

220 t/h 锅炉再燃改造的数值模拟

李德波¹, 张 睿²

(1. 广东电网公司电力科学研究院 广东 广州 510600;

2. 浙江大学 热能工程研究所 能源清洁利用国家重点实验室 浙江 杭州 310027)

摘 要: 为了对锅炉进行再燃改造,借助 Fluent 6.3 软件平台,采用数值模拟的方法,对某电厂一台 220 t/h 四角切圆燃烧锅炉再燃改造前后炉内的气流场、温度场和污染物排放特性进行了分析,并对再燃区过量空气系数对再燃改造效果的影响进行了探讨。湍流模型分别采用了 realizable $k-\varepsilon$ model 和大涡模型(LES),并对模拟结果进行了比较;LES 模拟和结果与现场的实验数据进行了对比验证,包括温度场、组分场和 NO_x ,LES 数值模拟结果与实验结果吻合比较好。计算结果表明:使用再燃改造后炉膛温度分布更加均匀;再燃喷口附近形成了还原性气氛,降低了 NO_x 浓度;当再燃区过量空气系数为 0.90 时,再燃效果最佳,此时炉膛出口处 NO_x 浓度下降 33.87%;LES 模拟结果较 realizable $k-\varepsilon$ model 准确。

关键词: 四角切圆锅炉;再燃改造;过量空气系数; NO_x ;数值模拟

中图分类号:TK223;O242 文献标识码:A

引 言

四角切圆燃煤锅炉是我国火力发电站最常用的锅炉。从 20 世纪 50 年代以来,大气中的 NO_x 含量至少增加了 3 倍^[1]。因此,研究和改造现有的燃煤锅炉对我国“节能减排”目标的实现具有重要意义。目前,再燃改造作为降低 NO_x 的重要手段,受到广泛关注。它通过在炉膛中喷入再燃燃料,形成还原性气氛,来还原已经生成的 NO_x ^[2]。

斯东波等人在 200 MW 四角切圆燃烧煤粉炉上进行了三次风再燃的现场试验和数值模拟相结合的研究^[3]。朱伟平等人采用超细煤粉再燃技术对 300 MW W 型炉进行了 NO_x 排放量数值模拟研究^[4]。郭永红数值模拟了再燃技术中 HCN 对 NO_x 生成和还原的影响^[5]。从以上研究结果得出,再燃方法在降低 NO_x 上具有非常重要的工程应用价值。

虽然很多研究者进行了再燃数值模拟的研究,

但是大多数研究结果是基于实验炉与中试炉,在实际全尺寸锅炉上系统性的数值模拟研究比较少,因此这些数值模拟结果准确性和实用性有一定的限制。因此本研究运用 Fluent 6.3 软件,采用高级数值模拟方法,即大涡数值模拟方法(Large eddy simulation)对一台 220 t/h 四角切圆煤粉锅炉炉内的气流场、燃烧工况和污染物排放情况进行了数值模拟,数值模拟的结果与现场试验结果进行了对比验证。探讨了在不同的再燃区过量空气系数的情况下,再燃降低 NO_x 的效果,为电厂锅炉进行再燃改造提供了理论依据,具有一定的工程应用价值。

1 研究对象

模拟对象是某锅炉厂一台 220 t/h 煤粉炉。锅炉截面为 8 370 mm × 8 370 mm 的正方形,锅炉高 29 490 mm,其结构示意图如图 1 所示。整组燃烧器分为两层一次风喷口,三层二次风喷口和一层三次风喷口,一、二次风间隔布置。针对原锅炉燃烧工况下炉膛结焦严重,污染物排放量较高的突出问题,对锅炉的燃烧器进行了改进。改进后采用了再燃燃烧技术,一、二、三次风进口高度不变,将三次风喷口作为再燃燃料进口。此外,在三次风喷口上部 1 000 和 1 550 mm 处增加紧凑型燃尽风进口和高位燃尽风进口,在一次风背火侧增加了侧边风,改造方案如图 2 所示。同时,将气流切圆直径由 $\phi 850$ mm 改为 476 mm。再燃改造后,不但燃烧器的进风口位置有所改变,一、二、三次风的风速、风率和风温也有相应调整,如表 1 所示。

2 数学模型及计算方法

2.1 网格的划分

对于所计算的炉膛,如果采用正规的网格划分

收稿日期:2011-11-24; 修订日期:2012-02-05

作者简介:李德波(1983-),男,土家族,湖北宜昌人,广东电网公司电力科学研究院工程师,博士。

和差分离散方法,将会产生流动伪扩散。产生伪扩散的原因在于:把流过每一控制容积面的多维流动处理成了局部的一维流动^[6]。为避免这一问题,将炉膛分为灰斗、下炉膛、燃烧器、上炉膛、折焰角和炉膛出口 6 个区域,对燃烧器和折焰角区域进行加密,并对燃烧器区域网格特殊处理,使气流方向与网格边界垂直。燃烧器区域的网格划分如图 3 所示。网格总数约 45 万。

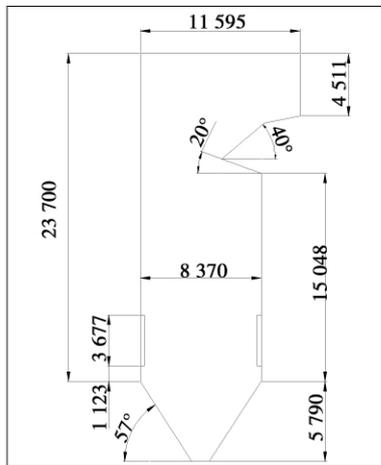


图 1 锅炉结构示意图(mm)

Fig. 1 Schematic drawing of the boiler structure

表 1 再燃改造前后进风参数的变化

Tab. 1 Change of air parameters before and after the reburning reconstruction

	改造前			改造后		
	风速 /m·s ⁻¹	风率 /%	风温 /℃	风速 /m·s ⁻¹	风率 /%	风温 /℃
高位燃尽风				45	10	310
紧凑型燃尽风				8	45	310
三次风	57.1	22	60	22	57	60
上二次风				6	45	310
中二次风	47.7	50.8	312	11.5	45	310
下二次风				3	45	310
下一次风				6	31	230
	28.6	23	231	11.5	31	230
上一次风侧边风				3	45	310
下一次风侧边风				15	45	310

2.2 数学模型

数值模拟采用三维稳态计算, SIMPLE 算法。湍流模型采用了两种模型:可实现双方程模型(realizable $k-\varepsilon$ model) 和大涡模型(LES); 用混合分数-概率密度函数(mixture - fraction/PDF) 模拟气相

湍流燃烧; 用 P-1 辐射模型(P-1 radiation model) 计算辐射传热; 采用双匹配速率模型(the two competing rates model) 模拟煤粉挥发分的析出; 焦炭燃烧采用动力/扩散控制燃烧模型(kinetics/diffusion - limited char combustion model); 煤粉颗粒跟踪采用随即轨道方法(stochastic tracking)。对于氮氧化物的生成采用后处理的方法, 主要考虑了燃料氮、热力氮和快速氮的生成以及氮氧化物的再燃效应, 具体模拟方法参见文献 [7~8]。对于燃料型 NO_x 的模拟, 计算中认为煤粉颗粒中的氮均匀分布于挥发分和焦炭中^[9~10]。在模拟再燃区 NO_x 生成、还原过程中, 采用了文献 [9] 中模拟 NO_x 的方法。

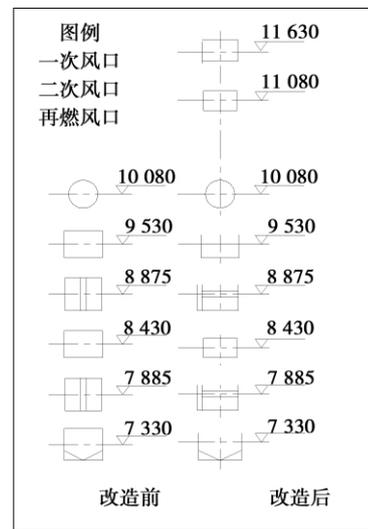


图 2 燃烧器的再燃改造(mm)

Fig. 2 Reburning modification of the burners(mm)

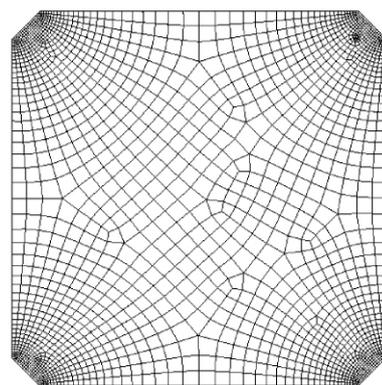


图 3 燃烧器区域截面网格图

Fig. 3 Chart showing the grid of a section in the burner zone

动量方程、能量方程、 k 方程、 ε 方程、NO 和 HCN 输运方程均采用二阶迎风格式离散。在边界

条件的处理上, 燃烧器进口为固定速度进口, 采用近壁函数法处理近壁区域方程的过渡计算。

2.3 煤粉参数的设置

锅炉燃用和再燃煤种均为淮南烟煤。细粉粒 37 ~ 81 μm, 最大粒径 44 ~ 103 μm, 平均粒径 70 μm, 粒径分布满足 Rosin-Rammler 分布。

3 结果与分析

3.1 再燃区过量空气系数的选择

通过调节煤粉在主燃区和再燃区的分配来达到改变再燃区过量空气系数 (SR_2) 的目的, 从而得到了 5 组实验条件, 其 SR_2 分别为 0.85、0.88、0.9、0.95、1.0。采用 LES 方法进行了数值模拟, 得到了不同过量空气系数下炉膛内各截面 NO 平均浓度曲线, 如图 4 所示。从图中可以看到, 当再燃量空气系数为 0.9 时, 炉膛出口处 NO 浓度最低, 此时再燃效果最明显, 故在研究中将再燃区过量空气系数选为 0.9。

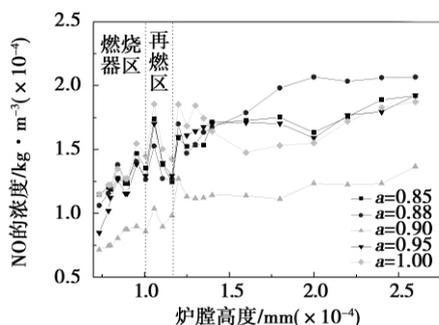


图 4 不同 SR_2 下炉内各截面处 NO 浓度沿炉膛高度的变化

Fig. 4 NO concentration at various sections in the boiler along the direction of the boiler height under various SR_2

3.2 温度场数值模拟结果与实验对比

图 5 为 LES 模拟的再燃改造之前炉膛温度分布图。从图中可以直观地看出, LES 对炉膛内温度变化过程模拟更加细致, 而采用 RANS 模拟方法是不能实现的。炉膛内温度最高达到 1 550 °C 以上, 燃烧器上部区域温度平均水平较高。为了验证模拟的准确性, 同时进行了原炉的摸底测试。分别在 8 380 和 11 580 mm 高度截面中心点布置测试点, 测得温度分别为 1 525 和 1 310 °C。而对应点的 LES 模拟结果分别在 1 500 ~ 1 550 °C 和 1 300 ~ 1 350 °C 之间, 如图 5 所示与实验结果吻合比较好。此外, 实验结果显示, 炉膛出口平均温度约为 949 °C, 而模拟结果显示炉膛出口平均温度约为 959 °C, 再次验证

了模拟结果的准确性。

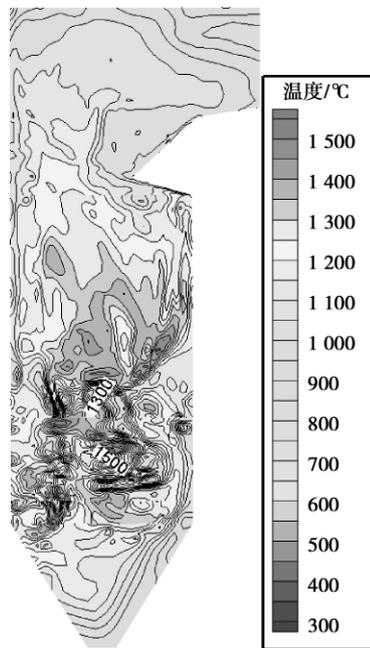


图 5 再燃改造后的温度场

Fig. 5 Temperature field after the reburning reconstruction

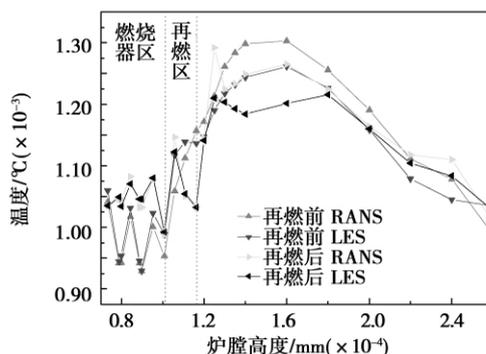


图 6 再燃改造前后温度场对比

Fig. 6 Comparison of the temperature fields before and after the reburning reconstruction

分别采用 realizable $k - \epsilon$ model 和 LES 对再燃前后锅炉的燃烧工况进行了模拟, 炉膛各截面平均温度随炉膛高度变化的对比曲线如从图 6 所示。从图中可见, 在燃烧器区, 采用 realizable $k - \epsilon$ model 模拟的结果与 LES 模拟结果比较一致, 但随后两者结果差别较大。在燃烧器以上区域, 即平均温度水平较高的区域, realizable $k - \epsilon$ model 模拟的温度偏高。再燃改造后, 燃烧器区域温度水平有所升高, 而燃烧器以上区域温度有所降低, 即再燃改造使炉内

温度分布更加均匀。这主要是由于煤粉从主燃区及再燃区均匀地喷入炉内造成的。再燃改造后,温度在高位燃尽风处(11 630 mm)骤然降低,这是由于温度较低的燃尽风大量补入造成的。

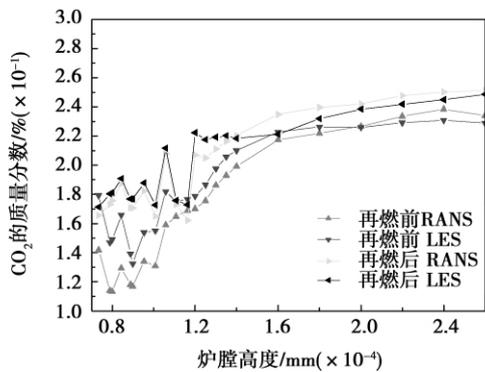


图7 沿炉膛高度各截面上 CO₂ 质量分数

Fig. 7 Mass fraction of CO₂ in various sections of the furnace along the direction of the boiler height

3.3 组分场数值模拟结果与实验对比

图7~9分别为采用 realizable $k-\epsilon$ model 和 LES 方法模拟得到的再燃改造前后炉内各截面处 CO₂、CO、O₂量(平均质量分数)沿炉膛高度的分布。从图中可知,再燃改造后,O₂浓度略有降低,CO浓度有所升高,CO₂浓度有所升高。这是由于再燃改造后,O₂利用率更高所致。改造后的燃烧器区域的CO质量分数有所增加,而O₂质量分数有所下降。这是由于该再燃改造方案不但为燃料分级,且为空气分级,即将大量空气作为燃尽风在炉膛上部补入,使燃烧器区域空气量减少,故而造成了CO的不完全燃烧,故在燃烧器区的CO浓度较改造前高,而O₂浓度较改造前低。在再燃煤粉喷入处(10 080 mm)处,O₂浓度达到最低,但随着燃尽风(11 630 mm)的补入,O₂浓度又迅速升高,而CO又逐渐氧化生成CO₂。再燃改造后,炉膛出口处CO₂平均质量分数较改造前小幅升高。在主燃区,尽管由于喷入的煤粉量有所减少使CO₂生成量减少,但相对而言总空气量减少幅度更大,故而CO₂的质量分数在主燃区有所增加。在高位燃尽风处由于低温空气的大量补入,使CO₂质量分数迅速下降,但随着燃烧反应完全,CO₂质量分数逐渐上升。原炉实验结果显示,改造前炉膛出口处CO₂、CO和O₂的摩尔分数分别为14.31%、1.33%和4.68%。而LES模拟结果显示,相应组分的摩尔分数分别为15.1%、1.20%和4.27%; realizable $k-\epsilon$ model 相应的模拟结果为

15.96%、2.30%和2.83%。采用LES模拟结果与实验结果吻合比较好,realizable $k-\epsilon$ model数值模拟结果与实验结果偏差比较大,由此可见采用高级数值模拟方法(LES)在预测组分场方面具有明显的优势。

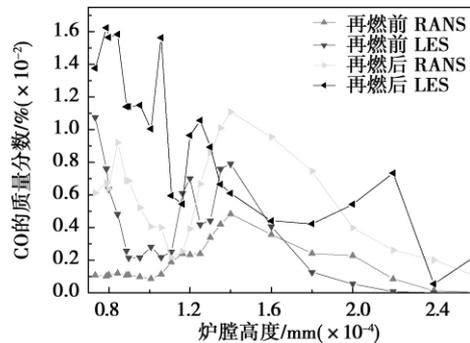


图8 沿炉膛高度各截面上 CO 质量分数

Fig. 8 Mass fraction of CO in various sections of the furnace along the direction of the boiler height

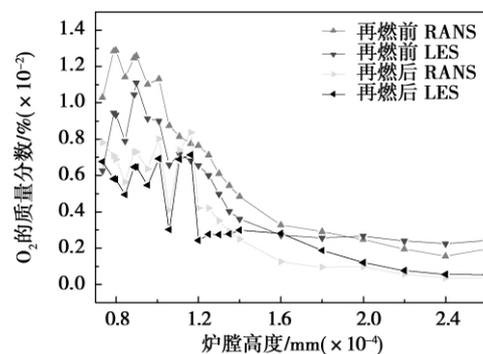


图9 沿炉膛高度各截面上 O₂ 质量分数

Fig. 9 Mass fraction of O₂ in various sections of the furnace along the direction of the boiler height

图10为分别采用 realizable $k-\epsilon$ model 和 LES 模拟得到的再燃改造前后炉膛各截面上NO平均浓度变化曲线。不论是再燃改造前后,LES模拟的结果均较 realizable $k-\epsilon$ model 要小。再燃改造前,原炉测试结果显示,炉膛出口处NO_x浓度为621.33 mg/m³,而 realizable $k-\epsilon$ model 和 LES 相应结果分别为286.25 kg/m³和206.69 kg/m³。假设烟气为理想气体,炉膛出口处为一个大气压,以炉膛出口处平均温度按理想气体状态方程换算后得到1035.93 mg/m³和726.36 kg/m³,相对误差分别为66.73%和16.90%。LES的模拟结果明显优于 realizable $k-\epsilon$ model。从图10中可以看到,再燃燃料喷入后使NO浓度略有下降,但下降并不明显,这说明此处的

NO_x 浓度下降主要是由于大量空气稀释的结果。随后在炉膛高度为 11 630 mm 左右, NO 浓度骤然下降。这可以归结为再燃煤粉起到的还原作用和大量空气的补入起到的稀释作用。煤粉再燃还原 NO_x 过程包括挥发分的同相还原反应和煤焦的异相反应。根据所计算得到最佳的再燃区空气过量系数为 0.9, 在这种再燃区空气过量系数下有利于挥发分的释放, 以挥发分还原 NO_x 的同相反应为主^[9-10]。 NO_x 在燃尽风喷口附近骤然降低后随后又迅速升高, 这是由于烟气进入了炉膛高温区(高温区位置恰好在 12 000 mm 之后), 在这个区域有部分新的 NO_x 的产生。烟气离开高温区后温度不断降低, NO 曲线缓慢上升。再燃改造后, LES 模拟结果得到的 NO_x 浓度为 156.74 mg/m^3 , 较改造前下降 27.66%。

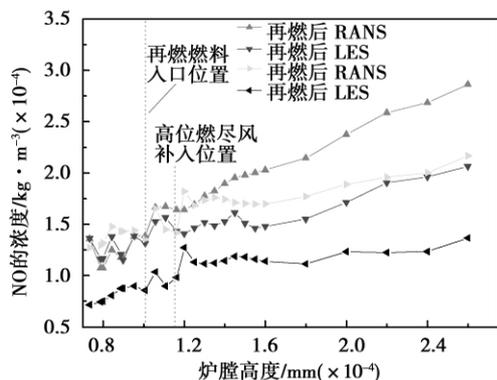


图 10 沿炉膛高度各截面上 NO 浓度

Fig. 10 NO concentrations in various sections along the direction of the furnace height

4 结 论

针对 220 t/h 四角切圆燃煤锅炉, 提出再燃改造方案, 并利用 Fluent 软件平台进行了数值模拟, 得到以下结论。

(1) 再燃改造后燃烧器区域温度有所提高, 而燃烧器以上区域温度有所下降, 即炉膛内温度分布更加均匀。这是由于煤粉从多个位置更加均匀地喷入炉内所致;

(2) 再燃区过量空气系数为 0.9 时, 炉膛出口处 NO 浓度为 156.74 mg/m^3 , 较原来的 216.69 mg/m^3 下降 27.66%;

(3) 锅炉进行再燃改造时, 再燃区过量空气系数取 0.90 时再燃效果最好;

(4) 采用 LES 模拟结果在温度场、组分场和

NO_x 的预测都比 realizable $k - \varepsilon$ model 准确, 采用 LES 模拟, 能够得到比较准确的结果。

参考文献:

- [1] 潘 维, 池作和, 斯东波, 等. 200 MW 四角切圆燃烧锅炉改造工况数值模拟 [J]. 中国电机工程学报. 2005, 25(8): 110-115.
PAN Wei, CHI Zuo-he, SI Dong-bo, et al. Numerical simulation of operating conditions after a modification of a 200 MW tangentially-fired boiler [J]. Journal of China Electric Machinery Engineering, 2005 25(8): 110-115.
- [2] 岑可法, 姚 强, 骆仲决. 高等燃烧学 [M]. 杭州: 浙江大学出版社. 2002.
CEN Ke-fa, YAO-qiang, LUO Zhong-yang. Higher Combustion [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press 2002.
- [3] 斯东波, 周 昊, 岑可法. 不同带粉量的三次风再燃试验与数值模拟 [J]. 浙江大学学报(工学版) 2010 44(3): 482-488.
SI Dong-bo, ZHOU Hao, CEN Ke-fa. Reburning test and numerical simulation of the tertiary air at various pulverized coal contents [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science Edition) 2010 44(3): 482-488.
- [4] 朱伟平, 卫运钢. 采用超细粉再燃降低 300 MW W 火焰炉燃烧 NO 排放量 [J]. 锅炉制造 2008(2): 44-58.
ZHU Wei-ping, WEI Yun-gang. Reduction of NO_x emissions of a 300 MW W-shaped flame boiler by burning superfine pulverized coal [J]. Boiler Manufacturing 2008(2): 44-58.
- [5] 郭永红, 孙保民, 康志忠. 超细粉再燃技术中 HCN 对 NO_x 的生成和还原的影响 [J]. 电站系统工程 2005 21(2): 15-17.
GUO Yong-hong, SUN Bao-min, KANG Zhi-zhong. HCN effect on NO_x formation and deoxidation for micro-PC reburning technology [J]. Electrical Engineering 2005 21(2): 15-17.
- [6] 康 浩, 钟北京, 傅维标, 等. 大型褐煤锅炉煤粉再燃技术的数值模拟 [J]. 热能动力工程 2006 21(4): 378-382.
KANG Hao, ZHONG Bei-jing, FU Wei-biao, et al. Numerical simulation of pulverized coal reburning technology for a large-sized lignite-fired boiler [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2006 21(4): 378-382.
- [7] 贾艳艳, 毕明树, 柳 智. 煤种对超细煤粉再燃脱销效率影响的数值研究 [J]. 热能动力工程 2007 22(5): 542-547.
JIA Yan-yan, BI Ming-shu, LIU Zhi. Numerical study of the influence of coal ranks on the superfine pulverized coal reburning denitration efficiency [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2007 22(5): 542-547.
- [8] 贾艳艳. 四角切圆燃煤锅炉超细煤粉再燃技术数值试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学 2008.
JIA Yan-yan. Numerical and experimental study of superfine pulverized coal reburning technology for tangentially-fired boilers [D]. Dalian: Dalian University of Technology 2008.
- [9] Xu M, Azevedo J L T. Modelling of the combustion process and NO_x emission in utility boiler [J]. Fuel 2000 79: 1611-1619.
- [10] 周 昊. 大型电站锅炉氮氧化物控制和燃烧优化中若干关键性问题的研究 [D]. 杭州: 浙江大学 2004.
ZHOU Hao. Investigation of several key problems concerning the NO_x control and combustion optimization of large-sized utility boilers [D]. Hangzhou: Zhejiang University 2004.

(陈 滨 编辑)

teristics was performed by burning coal mixed and diluted with petroleum coke in various proportions. The influence of the furnace temperature, excess air ratio and calcium/sulfur molar ratio on the sulfur dioxide emission characteristics was studied during the combustion of the blended fuel in various proportions. It has been found that to increase the excess air ratio and calcium/sulfur molar ratio can reduce the sulfur dioxide emissions concentration. There exists an optimum desulfurization temperature at which the sulfur dioxide emissions concentration will be the lowest. For a variety of blended fuels, the optimum desulfurization temperature falls in a range from 830°C to 850°C. **Key words:** circulating fluidized bed, mixing-dilution combustion, petroleum coke, sulfur dioxide

220 t/h 锅炉再燃改造的数值模拟 = **Numerical Simulation of the Reburning Modification of a 220 t/h Boiler**
[刊, 汉] LI De-bo (Guangdong Electric Grid Company, Academy of Electric Power Science, Guangzhou, China, Post Code: 510600), ZHANG Rui (National Key Laboratory on the Clean Utilization of Energy Resources, Thermal Energy Engineering Research Institute, Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(4). - 459 ~ 463

To perform a reburning modification of a boiler, with the help of a Fluent 6.3 software platform and by adopting a numerical simulation method, studied were the in-furnace gas flow field, temperature field and pollutant emissions characteristics before and after a reburning modification of a 220 t/h tangentially-fired boiler. Furthermore, the influence of the excess air ratio in the reburning zone on the reburning modification effectiveness was also investigated. The realizable $k-\varepsilon$ and LES model were used as the turbulent flow model respectively and a comparison of the simulation results was conducted. A contrast and verification of the simulation results obtained by using the LES model with the on-the-spot test data were conducted, including the temperature field, component field and NO_x . It has been found that the numerical simulation results obtained by using the LES model are in relatively good agreement with the test results. The calculated results show that after the reburning modification, the temperature distribution in the furnace is more uniform and a reduction atmosphere is formed around the reburning spout, leading to a drop of the NO_x concentration. When the excess air ratio in the reburning zone is 0.90, the reburning effectiveness is deemed as the best one and in such a case, the NO_x concentration at the outlet of the furnace will decrease by 33.87%. The simulation results obtained by using the LES model are more precise than those obtained by using the realizable $k-\varepsilon$ model. **Key words:** tangentially-fired boiler, reburning modification, excess air ratio, NO_x , numerical simulation

基于信息融合技术的风煤比优化控制研究 = **Study of the Optimized Control of Air/coal Ratio Based on the**