

DOI 10.11715/rskxjs.R201503034

多点喷射气体再燃的氮氧化物排放特性

陈宝明, 张忠孝, 毕德贵, 李明强, 田莉勤

(上海理工大学能源与动力学院, 200093)

摘要: 为检验某 220 t/h 煤粉炉采用多点喷射气体再燃改造技术的效果进行实验, 研究停留时间、炉膛氧量、再燃比例等因素对 NO_x 排放特性的影响, 并结合化学动力学计算分析天然气再燃机理, 与已有成果进行对比分析. 结果表明, 最佳停留时间为 0.67 s, 过长的停留时间对 NO_x 还原效果影响不大; NO_x 排放浓度都随着氧量的增加而增大, 随着锅炉负荷降低而减小, 炉膛出口最佳氧量为 5%; 随着再燃量的增加 NO_x 浓度下降, 最佳再燃比例为 15%, 再燃喷嘴采用多点喷射的脱硝效率比四点喷射时提高 11%.

关键词: 多点喷射; 再燃; 影响因素; NO_x 浓度

中图分类号: TK16

文献标志码: A

文章编号: 1006-8740(2015)03-0254-06

NO_x Emission Characteristics of Gas Reburning with Multi-Point Injection

Chen Baoming, Zhang Zhongxiao, Bi Degui, Li Mingqiang, Tian Liqin

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Focusing on a 220 t/h PC boiler that was renovated with gas reburning technology, the main target of this paper was to observe the influence of several operation factors, such as residence time, oxygen and reburning fuel ratio on NO_x reduction. The research results were compared with the existing conclusions according to the chemical kinetic calculation of gas reburning. The results indicated that: the best residence time was 0.67 s, and too long a residence time had little effect on NO_x reduction; NO_x emission concentration increased with the increase of oxygen content and decreased with the decreasing of boiler load, and the optimal oxygen content was 5%; NO_x concentration decreased with the increase of reburning fuel, and the best reburning amount was 15%; the denitration efficiency using multi-point injection reburning nozzle was increased by 11% compared with that using four-point injection.

Keywords: multi-point injection; reburning; influence factors; NO_x concentration

氮氧化物减排是当前国家环保工作的重点之一, 2011 年颁布的新标准要求新建机组从 2012 年 1 月 1 日开始、现有机组从 2014 年 7 月 1 日开始执行 NO_x 排放限值为 100 mg/m^3 ^[1]. 再燃技术是最有效的低 NO_x 燃烧技术之一, 以常规煤粉、超细煤粉和各种气体作为再燃燃料的再燃技术得到了广泛研究, 一些研究成果已逐步在国内外燃煤电站锅炉上得到了成功应用^[2-4]. 气体再燃还原 NO_x 的影响因素主要有再燃量、再燃区过量空气系数、再燃区停留时间、射流速度等^[5-9], 采用一氧化氮子模型耦合三维煤粉燃烧数

值模拟计算并结合实验进行研究, 结果表明, 天然气再燃燃料比例 10% ~ 15%, 再燃区停留时间 0.7 ~ 0.9 s 时 NO_x 排放量降低 50% 以上^[10], 而在一维沉降炉上做天然气再燃实验^[11]发现, 再燃区最佳停留时间为 0.6 s, 再燃量为 10% 时就能取得 50% 以上的脱氮效果, NO_x 排放浓度可在 200 mg/m^3 以下, 两者实验方法的差异及实验误差导致结果有所不同. 国外学者 Nazeer 等^[12]也通过天然气再燃实验表明, 增加再燃区的停留时间对降低 NO_x 是有利的, 但是当停留时间超过 700 ms 时就变得不再重要. 除以上影响

收稿日期: 2014-12-15.

作者简介: 陈宝明 (1978—), 男, 硕士研究生.

通讯作者: 张忠孝, 男, 博士, 教授, zhzhx222@163.com.

因素外, Zarnescu 等^[13]还提出, NO 还原率随着再燃气流的初动量提高而提高, NO 的还原主要发生在再燃燃料射流子区域内. 以上研究多采用加热反应炉进行实验以及结合数值模拟计算的方法, 对其反应机理分析较欠缺, 且反应过程与实际煤粉燃烧状态下的再燃过程仍有很大不同, 对实际锅炉运行的指导仍有局限性.

本文在某 220 t/h 四角切圆煤粉炉上采用燃料为天然气的再燃技术进行改造, 并在传统四角喷射再燃技术基础上增加 4 个侧墙喷口, 形成再燃喷口多点喷射, 针对改造后的锅炉在实际运行中再燃区停留时间、炉膛氧量及再燃燃料量等因素对 NO_x 还原效果的影响进行实验, 并借助商业化学动力学软件对天然气还原 NO 反应过程进行计算分析, 通过基元反应深入探讨天然气降低 NO_x 的机理, 为再燃技术的发展和运行、调试提供可靠的参考

1 实验系统与方法

某 220 t/h 煤粉炉采用多点喷射再燃技术改造前后的燃烧器布置如图 1 所示, 在对一次风、二次风喷口进行改造的基础上, 新增加再燃喷口和燃尽风喷口 (OFA), 主燃区长度 2 700 mm, 再燃喷口距离主燃区 450 mm, 距离 OFA 喷口为 3 600 mm. 再燃喷口布置示意图如图 2 所示, 炉膛四角各 1 只, 四侧炉墙中心处各 1 只, 形成多点喷射, 强化再燃气体与上升烟气的混合. 再燃燃料比例设计为 20% (再燃燃料发热量占入炉燃料总发热量的比例), 四角处和侧墙处单个喷口额定流量分别为 814 m³/h 和 271 m³/h, 流速分别为 100 m/s 和 80 m/s, 压力均为 80 kPa, 常温. 入炉煤为烟煤, 再燃燃料为矿井伴生气 (天然气), 各燃料特性如表 1 和表 2 所示.

实验采用单因素轮换法^[14], 测点布置在下级空气预热器出口, 采用等截面网格法, 烟气成分测试采

用德图 340 烟气分析仪, 气泵流量为 0.6 L/min, 各主要成分测试精度: O₂ 为 0.2%, CO 为 5% 测量值, NO 为 5% 测量值. 基本工况为满负荷、220 t/h 煤粉炉、未投再燃技术工况.

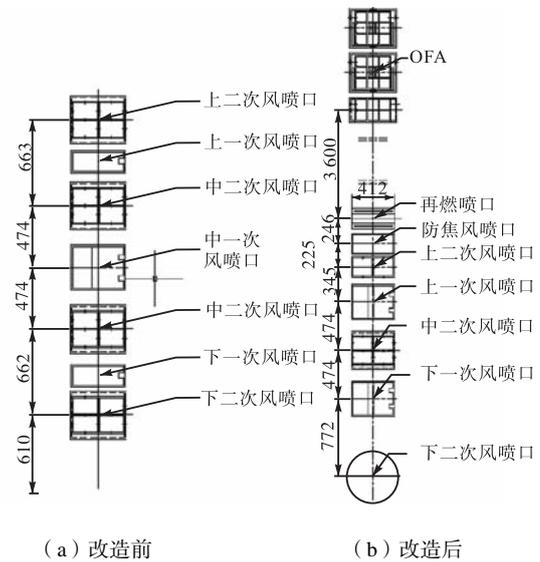


图 1 某电厂 220 t/h 锅炉改造前后燃烧器布置示意 (单位: mm)

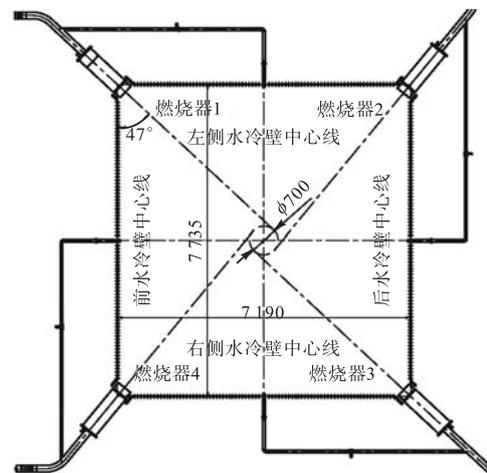


图 2 某电厂 220 t/h 锅炉改造后再燃喷口布置示意 (单位: mm)

表 1 某电厂 220 t/h 锅炉入炉煤煤质分析

工业分析/%				元素分析/%					$Q_{net, ar} / (MJ \cdot kg^{-1})$
M_t	V_{daf}	A_{ar}	$F_{C, ar}$	$w_{C, ar}$	$w_{H, ar}$	$w_{N, ar}$	$w_{St, ar}$	$w_{O, ar}$	
7.3	37.37	33.86	36.85	48.96	3.23	0.65	0.32	5.68	19.2

表 2 某电厂 220 t/h 锅炉再燃气体成分分析

$\varphi(CH_4)$	$\varphi(C_2H_6)$	$\varphi(C_3H_8)$	$\varphi(N_2)$	$\varphi(CO_2)$	$Q_{net, ar} / (MJ \cdot m^{-3})$
63.67	1.24	0.04	4.18	30.87	23.609

2 结果及分析

2.1 再燃区停留时间对 NO_x 排放影响及机理分析

再燃区停留时间是 NO_x 的生成与还原密切相关的决定性因素,直接影响 NO_x 排放浓度. 实验工况为 220 t/h 煤粉时再燃工况,再燃燃料比例为 20%,烟气中含氧量(体积分数)为 3.5%,通过调节各喷口摆角控制停留时间,CO 排放为 20×10^{-6} . 图 3 中的实验结果表明,最佳停留时间为 0.67 s, NO_x 排放为 142 mg/m^3 ,而 Nazeer 等^[12]的实验研究结果也表明,再燃区停留时间超过 0.7 s 对 NO_x 排放影响就不再重要,与本实验结果基本一致.

基于气体再燃反应是均相反应过程,在实验测试的基础上,结合 Miller 和 Bowmen 的全面基元反应模型,从机理方面对 CH_4 气体再燃燃烧过程进行了数值计算. 计算结果表明,0.4 s 以后 NO 还原效率达到 65% 以上,0.4 s 为最佳停留时间. 通过 Miller 敏感性分析法对 CH_4 还原 NO 反应过程进行分析,如图 4 计算结果表明,与 NO 发生还原反应主要是通过 CH_4 热分解生成中间产物 $\text{CH}_i (i = 1, 2, 3)$ 和 NH 、 NH_2 、 NCO 等反应产生的中间含氮组分, NO 消耗最大的途径之一是 CH_3 与 NO 的反应(R164),敏感性系数为 1.04,而 CH_3 是 CH_4 发生分解反应的主要产物, NH 、 NH_2 还原 NO 反应方程(R119, R120)的敏感性系数分别为 0.20、0.22,还原效果也相对明显. HCN 和 HNOC 等中间产物本身不直接与 NO 发生还原反应,而是通过活化基置换反应生成 NH 和 NH_2 (R151, R169),这些含氮组分间相互转化的关系非常复杂,在一定条件下发生逆转反应. 在反应初始阶段,反应方程 R164 敏感性系数剧增,主要是烃根 CH_3 还原烟气中的 NO ,使 NO_x 降低明显;0.4 s 以后,随着反应的进行, CH_3 的消耗导致反应 R164 敏感性系数降低,还原反应减弱,而产生的 HCN 、 H_2CN 等中间产物浓度的增加,反应式 R119 和 R120 的反应逐渐增强,同时反应式 R151 和 R169 逆向反应也逐渐增强,整体还原效果降低,所以计算值最佳停留时间为 0.4 s,与实验值有一定的差异,但其趋势与实验结果匹配较好,两者之间产生偏差的主要原因是再燃还原反应不仅受化学反应控制,也受气流混合过程影响,而计算是在理想混合状态的前提下进行的,该机理也解释了天然气还原 NO_x 效果显著的原因.

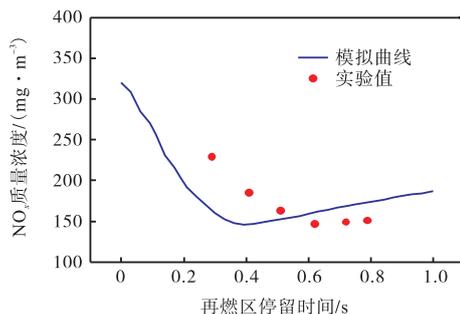


图 3 停留时间对 NO_x 排放的影响

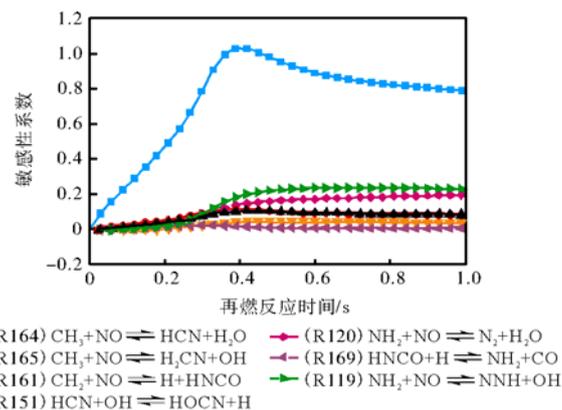
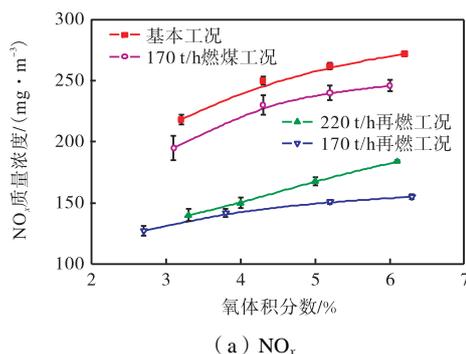


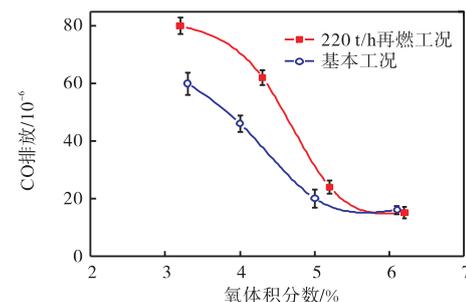
图 4 再燃过程重要基元反应的敏感性分析

2.2 炉膛出口烟气含氧量对 NO_x 排放的影响

炉膛出口烟气含氧量与炉膛内的空气量有关,炉膛出口烟气含氧量的增加说明燃烧区域氧量增加,而燃烧区的氧量变化对 NO_x 产生、 NO_x 还原效果及燃尽程度有重大影响^[15],针对炉膛出口烟气含氧量因素的影响进行了 4 种工况的实验,实验结果如图 5 所示.



(a) NO_x

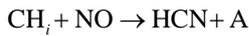


(b) CO

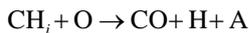
图 5 炉膛出口烟气含氧量对 CO 和 NO_x 排放的影响

从图 5(a)可以看出,在 4 种工况下,NO_x 排放都随着炉膛出口烟气含氧量的增加而增大,这是因为在各级配风都不变的情况下,炉膛出口烟气含氧量的增大大会导致主燃区和再燃区氧量增大。

均相再燃反应机理指出,反应生成物 HCN 含量越高,NO_x 的还原率就越高,在富燃料情况下,煤粉挥发分及再燃燃料中烃根发生如下反应:



而在贫燃料情况下则发生如下反应:



氧量过大导致 HCN 生成浓度降低,从而降低 NO_x 还原效果. 樊俊杰等^[16]通过 CHEMKIN 模块软件对再燃燃烧碳氢组分转化机理的计算表明,再燃燃烧中对 NO 有还原及促进作用的是 CH_i 反应产生的 HCN,在 O、O₂ 等氧化剂存在的条件下,这些碳氢基也会被直接氧化成 CO、CO₂ 等产物,在一定程度上减弱碳氢基对 NO 的还原效果,张忠孝等^[11]通过实验证明再燃区最佳空气过量系数为 0.8~0.9,还原性气氛更利于 NO_x 还原,与本实验结论相符. 再燃工况下 NO_x 排放明显低于纯煤粉工况的值,究其原因是在再燃燃料中烃根远远多于煤热解产生的烃根,而正是烃根反应产生的 HCN、NH₃ 等含氮组分对 NO 还原具有重要作用^[17],应用 FG-DVC 模型模拟计算发现,只有 CH₃、N₂O、NH_i、HCN 和 H₂CN 才可以将 NO 还原成 N₂^[18],基本工况下 NO_x 平均质量浓度为 268 mg/m³,再燃 220 t/h 工况下 NO_x 平均质量浓度为 146 mg/m³,NO_x 排放降低了 45.5%,天然气再燃还原 NO_x 效果显著. 4 种工况下 NO_x 排放质量浓度随着锅炉负荷降低而减小,这是因为低负荷工况下炉膛温度较低,热力型 NO_x 减少. 但不是炉膛出口烟气含氧量越低越好,从图 5(b)看出,在满负荷工况下,在氧量小于 4%时,各工况 CO 排放体积分数较高,最高排放达到 80 × 10⁻⁶,烟气中含有的未完全燃烧成分影响锅炉效率. 采用天然气再燃后比无再燃工况下 CO 含量上升 25%左右,究其原因,为投用再燃技术时再燃区处于缺氧气氛,较无再燃工况时缩短了煤粉的燃烧时间,且燃尽区又靠近炉膛出口,少量 CO 未来得及与氧气充分混合而造成未完全燃烧. 随着氧量增加,CO 排放浓度不断下降,所以在调试过程中不能一味地追求 NO_x 低排放. 从图 5 看出,各数据测试标准偏差基本都在 5 mg/m³ 以下。

2.3 再燃量对 NO_x 排放的影响

再燃量对 NO_x 排放的影响通过改变再燃阀门开度来调控,再燃燃料比例设置为 5%、10%、15%和

20%,分别测试了再燃燃料四角喷射和八点喷射两种情况下的 NO_x 排放,同时比较了不同喷射方式造成的炉内气体流动对 NO_x 还原效果的影响,实验结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出,两种工况下 NO_x 质量浓度随着再燃燃料比例的增加而下降,再燃燃料比例小于 5%时,NO_x 排放质量浓度下降不明显. 这是因为喷口平行射流特性决定了再燃量小必然造成气流速度低,刚性小,再燃气流沿再燃喷口轴线方向迅速衰减,无法到达炉膛中心与上旋烟气充分混合,不利于 NO_x 还原. 再燃燃料比例从 5%增加到 10%时,NO_x 质量浓度明显降低,再燃气流刚性增强,与炉膛中心旋转烟气充分混合,NO_x 还原效果大大提升. 这表明湍流射流混合过程对 NO_x 还原化学反应有着极为重要的作用,王伟平等^[19]利用冷态实验和数值模拟研究再燃气流的速度切圆时也证明了这一点. 运行时,再燃比例大于 15%时,NO_x 质量浓度变化不明显,采用再燃燃料比例 15%为最佳,这与苏胜等^[20]在实验室单角炉上做的实验结果一致,在实验室一维炉上的实验结果^[21]如图 7 所示,通过与现场运行测试结果比较发现,当再燃比例小于 5%时,NO_x 质量浓度下降明显,再燃比例大于 15%时,NO_x 质量浓度仍有持续下降,与现场运行有较大差异,表明燃烧流场对再燃还原 NO_x 的效果有较大影响,反应炉不能很好地模拟锅炉内实际燃烧流场,利用此方法研究的结果对工程应用的指导有一定局限性。

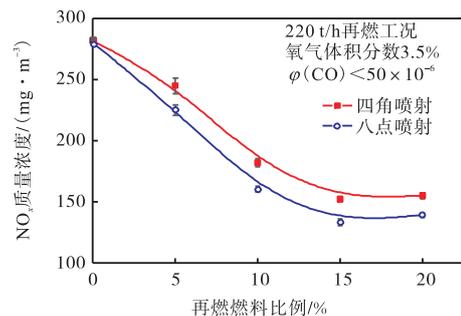


图 6 不同再燃量对 NO_x 排放的影响

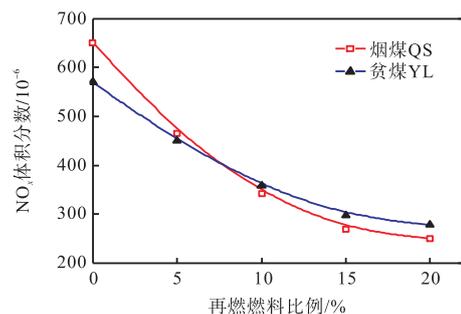


图 7 一维炉不同再燃燃料比例下 NO_x 的排放^[21]

从图 6 还可以看出,采用八点喷射再燃工况的 NO_x 排放质量浓度低于采用四角喷射时的值,当再燃比例为 10% ~ 15% 时比较明显. 究其原因,在再燃气流速度足够的条件下,四角喷射再燃燃料气流速度为 100 m/s,出口气流刚性较强,靠近炉膛中心处气流衰减,并与主旋流上升烟气混合,而靠近再燃喷口处的四侧墙水冷壁区域内无法形成旋流,不能覆盖该区域上升烟气;而增加四侧墙再燃喷口后,速度为 80 m/s,沿喷口轴线速度方向衰减较快,并受到四角刚性较强气流的影响,在靠近水冷壁侧形成旋流,与上升烟气充分混合,弥补了仅有四角喷射点造成的 NO_x 还原盲区,从而提高炉内整体 NO_x 还原效率.

再燃喷口采用八点喷射方式时, NO_x 排放浓度为 137 mg/m^3 ,采用四角喷射方式时 NO_x 排放浓度为 154 mg/m^3 , NO_x 还原率提高了 11%,相对于同组测试实验,基本工况排放为 280 mg/m^3 ,多点喷射再燃降低氮氧化物排放为 51.1%;与 350 MW 机组上采用四角喷射方式再燃热态实验值 157 mg/m^3 [22] 进行比较, NO_x 排放降低了 12.7%,说明再燃喷口采用多点喷射布置方式具有一定的优越性.

3 结 论

(1) NO_x 浓度随着再燃区停留时间增加而降低,再燃区最佳停留时间为 0.67 s,停留时间超过 0.7 s 后, NO_x 浓度下降不明显,过长的停留时间对再燃还原效果影响不大.

(2) NO_x 排放浓度都随着炉膛出口烟气含氧量的增加而增大,但氧量过低会造成燃料的不完全燃烧,调试需兼顾锅炉效率,最佳氧量为 5%;再燃工况下, NO_x 排放质量浓度明显低于纯煤粉工况时的值,且 NO_x 排放浓度随着锅炉负荷降低而减小.

(3) 随着再燃量的增加 NO_x 浓度下降,再燃量在 5% ~ 10% 时, NO_x 浓度下降最显著,当再燃量大于 15% 以后, NO_x 浓度基本保持不变,最佳再燃量保持在 15%,再燃喷口采用多点喷射方式时 NO_x 还原率比采用四角喷射方式时提高了 11%.

参考文献:

- [1] 中国环保部. GB 13223—2011 火电厂大气污染物排放标准[S]. 北京: 中国科学环境出版社, 2012.
The Ministry of Environment, China. GB13223—2011 Emission Standard of Air Pollutants for Thermal Power Plants[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2012 (in Chinese).
- [2] Su Sheng, Xiang Jun, Sun Lushi, et al. Application of gaseous fuel reburning for controlling nitric oxide emissions in boilers[J]. *Fuel Processing Technology*, 2009, 90(3): 396-402.
- [3] Alessandro F, Diaz Ana R. Future challenges for clean coal technologies: Joining efficiency increase and pollutant emission control [J]. *Energy*, 2009, 34(3): 348-354.
- [4] 苏 胜, 宁 星, 李亮国, 等. 再燃条件下生物燃料及其焦还原 NO 特性研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(3): 388-393.
Su Sheng, Ning Xing, Li Lianguo, et al. Study on characters of NO reduction by biofuels and biochars under reburning conditions. [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2013, 34(3): 388-393 (in Chinese).
- [5] 朱 明, 张忠孝, 周 托. 气体再燃低 NO_x 燃烧器喷口射流特性[J]. 燃烧科学与技术, 2008, 14(3): 281-287.
Zhu Ming, Zhang Zhongxiao, Zhou Tuo. Flow characteristics in the nozzle of a gas re-burning and low- NO_x burner[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2008, 14(3): 281-287 (in Chinese).
- [6] 王亚飞, 罗永浩, 陆 方, 等. 天然气高级再燃特性实验研究[J]. 锅炉技术, 2011, 42(1): 64-68.
Wang Yafei, Luo Yonghao, Lu Fang, et al. Experimental study on characteristics of advanced NG reburning. [J]. *Boiler Technology*, 2011, 42(1): 64-68 (in Chinese).
- [7] 苏 胜, 何金亮, 向 军, 等. 生物燃料再燃脱硝特性实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(8): 38-44.
Su Sheng, He Jinliang, Xiang Jun, et al. Experimental study on characteristics of nitrogen oxides reduction by biofuel reburning[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(8): 38-44 (in Chinese).
- [8] 苏 胜, 何金亮. 生物质再燃过程中气相成分分布规律[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(6): 1061-1064.
Su Sheng, He Jinliang. Distribution rule of gaseous compositions during biomass reburning process [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, 32(6): 1061-1064 (in Chinese).
- [9] 郝江涛, 卢 平, 于 伟, 等. 生物质再燃/高级再燃脱硝的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(3): 593-597.
Hao Jiangtao, Lu Ping, Yu Wei, et al. Experimental

- studies on NO reduction by reburning/advanced reburning with biomass[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014, 35(3): 593-597(in Chinese).
- [10] 苏胜, 孙路石, 向军. 气体燃料的再燃[J]. 燃烧科学与技术, 2009, 15(5): 417-422.
Su Sheng, Sun Lushi, Xiang Jun. Gaseous fuel reburning [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2009, 15(5): 417-422 (in Chinese).
- [11] 张忠孝, 姚向东, 乌晓江, 等. 气体再燃低 NO_x 排放实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 99-102.
Zhang Zhongxiao, Yao Xiangdong, Wu Xiaojiang, et al. Experimental study on low NO_x emission using gas reburning[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(9): 99-102(in Chinese).
- [12] Nazeer W A, Jackson R E, Peart J A. Detailed measurements in a pulverized coal flame with natural-gas reburning[J]. *Fuel*, 1999, 78(6): 689-699.
- [13] Zarnescu Vlad. The effect of mixing model and mixing characteristics on NO_x reduction during reburning[J]. *Energy & Fuels*, 2001, 15(2): 363-371.
- [14] 周新刚, 路云. 660 MW 超超临界机组锅炉燃烧调整试验研究[J]. 电站系统工程, 2012, 28(5): 41-43.
Zhou Xingang, Lu Yun. Experimental study on optimal combustion control for 660 MW ultra supercritical boiler[J]. *Power System Engineering*, 2012, 28(5): 41-43(in Chinese).
- [15] 费俊, 孙锐, 张晓辉, 等. 不同燃烧条件下煤粉锅炉 NO_x 还原特性的试验研究[J]. 动力工程, 2009, 29(9): 813-817.
Fei Jun, Sun Rui, Zhang Xiaohui, et al. Characteristics of NO_x emission in pulverized coal fired boiler under different combustion conditions[J]. *Journal of Power Engineering*, 2009, 29(9): 813-817(in Chinese).
- [16] 樊俊杰, 张忠孝, 金晶. 煤粉再燃燃烧含氮组分转化机理的敏感性分析[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(12): 2145-2148.
Fan Jun jie, Zhang Zhongxiao, Jin Jing. Numerical simulation of nitrogen components transforming mechanism during coal reburning [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008, 29(12): 2145-2148(in Chinese).
- [17] Luan Jiyi, Sun Rui, Wu Shaohua, et al. Experimental studies on reburning of biomasses for reducing NO_x in a drop tube furnace[J]. *Energy & Fuels*, 2009, 23(3): 1412-1421.
- [18] 刘栗, 邱朋华, 吴少华. 煤热解挥发分还原 NO 的反应过程分析[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(3): 331-334.
Liu Li, Qiu Penghua, Wu Shaohua. Analysis of NO reduction mechanism by volatiles from coal pyrolysis[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, 31(3): 331-334(in Chinese).
- [19] 王伟平, 张忠孝, 滕叶, 等. 部分气化煤制气多点喷射再燃脱硝的冷态流场研究[J]. 洁净煤技术, 2013, 19(1): 97-100.
Wang Weiping, Zhang Zhongxiao, Teng Ye, et al. Influence of multi-point injection on coverage fraction of coalgas during its reburning process [J]. *Clean Coal Technology*, 2013, 19(1): 97-100(in Chinese).
- [20] 苏胜, 向军, 孙路石. 再燃过程影响因素及燃尽特性研究[J]. 热能动力工程, 2009, 24(4): 507-512.
Su Sheng, Xiang Jun, Sun Lushi, et al. Study of the influencing factors and burn-out characteristics of a reburning process[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 2009, 24(4): 507-512(in Chinese).
- [21] 苏胜, 向军, 孙路石, 等. 再燃降低 NO_x 排放及煤粉燃尽特性研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(10): 1767-1770.
Su Sheng, Xiang Jun, Sun Lushi, et al. NO_x reduction and burnout characteristics of coal in re-burning process [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2009, 30(10): 1767-1770(in Chinese).
- [22] 魏华彦, 张忠孝, 朱基木, 等. 气体再燃技术在宝钢电厂 350 MW 锅炉机组上的工业应用[J]. 热能动力工程, 2005, 20(5): 535-538.
Wei Huayan, Zhang Zhongxiao, Zhu Jimu, et al. The industrial application of gas reburning technology in a 350 MW boiler unit at Bao Steel works power plant[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 2005, 20(5): 535-538(in Chinese).