

大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201804004 中图分类号 X511 文献标识码 A

谢兴旺, 仲兆平, 薛则禹. 流化床中煤与稻秆混烧污染物排放特性[J]. 环境工程学报, 2018, 12(9): 2572-2579.

XIE Xingwang, ZHONG Zhaoping, XUE Zeyu. Characteristics of pollutant emissions from co-combustion of straw and coal in fluidized bed [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(9): 2572-2579.

流化床中煤与稻秆混烧污染物排放特性

谢兴旺, 仲兆平*, 薛则禹

东南大学能源与环境学院, 南京 210096

第一作者: 谢兴旺(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 生物质能利用. E-mail: xxwzzz@foxmail.com

*通信作者, E-mail: zzhong@seu.edu.cn

摘要 在自主设计的流化床上开展煤与稻秆混烧的实验。通过对燃烧过程中烟气成分及飞灰含碳量的分析, 研究了质量掺混比、燃烧温度、流化风速及二次风率对混烧的影响。实验结果表明, 掺混稻秆有效改善了煤的燃烧特性, 随着质量掺混比的增加, NO_x 、 SO_2 及 CO 的排放浓度降低, 飞灰含碳量降低。当掺混比由 0% 增加至 30%、温度为 850 °C 时, NO_x 排放浓度由 506.25 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 降低至 404.33 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, SO_2 排放浓度由 762.86 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 降低至 522.86 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。随着燃烧温度的增加, NO_x 与 SO_2 排放浓度增加, 而 CO 排放浓度和飞灰含碳量降低。随着流化速度的增加, NO_x 与 SO_2 排放浓度增加, CO 排放浓度和飞灰含碳量先降低后增加, 并分别在流化速度 0.234 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 0.26 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时达到最低。随着二次风率的增加, SO_2 排放浓度与飞灰含碳量降低, NO_x 排放浓度与 CO 排放浓度先减小后增加, 均在 20% 二次风率时达到最低。

关键词 混烧; 流化床; 稻秆; 煤

随着能源需求的增长及日益严重的生态环境问题, 生物质受到了国内外研究人员的广泛关注。煤与生物质的混烧技术是一种综合利用煤与生物质能的方法, 煤与生物质的混烧不仅可以减少煤的消耗^[1], 缓解温室效应, 同时还可以处理大量的农林废弃物, 有效提高生物质能利用率。煤与生物质的混烧结合了煤与生物质单独燃烧的优点, 生物质成本低廉, 易于获得, 可以有效降低发电成本; 生物质通过光合作用生成, 混烧过程不会产生额外的碳排放; 生物质硫含量低, 混烧过程可有效降低二氧化硫的排放^[2-4]; 生物质挥发分含量高, 固定碳含量低, 混烧可有效改善燃烧品质^[5]; 生物质含氮量适中, 含水量高, 混烧过程可有效抑制氮氧化物的排放。研究生物质与煤混烧的燃烧特性参数, 将对促进能源的高效利用提供一定的指导意义。

国内外研究人员对生物质与煤混烧技术进行了大量的研究。马爱玲等^[6]利用 TG-FTIR 研究了混烧产物, 发现生物质加入可以降低 CO 与 CO_2 的比例, 提高燃料利用率。MADHIYANON 等^[7]发现混烧生物质和合适的燃烧温度可以有效降低 SO_2 和 NO 的生成。SHEN 等^[8]在沸腾炉上开展煤/生物质的混烧实验, 发现生物质中含有许多带还原性离子的挥发性物质, 由沸腾炉的快速热解和燃烧产生, 且这些离子和氧的反应会抑制 N_2O 和 NO_x 的形成。LU 等^[9]在空气气氛下对甜菜根、柳枝与烟煤的混烧特性进行了热重实验, 结果表明, 混烧的着火温度远低于烟煤, 但略高于纯生物质的着火温度, 随着升温速率提高, 着火温度逐渐提高。罗娟等^[10]对 8 种典型生物质颗粒燃料进行实验研究, 发现挥发分含量越高, 含水率越低, SO_2 、 NO_x 等污染物排放质量浓度远低于国家标准, 但存在着部分生物质颗粒燃料灰分含量过大、结渣严重等问题。

综上所述, 目前对于生物质与煤混烧的特性研究主要集中在热重曲线和生物质单独燃烧, 对于流化床中煤和生物质混烧的实验探究较少且不全面。本研究在自行设计的一套小型流化床实验台上开展实验研究, 选取典型生物质稻秆作为研究对象, 对煤与稻秆的混烧的污染物排放进行研究, 可以对现有的研究数据和成果进行有效的补充, 为工业化应用设计提供重要的参考数据。

1 实验部分

1.1 实验装置

实验装置如图 1 所示, 装置系统由进料装置、流化床主体段、加热保温层、温控装置、布风装置、旋风分离器和烟气分析装置组成。底部为布风板, 一次风通过布风板进入流化床中参与燃烧。燃料在实验前经筛分装入料斗。为防止生物质的预热的解, 采用双级进料, 并在二级进料管外围采用水冷降温。烟气分析仪的品牌型号为德国 MRU MGA5。

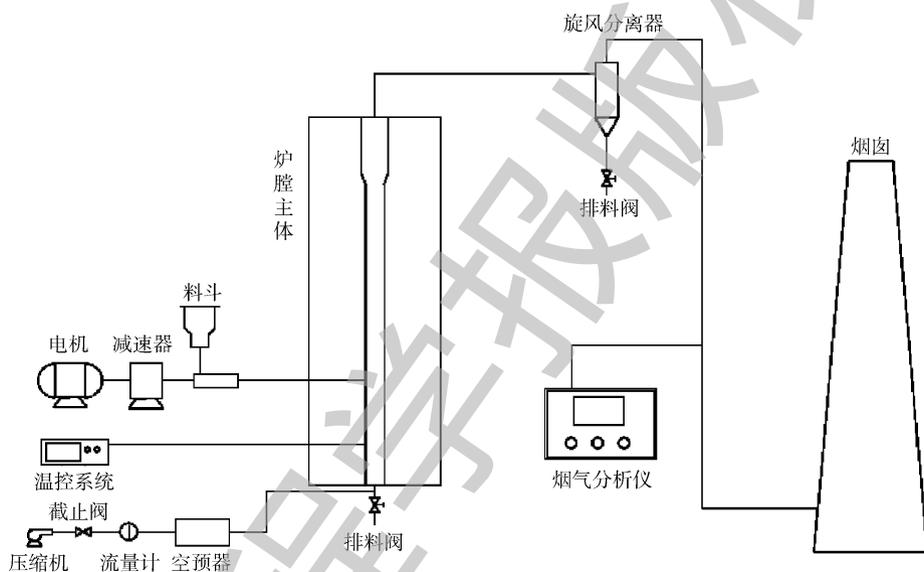


图 1 流化床实验台示意图
Fig. 1 Schematic diagram of fluidized bed

1.2 实验原料

实验所使用的物料分为床料和燃料。燃料包括实验用煤和稻秆生物质, 煤取自山东省临沂市, 稻秆生物质来自江苏省南京市, 选用的床料为熔点较高不易结渣的高铝矾土颗粒, 来自河南省商丘市。为适应床内的流化, 床料的粒径为 0.2~0.3 mm, 煤颗粒的粒径为 0.8~1.0 mm, 稻秆颗粒的粒径为 1.0~1.2 mm。

燃料的元素分析和工业分析见表 1。

表 1 煤和稻秆的元素分析和工业分析
Table 1 Ultimate and proximate analysis of coal and straw

样品	元素分析					工业分析			
	C_{ad}	H_{ad}	O_{ad}	N_{ad}	S_{ad}	M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}
煤	72.87	2.07	5.59	0.62	0.93	1.56	16.36	11.12	70.96
稻秆	42.44	5.1	33.23	1.19	0.19	3.58	14.27	62.66	19.49

注: ad 代表空气干燥基。

1.3 实验方法

如图1所示,实验过程中煤与稻秆混合均匀后由料斗给入,以煤与稻秆质量掺混比、床温、二次风率、流化速度为变量,进行煤与稻秆的混烧实验,实验工况如表2所示。实验中,每个工况稳定燃烧1h后开始采集数据,最后取稳定工况下平均值。该实验使用的烟气分析仪所测量的数据随氧气浓度的波动而不断变化,属于特定工况下的实时测量数据,最终各工况的数据对比分析须将该实测数据进行校核计算,然后才可与之对比和分析。该校核公式如下:

$$Y = X (21 - C_{\text{参考}}) / (21 - C_{\text{测定}}) \quad (1)$$

式中: Y 表示气体浓度基准值; X 表示实测浓度值; $C_{\text{参考}}$ 为 O_2 为参考值, $C_{\text{测定}}$ 为 O_2 测定值。在本研究中, $C_{\text{测定}}$ 取值为6,即折算 O_2 浓度为6%,由于 CO 、 SO_2 、 NO_x 的实测浓度与 O_2 浓度相关,下文出现的 CO 、 SO_2 、 NO_x 的浓度值均为折算值(6% O_2 浓度)。

实验中利用旋风分离器捕集生成的飞灰,并置于干燥箱中在 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 下干燥12h并取出称重,然后将飞灰放入坩埚,在马弗炉中进行灼烧,在灼烧温度为 $810\text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下灼烧40min后取出称重,测得飞灰含碳量。

表2 实验工况
Table 2 Experimental condition

稻秆质量 掺混比/%	温度/ $^\circ\text{C}$				流化风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$					二次风率/%		
	第1次	第2次	第3次	第4次	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次	第1次	第2次	第3次
0	750	800	850	900	0.208	0.234	0.260	0.286	0.312	0	10	20
10	750	800	850	900	0.208	0.234	0.260	0.286	0.312	0	10	20
20	750	800	850	900	0.208	0.234	0.260	0.286	0.312	0	10	20
30	750	800	850	900	0.208	0.234	0.260	0.286	0.312	0	10	20

2 结果及分析

2.1 SO_2 及 NO_x 的排放特性

2.1.1 质量掺混比与温度的影响

图2是 NO_x 排放浓度与稻秆质量掺混比的关系。本研究中质量掺混比定义为生物质占混合燃料的质量比例。可见,随着质量掺混比的增加, NO_x 的排放浓度呈下降趋势,当掺混比为30%、温度为 $850\text{ }^\circ\text{C}$ 时, NO_x 的排放浓度由纯煤燃烧时的 $506.25\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 降低至 $404.33\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。根据稻秆的工业分析可知,其挥发分及水分较高。随着质量掺混比的增大,混合燃料中的挥发分及水分增加。大量的挥发分快速地析出和释放,消耗了大部分的氧气,造成局部空间的缺氧,形成了还原性的气氛空间,不仅阻碍了 NO_x 的生成,还转化了一部分的 NO_x 。大量的水蒸气的存在使得气化和还原反应容易进行,同样抑制了 NO_x 的生成。与此同时,稻秆热解产生的多孔炭对 N_2O 和 NO_x 的分解有显著的促进作用,使得 NO_x 浓度降低^[1]。

图3为 SO_2 排放浓度与质量掺混比的关系。可见,随着质量掺混比的增加, SO_2 的排放浓度呈下降趋势,当掺混比为30%、温度为 $850\text{ }^\circ\text{C}$ 时, SO_2 的排放浓度由纯煤燃烧的 $762.86\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 降低至 $522.86\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。由于稻秆中含有较多的矿物质 (Na_2O 、 K_2O 、 CaO 等),这些碱金属矿物质能够很好

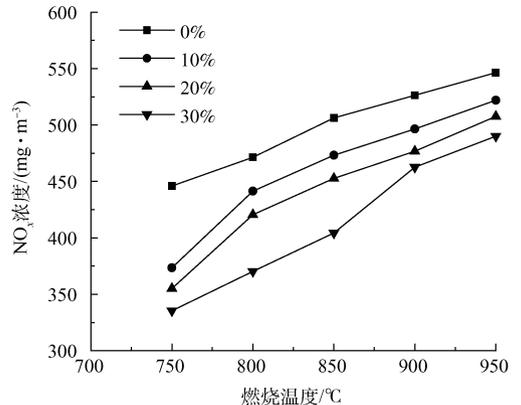


图2 温度和稻秆掺混比对 NO_x 排放浓度的影响
Fig. 2 Effect of temperature and straw ratio on NO_x emission

地与 SO₂ 结合生成硫酸盐, 起到了一定的固硫效果^[12], 达到减少 SO₂ 气体排放的目的。此外, 大量挥发分的析出、燃烧和水蒸气的存在形成还原性气氛, 抑制了 SO₂ 的生成, 因此, 随着稻秆比例的增加, SO₂ 的排放浓度降低。

由图 2 和图 3 可以看出, 随着密相区温度增加, NO_x 和 SO₂ 排放浓度也随之增加, 这是由于燃烧温度的升高, 反应速率增加, 燃烧趋于完全, 污染物生成量增加。当流化床燃烧温度上升时, 少部分的自由基 (O、OH 等) 的浓度不断增大, 从而使得生成 NO_x 的均相反应过程不断加强, 最终导致 NO_x 的生成量增加。但随着质量掺混比的增加, NO_x 和 SO₂ 的排放浓度降低仍较为明显, 这是由于稻秆着火点低, 易于燃烧, 在相同温度下, 稻秆比例越大, 挥发分消耗的 O₂ 也越多, 使还原性气氛区域增加, NO_x 和 SO₂ 排放量减少。

2.1.2 流化速度的影响

850 °C 下, 20% 稻秆生物质与纯煤时, 流化速度对 NO_x 与 SO₂ 排放浓度的影响如图 4 和图 5 所示。随着流化速度的增加, NO_x 与 SO₂ 的浓度均有较为明显的增加, 这是由于流化速度的增加有利于床内的传热与传质, 增加了燃料与氧气的混合和扰动程度, 床内燃烧更加充分, 床内温度升高, 使得 NO_x 与 SO₂ 生成增多。NO_x 排放浓度的增加要比 SO₂ 明显, 这是由于 NO_x 的含量取决于煤与稻秆中氮的合成反应及消耗反应过程的平衡, 流化速度的增加使得氧化气氛增强, 燃料中的氮更易于氧化成 NO_x, 且流化速度增加使得 CO 等还原物质更快被消耗, 不利于 NO_x 的还原反应, 因此 NO_x 的排放浓度变化较为明显。而当流化速度增加到 0.286 m·s⁻¹ 时, NO_x 与 SO₂ 排放浓度的变化趋势变缓, 主要是由于当流化速度继续增加后, 气体在床内停留时间变短, 一部分气体来不及反应, 导致 NO_x 与 SO₂ 浓度变化缓慢。相对于纯煤燃烧, 20% 稻秆混烧随流化速度的变化 NO_x 上升明显, 这是因为混烧时床内扰动增强, 且稻秆挥发分的燃烧使稀相区温度升高, 促进了 NO_x 的生成。

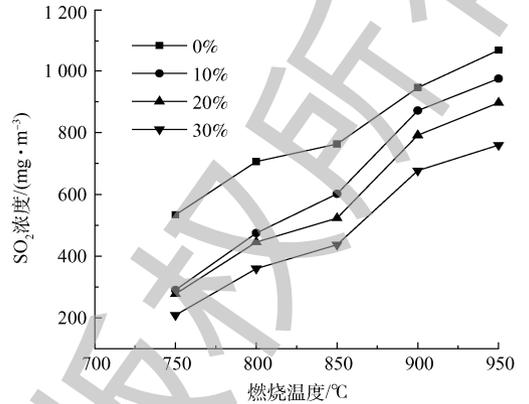


图 3 温度和稻秆掺混比对 SO₂ 排放浓度的影响
Fig. 3 Effect of temperature and straw ratio on SO₂ emission

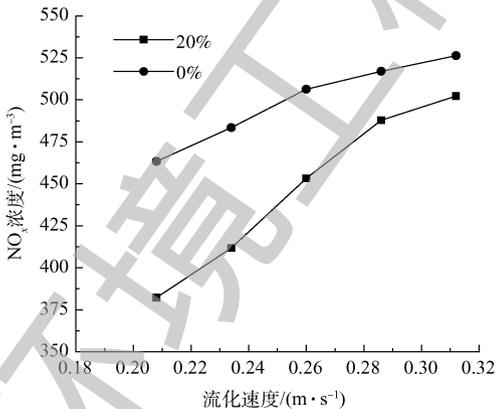


图 4 流化速度对 NO_x 排放浓度的影响
Fig. 4 Effect of fluidization velocity on NO_x emission

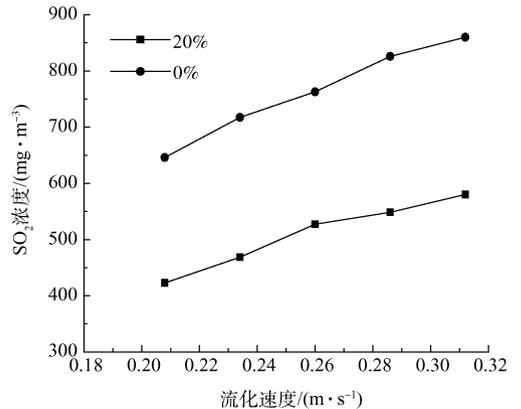


图 5 流化速度对 SO₂ 排放浓度的影响
Fig. 5 Effect of fluidization velocity on SO₂ emission

2.1.3 二次风率的影响

图 6 为 850 °C 下, 20% 稻秆生物质与纯煤时, 二次风率对 NO_x 排放浓度的影响。可见, NO_x 排放浓度随着二次风率的增大先下降而后增加。在过量空气系数不变的情况下, 随

随着二次风率的增加，一次风率相应降低，密相区的氧浓度降低，煤与稻秆燃烧生成大量 CO，还原性气氛较强，NO_x 的还原反应速率增加，使 NO_x 的排放浓度由于分级燃烧而降低。但当二次风率增加至 30% 时，混烧时 NO_x 排放浓度反而增加。研究 [13-16] 表明，NO_x 的生成与局部过量空气系数密切相关，过量空气系数增加，局部的氧气浓度不断上升，加快了焦炭的反应速率，使得焦炭氮的析出速率得到提升，最终导致瞬时的 NO_x 浓度不断升高。这导致了二次风率过大时，煤与稻秆中未被氧化的氮重新与二次风中多余的氧结合，并生成较多 NO_x，导致 NO_x 排放量反而增加。

图 7 为 850 °C 下，20% 稻秆生物质与纯煤时，二次风率对 SO₂ 排放浓度的影响。如图 7 所示，SO₂ 排放浓度随着二次风率的增加而降低。在过量空气系数保持不变的条件下，随着二次风率的增加，密相区处于更加缺氧的状态，使得燃料在还原性气氛和烟温相对较低的环境下燃烧，有效抑制了 SO₂ 的生成。但随着二次风率的增加，SO₂ 变化趋于平稳，这是由于二次风率增加，密相区氧气减少，使得稻秆中碱金属吸收 SO₂ 的反应速率变慢，使脱硫效果变差。

2.2 CO 排放特性与飞灰含碳量变化规律

2.2.1 质量掺混比和温度的影响

煤与稻秆混烧时 CO 排放规律及飞灰含碳量的变化如图 8 和图 9 所示。随着燃烧温度的上升，燃烧反应速率增加，趋于完全，CO 浓度及飞灰含碳量均随之降低，且温度较高时（950 °C），燃烧更加完全，CO 浓度及飞灰含碳量均较低。

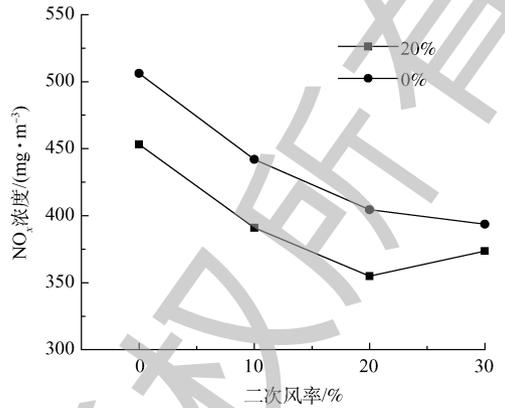


图 6 二次风率对 NO_x 排放浓度的影响
Fig. 6 Effect of secondary air ratio on NO_x emission

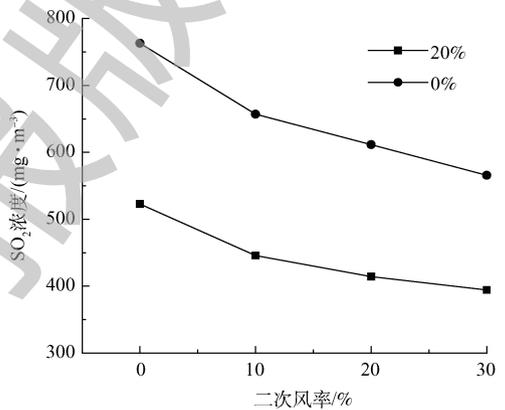


图 7 二次风率对 SO₂ 排放浓度的影响
Fig. 7 Effect of secondary air ratio on SO₂ emission

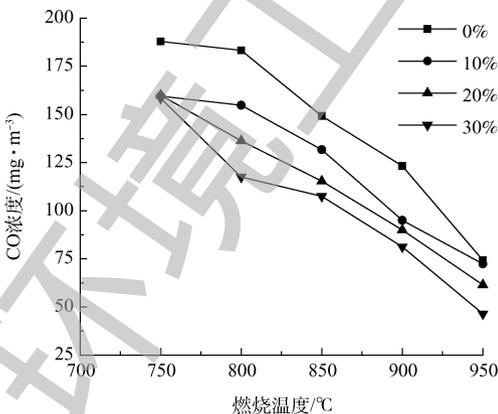


图 8 温度和稻秆掺混比对 CO 排放浓度的影响
Fig. 8 Effect of temperature and straw ratio on CO emission

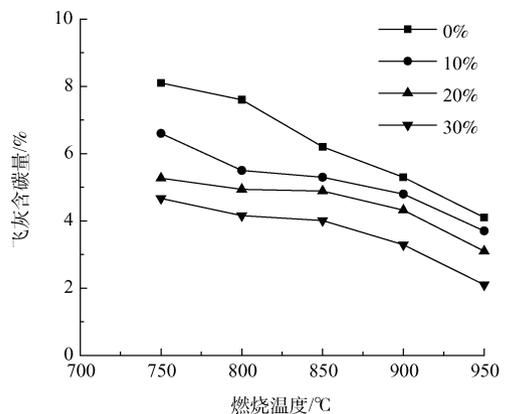


图 9 温度和稻秆掺混比对飞灰含碳量的影响
Fig. 9 Effect of temperature and straw ratio on carbon content of fly ash

当燃烧温度一定时,随着煤中掺混稻秆比例的增加,CO 浓度及飞灰含碳量均呈下降的趋势。稻秆中挥发分较多,易于燃烧,同时改善了煤的燃烧,使得燃烧更加充分。且随着混烧稻秆质量比的增加,改善的效果越显著。当密相区温度为 750 ℃ 时,掺混稻秆时 CO 排放浓度几乎一致,这可能是由于密相区温度较低,均存在不完全燃烧的情况,导致生成的 CO 较多。由图 9 可知,随着稻秆的增多,飞灰含碳量降低,且温度升高,这一效果更加显著。燃烧温度为 950 ℃ 时,30% 稻秆混烧的飞灰含碳量由纯煤燃烧时的 4.1% 降低至 2.1%。稻秆挥发分含量高,易于燃尽,所以随着稻秆含量的增加,飞灰含碳量降低,另一方面,由于掺混稻秆,使得煤的燃烧特性得到改善^[17],得以充分燃烧,降低了飞灰含碳量。

2.2.2 流化风速的影响

850 ℃ 下,掺混 20% 稻秆生物质时,流化风速对 CO 排放浓度及飞灰含碳量的影响如图 10 和图 11 所示。纯煤燃烧时,CO 排放浓度随着流化速度的增加,先减少后增加,在流化速度为 0.234 m·s⁻¹ 时达到最低,为 131.25 mg·m⁻³。当流化速度增加,流化床内混合扰动增强,燃烧更加充分,CO 排放浓度减小。达到最佳流化速度后,随着流化速度的继续增加,燃烧产生的部分 CO 来不及充分燃烧,随着流化气带出床内,导致出口处 CO 排放浓度增加。混烧时,稻秆中挥发分多,改善了床内燃烧情况,CO 含量减少,但随着流化速度的增加,未完全燃烧的 CO 也变多。飞灰含碳量的变化如图 11 所示,飞灰含碳量随着流化速度的增加先减小后增大。单独燃煤和混烧时均在流化速度为 0.26 m·s⁻¹ 时达到最低,分别为 6.2% 和 4.76%。流化速度增加,增加了床内的混合,燃料充分燃烧,但流化速度过大时,飞灰中的碳未充分燃烧便被带出了床外^[18],因此,应合理选择流化速度,增加燃烧效率。

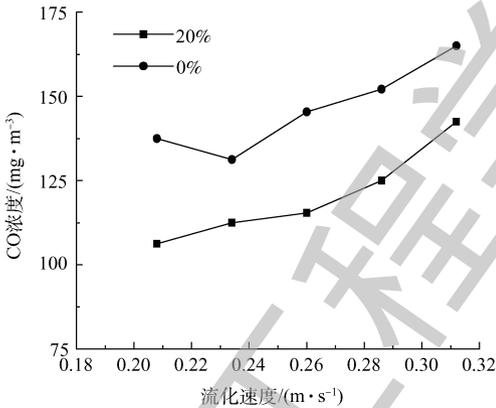


图 10 流化速度对 CO 排放浓度的影响

Fig. 10 Effect of fluidization velocity on CO emission

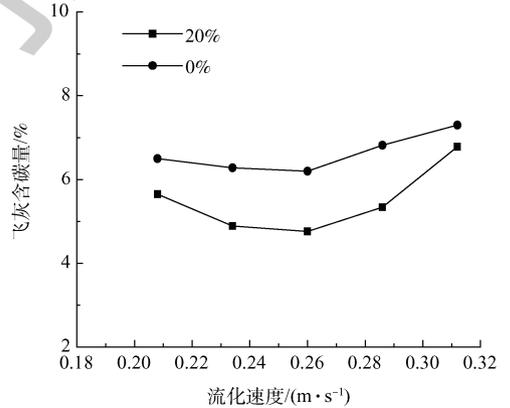


图 11 流化速度对飞灰含碳量的影响

Fig. 11 Effect of fluidization velocity on carbon content of fly ash

2.2.3 二次风率的影响

850 ℃ 下,20% 稻秆生物质时,二次风率对 CO 排放浓度的影响如图 12 所示。混烧时 CO 排放浓度在 20% 二次风率时最低,为 102.88 mg·m⁻³。当二次风加入后,燃料在密相区生成较多 CO,然后在二次风的作用下充分燃烧成 CO₂。当二次风率不大时,由于二次风的加入,使得床内扰动增强,CO 排放浓度略微下降。但当二次风率继续增加至 30% 后,密相区燃烧主要产物为 CO,大量 CO 进入稀相区燃烧,导致 CO 在稀相区燃烧不完全,出口 CO 排放浓度反而增加。飞灰含碳量变化如图 13 所示,随着二次风率的增加,飞灰含碳量逐渐降低,分级燃烧使得燃料在密相区转化为 CO,然后 CO 在稀相区燃烧,使得飞灰中的含碳量减少。二次风的存在也使得床内扰动增强,飞灰中的残碳燃烧更加充分,所以飞灰含碳量随着二次风率增加而减小。

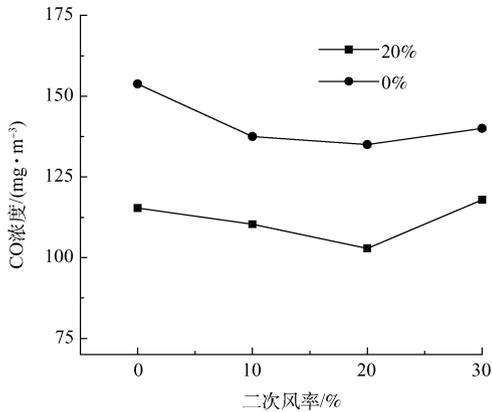


图12 二次风率对CO排放浓度的影响

Fig. 12 Effect of secondary air ratio on CO emission

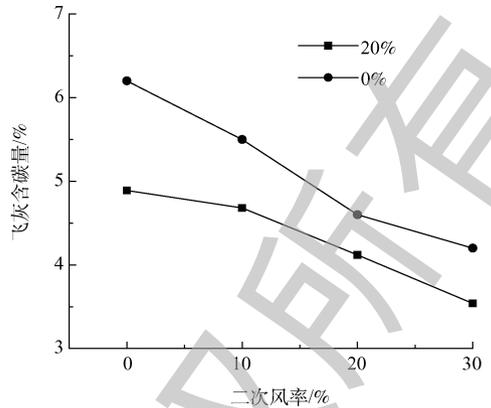


图13 二次风率对飞灰含碳量的影响

Fig. 13 Effect of secondary air ratio on carbon content of fly ash

3 结论

1) 流化床中煤和稻秆的混烧有效降低了 NO_x 及 SO_2 的排放,且随着稻秆质量掺混比的增加, NO_x 及 SO_2 排放降低的效果越显著。相比于纯煤燃烧,在 $850\text{ }^\circ\text{C}$ 下,掺混30%稻秆使 NO_x 和 SO_2 分别降低了 $101.92\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $240\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

2) 随着床内温度及流化速度的增加, NO_x 及 SO_2 的排放浓度均增加。 NO_x 受流化速度影响较大,流化速度增加, NO_x 排放浓度增加明显。

3) 在过量空气系数一定的条件下,随着二次风率增加, NO_x 先减小后增加, SO_2 的排放浓度减小。

4) 稻秆与煤混烧改善了煤的燃烧特性,燃烧更加完全,有效降低了出口CO排放浓度及飞灰含碳量。CO排放浓度及飞灰含碳量随着燃烧温度增加而降低。

5) CO排放浓度和飞灰含碳量均随着流化速度、二次风率的增加呈先减小后增大。CO排放浓度在流化速度 $0.234\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时达到最低,而飞灰含碳量在流化速度 $0.26\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时最低。飞灰含碳量随着二次风率的增加而降低,最佳二次风率为20%。

参考文献

- [1] 马文超,陈冠益,颜蓓蓓,等.生物质燃烧技术综述[J].生物质化学工程,2007,41(1):43-48.
- [2] ELDENSTEN L, KUCINSKI A, EL-DORGHAMY A, et al. Introduction of co-combustion of coal and biomass in a 315 MW CFB boiler[J]. International Waste Management and Landfill Symposium,2005,4(6):18-25.
- [3] 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.
- [4] PROMPUBESS C, MEKASUT L, PIUMSOMBOON P, et al. Co-combustion of coal and biomass in a circulating fluidized bed combustor[J]. Korean Journal of Chemical Engineering,2007,24(6):989-995. DOI:10.1007/s11814-007-0109-4.
- [5] SONG Q. Numerical simulation and combustion analysis of biomass gas and coal co-firing process[J]. Journal of Henan Science & Technology,2016,12(4):227-236.
- [6] 马爱玲,谌伦建,黄光许,等.生物质与煤混烧的热重-红外实验研究[J].煤炭学报,2011,36(1):124-128.
- [7] MADHIYANON T, SATHITRUANGSAK P, SOPONRONNARIT S. Co-combustion of rice husk with coal in a cyclonic fluidized-bed combustor (ψ -FBC)[J]. Fuel,2009,88(1):132-138. DOI:10.1016/j.fuel.2008.08.008.
- [8] SHEN B X, YAO Q, LIU D C. Emission of N_2O and NO_x by co-combustion of biomass and coal in fluidized bed boiler[J]. Power System Engineering,2002,12(8):124-132.
- [9] LU W Q, FANG D Y, YANG Z Y. Study on burnout and SO_2 emission characteristics during co-combustion of petroleum coke and oil shale in a fluidized bed[J]. Applied Mechanics & Materials,2011,55-57:1547-1553. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.55-57.1547.
- [10] 罗娟,侯书林,赵立欣,等.典型生物质颗粒燃料燃烧特性实验[J].农业工程学报,2010,26(5):220-226.

- [11] ZHOU W, ZHAO C S, DUAN L B, et al. Two-dimensional computational fluid dynamics simulation of coal combustion in a circulating fluidized bed combustor[J]. *Chemical Engineering Journal*,2011,166(1):306-314. DOI:10.1016/j.cej.2010.09.048.
- [12] PATIL D J, SMIT J, VAN S A M, et al. Wall-to-bed heat transfer in gas-solid bubbling fluidized beds[J]. *AIChE Journal*,2010, 52(1):58-74. DOI:10.1002/aic.10590.
- [13] FU W, ZHANG Y, HAN H, et al. A general model of pulverized coal devolatilization[J]. *Fuel*,1989,68(4):505-510. DOI:10.1016/0016-2361(89)90274-3.
- [14] GUNGOR A. Two-dimensional biomass combustion modeling of CFB[J]. *Fuel*,2008,87(8/9):1453-1468. DOI:10.1016/j.fuel.2007.08.013.
- [15] GOYAL A, REHMAT A. Modeling of a fluidized-bed coal carbonizer[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*,1993,32(7): 1396-1410. DOI:10.1021/ie00019a014.
- [16] 胡满银, 乔欢, 杜欣, 等. 烟气再循环对炉内氮氧化物生成影响的数值模拟[J]. *华北电力大学学报(自然科学版)*, 2007,34(6):77-82.
- [17] FRYDA L, SOBRINO C, CIEPLIK M, et al. Study on ash deposition under oxyfuel combustion of coal/biomass blends [J]. *Fuel*, 2010,89(8):1889-1902. DOI:10.1016/j.fuel.2009.11.022.
- [18] WANG X, SI J, TAN H, et al. Kinetics investigation on the reduction of NO using straw char based on physicochemical characterization[J]. *Bioresource Technology*,2011,102(16):7401-7409. DOI:10.1016/j.biortech.2011.05.038.

(本文责任编辑: 郑晓梅)

Characteristics of pollutant emissions from co-combustion of straw and coal in fluidized bed

XIE Xingwang, ZHONG Zhaoping *, XUE Zeyu

School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China

* Corresponding author, E-mail: zzhong@seu.edu.cn

Abstract Combustion experiments of coal and straw mixture were conducted in a lab designed fluidized bed. The effect of mixing ratio, bed temperature, fluidization velocity and secondary air ratio were studied by analyzing flue gas components and the carbon content in fly ash. The experimental results show that mixing straw can effectively improve the combustion characteristics of coal. With the increase of straw mass mixing ratio, the emission concentration of NO_x, SO₂ and CO decreases and the carbon content in fly ash decreases as well. In the condition of bed temperature at 850 °C, when the mixing ratio were increased from 0% to 30%, the emission of NO_x reduced from 506.25 mg·m⁻³ to 404.33 mg·m⁻³ and the emission of SO₂ reduced from 762.86 mg·m⁻³ to 522.86 mg·m⁻³. As the combustion temperature increased, the concentration of NO_x and SO₂ increased, while the CO emission concentration and fly ash content decreased. With the increase of fluidization velocity, NO_x and SO₂ emission concentration increased, CO emission concentration and fly ash carbon content decreased first and then increased, and reached the lowest when the fluidization velocity was 0.234 m·s⁻¹ and 0.26 m·s⁻¹. With the increase of the secondary air ratio, the emission of SO₂ and the carbon content of fly ash decreased, the emission of NO_x and CO first declined and then increased, and reached the lowest at 20% secondary air ratio.

Key words co-combustion; fluidized bed; straw; coal