

燃煤电站锅炉 NO_x 排放 影响因素的数值模拟分析

林鹏云, 罗永浩, 胡元

(上海交通大学 热能工程研究所, 上海 200240)

摘 要: 燃煤电站锅炉是氮氧化物(NO_x)的主要污染源之一, 通过 CFD 软件平台, 使用数值计算的方法对实际电站锅炉不同的燃烧工况进行数值模拟, 研究影响燃煤电站锅炉 NO_x 排放的不同因素。计算结果表明: 过量空气系数是影响 NO_x 生成的重要因素之一, NO_x 排放浓度随着过量空气系数的增大而增加; 改变二次风配风方式也能影响 NO_x 的生成, 在计算的 3 种工况中, 均等型配风生成的 NO_x 浓度最低, 倒塔型次之, 束腰型最大; 改变二次风偏转角度能影响 NO_x 的生成量, NO_x 排放浓度随着二次风偏转角度的增大而减小。

关 键 词: 燃煤锅炉; 数值模拟; NO_x 排放; 影响因素

中图分类号: TK229. 6 文献标识码: A

引 言

近几年来, 能源问题已经越来越成为制约国民经济发展的一个重要因素之一, 国家在倡导建设节能型社会的同时也越来越注意到能源消耗对环境带来的污染问题。根据目前能源的供应情况来看, 我国将在未来相当长的一段时间内继续维持目前“以煤为主”的能源结构。煤的燃烧是目前我国大气污染的主要来源, 而燃煤电站锅炉污染所占比重又最大, 因此降低燃煤电站锅炉污染物排放的研究具有重要的意义^[1]。

通过 CFD 软件平台, 以计算机数值模拟为研究手段对燃煤电站锅炉进行研究是一种常用的方法, 也有不少这方面研究的文献, 但是多数文献只是对一种工况进行了计算^[2~3], 或者是对特定的个别几个不同工况进行计算, 比较计算结果^[4], 很少有系统地针对不同的燃烧工况因素对 NO_x 生成的影响进行对比分析, 本文以此为出发点, 选取合适的数学物理模型, 针对某电厂实际锅炉不同的燃烧工况进行了数值模拟, 对影响燃煤电站锅炉 NO_x 排放浓度的不同因素进行了研究, 并与现场测试所得的数据进行对比, 为优化电站锅炉的运行, 降低电站锅炉的 NO_x 排放提供依据。

1 模拟对象

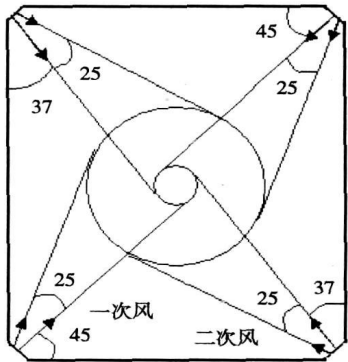


图 1 四角切圆燃烧方式布置示意图

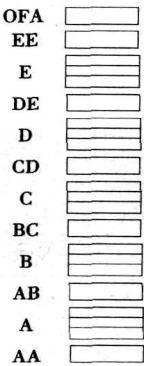


图 2 燃烧器喷口布置示意图

数值模拟的对象是某电厂一台 1 025 t/h 亚临界一次中间再热强制循环汽包锅炉。为了加强炉膛内燃料和空气的混合, 以及减少一次风贴壁, 降低结焦趋势, 该炉膛设计采用的是一、二次风同心反切燃烧技术, 四角切圆燃烧方式具体布置情况如图 1 所示。一次风射流进入炉膛后, 在动量较大的二次风

射流引射和冲击下,被带入沿二次风射流方向旋转的火球中。由于一次风被围在炉膛中央,使得炉膛中央形成富燃料区,而在水冷壁周围形成富氧区域,减少了一次风冲刷水冷壁的可能性,同时也有利于降低NO_x的生成量。燃烧器布置情况如图2所示,A、B、C、D、E分别为5层一次风喷口,其它均为二次风喷口,实际运行时5层一次风喷口通常只运行其中4层,另一层备用。

2 计算模型

大型燃煤电站锅炉实际尺寸比较大,长宽都超过10 m,高度方向超过50 m,所以根据实际参数的建模所得到的体积需要的网格数目也比较大,计算模型完全参照实际参数,全部使用六面体网格,网格数目约为50万个。考虑到模型在四个角上需要布置燃烧器,燃烧器部分的锅炉主体横截面是规则的八边形,为了尽量减少数值计算中伪扩散对计算准确性的影响(当流体速度方向与网格边界成45°角的时候容易产生数值计算的伪扩散)^[3],整个横截面使用Pave的方法生成网格,从而做到了即使流体喷入炉内的速度方向与网格的边界尽量平行又不影响网格的质量,燃烧器部分炉膛横截面网格布置如图3所示。考虑到燃烧器部分的锅炉炉膛是煤粉和空气喷入的主要部分,存在剧烈的湍流和燃烧等现象,因此对这一部分的网格进行局部加密,使这部分的网格间距相对锅炉的其它部分较小。

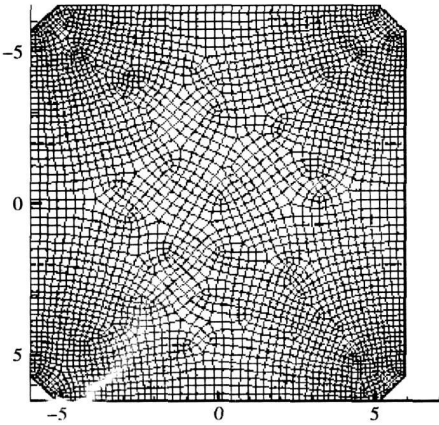


图3 燃烧器横截面计算网格图(m)

数值计算为三维稳态,采用Simple算法,数值计算中使用的模型包括:非预混燃烧模型、Realizable $\kappa-\epsilon$ 双方程湍流模型、混合分数/概率密度函数(mixture fraction PDF)气相湍流燃烧模型、P1辐射传

热模型(P1 radiation model)、为双平行反应(two competing rates model)煤粉挥发分析出模型、动力扩散控制燃烧模型(kinetics/diffusion limited char combustion model)焦炭燃烧模型以及随机轨道(stochastic tracking)方法跟踪煤粉颗粒^[5~6]

计算所用煤质成分如表1所示,计算中用到的主要边界条件参数如表2所示。

表1 计算煤种的成分分析

工业分析/ %			元素分析/ %					热值 $Q_{\text{net, ar}}$ /MJ·kg ⁻¹
灰分	挥发分	固定碳	碳	氢	硫	氮	氧	
A	V	FC	C	H	S	N	O	
7.19	23.56	52.80	61.74	3.35	0.63	0.69	9.95	24.074

表2 设计工况主要计算参数

	数值
一次风速/ m·s ⁻¹	24
一次风率/ %	21.77
一次风温度/ °C	76.7
二次风速/ m·s ⁻¹	47.6
二次风率/ %	78.23
二次风温度/ °C	320.6

3 计算结果与讨论

3.1 设计值工况计算与实际测试值的对比

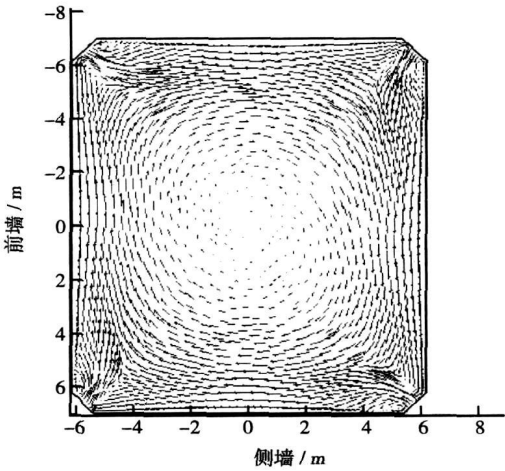


图4 一次风横截面速度场矢量分布图

锅炉设计值工况的主要参数包括过量空气系数为1.23,均匀配风,二次风相对一次风偏转角为25°。进入锅炉的煤粉依靠一次风携带,而且在上下二次风之间,炉内空气流动与混合的状况是决定煤粉燃烧状况的一个前提条件,图4显示的是一次风(B层)炉膛横截面的流场分布矢量图。从图中可

见,一次风明显形成了一个旋流场(即四角切圆)的燃烧方式,通过截面流场可以看到计算的空气在炉膛内混合状况很好。

图 5 显示的是二次风(DE 层)炉膛横截面的温度分布,从图可以看到炉膛中心存在高温切圆,符合典型的四角切圆锅炉的燃烧方式中心最高温度达 1 900 K 左右,并且温度随着离开中心的距离增大而降低。

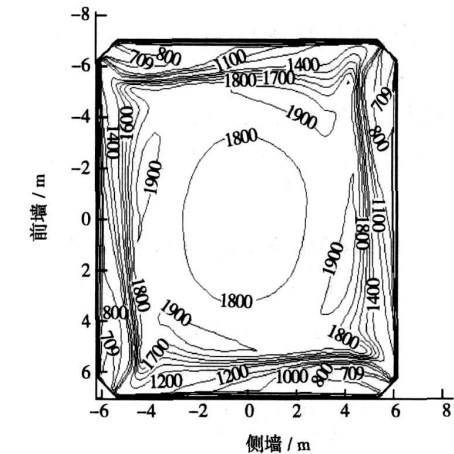


图 5 二次风横截面温度场分布图(K)

图 6 显示的是二次风截面的氧浓度分布情况,从图中可以看到在靠近燃烧器的区域由于空气较多氧浓度较高,随着煤粉的燃烧消耗大量氧量,氧浓度逐渐降低,炉膛中心的氧浓度最低。

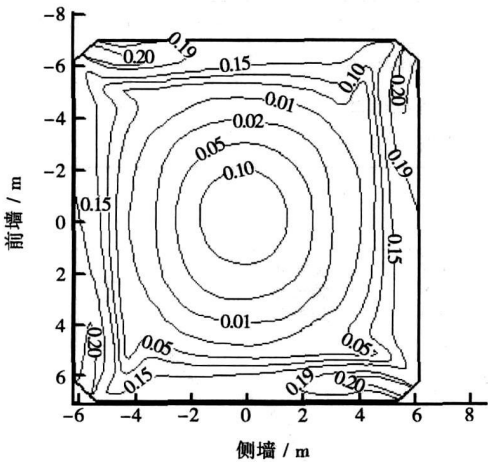


图 6 二次风横截面氧摩尔浓度场分布图

图 7 和图 8 分别显示的是一次风截面和锅炉中心纵剖面 NO_x 浓度分布,从图 7 可以看到随着煤粉的燃烧,NO_x 在着火初期迅速形成,浓度上升,由于速度旋流场的方向还没有完全扩散,因此在炉膛中

心的外围形成一个浓度最高的环形带,而外围浓度相对要低一些。从图 8 同样可以看到,NO_x 在着火初期迅速形成,并且随着炉膛高度的上升,NO_x 开始逐步向中心扩散,充满整个炉膛空间。

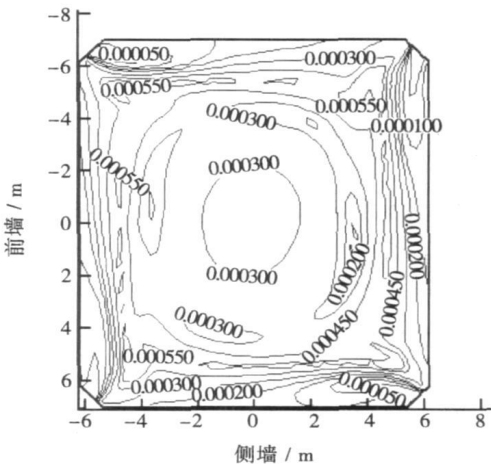


图 7 一次风横截面 NO 摩尔浓度分布图

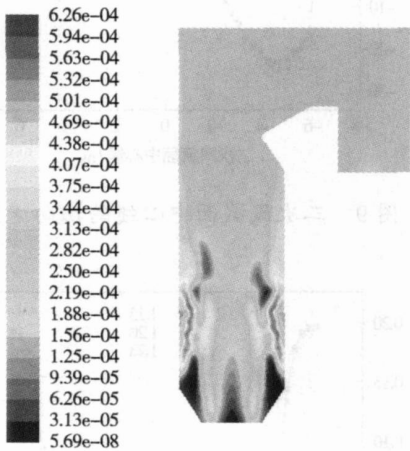


图 8 中心纵截面 NO 摩尔浓度分布图

根据设计值工况计算所得锅炉的出口 NO_x 浓度为 537 mg/m³(折算 6% 的氧量条件),与实际运行工况测试所得数据非常接近,实测锅炉出口处的 NO_x 平均浓度为 575 mg/m³(折算成 6% 的氧量条件),数值模拟所得到的结果基本符合锅炉燃烧的实际情况。设计值工况数值模拟结果的准确性为其它工况的数值模拟结果提供了可靠的依据。

3.2 不同变化工况的计算结果

首先对变化过量空气系数后的不同工况进行计算,选择过量空气系数为 1.15 和 1.20 的工况分别进行了计算,并与过量空气系数为 1.23 的设计工况计算结果相比较,计算结果如表 3 所示,可以看出过

量空气系数的大小对锅炉最后的 NO_x 生成有直接的影响,过量空气系数越大,炉内的氧化性气氛强,因此更有利于 NO_x 的生成。

表 3 过量空气系数变化的计算结果

计算工况	NO 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (6% O_2)
过量空气系数 1.15	324
过量空气系数 1.20	483
过量空气系数 1.23 (设计工况)	537

图 9 显示的是不同过量空气系数条件下,二次风横截面中心线的切向速度分布,从图中可以看出随着过量空气系数减小,二次风速度相应减小,但对切圆的大小影响不是很大。

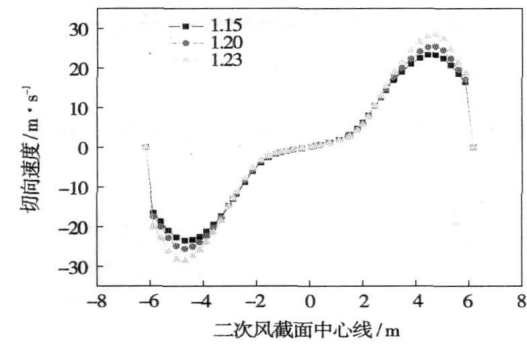


图 9 二次风截面中心线的切向速度

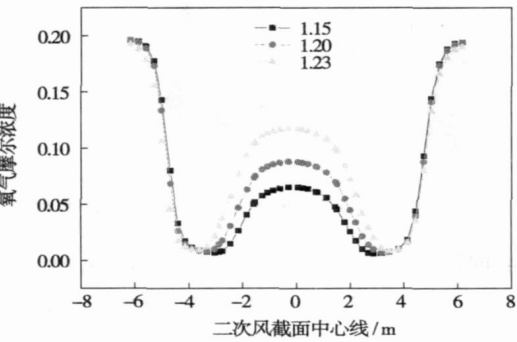


图 10 二次风截面中心线的氧摩尔浓度分布

图 10 显示的是不同过量空气系数条件下,二次风截面中心线的氧浓度分布,从图中可以看出过量空气系数的减小,使得炉膛中心的氧浓度相应减少,但是由于二次风的大偏转角度对一次风和煤粉形成的保护,因而对水冷壁附近的氧浓度影响不大,并不会产生煤粉贴壁的现象。过量空气系数是影响锅炉燃烧的重要因素之一,选择过大会造成排烟损失增

大, NO_x 生成过多等,但是过量空气系数过小也会造成燃烧不稳,影响锅炉效率等后果,因此要在综合考虑环境效益和经济效益等因素的基础上合理选择过量空气系数。

对二次风配风变化后的不同工况进行计算,选择了常见的束腰型、倒塔型和均等型 3 种工况进行计算,二次风配风方式和计算结果如表 4 所示。可以看出二次风配风的变化情况会对锅炉最后的 NO_x 生成有直接的影响,在计算的 3 种工况中结果显示束腰型配风生成 NO_x 最大,倒塔型配风生成 NO_x 其次,均等型配风生成 NO_x 最小。从这 3 种配风工况的计算结果表明,均匀的二次配风有利于减小 NO_x 的生成,锅炉的实际运行中应该注意配风的均匀性。

表 4 二次风配风变化工况的计算结果

计算工况	二次风配风	NO 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (6% O_2)
束腰型	DE100%CD75%BC60%AB75%AA100%	425
倒塔型	DE90%CD80%BC70%AB60%AA60%	370
均等型	DE75%CD75%BC75%AB75%AA75%	358

选择考虑不同的二次风偏转角度对生成 NO_x 的影响,分别选择二次风偏转角度为 20° 和 30° 进行计算,并与二次风偏转角度为 25° 的设计工况相比较,计算结果如表 5 所示,从计算结果可以看出二次风偏转角度越大,生成的 NO_x 浓度有所减少。

表 5 二次风不同偏转角度工况的计算结果

计算工况	NO 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (6% O_2)
二次风偏转 20°	567
二次风偏转 25°	537
二次风偏转 30°	441

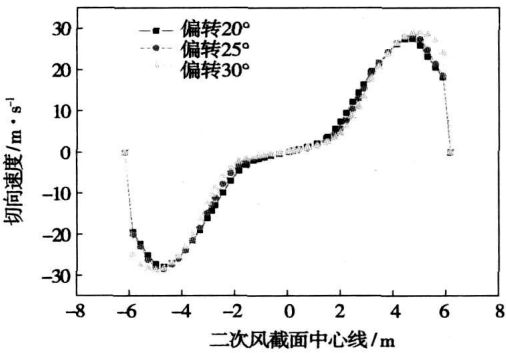


图 11 二次风截面中心线的切向速度

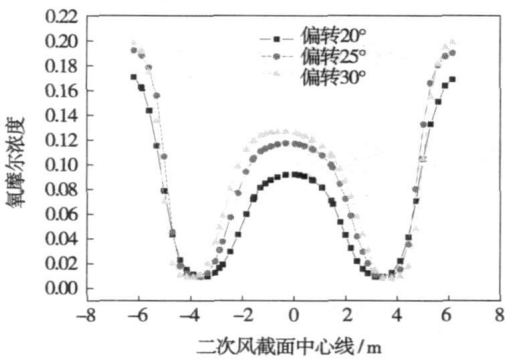


图 12 二次风截面中心线的氧摩尔浓度分布

图 11 是二次风截面中心线的切向速度, 从图中可以看出随着二次风偏转角度增大, 切圆半径有明显增大。图 12 是二次风截面中心线的氧浓度分布, 随着二次风偏转角度的增加, 水冷壁附近的氧浓度也有所增加, 对防止煤粉贴壁现象的发生有一定的好处。

4 结 论

由于 NO_x 生成的机理比较复杂, 影响燃煤电站锅炉 NO_x 生成的因素也很多, 利用数值计算的方法能对不同的工况进行数值模拟, 研究影响燃煤电站锅炉 NO_x 排放的因素。通过计算结果可以看出: 过量空气系数是影响 NO_x 生成的重要因素之一, NO_x 排放浓度随着过量空气系数的增大而增大; 改变二次风配风方式也能影响 NO_x 的生成。在计算的 3 种工况中, 均等型配风生成的 NO_x 浓度最低, 倒塔型次之, 束腰型最大; 改变二次风偏转角度也能影响 NO_x 的生成量, NO_x 排放浓度随着二次风偏转角度

的增大而减小。综合以上各项数值模拟所得到的结果, 认为对于控制 NO_x 排放浓度较为优化的运行参数必须注意以下几点: 过量空气系数不宜过大, 在不影响锅炉运行效率和经济性的条件下, 过量空气系数越小, NO_x 的排放浓度越低; 通过数值模拟可以得知其它的配风形式包括常见的倒塔型、束腰型不利于 NO_x 的排放浓度的降低。通过数值计算可看到在均匀配风条件下, NO_x 排放浓度比束腰型配风条件下要低 15%, 因此二次风应该尽量做到均匀配风, 也即保持二次风速的一致性; 二次风偏转角度不宜过小, 通过数值计算可看到二次风偏转 30° 比偏转 20° 的条件下, NO_x 排放浓度可以降低达 20%。除了综合考虑上述影响因素之外, 实际运行中还需要结合锅炉的实际情况, 才能找到既能够控制 NO_x 排放浓度, 又不影响锅炉运行经济性的最佳运行工况。

参考文献:

[1] 还博文. 锅炉燃烧理论与应用 [M] . 上海: 上海交通大学出版社, 1999

[2] 申春梅, 孙 锐, 吴少华. 超超临界锅炉炉内燃烧过程的数值模拟 [J] . 动力工程, 2006 26(1): 32—37

[3] 潘 维, 池作和, 李 戈, 等. 四角切圆燃烧锅炉燃烧和污染物排放数值模拟 [J] . 浙江大学学报(工学版), 2004 36(6): 761—764.

[4] 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—200.

[5] 范贤振, 郭烈锦, 高 晖, 等. 200 MW 四角切向燃烧煤粉炉炉内过程的数值模拟 [J] . 西安交通大学学报, 2002, 36(3): 241—245.

[6] 由长福, 祁海鹰, 徐旭常, 等. 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(1): 1128—1131.

(编辑 滨)

新技术

汽轮机末级工作叶片的强化和修复

据《ЭлектРические станции》2006 年 7 月号报道, ВТИ (全俄热工研究所) 制定了在不用拆卸转子叶片, 其中包括不用打开汽轮机组汽缸盖(通过冷凝器), 利用电火花熔合的方法强化并修复汽轮机末级工作叶片的工艺过程, 允许在转子不同位置的叶片上形成涂层。

确定了在强化并修复末级工作叶片时用于形成涂层的材料; 制定并制造了在不拆卸叶片的情况下用于完成涂层形成过程的可移动设备的样机; 研制了具有相当长寿命并对金属喷镀枪人手具有最小振动作用的振动器—电磁振动器和电动机械振动器; 修整了在叶片和各种类型汽轮机叶片的叶型上形成涂层的过程; 应用所制定的工艺过程, 强化并修复了不同电站汽轮机组末级的 18 000 多个工作叶片。

(吉桂明 供稿)

ducted. The steam output of the boiler has increased by nearly 40% when compared with a 0.5 t/h conventional boiler having the same volume, thus exhibiting a comparatively good thermodynamic performance. **Key words:** pulsation combustion, pulsation heat transfer, pulsation frequency, boiler, self-excited burner

燃煤电站锅炉 NO_x 排放影响因素的数值模拟分析 = **Numerical Simulation and Analysis of the Influencing Factors of NO_x Emissions of Coal-fired Utility Boilers** [刊, 汉] / LIN Peng-yun, LUO Yong-hao, HU Li-yuan (Research Institute of Thermal Energy Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(5). — 529 ~ 533

A coal-fired utility boiler is one of the main sources of NO_x pollutants. By using a CFD (computational fluid dynamics) software platform and a numerical calculation method, a numerical simulation was performed of various combustion conditions of a utility boiler to study the different factors exercising an influence on NO_x emissions of the boiler in question. The calculation results show that the excess air ratio is one of the major factors influencing the production of NO_x and the concentration of NO_x emissions will increase with an increase of the excess air ratio. A change of the secondary-air distribution mode can also influence the generation of NO_x . Among the three combustion conditions being calculated, the concentration of NO_x produced by equal air distribution is the lowest followed by that of a reverse-tower type air distribution. The girdled type air distribution has produced the highest concentration. To change the secondary-air deflection angle can influence the amount of NO_x produced. The concentration of NO_x emissions will decrease in case of an increase in the secondary-air deflection angle. **Key words:** coal-fired boiler, numerical simulation, NO_x emission, influencing factor

某200 MW 四角切圆锅炉燃烧器改造降低 NO_x 数值模拟 = **Numerical Simulation of the Modification of Burners for a 200 MW Tangentially Fired Boiler to Reduce NO_x Emissions** [刊, 汉] / XING Fei, FAN Wei-jun (College of Energy Source and Power Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, China, Post Code: 100083), CUI Jin-lei, DENG Yuan-kai (Beijing Guodian Kehuan Clean Combustion Engineering Technology Co. Ltd., Beijing, China, Post Code: 100039) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(5). — 534 ~ 538

To address such problems as comparatively high NO_x emissions and serious slagging in the 200 MW tangentially fired boiler of a power plant in China, a study has been conducted of the in-furnace combustion process before and after burner modification by using a CFD (computational fluid dynamics) software platform and numerical simulation method. The calculation results show that due to the effect of attached wall jet flow, high-temperature zones are concentrated in the central part of the furnace, effectively preventing boiler slagging. After modification, the furnace had a reducing atmosphere zone even greater than that of a boiler adopting conventional combustion modes, thus suppressing the generation of NO_x emissions and reducing them by 34.6%. The calculation results after the modification correspond quite well with those of test ones. The numerical simulation can well provide a theoretical basis for the design, modification and operation of the boiler in question. **Key words:** boiler combustion, temperature distribution, NO_x emissions, numerical simulation

高压汽水两相流摩擦阻力特性的研究 = **A Study of Frictional Resistance Characteristics of High-pressure Steam-water Two-phase Flows** [刊, 汉] / ZHU Yu-qin, LI Ya-hong (Technology Research Center of Petroleum Refinery Engineering, Xi'an Shiyu University, Xi'an, China, Post Code: 710065), BI Qin-cheng, CHEN Ting-kuan (National Key Laboratory on Multi-phase Flows in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(5). — 539 ~ 541

A study was performed of the frictional resistance characteristics of the water-wall tubes in subcritical and close-to-critical pressure zones of a 600 MW once-through boiler made in China. The test section consists of 1Cr18Ni9Ti stainless steel tubes having a diameter of $\phi 25 \times 3$ mm with the following experimental parameters: pressure $p = 12 \sim 21$ MPa, mass flow