

660 MW 旋流对冲锅炉低 NO_x 燃烧优化数值模拟

钟用禄¹, 曾过房², 李海山¹, 方庆艳³

(1. 国网江西省电力科学研究院, 江西 南昌 330096; 2. 中电投新昌发电有限公司, 江西 南昌 330088;
3. 华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 对一台 660 MW 旋流对冲锅炉在不同层燃烧器组合运行工况下进行了炉内流动、燃烧和 NO_x 排放特性的数值模拟。模拟结果与试验值相对误差小于 10%。模拟结果表明: 额定负荷时, 5 层燃烧器运行, 停前墙和停后墙同层燃烧器时 NO_x 排放和飞灰含碳量基本相同; 停上层燃烧器相比于停中层燃烧器, 空气分级效果强化, 煤粉颗粒停留时间增加, NO_x 和飞灰含碳量分别降低 9.5% 和 9.8%, 在锅炉实际运行过程中, 停上层燃烧器更有利于降低 NO_x 排放和提高燃烧效率。

关键词: 磨煤机组合; 氮氧化物排放; 燃烧; 数值模拟
中图分类号: TK227 文献标识码: A
DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.01.029

引言

新的《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223-2012) 将燃煤电站锅炉 NO_x(以 NO₂ 计) 排放浓度限定为 100 mg/m³, 一些重点地区排放浓度限定为 50 mg/m³, 个别炉型和地区为 200 mg/m³, 对燃煤电厂 NO_x 排放控制提出了更严格的要求。目前, 炉内低 NO_x 燃烧结合燃烧后烟气脱硝是有效的控制 NO_x 排放的方法, 在国内燃煤电厂得到了广泛的应用。

对低 NO_x 燃烧技术采用数值模拟的方法进行研究比较多, 主要是对燃煤、燃烧器、燃烧系统以及运行工况等方面加以控制^[1-3]。文献[4]对一台 1000 MW 超超临界前后墙旋流对冲燃烧煤粉锅炉进行了燃尽风对燃烧特性与 NO_x 排放特性影响的数值模拟研究。文献[5]进行了二次风旋流强度可调范围的数值模拟研究, 研究了内、外二次风旋流强度对炉内流场的影响。文献[6]采用数值模拟的方法, 对一台 660 MW 超超临界旋流燃烧煤粉锅炉进行数值模拟研究, 研究表明燃尽风对炉内的 NO_x 浓

度分布场、烟气温度场、锅炉热效率影响较大。文献[7]采用新型低氮燃烧器和全炉膛分级燃烧技术对锅炉低 NO_x 燃烧系统进行了改造的模拟和试验。尽管开展了一些低燃烧方面的工作, 但是由于锅炉设备、燃煤以及运行状况的在个体上的差异, 仍然需要开展进一步的研究。

本研究对一台 660 MW 超超临界前后墙旋流对冲锅炉, 在不同层燃烧器组合工况下进行流动、燃烧、传热及污染物 NO_x 排放等特性进行数值模拟研究, 为锅炉的运行以及优化研究提供依据。

1 锅炉概况

该锅炉为 DG2060/26.15-Ⅱ2 型、超超临界参数变压直流炉、一次再热、平衡通风、露天布置、固态排渣、全钢构架、全悬吊结构 II 型锅炉。采用旋流煤粉燃烧器, 前后墙对冲燃烧方式。炉膛宽 22.162 4 m、深 15.456 8 m、高 65.7 m、尾部竖井前烟道深 6.604 m、尾部竖井后烟道深 8.331 2 m。

为了保证沿炉膛宽度方向热负荷及烟气温度分布更均匀, 36 只 HT-NR3 型低 NO_x 燃烧器分 3 层布置在前、后墙上; 前后墙燃烧器上部布置有一层燃烬风(OFA) 风口, 包括 2 只侧燃烬风喷口, 6 只燃烬风喷口。采用中速磨煤机直吹式正压冷一次风制粉系统, 每炉配 6 台磨煤机, 额定负荷下 5 台磨运行, 1 台备用。E、B 和 A 磨煤机分别向前墙上层(E 层)、中层(B 层)和下层(A 层)燃烧器输送煤粉, F、C 和 D 磨煤机则分别向后墙上层(F 层)、中层(C 层)、下层(D 层)燃烧器输送煤粉。煤粉细度 200 目筛通过量为 70%, 煤粉均匀性系数为 1.10。

收稿日期: 2014-02-27; 修订日期: 2014-05-06

作者简介: 钟用禄(1964-), 男, 江西南昌人, 国网江西省电力科学研究院高级工程师。

2 数学模型与计算条件

2.1 数学模型

煤粉燃烧包括煤粉热解、燃烧、湍流流动、传热传质等一系列复杂的物理过程和化学反应的过程。本研究采用旋流修正的 Realizable $k-\epsilon$ 双方程湍流模型模拟气相湍流流动; 采用组分输运模型模拟气相湍流燃烧; 采用颗粒随机轨道模型模拟煤粉颗粒的运动; 煤的热解采用双方程平行反应模型; 焦炭燃烧则采用动力/扩散控制反应速率模型; 辐射传热计算采用 P1 法。模型的详细描述见文献 [8]。

对于 NO_x 的模拟, 主要考虑 NO, 采用“后处理”的方法来计算 NO 生成。煤粉炉内的 NO 生成主要涉及热力型 NO 与燃料型 NO 两种机理。由于快速型 NO 占很小比例, 且主要存在于富碳氢燃料的火焰中, 在此处将不予考虑。热力型 NO 主要是空气中的 N₂ 氧化生成的, 主要受是温度、氧浓度等因素影响, 可采用扩展的 Zeldovich 机理描述^[9]。对于 [O] 和 [OH] 基, 采用部分平衡方法计算。燃料型 NO 主要是燃料中的氮元素经热解和氧化反应而生成的, 是煤粉燃烧过程中 NO 的主要来源。燃料型 NO 的生成和还原过程不仅跟煤种特性、燃料中氮的官能团形式、分布形态等有关, 而且还与温度和氧浓度等密切相关。燃料型 NO 采用 De Soete 模型^[10] 描述, 燃料氮主要分布于挥发份与煤焦中, 挥发份中的氮以 HCN 和 NH₃ 的形式释放出来, 而焦炭中的氮直接氧化转化成 NO。

2.2 网格划分

根据锅炉的实际物理结构和尺寸建立几何模型, 将炉膛依次划分为冷灰斗区、燃烧器区域、燃尽区、屏式过热器区、高温再热器区、后竖井区、低温再热器区、低温过热器区以及省煤器区, 采用分区网格划分方法, 使用高质量的六面体网格。将燃烧器区域的网格加密, 以降低数值计算误差。经过网格的无关性测试后, 整个模型网格总数为 313 万。锅炉炉膛的物理模型与网格划分如图 1 所示。

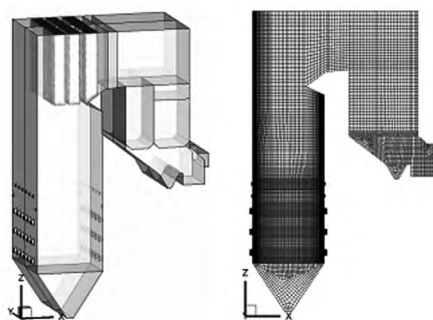


图 1 锅炉模型及网格划分

Fig. 1 Boiler model and grid division

2.3 计算工况

共开展了 4 个工况的计算, 工况 1: 基准工况 660 MW 6 层燃烧器运行, 各燃烧器出力 and 配风均匀; 工况 2: 变燃烧器组合工况 5 层燃烧器运行, 停前墙上层 E 燃烧器; 工况 3: 变燃烧器组合工况 5 层燃烧器运行, 停后墙上层 F 燃烧器; 工况 4: 变燃烧器组合工况 5 层燃烧器运行, 停前墙中层 C 燃烧器。各计算工况运行参数如表 1 所示, 煤质特性如表 2 所示。

表 1 计算工况运行参数

Tab. 1 Operating parameters under the calculation condition

工况	负荷 /MW	运行氧量 /%	一次风量 /t · h ⁻¹	二次风量 /t · h ⁻¹	燃烬风量 /t · h ⁻¹	燃烧器区域 过量空气系数	运行燃烧器	单台燃烧器出力 /t · h ⁻¹
工况 1	660	3.2	516.5	1214.7	449.7	0.95	ABCDEF 层	8.1
工况 2	660	3.2	516.5	1214.7	449.7	0.95	ABCDF 层	9.7
工况 3	660	3.2	516.5	1214.7	449.7	0.95	ABCDE 层	9.7
工况 4	660	3.2	516.5	1214.7	449.7	0.95	ABDEF 层	9.7

表 2 煤质特性

Tab. 2 Characteristics of coal

工业分析 /%				元素分析 /%				Q _{net, ar} /kJ · kg ⁻¹
V _{daf}	M _{ad}	A _{ar}	C _{ar}	H _{ar}	O _{ar}	N _{ar}	S _{ar}	
31.27	1.23	22.33	54.88	3.72	6.31	1.13	1.27	21430

2.4 计算方法

在边界条件设定中,燃烧器入口边界条件将中心风、一次风、内二次风和外二次风、燃尽风、侧燃尽风均设置为设为质量入口。屏式过热器、高温过热器、高温再热器、低温过热器、低温再热器、省煤器各自设定为源项,采用负的内热源。出口采用压力出口,设置为 - 80 Pa。煤粉颗粒直径按照 Rosin-Rammler 方法分布,平均粒径 54 μm,分布指数 1.1,最大粒径 250 μm,最小粒径 5 μm。

计算迭代时,先进行冷态计算获得一定收敛程度的流场,然后再进行热态计算,直至收敛。求解离散方程组的压力和速度耦合采用 SIMPLE 算法,求解方程采用逐线迭代法及低松弛因子,离散方法均采用一阶迎风格式。收敛标准为能量、辐射传热、NO、HCN 和 NH₃项计算残差小于 10⁻⁶,其余各项计算残差小于 10⁻³。

3 结果与分析

3.1 模拟结果验证

表 3 为工况 1 模拟结果与实验测量值的比较。可以看出,锅炉出口烟气氧量,NO_x浓度以及飞灰含碳量的模拟结果与实验值都符合较好;氧量的模拟结果与实验值的误差为 3.9%,NO_x浓度的模拟结果与实验值的绝对误差为 32 mg/m³,相对误差为 8.6%,飞灰含碳量的模拟结果与实验值的误差为 7.2%。这表明,本研究所建立的网格和采用的模型及边界条件是合理的,可以用来预测该锅炉的燃烧和 NO_x 排放特性。

表 3 模拟结果与实验测量值的对比

Tab.3 Contrast of the simulation results with those measured during the test

参数	模拟结果	实测结果
烟气氧量/%	3.3	3.17
烟气 NO _x 浓度/mg·m ⁻³	340	372
飞灰含碳量/%	2.95	3.19

3.2 燃烧特性分析

图 2 为工况 1 炉膛的中心截面和各层燃烧器以及燃尽风层的温度分布图。可以看出炉膛中心截面

的烟气温度分布较均匀对称,有利于减小壁面热负荷偏差。各层燃烧器区域的温度分布大致相同,在燃烧器出口处的温度变化梯度较大,炉膛中心区域燃烧最为剧烈,炉膛火焰充满度良好。随着炉膛高度的增加,温度逐渐增加,在上层燃烧器和燃尽风之间达到最高。后竖井区的烟气依次经过屏式过热器、过热器、再热器和省煤器,烟气温度逐渐降低。

图 3 为炉膛燃烧器中心截面 O₂、CO、NO_x 的体积浓度分布图。由图 3(a) 和图 3(b) 可以看出,在燃烧器区域内,煤粉着火后迅速燃烧,大量消耗氧,由于过量空气系数小于 1,在燃烧器区域尤其是炉膛中心形成了低氧区域;由于该锅炉的旋流燃烧器有中心风,而煤粉着火首先是在一次风的外边界,因此中心风区域的氧浓度较高,一直到中心风相邻的煤粉着火燃烧后,氧浓度迅速降低。相应的,在氧浓度较低的区域,由于不完全燃烧,形成了高 CO 浓度的还原性区域。在大量燃烬风进入炉膛后,未燃烬的焦炭继续燃烧,产生的大量 CO 也迅速被氧化。

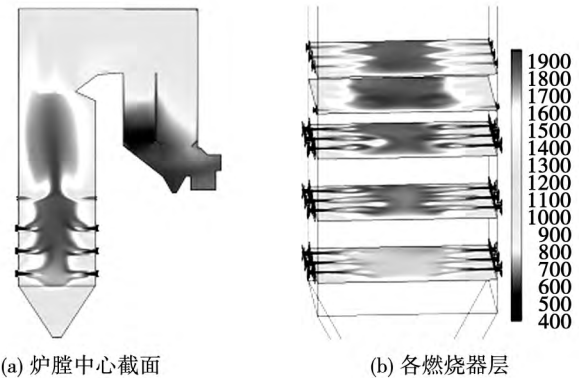


图 2 炉膛燃烧器截面温度分布图(K)

Fig.2 Chart showing the temperature distribution in the cross section of the furnace at the location of the burner(K)

由图 3(c) 可以看出,在燃烧器出口附近的中心风和二次风之间的区域有大量的 NO 生成,这是由于煤粉着火和燃烧时发生在中心风和二次风之间的区域,挥发分氮 HCN 等中间产物大量析出,同时大量二次风混合进来,HCN 等中间产物被氧化大量生成 NO。在中心风流动的区域,没有 NO 生成。在炉膛中心的还原区域,由于 HCN 等中间产物和煤焦产

生的还原反应,生成的 NO 被大量还原,也有使得此区域的 NO 浓度很低。大量燃烬风进入炉膛后,未

燃烬的煤焦继续燃烧,焦炭氮被氧化生成 NO,因此在燃烬风上部区域,NO 浓度又有所增加。

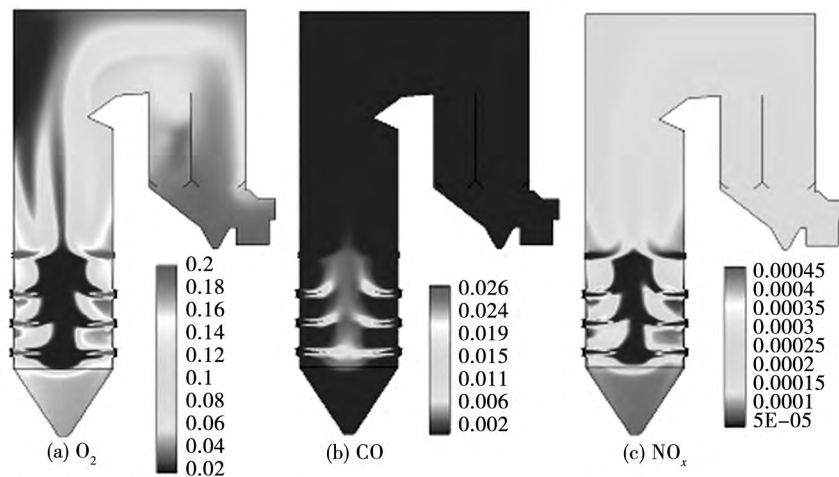


图 3 炉膛燃烧器中心截面 O₂、CO、NO_x 的体积浓度分布图

Fig. 3 Chart showing the distribution of O₂, CO and NO_x volumetric concentration in the cross section of the furnace at the center of the burner

3.3 不同层燃烧器组合运行方式分析

图 4 为不同层燃烧器组合工况下 NO_x 排放量和飞灰含碳量对比图。由图 4 可以看出,运行 ABC-DF 层燃烧器、停运前墙上层 E 燃烧器(工况 2)和运行 ABCDE 层燃烧器、停运后墙上层 F 燃烧器(工况 3)相比,锅炉出口的 NO_x 排放量(换算成 6% O₂)分别为 333 mg/m³和 332 mg/m³,飞灰含碳量分别为 1.83%和 1.85%,基本相同。这说明停运同层燃烧器锅炉的 NO_x 排放和燃烧效率没有影响。

运行 ABCDE 层燃烧器、停运后墙上层 F 燃烧器(工况 3)和运行 ABDEF 层燃烧器、停运后墙中层 C 燃烧器(工况 4)相比,锅炉出口的 NO_x 排放量(换算成 6% O₂)分别为 332 mg/m³和 367 mg/m³,飞灰含碳量分别为 1.85%和 2.05%;停上层 C 燃烧器时,NO_x 和飞灰含碳量分别降低 9.5%和 9.8%。这表明停上层燃烧器更有利于降低锅炉 NO_x 排放量,提高锅炉燃烧效率。停运上层 F 燃烧器时,由中层 C 燃烧器进入炉膛的煤粉燃烧获得的还原区高度,要比停运中层 C 燃烧器时,由上层 F 燃烧器进入炉膛的煤粉燃烧获得的还原区高度高 3 m 多,其空气分级效果得到强化,因此停运上层 F 燃烧器时,NO_x 排放量更低。同样,停运上层 F 燃烧器时,由中层 C

燃烧器进入炉膛的煤粉燃烧获得的燃尽区高度,要比停运中层 C 燃烧器时,由上层 F 燃烧器进入炉膛的煤粉燃烧获得的燃尽区高度高 3 m 多,其煤粉颗粒在炉膛内停留的时间增加,因此停运上层 F 燃烧器时,飞灰含碳量更低。

上述分析表明,锅炉额定负荷时,停运前墙和后墙的同层燃烧器对锅炉燃烧和 NO_x 排放特性没有影响,而停运前墙或后墙的上层燃烧器,更有利于降低 NO_x 排放和提高燃烧效率。

4 结 论

(1) 模拟结果与试验值符合性较好,相对误差小于 10%,所建立的网格和采用的模型及边界条件是合理的,可以用来预测该锅炉的燃烧和 NO_x 排放特性。

(2) 额定负荷时 5 层燃烧器运行,停前墙和停后墙同层燃烧器时 NO_x 排放和飞灰含碳量基本相同,对锅炉燃烧和 NO_x 排放特性没有影响。

(3) 停上层燃烧器相比于停中层燃烧器,空气分级效果强化,煤粉颗粒停留时间增加,NO_x 和飞灰含碳量分别降低 9.5%和 9.8%。在锅炉实际运

行过程中,停上层燃烧器更有利于降低 NO_x 排放和提高燃烧效率。

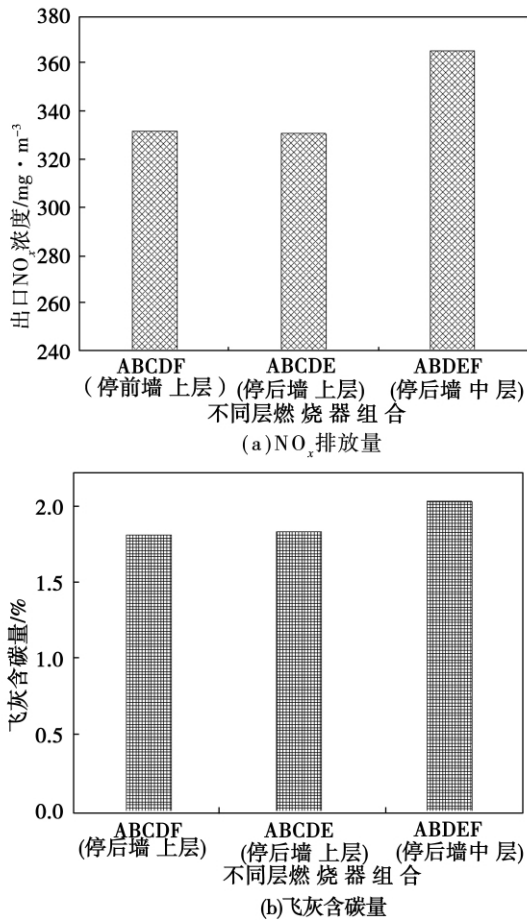


图 4 不同层燃烧器组合工况下 NO_x 排放量和飞灰含碳量对比

Fig. 4 Contrast of the NO_x emissions and carbon content of the flying ash in different combinations of the burners at various layers

参考文献:

[1] 曾汉才. 大型锅炉高效低 NO_x 燃烧技术的研究 [J]. 锅炉制造 2001, 1: 1 - 11.
ZENG Han-cai. Study on the high efficiency low NO_x combustion technology for large-sized boilers [J]. Boiler Manufacturing 2001, 1: 1 - 11.

[2] 刘志超. 燃煤锅炉 NO_x 排放浓度影响因素的试验和分析 [J]. 电站系统工程 2005 21(5): 30 - 34.
LIU Zhi-chao. Experiment and analysis of the factors influencing the NO_x emissions concentration of a coal-fired boiler [J]. Power Plant System Engineering 2005 21(5): 30 - 34.

[3] 高小涛, 黄磊, 张恩先, 等. 600 MW 前后墙布置燃烧器锅炉的 NO_x 排放特性及其影响因素的分析 [J]. 动力工程 2009 (09): 806 - 812.
GAO Xiao-tao, HUANG Lei, ZHANG En-xian, et al. NO_x emission characteristics of a 600 MW boiler with burners being arranged on the front and rear walls and analysis of the influencing factors [J]. Journal of Power Engineering 2009 29(09): 806 - 812.

[4] 方庆艳, 汪华剑, 陈刚, 等. 燃尽风对超超临界锅炉燃烧特性影响的数值模拟 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版 2010, 38(11): 92 - 95.
FANG Qing-yan, WANG Hua-jian, CHEN Gang, et al. Numerical simulation of the influence of the over-fired air on the combustion characteristics of an ultra-supercritical boiler [J]. Central China Univ. of Sci & Tech. (Natural Science Edition) 2010 38(11): 92 - 95.

[5] 李兵臣, 宋景慧, 沈跃良, 等. 二次风旋流强度可调范围的数值模拟研究 [J]. 动力工程学报 2012 32(12): 917 - 22.
LI Bing-chen, SONG Jing-hui, SHEN Yue-liang, et al. Study of the numerical simulation of the controllable range of the secondary air swirling intensity [J]. Journal of Power Engineering 2012 32(12): 917 - 922.

[6] 李德波, 沈跃良, 宋景慧, 等. 改变燃尽风风量对比对 660 MW 超超临界前后对冲煤粉锅炉炉内燃烧影响的数值模拟研究 [J]. 广东电力 2013 26(6): 5 - 10.
LI De-bo, SHEN Yue-liang, SONG Jing-hui, et al. Numerical simulation study on the impact of the changes in the over-fired air quantity proportion on the in-furnace combustion of a 660 MW ultra-supercritical front and rear opposed combustion pulverized coal-fired boiler [J]. Guangdong Electric Power 2013 26(6): 5 - 10.

[7] 高鹏, 高明, 张建文. 350 MW 机组锅炉低 NO_x 燃烧器改造试验研究 [J]. 热力发电 2013 42(4): 43 - 48.
GAO Peng, GAO Ming, ZHANG Jian-wen, et al. Experimental study of the modification to a 350 MW boiler by using low NO_x burners [J]. Thermal Power Generation 2013 42(4): 43 - 48.

[8] Smoot L D, Smith P J, Coal combustion and gasification [M]. Plenum Press: New York, 1989.

[9] Hill S C, Smoot L D, Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems, Progress in Energy and Combustion Science [J]. 2000 26: 417 - 458.

[10] De Soete G G. Overall reaction rates of NO and N₂ formation from fuel nitrogen. 15th Symposium (international) on Combustion [C]. Pittsburgh, PA, 1975: 1093 - 1102.

(姜雪梅 编辑)

staged combustion of two kinds of bituminous coal with a relatively high fuel nitrogen content. It has been found that under the condition of coal combustion with air being not staged, the higher the fuel nitrogen content of the coal, the higher the amount of the nitrogen oxide emissions and under the condition of the air staged combustion, the lower the conversion rate of the fuel nitrogen to NO_x . Under the condition of the air staged combustion, when the residence time in the reduction zone is between 0.8 s and 1.0 s and the chemical equivalent ratio is 0.75, both Datong-originated and Russia-originated bituminous coal can achieve a relatively low amount of nitrogen oxide emissions. In the meantime, under the condition of the air staged combustion, the burn-out degree of Russia-originated bituminous coal is similar to that of Datong-originated bituminous coal, featuring a relatively good burn-out degree. **Key Words:** fuel nitrogen, nitrogen oxide, pulverized coal combustion, air staged, burn-out

660 MW 旋流对冲锅炉低 NO_x 燃烧优化数值模拟 = **Numerical Simulation of the Optimization of the Low- NO_x Combustion of a 660 MW Swirling Opposed-firing Boiler** [刊, 汉] ZHONG Yong-lu, LI Hai-shan (National Power Grid Jiangxi Provincial Academy of Electric Power Science, Nanchang, China, Post Code: 330096), ZENG Guo-fang (Xinchang Power Generation Co., Ltd., China Electric Power Investment Corporation, Nanchang, China, Post Code: 330088), FANG Qing-yan (National Key Laboratory on Coal Combustion, Central China University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(1). -108-112

A numerical simulation of the in-furnace flow, combustion and NO_x emissions characteristics of a 660 MW swirling opposed-firing boiler was conducted to optimize its low NO_x combustion operating condition under the condition of burners in various layers operating in a combination mode. The relative error between the simulation results and the test values was less than 10%, indicating relatively good agreement. It has been found that at the rated load, when burners in all five layers are in operation, if the burners on the front and rear wall in the same layer are shut down respectively, the NO_x emissions and the carbon content of flying ash are basically identical. When to shut down the burners in the upper layer is compared with to shut down the burners in the middle layer, the former has a better air staging effectiveness and a longer pulverized coal particle residence time and the NO_x emissions and the carbon content of flying ash decrease by 9.5% and 9.8% respectively. In the practical operation of boilers, to shut down the burners in the upper layer will be favorable for reducing the NO_x emissions and enhancing the combustion efficiency. **Key Words:** coal mill combination, nitrogen oxide emissions, combustion, numerical simulation

天然气再燃降低 NO_x 排放的热态工业试验研究 = **Hot-state Industrial Experimental Study of the Reburning**