

一种生物基离子液体修饰型磷系阻燃母粒的制备方法及应用

王 莎¹, 代 莉², 谢君瑶¹, 杨佳睿², 王乙婷², 马祥伟^{1*}
(1. 四川省精细化工研究设计院有限公司, 四川 自贡 643000;
2. 四川兴晶铈科技有限公司, 四川 成都 611100)

摘要:针对高填充量下焦磷酸哌嗪(PAPP)基阻燃母粒加工性能差及分散性不佳的问题,合成了一种含磷氮结构的生物基离子液体,用于PAPP/三聚氰胺聚磷酸盐(MPP)复配体系的界面修饰,通过熔融共混制备了阻燃剂质量分数高达85%的阻燃母粒。该离子液体通过氢键与离子键的协同作用包覆于阻燃剂颗粒表面,显著改善了其与聚丙烯(PP)基体的界面相容性。当阻燃剂添加量为20%时,改性PP的阻燃性能与力学性能均得到显著提升。该策略为高填充阻燃母粒加工性能与分散性的矛盾提供了有效解决方案,对高性能阻燃聚丙烯材料的发展具有重要应用价值。

关键词:生物基离子液体;焦磷酸哌嗪;三聚氰胺聚磷酸盐;阻燃母粒;界面修饰

中图分类号:TQ314.2

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)S2-0271-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S2.044

Preparation method and application of a bio-based ionic liquid-modified phosphorus flame-retardant masterbatch

WANG Sha¹, DAI Li², XIE Jun-yao¹, YANG Jia-rui², WANG Yi-ting², MA Xiang-wei^{1*}

(1. Sichuan Institute of Fine Chemical Industry Research & Design Co., Ltd., Zigong 643000, China;

2. Sichuan Xingjinghua Technology Co., Ltd., Chengdu 611100, China)

Abstract: To address the issues of poor processing performance and dispersion of piperazine pyrophosphate (PAPP)-based flame-retardant masterbatches at high filler loadings, a bio-based ionic liquid containing phosphorus-nitrogen structures was synthesized for interfacial modification of PAPP/melamine polyphosphate (MPP) composite systems. Flame retardant masterbatches with a flame retardant content of up to 85 wt% were prepared via melt blending. The ionic liquid coats the surface of the flame-retardant particles through the synergistic action of hydrogen and ionic bonds, significantly improving their interfacial compatibility with the polypropylene (PP) matrix. When the flame-retardant content is 20 wt%, both the flame retardant performance and mechanical properties of the modified PP are significantly enhanced. This strategy provides an effective solution to the contradiction between processing performance and dispersion of highly filled flame-retardant masterbatches and has important application value for the development of high-performance flame-retardant polypropylene materials.

Key words: bio-based ionic liquids; piperazine pyrophosphate; melamine polyphosphate; flame-retardant masterbatch; interface modification

聚丙烯(PP)作为通用热塑性塑料,因其密度低、耐化学腐蚀、易加工等优点,广泛应用于电子电器、汽车内饰及建筑材料等领域^[1-3]。然而,PP的极限氧指数(LOI)仅约17%~18%,且燃烧时熔滴严重,极易传播火焰,极大限制了其在阻燃要求较高的场景中的应用^[4-6]。为实现PP的高效阻燃,添加无卤膨胀型阻燃剂已成为主流策略^[7-8]。其中,以焦磷酸哌嗪(PAPP)为酸源和气源,与碳源复配形成的膨胀阻燃体系,因其低烟、低毒、高效等特点备受关注^[9-11]。

工业上常通过制备阻燃母粒的方式解决粉体阻燃剂直接使用过程中存在的分散不均、扬尘等问题^[12-13]。然而,现有PAPP基复配阻燃母粒在制备过程中面临两大技术瓶颈:一是高填充量($\geq 70\%$)下熔体黏度急剧上升,流动性恶化,挤出过程极易出现“抱杆”和熔体破裂,导致加工困难;二是常规熔融共混仅能实现物理混合,无法在阻燃组分之间及其与基体之间建立有效的界面结合,抑制了膨胀炭层质量及阻燃效率的进一步提升^[14-15]。

离子液体作为一种具有结构可设计性的绿色介

收稿日期:2026-03-30;修回日期:2026-06-24

基金项目:四川省科技计划项目(2024ZHYS0022)

作者简介:王莎(1995-),女,博士,研究方向为阻燃材料,1662111722@qq.com;马祥伟(1988-),男,硕士,高级工程师,研究方向为改性高分子材料,通讯联系人,daage123@sohu.com。

质,因其良好的热稳定性、低挥发性及强界面相互作用能力,在高分子复合材料改性中展现出独特优势^[16-17]。近年来,利用离子液体对无机填料或阻燃剂进行表面修饰,改善其分散性和相容性的研究逐渐受到关注。然而,目前采用生物基离子液体协同修饰复配磷系阻燃剂,并应用于高含量母粒制备的系统研究仍鲜见报道^[18-23]。

本文基于上述背景,设计合成了一种生物基磷氮离子液体,将其用于 PAPP/MPP 复配体系的表面修饰,开发出一种兼具高流动性、高分散性与协同阻燃特性的阻燃母粒。系统研究了离子液体的修饰机制、阻燃剂的热稳定性及其在 PP 中的阻燃和力学性能,旨在为高性能阻燃 PP 材料的绿色制备提供理论依据和技术支持。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

焦磷酸哌嗪(PAPP),工业级;三聚氰胺聚磷酸盐(MPP),工业级;季戊四醇磷酸酯(PEPA),分析纯;对甲苯磺酰氯,分析纯;*N*-甲基-*L*-组氨酸,分析纯;三乙胺(Et₃N),分析纯;二氯甲烷(DCM)、无水乙醇,均为分析纯;功能协效剂,工业级;聚丙烯(PP)树脂,注塑级。

电动搅拌器:JJ-1A,常州市金坛双捷实验仪器厂;恒温电加热套:SXKW-2000,上海坤诚科学仪器有限公司;热失重分析仪,STA 449 F3;红外光谱仪,Nicolet Summit FT-IR;电热鼓风干燥箱:DHG,上海善志仪器设备有限公司;水平/垂直燃烧测试仪,SH5320;双螺杆混炼挤出冷粒造粒实验机,HPIA0/48-500;注塑成型机,PL860/260;万能力学试验机,XWW-20A。

1.2 制备方法

1.2.1 生物基离子液体的合成

采用两步合成法制备目标生物基新型磷氮离子液体(图 1)。第 1 步,以季戊四醇磷酸酯(PEPA)、对甲苯磺酰氯及三乙胺为原料,在二氯甲烷中控温反应,经过滤、热乙醇洗涤滤饼、真空干燥后得到中间体。第 2 步,将中间体与 *N*-甲基-*L*-组氨酸在二氯甲烷中加热搅拌充分反应,经沉淀、洗涤、干燥至

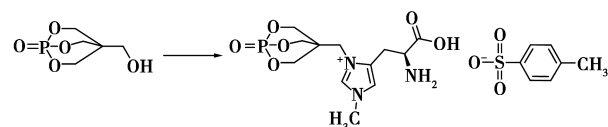


图 1 生物基新型磷氮离子液体的合成路线

恒重,得到生物基磷氮离子液体。

1.2.2 离子液体修饰型复配阻燃剂的制备

将 PAPP、MPP 及功能协效剂投入反应釜,加入适量无水乙醇,搅拌分散均匀。将离子液体(20%)研磨过 200 目筛后,缓慢加入上述悬浮液中,升温至 70℃,持续搅拌 2 h。反应结束后,减压脱除溶剂,所得固体物料冷却、过筛,即得离子液体共修饰的 PAPP/MPP 复合阻燃剂。

1.2.3 高含量阻燃母粒的制备

将上述离子液体修饰型复配阻燃剂(85%)与 PP 树脂(15%)按比例混合,投入双螺杆挤出机中,在 200℃、螺杆转速 400 r/min 条件下熔融共混、挤出、冷却、切粒,即得阻燃母粒。

1.2.4 阻燃 PP 复合材料的制备

将上述阻燃母粒与 PP 树脂按比例稀释共混,使最终阻燃剂添加量为 20%。混合均匀后经注塑成型制备标准测试样条。

2 结果与讨论

2.1 性能测试及表征

红外光谱(FT-IR)采用 ATR 法,扫描范围 4 000~500 cm⁻¹;热重分析(TGA)在 N₂ 气氛下进行,升温速率 10℃/min,温度范围 50~500℃;极限氧指数(LOI)按 ASTM D2863 测试;垂直燃烧等级按 UL-94 标准测试(样条厚度 1.60 mm);拉伸性能按 ASTM D638 测试;锥形量热仪测试按 ISO 5660 标准进行,热流率 50 kW/m²。

2.2 生物基离子液体的红外结构表征图及结果分析

生物基离子液体 FT-IR 谱图显示(图 2), 1 633.67 cm⁻¹处出现咪唑环 C=N 与 C=C 骨架振动吸收峰,证实咪唑阳离子结构已被成功引入。1 249.88 cm⁻¹与 1 096.53 cm⁻¹处分别为 P=O 及 P—O—C 的特征吸收峰,表明环状磷酸酯骨架在合成过程中保持完整。1 176.94 cm⁻¹及 1 040.76 cm⁻¹处对应磺酸根(—SO₃⁻)的不对称与对称伸缩振动,证实对甲苯磺酸根离子的存在。2 700~3 000 cm⁻¹范围内出现的宽化吸收带对应于组氨酸结构中氨基(—NH₂)与羧基形成分子间/分子内氢键所产生的 N—H 及 O—H 伸缩振动的叠加,进一步佐证组氨酸部分以两性离子形式存在。上述特征吸收峰的协同出现,与目标化合物结构中咪唑阳离子、环状磷酸酯、组氨酸片段及磺酸根阴离子的官能团组成完全吻合,由此确证目标化合物已成功合成。

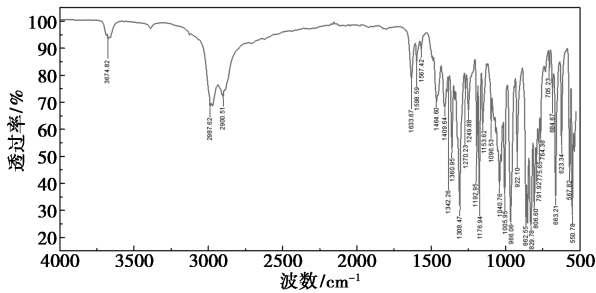


图2 生物基离子液体阻燃剂红外光谱图

2.3 离子液体修饰型复配阻燃剂的红外结构表征图及结果分析

离子液体修饰型复配阻燃剂的 FT-IR 谱图显示(图3), 1 632.68 cm^{-1} 处出现咪唑环 $\text{C}=\text{N}$ 骨架振动峰, 证明离子液体被成功引入。1 316.16、1 064.13 cm^{-1} 及 973.84 cm^{-1} 处分别为 $\text{P}=\text{O}$ 、 $\text{P}-\text{O}-\text{C}$ 及 $\text{P}-\text{O}-\text{P}$ 的特征吸收峰, 表明 PAPP 与 MPP 主体结构在修饰过程中未被破坏。3 011.67 cm^{-1} 处 $\text{N}-\text{H}$ 峰宽化及 2 688.88 cm^{-1} 处氢键组合吸收峰的出现, 证实离子液体与阻燃剂间形成氢键网络。1 022.03 cm^{-1} 处的离子键特征峰进一步表明离子液体通过离子键作用牢固包覆于 PAPP/MPP 颗粒表面。该多重界面作用机制为实现阻燃组分在分子水平上的紧密接触奠定了基础。

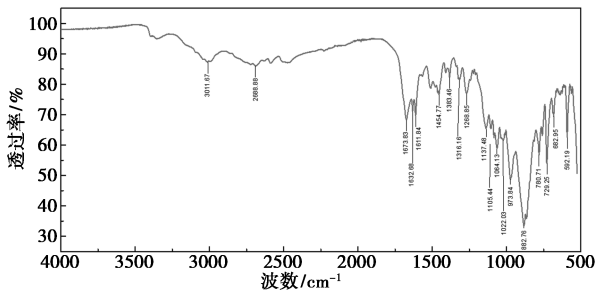


图3 复配阻燃剂红外光谱图

2.4 离子液体修饰型复配阻燃剂的热稳定性分析

TGA 结果表明, 离子液体修饰型复配阻燃剂在 294.3℃ 时质量保留率高达 99.50%, 说明其在聚丙烯典型加工温度区间内热稳定性优异, 仅存在吸附水挥发导致的微量失重。300~450℃ 区间呈现阶梯式失重: 312.4℃ 时保留率 98.00%, 324.3℃ 时保留率 95.00%, 对应焦磷酸哌嗪与三聚氰胺聚磷酸盐的初始分解及离子液体结构断裂。起始分解温度 364.1℃, 显著高于未修饰的 PAPP/MPP 共混体系, 表明离子液体通过氢键与离子键协同促进了交联成炭, 形成致密膨胀炭层(图4)。高残炭率证明离子液体通过氢键与离子键的协同作用, 生成了更为致密稳定的膨胀炭层, 从热力学机制上揭示了本研究

阻燃母粒兼具高载量、易加工及高效阻燃特性的内在原因。

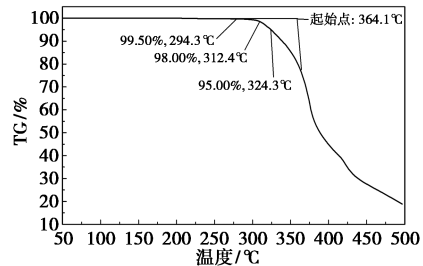


图4 离子液体修饰型复配阻燃剂的 TGA 曲线图

2.5 PP 及其复合材料阻燃性能与力学性能

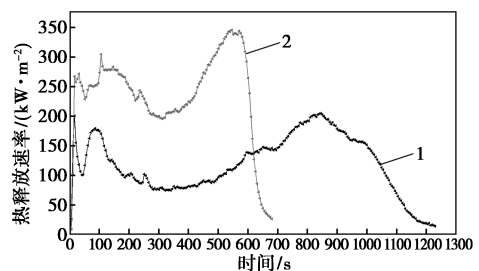
阻燃及力学性能测试结果表明(表1), 添加 20% 修饰型复配阻燃剂后, PP 复合材料的 LOI 由 28.6% 提高至 32.2%, 垂直燃烧等级由 V-1 提升至 V-0。拉伸强度和断裂伸长率分别提高 11.4% 和 42.6%, 表明界面相容性的改善显著减少了应力集中点。

表1 PP 及其复合材料的阻燃/力学性能试验数据

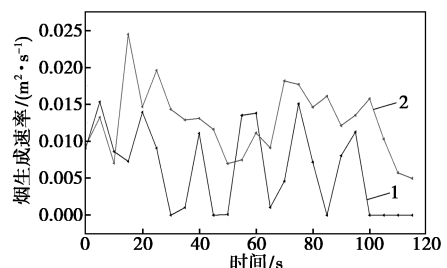
测试项目	测试标准	未修饰 PAPP/ MPP 母粒	修饰型复配 阻燃母粒
极限氧指数 (LOI)	ASTM D2863	28.6%	32.2%
垂直燃烧等级	UL-94 (1.6 mm)	V-1	V-0
拉伸强度	ASTM D638	24.5 MPa	27.3 MPa
断裂伸长率	ASTM D638	115%	164%

2.6 锥形量热仪测试数据

根据锥形量热仪测试结果, 结合热释放速率 (HRR)、总热释放量 (THR)、生烟速率 (SPR) 及总烟产生量 (TSP) 4 组曲线的演变特征(图5), 可系统



(a) 热释放速率曲线



(b) 烟生成速率曲线

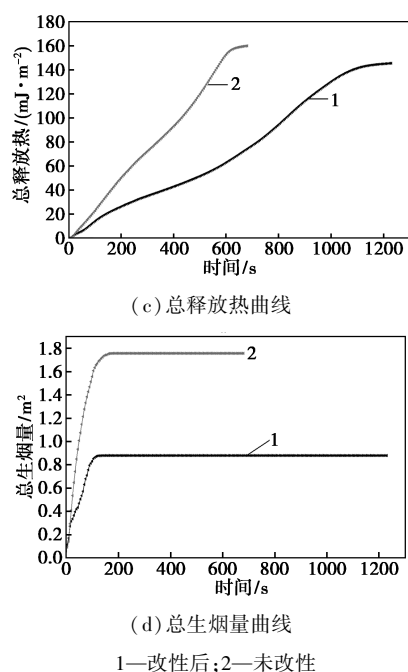


图 5 PP 及其复合材料的锥形量热仪试验曲线

阐明生物基离子液体对焦磷酸哌嗪 (PAPP)/三聚氰胺聚磷酸盐 (MPP) 膨胀型阻燃体系的修饰作用及其对聚丙烯 (PP) 燃烧行为的调控机制。

结合曲线演变特征及表 2 数据可知,未改性 PP (2 号样) 的 HRR 曲线呈现尖锐单一热释放峰,峰值热释放速率 (PHRR) 高达 347 kW/m^2 ,而改性后 (1 号样) PHRR 降至 206 kW/m^2 ,降幅达 40.6%,曲线趋于平缓,表明成炭反应提前启动;THR 曲线斜率降低,总热释放下降 9.4%,燃烧进程被有效延缓。SPR 与 TSP 曲线差异更为显著,改性后总烟产生量降幅达 54.8%,反映炭层对烟颗粒的有效封锁。上述图形数据表明,生物基离子液体通过化学修饰作用,与 PAPP/MPP 形成热稳定性更高的复合物,降低成炭活化能,促使体系快速形成致密连续的高膨胀炭层,从而同步抑制热释放与烟气产生,残炭率由 12.5% 增至 21.5%,亦从侧面印证了凝聚相成炭效率的提升。

表 2 PP 及其复合材料的锥形量热仪测试数据

测试参数	未修饰 PAPP/ 修饰型复配	
	MPP 母粒	阻燃母粒
热释放速率峰值 (PHRR) / ($\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$)	347	206
总热释放量 (THR) / ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)	160	145
总烟产生量 (TSP) / m^2	188	85
残炭率 / %	12.5	21.5

3 结论

本研究成功合成了一种生物基磷氮离子液体,

并将其用于 PAPP/MPP 复配阻燃体系的表面修饰,构建了氢键与离子键协同的界面作用层。基于该修饰技术制备的阻燃母粒,阻燃剂含量高达 85%,兼具优异的热加工稳定性及分散性。在聚丙烯中仅添加 20% 修饰型复配阻燃剂,即可使材料的极限氧指数达到 32.2%,并通过 UL-94 V-0 级,同时热释放速率峰值和总烟产生量显著降低,力学性能也得到同步提升。本研究为开发高载量、高性能无卤阻燃母粒提供了一条绿色高效的新路径,具有良好的工业应用前景。

参考文献

- [1] Gülayşe G, Vera K, Alexandru S. Influence of palmitic acid and temperature on the behaviour of polypropylene films for medical uses[J]. Journal of Polymer Research, 2025, 32(11): 419.
- [2] Abdulhakim A, Rolf W, Tim K, et al. The multiple uses of polypropylene/polyethylene terephthalate microfibrillar composite structures to support waste management—composite processing and properties[J]. Polymers, 2021, 13(8): 1296.
- [3] 程焯. 聚丙烯酰胺行业发展综述[J]. 精细与专用化学品, 2023, 31(8): 28-30.
- [4] Chen X, Jiao C. Flame retardancy and thermal degradation of intumescent flame retardant polypropylene material[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2011, 22(6): 817-821.
- [5] 方伟, 李峰, 张维, 等. 我国煤制聚丙烯工业发展现状综述[J]. 石化技术与应用, 2014, 32(5): 462-465.
- [6] Yasaman A, Costas T, Alexander P. An overview of the potential of UV modification of polypropylene[J]. Macromolecular Symposia, 2016, 360(1): 96-107.
- [7] 刘文星. 聚丙烯阻燃研究进展[J]. 塑料科技, 2025, 53(9): 215-219.
- [8] 王清硕, 惠岚峰, 张宜宜, 等. 新型无卤素阻燃剂研究及应用进展[J]. 现代化工, 2024, 44(6): 35-40.
- [9] Li H, Sun L, Qu Y. Thermal behavior characteristics of the intumescent flame-retardant coating composition: 中国涂料技术创新高峰论坛论文集[C]. 2012: 107-114.
- [10] Liu Y, Wang D, Wang J, et al. A novel intumescent flame-retardant LDPE system and its thermo-oxidative degradation and flame-retardant mechanisms[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2008, 19(11): 1566-1575.
- [11] Lu D, Wang Y, Feng S, et al. Optimization design of flame-retardant rigid polyurethane foam modified by piperazine pyrophosphate/zinc tailings/sodium ligninsulfonate based on orthogonal experiment[J]. Industrial Crops and Products, 2024, 222(2): 119696.
- [12] 钟志强. 磷氮型无卤膨胀阻燃聚乙烯母粒的制备及应用[J]. 塑料, 2023, 52(3): 177-182.
- [13] Li X, Shi J, Xu X, et al. Performance of flame retardant master batch made by twin-screw extruder[C]. Proceedings of the First Annual Sino-American Joint International Fire Safety Conference, 2006: 127-130.

(下转第 286 页)

- [17] Xiang Y, Xin L, Deetz J D, *et al.* Reaction mechanisms of the initial oligomerization of aluminophosphate [J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2016, 120(18): 2902–2910.
- [18] Morris J H, Perkins P G, Li S. The relationship between the adhesion of aluminum dihydrogen phosphate and silica complex and the crystal form of aluminum dihydrogen phosphate [J]. *Inorganic Salt Industry*, 1980, (5): 53–55.
- [19] Wang K, Fu Y Q, Song J L, *et al.* Preparation of aluminum phosphate-coated nano-silica and its effect on the flame retardancy of PAN nanofibers [J]. *Plastics Science and Technology*, 2025, 53(10): 13–17.
- [20] Wang Z, Wen Y, Zhao S, *et al.* Soy protein as a sustainable surfactant to functionalize boron nitride nanosheets and its application for preparing thermally conductive biobased composites [J]. *Industrial Crops and Products*, 2019, 137: 239–247.
- [21] Akech S R O, Harrison O, Saha A. Removal of a potentially hazardous chemical, tetrakis (hydroxymethyl) phosphonium chloride, from water using biochar as a medium of adsorption [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2018, 12: 196–210.
- [22] Walkley B, Nicolas R S, Sani M, *et al.* Phase evolution of Na₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O gels in synthetic aluminosilicate binders [J]. *Dalton Transactions*, 2016, 45(13): 5521–5535.
- [23] He Y, Liu L, He L, *et al.* Characterization of chemosynthetic H₃PO₄-Al₂O₃-2SiO₂ geopolymers [J]. *Ceramics International*, 2016, 42(9): 10908–10912.
- [24] Tchakouté H K, Fotio D, Rüschler C H, *et al.* The effects of synthesized calcium phosphate compounds on the mechanical and microstructural properties of metakaolin-based geopolymer cements [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 163: 776–792.
- [25] Wang F, Wang Q, Wang X. Progress in research on fire retardant-treated wood and wood-based composites: A Chinese perspective [J]. *Forest Products Journal*, 2010, 60(7/8): 668–678.
- [26] Zhong S, Song S, Wang B, *et al.* Fast preparation of ERI-structure AlPO-17 and SAPO-17 in the presence of isomorphous and heterogeneous seeds [J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2018, 263: 11–20.
- [27] Lin H, Liu H, Li Y, *et al.* Properties and reaction mechanism of phosphoric acid activated metakaolin geopolymer at varied curing temperatures [J]. *Cement and Concrete Research*, 2021, 144: 106425. ■

(上接第 274 页)

- [14] 王菁, 杨冰冰, 陈蕾, 等. 无卤阻燃母粒及其改性纤维的制备和性能研究 [J]. *合成纤维工业*, 2024, 47(1): 23–27.
- [15] 李湘, 方松刚, 徐娟, 等. 聚乙烯基阻燃母粒的制备及其在木塑复合材料中的应用 [J]. *塑料工业*, 2025, 53(6): 139–143, 168.
- [16] Konrad G, Laurent C, Yongjun M. Thiazolium-containing poly(ionic liquid)s and ionic polymers [J]. *Polymers and Ionic Liquids*, 2014: 67–77.
- [17] Zhang W, Kochovski Z, Bernhard V, *et al.* Crosslinked 1,2,4-triazolium-type poly(ionic liquid) nanoparticles [J]. *Polymer*, 2016, 107: 509–516.
- [18] 李艳伟. 咪唑基离子液体改性三聚氰胺阻燃硬质聚氨酯泡沫的研究 [J]. *现代化工*, 2013, 33(4): 71–74.
- [19] Xu D, Zhou M, Qian X. The influence of poly lactic acid's crystalline behavior and the compatibility by poly(ionic liquid) [C]. *Mechatronics and Intelligent Materials III: Trans Tech Publications*, 2013: 334–337.
- [20] Guo P, Zhang H, Liu X, *et al.* Counteranion-mediated intrinsic healing of poly(ionic liquid) copolymers [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(2): 2105–2113.
- [21] 马恩庆, 周俏, 郭立颖. 酸性离子液体催化合成生物基共聚酯 PEHF [J]. *塑料科技*, 2025, 53(11): 7–11.
- [22] Renjith S, Talasila P, Sudha J. Bio-based ionic liquid crystalline quaternary ammonium salts: Properties and applications [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(6): 4126–4133.
- [23] Chen X, Ding Y, Li Y, *et al.* Modification of polylactide by poly(ionic liquid)-b-polylactide copolymer and bio-based ionomers: Excellent toughness, transparency and antibacterial property [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 221: 1512–1526. ■

(上接第 279 页)

- [10] Li X, Zhang Y, Wang J. Preparation and properties of isocyanate modified SIS hot-melt pressure-sensitive adhesive for high temperature application [J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2021, 35(15/16): 1689–1705.
- [11] 蹇磊. 增黏树脂对改性 SIS 型热熔压敏胶性能的影响 [J]. *中国建筑防水*, 2021, 41(8): 12–15.
- [12] 吕国松, 张广彬. 高密度聚乙烯自粘胶膜防水卷材的研制 [J]. *中国建筑防水*, 2014, (21): 30–33.
- [13] Park S H, Lee J H, Kim Y C. Rheological and adhesive properties of SIS-based HMPSAs modified with polar functional monomers [J]. *Polymer Testing*, 2022, 106: 107562.
- [14] Han L, Chen G, Zhang L. Effect of graft modification on the thermal and aging resistance of SIS-based hot-melt pressure-sensitive adhesives [J]. *European Polymer Journal*, 2023, 192: 111958.
- [15] Garcia M, Rodriguez L, Martinez J. Weather resistance of modified SIS hot-melt pressure-sensitive adhesives for outdoor construction applications [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 265: 120987.
- [16] 张广彬. 高分子防水卷材用自粘胶的制备及性能研究 [J]. *中国建筑防水*, 2011(9): 6–8, 18.
- [17] Kim J H, Lee S W, Park J Y. Effect of isocyanate-based crosslinker on the thermal stability and adhesion properties of SIS hot-melt pressure-sensitive adhesives [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2020, 89: 234–241.
- [18] Liu Y, Chen W, Wang L. Improvement of weather resistance of SIS-based HMPSAs by grafting with maleic anhydride and ethylene glycol diglycidyl ether [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2021, 159: 106328.
- [19] Zhang Q, Li M, Zhao J. Influence of grafting degree of SIS-g-MMA copolymer on the rheological and adhesive properties of hot-melt pressure-sensitive adhesives [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, 139(36): 52187.
- [20] 陈晨, 李娟, 张宏伟. 异氰酸酯改性 SIS 热熔压敏胶的耐老化性能研究 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2023, 39(5): 68–74.
- [21] Zhou Y, Wang H, Chen F. Preparation of SIS-based HMPSAs with enhanced high and low temperature resistance by composite modification of IPDI and TiO₂ [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 368: 131345. ■