

生物质与煤直接耦合燃烧试验研究

倪刚^{1,2}, 杨章宁^{1,2}, 冉燊铭^{1,2}, 李维成^{1,2}, 莫春鸿^{1,2}, 张秀昌^{1,2}

(1. 清洁燃烧与烟气净化四川省重点实验室, 四川 成都 611731; 2. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川 自贡 643001)

摘要:为了研究生物质不同掺烧位置、掺烧比例、生物质一次风温和风率以及不同煤种掺烧后对锅炉 NO 排放以及飞灰可燃物的影响, 基于 50 kW 下行炉煤粉综合试验台进行了生物质颗粒掺烧热态试验。试验结果表明, 生物质输入热量掺烧比例为 6% 时, 生物质从不同位置掺入, NO 排放都有一定程度下降, 不同位置降幅不同, 生物质从还原区送入时 NO 排放下降幅度最大, 烟煤下降幅度为 23.47%, 贫煤下降幅度为 13.64%; 烟煤掺烧生物质时从燃烧前期加入利于煤粉燃尽, 贫煤掺烧生物质时从燃烧后期加入利于煤粉燃尽, 总体上掺入生物质后, 炉膛出口烟气温度都有不同程度上升; 生物质输入热量掺烧比例从 6% 提高到 12% 后, 与烟煤耦合燃烧时 NO 排放降幅从 23.31% 增至 39.5%, 与贫煤耦合燃烧时 NO 排放的降幅从 13.61% 降至 10%, 但贫煤作为主燃料时, NO 下降绝对值高于烟煤; 不同生物质对 NO 下降幅度与生物质中氮含量相关, 氮含量越低, NO 下降幅度越大; 提高生物质的一次风温, 飞灰可燃物含量从 13.88% 降至 7.62%, 不影响安全的情况下, 应尽量提高生物质一次风温度; 生物质一次风率的变化对燃烧效率影响较小。

关键词: 生物质; 煤; NO 排放; 热态试验

中图分类号: TQ53; TK114

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2021)03-0198-06

Experimental study on direct coupled combustion of biomass and coal

NI Gang^{1,2}, YANG Zhangning^{1,2}, RAN Shenming^{1,2}, LI Weicheng^{1,2}, MO Chunhong^{1,2}, ZHANG Xiuchang^{1,2}

(1. Clean Combustion and Flue Gas Purification Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611731, China;

2. Dongfang Boiler Group Co., Ltd., Zigong 643001, China)

Abstract: In order to study the influence of different blending position, proportion, primary air temperature and air rate of biomass and different coal blending on NO emission and combustible matter in fly ash of boiler, the thermal experiments of biomass particle blending combustion was carried out based on a 50 kW downer pulverized coal test boiler. The results show that when the proportion of biomass input heat is 6% and biomass is mixed in from different locations, NO emissions are reduced to a certain extent, and different locations have different rates of reduction. NO emission decreases the most when biomass is fed into the reduction zone, The decrease of bituminous coal is 23.47%, and that of lean coal is 13.64%. After the biomass is mixed in, the flue gas temperature at the outlet of the furnace rises to varying degrees. The biomass blended with bituminous coal should be added in the early stage of combustion, which is more conducive to the burn-out of pulverized coal, but the biomass blended with lean coal should be added in the later stage of combustion. When the proportion of biomass blended with combustion is increased from 6% to 12%, the reduction of NO emission increases from 23.31% to 39.5% when coupled with bituminous coal. When coupled with lean coal combustion, the reduction of NO emission decreases from 13.61% to about 10%. When lean coal is used as the main fuel, the absolute value of NO decrease is higher than that of bituminous coal. The reduction of NO by different biomass is related to the nitrogen content in biomass, and the lower the nitrogen content is, the greater the reduction of NO is. By increasing the primary air temperature of biomass, the content of combustible matter in fly ash decreases from 13.88% to 7.62%, and the primary air temperature of biomass should be increased as much as possible without affecting safety. The change of primary air rate of biomass has little impact on combustion efficiency.

Key words: biomass; coal; NO emission; hot test

收稿日期: 2020-03-04; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.20030402

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0604403)

作者简介: 倪刚(1985—), 男, 湖北汉川人, 中级工程师, 研究方向为清洁燃烧。E-mail: nig@dbc.com.cn

引用格式: 倪刚, 杨章宁, 冉燊铭, 等. 生物质与煤直接耦合燃烧试验研究[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(3): 198-203.

NI Gang, YANG Zhangning, RAN Shenming, et al. Experimental study on direct coupled combustion of biomass and coal

[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(3): 198-203.



移动阅读

0 引言

生物质是可再生能源的重要组成部分,具有资源丰富、可再生、低污染、分布广泛等特点。为了应对能源短缺、环境污染等问题,各国都在大力开发利用生物质能,将生物质作为洁净能源替代部分传统燃煤发电^[1-3],生物质与煤直接耦合燃烧是生物质利用的重点方向之一^[4-5]。生物质与煤耦合燃烧试验及工程应用研究^[6-7]表明,加入生物质能改变煤的着火性能,混合燃烧对煤的燃尽性能影响很小^[8]。Savolainen等^[9]在315 MW煤粉炉内混烧生物质,用火焰探测器实时监测炉内火焰情况,结果显示生物质混燃过程中未产生燃烧不稳定现象;Foster Wheeler公司在TVA电站上进行了木材的混燃试验,结果表明混燃过程中火焰温度降低,降幅约40℃^[10];董信光等^[11]利用管式锅炉和烟气分析仪研究了生物质混合燃烧料的NO_x排放特性,结果表明生物质的加入可明显降低煤燃烧时的NO_x排放量;Molcan等^[12]在3 MW炉内对煤粉和生物质混燃进行测试,结果表明生物质掺烧后,SO₂排放量降幅较大;生物质燃料的可燃组分含量相对较低,发热量低^[13];生物质的燃烧特性明显优于煤,粒度越小,燃点和燃尽温度更低,更有利于着火和燃尽^[14],生物质粒径小到一定值后,燃烧特性与粒径无关,满足充分燃烧。

我国生物质资源主要包括作物秸秆(农业废弃物及农产品加工业废弃物)、林木(包括林产品加工业废弃物)、畜禽粪便、城市垃圾和废水等方面,其中,秸秆及农业加工剩余物、畜禽粪便、薪柴和林木生物质能共占生物质理论可获得量的97%(秸秆及农业加工剩余物占38.9%,畜禽粪便占22.1%,薪柴和林木生物质能占36.0%)^[15],畜禽粪便等收集运输不便,所以本文以木头、水稻、小麦秸秆、花生秸秆及玉米秸秆为研究对象。

本文主要研究不同生物质与煤粉耦合燃烧后,锅炉NO排放及煤粉的燃尽特性,为此搭建了50 kW生物质与煤耦合燃烧下行炉试验台,并将生物质放入磨煤机(雷蒙磨)中磨制,然后进行激光粒径测试,选取生物质最佳燃烧粒径0.3~0.5 mm进行

试验,重点研究木头、水稻、小麦秸秆、花生秸秆及玉米秸秆等生物质不同掺烧位置、掺烧比例、一次风温、一次风率以及不同煤种掺烧后对锅炉NO排放以及飞灰可燃物的影响,以寻求生物质最佳掺烧位置和掺烧比例,为工程设计提供设计依据。

1 试验系统

1.1 试验设备

生物质耦合试验在一维下行炉上进行,试验台功率50 kW,炉膛内径0.25 m,炉膛高度6.5 m,停留时间3.2 s,炉膛容积0.32 m³,试验台系统示意图如图1所示。燃烧系统主要流程如下:主燃料从炉顶上方的煤粉燃烧器送入,一次风经过加热器加热至指定温度后与煤粉混合后送入煤粉燃烧器;二次风由加热器加热后一部分由燃烧器二次风管道送入炉膛,一部分由燃尽风管道送入炉膛;生物质燃料磨制好后放入单独的生物质粉仓,一次风经加热器加热至指定温度后与生物质粉混合进入生物质燃烧器。

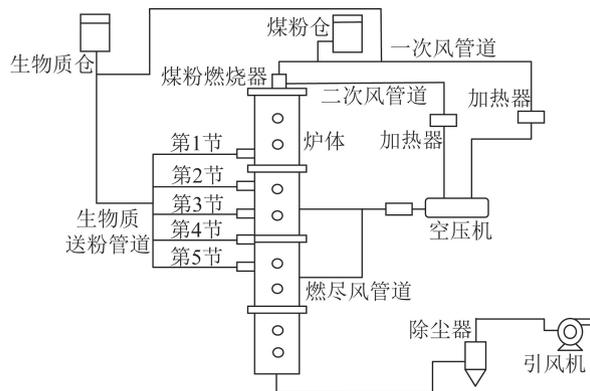


图1 50 kW 下行炉生物质与煤耦合试验装置系统

Fig.1 Systematic diagram of a 50 kW biomass-coal coupling test device

生物质燃烧器布置在炉膛侧面的燃烧区域、还原风区域及燃尽风区域,自上而下布置5层,满足煤与生物质耦合燃烧的要求。

1.2 试验燃料

选取2种典型煤作为试验煤种:陕西烟煤和山西贫煤。每个工况在给粉机下部对煤粉进行取样,工业分析及元素分析见表1。试验用生物质包括木头、水稻、小麦秸秆、花生秸秆及玉米秸秆,按生物质

表1 煤的元素分析和工业分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of coal samples

| 试验煤种 | 元素分析/% | | | | | 工业分析/% | | | | $Q_{\text{net,ar}} / (\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$ |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|--|
| | C_{ar} | H_{ar} | S_{ar} | N_{ar} | O_{ar} | M_{ar} | V_{ar} | FC_{ar} | A_{ar} | |
| 烟煤 | 57.02 | 3.27 | 0.25 | 1.04 | 11.58 | 12.08 | 25.98 | 47.18 | 14.76 | 21.62 |
| 贫煤 | 51.10 | 2.04 | 1.89 | 0.63 | 2.92 | 3.48 | 8.83 | 49.75 | 37.94 | 19.43 |

化验的相关标准进行工业分析及元素分析,结果见表2。可知,与常规燃料煤相比,生物质燃料碳含量

较少、固定碳少、氢含量稍多、挥发分明显较多、氧含量多、硫含量低、发热量低。

表2 生物质的元素分析和工业分析

Table 2 Proximate and ultimate analysis of biomass

| 试验生物质 | 元素分析/% | | | | | 工业分析/% | | | | $Q_{\text{net,ar}}/(MJ \cdot kg^{-1})$ |
|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|--|
| | C_{ar} | H_{ar} | S_{ar} | N_{ar} | O_{ar} | M_{ad} | V_{ad} | FC_{ar} | A_{ad} | |
| 木头 | 45.85 | 5.41 | 0.04 | 0.66 | 39.01 | 6.42 | 76.55 | 16.40 | 0.63 | 16.76 |
| 水稻 | 38.52 | 4.71 | 0.17 | 0.90 | 36.20 | 8.28 | 64.90 | 15.60 | 11.22 | 15.30 |
| 小麦 | 40.07 | 4.76 | 0.18 | 0.54 | 36.36 | 8.54 | 64.95 | 16.96 | 9.55 | 14.63 |
| 花生 | 39.20 | 4.65 | 0.20 | 1.28 | 34.88 | 9.39 | 64.54 | 15.67 | 10.40 | 14.51 |
| 玉米 | 41.00 | 4.78 | 0.17 | 0.92 | 37.54 | 8.47 | 68.19 | 16.22 | 7.12 | 15.23 |

2 试验结果与讨论

2.1 生物质掺入位置对NO排放的影响

为考察生物质在不同掺烧位置下炉膛出口NO及飞灰可燃物的变化,选取木头和烟煤进行耦合燃烧,以木头和贫煤进行对比试验。烟煤耦合试验氧量3%、燃尽风率40%、木头掺入比例(热值比,下同)6%;贫煤耦合试验氧量4.4%、燃尽风率38%、木头掺入比例6%。在此基础上改变掺烧位置(图1中第1~5节分别对应燃烧区域、还原区区域、一级燃尽风区域、燃尽风之间区域和二级燃尽风区域),进行烟气和飞灰可燃物的取样及分析。

维持炉膛输入热负荷、燃尽风率、炉膛出口氧量基本一致的情况下,在不同位置掺入相同比例生物质,发现无论从燃烧区域、还原区域还是燃尽风区域送入,NO排放都有一定程度下降,生物质不同位置NO降幅如图2所示。

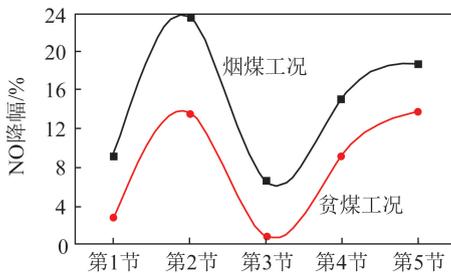


图2 不同位置对NO下降幅度的影响

Fig.2 Effect of different burning positions on reduction rate of NO emission

由图2可知,燃烧器区域送入时,燃烧区域的最高温度下降,产生的热力型NO下降;生物质从第2节即还原区位置送入后,NO降幅最大,烟煤降幅为23.47%,贫煤降幅为13.64%;从第3节送入时,NO降幅又急剧下降;从第4、5节送入后,NO降幅逐渐上升,贫煤和烟煤工况的NO降幅曲线一致。这是由于生物质从还原区送入后,由于烟温较高,且氧量

较低,生物质快速热解产生大量挥发分,挥发分会加强对主燃料产生的NO的还原;另外生物质从还原区送入,产生的还原性物质与NO有足够的时间进行还原反应。所以生物质对NO的还原效果与生物质送入炉膛时周围的氧量及挥发分停留时间有关。

2.2 生物质掺入位置对燃尽的影响

生物质不同掺烧位置的飞灰可燃物曲线如图3所示(工况与2.1节一致)。

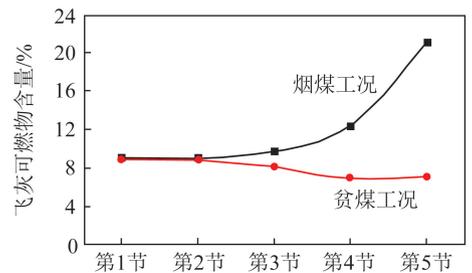


图3 不同位置对飞灰可燃物的影响

Fig.3 Effect of different burning positions on unburnt carbon in the fly ash

由图3可知,随着生物质掺入位置从上至下变化,烟煤工况的飞灰含碳量逐渐上升,上升幅度较大,第1、2、3节送入时,飞灰可燃物含量在9.12%~9.74%;贫煤工况的飞灰含碳量逐渐下降,变化幅度不大,第1、2、3节送入时,飞灰可燃物含量为8.14%~8.96%。第4、5节送入时,贫煤和烟煤工况呈相反趋势,主要因为生物质挥发分能在较低温度下析出和燃烧,使煤粉附近的烟气温度升高,提高煤粉的燃烧速度,对煤焦炭有较明显的助燃作用,烟煤的焦炭燃烧主要在前期,所以后期加入对焦炭燃尽的促进作用较弱;贫煤的焦炭燃烧主要在后期,后期加入对焦炭促进作用较强,贫煤耦合燃烧生物质宜从燃烧后期加入,更利于煤粉燃尽。

2.3 生物质掺烧比例对NO排放的影响

为考察生物质不同掺烧比例对炉膛出口NO的影响,选取木头和烟煤进行耦合燃烧,并以木头和贫

煤耦合燃烧进行对比。烟煤耦合试验选取氧量3%、燃尽风率40%，木头掺入位置为还原区；贫煤耦合试验选取氧量4.3%、燃尽风率37%，木头掺入位置为还原区，生物质掺烧比例分别为6%、12%和18%。生物质不同比例、不同煤种下NO下降幅度如图4所示。

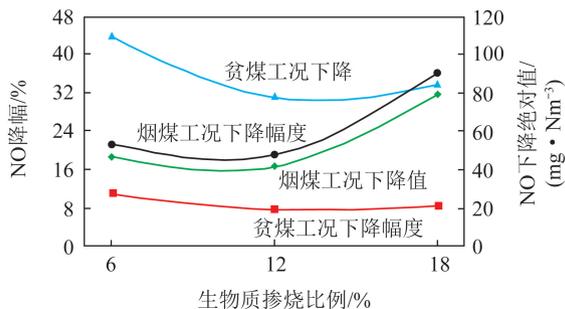


图4 生物质掺烧比例对NO下降幅度的影响

Fig.4 Effect of burning proportions of biomass on reduction rate of NO emission

木头和烟煤耦合燃烧时，木头掺烧比例从6%升至18%时，NO降幅逐渐增大，从23.31%增至39.5%；木头和贫煤耦合掺烧时，随生物质掺烧比例增大，NO降幅从13.61%降至10%；从降幅看，生物质与烟煤耦合时对NO还原的幅度大于贫煤，但从下降绝对值看，贫煤工况NO下降90~109 mg/Nm³，烟煤工况的NO下降47~77 mg/Nm³，贫煤耦合掺烧NO下降的绝对值比烟煤耦合掺烧大。分析原因是生物质从还原区送入，对于烟煤，燃料N产生的NO在燃烧前期大部分已释放出来，此时送入木头，NO的还原会随着送入生物质比例增高而增大。对于贫煤，燃料N在燃烧后期也会释放出来，燃烧前期送入木头比例6%时，对NO的还原已达到最佳效果。送入木头比例提高后，反而炉膛出口NO会升高，可能是因为木头N含量比贫煤略高，木头产生的燃料性NO使得最终NO排放略升高。

2.4 不同生物质对NO排放的影响

为考察不同生物质及掺烧比例对炉膛出口NO的影响，选取木头、水稻、小麦秸秆、花生秸秆和玉米秸秆和烟煤进行耦合燃烧，氧量3%，燃尽风率40%，木头掺入位置为还原区，生物质掺烧比例(6%、12%和18%)对锅炉NO排放影响如图5所示。

由图5可知，生物质掺烧比例为12%时，NO降幅排序为：小麦>木头>水稻>花生>玉米。与表2各生物质N含量(小麦<木头<水稻<玉米<花生)基本一致。分析原因是5种生物质的挥发分在60%以上，产生的还原性气氛比例相近，但每种生物质N含量差别较大，小麦N含量是0.54%，花生N含量

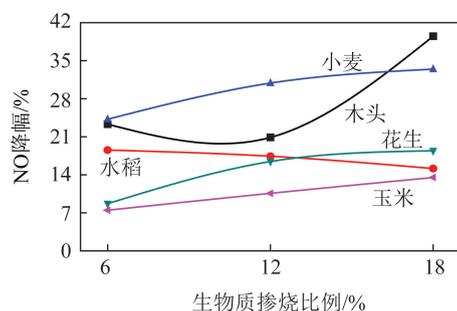


图5 不同生物质对NO排放的影响

Fig.5 Effect of different coupled combustion of biomass on reduction rate of NO emission

是1.28%，燃料N含量越高，产生的燃料性NO越高。说明生物质除了产生的挥发分能还原NO外，其本身燃烧也会产生燃料型NO，工程上掺烧生物质时应注意生物质的N含量。

在相同位置掺入不同比例生物质，研究其对NO的影响，结果显示除水稻外，木头、小麦秸秆、花生秸秆及玉米秸秆等生物质都是掺入比例越大，NO降幅越大；水稻、小麦秸秆、花生秸秆及玉米秸秆掺入比例高于12%后，NO降幅未明显上升。分析原因是因为试验中所有生物质都从一级燃烧器送入，生物质比例提高后，炉膛内一部分还原性物质未与氧化物发生还原反应即被氧化，猜测将生物质分级送入会提升生物质对NO的还原效果。

2.5 不同生物质对燃尽特性的影响

不同生物质与煤耦合燃烧对锅炉飞灰可燃物含量的试验结果如图6所示。

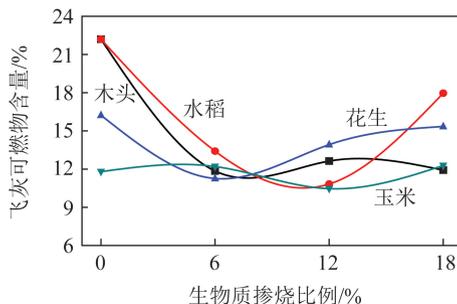


图6 不同生物质对飞灰可燃物含量的影响

Fig.6 Effect of different coupled combustion of biomass on combustible content of fly ash

由图6可知，在相同输入热负荷及过量空气系数下，与纯烧煤工况相比，掺入木头、水稻、花生秸秆及玉米秸秆等生物质后飞灰可燃物均出现不同程度降低，说明生物质与煤直接耦合燃烧能提高主燃料煤的燃尽率，这是因为生物质挥发分基本在60%以上，挥发分极易燃烧，能有效提高煤粉周围烟温，提高反应速率；另外生物质掺烧比例提高至12%后，木头、花生秸秆及玉米秸秆飞灰可燃物规律不同且

变化幅度较小,分析原因可能是因为生物质比例提高,还原区域氧量较低,不能及时完全燃烧,煤粉周围烟气温度不会随生物质同比例提高,所以生物质对主燃料燃尽的提高程度有限。

2.6 不同生物质一次风率对 NO 及燃尽的影响

改变生物质燃烧器的配风量,考察炉膛出口 NO 及飞灰可燃物的变化。氧量 4.25%,生物质燃烧器一次风率为 33%、50% 和 66%,考察生物质一次风率对烟煤的燃尽、NO 排放等的影响,试验期间进行了烟气及飞灰可燃物的取样及分析。不同生物质一次风率对 NO 及燃尽影响如图 7 所示。

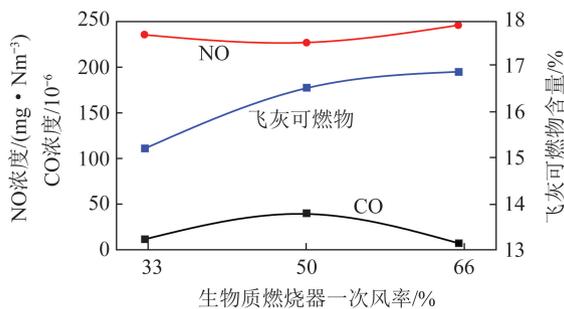


图 7 一次风率对燃烧的影响

Fig.7 Effect of primary air rate of biomass on combustion

由图 7 可知,生物质一次风率从 33% 升到 66% 后,各工况 CO 较低,都在 40×10^{-6} 以下;随着配风量增加,NO 从 235.4 mg/Nm^3 升至 246.9 mg/Nm^3 ,增幅较小;飞灰可燃物变化不明显,分析认为生物质一次风率提高后会增加还原区域的氧浓度,同时会降低还原区温度,推测炉膛内煤粉的反应速率未出现明显变化,生物质挥发分的反应速率略有提升,对炉膛内 NO 还原效果削弱。整体上生物质一次风率对锅炉燃烧特性影响不大。

2.7 不同生物质一次风温对 NO 及燃尽的影响

改变生物质一次风温度,考察炉膛出口 NO 和 CO 排放特性及飞灰可燃物的变化。选取氧量 2.8%,并维持风量不变,一次风温为 30、50 和 70 °C 时,NO 及燃尽效果如图 8 所示。

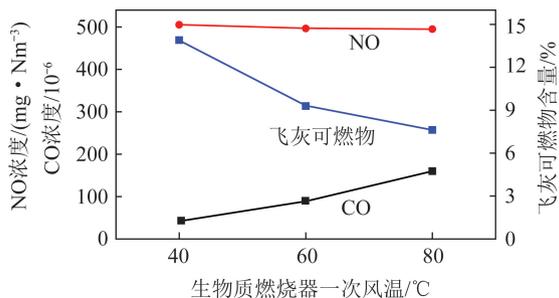


图 8 一次风温对燃烧的影响

Fig.8 Effect of primary air temperature of biomass on combustion

由图 8 可知,随着生物质一次风温从 30 °C 升高 70 °C 后,CO 含量较低,在 180×10^{-6} 以下;随着生物质一次风温升高,NO 变化不明显,均在 500 mg/Nm^3 左右,但风温升高后飞灰可燃物含量降低较明显,从 13.88% 降至 7.62%。一次风风温升高至 70 °C 对生物质的热解影响较小,产生的挥发分变化较小,所以对 NO 影响不大。升高风温能提高生物质燃烧区域的炉膛温度,显著提升生物质及煤焦的化学反应速度,另外由于生物质从还原区送入,此区域炉膛温度较高,煤焦在此高温区燃烧速率提高,更有利于燃尽,能有效提高燃烧效率。分析认为在不影响安全的情况下,生物质燃烧器应尽量提高一次风温度。

2.8 生物质掺入对烟气温度的影响

在维持输入热负荷、氧量、燃尽风率不变的情况下,不掺烧生物质及改变生物质不同掺烧位置后,炉膛燃烧区域烟温与炉膛出口烟温如图 9 所示。

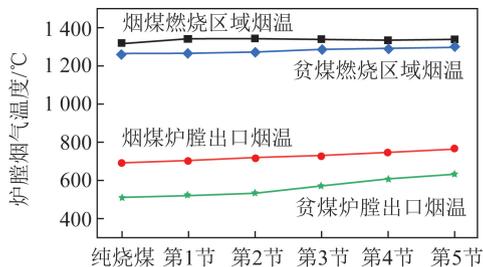


图 9 不同位置对烟气温度的影响

Fig.9 Effect of burning positions on flue gas temperature

由图 9 可知,相比纯烧煤工况,贫煤和烟煤的炉膛燃烧区域以及炉膛出口的温度都有不同幅度上升,原因主要是在较低温度下生物质挥发分即可析出和燃烧,提高了煤粉周围的烟气温度,加速了煤粉的燃烧,提高了煤的燃尽性。由图 6 可知,生物质掺烧后飞灰可燃物均出现不同程度降低;随着生物质送入位置向下移动,燃烧区域及炉膛出口温度上升幅度越大,这是由于贫煤的焦炭燃烧主要在后期,生物质后期加入,提高了焦炭周围烟气温度,对焦炭的促进作用较强,由图 3 可知,对于贫煤,生物质在后期加入,飞灰含碳量最低。

由图 2、5 可知,不同生物质、位置及比例掺烧后,炉膛 NO 排放不同程度降低,这可能是由于生物质掺烧后,炉膛燃烧区域烟气温度升高,如图 9 所示,烟煤工况下燃烧区域的烟气温度上升 18~26 °C,贫煤工况下燃烧区域温度上升 0~32 °C,促进煤粉燃烧的同时,也有利于燃料 N 产生的 NO 在燃烧器区域提前释放,在还原区有效被还原,最终炉膛出口 NO 排放降低。

3 结 论

1)从NO排放情况看,生物质与燃煤锅炉耦合燃烧最佳送入位置为还原区,此工况NO排放降幅最大,烟煤降幅23.47%,贫煤降幅为13.64%。从燃尽角度看,对于烟煤,生物质宜从燃烧前期加入;对于贫煤,生物质宜从燃烧后期加入。

2)生物质掺烧比例从6%提高至12%后,与烟煤耦合燃烧时,NO排放降幅从23.31%增至39.5%;与贫煤耦合燃烧时,NO排放降幅变化不明显,从13.61%下降至10%左右。

3)掺烧不同生物质对NO降幅不同,NO降幅与生物质中氮含量相关,氮含量越低,NO降幅越大。

4)提高生物质的一次风温,飞灰可燃物降低明显,从30℃升至70℃时,飞灰可燃物含量从13.88%降至7.62%,建议在不影响制粉系统安全的情况下,生物质燃烧器宜尽量提高一次风温度。

参考文献(References):

[1] 杨艳华,汤庆飞,张立,等.生物质能作为新能源的应用现状分析[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2015,17(1):102-105.
YANG Yanhua,TANG Qingfei,ZHANG Li,et al. Present application status analysis on the new energy of biomass[J].Journal of Chongqing University of Science and Technology(Natural Sciences Edition),2015,17(1):102-105.

[2] 马广鹏,张颖.中国生物质能源发展现状及问题探讨[J].农业科技管理,2013,32(1):20-22.
MA Guangpeng,ZHANG Ying. Discussions on current situation and problems of biomass energy development in China[J].Management of Agricultural Science and Technology,2013,32(1):20-22.

[3] 魏伟,张绪坤,祝树森,等.生物质能开发利用的概况及展望[J].农机化研究,2013(3):7-11.
WEI Wei,ZHANG Xukun,ZHU Shusen,et al. The overview and prospect in biomass energy exploitation and utilization in China[J].Journal of Agricultural Mechanization Research,2013(3):7-11.

[4] 金山.生物质直接燃烧发电技术的探索[J].电力科技与环保,2015,31(1):50-52.
JIN Shan.Exploration of biomass direct combustion technology[J].

Electric Power Technology and Environmental Protection,2015,31(1):50-52.

[5] 冀佳蓉,王运军.国外生物质发电技术研究进展[J].山西科技,2014,29(3):59-61.
JI Jiarong,WANG Yunjun. Review of the research progress of biomass power generation technology foreign countries[J].Shanxi Science and Technology,2014,29(3):59-61.

[6] 杜一帆,于敦喜,吴建群,等.稻壳与不同煤种的混燃特性研究[J].热力发电,2016,45(8):6-13.
DU Yifan,YU Dunxi,WU Jianqun,et al.Co-combustion characteristics of rice husk and different coals[J].Thermal Power Generation,2016,45(8):6-13.

[7] 陈海平,鲁光武,于鑫玮,等.燃煤锅炉掺烧生物质的经济性分析[J].热力发电,2013,42(12):40-44.
CHEN Haiping,LU Guangwu,YU Xinwei,et al. Economic analysis of co-combustion biomass in a coal-fired boiler[J].Thermal Power Generation,2013,42(12):40-44.

[8] HIGGINS B,YAN L,GADALLA H,et al. Biomass co-firing retrofit with ROFA for NO_x reduction.[J]. Polish Journal of Environmental Studies,2010,19(6):1185-1197.

[9] SAVOLAINEN K. Co-firing of biomass in coal-fired utility boilers[J]. Applied Energy,2003,74(3):369-381.

[10] GOLD B A,TILLMAN D A. Wood cofiring evaluation at TVA power plants[J]. Biomass & Bioenergy,1996,10(2):71-78.

[11] 董信光,董建,刘豪杰,等.生物质与煤混合燃料的燃烧特性及NO_x的物排放特性[C]//京津冀晋蒙鲁电机工程(电力)学会第二十三届学术交流会.天津:中国电力工程学会,2013:20-27.

[12] MOLCAN P,LU G,BRIS T L,et al. Characterisation of biomass and coal co-firing on a 3 MW_{th} Combustion Test Facility using flame imaging and gas/ash sampling techniques[J]. Fuel,2009,88(12):2328-23347.

[13] 任建兴,邓淙仁,李芳芹,等.生物质燃料燃烧特性分析与研究[C]//中国动力工程学会锅炉专业委员会第三次学术交流会.哈尔滨:中国动力工程学会,2006:61-64.

[14] 鲁光武.生物质混煤燃烧特性的实验及动力学研究[D].北京:华北电力大学,2013:18-28.
LU Guangwu. Experimental and kinetics study on combustion characteristics of biomass blend with coal[D]. Beijing:North China Electric Power University,2013:18-28.

[15] 贺仁飞.中国生物质能的地区分布及开发利用评价[D].兰州:兰州大学,2013:1-20.
HE Renfei. Geographical distribution of biomass energy and access on its development and utilization in China[D].Lanzhou:Lanzhou University,2013:1-20.