参数, 综合表征了炉膛中的燃烧状况和传热能力。由于在炉膛下部密相区内, 横向上的物料混合强度远低于垂直方向^[2], 给煤在密相区内横向混合的强度直接决定了密相区内的燃烧状况和床温均匀性, 流化风速、固体物料浓度和床料粒径等因素都会影响密相区内物料混合的强度。关于 CFB 炉膛内物料横向混合的研究工作多集中在床截面较小的实验台上^[3~4], Liu 和 Chen 等人的研究表明^[5], 床截面的大小对密相区横向混合强度的影响较大, 因此有必要在炉膛截面积较大的商用锅炉上进一步验证实验室内获得的研究结论。

一次风和下二次风作为 CFB 锅炉炉膛下部床温的主要调节手段, 其调节效果已被长期工程实践所证实, 并被大多数锅炉厂用作床温的主要控制手段^[6]。为维持炉内较均匀的温度场和热负荷分布, 大型 CFB 锅炉的设计中往往在炉膛截面上设置了多个给煤点, 每个播煤口的给煤量主要用于调节炉膛下部床温在水平截面上的分布。本研究主要侧重于考察大型 CFB 锅炉炉膛下部床温分布特点, 明确给煤量分布对床温的调节作用, 以为锅炉设计和运行提供可借鉴的规律。

1 试验条件

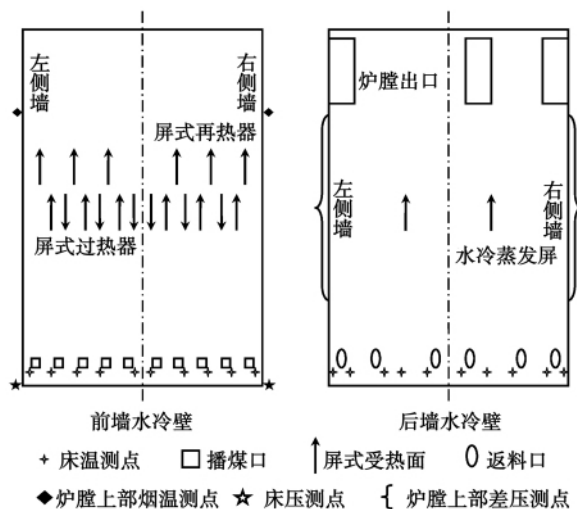


图 1 炉膛水冷壁结构示意图

Fig. 1 Schematic drawing of the structure of waterwalls in the furnace

在单炉膛单布风板结构的 1 177 t/h 循环流化床锅炉上, 对床温影响因素进行了实炉研究。炉膛宽度 L_r 达到 30.3 m, 布风板深度 4.7 m, 炉膛上部深度 9.8 m, 炉膛高度(从布风板计起) 达 40 m。主循

收稿日期: 2010 - 09 - 09; 修订日期: 2010 - 11 - 16

作者简介: 李金晶(1983 -), 男, 贵州遵义人, 华北电力科学院有限责任公司工程师。

环回路采用了 3 路并联的物料循环系统,炉膛出口和返料口设置在后墙水冷壁,两侧分离器对称于炉膛中心线,中间的分离器为非对称布置,如图 1 所示。10 个播煤口布置在炉膛前墙水冷壁,每个播煤口对应一台给煤机,播煤口中心距布风板高度为 1.0 m。燃用煤种的工业分析和元素分析如表 1 所示。为保证炉膛内足够的受热面,控制床温和炉膛出口温度,水冷壁前墙设置了 12 片屏式过热器和 6 片屏式再热器,后墙设置了 2 片水冷蒸发屏,图 1 中箭头指示的方向为屏式受热面内工质的流向。

表 1 燃料工业分析和元素分析

Tab.1 Industrial and elementary analysis of the fuel

| | 数值 |
|---|-------|
| 收到基碳 $C_{ar}/\%$ | 48.65 |
| 收到基氢 $H_{ar}/\%$ | 2.92 |
| 收到基氧 $O_{ar}/\%$ | 8.25 |
| 收到基氮 $N_{ar}/\%$ | 0.57 |
| 收到基硫 $S_{ar}/\%$ | 2.19 |
| 收到基灰份 $A_{ar}/\%$ | 13.62 |
| 收到基水份 $M_{ar}/\%$ | 23.8 |
| 空气干燥基水份 $M_{ad}/\%$ | 18.67 |
| 干燥无灰基挥发份 $V_{daf}/\%$ | 41.11 |
| 低位发热量 $Q_{net,ar}/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 17730 |

在前后墙各布置了 10 个床温测点,用于监视炉膛下部沿宽度方向的床温分布,床温测点距布风板高度均为 0.5 m。图 2 ~ 图 6 中,将各床温测点或播煤口、返料口、二次风口和屏式受热面中心距左侧炉膛的距离表示为无量纲参数 L/L_f ,即与左侧墙距离 L 和炉膛总宽度 L_f 的比值,具体参数如表 2 所示。两侧墙水冷壁均布置有炉膛上部烟温测点、床压测点和炉膛上部差压测点,其中炉膛上部烟温测点距布风板高度为 31.5 m,床压测点距布风板高度为 0.1 m,炉膛上部差压测点距布风板高度分别为 9.4 和 31.5 m。

为详细考察不同工况下给煤量对炉膛下部床温分布的调节作用,设计了 5 个试验工况,各工况下炉膛内的主要运行参数如表 3 所示,其中平均床压是指两侧墙床压测点示数的算术平均值。试验过程保持给煤和排渣量稳定。为方便比较床温调节效果,定义各床温测点的平均方差为:

$$R = \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{b,i} - \bar{T}_b)^2 / n}$$

式中: n —床温测点总数, 20; $T_{b,i}$ —第 i 个床温测点

示数; \bar{T}_b —所有床温测点示数的算术平均值,即表 3 中的平均床温。类似地,可以定义各播煤口给煤量平均方差。平均方差越小,代表分布参数的均匀性越好。

表 2 炉膛结构参数及测点位置

Tab.2 Structural parameters and measuring point locations of the furnace

| | 数值 |
|------------------------|--|
| 炉膛高度(布风板计起)/m | 30.3 |
| 炉膛宽度/m | 40.0 |
| 炉膛上部深度/m | 9.8 |
| 布风板深度/m | 4.7 |
| 床压测点高度(距布风板)/m | 0.1 |
| 炉膛上部烟温测点高度(距布风板)/m | 31.5 |
| 炉膛上部差压测点高度(距布风板)/m | 9.4, 31.5 |
| 播煤口中心高度(距布风板)/m | 1.0 |
| 各播煤口中心位置(L/L_f) | 0.052, 0.150, 0.251, 0.350, 0.448, 0.552, 0.650, 0.749, 0.850, 0.948 |
| 床温测点高度(距布风板)/m | 0.5 |
| 前墙床温测点位置(L/L_f) | 0.022, 0.122, 0.220, 0.321, 0.474, 0.526, 0.679, 0.780, 0.878, 0.979 |
| 后墙床温测点位置(L/L_f) | 0.006, 0.108, 0.242, 0.300, 0.424, 0.556, 0.700, 0.758, 0.894, 0.995 |
| 返料口中心高度(距布风板)/m | 1.8 |
| 返料口中心位置(L/L_f) | 0.068, 0.207, 0.458, 0.597, 0.793, 0.932 |
| 下二次风口中心高度(距布风板)/m | 1.1 |
| 前墙下二次风口中心位置(L/L_f) | 0.105, 0.204, 0.305, 0.400, 0.600, 0.695, 0.796, 0.895 |
| 后墙下二次风口中心位置(L/L_f) | 0.128, 0.264, 0.334, 0.403, 0.510, 0.669, 0.733, 0.874 |
| 上二次风口中心高度(距布风板)/m | 4.95 |
| 前墙上二次风口中心位置(L/L_f) | 0.053, 0.152, 0.253, 0.351, 0.449, 0.551, 0.649, 0.747, 0.848, 0.947 |
| 后墙上二次风口中心位置(L/L_f) | 0.100, 0.163, 0.293, 0.377, 0.551, 0.698, 0.837, 0.900 |
| 屏式过热器中心位置(L/L_f) | 0.132, 0.181, 0.279, 0.328, 0.426, 0.475, 0.525, 0.574, 0.672, 0.721, 0.819, 0.868 |
| 屏式再热器中心位置(L/L_f) | 0.082, 0.230, 0.377, 0.623, 0.770, 0.918 |
| 水冷蒸发屏中心位置(L/L_f) | 0.334, 0.666 |

表 3 试验工况设计

Tab. 3 Design of the operating conditions of the test

| | 工况 1 | 工况 2 | 工况 3 | 工况 4 | 工况 5 |
|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 给煤总量 / t · h ⁻¹ | 184 | 185 | 86.2 | 118 | 166 |
| 一次风量 / t · h ⁻¹ | 574 | 573 | 388 | 394 | 590 |
| 二次风量 / t · h ⁻¹ | 721 | 694 | 374 | 428 | 658 |
| 平均床压 / kPa | 8.1 | 8.1 | 7.2 | 8.6 | 5.8 |
| 炉膛上部差压(左侧/右侧) / kPa | 1.81/1.94 | 1.86/2.07 | 0.60/0.64 | 0.89/0.84 | 1.43/1.43 |
| 炉膛上部烟温(左侧/右侧) / °C | 878/828 | 870/848 | 744/757 | 818/789 | 885/890 |
| 平均床温 / °C | 901 | 899 | 852 | 860 | 929 |
| 床温平均方差 / °C | 21.8 | 13.0 | 25.7 | 6.2 | 16.9 |
| 单个播煤口平均给煤量 / t · h ⁻¹ | 18.4 | 18.5 | 8.62 | 11.8 | 16.6 |
| 给煤量平均方差 / t · h ⁻¹ | 0.10 | 2.90 | 0.09 | 4.78 | 8.42 |

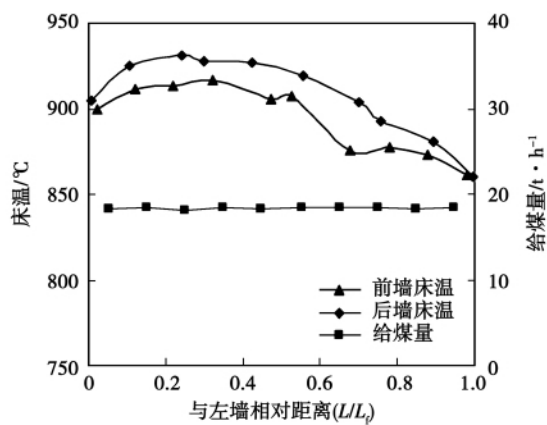


图 2 工况 1 床温和给煤量分布

Fig. 2 Distribution of the bed temperature and coal feed quantity(No. 1 operating condition)

2 试验结果

如图 2 所示,在满负荷工况下,各播煤口给煤量相同时,炉膛两侧床温差别较大,左侧床温明显高于右侧。由于炉膛出口在宽度方向上为非对称布置,若以炉膛几何中心线为界,则右侧炉膛有两个出口,左侧炉膛只有一个出口。因为炉膛中心线左右侧流动阻力不同,所以右侧炉膛内的烟气流流量明显高于左侧炉膛。从风量影响的角度,右侧风量高于左侧,因此右侧床温较低;由于风量的偏差会引起两侧炉膛内流动状态的偏差,从床压影响的角度,右侧炉膛上部物料浓度(炉膛上部差压)高于左侧炉膛,因此右侧炉膛上部受热面吸热量也比左侧大^[7]。根据床温分布状况,基于“高温处减煤,低温处增煤”

的原则,适当调节各播煤口给煤量后,炉膛左右侧床温水平趋于一致,如图 3 所示;炉膛上部烟气温分布也相对更加均匀,如表 3 所示。但是,即使是床温比较均匀时,前后墙的床温也存在较大差异,后墙平均床温比前墙高约 10 °C;在两侧墙附近,床温明显低于中心线附近区域(约 20 °C)。

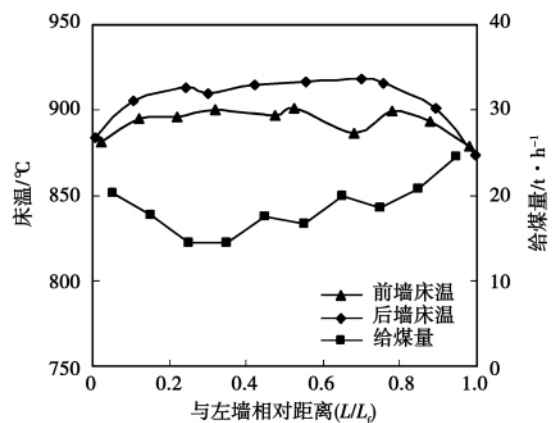


图 3 工况 2 床温和给煤量分布

Fig. 3 Distribution of the bed temperature and coal feed quantity(No. 2 operating condition)

由图 4 看出,在低负荷工况下,各播煤口给煤量相同时,沿炉膛宽度方向上床温差异更大,中心线附近床温较高(850 °C 以上),侧墙附近床温较低(约 800 °C),尤其是在后墙附近表现得非常明显。这是因为低负荷工况下,炉膛内气体流速较低,密相区沿宽度方向的横向混合强度也较低,同时炉膛两侧墙水冷壁的吸热量相对密相区内燃烧放热量的比例较大,所以经两侧墙冷却后的边壁下降流与密相区热床料的温差也相对较大,此时两侧墙温度较低的边

壁下降流^[8]对附近密相区床料的冷却作用更为明显,因此在两侧墙附近出现了较大的床温梯度。调节各播煤口给煤量后,沿炉膛宽度上的床温分布情况如图 5 所示。此时各床温测点示数的平均方差仅为 6.2 °C,给煤的调节效果非常理想。

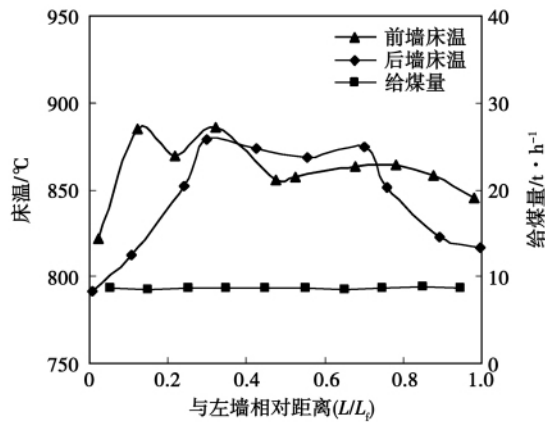


图 4 工况 3 床温和给煤量分布

Fig. 4 Distribution of the bed temperature and coal feed quantity(No. 3 operating condition)

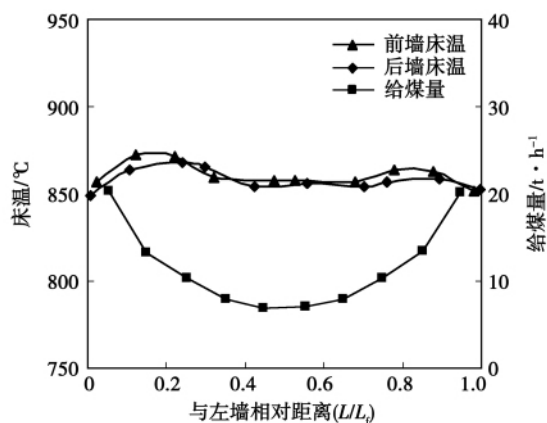


图 5 工况 4 床温和给煤量分布

Fig. 5 Distribution of the bed temperature and coal feed quantity(No. 4 operating condition)

如图 6 所示,在满负荷工况下,由于炉膛内床压过低(5.8 kPa),致使炉膛下部整体床温升高,并且局部床温高于设定报警值。虽然采取了增大一次风量和增大两侧播煤口给煤量等措施,但整体床温仍高于正常工况,同时仍有局部区域床温达到 950 °C。这一测量结果也证实了,当炉膛内物料浓度减小时,密相区内的物料横向混合强度将减小,与文献[3]利用热示踪粒子的试验结果,以及文献[4]在二维实验台上的研究结论相吻合。可见合适的炉膛床压

不仅有利于控制炉膛下部的整体床温水平,也有利于保证床温沿炉膛宽度方向上的分布均匀。

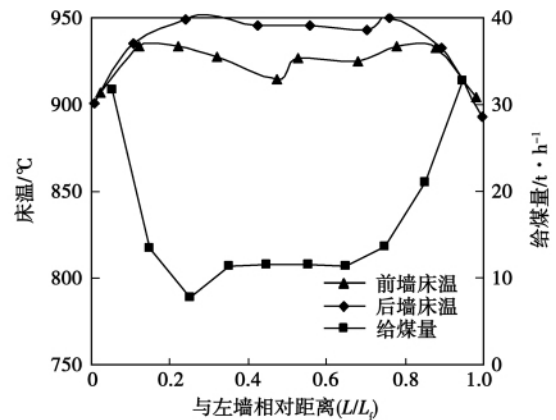


图 6 工况 5 床温和给煤量分布

Fig. 6 Distribution of the bed temperature and coal feed quantity(No. 5 operating condition)

进一步比较图 3、图 5 和图 6,不难看出,低负荷工况下调节各播煤口给煤量的效果要优于高负荷工况。其主要原因在于,低负荷工况下,炉膛内大部分物料还处于鼓泡床状态,密相区的燃烧份额较大^[9],局部区域给煤量对床温的影响也较大;随着负荷的升高,锅炉的循环量增大,密相区内的燃烧份额减小,同时密相区内的横向混合作用增强,在二者的共同作用下,局部区域给煤量对床温的影响逐渐减小^[10]。因此,在高负荷工况下,局部区域给煤量的调节作用有限,各播煤口给煤量偏差过大还会造成少数几台给煤机长期超负荷运行,缩短其使用寿命,因此对这一调节手段不应过分依赖,当床温偏差过大时,应当从其它方面查找原因。对于大宽深比的 CFB 炉膛,靠近两侧墙的播煤口给煤量往往较大,因此在给煤系统设计中应考虑给两侧给煤机出力留出一定的裕度,以满足局部床温调节的需求。

3 结 论

针对大型 CFB 锅炉炉膛下部床温分布,设计并完成了 5 个不同工况下的床温调节试验。在具有大宽深比特点的 CFB 锅炉炉膛中,密相区沿炉膛宽度方向的物料混合强度和炉膛下部密相区的燃烧份额是影响床温分布均匀性的两个主要因素,风量、床压和给煤量等操作参数的影响最终都表现为这两个因素的变化。实炉测量结果表明:

(1) 由于炉膛出口在宽度方向上为非对称布

置 在满负荷工况下 左右侧炉膛的流动状态偏差较大 ,各播煤口给煤量相同时 ,炉膛两侧床温差别较大。

(2) 两侧墙受热面的冷却作用是侧墙附近存在明显床温梯度的主要原因。在低负荷工况下 ,由于密相区横向混合强度不足 ,这一温度梯度更加明显。

(3) 随着负荷的升高 ,局部区域给煤量对床温的影响逐渐减小。低负荷工况下 ,给煤对床温均匀性的调节效果较好;在高负荷工况下 ,局部区域给煤量的调节作用有限 ,此时对这一调节手段不应过分依赖。

(4) 靠近两侧墙的播煤口给煤量往往较大 ,在给煤系统设计中应考虑给两侧给煤机出力留出一定的裕度 ,以满足局部床温调节的需求。

参考文献:

[1] LI J ,ZHANG H ,YANG H ,et al. The mechanism of lateral solid transfer in a CFB riser with pant-leg structure [J]. *Energy & Fuels* 2010 ,24(4) : 2628 - 2633.

[2] Schlichthaerle P ,Werther J. Solids mixing in the bottom zone of a circulating fluidized bed [J]. *Powder Technology* 2001 ,120(1) : 21 - 33.

[3] 杨海瑞 ,吕俊复 ,刘 青 等. 循环流化床锅炉密相区内颗粒的横向扩散研究 [J]. *热能动力工程* 2001 ,16(4) : 395 - 398.
YANG Hai-rui ,LU Jun-fu ,LIU Qing ,et al. Study of the Transversal Diffusion of Particles in the Dense-phase Zone of a CFB Boiler [J]. *Journal of Engineering for Thermal Power and Energy* 2001 ,16(4) : 395 - 398.

[4] Pallares D ,Johnsson F. A novel technique for particle tracking in cold 2-dimensional fluidized beds—simulating fuel dispersion

[J]. *Chemical Engineering Science* 2006 61: 2710 - 2720.

[5] LIU D ,CHEN X. Lateral solids dispersion coefficient in large-scale fluidized beds [J]. *Combustion and Flame* , 2010 , 157: 2116 - 2124.

[6] 李金晶 ,吕俊复 ,米子德. 300 MWe 等级循环流化床电站锅炉技术特点 [J]. *电站系统工程* 2010 26(6) : 1 - 4.
LI Jin-jing ,LU Jun-fu ,MI Zi-de. Technical Features of a 300 MWe Class CFB Utility Boiler [J]. *Power Plant Systematic Engineering* , 2010 ,26(6) : 1 - 4.

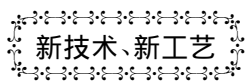
[7] 李金晶 ,李 燕 ,吕俊复 ,等. 循环流化床锅炉炉内传热的影响因素. *清华大学学报(自然科学版)* [J]. 2007 47(11) : 2026 - 2030.
LI Jin-jing ,LI Yan ,LU Jun-fu ,et al. Factors Influencing the In-furnance Heat Transfer in a CFB Boiler [J]. *Journal of Tsinghua University* 2007 47(11) : 2026 - 2030.

[8] Glicksman L R. Heat transfer in circulating fluidized beds [M]. Grace J R ,Avidan A A , and knowlton T M , eds. *Circulating Fluidized Beds*. London: Blackie Academic and Professional ,1997: 261 - 311.

[9] 赵石铁. 循环流化床中热量及挥发分释放规律的实验研究 [D]. 北京: 清华大学 2005.
ZHAO Shi-tie. Experimental Study of the Law Governing the Heat and Volatile Release in a Circulating Fluidized Bed [D]. Beijing: Tsinghua University 2005.

[10] 张建春 ,马素霞 ,武卫红. 循环流化床锅炉不同负荷下燃烧份额的分布研究 [J]. *太原理工大学学报* ,2010 ,41(1) : 65 - 68.
ZHANG Jian-chun ,MA Su-xia ,WU Wei-hong. Study of the Combustion Constituent Distribution in a CFB Boiler [J]. *Journal of Taiyuan University of Science and Technology* , 2010 41(1) : 65 - 68.

(陈 滨 编辑)



通用电气公司扩大检验技术总部

通用电气公司报道 ,其正在投资超过一千万美元扩大其美国宾西法尼亚刘易斯城检验技术总部。扩展工程的主要特点包括一个新全球客户应用中心以及通用电气雇员和客户的无损检测研究院。

通用电气现有 7 620 m² 厂房雇佣 230 多人 ,生产无损检验工具 ,用在石油和天然气 ,发电 ,金属加工 ,汽车和航空部门。通用电气的 4 830 m² 扩建工程将增加厂房使用面积超过 63% ,该工程将于 2012 年完工。

扩建工程将使通用电气能够继续开发和加工广泛的遥控可视检验、超声、电磁、先进的放射线照相和计算 X 线断层摄影系统 ,以及数据管理软件。这些无损检验系统用来延长多个部门工业资产的寿命。

《Diesel & Gas Turbine Worldwide's Engine Room News 》 - 10/20/2011 (春清 供稿)

给煤对大型 CFB 锅炉床温均匀性的影响 = **Influence of the Coal Feed on the Bed Temperature Uniformity of a Large-sized CFB Boiler** [刊, 汉] LI Jin-jing, GONG Peng, MI Zi-de (North China Electric Power Science Research Institute Co. Ltd., Beijing, China, Post Code: 100045), LU Jun-fu (Education Ministry Key Laboratory on Thermal Energy and Power Engineering and Thermal Science, Department of Thermal Energy Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2012, 27(1). -76~80

Compared with the traditional boiler types, the width/depth ratio of a large-sized CFB boiler will increase by a large margin and the influence of the bed temperature distribution characteristics at the lower portion of the furnace along the width direction on the boiler performance is even more remarkable. To identify the factors influencing the bed temperature at the lower portion of the furnace, the authors have designed and completed the bed temperature regulation test under five different operating conditions in a large-sized utility boiler. The test results show that the non-symmetrical arrangement of the furnace outlet along the width direction leads to a relatively large flow state deviation in the right and left portion of the furnace. The cooling role played by the heating surfaces on both-side walls is deemed as the main causes for a conspicuous bed temperature gradient existing in a place nearing the side walls. The effectiveness to regulate the coal feed quantity at each coal feed ports at low loads is superior to that at high loads. In the design of a coal feed system, a certain allowance shall be considered for the coal feeders at both sides so as to meet the requirements for local bed temperature regulation. **Key words:** circulating fluidized bed, large-sized utility boiler, bed temperature uniformity, transversal mixing, combustion share distribution

声波法炉内冷态流场在线监测系统的应用 = **Application of the Acoustic Wave Method in In-furnace Cold-state Flow Field On-line Monitoring Systems** [刊, 汉] CHEN Shi-ying (Electric Power Experiment Research Institute, Hubei Provincial Electric Power Company, Wuhan, China, Post Code: 430077), ZHANG Yin-di, GUI Li-jia (National Key Laboratory on Coal Combustion, Central China University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074), LI Yan-qin (College of Chemical Industry and Energy Source, Zhengzhou University, Zhengzhou, China, Post Code: 450001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2012, 27(1). -81~85

In the light of the untractable problems that the in-furnance flow field on-line visual monitoring technologies for large-sized utility boilers are short of effective and convenient testing means, the authors performed a cold-state model test in a laboratory of the method for measuring a flow field based on the acoustic waves. On this basis the test results, they successfully applied the technology under discussion in No. 1 boiler in Guodian Changyuan Jingzhou Thermal Power Co. Ltd. and No. 1 boiler in Wuhan Steel-power Stock Co. Ltd. It has been found that the acoustic wave method-based boiler in-furnance cold state flow field on-line monitoring system thus developed can be widely