

二氧化硅气凝胶及其复合材料吸声性能的研究进展

张 鹏, 杨自春, 张 震, 李昆锋, 杨飞跃, 李肖华, 邵慧龙,
费志方, 谢旭阳, 甘智聪

(海军工程大学 动力工程学院, 湖北 武汉 430032)

摘 要: 制备出良好的具有高孔隙率的吸声材料对于噪声的控制至关重要。二氧化硅气凝胶凭借其高孔隙率和高声阻抗近年来越来越受关注, 将其与传统吸声材料相复合可显著结合两者的吸声优势, 对于噪声的消除具有很重要的意义。介绍了吸声性能的概念、吸声结构、机理以及测量表征方法, 深入探究了密度、厚度、孔隙率、孔径、杨氏模量以及颗粒大小对气凝胶吸声性能的影响规律, 详细综述了二氧化硅气凝胶与有机物、有机物/无机矿物以及非织造布复合材料吸声性能的研究进展, 最后展望了目前面临的挑战和未来的发展方向。

关键词: 二氧化硅气凝胶; 复合材料; 吸声影响因素; 有机聚合物

中图分类号: TB303; TB332; TB34

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)11-4306-17

气凝胶是由斯坦福大学的 Kistler 于 1931 年以水玻璃为原料, 采用乙醇超临界干燥技术首次制备得到的^[1], 它是目前世界上最轻的固体, 最低密度可达 0.16 kg/m^3 ^[2], 它也具有极低的导热系数, 可达 $0.013 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ^[3], 较大的孔隙率(约为 99%)^[4]也使得气凝胶作为典型的多孔材料有着极大的应用市场。凭借其多孔性、高比表面积^[5]、低密度性和良好的声阻抗(100 m/s 的低声速)^[6], 气凝胶材料在隔热^[7], 吸隔声^[8], 催化^[9], 吸附^[10]等领域有着巨大的优势和潜力, 例如在建筑工程^[11]、交通运输^[12]、化工过程^[13]、制药工程^[14]、航空航天^[15]中起到了重要的作用, 如图 1 所示。

尽管气凝胶已经发展了 90 年之久, 气凝胶的种类不断增加, 包括有机气凝胶^[16]、氧化物气凝胶^[17]、生物质基气凝胶^[18]等, 但是传统的二氧化硅气凝胶仍然是研究的重点和研究的基础, 其隔热保温性能依然是主要的市场驱动力, 二氧化硅气凝胶的其他性能如吸声性能近年来不断成为研究的热点。作为具有高孔隙率和高声阻抗的介孔材料, 二氧化硅气凝胶在消除噪声方面取得了不错的进展^[8]。噪声干扰作为长期的问题已经影响着人类许久, 市场上也早已出现了不同的吸声材料, 如聚苯乙烯泡沫塑料等高聚物^[19]、水泥膨胀珍珠岩板等多孔结构^[20]、硬质纤维板等穿孔板共振吸声结构^[21]。这些材料在特定的频率下表现出良好的吸声性能, 研究人员也常将 2 种及以上的材料进行复合以提高其在较宽频率下的吸声性能。为了充分结合多种吸声材料的优

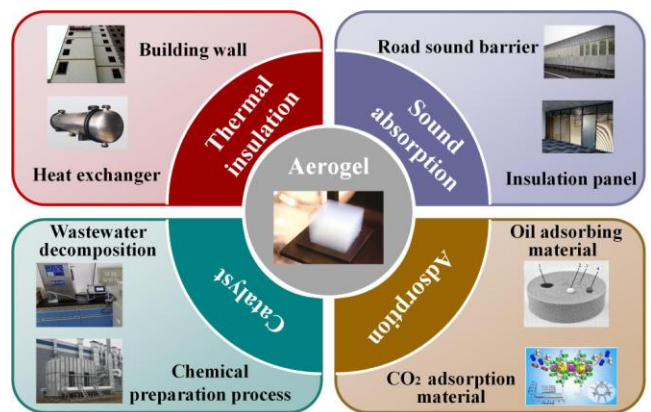


图 1 气凝胶的主要应用

Fig.1 Main application of aerogel

势, 二氧化硅气凝胶与上述常见吸声材料的复合实验研究也不断引起了研究人员的兴趣。

本文主要以二氧化硅气凝胶为出发点, 首先详细介绍了吸声性能的概念、结构、机理以及测量表征方法; 其次以吸声机理为依据, 总结了气凝胶自身属性及孔隙内介质状态对其吸声性能的影响, 将定性讨论吸声问题逐渐转为定量化分析; 接着概述了气凝胶及其复合材料吸声性能的研究进展, 从不同复合物的角度对吸声性能进行了讨论; 最后展望了气凝胶吸声性能的发展方向。

收稿日期: 2021-10-27

基金项目: 国家自然科学基金(51802347); 国家部委基金资助项目(9140A27030514JB11449)

作者简介: 张 鹏, 男, 1995 年生, 博士, 海军工程大学动力工程学院, 湖北 武汉 430032, E-mail: zphlgs19951027@163.com

1 吸声性能的概念、结构、机理以及测量表征方法

1.1 吸声性能的概念

当声波传播过程中撞击物体时，声能的一部分发生反射，称为材料的隔声；一部分继续传播，称为材料的声透射；另一部分会因为其在内部传播时空气的粘性摩擦而发生损耗，称为材料的吸声。虽然隔声和吸声材料都是为了降噪而设计的，但是隔声材料是利用大声阻抗来反射声波，在材料的另一端只有极少量的透射声，而吸声材料是利用吸声结构和吸声介质造成无限声场来减弱反射声波，获得降噪效果的。

材料的吸声性能就是指声能穿透材料和被材料消耗的能力。材料的吸声性能越好，表明声能可以透过材料不被反射的能力越强，且透过材料表面进入内部的声音发生耗散的部分占比越高，被透射的部分占比越低，对于环境的吸声降噪效果越好。

1.2 吸声结构

吸声材料根据其微观结构可以分为多孔吸声材料、微穿孔板共振吸声材料、薄膜共振吸声材料等^[22]。多孔吸声材料分为蜂窝状吸声材料^[23]、纤维吸声材料^[24]和颗粒吸声材料^[25]，图 2 展示了 3 种多孔吸声材料的结构示意图。

蜂窝状吸声材料是典型的多孔吸声材料，其主要代表是泡沫吸声材料和开孔聚氨酯材料，主要特点是具有连接气孔的立方体细胞，内部结构较为规则。纤维吸声材料在市售中比较常见，基本特征是由一系列平行的纤维束构成的吸声体，分为天然纤维和合成纤维，由于其具有高吸收性和绿色环保性，因此常常被

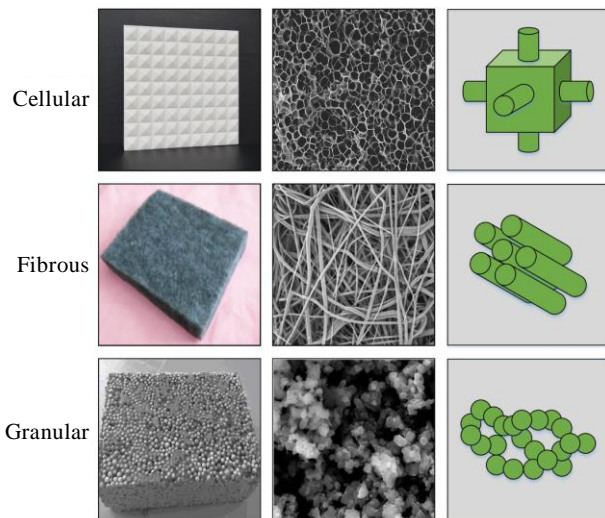


图 2 3 种常见的多孔吸声材料

Fig.2 Three common porous sound absorbing materials

用来制作纤维增强二氧化硅气凝胶，在吸声和隔热方面都有一定的优势^[26]。颗粒吸声材料一般包括多孔混凝土、土壤等，颗粒状气凝胶也可以归为颗粒吸声材料，其特点是由单个颗粒经过堆积而成，松散的颗粒导致孔隙率较大，具有良好的吸声性能。多项研究表明二氧化硅气凝胶中存在多个开孔腔，其吸声方式类似谐振器，吸声性能的优良取决于谐振器的结构。

1.3 吸声机理

二氧化硅气凝胶等多孔吸声材料的内部示意图如图 3 所示，根据孔与空气的接触方式以及孔的结构可将孔分为开孔、通孔、盲孔和闭孔，多孔吸声材料正是由于这些孔的存在使得其具备良好的吸声性能。从吸声效果上来看，闭孔的吸声能力明显不如其他 3 种形式的孔，因为它与空气隔绝开，大部分声音难以到达孔隙中。当空气中的声音遇到多孔材料时，首先进入开孔，声波也跟着来回运动，孔壁附近的空气运动有快有慢，空气在材料内部孔隙中传播时，由于声波的振动，空气质点的黏滞性会产生相应的黏滞力，使得声能转化为热能，从而造成声波的衰减，达到吸收声波的目的^[27]。同时声波的传播会伴随着空气的膨胀和压缩，膨胀时温度降低，压缩时温度升高，空气与孔壁间也会发生热传导，这种持续的热交换也会导致声能不断向热能转化，因此开孔、盲孔和通孔的数量和结构在很大程度上影响了多孔材料的吸声性能。吸声材料对于高频声波的吸收一般优于低频声波，是由于高频声波加快了孔隙中空气的振动，使得孔隙中热耗散加快，声波衰减的更多，因此多孔材料对高频声波的吸收更加充分。

1.4 吸声测量方法

测量材料吸声系数一般的方法是混响室法^[28]和阻抗管法^[29]。混响室法是测量声音从不同方向射入材料时的声波能量损失，而阻抗管法是测量声波正入射到材料表面的吸声系数。工业上由于声波入射到建筑

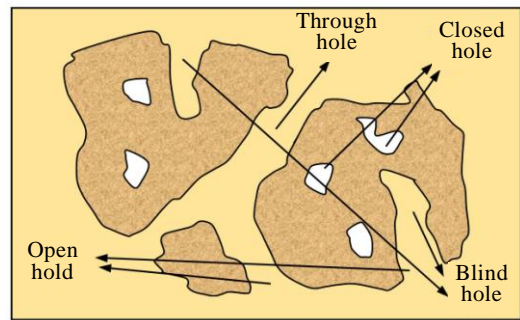


图 3 多孔吸声材料内部示意图

Fig.3 Schematic diagram of the interior of porous sound absorbing material

表面的无规则性,常用的是混响室法,在科学研究中,为了提高测量的吸声系数的准确性,一般采用的是阻抗管法,声波以正入射的方式进入不同的材料,减少了因声波方向不同而产生的测量误差。阻抗管法又分为驻波法^[30]和传递函数法^[31],目前最常用的方法是传递函数法。在传递函数法中,阻抗管是一个圆柱形的结构,一端是被测试的吸声材料样品,一端是安装扬声器作为声源(通常是白噪声)。在阻抗管的上端安装有 2 个传声器,分别记录入射声波压力和反射声波压力,最终根据记录的数据计算材料的声学性能,传递函数法的阻抗管构造如图 4 所示。阻抗管中传声器 1 和 2 的距离和阻抗管的直径决定了测量的频率范围,29 mm 的阻抗管测量的频率范围是 50~1600 Hz,100 mm 的阻抗管测量的频率范围是 500~6400 Hz,然后通过软件算法将 2 个阻抗管测量的频率合并到一起,形成材料从低频到高频的全频段吸声曲线图^[32]。

1.5 吸声表征方法

吸声系数 α 是用来表征材料吸声性能的最常用指标,其定义是材料吸收声强与入射声强的比值,范围是 0 到 1 之间,吸声系数 α 大于 0.2 的被称为吸声材料,其越接近 1 表明材料的吸声能力越强。通过传递函数法测量的入射声波传递函数 G_I ,反射声波传递函数 G_R ,传声器 1 和 2 之间的传递函数 G_{12} 等,可以计算出材料的反射系数 R ,从而计算出材料的吸声系数 α ,如公式(1),(2)所示。

$$\exp[j2k(s+l)] \cdot [(G_{12} - G_I) / (G_R - G_{12})] \quad (1)$$

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (2)$$

其中 k 为波数, s 和 l 分别为传声器 1、2 间的距离和传声器 2 到吸声材料样品上表面的距离。

吸声系数曲线(SAC)形象地展现了材料吸声系数与频率的关系,纵坐标是 0 到 1 的吸声系数,横坐标是 100~6400 Hz 的声波频率。吸声系数曲线的变化趋势可以很好地反映出材料在不同频率下的吸声效果,不同走势的吸声曲线还可以反映出材料不同的内外部属性,具有直观的效果^[33],如图 5 所示。

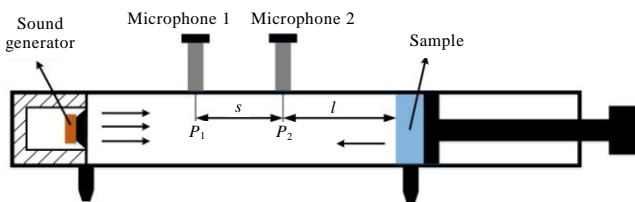


图 4 传递函数法的阻抗管结构

Fig.4 Impedance tube structure of transfer function method

降噪系数(NRC)是另外一个评价材料吸声性能的指标,与吸声系数不同,它是材料在声波频率为 250、500、1000 和 2000 Hz 下的吸声系数的算术平均值^[34],表示了材料的平均吸收声波能力,更能反映出材料对中低频声波整体吸收水平的高低,其基本表达式如公式(3)所示。

$$NRC = (\alpha_{250\text{Hz}} + \alpha_{500\text{Hz}} + \alpha_{1000\text{Hz}} + \alpha_{2000\text{Hz}}) / 4 \quad (3)$$

部分文献^[35,36]还采用声学活性 $\alpha_{\text{normalized}}$ 评价材料的吸声性能,其表示在一定频率范围内吸声曲线下的归一化面积,可以反映出材料在某个频段上的总体吸声水平,其表达式如公式(4)所示。

$$\alpha_{\text{normalized}} = \frac{1}{f_2 - f_1} \int_{f_1}^{f_2} \alpha(f) df \quad (4)$$

其中 f_1 是 50 Hz 低频, f_2 是 1600 Hz 高频。

2 影响气凝胶吸声性能的因素

声波进入气凝胶孔隙的时候会发生耗散,这也是材料吸声的关键,因此发生声波耗散时的气凝胶自身属性状态决定了声波的损耗效率,从而决定了材料的吸声性能好坏^[37]。研究表明,密度^[38]、厚度^[33]、孔隙率和孔径^[39]、杨氏模量^[40]以及颗粒大小^[41]等因素会影响材料的吸声性能。如何选择且制备出具有合适上述基本属性组合的气凝胶及其复合材料成为研究吸声性能的重点环节,同时也是研究的难点所在。因此,准确把握各种因素影响气凝胶吸声性能的原理是研究成功的关键一步。近年来,针对这些影响吸声性能的因素,也有了很大的研究和关注。

2.1 密度

多孔材料的密度是指其单位体积质量,密度的增加可能导致多孔材料孔隙率的降低,进而可能影响材料的吸声性能。

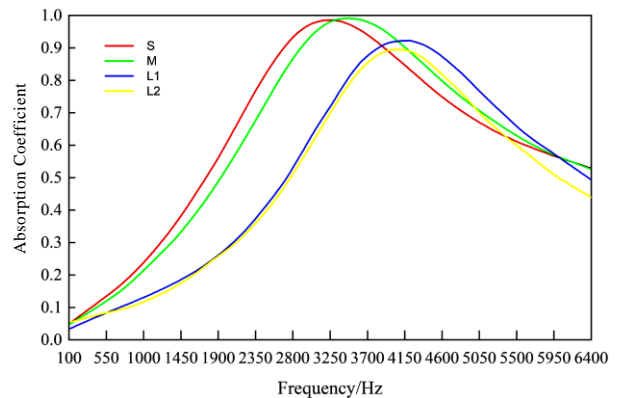


图 5 吸声系数曲线

Fig.5 Sound absorption coefficient curves^[33]

通过控制不同的原料含量和配比可以制备出不同密度的吸声材料。任晓荷等^[38]通过向密闭容器中加入不同质量的发泡料浆，制备出不同密度的 IBPIF 材料，探究密度对吸声性能的影响。实验结果发现密度对泡孔尺寸和开孔率的影响较大，密度增加，材料的开孔率逐渐降低，泡孔尺寸也逐渐变小。适当地提升泡沫材料的密度，能够有效地提升材料对低频声波的吸收。但对于高频声波，随着材料密度进一步增大，到一定程度时材料的隔声性能凸显，导致在此范围内吸声性能下降。因此密度对吸声性能的影响也是间接的，通过影响孔尺寸、开孔率等进而影响材料的吸声性能。王月^[42]研究了密度对泡沫铝吸声性能的影响，发现密度较小的泡沫铝在某一频率之后其吸声系数明显高于密度较大的泡沫铝，是由于密度较小的泡沫铝更易破裂形成微通孔，而且其孔隙曲折程度更大，声波的传播更加受阻，造成能量的损耗越多，因此吸声系数越高。

由此可知，密度通过影响多孔吸声材料的孔隙率、孔结构等进而影响声波在材料内部的传播，从而影响了材料的吸声性能。

2.2 厚度

厚度是材料易调节的一个属性，可以通过选择不同尺寸的模具来获得不同厚度的气凝胶吸声材料。

为了得到材料厚度与其吸声性能之间的密切关系，Buratti 等^[33]研究了 5 种厚度(15, 20, 25, 30, 40 mm)的颗粒气凝胶的吸声性能。利用 4 种半透明的颗粒二氧化硅气凝胶(平均颗粒直径为 0.01~1.2、0.7~2.0、0.7~4.0、1.2~4.0 mm，分别命名为 S、M、L1、L2)，

最小颗粒和最大颗粒采用二氧化硅复合气凝胶(如石膏、水泥)，采用不同的模具将样品塑性成具有不同厚度的气凝胶。实验结果表明，当气凝胶厚度增加时，样品的第 1 个吸声峰值会往低频移动，如图 6 所示。是因为较大厚度的气凝胶具有更高的曲折度，影响了声音在气凝胶内部的传播，从而增加了声能损耗，提高了吸声性能。

不同的制备方式对相同厚度的气凝胶吸声性能也有不同的影响，掌握其影响机理对于在多个场景下不同的噪声频率范围，设计出具有最佳吸声性能的气凝胶片具有重要的意义。Merli 等^[43]采用了一种新颖的快速超临界萃取法制备了不同厚度的单片气凝胶(12.7, 19.1, 25.4 mm)，并利用阻抗管对其吸声性能进行了研究。结果显示，12.7 mm 厚度的气凝胶的吸声系数峰值在 1500 Hz 下为 0.88，当气凝胶片的厚度增加时，峰值吸声系数和峰值频率均减小，19.1 mm 厚度时，气凝胶的吸声系数峰值在 1300 Hz 下为 0.78，25.4 mm 厚度时，气凝胶的吸声系数峰值在 1100 Hz 下为 0.54。

Cao^[44]通过采用冷冻浇铸技术，设计了一种质量轻、厚度小、吸声性能好的迷宫状结构的纳米纤维气凝胶。重点研究了厚度对吸声性能的影响，发现随着材料厚度的增加，最大吸声系数向低频范围移动，且 10, 20, 30, 40, 50 mm 厚度材料的 NRC 分别为 0.33, 0.45, 0.47, 0.51 和 0.58。厚度的增加延长了声波在材料内部的传播路径，为声波传输介质与材料壁面间的摩擦和反射提供了更多机会，增加了更多的能力消耗，从而提升了吸声性能和效率。

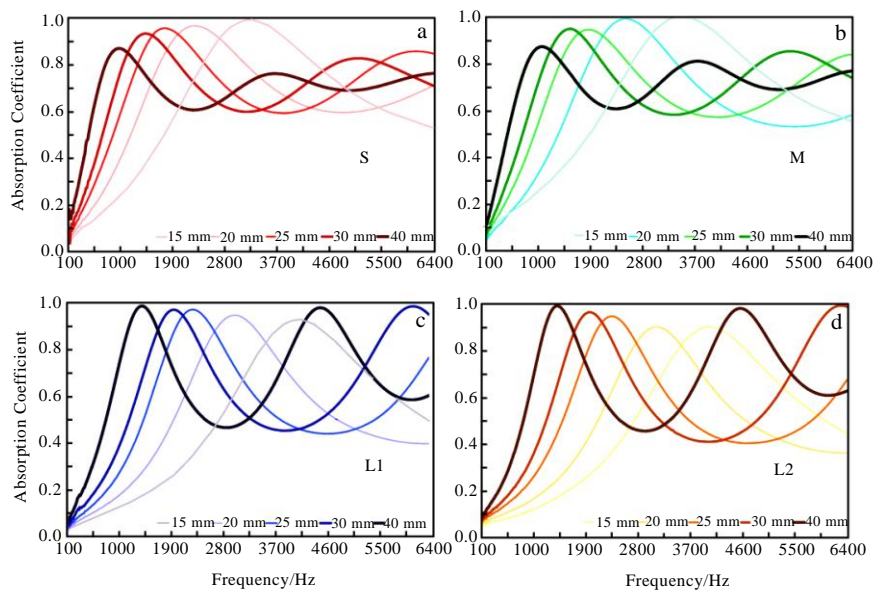


图 6 不同厚度和颗粒大小的气凝胶样品垂直入射吸收系数

Fig.6 Normal incidence absorption coefficient of S (a), M (b), L1 (c), and L2 (d)^[33]

综上所述,厚度是影响气凝胶等多孔材料吸声性能的一个重要因素,增加厚度会导致气凝胶内部结构的复杂性增加,声音传播路径更为曲折,导致更多的摩擦损耗,从而会对吸声有益。但是过大的厚度会影响材料的轻量化,作为实际建筑原材料或化工过程原料会产生冗余性和更多的成本。因此,设计出兼具适宜厚度和轻质的气凝胶吸声材料也是今后研究的重点。

2.3 孔隙率和孔径

孔隙率和孔径是多孔材料最显著的基本属性,不仅对材料的吸声性能有影响,对其隔热性能、吸附、吸波性能均有重要的影响,与此相关的研究也比较多。研究表明,气凝胶材料是具有离散空腔的材料,吸声行为类似谐振器^[45],其吸收频率取决于腔体的尺寸。目前有 2 种近似气凝胶多孔结构的模型表征气凝胶的吸声频率,赫姆霍兹模型是一个具有颈部的空腔结构^[46],共振频率与空腔的大小和颈部的长度成反比,与颈部横截面积和声速成正比,如公式(5)所示。

$$f_H = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{VL}} \quad (5)$$

其中, f_H 为赫姆霍兹共振频率, v 为声速, A 为空腔颈部横截面积, L 为空腔颈部长度, V 为空腔体积。

当气凝胶内部腔体倾向于球体时^[47],共振频率与腔体的直径成反比,与开口的大小成正比,如公式(6)。

$$f = Y \sqrt{\frac{d}{D^3}} \quad (6)$$

其中, f 为共振频率, Y 为常量(与材料有关), d 为腔体开口直径, D 为腔体直径。气凝胶的吸声系数曲线常呈现出多个狭窄的吸收峰的形态表明气凝胶中既有大的共振腔也有小的共振腔,即气凝胶中既有大孔也有小孔,孔径的分布一般是不均匀的,也使得气凝胶对高频和低频声波均有一定的吸收效果^[48]。

为了探究颗粒材料的有效孔隙率与综合吸声性能的关系,李文芳等^[49]研究了以陶粒为主要原料的多孔吸声材料在不同中值孔径和有效孔隙率下的吸声性能,利用流阻法和显微分析法定量表征材料的孔隙状况。材料的孔径在 0.71~1.44 mm 这一范围,选择了 0.96, 1.16, 1.33, 1.44 mm 4 个孔径大小的样品。实验表明,随着孔径增大,吸声性能得到改善, NRC 不断增大;随着孔径不断减小,一些开孔不断变成闭孔,对于吸声产生了不利影响,吸声性能也不断恶化。随着有效孔隙率的增加, NRC 也不断增加。研究同时也发现材料的孔径大小及孔隙率高对高频声波更加敏感,材料内部孔隙越多且越大,声波振动损耗效果越明显。

二氧化硅气凝胶复合材料的孔隙率和孔径受到二氧化硅以及第二相材料共同的影响。为了探究其影响吸

声性能的规律, Talebi 等^[39]研究了二氧化硅气凝胶和聚酯毡复合物的吸声性能,通过控制不同的合成条件,获得不同孔结构和性能的气凝胶颗粒,如图 7 所示。利用 X 射线显微计算机断层扫描和扫描电子显微镜对样品的孔隙率、孔径等参数进行了表征,另外还进行了氮气吸附分析,测定气凝胶颗粒的比表面积和孔结构。结果表明,气凝胶聚酯毡复合材料比传统的非织造布样品具有更优异的吸声性能,是由于加入的二氧化硅气凝胶具有低堆积密度、小孔径和大弯曲度。低堆积密度会减缓声波在材料内部的传播,增大孔隙中空气振动的频率,更高的孔隙率和更大的孔径使得声波更加容易进入材料内部,减少材料表面反射,因此更多的声波经过摩擦阻力发生耗散,材料表现出更高的吸声系数。

孔隙率和孔径不仅对材料的吸声性能有直接的影响,而且也会通过影响孔隙空气流阻进而影响材料的吸声性能。

由于空气流阻随着材料属性及周围环境的条件变化是无法预测的,研究人员建立了相应的流阻预测模型,将流阻与材料属性及周围环境的条件的关系更加清晰化。Wei 等^[50]采用一种新的模板复制方法,以金属浆料为前驱体,以聚氨酯泡沫塑料为模板,制备了具有吸声能力的开孔 IN625 泡沫材料。采用 FP 和 DB 模型相结合的方法,以孔隙率和泡孔尺寸(支柱长度和支柱宽度)为输入,对 IN625 泡沫材料的吸声性能进行了数值模拟,如图 8 所示。

文献结合了 Fouriea 等^[51]提出的几何模型,建立了基于微观结构的泡沫流阻模拟模型,如公式(7)~(10)所示。

$$d = \frac{3(3-\chi)(\chi-1)}{3.18d_m/t^2 - 0.61d_m^2/t^3} \quad (7)$$

其中, t 为杆长, d_m 为宽度, χ 为弯曲度,是描述气流扭曲的多孔结构的形状因子。

$$\chi = 2 + 2 \cos \left[\frac{4\pi}{3} + \frac{1}{3} \cos^{-1}(2\phi - 1) \right] \quad (8)$$

其中, ϕ 为多孔材料的孔隙率。

$$K = \frac{\phi^2 d^2}{36\chi(\chi-1)} \quad (9)$$

其中, K 为流动渗透率,与材料的属性有关。

最终得到的流阻模型为:

$$\sigma = \frac{\eta}{K} = \frac{36\eta\chi(\chi-1)}{\phi^2 d^2} \quad (10)$$

其中, η 为空气动态粘度,室温下为 $1.84 \times 10^{-5} \text{ N s m}^{-4}$ 。

从结果来看,材料的孔隙率、孔径、弯曲度等自身属性是影响材料周围的空气流阻的重要部分,进而对材料吸声性能造成影响。

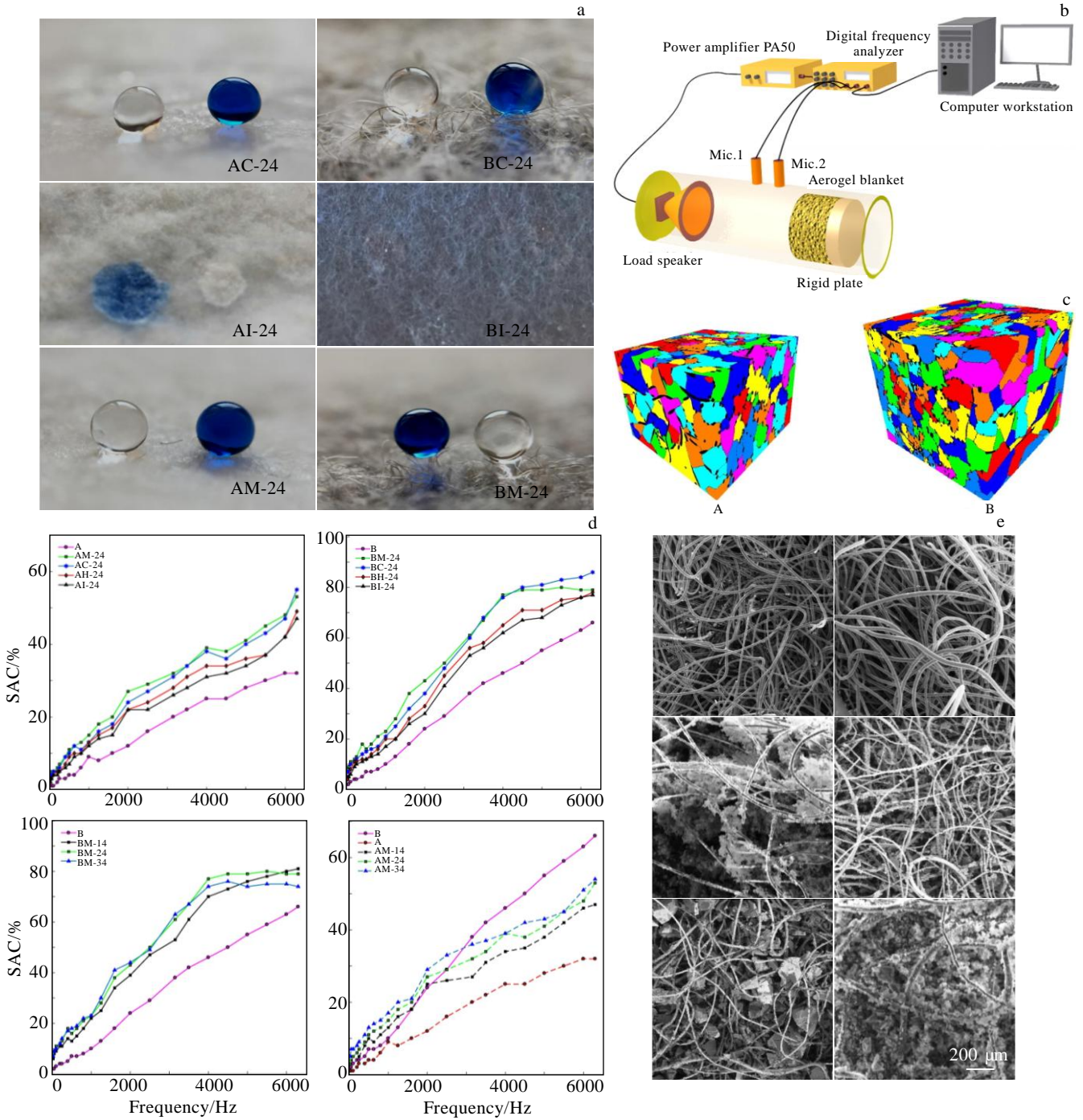


图 7 二氧化硅气凝胶和聚酯毡复合物的吸声性能研究

Fig.7 Water droplets on the surface of different composite aerogel blankets (a), schematic diagram of sound absorption device (b), separate holes displayed using a circular color map table (c), variation of sound absorption coefficient (SAC) of different samples with frequency (d), SEM images of non-woven fabric and gel blanket (e) [39]

Yang 等^[52]研究了一种计算玻璃纤维毡流阻的模型，基于 Bies 等^[53]提出的流阻基本表达式(11)，所提出的模型演变为公式(12)。

$$Rd^2\rho^{-1.53} = K \tag{11}$$

其中， R 为流阻， d 为纤维直径， ρ 是体积密度， K 为常数，当 d 单位是 m 时，一般取 3.18×10^{-9} 。

$$R = \frac{64\eta a}{B(B-2a)^2} \left(B = \sqrt{\frac{\pi [b^2\rho_g + (a^2 - b^2)\rho_r]}{\rho}} \right) \tag{12}$$

其中， ρ_g 是玻璃纤维的密度， ρ_r 是树脂的密度， a 是纤维直径， η 是空气粘度。

该模型假设气流速度垂直于纤维，毡中的纤维主

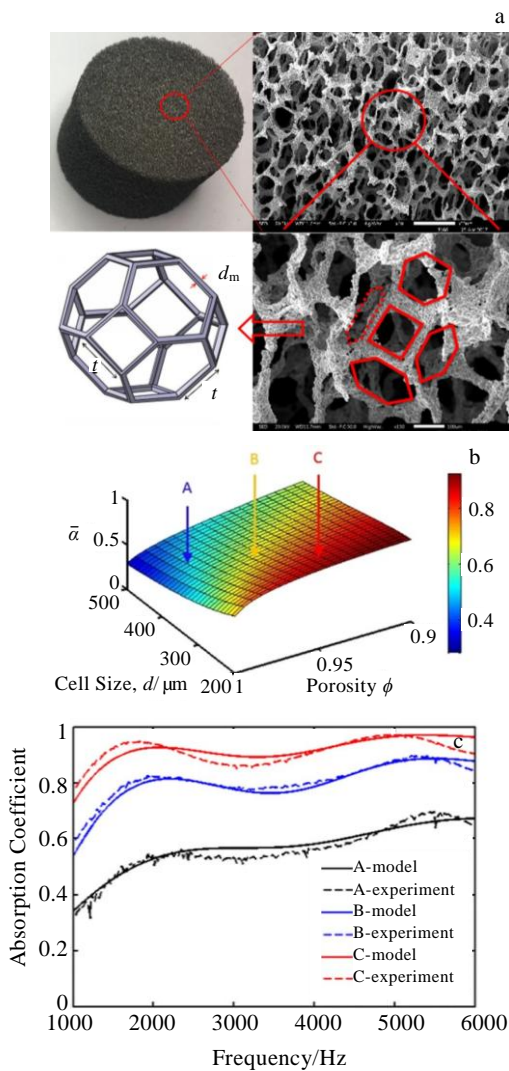


图 8 使用模板复制法制备的开孔泡沫吸声材料及流阻模拟模型的建立

Fig.8 Macro and micro images of IN625 foam (a); optimization of the sound absorption coefficient as objective function, versus cell size and porosity (b); experimental and simulation results of the sound absorption coefficient (c)^[50]

要与最大表面平行，模型适用于玻璃纤维毡。实验结果表明，新模型计算得到的玻璃纤维毡流阻与实测值相近，根据所建立的模型，可以看出流阻取决于稳定压差下的纤维直径、纤维的平均间距、树脂粘结量和空气的物理特性。流阻模型计算结果和直接测量结果与 B-H 模型^[53]也相当接近，证明假设的玻璃纤维毡模型是合适的。

孔隙率高低决定了多孔吸声材料内部共振腔的比率高低，孔径大小影响了多孔吸声材料内部共振腔的尺寸大小。共振腔的比率和尺寸影响了吸收声波的频率范围及吸收峰值高低，对于多孔吸声材料的吸声特

性具有决定性的作用。

孔隙率和孔径还通过影响材料周围空气流阻大小影响了粘性摩擦行为，从而间接影响材料的吸声性能，在吸声影响因素中至关重要。对于尺寸接近平均自由路径的孔，多孔材料的吸附作用占主导，对于孔尺寸与粘性边界层厚度相似或者更大的孔隙，摩擦效应和惯性吸收占主导作用^[54]，因此建立比较清晰且准确的针对孔隙率和孔径的多孔吸声模型对于吸声的量化研究具有十分重要的意义。

2.4 杨氏模量

杨氏模量是气凝胶材料自身的一种基本属性，可以反映出材料的弹性，更多的在讨论其力学性能的时候提到，杨氏模量对多孔材料吸声性能的相关研究较少。

为了研究二氧化硅气凝胶薄膜的孔隙率与杨氏模量之间的关系，Flannery 等^[55]利用激光产生的宽带表面声波的色散测量了亚微米厚度气凝胶薄膜的密度和杨氏模量，发现气凝胶的杨氏模量随着孔隙率的增加而急剧降低，是由于孔隙率的增加降低了气凝胶薄膜材料的刚度，印证了杨氏模量和刚度的正相关性。也有一些工作进一步研究了杨氏模量和孔隙率对气凝胶吸声性能的影响。

杨氏模量与材料表面维氏硬度、断裂韧度、脆性等属性之间存在着一定的关系，也是可能影响材料吸声性能的重要原因。Dong 等^[40]制备了不同浓度二氧化硅和聚二甲基硅氧烷的复合气凝胶，通过聚二甲基硅氧烷改性二氧化硅气凝胶的陶瓷结构，降低材料的硬度及杨氏模量，同时保持气凝胶结构较高的孔隙率，探究了杨氏模量对复合气凝胶吸声性能的影响。结果表明，聚二甲基硅氧烷可以有效地降低复合气凝胶的杨氏模量和平均孔径；气凝胶的杨氏模量越大，其表面维氏硬度、断裂韧度、脆性均越高，复合材料的吸声性能随着杨氏模量的减小而提升，且第 1 个峰值频率往高频移动。

杨氏模量作为气凝胶的自身属性，可以通过不同前驱体、增强相等来调节，选择合适的杨氏模量对材料的吸声性能及力学性能均有提升，因此杨氏模量作为比较重要的材料自身属性还需要更多的探究。

2.5 颗粒大小

颗粒大小对于颗粒气凝胶的整体形貌有着重要的影响，不同的颗粒大小会形成不同的堆积密度，对气凝胶内部孔结构有着至关重要的作用，进而影响了吸声性能。

Forest 等^[41]研究了不同的颗粒大小对气凝胶声学性能的影响，结果发现，声音在小颗粒气凝胶中有着更低的速度，表明小颗粒气凝胶的声阻抗更高；小颗粒气凝胶具有更高的声衰减，是由于空气和颗粒之间的摩擦造成的粘性损失更大；但是小颗粒相比大颗粒气凝胶来说

有着更高的反射系数,可能是由于更加致密的组成使得气凝胶材料表面的硬度增加,提高了声音反射率。

为了更加准确地掌握二氧化硅气凝胶的颗粒大小与其吸声性能的关系,Sachithanadam 等^[56]制备了不同粒径(0.5~3.35 mm)、孔径均为 20 nm 的二氧化硅气凝胶,并且在 50~1600 Hz 的超低频率范围内测定其吸声系数。同时制备了 1.2 和 1.7 mm 颗粒组成的不同构型的十二烷基硫酸钠掺杂明胶二氧化硅气凝胶(GSA-SDS)。实验发现,不同大小颗粒的二氧化硅气凝胶在 50~200 Hz 下,吸声系数值都不稳定,可能由于低频率的入射波和反射波叠加形成了粒子速度最大的区域,导致振动不太稳定。随着气凝胶颗粒的增大,吸声系数曲线趋于平缓,且吸声系数值降低。相同体积的颗粒气凝胶,较大的颗粒间孔隙更大,声波的衰减减弱,且较小的颗粒气凝胶更加紧凑,具有更高的堆积密度,更高的硅含量也有助于提高二氧化硅纳米孔的曲折性和复杂性。GSA-SDS 复合气凝胶颗粒在平均颗粒尺寸为 1.7 mm 时的吸声性能也明显优于平均颗粒尺寸为 1.2 mm 的样品,也反映出气凝胶复合材料颗粒大小与单一二氧化硅气凝胶颗粒大小对样品吸声性能的影响是相近的。

为了进一步定量分析颗粒大小对气凝胶吸声性能的影响,以及采用不同的表征方式更加全面地分析材料的吸声性能,Merli 等^[43]对比了 4 种不同颗粒大小(S, M, L1, L2)的二氧化硅气凝胶的声学性能,较小颗粒的二氧化硅气凝胶(密度为 80~85 kg/m³)吸声性能优于较大颗粒(密度为 65~70 kg/m³)。吸声性能用 NRC 和 SAC 来表征,发现 NRC 随着样品颗粒的增大而减小,SAC 峰值频率随着颗粒的增大而往高频移动,因为较大的颗粒堆积导致气凝胶较大的空气体积分数,从而影响声音的衰减和声速的增加,影响吸声效果。

综上所述,二氧化硅气凝胶等多孔吸声材料的吸声性能与密度、厚度、孔隙率和孔径、杨氏模量以及颗粒大小有着密切的关系,这些基本属性大多都是通过影响空腔内空气受声波振动的效率进而影响材料的吸声性能,孔隙率和孔径还会影响多孔材料内部谐振腔的尺寸,进而影响空气与材料壁面间的谐振频率和幅值,从而影响材料的吸声水平。因此选择合适的属性组合是制备出高吸声性能二氧化硅气凝胶的关键,如何通过控制实验条件和合成步骤去控制样品的基本属性是实验成功的重点,后续的工作应该围绕这两个方面来开展。

3 二氧化硅气凝胶及其复合材料吸声性能

二氧化硅气凝胶的内部多孔性,以及其低密度性使得其成为良好的吸声材料,比传统材料更受欢迎。纯二

氧化硅气凝胶虽然具有一定的吸声能力,但是其吸声特性毕竟是单一的,无法适应不同噪音环境下的降噪要求,而且其最佳吸声系数也会受到单一材料的局限性^[57]。工业常用的吸声材料多为疏松多孔的材料,如有机纤维材料(主要指天然植物纤维)、无机纤维材料(主要包括以天然或人造的无机矿物为基本成分的纤维材料)、无机泡沫材料(主要包括泡沫玻璃和泡沫金属)、泡沫塑料(主要指聚氨酯泡沫)和非织造布吸声材料等。近年来,研究人员也将气凝胶吸声材料与两种或以上的这些传统的吸声材料通过不同的工艺路线进行复合,制备出了各式各样的二氧化硅气凝胶复合材料,复合气凝胶结合了二氧化硅气凝胶和传统吸声材料的优势,展现出更佳的声学性能,也不断被应用到各行各业。根据不同的复合物种类,将气凝胶复合材料分为有机聚合物复合二氧化硅气凝胶、有机聚合物/无机矿物复合二氧化硅气凝胶、非织造布复合二氧化硅气凝胶,并对其吸声性能研究进展进行了规划总结。

3.1 纯二氧化硅气凝胶吸声性能

研究人员早在 1995 年就对纯二氧化硅气凝胶的吸声性能进行了研究^[58],制备了 3 种不同厚度的二氧化硅气凝胶颗粒层,利用阻抗管测定其吸声系数。随着二氧化硅气凝胶颗粒层厚度增加,整个频率范围内的吸声系数最大值不断减小,且朝着低频方向移动。当厚度为 10 mm 时,其最大吸声系数在 4500 Hz 附近超过了 0.90,当厚度为 40 mm 时,吸声系数在 650~1000 Hz 范围内达到了 0.60 以上。可以发现在低频范围内,纯二氧化硅气凝胶的吸声性能明显降低,这归因于空气振动幅度在低频声波下不大,导致的声波损耗较小。

近年来,针对纯二氧化硅气凝胶也有一定的研究,主要偏向于应用方面。Merli 等^[43]利用快速超临界萃取制备了 3 种不同厚度的整体式二氧化硅气凝胶(分别为 12.7, 19 和 25.4 mm),并且在 100~5000 Hz 的范围内利用阻抗管测定其吸声系数 α 。结果发现 12.7 mm 厚的圆柱形整体式气凝胶在 1500 Hz 处的峰值吸声系数为 0.88。随着整体式气凝胶样品厚度的增加,吸声系数峰值减小(19 和 25.4 mm 厚度的样品分别为 0.78 和 0.54),且出现在较低的频率(19 和 25.4 mm 的样品分别为 1300 和 1100 Hz),与先前的研究结果是相近的。并且还将 4 种颗粒大小的颗粒二氧化硅气凝胶和制备的整体式气凝胶进行吸声性能的比较,结果表明,整体式气凝胶的峰值吸声系数一般低于相似的颗粒气凝胶的吸声系数峰值,颗粒气凝胶的峰值在 0.9~1.0 范围内,整体式气凝胶的峰值在 0.54~0.88 之间,最后也发现在传统玻璃系统的空隙中使用透明的整体式二氧化硅气凝胶将显著改善其声学性能。

纯二氧化硅气凝胶虽然具有一定的吸声性能,但是其较低的吸声系数以及很窄的吸声频带使其不能作为良好的工业上的吸声材料,越来越多的研究者将二氧化硅气凝胶与传统的有机聚合物、无机矿物、非织造布等结合在一起,制备出了高吸声性能的复合二氧化硅气凝胶,被应用在各行各业中。

3.2 有机聚合物复合二氧化硅气凝胶的吸声性能

研究人员已经采取有机聚合物交联策略增强了气凝胶的柔韧性,其力学性能明显得到提高^[59],但是有机聚合物是否可以增强气凝胶的其他性能依然是悬而未决的问题,也是现在研究和探索的重点和热点。有机聚合物包括纤维素、蛋白质、橡胶等天然高分子化合物和塑料、合成纤维、合成橡胶、涂料等合成材料,二氧化硅气凝胶与这些有机聚合物复合后表现出比单一二氧化硅气凝胶更加优异的吸声性能。二氧化硅气凝胶常作为填料的形式被加入到这些有机聚合物结构中,同时这些有机聚合物也会被作为填料加入到二氧化硅气凝胶基体中。

硬质聚氨酯泡沫(PUR)、聚氨酯材料(PU)凭借其优良的自身属性已经具备较好的吸声性能。为探究它们与二氧化硅气凝胶复合后的协同吸声性能,Dourbash等^[60]制备了SA和PUR复合材料、SA和PU复合材料,在250~6000 Hz的频率范围内测定不同复合材料样品的吸声性能。吸声系数曲线的走势表明,几乎在所有的频率范围内,复合材料的吸声系数都比原始的聚氨酯泡沫材料有所增加,但是与二氧化硅气凝胶材料或软聚氨酯泡沫塑料比,复合吸声材料并没有表现出良好的吸声性能,可能是归因于其坚硬和不透水的性质。含有松木的样品比含有二氧化硅气凝胶的表面更加柔软,降低了材料表面的反射,具有更佳的吸声性能。具有较高强度和良好防腐性能的弹性聚氨酯与二氧化硅气凝胶复合可以提高其吸声性能,而硬质聚氨酯泡沫塑料与二氧化硅气凝胶的复合物因为其较高的粘度和较低的密度,吸声性能提升效果不明显。

聚酯毡俗称涤纶树脂,具有良好的力学性能、优良的耐高温、低温性能,是一种典型的有机高聚物,已成功被应用于各种行业中。为探究聚酯毡材料的吸声性能,Talebi等^[39]选用正硅酸乙酯,采用溶胶-凝胶法在非织造布上原位合成了二氧化硅气凝胶,然后利用常压干燥制备了二氧化硅气凝胶毡,并且利用不同的合成条件得到了具有不同孔结构的气凝胶颗粒,分析了复合吸声材料自身属性对吸声性能的影响。利用双麦克风阻抗管测量了气凝胶毡在50~6100 Hz的全频率范围内的吸声系数,结果表明,在所有的频率下,复合气凝胶毡比纯非织造布材料具有更高的吸声系数。这是由于加入的二

氧化硅气凝胶体积密度低,孔径小,气凝胶毡的弯曲度增大,体积密度最低的气凝胶颗粒M的吸声系数最高。研究还发现,含有非织造布的气凝胶涂层使得其更适应于低频声波的控制,在所有的样品中,溶胶体积为24 mL气凝胶样品具有最佳的吸声系数且其疏水特性也为吸声用途提供了更长的使用寿命。

聚二甲基硅氧烷(PDMS)是一种疏水类的有机硅物料,其密度低,表面张力小,Dong等^[40]以二氧化硅气凝胶为基体,PDMS为填料,成功制备了不同浓度二氧化硅和聚二甲基硅氧烷的复合气凝胶,测量了他们的吸声系数随着成分和平均孔径的变化关系。实验发现,随着PDMS的浓度升高,复合材料的吸声系数峰值增大,且峰值频率朝着高频移动。复合气凝胶的平均孔径也随着PDMS的浓度从0%增加到40%从20 nm减小到5 nm,这也与提出的谐振器模型相匹配。复合材料的SEM照片也反映出20%浓度的PDMS比40%的PDMS气孔更大,孔隙更多,结构更粗糙,进一步证实了其谐振器吸收行为。加入PDMS后,可以显著地改性纯二氧化硅气凝胶的弹性模量,使得其弹性模量降低,降低了复合材料的硬度,同时保持了气凝胶结构的高孔隙率,在某些频率下,复合气凝胶也表现出比商用玻璃纤维更高的吸收率,最大高达40%,使得其可以作为很有竞争力的复合气凝胶吸声材料。

利用相同组分,采用不同制备方法获得的吸声材料性能也不尽相同,为了探究不同制备方法对材料吸声性能的影响,Schmidt等^[58]测定了4种不同的复合气凝胶与矿棉的吸声系数值,并在250,500和800 Hz下展示了其吸声性能,结果表明发泡聚苯乙烯气凝胶和挤塑聚苯乙烯气凝胶的吸声性能交叉,矿棉在高频下显示出高的吸声值,在低于800 Hz频率以下,吸声性能明显降低,而分散结合二氧化硅气凝胶板在中高频处展现出了较强的吸声性能。

建筑排水管道和窗型材材料的吸声也是近年来研究的热点,硬质聚氯乙烯(UPVC)具有耐腐蚀、柔软性好、输水能力强等特点,被广泛应用于上述场景,但是对声音吸声能力却不强。针对这一问题,Eskandari等^[61]将二氧化硅气凝胶与UPVC复合,制备了UPVC/二氧化硅复合气凝胶,采用SEM和BET分析了复合材料的密度、比表面积和粒径等物性,并且采用5种不同的复合材料质量比,对复合材料的吸声性能进行了表征。吸声系数曲线表明,纯UPVC在1800 Hz下的吸声系数只有17%,不是理想的吸声材料,但是加入二氧化硅气凝胶之后,可以大幅提升其吸声系数。向UPVC中加入质量分数分别为0.5%,1.5%和3%的二氧化硅气凝胶可使其吸声系数增加至24%,28%,

43%。具有多孔性的二氧化硅气凝胶材料分散在有机聚合物中时,赋予了有机聚合物复合材料更大孔隙率,当声波撞击样品时,会通过大量小孔和开孔进入材料内部,随着复合材料孔隙率的增加,声波通过的路径复杂度增加,空气与壁面的摩擦引起的粘性应力增加,导致吸声的增加。复合材料结构内的孔越小且越均匀,通过振动发生的能量吸收就越多,且气凝胶材料减缓了声速,也会导致吸声的增加。

研究人员利用工厂回收的废旧材料与现有材料的复合制备出了一系列的具有隔热、吸附、隔声等高性能复合材料,也应用在了不同的场景。这些废旧原料摒弃了以往的直接被分解的方式,而与现有材料组合利用大大提升了材料的利用率且对环保有益。借鉴了这种思路,Feng 等^[62]首次以回收纤维素纤维和三甲氧基硅烷(MTMS)为前驱体,成功制备了二氧化硅-纤维素气凝胶,具有超强的疏水性、低导热系数、良好的力学性能和优良的吸声系数。通过改变再生纤维素纤维的用量,得到了具有不同孔隙率的再生纤维素气凝胶。结果表明,随着纤维素用量的增加,纤维素基质的吸声系数减小,随着二氧化硅颗粒的加入,复合材料的吸声系数增加。除了空气振动导致的声波耗散原因外,也可能是由于二氧化硅颗粒与纤维素纤维之间界面吸收了部分声能。质量分数为 1%的纤维素制备的复合气凝胶与纤维素气凝胶吸声性能差别不大,但是随着含量的升高,吸声性能改善。这是由于随着纤维素纤维的增加,密度增大,二氧化硅-纤维素界面形成的越充分,其中的吸声作用越明显。随着二氧化硅-纤维素气凝胶中纤维素含量的增加,二氧化硅颗粒的分布更加均匀,粒径更小,吸声系数增加,当纤维素含量从 2%到 4%的时候,吸声系数无明显改变,可能是由于 2%纤维素含量的复合气凝胶颗粒分布足够小和均匀,已经具有优良的吸声性能。增强的纤维素基质限制了二氧化硅颗粒的运动,并将二氧化硅颗粒限制在其孔隙度,相互连接的二氧化硅颗粒通过支撑纤维素纤维基质使二氧化硅-纤维素气凝胶变硬,这些良好的吸声结构使得纤维素-二氧化硅气凝胶吸声性能优于纤维素气凝胶和商品聚苯乙烯泡沫塑料。

线性聚酰亚胺气凝胶在高温环境下较为稳定,耐化学腐蚀性好,机械性能优异,但是其在加工过程中容易收缩,机械性能也不佳,在老化过程中易破裂。为了克服这一现象,Yan 等^[63]以 4,4'-氧基二苯胺(ODA)、对苯二胺(PPDA)和联苯-3,3',4,4'-四羧酸二苯胺(BPDA)为原料,用双(三甲氧基硅丙基)胺(BTMSPA)交联聚酰胺酸,与 MTMS 水解后的硅胶网络复合,经过超临界干燥,制得不同固体物质质量分数

和不同 MTMS 用量的聚酰亚胺交联气凝胶,如图 9 所示。所制备的聚酰亚胺交联二氧化硅气凝胶的孔隙主要是介孔和少量的大孔和微孔,孔径分布峰在 36 nm,且不同固体前驱体含量和 MTMS 体积对孔径分布范围影响不大。测量了厚度为 1 和 3 cm 的不同合成原料样品的吸声系数,对于 1 cm 厚度的样品,在 4500 Hz 下吸声系数很低(低于 0.4),在 5500~7200 Hz 下快速上升并达到峰值(0.8~0.97)。相比来说,3 cm 厚度的样品在低频范围具有较高的吸声性能,固体前驱体含量为 11.72%,厚度为 3 cm 的 2 组复合气凝胶在 2500 Hz 的吸声系数均大于 0.8,随后开始急剧下降,之后又开始回升,固体前驱体含量为 8.7%的复合气凝胶也具有同样趋势的吸声曲线,性能差于前者。因此厚度以及原料密度对复合气凝胶的吸声性能具有显著的影响,厚度为 1 cm 的复合气凝胶可以作为高频吸声材料,厚度为 3 cm 的复合气凝胶既可以适用于高频吸声,也可以作为低频吸声材料,因此聚酰亚胺交联二氧化硅气凝胶的良好吸声性也使得其具有较宽的应用范围。

常见的有机聚合物本身就具备一定的天然吸声性能,与二氧化硅气凝胶复合后,结合了两者的吸声优势,互相贯穿的多孔骨架网络增加了声传播路径的复杂度,有利于吸声性能的改善。

3.3 有机聚合物/无机矿物复合二氧化硅气凝胶的吸声性能

二氧化硅气凝胶与有机聚合物的结合增强了材料的吸声性能,无机矿物是另一类天然材料,具有多种组织结构,有些呈不规则的颗粒,也具有一定的吸声性能,且无机矿物比有机物硬度更大、来源更广。最近也出现了一些关于无机矿物复合吸声材料的研究和探索,研究者利用不同的有机聚合物和工业上不同环节得到的无机矿物与二氧化硅气凝胶进行复合,对其吸声性能进行了深入研究。

Buratti 等^[33]研究了颗粒尺寸对颗粒气凝胶以及气凝胶基溶液(石膏和半透明聚碳酸酯板材)在建筑节能中声学性能的影响,并且将气凝胶样品与传统的无机纤维材料(岩棉)和玄武岩纤维板进行吸声性能的比较。针对颗粒气凝胶,采用了一种阻抗管垂直测量法以便更精确地计算出样品的吸声系数,利用 SAC 和 NRC 对各个样品的吸声性能进行了表征,如图 10 所示。选择了 30 cm 厚度的气凝胶产品和岩棉板,27 cm 厚度的玄武岩纤维板进行了对比实验,发现大颗粒气凝胶产品和岩棉在 1800 Hz 的吸声系数相当(约为 0.95),玄武岩纤维板由于厚度低于前两者,因此吸声系数较低。且在中高频范围内(2200~5500 Hz),岩棉

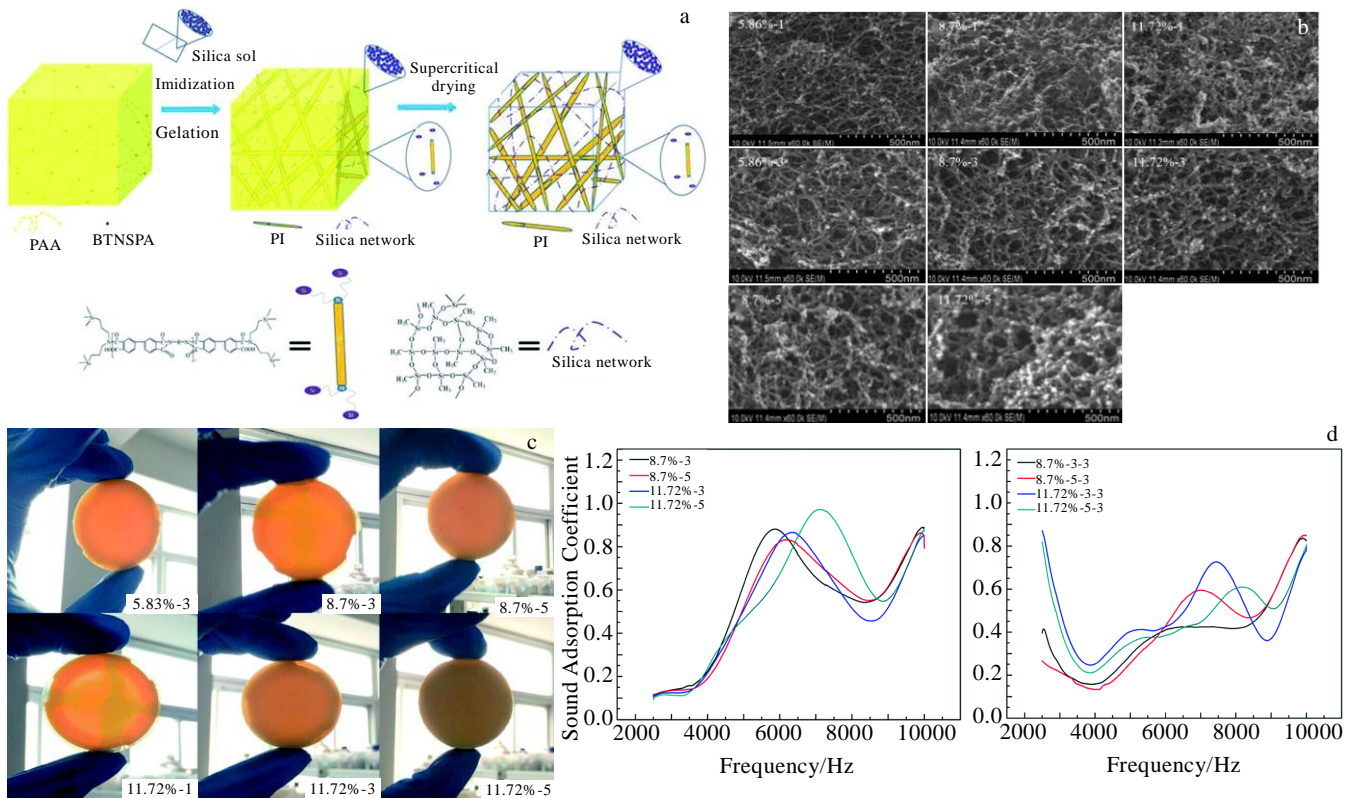


图 9 聚酰亚胺交联二氧化硅气凝胶的吸声性能研究

Fig.9 Structural changes of polyimide crosslinked silica aerogel during preparation (a), SEM images of polyimide crosslinked silica aerogel with different percentage of solid precursor and different MTMS volume (b), morphologies of polyimide crosslinked silica aerogel with different percentage of solid precursor and different MTMS volume (c), sound absorption coefficient of polyimide crosslinked silica aerogel with different thickness at 2500~1000 Hz (d) [63]

和玄武岩纤维板的吸声系数高于颗粒状二氧化硅气凝胶,是由于颗粒状材料吸声性能具有典型的正线特性。对于 NRC 值,较小颗粒的气凝胶样品与岩棉和玄武岩纤维持平,而大颗粒的气凝胶样品 NRC 值较低,与天然纤维的特性一致。凭借气凝胶独特的结构性能和常规岩棉和玄武岩纤维的优势,市场上已经存在用于建筑物翻新的气凝胶石膏等复合材料,通过不同含量的颗粒气凝胶与天然石灰混合制备而成,对于传统石灰, NRC 只有 0.049,而气凝胶基石膏的 NRC 值在同样的频率下达到 0.142,约为传统石灰的 3 倍,吸声系数峰值为 0.29,也约为天然石灰吸声系数峰值的 3 倍,具有更好的声学性能。

火力发电厂在化工过程燃烧后会排出颗粒较小的煤粉灰,其中一般包含 55.8%的 SiO₂, 25.8%的 Al₂O₃ 和部分的其他组分,可作为多种水泥、混凝土的组分。Duong 等[64]首次将其应用在气凝胶材料中。将煤粉灰与聚乙烯醇混合后经过冷冻干燥形成气凝胶,再用

MTMS 涂层修饰 FA 气凝胶的表面,获得 MTMS 涂覆的 FA 气凝胶。SEM 像显示出 FA 气凝胶具有开孔结构,具备吸声的条件,其主要成分是氧化物颗粒,易与 PVA 聚合物形成氢键。随着 FA 和 PVA 浓度的增加,复合气凝胶的密度都增加,孔隙率下降,当 FA 含量为 2.5%(质量分数),PVA 含量为 1.00%时,复合气凝胶具有最低的密度(0.10 g/cm³)和最大的孔隙率(90%)。吸声性能的测试结果表明,复合气凝胶的密度越高,吸声效率越高,随着密度从 0.10 g/cm³增加到 0.12 g/cm³, NRC 值从 0.20 增加到 0.30。研究也指出 FA 气凝胶的吸声能力约为 PET/二氧化硅气凝胶(NRC 为 0.16)的 1.3 至 1.9 倍,与商业产品如针叶木硫酸盐浆(NRC 为 0.19)和 PP/玻璃纤维(NRC 为 0.19)相当。因此,FA 气凝胶是一种潜在的吸声应用材料。

纳米粘土是由硅酸盐矿物风化形成的较小颗粒,一般成分是氧化硅和氧化铝,由于其独特的矿物组成和颗粒大小,在吸附,催化剂等领域有着重要的作用。

为研究其对声音的吸收作用, Simón-Herrero 等^[65]利用聚乙烯醇(PVA)、纳米粘土和热氧化还原石墨烯(trGO)三元体系为基础, 利用冷冻干燥方法, 制备了复合气凝胶。多孔材料的孔隙形态决定了吸声能力的高低, 3种材料的复合使得孔隙内部更加复杂, 增强了吸声性能。实验测定了纳米粘土/聚乙烯醇复合物和纳米黏土/聚乙烯醇/石墨烯复合气凝胶的吸声系数, 由于两者均具有较高的孔隙率, 因此都具有良好的吸声性能。在聚合物基质中加入诸如纳米粘土的填料可以显著增加内部声波传播路径的复杂度, 并且在不增加质量和尺寸的前提下改善了传统材料的吸声性能, 非常适合运用在噪声控制领域。

同样地, 为探究纳米粘土以及纳米纤维对二氧化硅气凝胶的综合影响作用, Hamidi 等^[66]研究了 SA/聚酯无纺布层纳米复合材料, SA/PAN 纳米纤维纳米复合材料, SA/纳米粘土纳米复合材料和 SA/聚酯无纺布层/PAN 纳米纤维/纳米粘土纳米复合材料 4 种复合材料的吸声性能。复合材料的厚度均为 2 cm, 同时分别制备了直径为 100 和 29 cm 的纳米复合材料以测量其在全频段下的吸声系数。SA/聚酯无纺布层/PAN 纳米纤维/纳米粘土纳米复合材料的 SEM 照片显示, 二氧化硅气凝胶颗粒在纳米纤维和纳米粘土上均匀分布, SA 纳米颗粒和纳米纤维完全互连并分散, 纳米纤维和纳米粘土颗粒在纳米复合材料中起骨架作用, 含有较

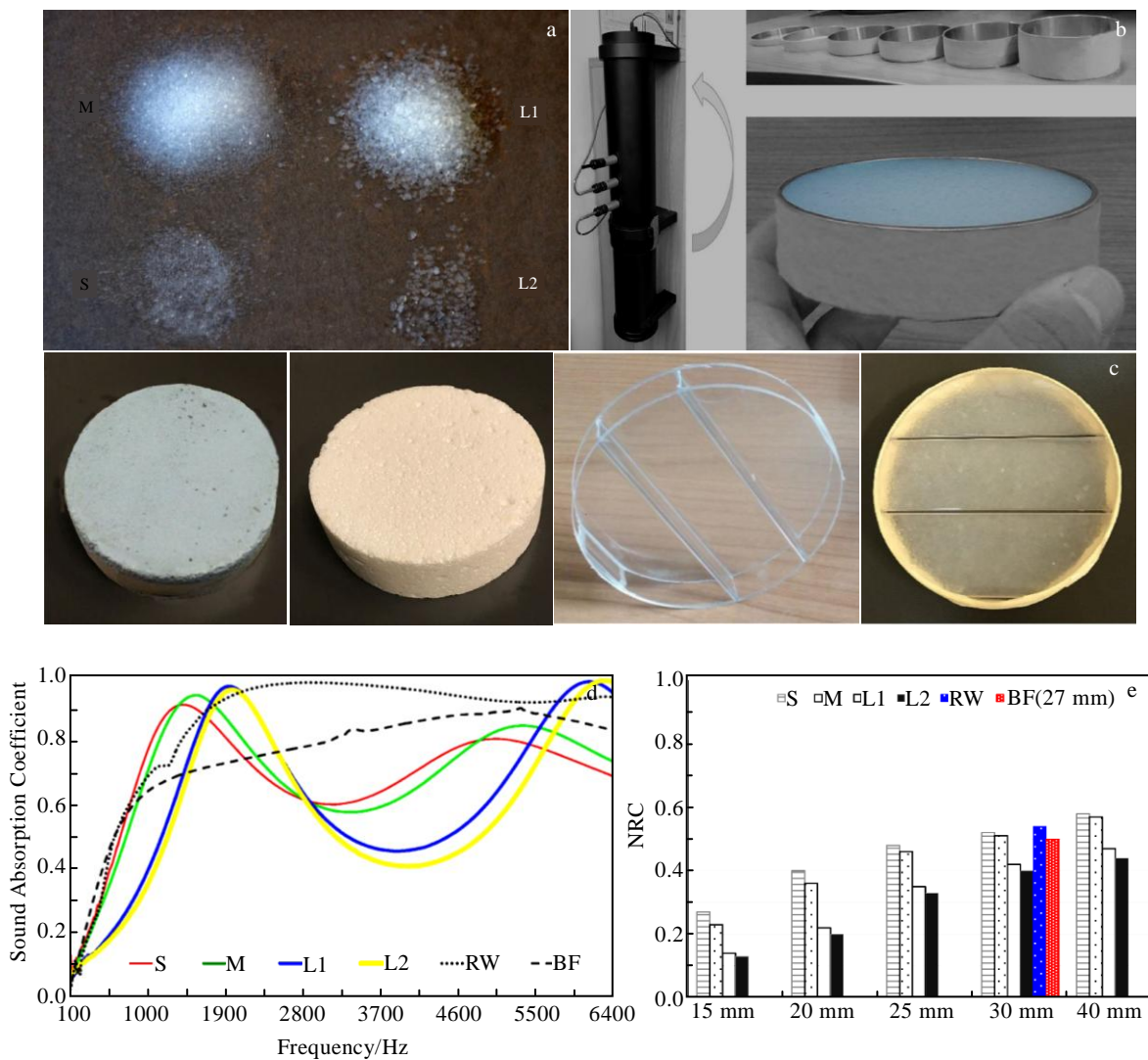


图 10 建筑应用的气凝胶基材料吸声性能的研究

Fig.10 Investigated samples for thermal and acoustic characterization (a), details of the measurement methodology developed to test the samples (b), products for building applications (c), comparison aerogel samples with rock wool and basalt fiber on absorption coefficient (d), NRC values comparison between conventional materials and the tested samples (e)^[33]

多的空腔和孔隙,具有良好的吸声性能。测量结果也表明,4种复合材料在高频段均具有较高的声系数,SA/PAN 纳米纤维纳米复合材料在 3150 Hz 具有最高的吸声系数 0.98,但其在低频段吸声系数最低。总体来说,SA/聚酯无纺布层/PAN 纳米纤维/纳米粘土纳米复合材料在中低频均具有较好的吸声性能,在 400、500、1000、1250 和 2000 Hz 频率下的 SAC 分别为 0.38、0.51、0.78、0.83 和 0.84。因此,有机材料和矿物材料同时加入到二氧化硅气凝胶中可以改善其声学性能。

石膏是一种用途广泛的工业材料和建筑材料,主要成分是 CaSO_4 ,具有优良的声学 and 热学性能,在各个行业有着广泛应用。Buratti 等^[67]为研究新型建筑涂料的声学性能,将颗粒状二氧化硅气凝胶与天然石膏按不同比例混合,利用阻抗管测定了其吸声性能。将样品分为了 3 类,A0 是 12.5 mm 的纯石膏层,A1 是 24.5 mm 的气凝胶绝缘石膏层,A2 是 44.5 mm 的气凝胶绝缘石膏层与涂层组成。结果表明纯石膏层的吸声系数较低,在 100~1600 Hz 范围内不超过 0.05,随着厚度的增加,最大吸声系数频率往低频移动。最后通过去除样品中最后一层涂层,测量的单一气凝胶石膏的声学性能,发现其总体吸声系数较高,加入涂层会导致复合气凝胶吸声性变差,吸声系数强烈依赖于最终涂层,气凝胶石膏层对最终吸声系数影响较小。

有机聚合物、无机矿物复合二氧化硅气凝胶来源广泛、种类多样,适量的组合可以提升吸声性能,但是过量的加入会严重影响吸声能力。因此,如何选择有机聚合物、无机矿物的种类和调整用量是决定吸声性能的关键。

3.4 非织造布复合二氧化硅气凝胶的吸声性能

非织造布是不经过纺纱织布而形成的织物,也是一种有机物,是由定向或者随机的纤维构成的,价格比较低廉,也有一些研究人员在二氧化硅气凝胶中浸入非织造布,探索了其吸声性能。

Oh 等^[68]在常压下制备了柔性多孔聚对苯二甲酸乙二酯(PET)二氧化硅气凝胶毯,并对其热学和声学性能进行了表征。利用了 2 种方法制备了 PET 二氧化硅气凝胶毯,方法 1 是二氧化硅在 PET 上直接凝胶。具体是将 PET 无纺布在正硅酸乙酯和乙醇混合溶剂中浸渍膨胀,水解时的 pH 控制在 2.5,缩合时的 pH 控制在 7,8,9 和 10。方法 2 是将 PET 无纺布浸入二氧化硅水凝胶的分散液中,与方法 1 的凝胶化过程一样,将水凝胶分散后在乙醇中陈化 24 h 后,再将 PET 无纺布浸泡在水凝胶和乙醇分散体中 24 h,在最佳条件下合成了具有多孔网络结构的二氧化硅气凝胶毯。将制备的 PET 二氧化硅气凝胶毯放置在阻抗管中测量其牺

牲效果。结果表明,PET 二氧化硅混合气凝胶毯的密度随着添加量的增加而增加,并且在 pH 为 7 时,可以获得高密度的复合气凝胶毯。用方法 1 和方法 2 制备的复合气凝胶毯的吸声系数都很低,在 1000 Hz 以下的低频吸声系数不变(小于 0.1),在 1000 Hz 以上的高频吸声系数都稳定呈现出上升的趋势,特别是在 pH 为 5 时制备的样品在较高频率范围内表现出良好的吸声性能,与纯二氧化硅气凝胶的吸声特征一致,与 PET 非织造布相比,在最佳条件下制备的 PET 二氧化硅复合气凝胶毯在高频下具有明显较高的吸收峰,这可以二氧化硅颗粒和 PET 基质之间的界面吸收更多的波能量来解释,与材料振动能量吸收有关,声波入射到胞壁材料表面的时候,孔隙中的空气开始振动并导致胞壁壁面也发生振动,壁面材料中存在大量均匀和小尺寸的二氧化硅气凝胶对声波的吸收有积极的作用。PET 二氧化硅复合气凝胶毯在 2500~5000 Hz 吸声系数较高,处于人类的声学敏感范围,因此也被认为是良好的吸声材料。

聚酯/聚乙烯非织造布采用聚酯和聚乙烯复合的方式制造而成,具有比单一聚酯非织造布更优良的性能,Yang 等^[69]在先前研究的基础上,探讨了聚合物非织造布复合二氧化硅气凝胶的吸声性能。选择包埋有疏水无定形二氧化硅气凝胶的聚酯/聚乙烯非织造布进行吸声测试。用阻抗管测试了气凝胶非织造布单层和叠层的吸声系数,并用 NRC 进行了数值分析,且提出了吸声指数。采用了 1:1 比例的聚酯/聚乙烯非织造布和二氧化硅气凝胶混合,分析了气凝胶含量对吸声性能的影响。SEM 照片显示出气凝胶均匀分散在复合结构中的纤维上,吸声性能测试结果表明,随着无纺布材料密度的降低,二氧化硅气凝胶的含量增加。对于单层样品来说,吸声性能是改善的,其 NRC 值范围在 0.0556~0.0858 之间,吸声性能一般,与厚度和密度相比,气凝胶含量不是影响吸声性能的关键。对于多层样品来说,随着厚度增加,复合材料的低频吸声性能提升,但是厚度有临界值,到达临界值后吸声系数不再增加。二氧化硅气凝胶的过量增加可能导致流阻的降低,也会影响复合材料的吸声性能。

同样地,为进一步研究聚乙烯/聚酯非织造布的性能,Venkataraman 等^[70]制备了 3 种厚度(3.5,6.2,6.6 mm)的聚乙烯/聚酯非织造布复合气凝胶,测试其在不同频率(50~6400 Hz)的吸声性能。不同的样品之间由于织物结构以及纤维中存在气凝胶颗粒的含量不同而存在差异,所有样品的近似孔隙率约为 93%。并且分析了气凝胶含量和材料基本参数对吸声性能的影响,随着气凝胶的增加,其吸声表面积增加,大幅度降低了声速,因

此在非织造布中加入气凝胶会影响吸声性能。另外在织物中加入气凝胶可以提升其孔隙率,进而影响织物的透气性,气凝胶处理过的非织造布透气率有明显提高。气凝胶嵌入非织造布材料在较高频率范围内具有更好的吸声系数,在较低频率内,织物的吸声系数低于玻璃纤维和岩棉制成的材料。样品 3 具有最大的厚度和最小的密度,其吸声性能最好,因此纤维材料越多,即厚度越大、密度越小,吸声效果越好。

Ramamoorthy 等^[71]制备了不同二氧化硅含量的二氧化硅/PET 纤维非织造布复合气凝胶(M-110, M-83, M-55, M-28)。PET 无纺布通过针织机制得后,浸泡在溶胶中进行凝胶化,通过常压干燥获得二氧化硅气凝胶和 PET 无纺布复合材料。随着二氧化硅气凝胶含量的增加,复合材料孔隙的平均尺寸变小,提高了粘性摩擦损失,而且气凝胶作为填充加入非织造布中,增加了气流流动的曲折性。复合材料比纯 PET 非织造布具有更好的吸声能力,组分中二氧化硅气凝胶含量越多,吸声性能越好,均在 2200 Hz 附近达到吸声峰值,二氧化硅气凝胶含量最高的样品 M-28 的吸声峰值达到 0.90。

棉质非织造布(CNM)也是一种非织造布形式,具有优良的吸声性能,为探究其与二氧化硅气凝胶的复合吸声效果, Motahari 等^[72]在 CNM 中合成二氧化硅气凝胶,并将其用作吸声材料。3000 Hz 以下的频率范围内,所有的棉质非织造布-二氧化硅复合气凝胶的吸声系数均大于纯棉质非织造布,是由于二氧化硅气凝胶涂覆在非织造布表面,使得纤维层变厚,纤维间距减小,从而导致粘性摩擦增加,吸声量增多。且密度较低的气凝胶减缓了声音传播速度,从而增加了吸声量。3000 Hz 以上的频率范围中,可能是由于共振效应的存在导致吸声系数的降低,随着甲醇/正硅酸乙酯的摩尔比增加,声波在二氧化硅气凝胶中的体积密度和传播速度提高,吸声性能下降。实验结果也表明,老化时间的延长,也降低了二氧化硅气凝胶的体积密度,进而影响了吸声性能。NRC 值测试结果说明了体积密度是影响材料吸声的唯一参数,材料的比表面积、平均孔径与 NRC 间没有特定的关系,受密度影响的声速是影响材料低频吸声的主要原因。

作为天然具有一定吸声能力的非织造布材料,常常利用针织机在实验室内进行制备,其制备过程比直接通过化学反应过程获得的多孔吸声材料复杂。其整齐的纤维排列对吸声性能有一定的积极作用,与二氧化硅气凝胶复合后也展示出更加优异的吸声性能。复合吸声材料的吸声性能主要也取决于二氧化硅气凝胶的含量、体积密度以及纤维透气率等因素,给未来复合多孔吸声材料的研究提供了一个很有价值的研究方向。

4 结 语

二氧化硅气凝胶凭借其良好的多孔性和低密度性等优良属性被应用在声波吸收领域,传统的吸声材料经过不断的发展也具备较强的吸声能力,将以上两种结合起来,制备二氧化硅气凝胶复合传统吸声材料,可以提高其不同条件下的吸声性能,对于噪声的控制具有重要的意义。

本文从二氧化硅气凝胶的发展历史和应用场景出发,引出了二氧化硅气凝胶在吸声场景的应用。首先介绍了吸声性能的概念、吸声结构、吸声机理以及吸声的测量表征方法,详尽地从原理上展现了一般的吸声过程。其次详细地介绍了影响气凝胶吸声性能的因素,包括密度、厚度、孔隙率和孔径、杨氏模量以及颗粒大小,列举不同的研究结果分析了这些因素影响吸声性能的机理。总体来说,影响气凝胶吸声性能最关键在于其内部孔隙结构和分布,不同的孔隙结构和分布决定了空气与材料壁面间的粘性摩擦状态,从而影响材料的吸声。最后综述了二氧化硅气凝胶与不同的传统吸声材料之间的复合性能,将制备的复合气凝胶吸声材料分为有机聚合物复合二氧化硅气凝胶、有机聚合物/无机矿物复合二氧化硅气凝胶、非织造布复合二氧化硅气凝胶。详细介绍了每一类复合气凝胶的原料来源、制备过程,结构表征以及吸声性能,总结了每一类复合气凝胶影响吸声性能的共性和规律,为后续阶段的探索研究提供了参考。

虽然有越来越多的研究人员成功制备出具有良好吸声性能的二氧化硅复合气凝胶,但是研究的重点是实验的设计和原料的选取上,对于复合气凝胶材料的吸声性能机理的探究少之又少,对影响复合气凝胶材料的因素分析局限于已有的少量知识,只是定性的评判,也没有定量的模型。针对密度、厚度、孔隙率、孔径、杨氏模量以及颗粒大小等影响吸声的因素几乎没有精确的数学模型,分析这些因素对吸声性能的影响只能凭借经验和不断的实验尝试,不具备普适性。再而,不同的复合气凝胶原料的选择应该基于一定的理论基础,如何选择不同的原料以及控制原料的配比都应该依据一定的理论模型及分析,才能够成功制备出不同应用场景中的复合气凝胶吸声结构。此外,在实际应用中,具有吸声功能的气凝胶常常兼具其他的优良性能,这也是近年来的研究热点,制备出具有多重优良性能的气凝胶材料在各个领域都有重要的意义,因此在制备多功能化气凝胶材料中兼顾气凝胶参数的需求协同也需要被重点考虑。

基于以上存在的问题和挑战,今后主要的研究方

向和重点如下:

1) 对密度、厚度、孔隙率、孔径、杨氏模量、颗粒大小等影响吸声的因素建立精确的数学模型和数值模拟, 从而可以通过控制复合气凝胶的基本属性来控制其结构、进而改善其吸声性能, 对于多孔材料的吸声性能进一步稳定提高具有重要的意义。

2) 研究不同吸声影响因素对于复合气凝胶材料吸声性能的协同影响作用, 探究影响每一类复合气凝胶材料吸声的主要和次要的因素, 建立其不同影响因素间的数学模型, 从而为制备出具有最佳吸声性能的复合气凝胶材料提供依据。

3) 研究不同合成原料自身的属性和吸声机理, 以及二氧化硅气凝胶与不同传统吸声材料间的界面行为, 从结构上分析不同组成的复合气凝胶吸声行为的关键。探究原料配比对复合气凝胶材料吸声性能的影响, 从而找到最佳的配比, 为后续的实验过程提供设计思路。

4) 探究各种气凝胶参数对不同性能的影响作用, 选择最佳的参数组合, 制备出兼具优良声学、热学、力学性能等的气凝胶材料, 增加气凝胶材料的应用场景、减少制备多个单一功能气凝胶的成本, 进一步提升制备工艺的经济性。

参考文献 References

- [1] Kistler S S. *Nature*[J], 1931, 127: 741
- [2] Yang K C, Xu L H, Pan H *et al.* *Nano*[J], 2019, 15(2): 1
- [3] Shi Chunxiao(师春晓), Zhang Shouchun(张寿春), Jiang Yonggang(姜勇刚) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(S1): 210
- [4] He Fei(何飞), Zhao Shuyuan(赵淑媛), Song Guangping(宋广平) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(S1): 392
- [5] Zun Guoqing(祖国庆), Shen Jun(沈军), Wang Wenqin(王文琴) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(S1): 522
- [6] Fernandez-Marin A A, Jimenez N, Groby J P *et al.* *Applied Physics Letters*[J], 2019, 115(6): 061 901
- [7] Liu H, Xu Y, Tang C *et al.* *Ceramics International*[J], 2019, 45(17): 23 393
- [8] Mazrouei-Sebdani Z, Begum H, Schoenwald S *et al.* *Journal of Non-Crystalline Solids*[J], 2021, 562(3211): 120 770
- [9] Zhang Zhen(张震), Zhao Shuang(赵爽), Chen Guobing(陈国兵) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(11): 3977
- [10] Fu Yinyi(傅颖怡), Ding Xingeng(丁新更), Meng Cheng(孟成) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(S1): 431
- [11] Angel A, Suarez G, Nino J. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*[J], 2019, 519(1): 012 008
- [12] Thai Q B, Siang T E, Le D K *et al.* *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*[J], 2019, 577: 702
- [13] Ag A, Smj B, Jing K C *et al.* *Journal of Water Process Engineering*[J], 2019, 28: 107
- [14] Wang C, Okubayashi S. *Journal of Supercritical Fluids*[J], 2019, 148: 33
- [15] Za A, Xh A, Peng Z B *et al.* *Ceramics International*[J], 2021, 47(9): 12 963
- [16] Li X, Dong G Q, Liu Z W *et al.* *ACS Nano*[J], 2021, 15(3): 4759
- [17] Du Ai(杜艾), Huang Shangming(黄尚明), Xu Weiwei(许维维) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(S1): 580
- [18] Nita L E, Ghilan A, Rusu A G *et al.* *Pharmaceutics*[J], 2020, 12(5): 1
- [19] Zhang N, Qi Y F, Tian S H *et al.* *Separation and Purification Technology*[J], 2020, 262: 118 233
- [20] Ibrahim M, Ahmad A, Barry M S *et al.* *International Journal of Concrete Structures and Materials*[J], 2020, 14(1): 1
- [21] Balos S, Howard D, Brezulanu A *et al.* *Metals-Open Access Metallurgy Journal*[J], 2021, 11(4): 526
- [22] Liang Lisi(梁李斯), Guo Wenlong(郭文龙), Zhang Yu(张宇) *et al.* *Journal of Functional Materials*(功能材料)[J], 2020, 51(5): 5013
- [23] Oh J H, Kim J S, Nguyen V H *et al.* *Composites Part B: Engineering*[J], 2020, 186: 107 817
- [24] Linhares T, Amorim M T, Dures L. *Journal of Materials Chemistry A*[J], 2019, 7(40): 22 768
- [25] Samaei S E, Berardi U, Taban E *et al.* *Applied Acoustics*[J], 2021, 181: 108 157
- [26] Yu Yuxi(余煜玺), Ma Rui(马锐). *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2018, 46(11): 45
- [27] Arenas P J, Crocker M J. *Sound and Vibration*[J], 2010, 44(7): 12
- [28] Nolan M, Berzborn M, Fernandez-Grande E. *Journal of the Acoustical Society of America*[J], 2020, 148(2): 1077
- [29] Lawanwadeekul S, Tomiku R, Okamoto N *et al.* *Acoustical Science and Technology*[J], 2021, 42(3): 154
- [30] Macho-Stadler E, Elejalde-Garcia M J. *European Journal of Physics*[J], 2017, 38(5): 055 703
- [31] Komkin A, Bykov A, Mironov M. *Journal of the Acoustical Society of America*[J], 2020, 148(3): 1391

- [32] Kang C W, Jang E S, Jang S S *et al.* *Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University*[J], 2020, 65(2): 351
- [33] Buratti Cinzia, Merli Francesca, Moretti Elisa *et al.* *Energy and Buildings*[J], 2017, 152(10): 472
- [34] Wang J Q, Du B. *Journal of Building Engineering*[J], 2020, 32: 101 836
- [35] Verdejo R, Staempfli R, Alvarez-Lainez M *et al.* *Composites Science and Technology*[J], 2009, 69(10): 1564
- [36] Sedigheh Basirjafari, Rasoul Malekfar, Siamak Esmailzadeh Khadem *et al.* *Journal of Applied Physics*[J], 2012, 112(10): 013 523
- [37] Pu H X, Ding X L, Chen H *et al.* *Environmental Technology & Innovation*[J], 2021, 24: 101 874
- [38] Ren Xiaohe(任晓荷), Sun Gaohui(孙高辉), Bai Guofeng(白国锋) *et al.* *Technical Acoustics*(声学技术)[J], 2018, 37(6): 2
- [39] Talebi Z, Soltani P, Habibi N *et al.* *Construction and Building Materials*[J], 2019, 220: 76
- [40] Dong Winny, Faltens Tanya, Pantell Michael *et al.* *MRS Online Proceedings Library Archive*[J], 2009, 1188(7): 2
- [41] Forest L, Gibiat V, Hooley A. *Journal of Non-Crystalline Solids*[J], 2001, 285(1-3): 230
- [42] Wang Yue(王 月). *Materials for Mechanical Engineering*(机械工程材料)[J], 2002, 26(3): 29
- [43] Merli F, Anderson A M, Carroll M K *et al.* *Applied Acoustics*[J], 2018, 142: 123
- [44] Cao L T, Yu X, Yin X *et al.* *Journal of Colloid and Interface Science*[J], 2021, 597: 21
- [45] Sung H L, Bong S K, Gyu M K *et al.* *Micromachines*[J], 2020, 11(11): 983
- [46] Langfeldt F, Hoppen H, Gleine W. *Journal of Sound and Vibration*[J], 2020, 476: 115 309
- [47] Ayoub H S, El-Sherif A F, Ibrahim D *et al.* *Optical and Quantum Electronics*[J], 2021, 53(9): 525
- [48] Cai J Y, Lucas S, Wang L J *et al.* *Advanced Materials Research*[J], 2012, 391-392: 116
- [49] Li Wenfang(李文芳), Luo Xiangyu(骆翔宇), Jin Xueli(金雪莉). *Journal of Building Materials*(建筑材料学报)[J], 2013, 16(1): 70
- [50] Wei Z, Xiang Y, Xu S *et al.* *Materials & Design*[J], 2018, 137(5): 108
- [51] Fouriea J G, Plessisb J P. *Chemical Engineering Science*[J], 2002, 57(14): 2781
- [52] Yang Y, Chen Z F. *Applied Acoustics*[J], 2015, 91: 6
- [53] Bies D A, Hansen C H. *Applied Acoustics*[J], 1980, 13(5): 357
- [54] Cao L T, Fu Q X, Yang S *et al.* *Composites Communications*[J], 2018, 10: 25
- [55] Flannery C M, Murray C, Streiter I *et al.* *Thin Solid Films*[J], 2001, 388(1-2): 1
- [56] Sachithanadam M, Joshi S. *Gels*[J], 2016, 2(1): 11
- [57] Zhang H, Fang W Z, Wang X *et al.* *International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2017, 115(P.T.B): 21
- [58] Schmidt M, Schwertfeger F. *Journal of Non-Crystalline Solids*[J], 1998, 225(1): 364
- [59] Zhang X H, Ni X X, Li C X *et al.* *Journal of Materials Chemistry A*[J], 2020, 8(19): 9701
- [60] Dourbash A, Buratti C, Belloni E *et al.* *Journal of Applied Polymer Science*[J], 2016, 134(8): 44 521
- [61] Eskandari N, Motahari S, Atoufi Z *et al.* *Journal of Applied Polymer Science*[J], 2017, 134(14): 44 685
- [62] Feng J, Le D, Nguyen S T *et al.* *Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects*[J], 2016, 506: 298
- [63] Yan P, Zhou B, Du A. *RSC Advances*[J], 2014, 4(102): 58 252
- [64] Duong H M, Ling N R B, Thai Q B. *Waste Management*[J], 2021, 124(78): 1
- [65] Simón-Herrero C, Peco N, Romero A *et al.* *Applied Acoustics*[J], 2019, 156: 40
- [66] Hamidi M, Nassiri P, Panahi H *et al.* *Polymers and Polymer Composites*[J], 2021, 1(2): 096739112098574
- [67] Buratti C, Moretti E, Belloni E *et al.* *Sustainability*[J], 2014, 6(9): 5839
- [68] Oh K W, Kim D K, Kim S H. *Fibers & Polymers*[J], 2009, 10(5): 731
- [69] Yang T, Xiong X, Venkataraman M *et al.* *Journal of the Textile Institute*[J], 2018, 110(2): 196
- [70] Venkataraman M, Mishra R, Arumugam V *et al.* *Proceedings of 6th NANOCON International Conference*[C]. Brno, Czech Republic: Advances in Fibrous Material Science, 2014: 124
- [71] Ramamoorthy M, Pisal A A, Rengasamy R S *et al.* *Journal of Porous Materials*[J], 2017, 25: 179
- [72] Motahari S, Javadi H, Motahari A. *Journal of Materials in Civil Engineering*[J], 2015, 27(9): 1

Research Process on Sound Absorption Performance of Silica Aerogel and Composite Materials

Zhang Peng, Yang Zichun, Zhang Zhen, Li Kunfeng, Yang Feiyue, Li Xiaohua, Shao Huilong, Fei Zhifang,
Xie Xuyang, Gan Zhicong

(College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430032, China)

Abstract: The preparation of sound-absorbing materials with high porosity is very important for noise control. Silica aerogel has attracted increasing attention in recent years with its high porosity and high acoustic impedance. Combining silica aerogel with traditional sound absorbing materials can significantly combine their sound absorption advantages, and it is quite significant for noise elimination. The concept of sound absorption properties, sound absorption structure, mechanism, methods for measurement and characterization were introduced, and then the effects of density, thickness, porosity, pore diameter, Young's modulus and particle size on the sound absorption properties of aerogels were deeply investigated. In addition, the research progress of sound absorption properties of silica aerogels and organic compounds, organic/inorganic minerals and non-woven fabric composites were reviewed in detail. Finally, the challenges faced at present and the development direction in the future were prospected.

Key words: silica aerogel; composite material; influence factors of sound absorption; organic polymer

Corresponding author: Yang Zichun, Ph. D., Professor, College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430032, P. R. China, E-mail: zichunyang12a@126.com