

# 300MW 燃煤机组混燃秸秆成型燃料的试验研究

王学斌, 谭厚章, 陈二强, 牛艳青, 刘洋, 刘正宁, 徐通模

(西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西省 西安市 710049)

## Experimental Research on Co-firing of Molding-straw in 300 MW Coal-firing Utility Furnace

WANG Xue-bin, TAN Hou-zhang, CHEN Er-qiang, NIU Yan-qing, LIU Yang, LIU Zheng-ning, XU Tong-mo  
(School of Energy and Power, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

**ABSTRACT:** Molding-biomass has been utilized in a 300 MW pulverized coal furnace, and biomass was ground using the existing mill system, without any apparatus addition. The possibility of biomass grinding and the security of mill operating was analyzed, and the effects of biomass-cofiring on combustion flame, furnace temperature profile, furnace efficiency and pollution emission were also investigated. Results show that, roller mills and direct blowing pulverizing system can be used to grind molding-biomass and to transport biomass particles. During the processes of biomass co-firing, the flame of biomass injector is stable. Both outlet temperature of furnace and air preheater decreases after the biomass injection. When the pulverized coal furnace is operated under the biomass co-firing condition, the furnace efficiency is lowered.  $\text{NO}_x$  and  $\text{SO}_2$  emission also decreases with the biomass quantity increasing. The results would provide a guidance for biomass co-firing on the existing pulverized coal furnace in China.

**KEY WORDS:** biomass co-firing; molding-straw; furnace efficiency; mill;  $\text{NO}_x$

**摘要:** 该文利用已有制粉系统对成型生物质进行磨制并送入炉内燃烧, 在 300 MW 煤粉炉内实现了生物质的规模化利用。试验对生物质可磨性及磨煤机安全性进行分析; 研究生物质混燃对火焰、温度、锅炉效率及污染物排放的影响。研究表明: 辊式磨煤机和直吹式制粉系统, 可用于成型生物质的磨制输送; 生物质燃烧器喷口火焰稳定; 生物质混燃工况下的炉膛上部温度分布和排烟温度, 均比纯烧煤粉时更低; 煤粉炉在混燃生物质的工况下运行时, 锅炉效率略有下降;

生物质混燃相对于纯烧煤粉,  $\text{NO}_x$  和  $\text{SO}_2$  均有所降低。该文研究对生物质在我国现有大容量煤粉炉上的直接混燃具有指导意义。

**关键词:** 生物质混燃; 成型秸秆燃料; 锅炉效率; 磨煤机;  $\text{NO}_x$

## 0 引言

温室效应的加剧使  $\text{CO}_2$  减排成为人类更加关注的焦点, 而生物质被广泛认为是一种  $\text{CO}_2$  零排放的燃料, 由于生物质燃料中的钾、氯含量高, 直接燃烧会产生严重的结渣和腐蚀, 而将生物质与煤粉混燃则可以消除该问题的出现<sup>[1-2]</sup>。因此国际上提出将生物质在大容量机组中与煤混燃, 从而实现大规模利用生物质燃料发电以减排  $\text{CO}_2$  的方案<sup>[3-10]</sup>。

在现有的大容量燃煤机组上混燃生物质可利用电厂现有设备, 燃用价格相对低廉的生物质还能降低电厂的燃料费用, 从而提高电厂的经济效益<sup>[7-9]</sup>; 同时由于高挥发分的生物质更易着火, 可在一定程度上缓解煤粉着火的不稳定性问题<sup>[9]</sup>; 将高挥发分的生物质作为再燃燃料送入主燃区下游, 还可实现  $\text{NO}_x$  的还原<sup>[11-15]</sup>。

在传统燃煤机组中混燃生物质已在欧美各国进行了大量试验研究, 并得到推广和应用, 但由于生物质燃料特性及锅炉结构系统的差异, 关于生物质混燃对磨煤机安全性、污染物排放及系统经济性分析方面的结论并不统一<sup>[4,7,9,16]</sup>。因此如要在我国大型电站煤粉炉内混燃生物质, 则有必要根据我国生物质燃料特性及机组结构等进行混燃方案的设计。

本文提出了一套新的生物质利用模式: 首次在国内某 300MW 机组上, 不增加电厂任何设备和固定资产投资, 利用已有磨煤机对生物质成型燃料进行磨

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50976086); 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2005CB221206)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50976086); The National Basic Research Program of China(973 Program)(2005CB221206).

制,并送入炉内进行燃烧,实现生物质的规模化利用。通过试验对生物质的可磨性及磨煤机的安全性进行分析;研究生物质混燃对炉内火焰特性、烟气温度、锅炉效率以及  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  排放的影响。

## 1 试验装置及方法

### 1.1 设备概况和燃料特性

试验锅炉为东方锅炉厂设计制造的 DG1025/18.3-II 9 锅炉,300 MW 负荷对应实际燃料消耗量为 137.85 t/h,采用同心反切的四角切圆燃烧方式。燃烧器为 A~F 6 层直流摆动式煤粉燃烧器,分 3 组布置,均等配风。每组有 2 个一次风喷口,一台磨煤机带一层一次风喷口,上层燃烧器顶部增设了一层燃尽风喷嘴。本炉配有 6 台北京电力修造总厂生产的 ZGM-95G 型中速磨煤机和正压直吹式燃烧系统。

试验用主燃料为甘肃华亭烟煤;掺烧燃料为成型生物质,该型生物质燃料为秸秆经破碎后用压型机械压制而成,表 1 为燃料的工业分析和元素分析,生物质成型燃料的灰分偏高,是由加工过程中黏合剂的添加导致。成型生物质燃料的密度为  $1.18 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

表 1 试验用燃料的工业分析和元素分析

Tab. 1 Proximate and ultimate analysis of tested fuel

燃料	低位发热量/( $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	工业分析				元素分析				
		$M_{\text{ar}}$	$V_{\text{daf}}$	$A_{\text{ar}}$	$C_{\text{ar}}$	$H_{\text{ar}}$	$O_{\text{ar}}$	$N_{\text{ar}}$	$S_{\text{ar}}$	
煤	18.7	18.5	35.5	17.6	52.5	3.03	9.96	0.51	0.64	
生物质	12.2	12.6	79.3	28.3	34.4	3.08	30.6	1.50	0.32	

### 1.2 试验工况及数据采集分析

本试验锅炉的 A~F 6 层燃烧系统,只有 A~E 层频繁利用,备用的 F 组长期空置,因此利用 F 层制粉系统进行生物质的磨制和燃烧。该方案可以保证 F 层生物质燃烧系统对 A~E 层煤粉燃烧系统不产生任何影响。如果将生物质和煤加入同一磨煤机,则有可能因为少量生物质的加入影响占大部分的煤的磨制质量,影响机组的正常运行。

试验过程中,首先将 F 层制粉系统内残余的煤清空,再将生物质送入 F 层煤仓,经过磨煤机磨制后,直接送入炉膛燃烧。

试验过程中控制生物质的给料为当前总燃料质量的 10%~30%(对应混燃生物质的热量输入比例为 6.76%~21.9%),试验均在 250 MW 的稳定负荷下进行。煤粉通过 A~D 层制粉系统送入炉膛,生物质燃料通过 F 层制粉系统送入。F 层磨煤机入口温

度不超过  $90^\circ\text{C}$ ,出口温度低于  $50^\circ\text{C}$ ,保证配风系统的各挡板开度值不变,并控制炉膛出口氧量 4%左右,表 2 为所测试试验工况,其中工况 3 为给料量 24 t/h 时,减小 F 层一次送风量时的工况。

表 2 混燃试验测试工况

Tab. 2 Experiment test working conditions of biomass co-firing

参数	工况编号				
	0	1	2	3	4
负荷/MW	纯燃煤	250	250	250	250
生物质量/(t/h)	粉工况:	12	24	24	30
F 层一次风量/( $\text{m}^3/\text{s}$ )	250 MW,	21.74	19.37	15.99	18.70
F 磨煤机入口风温/ $^\circ\text{C}$	A~E 磨运	78	83	86	84
F 磨煤机出口风温/ $^\circ\text{C}$	行, E 磨给煤量 17 t/h	48	43	42	43

待工况稳定后,对 F 磨煤机出口生物质粉料进行取样,用 Mastersizer 2000 型激光粒度仪对其粒径分布进行测试,仪器精度:  $\pm 1\%$  测量值;烟道出口烟气中  $\text{NO}_x$  和  $\text{SO}_2$  浓度由 Testo350 型烟气分析仪进行检测,分辨率  $1 \times 10^{-7}$ ,仪器精度:  $\pm 5\%$  测量值;炉膛内温度由 Raytek-3iLRL3 型红外测温仪测量,分辨率  $1^\circ\text{C}$ ,仪器精度:  $\pm 1\%$  测量值,温度测点分别位于炉膛 34、37 及 48.3 m 平台处,每一个高度的炉膛截面选取 4 个测点,取其平均值作为炉膛在该高度处的温度。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 生物质的可磨性及磨煤机安全性分析

生物质混燃利用过程中的难题集中在对生物质的安全经济性输送、破碎以及如何避免生物质磨制过程中的自燃<sup>[7,17]</sup>。在现有磨煤机系统上进行生物质的磨制时,如生物质给料量过大,易导致磨煤机电流超标而影响磨煤机性能,造成一次风管道堵塞,影响系统安全运行。

Foster Wheeler 公司在 Kingston 和 Colber 电站四角切圆炉内的生物质混燃测试结果则表明:由于生物质未采用压型料,磨煤机很难将生物质磨制为和煤粉同样的粒径,生物质最大输入量仅可达 5%,当煤粉炉内混燃生物质的比例大于 5%~10%时,则需要另外配套独立的生物质处理及给料系统<sup>[18]</sup>。

图 1 为磨煤机磨制前后的生物质燃料,图 1(a)为磨制前的原生物质型料,质地坚硬,可磨性较强,图 1(b)为磨制后的生物质粉料,粒径较细,表明能够利用原有的磨煤机系统进行生物质型料的磨制。

图 2 为生物质投料量及 F 层一次风量对磨煤机电流的影响。可见,当 F 层磨煤机的生物质给料量

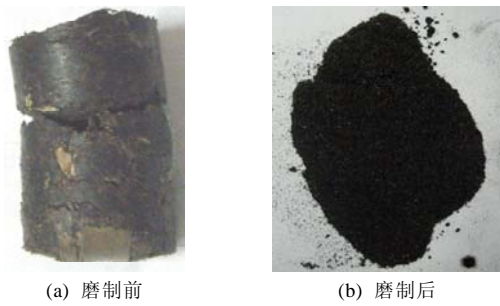


图 1 磨煤机前后生物质的形貌特性

Fig. 1 Fuel characteristics before and after mill

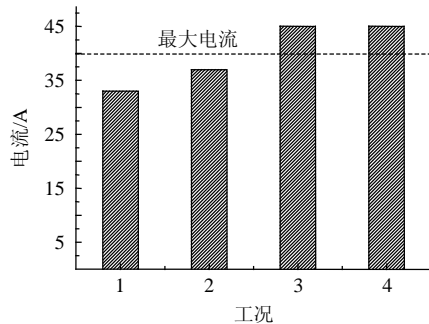


图 2 生物质给料量与一次风量对磨煤机电流的影响

Fig. 2 Effect of biomass and air quantity on mill current

为 12 和 24 t/h，一次风量正常(20m<sup>3</sup>/s)送粉时，F 磨煤机电流为 33 和 37 A，且表 2 中磨煤机进出口风温均控制在 90℃ 以下，磨煤机运行安全。

当生物质给料量继续增大至 30 t/h 时，磨煤机电流很快升高超过警戒电流 40 A，并且磨煤机开始出现堵塞现象，一次风量最高只能达到 18.70 m<sup>3</sup>/s，导致该工况下的测试工作未能正常进行；当生物质给料量维持在 24 t/h 时，减小 F 层的一次风量至 15.99 m<sup>3</sup>/s，磨煤机运行也缓慢持续升高达到 45 A。

因此，在进行生物质型料的磨制时，应保证生物质给料量不能过大，并且在较大的生物质给料量时应控制磨煤机的风量开大，否则易出现磨煤机电流偏高以及堵管等安全问题。

图 3 为不同生物质给料量对磨煤机磨制的生物质粉料粒径分布的影响。由图可见：成型生物质燃料经辊式磨煤机磨制后的粒径为 10~2000 μm；随着给料量的增大，磨制效果下降，生物质粉料的粒径逐渐增大。

当生物质给料量 30 t/h 时，生物质粉料主要为 100~2000 μm 的大颗粒；给料量降至 24 t/h 时，100 μm 以下的颗粒约占 30%；而当给料量降至 12 t/h 时，粒径小于 100 μm 的颗粒量与大于 100 μm 的颗粒量各占总粉料的 50%。投料量分别为 12、24、

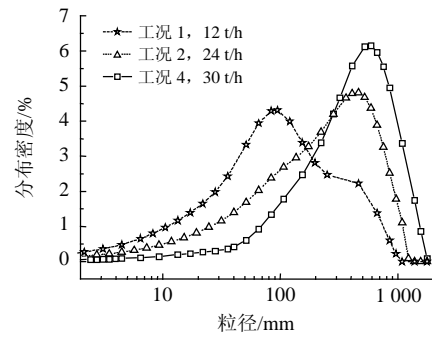


图 3 生物质给料量对生物质粉料粒径分布影响

Fig. 3 Effect of feeding quantity on size distribution of biomass particles

30 t/h 时对应的  $d_{0.5}$  分别为 92、240、438 μm。

实际运行时，磨煤机的电耗是衡量磨煤机经济型的重要参数，因此进一步对工况 0 和工况 2 的上层磨煤机电耗进行了计算。结果表明：磨煤机磨制总热量输入与煤相等的压型生物质时的电耗为 20.2 kW·h/t(煤)，略高于磨制煤的电耗 17.7 kW·h/t(煤)。

## 2.2 生物质混燃对炉膛火焰及温度分布的影响

图 4 为生物质混燃量为 12 和 24 t/h 时，F 层生物质喷口燃烧火焰，可见生物质喷口火焰燃烧稳定。

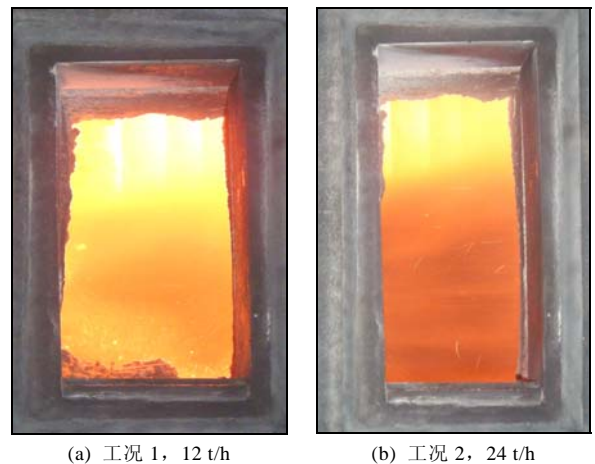


图 4 不同生物质给料量时 F 层生物质喷口火焰

当生物质给料量从 12 t/h 增至 24 t/h 时，燃烧器喷口处的黑浓区范围明显增大。用 R 型 Pt-Rh13/Pt 热电偶对 F 层 4 个燃烧器喷口处黑浓区的温度进行测量，该区温度范围为 106~175℃，这是由于生物质粉料的送粉温度较低导致。

图 5 为当生物质混燃量从 0 t/h 至 12 t/h、24 t/h 时，炉膛出口烟气温度和排烟温度的变化。可见：工况 2 与工况 0 相比，工况 2 炉膛出口烟温和排烟温度略有降低，这是因为：1) 为保证生物质粉料

磨制的安全性,生物质的磨煤机入口风温仅为 78~86℃,低于煤粉的磨煤机入口风温 229℃;2) 生物质相对于煤粉的挥发分很高,固定碳含量低,其着火更容易提前,使火焰中心下移,因此总体上混燃工况下的炉膛出口温度和排烟温度更低。而对于生物质混燃工况 1 和 2,生物质混燃量 24 t/h 时的炉膛出口温度和排烟温度要高于混燃量 12 t/h 时的温度:这是由于 2 个工况下 A~D 层各层给煤量变化很小,主要的燃料变化集中反映在 F 层的生物质给料量。由表 2 可见,工况 1~2 中当生物质混燃量从 12t/h 增到 24t/h 时,F 层的一次风量变化不大,从而导致一次风中生物质粉料的浓度大幅提高,并且由此导致了图 4 所示的喷口处黑浓区范围增大,生物质着火推迟,因此,炉膛出口温度及排烟温度随生物质量的增大而有所上升。

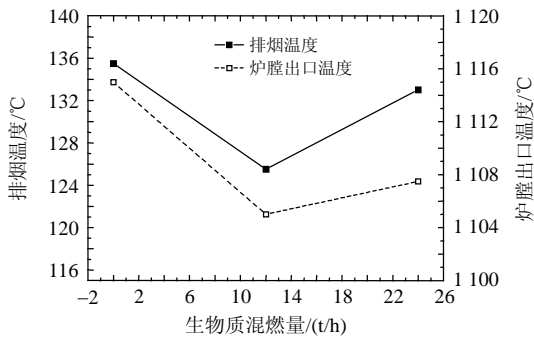


图5 生物质混燃量对炉膛出口温度和排烟温度的影响  
Fig. 5 Effects of biomass quantity on outlet temperature of furnace and air preheater

沿炉膛高度上的温度分布如图 6 所示,与图 5 所示的炉膛出口温度及排烟温度的变化规律一样:在炉膛上部的不同高度处,均是无生物质混燃的温度最高,温度分布最低的是生物质混燃量为 12 t/h 的工况,总体炉膛上部温度水平的变化不明显。

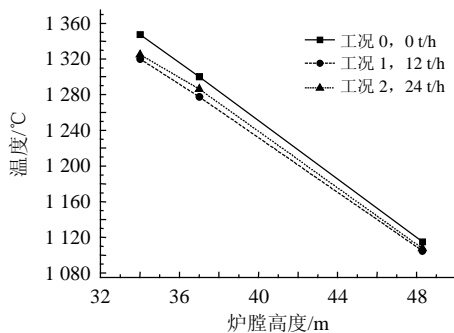


图6 生物质混燃量对炉膛上部温度分布的影响  
Fig. 6 Effects of biomass quantity on temperature profile of upper furnace

### 2.3 生物质混燃对锅炉效率的影响

不同生物质混燃量工况下的锅炉效率测试结

果如表 3 所示:当煤粉炉在混燃生物质工况下运行时,飞灰含碳量略升高,导致锅炉效率略下降。当生物质混燃量为 12 t/h 时,锅炉效率下降 0.192%;当生物质混燃量 24 t/h 时,相对于工况 1 排烟温度升高 7.5℃,从而锅炉效率下降达 0.524%,这是由于试验过程中大量生物质从最下游的 F 层输入导致。因此实际运行中掺烧量不宜过高,且应从相对下层如从 E 层燃烧器输入,则可在一定程度缓解飞灰含碳量升高的问题。

表3 生物质混燃量对锅炉效率的影响

Tab. 3 Effects of biomass quantity on furnace efficiency

参数	工况		
	0	1	2
生物质混燃量/(t/h)	0	12	24
最上层磨煤机入口温度/°C	229 (E)	78 (F)	83 (F)
飞灰含碳/%	0.179	0.474	0.519
炉渣含碳/%	1.393	1.438	1.269
排烟温度/°C	135.5	125.5	133
锅炉效率/%	94.673	94.481	94.149

M. Sami<sup>[9]</sup>通过对生物质和煤粉湍流燃烧的数值模拟,得到掺混比例对混合燃烧效率的影响公式,认为燃烧效率变化与掺混的质量分数成线性关系:

$$\eta_{\text{blend}} / \eta_{\text{coal}} = 1 + AY_b$$

式中:  $\eta_{\text{blend}}$  为生物质混燃时的燃烧效率,%;  $\eta_{\text{coal}}$  为纯烧煤粉时的燃烧效率,%;  $Y_b$  为生物质的掺混质量分数,%;  $A$  为常数。在本试验中,引用公式(1)计算得到本试验  $A = -0.03474$ 。

如本试验的一台机组在工况 2 下运行,以平均掺烧量 24 t/h,机组年运行 5 000 h 计算,混燃成型生物质一年可替代用煤 78 289 t,同时减排温室气体 CO<sub>2</sub> 达 166 207 t。

### 2.4 生物质混燃对 NO<sub>x</sub> 及 SO<sub>2</sub> 排放特性的影响

生物质混燃量对 NO<sub>x</sub> 排放的影响如图 7 所示:随着生物质混燃量的增大,NO<sub>x</sub> 的排放逐渐降低,当生物质混燃量达 24 t/h 时,NO<sub>x</sub> 排放降低约 10%。由表 1 对煤和生物质的元素分析可见,该成型生物质的含氮量并不低,但是由于生物质中的挥发分极高并且生物质中的氮元素主要以氨基的形式存在<sup>[4,16]</sup>。因此当生物质从最上层送入炉内,可能会在局部还原性气氛环境下,热解过程产生大量 CH<sub>4</sub> 和 NH<sub>3</sub> 等基团,以再燃和热力脱硝的反应原理,将 A~D 下层煤粉燃烧产生的 NO<sub>x</sub> 还原为 HCN 或 N<sub>2</sub><sup>[4,11,13,16]</sup>。Gold<sup>[19]</sup> 在田纳西流域管理局(Tennessee Valley Authority)电站煤粉炉内混烧生物质时的 NO<sub>x</sub> 排放也有所减低,同时混燃生物质时的炉膛温度水平降

低了 40 °C, 因此其认为混燃生物质又可能抑制部分热力型 NO<sub>x</sub> 的产生。

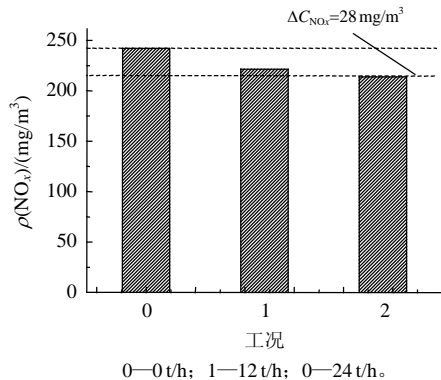


图 7 生物质混燃量对 NO<sub>x</sub> 排放量的影响  
Fig. 7 Effects of biomass quantity on NO<sub>x</sub> concentration

图 8 所示为生物质混燃量对 SO<sub>2</sub> 排放的影响, 该 SO<sub>2</sub> 浓度在进入脱硫系统前的尾部烟道用烟气分析仪测得。该图表明, 生物质混燃的 SO<sub>2</sub> 排放浓度略有降低, 但不明显, 最高降幅仅 84 μL/L。由表 1 可见, 生物质含硫量约为煤含硫量的一半, 因此一定负荷下炉膛整体的硫输入量降低, 但由于生物质掺混比例较小, 因此导致生物质混燃过程中 SO<sub>2</sub> 含量略有降低<sup>[19]</sup>。

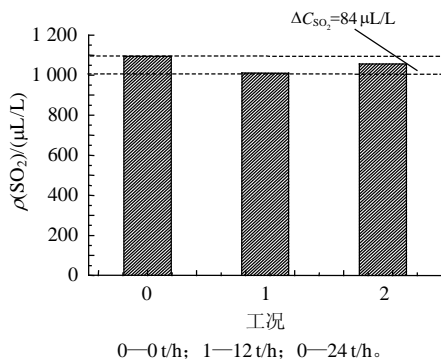


图 8 生物质混燃量对 SO<sub>2</sub> 排放量的影响  
Fig. 8 Effects of biomass quantity on SO<sub>2</sub> concentration

### 3 结论

本文在国内某 300 MW 机组上, 不增加电厂任何设备, 利用已有磨煤机对生物质成型燃料进行磨制, 并送入炉内燃烧。通过试验对生物质的可磨性及磨煤机的安全性进行了分析; 研究了生物质混燃对炉内火焰特性、烟气温度、锅炉效率以及 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放的影响, 得到以下结论:

1) ZGM-95G 型辊式中速磨煤机, 直吹式制粉系统, 可用于成型生物质燃料的磨制及生物质粉料的输送; 磨煤机的生物质给料量存在一上限值, 同

时为使磨煤机安全运行, 磨制生物质的磨煤机风量不能太小。成型生物质燃料经辊式磨煤机磨制后的粒径为 10~2000 μm, 随着生物质给料量的增加, 生物质粉料的粒径增大。

2) 生物质混燃过程中, 生物质燃烧器喷口火焰稳定; 生物质混燃工况下的炉膛上部温度分布和排烟温度, 均比纯烧煤粉时更低。

3) 煤粉炉在混燃生物质的工况下运行时, 飞灰含碳量略有升高, 锅炉效率略有下降。本试验过程中纯烧煤粉时的锅炉效率为 94.673%; 当生物质混燃量为 12 和 24 t/h 时, 锅炉效率分别对应 94.481% 和 94.149%。

4) 随着生物质混燃量的增大, NO<sub>x</sub> 的排放逐渐降低: 试验过程中当生物质混燃量达 24 t/h 时, NO<sub>x</sub> 排放降低约 10%。生物质混燃的 SO<sub>2</sub> 排放浓度略有降低, 但不明显, 实验过程中最高降幅 84 μL/L。

5) 当机组在 250 MW 运行, 以平均掺烧量 24 t/h, 机组年运行 5 000 h 计算, 在一台机组混燃成型生物质就可替代用煤 78 289 t/年, 同时减排温室气体 CO<sub>2</sub> 达 166 207 t/年。

### 参考文献

- 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).
- 宁新宇, 李诗媛, 吕清刚, 等. 秸秆类生物质与石煤在流化床中的混烧与黏结机理[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(29): 105-110.  
Ning Xinyu, Li Shiyuan, Lü Qinggang, et al. Study on co-firing and agglomeration mechanism of stalk biomass and stone coal in fluidized bed[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(29): 105-110(in Chinese).
- Molcan P, Lu Gang, Bris T L, et al. Characterisation of biomass and coal co-firing on a 3MWth combustion test facility using flame imaging and gas/ash sampling techniques[J]. Fuel, 2009, 88(12): 2328-2334.
- Harding N S, Adams B R. Biomass as a reburning fuel: a specialized cofiring application[J]. Biomass and Bioenergy, 2000, 19(6): 429-445.
- Broek R V D, Faaij A, Wijk A V. Biomass combustion for power generation[J]. Biomass and Bioenergy, 1996, 11(4): 271-281.
- Brouwer J, Owens W D, Harding S, et al. Cofiring waste biofuels and coal for emissions reduction[C]. Proceedings of the 2nd Biomass Conference of the Americas, Portland, OR, 1995.
- Savolainen K. Co-firing of biomass in coal-fired utility boilers [J]. Applied Energy, 2003, 74(3-4): 369-381.
- Ireland S N, McGrellis B, Harper N. On the technical and economic issues involved in the co-firing of coal and waste in a conventional

- pf-fired power station[J]. Fuel, 2004, 83(7-8): 905-915.
- [9] Sami M, Annamalai K, Wooldridge M. Co-firing of coal and biomass fuel blends[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2001, 27(2): 171-214.
- [10] 阎维平, 陈吟颖. 生物质混合物与煤共热解的协同特性[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(2): 80-86.  
Yan Weiping, Chen Yinying. Interaction performance of co-pyrolysis of biomass mixture and coal of different rank[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(2): 80-86(in Chinese).
- [11] Glarborg P, Jensen A D, Johnsson J E. Fuel nitrogen conversion in solid fuel fired systems[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2003, 29(2): 89-113.
- [12] Hill S C, Douglas Smoot L. Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2000, 26(4-6): 417-458.
- [13] Smoot L D, Hill S C, Xu H. NO<sub>x</sub> control through reburning [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1998, 24(5): 385-408.
- [14] Demirbas A. Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2005, 31(2): 171-192.
- [15] 栾积毅, 孙锐, 路军锋, 等. 生物质再燃脱硝的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(14): 73-79.
- Luan Jiayi, Sun Rui, Lu Junfeng, et al. Experimental studies on reburning with biomass for NO<sub>x</sub> reduction[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(14): 73-79(in Chinese).
- [16] Narayanan K V, Natarajan E. Experimental studies on cofiring of coal and biomass blends in India[J]. Renewable Energy, 2007, 32(15): 2548-2558.
- [17] Sampson G R, Richmond A P, Brewster G A, et al. Cofiring of wood chips with coal in interior Alaska[J]. Forest Products Journal, 1991, 41(5): 53-56.
- [18] Hughes Evan E, Tillman David A. Biomass cofiring: status and prospects 1996[J]. Fuel Processing Technology, 1998, 54(1-3): 127-142.
- [19] Gold Bruce A, Tillman David A. Wood cofiring evaluation at TVA power plants[J]. Biomass and Bioenergy, 1996, 10(2-3): 71-78.



王学斌

收稿日期: 2009-12-18。

作者简介:

王学斌(1984—), 男, 博士研究生, 研究方向为燃烧过程中污染物的控制及生物质能的应用, xuebinwang1984@yahoo.cn;

谭厚章(1965—), 男, 副教授, 主要研究方向为电站锅炉燃烧技术优化及辅机节能技术改造等。

(责任编辑 车德竞)