

内置稳燃热岛燃气锅炉内流动与传热数值模拟

欧俭平¹, 马爱纯¹, 赖朝彬², 邓仁华²

(1. 中南大学能源与动力工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 新余钢铁有限责任公司, 江西新余 338001)

摘要: 以内置稳燃热岛的燃气锅炉为对象, 利用 CFD 软件 PHOENICS 耦合锅内流体流动、燃烧和传热过程, 对锅炉内的气体流动和传热特性进行数值模拟分析, 研究了点火烧嘴的工作条件以及环形稳燃热岛对锅炉内气体流动和传热过程的影响, 并在生产实际中进行对比验证。结果表明, 四角切圆的烧嘴布置及锅炉内部环形热岛的存在, 有利于锅内燃烧的稳定和锅内切圆流动方式的形成, 加强了炉内烟气的搅动, 炉膛温度分布更均匀, 炉膛受热面的换热效果得到改善; 通过调整点火烧嘴的位置, 实现了低热值煤气锅炉的稳定燃烧。研究结果可为改进高炉煤气锅炉的设计和生组提供组织提供参考。

关键词: 锅炉; 高炉煤气; 稳燃热岛; 流场; 传热; 数值模拟
中图分类号: TK224 文献标识码: A

1 前言

近年来, 随着钢铁工业的迅猛发展, 生产中的副产煤气大量增加。焦炉煤气和转炉煤气由于发热值高, 可以在生产和生活中有效利用。而高炉煤气属低热值燃料, 受到其燃烧特性的限制, 很难作为远距离输送的生活用气, 只能在企业内部转换利用^[1]。为了充分利用自产的高炉煤气, 国内钢铁企业纷纷兴建全燃高炉煤气的蒸汽锅炉, 既避免了高炉煤气直接排空造成的烟尘污染和热污染, 又提高了企业的经济效益。但是, 烧高炉煤气锅炉的燃烧状况受高炉生产影响较大, 尤其在出铁时, 煤气压力波动较大, 锅炉的燃烧状况很不稳定, 甚至会造成锅炉熄火, 进而影响汽动风机或发电机组的安全运行。为了实现高强度下全燃高炉煤气锅炉的稳定燃烧, 除了在燃烧器上安装点火辅助烧嘴以外, 还在锅内设置了稳燃热岛。热岛的存在对四角切圆锅炉内的流场和温度分布有较大影响。由于能更有效地利用低热值的高炉煤气, 带稳燃热岛的燃气锅炉已得到推广应用, 但关于这种锅炉内流动和传热特性的研究进行不多。本文以某电厂 130 t/h 全燃低热值高炉煤气锅炉为对象, 利用

计算流体力学软件 PHOENICS, 对锅炉内的气体流动和传热特性进行模拟分析, 为改进高炉煤气锅炉的设计和生组提供组织提供参考。

2 数学模型

本文研究的高炉煤气锅炉采用四角切圆的燃烧方式, 分上、下两段燃烧区间(其中上部燃烧区间未使用), 在每段四个角部分别布置了 4 层同轴套筒式平面火焰燃烧器, 燃气和空气分别流经内、外套管的环形通道, 燃烧器中心设有焦炉煤气点火烧嘴。各层烧嘴的中心间距为 900 mm, 最下层烧嘴离底 2 600 mm, 喷嘴的切入角为 30.8°, 烧嘴的结构相同。锅炉本体长 6 336 mm×宽 6 336 mm×高 24 100 mm, 下部无灰斗; 在锅炉底面居中内置一个下圆直径为 3 000 mm、上圆直径为 2 400 mm、高 5 800 mm 的圆台形热岛(见图 1(a)), 水平切圆燃烧系统如图 1(b)所示, 计算模型的网格划分如图 2 所示。

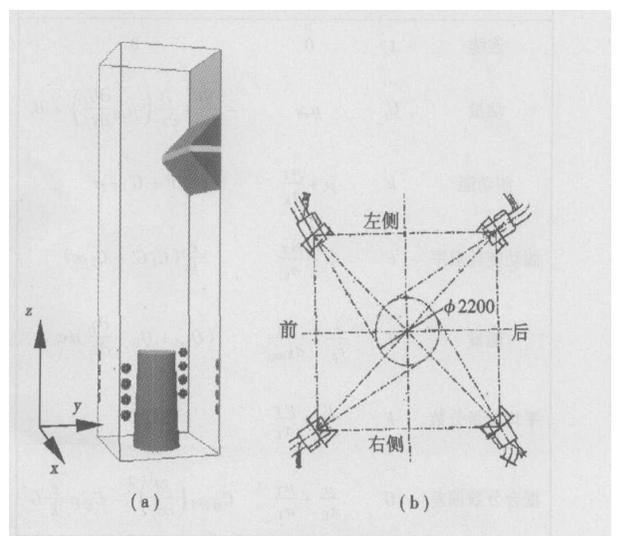


图 1 锅炉水平切圆燃烧系统

收稿日期: 2005-08-24; 修订日期: 2005-11-23

作者简介: 欧俭平(1970-)男, 湖南邵阳人, 中南大学副教授。

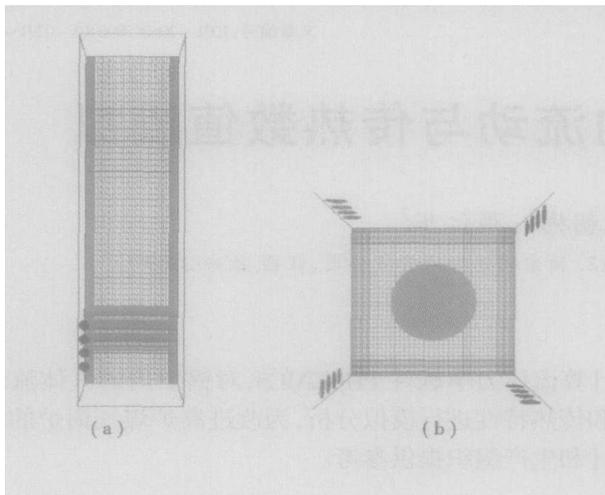


图 2 模型的网格划分

2.1 控制方程组

综合考虑体系的质量、动量守恒,在欧拉坐标系中导出气体燃烧的三维非稳态数学模型。用一个通用的基本参数 Φ 进行描述,模型的守恒方程组的通用表达式为^[2]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right) + S_\Phi$$

式中: U_i —气体在 x, y, z 方向的速度; ρ —密度; Γ_Φ —扩散系数; S_Φ —对应的源项,具体的内容与表达式列于表 1。

表 1 守恒方程中的变量、输运系数和源项^[2~5]

	Φ	Γ_Φ	S_Φ
连续	1	0	0
动量	U_j	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) + B_i$
湍动能	k	$\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k}$	$P + G' - \rho\epsilon$
湍动能耗散率	ϵ	$\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k} (C_1 G' - C_2 \rho\epsilon)$
能量	T	$\frac{\lambda}{c_p} + \frac{\mu_T}{\sigma_{\text{Temp}}}$	$(Q_{\text{rad}} + Q_{\text{R}} - \frac{\partial q_i}{\partial x_j}) / c_p$
平均质量分数	F	$\frac{\mu}{\sigma_E} + \frac{\mu_T}{\sigma_T}$	0
混合分数偏差	G	$\frac{\mu}{\sigma_E} + \frac{\mu_T}{\sigma_T}$	$C_{g1} \mu_T \left(\frac{\partial F}{\partial x_j} \right)^2 - C_{g2} \rho \frac{\epsilon}{k} G$

注: B_i —体积力; P —剪切生成项; G' —体积生成项; C_p —定压比热; $Q_{\text{rad}}, Q_{\text{R}}$ —辐射热和化学反应热; q_i —总能量通量; $\mu, \mu_T, \mu_{\text{eff}}$ —气体的分子粘度、湍流粘度、有效粘度,且有 $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_T$; $\sigma_k, \sigma_T, \sigma_H$ —普朗特数; C_1, C_2, C_{g1}, C_{g2} —模型常数。

2.2 边界条件

进口采用 Dirichlet 边界条件,直接设定气体进口速度。本计算中各入口处气体的压力和速度等根据工程实际确定,通过所有烧嘴的同类气体的流量保持一致(见表 2)。出口采用压力边界条件,根据工程实际,设为 -100 Pa ;计算域内的初始速度为零。

表 2 通过烧嘴的各类气体的流量和速度

	流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	出口速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
高炉煤气	5 480	14.0
焦炉煤气	312	12.0
空气	6 600	14.0

2.3 求解方法

采用有限差分方法和修正的速度—压力耦合算法^[4],利用 PHOENICS 对模型进行求解,应用 $k-\epsilon$ 双方程湍流模型,采用混合差分格式对控制方程组进行离散,对速度、压力等采用欠松弛迭代达到收敛。计算区域共布置 124 394 个网格节点,对流动情况比较复杂、变量的变化梯度较大的位置,如喷口处,采用均匀性网格且网格分布较密;喷口附近设置线性渐进式的网格划分,使相邻两个网格尺寸的变化不超过 150%;在变量变化缓慢的地方,网格划分较少。在流动的近壁面区域许多变量变化很快,由于计算机内存的限制,在这些区域不可能使用很细的网格,为了减少计算成本,采用壁面函数处理。

3 结果及分析

锅内不同纵截面的气体速度分布云图和 4 层烧嘴中心截面气体速度分布矢量图分别如图 3 和图 4 所示。由图 3 和图 4 可以看出,对于该类型锅炉,由于烧嘴出口平行射流的相互干涉,使得各股射流的速度分布并不规则,流股大小有粗有细。但由于采用了四角切圆的烧嘴布置,加上锅炉内部环形热岛的存在,在锅炉内部形成很好的切圆流动方式,加强了锅内烟气的搅动,促进了烟气与锅壁间的对流换热;而在所计算参数下,靠近热岛的流动则较弱,避免了高温气流对热岛耐火材料的冲刷,有利于延长其使用寿命。此外,由于锅炉的换热器和烟道布置在上部,加上内部热岛的影响,锅内烟气往上流动,在靠近锅壁附近的气流速度相对较快,也有利于烟气与锅壁间的对流换热,提高锅炉的热效率。

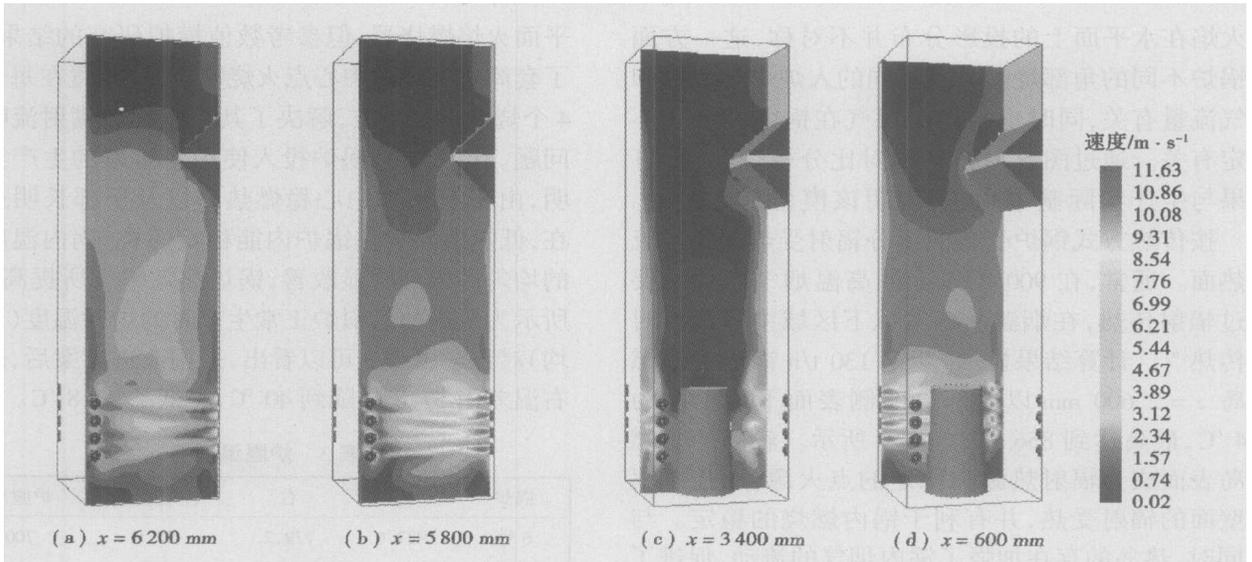


图 3 锅内不同纵截面的气体速度分布图

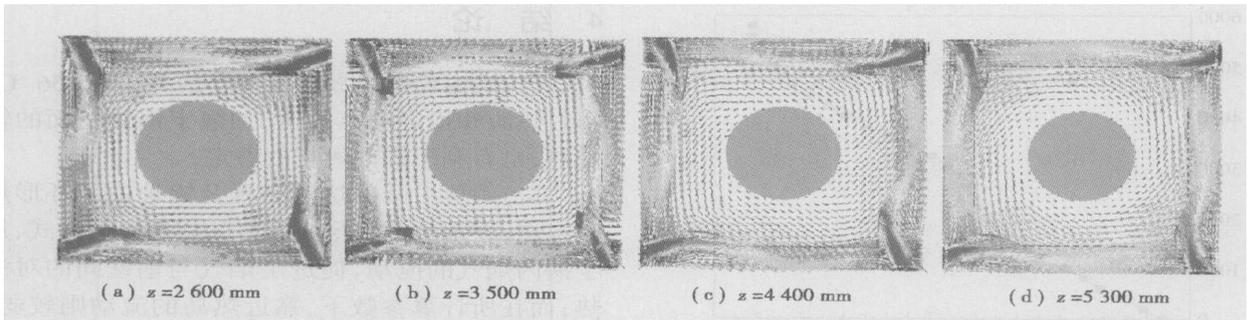


图 4 锅内不同层烧嘴中心截面的气体速度分布矢量图

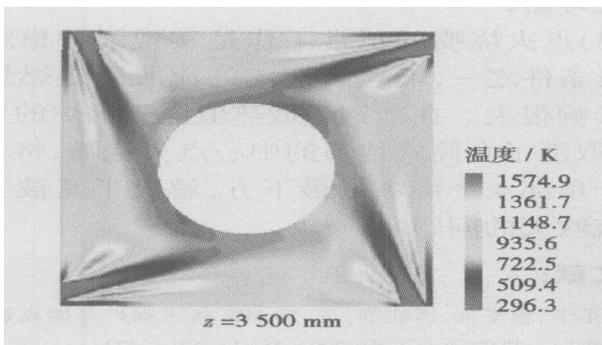


图 5 烧嘴中心截面的温度分布

图 5 所示为该计算条件下, $z=3500\text{ mm}$ 处烧嘴中心截面的温度分布(其它层烧嘴中心截面的温度分布规律与此基本相同)。图中温度分布基本合理, 高温区离开喷口较远, 介于水冷壁和热岛之间, 向着水冷壁面有较长的火焰区及高温气体, 燃烧产生的大量热量通过辐射与对流换热的方式传递给水冷壁壁面。而在助燃风喷口附近的水冷壁壁面上, 则存

在一个相对低温区, 这表明布置在燃烧器外面的助燃风的使用能阻止高温气流对水冷壁的冲刷, 在一定程度上起到了保护水冷壁的作用。

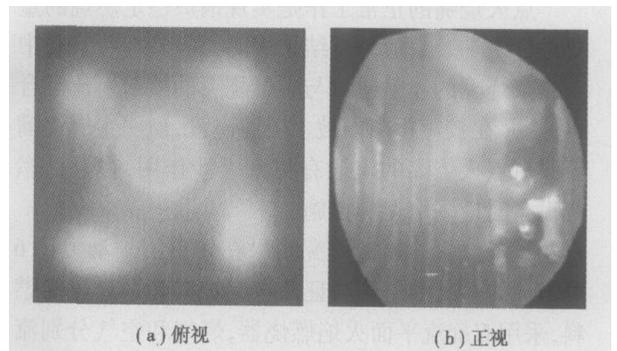


图 6 生产中锅炉内的燃烧照片

图 6 所示为正常生产时锅内燃烧现象的实物照片, 其中(a)为采用安装在锅顶的高温摄像相机拍摄, (b)为从锅壁侧面人孔中拍摄。由图 6(a)不难看出, 虽然锅炉内烧嘴的切圆布置方式是对称的, 但锅

内火焰在水平面上的投影分布并不对称,这一方面与锅炉不同的角部烧嘴具有不同的入炉煤气流量和空气流量有关,同时也与高炉煤气在锅内的燃烧不稳定有关。通过图 5 与图 6 的对比分析表明,计算结果与生产实际基本吻合,说明该模型是有效的。

按传热方式锅炉受热面可分辐射受热面和对流受热面。通常,在 900 °C 以上的高温烟气区域主要通过辐射传热,在烟温 900 °C 以下区域主要进行对流传热^[6]。计算结果显示,新钢 130 t/h 锅炉内稳燃热岛 $z=2\ 600\text{ mm}$ 以上部分的侧表面平均温度为 764 °C,最高达到 856 °C,如图 7 所示。较高的稳燃热岛表面成为辐射热源和稳定的点火源,加强了锅炉壁面的辐射受热,并有利于锅内燃烧的稳定性。与此同时,热岛的存在加强了锅内烟气的流动,促进了烟气与锅壁间的对流换热。

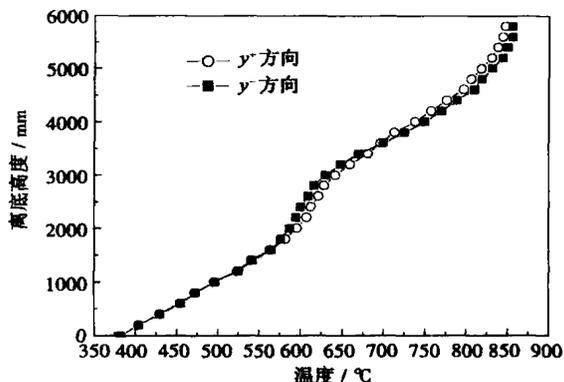


图 7 稳燃热岛侧表面高度方向温度分布($x=3\ 000\text{ mm}$ 截面)

点火烧嘴的正常工作是实现锅炉稳定燃烧的重要条件之一。数值分析结果表明,在稳定状态下,中心点火烧嘴的喷射射流与主燃烧嘴的喷射射流混合迅速,并在较短距离内被主流股淹没,说明主燃烧嘴流股对点火烧嘴的流股有很大干涉作用,在设计燃烧设备时应采取避免措施。

该条件下的模拟研究结果在新钢第一动力厂 6 号锅炉的生产中得到验证。该锅炉以高炉煤气为燃料,采用双旋流平面火焰燃烧器,燃气和空气分别流经内、外套管的环行通道,通道内均布置有轴向导流叶片,燃烧器中心设有焦炉煤气点火烧嘴。由于煤气压力不稳定,时有中心焦炉煤气点火烧嘴的火焰被吹灭的现象发生,一方面直接影响到锅炉的稳定燃烧,另一方面,锅内燃烧不均匀,导致较大的温度偏差。因此,该厂在 7 号锅炉的烧嘴设计中,仍采用双旋流

平面火焰燃烧器,但参考数值模拟研究的结果,取消了套筒式烧嘴的中心点火烧嘴,将其布置在每个角部 4 个烧嘴的最下方,解决了其被主燃烧嘴射流吹灭的问题。该厂 7 号锅炉投入使用半年来的生产实践表明,由于有锅炉中心稳燃热岛以及下部长明火的存在,低热值煤气在锅炉内能稳定燃烧,锅内温度分布的均匀性得到明显改善,锅炉热效率有所提高。表 3 所示为改进前后锅炉正常生产时的炉膛温度(当班平均)对比。由表 3 可以看出,采用改进方案后,炉膛左右温差由 57.8 °C 降到 40 °C,降低了 17.8 °C。

表 3 炉膛温度 (°C)

锅炉	左	右	左右温差	炉膛出口
6 号	837.0	779.2	57.8	700.5
7 号	839.2	799.2	40.0	704.9

4 结 论

(1) 高温稳燃热岛表面温度最高达到 856 °C,是辐射热源和稳定的点火源,加强了锅炉壁面的辐射受热,也有利于锅内燃烧的稳定性;

(2) 四角切圆的烧嘴布置及锅炉内部环形热岛的存在,在锅炉内部形成很好的切圆流动方式,加强了锅内烟气的搅动,促进了烟气与锅壁间的对流换热;而在所计算参数下,靠近热岛的流动则较弱,避免了高温气流对热岛耐火材料的冲刷,有利于延长其使用寿命;

(3) 点火烧嘴的正常工作是实现锅炉稳定燃烧的重要条件之一,而点火烧嘴的流股受主燃烧嘴流股的影响很大。在新钢燃低热值煤气锅炉的生产实践中,取消了套筒式烧嘴的中心点火烧嘴,将其布置在每个角部 4 个烧嘴的最下方,解决了其被主燃烧嘴射流吹灭的问题。

参考文献:

[1] 庄正宁,曹子栋,唐桂华,等. 50 MW 高压锅炉全燃高炉煤气的研究[J]. 热能动力工程, 2004, 16(3): 271-274.
 [2] 帕坦卡 S V. 传热与流体流动的数值计算[M]. 张 政,译. 北京: 科学出版社, 1984.
 [3] 梅 焯. 有色冶金炉窑仿真与优化[M]. 北京: 冶金工业出版社 2001.
 [4] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
 [5] 张 泽,吴少华,秦裕琨. 近流数值计算方法在四角切圆燃烧炉膛中的应用[J]. 热能动力工程, 2000, 15(1): 47-49.
 [6] 动力工程师手册编辑委员会. 动力工程师手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.

(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-dun (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