

市政污泥流化床掺烧生物质的 NO 与 SO₂ 排放特性研究

魏志强, 马吉亮, 陈晓平, 赵子范

(东南大学 能源热转换及其过程测控教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要: 为了探究市政污泥燃烧过程中的气态污染物排放特性, 在 30 kW 鼓泡流化床实验台上进行了市政污泥的燃烧实验, 研究燃烧温度、二次风率、秸秆掺混比等参数对气态污染物排放特性的影响。结果表明: 燃烧温度的升高会显著提高 NO 与 SO₂ 的排放; 提高二次风率使 NO 排放浓度减少, SO₂ 排放浓度增加; 由于生物质中较低的 N、S 含量以及生物质与污泥燃烧的协同作用, 污泥掺烧生物质能够有效地减少 NO 与 SO₂ 的排放; 秸秆占比由 0 提升至 40%, NO 由 289 mg/m³ 下降至 140 mg/m³, 而 SO₂ 排放浓度也从 3 949 mg/m³ 下降至 1 725 mg/m³; 污泥掺烧秸秆时, NO 与 SO₂ 的整体排放特性与污泥单独焚烧相似, 掺烧秸秆能够加快整体的燃烧速率, 并加强燃烧气氛的氧化性, 进而影响气态污染物的排放。

关键词: 污泥; 秸秆; 流化床; 掺烧; 一氧化氮; 二氧化硫

中图分类号: X705

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.11.018

[引用本文格式] 魏志强, 马吉亮, 陈晓平, 等. 市政污泥流化床掺烧生物质的 NO 与 SO₂ 排放特性研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(11): 151-157. WEI Zhi-qiang, MA Ji-liang, CHEN Xiao-ping, et al. Study on NO and SO₂ emission characteristics of municipal sludge fluidized bed mixed with biomass[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(11): 151-157.

Study on NO and SO₂ Emission Characteristics of Municipal Sludge Fluidized Bed mixed with Biomass

WEI Zhi-qiang, MA Ji-liang, CHEN Xiao-ping, ZHAO Zi-peng

(Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096)

Abstract: In order to explore the emission characteristics of gaseous pollutants during the combustion of municipal sludge, the combustion experiments of municipal sludge were carried out on a 30 kW bubbling fluidized bed test rig, and the effects of combustion temperature, secondary air rate, straw blending ratio and other parameters on the emission characteristics of gaseous pollutants were studied. The results show that the increase of combustion temperature will significantly increase the emission of NO and SO₂; increasing the secondary air rate can reduce NO emission concentration and increase SO₂ emission concentration; due to the low N and S content in biomass and the synergetic effect of biomass and sludge combustion, sludge blended with biomass can effectively reduce the emission of NO and SO₂; the proportion of straw increases from 0 to 40%, NO emission concentration decreases from 289 mg/m³ to 140 mg/m³, and SO₂ emission concentration also decreases from 3 949 mg/m³ to 1 725 mg/m³; when the sludge is mixed with straw, the overall emission characteristics of NO and SO₂ are similar to that of the sludge in-

收稿日期: 2022-12-23; 修订日期: 2023-02-27

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFC1908703)

Fund-supported Project: National Key R&D Program of China (2020YFC1908703)

作者简介: 魏志强(1996-), 男, 东南大学硕士研究生.

通讯作者: 马吉亮(1984-), 男, 东南大学副教授.

cineration alone, the mixing of straw can accelerate the overall combustion rate, strengthen the oxidation of the combustion atmosphere, and then affect the emission of gaseous pollutants.

Key words: sludge, straw, fluidized bed, mixed burning, NO, SO₂

引 言

焚烧法可以有效去除污泥中难以降解的有机质成分和有害的病原体^[1],符合减量化、无害化及资源化的处理原则^[2],已成为国内外处置污泥的主要手段^[3]。但是,污泥富含氮元素及硫元素,在焚烧过程中会排放大量的 NO 及 SO₂。中国的生物质资源十分丰富^[4]。与污泥相比,生物质的热值及挥发分含量更高,着火温度更低,易于燃尽;生物质的含氮量和含硫量较低^[5],含氮量一般为 0.5%~3%,含硫量一般为 0.1%~1.5%,因此,污泥掺烧生物质可减少大气污染物的排放。生物质燃烧不会增加新的 CO₂排放,有助于缓解温室效应^[6]。

目前,国内外一些学者在不同方面研究了污泥与生物质燃料的掺烧。Liu 等人^[7]在马弗炉中进行的秸秆与污泥的热重实验表明,污泥中由 N 到 NO 的转化率低于秸秆。陶志伟等人^[8]在管式炉中进行了城市污泥与稻草混烧实验,指出随着稻草掺混比例的提高,燃烧过程缩短,CO 的生成总量逐渐减小。Zhang 等人^[9]研究了污泥/稻秆共热解特性,发现污泥与稻秆的混合热解过程具有显著的协同作用。

已有文献主要通过管式炉反应器研究污泥/生物质的混燃机理。流化床因其较好的燃料适应性、高效的传热传质效率及热稳定性,广泛应用于固废处置领域。然而在流化床操作条件下,污泥单独焚烧及与生物质掺烧过程的 NO 与 SO₂等典型污染物的排放特性尚不明确。本文在 30 kW 鼓泡流化床实验台上开展污泥与生物质的混燃特性研究,考察污泥燃烧过程中 NO 与 SO₂的排放特性,特别是污泥掺烧生物质时的污染物排放特性,为工业应用中的污染物排放治理提供参考。

1 实验研究

1.1 实验材料

所选取的燃料为来自宁波某污泥处理厂的干化污泥和来自张家港某地的玉米秸秆,工业分析与元素分析如表 1 和表 2 所示,灰成分分析如表 3 所示。市政污泥的挥发分含量较高,易于着火,但其灰分含量过高,不易燃尽;秸秆的固定碳和灰分含量较低,挥发分含量较高。入炉污泥的粒径为 0~4 mm,秸秆燃料尺寸为 0~2 mm。实验中所使用的床料为直径 0.45~0.8 mm 的石英砂。

表 1 污泥工业分析及元素分析

Tab.1 Proximate and ultimate analyses of sludge

工业分析%				元素分析%					低位发热量
<i>M</i>	<i>A_d</i>	<i>V_d</i>	<i>FC_d</i>	N	C	H	S	O	<i>Q_{net, ar}</i> /MJ·kg
39	55.33	36.01	8.66	2.98	19.78	3.627	0.832	21.608 5	6.47

表 2 秸秆工业分析及元素分析

Tab.2 Proximate and ulltimate analyses of straw

工业分析%				元素分析%					低位发热量
<i>M</i>	<i>A_d</i>	<i>V_d</i>	<i>FC_d</i>	N	C	H	S	O	<i>Q_{net, ar}</i> /MJ·kg
9.03	28.77	57.51	13.72	0.735	34.97	4.641	0.243	36.528	13.04

表 3 污泥与秸秆的灰成分分析(%)

Tab.3 Ash composition analysis of sludge and straw(%)

灰成分	K ₂ O	Na ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂	MnO ₂	P ₂ O ₅
污泥	1.77	1.13	41.78	23.56	9.58	4.14	2.51	1.65	0.75	0.34	15.703
秸秆	2.37	0.33	84.60	2.01	1.16	1.54	1.32	0.44	0.58	0.39	1.318

1.2 实验装置

实验采用的 30 kW 鼓泡流化床实验台主要由送气系统、焚烧系统、烟气分析系统和尾气处理系统等组成,如图 1 所示。

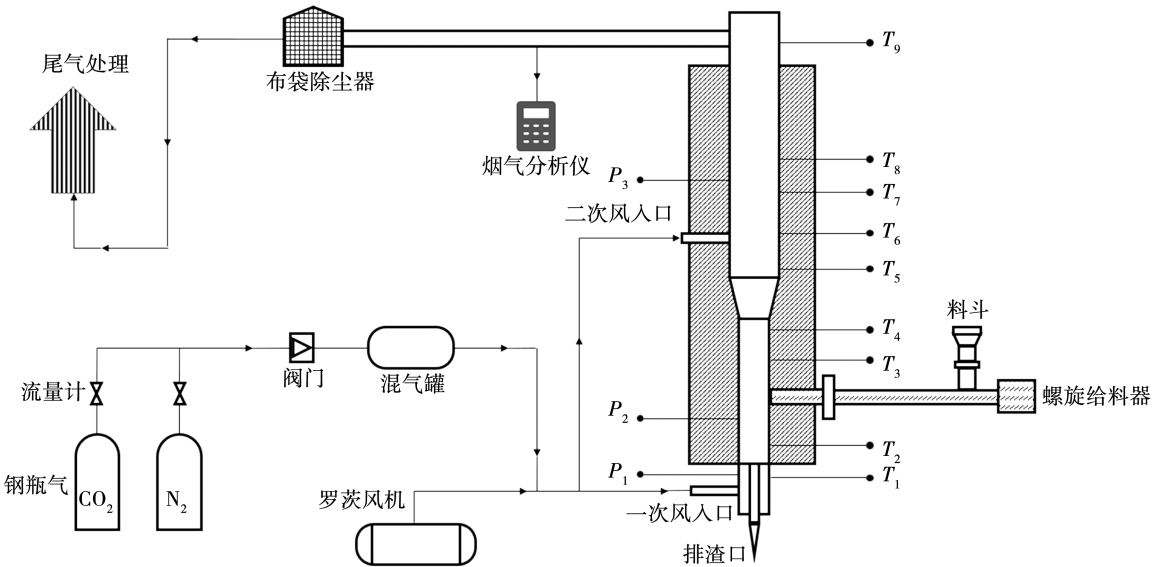


图 1 流化床结构示意图
Fig. 1 Structure diagram of fluidized bed

由图 1 可知,流化床密相区直径为 100 mm,稀相区直径为 120 mm,炉膛总高度为 4 700 mm,给料口位于布风板上方 340 mm 处,二次风口位于布风板上方 810 mm 处。

实验所用石英砂颗粒的临界流化速度为 0.12 m/s,污泥的流化速度为 0.26 m/s,秸秆的流化速度为 0.09 m/s。在运行过程中,实际的流化数为 2.5~3,因此流化速度为 0.3~0.36 m/s,使混合燃料和床料都处于流化状态。送气系统由罗茨风机和氮气、二氧化碳等钢瓶气组成。罗茨风机向密相区炉膛内提供稳定的一次风,满足流化以及燃烧的需要。焚烧系统主要由炉体、电加热装置、料斗和螺旋给料器组成。尾部烟道设置烟气取样口,通过 MRU 烟气分析仪实时检测烟气中的 O₂,CO,NO,SO₂ 等成分浓度,并由计算机进行记录。实验台各位置设置了压力测点 P₁~P₃ 与温度测点 T₁~T₉,检测温度与压力变化。

2 结果与分析

2.1 单独焚烧污泥的 NO 和 SO₂排放特性

首先在鼓泡流化床中进行了市政污泥单独焚烧实验,考察床层温度、二次风率等燃烧参数对污染物排放的影响。污泥给料量约为 7 kg/h,流化床实验

台电加热功率为 15 kW,流化速度 0.4 m/s。

2.1.1 床层温度

设置二次风率为 40%,过量空气系数为 1.2,不同温度下污泥在流化床燃烧过程中的 NO 与 SO₂ 排放质量浓度如图 2 所示。

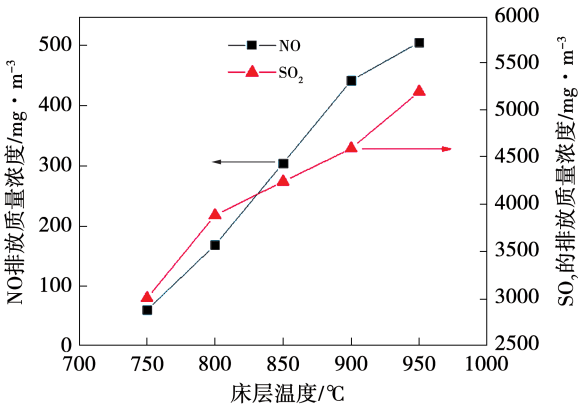


图 2 污泥单独焚烧条件下床层温度对 NO 与 SO₂排放浓度的影响

Fig. 2 Effect of bed layer temperature on NO and SO₂ emission concentrations under the condition of sludge incineration alone

当温度由 750 ℃ 上升到 950 ℃ 时,NO 的排放浓度迅速从 60 mg/m³ 上升到 506 mg/m³。这表明提升

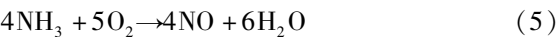
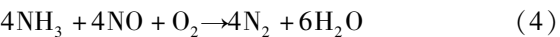
燃烧温度将会显著促进 NO 的生成与排放。

污泥中的氮含量较高^[10],在高温环境下,一部分氮会随着挥发分的析出而转化为 HCN 和 NH₃。HCN 的主要反应式为^[11-12]:



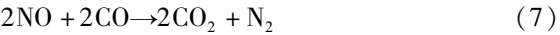
当反应温度升高时,反应(1)和(2)会得到促进,NO 的生成量增加。

在不同温度下,NH₃在炉中会同时进行还原反应与氧化反应,如式(4)~式(5)所示^[13]:



当温度升高时,将会促进 NH₃的氧化反应(5),致 NO 浓度上升。

除此之外,床层温度上升会加快炉内的燃烧反应,炉内半焦和 CO 的浓度降低,因此 NO 的还原反应(6)和(7)受到抑制^[14]。



随着床层温度的上升,SO₂的排放量也在迅速提高,从 750 ℃时的 3 008 mg/m³增加到 950 ℃时的 5 197 mg/m³。

污泥中硫的存在形式可分为有机硫和无机硫,污泥燃烧过程中生成的 SO₂主要来自有机硫的氧化反应^[7]。某些无机硫相对稳定,不易转变成 SO₂^[15]。床层温度的提高可以显著促进无机硫氧化反应的进行,促进了 SO₂的生成。同时,如表 3 所示,污泥灰成分中含有大量碱金属或碱土金属的氧化物,如 K₂O、Al₂O₃等,能够与 SO₂反应生成硫酸盐^[5],以降低 SO₂的排放,而床层温度上升将会抑制这些固硫反应的进行^[16],从而提升 SO₂的排放量。

2.1.2 二次风率

一二次风配比不仅会改变炉内气氛和燃烧过程,也会影响 NO 与 SO₂的排放特性^[14]。图 3 为不同二次风率下的 NO 和 SO₂排放浓度,床层温度为 850 ℃,过量空气系数为 1.2。当二次风率从 20% 上升至 60%,NO 排放质量浓度由 415 mg/m³下降至 93 mg/m³,而 SO₂排放质量浓度由 3 840 mg/m³上升至 4645 mg/m³。

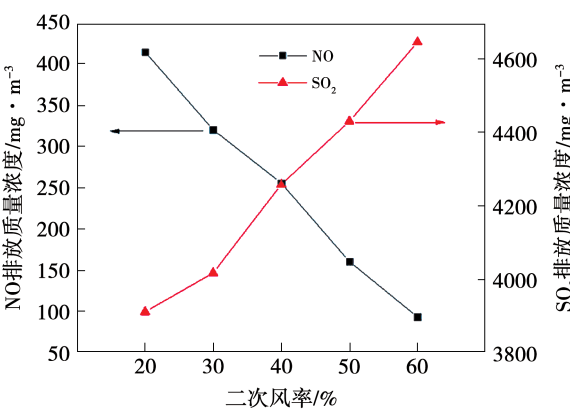


图 3 污泥单独焚烧条件下二次风率对 NO 与 SO₂排放的影响

Fig. 3 Effect of secondary air rate on NO and SO₂ emissions under the condition of sludge incineration alone

随着二次风率增大,一次风量减少,密相区的氧气浓度降低,抑制了 NO 的生成反应^[14],同时增强了炉内的还原性气氛,如 HCN、CO 等促进了 NO 的还原反应^[17]。因此,NO 的排放浓度随着二次风率的增大而降低。SO₂的排放量会随着二次风率的提高而逐步上升,尤其是在二次风率较高时。在二次风率较高时,虽然密相区的氧气浓度降低减缓了燃料中硫的氧化过程,但是在稀相区硫的氧化过程还是会完成^[14]。SO₂浓度上升的主要原因是密相区氧气浓度降低导致碱金属的固硫反应被削弱,因此更多的硫存在于烟气中,并氧化为 SO₂。

2.2 污泥掺烧生物质的 NO 和 SO₂排放特性

市政污泥与玉米秸秆的掺烧实验中首先研究掺混比例的影响,然后在一定的掺混比例下研究床层温度、二次风率的影响。

本次实验中,燃料的总消耗量约为 6 kg/h,秸秆的比例在 0 ~ 40% 之间变化,由此确定各组实验中两种燃料各自的消耗量。流化床实验台的电加热功率为 15 kW。流化速度 0.35 m/s。

2.2.1 生物质掺混比例

图 4 为生物质掺烧比例对 NO 和 SO₂排放质量浓度的影响规律,二次风率为 40%,床层温度为 850 ℃,过量空气系数为 1.2。随着秸秆占比由 0 提升至 40%,NO 排放浓度由 289 mg/m³下降至

140 mg/m³,而 SO₂排放浓度也从 3 949 mg/m³下降至 1 725 mg/m³。

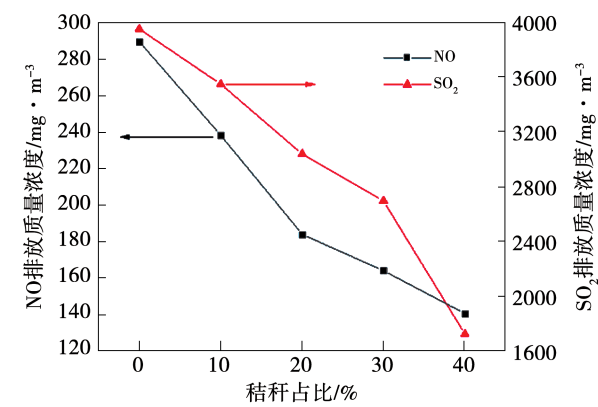


图 4 生物质掺混比例对 NO 与 SO₂排放的影响

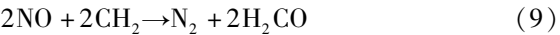
Fig. 4 Effect of biomass mixing ratio on NO and SO₂ emissions

对 NO 排放来说,当秸秆占比低于 20% 时,掺烧秸秆的脱硝效果尤其显著,有以下多方面的原因:

(1) 秸秆的氮含量低于污泥,因此掺混秸秆使得燃料整体的含氮量降低,NO 排放量下降。

(2) 秸秆中挥发分含量更高,并且秸秆中的半纤维素和纤维素热解^[18]和燃烧的速率比污泥中的挥发分更快,消耗了更多的 O₂^[5],削弱了炉内的氧化性气氛,从而抑制了 NH₃、HCN 等含氮前驱体向 NO 的转化。

(3) 秸秆挥发分析出后在焦炭中形成了大量空隙,有利于催化 NO 在其上发生的还原反应^[7,19],化学反应如式(8)与式(9)所示^[20]:



(4) 在秸秆占比超过 20% 之后,NO 浓度降低速度下降,这是因为随着挥发分含量的提高,燃料氮的氧化反应会比还原反应进行得更加剧烈^[21]。

污泥掺烧秸秆同样可以显著降低 SO₂的排放。具体原因为:(1) 秸秆中的 S 含量低于污泥,使燃料中整体的含硫量下降;(2) 秸秆燃烧灰中含有丰富的碱土金属氧化物,可以作为固硫反应的添加剂^[22];(3) 污泥灰成分中的 Fe₂O₃和 P₂O₅的含量很高,Fe₂O₃与 CaO 的反应降低了活性 CaO 与 S 的结合率^[16],而 P₂O₅也会与污泥灰分中的 CaO 反应生

成 Ca₃(PO₄)₂,从而降低固硫效果^[23]。加入秸秆后燃料灰成分中的 Fe₂O₃与 P₂O₅的含量下降,有利于降低 SO₂浓度;(4) 秸秆中的木质素和腐殖酸^[7]对 SO₂具有较强的吸附能力,可以减少 SO₂的释放;(5) 秸秆挥发分的析出燃烧过程中形成了大量的微孔结构^[7],为 SO₂与碱金属的反应提供了较大的面积,减少 SO₂浓度。

2.2.2 床层温度

图 5 为不同床层温度下,掺烧生物质的 NO 与 SO₂排放浓度,秸秆占比为 30%,二次风率为 40%,过量空气系数为 1.2。随着床层温度的升高,NO 与 SO₂的排放浓度都在持续上升。

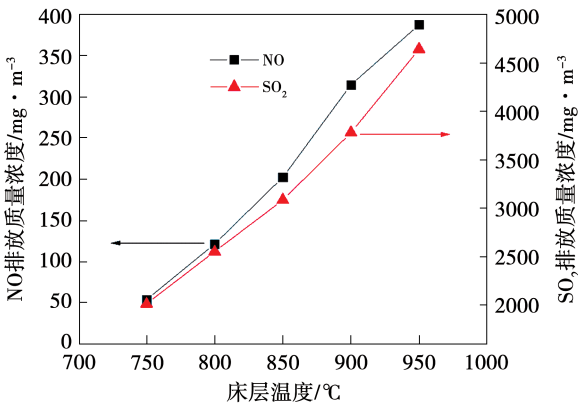


图 5 污泥掺烧条件下床层温度对掺烧过程中 NO 和 SO₂排放的影响

Fig. 5 Effect of bed layer temperature on NO and SO₂ emissions under the condition of sludge blending combustion

污泥与秸秆掺混燃烧时,NO 排放量随温度提升的上升幅度低于污泥单独焚烧,从 750 °C 下的 54 mg/m³上升到 950 °C 下的 388 mg/m³。这表明,污泥与生物质的协同作用能够在高温下减少 NO 的排放。掺烧秸秆不仅直接减少了固定碳的含量,并且还会阻碍碳燃烧过程中 NO 的释放^[24]。在高温下固定碳的燃烧速率和释放 NO 加快,因此掺烧生物质能够减少 NO 生成。

由图 5 可知,在高温下,SO₂排放浓度上升的速率更快。这表明,掺烧生物质对 SO₂减排的作用在高温下相对较小。主要原因是,生物质中碱土金属的固硫作用在温度较高时会减弱。先前的研究表

明,在 600 ~ 800 ℃ 的温度范围内,硫可通过与燃料中的钙和钾形成 CaSO_4 或 K_2SO_4 与底灰或炉渣结合而保留^[25]。在更高的温度下,钙和钾可并入硅酸盐结构中,不再用于硫酸盐的形成,因此生物质的固硫作用降低。

2.2.3 二次风率

图 6 为二次风率对掺烧过程中 NO 和 SO_2 排放浓度的影响规律,秸秆占比为 30%,燃烧温度为 850 ℃,过量空气系数为 1.2。掺混燃烧和污泥单独焚烧的整体趋势一致,即随着二次风率的上升,NO 排放量下降,而 SO_2 排放量上升。

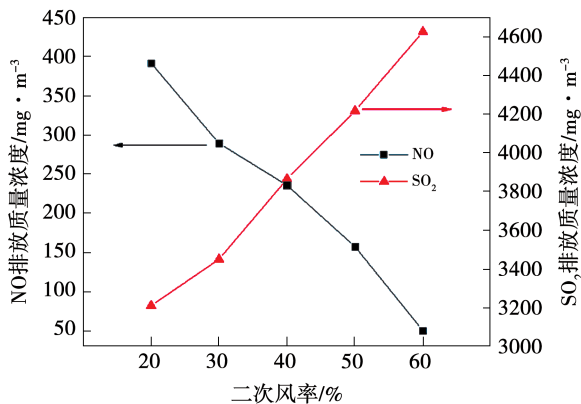


图 6 污泥掺烧条件下二次风率对掺烧过程中 NO 与 SO_2 排放的影响

Fig. 6 Effect of secondary air rate on NO and SO_2 emissions under the condition of sludge blending combustion

对于 NO 排放,添加生物质掺烧的影响主要表现在 NO 排放降低的速率在二次风率较高时更快。掺烧生物质与提高二次风占比具有相似的作用,都会降低 NO 排放。燃料中掺混生物质之后,由于生物质的燃烧速率更快,耗氧速率加快,加强了炉内气氛的还原性,从而增加了炉内半焦和 CO 等还原性物质的含量,强化 NO 的还原过程。并且,二次风率较高时密相区燃烧气氛增强进一步强化了 NO 的还原反应,因此 NO 减排效应在二次风率较高时更加明显。

掺烧生物质后, SO_2 的整体排放量低于污泥单独焚烧,并且当二次风率较高时 SO_2 排放量上升较

快。生物质燃料不仅含硫量较低,且加入生物质能够强化固硫反应,从而减少 SO_2 的排放。但是,掺烧生物质对 SO_2 减排的不利影响在于加快了燃料整体的燃烧速率,使炉内的还原性气氛增强,削弱了碱土金属的固硫反应,再加上在二次风率较大的情况下,炉内燃烧气氛的还原性进一步增强,使 SO_2 排放浓度快速上升。

3 结 论

以市政污泥和玉米秸秆为研究对象,在鼓泡流化床实验台上研究床层温度、二次风率以及秸秆掺混比等参数对 NO 和 SO_2 排放特性的影响,得到以下结论:

(1) 单独焚烧污泥时,NO 与 SO_2 的排放量随着床层温度的上升显著增加。为了降低酸性气体污染物的排放,应在保证燃烧效率的前提下尽量降低燃烧温度。

(2) 改变一二次风配比能够显著影响酸性气体污染物的排放,二次风率提高增强了炉内的还原性气氛,减少了 NO 的排放量,但是也同时抑制了炉内固硫反应的进行,增加了 SO_2 的排放量。

(3) 污泥掺烧秸秆时,NO 排放量随温度提升的上升速率低于污泥单独焚烧,而 SO_2 排放浓度的上升速率加快;污泥掺烧秸秆时,在二次风率超过 40% 时,NO 的减排速率加快,同时 SO_2 排放上升的速率也加快。

参考文献:

- [1] WERTHER J, OGADA T. Sewage sludge combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1999, 25(1): 55 - 116.
- [2] WERLE S, WILK R K. A review of methods for the thermal utilization of sewage sludge: the polish perspective[J]. Renewable Energy, 2010, 35(9): 1914 - 1919.
- [3] MA J, ZHANG L, LI A. Energy-efficient co-biodrying of dewatered sludge and food waste: synergistic enhancement and variables investigation[J]. Waste Management, 2016, 56(10): 411 - 422.
- [4] 刘雅琴. 大力开发工业锅炉生物质燃烧技术前景分析[J]. 工业锅炉, 1999(3): 2 - 3.
- [5] LIU Ya-qin. Development trend of biomass combustion technology in industrial boilers[J]. Industrial Boilers, 1999(3): 2 - 3.
- [5] 段菁春, 肖 军, 王杰林, 等. 生物质与煤共燃研究[J]. 电站系统工程, 2004, 20(1): 1 - 4.

DUAN Jing-chun,XIAO Jun,WANG Jie-lin,et al. Research on co-firing of biomass and coal[J]. Power System Engineering,2004,20(1):1-4.

[6] 阴秀丽,吴创之,徐冰嫵,等. 生物质气化对减少 CO₂排放的作用[J]. 太阳能学报,2000,21(1):40-44.

YIN Xiu-li,WU Chuang-zhi,XU Bing-yan,et al. The effect of biomass gasification on reducing CO₂ emission [J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2000,21(1):40-44.

[7] LIU H,ZHANG S,FENG S,et al. Combustion characteristics and typical pollutant emissions of corn stalk blending with municipal sewage sludge[J]. Environmental Science and Pollution Research,2021,28(8):9792-9805.

[8] 陶志伟,邢献军. 城市污泥与稻草混合燃烧污染物排放特性研究[J]. 绿色科技,2020(14):93-96.

TAO Zhi-wei,XING Xian-jun. Study on pollutant emission characteristics of mixed combustion of municipal sludge and rice straw [J]. Journal of Green Science and Technology, 2020 (14): 93-96.

[9] ZHANG S Q,YUE X M,YIN Z Y,et al. Study of the co-pyrolysis behavior of sewage-sludge/rice-straw and the kinetics [C]//The 6th International Conference on Mining Science & Technology, Xuzhou, China,2009.

[10] TSAI C H,LEE W J,CHEN C Y,et al. Decomposition of CH₃SH in a RF plasma reactor: reaction products and mechanisms[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2001, 40 (11): 2384-2395.

[11] KILPINEN P,HUPA M. Homogeneous N₂O chemistry at fluidized bed combustion conditions;a kinetic modeling study[J]. Combustion and Flame,1991,85(1/2):94-104.

[12] ÅMAND L,LECKNER B,ANDERSSON S. Formation of nitrous oxide in circulating fluidized-bed boilers[J]. Energy & Fuels, 1991,5(6):815-823.

[13] 卢志民. SNCR 反应机理及混合特性研究[D]. 杭州:浙江大学,2006.

LU Zhi-min. Study on SNCR reaction mechanism and mixing characteristics[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2006.

[14] 侯海盟. 城市下水污泥循环流化床焚烧及排放特性试验研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(工程热物理研究所),2013.

HOU Hai-meng. Experimental study on incineration charecteristics and pollutants emission of sewage sludge in circulating fluidized bed [D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences,2013.

[15] 刘 豪,邱建荣,吴 昊,等. 生物质和煤混合燃烧污染物排放特性研究[J]. 环境科学学报,2002,22(4):484-488.

LIU Hao, QIU Jian-rong, WU Hao, et al. Study on the pollutant emission characteristics of co-firing biomass and coal[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2002,22(4):484-488.

[16] FOLGUERAS M B, DIAZ R M, XIBERTA J. Sulphur retention during co-combustion of coal and sewage sludge[J]. Fuel,2004,83(10):1315-1322.

[17] TARELHO L,MATOS M A,PEREIRA F. Axial concentration profiles and N₂O flue gas in a pilot scale bubbling fluidised bed coal combustor[J]. Fuel Processing Technology, 2005, 86 (8): 925-940.

[18] 侯海盟,李诗媛,吕清刚. 城市污泥与煤或玉米秆混烧特性及动力学研究[J]. 环境工程,2012,30(S2):267-271.

HOU Hai-meng,LI Shi-yuan,LYU Qing-gang. The co-combustion characteristics and kinetics of sewage sludge and coal or corn stalk[J]. Environmental Engineering,2012,30(S2):267-271.

[19] 魏 刚,樊孝华,王毅斌,等. 生物质混燃与空气分级对 NO_x排放的影响[J]. 热力发电,2015,44(5):7-11.

WEI Gang,FAN Xiao-hua,WANG Yi-bin,et al. Effect of biomass co-firing and air staging on NO_x emissions [J]. Thermal Power Generation,2015,44(5):7-11.

[20] 王晶红,刘 皓,陆继东,等. 生物质燃料与煤混燃时 NO_x/N₂O 排放的研究[J]. 华中理工大学学报,1998,26(1):72-74.

WANG Jing-hong,LIU Hao,LU Ji-dong,et al. On the emission of NO_x/N₂O during the co-combustion of biomass and coal [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology,1998,26(1):72-74.

[21] LECKNER B,ÅMAND L E,LÜCKE K,et al. Gaseous emissions from co-combustion of sewage sludge and coal/wood in a fluidized bed[J]. Fuel,2004,83(4/5):477-486.

[22] OKASHA F. Enhancing sulphur self-retention by building-in CaO in straw-bitumen pellets[J]. Fuel Processing Technology,2007,88(4):401-408.

[23] ELLED A L,ÅMAND L E,LECKNER B,et al. Influence of phosphorus on sulphur capture during co-firing of sewage sludge with wood or bark in a fluidised bed [J]. Fuel,2006,85(12/13):1671-1678.

[24] YANG R,MA C,CHEN G,et al. Study on NO_x emission during corn straw/sewage sludge co-combustion:experiments and modeling[J]. Fuel,2021,285:119208.

[25] WOLF K J,SMEDA A,MÜLLER M,et al. Investigations on the influence of additives for SO₂ reduction during high alkaline biomass combustion[J]. Energy & Fuels,2005,19(3):820-824.