

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.02.007

四溴苯酐反应增容PA6/APP/BPS复合材料制备与性能

张一可¹, 程文喜^{1,2}, 苗蔚^{1,2}, 曹远航¹, 宋伟强^{1,2}, 王金瑞¹, 王韬¹, 王宏森², 安顺利²

(1.河南工业大学材料科学与工程学院,郑州 450001; 2.河南海瑞祥科技有限公司,河南平顶山 467199)

摘要: 采用聚磷酸铵(APP)与溴代聚苯乙烯(BPS)作为阻燃剂,以四溴苯酐(TBPA)为反应型增容剂,与聚酰胺6(PA6)进行熔融共混,制备了PA6/APP/BPS/TBPA复合材料,并探究TBPA含量对复合材料性能的影响。极限氧指数(LOI)测试、垂直燃烧测试(UL 94)及锥形量热仪测试数据结果表明,当TBPA质量分数达到或超过0.5%时,PA6复合材料的LOI值均可达到30%以上,同时满足UL 94 V-0级阻燃标准。此外,随着TBPA质量分数的增加,燃烧时CO产量增加,间接证明了TBPA有效增强了APP与BPS的阻燃效能。热失重结果显示,含有TBPA的PA6复合材料具有更好的热稳定性,在300℃以下基本不失重。力学性能测试显示,TBPA的加入降低了PA6复合材料的拉伸强度,小幅度提升其韧性。由此可见,TBPA在PA6/APP/BPS复合材料中具有良好的增容作用,能提升复合材料的阻燃等级、热稳定性和韧性。

关键词: 阻燃;聚酰胺6;溴代聚苯乙烯;聚磷酸铵;四溴苯酐

中图分类号: TQ321.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)02-0052-06

Preparation and properties of tetrabromophthalic anhydride reactive compatibilized PA6/APP/BPS composites

ZHANG Yike¹, CHENG Wenxi^{1,2}, MIAO Wei^{1,2}, CAO Yuanhang¹, SONG Weiqiang^{1,2}, WANG Jinrui¹, WANG Tao¹,
WANG Hongsen², AN Shunli²

(1. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;

2. Henan Hairuixiang Technology Co., Ltd., Pingdingshan 467199, China)

Abstract : Ammonium polyphosphate(APP) and brominated polystyrene(BPS) were used as flame retardant additives, combined with tetrabromophthalic anhydride (TBPA) as a reactive compatibilizer, and melt blended with polyamide 6(PA6) to prepare PA6/APP/BPS/TBPA composites, the effect of TBPA content on the performance of PA6 composites were investigated. The results of limit oxygen index (LOI) test, vertical flammability test (UL 94) indicate that when mass fraction of TBPA reach or exceed 0.5%, LOI value of PA6 composites can reach over 30% and meet UL 94 V-0 flame retardant standard. In addition, with the increase of TBPA content, CO production in cone calorimeter test increase, indirectly showing that TBPA could effectively enhance the flame retardant performance of APP and BPS. Thermogravimetric results show that PA6 composite containing TBPA has better thermal stability and lost weight little below 300 °C. Mechanical performance tests show that the addition of TBPA reduce the tensile strength of PA6 composites and slightly improve their toughness. From this, it can be seen that TBPA has a good compatibilization effect in PA6/APP/BPS composites, which can improve the flame retardant grade, thermal stability, and toughness of the composites.

Keywords : flame retardant ; polyamide 6 ; brominated polystyrene ; ammonium polyphosphate ; tetrabromophthalic anhydride

基金项目: 河南省科技计划项目(232102230097),河南省高等教育教学改革研究与实践项目(2024SJGLX0015)

通信作者: 程文喜,副教授,主要从事高分子材料的改性和加工工作

收稿日期: 2024-11-31

引用格式: 张一可,程文喜,苗蔚,等.四溴苯酐反应增容PA6/APP/BPS复合材料制备与性能[J].工程塑料应用,2025,53(2):52-57.

ZHANG Yike, CHENG Wenxi, MIAO Wei, et al. Preparation and properties of tetrabromophthalic anhydride reactive compatibilized PA6/APP/BPS composites[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(2): 52-57.

材料在使用过程中的安全问题是材料工程领域的一个经典课题^[1],聚酰胺6(PA6)作为PA类材料中产量最大的品种,因其具有优异的力学性能、电隔离性能等优点,被广泛应用于电子、电气等领域^[2]。但作为一种典型的聚合物材料,PA6材料中存在大量亚甲基结构^[3],当接触明火后快速燃烧且熔滴严重^[4],使PA6产品的火灾隐患十分明显^[5]。限制了PA6的广泛应用^[6]。因此开发阻燃PA6材料时要使其阻燃等级达到垂直燃烧测试(UL94)V-0级别,具有充分的使用安全性,以扩大材料的应用范围^[7]。

用于PA6的阻燃剂通常分为无卤和有卤两种类别。引入溴、氮、磷、硅等阻燃元素,这些阻燃元素在气相中起作用,与可燃自由基反应,终止反应链,减弱火焰^[8]。含卤阻燃剂安全性稍差,但具有价格低,阻燃效果好,相容性好等特点,会在一些特定场所以保留应用。溴代聚苯乙烯(BPS)是一种高分子阻燃剂,虽然为溴系阻燃剂,但与高聚物相容性好、不迁移、不结霜,且不会产生有毒物质多溴代二苯并二恶烷(PBDD)及多溴代二苯并呋喃(PBDF),是产生“二噁英”问题系列阻燃剂的替代品^[9]。且BPS对PA6材料的阻燃效果明显。同时四溴苯酐(TBPA)也作为溴系阻燃剂中的反应性阻燃剂的一种,在反应过程中与高分子材料发生交联反应,形成更加紧密的网络结构,限制产物燃烧过程中可燃性气体的释放,从而提高材料的阻燃性能,TBPA的分解温度较高,能够在一定程度上提高材料的热稳定性。此外,含磷阻燃剂也广泛用于阻燃PA6,磷系阻燃剂具有无毒、无卤、抑烟、阻燃效果好和环境友好等特点,聚磷酸铵(APP)作为一种常见的磷系阻燃剂,受到了研究者的广泛关注^[10-11]。但APP在单独使用时存在添加质量分数高、吸湿性强、分散性差、易析出、与基体相容性差等缺点^[12],因此与其他类型阻燃剂协同作用于基体可以更好发挥出APP的阻燃作用。例Tang等^[13]合成了两种基于咪唑/三嗪基团的炭化剂PT-cluster和PT,并将它们与APP阻燃剂协同作用于聚丙烯(PP)材料,制备出膨胀阻燃PP复合材料。研究表明仅添加质量分数25%APP时,制备的APP/PP阻燃材料的极限氧指数(LOI)为21.7%且无UL94等级。当加入PT-cluster和PT后,制备得到阻燃复合材料LOI值均达30%以上,且UL94等级均为V-0级。说明APP与其他阻燃剂协同作用能更好发挥出其阻燃作用。但因复合阻燃剂用量过多会使复合材料的力学性能降

低^[14],在一定程度上会降低聚酰胺材料的结晶度与分子内氢键的数目,导致力学性能变差^[15]。因此,探索能满足阻燃性及损害力学性能最低阻燃体系势在必行^[16-17]。

笔者将BPS与APP进行复配,制备出阻燃PA6材料。然后在保持阻燃剂总量不变的前提下,用少量反应性阻燃剂TBPA代替BPS,以提高PA6与阻燃剂的相容性,研究TBPA的用量对产物的阻燃性能、力学性能和热稳定性的影响。

1 实验部分

1.1 主要原料

PA6切片颗粒:YH800,湖南岳化化工股份有限公司;

APP:纯度 $\geq 99.9\%$:FR-2000A,河南誉鑫化工有限公司;

BPS:纯度 $\geq 99.9\%$:XZ-6700,山东兄弟科技股份有限公司;

TBPA:纯度 $\geq 95.0\%$:T135047,上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

1.2 主要设备及仪器

双螺杆挤出机:SHJ-20,江苏南京达力特挤出机械有限公司;

精密注塑机:TW1580,宁波通用塑料机械制造有限公司;

LOI仪:FTT0080,英国Fire Testing Technology公司;

UL 94测试仪:ZY6017,东莞市中诺质检仪器设备公司;

锥形量热(FTT)仪:PX07007,江苏费尔曼安全科技有限公司;

热重(TG)分析仪:ZCT-A,北京京仪高科仪器有限公司;

电子万能试验机:WDW-50,济南永科试验仪器有限公司;

冲击性能试验机,XJ-300A,吴忠材料试验机有限公司。

1.3 阻燃PA6材料的制备

将PA6切片颗粒、BPS、APP、四溴苯酐放入鼓风干燥箱中在100℃下烘干12 h,按照相应配比称量好后放入高速混料机中混合均匀,用双螺杆挤出机共混挤出制备阻燃PA6材料粒料,挤出温度为225,230,235,240,240,245℃。将制备得到的阻燃PA6材料粒料在40℃烘干箱中烘干4 h。再用注塑

机将挤出物料注塑成相应的标准测试样条,注塑温度为235~240℃。

实验共制备五组样品,纯PA6材料一组,PA6阻燃复合材料四组,添加阻燃剂质量分数见表1。

表1 纯PA6和PA6/APP/BPS复合材料的组成(质量分数)

Tab. 1 Compositions (mass fraction) of pure PA6 and PA6/APP/BPS composites

Sample	PA6	APP	BPS	TBPA	%
PA6	100	0	0	0	
PA6/APP/BPS	72	14	14	0	
PA6/APP/BPS/TBPA3	72	14	13.7	0.3	
PA6/APP/BPS/TBPA5	72	14	13.5	0.5	
PA6/APP/BPS/TBPA8	72	14	13.2	0.8	

1.4 性能测试与表征

LOI测试:依据GB/T2406.2-2009进行测试,试样尺寸130 mm×13 mm×3 mm。

垂直燃烧测试:按照UL 94标准进行垂直燃烧测试。样品尺寸130 mm×13 mm×3 mm。

FTT测试:根据ISO5660-1-2015,在入射热流为50 kW/m²的情况下,用FTT仪测量样品的燃烧行为,样品尺寸100 mm×100 mm×3 mm。

TG测试:温控范围为室温~650℃,氩气气氛,升温速率为10℃/min,以 α -Al₂O₃作参比样。

拉伸性能测试:按GB/T 1040.1-2006进行测试,拉伸速率为10 mm/min,测试样条为哑铃形,试样尺寸为80 mm×10 mm×4 mm。每组样品至少测试五次,取其平均值作为最终的实验结果。

弯曲性能测试:按GB/T 9341-2008进行测试,弯曲速率为2 mm/min,弯曲跨度为64 mm。采用三点抗弯法,长条状样条尺寸为80 mm×10 mm×4 mm。每组样品至少测试五次,取其平均值作为最终的实验结果。

冲击性能测试:按GB/T 1843-2008进行悬臂梁冲击性能测试,冲击能量5.5 J,冲击速度3.5 m/s。长条状样条尺寸为80 mm×10 mm×4 mm。每组样品至少测试五次,取其平均值作为最终实验结果。

2 结果与讨论

2.1 阻燃剂含量对PA6复合材料阻燃性能的影响

2.1.1 LOI和UL 94测试

表2列出了纯PA6和PA6/APP/BPS复合材料的LOI值和UL 94测试结果。由表2可见,纯PA6的LOI值为24.7%,在垂直燃烧过程中,样条点燃后未出现自熄灭现象,且有大量滴落物,滴落物引燃现

象较为严重,极易在火灾中造成火势蔓延。当PA6中加入APP和BPS后制得的样品LOI值显著提升,样条点燃后,出现有滴落物的现象,滴落物将热量带走样品可以自熄,且滴落物能引燃下方的脱脂棉,其阻燃性能等级达到UL94-V2级,加入28%的阻燃剂后制得的PA6复合材料具有阻燃性,且LOI值在30%以上,证明其具备良好的阻燃性能,但因APP与PA6基体相容性较差导致分散不均匀,在垂直燃烧测试中会出现滴落物,且滴落物能引燃下方脱脂棉。所以在PA6阻燃材料中进一步加入TBPA进行反应增容,发现TBPA质量分数为0.3%时,样品的LOI值进一步提高,点燃后有滴落物现象,且滴落物能引燃下方的脱脂棉,当滴落物落下将热量带走后,样品可自熄,阻燃性能等级达到UL94 V-2级;当TBPA的质量分数分别为0.5%和0.8%时,制得的阻燃PA6的LOI值变化不大,样条滴落物变少,且滴落物不能引燃下方的脱脂棉,说明此时阻燃PA6的阻燃性能等级达到UL94 V-0级。这说明了TBPA的加入有利于提高APP和BPS对PA6的阻燃效果。

表2 纯PA6和PA6/APP/BPS复合材料的LOI和UL94测试结果

Tab. 2 LOI and UL94 test results of pure PA6 and PA6/APP/BPS composites

Sample	LOI/%	UL94 rating
PA6	24.7	NR
PA6/APP/BPS	30.5	V-2
PA6/APP/BPS/TBPA3	31.8	V-2
PA6/APP/BPS/TBPA5	32.3	V-0
PA6/APP/BPS/TBPA8	31.6	V-0

Note:NR refers to not passing flame retardant test.

2.1.2 锥形量热仪燃烧测试

表3列出了纯PA6和PA6/APP/BPS复合材料的锥形量热仪燃烧测试结果,图1为纯PA6和PA6/APP/BPS复合材料的热释放总量(THR)曲线。从表3可知,纯PA6的THR高达104.37 MJ/m²,加入阻燃剂APP和BPS后,PA6/APP/BPS的THR显著降低到78.30 MJ/m²,进一步加入TBPA作为相容剂,可以发现PA6/APP/BPS/TBPA复合材料的THR和未增容的阻燃PA6区别不大,在73.30~79.97 MJ/m²之间变化。上述样品的平均有效燃烧热的变化趋势类似THR的,均是加入APP和BPS后,样品的数值显著下降,进一步加入TBPA后,样品的THR数值变化不大。纯PA6的CO生成量和CO₂生成量分别为0.03 kg/kg和2.35 kg/kg。加入APP和BPS阻燃后,样品

的CO生成量大幅度提升到0.13 kg/kg,CO₂生成量显著降低到1.73 kg/kg,这主要是因为阻燃体系对PA6燃烧链式反应的抑制作用导致其不完全燃烧所致^[18]。当阻燃PA6进一步用TBPA增容后,改变原有材料的热解和燃烧路径,使得更多的碳元素未能完全氧化为CO₂,而是转化为CO,使PA6/APP/BPS/TBPA复合材料的CO生成量略微提高到0.14 kg/kg,CO₂生成量有小幅降低。上述结果进一步说明了TBPA能将APP和BPS的阻燃效果更好地发挥出来。

表3 纯PA6和PA6/APP/BPS复合材料的燃烧测试结果

Tab. 3 Combustion test results of pure PA6 and PA6/APP/BPS composites

Sample	THR/ (MJ·m ⁻²)	Avg EHC/ (MJ·kg ⁻¹)	MCO/ (kg·kg ⁻¹)	MCO ₂ / (kg·kg ⁻¹)
PA6	104.37	31.89	0.03	2.35
PA6/APP/BPS	78.30	25.06	0.13	1.73
PA6/APP/BPS/TBPA3	73.30	23.29	0.14	1.63
PA6/APP/BPS/TBPA5	78.95	24.55	0.14	1.69
PA6/APP/BPS/TBPA8	79.97	24.61	0.14	1.65

Notes: THR is total heat release; Avg EHC is average effective heat of combustion; MCO is average CO output; MCO₂ is average CO₂ output.

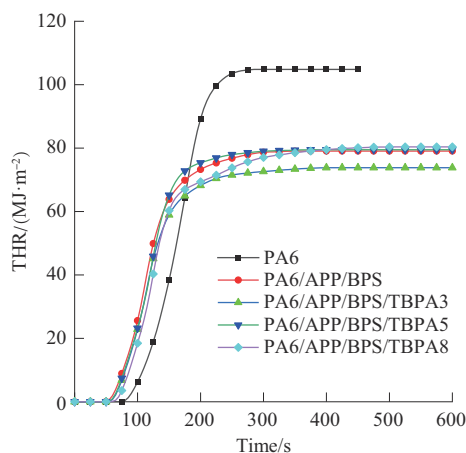


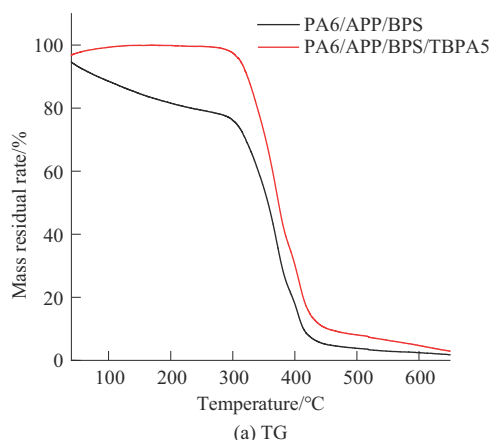
图1 纯PA6和PA6/APP/BPS复合材料的THR曲线

Fig. 1 THR curves of pure PA6 and PA6/APP/BPS composites

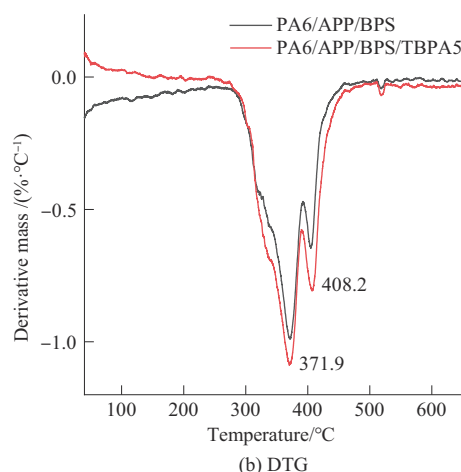
2.2 TBPA对复合材料热稳定性的影响

对PA6/APP/BPS复合材料和PA6/APP/BPS/TBPA5进行TG测试,分析TBPA对PA6复合材料热稳定性的影响,其TG和DTG曲线如图2所示。从图2可以看出,不含TBPA的PA6/APP/BPS热稳定性明显低于含有TBPA的PA6/APP/BPS/TBPA5的热稳定性,由于APP阻燃剂水解产物为酸性物质^[19]且与PA6材料相容性较差,PA6材料耐酸碱性较差,催化PA6材料加速降解。加入TBPA后与APP的铵根离子发生反应,形成酸酐-铵盐结构。这种结构有

助于提高复合材料的热稳定性和阻燃性能同时增强APP与基体的相容性,提高了材料整体的热稳定性,如前者从受热开始就不断失去重量,而后者在300℃前仅失去很少的重量。从DTG曲线(图2b)可以发现,两者在快速失重时具有两个最大失重速率温度,一个在371.9℃,为PA6和BPS的主链分解;另一个在408.2℃,为BPS的侧链苯环分解^[20]。由此可见,TBPA在燃烧过程中捕获自由基,中断燃烧链反应,同时与APP和BPS形成协同阻燃效应,促进炭层的形成,阻止热量和氧气的传递,减缓材料的燃烧速度,从而能显著提升PA6复合材料的热稳定性,使得复合材料在300℃以下很少失重。



(a) TG



(b) DTG

图2 PA6/APP/BPS和PA6/APP/BPS/TBPA5的TG和DTG曲线

Fig. 2 TG and DTG curves of PA6/APP/BPS and PA6/APP/BPS/TBPA5

2.3 阻燃剂含量对PA6复合材料力学性能的影响

为探究阻燃剂添加对PA6力学性能的影响,制备了纯PA6及PA6/APP/BPS复合材料拉伸样条,并进行了拉伸测试。图3展示了纯PA6和PA6/APP/BPS复合材料的应力-应变曲线,具体数据汇总于表4。分析表明,纯PA6展现出高强度与良好韧性,其

拉伸强度和断裂伸长率分别为 42.4 MPa 和 33.7%。加入阻燃剂 APP 和 BPS 后,样品韧性大幅下降至 9.8%,而拉伸强度略有提升。随后,通过添加 TBPA 进行增容,发现 PA6/APP/BPS/TBPA 复合材料的拉伸强度随 TBPA 含量增加而逐渐降低,断裂伸长率则呈现先增后减的趋势,表明 TBPA 有效促进了 APP 和 BPS 在 PA6 中的分散,尤其在 0.3% 质量分数时显著提升 PA6 韧性。TBPA 具有稳定的化学结构,分子中的溴原子被羰基活化,具有较高的反应活性,但这种活性并不足以在含量较低时引发 PA6 降解。然而,当 TBPA 含量较高时,其强酸性催化降解 PA6,导致分子链断裂,强度和韧性均下降。

此外,还评估了纯 PA6 与 PA6/APP/BPS 复合材料的弯曲性能和无缺口冲击强度(见表 4)。结果显示,阻燃剂的引入对弯曲强度的影响与拉伸强度相似,纯 PA6 表现最优,PA6/APP/BPS 次之,而增容后的 PA6/APP/BPS/TBPA 复合材料弯曲强度进一步降低。在冲击强度方面,纯 PA6 的冲击强度高达 135.7 kJ/m²,远超 PA6/APP/BPS 复合材料,再次证实

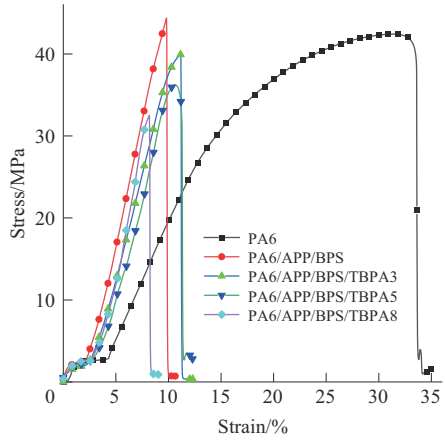


图 3 纯 PA6 和 PA6/APP/BPS 复合材料的拉伸应力-应变曲线
Fig. 3 Tensile stress-strain curves of pure PA6 and PA6/APP/BPS composites

APP 和 BPS 的加入不利于 PA6 的韧性。进一步考察 PA6/APP/BPS/TBPA 复合材料的冲击强度发现,随 TBPA 含量增加,冲击强度先升后降,在 0.5% 时达到峰值,为未添加 TBPA 阻燃 PA6 的 1.5 倍,验证了 TBPA 的增容增韧效果。

表 4 纯 PA6 和 PA6/APP/BPS 复合材料的拉伸、弯曲和冲击性能
Tab. 4 Tensile, bending and impact properties of pure PA6 and PA6/APP/BPS composites

Sample	Tensile strength/MPa	Tensile elastic modulus/MPa	Elongatinat at break/%	Bending strength/MPa	No notched impact strength/(kJ·m ⁻²)
PA6	42.4	294.5	33.7	75.8	135.7
PA6/APP/BPS	44.4	566.7	9.8	73.9	14.6
PA6/APP/BPS/TBPA3	39.9	369.3	11.1	68.8	20.2
PA6/APP/BPS/TBPA5	36.3	256.9	10.6	61.1	22.1
PA6/APP/BPS/TBPA8	32.4	341.3	8.1	63.5	13.8

3 结论

以 APP 和 BPS 为主要阻燃剂, TBPA 为反应性增容阻燃剂, 利用双螺杆挤出机熔融共混制备出 PA6/APP/BPS 和 PA6/APP/BPS/TBPA 复合材料。结果显示 APP 和 BPS 的加入显著提升了 PA6 产物的阻燃性能, 阻燃等级达到 UL94 V-2 级, 并大幅度降低了拉伸强度和韧性。进一步加入 TBPA 后, 可以发现 PA6/APP/BPS/TBPA 复合材料的阻燃等级在 TBPA 质量分数高于 0.5% 时达到 V-0 级, 平均 CO 产量提高。同时, TBPA 的加入显著提升了 PA6 复合材料的热稳定性, 使其在 300 °C 以下基本不失重。最后, TBPA 的加入能小幅度提升复合材料的韧性。综上所述, TBPA 对 APP 和 BPS 具有良好增容效果, 能有效提高其在基体中分散性, 从而达到提升 PA6 复合材料阻燃等级、韧性和热稳定性等多重功效。

参考文献

[1] SHAN H, YAN L, XU B, et al. Polyphosphamide containing

triazine and melamine cyanurate for flame-retardant PA6[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2023, 5(7):5 322–5 333.
[2] HE W, XU H, SONG P, et al. P, N-decorated halloysite nanotubes for flame retardancy enhancement of polyamide 6/aluminum diethylphosphinate[J]. Poly-mer Degradation and Stability, 2022, 196. DOI:10.1016/j.polymdegradstab.2022.109847.
[3] LI J, QIAN L, XI W, et al. Alloying synergistic flame retardant effect on PA6 by polyimide containing alkyl hypophosphate structure[J]. European PolymerJournal, 2024, 211. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2024.113033.
[4] FAN S, YUAN R, WU D, et al. Silicon/nitrogen synergistically reinforced flame-retardant PA6 nanocomposites with simultaneously improved anti-dripping and mechanical properties[J]. RSC advances, 2019, 9(14):7 620–7 628.
[5] 杨正, 王振华, 鲁世科, 等. 硼酸锌协效二乙基次膦酸铝阻燃 PA6 [J]. 中国塑料, 2022, 36(1):120–127.
YANG Zheng, WANG Zhenhua, LU Shike, et al. Synergistic effect of zinc borate and aluminum diethylphosphinate on flame retardancy of PA6[J]. China Plastics, 2022, 36(1):120–127.

- [6] 刘杰,孙启,航朱平,等.阻燃尼龙6纤维的制备及性能研究[J].青岛大学学报(工程技术版),2023,38(3):96–100.
LIU Jie, SUN Qi, HANG Zhuping, et al. Preparation and properties of flame retardant nylon6 fiber[J]. Journal of Qingdao University (E&T), 2023, 38(3):96–100.
- [7] 郑骏驰,舒帮建,孙兆懿,等.阻燃PA6复合材料研究进展[J].工程塑料应用,2019,47(11):149–155.
ZHENG Junchi, SHU Bangjian, SUN Zhaoyi, et al. Research progress of flame retardant PA6 composites[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(11):149–155.
- [8] GAO J, WU Y, LI J, et al. A review of the recent developments in flame-retardant nylon composites[J]. Composites Part C: Open Access, 2022, 9. DOI:10.1016/j.jcomc.2022.100297.
- [9] 朱凤丽.溴代苯乙烯聚合物的合成及其阻燃性能研究[D].青岛:青岛科技大学,2018.
ZHU Fengli. Synthesis and flame retardant properties of bromostyrene polymer[D]. Qingda: Qingdao University of Science and Technology, 2018.
- [10] DING S, LIU P, ZHANG S, et al. Preparation and characterization of cyclodextrin microencapsulated ammonium polyphosphate and its application in flame retardant polypropylene[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137(34). DOI:10.1002/app.49001.
- [11] LIU Y, GAO Y, ZHANG Z, et al. Preparation of ammonium polyphosphate and dye co-intercalated LDH/polypropylene composites with enhanced flameretardant and UV resistance properties[J]. Chemosphere, 2021, 277. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130370.
- [12] 罗勇,谢德龙,者加云,等.II型聚磷酸铵的改性及其阻燃聚丙烯的研究进展[J].塑料工业,2019,47(1):6–12, 50.
LUO Yong, XIE Delong, ZHE Jiayun, et al. Research process of modification of type II ammonium polyphosphate and its flame-retardant polypropylene[J]. China Plastics Industry, 2019, 47(1):6–12, 50.
- [13] TANG W, QIAN L, CHEN Y, et al. Intumescent flame retardant behavior of charring agents with different aggregation of piperazine/triazine groups in polypropylene[J]. Polymer Degradation and Stability, 2019, 169. DOI:10.1016/j.polymdegradstab.2019.108982.
- [14] XU J, MA B, NIU L, et al. Study on the flame retardancy of nano-Sb₂O₃/BPS-PBT composites[J]. Advanced Composites Letters, 2019, 28. DOI:10.1177/0963693519865743.
- [15] 张露荣,胡清,赵彪,等.共聚阻燃聚酰胺研究进展[J].中国塑料,2024,38(11):130–136.
ZHANG Lurong, HU Qing, ZHAO Biao, et al. Research progress on copolymer flame retardant polyamide[J]. China Plastics, 2024, 38(11):130–136.
- [16] LI J, QIAN L, XI W, et al. Alloying synergistic flame retardant effect improving fire resistance and mechanical properties of polyamide 6[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 139(48). DOI:10.1002/app.53226.
- [17] FENG H, QIU Y, QIAN L, et al. Flame inhibition and charring effect of aromatic polyimide and aluminum diethylphosphinate in polyamide 6[J]. Polymers, 2019, 11(1). DOI: 10.3390/polym11010074.
- [18] 叶冬蕾,柴晨泽,高伦巴根,等.低分子量溴化聚苯乙烯阻燃玻纤增强PBT的性能研究[J].化工新型材料,2023,51(10):125–129.
YE Donglei, CHAI Chenze, GAO Lunbagen, et al. Study of flame retardancy of low molecular weight brominated polystyrene on glass fiber reinforced PBT[J]. New Chemical Materials, 2023, 51(10):125–129.
- [19] 李超.新型有机磷阻燃剂在PA6中的阻燃应用研究[D].青岛:青岛科技大学,2022.
LI Chao. Research on the flame retardant application of new organic phosphine flame retardants in PA6[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2022.
- [20] 刘琳,李胜利.高分子阻燃剂溴化聚苯乙烯阻燃PA6的研究[J].工程塑料应用,2008,36(2):12–15.
LIU Lin, LI Shengli. Synthesis of brominated polystyrene flame retardant and its application in nylon6[J]. Engineering Plastics Application, 2008, 36(2):12–15.