

声学超材料和有源压电声学超材料的最新进展——综述

吉国胜, 约翰·胡贝尔

牛津大学工程科学系, Parks Road, Oxford, OX1 3PJ, UK

文章信息

文章历史:

2021年8月31日收稿 2021年10月23日
修订 2021年11月3日接受 2021年11
月27日在线发布

关键词:

积极的
被动的
压电声学超材料 声学
超表面

抽象的

声学超材料的结构可以产生传统材料中没有的异常反射和折射率, 在工程应用中越来越受到重视。这些人造结构具有新颖的功能, 例如负有效特性、非凡的波操纵、增强的吸声和隔音、隐身、声波聚焦和高效的能量收集。为了评价声学超材料领域的研究进展, 我们采取了一种新颖的观点, 追溯了从无源声学超材料到有源压电声学超材料的发展。本文总结了声学超材料的最新研究进展, 第一部分描述了无源声学超材料, 第二部分介绍了有源压电声学超材料和超表面。涵盖的主题包括它们的一般定义、机制、分类、结构和潜在应用。最后, 我们从实际工程的角度审视当前的技术挑战, 并讨论该领域的未来前景。

© 2021 Elsevier Ltd. 保留所有权利。

1. 介绍

Walser 对超材料进行了定义, 指出超材料的命名是为了认识并强调其改善材料性能超越传统复合材料局限性的目的 [1]。在实践中, 超材料通常是由周期性亚波长结构组成的人造材料, 其特性和功能在自然界中通常不存在 [2]。

开发超材料的最早研究工作涉及电磁学。一般来说, 定义介质中电磁场行为的基本参数是相对介电常数、相对磁导率 μ 和折射率 $n = \sqrt{\epsilon \mu}$

大于或等于 1 的原始数。Veselago 指出, 在 19 世纪中叶, 同时具有负值和 μ 的介质可能会导致电磁场中出现负折射 [3]。然而, 直到大约三十年后, 当 Pendry 创建了线介质结构 [4] 和开口环结构 [5] 以产生负介电常数和负磁导率时, 人们才知道创建负折射率材料的方法。

通过彭德里的工作, 史密斯等人提出了所谓的双重否定

具有较高工程可行性的活性超材料 [6], 并首次在实验室观察到反常负折射现象 [7]。电磁超材料的概念引入了光学 [8–10] 以及声学 [11, 12]、机械振动 [13, 14] 甚至热传导 [15–17] 等相关领域的快速发展, 其中波具有相似的物理特性。特征。

声学超材料 (AM) 是具有异常有效特性的人造材料, 可以操纵声波, 并且在过去二十年中得到了研究。表 1 总结了超材料领域, 特别是 AM 领域的研究里程碑。无源 AM 通常无法为声波提供外部能量输入。最初创建的无源亚波长超原子是为了证明高声音传输损耗 [11], 随后无源 AM 被分为亚波长超原子和周期性声学超表面, 其形式包括空间线圈结构、亥姆霍兹谐振器、膜谐振器和多孔超材料。

近年来, 活性元素开始被纳入 AM 中。例子包括压电分流、改变特性的结构变形、可控温度、压力、电场和磁场效应。有源 AM 提供了在可调频率下异常有效材料特性的机会; 具体来说, 有源压电 AM 与固态电子控制机会相结合, 具有巨大的潜力。已确定的潜在应用包括异常波操纵、非凡的吸声

* 通讯作者。

电子邮件地址: guosheng.ji@eng.ox.ac.uk (G. Ji), john.huber@eng.ox.ac.uk (J. Ji)
胡贝尔)。

¹ 主要通讯作者

表格1
超材料、AM 和有源压电 AM 领域的里程碑。

Year	作者	研究里程碑
1967	韦塞拉戈 [3]	提出了同时具有负介电常数和磁导率的异常材料的基本理论。
1996	彭德里 [4]	提出了设计负介电常数材料（“线介质”结构）的理论指南。
1999	彭德里 [5]	提出设计负磁导率材料（“开口环”结构）的理论指南。
2000	刘 [11]	设计并测试了具有负质量密度的 AM。
2001	谢尔比 [7]	实验验证了负折射现象。
2004	莫夫坎 [18]	设计并测试了具有负质量密度的膜型 AM。
2004	它[19]	理论上提出了同时具有负质量密度和体积模量的双负 AM。
2006	Fang [20]	提出并通过实验实现了具有负体积模量的亥姆霍兹谐振器链。
2009	基地 [21]	提出具有负密度的有源压电 AM。
2010	李 [22]	实验证明了双负AM的存在。
2010	阿克勒 [23]	提出具有负体积模量的有源压电 AM。
2010	阿克勒 [24]	提出具有双负特性的有源压电 AM。
2011	于 [10]	提出了广义斯涅耳定律，并通过实验证明了光学中反常反射和折射现象的存在。
2012	艾埃塔 [25]	提出了适用于平面和球形界面的更通用的斯涅尔定律。
2013	阅读[12]	基于广义斯涅耳定律的声学超表面的数值设计。
2014	阅读[26]	实验证明了散射声压场中存在反常反射现象。
2015	波帕 [27]	设计了主动声学超表面，以在不改变其物理结构的情况下实现各种异常现象。
2019	鞠 [28]	将几何曲率效应引入增材制造结构中。
2020	它[29]	设计用于三维空间反射波前调制的曲面 AM。

二维和三维空间中的化和绝缘、声聚焦和隐形，远远超出了传统材料。

AM 的发展已经从分析 [30–33] 和工程 [34–37] 的角度进行了广泛的调查，从早期发现的负面特征到其不同的功能和影响。一些新的研究方向和早期成果已得到广泛关注，包括流体中的波操纵、弹性和机械材料、石墨烯启发的AM、非互易AM、单向隔音体、软AM和主动控制AM等 [30–38]。这些综述主要强调增材制造的基本概念和应用，但没有明确概述超材料和增材制造的研究里程碑。因此，仍然有必要对空气吸声、隔热和能量收集方面最有前途的应用进行全面调查。

这些总体评估凸显了有源 AM 的广阔前景和不断加大的研究力度，这可能能够克服无源 AM 的挑战并提高其在相关应用中的有效性 [30–38]。其他研究人员回顾了有源可调AM的研究进展，其工作原理从形状变形、可控压力和流固相互作用等机械因素到电场、磁场和压电分流方法等电子因素正在考虑中 [39–41]。其中，有源压电AM引起了越来越多的研究兴趣，因此需要了解无源AM和有源压电AM之间的关系，并确定压电AM领域未来研究的潜在研究方向。因此，需要进行全面的研究，以清楚地了解与无源 AM 和有源压电 AM 相关的当前研究和工程挑战。因此，考虑到无源 AM 和有源压电 AM 的巨大潜力和电子控制能力，需要重新评估它们的研究前沿。本综述旨在提供这种联系，并详细探讨无源 AM 和有源压电 AM 之间的区别。因此，它提供了 AM 的简明概述、研究见解以及相关术语以及从无源 AM 到有源压电 AM 的发展概述。

在目前的工作中，增材制造的分类是基于其基本材料力学和物理机制。综合评估重点关注增材制造的进步，包括设计理念、材料、制造技术、结构

自然优化、各种增强的声学特性和应用。我们描述了许多问题的实际解决方案，同时提出了许多未解决的问题。此外，我们系统地回顾了快速新兴的多孔 AM 和有源压电 AM，展示了基本设计概念和结构优化方面最显着的进步，并与实际制造相结合，以实现各种非凡的声学特性。最后，该评论确定了这个有吸引力的研究领域的应用和潜在挑战。

综述的结构如下：我们首先总结了无源AM的定义、机制、总体安排和分类。本节的主要目的是提供基本背景并介绍描述后续研究发展所需的术语。然后，回顾了以压电材料作为有源元件的有源AM的功能机制，以及它们在有源声波导、波操纵器、吸声器、绝缘体和能量采集器中的潜在应用。最后，给出了无源AM和有源压电AM领域的结论和未来展望。

2. 基础知识

2. 1. 声学超材料的概念

在没有内部声源的情况下，控制声波在均匀介质内传播的基本方程是 [42]：

$$\nabla p - \frac{\rho \partial p}{\kappa \partial t} \quad (1)$$

其中 p 是声压， t 是时间， ρ 和 κ 分别是介质的质量密度和体积模量。比声阻抗 Z 控制界面处的波反射和折射幅度，定义为压力与流体速度之比： $Z = p/v$ $\rho \kappa \rho$ 其材料成分和微观结构所固有的正值。然而，由亚波长共振元原子构成的AM可以增强声音与物质的相互作用，从而产生宏观行为，就像具有非常规有效特性的连续材料一样。广义上讲，AM 是亚波长元原子的集合体，具有不寻常的均质声学特性和功能。

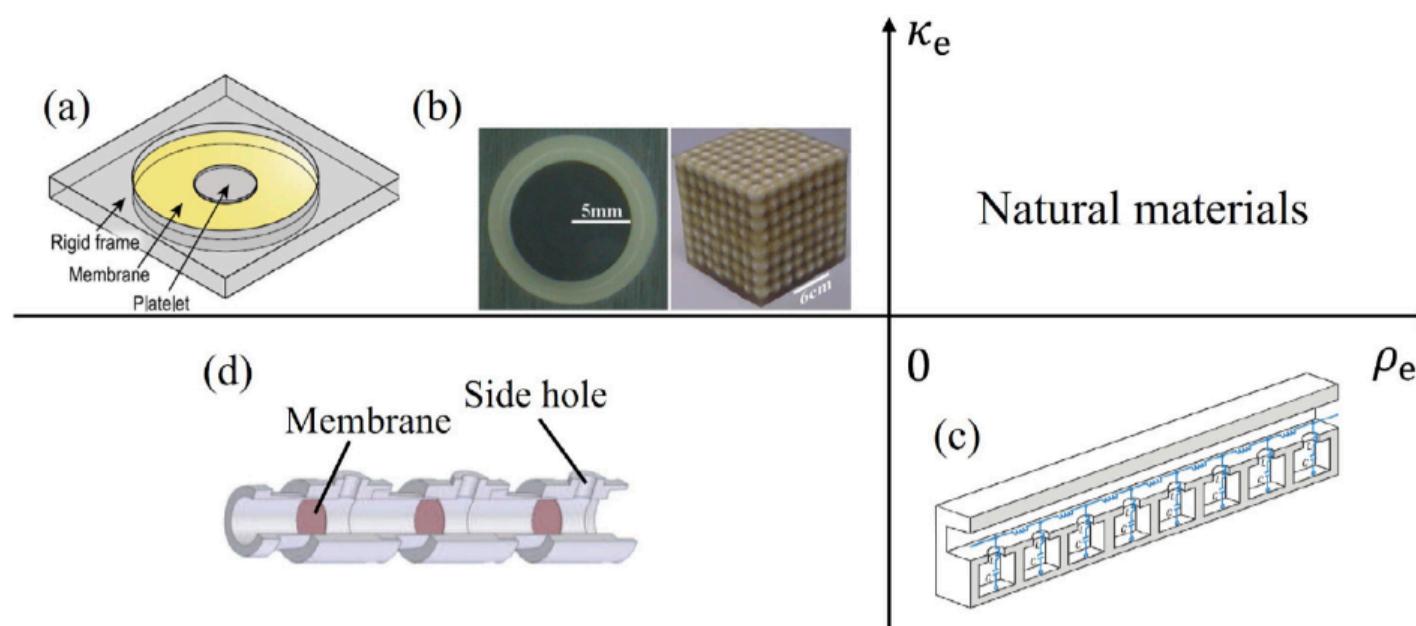


图 1. 亚波长共振元原子。 (a) 膜型元原子。经 [43] 许可转载, 版权所有 2014 Springer Nature。 (b) 局部共振声波晶体。 摘自 [11], 经美国科学促进会 (AAAS) 许可转载。 (c) 亥姆霍兹谐振器链。 经 [20] 许可转载, 版权所有 2006 Springer Nature。 (d) 双负元原子。经 [22] 许可转载图, 美国物理学会版权所有 2010。

2.2. 声学超材料机理

具有深亚波长尺寸的共振声元原子的机制依赖于产生异相响应来改变波传播的振荡器 [11, 20, 43, 43–45]。法诺干涉会导致负有效质量密度和虚数波矢量 [11, 43, 43–46]。另一种策略是设计具有共振引起的负体积模量的亚波长AM [47, 48], 例如亥姆霍兹共振器链 [20]。此外, 通过重叠负有效质量密度和负体积模量的频率范围, 可以形成双负 AMs [22, 49–51], 表现出不寻常的声学特性。

声学超表面作为具有深亚波长厚度的波前整形装置。它们不寻常的声学特性和功能通常是由亚波长空间卷曲通道 [12, 52, 53] 或高度共振的内含物引起的 [54–58]。深亚波长结构能够通过空间相位梯度位移来操纵声波, 这可以通过空间线圈元件 [12, 52, 53]、亥姆霍兹谐振器 [54–58]、谐振膜和板 [59–61] 来实现, 或多孔材料 [62–65]。例如, 空间线圈结构可以减慢AM 内部的声波速度, 以实现大折射率和所需的空间相位梯度, 扩大其工作带宽并避免共振引起的能量耗散 [12, 52, 53]。因此, 声学超表面能够控制撞击声波的相位梯度和振幅。AM 提供了一种在特定频率下操纵自然介质有效本构参数的方法, 提供了广泛的值, 包括负值。这使得 AM 能够展示各种异常现象。

2.3. 质量定律

空气传播的声波通过组件的传输损耗通常在一定的频率和密度范围内遵循质量定律。这可以表示为 [66]:

$$TL(\theta) = 10 \lg \left(\frac{\omega}{2\rho c} \right) \quad (2)$$

其中 $TL(\theta)$ 是入射角 θ 处组件的传输损耗, m 是单位面积的质量, ω 是声波角频率! ρ 和 c 分别是空气密度和空气中的声速。确定在特定频率下通过组件的传输损耗值的最重要的物理属性, 单位面积质量 m

是材料密度与其厚度的乘积。等式。图 2 预测, 一旦单位面积的质量加倍, 组件在特定频率下的传输损耗将增加 6 dB。可以通过增加厚度或选择更致密的材料来增加单位面积的质量。AM 提供了一种打破质量定律的方法, 从而在质量要求不高的情况下实现比其他材料更大的传输损耗。

3. 无源声学超材料

无源 AM 不向由入射声波激发的 AM 系统提供能量; 无需外部能量输入即可实现异常现象, 并且频率响应由结构设计固定。目前, 无源AM根据实现反常效应的人工结构可分为几类: 亚波长超原子、具有空间线圈结构的周期性声学超表面、亥姆霍兹谐振器、膜板谐振器以及多孔材料。

3.1. 亚波长元原子

亚波长元原子是人造材料的组成部分, 其晶胞周期性或随机地存在于专门设计的矩阵中。由此产生的元原子可以作为具有不寻常物理特性的均质材料影响撞击声波。根据其不同寻常的有效质量密度和体积模量, 亚波长超原子可分为三种主要类型, 如图1所示。

3.1.1. 有效质量密度为负的元原子

弹簧质量模型通常用于描述负有效质量密度元原子的机理, 该模型由具有低体积模量和密度的弹簧结构与具有高体积模量和密度的质量结构相结合。质量的相对运动由 [67, 68] 给出:

$$F = m \ddot{x}, \quad (3)$$

其中 F 和 m 分别是外部谐波激振力和有效系统质量。 \ddot{x} 是质量结构的相对加速度。有效系统质量 m 由下式确定:

$$m = m_{\text{is}} + \frac{k}{\omega - \omega'}, \quad (4)$$

其中, m_{is} 是质量结构的质量, $k = \omega m_{\text{is}}$ 是弹簧结构的体积模量, m_{as} 是弹簧的质量

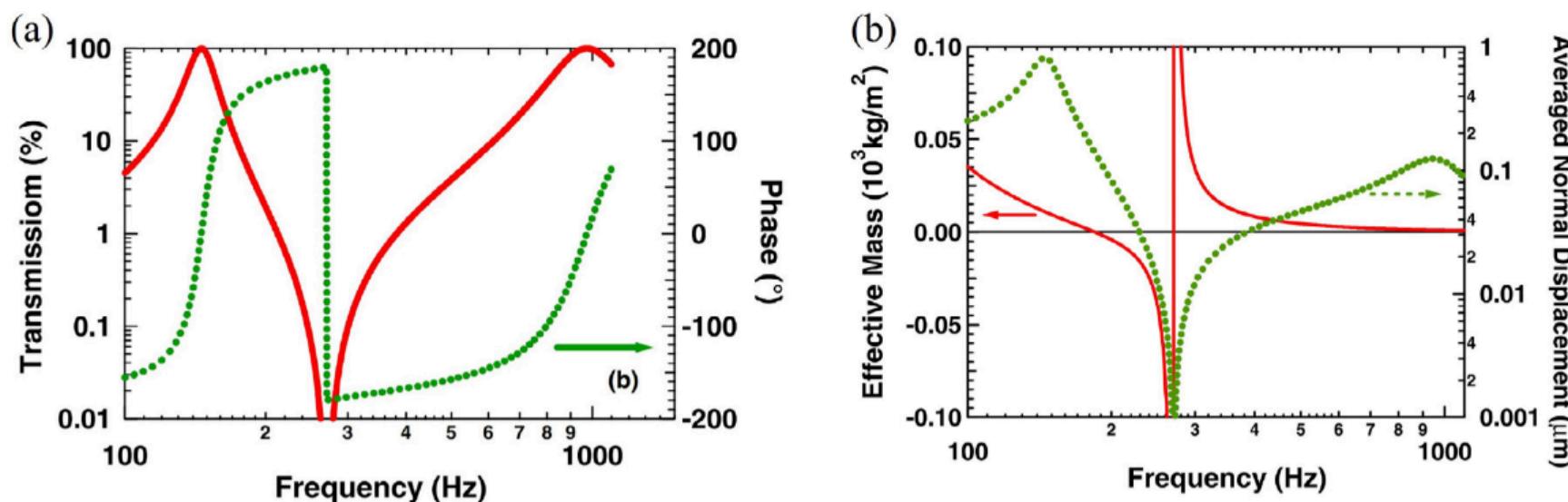


图2. (a) 膜谐振器的传输幅度 (红色曲线) 和相位 (绿色曲线), 以及通过质量密度定律预测的传输幅度 (蓝线)。(b) 谐振器的有效动态质量 (红色曲线) 和面内平均法向振动幅度 (绿色曲线)。经 [70] 许可转载图, 美国物理学会版权所有 2008。(为了解释该图例中对颜色的引用, 读者可以参考本文的网络版本。)

结构, 以及 $\omega\omega$

分别是弹簧结构和外力的角频率。因此, 有效质量密度可以定义为 $\rho = m/V$, 其中 V_i 是系统的有效体积。当驱动频率 ω 从上方接近 ω 时, 有效系统质量 m 可能变为负值, 这将导致强烈的能量耗散[68]。

对于带有质量的典型模型AM, 如图1 (a) 所示, 平面入射波下的振动控制方程变为[69]:

$$\rho h \frac{\partial W(x, y, t)}{\partial t} - \nabla W(x, y, t) = p_- - p_+ Q(t) \delta(x - x) \delta(y - y), \quad (5)$$

其中 $W(x, y, t)$ 是笛卡尔坐标系 (x, y, z) 中 z 方向上膜的面外位移, $p_- - p_+$ 是跨膜的声压差,

δ 狄拉克 δ 函数, T 是单位长度的均匀张力, t 是时间, ρ 和 h 分别是膜的密度和厚度。 $Q(t) \delta(x - x) \delta(y - y)$ 是膜和质量结构之间的界面上的搭配点处的点力的总和。

在实验室测试中, 刘等人。提出了一种由实心球芯材料作为质量结构和软硅橡胶作为弹簧结构制成的局部共振元原子, 如图1 (b) 所示。晶格尺寸比相应的声波波长小两个数量级。在工作频率下, 观察到完全的声音衰减和负的有效质量密度[11]。局部共振超原子的出现打破了所谓的质量定律, 即通过墙壁的声音传输损失与墙壁的厚度和密度以及入射波的角频率成正比。杨等人。[70]提出了第一个在中心附有质量结构的模型AM, 它可以调整振动本征频率并导致各种传输行为。图2 (a) 中最小透射系数时可以实现接近全声反射, 此时面内平均法向振动幅度最小, 谐振器的有效动质量为负, 如图2 (b) 所示。

进一步提出了具有负有效质量密度的各种弹簧质量类型的元原子, 例如铝块[71]、开环谐振器结构[18]、板型元原子[72, 73]、膜和壳-型元原子[43–45, 70, 74, 75]。元原子将声波晶体缩小到深亚波长尺寸, 其中连续态和尖锐局域态之间发生的法诺干涉起着至关重要的作用[46]。但受限于结构特点

该晶体只能在非常窄的频率范围内有效工作, 这可能远远达不到实际应用的要求。此外, 有效质量密度为负的元原子总是与质心的位移相关, 这不可避免地会给系统带来能量耗散。

3.1.2 有效体积模量为负的元原子

亚波长尺寸的元原子也可以通过引入具有共振引起的负体积模量的结构来实现, 例如亥姆霍兹共振器链。亥姆霍兹谐振器由一个带有窄颈的简单腔室组成, 可以通过振动阻力将声能转化为热量。该过程由弹簧质量模型控制, 其中窄颈部中的小流体元件充当有效振荡质量, 而腔室主体中包含的流体充当有效弹簧。如果亥姆霍兹谐振器的尺寸远小于入射声波波长, 在绝热和声压条件下, 其谐振频率由下式给出: [76]

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V l}} \quad (6)$$

其中 l 是颈部的有效长度, V 是腔室的体积, c 是流体中的声速, S 是颈部的横截面积。各种类型的声学谐振器, 例如穿孔板和微穿孔板, 通过将亥姆霍兹谐振器的初始颈部分成许多较小的颈部, 在谐振器腔内的压缩-拉伸运动方面具有相似的物理机制[77–79]。因此, 通道中的压力波动作为源, 压缩和拉伸腔内包含的液体, 从而产生与频率相关的有效体积模量。

图 1(c) 中的亥姆霍兹谐振器链可用于产生负的有效体积模量。在这些结构中, 可以通过调节谐振器的颈部和腔来分别控制声电感和电容。一维 AM 的声音传输是在水下测量的, 作为频率的函数。其有效体积模量 κ 定义为[20]:

$$\kappa(\omega) = \left(1 - \frac{G\omega}{\omega - \omega_+ iD\omega} \right), \quad (7)$$

其中 G 是几何因子, ω 是谐振角频率, i 是虚数, D 是谐振元件中的耗散损耗。在群速度与相速度反平行的实验中, 在谐振频率附近观察到负有效动态体积模量区域[20], 表明在负折射和超级透镜中的潜在应用。

受这项研究的启发，各种具有负有效体积模量的元原子，如准二维亥姆霍兹谐振器[47, 48, 48]，泡沫[80]，以及亚波长元原子的拓扑优化原子设计[81]进行了探索。然而，对于二维或三维结构，亥姆霍兹谐振器链不能在宽频率范围内有效工作。这主要是因为二维或三维亥姆霍兹谐振器链的内部结构要复杂得多，因此只能在很窄的频率范围内获得负体积模量值。

3.1.3 具有双负有效性质的间原子

一般来说，间位原子的共振模式可以作为其有效性质的指标。在所有方向上均匀辐射声音的单极源有助于压缩延伸响应和色散体积模量。相反，偶极子源可以通过将两个强度相等但极性相反的单极子放置在一起实现，两个单极子之间的距离小于声波波长。这导致中心质量的位移和分散的质量密度。通过重叠共振频谱，声元原子的有效质量密度和体积模量可以在相同的频率范围内同时色散和负值。人们已经研究了许多同时表现出负质量密度 ρ 和体积模量 κ 的元原子分析模型，例如橡胶球结构模型 [19]、闪锌矿结构模型 [82]、由分流组成的一维阵列亥姆霍兹谐振器 [83]，以及嵌入泡沫主体中的橡胶涂层水缸 [84]。

李等人。[22]在实验测试中证明了具有双负有效特性的声元原子的存在，其由间隔膜和侧孔的周期性阵列组成，如图1 (d) 所示。在此模型中，具有紧密薄膜阵列的管的有效密度 ρ 是频率 ω 的函数：

$$\rho = \rho(1 - \omega/\omega_c), \quad (8)$$

其中 ρ 是膜间流体的平均密度， ω_c 是膜阵列的截止频率。具有侧孔阵列的管的体积模量 κ 为：

$$\kappa = \kappa(1 - \omega/\omega_c), \quad (9)$$

其中 ω_c 是其截止频率， κ 是空气的体积模量。在实验室测量了元原子的透射率、有效密度和相速度，并首次同时观测到负密度和体积模量[22]。

具有双负有效特性的声元原子产生的异常现象及其潜在应用在分析、数值和实验室测试中得到了广泛的研究。例如，声波[85]和弹性波[86]的负折射可以通过新型手性微结构在相对较宽的频率范围内产生。在耦合膜结构中也观察到双重负性[87]。此外，还研究了各种声元原子的透射和反射行为，例如三维笛子模型结构[88]、单一分子结构[89]、迷宫共振结构[49, 50]、二维梳状结构[89]。如夹层结构[51]和三维空心钢管结构[90]。

需要指出的是，超原子及其共振的复杂结构主要决定了所有这些亚波长共振结构的反常性质。因此，具有负面有效特性的声学元原子只能在非常有限的频率范围内运行。对于隔音和吸收应用，元原子的用途有限，因为必须抑制与人类听觉相对应的宽频率范围 (~ 20 Hz 至 ~ 20 kHz)。

3.2. 周期性声学超表面

局部共振声元原子提供了一种生成的方法具有不寻常的有效特性和异常现象，但由于其谐振性质，工作带宽的挑战仍然存在。周期性声学超表面已被提出来避免能量耗散并拓宽工作带宽。周期性声学超表面是包含亚波长结构的功能表面，并且能够产生局部相移。声学超表面的主要功能在于其在散射声压场中操纵声波传播的独特能力。

使用广义斯涅尔定律可以很好地预测声学超表面的波操纵函数 [10, 91]：

$$n \sin \theta - n' \sin \theta' = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{d\Phi}{dx}, \quad (10)$$

其中 θ 是超表面上 x 位置处的局部相移。 n 和 n' 分别是折射介质和入射介质中的折射率。 θ 和 θ' 分别是折射角和入射角， λ 是自由空间波长。

考虑到额外折射模式的存在，以更一般的形式提出了广义折射和衍射理论之间的类比[92]。根据广义斯涅尔定律，可以通过调整局部相移梯度 $d\Phi/dx$ 来随意控制反射波或折射波的方向。例如，通过采用具有空间变化相移的二维谐振器阵列，首次在光传播中观察到反常反射和折射现象[10]，然后在声波中预计会出现类似的效果。通过创建亚波长单元的周期性阵列（例如卷绕空间结构、亥姆霍兹谐振器、膜、板和多孔材料），可以将广义斯涅尔定律扩展到声学对应物，以产生所需的相移，然后操纵声波。

3.2.1 具有空间线圈结构的声学超表面

通过使用亚波长卷曲通道，空间卷曲声学超表面产生了异常的有效特性。空间卷绕单元能够减慢和控制 AM 内部的有效声速，这有助于实现大折射率和所需的空间相位梯度。这可以拓宽工作带宽并避免谐振引起的能量耗散。例如，由八个空间线圈结构单元（图3 (a) 中给出的典型单元）构造的超薄平面声学超表面，可以在 2π 跨度上产生离散局部相移，步长为 $\pi/4$ 如图3(b) 所示[12]。通过适当选择相移轮廓和周期长度，在数值模拟中演示了反常波前现象，例如反常反射、从传播波到表面波的转换以及无平面像差透镜。随后不久，随着对广义斯涅尔定律控制的反常折射现象的观察，理论研究和实验验证也随之而来[26]。

经典的空间螺旋结构进一步发展为许多具有特定波操纵功能的几何形状，例如螺旋狭缝单元[96]、锥形迷宫结构（图3(c)）[52, 97]、角状空间-线圈结构[98]、空间线圈圆柱形结构（图3(d)）[53]、锥形波纹孔[95]、装饰有亚波长狭缝的刚性薄板[99]、三明治状空间线圈结构[100]、具有螺旋结构的螺旋通道[101, 102]、具有迷宫通道和穿孔板的多线圈超表面[103]等等。

发射的声波也可以通过具有亚波长厚的空间卷绕声学超表面来操纵。

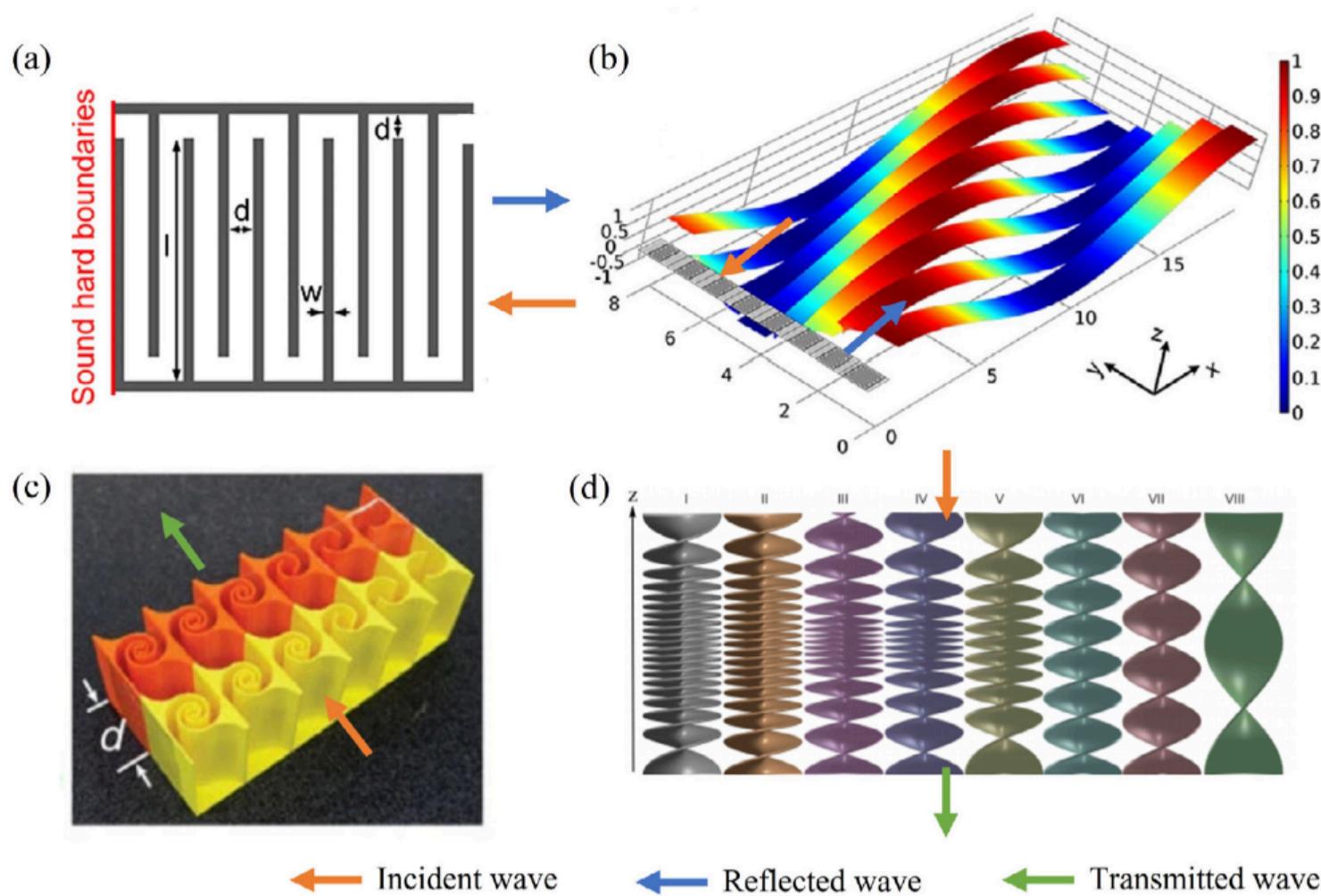


图 3. 空间卷绕结构。 (a) 典型单元的配置。经 [12] 许可转载, 版权所有 2013 Springer Nature。 (b) 各个单元的相移曲线。经 [12] 许可转载, 版权所有 2013 Springer Nature。 (c) 锥形迷宫结构。经 [52] 许可转载, 版权所有 2014 Springer Nature。

(d) 空间螺旋圆柱形结构。经 [53] 许可转载, 版权所有 2017 美国物理学会。

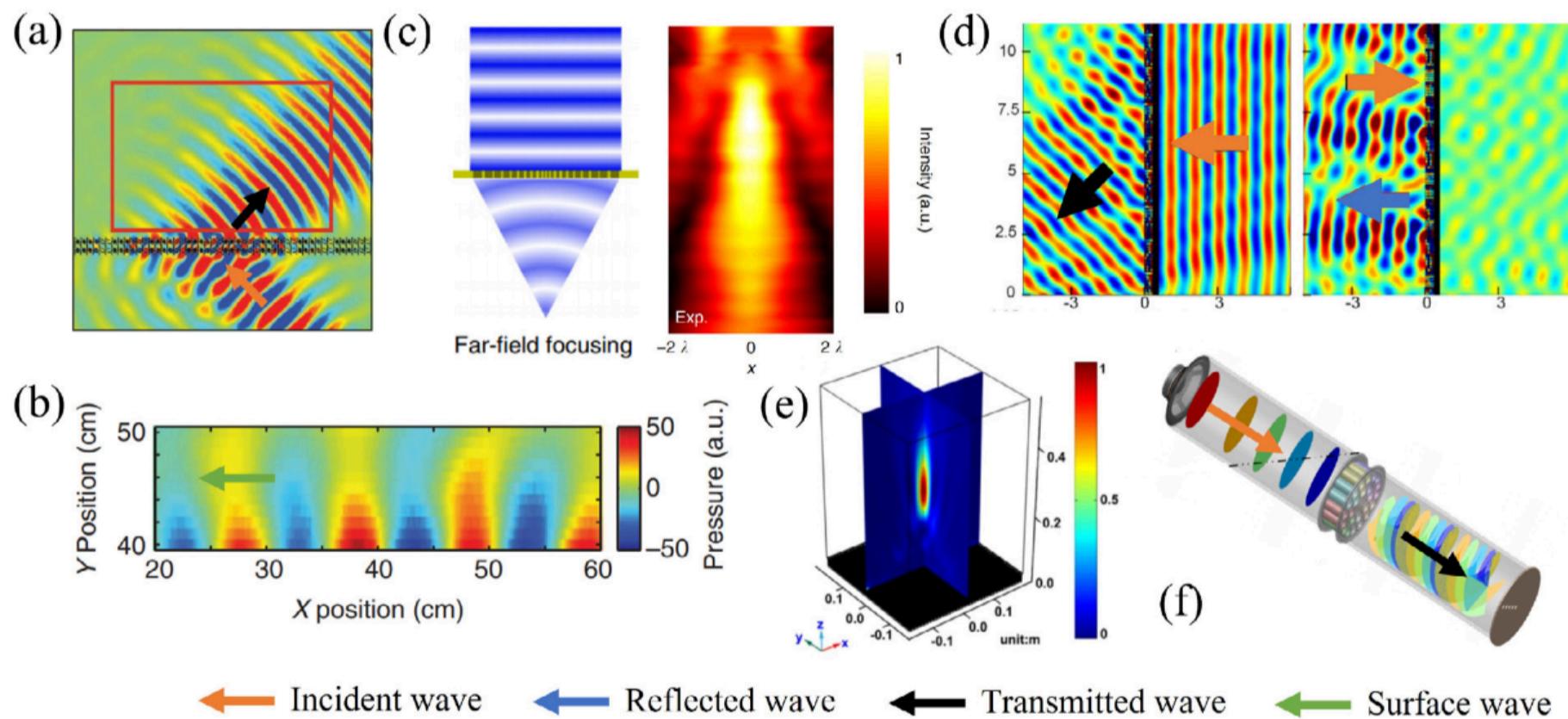


图4. 空间卷绕结构的应用。 (a) 负折射。经 [52] 许可转载, 版权所有 2014 Springer Nature。 (b) 传播到表面波的转换。经 [52] 许可转载, 版权所有 2014 Springer Nature。 (c) 平面波聚焦。经 [93] 许可转载, 版权所有 2018 Springer Nature。 (d) 单向声学超表面。经 [94] 许可转载, 版权所有 2016 Springer Nature。 (e) 三维声学聚焦。经 [95] 许可转载, 版权所有 2019 Springer Nature。 (f) 声涡流的产生。经 [53] 许可转载, 版权所有 2017 美国物理学会。

内斯[96]。使用锥形迷宫声学超表面观察到诸如波束转向(图4(a))和传播波转换为渐逝表面波(图4(b))等异常现象[52, 97]。大量研究表明, 空间卷绕声学超表面在实际应用中具有优越的性能, 包括同时调制传输波的相移和幅度[98]、声辐射模式的操纵(图4(c))[93], 其中之一双向声波传播(图4(d))[94], 三维声聚焦(图4(e))[95], 声涡产生(图4(f))[53], 声学高传输效率、超宽带频率聚焦

射程[99, 100]、宽带高吸声[104]和隐形[105]。

空间线圈结构提供了一种通过控制空间相移梯度来操纵声波的新方法。然而, 其结构复杂性以及超表面与背景介质之间的阻抗失配仍然存在挑战。其中一些挑战可以通过使用替代谐振器来解决, 例如亥姆霍兹谐振器。这种声学超表面的另一个问题是将其与其他吸声材料(例如多孔泡沫或软材料)集成, 以实现优异的吸声和隔音性能。拓扑结构

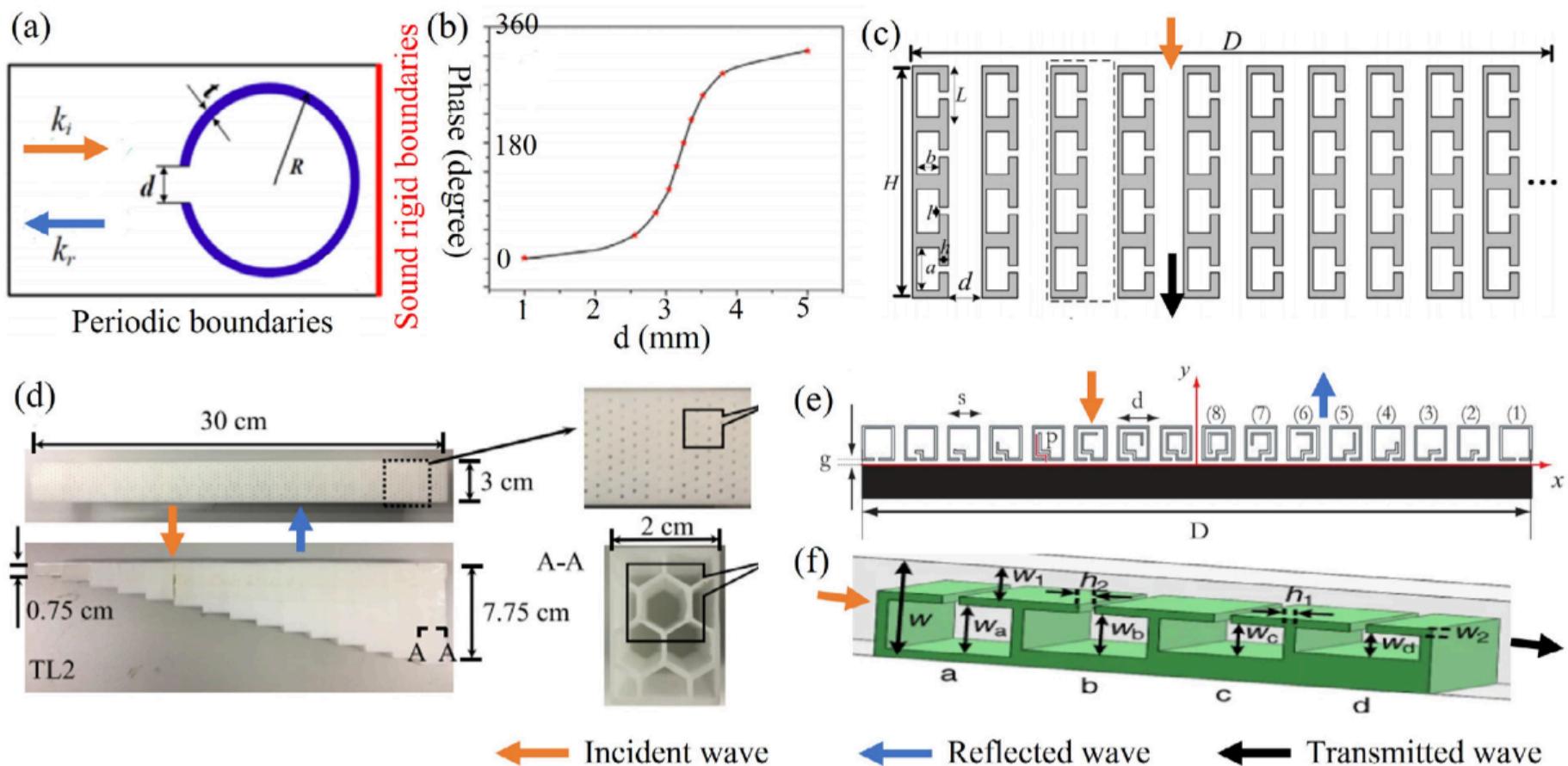


图 5. 亥姆霍兹谐振器类型的声学超表面。 (a) 亥姆霍兹谐振器的配置。经 [54] 许可转载, 版权所有 2015 IOP Publishing。 (b) 不同颈部长度的相移曲线。经 [54] 许可转载, 版权所有 2015 IOP Publishing。 (c) 具有亥姆霍兹谐振器和单缝的复杂声学超表面。经 [55] 许可转载, 版权所有 2017 Springer Nature。 (d) 具有不同的深度室的穿孔板。经 AIP Publishing 许可, 转载自 [56]。 (e) 具有不同内部线圈路径长度的亥姆霍兹谐振器。经 [57] 许可转载, 版权所有 2016 Springer Nature。 (f) 具有不同深度腔室的亥姆霍兹谐振器。经 [58] 许可转载, 版权所有 2018 Springer Nature。

具有空间线圈结构的声学超表面的优化已经建立, 有助于解决设计问题[106]。计算机分析可以对形状和拓扑进行系统优化, 以便在定义的约束下增强声学性能。因此, 拓扑优化可能会在具有空间线圈结构的声学超表面的设计中发挥越来越重要的作用。

3.2.2 带有亥姆霍兹谐振器的声学超表面

具有亥姆霍兹谐振器的声学超表面可以通过谐振器结构的定制产生所需的相移梯度。由此产生的超表面具有优异的特性, 例如宽带宽、高传输系数、匹配良好的声阻抗以及易于制造。

为了操纵反射声波, 如图5 (a) 所示, 由空心球谐振器阵列组成的声学超表面可以在反射波中产生所需的相移, 这可以通过调整颈部长度来控制 (图5 (a))。图5 (b))。这使得能够将入射声波操纵成任意角度的表面波或反射波[54, 107]。图5 (d) 中的不同深度亥姆霍兹谐振器阵列通过引入深度线性增加的腔室克服了传统超表面的窄带宽限制, 在宽带上同时具有反射波操纵和声能衰减的功能频率范围[56, 108]。在图5 (e) 中, 创建了具有不同内部盘绕路径长度[57]的亥姆霍兹谐振器, 通过引入沿声学超表面变化的反射相移来实现波束形成功能。

至于传输声波的操纵, acous-

图 5 (c) 中由具有四个亥姆霍兹谐振器和单个狭缝的金属单元制成的 tic 超表面以及图 5 (f) 中的各种腔深度可实现宽的有效带宽、出色的阻抗匹配和高传输效率[55, 58, 109]。分析、数值和实验结果表明, 使用亥姆霍兹谐振器可以实现几种类型的反常波前操纵, 例如非衍射贝塞尔光束[55]、隐身[110, 111]、传播到表面波转换[54]

双各向异性波前变换[112, 113], 以及二维和三维空间中的圆柱到平面波转换[55] [29]。

近年来, 制造技术取得了巨大进步, 各种增材制造技术降低了声学超表面的结构尺寸和制造成本, 并提高了制造精度, 从而能够制造一系列复杂结构[54, 55, 110, 113]。由此产生的结构设计自由度使带有亥姆霍兹谐振器的 AM 能够满足更广泛的外部要求, 从而扩展了应用范围。然而, 这种声学超表面的主要缺点仍然存在, 即难以在宽频率范围内实现实际有用的效果。

3.2.3 具有膜和板谐振器的声学超表面

膜和板谐振器通过不同的机制实现与亥姆霍兹谐振器类似的效果。通过调节施加在膜上的张力[59]或附着质量的重量和形状, 如图6 (a) 所示, 膜型谐振器可以在一个周期长度内产生所需的相移梯度。对于板型谐振器, 板刚度[114]在操纵反射相移方面起着至关重要的作用。

为了操纵透射声波前, 由具有不同侧缝厚度的膜谐振器组成的膜型声学超表面 (如图6 (b) 所示) 可以产生覆盖整个 2π 跨度的透射相移, 如图6 (b) 所示。6 (c) [60]。因此, 在数值模拟和实验中可以观察到异常现象, 包括异常声音传输、声自弯曲束、传播到表面波转换和声聚焦[59–61]。此外, 还构建了一个双膜声学超表面, 其气腔由两个弹性膜密封, 如图6 (d) 所示[61]。该研究表明, 通过调节膜宽度可以实现从0到 2π 的传输相移的控制, 并且可以将传播波转换为表面波。有趣的是, 一种嵌入铜珠的新型薄纤维膜,

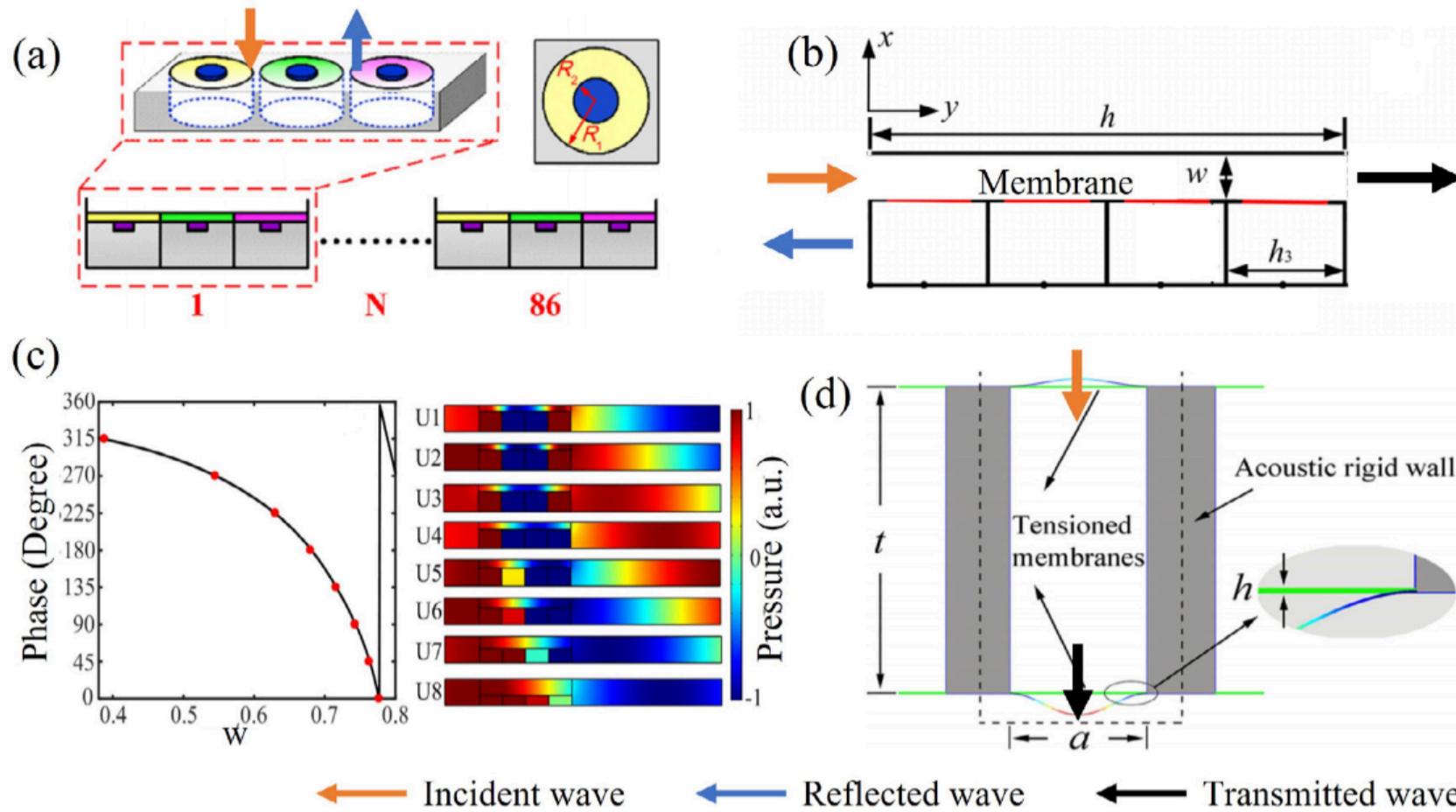


图 6. 声学超表面的膜谐振器类型。 (a) 膜谐振器的配置。经 AIP Publishing 许可, 转载自 [59]。 (b) 声学超表面的膜类型。经 [60] 许可转载, 版权所有 2018 Springer Nature。 (c) 不同狭缝厚度的传输相移分布。 (d) 双膜谐振器。经 [61] 许可转载, 版权所有 2015 Springer Nature。

物理上相当于交联弹簧质量谐振器, 还可以实现各种异常功能, 例如声涡流生成、聚焦和超分辨率[115]。

一项挑战是克服膜和板谐振器声学超表面固有的几何复杂性和脆弱性。另一种有吸引力的选择是将几种经典材料 (例如多孔泡沫、气隙和谐振器) 与这种声学超表面结合起来[116–118]。正在进行的研究旨在使用先进的制造方法将声学超表面理念与经典材料结合起来。这使得新颖的功能组合成为可能, 例如超薄和超轻结构, 或可调节的正/负体积模量和有效密度。

3.2.4 多孔材料声学超表面

多孔材料由充满流体相的固相骨架组成, 可以通过固体结构元件与流体相之间的摩擦将声能转化为热量[119]。多孔材料声学特性的分析预测很复杂, 因为它们的内部微观结构复杂且通常是随机的[120]。结果, 开发了几种经验模型, 例如 Delany-Bazley 模型 [121] 和 Johnson-Champoux-Allard (JCA) 模型 [122–124]。这些在宏观声学特性 (例如特征阻抗和波数) 与微观结构参数 (例如孔隙率、流阻率、弯曲度、粘性特征长度和热特征长度) 之间建立联系。在JCA模型中, 刚性框架多孔泡沫的有效体积模量K和密度 ρ 可表示为:

$$K = \frac{\text{功率/频率}}{\gamma - \left(\frac{\gamma}{1 + \frac{8\eta}{1 + \frac{2\beta_2}{\sigma} \omega \rho_0}} \right)^2}, \quad (11)$$

$$\rho = \frac{\beta \rho}{\varphi} \left[1 + \frac{\sigma \varphi}{i \omega \rho \beta} \left(1 + \frac{4 \text{伊贝罗}}{\sigma \Lambda \varphi} \right) \right], \quad (12)$$

式中, P和 ω 分别为标准大气压和角频率; η 为流体相的粘度;

γ 和 ρ 比热比和密度; β 是普朗特数。JCA模型中的五个主要微观结构参数是多孔材料的开孔率 φ 、流阻率 σ 、弯曲度 β 、粘性特征长度 Λ 和热特征长度 Λ 。

多孔声学超表面已被提出来改善薄多孔材料的声学特性, 其中声能被捕获并消散在多孔元件内部[125–132]。与由膜谐振器、亥姆霍兹谐振器和空间线圈结构制成的声学超表面相比, 这拓宽了有效带宽。多孔泡沫内部具有复杂刚性几何形状的多孔声学超表面在深亚波长厚度下表现出优异的吸声和声音传输损失特性, 例如由刚性周期性矩形不规则性支撑的多孔层[133]、带有精心插入的刚性隔板的多孔层 (图7(d)) [65], 以及刚性共振夹杂物 [125]。

多孔声学超表面提供了一种基于广义斯涅耳定律来操纵声波传播并将传播波转换为表面波的方法。一个周期长度上所需的相移可以通过修改多孔元件的几何参数来获得, 包括多孔泡沫内部迷宫般的刚性几何形状 (图7(a)) [62]、纤维直径和材料孔隙率 (图7(b)) [63, 135], 嵌入式刚性隔板的长度 (图7(c) 和 7(d)) [65, 134], 以及层厚度和宽度 (图7(e)) [64, 136]。在散射声压场中观察到包含高阶波模的反常折射或反射现象[63]。通过调整周期长度, 高阶传播波模可以转换为倏逝表面波[62, 64], 显著改善宽频带内的吸声系数和传输损耗特性。

多孔泡沫内部复杂的插入物或结构可能通过拓扑优化进行细化以产生最先进的几何配置[106]。多孔声学超表面概念可以扩展到各种母材料, 尤其是软材料或气凝胶, 从而减小它们的尺寸和重量[137, 138]。最近的研究还强调声学超表面的制造以及声学的控制

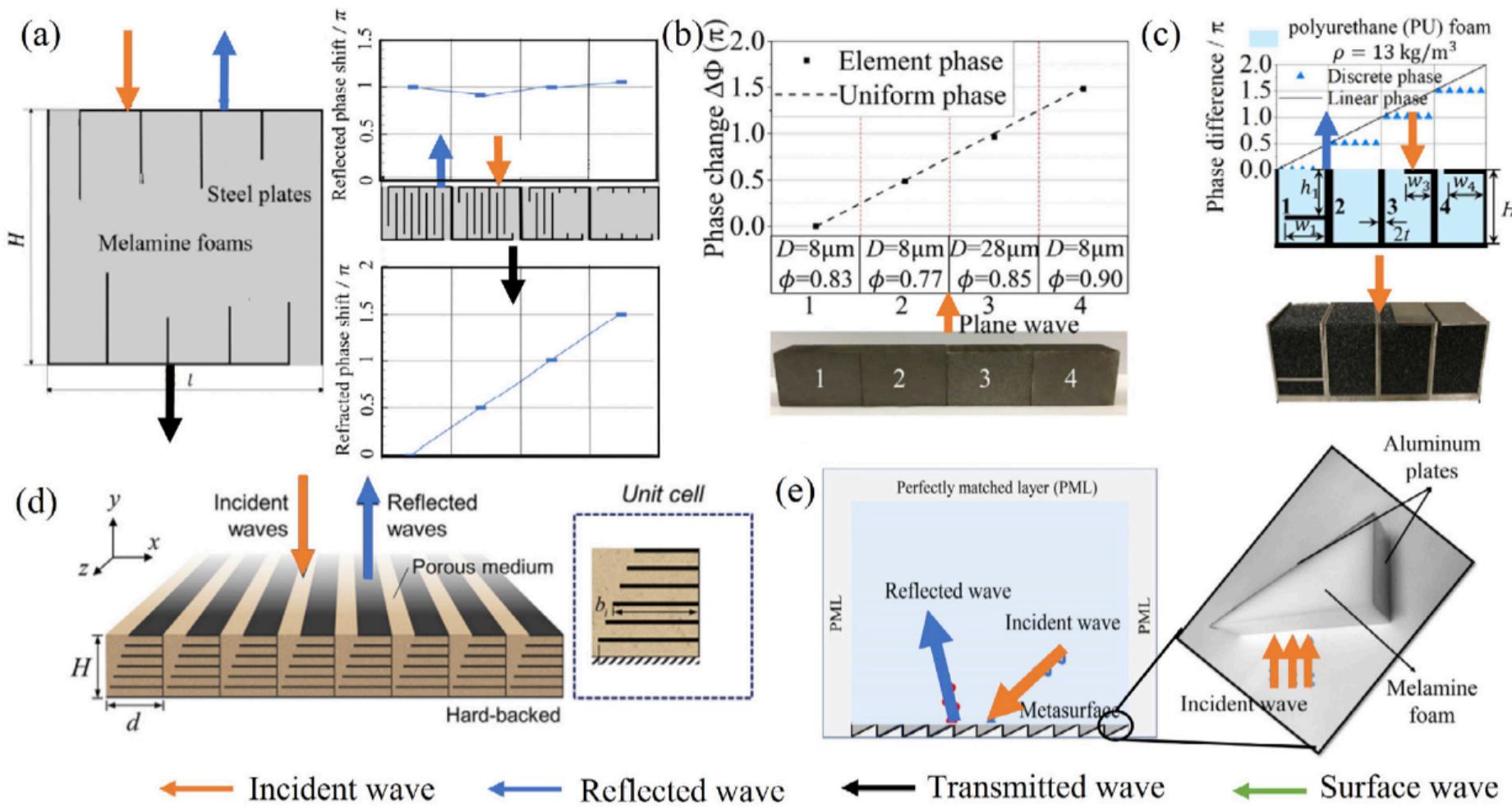


图 7. 多孔声学超表面。(a) 典型多孔超表面的结构及其相移。经 AIP Publishing 许可, 转载自 [62]。(b) 具有各种纤维直径和孔隙率的金属基纤维材料。经 AIP Publishing 许可, 转载自 [63]。(c) 具有嵌入式刚性隔板的多孔超表面, 转载自[134], 版权所有 2019, 经爱思唯尔许可。(d) 具有精心插入的刚性隔板的多孔层。经 [65] 许可转载, 版权所有 2016 IOP Publishing。(e) 倒楔形多孔超表面。转载自 [64], 版权所有 2020, 经爱思唯尔许可。

特性。这提供了从理论或纯科学的研究到实际应用的桥梁 [139, 140]。

4. 有源压电声学超材料

在 AM 的上下文中, 术语“主动”通常是指具有可在使用中重新配置或可与声波交换能量(例如提取电能或提供能量输入)的组件的 AM。有源AM的有效频率范围和特性可以通过多种方法进行调整, 包括压电分流方法[141]、流体-结构相互作用[142]、机械变形[29, 101, 143, 144]、可控温度[145, 146]、电场[147, 148]、磁场[149, 150]、压力[146]和自适应连接[151], 用于多功能应用。具体来说, 我们有兴趣回顾压电材料主动 AM 的当前研究前沿, 因为它们具有巨大的潜力以及电子控制的机会。

4.1. 物理机制

4.1.1. 压电

压电材料是在外部机械应力的作用下积累表面电荷的固体。压电效应由机械场和电场之间的线性相互作用定义, 并且由于某些晶体材料缺乏反演对称性而产生。逆压电效应, 即响应于施加的电场而产生机械应变, 也发生在所有压电材料中[141]。采用压电材料的有源AM由机械谐振器和分流到外部电路的压电元件组成, 可以在机械或电谐振附近产生局部谐振带隙。与无源 AM 相比, 这些机电混合谐振器的主要优点是允许可调的有效质量和刚度特性。

一维[152]和二维[153]局部谐振压电AM的有效刚度是利用 Kirchhoff-Love 板理论和汉密尔顿原理推导出来的。

Akl 和 Baz 通过分析和实验室测试对采用压电材料的有源 AM 进行了开创性研究, 特别是对于采用压电膜作为传感器和执行器的复合声谐振器 [21, 23, 24, 154 – 158]。压电材料也已在增材制造中用于驱动机械变形, 例如弯曲阻抗控制和波传播定制。此外, 通过将压电材料引入其他无源AM中, 可以通过外部电子电路在某些频段上实时操纵有效参数, 包括刚度、体积模量和密度。尽管有源 AM 的压电材料实现受益于固有的自传感特性, 但大多数压电材料的脆性和高体积模量在实践中存在很大的困难。

4.1.2. 声电相互作用

压电体中的声电波相互作用包括三种不同的现象: 增益、声电效应和非线性混合[159]。这里简要介绍了声电相互作用的基本类型, 特别是压电 AM 中的声电相互作用。

声电效应是指声波通过压电材料传播时发生的相互作用[160]。穿过压电层厚度方向的声波会产生相关的电场, 从而改变内部电荷分布[161]。这可以释放捕获的电荷, 从而在相邻电极之间产生电信号[162]。声电相互作用的研究表明, 压电层中行进的声波可以通过电子散射而衰减[159, 161, 163]。相反, 能量可以从移动的电子转移到声波, 从而增强声子的能量。一般来说, 当载流子漂移速度超过声速时, 平行波分量通过从电子到声子的能量转移而增强, 而反平行波分量则增强。

分量被电子散射抑制[159, 163]。特别是对于有源压电AM来说，平行波分量通过从电子到声子的能量转移而增强，当外部电路跨压电层上的表面电极连接时，电流流过外部电路，由于声电相互作用而导致功率损失[161]。当声波通过压电层传播时，也会发生非线性声电相互作用[161][164, 165]。声场和振动压电板之间的谐波耦合产生强耦合电场和具有周期性电势的空间电荷波。通过设置平行于波传播方向的电场来增加电荷密度，并且可以将功率从声波传输到电子，导致声能衰减[159, 163]。声电效应似乎并未广泛用于产生 AM 的异常行为 [166–168]。

4.2. 分类

本节的目的是根据有源压电 AM 的可控体积模量和有效密度对其进行分类。这些异常的物理反应是开发新型活性材料和结构的理想目标。

4.2.1 有效密度可调的有源压电 AM

有源压电 AM 能够在比组件材料密度高和低几个数量级的范围内调节有效密度，甚至可以达到负值。更具体地说，有源 AM 中的压电元件分流到外部电子元件，允许动态调整有效密度，从而提高工作带宽。可调谐性主要来自声电耦合的使用，由此可以通过与压电材料上的电极相连的外部电路的变化来控制压电元件的有效声学特性。结果，可以获得反常的声学特性和现象，例如负密度和折射。

一维有源压电 AM 的概念是基于多单元流体腔阵列提出的，压电膜附着在每个腔的一侧 [21]。然后可以通过并联电感、无源电容和控制电压来主动调节有效密度。压电薄膜在控制各个腔体的刚度方面发挥着关键作用，从而在广泛的工作频率范围内实现频率相关的动态密度。

由充满水的密封圆柱形管道组成的原型

由两个压电双压电晶片组成，如图 1 和 2 所示。8(a) 和 8(b) 被提议在数值上和实验室测试中研究传输损耗和声阻抗 [154, 169]。结果表明，压电双压电晶片的刚度可以通过电信号的正反馈来控制电池的均匀有效密度。正反馈控制回路可以通过将一个双压电晶片设置为传感器来测量入射波，将另一个双压电晶片设置为控制执行器来实现，该控制执行器产生与所需有效密度一致的振动响应。然后，可以获得五倍或更多的动态密度变化[155]。此外，考虑到外部扰动的存在，采用扰动抑制控制策略来完成闭环控制，该策略可以随着沿流体腔和跨流体腔的变化的增加或减少来调整有效密度[157]。

两侧沉积有压电材料的膜和板已成功用于通过外部电路调整其有效特性。在夹紧的铅膜两侧使用锆钛酸铅 (PZT) 环，二维有源压电 AM 展示了可编程各向异性密度，包括负密度和正密度

值[158]。在实验室中实现了通过在黄铜板两侧沉积 PZT 层制成的类似板式压电 AM (图 8(c))，证实了可控的有效密度 [156]。由超薄铝箔与可调谐压电贴片粘合组成的类似装置打破了声音衰减的质量定律[172]；这归因于通过调整外部压电电路实现的高有效动态质量密度。

4.2.2 具有可调体积模量的有源压电 AM

压电元件可以像无源 AM 一样集成到亥姆霍兹谐振器链中。压电元件通过适当的控制策略分流到外部电路，以调整其有效体积模量。该策略可以扩展体积模量和结构刚度的空间和光谱可控性。

通过将带有压电边界的侧面亥姆霍兹谐振器引入声腔，首次在水中实现了具有可编程有效体积模量的有源压电AM，如图8(d) 所示。使用分析方法预测由压电材料制成的有源 AM 的有效体积模量 [23, 170]。通过在声腔的另一侧再引入一个压电亥姆霍兹谐振器，开发了一种具有可调谐有效体积模量的类似有源压电 AM，从而提高了宽频带内的可调谐性。压电隔膜的刚度可以通过调整外部电压来控制，从而产生负的有效体积模量 [173]。

4.2.3 具有双可调特性的有源压电 AM

压电材料可以被引入到有源压电AM中的膜或亥姆霍兹谐振器结构中，从而可以通过外部电子控制来调节它们的有效密度和体积模量。与无源 AM 一样，可以通过周期性侧面排列的亥姆霍兹谐振器和弹性层来实现双负特性。用压电贴片支持这些并调整压电元件的外部控制信号可以控制有源压电 AM 的声速和双负性 [24]。

基于这一概念，**人们提出了具有同时可调的有效密度和体积模量的有源压电AM。**无花果。图8(e)和8(f)示出了通过将压电面板放置在充满水的圆柱体的表面或侧面上来实现该功能的一种方法。然后，电子控制可以调整有源元件的刚度，从而修改均质化的效果体积模量和密度[24]。一种具有双负特性的创新型有源压电 AM 是通过使用传感器来感应入射声波和由外部电子电路驱动的 PZT 膜来实现主动控制而制成的。这种设计允许通过调整外部电子设备来控制有效材料特性，从而在大范围的正值和负值范围内实现可调的有效质量密度，同时体积模量几乎保持恒定，反之亦然。负折射和可调谐吸收特性的主动操纵是应用的例子[174]。压电膜还可以与两个亥姆霍兹腔耦合形成单向装置，如图8(g) 所示。通过电子控制，这种有源压电结构在相对较宽的频率范围内提供可调谐的局部声学响应。所需的相位延迟可以在阵列中建立，从而操纵传输平面波的方向 [27, 171]。

力学、材料、传感和控制的融合

压电 AM 的应用提出了复杂的设计挑战。许多研究人员已经解决了设计问题[27, 153, 175 – 179]。有源压电 AM 具有更多的设计变量和功能目标。在此背景下，

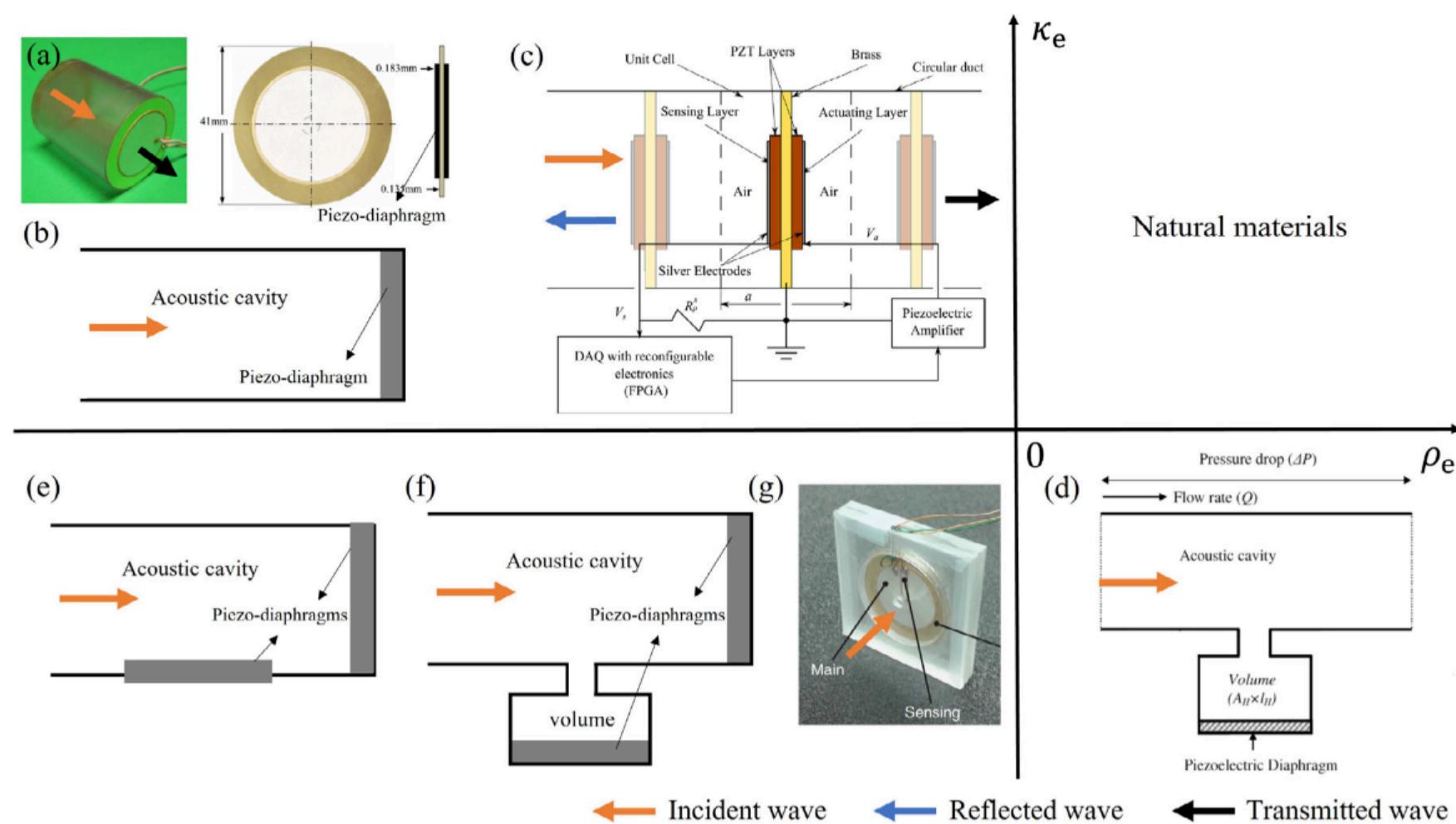


图 8. 采用压电材料的有源 AM。(a) 具有可编程负有效密度的膜。经 AIP Publishing 许可, 转载自 [154]。(b) 具有可编程有效密度的 AM。(c) 具有可编程有效密度的板式 AM。经 AIP Publishing 许可, 转载自 [156]。(d) 具有可编程体积模量的 AM。经 [170] 许可转载, 版权所有 2011 IOP Publishing。(e) 双负 AMs, 在充满水的圆柱体表面带有压电面板。(f) 双负 AMs, 在充满水的圆柱体的侧壁上带有压电板。(g) 非互易和高度非线性有源 AM。

经 [171] 许可转载, 版权所有 2014 Springer Nature。

机器学习方法可以协助数据分析以发现最佳解决方案 [180, 181]。除了这里列出的技术挑战之外, 实现这一长期愿景的一个要求是在材料科学、机械和电气工程、制造和其他领域进行创新合作。

4.3. 应用领域

通过有源压电 AM 可以获得非凡的声学特性, 从而带来多种好处, 包括新型超轻和超薄结构、负声反射和折射、可控和可调的有效体积模量和密度、能量收集、和降噪。此外, 有源压电 AM 提供了一种仅使用具有不同外部控制电路的声学器件即可实现多种功能的方法, 例如反常反射、折射和聚焦、声音隔离和声学隐身。

4.3.1 波浪操纵

将声波前调整为所需的方向或形状在无源 AM 领域引起了极大的关注。该功能依赖于惠更斯-菲涅耳原理 [93], 其中声场可以由有源压电 AM 生成的球形小波之和形成。

通过在附有钢块的低密度聚乙烯膜两侧沉积 PZT 环, 制备了具有超薄混合膜的有源压电 AM。通过实时调节外部静态电压可以实现可调节的声波传输相移。相移机制依赖于膜的张力、刚度和质量的变化, 可以使用压电层来操纵这些变化 [182]。为了控制反射声波, 图 9(a) 中开发了一种具有压电换能器和铅层的类似有源 AM [183]。异常的透射和反射现象, 包括声学隐身 (图9(c))、波

操纵 (图9(d)) 和自弯曲梁 (图9(e)) 可以通过电气方式实现, 而不需要不同的机械配置 [182, 183]。对于表面声波, 从入射表面波到体剪切波的反常波转换也可以通过利用压电单元来主动操纵 [184]。

可调谐声波导通常包括具有周期性圆柱形短截线的薄板和一系列具有外部电路的压电换能器, 如图9(f) [141]所示。压电换能器的谐振特性导致在特定频率下产生强烈响应, 从而实现波模式转换等异常现象。一般来说, 采用压电材料的有源 AM 可以设计出能够用单个设备执行一系列波操纵功能的多功能结构 [141, 183–187]。

4.3.2 能量收集

声能采集器是将声能转化为电能的装置。压电是收集声能的典型方法之一, 其中能量转换效率很大程度上取决于压电材料的弹性、压电和介电特性。天然块体材料受到其固有物理特性的限制, 但有源压电 AM 提供了一种将材料特性扩展到通常无法获得的值的方法, 例如负刚度、密度和折射率。通过将有源压电 AM 引入声能收集装置, 其异常的物理特性带来了进一步提高能量转换效率的创新机制。人们提出了使用压电 AM 来增强能量收集的两种主要方法: 声能集中和共振效应。

第一种方法是限制, 可以通过在元原子的二维晶格结构中引入亚波长缺陷来实现 [188, 198–201]。如图所示。如图10(a)和10(b)所示, 当入射声波撞击 AM 时, 声能可以被限制在亚波长缺陷中。然后是压电

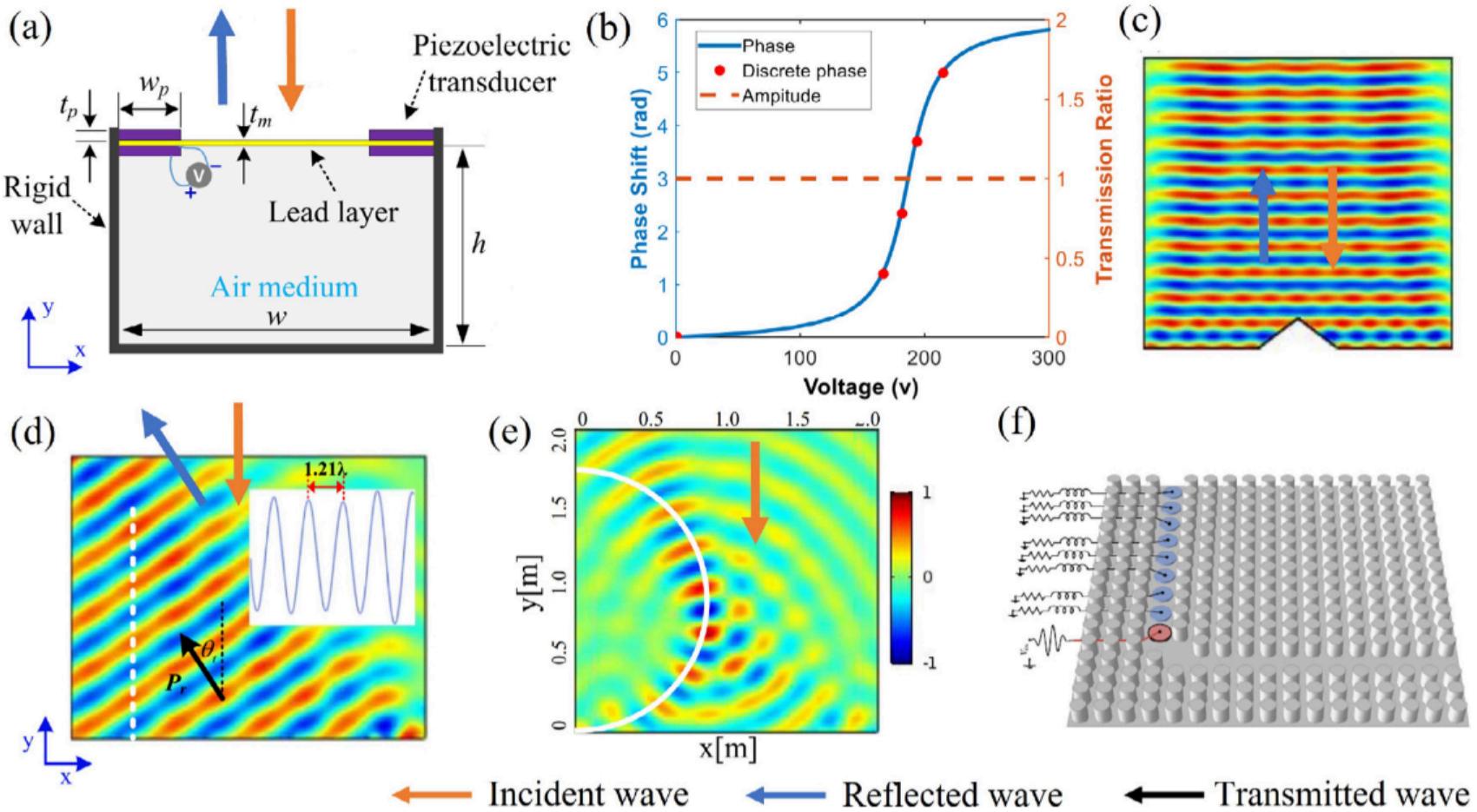


图 9. 有源压电 AM 在波操纵中的应用。 (a) 薄膜型有源压电 AM。经 [183] 许可转载, 版权所有 2020 IOP Publishing。 (b) 相移和相应的静态电压。经 [183] 许可转载, 版权所有 2020 IOP Publishing。 (c) 声学隐身, 经 [183] 许可转载, 版权所有 2020 IOP Publishing。 (d) 异常波操纵。经 [183] 许可转载, 版权所有 2020 IOP Publishing。 (e) 非近轴光束生成。经 [183] 许可转载, 版权所有 2020 IOP Publishing。 (f) 可调谐声波导。经 AIP Publishing 许可, 转载自 [141]。

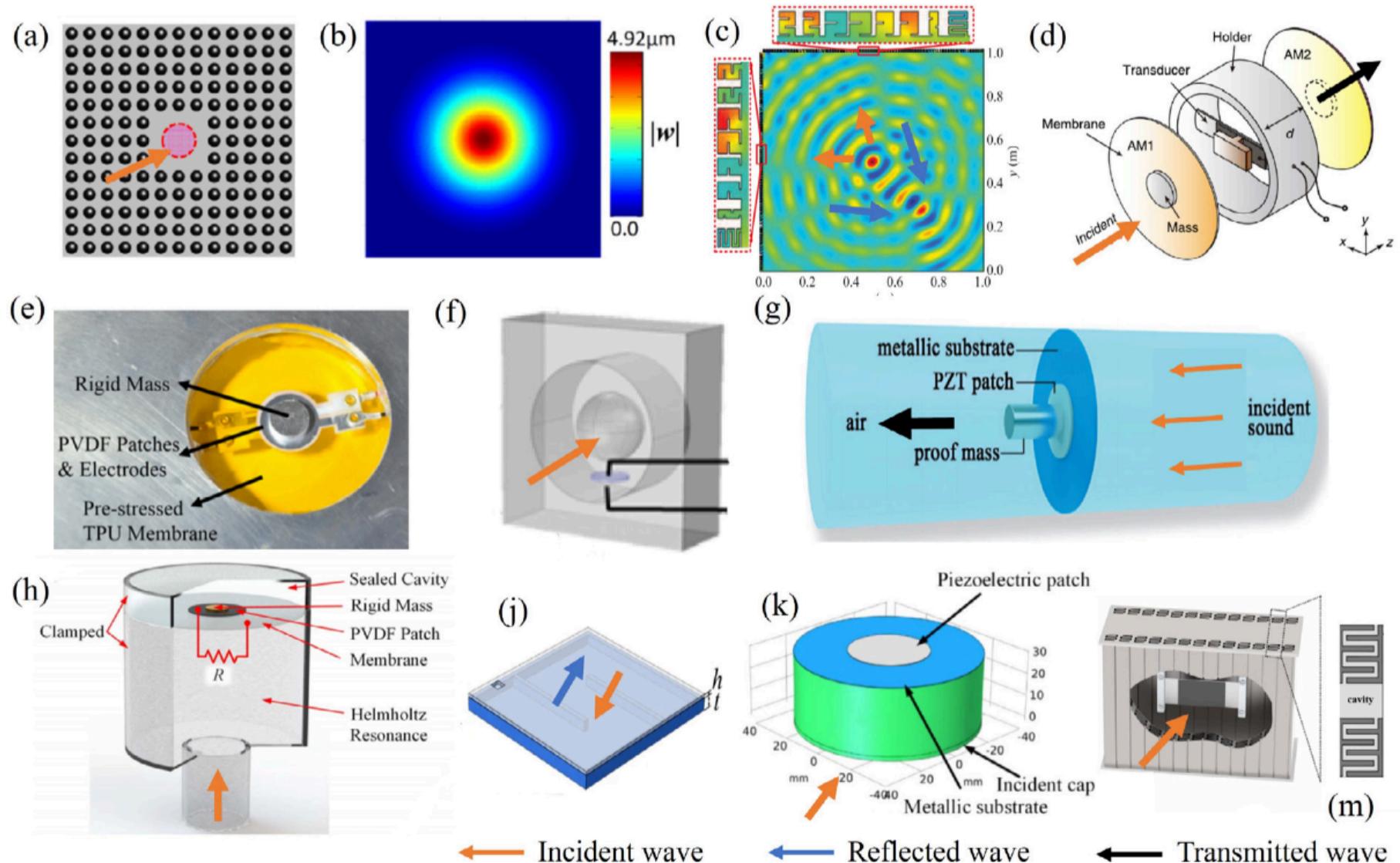


图 10. 利用具有压电效应的 AM 的声能收集器。 (a) 具有亚波长缺陷的声学超表面。经 [188] 许可转载, 版权所有 2017 IOP Publishing。 (b) 声能集中在亚波长缺陷处。经 [188] 许可转载, 版权所有 2017 IOP Publishing。 (c) 通过被动式迷宫式 AM 收集声能。经 [189] 许可转载图, 美国物理学会版权所有 2017。 (d) AM 由两层膜密封的空腔组成。经 [190] 许可转载, 版权所有 2017 IOP Publishing。 (e) 重新拉伸膜的 AM。经 [191] 许可转载, 版权所有 2016 IOP Publishing。 (f) AM 由矩形框架、圆柱形矩阵和重核心组成。经 AIP Publishing 许可, 转载自 [192]。 (g) 金属基膜类型的 AM。经 [193] 许可转载, 版权所有 2016 IOP Publishing。 (h) 亥姆霍兹谐振器内带有薄膜的 AM。经 [194] 许可转载, 版权所有 2018 IOP Publishing。 (j) 具有狭窄通道的折叠结构超表面。经 [195] 许可转载, 版权所有 2019 Springer Nature。 (k) 紧凑型声能收集器。经 [196] 许可转载, 版权所有 2020 IOP Publishing。 (m) 双壁迷宫结构。

表2
AM 在压电能量收集中的应用总结 (NG: 未给出)。

参考	装置尺寸/cm	声压级/分频率/Hz	电压/V	输出功率/μW	I	能量密度/μWcm
齐 [198]	18	100	2257.5	1.3	8.8	0.54
欧迪奇 [188]	23	100	520	0.45	18	0.78
齐[202]OF		NG	3430	4	12	NG
太阳 [197] 的		100	600	0.2585	0.345	NG
太阳 [202] 251		100	183	NG	7.3	0.029
元[208]200		100	341	NG	66.7	0.33
元 [193]	98	114	155	9	210	2.14
Zhang [194]	155	94	453	0.413	3.22	0.02
金 [195] OF		100	1303	4.4	8.6	NG
埃格巴里 [206] OF		100	107	NG	44	NG
在[200]中	36	120	3086	0.291	28	0.77
元 [196]	41	100	140	NG	8.1	0.19

可以将 tric 贴片放置在缺陷位置以收集声能。压电AM和声波之间的相互作用可以通过忽略压电元件的质量和刚度来进行分析描述[188]。这表明可以通过改变元原子的性质来调整工作频率。为了提高能量转换效率，该模型检查了不同尺寸和类型的亚波长缺陷。另一种方法是使用声学超表面将入射声能集中在空间点，然后通过压电材料收集聚焦的声能[189, 202 – 204]。利用具有迷宫结构的无源声学超表面将入射声波聚焦在空间点，在该空间点放置压电双压电晶片来收集声能，如图10 (c) 所示。数值结果表明，随着声学超表面的使用，压电双压电晶片获得的输出电压和功率显着增加[202, 203]。

能量收集的第二种方法是将压电材料嵌入到具有深亚波长尺寸的 AM 中，以产生低频入射声波 [190 – 197, 205 – 210]。通过将基于梁的 PZT 换能器放置在由两个附有质量的膜密封的空腔内，可以显着增加收集的声能，如图 10 (d) 所示。当 PZT 换能器的第一共振接近膜型元原子的共振时，实验和数值模拟中都发现了最大声压放大和能量收集的显着增强[190]。类似地，两侧附有两个刚性质量片的预拉伸聚氨酯膜（图10 (e)）使用压电贴片表现出能量收集能力[191]。声弹性AM由矩形铝框架和带有巨大球形核心的圆柱形矩阵组成，通过矩阵内部的压电晶片将捕获的应变能转换为电能，如图10 (f) 所示。该装置可以建模为传统的弹簧质量系统，其中核心质量、压电晶片的放置和耦合谐振效应决定能量收集效率[192, 209, 210]。在低频处，双壁迷宫式 AM 获得了显着的声音放大，如图 10(m) 所示。与典型的双压电晶片板相比，AM结构和压电双压电晶片板之间的耦合显着增加了输出电压[197]。

人们已经探索了许多有源压电 AM 结构来提高低频输出功率，同时缩小设备尺寸。典型的优化包括改变膜材料（图10 (g)）[193]，包括亥姆霍兹谐振器（图10 (h)）[194, 205]，构建具有窄通道的曲折结构（图10 (j)）[195]，并制造带有粘合压电片的声谐振器（图10 (k)）[196, 206 – 208]

表 2 列出了使用具有压电效应的有源 AM 的声能采集器的性能摘要。可以看出，实现可调谐性和宽带宽、以及良好的能量转换效率和紧凑的设备尺寸仍然具有挑战性。通过引入有源压电AM，可以克服传统压电材料在材料特性、器件尺寸和耦合效率方面的一些限制。这使得能够开发能够进行波操纵、能量收集和降噪的多功能有源压电AM结构。

4.3.3 降噪

在过去的二十年中，无源 AM 作为声学衬里在所需的频率范围内表现出了出色的声学性能，实现了增强的传输损耗并打破了质量定律。然而，有效带宽、效率和设备尺寸之间的权衡仍然存在挑战。通过将有源压电元件集成到无源AM中，例如空间线圈结构、亥姆霍兹谐振器和膜谐振器，可以在较宽的可调谐频率范围内以深亚波长器件尺寸实现更高的吸声或传输系数。

对于有源压电AM在降噪方面的应用，使用有效介质方法[175, 211]和数值模拟[175, 212]研究了将多个亚波长分流压电贴片粘合到薄板上的夹层结构（图11 (a)）。研究结果表明，与尺寸和重量相当的经典材料相比，具有分流压电贴片的有源 AM 可以实现更高的声音传输损耗和更宽的有效带宽 [175]。图11 (b) 中类似的有源压电AM，通过用声学腔代替图11 (a) 中的薄板，使用基于板理论的全耦合分析模型评估了声音传输损失。[176]。数值模拟用于研究声腔深度、外部电压、入射波方向以及气体和材料类型对声音传输损失的影响。图11 (c) 中的可调谐声学超表面是使用波束控制装置阵列制成的，如图8 (g) 所示，它可以配置为通过调整外部电子设备而不是改变物理结构来同时实现各种功能[27]。一般来说，将压电材料融入 AM 中可以创建具有可调有效频率范围的新型有源压电 AM。有源压电AM表现出多种非凡的声学特性，其中许多特性是传统材料所没有的，因此具有广泛的潜在应用。表 3 给出了无源 AM 和有源压电 AM 的详细比较。当前的有源压电 AM 在很大程度上依赖于制造方法来在实验室中展示不同的功能，以及所得结构的成功和质量

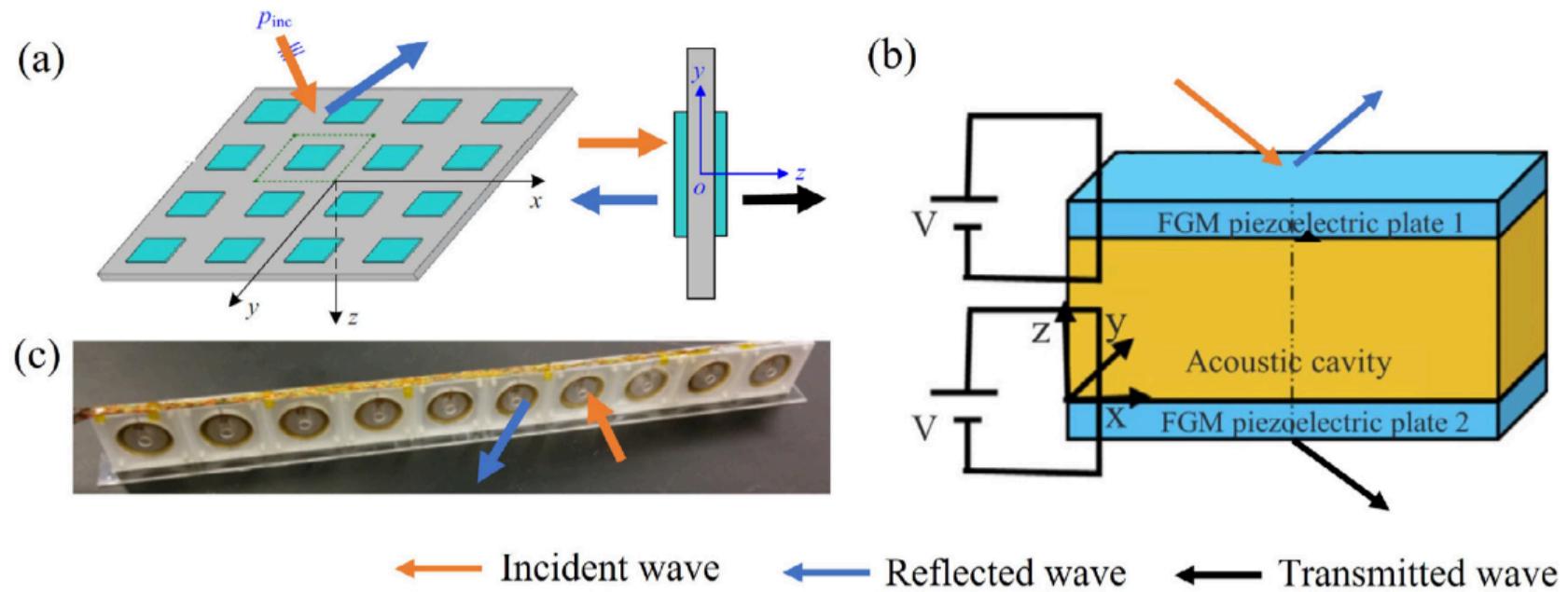


图 11. 有源压电 AM 在降噪方面的应用。 (a) 具有分流压电贴片的 AM 示意图, 转载自 [175], 版权所有 2015, 并获得 Elsevier 许可。 (b) 具有声腔的压电板。转载自 [176], 版权所有 2019, 经爱思唯尔许可。 (c) 由十个活动单元组成的阵列。经 [27] 许可转载图, 美国物理学会版权所有 2015。

表3

无源 AM 和有源压电 AM 的比较。

AM 类型	应用领域	结构及性能特点
亚波长元原子	完全隔音和吸收、波操纵（负折射和反射）。	深亚波长尺寸，单品结构。 & 负特性，有效频率范围固定且窄。
空间螺旋结构	完整的隔音和吸收、波操纵（负折射和反射、传播到表面波转换、声聚焦、单向传播、声涡流生成、隐身）。	深亚波长尺寸、拓扑优化、结构复杂。 & 负特性，有效频率范围固定且窄。
亥姆霍兹谐振器	完整的隔音和吸收、波操纵（负折射和反射、传播到表面波转换、声聚焦、单向传播、隐形）。	深亚波长尺寸，易于制造。 & 负特性，频率范围固定且窄。
膜谐振器和板谐振器	完整的隔音和吸收、波操纵（负折射和反射、传播到表面波转换、声聚焦、声涡生成、超分辨率、隐身）。	深亚波长尺寸、几何复杂性和易碎性、重量轻。 & 负特性，有效频率范围固定且窄。
多孔材料	出色的声音衰减、波操纵（负折射和反射、传播到表面波转换）。	深亚波长尺寸，易于制造，重量轻。 & 负特性，宽带有效频率范围。
有源压电 AM	完整的隔音和吸收、波操纵（负折射和反射、传播到表面波转换、声聚焦）、能量收集。	极深的亚波长尺寸，易于制造。 & 负特性、可调有效频率范围、多功能电位、电子控制。

高度依赖于操作程序和材料特性[27, 153, 176 – 179]。此外，传感、驱动和数字控制器组件应精确且可重复地集成在有源压电 AM 中。最后，应该指出的是，尽管有源压电 AM 的发展仍处于早期阶段，但研究人员应谨慎地展望未来并考虑可能的应用。

5. 结论与展望

5.1. 结论

声学超材料和超表面领域在过去二十年中迅速发展。增材制造的反常材料特性被认为是超越传统材料特性的突破，有可能带来许多进步。人们已经提出了物理和工程应用中令人兴奋的前景，例如吸声器和绝缘体、波操纵、隐形、能量收集、通信、成像和具有改进性能和减小尺寸或重量的医疗设备。

然而，仍然存在限制AMs实际应用的重大挑战。最初，AM 是被动结构

它们的主要缺点在于固有的窄带隙。换句话说，具有异常性能的有效频率范围很窄，并且由结构共振决定。此外，在无源 AM 中，工程亚波长结构表明谐振频率处的高耗散导致高能量损失。此外，无源增材制造无法适应工作条件或环境的变化：其独特的特性保持不变，严格按照设计的结构参数。因此，在不同的使用条件下无法控制或优化非凡的性能。最后，许多增材制造（例如无源膜谐振器）需要结构复杂性，这往往会导致脆弱性，并且对制造来说是一个挑战。**有源压电 AM 提供了具有可调频带的非凡材料特性的机会**。例如，**引入薄膜型或亥姆霍兹谐振器型 AM 的压电元件创建了一种电子控制和反馈机制**。然后可以修改有源压电 AM 的动态密度或模量，从而在可变和可控频带上产生负反射和折射。目前的许多研究集中在利用自适应外部电路来实现可调频率，广泛采用传统的PZT材料作为有源压电元件。然而，

最初，有源压电 AM 仍有大幅改进的潜力。常用的压电材料与水的声阻抗匹配可以接受，但与空气的匹配较差，导致声能泄漏成不期望的波模式。因此，在当前有源压电 AM 中，需要在效率、频率范围、器件尺寸和波前操纵能力方面进行权衡。真正高效的宽带波操纵尚未在实际设备中实现。

5.2. 外表

声能收集、反常波操纵和降噪方面的潜在应用正在推动增材制造研究的快速进展。降噪似乎是最有前途的应用之一。考虑到无源 AM 的局限性，出于增加有效带宽、调整工作频率以及减小尺寸和重量的需要，开发了适用于各种应用的有源压电 AM。近年来，利用其多孔结构来拓宽有效带隙的软多孔AMs引起了人们的研究兴趣。纤维材料实际上是一种开孔多孔泡沫，可以通过调整纤维直径和填充来轻松控制密度[213–220]。这种方法可以改善与空气的阻抗匹配。同样，水凝胶[221]、弹性体[222]、气凝胶[131]和软纤维/珠复合材料[115]等软材料已被用来实现与空气良好匹配的增材制造。气泡晶体是水中软 AM 的代表，在分析[223, 224]和实验[138, 225]中显示出有吸引力的带隙。使用有效的方法来分析气泡和泡沫[226]，气泡AM在波浪操纵应用中具有巨大的潜力，例如水下全反射、绝缘和隐身[227–229]以及增强的水空气声传输[230]。受无源 AM 的启发，基于纤维压电材料的有源软 AM 未来可能会同时拓宽和调整有效带隙。然而，有源纤维压电AM的发展仍处于早期阶段，因此研究人员面临着在制造方法的限制下选择物理机制和优化技术性能的挑战。

多功能有源压电AM的开发是一个令人兴奋的新研究方向，单一结构可以在外部电子控制下实现独特的超材料效应。这些是高度工程化的材料，具有复杂的结构，对制造提出了挑战。增材制造技术最近的快速发展提供了制造具有有利性能的所需复杂结构的机会，包括混合压电材料和聚合物材料的机会。在未来的有源压电增材制造设计中，温度、湿度、外部流动、曲率对结构和材料特性的影响都需要考虑。考虑到过去十年取得的巨大进步，AM 和有源压电 AM 已经迅速成熟，并且似乎可能在不久的将来对工程应用产生重大影响。

竞争利益声明

作者声明，他们没有已知的可能影响本文报告工作的相互竞争的经济利益或个人关系。

致谢

季国胜获得了牛津大学克拉伦登基金和三一学院奖学金的支持。

参考

- [1] R.M. Walser, 电磁超材料, 国际光学科学与技术研讨会, 国际光学与光子学会, 2001 年。 [2] M.A. Noginov, V.A. Podolskiy, 超材料教程, CRC press, 2011。 [3] V.G. Veselago, 同时具有负值 和 μ 的物质的电动力学, 苏联物理学 Uspekhi 10 (4) (1968) 509。 [4] J. Pendry、A. Holden、W. Stewart、I. Youngs, 极低频等离激元在金属介观结构中, 物理学. 莱特牧师. 76 (25) (1996) 4773。 [5] J.B. Pendry、A. Holden、D. Robbins、W. Stewart, 导体的磁性和增强的非线性现象, IEEE Trans Microw Theory Tech 47 (11) (1999) 2075 – 2084。 [6] 博士 Smith、W.J. Padilla、D. Vier、S.C. Nemat-Nasser、S. Schultz, 同时具有负磁导率和介电常数的复合介质, 物理学。
- 礁。简单的。 84 (18) (20 0 0) 4184。
- [7] R.A. 谢尔比, D.R. Smith, S. Schultz, 负折射率的实验验证, Science 292 (5514) (2001) 77 – 79。
- [8] J. Valentine、S. 张、T. Zentgraf、E. Ulin-Avila、D.A. Genov, G. Bartal, X. 张, 具有负折射率的三维光学超材料, Nature 455 (7211) (2008) 376 – 379。 [9] P. Moitra、Y. Yang、Z. Anderson、I.I. 克拉夫琴科, D.P. Briggs, J. Valentine, 全电介质零折射率光学超材料的实现, Nat Photonics 7 (10) (2013) 791 – 795。
- [10] N. Yu, P. Genevet, M.A. 凯茨, F. 艾埃塔, J.P. 泰蒂安、F. 卡帕索、Z. 加布罗、具有相位不连续性的光传播: 反射和折射的广义定律, 《科学》(6054) (2011)。
- [11] Z. Liu, X. 张, Y. Mao, Y. Zhu, Z. Yang, C. Chan, P. Shen, 局域共振声波材料, Science 289 (5485) (20 0 0) 1734 – 1736。
- [12] Y. 李, B. 梁, Z.M. Gu, X. Zou, J.C. Cheng, 基于超薄平面声学超表面的反射波前操纵, Sci Rep (2013)。
- [13] X. Xiao, Z. He, E. Li, B. Zhou, X. Li, A lightweight adaptive hybrid lami- 具有更高波衰减设计自由度的天然超材料, Compos Struct 243 (2020) 112230。
- [14] K. Yi, M. Collet, 局部谐振中的低频带隙加宽 负电容压电超材料, J Sound Vib 493 (2021) 115837。
- [15] 沈X., 蒋春, 李Y., 黄J. 黄, 用于高效传导热汇聚传输的热超材料, Appl Phys Lett 109 (20) (2016) 201906。
- [16] 韩涛、白晓、刘东、高东、李斌、J.T. Thong, C.W. Qiu, 通过感性形状热超材料操纵稳定热传导, Sci Rep 5 (1) (2015) 1 – 7。
- [17] 陈峰, D.Y. Lei, 利用易于制造的热超材料实验实现极端热通量集中, Sci Rep 5 (1) (2015) 1 – 8。
- [18] A. Movchan、S. Guenneau, 裂环谐振器和局域模式, 物理评论 B 70 (12) (2004) 125116。
- [19] Li, J.C. Chan, 双负声学超材料, 物理评论 E 70 (5) (2004) 055602. [20] N. Fang, D. Xi, J. Xu, M. Ambati, W. Srituravanich, C. Sun, X. Zhang, 负模量超声超材料, Nat Mater 5 (6) (2006) 452 – 456。 [21] A. Baz, 有效密度可调的活性声学超材料的结构, New J Phys 11 (12) (2009) 123010。 [22] S.H. 李, C.M. 帕克, Y.M. 徐, Z.G. 王志强 Kim, 同时具有负密度和模量的复合声学介质, 物理学. 莱特牧师。
- 104 (5) (2010) 054301.
- [23] W. Akhmedov、A. Baz, 具有可编程体积模量的多单元有源声学超材料, J Intell Mater Syst Struct 21 (5) (2010) 541 – 556。
- [24] W. Akhmedov、A. Baz, 具有同时可编程密度和体积模量的有源声学超材料, J Vib Acoust 135 (3) (2013)。 [25] F. Aieta、A. Kabiri、P. Genevet、N. Yu、M.A. Kats、Z. Gaburro、F. Capasso, Reflec- 来自具有相位不连续性的超表面的光的化和折射, J Nanophotonics 6 (1) (2012) 063532。
- [26] Y. 李, X. 江, R.Q. 李宝良, X.Y. 邹丽丽, 尹丽丽, 程俊城, 亚波长声学超表面反射波完全控制的实验实现, Phys Rev Appl 2 (6) (2014) 064002。
- [27] 双。 Popa、D. Shinde、A. Konneker、S.A. Cummer, 可实时重构的有源声学超材料, 物理评论 B 91 (22) (2015) 220303。
- [28] 鞠芳, 熊伟, 刘成, 程勇, 刘旭, 基于弯曲超表面的声加速束, Appl Phys Lett 114 (11) (2019) 113507。
- [29] X.S. 李一峰王爱乐 陈Y.S. Wang, 用于三维反射波前调制的任意弯曲声学超表面, J Phys D Appl Phys 53 (19) (2020) 195301。
- [30] G. Ma, P. Shen, 声学超材料: 从局域共振到广阔视野, Sci Adv 2 (2) (2016) e1501595。
- [31] S.A. Cummer、J. Christensen、A. Alù, 用声学超材料控制声音, Nat. 马特牧师. 1 (3) (2016) 1 – 13。
- [32] J. Liu, H. 郭, T. Wang, 声学超材料和声子晶体综述, Crystals 10 (4) (2020) 305。

- [33] B. Assouar, B. Liang, Y. Wu, Y. Li, J.-C. Cheng, Y. Jing, 声学超表面, Nat. 马特牧师。3 (12) (2018) 460–472。[34] X. 张, Z. Qu, H. Wang, 用于吸声的工程声学超材料: 从均匀结构到梯度结构, Iscience 23 (5) (2020) 101110。[35] S. Kumar, H.P. Lee, 声学超材料的最新进展
新的声音衰减和空气流通性能, Crystals 10 (8) (2020) 686。
- [36] S. 库马尔, H.P. Lee, 声学超材料的现在和未来的作用
建筑和城市噪声缓解, 见: 声学, 第 1 卷, 多学科数字出版研究所, 2019 年, 第 590–607 页。
- [37] G. Liao, C. Luan, Z. Wang, J. Liu, X. Yao, J. Fu, 声学超材料: a 理论、结构、制造方法和应用综述, 先进材料技术 6 (5) (2021) 20 0 0787。
- [38] Q. Chen, B. 张、Y. Bai, L. Wang, M. Rejab, 声子晶体和声学超材料综述, 载于: IOP 会议系列: 材料科学与工程, 第 788 卷, IOP 出版社, 2020 年, 第 11 页。012052。
- [39] S. Kumar, H. Pueh Lee, 有源声学超材料的最新进展, Int J Appl Mech 11 (08) (2019) 1950081。
- [40] S. Chen, Y. Fan, Q. Fu, H. Wu, Y. Jin, J. Cheng, F. Zhang, 可调谐声学超材料综述, 应用科学 8 (9) (2018) 1480。
- [41] F. Zangeneh Nejad, R. Fleury, 声学超材料的活跃时间, Rev. 物理。4 (2019) 10 0 031。
- [42] T.J. Cox, P. D' Antonio, 吸声器和扩散器: 理论、设计和应用, CRC Press, 2009 年。
- [43] G. Ma, M. Yang, S. Xiao, Z. Yang, P. Shen, 具有混合共振的声学超表面, Nat Mater 13 (9) (2014) 873–878。
- [44] 马芳, 徐勇, J.H. 吴, 壳型声学超表面与弧形地毯斗篷, Sci Rep 9 (1) (2019) 1–11。
- [45] J. Jin Park, J.H. Kwak, K. Song, 具有声学记忆的超慢介质
用于低频隔离的膜状无阻尼动态减振器, Extreme Mech Lett (2021) 101203。
- [46] M.F. 利莫诺夫, M.V. 赖宾, A.N. 波杜布尼, Y.S. Kivshar, 光子学中的法
诺共振, Nat Photonics 11 (9) (2017) 543–554。[47] 丁成, 郝丽, 赵晓, 负
模量二维声学超材料, J Appl Phys 108 (7) (2010) 074911。[48] V.M.
Garcia-Chocano, R. Graciá-Salgado, D. Torrent, F. Cervera, J. Sánchez-
De- hesa, 具有负体积模量的准二维声学超材料, 物理评论 B 85 (18) (2012)
184102。
- [49] 梁子明、冯泰、乐圣、刘凤、K.B. 吴 CH. Chan, J. Wang, S. Han, S. Lee,
J. Li, 双负性和锥形色散的空间螺旋超材料, Sci Rep 3 (2013) 1614。
- [50] 谢勇, B.I. Popa, L. Zigoneanu, S.A. Cummer, 宽带测量
空间螺旋声学超材料的负折射率, Phys. 莱特牧师。110 (17) (2013)
175501。
- [51] Y.F. 王 Y.S. 王成张, 二维局部共振弹性
具有手性梳状夹层的超材料: 带隙和同时双负特性, J. Acoust. 苏克。是。
139 (6) (2016) 3311–3319。
- [52] 谢 Y., W.Q. 王海燕 Chen, A. Konneker, B.I. Popa, S.A. Cummer, 波前调制
和声学超表面的亚波长衍射声学, Nat Commun (2014)。
- [53] H. Esfahlani, H. Lissek, J.R. Mosig, 使用超表面生成声学螺旋波前, 物
理评论 B 95 (2) (2017) 024312。
- [54] C. 丁, H. 陈, S. 翟, S. 刘, X. 赵, 异常操纵
基于分裂空心球平面超表面的声波, J Phys D Appl Phys 48 (4) (2015)
045303。
- [55] J. Lan, Y. Li, Y. Xu, X. Liu, 基于亥姆霍兹谐振器的梯度超表面操纵声
波前, Sci Rep 7 (1) (2017) 1–9。[56] J. Guo, X. Zhang, Y. Fang,
R. Fattah, 异同构反射波操纵
通过不同深度的声学衬垫实现均匀阻抗, J Appl Phys 123 (17) (2018) 174902。
- [57] K. Song, J. Kim, S. Hur, J.H. Kwak, S.H. Lee, T. Kim, 定向反射表面
通过梯度阻碍声学超表面形成的面, Sci Rep 6 (2016) 32300。
- [58] J. Li, C. Shen, A. Díaz-Rubio, S.A. Tretyakov, S.A. Cummer, 用于声波
前无散射操纵的双各向异性超表面的系统设计和实验演示, Nat Commun 9 (1)
(2018) 1–9。
- [59] X. Chen, P. Liu, Z. Hou, Y. Pei, 低频范围内膜型超表面声波解复用的实
现, Appl Phys Lett 110 (16) (2017) 161909。
- [60] J. Lan, X. Zhang, X. Liu, Y. Li, 基于透射的波前操纵
具有模式混合结构的大型声学超表面, Sci Rep 8 (1) (2018) 1–9。
- [61] 翟胜, 陈洪, 丁长, 沈凤, 罗长, 赵晓, 传输的操纵
使用超薄平面声学超表面的波前, Appl. 物理。120 (4) (2015) 1283 –
1289。
- [62] G. Ji, Y. Fang, J. Zhou, X. Huang, 具有高传输损耗特性的多孔迷宫声学
超材料, J Appl Phys 125 (21) (2019) 215110。
- [63] Y. Fang, X. Zhang, J. Zhou, 通过具有周期性结构的声学多孔超表面的声音传
输, Appl Phys Lett 110 (17) (2017) 171904。[64] G. Ji, Y. Fang, J. Zhou, 倒
楔形多孔声学超材料, Extreme Mech Lett (2020) 100648。[65] J. Yang, J.S.
李, Y.Y. Kim, 用于宽带吸声的变孔层中的多个慢波, J Phys D Appl Phys 50
(1) (2016) 015301。[66] F.J. Fahy, P. Gardonio, 声音和结构振动: 辐射、
传输和响应, Elsevier, 2007。[67] G.W. Milton, J.R. Willis, 论牛顿第二定
律和线性定律的修正
- [68] 连续弹性动力学, 见: 伦敦皇家学会论文集 A: 数学、物理和工程科学, 皇
家学会, 2007 年。
- [69] H. Huang, C. Sun, G. Huang, 关于声学超材料中的负有效质量密度, Int J
Eng Sci 47 (4) (2009) 610–617。
- [70] Y. Chen, G. Huang, X. Zhou, G. Hu, C.T. Sun, 膜型声学超材料的分析耦
合振动声学建模: 膜模型, J. 声学。苏克。是。136 (3) (2014) 969–979。
- [71] Z. Yang, J. Mei, M. Yang, N. Chan, P. Shen, 负动态质量的膜型声学超材
料, Phys. 牧师。信件。101 (20) (2008) 204301。
- [72]姚树, 周晓, 胡国强, 一维质量-弹簧系统负有效质量的实验研究, 新物理学
报 10 (4) (2008) 043020。
- [73] S. Yao, X. Zhou, G. Hu, 截止频率以下发生的负质量行为的调查, New J
Phys 12 (10) (2010) 103025。
- [74] X. Zhou, G. Hu, 近零动态质量各向异性超材料板的超透镜效应, Appl Phys
Lett 98 (26) (2011) 263510。
- [75] S.H. 李, C.M. 帕克, Y.M. 徐, Z.G. 王志强 Kim, 负密度声学超材料, 物理学。
莱特。373 (48) (2009) 4464–4469。
- [76] C.J. 奈菲, C.M. Chang, G. McKnight, S. Nutt, 膜型局部谐振声超材料的传
输损耗和动态响应, J Appl Phys 108 (11) (2010) 114905。
- [77] R. Chanaud, 几何形状对亥姆霍兹谐振器谐振频率的影响, J Sound Vib 178
(3) (1994) 337–348。
- [78] 刘俊荣, J.H. 吴, 杨, 马凤, 超宽带吸声材料
具有多阶共振的薄微穿孔面板超材料, Compos Struct 246 (2020) 112366。
- [79] 赵宏, 郑清, 王宇, 曹建, 王成, 文建, 超材料面板的吸声: 机理、边界效应
与实验演示, 应用声学 184 (2021) 108369。
- [80] S. Ren, L. Van Belle, C. Claeys, F.X. 辛, T.J. Lu, E. Deckers, W.
Desmet, 通过局部共振改善柔性微穿孔板的吸声效果, Mech Syst Signal
Process 117 (2019) 138–156。
- [81] B. Moore, T. Jaglinski, D. Stone, R. Lakes, 泡沫中的负增量体积模量,
Philos Mag Lett 86 (10) (2006) 651–659。
- [82] L. Lu, T. Yamamoto, M. Otomori, T. Yamada, K. Izui, S. Nishiwaki, 使
用局部谐振、有限 Eleme 对具有负体积模量的声学超材料进行拓扑优化。肛
门。德斯。72 (2013) 1–12。
- [83] Y. Ding, Z. Liu, C. Qiu, J. Shi, 同时具有负体积模量和质量密度的超材
料, Phys. 莱特牧师。99 (9) (2007) 093904。
- [84] Y. Cheng, J. Xu, X. Liu, 同时具有负动态密度和模量的一维结构超声超材
料, 物理评论 B 77 (4) (2008) 045134。
- [85] 吴 Y., 赖 Y., Z.Q. 张, 同时具有负有效剪切模量和质量密度的弹性超材料,
物理学。莱特牧师。107 (10) (2011) 105506。
- [86] X. Liu, G. Hu, G. Huang, C. Sun, 一种同时具有弹性的超材料
明显负的质量密度和体积模量, Appl Phys Lett 98 (25) (2011) 251907。
- [87] R. Zhu, X. Liu, G. Hu, C. Sun, G. Huang, 单相超材料中深亚波长尺度弹
性波的负折射, Nat Commun 5 (2014)。
- [88] 杨明, 马刚, 杨正, 盛鹏, 双负质量密度和体积模量耦合膜, 物理学。莱特牧
师。110 (13) (2013) 134301。
- [89] H.C. 曾, C.R. 罗 H.J. 陈 S.L. 翟春丽 丁 X.P. 赵 长笛模特
同时具有负体积模量和质量密度的声学超材料, Solid State Commun 173
(2013) 14–18。
- [90] 翟胜, 陈洪, 丁长, 赵晓, 基于超分子的双负声学超材料, J Phys D Appl
Phys 46 (47) (2013) 475105。[91] H. Chen, H. 曾, C. 丁, C. 罗, X. 赵, 双负
声学元
基于空心钢管元原子的材料, J Appl Phys 113 (10) (2013) 104902。
- [92] D. Smith, J. Mock, A. Starr, D. Schurig, 梯度折射率超材料, 物理评论
E 71 (3) (2005) 036609。
- [93] S. 拉鲁什, D.R. Smith, 广义折射与衍射理论的调和, Opt Lett 37 (12)
(2012) 2391–2393。
- [94] J. Chen, J. Xiao, D. Lisevych, A. Shakouri, Z. Fan, 超紧凑超表面透镜
中声波的深亚波长控制, Nat Commun 9 (1) (2018) 1–9。
- [95] 江晓, 梁斌, X.Y. 邹, 杨, L.L. 尹, J. 杨, J.C. 程, 声学
单向超表面: 亚波长层对声音的非对称相位调制, Sci Rep 6 (2016)
28023。
- [96] X.S. 李一峰 王爱乐 陈 Y.S. Wang, 使用带有锥形波纹孔的声学超表面调制面外
反射波, Sci Rep 9 (2019)。
- [97] K. Tang, C. Qiu, M. Ke, J. Lu, Y. Ye, Z. Liu, 超薄超表面空气传播声音
的反常折射, Sci Rep 4 (1) (2014) 1–7。
- [98] Y. Xie, A. Konneker, B.I. Popa, S.A. Cummer, 锥形迷宫声学
用于宽带阻抗匹配的超材料, Appl Phys Lett 103 (20) (2013) 201906。
- [99] R. Ghaffariardavagh, J. Nikoliczky, R.G. Holt, S. Anderson,
X. Zhang, 面向同时相位和幅度调制的类似空间螺旋超材料, Nat Commun 9
(1) (2018) 1–8。
- [100] R. Al Jahdali, Y. Wu, 通过阻抗匹配声学超表面进行高传输声学聚焦,
Appl Phys Lett 108 (3) (2016) 031902。
- [101] W. Tang, C. Ren, S. Tong, X. Huang, 三明治状空间螺旋超表面
弱色散高效传输面, Appl Phys Lett 115
(13) (2019) 134102。

- [101] S.W. 范, S.D. 赵 A.L. 陈Y.F. Wang, B. Assouar, Y.S. 王可调宽带反射声学超表面, *Phys Rev Appl* 11 (4) (2019) 044038.
- [102] S.W. 范, S.D. 赵, 曹丽, 朱勇, 陈艾乐, Y.F. 王, K. 唐达, Y.S. Wang, B. Assouar, 用于声学隐身和幻觉的可重构弯曲超表面, *物理评论 B* 101 (2) (2020) 024104.
- [103] K. Donda, Y. Zhu, S.-W. Fan, L. Cao, Y. Li, B. Assouar, 极低频超薄吸声超表面, *Appl Phys Lett* 115 (17) (2019) 173506.
- [104] H. Chang, L. Liu, C. Zhu, X. Hu, 迷宫式超表面宽带高吸声, *AIP Adv* 8 (4) (2018) 045115. [105] X. Wang, D. Mao, Y. Li, 基于螺旋超表面的宽带声学皮肤斗篷, *Sci Rep* 7 (1) (2017) 1–7. [106] K. Miyata, Y. Noguchi, T. Yamada, K. Izui, S. Nishiwaki, 优化设计使用基于 zwicker 振幅模型的拓扑优化的多功能声学超表面, *应用机械工程计算方法* 331 (2018) 116–137.
- [107] 丁长, 赵晓, 陈浩, 翟世, 沉峰, 基于双分裂空心球的声学超表面反射波前调制, *应用物理* 120 (2) (2015) 487–493.
- [108] 刘X., 曾X., 高东, 沈文, 王J.王, S. 王, 亚波长孔径声学超表面异常反射的实验实现, *J Phys D Appl Phys* 50 (12) (2017) 125303.
- [109] Y. Zhu, B. Assouar, 基于亥姆霍兹谐振器阵列的多功能声学超表面, *物理评论 B* 99 (17) (2019) 174109.
- [110] J. Guo, J. Zhou, 一种基于加长颈部谐振器的超薄声学地毯斗篷, *J Phys D Appl Phys* 53 (50) (2020) 505501.
- [111] Z. Chen, F. Yan, M. Negahban, Z. Li, 基于谐振器的低频水下声波反射超表面, *J Appl Phys* 128 (5) (2020) 055305.
- [112] J. Li, A. Song, S.A. Cummer, 用于表面的双各向异性声学超表面面波增强波前变换, *Phys Rev Appl* 14 (4) (2020) 044012.
- [113] X. Peng, J. Li, C. Shen, S.A. Cummer, 利用功率流共形双各向异性声学超表面进行高效无散射波前变换, *Appl Phys Lett* 118 (6) (2021) 061902.
- [114] T.Y. Huang, C. Shen, Y. Jing, 膜型和板型声学超材料, *J. Acoust. 苏克是。* 139 (6) (2016) 3240–3250.
- [115] H. Tang, Z. Chen, N. Tang, S. Li, Y. Shen, Y. Peng, X. Zhu, J. Zang, 使用软纤维/刚性珠网络实现多功能的镂空图案超薄声学超表面, *Adv 功能材料* 28 (36) (2018) 1801127.
- [116] A. Abbad, N. Atalla, M. Ouisse, O. Doutres, 嵌入多孔基体中的膜亥姆霍兹谐振器声学性能的数值和实验研究, *J Sound Vib* 459 (2019) 114873.
- [117] M. Lewińska, J. van Dommelen, V. Kouznetsova, M. Geers, 走向声学超泡沫: 具有局部谐振器的多孔弹性材料的增强性能, *J Mech Phys Solids* 124 (2019) 189–205.
- [118] 英石。邓俊杰刘K.Y.A. Yeung, Z. Yang, 混合膜谐振器的多频完美吸收, *Appl Phys Lett* 116 (16) (2020) 161902.
- [119] J. Rouquerol, F. Rouquerol, P. Llewellyn, G. Maurin, K.S. 歌唱、吸附粉末和多孔固体: 原理、方法和应用, 学术出版社, 2013 年。
- [120] F. Fahy, 互易原理在实验振动声学中的一些应用, *Acoust Phys* 49 (2) (2003) 217–229.
- [121] M. Delany, E. Bazley, 纤维吸收材料的声学特性, *应用声学* 3 (2) (1970) 105–116.
- [122] J. Allard, N. Atalla, 多孔介质中声音的传播: 吸声材料建模, John Wiley & Sons, 2009 年。
- [123] J.F. Allard, Y. Champoux, 刚性框架纤维材料中声音传播的新经验方程, *J. Acoust. 苏克是。* 91 (6) (1992) 3346–3353.
- [124] D.L. Johnson, J. Koplik, R. Dashen, 流体饱和多孔介质中的动态渗透率和弯曲度理论, *J Fluid Mech* 176 (1987) 379–402.
- [125] L. Xiong, B. Nennig, Y. Aurégan, W. Bi, 使用在特殊点上调谐的变孔材料进行声音衰减优化, *J. Acoust. 苏克是。* 142 (4) (2017) 2288–2297.
- [126] J. 杨, J.S. 李, Y.Y. Kim, 克服宽带吸声厚度限制的变孔层, *J Appl Phys* 117 (17) (2015) 174903.
- [127] J.P. Groby, W. Huang, A. Lardeau, Y. Aurégan, 利用慢波设计简单的吸声材料, *J Appl Phys* 117 (12) (2015) 124903.
- [128] J.P. Groby, O. Dazel, A. Duclos, L. Boeckx, L. Kelders, 通过嵌入圆形周期性夹杂物增强背衬刚性框架多孔层的吸收系数, *J. Acoust. 苏克是。* 130 (6) (2011) 3771–3780.
- [129] A. Elliott, R. Venegas, J. Groby, O. Umnova, 具有多孔芯和超材料匹配层的全向吸声器, *J Appl Phys* 115 (20) (2014) 204902.
- [130] J. Yang, J.S. Lee, H.R. Lee, Y.J. Kang, Y.Y. Kim, Slow-wave metasurface open panels for efficient reduction of low-frequency sound transmission, *Appl Phys Lett* 112 (9) (2018) 091901.
- [131] 医学博士吉尔德, V.M. García-Chocano, J. Sánchez Dehesa, T.P. 马丁, D.C. 禹, G.J. Orris, Aerogel as a soft acoustic metasurface for airborne sound, *Phys Rev Appl* 5 (3) (2016) 034012.
- [132] Y. Jin, R. Kumar, O. Poncelet, O. Mondain-Monval, T. Brunet, Flat acoustics with soft gradient-index metasurfaces, *Nat Commun* 10 (1) (2019) 1–6. [133] J.P. Groby, W. Lauriks, T. Vigran, Total absorption peak by use of a rigid frame porous layer backed by a rigid multi-irregularities grating, *J. Acoust. Soc. Am.* 127 (5) (2010) 2865–2874.
- [134] Y. Fang, X. Zhang, J. Zhou, J. Guo, X. Huang, Acoustic metaporous layer with composite structures for perfect and quasi-omnidirectional sound absorption, *Compos Struct* 223 (2019) 110948.
- [135] Y. Fang, X. Zhang, J. Zhou, Experiments on reflection and transmission of acoustic porous metasurface with composite structure, *Compos Struct* 185 (2018) 508–514.
- [136] Y. Fang, X. Zhang, J. Zhou, Acoustic porous metasurface for excellent sound absorption based on wave manipulation, *J Sound Vib* 434 (2018) 273–283. [137] A.A. Fernández-Marín, N. Jiménez, J.P. Groby, J. Sánchez Dehesa, Aerogel-based metasurfaces for perfect acoustic energy absorption, *Appl Phys Lett* 115 (6) (2019) 061901.
- [138] Z. Cai, S. Zhao, Z. Huang, Z. Li, M. Su, Z. Zhang, Z. Zhao, X. Hu, Y.-S. Wang, Y. Song, Bubble architectures for locally resonant acoustic metamaterials, *Adv Funct Mater* 29 (51) (2019) 1906984.
- [139] N. Gao, L. Tang, J. Deng, K. Lu, H. Hou, K. Chen, Design, fabrication and sound absorption test of composite porous metamaterial with embedding i-plates into porous polyurethane
- [140] M. Mingia, Applied Acoustics, 145S (2021) 1078N5. Kherraz, F. Bosia, N.M. Pugno, Design and fabrication of bioinspired hierarchical dissipative elastic metamaterials, *Phys Rev Appl* 10 (2) (2018) 024042.
- [141] T. Delpero, A. Bergamini, P. Ermanni, M. Ruzzene, Piezoelectric resonator arrays for tunable acoustic waveguides and metamaterials, *J Appl Phys* 112 (6) (2012) 064902.
- [142] F. Casadei, K. Bertoldi, Harnessing fluid-structure interactions to design self-regulating acoustic metamaterials, *J Appl Phys* 115 (3) 020403.
- [143] S. Shan, J.C. Weaver, K. Bertoldi, Harnessing buckling to design tunable locally resonant acoustic metamaterials, *Phys Rev Appl* 14 (4) (2020) 044041.
- [144] Z. Tian, C. Shen, J. Li, E. Reit, Y. Gu, H. Fu, S.A. Cummer, T.J. Huang, Programmable acoustic metasurfaces, *Adv Funct Mater* 29 (13) (2019) 1808489. [145] B. Xia, N. Chen, L. Xie, Y. Qin, D. Yu, Temperature-controlled metasurfaces with active band gap and negative bulk modulus, *Applied Acoustics* 112 (2016) 1–9.
- [146] S. Ning, Z. Yan, D. Chu, H. Jiang, Z. Liu, Z. Zhuang, Ultralow-frequency tunable acoustic metamaterials through tuning gauge pressure and gas temperature, *Extreme Mech Lett* (2021) 101218.
- [147] S. Xiao, G. Ma, Y. Li, Z. Yang, P. Sheng, Active control of membrane-type acoustic metamaterial by electric field, *Appl Phys Lett* 106 (9) (2015) 091904. [148] Z. Chen, W. Zhou, C. Lim, Tunable frequency response of topologically protected modes for membrane-type metamaterials via voltage control, *J Sound Vib* 494 (2021) 115870.
- [149] X. Chen, X. Xu, S. Ai, H. Chen, Y. Pei, X. Zhou, Active acoustic metamaterials with tunable effective mass density by gradient magnetic fields, *Appl Phys Lett* 105 (7) (2014) 071913.
- [150] P. Liu, X. Chen, W. Xu, Y. Pei, Magnetically controlled multifunctional membrane acoustic metasurface, *J Appl Phys* 127 (18) 084901.
- [151] T. Delpero, L.D. Simoni, L.D. Lillo, M. Ruzzene, P. Ermanni, Phononic crystal with adaptive connectivity, *Adv. Mater.* 26 (9) (2014) 1343–1347.
- [152] C. Sugino, M. Ruzzene, A. Erturk, Dynamics of hybrid mechanical-electromechanical locally resonant piezoelectric metastructures, *Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, American Society of Mechanical Engineers, 2017.
- [153] C. Sugino, M. Ruzzene, A. Erturk, An analytical framework for locally resonant piezoelectric metasurface plates, *Int J Solids Struct.* 182 (2020) 1–18.
- [154] A. Baz, Experimental demonstration of an active acoustic metasurface cell, *J Appl Phys* 111 (4) (2012) 044505.
- [155] A. Baz, Experimental characterization of active acoustic metasurface cell with controllable dynamic density, *J Appl Phys* 112 (12) (2012) 125106.
- [156] W. Akl, Experimental demonstration of one-dimensional active plate-type acoustic metasurface with adaptive programmable density, *J Appl Phys* 121 (12) (2017) 125106.
- [157] A. Baz, Active acoustic metasurface with tunable effective density using a disturbance rejection controller, *J Appl Phys* 125 (7) 074503.
- [158] W. Akl, Modeling and design of two-dimensional membrane-type active acoustic metasurfaces with tunable anisotropic density, *J. Acoust. Soc. Am.* 140 (5) (2016) 3607–3618.
- [159] A. Baz, Acoustoelectric waves in piezoelectric materials, *J Appl Phys* 37 (13) (1966) 4729–4737.
- [160] T. Poole, G. Nash, Acoustoelectric current in graphene nanoribbons, *Sci Rep* 7 (1) (2017) 1–9.
- [161] G.S. Kino, Acoustoelectric interactions in acoustic-surface-wave devices, *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.* 64 (5) (1976) 724–748.
- [162] C. Ravat, É. Absil, S. Holé, J. Lewiner, Acoustoelectric coupling for direct electrical characterization of semiconductor devices, *J Appl Phys* 99 (6) (2006) 063712.
- [163] V.J. Gokhale, M. Rais-Zadeh, Phonon-electron interactions in piezoelectric semiconductor bulk acoustic wave resonators, *Sci Rep* 4 (1) (2014) 1–10. [164] X. Peng, Y. Wen, P. Li, A. Yang, X. Bai, Enhanced acoustoelectric energy harvester using dual helmholtz resonators, *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control* 60 (10) (2013) 2121–2126.
- [165] W. Wang, Acoustoelectric interactions in piezoelectric semiconductors, *Physical Review B* 1 (2) (1970) 683.
- [166] J.Q. Shen, Strong and weak confinement of parity-time-symmetric acoustic surface wave, *Europhys Lett* 105 (1) (2014) 17006.
- [167] X. Wang, X. Luo, H. Zhao, Z. Huang, Acoustic perfect absorption and broad-

- 通过双零超材料实现的带绝缘, *Appl Phys Lett* 112 (2) (2018) 021901.
- [168] Z. Hou, B. Assouar, 基于分流压电材料的可调谐弹性宇称时间对称结构, *J Appl Phys* 123 (8) (2018) 085101.
- [169] W. Akl, A. Baz, 具有可编程有效密度的多单元有源声学超材料, *J Dyn Syst Meas Control* 134 (6) (2012).
- [170] W. Akl, A. Baz, 具有可编程体积模量的有源声学超材料的稳定性分析, *Smart Mater. 结构*. 20 (12) (2011) 125010.
- [171] 双. Popa, S.A. Cummer, 非互易和高度非线性有源声学超材料, *Nat Commun* 5 (1) (2014) 1 - 5.
- [172] 张宏, 肖勇, 文俊, 于大, 文晓, 超薄智能声学元低频隔音表面, *Appl Phys Lett* 108 (14) (2016) 141902.
- [173] 宁宁, Y.Z. Wang, 由对称双亥姆霍兹谐振腔组成的弹性超材料的主动控制, *Int. J. 机械. 科学*. 153 (2019) 287-298.
- [174] 双. Popa, L. Zogoneanu, S.A. Cummer, 可调谐有源声学超材料, *物理评论 B* 88 (2) (2013) 024303.
- [175] H. Zhang, J. Wen, Y. Xiao, G. Wang, X. Wen, 具有分流压电贴片周期性亚波长阵列的超材料薄板的声传输损失, *J Sound Vib* 343 (2015) 104-120.
- [176] M. Danesh, A. Ghadami, 通过三阶剪切变形理论计算功能梯度材料双壁压电板的声传输损失, *Compos Struct* 219 (2019) 17-30.
- [177] A. Spadoni, M. Ruzzene, K. Cunefare, 具有分流压电贴片周期性阵列的板的振动和波传播控制, *J Intell Mater Syst Struct* 20 (8) (2009) 979 - 990.
- [178] X. Li, Y. Chen, R. Zhu, G. Huang, 一种用于最佳弯曲波吸收和隐形的活性元层, *Mech Syst Signal Process* 149 (2021) 107324. [179] Y. Chen, G. Hu, G. Huang, 一种具有混合分流电路的自适应超材料梁, 用于弯曲波的超宽带控制, *Smart Mater. Struct.* 25 (10) (2016) 105036.
- [180] P. Jiao, 压电和摩擦纳米发电机中的新兴人工智能, *纳米能源* (2021) 106227.
- [181] P. Jiao, A.H. Alavi, 人工智能支持的智能机械超材料: 出现和未来趋势, *Int. 马特. 修订版* 66 (6) (2021) 365 - 393.
- [182] Y.F. 唐, 梁, 杨, 杨, 郑, 压控膜型超薄主动声学超表面, *应用。物理快报* 12 (6) (2019) 064501.
- [183] Li, Xu, Y. Yao, J. Tang, 压电超表面调制的可调谐反射声波前, *J Phys D Appl Phys* 54 (9) (2020) 095102.
- [184] S. Alan, A. Allam, A. Erturk, 可编程模式转换和带隙使用压电超材料形成表面声波, *Appl Phys Lett* 115 (9) (2019) 093502.
- [185] Z. Liang, M. Willatzen, J. Li, J. Christensen, 可调谐声学双负性超材料, *Sci Rep* 2 (2012) 859.
- [186] 邵华, 何华, 陈桂, 陈宇, 两种用于主动波传播控制的灯型压电超材料的新设计, *中国。J. Phys.* (2020) .
- [187] A. Bacigalupo, M.L. De Bellis, D. Misseroni, 具有周期性压电微结构的可调谐声学超材料的设计, *Extreme Mech Lett* 40 (2020) 100977.
- [188] M. Oudich, Y. Li, 利用超材料板进行可调谐亚波长声能收集, *J Phys D Appl Phys* 50 (31) (2017) 315104.
- [189] S. Qi, Y. Li, B. Assouar, 基于多边超表面的声学聚焦和能量限制, *Phys Rev Appl* 7 (5) (2017) 054006.
- [190] X. Wang, J. Xu, J. Ding, C. Zhu, Z. Huang, 一种使用层状声学超材料的紧凑型低频声能收集器, *Smart Mater. Struct.* 28 (2) (2019) 025035.
- [191] J. Li, X. Zhou, G. Huang, G. Hu, 兼具隔音和能量收集功能的声学超材料, *Smart Mater. 结构*. 25 (4) (2016) 045013.
- [192] R.U. Ahmed, S. Banerjee, 使用亚波长尺度声弹性超材料进行低频能量清除, *AIP Adv* 4 (11) (2014) 117114.
- [193] M. Yuan, Z. Cao, J. Luo, R. Ohayon, 有效的声学元结构低频声能收集, *低频噪声、振动和主动控制杂志* 37 (4) (2018) 1015 - 1029.
- [194] 张X., 张H., 陈Z., 王G., 利用声学超材料同时实现大隔音和高效能量收集, *Smart Mater. 结构*. 27 (10) (2018) 105018.
- [195] 金明, 梁斌, 杨建, 程建城, 具有深亚波长厚度和机械刚性的超薄平面超表面声能采集器, *Sci Rep* 9 (1) (2019) 1-7.
- [196] 袁明, 盛晓, 曹正, 庞正, 黄国强, 深亚波长声学器件联合声能采集与噪声抑制, *Smart Mater. 结构*. 29 (3) (2020) 035012.
- [197] K.H. Sun, J.E. Kim, J. Kim, K. Song, 使用双声能量收集 bly 卷绕声学超材料腔体, *Smart Mater. 结构*. 26 (7) (2017) 075011.
- [198] S. Qi, M. Oudich, Y. Li, B. Assouar, Acoustic energy harvesting based on a planar acoustic metamaterial, *Appl Phys Lett* 108 (26)
- [199] Q2016Wu26B5W1.Chen, C.M. Liu, Acoustic energy harvesting using resonant cavity of a sonic crystal, *Appl Phys Lett* 95 (1) (2009)
- [200] Q1350Ma, T. Tan, F.R. Liu, L.C. Zhao, W.H. Liao, W.M. Zhang, Acoustic energy harvesting enhanced by locally resonant 29 metasurfaces, *Smart Mater. Struct.*
- [201] T. Deng, S. Zhang, Y. Gao, Tunability of band gaps and energy harvesting based on the point defect in a magneto-elastic acoustic metamaterial plate, *Appl. Phys Express* 13 (1) (2019) 015503.
- [202] S. Qi, B. Assouar, Acoustic energy harvesting based on multilateral metasurfaces, *Appl Phys Lett* 111 (24) (2017) 243506.
- [203] S. Qi, B. Assouar, Ultrathin acoustic metasurfaces for reflective wave focusing, *J Appl Phys* 123 (23) (2018) 234501.
- [204] K. Yi, M. Collet, S. Chesne, M. Monteil, Enhancement of elastic wave energy harvesting using adaptive piezo-lens, *Mech Syst Signal Process* 93 (2017) 255 - 266.
- [205] G.S. Liu, Y.Y. Peng, M.H. Liu, X.Y. Zou, J.C. Cheng, Broadband acoustic energy harvesting metasurface with coupled helmholtz 113 resonators, *Appl Phys Lett*
- [206] P. Eghbali, D. Younesian, S. Farhangdoust, Enhancement of the low-frequency acoustic energy harvesting with auxetic resonators, *Appl Energy* 270 (2020) 115217.
- [207] M. Yuan, Z. Cao, J. Luo, Z. Pang, Helix structure for low frequency acoustic energy harvesting, *Rev. Sci. Instrum.* 89 (5) (2018) 055002.
- [208] M. Yuan, Z. Cao, J. Luo, Z. Pang, Low frequency acoustic energy harvester based on a planar helmholtz resonator, *AIP Adv* 8 (8) (2018) 085012. [209] R. Ahmed, D. Madisetti, S. Banerjee, A sub-wavelength scale sonic crystal for harvesting energies at very low frequencies (< 1 khz) using controlled geometric configurations, *J Intell Mater Syst Struct* 28 (3) (2017) 381-391.
- [210] F. Mir, M. Saadatzi, R.U. Ahmed, S. Banerjee, Acoustoelastic metawall noise barriers for industrial application with simultaneous energy harvesting capability, *Applied Acoustics* 139 (2018) 282 - 292.
- [211] Jin, B. Bonello, Y. Pan, Acoustic metamaterials with piezoelectric resonant structures, *J Phys D Appl Phys* 47 (24)
- [212] C20\$4en24B30g, W. Ji Hong, W. Gang, W. Xi Sen, Tunable band gaps in acoustic metamaterials with periodic arrays of resonant shunted piezos, *Chin. Phys. B* 22 (7) (2013) 074301.
- [213] K. Koziol, J. Vilatela, A. Moisala, M. Motta, P. Cunniff, M. Sennett, A. Windle, High-performance carbon nanotubes, *Nature* 431 (6915) (2004) 1892 - 1895.
- [214] A.M. Mohamed, K. Yao, Y.M. Yousry, S. Chen, J. Wang, S. Ramakrishna, Open-cell poly(vinylidene fluoride) foams with polar phase for enhanced airborne sound absorption, *Appl Phys Lett* 113 (9) (2018) 092903.
- [215] S. Jayaram, C.H. Lee, M. Xie, D. Blair, N. Bauman, Y.K. Yap, S.A. Green, H. Liu, Noncovalent functionalization of boron nitride nanotubes with poly(p-phenylene-ethynylene)s and polythiophene, *ACS Applied Materials & Interfaces* 2 (1) (2010) 104 - 110.
- [216] H.F. Xiang, S.X. Tan, X.L. Yu, Y.H. Long, X.L. Zhang, N. Zhao, J. Xu, Sound absorption behavior of electrospun polyacrylonitrile nanofibrous membranes, *Chin. J. Polym. Sci.* 29 (6) (2011) 650 - 657.
- [217] Rabbani, H. Bahrambeygi, K. Nasouri, A.M. Shoushtari, M.R. Babaei, Manufacturing of pan or pu nanofiber layers/pet nonwoven composite as highly effective sound absorbers, *Adv. Polym. Tech.* 33 (4)
- [218] K20Q4moshi, R. Rasuli, Subwavelength structure for sound absorption from graphene oxide-doped polyvinylpyrrolidone nanofibers, *Appl. Phys. A* 9 (122) (2016) 1 - 7.
- [219] C.M. Wu, M.H. Chou, Polymorphism, piezoelectricity and sound absorption of electrospun pdvf membranes with and without carbon nanotubes, *Compos Sci Technol* 127 (2016) 127 - 133.
- [220] Y. Li, S. Wang, Q. Peng, Z. Zhou, Z. Yang, X. He, Y. Li, Active control of graphene-based membrane-type acoustic metamaterials using a low voltage, *Nanoscale* 11 (35) (2019) 16384 - 16392.
- [221] K. Zhang, C. Ma, Q. He, S. Lin, Y. Chen, Y. Zhang, N.X. Fang, X. Zhao, Metagel with broadband tunable acoustic properties over air-water-solid ranges, *Adv Funct Mater* 29 (38) (2019) 1903699.
- [222] A. Ba, A. Kovalenko, C. Aristegui, O. Mondain-Monval, T. Brunet, Soft porous silicone rubbers with ultra-low sound speeds in acoustic metamaterials, *Sci Rep* 7 (1) (2017) 1 - 6.
- [223] M. Kushwaha, B. Djafari-Rouhani, L. Dobrzynski, Sound isolation from cubic arrays of air bubbles in water, *Phys. Lett. A* 248 (2 - 4)
- [224] 1998to252A. B. Etienne, M. Fink, H. Willaime, P. Tabeling, A. Tourin, Design and characterization of bubble phononic crystals, *Appl Phys Lett* 95 (17) (2009) 171904.
- [225] T. Brunet, A. Merlin, B. Mascaro, K. Zimny, J. Leng, O. Poncelet, C. Aristegui, O. Mondain-Monval, Soft 3d acoustic metamaterial with negative index, *Nat Mater* 14 (4) (2015) 384 - 388.
- [226] Z. Huang, M. Su, Q. Yang, Z. Li, S. Chen, Y. Li, X. Zhou, F. Li, Y. Song, A general patterning approach by manipulating the evolution of two-dimensional liquid foams, *Nat Commun* 8 (1) (2017) 1 - 9.
- [227] Z. Huang, S. Zhao, M. Su, Q. Yang, Z. Li, Z. Cai, H. Zhao, X. Hu, H. Zhou, F. Li, et al., Bioinspired patterned bubbles for broad and low-frequency acoustic blocking, *ACS Applied Materials & Interfaces* 12 (2020) 74764 - 74774.
- [228] Z. Huang, S. Zhao, M. Su, Q. Yang, Z. Li, Z. Cai, H. Zhao, X. Hu, H. Zhou, F. Li, et al., Bioinspired patterned bubbles for broad and low-frequency acoustic blocking, *ACS Applied Materials & Interfaces* 12 (2020) 74764 - 74774.
- [229] 12 Zhang, 2019, Adv. 7 (34) (2021) Paper 1749. Theoretical optimization of trapped-bubble-based acoustic metamaterial performance, *Applied Sciences* 10 (16) (2020) 5720. [230] Z. Huang, S. Zhao, Y. Zhang, Z. Cai, Z. Li, J. Xiao, M. Su, Q. Guo, Y. Song, et al., Tunable fluid-type metasurface for wide-angle and multifrequency water-air acoustic transmission, *Research* 2021 (2021).