

## 折焰角结构对上部炉膛流场影响的数值研究

(西安交通大学) 李彦鹏 许晋源

**摘要:**采用空度概念对折焰角在不同结构下炉内流场进行了数值模拟,研究了折焰角结构对炉膛出口残余旋转和水平烟道入口处速度分布的影响,并结合冷模试验验证了结果,为电站锅炉的设计及改造提供了有价值的参考资料。图 7 表 1 参 4。

**关键词:**折焰角;残余旋转;热偏差;数值模拟

**中图分类号:**TK 229.6 TK 224.1

## 1 前言

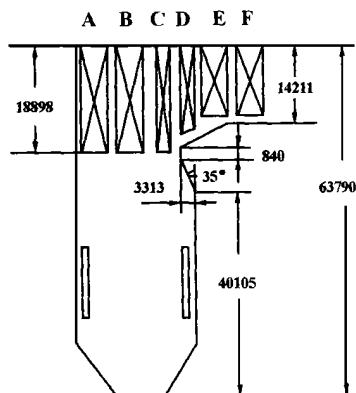
切向燃烧方式具有燃烧稳定性高、煤种适应性强、火焰充满度好等一系列优点,因而为我国大多数电站锅炉所采用。但是,近年来该炉型在实际运行中出现了不少问题,水平烟道入口处存在较大的烟温偏差就是其中之一<sup>[1]</sup>。

四角切向燃烧锅炉中,烟气作螺旋上升运动。在其上升过程中,首先遇到的就是折焰角,所以折焰角的结构必然会对炉内流场产生影响,从而影响到水平烟道入口处的速度分布。本文以哈尔滨第三电厂 600 MW 机组配套燃煤锅炉为对象,使用空度概念对折焰角在不同结构下的炉内流场进行了数值模拟,研究了折焰角结构对炉膛出口残余旋转和水平烟道入口处烟气偏差的影响。

## 2 锅炉概况

哈尔滨第三电厂 600 MW 机组配套锅炉是由哈尔滨锅炉厂引进美国 CE 公司技术设计的亚临界控制循环锅炉。最大连续蒸发量为 2008 t/h,过热蒸汽压力 18.27 MPa。该炉燃烧系统采用正压直吹式制粉系统,六台中速磨煤机前墙布置,每台配一层煤粉喷嘴,四角切圆燃烧。四个角的一、二次风气流在炉内形成不等的切圆,呈逆时针旋转方向。该锅炉

为单炉膛,炉膛上部布置有分隔屏过热器与后屏过热器,水平烟道依次布置有高温再热器和高温过热器。图 1 为锅炉炉膛的主要结构尺寸。



A: 前分隔屏 B: 后分隔屏  
C: 后屏过热器 D: 后屏再热器  
E: 末级再热器 F: 末级过热器

图 1 炉膛的主要结构尺寸

实际锅炉的炉膛上部有分隔屏过热器两组各 6 片,管径  $\Phi 57$  mm,后屏过热器 24 片,管径  $\Phi 60$  mm,受计算机容量的限制,本文中后屏过热器只设置了 8 片,保留了原设计分隔屏过热器的数目。同时,为了计算方便,将管径均取为  $\Phi 60$  mm。这些屏式过热器的尺寸及布置如图 2 所示。

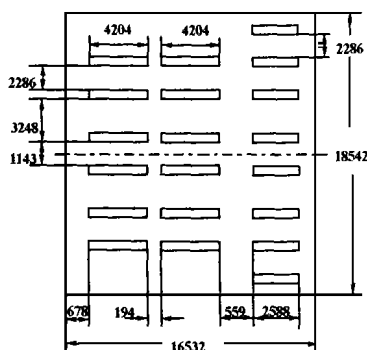


图 2 屏式过热器位置与尺寸

## 3 数学模型

四角切向燃烧锅炉炉内的流动是复杂的三维湍流流动。本文仍采用经典的  $k-\epsilon$  双方程模型<sup>[2]</sup>,通用的控制方程形式如下:

$$\text{div}(\rho u \phi - \Gamma_{\phi} \text{grad} \phi) = S_{\phi} \quad (1)$$

式中,  $\phi$  代表通用变量,  $S_{\phi}$  为通用变量  $\phi$  的源项,  $\Gamma_{\phi}$  代表了变量  $\phi$  的有效扩散系数。

为了较好地模拟折焰角和屏区结构,引入了计

收稿日期: 1998-10-20; 修订日期: 1999-05-04

基金项目: 机械工业部技术发展基金资助项目(95JB101)

作者简介: 李彦鹏(1973-),男,陕西泾阳人,现在东南大学做博士后研究工作,主要从事锅炉烟温偏差的研究。通讯处: 210096 南京东南大学热能工程研究所

算流体力学中的空度<sup>[3]</sup>概念。

空度是流体可流通区域在整个积分区域中所占的比例。在网格化了的积分区域中, 各个网格可以有不同的空度。空度分为体空度和面空度, 前者表示在一个网格内流体所占据的体积分数(= 通流体积 / 总体积), 后者表示在一个网格面中流体可以通过的面积分数(= 通流面积 / 总面积)。这样对任意一个单元控制体 P 内的流体的控制方程可写为:

$$\sum_{e, w, n} [(\rho u \phi - \Gamma_{\phi} \text{grad } \phi) A P_{0a}] = (S_{\phi} V P_{0v}) p \quad (2)$$

式中  $P_{0a}$  表示面空度,  $P_{0v}$  表示体空度。

对式(2)在三维直角坐标下, 用非均匀交错网格, 混合差分格式和源项线性化进行离散, 可得:

$$\left( \sum A_{nb} P_{0a} - S_P P_{0v} \right) \phi_P = \sum A_{nb} P_{0a} \phi_{nb} + S_C P_{0v} \quad (3)$$

式中  $A_{nb}$  为各邻点的系数,  $S_P$  和  $S_C$  为线性化源项的系数。

计算中将炉膛划分为  $18 \times 18 \times 55$  的矩形网格, 并在燃烧器、折焰角及屏式过热器区域加密, 以便准确地模拟这些区域各物理量的剧烈变化。计算采用 SIMPLE 方法, 一般在网格的划分及初始流场比较合理时, 迭代 500 ~ 600 次后基本上就可以达到一定程度的收敛。

### 4 计算结果与讨论

为了系统地研究折焰角的结构对炉膛出口烟温偏差的影响, 这里共进行了六个工况的计算, 各工况的参数列于表 1。

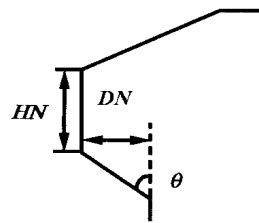


图 3 折焰角结构

表中, 工况 2 为原设计工况。在原设计工况中, 后屏过热器下端与折焰角端头下端高度相同, 影响折焰角前伸, 故工况 5 将折焰角深度加大到 5560 mm 时, 后屏过热器被拆除。折焰角角度指折焰角下斜面与竖直方向夹角(图 3 中  $\theta$ ), 折焰角高度指折焰角端部竖直段长度(图 3 中  $HN$ ), 折焰角深度指折焰角端部至后墙之间的水平距离(图 3 中  $DN$ )。

表 1 计算工况

工况	折焰角角度	折焰角深度(mm)	折焰角高度(mm)	后屏过热器
1	无折焰角			有
2	35°	3313	840	有
3	60°	3313	840	有
4	35°	3313	3200	有
5	35°	5560	840	无
6	35°	3313	840	无

#### 4.1 炉膛出口残余旋转

为了研究炉膛内旋转气流的变化情况, 引入速度环量概念<sup>[4]</sup>来描述气流旋转强度:

$$\Gamma = \oint_C \vec{v} \cdot d\vec{l} \quad (4)$$

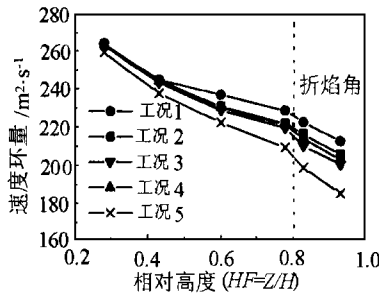
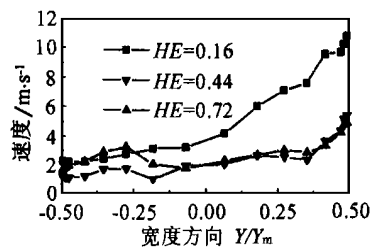
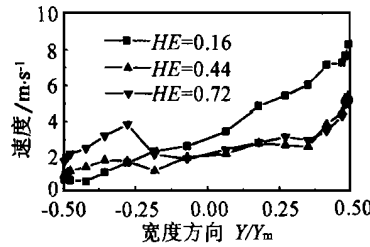


图 4 速度环量沿高度方向分布

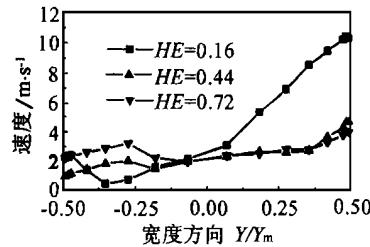
图 4 表示了在不同工况下炉内速度环量沿高度方向的分布。图中  $HF$  代表了炉膛中测点距燃烧器中心水平面的相对高度。Z 为测点至燃烧器中心水平面间的距离,  $H$  为燃烧器中心水平面至折焰角端头所在平面间的距离。



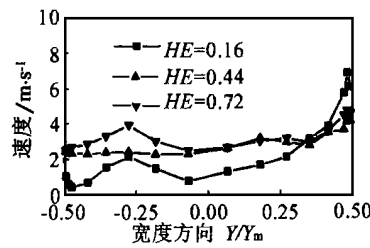
(a) 原设计工况 (工况 2)



(b) 折焰角角度  $\theta=60^\circ$ (工况 3)



(c) 折焰角高度  $HN=3200\text{mm}$ (工况 4)



(d) 折焰角深度  $DN=5560\text{mm}$ (工况 5)

结果表明, 在折焰角以下区域, 除折焰角深度增加和无折焰角工况外, 各工况曲线基本重合, 说明折焰角对其上游流场影响甚微。无折焰角结构的速度环量衰减最慢, 旋转气流到达折焰角处, 速度环量只衰减了 20.4%; 其它工况在折焰角区的衰减均大于无折焰角工况, 说明折焰角对速度环量的衰减有一定的影响。在原设计工况, 旋转气流到达折焰角处, 即进入屏区前, 速度环量依然很大, 仅衰减了 22.6%, 这说明烟气在进入屏区时残余旋转仍然相当强烈, 这是导致水平烟道左右两侧存在较大速度偏差的主要原因。相比之下, 折焰角深度增加对速度环量的衰减影响最大, 其速度环量衰减了 28.8%, 折焰角角度  $\theta=60^\circ$  (衰减了 24.5%) 及折焰角端头高度(衰减了 24.2%) 增加时速度环量与原设计相

图 5 水平烟道入口截面的速度分布

比均有所下降。

### 4.2 水平烟道入口气流速度分布

图5是工况2~工况5时水平烟道入口截面的速度分布。图中,  $Y_m$  为炉膛宽度,  $HE$  为测点距水平烟道底面的相对高度。

图中可以看出, 在原设计工况, 水平烟道入口处右侧速度大于左侧, 特别是水平烟道下部 ( $HE = 0.16$ ), 左右侧速度偏差最大; 在水平烟道中上部 ( $HE = 0.44$  和  $HE = 0.72$ ) 速度分布趋于均匀, 但右侧仍然高于左侧, 水平烟道左右两侧存在较大速度偏差是导致布置在水平烟道内的受热面左右温度偏差的一个主要原因。

比较可知, 当折焰角角度、高度与深度分别增加时, 水平烟道左右两侧的速度偏差较原设计工况均有所减小, 尤其是折焰角加深后, 其左右两侧的速度偏差最小, 这是由于折焰角前伸后, 使上部炉膛右侧进入水平烟道的一部分气流受到阻碍而造成。

为了评价水平烟道入口截面上烟气分布的均匀性, 本文引入了速度偏差系数  $MVD^{[4]}$  指标, 其定义如下:

$$MVD = \frac{(\overline{V_h})_{\max}}{\overline{V_e}} \quad (5)$$

式中,  $\overline{V_h}$  为水平烟道宽度方向上某点速度沿高度方向的平均值;  $\overline{V_e}$  为水平烟道入口截面上的速度平均值。

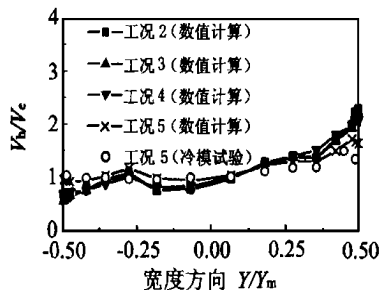


图6 水平烟道入口处速度偏差比较

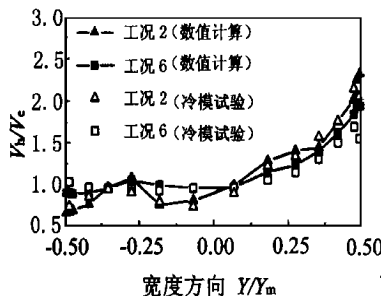


图7 后过对水平烟道入口速度偏差影响

烟道入口处速度偏差影响较小, 折焰角深度增加对

降低速度偏差有明显效果。图中还图示了折焰角深度增加工况下的冷模试验数据<sup>[4]</sup>。可见, 冷模试验与数值模拟在一定程度上符合得较好。

### 4.3 屏式过热器的影响

由于工况5在加深折焰角时未考虑后屏过热器, 所以本次数值模拟又计算了原设计工况下拆除后屏过热器的情况。有无后屏过热器时水平烟道入口速度偏差比较如图7所示。数值计算与冷模试验<sup>[4]</sup>结果吻合较好。两者结果均表明, 不考虑后屏过热器时的总体速度分布比有后屏过热器时明显均匀, 其速度偏差系数  $MVD = 1.97$  (计算值)。这是因为后屏过热器的拆除将使旋转气流受到后屏的阻力大大降低, 使其流向左侧的流量增加, 从而降低水平烟道入口截面的烟气流量偏差。但是水平烟道入口截面仍然存在速度偏差, 说明仅靠改变后屏过热器的布置方式还不能从根本上解决速度偏差现象。

## 5 结论

(1) 折焰角结构对炉内速度环量的衰减有明显的影响, 其中, 折焰角深度增加对速度环量衰减的影响最大。

(2) 折焰角结构对水平烟道入口处的速度分布有一定的影响。改变折焰角高度及角度对水平烟道入口处的速度偏差影响较小, 改变折焰角深度对水平烟道入口处的速度偏差影响较大。

(3) 后屏过热器的布置方式对水平烟道入口处的速度分布有明显影响, 增加后屏过热器与后分隔屏之间的距离有利于降低水平烟道入口处的速度分布的不均匀性。

(4) 在  $k-\epsilon$  双方程模型基础上, 空度概念及其数值方法的计算结果合理, 与冷模试验较吻合。空度方法为模拟积分区域中的实心或多孔固体, 为模拟不规则边界提供了一条新的有效的途径。

### 参考文献

- [1] 张文宏, 许晋源. 切向燃烧煤粉炉的回顾和展望. 中国动力工程学会锅炉燃烧技术学术会议论文集, 1996.
- [2] 陶文铨. 数值传热学. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [3] 范维澄, 万跃鹏. 流动及燃烧的模式及计算. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1992.
- [4] 张文宏. HG-2008-YM2型锅炉炉膛残余旋转与其影响的研究及漏量修正法数值模拟; [博士学位论文]. 西安: 西安交通大学能源与动力工程学院, 1997.

(复 编)

ICR 进展及关键技术 = **New Developments in ICR Engines and Related Key Techniques** [刊, 中] / Liu Yongbao, Zhang Renxing (Naval Engineering Academy) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 415 ~ 418

In addition to a series of advantages specific to a simple cycle gas turbine ICR engines feature an excellent off-design performance with Model WR-21 engine being ranked as the most advanced. This paper gives a brief description of some new developments in WR-21 gas turbines. The key techniques relating to such major components as intercoolers, regenerators, engine enclosures and digital control systems are also analyzed. **Key words:** ICR gas turbine, intercooler, regenerator, enclosure, control system

气体燃料再燃对 NO<sub>x</sub> 还原的影响 = **Effects of Gaseous Fuel Reburning on NO<sub>x</sub> Reduction** [刊, 中] / Zhong Beijing, Fu Weibiao (Qinghua University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 419 ~ 423

Gaseous fuel reburning pertains to one of the most effective methods being extensively studied for the reduction of NO<sub>x</sub> content in flue gases. With the gases in a typical primary combustion zone serving as simulation gases the authors have studied the influence of different gaseous fuels (CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> and C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) and the reburning zone combustion conditions (excess air coefficient and reburning temperature) on NO<sub>x</sub> reburning process and its reduction. Through calculations it is found that different compositions of gaseous fuels, the excess air coefficient and firing temperature in the reburning zone exercise a significant influence on the NO<sub>x</sub> reburning process and NO<sub>x</sub> reduction rate. **Key words:** fuel reburning, gaseous fuel, NO<sub>x</sub> reduction

煤粉锅炉炉膛燃烧、传热一维数学模型的研究 = **A Study of the Combustion and Heat Transfer One-dimensional Mathematical Model for a Pulverized Coal-fired Boiler Furnace** [刊, 中] / Dong Peng, Hong Mei, Qin Yukun et al (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 424 ~ 427

A combustion and heat transfer one-dimensional mathematical model has been set up for the analytical computation of one-dimensional distribution magnitudes of such thermodynamic parameters as furnace gas temperatures, water wall absorption heat flux density, heat release rate, etc. under various operating conditions. The calculation and analysis of three different models of boilers and a comparison of the calculated results with original design data have validated the rationality of the adopted mathematical model. **Key words:** furnace internal process, in-furnace heat transfer, mathematical model, pulverized coal combustion

折焰角结构对上部炉膛流场影响的数值研究 = **Numerical Simulation of the Effect of Arch Nose Structure on Furnace Upper Section Flow Field** [刊, 中] / Li Yanpeng, Xu Jinyuan (Xi'an Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 428 ~ 430

Based on a porosity conception conducted is a numerical simulation of the flow field in a boiler furnace under various arch nose structures. The effects of such structures on the residual swirl at the furnace outlet and the velocity distribution at the inlet of horizontal gas-pass were studied. The study results have been verified by way of a cold-state simulation test. They can serve as useful reference data during the design and retrofitting of utility boilers. **Key words:** arch nose, residual swirl, thermal excursion, numerical simulation

椭圆锥急燃器对煤粉火焰的稳燃作用 = **The Combustion Stabilizing Role Played by an Ellipsoidal Cone Combustion Stabilizer** [刊, 中] / Jing Youyin, Wang Baosheng (North China Electrical Power University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 431 ~ 433

By introducing the characteristics parameters of a gas-solid two-phase flow and proceeding from the structure of a pulverized-coal flow an analysis is performed of the combustion stabilizing action of an ellipsoidal cone combustion stabilizer on a pulverized-coal flame. **Key words:** ellipsoidal cone combustion stabilizer, characteristics parameter, pulverized-coal flame, ignition and steady combustion

600MW 锅炉机组膜式水冷壁壁温的试验研究及理论分析 = **Experimental Investigation and Theoretical Analysis of Membrane Water Wall Temperature in a 600 MW Boiler Unit** [刊, 中] / Yu Yanzhi, Tang Biguang, Liu Yong, et al (Wuhan University of Water Resources and Electrical Power) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 434 ~ 436