

DOI: 10.19666/j.rlfed.202505075

掺烧氢/氨对煤粉锅炉 NO_x 排放的影响

张波¹, 张国军², 贾子秀¹, 王志超¹, 李宗泰¹, 晋中华¹, 房凡¹

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;
2.北京中润汉泰科技有限公司, 北京 102206)

[摘要] 分析某 600 MW 燃煤机组掺烧氢/氨对 NO_x 排放的影响。根据煤质分析及试验结果修正反应动力学文件, 根据流体动力学 (CFD) 模拟结果构建完全搅拌全混流反应器 (perfectly stirred reactor, psr) 反应器网络, 结合采用化学反应动力学分析方法, 对锅炉在一次风、周界风、二次风、二次风后 4 个位置的 5 个方案, 分别掺烧氢/氨后的 NO_x 排放进行分析, 结果表明: 对于所研究的锅炉, 氢气掺烧位置位于二次风方案, 掺氢 20% 工况, NO 降低 32.4%、未燃尽碳排放量与纯煤工况相当; 氨气掺烧位置位于二次风后方案, NO 排放量略高于纯煤工况, 未燃尽碳排放量显著减小。上述 2 个方案是该锅炉以 NO_x 排放作为评价指标的掺氢/氨燃烧的推荐方案。该方法和结论可为掺烧氢/氨技术的工程实施提供设计依据。

[关键词] 掺氢燃烧; 掺氨燃烧; NO_x

[引用本文格式] 张波, 张国军, 贾子秀, 等. 掺烧氢/氨对煤粉锅炉 NO_x 排放的影响[J]. 热力发电, 2025, 54(8): 124-130. ZHANG Bo, ZHANG Guojun, JIA Zixiu, et al. Effect of co-firing hydrogen/ammonia on nitrogen oxides emissions from boilers[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(8): 124-130.

Effect of co-firing hydrogen/ammonia on nitrogen oxides emissions from boilers

ZHANG Bo¹, ZHANG Guojun², JIA Zixiu¹, WANG Zhichao¹, LI Zongtai¹,
JIN Zhonghua¹, FANG Fan¹

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;
2. SinoFlow Engine Technology Co., Ltd., Beijing 102206, China)

Abstract: The effect of co-firing hydrogen/ammonia on nitrogen oxides emissions from boilers is investigated. The reaction kinetics file is modified based on coal quality analysis and experimental results. A psr reactor network based on CFD simulation results is constructed according to the fluid dynamics (CFD) simulation results. Combining with the chemical reaction kinetics analysis method, the NO_x emissions after burning hydrogen/ ammonia at four positions of primary air, peripheral air, secondary air and post secondary air in five schemes are analyzed. The results show that, for the researched boiler, when the hydrogen co-firing position is located in the secondary air scheme, and the hydrogen mixing ratio is 20%, the NO emission reduces by 32.4%, and the emission concentration of unburned carbon does not change much compared to the pure coal condition. When the ammonia co-firing position is located behind the secondary air, the NO emission mass concentration is slightly higher than that under the pure coal condition, and the emission mass concentration of unburned carbon reduces significantly. The above two schemes are recommended for co-firing hydrogen/ammonia in the coal-fired boiler, with nitrogen oxide emissions as the evaluation index. This method and conclusion provides a theoretical basis for the engineering implementation of hydrogen/ammonia co-firing technology.

Key words: hydrogen co-firing; ammonia co-firing; NO_x

“双碳”战略目标背景下, 煤粉锅炉掺烧氢/氨技术已经成为行业内研究热点^[1-7]。杨澜等^[8]在一台 50 kW 燃烧试验炉上进行了煤粉掺氢试验研究, 结

果表明: 掺氢降碳的同时, 并不会引起 NO_x 排放增加; 高燃尽风率条件下, NO_x 排放降幅高达 30%。田舒曼等^[9]通过试验发现氨燃烧过程中 NO_x 的生成

收稿日期: 2025-05-16 网络首发日期: 2025-07-08

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFB4005704)

Supported by: National Key Research and Development Program (2023YFB4005704)

第一作者简介: 张波 (1977), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为燃烧过程反应动力学及流体动力学分析, zhangbo@tpri.com.cn。

显著高于传统碳氢燃料，合理设计氨气喷嘴和选择适当的氨气注入位置可显著降低 NO_x 生成。Wang 等人^[10]通过试验发现：煤/氨混合给料，NO_x 排放高；为氨气设置独立喷口，并通过控制氧量及分级风比例，可以使 NO_x 排放保持在较低水平。刘鑫等^[11]通过数值模拟研究了燃煤锅炉一次风掺混氢/氨对炉膛温度的影响，结果表明：掺烧氢/氨，火焰温度有所提高，可以改善低负荷燃烧的不稳定性；随着掺烧比例的增加，烟气中水分比例增高，炉膛截面平均温度逐步降低。

基于此，本文对一台煤粉切圆燃烧锅炉掺烧氢/氨后的 NO_x 排放进行研究，确定该锅炉以 NO_x 为评价指标的氢/氨掺烧方案。

1 研究对象

某电厂 600 MW 燃煤机组，采用亚临界压力一次中间再热控制循环汽包炉，单炉膛 II 型布置，一次风正压直吹式制粉系统，四角切向燃烧、固态排渣、平衡通风。锅炉设计煤种和校核煤种均为内蒙古东胜万利川煤田烟煤，煤质特性见表 1。

表 1 煤质特性参数
Tab.1 Coal quality characteristic parameters

项目	设计煤种	校核煤种
全水分 w _t (M)/%	24.81	25.13
空气干燥基水分 w _{ad} (M)/%	14.80	19.89
收到基灰分 w _{ar} (A)/%	10.39	9.12
干燥无灰基挥发分 w _{daf} (V)/%	37.22	39.68
收到基碳 w _{ar} (C)/%	52.20	50.90
收到基氢 w _{ar} (H)/%	2.47	2.70
收到基氧 w _{ar} (O)/%	8.42	10.83
收到基氮 w _{ar} (N)/%	0.98	0.50
收到基全硫 w _{ar} (S)/%	0.73	0.82
收到基低位发热量 Q _{net,ar} (MJ·kg ⁻¹)	18.852	16.160

锅炉燃烧系统经过低氮改造后，采用翼型导流浓淡+偏置周界风+偏置部分二次风（CFS）+分级风（SOFA）燃烧技术，图 1 为燃烧系统结构。

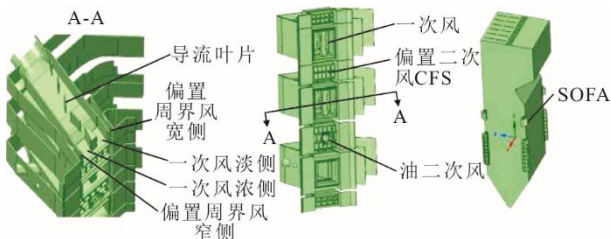


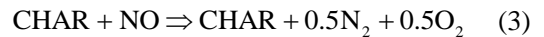
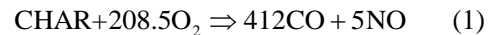
图 1 燃烧系统结构
Fig.1 Structural diagram of the combustion system

2 研究过程

2.1 反应动力学文件

将煤粉燃烧模型 hashemi、氢气反应模型 Gri3.0、氨气反应模型 stagni 3 个反应动力学计算模型合并，生成一个能够满足煤、氢、氨 3 种燃料混合燃烧反应动力学分析的计算模型；根据煤质分析、CPD 计算模型、元素及能量守恒，确定煤粉在炉内快速加热过程中的生成物成份及比例。

该动力学模型中，燃料 N 可分为：1) 挥发分中的燃料 N 以 HCN 的形式释放；2) 焦炭 CHAR 中的燃料 N 以式(1)的反应形式释放。



最终的反应动力学文件包含 113 种物质、841 个反应。其准确性通过柱塞流反应器及一维炉试验进行验证，验证过程参考文献[12]。

2.2 生成 psr 分析网络

对 600 MW 燃煤锅炉采用流体动力学（CFD）软件进行模拟，该锅炉燃烧器 a、b、c 层与 e、d、f 层分别组成 2 组燃烧器组。气流流线及停留时间模拟结果如图 2 所示。由图 2 可见：下组 a、b、c 层流线先向下充满灰斗再由旋涡中心向上流动；上组 e、d、f 层流线直接旋转向上经由旋涡外围流动。不同的流动路径，气流及固体颗粒的停留时间不同。

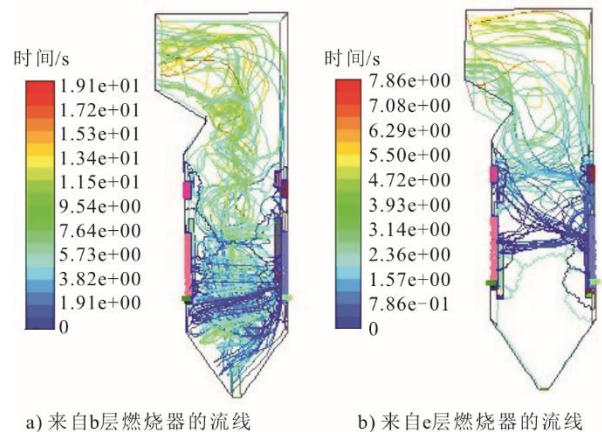


图 2 气流流线及停留时间
Fig.2 Streamlines and residence time

根据温度、停留时间、反应过程，将炉内空间划分为不同区域，获得全搅拌全混流反应器（perfectly stirred reactor, psr）分析网络，如图 3 所示。

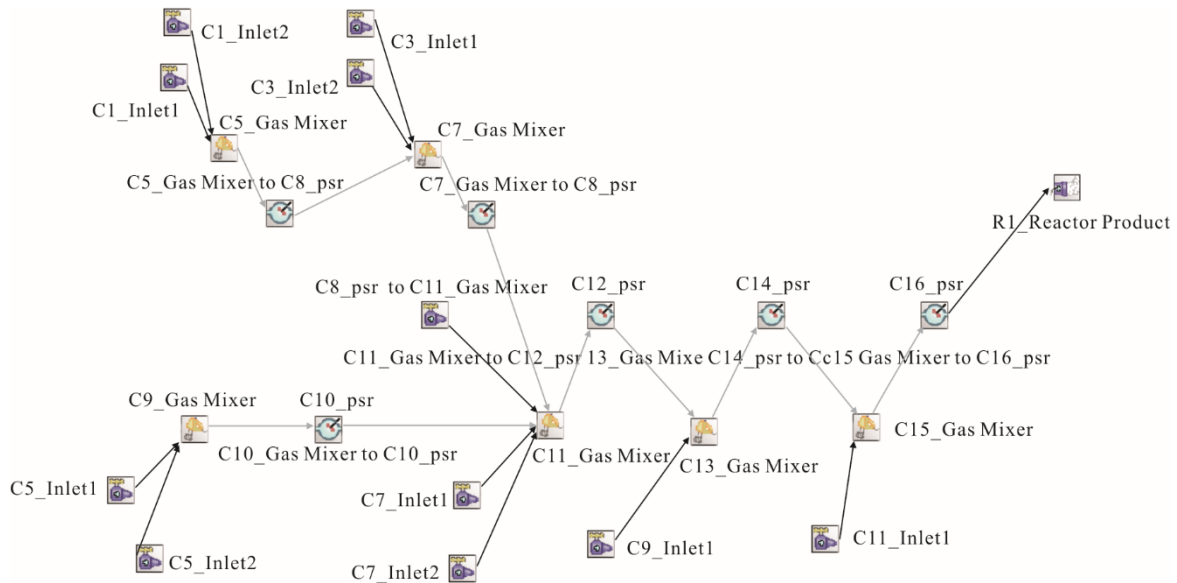


图 3 psr 分析网络

Fig.3 The psr analysis network

2.3 掺氢/氨燃烧反应动力学分析

利用上述反应机理文件及 psr 分析网络, 计算氢/氨掺烧位置分别在一次风、周界风、二次风、二次风后 (二次风与分级风之间)、二次风后+调风 5 种方案对锅炉排放 NO_x 的影响。图 4 为 4 个掺氢/氨位置示意, 其中红色为氢/氨布置位置。根据锅炉满负荷下, 各磨煤机实际负荷分配情况, 对来自各投运层煤粉及气流的反应动力学分析结果加权平均, 获得锅炉满负荷下的分析结果。

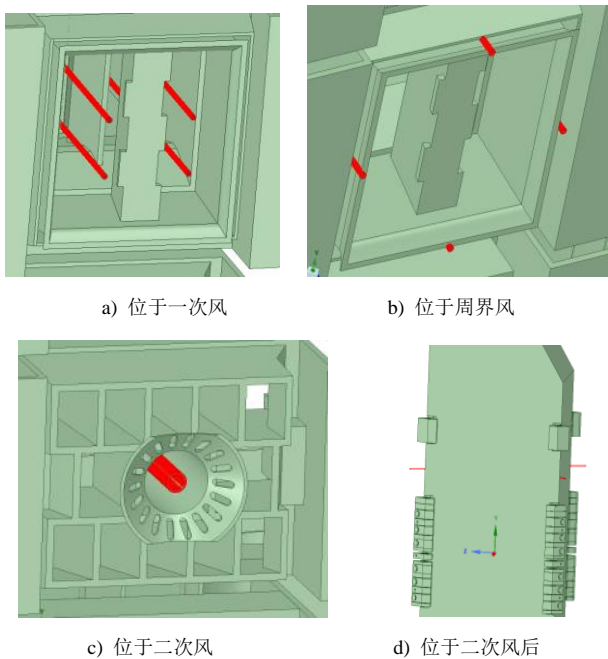


图 4 4 个掺氢/氨位置示意

Fig.4 Schematic diagram of four hydrogen/ammonia doping positions

2.3.1 掺氢燃烧反应动力学分析

图 5 为掺氢热量比分别为 0 (全煤)、5%、10%、15%、20% 工况, 各方案的 NO 排放体积分数。由图 5 可见: 掺氢位置位于一次风、二次风后 2 个方案时, 各掺氢比例下的 NO 排放量均大于全煤工况; 掺氢位置位于周界风、二次风、二次风后+调风方案, NO 排放量均小于全煤工况, 且随掺氢比例的增加, NO 排放体积分数逐渐减小。掺氢 20% 工况下, 掺氢位置位于二次风, NO 排放体积分数由全煤工况的 262 μL/L 降为 177 μL/L; 掺氢位置位于周界风, NO 排放体积分数为 167 μL/L; 掺氢位置位于二次风后+调风方案, NO 排放体积分数为 133 μL/L。3 种方案 NO 排放降幅分别为 32.4%、36.3%、49.2%, 均大于燃料替代造成的 NO 下降幅度 (约 20%)。因此合理的掺氢方案可以抑制炉内 NO 的生成, 降低 NO_x 的排放。

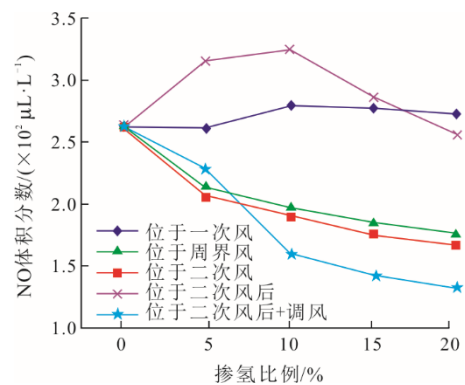


图 5 掺氢后 NO 体积分数

Fig.5 NO volume fractions after hydrogen blending

图 6 为不同掺氢位置方案下, 掺氢 20% 时炉内不同区域的 NO 体积分数。

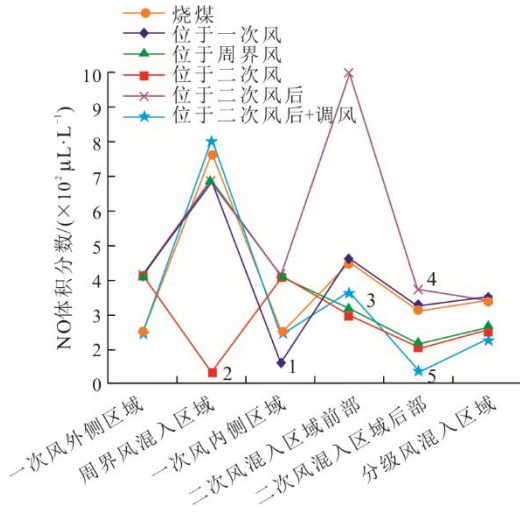


图 6 掺氢 20% 炉内不同区域 NO 体积分数
Fig.6 The NO volume fractions in different areas of the furnace with hydrogen mixing ratio of 20%

由图 6 可见: 1) 掺氢位置位于一次风方案, 锅炉设计一次风率 28%, 掺氢后, 一次风量不能满足燃料燃烧初期的助燃需求, 烟气呈还原性气氛, 烟气中 NH₃、HCN、NO 体积分数分别为 571、1017、56 μL/L (标示 1)。虽然 NO 体积分数低, 但 NH₃、HCN 体积分数高, 后续二次风混入后, 部分 NH₃ 及 HCN 转化为 NO, 使后续流程中, NO 含量始终高于纯煤工况。

2) 对于掺氢位置位于周界风的方案, 锅炉设计周界风率 8.7%, 掺氢后, 烟气中局部 H₂ 体积分数为 12.3%, NH₃、HCN、NO 体积分数分别为 0.20、0.21、23.70 μL/L (标示 2)。NO、NH₃、HCN 体积分数均极低, 后续二次风及分级风混入后, NO 体积分数始终大幅度低于纯煤工况。

3) 对于掺氢位置位于二次风的方案, 锅炉设计二次风率 42.3%, 掺氢后, 氢气先与二次风充分反应, 生成的产物气再参与焦炭的燃烧过程。烟气局部 H₂、NH₃、HCN、NO 体积分数分别为 551、0、0、234 μL/L (标示 3), 低于纯煤工况。后续分级风混入后, NO 含量始终大幅度低于纯煤工况。

4) 对于掺氢位置位于二次风后的方案, 纯煤工况下, 锅炉设计主燃烧器区域过量空气系数 0.95。将热值 20% 的燃料替换成氢气, 并在二次风后喷入炉膛, 主燃烧器区的过量空气系数变为 1.2, NO 体积分数局部高达 1 000 μL/L。喷入氢气后, 总过量

空气系数又成为 0.95, 还原性气氛下, NO 体积分数降为 295 μL/L (标示 4), 仍大于纯煤工况。后续分级风混入后, NO 得到稀释, 最终 NO 排放体积分数与纯煤工况接近。

5) 对于掺氢位置位于二次风后+调风的方案 (标示 5), 将 20% 热值的燃料替换为氢气, 并在二次风后喷入炉膛。主燃烧器区同步减少助燃风量 20%, 使主燃烧器区的过量空气系数保持在 0.95。喷入氢气后, 总过量空气系数成为 0.76, H₂、CO 体积分数降为 2.48%、5.55%, NO、NH₃、HCN 体积分数分别降为 31.5、1.41、0.03 μL/L。后续分级风混入后 (主燃烧器区减少的 20% 助燃风量并入分级风), 总过量空气系数变为 1.2, CO 及 H₂ 继续燃尽, 此时烟气温度低, NO 生成量不高。最终 NO 排放体积分数为 133 μL/L, 在各掺氢方案中 NO 排放量最低。

图 7 为各方案的未燃尽碳排放质量浓度。掺氢位置位于二次风后方案, 由于主燃烧器区燃料减少, 氧量相对增大, 未燃尽碳燃烧充分, 排放量减小; 掺氢位置位于二次风后+调风方案, 由于主燃烧器区燃料减少的同时, 助燃空气也同比例减少, 氢燃料及大比例的分级风在焦炭燃烧后期加入, 使未燃尽碳排放质量浓度增大; 其他各方案, 未燃尽碳排放质量浓度与纯煤方案相差不大。

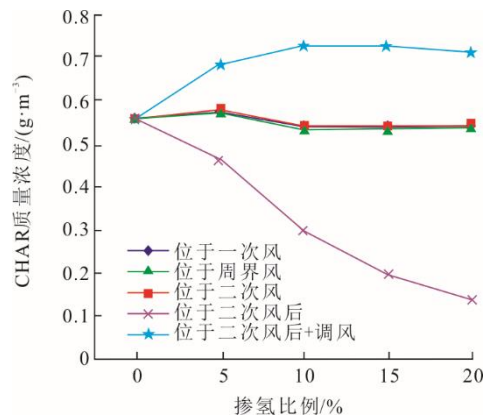


图 7 掺氢后未燃尽碳排放质量浓度
Fig.7 Emission mass concentrations of the unburned carbon after hydrogen blending

图 8 为各方案的 H₂ (未燃尽氢) 排放体积分数。掺氢位置位于二次风后、二次风后+调风方案, 由于掺氢位置靠近炉膛出口、氢气燃烧区温度及反应停留时间均不利于其燃尽, 因此排烟中氢气体积分数高于其他方案。由于氢气的反应活性高, 在后续的烟气流动过程中, 未燃尽的氢气会在温度大于

700 °C 的区域内继续反应，因此实际设备中氢气的燃尽率不是制约因素。

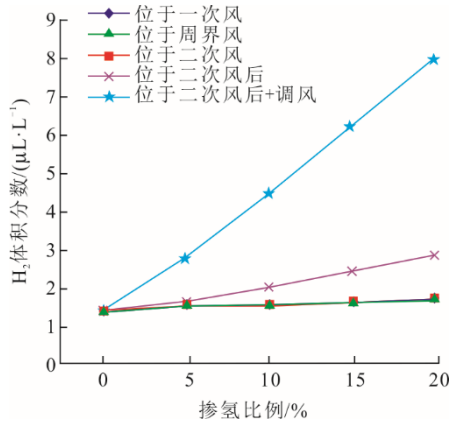


图 8 不同掺烧位置方案 H₂ 排放体积分数
Fig.8 H₂ emission volume fractions after hydrogen blending in different locations

综上所述：氢气掺烧位置位于周界风、二次风、二次风后+调风 3 个方案的 NO 排放体积分数较低。

相对于周界风的狭缝结构，油二次风喷口中心的油路结构更适合氢气喷嘴的布置。因此推荐将氢气掺烧位置布置在油二次风处，根据掺氢比例，仅改造油二次风喷口结构，对原锅炉设备改动最小。掺氢 20% 时，NO 排的相较全煤工况下降 32.4%；掺氢前后，未燃尽碳变化不大。

锅炉目前 SOFA 风喷口速度已经很高，实行二次风后+调风方案需要继续增加分级风比例，需要进行 SOFA 风改造，增大喷口面积。改造工程量较大，但掺氢降氮效果最好，掺氢 20%，NO 排放降幅达 49.20%，但未燃尽碳会有小幅增加。

2.3.2 掺氨燃烧反应动力学分析

图 9 为掺氨热量比分别为 0 (全煤)、5%、10%、15%、20% 工况，各方案的 NO 排放体积分数。由图 9 可见，掺氨位置位于二次风后、二次风后+调风 2 个方案，各掺氨比例下的 NO 排放量与全煤工况排放水平相当。二次风后+调风方案相比于二次风后方案，NO 排放更低。掺氨位置位于一次风、周界风、二次风的方案，NO 排放体积分数均远大于全煤工况，且随掺氨比例的增加，NO 排放逐渐增大；掺氨 20% 工况下，3 个方案 NO 排放体积分数均大于 1 000 μL/L。

图 10 为不同掺氨位置方案下，掺氨 20% 炉内不同区域 NO 体积分数。由图 10 可见，1) 掺氨位置位于一次风方案，锅炉设计一次风率 28%，掺氨

后，一次风量不能满足燃料燃烧初期助燃需求，烟气呈还原性气氛，烟气中 NH₃ 体积分数 3.02%，HCN 体积分数 4 955 μL/L、NO 体积分数 194 μL/L (标示 a)。虽然 NO 体积分数不高，但 NH₃、HCN 体积分数极高，后续二次风混入后，部分 NH₃ 及 HCN 转化为 NO，使 NO 体积分数最高达到 2 053 μL/L。随着分级风的加入及炉内停留时间的增加，NO 体积分数逐渐降低，最终排放体积分数为 1 420 μL/L。

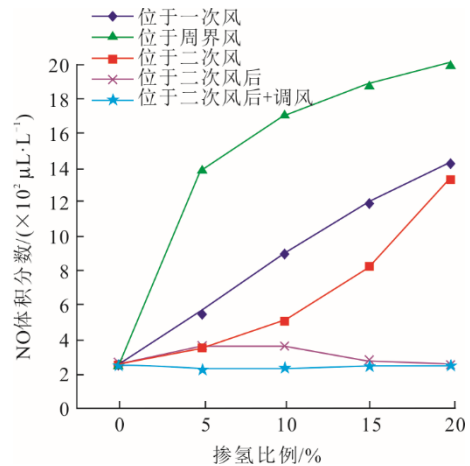


图 9 掺氨后 NO 排放体积分数
Fig.9 The NO emission volume fractions after ammonia blending

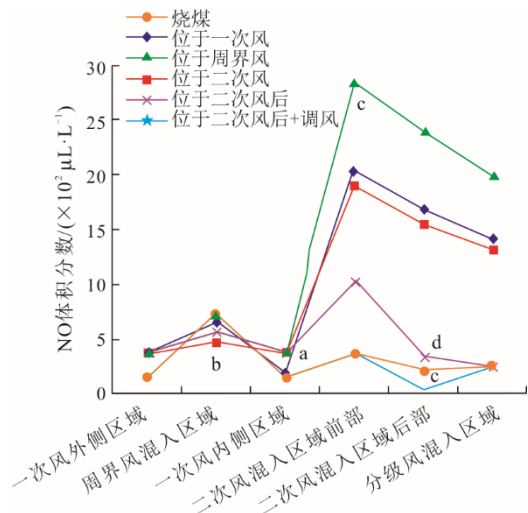


图 10 掺氨 20% 炉内不同区域 NO 体积分数
Fig.10 The NO volume fractions in different areas of the furnace with ammonia mixing ratio of 20%

2) 掺氨位置位于周界风的方案，锅炉设计周界风率 8.7%，掺氨后，烟气局部 H₂ 体积分数 9.26%，NH₃ 体积分数 4.2%、HCN 体积分数 124 μL/L、NO 体积分数 488 μL/L (标示 b)。二次风混入后，部分

NH₃ 及 HCN 转化为 NO, 使 NO 体积分数升至 1 910 μL/L。随着分级风的加入及炉内停留时间的增加, NO 体积分数逐渐降低, 最终排放 NO 体积分数为 1 319 μL/L。

3) 掺氨位置位于二次风的方案, 锅炉设计二次风率 42.3%, 掺氨后, 氨气先与二次风在富氧条件下充分反应, 生成的产物气再参与焦炭的燃烧过程。烟气局部 NO 体积分数高达 2 841 μL/L (标示 c)、NH₃ 体积分数 4.44 μL/L, HCN 体积分数为 0, 后续随着烟气炉内停留时间的延长及分级风混入, NO 体积分数降至 1 995 μL/L 排出炉膛。

4) 掺氨位置位于二次风后的方案, 纯煤工况下, 锅炉设计主燃烧器区域, 过量空气系数 0.95。将 20% 热值的燃料替换为氨气, 并在二次风后喷入炉膛, 主燃烧器区的过量空气系数变为 1.2, 局部 NO 体积分数达到 1 036 μL/L。喷入氨气后, 总过量空气系数又成为 0.95, 还原性气氛下, NO 体积分数降为 347 μL/L (标示 d), 仍大于纯煤工况。后续分级风混入后, NO 体积分数继续降低, 最终排放 NO 体积分数与纯煤工况接近。

5) 掺氨位置位于二次风后+调风的方案, 将 20% 热值的燃料替换成氨气, 并在二次风后喷入炉膛。主燃烧器区同步减少助燃风量 20%。使主燃烧器区的过量空气系数保持在 0.95。喷入氨气后, 总过量空气系数约为 0.76, NO 体积分数降低为 39.5 μL/L (标示 e)、CO 体积分数 2.75%、NH₃ 体积分数 3.39%、HCN 体积分数 254 μL/L、后续分级风混入后 (主燃烧器区减少的 20% 助燃风量并入分级风), 总过量空气系数变为 1.2, NH₃ 及 CO 继续燃尽, 部分 NH₃ 及 HCN 向 NO 转化。最终 NO 排放体积分数与纯煤工况相当。

图 11 为不同掺氨位置方案下未燃尽碳排放质量浓度。由图 11 可见: 掺氨位置位于二次风后方案, 由于主燃烧器区燃料减少, 氧量相对增大, 焦炭燃烧充分, 排放质量浓度非常小; 其他各方案, 未燃尽碳排放质量浓度均略大于纯煤方案。

图 12 为不同掺氨位置方案下 NH₃ (未燃尽氨) 排放体积分数。由图 12 可见, 对于掺氨位置位于二次风后+调风方案, 由于掺氨位置靠近炉膛出口、氨气燃烧区温度、反应停留时间均不利于其燃尽, 因此排烟中有未燃尽氨, 且随掺氨比例的增大而增大。其他掺氨方案, 氨排放体积分数均较低。

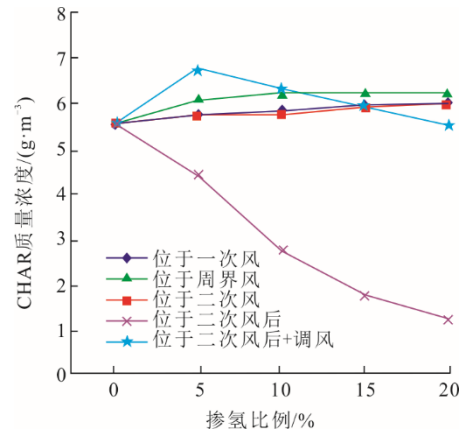


图 11 不同位置掺氨后未燃尽碳排放质量浓度
Fig.11 The emission mass concentrations of unburned carbon after ammonia blending in different locations

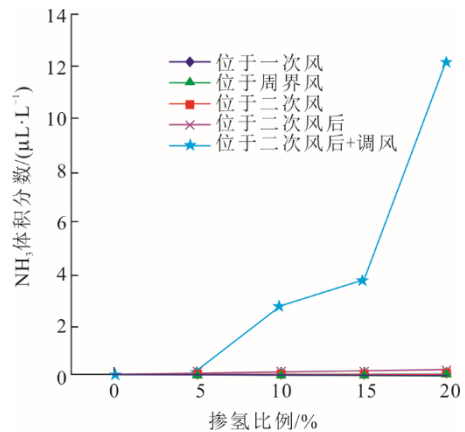


图 12 掺氨后 NH₃ 排放体积分数
Fig.12 The NH₃ emission volume fractions after ammonia blending

综上所述: 氨气掺烧位置位于二次风后、二次风后+调风 2 个方案的 NO 排放量略高于纯煤工况。其中掺氨位置位于二次风后方案, 未燃尽碳排放质量浓度显著减小; 掺氨位置位于二次风后+调风方案, 相较于位于二次风后方案, NO 排放体积分数没有任何优势, 且排烟中有未燃尽氨。因此, 推荐将氨气掺烧位置布置在二次风后的方案。

3 结 论

1) 适当的掺氨位置方案可以降低锅炉 NO 排放。从减少改造成本的角度考虑, 推荐将氨气掺烧位置布置在二次风处的方案。仅改造油二次风喷口结构, 对原锅炉设备改动最小。掺氨 20%, NO 排放降幅 32.4%; 从最大幅度的降低 NO 排放量的角度考虑, 推荐将氨气掺烧位置布置在二次风后+调风方案, 完成 SOFA 风改造后, 掺氨 20%, NO 排放降幅 49.2%, 未燃尽碳略有增加。

2) 适当的掺氨方案可以使锅炉 NO 排放保持与纯煤工况接近。推荐掺氨掺烧位置布置于二次风后方案, NO 排放略高于纯煤工况, 未燃尽碳低于纯煤工况, 排烟中未燃尽氨含量低。

3) 上述结论仅适用于本文研究的锅炉, 对于其它锅炉, 由于煤质变化及燃烧设备的具体尺寸不同, 燃料的反应动力学特性及设备的流体动力学过程均与本文研究对象有所不同, 掺烧方案需另做分析。

[参考文献]

- [1] WANG X, FAN W D, CHEN J, et al. Experimental study and kinetic analysis of the impact of ammonia co-firing ratio on products formation characteristics in ammonia/coal co-firing process[J]. Fuel, 2022, 329: 125496.
- [2] ABDALLA A M, HOSSAIN S, NISFINDY O B, et al. Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: a review[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 165: 602-627.
- [3] CHAI W S, BAO Y, JIN P, et al. A review on ammonia, ammonia-hydrogen and ammonia-methane fuels[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 147(39): 111254.
- [4] KOBAYASHI H, HAYAKAWA A, SOMARATHNE K D, et al. Science and technology of ammonia combustion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2018, 37(1): 109-133.
- [5] FANG J, XIONG C H, FENG M Q, et al. Utilization of carbon-based energy as raw material instead of fuel with low CO₂ emissions: energy analyses and process integration of chemical looping ammonia generation[J]. Applied Energy, 2022, 312: 118809.
- [6] XIA Y, HADI K, HASHIMOTO G, et al. Effect of ammonia/oxygen/nitrogen equivalence ratio on spherical turbulent flame propagation of pulverized coal/ammonia co-combustion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38: 4043-4052.
- [7] XU Y S, WANG H K, LIU X W, et al. Mitigating CO₂ emission in pulverized coal-fired power plant via co-firing ammonia: a simulation study of flue gas streams and energy efficiency[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 256: 115328.
- [8] 杨澜, 王勇, 汪鑫, 等. 煤粉掺氢燃烧技术试验研究[J]. 工业安全与环保, 2025, 51(1): 104-108.
YANG Lan, WANG Yong, WANG Xin, et al. Study on combustion technology of pulverized coal mixed with hydrogen[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2025, 51(1): 104-108.
- [9] 田舒嫚, 李宇航, 张普选, 等. 燃煤电站锅炉掺氨 NO_x 生成特性研究进展[J]. 热力发电, 2025, 54(4): 1-12.
TIAN Shuman, LI Yuhang, ZHANG Puxuan, et al. Research progress on NO_x formation characteristics of coal-fired power plant boilers with ammonia injection[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(4): 1-12.
- [10] WANG Z C, JIA Z X, ZHAO C, et al. Effect of ammonia on the characteristics of coal combustion[J]. Journal of the Energy Institute, 2023, 109: 101275.
- [11] 刘鑫, 任建兴, 李芳芹, 等. 燃煤锅炉一次风掺混氢氧对炉膛温度影响的数值模拟[J]. 热能动力工程, 2023, 38(1): 156-163.
LIU Xin, REN Jianxing, LI Fangqin, et al. Numerical simulation of effect of primary air mixed with hydrogen and oxygen on furnace temperature of coal-fired boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(1): 156-163.
- [12] 张波, 张国军, 张向宇, 等. 煤粉燃烧高温还原区喷氨脱硝技术计算模型开发与一维炉实验验证[J]. 热力发电, 2021, 50(11): 68-74.
ZHANG Bo, ZHANG Guojun, ZHANG Xiangyu, et al. Calculation model development and one-dimensional furnace experimental verification of ammonia injection denitration technology in high temperature reduction zone of pulverized coal combustion[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(11): 68-74.

(责任编辑 杜亚勤)