

文章编号 : 0253-2409(2006)03-0309-06

## 油棕废弃物热解的 TG-FTIR 分析

杨海平<sup>1</sup>, 陈汉平<sup>1</sup>, 晏蓉<sup>2</sup>, 张世红<sup>1</sup>, 郑楚光<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室 湖北 武汉 430074 ; 2. 南洋理工大学 环境科学与工程研究院, 新加坡 637723)

**摘要** : 利用热重分析(TGA)和傅里叶红外光谱(FTIR)联用技术对油棕废弃物的热解特性及其气体产物的释放特性进行了研究, 采用一级反应计算了油棕废弃物的热解动力学参数。研究表明, 油棕废弃物较易于热解, 失重集中在 220 °C ~ 400 °C, 其热解活化能较小, 约为 60 kJ/mol; 气体产物的析出与生物质的热解失重有着相似的特性, 气体产物主要在 200 °C ~ 400 °C 析出, 主要成分为 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、CO、CH<sub>4</sub> 和有机碳水化合物的混合物, 其中 CO<sub>2</sub> 和有机混合物的析出温度较低, 而 CO 和 CH<sub>4</sub> 的析出温度相对较高。随着温度的进一步升高 (>400 °C) 除少量的 CO<sub>2</sub> 和 CO 外, 无其他气体产物析出。气体产物的析出量与生物质样品的化学组成和结构有关, CO<sub>2</sub> 和有机混合物的析出与生物质的热解失重曲线(DTG)有着相似的特性, 是引起油棕废弃物热解失重的主要原因。

**关键词** : 油棕废弃物 ; 热解 ; 动力学计算 ; TG-FTIR

**中图分类号** : S216      **文献标识码** : A

## TG-FTIR analysis of palm oil wastes pyrolysis

YANG Hai-ping<sup>1</sup>, CHEN Han-ping<sup>1</sup>, YAN Rong<sup>2</sup>, ZHANG Shi-hong<sup>1</sup>, ZHENG Chu-guang<sup>1</sup>

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China ;  
2. Nanyang Technological University, Singapore 637723)

**Abstract** : The pyrolysis of palm oil wastes was carried out using thermogravimetry (TG). The results show that these wastes are easily to be decomposed. The weight loss rang is from 220 °C to 400 °C at slow heating rates. Shell and fiber display similar pyrolysis characteristics with two peaks in weight loss rate curves, whereas EFB just shows one sharp peak. Their kinetics parameters were calculated using non-isothermal integrated method. The activation energies are quite low ( $\approx 60$  kJ/mol), and first order reaction is suitable for biomass pyrolysis. The gas product evolved from palm oil wastes pyrolysis was detected on-line with Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The main gas products are H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, and some organics carbohydrate mixtures. They show the similar evolution trend of weight loss at 200 °C ~ 400 °C. With temperature increasing further, except trace amount of CO<sub>2</sub> and CO, almost no other volatile is released. CO<sub>2</sub> and organic mixtures play a great role in biomass pyrolysis. This fundamental study provides a basic insight of the palm oil waste pyrolysis, which can benefit the work in developing an advanced thermal process for high-yield biofuel production from palm oil wastes.

**Key words** : palm oil wastes ; pyrolysis ; kinetics calculation ; TG-FTIR

随着化石能源的日益枯竭和环境污染的日益严重, 生物质能作为一种低硫、低氮以及二氧化碳“零排放”的清洁和可再生能源, 逐渐受到了研究者的重视。油棕废弃物作为棕榈油加工生产的固体废弃物现在主要是直接堆积或用于棕榈油加工厂的锅炉燃料, 利用效率低, 并且带来严重的环境污染。油棕废弃物作为东南亚的主要生物质能源, 它的洁净、高效利用逐渐引起研究者的广泛关注<sup>[1,2]</sup>, 其中新加坡南洋理工大学主要致力于油棕壳(shell)制活性炭的研究<sup>[2]</sup>。热解是一种转化生物质到高品位工

业品、能源和化学品的高效转化技术, 能量转化效率高, 高达 95.5%<sup>[3]</sup>。目前, 国内外对生物质的热解已有大量的研究, 但是对油棕废弃物的研究还鲜见报道<sup>[4-7]</sup>。生物质热解动力学研究是生物质高效热解取得气体燃料、化学制品和能源的基础, 同时对生物质热解反应器设计和优化也有着重要意义<sup>[4,5]</sup>。热重分析(TG)和傅里叶红外光谱(FTIR)联用技术不仅可以分析样品热解过程的质量变化特性, 也能对热解过程中气体产物的形成和释放特性进行快速在线分析, 为低升温速率下样品的热解提供足够的动

收稿日期 : 2005-09-30 ; 修回日期 : 2006-02-13。

基金项目 : 国家自然科学基金(50446021) ; 湖北省自然科学基金(2003ABA086)。

作者简介 : 杨海平(1977-), 女, 博士, 河南许昌人, 从事生物质的热解和气化特性及其应用的研究。E-mail : yhp2002@163.com。

力学信息。TG-FTIR 联用技术已在生物质和煤等燃料的利用研究中得到广泛的应用<sup>[8-12]</sup>。本文采用 TG-FTIR 联用技术对油棕废弃物进行热解试验研究, 主要对油棕废弃物的热解动力学和热解气体产物的释放特性进行了实时在线分析, 在全面掌握油棕废弃物热解特性的同时, 对生物质的热解特性也有了一定的认识。

## 1 实验部分

**1.1 生物质样品** 三种油棕废弃物(shell, fiber 和 EFB) 选自马来西亚, 所采用样品为经研磨、筛分后(1 mm 筛子)的粉末, 所有样品颗粒都小于 1 mm。颗粒粒度分布特性采用 Malvern 粒度分析仪(Malvern instruments Mastersizer 2000)进行分析, 其粒度分布见图 1。从图 1 可以看出, shell 比较难以磨碎,

其颗粒粒度相对较大, 有 50% 颗粒大于 360  $\mu\text{m}$ , 其体积平均粒径为 452.6  $\mu\text{m}$ , fiber 和 EFB 比较细, 平均粒径约为 200  $\mu\text{m}$ 。油棕废弃物的基本物性参数见表 1。

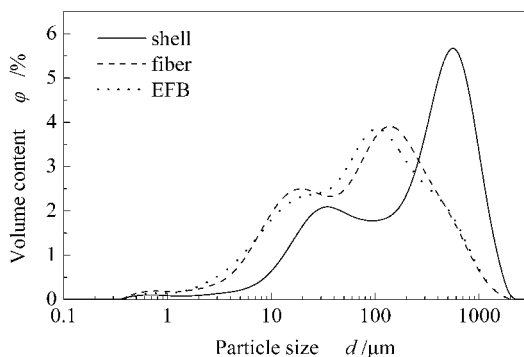


图 1 油棕废弃物的颗粒粒度分布曲线

Figure 1 The distribution of palm oil wastes particle

表 1 油棕废弃物的工业分析和元素分析

Table 1 The proximate and ultimate analysis result of palm oil wastes

	Proximate analysis $w/\%$				Ultimate analysis $w_d/\%$					$Q$ /MJ·kg <sup>-1</sup>
	$M_{ad}$	$V_{ad}$	$A_d$	$FC_{ad}$	C	H	N	S	O*	
Shell	5.73	73.74	2.21	18.37	53.78	7.20	0.00	0.51	36.30	22.14
Fiber	6.56	75.99	5.33	12.39	50.27	7.07	0.42	0.63	36.28	20.64
EFB	8.75	79.67	3.02	8.65	48.79	7.33	0.00	0.68	40.18	18.96

\* content calculated by difference ; ad : on air dried basis ; d : on dried basis

**1.2 试验方法** 生物质的热解采用热重分析仪(TA2050, TA Instrument)。实验取样品 20 mg, 载气高纯 N<sub>2</sub>(99.9999%), 流量 120 mL/min; 从室温以 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的升温速率加热到 105  $^{\circ}\text{C}$ , 恒温 5 min, 以确保样品完全干燥, 以同样的升温速率加热到 900  $^{\circ}\text{C}$  热解结束。生物质样品热解过程中释放出的气体产物由与 TG 直接相连的 FTIR 进行在线检测分析。气体产物直接、快速地进入 FTIR(BioRad Excalibur Series FTS 3000 气室进行红外扫描分析, 检测器为重水硫酸三甘肽(deuterated triglycine sulfate, DTGS)。为了避免半挥发性气体产物潜在的冷凝和吸收, 测试中气室和气体传输管路的温度保持在 230  $^{\circ}\text{C}$ 。FTIR 扫描的波长为 4 000  $\text{cm}^{-1}$  ~ 500  $\text{cm}^{-1}$ , 分辨率和敏感度分别为 2.5  $\text{cm}^{-1}$  和 1  $\text{cm}^{-1}$ 。当热解温度低于 150  $^{\circ}\text{C}$  时, 只有水分释放, FTIR 的 IR 扫描分析从 TG 炉温为 150  $^{\circ}\text{C}$  开始连续扫描, 直到 900  $^{\circ}\text{C}$  热解结束。

## 2 结果和讨论

**2.1 生物质样品热解特性分析** 油棕废弃物的热重(TG)和微商热重(DTG)曲线见图 2 和图 3。从

图 2 可以看出, 热解温度低于 220  $^{\circ}\text{C}$ , 只有水分的析出(<100  $^{\circ}\text{C}$ )是生物质的干燥过程, 油棕废弃物的热解失重主要集中在 220  $^{\circ}\text{C}$  ~ 400  $^{\circ}\text{C}$ ; 高于 400  $^{\circ}\text{C}$  热解结束, 失重速率接近零, 无明显失重。生物质热解开始于 220  $^{\circ}\text{C}$ , 之后随着温度的升高, 失重迅速增加, shell 和 fiber 具有相似的热解特性。热解开始后, 失重迅速加快, 在 280  $^{\circ}\text{C}$  两者都取得了第一个最大热解峰, 失重速率为 0.47%/ $^{\circ}\text{C}$ ; 而后, 失重速率稍有降低, 在 315  $^{\circ}\text{C}$  左右取得最小值(shell 和 fiber 分别为 0.37%/ $^{\circ}\text{C}$  和 0.43%/ $^{\circ}\text{C}$ ); 随着温度的继续升高, 热解加剧, 分别在 352  $^{\circ}\text{C}$  和 340  $^{\circ}\text{C}$  取得了第二个热解峰, 也是热解速率的最大值(0.58%/ $^{\circ}\text{C}$  和 0.61%/ $^{\circ}\text{C}$ ), 在此温度段中 fiber 的热解比 shell 稍快, 失重速率明显高于 shell。在热解速率达到最大值之后, 失重率迅速降低, 在 390  $^{\circ}\text{C}$  降为 0.08%/ $^{\circ}\text{C}$  并保持到热解试验结束。因此, shell 和 fiber 的热解大约在 390  $^{\circ}\text{C}$  结束, 焦炭残留物分别为 36% 和 33%, 焦炭产量较高。EFB 的热解特性与 shell 和 fiber 不同, 只在 315  $^{\circ}\text{C}$  左右出现一个尖而高的热解峰, 最大失重率为 0.87%/ $^{\circ}\text{C}$ 。EFB 热解比 shell 和 fiber 迅速, 在 220  $^{\circ}\text{C}$  ~ 315  $^{\circ}\text{C}$ , 随热解温度升高, 失

重速率快速增加,而后随温度增加,快速降低,在 400 °C 降为 0.06%/°C 并持续降低直到 900 °C 试验结束,此阶段生物质样品无明显失重,焦炭残余量相对较低为 28%。

油棕废弃物样品热解特性的差异可能与它们的颗粒特性、物性有关。从颗粒尺寸来说,EFB 和 fiber 样品颗粒细且均匀,shell 尺寸相对较大,从而影响颗粒内热、质传递,使 shell 颗粒内升温变慢,温差加大,进而使其热解速度相对降低,所以 shell 的热解比 EFB 和 fiber 稍慢。再者可能与油棕废弃物内的挥发分和固定碳的不同有关(见表 1)。Shell 和

fiber 的固定碳含量较高,而挥发分相对较低,大量固定碳的存在一定程度上阻碍了挥发分的析出,进而阻碍颗粒内部的热、质传递,而使热解速度变慢。

**2.2 生物质热解动力学计算** 假设生物质在热重分析仪中的热解反应是简单热裂解反应。根据所采用的试验条件,油棕废弃物热解的动力学计算采用如下方程<sup>[13]</sup>：

$$\ln[F(\alpha)] = -(E/RT) + \ln(AR/\beta E) \quad (1)$$

$$F(\alpha) = -\ln(1-\alpha)/T^2 \quad n = 1 \quad (2)$$

$$F(\alpha) = [1-(1-\alpha)^{1-n}]/(1-n)T^2 \quad n \neq 1 \quad (3)$$

其中,生物质转化率  $\alpha = (w_0 - w)/(w_0 - w_\infty)$ ,  $w$  是  $t$  时刻生物质样品的量,  $w_0$  和  $w_\infty$  是样品初始质量和最终剩余量,  $n$  为反应级数,  $E$  和  $A$  分别是热解反应的活化能和指前因子,  $R$  指理想气体常数 ( $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ )。若  $n$  与裂解反应级数一致,  $\ln[F(\alpha)] \sim -1/T$  图形为一条直线,从直线的斜率和截距可计算出样品热解的  $E$  和  $A$ 。根据生物质的热解特性,本文取反应级数  $n$  为 1<sup>[14,15]</sup>。

对于多步反应, Cuming<sup>[16]</sup>提出了质量加权平均活化能( $E_m$ )用于表征热解反应的总活化能,分析样品热解的整体活性：

$$E_m = F_1 \times E_1 + F_2 \times E_2 + \dots + F_n \times E_n \quad (4)$$

其中  $E_1$  到  $E_n$  是各温度段的平均活化能,  $F_1$  到  $F_n$  是各温度段的相对失重份额。

如上所述,油棕废弃物热裂解发生在 220 °C ~ 400 °C,因此,热解动力学计算中只考虑此温度段的动力学参数,计算结果见表 2。从表 2 可以看出,反应级数  $n = 1$  是油棕废弃物热解最合适的反应级数,拟合相关系数大于 0.99。油棕废弃物的活化能比较低,约 60 kJ/mol,与一般生物质热解的活化能一致<sup>[5]</sup>。相比 fiber 和 EFB,shell 热解的活化能稍高。这说明 shell 较难热解,与 TG 曲线所示结果一致,可能与它们化学组成和粒度特性的不同有关(见表 1 和图 1)。

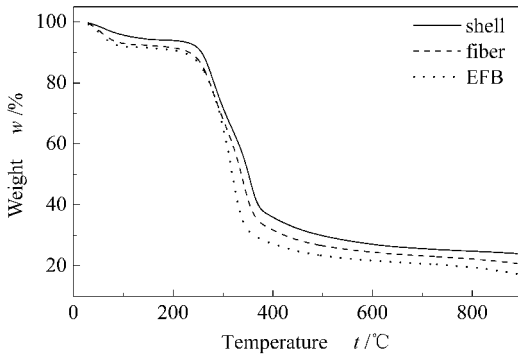


图 2 油棕废弃物热解的 TG 曲线

Figure 2 TG curves of palm oil wastes pyrolysis

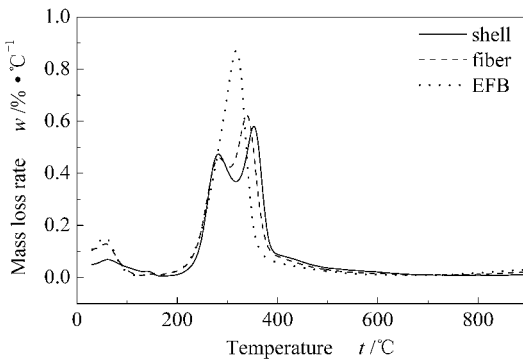


图 3 油棕废弃物热解的 DTG 曲线

Figure 3 DTG curves of palm oil wastes pyrolysis

表 2 生物质样品的热解动力学参数

Table 2 The kinetics parameters of palm oil wastes pyrolysis

Sample	Temp $t/^\circ\text{C}$	$E/\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	$A/\text{s}^{-1}$	CR <sup>*</sup>	Weight loss $w/\%$	$E_m/\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$
Shell	220 ~ 315	55.64	28.2	0.993 6	27.6	66.12
	315 ~ 400	75.72	$2.4 \times 10^3$	0.999 1	30.1	66.12
Fiber	220 ~ 315	51.82	10.3	0.996 7	28.7	59.98
	315 ~ 400	67.68	$3.6 \times 10^2$	0.998 0	30.4	59.98
EFB	220 ~ 315	59.50	77.4	0.986 8	34.1	63.16
	315 ~ 400	67.58	$6.2 \times 10^2$	0.995 3	28.3	63.16

CR : regression coefficient

对于油棕废弃物,从表2可以看出,低温段的活化能都小于高温段的活化能。这可能是由于低温段(220 °C ~ 315 °C)的活化能主要是半纤维素的热解引起的,而高温段(315 °C ~ 400 °C)的活化能主要是纤维素的热解引起<sup>[17]</sup>。而油棕废弃物与生物质主要组分间活化能的差别可能是由生物质内固有的矿物质的催化作用引起的<sup>[4,18]</sup>。

**2.3 油棕废弃物热解气体产物的 FTIR 分析** 图4为 fiber 热解的 TG-FTIR 的 IR 图谱。由图4可以看出,油棕废弃物热解的主要气体产物是 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>、CO 和一些有机碳水化合物。因为样品的 N 和 S 的质量分数很低,气体产物中没有检测到含 N 和 S 的化合物。这也说明了油棕废弃物是洁净的生物质能源,它的转化利用有益于环境保护。气体的释放始于 230 °C,相对于生物质样品的热重曲线,由于气体传输线的存在,气体产物的红外检测滞后 1 min,温度滞后约 10 °C。大部分气体集中在 230 °C ~ 400 °C 释放,与热重分析的质量损失趋势一致(图2和图3)。CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的排放随着温度的升高而增加,并分别在 330 °C 和 340 °C 取得最大值,随着温度的进一步增加,甲烷的排放量迅速减少,直到 900 °C;对于 CO<sub>2</sub>,先快速减少,在 400 °C 得到最小值,随温度继续升高,CO<sub>2</sub> 的排放量缓慢增加至热解结束。CO 的排放趋势与 CO<sub>2</sub> 相似,它的第一个最大释放峰在 270 °C。当热解温度大于 400 °C,除少许 CO<sub>2</sub> 和 CO 气体缓慢析出外,气体产物析出极少。

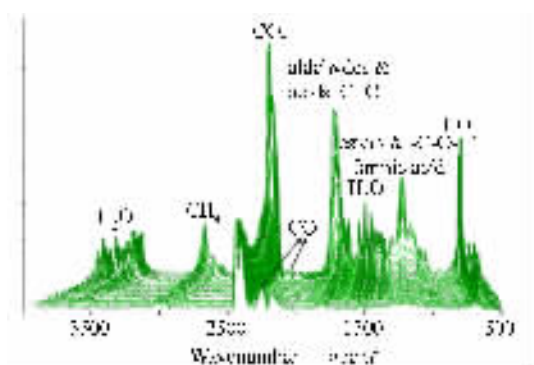


图4 Fiber 热解气体产物的 FTIR 三维图谱

Figure 4 The typical IR profile of gas products from fiber pyrolysis

气体产物中也存在少许的有机物,如 C<sub>2+</sub> 的酸、醚、脂等碳水化合物。它们的质量分数很低,难于检测。H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 等气体,没有或有很弱的红外吸收,采用 FTIR 不可能对它们进行检测<sup>[11]</sup>。FT-IR 对气体产物的分析可以提供快速和在线的 IR 扫

描,有益于生物质热解的动力学和气体释放过程的研究。氢气作为主要热解气体产物将在以后的研究中采用气相色谱(GC)进行定量分析。

虽然图4的三维气体产物排放的红外光谱给出了气体释放过程,但是从三维图谱上很难准确的分析出不同温度下各气体产物的排放特性。为了详细研究不同温度下,生物质热解过程中气体产物的释放规律,以红外吸收峰的吸收面积对油棕废弃物热解气体产物的排放进行定性或半定量分析。FTIR 的扫描频率改为每 5 s 一次,其他参数保持不变。主要气体产物为 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>、CO 和一些有机化合物。有机碳水化合物主要为酸、醛、链烃和醚等碳水化合物的混合物。根据文献[10,11]研究可知,这些混合物可能是甲醛(CH<sub>2</sub>O)、乙醛(CH<sub>3</sub>CHO)、甲醇(CH<sub>3</sub>OH)、乙酸(HCOOH)、苯酚(C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>OH)和丙酮(CH<sub>3</sub>COCH<sub>3</sub>)等碳水化合物。

鉴于红外光的吸收强度(IR 吸收峰的面积)与气体产物的浓度直接相关,为了更清楚的分析气体产物的析出趋势,气体释放特性以 IR 吸收面积表示(见图5)。因为热解失重主要在 220 °C ~ 400 °C (见图2~图4),FTIR 只扫描记录了 200 °C ~ 500 °C 释放气体产物的 IR 吸收。IR 吸收峰面积是基于图4中的 IR 图谱,对每种气体产物的红外特征吸收峰面积进行积分计算得到。具体计算原则如下:CO<sub>2</sub> 的面积为 IR 图谱从 2 400 cm<sup>-1</sup> ~ 2 260 cm<sup>-1</sup> 的 IR 吸收峰的面积,有机碳水化合物的为 900 cm<sup>-1</sup> ~ 1 900 cm<sup>-1</sup>,甲烷的为 2 700 cm<sup>-1</sup> ~ 3 200 cm<sup>-1</sup>;一氧化碳的为 2 200 cm<sup>-1</sup> ~ 2 100 cm<sup>-1</sup>。在积分 IR 峰面积时 1 700 cm<sup>-1</sup> 的 C=O 官能团和 1 200 cm<sup>-1</sup> 的 C—C、C—O—C 官能团的 IR 吸收面积有一定程度的重叠,因此把它们合为一体称之为有机混合物。从 900 cm<sup>-1</sup> 到 1 900 cm<sup>-1</sup> 计算得到的面积中也有一些水分的作用,因为水分在 ~1 500 cm<sup>-1</sup> 也有 IR 吸收。

油棕废弃物热解的气体产物释放的 FTIR 曲线见图5。从图5可以看出,shell 和 fiber 的气体产物有着相似的析出特性,CO<sub>2</sub> 和有机物都有两个释放峰,而 CH<sub>4</sub> 和 CO 为单峰,EFB 的气体释放都为单峰曲线。高于 200 °C 时,CO<sub>2</sub> 和有机物气体的析出量随着热解温度的升高而快速增加,shell 和 fiber 在 280 °C 和 350 °C 取得两个最大值,随温度继续升高而快速减小,高于 400 °C 时析出量极少;对于 EFB 来说,CO<sub>2</sub> 和有机物在 325 °C 左右取得最大值,而 CH<sub>4</sub> 和 CO 的析出温度稍高,大部分集中在 300 °C 以上析出。比较图3和图5可以发现,CO<sub>2</sub> 和有机的

物的IR吸收曲线和油棕废弃物的热解失重速率曲线有相似的特征温度和释放趋势。这说明生物质热解的失重可能主要是由CO<sub>2</sub>和有机混合物的析出引起的。对比三种油棕废弃物的气体释放特性可以看出,EFB的CO<sub>2</sub>和CO的产量明显高于fiber和shell,并且相对较低的温度快速释放,而fiber的CH<sub>4</sub>的产量相对较高,而shell的有机物产量稍微偏

高。这种差别可能与它们的化学组成(表1)和化学结构的不同有关。对比三种油棕废弃物的热解气体产物的析出特性还可发现,shell的气体析出温度比其他两种样品高20℃~50℃。这可能是由于shell样品颗粒较大,结构密实,并且有机挥发分的质量分数较低,使得样品内的传热和挥发分的析出受阻,热解过程变慢,从而气体产物的析出温度升高。

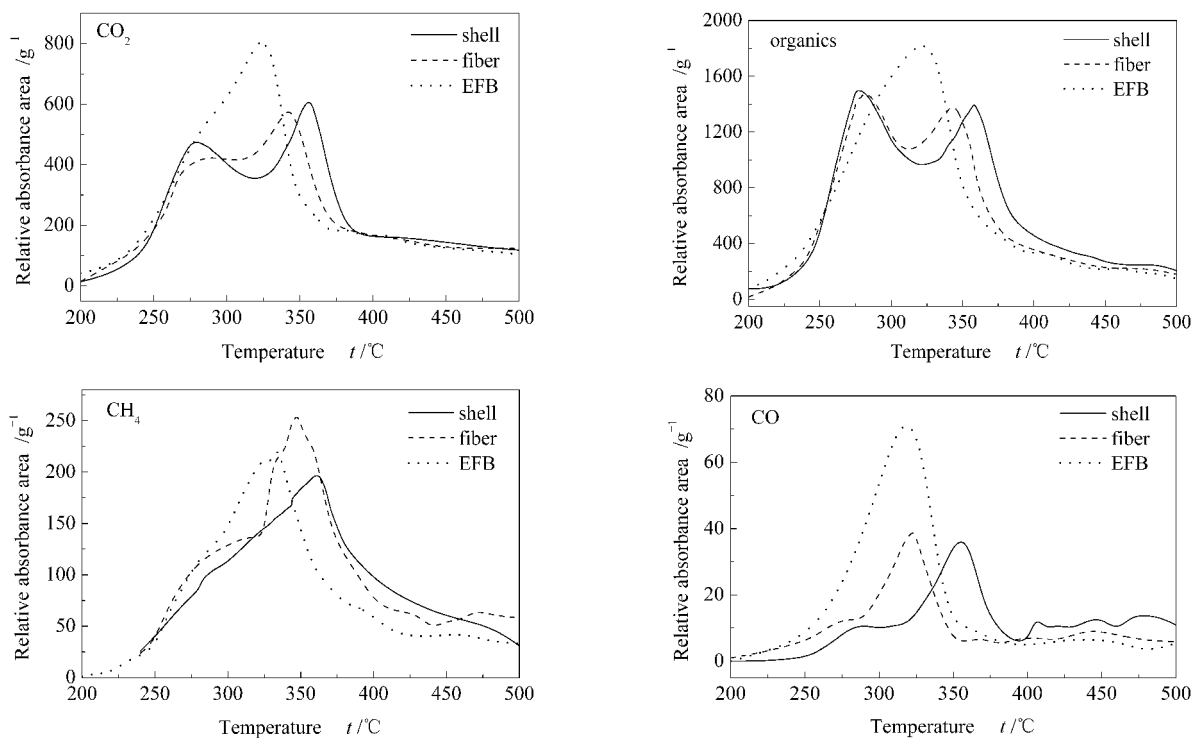


图5 油棕废弃物热解的气体产物释放的FTIR曲线

Figure 5 The FTIR profile of gas products releasing from palm oil wastes pyrolysis

### 3 结语

采用TG-FTIR联用技术对油棕废弃物的热解特性进行了分析研究,发现油棕废弃物易于热解,其热解主要集中在200℃~400℃,三种油棕废弃物的热解活化能相近,约为60 kJ/mol,一级反应适于油棕废弃物的热解。气体产物的形成和释放特性与生物质样品的热解失重相似,主要集中在220℃~400℃,主要气体产物为H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、CO、CH<sub>4</sub>和有机混合物。CO<sub>2</sub>和有机混合物的形成温度相对较低,

而CH<sub>4</sub>和CO的析出温度较高。CO<sub>2</sub>和有机物的析出曲线和生物质热解失重曲线相似,shell和fiber有两个析出峰,而EFB只有一个峰,对于CH<sub>4</sub>和CO来说,三种油棕废弃物热解析出都只有一个失重峰,可以说生物质热解的失重主要是由于CO<sub>2</sub>和有机混合物的排放引起的。由于油棕废弃物的化学结构和化学组成的不同而使得EFB的CO<sub>2</sub>和CO的析出量比其他两种(shell和fiber)的都高,而fiber的甲烷量最高。

### 参考文献:

- [1] KITTIKUN A H, PRASERTSAN P, SRISUWAN G, KRAUSE A. Environmental management for palm oil mill[C/OL]. In Internet Conference on Material Flow Analysis of Integrated Bio-Systems. <http://www.ias.unu.edu/proceedings/icibs/ic-mfa/kittikun/paper.html>, 2000.
- [2] LUA A C, GUO J. Preparation and characterization of chars from oil palm waste[J]. Carbon, 1998, 36(11):1663-1670.
- [3] MCKENDRY P. Energy production from biomass: Part 2 Conversion technologies[J]. Bioresour Technol, 2002, 83(1):47-54.
- [4] VARHEGYI G, ANTAL Jr M J, JAKAB E, SZABO P. Kinetic modeling of biomass pyrolysis[J]. J Anal Appl Pyrolysis, 1997, 42(1):73-87.
- [5] ORFAO J, ANTUNES F J A, FIGUEIREDO J L. Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials-three independent reaction model[J]. Fuel, 1999, 78(3):349-358.

- [6] 张军,范志林,林晓芬,徐益谦. 生物质快速热解过程中产物的在线测定[J]. 东南大学学报(自然科学版),2005,35(1):16-19.  
(ZHANG Jun, FAN Zhi-lin, LIN Xiao-fen XU Yi-qian. Online measurement of products during fast pyrolysis of biomass[J]. Journal of Southeast University (Natural Science edition), 2005, 35(1):16-19.)
- [7] 周俊虎,平传娟,杨卫娟,刘建忠,程军,岑可法. 用热重红外光谱联用技术研究混煤热解特性[J]. 燃料化学学报,2004,32(6):658-662.  
(ZHOU Jun-hu, PING Chuan-juan, YANG Wei-juan, LIU Jian-zhong, CHENG Jun, CEN Ke-fa. Experimental study on the pyrolysis characteristic of coal blends using TGA-FTIR[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2004, 32(6):658-662.)
- [8] 谢克昌,刘生玉. 热解/红外光谱联用技术用于热解反应的快速检测[J]. 分析化学,2003,31(4):501-504.  
(XIE Ke-chang, LIU Sheng-yu. Application of pyrolysis/Fourier transform infrared spectroscopy to study the reaction of pyrolysis[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2003, 31(4) 501-504.)
- [9] 徐朝芬,胡松,孙学信,陈刚. 热重-红外联用技术在煤燃烧特性研究中的应用[J]. 热力发电,2005,34(3)39-41.  
(XU Chao-fen, HU Song, SUN Xue-xin, CHEN Gang. Application of TGA-FTIR integrated technology in study on coal-burning behavior [J]. Thermal Power Generation, 2005, 34(3) 39-41.)
- [10] de JONG W, PIRONE A, WOJTOWICZ M A. Pyrolysis of miscanthus giganteus and wood pellets :TG-FTIR analysis and reaction kinetics [J]. Fuel, 2003, 82(9):1139-1147.
- [11] BASSILAKIS R, CARANGELO R M, WOJTOWICZ M A. TG-FTIR analysis of biomass pyrolysis[J]. Fuel, 2001, 80(12):1765-1786.
- [12] 林伟刚,宋文立. 丹麦生物质发电的现状和研究发展趋势(英文)[J]. 燃料化学学报,2005,33(6):650-655.  
(LIN Wei-gang, SONG Wen-li. Power production from biomass in Denmark[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2005, 33(6):650-655.)
- [13] GALWEY A K. Is the science of thermal analysis kinetics based on solid foundations : A literature appraisal[J]. Thermochim Acta, 2004, 413(1-2):139-183.
- [14] RAO T R, SHARMA A. Pyrolysis rates of biomass materials[J]. Energy, 1998, 23(11):973-978.
- [15] ANTAL J J M. Cellulose pyrolysis kinetics :Revisited[J]. Ind Eng Chem Res, 1998, 37(4):1267-1275.
- [16] CUMMING J W. Reactivity assessment of coals via a weighted mean activation energy[J]. Fuel, 1984, 63(10):1436-1440.
- [17] MANYA J J, VELO E, PUIGIANER L. Kinetics of biomass pyrolysis : A reformulated three-parallel-reactions model[J]. Ind Eng Chem Res, 2003, 42(3):434-441.
- [18] WILLIAMS P T, HORNE P A. The role of metal salts in the pyrolysis of biomass[J]. Renewable Energy, 1994, 4(1):1-13.

## 《燃料化学学报》征稿简则

《燃料化学学报》是由中国科学院主管、中国化学会和中国科学院山西煤炭化学研究所主办。刊载国内外燃料化学基础研究及其相关领域的最新研究成果和进展,涵盖煤炭、石油、油页岩、天然气、生物质,以及与此相关的环境保护和应用催化等方面的内容。

### 栏目设置

**研究论文** 报道学术价值显著、实验数据完整的研究成果,全文一般不超过6000字。

**研究快报** 迅速报道学术价值显著的最新进展,全文一般不超过4000字。

**研究简报** 报道研究工作中的部分或阶段性的研究成果,全文一般不超过4000字。

**综合评述** 一般为预约稿(不超过8000字)。

### 投 稿

1. 本刊热忱欢迎国内外学者投稿,中英文稿均可。

2. 来稿请附投稿申请表(网上下载:[www.sxicc.ac.cn](http://www.sxicc.ac.cn)/科技出版物/《燃料化学学报》简介/投稿申请表)和本单位推荐信,说明文稿无泄密和一稿多投。

3. 来稿请寄一式两份(打印),尽可能E-mail投稿。

4. 稿件请寄“山西太原桃园南路27号《燃料化学学报》编辑部”,邮编030001 电话:(0351)2025214 传真:(0351)2025214 E-mail:[rlhx@sxicc.ac.cn](mailto:rlhx@sxicc.ac.cn)

### 稿件及出版

(1) 审理结果一般在3个月内通知作者,对不宜采用的稿件尽快通知。不刊用的稿件恕不退还。

(2) 刊出的稿件通知作者交论文发表费。期刊印出后,酌致稿酬,并赠期刊2份和分装本10份。

(3) 从2000年起本刊已入编中国学术期刊光盘版、网络版,均不再另外通知和另付稿酬。凡不愿加入者,请投稿时说明。