

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.016

# 农业秸秆烘焙特性及其产物能源特性的影响\*

陈应泉 杨海平 朱波 郝宏蒙 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】** 农业秸秆由于含水量高、能量密度低、不易储存等优点,限制了其规模化应用。以稻秆、棉秆等典型秸秆为研究对象,采用固定床反应器研究了秸秆的烘焙及其对秸秆物化特性的影响。结果表明:烘焙后农业秸秆表观体积明显缩小,粒度分布更加均一化,可磨性能得到显著提升;固体含氧官能团数量减少,同时固定碳含量显著提升,氧含量明显降低,发热量明显提高;然而烘焙后质量产率和能量产率均有所降低,但能量产率始终优于质量产率。烘焙有利于秸秆能源特性的提高和物化特性的改善,对提高生物质品质有积极的作用。

**关键词:** 农业秸秆 烘焙 红外分析 能量产率

**中图分类号:** TK6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)04-0075-08

## Torrefaction of Agriculture Straw and Its Effect on Material and Energy Characteristics

Chen Yingquan Yang Haiping Zhu Bo Hao Hongmeng Wang Xianhua Chen Hanping

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

### Abstract

The shortcomings such as high water content, low energy density and difficulty to storage, have limited the large-scale applications of agricultural straw. The torrefaction characteristic of four typical straws in China such as rice straw, cotton stalks, corn stalks, wheat straw, was investigated, which was carried out in the fixed-bed reactor and focused on the evolution of physical and chemical properties of straw during torrefaction. After torrefaction, the apparent volume of agricultural straw was significantly reduced and a more uniform distribution of particle size was observed which suggested the grinding performance could be significantly improved. Meanwhile, the number of solid oxygen-containing functional groups in the solid product reduced. The significantly increasing of the fixed carbon content and the significantly decreasing of the oxygen content improved the heat value of solid products. Although the mass and energy production yield ratio decreased after torrefaction, the energy production yield ratio was better than the mass. The torrefaction was benefit to the improvement of energy property and material characteristics of straw and had a positive effect on the quality of biomass material.

**Key words** Agricultural straw, Torrefaction, Infrared analysis, Energy production yield ratio

### 引言

生物质能储量丰富<sup>[1-2]</sup>,且污染物排放低、CO<sub>2</sub>近零排放,具有替代化石能源的潜力<sup>[3]</sup>。然而生物

质具有含水量高、含氧量高、不易储存、较难破碎等缺点,使得其气化或液化后产物热值及品质较低<sup>[4]</sup>。因此采用合理的预处理方式解决上述问题成为当前的研究热点<sup>[5]</sup>。

收稿日期: 2011-06-23 修回日期: 2011-07-30

\* 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: 陈应泉, 博士生, 主要从事生物质热解多联产研究, E-mail: chyq721@163.com

通讯作者: 杨海平, 副教授, 博士生导师, 主要从事生物质高值化转化研究, E-mail: yhp2002@163.com

烘焙是一种常压、无氧的情况下,在 200 ~ 300℃ 内的慢速热解过程。烘焙后生物质疏水性增强,易于储存和运输<sup>[6-7]</sup>。Bergman 等对木屑的烘焙研究表明,烘焙可大幅降低生物质原料的运输费用;若与压缩成型结合,生物质热转化经济性可提高 30% ~ 70%<sup>[8]</sup>。Phanphanich 等研究了烘焙对林业废弃物可磨性的影响,经烘焙后其可磨性得到明显改善,粉碎耗能为 23 ~ 78 kW·h/t,与烟煤相当,而粉碎 1t 木屑原样耗能为 237 kW·h<sup>[9]</sup>。经烘焙后,生物质原料结构更均匀,有利于生物质的燃烧与气化<sup>[10-11]</sup>。Prins 等研究了柳枝、落叶松等烘焙后的燃烧特性,发现烘焙后其排烟量明显减少<sup>[12]</sup>。Couhert 等研究了山毛榉材烘焙后的气化特性,发现烘焙后气化产气中 CO 和 H<sub>2</sub> 的产量有明显提高(7% ~ 20%)<sup>[13]</sup>。Prins 等在对生物质气化系统的热动力学计算分析时发现若与烘焙相结合,气化效率可明显提高<sup>[14]</sup>。然而,关于生物质的烘焙过程及其对生物质理化结构的影响鲜有涉及。我国有大量农业秸秆,烘焙后利用的效果可能更好,但是目前我国在农业秸秆的烘焙特性及其产物物化特性的研究还很少开展。鉴于此,本文以我国典型的农业秸秆——稻秆、麦秆、棉秆和玉米秆为研究对象,采用固定床反应器对不同温度下的烘焙过程及其对产物能源特性的影响进行分析,为进一步研究烘焙工艺、建立合理的烘焙技术提供理论依据。

## 1 实验样品及方法

### 1.1 原料选取与制备

实验选取稻秆、麦秆、棉秆和玉米秆为原料,经粉碎和筛分后选择小于 40 目的样品进行脱外水处理(55℃,16 h),然后用密封袋封装放入干燥塔内备用。样品的工业分析、元素分析、低位热值如表 1 所示。表中数据均基于空气干燥基测得。从表中可知,生物质中挥发分含量较高,N、S 含量很低,可有效降低 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 等气体的生成,而 O 含量较高,发热量可达 17 MJ/kg,相比化石能源较低,为提高生物质的能量密度,需要尽量降低生物质中 O 含量。

### 1.2 实验装置及方法

农业秸秆烘焙实验在立式固定床反应器中进行,其内径为 38 mm,高度为 600 mm;实验采用电加热方式,电炉以 20℃/min 升至设定烘焙终温:200、230、260 和 290℃。每次实验放入粒径为 2 cm 的样品 5 g。载气为 500 mL/min 的高纯 N<sub>2</sub>(99.99%)。待炉温升到设定温度并保持恒定 10 min 后,将样品快速放入反应器中恒温 30 min。反应结束后,关闭电炉,待反应物冷却至 60℃ 以下,取出固体产物放

置干燥器中冷却至室温后收集并称量;液体产物经冰水混合物冷凝后称其质量;气体产物的产率则通过差减法得到。

表 1 生物质样品物性参数

Tab. 1 Basic analysis of biomass samples

参数	质量分数/%				
	稻秆	麦秆	棉秆	玉米秆	
元素分析	C	37.52	40.35	45.22	42.68
	H	5.92	5.95	6.34	6.21
	N	1.16	0.55	1.15	1.22
	S	0.13	0.27	0.34	0.32
	O*	42.49	35.59	37.70	36.30
工业分析	水分	5.04	4.38	4.66	5.02
	挥发分	82.12	68.51	74.96	70.17
	灰分	7.74	12.91	4.59	8.25
	固定碳	5.10	14.19	15.80	16.56
低位热值/MJ·kg <sup>-1</sup>	17.23	16.13	17.77	16.84	

注:\* O 质量分数由差减法算得。表 3 同。

采用便携红外多组分煤气分析仪(Gasboard-3100P 型,四方光电科技有限公司,武汉)对烘焙气体产物进行在线测试,该仪器可同时测量 CO、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 5 种气体组分的浓度。

液体产物中有机组分采用气相色谱质谱联用分析仪(GC-MS7890A/5975C 型)进行分析,所用 GC 色谱柱 HB-5。GC 运行条件是:在 50℃ 保持 10 min,后以 8℃/min 的升温速度升至 250℃ 并保持 10 min,流量为 1 mL/min,进样量为 1 μL。MS 条件:电离方式 EI,电子轰击能量 70 eV,光电倍增管电压 500 V,扫描时间 1 s。采用化学工作站谱库检索对结果进行匹配分析。

烘焙后的固体产物分别在西班牙 Las Navas 公司的 SDTGA-2000 型工业分析仪和德国 Vario 公司 EL-2 型的元素分析仪进行工业分析、元素分析。采用 Friedl 等<sup>[15]</sup>总结的计算方法得到秸秆在干燥基下的高位发热量(HHV)计算结果,计算式为

$$Q_{\text{HHV}} = 1.87w_{\text{C}}^2 - 144w_{\text{C}} - 2802w_{\text{H}} + 63.8w_{\text{C}}w_{\text{H}} + 129w_{\text{N}} + 20147 \quad (1)$$

式中  $w_{\text{C}}$ 、 $w_{\text{H}}$ 、 $w_{\text{N}}$ ——烘焙产物碳、氢、氮元素质量分数

为了进一步分析烘焙对农业秸秆可磨性能的研究,对样品进行相同条件的破碎(台湾 Chyun Tseh Industrial Co., Ltd.),然后过 100 目筛 5 min,对小于 100 目的样品采用英国 Malvern 公司的激光粒度分析仪(Master Min)进行粒径分析。

在德国 Bruker 公司的 VERTEX 70 型傅里叶变

换显微红外/拉曼光谱仪(FT-IR)上进行固体产物的有机官能团分析。FT-IR分析条件为:波数扫描范围为 $4\,000\sim 400\text{ cm}^{-1}$ ,分辨率优于 $0.5\text{ cm}^{-1}$ ,并实现动态调整。溴化钾与样品的混合比例是200:1。

## 2 结果与讨论

### 2.1 秸秆的烘焙产物特性

秸秆在不同温度下烘焙产物分布特性如图1所示,每一温度由左至右依次表示稻秆、麦秆、棉秆和玉米秆。从图中可以看出,200℃和230℃烘焙时,烘焙后的固体产量均较高,约为90%左右,但是随着烘焙温度的进一步提高(大于260℃),4种样品的固体产率急剧下降,液体和气体产率逐步提高,转化率增加了近一倍,这主要因为温度升高使得秸秆中的半纤维素逐渐热解,所含有机碳氢化合物挥发析出,且高温有利于其热解析出。

烘焙过程中气体产物析出特性如图2所示。生物质烘焙过程中主要为CO和CO<sub>2</sub>的析出,CO的析

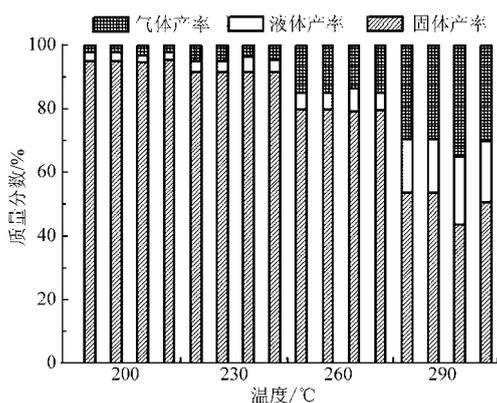
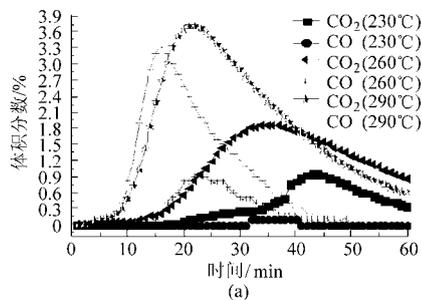


图1 秸秆烘焙产物分布特性

Fig. 1 Product distribution after torrefaction

出稍早于CO<sub>2</sub>,但CO<sub>2</sub>的体积分数明显高于CO,且随着烘焙温度的升高,析出量明显增加。其可能原因是低温下半纤维素中C—O—C易于断裂形成CO和C=O,而随着时间的推移C=O逐渐断裂,形成CO<sub>2</sub>,而高温有利于C—O—C与C=O键的断裂,进而析出更多的气体产物<sup>[16]</sup>。

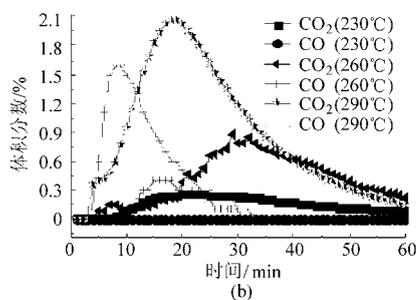


图2 秸秆烘焙气体产物析出曲线

Fig. 2 Releasing characteristic of gas product during torrefaction

(a) 棉秆 (b) 稻秆

在200~300℃的低温区烘焙时,生物质中有机碳氢化合物的析出较少,所得液体产物量少,且主要为水分,是一种黄褐色有刺激性气味的液体。对稻秆和棉秆液体产物进行GC-MS分析,结果如表2所示。提高烘焙温度可使液体产物的成分变得复杂,各物质相对含量也有明显的变化。液体中主要是乙酸、醇类和糠醛等物质;并且随着温度的提高,乙酸质量分数有明显的提高,稻秆230~290℃提高了约6倍,棉秆提高了6.5倍,而甲醇质量分数明显降低(稻秆降低了80%,棉秆降低了87.5%)的同时1-羟基-2-丙酮质量分数明显提高(稻秆增至12%,棉秆增至18%)。这主要是由于随着温度的提高,生物质中半纤维素支链更加不稳定,得到进一步分解,其分子内的羟基脱落,形成了水、羰基,并同时发生脱羧基反应,支链之间部分环内的C—O、C—C键断裂,从而形成较多的含有酸、醇、醛等液体产物<sup>[17]</sup>,并在不同温度下发生特定的化学反应,导致酸醇产物的含量变化。

### 2.2 烘焙秸秆的物理形貌演变特性

图3为烘焙前、后产物的表观形貌图片,由左至右分别为4种不同样品原样、200、230、260和290℃时的外观形貌。由图可知,提高烘焙温度,固体产物由黄色逐渐变为褐色直至变为黑色,其表观体积明显缩小,而且在230~290℃时,固体产物变得脆而易碎,其形状向圆柱形或球形转变,而且这种固体产物具有一定的疏水性能<sup>[18-19]</sup>。

图4所示为生物质原样与经过不同温度烘焙后产物的可磨性对比。从图中可以看出,原始生物质经粉碎至小于100目后,大于470 μm的颗粒很少,为5%左右,小于100 μm的颗粒约占20%~30%左右;经过低温烘焙后,固体产物可磨性得到了很大改善,大于470 μm的颗粒随着烘焙温度的提高进一步降低,而小于100 μm的颗粒数大幅增加,上升至50%左右。

对比4种生物质样品,粒径分布均一化顺序由大到小依次为:棉秆、玉米秆、稻秆、麦秆。可

能是麦秆、稻秆等表层结构致密,由无定形木质素构成的细胞壁附着在由半纤维构成的微纤维束上,其强度较高,导致其很难破碎;而棉秆所含木质素含量较高,其表面的纤维结构较其他生物质松弛。低温烘焙使得半纤维素大部分分解,并使其在木质素中的微纤维取向发生变化,从而影

响到生物质秸秆的韧性<sup>[20]</sup>,而且烘焙使得生物质颗粒在长度方向减小,形状向球形化转变。同时,烘焙过程大大降低了生物质秸秆中细胞壁强度,提高了生物质的可磨性能。因此,生物质烘焙可有效解决生物质流动性差和运输困难的问题<sup>[21-22]</sup>。

表2 烘焙后液体产物成分分布

Tab.2 Composition of liquid product obtained from different temperatures during torrefaction

保留时间/min	化合物名称	不同烘焙温度产物峰面积比/%					
		稻秆			棉秆		
		230℃	260℃	290℃	230℃	260℃	290℃
2.44	乙酸乙酯	3.28	1.05				
2.51	甲醇	29.10	14.39	5.49	26.82	4.17	3.34
6.96	1-羟基-2-丙酮	3.24	10.45	12.52	3.48	16.89	18.52
7.58	1-羟基-2-丁酮	2.29	7.34	11.81	1.25	3.75	6.24
8.09	乙酸	4.69	24.87	34.04	4.41	29.14	33.17
8.23	糠醛	14.41	10.62	7.33	2.54	2.34	1.64
9.49	$\alpha$ -呋喃甲醇	3.23	4.26	4.56	1.09	3.49	4.16
12.01	环丁醇	1.19	2.69	4.15	1.54	3.30	6.02
13.56	2,3-二氢苯并呋喃	16.02	5.69	1.25	36.19	20.67	10.38

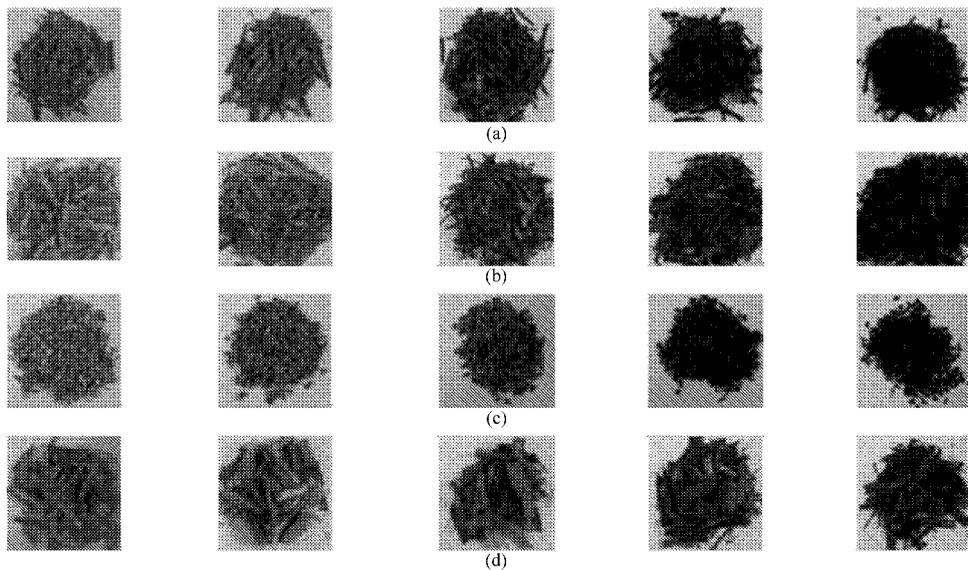


图3 烘焙秸秆形貌

Fig.3 Evolution of morphology of straws and solid products during torrefaction

(a) 稻秆 (b) 麦秆 (c) 棉秆 (d) 玉米秆

然而,200℃烘焙后产物与原样品相比可磨性并未发生太大改善,这可能是由于在较低温度下,生物质中一些含氧烃类化合物液化,木素结构软化,结构粘合力加大,导致其在相同的破碎条件下不易细化。因此,生物质烘焙温度应不低于200℃,特别是对挥发分含量较高的生物质。

### 2.3 烘焙秸秆化学组成演变特性

秸秆原样与烘焙后固体产物的工业分析、元素

分析和通过式(1)计算所得的高位热值结果如表3所示(以棉秆和稻秆为代表)。表中数据均基于空气干燥基测得。从表中可以看出,烘焙温度从230℃升到290℃时,固体产物中固定碳含量显著增加,挥发分含量相应减少,氧含量的减少非常显著。稻秆在290℃下氧含量比原样降低了约36%,这主要是由于生物质中半纤维素的支链结构在热力作用下发生了脱羧基、羰基化反应,部分木质素结构也被

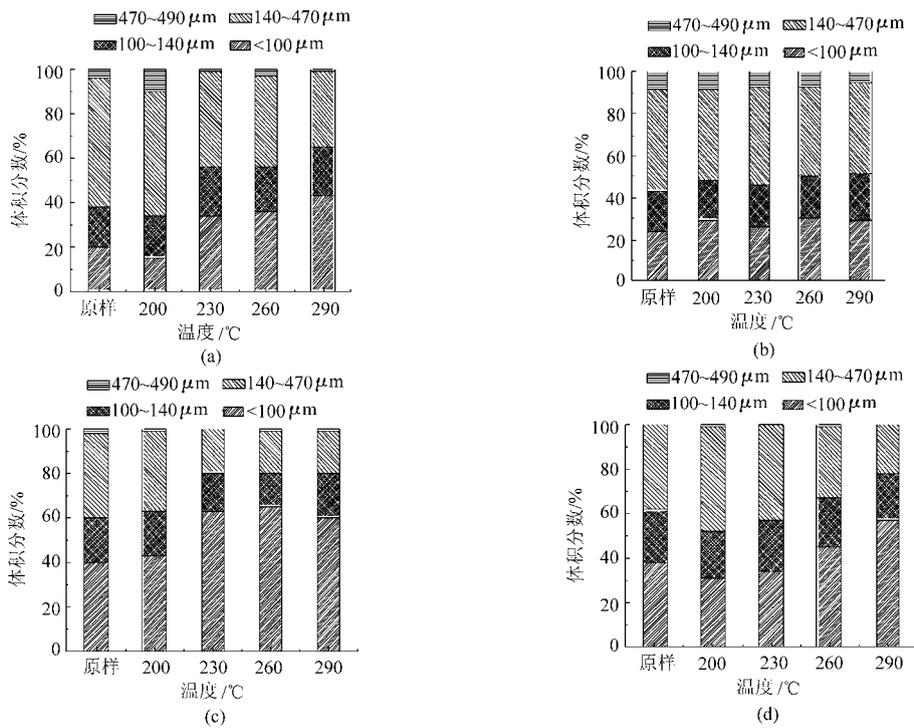


图 4 烘焙前、后秸秆可磨性对比

Fig. 4 Comparison of grinding performance of raw straws and solid products during torrefaction

(a) 稻秆 (b) 麦秆 (c) 棉秆 (d) 玉米秆

破坏,生成大量水分、CO<sub>2</sub> 和较多的含氧碳水化合物。而棉秆则降低了约 43%,这主要是由于棉秆内木质素含量较高,并且其在较高的烘焙温度下(290℃)进一步分解,析出大量的 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 等<sup>[23]</sup>。氢元素也有降低,则可能是烘焙过程中水分、CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 等富氢化合物的逸出所致<sup>[24]</sup>。2 种生物质的 O/C 均有降低,其中棉秆降低大(约 0.4%),当烘焙固体产物中 O/C 较低时,气化过程

中自燃烧的概率降低,则产生 CO<sub>2</sub> 含量较低,从而使气化质量和合成气热值提高<sup>[25]</sup>。而同时 H/C 的降低则减少燃烧过程中水蒸气和烟雾的生成<sup>[26]</sup>。比较两种生物质的 HHV 计算结果可以看出,经过低温烘焙后棉秆的热值提高大(约 57%),而稻秆较小(约 18%),这主要是由于棉秆在烘焙过程中半纤维素分解较为剧烈,特别是在 260~290℃ 时,而稻秆的分解较为缓慢,半焦中灰分和挥发分含量较高。

表 3 烘焙秸秆的基本物性

Tab. 3 Basic analysis of solid product after torrefaction

样品	工业分析质量分数/%				元素分析质量分数/%					Q <sub>HHV</sub> /MJ·kg <sup>-1</sup>
	水分	挥发分	灰分	固定碳	C	H	N	S	O	
棉秆(原样)	4.66	74.96	4.59	15.79	46.07	7.06	0.61	0.34	41.33	15.78
棉秆(230℃)	0.93	67.46	5.28	26.33	48.97	6.69	0.65	0.33	38.08	19.82
棉秆(260℃)	0.70	63.72	6.20	29.38	53.06	6.34	0.67	0.34	33.39	21.56
棉秆(290℃)	0.48	57.53	7.34	34.65	62.63	5.26	0.86	0.30	23.61	24.85
稻秆(原样)	5.04	82.12	7.74	5.10	39.52	6.24	1.16	0.14	45.20	15.78
稻秆(230℃)	2.27	77.55	10.66	9.52	41.32	5.14	1.07	0.13	41.68	16.68
稻秆(260℃)	1.51	72.50	13.06	12.93	43.89	5.03	1.02	0.11	36.89	17.55
稻秆(290℃)	1.01	62.77	18.61	17.61	47.22	4.29	1.12	0.09	28.67	18.57

图 5 所示为烘焙前、后稻秆和棉秆固体产物的 FT-IR 谱图。从图中可以看出,生物质的红外图谱中均可观察到多种含氧官能团的存在,如 O—H(波数范围 3 400~3 200 cm<sup>-1</sup>),C=O(波数范围 1 765~1 715 cm<sup>-1</sup>),C—O—H(波数 1 050 cm<sup>-1</sup>)及 C—

O—C(波数 1 260 cm<sup>-1</sup>)<sup>[27]</sup>,导致热值较低(约 15 MJ/kg,为化石燃料的一半)。而且棉秆中芳香烃类的吸收峰明显高于稻秆,这主要是由于木质素含量较高,而木质素类主要含有愈疮木基型、紫丁香基型和对羟苯基型的致密的苯丙烷结构<sup>[28-29]</sup>。

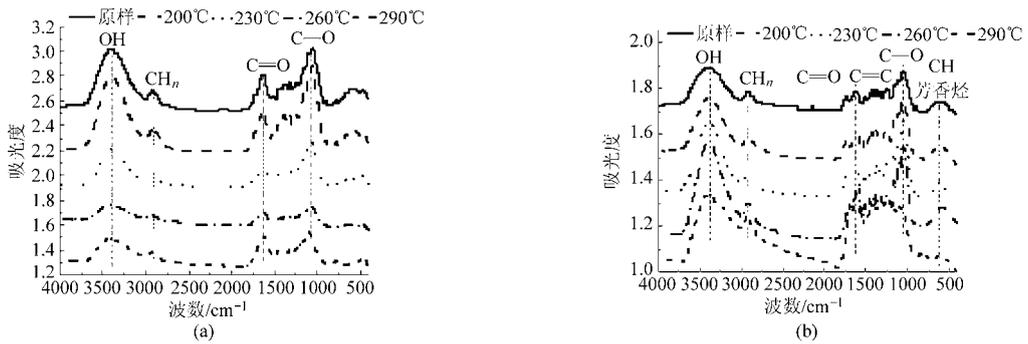


图5 烘焙秸秆的 FT-IR 谱图

Fig. 5 FT-IR spectra of solid product from torrefaction of straws

(a) 稻秆 (b) 棉秆

烘焙前、后秸秆的有机官能团吸收峰值发生了较大变化。当烘焙温度为 200℃ 时,2 种秸秆的吸收峰值均有所提高,这主要是由于水分的析出导致其有机官能团加强,而此时并未有较多挥发分的析出。当温度升至 230~290℃ 后,部分含氧官能团的吸收峰明显降低,其中 OH(波数范围 3 400~3 200  $\text{cm}^{-1}$ ) 峰值减弱主要是由于烘焙导致生物质内半纤维素发生了分子内的脱水反应,而 C=O(波数范围 1 516~1 560  $\text{cm}^{-1}$ 、1 700~1 730  $\text{cm}^{-1}$ ) 主要对应的是半纤维素内的醛酸的羧基官能团,随着温度的升高,其吸光度明显减弱,表明半纤维发生了乙烯类的脱羧基、糖苷键断裂、环内 C=O 基团断裂、形成一系列的酸、醇、醛、醚类等焦油物质,及 CO、CO<sub>2</sub> 等气体<sup>[16]</sup>,同时可以看出,烘焙后生物质内部发生了一系列的化学反应,导致其官能团数量更为简单化。综上所述,烘焙产物中的含氧官能团显著减小,这也和前面的元素分析结果一致(表 3)。

#### 2.4 秸秆烘焙过程能量产率

能量密度仅能反映经不同温度烘焙后生物质单位质量能量发生的变化,未考虑烘焙过程中生物质质量发生的变化。本文采用 Bergman 等<sup>[30]</sup>提出的能量产率对烘焙过程作出更加全面的评价。能量产率反映了生物质经烘焙后的能量转化率,其计算式为

$$Y_{\text{mass}} = \frac{m_{\text{product}}}{m_{\text{feed}}} \times 100\% \quad (2)$$

$$Y_{\text{energy}} = Y_{\text{mass}} \frac{Q_{\text{HHV product}}}{Q_{\text{HHV feed}}} \quad (3)$$

式中  $m$ ——样品质量, g  $Y_{\text{mass}}$ ——质量产率, %  
 $Y_{\text{energy}}$ ——能量产率, %

下标 product、feed 分别表示烘焙产物和原始生物质。

不同烘焙温度下生物质能量产率和质量产率分布如图 6 所示。随着烘焙温度的提高,生物质的质量产率和能量产率均有所降低,200~230℃ 时,两者之间的差异并不明显,而随着温度升至 260~290℃ 时,两者之间的差值变大,而且温度对于能量产率的效应大于质量产率,表现为能量产率均高于质量产率。从图中可以看出,棉秆产率的降幅最大,290℃ 时质量产率降低约 56.4%,能量产率下降 41.5%,而且其在两者之间的差值在 290℃ 也最大(约 14.9%),而稻秆在 290℃ 时,质量和能量产率均高于棉秆,这主要是由于棉秆等木质类生物质中半纤维素含量比稻秆少,而在 300℃ 以下发生的主要是半纤维素的热裂解。对比 2 种生物质,在 200、230、260 和 290℃ 时,两产率差值分别为:稻秆 1.2%、3.7%、7.9%、10.5%,棉秆 1.7%、6.4%、12.9%、14.9%。值得注意的是,2 种产物在 260℃ 时的能量

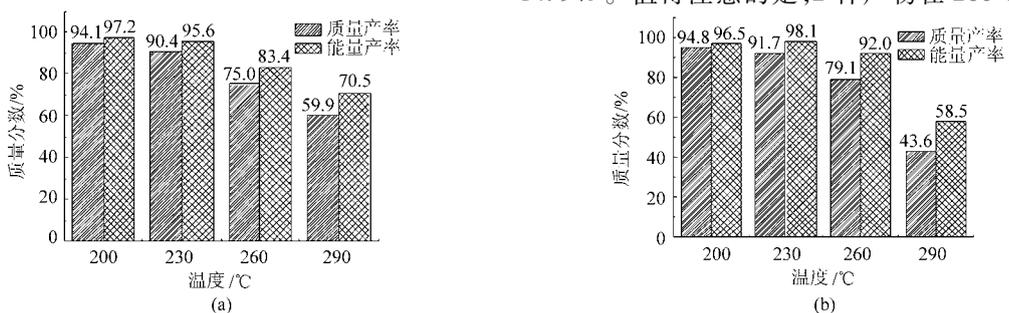


图6 生物质烘焙能量产率和质量产率

Fig. 6 Energy and mass production yield ratio of biomass torrefaction

(a) 稻秆 (b) 棉秆

产率均较大,对比前面的元素分析结果可以看出,在此温度下生物质的自身品质提升较大,为较适宜的烘焙温度。

### 3 结论

(1) 农业秸秆经烘焙后,固体产物颜色逐渐变为黑色,表观体积明显缩小,可磨性也显著提高,产物的粒度分布更加均一化,粒径趋于更小,有利于后续的原料存储运输。

(2) 低温烘焙使得农业秸秆中的含氧官能团含量减少,半纤维素糖苷键断裂,环内 C=O 基团断裂,形成一系列的酸、醇等物质,以及 CO<sub>2</sub> 等气体,同时固体产物中固定碳含量显著提升,氧含量明显降低,水分脱除,发热量也有了一定的改善,这也将有利于生物质气化和液化产物品质提升。

(3) 烘焙过程中农业秸秆的质量产率和能量产率随烘焙温度提高均有所降低,但能量产率始终优于质量产率,且随着温度提高而进一步加强。

### 参 考 文 献

- 李俊峰,时璟丽,王仲颖. 欧盟可再生能源发展的新政策及对我国的启示[J]. 可再生能源,2007,25(3):1~3.  
Li Junfeng, Shi Jingli, Wang Zhongying. New progress of renewable energy policy in Europe and its reference for China[J]. Renewable Energy Resources,2007,25(3):1~3. (in Chinese)
- Dincer I. Renewable energy and sustainable development: a crucial review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2000,4(2):157~175.
- 阴秀丽,吴创之. 生物质气化对减少 CO<sub>2</sub>排放的作用[J]. 太阳能学报,2000,21(1):40~44.  
Yin Xiuli, Wu Chuangzhi. The effect of biomass gasification on reducing CO<sub>2</sub> emission[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2000,21(1):40~44. (in Chinese)
- 朱金忠,陈雪莉,王辅臣. 稻草及热解半焦颗粒流化特性[J]. 过程工程学报,2010,10(1):46~50.  
Zhu Jinzhong, Chen Xueli, Wang Fuchen. Fluidization characteristics of mixture of straw and semi-char particles in a fluidized bed[J]. The Chinese Journal of Process Engineering,2010,10(1):46~50. (in Chinese)
- Deng J, Wang G, Kuang J, et al. Pretreatment of agricultural residues for co-gasification via torrefaction[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,2009,86(2):331~337.
- Pastorova I, Arisz P W, Boon J J. Preservation of d-glucose oligosaccharides in cellulose chars[J]. Carbohydrates Research, 1993,248(4):151~165.
- Wooten J B, Crosby B, Hajaligol M R. Evaluation of cellulose char structure monitored by <sup>13</sup>C CP/MAS NMR [J]. Fuel Chemistry Division Preprints,2000,46(9):191~193.
- Bergman P C A. Combined torrefaction and pelletization (the top process) [R]. Energy Research Center of the Netherlands, 2005.
- Phanphanich M, Mani S. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass[J]. Bioresource Technology,2011,102(2):1246~1253.
- Yan W, Acharjee T C, Coronella C J, et al. Thermal pretreatment of lignocellulosic biomass[J]. Environmental Progress and Sustainable Energy,2009,28(3):435~440.
- Zwart R W R, Boerrigter H, Drift Avd. The impact of biomass pretreatment on the feasibility of overseas biomass conversion to fischer-tropsch products[J]. Energy & Fuels,2006,20(5):2192~2197.
- Prins M J, Ptasiński K J, Janssen F. Torrefaction of wood: part I. weight loss kinetics[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,2006,77(1):28~34.
- Couhert C, Salvador S, Commandr J M. Impact of torrefaction on syngas production from wood[J]. Fuel,2009,88(11):2286~2290.
- Prins M. Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction[D]. Eindhoven: Eindhoven Technical University; 2005.
- Friedl A, Padouvas E, Rotter H, et al. Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition[J]. Analytica Chimica Acta,2005,544(1~2):191~198.
- Yang H, Yan R, Chen H, et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis[J]. Fuel,2007,86(12~13):1781~1788.
- 杨昌炎,杨学民,吕雪松,等. 分级处理秸秆的热解过程[J]. 过程工程学报,2005,5(4):379~383.  
Yang Changyan, Yang Xuemin, Lü Xuesong, et al. Pyrolysis of straw obtained from stagewise treatment[J]. The Chinese Journal of Process Engineering,2005,5(4):379~383. (in Chinese)
- Bourgeois J, Guyonnet R. Characterization and analysis of torrefied wood[J]. Wood Science and Technology,1988,22(2):143~155.

- 19 Prins M J, Ptasiniski K J, Janssen F. Torrefaction of wood: part 2. Analysis of products[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2006, 77(1):35 ~ 40.
- 20 Prins M J, Ptasiniski K J, Janssen F. More efficient biomass gasification via torrefaction[J]. *Energy*, 2006, 31(15):3 458 ~ 3 470.
- 21 Gera D, Mathur M P, Freeman M C, et al. Effect of large aspect ratio of biomass particles on carbon burnout in a utility boiler[J]. *Energy & Fuels*, 2002, 16(6):1 523 ~ 1 532.
- 22 Zulfiqar M, Moghtaderi B, Wall T F. Flow properties of biomass and coal blends[J]. *Fuel Processing Technology*, 2006, 87(4):281 ~ 288.
- 23 Müller-Hagedorn M, Bockhorn H, Krebs L, et al. A comparative kinetic study on the pyrolysis of three different wood species[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2003, 68(15):231 ~ 249.
- 24 Strezov V, Patterson M, Zymly V, et al. Fundamental aspects of biomass carbonisation[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2007, 79(1 ~ 2):91 ~ 100.
- 25 赵辉. 生物质高温气流床气化制取合成气的机理试验研究[D]. 杭州:浙江大学, 2007.  
Zhao Hui. Experimental and mechanism research on entrained flow gasification of biomass for syn-gas[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)
- 26 Fellli F F, Luengo C A, Suárez J A, et al. Wood briquette torrefaction[J]. *Energy for Sustainable Development*, 2005, 9(3):19 ~ 22.
- 27 Demirba A. Mechanisms of liquefaction and pyrolysis reactions of biomass[J]. *Energy Conversion and Management*, 2000, 41(6):633 ~ 646.
- 28 杨海平, 陈汉平, 晏蓉, 等. 油棕废弃物及生物质三组分的热解动力学研究[J]. *太阳能学报*, 2007, 28(6):626 ~ 631.  
Yang Haiping, Chen Hanping, Yan Rong, et al. Thermodynamic analysis of pyrolysis of palm oil wastes and biomass components[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2007, 28(6):626 ~ 631. (in Chinese)
- 29 姚燕, 王树荣, 郑赞, 等. 基于热红联用分析的木质素热裂解动力学研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2007, 13(1):50 ~ 54.  
Yao Yan, Wang Shurong, Zheng Yun, et al. Kinetic research of lignin pyrolysis by TGA-FTIR analysis[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2007, 13(1):50 ~ 54. (in Chinese)
- 30 Bergman P C A, Boersma A R, Kiel J H A, et al. Torrefaction for entrained-flow gasification of biomass[R]. ECN - C - 05 - 067, 2004.

~~~~~

(上接第 87 页)

- 7 李大中, 王臻. 基于最小二乘支持向量机的生物质气化过程模型建立[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(3):629 ~ 633.  
Li Dazhong, Wang Zhen. Modeling of biomass gasification process based on least squares SVM[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(3):629 ~ 633. (in Chinese)
- 8 李大中, 王卉. 稻秆气化焦油催化裂解脱除过程模型改进与优化[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(3):109 ~ 112.  
Li Dazhong, Wang Hui. Improving and optimizing the LS - SVM model of the rice straw gasification tar removal process by catalytic cracking[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(3):109 ~ 112. (in Chinese)
- 9 王小平, 曹立明. 遗传算法理论、应用与软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2002.
- 10 林铿云, 董加礼. 多目标优化的方法与理论[M]. 长春:吉林教育出版社, 1992.
- 11 de Toro F, Ortega J, Fernández J, et al. PSFGA: a parallel genetic algorithm for multiobjective optimization[C] // *Proceedings 10th Euromicro Workshop on Parallel, Distributed and Network-based Processing*, 2002:384 ~ 391.
- 12 姜健, 赵杰, 臧希喆. 基于并列选择遗传算法的多机器人协作探测[J]. *计算机工程与设计*, 2008, 29(5):1 218 ~ 1 221.  
Jiang Jian, Zhao Jie, Zang Xizhe. Coordinated multi-robot exploration based on parallelism selection genetic algorithm[J]. *Computer Engineering and Design*, 2008, 29(5):1 218 ~ 1 221. (in Chinese)
- 13 刘军利, 蒋剑春. 论生物质能源标准体系(Ⅲ)——生物质固体燃料标准化研究进展[J]. *生物质化学工程*, 2006, 40(6):54 ~ 58.  
Liu Junli, Jiang Jianchun. Statement of biomass energy standard system(Ⅲ)—biomass solid fuel standardization progress[J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2006, 40(6):54 ~ 58. (in Chinese)
- 14 李昂. 电力系统标幺制与归算[J]. *电气电子教学学报*, 2004, 26(4):53 ~ 54, 56.  
Li Ang. Per-unit system and conversion in power system[J]. *Journal of Electrical & Electronic Education*, 2004, 26(4):53 ~ 54, 56. (in Chinese)