

分隔屏布置对四角布置切圆燃烧锅炉 水平烟道空气动力场的影响

张晋¹, 袁益超¹, 刘聿拯¹, 刘亚¹, 杨震², 郭琴琴²

(1. 上海理工大学能源与动力工程学院, 上海市 杨浦区 200093;

2. 上海锅炉厂有限公司, 上海市 闵行区 200245)

Influence of the Panel Superheater Layout on Air Dynamic Field in Tangentially Fired Boiler Horizontal Gas Pass

ZHANG Jin¹, YUAN Yi-chao¹, LIU Yu-zheng¹, LIU Ya¹, Yang Zhen², Guo Qin-qin²

(1. College of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology,

Yangpu District, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Boiler Works Co. Ltd, Minhang District, Shanghai 200245, China)

ABSTRACT: Based on the cold modeling test and computational fluid dynamics numerical simulation on a 600 MW tangentially fired boiler, the influence of the panel superheater layout on air dynamic field of the upper furnace and horizontal gas pass was researched to improve the situation of the flue gas velocity deviation. The flow characteristics in furnace and the forming mechanism of velocity deviation in the horizontal gas pass were analyzed, and the influence of panel superheater layout on the upper furnace flow distribution and velocity deviation in the horizontal gas pass was got. The results indicated that, compared with without panel superheater, the flow is closer to the wall in horizontal gas pass with panel superheater, the velocity deviation in local area has a greater increase, and the velocity deviation of left and right side in furnace outlet could be reduced to some extent, but the effect is not obvious.

KEY WORDS: tangentially fired boiler; panel superheater; velocity deviation; modeling experiment; numerical simulation

摘要: 为改善四角布置切圆燃烧锅炉水平烟道烟气偏差, 以某 600 MW 级锅炉为研究对象, 就分隔屏布置对其炉膛上部及水平烟道空气动力场的影响进行了冷态模化试验及计算流体力学数值模拟研究。通过分析气流流动特性和水平烟道速度偏差的形成机制, 得到分隔屏布置对炉膛上部气流分布及水平烟道速度偏差的影响规律。结果表明: 布置分隔屏使得水平烟道内气流相对于无分隔屏时更加贴近壁面, 局部区域速度偏差有较大的增加; 分隔屏可在一定程度上减小炉膛出口两侧速度偏差, 但效果不明显。

基金项目: 上海市科委重大科技项目(07dz12005)。

The Major Program of the Shanghai Municipal Science and Technology (07dz12005).

关键词: 切圆燃烧锅炉; 分隔屏; 速度偏差; 模化试验; 数值模拟

0 引言

四角布置切圆燃烧锅炉由于四角火焰的相互支持, 一、二次风的混合便于控制, 炉膛中央低压区煤粉、氧气和高温烟气等得到充分混合, 所以其燃烧效率高, 可燃用各种低挥发分和高灰分的煤种, 适合我国燃煤电站锅炉煤种多变和煤质逐渐变差的特点^[1-2]。但是这种锅炉由于炉内旋转上升气流至屏区入口时, 仍然存有残余旋转, 在引风机吸力的作用下, 使得水平烟道内左右侧气流速度发生偏差, 导致水平烟道内的烟速和烟温偏差, 这种偏差常会引起对流受热面超温爆管事故的发生^[3-4]。当前, 我国火电建设已经向着大容量、高参数发展, 若不采取相关措施, 烟温偏差会随着容量的增大而更加严重^[5-8]。据统计, 约 90% 以上的对流受热面超温爆管事故由此而引起, 这种情况严重威胁机组安全经济运行^[9]。

对于四角布置切圆燃烧锅炉炉内气流残余旋转引起的烟速、烟温偏差问题, 国内外学者和工程技术人员进行了大量的试验研究和技术攻关, 对引起热偏差的机制有了一定的认识, 并提出了许多减小烟温偏差的措施^[10-19]。一般来说减少热力偏差的方法有: 1) 调整工质侧的流量分配, 不过调节的流量范围小, 调节手段和技术也受到限制, 并使得流程或装置变得复杂; 2) 采用反切风技术削弱炉膛出口残余旋转, 改善水平烟道内速度和温度场均

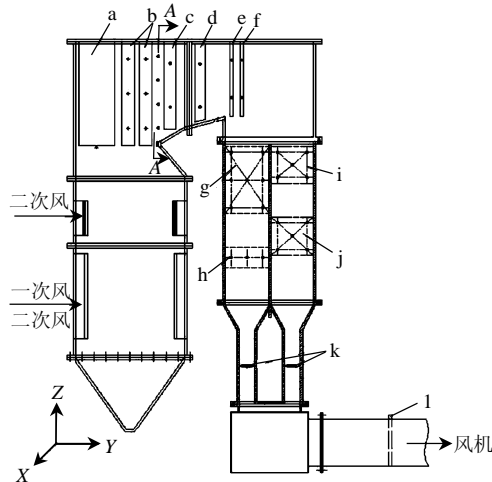
匀性，但是会因减弱炉膛内气流旋转强度而影响锅炉的燃烧性能。此外，有的学者提出利用分隔屏阻挡、整流作用，将分隔屏偏置一定角度以改善水平烟道内气流速度分布^[20]。但是，分隔屏偏置使得炉顶上方管系和设备布置复杂，工程应用价值受限。

本文以某 600 MW 级四角布置切圆燃烧锅炉炉膛上部及水平烟道为研究对象，利用冷态空气动力场模化试验和数值模拟相结合的方法，研究分隔屏布置对该区域空气动力场的影响，为过热器和再热器系统的布置优化及受热面烟气偏差而导致超温爆管问题的解决提供参考。

1 试验系统及方法

本文研究 600 MW 级四角布置切圆燃烧锅炉采用低 NO_x 同轴燃烧系统。其炉膛上部及水平烟道内依次布置屏式过热器、末级过热器、末级再热器，分隔屏、后屏、末级过热器、末级再热器。沿宽度方向分别布置 6、12、33、82 片；尾部烟道分为前、后两部分：前烟道布置低再水平段、低再侧省煤器，后烟道布置低过水平段、低过侧省煤器。其再热汽温采用烟气挡板调节方式。

试验模型采用纯几何相似的模化方法按与实炉 1:20 比例几何缩小而成，炉膛横截面尺寸为 940.8 mm×907.2 mm。根据该锅炉燃烧系统及受热面布置特点，设计的模化试验系统及模型内受热面布置如图 1 所示。模型炉膛上部及对流烟道内的受热面管束采用一定结构的有机玻璃板制作，以满足模化试验要求。试验系统采用引风方式，试验工况均进入第二自模区。



a—分隔屏；b—后屏；c—末级过热器；d—末级再热器；
e—低再垂直段；f—低过垂直段；g—低再水平段；h—低再侧省煤器；
i—低过水平段；j—低过侧省煤器；k—前后烟道挡板；l—双笛形管。

图 1 模化试验系统图

Fig. 1 Schematic of modeling experimental system

本文研究分隔屏布置对炉膛上部及水平烟道空气动力场的影响(如图 2)，为此，在末级过热器进口截面 A-A 的上部、中上部、中下部和下部不同高度上布置 4 个测孔，各测孔相对标高分别为距水平烟道底部 7/8、5/8、3/8、1/8。试验过程中，用 KA22 型热线风速仪(风速量程：低：0~4.99 m/s，高：5~50 m/s，满量程精度：±2%)测量各点气流速度。

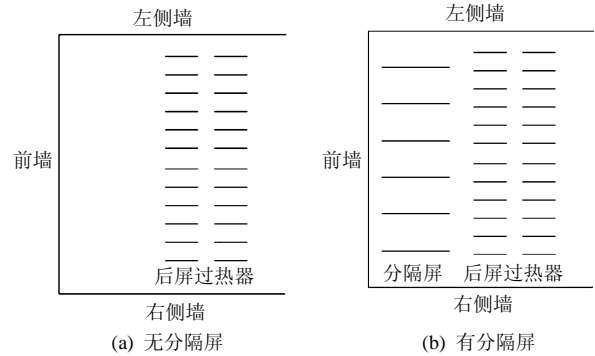


图 2 分隔屏布置示意图

Fig. 2 Schematic of Panel Superheater Layout

2 数值模拟方法

采用的 *k-ε* 模型和 SIMPLE 算法针对本文设计的某 600 MW 级超临界锅炉模化试验模型的炉膛上部及水平烟道内空气动力场进行了数值模拟。数值计算中控制方程的离散采用控制容积积分，控制方程对流项采用二阶迎风差分格式。受热面固体壁面均采用无速度滑移和无质量渗透条件。炉膛上部及水平烟道采用四面体单元网格；其他区域采用六面体单元网格，燃烧器喷口附近网格加密以提高差分格式精度，并保证绝大多数网格满足流体以垂直于网格边界的方向进入计算微元体，减少假扩散的影响。有、无分隔屏时网格总数分别为 110 万、103 万；计算残差小于 10⁻⁴，进出口流量相对误差小于 0.1%~0.5%，则认为计算收敛。

3 结果及分析

3.1 数据的整理

为便于描述水平烟道的速度分布特点，引入宽度方向速度偏差系数、整个截面宽度方向速度偏差系数、左右侧速度比、整个截面左右侧速度比等参数。其含义分别为：

1) 宽度方向速度偏差系数 η_w ，即：在水平烟道沿烟气流程某截面处一定高度上沿宽度方向各点的速度 w_i 与该高度上沿宽度方向所有点的平均速度 \bar{w}_i 之比，可表示为

$$\eta_w = \frac{w_i}{\bar{w}_i} \quad (1)$$

宽度方向速度偏差系数 η_w 反映水平烟道沿烟气流某截面处一定高度上沿宽度方向的速度不均匀性。

2) 整个截面宽度方向速度偏差系数 η , 即: 在水平烟道沿烟气流某截面处沿宽度方向不同高度上各点的平均速度 \bar{w}_j 与整个截面上所有点的平均速度 \bar{w} 之比, 可表示为

$$\eta = \frac{\bar{w}_j}{\bar{w}} \quad (2)$$

整个截面宽度方向速度偏差系数 η 反映水平烟道沿烟气流某截面处沿宽度方向的速度不均匀性。

3) 左右侧速度比 β_w , 即: 在水平烟道沿烟气流某截面处一定高度上烟道左侧各点的平均速度 \bar{w}_l 与烟道右侧各点的平均速度 \bar{w}_r 之比, 可表示为

$$\beta_w = \frac{\bar{w}_l}{\bar{w}_r} \quad (3)$$

左右侧速度比 β_w 反映水平烟道沿烟气流某截面处一定高度上烟道两侧速度偏差。

4) 整个截面左右侧速度比 β , 即: 在水平烟道沿烟气流某截面处烟道左侧各点的平均速度 \bar{w}_L 与烟道右侧各点的平均速度 \bar{w}_R 之比, 可表示为

$$\beta = \frac{\bar{w}_L}{\bar{w}_R} \quad (4)$$

整个截面左右侧速度比 β 反映水平烟道沿烟气流某截面处烟道两侧速度偏差。

3.2 水平烟道内速度偏差分析

图3、4分别表示由模化试验和数值模拟得到的无分隔屏、有分隔屏时宽度方向速度偏差情况, 图5为由模化试验和数值模拟得到的无分隔屏、有分隔屏时整个截面宽度方向速度偏差情况。从图中可以看出, 试验结果与数值模拟结果在整体规律上相一致, 说明数值模拟结果可以较好地反映炉内气流的流动特性和水平烟道内速度偏差。

表1为由模化试验得到的水平烟道两侧气流速度比。从表中可见, 有分隔屏和无分隔屏两种情况下烟道左侧平均速度均大于烟道右侧平均速度(左右侧速度比 β 均大于1), 其主要原因是: 该锅炉燃烧系统的设计使其炉膛内气流呈左旋上升, 且炉膛出口存在残余旋转, 引起水平烟道两侧气流流动状况明显不同, 造成水平烟道内速度偏差。图6、7所示的数值模拟结果表明, 对于进入右侧屏区的上升气流, 其切向速度方向指向炉前上方, 气流经过折焰角后先偏向炉前上方流动, 在前墙的阻滞和引

风机吸力的作用下, 气流转向屏区上方进入水平烟道; 对于进入左侧屏区的上升气流, 其切向速度方向指向水平烟道, 在引风机吸力的作用下, 气流经屏区直接进入水平烟道。

水平烟道下方近左侧墙处宽度方向速度偏差系数都比较大(见图3、4), 所以对于近左侧墙的屏局部速度偏差很大。但是由于近左侧墙的屏上方宽度方向速度偏差系数较小, 所以从整个屏的角度看, 近左侧墙的屏整个截面宽度方向速度偏差系数不是很大(见图5)。

无论有、无分隔屏, 水平烟道下部平均速度都比其他部位高(见表1)。其主要原因是, 末级过热器和末级再热器与折焰角及水平烟道底部之间有较大间隙, 且该处气流流程较短, 使得流动阻力小、流速高, 从而使水平烟道左下部为相对高速区。

表1 水平烟道两侧气流速度比
Tab. 1 Both sides of the flow velocity ratio in horizontal gas pass

位置	左侧平均速度 w_l (m/s)	右侧平均速度 w_r (m/s)	左右侧速度比 β_w	整个截面左右侧速度比 β	
无分隔屏	上部	5.88	5.43	1.08	1.25
	中上部	5.59	3.76	1.49	
	中下部	6.13	3.61	1.67	
	下部	7.18	7.03	1.02	
有分隔屏	上部	4.63	5.88	1.02	1.22
	中上部	5.09	4.8	1.06	
	中下部	5.89	2.52	2.34	
	下部	7.85	6.07	1.29	

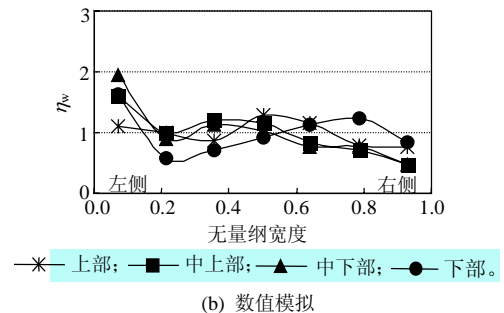
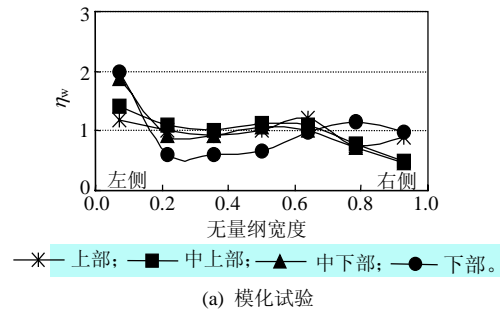


图3 无分隔屏时宽度方向速度偏差系数
Fig. 3 Width direction of velocity deviation coefficient without panel superheater

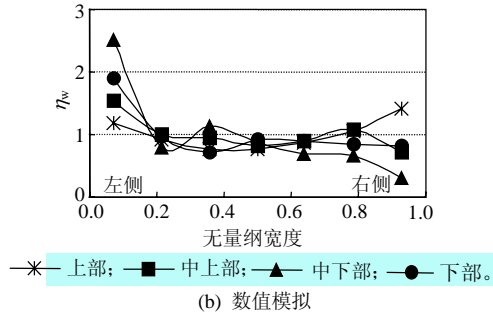
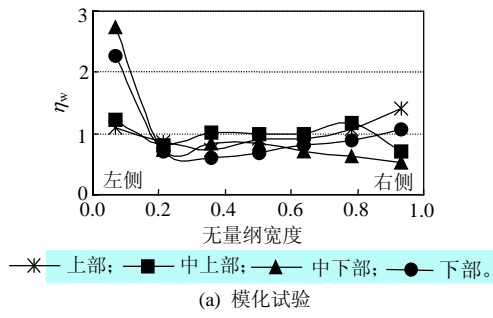


图 4 有分隔屏时宽度方向速度偏差系数
Fig. 4 Width direction of velocity deviation coefficient with panel superheater

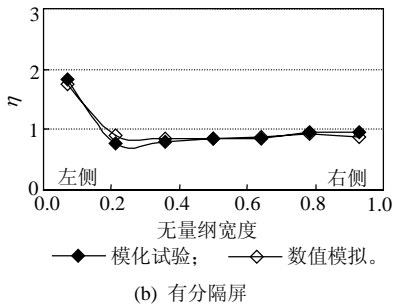
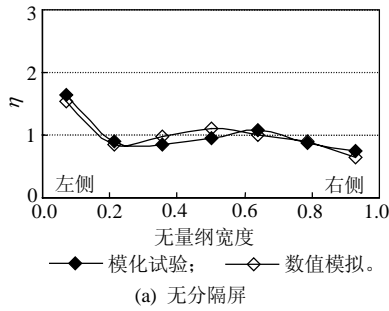


图 5 整个截面宽度方向速度偏差系数
Fig. 5 Width direction of velocity deviation coefficient on the entire cross-section

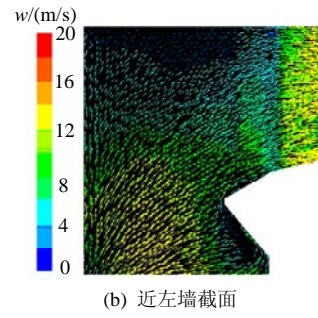
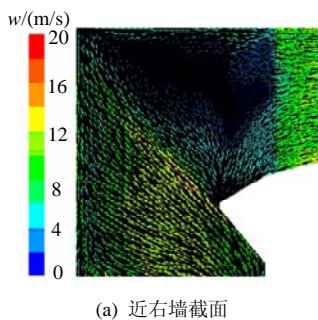


图 6 无分隔屏时近左、右墙截面速度分布
Fig. 6 Velocity distribution in the left side and right side of horizontal gas pass without panel superheater

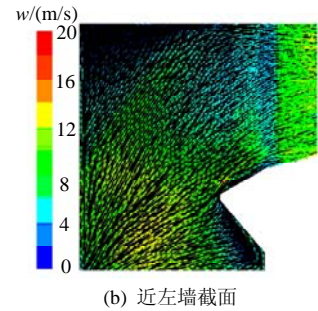
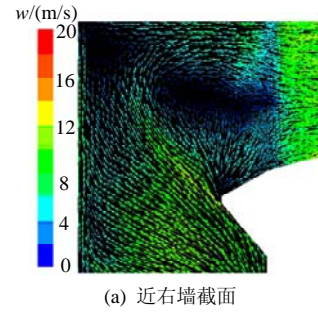


图 7 有分隔屏时近左、右墙截面速度分布
Fig. 7 Velocity distribution in the left side and right side of horizontal gas pass with panel superheater

3.3 分隔屏布置对速度偏差的影响分析

从表 1 可见：水平烟道中下部左右侧速度比 β_w 从无分隔屏时的 1.67 增加到有分隔屏时的 2.34，水平烟道上部左右侧速度比 β_w 从无分隔屏时的 1.08 减小到有分隔屏时的 0.79；而整个截面左右侧速度比 β 从无分隔屏时的 1.25 减小到有分隔屏时的 1.22，同时，比较图 3(a)和图 4(a)可见，有分隔屏时水平烟道中下部的宽度方向速度偏差系数有较大增加；所以，布置分隔屏使得炉膛出口两侧速度偏差有一定减小，同时也会使局部区域速度偏差有较大的增加，其原因分析如下：

对于进入右侧屏区的上升气流，无分隔屏时，在残余旋转的作用下，气流可以无阻挡地流向左侧；而有分隔屏时，在分隔屏的阻挡、整流作用下，气流不能顺利地流向左侧，大部分气流由右上方进入水平烟道，使得水平烟道上部和中上部两区域右

侧平均流速均有所增大,而左侧平均流速均有所减小。根据表1,水平烟道上部左、右两侧平均速度分别从无分隔屏时的5.88、5.43 m/s变化到有分隔屏时的4.63、5.88 m/s,水平烟道中上部左、右两侧平均速度分别从无分隔屏时的5.59、3.76 m/s变化到有分隔屏时的5.09、4.8 m/s。同时从图8(a)和图9(a)也可以清楚地看到,有分隔屏时,水平烟道上部气流相对于无分隔屏时更加贴近右侧墙,右上方流速明显增加。

同样,对于进入左侧屏区的上升气流,与无分隔屏时相比,有分隔屏时因气流不能顺利地流向右侧,造成水平烟道下方气流速度偏差有所增大。根据表1,水平烟道中下部左、右两侧平均速度分别从无分隔屏时的6.13、3.61 m/s变化到有分隔屏时的5.89、2.52 m/s,水平烟道下部左、右两侧平均速度分别从无分隔屏时的7.18、7.03 m/s变化到有分隔屏时的7.85、6.07 m/s;水平烟道中下部和下部两区域左右侧速度比 β_w 分别由1.67增加到2.34、1.02增加到1.29。同时从图8(b)和图9(b)可以看到,有分隔屏时,有相当一部分气流集中在屏式过热器和左侧墙之间通道里,使得局部区域速度偏差相对于无分隔屏时有较大的增加。

由于左、右两侧气流的综合作用,有分隔屏时在分隔屏的阻挡、整流作用下,气流不能在宽度方向自由流动,使得右侧气流流量相对于无分隔屏时有一定增加,两侧速度偏差减小。

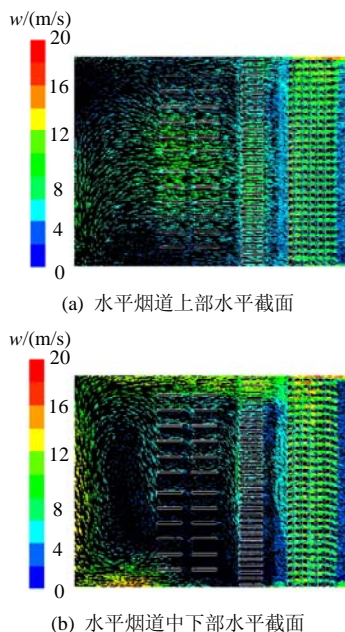


图8 无分隔屏各水平截面处速度分布

Fig. 8 Velocity distribution in each horizontal cross section without panel superheater

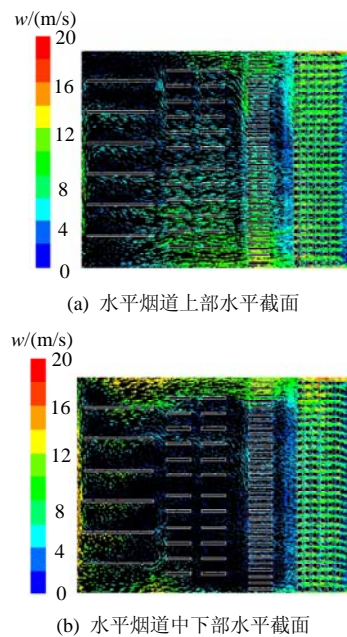


图9 有分隔屏各水平截面处速度分布

Fig. 9 Velocity distribution in each horizontal cross section with panel superheater

4 结论

本文针对某600 MW级四角布置切圆燃烧锅炉就分隔屏布置对炉膛上部及水平烟道空气动力场的影响进行了模化试验及数值模拟研究。根据研究结果,可以得到如下结论:

- 1) 在分隔屏的阻挡、整流作用下,水平烟道内气流相对于无分隔屏时更加贴近壁面,局部区域速度偏差有较大的增加。
- 2) 从整体看,布置分隔屏可在一定程度上减小炉膛出口两侧速度偏差,但效果不明显。

参考文献

- [1] 徐通模,袁益超,陈干锦,等. 超大容量超超临界锅炉的发展趋势[J]. 动力工程, 2003, 23(3): 2363-2369.
Xu Tongmo, Yuan Yichao, Chen Ganjin, et al. Developmental trend of super-large capacity and ultra supercritical boilers[J]. Power Engineering, 2003, 23(3): 2363-2369(in Chinese).
- [2] 陈辉,王文祥,严毅. 当前1000MW超超临界锅炉的主要技术特点[J]. 锅炉制造, 2009, 31(1): 10-14.
Chen Hui, Wang Wenxiang, Yan Yi. The currently main technical characters of 1000MW ultra-supercritical boiler[J]. Boiler Manufacturing, 2009, 31(1): 10-14(in Chinese).
- [3] 孙建. 超临界压力锅炉的过热器、再热器热偏差问题探讨[J]. 锅炉技术, 2006, 37(5): 48-51.
Sun jian. Investigation on superheater and reheater thermal deviation of supercritical pressure boilers[J]. Boiler Technology, 2006, 37(5): 48-51(in Chinese).
- [4] 胡海蓉,暴春风. 锅炉热偏差的分析与控制[J]. 锅炉制造, 2007, 29(4): 22-24.

- Hu Hairong, Bao Chunfeng. Analysis and control of thermal deviation of boiler[J]. Boiler Technology, 2007, 29(4): 22-24(in Chinese).
- [5] 袁益超, 庄恩如, 冯景源, 等. 四角布置切圆燃烧锅炉水平烟道内烟温分布的试验研究[J]. 动力工程, 2000, 20(4): 735-739.
Yuan Yichao, Zhuang Enru, Feng Jingyuan, et al. Experimental study of flue gas temperature distribution on horizontal flue in pulverized coal tangentially fired boiler[J]. Power Engineering, 2000, 20(4): 735-739(in Chinese).
- [6] 刘秦生, 姚本荣, 许晋源. 切向燃烧锅炉水平烟道中烟速偏差成因的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 49-53.
Liu Taisheng, Yao Benrong, Xu Jinyuan. The research of the cause of velocity imbalance in a tangentially-fired furnace[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 49-53(in Chinese).
- [7] 周月桂, 徐通模. 四角切向燃烧锅炉烟道烟速偏差的实验研究与数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(1): 68-72.
Zhou Yuegui, Xu Tongmo. Experimental and numerical study on the flue gas velocity deviation in a tangentially fired boiler furnace [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(1): 68-72(in Chinese).
- [8] 朱珍锦, 刘松, 张长鲁. 四角切圆锅炉炉内等温气流旋转特性的研究[J]. 动力工程, 2000, 12(6): 927-932.
Zhu Zhenjin, Liu Song, Zhang Changlu. Research on rotating characteristics of isothermal air-flow in tangentially fired utility boiler[J]. Power Engineering, 2000, 12(6): 927-932(in Chinese).
- [9] 李永光, 李岸然, 白宏刚, 等. 用扭曲分隔屏消除锅炉水平烟道的烟速偏差[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(17): 34-38.
Li Yongguang, Li Anran, Bai Honggang, et al. Investigation of using screwy superheater panels to reduce the velocity deviation of tangentially fired boiler horizontal gas pass[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(17): 34-38(in Chinese).
- [10] 唐从耿, 刘丛涛, 张裕嘉, 等. 锅炉受热面热偏差的改进措施[J]. 动力工程, 2006, 26(6): 773-779.
Tang Conggeng, Liu Congtao, Zhang Yuji, et al. Countermeasures for reducing thermal deviation on boiler's heat delivery surfaces[J]. Power Engineering, 2006, 26(6): 773-779(in Chinese).
- [11] Shafii M B, Faghri A, Zhang Y. Thermal modeling of unlooped and looped pulsating heat pipes[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2002, 12(3): 1159-1172.
- [12] 袁益超, 刘聿拯, 陈之航. 大型电站锅炉烟温与汽温分布理论分析与试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 56-61.
Yuan Yichao, Liu Yuzheng, Chen Zhihang. Theoretical analysis and experimental research on temperature distribution of flue gas and steam in large capacity utility boilers[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12): 56-61(in Chinese).
- [13] 罗永浩. 应用旋流器控制并联管组中流量分配的实验研究[J]. 动力工程, 2000, 20(4): 750-759.
Luo Yonghao. Experimental study of applying a swirl generator to control the flow distribution in manifolds[J]. Power Engineering, 2000, 20(4): 750-159(in Chinese).
- [14] 王恩禄, 张海燕, 罗永浩, 等. 电站锅炉分配集箱静压分布参数的确定[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(7): 1187-1192.
Wang Enlu, Zhang Haiyan, Luo Yonghao, et al. Formula of static pressure distribution parameters for calculating the static pressure distribution in distributing headers of utility boiler[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(7): 1187-1192(in Chinese).
- [15] Paul R, Thibeault B, Robert C, et al. Furnace aerodynamics and thermal performance in tangentially fired steam generators [R]. Windsor: ABB-CE, 1992.
- [16] 李彦鹏, 张强, 顾璠, 等. 二次风反切对大容量切向燃烧锅炉烟气偏差影响的数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 33-37.
Li Yanpeng, Zhang Qiang, Gu Fan, et al. Numerical study on the effect of reverse swirl of secondary air on flue gas imbalance in large tangentially fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 33-37(in Chinese).
- [17] 刘平元, 陈朝松, 张妮乐, 等. 辅助风反切方式在1175t/h锅炉再热器热偏差改造中的应用[J]. 动力工程, 2009, 29(7): 618-621.
Liu Pingyuan, Chen Chaosong, Zhang Nile, et al. Application of counter tangential auxiliary air on reheater retrofit of a 1175t/h boiler against heat deviation[J]. Power Engineering, 2009, 29(7): 618-621(in Chinese).
- [18] 赵宗让, 章明川. 切向燃烧锅炉一次风逆向偏转燃烧技术的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(1): 54-57.
Zhao Zongrang, Zhang Mingchuan. Application study on the combustion technology by counter-offsetting primary air and coal streams for tangentially-fired boilers[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(1): 54-57.
- [19] 刘恩生, 吴安, 胡兴胜, 等. 邹县发电厂6号锅炉再热器热偏差的改造措施[J]. 动力工程, 2008, 28(1): 6-13.
Liu Ensheng, Wu An, Hu Xingsheng, et al. Remedial measures for heat deviation of the reheater of Zouxian power plant's boiler No.6[J]. Power Engineering, 2008, 28(1): 6-13(in Chinese).
- [20] 李永光, 朱珍锦, 刘松, 等. 一种消除四角喷燃锅炉水平烟道流速偏差的新方法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(12): 18-21.
Li Yongguang, Zhu Zhenjin, Liu song, et al. A new method for reducing the flow velocity deviation of tangentially fired utility boiler horizontal gas pass[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(12): 18-21(in Chinese).



张晋

收稿日期: 2010-01-25。

作者简介:

张晋(1986—), 男, 硕士研究生, 研究方向为强化传热技术, zhangjin805059@163.com;

袁益超(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为大型电站锅炉技术、强化传热技术等, 本文通讯作者, ychyuan@163.com。

(责任编辑 王庆霞)