

# 声学材料研究进展及其在工业噪声污染治理中的应用

冯涛<sup>1</sup>, 尤炫惠<sup>1</sup>, 汪婕<sup>2</sup>, 王晶<sup>1</sup>

1. 北京工商大学计算机与人工智能学院, 北京 100048

2. 生态环境部核与辐射安全中心, 北京 100082

**摘要** 工厂周边声环境质量的提升需要对工业噪声进行有效治理。声学材料在噪声治理中发挥着重要的作用, 是实施各种降噪措施的基础。根据声学材料的分类, 综述了计算模型和设计制备的最新研究进展, 总结各种声学材料在工业噪声治理中的应用。研究表明, 由于材料声学性能的建模及计算方法多种多样, 需根据所要解决的具体问题选择合适的模型, 以保证计算精度; 新型声学材料主要在结构和基材上创新, 为工业噪声治理提供了更多选择。

**关键词** 工业噪声; 声学材料; 设计制备; 计算模型

2020年数据显示, 中国环境污染率高于治理率<sup>[1]</sup>, 环境噪声问题受到人们的广泛关注。据统计, 环境噪声的来源主要有4种类型: 生活噪声、交通噪声、工业噪声以及建筑施工噪声。其中, 工业噪声占27%<sup>[2]</sup>, 包括机械及运输设备、工具、工艺流程等在工业生产和运营过程中所产生的噪声。从物理机理上看, 工业噪声的具体来源复杂多样, 主要源于机械振动、气体排放、液体流动以及其他与工业生产相关的活动, 包括动力系统、机械传动系统和液气压系统导致的结构振动和自身的结构辐射噪声<sup>[3-4]</sup>, 需要注意的是, 一些工业机械设备, 如抛

丸机、轧胚机产生的工业噪声最大声压级主要集中在中频段的250 Hz; 而砂轮抛光机、等离子切割机、打磨机、铸机、碎料机、织布机表现出更强的噪声特性, 产生的工业噪声最大声压级主要集中在高频段的4、8 kHz这2个频率点<sup>[5]</sup>, 可以看出, 工业噪声的频带范围很宽。又因为工业噪声还具有声压级高、低频声占比较大的特点, 所以会对周围环境产生不可忽视的影响<sup>[6]</sup>。长期暴露在噪声环境下, 不仅会对人的听觉产生不利影响, 还会增加高血压和心脑血管疾病的患病风险<sup>[7]</sup>。因此, 为了改善工厂周边居民的声环境质量和企业工人的身心健康,

收稿日期: 2023-10-31; 修回日期: 2024-03-21

作者简介: 冯涛, 教授, 研究方向为声学材料、噪声防治等, 电子信箱: fengt@btbu.edu.cn

引用格式: 冯涛, 尤炫惠, 汪婕, 等. 声学材料研究进展及其在工业噪声污染治理中的应用[J]. 科技导报, 2024, 42(20): 32-47;

doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2023.10.01614

对工业噪声污染的治理至关重要。

声学材料具备良好的吸隔声特性,可根据特定声学需求进行设计,作为改善声学环境的有效措施,在环境噪声治理中有着广泛的应用。本文对新型声学材料的计算模型、设计与制备方法以及其在工业噪声治理中的应用等方面进行综述。

## 1 声学性能建模及计算方法

计算模型是研究声学材料机理、性能及设计方法的基础,种类包括参数化模型、数据驱动模型和其他相关模型,这些模型可为声学材料的研发和应用提供坚实的理论支撑。

### 1.1 参数化模型

参数化模型是一种白箱模型,在明确物理机理的基础上,建立材料的物理参数与材料声学性能之间的定量关系,通过理论分析、数值计算,以及理论和实验相结合的方法对材料的声学特性进行研究。多孔吸声材料的声学特性可用 Biot 理论模型计算。传递矩阵可用于描述局部作用材料的声学特性,例如毡类和泡沫材料,在传递矩阵基础上推算出吸声系数和隔声量。

#### 1.1.1 多孔材料的理论模型

多孔材料的理论模型基于材料的非声学参数,对声学材料的性能进行数学描述和预测。多孔材料声学模型的发展可追溯到 Biot 等<sup>[8]</sup>在 1956 年提出的理论模型,此后的 Delany-Bazley 经验模型<sup>[9]</sup>、Miki-Delany-Bazley 优化模型<sup>[10]</sup>、Iannace-Berardi 经验模型<sup>[11]</sup>,以及 Johnson-Champoux-Allard 唯象学模型<sup>[12]</sup>都进一步推动了多孔材料声学的研究。此外,针对特定聚酯纤维材料, Garai 等<sup>[13]</sup>在 2005 年提出的经验模型拓宽了 Delany-Bazley 模型在这一领域的应用范围。该模型主要应用于评估各种多孔材料的声学特性,为材料的设计、优化和应用提供科学的理论依据。在材料声学性能研究领域,具有重要的学术价值和应用前景。

Santoni 等<sup>[14]</sup>提出一个简化模型,用于评估大麻纤维声学特性与密度的函数关系,该模型的预测结果与实测物理参数之间具有良好的一致性,为计算

和比较声音在不同压缩程度材料中的传播提供了有效手段。Caniato 等<sup>[15]</sup>提出一个计算蜂窝藻酸盐泡沫材料声学特性的修正方程,以解决传统声学特性预测模型不适用于新型泡沫材料的现象。

Ehsan 等<sup>[16]</sup>使用 Johnson-Champoux-Allard 模型,预测凤尾兰与以红麻纤维和废稻壳颗粒为原料的新型天然纤维颗粒复合材料的声学特性,发现该模型可用于预测非织造纤维结构的声学性能。Ehsan 等还使用响应面法和中心复合设计技术(RSM-CCD)建立二次方程模型,发现厚度、密度、黏结剂含量、纤维粒比等自变量对吸声性能有显著影响,且模型预测值与实测值一致性好。

#### 1.1.2 数值模型

数值模型主要利用有限元、时域有限差分、统计能量等方法模拟材料的声学特性,将求解域划分为节点和网格,求解域可以是空气,也可以是相同或不同的材料,通过对网格赋值不同的物理参数来模拟不同的材料。仿真模型能够准确地模拟出不同条件下材料的声学特性,具有高精度、高效率以及适用范围广的特点。

An 等<sup>[17]</sup>设计了具有半径跳变不连续的十字形核以形成共振腔的晶格结构。采用谱元法(SEM)计算有限二维点阵结构在时谐载荷作用下的频率响应,通过有限元法验证其优越性和有效性。结果显示,复合 AM 基晶格结构可实现低频和高频的振动衰减,得益于不同材料的部分晶格结构引起的带隙叠加特性。该设计在保证结构安全可靠的前提下,为周期性网格结构的弹性波减振提供新思路。

#### 1.1.3 理论与实验的混合模型

理论与实验混合模型适用于多层材料,集合了实验模型与理论模型的优势,有适用性广、计算效率高且与实测结果较为符合的特点。

冯涛等<sup>[18]</sup>研究了泡沫材料传递矩阵的实验辨识方法,研究结果表明,传递矩阵是材料本身固有的声学属性,不随其声学边界条件的改变而改变,以 1 层泡沫材料的传递矩阵参数为基础,通过计算可得到多层泡沫材料的吸声系数。杨梦露等<sup>[19]</sup>将实测泡沫材料声传递矩阵和空气声传递矩阵的理论计算结合,建立了理论与实验混合模型,为测定

和研究空气背衬条件下泡沫材料法向吸声系数提供了便利有效的手段。汪婕等<sup>[20]</sup>为了深入研究中间层材料的声学特性,提出了一种基于中间层传递矩阵法的结合实验与计算混合模型。该方法不仅为薄材料及薄膜类材料声特性的测量和计算提供有效的解决策略,还极大提升了计算的准确性和效率。此外,还进一步探索了该方法在评估不同材料间黏接胶对组合材料声特性影响方面的应用潜力。通过一系列研究,为薄材料声特性的测量和计算提供了新的思路。

### 1.2 数据驱动模型

数据驱动模型是一种黑箱模型,它选择合适的机器学习模型,通过大量相互对应的输入和输出参数,建立输入和输出之间的对应关系。许多学者已经开始探索使用机器学习或深度学习方法来预测材料声学特性,在大量数据的基础上进行统计分析,来预测材料的声学特性。

机器学习模型始于高尔顿提出的线性回归模型。随后,McCulloch等<sup>[21]</sup>首次为单个神经元建立数学模型,奠定了机器学习的基础,开创了人工神经网络(ANN)研究的时代。接着,Rosenblatt提出由2层神经元组成的神经网络,即“Perceptrons”,用于机器学习分类<sup>[22]</sup>。Gordon等<sup>[23]</sup>提出分类与回归树模型,既可用于分类,也可用于回归。第2年,Rumelhart等<sup>[24]</sup>提出反向(BP)传播模型,优化神经网络的计算量。最后,Moody等<sup>[25]</sup>提出径向基函数(RBF)神经网络,具有较强的非线性拟合能力,学习规则简单,应用广泛。

Iannace等<sup>[26]</sup>、Ciaburro等<sup>[27]</sup>以及Kumar等<sup>[28]</sup>分别用ANN对金雀花纤维、PVP/二氧化硅复合材料和多层Helmholtz共振腔结构(图1)的声学特性进行预测,均显示出较高的Pearson相关系数,说明ANN可用于预测特定频率范围内材料的吸声系数。Ciaburro等<sup>[29]</sup>还验证了基于回归树模型来预测膜型超材料声学特性的可行性。Liang等<sup>[30]</sup>发现RBF可用于预测复合泡沫铝的声学特性。Luo等<sup>[31]</sup>发现,在预测芳纶蜂窝夹芯板的隔声性能时,使用同样的数据集进行训练,BP和ANN存在过拟合现象,而广义神经网络预测结果与实测结果更接近,

这表明数据驱动模型的选择对预测结果有很大影响。这些研究将数据驱动模型和材料声学性能预测结合,为材料声学特性的研究提供了新的方法,具有广泛的应用前景。

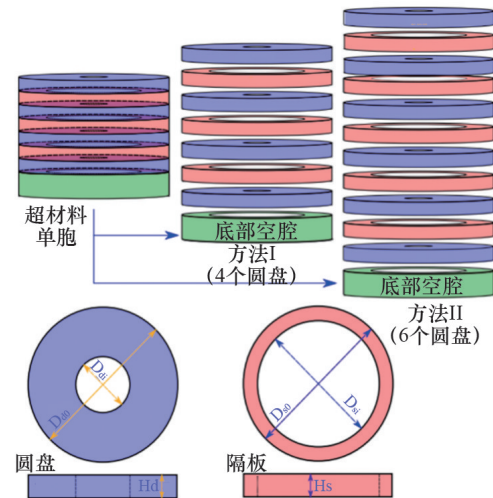


图1 分级Helmholtz结构

### 1.3 优化计算方法

除此之外,计算材料设计(CMD)是计算力学领域的一个新兴分支,对于基于超材料的工业声学部件设计具有巨大的潜力。Roca等<sup>[32]</sup>设计的新型轻质隔音板(图2),能够衰减低于5000 Hz噪声源,而不需要非常致密的厚材料,并提出一种设计程序,为低频范围局部共振声学超材料隔声设计提供了强有力的工具。

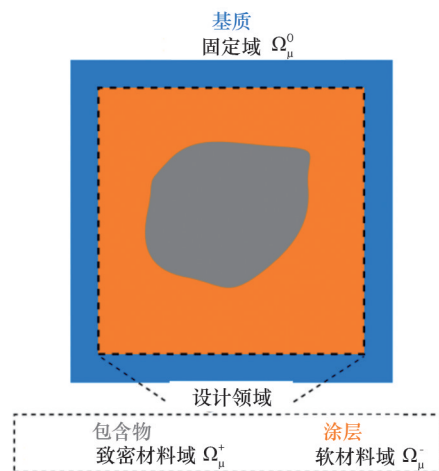


图2 薄板结构示意图

Rao等<sup>[33]</sup>在2011年提出教学优化算法(TLBO),是一种基于群体的启发式优化算法,模拟传统课堂教学过程,不需要特定的参数。相比以往的几何参数拓扑优化<sup>[34]</sup>或基于声学性能的直观几何参数分析<sup>[35-37]</sup>,具有更多优势,可以减少正向设计时间,并根据目标提高吸声性能,易于实现、参数设置简单、

收敛速度快、精度高。Gao等<sup>[38]</sup>基于TLBO教学优化算法优化了复合多孔超材料(CHPM)的层间距和侧板长度(图3),提高其在0~10 kHz频率范围内的平均吸声系数,这一声学结构和优化方法将激发更多新型超宽带吸声器的设计思路,并在工业噪声控制和“安静”客舱设计建设领域具有应用前景。

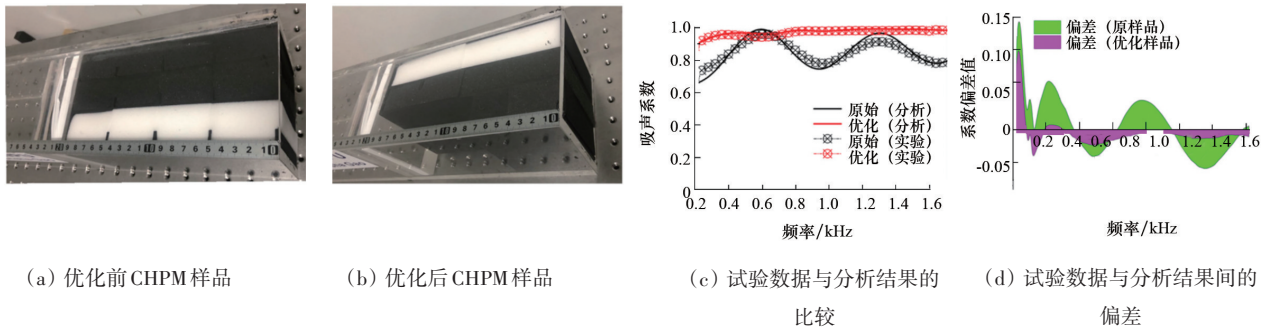


图3 复合多孔超材料的层间距和侧板长度

## 2 新型声学材料的设计与制备

声学材料的建模及计算方法可用于新型声学材料的设计、制备与应用等环节。在设计和制备阶段,通过建立可模拟和预测的材料声学模型,实现基材选择、结构调整及制备工艺的优化,从而提高新型声学材料的开发效率和精确性。

传统隔音材料难以控制低频噪声,需要体积庞大、表面密度大的结构来有效衰减低频声波,难以满足工程设计要求<sup>[39]</sup>。而新型声学材料的质量轻、体积小,打破了质量定律,具有更优越的声学性能,在多领域得到了广泛研究和应用<sup>[40]</sup>,为解决低频噪声问题开辟了新的研究方向。

### 2.1 新型声学材料的结构设计

新型声学材料的特点之一是结构的创新。在传统声学材料的基础上融合了新颖的设计,例如与微穿孔板或膜型超材料相结合,不仅保留了传统声学材料的优点,同时也改进了其中低频噪声抑制方面的不足,拓宽了适用范围。

#### 2.1.1 Helmholtz型超材料

Helmholtz 共鸣器是声学中最基本的结构之一。在工业噪声治理中,主要体现在声学性能的改变

与优化上,能够实现对特定频率范围内声音的有效吸收和隔离,显著降低工业环境中的噪声污染。

Abbad等<sup>[41]</sup>用丙烯酸膜替代Helmholtz共鸣器前壁,颈管和红环组装后放在2面都有黏性的膜上,整个结构嵌在三聚氰胺泡沫中(图4),发现高度黏弹性薄膜显著影响结构的声学学和力学特性,对频率高于400 Hz声音的吸声系数和传声损失均有所提高。Jena等<sup>[42]</sup>、Ma等<sup>[43]</sup>、Haberman等<sup>[44]</sup>对Helmholtz共鸣器(HR)不同构型(图5)的声学特性进行研究,发现单个Helmholtz共鸣器是负压缩模量的声学超材料;当2个相似或不同的Helmholtz共鸣器串联或并联时,有效密度和压缩模量均变为负值。Kumar等<sup>[28]</sup>发现将不同数量圆盘和隔板按

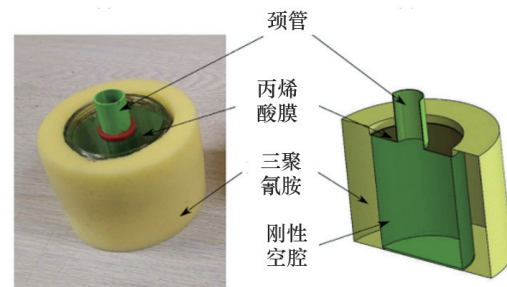


图4 泡沫中的膜腔Helmholtz共鸣器

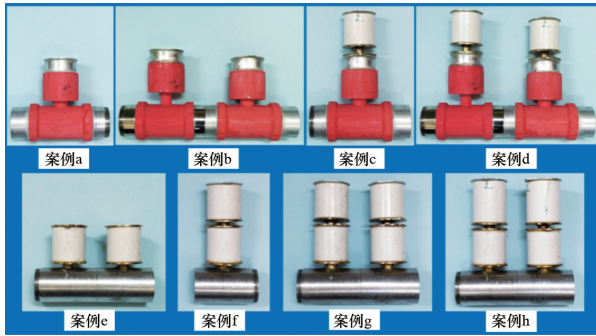
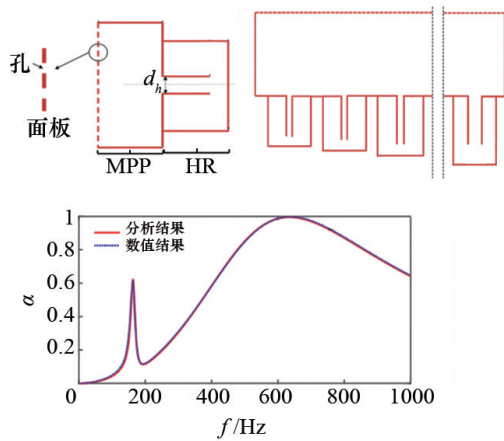
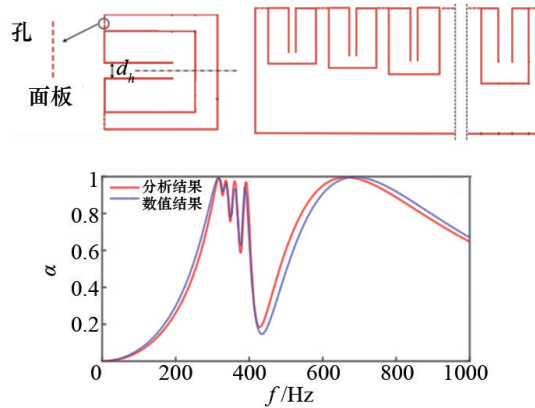


图5 实验用不同的Helmholtz共鸣器阵列结构

一定序列配置可具有不同的吸声特性(图1),该结构对80~1600 Hz声音有卓越的吸声性能,并出现多个吸收峰值。Mahesh等<sup>[45]</sup>将微穿孔板(MPP)与多插入式颈管Helmholtz共鸣器(HRIN)并联和串联,产生2个吸收峰,HRIN的共振频率与MPP作用所产生的峰值分别对应低频峰、高频峰;将HRIN平行布置,可显著减少吸声器的厚度;HR与MPP并联会在低频区形成多个吸收峰,拓宽吸收带(图6);调整HRINs和MPP参数可实现所需的吸收带宽,在低频降噪领域具有广阔的应用前景。



(a) 不同体积Helmholtz共鸣器与MPP串联(S-MPPHR)结构示意图

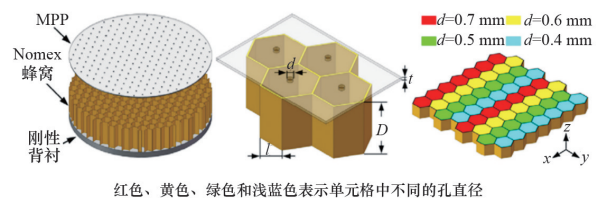


(b) 不同体积Helmholtz共鸣器与MPP并联(P-MPPHR)结构示意图

图6 插入式颈管的Helmholtz共鸣器(HRIN)与MPP集成结构

马大猷<sup>[46]</sup>提出的MPP基于Helmholtz共鸣器原理,被认为是有望取代多孔吸声材料的前沿选择之一,在工业噪声治理方面具有广阔的应用前景,可应用于需要高效吸声的场合,如建筑隔音、交通工具噪声控制、工厂车间降噪等。此外,由于其薄型设计,它们还特别适合在空间受限的场合使用。Xie等<sup>[47]</sup>在每个蜂窝单元上都置有微穿孔制成微穿孔蜂窝超表面板(MHMP)(图7),相比微穿孔板,空气背衬更薄且吸声效果更好,在共振频率下可吸收99%的声音;多种孔径组合的MHMP吸声效果与孔径平均值组合的MHMP相当。

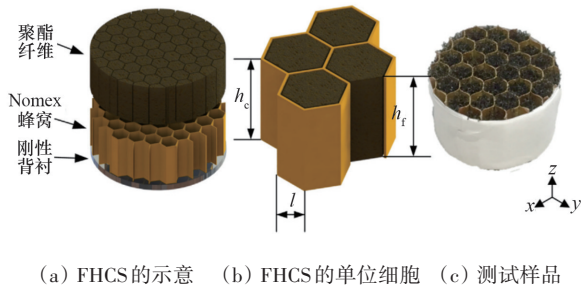
随后发现在Nomex蜂窝中填充聚酯纤维形成的填充蜂窝复合材料结构(FHCS)<sup>[48]</sup>(图8),吸声性



(a) MHMP示意 (b) MHMP单元: (c) 由4种不同孔径的MPP上的穿孔和蜂窝单元组成一个HR MHMP

图7 蜂窝超表面板结构示意图

能明显优于传统材料;不同规格的蜂窝对吸声系数有轻微影响;填料孔隙率越大,中低频吸声系数越高,但对大于6000 Hz的高频范围内无明显改善。



(a) FHCS的示意 (b) FHCS的单位细胞 (c) 测试样品

图8 FHCS结构示意图

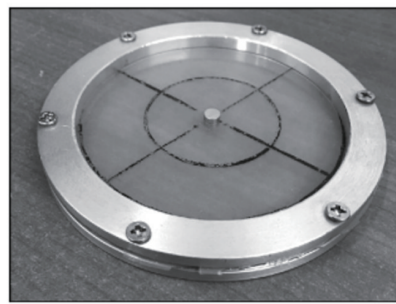
该实验为蜂窝夹层板在声学 and 降噪领域的应用提供了支持。

### 2.1.2 膜型超材料

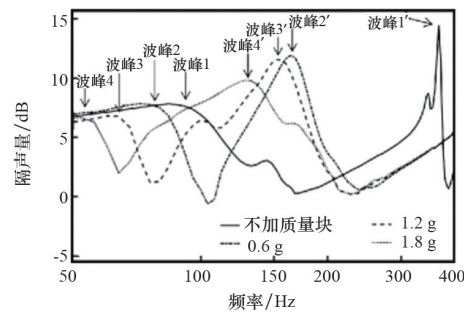
膜型超材料(MAM)通常由质量块和应力膜组成,与传统的多孔材料和微穿孔板相比,在低频表

现出优异的吸隔声性能。随着研究的深入和技术的不断进步,膜型声学超材料的设计将更加优化,性能将更加卓越,为低频噪声控制领域提供更多高效、实用的解决方案。

贾玉麒等<sup>[49]</sup>利用铝制框架和硅胶薄膜制作薄膜型超材料,发现在薄膜中心施加不同质量的钕铁硼磁铁块可提高在低频范围的隔声性能(图9),该材料特别适用于工厂车间、机械设备等工业环境,能够有效减少低频噪声对工人和工作环境的影响,提高工作效率和舒适度。Lu等<sup>[50]</sup>设计一种有偏心铝板的膜型超材料(图10),最佳配置为4裂环、外半径60 mm、内半径50 mm,适用于低频噪声隔离,作为建筑物窗户的外层防止环境低频噪声传播到室内,该特性使得膜型超材料在工厂、仓库等工业



(a)



(b)

图9 膜式声学超材料实物及隔声量曲线

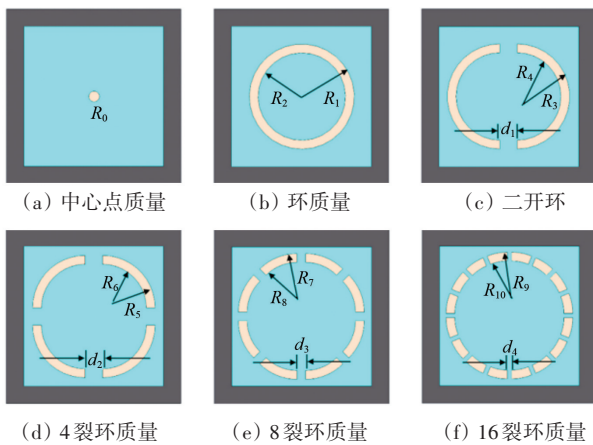
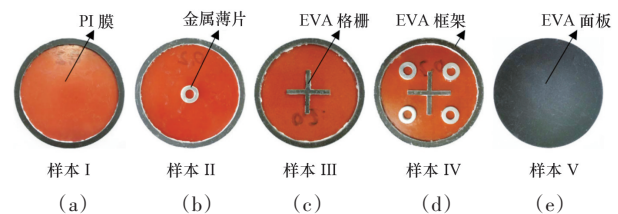


图10 膜上的各种质量结构

建筑的噪声控制中具有广泛的应用潜力,有助于创造更加安静的工作环境。Zhou等<sup>[51]</sup>提出一种具有

连续多态反共振模式的低频薄膜型超材料(LMAM)(图11),可有效拓宽低频声衰减区域,产生单一的负有效参数特性,该研究将在一定程度上丰富质量薄板与膜之间的多重解耦设计,并可能促进具有多态反共振的轻质MAMs研究,对工程应用研究具有一定指导意义。Li等<sup>[52]</sup>设计了一种双膜



(a~d)为具有不同共振器结构的测量样本;(e)为均质EVA板

图11 膜式超材料结构

型声学超材料与Helmholtz共鸣器相结合的夹层结构(DMAM)(图12),平均隔声性能在50~1600 Hz范围内,比单膜型夹层结构提高30%,比不增加空腔高度的双膜夹层结构提高24.8%,可通过改变空腔高度、附加块排列形式和膜缺陷位置进行灵活设计,具有良好的力学和低频隔音性能,满足轻量化、承重和隔声要求,在解决工业设备产生的低频噪声问题方面具有独特优势,能为工业噪声治理提供新的解决方案。

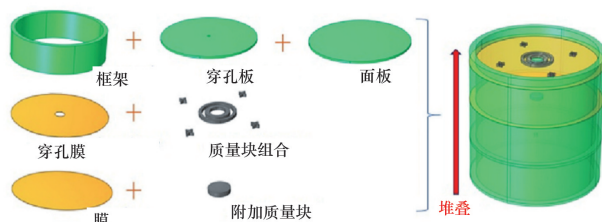


图12 DAMA的结构单元设计

### 2.1.3 砖基结构

在工业噪声治理中,砖基材料的应用场景主要聚焦于搭建隔声墙,利用砖基材料的特性,有效地减少或阻隔噪声的传播,为工厂、车间等工业环境提供更为安静的工作条件。下面介绍2种新型砖基结构。

Fiala等<sup>[53]</sup>使用砖工业产生的砖屑(BR)和砖微粒(BM)填充陶砖砌块中的空隙,该环保型砖基材料增强了50~5000 Hz的隔音能力,且没有增加太多成本。研究样品如表1所示,图13为BB和BBCM样品实物图。

表1 研究砖块样品

| 样品型号 | 填料比例/% |     |
|------|--------|-----|
|      | BR     | BM  |
| BB   | 0      | 0   |
| BBC  | 100    | 0   |
| BBM  | 0      | 100 |
| BBCM | 50     | 50  |

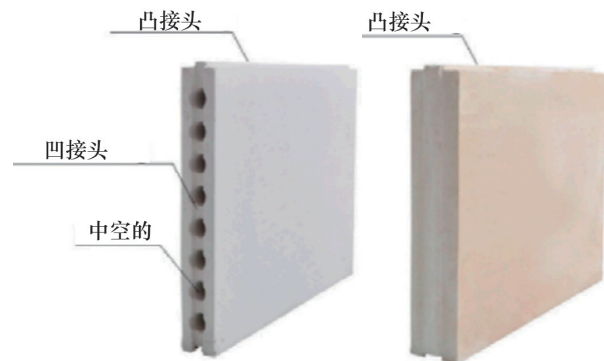
Júnior等<sup>[54]</sup>使用图14所示的实心 and 空心石膏砌块建造墙壁,发现在2层墙之间加入吸音材料的双层墙壁隔音性能更佳,但具体隔音性能取决于放置材料的种类。由于对石膏砌块声学性能的研究很少,该研究在这一领域具有重大意义。



(a) BB样品

(b) BBCM样品

图13 样品实物



(a) 空心

(b) 实心

图14 空心 and 实心石膏块

### 2.1.4 其他结构

Arjunan等<sup>[55]</sup>通过选择性激光熔化(SLM)技术用Nylon-12制造Herschel-Quincke-Arjunan(HQA)几何复杂波导模型(图15),合适的参数能显著改善在设计频率下的吸声系数和传声损失。此模型可利用声波干涉原理开发定制波导,应用于建筑墙壁、隔音屏障和吸音板,为无源声学开辟新的方向。

## 2.2 新型声学材料的制备

新型声学材料的另一个特点是使用环保和可持续性强的基材<sup>[56-57]</sup>,如天然纤维、可回收材料和工业废料等,以减少能源消耗和环境污染,在制备过程中尽可能降低对环境的影响,符合当前社会和经济发展的趋势。

### 2.2.1 多孔材料

多孔材料具有重量轻、搬运方便等优点,由于其独特的结构和性能,主要应用于高频噪声控制、防火吸声、室内外环境隔音等方面,是建筑和交通运输领域的良好吸声材料<sup>[58-59]</sup>。复合多孔材料应用

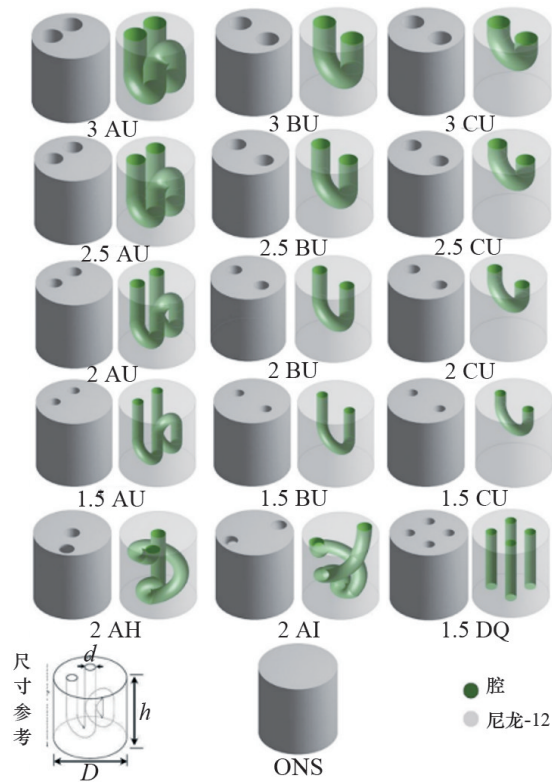


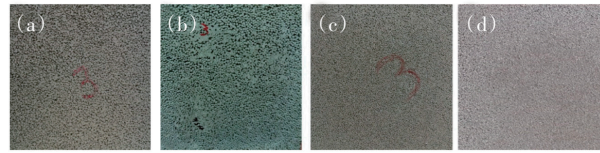
图15 波导内部和外部视图的几何设计

广泛,综合性能强,受到越来越多的关注和研究<sup>[60]</sup>。

Baghban 等<sup>[61]</sup>使用非极性聚酯树脂、亚甲基二苯基二异氰酸酯和其他试剂,通过聚合反应制备高效吸音软质聚氨酯泡沫(FPUF),发现增加异氰酸酯指数和含水量可提高1500~4000 Hz的吸声系数及声学阻尼,是一种很有前途的隔音材料,可安装在指定位置以降低噪声。

Liu 等<sup>[62]</sup>将三聚氰胺泡沫(MF)分别浸泡在氧化石墨烯(GO)溶液和GO-功能化碳纳米管(CNT)溶液中,后干燥制得MFGO和MFGOCNT样品。与纯MF相比,可提高250~1600 Hz范围内的吸声性能。该吸声材料具有出色的隔湿、阻燃性,成本低、易合成且环保,可应用于工业。

Shtrepi 等<sup>[63]</sup>使用普通骨料和轻质骨料制备4种不同配比的多孔混凝土面板(图16),发现面板(d)的适用范围最广,面板(b)的吸声性能最差;普通骨料吸声性能优于轻质骨料;面板的厚度越大,吸声性能越好,留有空腔可提高低频吸声性能。可实际应用于室内和室外环境中。



面板(a)的背面: 4~8 mm压碎的普通骨料;面板(b): 4~8 mm的圆形轻质骨料;面板(c): 2~4 mm的圆形轻质骨料;面板(d): 0.5~1 mm的圆形轻质骨料

图16 多孔混凝土面板

泡沫铝作为新概念的金属材料,以超轻、吸声降噪、耐火阻燃、环保等特点,近年来备受关注。王和平等<sup>[64]</sup>介绍了抗氧化发泡铝降噪芯片的制造工艺,在高温下熔化高纯度铝锭,用无工业盐、含有氢化钛的发泡剂发泡,形成不会被腐蚀的发泡铝。该材料广泛地应用于航空航天、船舶、火车、汽车等运载工具和道路声屏障中,简化施工工艺并保证降噪效果。

Yang 等<sup>[65]</sup>将多孔铜压制、组装成4层梯度压缩多孔金属(图17),最佳组合的样品以更薄的厚度、更少的材料实现更高的吸声效率,在100~6000 Hz的最佳平均吸声系数为60.33%;可通过压缩或拉伸调节孔隙率和流动电阻率;随着压缩比的增大,厚度对吸声系数的影响越来越小。该材料可应用于声学环境检测和工业降噪中。



图17 4层压缩金属示意

## 2.2.2 天然纤维

天然纤维与传统复合材料相比,具有低密度、种类多、可再生、成本低等特点,在近年受到广泛关注,其经过不同的处理工艺,如梳理、碱处理、精梳等,以及与其他材料的混合压制,可展现出优良的吸声性能,并适应不同频率范围的噪声治理需求。

Santoni 等<sup>[14]</sup>通过实验测量了经过梳理、碱处理、宽齿精梳以及细尺精梳后的大麻纤维的物理特性和吸声系数,发现梳理和碱处理对材料声学特性或物理特性影响不明显,但宽齿精梳和细尺精梳会改变其声学特性及物理特性。

伊朗的研究者研究了凤尾兰和甘蔗渣(SBW)的声学特性。采用水脱胶法去除凤尾兰叶片中的非纤维成分,干燥后与聚乙烯醇(PVA)溶液混合<sup>[66]</sup>,对于SBW,经清洗、干燥和研磨后与PVA溶液混合<sup>[67]</sup>,分别置于不同模具内压制样品。发现增加样品厚度或空气背衬可使吸声系数的峰值向低频移动;增加凤尾兰样品的空气背衬可改善低频吸声带宽;增加SBW纤维的厚度可增加中低频吸声系数的峰值。该发现有望为设计吸声器时节省材料,SBW经过处理后可作为针对中低频声的环保型建筑用隔热吸音材料。

Iannace 等<sup>[20]</sup>将剪掉叶子的金雀花树枝晾晒后切割成200 mm枝段,根据直径划分,组装成不同厚度的样本(图18),发现增加样品厚度会使吸声系数的低频峰值向更低频移动,且大直径枝段吸声系数更大。当样品厚度为120 mm时,会有2个峰值,这是粒状材料的典型特征。



图18 装入阻抗管中的样品示意

Ehsan 等<sup>[16]</sup>使用常见的农业废料即红麻纤维和稻壳颗粒,用PVA黏合制备样品,发现增加厚度可提高吸声性能,且吸声系数峰值向低频移动。在150~200 kg/m<sup>3</sup>范围内,吸声平均值(SAA)随密度的增加而增加,超过200 kg/m<sup>3</sup>后吸声平均值减小;存在一个最佳流阻率,使多孔介质具有最佳的吸声性

能;当黏合剂含量占溶液总质量的15%时,吸声效果最佳。

### 2.2.3 工业废料

全球每年会产生大量的废料,这些废料大多无法降解或降解时间过长,给环境带来很大的压力,因此,二次利用工业废料制备声学材料也是一个新的方向,将这些废料通过不同的处理工艺和组合方式,转化为具有优异吸声性能的环保型材料,为工业噪声治理提供了新的解决方案,具有良好的应用前景。

Fontoba-Ferrándiz 等<sup>[68]</sup>将黄麻、大麻、椰子、双轴亚麻和纺织废料纤维通过2种不同的树脂进行灌注工艺制造的环保型材料可作为传统合成基材和玻璃纤维增强复合材料的替代品,为建筑声学领域提供了新的可能性。

Arenas 等<sup>[69]</sup>以工业废料(即底灰、冶金渣和建筑拆除垃圾)为原料制备多孔混凝土,发现在低于800 Hz和1000~4000 Hz频带内,中等粒径混合物的吸声效果优于粗粒混合物;粗骨料和中等骨料吸声效果相当,而细骨料吸声效果不佳;混合比例对声学特性影响不大,但会影响重金属的浸出和机械特性。在保证重金属不浸出的前提下,该材料可作为隔声屏障的原材料。

Dissanayake 等<sup>[70]</sup>将棉/聚酯混合废料经预处理后,以天然橡胶为黏合剂,采用热压成型法制备的隔音材料吸声性能与市面上的吸声板相当,可根据降噪系数(NRC)值确定面板的厚度。图19为不同压力下的吸声系数(SAC)和NRC的变化图像。

Selvaraj 等<sup>[71]</sup>将从废皮革边角料中提取的胶原蛋白水解物与PVA进行电纺,夹在聚丙烯腈纳米纤维层之间制成多层复合吸音材料,提高了在80~2500 Hz频率范围内的吸音效果,为循环利用皮革废料提供一种新的方案,可应用于房间声学。

Ciaburro 等<sup>[29]</sup>回收废弃物中的软木板、图钉和纽扣,通过在软木板上粘贴不同数量及排列方式的图钉和纽扣,开发出一种新型膜型超材料(图20)。随着图钉或纽扣数量增加,吸声系数峰值增大且逐渐向低频移动,以有限的结构厚度实现优异的低频性能,可应用于吸音板,对环境进行声学修正。

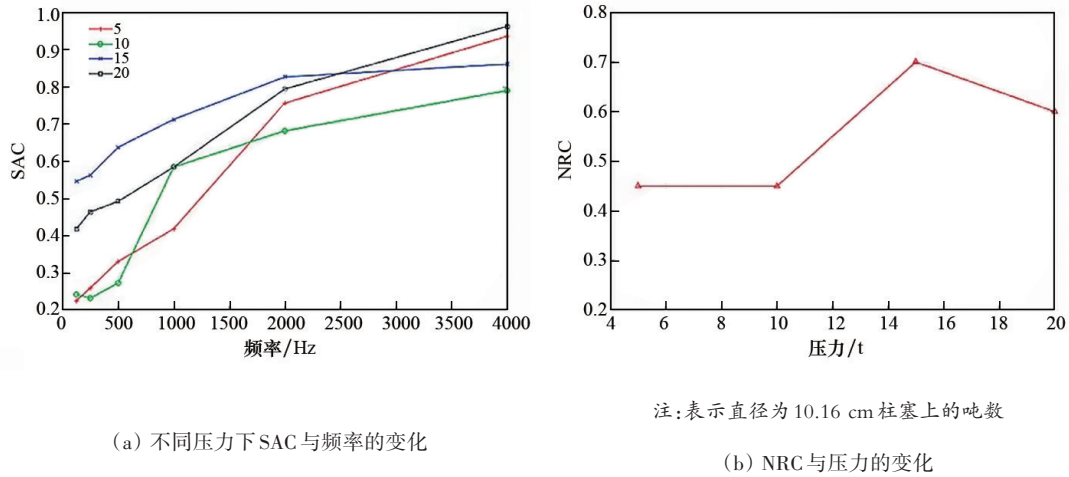


图19 不同压力下声学性能的变化图像

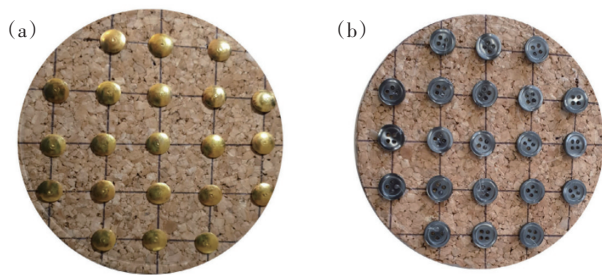


图20 膜型声超材料实物

对于工业废料在工业噪声治理的应用前景持乐观的态度的同时,也应认识到工业废料的利用仍面临一些挑战,如废料的来源稳定性、处理工艺的复杂性及产品的标准化等问题。未来研究可以关注建立稳定的废料供应体系、优化处理工艺、制定产品标准等方面,以推动工业废料在工业噪声治理领域的更广泛应用。

### 3 声学材料在工业污染治理中的应用

目前,工业噪声治理主要从源头、传播途径及敏感点保护<sup>[72]</sup>3个方面<sup>[73]</sup>进行治理,其中敏感点保护为职业卫生和健康范畴。制定治理方案时,应从实际出发,制定长期机制,按计划、程序分阶段实

施<sup>[74]</sup>。声学材料的吸隔声特性可减少声波反射和传播,有效衰减噪声,为工业噪声治理提供有效、可持续的解决方案,对改善人居环境产生积极影响。

冷却塔、高速冲床、球磨机等由于机器运转产生的单体机械噪声可通过源头控制来降低噪音<sup>[75]</sup>。吕玉恒等<sup>[76]</sup>设计一款如图21所示的隔声套,使大型球磨机的噪声降低15~22 dB,该隔声套占地小,不影响设备的运转、安全检查和维修。随后设计了安装在冷却塔上部的微穿孔板出风消声器(图22)<sup>[77]</sup>,用于治理大型冷却塔上部出风口处风机气流噪声;通过修整原有的PVC降噪填料,将进风挡板改为消声挡水板,将新型泡沫铝吸声板材与原挡水板间的不等空腔构成吸声结构,治理下部进风口的淋水噪声。该方案消声性能稳定,便于后续检修。

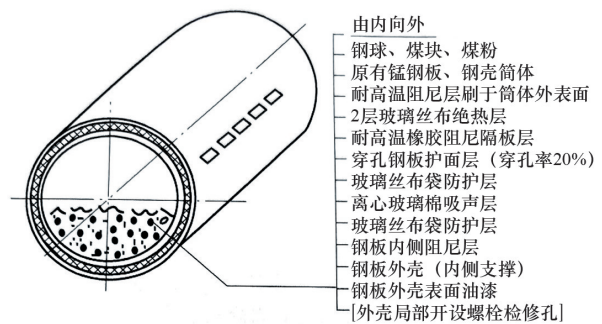


图21 球磨机隔声套结构示意图

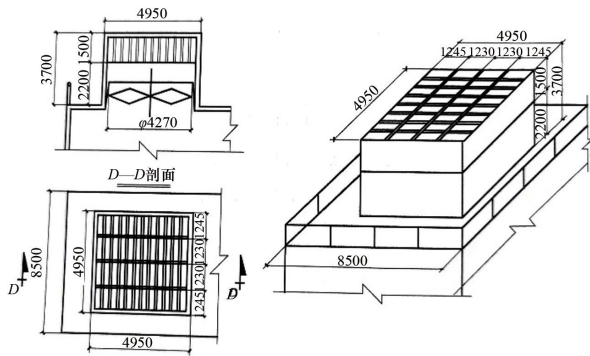


图 22 大型冷却塔微穿孔板出风消声器示意(单位:mm)

Gao 等<sup>[78]</sup>提出一种由多孔聚氨酯海绵组成,嵌入多层工字型板的复合多孔材料(图 23),提高 0~6.4 kHz 和 0.2~6.4 kHz 范围内的平均吸声系数,且在高频下仍保持优异的吸声性能,在建筑声学产品和工业设备减振降噪方面具有潜在应用价值。Isaac 等<sup>[79]</sup>发现由 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和各种边界条件制成的功能分级轻质方形面板在低频和中频区域的传声损失高于纯铝材料,适用于环绕高噪声设备、家用电器或工业机器的降噪外壳,并能限制噪声向环境的传播。Nakayama 等<sup>[80]</sup>开发了一种具有相互连接二维弹簧质量的局部共振器阵列的新型实用声学超材料(AMM)片材(图 24),具有显著的隔音性能,并可通过更改设计参数实现针对不同目标频率进行定制,用于降低旋转电机和风扇在特定频率下产生的辐射噪声及共振部件偶然发出的辐射噪声。Muhammad 等<sup>[81]</sup>通过在轴承内嵌入 5 层不同的多共振复合结构(图 25)缓解轴承在 3~52 kHz 范围内产生的振动和噪声,该研究为轴承行业设计和应用声

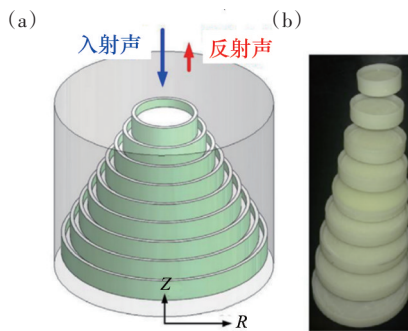


图 23 复合多孔材料结构示意图

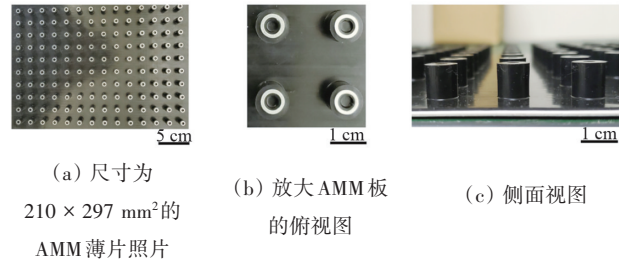
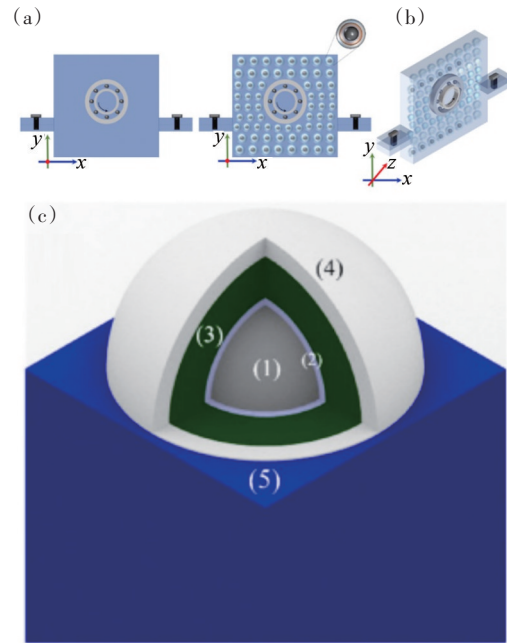


图 24 局部共振器阵列的片材结构示意图



(a) 传统的轴承;(b) 耗散弹性超材料增强轴承壳,将多共振弹性超材料应用于壳体内部的 5 层;(c) 多层应用于轴承座内部的多共振弹性超材料的单元胞:(1) 钢球,(2) 聚氨酯橡胶薄层,(3) 铅,(4) 为嵌入(5) 铸铁基体中的硅橡胶层

图 25 轴承原理

学弹性超材料提供了一个新概念,提高了机器使用寿命。

声传播途径治理也是工业噪声综合治理的常见方法,其中的声屏障是基础的噪声治理方法之一,在日常生活中随处可见。

吕玉恒<sup>[1]</sup>设计了用于治理居民住宅附近大型冷却塔噪声的声屏障,但其成本较高,降噪效果有限,受天气、安全等因素的影响,需慎重考虑设计、安装、维护等方面。

Negahdari 等<sup>[82]</sup>以花为灵感设计内部准分形声晶体声屏障(IQFSCAB)(图 26),通过非对称管道实现宽带降噪,同时在内外管道间添加聚氨酯弹性体泡沫或岩棉来衰减低频噪声(图 27),内置岩棉的吸声效果约为 6 dB。IQFSCAB 1 和 2 可发挥宽带滤波器的作用,具有灵活性,用于降低交通和工业噪声。

此外,前文所述的软质聚氨酯泡沫(FPUF)、MFGO 和 MFGCNT、压缩多孔金属、利用纺织废料制备的复合型声学材料、使用废皮革制备的多层复合吸音材料、SBW 纤维、HQA 波导、偏心铝板膜型超材料、使用工业废料制作的多孔混凝土面板均可用于工业噪声治理。

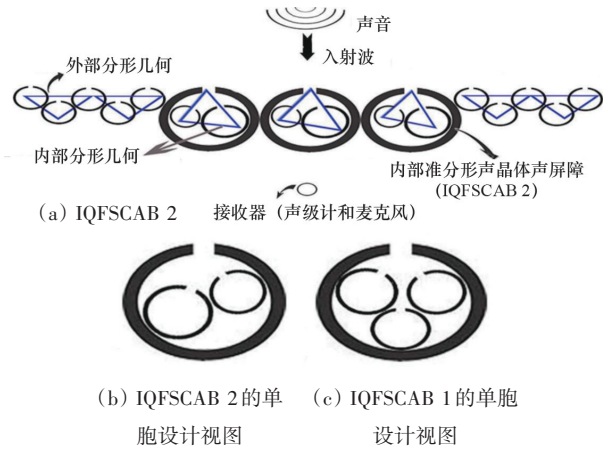


图 26 内部分形的 IQFSCAB 1 和 2 声屏障设计细节

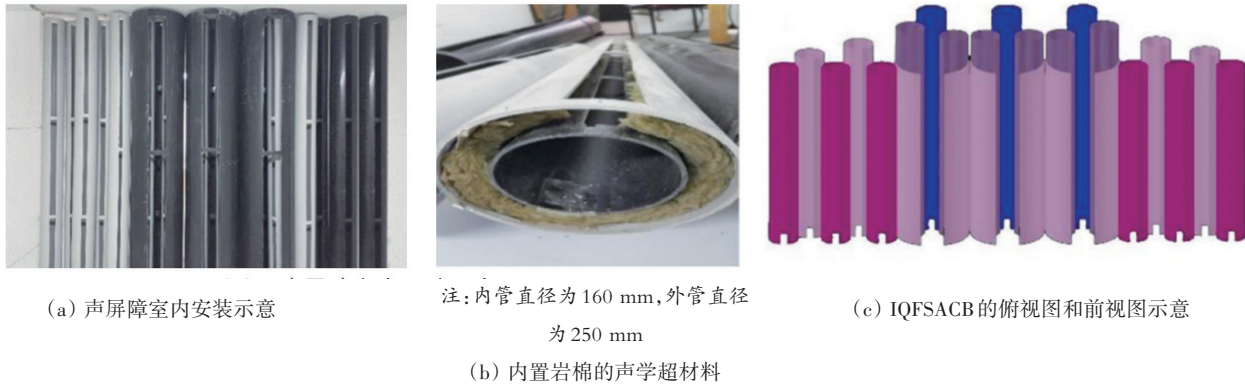


图 27 声屏障安装示意

## 4 结论

根据声学材料的分类,从建模及计算方法、设计制备和应用等方面对声学材料的研究进展及其在工业噪声污染治理中的应用进行了综述,得出如下结论。

1) 在声学材料的计算模型中,参数化模型是一种白箱模型,在材料物理机理的基础上,建立材料的物理参数与其声学特性之间的定量关系,每一种类型的材料都有相对应的参数化模型。其中,Biot 模型是用来预测多孔材料声学特性的理论模型,预测结果与材料种类和参数测量精度相关;数值模型适用范围广,精度受限于模型、边界条件和计算资源;混合模型集成理论和实验模型的优点,

高效准确。数据驱动模型是一种黑箱模型,在机器学习和深度学习模型的基础上,利用大量的数据建立输入和输出之间的对应关系,为材料声学特性的研究提供了一种新的研究范式。优化算法在声学超材料的设计方面潜力巨大,通过优化结果设计声学超材料,可以最大程度地满足噪声治理的技术要求。

2) 新型声学材料在结构和基材上创新,结合 Helmholtz 共鸣器和膜型超材料开发的新结构,在低频降噪方面前景广阔;采用天然纤维、可回收材料和工业废料等,通过物理反应、添加试剂或浸泡溶液等方法研制的新型声学材料,可以改进中低频噪声抑制方面的不足,又具有环保节能的特性,可广泛应用于声屏障、隔音板。

3) 抑制机器噪声的传统方法是使用隔音仓和安装消声器,但新型声学材料的出现提供了更多降噪方法,用其制备降噪外壳或作为轴承座材料可以大幅度降低噪声。基于结构和基材创新的新型声学材料可以用来制备声屏障、隔音板或围墙来有效降低常见的工业噪声。

### 参考文献(References)

- [1] 吕玉恒. 环境保护声屏障降噪效果分析与应用[C]//上海市老科学技术工作者协会学术年会. 上海: 上海市老科学技术工作者协会, 2012.
- [2] 董晓冬. 城市环境噪声污染危害的研究进展[J]. 环境与发展, 2020, 32(5): 59-60.
- [3] 毛兴中. 工程机械噪声控制技术[J]. 筑路机械与施工机械化, 2008, 25(4): 16-19.
- [4] 蒋真平, 周守艳. 工程机械噪声与控制分析[J]. 建筑机械(上半月), 2007(4): 79-82.
- [5] 刘静, 李梅莉, 孙金艳, 等. 天津市某工业区企业噪声危害现状与控制对策[J]. 中国工业医学杂志, 2014, 27(2): 87-89, 96.
- [6] 于博雅, 马蕙. 石化企业工业噪声对绿色城市环境影响的实测分析[J]. 建筑节能, 2018, 46(1): 137-140.
- [7] 阎瑞雪, 夏杰, 张荣, 等. 某轴承生产企业噪声作业工人对噪声危害和防护知识认知情况[J]. 中国职业医学, 2019, 46(4): 497-500.
- [8] Biot M A, Willis D G. The elastic coefficients of the theory of consolidation[J]. Journal of Applied Mechanics, 1957, 24(4): 594-601.
- [9] Delany M E, Bazley E N. Acoustical properties of fibrous absorbent materials[J]. Applied Acoustics, 1970, 3(2): 105-116.
- [10] Miki Y. Acoustical properties of porous materials. Modifications of Delany-Bazley models[J]. Journal of the Acoustical Society of Japan, 1990, 11(1): 19-24.
- [11] Berardi U. Determination through an inverse method of the acoustic impedance and the propagation constant for some natural fibers[C]//INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. Dubrovnik: Institute of Noise Control Engineering, 2015.
- [12] Johnson D L, Koplik J, Dashen R. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1987, 176: 379.
- [13] Garai M, Pompoli F. A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications[J]. Applied Acoustics, 2005, 66(12): 1383-1398.
- [14] Santoni A, Bonfiglio P, Fausti P, et al. Improving the sound absorption performance of sustainable thermal insulation materials: Natural hemp fibres[J]. Applied Acoustics, 2019, 150: 279-289.
- [15] Caniato M, Kyaw Oo D' Amore G, Kaspar J, et al. Sound absorption performance of sustainable foam materials: Application of analytical and numerical tools for the optimization of forecasting models[J]. Applied Acoustics, 2020, 161: 107166.
- [16] Ehsan S S, Berardi U, Taban E, et al. Natural fibrogranular composite as a novel sustainable sound-absorbing material[J]. Applied Acoustics, 2021, 181: 108157.
- [17] An X Y, Fan H L, Zhang C Z. Elastic wave and vibration bandgaps in planar square metamaterial-based lattice structures[J]. Journal of Sound and Vibration, 2020, 475: 115292.
- [18] 冯涛, 王晶, 刘斌, 等. 用传递矩阵法计算多层泡沫材料的法向吸声系数[J]. 机械设计与制造, 2012(2): 35-37.
- [19] 杨梦露, 冯涛, 贾玉麒, 等. 空气背衬条件下泡沫材料法向吸声系数混合计算方法研究[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(2): 42-44, 76.
- [20] 汪婕, 冯涛, 杨梦露, 等. 应用传递矩阵测量中间薄层材料声特性[J]. 声学技术, 2019, 38(3): 334-339.
- [21] McCulloch W S, Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity[J]. The Bulletin of Mathematical Biophysics, 1943, 5(4): 115-133.
- [22] 张润, 王永滨. 机器学习及其算法和发展研究[J]. 中国传媒大学学报(自然科学版), 2016, 23(2): 10-18, 24.
- [23] Gordon A D, Breiman L, Friedman J H, et al. Classification and regression trees[J]. Biometrics, 1984, 40(3): 874.
- [24] Rumelhart D E, Hinton G E, Williams R J. Learning internal representations by error propagation[M]//Readings in Cognitive Science. Amsterdam: Elsevier, 1988: 399-421.
- [25] Moody J, Darken C J. Fast learning in networks of locally-tuned processing units[J]. Neural Computation, 1989, 1(2): 281-294.
- [26] Iannace G, Ciaburro G, Trematerra A. Modelling sound absorption properties of broom fibers using artificial neural networks[J]. Applied Acoustics, 2020, 163: 107239.
- [27] Ciaburro G, Iannace G, Passaro J, et al. Artificial neural network-based models for predicting the sound absorption coefficient of electrospun poly(vinyl pyrrolidone)/sil-

- ica composite[J]. *Applied Acoustics*, 2020, 169: 107472.
- [28] Kumar S, Jin H, Lim K M, et al. Comparative analysis of machine learning algorithms on prediction of the sound absorption coefficient for reconfigurable acoustic meta-absorbers[J]. *Applied Acoustics*, 2023, 212: 109603.
- [29] Ciaburro G, Iannace G. Membrane-type acoustic metamaterial using cork sheets and attached masses based on reused materials[J]. *Applied Acoustics*, 2022, 189: 108605.
- [30] Liang L S, Guo W L, Zhang Y, et al. Radial basis function neural network for prediction of medium-frequency sound absorption coefficient of composite structure open-cell aluminum foam[J]. *Applied Acoustics*, 2020, 170: 107505.
- [31] Luo Z H, Li T, Yan Y W, et al. Prediction of sound insulation performance of aramid honeycomb sandwich panel based on artificial neural network[J]. *Applied Acoustics*, 2022, 190: 108656.
- [32] Roca D, Yago D, Cante J, et al. Computational design of locally resonant acoustic metamaterials[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2019, 345: 161–182.
- [33] Rao R V, Savsani V J, Vakharia D P. Teaching–Learning–based optimization: An optimization method for continuous non-linear large scale problems[J]. *Information Sciences*, 2012, 183(1): 1–15.
- [34] Takezawa A, Yamamoto T, Zhang X P, et al. An objective function for the topology optimization of sound-absorbing materials[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2019, 443: 804–819.
- [35] Park J H, Yang S H, Lee H R, et al. Optimization of low frequency sound absorption by cell size control and multiscale poroacoustics modeling[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 397: 17–30.
- [36] Chambers A T, Manimala J M, Jones M G. Design and optimization of 3D folded-core acoustic liners for enhanced low-frequency performance[J]. *AIAA Journal*, 2020, 58(1): 206–218.
- [37] Gao N S, Luo D D, Cheng B Z, et al. Teaching–learning–based optimization of a composite metastructure in the 0~10 kHz broadband sound absorption range[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2020, 148(2): EL125.
- [38] Gao N S, Zhang Z C, Tang L L, et al. Optimal design of broadband quasi-perfect sound absorption of composite hybrid porous metamaterial using TLBO algorithm[J]. *Applied Acoustics*, 2021, 183: 108296.
- [39] Zuo HW, Li J Z, Shen C, et al. Sound insulation performance of acoustic metamaterials based on attachable helmholtz resonators[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2022, 39(S1): 23–31.
- [40] 冯涛, 王余华, 王晶, 等. 结构型声学超材料研究及应用进展[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(20): 150–157.
- [41] Abbad A, Atalla N, Ouisse M, et al. Numerical and experimental investigations on the acoustic performances of membraned Helmholtz resonators embedded in a porous matrix[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2019, 459: 114873.
- [42] Jena D P, Dandsena J, Jayakumari V G. Demonstration of effective acoustic properties of different configurations of Helmholtz resonators[J]. *Applied Acoustics*, 2019, 155: 371–382.
- [43] Ma G C, Sheng P. Acoustic metamaterials: From local resonances to broad horizons[J]. *Science Advances*, 2016, 2(2): e1501595.
- [44] Haberman M R, Guild M D. Acoustic metamaterials[J]. *Physics Today*, 2016, 69(6): 42–48.
- [45] Mahesh K, Mini R S. Theoretical investigation on the acoustic performance of Helmholtz resonator integrated microperforated panel absorber[J]. *Applied Acoustics*, 2021, 178: 108012.
- [46] 马大猷. 微穿孔板吸声结构的理论和设计[J]. *中国科学*, 1975(1): 38–50.
- [47] Xie S C, Wang D, Feng Z J, et al. Sound absorption performance of microperforated honeycomb metasurface panels with a combination of multiple orifice diameters [J]. *Applied Acoustics*, 2020, 158: 107046.
- [48] Xie S C, Yang S C, Yang C X, et al. Sound absorption performance of a filled honeycomb composite structure [J]. *Applied Acoustics*, 2020, 162: 107202.
- [49] 贾玉麒, 冯涛, 杨梦露, 等. 硅胶薄膜声学超材料单胞结构的隔声测量研究[J]. *功能材料*, 2018, 49(1): 1108–1111, 1116.
- [50] Lu Z B, Yu X, Lau S K, et al. Membrane-type acoustic metamaterial with eccentric masses for broadband sound isolation[J]. *Applied Acoustics*, 2020, 157: 107003.
- [51] Zhou G J, Wu J H, Lu K, et al. Broadband low-frequency membrane-type acoustic metamaterials with multi-state anti-resonances[J]. *Applied Acoustics*, 2020, 159:

- 107078.
- [52] Li H Z, Liu X C, Liu Q, et al. Sound insulation performance of double membrane-type acoustic metamaterials combined with a Helmholtz resonator[J]. *Applied Acoustics*, 2023, 205: 109297.
- [53] Fiala L, Konrád P, Fořt J, et al. Application of ceramic waste in brick blocks with enhanced acoustic properties [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 261: 121185.
- [54] Júnior O J S, Pinheiro M A S, Silva J J R, et al. Sound insulation of gypsum block partitions: An analysis of single and double walls[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 39: 102253.
- [55] Arjunan A. Targeted sound attenuation capacity of 3D printed noise cancelling waveguides[J]. *Applied Acoustics*, 2019, 151: 30–44.
- [56] Islam S, Bhat G. Environmentally-friendly thermal and acoustic insulation materials from recycled textiles[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 251: 109536.
- [57] Asdrubali F, D' Alessandro F, Schiavoni S. A review of unconventional sustainable building insulation materials [J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2015, 4: 1–17.
- [58] Chen S M, Jiang Y, Chen J, et al. The effects of various additive components on the sound absorption performances of polyurethane foams[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 2015: 317561.
- [59] Zhang X H, Qu Z G, He X C, et al. Experimental study on the sound absorption characteristics of continuously graded phononic crystals[J]. *AIP Advances*, 2016, 6(10): 105205.
- [60] 刘杨, 霍又嘉, 杜元开, 等. 吸声材料制备、性能研究进展[J]. *功能材料*, 2022, 53(2): 2073–2079.
- [61] Baghban S A, Khorasani M, Sadeghi G M M. Acoustic damping flexible polyurethane foams: Effect of isocyanate index and water content on the soundproofing[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, 136(15): e47363.
- [62] Liu L, Chen Y J, Liu H Z, et al. A graphene oxide and functionalized carbon nanotube based semi-open cellular network for sound absorption[J]. *Soft Matter*, 2019, 15(10): 2269–2276.
- [63] Shtrepi L, Astolfi A, Badino E, et al. More than just concrete: Acoustically efficient porous concrete with different aggregate shape and gradation[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(11): 4835.
- [64] 王和平, 王飞, 吕玉恒. 降噪芯片-抗氧化发泡铝及其应用[C]//2014年全国环境声学学术会议论文集. 厦门:《声学技术》编辑部, 2014: 401–404.
- [65] Yang X C, Shen X M, Bai P F, et al. Preparation and characterization of gradient compressed porous metal for high-efficiency and thin-thickness acoustic absorber[J]. *Materials*, 2019, 12(9): 1413.
- [66] Soltani P, Taban E, Faridan M, et al. Experimental and computational investigation of sound absorption performance of sustainable porous material: Yucca Gloriosa fiber[J]. *Applied Acoustics*, 2020, 157: 106999.
- [67] Mehrzad S, Taban E, Soltani P, et al. Sugarcane bagasse waste fibers as novel thermal insulation and sound-absorbing materials for application in sustainable buildings [J]. *Building and Environment*, 2022, 211: 108753.
- [68] Fontoba-Ferrándiz J, Juliá-Sanchis E, Crespo Amorós J E, et al. Panels of eco-friendly materials for architectural acoustics[J]. *Journal of Composite Materials*, 2020, 54(25): 3743–3753.
- [69] Arenas C, Ríos J D, Cifuentes H, et al. Sound absorbing porous concretes composed of different solid wastes[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2022, 26(9): 3805–3817.
- [70] Dissanayake D G K, Weerasinghe D U, Thebuwanage L M, et al. An environmentally friendly sound insulation material from post-industrial textile waste and natural rubber[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 33: 101606.
- [71] Selvaraj S, Ramalingam S, Parida S, et al. Chromium containing leather trimmings valorization: Sustainable sound absorber from collagen hydrolysate intercalated electrospun nanofibers[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 405: 124231.
- [72] 谈卓章, 余婷婷, 周元陵, 等. 噪声作业工人对噪声危害和防护知识认知情况分析[J]. *中国职业医学*, 2020, 47(5): 614–617.
- [73] 韩运强. 铁路噪声治理原则及措施研究[J]. *铁道工程学报*, 2017, 34(10): 30–33, 72.
- [74] 王永华, 武海权, 刘哲明, 等. 一种快速测试多孔介质声学特征参数的方法[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 41(1): 85–89, 94.
- [75] 槐建坤. 工程机械噪声声源分析及降噪处理研究[J]. *内燃机与配件*, 2019(22): 134–135.
- [76] 吕玉恒, 郑和平. 大型球磨机噪声治理设计与效果[J]. *振动与冲击*, 1999, 18(1): 44.
- [77] 吕玉恒, 郁慧琴, 刘丽华, 等. 微穿孔板消声器应用于

- 大型冷却塔噪声治理[C]//第十届全国噪声与振动控制工程学术会议论文集. 北京: 中国声学学会, 2005: 5.
- [78] Gao N S, Tang L L, Deng J, et al. Design, fabrication and sound absorption test of composite porous metamaterial with embedding I-plates into porous polyurethane sponge[J]. *Applied Acoustics*, 2021, 175: 107845.
- [79] Isaac C W, Wrona S, Pawelczyk M, et al. Numerical investigation of the vibro-acoustic response of functionally graded lightweight square panel at low and mid-frequency regions[J]. *Composite Structures*, 2021, 259: 113460.
- [80] Nakayama M, Matsuoka T, Saito Y, et al. A practically designed acoustic metamaterial sheet with two-dimensional connection of local resonators for sound insulation applications[J]. *Journal of Applied Physics*, 2021, 129(10): 105106-1-10.
- [81] Muhammad, Lim C W, Vyas N S. A novel application of multi-resonant dissipative elastic metahousing for bearings[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2021, 34(4): 449-465.
- [82] Negahdari H, Javadpour S, Moattar F. Designing, constructing and testing of a new generation of sound barriers[J]. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 2019, 17(2): 507-527.

## Research progress of acoustic materials and the application in industrial noise pollution control

FENG Tao<sup>1</sup>, YOU Xuanhui<sup>1</sup>, WANG Jie<sup>2</sup>, WANG Jing<sup>1</sup>

1. School of Computer and Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China
2. Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Ecology and Environment of People's Republic of China, Beijing 100082, China

**Abstract** The improvement of the quality of the acoustic environment around factories requires effective management of industrial noise. Acoustic materials play an important role in noise management and are the basis for implementing various noise reduction measures. According to the classification of acoustic materials, the latest research progress of acoustic materials is reviewed from the aspects of calculation model to design and preparation, and the application of various acoustic materials in industrial noise management is analysed and summarized. The results of the study show that: there are various modelling and calculation models for acoustic performance, and suitable models need to be selected according to the problems to be solved in order to ensure the accuracy of the calculation; the new acoustic materials are mainly innovated in structure and substrate, which provide more noise reduction methods, and the results of the study can be used as a reference for the management of industrial noise and the research and development of new acoustic materials.

**Keywords** industrial noise; acoustic materials; design and preparation; calculation model ●



(责任编辑 王微)