

http://pmse.scu.edu.cn

## 改性聚磷酸铵/木质素对高密度聚乙烯电缆料的性能影响

齐磊杰<sup>1</sup>, 冯希波<sup>1</sup>, 李岩<sup>2</sup>, 宋浩源<sup>2</sup>, 宋长宇<sup>3</sup>

(1. 湖北省电力规划设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 华北电力大学 电力工程系, 河北 保定 071003;  
3. 张家口市交投实业有限公司, 河北 张家口 075000)

**摘要:** 文中将六氯环三磷腈(HCCP)和三聚氰胺(MEL)通过缩聚法包覆于聚磷酸铵(APP)单体表面, 得到改性聚磷酸铵(MAPP)。以木质素(Lig)为碳源、MAPP为酸源和气源组成膨胀型阻燃剂(IFR), 用于阻燃高密度聚乙烯(HDPE)电缆料的制备。极限氧指数(LOI)、垂直燃烧等级(UL-94)测试结果表明, 改性后的MAPP/Lig对HDPE有更高的阻燃效率。当添加MAPP/Lig质量分数为30%, 且配比为3/1时, HDPE复合材料达到垂直燃烧V-1等级, LOI值达到28.6%。锥形量热(CCT)测试结果表明, MAPP/Lig阻燃剂相较于APP/Lig阻燃剂可以明显减小HDPE的总热释放量和热释放速率。力学测试表明, 乙烯-辛烯共聚物(POE)可以使复合材料的断裂伸长率显著提升。以MAPP取代APP, 会导致HDPE复合材料的电气性能降低, 但仍能符合标准使用要求。

**关键词:** 高密度聚乙烯; 木质素; 阻燃性能; 力学性能; 电气性能

中图分类号: TM247.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7555(2025)01-0070-08

目前用于电缆护套的材料多为有机聚合物, 包括聚氯乙烯(PVC)、聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、乙烯醋酸乙烯(EVA)等, 其中高密度聚乙烯(HDPE)具有价格低廉、电气绝缘和力学性能优良等优点, 是电缆护套的常用材料。然而, HDPE属于易燃材料, 着火后会继续燃烧。同时, 它在燃烧过程中会释放出大量烟雾, 对生命和财产安全构成严重威胁, 所以需要HDPE材料进行阻燃改性。然而, 直接在HDPE中添加阻燃剂会严重影响复合材料的力学性能。因此, 对HDPE的阻燃协同力学性能改性研究已成为一种必然的趋势。

膨胀型阻燃剂(IFR)作为一种新型的复合阻燃体系, 由于其具有无卤、低烟、低毒的特点, 符合保护环境的要求, 近年来受到了研究学者们的高度关注<sup>[1]</sup>。木质素(Lig)被称为21世纪人类可以利用的最丰富的绿色资源之一, 其分子中有多个苯环结构, 包含羟基(—OH)、羰基(C=O)和羧基(—COOH), 这为其作为IFR系统中的碳源成分提供了物质基

础<sup>[2]</sup>。聚磷酸铵(APP)作为一种常见的IFR, 因其高氮(N)和磷(P)含量在阻燃领域受到极大关注。然而, APP和聚合物之间的极性差异, 造成两者相容性较差, 从而会降低聚合物材料的力学性能<sup>[3]</sup>。此外, APP具有亲水性, 容易吸收和渗出水分, 导致聚合物材料的阻燃性降低。六氯环三磷腈(HCCP)由于其携带多反应活性位点, 容易与其他基团发生亲核取代反应, 且其分子中含有交替的—P=N—结构, 可以提高阻燃效果, 是一种理想的阻燃中间体<sup>[4]</sup>。

目前, 木质素为碳源的膨胀型阻燃剂用于HDPE阻燃改性研究极少报道<sup>[5]</sup>。本文采用环保型材料木质素作为膨胀型阻燃剂的碳源, 同时用缩聚法将HCCP和三聚氰胺(MEL)包覆于APP表面, 结合HCCP热稳定性和APP膨胀阻燃效果的优点, 得到改性聚磷酸铵(MAPP)。为保证HDPE复合材料的力学性能, 采用20%乙烯-辛烯共聚物(POE)为增韧剂替换等量的HDPE。本文研究了不同MAPP/Lig添加比例对HDPE的阻燃效果, 同时考察了力学及

电气性能的改善效果<sup>[6]</sup>。筛选出一组优化的高性能 APP/Lig 复合材料作为 HDPE 电缆护套料配方。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

HDPE 和 POE:工业级,苏州兆海塑料化工有限公司;APP:分析纯,杭州捷尔思阻燃化工有限公司;碱木质素:分析纯,梯希爱(上海)化成工业发展有限公司;4,4'-二氨基二苯醚(ODA)和 HCCP:分析纯,上海麦克林生化科技有限公司;吡啶:分析纯,科密欧化学试剂有限公司;MEL、去离子水和无水乙醇:分析纯,国药化学试剂有限公司。

### 1.2 试样制备

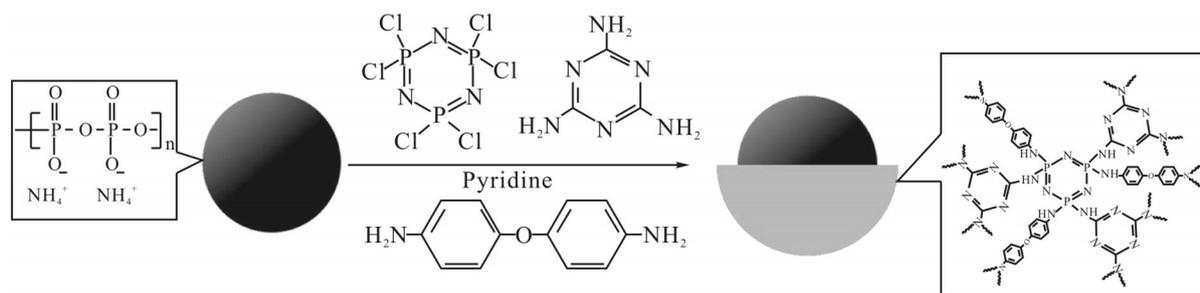
将 MEL(5 g)和 ODA(10 g)溶解在 400 mL 吡啶中,记为溶液 A。将溶液 A 在 0 °C 超声搅拌 10 min。再添加 APP(30 g),继续搅拌 1 h。然后,将 HCCP(10 g)溶解在 50 mL 吡啶中,将此混合物标记为溶液 B。将溶液 B 在 30 min 内缓慢滴加到溶液 A 中。添加完成后,将混合物移入油浴,设置加热温度为

80 °C,加热时间 24 h。最后,将过滤得到的凝胶状产品用无水乙醇和去离子水洗涤 3 次,将产物在真空烘箱 65 °C 处理 48 h,得到干燥后的 MAPP 粉末,MAPP 的合成机理如 Scheme 1 所示。为了进行比较,除了引入 APP 这一步骤外,使用类似的工艺制备出 HCCP 和 MEL 的共聚物,记为 PZMA。

按照 Tab.1 中不同试样的配比,首先添加一定量的 HDPE 到实验室干粉混合机中,然后取不同的阻燃剂分别放入混合机中进行物理混合,设定搅拌时间为 20 min。然后将混合好的材料置于双辊混炼机中于 165 °C 进行熔融混合。辊子的速度和加工时间分别设定为 40 r/min 和 25 min。然后,将所得到的混合物在 15 MPa 和 170 °C 热压 10 min,以获得合适尺寸的试样。

### 1.3 测试与表征

**1.3.1 傅里叶变换红外光谱分析:**采用 Infinity Gold 型红外光谱仪(FT-IR,美国 Thermo Mattson 公司)对样品的化学结构进行分析。分辨率为  $1\text{ cm}^{-1}$ ,平均扫描范围为  $400\sim 4000\text{ cm}^{-1}$ ,采用直接吸光模式,试样为



Scheme 1 Synthesis process of MAPP

Tab. 1 Formulations, LOI and UL-94 test results of HDPE composite materials

Sample	w(HDPE)/%	w(POE)/%	w(APP)/%	w(MAPP)/%	w(Lig)/%	LOI/%	UL-94
0#	70.0	0	22.5	0	7.5	23.6	NR
1#	80.0	20	0	0	0	17.8	NR
2#	50.0	20	22.5	0	7.5	23.8	NR
3#	50.0	20	20.0	0	10.0	23.5	NR
4#	50.0	20	15.0	0	15.0	22.0	NR
5#	50.0	20	0	22.5	7.5	28.6	V-1
6#	50.0	20	0	20.0	10.0	27.8	V-2
7#	50.0	20	0	15.0	15.0	27.1	NR

粉体。

**1.3.2 LOI测试:**采用极限氧指数分析仪JF-3A(江苏卓恒测控技术有限公司),根据国标GB/T 2406-2009进行测试。样条尺寸为150 mm×6.5 mm×3 mm。

**1.3.3 UL-94测试:**采用水平垂直燃烧仪CZF-3(南京瑞光仪器有限公司),根据国标GB/T 2408-2008进行测试。样条尺寸为150 mm×13 mm×3 mm。

**1.3.4 CCT测试:**采用锥形量热仪i-Cone-0402(江苏费尔曼安全科技有限公司),根据ISO 5660标准进行测试。试样尺寸为100 mm×100 mm×3 mm,辐射功率为35 kW/m<sup>2</sup>,燃烧时间为10~20 min。

**1.3.5 TGA分析:**采用热重分析仪TGA-50H(深圳市科时达电子科技有限公司),试样置于氮气氛围中,升温速率为10 °C/min,温度从30 °C升到800 °C。

**1.3.6 形貌表征:**采用扫描电镜FEI-Quanta FEG 250(北京亿诚恒达科技有限公司)对试样粉体进行观察。加速电压为20 kV,样品在测试前进行表面喷金处理,厚度为10 nm。

**1.3.7 拉伸性能测试:**采用万能拉力测试机AG-J10KN(日本岛津公司),根据国标GB/T 1040.3-2006进行测试。试样为5型哑铃片,厚度为1 mm,拉伸速度为250 mm/min。

**1.3.8 介电强度测试:**采用工频高电压试验控制台HY-AC20(上海杨高电器有限公司),根据国标GB/T 1408.1-2006进行测试。采用球形对称电极,电极的直径为20 mm,以恒定升压速率2 kV/s加压直至材料发生击穿。

**1.3.9 体积电阻率测试:**采用三电极高阻计ZC-36(上海亨美电气有限公司),根据国标GB/T1410-2006进行测试。测试环境温度为25 °C,试样厚度为1 mm,测试电压为1 kV,标准读数时间为1 min。

## 2 结果与讨论

### 2.1 MAPP的表征

由Fig.1可知,共聚单体HCCP,ODA和MEL之间发生了缩聚反应得到MAPP。对于MAPP而言,APP的所有典型峰值仍然存在,还出现了一些新的吸收峰。其中,1500 cm<sup>-1</sup>处的峰对应于ODA分子结构中苯基C—C基团的伸缩振动<sup>[7]</sup>。865 cm<sup>-1</sup>和1205

cm<sup>-1</sup>处的典型峰分别归属于HCCP的P—N和P=N特征吸收峰<sup>[8]</sup>。1105 cm<sup>-1</sup>处的尖峰归因于醚键的伸缩振动,3345 cm<sup>-1</sup>的尖峰对应于ODA单元中的氨基,1660 cm<sup>-1</sup>和1560 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰与三嗪环有关,以上表明MEL和HCCP之间的缩合反应成功实现<sup>[9]</sup>。

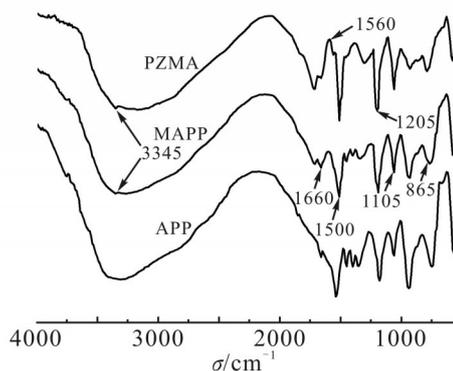


Fig. 1 FT-IR spectra of APP, MAPP and PZMA

Fig.2是APP和MAPP粉末的SEM照片,可以看出,APP颗粒呈现出光滑的表面,而MAPP的表面产生了褶皱状的附着物。说明HCCP和MEL包裹在APP表面,得到成功改性的MAPP。

### 2.2 LOI与UL-94分析

如Tab.1所示,纯HDPE(1#试样)的LOI只有17.8%,且在UL-94测试中没有等级。在纯HDPE中添加质量分数30%的APP/Lig后,得到试样2#~4#。当APP/Lig添加配比为3/1时,所得2#试样的阻燃性能较3#和4#试样更好,其LOI数值达到23.8%,然而2#试样在UL-94测试中为无等级。以MAPP代替APP,得到5#~7#试样。当MAPP/Lig添加配比为3/1时,得到5#试样的LOI最高,达28.6%,同时取得UL-94测试的V-1等级。结果表明,以MAPP取代APP作为碳源和氧源,Lig作为碳源组成MAPP/Lig膨胀型阻燃剂,将其用于阻燃HDPE,复合材料的阻燃性能明显提升。

### 2.3 CCT测试结果分析

根据CCT试验结果,可以得到材料的总热释放量(THR)、热释放速率(HRR)、热释放速率峰值(p-HRR)和达到p-HRR所用时间(Time to p-HRR)。Fig.3显示了试样的THR和HRR曲线,观察到5#~7#试样的THR和HRR曲线均位于2#试样以下。其中,当MAPP/Lig膨胀阻燃剂的添加量为30%,且两者添

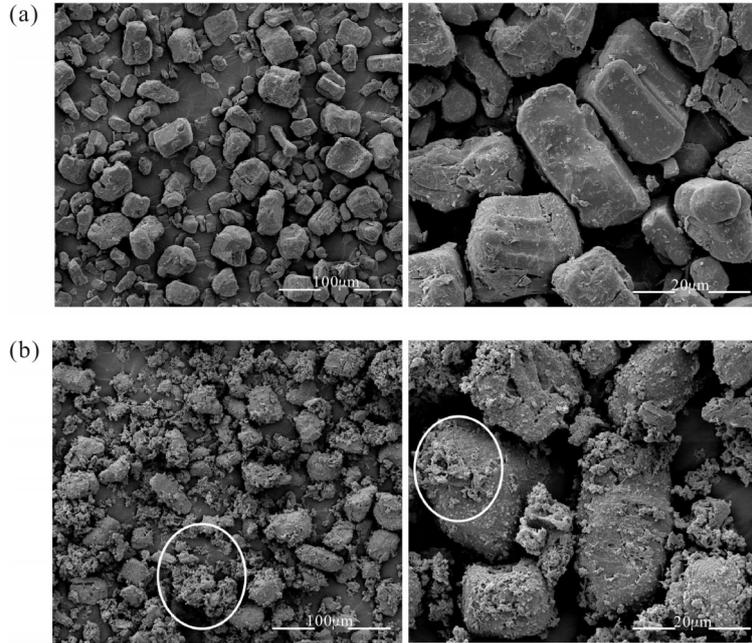


Fig. 2 SEM images of (a) APP and (b) MAPP

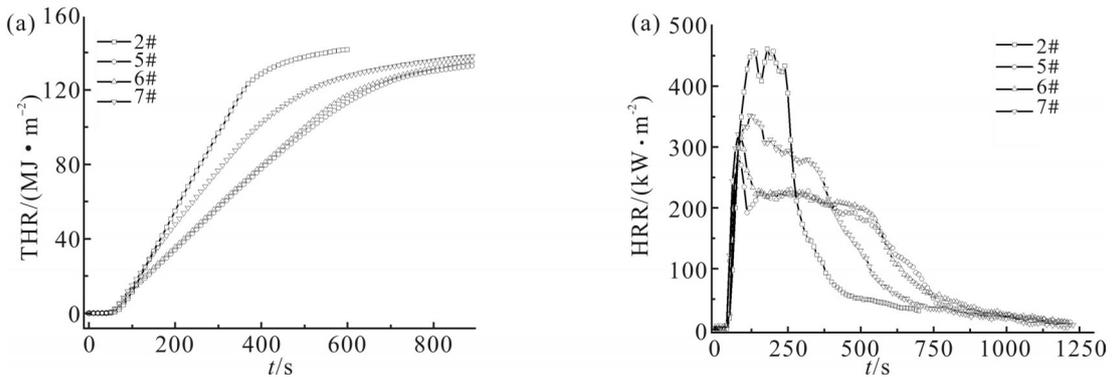


Fig. 3 (a) THR and (b) HRR curves of HDPE composite materials

Tab. 2 CCT test results of HDPE composite materials

Sample	THR/(MJ·m <sup>-2</sup> )	p-HRR/(kW·m <sup>-2</sup> )	Time to p-HRR/s	FGR/(kW·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )
2#	142.4	472.0	144.3	3.3
5#	126.1	281.4	95.9	2.9
6#	130.6	321.9	102.5	3.1
7#	132.9	357.6	115.1	3.1

加配比为3/1时,得到5#试样的THR和HRR数值最小。可以得出,MAPP/Lig阻燃剂相较APP/Lig阻燃剂可以明显减小HDPE聚合物的总热释放量和热释放速率。

Tab.2列出了CCT测试中的重要数据,2#试样的THR为142.4 MJ/m<sup>2</sup>,5#,6#和7#试样的THR分别为

126.1 MJ/m<sup>2</sup>, 130.6 MJ/m<sup>2</sup>和 132.9 MJ/m<sup>2</sup>。可以看到,5#试样较2#试样的THR数值明显降低。同样,5#试样的p-HRR和达到p-HRR所用时间的值均明显降低,表明5#复合材料的阻燃性能加强。在火灾事故中,火灾增长指数(FGR)越低对应材料的防火安全性越好,其中5#试样的FGR数值较2#试

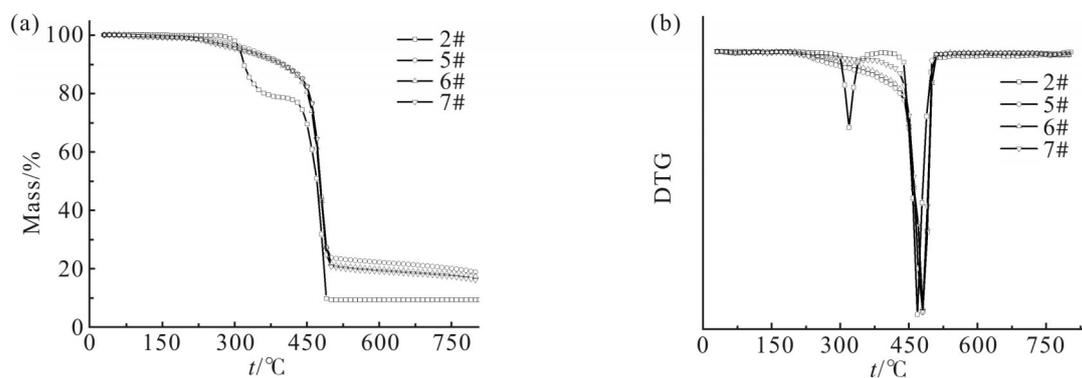


Fig. 4 (a) TGA and (b) DTG curves of HDPE composite materials

Tab. 3 Thermal degradation parameters of different HDPE composite materials

Sample	$T_{on}^a / ^\circ\text{C}$	$T_{max}^b / ^\circ\text{C}$	Char residue / %			
			500 °C	600 °C	700 °C	800 °C
2#	364.6	471.0	10.43	10.20	10.09	9.97
5#	353.7	482.1	23.22	20.81	19.89	18.81
6#	347.3	483.8	19.66	18.73	17.89	17.43
7#	348.9	483.9	18.98	17.94	16.79	16.40

<sup>a</sup>temperature at the mass loss of 5%; <sup>b</sup>temperature at the maximum thermal mass loss rate

样降低<sup>[10]</sup>。由此说明,使用MAPP/Lig代替APP/Lig用于阻燃HDPE,有助于进一步降低电缆火灾的危险程度。

## 2.4 TGA分析

Fig.4是HDPE复合材料在氮气中的TGA曲线和热失重速率曲线(DTG),相应的热降解参数见Tab.3。其中,初始分解温度( $T_{on}$ )和最大热失重率温度( $T_{max}$ )以及燃烧后的残炭量三者通常被作为衡量材料热稳定性的关键参数<sup>[11]</sup>。

可以发现,HDPE/MAPP/Lig复合材料的 $T_{on}$ 比HDPE/APP/Lig复合材料的 $T_{on}$ 略低,是因为MAPP/Lig在不到200 °C就开始分解,而APP/Lig在较高温度(约300 °C)才开始分解。由TGA曲线可知,HDPE/APP/Lig复合材料存在两阶段降解,而HDPE/MAPP/Lig复合材料呈现单一阶段降解过程。因为在一定温度下,APP先分解,产生的聚磷酸等物质使木质素脱水成炭,而MAPP和Lig协同作用使得HDPE聚合物提前受热分解,该分解反应是一个较为缓慢的过程。

从Tab.3可得,2#试样在800 °C时的残炭量为9.97%,明显低于5#试样的残炭量(18.81%),可能是

MAPP中的N,P含量增加,提高了聚合物燃烧后的残炭量。由此得出结论,MAPP/Lig用于HDPE聚合物的阻燃效率大大提高,原因是MAPP/Lig相较于APP/Lig用于阻燃HDPE时燃烧后产生的残炭量明显增加,从而起到了隔绝HDPE与O<sub>2</sub>和热量的接触,保护作用进一步加强<sup>[12]</sup>。

## 2.5 残炭形貌

Fig.5是HDPE复合材料在CCT测试后生成的残炭照片。由于IFR主要在凝聚相中发挥阻燃作用,因此有必要分析膨胀炭层的形态及其膨胀程度。可以看到,2#试样燃烧后形成的残炭量较少,同时伴随着裂纹的产生,导致炭层对内部HDPE基质的保护作用减小。而5#试样的残炭量明显增加,同时生成的残炭表面更为连续致密,产生了明显的膨胀炭层结构。由此得出结论,以MAPP取代APP作为IFR的炭源和气源,能使HDPE复合材料在燃烧后产生的膨胀炭层的膨胀程度和致密程度得到明显提高,这一点从凝聚相方面解释了MAPP较APP有更好的阻燃效果。

## 2.6 MAPP/Lig阻燃HDPE的力学性能

Fig.6是0#~7#试样拉伸强度和断裂伸长率数

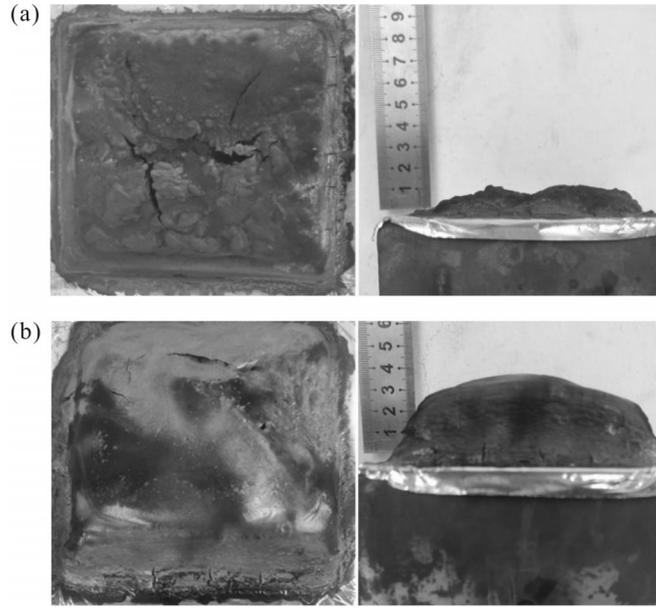


Fig. 5 Photos of residue samples collected after cone calorimeter test: (a) 2#; (b) 5#

据的柱状图。可以看到,添加了POE的1#~7#试样的拉伸强度和断裂伸长率均可以满足GB/T 32129-2015电线电缆用低烟无卤阻燃电缆料标准的要求(拉伸强度 $\geq 20$  MPa,断裂伸长率 $\geq 160\%$ )。在HDPE中添加30%APP/Lig膨胀型阻燃剂,得到0#试样的拉

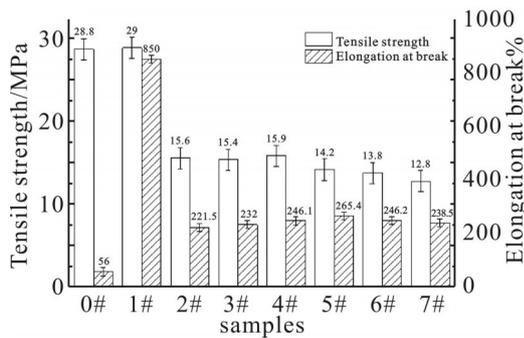


Fig. 6 Tensile strength and elongation at break of samples 0#~7#

伸强度和断裂伸长率分别为28.8 MPa和56%,由于阻燃剂在HDPE中的相容性和分散性较差,复合材料的力学性能降低。添加POE后得到2#试样的拉伸强度和断裂伸长率分别为15.6 MPa和221.5%。由此可见,POE对HDPE有优良的增韧作用。这是因为POE的分子量分布窄,分子结构中侧辛基长于侧乙基,在分子结构中可形成联结点,在各成分之间起到联结、缓冲作用,当体系受到张力时,这些联结点所形成的网络状结构可以发生较大的形变,所以,体系的断裂伸长率有显著的增加。同时,添加20% POE,可导致体系的拉伸强度有所下降,但仍然满足

国标GB/T 32129-2015的要求。

### 2.7 MAPP/Lig阻燃HDPE的介电强度

Fig.7是1#~7#试样的介电强度折线统计图。7组试样均能满足国标GB/T 32129-2015电线电缆用低烟无卤阻燃电缆料标准对介电强度的要求( $\geq 20$  MV/m)。可以看出,纯HDPE的介电强度为42.2 MV/m。加入APP/Lig阻燃剂后,2#~4#试样的介电强度得到提高,3#试样的介电强度最高,达到48.6 MV/m。以MAPP替换APP,得到5#~7#试样的介电强度呈现下降的趋势,但依然能达到39 MV/m以上。

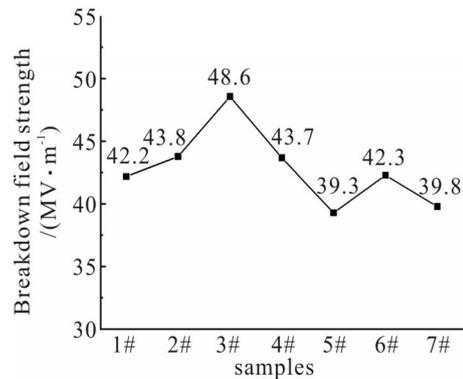


Fig. 7 Breakdown field strength of samples 1#~7#

### 2.8 MAPP/Lig阻燃HDPE的体积电阻率

Fig.8是1#~7#试样的体积电阻率折线统计图,所有试样的数值均能满足国标GB/T 32129-2015电线电缆用低烟无卤阻燃电缆料标准对体积电阻率的要求( $\geq 2 \times 10^8 \Omega \cdot m$ )。纯HDPE(1#试样)的体积电阻

率为  $3.8 \times 10^{12} \Omega \cdot m$ 。以 MAPP 替代 APP, 所得 5#~7# 试样的体积电阻率均明显降低, 分别为  $7.8 \times 10^{11} \Omega \cdot m$ ,  $8.5 \times 10^{11} \Omega \cdot m$  和  $7.5 \times 10^{11} \Omega \cdot m$ , 这意味着 MAPP 对 HDPE 的导电路径具有加强作用。

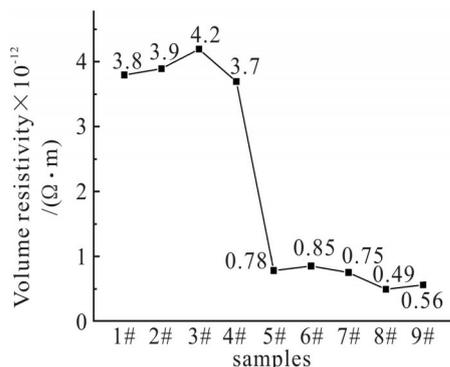


Fig. 8 Volume resistivity of samples 1#~7#

### 3 结论

本文利用 HCCP 和 MEL 对 APP 进行阻燃改性得到 MAPP, 可以提高聚磷酸铵和木质素膨胀型阻燃剂对 HDPE 的阻燃效果, 还能起到更好的抑制热量释放作用, 从而减缓火灾的蔓延。同时对比了不同添加比例的 MAPP 和 Lig 对 HDPE 的阻燃效果, 筛选出一组优化的高性能复合材料配方作为电缆护套料配方。TGA 分析表明, 以 MAPP 取代 APP, 所得 HDPE 复合材料的热稳定性得到明显提高。通过扫描电镜观察残炭形貌得出, 相较于 APP, MAPP 所组成的 HDPE 复合材料在燃烧后产生的膨胀炭层的膨胀程度和致密程度得到明显提高, 这一点从凝聚相方面解释了 MAPP 较 APP 有更好的阻燃效果。力学试验表明, 添加 20%POE, 所得 HDPE 复合材料的断裂伸长率取得明显提高, 说明 POE 对阻燃 HDPE 电缆料具有良好的增韧效果。研究结果对开发高性能电缆护套料具有很好的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] Wei T, Yang X, Huo Y N, *et al.* Lignin/ammonium polyphosphate-modified wood flour/high-density polyethylene composites[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2022, 39: 126594-126602.
- [2] Kim H H, Sim M J, Lee J C, The effects of chemical structure for phosphorus-nitrogen flame retardants on flame retardant mechanisms[J]. *Journal of Materials Science*, 2023, 58: 6850-6864.
- [3] 邵博, 张志军, 王清文, 等. APP 对木粉-HDPE 复合材料阻燃和力学性能的影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2008, 24(4): 93-96.  
Shao B, Zhang Z J, Wang Q W, *et al.* Effects of APP on the fire-retardant and mechanical properties of wood-flour-HDPE composite[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2008, 24(4): 93-96.
- [4] Qiu S L, Ma C, Wang X, *et al.* Melamine-containing polyphosphazene wrapped ammonium polyphosphate: a novel multifunctional organic-inorganic hybrid flame retardant[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 13: 839-848.
- [5] 董延茂, 赵丹, 朱玉刚. MWCNT-FAP 协效聚磷酸铵阻燃环氧树脂研究[J]. *化工新型材料*, 2023, 51(1): 95-101.  
Dong Y M, Zhao D, Zhu Y G. Study on synergistic ammonium polyphosphate flame retardant epoxy resin with MWCNT-FAP[J]. *New Chemical Materials*, 2023, 51(1): 95-101.
- [6] Wei Y, Zhu S Y, Qian Q W, *et al.* Hexachlorocyclotriphosphazene functionalized lignin as a sustainable and effective flame retardant for epoxy resins[J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 187: 115543.
- [7] Weng S X, Li Z, Bo C Y, *et al.* Design lignin doped with nitrogen and phosphorus for flame retardant phenolic foam materials [J]. *Reactive & Functional Polymers*, 2023, 185: 105535.
- [8] Qiu S L, Ma C, Wang X, *et al.* Melamine-containing polyphosphazene wrapped ammonium polyphosphate: a novel multifunctional organic-inorganic hybrid flame retardant[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 344: 839-848.
- [9] Vahabi H, Laoutid F, Movahedifar E, *et al.* Description of complementary actions of mineral and organic additives in thermoplastic polymer composites by flame retardancy index[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2019, 30: 2056-2066.
- [10] 杨晓涵, 宋艳, 林肯, 等. 木质素基成炭剂的制备及在膨胀阻燃聚丙烯的应用[J]. *高分子材料科学与工程*, 2022, 38(12): 39-46.  
Yang X H, Song Y, Lin Y, *et al.* Preparation of lignin-based charring agent and its application in intumescent flame retardant polypropylene[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2022, 38(12): 39-46.
- [11] Yan D, Chen D, Tan J, *et al.* Synergistic flame retardant effect of a new N-P flame retardant on poplar wood density board[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2023, 211: 110331.
- [12] 李计彪, 付晓, 王中武, 等. 高性能低烟无卤聚烯烃电缆护套料的开发[J]. *高分子材料科学与工程*, 2019, 35(7): 114-120.  
Li J B, Fu X, Wang Z W, *et al.* Development of high performance low smoke halogen free polyolefin cable sheathing compound[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2019, 35(7): 114-120.

## Effect of Modified Ammonium Polyphosphate/Lignin on Properties of High Density Polyethylene Cable Materials

Leijie Qi<sup>1</sup>, Xibo Feng<sup>1</sup>, Yan Li<sup>2</sup>, Haoyuan Song<sup>2</sup>, Changyu Song<sup>3</sup>

(1. Power China Hubei Electric Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China; 2. Department of Electric Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 3. Zhangjiakou Jiaotou Industrial Co., Ltd., Zhangjiakou 075000, China)

**ABSTRACT:** The modified ammonium polyphosphate (MAPP) was obtained by the condensation of hexachlorocyclotriphosphazene (HCCP) and melamine (MEL) onto the surface of ammonium polyphosphate (APP) monomers. Using lignin (Lig) as carbon source, MAPP as acid and gas source to form an expanding flame retardant (IFR) for the preparation of flame-retardant high-density polyethylene (HDPE) cable materials. The results of the limiting oxygen index (LOI) and vertical burning class (UL-94) tests indicate that the modified MAPP/Lig has a higher flame retardant efficiency for HDPE. When the mass fraction of MAPP/Lig is 30% and the ratio is 3/1, the HDPE composite material reaches the vertical combustion V-1 grade, and the LOI value reaches 28.6%. Cone calorimetry (CCT) testing shows that MAPP/Lig flame retardant can significantly reduce the total heat release and heat release rate of HDPE compared to APP/Lig flame retardant. Mechanical test results show that ethylene octene copolymer (POE) can significantly increase the elongation at break of the composite materials. Replacing APP with MAPP will reduce the electrical performance of the HDPE composite materials, but still meet the standard usage requirements.

**Keywords:** high density polyethylene; lignin; flame retardant properties; mechanical properties; electrical properties