文章编号:1674-2869(2024)02-0209-08

# 兼顾降噪和通风性能的声学超材料研究进展

许 哲,吴巧云*
武汉工程大学土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430074

**摘 要**:传统用于隔声降噪的结构,通常阻碍了气流的传输,无法满足许多实际应用场景的需求。声学超材料作为当下声学研究的热点,为设计新颖的通风降噪结构提供了有效的解决方案。简要讨论了传统通风降噪结构在应用中的局限性,追溯了声学超材料的出现与发展,重点介绍了Helmholtz共振结构、空间盘绕结构、声学超笼和声传输可调结构这几种类型的声学超材料在通风和降噪方面应用的最新进展,总结了这些超材料的结构特点、降噪原理和通风特性,以及它们在低频宽带噪声衰减、通风效果和结构轻薄化等方面的明显优势。最后,对这一新兴领域在优化设计、现场实验和通风性能研究三个方面的发展进行了展望。

**关键词**:声学超材料;降噪;通风特性;低频宽带
**中图分类号**:TU112 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202305005

# Research advances in acoustic metamaterials balancing noise reduction and ventilation performance

*XU Zhe*, *WU Qiaoyun**
School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China

**Abstract**: Some traditional structures of sound insulation or noise reduction hinder the transmission of airflow, failing to meet the needs of certain application scenarios. Acoustic metamaterials, the focus of current acoustic research, provide an effective solution for the design of novel ventilation and noise-reduction structures. This paper briefly discusses the limitations of traditional ventilation and noise-reduction structures in application, traces the emergence and development of acoustic metamaterials, and focuses on the latest progress in the application of several types of acoustic metamaterials in ventilation and noise reduction, such as Helmholtz resonance structure, space coiling structure, acoustic metacage and acoustic transmission adjustable structure. The structural characteristics, noise-reduction principles and ventilation characteristics of these metamaterials are summarized, and their obvious advantages in low-frequency broadband noise attenuation, ventilation effect and lightweight structure are presented. Finally, the development of this new field in three aspects, i.e. optimization design, field experiment and ventilation performance research, is proposed.

**Keywords**: acoustic metamaterial; noise reduction; ventilation performance; low frequency broadband

噪声控制作为声学领域的重要课题,应用于建筑设计、交通发展、重型机械舱室和航空/汽车工程等各个领域。传统的降噪技术总是需要在隔声和通风性能之间进行权衡[1]。然而,许多实际工程场景往往需要空气的流通[2-3]。传统隔声措施总是限制气流的自由进出,若采用机械辅助通风又将消耗额外的能源,不符合可持续发展理念,所以能够实现自然通风尤为重要。

**收稿日期**:2023-05-06
**基金项目**:国家自然科学基金(52078395)
**作者简介**:许 哲,硕士研究生。 Email:1453338126@qq.com
***通信作者**:吴巧云,博士,教授。 Email:wuqiaoyun@wit.edu.cn
**引文格式**:许哲,吴巧云. 兼顾降噪和通风性能的声学超材料研究进展[J]. 武汉工程大学学报,2024,46(2):209-216.

声学超材料的出现引起研究人员广泛的兴趣，提供了多领域的应用前景，如低频声波衰减、声能收集、声隐身、生物医学声学和拓扑声学等。超材料的概念最初起源于电磁学，最早可以追溯到20世纪60年代，由Veselago[4]所提出的关于超材料的第一个主要假设，讨论了采用具有“双负”参数（即介电常数$\varepsilon$和磁导率$\mu$）的材料操纵电磁波的可能性。而声学超材料的研究始于2000年，Liu等[5]首次提出了局域共振声子晶体的概念，这项工作被视为声学超材料领域的里程碑之作，原因在于该研究首次实现了负等效质量密度这一新奇的物理概念。此后，国内外学者对声学超材料展开了大量的研究，提出了各种类型的声学超材料，为声波操纵提供了前所未有的潜能。与电磁超材料类似，声学超材料也可以表现出“双负”的参数特性，即负等效质量密度和负体积模量。已有研究表明，单极共振可以实现负的等效体积模量，而偶极共振可以导致在各自的共振频率附近产生负的等效质量密度[6]。这些异常行为是通过超材料的局部共振亚波长单元来实现的，这种结构被称为局部共振超材料。尽管共振声学超材料已经能够实现先进的声音控制，但共振行为发生在窄带频率范围内，大大限制了其应用。

近年来，一些研究设计已经在拓宽带宽方面取得了进展。声学超材料的概念不仅限于局部共振超材料或周期结构，其他几种类型的声学超材料也被逐步提出，如空间盘绕型超材料[7-8]、拓扑声学[9]、分形声学超材料[10-14]、螺旋结构超材料[15-16]和声学超表面[17-18]。声学超材料超越天然材料的声学特性一般来源于它们的几何形状和结构，通过调整结构的几何参数及形状，可实现在特定预设和可调频率范围内的噪声衰减[19]，为设计出兼具高效降噪和通风的结构提供了新的研究途径。

## 1 传统的通风降噪结构

### 1.1 传统通风隔声窗

在基于声学超材料的通风降噪结构出现之前，人们已在同时满足空气流通和降低噪声的方面进行探索。例如传统建筑里的通风隔声窗，可大致分为两类：第一类是在普通窗上安装通风器，一般是辅助通风，通风效果不佳，对于复杂的噪声环境其隔声效果也并不理想；第二类是采用传统通风隔声技术的结构设计，例如双层窗和百叶窗。在20世纪70年代，Ford和Kerry首次提出使用带有交错进出口的部分开放双层窗来提高隔音效果[20-21]。通过实验和现场测试，证明了该窗户可以提供一定的声学和通风性能。Kang等[22-23]研究了将透明微孔吸声器集成到双层玻璃之间的空气通道中的可行性。Tong等[24-25]对双层通风窗进行了缩尺实验和现场测试。实验结果表明，与开放的单层窗相比，双层通风窗的隔声效果显著提高，甚至可以与封闭的单层窗相媲美。Martello等[26]研究了叶片下方放置吸声材料薄层的金属轻质百叶窗，在窗户表面进行了声压级测试和建筑立面隔声测试，并与普通百叶窗的降噪性能进行了对比。金伟等[27]提出将往复振荡消声技术应用于通风口百叶窗，采用具有优异隔声性能的材料，设计了对入射声波形成声陷阱式的消声结构。百叶采用椭圆形式以减小空气阻力，能同时满足通风散热和宽频范围内入射声波的高效消能吸收。

### 1.2 传统通风声屏障

声屏障作为降低高速铁路运营噪声的有效措施，广泛应用于我国高速铁路沿线。随着高速列车运行速度的不断提升，列车风致气动荷载导致普通声屏障的使用寿命减短，危害列车的平稳运行。铁路采用的通风声屏障属于减载式声屏障的一种，通过在声屏障上设置空气通道以减弱气动荷载的影响。韩咖琪[28]对比研究了几种具有不同透气通道类型的声屏障，减载率由大到小依次为S型、棒式、百叶窗式、V型。周立群等[29]对一种吸隔声结合的V型减载式声屏障的降噪特性进行了试验研究。实验结果表明，V型减载式声屏障与普通声屏障的插入损失差异随列车行驶速度的增加逐渐减小，并在350 km/h时两者相当，之后V型减载式声屏障降噪效果将更佳。

虽然传统结构能够在一定程度上兼顾通风和降噪性能，但仍然存在很多弊端。由于总是受限于结构的尺寸厚度，无法实现对低频噪声的有效控制。传统结构的声学性能和通风效率之间仍然存在很强的相互制约，从而限制了它们在多种环境中的应用潜力。通风降噪结构的发展困境在于对其潜在工作机制的突破。

## 2 基于声学超材料的通风降噪结构

### 2.1 Helmholtz共振结构

Helmholtz共振器是一种最基本的声共振系统，常用来吸收声波能量。在过去的二十多年，Helmholtz共振器的概念已经被广泛应用在声学超材料的开发中。Kim等[30]基于声学超材料理论

和衍射理论提出了一种空气可流通的隔声窗，该结构由具有亚波长直径气孔的强衍射型共振器三维阵列组成，如图1(a)所示。共振腔和气孔产生了特定频率下的负等效体积模量，同时孔洞又保证了空气流通。该隔音窗声学性能测试结果如图1(b)所示，20 mm孔径的隔声窗在400~5 000 Hz的频率范围内降噪为30~35 dB，而50 mm孔径的隔声窗在700~2 200 Hz的频率范围内降噪为20~35 dB，通风面积率分别为1.4%和8.7%。然而这种实现了超宽频高效降噪的隔声窗通风面积率仍然较小，不具备很好的通风性能。Jung等[31]基于Helmholtz共振效应展示了一种在2 000~4 000 Hz的可听频率范围内宽带隔声且允许流体通过的声学超材料多孔板。Wang等[32]通过实验研究了多孔约束声学超材料的声学性能。如图2(a)所示，该超材料由多孔板和刚性支撑框架组成。研究结果表明，这种板式超材料在低频噪声范围内展现出较高的声传递损失性能，在430 Hz时达到最大传递损失峰值，约为20 dB，如图2(b)所示。这种高降噪性能归因于孔板和平板区域的两个波场之间的充分干扰实现辐射抵消效应。

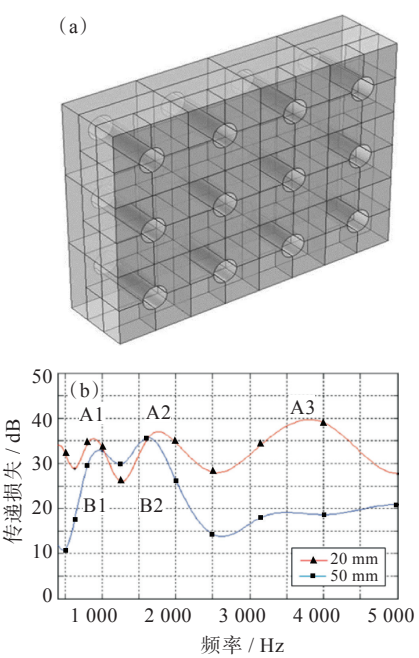



**图1　多孔通风隔声窗[30]：(a)结构示意图，(b)传递损失曲线**

Fig. 1　Perforated ventilated soundproof window[30]: (a) schematic diagram of the structure, (b) transmission loss curve

除了上述研究所设计的多穿孔板式Helmholtz共振声学超材料，另有学者基于Helmholtz共振器提出不同结构形式的超材料，如

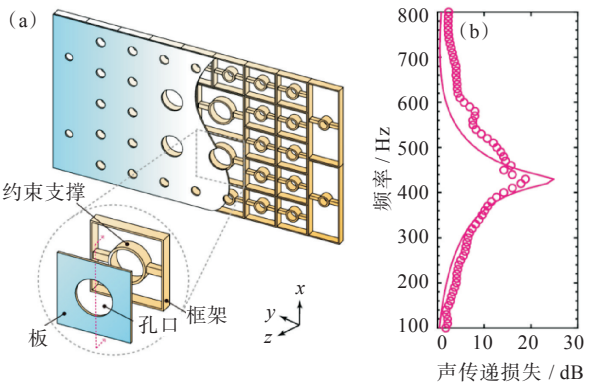



**图2　多孔约束声学超材料[32]：(a)示意图，(b)声传递损失曲线**

Fig. 2　Perforated and constrained acoustic metamaterial[32]: (a) schematic diagram, (b) sound transmission loss curve

超结构吸声器，以期应用于更普遍或功能要求更高的实际场景。Lee等[33]提出了具有超高稀疏性的吸声型超材料，如图3(a)所示，这种稀疏吸声器由双面Helmholtz共振器的周期性阵列组成，在隔绝声音的同时允许气流流动和光的传播。通过实验发现，在2 200 Hz的共振频率下，稀疏吸声器阵列的吸收率超过了90%，体积填充比约为26%(高通风性)，相应的声学频谱如图3(b)所示。此外，超稀疏吸声器在气流方向控制方面还表现出了优异的可调性。最近，He等[34]从理论上提出并实验验证了一种超稀疏且轻薄的声学通风超屏障，可以高效屏蔽全向声音。该声屏障是由两个中心对称腔组成的单元通过稀疏排列而成，稀疏度可达到80%，实测风速比超过了90%，展现出优越的通风性能。

通过对Helmholtz共振结构精心设计和不断调整，通风开放面积不断扩大，甚至可实现气流流向控制，丰富了结构的通风性能。此类结构向着小体型薄厚度发展，并在拓宽降噪带宽和精准的低频噪声控制方面展现了巨大潜能，可谓是以“小尺寸”控制了“大波长”。

## 2.2　空间盘绕结构

空间盘绕结构是在受限空间内设计了具有亚波长尺寸盘绕路径声通道的隔声通风结构，这种结构通常将盘绕通道与中空通道结合以实现通风，由于构造了离散态与连续态之间的耦合而产生相位差，耦合结构的透射谱呈现非对称的Fano线型。Zhang等[35]基于Fano共振原理设计了一个高效通风的超材料声屏障，如图4(a)所示，该声屏障是由共振单元(迷宫结构)和非共振单元(空心管道)排列组成。研究表明，所提出的声屏障能够

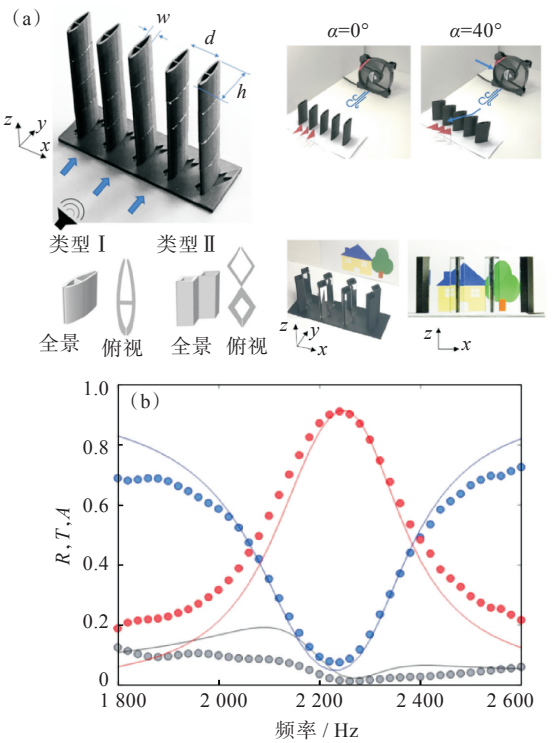



**图3 多功能稀疏吸声器[33]:(a)示意图,(b)声学频谱**

Fig. 3 Multifunctional sparse acoustic absorbers[33]: (a) schematic diagram, (b) acoustic spectra

允许63%的气流通过并高效屏蔽来自各个方向的低频声波,如图4(b)所示,在5 900 Hz处耦合结构出现透射峰,对入射声产生最大的能量削弱。林远鹏等[36]也提出了一种基于空间折叠结构和中空管道相互组合的双层通风隔声屏障,利用层间的类Fano共振耦合对特定频带内的声波能量实现高效隔离。Yang等[37]利用基于双面板结构的慢波概念提出了一种用于低频消声的声学超材料开口面板。双面板结构单元由两个间距适当的薄板组成,每个薄板的中心都有一个方孔,孔板之间插入具有亚波长尺寸开槽分区的刚性隔板,如图5(a)所示。超材料面板的中心孔允许不间断的流体流通,而刚性隔板结构的亚波长开槽可减慢其内声波速度来实现降噪。研究结果显示,“四分之一模型”单元面板的有效传递损失在1 400~2 500 Hz的宽带范围内,传递损失峰值约为25 dB,如图5(b)所示。而“半模型”单元面板在730~1 350 Hz的相对较低频率范围内实现宽带降噪,最大传递损失峰值约为18 dB,如图5(c)所示。Ghaffarivardavagh等[38]提出了一种基于类Fano共振的双层超材料设计方法,设计了超开放消声器,其结构是由外围的多螺旋通道和中心的完全开放通道组成,开放区域占总横截面积的60%,如图6(a)所示。之所以能够在目标频率范围衰减入射声波能量,是因为开放区域和螺旋结构之间的声学折射率不匹配。实验结果如图6(b)所示,所设计的超材料结构能够在低频区域(460 Hz附近)减少高达94%的透射声能量。为进一步探究空间盘绕结构与中空通道结合是否会有相互冲突的影响,即在一定的通风条件下是否会减弱了降噪的效果,Chen等[39]提出一种环形迷宫式通道与中空通道结合的通风隔声超材料,通过数值模拟研究了气流对所设计结构的传递损失的影响。模拟结果显示,在通风条件下,气流的存在会导致传递损失峰值相较于无气流时显著降低,同时在干扰下峰值稍移向较低频率。然而,工作频带的隔声效果基本保持不变,这表明此结构的设计在气流存在时仍可以实现宽频隔声。

上述设计在很大程度上都超越了传统的通风隔声结构,打破了亚波长尺寸上可调节大尺寸波的限制,更重要的是,在允许空气自由流动方面取得了巨大进步。然而,潜在的工作机制表明,这种类Fano共振的设计主要在每个破坏性干扰频率周围的狭窄工作范围内工作。这些设计非常适合那些具有显著峰值的噪声,例如齿轮机械噪声。普遍来说,噪声一般是覆盖了很宽的频段,所以对于此类工作机制设计一个超宽带通风结构仍然是一

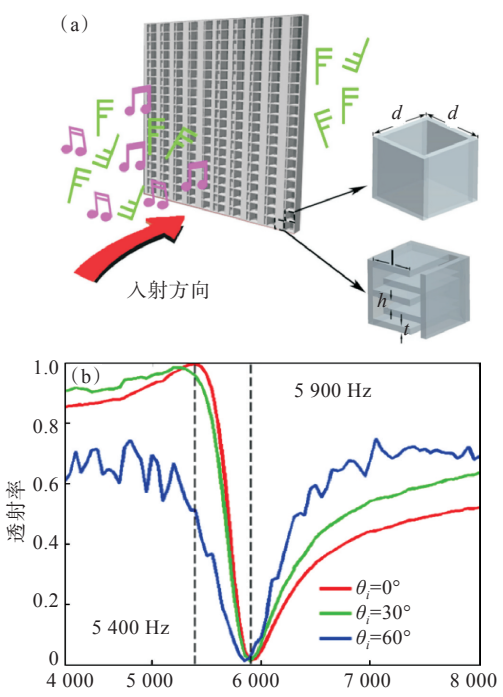



**图4 迷宫状空间盘绕声屏障[35]:(a)示意图,(b)透射谱**

Fig. 4 Labyrinthine-like space coiling acoustic barrier[35]: (a) schematic diagram, (b) transmission spectra

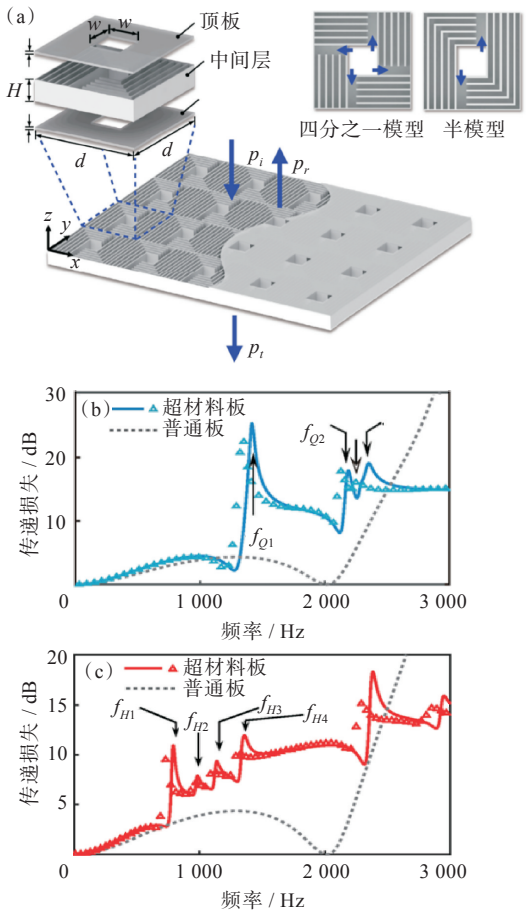



图5　超材料开口板[37]：(a)示意图，(b)“四分之一模型”单元的传递损失，(c)“半模型”单元的传递损失

Fig. 5　Metamaterial open panel[37]: (a) schematic diagram, (b) transmission loss of quarter-model unit cell, (c) transmission loss of half-model unit cell

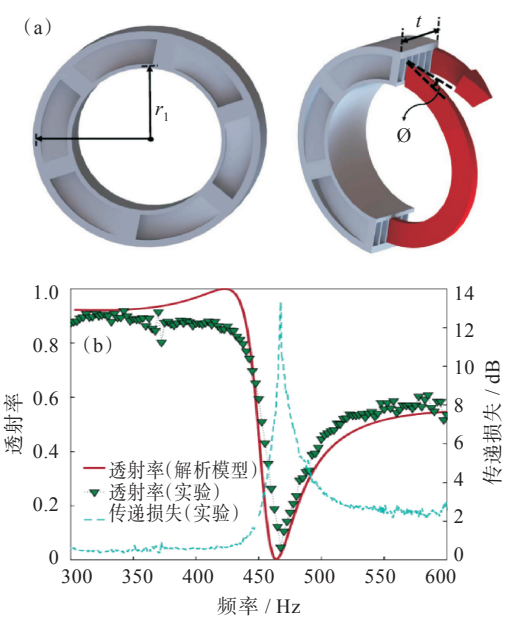



图6　超开放声学超材料消声器[38]：(a)示意图，(b)声传递损失曲线

Fig. 6　Ultra-open acoustic metamaterial silencer[38]: (a) schematic diagram, (b) sound transmission loss curve

个巨大的挑战。

### 2.3　声学超笼

基于声学超材料所提出的开放通风声屏障或隔声板结构大多局限于一维，仅能阻止噪声沿单一方向的传播，所以对于需要更高维度全方位屏蔽噪声的封闭区域，声学超笼便展现出很大的优势。声学超笼是指由声学超材料包围制成的笼状结构，通常安装在声源或接收器周围用以屏蔽噪声。

Shen等[40]基于锥形开放通道和分流Helmholtz共振腔组成的声梯度指数超表面设计了一种环形的二维声学超笼。为了确保超笼内外表面都有足够的相位梯度，单元设计为楔形，每个占圆形的5°段，以四个单元为一个超单元即超笼的一个周期，如图7(a)所示。通过对单元尺寸进行优化，确保了超单元覆盖完整的2π相位延迟，这种结构在所有入射角下都能实现几乎均匀的声屏蔽，并且无论声波是从内部还是外部传入超笼都会被阻隔。实验表明，在2.2~2.6 kHz的频率范围内，当风速为1 m/s时，所制备声学超笼能实现平均超过10 dB的声传递损失，如图7(b)所示。Melnikov等[41]提出了一种新型的三维声学超材料长方体胶囊，验证了其在降低舞台机械噪声方面的能力，单元之间的间隙允许气体流通以冷却机械部件。Liu等[42]基于迷宫型超材料的声学原理提出三维声学超笼，如图8(a)所示，这种立方体笼状结构的六个面均为开孔板，圆形开孔通道与隐藏在板内部的迷宫通道相连。声波在$z$方向上沿直线传播，在$xy$平面上沿之字形传播。与传统的二维迷宫型超材料相比，这种超笼的厚度可以显著降低到深亚波长尺寸。通过实验研究了超笼在通风条件下的隔声性能，并设置普通开孔笼(无迷宫通道)作为对比笼。结果表明，在1 030 Hz的工作频率下，超笼内的声强相较于对比笼能够降低到1/10以上，如图8(b)所示。

### 2.4　声传输可调结构

声学超表面为平面超薄结构的先进声学操纵提供了丰富的可能性。通过在通道或窗户表面引入声学超表面，可实现单向和全向隔声的特性。基于这些设计理念，还可以设计出传输特性在所有可能方向上可自由调节的声波导，在开发具有声传输可调性的通风隔声窗板方面具有很大的应用潜力。Ge等[43]基于超薄钩状单元超表面提出了一种单双向可调的开放隔声窗，通过将钩状超表面叶片旋转一定角度可实现从单向到双向隔声窗的转换，并且这种双向隔声效应是全方向的。

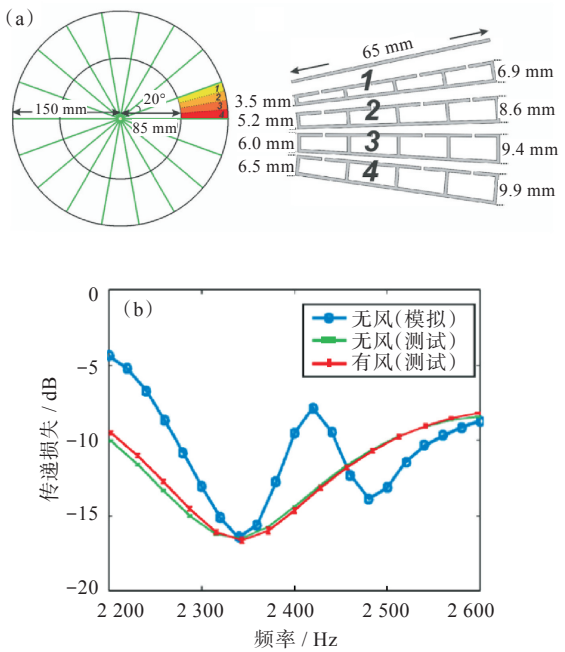



图7 环形的二维声学超笼[40]：
(a)示意图，(b)传递损失曲线

Fig. 7 Ring-shape 2D acoustic metacage[40]:
(a) schematic diagram, (b) transmission loss curve

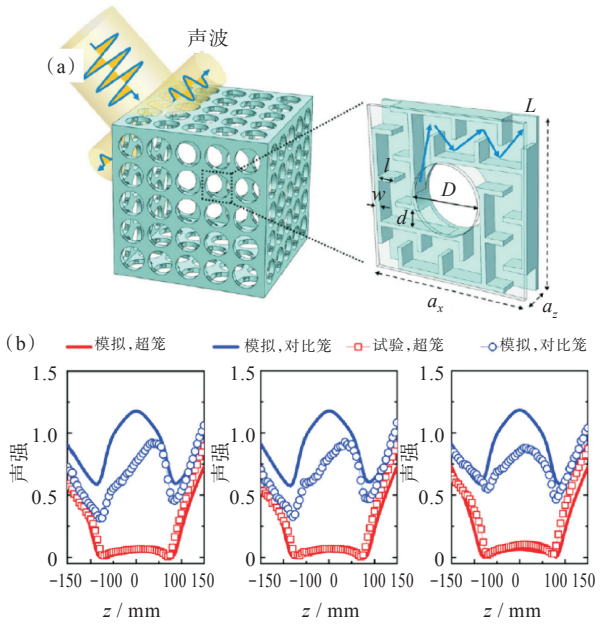



图8 迷宫型三维声学超笼[42]：
(a)示意图，(b)声强随测量位置变化曲线

Fig. 8 Labyrinthine 3D acoustic metacage[42]:
(a) schematic diagram, (b) sound intensity variation curve with measuring position

通过进一步研究，利用该声学超表面设计出了两种可实现“打开”或“关闭”的全向可调隔声窗[44]。最近，Xiao等[45]提出了一种多功能的声学超材料，其功能包括通风、宽带隔声和声传输可调。所设计的超材料由多个周期性排列的共振腔单元串联组成，每个单元中间都有1个由4条椭圆曲线包围而成的星形开孔，如图9(a)所示。当星形开孔倾角$\theta=0°$时，该结构能够在625~1 695 Hz的宽频范围内降低30 dB的噪声。星形开孔如同声学“开关”，通过旋转开孔改变倾角，便可切换声波传输。当开孔旋转45°时，在低传输隔声频带上出现1个1 210~1 225 Hz的高传输窗口，如图9(b)所示。这种新颖的声波传输可调节超材料将有望应用在创新的多功能建筑外墙、信号滤波和声学电路等方面。

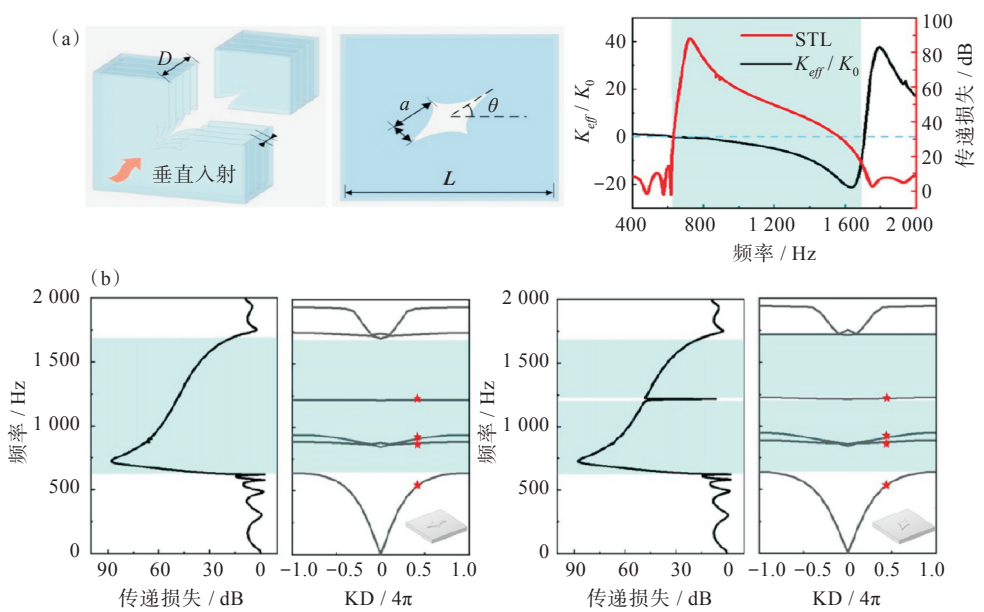



图9 多功能声学超材料[45]：(a)示意图及声学性能模拟结果，(b)$\theta=0°$和$\theta=45°$时声传递损失曲线及能带图对比

Fig. 9 Multifunctional acoustic metamaterial[45]: (a) schematic diagram and simulation results of acoustic performance, (b) comparison of sound transmission loss curve and band diagram when $\theta=0°$ and $\theta=45°$

## 3　结论与展望

声学超材料是当下声学研究前沿的热门领域。通过理论研究与实践应用的并行，超材料在许多应用中展现出的非凡能力均已得到证明，其源于几何形状和结构的优越声学性能为通风降噪结构的设计提供了丰富的可能性。从Helmholtz共振结构到空间盘绕结构，从一维的超材料通风屏障或窗板到三维的声学超笼，从单向传输单一功能声波控制到多功能全向传输可调控，能够实现高效通风和宽带降噪的超材料发展迅猛。回顾了通风降噪超材料的最新进展，未来的研究也许可以扩展到以下几个方面：

（1）此类声学超材料通常具有复杂的几何设计和大量可调的结构参数。对于为了达到所需目标而设计的结构，在确定最终模型之前，常常需要经过耗时费力的多次试验模拟。这一方面若能与基于人工智能的新兴技术（如拓扑优化和机器学习等）相结合，编写设计出相应的参数优化算法，必将为此领域的设计研究注入新的动力，提高设计效率，使得更为复杂的超材料模型设计成为可能。

（2）此类声学超材料通常是由具有亚波长尺寸的单元组成，实验中通过3D打印技术制备样品，并在声阻抗管中进行声学性能测试。然而，实际中的全尺寸结构多是由大量的单元组成，且应用场景更为复杂，这可能导致实际的声学性能效果与实验室的结果不同。所以该领域相关研究的全尺寸实验和现场实测势在必行。

（3）比较缺乏准确详细的通风性能研究，简单地采用一个风扇对实验模型进行通风性能测试可能会与实际情况有较大误差，设计和安装合适的风扇系统来提供所需要的气流存在一定的挑战性。对结构模型进行风洞试验是一个可行的方案，同时还可以观测所设计的结构在目标气流条件下是否具有足够的强度而不发生破坏。

**参考文献**


[1] YUYA N, SOHEI N, TSUYOSHI N, et al. Sound propagation in soundproofing casement windows[J]. Applied Acoustics, 2009, 70(9): 1160-1167.

[2] 王俪静, 吴晓莉. 声学超材料在绿色建筑通风隔声中的应用展望[J]. 林业机械与木工设备, 2022, 50(10): 13-21.

[3] 牛亚文, 赵才友, 易强, 等. 可实现宽频隔声的全向通风铁路声屏障[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(6): 1048-1055.

[4] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ε and μ[J]. Soviet Physics-Uspekhi, 1968, 10(4): 509-514.

[5] LIU Z, ZHANG X, MAO Y W, et al. Locally resonant sonic materials[J]. Science, 2000, 289: 1734-1736.

[6] FOKIN V, AMBATI M, SUN C, et al. Method for retrieving effective properties of locally resonant acoustic metamaterials[J]. Physical Review B, 2007, 76(14): 144302.

[7] LI Y, LIANG B, TAO X, et al. Acoustic focusing by coiling up space[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(23): 233508.

[8] CAI X B, GUO Q Q, HU G K, et al. Ultrathin low-frequency sound absorbing panels based on coplanar spiral tubes or coplanar Helmholtz resonators[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(12): 121901.

[9] YANG Z J, GAO F, SHI X H, et al. Topological acoustics[J]. Physical Review Letters, 2015, 114(11): 114301.

[10] SONG Y G, CHENG Q, HUANG B, et al. Broadband fractal acoustic metamaterials for low-frequency sound attenuation[J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(13): 131901.

[11] LIU J, LI L P, XIA B Z, et al. Fractal labyrinthine acoustic metamaterial in planar lattices[J]. International Journal of Solids and Structures, 2018, 132/133: 20-30.

[12] MAN X F, LUO Z, LIU J, et al. Hilbert fractal acoustic metamaterials with negative mass density and bulk modulus on subwavelength scale[J]. Materials & Design, 2019, 180: 107911.

[13] MAN X F, XIA B Z, LUO Z, et al. 3D Hilbert fractal acoustic metamaterials: low-frequency and multi-band sound insulation[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2019, 52(19): 195302.

[14] ZHAO X Z, LIU G Q, XIA D. Maze-like acoustic metamaterial for low-frequency broadband noise suppression[J]. Applied Physics Express, 2020, 13(2): 27002.

[15] ZHU X F, LI K, ZHANG P, et al. Implementation of dispersion-free slow acoustic wave propagation and phase engineering with helical-structured metamaterials[J]. Nature Communications, 2016, 7(1): 11731.

[16] ESFAHLANI H, LISSEK H, MOSIG J R. Generation of acoustic helical wavefronts using metasurfaces[J]. Physical Review B, 2017, 95(2): 024312.

[17] LI Y, JIANG X, LI R Q, et al. Experimental realization of full control of reflected waves with subwavelength acoustic metasurfaces[J]. Physical

Review Applied, 2014, 2(6):064002.
[18] ZHONG J, ZHAO H G, YANG H B, et al. Theoretical requirements and inverse design for broadband perfect absorption of low-frequency waterborne sound by ultrathin metasurface [J]. Scientific Reports, 2019, 9:1181.
[19] KUMAR S, LEE H P. The present and future role of acoustic metamaterials for architectural and urban noise mitigations[J]. Acoustics, 2019, 1(3):590-607.
[20] FORD R D, KERRY G. The sound insulation of partially open double glazing[J]. Applied Acoustics, 1973, 6(1):57-72.
[21] KERRY G, FORD R D. The field performance of partially open dual glazing [J]. Applied Acoustics, 1974, 7(3):213-227.
[22] KANG J,BROCKLESBY M W. Feasibility of applying micro-perforated absorbers in acoustic window systems[J]. Applied Acoustics, 2004, 66(6):669-689.
[23] KANG J, LI Z M. Numerical simulation of an acoustic window system using finite element method [J]. Acta Acustica United Acustica, 2007,93:152-163.
[24] TONG Y G, TANG S K. Plenum window insertion loss in the presence of a line source—a scale model study [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 133:1458-1467.
[25] TONG Y G, TANG S K, KANG J, et al. Full scale field study of sound transmission across plenum windows[J]. Applied Acoustics, 2015, 89:244-253.
[26] MARTELLO N Z, FAUSTI P, SANTONI A, et al. The use of sound absorbing shading systems for the attenuation of noise on building façades. An experimental investigation [J]. Buildings, 2015, 5(4):1346-1360.
[27] 金伟, 蔡俊. 室内变电站散热通风口的新型消声结构研究[J]. 噪声与振动控制, 2010, 30(4):158-160.
[28] 韩珈琪. 高速铁路声屏障结构特性研究及减载式声屏障技术初探[D]. 成都:西南交通大学, 2014.
[29] 周立群, 韩健, 何宾, 等. V型减载式声屏障降噪特性的试验研究[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(6):199-204.
[30] KIM S H, LEE S H. Air transparent soundproof window[J]. AIP Advances, 2014, 4(11):117123.
[31] JUNG J W,KIM J E,LEE J W. Acoustic metamaterial panel for both fluid passage and broadband soundproofing in the audible frequency range [J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(4):041903.
[32] WANG X L, LUO X D, YANG B, et al. Ultrathin and durable open metamaterials for simultaneous ventilation and sound reduction [J]. Applied Physics Letters, 2019, 115(17):171902.
[33] LEE T, NOMURA T, DEDE M E, et al. Ultrasparse acoustic absorbers enabling fluid flow and visible-light controls[J]. Physical Review Applied, 2019, 11(2):024022.
[34] HE J J, ZHOU Z L, ZHANG C X, et al. Ultrasparse and omnidirectional acoustic ventilated meta-barrier [J]. Applied Physics Letters,2022, 120(19):191701.
[35] ZHANG H L, ZHU Y F, LIANG B, et al. Omnidirectional ventilated acoustic barrier [J]. Applied Physics Letters, 2017, 111(20):203502.
[36] 林远鹏, 梁彬, 杨京, 等. 可实现宽频宽角度隔声的薄层通风结构[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2019, 55(5):791-795.
[37] YANG J, LEE J S, LEE H R, et al. Slow-wave metamaterial open panels for efficient reduction of low-frequency sound transmission [J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(9):091901.
[38] GHAFFARIVARDAVAGH R, NIKOLAJCZYK J, ANDERSON S, et al. Ultra-open acoustic metamaterial silencer based on Fano-like interference [J]. Physical Review B, 2019, 99(2):024302.
[39] CHEN A, ZHAO X G, YANG Z W, et al. Broadband labyrinthine acoustic insulator [J]. Physical Review Applied, 2022, 18(6): 064057.
[40] SHEN C, XIE Y, LI J, et al. Acoustic metacages for sound shielding with steady air flow [J]. Journal of Applied Physics, 2018, 123(12):124501.
[41] MELNIKOV A, MAEDER M, FRIEDRICH N, et al. Acoustic metamaterial capsule for reduction of stage machinery noise [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2020, 147(3):1491-1503.
[42] LIU C K, SHI J J, ZHAO W, et al. Three-dimensional soundproof acoustic metacage [J]. Physical Review Letters, 2021, 127(8):084301.
[43] GE Y, SUN H X, YUAN S Q, et al. Broadband unidirectional and omnidirectional bidirectional acoustic insulation through an open window structure with a metasurface of ultrathin hooklike meta-atoms [J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(24):243502.
[44] GE Y, SUN H X, YUAN S Q, et al. Switchable omnidirectional acoustic insulation through open window structures with ultrathin metasurfaces [J]. Physical Review Materials, 2019, 3(6):065203.
[45] XIAO Z Q, GAO P L, HE X, et al. Multifunctional acoustic metamaterial for air ventilation, broadband sound insulation and switchable transmission [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2022, 56(4):044006.

本文编辑:张 瑞