

DOI: 10.19666/j.rlfed.202503044

660 MW 对冲锅炉下位燃尽风错层布置 燃烧特性数值模拟

宋和斌^{1,2}, 郭修文^{2,3}, 韩金克^{2,3}, 夏永俊^{2,3}, 吴建群^{2,3}, 李志华⁴, 方庆艳⁵

(1.江西赣能股份有限公司, 江西 南昌 330096;

2.江西省工业烟气二氧化碳综合利用(CCUS)工程研究中心, 江西 南昌 330096;

3.江西江投能源技术研究有限公司, 江西 南昌 330096;

4.国家能源集团江西电力有限公司, 江西 南昌 330029;

5.华中科技大学煤燃烧与低碳利用全国重点实验室, 湖北 武汉 430074)

[摘要] 某660 MW 对冲锅炉设计采用下位燃尽风错层布置, 投运前墙上层燃烧器时炉膛出口 NO_x 质量浓度高、燃尽效率低, 利用数值模拟研究满负荷工况磨煤机组合运行方式和前墙下位燃尽风率、射流角度、喷口高度对锅炉燃烧及 NO_x 排放特性的影响。结果表明: 停用前墙上层燃烧器后, NO_x 排放质量浓度降低了 29.49 mg/m^3 , 且飞灰含碳量降低了0.16%, 实际运行推荐采用BCDEF层燃烧器组合方式; 下位燃尽风总风率不变, 前墙下位燃尽风率由10.2%提高到14.2%后 NO_x 排放质量浓度增大, 当风率超过13.2%, 后墙下位燃尽风不足导致燃尽效率降低, 实际运行时前墙下位燃尽风率宜控制在12.2%~13.2%; 当前墙下位燃尽风由斜向下 15° 改为水平喷入后, NO_x 排放质量浓度降低了 18.13 mg/m^3 , 飞灰含碳量增加0.38个百分点; 前墙下位燃尽风喷口上移对齐后墙下位燃尽风喷口后, NO_x 排放质量浓度降低了 41.78 mg/m^3 , 飞灰含碳量增加0.68个百分点。相对常规下位燃尽风喷口对冲布置锅炉, 错层布置后深度空气分级燃烧效果减弱, 但燃尽率提高, 可调节性增强。

[关键词] 对冲锅炉; 下位燃尽风; 燃烧器组合; 错层布置; 燃烧特性

[引用本文格式] 宋和斌, 郭修文, 韩金克, 等. 660 MW 对冲锅炉下位燃尽风错层布置燃烧特性数值模拟[J]. 热力发电, 2025, 54(8): 152-159. SONG Hebin, GUO Xiuwen, HAN Jinke, et al. Numerical simulation on combustion characteristics of a 660 MW opposed firing boiler with staggered layout of lower over fire air[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(8): 152-159.

Numerical simulation on combustion characteristics of a 660 MW opposed firing boiler with staggered layout of lower over fire air

SONG Hebin^{1,2}, GUO Xiuwen^{2,3}, HAN Jinke^{2,3}, XIA Yongjun^{2,3}, WU Jianqun^{2,3},
LI Zhihua⁴, FANG Qingyan⁵

(1.Jiangxi Ganneng Co., Ltd., Nanchang 330096, China;

2.Jiangxi Engineering Research Center of Industrial Flue Gas Carbon Dioxide Comprehensive Utilization (CCUS), Nanchang 330096, China;

3.JXIC Energy Tech. Research Institute Co., Ltd., Nanchang 330096, China;

4.National Energy Group Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330029, China;

5.State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A 660 MW opposed firing boiler is designed with staggered lower over fire air (OFA) burner arrangement, in response to the problems of high NO_x emission and low burn-out efficiency at the furnace outlet caused by the use of upper burners on the front wall, numerical simulation is performed to study the effects of the coal mill combinations, as well as the lower OFA ratios, injection angles, heights of the burners on front wall on

收稿日期: 2025-03-11 网络首发日期: 2025-05-09

基金项目: 江西省重点研发计划项目(20214BBG74004)

Supported by: Key Research and Development Program of Jiangxi Province (20214BBG74004)

第一作者简介: 宋和斌(1974), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力生产安全经济, 602396736@qq.com.

通信作者简介: 夏永俊(1982), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为电力行业减污降碳, 18970990060@189.cn.

the combustion and NO_x emission characteristics under full load conditions. The results show that, the NO_x emission mass concentration decreased by 29.49 mg/m^3 and the carbon content in fly ash decreased by 0.16% after the upper burner of the front wall was deactivated. The combined operation mode of BCDEF burners should be selected in actual operation. When keeping the lower OFA ratio unchanged, the NO_x emission mass concentration increased after the lower OFA ratio on the front wall was increased from 10.2% to 14.2%. When the air rate exceeded 13.2%, insufficient overfire air at the lower part of the back wall led to a decrease in burnout efficiency. The lower OFA rate on the front wall should be controlled within 12.2%~13.2% during actual operation. The NO_x emission mass concentration reduced by 18.13 mg/m^3 and the carbon content in fly ash increased by 0.38 percentage point after the lower OFA was changed from 15° injection to horizontal injection. When the lower OFA burners on the front wall were moved up to the height of the lower OFA burners on the rear wall, the NO_x emission mass concentration decreased by 41.78 mg/m^3 , and the carbon content in fly ash increased by 0.68 percentage point. Compared to the opposed firing boilers with conventional lower OFA burners, the one with staggered layout of lower OFA burners has relatively weak deep air staged combustion effect, but with high burnout rate and better adjustability.

Key words: opposed firing boiler; lower OFA; burners operation mode; staggered layout; combustion characteristics

相对于切圆燃烧,旋流对冲燃烧具有一次风和二次旋流风混合强烈、高温烟气卷吸有助于低负荷稳燃、热负荷控制相对较好、出口烟温偏差很小且易控制等特点^[1],国内超临界和超超临界燃煤电站锅炉逐渐以旋流对冲燃烧器作为首选。为保证旋流对冲锅炉稳定经济运行,对该类型锅炉已开展了大量试验研究^[2-4]。借助计算流体力学(CFD)数值模拟手段,能够较为准确地得到不同参数下的炉内燃烧和污染物生成特性,从而降低成本及缩短研究周期^[5],此类研究多数集中在过剩空气系数^[6]、风量配比^[7-8]、磨组运行方式^[9-10]、燃尽风位置^[11]、燃尽风喷口形式^[12]等对燃烧和 NO_x 生成特性影响。火电厂主要通过燃料源控制、低氮燃烧控制、脱硝系统处理控制等手段来实现低 NO_x 排放,实际生产过程中燃料源控制手段作用有限,配煤掺烧中常有偏离设计值较多的煤种。空气分级燃烧(OFA)技术是现今应用最普遍也十分有效的低 NO_x 排放技术^[13],通过合理的空气分级,降低炉膛出口 NO_x 污染物含量,减轻后续脱硝系统压力。

某电厂 660 MW 对冲锅炉设计采用典型下位燃尽风错层布置,实际运行中发现启用前墙上层燃烧器会导致炉膛出口 NO_x 排放量高、燃尽效率低等问题。目前,针对 2 层布置燃尽风且下位燃尽风错层布置形式的对冲燃煤锅炉性能研究较少,基于燃尽风错层布置且斜向下射流对锅炉性能影响了解不足。结合现场试验数据,以该锅炉为研究对象,通过数值模拟方法得到满负荷工况下磨煤机组合(磨组)运行方式、前墙下位燃尽风率、前墙下位燃尽风喷口的射流角度和高度对炉内燃烧及污染物 NO_x 生成特性影响结果,该结果能为运行调整和后续同

类型锅炉技术改造提供一定参考价值。

1 锅炉概况及物理建模

以某超超临界 660 MW 参数变压运行、单炉膛、前后墙对冲燃烧 II 型锅炉为研究对象,旋流煤粉燃烧器前、后墙分别 3 层布置,每层 6 只燃烧器,在燃烧器上方布置了上位燃尽风和下位燃尽风,每层 6 只燃尽风喷口。下层燃烧器层间距为 4.579 9 m,上层燃烧器层间距为 6.196 5 m,燃烧器列间距为 3.048 0 m,上层燃烧器中心线距屏底约 24.035 0 m,下层燃烧器中心线与冷灰斗拐角距离为 3.259 8 m,最外侧燃烧器中心线与侧墙距离为 3.461 2 m。燃烧器配风分为中心风、一次风、内旋流二次风和外旋流二次风,燃用煤质参数见表 1。

表 1 煤质分析
Tab.1 Coal quality analysis

项目	数值
全水 $w_1(\text{M})/\%$	17.3
空气干燥基水分 $w_{\text{ad}}(\text{M})/\%$	5.87
收到基灰分 $w_{\text{ar}}(\text{A})/\%$	10.62
干燥无灰基挥发分 $w_{\text{daf}}(\text{V})/\%$	35.83
收到基碳 $w_{\text{ar}}(\text{C})/\%$	58.12
收到基氢 $w_{\text{ar}}(\text{H})/\%$	3.40
收到基氧 $w_{\text{ar}}(\text{O})/\%$	9.46
收到基氮 $w_{\text{ar}}(\text{N})/\%$	0.60
全硫 $w_{\text{t,ar}}(\text{S})/\%$	0.60
收到基低位发热量 $Q_{\text{net,ar}}(\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	21.80

采用分区策略对锅炉进行等比建模,模型如图 1 所示,对模型进行全六面体结构化网格划分,网格线与流体流动方向基本保持一致以降低数值计算产生的伪扩散^[14]。在近壁面流动剧烈区域加密

网格, 网格无关性验证结果见表 2, 不同网格计算得到氧量和温度结果差异较小, 综合考虑计算准确性和计算资源要求, 确定后续计算网格数为 473 万。

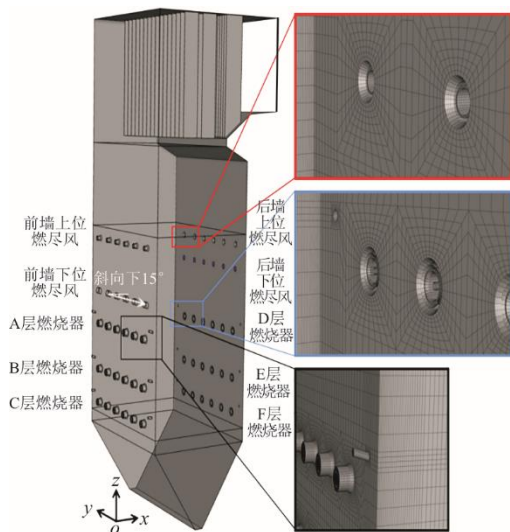


图 1 锅炉模型及网格划分
Fig.1 The boiler model and the mesh generation

表 2 网格无关性验证
Tab.2 Grid independence verification

网格数量/万	炉膛出口氧量/%	炉膛出口温度/K
351	2.85	1 248.78
473	2.72	1 216.29
615	2.70	1 210.35

2 数值计算方法

2.1 数值计算模型

参考应用性较好的旋流对冲锅炉燃烧及污染物生成模型^[15]。采用带旋流修正的 Realizable $k-\varepsilon$ 双方程模型以更好模拟旋流对冲锅炉内旋流气相湍流流动, 煤粉颗粒相体积分数小于 10%, 颗粒输运采用离散相模型 (DPM), 以 Lagrange 描述下的随机粒子轨道模型控制煤粉颗粒喷入炉膛后的运动过程, 气相燃烧采用组分输运模型中的涡耗散模型 (EDM), 忽略化学反应时间尺度影响以节省计算资源, 分别采用双步反应竞争模型和动力/扩散模型求解煤粉热解挥发分析出和煤焦非均相氧化反应过程, 由于炉膛辐射光学厚度一般为 1~3, 使用 P1 辐射模型控制炉膛内的辐射传热, 以灰度加权 WSGGM 模型计算烟气发射率, 较为准确反映炉内辐射传热过程且不占用过多计算资源。燃煤锅炉中快速型 NO_x 生成量仅占 5% 左右, 故只考虑热力型和燃料型 NO_x 生成, 由于气相产物中 NO_x 占比很小且对各物理场影响较小, 在计算收敛结束后再进行

污染物 NO_x 的后处理计算, 计算中采用 Zeldovich 和 de Soete 机理模型分别控制热力型 NO_x 和燃料型 NO_x 生成, 挥发分氮和焦炭氮分配比例由化学渗透脱挥发分 (CPD) 模型计算得到, 计算考虑湍流温度及氧原子脉动影响。

2.2 计算边界条件

根据满负荷工况下的设计参数设置计算边界条件, 主要风量设置见表 3。停用燃烧器根据实际运行防止高温烧损设置一个小风量, 喷口设置为质量入口边界条件, 除风管间交界面为耦合壁面, 其他均为无滑移温度壁面, 并根据设计值设置不同的温度和辐射率, 灰斗底和灰斗斜面设置 Trap 颗粒捕集面, 炉膛出口设置为 -150 Pa 的压力出口边界, 燃烧器内二次风、外二次风和上位燃尽风外旋流风等参考设计旋流方向, 旋流角度设置为 35° , 一次风边界条件加入煤粉颗粒, 直径按 Rosin-Rammler 方法分布, 最小粒径 $10 \mu\text{m}$, 最大粒径 $200 \mu\text{m}$, 平均粒径 $65 \mu\text{m}$, 分散系数 1.15。

表 3 满负荷工况风量边界条件
Tab.3 Boundary conditions for airflow under full load

边界	风量/($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	风温/K
中心风	5.83	618.15
一次风	130.39	350.15
内二次风	40.24	618.15
外二次风	160.53	618.15
前墙下位直流燃尽风	71.14	618.15
后墙下位直流燃尽风	68.81	618.15
前墙上位内层直流燃尽风	25.66	618.15
前墙上位外层旋流燃尽风	18.46	618.15
后墙上位内层直流燃尽风	25.66	618.15
后墙上位外层旋流燃尽风	18.46	618.15

3 结果与讨论

3.1 计算准确性验证

对比燃烧调整 660 MW 负荷工况试验结果, 模拟偏差见表 4。氧量和 NO_x 质量浓度 (干基, 氧体积分数 6%, 下同) 偏差分别为 -3.45% 和 -5.58%, 飞灰含碳量计算偏差为 7.35%, 可以看出数值计算模型具有较好的准确性。

表 4 计算准确性验证
Tab.4 Calculation accuracy verification

项目	试验值	计算值	偏差/%
炉膛出口氧量/%	3.19	3.08	-3.45
炉膛出口 NO_x 质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	197.00	186.00	-5.58
飞灰含碳量/%	0.68	0.73	7.35

3.2 运行磨组变化对燃烧及 NO_x 生成特性影响

满负荷 5 台磨煤机在不同组合工况沿炉膛高度平均烟温分布如图 2 所示。

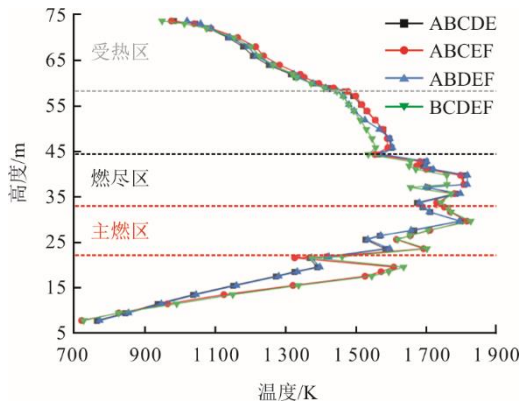


图 2 变磨组运行沿炉膛高度烟温分布
Fig.2 Temperature distribution along the furnace height with different coal mill combinations

由图 2 可见，在主燃区和灰斗区域截面温度分布差异明显，开启上两层燃烧器的 ABCDE 和 ABDEF 组合工况温度较低，而当 BCEF 下两层燃烧器开启时的平均温度更高，此时火焰中心偏低。在燃尽区域，停用靠近前墙下位斜喷直流燃尽风的 A 层燃烧器的 BCDEF 组合工况温度最低。对比同样开启下两层燃烧器的 ABCEF 和 BCDEF 2 种组合工况，在炉膛下部的温度分布几乎一致，但在燃尽区往上至受热区前的温度分布差异较大，开启前墙 A 层燃烧器的温度明显偏高，由于 A 层燃烧器距离前墙下位斜喷直流燃尽风较近，大量燃尽风提前补

氧促进 A 层燃烧器喷出煤粉燃烧，前墙下位斜喷直流燃尽风对燃尽区的温度分布影响较大。

变磨组运行沿炉膛高度截面上的 NO 平均生成量如图 3 所示。

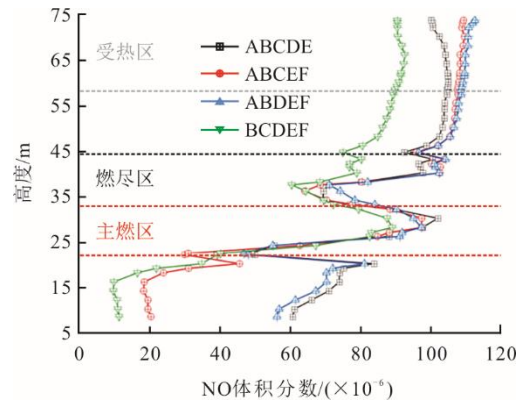


图 3 变磨组运行沿炉膛高度的 NO 体积分数
Fig.3 Distribution of NO volume fraction along the furnace height with different coal mill combinations

由图 3 可见，不同磨组运行方式下 NO 生成量差异较大。开启下两层燃烧器运行，灰斗区域的氧气被大量消耗，缺氧燃烧导致灰斗区域内还原性气氛增加，生成的 NO 被大量还原，因此 ABCEF 和 BCDEF 磨组运行时灰斗区域 NO 体积分数低于 2×10^{-5} ，而开启上两层磨煤机的 ABCDE 和 ABDEF 运行方式在该区域生成 NO 体积分数高于 6×10^{-5} 。主燃区 NO 生成量差异不大，但在燃尽区以上，BCDEF 运行方式的 NO 生成量明显偏低。图 4 为变磨组运行 NO 分布云图。

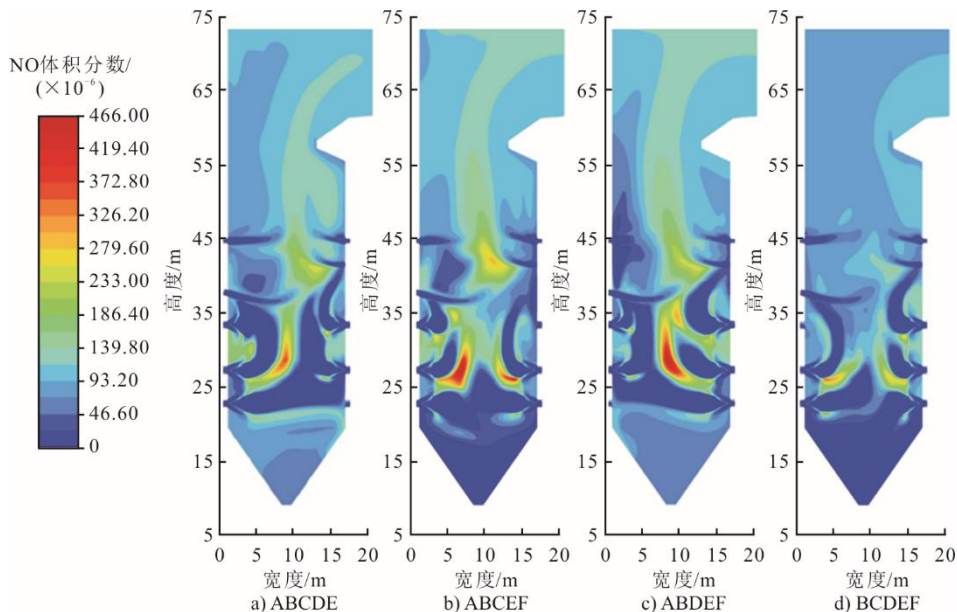


图 4 变磨组运行 NO 体积分数分布云图
Fig.4 The contours of NO volume fraction distribution with different coal mill combinations

从图 4 可以看出：一方面，由于 A 层燃烧器喷口距离前墙下位燃尽风喷口较近，该区域提前补

氧, 弱化空气分级作用, 大量 NO 生成; 另一方面, 前墙下位燃尽风喷入后影响炉膛整体流场, 前墙燃烧器喷出的大量未燃尽物流动至后墙下位燃尽风区域继续燃烧, 在该区域温度和氧量很高, 生成了大量的热力型 NO 和燃料型 NO。同时 BCDEF 磨煤机组合运行方式在燃尽风喷入后炉膛高度上的截面温度最低, 削弱了热力型 NO_x 生成。

满负荷变磨组运行时高温过热器(高过)进口烟温、炉膛出口 NO_x (折算到 6% 氧量标况) 和炉膛出口飞灰含碳量计算结果如图 5 所示。由图 5 可见, 开启上两层燃烧器 ABDE 运行, 火焰中心上移, 高过进口烟温相对较高, 当前墙仅有 2 层燃烧器运行时, 开启上两层燃烧器比开启下两层燃烧器出口烟温高 52 K。开启前墙上层 A 燃烧器运行的出口 NO_x 质量浓度在 200.00 mg/m³ 左右, 而停用前墙上层 A 燃烧器后出口 NO_x 质量浓度大幅降低到 173.81 mg/m³, 错层布置的下位直流燃尽风对锅炉运行温度和 NO_x 污染物生成有很大影响。因煤粉颗粒在炉内停留时间差异, ABCDE 和 ABDEF 磨组运行时出口飞灰含碳量分别为 1.69% 和 2.06%, 而 ABCEF 和 BCDEF 运行方式出口飞灰含碳量为 1.51% 和 1.35%, 这和实际运行情况相吻合。由于错层布置, 前墙下位燃尽风喷口距离前墙上层燃烧器较近, 开启前墙上层燃烧器时受热面温度抬升、燃烧效率降低, 并且 NO_x 生成量较多, 实际运行中推荐开启后墙燃烧器运行, 当上部受热情况较差时, 应开启前墙燃烧器适当调整。

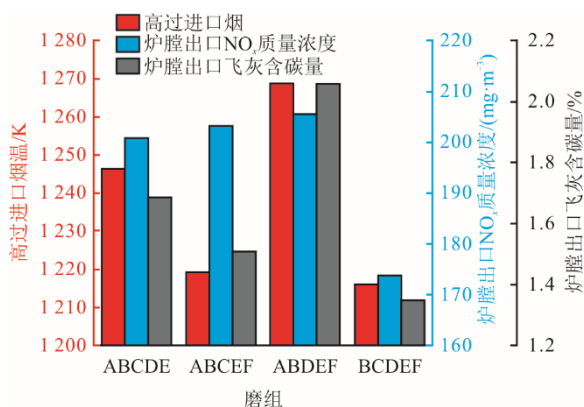


图 5 变磨组运行锅炉主要性能结果
Fig.5 Performance of the boiler with different coal mill combinations

燃烧调整试验期间对 600 MW 负荷工况不同磨煤机组合方式的锅炉运行特性进行检测计算, 除磨煤机组合方式外其他运行参数不变, 在空气预热器出口处采用网格法取样测量排烟氧量和飞灰含碳量, 同步测量选择性催化还原 (SCR) 脱硝反应器

入口处 NO_x 质量浓度, 采用热损失法计算锅炉热效率, 试验结果见表 5。

表 5 变工况运行试验结果
Tab.5 Tested results of different operating conditions

组合方式	排烟氧量/%	反应器入口 NO _x 质量浓度/(mg·m ⁻³)	飞灰含碳量/%	锅炉热效率/%
BCDEF	3.68	179	0.70	94.84
ABCEF	3.61	215	1.51	94.79
ABCDEF	3.65	221	1.97	94.74

停用前墙上层 A 燃烧器后, SCR 脱硝反应器入口 NO_x 质量浓度明显下降, 且飞灰含碳量最低, 锅炉热效率最高, 磨煤机组合方式通过影响煤粉颗粒在炉膛内停留时间、燃烧空气分级效果等造成锅炉运行特性差异^[9]。尤其对于下位燃尽风错层布置对冲锅炉, 数值模拟计算和燃烧调整试验结果都表明: 启用 A 层燃烧器后锅炉效率降低且污染物生成增多, 实际运行满负荷工况下推荐 BCDEF 磨煤机组合运行方式。

3.3 错层下位燃尽风率对燃烧及 NO_x 生成特性影响

错层下位燃尽风对燃烧及 NO_x 生成影响较大, 当距离较近的 A 层燃烧器启用时尤为明显。运行时一般选择停用 A 磨, 对 BCDEF 磨煤机组合运行方式适当增大前墙下位燃尽风率, 同时等比例降低后墙下位燃尽风率, 计算得到风率对炉膛温度分布的影响, 沿炉膛高度截面平均温度如图 6 所示。

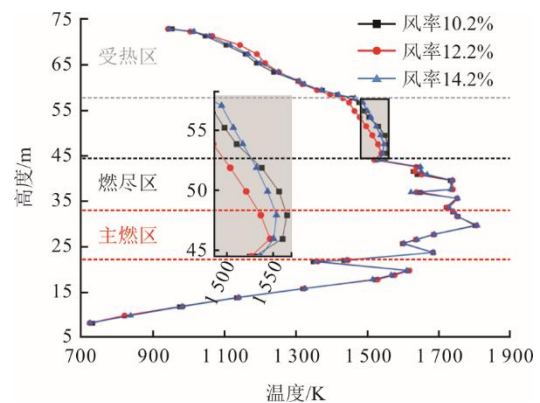


图 6 变前墙下位燃尽风率工况沿炉膛高度上的温度分布
Fig.6 Temperature distribution along the furnace height with various ratios of the lower OFA on front wall

由图 6 可见, 随前墙下位燃尽风率增大到 12.2%, 前墙下位燃尽风更加深入炉膛中心, 火焰中心下移, 提前补风助燃作用增强, 燃尽区后的高温区减少, 但当前墙下位燃尽风率增大到 14.2%, 后墙下位燃尽风不足以深入炉膛中心, 造成主燃区未燃尽碳颗粒逃逸量增多, 在燃尽风区后继续燃尽, 出现了较多高温区。

前墙下位燃尽风率对炉膛出口 NO_x 质量浓度和飞灰含碳量的影响如图 7 所示。由图 7 可见, NO_x 质量浓度随前墙下位燃尽风率不断增大而增大, 磨煤机 BCDEF 运行方式出口 NO_x 质量浓度显著偏低。提升风率强化提前补风, 削弱空气分级作用, 增强主燃区氧化, NO_x 还原减弱, 为缓解脱硝系统工作压力, A 层燃烧器启用时应适当降低前墙下位燃尽风开度。随前墙下位燃尽风率增大, 出口飞灰含碳量总体呈现降低趋势, 增大前墙下位燃风量加强补氧, 主燃区燃烧充分, 未燃尽碳不断减少, 但后墙 3 层燃烧器全开的 ABDEF 和 BCDEF 工况在风率超过 13.2% 后飞灰含碳量攀升, 此时后墙下位燃风不足以深入炉膛中心, 后墙燃烧器喷出煤粉颗粒燃烧反而不完全。基于燃烧效率考虑, 后墙燃烧器全开工况时应控制前墙下位直流燃尽风率不超过 13.2%, 满负荷工况前墙下位燃尽风率应控制在 12.2%~13.2%。

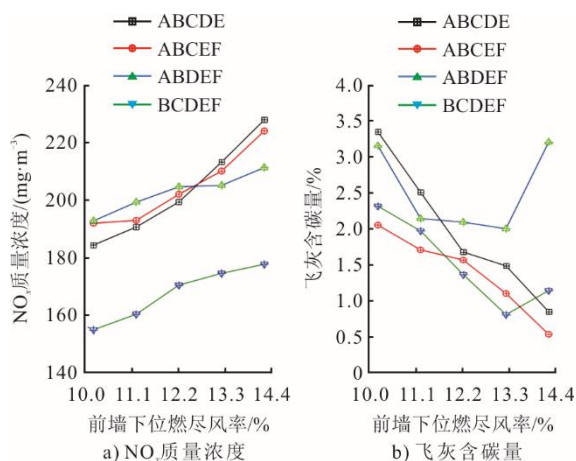


图 7 变前墙下位燃尽风率炉膛出口 NO_x 质量浓度和飞灰含碳量
Fig.7 NO_x mass concentrations and carbon content in fly ash at furnace outlet at various ratios of the lower OFA on front wall

在燃烧调整试验期间, 调整前墙下位燃尽风门开度, 为避免运行波动影响, 取长时间试验数据, SCR 脱硝反应器入口 NO_x 折算变化结果如图 8 所示。由图 8 可见, NO_x 质量浓度和前墙下位燃尽风门开度有较强的正相关性, 风门开度在 45% 左右时 NO_x 质量浓度稳定在 $170 \text{ mg}/\text{m}^3$ 左右, 风门开大至 65%, NO_x 质量浓度最高达到了 $341.46 \text{ mg}/\text{m}^3$, 为防止尾排污染物超标, 前墙下位燃尽风门不应大开度运行。

3.4 射流角度对燃烧及 NO_x 生成特性影响

为对比斜向下射流同常规水平喷入方式对炉内燃烧和污染物生成影响的差异, 便于后续燃用高氮劣质煤种时的技改参考。对 ABCDE 磨煤机组合

运行方式模拟满负荷工况条件下前墙下位直流燃尽风斜向下射流角度对炉内燃烧和 NO_x 生成影响, 结果如图 9 所示。

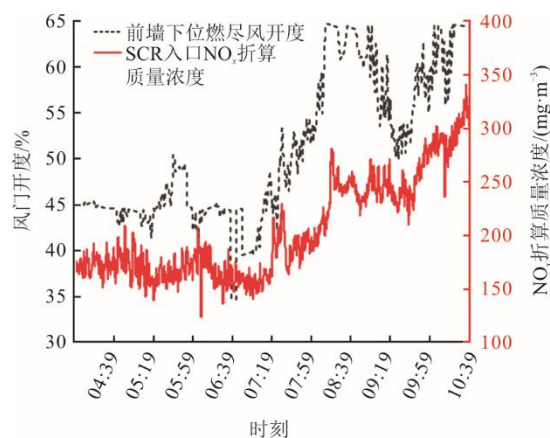


图 8 变前墙下位燃尽风率试验结果
Fig.8 Experimental results at various ratios of the lower OFA on front wall

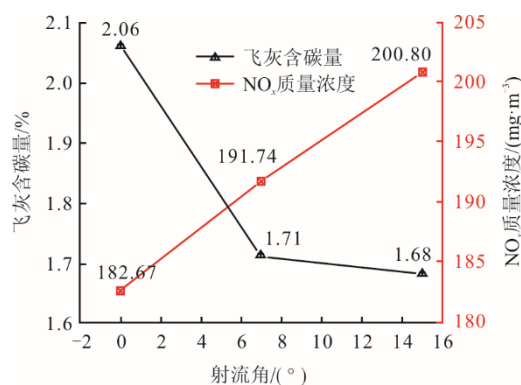


图 9 不同射流角度炉膛出口 NO_x 质量浓度和飞灰含碳量
Fig.9 NO_x mass concentrations and carbon content in fly ash at furnace outlet with different injection angles

由图 9 可见, 前墙下位直流燃尽风喷口的射流角度设计值为 15° , 当射流角度逐渐减小到水平射入后, 炉膛出口飞灰含碳量由 1.68% 增大到 2.06%, 而炉膛出口 NO_x 排放质量浓度由 $200.80 \text{ mg}/\text{m}^3$ 降低到 $182.67 \text{ mg}/\text{m}^3$, NO_x 排放质量浓度降低了 $18.13 \text{ mg}/\text{m}^3$, 飞灰含碳量增加 0.38 个百分点, 斜向下射流方式有助于提高燃尽效率, 但不利于控制炉内 NO_x 生成。前墙下位直流燃尽风射流角度变化对颗粒平均停留时间几乎没有影响, 但对煤粉燃烧速率影响较大, 燃烧速率主要由氧化剂扩散到颗粒表面的速率和颗粒本征反应动力学共同控制, 计算中焦炭燃烧模型考虑了二者的耦合作用, 随着射流角度增加, 前墙下位燃尽风提前射入下部主燃区, 强化了湍流扰动, 该处燃烧温度增加, 动力学反应速率和氧气向颗粒表面的扩散速率提高, 因此飞灰含碳量降低。

图 10 为不同射流角度工况沿炉膛高度 NO 体积分数分布。从图 10 可见, 在燃尽区前区域, 生成 NO 体积分数差异不大, 射流角度改变对燃尽区以下区域的 NO 生成影响较小, 而在下位燃尽风喷出直至炉膛出口的 NO 体积分数分布出现了明显差异, 射流角度越大, NO 生成量越多, 由于斜向下射流方式, 提前扰流补氧作用缩短了下部燃尽区的还原距离, 还原性气氛减弱, 强化了燃料中的氮元素向 NO 的转化, 燃料型 NO_x 生成量增多, 在一定程度上弱化深度空气分级燃烧作用。当锅炉燃用高氮劣质掺烧煤种时, 若后续脱硝系统压力大, 尾排 NO_x 质量浓度控制难度大时, 可以考虑适当减小射流角度。

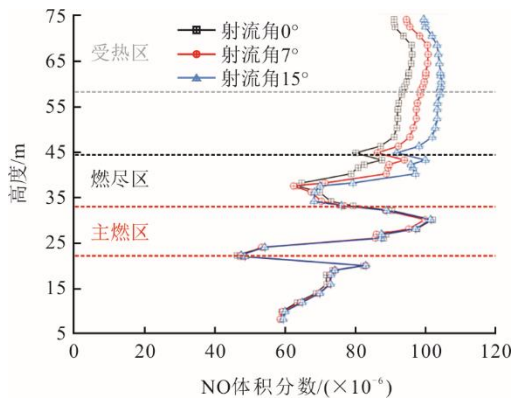


图 10 不同射流角度工况沿炉膛高度 NO 体积分数分布
Fig.10 NO volume fraction distribution along the furnace height with different injection angles

3.5 喷口高度对燃烧及 NO_x 生成特性影响

常规对冲锅炉前、后墙燃尽风喷口为等高度对冲布置, 基于下位燃尽风错层布置形式对燃烧和污染物生成特性影响研究较少。为了解错层布置影响特性, 基于磨煤机 ABCDE 组合运行满负荷工况, 上移前墙下位燃尽风喷口至后墙下位燃尽风高度, 计算结果如图 11 所示。

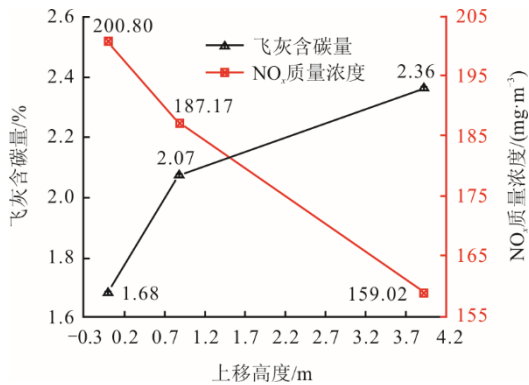


图 11 前墙下位燃尽风喷口不同上移高度时炉膛出口 NO_x 质量浓度和飞灰含碳量
Fig.11 NO_x mass concentrations and carbon content in fly ash at furnace outlet at different upward heights

由图 11 可见, 上移至后墙下位燃尽风喷口高度后, 炉膛出口飞灰含碳量由 1.68% 增大至 2.36%, SCR 脱硝反应器入口 NO_x 质量浓度由 200.80 mg/m³ 降低至 159.02 mg/m³。上移后打破了原本设计的错层布置形式, 前墙下位燃尽风对主燃区的扰动补氧作用消失, 深度空气分级燃烧效果加强, 大量未燃尽煤粉缺氧燃烧, 至炉膛出口补氧燃烧时间不足导致飞灰含碳量增大, 不完全燃烧热损失增大, 不利于经济运行。

前墙下位燃尽风喷口不同上移高度时沿炉内高度上的 NO 体积分数如图 12 所示。由图 12 可见, 在灰斗和主燃区生成的 NO 体积分数区别不大, 从前墙下位燃尽风喷口高度往上的 NO 分布差异明显, 喷口上移至设计后墙下位燃尽风高度后, 在原错层高度区域还原气氛强, 导致燃烧区生成的部分 NO 持续被还原, 大幅度降低了出口 NO 体积分数, 在设计前、后墙下位燃尽风高度之间产生的 NO 高含量区逐渐消失, 拉长了还原距离, 随前墙下位燃尽风喷口上移, 炉膛出口 NO_x 排放质量浓度持续降低。

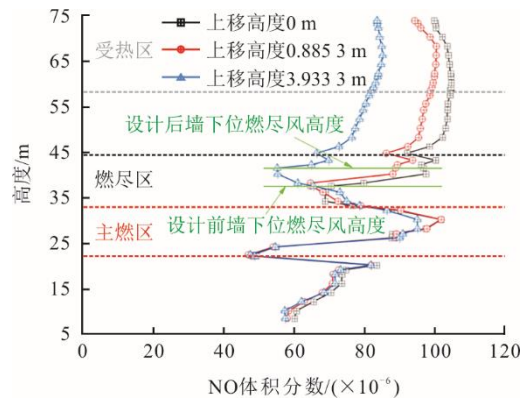


图 12 前墙下位燃尽风喷口不同上移高度时沿炉膛高度 NO 体积分数
Fig.12 NO volume fraction distribution along the furnace height at different upward heights

4 结 论

1) 结合燃烧调整试验, 对某设计采用典型下位燃尽风错层布置的对冲锅炉进行数值模拟, 结果表明磨煤机组合运行方式对燃烧和 NO_x 生成影响较大。满负荷工况启用 5 台磨煤机运行时, 由于煤粉停留时间和火焰中心高度影响, 启用上两层燃烧器出口烟温和飞灰含碳量更高; 错层布置的前墙下位直流燃尽风喷口和主燃区距离很小, 同样启用下两层燃烧器, 停前墙上层燃烧器后 NO_x 质量浓度显著降低了 29.49 mg/m³, 且飞灰含碳量也降低了 0.16%。燃烧调整试验结果同模拟结果一致, 故实际运行应该选择停用前墙上层燃烧器的 BCDEF 磨煤机组合运行方式。

2) 仅改变前、后墙下位燃尽风率, 随前墙下位燃尽风率增大, 强化提前补风作用, 炉膛出口 NO_x 含量逐渐增大, 飞灰含碳量有所降低, 但后墙 DEF 层燃烧器全开时, 前墙下位燃尽风率超过 13.2% 导致后墙下位燃尽风不足, 引起飞灰含碳量升高。综合燃尽效率和脱硝系统压力, 满负荷工况控制前墙下位直流燃尽风率在 12.2%~13.2%。

3) 前墙下位燃尽风斜喷角度和喷口高度对燃烧和 NO_x 生成影响明显。减小喷射角度及提高喷口高度都能有效降低出口 NO_x 质量浓度, 但降低了燃尽效率。模拟由设计斜向下 15° 喷入改为水平喷入炉膛后 NO_x 排放质量浓度降低了 18.13 mg/m^3 , 飞灰含碳量增加了 0.38 百分点; 设置喷口对齐后墙下位燃尽风高度, NO_x 质量浓度显著降低了 41.78 mg/m^3 , 飞灰含碳量增加了 0.68 百分点; 相对常规对冲布置方式, 错层斜喷布置深度空气分级燃烧效果减弱, 但燃尽率提高, 可调节性增强。模拟结果可为燃烧调整和后续技术改造提供参考。

[参考文献]

- [1] FANG Q Y, WANG H J, WEI Y, et al. Numerical simulations of the slagging characteristics in a down-fired, pulverized-coal boiler furnace[J]. Fuel Processing Technology, 2010, 91(1): 88-96.
- [2] 钟伟, 马达夫, 何翔. 660 MW 超超临界对冲燃烧锅炉低负荷试验[J]. 发电设备, 2021, 35(6): 435-439. ZHONG Wei, MA Dafu, HE Xiang. Experiment on a 660 MW supercritical opposed firing boiler under low load[J]. Power Equipment, 2021, 35(6): 435-439.
- [3] 彭宗贵, 杜智华, 练领先, 等. 600 MW 对冲燃烧煤粉锅炉贴壁风空气动力场及燃烧运行试验研究[J]. 热力发电, 2022, 51(9): 132-140. PENG Zonggui, DU Zhihua, LIAN Lingxian, et al. Experimental study on aerodynamic field and combustion operation of a 600 MW opposed-firing coal boiler with closing-to-wall air[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(9): 132-140.
- [4] 武生, 张志强, 姚力, 等. 600 MW 超临界对冲锅炉燃烧优化调整试验[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(增刊2): 176-180. WU Sheng, ZHANG Zhiqiang, YAO Li, et al. Experiment study on combustion optimization and adjustment of 600 MW supercritical hedging boiler[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(Suppl.2): 176-180.
- [5] 刘鹏宇, 李德波, 刘彦丰, 等. 旋流对冲燃烧锅炉整炉膛数值模拟与工程应用研究进展与展望[J]. 热能动力工程, 2022, 37(3): 1-8. LIU Pengyu, LI Debo, LIU Yanfeng, et al. Research progress and prospects of numerical simulation and engineering application of the whole furnace of swirl opposed combustion boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(3): 1-8.
- [6] 吕洪坤, 童家麟, 齐晓娟, 等. 对冲燃烧锅炉低负荷运行优化数值模拟研究[J]. 热能动力工程, 2020, 35(7): 89-94. LYU Hongkun, TONG Jialin, QI Xiaojuan, et al. Numerical simulation of low-load operation optimization for opposite firing boilers[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(7): 89-94.
- [7] 毛睿, 李源, 任利明, 等. 600 MW 旋流对冲燃烧锅炉燃尽特性及其优化数值模拟[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(12): 117-124. MAO Rui, LI Yuan, REN Liming, et al. Numerical simulation on burner burnout characteristics and optimization in a 600 MW swirling opposed boiler[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(12): 117-124.
- [8] 李怀强, 袁宏伟, 马仑, 等. 某 600 MW 超超临界对冲锅炉二次风配风方式对燃烧及排放特性影响的数值模拟[J]. 湖北电力, 2020, 44(5): 83-87. LI Huaqiang, YUAN Hongwei, MA Lun, et al. Numerical simulation on influence of secondary air distribution on coal combustion characteristic and NO_x emission in 600 MW ultra-supercritical opposed firing boiler[J]. Hubei Electric Power, 2020, 44(5): 83-87.
- [9] 方庆艳, 汪华剑, 陈刚, 等. 超超临界锅炉磨煤机组合运行方式优化数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(5): 1-6. FANG Qingyan, WANG Huajian, CHEN Gang, et al. Optimal simulation on the combination mode of mills for an ultra-supercritical utility boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(5): 1-6.
- [10] 彭昭雄, 刘兵兵, 范多文, 等. 600 MW 对冲燃烧锅炉分磨掺烧煤粉燃尽特性的模拟和试验研究[J]. 热力发电, 2024, 53(1): 175-182. PENG Zhaoxiong, LIU Bingbing, FAN Duowen, et al. Simulation and experimental study on the burnout characteristics of pulverized coal in a 600 MW opposed combustion boiler by mixing grinding and burning[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(1): 175-182.
- [11] 阮志龙, 廖伟辉, 吕兴城, 等. 燃煤与半焦混合燃烧过程中燃尽风配风位置对燃烧特性影响的模拟研究[J]. 发电设备, 2023, 37(6): 368-374. RUAN Zhilong, LIAO Weihui, LYU Xingcheng, et al. Numerical study on the impact of overfire air position on combustion characteristics in the co-firing process of coal and semi-coke[J]. Power Equipment, 2023, 37(6): 368-374.
- [12] 李明, 王雪彩, 孙树翁, 等. 燃尽风射流形式对墙式对冲煤粉锅炉低氮燃烧改造的影响[J]. 动力工程学报, 2015, 35(4): 263-269. LI Ming, WANG Xuecai, SUN Shuweng, et al. Influence of overfire air jet form on low NO_x retrofit effect of an opposed firing boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(4): 263-269.
- [13] 王晶, 廖昌建, 王海波, 等. 锅炉低氮燃烧技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(2): 99-114. WANG Jing, LIAO Changjian, WANG Haibo, et al. Research progress of low- NO_x combustion technology for boilers[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(2): 99-114.
- [14] NORBERT M. Computational modeling of a utility boiler tangentially-fired furnace retrofitted with swirl-burners[J]. Fuel Processing Technology, 2010, 91(11): 1601-1608.
- [15] 廖伟辉, 阮志龙, 吕兴城, 等. 燃烧器偏转解决对冲燃烧锅炉高温腐蚀及颗粒冲刷技术研究[J]. 热力发电, 2023, 52(7): 191-199. LIAO Weihui, RUAN Zhilong, LYU Xingcheng, et al. Research on burner deviation for mitigating high-temperature corrosion and particle erosion in opposed wall combustion boiler[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(7): 191-199.

(责任编辑 杜亚勤)