

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.11.010

高透明阻燃聚丙烯复合材料的制备与性能

王鲁静, 张玉亮, 乔志川

(山东泰星新材料股份有限公司, 济南 250204)

摘要: 为制备一种低阻燃剂添加量下兼具优异阻燃性、热稳定性及力学性能的透明聚丙烯(PP)复合材料, 开发了一种基于无机包覆结构与磷-氮协同作用的新型高效无卤阻燃体系。该体系以自制的新型次磷酸镁/次磷酸铝镁共包覆次磷酸铝(MAP)作为核心阻燃剂, 复配六苯氧基环三磷腈(HPCTP)与联苯(DMDPB)作为磷氮协效剂(HD), 通过熔融共混工艺制备了高性能阻燃PP复合材料, 并对材料的阻燃性能与力学性能进行测试。结果表明, 当MAP质量分数为8%、HD质量分数为5%时, 复合材料极限氧指数高达32.3%, 达到UL 94 V-0等级, 且燃烧无滴落。热重分析表明MAP的热稳定性和成炭性显著优于未包覆次磷酸铝。进一步优化配方确定, HD中HPCTP与DMDPB的最佳质量比为3:2, 此配比下复合材料在保证V-0阻燃等级的同时, 仍具备良好的透明度, 其拉伸强度保留率达92.7%, 最大程度地维持了PP基体的力学性能。综上所述, 添加了MAP和HD的PP复合材料实现了高效阻燃与综合性能的平衡, 在低阻燃剂添加量下展现出巨大的应用潜力。

关键词: 聚丙烯; 次磷酸盐; 包覆结构; 磷氮协效; 阻燃性能

中图分类号: TQ323.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)11-0072-06

Preparation and performances of high-transparency flame-retardant polypropylene composites

WANG Lujing, ZHANG Yuliang, QIAO Zhichuan

(Shandong Taixing New Material Co., Ltd., Jinan 250204, China)

Abstract : A new efficient halogen-free flame retardant system based on an inorganic coating structure and phosphorus-nitrogen synergistic effect was developed to prepare a transparent polypropylene (PP) composite with excellent flame retardancy, thermal stability, and mechanical properties at low flame retardant addition. The system utilized a self-made novel magnesium hypophosphite/aluminum magnesium hypophosphite co-coated aluminum phosphinate (MAP) as the core flame retardant, and combined hexaphenoxycyclotriphosphazene (HPCTP) and dicumylphenyl-p-benzoquinone (DMDPB) as the phosphorus-nitrogen synergistic agent (HD). High-performance flame-retardant PP composites were prepared by melt blending process, and their flame retardancy and mechanical properties were tested. The results indicate that the composite exhibits a high limiting oxygen index of 32.3%, and no dripping occurs when the mass fraction of MAP is 8% and that of HD is 5%, reaching the UL 94 V-0 rating. Thermogravimetric analysis reveals that the thermal stability and carbonization property of MAP are significantly better than those of uncoated aluminum hypophosphite. Through further formulation optimization, it is determined that the optimal mass ratio of HPCTP to DMDPB in HD is 3:2. At this ratio, the composite not only maintains the V-0 flame retardant rating but also exhibits good transparency, with a tensile strength retention rate of 92.7%, thereby maximizing the retention of the PP matrix's mechanical properties. In conclusion, the PP composite material with incorporated MAP and HD achieves a balance between effective flame retardancy and comprehensive performance, demonstrating substantial potential at low flame retardant addition levels.

Keywords : polypropylene ; hypophosphite ; coated structure ; synergistic effect of phosphorus and nitrogen ; flame retardancy

通信作者: 王鲁静, 硕士, 高级工程师, 研究方向为无卤阻燃剂的合成和应用

收稿日期: 2025-09-13

引用格式: 王鲁静, 张玉亮, 乔志川. 高透明阻燃聚丙烯复合材料的制备与性能[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(11): 72-77.

WANG Lujing, ZHANG Yuliang, QIAO Zhichuan. Preparation and performances of high-transparency flame-retardant polypropylene composites[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(11): 72-77.

聚丙烯(PP)属于热塑性树脂,因其综合性能优异被广泛应用于汽车工业、包装行业、电子电器及家用消费品等领域^[1-2]。然而,PP极限氧指数(LOI)较低(约17.9%),极易燃烧,存在巨大的火灾安全隐患^[3-5]。传统的卤系阻燃剂虽然对PP的阻燃效果显著,但在PP燃烧时会产生有毒、腐蚀性气体,已被日益严格的环保法规所限制^[6-7]。故开发一种高性能且环保的无卤阻燃PP体系是当前阻燃PP研究的重要方向。

众多无卤阻燃剂中,次磷酸铝(AP)因其磷含量高、抑烟效果好而备受关注^[8-9]。但其固有的微水溶性、与高分子材料基体相容性差等问题,导致阻燃效率不高且严重劣化材料力学性能,通常需要很高的添加量(质量分数>20%)才能生效,极大限制了其应用^[10-11]。为克服这些缺陷,研究者们多采用表面改性技术^[12],如微胶囊化、硅烷改性及有机包覆等手段^[13-15]。然而,现有包覆技术多采用有机聚合物为包覆层,存在工艺复杂、成本高、可能引入新的环保问题等挑战^[16-17]。

综上所述,笔者提出一种无机-无机包覆新策略。以AP为核,通过氢氧化镁与体系中的酸反应,原位生成次磷酸镁/次磷酸铝镁混合包覆层。该结构不仅有效改善了AP的热稳定性和与PP的相容性,还解决了AP自身易燃的问题。进一步地,通过加入微量六苯氧基环三磷腈(HPCTP)/联枯(DMDPB)复合的磷氮协效剂(HD),利用显著的磷-氮阻燃协效作用,在极低的阻燃剂总添加量下实现了PP的高效阻燃,并保持原有的透明度和力学性能。

1 实验部分

1.1 主要原材料

无机AP:HT-220B,山东泰星新材料股份有限公司;

氢氧化镁:HT-206,山东泰星新材料股份有限公司;

HPCTP:HT-231,山东泰星新材料股份有限公司;

一水合次磷酸钠($\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$):江西福尔鑫医药化工有限公司;

十八水合硫酸铝 $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}]$:淄博大众食用化工股份有限公司;

DMDPB:工业级,湖北玖丰隆化工有限公司;

PP:PP-T30s,工业级,中国石油天然气股份有限公司呼和浩特石化分公司。

1.2 主要仪器及设备

双螺杆挤出机:SHJ-35,南京聚力化工机械有限公司;

注塑机:HMK880-F5,宁波海明塑料机械有限公司;

高混机:SHR-25,张家港市丰城机械制造有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):TM300,日本HITACHI公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Thermo NICOLET5700,美国热电科技仪器有限公司;

热重(TG)分析仪:NETZSCHSTA409PC/PG,德国耐驰公司;

锥形量热仪:FTT-icone,英国FTT公司;

伺服控制拉力试验机:AI-3000,高特威尔检测仪器(青岛)有限公司;

水平垂直燃烧测试仪:M607,青岛山纺仪器有限公司;

简支梁冲击试验机:XJJ-5,承德市考思科学检测有限公司;

自动氧指数测试仪(LOI):ZR-011,青岛山纺仪器有限公司;

可见分光光度计:725S,上海棱光技术有限公司。

1.3 试样制备

1.3.1 阻燃剂AP的改性

将 $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ 按照1:1.2的质量比分别溶于水中,加热至90~120℃搅拌至完全溶解,然后将次磷酸钠溶液倒入硫酸铝溶液中在90~120℃下搅拌反应4~8h,得到AP浆液。将AP浆液降温到65~90℃,加入占AP质量30%的氢氧化镁水分散体系,保温条件下继续反应2~5h,然后对反应液进行抽滤、洗涤,得到次磷酸镁/次磷酸铝镁共包覆的AP(MAP)。

1.3.2 阻燃PP复合材料的制备

PP树脂在烘箱中105℃下干燥2h,按照表1配比将PP,MAP,AP,HD在高速混合机中混合均匀,通过双螺杆挤出机(挤出温度180~192℃;螺杆转速225 r/min;侧喂料转速20 r/min)熔融共混,切料后在烘箱105℃下干燥2h,使用注塑机进行注塑打板成

表1 阻燃PP复合材料各组分质量分数

Tab. 1 Mass fraction of components of flame retardant PP composites

Samples	PP	MAP	AP	HD	
				HPCTP	DMDPB
FRPP-1	78		22		
FRPP-2	87	8		3	2
FRPP-3	89	6		3	2
FRPP-4	85	10		3	2
FRPP-5	88	8		2.4	1.6
FRPP-6	86	8		3.6	2.4
FRPP-7	87	8		1	4
FRPP-8	87	8		4	1
FRPP-9	83	12		5	

样条,用于性能测试。

1.4 测试与表征

SEM测试:对样品进行喷金处理,使用SEM观察样品的微观形貌。

FTIR测试:采用KBr压片技术在扫描次数为32,分辨率为 8 cm^{-1} 的条件下对样品进行FTIR分析。

TG测试:将样品在氮气保护下以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率从 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热到 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$,气体流速为 $90\text{ mL}/\text{min}$ 。

锥形量热测试:采用ISO 5660-2015标准进行测试,设定热辐射功率为 $35\text{ kW}/\text{m}^2$,样品尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 。

力学性能测试:拉伸性能根据GB/T 1040.5-2008进行测试,测试速率为 $50\text{ mm}/\text{min}$,测试样条尺寸为 $100\text{ mm}\times 6\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 。

LOI测试:根据GB/T 2406.2-2009进行测试,测试样条尺寸为 $128\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 。

垂直燃烧(UL 94)测试:根据ANSI/UL 94-2006进行测试,测试样条尺寸为 $128\text{ mm}\times 12\text{ mm}\times 1.6\text{ mm}$ 。

透光率测试:根据GB/T 2410-2008进行测试,样品为边长 $\geq 25\text{ mm}$ 的方片。

2 结果与讨论

2.1 MAP阻燃剂的形貌与结构表征

为验证包覆工艺的成功与否,采用SEM对包覆前后的AP样品进行了形貌观察,结果如图1所示。从图1a可见,未包覆的AP颗粒表面相对光滑,棱角分明。相比之下,从图1b可以清晰地观察到,MAP样品表面被一层致密且均匀的包覆层所覆盖,原始AP的尖锐棱角消失,颗粒轮廓变得圆滑。该结果表明,通过氢氧化镁的中和反应,成功在AP表面原位

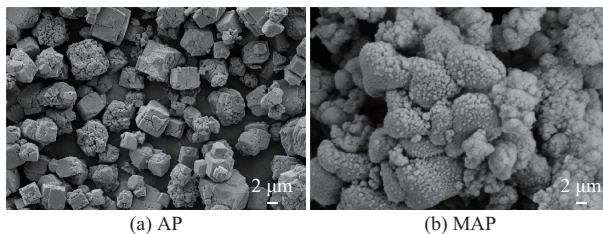


图1 AP和MAP的SEM照片

Fig. 1 SEM photos of AP and MAP

生成了次磷酸镁/次磷酸铝镁复合包覆层。这种完整的包覆结构有望改善AP与PP基体的相容性,减少因界面缺陷导致的应力集中,并为后续提升阻燃性能和热稳定性奠定基础。

2.2 FTIR分析

图2为AP和MAP的FTIR谱图。从FTIR谱图中可以看出,AP和MAP在 $2\,410\text{ cm}^{-1}$ (P—H), 826 cm^{-1} 和 $1\,130\text{ cm}^{-1}$ (P—O), $1\,090\text{ cm}^{-1}$ (P=O)处都呈现出特征吸收峰。而MAP谱图中在 $1\,410\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,160\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰较低,这是因为 Al^{3+} 比 Mg^{2+} 具有更强的极化能力和离子势,生成的次磷酸镁削弱了峰的程度,说明次磷酸铝镁成功包覆了AP。

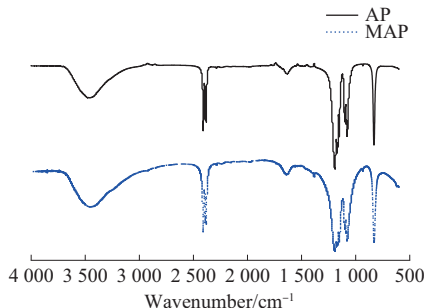


图2 AP和MAP的FTIR谱图

Fig. 2 FTIR spectra of AP and MAP

2.3 热稳定性分析

TG测试是评估材料热稳定性和分解行为的重要手段。通过对比未包覆AP与MAP在氮气气氛下的热分解行为,可探索包覆结构对热性能的影响。图3为AP与MAP的TG测试结果,具体数值见表2。从图/表中可以看出,AP的1%分解温度($T_{1\%}$)为 $293.61\text{ }^{\circ}\text{C}$,MAP的 $T_{1\%}$ 为 $305\text{ }^{\circ}\text{C}$,提升了 $11.39\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。而且MAP的最大热失重速率(D_{max})显著降低,从AP的 $-0.26\%/ \text{min}$ 下降至 $-0.14\%/ \text{min}$,表明包覆层有效延缓了AP的早期分解,说明包覆对改善AP的热稳定性有一定帮助,增强了其热稳定性。此外,在 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,AP的残炭率为 73.16% ,而MAP的残炭率为 80.56% ,残炭率增加 7.4% 。较高的残炭率表明

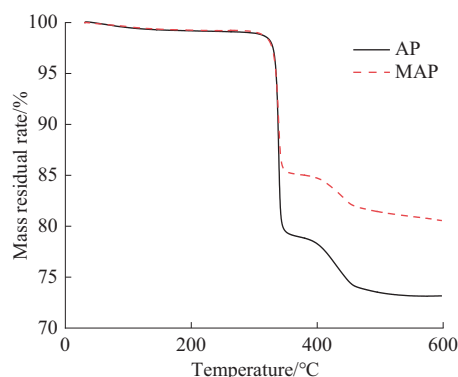


图3 AP和MAP的TG曲线

Fig. 3 TG curves of AP and MAP

表2 AP和MAP的TG测试结果

Tab. 2 TG test results of AP and MAP

Samples	$T_{1\%}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{onset}}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ter}}/^{\circ}\text{C}$	$D_{\text{max}}/(\%\cdot\text{min}^{-1})$	CR/%
AP	293.61	327.29	343.82	-0.26	73.16
MAP	305	330.53	344.37	-0.14	80.56

Notes: $T_{1\%}$ is temperature at 1% mass loss; T_{onset} is starting temperature of decomposition; T_{ter} is end temperature of decomposition; D_{max} is maximum rate of mass loss; CR is residual mass (char yield).

MAP在高温下具有更优异的成炭能力,形成的炭层可有效隔绝热量和氧气,抑制材料进一步分解,从而提升阻燃性能。该结果表明,通过无机包覆策略显著改善了AP的热稳定性和凝聚相阻燃作用。

2.4 阻燃性能分析

为了更好地确定MAP产品的阻燃性能,对MAP, AP分别按照不同质量比制备的阻燃PP复合材料进行LOI和UL 94测试,详细地评估了复合材料的阻燃性能,结果见表3。

表3 PP复合材料LOI和UL 94测试结果

Tab. 3 Test results of LOI and UL 94 of PP composites

Samples	light transmittance/%	LOI/%	UL 94	Dripping	Ignite
PP	88	17.9	NR	Yes	Yes
FRPP-1	56	29.6	V-0	Yes	No
FRPP-2	86	32.3	V-0	No	No

Notes: LOI is limiting oxygen index; UL 94 is vertical burning rating; Yes means dripping or ignite occurs; No means no dripping or ignite; NR indicates not rated.

从表3结果可看出,FRPP-1在AP质量分数为22%时,虽达到UL 94 V-0级,但燃烧时有熔滴产生(虽未引燃脱脂棉),且LOI值相对较低(29.6%),表明AP单独使用时效率有限。FRPP-2在MAP和HD总质量分数为13%的情况下,样品表现出最优异的阻燃性能:LOI值高达32.3%,并达到了UL 94 V-0等

级,且无任何熔滴。复合材料FRPP-1添加阻燃剂后透光率下降到56%,由透明材料变成乳白色材料,FRPP-2在添加阻燃剂后透光率能保持在86%,与透明纯PP的透明度基本相当,证明MAP优异的相容性。这与SEM的观察结果一致。结果表明,MAP与HD之间存在显著的协同阻燃效应,实现了阻燃剂低添加量下的高效阻燃。

2.5 燃烧残炭分析

图4展示了PP复合材料燃烧后残炭的宏观形貌。如图4a所示,纯PP几乎无残炭残留;如图4b所示,FRPP-1虽有一定炭层,但结构疏松、易塌陷,保护效果有限;如图4c所示,FRPP-2形成了连续、致密且膨胀的炭层,结构完整且具有明显的膨胀特性。该炭层可有效阻隔可燃气体逸出和氧气进入,同时作为热屏障延缓热分解反应,从而显著提升阻燃性能。这一结果说明,MAP与HD共同作用,优化了成炭过程,实现了气相与凝聚相协同阻燃机制。

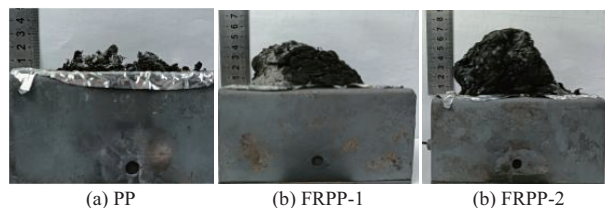


图4 纯PP和阻燃PP复合材料锥形量热测试后残炭图片

Fig. 4 Residual carbon images of pure PP and flame retardant PP composites after cone calorimetric test

2.6 力学性能分析

阻燃剂的加入通常会对聚合物基体的力学性能产生负面影响。各复合材料的力学性能测试结果见表4。由表4可知,所有阻燃复合材料的力学性能均出现下降,这是由于刚性阻燃剂颗粒破坏了PP分子链的连续性,并作为应力集中点所致。FRPP-2的力学性能保留率显著高于FRPP-1。即FRPP-2的拉伸强度为33.2 MPa,保留率高达92.7%,而FRPP-1的保留率仅为82.7%。缺口冲击强度的下降最为明显,FRPP-1下降了16.9%,而FRPP-2仅下降

表4 PP复合材料的力学性能

Tab. 4 Mechanical properties of PP composites

Samples	Tensile strength/MPa	Elongation at break/%	Bending strength/MPa	Notched impact strength/(kJ·m ⁻²)
PP	35.8	663.32	45	7.6
FRPP-1	29.6	616.12	39	6.5
FRPP-2	33.2	653.26	43	7.2

5.3%。这充分证明了低添加量的MAP/HD体系在赋予PP材料优异阻燃性的同时,能最大限度地保持其力学性能,实现了阻燃性与力学性能的良好平衡。

2.7 MAP用量分析

将MAP阻燃剂添加量不同的样品FRPP-2, FRPP-3, FRPP-4加工制备为阻燃样条与力学性能测试样条,测试阻燃性能和力学性能,研究了不同阻燃剂添加量对PP阻燃性能的影响,结果见表5。

表5 阻燃剂MAP添加量对PP复合材料性能的影响

Tab. 5 Influence of flame retardant MAP addition amount on properties of PP composites

Items	Mass fraction of MAP/%		
	6	8	10
LOI/%	30.4	32.3	33.2
UL 94	V-2	V-0	V-0
Tensile strength/MPa	33.8	33.2	31.4
Bending strength/MPa	45	43	40
Notched impact strength/(kJ·m ⁻²)	7.5	7.2	6.7

由表5可以看出,PP的UL 94测试等级达到V-0级的MAP阻燃剂最小添加量为8%,此时LOI为32.2%,且对PP基材的力学性能影响较小。

2.8 HD用量与配比分析

为进一步优化体系,对样品FRPP-2, FRPP-5, FRPP-6的阻燃性能和力学性能进行分析,研究了HD添加量对复合材料阻燃性能和力学性能影响,测试结果见表6。由表6可知,随HD质量分数从4%增加至6%,LOI值升高,阻燃等级从V-2提升至V-0。但HD质量分数超过5%后,力学性能出现明显劣化。因此,5%为复合材料综合性能最优时HD的添加量,能在确保V-0等级的同时,使力学性能损失最小。

表6 HD添加量对PP复合材料性能的影响

Tab. 6 Influence of HD addition amount of synergist on properties of PP composites

Items	Mass fraction of HD/%		
	4	5	6
LOI/%	31.4	32.3	33.6
UL 94	V-2	V-0	V-0
Tensile strength/MPa	34.5	33.2	31.9
Bending strength/MPa	44	43	41
Notched impact strength/(kJ·m ⁻²)	7.6	7.2	6.8

在此基础上,对样品FRPP-2, FRPP-7, FRPP-8, FRPP-9进行测试,探究HD内部对比对PP性能的影响,结果见表7。固定HD质量分数为5%,当仅使用HPCTP时,需质量分数12%的MAP才能达到V-0

级。而引入质量分数20%的DMDPB复配后,MAP用量可降至8%。DMDPB在HD中占比40%时,体系在MAP质量分数为8%时可实现V-0阻燃,且力学性能最佳。这表明DMDPB与HPCTP及MAP产生了“磷-氮-碳”多元素协同效应,DMDPB不仅作为协效成分,更可能作为成炭促进剂,优化了炭层结构,从而在降低阻燃剂总添加量的同时提升了阻燃效率。

表7 HD不同对比对PP复合材料的影响

Tab. 7 Influence of different co-solvent ratio on PP composites

Items	Mass fraction of DMDPB in HD/%			
	80	40	20	0
Mass fraction of PP/%	87	87	87	83
Mass fraction of MAP/%	8	8	8	12
LOI/%	30.8	32.3	31.6	30.4
UL 94	V-2	V-0	V-0	V-0
Tensile strength/MPa	31.5	33.2	32.2	31.9
Bending strength/MPa	41	43	42	41
Notched impact strength/(kJ·m ⁻²)	7.0	7.2	6.9	6.8

3 结论

通过无机包覆工艺成功制备了以AP为核、次磷酸镁/次磷酸铝镁为壳的阻燃剂MAP,并复配HPCTP与DMDPB作为HD,通过熔融共混工艺制备了高性能阻燃PP复合材料。研究了不同阻燃剂及添加量对PP性能的影响,得出以下结论。

(1)SEM与TG分析表明,MAP包覆层结构完整致密,显著提升了芯材的热稳定性和成炭性能。

(2)MAP与HD展现出优异的协同阻燃效果。当总质量分数为13%(8%MAP+5%HD)时,复合材料LOI为32.3%,达到UL94 V-0等级,燃烧无滴落,同时保持了基材的透明度。

(3)相较于添加质量分数22%未包覆AP的样品,添加MAP和HD的阻燃体系在实现更高阻燃等级的同时,显著降低了对PP力学性能的负面影响。HPCTP与DMDPB质量比为3:2时,可在维持V-0等级的前提下进一步优化力学性能,显示出良好的工业化应用前景。

参考文献

- [1] 汤维,钱立军,邱勇,等.聚丙烯材料无卤阻燃改性研究进展[J].中国塑料,2021,35(1):136-149.
TANG Wei, QIAN Lijun, QIU Yong, et al. Research progress in halogen-free flame retardant technology for polypropylene[J]. China Plastics, 2021, 35(1):136-149.
- [2] 潘飞,马殿普,李俊,等.高阻燃性能聚丙烯的研究进展[J].云南化工,2023,50(2):5-8.

- PAN Fei, MA Dianpu, LI Jun, et al. Research progress of polypropylene with high flame retardancy[J]. Yunnan Chemical Technology, 2023, 50(2):5-8.
- [3] 周雷. 磷-氮系阻燃剂的制备及其阻燃聚丙烯的性能[J]. 塑料工业, 2025, 53(6):116-121.
- ZHOU Lei. Preparation of P-N flame retardant and properties of its flame-retardant polypropylene[J]. China Plastics Industry, 2025, 53(6):116-121.
- [4] 孙华旭, 朱芳菊, 姚军龙. 改性焦磷酸哌嗪及聚丙烯阻燃性能研究[J]. 化肥设计, 2025, 63(2):18-22.
- SUN Huaxu, ZHU Fangju, YAO Junlong. Study on flame retardant properties of modified piperazine pyrophosphate and polypropylene [J]. Chemical Fertilizer Design, 2025, 63(2):18-22.
- [5] 刘文星. 聚丙烯阻燃研究进展[J]. 塑料科技, 2025, 53(9):215-219.
- LIU Wenxing. Research progress on flame retardancy of polypropylene[J]. Plastics Science and Technology, 2025, 53(9):215-219.
- [6] 展召顺, 申津锋, 石启星. 微胶囊阻燃抗静电聚丙烯的制备及其性能[J]. 黑龙江科技大学学报, 2025, 35(1):43-50.
- ZHAN Zhaoshun, SHEN Jinfeng, SHI Qixing. Preparation and properties of microcapsule polypropylene with flame retardancy and antistatic property[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2025, 35(1):43-50.
- [7] 李磊, 周俊. 高效膨胀型阻燃剂阻燃聚丙烯的阻燃机理[J]. 橡塑技术与装备, 2024, 50(1):25-30.
- LI Lei, ZHOU Jun. The flame retardant mechanism of high-efficiency expandable flame retardant for flame retardant polypropylene[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2024, 50(1):25-30.
- [8] 李明, 欧红香, 冉镒柠, 等. 焦磷酸哌嗪/壳聚糖膨胀阻燃聚丙烯制备及性能研究[J]. 功能材料, 2024, 55(10):10 165-10 171.
- LI Ming, OU Hongxiang, RAN Yining, et al. Preparation and properties of pyrophosphate piperazine/chitosan intumescent flame retardant polypropylene[J]. Journal of Functional Materials, 2024, 55(10):10 165-10 171.
- [9] 张津畅. 磷-硅-碳复合聚丙烯材料阻燃性能与电性能的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2024.
- ZHANG Jinchang. Study on flame retardant and electrical properties of phosphorus-silicon-carbon composite polypropylene material [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2024.
- [10] 陆忠海, 杨晓龙, 龙德晓, 等. 焦磷酸哌嗪复配阻燃剂在聚丙烯中阻燃性能的研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(5):52-57.
- LU Zhonghai, YANG Xiaolong, LONG Dexiao, et al. Study on flame retardancy of piperazine pyrophosphate compound flame retardant in polypropylene[J]. Plastics Science and Technology, 2024, 52(5):52-57.
- [11] 程宏扬. 高效阻燃剂的制备及其在聚丙烯中的阻燃研究[D]. 武汉: 湖北大学, 2024.
- CHENG Hongyang. Preparation of high-efficiency flame retardants and their fire-retardant research in polypropylene[D]. Wuhan: Hubei University, 2024.
- [12] 邵东亮, 袁伟忠. 不同添加量阻燃剂对聚丙烯复合材料阻燃性能的影响研究[J]. 化学与粘合, 2024, 46(3):220-225.
- SHAO Dongliang, YUAN Weizhong. Effect of different additive amounts of flame retardants on flame retardancy of polypropylene composites[J]. Chemistry and Adhesion, 2024, 46(3):220-225.
- [13] 姜向新, 杨霄云, 吴国峰, 等. 无机次磷酸铝对阻燃改性聚丙烯体系韧性影响研究[J]. 广州化工, 2024, 52(24):63-66.
- JIANG Xiangxin, YANG Xiaoyun, WU Guofeng, et al. Effect of aluminum hypophosphite on toughness of flame-retardant modified polypropylene[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2024, 52(24):63-66.
- [14] 王鲁静, 徐亮, 段金凤, 等. 微胶囊次磷酸铝的制备及在TPU/WPU中的应用[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(10):120-124, 130.
- WANG Lujing, XU Liang, DUAN Jinfeng, et al. Preparation of microencapsulated aluminum hypophosphite and its application in TPU/WPU[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(10):120-124, 130.
- [15] 刘旭冉, 周潇涵, 张行. 聚丙烯(PP)无卤阻燃配方设计与性能研究[J]. 中国轮胎资源综合利用, 2024(11):36-38.
- LIU Xuran, ZHOU Xiaohan, ZHANG Xing. Design and performance study of halogen free flame retardant formula for polypropylene(PP)[J]. China Tire Resources Recycling, 2024(11):36-38.
- [16] 宋肄业. 聚丙烯/氢氧化镁复合材料的制备及阻燃性能研究[J]. 化工新型材料, 2023, 51(增刊2):574-576.
- SONG Yiye. Preparation and flame retardancy of polypropylene/magnesium hydroxide composites[J]. New Chemical Materials, 2023, 51(Suppl 2):574-576.
- [17] 张志豪. 膨胀型阻燃体系和协效剂的表面改性及其在聚丙烯中的应用[D]. 北京: 北京化工大学, 2023.
- ZHANG Zhihao. Surface modification of expansion-type flame retardant system and synergist and its application in polyprop[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2023.