

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.12.031

多功能特性的聚氨酯泡沫材料研究进展

向军淮^{1,2}, 安佳琪^{1,2}, 胡梦婷³, 艾建平^{1,2}, 胡敏⁴, 邓释禅^{1,2}(1. 江西科技师范大学材料与能源学院, 南昌 330038; 2. 江西科技师范大学材料表面工程江西省重点实验室, 南昌 330038;
3. 运达能源科技集团股份有限公司, 杭州 311199; 4. 江西科技师范大学智能制造学院, 南昌 330038)

摘要: 轻质与高强相矛盾以及高可燃性严重限制了聚氨酯泡沫材料的广泛应用。为解决上述问题提供参考, 本文简要介绍了聚氨酯泡沫材料的合成方法, 并较为全面地综述了轻质高强型、吸声和阻燃型聚氨酯泡沫材料的制备策略, 梳理了近年来添加型、反应型和表面处理型阻燃技术对聚氨酯泡沫阻燃性能提升的研究进展。最后, 结合当前研究热点, 提出了构建轻质高强、吸声和低黏度阻燃多功能、经济高效和绿色环保的聚氨酯泡沫材料体系的发展方向。

关键词: 聚氨酯泡沫; 轻质高强; 阻燃性能; 协同效应; 研究进展

中图分类号: TQ323.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)12-0234-07

Research progress of polyurethane foam with multifunctional characterization

XIANG Junhuai^{1,2}, AN Jiaqi^{1,2}, HU Mengting³, AI Jianping^{1,2}, HU Min⁴, DENG Shichan^{1,2}(1. School of Materials and Energy, Jiangxi Science & Technology Normal University, Nanchang 330038, China;
2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Surface Engineering, Jiangxi Science & Technology Normal University, Nanchang 330038, China;
3. Yunda Energy Technology Group Co., Ltd., Hangzhou 311199, China;
4. School of Intelligent Manufacturing, Jiangxi Science & Technology Normal University, Nanchang 330038, China)

Abstract : The contradiction between lightweight and high-strength, as well as high flammability, significantly restricts the wide application of polyurethane foams. In order to provide reference for the solution of the above problems, the synthesis methods of polyurethane foams were simply introduced. A comprehensive review of fabrication strategies for polyurethane foams with integrated properties of lightness, high strength, sound absorption, and flame retardancy was presented. And the recent development of three kinds of flame retardant technologies were summarized, including additive, reactive and surface treated flame retardant technology. Finally, combined with the current research hotspots, the development direction of building a lightweight, high-strength, sound-absorbing and low-viscosity flame retardant multi-functional, economical, efficient and environmentally friendly polyurethane foam material system was proposed.

Keywords : polyurethane foam ; lightweight and high-strength ; flame retardancy ; synergistic effect ; research progress

聚氨酯的分子结构由多异氰酸酯、多元醚或多元醇、小分子扩链剂缩聚而成^[1-2]; 聚氨酯结构中含有软段和硬段两种组分, 异氰酸酯和扩链剂反应形成硬段结构, 低聚物多元醇作为软段结构, 硬段和软段之间存在溶解性差异导致热力学不相容, 会出现微相分离的现象。其中, 硬质聚氨酯泡沫(RPUF)具有一定的强度, 负载作用下一般不会产生明显形变, 若负载过大容易产生不可恢复的变形; 与闭孔硬质聚氨酯泡沫相比, 软质聚氨酯泡沫(FPUF)因拥有高回弹的柔性特

质、独特的开孔结构及特定化学组成, 导致其阻燃难度显著增加^[3]。据统计, 2025年聚氨酯的市场份额将达到175.6亿美元, 近年来聚氨酯泡沫材料得到快速发展^[4]。笔者综述了聚氨酯泡沫材料的合成方法, 轻质高强型聚氨酯泡沫材料、吸声的聚氨酯泡沫材料和阻燃性聚氨酯泡沫研究现状, 并展望了多功能特性的聚氨酯泡沫材料应用。

1 聚氨酯泡沫材料的合成方法

聚氨酯泡沫的合成方法, 从工艺步骤来讲可以细分为

基金项目: 江西省自然科学基金项目(20252BAC240392), 材料表面工程江西省重点实验室平台基金项目(2024SSY05071)

通信作者: 胡敏, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为新材料制备与智能制造

收稿日期: 2025-11-15

引用格式: 向军淮, 安佳琪, 胡梦婷, 等. 多功能特性的聚氨酯泡沫材料研究进展[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(12): 234-240.

XIANG Junhuai, AN Jiaqi, HU Mengting, et al. Research progress of polyurethane foam with multifunctional characterization[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(12): 234-240.

“一步法”和“预聚体法”。另外,合成聚氨酯泡沫的性质受到原料配方、添加剂种类和含量以及温度环境等因素的影响,合理控制工艺参数和调控发泡机制是获得高性能聚氨酯泡沫材料的关键。

聚氨酯泡沫合成时,发泡反应与凝胶反应并存,具体包含3类关键反应:一是异氰酸酯基团(—NCO)与羟基(—OH)反应生成聚氨酯链,伴随放热现象;二是多异氰酸酯先与水反应生成氨基甲酸,其分解产物为胺基与二氧化碳,胺基继续与异氰酸盐反应,形成链式生长与泡沫生成结合的过程;三是氨基甲酸酯基团与异氰酸酯作用,生成具有脲基结构的化合物。综合上述内容,从合成机理来看,可知聚氨酯泡沫材料合成包括链增长反应、发泡反应和交联反应三种类型。杜宗澳等^[5]以甲苯二异氰酸酯(TDI)、聚四氢呋喃二醇(PTMEG)、自制混合扩链剂和填充油为原料,采用预聚体法制备的聚氨酯弹性体,其储能模量与硬度随扩链剂用量的增加而逐渐上升。幸锦福等^[6]采用化学发泡二次开模方法创新性地制备出热塑性聚氨酯微发泡材料,结果表明高的注射速度和压力有利于提高孔的形核密度和孔结构的均匀性。进一步,通过孔隙结构的设计可以赋予聚氨酯弹性体更优异的综合性能。陈弋舲等^[7]采用一次升温发泡与二次卸压发泡制备出具有梯度泡孔结构的高倍率聚氨酯发泡材料,与均匀发泡材料相比,梯度发泡材料展现出高发泡倍率下优异的缓冲性能和回弹性。

为了实现聚氨酯生产工业的可持续发展,研究人员寻求使用绿色可再生的生物质资源合成聚氨酯材料。通常会将这些生物质资源进行改性合成具有功能特性的生物基聚氨酯材料,洪韵等^[8]以丝素蛋白中特征性重复肽段为扩链剂制备出改性的聚氨酯含多肽扩链剂的聚氨酯具有良好的回收性、热稳定性和生理条件水解稳定性,具备在生物医学工程等多领域应用的潜力。

2 轻质高强的聚氨酯泡沫材料

聚氨酯被誉为“第五大塑料”,运用在建筑保温、航空航天和电子元件灌封领域时,需要具有轻质高强的特征,要求能够承受一定的机械损伤。目前,围绕着提升聚氨酯泡沫塑料的力学性能,主要方法包括聚合物网络增强、粒子增强、纤维增强、孔隙结构调控和混合增强等。

根据经典的Flory-Huggins相分离理论,可知嵌段共聚物的长度将会显著影响微相分离,史家昕等^[9]采用具有氢键阵列结构的酰肼扩链剂制备出含不同序列长度的3种聚氨酯材料,结果显示具有较长序列的聚己内酯-己二酸二酰肼-3(PCL-AD-3)可以强化微相分离和调控氢键的分级响应,实现聚合物内部交联结构优化,从而全方位提升聚氨酯材料的拉伸强度、韧性和抗松弛性能。在聚氨酯泡沫材料的结构控制方面,优化 $\text{—NCO}/\text{—OH}$ 的指数能够调节材料的硬度、脆性和热稳定性。周慧峰等^[10]通过引入4,4'-二苯基甲烷二异氰酸酯(MDI)以强化与聚醚多元醇的交联,构建均匀硬段-软段协同结构,大幅提升材料的抗压强度、拉伸强度及硬度。

有学者采用“烯-硫醇”点击化学反应制备出具有三维有机-无机网络结构的硬质聚氨酯泡沫材料,有效改善组分间的相容性和气泡稳定性,赋予泡沫材料更加细腻均匀的孔隙分布与优异的压缩强度^[11]。刘世盟等^[12]和严红革等^[13]通过聚多巴胺或苯基异氰酸酯改性石墨烯,将其用于聚氨酯材料改性,实现石墨烯在基体中充分分散,大幅提升材料的拉伸强度与断裂伸长率。罗志^[14]对纳米 SiO_2 进行改性,得到可均匀分散的球形 SiO_2 ,添加质量分数3%球形 SiO_2 后的聚氨酯制品综合力学性能得到提升。短切纤维由于比较容易分散,增强效果显著,常被用来作为聚氨酯泡沫的增强剂,冯阳宁等^[15]使用硅烷偶联剂KH560修饰的芳纶纤维改性聚氨酯泡沫,当改性芳纶纤维添加质量分数为1%时,复合材料拉伸强度提高140%。Andersons等^[16]使用微晶纤维素强化硬质聚氨酯泡沫材料,可以使泡沫材料的拉伸弹性模量提高45%,拉伸强度提高17%,且泡沫孔结构保持不变。陈海霞等^[17]使用混合增强的策略开发出保温型、多功能特征的聚氨酯/氢氧化镁复合材料,氢氧化镁添加质量分数达到30%时,复合材料兼具优异的力学性能和阻燃特性,UL 94燃烧等级从V-2提高至V-0。白静静等^[18]以碳点(CDs)水热合成产物为发泡剂,利用CDs与聚氨酯泡沫之间的化学键结合作用,扰乱大分子链的有序排列,加快凝胶反应过程,制备出开孔率低、孔径分布均匀、泡孔结构完整的CDs/聚氨酯泡沫复合材料,压缩强度提高113%。王帅等^[19]利用调配生物基多元醇提高聚氨酯泡沫材料的压缩强度,结果表明在低压压缩应变环境下压缩应力-应变曲线呈现线性变化,在压缩应变继续增大时,泡孔壁发生弹性弯曲和脆性破裂,出现连续变形平台。Zhang等^[20]发现用壳源性多元醇制备的聚氨酯泡沫具有更加均匀的泡孔尺寸,展示出优异的压缩强度。

综上所述可知,具有紧密细小的泡沫结构和三维有机-无机网络结构,能够有效吸收和分散应力,为聚氨酯泡沫提供骨架支撑,可有效提升材料的强度。为了拓展聚氨酯泡沫材料的应用场景和满足苛刻环境下的应用要求,轻质高强的聚氨酯泡沫材料一直都是产业界的追求目标。当前,针对不同类型的聚氨酯泡沫力学性能提升策略较多,如何选择经济、高效且利于产业化生产的方案是进一步推动聚氨酯泡沫更广泛在经济社会发挥作用的关键。

3 吸声的聚氨酯泡沫材料

聚氨酯泡沫材料因具有一定的柔性、独特的软硬段结构,使其具有较好的声学阻尼特性,能够吸声降噪。往往具有与大气连通的开孔结构的聚氨酯泡沫的吸声减振作用更加明显。传统的吸声材料仅对中高频范围的声波有效,对于小于500 Hz的低频声波吸收较差,其中影响聚氨酯泡沫材料吸声性能的因素包括孔结构、材料流阻和孔道曲折度等。熊康等^[21]利用圆管理论模型评价低污染聚氨酯泡沫结构参数与吸声性能之间关系,验证了泡沫孔隙率和厚度是影响吸声性能的主要因素。国内学者采用一步全水发泡法制备出各向同性和各向异性的磁性聚氨酯泡沫^[22],在64~1600 Hz范

围内材料的平均吸声系数高达 0.55~0.60。近年来,天然纤维因其可再生环保特性,作为吸声聚氨酯泡沫材料被广泛应用^[23]。针对聚氨酯泡沫吸声性能的优化,李婷婷等^[24]利用热压发泡法引入竹粉、木粉纤维,发现质量分数 0.5% 的竹粉可使材料低频吸声性能达到最优;Choe 等^[25]则通过掺入化学处理的木纤维,达成了对聚氨酯泡沫复合材料吸声性能的提升。综上所述可知,引入适当的添加物可以提升聚氨酯泡沫的开孔率降低材料流阻,增加声波的传输路径,有利于材料的吸声性能提升。Seung 等^[26]引入丙烯酸颗粒增强水性聚氨酯对声波的阻尼和摩擦,在加入质量分数 2% 时,复合材料的泡沫孔径较小、孔隙率最高,在 3 200 Hz 处的吸声系数达到 0.89。Jac 等^[27]系统探究了柔性聚氨酯泡沫材料的吸声性能与泡孔结构之间的关系,证实大量的小泡沫会导致声波沿不规则的途径传播,增大声波传输的损耗,显著提高吸声效率。

除了从聚氨酯泡沫材料本体出发,引入各种类型添加剂或者调控孔隙结构,增加对声波能量损耗,改善聚氨酯泡沫声学阻尼特性外,还采用表面改性策略优化材料的吸声性能。如王金灿等^[28]采用涂层方法制备出聚氨酯基多孔吸声泡沫涂层织物,伴随涂层孔隙率和开孔率增加,表层织物的吸声性能提高。Lee 等^[29]提出了一种多层氧化石墨浸渍聚氨酯泡沫结构,优化之后的复合材料在 500 Hz 以上的平均最大吸声系数提高至 0.9。因此,优化聚氨酯泡沫材料的吸声性能,可以通过引入不同类型的添加剂调控本体孔隙结构、孔道的曲折度;也可以从表层出发,增加声波的吸收和损耗,提升材料的吸声性能。

4 阻燃型聚氨酯泡沫材料

聚氨酯泡沫材料因分子链中含大量易燃碳氢链段而具有可燃性,同时其多孔结构增大了材料表面积与空气的接触范围,燃烧时会产生大量有毒烟雾,对生命安全构成严重威胁^[30]。为提升聚氨酯泡沫的应用安全性,系统开展其阻燃性能研究尤为关键。阻燃的核心在于借助阻燃剂的添加,增强泡沫材料的稳定性,减少燃烧热释放速率及烟气排放量,进而降低燃烧速率或实现自熄,以延缓火灾的蔓延。当前主流的阻燃手段包括添加型阻燃技术、反应型阻燃技术和表面处理阻燃技术,笔者梳理了近年来聚氨酯泡沫在阻燃性能的应用研究及其机理^[31]。

4.1 添加型阻燃改性

添加型阻燃改性过程主要是将合成聚氨酯泡沫的原料与阻燃添加剂相互混合,阻燃剂在发泡、固化过程中分散于

泡沫塑料表面或者埋入泡沫塑料内部从而实现阻燃的目的^[32-33]。当前工业应用中常见的添加型阻燃剂包括有机、无机和无机-有机复配阻燃剂。例如,无机型阻燃剂氢氧化铝、氢氧化镁在受热的过程中不仅可以吸收热量,还会分解生成水蒸气稀释材料表面的可燃性气体和氧气^[34-35]。尿素、可膨胀石墨和三氧化二锑也是被广泛使用的阻燃增效剂^[36-37],但是单纯的无机阻燃剂与聚氨酯发泡体系的界面相容性较差,阻燃效率与力学性能平衡难题突出,复配阻燃剂成为研究的重点之一。宋聪聪^[38]采用一步法制备出乙基磷酸二甲酯(DEEP)与尿素(UC)复配阻燃剂改性的硬质聚氨酯泡沫,DEEP 与 UC 质量比为 10:30 时,复合材料的点燃时间、燃烧释放速率和烟释放速率指标最小,阻燃效果最佳。部分含磷的无机阻燃剂红磷、金属次磷酸盐、聚磷酸铵(APP)等可以生成猝灭燃烧的 $\text{PO}\cdot$ 自由基,抑制燃烧进行;磷元素氧化后生成的磷酸可以促进聚合物基体炭化,抑制可燃挥发物的释放和传热作用^[39]。APP 与磷酸盐经热分解可生成聚偏磷酸等酸性物质,这些物质既能促进聚氨酯材料炭化,又会释放出 NH_3 、水蒸气等不可燃气体,从而稀释可燃气体的浓度^[40]。有机磷系阻燃剂涵盖磷酸酯、有机磷盐及磷杂环化物等类型,可通过物理共混法添加至基体中^[41]。以磷酸三(2-氯丙基)酯(TCPP)与磷酸三(1,3-二氯丙基)酯为例,二者作为典型有机磷阻燃剂,当添加质量分数为 20% 时,可将硬质聚氨酯泡沫的极限氧指数(LOI)提升至 28.5%。此类阻燃剂在燃烧时释放 $\text{PO}\cdot$ 和 $\text{PO}_2\cdot$ 自由基,能有效捕获气相中的可燃性自由基,从而实现阻燃^[42]。

表 1 展示了 6 种不同含磷阻燃剂聚氨酯的综合性能对比^[43]。Li 等^[44]以苯酚、甲醛和二苯醚为原料合成出一种新型的无卤无磷阻燃泡沫,添加少量的硅溶胶作为阻燃功能成分,使得材料的 LOI 提升至 28.5%,赋予该材料高成炭率、高抗压强度等优点。综上所述,可知添加型阻燃改性具有操作简便、成本经济和原理简单的优点,在结构和调控组元上有更多的选择^[45]。虽研究已获显著进展,然而部分复配阻燃剂协同增效的定量构效关系仍不明确,需借助表面功能化修饰改善无机相分散性,同时发展多尺度阻燃技术,对复合材料体系服役周期内的环境毒性展开系统评估。

4.2 反应型阻燃改性

降低聚氨酯泡沫可燃性的另一途径,是将阻燃结构基团通过化学键合引入高分子链段,形成含特殊官能团的化合物,从而显著提升聚氨酯结构的阻燃能力。反应型阻燃剂将

表 1 6 种含磷阻燃剂聚氨酯的综合性能对比^[43]

Tab. 1 Comparison of the optimal comprehensive performance of polyurethane including six phosphorus-based flame retardants^[43]

Flame retardant	Addition level/%	Tensile strength/MPa	Impact strength/(kJ·m ⁻²)	LOI/%
Red phosphorus	20	3.5	6.25	28.6
Microencapsulated red phosphorus	20	3.9	7.5	29.2
Ammonium polyphosphate	25	3.3	5.4	27.9
Surface-treated ammonium polyphosphate	25	4.2	7.8	28.7
Phosphorus-containing intumescent flame retardant	25	5.3	8.7	29.5
Melamine pyrophosphate	25	3.8	6.7	28.1

阻燃元素与活泼官能团(如异氰酸酯、羟基)结合,参与单体聚合与发泡反应,嵌入聚氨酯泡沫分子链中,赋予其持久阻燃性,同时有效解决了添加型阻燃剂易迁移、析出的问题,实现阻燃元素与基体的均匀分布。

依据阻燃剂的化学特性,目前反应型阻燃剂可划分为有机型及有机-无机复合型两类^[46]。聚氨酯泡沫材料合成的关键单体为异氰酸酯与多元醇类化合物,众多研究者已分别针对二者开展阻燃改性研究,改性原则是在维持原有单体反应特性与力学性能的基础上,通过分子结构设计赋予材料本征阻燃性,以满足行业防火安全标准^[47]。例如,Ding等^[48]将绿色环保的阻燃剂2-[[双(2-羟乙基)氨基]甲基]-5,5-二甲基-1,3,2-二氧杂磷2-氧(HAMPP)与异氰酸酯反应,将阻燃单元嵌入到聚氨酯网络结构中,结果表明引入质量分数10% HAMPP的聚氨酯泡沫材料的LOI从19%上升至23.7%;材料在燃烧过程中HAMPP可以转化成具有一层均匀黏性的保护层,利用凝聚相和气相机制达到阻燃效果。Wang等^[49]采用*N,N*-二乙醇氨基磷酸二乙酯与异氰酸酯反应,使阻燃单元均匀嵌入聚氨酯链段,既拓宽了材料热分解温度范围,又促进高温炭层的形成以减少可燃挥发物生成。该化学改性方法规避了传统物理共混界面不相容的问题,可同步提升材料的阻燃与力学性能。虽然异氰酸酯阻燃改性具有诸多优势,但原位功能化反应需经多步合成,致使制造成本上升;其次,异氰酸酯指数调控具有阈值效应,一NCO/OH>2.5时泡孔结构易劣化,制约材料阻燃性能提升。另一种有效策略是将阻燃单元引入多元醇分子链,制得反应型阻燃多元醇,再与异氰酸酯反应生成阻燃聚氨酯泡沫材料。He等^[50]合成了一种受阻胺含磷多元醇(DTAP),该物质能与氨基甲酸乙酯形成多重氢键,在较宽温度范围内有效捕获自由基。引入质量分数5.1%的DTAP后,材料的垂直燃烧性能达标,且拉伸强度与断裂伸长率显著提升。Cao等^[51]将含磷二醇与聚磷酸铵结合,制得磷杂化二氧化硅气凝胶(P-SiA)。其多元羟基结构增强了与聚氨酯泡沫的相容性,引入后复合材料的抗压强度提升约46.4%,LOI值增至23.2%,有效降低了复合材料的热释放速率与烟雾释放速率。Tang等^[52]以大豆油为原料制得磷酸化大豆油基多元醇(PESO),进而合成植物油基RPUF。结果显示,PESO的引入使复合材料高温区产炭量上升,阻燃性能提升。Zeng等^[53]研发了一种含磷多尺度能量耗散网络的韧性聚氨酯泡沫,借助含磷阻燃分子的极性与反应性,于发泡时原位构建互穿能量耗散网络。此方法避免了传统交联网络或刚性填料导致的脆性,羟甲基二苯基氧化膦作为含磷物质,赋予材料更强自由基清除能力,低添加量即可使材料快速自熄,为平衡材料阻燃、力学性能及强度与韧性提供了新策略。

运用化学键合策略改性多元醇阻燃性,引入阻燃元素或单元,可实现聚氨酯泡沫阻燃性能本征化。其阻燃机制包括凝相成炭与气相自由基淬灭,能减少元素迁移、提升阻燃性能。但该技术存在工艺适配难题,因阻燃多元醇黏度大易致

发泡不均。未来研究应聚焦低黏度阻燃—增强双功能体系开发,推动阻燃聚氨酯泡沫高性能、绿色化发展。

4.3 表面处理型阻燃改性

随着阻燃技术的不断发展,引入阻燃物质带来的不利因素已经被大幅度抑制,但是添加剂与聚合物基体之间的相容性、力学性能劣化等问题仍然存在。为了最大限度提升聚氨酯泡沫材料的整体性能,研究人员提出了将阻燃添加剂涂覆到聚氨酯材料表面,实现阻燃改性。表面处理阻燃技术对高比表面积的泡沫材料具有十分显著的阻燃效果,阻燃功能组分可以最大程度涂覆在泡沫材料的三维框架内外表面,发挥高效的阻燃防火作用^[54]。聚氨酯泡沫表面阻燃技术一般采用层-层组装技术来制备,主要方法包括涂层和浸渍等^[55]。Kim等^[56]利用层-层组装技术,在聚氨酯泡沫表面全覆盖碳纳米纤维涂层,大幅提升其阻燃性。该技术还可制备含不同组分的多层薄膜,如Cain等^[57]制得成分独立的钠基蒙脱土、聚丙烯酸盐和聚磷酸钠三层纳米涂层,完全抑制了开孔软质聚氨酯泡沫的熔滴现象。Tsuyumoto等^[58]运用真空与加压浸渍技术,以聚硼酸钠溶液处理聚氨酯泡沫,在泡沫表面沉积10 mm厚聚硼酸钠层后,材料展现出卓越的耐火阻燃性能。孟丹^[3]通过将聚电解质复合物聚乙烯亚胺(PEI)、聚磷酸铵(APP)和氧化石墨烯纳米片三者结合,在软质聚氨酯泡沫表面构筑出了高效环保和耐疲劳涂层,经过涂层防护处理之后的材料总热释放量降低了23.2%,烟密度峰值降低33.3%,泡沫材料的阻燃抑烟性能显著提升。Laufer等^[59]利用天然生物质材料壳聚糖与蒙脱土对聚氨酯泡沫表面涂覆处理10层厚,显著降低材料热释放速率峰值。与其他改性聚氨酯泡沫阻燃性能技术相比,表面阻燃技术可以在显著降低阻燃组分浓度的情况下明显改善聚氨酯泡沫材料的阻燃性能。尽管表面处理阻燃组元来源广泛,制备流程简易环保,阻燃效果明显,但是该技术存在制作工艺复杂费时,涂层耐水性能有待进一步提高。不同类型阻燃剂对发泡材料阻燃性能的影响情况见表2。

由于聚氨酯泡沫是一种可燃的有机物,相较于其轻质高强、吸声等特性来讲,改善聚氨酯泡沫的阻燃特性关注度更高且更契合人民生命健康与消防安全需要。本节中综述的3类改性聚氨酯阻燃特性的方法各有特点,见表3。

5 结语与展望

利用安全环保的生物质基原料合成轻质高强、吸声和阻燃等多功能的聚氨酯泡沫材料,正成为当前研究的重点方向之一。轻质高强的聚氨酯泡沫是拓展材料在不同领域和场景下应用的必然需求,围绕提升聚氨酯泡沫材料的综合力学性能,强化聚氨酯泡沫网络,引入添加物和纤维增强以及调控开孔率、孔道曲折程度是有效提升吸声性能的策略。同时,提高聚氨酯泡沫材料的使用安全性非常有必要,通过调控聚氨酯泡沫材料合成工艺,同步优化聚氨酯泡沫力学性能、吸声性能与阻燃效率,开发出多功能特性的聚氨酯泡沫体系是未来发展方向。聚氨酯泡沫材料的发展可以从以下

表 2 不同类型阻燃剂对发泡材料阻燃性能的影响

Tab. 2 Influence of different types of flame retardants on flame retardancy of foams

Flame retardant	Type	Thermal conductivity/ (mW·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Enhancing effect/%			LOI/%	References
			Peak heat release rate	Peak smoke production rate	Total smoke release		
Expandable graphite	Additive type		-65.0	-87.0		35.0	[60]
Al(OH) ₃	Additive type	48	-51.08	-57.1		30.1	[61]
Boric acid and phosphoric acid	Additive type	44.8	-43.6		-78.6	49.1	[62]
Lignin	Reactive type		-48.0	-53.2		33.3	[63]
Cellulose	Reactive type	27	-72.4	-68.5			[64]
Flame-retardant diol and dimethyl methylphosphonate	Reactive type		-82.0	-82.0	-38.0	29.5	[65]
Silicone oligomer	Coating type		-55.0	-59.0		32.3	[66]
Polyethylenimine and ammonium polyphosphate	Coating type		-35.7	-33.3	-23.2	25.7	[3]
Layered silicate	Coating type		-66.8		-59.3		[67]

表 3 不同阻燃改性方法的优势与劣势比较

Tab. 3 Comparison of advantages and disadvantages of different flame retardant modification methods

Flame retardancy methods		Advantages	Disadvantages
Additive flame retardant modification	There is a wide range of options and considerable flexibility in the selection and operation of flame retardant additives.		It faces a significant challenge in balancing flame retardancy efficiency with mechanical properties.
Reactive flame retardant modification	This approach effectively resolves the issue of migration and leaching commonly associated with additive flame retardants.		Flame-retardant polyols, with their high viscosity, often lead to uneven foaming, posing a major challenge for process compatibility.
Surface-treatment flame retardant modification	A low dosage can achieve highly efficient flame retardancy and fire resistance.		It is difficult to enhance the adhesion strength between the surface flame-retardant coating and the substrate. The operational process is complex, and the coating requires high waterproof performance.

几个方面具体推进。

(1)采用绿色可再生生物质原料合成高性能聚氨酯泡沫材料。通过绿色化学路径,设计低黏度、高活性且含阻燃单元的多元醇与异氰酸酯核心单体,优化官能团分布,提升反应组元结合力及发泡均匀性,实现泡孔精细调控,从而制得轻质高强聚氨酯泡沫材料。

(2)未来可借助纳米新技术进行接枝改性,优化阻燃填料表面化学性质,解决有机/无机杂化体系中阻燃剂界面相容性不佳的问题;或采用微胶囊技术包裹阻燃剂,实现其可控释放,以提升聚氨酯泡沫阻燃性能。同时,系统评估阻燃泡沫材料服役期间的性能变化及阻燃剂迁移、析出情况,确保材料在服役环境中保持良好阻燃效果与环境友好性。

(3)不同类型的阻燃体系复杂,对聚氨酯泡沫材料多个方面内容,包括原料配方、发泡与固化机理、合成方法和阻燃单元引入技术,需要进一步开展系统研究。可依据不同来源聚氨酯泡沫合成单体的化学结构特征,探究材料界面优化、阻燃组元微观结构设计及力学与阻燃性能评价等关键技术及原理。重点研究低黏度阻燃—增强多功能体系,开发高性能且低环境影响的多功能聚氨酯泡沫材料,满足建筑、交通、家电等领域多样化应用需求。

参考文献

[1] ZHANG Jingying, et al. Coatings, 2023, 13(9). DOI:10.3390/coatings13091619.

[2] 周鑫,等.高分子材料科学与工程,2022,38(6):15-21.

ZHOU Xin, et al. Polymer Materials Science and Engineering, 2022, 38(6):15-21.

[3] 孟丹.阻燃抑烟软质聚氨酯泡沫的构筑与机理研究[D].北京:北京化工大学,2024.

MENG Dan. The construction and mechanism study of flame retardancy and smoke suppression for flexible polyurethane foam[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2024.

[4] 戚昕禹,等.高分子材料科学与工程,2025,41(2):181-190.

QI Xinyu, et al. Polymer Materials Science and Engineering, 2025, 41(2):181-190.

[5] 杜宗澳,等.塑料科技,2025(1):109-114.

DU Zongao, et al. Plastics Science and Technology, 2025(1): 109-114.

[6] 幸锦福,等.塑料工业,2025,53(1):70-76.

XING Jinfu, et al. Plastics Industry, 2025, 53(1):70-76.

[7] 陈弋翀,等.化学学报,2025,76(2):897-908.

CHEN Yichong, et al. Acta Chimica Sinica, 2025, 76(2):897-908.

[8] 洪韵,等.应用化学,2024,41(10):1 425-1 435.

HONG Yun, et al. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2024, 41 (10):1 425-1 435.

[9] 史家昕,等.高分子学报,2025,56(9):1 537-1 545.

SHI Jiaxin, et al. Acta Polymerica Sinica, 2025, 56(9):1 537-1 545.

[10] 周慧峰,等.材料导报,2026,40(9):25040259.

ZHOU Huifeng, et al. Materials Review, 2026, 40(9):25040259.

[11] 陈晓,等.功能材料,2025,7(56):7 001-7 007.

CHEN Xiao, et al. Journal of Functional Materials, 2025, 7(56):

- 7 001-7 007.
- [12] 刘世盟,等. PDA/GO/PUF 聚氨酯泡沫的力学与隔热性能及其微观机理[J]. 材料导报, 2024, 38(22). DOI: 10.11896/cldb.23110080.
- LIU Shimeng, et al. Materials Review, 2024, 38(22). DOI: 10.11896/cldb.23110080.
- [13] 严红革,等. 湖南大学学报(自然科学版),2018,45(6):45-50.
- YAN Hongge, et al. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2018,45(6):45-50.
- [14] 罗志. 中国胶粘剂,2019,28(4):24-27,32.
- LUO Zhi. China Adhesives,2019,28(4):24-27,32.
- [15] 冯阳宁,等. 胶体与聚合物,2021,39(4):153-156.
- FENG Yangning, et al. Colloid and Polymer, 2021, 39(4): 153-156.
- [16] ANDERSONS J, et al. Materials, 2020, 13(12). DOI: 10.3390/ma13122725.
- [17] 陈海霞,等. 塑料科技,2024,52(5):104-106.
- CHEN Haixia, et al. Plastics Science and Technology,2024,52(5): 104-106.
- [18] 白静静,等. 化工新型材料,2024,52(7):63-68.
- BAI Jingjing, et al. New Chemical Materials,2024,52(7):63-68.
- [19] 王帅,等. 化工学报,2023,74(3):1 399-1 408.
- WANG Shuai, et al. CIESC Journal, 2023, 74(3):1 399-1 408.
- [20] ZHANG G, et al. Open-cell rigid polyurethane foams from peanut shell derived polyols prepared under different post-processing conditions[J]. Polymers, 2019, 11(9). DOI: 10.3390/polym11091392.
- [21] 熊康,等. 材料导报,2022,36(5). DOI:10.11896/cldb.20110059.
- XIONG Kang, et al. Materials Review, 2022, 36(5). DOI: 10.11896/cldb.20110059.
- [22] 李赵春,等. 功能材料,2019,12(50):12 196-12 201.
- LI Zhaochun, et al. Journal of Functional Materials, 2019, 12(50): 12 196-12 201.
- [23] 宁春平,等. 聚氨酯工业,2020,35(6):5-7.
- NING Chunping, et al. Polyurethane Industry,2020,35(6):5-7.
- [24] 李婷婷,等. 胶体与聚合物,2018,36(4):157-159.
- LI Tingting, et al. Chinese Journal of Colloid & Polymer,2018, 36(4):157-159.
- [25] CHOE H, et al. Composites Science and Technology, 2018, 156: 19-27.
- [26] SEUNG H B, et al. Composites Science & Technology, 2020, 198. DOI:10.1016/j.compscitech.2020.108325.
- [27] JAE G G, et al. Materials & Design,2016,89:448-454.
- [28] 王金灿,等. 染整技术,2024,46(10):14-20.
- WANG Jincan, et al. Textile Dyeing and Finishing Journal,2024,46 (10):14-20.
- [29] LEE J, et al. Applied Acoustics, 2023, 203. DOI: 10.1016/j.apacoust.2022.109194.
- [30] USTA N. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 124(4): 3 372-3 382.
- [31] 周子昂,等. 中国造纸,2024,43(12):31-39.
- ZHOU Ziang, et al. China Pulp & Paper,2024,43(12):31-39.
- [32] 蔡昌辰. 无卤阻燃聚氨酯的制备与性能研究[D]. 淄博:山东理工大学,2021.
- CAI Changchen. Preparation and properties of halogen-free flame retardant polyurethane[D]. Zibo:Shandong University of Technology,2021.
- [33] VELENCOSO M M, et al. Angewandte Chemie-International edition. 2018,57(33):10 450-10 467.
- [34] LI B, et al. Polym Degrad Stabil,2006,91(6):1 380-1 386.
- [35] 王圣程,等. 工程塑料应用,2018,46(11):11-15.
- WANG Shengcheng, et al. Engineering Plastics Application, 2018,46(11):11-15.
- [36] 穆佳凡,等. 塑料工业,2025,53(1):36-41.
- MU Jiafan, et al. Plastics Industry,2025,53(1):36-41.
- [37] 罗凤姿. 塑料工业,2015,43(10):81-86.
- LUO Fengzi. Plastics Industry,2015,43(10):81-86.
- [38] 宋聪聪. 塑料科技,2021,3:48-51.
- SONG Congcong. Plastics Science and Technology, 2021, 3: 48-51.
- [39] LIU B W, et al. Advanced Materials, 2022, 34(46). DOI:10.1002/adma.202107905.
- [40] 芦宇骁. 基于三嗪环的化合物合成及其阻燃性能的研究[D]. 上海:东华大学,2016.
- LU Yuxiao. Synthesis of triazine ring-based compounds and their flame retardant properties[D]. Shanghai: Donghua University, 2016.
- [41] 薛建英,等. 科学技术与工程,2020,20(30):12 507-12 511.
- XUE Jianying, et al. Science Technology and Engineering, 2020, 20(30):12 507-12 511.
- [42] 李林洁. 基于有机磷化合物多元复合阻燃聚氨酯硬泡的研究[D]. 北京:北京工商大学,2019.
- LI Linjie. Study on multi-composite flame retardant rigid polyurethane foam based on organophosphorus compounds[D]. Beijing: Beijing Technology and Business University,2019.
- [43] 洪晓东,等. 工程塑料应用,2013,41(8):95-99.
- HONG Xiaodong, et al. Engineering Plastics Application, 2013, 41(8):95-99.
- [44] LI T T, et al. ACS Omega,2021,23(6):15 246-15 256.
- [45] BAZAN P, et al. Flame retardant polypropylene reinforced with natural additives[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 164. DOI:10.1016/j.indcrop.2021.113356.
- [46] 张佳燕,等. 高分子学报,2022,53(7):842-855.
- ZHANG Jiayan, et al. Acta Polymerica Sinica, 2022, 53(7): 842-855.
- [47] 蔡锦尚,等. 工程塑料应用,2025,53(5):178-185.
- CAI Jinshang, et al. Engineering Plastics Application,2025,53(5): 178-185.
- [48] DING Y L, et al. ACS Omega,2021,6(25):16 410-16 418.
- [49] WANG X L, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2001, 82 (2):276-282.
- [50] HE L, et al. Materials Horizons,2024,11(18):4 462-4 471.

- [51] CAO J T, et al. Chemical Engineering Journal, 2024, 485. DOI: 10.1016/j.cej.2024.149909.
- [52] TANG G, et al. Polymer Degradation and Stability, 2021, 191. DOI:10.1016/j.polymdegradstab.2021.109701.
- [53] ZENG F R, et al. Chemical Engineering Journal, 2023, 454. DOI: 10.1016/j.cej.2022.140023.
- [54] LU S Y, et al. Progress in Polymer Science, 2002, 27(8):1 661–1 712.
- [55] LIANG S Y, et al. Progress in Organic Coatings, 2013, 76(11): 1 642–1 665.
- [56] KIM Y S, et al. Polymer, 2011, 52(13):2 847–2 855.
- [57] CAIN A A, et al. Polymer Degradation Stability, 2013, 98(12): 2 645–2 652.
- [58] TSUYUMOTO I, et al. 2011, 122(3):1 707–1 711.
- [59] LAUFER G, et al. ACS Applied Materials & Interfaces, 2012, 4 (3):1 643–1 649.
- [60] CHAN Y Y, et al. Polymer Degradation and Stability, 2021, 191. DOI:10.1016/j.polymdegradstab.2021.109656.
- [61] BASAK S, et al. Polymer Degradation and Stability, 2021, 189. DOI:10.1016/j.polymdegradstab.2021.109603.
- [62] CHEN X Y, et al. Construction and Building Materials, 2022, 315. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.125711.
- [63] SONG F, et al. Journal of Dispersion Science and Technology, 2021, 42(7):1 042–1 051.
- [64] WANG D, et al. Chemical Engineering Journal, 2019, 375. DOI: 10.1016/j.cej.2019.121933.
- [65] QIAN X, et al. Polymer Degradation and Stability, 2023, 213. DOI:10.1016/j.progpolymsci.2021.101366.
- [66] WANG S H, et al. Chemical Engineering Journal, 2020, 385. DOI: 10.1016/j.cej.2019.123755.
- [67] LIU X D, et al. Macromolecular Materials and Engineering, 2019, 304. DOI:10.1002/mame.201800531.