

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.018

# 烟秆流化床燃烧结渣特性实验\*

张世红 杨子旭 王贤华 陈汉平

(华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 武汉 430074)

**【摘要】** 在中试流化床实验台架上,以石英砂、煤灰作为床料,对烟秆在 800~900℃ 下的燃烧聚团现象进行了研究,并对其机理进行讨论。结果表明,烟秆在流化床中与以上 2 种床料发生粘结的难易程度不相同,石英砂燃烧粘结现象非常严重并最终导致失流,而煤灰床料经过长时间运行没有结渣。对实验后的床料颗粒和结团分别进行 XRF 以及 SEM/EDX 分析,分析表明煤灰中的 Al、Fe 等元素能够与烟秆灰中的碱金属元素发生反应形成高熔点物质,阻止床料颗粒的增大,从而抑制结渣。

**关键词:** 烟秆 流化床 燃烧 床料粘结

**中图分类号:** TK6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)06-0097-05

## Experiment on Agglomeration Characteristics during Fluidized Bed Combustion of Tobacco Stem

Zhang Shihong Yang Zixu Wang Xianhua Chen Hanping

(State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

### Abstract

The agglomeration phenomenon of tobacco stems was investigated on a pilot-scale fluidized bed at temperature between 800℃ and 900℃ with two kinds of bed materials silica sand and cinder, followed by a discussion on the agglomeration mechanism. The results indicated that the inclination of agglomeration for the two bed materials above was different. Severe incineration was found in silica sand which led to defluidization finally, while no agglomeration was discovered during long-term run. The data from X-ray fluorescence and scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray (EDX) indicated that Al, Fe contained in cinder could react with alkali metals in the tobacco stem ash to form high-melting compounds, which prevented the agglomerates to grow, therefore inhibit the agglomeration.

**Key words** Tobacco stem, Fluidized bed, Combustion, Bed material agglomeration

### 引言

随着能源紧缺与环境问题的日益突出,生物质能以其可再生性以及低污染物排放等优点,逐渐成为人们新能源开发的关注焦点。在所有生物质能热化学转化技术中,生物质流化床燃烧技术具有燃料适应性广、燃烧效率高、低 SO<sub>2</sub>、低 NO<sub>x</sub> 排放等优势<sup>[1]</sup>。

然而,在生物质流化床燃烧技术应用中经常出

现床料聚团增大而导致非正常停炉事故。国内外许多研究人员针对生物质燃烧锅炉床料聚团问题进行了研究,研究结果表明燃烧温度是影响结渣的重要因素;同时,床料中的 Al、Si、Ca、Fe 等元素在生物质燃烧过程中的转化行为与结渣现象有密切联系<sup>[2-6]</sup>;由于生物质含有较高含量的碱金属和碱土金属元素,易与主要以二氧化硅为基本成分的流化床床料在高温下形成低熔点的类玻璃熔融物质,形成床料聚团而导致流化状态的破坏<sup>[7-8]</sup>。为了解决

收稿日期: 2011-08-25 修回日期: 2011-10-31

\* 国家自然科学基金资助项目(50930006,50806027)和国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2007CB210202)

作者简介: 张世红,教授,博士生导师,主要从事生物质能源转化利用研究,E-mail: shzhang@hust.edu.cn

床料聚团问题,许多研究者推荐采用非二氧化硅床料,比如高岭土、粘土等<sup>[9-10]</sup>。高炉炉渣不易与生物质燃料中的K、Ca发生反应,从而缓解床料聚团的发生<sup>[11-12]</sup>,而且很容易获得。本文中用到的煤灰即高炉炉渣经过筛分后剩下的细颗粒物。

烟秆是烟叶烘烤工艺过程中产生的主要农业废弃物,较容易集中获取。我国是烟草生产大国,年产烟叶450~500万t,约产生90~100万t废弃物<sup>[13]</sup>。由于烟叶烘烤工艺需要大量的能源消耗,因此探寻烟秆的能源化利用途径为烟叶烤房供热,对于实现节能环保、提高农村经济效益具有积极意义,并且对其他农林废弃物资源化利用具有示范作用。而烟秆作为较为典型的农业废弃物,其在流化床中的燃烧特性还鲜见报道。

本文在中试流化床实验台架上,分别以石英砂和煤灰作为床料,进行烟秆燃烧粘结特性实验研究。采用XRF、SEM/EDX等方法分析渣块和床料颗粒的成分及微观特性。采用HSC化学平衡模拟软件分析燃烧过程中碱金属与碱土金属元素的挥发特性,以及与床料的反应特性,寻求床料聚团的理论依据。

## 1 实验

### 1.1 实验原料

烟秆取自湖北省恩施州。为方便连续进料,实验前将烟秆破碎至长度2~4mm,并且平铺在空地上日晒4h以除去原料中过多的外在水分。烟秆的工业分析和常规分析如表1所示,灰分分析如表2所示。

表1 烟秆元素分析、工业分析及发热量

Tab.1 Proximate analysis, ultimate analysis and LHV of tobacco stem

工业分析质量分数/%					元素分析质量分数/%					发热量/MJ·kg <sup>-1</sup>
收到基水分	干燥基水分	挥发分	灰分	固定碳	C	H	O	N	S	
20.86	3.51	68.64	21.70	6.14	32.66	5.66	31.91	3.81	0.76	11.30

表2 烟秆灰分分析

Tab.2 Ash components of tobacco stem

元素	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl
质量分数	0.38	5.88	5.00	16.04	21.20	31.36	0.08	0.04	0.45	4.05	7.96	8.34

实验中选用粒径为0.1~1mm石英砂和1~2mm的煤灰作为床料,其物理性质如表3所示。

表3 床料的流化特性

Tab.3 Fluidized characteristics of bed materials

参数	石英砂	煤灰
粒径/mm	0.1~1.0	1.0~2.0
堆积密度/kg·m <sup>-3</sup>	1473	707
最小流化速度/m·s <sup>-1</sup>	0.20	0.45

### 1.2 实验装置

中试循环流化床实验台架如图1所示,高为10m、密相区内径为108mm、稀相区内径为150mm,在距布风板1720mm处布置二次风进口。实验台上部设有观察口和取样口,可以实时观察燃烧状况和动态取样。一次风由鼓风机提供,通过调节阀控制,进入燃烧室与煤气混合后用电火花点燃,煤气的流量用转子流量计调节和控制。在距离布风板0、420、1220、2020、2870、3885、4885、5915mm以及尾部烟道处分别布置了9个温度测点(T<sub>1</sub>~T<sub>9</sub>),在风室底部和炉膛上部燃烧区分别布置了2个压力测点,可对燃烧过程中的压力进行在线测量。用螺旋

给料机将烟秆从炉膛密相区给入,给料口位于距离布风板垂直距离970mm处。

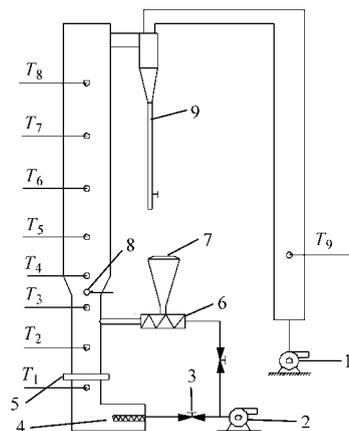


图1 循环流化床台架示意图

Fig.1 Schematic diagram of circulated fluidized bed

1.引风机 2.鼓风机 3.调节阀 4.预燃室 5.布风板 6.螺旋给料器 7.料仓 8.二次风 9.旋风分离器

### 1.3 实验方法

实验中选取的过量空气系数为1.05~1.29,流化风速为0.40~0.57m/s,给料速率为8~12kg/h,床料静止高度为200mm。在实验开始阶段,燃

烧煤气对炉膛进行预热。待预燃室温度达到400℃时,开始人工间断给料,观察床层各个测点温度变化情况,当床温达到800℃时切断煤气,稳定一段时间后开始连续进料。实验过程中对床层压降和床温进行监测,当出现较大的压力波动或者是局部高温时停止实验,否则连续运行5 h。实验结束后排出床料,进行XRF以及SEM/EDX检测分析。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 床料粘结现象

实验过程中,使用石英砂作为床料时,床层在运行约1 h后,床压出现了大幅度波动,炉内流化失败。停炉后发现炉膛内壁发生了大面积结渣,致使炉膛流化截面积大大减小(图2a、2b)。而床料为煤灰时,连续运行5 h后,床层压降没有出现大范围波动,停炉后在炉膛内壁并没有发现粘附较厚的结团颗粒,只发现了厚度为1~2 mm的薄片(图2c)。实验后将床料从炉膛底部放出,可以观察到石英砂表面变得光滑,而煤灰颗粒的几何外形依旧很分明。煤灰筛分后的粒径分布如表4所示,从表中可以看

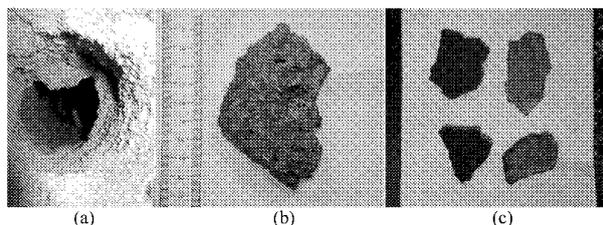


图2 不同床料燃烧后的结渣图片

Fig. 2 Photographs of different bed material agglomerates

(a) 炉膛内壁结渣 (b) 石英砂大渣块

(c) 煤灰床料形成的片状物

出大于2 mm以上的颗粒在总床料中所占比例很小,因此煤灰在燃烧过程中没有明显团聚或熔融发生。

表4 煤灰燃烧后粒径分布

Tab. 4 Size distribution of cinder particle after combustion

粒径/mm	3 ~ ∞	2 ~ 3	1 ~ 2	0 ~ 1
质量分数/%	0.7	1.7	41.5	56.1

### 2.2 床料XRF分析

用EAGLE III聚焦型扫描X-射线荧光能谱仪(XRF)对未反应的床料颗粒和实验后的床料结团颗粒分别进行了分析,结果如表5所示。

表5 床料成分分析

Tab. 5 Components of bed material

床料	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl
石英砂原样	2.99	0.93	6.54	85.91	0.23	1.76	0.42	0	1.22	0	0
石英砂渣块	2.28	5.09	1.37	4.95	3.40	22.08	36.61	0.20	0.26	12.33	10.85
煤灰原样	0.83	0.72	18.97	73.34	0.57	0.71	0.36	0.57	1.85	1.30	0.77
煤灰片状物	1.29	0.10	2.78	79.34	1.19	1.12	0.81	0.38	7.73	1.80	6.73

燃烧前、后石英砂床料颗粒的成分发生了明显变化,石英砂结团颗粒的主要成分是K、Ca、Na、Mg等碱金属和S、Cl。原样中这些元素的质量分数很少,但是经过累计运行后,碱金属元素在床料中显著富集,K和Ca的质量分数增加幅度最大,K从1.76%增加到22.08%,Ca从0.42%增加到36.61%,而Si、Al等元素的质量分数都明显减小。这表明石英砂渣块主要是由烟秆灰中的碱金属元素在燃烧过程中的富集所致,在高温下,K、Na与Cl、S形成低熔点化合物K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>7</sub>(325℃)、Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>7</sub>(401℃)、Na<sub>3</sub>K<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(552℃)、KCl(770℃)熔化后增大床料颗粒的粘性<sup>[14-15]</sup>,还会与SiO<sub>2</sub>反应生成低共熔点的硅酸盐如K<sub>2</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>9</sub>。而Ca在高浓度下容易形成高熔点化合物如CaSO<sub>4</sub>(1400℃),对灰的熔融性有抑制效果,所以石英砂床料的结渣主要是K、Na等碱金属元素所致。

煤灰片状物样品的XRF分析表明,K、Na、Ca等

元素也有不同程度的富集,但是质量分数增加的幅度很小,相反Fe、Cl增加的幅度比较大,Fe从1.85%增大到7.73%,Cl从0.77%增大到6.73%。这表明,煤灰渣块不是由碱金属低熔点化合物组成的,因此长时间运行不易形成结渣。

对比2种床料发现,石英砂中的Si含量明显高于煤灰而Al含量明显低于煤灰。用石英砂作为床料时,短时间内运行就出现了大面积结渣现象,而选用煤灰作为床料时,流化床能够稳定长时间运行。因此,石英砂床料不适合在燃烧生物质的流化床中作为床料。

### 2.3 结团颗粒的SEM/EDX分析

对实验中的石英砂渣块和煤灰片状物分别进行了SEM/EDX分析,结果如图3、4所示。通过比较微观形貌图像可发现,石英砂渣块表面包覆了结构致密的细小颗粒,较为严实,而煤灰片状物颗粒的结构较酥松,表面出现了熔融物质,但是粘附在颗粒表

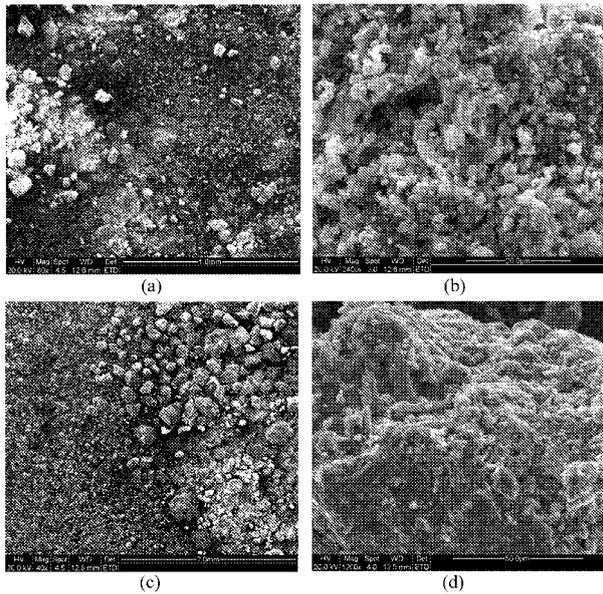


图3 不同床料渣块形貌 SEM 分析

Fig. 3 SEM results of different agglomerates

(a) 石英砂渣块(×80) (b) 石英砂渣块(×2 400)  
(c) 煤灰渣块(×40) (d) 煤灰渣块(×1 200)

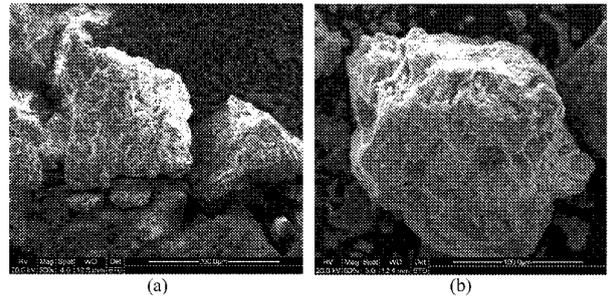


图4 结团颗粒表面 SEM/EDX 分析

Fig. 4 SEM/EDX results of agglomerates

(a) 石英砂结团颗粒 (b) 煤灰结团颗粒

致密,而煤灰颗粒表面的包覆层较为稀松。

对结团颗粒表面物质的 EDX 分析表明(表 6),石英砂渣块颗粒的表面富集了大量的 K、Ca、Mg、Si、Cl 等元素,而煤灰片状物颗粒表面的 Si、Fe 等元素质量分数远远大于前者,K、Ca、Mg 等元素质量分数很小。结合烟秆灰、石英砂、煤灰成分分析可以得出烟秆灰中的含碱金属 K 容易与 Cl、S 等元素形成低熔点的氯化物和硫酸盐,而且石英砂中的  $\text{SiO}_2$  也会与 K 以及碱土金属 Ca、Mg 化合物形成低熔点物质覆盖在床料颗粒表面,这种物质在高温下具有一定粘性,床料颗粒通过这种熔融物质粘结在一起,增大了颗粒碰撞的阻力,熔融程度随着燃烧进一步扩大,

表 6 粘结物表面 EDX 分析

Tab. 6 EDX analysis of agglomerates

%

床料	元素质量分数								
	MgO	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{SO}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	CaO	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Cl
石英砂	4.47	5.79	8.03	2.45	3.74	27.39	39.04		9.09
煤灰	0.20	0.81	49.84		2.05	3.46	0.75	42.89	

从而其粘性阻力增大,导致更多的床料颗粒粘结在一起,并且最终导致失流<sup>[16]</sup>。煤灰中的 Al、Fe 元素能够与烟秆灰中的碱金属化合物生成高熔点物质,这种物质覆盖在颗粒表面阻止了碱金属化合物向低熔点物质的迁移和转化,从而在一定程度上抑制了床料的结团。

为进一步探索煤灰与烟秆灰在高温下的相互作用,取 4 g 的煤灰和烟秆按质量比 1:1 在刚玉坩埚中混合研磨均匀,放入马弗炉中在 900℃ 下灼烧 2 h,实验结束后没有观察到粘结现象,取少量灰样进行 XRD 测试,发现混合物中除了显示含有  $\text{SiO}_2$  外,还含有  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaSO}_4$ 、 $3\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$  和  $\text{Na}_3\text{K}_3\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}$ 。这些化合物的熔点都比较高,低温下不易粘结,进一步证实了煤灰在作为床料时能够抑制结渣。

## 2.4 燃烧过程化学平衡模拟

烟秆中的 K 在燃烧过程中的存在形态对结渣

有着重要影响。用 HSC 5.0 化学平衡软件分析了烟秆与 2 种床料在 400 ~ 1 500℃ 时,过量空气系数为 1.2、给料量为 12 kg/h 的工况下,K 的化学平衡组成和组分浓度。探讨了燃烧中的含 K 化合物的生成,如图 5 所示。在低温下,K 的存在形式主要是  $\text{K}_2\text{SO}_4(\text{s})$ 、 $\text{K}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$  以及少量  $\text{KNO}_3$ ,在高温下,K 转化成气态的  $\text{KCl}$ 、 $\text{K}_2\text{SO}_4$  以及  $\text{KAISiO}_4(\text{K})$ 、 $\text{K}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$ 、 $\text{KAISi}_3\text{O}_8$ 。由于床料的存在,K 在高温下并没有直接以气态形式挥发,而是更多地与床料中的  $\text{SiO}_2$ 、Al 等元素形成化合物。对比 2 幅图可以发现,石英砂做床料时, $\text{K}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$  更容易在较低温度下生成,在高温段,2 种床料下都产生了高熔点的  $\text{KAISiO}_4(\text{K})$ ,但是它在煤灰中的富集趋势较为明显。而随着温度升高,石英砂更容易与 K 反应形成  $\text{K}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$  等低温共融物,含量最后趋于稳定, $\text{KCl}(\text{g})$  的释放也明显比在煤灰中多。

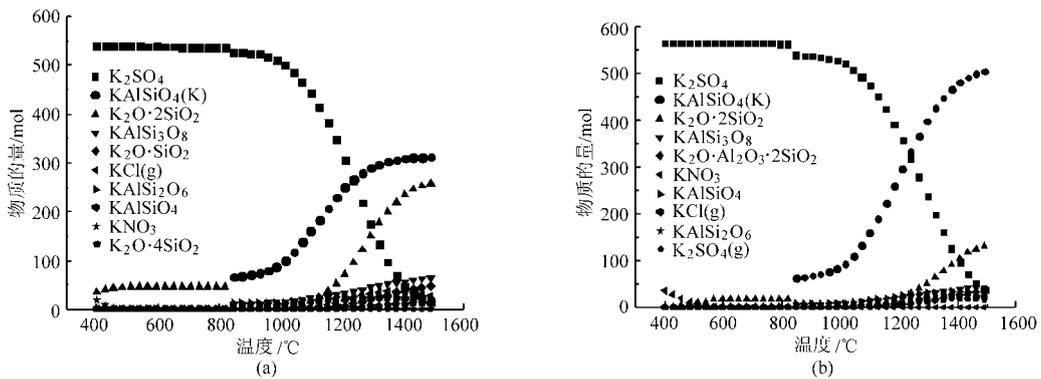


图5 K在烟秆燃烧过程中的热化学平衡组分

Fig. 5 Thermodynamically stable species of potassium in tobacco combustion

(a) 石英砂 (b) 煤灰

可见,随着温度升高,K更容易析出进入气相或者更多地与床料中的 $\text{SiO}_2$ 结合成低共熔晶体,在床料颗粒表面形成粘性包覆层,从而导致结渣、床料聚团等问题。因此,适当地降低燃烧温度,选用低 $\text{SiO}_2$ 的床料能够很好地缓解以上各种问题。

### 3 结论

(1) 烟秆在流化床中与石英砂和煤灰作为床料

燃烧时形成结团具有不同的难易程度。通过2种床料形成结团的尺寸、形态以及实验后床料的粒径分布可以得出,石英砂比煤灰更容易引起燃烧过程中床料的结团,因此煤灰更适合作为床料。

(2) 煤灰中的Al、Fe等元素能够与烟秆灰中的碱金属化合物反应形成高熔点物质,阻止碱金属化合物向低熔点物质的迁移和转化,从而有效控制床料颗粒的结团。

### 参 考 文 献

- 1 吴创之, 马龙隆. 生物质能现代化利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- 2 Lin W G, Dam J, Frandsen K, et al. Agglomeration in bio-fuel fired fluidized bed combustors[J]. Chemical Engineering Journal, 2003, 96(1~3): 171~185.
- 3 Elisabet B, Marcus O, Anders N, et al. Mechanisms of bed agglomeration during fluidized-bed combustion of biomass fuels[J]. Energy & Fuels, 2005, 19(3): 825~832.
- 4 姚冬林, 金保升, 肖刚. 生物质流化床燃烧/气化的烧结特性与机理综述[J]. 锅炉技术, 2009, 40(4): 76~80. Yao Donglin, Jin Baosheng, Xiao Gang. Review on biomass fluidized bed combustion/gasification sintering characteristic and mechanism[J]. Boiler Technology, 2009, 40(4): 76~80. (in Chinese)
- 5 Bartels M, Lin W, Nijenhuis J, et al. Agglomeration in fluidized beds at high temperatures: mechanisms, detection and prevention[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2008, 34(5): 633~666.
- 6 米铁, 陈汉平, 吴正舜, 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 charactersitic study on biomass ash[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2004, 25(2): 236~241. (in Chinese)
- 7 Fabrizio S, Riccardo C. An SEM/EDS study of bed agglomerates formed during fluidized bed combustion of three biomass fuels[J]. Biomass and Bioenergy, 2008, 32(3): 252~266.
- 8 Riccardo C, Francesco M, Fabrizio S, et al. Mechanism and prediction of bed agglomeration during fluidized bed combustion of a biomass fuel: effect of the reactor scale[J]. Chemical Engineering Journal, 2006, 123(3): 71~80.
- 9 Vamvuka D, Zografos D, Alevizos G, et al. Control methods for mitigating biomass ash-related problems in fluidized beds[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(9): 3534~3544.
- 10 马孝琴, 骆仲泱, 方梦祥, 等. 添加剂对秸秆燃烧过程中碱金属行为的影响[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2006, 40(4): 599~604. Ma Xiaoqin, Luo Zhongyang, Fang Mengxiang, et al. Effect of additives on behavior of alkali metals during straw combustion[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2006, 40(4): 599~604. (in Chinese)
- 11 Elisabet B, Marcus O, Anders N, et al. Bed agglomeration characteristics of biomass fuels using blast-furnace slag as bed material[J]. Energy & Fuels, 2004, 18(4): 1187~1193.

(下转第106页)

- 8 Zhang J C, Zeng G M, Chen Y N, et al. Effects of physico-chemical parameters on the bacterial and fungal communities during agricultural waste composting [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3): 2 950 ~ 2 956.
- 9 Kaiser J. Modeling composting as a microbial ecosystem: a simulation approach [J]. *Ecological Modeling*, 1996, 91(1~3): 25 ~ 37.
- 10 席北斗,李英军,张晓萱,等. 垃圾堆肥工艺过程动态模拟及优化研究[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2005, 6(2): 20 ~ 23.  
Xi Beidou, Li Yingjun, Zhang Xiaoxuan, et al. Study on dynamic simulation of composting processes for domestic solid wastes [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2005, 6(2): 20 ~ 23. (in Chinese)
- 11 Mason I G. Mathematical modeling of the composting process: a review [J]. *Waste Management*, 2006, 26(1): 3 ~ 21.
- 12 王永江,黄光群,韩鲁佳. 猪粪好氧堆肥过程有机质降解和热量平衡模型[J]. *农业机械学报*, 2011,42(10): 121 ~ 124, 115.  
Wang Yongjiang, Huang Guangqun, Han Lujia. Modeling of organic matter degradation and thermal balance during pig slurry aerobic composting[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011,42(10): 121 ~ 124, 115. (in Chinese)
- 13 陈同斌,罗维,高定,等. 混合堆肥过程中自由空域(FAS)的层次效应及动态变化[J]. *环境科学*, 2004, 25(6):150 ~ 153.  
Chen Tongbin, Luo Wei, Gao Ding, et al. Stratification of free air space and its dynamics in the process of co-composting [J]. *Environment Science*, 2004, 25(6): 150 ~ 153. (in Chinese)
- 14 罗玮,曾光明. 城市生活垃圾堆肥过程动力学模型研究[J]. *湖南大学学报:自然科学版*, 2005, 32(5): 104 ~ 107.  
Luo Wei, Zeng Guangming. Study on the composting kinetic model of municipal solid waste [J]. *Journal of Hunan University: Natural Science*, 2005, 32(5): 104 ~ 107. (in Chinese)
- 15 张锐. 小型实验室好氧堆肥反应器系统研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.  
Zhang Rui. Study on the bench-scale aerobic composting reactor system [D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 16 王永江,黄光群,韩鲁佳. 自由空域对猪粪麦秸好氧堆肥的影响实验分析[J]. *农业机械学报*, 2011,42(6): 122 ~ 126.  
Wang Yongjiang, Huang Guangqun, Han Lujia. Effects analysis of free airspace to pig slurry wheat straw aerobic composting in laboratory reactor[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011,42(6): 122 ~ 126. (in Chinese)
- 17 Ahn H K, Richard T L, Choi H L. Mass and thermal balance during composting of poultry manure-wood shavings mixture at different aeration rates [J]. *Process Biochemistry*, 2007, 42(2): 215 ~ 223.
- 18 Higgins C, Walker L. Validation of a new model for aerobic organic solids decomposition: simulations with substrate specific kinetics[J]. *Process Biochemistry*, 2001, 36(8~9): 875 ~ 884.
- 19 Kim K Y, Kim H W, Han S K, et al. Effect of granular porous media on the composting of swine manure [J]. *Waste Management*, 2008, 28(11): 2 336 ~ 2 343.
- 20 Iqbal M K, Shafiq T, Ahmed K. Characterization of bulking agents and its effects on physical properties of compost [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(6): 1 913 ~ 1 919.

(上接第 101 页)

- 12 Khan A A, De Jong W, Jansens P J, et al. Biomass combustion in fluidized bed boilers: potential problems and remedies [J]. *Fuel Processing Technology*, 2009,90(1): 21 ~ 50.
- 13 李军,李吉昌,吴晓华,等. 烟草废弃物利用研究[J]. *云南化工*, 2010,37(2): 44 ~ 49.  
Li Jun, Li Jichang, Wu Xiaohua, et al. Progress in research on comprehensive utilization of tobacco waste [J]. *Yunnan Chemical Technology*, 2010,37(2): 44 ~ 49. (in Chinese)
- 14 Elisabet B, Marcus O, Anders A, et al. Mechanisms of bed agglomeration during fluidized-bed combustion of biomass fuels [J]. *Energy & Fuels*, 2005,19(3): 825 ~ 832.
- 15 Olofsson G, Ye Z C, Bjerle I, et al. Bed agglomeration problems in fluidized-bed biomass combustion [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2002,41(12): 2 888 ~ 2 894.
- 16 沈国章,鲁许鳌,钟振成,等. 流化床燃烧麦秸床料团聚结渣研究[J]. *中国电机工程学报*, 2011,31(23): 14 ~ 20.  
Shen Guozhang, Lu Xuao, Zhong Zhencheng, et al. Research on bed agglomeration formed during fluidized bed combustion of wheat straw [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011,31(23): 14 ~ 20. (in Chinese)