

反切配风对大容量锅炉炉内流场特性影响的研究

(西安交通大学热能工程系, 陕西 西安 710049) 周屈兰 奚文宇 周月桂 徐通模 惠世恩

摘要: 通过实验测量和数值模拟研究了大容量锅炉的炉内流场特性。实验测量和数值模拟的结果完全吻合, 并得出如下结论: 大容量锅炉的炉膛出口存在由残余旋转引起的速度偏差; 大容量锅炉的燃烧器区域的实际切圆有贴壁倾向; 二次风反切的配风方式可有效降低炉内旋转动量流率矩的水平, 并明显削弱了炉膛出口的残余旋转。

关键词: 锅炉; 二次风反切; 模型试验; 数值模拟

中图分类号: TK223.23

文献标识码: A

1 引言

四角布置切向燃烧是我国火电厂锅炉的主要燃烧方式。运行实践证明, 锅炉水平烟道沿宽度方向上存在较大的烟温偏差, 从而引发频繁爆管事故, 并且, 随锅炉容量的增加, 烟温偏差有增大的趋势, 严重影响了锅炉运行的安全性和经济性。因此, 如何改善水平烟道内的烟气分布是急需解决的课题。

目前, 学术界对此问题较一致的看法是由于炉膛出口处存在残余旋转而造成烟气流速沿流通截面分布不均匀, 即烟速偏差^[1]。所以, 如何削弱炉膛出口的残余旋转成为问题的关键。燃烧器部分二次风反切正是通过反切气流与主体正旋气流间剧烈的动量、质量交换, 使得主体气流旋转强度降低, 炉膛出口残余旋转减弱, 从而改善了水平烟道中左右侧速度分布的均匀性。因此, 掌握炉膛内的流场结构随配风状况的变化规律, 寻求合理的反切动量流率矩就成为本文的研究任务。本文从实验测量和数值模拟两条途径对炉内的流场进行了详细的分析。

2 试验系统及试验内容

本文以国产 600 MW 机组四角布置切向燃烧锅炉为原型进行了炉膛空气动力场冷态等温模拟试验, 采用纯几何相似的模化方法。为此建立了 1:25 的模型试验台, 试验系统与测点布置见图 1。气流

速度采用恒温热线风速仪测量。

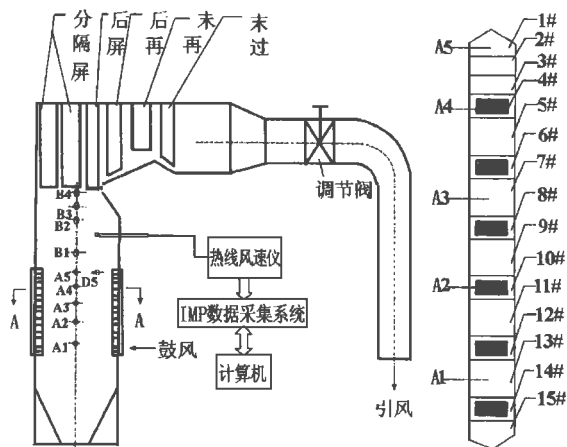


图1 试验系统与测点布置

在进行工况设计时, 根据文献[2]引入反切与正切射流的旋转动量流率矩之比 XJ 这个无量纲准则数来作为炉内燃烧空气动力工况的基本判据, 其定义如下:

$$XJ = \frac{\sum(\rho QWR)_{\text{反切}}}{\sum(\rho QWR)_{\text{正切}}}$$

其中: ρ 为燃烧器喷口射流密度 (kg/m^3); Q 为燃烧器喷口射流体积流量 (m^3/s); W 为燃烧器喷口射流速度 (m/s); R 为燃烧器喷口射流形成的假想切圆半径 (m)。工况设计及相应的 XJ 见表 1。

表1 试验工况设计

工况	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
反切层数	无反切	1#2#	1#2#	1#2#3#(20°)	1#2#3#(20°)
及角度		(20°)	3#(20°)	5#(15°)	5#7#9#(15°)
XJ	0	0.41	0.7	1.12	2.69

主要的测量对象是炉内的速度场, 并由速度场推算出炉内表征旋转的物理量——炉内气流旋转动量流率矩 $(\rho QW)R$ 沿炉膛高度 H 的分布, 计算式为:

收稿日期: 1999-01-06

基金项目: 机械部技术发展基金委员会资助项目(95JB1101)

作者简介: 周屈兰(1974-), 男, 湖南涟源人, 西安交通大学能源与动力工程学院热能工程系锅炉实验室, 博士生。

<http://www.cnki.net>

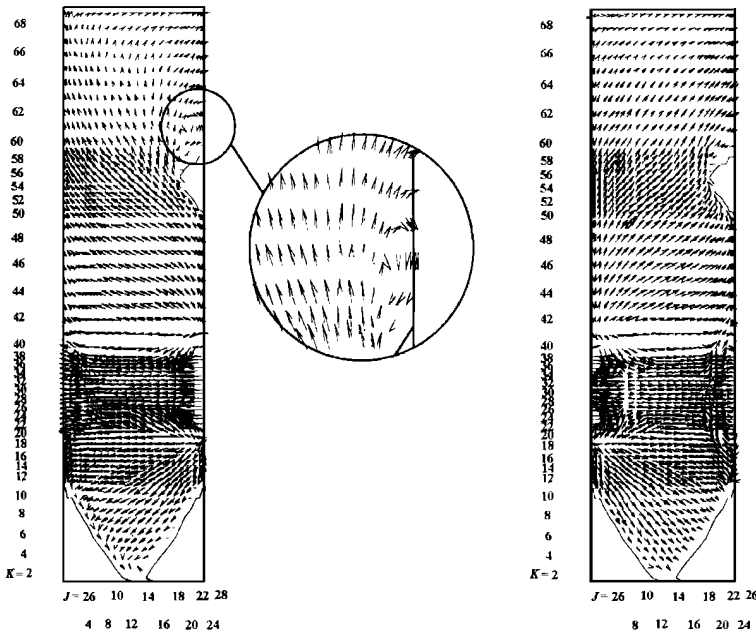


图 2 (a) 工况 1 左墙流场图谱 (b) 工况 1 右墙流场图谱

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w \phi) = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z}) + S$$

其中, ϕ 为通用变量, Γ 为扩散系数, S 为源项。采用 SIMPLE 算法求解。

程序对冷态模拟实验台进行了数值模拟, 为适应整个炉膛模拟的需求, 使用非均分交错网格系统, 将炉膛剖分为主 $26 \times 26 \times 68 = 459\ 68$ 个网格。

壁面条件用高 Re 数的壁面函数法, 将第一个内节点布置到旺盛湍流区, 假设其速度分布为对数分布, 计算出当量壁面扩散系数 μ_t 。进口条件根据假想切圆的大小计算出进口气流的方向角 α, β , 然后在各相应的边界节点赋上相应的速度值。出口条件为防止计算过程中回流区延伸到出口截面引起发散, 使用“出口流速提升法”。

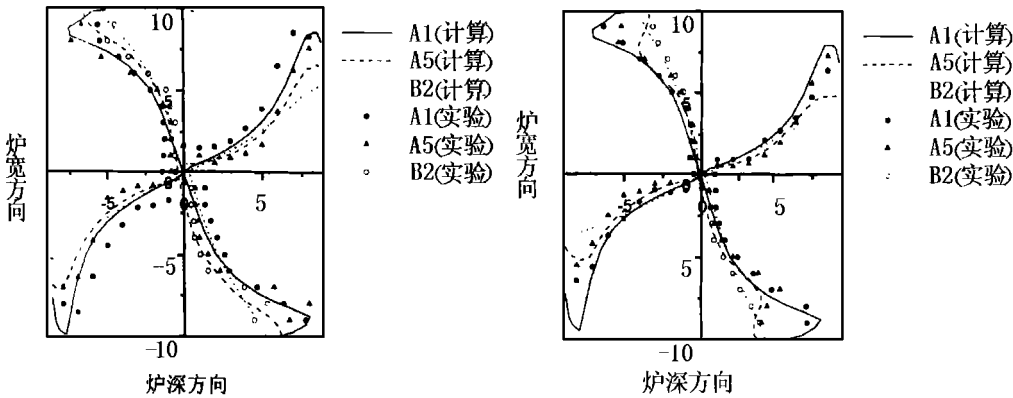


图 3 工况 1(左)和工况 4(右)的切向速度分布

4 实验研究与数值模拟的结果分析

4.1 炉内流场状况

数值模拟所得的部分流场图谱如图 2。其中, 图 2(a) 为工况 1 左墙的流场图谱, 图 2(b) 为工况 1 右墙的

流场图谱。从图中可以看出, 左墙的气流在经过折焰角后, 先冲刷前墙的顶部, 然后折向水平烟道。而右墙的气流在经过折焰角后直接冲刷水平烟道。这正是炉膛出口存在残余旋转的表现。左侧水平烟道的下部还存在一个微弱的回流区, 这使得水平烟道的下部产生了比较严重的烟速偏差。并且, 左侧的烟气经过了较长的行程后进入水平烟道, 其温度将比右侧气流下降, 这将直接导致烟温的偏差。计算结果还表明, 水平烟道入口的右下角是局部速度最高的区域, 这与实际运行中水平烟道入口的右下角发生爆管最频繁的现象吻合。

实验测量和计算所得的炉内流场状态如表 2 所示。

$$(\rho Q W) R = [\sum_{i=1}^n (\rho V_1^2 \Delta S \Delta H \cdot L_i) + \sum_{j=1}^m (\rho V_2^2 \Delta S \Delta H \cdot L_j)] / 2$$

式中: ρ 为气体密度 (kg/m^3); V_1 为炉宽方向各测点切向速度 (m/s); n 为炉宽方向测点数; V_2 为炉深方向各测点切向速度 (m/s); m 为炉深方向测点数; ΔS 为相邻测点距离 (m); ΔH 为单位高度 (m); L_i 为炉宽方向各测点到炉膛中心的距离 (m); L_j 为炉深方向各测点到炉膛中心的距离 (m)。

3 数值模拟的控制方程与定解条件

数值模拟程序对炉内湍流流场采用工程上最常用的 $K-\epsilon$ 模型, 其控制方程的通用形式如下:

表 2 炉内流场状态

工况	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
实验结果	逆时针	逆时针	逆时针	逆时针	不稳定
计算结果	逆时针	逆时针	逆时针	逆时针	顺时针
	旋 转	旋 转	旋 转	旋 转	旋 转

由于从工况 1 到工况 5 反切风的动量逐渐增加, 到达工况 5 时, 整个炉内的流场有转向顺时针旋转的趋势。实验测量发现, 工况 5 ($XJ = 2.69$) 的炉内流场呈现不稳定的状态, 因启动方式的不同而产生不同的旋向。而工况 5 数值模拟过程收敛极其缓慢, 并最终得到了顺时针旋转的炉内流场。因此, 实验和计算都表明, 工况 5 处于炉内旋向转变的临界状态。考虑到炉内燃烧的需要, 这种不稳定的工况应予以避免。

4.2 炉内的切圆

实验和计算所得的炉内切向速度分布如图 3 所示。可以看出, 实验与计算的结果吻合非常良好, 并且同时体现出燃烧器区的切圆(测点 A1、A5)较大, 几乎贴壁。这是由于大容量锅炉的截面尺寸增加, 而各层喷口的风速却没有增加, 射流相对炉膛的穿透能力下降, 因而切圆倾向于贴壁, 这也是大容量锅炉的残余旋转及其引起的烟温偏差较为严重的原因之一。而在燃烧器区域以上(测点 B2), 由于流动不再受喷口射流的驱动, 流场类似于自由旋转的状态, 切圆完全贴壁。

4.3 炉内旋转动量流率矩的分布

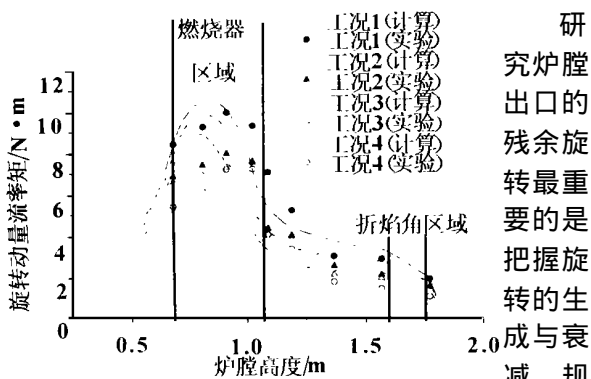


图 4 旋转动量流率矩随炉膛高度分布

研究和计算所得的炉内旋转动量流率矩沿炉膛高度的分布。从图 4 可以看出, 旋转动量流率矩在燃烧器区域中到达最高值。在离开燃烧器区域后, 由于失去了燃烧器喷口射流的驱动, 旋转动量流率矩先剧烈下降, 然后在气流上升过程中平缓地衰减。在折焰角区域, 其衰减速度又因折焰角的挤压与扰动有所增加。

削弱炉膛出口的残余旋转的主要手段有两种:

一是减少旋转动量的生成, 从而降低整个炉膛内旋转动量流率矩的水平, 比如采用反切配风; 二是控制旋转的衰减过程, 比如增加炉膛的高度以使衰减过程加长, 或者采用特定形状的折焰角使衰减过程加速。

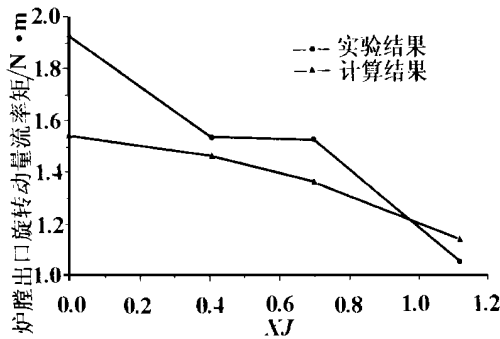


图 5 炉膛出口旋转动量流率矩随 XJ 的变化

从图 4 看出, 从工况 1 到工况 4, 随着反切风动量的增加(即 XJ 的增加), 整个炉内的旋转动量流率矩的水平不断下降。图 5 所示的是炉膛出口的旋转动量流率矩(也即残余旋转)随 XJ 的变化规律, 显然, XJ 的增加使残余旋转被削弱。

综上所述, 本文中的工况 4 具有最低的炉膛出口残余旋转动量流率矩, 同时, 实验和计算都表明其炉内空气动力场比较稳定。

5 结论

通过实验研究和数值模拟的对比分析, 可得出以下结论:

- (1) 大容量锅炉炉膛出口存在着由残余旋转引起的明显的流速偏差;
- (2) 大容量锅炉炉膛内燃烧器区域的切圆有贴壁的倾向;
- (3) 二次风反切的配风方式可以降低整个炉膛内旋转动量流率矩的水平, 同时, 随着 XJ 的增加, 炉膛出口的残余旋转明显下降; 当 XJ 增加到 2.69 附近时, 炉内流场不稳定, 并有改变旋向的趋势; 而 $XJ = 1.12$ 的工况 4 为本文研究范围内的最佳工况;
- (4) 数值模拟的结果在本文中与实验研究的结果已基本到达定量吻合, 表明数值模拟可以作为一种有力的研究手段。

参考文献

[1] 姜义道, 李永兴, 刘明仁. 四角切圆大容量电站锅炉烟气参数场偏置问题的研究. 动力工程, 1994, 14(5): 16~21.
 [2] 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、汽温偏差原因分析与防止对策. 动力工程, 1996, 16(2): 8~13.

(渠 源 编 辑)

反切配风对大容量锅炉内流场特性影响的研究= **The Effect of an Reverse Tangential Air Distribution on the Flow Field Characteristics in a Large-sized Boiler Furnace** [刊, 汉] Zhou Qulan, Dou Wenyu, Zhou Yuegui, et al (Xi'an Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(2). — 116 ~ 118

The in-furnace flow-field characteristics of a large-sized boiler were studied by way of experimental measurements and numerical simulation. The results of the experimental measurements fully agree with those of numerical simulation. In addition, in both cases the same conclusions have been reached. They are: 1. There exists at the furnace outlet of a large-sized boiler a speed excursion caused by a residual rotation; 2. There is a wall attachment tendency in the actual tangential circle at the burner zone of the large-sized boiler; and 3. The reverse tangential air-distribution mode can effectively reduce the level of rotating momentum flow rate moment in the furnace, and markedly weaken the residual rotation at the furnace outlet. **Key words:** boiler, secondary-air reverse-tangential circle, model test, numerical simulation

齿轮结构参数和误差对某动力装置主齿轮传动振动的影响= **The effect of Gear Structural Parameters and Errors on the Main Gear Transmission Vibrations of a Marine Propulsion Plant** [刊, 汉] / Shi Huamin (Naval Engineering Academy) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(2). — 119 ~ 121
Following the creation of a single-stage helical-gear transmission vibration model set up was a dynamics model for the main-gear transmission vibrations of a marine propulsion plant. A modal analysis method was employed to solve for the model. Analyzed and discussed was the effect of the structural parameters and errors on the main gear transmission vibrations. In addition, some pertinent conclusions were also obtained. **Key words:** gear transmission, vibration

同心反切燃烧方式的气固两相流动特性实验研究= **An Experimental Study of the Gas-solid Dual-phase Flow Characteristics of the Reverse Tangential Firing System (CFS-II)** [刊, 汉] / Wang Chungang, Zhu Qunyi, Li Zhengqi (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(2). — 122 ~ 124

Low-quality coal-fired boilers operating in a tangential firing mode often suffer from such problems as a deteriorating flame stabilization and water wall high-temperature corrosion. With respect to the above-cited issues an experimental study was conducted of the gas-solid dual-phase flow characteristics of the Tangential firing system (CFS-I) and the reverse tangential firing system (CFS-II) with the help of PDA (particle dynamic analyzer) system. The study results show that as compared to the CFS-I system the CFS-II system enjoys a better performance as regards the flame stabilization, low NO_x emissions, heating-surface slagging and high-temperature corrosion. **Key words:** tangential firing system, reverse tangential firing system, gas-solid flow characteristics, particle dynamic analyzer

切圆燃烧流场中不同高宽比矩形喷嘴射流特性的试验研究= **Experimental Study of Jet Characteristics of a Rectangular Nozzle with Different Height-to-width Ratios in a Tangentially-fired Combustion Flow Field** [刊, 汉] / Zhang Ze, Wu Shaohua, Yao Zheng, et al (Harbin Institute of Technology), Li Min (Harbin Power Plant Equipment Group Corp.) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(2). — 125 ~ 127
With the help of a hot wire anemometer a detailed experimental study was performed of the rigidity and turbulence characteristics of the jet flow of a primary-air rectangular nozzle with different height-to-width ratios in a tangentially-fired combustion flow field. Furthermore, the deflection and stable combustion mechanism of the rectangular nozzle jet flow under different height-to-width ratios is also analyzed. As a result, obtained was the optimum height-to-width ratio of the rectangular nozzle in the tangentially-fired combustion flow field. The study results may serve as helpful reference data for engineering design and general applications. **Key words:** tangentially-fired furnace, jet characteristics, height-to-width ratio, experimental study, hot wire anemometer