http://pmse.scu.edu.cn

芳纶纤维/聚酰亚胺复合气凝胶的制备及声学性能

胡靖杰，韩淑芬，陈依玲，游峰，江学良，姚楚

(武汉工程大学 材料科学与工程学院 湖北省等离子体化学与新材料重点实验室, 湖北 武汉 430205)

摘要：聚酰亚胺气凝胶（PI）作为一种高性能聚合物材料，在声热防护方面有着巨大的应用前景，然而纯 PI 存在孔结构单一，声学和力学性能较差的问题限制了其在降噪领域应用。为了提升 PI 气凝胶的综合性能并且拓展其应用范围，通过将芳纶纤维（ANF）分散体与聚酰亚胺酸（PAA）混合，采用冷冻干燥、热亚胺化处理的方法制备了一种低收缩、高强度、吸声性能良好的聚酰亚胺-芳纶纤维气凝胶（PI-ANF）。ANF 加入后，气凝胶样品的收缩率由 PI 纯样的 37.4%逐步降低至 PI-ANF-8 的 30.0%，而最大压缩强度由 PI 的 20.3 kPa 提升至 PI-ANF-8 的 104 kPa，PI-ANF 最低分解温度为 430 °C，依然支持气凝胶在 400 °C 以下的较高温度下使用。当 ANF 含量为 3 wt%时，附着在 PI 骨架内的 ANF 构建了大量介孔可以有效吸收声波，使复合气凝胶的声学性能达到最佳，平均吸声系数可达 0.78。结果表明，ANF 引入后有效提高了 PI 气凝胶吸声性能和力学性能，在新能源和建筑材料领域具有一定应用价值。

关键词：聚酰亚胺；芳纶纤维；复合气凝胶；吸声性能

随着现代社会的发展快速发展，噪声污染问题日益严重[1-3]。噪声污染问题不仅会对人体产生危害，造成一系列健康问题，同时伴随声波能量耗散而产生的热扩散问题也日益严峻[4]。因此，开发具有良好降噪性能的材料具有重要的实际意义，特别是需要将吸声和热稳定性能结合起来的材料[5]。

气凝胶材料有着质轻多孔、高孔隙率和比表面积大的独特结构优势，已成为广泛应用的降噪材料，气凝胶这类多孔声学材料通过内部孔隙的粘性阻力将噪声声波能量转化为热能或其他形式的能量，从而耗散噪声能量[6-9]。近年来，聚合物气凝胶在实际应用中已经表现出良好的噪声吸收能力，Chen 等[10]用定向冷冻法制备了层状纤维素气凝胶，样品的平均降噪系数（NRC）可达到 0.42，且该层状纤维素气凝胶样品还具有密度低、柔性强的优点在降低机舱噪音方面有着潜在的应用价值。Yan 等[11]以芳纶纤维为原料，将表面活性剂、交联剂与芳纶纤维均匀混合，制备出多层多孔复合芳纶纳米纤维气凝胶（MPL-ANFs），当表面活性剂和芳纶纤维的重量比为 1：1 时 MPL-ANFs 气凝胶的平均吸声系数和 NRC 分别达到 0.71 和 0.52，表明 MPL-ANF 确实具有优异的声学性能。Niu 等[12]将细菌纤维素/氧化石墨烯（BC/GO）碳化得到碳纳米纤维增强石墨烯气凝胶（CNF/GAs），所制备的低表观密度 CNF/GA 气凝胶在 30 mm 厚时 NRC 系数可以高达 0.56 表现出优异的宽带吸声性能。这些不同类型的气凝胶均显示出较高的吸声降噪性能，但是由于气凝胶材料固有的特性，这些材料大

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2026.0125
收稿日期：2025-08-26
基金项目：湖北省重点研发计划 (2023BAB001)
通讯联系人：游峰，主要从事功能高分子复合材料研究，E-mail: youfeng.mse@wit.edu.cn

部分为具有可燃性且受热易分解大大限制了其应用[13]，因此开发具有良好热稳定性和优异力学性能的吸声材料已成为当务之急[14-16]。芳纶纳米纤维(ANF)是从芳纶纤维中提取的，具有丰富的酰胺基团和较大的比表面积，且 ANF 有着良好的柔韧性和耐热性，使得 ANF 作为填料可以同时提供热学和力学性能上的支持，以满足各种条件下的应用要求[17]。

聚酰亚胺（PI）独特的刚性酰亚胺环结构[18]，使得聚酰亚胺气凝胶材料具有优异的机械性能、耐高温性能和热稳定性，使其在航空航天、道路运输、建筑保温等多个工业领域有着广阔的应用前景[19]。PI 气凝胶除了具有质量轻、化学性质稳定、密度低的基本特征外[20]，还具有良好的热稳定性和环境稳定性，克服了其他气凝胶材料化学和热稳定性差的缺陷[21]，使得 PI 材料在吸声领域也具有广阔的应用前景。但是 PI 依然有着声学和力学性能较低，收缩率较大的问题[22]。因此，运用纤维对 PI 气凝胶基体进行改性可以有着声学和力学性能存在劣势的问题。纤维的核心作用是为 PI 气凝胶骨架提供支撑或增强，由于芳纶纤维分子主链由键能高的芳环和酰胺键构成，相比其他常见有机填料有着良好的耐高温性，并且能构建强韧的三维纤维网络结构，使得芳纶纤维填料可以在保持高强度和高耐热的同时与 PI 基体材料协同作用，获得综合性能更加优异的复合材料。因此将芳纶纤维与气凝胶基体进行结合，可以实现 PI 气凝胶材料综合性能的提升。

本文采用了去质子化法制备了芳纶纳米纤维（ANF）溶液，选用均苯四甲酸酐（PMDA）作为二酐单体和 4,4'-二氨基二苯醚（ODA）作为二胺单体合成了聚酰亚胺酸（PAA），将 ANF 与 PAA 复合后，经过冷冻干燥和热亚胺化处理，制备出了高强度的聚酰亚胺-芳纶纤维（PI-ANF）气凝胶。讨论了不同 ANF 含量对气凝胶声学、力学、热稳定性能的影响，为 PI 气凝胶在高效降噪吸声领域的应用提供了借鉴。

1 实验部分

1.1 主要原料

均苯四甲酸酐（PMDA）：分析纯，上海阿拉丁生化科技股份有限公司；4,4'-二氨基二苯醚（4,4'-ODA）：分析纯，上海阿拉丁生化科技股份有限公司；N,N-二甲基乙酰胺（DMAc）：分析纯，国药集团化学试剂有限公司；三乙胺（TEA）：分析纯，国药集团化学试剂有限公司；二甲基亚砜（DMSO）：分析纯，国药集团化学试剂有限公司；氢氧化钾（KOH）：分析纯，国药集团化学试剂有限公司；芳纶纤维：中芳特纤有限公司（VP220）

1.2 聚酰亚胺酸的制备过程

将 0.1 mol4,4'-ODA 和 50 mL DMAc 加入 100 mL 三颈烧瓶中，通过搅拌使 4,4'-ODA 完全溶解，接着加入 0.1 mol PMDA，溶液在冰水浴条件下反应 8 h。将反应溶液倒入 500 mL 去离子水中，除去 DMAc 溶剂，收集得到淡黄色聚合物固体。用去离子水洗涤干净后，将淡黄色聚合物固体在 60 ℃条件下干燥，干燥后得到淡黄色固体即为水溶性聚酰亚胺前驱体 PAA 粉末。

1.3 芳纶纳米纤维分散体的制备过程

将 1.0 g 芳纶纤维和 1.0 g KOH 加入到含有 200 mL DMSO 的烧杯中。并加入适量水将混合物密封并在室温下磁力搅拌 4 h，使芳纶纤维完全溶解，溶液从淡黄色变成暗红色。将暗红色溶液与去离

子水以 1：2 的比例倒入大烧杯中，得到黄色凝胶状膜。随后通过机械搅拌将膜分散在去离子水中，过滤浑浊液体，得到淡黄色凝胶膜并用去离子水洗涤 3 次，最后将膜分散在 200 mL 去离子水中获得 2 mg/mL ANF 分散体。

1.4 聚酰亚胺-芳纶纤维气凝胶和聚酰亚胺气凝胶的制备过程

PI-ANF 气凝胶制备流程：将制备好的 ANF 分散体加入去离子水中调节至合适浓度，然后加入适量的 PAA，保证 PAA 占总质量的 5 wt%，再加入 0.5 g TEA，搅拌至 PAA 完全溶解，将所得的溶液倒入模具，冷冻后放入冷冻干燥机进行抽真空冷冻干燥（72 h），冷冻干燥后的样品放入管式炉中并在 Ar 气氛下，加热至 100 ℃、200 ℃和 300 ℃保持恒温 1 h，热亚胺化后将样品冷却至室温最终得到淡黄色 PI-ANF 气凝胶，ANF 质量占总质量的比例分别为 1%、2%、3%、5%和 8%，样品命名为 PI-ANF-1、PI-ANF-2、PI-ANF-3、PI-ANF-5 和 PI-ANF-8。PI-ANF 气凝胶的具体配方见 Tab.1。ANF 气凝胶是直接取 ANF 分散体将分散体倒入模具冷冻，在通过冷冻干燥得到 ANF 气凝胶。PI 气凝胶则是直接取 1.0 g PAA，加入 18.5 g 去离子水，同时加入 0.5 g TEA。磁力搅拌使 PAA 完全溶解，将溶液倒入模具，剩余冷冻干燥，热亚胺化步骤都与 PI-ANF 气凝胶的制备流程一致，样品命名为聚酰亚胺气凝胶（PI）。PI-ANF 制备流程示意图如 Fig.1 所示。

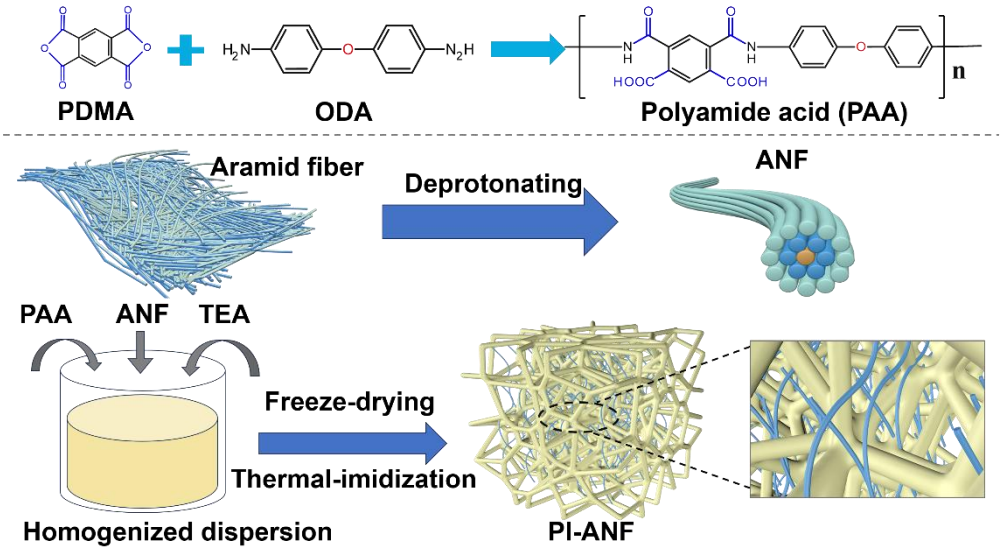


Fig. 1　Preparation process of PI-ANF aerogel composites

Tab. 1　Formulations of PI-ANF

Sample	PAA (wt%)	ANF (wt%)	Water (wt%)	TEA (wt%)
ANF	-	0.2	99.8	-
PI	5	-	94	1
PI-ANF-1	5	1	93	1
PI-ANF-2	5	2	92	1
PI-ANF-3	5	3	91	1

PI-ANF-5	5	5	89	1
PI-ANF-8	5	8	86	1

1.5 测试与表征

1.5.1 红外光谱分析：采用傅里叶变换红外光谱分析仪（FT-IR），美国赛默飞世尔科技有限公司，Nicolet 6700 型）用溴化钾压片法，将样品共混于溴化钾粉末，扫描频率范围为 4000~600 cm^{-1}，分辨率为 4 cm^{-1}，扫描次数为 16 次。

1.5.2 微观形貌分析：采用扫描电子显微镜（SEM，日本电子株式会社，JSM-5500 型）观察样品的微观结构，样品真空喷金处理，测试电压为 15 kV。

1.5.3 孔隙率测定：采用全自动真密度分析仪(贝士德仪器科技有限公司，3H-2000TDI 型)，对样品进行孔隙率测试。先利用式（1）算出气凝胶样品的$\boldsymbol{\rho_0}$表观密度（单位 g/cm^3）:

$$\rho_0 = \frac{M}{V} \tag{1}$$

式中：M 是气凝胶的质量，g；V 是气凝胶的体积，cm^3。

气凝胶的孔隙率（P）使用式（2）进行计算

$$P = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) \times 100\% \tag{2}$$

式中：ρ_0是表观密度，g/cm^3；ρ是真密度，g/cm^3。

1.5.4 气凝胶收缩率测定：收缩率由式（3）计算

$$shrinkage = \left(1 - \frac{W}{W_0}\right) \times 100\% \tag{3}$$

式中：w 是气凝胶样品在热亚胺化之后在室温下测量的气凝胶的直径宽度，mm；w_0是制备气凝的模具直径宽度，mm。

1.5.5 吸声性能测试：根据 ISO 10534-2:1998 标准，采用阻抗管声学测试仪（北京声望声电技术有限公司，SW477 型）对厚度为 15 mm，直径为 30 mm 的样品进行吸声系数测试（SAC），测试频率范围为 1000~5000 Hz，每个组分样品测试 3 次，结果以拟合后的 1/12 频程值表示。

1.5.6 力学性能测试：根据国标 GB/T 1041-2008，采用电子万能试验机（美国 Instron 公司，5966 型）对样品为厚度为 15 mm，直径为 30 mm 的圆柱形样品，以 5 mm/min 的压缩速率对气凝胶样品进行压缩-回弹测试。每个组分测试 3 个样品取平均值。

1.5.7 热失重分析：采用综合热分析仪（T_g，美国 TA Instruments 公司，SDT-Q600 型）在 N_2 气氛下对样品进行热重分析，样品质量为 5-10 mg，升温速率为设定为 10 ℃/min^{-1}，加热范围为 25~800 ℃。

2 结果与讨论

2.1 PI-ANF 化学结构分析

通过 FT-IR 对 PI 和 PAA 化学结构进行了分析，PAA 完全脱水环化成功转变为 PI 的主要标志是在 FT-IR 中出现 C=O、C-N、C-N-C 集团对应特征峰。如 Fig.2(a)所示 PI 的 FT-IR 光谱中在 1774 cm^{-1}

和 1713 cm^{-1} 处较强的特征吸收峰对应与 C=O 键不对称伸缩振动和 C=O 键对称伸缩振动。在 738 cm^{-1} 处的吸收峰对应于 C=O 键的弯曲振动证明了酰亚胺环的存在。在 1014 cm^{-1} 和 742 cm^{-1} 附近的峰与 C-N-C 键伸缩振动相关，1372 cm^{-1} 处属于 C-N 键的伸缩振动峰，1244 cm^{-1} 和 1086 cm^{-1} 处的峰对应于芳醚键的伸缩振动[1,18]，对比未热亚胺化的 PAA 样品，PAA 样品在 FT-IR 光谱图中均没有出现 C=O、C-N、C-N-C 集团对应特征峰，表明制备的 PI 制备成功，PAA 已经完全亚胺化。在 Fig.2(b) ANF 的 N-H 键和 C-O 键的拉伸振动的吸收峰出现在 3315 cm^{-1} 和 1643 cm^{-1} 处，在 1305 cm^{-1} 处的吸收峰对应于 ANF 中 Ph-N 键的振动[23]。PI-ANF 复合气凝胶的光谱图中出现了 C=O、C-N、C-N-C 集团对应特征峰，而且在 1305 cm^{-1} 处的出现了 ANF 中 Ph-N 键的吸收峰，PI-ANF 气凝胶的红外光谱图出现了 ANF 和 PI 对应的特征峰，证明了 PI-ANF 材料的成功制备。

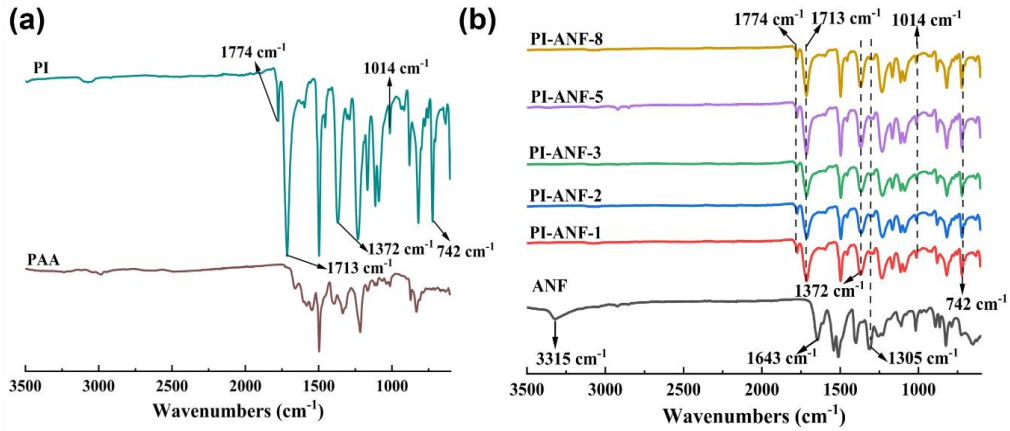


Fig. 2　FT-IR spectra of (a) PI and PAA, (b) ANF and PI-ANF

2.2 PI-ANF 气凝胶微观形貌和结构分析

从 Fig.3(a)和(b) PI 气凝胶的 SEM 图像可以清楚地看出 PI 气凝胶内部是连续的孔隙结构，并且孔壁光滑。在加入 ANF 后 PI-ANF 气凝胶显示出和 PI 类似的均匀多孔隙结构 Fig.3(c~f)，但是 ANF 的加入使得气凝胶孔隙变得薄且凌乱，可能是因为 ANF 附着在 PI 骨架上使得孔隙变薄。在气凝胶边缘层的末端可以观察到丝状 ANF。当 ANF 含量过高达到 8 wt% 时 Fig.3(g~h) ANF 气凝胶的明显团聚使得气凝胶孔隙变为薄片非常薄，由 PI 气凝胶的明显孔隙结构变为边缘不均匀片层结构。Fig.3(i)是 PI-ANF 气凝胶剖面的 SEM 图像，展示了通过定向冷冻模具冷冻后冰晶的生长方向，正是有这种均匀的冰晶生长带来的竖向取向可以提供给 PI-ANF 气凝胶较强的机械强度[18]。

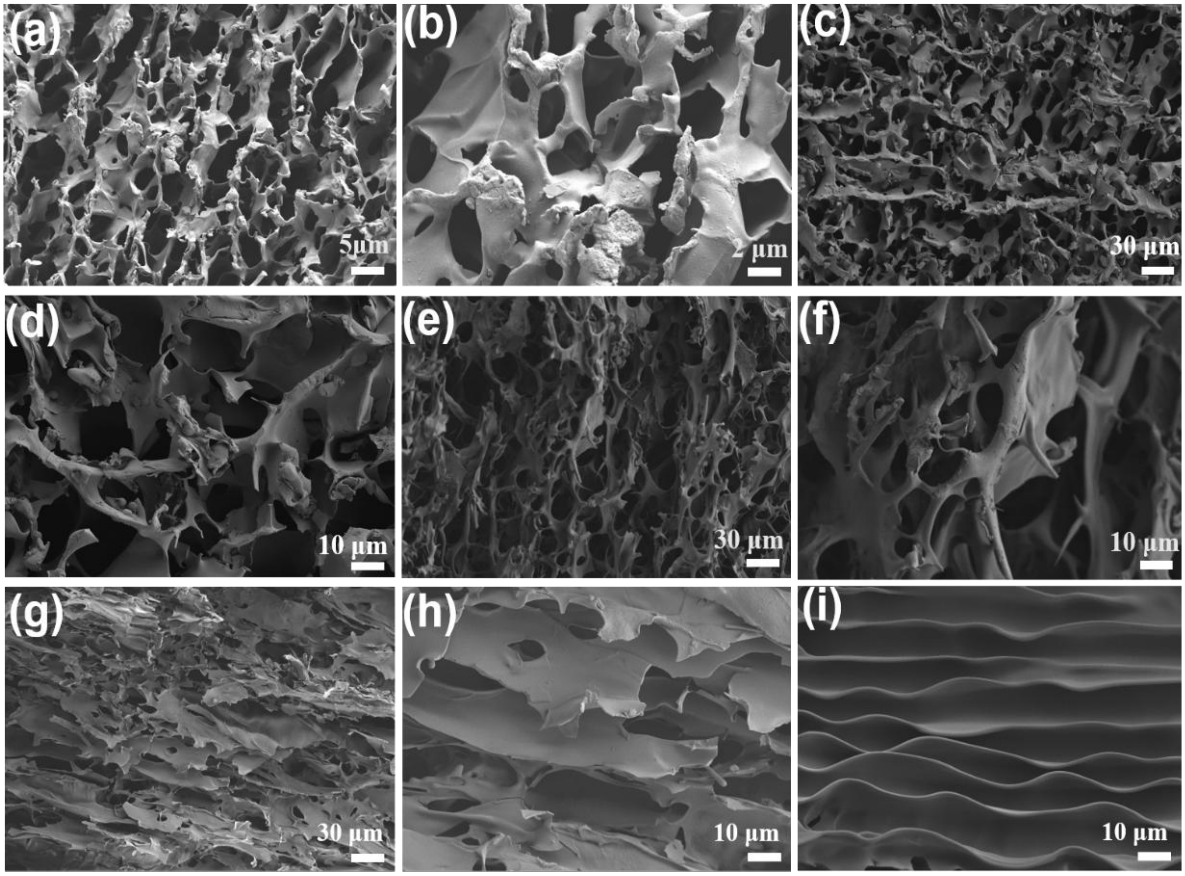


Fig. 3 SEM images of surface for (a, b) PI, (c, d) PI-ANF-3, (e, f) PI-ANF-5, (g, h) PI-ANF-8, (i) directed freezing of pores

PI 气凝胶在制备过程中由于要经历冷冻干燥和热亚胺化的过程，由于液-气界面处的压力差，溶剂蒸发会引起毛细作用力，导致 PI 气凝胶的收缩[24]，但是 PI 气凝胶的收缩主要发生在热亚胺化过程中， PAA 气凝胶在升高的温度下会遭受严重的体积收缩，在加入 ANF 以后气凝胶的收缩率明显下降[20]，如 Fig.4(a)所示。PI 与 PI-ANF 气凝胶孔隙率几乎保持不变，而气凝胶的体积收缩率逐渐减小从 PI 纯样的 37.4%逐步降低至 PI-ANF-8 的 30.0%。Fig.4(b)显示气凝胶的密度随着 ANF 含量的增加密度表现出上升趋势从 PI 纯样的 0.0976 g/cm^3 增加到 0.116 g/cm^3 。这是由于 ANF 在其中起到有机填料的作用，PI 作为骨架而 ANF 可以作为填料填充其间从提升其密度抑制 PI-ANF 收缩，因此 PI-ANF 气凝胶有着更小的体积收缩率，从而赋予 PI-ANF 气凝胶更大尺寸稳定性能。

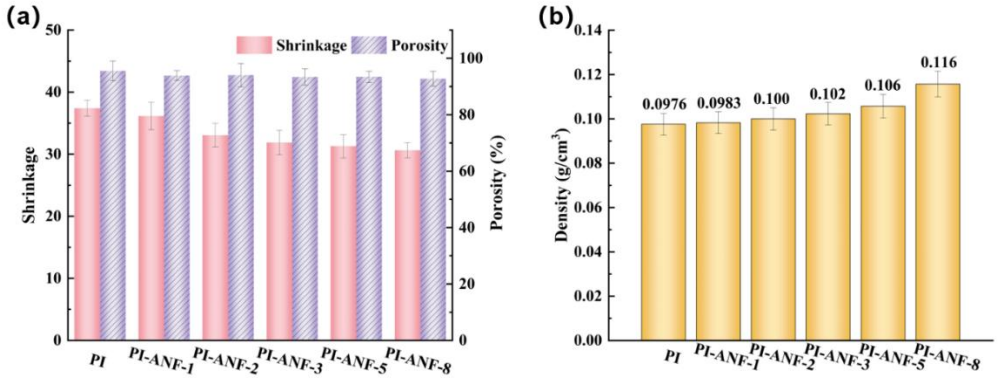


Fig. 4 (a) Shrinkage and porosity, (b) density of ANF and PI-ANF

2.3 PI-ANF 气凝胶声学性能

如 Fig.5(a)所示，所有气凝胶样品的吸声系数范围在 0.02~0.98 之间，随着频率的升高，由于 ANF 独有的大开孔结构，ANF 气凝胶仅能与高频声波产生恒定的摩擦和能量耗散，因此 ANF 气凝胶在中低频（3000 Hz 以下）的范围内，显示出非常低的平均吸声系数值。PI-ANF 气凝胶的吸声系数呈现先增高后降低的趋势。当 ANF 含量为 3 wt%时，PI-ANF 气凝胶的吸声性能达到最佳。Fig.5(b)展示了所有气凝胶样品的平均吸声系数，从 Fig.5(b)中可以看出，在 1000~5000 Hz 范围内，PI-ANF-3 的平均吸声系数从 PI 纯样的 0.56 提升至 0.78。虽然 ANF 气凝胶在 4000-5000 Hz 的高频波段表现出非常高的吸声系数，但是其全波段平均吸声系数为 0.53，依然小于 PI-ANF-3 和 PI 气凝胶。PI-ANF-3 优异的隔音性能可归因于 ANF 的加入，其在 PI 骨架的开孔结构内构建了大量介孔[23]。大孔结构优先消散高频噪音[25]，而较小的孔结构优先消散低频噪音。因此，PI-ANF-3 气凝胶独有的混合孔隙结构表现出优异的宽带吸声行为。此外，ANF 的加入使其附着于 PI 骨架表面，提供了更多的比表面积(Fig.3(c, d))，有效的增加了声波的反射路径从而有效的增加了声能的耗散。但 ANF 含量为 5 wt%和 8 wt%时其吸声系数呈现出了下降趋势(Fig.5(a))，特别是当 ANF 含量达到 8 wt%时 PI-ANF-8 气凝胶的平均吸声系数显著降低，平均吸声系数仅为 0.26。这是由于 ANF 含量过高，在 PI 孔隙中出现了团聚导致 PI 气凝胶内部致密均孔隙被填满(Fig.3(g~h))，大量声波在材料表面就被反射难以进入从气凝胶被耗散。结果表明过量添加 ANF 并不会提高 PI-ANF 气凝胶的吸声性能。ANF 作为有机填料在含量小于 5 wt%时，制备的 PI-ANF 气凝胶内部多孔结构可以增加空气阻尼，有利于声波能量的耗散从而表现出优异的宏观吸声降噪性能。

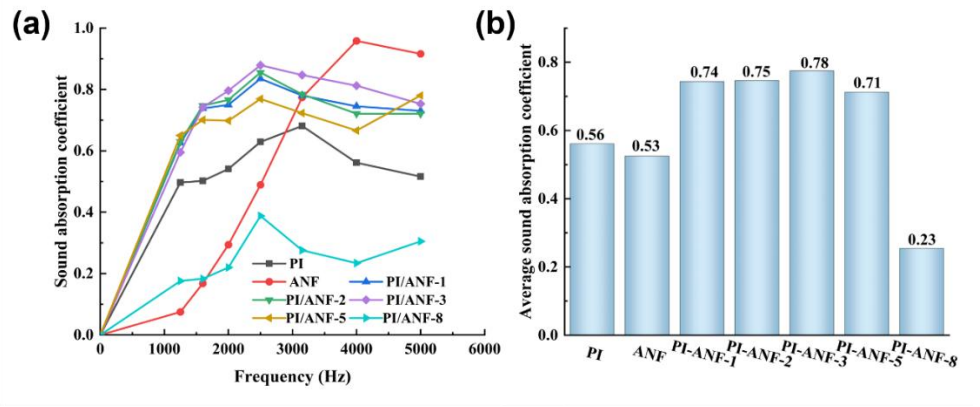


Fig. 5　(a) Aerogel sound absorption coefficients and (b) average sound absorption coefficients of ANF and PI-ANF

2.4 PI-ANF 气凝胶力学性能

ANF 的加入不仅提高了 PI 气凝胶的声学性能，还可以赋予 PI-ANF 气凝胶材料较强的力学性能。为了进一步探究 ANF 对 PI 力学性能的影响，对 ANF 含量的 PI-ANF 复合气凝胶进行了压缩测试应力-应变曲线示于 Fig.6(a)中，所有 PI-ANF 气凝胶样品均表现出良好的压缩回弹性能。随着 ANF 含量的增加，PI-ANF 气凝胶样品的压缩强度和压缩模量均得到了显著提升，最大压缩强度由 PI 纯样的 20.3 kPa 增加至 PI-ANF-8 的 104 kPa，提高了 5.24 倍这是由于 ANF 的加入使气凝胶材料形成了更加致密的内部凝聚结构(Fig.3(g))。压缩模量是用来反映材料压缩性能和力学稳定性的重要指标，Fig.6(b)可以明显看出 PI-ANF 气凝胶的压缩模量也由纯样的 66.7 kPa 提升至 434 kPa 提升了 6.5 倍。这归因互连的 ANF 为 PI 骨架提供了有效的物理支持，而且适当浓度的 PI 和 ANF 之间的物理支持作用有效的防止气凝胶内部多孔结构的塌陷。由 ANF 和 PI 组成的气凝胶能够在压缩至 30%应变后实现良好的回弹性能，进一步提升了气凝胶的力学性能。

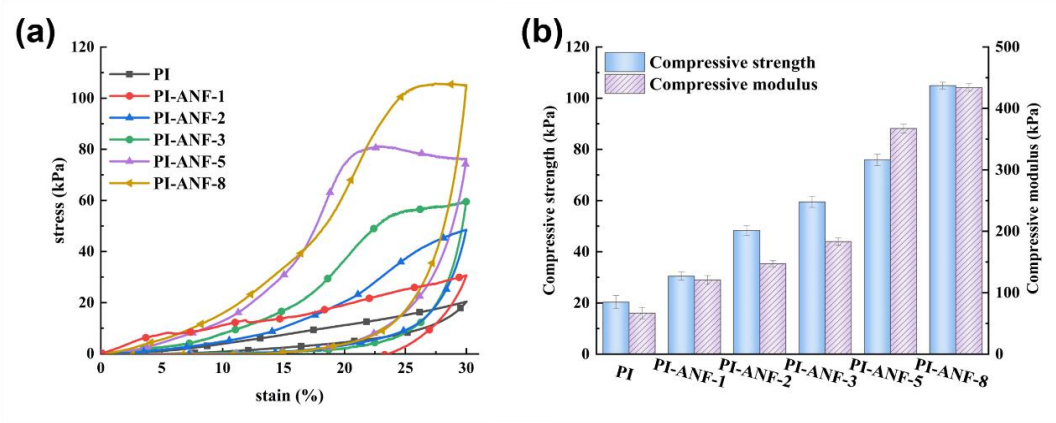


Fig. 6　Compressive resilience curves for PI and PI-ANF materials: (a) compressive stress-strain curves of PI and PI-ANF materials with the ultimate compressive strain of 30%; (b) compression modulus and compression strength of PI and PI-ANF materials

2.5 PI-ANF 气凝胶热稳定性能

气凝胶的热稳定性也是决定其在极端条件下作为耐用材料的关键因素之一，Fig.7(a, b)可以看出加入 ANF 以后材料热稳定性下降略微下降。Tab.2 列出了 ANF、PI 和 PI-ANF 材料的详细 T_g 数据，$T_{5\%}$表示材料质量损失为 5%时对应的温度，T_{max} 表示材料最大失重率对应的温度，从 Tab.2 可以明显看出，PI 由于其骨架上的苯环和酰亚胺环所以 PI 有着很强的分子刚性和高内聚能密度，使得 PI 是种高热稳材料[19]，$T_{5\%}$和 T_{max} 分别为 546 ℃和 593 ℃。随着温度的升高在 253 ℃时 ANF 最先达到材料的 $T_{5\%}$开始分解。加入 ANF 后 PI-ANF 气凝胶的 $T_{5\%}$和 T_{max} 相比与 PI 都有所降低，这是由于加入 ANF 材料以后因为 ANF 中 NH-CO 键容易先发生分解，导致 ANF 含量越高 PI-ANF 的 $T_{5\%}$越低，$T_{5\%}$从 PI-ANF-1 的 545 ℃下降到了 PI-ANF-8 的 430 ℃，而 T_{max} 由 PI-ANF-1 的 585 ℃略微降低至 PI-ANF-8 的 582 ℃，由于 T_{max} 主要由于 PI-ANF 气凝胶中的 PI 基体决定，T_{max} 保持不变表明 ANF 含量的增加对 PI 基体影响不大。虽然 PI-ANF-8 气凝胶材料 $T_{5\%}$和 T_{max} 都有所降低，但是在 800 ℃时样品剩余物百分比依然有着 49.1%。PI-ANF 气凝胶在 800 ℃时样品剩余物百分比随着 ANF 含量增加出现先增加后降低的趋势，这是由于 ANF 含量较低时 ANF 对 PI 骨架热分解影响不大，最终残余物中包含 ANF 残余物和 PI 基体残余物，且主要是 PI 的残余物使得残余物百分比上升，随着 ANF 含量的增加使得复合气凝胶残余物中 ANF 比例上升，且 ANF 加入后对 PI 基体分解有促进作用导致残余物百分比下降。结果表明加入 ANF 后 PI-ANF 气凝胶的热稳定性有所降低，但它仍然支持在 400 ℃的较高温度下使用，依然有着优异的热稳定性。

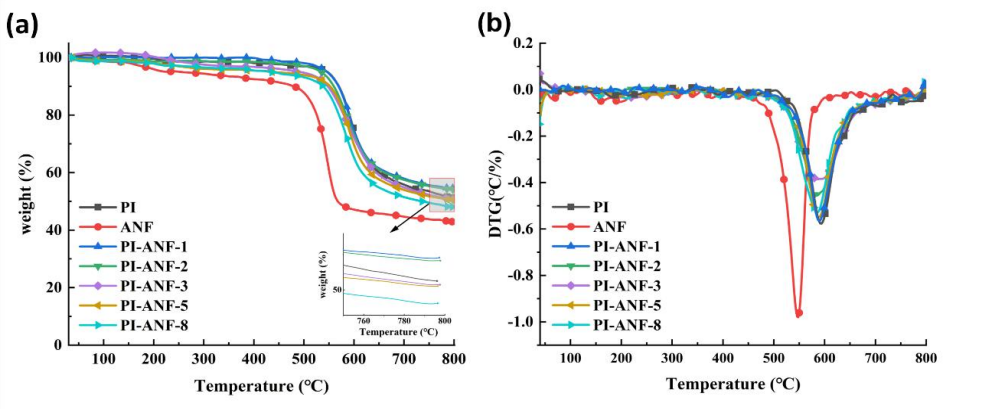


Fig. 7　(a) TG and (b) DTG curves of ANF and PI-ANF aerogel

Tab. 2　Thermal stability data of ANF, PI and PI-ANF materials

Sample	$T_{5\%}$ (℃)	T_{max} (℃)	Residue at 800 ℃/%
ANF	253	547	42.9
PI	546	593	51.3
PI-ANF-1	545	585	54.5

PI-ANF-2	533	584	54.1
PI-ANF-3	491	583	50.7
PI-ANF-5	440	583	50.5
PI-ANF-8	430	582	49.1

3 结论

通过将 ANF 和 PI 进行复合，制备了 PI-ANF 复合气凝胶材料。ANF 和 PI 独特的混合孔隙结构赋予了 PI-ANF 复合气凝胶优异的声学和力学性能，ANF 附着在 PI 骨架内构建了大量的介孔可以有效吸收和耗散声波，PI-ANF 复合气凝胶平均吸声系数最高可以达到 0.78。随着 ANF 含量的上升 PI 和 ANF 之间增强的物理支持作用有助于吸收和分散更多能量，更好抵抗内部结构破坏，PI-ANF 气凝胶最大压缩强度由 PI 的 20.3 kPa 增加至 PI-ANF-8 的 104 kPa。由于 PI 和 ANF 较强的分子刚性和高内聚能密度，PI-ANF 气凝胶也有着较高的热稳定性支持在 400 ℃的较高温度下使用，在建筑、消防、电子包装等领域都有着潜在应用前景。

参考文献：

[1] 段银莹, 徐奕灵, 洪峰, 等.聚氨酯多孔吸声材料的制备、结构及性能研究进展[J].高分子材料科学与工程, 2024, 40(12): 137-147.

Duan Y Y, Xu Y L, Hong F, *et al*. Progress in research of preparation, structure and properties of porous polyurethane sound-absorbing materials[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(12): 137-147.

[2] Badri Y, Dodd G, Cater J, *et al*. Review of granular material damping and sound absorption for possible application in the sound insulation of lightweight floors[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 97: 110881.

[3] Chen K, Wang D, Du J, *et al*. Excellent broadband sound absorption in composites manufactured by embedding piezoelectric polymer aerogels in porous ceramics[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2025, 680: 537-545.

[4] Zhao X, Hu Y, Xu X, *et al*. Sound absorption polyimide composite aerogels for ancient architectures' protection[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2023, 6: 137.

[5] Hou X, Chen J, Chen Z, *et al*. Flexible aerogel materials: a review on revolutionary flexibility strategies and the multifunctional applications[J]. ACS Nano, 2024, 18(18): 11525-11559.

[6] Feng L, Wei P, Ding S, *et al*. Superelastic and thermal insulating multilayer organic-inorganic hybrid aerogel built from boron nitride nanoribbons and aramid nanofibers[J]. Composites Science and Technology, 2023, 244: 110277.

[7] Yang Z, Hu Q, Wang L, *et al*. Recent advances in the synthesis and application of graphene aerogel and silica aerogel for environment and energy storage: A review[J]. Journal of Environmental Management, 2025, 377: 124668.

[8] Gao H, Bo L, Liu P, *et al*. Ambient pressure dried flexible silica aerogel for construction of monolithic shape-stabilized phase change materials[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2019, 201: 110122.

[9] Zhao X, Zou D, Wang S. Flexible phase change materials: preparation, properties and application[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 431: 134231.

[10] Chen J, Yang Y, Liu L, *et al*. Preparation of lamellar-structured carboxymethyl cellulose aerogels for efficient sound absorption[J]. Cellulose, 2025, 32: 505-518.

[11] Yan R, Qin W, Gong G, *et al*. Lightweight composite aramid nanofiber aerogel with multistage pores and layered structure for acoustic and thermal insulation[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2025, 142: e56850.

[12] Niu T, Zhao Y, Ahmad N, *et al*. Ultralight and strain-sensitive bacterial cellulose derived carbon fiber-reinforced graphene aerogel for broadband sound absorption[J]. Ceramics International, 2024, 50: 23550-23559.

[13] Fan W, Zhang X, Zhang Y, *et al*. Lightweight, strong, and super-thermal insulating polyimide composite aerogels under high temperature[J]. Composites Science and Technology, 2019, 173: 47-52.

[14] Ni L, Luo Y, Shen L, *et al*. Lightweight polyimide/silica aerogel composite foams and their derived carbon foams for excellent flame retardancy, thermal insulation and EMI shielding performance[J]. Polymer, 2024, 305: 127158.

[15] Huang Y, Hao X, Ma S, *et al*. Covalent organic framework-based porous materials for harmful gas purification[J]. Chemosphere, 2022, 291: 132795.

[16] Wang W H, Wang Y, Li J J, *et al*. Dose effects of calcium peroxide on harmful gases emissions in the anoxic/anaerobic landscape water system[J]. Environmental Pollution, 2019, 255: 112989.

[17] Yang M, Cao K, Sui L, *et al*. Dispersions of aramid nanofibers: a new nanoscale building block[J]. ACS Nano, 2011, 5: 6945-6954.

[18] Zhang L, Li X, Ding E, *et al*. Shape memory polyimide/carbon nanotube composite aerogels with physical and chemical crosslinking architectures for thermal insulating applications[J]. Composites Science and Technology, 2024, 251: 110588.

[19] Ruan K, Gu J. Ordered alignment of liquid crystalline graphene fluoride for significantly enhancing thermal conductivities of liquid crystalline polyimide composite films[J]. Macromolecules, 2022, 55: 4134-4145.

[20] Guo Y, Qiu H, Ruan K, *et al*. Hierarchically multifunctional polyimide composite films with strongly enhanced thermal conductivity[J]. Nano-Micro Letters, 2022, 14: 26.

[21] Song S, Shi Y, Tan J, *et al*. An efficient approach to fabricate lightweight polyimide/aramid sponge with excellent heat insulation and sound absorption performance[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2022, 109: 404-412.

[22] Zhao X, Ruan K, Qiu H, *et al*. Fatigue-resistant polyimide aerogels with hierarchical cellular structure for broadband frequency sound absorption and thermal insulation[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2023, 6: 171.

[23] Wang X, Zhao K, Cao W, *et al*. Polyimide-coating-on-aramid nanofiber strategy toward ultralight organic aerogels with multifunctional properties[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 499: 155939.

[24] Hou X, Mao Y, Zhang R, *et al*. Super-flexible polyimide nanofiber cross-linked polyimide aerogel membranes for high efficient flexible thermal protection[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 417: 129341.

[25] Duan Y, Ke X, Shi Z, *et al.* Simultaneously enhanced the sound absorption coefficient and dimensional stability of Carboxymethyl cellulose/clay aerogel by impregnating polyurethane[J]. Materials Today Communications, 2024, 39: 109183.

Preparation and Acoustic Properties of Aramid Fiber/Polyimide Composite Aerogel

Jingjie Hu, Shufen Han, Yiling Chen, Feng You, Xueliang Jiang, Chu Yao

(*Hubei Key Laboratory of Plasma Chemistry and New Materials, School of Materials Science & Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China*)

ABSTRACT: As a high-performance polymer material, polyimide (PI) aerogel holds great promise for applications in acoustic and thermal protection. However, PI suffers from a monotonous pore structure and poor acoustic and mechanical properties, which limit its use in noise reduction. To enhance the overall performance of PI aerogels and expand their scope of application, a polyimide-aramid fiber aerogel (PI-ANF) with low shrinkage, high strength, and excellent sound-absorbing properties was prepared by mixing an aramid fiber (ANF) dispersion with polyimide acid (PAA) and subjecting the mixture to freeze-drying and thermal imidization. Following the incorporation of ANF, the shrinkage rate of the aerogel samples gradually decreases from 37.4% in the pure PI sample to 30.0% in the PI-ANF-8 sample, while the maximum compressive strength increases from 20.3 kPa in PI to 104 kPa in PI-ANF-8. The minimum decomposition temperature of PI-ANF is 430 °C, which still allows the aerogel to be used at relatively high temperatures below 400 °C. When the ANF mass fraction is 3%, ANF incorporated into the PI matrix forms a large number of mesopores capable of effectively absorbing sound waves, optimizing the acoustic performance of the composite aerogel and achieving an average sound absorption coefficient of 0.78. The results indicate that the introduction of ANF effectively enhances both the sound absorption and mechanical properties of PI aerogels, demonstrating significant application potential in the fields of new energy and building materials.

Keywords: polyimide; aramid nanofiber; composite aerogels; sound absorption