

天然气调质煤粉再燃中关键参数的实验研究

李玉凯, 孙绍增, 赵义军, 张文达, 冯冬冬

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对煤粉再燃技术, 提出了一种结合再循环烟气输送煤粉和天然气调质的方案。其目的在于提高再燃煤粉的还原能力, 从而降低燃煤锅炉产生的氮氧化物排放。为了探索如何利用天然气中高活性成分, 创造一个更有利于煤粉还原 NO_x 的环境, 利用模拟实际燃煤锅炉条件下的多反应控制段携带流反应器实验系统, 研究了天然气调质的整个过程。结果表明, 天然气调质产生的大量还原性物质, 如 CO^* 、 OH^* 、 H 和 CH_i 等优化了煤焦的物理化学结构, 增强了煤焦还原氮氧化物的能力。与传统的再循环烟气输送煤粉相比, 添加天然气调质后, NO_x 的还原效率提高了约 12.23%。通过实验和数据分析, 解析了天然气调质技术对于煤粉再燃的显著影响, 并提出了在工程应用中的具体参数要求。从工程应用角度来看, 为了实现高效率的氮氧化物还原, 并兼顾煤粉的燃烬和经济性, 需要对再燃区的过量空气系数、停留时间和燃料比进行精确控制, 分别为 0.8、0.6 s 和 20%。总的来说, 采用天然气调质技术可在保证氮氧化物超低排放的同时, 尽量减少活性气体的使用, 从而提高系统运行的经济性。该灵活的天然气使用技术不仅在实验室条件下取得了良好的效果, 也为工程实践提供了可行的方案, 保证系统运行的经济性。

关键词: 天然气; 调质; 再燃; NO_x ; 燃烧参数

中图分类号: TK16 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)07-3245-08

Experimental study of key parameters of natural gas-activated pulverised coal reburning

LI Yukai, SUN Shaozeng, ZHAO Yijun, ZHANG Wenda, FENG Dongdong

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In the study of coal powder reburning technology, combining the coal powder delivery via recirculating flue gas and natural gas conditioning was proposed. The purpose of this approach is to enhance the reduction capability of coal powder reburning, thereby reducing the emission of nitrogen oxides from coal-fired boilers. The main objective of the research is to explore how to utilize the highly reactive components in natural gas to create a more favorable environment for coal powder to reduce nitrogen oxides. To achieve this, a detailed investigation of the entire process of natural gas conditioning was conducted using a multi-reaction control section with a flow reactor experimental system simulating actual coal-fired boiler conditions. The results revealed that the abundant reduction substances generated during natural gas conditioning, such as CO^* , OH^* , H , and CH_i , optimized the physical and chemical structure of coal char, thereby enhancing its ability to reduce nitrogen oxides. Compared with traditional coal powder delivery via recirculating flue gas, the addition of

收稿日期: 2023-11-15 修回日期: 2024-03-01 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.ZZ23.1507

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52076058); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2022ZFJH004)

作者简介: 李玉凯 (1994—), 男, 河北沧州人, 博士研究生。E-mail: 857132094@qq.com

通讯作者: 孙绍增 (1963—), 男, 河南舞阳人, 教授, 博士。E-mail: sunsz@hit.edu.cn

引用格式: 李玉凯, 孙绍增, 赵义军, 等. 天然气调质煤粉再燃中关键参数的实验研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(7): 3245-3252.

LI Yukai, SUN Shaozeng, ZHAO Yijun, et al. Experimental study of key parameters of natural gas-activated pulverised coal reburning[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(7): 3245-3252.



移动阅读

natural gas conditioning significantly increased the efficiency of nitrogen oxide reduction by approximately 12.23%. Through experimental investigation and data analysis, the significant impact of natural gas conditioning technology on coal powder reburning was elucidated, and the specific parameter requirements for engineering applications were proposed. From an engineering perspective, the precise control of the excess air ratio, residence time, and fuel ratio in the reburning zone is essential to achieve a high-efficiency nitrogen oxide reduction while ensuring a complete coal powder combustion and economic feasibility. Overall, adopting natural gas conditioning technology can not only guarantee ultra-low nitrogen oxide emissions but also minimize the use of reactive gases, thereby enhancing the economic efficiency of system operation. This flexible use of natural gas technology has demonstrated some promising results in laboratory conditions and offers feasible solutions for engineering practice, ensuring the economic efficiency of system operation.

Key words: natural gas; modification; reburning; nitrogen oxides; combustion parameters

根据中国工程院研究预测,到 2035 年,能源消费总量将达 57 亿 t 标准煤^[1]。我国煤矿储量大、价格低,且是主要能源。目前,燃煤发电仍占我国电力生产总量的 50% 以上,且短期内不可能摆脱对煤炭的依赖^[2]。火电是中国电力来源的重要组成部分,也成为大气污染的主要来源。近几年来我国不仅为完成双碳目标努力,在大气污染治理方面也不曾松懈^[1]。

因燃料分级技术初投资小、运行费用较低而被普遍应用^[3]。燃料分级技术的主要措施为使用空气或部分再循环烟气输送煤粉至煤粉锅炉炉膛的再燃区域^[4]。再燃区域是还原 NO_x 的重点区域,再燃燃料产生的碳氢化合物自由基可与 NO_x 相互作用,从而减少最终 NO_x 的排放。同时减少烃基与氧自由基的接触,因此过量空气系数必须小于 1,应控制在 0.70~0.95^[5-6]。在燃烬区,将燃烧所需的剩余空气以燃烬风的方式输入到着火气流中以消除未燃烬的混合物,在过量空气系数大于 1 的条件下完成全部燃烧过程。此时一些含 N 中间产物又被重新氧化成 NO。但由于燃烬区整体温度较低,重新生成 NO_x 不多,因而炉膛出口处 NO_x 总排放量降低。目前,燃煤发电锅炉在采用低氮燃烧技术燃用主流烟煤时 NO_x 排放水平为 200~400 mg/Nm³,达到了在源头上控制 NO 排放的效果^[7]。

再燃燃料的选择多样,可以是气体(天然气、液化石油气、焦炉气、合成气等)、液体(酒精、废油等)或固体(煤、生物质、污泥、固体废物等)^[8-13]。这些燃料具有挥发性和反应性强的特点,在分解时产生大量的烃基和氢基。虽然天然气/合成气能够生成大量有助于还原 NO_x 的碳氢根离子,但在富燃料区域采用煤粉再燃,HCN 可更快地被破坏,而这是在富燃料区将 NO_x 还原成 N_2 的关键中间步骤,其破坏速度远大于天然气/合成气再燃^[14]。对于燃煤电站,采用煤粉作为再燃燃料是较合理并具有吸引力的方式。LIU 等^[15]利用沉降炉研究了不同燃料的再燃特性发现,在还原性气氛中,含 N 燃料比不含 N 燃料具有更好的脱硝

效果。GREUL 等^[16]也证明,燃料中的 N 析出后,可能会参与 NO_x 的还原反应。高温缺氧条件下挥发分-N 被氧化成 NO 的可能性显著降低,同时产生的热量使煤发生热解^[17]。煤粉再燃过程中,还原 NO_x 主要有 2 个途径:一是在煤粉挥发分析出过程中,产生的气相中间产物,如 CH_4 、HCN 和 NH_3 等与 NO_x 发生均相反应^[18-19];二是煤粉脱挥发分后形成的煤焦与 NO_x 发生异相还原反应以及焦炭的吸附作用,其反应过程则与煤焦的化学物理特性密切相关^[20]。

煤粉再燃过程受许多因素影响。其中温度对燃料-N 的释放过程有直接的影响。RÜDIGER 等^[21]研究表明,在煤的热解过程中,温度对热解气组分浓度有明显影响,存在最佳热解温度使 NH_3 和 HCN 的生成量最高。同时,对低氮或无氮燃料作为再燃燃料进行了试验,发现温度对这些燃料的热解气脱除 NO_x 的影响并不明显。因此燃料-N 尤其是在热解气中焦油-N 的存在对再燃降低 NO_x 具有积极的影响。燃烧反应过程中的化学计量参数对燃料-N 的转化同样起重要作用。NELSON 等^[22]通过在携带流反应器中进行包括烟煤和次烟煤在内的焦炭-N 异相转化过程研究发现,随着氧气化学计量比的增大,焦炭-N 转化为 NO 的比例逐渐增大,由 0.3~0.4 增至 0.7~0.8;在化学计量比为 1 时,转化率在 0.5 左右。沙永涛等^[23]通过数值模拟和实验方法研究了煤粉气化合成气的再燃脱硝能力,结果表明,煤粉气化合成气的再燃脱硝能力随温度的升高而加强,随再燃区停留时间的增加而加强,当停留时间超过 0.8 s 后, NO_x 的还原效率的增幅趋于平缓;再燃燃料比例超过 20% 后, NO_x 还原效率增幅变缓,随着再燃区过量空气系数的增加,合成气的脱硝效果逐渐降低。

使用空气输送再燃煤粉会在再燃初期消耗大量再燃煤粉,为了保证空气基本耗尽后参与还原 NO_x 的煤粉量,需要加大再燃煤粉比例,这导致锅炉燃烬情况变差、运行方式受限等问题。因此,采用再循环烟

气是一个有效的解决措施。再循环烟气输送煤粉的同时送入天然气,烟气中的氧气被提前消耗,使得再燃煤粉得到活化,提高了其还原 NO_x 的能力。针对神华烟煤(高挥发分烟煤),采用能够模拟实际炉膛煤粉燃烧环境的多反应控制段携带流反应系统(Entrained Flow Reactor with Multiple Reaction Segment, EFR-MRS)研究了天然气调质煤粉再燃条件下,温度(T)、再燃燃料比(R_p)、再燃区过量空气系数(λ)、再燃区停留时间(t_2)等因素对 NO 排放的影响,以期构建完全基于煤粉的高效低成本超低 NO_x 燃烧技术和系统提供理论基础。

1 实 验

1.1 燃料样品制备

以补连塔矿区神华烟煤为实验样品。根据 GB/T 212—2008 对烟煤进行了工业分析和元素分析,结果见表 1。

1.2 实验方法和条件

使用多反应控制段携带流反应器系统(EFR-MRS),配合烟气在线分析系统进行实验。实验系统示意如图 1 所示,再燃燃烧器结构和实验台架如图 2 所示,具体试验工况见表 2。由于实验温度控制在 1 573 K, N_2O 和 NO_2 生成浓度过低,因此不予考虑。多反应段携带流试验系统主要由微量给粉系统、燃烧器及其冷

表 1 神华烟煤的工业分析和元素分析

Table 1 Proximately and ultimately analysis of raw coal

元素分析					工业分析			
C_{daf}	H_{daf}	O_{daf}^*	N_{daf}	$\text{S}_{\text{t,daf}}$	M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{daf}
75.02	4.39	18.84	1.50	0.25	3.12	1.87	32.76	62.25

注: *表示差减法计算。

却系统、配气系统、再燃系统、炉体及控温系统、采样分析系统和相应的监控系统等组成。该系统的主要特点如下:①再燃区多级给料,即在炉膛径向方向,预留 1 对呈对冲布置的喷口,用以模拟再燃喷口实现多级给料;②燃烧器、取样枪及燃烬风喷口均可沿着炉膛方向轴向移动,更有利于控制实验过程中停留时间的变化,扩展了可研究的范围;③炉膛采用分段加热方法,可模拟不同燃烧区域的温度水平,且解决了密封问题。

炉体全长 4 m,主燃烧器位于携带流反应器顶部。燃烧器一次风喷管由全长 1.59 m、外径 51 mm 的不锈钢管作为外套管,中心给粉管内径 14 mm,喷口处采用扩口结构,根据自由射流特点,扩口角度设置为 30° ,为保证燃烧器在炉膛内安全运行,采用冷却油对燃烧器进行不间断冷却。二次风管长 1.9 m,呈对冲布置进入炉膛,其喷口中心与一次风喷口距离为 50 mm,

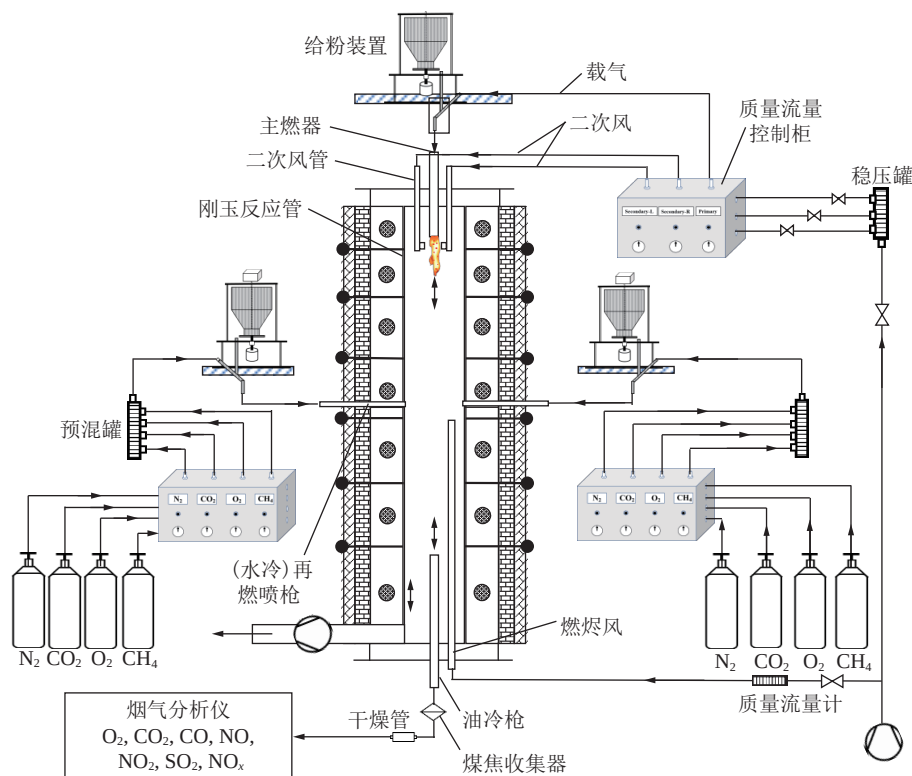
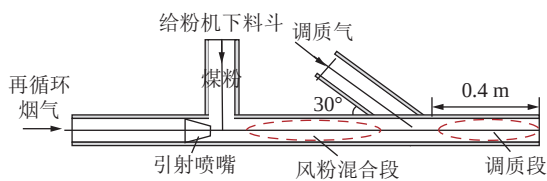


图 1 多反应段携带流试验系统示意

Fig.1 Entrained Flow Reactor with Multiple Reaction Segment (EFR-MRS) analysis system



(a) 再燃燃烧器结构示意图



(b) 实验台架

图 2 再燃燃烧器结构和实验台架

Fig.2 Reburning burner structure and test bench

表 2 实验工况

Table 2 Experimental working conditions

参数	数值
总过量空气系数 λ	1.25
一次风温度/K	373
一次风率/%	30
二次风温/K	453
炉膛壁温/K	1573
主燃区停留时间/s	1.0
主燃区过量空气系数 λ_1	0.8
还原区再燃燃料占比 R_f	1/7, 1/6, 1/5, 1/4, 2/7, 1/3
再燃区停留时间 t_2 /s	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0
再燃区过量空气系数 λ_2	0.65, 0.75, 0.85, 0.95

注：本文主要研究再燃区中再燃燃料比、过量空气系数和停留时间的影响，因此，未在炉膛中吹入燃烬风。

二次风喷口内径为 14 mm。当煤粉随着一次风喷入炉膛后，与对冲布置的二次风迅速混合并着火。再燃燃烧喷口位于距离携带流反应器顶部 1.63 m 处，全长 1.0 m，外径为 12 mm，内径为 10 mm。为保证给粉顺利，下料管采用垂直布置，且设计了引射器结构。再循环烟气携带煤粉进入后，与喷入的调质气进行活化作用，使得煤粉活化成还原能力更强的煤焦。

主燃区过量空气系数的增大，导致挥发分中的

CH_i 、 HCN 、 NH_3 等基团析出后被氧化的占比增加，同时煤焦的异相还原作用减弱，促进了主燃区燃料型 NO_x 的生成。主燃区过量空气系数增加会影响再燃区的还原性氛围，阻碍再燃区还原性物质与 NO_x 反应^[24-27]。煤粉再燃过程中应尽量避免再燃煤粉挥发分析出后生成的还原性中间产物在煤粉再燃初期发生均相着火燃烧而消耗掉，这要求在再燃区入口烟气氧含量极低，以促进再燃煤粉在喷入炉膛后快速热解而不是燃烧。因此，在主燃区营造一个富燃料环境，有利于主燃区生成更多的还原性中间产物并降低主燃区出口氧量（几乎为 0），有效避免因主燃区残留氧进入再燃区后对再燃燃料的消耗。因此，主燃区设定为还原性气氛，希望能进一步减低再燃 NO_x 排放。本技术利用天然气活性较好的特点将再循环烟气中的 O_2 消耗掉，因此天然气与再循环烟气中氧气的当量比应为 1。再循环烟气中氧含量为 6%，因此通入天然气的比例为 3%。

1.3 关键参数确定

在低雷诺数 ($Re \leq 2\,000$) 条件下，流体的惯性作用相对较小，黏性作用占主导地位，此时流体分子在固体表面的运动速度与固体表面的运动速度相比非常缓慢，因此可忽略流体与固体之间的滑移效应。经计算，煤粉混合气流的雷诺数在 600~1 700，认为样品颗粒的速度与烟气流速一致。煤颗粒在再燃区停留时间 t 可由式 (1)^[28] 计算：

$$t = \frac{273 \times 10^3 LA}{Q(T + 273)} \quad (1)$$

式中， L 为样品颗粒落管的长度，m； A 为刚玉管的截面积， m^2 ； Q 为烟气流量，L/s； T 为炉膛温度，K。

再燃燃料占比 R_f 指再燃燃料的热值占整个燃烧过程所需燃料总热值的比例，其计算公式为

$$R_f = \frac{Q_1}{Q_t} \quad (2)$$

式中， Q_1 为再燃燃料热值； Q_t 为燃烧过程所需总燃料热值。

各区域过量空气系数 λ_n 的计算公式为

$$\lambda_n = \frac{20.9\%}{20.9\% - \alpha} \quad (3)$$

式中，20.9% 为 O_2 在环境空气中的体积分数； α 为仪器测量烟道中 O_2 的实测值。

燃料氮向 NO_x 的转化率 $X(\text{NO}_x)$ 计算公式^[29]为

$$X(\text{NO}_x) = \frac{10^{-6} C(\text{NO}_x) \times 14 V_{\text{gas}}}{22.4 m N_{\text{ad}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中， $C(\text{NO}_x)$ 为实测炉膛出口 NO_x 体积分数， 10^{-6} ；

V_{gas} 为烟气流量, Nm^3/h ; m 为混合燃料的给粉速率, kg/h ; N_{ad} 为燃料空气干燥基中氮质量分数, %。

NO_x 的还原率评价是 NO 减排技术的主要指标, 分级燃烧过程中 NO 还原率 η 计算公式^[30]为

$$\eta = \left(1 - \frac{C_{\text{NO, staged}}}{C_{\text{NO, un-staged}}} \right) \times 100\% \quad (5)$$

式中, $C_{\text{NO, staged}}$ 为分级燃烧条件下炉膛出口 NO 质量浓度, mg/Nm^3 , 以 6% O_2 计; $C_{\text{NO, un-staged}}$ 为不分级燃烧条件下炉膛出口 NO 质量浓度, mg/Nm^3 , 以 6% O_2 计。

燃料燃烧过程中的挥发分、固定碳和燃料的燃烬率计算公式为

$$B_{\text{R,V}} = \left(1 - \frac{V_i A_0}{V_0 A_i} \right) \times 100\% \quad (6)$$

$$B_{\text{R,FC}} = \left(1 - \frac{\text{FC}_i A_0}{\text{FC}_0 A_i} \right) \times 100\% \quad (7)$$

$$B_{\text{R,F}} = \left(1 - \frac{A_0}{1 - A_0} \frac{1 - A_i}{A_i} \right) \times 100\% \quad (8)$$

式中, $B_{\text{R,V}}$ 、 $B_{\text{R,FC}}$ 和 $B_{\text{R,F}}$ 分别为挥发分、固定碳和混合燃料的燃烬率; 下标 0 和 i 分别表示初始混合燃料和燃烧过程中收集的未燃烬焦炭。

2 结果和讨论

2.1 不同再燃技术 NO 排放

图 3 为不同低氮燃烧技术下, 炉膛出口 NO 质量浓度 (NO 质量浓度是以体积分数 6% O_2 为基础计算得到), 几种不同再燃技术的差异在于再燃介质的不同。实验过程中其他参数保持不变, 只改变输送介质 (表 3), 因此影响因素只来源于再燃的输送介质组分, 满足控制变量的研究思想。通过对比可以发现, 相较于空气分级技术, 燃料分级可更有效地降低 NO 的排放, NO 的还原效率增加了近 20.8%。当输送介质为再循环烟气时 NO 的排放明显低于空气输送, NO 的还原效率增加了近 28.1%。这是因为输粉空气中所含 O_2 在再燃初期消耗大量的再燃煤粉, 导致还原 NO 的煤粉量降低。相较于传统的空气输送煤粉, 经再循环烟气输送、天然气调质后, NO 的还原效率增加近 36.88%。相较于再循环烟气输送煤粉, 添加甲烷调质后, NO 的还原效率增加了近 12.23%。这是因为传统的煤粉再燃技术使用空气输送再燃煤粉至再燃区, 再燃煤粉燃烧产生氨基活性物质, 与主燃区煤粉燃烧产生的 NO 发生还原反应, 从而达到降低 NO 排放的目的。而再循环烟气送粉、天然气调质的煤粉再燃技术可进一步的降低 NO 的排放。调质气体与烟气中的 O_2 反应,

促进了挥发物的释放, 同时在高加热速率条件下煤焦会生成更复杂的孔隙结构。焦炭在 CH_4^* 、 H^* 和 OH^* 等还原性分子的活化作用下逐渐碎片化, 相对平整的表面逐渐被气-固异相反应过程侵蚀, 形成了更多的多孔结构以及细小碎片^[31-32], 这些丰富的孔隙结构有助于形成活性位, 从而利于还原 NO 反应的发生。

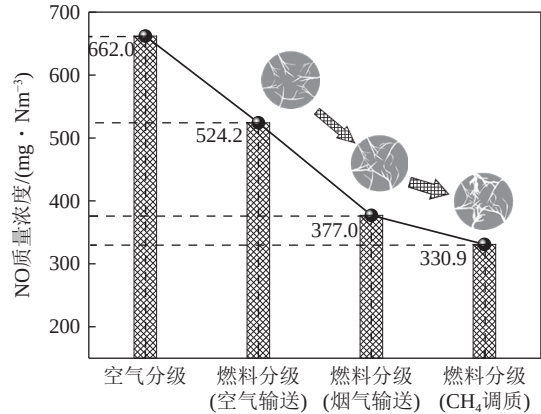


图 3 不同再燃技术 NO 排放

Fig.3 NO emissions from different reburning technologies

表 3 空气分级和不同再燃技术具体定量参数

Table 3 Air staging and specific quantitative parameters of different reburning technologies

再燃技术	工况
空气分级	一次风30%, 二次风70%
燃料分级 (空气输送)	采用空气输送再燃煤粉, 再燃区过量空气系数0.8, 再燃燃料比20%, 再燃区停留时间1.0 s
燃料分级 (烟气输送)	采用再循环烟气输送煤粉, 再燃区过量空气系数0.8, 再燃燃料比20%, 再燃区停留时间1.0 s。
燃料分级 (烟气输送, 天然气调质)	采用再循环烟气输送, 天然气调质, 再燃区过量空气系数0.8, 再燃燃料比20%, 再燃区停留时间1.0 s; 天然气与烟气中氧气的化学当量比为1。

注: 总过量空气系数1.25; 炉壁温度1 573 K; 主燃区停留时间1.0 s; 主燃区过量空气系数0.8。

2.2 再燃燃料比对 NO 排放的影响

由图 4(a) 可知, 在不同过量空气系数下, NO 的排放质量浓度随着再燃燃料比的变化趋势具有一致性。随着再燃燃料比从 1/7 增至 1/5, NO 排放质量浓度呈下降趋势。但再燃燃料比超过 1/5 后, NO 排放的下降趋势变得缓慢。由图 4(b) 可知, 燃烬率随着再燃燃料比的增加而降低, 当再燃燃料比超过 1/5 时, 燃烬率大于 95%。因此, 对于高挥发分煤, 在天然气调质再燃条件下, 再燃燃料比为 20% 时, 既能获得较高的 NO_x 还原率, 也能兼顾煤粉的燃烬及经济性。再燃燃料比增加会导致再燃火焰中还原性气体 (如 CO 、 H_2 等) 体积分数增加, 这些还原性气体可与氧气反应

生成 H_2O 和 CO_2 , 从而消耗了氧气, 降低了氧气体积分数, 抑制主燃区中 NO 的生成。此外, CO 等还原性气体也可与已生成的 NO 反应, 从而降低 NO 质量浓度。再燃燃料比增加会导致燃烧温度下降, 较低的燃

烧温度不利于 NO 的生成, 因此随着再燃燃料比的增加, NO 排放降低。但过大的再燃燃料比会导致大量未燃尽焦炭中的燃料-N 进入到燃烬区, 从而在燃烬区再一次生成大量 NO , 影响最终的 NO 排放。

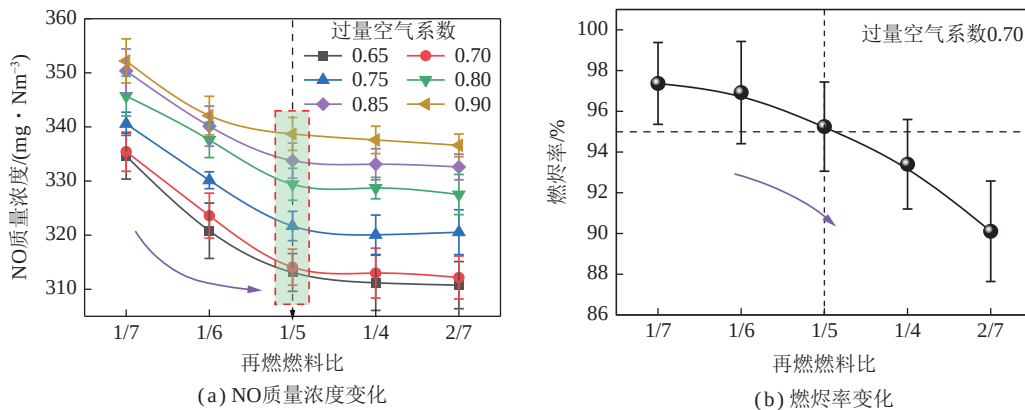


图 4 再燃燃料比对 NO 排放的影响

Fig.4 Effect of reburning fuel ratio on NO emissions

2.3 再燃区过量空气系数的影响

由图 5(a) 可知, 在不同再燃燃料比下, NO 的排放浓度随过量空气系数变化的趋势具有一致性。 NO 排放量随着再燃区过量空气系数的增大而增大。随着过量空气系数从 0.65 增至 0.85, NO 排放质量浓度呈上升趋势。但当过量空气系数超过 0.85 后, NO 的上升趋势趋缓。这是因为再燃区过量空气系数的增大促进了挥发分 N 与氧之间的氧化反应, 而再燃区即富燃料区中大量含 N 还原性中间产物 (HCN 、 NH_3 等) 的存在, 促进了 NO 的还原。此外, 过量空气系数越大, 氧含量越高, 煤粉燃烧越剧烈, 促进了燃料-N 向 NO 的

转化。由图 5(b) 可知, 再燃区的过量空气系数不宜过低, 当过量空气系数低于 0.70 时, 燃烬率小于 90%。过量空气系数从 0.65 上升至 0.85 时, 燃烬率提高了近 10%, NO 排放质量浓度提高了 3%~8%。虽然过量空气系数的降低会导致 NO 的低排放, 但会导致焦炭燃烬率变差。因此天然气调质煤粉再燃条件下, 最适合的再燃区过量空气系数应在 0.70 左右。合适的过量空气系数可促使活性物质 CH_i^* 、 CO^* 、 OH^* 和 H^* 增多, 这些中间还原性物质不仅与 NO 发生反应生成 N_2 , 也会诱使焦炭孔道结构的复杂化和表面活性位点增多。

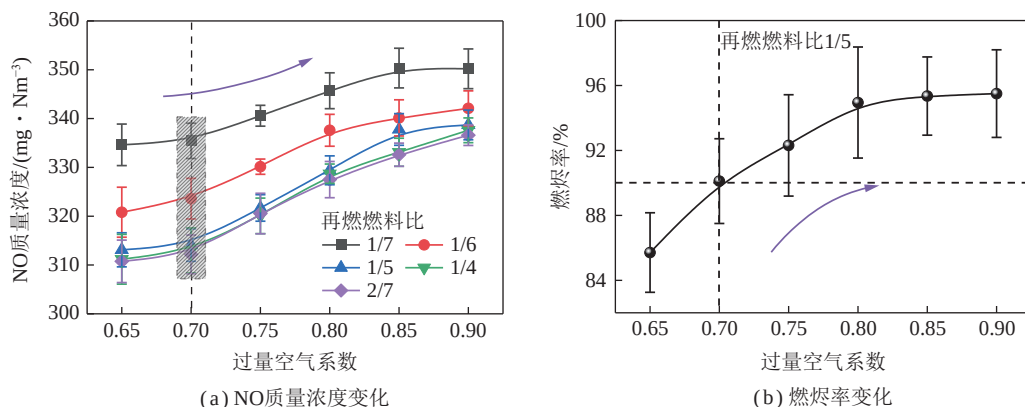


图 5 再燃区过量空气系数对 NO 排放的影响

Fig.5 Influence of excess air coefficient in the reburning zone on NO emissions

2.4 再燃区停留时间的影响

由图 6(a) 可知, 3 种燃料分级再燃技术的 NO 排放质量浓度随再燃区停留时间的变化规律具有一致性。随着再燃区停留时间的延长, NO_x 排放量持续降低, 随后平缓。其中烟气输送的再燃方式受停留时间

的影响较小, NO 排放质量浓度下降近 5%。甲烷调质技术受停留时间影响较大, NO 排放质量浓度下降了 10.5%。再燃区停留时间的延长增加了碳氢化合物及含氮气态还原物质与主燃区生成的 NO 接触的概率和时间。与均相还原 NO 的反应相比, 煤焦氧化及焦

炭 N 析出氧化还原所需时间更多。还原区反应时间的延长有助于再燃区煤焦与 NO 之间的异相还原反应。当再燃区停留时间超过 0.6 s 后,虽然 NO 的排放也在下降但是降幅缓慢。这是因为煤中存留的还原性物质已不多。

由图 6(b) 可知,再燃区停留时间过短(低于 0.6 s)时,燃烬率较低(低于 95%)。此后未燃烬的焦炭及

HCN 等含氮物质进入富氧的燃烬区后会被部分氧化成 NO,加重尾部 NO 排放的负担。因此天然气调质煤粉再燃条件下,最适合的再燃区停留时间应控制在 0.6 s 左右。合适的停留时间有利于使反应 $\text{CH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_3^* + \text{OH}^*$ 和 $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_2^* + \text{OH}^*$ 产生的活性自由基侵入焦炭的基层,增加小芳香环结构或尺寸较小的碳基质的数量,有利于 NO 还原。

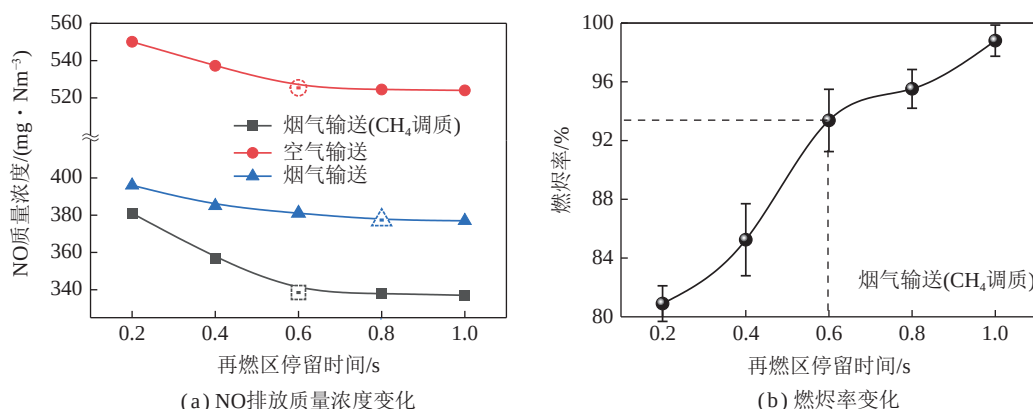


图6 再燃区停留时间对 NO 排放的影响

Fig.6 Effect of residence time in the reburning zone on NO emissions

3 结 论

(1) 相较于传统的空气输送煤粉,新技术可有效提高 NO 的还原效率近 36.88%。

(2) 相较于再循环烟气输送煤粉,添加天然气调质后,NO 的还原效率增加了近 12.23%。

(3) 在主燃区相对最优参数条件下(即主燃区过量空气系数和停留时间分别为 0.8、1.0 s 时),为了获得较高的 NO_x 还原率,且兼顾煤粉的燃烬和经济性,再燃区过量空气系数、停留时间和再燃燃料比应分别控制在 0.8、0.6 s、20%。

参考文献(References):

- [1] LUO Y, WU Y H, MA S H, et al. Utilization of coal fly ash in China: a mini-review on challenges and future directions[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2021, 28(15): 18727–18740.
- [2] YOU Z W, ZHAO T, SONG C, et al. Analyzing China's coal-related carbon emissions from economic growth perspective: Through decoupling and decomposition model[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(3): 3703–3718.
- [3] FLAMME M. Low NO_x combustion technologies for high temperature applications[J]. Energy Conversion and Management, 2001, 42(15-17): 1919–1935.
- [4] WANG J, ZHENG K L, SINGH R, et al. Numerical simulation and cold experimental research of a low-NO_x combustion technology for pulverized low-volatile coal[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 114: 498–510.

- [5] FAN W D, LIN Z C, KUANG J G, et al. Impact of air staging along furnace height on NO_x emissions from pulverized coal combustion[J]. Fuel Processing Technology, 2010, 91(6): 625–634.
- [6] MEREB J B, WENDT J O L. Air staging and reburning mechanisms for NO_x abatement in a laboratory coal combustor[J]. Fuel, 1994, 73(7): 1020–1026.
- [7] 杨航, 郑成航, 金侃, 等. 燃煤电厂选择性催化还原脱硝系统运行成本[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(2): 363–369. YANG Hang, ZHENG Chenghang, JIN Kan, et al. Analysis on operation cost of SCR system in coal-fired power plant[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(2): 363–369.
- [8] CUOCI A, FRASSOLDATI A, BUZZI FERRARIS G, et al. The ignition, combustion and flame structure of carbon monoxide/hydrogen mixtures. Note 2: Fluid dynamics and kinetic aspects of syngas combustion[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(15): 3486–3500.
- [9] JITHIN E V, RAGHURAM G K S, KESHAVAMURTHY T V, et al. A review on fundamental combustion characteristics of syngas mixtures and feasibility in combustion devices[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 146: 111178.
- [10] ADAMS B R, HARDING N S. Reburning using biomass for NO_x control[J]. Fuel Processing Technology, 1998, 54(1-3): 249–263.
- [11] OLUWOYE I, ZENG Z, MOSALLANEJAD S, et al. Controlling NO_x emission from boilers using waste polyethylene as reburning fuel[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 411: 128427.
- [12] ANUFRIEV I S, KOPYEV E P, SADKIN I S, et al. NO_x reduction by steam injection method during liquid fuel and waste burning[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 152: 240–248.
- [13] BAN-WEISS G A, CHEN J Y, BUCHHOLZ B A, et al. A numeric-

- al investigation into the anomalous slight NO_x increase when burning biodiesel: A new (old) theory[J]. Fuel Processing Technology, 2007, 88(7): 659–667.
- [14] WENDT J. Mechanisms governing the formation and destruction of NO_x and other nitrogenous species in low NO_x coal combustion systems[J]. Combustion Science and Technology, 1995, 108: 323–344.
- [15] LIU H, HAMPARTSOUMIAN E, GIBBS B M. Evaluation of the optimal fuel characteristics for efficient NO reduction by coal reburning[J]. Fuel, 1997, 76(11): 985–993.
- [16] GREUL U, SPLIETHOFF H, MAGEL H C, et al. Impact of temperature and fuel-nitrogen content on fuel-staged combustion with coal pyrolysis gas[J]. Symposium (International) on Combustion, 1996, 26(2): 2231–2239.
- [17] THIBANYANE N, AGACHI P, DANHA G. Effects of biomass/coal copyrolysis parameters on the product yield: A review[J]. Procedia Manufacturing, 2019, 35: 477–487.
- [18] ZHONG B J, SHI W W, FU W B. Effects of fuel characteristics on the NO reduction during the reburning with coals[J]. Fuel Processing Technology, 2002, 79(2): 93–106.
- [19] MALY P, ZAMANSKY V, HO L, et al. Alternative fuel reburning[J]. Fuel, 1999, 78(3): 327–334.
- [20] WU Z. Fundamentals of pulverised coal combustion[M]. London: IEA Clean Coal Centre, 2005.
- [21] RÜDIGER H, GREUL U, SPLIETHOFF H, et al. Distribution of fuel nitrogen in pyrolysis products used for reburning[J]. Fuel, 1997, 76(3): 201–205.
- [22] NELSON P F, NANCARROW P C, BUS J, et al. Fractional conversion of char N to no in an entrained flow reactor[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(2): 2267–2274.
- [23] 沙永涛, 金晶, 宋博, 等. 煤粉气化合成气再燃降低 NO_x 排放的特性研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(10): 1712–1716.
- SHA Yongtao, JIN Jing, SONG Bo, et al. Study on NO_x reduction with syngas reburning[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(10): 1712–1716.
- [24] 冯琰磊, 罗永浩, 陆方, 等. 层燃炉低 NO_x 再燃烧技术的实验研究[J]. 动力工程, 2004, 24(1): 29–32.
- FENG Yanlei, LUO Yonghao, LU Fang, et al. Experimental research on reburning technology to reduce NO_x emissions in stoker boiler[J]. Power Engineering, 2004, 24(1): 29–32.
- [25] 荀湘, 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.
- [26] MEADOWS M L, KUO B P, ROBERTS A, et al. Control of NO_x emissions by reburning: Summary report[R]. Cincinnati: Environmental Protection Agency, 1996.
- [27] 杨建成. 高挥发分煤分级燃烧 NO_x 减排实验及应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- YANG Jiancheng. Experimental and applied research on NO_x reduction in graded combustion of high-volatile coal[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [28] WANG C A, WANG C W, JIA X W, et al. NO formation characteristics and fuel-nitrogen transformation mechanism during co-firing of low-volatile carbon-based solid fuels with bituminous coal[J]. Fuel, 2021, 291: 120134.
- [29] KUROSE R, IKEDA M, MAKINO H, et al. Pulverized coal combustion characteristics of high-fuel-ratio coals[J]. Fuel, 2004, 83(13): 1777–1785.
- [30] SMOOT L D, HEDMAN P O, SMITH P J. Pulverized-coal combustion research at Brigham Young University[J]. Progress in Energy Combustion Science, 1984, 10(4): 359–441.
- [31] FENG D D, ZHANG Y, ZHAO Y J, et al. Mechanism of *in situ* dynamic catalysis and selective deactivation of H_2O -activated biochar for biomass tar reforming[J]. Fuel, 2020, 279: 118450.
- [32] YU J L, LUCAS J A, WALL T F. Formation of the structure of chars during devolatilization of pulverized coal and its thermoproperties: A review[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2007, 33(2): 135–170.