

燃烧调整对 NO_x 排放及锅炉效率的影响

肖海平¹, 张千², 王磊¹, 孙保民¹

- (1. 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206;
2. 神华国华(北京)电力研究院有限公司, 北京市 丰台区 100069)

Effect of Combustion Adjustment on NO_x Emission and Boiler Efficiency

XIAO Haiping¹, ZHANG Qian², WANG Lei¹, SUN Baomin¹

(1. Key Laboratory of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment (North China Electric Power University), Ministry of Education, Changping District, Beijing 102206, China; 2. Shenhua Guohua (Beijing) Electric Power Research Institute Co., LTD, Fengtai District, Beijing 100069, China)

ABSTRACT: The combustion-adjustment experiments for NO_x emission reduction were performed on an 1025 t/h boiler. By changing the factors such as the oxygen content, top tertiary-air, overfire-air and the distribution of second-air, the regularity of NO_x emissions concentration and boiler efficiency in different working conditions were studied, and the results indicates that change of average temperature of flame in furnace is very small under different oxygen concentrations. The fuel-NO_x and the boiler efficiency rapidly become greater with increasing the oxygen content, but they decreases by increasing the top tertiary-air gradually. With the overfire-air increasing, average temperature of flame in furnace and NO_x emission decreases, however this influence on boiler efficiency may be neglected. The experiments also confirmed that the most boiler efficient and the minimum NO_x emissions occurs in constricted air distribution mode, by comparison, in uniform mode, the NO_x emissions increases 14.20%. On the premise of a certain boiler efficiency, the NO_x emissions can be reduced by 10%~20% through combustion-adjustment.

KEY WORDS: combustion; NO_x emission; tertiary air; over fire air; boiler efficiency

摘要: 为控制 NO_x 排放, 在 1025 t/h 锅炉上进行了燃烧调整试验。通过改变氧量、上三次风、燃尽风以及二次风配风方式等因素, 研究不同工况下 NO_x 浓度及锅炉效率变化规律。试验表明, 不同氧量工况下炉内火焰平均温度基本不变, 随氧量增加, 燃料型 NO_x 急剧增加, 锅炉效率升高; 随上三

次风比例增加, NO_x 和锅炉效率都下降; 随着燃尽风挡板开度增大, 炉内火焰平均温度下降, NO_x 排放浓度下降, 锅炉效率变化较小; 不同配风方式下, 束腰型配风工况的锅炉效率最高, NO_x 排放量最低, 均匀配风工况下 NO_x 排放浓度增加了 14.20%。在保持一定锅炉效率的前提下, 燃烧调整可以降低 NO_x 排放浓度 10%~20%。

关键词: 燃烧; NO_x 排放; 三次风; 燃尽风; 锅炉效率

0 引言

NO_x 是主要大气污染物之一。排入大气的 NO_x 引起酸雨和光化学烟雾污染, 破坏臭氧层, 严重破坏生态环境, 危害人类健康。在中国, 50% 以上的 NO_x 来源于电站燃煤锅炉。目前火力发电企业控制 NO_x 排放的主要技术有烟气脱硝及炉内燃烧过程脱硝。烟气脱硝如选择性非催化还原(selective non-catalytic reduction, SNCR) 和选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR) 技术, 脱硝率高, 成本也较高。燃烧过程脱硝如先进再燃、浓淡燃烧、低氧燃烧等技术, 脱硝率中等, 成本中等^[1-2]。对于电厂而言, 最经济实用的方法是通过燃烧调整, 降低 NO_x 排放浓度, 减轻烟气脱硝成本。

燃煤锅炉 NO_x 的生成机制非常复杂, 不仅与燃煤特性、锅炉型式、燃烧器结构等有关, 还与炉内温度、过量空气系数、煤粉细度、三次风、配风方式等因素有关^[3]。燃用烟煤锅炉 NO_x 排放浓度高于燃用贫煤锅炉, 燃用烟煤的锅炉燃烧调整对 NO_x 的减排效果优于燃用贫煤的锅炉^[4]。文献[5-7]针对某中储式燃煤锅炉进行低 NO_x 改造, 数值计算结果表明, 磨煤机不同投运方式下炉内温度分布与各气

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0720); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(09ZG02)。

Program Supported by Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University(IRT0720); The Fundamental Research Funds for the Central Universities(09ZG02).

体组分浓度分布直接相关, 高温区域 CO 气体浓度较高, 而 CO₂ 和 O₂ 浓度较低; 主燃区低氧燃烧可以抑制 NO_x 的生成, 选择合适的再燃风喷口位置, 能够有效降低 NO_x 排放浓度; 高速喷入的三次风会造成炉膛三次风截面处炉内切圆缩小和 NO_x 排放浓度升高, 煤粉燃尽过程中 HCN 和焦炭 N 的氧化使得 NO 在炉膛高度沿程有上升趋势; 燃烧调整试验表明, 磨煤机投运方式不同可造成 NO_x 排放质量浓度相差 63.8%, 三次风运行优化可有效降低 NO_x 排放。斯东波^[8]对某 200 MW 机组的四角切圆燃烧煤粉炉实施了超细煤粉再燃系统改造, 利用三次风携带的超细煤粉作为再燃燃料, 并通过烟气再循环来降低三次风中的氧浓度, 最佳工况取得约 40% 的脱硝率, 同时对锅炉的运行影响很小, 飞灰含碳量仅比原始工况增加 1.4%。高正阳^[9]实验研究表明, NO 还原效率随 O₂ 浓度降低和再燃燃料比增加而单调增加, 过量空气系数为 0.3~0.65 的范围为高比脱硝量区。煤粉粒径减小、反应时间增加导致 NO 还原效率与比脱硝量增加。张晓辉^[10]在某 220 t/h 燃煤锅炉的试验表明, 燃尽风份额增加, 出口氧量增加, CO、CO₂、飞灰碳含量变化不大, 主燃烧区域温度水平总体呈降低趋势, 燃尽区温度水平呈现先增加后降低趋势, NO_x 排放浓度持续降低。文献[11]针对某燃用天然气的锅炉, 将 15% 的烟气量进行再循环, 送入到燃烧器的一次风喷口和二次风喷口, 并减少燃烧区的过量空气系数和在燃烧区中喷水, 多种方法同时运用使得 NO_x 排放浓度最多下降 40%。文献[12]在 300 MW 机组的锅炉上进行空气分级燃烧调整试验。研究发现, 影响 NO_x 排放浓度的主要因素主要有总过量空气系数、二次风配风方式、燃尽风喷口挡板开度。过量空气系数为 1.22 时, NO_x 的排放浓度较低而且锅炉热效率较高。通过配风优化, NO 体积浓度减少了 0.018 2%, 而锅炉热效率仅仅减少了 0.21%。金晶^[13]通过数值模拟和实验手段研究了一维炉内煤粉燃烧过程 NO_x 的释放规律。研究结果表明, 随温度升高, NO_x 的析出峰值前移, NO_x 释放量增加; 温度达到一定值后, 随温度继续升高, NO_x 释放量呈下降趋势; 煤种含氮量越高, 挥发分含量越高, 则 NO_x 释放量越大, NO_x 析出峰值位置随煤种的碳化程度增加而逐渐后移; 随着过量空气系数增加, NO_x 释放量呈明显增加趋势。文献[14]通过实验发现, 影响分级燃烧技术脱硝效果的主要因素有过量空气系数、燃尽风喷口的位置、风粉比等, 两段分级配风效果优于一段分级配风,

燃尽风的最佳比例范围为 0.3~0.6。文献[15]在加压流化床上研究了锅炉运行条件对 NO 排放的影响。研究发现, 压力越大, NO_x 排放浓度越低, 氧气浓度对 NO_x、N₂O 的排放浓度影响显著。

鉴于现场燃烧调整工作量大, 众多学者通过数值模拟计算预测燃烧调整降低 NO_x 的效果。李钧^[16]运用计算软件 COALFIRE 对某 300 MW 机组四角切圆燃烧煤粉炉 NO_x 排放特性进行数值模拟。模拟结果表明, 燃煤挥发分和含 N 量高的煤, NO_x 析出浓度较高; 较细的煤粉有利于降低 NO_x 浓度; NO_x 排放浓度随机组负荷下降而下降; 倒塔型配风有利于降低 NO_x 生成, 三次风的投入使得 NO_x 排放浓度下降 11%。文献[17]对 600 MW 机组四角切圆燃烧锅炉的模拟表明, 合理利用燃尽风能够有效减少 NO_x 浓度。文献[18]针对无火焰燃烧过程, CO₂、H₂O 与焦炭的气化反应对 NO_x 的形成影响较大。模拟过程考虑了 CO₂ 和 H₂O 对 NO 形成的影响, NO_x 生成量预测值比不考虑气化因素的 NO_x 生成量预测值降低 40%。文献[19-20]分别优化了 NO_x 的生成模型, 使得预测精度提高。文献[21]针对 500 MW 机组的四角切圆燃烧锅炉 NO_x 的模拟计算表明, NO_x 的形成主要取决于温度分布和气体组分分布, 燃尽风的运用是降低 NO_x 的有效措施。空气分级燃烧可以有效降低燃料型 NO_x 和热力型 NO_x。低氧燃烧减低了 N 与 O 的接触机会, 从而减少了燃料型 NO_x 生成, 炉内温度下降导致热力型 NO_x 降低。

燃烧调整降低 NO_x 排放的理论研究较多, 而燃煤锅炉现场详细的试验研究较少。本文针对某电厂 1 025 t/h 燃煤锅炉进行燃烧调整减低 NO_x 的试验, 探讨不同配风方式对 NO_x 的排放浓度及锅炉效率的影响。

1 试验方法

1.1 设备介绍

试验锅炉为自然循环燃煤锅炉, 最大连续蒸发量(boiler maximum continuous rating, BMCR)为 1 025 t/h。该锅炉采用 EI-DRB 型燃烧器。EI-DRB 型燃烧器中心为一次风喷口, 其外环分别是内二次风喷口和外二次风喷口。内外二次风采用了分级送风措施, 具有合理的风量分配比和适当的旋流强度, 有利于煤粉的着火和稳燃, 增强燃烧器对煤质变化的适应能力, 同时也有利于控制火焰中 NO_x 的生成。但是, 由于锅炉炉内温度偏高, 配风方式不合理, BMCR 工况下 NO_x 排放浓度甚

至高达 1 285 mg/m³(标准状态)。燃烧器对冲布置在炉膛的前后墙上,前墙 3 层、后墙 3 层,每层 4 个燃烧器,每台锅炉共 24 个燃烧器。燃尽风(over fire air, OFA)喷口布置于所有煤粉燃烧器的上方,前后墙各一层,每层 4 个 OFA 喷口,共 8 个 OFA 喷口。制粉系统采用 4 台钢球磨煤机,中间贮仓式热风送粉系统。整台锅炉共 16 个三次风喷口,前后墙各 8 个,下三次风喷口分别处于 20 060 和 23 565 mm 标高处,即 3 层煤粉燃烧器之间。上三次风喷口分别处于 26 615 和 28 365 mm 标高处,即上层煤粉燃烧器与 OFA 喷口之间,燃烧器布置见图 1。从磨煤机出来的乏气分成上三次风和下三次风,分别送到上下三次风喷口,上下三次风比例可以根据需要进行调节。BMCR 工况下,一次风率为 16%,二次风率为 50%,三次风率为 16%,OFA 风率为 17%,贴壁风率为 1%。

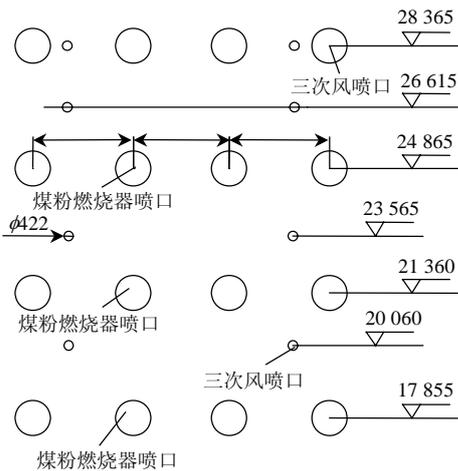


图 1 燃烧器布置图(单位: mm)

Fig. 1 Layout of burners (mm)

1.2 测试方法及数据处理

按试验设计工况要求调整锅炉运行,试验期间,机组功率保持在 300 MW,锅炉稳定运行 2 h 后进行数据测量。数据测量时间持续 2 h。通过网格法布置的 48 根 K 型热电偶测量空气预热器进出口处烟气温度,通过 Agilent 数据采集仪每 5 min 自动记录一次烟气温度,所采用的热电偶均为 I 级精度。16 根烟气采样枪均匀分布在空预器进出口处的烟道内,采用 testo350 德图烟气分析仪测试空气预热器进出口处烟气成分,每 5 min 采样一次,氧气体积分数的测量精度为 0.01%,NO 体积分数的测量精度为 1×10^{-6} 。提前 4 h 采集原煤样品,每 0.5 h 采集一次煤粉、飞灰和炉渣等试样。对于同一标高,分别取炉膛四面侧墙的观火孔作为测点,采用红外

测温仪测量炉膛不同位置处的火焰温度,该仪器的分辨率为 1 °C。温度测试过程中分别测量了 9 层标高处共 36 个测点的火焰温度,将同一标高所测得的 4 个温度求平均值,以表示该标高处的火焰平均温度,将 9 层标高所有测点综合求平均温度得到炉膛火焰平均温度。通过计算机数据采集系统每 5 min 采集一次锅炉运行数据。试验煤种特性见表 1,该煤种为高灰分低挥发份中等发热量的贫煤。

表 1 煤质分析报告

Tab. 1 Proximate analysis and ultimate analysis of coal

工业分析/%				$Q_{\text{net,ar}}/$	元素分析%				
M_{ar}	A_{ar}	V_{ar}	FC_{ar}	(kJ/kg)	C_{ar}	H_{ar}	N_{ar}	S_{ar}	O_{ar}
7.13	32.24	16.98	43.65	20 463	54.03	2.48	1.01	0.8	2.31

数据处理过程中,对各个参数求平均值,NO_x 排放浓度折算到 6% 氧量对应浓度,考虑空预器的漏风问题,用修正后的排烟温度来求锅炉效率。数据分析表明,锅炉效率的合成不确定度为 0.23%。

2 试验结果分析

2.1 不同氧量的影响

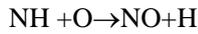
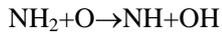
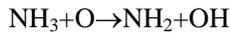
试验过程中,保持上三次风比例为 70%,OFA 挡板开度为 60%,负荷稳定在 300 MW,上中下层燃烧器二次风挡板开度分别为 80%、80%、100%。不同氧量下的试验结果如表 2 所示。

表 2 不同氧量下试验结果

Tab. 2 Result of tests at different oxygen

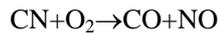
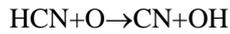
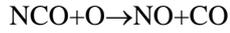
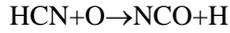
参数	工况 1	工况 2	工况 3
氧量/%	3.2	3.9	5.0
燃烧器区域火焰平均温度/°C	1321	1325	1324
炉膛火焰平均温度/°C	1273	1271	1275
$\varphi(\text{NO}_x)/(\text{mg}/\text{m}^3)$	753	767	903
飞灰含碳量/%	7.31	3.31	3.06
炉渣含碳量/%	9.38	8.44	8.25
排烟损失 q_2 /%	4.92	5.54	5.89
固体不完全燃烧损失 q_4 /%	4.30	2.12	1.98
锅炉效率/%	91.29	92.36	92.11

随氧量增大,NO_x 排放浓度增加。氧量为 3.2% 时,NO_x 排放浓度为 753 mg/m³。当氧量增加到 3.9%,NO_x 排放量仅仅增加了 1.86%,而烟气中氧量增加到 5% 时,NO_x 排放量比工况 1 增加了 19.92%。对于煤粉炉而言,燃料型 NO_x 约占 80%~90%。热力型 NO_x 约占 10%~20% 左右。燃料型 NO_x 的生成主要与氧量有关。煤中 N 元素可以分为挥发份 N 和焦炭 N,挥发份 N 主要以 HCN 和 NH₃ 的形式析出,NH₃ 在 O、OH、H 等自由基的作用下被氧化生成 NO,以自由基 O 为例:



HCN 在 O、OH、O₂ 的作用下氧化生成 NO，

主要反应途径如下：



反应环境中氧量直接影响挥发份 N 向 NO 的转化效率。增加氧量供应，反应气体中 O、OH、O₂ 等物质浓度增加，烟气中 NO 浓度增大。不同煤种挥发份氮析出浓度和析出时间不同，导致了 NO_x 生成量差别较大。该锅炉设计炉温相对较高，燃用煤种为贫煤，NO_x 排放量远高于燃用烟煤的锅炉 NO_x 排放量。

热力型 NO_x 的生成主要与温度有关。将上中下层燃烧器标高处不同测点的火焰温度综合求平均，得到燃烧器区域火焰平均温度。表 2 数据表明，不同工况下燃烧器层区域火焰平均温度基本相同，炉膛火焰平均温度也基本接近，这意味着在不同氧量的工况下，温度的影响较小，热力型 NO_x 生成量变化较小。随氧量增加，燃料型 NO_x 生成量增加导致了总体 NO_x 排放量增加。

氧量偏低情况下，煤粉燃烧不充分，飞灰含碳量明显下降，锅炉效率下降。与工况 3 相比，工况 2 的飞灰含碳量增加了 8.17%，而工况 1 的飞灰含碳量增加了 139.89%，对应锅炉效率最低，只有 91.29%，因此，综合考虑 NO_x 排放量及锅炉热效率，该锅炉在 4% 氧量下运行的整体效果比较理想，后期的燃烧调整工况的氧量均设定为 4%。

2.2 不同上三次风量的影响

试验过程中，保持 OFA 挡板开度为 60%，机组负荷稳定在 300 MW，上中下层燃烧器二次风挡板开度分别为 80%、80%、100%，运行过程中省煤器出口烟气氧量保持在 4%。不同上三次风比例的试验结果如表 3 所示。

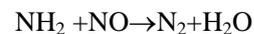
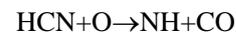
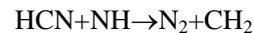
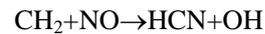
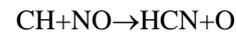
三次风为制粉系统细粉分离器分离出来的乏气，含有 10% 左右细煤粉，三次风从上三次风喷口和下三次风喷口送入炉膛燃烧。随上三次风比例增大，NO_x 排放量下降。当上三次风比例为 80% 时，NO_x 排放浓度为 740 mg/m³；上三次风比例降为 70% 时，NO_x 排放浓度下降 3.65%；而当上三次风下降到 60%，NO_x 排放浓度下降了 15.14%。下三次风喷

表 3 不同上三次风比例试验结果

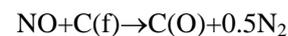
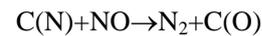
Tab. 3 Result of tests at different top tertiary-air

项目	工况 4	工况 2	工况 5
上三次风比例/%	60	70	80
$\varphi(\text{NO}_x)/(\text{mg}/\text{m}^3)$	852	767	740
飞灰含碳量/%	2.94	3.31	5.49
$q_2/\%$	5.13	5.54	5.13
$q_4/\%$	2.10	2.12	3.25
锅炉效率/%	92.92	92.36	91.89

口布置在煤粉燃烧器区域，增大上三次风量，相应减小了下三次风量，燃烧器区域供氧量减小，煤粉燃烧不充分，还原性气体增多，NO_x 生成量下降。上三次风喷口布置在第三层煤粉燃烧器和 OFA 喷口之间，上三次风中携带较多细粉进入炉膛，在局部形成弱还原区域，直接还原烟气中 NO_x，上三次风携带的细煤粉还原 NO 的机制类似于煤粉再燃脱硝机制。细煤粉进入炉膛，受热析出的 HCN、NH_i、CH_i 等物质，这些物质与烟气中 NO 发生均相还原反应，如：



细煤粉析出气体后生成的焦炭也具有还原 NO_x 的能力。焦炭中的碳与 N 都可以与烟气中的 NO 发生异相反应：



所以随着上三次风比例增加，NO_x 浓度降低。

炉内火焰温度如表 4，显然，炉内火焰温度分布极不规律。上三次风比例为 70% 的工况燃烧器区域火焰温度最高，炉膛火焰平均温度也最高，上三

表 4 不同上三次风工况下炉内火焰平均温度分布

Tab. 4 Distribution of average temperature of flame in furnace at different top tertiary-air cases °C

标高/m	工况 4	工况 2	工况 5
13.6(平台 12.6)	1 138	1 110	1 089
18.155(下层燃烧器)	1 235	1 242	1 255
21.66(中层燃烧器)	1 329	1 337	1 346
25.165(上层燃烧器)	1 332	1 397	1 368
28.665(OFA 喷口)	1 312	1 392	1 348
31.8(平台 30.8)	1 288	1 313	1 304
34.6(平台 33.4)	1 249	1 256	1 280
37.4(平台 36.2)	1 215	1 224	1 230
40.8(平台 39.4)	1 182	1 173	1 192
炉膛火焰平均温度	1 253	1 271	1 268

次风比例为 60% 的工况其燃烧器区域火焰温度最低，炉膛火焰平均温度也最低。然而，温度分布与 NO_x 排放并未形成直接联系，温度对 NO_x 的影响远远弱于氧量对 NO_x 的影响。上三次风比例变化造成燃烧区域氧量变化，从而影响燃料型 NO_x 排放量。

上三次风比例过高，导致飞灰含碳量上升，锅炉效率下降。上三次风比例为 60% 时，飞灰含碳量为 2.94%，锅炉效率最高，为 92.92%；上三次风比例为 70% 时，飞灰含碳量为 3.31%，锅炉效率略微下降；上三次风比例为 80% 时，飞灰含碳量为 5.49%，锅炉效率仅为 91.89%。综合考虑 NO_x 排放浓度与锅炉效率，上三次风比例取 70% 比较合理。

2.3 不同 OFA 挡板开度

试验过程中，保持上三次风比例为 60%，机组负荷稳定在 300 MW，上中下层燃烧器二次风挡板开度分别为 80%、80%、100%，运行过程中省煤器出口烟气氧量保持在 4%。将 OFA 挡板开度分别设置为 20%、60%、80%、100%。

试验结果表明，随着 OFA 喷口挡板开度增大，炉内火焰平均温度下降，NO_x 排放浓度下降。当 OFA 开度为 20% 时，炉膛火焰平均温度为 1273 °C，NO_x 排放浓度高达 1 020 mg/m³；OFA 开度为 60% 时，炉内火焰平均温度为 1 267 °C，NO_x 排放浓度下降了 12.94%；OFA 开度为 100% 时，炉内火焰平均温度为 1 254 °C，NO_x 排放浓度下降了 17.25%。

OFA 为燃尽风，来源于二次风箱。增大 OFA 喷口挡板开度，将使得上中下燃烧器的二次风量相对下降，燃烧器区域过量空气系数减小。如表 5，OFA 为 20% 开度的工况，主燃区过量空气系数为 1.19，而 OFA 开度为 100% 的工况，主燃区的过量空气系数仅为 1.04。主燃区氧量下降，导致煤粉燃烧强度下降，火焰温度降低，热力型 NO_x 的生成量下降，同时由于主燃区区域氧量相对下降，挥发份氮 HCN 和 NH₃ 生成 N₂ 的份额上升，燃料型 NO_x 生成量减少。当烟气经过 OFA 喷口对应区域时，未完全燃烧的可燃物和部分还原性气体实现再燃，

表 5 不同 OFA 挡板开度试验结果

Tab. 5 Result of tests with different overfire-air distribution

项目	工况 6	工况 7	工况 8	工况 9
OFA 挡板开度/%	20	60	80	100
燃尽区风率/%	5	13	14	16
主燃区过量空气系数	1.17	1.07	1.06	1.04
炉内火焰平均温度/°C	1 273	1 267	1 265	1 254
$\varphi(\text{NO}_x)/(\text{mg}/\text{m}^3)$	1 020	888	885	844

降低飞灰和烟气中可燃物浓度。所以 OFA 开度变化，引起了火焰温度及燃烧器区域氧量的变化，从而导致 NO_x 排放量变化。

不同 OFA 开度的工况，飞灰含碳量在 5.38%~6.87% 间波动，锅炉效率在 91.25%~91.81% 间波动，变化较平缓，在本文试验条件下，OFA 挡板开度的调整对锅炉效率的影响相对较小。

2.4 不同二次风配风方式

试验过程中，保持上三次风比例为 70%，负荷稳定在 300 MW，运行过程中省煤器出口烟气氧量保持在 4%。不同配风方式下 OFA 挡板开度及各层煤粉燃烧器二次风挡板开度如表 6 所示。

表 6 不同二次风配比试验结果
Tab. 6 Result of tests with different second-air distribution

参数	工况 10 (均等配风)	工况 11 (正塔型配风)	工况 12 (束腰型配风)
OFA 挡板开度/%	100	80	100
上层燃烧器二次风挡板开度/%	100	80	70
中层燃烧器二次风挡板开度/%	100	80	70
下层燃烧器二次风挡板开度/%	100	100	100
$\varphi(\text{NO}_x)/(\text{mg}/\text{m}^3)$	941	886	824
炉内火焰平均温度/°C	1272	1267	1282
飞灰含碳量/%	6.06	5.38	4.93
炉渣含碳量/%	8.79	8.97	9.2
$q_2/\%$	5.66	5.60	5.50
$q_4/\%$	3.10	2.87	2.61
锅炉效率/%	91.11	91.71	91.92

工况 12 为束腰型配风，烟气中 NO_x 浓度为 824 mg/m³。工况 11 为正塔型配风，NO_x 浓度比工况 12 增加了 7.52%。工况 10 为均匀配风，NO_x 浓度比工况 12 增加了 14.20%。束腰型配风减小了上层和上层燃烧器的二次风，降低了主要燃烧区域氧量，使得燃料型 NO_x 生成量减少，OFA 风量较大，能及时补充空气，减小飞灰含碳量。下层燃烧器二次风挡板开度大，二次风量大，能够有效托住离析煤粉，减小炉渣含碳量，提高经济性。束腰型配风方式下炉内火焰平均温度为 1 282 °C，高于其它两种配风方式，因为锅炉炉内温度分布受多种因素影响，难以将温度与配风方式直接联系。在炉内火焰平均温度最高的情况下，束腰型配风依旧可以获得最低的 NO_x 排放浓度，更说明了氧量分布情况是决定 NO_x 排放浓度高低的关键因素。

3 结论

1) 不同氧量工况下炉内火焰温度变化较小，

热力型 NO_x 生成量基本不变。随氧量增加, 飞灰含碳量下降, 锅炉效率升高, 燃料型 NO_x 生成量增加导致了总体 NO_x 排放量增加。

2) 随上三次风比例增大, NO_x 生成量下降, 飞灰含碳量上升, 锅炉效率下降。当上三次风比例为 80% 时, NO_x 排放浓度为 740 mg/m^3 , 锅炉效率为 91.89%; 而当上三次风下降到 60%, NO_x 浓度下降了 15.14%, 锅炉效率上升了 1.03%。

3) 随着 OFA 挡板开度增大, 燃烧器区域过量空气系数减小, 炉内火焰平均温度下降, NO_x 排放浓度下降, 锅炉效率小范围波动。

4) 不同配风方式下, 束腰型配风工况的锅炉效率最高, NO_x 排放浓度最低, 正塔型配风工况 NO_x 排放浓度增加了 7.52%。均匀配风工况 NO_x 排放浓度增加了 14.20%。

参考文献

- [1] 朱宝山. 燃煤锅炉大气污染物净化技术手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 227-235 .
Zhu Baoshan. Purification of air pollutants in coal-fired boilers technical manual[M], Beijing: China Electric Power Press, 2006: 227-235 (in Chinese).
- [2] 岑可法, 姚强, 骆仲泱, 等. 燃烧理论与污染物控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 447-452.
Cen Kefa, Yao Qiang, Luo Zhongyang, et al. Combustion theory and pollution control[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2004: 447-452 (in Chinese).
- [3] 岑可法, 周昊, 池作和. 大型电站锅炉安全及优化运行技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003: 571-589 .
Cen Kefa, Zhou Hao, Chi Zuohe. Utility boiler safety and optimization technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003: 571-589 (in Chinese).
- [4] 王学栋, 栾涛, 程林, 等. 锅炉燃烧调整对 NO_x 排放和锅炉效率影响的试验研究[J]. 动力工程, 2008, 28(1): 19-23.
Wang Xuedong, Luan Tao, Cheng Lin, et al. Experimental study of the effect of boiler combustion control on NO_x emission and boiler efficiency [J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(1): 19-23(in Chinese).
- [5] 杨卫娟, 周志军, 刘茂盛, 等. 锅炉低 NO_x 燃烧中的三次风运行优化[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2008, 42(7): 1227-1230.
Yang Weijuan, Zhou Zhijun, Liu Maosheng, et al. Tertiary air operation optimization aiming at low NO_x combustion in boiler [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2008, 42(7): 1227-1230(in Chinese).
- [6] 苟湘, 周俊虎, 周志军, 等. 三次风对四角切圆锅炉燃烧和 NO_x 排放的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(8): 7-12.
Gou Xiang, Zhou Junhu, Zhou Zhijun, et al. Tertiary-air effects on combustion and NO_x mission in tangentially fired furnace [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(8): 7-12(in Chinese).
- [7] 苟湘, 周俊虎, 周志军, 等. 低 NO_x 改造方案中煤粉再燃风喷口位置的选择[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(20): 1-7.
Gou Xiang, Zhou Junhu, Zhou Zhijun, et al. Selection of position of pulverized coal reburning injector in low NO_x retrofit schemes[J] Proceedings of the CSEE, 2008, 28(20): 1-7(in Chinese).
- [8] 斯东波, 池作和, 黄郁明, 等. 200MW 煤粉锅炉实施超细煤粉再燃的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(26): 1-6.
Si Dongbo, Chi Zuohe, Huang Yuming, et al. Experimental study on micronized coal reburning for a 200MW coal-fired boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(26): 1-6.
- [9] 高正阳, 阎维平. 煤粉再燃过程再燃煤比脱硝量的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(5): 32-36.
Gao Zhengyang, Yan Weiping. Experimental investigation on specific no reduction quantity for coal reburning process[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(5): 32-36(in Chinese).
- [10] 张晓辉, 孙锐, 孙绍增, 等. 立体分级燃烧对 NO_x 排放特性的影响[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 199-205(in Chinese).
Zhang Xiaohui, Sun Rui, Sun Shaozeng, et al. Effects of stereo-staged combustion technique on NO_x emission charactistics[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2): 199-205(in Chinese).
- [11] Jarquin-López G, Polupan G, Toledo-Velázquez M, et al. Analytical and experimental research for decreasing nitrogen oxides emissions [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(8-9): 1614-1621.
- [12] Li Sen, Xu Tongmo, Hui Shien, et al. NO_x emission and thermal efficiency of a 300MWe utility boiler retrofitted by air staging [J]. Applied Energy, 2009, 86(9): 1797-1803.
- [13] 金晶, 张忠孝, 李瑞阳. 煤粉燃烧炉膛沿程 NO_x 释放规律的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(1): 35-39.
Jin Jing, Zhang Zhongxiao, Li Ruiyang. Study on the NO_x release rule along boiler during pulverized coal combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(1): 35-39(in Chinese).
- [14] Fan Weidong, Lin Zhengchun, Kuang Jinguo. Impact of air staging along furnace height on NO_x emissions from pulverized coal combustion[J]. Fuel Processing Technology, 2010, 91(6): 625-634.
- [15] Svoboda K, Pohorely M. Influence of operating conditions and coal properties on NO_x and N_2O emissions in pressurized fluidized bed combustion of subbituminous coals[J]. Fuel, 2004 83(7-8): 1095-1103.
- [16] 李钧, 阎维平, 李春燕, 等. 基于数值计算的煤粉锅炉 NO_x 释放规律研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(23): 13-19.
Li Jun, Yan Weiping, Li Chunyan, et al. Study on NO_x emission characteristics of pulverized coal fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(23): 13-19(in Chinese).
- [17] Díez L I, Cortés C, Pallarés J. Numerical investigation of NO_x emissions from a tangentially-fired utility boiler under conventional and overfire air operation[J]. Fuel, 2008, 87(7): 1259-1269.
- [18] Stadler H, Toporov D. On the influence of the char gasification reactions on NO formation in flameless coal combustion [J]. Combustion and Flame, 2009, 156(9): 1755-1763.
- [19] Zhou Hao, Zheng Ligang, Cen Kefa. Computational intelligence approach for NO_x emissions minimization in a coal-fired utility boiler [J]. Energy Convection and Management, 2010, 51(3): 580-586.
- [20] Lazaroiu G. Modeling and simulating combustion and generation of NO_x [J]. Fuel Processing Technology, 2007, 88(8): 771-777.
- [21] Choi C R, Kim C N. Numerical investigation on the flow, combustion and NO_x emission characteristics in a 500 MWe tangentially fired pulverized-coal boiler[J]. Fuel, 2009, 88(9): 1720-1731.



肖海平

收稿日期: 2010-06-01。

作者简介:

肖海平(1978), 男, 副教授, 主要从事煤的清洁燃烧及污染物控制方面的研究, dr_xiaohaiping@126.com;

张千(1975), 男, 工程师, 主要从事燃煤烟气污染物控制技术的研究。

(责任编辑 王庆霞)