

# 污泥及秸秆生物质固体燃料制备中试工艺及燃烧特性

赵培涛, 葛仕福\*, 张长飞, 李 杨, 闫伟伟, 陈振乾

(东南大学能源与环境学院, 能源热转换及其过程测控教育部重点实验室, 南京 210096)

**摘 要:** 为实现污泥的无害化和资源化处置, 该文利用处理量为 24 t/d 的中试试验台, 进行了化学调理剂添加比例、脱水时间、秸秆尺寸等工艺参数对污泥制备固体燃料性能影响的研究。结果表明: 以  $\text{Fe}^{3+}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  为调理剂, 污泥及秸秆等生物质制备固体燃料最佳的铁钙比及燃料压滤最优时间分别为 1:4~1:2 和 6 h; 化学调质法制备的污泥固体燃料存在一个脱水极限, 在脱水压力为 1.2 MPa、秸秆或木屑添加质量比为 10% 时, 污泥固体燃料的质量含水率最低为 40%~50%; 同等条件下, 秸秆越长, 燃料脱水性能越好; 燃料着火点低, 约 500 K, 完全燃烧温度范围窄, 燃烧性能好, 可做替代燃料使用。该文研究成果对降低污泥处理成本、实现污泥的无害化、资源化处置具有重要的理论意义和实用价值。

**关键词:** 秸秆, 污泥处理, 燃烧特性, 化学调质法, 固体燃料, 成型参数

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.09.028

中图分类号: X712

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-09-0165-06

赵培涛, 葛仕福, 张长飞, 等. 污泥及秸秆生物质固体燃料制备中试工艺及燃烧特性[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 165-170.

Zhao Peitao, Ge Shifu, Zhang Changfei, et al. Pilot process and combustion characteristics of sludge-straw derived solid biofuel [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(9): 165-170. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

污泥是污水处理过程中产生的副产物, 是一种由有机残片、细菌菌体、胶体、各种微生物及有机、无机颗粒组成的极其复杂的非均质体<sup>[1]</sup>。所含的有毒污染物、重金属、有害病原体和寄生虫等严重威胁人类的健康。随着污水处理量和处理率逐年提高, 污泥产量急剧增加, 以含水率 80% 计, 全国污泥总产生量将很快突破 3 000 万 t/a<sup>[2]</sup>。因此, 开发一种既能充分利用污泥中的有效成分, 又能实现减量化、稳定化、无害化的污泥处理技术, 是当前污泥处理、处置技术研究的重要方向。

城市污泥中有机物约占 70%~80% (质量分数), 低位干基热值约 14.9~18.2 MJ/kg<sup>[3]</sup>。将污泥制成燃料燃烧不仅可以利用其有机成分、去除污泥中有机污染物及致病菌, 还可将部分重金属离子沉积在灰渣中, 减轻环境污染。相关研究者<sup>[4-6]</sup>从污染物成分、重金属迁移特性等角度研究了污泥的燃烧特性, 应用热重分析法<sup>[7-10]</sup>建立污泥及污泥与其他辅助燃料的燃烧动力学模型。在污泥燃料化方面, Dospy 等<sup>[11]</sup>于 1998 年首次将造纸污泥、煤粉和塑料混合制成衍生燃料并投入工程应用, 结果表明该

种燃料抗压强度较好, 便于运输和储藏, 同时, 焚烧时能形成稳定的骨架, 为燃料的充分燃烧创造较好的条件。为实现污泥的无害化处理和资源化处置, 中国研究者胡光坝<sup>[12]</sup>、蒋建国<sup>[13-15]</sup>、汪恂<sup>[16-17]</sup>、Chen<sup>[18]</sup>、张长飞<sup>[19-20]</sup>等则从工艺条件、燃烧特性等角度研究了污泥制备固体燃料的技术, 但大多都局限于实验室研究, 且技术方案通常是将半干污泥与辅助燃料(煤、木屑、秸秆等)、稳定剂等混合成型后制得燃料, 辅助燃料添加比例大(约 50%)。污泥需要干化或半干化, 一定程度上增加了污泥制备固体燃料的成本, 限制了该技术的应用。本文者在课题组将污泥深度脱水技术与燃料化技术相结合, 在实验室成功将脱水湿污泥(含水率大于 80%)直接制得固体燃料, 取得一定的进展<sup>[19-20]</sup>。

本文以实验室研究为基础, 在处理量为 24 t/d 的中试试验平台上确定化学调节法制备污泥固体燃料的合理工艺条件, 研究影响污泥固体燃料物理、化学和燃烧特性的因素。

## 1 材料及方法

### 1.1 原材料

污泥取自扬中某污水处理厂脱水间, 质量含水率为 82.4%, 干基热值为 10 358 kJ/kg。添加的生物质分别为木屑、稻草、麦秆和梧桐树落叶。木屑取自某木材加工厂, 粉末状, 稻秆、麦秆和树叶分别用粉碎机粉碎 2 次, 筛分后得到长度分别为 50、35、20 和 10 mm 的试验原材料。引燃剂为苯甲酸, 化学调理剂为  $\text{Fe}^{3+}$  和  $\text{Ca}^{2+}$ 。各原料的工业分析如表 1 所示。

收稿日期: 2011-08-31 修订日期: 2012-03-26

基金项目: 国家科技重大专项(水专项)(2010ZX07319-002)

作者简介: 赵培涛(1984—), 男, 博士生, 研究方向为固体废弃物处理及资源化利用。南京 能源热转换及其过程测控教育部重点实验室, 东南大学能源与环境学院, 210096。Email: seupt1985@seu.edu.cn

※通信作者: 葛仕福(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为干燥及多孔介质传热传质。南京 能源热转换及其过程测控教育部重点实验室, 东南大学能源与环境学院, 210096。Email: ge1962@126.com

表 1 各原料工业和热值分析  
Table 1 Proximate analysis of materials

样品名称	质量含水率 $W_{ad}/\%$	工业分析 $w_{ad}/\%$				热值/ (干基, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
		M	A	V	FC	
污泥	82.4	4.01	48.11	43.36	4.53	10 358.47
麦秆	/	9.34	5.18	69.89	15.59	16 827.15
树叶	/	7.12	5.55	70.96	16.37	17 527.26
木屑	/	12.57	1.25	69.71	16.47	16 500.22
稻秆	/	8.60	8.74	68.95	13.71	15 939.38

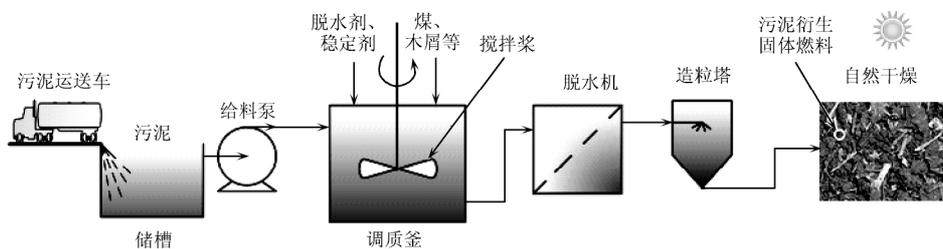
注: M 为内水, A 为灰分, V 为挥发份, FC 为固定碳, 均为质量分数。

## 1.2 试验系统及装置

污泥制备固体燃料工艺流程及中试装置如图 1 所示。

本技术通过添加少量化学药剂及秸秆等生物质, 改变污泥中水分子的结合形态, 提高污泥-秸秆混合物的脱水性能, 直接将湿污泥制成质量含水率 45% 左右的固体

燃料。为使污泥与秸秆等生物质混合均匀, 试验中先加水将脱水湿污泥配制成质量含水率 90% 的泥浆。加入秸秆等生物质后搅拌 10~15 min, 再加入一定量的  $\text{Fe}^{3+}$  和  $\text{Ca}^{2+}$ , 搅拌 10 min 左右, 随后将污泥-秸秆混合物泵送到压滤机中脱水, 制得污泥固体燃料。试验中,  $\text{Fe}^{3+}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  总质量为绝对干污泥质量的 13%,  $\text{Fe}^{3+}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  的质量比(铁钙质量比)在 1:8~1:2 间变化, 生物质的添加量为干污泥质量的 10%。由于原材料热值差异较小, 固体燃料热值主要取决于其含水率的高低, 因此, 本文以固体燃料最终含水率作为燃料性能指标。过滤压力越大, 达到相同含水率所需的脱水时间越短<sup>[19-20]</sup>, 因此, 本文中脱水压力取为 1.2 MPa。为使研究更具工程指导意义, 文还比较分析了中试与实验室制备的固体燃料物理性能的差异性。



a. 污泥制备固体燃料工艺流程



b. 中试试验装置

图 1 污泥及秸秆等其他生物质制备固体燃料中试工艺及装置

Fig.1 Pilot process and equipment for producing sludge-straw derived biofuel

## 1.3 测试方法

采用 SFY-60A 型红外水分测定仪测定燃料质量含水率, 质量范围 0~60 g, 最小读数 0.001 g, 温度范围为 293~523 K, 功率 270 W, 频率 50 Hz。热值用 SXHW-2 数显恒温量热仪测量, 温度范围为 273~313 K, 分辨率 0.0001 K。

## 2 结果与分析

### 2.1 工艺参数对燃料性能的影响

#### 2.1.1 脱水时间

为研究脱水时间对污泥制备固体燃料含水率的影响, 将脱水湿污泥加水配制成质量含水率为 90% 的泥浆后加入粉碎后的树叶(干污泥质量的 9.13%), 搅拌均匀

并投加干污泥质量 3% 的  $\text{Fe}^{3+}$  和 10% 的  $\text{Ca}^{2+}$ , 搅拌后泵送至压滤机中脱水, 固体燃料含水率随脱水时间的变化如图 2 所示。可以看出, 固体燃料的含水率随脱水时间的延长而降低, 大约 4 h 后, 燃料的含水率降至 50% 左右; 压滤 6 h 后, 污泥固体燃料的含水率为 45.66%; 压滤 21 h 后, 污泥固体燃料的含水率仅降至 42.52%, 含水率的降低幅度大幅减小, 与压滤 6 h 的污泥固体燃料相比含水率仅降低了 3.14%, 而脱水时间则延长了 2.5 倍。图 2 表明采用该技术时, 燃料脱水存在一个极限, 此时固体燃料含水率大致为 40%~50%。污泥固体燃料的含水率越接近极限值, 脱水越困难, 延长脱水时间不能有效降低污泥固体燃料的含水率、提高燃料的湿基热值, 却会增加燃料的生产成本。因此, 取最佳脱水时间 6 h。

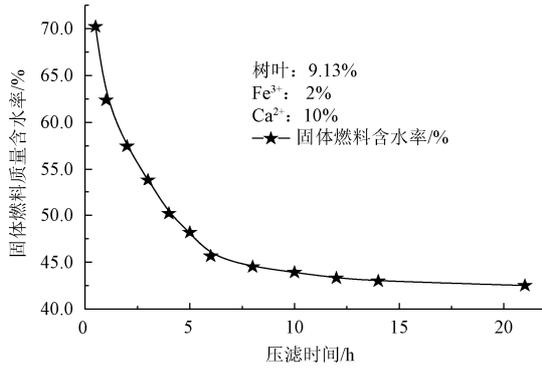


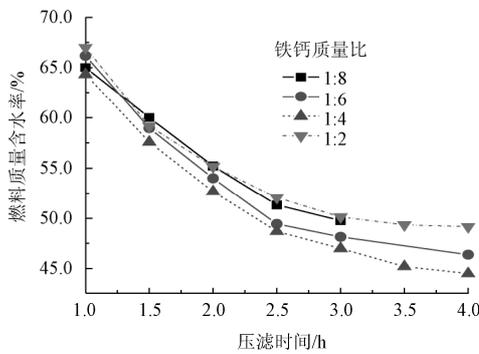
图 2 脱水时间对污泥固体燃料含水率的影响

Fig.2 Influence of dewatering time on moisture content of sludge derived biofuel

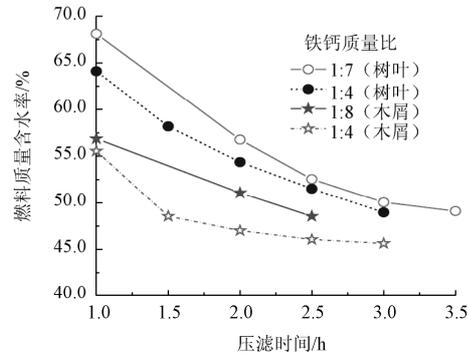
2.1.2 调理剂用量

基于课题组前期研究结果<sup>[18-19]</sup>, 本文试验中控制药剂的添加总量为干污泥质量的 13%。不同铁钙比下污泥

及稻秆制备的燃料的含水率随脱水时间的变化如图 3a 所示, 压滤 3 h 后, 随着铁钙比的增加, 燃料的含水率分别为 51.34%、49.44%、47%和 50.14%, 且在脱水时间相同时, 燃料含水率随铁钙比的变化趋势与此相同。从图中还可看出, 在铁钙比由 1:8 增至 1:4 的过程中, 燃料含水率随铁钙比的增加而降低, 但当铁钙比增大至 1:2 时, 同等条件下燃料含水率反而越高。图 3b 示出了以树叶和木屑为原料时, 不同铁钙比下燃料含水率随脱水时间的变化。以树叶为原料时, 1:7 和 1:4 两种铁钙比中以 1:4 时燃料的含水率更低, 压滤 2 h 后, 燃料的含水率可降至 54%。以木屑为原料时, 1:8 和 1:4 两种铁钙比中以 1:4 时燃料的含水率更低, 压滤 2 h 后可降至 47%。根据污泥固体燃料含水率随铁钙比的变化趋势, 在调理剂总用量为 13%时, 对于本文以污泥和秸秆(木屑、稻秆、麦秆、树叶)为原料, Fe<sup>3+</sup>和 Ca<sup>2+</sup>为调理剂, 化学调质法制备污泥固体燃料, 最佳铁钙质量比在 1:4~1:2 之间。



a. 污泥及稻秆制备燃料的含水率变化



b. 污泥及树叶、木屑制备燃料的含水率变化

图 3 铁钙比对燃料含水率的影响

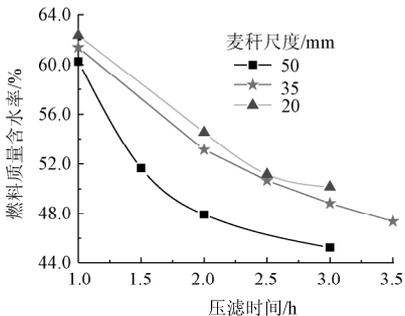
Fig.3 Effect of Fe<sup>3+</sup>/Ca<sup>2+</sup> ratio on moisture content of sludge-straws derived biofuel

2.1.3 一定秸秆添加量条件下秸秆尺度

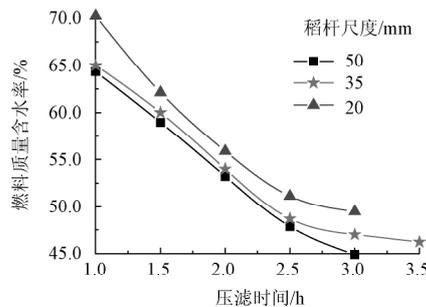
由表 1 可看出, 秸秆的挥发性远好于污泥, 更易于燃烧, 因此, 秸秆的添加比例越高, 污泥及秸秆制备的固体燃料的燃烧性能越好。但为提高污泥处理率, 秸秆的添加比例越小越好, 结合已有研究成果, 本文研究中取秸秆的添加比例为干污泥质量的 10%。

秸秆尺寸不仅会影响固体燃料的脱水性能, 还会影响

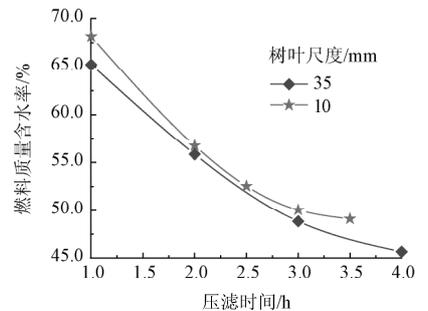
污泥固体燃料的生产成本。不同尺度的秸秆制备的固体燃料含水率的变化如图 4 所示。以 50、35 和 20 mm 的麦秆制备污泥固体燃料, 在 1.2 MPa 下压滤 1 h 后, 不同尺寸麦秆制备的燃料的含水率相差不大; 压滤 2 h 后, 以平均长度为 50 mm 的麦秆制备的污泥固体燃料的含水率为 47.92%, 低于 35 和 20 mm 的麦秆制得燃料的含水率。再压滤, 呈现出相同的变化规律。以不同尺寸的稻秆为原料



a. 麦秆尺度对固体燃料脱水性能的影响



b. 稻秆尺度对固体燃料脱水性能的影响



c. 树叶尺度对固体燃料脱水性能的影响

注: 脱水压力为 1.2 MPa; 秸秆的添加比例为干污泥质量的 10%。

图 4 秸秆尺度对固体燃料脱水性能的影响

Fig.4 Effects of straw size on moisture content of biofuels

时, 压滤 3 h 后, 以 50 mm 的稻秆制备的燃料的含水率为 44.86%, 而以 35 和 20 mm 的稻秆制备的燃料含水率则分别为 47% 和 49.77%。同样, 以不同尺寸的树叶为原料时, 35 mm 的树叶比 10 mm 的树叶制备的燃料含水率低, 但幅度较小。这是由于树叶呈扁平状, 而麦秆、稻秆呈纤维状, 说明纤维状物质对机械脱水性能的影响较大。总之, 平均直径大的秸秆与污泥混合调质制备污泥固体燃料时燃料的脱水性能更好, 相同脱水时间下燃料的含水率更低。

2.2 污泥衍生固体燃料燃烧特性

为研究污泥及秸秆等其他生物质制备污泥固体燃料的燃烧特性, 取污泥-木屑制备的固体燃料, 通过量热仪测得燃料的净热值为 3 260 kJ/kg。取研磨后的样品 20 mg 左右放入差热天平的坩埚内, 在 70 mL/min 的空气氛围中, 以 15 K/min 的升温速率加热污泥固体燃料至完全燃烧, 图 5 示出了污泥燃烧的热重 (TG) 和微分热重 (DTG) 曲线。可看出燃料大致经历了水分蒸发、挥发份析出、燃烧和固定碳燃烧 3 个阶段。随着炉温的升高, 样品中的水分快速析出, 样品质量迅速减小, 水分蒸发结束后, 样品分为有机质和无机质 2 部分, 样品质量暂时恒定。随后在较高温度下, 样品中挥发份开始析出并着火, 样品质量又开始减少, 燃烧完成后, 样品质量保持不变。

发速率最大为 3.62 mg/min。2) 挥发份析出和燃烧阶段, 温度范围为 453~800 K, 对应时间为 14~35 min; DTG 曲线在 549 K (18.24 min) 和 732 K (30.16 min) 处各有一峰值, 分别为 0.34 和 0.38 mg/min。双峰的产生是由有机物挥发性的不同导致的。3) 固定碳燃烧阶段, 温度范围为 890~960 K, 对应时间为 40~46 min, 最大失重速率为 0.05 mg/min。尽管燃料中固定碳含量低, 固定碳完全燃烧的时间仍较长, 表明固定碳燃烧阶段活化能最高。

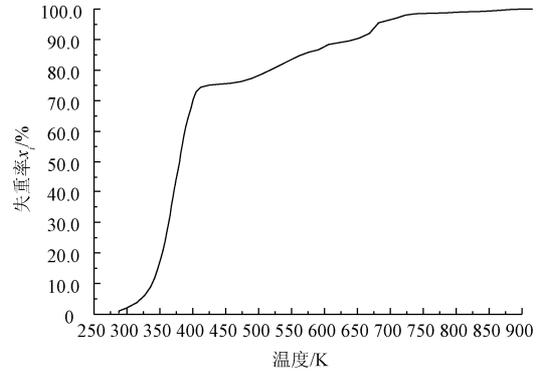


图 6 污泥-木屑制备固体燃料的失重率曲线

Fig.6 Weight loss rate curve of sludge-sawdust derived biofuel

综合分析以上数据可看出, 利用化学调质法制备的污泥固体燃料具有一定的燃烧热值, 燃料着火点活化能低, 为 500 K, 易点燃, 且大部分可燃物能在较低的温度范围内 (290~800 K) 完全燃烧, 燃烧性能较好, 可做替代燃料使用, 说明通过该工艺制备污泥及秸秆固体燃料是可行的。

2.3 中试试验与实验室制备的固体燃料的比较

中试与实验室试验化学调节法制备污泥固体燃料的条件及样品对比如表 2 所示。试验中, 调质剂用量指各原材料绝干固体质量与污泥干质量的比值, 其顺序为 Fe<sup>3+</sup>:Ca<sup>2+</sup>:木屑:粉煤灰。

表 2 中试与小试试验条件及样品比较

Table 2 Comparison of operating conditions and samples between pilot scale and lab scale

类别	编号	辅助物料种类	调质剂用量(DS)	过滤压力/MPa	脱水时间/h	含水率/%	热值/(干基, kJ·kg <sup>-1</sup> )	净热值/(kJ·kg <sup>-1</sup> )
小试 <sup>[18-19]</sup>	A	煤粉	0.03:0.1:0.4:0	0.6	2	50.00	11 805.3	4 342.1
	B	煤粉	0.03:0.1:0.1:1.25	1.2	1	36.74	3 462.3	1 360.0
	C	木屑	0.03:0.1:0.1:1.25	1.2	1	38.76	2 568.2	696.8
中试	D	木屑	0.03:0.1:0.1:0	1.2	1.5	56.38	10 280.2	3 260.1

注: 调质剂用量指各原材料绝干固体质量与污泥干质量的比值, 其顺序为 Fe<sup>3+</sup>:Ca<sup>2+</sup>:木屑:粉煤灰。

表 2 表明中试制备的污泥固体燃料的含水率较高。这是由于在 Fe<sup>3+</sup>、Ca<sup>2+</sup>用量相同 (0.03:0.1) 情况下, 小试中辅助物料的添加比例大, A 中煤的添加质量为 D 中木屑添加质量的 4 倍, 而 B、C 中则添加了大量的煤灰 (质量为干污泥质量的 1.25 倍), 添加的辅助物料极大地增加了燃料的固体含量, 有助于降低燃料的质量含水率。

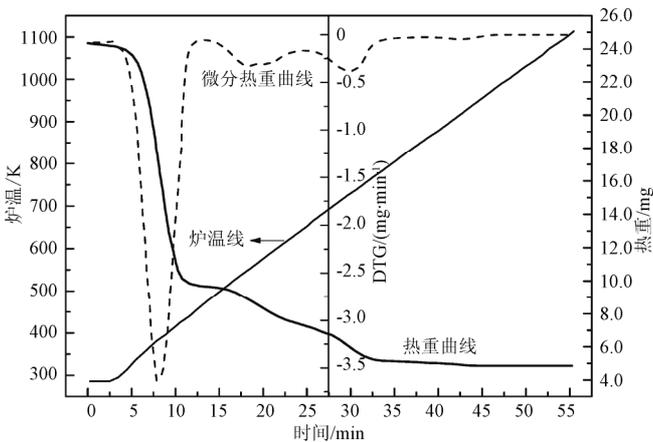


图 5 污泥-木屑制备固体燃料的燃烧特性曲线

Fig.5 TG and DTG curves of sludge-sawdust derived biofuel

定义燃料燃烧时的失重率为  $x_i$ <sup>[20-21]</sup>

$$x_i = \frac{w_0 - w_i}{w_0 - w_\infty} \times 100\%$$

式中,  $w_0$  为试样初始质量, mg;  $w_i$  为着火温度  $T_i$  时试样的质量, mg;  $w_\infty$  为完全燃烧后试样的最终质量, mg; 根据热重试验结果整理得污泥固体燃料燃烧过程中失重率随温度的变化规律如图 6 所示, 燃烧温度在 800 K 左右时, 污泥固体燃料的失重率达 98%。

由图 5 通过切线法对 TG 曲线做切线, 得知燃料着火温度为 500 K。结合图 5 和 6, 可得出燃料的燃烧中 3 个阶段的特性参数分别为: 1) 样品干燥阶段的温度范围为 290~433 K, 对应时间为 3~11 min; DTG 曲线在 381 K (7.89 min) 有一峰值, 此时燃料干燥速率最大, 水分蒸

从表 2 还可以看出: 尽管中试制备污泥固体燃料时木屑的添加量仅为 10%, 质量含水率相对较高, 但与其他 3 组相比, 净热值也较高。4 种燃料中, 中试 D 的净热值高于小试的 B、C, 但低于小试 A。这是由于小试燃料制备过程中 A、B 组中添加了 40% 的煤, 提升了固体燃料的热值; 而 B、C 中为了降低燃料的含水率而添加了大量 (125%) 的煤灰, 大幅降低了燃料的净热值, 同时还增加了燃料的体积; 而中试仅添加木屑, 通过化学调质改善污泥的脱水性能, 固体燃料的净热值仍较高, 燃烧性能较好, 该结果具有一定的工业应用参考价值。

与其他污泥燃料化技术工艺相比, 该技术通过化学调质改善污泥的脱水性能, 将污泥制成固体燃料, 有效降低了辅助物料的添加比例 (从 50% 降到 10%), 提升污泥本身热值, 制备的燃料热值较高; 同时, 该工艺省却了污泥干化或半干化环节, 降低污泥燃料化过程中的能量消耗, 从而降低了污泥的处理成本。结果表明, 该技术能低成本地实现污泥的无害化处置和资源化利用, 具有较好的应用前景。

### 3 结 论

本文以污泥和稻秆、麦秆、树叶及木屑为原料, 在日处理量为 24 t 的中试试验台上进行了化学调质法污泥制备固体燃料主要工艺参数对其燃烧性能影响的研究, 得到以下结论:

1) 在脱水压力为 1.2 MPa、秸秆或木屑添加质量比为 10% 时, 化学调质法制备的污泥固体燃料的质量含水率最低为 40%~50%, 最佳脱水时间为 6 h。

2) 以  $\text{Fe}^{3+}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  为调理剂, 总用量为干污泥质量的 13% 时, 污泥及秸秆等生物质制备固体燃料最佳的铁钙质量比为 1:4~1:2。

3) 秸秆尺寸会影响燃料的脱水性能, 相同条件下, 秸秆越长, 制得的燃料的质量含水率越低。

4) 污泥及秸秆制备的固体燃料的净热值可达 3 260 kJ/kg, 其燃烧过程分为干燥、挥发份析出及燃烧、固定碳燃烧 3 个阶段, 温度范围分别为 290~433、453~800 和 890~960 K, 燃烧的着火点为 500 K, 800 K 时燃料失重率可达 98%, 燃烧性能好。

#### 【参 考 文 献】

[1] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 农业化学常规分析法 [M]. 北京: 科学出版社, 1989, 91—93.

[2] Ministry of Environmental protection, State of discharge and treatment of wastewater in fiscal year 2008, 2009. See <http://www.stats.gov.cn/tjsj/qtsj/hjtjzl/hjtjsj2009/index.htm>.

[3] Gomez-Rico F M, Font R, Fullana A, et al. Thermogravimetric study of different sewage sludges and their relationship with the nitrogen content[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2005, 74(3): 421—428.

[4] Lopes M H, Abelha P, Santos Oliveira J F, et al, Heavy metals behavior during mono-combustion and co-combustion of sewage sludge[J]. Environmental Engineering Science, 2005, 22(2): 205—220.

[5] Xiao Hanmin, Ma Xiaoqian, Liu Kai. Co-combustion kinetics of sewage sludge with coal and coal gangue under different atmospheres[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(10): 1976—1980.

[6] Wang Qunying, Zhang Lian, Sato A, et al. Mineral interactions and their impacts on the reduction of PM10 emissions during co-combustion of coal with sewage sludge[J]. Proceeding of the Combustion Institute, 2009, 32(2): 2701—2708.

[7] 何必繁, 王里奥, 黄川. 重庆市污泥燃烧及动力学特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(35): 32—37.

He Bifan, Wang Li'ao, Huang Chuan. Study on combustion characteristics and kinetics of Chongqing municipal sewage sludge[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(35): 32—37. (in Chinese with English abstract)

[8] Sanchez M E, Otero M, Gómez C, et al. Thermogravimetric kinetic analysis of the combustion of biowastes[J]. Renewable Energy, 2009, 34(6): 1622—1627.

[9] Liao Yanfen, Ma Xiaoqian. Thermogravimetric analysis of the co-combustion of coal and paper mill sludge[J]. Applied Energy, 2010, 87(11): 3526—3532.

[10] 万嘉瑜, 金余其, 池涌. 不同氧气浓度下城市污泥燃烧特性及动力学分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(5): 35—40.

Wan Jiayu, Jin Yuqi, Chi Yong. Study on combustion characteristics and kinetics of municipal sludge under different oxygen concentrations[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(5): 35—40. (in Chinese with English abstract)

[12] Dospoy R L, Raleigh C E, Harrison C D, et al. Pelletized Fuel Composition and Method of Manufacture[P]. US Patent 5743924, 1998-4-28.

[12] 胡光坝, 洪云希. 城市污泥合成燃料的应用研究[J]. 中国给水排水, 1996, 2(12): 13—16.

[13] Jiang Jianguo, Du Xuejuan, Yang Shihui. Analysis of the combustion of sewage sludge-derived fuel by a thermogravimetric method in China[J]. Waste Management, 2010, 30(7): 1407—1413.

[14] 蒋建国, 杜雪娟, 杨世辉, 等. 城市污水厂污泥衍生燃料成型的研究[J]. 中国环境科学, 2008, 28(10): 904—909.

Jiang Jianguo, Du Xuejuan, Yang Shihui, et al. Study on the granulating characteristics of sewage sludge derived fuel[J]. China Environmental Science, 2008, 28(10): 904—909. (in Chinese with English abstract)

[15] 蒋建国, 杜雪娟. 城市污水处理厂污泥半干化合成燃料棒技术研究[C]//第六届亚太地区基础设施发展部长级论坛暨第二届中国城镇水务发展国际研讨会论文集. 北京: 中国城市出版社, 2007: 489—497.

Jiang Jianguo, Du Xuejuan. Study on part drying and briquetting of sewage sludge as fuel[C]//The 2<sup>nd</sup> International Conference for China Urban Water Development and Expo of New Technologies and Facilities for Water Treatment. Beijing, China: MOHURD, 2007: 489—497. (in Chinese with English abstract).

[16] 汪恂, 姜应和, 李行佳. 炭化污泥与煤成型煤的试验与研究[J]. 武汉工业大学学报, 2000, 22(1): 37—40.

- Wang Xun, Jiang Yinghe Li Xingjia. Experiments and researches on shaped coal mixed coal with charry sludge[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2000, 22(1): 37–40. (in Chinese with English abstract)
- [17] 汪恂. 污泥合成燃料试验研究[J]. 国外建材科技, 2002, 23(4): 57–58.
- [18] Chen Weisheng, Chang Fangchih, Shen Yunhwei, et al. The characteristics of organic sludge/sawdust derived fuel[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(9): 5406–5410.
- [19] 张长飞, 葛仕福, 赵培涛, 等. 污泥燃料化技术研究[J]. 环境工程(增刊), 2010, 28(增刊 1): 377–380.
- Zhang Changfei, Ge Shifu, Zhao Peitao, et al. Research on sludge fuel techniques[J]. Environmental Engineering, 2010, 28(Supp.1): 377–380. (in Chinese with English abstract)
- [20] 张长飞, 葛仕福, 赵培涛, 等. 污泥合成燃料的研制及燃烧特性研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(1): 130–135.
- Zhang Changfei, Ge Shifu, Zhao Peitao, et al. Development of synthetic sludge fuel and measurement of its combustion properties[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(1): 150–155. (in Chinese with English abstract)
- [21] 曹晓哲, 刘建忠, 赵卫东. 煤泥水煤浆燃烧特性的热重研究[J]. 煤炭学报, 2009, 34(10): 1394–1398.
- Cao Xiaozhe, Liu Jianzhong, Zhao Weidong. A thermogravimetry investigation on the combustibility of coalslime water slurry [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(10): 1394–1398. (in Chinese with English abstract)

## Pilot process and combustion characteristics of sludge-straw derived solid biofuel

Zhao Peitao, Ge Shifu\*, Zhang Changfei, Li Yang, Yan Weiwei, Chen Zhenqian

(Education Ministry Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control, School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** To realize the harmless treatment and recycling of sludge, the influences of operation conditions (the ratio of  $\text{Fe}^{3+}$  to  $\text{Ca}^{2+}$ , dewatering time and size of straws) on physical properties of sludge-straw derived solid biofuel were experimentally studied on a pilot experimental device with a capacity of 24 t/d. The results showed that the optimal ratio of  $\text{Fe}^{3+}$  to  $\text{Ca}^{2+}$  and dewatering time were 1:4~1:2 and 6 h respectively, and there was a dewatering limit for chemical conditioning to produce sludge-straw derived fuel. The values of moisture content was about 40%~50% under the condition that the dewatering pressure and ratio of sludge to straw were 1.2 MPa and 10:1 respectively. The biofuel produced with longer straw had lower moisture content. Thermogravimetric analysis showed that the biofuel had good combustion performance with low ignition point (about 500 K), narrow range of combustion temperature, and could be used as substituted fuel. This study can provide theoretical and practical references for realizing the recycling and innocuous treatment of sewage sludge cost-effectively.

**Key words:** straw, sludge disposal, combustion, chemical conditioning, solid fuel, operation conditions