

600 MW 机组燃煤锅炉耦合生物质气再燃 污染物排放研究

张小桃, 张卫东, 慕昊良, 张程俞, 武艺超, 刘昊明
(华北水利水电大学电力学院, 河南 郑州 450011)

[摘要] 为了研究生物质气种类及再燃区过量空气系数对燃煤耦合生物质气再燃过程的影响, 基于 Fluent 软件搭建燃煤锅炉耦合生物质气化炉再燃燃烧模型, 对某电厂 600 MW 机组四角切圆燃煤锅炉耦合 2 台 20 t/h 生物质气化炉再燃过程进行数值模拟, 研究了秸秆气、食物垃圾气及沼气分别在再燃区过量空气系数为 0.7、0.8、0.9 工况下对炉内烟气温场、组分场及炉膛出口 NO_x 排放的影响。结果表明: 生物质气再燃降低锅炉煤粉消耗量, 使得主燃区燃烧温度降低, 但同时使得炉内燃烧火焰中心上移, 提高了炉膛出口烟气温度; 生物质气再燃能有效改善锅炉污染物排放问题, 生物质气内烃类化合物 CH_4 含量越高, 降低 NO_x 排放的效果越好, 秸秆气、食物垃圾气和沼气再燃降氮效果依次增加, 沼气再燃降氮效果最好, 最高可达 41.20%; 当再燃区过量空气系数为 0.7~0.8 时, 再燃锅炉耦合系统降氮效果最好, 再燃区过量空气系数继续升高时, 降氮效果逐渐变差。

[关键词] 生物质气; 再燃燃烧; 过量空气系数; 降氮率; 数值模拟

[中图分类号] TK16 **[文献标识码]** A **[DOI 编号]** 10.19666/j.rfd.202010258

[引用本文格式] 张小桃, 张卫东, 慕昊良, 等. 600 MW 机组燃煤锅炉耦合生物质气再燃污染物排放研究[J]. 热力发电, 2021, 50(6): 26-32. ZHANG Xiaotao, ZHANG Weidong, MU Haoliang, et al. Pollutant emission of a 600 MW coal-fired boiler coupled with biomass gas reburning[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(6): 26-32.

Pollutant emission of a 600 MW coal-fired boiler coupled with biomass gas reburning

ZHANG Xiaotao, ZHANG Weidong, MU Haoliang, ZHANG Chengyu, WU Yichao, LIU Haoming
(School of Electric Power, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: In order to study the influence of different types of biomass and the excess air coefficient in the reburning zone on the combustion process of coal-fired coupled biomass gas, the re-burning processes of a 600 MW tangentially-fired boiler coupled with two 20 t/h gasifiers have been simulated by Fluent software. The effects of straw gas, food waste gas and biogas on the temperature field, composition field and NO_x emissions at the furnace outlet under the conditions with the excess air coefficient of 0.7, 0.8 and 0.9 in the re-burning zone were studied. The results show that, biomass gas re-burning can reduce the coal consumption of the boiler and the combustion temperature in the main combustion zone, but the center of the combustion flame in the furnace is moved upward, which increases the temperature of the flue gas at the outlet of the furnace. Biomass gas re-burning can improve the problem of boiler pollutant emissions effectively, the higher the content of hydrocarbon compounds in the biomass gas, the better the effect of reducing nitrogen oxide emissions. The nitrogen reduction effect of straw gas, food waste gas and biogas re-burning increases sequentially, the nitrogen reduction rate of biogas re-burning can reach up to 41.20%. When the excess air coefficient in the re-burning zone is in the range of 0.6~0.8, the biomass gas re-burning system has the best pollutant emission effect. When the excess air coefficient in the re-burning zone continues to increase, the nitrogen reduction effect becomes worse gradually.

Key words: biomass gas, re-burning, excess air coefficient, nitrogen reduction rate, numerical simulation

目前, 气体再燃技术被认为是最为经济且最具应用前景的降氮技术之一。王鹏涛等^[1]针对气体再

燃脱硝机理, 总结了国内外气体再燃技术应用与锅炉改造的典型工程, 研究发现再燃脱硝过程中再燃

收稿日期: 2020-10-10

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(21A480006)

Supported by: Key Scientific Research Projects of Colleges and Universities in Henan Province (21A480006)

第一作者简介: 张小桃(1967), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为生物质能的开发及利用技术, zxt@ncwu.edu.cn.

区停留时间、过量空气系数、再燃温度等对脱硝效果有明显影响。岳朴杰等^[2]对某厂一台 240 t/h 煤粉锅炉进行再燃脱硝改造,实验结果表明,气体再燃比在 0~20% 时,脱硝效率最高可达 43.1%。陈宝明等^[3]对某电厂 220 t/h 锅炉采用天然气再燃技术进行低氮改造试验,结果表明锅炉 NO_x 排放质量浓度随再燃量的增加而逐渐降低,当再燃量保持在 15%,再燃燃料停留时间为 0.67 s 时降氮效果最好。吴国强等^[4]在滴管炉内进行再燃燃烧实验,结果表明 CH_4 对 NO_x 的还原性最强, H_2 对 NO_x 还原效果稍差, CO 效果最差,再燃脱硝效率随合成气内碳氢比的增大先上升后下降,当碳氢比为 7/3 时,脱硝效率较好。

随着生物质气化技术的发展,煤粉耦合生物质气发电技术逐渐得到应用,Sylwester Kalisz 等^[5]研究将生物质进行气化后间接与煤粉耦合燃烧,与生物质与煤粉直接共燃相比,其对煤粉锅炉的影响较小。王一坤等^[6]研究了生物质气化耦合发电技术对燃煤机组的影响,研究表明少量掺烧生物质气后对锅炉原系统影响较小,烟风系统和减温水系统仍能满足需求。J.J. Hernandez 等^[7]使用生物质气代替部分柴油机进气口喷射的柴油,研究发现柴油发动机热效率随着燃料替代量的增加而降低, CO 增加,但 NO_x 排放明显降低。吴国强等^[8]分析了煤粉耦合生物质气对锅炉燃烧安全性的影响,结果表明,生物质气化耦合发电系统对锅炉的正常运行影响很小,且可替代部分煤粉为锅炉提供热量,有效降低炉膛出口污染物的排放。

生物质气是一种具有还原性质的混合气体,对 NO_x 具有一定的还原性,因此生物质气再燃技术成为当今研究热点。马先良^[9]选取 600 MW 机组四角切圆变压直流炉为研究对象,基于 Fluent 软件,分别对再燃温度为 950、1 100、1 200 °C 的生物质气再燃过程进行了数值模拟,研究发现在不同的温度区间,预计实际脱硝效率可达 10%~20%。孙俊威等^[10]以对冲旋流燃煤锅炉为研究对象,对 3 种类型生物质气再燃进行仿真模拟,结果表明,生物质气种类对再燃脱硝率有一定影响,炉膛出口 CO_2 、 NO_x 排放质量浓度随生物质气再燃量的增加而降低,而出口烟温和 CO 体积分数相对升高。张小桃等^[11-13]对某电厂 660 MW 机组燃煤锅炉耦合生物质气再燃进行了仿真模拟,研究再燃喷口高度对锅炉污染物排放的影响,结果表明,当再燃喷口位于再燃区中

间位置,再燃系统降低 NO_x 排放效果最好,降氮率最高可达 28.01%。王义德等^[14]进行了以废弃沼气作为工业锅炉再燃燃料的研究,联用 FLIC 床层燃烧模型和 Fluent 软件对炉内再燃燃烧特性进行了模拟,研究表明 CH_4/NO 投入比例和沼气稀释比对 NO_x 的还原效果有重要影响。

本文选取 2 台 20 t/h 生物质气化炉,在保证气化炉容量的前提下,基于 Fluent 软件,分别研究秸秆气(SG)、食物垃圾气(WG)及沼气(BG)在不同再燃区过量空气系数下对 600 MW 机组四角切圆煤粉锅炉耦合生物质气再燃过程进行模拟,对比分析不同种类生物质气及再燃区过量空气系数对炉内烟气温场、组分场及炉膛出口 NO_x 排放质量浓度的影响,为生物质气再燃降氮技术提供理论依据。

1 再燃燃烧系统

1.1 锅炉概况

以某电厂超临界 600 MW 机组自然循环锅炉为研究对象,该锅炉采用单炉膛四角切圆燃烧、全悬吊型、半露天、Π 型布置。炉膛本体高 63.55 m,其截面尺寸为 18.82 m×17.70 m (宽×深)。一、二次风间隔布置,共计布置 13 层,其中一次风喷口 6 层,二次风喷口 7 层,距主燃区最上层二次风喷口上方 6 m 处布置 2 层燃尽风喷口。依据燃料分级原理,在炉膛主燃区和燃尽区之间设置生物质气再燃区,以四角切圆的布置方式分别布置 1 层生物质气喷口和 1 层再燃风喷口,且 2 层喷口的喷射角度与主燃区喷口保持一致,改造前后炉膛结构及燃烧器布置方式如图 1 所示。

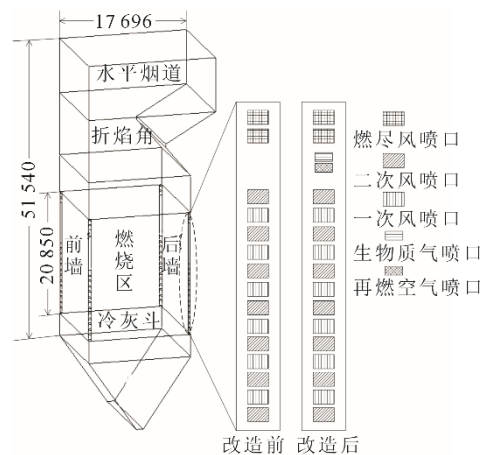


图 1 炉膛结构及燃烧器布置方式 (mm)

Fig.1 The boiler structure and burner arrangement (mm)

1.2 煤粉耦合生物质气再燃燃烧理论基础

1.2.1 生物质气再燃降氮机理

生物质气再燃依据空气分级及燃料分级原理，将炉膛燃烧区分为主燃区、再燃区和燃尽区3部分，再燃燃烧过程模型如图2所示。

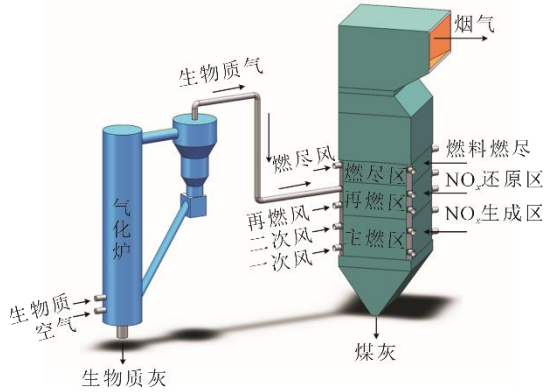


图2 生物质气再燃燃烧过程
Fig.2 The biomass gas re-burning process

煤粉耦合生物质气再燃燃烧反应过程中，生物质气能代替部分煤粉进行燃烧，降低燃料型NO_x的产生；另一方面，生物质气的还原性使得再燃区构成还原性气氛，煤粉燃烧产生的NO_x在再燃区能被有效还原为N₂，从而降低NO_x的排放质量浓度。

在生物质气化合生成气中，CO虽然具有还原性，但相比于H₂、CH₄及其他烃类化合物，CO在还原NO的反应中处于劣势，其主要与O₂发生氧化反应生成CO₂，而生物质气化合生成气中其他烃类化合物的含量极少，因此本文主要考虑CH₄、H₂在还原区与NO发生的一系列还原反应。

生物质气中的H₂在还原区的反应至关重要，它主要是与O发生反应，产生大量的H及OH，进而参与CH₄的热解过程。CH₄在再燃还原区的反应主要分为3个阶段：CH₄首先与H、O及OH反应生成CH₃，继而与NO发生反应，生成HCN，最后再与其他活性基团NH、NCO等反应生成最终产物N₂。再燃区主要反应过程如图3所示。

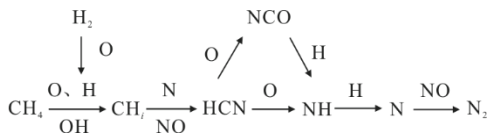


图3 再燃区主要反应过程
Fig.3 The major reaction process in re-burning zone

1.2.2 燃料特性

本文以神府东胜煤为设计煤种，煤粉特性参数见表1。

表1 煤粉工业分析及元素分析 w/%
Tab.1 Proximate and ultimate analysis of the coal

工业分析				元素分析				
M _{ar}	A _{ar}	V _{ar}	FC _{ar}	C _{ar}	H _{ar}	O _{ar}	N _{ar}	S _{ar}
4.93	32.57	22.04	40.46	52.41	3.43	5.29	0.73	0.64

选择2台容量为20 t/h的生物质气化炉，生物质原料经热解气化，为降低生物质合成气内焦油对耦合锅炉的影响，经分离后由换热器进行降温处理送入锅炉再燃区，气化耦合过程如图4所示。

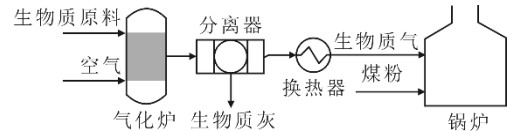


图4 气化耦合过程
Fig.4 The process of syngas co-firing with coal

生物质原料经相同容量气化炉气化、分离、降温，最终将450℃纯净生物质合成气送入耦合锅炉内进行再燃燃烧。不同种类生物质原料气化产率、气化气成分及低位热值均有不同，单位体积生物质气在450℃下所携带的热量的计算公式为

$$Q_{\text{syngas}} = \frac{Q_{\text{net,syngas}} \times V_{\text{N,syngas}} + Q_{\text{bio}}}{V_{\text{syngas}}} \quad (1)$$

式中：Q_{syngas}为单位体积生物质气在温度450℃下所携带的热量，kJ/m³；Q_{net,syngas}为生物质气低位热值，kJ/m³；V_{N,syngas}为1 kg生物质原料经气化后标准工况下生成生物质气体积，即气体产率，m³；V_{syngas}为在温度450℃下生物质气的体积，m³；Q_{bio}为生物质气的显热，kJ。

生物质气中CH₄、H₂等在再燃还原中起主导作用，为进一步研究烃类化合物对NO_x的还原效果，本文再引入CH₄含量较高的沼气作为比较对象，相比于秸秆气和食物垃圾气，沼气的热值相对较高，为减少气体流速及掺烧比对模拟结果的影响，对沼气耦合煤粉锅炉模型进行调整，缩小沼气喷口面积，降低生物质气的喷射角度及喷射速度对不同工况的干扰。生物质及沼气特性见表2。

1.3 研究工况及边界条件设定

本文主要研究不同种类生物质气耦合再燃及改变再燃区过量空气系数对燃煤锅炉燃烧过程及污染物排放的影响。依据边界条件定义标准，将所有喷口设置为速度进口，炉膛出口设置为压力出口，炉内为微负压，负压为-100 Pa。分别选取秸秆气、食物垃圾气及沼气，设置再燃区过量空气系数分别为0.7、0.8、0.9，10种设置工况下再燃模型输入参数见表3。

表 2 生物质气特性
Tab.2 The characteristics of biomass gas

燃料	生物质气体积分数/%						温度/K	$V_{N, \text{syngas}}/\text{m}^3$	$V_{\text{syngas}}/\text{m}^3$	$Q_{\text{net, syngas}}/(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3})$	Q_{bio}/kJ	$Q_{\text{syngas}}/(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3})$
	CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	N ₂	H ₂ O						
SG	25.52	21.53	0.43	7.95	40.29	4.23	723	2.36	6.25	5 697.05	1 726.77	2 427.68
WG	15.00	25.79	1.21	9.39	40.71	7.86	723	2.70	7.15	5 110.07	3 192.79	2 375.88
BG	1.60	6.50	58.20	31.40	0.70		300					24 614.49

表 3 初始参数
Tab.3 The initial parameters

工况	再燃燃料	λ	掺烧比 $A/\%$	煤耗量 $B/(\text{kg s}^{-1})$	一次风速 $V_1/(\text{m s}^{-1})$	二次风速 $V_2/(\text{m s}^{-1})$	燃尽风速 $V_3/(\text{m s}^{-1})$	再燃风速 $V_4/(\text{m s}^{-1})$	气体燃料风速 $V_5/(\text{m s}^{-1})$
原工况		0	0	3.09	28.16	54.65	55.53	0	0
工况 1		0.7	11.08	2.74	25.00	45.03	59.68	45.13	52.96
工况 2	SG	0.8	11.08	2.74	25.00	45.03	57.80	51.57	52.96
工况 3		0.9	11.08	2.74	25.00	45.03	55.93	58.02	52.96
工况 4		0.7	12.42	2.70	24.63	44.35	59.67	48.35	60.66
工况 5	WG	0.8	12.42	2.70	24.63	44.35	57.66	55.25	60.66
工况 6		0.9	12.42	2.70	24.63	44.35	55.65	62.16	60.66
工况 7		0.7	10.00	2.78	25.31	45.58	61.97	52.52	55.00
工况 8	BG	0.8	10.00	2.78	25.31	45.58	59.79	60.03	55.00
工况 9		0.9	10.00	2.78	25.31	45.58	57.61	67.53	55.00

2 结果分析

2.1 模型模拟结果验证

依据上述数学模型对研究锅炉进行模拟计算，为保证模拟结果的准确性，将仿真结果与锅炉设计

值^[15]进行对比，结果见表 4。由表 4 可见，炉膛出口烟气 O₂ 体积分数模拟值与设计值误差为 0.93%，CO₂ 体积分数误差值为 1.17%，NO_x 质量浓度误差值为 7.47%。模拟结果与设计参数存在一定偏差，但在可接受范围内，具有一定参考性。

表 4 模拟结果验证
Tab.4 The simulation result verification

项目	出口烟气 O ₂ 体积分数/%	出口烟气 CO ₂ 体积分数/%	出口烟气 NO _x 质量浓度/(mg·m ⁻³)
模拟结果	3.20	14.69	323.87
设计参数	3.23	14.52	350.00

2.2 再燃燃烧对炉内主燃区温度场的影响

分别选取秸秆气、食物垃圾气及沼气在不同过量空气系数下进行再燃燃烧，炉膛燃烧器区域各水平截面烟气平均温度分布如图 5 所示。由图 5 可以看出：不同工况下炉内温度变化趋势大致呈先升后降的趋势，煤粉在主燃区剧烈燃烧，释放热量，因此由炉膛底部至燃烧器区域，炉内温度急剧升高，之后由于辐射及对流换热的作用，炉内温度逐渐降低；纯煤工况下，煤粉在主燃区剧烈燃烧，炉内温度快速升高，在主燃区顶部 27 m 处达到峰值，温度高达 2 069.17 K；再燃工况下，生物质气代替部分煤粉进行燃烧，导致再燃工况下主燃区煤耗量降

低，因此纯煤工况炉内主燃区平均温度及主燃区烟气峰值温度均高于再燃工况；由于设置再燃区，生物质气由此喷入炉内进行二次燃烧，因此相比于原工况，工况 1—工况 9 在再燃区（31 m）出现第 2 个温度峰值，生物质气燃料在再燃区进行燃烧释放热量，该区域温度明显增加，但由于再燃空气及再燃燃料温度较低，且再燃燃料量相对较少，故再燃区峰值温度相对低于主燃区峰值。

由于生物质气的二次燃烧，再燃工况下再燃区温度高于纯煤工况。燃尽风区喷入大量空气，且空气温度低于炉内温度，故此区域温度先急剧下降，当主燃区少量未燃尽燃料与空气混合进行二次燃

烧后,炉内温度虽仍在下降,但降低趋势逐渐变缓。纯煤燃烧下出口烟气平均温度为 1 358.88 K, 由于再燃喷口的建立,提高了炉内燃料燃尽的位置,使得炉膛中心火焰向上偏移,故而工况 1—工况 9 的炉膛出口烟气平均温度均高于原工况,且同种生物质气在不同再燃区过量空气系数的条件下,炉膛出口烟气平均温度均有小幅变化。

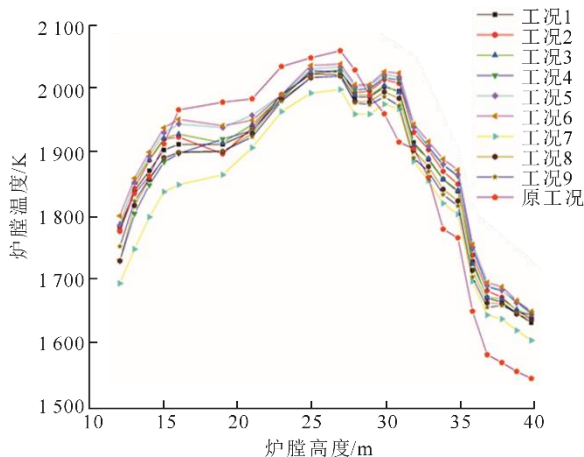


图5 炉膛各水平截面烟气平均温度分布

Fig.5 Distribution of mean temperature on horizontal cross-sections along furnace height

2.3 再燃燃烧对炉膛出口烟气排放的影响

秸秆气、食物垃圾气及沼气在不同再燃区过量空气系数条件下进行再燃燃烧,炉膛出口 O₂、CO₂ 及 CO 体积分数变化趋势如图 6 所示。

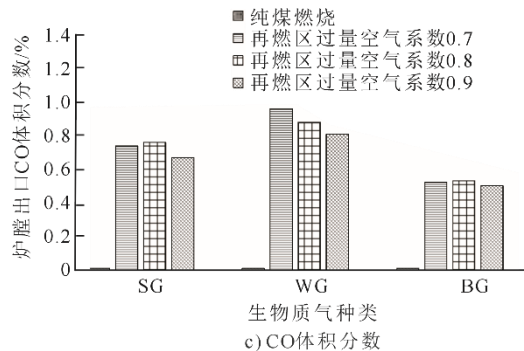
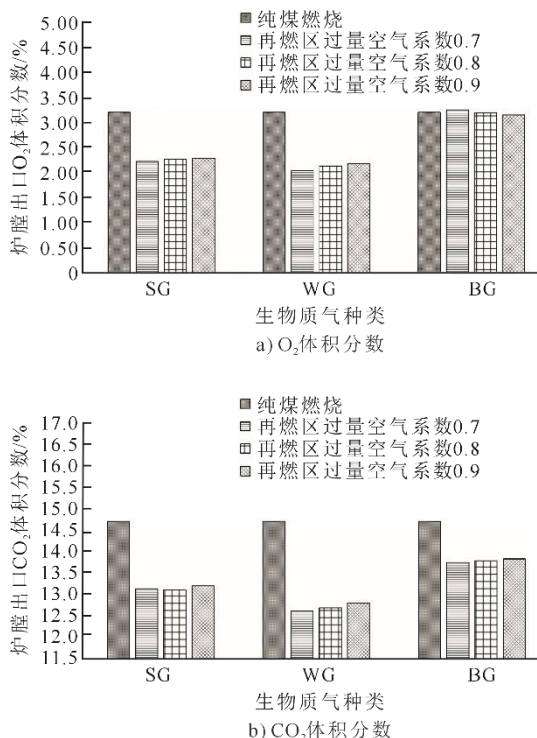


图6 炉膛出口烟气组分场变化分布

Fig.6 The variations of flue gas composition field at the furnace outlet

由图 6 可以看出:生物质气再燃对炉膛出口烟气中 O₂ 体积分数有一定影响,秸秆气和食物垃圾气再燃时,其燃烧所需理论空气量小于煤粉燃烧,炉内氧气供给量相对于纯煤工况更小;由于再燃工况下,燃料进行分级燃烧,使得炉内燃烧火焰分布更立体,促进燃料燃烧对 O₂ 的消耗,因此再燃工况下炉膛出口烟气中 O₂ 体积分数小于纯煤工况,选择食物垃圾气且再燃区过量空气系数为 0.7 时,炉膛出口 O₂ 体积分数最小,为 2.02%;当再燃燃料为沼气时,炉内空气供给量升高,炉膛出口烟气中 O₂ 体积分数相对升高,最高达 3.25%。

相比于 O₂,炉膛出口烟气中 CO 变化趋势刚好相反,由于生物质气中含有大量 CO 气体,且生物质气大多呈还原性质,易与炉内烟气中各组分发生还原反应,因此生物质气再燃工况下炉膛出口烟气中 CO 体积分数相较于纯煤工况有显著提高,工况 4 条件下炉膛出口 CO 体积分数最高,达 0.96%,再燃区过量空气系数增大时,CO 减少;而沼气中以 CH₄ 气体为主,CO 含量极少,因此沼气再燃时炉膛出口 CO 体积分数较生物质气再燃有所降低,但仍高于纯煤燃烧工况;燃料中 CO 含量越多,越不利于充分燃烧,因此再燃工况下炉膛出口烟气中 CO₂ 体积分数降低,食物垃圾气再燃时炉膛出口 CO₂ 平均体积分数相对较低,最低为 12.61%,沼气再燃时炉膛出口 CO₂ 平均体积分数最高,最高达 13.82%,但仍低于纯煤工况的 14.69%。

由图 6 还可以看出,随着再燃区过量空气系数的增加,炉内 O₂ 供给量升高,炉膛出口烟气中 O₂ 体积分数逐渐升高,再燃区还原性氛围被破坏,因此 CO 体积分数呈降低趋势,而 CO₂ 体积分数与 CO 体积分数变化呈负相关,随再燃区过量空气系数的增加而升高。

2.4 再燃燃烧对炉膛出口 NO_x 排放的影响

生物质气的种类及再燃区过量空气系数对炉膛出口 NO_x 的排放有较大影响,不同工况下炉膛出口 NO_x 质量浓度变化及降氮率如图 7 所示。

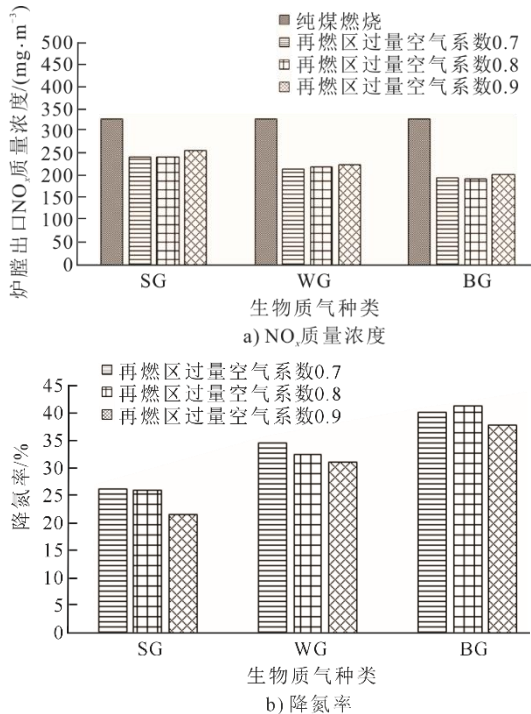


图 7 炉膛出口 NO_x 质量浓度及降氮率

Fig.7 Changes in NO_x mass concentration at the furnace outlet

由图 7 可以看出:生物质气再燃能降低炉膛出口 NO_x 质量浓度,再燃燃料选取秸秆气、食物垃圾气及沼气时,最低能使炉膛出口 NO_x 质量浓度分别降低至 239.61、212.29、190.45 mg/m³,其降氮率分别为 26.02%、34.45%和 41.20%;相比于秸秆气和食物垃圾气,沼气再燃对 NO_x 的还原效果更好,降氮率更高,这是因为沼气内烃类化合物 CH₄ 含量较高,且 N₂ 含量更低,具有更强的还原性,再燃燃烧时能有效还原主燃区燃烧生成的 NO_x,同时也降低了 N₂ 氧化反应,减少二次燃料燃烧产生的 NO_x。

由图 7 还可以看出:随着再燃区过量空气系数的变大,不同生物质气再燃降氮率均有不同幅度的降低;秸秆气耦合煤粉再燃燃烧时,当再燃区过量空气系数由 0.7 升至 0.8 时,降氮率基本不变,当再燃区过量空气系数由 0.8 升至 0.9 时,降氮率显著下降;食物垃圾气耦合煤粉再燃燃烧时,随着再燃区过量空气系数的增加,降氮率由 34.45%降至 31.02%;沼气再燃时,当再燃区过量空气系数为 0.8 时,降氮率最高,可达 41.20%,随着再燃区过

量空气系数的增加,降氮率降低。由此可见,再燃区过量空气系数对锅炉 NO_x 排放有一定影响,这是因为当再燃区过量空气系数过高时,再燃区 O₂ 含量相对较高,破坏了再燃区的还原性气氛,不利于 NO_x 的还原。因此,生物质气再燃燃烧时,最佳再燃区过量空气系数为 0.7~0.8。

3 结 论

1) 生物质气再燃减少了锅炉煤耗量,因此炉膛主燃区烟气平均温度较原工况相对降低,但生物质气再燃燃烧使得炉内燃烧火焰中心上移,从而导致炉膛出口烟气平均温度升高,增加了锅炉排烟热损失。

2) 不同种类生物质气再燃对炉膛出口烟气组分的影响不尽相同,再燃燃烧能有效降低炉膛出口氮氧化物浓度。烃类化合物 CH₄ 含量高的沼气,降氮效果相对更好,最低能使炉膛出口 NO_x 质量浓度降至 190.45 mg/m³,食物垃圾气降氮效果次之,秸秆气内 CH₄ 含量最低,降氮效果最差。

3) 再燃区过量空气系数对炉膛出口 NO_x 排放质量浓度有一定影响,选用生物质气为再燃燃料时,当再燃区过量空气系数为 0.7~0.8 时,再燃锅炉耦合系统降氮效果最好。

4) 煤粉耦合生物质气再燃锅炉系统不仅能有效利用生物质资源,还能降低煤粉消耗量。2 台 20 t/h 秸秆气化炉和 2 台 20 t/h 食物垃圾气化炉耦合 600 MW 机组煤粉锅炉再燃系统可节约标准煤分别为 29.55、33.13 t/h,掺烧比为 10%的沼气再燃系统可节约标准煤 26.67 t/h,节能效果显著。

[参 考 文 献]

- [1] 王鹏涛,王乃继,梁兴,等. 气体燃料再燃脱硝机理及工程应用现状[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(6): 51-60.
WANG Pengtao, WANG Naiji, LIANG Xing, et al. Denitration mechanism and engineering application progress of gas fuel reburning[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(6): 51-60.
- [2] 岳朴杰,张忠孝,毕德贵,等. 煤粉锅炉气体再燃及 SNCR 联合脱硝的实验研[J]. 热能动力工程, 2017, 32(9): 57-62.
YUE Pujie, ZHANG Zhongxiao, BI Degui, et al. Experimental study on joint denitration by gas reburning and SNCR in PC-boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2017, 32(9): 57-62.
- [3] 陈宝明,张忠孝,毕德贵,等. 天然气再燃降低 NO_x 排放的热态工业试验研究[J]. 热能动力工程, 2015, 30(1): 113-117.
CHEN Baoming, ZHANG Zhongxiao, BI Degui, et al. Hot-state industrial experimental study of the reburning of

- natural gas to reduce NO_x emissions[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2015, 30(1): 113-117.
- [4] 吴国强, 张永生. 再燃对 NO_x 污染物排放影响研究[J]. 山东化工, 2017, 46(13): 164-166.
WU Guoqiang, ZHANG Yongsheng. Study of the impact on NO_x emission caused by reburning[J]. Shandong Chemical Industry, 2017, 46(13): 164-166.
- [5] KALISZ S, PRONOBIS M, BAXTER D. Co-firing of biomass waste-derived syngas in coal power boiler[J]. Energy, 2008, 33(12): 1729-1824.
- [6] 王一坤, 张广才, 王晓旭, 等. 生物质气化耦合发电提升燃煤机组灵活性分析[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 77-82.
WANG Yikun, ZHANG Guangcai, WANG Xiaoxu, et al. Analysis of flexibility improvement of coal-fired power plant by biomass gasification coupled power generation[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 77-82.
- [7] HERNANDEZ J J, LAPUERTA M, BARBA J. Effect of partial replacement of diesel or biodiesel with gas from biomass gasification in a diesel engine[J]. Energy, 2015, 89: 148-157.
- [8] 吴国强, 倪浩. 生物质气化耦合燃煤锅炉对燃烧安全性的影响[J]. 科技创新与应用, 2017(19): 68.
WU Guoqiang, NI Hao. Influence of biomass gasification coupled coal burning boiler on combustion safety[J]. Innovation and Application of Science and Technology, 2017(19): 68.
- [9] 马先良. 生物质气再燃降低 NO_x 的可行性研究[J]. 科技创新导报, 2018, 15(20): 93-94.
MA Xianliang. Feasibility study on reducing NO_x by biomass gas recombustion[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2018, 15(20): 93-94.
- [10] 孙俊威, 阎维平, 赵文娟, 等. 600 MW 超临界燃煤锅炉生物质气体再燃的数值研[J]. 动力工程学报, 2012, 32(2): 89-95.
SUN Junwei, YAN Weiping, ZHAO Wenjuan, et al. Numerical study on biomass gas recombustion of 600 MW supercritical coal-fired boilers[J]. Chinese Journal of Power Engineering. 2012, 32(2): 89-95.
- [11] 张小桃, 段佛元, 黄勇, 等. 660 MW 机组燃煤锅炉耦合生物质气再燃数值模拟[J]. 热力发电, 2020, 49(3): 38-44.
ZHANG Xiaotao, DUAN Foyuan, HUANG Yong, et al. Numerical simulation study on biomass gas re-burning in a 660 MW coal-fired boiler[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(3): 38-44.
- [12] 马务, 盛昌栋. 基于循环流化床的间接耦合生物质技术应用现状[J]. 热力发电, 2019, 48(4): 1-7.
MA Wu, SHENG Changdong. Application status of indirect biomass co-firing power generation technologies based on circulating fluidized bed gasification[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(4): 1-7.
- [13] 张小桃, 赵伟, 闻猛. 不同温度下生物质气与煤粉混燃过程及污染物排放特性[J]. 热力发电, 2017, 46(9): 47-52.
ZHANG Xiaotao, ZHAO Wei, WEN Meng. Study on co-combustion process and pollutant emission characteristics of biomass gas and pulverized coal at different temperatures[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(9): 47-52.
- [14] 王义德, 孙巧群, 王华山, 等. 链条炉沼气再燃还原 NO_x 数值模拟与优[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(1): 52-57.
WANG Yide, SUN Qiaoqun, WANG Huashan, et al. Numerical modeling and optimization of nitrogen oxides reduction by biogas reburning in travelling grate boilers[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(1): 52-57.
- [15] 陈拓, 李德波, 成志红, 等. 600 MW 火电机组 SCR 脱硝系统超低排放改造性能试验[J]. 热能动力工程, 2017, 32(12): 126-130.
CHEN Tuo, LI Debo, CHENG Zhihong, et al. Experimental research on performance test after SCR denitrification system near-zero emission reconstruction[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2017, 32(12): 126-130.

(责任编辑 马昕红)