

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.10.027

聚氨酯声学复合材料研究进展

于天淼,曹梦馨,郝蕊,王楠,王樱媛,陈思雨,胡晨鸽,何燕珍

(咸阳师范学院化学与化工学院,陕西咸阳 712000)

摘要: 聚氨酯复合材料在工程声学降噪领域应用极为广泛。首先介绍了硬质聚氨酯泡沫和聚氨酯弹性体这两类基体材料的声学机理及应用场景。随后,从填料改性这一重要角度出发,对近年来纤维材料、粉末颗粒材料、片层状材料和中空材料这四类填料改性聚氨酯复合材料在声学性能方面的最新研究进展进行了全面综述。纤维材料可以利用纤维界面来增加声波在材料内部的反射次数,并延长声波的传播路径;粉末颗粒材料的加入改变了聚氨酯的物理和化学性质,利用颗粒界面增加声波反射,延长声波的传播路径;片层状材料可以通过增加聚合物分子链间的摩擦力、制造孔隙、改性孔隙结构以及调节聚合物的黏弹性来改善吸隔声性能;而空心材料的空腔结构能够通过声波反射和摩擦能量耗散来增强吸声和隔声效果。分析表明,聚氨酯复合材料在声学降噪领域占据着举足轻重的地位。然而,目前的研究大多集中在单一填料改性方面,对于多填料协同改性的研究相对较少,且声波传播模型尚不明确,有待学界进一步深入探索。

关键词: 聚氨酯;填料改性;复合材料;声学性能;降噪

中图分类号: TQ328.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)10-0217-06

Research progress on polyurethane acoustic composites

YU Tianmiao, CAO Mengxin, HAO Rui, WANG Nan, WANG Ying'ai, CHEN Siyu, HU Chenghe, HE Yanzhen

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Xianyang Normal University, Xianyang 712000, China)

Abstract : Polyurethane composites are extensively applied in the field of engineering acoustics for noise reduction. Firstly, the acoustic mechanisms and application scenarios of two types of matrix materials, including rigid polyurethane foam and polyurethane elastomer, were introduced. Subsequently, from the crucial perspective of modification of fillers, a comprehensive review was provided on the latest research progress in the acoustic properties of polyurethane composites modified by four categories of fillers in recent years, namely fibers, powder particles, lamellar materials, and hollow materials. Fibers can utilize fiber interfaces to increase the number of sound wave reflections within the material and extend the propagation path of sound waves. The incorporation of powder particles alters the physical and chemical properties of polyurethane, leveraging particle interfaces to enhance sound wave reflection and extend sound wave propagation paths. Lamellar materials can improve sound absorption and insulation performances by increasing friction between polymer molecular chains, creating pores, modifying pore structures, and adjusting the viscoelasticity of polymers. The cavity structure of hollow materials can enhance sound absorption and insulation effects through sound wave reflection and frictional energy dissipation. The analysis indicates that polyurethane composites hold a pivotal position in the field of acoustic noise reduction. However, most current research focuses on single-filler modification, with relatively limited studies on the collaborative modification of multiple fillers. Moreover, the sound wave propagation model remains unclear, warranting further in-depth exploration by the academic community.

Keywords : polyurethane ; filler modification ; composite ; acoustic property ; noise reduction

基金项目: 陕西省教育厅科学研究计划项目(24JK0707),陕西省自然科学基金研究计划项目(2025JC-YBQN-503),咸阳师范学院科研计划项目(XSYK23002,XSYK24029),咸阳师范学院大学生创新创业训练计划项目(xysfxy2025130),咸阳师范学院大学生创新创业基地项目(XSYC202459)

通信作者: 于天淼,博士,讲师,研究方向为高分子复合材料和声学功能材料

收稿日期: 2025-07-04

引用格式: 于天淼,曹梦馨,郝蕊,等. 聚氨酯声学复合材料研究进展[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(10): 217-222.

YU Tianmiao, CAO Mengxin, HAO Rui, et al. Research progress on polyurethane acoustic composites[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(10): 217-222.

随着当代社会的高速发展,城市化进程加快、工业规模扩张与交通网络密集化,噪声污染问题已演变为全球性环境危机,严重威胁人们的生产与生活^[1-2]。长期暴露于高分贝噪声环境中,不仅会引发听力损伤、耳鸣等生理疾病,还会导致焦虑、失眠、注意力分散等心理问题,显著降低生活质量。在工业领域,噪声污染的危害更为突出:机械振动与设备运转产生的强噪声会干扰工人对设备异常声响的判断,掩盖报警信号,增加操作失误风险,进而引发安全事故。此外,噪声还会加速设备疲劳损伤,缩短精密仪器使用寿命,导致生产效率下降与维护成本攀升。因此,于当今社会而言,噪声污染问题日益凸显,噪声治理是保障公共健康、提升工业安全、推动可持续发展的关键之一,高效降噪材料与技术的研发应用刻不容缓。

聚氨酯复合材料在声学降噪领域应用广泛^[3-4]。在建筑领域中,聚氨酯复合材料可用于楼板、墙体等,如聚氨酯减振隔声垫,能降低撞击声与空气传声;在航空领域,可用于飞机的发动机舱、机舱内饰和起落架吸声罩等多个部位;在汽车领域,可应用于发动机罩盖、包围及内部垫片等,减少发动机噪音与振动;在船舶领域,既可作为阻尼减震涂料涂覆船体吸收声波,又能制成夹层板结构用于船舶不同区域降低振动传递,还可与其他材料复合提升性能,降低船舶噪声。此外,它也适用于医院、实验室、录音棚等对振动和噪声敏感的场所。笔者首先介绍了用于声学领域的两种聚氨酯基体材料,然后综述了聚氨酯声学复合材料的填料改性研究进展情况,为该类材料的研发和应用提供参考。

1 用于声学领域的聚氨酯基体材料

聚氨酯是一种在声学降噪领域常用的高分子,它凭借自身独特的结构与性能,在该领域占据着举足轻重的地位。

从微观结构来看,聚氨酯泡沫展现出独特的内部构造,其内部广泛分布着大量呈相互连接或半连接状态的微孔结构。这些微孔的孔径尺寸处于微米量级,形成了复杂且不规则的三维孔隙网络。当声波传入聚氨酯材料时,孔隙内的空气作为传播介质开始振动。依据流体力学原理,空气在微孔中振动时,会与孔壁发生频繁且剧烈的相对运动,进而产生黏滞阻力。这种黏滞阻力会促使声波的机械能持续转化为空气分子的热运动能,使得声波的能量在传播过程中不断衰减,从而有效削弱了声波的传播强度与距离^[5-7]。此外,聚氨酯材料具有弹性,当受到声波振动时会随之轻微振动。振动过程中会产生内摩擦,而内摩擦做功会将声波的能量转化为材料内部分子的热能,从而进一步消耗声能,显著降低噪音水平。并且近年来,学界围绕聚氨酯声学材料展开了深入且广泛的研究,成功开发出众多以聚氨酯为基体,并使用各类填料进行改性的聚氨酯声学复合材料。这些填料种类丰富,涵盖纤维材料、粉末颗粒材料、片层状材料和中空材料等。在复合材料体系里,填料凭借其独特的物理化学性质,与聚氨酯基体产生协同作用,极大改善了聚氨酯的吸声和隔声性能。通过优化填料的种类、含量及分散状态,能使复合

材料在不同频段均展现出良好的降噪效果。正因如此,此类复合材料在建筑隔声、轨道交通降噪、航空航天舱内噪声控制以及国防军事装备隐身降噪等多个关键领域,都获得了极为广泛的应用^[8]。一般而言,在声学降噪领域,最常用的聚氨酯基体材料包括硬质聚氨酯泡沫和聚氨酯弹性体。

1.1 硬质聚氨酯泡沫

硬质聚氨酯泡沫是以聚醚或聚酯与多异氰酸酯为主要原料,再加阻燃剂、稳定剂和发泡剂等,经混合、搅拌产生化学反应而形成发泡体的一种泡沫材料。硬质聚氨酯的合成与制备主要有一步法、预聚体法、半预聚体法三种方法^[9-10]。

硬质聚氨酯泡沫作为一种典型的多孔材料,在声学降噪领域展现出了独特且优异的性能,这主要得益于其内部丰富且复杂的相互连通孔隙结构。从微观层面来看,这些孔隙大小不一、形状各异,相互交织形成了一个庞大的三维网络。当声波传入硬质聚氨酯泡沫时,孔隙壁发挥了关键作用,其不断反射声波,极大地增加了声波的反射次数,使得声波在材料内部的传递路径被大幅延长,能量在不断迂回的过程中逐渐损耗。在声波传播的动态过程中,空气分子受到声波的激发而剧烈振动,随后与泡沫内的孔壁和泡沫经络产生相对位移。这一过程蕴含着双重能量消耗机制:其一,空气流体有着独特的内部摩擦特性与黏性效应,当声波传播引发空气周期性压缩和松弛时,空气分子间频繁地相互摩擦、碰撞,这一过程持续消耗着声波的能量;其二,空气分子振动时,不仅分子自身内部存在摩擦,还会和周围材料表面产生剧烈摩擦,这种摩擦产生的热量,会通过传导、对流等多种方式,迅速散发到周围环境中。随着这些过程的不断进行,声能逐步转化为热能并消散,声波能量持续衰减,最终达成显著且有效的降噪目的^[11-12]。硬质聚氨酯泡沫在工程降噪上的应用领域主要包括建筑隔音、工业设备降噪、交通运输降噪等。

1.2 聚氨酯弹性体

聚氨酯弹性体通常是由低聚物多元醇(构成软段部分)与多异氰酸酯以及扩链剂(构成硬段部分)经逐步加成聚合反应形成的一种嵌段型高分子材料。从微观结构形态来看,其软段与硬段呈现出微相分离的状态,二者在热力学上并不相容^[13-18]。聚氨酯弹性体性能介于塑料和橡胶之间,兼具橡胶的高弹性和塑料的易加工性,应用领域广泛。

聚氨酯弹性体具有极为突出的黏弹性属性,这一独特性质使其在能量转化与耗散方面表现出色,具备吸收部分振动能量并将其转化为“热能”进而耗散的能力。当把聚氨酯弹性体用作吸声材料时,其阻尼作用原理主要围绕大分子链段的相对位移运动展开,即当声能作用于聚氨酯弹性体表面,材料内部会迅速发生从玻璃态向橡胶态的转变。在这一转变过程中,内部原本相对固定的大分子链段开始变得活跃,它们之间相互摩擦、碰撞。这种分子层面的剧烈相互作用,促使声能逐步转化为热能。随后,产生的热量通过热传导、热对流等方式,在材料内部及与周围环境的交互中耗散掉,从而有效降低了声波的能量,实现良好的吸声降噪效果^[19]。

目前,聚氨酯弹性体在声学领域的应用主要集中在隔音减振、浮筑楼板隔声、水声吸声材料等方面,具有良好的应用前景。

2 填料改性

近年来,在声学领域,针对硬质聚氨酯泡沫与聚氨酯弹性体的研究,聚焦于复合材料方向。科研人员常以硬质聚

氨酯泡沫或聚氨酯弹性体作为基体材料,在此基础上,添加各类填料进行改性。通过这种方式,有效调整材料的内部结构与性能,进而显著提高材料吸声或隔声能力,以满足不同场景下的声学需求。表1列出的是聚氨酯声学复合材料中常用的填料,包括纤维材料^[20-26]、粉末颗粒材料^[27-30]、片层状材料^[31-33]和中空材料^[34-36]。

表1 聚氨酯声学复合材料中常用的典型填料

Tab. 1 Typical fillers commonly used in polyurethane acoustic composite

Types of fillers	Some typical materials	A brief introduction to acoustic mechanisms
Fibers	Perlite fiber ^[20] , Plant fiber ^[21] , Glass fiber ^[22-25] , Carbon fiber ^[26]	Utilize the fiber interface to increase the number of reflections of acoustic waves inside the material and extend the propagation path of the acoustic waves.
Powder particles	Silicon dioxide ^[27] , Magnesium hydroxide ^[28] , Carbon black ^[29] , Iron powder ^[30]	Modify the physicochemical properties of polyurethane, and utilize particle interfaces to increase acoustic wave reflection and extend the propagation path of acoustic waves.
Lamellar materials	Montmorillonite ^[31] , Mica ^[32] , Graphene ^[33]	Improve acoustic performance by increasing the friction of polymer molecular chains, creating pores, modifying the pore structure, and adjusting the viscoelasticity of the polymer.
Hollow materials	Metallic hollow sphere ^[34] , Hollow glass microsphere ^[35] , Carbon nanotube ^[36]	The cavity structure of hollow materials can enhance sound absorption and insulation effects through acoustic wave reflection and frictional energy dissipation.

2.1 纤维材料改性

与聚氨酯树脂相比,纤维类材料通常表现出更大的声阻抗特性。这主要是由于纤维材料的密度比聚氨酯高,并且纤维材料内的声波传播速度更快。当声波从声阻抗较低的聚氨酯树脂传播到声阻抗较高的纤维外表面时,会发生显著的反射效应,从而延长声波传播路径。此外,纤维还可以显著地增强聚氨酯的力学性能,譬如强度和韧性。基于这些独特的优势,近年来,学术界对纤维改性聚氨酯声学复合材料进行了许多研究。

曹书豪等^[37]首先通过干混和热熔胶黏结的办法将聚丙烯纤维制备成纤维毡,然后再将聚丙烯纤维层与聚氨酯泡沫复合成一种双层结构材料,研究表明当声音从聚丙烯纤维毡一侧入射时,复合材料的吸声系数可达0.86 (480 Hz),具有良好的低频吸声效果。翟彤等^[38]以聚(氨酯-酰亚胺)树脂为基体,纳米碳纤维为填料,通过预分散和一步发泡法制备了复合材料,相比于未加入纳米碳纤维的样品,纳米碳纤维/聚(氨酯-酰亚胺)复合材料在125~4 000 Hz范围的平均吸声系数从0.28提升到了0.39。Liu等^[39]以水性聚氨酯为基体材料、碳纤维为填料、十二烷基硫酸钠作为发泡剂合成了一种全新的聚氨酯/碳纤维复合薄膜,其声学研究表明复合薄膜的黏弹性促进了声能的转换,其内部碳纤维形成的3D网络可以增强声波的散射和吸收,从而将声能转化为热能,从而提高了吸声的效果。Ju等^[40]将棕榈纤维加入到硬质聚氨酯泡沫中制备复合材料,研究发现经过汽爆处理后的棕榈纤维外表面和基体之间具有更多的耦合反应位点,吸声峰值表明棕榈纤维在硬质聚氨酯泡沫中的最佳质量分数为1%。Mohammadi等^[41]将不同质量分数(0%, 0.5%, 1%, 1.5%)的经碱性表面处理的岩棉纤维(RWF)加入到聚氨酯泡沫中制成复合材料,研究表明加入质量分数为1%和1.5%的RWF可使聚氨酯复合泡沫的自由表面积有所增加,并且当RWF的质量分数为1.5%时,复合材料在500~4 800 Hz内具有最佳

的吸声效果。Liu等^[42]设计制备了一种玻璃纤维/聚氨酯弹性体复合材料,研究表明经KH550偶联剂改性后的玻璃纤维(MGF)具有高刚度,其与聚氨酯具有良好的兼容性,这种兼容性会增加声音的反射并降低声音的透过率。同时,复合材料的隔音性能还与其微相分离程度有关。当声源向聚氨酯复合材料发射声波时,部分声波会在界面上反射,而另一部分声波则会传入聚氨酯基体。传入聚氨酯的声能会通过硬段和软段之间的相互作用而耗散。当微相分离程度较高时,声波会在材料中的软硬段之间多次反射和传播,并被这种重复传播所消耗。因此,具有最佳微相分离程度的复合材料(MGF质量分数0.6%)展现出最优的隔音性能。

通过上述学者的研究结果可以发现,目前针对纤维材料对聚氨酯声学性能的改性研究,主要集中于以下关键因素:纤维种类、纤维含量和纤维预处理等方面。纤维材料具有独特声学特性,其密度一般高于聚氨酯,声音在纤维中传播速度更快,声阻抗也更大。当声波从低阻抗的聚氨酯树脂传播至高阻抗的纤维外表面时,会因阻抗差异产生显著反射,这延长了声波的传播路径,进而增强了吸声效果。在复合材料体系里,纤维所形成的三维网络结构,可有效增强声波的散射与吸收。同时,复合材料自身具备的黏弹性,能促进声能向热能的转化,进一步提升吸声性能。而且,经改性后的纤维与聚氨酯兼容性良好,可增加声波反射、降低声音透过率,微相分离程度也影响隔音,高微相分离让声波在软硬段间多次反射耗散。

2.2 粉末颗粒材料改性

当粉末颗粒材料加入到聚氨酯树脂内部时,一方面可以改变聚氨酯的理化特性,特别是改变阻尼因子,一般而言同频率下,材料的阻尼因子越大,隔声量越高;另一方面当声波传播到粉末颗粒与聚氨酯基体的界面处时会产生明显的散射、折射和反射现象,这可以有效地延长声波的传递路径,进而增加声波能量的耗散。

王彩萍等^[43]通过在聚氨酯泡沫中掺入磁性颗粒(羰基铁粉),并施加磁场诱导颗粒形成链状结构,获得了各向异性磁性聚氨酯泡沫,研究表明与各向同性磁性聚氨酯泡沫相比,各向异性磁性聚氨酯泡沫具有更大的孔隙和泡孔,开孔率更小,闭孔率更大,在低频吸声性能占有优势。Yeşilyurt等^[44]将天然竹粉添加到硬质聚氨酯泡沫中制备复合材料,吸声测试结果表明,未填充竹粉的硬质聚氨酯泡沫在1 600~6 300 Hz范围的平均吸声系数为0.66,当竹粉质量与复合材料体积的比例为2.5%时,复合材料在1 600~6 300 Hz范围的平均吸声系数为0.71,相比未填充竹粉的泡沫提高了7.6%。Shanigaram等^[45]采用溶胶-凝胶自燃烧法制备了超细 MnCo_2O_4 纳米颗粒,并将其加入到氧化石墨烯/聚氨酯复合泡沫中,研究表明 MnCo_2O_4 纳米粒子可以显著增强聚氨酯泡沫的宽频率吸声性能(100~5 000 Hz),其最大吸声系数为0.90(2 000 Hz)。Choe等^[46]将油酸处理后的碳酸钙颗粒作为填料,与聚氨酯复合制备成复合泡沫,实验结果表明,碳酸钙表面特性会影响聚氨酯基体与填料间的界面相容性,进而决定泡沫的蜂窝结构、吸声及物理性能。经油酸处理的碳酸钙制成的复合泡沫开孔率低,吸声系数高,在碳酸钙质量分数为6%时达最高值,且应力更高,应力松弛和滞后损失表现更优,这归因于界面接触和相容性增强。Zhang等^[47]以水性聚氨酯(WPU)、纳米纤维素(CNCs)和海泡石(SEP)为原材料,制备了一种复合气凝胶,研究表明随着WPU含量的增加,气凝胶的孔径减小,热稳定性提高,同时保持良好的压缩回弹性和吸声性能,其在2 000 Hz以上的宽频带内,吸声系数均大于0.8。Yun等^[48]研究了三聚氰胺颗粒对聚氨酯复合泡沫吸声性能和形态结构的影响,研究发现添加质量分数3%的三聚氰胺颗粒的复合泡沫的吸声性能最佳,而分散剂的加入可以让三聚氰胺颗粒分散更为均匀,从而使孔隙结构更均匀,进一步提高复合泡沫的低频吸声性能。

综上所述可以发现,针对粉末颗粒材料对聚氨酯声学性能的改性研究,主要聚焦于以下关键因素:颗粒种类、颗粒含量、颗粒结构以及颗粒表面处理等。将粉末颗粒材料引入聚氨酯中,会引发聚氨酯内部微观结构与宏观性能的改变,其中阻尼因子的变化具有显著性。在特定频率条件下,材料的阻尼因子数值与隔声性能呈正相关关系,即阻尼因子增大,材料对声波的阻隔能力增强,隔声量提升。当声波在复合材料中传播并抵达粉末颗粒与聚氨酯基体的界面时,基于声学原理会发生散射、折射和反射现象。这些声学现象导致声波在材料内部的传播路径延长,声波与界面的相互作用次数增加,进而促使声波能量通过多种机制发生耗散,最终实现材料吸声性能的优化。

2.3 片层状材料改性

向聚氨酯引入片层状材料可显著提升其吸声隔声效果。二者复合后,当声波使大分子链运动时,片层状结构增大分子链摩擦力耗散声能;层间孔隙让声波与孔壁摩擦生热耗能;分层结构改变孔隙构造影响声波传播;声波在材料内反

射延长路径加剧声能损失;片层状材料还能调节黏弹性,使材料因内摩擦更剧烈而耗能。

孙卫红等^[49]在聚氨酯/环氧树脂弹性体基材中加入云母后,研究揭示了云母添加对复合材料吸声性能的影响模式:当云母质量分数为5%时,材料的平均吸声系数达到相对较高的水平;此外,高云母含量有助于提高基材在低频区域的吸声性能,而在其他频率范围内的改善效果相对有限。Kiddell等^[50]将闪蒸石墨烯(FG)加入到柔性聚氨酯泡沫(PUF)中制备成复合材料,与纯的PUF相比,加入石墨烯的复合材料在500~2 000 Hz频率范围内的吸声性能更高,这是因为石墨烯可以通过成核来减小孔尺寸,增加泡沫内的路径复杂性(即曲折度),以及通过界面滑动和裂纹等形式来耗散声能。Lee等^[51-52]采用逐步真空辅助浸渍法制备了一种多层氧化石墨烯浸渍聚氨酯(GO-PU)泡沫,通过理论建模以及实验验证,发现氧化石墨烯的浓度会影响泡沫的孔隙率、杨氏模量和流阻率,其中流阻率对吸声性能的影响最大。而氧化石墨烯的加入显著提升了聚氨酯泡沫的吸声系数,与原始聚氨酯相比,其平均吸声系数提高了153%。并且在经过层排列优化设计后,厚度为54.6 mm的GO-PU泡沫在500 Hz以上频率段的平均吸声系数可从优化前的0.728提升至0.901。

综上所述可以发现,针对片层状材料对聚氨酯声学性能的改性研究,主要聚焦于以下几个方面:片层状材料的种类及含量影响,以及特定频率范围的吸隔声性能优化。上述研究结果表明,当片层状材料与聚氨酯树脂复合形成复合材料后,可通过多机制协同作用显著提升复合材料的吸声性能。从分子层面看,声波冲击会引发聚合物大分子链的振动与相对位移,此时片层状结构通过物理限域作用增大分子链间的摩擦阻力,依据能量守恒定律,声波携带的机械能被高效转化为热能并耗散。微观结构方面,片层间存在的纳米级细微孔隙构成声波的散射通道,声波在传播过程中与孔壁发生周期性摩擦,进一步通过黏滞损耗将声能转化为热能。此外,片层状材料的周期性排列可引发声波的多重反射、折射及衍射,显著延长声波在材料内部的传播路径,增加能量耗散机会。该材料还能调控聚氨酯的黏弹性特征,使材料在动态形变中产生更剧烈的内摩擦,从而消耗更多声能。

2.4 中空材料改性

中空类材料具有空腔且常具外层壳体,可以包裹空气,当该类材料加入聚氨酯树脂后,其空腔类似多孔泡沫孔隙,声波在内外表面大量反射增加耗损,还能使空腔内空气振动产生黏滞阻力,将声能转化为热能损耗。中空类材料所具备的空腔结构形式多样,既可以是呈完全封闭状态的球体形态,例如空心玻璃微珠、金属空心球等,也可以是呈半封闭特征的管状结构,如碳纳米管、短切中空纤维。此外,有些中空类材料还存在不规则形状的空腔结构,如纳米级硅藻土、火山灰等。

姚金金等^[53]制备了一种聚氨酯/硅藻土多孔复合材料,研究表明,随着硅藻土粒径的增大,复合材料的吸声系数峰

值增大且向高频移动,而随着硅藻土含量的增加,吸声系数峰值增大且向低频移动,当铝酸酯偶联剂改性后的硅藻土含量为60份、粒径为5 μm 时,复合材料的吸声系数峰值可达0.94。张伟程等^[54]制备了一种空心玻璃微珠改性聚氨酯复合泡沫,通过添加增塑剂磷酸三甲酯和发泡剂偶氮二甲酰胺来优化复合泡沫的吸声性能,测试结果表明当磷酸三甲酯质量分数为25%、空心玻璃微珠质量分数为10%、偶氮二甲酰胺质量分数为2%时,材料的吸声性能最佳,平均吸声系数达到0.29,在1 714 Hz处具有最大吸声系数,为0.55。Statharas等^[55]研究开发了一种新型的聚氨酯/聚偏氟乙烯/多壁碳纳米管复合泡沫材料,实验结果表明该复合泡沫材料在100~1 600 Hz频率范围内表现出较为优异的吸声性能,特别是在1 000 Hz时吸声系数达到0.85,显著高于纯聚氨酯泡沫的0.40。Yu等^[56-58]将金属空心球与聚氨酯树脂复合,研发制备了一系列聚氨酯/金属空心球复合材料,并对空心球的偶联剂改性、空心球尺寸和空心球层数等因素对复合材料声学性能的影响展开了深入研究,研究结果表明经硅烷偶联剂表面改性后的空心球,其直径越小,其对聚氨酯的吸隔声性能提升效果越明显。尤其是加入碳纳米管-不锈钢双层空心球的复合材料的声学性能比加入单层不锈钢空心球的复合材料更好,这是因为空心球壳层数的增多可以增加声波的反射次数从而延长声波的传播路径,增加声能损耗,不锈钢球壳层和碳纳米管球壳层可以协同提升复合材料吸声和隔声性能。

综上,对于中空材料改性聚氨酯声学性能的研究,主要集中在中空材料的种类、粒径、含量以及壳层数量对复合材料声学性能的影响及相关机理。当中空材料掺入聚氨酯树脂基体时,会形成封闭空腔结构,该结构在微观尺度具有特定拓扑构型,与多孔泡沫材料孔隙拓扑特征存在相似性。声波入射至复合体系时,在空腔-树脂界面以及空腔内部空气-壁面界面处,基于声学反射与散射原理,会发生多次反射和散射现象,这直接导致声波传播路径长度增加,同时增大了声波与材料相互作用的界面面积。根据能量守恒与转化定律,界面面积的增大为声能耗散提供了更多作用位点,促使声能向其他形式能量转化。此外,空腔内空气介质在声波交变应力作用下产生周期性振动,空气质点间出现相对位移。依据流体力学中黏滞力相关理论,质点相对位移会产生黏滞内摩擦力,声波的机械能通过该内摩擦力持续转化为空气介质的热能,进而实现声能在复合材料中的衰减,达到吸隔声目的。

3 结语

综上所述,目前聚氨酯复合材料在声学降噪功能材料领域已占据举足轻重的地位,凭借其出色的性能,在建筑、航空、汽车、船舶等众多领域展现出极为广阔的发展前景,成为众多行业降噪的首选材料之一。在基体材料上,硬质聚氨酯泡沫、聚氨酯弹性体等均有深入研究;在填料方面,纤维材料、粉末颗粒材料、片层状材料和中空材料等也备受关注,相

关研究众多,且都获得了一些吸隔声性能良好的声学降噪功能材料。但目前聚氨酯声学复合材料仍然存在一些不足之处,需要进一步深入探究。

(1)目前关于聚氨酯声学复合材料的研究状况存在一定局限性。具体而言,大多数研究工作主要聚焦于利用单一种类的填料对聚氨酯进行改性,以期提升其吸隔声性能。但针对多种类填料协同作用来改性聚氨酯声学性能的研究却较为匮乏。单一填料研究模式虽能揭示该填料对聚氨酯性能的部分影响规律,可实际工程应用中,往往是多种因素相互交织、共同作用,此模式难以全面呈现这种复杂情况,不利于相关研究的深入与应用拓展。

(2)聚氨酯复合材料的声学机理至今仍未被完全透彻地解析,虽然已有部分研究对其吸声和隔声机理展开定性描述,但多数描述仅浮于表面,未深入至理论内核。例如,对于材料内部结构如何精准影响声波传播与能量耗散,缺乏系统性理论探讨,也未构建完善的声波传播模型来定量呈现这一过程。这种理论层面的欠缺,极大地制约了对聚氨酯复合材料声学性能的深度理解,以及基于科学原理的优化设计。所以,深入开展聚氨酯复合材料吸隔声机理研究,并构建精准的声波传播模型,必将成为未来该领域的重要研究方向。

参考文献

- [1] 魏新渝,等.科技导报,2024,42(6):42-50.
WEI Xinyu, et al. Science & Technology Review, 2024, 42(6): 42-50.
- [2] 毛玉如,等.科技导报,2024,42(20):23-31.
MAO Yuru, et al. Science & Technology Review, 2024, 42(20): 23-31.
- [3] 崔向红,等.应用科技,2022,49(6):129-135.
CUI Xianghong, et al. Applied Science and Technology, 2022, 49(6):129-135.
- [4] 熊康,等.材料导报,2022,36(5):211-215.
XIONG Kang, et al. Materials Reports, 2022, 36(5):211-215.
- [5] RASTEGAR N, et al. Iranian Polymer Journal, 2022, 31:83-105.
- [6] SUJON M A S, et al. Polymer Testing, 2021, 104. DOI: 10.1016/j. polymertesting.2021.107388.
- [7] TAO Y, et al. Applied Materials Today, 2021, 24. DOI: 10.1016/j. apmt.2021.101141.
- [8] 段银莹,等.高分子材料科学与工程,2024,40(12):137-147.
DUAN Yinying, et al. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(12):137-147.
- [9] 吕雄宪.阻燃型硬质聚氨酯泡沫吸声材料的制备与表征[D].广州:华南理工大学,2022.
LYU Xiongkuan. Preparation and characterization of flame-retarded rigid polyurethane foams with acoustic absorbing capacity[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.
- [10] 李哲浩.开孔型硬质聚氨酯泡沫及其复合结构吸声性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2023.
LI Zhehao. Study on sound absorption properties of open cell

- rigid polyurethane foam and its composite structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.
- [11] ZHANG C, et al. *Materials & Design*, 2012, 41:319–325.
- [12] KAUSAR A. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2018, 57(4):346–369.
- [13] HU J, et al. *Polymer*, 2021, 222. DOI: 10.1016/j.polymer.2021.123674.
- [14] AKRAM N, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, 136(13). DOI:10.1002/app.47289.
- [15] KHADIVI P, et al. *Applied Physics A*, 2019, 125(11). DOI: 10.1007/s00339-019-3082-y.
- [16] SAHEBI J I, et al. *Polymer Composites*, 2019, 40(S1):422–430.
- [17] GUI H, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 365:369–377.
- [18] 郭书君,等. *聚氨酯工业*, 2022, 37(5):5–8.
GUO Shujun, et al. *Polyurethane Industry*, 2022, 37(5):5–8.
- [19] 赵清白. 聚氨酯链段化学结构对其弹性体的水声吸声性能的影响研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2019.
ZHAO Qingbai. Study on the influence of polyurethane chemical structure on its underwater acoustic absorptive properties[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [20] LI T T, et al. *Fibers and Polymers*, 2015, 16:691–698.
- [21] CHOE H, et al. *Composites Science and Technology*, 2018, 156:19–27.
- [22] ZHANG X L, et al. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 275:1 623–1 627.
- [23] CHUANG Y C, et al. *Fibers and Polymers*, 2016, 17:2 116–2 123.
- [24] DIHARJO K, et al. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 660:516–520.
- [25] YILMAZ N D, et al. *Journal of Industrial Textiles*, 2013, 43(2):231–246.
- [26] 刘彦佐. 碳纤维圆管增强超弹多孔结构减振吸能性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2022.
LIU Yanzuo. Vibration and energy absorption performance of carbon fiber circular tube reinforced hyperelastic porous structures [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2022.
- [27] PINILLA-PENALVER E, et al. *Construction and Building Materials*, 2025, 471. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2025.140730.
- [28] SUNG G, et al. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2016, 44:99–104.
- [29] 蔡俊,等. *复合材料学报*, 2006, 23(3):87–90.
CAI Jun, et al. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2006, 23(3):87–90.
- [30] 李锐,等. *中国科学:技术科学*, 2018, 48(9):980–990.
LI Rui, et al. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2018, 48(9):980–990.
- [31] CHEN Q, et al. *Materials*, 2019, 12(3). DOI: 10.3390/ma12030420.
- [32] LAPČÍK L, et al. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 77:304–310.
- [33] 李菁瑞. 石墨烯/苯乙烯-丙烯腈/聚氨酯层状复合材料的制备及声学特性研究[D]. 武汉:武汉工程大学, 2019.
LI Jingrui. Preparation and acoustic properties of the layered graphene/styrene-acrylonitrile copolymer/polyurethane composites [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2019.
- [34] JIANG F, et al. *Polymers for Advanced Technologies*, 2021, 32(3):1 363–1 371.
- [35] 何万万,等. *纺织科学与工程学报*, 2024, 41(1):41–46.
HE Wanwan, et al. *Journal of Textile Science and Engineering*, 2024, 41(1):41–46.
- [36] BANDARIAN M, et al. *Polymer International*, 2011, 60(3):475–482.
- [37] 曹书豪,等. *武汉理工大学学报*, 2013, 35(5):29–32.
CAO Shuhao, et al. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2013, 35(5):29–32.
- [38] 翟彤,等. *材料保护*, 2013, 46(S2):123–124.
ZHAI Tong, et al. *Materials Protection*, 2013, 46(S2):123–124.
- [39] LIU Y, et al. *Applied Materials Today*, 2025, 43. DOI:10.1016/j.apmt.2025.102647.
- [40] JU Z, et al. *Polymer Composites*, 2020, 41(7):2 893–2 906.
- [41] MOHAMMADI B, et al. *Journal of Building Engineering*, 2022, 48. DOI:10.1016/j.jobbe.2021.103872.
- [42] LIU H, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2024, 141(7). DOI:10.1002/app.54960.
- [43] 王彩萍,等. *材料科学与工程学报*, 2020, 38(6):934–940, 1 019.
WANG Caiping, et al. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2020, 38(6):934–940, 1 019.
- [44] YEŞİLYURT A, et al. *ChemistrySelect*, 2024, 9(36). DOI:10.1002/slct.202401976.
- [45] SHANIGARAM M, et al. *Ceramics International*, 2024, 50(9):15 551–15 560.
- [46] CHOE H, et al. *Composites Science and Technology*, 2020, 194. DOI:10.1016/j.compscitech.2020.108153.
- [47] ZHANG Y, et al. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 298. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2025.140015.
- [48] YUN D, et al. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2023, 40(12):3 052–3 058.
- [49] 孙卫红,等. *工程塑料应用*, 2017, 45(12):112–116.
SUN Weihong, et al. *Engineering Plastics Application*, 2017, 45(12):112–116.
- [50] KIDDELL S, et al. *Polymer Testing*, 2023, 119. DOI: 10.1016/j.polymeresting.2022.107919.
- [51] LEE J, et al. *Applied Acoustics*, 2019, 151:10–21.
- [52] LEE J, et al. *Applied Acoustics*, 2023, 203. DOI: 10.1016/j.apacoust.2022.109194.
- [53] 姚金金,等. *工程塑料应用*, 2015, 43(12):118–122.
YAO Jinjin, et al. *Engineering Plastics Application*, 2015, 43(12):118–122.
- [54] 张伟程,等. *中国塑料*, 2023, 37(1):38–45.
ZHANG Weicheng, et al. *China Plastics*, 2023, 37(1):38–45.
- [55] STATHARAS E C, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, 136(33). DOI:10.1002/app.47868.
- [56] YU T, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, 138(8). DOI:10.1002/app.49891.
- [57] YU T, et al. *Composite Structures*, 2021, 261. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.113554.
- [58] YU T, et al. *Materials Today Communications*, 2022, 31. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.103295.