

# 秸秆类生物质与石煤在流化床中的混烧与黏结机理

宁新宇<sup>1</sup>, 李诗媛<sup>2</sup>, 吕清刚<sup>2</sup>, 贡小银<sup>2</sup>, 矫维红<sup>2</sup>

(1. 中国科学院研究生院, 北京市 海淀区 100190;

2. 中国科学院工程热物理研究所, 北京市 海淀区 100190)

## Study on Co-firing and Agglomeration Mechanism of Stalk Biomass and Stone Coal in Fluidized Bed

NING Xin-yu<sup>1</sup>, LI Shi-yuan<sup>2</sup>, LÜ Qing-gang<sup>2</sup>, YUN Xiao-yin<sup>2</sup>, JIAO Wei-hong<sup>2</sup>

(1. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100190, China;

2. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100190, China)

**ABSTRACT:** Co-firing characteristics of corn stalk and stone coal in different proportion were investigated by thermal gravimetric analysis. The results showed that corn stalk can improve the ignition and combustion of stone coal. The agglomeration experiments on corn stalk were made in a bench-scale bubbling fluidized bed with quartz sand as bed material and stone coal ash as additive. The results indicate that stone coal ash can inhibit agglomeration of bed material particles at temperature of 900°C. Agglomerate of blends was analyzed by means of scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray (SEM/EDX), and the bed materials were analyzed by means of X-ray fluorescence (XRF). Analysis showed that aluminum element and iron element in stone coal ash can react with alkali compounds and eutectics with low melting point, form a covering layer with high melting point on the surface of biomass and quartz sand particles, thus inhibit the forming and transfer of low melting compounds.

**KEY WORDS:** biomass; corn stalk; stone coal; combustion; fluidized bed; agglomeration

**摘要:** 以玉米秸秆与石煤按不同比例组成的混合物为研究对象, 在 TG-DTG 热分析仪上进行了燃烧特性分析, 结果表明玉米秸秆有利于石煤的着火和稳定燃烧, 对石煤有一定的助燃作用; 在小型鼓泡流化床实验装置上, 以石英砂为床料、石煤灰为添加剂, 进行了玉米秸秆成型燃料流化床燃烧的床料黏结实验, 结果表明: 石煤灰能够在生物质流态化燃烧过程中有效地抑制流化床床料黏结现象的发生; 通过对实验中形成的结团进行扫描电子显微镜 X 射线能谱(scanning

electron microscopy/Energy-dispersive X-ray- SEM/EDX), 对床料进行 X 射线荧光光谱(X-ray fluorescence, XRF)分析, 结果表明石煤灰中的 Al 和 Fe 能够与生物质灰中的碱金属化合物以及低熔点共熔物发生化学反应生成高熔点物质, 并且覆盖在生物质碳颗粒与石英砂颗粒表面形成隔绝层, 从而阻止低熔点物质的生成与迁移。

**关键词:** 生物质; 玉米秸秆; 石煤; 燃烧; 流化床; 黏结

## 0 引言

与常规固体燃料煤相比, 生物质具有其特殊性, 如 CO<sub>2</sub> 零排放、可再生、燃烧时污染物排放低等<sup>[1]</sup>; 当前生物质能的利用方式存在多种途径, 其中利用锅炉直燃供热和发电是生物质能的重要利用方式之一<sup>[2]</sup>。但当前生物质直燃技术存在着一些问题, 其中部分原因是由于在大部分农业生物质和部分林业生物质中含有较高量的 K、Na 等碱金属元素以及碱土金属元素 Ca、Mg 等<sup>[3-4]</sup>, 其中的 K 元素以离子形态或者有机金属化合物形态存在<sup>[5]</sup>。有研究表明生物质在燃烧过程中形成的绝大多数碱金属盐不会被烟气带走, 而是沉淀在燃烧后所形成的灰中。由于这些碱金属盐本身的熔点较低, 并且当多种碱金属盐(K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、KCl、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>等)与碱土金属盐(CaSO<sub>4</sub>、MgSO<sub>4</sub>等)共存时, 将形成熔点更低的共晶体; 另一方面, 当生物质处于流态化燃烧状态时, 燃烧反应所形成的 KCl、K<sub>2</sub>O 等碱金属化合物还将与床料的主要成分 SiO<sub>2</sub> 发生反应生成 K<sub>2</sub>O·nSiO<sub>2</sub> 等低熔点物质, 同时生成 HCl、SO<sub>2</sub> 等气体<sup>[6]</sup>。研究表明, 流化床中固体颗粒的黏结与低熔点共晶体熔化而形成的黏性液体物质有关, 液体物

基金项目: 国家自然科学基金项目(50706055)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50706055).

质与固体物质之间的比例决定颗粒的黏性，以及颗粒之间的黏结程度<sup>[7]</sup>。

目前，除了采用生物质与煤混烧的方式来解决生物质流化床燃烧床料黏结的方法之外<sup>[8]</sup>，还有3类解决方案：①在床料中加入添加剂<sup>[9]</sup>；②不使用砂子作为床料<sup>[10]</sup>；③对生物质进行燃烧前脱除碱金属处理<sup>[11]</sup>。在第1种方案中，文献中研究的添加剂大多数集中在金属矿物质方面<sup>[12-14]</sup>。本文按照能源与资源综合利用的基本原则，利用石煤灰含量高、灰中有效成分含量高以及燃烧后的煤灰能够产生类似添加剂作用的特点，提出通过将生物质成型燃料与石煤进行混合燃烧，从而解决生物质成型燃料流化床燃烧床层结团结焦的问题。

本文通过热重分析，进行玉米秸秆与石煤混合物燃烧特性研究；在小型鼓泡流化床实验装置上，分别进行以石英砂和以石煤灰为添加剂与石英砂混合物为床料的黏结机理实验研究，通过SEM/EDX以及XRF等分析手段对床料中出现的结团和床料进行分析，研究石煤灰抑制生物质流态化燃烧过程中床料黏结的机理。

## 1 实验

### 1.1 实验样品

实验所用的石煤为湖南安化石煤，生物质燃料为辽河平原的玉米秸秆，实验样品的特性分析结果见表1。

用于热重实验的试样均磨细到0.5 mm以下，并分别按玉米秸秆与石煤的质量比为8:2、5:5和3:7混合均匀。在生物质成型颗粒与石煤混合燃烧黏结机理实验中，玉米秸秆成型颗粒的平均长度为15 mm，直径为6 mm。以石煤燃烧后的灰为添加剂，与石英砂按照质量比1:1进行混合后作为实验床料，床料粒径范围为0.20~0.355 mm。其中，玉米

表1 玉米秸秆和石煤的燃料特性分析

Tab. 1 Characteristics of corn stalk and stone coal

成分	玉米秸秆	石煤	
工业分析 $w_{ad}/\%$	水分	1.28	1.25
	灰分	6.23	74.9
	挥发分	74.5	3.57
	固定碳	17.99	20.28
元素分析 $w_{ad}/\%$	C	44.92	19.74
	H	5.62	0.41
	N	0.87	0.29
	O	40.9	0.61
	S	0.18	2.8
低位发热量/(MJ/kg)	16.89	6.71	

秸秆灰、石英砂和石煤灰的成分分析见表2，玉米秸秆灰与石煤灰的熔融特性见表3。

表2 玉米秸秆灰、石英砂和石煤灰的成分分析

Tab. 2 Composition of corn stalk ash, quartz sand and stone coal ash %

成分	玉米秸秆灰	石英砂	安化石煤灰
SiO <sub>2</sub>	45.64	99.02	74.16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.04	0.47	8.02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.20	0.23	5.02
CaO	9.35	0.06	1.88
MgO	16.2	—	1.32
TiO <sub>2</sub>	0.27	0.02	0.43
SO <sub>3</sub>	3.30	0.09	1.12
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3.91	—	1.02
K <sub>2</sub> O	10.1	0.05	2.24
V	—	—	0.46
Na <sub>2</sub> O	0.29	—	0.04

表3 玉米秸秆灰与石煤灰分的熔融特性

Tab. 3 Analysis of fusibility of corn stalk ash and stone coal ash

试样	变形温度/°C	软化温度/°C	半球温度/°C	流动温度/°C
玉米秸秆灰	1 120	1 190	1 220	1 230
安化石煤灰	1 260	1 340	1 460	>1 500

### 1.2 实验设备与实验方法

在热重实验中，载气为高纯度N<sub>2</sub>与高纯度O<sub>2</sub>按体积比为8:2的混合气体，流量为60 mL/min，升温速率为10 °C/min，温度范围为室温~950 °C。

在黏结机理实验中，实验装置由炉体、电加热炉、螺旋给料机以及空气压缩机等组成，见图1。炉体下部内径为120 mm、高500 mm，上部内径为200 mm、高450 mm。在实验过程中静止料位高度为120 mm，流化速度为0.25 m/s，工况温度为900 °C；实验时保持螺旋给料机连续稳定的给料，通过炉膛顶部设置的观察窗不间断的观察流化床中床料的流化状态，识别床料发生黏结、停止流化

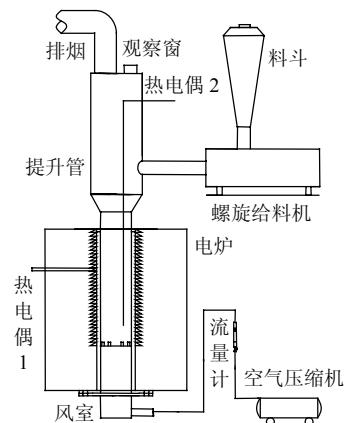


图1 实验装置示意图

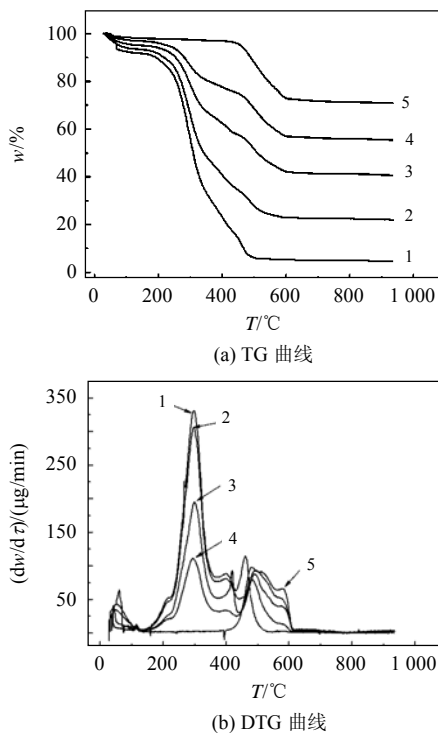
Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

的时刻; 试验结束后, 取出床料, 对结团进行 SEM/EDX 以及 XRF 分析。

## 2 玉米秸秆与石煤混燃的热重分析

图 2 为玉米秸秆与石煤按不同比例组成的混合物燃烧过程的 TG/DTG 曲线。

从图 2(a)中可以看出, 试样燃烧过程的 TG 曲线大致分为 4 个阶段, 第 1 阶段为水分和其它吸附气体的析出; 第 2 阶段失重曲线几乎成一平台, 重量损失较少; 第 3 阶段主要为挥发分的析出燃烧和固定碳的燃烧, 是整个燃烧过程的主要反应阶段, 其失重量占试样总失重量的 90%; 第 4 阶段试样已不发生失重, TG 曲线保持水平; 在图 2(b)中, 试样燃烧过程的 DTG 曲线存在 3 个峰, 这是由于试样先后发生了半纤维素、纤维素的分解, 木质素的炭化, 以及固定碳的燃烧的缘故<sup>[15-17]</sup>。根据表 1, 及试样的 TG 曲线, 得出生物质与石煤相比, 具有如下燃烧特性: 含碳量少, 热值低; 含氢量稍多, 挥发分明显较多; 含氧量多, 易于引燃; 密度小, 质地比较疏松, 燃料易于燃烧和燃尽等<sup>[18]</sup>。随着混合物中生物质比例的增大, 4 个阶段的温度区域稍有差异, TG 曲线向低温区域移动<sup>[19]</sup>, 这是由于生



1—玉米秸秆; 2—4—玉米秸秆与石煤的混合物(玉米秸秆与石煤的质量比分别为 8:2、5:5、3:7); 5—石煤

图 2 玉米秸秆与石煤混合燃烧 TG 和 DTG 曲线  
Fig. 2 TG and DTG curves of the blends of corn stalk and coal for the combustion

物质挥发分析出温度低的缘故, 同时挥发分的析出对后期石煤的燃烧将起预热作用<sup>[20]</sup>, 有利于石煤的着火燃烧。从图 2 中还可得出混合燃料的着火温度, 见表 4。随着玉米秸秆掺混比例增加, 混合物着火温度降低<sup>[21]</sup>。综合考虑, 生物质与石煤混合物的质量比为 2:8 时进行混烧较合适<sup>[22]</sup>。

表 4 玉米秸秆与石煤的混合物及组分的着火温度  
Tab. 4 Ignition temperatures of the mixture of corn stalk and stone coal

试样	着火温度/°C
石煤	453.1
玉米秸秆: 石煤=3:7	261.5
玉米秸秆: 石煤=5:5	256.8
玉米秸秆: 石煤=8:2	253.4
玉米秸秆	251.1

## 3 玉米秸秆与石煤流态化燃烧黏结特性

分别以石英砂和以石煤灰为添加剂与石英砂的混合物为床料, 进行了玉米秸秆成型燃料流态化燃烧黏结机理实验。在以石英砂为床料的实验中, 当床温达到 900 °C 时, 床料流化状况良好, 玉米秸秆成型颗粒大部分飘浮在床层表面燃烧, 但在运行 15 min 后, 床层在不到 1 min 的时间内发生了全面黏结, 床料流化被完全破坏, 床层温度急剧上升。在实验后冷却的床料中发现大量的结团, 这些结团结构松散, 极易破碎, 见图 3。

在同样的实验条件下, 在石英砂床料中添加石煤灰(质量比 1:1)后, 实验现象发生了很大改变, 在 900 °C 工况温度下, 玉米秸秆成型燃料的燃烧实验持续进行了 8 h, 没有出现床料大面积黏结而导致流化被破坏的现象, 在实验后取出的床料中仅发现少量粒径约 3 mm 的结团, 见图 4; 这些结团与图 3 中的结团相比, 稍坚硬, 但是仍然很松散。从以上的对比实验可以得出结论: 石煤灰作为添加剂能在很大程度上抑制生物质在流化床燃烧过程中床料



图 3 实验后床料照片(石英砂; 900 °C)  
Fig. 3 Bed material after the experiment (100% quartz sand; 900 °C)



图4 实验后床料照片(50%石英砂+50%石煤灰; 900 °C)  
Fig. 4 Bed material after the experiment (50% quartz sand + 50% stone coal ash; 900 °C)

的黏结现象。

根据文献[23-24],并结合表2,得到玉米秸秆灰、石英砂和石煤灰的黏结特性分析,见表5。从硅比来看,玉米秸秆灰黏结程度严重,石煤灰次之,石英砂最低;从酸碱比来看,玉米秸秆灰黏结程度最重,石煤灰次之,石英砂最低;从硅铝比来看,玉米秸秆灰黏结程度最重,石煤灰次之,石英砂最低;与实验结果对比,玉米秸秆灰与石煤灰发生黏结的难易程度与之相符,而石英砂的分析结果与实验不符,其原因是石英砂属于矿物原料,不适合此类判据。

将2种不同床料实验后的结团进行SEM/EDX分析。图5是床料为石英砂时结团的SEM分析结果;从SEM照片中可以看出,石英砂颗粒之间已有熔融状物质生成,将颗粒与颗粒黏结在一起,但此时的床层温度低于玉米秸秆灰分的变形温度,此

表5 玉米秸秆灰、石英砂和石煤灰的特性分析  
Tab. 5 Analysis of corn stalk ash, quartz sand and stone coal ash %

试样	酸碱比	硅比	硅铝比
玉米秸秆灰	0.734	62.19	7.56
石英砂	0.0034	99.71	210.68
安化石煤灰	0.127	90.02	9.25

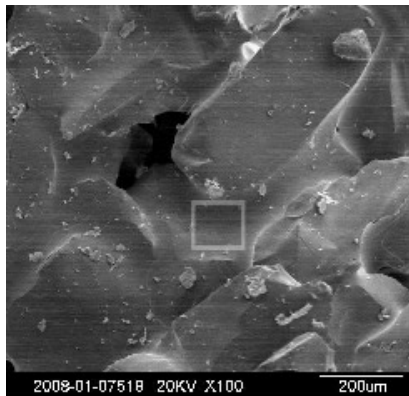
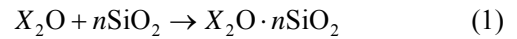


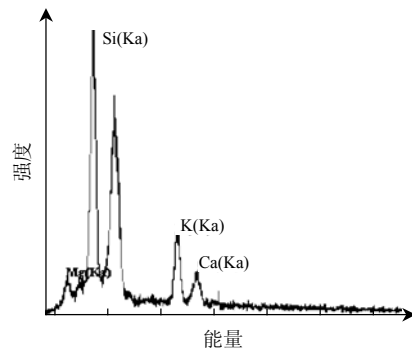
图5 结团的SEM分析结果(石英砂; 900 °C)  
Fig. 5 SEM image of the agglomerates (quartz sand; 900 °C)

结果与文献[25]的实验结果一致,表明生物质流化床燃烧发生床层黏结的温度低于根据国家标准检测的生物质灰本身的变形温度,因此按照国家标准检测的生物质灰的变形温度不能作为判断流化床床层发生黏结的初始温度。原因是燃烧过程中生物质灰中碱金属氧化物能够与床料中的硅化物反应,形成低熔点的共熔物,其反应式为式(1)<sup>[22,26-27]</sup>:



方程式中X代表K、Na等碱金属元素,当n为3、4时,其熔融温度在800 °C以下,这些熔融物在床料的不断碰撞接触中,在不同的床料颗粒表面传递,当这些化合物积累到一定程度时,使黏附颗粒的力大于破坏力,床料中的颗粒就会黏附在一起形成结团<sup>[22,28]</sup>。通过颗粒之间黏结物的EDX分析(见图6)表明黏结物中含有Si以及碱金属K,同时还含有一定量的碱土金属Ca、Mg,同试验后床料的XRF分析结果一致,见表6。

对以石煤灰为添加剂与石英砂混合物为床料的抑制黏结实验中形成的结团进行SEM/EDX分析。从SEM分析中没有发现类似图5中床料颗粒



w(Si)=61.2%; w(Mg)=11.3%; w(K)=17.9%; w(Ca)=9.6%

图6 结团的EDX分析结果(石英砂; 900 °C)  
Fig. 6 EDX analysis of the agglomerates (quartz sand; 900 °C)

表6 床料的XRF分析结果  
Tab. 6 XRF analysis of the materials %

成分	石英砂	50%石英砂+50%石煤灰
O	56.80	55.68
Si	34.90	26.90
C	2.75	2.78
K	1.63	3.96
Mg	1.60	1.56
Ca	0.66	1.62
Al	0.45	3.82
P	0.20	0.38
S	0.03	0.02
Fe	—	2.21
Na	0.05	0.30



与颗粒之间熔融的现象，而是床料颗粒表面被絮状物质覆盖，见图 7。对絮状覆盖物进行EDX分析，见图 8；结果表明，除了含有碱金属K、碱土金属Ca和Mg，还含有Fe和Al。XRF分析结果也证明床料中存在一定量的Fe和Al，见表 6。分析可得，石煤灰具有抑制石英砂床料发生黏结的作用，其原因是石煤灰分中含有 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ，它们能够与碱金属化合物发生反应生成高熔点物质<sup>[27,29]</sup>：

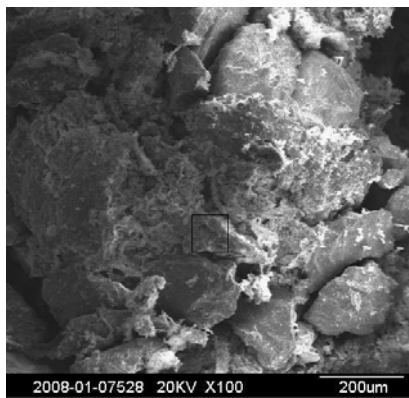
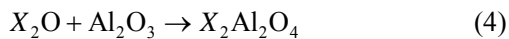
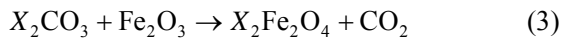
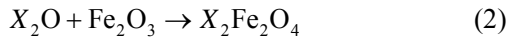
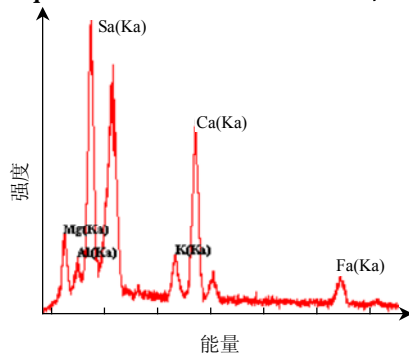


图 7 结团的 SEM 分析结果  
(50%石英砂+50%石煤灰; 900 °C)

Fig. 7 SEM analysis of the agglomerates  
(50% quartz sand + 50% stone coal ash; 900 °C)

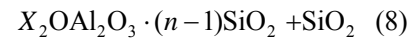
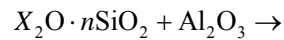
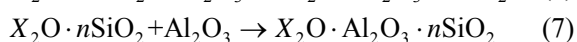
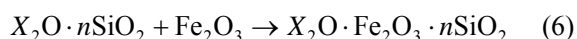


$w(\text{Si})=43.1\%$ ;  $w(\text{Mg})=19.7\%$ ;  $w(\text{Ca})=20.9\%$ ;  $w(\text{Fe})=5.5\%$ ;  
 $w(\text{Al})=5.1\%$ ;  $w(\text{K})=5.7\%$

图 8 结团的 EDX 分析结果  
(50%石英砂+50%石煤灰; 900 °C)

Fig. 8 EDX analysis of the agglomerates  
(50% quartz sand + 50% stone coal ash; 900 °C)

反应生成物最低熔点为  $1135\text{ °C}$ <sup>[29]</sup>；同时 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 还能够与 $\text{X}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ 发生反应，其反应如下<sup>[27]</sup>：



反应将生成锥辉石、钠长石、霞石等，这些生成物的熔点在  $955\text{ °C}$  以上<sup>[27]</sup>。通过实验现象可推测出，生物质颗粒在燃烧过程中，颗粒表面形成的灰与床料颗粒之间的频繁接触，造成石煤灰中的Al和Fe元素与生物质灰中的碱金属元素(K、Na等)发生反应，生成较高熔点的物质在生物质碳颗粒表面以及生物质灰与石英砂反应后的颗粒表面均形成隔绝层，阻止低熔点物质的生成与迁移，使床料颗粒之间不能相互黏结，从而抑制床料结团，这与图 8 中的碱金属元素含量远低于图 6 中的分析结果相符。同时，在图 7 中可以观察到较大面积的覆盖在生物质颗粒表面的絮状物质，这便是隔绝层，这也是在以石煤灰和石英砂混合物为床料的实验中，只发现少量较结实结块的原因。总之，石煤灰对于控制生物质流态化燃烧过程中床料的黏结非常有效，因此采用生物质与石煤混烧的方式能大大缓解因流化床中纯烧生物质所引起的床料黏结和结焦。

## 4 结论

1) 玉米秸秆在流化床中燃烧，床层发生结团的初始温度低于燃料按国家标准检测的变形温度。

2) 石煤灰分中含有的 Al 和 Fe 能够与玉米秸秆灰中的碱金属化合物以及低熔点共熔物发生化学反应生成高熔点物质，并且覆盖在玉米秸秆碳颗粒表面以及石英砂颗粒表面形成隔绝层，阻止低熔点物质的生成与迁移，从而在一定程度上抑制玉米秸秆颗粒在流态化燃烧过程中出现的床料黏结现象；采用玉米秸秆与石煤混烧的方式能够控制由于流化床中纯烧玉米秸秆所造成的床料黏结。

## 参考文献

- [1] 蒲舸, 张力, 辛明道. 王草的热解与燃烧特性实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 65-69.  
Pu Ge, Zhang Li, Xin Mingdao. Experimental study on pyrolysis and combustion characteristic of king grass[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11): 65-69(in Chinese).
- [2] 陈伟, 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, 28(2): 43-48(in Chinese).
- [3] Liao C, Wu C, Yan Y, et al. Chemical elemental characteristics of biomass fuels in China[J]. Biomass and Bioenergy. 2004, 27(2): 119-130.
- [4] 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).
- [5] Tran K, Iisa K, Hagström M, et al. On the application of surface ionization detector for the study of alkali capture by kaolin in a fixed bed reactor[J]. Fuel, 2004, 83(7-8): 807-812.
- [6] Aho M, Silvennoinen J. Preventing chlorine deposition on heat transfer surfaces with aluminium-silicon rich biomass residue and additive[J]. Fuel, 2004, 83(10): 1299-1305.
- [7] Frnandez L M J, Murillo L J M, Escalada C R, et al. Ash behaviour of lignocellulosic biomass in bubbling fluidized bed combustion [J]. Fuel, 2006, 85(9): 1157-1165.
- [8] 王泉斌, 徐明厚, 夏永俊. 煤与生物质混烧时可吸入颗粒物中的矿物质元素演变研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 103-108.
- Wang Quanbin, Xu Minghou, Xia Yongjun. Experimental study on transformation of mineral elements of inhaled particulate matters during co-combustion of coal with biomass[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(16): 103-108(in Chinese).
- [9] Uthalluru H B, Linjewile T M, Zhang Dongke, et al. Investigations into the control of agglomeration and defluidisation during fluidised-bed combustion of low-rank coals[J]. Fuel, 1999, 78(4): 419-425.
- [10] Ferná'ndez L M J, Escalada C R, Murillo L J M, et al. Combustion in bubbling fluidised bed with bed material of limestone to reduce the biomass ash agglomeration and sintering[J]. Fuel, 2006, 85(14-15): 2081-2092.
- [11] Davidsson K O, Korsgren J G, Pettersson J B C, et al. The effect of fuel washing techniques on alkali release from biomass[J]. Fuel, 2002, 81(2): 137-14.
- [12] Steenari B M, Lindqvist O. High-temperature reaction of straw ash and the anti-sintering additives kaolin and dolomite[J]. Biomass and Bioenergy, 1998, 14(1): 67-76.
- [13] Marcus O, Anders N. Role of kaolin in prevention of bed agglomeration during fluidized bed combustion of biomass fuels [J]. Energy and Fuels, 2000, 14(3): 618-624.
- [14] Davidsson K O, Steenari B M, Eskilsson D. Kaolin addition during biomass combustion in a 35 MW circulating fluidized-bed boiler [J]. Energy and Fuels, 2007, 21(4): 1959-1966.
- [15] 尚琳琳, 程世庆, 张海清. 生物质与煤共热解特性研究[J]. 太阳能学报, 2006, 27(8): 852-856.
- Shang Linlin, Cheng Shiqing, Zhang Haiqing. Experimental study on pyrolysis behaviors of coal and biomass blending[J]. Acta Energy Solaris Sinica, 2006, 27(8): 852-856(in Chinese).
- [16] 刘荣厚, 牛卫生, 张大雷. 生物质热化学转换技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [17] 徐朝芬, 陈汉平. 生物质与煤共燃特性的研究[J]. 实验技术与管理, 2006, 23(9): 35-38.
- Xu Chaofen, Chen Hanping. Study on co-fire combustion performance of biomass with coal[J]. Experimental Technology and Management, 2006, 23(9): 35-38(in Chinese).
- [18] 刘建禹, 翟国勋, 陈荣耀. 生物质直接燃烧过程特性的分析[J]. 东北农业大学学报, 2001, 32(3): 290-294.
- Liu Jianyu, Zhai Guoxuan, Chen Rongyao. Analysis on the characteristics of biomass fuel direct combustion process[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2001, 32(3): 290-294(in Chinese).
- [19] 刘豪, 邱建荣, 董学文, 等. 生物质与煤混烧的燃烧特性研究[J]. 热能动力工程, 2002, 17(101): 451-454.
- Liu Hao, Qiu Jian-rong, Dong Xuewen, et al. A study of the combustion characteristics of biomass and coal mixed firing [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2002, 17(101): 451-454(in Chinese).
- [20] 闵凡飞, 张明旭. 生物质与不同变质程度煤混合燃烧特性的研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(2): 236-241.
- Min Fanfei, Zhang Mingxu. Research on combustion characteristics of biomass and coals with different ranks[J]. Journal of China university Mining & Technology, 2005, 34(2): 236-241(in Chinese).
- [21] 张海清, 尚琳琳, 程世庆, 等. 秸秆以及秸秆混煤燃烧特性研究 [J]. 水利电力机械, 2006, 28(12): 104-108.
- Zhang Haiqing, Shang Linlin, Cheng Shiqing, et al. Research on the combustion characteristics of the mixtures made of biomass and coal[J]. Energy Research & Utilization, 2006, 28(12): 104-108(in Chinese).
- [22] Lin Weigang, Dam-Johansen K, Flemming F. Agglomeration in Bio-fuel fired fluidized bed combustors[J]. Chemical Engineering Journal, 2003, 96(1): 171-185.
- [23] 米铁, 陈汉平, 吴正瞬, 等. 生物质灰化学特性的研究[J]. 太阳能学报, 2004, 25(2): 236-241.
- Mi Tie, Chen Hanping, Wu Zhengshun, et al. Chemistry characteristic study on biomass ash[J]. Acta Energy Solaris Sinica, 2004, 25(2): 236-241(in Chinese).
- [24] 阎维平, 陈吟颖. 生物质燃料结渣特性分析与判别[J]. 华北电力大学学报, 2007, 34(1): 49-54.
- Yan Weiping, Chen Yinying. Study on slagging characteristics of biomass fuels[J]. Journal of North China Electric Power University, 2007, 34(1): 49-54(in Chinese).
- [25] Natarajan E, Öhman M, Gabra M, et al. Experimental determination of bed agglomeration tendencies of some common agricultural residues in fluidized bed combustion and gasification[J]. Biomass and Bioenergy, 1998, 15(2): 163-169.
- [26] Birgitta O, Britt-marie S. Characterization of ashes from wood and straw[J]. Biomass and Bioenergy, 1995, 8(2): 105-115.
- [27] Prakash A. Process challenges and evaluation of bed agglomeration in a circulating bed combustion system incinerating red water [J]. Environmental Process, 1997, 16(1): 54-64.
- [28] Chiou-Liang L, Ming-Yen W. The effect mineral composition of waste and operating condition on particle gglomeration/ defluidization during incineration[J]. Fuel, 2004, 83(17-18): 2335-2343.
- [29] Olofsson Göran, Ye Zhicheng, Bjerle Ingemar, et al. Bed agglomeration problems in fluidized-bed biomass combustion [J]. Ind. Eng. Chem. Res, 2002, 41(12): 2888-2894.



宁新宇

收稿时间: 2008-06-11.

作者简介:

宁新宇(1981—), 男, 硕士研究生, 主要从事生物质燃烧特性研究, ningxinyu@yahoo.cn;

李诗媛(1979—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事生物质燃烧、固体废弃物焚烧以及燃烧污染物控制研究。

(责任编辑 王庆霞)