

文章编号: 0253-2409(2012)09-1147-06

## 基于热重红外联用分析的 PE、PS、PVC 热解机理研究

罗希韬<sup>1,2</sup>, 王志奇<sup>1</sup>, 武景丽<sup>1</sup>, 吴晋沪<sup>1</sup>

(1. 中国科学院青岛生物能源与过程研究所 生物燃料重点实验室, 山东 青岛 266101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 利用 TGA-FTIR 联用技术考察了 PE、PS、PVC 三种典型塑料的热解特性。结果表明,热稳定性从弱到强依次为 PVC、PS、PE。PE 热解反应过程为典型的一段式反应,红外光谱分析结果表明,PE 热解过程为不规则断链形式,生成产物成分复杂,且随热解过程而改变,开始以饱和烃基团为主,中后期以烯烃基团为主,同时有少量炔烃;PS 热解过程同样为一段式反应,红外光谱显示主要热解产物为苯乙烯单体,说明热解过程主要是苯乙烯的解聚过程;PVC 热解过程较为复杂,主要分为脱氯阶段和共轭多烯重构阶段,红外光谱结果表明,产物中有芳香族化合物。脱氯过程和共轭多烯重构、环化过程在时间和空间上有重合,给二噁英类污染物的生成制造了可能。

**关键词:** PE; PS; PVC; TGA-FTIR 联用; 热解机理

**中图分类号:** TQ320 **文献标识码:** A

## Study on the pyrolysis mechanism of polyethylene, polystyrene, and polyvinyl chloride by TGA-FTIR

LUO Xi-tao<sup>1,2</sup>, WANG Zhi-qi<sup>1</sup>, WU Jing-li<sup>1</sup>, WU Jin-hu<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Biofuels, Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266101, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The pyrolysis behaviors of three kinds of typical plastics like polyethylene (PE), polystyrene (PS) and polyvinyl chloride (PVC) were investigated through thermal gravimetric analysis (TGA) and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The results showed that the thermal stability of these plastics increases following the sequence of PVC < PS < PE. PE pyrolysis is a typical one-stage reaction and involves irregular chain scission; the products of PE pyrolysis are complicated and changed gradually during the pyrolysis process; alkanes are the main products in the preliminary stage, while alkenes with trace amount of alkynes are the main products in the rest of pyrolysis process. PS pyrolysis is also a typical one-stage reaction with styrene as the main product, which suggests that the main reaction is depolymerization of PS to styrene monomer. PVC pyrolysis includes two events, i. e. dechlorination of PVC and rearrangement of conjugated polyene, in which aromatic compounds were found in the pyrolysis products; the dechlorination of PVC and the rearrangement and cyclization of conjugated polyene may take place simultaneously, which creates the potential for producing dioxin during PVC pyrolysis.

**Key words:** PE; PS; PVC; TGA-FTIR; pyrolysis mechanism

随着城市化进程的加速,人们环保意识的加强,城市固体废弃物处理问题日益成为各地市政建设的难题,传统的卫生填埋、堆肥、焚烧等方法逐渐暴露出其弊端。近年来,固体废弃物热解技术得到发展,通过适当的处理,热解技术可以克服传统处理方法的占地多、对大气及地下水造成污染的弊端,同时可以将固体废弃物中的有机物转化成为能源或化学品。因此,固体废弃物热解技术的研究有巨大的潜力。

通过垃圾分类发现,固体废弃物中主要的有机物除纤维素类物质外,塑料类垃圾占相当大的比例,

其同时具有高热值、难降解、燃烧毒性大等特点,比较适合热解技术处理。根据垃圾分类统计结果,塑料类垃圾中以 PE(聚乙烯)、PS(聚苯乙烯)、PVC(聚氯乙烯)类居多。其中,PVC 中含有比较多的氯元素(纯 PVC 中氯的质量分数为 56%),是固体废弃物中氯的主要来源,被认为是固体废弃物焚烧过程中生成二噁英的参与物之一。而二噁英是目前毒性最强,最难控制的污染物之一<sup>[1]</sup>。所以对上述三者进行热解机理研究十分必要。

TGA-FTIR(热重-傅里叶变换红外光谱)联用技术以其准确、灵敏、在线分析等优点,广泛应用于煤

收稿日期: 2011-12-17; 修回日期: 2012-03-07。

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973 计划, 2011CB201502); 山东省“泰山学者”计划(200824085)。

联系作者: 王志奇, Tel: 0532-80662763, Fax: 0532-80662761, E-mail: wangzq@qibebt.ac.cn。

和生物质的热解气化机理研究。Bassilakis 等<sup>[2]</sup>对生物质热解产物进行热重红外联用分析,提出了七种生物质的产物生成模型。Pan 等<sup>[3]</sup>也利用热重红外联用分析,研究了阳离子对木材热解气体产物的催化作用。Marcilla 等<sup>[4]</sup>利用 TG-FTIR 技术对 EVA 共聚物进行了研究,得出不同组分间的相互影响关系。王树荣等<sup>[5-7]</sup>利用热重红外联用技术对纤维素、半纤维素、白松木屑热解机理进行了研究,获得了纤维素、半纤维素等热解特性及主要气体产物的分布,从而进一步得出了相应的热解机理。王伟等<sup>[8]</sup>利用 TG-FTIR 技术对红松木屑进行了热解特性研究,研究了粒径、升温速率等对相应热解特性和气体产物的影响。王兴润等<sup>[9]</sup>对不同来源污泥进行了基于 TGA-FTIR 技术的燃烧和热解特性研究,获得了不同工艺处理获得的污泥相应的热解规律和气体产物特征。武景丽等<sup>[10]</sup>利用 TG-FTIR 技术对生物质重质组分进行了热解特性研究,获得了丁香

酚、3,4-二甲氧基苯甲醛、左旋葡萄糖相应的热解失重特性及生成气体的特征。

本研究利用热重红外联用技术,对可燃固体废弃物典型基元组分 PE、PS、PVC 进行了热解实验研究,并对其在热解过程中的失重特性、逸出气体产物组分及逸出特点进行了在线分析,对下一步的动力学相关研究有很好的指导作用。

## 1 实验部分

### 1.1 原料

PE、PS、PVC 三种塑料均来自中国石油化工齐鲁分公司,实验前预先粉碎,筛选其中粒径为 100 ~ 200 目部分,工业分析和元素分析见表 1。

从表 1 可以看出,实验材料中不含 N、O 元素,S 含量非常少,主要是 C、H 元素,PVC 中还含有约 57% 的 Cl 元素。工业分析结果主要为挥发分,几乎不存在水分,热值较高。

表 1 原料的元素分析及工业分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of experimental samples

Sample	Ultimate analysis $w_{ad}/\%$						Proximate analysis $w_{ad}/\%$			$Q_{NCV}$ /( $\text{MJ}\cdot\text{g}^{-1}$ )
	C	H	O	N	S	Cl	A	V	FC	
PE	85.66	14.08	0.00	0.00	0.39	0.05	0.00	99.98	0.02	44.09
PVC	38.56	4.61	0.00	0.00	0.40	57.04	0.00	94.78	5.06	19.88
PS	92.16	7.72	0.00	0.00	0.26	0.36	0.04	99.12	0.39	37.45

### 1.2 仪器及实验条件

实验系统由德国 NETZSCH 公司的 STA 409 PC 型热重差热分析仪和 Bruker 公司的 TENSOR 27 型傅里叶变换红外光谱仪组成。实验塑料的量为 (10 ± 0.1) mg,反应气氛为高纯氮气(99.999%),流量为 80 mL/min。为最大程度模拟真实热解过程,设定仪器最大升温速率(40 °C/min)从室温升至 900 °C。实验过程中同时记录热重-微商热重曲线(TG-DTG)和红外光谱扫描数据。TGA 与 FT-IR 所有连接部位,气体传输线路及 FT-IR 气室温度均设定为 200 °C,由仪器自带系统自动控温,FT-IR 扫描 4 000 ~ 600  $\text{cm}^{-1}$ ,分辨率为 4  $\text{cm}^{-1}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PE 热解特性及产物分析

图 1 为 PE 在 40 °C/min 升温速率下的 TG 和 DTG 曲线。图 1 结果表明,PE 在 200 °C 以下没有明显失重峰,说明原料中没有吸附水分等易析出物质,当温度升高至 420 °C 时开始出现明显失重,在 490 °C 时出现最大失重峰,最大失重速率为

0.024 7 % · min<sup>-1</sup>,而到 530 °C 时热解反应基本结束,热解最终固体残渣质量为加入量的 1.5%。整个热解过程仅出现一个失重峰,主要热解反应一步完成。

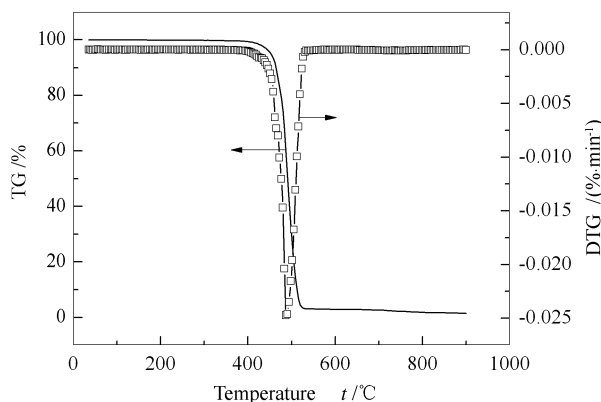


图 1 PE 在 40 °C/min 升温速率下的 TG-DTG 曲线

Figure 1 TG-DTG curve of PE under the heating rate of 40 °C/min

图 2、图 3 分别是 PE 热解过程的 FT-IR 三维谱图和从中选取不同阶段的红外光谱图。从图 2 可以

看出,热解产物特征吸收峰出现的时间对应于热重曲线开始失重反应的温度至反应结束,在热解过程主要的温度段内产物特征峰吸收强度及位置随反应时间(温度)的变化而不同。从图3中相应时间所对应红外吸收谱图的解析结果可以得出,PE热解过程的逸出气体开始阶段以饱和烃基团(2 928、2 856  $\text{cm}^{-1}$ ,  $-\text{CH}_2$ -伸缩振动)为主(实验时间790 s之前),而热解后半阶段以烯烃基团(3 016  $\text{cm}^{-1}$ ,  $=\text{C}-\text{H}$ 伸缩振动;1 641  $\text{cm}^{-1}$ ,  $-\text{C}=\text{C}$ -伸缩振动;1 462  $\text{cm}^{-1}$ ,  $=\text{CH}_2$ 剪式振动;910  $\text{cm}^{-1}$ , 950  $\text{cm}^{-1}$ , 987  $\text{cm}^{-1}$ ,  $=\text{C}-\text{H}$ 非平面摇摆振动)为主的烯烃类占主要部分,同时有部分饱和烃(2 928、2 856  $\text{cm}^{-1}$ ,  $-\text{CH}_2$ -伸缩振动;1 460  $\text{cm}^{-1}$ ,  $-\text{CH}_2$ -剪式振动;1 370  $\text{cm}^{-1}$ ,  $-\text{CH}_3$ 变形振动)和少量的炔烃(3 300  $\text{cm}^{-1}$ ,  $\text{C}-\text{H}$ 伸缩振动)。

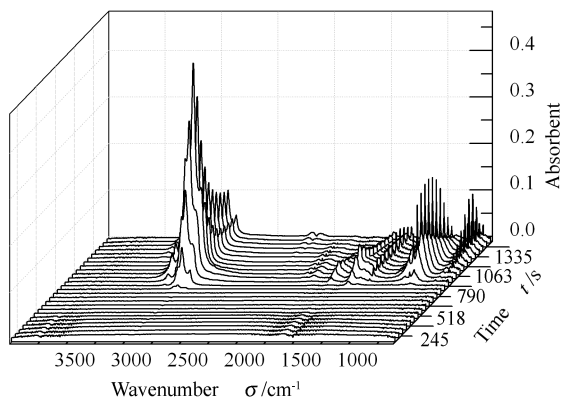


图2 PE在40  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温速率下热解的FT-IR谱图  
Figure 2 FT-IR 3D spectra of pyrolysis process of PE under the heating rate of 40  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$

时产物成分比较复杂,且开始热解阶段以烷烃产物为主,表明热解过程以无规则断链形式为主。这主要是由于PE分子为简单直链式,支化度低,聚合物分子间作用力相对较大,断链在聚合物链的任意部位随机发生,生成分子量不等的热解产物<sup>[11]</sup>。

## 2.2 PS热解特性及产物分析

图4为PS在40  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温速率下的TG和DTG曲线。由图4可知,和PE类似,200  $^{\circ}\text{C}$ 以下没有明显失重峰,随着温度的上升,PS在370  $^{\circ}\text{C}$ 开始明显失重,在445  $^{\circ}\text{C}$ 出现最大失重峰,最大失重速率为0.0226  $\% \cdot \text{min}^{-1}$ ,到500  $^{\circ}\text{C}$ 反应基本结束,剩余质量为加入量的0.5%。整个热解过程仅出现一个失重峰,主要热解过程一步完成。相对于PE,PS的整个热解过程都在更低的温度完成,说明PS热稳定性比PE差,主要原因是相对于PE的简单直链高分子结构,PS主分子链上有苯环侧链,支化度高,热稳定性差。

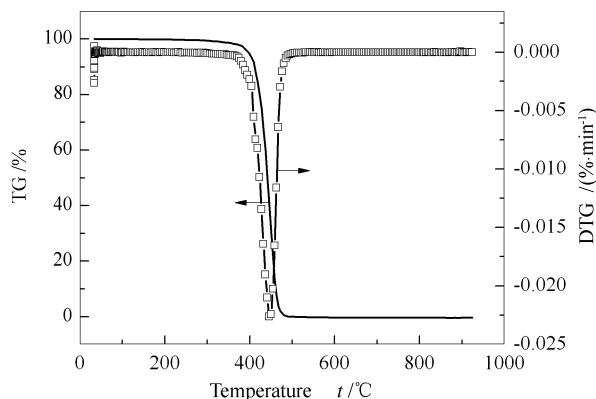


图4 PS在40  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温速率下的TG-DTG曲线  
Figure 4 TG-DTG curve of PS under the heating rate of 40  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$

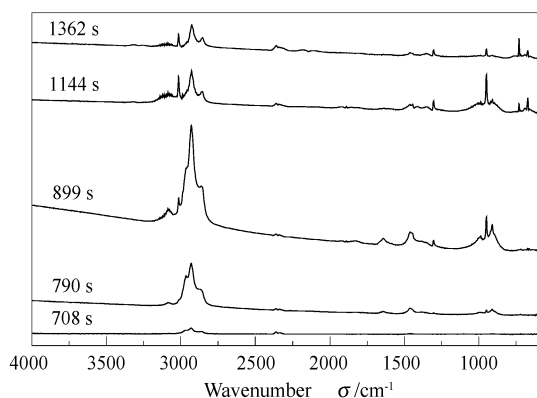


图3 PE在40  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温速率下热解过程不同阶段的FT-IR红外光谱图

Figure 3 FT-IR curves of different phases of pyrolysis process of PE under the heating rate of 40  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$

综合PE热解过程的热重及红外数据分析,整个热解过程没有明显分段,表现为一段式反应。同

图5,图6是PS热解过程的FT-IR三维谱图和从中选取不同阶段的红外谱图。从图5可以看出,整个热解反应过程中出现的几个主要物质吸收峰强度和位置随反应时间没有明显变化。从图6中相应时间所对应红外吸收谱图的解析结果可以得出,PS整个热解过程主要产物没有明显变化,以苯乙烯(3 077  $\text{cm}^{-1}$ ,单核芳环 $\text{C}-\text{H}$ 伸缩振动;3 027  $\text{cm}^{-1}$ ,  $=\text{CH}_2$ 伸缩振动;1 631  $\text{cm}^{-1}$ ,  $-\text{C}=\text{C}$ -伸缩振动;1 495、1 590  $\text{cm}^{-1}$ ,芳环 $\text{C}=\text{C}$ 伸缩振动;1 443  $\text{cm}^{-1}$ ,烯烃 $=\text{CH}_2$ 剪式振动;910、989  $\text{cm}^{-1}$ ,烯烃 $=\text{C}-\text{H}$ 非平面摇摆振动;695  $\text{cm}^{-1}$ ,芳烃 $\text{C}-\text{H}$ 面外摇摆振动)为主,同时生成少量含饱和基团物质(2 927、2 854  $\text{cm}^{-1}$ ,  $-\text{CH}_2$ -伸缩振动)。

相比于 PE 热解过程, PS 的热解过程简单很多, 主要是苯乙烯单体的解聚, 同时伴有少量的无规断链反应。这一结果与文献<sup>[12-14]</sup>报道的实验结果相符。

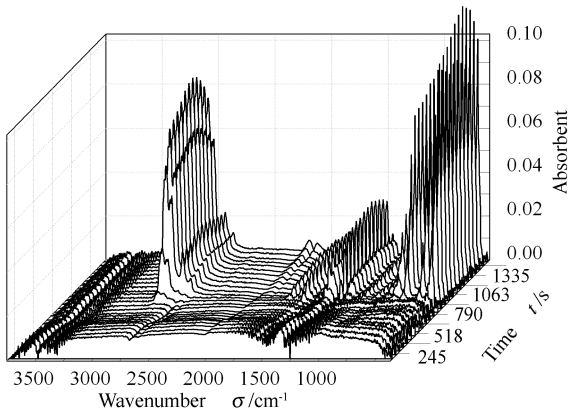


图5 PS在40℃/min升温速率下的FT-IR谱图  
Figure 5 FT-IR 3D spectra of pyrolysis process of PS under the heating rate of 40℃/min

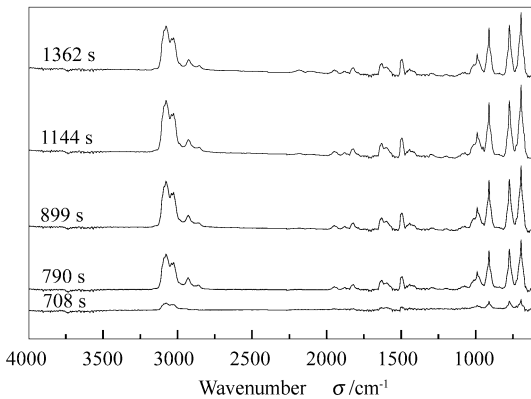


图6 PS在40℃/min升温速率下热解过程不同阶段的FT-IR红外光谱图

Figure 6 FT-IR curves of different phases of pyrolysis process of PS under the heating rate of 40℃/min

### 2.3 PVC热解特性及产物分析

图7为PVC在40℃/min升温速率下的TG和DTG曲线, 由图7可以看出, PVC在270℃时开始明显失重, 在324℃时出现第一个失重峰, 最大失重速率为0.0150%·min<sup>-1</sup>, 500℃出现第二个大的失重峰, 最大失重速率为0.0035%·min<sup>-1</sup>, 两个峰以413℃为分界点, 到570℃时反应基本结束, PVC剩余质量5.7%。热解过程出现两个明显的失重峰。

图8是PVC在40℃/min升温速率下的FT-IR三维谱图, 从图8中可以看出, 产物逸出过程也是分两个阶段的。第一阶段主要产物是HCl(2600~3100 cm<sup>-1</sup>)和氯代烃(672 cm<sup>-1</sup>, C-Cl伸缩振动), 说明这一阶段主要是HCl气体的析出, 同时伴有部

分氯代烃生成; 第二阶段也有少量的HCl生成, 主要产物是烷烃(2926、2854 cm<sup>-1</sup>, -CH<sub>2</sub>-伸缩振动)和烯烃(3015 cm<sup>-1</sup>, =C-H伸缩振动), 同时可以检测到少量的芳香族化合物(3090~3075 cm<sup>-1</sup>, 芳环C-H伸缩振动)。这说明第一阶段中HCl气体并没有完全脱除, 仍有较多的Cl元素在这一阶段析出, 同时, 检测到有少量芳香族化合物生成。PVC热解过程中C-Cl键断裂, 脱出HCl气体, 剩余骨架生成共轭多烯, 部分多烯碎片通过分子重排、环化形成芳香族结构, 其中, 一部分以小分子芳烃化合物的气体形式逸出, 另一部分进一步聚合成为稠环芳烃<sup>[13-17]</sup>, 而此时系统环境内仍有相当部分的HCl, 以及Cl的其他存在形式, 为进一步形成二噁英类物质创造了条件, 使之成为可能; 剩下的多烯碎片直接逸出。

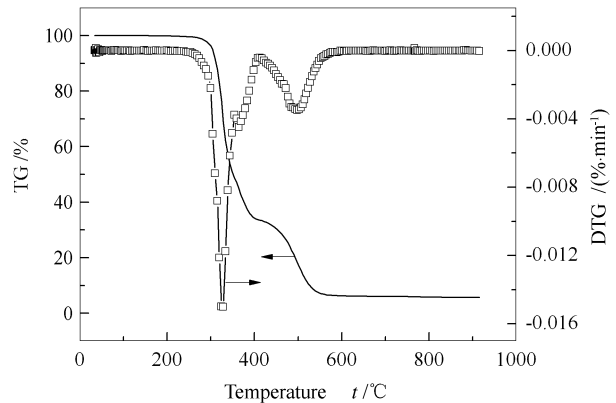


图7 PVC在40℃/min升温速率下的TG-DTG曲线  
Figure 7 TG-DTG curve of PVC under the heating rate of 40℃/min

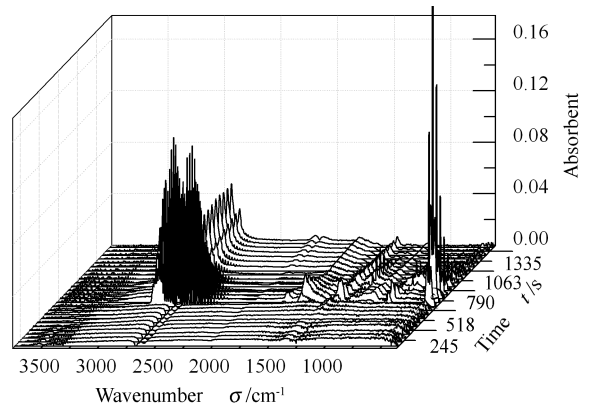


图8 PVC在40℃/min升温速率下FT-IR红外光谱图  
Figure 8 FT-IR 3D spectra of pyrolysis process of PVC under the heating rate of 40℃/min

### 2.4 三种塑料热解特性比较

PE、PS、PVC三种塑料热解特性因分子结构组成的不同而有着很大的差异, 三种塑料热解反应及产物基本特征数据见表2和表3。

表2 不同样品的热解特征参数

Table 2 Characteristic parameters of samples' pyrolysis process

Sample	$t_i/^\circ\text{C}$	$t_p/^\circ\text{C}$	DTG <sub>p</sub>	$t_f/^\circ\text{C}$	Residue
			$/(\% \cdot \text{min}^{-1})$		$/\%$
PE	420	490	0.024 7	530	1.50
PS	370	445	0.022 6	500	0.50
PVC	270	324	0.015 0	413	33.54
	413	500	0.003 5	570	5.70

$t_i$ : initial reaction temperature;  $t_p$ : peak reaction temperature  
 DTG<sub>p</sub>: the peak value of derivative thermo-gravimetry (the maximum reaction rate)

$t_f$ : final reaction temperature

表3 特征基团对应的红外峰值

Table 3 Assignments of the IR bands to vibrational modes of atomic groups

Sample	Group	Vibrational mode	Assigned wavenumber $\sigma/\text{cm}^{-1}$
PE	-CH <sub>2</sub> -	C-H stretching	2 928, 2 856
	=C-H	=CH stretching	3 016
	-C=C-	-C=C- stretching	1 641
	=CH <sub>2</sub>	=CH <sub>2</sub> scissoring	1 462
	=C-H	=C-H wagging	910, 950, 987
	-CH <sub>3</sub>	-CH <sub>3</sub> deformation	1 370
	≡C-H	≡C-H stretching	3 300
	PS	mononuclear aromatic C-H	C-H stretching
=C-H		=CH stretching	3 027
-C=C-		-C=C- stretching	1631
aromatic C=C		C=C stretching	1 495, 1 590
olefinic =CH <sub>2</sub>		=CH <sub>2</sub> scissoring	1 443
olefinic =C-H		=C-H out-of-plane bending	910, 989
aromatic C-H		C-H wagging	695
-CH <sub>2</sub> -		-CH <sub>2</sub> - stretching	2 927, 2 854
PVC	H-Cl	H-Cl stretching	2 600 ~ 3 100
	-CH <sub>2</sub> -	C-H stretching	2 926, 2 854
	=C-H	=CH stretching	3 015
	aromatic C-H	C-H stretching	3 090 ~ 3 075

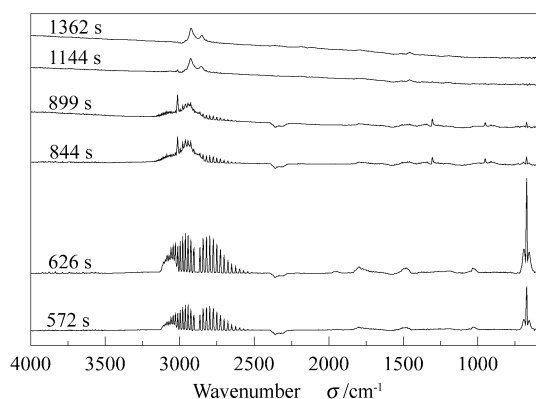


图9 PVC在40 °C/min升温速率下热解过程不同阶段的FT-IR红外光谱图

Figure 9 FT-IR curves of different phases of pyrolysis process of PVC under the heating rate of 40 °C/min

由表2和表3可知,PVC因易析出HCl气体而表现出弱热稳定性,在270 °C即开始失重,在324 °C达到第一个最大失重峰。而在这个温度下,PS、PE还没有出现明显失重,没有出现明显红外特征吸收峰,说明PS、PE还没有发生热降解。PVC的热解终止温度为500 °C,相同实验条件下热解温度范围为300 K,残留质量为5.7%,均高于其他两种塑料,说明PVC热解范围最广,最难完全热解。相比于其他两种塑料,PVC的红外特征产物是大量的HCl。

PS的热稳定性介于PVC和PE之间,相同实验条件下,热解反应温度范围为130 K,红外特征基团是苯环。

PE的热稳定性是三种塑料中最好的,420 °C才开始明显失重。相同实验条件下,热解反应温度范围仅为110 K,是三种塑料中反应温度范围最小的。PE热解的红外特征基团是烷烃基团。

### 3 结论

不同类型塑料的热解机理不同,PE热解过程是以无规则断链形式进行,生成产物成分复杂,且随热解过程而改变;PS热解过程主要是苯乙烯单体的解聚过程,同时伴有少量的无规断链反应,生成产物主要是苯乙烯单体;PVC热解过程主要分为两个阶段,第一阶段主要是HCl气体的析出,伴有少量氯

代烃的析出,第二阶段是共轭多烯的重构环化等过程,同时有前阶段没有析出的 Cl 元素以 HCl 等形式析出。

PE 热解产物以脂肪烃类物质为主,适合进一步重整作为燃料或化学品;PS 热解产品主要是苯乙烯,伴有其他副产物,适合于进一步研究改进工艺,提高苯乙烯收率;PVC 热解过程相对复杂,在生成

芳香族化合物的同时有 HCl 气体析出,说明脱氯过程较难和重排、环化过程分离,从而使二噁英类物质生成成为可能。

三种塑料热稳定性以 PVC 最差,在 270 °C 就已经开始热解析出 HCl 气体,其次是 PS,PE 热稳定性最好。

## 参考文献

- [1] 李海英,张书廷,赵新华. 城市生活垃圾焚烧产物中二噁英检测方法[J]. 燃料化学学报, 2005, **33**(3): 379-384.  
(LI Hai-ying, ZHANG Shu-ting, ZHAO Xin-hua. Detection methods of dioxins emitted from municipal solid waste incinerator[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2005, **33**(3): 379-384.)
- [2] BASSILAKIS R. TG-FTIR analysis of biomass pyrolysis[J]. Fuel, 2001, **80**(12): 1765-1786.
- [3] PAN Wei-ping. Influence of metal ions on volatile products of pyrolysis of wood[J]. J Anal Appl Pyrolysis, 1989, **16**(2): 117-126.
- [4] MARCILLA A. TG/FTIR study of the thermal pyrolysis of EVA copolymers[J]. J Anal Appl Pyrolysis, 2005, **74**: 224-230.
- [5] 王树荣,刘倩,骆仲泐,文丽华,岑可法. 基于热重红外联用分析的纤维素热裂解机理研究[J]. 浙江大学学报, 2006, **40**(7): 1154-1158.  
(WANG Shu-rong, LIU Qian, LUO Zhong-yang, WEN Li-hua, CEN Ke-fa. Mechanism study of cellulose pyrolysis using thermogravimetric analysis coupled with infrared spectroscopy[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2006, **40**(7): 1154-1158.)
- [6] 王树荣,刘倩,郑赞,文丽华,骆仲泐,岑可法. 基于热重红外联用分析的生物质热裂解机理研究[J]. 工程热物理学报, 2006, **27**(2): 351-353.  
(WANG Shu-rong, LIU Qian, ZHENG Yun, WEN Li-hua, LUO Zhong-yang, CEN Ke-fa. Mechanism study of biomass pyrolysis by thermogravimetric analysis coupled with infrared spectroscopy[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, **27**(2): 351-353.)
- [7] 姚燕,王树荣,郑赞,骆仲泐,岑可法. 基于热重红外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 Shu-rong, ZHENG Yun, LUO Zhong-yang, CEN Ke-fa. Kinetic research of lignin pyrolysis by TGA-FTIR analysis[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2007, **13**(1): 50-54.)
- [8] 王伟,蓝煜昕,李明. TG-FTIR 联用下生物质废弃物的热解特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(1): 380-384.  
(WANG Wei, LAN Yu-xin, LI Ming. Pyrolysis of pine sawdust by TG-FTIR analysis [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, **27**(1): 380-384.)
- [9] 王兴润,金宜英,王志玉,杜欣,聂永丰. 应用 TGA-FTIR 研究不同来源污泥的燃烧和热解特性[J]. 燃料化学学报, 2007, **31**(1): 27-31.  
(WANG Xing-rui, JIN Yi-ying, WANG Zhi-yu, DU Xin, NIE Yong-feng. Study on pyrolysis and combustion of different sewage sludges by TGA-FTIR analysis [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2007, **31**(1): 27-31.)
- [10] 武景丽,汪丛伟,阴秀丽,吴创之,马隆龙,周肇秋,陈汉平. 基于 TG-FTIR 的生物油重质组分热解特性研究[J]. 太阳能学报, 2010, **13**(1): 113-117.  
(WU Jing-li, WANG Cong-wei, YIN Xiu-li, WU Chuang-zhi, MA Long-long, ZHOU Zhao-qiu, CHEN Han-ping. Study on pyrolysis of heavy fractions of bio-oil by using TG-FTIR analysis[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2010, **13**(1): 113-117.)
- [11] 刘义彬,马晓波,陈德珍,赵磊,周恭明. 废塑料典型组分共热解特性及动力学分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, **30**(23): 56-61.  
(LIU Yi-bin, MA Xiao-bo, CHEN De-zhen, ZHAO Lei, ZHOU Gong-ming. Coprolysis characteristics and kinetic analysis of typical constituents of plastic wastes[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, **30**(23): 56-61.)
- [12] KAMINSKY W, SINN H. Pyrolyse von kunststoffabfallen und altreifen im wirbelschtrektor (pyrolysis of plastics wastes and used tires in a fluidized bed reactor) [J]. Kunststoffe, 1978, **68**: 284-290. (in German)
- [13] 万升龙,王剑秋. 聚烯烃塑料的降解特性研究[J]. 石油炼制与化工, 1997, **28**(9): 41-45.  
(WAN Sheng-long, WANG Jian-qiu. Study on degradation characteristics of polyolefins [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 1997, **28**(9): 41-45.)
- [14] 王宝庆,陈亚雄. 废塑料的回收利用及降解塑料的生产现状[J]. 云南环境科学, 2001, **20**(2): 27-29.  
(WANG Bao-qing, CHEN Ya-xiong. Recycling of wasted plastics and production of degradable plastics [J]. Yunnan Environmental Science, 2001, **20**(2): 27-29.)
- [15] WAGNER M. 热分析应用基础[M]. 陆立明,译. 上海: 东华大学出版社, 2011: 217-218  
(WAGNER M. Thermal analysis in practice[M]. trans. LU Li-ming. Shanghai: Donghua University Press, 2011: 217-218.)
- [16] 达里贝里. 逸出气体分析[M]. 唐远旺译. 上海: 东华大学出版社, 2010: 50-52.  
(DARRIBÈRE C. Evolved gas analysis[M]. trans. TANG Yuan-wang. Shanghai: Donghua University Press, 2010: 50-52.)
- [17] 田原宇,吕永康,谢克昌. PVC 的热解/红外(Py/FTIR)研究[J]. 燃料化学学报, 2002, **30**(6): 569-572.  
(TIAN Yuan-yu, LV Yong-kang, XIE Ke-chang. Application of Py/FTIR to pyrolysis of PVC [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2002, **30**(6): 569-572.)