

应用声学
Journal of Applied Acoustics
ISSN 1000-310X, CN 11-2121/O4

《应用声学》网络首发论文

题目：薄膜型声学超材料的发展与展望
作者：伍守豪，熊潞锦，王可
收稿日期：2023-08-27
网络首发日期：2024-03-08
引用格式：伍守豪，熊潞锦，王可. 薄膜型声学超材料的发展与展望[J/OL]. 应用声学.
<https://link.cnki.net/urlid/11.2121.O4.20240306.1101.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

薄膜型声学超材料的发展与展望*

伍守豪¹ 熊潞锦² 王可^{2†}

(1 深圳清华大学研究院 深圳 518071)

(2 深圳大学 深圳 518060)

摘要：声学超材料以可引导和控制声波反射、透射和吸收能力，在声学领域受到广泛关注。薄膜型声学超材料是声学超材料的一个重要分支。薄膜型声学超材料因其轻质、成本低、易加工并且能够在低频段产生理想的降噪效果，成为了当前声学超材料的主要研究方向之一。该文综述了薄膜型声学超材料在隔声等方面的研究进展，从薄膜理论模型建立和薄膜参数化分析出发，论述了薄膜型声学超材料基础理论及性能研究，重点介绍了不同薄膜结构的设计及其与不同隔声技术的结合，并对薄膜型声学超材料进行了总结与展望。

关键词：薄膜型声学超材料；薄膜型声学超材料基础理论；薄膜结构；隔声技术

中图分类号：TU112.5

文献标识码：A

Development and prospect of membrane-type acoustic metamaterials

WU Shouhao¹ XIONG Lujin² WANG Ke²

(1 Research Institute of Tsinghua University in Shenzhen, Shenzhen 518071, China)

(2 Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: Acoustic metamaterials, which can guide and control acoustic reflection, transmission and absorption, have received extensive attention in the field of acoustics. The membrane-type acoustic metamaterials is an important branch of acoustic metamaterials. Membrane-type acoustic metamaterials have become one of the main research directions of acoustic metamaterials because of their light weight, low cost, easy processing and ability to produce an ideal noise reduction effect in low frequency band. This paper reviews the research progress of membrane-type acoustic metamaterials in sound insulation and other aspects. Based on the theoretical model and parametric analysis of membrane-type acoustic metamaterials, the basic theory and properties of membrane-type acoustic metamaterials are discussed, with emphasis on the design of different membrane-type acoustic metamaterials structures and their integration with different sound insulation techniques. This paper also summarizes and prospects the membrane-type acoustic metamaterials.

Keywords: Membrane-type acoustic metamaterials; Theory of membrane-type acoustic metamaterials; Membrane-type acoustic metamaterial structures; Sound insulation techniques

2023-08-27 收稿; 2023-10-31 定稿

*深圳市重点技术攻关项目(JSGG20200103094001790)

作者简介: 伍守豪(1973-)男, 广东深圳人, 博士 高级工程师 研究方向 无线通信 现代声学信号处理。

†通信作者 E-mail:wong@szu.edu.cn

0 引言

声学超材料起源于声子晶体，其概念是类比电磁超材料概念而提出。由于电磁波和声波都满足波动性质，有共同的波参数(波矢、波阻抗和能流等)，且均满足波动方程^[1]，因此研究人员将电磁超材料设计思想推广到声学领域，设计了各种声学超材料。

2000年Liu等^[2]采用橡胶材料包覆高密度铅核心的方式，得到一种局部共振单元，并提出利用局域共振型的结构单元构建声学超材料。2004年，Li等^[3]通过类比具有谐振单元的电磁超材料，提出一种固液复合材料结构，使得局域共振单元结构同时具有负等效质量密度和负等效弹性模量的物理特性，并提出了声学超材料概念。总之，声学超材料是一种人工结构材料，它突破了自然界材料特性的束缚极大地拓展了自然界中现有材料的特性，例如负质量密度、负弹性模量和负折射等特性^[4]。

声学超材料应用非常广阔，目前主要应用有声学隐身、声学透镜、和减振降噪等^[5]。减振降噪是声学超材料一个极为重要应用领域，它可抑制无效机械运动和减少噪声污染。声学超材料以可引导和控制声波反射、透射和吸收能力，在振动与噪声控制领域受到广泛关注。声学超材料根据构成结构不同，分为一维杆状结构^[6-8]、超原子和超分子结构^[9-11]、混合盘绕型结构^[12-14]、亥姆霍兹腔结构^[15-17]、薄板型结构^[18-20]、薄膜型结构^[21-23]和其他类型结构(包括空间卷曲结构^[24]、空心球体结构^[25]等)。薄膜型声学超材料因其简单构造、轻便质量和占用空间小等优点而备受关注。

1 薄膜型声学超材料基础理论

1.1 薄膜型声学超材料隔声原理分析

传统的薄膜型结构与薄板型结构属于平板型结构^[26]，但它们的组成材料和特性有所不同。薄膜型结构通常由薄膜和质量块构成，薄膜厚度远小于声波波长；而薄板型结构由厚度相对较大的板材组成，通常具有周期性的孔洞或结构，这些孔洞或者结构的尺寸远小于声波波长。薄膜型结构与薄板型结构相比，薄膜型结构可以通过调节薄膜张力改善带隙范围。此外，薄膜型结构还可以通过调节质量块的尺寸、数量、形状、密度和位置来调整共振频率 $f_0 = \sqrt{K/M}$ (K 为等效弹簧系数， M 为等效质量)，使得声学特性的调节更加灵活。传统的薄膜型结构通常采用框架结构将单个元胞分隔开，采用圆形薄膜，并在薄膜上布置质量块。其工作原理是通过增加共振模式来提高超材料内部低频声波的能量密度。当声波传送到薄膜上时，与薄膜的接触边界的弹性曲率能量增强，消除与声波的耦合效应，达到谐振隔声的目的，实现减振降噪的效果^[27]。

传统薄膜结构的减震降噪效果，主要由隔声性能体现，其结构可以看成一个“弹簧-质量”系统，薄膜相当于“弹簧”，附加在薄膜上的质量块相当于“质量”，刚性框架主要用于固定施加了预紧力的薄膜。当“弹簧-质量”系统受弹性波作用时，系统将在谐振力作用下做简谐振动。薄膜的振动方程可表示为^[28]

$$\nabla^2 \eta = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2}, \quad (1)$$

其中， ∇^2 为二维直角坐标的拉普拉斯算符， $c = \sqrt{T/\sigma}$ ， T 表示薄膜张力， σ 为薄膜面密度， η 表示薄膜垂直方向位移， t 表示时间。传统薄膜结构在“弹簧-质量”系统下，圆膜振动与弹性体的情况一样，属于同一种分布参数系统，圆形薄膜振动位移大小与其径向位置有关。圆形薄膜的振动可以等效为圆心处有一个等效质量块在等效弹簧的作用下振动。从能量等效角度分析，结合薄膜振动方程，可以得到圆形薄膜的等效质量和振动固有频率分别为^[29]

$$M_{\text{en}} = m J_1^2(u_n), \quad (2)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\text{en}}}{M_{\text{en}}}}, \quad (3)$$

其中 M_{en} 表示薄膜的等效质量， m 为薄膜的实际质量， $J_1(u_n)$ 为1阶柱贝塞尔函数， K_{en} 为等效弹簧系数。

若在薄膜上添加一质量块 M ，此时等效质量为 $M + M_{\text{en}}$ ，振动固有频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\text{en}}}{M_{\text{en}} + M}}. \quad (4)$$

等式(4)是优化薄膜型声学超材料的重要工具，当入射声波频率与固有频率接近或相等时，薄膜系统将发生共振现象。在共振状态下，声波很容易透过薄膜，导致声透射量最大，隔声效果最差。当质量块边缘的薄膜振动位移与薄膜结构四周振动位移反相时，整个薄膜的平均振动位移近似为零。这种反相振动导致

声波很难透过薄膜,从而实现最佳的隔声效果。隔声效果通常用隔声量或者说传声损失(Sound transmission loss, STL)来进行衡量,其表达式为^[30]

$$\text{STL} = 10\lg\left(\frac{W_{\text{in}}}{W_{\text{out}}}\right), \quad (5)$$

其中, W_{in} 表示入射声波功率, W_{out} 表示出射声波功率。

1.2 薄膜型声学超材料基础理论发展

在声学超材料被提出之前,已经存在薄膜结构。1991年,Hashimoto等^[31]提出了附加质量块的薄膜结构,膜材料为乙烯基,附加钢铁为质量块,称该膜结构为MAW(membrane with additional weights)。MAW的隔声机理与质量定律的隔声机理完全不同。该机制是由薄膜和质量块振动运动所产生。随后,该团队研究了薄膜在扩散声场下的隔声性能特性^[32]。Yang等^[33]结合MAW和声学超材料提出了一种二维薄膜-质量块结构,其能在100~1000 Hz范围内打破声衰减质量密度定律,实现亚波长尺寸的低频隔声。随后该团队在薄膜上加入了多个非对称质量块,制成一种暗声学超材料^[34]。这些质量块在声波激励下发生振动,使得边缘的薄膜具有非常高的弹性能量密度,从而实现了声波吸收。

研究者们通常也从薄膜结构参数来分析其性能。Naify等^[35]在2010年分析了薄膜张力和质量块质量对薄膜隔声性能影响,发现通过改变薄膜预应力和质量块质量,可以将STL峰值频率调谐到特定值,同时他们利用激光测振仪测试薄膜振动响应,更加直观解释薄膜型声学超材料隔声机理。根据薄膜振动响应的分析,发现在超材料的隔声峰频率处,薄膜中心处的振动相位与声源声压的相位相反,说明此时声压对薄膜的作用力与薄膜的弹性回复力相互抵消,大大抑制了薄膜的振动,使得声波无法通过薄膜传播。当然,不仅质量块质量会影响薄膜型声学超材料的隔声性能,其形状同样也会影响, Ma等^[36]采用有限元法研究了质量块形状和支撑框架材质对薄膜型声学超材料带隙和隔声性能影响。薄膜的厚度也会影响薄膜型声学超材料的声学特性,郭磊等^[37]提出一种变厚度薄膜结构进行薄膜厚度参数化分析,它与普通薄膜等厚度的超材料相比,其隔声峰频率向低频偏移的同时具有更高幅值。蔡梦娜等^[38]对非对称双层薄膜结构的低频隔声性能进行研究,发现通过调整质量块分布方式、位置和数目,非对称结构可以呈现出轻质、多频的隔声特点,且可以通过调整质量块的质量分布方式和位置来调整隔声性能。

薄膜型声学超材料性能研究无论是其隔声机理,还是参数化分析,都需要精简的计算方式和合理的理论模型。Zhang等^[39]使用模态叠加法,模拟预测薄膜型声学超材料的STL,并将计算结果与Naify等^[35]的数据进行对比,验证了模态叠加法的准确性。随后,Tian等^[40]提出了一种附加环形质量的超材料传递损失解析模型,该模型也可以快速准确地预测和分析超材料隔声特性。薄膜的振动状态同样也是薄膜结构研究的重点,Chen等^[41]介绍了一种新颖的声膜振动解析模型,可以准确捕获有限维度刚性质量对弹性薄膜变形的影响。该模型采用点匹配法,在质量块与薄膜界面上施加一组分布式点力,从而得到了声膜振动的分析解。Langfeldt等^[42]提出了一种在斜入射声场下,预测带有多个亚波长尺寸薄膜型声学超材料挡板的STL分析模型。该模型采用有效表面质量密度的概念来近似结构的振动,并将其近似为活塞式位移。在边长小于声波波长一半的情况下,分析模型可以准确地预测STL,且计算时间比数值模拟的计算时间小100倍。这三个模型的研究对象、模型设计和预测能力都有所不同,但都是用于解决不同结构设计中的相关问题。这些模型采用不同的方法和概念来近似结构的振动,并能准确预测STL,同时计算时间相对较短。

Li等^[43]提出一种半解析模型,该模型可以快速预测任意形状面积密度结构的STL。与Langfeldt等^[42]的方法不同, Li等使用保角映射理论,将不规则质量块映射为规则质量块,从而简化了理论计算难度。该模型克服了Zhang等^[39]只能计算规则质量块体的局限性。同时参考Tian等^[40]的超材料传递损失解析模型中附加环形质量的方法, Li等将不同位置任意形状表面密度的质量块映射到薄膜中心,实现了垂直声压入射下膜型超材料低频声透射损失的快速预测。Jang等^[44]利用表面阻抗模型和传递阻抗模型计算薄膜结构的动态有效密度,并通过建立的动态等效密度模型将子结构划分振动类型,解释了薄膜结构的隔声机理。薄膜型声学超材料基础理论也可以结合人工智能算法来优化解析模型, Peng等^[45]将有限元分析和基于遗传算法的克里金代理模型相结合,优化了薄膜结构参数,同时获得目标结构的关键参数。这种方式使得结构优化难度降低,计算效率得到了提升。

2 薄膜型声学超材料结构设计

2.1 薄膜分布调整及质量环结构设计

人们不仅能通过薄膜型声学超材料的理论分析,对各种参数与模型进行调整来得到期望声学效果,还

可通过设计薄膜、质量块和框架环等结构来达到期望声学效果。Yang 等^[46]从二维薄膜-质量块结构出发，从薄膜的垂直分布上考虑，在结构上又提出了多层薄膜结构。通过对比单层、双层和四层薄膜结构，发现四层薄膜结构有更好隔声效果。四层薄膜结构以 60 mm 总厚度和 15 kg/m³面密度，在宽频带 50~1000 Hz 范围内，得到平均 STL 大于 40 dB。不同于堆叠 MAW 结构，Naify 等^[47]提出将传统 MAW 结构的附加质量块改为同轴型质量环，不同环数的结构如图 1 所示。通过改变环的数目、质量分布以及环半径大小进行研究，发现增加环数量会使得隔声峰得到增加，其中附加峰的数量与附着环的数量相对应；质量分布在中心质量和环质量之间的均匀性会影响隔声峰的宽带；增大环半径会对隔声性能产生负面效果，会降低隔声峰带宽。

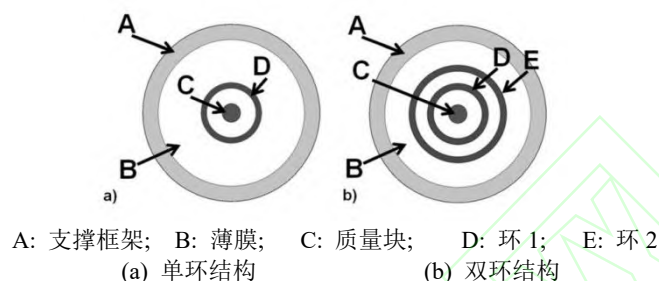


图 1 多环结构^[47]
Fig.1 Multiring structure^[47]

Naify 等^[48-49]设计了一中心对称四单元阵列结构，将薄膜进行阵列分布，其每单元都是薄膜-质量块结构，如图 2 所示。他们研究了该单元结构隔声特性和相邻单元间耦合的影响，并通过调整薄膜单元间的质量分布，成功实现在较宽频率范围内的多频隔声。Zhang 等^[50]将 Naify 具有相同对角质量块的阵列结构与对应单元的隔声曲线进行比较，发现阵列结构的隔声曲线并非两种单元隔声曲线的简单叠加，而是在两种单元隔声曲线的交点处形成隔声峰。同时，他们通过在阵列结构中设置不同质量的质量块来改变隔声峰。

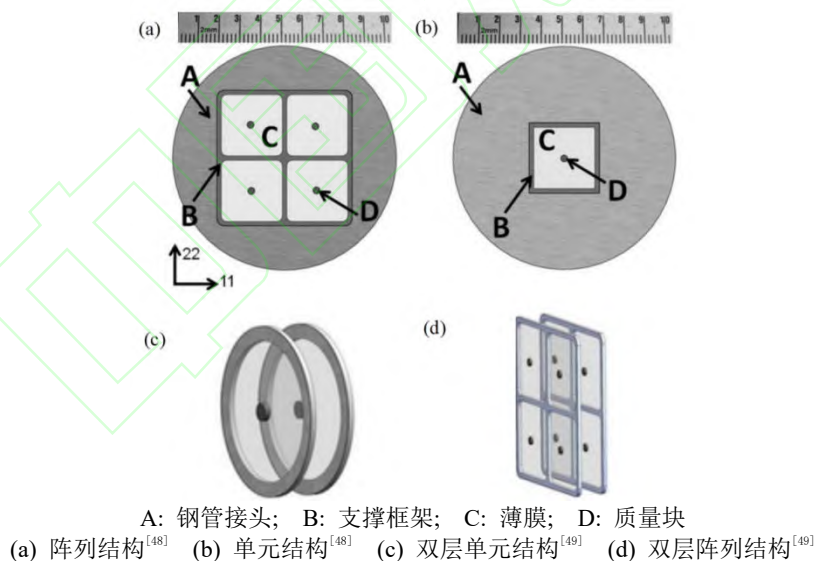


图 2 阵列隔声性能分析
Fig.2 Analysis of sound insulation performance of array structure

在结构设计中，环的处理存在很多方式。Chen 等^[51]设计了一种由两个膜和两个环块组成的环膜耦合结构，如图 3 所示。这种结构同时具有偶极共振和单极共振特性，能够显著地拓宽衰减带宽。此外，通过改变质量大小和膜张力，可以调节传输损耗峰值频率。

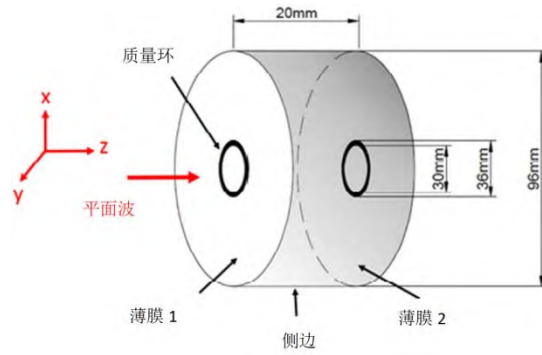


图 3 耦合环膜结构^[51]

Fig.3 Coupled ring membrane structure^[51]

Lu 等^[52]在考虑质量块偏心距影响基础上,提出一种基于偏心分裂环质量的薄膜结构,如图 4 所示。对比中心点质量结构和单环结构,分裂环结构能够显著拓宽隔声带宽。此外,调整分裂环结构参数及位置分布,会影响隔声带宽以及局域共振峰个数。

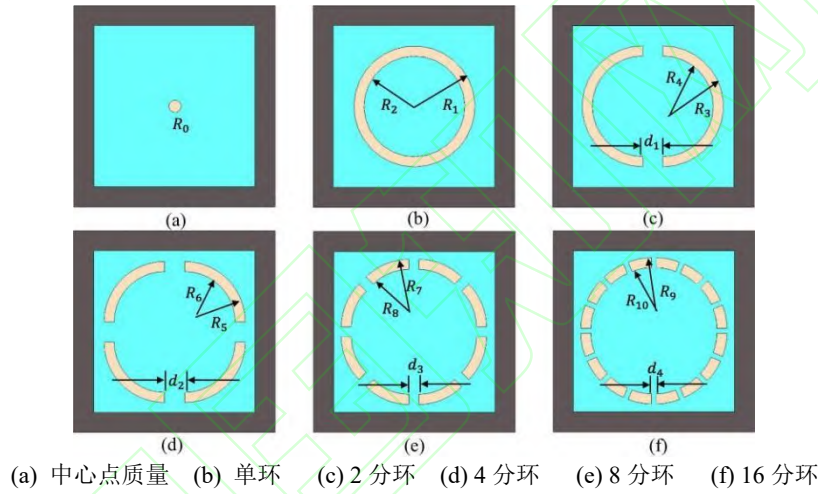


图 4 分裂环薄膜结构^[52]

Fig.4 Split ring membrane structure^[52]

Leblanc 等^[53]设计了一种 3D 打印薄膜型声学超材料。通过使用柔性材料和分裂环等结构,在膜中心添加多个不连续的元素,利用其旋转惯量来加强隔声效果,其结构及隔声效果如图 5 所示。实验和数值模拟结果表明,与传统的薄膜结构相比,具有实用性和低密度的优点,并且在隔声方面有更好的效果。

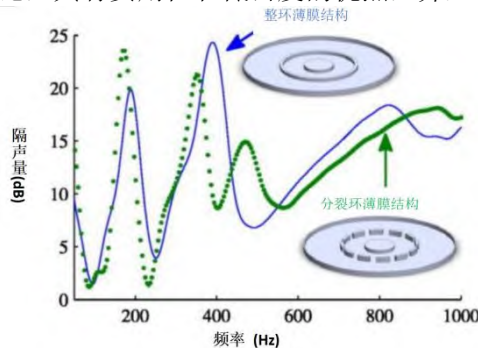


图 5 3D 打印附加质量块与环的薄膜结构^[53]

Fig.5 3D printing of additional mass blocks with ring membrane structure^[53]

2.2 质量块分布调整及其结构设计

MAW 中的质量块同样可以进行结构调整。邢拓等^[54]在薄膜中心对称放置了不同数量的质量块,通过改变质量块的质量和个数,使质量块薄膜反共振时的平均位移发生不同变化,从而改变隔声效果。Zhou

等^[55]设计了一种柔性好、可控性强的软膜型声学超材料。与传统膜型超材料不同，该材料去掉了刚性支撑框架，薄膜中心的质量块用若干个金属小颗粒代替，如图 6 所示。实验表明，其共存有布拉格散射能带结构和区域共振能带结构，且波传播特性与薄膜预拉伸无关。

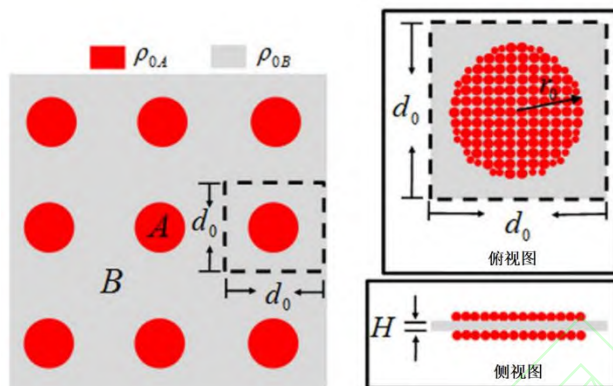


图 6 软膜型声学超材料^[55]
Fig.6 Soft film type acoustic metamaterial^[55]

Zhou 等^[56]为了解决反共振模式离散问题，改变质量块结构，提出了具有连续多态反共振模式的十字型摆臂式薄膜声学超材料结构。通过对比 5 组不同的结构，发现薄膜加质量块和十字摆臂结构所得到的 STL 具有更宽带宽和更高 STL，5 种结构如图 7 所示。实验有效验证了偶极子和四极子振动可以进一步形成多态反共振模式，这对设计多态抗谐振结构具有一定的指导意义。

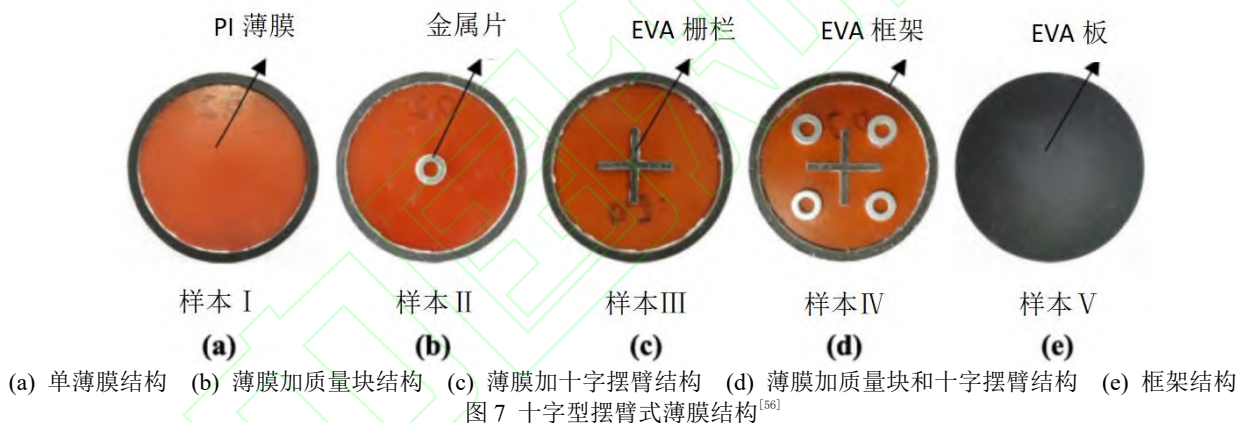


图 7 十字型摆臂式薄膜结构^[56]
Fig.7 Cross-shaped swing arm type film structure^[56]

Huang 等^[57]将仿生配置理念引入到设计中，以减轻结构质量和拓宽低频衰减带宽，并受蜘蛛网拓扑结构的启发，提出两种基于聚合物膜和附加谐振器的模型，如图 8 所示。其中，Model I 和 Modle II 为蜘蛛网拓扑结构，Model III 为对比参考模型。将两种结构与 Zhou 等^[56]提出的结构进行对比，实验发现两种仿生模型比 Zhou 的模型更轻，并且 Modle I 对比参考模型有相同隔声效果，Modle II 连续衰减带宽增加了 61%。

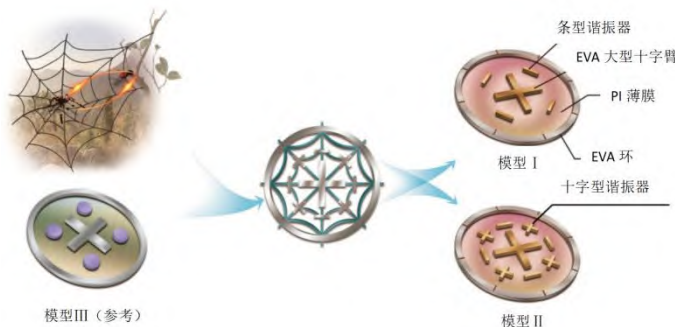


图 8 蜘蛛网拓扑结构^[57]

Fig.8 Spider web topology^[57]

3 与其他降噪技术的结合

3.1 薄膜结构与空腔共振方式结合

在实际降噪场景下，薄膜隔声往往会与其他降噪技术进行结合，以达到更好隔声效果。比如利用空腔共振结合薄膜结构，Ma 等^[58]提出一种耦合背腔的薄膜结构，如图 9(a)所示。该结构在薄膜后部设置一个背腔，薄膜与背腔内气体间产生混合共振，形成具备阻抗匹配特性的声学表面，使得声波在一定频率范围内可被完全吸收或转化为其他形式的能量。Sui 等^[59]设计一蜂窝型薄膜结构如图 9(b)所示。其与背腔结构相似，通过利用蜂窝腔内气体与薄膜共振来实现隔声。在低于 500 Hz 范围内，该结构的声波传输损耗均大于 45 dB，同时其面密度仅为 1.3 kg/m²。该结构坚固、轻便，具有优良隔声性能，且能够利用六边形特征实现多个单元拼接。

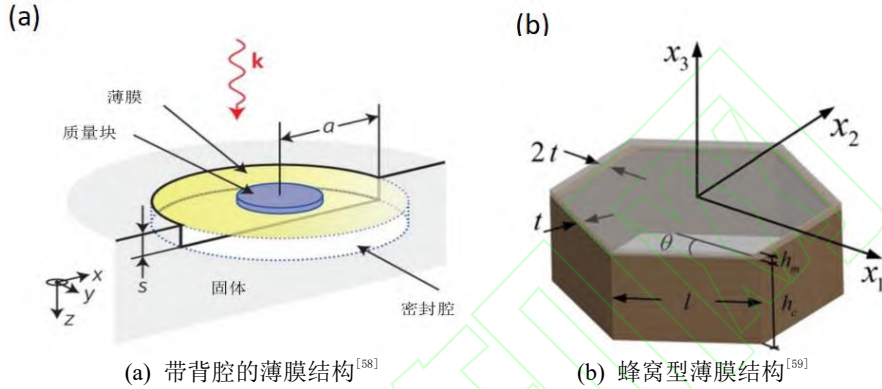


图 9 背腔薄膜结构

Fig.9 Dorsal cavity membrane structure

也有人将空腔中空气替换为其他材料。Wang 等^[60]设计一耦合多孔材料的背腔薄膜结构如图 10 所示。在该结构在两层薄膜的腔体中填充多孔材料(玻璃纤维棉层)。薄膜和多孔材料的组合可将入射声能转化为多孔材料层自身的耗散能，实现结构在临界频率附近声能向黏性热能的有效转化。空腔体也可有不同形式。

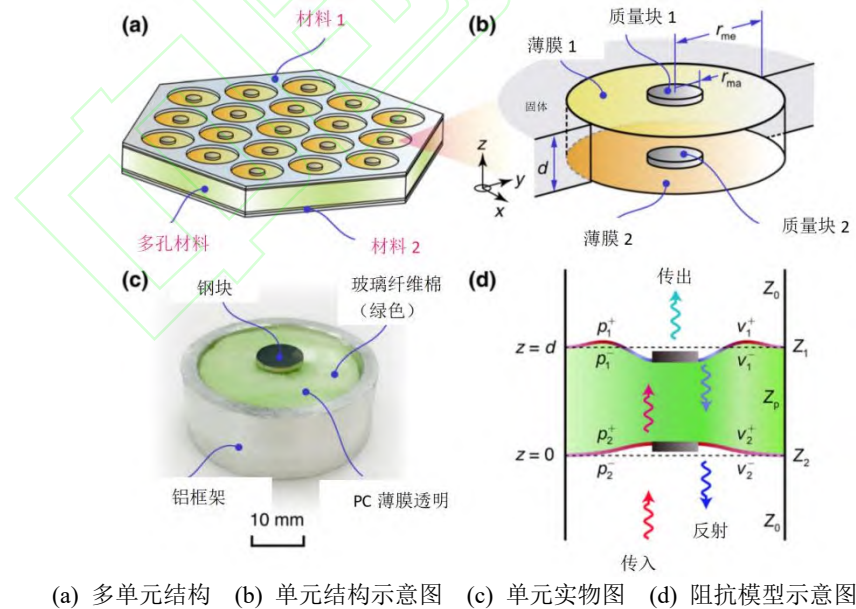


图 10 耦合多孔材料的背腔薄膜结构^[60]

Fig.10 Back cavity film structure coupled with porous material^[60]

周榕等^[61]将腔体设置为亥姆霍兹共振腔，中间引入一无附加质量块的硅胶薄膜，如图 11(a)所示。结合腔内空气和薄膜的反共振机制，使其比传统亥姆霍兹共振腔多产生几个隔声峰，且拓宽了隔声频率带宽。Li 等^[62]设计一双层薄膜与亥姆霍兹腔组合的薄膜结构，如图 11(b)所示。不同双层薄膜设计使得结构有更多不同隔声峰，同时利用亥姆霍兹腔的力学与声学特性，使得该结构有较好隔声性能。

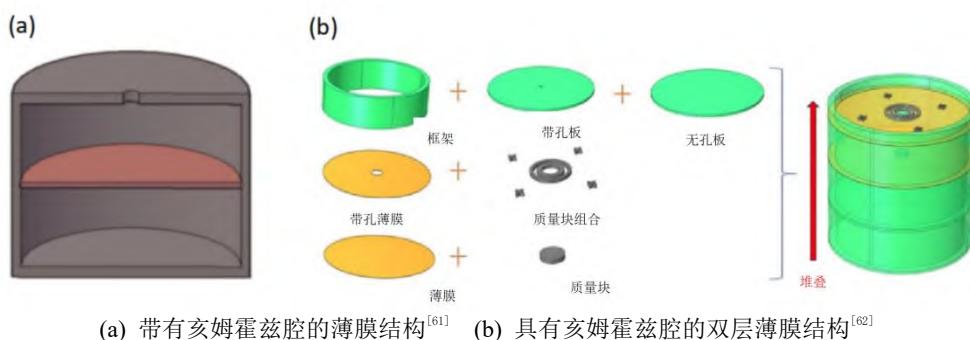


图 11 亥姆霍兹腔薄膜结构

Fig.11 Helmholtz cavity membrane structure

Zhang 等^[63]设计了亥姆霍兹共振腔和薄膜结构的复合结构，具有隔声和能量收集功能，如图 12 所示。理论和实验证明所提出的超构材料可获得两个隔声带，收集的声能也可以在同频率下有效获得。

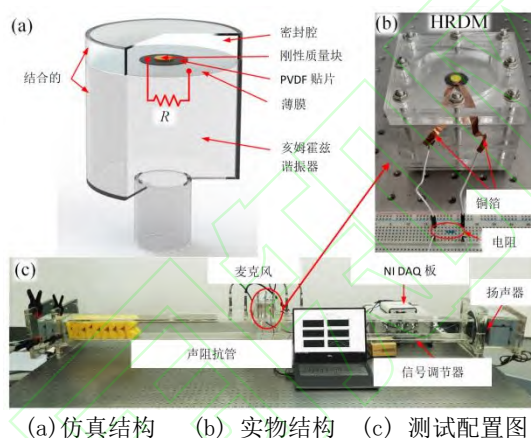


图 12 能量收集亥姆霍兹腔薄膜结构^[63]

Fig.12 Energy harvesting Helmholtz cavity thin film structure^[63]

3.2 薄膜结构与孔洞平衡气流原理结合

还可以利用孔洞平衡气流原理结合薄膜背腔实现减振。Chen 等^[64]在膜环结构中制造孔口，利用膜环弯曲运动和空气收缩与膨胀，得到减振降噪的作用，该结构如图 13(a)所示。Langfeldt 等^[65]使用双层膜堆叠形成背腔，硬质框架侧边开有一个小孔，薄膜上方放置质量块，如图 13(b)所示。通过侧边小孔将压缩空气注入密封腔中，改变腔内气体的压强使薄膜张力发生变化，从而实现对隔声峰频率的调节。该团队随后又提出了另一种穿孔结构^[66]，其结构由环形质量和中心穿孔的薄膜构成，如图 13(c)所示，环形质量块作用类似于亥姆霍兹腔的颈部，限制一部分空气体积；中心穿孔的作用是使气流通过。将穿孔薄膜和未穿孔薄膜进行对比，发现薄膜穿孔后，在低频段增加了一个隔声峰。

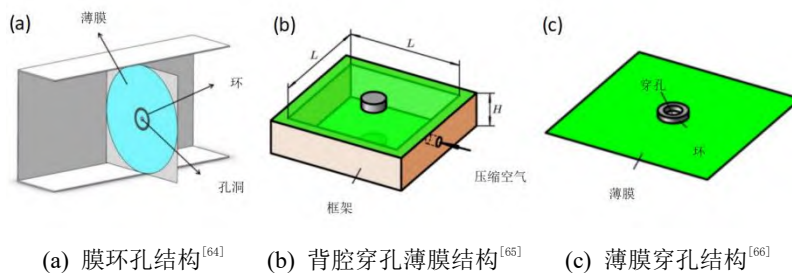


图 13 穿孔结构

Fig.13 Perforated structure

Ang 等^[67]结合实际应用需求，考虑到质量块的空间一致性、薄膜预张力的均匀性、膜的耐久性以及应

力松弛等问题，设计了一种薄膜无张力且不附加质量块的结构，如图 14 所示。这种结构低频隔声效果是通过两个密封腔之间联通孔的耦合效应来实现，其中孔径可以作为超材料隔声频段调节参数。一般薄膜结构在结构确定后，其声学性能很难再更改，而穿孔结构可以通过调整孔径大小以及气流压强等，让薄膜结构的声学性能还能得到主动控制。

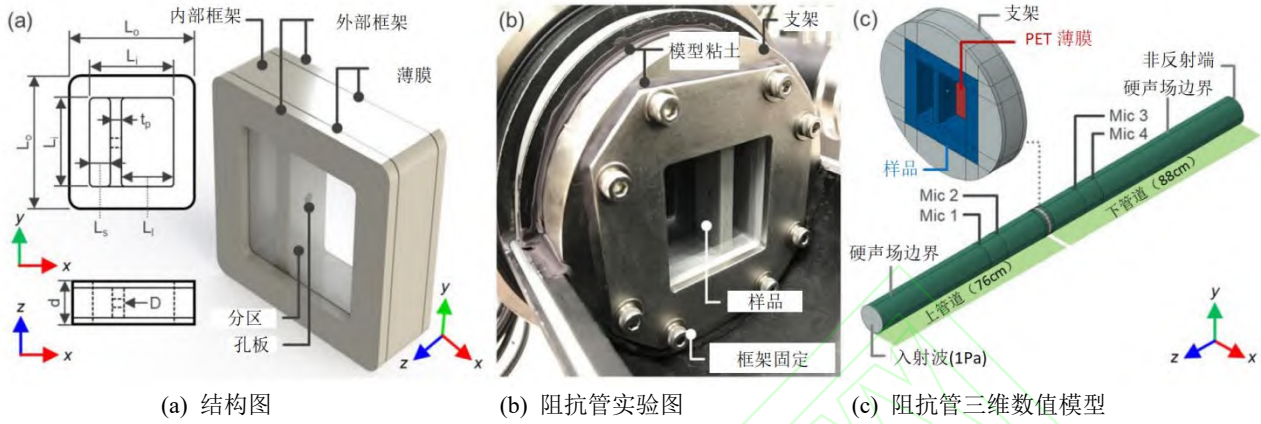


图 14 封闭腔穿孔膜结构^[67]

Fig.14 Closed cavity perforated membrane structure^[67]

3.3 薄膜结构主动控制研究及其他

主动控制方式有很多种，电或磁是目前趋势之一。Xiao 等^[68]在附有背腔的薄膜后部增加一个电极，通过对附加金属质量块施加磁场力来改变薄膜振动响应，如图 15(a)所示。该结构通过调节电路控制磁场幅值以及频率来影响超材料隔声性能。Zhao 等^[69]基于磁性技术研发出一种可自适应调节背腔结构强度的薄膜结构，该结构在覆盖薄膜的背腔结构中放入一磁铁，并在薄膜上方放置了一铁制质量块，如图 15(b)所示。通过合理调整磁力强度，背腔深度和磁铁长度等参数，可以实现不同吸声效果。Gao 等^[70]设计了一种采用磁力的双层膜结构，它由双层硅胶膜和三个磁铁构成，其中一个磁铁固定于双层膜中部，将两个磁铁作为附加质量块分别黏附于两层薄膜上，如图 15(c)所示。磁铁间相互作用力可以对超材料的振动响应产生影响，通过搭配不同厚度的磁体来调节磁场力，实现对超材料隔声峰频率的调控。

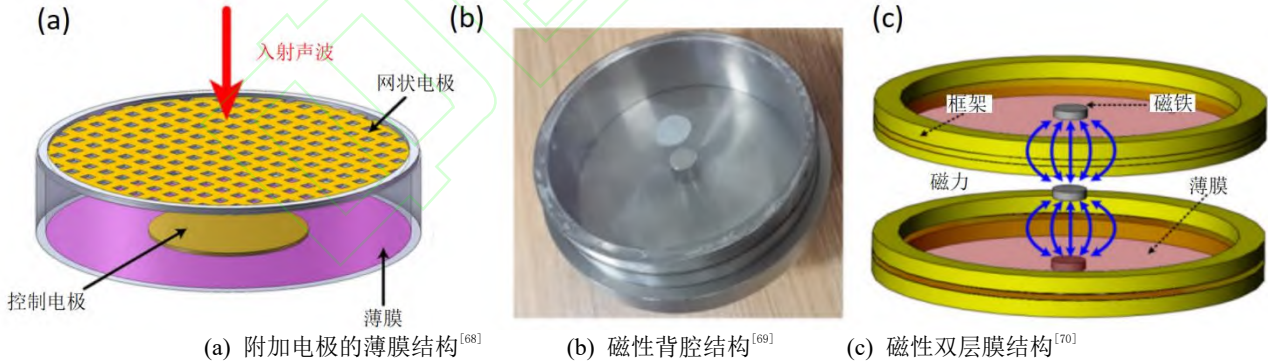


图 15 主动控制薄膜结构

Fig.15 Active control of membrane structure

如图 16(a)所示，Ma 等^[71]设计了利用电磁铁的开关控制使薄膜具有两种振动方式的空间声调制器。其中磁性质量块和塑料环放置在薄膜上端，并在磁性质量块上方放置电磁铁。通过对电磁铁开闭控制，改变单元振动模式，进而操纵声波相位。通过负反馈调节，使声场某处声波尽可能反相抵消而实现降噪。杭锐等^[72]基于电磁力调谐薄膜结构隔声性能^[68]和对声波主动控制^[73]，设计的变磁场薄膜结构如图 16(b)所示。其采用钕铁硼磁铁替代传统质量块，并将结构固定在通电螺线管磁场中。通过改变电流调控磁铁质量块的受力，实现超材料隔声峰频率的定向偏移。

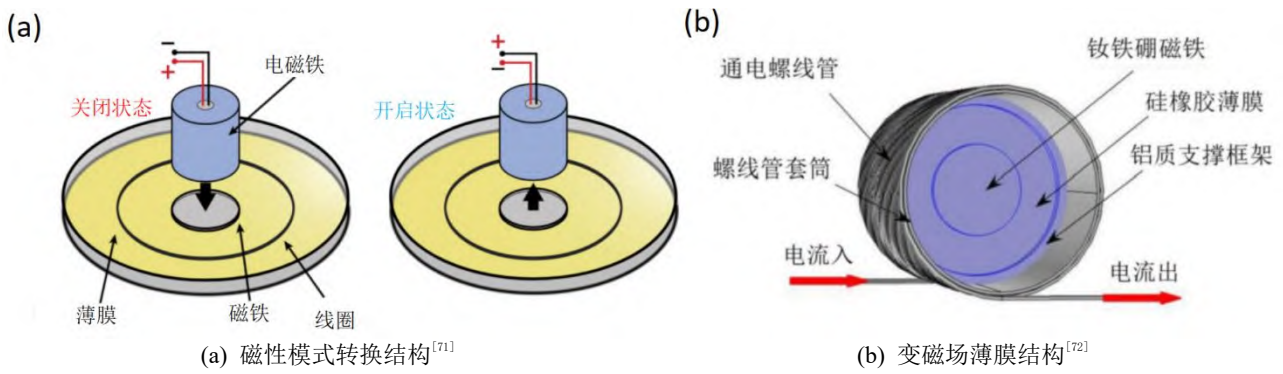


图 16 磁性薄膜结构

Fig.16 Magnetic membrane structure

贺子厚等^[74]受压电分流阻尼技术在一维梁结构^[75]、薄板^[76]和声子晶体^[77]中的应用启发,利用压电材料替代传统质量块,将压电材料连接到外部电路,通过调节电路参数对压电隔声峰进行调节,如图 17 所示。Zhao 等^[78-79]提出一种多胞阵列结构,其将阵列结构与磁性背腔结构相融合,并用永磁体替代质量块,如图 18 所示。该结构具备一个背腔,背腔底部放置多个永磁体。通过调节永磁体参数,每个单胞能改变薄膜张力,从而实现多频段隔声效果。

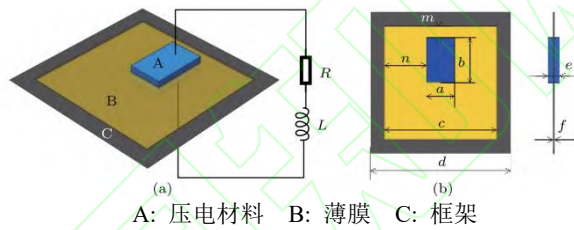


图 17 压电薄膜结构^[74]

Fig.17 Piezoelectric membrane structure^[74]

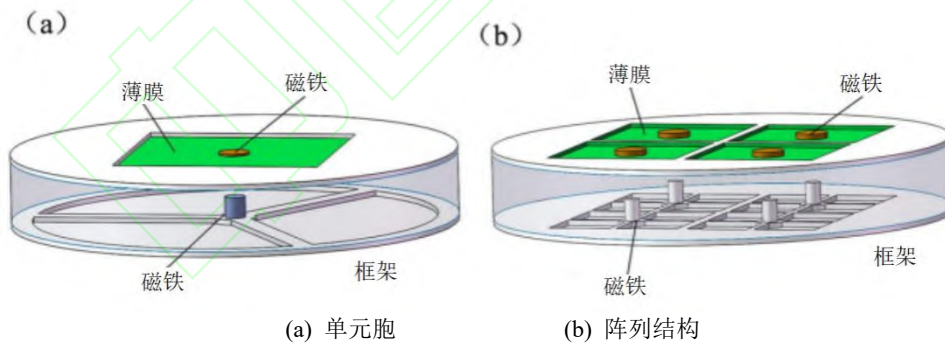


图 18 多胞磁性阵列结构^[79]

Fig.18 Multicellular magnetic array structure^[79]

此外还有结合其他隔声技术的薄膜结构。Lin 等^[80]提出一种由刚性框架、球形附件和薄膜组成的三维薄膜型声学超材料结构,如图 19(a)所示,并通过有限元仿真分析了材料参数和连接孔对禁带的影响。顾金桃等^[81]考虑在振动剧烈环境中,传统质量块可能容易脱落,因此参考含约束体的薄膜型声学超材料^[82],设计了用于飞机舱内低频宽带噪声控制的约束型层合薄膜声学超材料,如图 19(b)所示。该结构有两层约束体薄膜,每层薄膜由薄膜、框架和约束体组成,两层薄膜中间空腔填入吸声材料。吸声材料对层合声学超材料的隔声曲线的改变类似于阻尼材料,即削弱了隔声尖峰,但有效提高了隔声低谷。

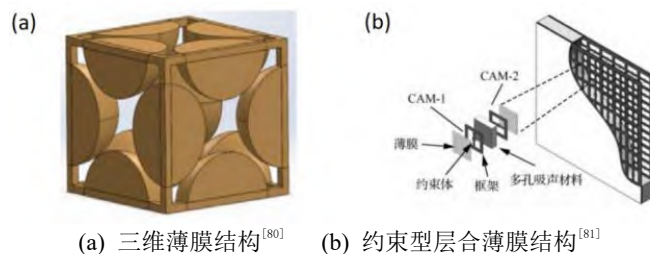


图 19 其他薄膜结构
Fig.19 Other magnetic structures

4 结语与展望

近几十年来,薄膜型声学超材料在低频噪声控制方面取得了重大成就,建立了一系列基础理论模型,这些理论模型为准确把控薄膜振动状态、建立精确仿真模型、提高运算速度和调节隔声性能起到了重要作用。这些理论模型涉及到薄膜型声学超材料的物理性质、结构参数、声学特性等多个方面,为研究者们提供了重要的理论指导和工具。

此外,其结构设计也非常多样化,研究者们通过改变薄膜的厚度、形状、张力等参数,以及引入多层结构、微结构等设计,实现了对声学性能的调控。例如,通过设计多层薄膜结构,可以实现更宽频带的隔声效果;通过设计质量块结构,可以解决反共振模态离散问题等。此外,薄膜型声学超材料还可以与其他隔声技术结合,如薄膜结构与空腔共振方式结合、薄膜结构与孔洞平衡气流原理结合、薄膜结构主动控制研究等。这些与隔声技术的结合,为薄膜型声学超材料的发展提供了广阔的空间。无论是从结构设计出发,还是将薄膜与其他隔声技术结合,都表明未来薄膜型声学超材料具有发展前景。未来,薄膜型声学超材料有望在更多领域展现其发展前景。随着科技的不断进步,人们对低频噪声控制的需求也越来越高。薄膜型声学超材料作为一种有效的低频噪声控制材料,将在交通运输、建筑环境、工业设备等领域发挥重要作用。其次,随着材料科学和工程技术的发展,薄膜型声学超材料的性能和结构设计也将不断改进和优化,进一步提高其声学性能。

尽管薄膜型声学超材料具有理论研究价值,但实际应用存在挑战。首先在性能上,虽然目前薄膜型声学超材料在中低频范围内具有优异隔声或吸声性能,但其工作频带往往较窄,不能完全满足不同场合处理宽带噪声要求。其次在结构上,通常需要在低质量和结构强度之间进行权衡。大多数声学超材料质量轻,结构强度低,不适用实际工程应用。此外,薄膜型声学超材料的制备和加工技术也需要进一步改进,以提高生产效率和降低成本。

目前基于薄膜型声学超材料基础理论已经能够对薄膜型声学超材料的隔声性能进行比较精准的模拟仿真。在此基础上,未来或许可以结合人工智能算法(如拓扑优化和机器学习等)有效控制复合材料特性,缩短计算时间,提高仿真质量等。在隔声效果的控制上,研究者们利用活性超材料(如压电陶瓷和热电材料等)作为薄膜型声学超材料的基材,这种方法是未来的一个趋势,有利于主动控制在宽频范围内的隔声效果并且保证结构的紧凑性。

综上所述,薄膜型声学超材料在低频噪声控制方面取得了重大进展,并具有广阔的发展前景。通过建立基础理论模型和多样化的结构设计,薄膜型声学超材料能够实现对声学性能的精确调控。未来,随着科技的进步和需求的增加,薄膜型声学超材料有望在更多领域展现其应用价值。薄膜型声学超材料若能不断突破研究中遇到的问题,将有望做到产业化和工程化,在国防、军事和民生领域体现出更多应用价值。

参 考 文 献

- [1] 丁昌林, 董仪宝, 赵晓鹏. 声学超材料与超表面研究进展[J]. 物理学报, 2018, 67(19): 194301.
Ding Changlin, Dong Yibao, Zhao Xiaopeng. Research advances in acoustic metamaterials and metasurface[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(19): 194301.
- [2] Liu Z, Zhang X, Mao Y, et al. Locally resonant sonic materials[J]. Science, 2000, 289(5485): 1734-1736.
- [3] Li J, Chan C T. Double-negative acoustic metamaterial[J]. Physical Review E, 2004, 70(5 Pt 2): 055602.
- [4] 田源, 葛浩, 卢明辉, 等. 声学超构材料及其物理效应的研究进展[J]. 物理学报, 2019, 68(19): 194301.
Tian Yuan, Ge Hao, Lu Minghui, et al. Research advances in acoustic metamaterials[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(19): 194301.
- [5] Liao G, Luan C, Wang Z, et al. Acoustic metamaterials: a review of theories, structures, fabrication approaches, and applications[J]. Advanced Materials Technologies, 2021, 6(5): 2000787.

- [6] Yu D, Liu Y, Zhao H, et al. Flexural vibration band gaps in Euler-Bernoulli beams with locally resonant structures with two degrees of freedom[J]. *Physical Review B*, 2006, 73(6): 064301.
- [7] 郁殿龙, 刘耀宗, 王刚, 等. 一维杆状结构声子晶体扭转振动带隙研究[J]. *振动与冲击*, 2006(1): 104-106, 170.
Yu Dianlong, Liu Yaozong, Wang Gang, et al. Research on torsional vibration band gaps of one dimensional phononic crystals composed of rod structures[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2006(1): 104-106, 170.
- [8] Zhang Z, Wang H, Yang C, et al. Vibration energy harvester based on bilateral periodic one-dimensional acoustic black hole[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(11): 6423.
- [9] Chen H, Zeng H, Ding C, et al. Double-negative acoustic metamaterial based on hollow steel tube meta-atom[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(10): 104902.
- [10] Zhai S, Chen H, Ding C, et al. Double-negative acoustic metamaterial based on meta-molecule[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013, 46(47): 475105.
- [11] Zeng H C, Luo C R, Chen H J, et al. Flute-model acoustic metamaterials with simultaneously negative bulk modulus and mass density[J]. *Solid State Communications*, 2013, 173: 14-18.
- [12] Liang Z, Li J. Extreme acoustic metamaterial by coiling up space[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(11): 114301.
- [13] Xie Y, Popa B I, Zigoneanu L, et al. Measurement of a broadband negative index with space-coiling acoustic metamaterials[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(17): 175501.
- [14] Ghaffarivardavagh R, Nikolajczyk J, Glynn Holt R, et al. Horn-like space-coiling metamaterials toward simultaneous phase and amplitude modulation[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1349.
- [15] Theocharis G, Richoux O, García V R, et al. Limits of slow sound propagation and transparency in lossy, locally resonant periodic structures[J]. *New Journal of Physics*, 2014, 16(9): 093017.
- [16] Zhao X, Cai L, Yu D, et al. A low frequency acoustic insulator by using the acoustic metasurface to a Helmholtz resonator[J]. *AIP Advances*, 2017, 7(6): 065211.
- [17] Nguyen H, Wu Q, Xu X, et al. Broadband acoustic silencer with ventilation based on slit-type Helmholtz resonators[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 117(13): 134103.
- [18] Oudich M, Senesi M, Assouar M B, et al. Experimental evidence of locally resonant sonic band gap in two-dimensional phononic stubbed plates[J]. *Physical Review B*, 2011, 84(16): 165136.
- [19] Xiao Y, Wen J, Huang L, et al. Analysis and experimental realization of locally resonant phononic plates carrying a periodic array of beam-like resonators[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, 47(4): 045307.
- [20] Zhang Z, Wang X, Liu Z Y, et al. A study of low frequency sound insulation mechanism of a perforated plate-type acoustic metamaterial[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2023, 558: 117775.
- [21] Li J, Jiang R, Xu D, et al. Study of acoustic transmission losses in particle-reinforced rubber-based membrane-type acoustic metamaterials[J]. *Applied Acoustics*, 2023, 208: 109379.
- [22] Chuan-Min C, Chuan-Xi Q, Zhao-Feng G U O, et al. Study on ultra-low frequency sound insulation characteristics of semi-active membrane type acoustic metamaterials[J]. *Noise and Vibration Control*, 2023, 43(3): 60.
- [23] Peng L, Bao B. Optimized membrane-type acoustic metamaterials for alleviating engineering fatigue damage via lightweight optimization[J]. *Engineering Structures*, 2023, 292: 116550.
- [24] Duan H, Yang F, Shen X, et al. Acoustic metamaterials for low-frequency noise reduction based on parallel connection of multiple spiral chambers[J]. *Materials*, 2022, 15(11): 3882.
- [25] Yang X, Tang S, Shen X, et al. Research on the sound insulation performance of composite rubber reinforced with hollow glass microsphere based on acoustic finite element simulation[J]. *Polymers*, 2023, 15(3): 611.
- [26] 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.
Feng Tao, Wang Yuhua, Wang Jing, et al. Progress in research and application of structural acoustic metamaterials[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(20): 150-157.
- [27] Mei J, Ma G, Yang M, et al. Dark acoustic meta- materials as super absorbers for low- frequency sound[J]. *Nature Communications*, 2012, 3(756): 756-756.
- [28] 姬艳露, 吕海峰, 刘继宾. 表面张力对薄膜型声学超材料隔声性能的影响[J]. *功能材料*, 2019, 50(1): 1120-1125.
Ji Yanlu, Lyu Haifeng, Liu Jibin. Effect of surface tension on acoustic insulation performance of membrane-type acoustic metamaterial[J]. *Journal of Functional Materials*, 2019, 50(1): 1120-1125.
- [29] 袁伟, 胡超楠, 林国昌, 等. 薄膜声学超材料低频隔声研究[J]. *机械设计与制造工程*, 2021, 50(3): 113-117.
Yuan Wei, Hu Chaonan, Lin Guochang, et al. Research on low frequency sound insulation of thin film acoustic metamaterials[J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2021, 50(3): 113-117.
- [30] Thongchom C, Jearsiripongkul T, Refahati N, et al. Sound transmission loss of a honeycomb sandwich cylindrical shell with functionally graded porous layers[J]. *Buildings*, 2022, 12(2): 151.
- [31] Hashimoto N, Katsura M, Yasuoka M, et al. Sound insulation of a rectangular thin membrane with additional weights[J]. *Applied Acoustics*, 1991, 33(1): 21-43.
- [32] Hashimoto N, Katsura M, Nishikawa Y, et al. Experimental study on sound insulation of membranes with small weights for application to membrane structures[J]. *Applied Acoustics*, 1996, 48(1): 71-84.

- [33] Yang Z, Mei J, Yang M, et al. Membrane-type acoustic metamaterial with negative dynamic mass[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(20): 204301.
- [34] Mei J, Ma G, Yang M, et al. Dark acoustic metamaterials as super absorbers for low-frequency sound[J]. *Nature Communications*, 2012, 3(756): 756-756.
- [35] Naify C J, Chang C M, McKnight G, et al. Transmission loss and dynamic response of membrane-type locally resonant acoustic metamaterials[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(11): 114905.
- [36] Ma F, Wu J H, Huang M, et al. A purely flexible lightweight membrane-type acoustic metamaterial[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2015, 48(17): 175105.
- [37] 郭磊, 张均东, 曾鸿. 变厚度薄膜型声学超材料单胞的隔声性能数值研究[J]. *舰船科学技术*, 2020, 42(1): 38-42.
- Guo Lei, Zhang Jundong, Zeng Hong. The numerical study of sound insulation performance of membrane acoustic metamaterial cell with variable thickness[J]. *Ship Science and Technology*, 2020, 42(1): 38-42.
- [38] 蔡梦娜, 田红艳, 郅彦辉. 非对称双层薄膜型局域共振声子晶体低频隔声性能研究[J]. *噪声与振动控制*, 2019, 39(2): 197-201.
- Cai Mengna, Tian Hongyan, Qie Yanhui. Low-frequency sound insulation performance of asymmetric double-membrane local resonant acoustic metamaterial[J]. *Noise and Vibration Control*, 2019, 39(2): 197-201.
- [39] Zhang Y, Wen J, Xiao Y, et al. Theoretical investigation of the sound attenuation of membrane-type acoustic metamaterials[J]. *Physics Letters A*, 2012, 376(17): 1489-1494.
- [40] Tian H, Wang X, Zhou Y. Theoretical model and analytical approach for a circular membrane-ring structure of locally resonant acoustic metamaterial[J]. *Applied Physics A*, 2014, 114(3): 985-990.
- [41] Chen Y, Huang G, Zhou X, et al. Analytical coupled vibroacoustic modeling of membrane-type acoustic metamaterials: Membrane model[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2014, 136(3): 969-979.
- [42] Langfeldt F, Gleine W, von Estorff O. An efficient analytical model for baffled, multi-celled membrane-type acoustic metamaterial panels[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 417: 359-375.
- [43] Li J, Shi Y, Jiang R, et al. Acoustic insulation mechanism of membrane-type acoustic metamaterials loaded with arbitrarily shaped mass blocks of variable surface density[J]. *Materials*, 2022, 15(4): 1556.
- [44] Jang J Y, Song K. Synergistic acoustic metamaterial for soundproofing: Combining membrane and locally resonant structure[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 256: 108500.
- [45] Peng W, Zhang J, Shi M, et al. Low-frequency sound insulation optimisation design of membrane-type acoustic metamaterials based on Kriging surrogate model[J]. *Materials & Design*, 2023, 225: 111491.
- [46] Yang Z, Dai H M, Chan N H, et al. Acoustic metamaterial panels for sound attenuation in the 50-1000 Hz regime[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(4): 041906.
- [47] Naify C J, Chang C M, McKnight G, et al. Transmission loss of membrane-type acoustic metamaterials with coaxial ring masses[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(12): 124903.
- [48] Naify C J, Chang C M, McKnight G, et al. Membrane-type metamaterials: Transmission loss of multi-celled arrays[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109(10): 104902.
- [49] Naify C J, Chang C M, McKnight G, et al. Scaling of membrane-type locally resonant acoustic metamaterial arrays[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, 132(4): 2784-2792.
- [50] Zhang Y, Wen J, Zhao H, et al. Sound insulation property of membrane-type acoustic metamaterials carrying different masses at adjacent cells[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(6): 063515.
- [51] Chen J S, Chen Y B, Chen H W, et al. Bandwidth broadening for transmission loss of acoustic waves using coupled membrane-ring structure[J]. *Materials Research Express*, 2016, 3(10): 105801.
- [52] Lu Z, Yu X, Lau S K, et al. Membrane-type acoustic metamaterial with eccentric masses for broadband sound isolation[J]. *Applied Acoustics*, 2020, 157: 107003.
- [53] Leblanc A, Lavie A. Three-dimensional-printed membrane-type acoustic metamaterial for low frequency sound attenuation[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2017, 141(6): EL538-EL542.
- [54] 邢拓, 李贤徽, 盖晓玲, 等. 附加多质量块的单胞薄膜型声学超材料的隔声性能研究[C]//2016 年全国声学学术会议论文集, 2016: 95-98.
- [55] Zhou W, Wu B, Muhammad M, et al. Actively tunable transverse waves in soft membrane-type acoustic metamaterials[J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 123(16): 165304.
- [56] Zhou G, 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.
- [57] Huang H, Cao E, Zhao M, et al. Spider web-inspired lightweight membrane-type acoustic metamaterials for broadband low-frequency sound isolation[J]. *Polymers*, 2021, 13(7): 1146.
- [58] Ma G, Yang M, Xiao S, et al. Acoustic metasurface with hybrid resonances[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(9): 873-878.
- [59] Sui N, Yan X, Huang T Y, et al. A lightweight yet sound-proof honeycomb acoustic metamaterial[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(17): 171905.
- [60] Wang X, Luo X, Zhao H, et al. Acoustic perfect absorption and broadband insulation achieved by double-zero

- metamaterials[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(2): 021901.
- [61] 周榕, 吴卫国, 闻轶凡. 一种带薄膜结构的 Helmholtz 腔声学超材料[J]. *声学技术*, 2017, 36(4): 297-302.
- Zhou Rong, Wu Weiguo, Wen Yifan. An acoustic metamaterial based on Helmholtz resonator with thin membrane[J]. *Technical Acoustics*, 2017, 36(4): 297-302.
- [62] 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.
- [63] Zhang X, Zhang H, Chen Z, et al. Simultaneous realization of large sound insulation and efficient energy harvesting with acoustic metamaterial[J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(10): 105018.
- [64] Chen J S, Chen Y B, Tsai H J, et al. Membrane-ring acoustic metamaterials with an orifice[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(9): 095802.
- [65] Langfeldt F, Riecken J, Gleine W, et al. A membrane-type acoustic metamaterial with adjustable acoustic properties[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, 373: 1-18.
- [66] Langfeldt F, Kemsies H, Gleine W, et al. Perforated membrane-type acoustic metamaterials[J]. *Physics Letters A*, 2017, 381(16): 1457-1462.
- [67] Ang L Y L, Koh Y K, Lee H P. Plate-type acoustic metamaterial with cavities coupled via an orifice for enhanced sound transmission loss[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(5): 051903.
- [68] Xiao S, Ma G, Li Y, et al. Active control of membrane-type acoustic metamaterial by electric field[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(9): 091904.
- [69] Zhao J, Li X, Wang Y, et al. Membrane acoustic metamaterial absorbers with magnetic negative stiffness[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2017, 141(2): 840-846.
- [70] Gao N, Hou H, Mu Y. Low frequency acoustic properties of bilayer membrane acoustic metamaterial with magnetic oscillator[J]. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2017, 7(4): 252-257.
- [71] Ma G, Fan X, Sheng P, et al. Shaping reverberating sound fields with an actively tunable metasurface[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(26): 6638-6643.
- [72] 杭锐, 吴卫国, 曾天成. 基于电磁力调谐的薄膜主动声学超材料[J]. *噪声与振动控制*, 2019, 39(6): 66-70.
- Hang Rui, Wu Weiguo, Zeng Tiancheng. Membrane-type active acoustic metamaterial based on electromagnetic force tuning[J]. *Noise and Vibration Control*, 2019, 39(6): 66-70.
- [73] Chen Y, Hu G, Huang G. A hybrid elastic metamaterial with negative mass density and tunable bending stiffness[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2017, 105: 179-198.
- [74] 贺子厚, 赵静波, 姚宏, 等. 基于压电材料的薄膜声学超材料隔声性能研究[J]. *物理学报*, 2019, 68(13): 134302.
- He Zihou, Zhao Jingbo, Yao Hong, et al. Sound insulation performance of thin-film acoustic metamaterials based on piezoelectric materials[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(13): 134302.
- [75] Chen S B, Wen J H, Yu D L, et al. Band gap control of phononic beam with negative capacitance piezoelectric shunt[J]. *Chinese Physics B*, 2011, 20(1): 014301.
- [76] Zhang H, Wen J, Xiao Y, et al. Sound transmission loss of metamaterial thin plates with periodic subwavelength arrays of shunted piezoelectric patches[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, 343: 104-120.
- [77] 孙炜海, 张超群, 鞠桂玲, 等. 含磁电弹夹层的压电/压磁声子晶体带隙特性研究[J]. *物理学报*, 2018, 67(19): 194303.
- Sun Weihai, Zhang Chaoqun, Ju Guiling, et al. Band gaps of piezoelectric/piezomagnetic phononic crystal with magneto-electro-elastic interlayer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(19): 194303.
- [78] Zhao J, Li X, Wang W, et al. Membrane-type acoustic metamaterials with tunable frequency by a compact magnet[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2019, 145(5): EL400-EL404.
- [79] Li X, Zhao J, Wang W, et al. Tunable acoustic insulation characteristics of membrane-type acoustic metamaterials array with compact magnets[J]. *Applied Acoustics*, 2022, 187: 108514.
- [80] Lin G, Hu C, Cong L, et al. Design and characterization of tunable three-dimensional acoustic composite metamaterials[J]. *Pigment & Resin Technology*, 2020, 50(5): 403-411.
- [81] 顾金桃, 王晓乐, 汤又衡, 等. 提高飞机壁板低频宽带隔声的层合声学超材料[J]. *航空学报*, 2022, 43(1): 355-364.
- Gu Jintao, Wang Xiaole, Tang Youheng, et al. Laminated acoustic metamaterial for improving low-frequency broadband sound insulation of aircraft wall panels[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(1): 355-364.
- [82] Wang X, Zhao H, Luo X, et al. Membrane-constrained acoustic metamaterials for low frequency sound insulation[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(4): 041905.