

# 生物质成型燃料三次配风锅炉的设计及低 NO<sub>x</sub> 排放效果

郭飞强<sup>1</sup>, 董玉平<sup>1</sup>, 董磊<sup>2</sup>, 景元琢<sup>2</sup>, 闫永秀<sup>2</sup>

(1. 山东大学机械工程学院, 高效洁净机械制造教育部重点实验室, 济南 250061; 2. 山东百川同创能源有限公司, 济南 250101)

**摘要:** 根据生物质原料的燃烧特性, 采用三次配风锅炉, 研究污染性气体及热损失随三次配风比例与进给量的变化特征。结果表明: 调节三次配风的比例, 可以有效改变 NO<sub>x</sub> 的质量浓度, 当一次风、二次风和三次风进给比例为 7:1:2, NO<sub>x</sub> 的排放浓度达到最低, 为 83.45 mg/m<sup>3</sup>。随着过剩空气系数 ( $\alpha_{py}$ ) 的增大, SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 的排放浓度逐渐减小, 烟尘排放浓度逐渐增大, 锅炉总热损失呈现先减小后增大的趋势。当  $\alpha_{py}$  值为 1.75 时, 锅炉的热损失最小, 为 13.8%, 此时, SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和烟尘排放质量浓度分别为 29.29、83.03 和 74.90 mg/m<sup>3</sup>, 为生物质成型燃料清洁低 NO<sub>x</sub> 排放燃烧锅炉的设计和运行提供了依据。

**关键词:** 生物质, 锅炉, 热损失, 三次配风, 过剩空气系数, NO<sub>x</sub> 排放

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.14.007

中图分类号: TK6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-14-0042-05

郭飞强, 董玉平, 董磊, 等. 生物质成型燃料三次配风锅炉的设计及低 NO<sub>x</sub> 排放效果[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 42-46.

Guo Feiqiang, Dong Yuping, Dong Lei, et al. Design and low NO<sub>x</sub> emission effect of biomass briquette boiler with third air distribution type[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(14): 42-46. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

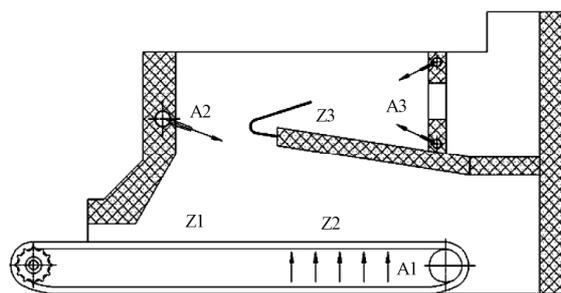
生物质能源属于清洁可再生能源, 其组成元素主要为碳、氢、氧、氮、硫等, 能源化利用过程中释放的碳量与其生长过程中固定的碳量相等, 即可以实现二氧化碳的零排放, 受到了世界各国的普遍关注<sup>[1-3]</sup>。直燃利用是生物质能源转化最直接、最有效的利用方式之一, 但生物质燃烧过程中会产生烟尘、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub> 等污染性气体, 不利于生物质能源的清洁开发<sup>[4-6]</sup>。

生物质中硫的质量分数一般为 0.1% 左右, 远低于煤炭等化石燃料中的硫含量, 但秸秆类生物质氮元素质量分数一般较高, 如玉米秸秆可以达到 0.7% 左右, 与煤中的氮含量相当, 因而, 控制 NO<sub>x</sub> 排放是生物质清洁燃烧的重点<sup>[7-9]</sup>。氮氧化物和硫氧化物的形成主要在挥发份的析出、焦炭燃烧和挥发份燃烧过程, 改变炉膛内的燃烧形式, 可有效减少污染物的产生<sup>[10-12]</sup>。

本文采用了三次配风的锅炉结构形式, 通过控制各级配风供给量, 在炉膛内形成还原性燃烧涡旋, 促进污染性气体的还原转化, 并研究不同配风比例和过剩空气系数下污染性气体的质量浓度及锅炉的热损失, 为生物质成型燃料清洁低 NO<sub>x</sub> 排放燃烧锅炉的设计和运行提供依据。

## 1 三次配风锅炉结构原理

生物质原料中挥发份在 70% 以上, 层燃过程中挥发份逐渐析出, 未燃烧完全的挥发份在炉膛内随着烟气流动, 为提高燃料的燃烧效率, 促进挥发份的充分燃烧, 本文锅炉设计了层燃燃烧区和气化燃烧区, 采取三次配风方式, 炉膛主要结构原理如图 1 所示, 一次风由炉排底部供入, 主要实现燃料的层燃燃烧; 二次风布置在炉膛喉口处, 主要实现对于挥发份的扰动; 三次风位于气化燃烧室区实现残余挥发份的彻底燃烧。



注: A1 为一次风入口; A2 为二次风入口; A3 为三次风入口; Z1 为热解气化区; Z2 为层燃燃烧区; Z3 为气化燃烧区。

图 1 生物质锅炉炉膛配风结构原理图

Fig. 1 Schematic diagram of air distribution in biomass boiler

物料进给到炉膛后, 首先进入热解气化区, 热解气化区没有直接的空气供给, 生物质在缺氧条件下热解, 生成半焦类固体可燃物和还原性烟气 (H<sub>2</sub>、CO 等)。半焦类固体随链条炉排进入到层燃燃烧区, 充分燃烧释放出热能, 同时也会产生氮氧化物 (NO<sub>x</sub>) 等污染性气体。还原性烟气从热解气化区流出后, 在

收稿日期: 2011-09-13 修订日期: 2012-05-10

基金项目: 科技部技术创新基金 (10C26213700415); 山东大学自主创新基金 (2009JC014); 山东大学研究生自主创新基金 (31360071613057)

作者简介: 郭飞强 (1985-), 男, 山东菏泽人, 博士生, 主要从事生物质清洁转化技术研究。济南 山东大学机械工程学院, 高效洁净机械制造教育部重点实验室, 250061。Email: shandaguofeiqiang@163.com

进入气化燃烧室的过程中，会受到二次风的扰动而在炉膛喉口处形成强烈的燃烧漩涡，与层燃燃烧区产生的 NO<sub>x</sub> 发生还原性反应<sup>[13-15]</sup>。烟气中未完全燃烧的挥发份，在引风的作用下进入气化燃烧室，在三次风的作用下充分燃烧。

## 2 试验材料与方法

### 2.1 试验材料

本试验所采用的材料是玉米秸秆成型燃料，其元素分析和工业分析如表 1 所示。

表 1 玉米秸秆化学成分表

Table 1 Chemical composition of corn stalk

名称	元素分析/%					工业分析/%				堆积体积质量/(g·cm <sup>-3</sup> )	低位热值/(kJ·kg <sup>-1</sup> )
	C <sub>d</sub>	H <sub>d</sub>	O <sub>d</sub>	N <sub>d</sub>	S <sub>d</sub>	M <sub>ar</sub>	A <sub>ar</sub>	V <sub>ar</sub>	FC <sub>ar</sub>		
玉米秸秆	45.54	6.02	47.41	0.77	0.13	5.12	5.76	71.64	17.48	1.05	16473.1

注：C<sub>d</sub>、H<sub>d</sub>、O<sub>d</sub>、N<sub>d</sub>、S<sub>d</sub>分别代表干燥基原料中C、H、O、N、S元素的质量分数；M<sub>ar</sub>、A<sub>ar</sub>、V<sub>ar</sub>、FC<sub>ar</sub>分别代表收到基原料中水分、灰分、挥发分和固定碳的质量分数；玉米秸秆低位发热量计算参考GB476-1979。

### 2.2 试验方法

本实验锅炉成型原料的进给量为 200 kg/h。首先，调节三次风进风比例，利用美国 IMR 公司生产的 IMR-1400C 燃烧效率测定仪（SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 的测量范围分别为 0~2 000×10<sup>-6</sup> 和 0~4 000×10<sup>-6</sup>，测量精度均为 5%）对排烟处烟气进行取样分析，验证三次配风对于 NO<sub>x</sub> 生成浓度的影响。

其次，通过改变进气风机频率调整锅炉空气进给量，得出排烟处过剩空气系数（ $\alpha_{py}$ ，为 1 kg 原料燃烧实际空气量与 1 kg 原料燃烧理论空气量之比）与生成 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 及烟尘排放浓度之间的关系，并参照 GB/T 10180-2003 《工业锅炉热工性能试验规程》计算不同过剩空气系数下锅炉的热损失。

## 3 结果与分析

### 3.1 配风比例对 NO<sub>x</sub> 浓度的影响

本文首先验证三次配风体积比例对 NO<sub>x</sub> 的生成影响，根据成型燃料充分燃烧的要求，层燃区要有足够的空气供应，因而一次风占总配风量的取值为 60%以上；二次风主要实现对挥发份的扰动，进风速度快但量较小，取值小于 30%；三次风主要实现残余挥发份气体的充分燃烧，取值为 10%~30%<sup>[16-18]</sup>。在不同配风比例下燃气中 NO<sub>x</sub> 的排放浓度如表 2 所示，过剩空气系数设定为 1.75 时，空气的总进给量约为 1 240 m<sup>3</sup>/h。

表 2 配风比例调整参数

Table 2 Ratio changes of air distribution

序号	一次风体积百分比/%	二次风体积百分比/%	三次风体积百分比/%	NO <sub>x</sub> 排放浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )
R1	60	0	40	244.91
R2	60	10	30	148.76
R3	60	20	20	224.96
R4	60	30	10	299.34
R5	70	0	30	163.27
R6	70	10	20	83.45
R7	70	20	10	210.44
R8	80	0	20	259.42
R9	80	10	10	185.04

注：R1~R9为试验序号，过剩空气系数设定为1.75。

采用烟气流量计测试烟气量为 1 370 m<sup>3</sup>/h 左右，三次配风的比例对于 NO<sub>x</sub> 的排放浓度具有重要影响，在二次

风体积比为 10%时，NO<sub>x</sub> 的排放浓度均较低，当二次风比例大于 10%时，NO<sub>x</sub> 的体积浓度呈现快速增加的趋势，当一次风、二次风和三次风比例为 7:1:2(R6)时，NO<sub>x</sub> 排放浓度达到最低，为 83.45 mg/m<sup>3</sup>。由此可见，三次配风比例为 7:1:2 时，可以有效降低 NO<sub>x</sub> 的产生，提高生物质成型燃料的燃烧清洁性，本文后续试验配风比例保持为 7:1:2，验证过剩空气系数对锅炉清洁燃烧的影响。

NO<sub>x</sub> 的产生过程较为复杂，形成受燃烧反应温度、氧气浓度及停留时间等因素影响。在本文炉膛结构和配风方式下，层燃产生的烟气从热解气化区流出后，在进入气化燃烧室的过程中，会受到高速二次风的扰动在炉膛喉口处形成强烈的燃烧漩涡，由于二次风量较小，可在此处形成还原性气氛，还原性烟气与层燃产生的 NO<sub>x</sub> 进行反应，CO 和 NO<sub>x</sub> 反应生成 N<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub>，H<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 反应生成 N<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O，从而能抑制 NO<sub>x</sub> 排放浓度<sup>[19-21]</sup>。

### 3.2 污染性气体随过剩空气系数变化规律

生物质成型燃料燃烧过程中产生的主要污染性气体为 NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>2</sub>，随着  $\alpha_{py}$  的升高，其主要变化趋势如表 3 所示。

表 3 NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>2</sub> 排放浓度与过剩空气系数  $\alpha_{py}$  变化趋势

Table 3 Relationship of excess air coefficient on NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> concentrations

过剩空气系数 $\alpha_{py}$	烟气容积/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	SO <sub>2</sub> 质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	NO <sub>x</sub> 质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )
1.25	1016.14	41.86	125.05
1.50	1193.94	34.86	100.45
1.75	1371.74	29.29	83.03
2.00	1549.54	25.42	67.65
2.25	1727.34	22.67	59.45
2.50	1905.14	20.44	49.20
2.75	2082.94	18.54	43.05

注：一次风、二次风及三次风配风体积比为7:1:2。

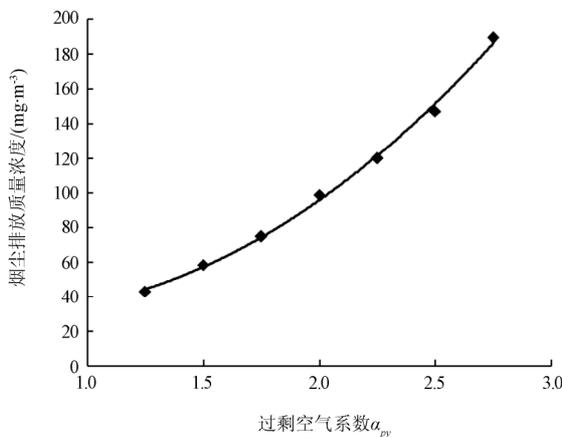
随着  $\alpha_{py}$  增加，过剩的空气会导致炉膛内的温度有所下降，影响 NO<sub>x</sub> 的生成，直接导致 NO<sub>x</sub> 的生成量有所下降；同时，二次风形成的燃烧漩涡增加，还原性烟气与 NO<sub>x</sub> 的接触时间延长，有利于 NO<sub>x</sub> 的还原反应，然而二次风供给量逐渐增大同样会破坏还原性氛围，降低 NO<sub>x</sub> 的还原转化；此外，空气的增加会对 NO<sub>x</sub> 质量浓度起到稀释的作用。因而，NO<sub>x</sub> 的质量浓度随着过剩空气系数的增

加呈现逐渐下降的趋势。

随着  $\alpha_{py}$  增加  $\text{SO}_2$  质量浓度缓慢降低, 但总体变化不大, 主要是由于生物质原料中的 S 含量不变, 燃烧过程中产生的总  $\text{SO}_2$  量变化不大, 当  $\alpha_{py}$  增加时,  $\text{SO}_2$  被稀释, 故而质量浓度呈现逐渐下降的趋势

### 3.3 烟尘排放浓度 (YC) 随过剩空气系数的变化

参照 GB5468-91《锅炉烟尘测试方法》, 采用滤筒测试排烟管道中的烟尘排放浓度, 如图 2 所示, 排烟中烟尘浓度随着  $\alpha_{py}$  增大逐渐增大, 其主要是由于炉膛内的风速的逐渐增大, 易于将灰粒携带出炉膛。本文采用了三次配风的形式, 将炉膛分为 2 个主要燃烧区, 在炉膛内形成了多个燃烧回流, 加速了挥发份充分燃烧, 有利于烟尘排放浓度的降低, 烟气的排放体积见表 3, 当  $\alpha_{py}$  为 1.5 时, 烟尘的排放质量浓度为  $58.3 \text{ mg/m}^3$ , 且随着  $\alpha_{py}$  的增大, 烟尘排放质量浓度也随之增加, 当过剩空气系数为 1.75 时, 烟尘排放质量浓度达到  $74.90 \text{ mg/m}^3$ 。



注: 一次风、二次风及三次风配风体积比为 7:1:2。

图 2 烟尘排放浓度与过剩空气系数  $\alpha_{py}$  变化曲线

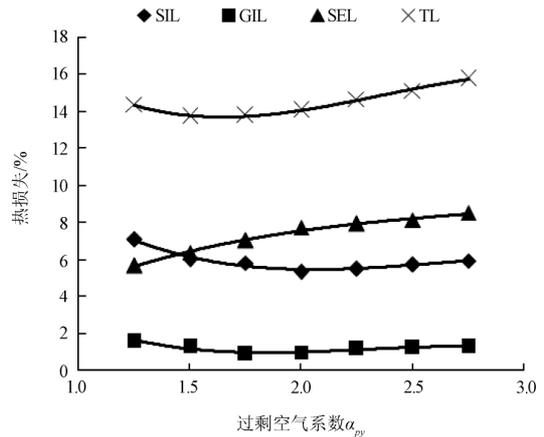
Fig.2 Relationship of excess air coefficient on flue dust emission concentration

### 3.4 锅炉热损失随过剩空气系数的变化

生物质燃烧过程中, 锅炉热损失主要由固体不完全燃烧 (SIL, solid incomplete combustion loss)、气体不完全燃烧 (GIL, gas incomplete combustion loss) 和排烟热损失 (SEL, smoke exhaust loss) 导致, 随着过剩空气系数的变化, 其热损失的变化趋势如图 3 所示。

#### 3.4.1 固体不完全燃烧热损失 (SIL) 随过剩空气系数的变化

当  $\alpha_{py}$  较小时, 炉膛内的空气量不足, 燃料中有一部分半焦无法与氧气充分反应, 产生一定的固体热损失, 因而不断增加  $\alpha_{py}$  的值, SIL 值首先有下降的趋势; 当  $\alpha_{py}$  值为 2 左右时, 燃料充分燃烧所需的氧量与空气供给的氧量相当, 此时 SIL 值达到最小, 为 5.4%; 当  $\alpha_{py}$  值大于 2 时, 炉膛内的空气量过剩, 导致炉内温度下降, 燃料不能与氧气充分反应, 造成一定量的固体无法完全燃烧, 同时空气流动速度增加时烟尘排放浓度增加, 烟尘夹带部分未完全燃烧的固体颗粒, 因而固体完全燃烧热损失有增加的趋势。



注: SIL为固体不完全燃烧; GIL为气体不完全燃烧; SEL为排烟热损失; TL为总热损失; 一次风、二次风及三次风配风体积比为 7:1:2。

图 3 锅炉热损失与过剩空气系数关系曲线

Fig.3 Relationship of excess air coefficient on heat loss of the boiler

#### 3.4.2 气体不完全燃烧热损失 (GIL) 随过剩空气系数的变化

当  $\alpha_{py}$  较小时, 炉膛内空气量相对不足, 燃料热解时产生的  $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$  等中间产物不易完全燃尽, 造成一定的热损失, 此时逐渐增加  $\alpha_{py}$  的值, 气体不完全燃烧的损失呈现下降的趋势;  $\alpha_{py}$  为 1.75 左右时, GIL 值达到最小, 为 0.9%;  $\alpha_{py}$  大于 1.75 后, 随着  $\alpha_{py}$  的增加, 炉膛内温度下降, 减弱了气体产物的燃烧反应, 形成较多的  $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$  等中间产物, 从而导致烟气中的可燃气体的量增加, 气体不完全燃烧导致的热损失有增加的趋势。

#### 3.4.3 排烟热损失 (SEL) 随过剩空气系数的变化

排烟热损失的大小主要由排烟量与排烟温度决定, 在排烟温度变化不大的情况下, 排烟热损失决定于排烟量。随着  $\alpha_{py}$  增大, 排烟量增大, SEL 逐渐增大, 因此在保证燃烧情况下  $\alpha_{py}$  越小越有利于降低排烟热损失。

#### 3.4.4 总热损失 (TL) 随过剩空气系数的变化

由图 3 可以看出, 随着  $\alpha_{py}$  的增大, 锅炉总热损失呈现先降低后增大的趋势, 当  $\alpha_{py}$  值为 1.75 左右时, TL 值达到最小, 为 13.8%。继续增大  $\alpha_{py}$  值, 排烟热损失对于总热损失的影响逐渐增大, 当  $\alpha_{py}$  值较高时, 总热损失主要取决于排烟热损失。

## 4 结论

1) 生物质燃烧过程中, 采用三次配风的形式, 控制各级配风供给量, 在炉膛内形成还原性燃烧涡旋, 促进污染性气体的还原转化, 可以降低烟气中污染物的质量浓度。

2)  $\text{NO}_x$  的生成浓度与配风比例有直接的关系, 控制合理的配风比例可有效实现生物质成型燃料的低氮燃烧, 在过剩空气系数为 1.75 时, 其中一次风、二次风、三次风的比例为 7:1:2 时  $\text{NO}_x$  的排放浓度最低位  $83.45 \text{ mg/m}^3$ 。

3) 随着过剩空气系数的变化,  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  排放浓度逐渐下降, 烟尘的排放浓度逐渐升高。同时, 锅炉的热损失

同样随着过剩空气系数的先降低后增加, 在  $\alpha_{py}$  值为 1.75 左右, 一次风、二次风和三次风的比例为 7:1:2 时, 锅炉总热损失达到最小, 为 13.8%。

本文研究不足之处在于试验中未进行三次配风与不采用三次配风对 NO<sub>x</sub> 排放浓度影响的对比。

#### [参 考 文 献]

- [1] 张明, 袁益超, 刘聿拯. 生物质直接燃烧技术的发展研究[J]. 能源研究与信息, 2005, 21(1): 15—20.  
Zhang Ming, Yuan Yichao, Liu Yuzheng. Research on biomass waste combustion technologies[J]. Energy Research and Information, 2005, 21(1): 15—20. (in Chinese with English abstract)
- [2] 刘刚, 袁静, 陈敏东, 等. 生物质燃烧颗粒物中有机质及源解析研究进展[J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2011, 3(2): 141—145.  
Liu Gang, Yuan Jing, Chen Mindong, et al. The research progress of source apportionment and particulate organic matters emitted from biomass burning[J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Natural Science Edition, 2011, 3(2): 141—145. (in Chinese with English abstract)
- [3] Gaeggeler K, Prevot A S H, Dommen J, et al. Residential wood burning in an Alpine valley as a source for oxygenated volatile organic compounds, hydrocarbons and organic acids[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(35): 8278—8287.
- [4] 闵凡飞, 张明旭. 生物质燃烧模式及燃烧特性的研究[J]. 煤炭学报, 2005, 30(1): 104—108.  
Min Fanfei, Zhang Mingxu. Study on combustion model and combustibility of biomass[J]. Journal of China coal society, 2005, 30(1): 104—108. (in Chinese with English abstract)
- [5] 李方勇, 宋景慧. 生物化学组分对生物质型煤燃烧特性影响的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(26): 124—130.  
Li Fangyong, Song Jinghui. Experimental study about the effect of biomass chemical composition on the combustion characteristics of bio-briquette[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(26): 124—130. (in Chinese with English abstract)
- [6] Yuan H, Pang Y, Wang K. Ignition and emission characteristics of ignition-assisting agents for densified corn stover briquette fuel[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2010, 18(4): 687—694.
- [7] 聂虎, 余春江, 柏继松, 等. 生物质燃烧中硫化物和氮氧化物生成机理研究[J]. 热力发电, 2010, 39(9): 21—26.  
Nie Hu, Yu Chunjiang, Be Jisong, et al. Study on formation mechanisms of sulphide and nitrogen oxides in combustion of biomass[J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(9): 21—26. (in Chinese with English abstract)
- [8] 陈祎, 段佳, 林鹏, 等. 氧量对典型生物质燃烧特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(2): 43—48.  
Chen Yi, Duan Jia, Lin Peng, et al. Effect of oxygen concentration on combustion characteristics of typical biomass materials[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(2): 43—48. (in Chinese with English abstract)
- [9] Zhou H, Jensen A D, Glarborg P, et al. Formation and reduction of nitric oxide in fixed-bed combustion of straw[J]. Fuel, 2006, 85(5/6): 705—716.
- [10] Gil M V, Casal D, Pevida C, et al. Thermal behaviour and kinetics of coal/biomass blends during co-combustion[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(14): 5601—5608.
- [11] 董信光, 李荣玉, 刘志超, 等. 生物质与煤混燃的灰分特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(26): 118—124.  
Dong Xinguang, Li Rongyu, Liu Zhichao, et al. Investigation on the ash characteristic during co-firing of coal and biomass[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(26): 118—124. (in Chinese with English abstract)
- [12] 徐朝芬, 孙学信. 用 TG-DTG-DSC 研究生物质的燃烧特性[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(3): 126—128.  
Xu Chaofen, Sun Xuexin. Combustion characteristics of biomass by using TG-DTG-DSC thermoanalysis[J]. J Huazhong Univ of Sci and Tech: Nature Science Edition, 2007, 35(3): 126—128. (in Chinese with English abstract)
- [13] Wang C P, Wang F Y, Yang Q R. Thermogravimetric studies of the behavior of wheat straw with added coal during combustion[J]. Biomass and Bioenergy, 2009, 33(1): 50—56.
- [14] 陈华艳, 苏俊林, 矫振伟. 生物质型煤燃烧特性[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2008, 38(6): 1281—1286.  
Chen Huayan, Su Junlin, Jiao Zhenwei. Combustion characteristics of biomass compound coal[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2008, 38(6): 1281—1286. (in Chinese with English abstract)
- [15] 陈光元, 邹显宏, 张锡强, 等. 420 t/h 锅炉低氮氧化物燃烧技术研究[J]. 热力发电, 2011, 40(2): 48—51.  
Chen Guang yuan, Zou Xianhong, Zhang Xiqiang, et al. Study on low NO<sub>x</sub> combustion technology for 420t/h boilers[J]. Thermal Power Generation, 2011, 40(2): 48—51. (in Chinese with English abstract)
- [16] Keeley L Bignal, Sam Langridge, John L Zhou. Release of polycyclic aromatic hydrocarbons, carbon monoxide and particulate matter from biomass combustion in a wood-fired boiler under varying boiler conditions [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(39): 8863—8871.
- [17] Lundgren J, Hermansson R, Dahl J. Experimental studies of a biomass boiler suitable for small district heating systems[J]. Biomass and Bioenergy, 2004, 26(5): 443—453.
- [18] 刘圣勇, 张百良, 杨群发, 等. 双层炉排生物质成型燃料锅炉设计与研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 268—271.  
Liu Shengyong, Zhang Bailiang, Yang Qunfa, et al. Design and study of biomass briquette boiler[J]. Transactions of the Chinese

- Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(6): 268—271. (in Chinese with English abstract)
- [19] Sarma V Pisupati, Sumeet Bhalla. Numerical modeling of  $\text{NO}_x$  reduction using pyrolysis products from biomass-based materials[J]. Biomass and Bioenergy, 2008, 32(2): 146—154.
- [20] Casaca C, Costa M.  $\text{NO}_x$  control through reburning using biomass in a laboratory furnace: Effect of particle size[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2008, 32(2): 2641—2648.
- [21] Hairong Yuan, Yunzhi Pang, Kuisheng Wang, et al. Ignition and emission characteristics of ignition-assisting agents for densified corn stover briquette Fuel[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2010, 18(4): 87—94.

## Design and low $\text{NO}_x$ emission effect of biomass briquette boiler with third air distribution type

Guo Feiqiang<sup>1</sup>, Dong Yuping<sup>1</sup>, Dong Lei<sup>2</sup>, Jing Yuanzhuo<sup>2</sup>, Yan Yongxiu<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Shandong Baichuan Tongchuang Energy Company Ltd, Jinan 250101, China)

**Abstract:** According to the combustion characteristics of biomass materials, a new boiler structure with three air distributions was designed, and the variation characteristics of the pollution gas emission and heat loss with the change of air distribution ratio and quantity were studied. The results showed that the mass concentration of  $\text{NO}_x$  changed by changing the ratio of air distributions. When the ratio of the primary air, secondary air, and tertiary air was 7:1:2, the mass concentration of  $\text{NO}_x$  got the minimum value of  $83.45 \text{ mg/m}^3$ . With the increase of excess air coefficient, the mass concentrations of  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_x$  decreased gradually; the flue dust concentration increased continuously; the total heat loss of the boiler decreased first and then increased. When excess air coefficient was 1.75, the total heat loss got the minimum value of 13.8%, and the mass concentrations of  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  and flue dust were 29.29, 83.03 and  $74.90 \text{ mg/m}^3$  respectively. This research provides the theory basis for the combustion boiler design and operation of biomass briquette with low  $\text{NO}_x$  emission.

**Key words:** biomass, boiler, heat losses, three air distributions, excess air coefficient,  $\text{NO}_x$  emission