阻燃改性EPS复合墙体材料的抑烟性能与力学性能研究

张 莹[1],赵亮平[2]

(1.郑州理工职业学院,河南 郑州 451150;2.河南工程学院,河南 郑州 451191)

摘 要:采用膨胀型阻燃体系(IFR),引入膨胀石墨(EG)和氢氧化铝(ATH)构建多组分复合阻燃体系,系统研究不同配方对膨胀聚苯乙烯(EPS)复合墙体材料力学性能、动态热机械性能及燃烧行为的影响。结果表明:单一膨胀型阻燃体系在显著改善材料阻燃性能的同时伴随着力学性能的下降。EG与ATH协同体系表现出最优的综合性能。此时,EPS复合材料的拉伸强度和弯曲强度分别达到17.9 MPa和27.9 MPa,25 ℃储能模量提高至1 260 MPa,极限氧指数(LOI)提升至31.2%,UL-94垂直燃烧等级达到V-0级。该体系的热释放速率峰值(PHRR)和总烟释放量(TSP)分别降低至265 kW/m^{2}和3.9 m^2,较纯EPS显著下降。合理构建膨胀型阻燃体系与无机抑烟组分的复合阻燃体系,不仅能够有效调控EPS复合墙体材料的燃烧行为,还能兼顾其力学性能,从而为高安全性建筑保温材料的设计提供参考。

关键词:膨胀聚苯乙烯;膨胀型阻燃体系;膨胀石墨;氢氧化铝;抑烟性能

中图分类号:TQ325.2 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3360(2026)08-0085-05

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.015

Study on Smoke Suppression Performance and Mechanical Properties of Flame-retardant Modified EPS Composite Wall Materials

ZHANG Ying[1], ZHAO Liangping[2]

(1. Zhengzhou Institute of Technology, Zhengzhou 451150, China; 2. Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China)

Abstract: An intumescent flame retardant (IFR) system was adopted, and expandable graphite (EG) and aluminum hydroxide (ATH) were introduced to construct a multicomponent composite flame-retardant system. The effects of different formulations on the mechanical properties, dynamic thermomechanical properties, and combustion behavior of EPS composite wall materials were systematically investigated. The results indicated that the sole IFR system significantly improved the flame retardancy of the material, but was accompanied by a deterioration in mechanical properties. The EG/ATH synergistic system exhibited the optimal overall performance. Under this condition, the tensile strength and flexural strength of the EPS composite reached 17.9 MPa and 27.9 MPa, respectively, the storage modulus at 25 ℃ increased to 1 260 MPa, the limiting oxygen index (LOI) rose to 31.2%, and the UL-94 vertical burning rating reached V-0. The peak heat release rate (PHRR) and total smoke production (TSP) of this system were reduced to 265 kW/m^2 and 3.9 m^2, respectively, showing significant reductions compared to those of neat EPS. The rational construction of a composite flame-retardant system combining an intumescent flame-retardant component and an inorganic smoke-suppressing component not only effectively regulated the combustion behavior of EPS composite wall materials, but also maintained their mechanical properties, thereby providing a reference for the design of high-safety building thermal insulation materials.

Keywords: EPS; IFR; Expanded graphite; Aluminum hydroxide; Smoke suppression performance

收稿日期Submitted date 2025-12-19;修回日期Revised date 2026-01-12;录用日期Accepted date 2026-02-27

基金项目:2024年河南省科技攻关项目(242102321021)

联系人,1527509068@qq.com

引用本文:张莹,赵亮平.阻燃改性EPS复合墙体材料的抑烟性能与力学性能研究[J].塑料科技,2026,54(8):85-89.

Citation: ZHANG Y, ZHAO L P. Study on smoke suppression performance and mechanical properties of flame-retardant modified EPS composite wall materials[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 85-89.

膨胀聚苯乙烯(EPS)具有密度低、导热系数小、加工性能优良等优点，在建筑墙体保温与节能领域展现出独特的应用价值[1-2]。EPS作为一种典型的易燃高分子材料，其火灾危险性主要体现在点火迅速、热释放剧烈以及有毒烟气大量生成3个方面，这些劣势制约其在建筑安全领域的广泛应用[3-4]。因此，提升EPS的阻燃性能与抑制烟气生成，已经成为当前研究的重点方向。膨胀型阻燃体系(IFR)因其无卤、低烟、环境友好等优点，在EPS阻燃改性中展现出良好的应用潜力。IFR体系由酸源、碳源与气源协同组成，在受热条件下，能够在材料表面形成膨胀炭层，从而隔绝热量、氧气及可燃挥发物的传递[5]。然而，单一IFR体系在EPS等低极性聚合物中分散性有限，在燃烧过程中形成的炭层在后期易出现开裂或塌陷，从而降低阻燃效率及抑烟效果；IFR的引入还可能对材料力学性能产生不利影响[6-7]。

为改善IFR体系的阻燃效率和抑烟能力，引入无机阻燃/抑烟填料成为当前研究的重要方向。膨胀石墨(EG)在高温条件下能够沿层间迅速膨胀，形成致密且结构稳定的“蠕虫状”炭层，在降低热释放速率和抑制烟气扩散方面表现出显著优势[8]。氢氧化铝(ATH)作为典型的无机阻燃剂，其阻燃机理主要体现为吸热降温与气相稀释，同时兼具抑制熔融滴落与烟气生成的作用[9]。然而，单独使用EG或ATH时，通常需要较高添加量才能实现有效阻燃，这会劣化材料的加工性能与力学强度。

本文构建IFR并引入EG和ATH形成多种复合阻燃体系，系统研究不同阻燃体系对EPS复合墙体材料力学性能、动态热机械性能、阻燃与抑烟性能的影响，重点分析EG与ATH在IFR中的协同阻燃与抑烟作用机制，旨在为高安全性EPS建筑保温材料的设计与工程应用提供依据。

1 实验部分

1.1 主要原料

EPS颗粒，工业级，表观密度约18~20 kg/m^3，巴斯夫(中国)有限公司；聚磷酸铵(APP)，II型，聚合度>1 000，工业级，山东凯盛新材料股份有限公司；季戊四醇(PER)，工业级，国药集团化学试剂有限公司；三聚氰胺(MEL)，工业级，阿拉丁试剂(上海)有限公司；EG，起始膨胀温度约200 ℃，膨胀倍率≥250 mL/g，青岛恒源石墨有限公司；ATH，平均粒径约1~3 μm，山东铝业有限公司。

1.2 仪器与设备

双螺杆挤出机，SHJ-20，南京瑞亚挤出机械制造有限公司；平板硫化机，XLB-D400×400，湖州东方机械有限公司；电子万能试验机，CMT 6104，美特斯工业系统(中国)有限公司；悬臂梁冲击试验机，XJJ-50，承德试验机有限责任公司；动态热机械分析仪(DMA)，DMA Q800，美国TA Instruments公司；LOI测定仪，JF-3，南京江宁分析仪器厂；垂直燃烧试验箱，UL-94，东莞市科标检测设备有限公司；锥形量热仪，FTT0007，英国 Fire Testing Technology公司；电热鼓风干燥箱，DHG-9070A，上海一恒科学仪器有限公司。

1.3 样品制备

采用工业级EPS颗粒为基体材料，各处理组分均按照质量分数统一配比，总添加量控制为100%。表1为EPS复合墙体材料的配方。其中，CK为未添加阻燃剂的纯EPS；F1在EPS基体中引入10%的IFR(APP、PER、MEL的质量比为2∶1∶1)；F2在F1基础上引入2%的ATH；F3在F1基础上引入3%的EG；F4则采用10%的IFR、2%的EG和2%的ATH组成复合协同体系。制备前，EPS颗粒及各类固体阻燃与抑烟助剂均置于60 ℃烘箱中干燥6 h，消除吸附水分。按配方精确称量各组分，投入双螺杆挤出机进行熔融共混，机筒温度由加料段至机头依次设定为150~170 ℃，螺杆转速为180 r/min。挤出熔体经冷却水槽冷却后切粒，得到均匀的阻燃改性EPS粒料。采用平板硫化机将所得粒料进行模压成型，温度为130 ℃，成型压力为8 MPa，保压时间为10 min，制备得到尺寸为100 mm×100 mm×10 mm的阻燃EPS复合材料试样。所有样品成型后均在23 ℃、相对湿度为50%的标准环境中放置24 h。F3中EG添加量高于F2中ATH的添加量，主要源于两种无机组分阻燃机理差异及其有效作用剂量区间不同，相关设计旨在保证各体系阻燃效果的可比性并突出EG与ATH的协同作用。

表1 EPS复合墙体材料的配方

Tab.1 Formula of EPS composite wall materials 单位：%

样品	w_{EPS}	w_{APP}	w_{PER}	w_{MEL}	w_{EG}	w_{ATH}
CK	100	0	0	0	0	0
F1	90	5	2.5	2.5	0	0
F2	88	5	2.5	2.5	0	2
F3	87	5	2.5	2.5	3	0
F4	86	5	2.5	2.5	2	2

1.4 性能测试与表征

力学性能测试：拉伸性能和弯曲性能按照GB/T 1040.2—2022和GB/T 9341—2008进行测试，采用电子万能试验机，拉伸速率为5 mm/min，弯曲试验加载速率为2 mm/min。缺口冲击强度按照GB/T 1843—2008测试。

DMA测试：按照ASTM D4065—2012，在单悬臂模式下进行DMA测试，升温速率为3 ℃/min，频率为1 Hz，得到储能模量(E')、损耗模量(E'')及损耗因子(tan δ)。玻璃化转变温度(t_g)取tan δ峰值对应温度。

阻燃性能测试：LOI按照GB/T 2406.2—2009进行测试。垂直燃烧性能按照GB/T 2408—2021进行测试。记录燃烧等级、燃烧时间及熔滴情况。锥形量热测试按照ISO 5660—1—2015进行测试，外加热辐照强度设定为35 kW/m，测试获得点燃时间(TTI)、热释放速率峰值(PHRR)、总热释放量(THR)、烟释放速率峰值(PSPR)及总烟释放量(TSP)等参数。所有测试样品在测试前均在23 ℃、相对湿度为50%的标准环境下调湿24 h。每组测试至少重复5次，取平均值。

2 结果与讨论

2.1 EPS复合墙体材料的力学性能分析

表2为EPS复合墙体材料的力学性能。从表2可以看出，与CK相比，F1的拉伸强度、弯曲强度和缺口冲击强度均下降，但拉伸模量和弯曲模量均升高。这一结果与IFR组分在低极性基体中分散性差、界面弱结合导致应力集中，从而削弱载荷传递的机理一致[10]。F2的拉伸模量和弯曲模量均进一步提高，拉伸强度、弯曲强度和缺口冲击强度有部分恢复。这一结果说明在良好分散与合适粒径条件下，ATH能够利用界面约束与应力重分配在一定程度上弥补IFR引入的界面弱化[11]。F3的拉伸模量和弯曲模量均显著提升，拉伸强度、弯曲强度和缺口冲击强度均显著降低。这一结果与片层状EG在室温下作为高刚性相提高刚度、在界面诱导应力集中、促进裂纹扩展的常见行为相符[12]。与CK相比，F4的拉伸强度略有下降，其余数据均显著高于CK。结果表明：在特定配比与加工条件下，EG提供的刚性骨架与ATH的界面缓冲/耗能作用可能产生互补效应，从而在刚度与韧性之间取得更佳平衡[13-14]。

表2 EPS复合墙体材料的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of EPS composite wall materials

样品	拉伸强度/MPa	拉伸模量/MPa	弯曲强度/MPa	弯曲模量/MPa	缺口冲击强度/(kJ·m^{-2})
CK	18.6±0.7	920±35	27.4±1.1	1 480±60	3.2±0.2
F1	15.2±0.6	1 010±40	23.1±0.9	1 625±55	2.6±0.2
F2	16.8±0.5	1 085±45	25.6±1.0	1 710±70	3.0±0.2
F3	14.9±0.8	1 120±50	24.2±1.2	1 765±65	2.3±0.3
F4	17.9±0.6	1 185±40	27.9±0.8	1 835±60	3.5±0.2

2.2 EPS复合墙体材料的DMA分析

图1为EPS复合墙体材料的DMA曲线，表3为EPS复合墙体材料的DMA性能参数。从图1和表3可以看出，在25 ℃下，F1的E'较CK提高约13.6%，表明无机-有机阻燃组分的存在限制聚合物链段的热振动和位移，从而增强材料刚性。随着填料含量的增加，复合材料的E'通常表现出上升趋势。原因是填料-基体界面减少了聚合物分子链的自由运动空间[15]。由于ATH的加入，F2的E'进一步增加，tan δ峰值显著降低。原因是ATH作为刚性无机填料增强了界面约束，聚合物链段在动态载荷下更难发生能量耗散，从而增强集料-基体体系的弹性响应[16]。与此相比，F3中EG的引入使E'达到更高水平，但t_g略有下降。EG的片层结构能够在室温区显著提升复合材料的E'。然而，由于片层间和基体之间的界面可能存在局部应力不均，有时会使t_g轻微下降或改变转变峰宽度[17]。F4在EG与ATH协同作用下表现出最优的动态热机械性能，其E'达到最高，tan δ峰值最低，而t_g反而略高于CK。EG与ATH在协同体系中功能互补，EG提供刚性相增强，ATH则发挥界面缓冲与能量耗散作用，二者协同不仅提高材料在玻璃态区域的承载能力，还能够增强链段运动的协调性[18]。

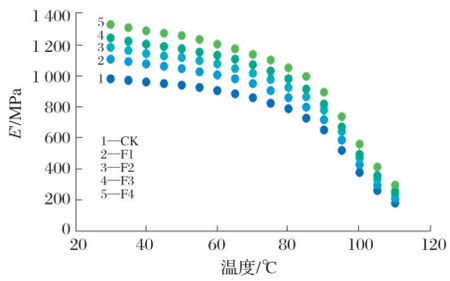


图1 EPS复合墙体材料的DMA曲线

Fig.1 DMA curves of EPS composite wall materials

表3 EPS复合墙体材料的DMA性能参数

Tab.3 DMA performance parameters of EPS composite wall materials

样品	E'/MPa	E''_{max}/MPa	tan δ峰值	t_g/℃
CK	920±30	165±8	0.82±0.03	96.4±0.6
F1	1 045±35	182±9	0.76±0.04	94.1±0.7
F2	1 120±40	176±7	0.71±0.03	95.6±0.5
F3	1 185±45	168±10	0.68±0.04	93.2±0.8
F4	1 260±38	171±8	0.64±0.02	97.8±0.6

2.3 EPS复合墙体材料的阻燃性能分析

2.3.1 LOI分析

LOI能够反映材料在氧气环境中的本征阻燃能力，是评价聚苯乙烯类材料阻燃改性效果的常用指标[19]。图2为EPS复合墙体材料的LOI。纯EPS的LOI约为18%~19%，属于极易燃范围，这与已有报道相符[20]。F1的LOI提升至26.8%，表明IFR在高温下能够促进碳化层形成，减少可燃挥发物逸出，从而提高材料的自熄能力[21]。F2的LOI进一步提升至28.4%。ATH的主要物理作用为吸热分解并释放水蒸气(冷却+稀释)，同时在凝聚相形成隔热层，因而能够有效提高LOI，其效果与添加量及分散性密切相关[22]。F3的LOI提升更显著(达29.6%)。原因是EG在高温下沿层间膨胀形成致密的“蠕虫状”炭层，能够快速建立隔热隔氧屏障，从而显著抑制热释放与挥发产物逸散[23]。F4的LOI达到31.2%，突破30%的“难燃”阈值，证实EG与ATH的协同阻燃效应。EG构建隔热炭层，发挥凝聚相阻燃作用；ATH通过吸热降温与气相稀释发挥气相阻燃作用，两者从不同维度协同抑制燃烧[24]。

2.3.2 垂直燃烧测试分析

表4为EPS复合墙体材料的UL-94垂直燃烧测试结果，其中t_1为第一次余焰时间，t_2为第二次余焰时间。从表4可以看出，F1在UL-94测试中达到V-2级，燃烧时间明显缩短，但熔滴仍存在。这表明IFR在燃烧初期能促进膨胀炭层形成并抑制火焰传播[25]。F2与F3均达到V-1级且不出现引燃熔滴。ATH的吸热降温与气相稀释能够降低燃区温度并稀释可燃气体，从而帮助抑制熔滴；而EG在高

温下能够迅速膨胀形成致密的隔热炭层，能够有效阻断热量和氧气传递，二者单独使用均可改善垂直燃烧行为[26-27]。F4实现V-0级且t_1+t_2最短，表明EG提供的结构化膨胀炭层与ATH的吸热，气相稀释效应在凝聚相与气相两端形成互补，从而显著抑制燃烧并杜绝熔滴[28]。

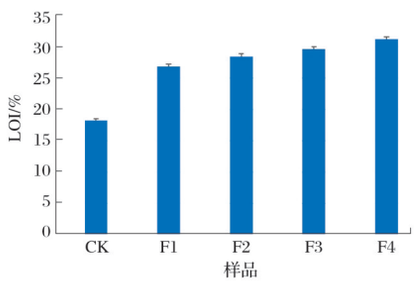


图2 EPS复合墙体材料的LOI

Fig.2 LOI of EPS composite wall materials

表4 EPS复合墙体材料的UL-94垂直燃烧测试结果

Tab.4 UL-94 vertical burning test results of EPS composite wall materials

样品	燃烧等级	t_1/s	t_2/s	(t_1+t_2)/s	熔滴引燃
CK	不评级	>30.0			是
F1	V-2	11.4±1.2	9.8±1.0	21.2±1.6	是
F2	V-1	7.6±0.9	6.2±0.8	13.8±1.3	否
F3	V-1	6.9±0.8	5.4±0.7	12.3±1.1	否
F4	V-0	2.8±0.5	2.1±0.4	4.9±0.7	否

2.3.3 锥形量热测试分析

锥形量热测试分析能够综合反映材料在外部热辐照条件下的燃烧强度、热释放行为及烟生成特征，是评价阻燃与抑烟性能的重要手段[29-30]。图3为EPS复合墙体材料的锥形量热测试曲线，表5为EPS复合墙体材料的锥形量热测试参数。从表5可以看出，与CK相比，F1的TTI明显延长，PHRR和THR显著下降(PHRR从685 kW/m^{2}降至430 kW/m^2，THR从78.6 MJ/m^{2}降至61.4 MJ/m^2)。原因是IFR在燃烧早期促进膨胀炭层形成，作为凝聚相的隔热/阻隔屏障有效减缓热和可燃分解产物的传输[31-33]。F1虽能有效抑制热释放，但其PSPR和TSP依然处于较高水平，降热与抑烟效果未能同步实现。F2的TTI、PHRR、THR以及烟参数均进一步改善。原因是ATH的吸热降温与气相稀释不仅能够降低燃区温度，还能够稀释燃烧产物并促进更稳定的碳化层形成，从而在热释放和烟生成两端发挥作用[34]。相比之下，F3在进一步降低PHRR/THR的同时，对PSPR与TSP的抑制更为显著。原因是EG层间剧烈膨胀形成“蠕虫状”致密炭层，增强凝聚相的隔热与阻氧能力，减少热释放并抑制烟气逸散[35]。F4的TTI最长，PHRR最低，THR与TSP也显著降低。EG提供的凝聚相骨架、ATH的吸热与气相稀释效应互补，既提高残碳的连续致密性，又抑制可燃挥发物与烟气释放。

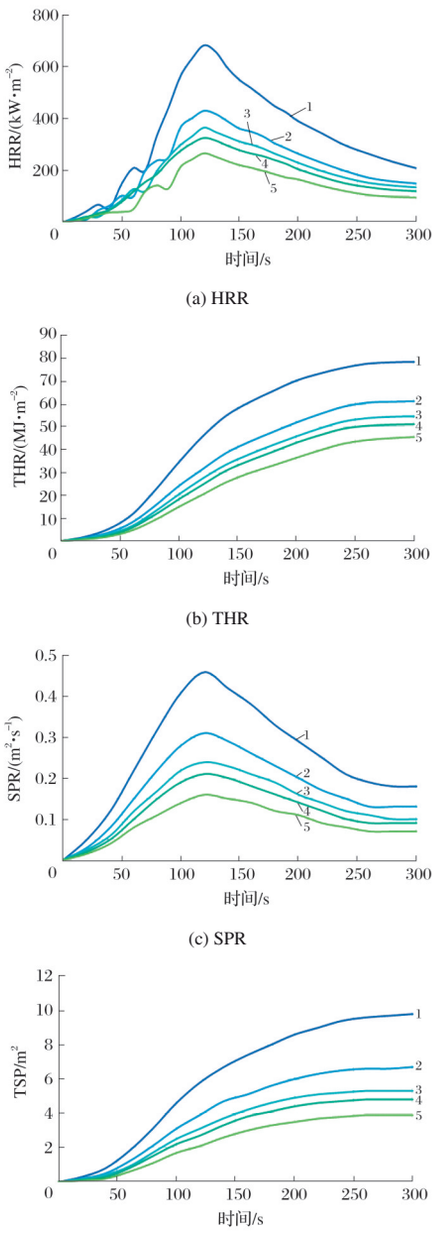


图3 EPS复合墙体材料的锥形量热测试曲线

Fig.3 Cone calorimeter test curves of EPS composite wall materials

表5 EPS复合墙体材料的锥形量热测试参数

Tab.5 Cone calorimeter test parameters of EPS composite wall materials

样品	TTI/s	PHRR/(kW·m^{-2})	THR/(MJ·m^{-2})	PSPR/(m^2·s^{-1})	TSP/m^2
CK	38±3	685±25	78.6±2.8	0.46±0.03	9.8±0.6
F1	52±4	430±18	61.4±2.2	0.31±0.02	6.7±0.5
F2	58±5	365±15	54.8±1.9	0.24±0.02	5.3±0.4
F3	61±4	325±14	51.2±1.7	0.21±0.01	4.8±0.3
F4	69±5	265±12	45.6±1.5	0.16±0.01	3.9±0.3

3 结论

本文研究不同阻燃体系对复合墙体材料力学性能、热机械行为及阻燃抑烟性能的影响。结果表明，单一IFR显

著提升了EPS复合墙体材料的阻燃性能，但力学性能有所降低。EG与ATH的协同引入在保持优异阻燃与抑烟性能的同时，实现力学性能与热机械稳定性的整体优化。

参考文献

[1] 刘孟龙, 欧红香, 冉锰柠, 等. 有机改性凹凸棒土协同膨胀型阻燃剂增强低密度聚乙烯的阻燃性能和抑烟性能[J]. 功能材料, 2025, 56(6): 6195-6204.

[2] 吴真钟. 有机-无机纳米杂化物的构筑及协同EG在低密度聚乙烯中的阻燃研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2023.

[3] 陈广升. 建筑领域阻燃高分子材料的应用进展[J]. 合成材料老化与应用, 2025, 54(6): 60-62.

[4] 申朋龙, 倪爱清, 王继辉, 等. 膨胀阻燃高密度聚乙烯抗紫外老化改性[J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(8): 110-117.

[5] 陶伟民. 简述膨胀型阻燃剂的研究现状[J]. 广东科技, 2013, 22(2): 184-185.

[6] WANG Y D, ZHANG Y G, MA L, et al. Layered charring agent with super strong carbonization for IFR system: Achieving highly efficient flame retardancy of PLA by ultra-low addition IFR[J]. Sustainable Materials and Technologies, 2024, 40: e00924.

[7] CHEN H D, WANG J H, NI A Q, et al. Effect of novel intumescent flame retardant on mechanical and flame retardant properties of continuous glass fibre reinforced polypropylene composites[J]. Composite Structures, 2018, 203: 894-902.

[8] SAIKAM L, ARTHI P, SENTHIL B, et al. A review on exfoliated graphite: Synthesis and applications[J]. Inorganic Chemistry Communications, 2023, 152: 110685.

[9] 李奉隆, 王建立, 宋为聪. 超细及高白氢氧化铝阻燃剂在建材行业的应用[J]. 铝镁通讯, 2020, 000(2): 1-5.

[10] LEE S H, LEE S G, LEE J S, et al. Understanding the flame retardant mechanism of intumescent flame retardant on improving the fire safety of rigid polyurethane foam[J]. Polymers, 2022, 14(22): 4904.

[11] YANG X R, DU G X, SHUAI H, et al. Study on the mechanical and thermal properties of waterborne polyurethane-modified aluminum hydroxide and its application in LDPE plastics[J]. Polymers, 2025, 17(5): 556.

[12] MARSET D, FAGES E, GONGA E, et al. Development and characterization of high environmentally friendly composites of bio-based polyamide 1010 with enhanced fire retardancy properties by expandable graphite[J]. Polymers, 2022, 14(9): 1843.

[13] MA L Y, SONG Q F, DONG F, et al. Effect of organic-inorganic mixed intumescent flame retardants on fire-retardant coatings[J]. Coatings, 2024, 14(8): 1034.

[14] MOMBEKI PEA H J, AN Z J, DU X Z, et al. Epoxy resin/aluminium hydroxide/expanded graphite synergistic effects on advancing flame retardancy, mechanical structure and thermal management of octadecanoic acid and octadecanol-based eutectic phase change materials[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 490: 151558.

[15] BASHIR M A. Use of dynamic mechanical analysis (DMA) for characterizing interfacial interactions in filled polymers[J]. Solids, 2021, 2(1): 108-120.

[16] AIN Q U, WANI M F, SEHGAL R, et al. Mechanical and viscoelastic characterization of Al_2O_3 based polymer nanocomposites: An experimental and molecular dynamics simulation approach[J]. Computational Materials Science, 2024, 239: 112955.

[17] ZUNINO M O H, PEREIRA I M, DIAS R R, et al. Graphene nanoplatelets on multi-scale polymer composites for potential ballistic shielding[J]. Materials Research, 2023, 26: e20220062.

[18] AJAYI N E, RUSNAKOVA S, AJAYI A E, et al. A comprehensive review of natural fiber reinforced polymer composites as emerging materials for sustainable applications[J]. Applied Materials Today, 2025, 43: 102666.

[19] 李欣月, 徐永田, 朱义新, 等. 膨胀型阻燃剂-ABS复合材料制备及性能[J]. 塑料工业, 2019, 47(11): 10-14.

[20] WANG L Y, WANG C, LIU P W, et al. The flame resistance properties of expandable polystyrene foams coated with a cheap and effective barrier layer[J]. Construction and Building Materials, 2018, 176: 403-414.

[21] ZHOU L, XU Z C, XU W J, et al. Novel preparation method and fire performance study of EPS composites based on calcium sulphate hemihydrate[J]. Fire Safety Journal, 2023, 141: 103976.

[22] GUO Q L. Preparation and sound insulation performance of polystyrene building flame retardant and thermal insulation building materials[J]. International Journal of Analytical Chemistry, 2022, 2022: 6444367.

[23] HUANG J, ZHAO Z Q, CHEN T, et al. Preparation of highly dispersed expandable graphite/polystyrene composite foam via suspension polymerization with enhanced fire retardation[J]. Carbon, 2019, 146: 503-512.

[24] HEJNA A. Expandable graphite as intumescent flame retardant for polyurethane foams: Mini review and application guidelines[J]. Environmental Chemistry and Safety, 2025, 1(1): 9600003.

[25] TOMIAK F, SCHOEFFEL A, RATHBERGER K, et al. Expandable graphite, aluminum diethylphospinate and melamine polyphosphate as flame retarding system in glass fiber-reinforced PA6[J]. Polymers, 2022, 14(6): 1263.

[26] TOMIAK F, RATHBERGER K, SCHÖFFEL A, et al. Expandable graphite for flame retardant PA6 applications[J]. Polymers, 2021, 13(16): 2733.

[27] ILYAS R A, SAPUAN S M, ASYRAF M R M, et al. Polymer composites filled with metal derivatives: A review of flame retardants [J]. Polymers, 2021, 13(11): 1701.

[28] LI J W, ZHAO H H, LIU H Y, et al. Recent advances in metal-family flame retardants: A review[J]. RSC Advances, 2023, 13(33): 22639-22662.

[29] 邢凤钦. 基于酚醛/硼酚醛硬质聚氨酯泡沫涂层的制备及其阻燃性能研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2023.

[30] 刘宏霞, 李军星. 有机硅改性聚磷酸铵制备聚氨酯复合材料及其力学性能和阻燃性能研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(11): 59-63.

[31] WANG X T, TU H Y, XIAO H F, et al. A novel halogen-free flame-retardant fabrication for the study of smoke suppression and flame retardancy of polystyrene[J]. Polymer, 2023, 283: 126240.

[32] SHI T, ZHANG S D, SHI X X. Oxidized regenerated celluloses to fabricate high fire safety for epoxy resin with super expansion char layer[J]. Cellulose, 2021, 28(5): 2995-3015.

[33] 胡桂林, 赵泽永, 颜渊巍, 等. 不同阻燃剂对天然橡胶胶料阻燃性能和物理性能的影响[J]. 橡胶工业, 2025, 72(12): 923-927.

[34] ZHU K, YANG Y P, LIN C H, et al. Effect of compounded aluminum hydroxide flame retardants on the flammability and smoke suppression performance of asphalt binders[J]. ACS Omega, 2024, 9(2): 2803-2814.

[35] YEOH G H, DE CACHINHO CORDEIRO I M, WANG W, et al. Carbon-based flame retardants for polymers: A bottom-up review[J]. Advanced Materials, 2024, 36(42): 2403835.