

二次风量非均匀配比控制烟气偏差的理论分析及模型试验

张小可, 丘纪华

(华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 针对切向燃烧锅炉普遍存在的烟气偏差问题, 从工程应用角度出发, 提出新的调节方式。通过调整上二次风量的分配, 形成炉内烟气流动中局部的高压富燃区, 挤压火焰主流, 改变炉膛出口烟气流量分布, 控制烟气偏差。从理论上分析其可行性, 并通过冷态模化试验等研究手段进行检验。研究结果表明, 这种调节手段可以平衡水平烟道两侧流量, 达到削弱残余旋转, 减小烟气偏差的目的。

关 键 词: 锅炉; 煤粉燃烧; 烟气偏差; 二次风调节; 模化试验

中图分类号: TK227.1 文献标识码: A

1 引言

对于四角切向燃烧方式的锅炉, 大型化后普遍存在炉膛出口两侧烟气温度和速度的偏差, 容易导致过热器和再热器一侧超温爆管, 严重影响了电站锅炉的安全经济运行。大量研究认为^[1~2]: 大型四角燃烧锅炉在炉膛出口会有较强的残余旋转, 并由此导致水平烟道两侧的偏差。因此, 减小炉膛出口气流的残余旋转, 使得水平烟道处烟气流量均匀, 是减少烟气偏差的主要途径。

目前常用的解决办法有^[1]: 通过反切削弱炉膛出口气流的残余旋转, 以及在各受热面之间加装混合联箱或左右交叉系统。这些办法在实际应用中取得了较好的效果, 但均要对锅炉本体进行改动, 改变锅炉结构, 这给工程实施增加了一定难度。此外也有考虑如加高炉膛, 偏置导流屏, 改造折焰角或是下移燃烧器等方法^[3~4]。

如果能在不改动锅炉的前提下, 调节燃烧器四角各喷口的风量, 造成炉膛中风量分布的不均匀, 平衡炉膛出口两侧烟气流量, 从而达到削弱残余旋转, 减小烟温汽温偏差的目的。这样在较少的改动下, 实现烟速烟温偏差的控制, 可为四角燃烧锅炉的实际运行及燃烧器配风设计提供依据, 将会有较好的

实用价值和应用前景。

本文针对这一改造思路作了理论分析和试验研究。

2 理论分析

2.1 产生烟气偏差的原因

四角布置切向燃烧方式的锅炉具有炉内燃料、空气和烟气混合强烈的特点, 由此产生良好的燃烧条件。并由于气流的旋转, 使火焰自上游点燃下游邻角气流, 促使煤粉气流着火燃烧。而且这种旋转气流呈螺旋状上升到炉膛出口, 延长了煤粉颗粒在炉内的行程, 有利于煤粉的燃尽。因此, 这种炉型在国内外得到了广泛的应用。

但这类锅炉在大型化时, 水平烟道处烟气的速度偏差和温度偏差也相应增加。据有关文献报道, 炉内烟气旋转的切向气流动量矩与锅炉容量有以下关系^[1]:

$$(\rho Q B) R \propto D^{1.33}$$

式中各符号分别对应的物理量: 烟气密度 ρ ; 燃烧所需风量 Q ; 燃料消耗量 B ; 假想切圆半径 R ; 锅炉容量 D 。

由上式分析可知, 炉膛的中心火焰旋转的切向气流动量矩比容量的增长更快。如何减小炉膛出口气流的残余旋转动量强度, 使得烟道处烟气流量均匀, 是减少烟温偏差的主要途径。电站锅炉改造多采用同心反切方式削旋, 以期减小偏差, 从理论分析和实际应用上看, 这种方式有一定效果, 但有些锅炉并未按预期的设想解决偏差问题。因此有必要对炉内燃烧流动作进一步的研究。

2.2 上部二次风控制烟气偏差

通常认为, 煤粉到达炉膛出口时, 基本燃烧完全, 整个烟气的压力温度比较平均。而对于大型锅

炉,烟气到达炉膛出口时,旋转动量强度尚未完全衰减,逆时针旋转上升的气流多从右侧烟道流走,而且烟温分布与烟速分布具有相同的趋势,因此右侧过热再热管段处于很恶劣的工作环境。即导致烟速偏差的主要原因是残余旋转,烟温偏差则是由于烟速偏差导致单位烟气放热量的不同而引起。

但在实际运行中发现,水平烟道处的烟速和烟温分布并不总是遵循这一规律,有时速度和温度两者分布趋势相反,有时左侧的烟速和烟温反比右侧高。

这种现象往往是由于运行中四角配风或粉量输送的波动引起的,如各角一次风管给粉或是二次风量分布的不均匀。这就提供了一个思路,即通过调节风量的方式,可以改变水平烟道处烟气的流量分布和温度分布,实现烟气偏差的控制,而且这种调节手段也比较容易在现场实现。

某些锅炉运行情况表明,到达炉膛出口时,煤粉尚未燃烧完全,烟气内部存在流动传热。一方面,锅炉燃煤成份并不稳定,很难保证烟气在到达炉膛出口时,其内部压力温度已经均匀;另一方面,煤粉在锅炉中燃烧后体积膨胀,压力变化产生的影响也较少考虑。由于运行中风粉量的波动变化,常有颗粒浓度分布与烟气分布的不一致。可见炉膛出口烟气的速度和温度分布受多种因素影响,它不仅与燃烧器安装角度、风粉配比有关,还与炉膛尺寸、煤粉颗粒运动及其燃烧特性有关。如文献[4]中提到,启停三次风对烟温的影响。三次风中细粉着火晚,燃烧放出的热量还未充分混合均匀,就进入了水平烟道,这也是造成烟温偏差的主要原因。

从以上分析中可得到以下调整方案:通过调节某层喷口各角的风量,形成烟气流动中局部的高压富燃区。该区域的烟气体积迅速膨胀,温度升高,压力增加,造成炉膛内烟气温度、压力及密度分布的变化,将到达炉膛出口时原本处于右侧的火焰主流挤压至中部。可以改变气流的流动方向和温度分布,迫使水平烟道两侧烟气流量基本平衡。起到加强气粉混合,削弱残余旋转,减小烟速烟温偏差的目的。

对于四角切向燃烧型锅炉,一次风输送燃料,二次风提供燃烧所需的空气。一次风作为着火源,其输送的煤粉在该层平面分布应该均匀,否则可能会造成燃烧不稳、结焦甚至灭火等不良后果。而采用二次风量调节,对燃烧主体的影响要小一些。此外,旋转气流上升衰减,燃烧器下部风量的调整对削弱残余旋转的作用较小。因此选择最上层的二次风喷口,作

为控制调节的重点。

当然,调整上部二次风是否会造成锅炉燃烧不稳、飞灰可燃物偏高等不良后果,我们正在作进一步的研究。如果能用较小的代价,取得比较明显的效果,从总的效益上来看,这将是调整烟温、汽温偏差、减少爆管的一个可行的办法。

3 试验模拟

3.1 模拟方法

根据以上分析,建立试验台架,用以研究上二次风量分配对炉膛出口烟气流量的影响。该试验主要观察调节后的衰减及流动情况。

试验模拟满足以下几个基本条件:

(1) 模型按原型结构成比例缩小(1:50),满足几何相似;

(2) 模型中流动处于第二自模化区;

(3) 模型与原型出口一、二次风动量流率比相同;

(4) 由于水平烟道处流量分布与烟气旋转密切相关,为保证与烟气旋转的相似性,模型与原型的旋流准则数相等。

此外,考虑到风粉喷入炉膛后会剧烈燃烧,体积很快膨胀,烟气密度减小,炉膛中的体积流量会远大于燃烧器喷口流量。故本试验加大了喷口流量。文献[5]的研究表明,煤粉射流的初期燃烧最强烈处在 $Y_c = b/2$; b 为射流的半宽度,与锅炉结构尺寸相比较小。通过计算将燃烧后的烟气量比拟为相应工质流量,放大后移到喷口,能较好的模拟实际工况。

3.2 试验系统

目前的模型试验多采用冷空气模拟,尽管能获得比较准确的试验数据,但观察效果不够直观。为研究流动状况,以便对上二次风喷口流量调节对炉膛出口宽度方向的流量分配有一个感性认识,选用水作为试验工质,采用透明材料有机玻璃制作模型,通过示踪溶剂观察工质的流动和交换过程。

本试验以某电厂670t四角切向燃烧锅炉为原型,适当简化后建立模型试验台。在模型的水平烟道处,沿宽度方向布置槽道,模拟屏式过热器,测量相应的水流量以便比较调节效果。

试验台架结构如图1。槽道及燃烧器各角的编号如图所示。

3.3 数据处理

由于水与烟气特性存在差别, 试验数据主要起定性的作用, 因此本试验采用水平烟道各段的流量占总流量的百分比来评价偏差特点, 定义偏差量为烟道处左侧流量与右侧流量之比。各段流量通过容器收集称重获得。各工况的试验次数为 10 次, 并根据测量要求取平均数。

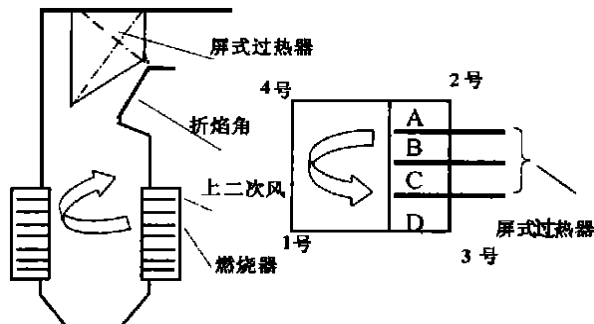


图 1 模型结构示意图

4 试验观察及结果分析

4.1 工况选择

根据研究目的, 选择以下试验工况:

设计工况: 各喷口流量严格按照电站锅炉设计值的模化数据选取。

调节工况: 根据理论分析, 以及前面工作的实际经验, 调整上部二次喷口流量。观察流动状况, 并记录流量数据。试验工况列于表 1。

表 1 试验工况及试验结果

试验工况	上二次风喷口各角流量配比				试验结果	
	1号角	2号角	3号角	4号角	两侧流量偏差情况	偏差量
设计工况	25	25	25	25	右侧流量较高	0.815
调节工况 1	40	20	20	20	左侧流量较高	1.228
调节工况 2	20	40	20	20	两侧流量比较均匀	1.049
调节工况 3	20	20	40	20	右侧流量高	0.788
调节工况 4	20	20	20	40	左侧流量高	1.360

4.2 设计工况分析

对设计工况的模拟测量和观察发现:

(1) 尽管经过折焰角后, 流体的旋转动量有所削弱, 但通过示踪溶剂可以观察到依然存在较强的残余旋转;

(2) 水平烟道处右侧流量大于左侧流量。可以看出, 从右侧短路流走的占很大比例, 而且流速最大处接近

烟道中部的右侧;

(3) 左侧接近炉膛出口处, 有小的漩涡, 存在回流, 流速相对较低。

可以看出, 残余旋转是造成烟气偏差的主要原因。此外, 由于屏的存在, 阻碍了流体的流动, 在一定程度上使烟气流量偏差加剧。

4.3 调整后流场分布

根据前面的分析, 对二次风量重新分析, 观察上部二次风各角流量变化对水平烟道流量分布的影响。各角流量分布及试验结果列于表 1。

按调节工况 1, 加大前墙右侧流量后, 由于该角射流的速度方向斜向后墙右侧, 与整个旋流迭加后, 冲击主流偏向左侧, 削弱了残余旋转。与设计工况相比, 烟道左侧的流量有明显提高, 可以看到流速最大处在烟道中部稍偏左, 其两侧流速逐渐减小。可能是 1 号角流量比例稍大, 右侧接近炉膛出口处, 由于主流牵引产生了小的涡团。相对原设计工况, 右侧流量比例减小, 起到了减小偏差的作用。

按调节工况 2, 加大后墙左侧流量, 该角射流方向斜向左侧前墙, 使主流偏向烟道右侧, 烟道中部流量较高, 烟道各段流量分布不均匀。由于后墙射流的速度方向与整体流动方向相反, 烟道最右侧受其影响较大, 有比较明显的回流, 导致 D 段流量较小。

当加大后墙右侧流量, 烟道两侧的流量分布没有明显改善, 尽管主流位置偏向左侧, 但该角射流方向朝前, 导致烟道左侧有小的涡团和回流, 流量没有明显提高, 因此两侧偏差依然较大。

调节工况 4 加大了前墙左侧流量, 前墙压力较高, 加上流动整体向前, 烟道左侧流量增加, 而 C 段上部稍有回流。烟道流量分布不太均匀, B 段流速较高。

以上现象说明, 当某一角的流量变化时, 能够影响到炉膛出口的流量分布, 而且其分布与喷口位置有密切关系。

以上各工况的试验数据列于图 2。

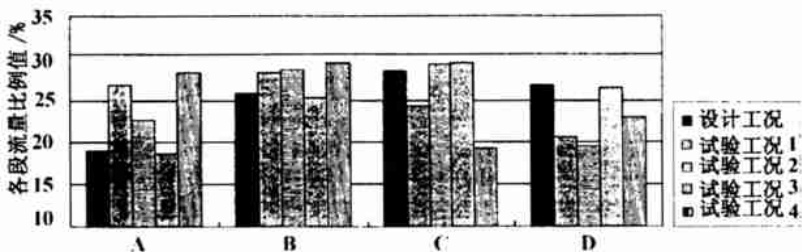


图 2 沿水平烟道宽度方向各段流量分布图

由于水的密度远大于烟气的密度, 流动时受重力的影响较大, 因此水平烟道各段的流量比较一致, 偏差值还不是很明显。锅炉在实际运行时, 偏差要大得多。通过试验, 可以定性地观察到各段流动特点。

从水模试验的观察结果可以看出, 调节上二次风喷口流量, 可以改变炉膛出口的流量分布。在实际运行中, 由于燃烧项的加入, 体积膨胀剧烈, 这种调节手段的影响可能更加明显。可以认为, 通过调节上部二次风量的分布, 能够起到削弱残余旋转, 减小偏差的作用。至于怎样的风量分配比较合适, 还有待进一步研究。

5 结论

本文对目前大型炉膛普遍存在的烟温烟速偏差问题进行了初步的探讨, 提出了一些新的调节方式, 并通过试验手段进行验证, 有一定的实用价值。就理论分析和试验结果, 可以得出以下结论:

(1) 分析认为, 引起炉膛出口烟速烟温偏差的

主要原因是炉内气流的残余旋转。通过调节上二次风喷口各角的风量, 形成烟气流动中局部的高压富燃区, 挤压火焰主流, 改变烟速烟温分布。可以起到迫使水平烟道两侧烟气流量基本平衡的目的。

(2) 通过水模试验, 采取调节上二次风量在各角的不均匀分配, 达到了削弱炉膛出口残余旋转, 减小烟气偏差的目的。

参考文献:

- [1] 郭宏生, 徐通模, 惠世恩, 等. 四角布置切向燃烧锅炉水平烟道烟温、汽温偏差原因分析及防止对策[J]. 动力工程, 1996, 16(2): 9-13.
- [2] 龚文字, 周月桂, 周屈兰, 等. 引进型 600 MW 切向燃烧锅炉烟气偏差的试验研究[J]. 动力工程, 1999, 19(2): 37-40.
- [3] 丁士发, 曹汉鼎, 许晋源. 四角切圆燃烧锅炉折焰角结构分析[J]. 动力工程, 1999, 19(2): 19-23.
- [4] 陈刚, 顾玉春, 谢勇. 三次风下移减小大容量煤粉锅炉烟温偏差[J]. 锅炉技术, 2000, 31(3): 27-29.
- [5] 丘纪华, 李佛金, 陈刚, 等. 煤粉射流燃烧特征试验及数值模拟[J]. 华中理工大学学报, 1996, 24(11): 107-109.

(渠源 编辑)

(上接第 266 页)

5 结论

(1) 通过冷态模化实验研究发现, 在原设计工况下, 炉内能够形成 W 型火焰, 主气流转弯在冷灰斗拐角处的下沿左右, 火焰行程较长。沿炉深方向火焰具有良好的对称性, 在炉宽方向未发生明显的不均匀现象, 动量流率比 $M_{拱}; M_{2D}; M_{2E}; M_3; M_{2F}$ 为 1; 0.25; 0.33; 1.33; 0.85。

(2) 三次风对于炉内流场的合理性具有重要作用。从极端工况(即缺少三次风的工况)中可以看出, 在其余参数与工况 1 保持一致, 关掉三次风的情况下炉内仍能形成较为对称的 W 型火焰, 但此时的火焰行程变长, 主气流运行至炉底并与炉底发生碰

撞后才转弯向上。

(3) 高速水平送入的三次风对于拱上主气流有明显的阻碍作用, 在适当的范围内提高拱上一次风风速并不会发生火焰冲刷冷灰斗, 当动量流率比 $M_{拱}; M_{2D}; M_{2E}; M_3; M_{2F}$ 增大到 1; 0.1; 0.14; 0.55; 0.35 火焰开始发生短路。

参考文献:

- [1] 魏小林, 徐通模, 惠世恩. W 型火焰锅炉冷态模型实验及数值计算[J]. 动力工程, 1994, 14(1): 27-32.
- [2] 李之光, 相似与模化[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
- [3] 岑可法. 锅炉燃烧实验研究方法及测量技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [4] 徐通模. 锅炉燃烧设备[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990.
- [5] 许晋源. 燃烧学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.

(渠源 编辑)

—2001, 16(3). —271~274

A detailed discussion was conducted concerning a blast furnace gas-fired 50 MW high-pressure boiler. Expounded were the combustion technology, which can promote the stable ignition of a blast furnace gas-fired boiler, and the latter's structural design features. After an analysis of the influence of blast furnace gas firing on the boiler's thermodynamic parameters, heat transfer characteristics and heating surface layout the authors have proposed a layout scheme suitable for a blast furnace gas-fired boiler. The first blast furnace gas-fired 50 MW boiler in China has been manufactured based on the above study results. Its successful operation experience indicates that with the blast furnace gas firing-related pollution issues effectively resolved this type of boiler will enjoy broad prospects of application in metallurgical industries. **Key words:** blast furnace gas, high-pressure boiler, research, design, operation

汽轮机调节系统中存在摩擦与间隙的响应特征研究=A Study of Response Characteristics of a Steam Turbine Governing System in the Presence of Friction and Clearance [刊, 汉] / DAI Yi-ping, DENG Ren-gang, SONG Xiao-wei (Turbomachinery Research Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049), XIE Dan-mei (Wuhan University of Water Resources and Electric Power, Wuhan, China, Post Code: 430072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(3). —275~277

Due to component wear, working oil-related pollution and ingress of foreign matter there may emerge cases of friction and an enlarged clearance in the governing system of a steam turbine. The foregoing can lead to a system limit-ring oscillation. When the friction resistance increased to a certain degree, seizure of moving parts may take place, posing a serious threat to the safety of the turbine unit. From the perspective of time-domain response and the analysis of frequency spectrum the authors have studied the response characteristics of the steam turbine governing system in the presence of friction and clearance. With the response characteristics of the friction and clearance being identified the present paper can serve some useful purpose for system status monitoring and failure diagnosis. **Key words:** steam turbine, governing system, nonlinear system, response characteristics

二次风量非均匀配比控制烟气偏差的理论分析及模型试验= Theoretical Analysis of Gas Deviation Control Based on Non-uniform Distribution of Secondary Air Flow and Its Related Model Testing [刊, 汉] / ZHANG Xiao-ke, QIU Ji-hua (National Key Lab of Coal Combustion under the Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(3). —278~281

With regard to the common problem of gas deviation in a tangentially fired boiler this paper presents a new regulation approach from the perspective of engineering applications. Through an adjustment of the distribution of secondary air flow created is a local high-pressure and fuel-rich zone in the in-furnace gas flow. By squeezing and impacting on the flame main flow this zone can change the gas flow distribution at the furnace outlet, thus limiting the gas deviation. The feasibility of such a method has been validated from a theoretical analysis and checked by way of a cold model test. The results of study indicate that under this method of regulation the gas flow at the two sides of the horizontal flue duct can be balanced, resulting in a weakening of the residual swirl and a decrease in gas deviation. **Key words:** boiler, pulverized coal combustion, gas deviation, secondary air regulation, model test

燃气轮机装置中湿压缩过程的一般规律及性能= General Laws Governing Wet Compression Process in a Gas Turbine Plant and the Process Performance [刊, 汉] / WANG Yong-qing, YAN Jia-lu, LIAN Le-ming (Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), LIU Ming, He Jian-yun (Liaoning Provincial Energy General Co., Shenyang, China, Post Code: 110014) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(3). —282~286, 310

Based on the basic principles of thermodynamics as well as heat transfer and mass transfer the authors have studied the general laws governing wet compression process in a gas turbine unit and the process performance. This research work provides to a certain extent a theoretical basis for the implementation of the wet compression technology. **Key words:** gas