

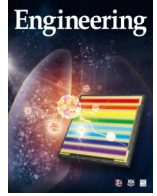


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Metamaterials—Perspective

未来工程中的声学超构材料

鲁强兵^a, 李鑫^a, 张秀娟^a, 卢明辉^{a,b,c,*}, 陈延峰^{a,c,*}

^a National Laboratory of Solid State Microstructures & Department of Materials Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China

^b Jiangsu Key Laboratory of Artificial Functional Materials, Nanjing University, Nanjing 210093, China

^c Collaborative Innovation Center of Advanced Microstructures, Nanjing University, Nanjing 210093, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 28 November 2021

Revised 27 March 2022

Accepted 20 April 2022

Available online 28 July 2022

关键词

声学超构材料

吸声/隔声

声学成像

工程应用

摘要

声学超构材料(acoustic metamaterials, AMMs)是一种人工结构材料,可以表现出自然材料所没有的奇异特性,如负的等效体积模量、负的等效质量密度和负的折射率等。这些有趣的物理现象为操纵声波提供了新的手段,引起了广泛的关注。在过去的20年里,对AMMs的基础研究取得了巨大的成就,这不仅促进了现代声学的发展,同时展现了AMMs在工程应用中的潜力。本文中,我们回顾了AMMs的最新进展,着重展望其在工程领域的应用,特别是在吸声/隔声、声成像、声隐身等领域。此外,我们还概述了工程应用过程中面临的机遇和挑战。

©2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

声学是研究机械波(即声波和弹性波)的产生、传播、检测和转换的物理学分支,在现代工程和医学领域(如通信、成像、非侵入超声手术等)发挥着越来越重要的作用。声波的波长较长,在材料中的衰减较弱[1],说明声波具有较强的衍射能力和穿透能力,正因此,超声成像展现出光学成像无法比拟的成像深度。另一方面,这些特点为声波的操纵带来了困难和挑战。随着声学超构材料(acoustic metamaterials, AMMs)的出现,操纵复杂的声波和振动成为可能。最早出现的声子晶体(sonic crystals, SCs) [2–3]类AMMs的研究可以追溯到20世纪90年代,通过在主体材料中引入高阻抗系数的周期性结构单元,声

波在SCs中发生强烈的布拉格散射[4–5],使得SCs表现出独特的能带结构。此外,通过精巧的结构设计,在SCs中还能观察到负折射[6–7]、异常透射[8]和边界态[9]等新奇现象。

随着局域共振(local resonance)类AMMs的发现[10–12], AMMs的范围得到了进一步扩展。与SCs不同,其要求晶格常数和声波的波长在同一数量级,局域共振类AMMs的晶格常数远小于被操纵声波的波长。因此,局域共振AMMs在调节深亚波长的声波方面显示出明显优势。长期以来,不同学科的研究人员设计了各种奇异本构参数的AMMs结构,如负的等效体积模量、负的等效质量密度和负折射率,来实现各种功能,如吸声[13]、声隐身[14–15]、声聚焦[16–17]和反向多普勒效应[18]等。声学超表

* Corresponding authors.

E-mail addresses: luminghui@nju.edu.cn (M. Lu), yfchen@nju.edu.cn (Y. Chen).

2095-8099/© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

英文原文: Engineering 2022, 17(10): 22–30

引用本文: Qiangbing Lu, Xin Li, Xiujuan Zhang, Minghui Lu, Yanfeng Chen. Perspective: Acoustic Metamaterials in Future Engineering. *Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.04.020>

面[19–22]、空间螺旋型 AMMs [23–25]的研究极大地丰富了 AMMs 的内涵。此外，受量子电子学和拓扑电子学的启发，许多 AMMs 被设计用于模拟这些拓扑现象和性质，如狄拉克锥型色散关系[26–27]、伪扩散传输[28]、拓扑单向边界态[29–31]、时间-宇称对称 (parity-time-symmetric) 声学[32–34]和声学非互易传播[35–36]等。

对 AMMs 的研究为航空工业、轨道交通、生物医学、新基础设施建设等领域的工程应用奠定了坚实的基础。然而，如何设计和优化 AMMs 以满足现实世界中的需求仍然是一个挑战。迄今为止，有大量关于 AMMs 的评论文章和书籍[37–46]，它们全面、详细地阐述了其物理本质、结构的具体类别和发展历史。在这里，我们将通过回顾在吸声/隔声、声成像、声隐身等领域取得的重大进展，重点介绍 AMMs 的实际应用。此外，我们还将概述 AMMs 在未来声学工程应用中的机遇和挑战。

2. 声学超材料的应用

2.1. 吸声/隔声

发动机、轮轨摩擦、空调等产生的噪声污染是当今社会影响人类生活的主要问题之一。对声波能量的耗散和阻隔声波的传播是减少甚至消除噪声污染的两种策略。然而，对于穿透力强、衰减弱的低频声波，传统的吸声/隔声材料体积过于庞大[13,47]。通过共振效应提高声波能量密度和产生传播带隙，亚波长结构的 AMMs 可以分别有效地实现吸声和阻止声传播。绝大多数用于吸声/隔声的 AMMs 由装饰膜谐振器 (decorated membrane resonators, DMRs)、亥姆霍兹谐振器 (Helmholtz resonators, HRs)、法布里-珀罗谐振器 (Fabry-Perot resonators, FPRs) 及其各种变体构成。

第一个 DMRs 型 AMMs 是在一个 0.28 mm 厚的圆形薄膜的中心附着一个小重物，共振频率为 146 Hz [48]，谐振器的尺寸远小于其 2.35 m 的谐振波长。进一步，研究人员将刚性重物以非对称的排布方式附着在弹性薄膜上[49] [图 1 (a)]，实现了 100~1000 Hz 范围内对应共振频率上的一致吸收。受到几何约束[50]的影响，DMRs 存在一个固有 50% 的吸声极限。为了克服这一限制，有三种可行的策略：一种策略是将 DMRs 靠近硬反射壁，因为壁和 DMRs 之间的多次反射可导致超过 99% 的能量吸收[51]。利用单极子和偶极子谐振器产生简并共振[图 1 (b)]是实现完美吸声的另一种策略[52]。第三种策略是引入一个与待吸收声波振幅相同但相位相反的控制波，以消除反射和透射，从而实现 100% 的吸声[53–55]。这种方法也称之为

相干完美吸收 (coherent perfect absorption, CPA) 法。除噪声吸收外，DMRs 超材料还可用于噪声隔离。Wang 等 [56]提出了一种膜约束型 DMRs 超构材料，通过抑制膜中心的振动，以隔离低频声波的传播。在一些对吸声/隔声材料的重量和体积有限制的应用领域，如飞机、高速铁路、汽车和船舶等，DMRs 超构材料因为结构简单、体积小和重量轻等特征，有望实现工程应用。

尽管 DMRs 具有优异的吸声/隔声性能，但由于疲劳，塑料薄膜在长时间运行后很容易失效。因此，使用刚性固体材料制造用于吸声的 HRs 和 FPRs 是另一个研究热点。通常，受与 DMRs 相似的几何约束，单个 HRs 表现出单极共振，导致 50% 的吸收上限。为了解决这个问题，Merkel 等 [57]通过固有损耗和高 Q 值时“透明模式”的相互作用证明了完美的吸声效果。此外，在对称 (非对称) 结构中实现了略超过 50% (和接近 96%) 的单侧吸收。两端贯通的结构另一个优势在于吸声的同时能够保持通风，使得封闭的环境 (如计算机机房、空调外机散热器等) 可以保持新鲜空气循环。除了双端口情况外，基于 HRs 的声学三端口网络也被提出，以在相同频率下既可以作为完美的吸声结构，也可以用于声波辐射 [58]。为了进一步减少体积，将开放孔嵌入到 HRs [59–60] 结构中最为常见。

以上实例证明提高声波的能量密度可以极大耗散声波能量，实现高效率吸声。然而，共振特性带来的窄频率带宽吸收制约了 AMMs 的实际应用。一个自然的想法是，巧妙地构建一个由不同共振频率单元组成的混合系统，让每个共振单元之间有微小的共振频率差异，以获得整体的宽带吸声 [61–64]。2006 年，一种基于阵列面板辐射阻抗的理论方法 [65] 被提出，用于计算低频范围内 HRs 阵列的吸声。从那时起，这种窄颈 HRs 被广泛探索，以减小谐振器的空间尺度并实现宽带吸声。一个例子是将一个或多个带有小孔的挡板插入 HRs 内部，从而形成穿孔复合 HRs [66] [图 1 (c)]，其可以在 450~1360 Hz 的宽带范围内实现连续的近完美吸收。

对于 FPRs，每个通道需要四分之一波长，这意味着低频吸声结构仍然有着十分庞大的空间尺寸。卷绕或折叠通道是减小吸声结构尺寸的一种有效方法。通过将具有不同共振频率的通道堆叠在一起，卷绕的空间结构 [23,67–68] 在宽带吸声上表现出良好的性能。然而，对于在指定频率范围内，给定吸声性能的情况下，AMMs 是否存在一个最小厚度的极限？因果律约束 (causality constraint) [13,69] 给出了合适的回答，其揭示了最小化吸收体厚度与吸收频谱之间的关系。在因果律指导下，Yang 等 [69] 实现了一个 10.86 cm 厚的结构，显示出宽带、近乎完美的平坦

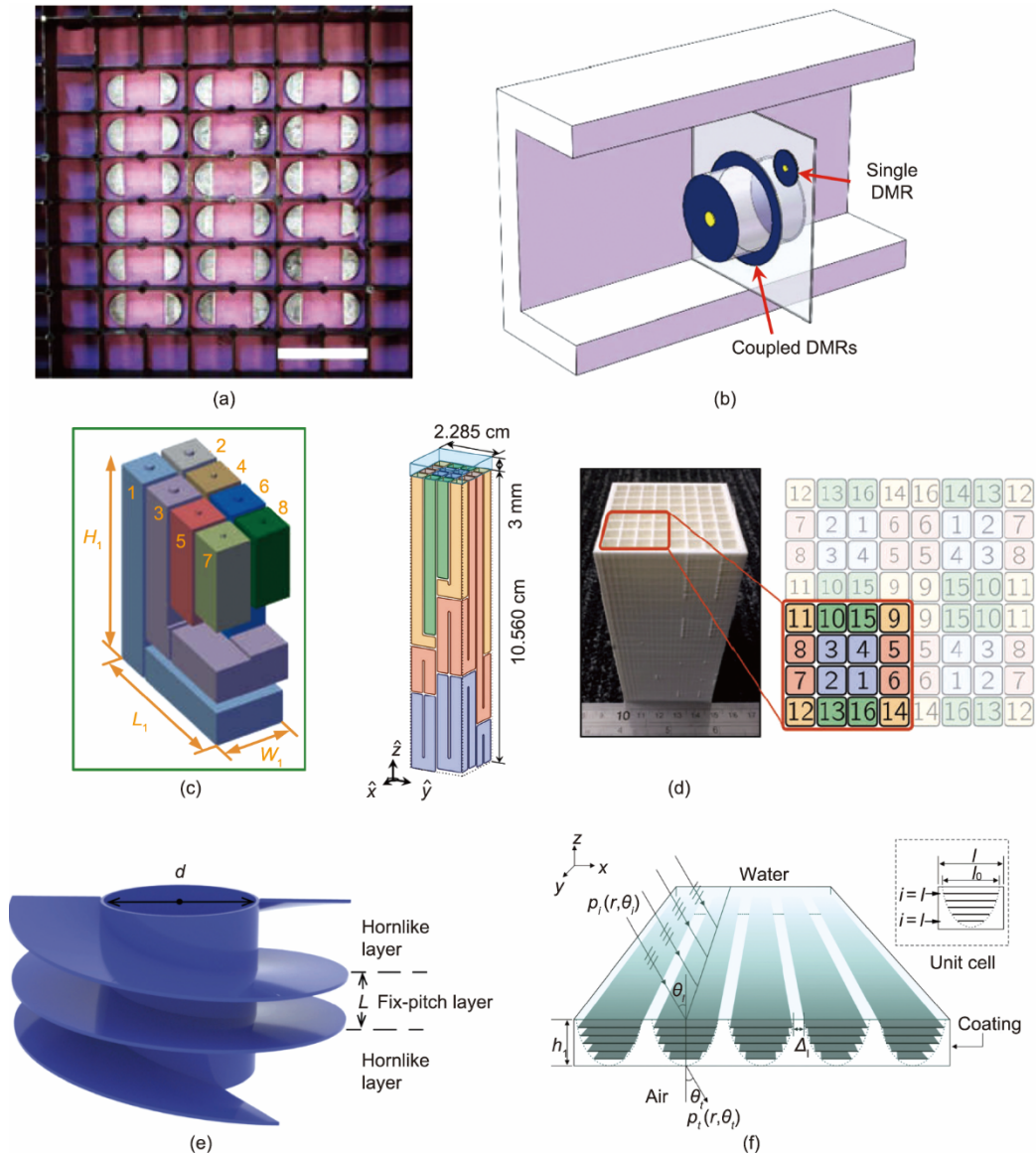


图1. 用于吸声/隔声的AMMs。(a)阵列薄膜谐振器AMMs照片[49];(b)简并薄膜谐振器的剖视图[52];(c)由8个谐振频率谐振器组成的超表面单元组示意图[66];(d)穿孔复合材料HRs示意图[69];(e)带有中心孔的两个螺旋结构AMMs的示意图[71];(f)在黏弹性涂层内嵌入周期分布板散射体组成水下吸声结构示意图[78]。图中所有缩写的定义见引用参考文献。

吸收谱[图1(d)]。然而,在某些情况下,可以通过操纵吸收器背面的边界条件来规避因果约束。Mak等[70]实现了比因果极限小一个数量级的最小吸收体厚度。阻隔声波的传播,同时保持通风也是AMMs的另一个优势。最近,一种基于类法诺干涉(Fano-like)的平面通风声屏障被提出,其具有中心空孔和两个不同螺距的螺旋结构[71],可阻挡900~1418 Hz频率范围内90%以上的入射能量[图1(e)]。与DMRs型AMMs相比,由刚性固体材料组成的HRs和FPRs超构材料可以大大延长使用寿命。鉴于其承载和装饰功能,这些AMMs有望在高速公路、智能电网和高速列车等应用中降低噪声。

水声噪声的吸收/隔绝可用于声纳屏蔽、水下通信、

海洋开发等领域,是AMMs另一潜在应用方向。然而,因为高静水压力和较小的阻抗对比度制约了“超原子”(meta-atoms)的构建,水声吸声/隔声超构材料的研究进展缓慢。一些初步尝试是在刚性结构中嵌入气泡结构[72~74]或在高黏度弹性主体材料中嵌入高密度球体作为共振单元[75]。受到生物超疏水系统的启发,一种气泡阵列的AMMs[76]被提出。由于局部共振,这种AMMs可以阻止低频声波。在不改变材料厚度的情况下改变气泡的大小和气泡之间的距离,可以在9~1756 kHz的范围内调整工作频率。Duan等[77]报道了另一种轻型AMMs,其由橡胶涂层和嵌入经典亥姆霍兹共振腔的金属颈部构成。通过调制内部几何参数,这种准亥姆霍兹谐振器在306~921 Hz之

间实现了几乎完美的吸收。为了拓宽吸声带宽, Zhang等[78]最近提出了一种使用不同散射体尺寸的方法[图1(f)], 与此同时 Shi等[79]使用了多涂层结构均取得了良好效果。

除了共振结构之外, 具有梯度折射率的非共振 AMMs 利用散射体的密度变化来调制局部折射率, 从而控制入射声波的损失。基于声学黑洞原理和多重散射理论, Naify等[80]设计了一种具有线性渐变声速的圆柱壳, 用于全方位水下吸声。在此基础上, Wang等[81]进一步开发了一种新的二维轴对称水下全向吸收器, 具有声学梯度折射率结构和空心吸收芯。然而, 对应于小波长的兆赫频段超声波的研究在材料制备上仍然存在极大的困难(更多细节见第3节)。

2.2. 声成像

声成像在医学超声、无损检测和光声成像中有着重要应用。更高的空间分辨率一直是这些领域的研究重点。与光学成像一样, 携带物体高频信息的倏逝波, 在离开物体表面时呈指数衰减, 导致常规光学/声学成像技术存在分辨率极限。如何获取倏逝波携带的信息是实现高分辨率成像的关键。得益于 AMMs 超越寻常材料的特性, 两种策略可以有效提高成像的分辨率。一种方法依赖于放大倏逝波以在一定距离内进行检测[82], 另一种方法将倏逝波变为传播波[83], 以便于测量。

第一种策略受到 John Pendry 的“完美透镜”[84]所启发, 通过使用光学负折射率材料来放大倏逝波[85–86]。在声学中同样如此, 通过设计了一种负折射率的 2D 薄膜谐振器 AMMs, 可以使倏逝波源获得 17 倍的净振幅增益[78]。类似结构的 AMMs 也被提出来, 使得从物体辐射的倏逝波共振耦合到 AMMs 表面声场, 并被增强, 以此来突破成像的衍射极限[87]。现有的研究表明, 通过使用 2D 薄膜谐振器 AMMs, 可以放大表面倏逝波, 从而分出距离为 $1/17$ 波长的两点源[88][图2(a)]。除了薄膜型 AMMs 之外, Kaina等[89]提出了一种由 HRs 组成的负折射率声学超透镜[图2(b)], 实现了 7 倍衍射极限的亚波长聚焦和 3.5 倍的分辨率。

第二种策略基于各向异性 AMMs, 通过耦合倏逝波分量, 可以将倏逝波转换为传播波。一般来说, 这种类型的 AMMs 通过激励声波导内的陷波共振[83,90–91]。通过将倏逝波转换为传播波, 各向异性的 AMMs 甚至可以在远场实现高分辨率成像。例如, Li等[83]使用 36 个计算机数字控制的黄铜翅片将倏逝波分量转换为传播波, 传播波可以传播到远场, 物体的深亚波长特征得以保持完整

[图2(c)]。

除上述策略外, 选择一个与周围介质有高折射率对比的平板, 在平板结构中激发波导谐振。包含物体细节信息的高空间分量可以耦合到这种平板波导的陷波模式中, 就可以在远平面获得亚波长图像[92]。由声学超透镜产生的超振荡波包提供了另一种打破超声成像衍射极限的方法[93][图2(d)]。由于 AMMs 的工作带宽较窄, 这可能导致成像中出现严重色差, 引入非共振单元[83]和鳍形超透镜[94–96]也可以有效解决这一问题。

虽然 AMMs 的大多数成像应用集中于空气声, 一些关于水声透镜的报道已经开始出现[97–98]。Peng等[99]设计了梯度负折射率 AMMs, 以实现宽带水声聚焦, 其焦距可通过改变晶格距离进行调整。这些材料有望用于超声成像, 因为超声成像通过发射宽带脉冲声波, 再接收回波进行成像。获得梯度折射率的宽带聚焦透镜还有其他方法, 包括利用 2D 五模材料[100], 使用具有非共振结构的超表面[101], 或者使用由单相杆制成的简单 SCs。另外, 设计声学复合透镜还可以在 15–25 kHz [102]频段实现三维水下声聚焦[图2(e)]。

2.3. 其他应用

除了上面讨论的应用之外, 还有其他几个值得注意的分支, 如声学隐身、单向声传播、声学互补超材料和阻抗匹配等。隐身的概念首次在光学中提出[103–104], 描述了一种物体在光学环境中不可见的现象, 就好像它消失了一样。基于变换声学方程[105–107], 已经提出了各种用于隐身的结构, 如交替各向同性层[108]、多层复合材料[15]和金字塔状穿孔板结构[109–110]。对于水声隐身, Zhang等[111]提出了一种由窄通道连接的亚波长腔构成的平面网络状 AMMs [图3(a)]来实现的方法。

单向声音传播是另一个值得关注的课题。其中入射波仅在一个方向上传播, 而在另一个方向被“阻挡”, 其行为类似于二极管, 并可能用于通信、反窃听和声学计算。对于这种非互易传播, 通常需要引入循环流体来打破时间反演对称性[36], 但与之伴随的声场不稳定性和气流的高黏度带来了新的挑战。另一种解决方案是打破空间反演对称性, 实现了更高效率、更宽带宽和更低功耗的单向声音传播[112][图3(b)]。

为了实现单向传播或减少背向散射, 另一个蓬勃发展的领域最近吸引了大量注意力, 即拓扑相材料[113–114]。拓扑物理学起源于电子系统, 首次被发现于著名的整数量子霍尔效应, 很快扩展到光学[115–116]和声学[117–118]等经典波领域。由于拓扑保护, 拓扑超构材料有着鲁棒的

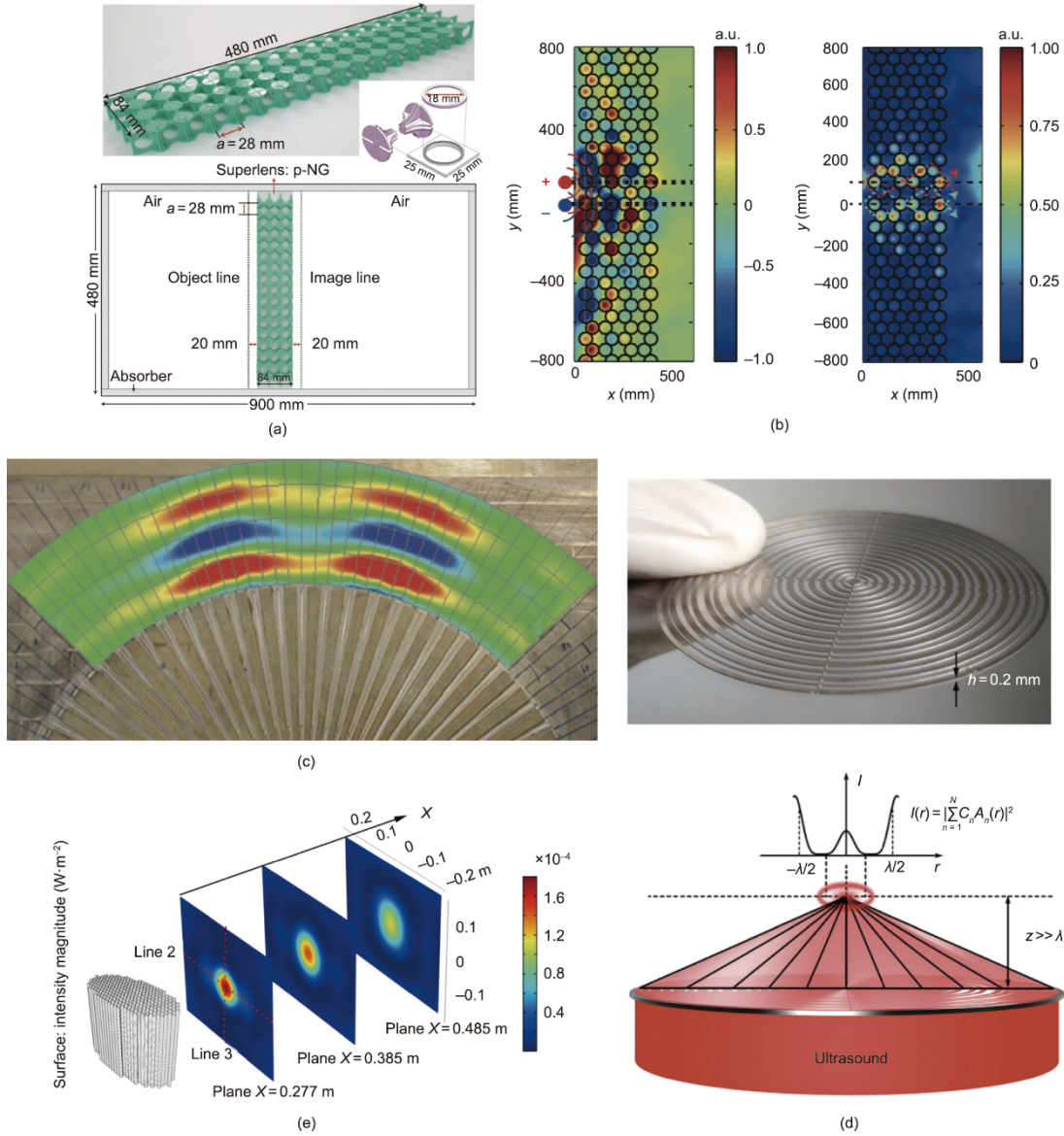


图2. 用于成像的AMMs。(a) 基于薄膜型AMMs制成的声学超透镜[88]；(b) 使用平面声学超透镜对两个异相源进行超分辨率成像[89]；(c) 亚衍射限制双光源放大成像的实验演示[83]；(d) 声学超表面透镜（上图）和克服倏逝波探测极限的超振荡场模式声场分布（下图）[93]；(e) 经超透镜聚焦之后的近平面波的声强的数值仿真结果[102]。图中所有缩写的定义见引用参考文献。

界面状态[117]来抑制声波的背向散射。这一特性使其在各个领域具有革命性的应用，包括低损耗波导、拓扑滤波和声波准直。更有趣的是，物质的拓扑相位为光和声音控制带来了新的自由度。例如，通过设计由钢棒组成的二维蜂窝状晶格，He等[119]实现了量子自旋霍尔效应的声学模拟，其支持背向散射免疫[图3(c)]。声学中伪自旋的产生促进了声学自旋电子学[22,120]的发展，这为自旋编码的声学通信展现了潜在加价值。此外，声学谷绝缘体[121]、Weyl半金属[122]和高阶拓扑绝缘体[31]的最新发展进一步增强了人类对各种声音的控制能力，并导出多种应用场景。

此外，当声波遇到阻抗失配较大的障碍物或界面时，

大量声能将被散射。为了恢复畸变声场，声学互补超构材料（complementary metamaterials, CMMs）被提出。一般来说，CMMs同时要求负的和各向异性材料性质，以防止过大的共振阻尼。它们在经颅超声和无损检测中具有潜在应用，例如，一种由固定薄膜和侧面分支结构阵列化组成的准2D声学CMMs[123]，可用于以非侵入方式恢复因颅骨等导致的畸变声场[图3(d)]。

克服大阻抗失配和增强水-空气界面处的声传播对于水下通信、成像和遥感具有重要意义。现有的研究已经证明声学超表面能够更优于传统的四分之一平板或多层抗反射涂层的阻抗匹配[124]。一种由锁定的空气层和具有多个中空单元的疏水固体基底组成的超表面，在10~4000 Hz的频

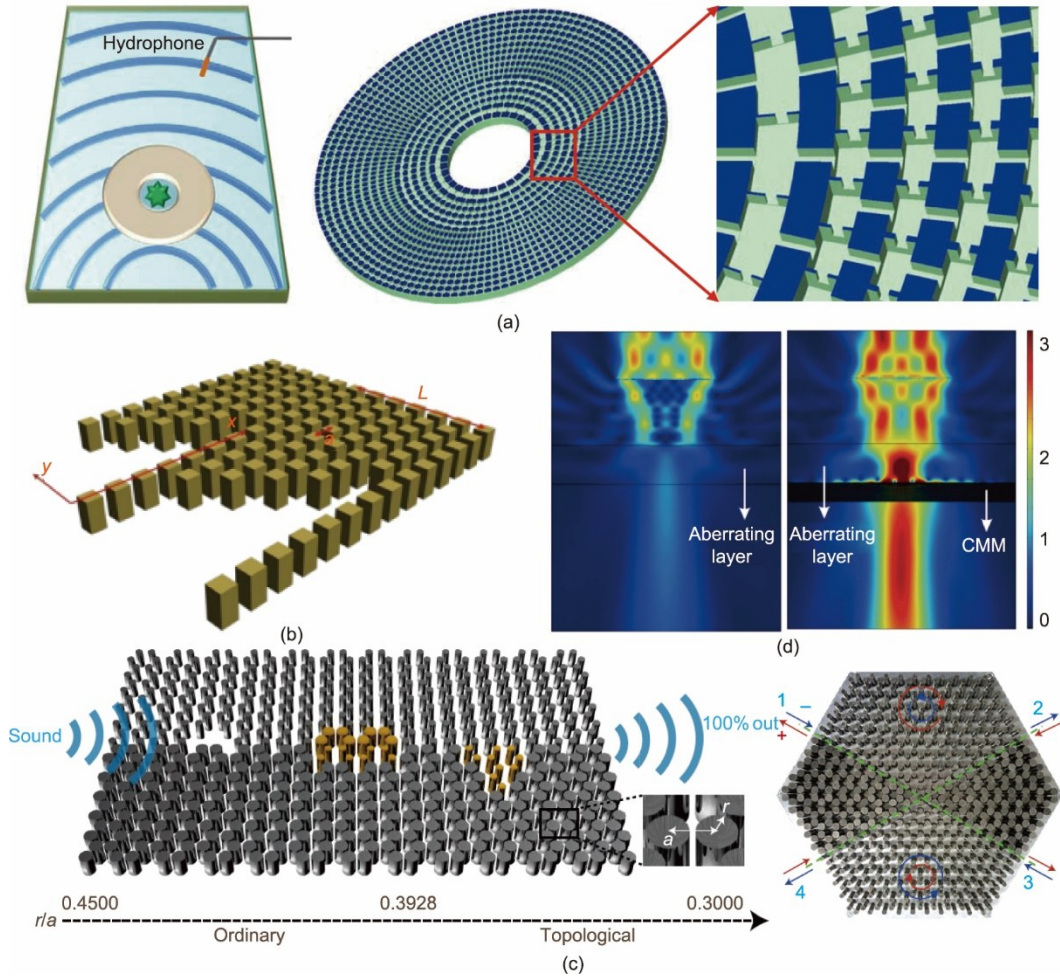


图3. (a) 声学圆柱形隐身斗篷的结构示意图[111]; (b) 在 y 方向上具有周期性布置的声子晶体声二极管示意图[112]; (c) 声学拓扑绝缘体示意图, 由两种声子“石墨烯”构成, 具有相同的晶格常数, 但不同的“原子”(即不锈钢棒)半径(左)和交叉波导分离器照片(右)[119]; (d) 仅在颅骨(左)和经过CMM后再经过颅骨(右)的未聚焦波束的声强度场分布[123]。图中所有缩写的定义见引用参考文献。

率范围内将声波透射能量提高200倍以上[125]。通过改变固体衬底的浸没深度, 在不损失能量的前提下, 还能改变工作频率。受“莲花效应”的启发, 使用超疏水铝板和空气构建一个微型空气层[126]。在10~100 kHz的频率范围内, 可以获得接近100%的能量透射系数和广角水-空气声传输。

另一个应用是医学超声领域, 要求压电材料和人体组织之间能够做到很好的阻抗匹配。引入具有梯度折射率的AMMs层是实现阻抗匹配的常用方法[127]。Li等[128]提出了一种各向异性的锥形AMMs匹配层, 其沿超声波传播方向具有梯度声阻抗, 以实现超声波在宽频率范围内的超常传播。在上述研究中, 阻抗匹配效应对于垂直入射是有效的, 但随着入射角的增加, 阻抗匹配效果逐渐恶化。为了实现广角声阻抗匹配, Liu等[129]通过应用具有空间色散参数的有效介质理论, 使用硅橡胶设计一维和二维声结构, 实现了与水的广角和宽带阻抗匹配, 得到了接近100%的声透射。

3. 讨论

在本文中, 我们首先简要概述了AMMs的研究内容、发展历程。然后, 我们回顾了AMMs在几个有前景领域中的潜在应用, 如吸声/隔声、声成像、声隐身等。尽管AMMs的基础研究丰富多样, 但在实际工程中, 应用AMMs仍然存在一些挑战, 以下做简要探讨。

共振引起的窄工作带宽和不可避免的能量损失会严重阻碍AMMs的实际应用。前者可以通过集成宽共振谱的AMMs和设计可调谐主动超构材料来解决。拓扑绝缘体和相关的拓扑器件可以提供拓扑保护, 实现无损声传播, 可以作为后一个问题的潜在解决方案。此外, 扬声器、换能器和其他能量转换方法(例如, 具有温度或电磁调节的多物理耦合)可用于补偿AMMs的能量损耗。

除了空气声AMMs外, 越来越多的人关注用于流体的超构材料设计。然而, 如上所述, 流体和固体主体材料

之间的阻抗对比度相对较小（仅约一个数量级）。大量声能传播到流体和固体结构中可能导致复杂的传播路径，因此等效声学参数可能更加复杂。解决这一挑战的一种策略是将气泡构建为谐振器，或者用弹性薄膜包裹气泡；在这种情况下，可以通过改变气泡的预设压力或通过选择不同的封装材料来调节等效参数。

另一个挑战在于 AMMs 的制造。简单结构 AMMs [130–131] 可通过常规制造方法制造，包括机械加工、铸造、注塑和激光切割。具有复杂 3D 结构的 AMMs，如通道[67]、腔室[132]和球形或圆柱形填充物[10]，主要依靠手工制造和 3D 打印。然而，大规模的手工制造可能会导致一致性损失和产品质量不稳定。3D 打印技术非常适合制造复杂结构。然而，当涉及大规模生产时，3D 打印可能会受到高成本消耗、低生产效率和材料品种有限的影响。因此，在现实世界 AMMs 应用的道路上，开发低成本、高效率 and 多种材料的新一代 3D 打印技术尤为迫切。此外，兆赫兹范围内的 AMMs 对于提高医学超声成像的分辨率和提高高强度超声手术的精度具有重要价值。然而，微米级的制造方法鲜少报道。因此，高频 AMMs 的制备迫切需要先进的微/纳米加工技术。

此外，定制特定功能或者结构的 AMMs 在工程实用化过程中至关重要。然而，确定 AMMs 的结构、功能和特性之间的复杂关系需要相当大的努力。将 AMMs 数字化与人工智能相结合，是节省非创新设计时间和精力最可能途径。如图 4 所示，在设计和优化 AMMs 时，全面考虑基本原理、性能、制造和应用，并在所有方面达成平

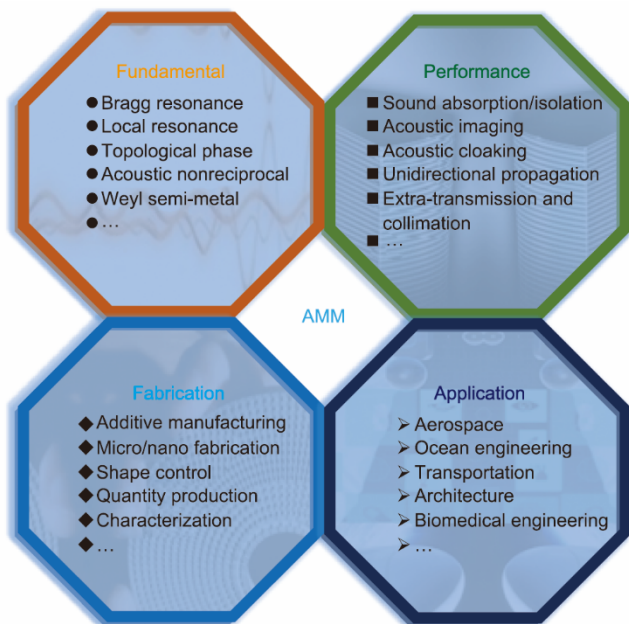


图 4. 设计和制备 AMMs 时应综合考虑的所有要素。

衡，是最终工业应用的关键。

致谢

本工作得到了国家重点研发计划(2017YFA0303702 和 2018YFA200) 和 国家自然科学基金(12172164、11625418、11774297、51732006、11890700 和 51721001) 的支持。在此表示感谢。

Compliance with ethics guidelines

Qiangbing Lu, Xin Li, Xiujuan Zhang, Minghui Lu, and Yanfeng Chen declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Kinsler LE, Frey AR, Coppens AB, Sanders JV. Fundamentals of acoustics. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.; 2000.
- [2] Schriemer HP, Cowan ML, Page JH, Sheng P, Liu Z, Weitz DA. Energy velocity of diffusing waves in strongly scattering media. *Phys Rev Lett* 1997; 79(17):3166–9.
- [3] Kushwaha MS, Halevi P, Dobrzynski L, Djafari-Rouhani B. Acoustic band structure of periodic elastic composites. *Phys Rev Lett* 1993;71(13):2022–5.
- [4] Sigalas M, Economou EN. Band structure of elastic waves in two dimensional systems. *Solid State Commun* 1993;86(3):141–3.
- [5] Martínez-Sala R, Sancho J, Sánchez JV, Gómez V, Llinares J, Meseguer F. Sound attenuation by sculpture. *Nature* 1995;378(6554):241.
- [6] Yang S, Page JH, Liu Z, Cowan ML, Chan CT, Sheng P. Focusing of sound in a 3D phononic crystal. *Phys Rev Lett* 2004;93(2):024301.
- [7] Ke M, Liu Z, Qiu C, Wang W, Shi J, Wen W, et al. Negative-refraction imaging with two-dimensional phononic crystals. *Phys Rev B* 2005;72(6):064306.
- [8] Lu MH, Liu XK, Feng L, Li J, Huang CP, Chen YF, et al. Extraordinary acoustic transmission through a 1D grating with very narrow apertures. *Phys Rev Lett* 2007;99(17):174301.
- [9] Qiu C, Liu Z. Acoustic directional radiation and enhancement caused by bandedge states of two-dimensional phononic crystals. *Appl Phys Lett* 2006; 89(6):063106.
- [10] Liu Z, Zhang X, Mao Y, Zhu YY, Yang Z, Chan CT, et al. Locally resonant sonic materials. *Science* 2000;289(5485):1734–6.
- [11] Ho KM, Cheng CK, Yang Z, Zhang XX, Sheng P. Broadband locally resonant sonic shields. *Appl Phys Lett* 2003;83(26):5566–8.
- [12] Sainidou R, Djafari-Rouhani B, Pennec Y, Vasseur JO. Locally resonant phononic crystals made of hollow spheres or cylinders. *Phys Rev B* 2006;73(2): 024302.
- [13] Yang M, Sheng P. Sound absorption structures: from porous media to acoustic metamaterials. *Annu Rev Mater Res* 2017;47(1):83–114.
- [14] Farhat M, Enoch S, Guenneau S, Movchan AB. Broadband cylindrical acoustic cloak for linear surface waves in a fluid. *Phys Rev Lett* 2008;101(13):134501.
- [15] Torrent D, Sánchez-Dehesa J. Acoustic cloaking in two dimensions: a feasible approach. *New J Phys* 2008;10(6):063015.
- [16] Zhang S, Yin L, Fang N. Focusing ultrasound with an acoustic metamaterial network. *Phys Rev Lett* 2009;102(19):194301.
- [17] Li Y, Yu G, Liang B, Zou X, Li G, Cheng S, et al. Three-dimensional ultrathin planar lenses by acoustic metamaterials. *Sci Rep* 2014;4(1):6830.
- [18] Lee SH, Park CM, Seo YM, Kim CK. Reversed Doppler effect in double negative metamaterials. *Phys Rev B* 2010;81(24):241102.
- [19] Li Y, Jiang X, Liang B, Cheng J, Zhang L. Metascreen-based acoustic passive phased array. *Phys Rev Appl* 2015;4(2):024003.
- [20] Cheng Y, Zhou C, Yuan BG, Wu DJ, Wei Q, Liu XJ. Ultra-sparse metasurface

- for high reflection of low-frequency sound based on artificial Mie resonances. *Nat Mater* 2015;14(10):1013–9.
- [21] Xie Y, Wang W, Chen H, Konneker A, Popa BI, Cummer SA. Wavefront modulation and subwavelength diffractive acoustics with an acoustic metasurface. *Nat Commun* 2014;5(1):5553.
- [22] Ge H, Xu XY, Liu L, Xu R, Lin ZK, Yu SY, et al. Observation of acoustic skyrmions. *Phys Rev Lett* 2021;127(14):144502.
- [23] Wang Y, Zhao H, Yang H, Zhong J, Zhao D, Lu Z, et al. A tunable soundabsorbing metamaterial based on coiled-up space. *J Appl Phys* 2018;123(18):185109.
- [24] Song GY, Cheng Q, Huang B, Dong HY, Cui TJ. Broadband fractal acoustic metamaterials for low-frequency sound attenuation. *Appl Phys Lett* 2016;109(13):131901.
- [25] Liang Z, Li J. Extreme acoustic metamaterial by coiling up space. *Phys Rev Lett* 2012;108(11):114301.
- [26] Yu SY, Sun XC, Ni X, Wang Q, Yan XJ, He C, et al. Surface phononic graphene. *Nat Mater* 2016;15(12):1243–7.
- [27] Torrent D, Sánchez-Dehesa J. Acoustic analogue of graphene: observation of Dirac cones in acoustic surface waves. *Phys Rev Lett* 2012;108(17):174301.
- [28] Zhang X, Liu Z. Extremal transmission and beating effect of acoustic waves in two-dimensional sonic crystals. *Phys Rev Lett* 2008;101(26):264303.
- [29] Chen ZG, Wu Y. Tunable topological phononic crystals. *Phys Rev Appl* 2016;5(5):054021.
- [30] Ni X, He C, Sun XC, Liu X, Lu MH, Feng L, et al. Topologically protected oneway edge mode in networks of acoustic resonators with circulating air flow. *New J Phys* 2015;17(5):053016.
- [31] Zhang X, Wang HX, Lin ZK, Tian Y, Xie B, Lu MH, et al. Second-order topology and multidimensional topological transitions in sonic crystals. *Nat Phys* 2019;15(6):582–8.
- [32] Christensen J, Willatzen M, Velasco VR, Lu MH. Parity-time synthetic phononic media. *Phys Rev Lett* 2016;116(20):207601.
- [33] Zhu X, Ramezani H, Shi C, Zhu J, Zhang X. PT-symmetric acoustics. *Phys Rev X* 2014;4(3):031042.
- [34] Hu B, Zhang Z, Zhang H, Zheng L, Xiong W, Yue Z, et al. Non-Hermitian topological whispering gallery. *Nature* 2021;597(7878):655–9.
- [35] Popa BI, Cummer SA. Non-reciprocal and highly nonlinear active acoustic metamaterials. *Nat Commun* 2014;5(1):3398.
- [36] Fleury R, Sounas DL, Sieck CF, Haberman MR, Alù A. Sound isolation and giant linear nonreciprocity in a compact acoustic circulator. *Science* 2014;343(6170):516–9.
- [37] Liao G, Luan C, Wang Z, Liu J, Yao X, Fu J. Acoustic metamaterials: a review of theories, structures, fabrication approaches, and applications. *Adv Mater Technol* 2021;6(5):2000787.
- [38] Zangeneh-Nejad F, Fleury R. Active times for acoustic metamaterials. *Rev Phys* 2019;4:100031.
- [39] Wu Y, Yang M, Sheng P. Perspective: acoustic metamaterials in transition. *J Appl Phys* 2018;123(9):090901.
- [40] Ge H, Yang M, Ma C, Lu MH, Chen YF, Fang N, et al. Breaking the barriers: advances in acoustic functional materials. *Natl Sci Rev* 2018;5(2):159–82.
- [41] Cummer SA, Christensen J, Alù A. Controlling sound with acoustic metamaterials. *Nat Rev Mater* 2016;1(3):16001.
- [42] Lu MH, Feng L, Chen YF. Phononic crystals and acoustic metamaterials. *Mater Today* 2009;12(12):34–42.
- [43] Muhammad LCW. From photonic crystals to seismic metamaterials: a review via phononic crystals and acoustic metamaterials. *Arch Comput Methods Eng* 2021;29:1137–98.
- [44] Kumar S, Lee HP. The present and future role of acoustic metamaterials for architectural and urban noise mitigations. *Acoustics* 2019;1(3):590–607.
- [45] Liu J, Guo H, Wang T. A review of acoustic metamaterials and phononic crystals. *Crystals* 2020;10(4):305.
- [46] Kumar S, Lee HP. Recent advances in active acoustic metamaterials. *Int J Appl Mech* 2019;11(8):1950081.
- [47] Allard J, Atalla N. Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing materials. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.; 2009.
- [48] Yang Z, Mei J, Yang M, Chan NH, Sheng P. Membrane-type acoustic metamaterial with negative dynamic mass. *Phys Rev Lett* 2008;101(20):204301.
- [49] Mei J, Ma G, Yang M, Yang Z, Wen W, Sheng P. Dark acoustic metamaterials as super absorbers for low-frequency sound. *Nat Commun* 2012;3(1):756.
- [50] Yang M, Li Y, Meng C, Fu C, Mei J, Yang Z, et al. Sound absorption by subwavelength membrane structures: a geometric perspective. *CR Mecanique* 2015;343(12):635–44.
- [51] Ma G, Yang M, Xiao S, Yang Z, Sheng P. Acoustic metasurface with hybrid resonances. *Nat Mater* 2014;13(9):873–8.
- [52] Yang M, Meng C, Fu C, Li Y, Yang Z, Sheng P. Subwavelength total acoustic absorption with degenerate resonators. *Appl Phys Lett* 2015;107(10):104104.
- [53] Wei P, Croëne C, Tak Chu S, Li J. Symmetrical and anti-symmetrical coherent perfect absorption for acoustic waves. *Appl Phys Lett* 2014;104(12):121902.
- [54] Yang M, Ma G, Yang Z, Sheng P. Subwavelength perfect acoustic absorption in membrane-type metamaterials: a geometric perspective. *EPJ Appl Metamat* 2015;2:10.
- [55] Meng C, Zhang X, Tang ST, Yang M, Yang Z. Acoustic coherent perfect absorbers as sensitive null detectors. *Sci Rep* 2017;7(1):43574.
- [56] Wang X, Zhao H, Luo X, Huang Z. Membrane-constrained acoustic metamaterials for low frequency sound insulation. *Appl Phys Lett* 2016;108(4):041905.
- [57] Merkel A, Theocharis G, Richoux O, Romero-García V, Pagneux V. Control of acoustic absorption in one-dimensional scattering by resonant scatterers. *Appl Phys Lett* 2015;107(24):244102.
- [58] Richoux O, Achilleos V, Theocharis G, Brouzos I. Subwavelength interferometric control of absorption in three-port acoustic network. *Sci Rep* 2018;8(1):12328.
- [59] Groby JP, Lagarrigue C, Brouard B, Dazel O, Tournat V, Nennig B. Enhancing the absorption properties of acoustic porous plates by periodically embedding Helmholtz resonators. *J Acoust Soc Am* 2015;137(1):273–80.
- [60] Huang S, Fang X, Wang X, Assouar B, Cheng Q, Li Y. Acoustic perfect absorbers via Helmholtz resonators with embedded apertures. *J Acoust Soc Am* 2019;145(1):254–62.
- [61] Jiménez N, Romero-García V, Pagneux V, Groby JP. Quasiperfect absorption by subwavelength acoustic panels in transmission using accumulation of resonances due to slow sound. *Phys Rev B* 2017;95(1):014205.
- [62] Groby JP, Pommier R, Aurégan Y. Use of slow sound to design perfect and broadband passive sound absorbing materials. *J Acoust Soc Am* 2016;139(4):1660–71.
- [63] Jiang X, Liang B, Li R, Zou X, Yin L, Cheng J. Ultra-broadband absorption by acoustic metamaterials. *Appl Phys Lett* 2014;105(24):243505.
- [64] Romero-García V, Theocharis G, Richoux O, Pagneux V. Use of complex frequency plane to design broadband and sub-wavelength absorbers. *J Acoust Soc Am* 2016;139(6):3395–403.
- [65] Kim SR, Kim YH, Jang JH. A theoretical model to predict the low-frequency sound absorption of a helmholtz resonator array. *J Acoust Soc Am* 2006;119(4):1933–6.
- [66] Liu CR, Wu JH, Chen X, Ma F. A thin low-frequency broadband metasurface with multi-order sound absorption. *J Phys D Appl Phys* 2019;52(10):105302.
- [67] Shen Y, Yang Y, Guo X, Shen Y, Zhang D. Low-frequency anechoic metasurface based on coiled channel of gradient cross-section. *Appl Phys Lett* 2019;114(8):083501.
- [68] Zhang C, Hu X. Three-dimensional single-port labyrinthine acoustic metamaterial: perfect absorption with large bandwidth and tunability. *Phys Rev Appl* 2016;6(6):064025.
- [69] Yang M, Chen S, Fu C, Sheng P. Optimal sound-absorbing structures. *Mater Horiz* 2017;4(4):673–80.
- [70] Mak HY, Zhang X, Dong Z, Miura S, Iwata T, Sheng P. Going beyond the causal limit in acoustic absorption. *Phys Rev Appl* 2021;16(4):044062.
- [71] Sun M, Fang X, Mao D, Wang X, Li Y. Broadband acoustic ventilation barriers. *Phys Rev Appl* 2020;13(4):044028.
- [72] Leroy V, Strybulevych A, Lanoy M, Lemoult F, Tourin A, Page JH. Superabsorption of acoustic waves with bubble metascreens. *Phys Rev B* 2015;91(2):020301.
- [73] Ivansson SM. Sound absorption by viscoelastic coatings with periodically distributed cavities. *J Acoust Soc Am* 2006;119(6):3558–67.
- [74] Ivansson SM. Numerical design of Alberich anechoic coatings with superellipsoidal cavities of mixed sizes. *J Acoust Soc Am* 2008;124(4):1974–84.
- [75] Meng H, Wen J, Zhao H, Wen X. Optimization of locally resonant acoustic metamaterials on underwater sound absorption characteristics. *J Sound Vibrat* 2012;331(20):4406–16.
- [76] Huang Z, Zhao S, Su M, Yang Q, Li Z, Cai Z, et al. Bioinspired patterned bubbles for broad and low-frequency acoustic blocking. *ACS Appl Mater Interfaces* 2020;12(1):1757–64.
- [77] Duan M, Yu C, Xin F, Lu TJ. Tunable underwater acoustic metamaterials via quasi-Helmholtz resonance: from low-frequency to ultra-broadband. *Appl Phys Lett* 2021;118(7):071904.
- [78] Zhang Y, Pan J, Chen K, Zhong J. Subwavelength and quasi-perfect underwater sound absorber for multiple and broad frequency bands. *J Acoust Soc Am* 2018;144(2):648–59.

- [79] Shi K, Jin G, Liu R, Ye T, Xue Y. Underwater sound absorption performance of acoustic metamaterials with multilayered locally resonant scatterers. *Results Phys* 2019;12:132–42.
- [80] Naify CJ, Martin TP, Layman CN, Nicholas M, Thangawng AL, Calvo DC, et al. Underwater acoustic omnidirectional absorber. *Appl Phys Lett* 2014;104(7):073505.
- [81] Wang C, Li SD, Zheng WG, Huang QB. Acoustic absorption characteristics of new underwater omnidirectional absorber. *Chin Phys Lett* 2019;36 (4):044301.
- [82] Park CM, Park JJ, Lee SH, Seo YM, Kim CK, Lee SH. Amplification of acoustic evanescent waves using metamaterial slabs. *Phys Rev Lett* 2011;107(19):194301.
- [83] Li J, Fok L, Yin X, Bartal G, Zhang X. Experimental demonstration of an acoustic magnifying hyperlens. *Nat Mater* 2009;8(12):931–4.
- [84] Pendry JB. Negative refraction makes a perfect lens. *Phys Rev Lett* 2000;85(18):3966–9.
- [85] Zhang X, Liu Z. Superlenses to overcome the diffraction limit. *Nat Mater* 2008;7(6):435–41.
- [86] Fang N, Lee H, Sun C, Zhang X. Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens. *Science* 2005;308(5721):534–7.
- [87] Ambati M, Fang N, Sun C, Zhang X. Surface resonant states and superlensing in acoustic metamaterials. *Phys Rev B* 2007;75(19):195447.
- [88] Park JJ, Park CM, Lee KJB, Lee SH. Acoustic superlens using membrane-based metamaterials. *Appl Phys Lett* 2015;106(5):051901.
- [89] Kaina N, Lemoult F, Fink M, Lerosey G. Negative refractive index and acoustic superlens from multiple scattering in single negative metamaterials. *Nature* 2015;525(7567):77–81.
- [90] Molerón M, Daraio C. Acoustic metamaterial for subwavelength edge detection. *Nat Commun* 2015;6(1):8037.
- [91] Ao X, Chan CT. Far-field image magnification for acoustic waves using anisotropic acoustic metamaterials. *Phys Rev E* 2008;77(2):025601.
- [92] Christensen J, García de Abajo FJ. Acoustic field enhancement and subwavelength imaging by coupling to slab waveguide modes. *Appl Phys Lett* 2010;97(16):164103.
- [93] Shen YX, Peng YG, Cai F, Huang K, Zhao DG, Qiu CW, et al. Ultrasonic superoscillation wave-packets with an acoustic meta-lens. *Nat Commun* 2019;10(1):3411.
- [94] García-Chocano VM, Christensen J, Sánchez-Dehesa J. Negative refraction and energy funneling by hyperbolic materials: an experimental demonstration in acoustics. *Phys Rev Lett* 2014;112(14):144301.
- [95] Shen C, Xie Y, Sui N, Wang W, Cummer SA, Jing Y. Broadband acoustic hyperbolic metamaterial. *Phys Rev Lett* 2015;115(25):254301.
- [96] Lemoult F, Fink M, Lerosey G. Acoustic resonators for far-field control of sound on a subwavelength scale. *Phys Rev Lett* 2011;107(6):064301.
- [97] Bai L, Dong HY, Song GY, Cheng Q, Huang B, Jiang WX, et al. Impedancematching wavefront-transformation lens based on acoustic metamaterials. *Adv Mater Technol* 2018;3(11):1800064.
- [98] Al Jahdali R, Wu Y. High transmission acoustic focusing by impedancematched acoustic meta-surfaces. *Appl Phys Lett* 2016;108(3):031902.
- [99] Peng S, He Z, Jia H, Zhang A, Qiu C, Ke M, et al. Acoustic far-field focusing effect for two-dimensional graded negative refractive-index sonic crystals. *Appl Phys Lett* 2010;96(26):263502.
- [100] Su X, Norris AN, Cushing CW, Haberman MR, Wilson PS. Broadband focusing of underwater sound using a transparent pentamode lens. *J Acoust Soc Am* 2017;141(6):4408–17.
- [101] Chen J, Rao J, Lisevych D, Fan Z. Broadband ultrasonic focusing in water with an ultra-compact metasurface lens. *Appl Phys Lett* 2019;114(10):104101.
- [102] Ruan Y, Liang X, Wang Z, Wang T, Deng Y, Qu F, et al. 3-D underwater acoustic wave focusing by periodic structure. *Appl Phys Lett* 2019;114(8):081908.
- [103] Schurig D, Mock JJ, Justice BJ, Cummer SA, Pendry JB, Starr AF, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. *Science* 2006;314(5801):977–80.
- [104] Pendry JB, Schurig D, Smith DR. Controlling electromagnetic fields. *Science* 2006;312(5781):1780–2.
- [105] Cummer SA, Popa BI, Schurig D, Smith DR, Pendry J, Rahm M, et al. Scattering theory derivation of a 3D acoustic cloaking shell. *Phys Rev Lett* 2008;100(2):024301.
- [106] Chen H, Chan C. Acoustic cloaking in three dimensions using acoustic metamaterials. *Appl Phys Lett* 2007;91(18):183518.
- [107] Cummer SA, Schurig D. One path to acoustic cloaking. *New J Phys* 2007;9(3):45.
- [108] Cheng Y, Yang F, Xu JY, Liu XJ. A multilayer structured acoustic cloak with homogeneous isotropic materials. *Appl Phys Lett* 2008;92(15):151913.
- [109] Popa BI, Zigoaneanu L, Cummer SA. Experimental acoustic ground cloak in air. *Phys Rev Lett* 2011;106(25):253901.
- [110] Zigoaneanu L, Popa BI, Cummer SA. Three-dimensional broadband omnidirectional acoustic ground cloak. *Nat Mater* 2014;13(4):352–5.
- [111] Zhang S, Xia C, Fang N. Broadband acoustic cloak for ultrasound waves. *Phys Rev Lett* 2011;106(2):024301.
- [112] Li XF, Ni X, Feng L, Lu MH, He C, Chen YF. Tunable unidirectional sound propagation through a sonic-crystal-based acoustic diode. *Phys Rev Lett* 2011;106(8):084301.
- [113] Hasan MZ, Kane CL. Colloquium: topological insulators. *Rev Mod Phys* 2010;82(4):3045–67.
- [114] Qi XL, Zhang SC. Topological insulators and superconductors. *Rev Mod Phys* 2011;83(4):1057–110.
- [115] Zhang L, Ren J, Wang JS, Li B. Topological nature of the phonon Hall effect. *Phys Rev Lett* 2010;105(22):225901.
- [116] Li N, Ren J, Wang L, Zhang G, Hänggi P, Li B. Colloquium: phononics: manipulating heat flow with electronic analogs and beyond. *Rev Mod Phys* 2012;84(3):1045–66.
- [117] Yang Z, Gao F, Shi X, Lin X, Gao Z, Chong Y, et al. Topological acoustics. *Phys Rev Lett* 2015;114(11):114301.
- [118] Xiao M, Ma G, Yang Z, Sheng P, Zhang ZQ, Chan CT. Geometric phase and band inversion in periodic acoustic systems. *Nat Phys* 2015;11(3):240–4.
- [119] He C, Ni X, Ge H, Sun XC, Chen YB, Lu MH, et al. Acoustic topological insulator and robust one-way sound transport. *Nat Phys* 2016;12(12):1124–9.
- [120] Zhang Z, Wei Q, Cheng Y, Zhang T, Wu D, Liu X. Topological creation of acoustic pseudospin multipoles in a flow-free symmetry-broken metamaterial lattice. *Phys Rev Lett* 2017;118(8):084303.
- [121] Zhu Z, Yan M, Pan J, Yang Y, Deng W, Lu J, et al. Acoustic valley spin Chern insulators. *Phys Rev Appl* 2021;16(1):014058.
- [122] Yang Z, Zhang B. Acoustic type-II Weyl nodes from stacking dimerized chains. *Phys Rev Lett* 2016;117(22):224301.
- [123] Shen C, Xu J, Fang NX, Jing Y. Anisotropic complementary acoustic metamaterial for canceling out aberrating layers. *Phys Rev X* 2014;4(4):041033.
- [124] Bok E, Park JJ, Choi H, Han CK, Wright OB, Lee SH. Metasurface for water-to-air sound transmission. *Phys Rev Lett* 2018;120(4):044302.
- [125] Huang Z, Zhao S, Zhang Y, Cai Z, Li Z, Xiao J, et al. Tunable fluid-type metasurface for wide-angle and multifrequency water-air acoustic transmission. *Research* 2021;2021:9757943.
- [126] Huang Z, Zhao Z, Zhao S, Cai X, Zhang Y, Cai Z, et al. Lotus metasurface for wide-angle intermediate-frequency water-air acoustic transmission. *ACS Appl Mater Interfaces* 2021;13(44):53242–51.
- [127] Ding Y, Statharas EC, Yao K, Hong M. A broadband acoustic metamaterial with impedance matching layer of gradient index. *Appl Phys Lett* 2017;110(24):241903.
- [128] Li Z, Yang DQ, Liu SL, Yu SY, Lu MH, Zhu J, et al. Broadband gradient impedance matching using an acoustic metamaterial for ultrasonic transducers. *Sci Rep* 2017;7(1):42863.
- [129] Liu C, Luo J, Lai Y. Acoustic metamaterials with broadband and wide-angle impedance matching. *Phys Rev Mater* 2018;2(4):045201.
- [130] Fernández-Marín AA, Jiménez N, Groby JP, Sánchez-Dehesa J, Romero-García V. Aerogel-based metasurfaces for perfect acoustic energy absorption. *Appl Phys Lett* 2019;115(6):061901.
- [131] Song K, Kim J, Hur S, Kwak JH, Lee SH, Kim T. Directional reflective surface formed via gradient-impeding acoustic meta-surfaces. *Sci Rep* 2016;6(1):32300.
- [132] Xie Y, Popa BI, Zigoaneanu L, Cummer SA. Measurement of a broadband negative index with space-coiling acoustic metamaterials. *Phys Rev Lett* 2013;110(17):175501.