

# MPP/PIPP/ATH 复配阻燃剂在聚丙烯中的阻燃性能研究

卢嘉男<sup>1</sup>, 姜凤阳<sup>1\*</sup>, 思芳<sup>1</sup>, 李泽将<sup>1</sup>, 周亮<sup>1</sup>, 周尧<sup>1</sup>, 王俊勃<sup>1,2</sup>, 马亚明<sup>2</sup>

(1. 西安工程大学材料工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 陕西鼎新汇智功能材料科技有限公司, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 以聚丙烯(PP)为基体, 以三聚氰胺聚磷酸盐(MPP)/聚焦磷酸哌嗪(PIPP)/氢氧化铝(ATH)为阻燃填料, 以聚丙烯接枝马来酸酐(PP-g-MAH)为相容剂, 采用熔融共混法制备PP/MPP/PIPP/ATH/PP-g-MAH阻燃复合材料, 并对其进行测试和表征, 探究不同比例MPP、PIPP、ATH对复合材料阻燃性能和力学性能的影响。结果表明: MPP、PIPP、ATH复配可以增强PP的高效阻燃性能, 当MPP、PIPP质量比为4:1时最佳, 复合材料的UL-94燃烧等级可达V-0级, 其极限氧指数为29.8%, 残炭率为17.88%; MPP、PIPP、ATH间的协同作用能够提升PP的最大热分解温度, 提高残炭率, 表现出优异的热稳定性。

**关键词:** 聚丙烯; 三聚氰胺聚磷酸盐; 聚焦磷酸哌嗪; 阻燃性能

中图分类号: TQ323.7

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)01-0032-05

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.01.006

## Study on Flame Retardant Properties of MPP/PIPP/ATH Compounded Flame Retardant in Polypropylene

LU Jianan<sup>1</sup>, JIANG Fengyang<sup>1\*</sup>, SI Fang<sup>1</sup>, LI Zejiang<sup>1</sup>, ZHOU Liang<sup>1</sup>, ZHOU Yao<sup>1</sup>, WANG Junbo<sup>1,2</sup>, MA Yaming<sup>2</sup>

(1. School of Materials Engineering, Xi'an University of Engineering, Xi'an 710048, China;

2. Shaanxi Dingxin Huizhi Functional Material Technology Co., Ltd., Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Taking polypropylene (PP) as the matrix, melamine polyphosphate (MPP)/phosphorylated imidazoline polyphosphate (PIPP)/aluminum hydroxide (ATH) as flame-retardant fillers, and maleic anhydride grafted polypropylene (PP-g-MAH) as a compatibilizer, the flame-retardant composites PP/MPP/PIPP/ATH/PP-g-MAH were prepared by the melt compounding method. The composites were tested and characterized to explore the effects of different ratios of MPP, PIPP and ATH on the flame-retardant and mechanical properties of the composites. The results showed that the combination of MPP, PIPP and ATH enhanced the flame-retardant properties of PP. The optimal mass ratio of MPP to PIPP was 4 : 1. The UL-94 flammability rating of the composites reached V-0, with a limiting oxygen index of 29.8% and a char yield of 17.88%. The synergistic effect among MPP, PIPP and ATH increased the maximum thermal decomposition temperature of PP, improved the char yield, and demonstrated excellent thermal stability.

**Keywords:** PP; MPP; PIPP; Flame retardant properties

聚丙烯(PP)因其优异的机械性能、化学稳定性、耐热性以及低成本等特点, 被广泛应用于包装、纺织和建筑等领域<sup>[1-3]</sup>。然而, PP的化学结构中含有大量碳-氢键, 导致其熔点低、燃烧速度快、发烟量大且易产生熔滴, 这限制其在阻燃要求较高领域中的应用<sup>[4-6]</sup>。目前, 提高PP阻燃性能的主要方法是添加阻燃剂。常见阻燃剂分为含卤阻燃

剂与无卤阻燃剂<sup>[7-8]</sup>。含卤阻燃剂虽阻燃效率高, 但其在燃烧或高温分解时会释放有毒气体, 对环境和人体健康造成威胁<sup>[9-11]</sup>。三聚氰胺聚磷酸盐(MPP)作为一种环保型无卤阻燃剂, 通过释放氨气和促进炭化层形成, 起到良好阻燃效果<sup>[12-14]</sup>。氢氧化铝(ATH)在高温下分解生成氧化铝与水, 无毒且不污染环境。但MPP在燃烧过程中会产生大

收稿日期 Submitted date 2025-03-08; 修回日期 Revised date 2025-04-15; 录用日期 Accepted date 2025-05-25

基金项目: 陕西省技术创新引导计划项目(2024QCY-KXJ-021); 陕西省科技厅三项改革项目(S2024-YD-SXGG-YYDP-0019); 西安市科技计划项目-高校院所人才服务企业项目(23GXFW0021)

\*联系人, jfy\_123@126.com

引用本文: 卢嘉男, 姜凤阳, 思芳, 等. MPP/PIPP/ATH 复配阻燃剂在聚丙烯中的阻燃性能研究[J]. 塑料科技, 2026, 54(1): 32-36.

Citation: LU J N, JIANG F Y, SI F, et al. Study on flame retardant properties of MPP/PIPP/ATH compounded flame retardant in polypropylene [J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(1): 32-36.

量烟雾和不稳定的炭层,ATH在燃烧过程中会使表面形成大量孔隙,两者单独使用时需要较高含量才能达到理想阻燃效果,而高含量阻燃剂会使复合材料力学性能降低<sup>[15-17]</sup>。聚焦磷酸哌嗪(PIPP)磷元素含量高,哌嗪结构丰富,具有优异的抗熔滴和阻燃性能,与其他阻燃剂复配可缓解阻燃体系对基体力学性能的不利影响<sup>[18-19]</sup>。通过制备MPP/PIPP/ATH复配型阻燃剂,在降低PP中阻燃剂含量的同时,可实现良好阻燃、抑烟效果,并减少单一阻燃剂对复合材料力学性能的负面影响。

本实验在PP中添加MPP/PIPP/ATH复配型阻燃剂,以聚丙烯接枝马来酸酐(PP-g-MAH)为相容剂,采用熔融共混法制备PP/MPP/PIPP/ATH/PP-g-MAH阻燃复合材料,研究不同MPP、PIPP、ATH复配比例对复合材料阻燃性能、力学性能及热稳定性的影响,探究其阻燃机制,为开发多功能PP基材料提供新思路。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

PP, 3155E5, 苏州辉塑工程塑料有限公司; MPP, FR-200, 广州尚合化学科技有限公司; PIPP, DL-102, 广州远达新材料有限公司; ATH, 分析纯, 蚌埠壹石通聚合物复合材料有限公司; PP-g-MAH, 接枝率 1.2%, 东莞市尚亿塑料有限公司。

### 1.2 仪器与设备

单螺杆挤出机, SY-6212-A-30/28, 东莞世研精密仪器有限公司; 注射机, JX-760K, 宁波金星塑料机械公司; 傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR), Nicoletis50, Thermo Fisher Scientific 公司; 热重分析仪 (TG), Q2000, 美国 TA 公司; 场发射扫描显微镜, Quanta-450-FEG, 美国 FEI 公司; X 射线衍射仪 (XRD), Bruker D8 Advance, 德国布鲁克公司; 垂直燃烧测定仪 (UL-94), FTT0082, 英国 FTT 公司; 极限氧指数仪 (LOI), FTT0077, 英国 FTT 公司; 微机控制万能试验机, UTM5504, 深圳三思试验设备有限公司; 摆锤冲击试验机, JBW-500, 济南东测试验机技术有限公司; 高速混合机, SHR-10A, 张家港市怡典机械有限公司。

### 1.3 样品制备

表 1 为 PP/MPP/PIPP/ATH/PP-g-MAH 复合材料的配方。原料经干燥处理后,按照表 1 所示配比,将精确计量的原料投入高速混合机中,混合 3 min。混合后的原料经螺杆挤出机进行熔融共混、挤出、冷却、造粒及干燥处理。在螺杆挤出机中,各区温度分别设定为 140、160、180、200 °C,螺杆转速维持在 7 r/min。干燥后的粒料最终通过注射成型工艺制成用于标准力学性能和阻燃性能测试的样条。

### 1.4 性能测试与表征

FTIR 分析:波数范围 4 000~400  $\text{cm}^{-1}$ ,扫描次数 32 次。

TG 分析:样品质量为 10 mg,  $\text{N}_2$  气氛,升温速率为 15 °C/min,测试范围为 30~800 °C。

LOI 测试:按照 ASTM D2863—23 进行测试,样品尺

寸为 125 mm×13 mm×5 mm。

UL-94 测试:按照 ASTM D3801—20a 进行测试,样品尺寸为 100 mm×10 mm×4 mm。

SEM 测试:对煅烧前后复合材料检测样进行喷金处理,进行形貌表征。

XRD 测试:扫描范围 10°~90°,扫描速度 10 (°)/min。

力学性能测试:拉伸强度按照 GB/T 1040.1—2018 进行测试,测试速率为 2 mm/min;冲击强度按照 GB/T 1043.2—2018 进行测试。样品尺寸为 170 mm×20 mm×3 mm,样品为哑铃形。

表 1 PP/MPP/PIPP/ATH/PP-g-MAH 复合材料的配方

Tab.1 Formula of PP/MPP/PIPP/ATH/PP-g-MAH

样品编号	composites					单位:%
	$W_{PP}$	$W_{MPP}$	$W_{PIPP}$	$W_{ATH}$	$W_{PP-g-MAH}$	
PP-0	100	0.0	0.0	0	0	
PP-1	65	12.0	12.0	6	5	
PP-2	65	16.0	8.0	6	5	
PP-3	65	18.0	6.0	6	5	
PP-4	65	19.2	4.8	6	5	

## 2 结果与讨论

### 2.1 复合材料组织结构分析

图 1 为复合材料的 FTIR 谱图。从图 1 可以看出,可精确辨识出在 2 955  $\text{cm}^{-1}$  处的特征吸收峰,该峰归属于甲基的不对称收缩振动模式;而在 2 916  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰则归因于亚甲基的不对称伸缩振动;1 460  $\text{cm}^{-1}$  和 1 378  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰分别代表亚甲基和甲基的弯曲振动模式<sup>[20]</sup>。相较于 PP-0,PP-1~PP-4 在 1 681、884、639、591  $\text{cm}^{-1}$  位置上展现了新的特征吸收峰。具体而言,1 681  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰为 C=N 键的振动模式;884  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰对应 C—P 键的振动模式;639  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰为 P—O 键的振动模式;而 591  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰则归因于 Al—O 键的振动模式。这些特征峰在 PP-0~PP-4 的光谱图中均有所体现,尽管原有吸收峰的强度有所变化,但这一结果表明,在熔融共混过程中并未发生化学反应,仅限于物理混合过程<sup>[21]</sup>。

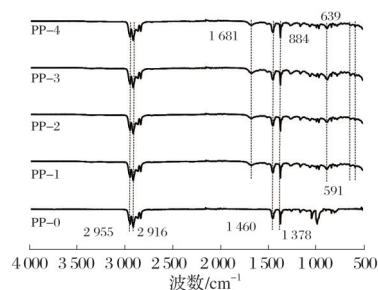


图 1 复合材料的 FTIR 谱图

Fig.1 FTIR spectra of composites

### 2.2 复合材料表面形貌分析

图 2 为复合材料的 SEM 照片。从图 2 可以看出,PP-0 断面平整连续,具有均匀的微观形貌。随着阻燃填料的增加,在 PP 连续相中出现较多微小粒子,变得凹凸不平,且

微粒与基体间有较多的孔隙(图中圆形框),这是因为阻燃填料与PP基体结合性较差。随着MPP在复配体系中含量的增加,颗粒状填料明显增多,阻燃填料在基体中的分散性发生变化,当MPP质量分数超过18%时,部分阻燃填料会发生团聚现象(图中矩形框)。

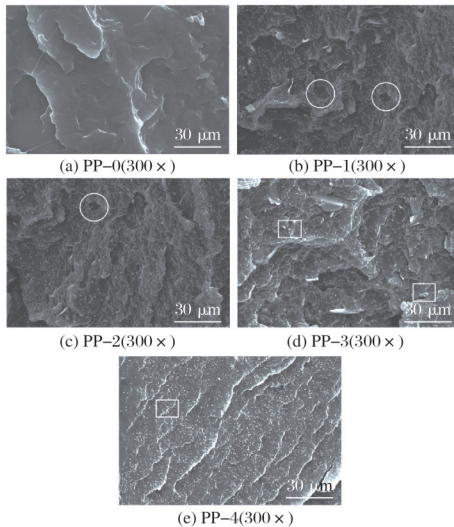


图2 复合材料的SEM照片

Fig.2 SEM images of composites

### 2.3 复合材料热稳定性分析

图3为复合材料的TG和DTG曲线。表2为复合材料TG测试结果。从图3与表2可以看出,PP-0在423.6℃开始分解,10%热分解温度( $t_{10\%}$ )和50%热分解温度( $t_{50\%}$ )分别为439.6℃和468.1℃,最大分解温度( $t_{max}$ )为471.5℃,800℃时残炭率为10.28%。PP-1~PP-4的初始热分解温度( $t_{5\%}$ )比PP-0降低5.3%~15.4%。这是由于在升温过程中,MPP与PIPP在300℃左右分解产生三聚氰胺、磷酸与偏磷酸等化合物,ATH分解生成水和氧化铝,导致复合材料提前发生热分解。添加MPP/PIPP/ATH的样品的质量损失速率明显减缓,说明MPP/PIPP/ATH起到了减缓PP热分解的作用。随着MPP在复配体系中含量的增加,复合材料残炭率从13.82%增加至17.88%。因为MPP在高温分解过程中生成的磷酸,与ATH分解产物氧化铝发生反应,生成的磷酸铝和偏磷酸铝能够有效提升材料的热稳定性,同时减缓材料分解和抑制可燃物的挥发。

### 2.4 复合材料阻燃性能分析

表3为复合材料LOI和UL-94测试结果。从表3可以看出,PP-0极易燃,LOI仅为17.4%,无UL-94燃烧等级,在燃烧过程中会产生熔滴现象。在添加MPP/PIPP/ATH后,复合材料的LOI从17.4%提高至22.5%,UL-94也提升为V-2级,表明复合材料阻燃性能得到提高。随着MPP在复配体系中含量的增加,PP-2、PP-3的LOI从22.5%分别提高至25.2%和26.9%,UL-94燃烧等级从V-2级提升至V-1级,同时在燃烧过程中不会产生熔滴。当MPP/PIPP质量比为4:1时,PP-2-4的LOI可达29.8%,UL94燃烧等级为V-0,同时复合材料在燃烧后能够自行熄灭,阻燃性能达到最佳。

这表明MPP/PIPP/ATH使复合材料阻燃性能提升,随着MPP在复配体系中含量的增加,阻燃性能有上升趋势。

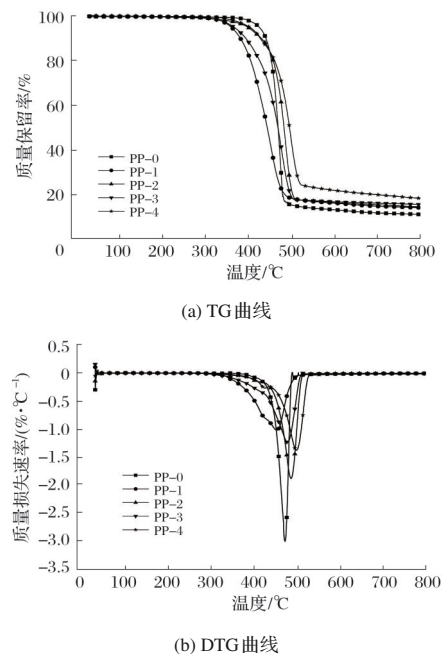


图3 复合材料的TG和DTG曲线

Fig.3 TG and DTG curves of composites

表2 复合材料TG测试结果

Tab.2 TG test results of composites

样品编号	$t_{5\%}/^{\circ}\text{C}$	$t_{10\%}/^{\circ}\text{C}$	$t_{50\%}/^{\circ}\text{C}$	$t_{max}/^{\circ}\text{C}$	残炭率(800℃)/%
PP-0	423.6	439.6	468.1	471.5	10.28
PP-1	358.5	380.1	442.7	451.2	13.82
PP-2	396.8	428.6	481.7	485.1	14.24
PP-3	364.7	392.6	467.6	476.4	15.32
PP-4	401.1	426.1	494.5	498.7	17.88

表3 复合材料LOI和UL-94测试结果

Tab.3 LOI and UL-94 test results of composites

样品编号	LOI/%	UL-94燃烧等级	是否熔滴
PP-0	17.4	无	是
PP-1	22.5	V-2	是
PP-2	25.2	V-1	否
PP-3	26.9	V-1	否
PP-4	29.8	V-0	否

### 2.5 复合材料残留物分析

图4为复合材料煅烧残留物的SEM照片。从图4可以看出,PP-1的残留物表面出现大量孔隙,形成许多微小针状结构。这是因为在燃烧过程中,复合材料分解产生大量氧化铝和氮磷化合物,导致炭化层较为松散。从PP-2至PP-3,形成的炭层表面裂缝逐渐减少。这是因为MPP含量增加使磷酸和偏磷酸与氧化铝充分反应,生成磷酸铝和偏磷酸铝。这些化合物具有较高的热稳定性,能够在复合材料表面形成一层相对紧密的炭层。然而,在燃烧过程中,复合材料会释放出可燃气体,导致炭层内外部形成压力差,从而引起炭层破裂。PP-4的残留物表面形成的炭层更加致密,且无明显裂纹。样品的LOI增加至29.8%,UL-94燃烧

等级提高至V-0级,这表明致密的炭化层在燃烧过程中隔离了氧气和热量,从而显著提升了复合材料的阻燃性能。

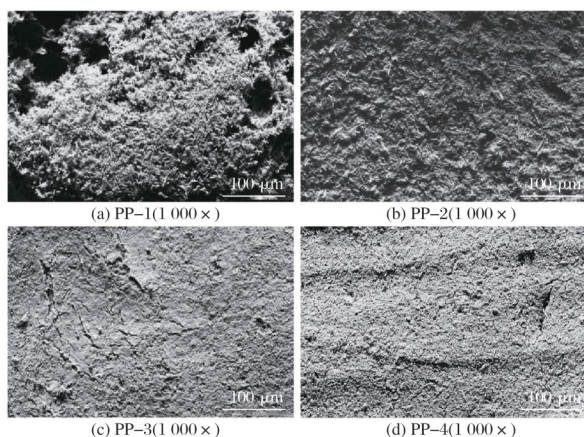


图4 复合材料煅烧残留物的SEM照片

Fig.4 SEM images of calcined residue of composites

图5为煅烧复合材料的质量损失率。从图5可以看出,PP-0样品在煅烧过程中的质量损失率为89.72%。在引入MPP/PIPP/ATH复合材料后,其质量损失率呈现下降趋势。当MPP与PIPP的质量比为1:1时,PP-1样品的质量损失率从89.72%降至86.18%。随着MPP在复合体系中比例的提升,复合材料的质量损失率进一步降低,并且损失率的减少幅度也随之增大。这一结果表明,MPP含量的增加导致复合材料表面形成了更为致密的保护炭层,从而有效保护了基体材料,并减缓了复合材料在高温环境下的分解速率及挥发性物质的损失。

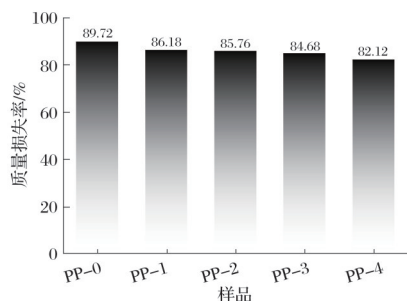


图5 煅烧复合材料的质量损失率

Fig.5 Mass loss rate of calcined composites

图6为煅烧后复合材料的FTIR和XRD谱图。从图6a可以看出,在 $1607\text{ cm}^{-1}$ 处出现了C=N键伸缩振动吸收峰;在 $1353\text{ cm}^{-1}$ 处出现了P=O键振动吸收峰;在 $776\text{ cm}^{-1}$ 处出现的P-N键振动吸收峰与燃烧后产生的磷酸铝、偏磷酸铝和氮磷化合物一致<sup>[22]</sup>。从图6b可以看出,煅烧后的样品中出现了 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{AlPO}_4$ 和 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 产物的衍射峰,证明了MPP/PIPP/APH分解产物的存在。这些无机产物通过促进表面炭化层、减少可燃气体的释放、提高热稳定性等方式增强复合材料的阻燃性能。

## 2.6 复合材料的阻燃机制

图7为复合材料的阻燃机制。从图7可以看出,在燃烧前,MPP/PIPP/ATH均匀分布在PP基体中。在燃烧过程

中,复合材料受热分解,MPP/PIPP/ATH发生脱水及离子键断裂反应。MPP与PIPP分解生成三聚氰胺、磷酸和偏磷酸等物质,ATH分解生成 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ 。同时,PP发生热降解和氧化降解,PP碳链上形成羟基、羧基等含氧官能团。随着受热过程的持续,生成的产物进一步脱水,不断释放磷酸类衍生物和氮磷化合物,这些物质与PP上的含氧官能团发生脱水交联反应,形成多组分残基和连续的炭层结构。三聚氰胺在受热过程中分解为碳、 $\text{N}_2$ 、 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ ,降低材料表面温度和氧浓度。部分磷酸和偏磷酸与氧化铝反应生成磷酸铝和偏磷酸铝,在复合材料表面形成稳定的炭层,起到隔绝氧气、抑制火焰蔓延的作用,使复合材料在高温环境中更稳定,适用于阻燃要求较高的领域。

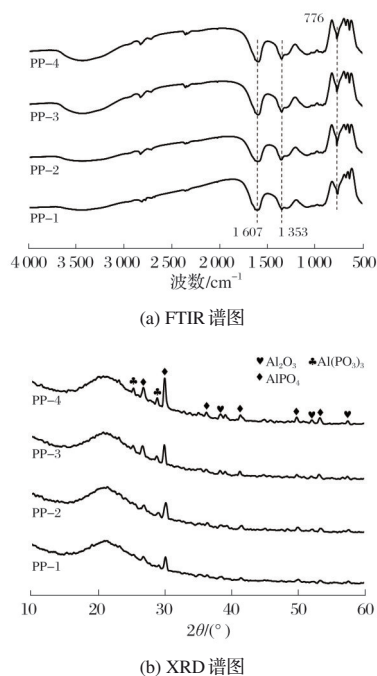


图6 煅烧后复合材料的FTIR和XRD谱图

Fig.6 FTIR spectra and XRD patterns of calcined composites

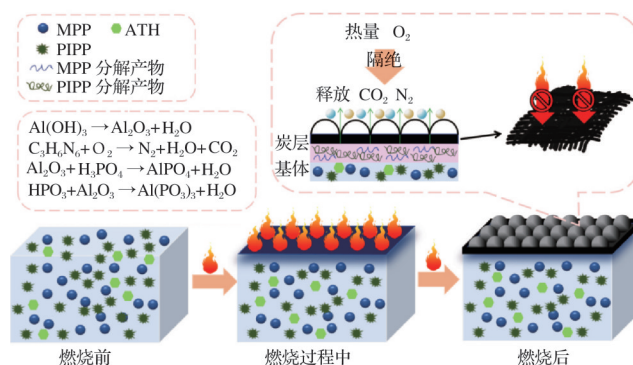


图7 复合材料的阻燃机制

Fig.7 Flame retardant mechanism of composites

## 2.7 复合材料力学性能分析

图8为复合材料的力学性能。从图8可以看出,PP-0拉伸强度为 $31.42\text{ MPa}$ ,冲击强度为 $9.15\text{ kJ/m}^2$ 。添加MPP/PIPP/ATH后,PP-1~PP-3拉伸强度分别降低了4.0%、7.5%和12.7%。PP-1~PP-3冲击强度分别降低了1.2%、5.2%和

10.1%。这是由于MPP/PIPP/ATH会稀释PP的连续相,削弱PP本身的负载能力,使复合材料拉伸强度与冲击强度降低。当MPP、PIPP质量比为4:1时,PP-4拉伸强度与冲击强度降低16.8%和19.2%,复合材料冲击强度大幅降低。当PIPP含量较高时,由于PIPP内含有柔性结构,对复合材料冲击性能的削弱较小,随着MPP在复配体系中含量的增加,由于MPP与基体相容性较差,导致复合材料刚性提高,降低基体韧性,导致冲击性能下降较为明显。

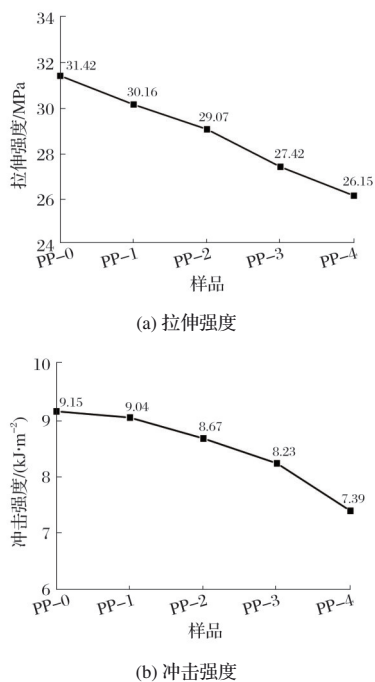


图8 复合材料的力学性能

Fig.8 Mechanical properties of composites

### 3 结论

随着MPP在复配体系中含量的增加,复合材料的阻燃性能与热稳定性呈上升趋势,当MPP/PIPP质量分数比为4:1时最佳,相比于PP-0,LOI提高71.3%,UL-94燃烧等级提升至V-0级,800 °C时残炭率提高73.9%,煅烧样品的质量损失率降低8.5%。添加MPP/PIPP/ATH复配阻燃剂后,复合材料的力学性能下降,与PP-0相比,PP-1~PP-4拉伸强度降低4.0%~16.8%,PP-1~PP-4冲击强度分别降低1.2%~19.2%。

### 参考文献

[1] 王昊宇, 劳志超, 郑浩, 等. 无机填料填充改性聚丙烯的研究进展及应用[J]. 橡塑技术与装备, 2024, 50(11): 48-51.

[2] RAMAKOTI I S, PANDA A K, JAL S, et al. Reinforcement of recycled polypropylene by nano lanthana with improved thermal, mechanical and antimicrobial properties[J]. Journal of Polymer Engineering, 2024, 44(10): 728-739.

[3] SAHARE S B, SEENIVASAN S, SATISHKUMAR P, et al. Enhancing mechanical durability and flame retardancy in bamboo-polypropylene composites with  $n\text{Al}_2\text{O}_3$  fillers[J]. Interactions, 2024, 245(1): 345.

[4] SANCHEZ-OLIVARES G, ROCKEL D, CALDERAS F, et al. Utilizing leather fibers from industrial wastes as bio-filler to improve

flame retardancy in polypropylene[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2024, 132: 148-160.

- [5] 陈智扬, 吴远华, 邓恒升, 等. 次磷酸铝/三聚氰胺/聚磷酸铵协效阻燃竹粉/聚丙烯木塑复合材料的制备及性能研究[J]. 广州化工, 2024, 52(21): 12-15.
- [6] XU J Y, DENG H M, LUO M Y. Preparation of MWCNTs@SiO<sub>2</sub> hybrids and its flame retardant synergistic effects with hyperbranched triazine-based flame retardant on polypropylene[J]. SPE Polymers, 2021, 2(4): 276-287.
- [7] WIDSTEN P, TAMMINEN T, PAAJANEN A, et al. Modified and unmodified technical lignins as flame retardants for polypropylene[J]. Holzforschung, 2021, 75(6): 584-590.
- [8] ZHANG Y, ZHAO X W, LI X H, et al. Novel four-in-one intumescent flame retardants for polypropylene: Synthesis, characterization and properties[J]. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2024, 7(3): 309-317.
- [9] 魏欢, 徐智, 刘生鹏, 等. 新型多羟基三嗪基炭化剂对聚丙烯的阻燃作用[J]. 化工新型材料, 2023, 51(6): 149-155.
- [10] 罗翔祥, 李峰, 乔成芳. 改性碳纤维含量对聚丙烯的阻燃性能影响研究[J]. 塑料科技, 2023, 5(3): 33-37.
- [11] 杨晓龙, 刘晨曦, 李云东, 等. 磷酸硼协效膨胀型阻燃剂对聚丙烯阻燃性能的研究[J]. 塑料科技, 2022, 50(8): 72-76.
- [12] FAN C R, WEI L J, ZHAO S C. Synergistic effect of nano silicon and piperazine pyrophosphate/melamine polyphosphate on flame retardancy of polypropylene[J]. Journal of Fire Sciences, 2023, 41(5): 169-185.
- [13] HU Z, ZHONG Z Q, GONG X D. Flame retardancy, thermal properties, and combustion behaviors of intumescent flame-retardant polypropylene containing (poly) piperazine pyrophosphate and melamine polyphosphate[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2020, 31(11): 2701-2710.
- [14] YAN H W, WEI J L, YIN B, et al. Effect of the surface modification of ammonium polyphosphate on the structure and property of melamine-formaldehyde resin microencapsulated ammonium polyphosphate and polypropylene flame retardant composites[J]. Polymer Bulletin, 2015, 72(11): 2725-2737.
- [15] 唐启恒, 任一萍, 郭文静. 三聚氰胺聚磷酸盐和次磷酸铝协效阻燃高密度纤维板复合材料[J]. 复合材料学报, 2021, 38(1): 84-92.
- [16] 郑晓宇. 基于三嗪基成炭剂的膨胀阻燃聚丙烯的制备与性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2025.
- [17] 苏淑倩, 周福龙, 杜玉莹, 等. 焦磷酸哌嗪/MPP对PP阻燃作用和力学性能影响[J]. 现代塑料加工应用, 2021, 33(3): 1-4.
- [18] HU Z, SHI T. Application of a piperazine pyrophosphate intumescent flame retardant in thin-walled glass fiber-reinforced polypropylene materials[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2023, 140(40): 1-13.
- [19] ZHAO T Y, WU W, HU H B, et al. The piperazine pyrophosphate intumescent flame retardant of polypropylene composites prepared by selective laser sintering[J]. Polymer Composites, 2023, 44(1): 305-317.
- [20] 周尧, 姜凤阳, 车秋凌, 等. 聚丙烯/聚二甲基硅氧烷防尘复合材料的制备及性能[J]. 塑料科技, 2024, 52(6): 61-66.
- [21] ZHAO J J, WU Z Q, HONG Y T, et al. Enhancing flame retardancy in epoxy resin with clever self-assembly method for optimizing interface interaction via well-dispersed cerium oxide on piperazine pyrophosphate[J]. Fire, 2024, 7(11): 372.
- [22] 覃德清, 马殿普, 郎丽君, 等. 焦磷酸哌嗪/三聚氰胺聚磷酸盐协效阻燃ABS应用研究[J]. 化工新型材料, 2024, 52(增刊1): 432-435.