

文章编号:1674-2869(2016)01-0017-07

# 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物和聚乙烯的热解特性及动力学

罗 婧<sup>1,2</sup>, 廖厚琪<sup>1,2</sup>, 潘梦远<sup>1,2</sup>, 吴华东<sup>1,2</sup>, 张林峰<sup>1,2</sup>, 郭 嘉<sup>1,2\*</sup>

1. 武汉工程大学化工与制药学院, 湖北 武汉 430074;

2. 绿色化工过程教育部重点实验室(武汉工程大学), 湖北 武汉 430074

**摘 要:**采用热天平对丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)和聚乙烯(PE)混合废料进行热分析,并用 $n$ 级动力学方程对其进行模拟,获得了热解动力学参数.结果表明,ABS与PE的质量比不同时(6:1, 5:1或4:3),其热失重可分为1步分解或者2步分解;随着升温速率的上升,热失重区间都向高温区移动;当ABS/PE的质量比为4:3时,混合物活化能较低,其反应活性则越高,越容易发生热解反应.该研究为有效利用ABS和PE等废旧塑料,以及其热解工艺的探索研究提供参考数据及理论依据.

**关键词:**丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物/聚乙烯;混合废料;升温速率;热解特性;热重分析

**中图分类号:** TQ325.2      **文献标识码:** A      **doi:** 10.3969/j.issn.1674-2869.2016.01.003

## Pyrolytic Property and Kinetics of Mixture of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Copolymer and Polyethylene

LUO Jing<sup>1,2</sup>, LIAO Houqi<sup>1,2</sup>, PAN Mengyuan<sup>1,2</sup>, WU Huadong<sup>1,2</sup>, ZHANG Linfeng<sup>1,2</sup>, GUO Jia<sup>1,2</sup>

1. School of Chemical Engineering and Pharmacy, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. Key Laboratory of Green Chemical Process (Wuhan Institute of Technology), Ministry of Education, Wuhan 430074, China

**Abstract:** We carried out the pyrolysis of the mixture of acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer (ABS) and polyethylene (PE) by using a thermal balance. Pyrolytic data under different conditions were obtained and used for kinetic study with an  $n^{\text{th}}$  order model. The results show that at the mass ratios of ABS and PE of 6:1, 5:1 and 4:3, the thermal decomposition of weight loss can be identified by one-step or two-step process. With the heating rate increasing, the weight loss is shifted to the high temperature zone. As the mass ratio of ABS/PE is 4:3, the mixture has lower activation energy and higher reactivity, resulting in an easy pyrolysis reaction. This study can provide experimental data and theoretical base for pyrolytic utilization of plastic solid wastes.

**Keywords:** ABS/PE; mixture wastes; heating rate; pyrolysis property; thermogravimetric analysis

## 1 引 言

塑料制品由于其优良的综合性能,广泛的运用于日常的生产与生活中.多年来,中国ABS(丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物)树脂的应用高度集中在电冰箱、电视机、计算机等电子电器产品的配

件上,占总消费量的80%<sup>[1]</sup>.而PE(聚乙烯)则常用于制作日常用品的各种容器、管材、包装带等.这两种塑料若不经处理可导致环境污染,若在光照受热时ABS还会释放出有害物质影响健康<sup>[2-4]</sup>.

近年来,无论是国际上还是国内,由于自然资源的不断开发利用和社会经济的发展,特别是随

收稿日期:2015-12-09

基金项目:国家自然科学基金(51346005);湖北省自然科学基金重点项目(2014CFA090)

作者简介:罗 婧,硕士研究生. E-mail:308414689@qq.com

\*通讯作者:郭 嘉,博士,教授. E-mail:guojia@wit.edu.cn

着人口的高度集中和城市化的迅速发展,世界各国的垃圾均以较快平均速度增长,由此产生的垃圾给地球生态以及人类生存环境带来了巨大的威胁,成为重要的社会问题<sup>[5-6]</sup>. 对于塑料废料的处理,国内外常见的处理方法可以分为以下几类:土地填埋法、焚烧法、原材料的回收再利用以及化学回收法. 众所周知,土地填埋法对土壤的伤害十分巨大而且还是不可逆的,所以用这种方法来处理废旧塑料已经逐渐退出人们的视线. 相对于原材料的回收再利用,焚烧法所产生的废气(其中,包括二恶英)对生态的破坏是不可估量的. 在全球化的当今社会,保护环境走可持续发展路线已使原材料的回收再利用和化学回收成为处理废旧塑料的最佳方法. 在化学回收方法中,可以利用热解技术来处理废料. 用此方法处理废旧塑料并不会产生损害人体健康或是对大气造成破坏的污染气体,而热解所产生的液态产物可经过一系列的处理成为再生燃料,其固体残渣也可进行再次利用. 在已有的研究中,针对聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯等进行热解实验研究的较多.

本研究通过对丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)和聚乙烯(PE)混合物进行热重(TG)实验,为废旧塑料热解工艺的探索研究提供参考数据以及理论依据.

## 2 实验部分

### 2.1 实验材料

本试验选用生活中常见的废旧塑料,其材质分别为聚乙烯(PE)和丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS). 分别对二者混合物(ABS与PE质量比分别为6:1、5:1和4:3)切粒后进行热重实验.

### 2.2 实验方法

采用沃特世科技(上海)有限公司生产的Q500热重分析仪,在高纯度 $N_2$ 气氛下,采用程序控温进行实验,温度误差在 $\pm 1\%$ 以内.  $N_2$ 流量控制在40 mL/min;实验温度从室温升至800  $^{\circ}C$ ,分别选取10、20、30  $^{\circ}C/min$ 以及40  $^{\circ}C/min$ 作为实验的升温速率,从而分别测定二者混合物热降解的TG和DTA曲线.

在进行热重实验前,将废旧塑料的试样切粒成5 mm左右的颗粒,再放入反应容器中进行热重实验. 为消除样品中水分对热重实验结果的影响,则将样品放入80  $^{\circ}C$ 的烘箱内干燥3 h后再进行热重实验.

## 3 结果与分析

经过重复性实验以及对数据的处理可以得到不同比例混合物在不同升温速率下的TG曲线和DTG曲线(a为整个实验温度范围的热失重情况,b为剧烈失重阶段的放大图,下同).

从图1和图2中可以观察到,ABS/PE(6:1)混合物的热失重分为2步分解. 分别在10、20、30  $^{\circ}C/min$ 以及40  $^{\circ}C/min$ 的升温速率下,对应的两个分解温度区间有所不同. 从DTG图中可以明显看出有两个明显的峰,且第二个峰明显高于第一个峰. 但总体上,随着升温速率的上升,失重区间向高温区移动,ABS/PE(6:1)混合物热失重过程中的初始温度 $T_i$ 、终止温度 $T_f$ 以及达到最大热解速率时的温度 $T_{max}$ 均有所上升;其热解速率也随之增大;最大热解率也随之升高;但是最终剩余质量百分数却没有明显的变化.

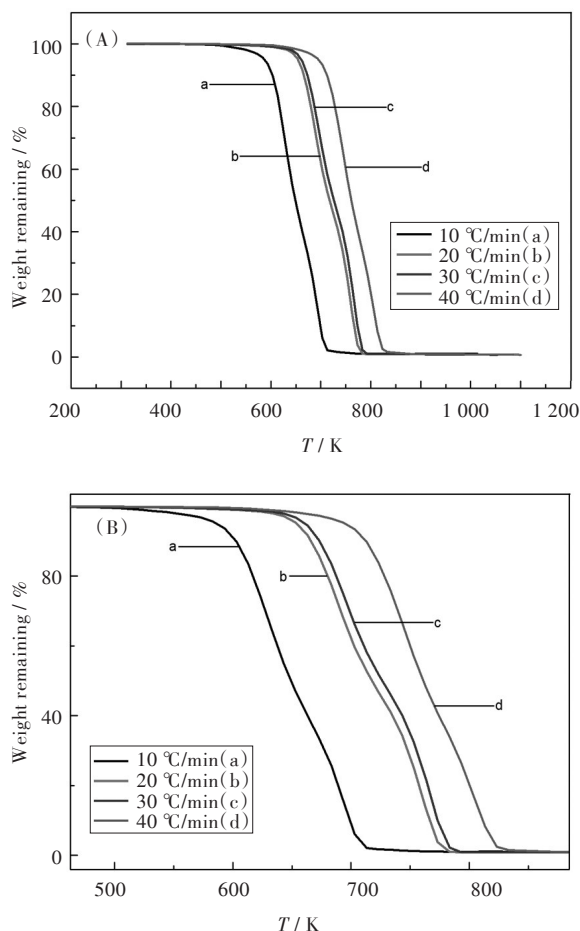


图1 在 $N_2$ 气氛下,ABS/PE(6:1)在不同升温速率下的TG曲线

Fig. 1 TG curves of ABS/PE(6:1) at different heating rates in  $N_2$  atmosphere

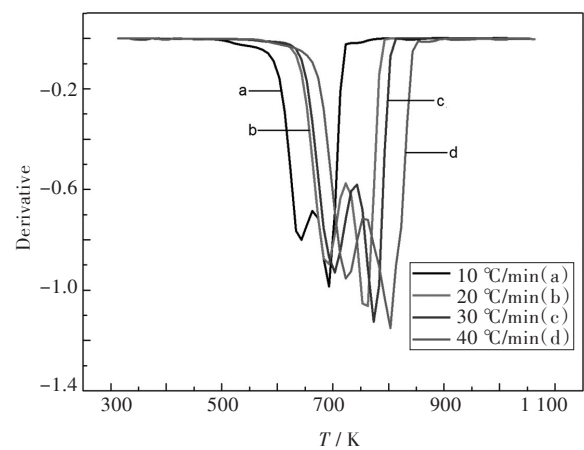


图2 在N<sub>2</sub>气氛下,ABS/PE(6:1)在不同升温速率下的DTG曲线

Fig. 2 DTG curves of ABS/PE(6:1) at different heating rates in N<sub>2</sub> atmosphere

从图3和图4中可以观察出,ABS/PE(5:1)混合物的热失重分为2步分解. 在不同升温速率(10、20、30 °C/min 以及 40 °C/min)下,对应的两个分解温度区间有所不同. 从DTG图中可以明显看出有两个明显的峰,且第一个峰明显高于第二个峰. 但总体上,随着升温速率的上升,失重区间向高温区移动,ABS/PE(5:1)混合物热失重过程中的初始温度 $T_i$ 、终止温度 $T_f$ 以及达到最大热解速率时的温度 $T_{max}$ 均有所上升;其热解速率也随之增大;最大热解率也随之升高;但是最终剩余质量百分数却没有明显的变化.

从图5和图6中可以观察出,ABS/PE(4:3)混合物的热失重是一步分解,可将其降解过程也分为三个阶段,分别为吸热熔融过程、高速热降解阶段以及热解衰退阶段. 从DTG图2中可以发现,在650~700 K之间有一个不明显的峰,此峰是ABS中的聚丁二烯的分解峰<sup>[7-8]</sup>,可能由于混合物中ABS含量并不高导致峰型特别不明显. 当升温速率为10 °C/min时,ABS/PE(4:3)热失重温度区间为635~750 K;当升温速率为20 °C/min时,ABS/PE(4:3)热失重温度区间为665~760 K;当升温速率为30 °C/min时,ABS/PE(4:3)热失重温度区间为670~770 K;当升温速率为40 °C/min时,ABS/PE(4:3)热失重温度区间为675~780 K. 随着升温速率的上升,ABS/PE(4:3)混合物热失重过程中的初始温度 $T_i$ 、终止温度 $T_f$ 以及达到最大热解速率时的温度 $T_{max}$ 均有所上升;其热解速率也随之增大;最大热解率也随之升高;但是最终剩余质量百分数却没有明显的变化.

综上所述,ABS/PE混合物在不同的配比下,

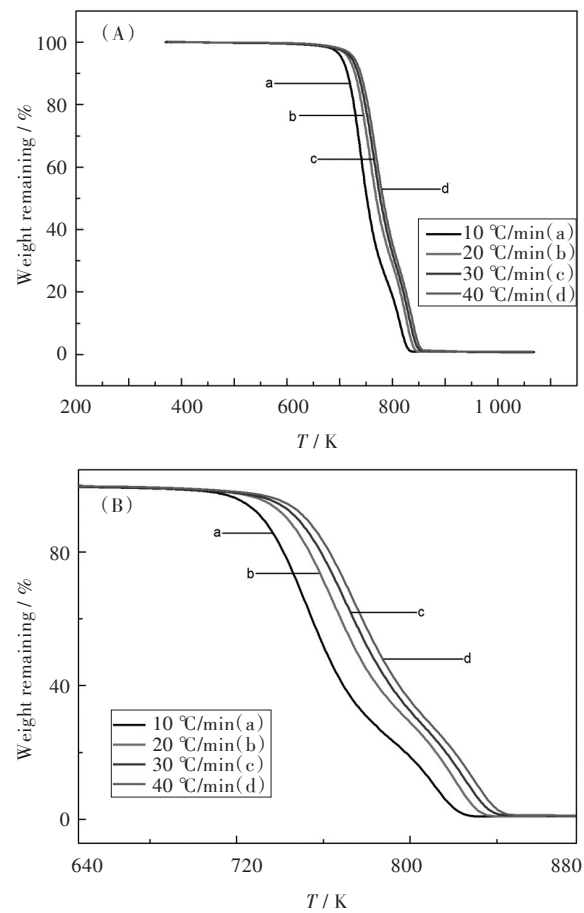


图3 在N<sub>2</sub>气氛下,ABS/PE(5:1)在不同升温速率下的TG曲线

Fig. 3 TG curves of ABS/PE(5:1) at different heating rates in N<sub>2</sub> atmosphere

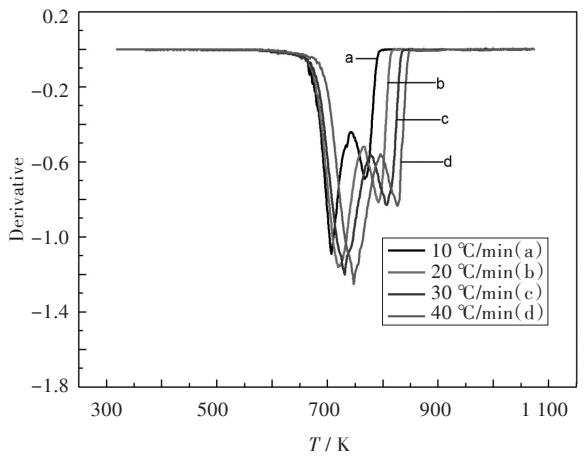


图4 在N<sub>2</sub>气氛下,ABS/PE(5:1)在不同升温速率下的DTG曲线

Fig. 4 DTG curves of ABS/PE(5:1) at different heating rates in N<sub>2</sub> atmosphere

其TG和DTG曲线是完全不同的. 这说明,在不同配比下,ABS和PE的协同作用的方式也不相同. 当ABS:PE配比为6:1和5:1时,可将第一个热解温度段看作主链裂解释放分子碎片的过程,将第二个热解温度段看作高温过程中产生的热稳定性

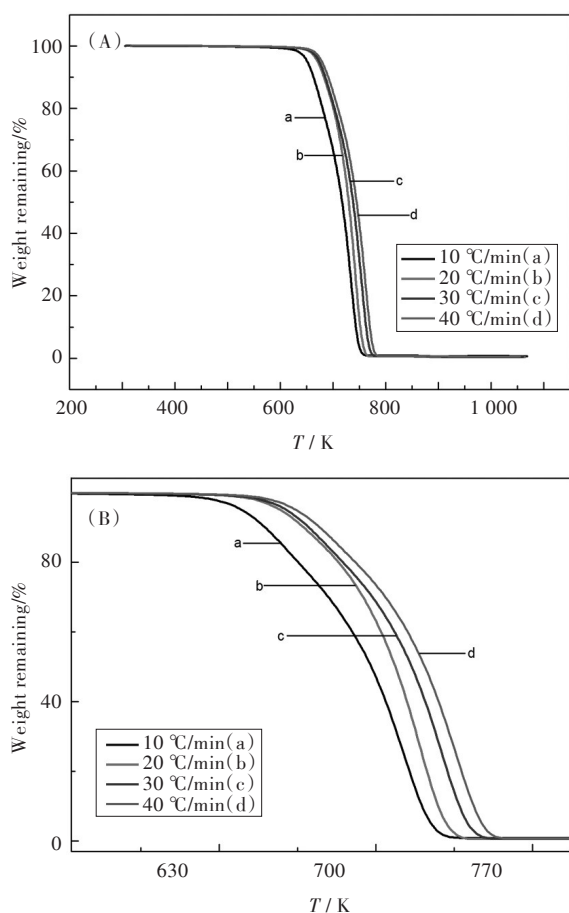


图5 在 $N_2$ 气氛下,ABS/PE(4:3)在不同升温速率下的TG曲线

Fig. 5 TG curves of ABS/PE(4:3) at different heating rates in  $N_2$  atmosphere

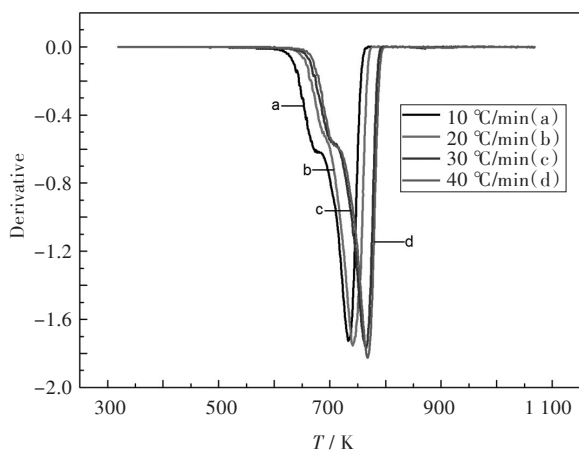


图6 在 $N_2$ 气氛下,ABS/PE(4:3)在不同升温速率下的DTG曲线

Fig. 6 DTG curves of ABS/PE(4:3) at different heating rates in  $N_2$  atmosphere

更高的结构再次发生失重的过程. 由于配比不同, 不同热解温度段的失重程度也不一样<sup>[9-11]</sup>. 但总体上, 随着升温速率的上升, 失重区间向高温区移动, 混合物热失重过程中的初始温度 $T_i$ 、终止温度 $T_f$ 以及达到最大热解速率时的温度 $T_{max}$ 均有所上

升; 热解速率也随之增大; 最大热解率也随之升高; 但是最终剩余质量百分数却没有明显的变化.

#### 4 热解动力学研究

由于 $n$ 阶动力学模型对实验数据的模拟要优于ASTME698模型<sup>[12-13]</sup>, 故采用 $n$ 阶动力学模型对实验结果进行数据分析.

塑料的热解反应过程可表示为:  $A(s) \rightarrow B(s) + C(g)$

则热解动力学方程可表示为:

$$\frac{dx}{dT} = kf(x) \quad (1)$$

其中,  $x$  为热解转化率(%),  $T$  为热力学温度(K),  $k$  为反应速率常数.

由阿列纽斯(Arrhenius)方程可以得到 $k$ 与热力学温度 $T$ 之间的关系:

$$k = \frac{A}{\beta} \exp(-E/RT) \quad (2)$$

其中,  $A$  为频率因子( $\text{min}^{-1}$ ),  $\beta$  为升温速率( $\text{K/min}$ ),  $E$  为活化能( $\text{kJ/mol}$ ),  $R$  为摩尔气体常量( $R = 8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ ).

由于采用 $n$ 阶动力学模型, 所以假定 $f(x) = (1-x)^n$ , 则(1)可转化成:

$$\frac{dx}{dT} = \frac{A}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) (1-x)^n \quad (3)$$

当 $n=1$ 时, 即把反应视为一级反应, 则可得到:

$$\frac{dx}{dT} = \frac{A}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) (1-x) \quad (4)$$

$$x = \frac{m_0 - m_t}{m_0 - m_\infty}$$

其中,  $m_0$  为起始质量( $\text{mg}$ ),  $m_t$  为热解过程中某一时刻的质量( $\text{mg}$ ),  $m_\infty$  为热解终点的残余质量( $\text{mg}$ ).

采用Coats-Redfern积分法可得:

$$-\frac{\ln(1-x)}{T^2} = \frac{AR}{\beta E} \left(1 - \frac{2RT}{E}\right) \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (5)$$

由于 $RT/E \ll 1$ , 故 $(1-2RT/E)$ 可近似等于1, 所以上式可简化为:

$$\ln\left[\frac{-\ln(1-x)}{T^2}\right] = \ln\frac{AR}{\beta E} - \frac{E}{RT} \quad (6)$$

利用作图软件Origin8.0, 由 $\ln\left[\frac{-\ln(1-x)}{T^2}\right]$ 对 $\frac{1}{T}$ 作图, 并进行线性拟合, 通过所得直线的斜率和截距分别可以求出该一级反应热解过程的之前因子 $A$ .

表 1  废旧塑料试样的动力学参数  
Tab.1  Kinetic parameters of plastic samples

样品	反应级数 $n$	升温速率/(℃/min)	温度段/℃	$R^2$	$G_i/\%$	$E_d/(\text{kJ/mol})$	$A/\text{min}^{-1}$
ABS/PE 6:1	1	10	370~430	0.984 64	34.2	167.771 1	$6.334\text{E}^{+11}$
			460~490	0.987 15	94.5		$4.833\ 69\text{E}^{+13}$
		20	380~440	0.979 98	32	168.654 8	$6.178\ 69\text{E}^{+12}$
			470~500	0.975 72	82		$1.209\ 62\text{E}^{+13}$
		30	410~450	0.976 71	30	206.089 9	3 281 008 158
			490~510	0.993 35	95.5		$1.875\ 17\text{E}^{+17}$
		40	400~440	0.996 39	35	218.882 4	$1.581\ 69\text{E}^{+12}$
			480~500	0.990 36	94.8		96 166 001 786
	2	10	370~430	0.994 04	34.2	433.518 9	$6.388\ 96\text{E}^{+13}$
			460~490	0.935 96	94.5		$3.716\ 31\text{E}^{+39}$
		20	380~440	0.989 16	32	440.420 1	$3.615\ 54\text{E}^{+14}$
			470~500	0.935 88	82		$6.381\ 1\text{E}^{+29}$
		30	410~450	0.985 95	30	543.321 6	$5.353\ 51\text{E}^{+11}$
			490~510	0.966 57	95.5		$5.812\ 13\text{E}^{+47}$
		40	400~440	0.999 13	35	557.456 8	$1.431\ 34\text{E}^{+14}$
			480~500	0.976 23	94.8		$4.304\ 22\text{E}^{+24}$
ABS/PE 5:1	1	10	380~420	0.957 85	36.2	178.069 6	14 657 575 823
			460~490	0.970 19	96		$3.327\ 57\text{E}^{+11}$
		20	380~420	0.996 53	33.5	186.589 8	$1.820\ 05\text{E}^{+15}$
			480~500	0.988 31	93.1		$1.462\ 38\text{E}^{+14}$
		30	390~450	0.981 48	38.8	195.785 8	$1.254\ 23\text{E}^{+12}$
			485~500	0.991 40	96.6		$1.236\ 84\text{E}^{+12}$
		40	420~480	0.997 31	94.3	207.562 1	3 080 129 921
	2	10	380~420	0.982 68	36.2	282.706 8	$6.812\ 99\text{E}^{+13}$
			460~490	0.925 90	96		$1.519\ 83\text{E}^{+35}$
		20	380~420	0.999 12	33.5	312.021 5	$1.438\ 34\text{E}^{+17}$
			480~500	0.961 82	93.1		$7.447\ 55\text{E}^{+42}$
		30	390~450	0.993 65	38.8	366.946 5	$6.219\ 64\text{E}^{+14}$
			485~500	0.978 59	96.6		$2.803\ 5\text{E}^{+32}$
		40	420~480	0.996 37	94.3	398.557 1	$3.721\ 55\text{E}^{+11}$
ABS/PE 4:3	1	10	400~450	0.998 50	89.9	112.852 1	$2.083\ 1\text{E}^{+13}$
		20	400~450	0.994 86	86.0	156.935 0	853 298 051
		30	400~450	0.985 83	85.2	186.273 1	$1.230\ 35\text{E}^{+12}$
		40	400~450	0.981 06	84.3	199.248 6	$1.263\ 71\text{E}^{+13}$
	2	10	400~450	0.994 79	89.9	140.245 1	$1.487\ 92\text{E}^{+11}$
		20	400~450	0.997 37	86.0	175.182 5	$3.590\ 43\text{E}^{+13}$
		30	400~450	0.984 69	85.2	189.503 8	$2.246\ 93\text{E}^{+13}$
		40	400~450	0.986 24	84.3	207.314 9	$1.165\ 24\text{E}^{+14}$



同理,当 $n=2$ 时,方程可化简为:

$$\ln\left[\frac{(1-x)^{-1}-1}{T^2}\right]=\ln\left[\frac{AR}{\beta E}\left(1-\frac{2RT}{E}\right)\right]-\frac{E}{RT} \quad (7)$$

由于 $RT/E \ll 1$ ,故 $(1-2RT/E)$ 可近似等于1,所以(7)式可化简为:

$$\ln\left[\frac{(1-x)^{-1}-1}{T^2}\right]=\ln\frac{AR}{\beta E}-\frac{E}{RT} \quad (8)$$

利用作图软件 Origin8.0,由 $\ln\left[\frac{(1-x)^{-1}-1}{T^2}\right]$ 对 $\frac{1}{T}$ 作图,并进行线性拟合,通过所得直线的斜率和截距分别可以求出该二级反应热解过程的指前因子 $A$ 。

经过拟合计算得到各实验的动力学参数见表1。表中的温度区间为试样主要热解温度段。其中, $G_i$ 为样品各阶段的失重率( $i \leq 2$ ); $E_e$ 为样品的总活化能,是反应各阶段活化能的加权平均值( $E_e = \frac{G_1 E_1 + G_2 E_2}{G_1 + G_2}$ ); $R$ 为相关系数。

由表1可知,在一级动力学方程下算出ABS/PE混合物的活化能比在二级动力学方程下算出的活化能要低。可以明显的看出,在二级动力学方程的拟合下,出现多组热解温度段时,其活化能可达到300~500 kJ/mol。当活化能越低,反应物的反应活性越高,越容易发生热解反应<sup>[14-15]</sup>。所以,当ABS/PE的质量比为4:3时,体系热解效应越明显,即混合物试样热解时存在的分子间自由基的转移越活跃,有效降低了热稳定性,使得其热解更加容易。对于混合物热解时DTG曲线为单一峰时,一级动力学方程和二级动力学方程都能较好的拟合;但对于混合物热解时DTG曲线为二重峰时,在低热解温度段时二级动力学方程拟合较好,而在高热解温度段时一级动力学方程拟合较好。

## 5 结 语

本实验可得到如下结论:

1) 当ABS与PE的质量比为6:1和5:1时,混合物的热失重分为2步分解;当ABS:PE=4:3时,混合物的热失重分为1步分解。但随着升温速率的上升,热失重区间都向高温区移动,混合物热失重过程中的初始温度 $T_i$ 、终止温度 $T_f$ 以及达到最大热解速率时的温度 $T_{max}$ 都均有所上升;热解速率也随之增大;最大热解率也随之升高;但是最终剩余质量百分数却没有明显的变化。

2) 当ABS:PE配比为6:1和5:1时,从DTG曲

线中可以明显看出有两个峰,可将第一个热解温度段看作主链裂解释放分子碎片的过程,将第二个热解温度段看作高温过程中产生的热稳定性更高的结构再次发生失重的过程。

3) 当ABS/PE的质量比为4:3时,一级动力学方程和二级动力学方程都能较好的拟合;当ABS与PE的质量比为6:1和5:1时,在低热解温度段时二级动力学方程拟合较好,而在高热解温度段时一级动力学方程拟合较好。

4) 当ABS/PE的质量比为4:3时,混合物活化能较低,其反应活性则越高,越容易发生热解反应。

5) 当ABS和PE混合物进行热解时,会出现1步分解或者2步分解的现象,而当ABS、PE分别进行单一热解时只会出现1步分解;将单一热解过程与混合物热解过程相比较,可以发现PE、ABS的活化能较高,而二者混合物(PE/ABS)的活化能较低,混合物试样热解时存在分子间自由基的转移,有效降低了热稳定性,热解更加容易。

## 参考文献:

- [1] 苏菲. 家电用塑料供需形势分析[J]. 电器供应商情, 2007(2): 6-8.  
SU F. Analysis of plastic supply and demand situation from appliances [J]. Planning China appliance magazine, 2007(2): 6-8.
- [2] 王其中. 塑料包装废弃物的污染及治理技术[J]. 宁波高等专科学校学报, 2006, 12(2): 62-65.  
WANG Q Z. Pollution and control technology of plastic packing waste [J]. Journal of Ningbo college, 2006, 12(2): 62-65.
- [3] 刘生鹏, 张苗, 胡昊泽, 等. 聚乙烯改性研究进展[J]. 武汉工程大学学报, 2010, 3: 31-36.  
LIU S P, ZHANG M, HU H Z, et al. Modified of polyethylene progress [J]. Journal of Wuhan institute of technology, 2010, 3: 31-36.
- [4] 袁军, 刘明, 陈威, 等. 碳酸钙和乙烯-辛烯共聚物对废旧聚丙烯塑料的改性[J]. 武汉工程大学学报, 2015, 37(3): 9-14.  
YUAN J, LIU M, CHEN W, et al. Modified of polypropylene in waste plastic by calcium carbonate and ethylene-octene copolymer [J]. Journal of Wuhan institute of technology, 2015, 37(3): 9-14.
- [5] 陈国艳, 张衍国, 朱九龙, 等. 灰色理论及改良方法对我国垃圾产量的预测[J]. 环保产业技术, 2011(6): 51-54.  
CHEN G Y, ZHANG Y G, ZHU J L, et al. Prediction to grey theory and improved methods for production of

- garbage[J]. Environmental protection industry, 2011 (6): 51-54.
- [6] 陈国艳, 张衍国, 朱九龙, 等. 灰色系统理论对我国垃圾产量的预测[J]. 环境科学, 2011, 37(4): 29-33.
- CHEN G Y, ZHANG Y G, ZHU J L, et al. Grey system theory to predict the yield of garbage to China[J]. AC-TA scientiae circumstantiae, 2011, 37(4): 29-33.
- [7] LUO G H, SUTO T, YASU S, et al. Catalytic degradation of high density polyethylene and polypropylene into liquid fuel in a powder-particle fluidized bed[J]. Polymer degradation and stability, 2000, 70: 97-102.
- [8] 陈烈强, 王保玉, 梁超, 等. 废旧家电塑料ABS的热解动力学分析[J]. 广州化工, 2008, 36: 40-43.
- CHEN L Q, WANG B Y, LIANG C, et al. Pyrolysis kinetics analysis of ABS plastic from waste household appliances [J]. Guangzhou chemical industry, 2008, 36: 40-43.
- [9] 靳素荣, 袁军, 张联盟.  $(\text{dienH}_3)_2\text{P}_2\text{Mo}_5\text{O}_{23}$  的非等温热解动力学研究[J]. 武汉工程大学学报, 2008(2): 38-42.
- JIN S R, YUAN J, ZHANG L M. Non-isothermal decomposition kinetics of  $(\text{dienH}_3)_2\text{P}_2\text{Mo}_5\text{O}_{23}$  [J]. Journal of Wuhan institute of technology, 2008(2): 38-42.
- [10] PANDA A K, SINGH R K, MISHRA D K. Thermolysis of waste plastics to liquid fuel a suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products—a world prospective [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2010, 14: 233-248.
- [11] 袁兴中, 曾光明, 李彩亭, 等. 废塑料裂解制取液体燃料新技术[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [12] 梁小平, 潘红, 王雨, 等. 城市生活垃圾典型组分的热解动力学分析[J]. 环境工程学报, 2009, 3(6): 1118-1122.
- LIANG X P, PAN H, WANG Y, et al. Pyrolysis kinetic analysis of typical components from municipal solid waste[J]. Chinese journal of environmental engineering, 2009, 3(6): 1118-1122.
- [13] 胡荣祖, 高胜利, 赵凤起, 等. 热分析动力学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2008.
- [14] OZAWA T. Non-isothermal kinetics of consecutive reactions[J]. Journal thermal analysis and calorimetry, 2000, 60: 887-894.
- [15] KIM S. Pyrolysis kinetics of waste PVC pipe [J]. Waste management, 2001, 21(7): 609-616.

本文编辑: 张 瑞