

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.05.001

无卤阻燃聚对苯二甲酸丙二酯的研究^{*}

李飞^{1,2},姜国伟²,孙春荣²,娄大伟¹,周光远²

(1. 吉林化工学院, 吉林吉林 132022; 2. 中国科学院长春应用化学研究所生态环境高分子材料重点实验室, 长春 130022)

摘要: 使用无卤磷系阻燃剂二乙基次膦酸铝 (ADP) 和氮系阻燃剂三聚氰胺氰尿酸盐 (MCA) 作为阻燃剂, 马来酸酐接枝聚烯烃弹性体 (POE-g-MAH) 为增韧剂, 对聚对苯二甲酸丙二酯 (PTT) 进行阻燃改性, 分别研究两种不同体系阻燃剂对 PTT 阻燃性能和力学性能的影响, 并通过热失重 (TG) 分析仪、差示扫描量热 (DSC) 仪、扫描电子显微镜 (SEM) 对其阻燃机理进行研究。实验结果表明, 添加质量分数 10% 的 ADP 时, 阻燃 PTT 达到 V-0 级, 极限氧指数 (LOI) 达到 30.0%, ADP 主要在凝聚相中发挥阻燃作用; 添加质量分数 20% 的 MCA 时, 阻燃 PTT 达到 V-0 级, LOI 达到 24.9%, MCA 主要在气相中发挥阻燃作用; ADP 与 MCA 的加入都降低了阻燃 PTT 的综合力学性能。TG 和 DSC 测试结果说明, ADP 与 PTT 间的相容性良好, 可以有效地促进 PTT 成炭并提高材料的阻燃性能; MCA 与 PTT 间的相容性较差, 且 MCA 对 PTT 成炭没有影响。添加质量分数 5% 的 ADP 和 10% 的 MCA 时, 阻燃 PTT 达到 V-0 级, LOI 达到 26.9%, 说明 ADP 与 MCA 具有协同阻燃作用。

关键词: 无卤阻燃; 聚对苯二甲酸丙二酯; 磷系阻燃剂; 氮系阻燃剂; 阻燃机理

中图分类号: O631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)05-0001-06

Study on Halogen-Free Flame Retardant PTT

Li Fei^{1,2}, Jiang Guowei², Sun Chunrong², Lou Dawei¹, Zhou Guangyuan²

(1. Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132022, China;

2. Key Laboratory of Polymer Ecomaterials, Changchun Institute of Applied Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

Abstract: The use of halogen-free phosphorus flame retardant two ethyl aluminum phosphinate (ADP) and nitrogen flame retardant melamine cyanuric acid (MCA) as the flame retardant, maleic anhydride grafted polyolefin elastomer (POE) as toughening agent to flame retardant modification of poly (trimethylene terephthalate) (PTT), the effects of two kinds of flame retardants on flame retardancy and mechanical properties of PTT were studied respectively. The flame retardant mechanism was studied by thermogravimetric (TG) analysis, differential scanning calorimeter (DSC) and scanning electron microscopy (SEM). Experimental results show that, when the mass fraction of ADP is increased by 10%, the flame retardant PTT reaches V-0 level, LOI reaches 30.0%, ADP mainly in the condensed phase plays the role of flame retardant. When the mass fraction of MCA is increased by 20%, the flame retardant PTT reaches V-0 level, LOI reaches 24.9%, MCA mainly in the gas phase plays the role of flame retardant. The addition of ADP and MCA reduce the mechanical properties of PTT. TG and DSC test results show that, the compatibility between ADP and PTT is good, it can effectively promote the PTT into carbon and improve the flame retardant properties of the material. Poor compatibility between MCA and PTT, and MCA has no effect on PTT carbon formation. When adding mass fraction of 5% ADP and 10% MCA, the flame retardant PTT reaches V-0 level, LOI reaches 26.9%, the results show that ADP and MCA have synergistic flame retardant effect.

Keywords: halogen-free flame retardant; poly (trimethylene terephthalate); phosphorus-containing flame retardant; nitrogen-containing flame retardant; flame retarding mechanism

聚对苯二甲酸丙二酯 (PTT), 与聚对苯二甲酸乙二酯 (PET) 和聚对苯二甲酸丁二酯 (PBT) 同为脂肪族聚酯^[1], 但与 PET 和 PBT 不同的是, PTT 具有奇数个亚甲基, 并具有“Z”字型结构, 使 PTT 具备更好的弹性、连续印染性等优良性能, 同时还具备非常优良的加工性能, 因此 PTT 在地毯、服装、工程塑

料等领域具有非常好的应用前景^[2-4]。但 PTT 的极限氧指数 (LOI) 只有 22% 左右, 极易燃烧的性质极

^{*} 吉林省科技发展计划基金项目 (20160203005GX)

联系人: 周光远, 研究员, 研究方向为烯烃聚合催化剂与结构可控聚合及新型聚酯合成

收稿日期: 2017-02-22

大地限制了其应用范围^[5]。因此,对 PTT 进行阻燃改性研究具有重要的意义。目前,针对 PTT 进行阻燃改性的研究很少。王学利等^[6]使用自制阻燃剂环状磷酸酯(MBEP)、三聚氰胺和溴化环氧树脂与 PTT 进行熔融共混,制备阻燃 PTT 纤维,当添加质量分数为 3% 的 MBEP 和 4% 的三聚氰胺时,阻燃材料具有良好的阻燃性,LOI 达到 28%。吕通建等^[7]使用传统溴锑阻燃剂阻燃 PTT,共混后加入玻纤制备高强度的阻燃 PTT,将 12% 的溴化聚苯乙烯与 4% 的三氧化二锑复配使用,可使玻纤增强阻燃 PTT 的阻燃级别达到 FV-0。

卤系阻燃剂由于其在分解过程中会产生大量有毒有害气体,严重危害人们身体健康和生态环境,正逐渐被淘汰,无卤阻燃剂成为研究重点^[8]。无卤阻燃剂主要包括磷系阻燃剂,氮系阻燃剂,无机氢氧化物阻燃剂,膨胀型阻燃剂,硼系阻燃剂等^[9-11],其中磷系阻燃剂在聚合物燃烧时可以分解生成偏磷酸等物质促进碳层的形成,还可以生成自由基捕捉剂捕获空气中游离的自由基,终止燃烧链式反应,在凝聚相和气相中发挥阻燃作用^[12-13];而氮系阻燃剂在聚合物燃烧过程中会分解生成大量不燃气体以达到稀释空气中可燃气体含量并带走一部分热量的目的,在气相中发挥阻燃作用^[14-15]。

笔者使用磷系阻燃剂二乙基次膦酸铝(ADP)和氮系阻燃剂三聚氰胺氰尿酸盐(MCA)作为阻燃剂,马来酸酐接枝聚烯烃弹性体(POE-g-MAH)为增韧剂,对 PTT 进行阻燃改性,研究不同阻燃剂体系对 PTT 阻燃性能的影响,对拓宽 PTT 在汽车、家居等领域的应用具有积极的意义。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PTT: 自制;

ADP: 工业级,江苏利思德新材料有限公司;

MCA: 工业级,清远市普塞味磷化学有限公司;

POE-g-MAH: 工业级,接枝率 1.1%,美国埃克森美孚公司。

1.2 主要仪器与设备

双螺杆挤出机: PTW24 型,德国 HAAKE 公司;

平板硫化机: XLR-D 型,湖州顺力橡胶设备有限公司;

注塑机: CJ80M3V 型,震德塑料机械厂;

热失重(TG)分析仪: TGA/DSC1 型,瑞士

Mettler Toledo 公司;

差示扫描量热(DSC)仪: DSC1 型,瑞士 Mettler Toledo 公司;

场发射环境扫描电子显微镜(SEM): XL30 ESEM FEG 型,美国 FEI 公司;

LOI 仪: HC-2 型,南京江宁分析仪器厂;

垂直燃烧仪: CZF-1 型,南京江宁分析仪器厂;

万能材料试验机: INSTRON-5869 型,美国 Instron 公司;

悬臂梁冲击试验机: JJ-20 型,长春市智能仪器设备有限公司。

1.3 试样制备

将 PTT, ADP, MCA 在真空烘箱中 80℃ 环境下干燥 8 h,将干燥好的原材料分别按照配方使用双螺杆挤出机熔融共混,并将挤出的阻燃 PTT 使用切粒机切粒,干燥 5 h 后,使用平板硫化仪压制试样,模压温度 240℃,压力 10 MPa,预热 15 min,热压 3 min,冷压 2 min,成型的试样用于测试材料的垂直燃烧等级和 LOI。使用注塑机在 230℃ 条件下注射成型力学性能标准测试试样,测试材料的拉伸强度、弯曲强度、冲击强度和断裂伸长率。

1.4 性能测试

TG 和 DSC 测试: 升温速率 10℃/min,温度范围 30~700℃,N₂ 气氛,流速为 20 mL/min;

LOI 按 GB/T 2046-2008 测试,试样尺寸为 130 mm×6.5 mm×3 mm;

垂直燃烧性能按 GB/T 2408-2008 测试,试样尺寸为 130 mm×13 mm×3 mm;

拉伸性能按 GB/T 1040-2006 测试,试样尺寸为 150 mm×10 mm×4 mm,拉伸速率为 10 mm/min;

弯曲性能按 GB/T 9341-2000 测试,试样尺寸为 80 mm×10 mm×4 mm,弯曲速率为 10 mm/min;

冲击性能按 GB/T 1843-1996 测试,试样尺寸为 80 mm×10 mm×4 mm,摆锤能量为 5.5 J;

相容性及分散性测试: 将阻燃 PTT 经液氮脆断后,使用 SEM 对其断面进行观察分析;

碳层形貌测试: 选择垂直燃烧测试后的试样,使用 SEM 观察其表面及内部形貌。

2 结果与讨论

2.1 阻燃 PTT 的阻燃性能

ADP 与 MCA 对 PTT 阻燃性能的影响见表 1。

表1 ADP与MCA对PTT阻燃性能的影响

样品	PTT/%	ADP/%	MCA/%	POE-g-MAH/%	是否点燃脱脂棉	是否有熔滴滴落	LOI/%	垂直燃烧测试结果
1 [#]	100	0	0	0	是	是	22.0	-
2 [#]	93	0	0	7	是	是	22.7	-
3 [#]	88	5	0	7	是	是	24.1	-
4 [#]	83	10	0	7	否	否	30.0	V-0
5 [#]	78	15	0	7	否	否	43.5	V-0
6 [#]	73	20	0	7	否	否	46.7	V-0
7 [#]	83	0	10	7	是	是	23.0	-
8 [#]	78	0	15	7	否	是	23.6	V-2
9 [#]	73	0	20	7	否	是	24.9	V-0
10 [#]	68	0	25	7	否	是	26.1	V-0
11 [#]	78	5	10	7	否	否	26.9	V-0

由表1可以看出,随着ADP与MCA添加量的增加,阻燃剂对PTT都具有很好的阻燃效果。添加ADP阻燃剂10%时可以使阻燃PTT的垂直燃烧等级达到V-0级,LOI达到30.0%;添加MCA阻燃剂20%时可以使阻燃PTT的垂直燃烧等级达到V-0级,LOI达到24.9%。故ADP阻燃PTT的性能更佳。

在燃烧过程中,MCA阻燃PTT有熔滴滴落。这是由于MCA在组分中起到促熔滴的作用,促进PTT降解形成熔滴,带走大量热量使材料达到自熄,并在熔滴滴落过程中分解生成大量不燃气体使熔滴自熄而不会引燃脱脂棉,使材料的阻燃等级达到V-0级。

当同时添加5%的ADP和10%的MCA阻燃剂时,阻燃材料的垂直燃烧等级达到V-0级,LOI达到26.9%,而单独添加5%的ADP阻燃剂或单独添加10%的MCA阻燃剂时,阻燃材料达不到阻燃级别,可以说明ADP与MCA具有协效阻燃效果。

2.2 阻燃PTT的力学性能

ADP和MCA对PTT力学性能的影响列于表2。

表2 ADP和MCA对PTT力学性能的影响

样品	拉伸强度 / MPa	弯曲强度 / MPa	冲击强度 / (kJ·m ⁻²)	断裂伸长率 / %
1 [#]	55.23	73.76	47.54	27.31
2 [#]	47.02	64.71	129.09	31.66
3 [#]	38.65	69.22	25.80	4.51
4 [#]	33.78	66.67	14.20	3.65
5 [#]	30.71	60.72	16.67	2.89
6 [#]	32.45	59.55	15.03	3.61
7 [#]	53.15	79.23	36.48	9.68
8 [#]	51.75	80.14	35.06	9.33
9 [#]	49.73	79.29	29.90	5.75
10 [#]	48.74	78.16	26.58	4.97
11 [#]	47.31	78.52	25.45	5.01

由表2可知,添加7%的POE-g-MAH后,阻燃PTT(2[#]样品)的拉伸强度和弯曲强度均有所降低,分别由纯PTT(1[#]样品)的55.23 MPa,73.76 MPa

降低到47.02 MPa,和64.71 MPa,而冲击强度提升较大,由纯PTT(1[#]样品)的47.54 kJ/m²提升到129.09 kJ/m²,断裂伸长率也由纯PTT材料的27.31%提高到31.66%。说明添加POE-g-MAH对PTT具有很好的增韧效果。

随着ADP添加量的增加,阻燃PTT的综合力学性能下降,当ADP添加量为10%时,阻燃PTT(4[#]样品)达到V-0级,其冲击强度由纯PTT(1[#]样品)的47.54 kJ/m²降低到14.2 kJ/m²,拉伸强度由纯PTT的55.23 MPa降低到33.78 MPa,弯曲强度降低较小,由纯PTT的73.76 MPa降低到66.67 MPa,断裂伸长率也降低到3.65%。

随着MCA添加量的增加,阻燃PTT的力学性能有升有降。当MCA添加量为20%时,阻燃PTT(9[#]样品)达到V-0级,其冲击强度降低到29.9 kJ/m²,拉伸强度降低到49.73 MPa,但弯曲强度提高到79.29 MPa,故MCA阻燃PTT的力学性能优于ADP阻燃PTT。

而磷氮复配之后的11[#]样品的拉伸强度为47.31 MPa,弯曲强度为78.52 MPa,冲击强度为25.45 kJ/m²,断裂伸长率为5.01%,其力学性能明显优于ADP阻燃PTT,但略低于MCA阻燃PTT。相比于ADP高昂的价格,复配体系在保证阻燃PTT阻燃效果和力学性能的同时,降低了其应用成本。

2.3 ADP和MCA在PTT中的分散性及相容性

通过对ADP阻燃PTT和MCA阻燃PTT进行液氮脆断,使用SEM对其断面进行分析,研究阻燃剂在PTT中的分散性及相容性。

不同ADP添加量下阻燃PTT的SEM照片如图1所示。

由图1a可看出,当ADP添加量为5%时,阻燃PTT断面没有明显的阻燃剂颗粒,也没有明显的两相分离,两者间相容性良好;随着阻燃剂添加量的

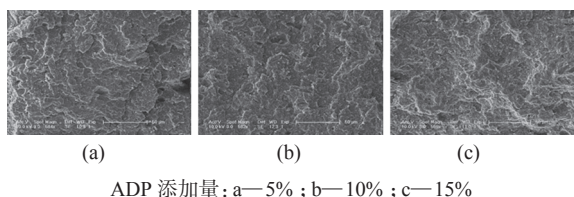


图1 不同ADP添加量下阻燃PTT的SEM照片

继续增加,当ADP添加量达到15%时,材料中出现ADP颗粒,但ADP依然均匀地分散在PTT中,没有出现团聚现象(图1c),说明ADP在PTT中分散性良好。随着阻燃剂添加量的增加相容性有所下降。

不同MCA添加量下阻燃PTT的SEM照片如图2所示。

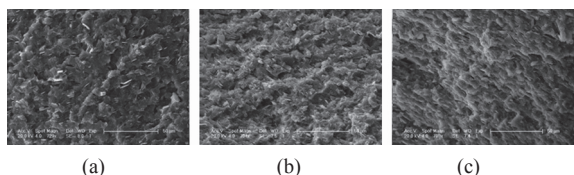


图2 不同MCA添加量下阻燃PTT的SEM照片

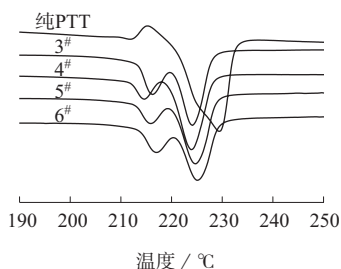
由图2可看出,阻燃PTT表面出现MCA阻燃剂颗粒,可以明显地看到MCA的片层结构从PTT中剥离出来,但MCA均匀地分散在PTT中,且随着阻燃剂添加量的增加同样没有出现团聚现象,说明MCA在PTT中分散性良好,但两者间的相容性较ADP与PTT差。这应该是由ADP为有机磷系阻燃剂,而MCA为无机氮系阻燃剂,有机阻燃体系和PTT的相容性明显优于无机阻燃体系和PTT。

2.4 阻燃PTT的DSC分析

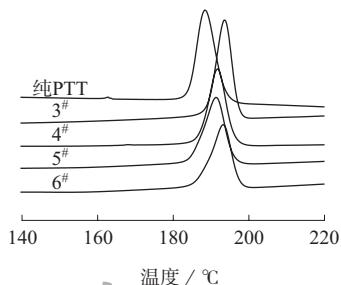
聚合物材料的性能由其微观形态和内部结构决定,对于聚合物共混而言,性能与形态结构的关系更加复杂。界面对共混物的形态结构起着至关重要的作用,由于界面处存在两相的相互作用,界面将会影响到共混物的熔融和结晶行为。因此,通过DSC测试,并讨论复合体系组分之间的相互作用及其对复合体系结构和性能的影响。聚合物在实际成型加工过程中经历的大多为非等温过程,研究聚合物在非等温条件下的熔融和结晶行为与材料性能和形态之间的关系具有现实意义。

ADP阻燃PTT的DSC曲线如图3所示。

由图3可以看出,在加热过程中,纯PBT出现双重熔融峰,添加ADP后,仍然保持双重熔融峰特征,且随着阻燃剂添加量的增加,熔融温度向低温方向移动,但结晶温度向高温方向移动。当阻燃PTT达到V-0级时,4#样品的熔融温度由纯PTT的



(a)



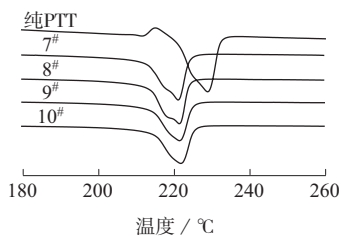
(b)

a—熔融曲线;b—结晶曲线

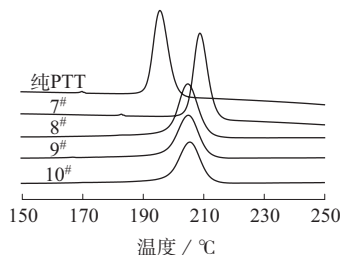
图3 ADP阻燃PTT的DSC曲线

228℃降低到224℃,结晶温度则由纯PTT的197℃升高到199℃。通过DSC曲线可以看出,阻燃PTT在熔融和结晶过程中,熔融和结晶曲线的趋势均与纯PTT基体的熔融和结晶曲线相同,说明ADP的加入没有改变PTT材料的熔融与结晶途径,ADP与PTT基体的相容性较好。这与SEM观察到的结果相符合。随着ADP添加量的增加,结晶峰变窄,说明ADP的加入提高了PTT材料的结晶速率。

MCA阻燃PTT的DSC曲线如图4所示。



(a)



(b)

a—熔融曲线;b—结晶曲线

图4 MCA阻燃PTT的DSC曲线

由图4可以看出,随着MCA添加量的增加,阻燃PTT的双重熔融峰逐渐消失,熔融峰向低温方向移动,但结晶温度升高。当阻燃PTT达到V-0级时,9#样品的熔融温度由纯PTT的228℃降低到224℃,结晶温度则由纯PTT的197℃升高到206℃。通过DSC曲线可以看出,MCA阻燃PTT在熔融和结晶过程中,熔融曲线的趋势与纯PTT熔融曲线相比有所改变,MCA的加入影响了PTT的熔融途径,说明MCA与PTT基体材料的相容性较差。这与SEM观察到的结果相符合。随着MCA添加量的增加,结晶峰变宽,说明MCA的加入减慢了PTT材料的结晶速度,改善了材料的加工性能。

2.5 阻燃PTT的TG分析

ADP阻燃PTT的TG曲线如图5所示。

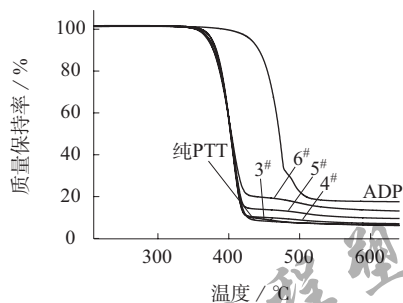


图5 ADP阻燃PTT的TG曲线

由图5可知,以热失重5%时的温度为分解温度,ADP阻燃剂的分解温度较高,为431℃,而纯PTT的分解温度为375℃。随着ADP添加量的增加,阻燃PTT的分解温度不断降低,添加量达到10%时,分解温度降低到368℃;而随着阻燃剂添加量的增加,阻燃PTT的残碳率不断增大,添加10%阻燃剂时由纯PTT的7.07%提高到8.24%。由此可以说明材料在分解过程中,ADP与PTT发生了相互作用,降低了PTT材料的热稳定性,使PTT提前分解,并在分解过程中促进PTT成炭,在凝聚相中发挥阻燃作用。

MCA阻燃PTT的TG曲线如图6所示。

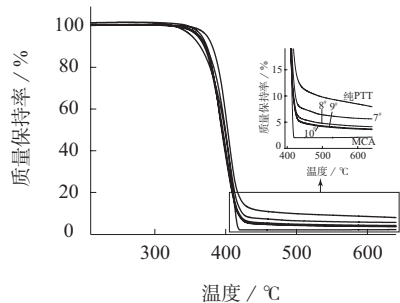


图6 MCA阻燃PTT的TG曲线

MCA在350℃时达到升华温度,开始吸热升华,但不分解,当温度升高到440℃左右时会分解成 NH_3 , CO_2 和 H_2O 。由图6可知,MCA热失重5%时的温度为352℃,600℃时残碳率仅为2.12%。随着阻燃剂添加量的增加,阻燃PTT的分解温度降低,残炭率同样有所降低。这是由于MCA在分解过程中几乎完全分解,随着组分中MCA添加量的增加,残炭率必然会降低。TG测试结果说明,MCA可以促进PTT提前分解,但却对PTT成炭没有影响,MCA应该在气相中发挥阻燃作用,一方面升华并促进熔滴滴落带走大量热量,一方面分解生成大量不燃气体稀释可燃气体浓度使材料自熄,使阻燃PTT的等级达到V-0级。

2.6 阻燃PTT燃烧后的碳层形貌

由TG分析结果可知,MCA对PTT成炭没有促进作用,而ADP对PTT成炭具有促进作用,故选择ADP添加量为10%时的阻燃PTT在700℃下充分燃烧,对残留的碳层进行SEM分析,结果如图7所示。

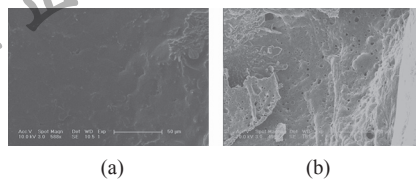


图7 添加10%的ADP时阻燃PTT(4#样品)燃烧后碳层表面和内部形貌的SEM照片

由图7可看出,阻燃PTT燃烧后碳层表面连续致密,可有效地隔热隔氧,具有很好的阻燃效果。而碳层内部同样是致密的结构,其中的微孔应该是小分子产物挥发造成的。这样的碳层结构除了隔绝热量和氧气外,还可以起到很好的抑烟效果。由此可以说明,ADP在凝聚相中发挥了很好的阻燃作用。

3 结论

(1) 添加ADP后,随着阻燃剂添加量的增加,阻燃PTT的阻燃等级和LOI都不断增大,但力学性能不断下降。ADP添加量为10%时,阻燃PTT达到V-0级,LOI达到30.0%,拉伸强度为33.78 MPa,弯曲强度为66.67 MPa,冲击强度为14.20 kJ/m²,断裂伸长率为3.65%。

(2) 添加MCA后,随着阻燃剂添加量的增加,阻燃PTT的阻燃等级和LOI都不断增大,力学性能有升有降,当MCA添加量达到20%时,阻燃PTT达到V-0级,LOI达到24.9%,拉伸强度为

49.73 MPa, 弯曲强度为 79.29 MPa, 冲击强度为 29.90 kJ/m², 断裂伸长率为 5.75%。

(3) ADP 和 MCA 都可以均匀分散在 PTT 中, 分散性良好, 但 ADP 与 PTT 间的相容性较好, 而 MCA 与 PTT 间的相容性较差。

(4) ADP 和 MCA 都降低了 PTT 的分解温度, ADP 主要是促进 PTT 分解成炭, 形成的碳层连续致密, 隔热隔氧, 在凝聚相中具有很好的阻燃效果; MCA 则促进 PTT 降解形成熔滴, 带走热量, 并分解形成大量不燃气体, 在气相中发挥阻燃作用。

(5) 添加 5% 的 ADP 和 10% 的 MCA 复配使用时, 阻燃 PTT 达到 V-0 级, LOI 达到 26.9%, 力学性能优于单纯添加 ADP 的阻燃 PTT, 但略低于 MCA 阻燃 PTT。相较于 ADP 高昂的价格, 复配体系在保证阻燃 PTT 阻燃效果和力学性能的同时, 降低了其应用成本。

参考文献

- [1] Zhang Jialiang. Study of poly(trimethylene terephthalate) as an engineering thermoplastics material[J]. J Appl Polym Sci, 2004, 91(3):1 657-1 666.
- [2] 吕初旭, 王玥, 柴焕敏. PTT 的结构和性能[J]. 聚酯工业, 2004, 17(4):6-10.
- Lyu Chuxu, Wang Yue, Chai Huamin. Structure and properties of PTT[J]. Poly Ind, 2004, 17(4):6-10.
- [3] Ho R M, Ke Z K, Chen M. Crystal Structure and banded spherulite of poly(trimethylene terephthalate)[J]. Macromolecules, 2015, 33(20):7 529-7 537.
- [4] 陈君, 黄宝铨, 陈婷, 等. 聚对苯二甲酸丙二醇酯的研究进展[J]. 精细石油化工进展, 2013, 14(1):49-54.
- Chen Jun, Huang Baoshuan, Chen Ting, et al. Research progress of poly(trimethylene terephthalate)[J]. Adv Fine Petrochem, 2013, 14(1):49-54.
- [5] 邵鸿飞, 苏芳. 塑料无卤阻燃剂研究进展[J]. 工程塑料应用, 2009, 37(8):91-94.
- Shao Hongfei, Su Fang. Progress on research of plastic halogen-free flame retardants[J]. Eng Plast Appl, 2009, 37(8):91-94.
- [6] 王学利, 彭治汉, 江建明, 等. 环状磷酸酯阻燃 PTT 纤维及其性能研究[J]. 合成纤维工业, 2007, 30(1):25-27.
- Wang Xueli, Peng Zhihan, Jiang Jianming, et al. Preparation and properties of flame retardant PTT fiber modified with cyclic phosphonate[J]. Chin Synth Fib Ind, 2007, 30(1):25-27.
- [7] 吕通建, 常怀春, 尹玉霞, 等. 玻纤增强阻燃 PTT 工程塑料的研制及应用[J]. 工程塑料应用, 2007, 35(9):45-48.
- Lyu Tongjian, Chang Huaichun, Yin Yuxia, et al. Development of flame retardant and glass fiber reinforced PTT engineering plastic[J]. Eng Plast Appl, 2007, 35(9):45-48.
- [8] Westerink R H S. Neurotoxic hazard and risk assessment of brominated and halogen-free flame retardants[J]. Toxicology Letters, 2016, 259:S51-S51.
- [9] Mahadev B, Ramasamy A, Apurba D. Flame retardant polymer composites[J]. Fiber Polym, 2015, 16(4):705-717.
- [10] 许博, 钱立军. 阻燃 PBT 用磷系阻燃剂的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2016(1):119-124.
- Xu Bo, Qian Lijun. Research progress on phosphorus-based flame retardant system for PBT[J]. Eng Plast Appl, 2016(1):119-124.
- [11] 曹征, 陆丁荣, 周晓波, 等. 阻燃型高分子材料发展状况简介[J]. 山东化工, 2015(7):71-73, 76.
- Cao Zheng, Lu Dingrong, Zhou Xiaobo, et al. Research progress of flame retardant polymer[J]. Shandong Chem Ind, 2015(7):71-73, 76.
- [12] 陈晓平, 张胜, 杨伟强, 等. 膨胀阻燃体系概述[J]. 中国塑料, 2010, 24(10):1-8.
- Chen Xiaoping, Zhang Sheng, Yang Weiqiang, et al. Review of Intumescent flame retardants[J]. China Plastics, 2010, 24(10):1-8.
- [13] 杨中文, 刘西文. 塑料无卤阻燃剂的研究进展[J]. 塑料助剂, 2015(5):6-14.
- Yang Zhongwen, Liu Xiwen. Progress in research on halogen-free flame retardants of plastics[J]. Plastics Additives, 2015(5):6-14.
- [14] 李娜娜, 姜国伟, 周光远, 等. 有机磷类阻燃剂的合成及应用进展[J]. 应用化学, 2016, 33(6):611-623.
- Li Nana, Jiang Guowei, Zhou Guangyuan, et al. Synthesis and application progress of organic phosphorus containing flame retardants[J]. Chinese J Appl Chem, 2016, 33(6):611-623.
- [15] 贺春江, 张国文, 潘会鹏, 等. 无卤阻燃聚合物抑烟的研究进展[J]. 合成树脂及塑料, 2016(4):72-77.
- He Chunjiang, Zhang Guowen, Pan Huipeng, et al. Research progress on smoke suppression of halogen free flame retardant polymer materials[J]. China Synthetic Resin & Plastics, 2016(4):72-77.

本刊声明

近期有不法网站和个人假借本刊名义向广大读者征稿, 同时收取高额注册费、审稿费、版面费。本刊特此声明:《工程塑料应用》为中国兵器工业集团第五三研究所(山东非金属材料研究所)主办, 杂志社所在地为山东省济南市, 本刊唯一合法投稿网址为 www.epa1973.com, 本刊未委托任何机构和个人从事征稿和组稿业务。请广大作者牢记本刊投稿网址, 辨别来电属地, 不要给个人账号汇款, 防止受骗。本刊保留对相关网站和个人追究法律责任的权利。

(《工程塑料应用》杂志社)