

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.01.024

ADP 协效 APP/PER 阻燃 PP 的制备及性能

鲁哲宏¹,李豪¹,任艳蓉²,刘保英²,房晓敏^{1,2},丁涛^{1,2}

(1. 河南大学化学化工学院功能有机分子工程研究所,河南开封 475004; 2. 阻燃与功能材料河南省工程实验室,河南开封 475004)

摘要:以二乙基次膦酸铝(ADP)为协效剂,与聚磷酸铵(APP)/季戊四醇(PER)传统膨胀型阻燃体系复配,通过熔融共混制备了膨胀阻燃聚丙烯(PP)。采用极限氧指数(LOI)、垂直燃烧测试、锥形量热仪、扫描电子显微镜和热重分析研究了阻燃 PP 的性能及相关作用机制。结果表明,ADP 和 APP/PER 具有很好的协同阻燃作用,它不但可以同时提高阻燃体系的残炭量和炭层质量,有效抑制熔滴,还可以降低燃烧过程中的生烟量,是更加绿色的阻燃体系。当阻燃体系的总添加量为 24%,APP/PER 和 ADP 的质量比为 6:1 时,阻燃 PP 的 LOI 可达到 29.8%,垂直燃烧等级为 V-0 级,且生烟性比不添加 ADP 的体系下降了 76.9%。阻燃机理研究表明,该体系是以凝聚相为主的凝聚相和气相协同阻燃机制。

关键词:聚丙烯;阻燃;二乙基次膦酸铝;聚磷酸铵;季戊四醇;协效作用

中图分类号: TQ326.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)01-0138-05

Preparation and Properties of ADP Synergistic APP/PER Flame Retardant PP

Lu Zhehong¹, Li Hao¹, Ren Yanrong², Liu Baoying², Fang Xiaomin^{1,2}, Ding Tao^{1,2}

(1. Institute of Functional Organic Molecular Engineering, College of Chemistry and Chemical Engineering, Henan University, Kaifeng 475004, China;

2. Henan Engineering Laboratory of Flame Retardant and Functional Materials, Kaifeng 475004, China)

Abstract: Intumescent flame retardant polypropylene (PP) was prepared by melt blending with aluminum diethylphosphinate (ADP) as a synergist and compounded with the traditional intumescent flame retardant system of ammonium polyphosphate (APP)/pentaerythritol (PER). The properties and retardant mechanism of the flame PP were studied by the limit oxygen index (LOI), the vertical burning test, cone calorimeter, scanning electron microscope and thermogravimetric analyser. The results show that ADP and APP/PER has a good synergistic flame retardant effect, which can not only improve the carbon residue and carbon layer quality of the flame retardant system, but also effectively inhibiting the melting droplets and reducing the amount of smoke generated in the combustion. It is a greener flame retardant system. When the mass ratio of APP/PER and ADP is 6:1, and the flame retardant system total additive content is 24%, the LOI of flame retardant PP is 29.8%, the vertical combustion reaches V-0 grade, and the smoke generation is 76.9% lower than that of the system without ADP. The study of flame retardant mechanism shows that the system is dominated by condensed phase flame-retardant mechanism and accompanying simultaneously gas phase flame-retardant mechanism.

Keywords: polypropylene; flame retardancy; aluminum diethylphosphite; ammonium polyphosphate; pentaerythritol; synergistic effect

聚丙烯(PP)是一种半结晶的热塑性塑料,密度小,具有良好的加工性能。但 PP 属于易燃材料,其极限氧指数(LOI)仅为 17%~18%,一经点燃极易燃烧,不能满足对阻燃性能要求高的应用领域,因此,赋予其阻燃性十分必要^[1]。由于 PP 分子链上无

活性基团,用于 PP 的阻燃剂以添加型阻燃剂为主,主要分为卤系阻燃剂、无机填充型阻燃剂、膨胀型阻燃剂等^[2-7]。伴随无卤化进程,膨胀型阻燃剂被认为是阻燃领域的重点发展方向之一。最常用的是聚磷酸铵(APP)/季戊四醇(PER)组成的膨胀型阻燃复

基金项目:国家自然科学基金项目(51403051),河南省科技发展计划项目(162102210023,162300410018),河南省高等学校重点科研项目(16A150003,15A150041)

通讯作者: 房晓敏,博士,教授,主要从事复合材料研究 E-mail: xmfang@henu.edu.cn

收稿日期: 2018-10-19

引用格式: 鲁哲宏,李豪,任艳蓉,等. ADP 协效 APP/PER 阻燃 PP 的制备及性能[J]. 工程塑料应用,2019,47(1): 138-142.

Lu Zhehong, Li Hao, Ren Yanrong, et al. Preparation and properties of ADP synergistic APP/PER flame retardant PP[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(1): 138-142.

合体系 (IFR)^[8-10],该 IFR 使 PP 的阻燃性能得到很大改善,但其阻燃效率还有待进一步提高。因此,采用各种协效剂对该膨胀型阻燃复合体系进行协同增效是研究的热点之一。

Feng Caimin 等^[11]探讨了二氧化铈对 PP/IFR 复合材料的协同作用,结果表明,加入二氧化铈可显著提高 PP/IFR 复合材料的 LOI,且能通过 UL94 V-0 级。Wang Zhijing 等^[12]将核苷酸嵌入三聚氰胺甲醛树脂中形成功能性微球 (MFA) 与 IFR 复配协效阻燃 PP。结果表明,加入质量分数 17% 的 IFR 和 1% 的 MFA,阻燃 PP 能通过 UL94 V-0 级,LOI 可达到 27.0%。二乙基次磷酸铝 (ADP) 是一种有机次磷酸盐^[13-15],它既能在凝聚相中发挥阻燃作用,促进聚合物成炭,同时又能除去燃烧区高能量的活性自由基,低烟低毒,属于磷系环保无卤阻燃剂^[16]。可以单独使用,也可与三聚氰胺聚磷酸盐和三聚氰胺氰尿酸盐等复配使用。但是,鲜有将其与 APP/PER 复配协同阻燃的报道。笔者将 ADP 与 APP/PER 复配用于阻燃 PP,探讨 ADP 对阻燃 PP 的协效作用及相关阻燃机理。

1 实验部分

1.1 主要原料

PP : K7227,中韩 (武汉) 石油化工有限公司;

APP : KT-201,什邡市太丰新型阻燃剂有限责任公司;

PER : 天津市科密欧化学试剂开发中心;

ADP : 山东秀诚化工有限公司。

1.2 主要设备及仪器

高速混合机: SHR-10A 型,张家港格兰机械有限公司;

同向双螺杆挤出机: AK22 型,南京科亚化工成套装备公司;

注塑机: N90A2 型,广东伊之密精密机械股份有限公司;

氧指数测定仪: JF-3 型,南京市江宁区分析仪器厂;

水平垂直燃烧测定仪: CZF-5 型,南京市江宁区分析仪器厂;

微机控制电子万能试验机: CS-2000 型,高铁科技股份有限公司;

热重 (TG) 分析仪: TGA/DSC3+ 型,梅特勒-托利多公司;

缺口制样机: DZY-90 型,济南恒思盛大仪器有

限公司;

摆锤式冲击试验机: ZBC8400-C 型,美特斯工业系统 (中国) 有限公司;

场发射扫描电子显微镜 (SEM) : JSM-7610F 型,日本电子株式会社;

锥形量热仪: FTT0402 型,英国 FTT 公司。

1.3 样品制备

将所用原料在 80℃ 鼓风干燥箱干燥 8 h,用高速混合机按照表 1 配比将原料混合均匀,再用同向双螺杆挤出机造粒。挤出机各区温度分别为 175, 178, 180, 180, 178℃ 和 175℃,螺杆转速为 120 r/min。挤出所得粒料需要在 80℃ 下干燥 4 h,随后使用注塑机制备测试所需试样,注塑温度为 175~180℃。

表 1 阻燃 PP 配方

样品编号	PP	APP/PER	ADP	APP/PER 与 ADP 质量比
1 [#]	76	24	0	1 : 0
2 [#]	76	16	8	2 : 1
3 [#]	76	19.2	4.8	4 : 1
4 [#]	76	20.6	3.4	6 : 1
5 [#]	76	21.3	2.7	8 : 1

注: APP 与 PER 质量比为 3 : 1。

1.4 性能测试与表征

极限氧指数 (LOI) 按照 GB/T 2406.2-2009 测试,样品尺寸为 80 mm×10 mm×4 mm。

垂直燃烧性能按照 GB/T 2408-2008 测试,样品尺寸为 125 mm×12.5 mm×3.2 mm。

TG 测试: 样品质量 3~5 mg,升温速率 10℃/min,温度范围为 25~800℃,氮气流速为 50 mL/min。

锥形量热测试: 按照 ISO 5660-1 : 2015 测试,样品尺寸为 100 mm×100 mm×6 mm,热辐射功率为 50 kW/m²。

SEM 分析: 使用 SEM 观察样品燃烧后的炭层表面形貌,加速电压为 10 kV。

缺口冲击强度按照 GB/T 1043-2008 测试,样品尺寸为 80 mm×10 mm×4 mm,缺口为 2 mm 深 V 型缺口。

拉伸强度按照 GB/T 1040-2006 测试,样品为 4 mm 厚 1A 型哑铃型标准样条,拉伸速率为 50 mm/min。

弯曲强度按照 GB/T 9341-2008 测试,样品尺寸为 80 mm×10 mm×4 mm,弯曲速率为 2 mm/min。

2 结果与讨论

2.1 阻燃性能分析

保持阻燃剂总添加量为 24%,考察 APP/PER 和 ADP 配比对 PP 阻燃性能的影响,结果列于表 2。由表 2 可知,采用传统阻燃剂的 1[#] 样品,其 LOI 为 28.5%,垂直燃烧阻燃等级只有 V-2 级,样品点燃后燃烧区逐渐变软,滴落带走热量,导致熄灭。而添加 ADP 协效剂后,2[#] 样品的垂直燃烧等级为 V-2 级,LOI 为 27.4%,低于 1[#] 样品;但随着 APP/PER 和 ADP 质量比的继续增加,样品的垂直阻燃等级提升至 V-0 级,LOI 较传统 APP/PER 阻燃 PP (1[#] 样品) 有所提高,其中 5[#] 样品的 LOI 高达 30.5%,样品一经点燃很快熄灭。由于 2[#]~5[#] 样品中的 ADP 添加量依次降低,对比可见,ADP 添加量不易过多,少量 ADP 对 APP/PER 体系有较好的协同阻燃作用。

表 2 阻燃 PP 的阻燃性能

样品编号	垂直燃烧等级	LOI/%
1 [#]	V-2	28.5
2 [#]	V-2	27.4
3 [#]	V-0	29.3
4 [#]	V-0	29.8
5 [#]	V-0	30.5

2.2 锥形量热分析

图 1 为阻燃 PP 的锥形量热测试的热释放速率 (HRR) 曲线,相关燃烧特征参数列于表 3。由图 1

表 3 阻燃 PP 的燃烧特征参数

样品编号	TTI/s	pkHRR/(kW·m ⁻²)	(pkHRR/TTI)/(kW·m ⁻² ·s ⁻¹)	THR/(MJ·m ⁻²)	EHC/(MJ·kg ⁻¹)	SEA/(m ² ·kg ⁻¹)	avMLR/(g·s ⁻¹ ·m ⁻²)
1 [#]	32	481.4	15.0	160.0	30.5	320.8	6.6
2 [#]	29	209.6	7.2	194.9	34.6	70.8	4.6
3 [#]	25	267.0	10.7	150.0	27.6	44.5	4.1
4 [#]	25	250.8	10.0	128.7	29.0	74.0	5.3
5 [#]	26	280.9	10.8	157.2	29.4	397.0	4.5

注: TTI 为使材料表面有发光火焰燃烧时所维持点燃的时间, pkHRR 为热速率释放峰值, pkHRR/TTI 为火灾危险指数, THR 为总放热量, EHC 为有效燃烧热, SEA 为比消光面积, avMLR 为平均质量损失速率。

有效燃烧热 (EHC) 和比消光面积 (SEA) 结合常用于阻燃机理的研究。EHC 表示热释放速率与质量损失速率之比,它反映了挥发性气体在气相火焰中的燃烧程度;SEA 表征材料的生烟性,即单位质量的材料所产生的烟量。1[#] 样品采用传统 APP/PER 膨胀阻燃体系,其阻燃机理是传统的以凝聚相为主的凝聚相和气相协同作用机制,即酸源 APP 受热分解生成磷酸、焦磷酸、聚磷酸等催化炭源成炭,同时兼具气源的 APP 释放出 NH₃ 气体,在此作用下形成膨胀炭层,阻隔燃烧区的氧气、可燃性气体以及热量的交换,从而达到阻燃的目的。与 1[#] 样品相比,ADP 协效 APP/PER 阻燃 PP 的 EHC 变化不大,均在 30 MJ/kg 左右,但其 SEA 却显著不同。

可知,APP/PER 阻燃 PP (1[#] 样品) 一经点燃即持续剧烈燃烧,热量迅速释放,只产生一个主释热峰且峰值较高。由表 3 可知,ADP 协效 APP/PER 阻燃 PP (2[#]~5[#] 样品) 的 HRR 曲线均为双峰且更加平缓,说明 ADP 和 APP/PER 有协同阻燃作用,可以有效降低阻燃 PP 的热释放速度,并且其协同效果和二者的配比有关。pkHRR/TTI 为火灾危险指数,数值越大,材料燃烧危险性就越大。1[#] 样品的火灾危险指数为 15.0,2[#]~5[#] 样品的 pkHRR/TTI 值在 10 左右,与纯 PP 相比降低约 30%,火灾危险性显著降低。样品的总热释放量 (THR) 差别不大,但添加 ADP 协效后的热释放速率峰值 (pkHRR)、平均质量损失速率 (avMLR) 都有所下降,进一步说明 ADP 和 APP/PER 有协同阻燃作用。

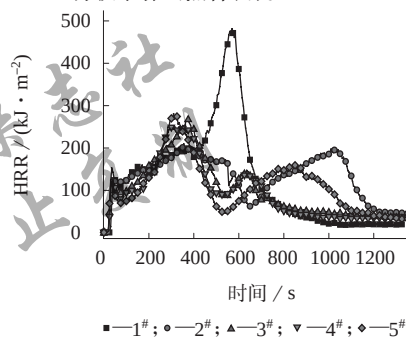


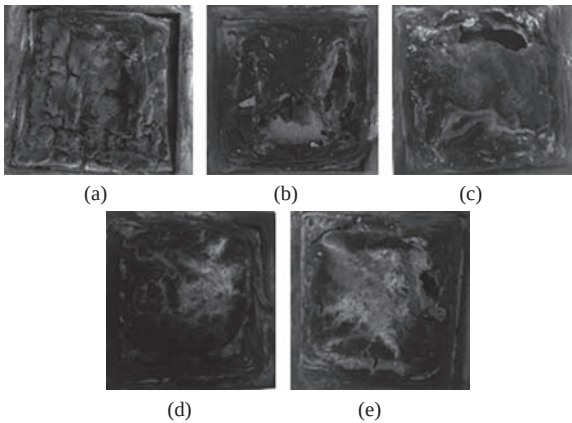
图 1 阻燃 PP 的 HRR 曲线

5[#] 样品的 SEA 为 397.0 m²/kg, 高于 1[#] 样品的 320.8 m²/kg,燃烧过程中的生烟量较大,这主要是由于 ADP 的加入量较少,抑烟效果不足造成的。随着 ADP 加入量的继续增加,2[#],3[#],4[#] 样品的 SEA 比 1[#] 样品显著降低,分别降低了 77.9%,86.1%,76.9%。说明适宜配比的 ADP 和 APP/PER 构成的协效阻燃体系,强化了凝聚相阻燃,抑制了材料在气相的燃烧,不仅有较好的协同阻燃作用,同时还有很好的抑烟效果,是一种更加绿色的环境友好膨胀阻燃体系。

2.3 残炭分析

图 2 是阻燃 PP 样品在锥形量热仪测试后表面炭层的数码照片。可以明显观察到,1[#] 样品的表面炭层稀且脆薄,燃烧时气体冲破炭层造成表面有很

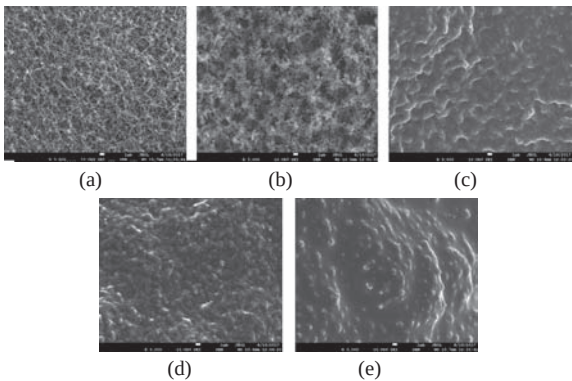
多空洞,为气体和热量的交换提供了便利的通道。添加 ADP 协效后样品燃烧形成的表面炭层蓬松且致密,表面几乎没有裂痕(2[#],3[#],5[#] 样品表面炭层中的破损是因为残炭膨胀过高碰到热锥导致的)。这种质地好的炭层能够有效地阻隔气体和热量的交换,阻止炭层下基体的持续燃烧。因此都表现出较低的热释放速率峰值和总的热释放量。



a—1[#] 样品;b—2[#] 样品;c—3[#] 样品;d—4[#] 样品;e—5[#] 样品

图2 阻燃 PP 样品锥形量热仪测试后表面炭层的数码照片

为进一步探讨炭层在阻燃过程中发挥的作用,通过 SEM 观察阻燃 PP 燃烧后表面炭层的形貌。图3是阻燃 PP 锥形量热仪测试后表面炭层的 SEM 照片。由图3可看出,1[#] 和 2[#] 样品燃烧后的表面炭层质量较差,有许多孔洞,开放的孔洞为可燃性气体、氧气及热量的交换提供了通道,不能有效隔绝热量和气体的传递,因而阻燃效果不佳。而少量添加 ADP 的 3[#],4[#] 和 5[#] 样品燃烧后表面形成明显的膨胀炭层,炭层表面致密连续,呈现褶皱状形貌,能够有效抑制燃烧过程中气体的交换和热量的逸散,进而发挥阻燃作用。这与垂直燃烧和 LOI 分析结果一致。



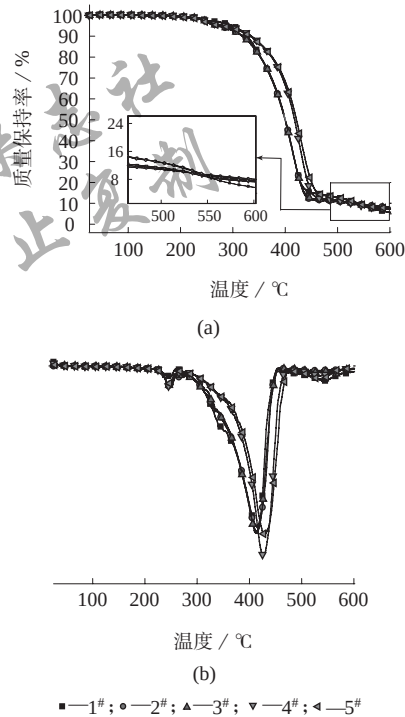
a—1[#] 样品;b—2[#] 样品;c—3[#] 样品;d—4[#] 样品;e—5[#] 样品

图3 阻燃 PP 样品锥形量热仪测试后表面炭层的 SEM 照片

2.4 TG 分析

图4为阻燃 PP 的 TG 和 DTG 曲线,相关分析

数据列于表4。由图4和表4可知,传统阻燃 PP (1[#] 样品) 的初始分解温度 ($T_{5\%}$) 为 299℃,600℃时的残炭率约为 5.7%。添加 ADP 协效剂后,2[#]~5[#] 样品的 $T_{5\%}$ 略低于 1[#] 样品。对比质量损失 50% 时的温度 ($T_{50\%}$) 和最大质量损失速率对应的温度 (T_{max}) 可知,2[#] 和 3[#] 样品与 1[#] 样品基本一致,而 4[#] 和 5[#] 样品均高于 1[#] 样品,表明适量添加 ADP 有利于提高阻燃 PP 的热分解温度,但是加入较多的 ADP 会降低阻燃 PP 的初始热稳定性。添加 ADP 协效剂的 2[#],3[#],4[#],5[#] 样品,在 600℃时的残炭率分别为 8.2%,7.7%,7.3% 和 7.6%,比 1[#] 样品提高 28% 以上。表明添加 ADP 有助于阻燃 PP 燃烧后残炭量的提升,且适量 ADP 协效的阻燃 PP 的热稳定性也更好。



a—TG 曲线;b—DTG 曲线

图4 阻燃 PP 的 TG 和 DTG 曲线

表4 阻燃 PP 的 TG 分析数据

样品 编号	$T_{5\%}/$ ℃	$T_{10\%}/$ ℃	$T_{50\%}/$ ℃	$T_{max}/$ ℃	600℃时 残炭率/%
1 [#]	299	324	399	415	5.7
2 [#]	271	319	400	414	8.2
3 [#]	272	318	400	413	7.7
4 [#]	286	335	417	426	7.3
5 [#]	278	333	421	426	7.6

注: $T_{5\%}$ 为初始分解温度, $T_{10\%}$ 为质量损失 10% 时的温度, $T_{50\%}$ 为质量损失 50% 时的温度, T_{max} 为最大质量损失速率对应的温度。

2.5 力学性能分析

表5是阻燃 PP 的力学性能测试结果。从表5可以看出,与 1[#] 样品相比,添加 ADP 后阻燃 PP 的

力学性能略有下降,但变化不大,仅4[#]样品的缺口冲击强度(4.16 kJ/m²)高于1[#]样品(3.75 kJ/m²),但数据误差较大。

表5 样品的力学性能

样品 编号	缺口冲击强度 / (kJ · m ⁻²)	拉伸强度 / MPa	弯曲强度 / MPa
1 [#]	3.75 ± 0.38	23.36 ± 0.70	36.41 ± 0.93
2 [#]	3.31 ± 0.36	22.03 ± 0.25	34.44 ± 0.48
3 [#]	3.24 ± 0.56	22.40 ± 0.36	35.20 ± 1.12
4 [#]	4.16 ± 1.39	21.70 ± 0.34	34.89 ± 1.00
5 [#]	2.92 ± 0.58	20.41 ± 0.55	34.33 ± 1.65

3 结论

采用ADP复配传统膨胀型阻燃剂APP/PER,探讨了阻燃复配体系对PP的阻燃效果、燃烧特性、热稳定性和力学性能的影响,结果表明,ADP和APP/PER具有较好的协同阻燃作用,当总添加量为24%,APP/PER和ADP质量比为6:1时,阻燃PP(4[#]样品)的垂直燃烧等级为V-0级,LOI达到29.8%,具有较好的阻燃性能,并且生烟性比APP/PER阻燃PP(1[#]样品)降低了76.9%。添加ADP提高了阻燃PP的热稳定性,但力学性能略有降低。适量添加ADP不但可以提高阻燃剂的成炭量,还能提高炭层的质量,抑制燃烧中的熔融滴落,有效隔绝氧气、可燃性气体和热量的交换,促进凝聚相中的阻燃作用,具有较好的协同阻燃效果。该阻燃体系是以凝聚相为主的凝聚相和气相协同阻燃机制,是一种更加绿色高效的阻燃体系,具有一定的应用前景。

参考文献

- [1] 王琪,卢朝亮,李振华,等. 滑石粉填充聚丙烯材料注塑微发泡性能[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(10):17-23.
Wang Qi, Lu Chaoliang, Li Zhenhua, et al. Microcellular foaming behavior of PP / talc composites by injection[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(10):17-23.
- [2] 田赓,李迎春,蔡智奇,等. 环保型溴系阻燃剂研究进展[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(9):142-147.
Tian Cheng, Li Yingchun, Cai Zhiqi, et al. Research progress on environmental-friendly brominated flame retardants[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(9):142-147.
- [3] Zhang Mengmei, Buekens A, Li Xiaodong. Brominated flame retardants and the formation of dioxins and furans in fires and combustion[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 304:26-39.
- [4] 李豪,何园,吴燕鹏,等. 磷-氮膨胀型阻燃剂和溴系阻燃剂复配阻燃聚丙烯的研究[J]. 中国塑料, 2017, 31(7):63-69.
Li Hao, He Yuan, Wu Yanpeng, et al. Study of flame-retardant polypropylene based on phosphorus-nitrogen intumescent flame retardant and brominated flame retardant[J]. China Plastics, 2017, 31(7):63-69.
- [5] Xu Zhisheng, Yan Long, Chen Lei. Synergistic flame retardant effects between aluminum hydroxide and halogen-free flame retardants in high density polyethylene composites[J]. Procedia Engineering, 2016, 135:631-636.
- [6] Pappalardo S, Russo P, Acierno D, et al. The synergistic effect of organically modified sepiolite in intumescent flame retardant polypropylene[J]. European Polymer Journal, 2016, 76:196-207.
- [7] 鲁哲宏,康兴隆,冯伟丽,等. 生物质阻燃剂的研究进展[J]. 河南大学学报:自然科学版, 2018, 48(6):710-716.
Lu Zhehong, Kang Xinglong, Feng Weili, et al. Research progress of bio-based flame retardants[J]. Journal of Henan University:Natural Science, 2018, 48(6):710-716.
- [8] Zheng Zaihang, Liu Yan, Zhang Long, et al. Synergistic effect of expandable graphite and intumescent flame retardants on the flame retardancy and thermal stability of polypropylene[J]. Journal of Materials Science, 2016, 51(12):5857-5871.
- [9] Ye Ting, Li Juan. Effect of anion of polyoxometalate based organic-inorganic hybrid material on intumescent flame retardant polypropylene[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2016, 27(9):1211-1219.
- [10] Chen Ligong, Yuan Yanyan, Wang Bowei, et al. Synthesis and application of novel triazine-based charring-foaming agents in intumescent flame retardant polypropylene[J]. Transactions of Tianjin University, 2017, 23(3):221-229.
- [11] Feng Caimin, Liang Minyi, Jiang Jiali, et al. Synergism effect of CeO₂ on the flame retardant performance of intumescent flame retardant polypropylene composites and its mechanism[J]. Journal of Analytical & Applied Pyrolysis, 2016, 122:405-414.
- [12] Wang Zhijing, Liu Yinfeng, Li Juan. Preparation of nucleotide-based microsphere and its application in intumescent flame retardant polypropylene[J]. Journal of Analytical & Applied Pyrolysis, 2016, 121:394-402.
- [13] 程宝发,马腾昊,李向梅,等. 聚酰胺6/二乙基次磷酸铝复合材料的阻燃性能[J]. 合成树脂及塑料, 2016, 33(4):24-28.
Cheng Baofa, Ma Tenghao, Li Xiangmei, et al. Flame retardant performance of PA 6 / ADP composites[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2016, 33(4):24-28.
- [14] 鲁哲宏,班大赛,李豪,等. 阻燃改性尼龙研究进展[J]. 化学研究, 2018, 29(3):310-316.
Lu Zhehong, Ban Dasai, Li Hao, et al. Research progress of flame retardant modified nylon[J]. Chemical Research, 2018, 29(3):310-316.
- [15] Li Nana, Jiang Guowei, Zhou Guangyuan, et al. Synthesis and application progress of organic phosphorus-containing flame retardants[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2016, 33(6):611-623.
- [16] 蔡曾平,王标兵. PA66 / AlPi / PPFBS 复合材料的协同阻燃机理[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(3):35-39.
Cai Zengping, Wang Biaobing. Synergistic flame retardant mechanism of PA66 / AlPi / PPFBS composites[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(3):35-39.