

15 MW 生物质循环流化床 NO_x 和温室气体排放特性孙锦余^{1,2}, 刘晓伟^{2,3}, 戴高峰², 赵小军¹, 郑仕杰², 薛东发¹, RAHMAN Ur Zia², 王学斌²

(1.南电能源综合利用有限公司, 广东 广州 510670; 2.西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049;

3.中广核研究院有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 生物质是零碳可再生能源, 对我国实现碳达峰、碳中和目标具有重要意义。虽然被视为清洁能源, 但生物质燃烧过程仍会排放 NO_x (NO 、 N_2O) 和温室气体 (CH_4 、 N_2O 、 CO_2), 有必要对生物质直燃的 NO_x 和温室气体排放特性进行研究。测量某 15 MW 生物质循环流化床的 NO_x 和温室气体排放, 并探究了改变床压、一二次风比、前后墙二次风比、废木料掺烧比例等因素对 NO_x 和温室气体排放特性的影响。燃烧调整试验表明: 升高床压有利于降低 NO 排放, 但降幅很小, 且会造成 CO 和 CH_4 体积分数上升, CO_2 体积分数降低; 随一二次风比增大, NO 排放略降低, 这意味着可适当降低二次风以降低 NO 排放量, CO 和 CH_4 体积分数降低, CO_2 体积分数升高; 当前墙二次风开度/后墙二次风开度较小或较大时, 均有利于降低 NO , CO 和 CH_4 排放量也较低; 高含氮废木料掺烧比例由 20% 增至 50% 时, NO 和 CO_2 排放量先升高后降低, CO 和 CH_4 排放量先降低后升高。研究表明当前生物质循环流化床锅炉采用低过量空气系数控制 NO_x 排放时, CO 和 CH_4 排放浓度显著提高, 一方面降低了燃烧效率, 另一方面 CH_4 作为温室气体排放也需引起关注; 炉内燃烧调整手段对 NO_x 降低有限, 高含氮燃料在不完全燃烧的情况下还会生成 NH_3 和 HCN 。

关键词: 生物质; 循环流化床; NO ; N_2O ; 温室气体**中图分类号:** TK6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2023)09-0032-06

Characterization of NO_x and greenhouse gas emissions in a 15 MW biomass circulating fluidized bed

SUN Jinyu^{1,2}, LIU Xiaowei^{2,3}, DAI Gaofeng², ZHAO Xiaojun¹,ZHENG Shijie², XUE Dongfa¹, RAHMAN Ur Zia², WANG Xuebin²

(1.Nandian Synthesis Energy Utilization Co., Ltd., Guangzhou 510670, China; 2.School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3.China Nuclear Power Technology Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: Biomass is a "zero carbon" renewable energy source and is of great importance to China in achieving the goal of "peak carbon emission and achieve carbon neutrality". Although it is considered as a clean energy source, biomass combustion still emits NO_x (NO , N_2O) and greenhouse gases (CH_4 , N_2O , CO_2). Therefore, it is necessary to investigate the NO_x and greenhouse gas emissions characteristics of direct biomass combustion. NO_x and greenhouse gas emissions from a 15 MW biomass circulating fluidized bed were measured, and the effects of bed pressure, primary and secondary air ratio, front and back wall secondary air ratio, waste wood blending ratio on NO_x and greenhouse gas emission characteristics were investigated. The combustion adjustment experiments show that the increase in bed pressure is beneficial to reduce NO and CO_2 emissions, but the reduction is small and causes an increase in the volume fraction of CO and CH_4 , and a decrease in CO_2 volume fraction. With an increase in the primary to secondary air ratio, NO emissions are slightly reduced with a low CO and CH_4 emission, which means that the secondary air can be reduced appropriately to reduce NO emissions. When the ratio of secondary air from front and back walls is small or large, it is beneficial to reduce NO with a low CO and CH_4 emission. When

收稿日期: 2022-08-09; **责任编辑:** 白娅娜 **DOI:** 10.13226/j.issn.1006-6772.SG22080901**基金项目:** 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作资助项目(丹麦)(2021YFE0107300)**作者简介:** 孙锦余(1978—), 男, 江苏盐城人, 高级工程师, 硕士。E-mail: sunjy@csg.cn**通讯作者:** 王学斌(1984—), 男, 山东潍坊人, 教授, 博士。E-mail: wxb005@mail.xjtu.edu.cn**引用格式:** 孙锦余, 刘晓伟, 戴高峰, 等. 15 MW 生物质循环流化床 NO_x 和温室气体排放特性[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(9): 32-37.SUN Jinyu, LIU Xiaowei, DAI Gaofeng, et al. Characterization of NO_x and greenhouse gas emissions in a 15 MW biomass circulating fluidized bed[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(9): 32-37.

移动阅读

the mixing ratio of waste wood with high content of N is increased from 20% to 50%, NO and CO₂ emissions first emissions increases and then decreases, while the CO and CH₄ show a reverse trend. This study shows that when low excess air co-efficient combustion method is employed to control NO_x emissions of the biomass circulating fluidized bed boiler, the concentration of CO and CH₄ emission is significantly increased, which reduces combustion efficiency. In addition, as a greenhouse gas emission, CH₄ must be considered. Combustion adjustments method is not sufficient enough to control NO_x, while high amount of NH₃ and HCN are emitted when some certain high nitrogen-containing fuels are burned with low oxygen combustion.

Key words: biomass; CFB; NO_x; N₂O; greenhouse gas

0 引言

生物质是可再生能源,能替代化石能源减缓能源危机,在电网调峰中将承担重要作用,生物质清洁高效利用对于我国实现碳达峰、碳中和目标和实现我国能源结构绿色低碳转型具有重要意义^[1]。2021 年我国生物质资源产量约合 4.2 亿 t 标煤,而目前有效利用量较低^[2]。农林生物质主要利用方式包括直接燃烧、化学转化等^[3]。直燃发电技术能大规模利用生物质能,是生物质主要利用途径。

生物质燃烧过程产生 NO_x、SO_x、粉尘等污染物,据估计,2017 年我国农林生物质直燃过程 NO_x 排放量达 29 516 t,SO₂ 排放量达 14 192.1 t^[4]。由于生物质含 S 量较低,生物质电厂不需投产脱硫设备,通过简单方法即可实现低硫排放。NO_x 成为目前生物质电厂急需解决和关注的对象。生物质脱硝方法有低氮燃烧技术、选择性非催化还原(SNCR)、选择性催化还原技术(SCR)、新型脱硝技术等。低氮燃烧技术包括低过量空气系数燃烧、空气分级、燃料再燃、低 NO_x 燃烧器、烟气再循环等^[5],此类方法操作简单,脱硝效率最高达 50%,缺点是会造成灰渣可燃物比例上升、锅炉效率下降。选择性非催化还原(SNCR)方法采用氨水或尿素溶液喷入炉膛脱硝,投资运行费用低,缺点是电厂燃用生物质水分较大,实际炉温低于 SNCR 最佳脱硝温度区间,因此 SNCR 脱硝效率较低。SCR 技术脱硝效率达 80%,主要缺点是投资运行成本高,由于生物质碱金属含量极高,使 SCR 催化剂失活。新型脱硝技术包括高分子脱硝技术(PNCR)、液态生物钙脱硝技术(B-SNCR)、臭氧脱硝技术等,工业化应用较少^[6]。

由于大多数电厂采用低过量空气系数燃烧和空气分级方法协同控制 NO_x 排放,导致生物质燃料在主燃区燃烧不充分,锅炉出口 CO 和 CH₄ 体积分数较高,且炉内 NO_x 前驱体 NH₃ 和 HCN 生成较多。NH₃ 生成途径包括生物质中氨基酸或蛋白质释放的氨基;焦油氮及半焦氮二次反应;HCN 在炭表面的水解转化^[7]。HCN 来源于一次热解燃料氮分解成

环酰胺、环酰胺裂解成 HCN,这是 HCN 主要生成途径;高温下焦油氮及半焦氮热裂解^[8]。与煤相比,生物质不完全燃烧易生成较多 NH₃,且随含氮量增加,NH₃ 排放量增加^[9];随温度升高,NH₃ 排放量先升后降^[10]。NH₃ 和 HCN 等前驱体再进一步燃烧生成 NO_x。

此外,生物质燃烧排放 CO₂、CH₄、N₂O 等温室气体^[11]。由于植物碳来源于光合作用吸收大气中 CO₂,因此生物质也被视为零碳能源。然而,生物质燃烧产生的 CO₂ 排放具有大量、短期、局地特征,而被植被后续固定是一个缓慢过程,因此生物质的 CO₂ 排放引起关注^[12]。此外,N₂O 全球变暖潜能值(GWP)是 CO₂ 的 298 倍,CH₄ 的 GWP 是 CO₂ 的 34 倍^[13],认识电厂 N₂O 和 CH₄ 排放特性对生物质电厂的温室气体减排具有重要意义^[14]。

农林生物质直燃发电的主要类型有水冷振动炉排和循环流化床。由于循环流化床燃料适应性好,能处理不同尺寸、水分、热值的生物质,具有较高的燃烧效率和较低的污染物排放,近年来应用广泛^[15]。生物质循环流化床的燃烧调整试验较多。费芳芳等^[16]在 50 MW 循环流化床上开展了燃烧调整试验,结果表明降低一次风量和运行氧量可降低 NO_x 排放。王鹏等^[17]对某 50 MW 循环流化床进行燃烧优化调整试验,研究了降低一次风比例,调整上下二次风门挡板开度、锅炉床压等方法对锅炉 NO_x 和锅炉效率的影响。然而,目前对生物质循环流化床燃烧过程中 N₂O、CH₄ 等组分排放还未见大量报道。因此,有必要对生物质循环流化床的 NO_x 和温室气体排放特性进行研究。

笔者对某 15 MW 生物质循环流化床的温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)和 NO_x(NO、N₂O)进行测量,研究了床压、一二次风比、前后墙二次风比、废木料掺烧比例的影响,以期得到综合控制生物质循环流化床锅炉 NO_x 和温室气体排放的手段。

1 试验

1.1 锅炉简介

测试某 15 MW 生物质循环流化床锅炉排放特

性,锅炉系统如图1所示。该锅炉为高温高压、单汽包、自然循环、循环流化床燃烧方式,全悬吊结构。炉膛采用悬吊结构,炉膛分为下部密相区、上部稀相区2部分。锅炉安装有旋风分离器,尾部烟道依次布置高温过热器、低温过热器、省煤器、空气预热器、

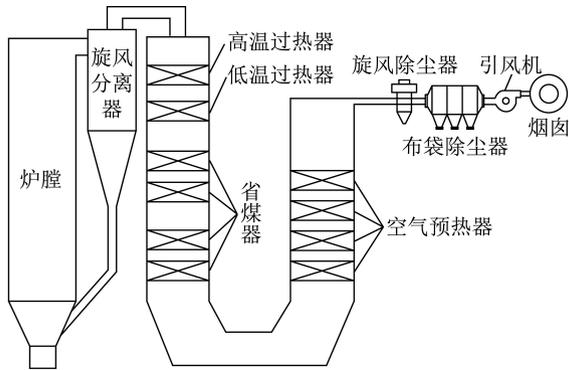


图1 循环流化床示意

Fig.1 Schematic diagram of circulating fluidized bed boiler

旋风除尘器、布袋除尘器、引风机、烟囱。

一次风系统用风由一次风机提供分3路。第1路:经一次风空气预热器加热后的热风进入炉膛底部水冷风室,通过布置在布风板上的风帽使床料流化,并形成向上通过炉膛的气固两相流;第2路:从空预热器后引一股热风用于炉前气力播料风;第3路:一部分未经预热的冷一次风作为给料机密封风。二次风分2排从前后墙送入。

锅炉额定工况下燃烧时,床温长期维持在820℃,空气过量系数为1.27。

1.2 燃料特性分析

该锅炉主要燃料为桉树皮、废木料。常规工况下,废模板掺烧比例为30%,桉树皮为70%。生物质燃料工业分析和元素分析见表1,桉树皮氮含量为0.55%,而废木料氮含量高达4.4%。2种主要燃料硫含量均极低。废木料的热值高于桉树皮。

表1 生物质燃料工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of biomass

燃料	工业分析/%				元素分析/%					$Q_{\text{net,ar}}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
	M_{ad}	V_{d}	A_{d}	FC_{d}	C_{d}	H_{d}	O_{d}	N_{d}	S_{d}	
桉树皮	5.45	76.94	4.93	18.13	42.34	5.766	46.40	0.55	0.011	5.60
废木料	16.25	80.52	7.75	11.73	39.96	5.830	42.03	4.40	0.027	12.95

1.3 测试方法及工况

在锅炉布袋除尘器前方尾部烟道布置烟气测点,采用Gasmeter DX4000测量烟气中CO、CH₄、NO、N₂O、O₂等浓度。研究运行床压、一二次风比、前后墙二次风开度、废木料掺烧比例等对循环流化床燃烧过程中污染物排放特性的影响,测试工况见表2。

表2 测试工况

Table 2 Test conditions

序号	工况
1	一次风27 000 m ³ /h,二次风25 000 m ³ /h
2	一次风26 000 m ³ /h,二次风26 000 m ³ /h
3	一次风25 000 m ³ /h,二次风27 000 m ³ /h
4	前后墙二次风开度=20:70
5	前后墙二次风开度=40:60
6	前后墙二次风开度=60:40
7	前后墙二次风开度=70:20
8	废木料掺烧20%
9	废木料掺烧40%
10	废木料掺烧50%
11	床压5 kPa
12	床压6 kPa

基准工况床压为4 kPa,一次风为27 000 m³/h,二次风25 000 m³/h,运行床温为820℃,桉树皮和废木料掺烧比为7:3。每次调整工况后,等待1~

2 h至锅炉运行稳定,连续测量20 min烟气,计算得到烟气组分平均值,根据式(1)、式(2)将测得的烟气组分浓度折算为6% O₂基准。

$$\rho' = \frac{M}{22.4} \frac{273}{273+T} \frac{P}{101325}, \quad (1)$$

$$\rho = \rho' \frac{21 - \varphi(\text{O}_2)}{21 - \varphi'(\text{O}_2)}, \quad (2)$$

式中, M 为所测污染物的相对分子质量,g/mol; T 为温度,℃; P 为压力,Pa; ρ 为基准氧含量下大气污染物排放质量浓度,mg/m³; ρ' 为实测大气污染物排放质量浓度,mg/m³; $\varphi'(\text{O}_2)$ 为实测氧体积分数,%; $\varphi(\text{O}_2)$ 为基准氧体积分数,%。

2 结果与讨论

2.1 床压对锅炉烟气排放特性的影响

运行床压对锅炉排放特性的影响如图2所示。随床压升高,NO和N₂O下降。本试验中,升高床压由降低一次风量导致,一次风量降低,主燃区处于富燃料状态,生物质燃料发生不完全燃烧产生焦炭、挥发分等组分,由于风速下降导致焦炭和挥发分在富燃料区停留时间变长,有利于NO和N₂O还原。

由图2可知,升高床压对降低NO排放效果有限,床压升高1 kPa,NO排放量仅降低4 mg/m³,考

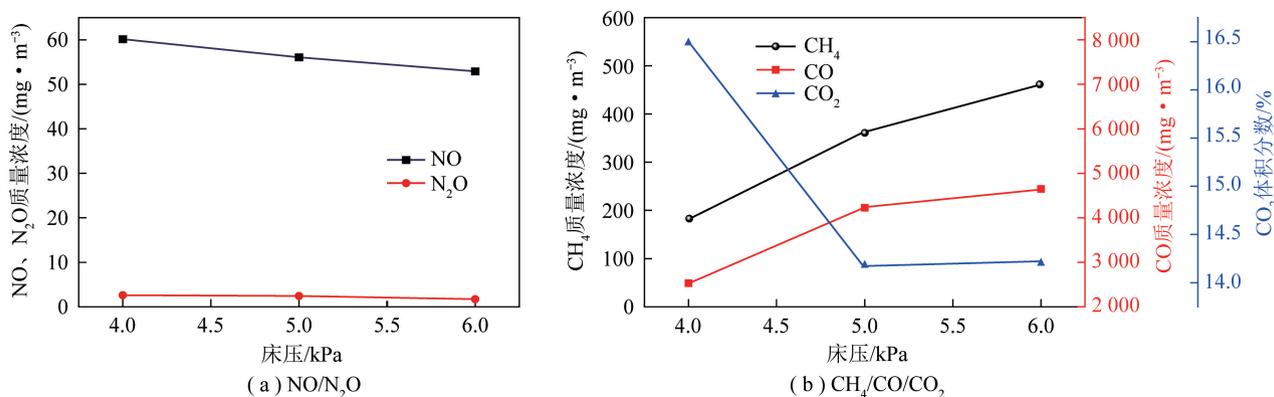


图2 床压对锅炉烟气排放特性的影响

Fig.2 Effect of bed pressure on the pollutant emissions of the boiler

考虑到流化效果和流化床锅炉运行的安全性,床压可适度降低。王鹏等^[17]对某 50 MW 生物质循环流化床的燃烧调整试验表明,床压对 NO 的影响不显著。

对比各种含氮组分含量,发现该循环流化床中,运行床温为 820 ℃ 时, N₂O 排放值极低。由于床压升高,燃料在富燃料区的停留时间变长,生物质热解将更加充分,因此生成较多 CO,能还原 NO_x。N₂O 在所有工况下的排放值均较低,这是由于一次风较小,在主燃区处于强还原性气氛,生成的 HCN 无法

在主燃区大量转化为 NCO 和 N₂O。

随运行床压升高,CO 和 CH₄ 体积分数升高,这是由于床压升高后一次风量随之降低,生物质在密相区燃烧氧量低,燃烧不完全,因此 CO 和 CH₄ 体积分数较高,CO₂ 体积分数降低。

2.2 一二次风比对锅炉烟气排放特性的影响

总风量 52 000 m³/h,前后墙二次风比为 20 : 60,废木料掺烧 30% 时,改变一二次风量相对比例,研究一二次风比对烟气排放特性的影响如图 3 所示。

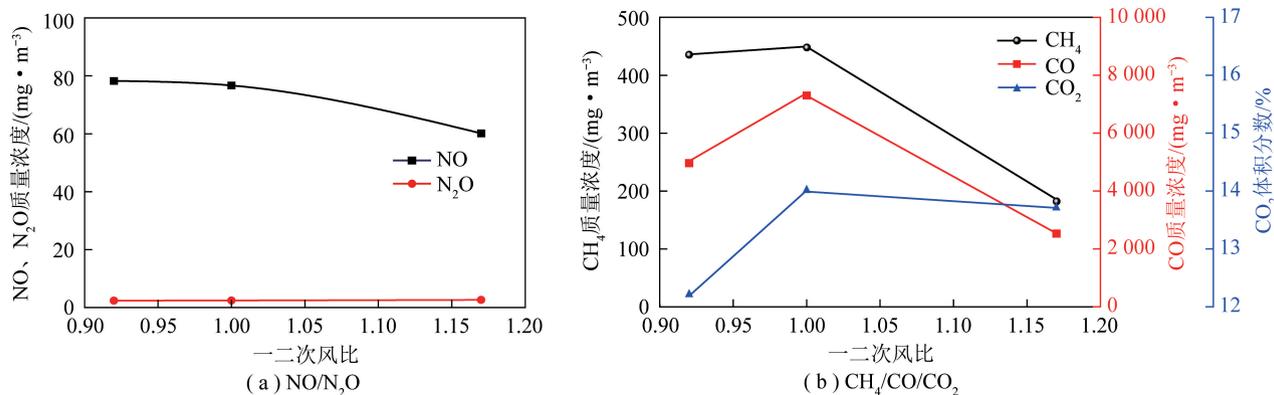


图3 一二次风比对锅炉烟气排放特性的影响

Fig.3 Effect of primary/secondary air ratio on the pollutant emissions of the boiler

由图 3 可知,随一二次风比增大,NO 下降。一次风量增大,燃料在主燃区燃烧相对更充分,生成的 CO 和 CH₄ 减少,减弱 NO_x 的还原作用,因此 NO 减少,说明降低二次风量有利于降低 NO 排放量。SAASTAMOINEN 等^[18]发现降低二次风量有利于降低 NO 排放量。

随一二次风比增大,CO 和 CH₄ 体积分数先升高后降低。一次风量较低时,燃料在主燃区处于富燃料状态,在密相区产生高浓度 CO 和 CH₄,而较高二次风可氧化生成 CO 和 CH₄,因此 CO 和 CH₄ 排放量较低。一次风增大、二次风减少时,由于燃料在主燃区燃烧相对充分,因此 CO 和 CH₄ 排放量较低。

2.3 前后墙二次风比对锅炉烟气排放特性的影响

前后墙二次风比对锅炉烟气排放特性的影响如图 4 所示,可知随前后墙二次风开度比增大,NO 质量浓度先升高后降低。固定前墙二次风,增大后墙二次风,即前后墙二次风比由 20 : 60 增至 20 : 70 时,NO 升高,这是由于总开度增加导致总风量增大,燃烧相对充分,燃料氮更多转化为 NO。

随前后墙二次风开度进一步增大,NO 降低,CO 和 CH₄ 排放量均呈降低趋势,这是由于前墙二次风大时,靠近给料机一侧的挥发分燃烧状况变好,因此生成的 CO 和 CH₄ 减少,而炉膛内部物料混合燃烧状态较好,有利于主燃区 NO_x 还原^[19]。

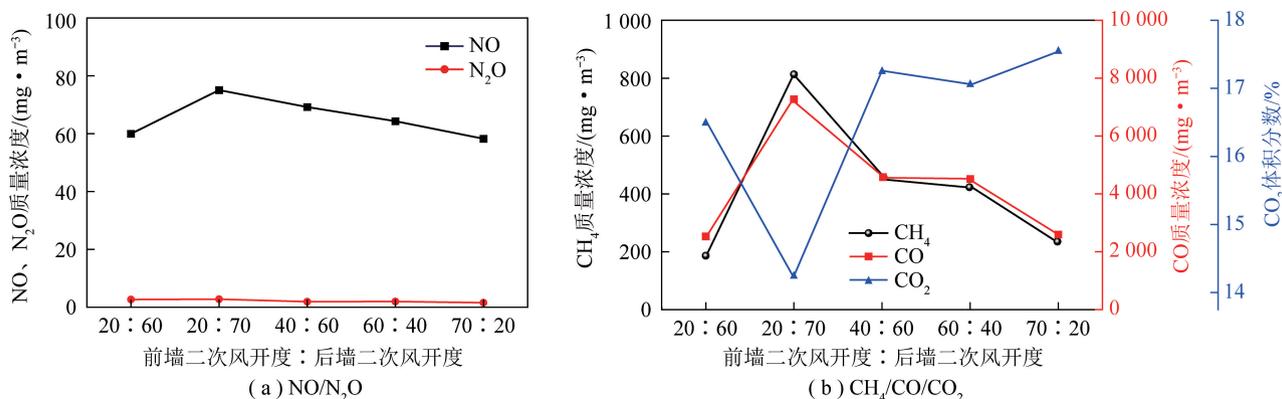


图4 前后墙二次风比对锅炉烟气排放特性的影响

Fig.4 Effect of front/back wall secondary air ratio on the pollutant emissions of the boiler

前后墙开度风量相差较大时,如前后墙二次风开度比为 20:60 或 70:20 时,在炉膛一侧能更好形成还原性气氛,有利于降低 NO 排放。在实际运行中,可将前后墙的二次风开度设置相差较大。

2.4 废木料掺烧比例对锅炉烟气排放特性的影响

废木料掺烧比例对锅炉烟气排放特性的影响如图 5 所示,可知随废木料掺烧比例增加,NO 先升高后降低。废木料氮含量高达 4.4%,因此随废木料掺烧增加,燃料氮增多,NO 排放量升高。废木料掺烧比例降至 20% 时,由于废木料热值较高,掺烧比例

较低导致床温下降,促进废木料在主燃区热解过程中一次风不变时,该掺烧比例下物料给料量相对较大,氧量相对较低,因此限制了 NO 生成过程,NO 生成较低。由于床温较低,CO 氧化速率下降,CO 排放量很高。废木料掺烧比例由 30% 增至 50% 时,由于废木料氮元素显著高于桉树皮,随氮含量增加,NH₃ 释放量增加^[9],因此可能生成的 NH₃ 和 HCN 量增加,有助于 NO 发生自发 SNCR 过程,降低 NO 排放。废木料掺烧 50% 时,运行床温上升,生成 NO 升高。同时 CO 和 CH₄ 排放量升高。

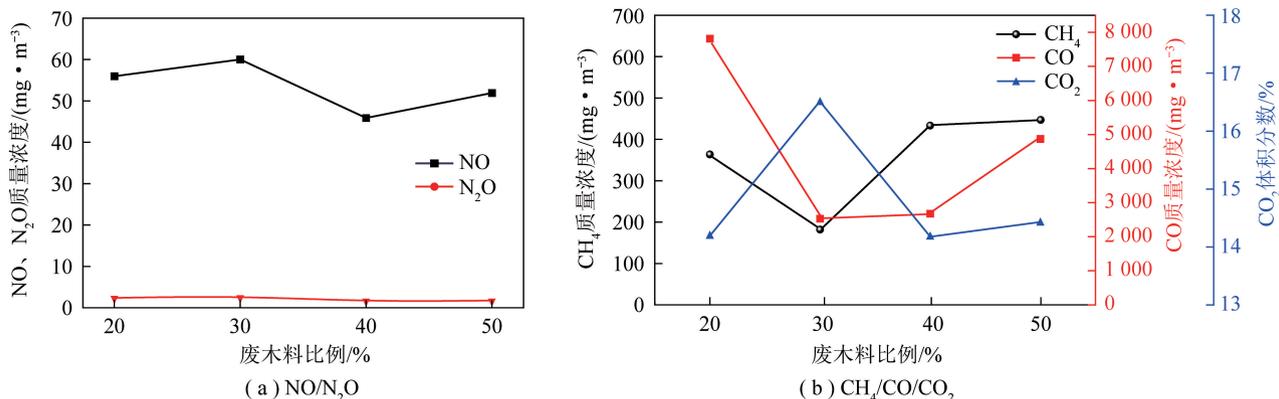


图5 废木料掺烧比例对锅炉烟气排放特性的影响

Fig.5 Effect of the co-firing ratio of waste wood on the pollutant emissions of the boiler

2.5 常规污染物排放特性

对比不同工况下排放数据,发现某 15 MW 生物质循环流化床在额定负荷下、运行床温 820 °C 时,试验工况内各污染物排放量为: NO 40~78 mg/m³, N₂O 1.5~2.6 mg/m³, CO 2 500~7 300 mg/m³, CH₄ 180~815 mg/m³, CO₂ 14.0%~17.5%。N₂O 排放可忽略不计,推测可能是高氮含量废木料掺烧导致生物质燃烧时产生大量 NH₃,有利于炉内发生 NO 还原反应,因此 NO 和 N₂O 排放量均较低^[20]。

循环流化床在较高温度下运行时,主要温室气体排放源是 CH₄,按照 N₂O 全球变暖潜能值(GWP)

是 CO₂ 的 298 倍,CH₄ 的 GWP 是 CO₂ 的 34 倍计算^[13],相当于烟气中 CO₂ 排放量增加 0.6%~2.7%,需要引起关注。

3 结论

1) 生物质循环流化床的燃烧调整试验表明:升高床压,有利于降低 NO 排放,但会造成 CO 和 CH₄ 排放量升高;增大一二次风比,NO 排放量有所降低;前后墙二次风比为 7:2 时,NO 排放量较低,CO 和 CH₄ 排放量也较低;增大高氮含量废木料掺烧比例时,NO 排放量先升高后降低。

2) 采用低氧燃烧方法控制 NO_x 排放导致实际燃烧过程中 CO 和 CH₄ 排放量升高, 其中 CH₄ 作为温室气体需引起关注。燃烧调整试验中, CH₄ 排放量为 180~815 mg/m³, 按温室气体排放因子折算, 相当于烟气中 CO₂ 排放量增加 0.6%~2.7%, 需引起关注。

3) 燃烧调整对 NO_x 减排效果有限, 大比例掺烧高氮含量废木料有助于降低 NO_x 排放。

参考文献 (References):

[1] 毛健雄, 郭慧娜, 吴玉新. 中国煤电低碳转型之路: 国外生物质发电政策/技术综述及启示 [J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 1-11.
MAO Jianxiong, GUO Huina, WU Yuxin. Road to low-carbon transformation of coal power in China: A review of biomass co-firing policies and technologies for coal power abroad and its inspiration on biomass utilization [J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(3): 1-11.

[2] 中国产业发展促进会生物质能产业分会. 3060 零碳生物质能发展潜力蓝皮书[R]. 北京: 中国产业发展促进会生物质能产业分会, 2021.

[3] 张东旺, 范浩东, 赵冰, 等. 国内外生物质能源发电技术应用进展 [J]. 华电技术, 2021, 43(3): 70-75.
ZHANG Dongwang, FAN Haodong, ZHAO Bing, et al. Development of biomass power generation technology at home and abroad [J]. Huadian Technology, 2021, 43(3): 70-75.

[4] LIN Shumin, TIAN Hezhong, HAO Yan, et al. Atmospheric emission inventory of hazardous air pollutants from biomass direct-fired power plants in China: Historical trends, spatial variation characteristics, and future perspectives [J]. Science of the Total Environment, 2021, 767: 144636.

[5] 毛洪钧, 李悦宁, 林应超, 等. 生物质锅炉氮氧化物排放控制技术进展 [J]. 工程科学学报, 2019, 41(1): 1-11.
MAO Hongjun, LI Yuening, LIN Yingchao, et al. Overview of advances in emission control technologies for nitric oxides from biomass boilers [J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(1): 1-11.

[6] 史俊高, 安晓熙, 房有为. 生物质锅炉脱硝技术现状及研究进展 [J]. 化学工业, 2019, 37(3): 52-58.
SHI Jungao, AN Xiaoxi, FANG Youwei. Status and research progress of denitrification technology in biomass boilers [J]. Chemical Industry, 2019, 37(3): 52-58.

[7] LENG Lijian, YANG Lihong, CHEN Jiefeng, et al. A review on pyrolysis of protein-rich biomass: Nitrogen transformation [J]. Bioresource Technology, 2020, 315: 123801.

[8] 周建强, 高攀, 董长青, 等. 固体生物质燃烧中氮氧化物产生机理综述 [J]. 热力发电, 2018, 47(12): 1-9, 16.
ZHOU Jianqiang, GAO Pan, DONG Changqing, et al. Formation mechanism of nitrogen oxides during solid biomass fuel burning: A review [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(12):

1-9, 16.

[9] BECIDAN Michaël, SKREIBERG Øyvind, HUSTAD Johan E. NO_x and N₂O precursors (NH₃ and HCN) in pyrolysis of biomass residues [J]. Energy & Fuels, 2007, 21(2): 1173-1180.

[10] 詹昊, 张晓鸿, 阴秀丽, 等. 生物质热化学转化过程含 N 污染物形成研究 [J]. 化学进展, 2016, 28(12): 1880-1890.
ZHAN Hao, ZHANG Xiaohong, YIN Xiuli, et al. Formation of nitrogenous pollutants during biomass thermo-chemical conversion [J]. Progress in Chemistry, 2016, 28(12): 1880-1890.

[11] BRAY Casey D, BATTYE William H, ANEJA Viney P, et al. Global emissions of NH₃, NO_x, and N₂O from biomass burning and the impact of climate change [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2021, 71(1): 102-114.

[12] YAN Xiaoyuan, OHARA Toshimasa, AKIMOTO Hajime. Bottom-up estimate of biomass burning in mainland China [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(27): 5262-5273.

[13] EL-HAWWARY Alaa, BREZINGER Kristof, LEE Hyo Jung, et al. Greenhouse gas (CO₂, CH₄, and N₂O) emissions after abandonment of agriculture [J]. Biology and Fertility of Soils, 2022, 58(5): 579-591.

[14] TSUPARI Eemeli, MONNI Suvi, TORMONEN Kauko, et al. Estimation of annual CH₄ and N₂O emissions from fluidised bed combustion: An advanced measurement-based method and its application to Finland [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2007, 1(3): 289-297.

[15] 胡南, 谭雪梅, 刘世杰, 等. 循环流化床生物质直燃发电技术研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 32-40.
HU Nan, TAN Xuemei, LIU Shijie, et al. Power generation of biomass direct combustion in circulating fluidized bed [J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(3): 32-40.

[16] 费芳芳, 毕武林. 生物质直燃发电锅炉 NO_x 排放特性与调整试验 [J]. 广东电力, 2015, 28(8): 15-18.
FEI Fangfang, BI Wulin. NO_x Emission characteristic of biomass direct combustion power generation boiler and adjustment experiment [J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(8): 15-18.

[17] 王鹏, 李定青. 50 MW 生物质循环流化床锅炉燃烧优化调整试验研究 [J]. 工业锅炉, 2021(6): 49-53.
WANG Peng, LI Dingqing. Experimental study of combustion optimization and adjustment of 50 MW biomass circulating fluidized bed boiler [J]. Industrial Boilers, 2021(6): 49-53.

[18] SAASTAMOINEN Heidi, LEINO Timo. Fuel staging and air staging to reduce nitrogen emission in the CFB combustion of bark and coal [J]. Energy & Fuels, 2019, 33(6): 5732-5739.

[19] SAIKAEW Teerachai, SUPUDOMMAK Prajak, MEKASUT Lursuang, et al. Emission of NO_x and N₂O from co-combustion of coal and biomass in CFB combustor [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2012, 10: 26-32.

[20] MAHMOUDI Shiva, BAEYENS Jan, SEVILLE Jonathan P K. NO_x formation and selective non-catalytic reduction (SNCR) in a fluidized bed combustor of biomass [J]. Biomass and Bioenergy, 2010, 34(9): 1393-1409.