

燃油锅炉改烧瓦斯气炉内 流动和燃烧过程的数值模拟

刘亚琴¹, 李素芬¹, 张 莉²

(1. 大连理工大学 动力工程系, 辽宁 大连 116024; 2. 大连大学, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 燃油锅炉改烧瓦斯气, 为分析炉内流动及燃烧状况的变化, 利用 FLUENT 软件进行三维数值模拟。带旋流的湍流流动采用 Realizable $k-\epsilon$ 模型, 湍流燃烧采用 PDF 模型, 辐射模型采用 P1 模型。计算给出了炉内流场、温度场及热流密度沿高度分布。计算结果对于燃气锅炉运行及锅炉改造有很好的理论指导意义。

关 键 词: 燃油锅炉; 气体燃烧; 数值模拟; 流场; 温度场; 热流密度

中图分类号: TK224. 1 文献标识码: A

1 引 言

近年来, 石化行业生产工艺的可燃副气量越来越多, 如何利用这些气体燃料已成为石化行业节能和环保所面临的一项必须解决的任务。为了回收利用工业可燃副气, 将现有的燃油锅炉改烧可燃副气或油气混烧是一项良好的节能措施。

然而, 燃料成份的改变、燃烧器喷射状况的不同以及炉膛结构与燃料适应性要求等方面的影响, 使炉内燃烧状况产生变化, 引起锅炉水动力循环变动, 处理不当可能导致水冷壁爆管。为了探讨燃油锅炉改烧气体燃料的热力特性以及结构的适应性, 有必要对炉内流动与燃烧过程进行深入研究。靠热态试验获得数据不仅耗费大量的人力、物力, 而且得到数据很少, 受测试手段和测试条件的限制, 有些数据难以取得, 有些试验甚至无法进行, 因此不能全面反映炉内的真实情况。炉内过程的数值模拟, 可以获得炉内温度场、速度场以及水冷壁各处的热流分布, 直观地反映炉内燃烧状况^[1]。目前国内对于燃油和燃气锅炉炉内过程的数值模拟主要是针对圆柱型炉膛的二维模拟^[2]。本文用 FLUENT 商业软件对某燃油锅炉改烧瓦斯气的炉内流动燃烧状况进行三维数值模拟, 从流场、温度场和热流密度等方面对炉内过程进行分析, 对炉内三维温度场做出数值预报。研究

结论对燃油锅炉改烧气体燃料的调节、控制以及锅炉喷嘴和炉膛结构的改造具有理论指导作用。

2 数学模型

炉内燃气燃烧是一个复杂的物理化学过程, 它涉及到流体流动、传热传质和燃烧等多个过程。本文采用 Realizable $k-\epsilon$ 模型模拟气相湍流流动^[3], 平衡混合分数/PDF 模型模拟气相湍流燃烧^[4], P1 模型模拟辐射换热^[5]。

2.1 湍流模型

标准 $k-\epsilon$ 模型是半经验公式, 主要是基于湍流动能和扩散率, 假定流场完全是湍流, 组分之间的粘性可以忽略。标准 $k-\epsilon$ 模型对完全湍流流场的模拟很有效, 相比 $k-\omega$ 模型、雷诺应力模型及大涡模拟更节约计算时间。对于有旋的流动, 修正的 $k-\epsilon$ 模型效果更好^[6]。

修正的 $k-\epsilon$ 模型 (Realizable $k-\epsilon$) 中关于 k 和 ϵ 的输送方程如下:

k 方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_\epsilon}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (1)$$

ϵ 方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_\epsilon}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_1 E \epsilon - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2)$$

其中: $\sigma_k = 1.0$; $\sigma_\epsilon = 1.2$;

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]; C_2 = 1.9;$$

$$\eta = (2 E_{ij} E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\epsilon}; E_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

2.2 非预混燃烧模型

非预混模拟方法的基础是在一定系列简化假设下^[7],认为流体的瞬时热化学状态与一个守恒量即混合分数 f 相关,将化学反应减少为一或二个守恒的混合分数,所有热化学标量(组分质量分数,密度和温度)均唯一与混合分数有关。给定反应系统化学性质与化学反应,系统其它的特定限制,流场中任一点的瞬时守恒分数值可被用于计算每个组分摩尔分数、密度和温度值。

混合分数可根据原子质量分数写为:

$$f = \frac{Z_i - Z_{i, \alpha}}{Z_{i, \text{fuel}} - Z_{i, \alpha}} \quad (3)$$

式中: Z_i —元素 i 的元素质量分数,下标 α —氧化剂流入口处的值; fuel —燃料流入口处的值。

混合分数输送方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{f}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f} \right) \quad (4)$$

同时解一平均混合分数均方值的守恒方程 $\bar{f}^2$:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}^2) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{f}^2) \\ &= \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f}^2 \right) + C_g \mu_t (\nabla^2 \bar{f}) - C_d \rho \frac{\epsilon}{k} \bar{f}^2 \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\bar{f}' = f - \bar{f}$ 。常数 σ_t 、 C_g 和 C_d 分别取0.85、2.86和2.0。

2.3 传热模型

炉内传热过程对于燃烧的流动过程和化学反应过程有很大的影响,也就是说火焰传热对于燃烧过程本身有强烈的反馈作用。传热模拟时求解以总焓形式表示的能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} H) = \nabla \cdot \left(\frac{k_t}{c_p} \nabla H \right) + S_k \quad (6)$$

其中:总焓的定义为 $H = \sum_j Y_j H_j$,而 Y_j 为组分 j 的质量分数; k_t —导热率; c_p —粘度; ρ —密度,方程右边的第一项包含热传导与组分扩散,粘性耗散及辐射包含于源项 S_k 中。

辐射传热可根据光学深度 α_L 选择不同的模型。本文选择P1辐射模型。此模型定义辐射热流:

$$q_r = \frac{1}{3(a + \sigma_s) - C_{\sigma_s}} \nabla G \quad (7)$$

辐射传热输送方程:

$$-\nabla q_r = aG - 4a\sigma T^4 \quad (8)$$

其中: a —吸收系数; σ_s —散射系数; σ —斯蒂芬—玻尔兹曼常数; G —入射辐射; C —线性各相异性相位函数系数; T —开氏温度。

3 实际模拟

3.1 模拟对象介绍

本文模拟的锅炉型号为Y-130/39-2,炉膛高18.75 m,宽6.08 m,深5 m,呈长方形。锅炉安装6个燃烧器,分两排布置在前墙上,上下排各3支,上下排间隔2 m。锅筒设计压力4.3 MPa,原设计燃料为重油或渣油,现运行燃料为瓦斯气。在燃气燃烧的过程中,只开3个燃烧器,即上排中间和下排侧向两个,运行负荷65 t/h。炉膛负压燃烧,燃料成份如表1所示。

表1 燃料成份体积百分比

H ₂	59.55	CH ₄	8.71
C ₃ H ₆	10.07	C ₂ H ₄	2.99
C ₂ H ₆	7.16	C ₃ H ₈	2.21
C ₄ H ₁₀	1.76	N ₂	7.61

气体燃料按其燃烧方式主要有扩散燃烧和预混燃烧^[8]。瓦斯气和助燃空气分别进入燃烧器,一边扩散混合一边燃烧形成扩散燃烧火焰。扩散燃烧的快慢主要取决于燃料与空

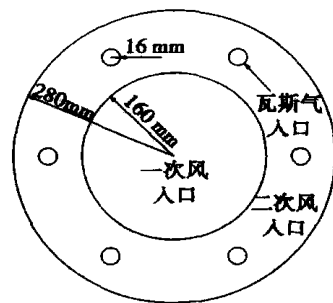


图1 喷嘴形式

气混合强度,因此燃烧器的结构形式及引入空气的旋流强度对于炉内燃烧有着重要作用。本文模拟的锅炉燃烧器采用6支喷枪喷射瓦斯气,中心一次风通过稳焰器进入炉膛,二次风通过可动切向叶片旋转进入,燃烧器形式如图1所示。

3.2 网格划分

数值计算的网格采用Gambit商业软件进行划分。为减少计算单元以及考虑计算的稳定性和收敛性,将整个炉膛分成4个部分。燃烧器采用四面体网格进行划分,前墙面区域采用pave划分四边形网格并进行了局部加密,炉膛区域全部网格均采用六面体网格^[9]。网格总数共约36万。燃烧器区域的网格如图2所示。

3.3 边界条件及计算方法

瓦斯气及空气均采用速度入口,一次风直流进

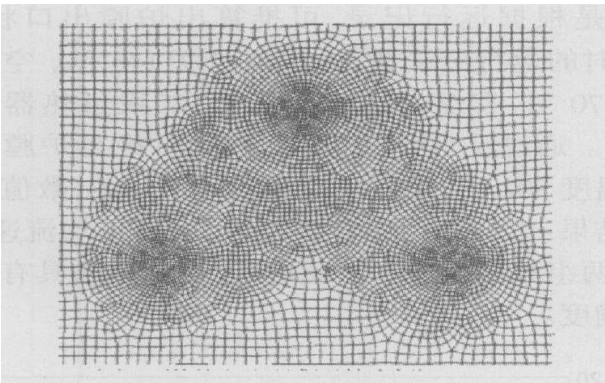


图 2 燃烧器区域网格划分

出, 速度 15 m/s 二次风旋流进入, 入口轴向速度 50 m/s, 切向速度 50 m/s (旋流数 $S=1$); 瓦斯气入口流速 180 m/s (质量流量 1.28 kg/s); 出口采用压力出口, $P=-20$ Pa; 壁面采用无滑移定壁温条件, $T=519$ K, 近壁面处使用标准壁面函数。

计算中压力-速度耦合采用 Simplec 方法。为减少误差, 其它方程均采用二阶迎风格式。

为得到收敛的解, 计算时先计算冷流场, 收敛后再加入 PDF 方程及能量方程。通过调节各个松弛因子降低残差, 直到计算收敛。

4 模拟结果与分析

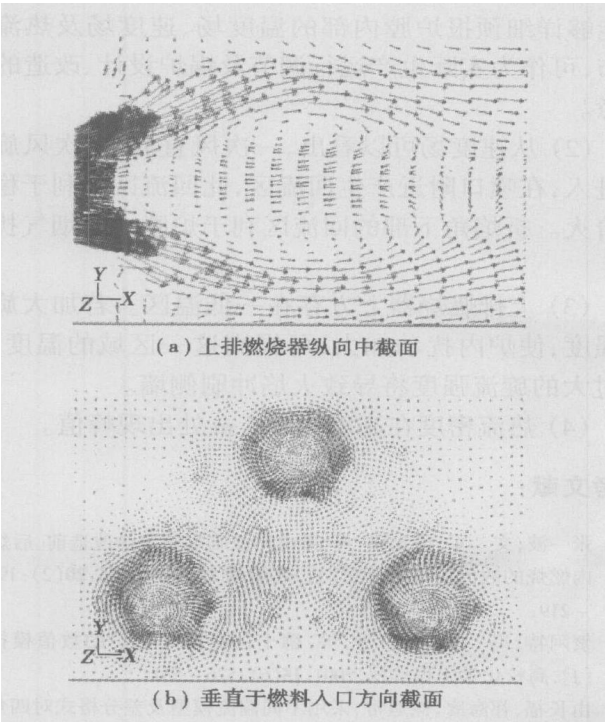


图 3 燃烧器区速度矢量剖面

4.1 速度场

图 3(a)为炉膛上排燃烧器纵向中截面速度矢量图。从图中可以看出, 在燃烧器附近, 有一个中心回流区。进入稳焰器的一次风速度很低, 二次风有较高的旋流强度, 因此在燃烧器出口轴线中心处形成低压区, 当此处轴向压力梯度足够大时便引起沿轴向的反向流动, 产生中心回流区。中心回流区速度较低, 能够保持火焰稳定。同时回流区卷吸周围高温烟气, 加火焰根部未燃气体, 使着火提前, 缩短火焰长度。实际燃烧过程中, 可以通过调节旋流强度及一二次风的配比, 来调节回流区尺寸及位置,

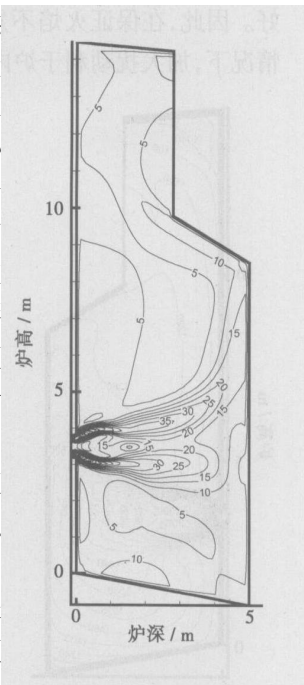


图 4 炉膛中心截面速度等势线 (m/s)

从而控制火焰在炉膛中的位置^[19]。图 3(b)为垂直于燃料入口方向的截面图, 从图中可以看出: 燃烧器出口切向速度相互干涉, 下排两燃烧器的速度扰动较大。

从图 4 可以看出, 在燃烧器的下方形成一回流区, 这是由于燃烧器射流速度引起。另外, 折焰角对气流的阻扰, 使得在炉膛中心处也形成一回流区, 这有利于炉内扰动, 使温度场分布均匀。

4.2 温度场

图 5 给出了炉膛中两个不同的纵向剖面上的等温线图。从图中可以看出, 瓦斯气火焰的温度约为 2 000 K, 整个炉膛高温区集中在火焰区即炉膛高度下方 1/3 处。炉膛上部温度较低, 为 1 200 K 左右。炉膛出口平均温度 1 140 K。上排燃烧器的上方存在一低温区。这主要是因为气体燃料产生的火焰中, 辐射成份主要是二氧化碳和水蒸气, 它们的辐射仅在较窄的波段内进行, 与具有连续发射光谱的发光固体颗粒相比, 气体火焰的辐射能力很弱; 另外此处流动速度较低, 对流换热较弱, 因而这一区域温度较低。

图 6 给出了高度为 1.5 m 和 3.5 m 的横截面温度分布图。从图中可以看出, 燃烧器区域的烟气回流、扰动较好, 温度场均匀, 温度较高。下排火焰面较上排宽, 主要由于下排布置两个燃烧器, 相互之间

存在干涉,彼此所受扰动更大,火焰的炉膛充满度更好。因此,在保证火焰不发生脱火及冲刷水冷壁的情况下,加大扰动利于炉内燃烧。

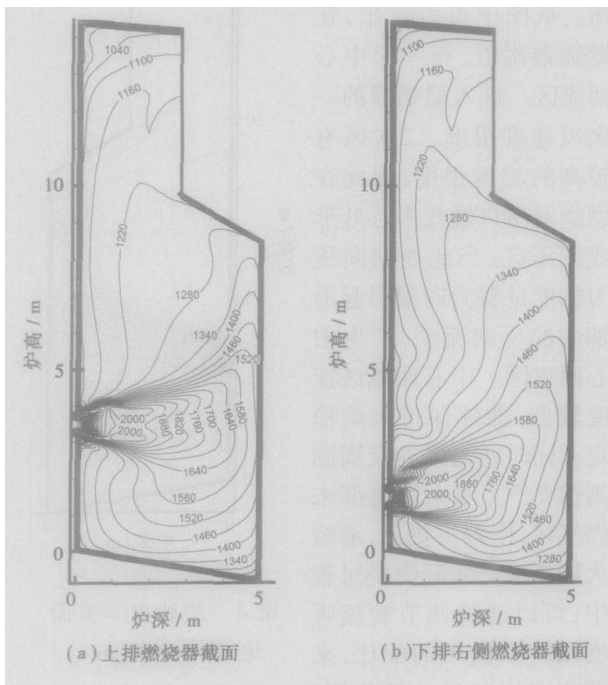


图 5 炉膛纵截面等温线(K)

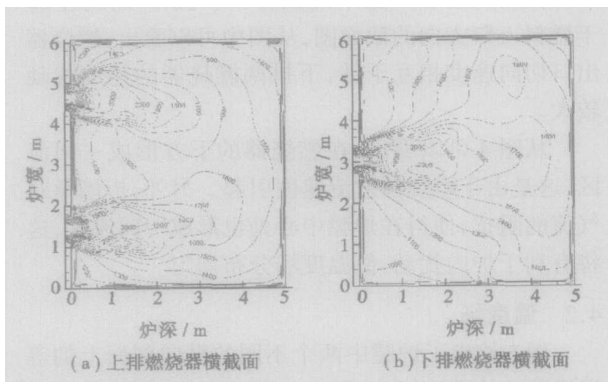


图 6 炉膛横截面等温线(K)

4.3 热流分布

图 7 给出的是热流密度随炉膛高度的变化图。从图中可以看出热流密度的最大值出现在高度约 2.5 m 处,处在两排燃烧器中间。这是因为此处为火焰区,扰动、辐射均较大;越往炉膛上部,热流密度越小;接近炉膛出口处,热流密度最小,此时,燃烧完全,烟气内部主要靠对流换热,流动速度较低,故换热较少。

4.4 计算结果与运行数据的对照

受实验条件的限制,炉膛内的温度无法准确测

出,但是根据运行记录,可推算出炉膛出口状况。65 t/h 时的运行记录数据,排烟温度 146 °C,空预器出口 170 °C,省煤器出口 233 °C,二级过热器出口 517 °C。通过反平衡法热力计算,可推得炉膛出口平均温度 902 °C,出口平均流速 4.78 m/s,数值模拟计算结果:出口平均温度 895 °C,出口平均流速 4.5 m/s。两组数据相近。由此可见,计算结果具有一定的准确度。

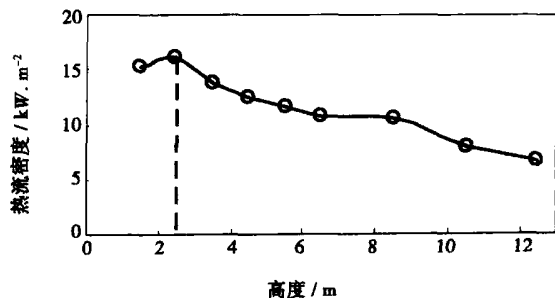


图 7 热流密度随高度变化

5 结 论

(1) 利用 FLUENT 商业软件,采用分区划分网格的方法对某 130 t/h 燃油锅炉燃烧瓦斯气炉内流动、燃烧和传热进行了三维数值模拟。数值模拟结果能够详细预报炉膛内部的温度场、速度场及热流分布,可作为实际生产运行调节及锅炉设计、改造的参考。

(2) 从速度场可以看出,一次风直流、二次风旋流进入,在喷口附近产生回流区,此回流区有利于稳定着火。折焰角下部的回流区利于炉膛内的烟气扰动。

(3) 上排燃烧器上方存在一低温区。若加大旋流强度,使炉内扰动加大,可提高这一区域的温度,但过大的旋流强度将导致火焰冲刷侧墙。

(4) 热流密度在高度约 2.5 m 处出现峰值。

参考文献:

- [1] 张 波,文 军,徐党旗,等.某电站亚临界直流炉改造前、后炉内燃烧的数值模拟及分析[J].热能动力工程,2005,20(2):197-219.
- [2] 贺阿特,冯 霄,董绍平,等.德士古渣油气化炉的数值模拟[J].高校化学工程学报,2001,15(6):526-531.
- [3] 由长福,祁海鹰,徐旭常.采用不同湍流模型及差分格式对四角切向燃烧煤粉锅炉内冷态流场的数值模拟[J].动力工程,2001,21(2):28-31.

(下转第 302 页)

图 7 所示。由图可知, 分配集箱垂直水冷壁管内流量分配的试验结果与计算结果偏差较小, 在本试验中, 其偏差在 10% 以内。当流量较小时(例如图 4 中 $G=800 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), 在靠近分配集箱进口处的第一根支管的流量比相邻支管内流量大。出现这种现象的原因是分配集箱为从最底部径向引入, 并联支管从分配集箱中部侧面水平引出之后再垂直向上, 而且, 第一根支管的位置离引入管很近。当分配集箱引入管内的流量较小时, 进入分配集箱内介质的动量相对较小, 故进入第一根支管的流量比相邻支管的流量大。当分配集箱引入管的质量流速较大时(例如 $G=1200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), 进入分配集箱内的介质的动量较大, 工作介质进入集箱后更容易沿轴向流动, 此时的流量分配规律与计算结果完全一致, 如图 7 所示。600 MW 超临界直流锅炉在超临界压力下运行时, 分配集箱引入管的质量流速大于 $1200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 所以利用上述离散模型计算分配集箱垂直水冷壁管内的流量分配可以得到较满意的结果。

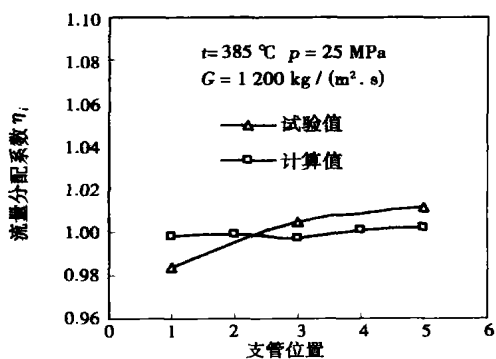


图 7 计算值与试验值的比较

6 结 论

(1) 随着分配集箱引入管内的质量流速的增加, 垂直水冷壁管内的流量分配均匀性增加; 当引入管内的质量流速增加到一定值后, 质量流速对垂直水冷壁管内流量分配不均匀性的影响很小。

(2) 在工质温度小于 350°C 时, 工质温度对分配集箱垂直水冷壁管内流量分配的不均匀性的影响很小; 但在拟临界点温度 384°C (压力 $p=25 \text{ MPa}$ 时) 附近流量分配的不均匀性有一明显的增加。

(3) 采用离散模型计算分配集箱并联支管内的流量分配, 其计算结果与试验值吻合较好; 在分配集箱引入管质量流速较大时, 其误差在 10% 以内。

参考文献:

- [1] 王峻华, 葛晓玲, 吴东棣. 分支流理论进展[J]. 力学进展, 1998(3): 392—401.
- [2] 吴东垠, 林宗虎. 水平并联管系统中气液两相流在联箱内的压力分布研究[J]. 热能动力工程, 1994, 9(3): 168—175.
- [3] 熊兴才. 超临界锅炉分配集箱的气液两相流动特性研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2002.
- [4] 吴东垠. 水平并联管系统中气液两相流在联箱内的压力分布和局部阻力研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1992.
- [5] 程卓明, 周云龙. 分配联箱气液两相流流动对垂直并联管分配特性的影响[J]. 热能动力工程, 1997, 12(4): 270—273.
- [6] 朱玉琴, 陈听宽, 毕勤成. 超临界压力下 600 MW 直流锅炉水冷壁管阻力特性的试验研究[J]. 动力工程, 2005(6): 786—789.
- [7] 罗永浩. 并联管组换热器的流动及传热特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 1997.

(何静芳 编辑)

(上接第 298 页)

- [4] OBIEGLO A, GASS J, POULIKAKOS D. Comparative study of modeling a hydrogen nonpremixed turbulent flame[J]. *Combustion and Flame*, 2000, 122: 176—194.
- [5] KERAMIDA E P, LIAKOS H H, FOUNTI M A, et al. Radiative heat transfer in natural gas-fired furnaces[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, 43: 1801—1809.
- [6] 王福军. 计算流体动力学分析—CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

- [7] 卡里尔 E E. 燃烧室与工业炉的数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [8] 李方运. 天然气燃烧及应用技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- [9] 潘 维, 池作和, 斯东波, 等. 四角切圆燃烧锅炉炉膛网格生成方法的研究[J]. 动力工程, 2005(3): 259—363.
- [10] 仇性启, 毛 羽. 燃气燃烧器空气旋流对回流区尺寸的影响[J]. 石油化工设备技术, 1999, 20(2): 35—38.

(何静芳 编辑)

when the water quality does not seriously deviate from the design regime, the accumulative tube-plugging rate can be chosen as the status parameter for the on-condition replacement with the decision-making threshold value being set at 1.28%. When the water quality deviates seriously from the design regime, the frequency of accumulative tube-plugging and the failure rate of the current year can be chosen as the status parameter with the decision-making threshold value being the accumulative failure frequency amounting to 20.4 times and the failure rate of the current year being set at 3.95 times/year. Compared with the currently prevailing maintenance modes, the optimized maintenance modes can reduce the operation and maintenance costs by 34%. **Key words:** power plant condensers, RCM analysis, maintenance decision-making, replacement based on specific conditions

内置稳燃热岛燃气锅炉内流动与传热数值模拟 = **Numerical Simulation in the Flow and Heat Transfer in a Gas-fired Boiler with a Built-in Stable-combustion Heat Island** [刊, 汉] / OU Jian-ping, MA Ai-chun (Energy Source and Power Engineering College under the Central South University, Changsha, Hunan, China, Post Code: 410083), LAI Chao-bin, DENG Ren-hua (Xinyu Iron and Steel Co. Ltd., Xinyu, Jiangxi, China, Post Code: 338001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(3). — 291 ~ 294

With a gas-fired boiler provided with a built-in stable-combustion heat island serving as an object of study and by making use of CFD software PHOENICS coupled with the in-boiler fluid flow, combustion and heat transfer process, a numerical simulation analysis has been performed of the gas flow and heat transfer characteristics of the boiler. The impact of an ignition-aid burner operating condition and an annular stable-combustion heat island on the gas flow and heat transfer process in the boiler was studied with a comparison and verification being made in production practice. The results of the study indicate that the corner-tangential layout of the burners and the presence of an annular heat island in the boiler are conducive to the stable combustion and the formation of tangential flow modes in the boiler, enhancing the agitation of flue gases in the boiler and making the furnace temperature distribution more uniform. As a result, the heat exchange efficiency of the heating surfaces in the furnace has been improved. Through an adjustment of the location of ignition-aid burners the stable combustion of a low heat value gas-fired boiler has been realized. The research results can serve as a guide during the design improvement and production organization of blast furnace gas-fired boilers. **Key words:** boiler, blast furnace gas, stable combustion-based heat island, flow field, heat transfer, numerical simulation

燃油锅炉改烧瓦斯气炉内流动和燃烧过程的数值模拟 = **Numerical Simulation of the Flow and Combustion Process of an Oil-fired Boiler Being Converted to Burn Gas** [刊, 汉] / LIU Ya-qin, LI Su-fen (Power Engineering Department, Dalian University of Science and Technology, Dalian, Liaoning, China, Post Code: 116024), ZHANG Li (Dalian University, Dalian, Liaoning, China, Post Code: 116024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(3). — 295 ~ 298, 302

An oil-fired boiler was converted to burn gas. To analyze the change of in-boiler flow and combustion conditions, the authors have conducted a three-dimensional numerical simulation by using software Fluent. A “Realizable $k-\epsilon$ ” model was employed to simulate the turbulent flow with a swirling one, while a PDF model used for the simulation of turbulent flow combustion and a P1 model for the simulation of radiation. Through calculations the distribution of in-boiler flow field, temperature field and heat-flux densities along the height were obtained. The calculation results are of major theoretical significance for guiding the operation of gas-fired boilers and their modification. **Key words:** gas combustion, numerical simulation, flow field, temperature field, heat-flux density

超临界压力下水冷壁中间集箱分配特性的研究 = **An Investigation on the Flow Distribution Characteristics of a Water-wall Intermediate Header at a Supercritical Pressure** [刊, 汉] / ZHU Yu-qin, BI Qin-cheng, CHEN Ting-kuan