

220 t/h 锅炉冷态数值试验研究

衡丽君, 段坤杰, 何长征

(平顶山工学院 建筑环境与热能工程系, 河南 平顶山 467001)

摘要: 针对锅炉传统冷、热态性能试验存在的局限性, 以 220 t/h 四角切圆燃烧锅炉为原型, 建立其可实现的 $k-\epsilon$ 数学模型, 结合锅炉冷态性能试验, 利用计算流体力学软件 Fluent 模拟炉内空气动力场。数值模拟结果与冷态试验结果的基本一致性和两种结果分布趋势的较好吻合性说明该数值模拟方法能较好地反映炉内真实的流场特性, 验证了所建数学模型的正确性及可靠性, 为进一步完善锅炉冷态性能试验和进行热态数值试验提供更全面的数据信息。

关键词: 锅炉; 冷态性能试验; 数值模拟

中图分类号: TK224 文献标识码: A

1 前言

锅炉冷、热态性能试验是火力发电厂的重要试验之一, 对保证设备和运行人员的安全以及鉴定机组的性能有着重要的意义。但其具有工作量大、工况调整困难和测量方法复杂等局限性, 且在获取炉内各物理量的细节信息方面具有很大难度。为降低人们对性能试验的依赖程度, 寻求一种既能克服上述弊端又具有实际应用价值的方法显得尤为重要。以 Fluent 软件为工具, 结合锅炉冷态性能试验, 对 220 t/h 四角切向燃烧锅炉炉内空气动力场进行了数值模拟。通过对比、分析模拟结果和试验数据, 验证所建数学模型和采用数值方法的正确性及可靠性, 进而为实际工程应用服务。

2 锅炉本体结构介绍

研究对象为 HG-220/100-MQ 型燃煤锅炉, 高压、单锅筒、自然循环、倒 U 型布置的固态排渣炉, 采用平衡通风、负压四角切向燃烧方式。该炉宽 7 570 mm, 深 7 570 mm, 炉高 27 290 mm。其燃烧器喷嘴自下而上分 6 层布置, 分别为二、一、二、一、二、二次风, 其中一次风为乏气送粉, 采用四角切向燃烧

布置, 一、二次风同心切圆, 射流在炉膛中心形成 800 mm 的假想切圆。

3 锅炉冷态试验结果

按冷态试验程序对该炉进行了一、二次风调整后的炉内空气动力场试验。炉膛冷态空气动力场试验参数如表 1 所示, 炉内中二次风截面的速度场如图 1 所示(图中数字代表各点实测风速, m/s)。

表 1 冷态试验参数

	数值
炉膛出口负压/Pa	-18
二次风喷口速度/ $m \cdot s^{-1}$	30
二次风温度/ $^{\circ}C$	36.3
一次风喷口速度/ $m \cdot s^{-1}$	24
一次风温度/ $^{\circ}C$	25.2
送风机出口风压/Pa	1 960
排粉机出口风压/Pa	1 750

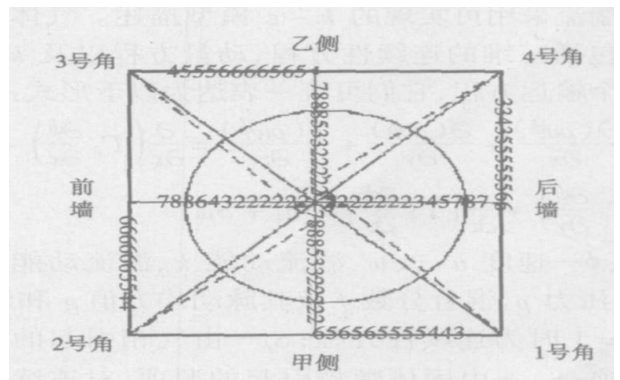


图 1 炉内中二次风截面速度分布

由图 1 可知: 炉内切向空气动力场比较理想, 四角气流在炉内形成逆时针旋转的切圆, 切圆基本位于炉膛中心, 并接近于圆形, 切圆直径约为 5~6 m;

收稿日期: 2006-03-20; 修订日期: 2006-07-14

作者简介: 衡丽君(1976-), 女, 河南内黄人, 平顶山工学院讲师。

燃烧器区域的强风环直径都较大,切圆中心稍偏向后墙,南北两墙切向速度及位置分布基本对称,壁面附近的速度不大,且风速总体上比较均匀。

4 冷态空气动力场的数值模拟

4.1 网格划分

利用 Gambit 软件提供的非一致化网格生成技术,对此炉膛进行网格划分及生成。把炉膛分为 5 个区段:冷灰斗段、燃烧器段、上炉膛段、冷灰斗与燃烧器交接面段、燃烧器与上炉膛交接面段。

对于四角切向燃煤锅炉炉内流场,采用笛卡尔直角坐标系,网格线与壁面平行布置,则燃烧器喷嘴出口射流轴线与网格线之间的夹角即在 45°左右,会极大地夸大射流在燃烧器出口附近的伪扩散现象,导致在整个计算流场中计算结果的不正确性。从改进网格划分的体系入手,使流动方向与网格边界的夹角远离 45°,流体尽可能地以垂直于网格边界的方向进入微元体,采用这一近流线的数值模拟思想,将整个炉膛在网格划分上分为上述 5 部分,使得绝大多数的网格满足流体流动方向垂直于网格边界的方向进入微元体的要求,从而能够减少数值伪扩散。

4.2 数值模型

4.2.1 气相湍流模型

锅炉炉内气体流动为三维湍流反应流,其平均流可视为稳态流,可用通常的守恒方程进行描述。对于湍流采用可实现的 $k-\epsilon$ 模型描述。气体流动模型包括三维的连续性方程、动量方程以及 k 和 ϵ 的两个输运方程,它们可统一表达为以下形式:

$$\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S_{\phi} + S_{\phi p} \quad (1)$$

式中: ϕ —速度 u, v, w 、湍流动能 k 、湍流动能耗散率 ϵ 、压力 p 、混合分数 f 及其脉动均方值 g 和焓 h , 当 $\phi = 1$ 时为连续性方程; S_{ϕ} —由气相引起的源项或汇项; $S_{\phi p}$ —由固体颗粒引起的源项,对连续性方程而言,该项是颗粒的质量变化项,对动量方程而言,是由颗粒和气体之间的相互阻力以及颗粒的热解挥发而引起的动量源项,在 k 和 ϵ 方程里忽略了这一项; Γ_{ϕ} —扩散系数。

可实现的 $k-\epsilon$ 模型比标准 $k-\epsilon$ 模型有两个主要的不同点:第一,可实现的 $k-\epsilon$ 模型为湍流粘性增加了一个公式;第二,为耗散率增加了新的传输方程,这个方程来源于一个为层流速度波动而作的

精确方程。可实现的 $k-\epsilon$ 模型直接的好处是对于平板和圆柱射流的发散比率有更精确的预测,而且它对于旋转流动、强逆压梯度的边界层流动、流动分离和二次流有很好的表现。此外,可实现的 $k-\epsilon$ 模型比标准 $k-\epsilon$ 模型在强流线弯曲、漩涡和旋转方面有更好的表现。

4.2.2 边界条件

模拟中入流边界条件完全采用现场试验值,以便现场试验与模拟研究进行对比。一、二次风风速取值见表 1。

4.2.2.1 入口边界条件

以燃烧器的喷口截面作为计算区域的入口边界。入口边界上气相速度根据运行参数给定,一次风速 $V_1 = 24 \text{ m/s}$,二次风速 $V_2 = 30 \text{ m/s}$ 。入口边界上的水力直径 H ,湍流强度 I 按下式计算:

$$H = 4A/x = 4R_h \quad (2)$$

式中: x —接触面周长; R_h —水力半径

$$I \approx 0.16(Re_{D_h})^{-1/8} \quad (3)$$

式中: Re —入口处雷诺数

4.2.2.2 出口边界条件

出口边界条件定在炉膛出口截面上。出口平面的压力取运行炉膛出口负压 -18 Pa ,水力直径 H 、湍流强度 I 按上式计算。

4.2.2.3 壁面边界条件

固体壁面上采用无速度滑移和无质量渗透条件。在壁面附近的粘性层中,由于流体的输运性质发生剧烈变化,需要考虑湍流运输的减弱和层流运输的增强对流体输运特性的影响,为了保证计算的精度,同时又避免壁面附近过细的网格划分,本文采用成熟的壁面函数(wall function method)来考虑壁面的影响。

4.3 冷态数值模拟结果

4.3.1 炉内气流速度分布

中二次风横截面的模拟速度分布如图 2 所示(其中曲线为流线,其流线各点的切向方向代表各质点的流动方向):气流以高速从四角喷入炉膛后,在炉膛中出现了类似于 Rankin 涡核的流动结构,以最大切向速度为圆周分接口,圆周内的切向速度与离中心的距离成正比,而圆周外的切向速度与离中心的距离成反比,分接口上切向速度最大。

炉膛高度方向各横截面沿深度方向切向速度分布如图 3 所示(各曲线名字代表对应燃烧器位置,数字代表在模型中的高度,其速度值为切向速度),可见炉内气流旋转强度沿炉膛高度方向逐渐减弱,直至炉

膛出口仍存在较为明显的逆时针残余旋转气流, 而在

冷灰斗附近则因气流扰动较强作不规则运动。

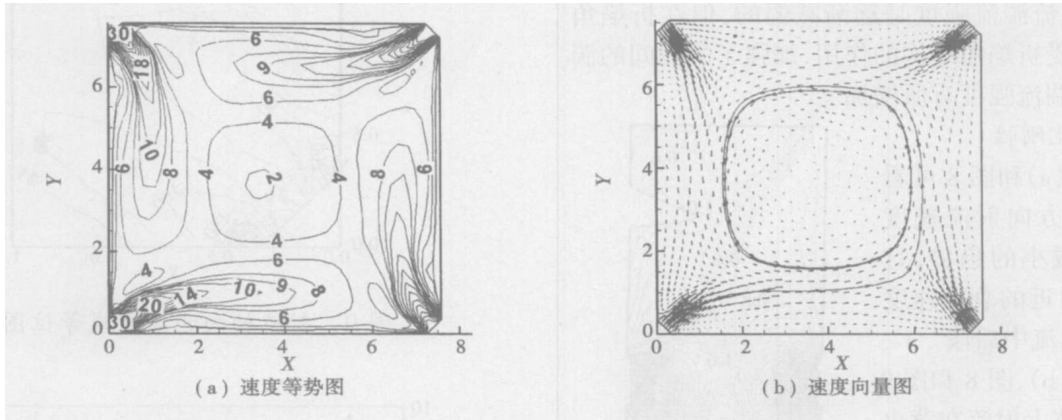


图 2 中二次风截面的速度分布

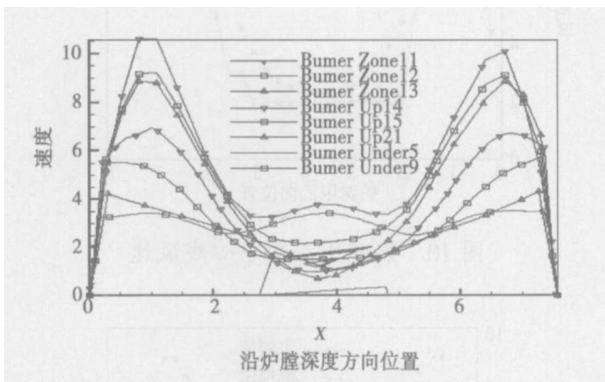


图 3 沿炉膛高度方向各横截面深度方向切向速度分布

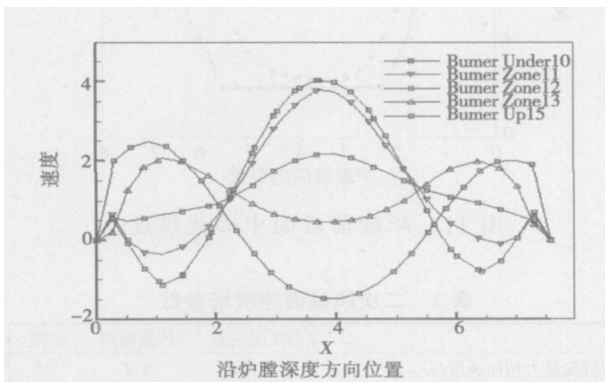


图 4 沿深度方向各炉膛横截面中心线 Z 向速度分布

燃烧器区域及其上、下区域的炉膛横截面中心线沿 Z 向速度分布如图 4 所示, 炉膛负压分布如图 5 所示。在燃烧器下部及以下区域附近, 其 Z 向速度呈“W”形分布, 而燃烧器上部及以上区域附近, 则呈“M”形分布; 在炉膛中心有一低速区, 并且在 Burner Zone12 及 Burner Zone13 曲线所在炉膛位置之间为“W”、“M”形分布的分界处, 此处即为负压中

心, 正好位于燃烧器区域。上述模拟结果是四角燃烧器相交射流相互作用及相互影响、使得炉内形成旋转上升气流所致, 这与通常的冷态炉内气流分布特点完全吻合。

4.3.2 气流湍流特性

湍流度表征了流体的脉动程度。湍流度值越大, 流体脉动程度越高, 越有利于燃烧过程中混合、扩散和分解反应的进行。炉内二次风气流湍流强度分布模拟结果如图 6 和图 7 所示。其中湍流度的定义为:

$$I = \sqrt{\frac{2}{3}} k / V_{ref}$$

其中: k —湍流动能; V_{ref} —气流平均速度。

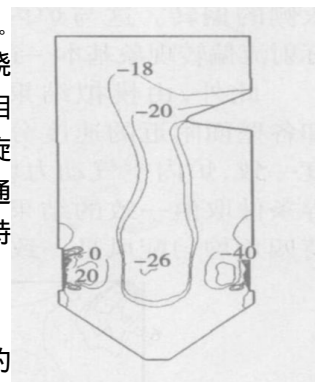


图 5 炉膛负压分布

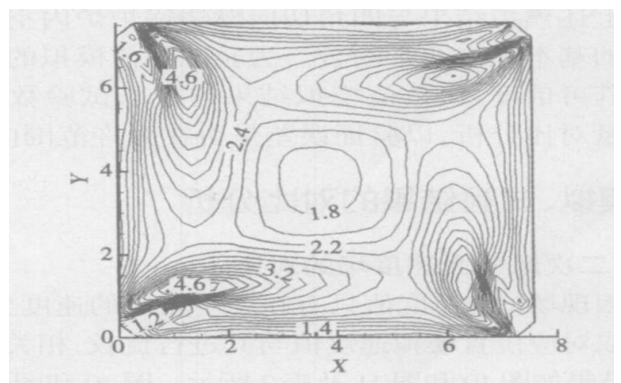


图 6 中二次风横截面湍流强度分布

可见: 炉膛中心区域湍流强度较低; 在离壁面一定距离处及射流的向火侧湍流强度很高, 这是由于

4 股射流在此区域相遇段相互作用造成的; 沿炉膛高度方向气流湍流强度是逐渐减弱的, 但在折焰角区域, 由于受折焰角结构的作用, 加强了气流间的湍流混合, 使湍流强度有所增加。

4.3.3 射流刚性

由图 2(a)和图 8 可看出: 沿射流方向射流速度呈现迅速减小的趋势, 且在近喷嘴附近的衰减速度明显大于射流中后段。

由图 2(b)、图 8 和图 9 可看出: 总体上射流在背火侧的偏转要远大于其在向火侧的偏转。这与炉内实际射流偏转现象基本一致。

此外, 由模拟结果还知各壁面附近的速度分布差异很小, 各射流偏斜程度一致, 炉内空气动力场合理, 这主要是 4 股射流边界条件取值一致的结果, 这与在现场试验中尽量保持四角均匀配风是一致的。

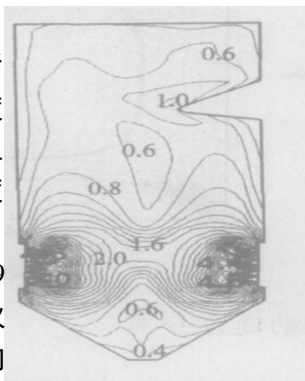


图 7 沿炉高湍流强度分布

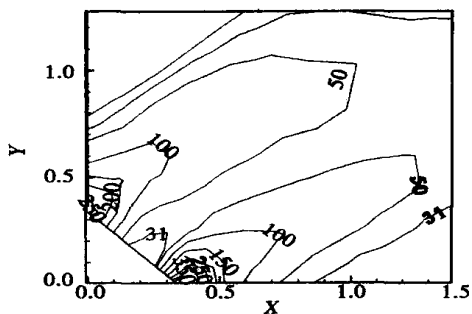


图 9 射流轴向速度衰减等位图

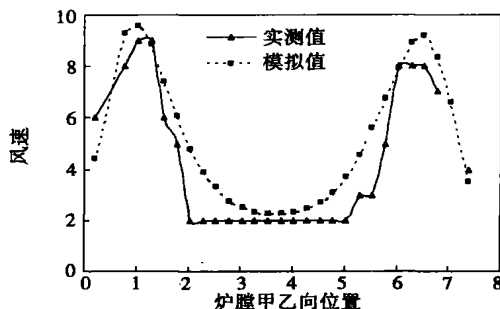


图 10 炉膛甲乙向中心线风速

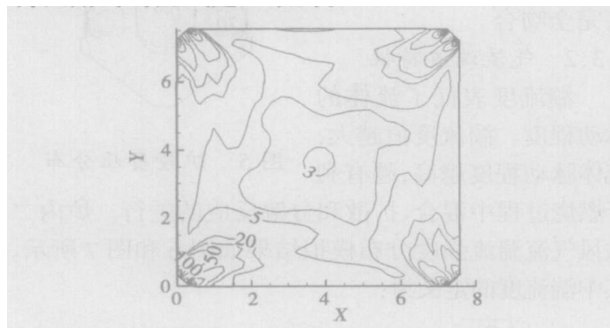


图 8 射流轴向速度衰减等位图

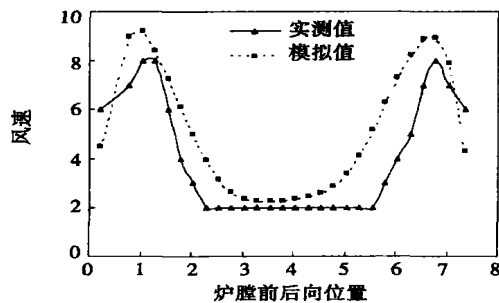


图 11 炉膛前后向中心线风速

上述模拟结果与四角切向燃烧锅炉炉内空气动力场的基本理论非常吻合。为验证数值模拟的正确性及其可信度, 将数值模拟结果与冷态试验数据进行定量对比分析, 以验证误差是否在允许范围内。

5 模拟、试验结果的对比分析

5.1 二次风截面速度场的对比

因现场试验速度值只有在“十”在线的速度分布, 因此取对应位置模拟速度值与其进行比较, 相关参数对比结果如图 10 和图 11 及表 2 所示。图 10 和图 11 中坐标系以数值模拟坐标系为标准, 横坐标代表前后墙、甲乙墙之间位置, 纵坐标代表气流切向速度。为便于比较切圆直径, 采用切圆当量直径 R_d 进行分析。

表 2 二次风截面速度场参数

	冷态性能试验	数值模拟	差值
前后向最大切向速度 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	8	9.2	1.2
前后向最大直径 m	5.625	5.75	0.125
甲乙向最大切向速度 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	9	9.57	0.57
甲乙向最大直径 m	5.125	5.5	0.375
当量直径 m	5.369	5.624	0.255

由图知模拟、试验的速度分布均出现了类似 Rankine 涡核的流动结构, 且前后墙、甲乙侧墙上的切向气流速度最大值相差不大; 由表 2 可知: 炉内模拟 $R_d = 5.624 \text{ m}$, 试验 $R_d = 5.369 \text{ m}$ 两者切圆当量直径相差 0.255 m , 模拟值非常接近实测值。

5.2 切圆中心位置对比

由表 3 可知: 模拟、试验的切圆中心位置却均偏向于后墙, 且偏移量较大; 虽试验切圆中心位置略偏向甲侧墙, 但其偏移量非常小, 可近似认为在甲乙墙方向没有偏移, 因此两者切圆中心位置几乎重合。

表 3 切圆中心位置偏移

	前后墙方向/m	甲乙墙方向/m	偏移情况
假想切圆中心位置	3.785	3.785	—
冷态性能试验中心位置	3.972 5	3.722 5	偏后侧墙、且略偏甲侧墙
数值模拟中心位置	3.91	3.785	偏后墙

5.3 四角射流偏斜对比

四角射流偏斜情况主要表现在壁面附近气流速度分布情况。从图 1 和图 2(a)中提取四面墙的近壁面速度进行比较, 绘制成曲线图 12~图 15。曲线的横坐标代表以各壁面中心 200 mm 处为原点、平行壁面沿射流下游方向的距离, 纵坐标表示壁面附近气流速度值。

由图 12~图 15 可知: 模拟速度值约在 4~6 m/s 之间, 试验速度值在 3~7 m/s 之间, 二者在壁面附近的速度均较小, 且均未出现某一射流偏斜严重的现象, 四面墙壁风速总体比较均匀。

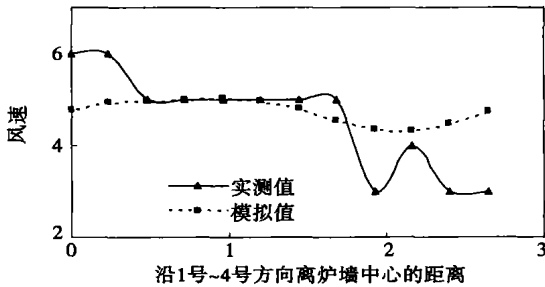


图 12 1 号~4 号壁面附近速度分布

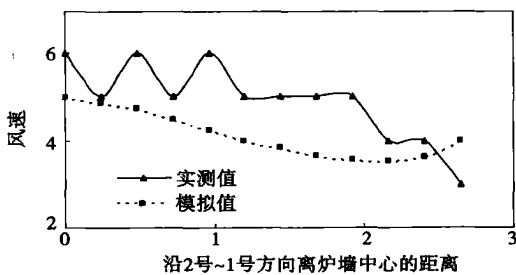


图 13 2 号~1 号壁面附近速度分布

5.4 误差分析

模拟值与实测值曲线分布趋势较为吻合, 但存在一定程度的偏差, 特别在壁面附近的速度分布上存在的偏差相对大。其误差主要原因由试验仪器系统误差和计算模型简化、出口边界条件设置等原因引起。

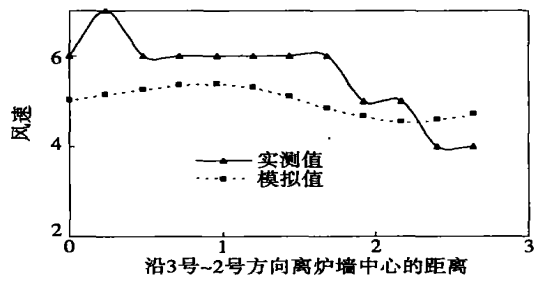


图 14 2 号~3 号壁面附近速度分布

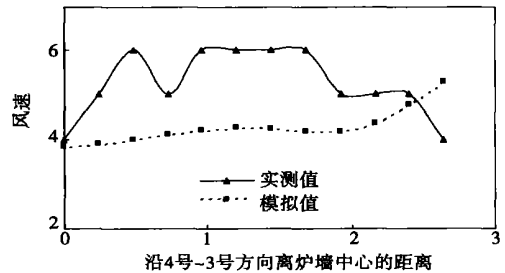


图 15 3 号~4 号壁面附近速度分布

6 结束语

(1) 模拟结果与试验结果基本一致, 说明该数值模拟方法能较好地反映炉内真实的流场特性, 很好地验证了其数学模型的正确性及可靠性。

(2) 模拟结果与试验结果分布趋势吻合性较好, 模拟结果能为冷态性能试验提供非常详细的流场数据信息, 进而可完善冷态试验; 并且可以此为基础进行炉内燃烧过程的数值模拟。

(3) 功能强大的 Fluent 软件优点突出: 分析结果三维可视、直观、清晰, 特别有利于速度场、压力场、温度场以及其它迭代计算变量的分析研究及新产品的开发设计。以冷态模拟为基础进行炉内燃烧过程的数值模拟, 可以预测炉内的速度场、温度场、气体组分浓度场等, 为进一步合理组织炉内燃烧、优化锅炉运行、降低污染物排放及改造燃烧设备等提供极有价值的数据信息。

参考文献:

- [1] 潘卫国. 一次风喷口速度分布对四角切向燃煤锅炉炉内空气动力场影响的数值研究[J]. 动力工程, 2004, 24(4): 496-500.
- [2] 任安禄. 复杂回旋流场的数值模拟和试验研究[J]. 空气动力学学报, 1994, 12(2): 178-184.
- [3] 朱 彤. 切向燃烧炉膛中网格划分方法对数值模拟的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1997(5): 59-61.
- [4] 扬子石化热电厂. 8 号锅炉冷态性能试验报告[R]. 南京: 东南大学, 2003.

(辉 编辑)

端壁附面层抽吸对扩压叶栅内分离结构的影响= **Impact of End-wall Boundary Layer Suction on the Separation Structure in a Diffuser Cascade**[刊, 汉] /ZHANG Hua-liang, WANG Song-tao, WANG Zhong-qi (College of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(6). — 565 ~ 568

An odd-point topological criterion appropriate for cascade surfaces is proposed on the basis of a topology theory. Moreover, also conducted is a numerical simulation of flow fields featuring compressor guide vanes of large turning angle and meridian expanding type. To compare the impact of end-wall suction on radial secondary flows in the blades, end-wall suction has been performed on two sets of cascades with their aspect ratios being 2.53 and 0.3 respectively under the condition that the upper and lower end-walls have a same suction rate of 1%. On the basis of the calculation results, the change in separation configuration in cascades before and after the boundary layer suction has been analyzed by using the cascade-surface odd point law and their topological structures are also given. The results show that the end-wall boundary layer suction near the suction surfaces has changed the separation configuration of the flow fields, restrained the separation at the end-wall corner zone and delayed and diminished the separation on suction surfaces. As a result, the blade loss along a majority of blade height has been reduced and tends to assume a uniform distribution along the radial direction. **Key words:** end-wall suction, topology, separation configuration

600 MW 煤粉锅炉汞排放的试验研究= **An Experimental Study of Mercury Emissions from a 600 MW Pulverized Coal-fired Boiler**[刊, 汉] /ZHOU Jin-song, WANG Guang-kai, LUO Zhong-yang, et al (National Key Laboratory on the Clean Utilization of Energy Resources under the Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(6). — 569 ~ 572

To evaluate the emission level of mercury from large-sized pulverized coal-fired boilers, the mercury content was determined from samples of coal, combustion product flue gas, fly ash and bottom slag taken from a 600 MW coal-fired utility boiler. The boiler has been operating at full load and also about 70% load under peak-shaving conditions. Through a study of the distribution of mercury content in combustion products under different operating conditions and of the change of mercury configuration before and after the ESP (Electro-static Precipitators) etc., the mercury emission characteristics of a 600 MW pulverized coal-fired boiler have been obtained. Through the experiments one can discover that the mercury in the 600 MW boiler has been emitted mainly in the form of gas with the total amount of gaseous mercury in the flue gas varying from 4.99 to 14.79 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$. Moreover, the percentage content of zero-valence mercury is relatively high and there is little change in gaseous mercury configuration before and after the ESP. The removal rate of particle mercury amounts to over 90%. **Key words:** 600 MW, pulverized coal-fired boiler, mercury, emission characteristics

220 t/h 锅炉冷态数值试验研究= **Numerical Experimental Study of the Cold State of a 220 t/h Boiler**[刊, 汉] / HENG Li-jun, DUAN Kun-jie, HE Chang-zheng (Construction Department, Pingdingshan Engineering Institute, Pingdingshan, China, Post Code: 467001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(6). — 573 ~ 577

With a 220 t/h tangentially corner-fired boiler serving as a prototype, a realizable $k-\epsilon$ mathematical model has been established to cope with the limitations of traditional cold and hot-state performance tests of boilers. In combination with cold-state performance tests of boilers, in-furnace aerodynamic fields were simulated by using software FLUENT of computational fluid dynamics. The basic agreement of the numerical simulation results with those of cold-state performance tests and comparatively good coincidence of the distribution tendency of both results indicate that the numerical simulation method under discussion can relatively well reflect the true characteristics of in-furnace flow fields. Hence, the foregoing has demonstrated the correctness and reliability of the mathematical model, providing more comprehensive data and information for further improving boiler cold-state performance tests and for performing hot-state numerical tests. **Key words:** boiler, cold state performance test, numerical simulation