

DOI: 10.19666/j.rlfd.202504072

煤粉炉掺烧芦竹 NO_x 生成特性模拟研究

刘凌¹, 陈祺¹, 郝建材², 陆利俊¹, 许香婷², 王长安², 柳明³,
杜勇博², 车得福²

(1. 上海上电漕泾发电有限公司, 上海 201507;
2. 西安交通大学绿色氢电全国重点实验室, 陕西 西安 710049;
3. 上海发电设备成套设计研究院有限责任公司, 上海 200240)

[摘要] 燃煤耦合生物质发电是燃煤机组有效降碳的技术之一, 芦竹作为典型的能源植物具有产量高、环境适应性强、热值高等特点, 可以大规模用于燃煤机组发电。为研究煤粉炉在燃煤过程中掺烧芦竹对 NO_x 排放的影响, 探究煤和芦竹混燃过程中燃料氮的迁移路径, 利用两段 PFR 构建了芦竹与煤混燃反应模型, 研究了煤粉炉掺烧芦竹 NO_x 生成特性与反应机理, 重点探讨了掺混比例、燃尽风率和燃尽风位置等因素对 NO_x 生成特性的影响规律。结果表明: 掺烧芦竹可以降低 NO_x 排放, 且随着掺混比例的增加, NO_x 的质量浓度逐渐减小; 随着燃尽风率的增加, NO_x 的转化率和 NO_x 的质量浓度先减小后增大, 存在一个最佳燃尽风率 (33%) 使 NO_x 排放量最低; 随着燃尽风位置的后置, NO_x 转化率和 NO_x 质量浓度都减小。通过研究煤和芦竹混燃过程中 NO_x 生成特性及氮的迁移路径, 为燃煤机组掺烧芦竹发电过程中的参数设置和降低尾气 NO_x 排放提供理论指导。

[关键词] 芦竹; 混燃; 煤粉炉; 氮氧化物; 化学反应; 动力学模拟

[引用本文格式] 刘凌, 陈祺, 郝建材, 等. 煤粉炉掺烧芦竹 NO_x 生成特性模拟研究[J]. 热力发电, 2026, 55(3): 100-109. LIU Ling, CHEN Qi, HAO Jiancai, et al. Simulation study on nitrogen oxides formation characteristics during co-combustion with arundo donax in a pulverized-coal boiler[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(3): 100-109.

Simulation study on nitrogen oxides formation characteristics during co-combustion with arundo donax in a pulverized-coal boiler

LIU Ling¹, CHEN Qi¹, HAO Jiancai², LU Lijun¹, XU Xiangting², WANG Chang'an², LIU Ming³,
DU Yongbo², CHE Defu²

(1. Shanghai Shangdian Caojing Power Generation Co., Ltd., Shanghai 201507, China;
2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. Shanghai Power Equipment Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200240, China)

Abstract: Coal-fired power generation coupled with biomass is one of the efficient carbon-reduction technologies for coal-fired units. As a typical energy plant, arundo donax has the characteristics of high yield, strong environmental adaptability and high calorific value, and can be used for large-scale coal-fired power generation. To investigate the effect of co-firing arundo donax in a pulverized-coal boiler on NO_x emissions and explore the migration pathways of fuel nitrogen during the co-combustion of coal and arundo donax, a co-combustion reaction model of arundo donax and coal was established with a two-stage plug flow reactor (PFR). The formation characteristics and reaction mechanisms of nitrogen oxides during co-combustion of the arundo donax and coal in a pulverized-coal boiler were studied, focusing on exploring the influences of co-firing ratio, over-fire air (OFA) ratio, and OFA position on the formation characteristics of nitrogen oxides. The results show that the NO_x emission can be reduced by co-firing arundo donax, and the mass concentration of NO_x decreases with the increase in co-firing ratio of arundo donax. The NO_x conversion rate and NO_x mass concentration first decrease and then increase with the increase in over-fire air ratio, and there is an optimal over-fire air ratio (around 33%) to minimize NO_x .

收稿日期: 2025-04-10 修回日期: 2025-06-09 接受日期: 2025-06-12

基金项目: 陕西省重点研发项目 (2024GX-YBXM-478)

Supported by: Key Research and Development Project of Shaanxi Province (2024GX-YBXM-478)

第一作者简介: 刘凌 (1977), 男, 工程师, 主要研究方向为火电厂运行, liul@sdcpjg.com。

通信作者简介: 王长安 (1986), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为化石燃料高效清洁利用与碳减排技术, changanwang@mail.xjtu.edu.cn。

emissions. Delaying the position of the OFA leads to a decrease in both the NO_x conversion rate and NO_x mass concentration. By studying the NO_x formation characteristics and the nitrogen migration pathways during co-combustion of coal and arundo donax, theoretical guidance can be provided for parameter setting and reducing exhaust NO_x emissions in the co-combustion of arundo donax for coal-fired power generation.

Key words: arundo donax; co-combustion; pulverized-coal boiler; nitrogen oxides; chemical reaction; kinetic simulation

生物质能作为重要的可再生能源,在我国能源结构中占重要地位。我国生物质资源丰富,截止2023年,我国生物质产量超过35亿吨,开发潜力相当于4.6亿吨标准煤^[1],大力开发利用生物质资源,是实现“双碳”目标的重要途径之一。生物质燃烧释放的碳来源于生长过程中吸收的 CO_2 ,因此生物质被认为是碳中性燃料,生物质发电的碳排放可按照“零排放”计算^[2]。目前,我国燃煤电厂不具备大规模将燃煤锅炉改造为纯燃生物质锅炉的条件,燃煤耦合生物质发电成为一种有明显优势的生物质资源利用方式,生物质替代了部分化石燃料,有效降低机组碳排放,是煤电机组低碳清洁转型的重要举措^[3-4]。燃煤机组掺烧生物质发电具有以下优势:生物质与煤混燃发电只需对现有燃煤机组进行局部改造,成本相对较低^[5-6];火电机组大容量、高参数的特点使混合燃烧的发电效率也远高于其他可再生能源发电^[7];生物质的低氮、低硫特性有利于降低机组氮氧化物和硫化物排放量^[6]。

芦竹作为典型的能源植物,具有分布广、产量大、生态适应性强和热值高等特点,种植面积巨大^[8]。芦竹在我国分布广泛,全国范围有效种植面积超过20万 hm^2 ,单位面积产量为45 t/hm^2 。芦竹的生态适应性强,可在边际地区种植^[9]。芦竹的高位发热量在17.00~24.30 MJ/kg ,略低于中发热量煤^[8]。结合我国煤电机组低碳化改造要求,燃煤机组掺烧芦竹发电具有广阔前景。

目前,已有一些对芦竹燃烧污染物排放特性的实验研究。Jeguirim等人^[10]通过热重分析仪研究了芦竹与芒草的气体污染物 CO_2 、 CO 和挥发性有机化合物(VOC)以及颗粒物的排放特性。Verónica等人^[11]基于家用炉灶通过水沸腾实验研究了芦竹燃烧 CO 、 NO_x 排放特性。贺越^[12]基于固定床反应器进行芦竹热解实验,研究物料种类、热解温度、掺混比例等因素对热解过程燃料氮转化的影响规律。上述实验研究的燃烧温度不超过1000 $^\circ\text{C}$,其升温速率与煤粉炉中燃料的升温速率差异较大,研究结果与芦竹在煤粉炉中的燃烧情况存在差异,缺乏对芦竹与煤混合燃烧污染物排放特性的实验研究。

另外,一些学者通过数值模拟和热力计算研究煤粉炉掺烧芦竹的燃烧过程。Mody等人^[13]通过50 kW煤粉炉进行实验并结合计算流体力学(CFD)模拟550 MW锅炉,研究了由芦竹等生物质制备的生物煤的燃烧特性和排放特性。刘光鹏等^[14]通过热力计算和实验数据研究了660 MW超临界对冲燃煤锅炉大比例直燃耦合芦竹、木头、秸秆等生物质,分析耦合燃烧对锅炉运行参数的影响规律,但未对掺烧芦竹的污染物排放特性展开研究。

目前,关于芦竹燃烧的工程应用研究较少,美国波特兰通用电气公司(PGE)在博德曼(Boardman)燃煤电厂进行了尝试^[8]。2025年国家电投集团能源科学技术研究院在上海漕泾电厂百万机组上进行了芦竹大比例共磨掺烧试验,实现了国内首例百万千瓦机组共磨25%比例掺烧能源植物的关键性技术突破^[15]。目前,国内外对芦竹燃烧的污染物排放特性已有一些研究,但缺乏温度在1000 $^\circ\text{C}$ 以上的研究和芦竹与煤混燃的研究,对煤粉炉掺烧芦竹 NO_x 生成特性还不明晰,在微观反应机理层面的研究较少,缺乏对芦竹与煤混燃过程中燃料氮迁移路径和组分变化规律的研究。本文基于Chemkin软件中一维柱塞流反应器(plug flow reactor, PFR)构建了芦竹与煤混燃反应动力学模型,模拟煤粉炉的燃烧过程,研究掺混比例、燃尽风率和燃尽风位置等因素对 NO_x 生成特性的影响规律;通过敏感性分析和生成速率分析,研究影响 NO_x 生成的主要反应和关键物质,探究燃料氮的迁移路径,为煤粉炉掺烧芦竹运行过程中设置燃烧参数以降低烟气 NO_x 排放提供理论指导。

1 芦竹与煤混燃反应动力学模型

1.1 建立模型

实际锅炉中的燃烧是一个复杂的三维过程,炉膛燃烧过程存在一定的轴向和径向梯度,主要是因为布风不均及壁面效应导致颗粒质量浓度和气体分布呈中心-边缘差异。但炉膛绝大部分区域的温度分布均匀,气体流速的轴向、径向梯度较小。温度、气体流速等量主要是沿着气体流动方向发生改

变。而 Chemkin 软件 PFR 模块的特点是径向完全混合，考虑轴向过程的变化，因此本文选择一维的 PFR 模拟实际炉膛燃烧过程。

选取烟煤和芦竹进行均相反应模拟。煤的挥发分以甲烷为主，因此用甲烷燃烧过程模拟煤的燃烧^[16-18]。根据钟北京等^[19]的研究，NO_x的前驱物通常为 NH₃ 和 HCN，烟煤中 HCN 与(HCN+NH₃)的摩尔比在 0.6~0.7 之间。本文用 NH₃ 和 HCN 模拟燃料氮，选取 0.7 作为 HCN 在烟煤中 NO_x 的前驱物占

比。芦竹的挥发分主要是甲烷^[20]，根据贺越^[12]的研究，1 000 ℃下热解过程中芦竹的 HCN 与(HCN+NH₃)的摩尔比为 0.66，接近 0.7，因此芦竹与煤采用相同的等效形式。各物质占比根据表 1 中烟煤与芦竹的元素分析及工业分析结果计算得到。本模拟使用的反应机理为 GRI-Mech 3.0 机理。该机理能够较为准确地模拟甲烷燃烧过程和氮氧化物的生成和还原过程^[16,18]，可以用于模拟研究芦竹与煤混燃 NO_x 生成特性以及燃料氮的迁移路径。

表 1 煤样与芦竹的工业分析与元素分析
Tab.1 Proximate and ultimate analysis of coal and arundo donax

样品	工业分析 w/%				元素分析 w/%					Q _{ar,net} /(MJ kg ⁻¹)
	M _{ar}	A _{ar}	V _{ar}	FC _{ar}	C _{ar}	H _{ar}	O _{ar}	N _{ar}	S _{ar}	
烟煤	9.20	21.85	26.32	42.63	54.22	3.30	9.80	1.00	0.63	20.62
芦竹	10.72	3.62	78.08	7.58	36.46	5.07	43.59	0.41	0.13	13.72

芦竹与煤的孔隙分布、颗粒形态等结构参数存在差异。芦竹的纤维结构疏松，孔隙率更高，挥发分释放更快，有利于形成还原性气氛，促进 NO_x 的还原。同时实际燃烧过程中，燃料与空气的混合方式为气固混合，本模拟采用的均相反应将燃料等效为气体，忽略了实际燃烧过程中焦炭对 NO_x 的异相还原作用和由于芦竹与煤两者之间的结构差异导致的生物质挥发分快速释放的影响。因此，在模拟过程中 NO_x 质量浓度可能偏高。

图 1 为芦竹与煤混燃模型。本模拟以煤粉炉为研究对象，采用 2 个串联的 PFR 模型（每个 PFR 模型长度为 50.0 cm，直径为 2.5 cm）分别模拟锅炉中的主燃区和燃尽区。主燃区风和燃尽风分别从气体入口模型 I、II 通入，待主燃区风在 PFR 模型 I 中发生反应后，二者在无反应气体混合模型混合，然后一同进入 PFR 模型 II 中发生反应，最后尾气通过气体出口模型离开。表 2 为芦竹与煤混燃基本工况，其中掺混比例为 30%，氧体积分数为 21%。

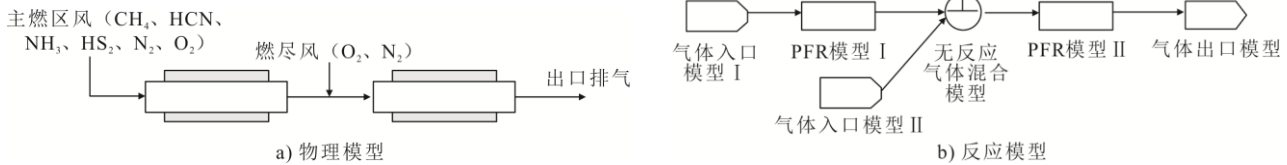


图 1 芦竹与煤混燃模型及流程示意
Fig.1 Co-combustion model of coal and arundo donax and the corresponding process

表 2 基本工况参数
Tab.2 Parameters of basic conditions

参数	主燃区	燃尽区	参数	主燃区	燃尽区
过量空气系数	0.90	0.30	风量（标准工况）/(cm ³ min ⁻¹)	3 000	894.76
燃烧温度/℃	1 400	1 100	压力/MPa	0.1	0.1
长度/cm	50	50			

1.2 模型验证及分析方法

1.2.1 模型验证

为验证模型的可靠性，选取侯岩等^[21]所用煤和生物质在主燃区、燃尽区温度分别为 1 400、1 000 ℃

下模拟掺混比例对 NO_x 生成特性的影响，并与实验结果对比，结果如图 2 所示。对比模拟结果与实验结果发现，二者数值接近，虽然 NO_x 体积分数的变化幅度有些差异，但模拟结果的变化趋势与实验结果一致，在定性分析芦竹混煤燃烧 NO_x 生成特性变

化趋势研究中具有可信度, 研究结果可以为煤粉炉中芦竹混煤燃烧控制污染物排放提供一定的指导意见。其中, 与实验结果相比, 掺烧生物质后模拟结果的 NO_x 排放量降幅较低, 这与本模拟忽略了实际燃烧过程中生物质挥发分快速释放和焦炭对 NO_x 异相还原作用的影响有一定关系。

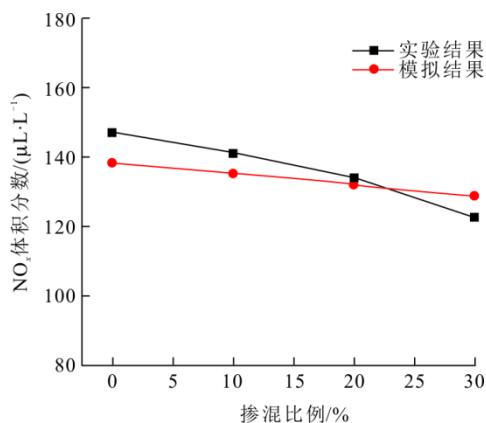


图2 不同掺混比例下 NO_x 体积分数模拟与实验结果对比
Fig.2 Comparison of the simulation and experimental results of NO_x volume fraction at different co-firing ratios

1.2.2 分析方法

本文模拟中主燃区温度最高为 1400 °C, 主要考虑燃料氮向 NO_x 的转化率, 在芦竹与煤混合燃烧过程中利用 NH₃ 和 HCN 的转化过程模拟燃料氮的转化, 表达式为:

$$\alpha_{\text{NO}_x} = \frac{(c_{\text{NO}} + 2c_{\text{N}_2\text{O}} + c_{\text{NO}_2}) \times q_{\text{V,out}}}{(c_{\text{HCN}} + c_{\text{NH}_3}) \times q_{\text{V,in}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: α_{NO_x} 为燃料氮向 NO_x 转化率, %; c_{NO} 、 $c_{\text{N}_2\text{O}}$ 、 c_{NO_2} 分别为 NO、N₂O 和 NO₂ 的摩尔分数; $q_{\text{V,out}}$ 为出口烟气的体积流量, cm³/min; c_{HCN} 、 c_{NH_3} 分别为 HCN、NH₃ 的摩尔分数; $q_{\text{V,in}}$ 为入口气流的体积流量, cm³/min。

此外, 本文采用敏感性分析法研究基元反应对 NO 的敏感程度, 分析各反应对 NO 生成的影响; 采用生成速率分析法分析燃烧中影响 NO 浓度和生成速率的关键反应, 得到燃料氮的迁移路径。

2 结果与讨论

2.1 掺混比例对 NO_x 生成特性的影响

本模拟中掺混比例按发热量计算, 定义为芦竹燃烧产生的能量与燃料总能量的比值, 记为 x 。为研究掺混比例对 NO_x 生成特性的影响, 本模拟在基本工况下进行, 选取 0~60% 的掺混比例进行模拟。

不同掺混比例下燃尽区出口 NO_x 的质量浓度 (6% 含氧量, 干基) 和转化率如图 3 所示。掺混比例从 0~60% 的变化过程中, 随着掺混比例增加, NO_x 的转化率呈现上升趋势, NO_x 排放质量浓度呈现降低趋势。这是由于芦竹含氮量低于煤, 混合燃料含氮量随着掺混比例增加而降低。经计算, 30%、60% 掺混比例下 NO_x 的质量浓度降幅分别为 4.73% 和 10.07%, 本模拟选用芦竹未经过预处理, 发热量较低, 为达到与燃煤相同的热量, 需要投入更多的芦竹。芦竹通过预处理可以提高发热量^[8], 有望提高混合燃烧对 NO_x 的减排能力。

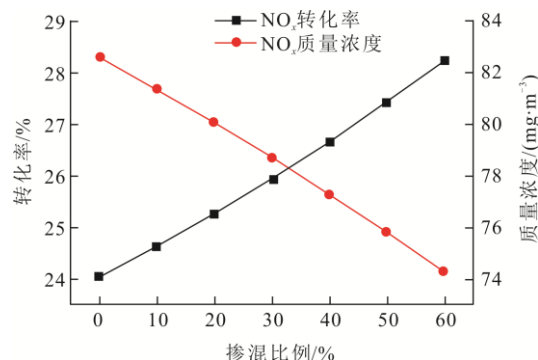


图3 掺混比例对 NO_x 生成特性的影响
Fig.3 Effect of co-firing ratio on NO_x formation characteristics

燃尽区出口氮氧化物主要有 NO、NO₂ 和 N₂O, 他们在 NO_x 中的占比基本不受掺混比例的影响。NO 质量分数最高, 约占 99.71%, NO₂ 和 N₂O 质量分数极低, NO₂ 约占 0.28%, N₂O 约占 0.01%。煤粉炉中芦竹与煤混合燃烧生成的氮氧化物以 NO 为主^[22-23], 因此研究芦竹与煤混燃 NO_x 的生成特性集中于研究 NO 的生成特性。

不同掺混比例 x 下 NO 沿 PFR 的分布情况如图 4 所示。可以看出, NO 的生成和还原主要发生在主燃区, 燃尽区中 NO 的摩尔分数变化较小。当燃料和空气通入主燃区时, 在主燃区入口迅速发生燃烧反应, NO 摩尔分数迅速增大, 随后 NO 被还原, NO 摩尔分数逐渐减少; 进入燃尽区后, 随着燃尽风的加入, NO 摩尔分数变化幅度较小, 在燃尽区入口附近迅速发生减小和增大的变化, 但该部分变化幅度较小。

为探究 NO 转化率随掺混比例增加的原因, 本文选取反应最剧烈的位置即主燃区入口的主要反应对 NO 敏感性系数进行分析, 结果如图 5 所示。

下列反应对 NO 的生成影响较大:

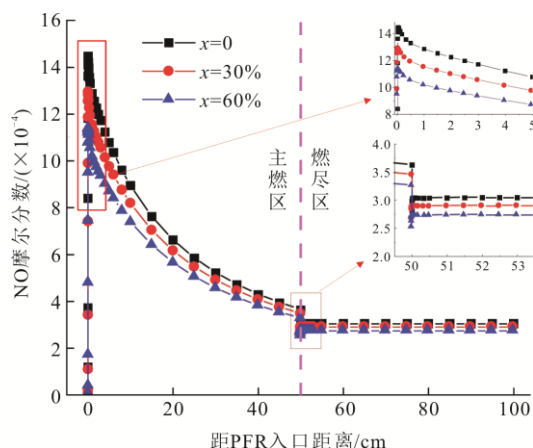


图4 不同掺混比例下 PFR 内 NO 摩尔分数分布情况
Fig.4 Distribution of NO mole fraction in PFR at different co-firing ratios

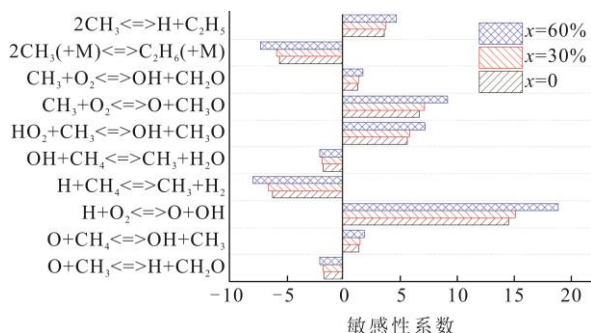
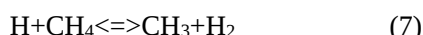
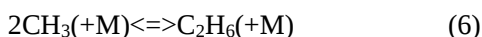
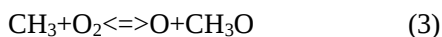
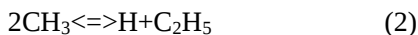


图5 不同掺混比例下各主要反应对 NO 的敏感性系数
Fig.5 Sensitivity coefficients of main reactions to NO at different co-firing ratios



由图5可见: 反应式(2)~式(5)对 NO 的敏感性系数为正, 对 NO 生成有促进作用; 反应式(6)、式(7)对 NO 的敏感性系数为负, 对 NO 生成有抑制作用。反应式(5)对 NO 的敏感性系数最大, 不同掺混比例下的敏感性系数均在 15 以上, 对 NO 生成的促进作用最大。随着掺混比例增大, 各反应对 NO 的敏感性系数的绝对值都增大, 并且掺混比例从 30%到 60%的敏感性系数变化幅度比掺混比例从 0 到 30%更大。整体上, 随着芦竹掺混比例的增大, 敏感性系数正向增加的程度大于负向增加的程度, 因此 NO 的转化率随掺混比例的增大而增大。

通过敏感性分析可以得到对 NO 生成影响较大的反应, 但不能明确指出生成 NO 的具体反应, 为

进一步探究 NO 的形成机理, 采用生成速率分析法对芦竹掺混比例为 30%的燃烧过程进行分析, PFR 内 NO 生成速率变化情况如图 6 所示。

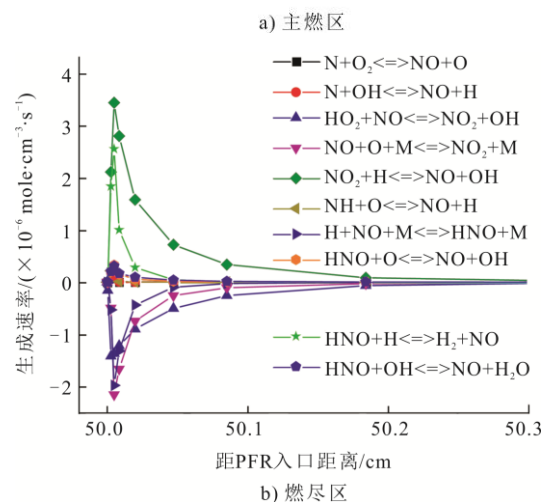
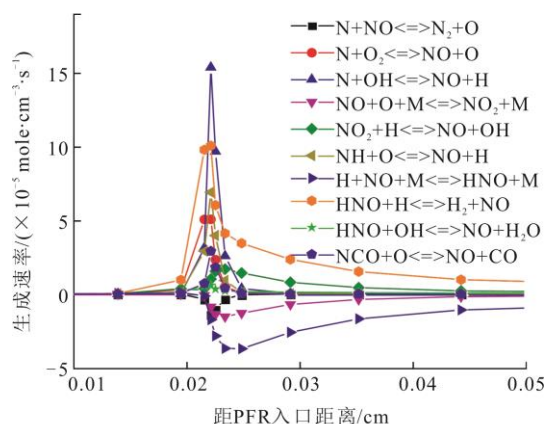
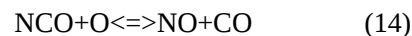
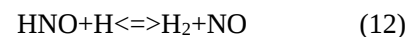
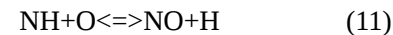
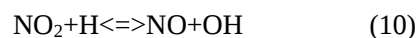
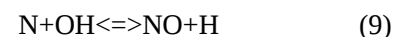
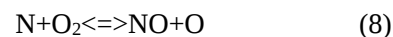
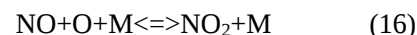
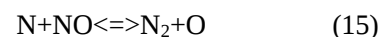


图6 PFR 内 NO 生成速率变化情况
Fig.6 Variations of NO generation rates in PFR

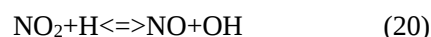
主燃区入口处生成 NO 的主要反应:

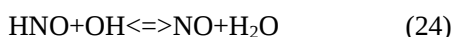


主燃区入口处消耗 NO 的反应:

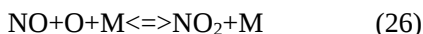
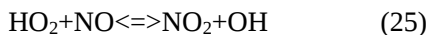


燃尽区入口生成 NO 的主要反应:





燃尽区入口消耗 NO 的反应:



在 NO 生成过程中,除了含氮中间产物之外, O、OH 和 H 自由基是生成 NO 的主要反应物,反应式(5)的生成物是 O 和 OH 自由基,因此该反应对 NO 的敏感性系数最大。在主燃区和燃尽区入口处, NO 向 N₂、NO₂ 和 HNO 方向转化。

在燃烧初期,由于氧气尚未被消耗,含氮前驱物 HCN 与 NH₃ 会被氧化为 NO; 在还原性气氛中, HCN 与 NH₃ 则与燃烧生成的 NO 发生反应生成 N₂。借助生成速率分析法,得到 30% 掺混比例下主燃区中 HCN 和 NH₃ 向 NO 主要转化路径如图 7 所示,其中箭头的粗细表示生成速率的大小。HCN 向 NO 的转化过程中, CN、NCO、HOCN、HNCO、NH、N、HNO 为主要中间产物; 从 NH₃ 向 NO 的转化过程中, NH₂、NH、N、HNO 为主要中间产物。

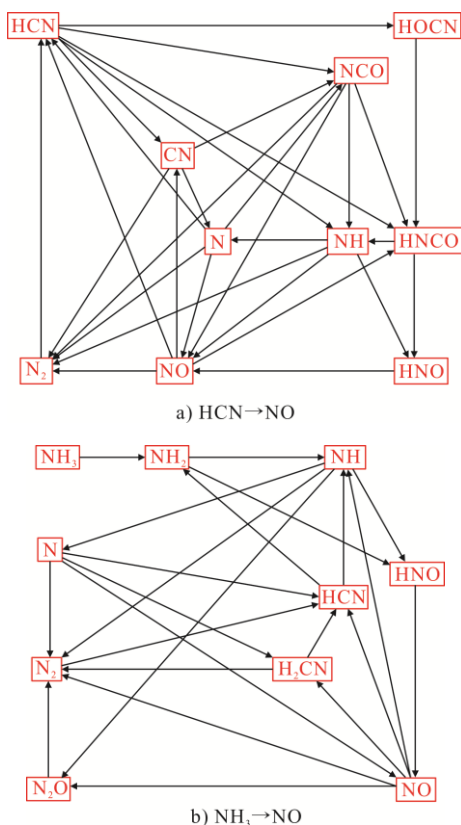


图 7 HCN 和 NH₃ 向 NO 主要转化路径

Fig.7 Main conversion pathways of HCN and NH₃ to NO

随后,由于氧气不足,主燃区为还原性气氛,主要发生 NO 的还原反应,距离主燃区入口 10 cm 处 NO 生成速率绝对值从大到小依次为反应式(28)一式(30), NO 的转化方向是 HNO、N₂O 和 N₂, NO 转化的最终产物为 N₂。距离主燃区入口 10 cm 处的 NO 还原路径如图 8 所示。另外,通过敏感性分析发现反应式(29)对 NO 的敏感性系数为负且绝对值最大,说明在主燃区 NO 还原过程中 NH 起到的作用最大。

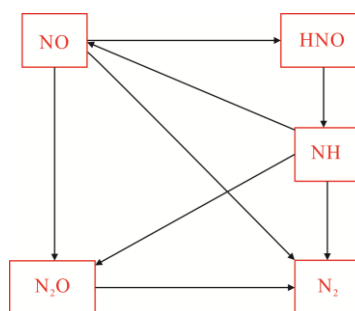
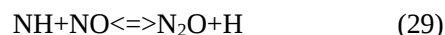
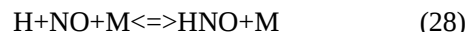


图 8 距离主燃区入口 10 cm 处 NO 的还原路径
Fig.8 Reduction pathways of NO at 10 cm from the entrance of the main combustion zone

2.2 燃尽风率对 NO_x 生成特性的影响

燃尽风率是燃尽风在总风量中的占比 (α_2/α , 本模拟设置总过量空气系数为 $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 = 1.20$ 不变, α_1 表示主燃区过量空气系数, α_2 表示燃尽风过量空气系数)。改变燃尽风率即重新分配主燃区与燃尽区的过量空气系数 α_1 和 α_2 。由于总过量空气系数 α 不变,下文中用燃尽风过量空气系数 α_2 代表燃尽风率。 α_2 越大表明燃尽风率越大。在基本工况下,对燃尽风过量空气系数 α_2 从 0.15~0.50 (即燃尽风率从 12.50%~41.67%) 的工况进行模拟,研究燃尽风率对 NO_x 生成特性的影响。图 9 表示燃尽区出口处 NO_x 转化率和质量浓度随燃尽风过量空气系数的变化情况。由图 9 可以看出,燃尽风率对 NO_x 生成的影响较大。 α_2 从 0.15 增大到 0.50 的过程中,燃尽区出口处 NO_x 转化率和质量浓度的变化趋势相同,均随着 α_2 的增加先减小后增大,在 $\alpha_2 = 0.40$,即燃尽风率为 33% 时 NO_x 转化率和质量浓度达到最低,分别为 14.16% 和 45.98 mg/m³。这与周科等^[24]基于 1 000 MW 超超临界机组锅炉的研究结果一致。另外,研究发现燃尽风率增加不利于煤粉燃尽,会使锅炉效率略微下降^[25],在实际燃烧过程中降低

NO_x 排放时需要综合考虑锅炉效率。

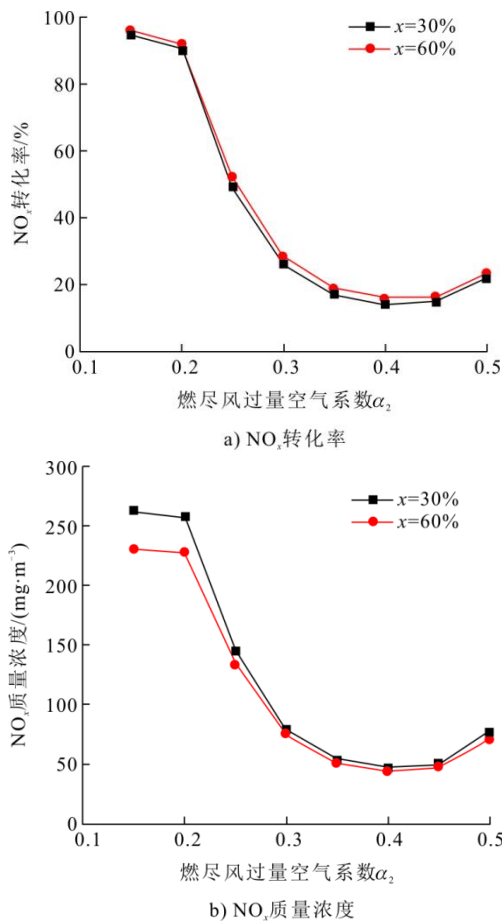


图9 燃尽风过量空气系数对 NO_x 生成特性影响

Fig.9 Effect of excess OFA air coefficient on NO_x formation characteristics

当 $\alpha_2 \leq 0.20$ 时, $\alpha_1 \geq 1.00$, 主燃区氧气过量, 会抑制 NO 的还原, 因此此时 NO_x 的转化率高达 90%。当 $\alpha_2 > 0.20$ 时, $\alpha_1 < 1.00$, 主燃区氧气不足, 形成的还原性气氛会促进 NO 的还原, 所以 α_2 从 0.25 增加到 0.40 的过程中, NO_x 转化率和质量浓度都在减小。当 $\alpha_2 > 0.40$ 时, 随着 α_2 的增大, NO_x 转化率开始重新增大, 原因是 α_1 过小, 在主燃区出口中存在一部分 HCN 与 NH_3 , 由于燃尽区氧量过高, HCN 与 NH_3 将在燃尽区被氧化为 NO_x , 使燃尽区出口处 NO_x 的生成量增多。

总过量空气系数 $\alpha=1.20$ 不变, 掺混比例保持 30% 不变时总质量流量不变, 为保证质量流量一致, 选用不同燃尽风率下燃尽区入口未发生反应的含 N 组分的摩尔分数进行分析, 结果如图 10 所示。由图 10 可见, α_2 从 0.15 增大到 0.50, 主燃区出口 NO 摩尔分数减小, 而 α_2 从 0.20 到 0.25 的变化过程是主燃区从氧化性气氛进入还原性气氛的过程, NO 摩尔分数变化幅度较大, NH_3 摩尔分数增大, N_2O

与 NO_2 的摩尔分数很小, 可以忽略不计。 α_2 增大则 α_1 减小, 主燃区氧量减少, 还原性气氛使得生成的 NO 被还原, NH_3 摩尔分数较大可能是因为氧气不足使部分 NH_3 与 HCN 未能参与反应。

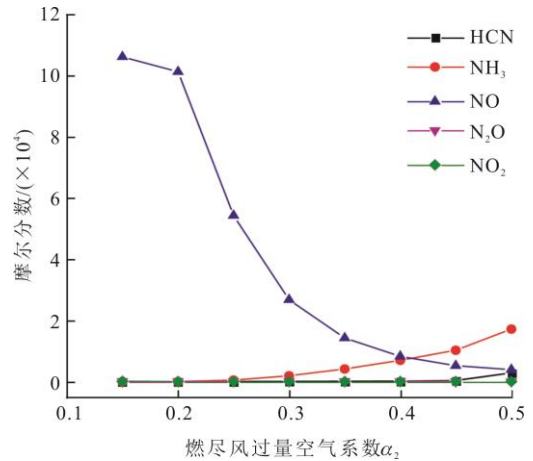


图10 不同燃尽风过量空气系数下燃尽区入口处主要含 N 组分的摩尔分数

Fig.10 Mole fraction of main nitrogenous components at burnout zone inlet at different excess air coefficients of OFA

30% 掺混比例、不同燃尽风率下 PFR 内 NO 摩尔分数分布情况如图 11 所示。由图 11 可见: $\alpha_2=0.15$ 时, 随着距 PFR 入口距离的增加, 主燃区不会发生 NO 摩尔分数减小的情形, 这是因为主燃区氧气过量, 抑制了 NO 的还原; 进入燃尽区后由于燃尽风的通入总流量增大, NO 占比减小, 由于主燃区中氧气过量, 已生成全部 NO , 在燃尽区通入空气后不会再生成 NO 。

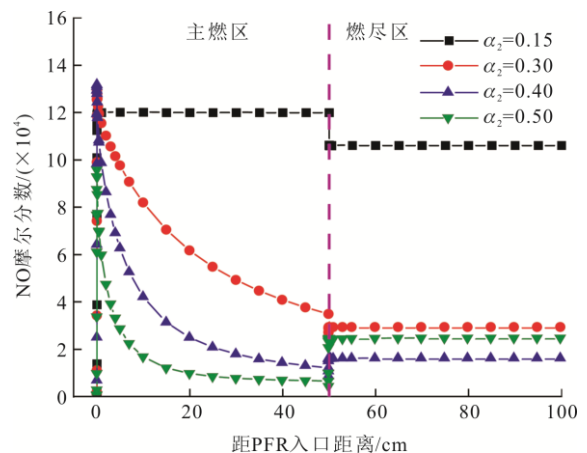


图11 不同燃尽风率下 PFR 内 NO 摩尔分数分布情况
Fig.11 Distribution of NO mole fraction in PFR at different OFA ratios

α_2 从 0.30 到 0.50, 随着距 PFR 入口距离的增加, 主燃区中由于燃烧反应 NO 摩尔分数先迅速增大达到峰值, 之后由于主燃区氧气不过量形成还原

性气氛,发生 NO 的还原反应,NO 摩尔分数减小,进入燃尽区后由于燃尽风的通入使体积流量增大从而导致 NO 摩尔分数迅速减小,随后燃尽风通入提供的氧气与剩余的 HCN 和 NH₃ 及其生成的中间产物反应生成 NO 使 NO 摩尔分数增大,最后保持不变。随着燃尽风率的增大,主燃区过量空气系数减小,主燃区的还原性气氛增强,同时,燃尽风率的增大主燃区体积流量减小,会延长燃料在主燃区的停留时间,二者都有利于降低主燃区 NO 的生成量。

α_2 增大, α_1 减小,主燃区还原性气氛增强,促进对 NO 的还原,因此主燃区中 NO 摩尔分数随着 α_2 的增大而减小。而 $\alpha_2=0.50$ 时燃尽区 NO 的生成量高于 $\alpha_2=0.40$ 时 NO 的生成量。为分析原因,分别在主燃区 NO 含量减小的位置距 PFR 入口 10 cm 处和燃尽区入口反应最剧烈的位置对 NO 进行敏感性分析,结果如图 12 所示。主燃区中,以下反应对 NO 的敏感性系数为负,对 NO 的生成起到抑制作用,在还原性气氛中,主要体现为促进 NO 的还原:

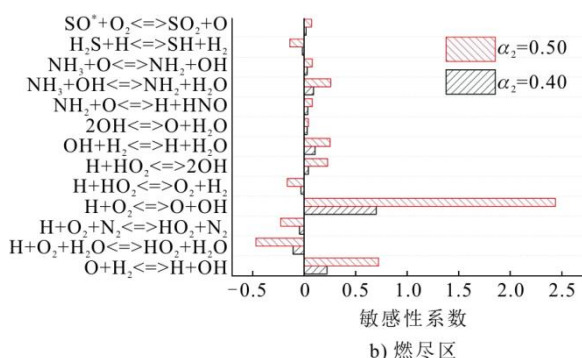
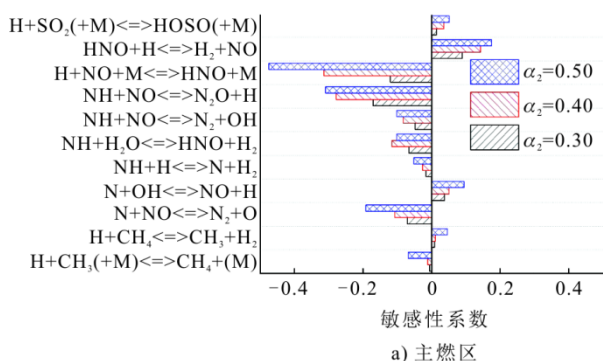
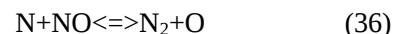
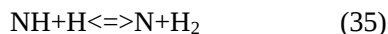
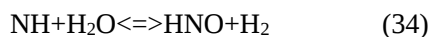
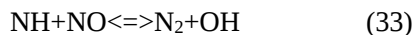
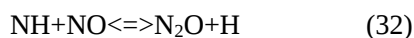


图 12 不同燃尽风率下各主要反应对 NO 的敏感性系数
Fig.12 Sensitivity coefficients of main reactions to NO at different OFA ratios



显然,主燃区中 NO 的敏感性系数为负的反应数量更多且敏感性系数绝对值更大,说明该位置处 NO 摩尔分数的变化率为负。随着 α_2 增大,主燃区还原性气氛增强,这些反应对 NO 敏感性系数的绝对值均增大,整体上,敏感性系数负向移动,对 NO 还原的促进作用增强。其中,反应式(31)、式(32)对 NO 的敏感性系数的绝对值较大,且二者随 α_2 的变化幅度较大。

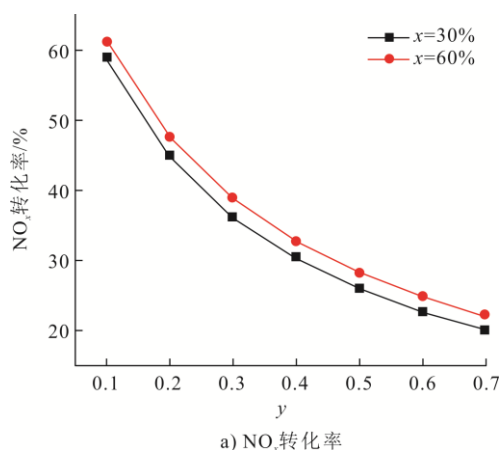
燃尽区中,反应式(38)对 NO 的敏感性系数最大,对 NO 生成的影响占主要地位:



该反应对 NO 的敏感性系数为正,且 α_2 从 0.40 增大到 0.50,该反应对 NO 的敏感性系数大幅度增加,对 NO 生成的促进作用增强,因此 $\alpha_2=0.50$ 时燃尽区 NO 的摩尔分数更大。

2.3 燃尽风位置对 NO_x 生成特性的影响

为研究燃尽风位置对 NO_x 生成特性的影响,分别选取芦竹掺混比例为 30% 和 60% 的工况,通过改变主燃区与燃尽区各部分 PFR 的长度调整燃尽风位置进行模拟。燃尽风位置用相对位置 y 表示,为主燃区长度与总长度之比。不同燃尽风位置下燃尽区出口 NO_x 的转化率和质量浓度如图 13 所示。随着燃尽风位置的延后,NO_x 的转化率和质量浓度都减小,说明延后燃尽风位置有利于降低 NO_x 排放量。燃尽风位置 y 从 0.1 到 0.7 的变化过程中,NO_x 转化率从约 60% 降低到约 20%,变化幅度较大,说明燃尽风位置对 NO_x 生成的影响较大。这是由于主燃区氧气不过量,为还原性气氛,燃尽风的延后使主燃区体积增大,烟气在主燃区还原性气氛中的停留时间增长,促进了 NO 的还原。



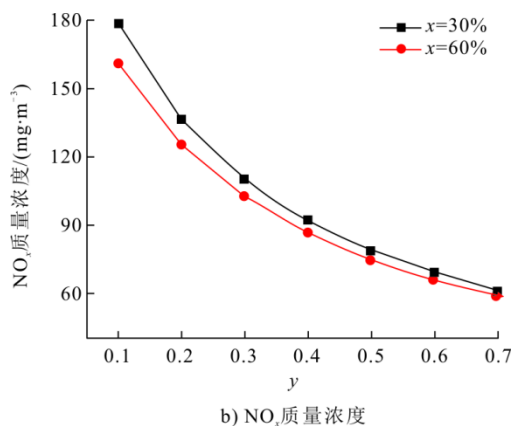


图 13 燃尽风位置对 NO_x 生成特性的影响
Fig.13 Effect of OFA position on NO_x formation characteristics

图 14 表示 30% 掺混比例、不同燃尽风位置 $y=0.1, 0.3, 0.5, 0.7$ 下 PFR 内 NO 摩尔分数分布情况。可以看出, 燃尽风的通入中断了 NO 的还原。在燃尽风通入之前, 主燃区还原过程中, 随着距离的增加, NO 摩尔分数的变化幅度逐渐减小, 越往后主燃区对 NO 的还原效果越弱。本模拟中烟气充分混合, 因此燃尽区出口烟气中基本不含 CO , 而在实际燃烧中需考虑燃尽风位置过于靠后燃尽风与烟气未充分混合导致燃烧不完全的问题。

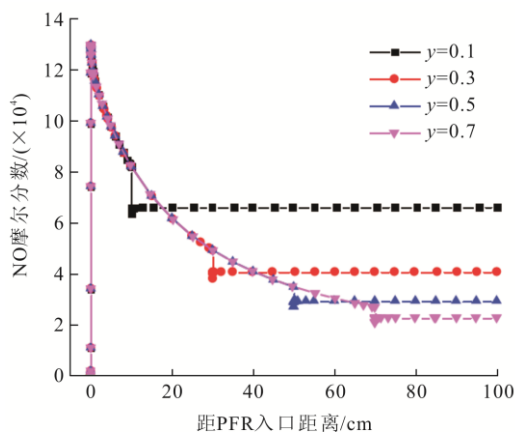


图 14 不同燃尽风位置下 PFR 内 NO 摩尔分数分布情况
Fig.14 Distribution of NO mole fraction in PFR at different OFA positions

3 结 论

芦竹具有产量大、热值高等特点, 燃煤机组通过掺烧芦竹可以实现煤电机组低碳清洁转型。本文利用两段式 PFR 构建芦竹与煤混燃反应模型, 研究煤粉炉掺烧芦竹的 NO_x 生成特性, 探究了燃烧过程中燃料氮的迁移路径, 重点分析了掺混比例、燃尽风率和燃尽风位置等因素的影响, 结论如下。

1) 掺烧芦竹可以降低 NO_x 排放。随着芦竹掺混比例增加, 主燃区入口附近各主要反应对 NO 生成的促进作用增强, NO_x 转化率略微增大; 由于芦竹的氮含量低, 故 NO_x 的质量浓度减小。通过生成速率分析得到了 HCN 与 NH_3 向 NO 的主要转化路径以及主燃区 NO 还原过程中的主要反应。

2) 燃尽风率对 NO_x 生成的影响较大, 随着燃尽风率增大, NO_x 转化率和质量浓度先减小后增大, 存在最佳燃尽风率 (33%) 使 NO_x 转化率和质量浓度最小。燃尽风率增大使主燃区中还原性气氛增强, 且延长了燃料在主燃区的停留时间, 促进了 NO 的还原, 但是燃尽风率过大会使大量的 NO 在燃尽区生成, 不利于降低 NO 排放, 最佳燃尽风率则是平衡主燃区和燃尽区 NO_x 生成的选择。另外, 燃尽风率过大意味着主燃区燃料燃烧不充分, 会使燃烧温度降低, 影响锅炉效率, 因此在锅炉参数设置时 also 需考虑燃尽风率对锅炉效率的影响。

3) 随着燃尽风位置延后, NO_x 的转化率和质量浓度都减小。主燃区氧气不过量时, 延后燃尽风位置可以增加主燃区的长度, 延长烟气在还原性气氛中的停留时间, 促进 NO 还原。延后燃尽风位置可以降低 NO_x 的排放, 但是在燃烧过程中需要避免因燃尽风位置靠后导致燃烧不完全的问题。

【参 考 文 献】

- [1] 庄修政, 张兴华, 张琦, 等. “双碳”背景下中国生物质能利用技术的发展现状及挑战[J]. 太阳能, 2024(7): 40-49.
ZHUANG Xiuzheng, ZHANG Xinghua, ZHANG Qi, et al. Development status and challenges of biomass energy utilization technology in China in the context of “dual carbon”[J]. Solar Energy, 2024(7): 40-49.
- [2] 毛健雄. 燃煤耦合生物质发电[J]. 分布式能源, 2017, 2(5): 47-54.
MAO Jianxiong. Co-firing biomass with coal for power generation[J]. Distributed Energy, 2017, 2(5): 47-54.
- [3] 周巍, 王浩帆, 熊晟熙, 等. 煤与生物质耦合燃烧的协同效应[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(2): 279-287.
ZHOU Wei, WANG Haofan, XIONG Shengxi, et al. Synergistic effects of co-combustion of coal and biomass[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(2): 279-287.
- [4] 蒋奕锋, 王锋, 薛文华, 等. 生物质与煤混燃特性研究[J]. 能源科技, 2022, 20(5): 44-48.
JIANG Yifeng, WANG Feng, XUE Wenhua, et al. Study on biomass and coal co-combustion characteristics[J]. Energy Science and Technology, 2022, 20(5): 44-48.
- [5] RONI M S, CHOWDHURY S, MAMUN S, et al. Biomass co-firing technology with policies, challenges, and opportunities: a global review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 78: 1089-1101.
- [6] 杨卧龙, 倪煜, 雷鸿. 燃煤电站生物质直接耦合燃烧发电技术研究综述[J]. 热力发电, 2021, 50(2): 18-25.

- YANG Wolong, NI Yu, LEI Hong. Biomass direct coupled combustion power generation technology for coal fired power station: a review[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(2): 18-25.
- [7] 杨卧龙, 倪煜, 曹洸. 生物质直接混烧技术在燃煤电站的应用研究进展[J]. 可再生能源, 2021, 39(8): 1007-1012.
- YANG Wolong, NI Yu, CAO Long. Research progress on application of biomass direct co-combustion technology in coal fired power plants[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(8): 1007-1012.
- [8] 汪义财, 喻鑫, 于敦喜. 能源植物芦竹燃烧利用研究进展[J]. 发电技术, 2025, 46(3): 570-578.
- WANG Yicai, YU Xin, YU Dunxi. Research progress on utilization of Arundo donax L. combustion[J]. Power Generation Technology, 2025, 46(3): 570-578.
- [9] 余醉, 李建龙, 李高扬. 芦竹作为清洁生物质能源牧草开发的潜力分析[J]. 草业科学, 2009, 26(6): 62-69.
- YU Zui, LI Jianlong, LI Gaoyang. Analysis on the potential capacity of exploiting giant reed as an energy forage[J]. Pratacultural Science, 2009, 26(6): 62-69.
- [10] JEGUIRIM M, DORGE S, TROUVE G. Thermogravimetric analysis and emission characteristics of two energy crops in air atmosphere: arundo donax and miscanthus giganthus[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(2): 788-793.
- [11] VERÓNICA C, ALEJANDRA M, ESTELA S. Thermal behaviour and emission characteristics of arundo donax L. as potential biofuel[J]. Bioenergy Research, 2023, 16(3): 1618-1628.
- [12] 贺越. 原生及烘焙生物质与煤共热解过程氮的转化规律研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019: 1.
- HE Yue. Research on nitrogen conversion in co-pyrolysis of raw and torrefied biomass with coal[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019: 1.
- [13] MODY J, SAVELIEV R, BAR-ZIV E, et al. Firing tests of biocoal[C]. American Society of Mechanical Engineer. ASME Power Conference, 2014.
- [14] 刘光鹏, 曾洁, 冉桑铭, 等. 煤粉锅炉大比例直燃耦合生物质的影响研究及工程应用[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(增刊 2): 237-242.
- LIU Guangpeng, ZENG Jie, RAN Shenming, et al. Research and engineering application on the influence of large-scale direct coupled biomass in pulverized coal boiler[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(Suppl.2): 237-242.
- [15] 上海发电设备成套设计研究院. 百万机组单磨 25%大比例掺烧芦竹关键性技术突破[EB/OL]. (2025-02-10) [2025-04-03]. <https://news.bjx.com.cn/html/20250210/1426285.shtml>.
- Shanghai Power Equipment Research Institute Co., Ltd. Key technology breakthrough of 25% large proportion blending arundo donax with single mill in million kW unit[EB/OL]. (2025-02-10) [2025-04-03]. <https://news.bjx.com.cn/html/20250210/1426285.shtml>.
- [16] 张涛, 戴良旭, 王长安, 等. 燃煤耦合农林废弃物在流化床内燃烧的氮氧化物生成特性模拟研究[J]. 动力工程学报, 2024, 44(5): 692-702.
- ZHANG Tao, DAI Liangxu, WANG Chang'an, et al. Simulation study on nitrogen oxide formation characteristics in co-combustion of coal and agricultural waste in fluidized bed boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(5): 692-702.
- [17] 徐德厚, 周月桂, 金旭东, 等. O₂/CO₂ 气氛下甲烷燃烧中 NO_x 转化过程的 CHEMKIN 模拟[J]. 锅炉技术, 2015, 46(3): 75-79.
- XU Dehou, ZHOU Yuegui, JIN Xudong, et al. CHEMKIN simulation of NO_x conversion in methane combustion at O₂/CO₂ atmosphere[J]. Boiler Technology, 2015, 46(3): 75-79.
- [18] 王超伟, 王长安, 王鹏乾, 等. 空气深度分级燃烧 NO_x 排放特性的 CHEMKIN 模拟研究[J]. 燃烧科学与技术, 2020, 26(1): 42-50.
- WANG Chaowei, WANG Chang'an, WANG Pengqian, et al. CHEMKIN simulation of NO_x emission of deep air-staged combustion[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2020, 26(1): 42-50.
- [19] 钟北京, 徐旭常. 燃烧过程中 NO_x 形成的数学模拟[J]. 燃烧科学与技术, 1995(2): 120-128.
- ZHONG Beijing, XU Xuchang. Numerical simulation of NO_x formation in combustion processes[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 1995(2): 120-128.
- [20] 马莹. 能源植物与褐煤混燃特性[D]. 北京: 华北电力大学, 2017: 1.
- MA Ying. Co-combustion of energy plants and lignite[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017: 1.
- [21] 侯岩, 杨富鑫, 谭厚章, 等. 两段式沉降炉内生物质与煤掺烧的 NO_x 生成规律[J]. 煤炭学报, 2025, 50(2): 1315-1324.
- HOU Yan, YANG Fuxin, TAN Houzhang, et al. NO_x formation of biomass co-firing with coal in two-stage drop-tube furnace[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(2): 1315-1324.
- [22] 卢旺. 燃煤锅炉低 NO_x 燃烧技术的分析[J]. 能源与节能, 2021(12): 137-138.
- LU Wang. Analysis on low NO_x combustion technology of coal-fired boilers[J]. Energy and Energy Conservation, 2021(12): 137-138.
- [23] 邱正霖, 张小辉, 赵頔, 等. 火电厂氮氧化物生成机理及排放控制技术分析[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2023, 19(1): 23-29.
- QIU Zhenglin, ZHANG Xiaohui, ZHAO Di, et al. Analysis of NO_x generation mechanism and emission control technology in thermal power plants[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2023, 19(1): 23-29.
- [24] 周科, 刘明昱, 陈胜军, 等. 超超临界 1 000 MW 机组锅炉燃尽风对炉膛内燃烧及 NO_x 生成特性的影响[J]. 热力发电, 2023, 52(9): 138-146.
- ZHOU Ke, LIU Mingyu, CHEN Shengjun, et al. Effect of overfire air on combustion and NO_x formation characteristics in a 1 000 MW ultra-supercritical boiler[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(9): 138-146.
- [25] 任少辉, 李跃峰, 马仑, 等. 燃尽风风率对四角切圆锅炉燃烧及排放特性的影响[J]. 湖北电力, 2017, 41(7): 35-39.
- REN Shaohui, LI Yuefeng, MA Lun, et al. Effects of SOFA ratios on combustion and NO_x emissions of a tangentially fired boiler[J]. Hubei Electric Power, 2017, 41(7): 35-39.

(责任编辑 杨嘉蕾)