弹性波超构表面研究进展

曹礼云, 杨智春*, 徐艳龙

西北工业大学航空学院结构动力学与控制研究所, 西安 710072

* E-mail: yangzc@nwpu.edu.cn

收稿日期: 2020-11-10; 接受日期: 2021-01-26; 网络版发表日期: 2021-10-27

国家自然科学基金(批准号: 11972296, 11602194)、高等学校创新引智计划(编号: BP0719007)和国家留学基金委(编号: 201806290176)资助项目

摘要 弹性波超构表面是一种新型的超薄超材料, 它革新了对弹性波的传统调控方式, 特别是为低频弹性波的调控提供了新的思路. 本文首先根据被调控弹性波的波型, 分类介绍了弹性波超构表面的基本概念、工作原理和最新的研究进展, 指出了目前弹性波超构表面研究中存在的问题, 随后重点论述了弹性波超构表面的工程应用, 包括模式分离、能量传输和低频减振, 最后对未来的研究工作进行了展望.

关键词 弹性波超构表面, 超构表面, 力学超材料, 亚波长, 减振

1 引言

弹性波是工程结构中典型存在的运动形式, 以大型航天/航空器、水下航行器、高速列车、精密机床等为代表的重大装备的机械振动, 实质上是其结构件内部弹性波的叠加效应. 弹性波传播机理的研究自20世纪70年代以来一直是力学领域重要的研究课题. 随着研究深入和工程应用的需要, 目前关注的重点更多是对弹性波调控的研究. 研究弹性波的调控问题, 能够从波动力学本质上理解复杂的结构振动形式, 突破工程中对结构振动控制与利用的技术难题的思维惯性, 从新的角度提供解决方向. 例如, 近年来出现的基于弹性波超材料(elastic metamaterial)的波动调控, 推进了低频减振^[1~3]、集能^[4~6]和检测^[7,8]等工程技术的发展.

弹性波超材料^[9]是指一类具有天然材料所不具备

的超力学属性的人工材料, 其在宏观上由周期的亚波长结构组成, 能够等效出负刚度^[10~12]、负质量^[13~15]等属性. 弹性波超材料能使禁带被局限在亚波长结构共振频率附近的频带内^[9,16~18], 以小尺寸结构来控制大波长的弹性波(即低频振动), 如用橡胶包裹铅块的局域共振超材料^[9]和蜂窝梁结构超材料^[16]. 通过调节弹性波超材料的介质结构, 宏观上还可以使其中传播的波具有负的群速度^[19], 异常地调控弹性波的传输方向, 如负折射^[20~22]等. 目前这种具有超常规功能的超材料研究已得到固体力学领域研究者的广泛关注. 近些年, 北京理工大学的胡更开教授课题组及其合作者^[23,24]、天津大学的汪越胜教授课题组及其合作者^[25~27]、国防科技大学的温激鸿教授课题组^[28,29]、浙江大学的陈伟球教授课题组^[30,31]及其他高校^[32~36]的课题组都对弹性波超材料开展了富有成效的研究. 更多关于弹性波超材料关键性技术和研究进展描述可见综述文献

引用格式: 曹礼云, 杨智春, 徐艳龙. 弹性波超构表面研究进展. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 911–927

Cao L Y, Yang Z C, Xu Y L. Advances in the study of elastic metasurfaces (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 911–927, doi: 10.1360/SST-2020-0447

[37~40]. 尽管弹性波超材料研究已明显推动了波动研究领域的进展, 但由于超材料的三维块体结构, 其设计和加工工艺较复杂, 同时, 三维结构的超材料通常只是单胞尺寸为亚波长, 周期单胞构成的整体结构仍然比波长大多, 这些因素使得超材料在低频减振等实际应用中进展缓慢^[41].

2011年, 哈佛大学的Capasso教授课题组在*Science*杂志上发文提出一种新型的超薄超材料^[42], 并称这种新概念超材料为超构表面(metasurface). 超构表面在波传播方向上具有小于波长的超薄厚度(亚波长厚度), 能够代替甚至超越传统超材料, 对电磁波实现多维度调控, 如任意角度偏折或反射(包括负折射和负反射)^[43~45]. 这种亚波长厚度的超构表面突破了上述传统块体超材料的缺陷, 使设计的结构更紧凑. 超构表面的概念一经提出, 迅速成为国内外电磁波^[46,47]领域的研究热点, 并很快拓展到了声波^[48~58]研究领域. 具有亚波长厚度的超构表面, 使得人们能够用小尺寸结构对大波长的声波进行调控, 特别为低频声波的吸收技术^[59~65]打开了新的途径. 更多关于声学超构表面研究进展的详细描述可见综述文献^[41,51].

随着电磁波超构表面和声学超构表面研究的发展, 弹性波超构表面(elastic metasurface)也得到了研究者的广泛关注. 由于固体中的弹性波具有丰富的波型, 更复杂的波动控制方程, 并在特定条件下弹性波波型会发生模式转换, 因此相对于电磁波超构表面和声学超构表面, 弹性波超构表面的研究具有更丰富的物理内涵^[66~70], 同时更具挑战性. 下面从弹性波超构表面的分类和其工程应用前景, 详细阐述其工作原理和相关的研究进展, 最后对其发展趋势进行展望.

相比于声波, 弹性波(矢量波)具有更多的自由度^[71], 在不同的介质结构中, 弹性波的传播形式有很大的不同. 为了更好地理解弹性波超构表面, 如图1所示, 我们根据常见的介质结构对弹性波进行了分类: (a) 无限大空间中传播的体波; (b) 沿半空间表层传播的表面波; (c) 板类结构中的兰姆波(在低频中低阶反对称模式又称为弯曲波); (d) 沿半空间层状结构传播的勒夫波; (e) 沿两半空间界面传播的界面波. 与声学超构表面相比, 弹性波波型的多样性大大丰富了调节弹性波的超构表面结构形式. 根据这些被调控弹性波的不同波型, 现有的弹性波超构表面主要分为体波超构表面^[72~77]和板波超构表面^[66,71,78~86]两大类, 下面主

要对其进行介绍. 另外需要指出的是, 表面波超构表面^[87,88]也被设计, 用于调控沿结构(b)表面传播的表面波, 但是目前相关研究非常少, 处于初步探索阶段. 表面波的调控常见于传感器设计和地震波探测, 其超构表面研究具有重要工程应用价值. 而对于结构(d)和(e), 相关的超构表面研究还未见报道. 它们也是传感器器件中的常见结构, 相关工程应用的发展也会促进该方向的研究, 是今后发展的方向之一.

2 体波超构表面

体波是在无限大空间介质中传播的弹性波. 根据在弹性波传播的介质中质点振动方向与波传播方向的不同, 体波可以分为纵波(P波)与横波(S波). 质点振动方向与波传播方向相同的波为P波; 质点振动方向与波传播方向垂直的波称为S波. S波又可以细分为SV波和SH波. 质点振动发生在与波传播方向相垂直的面内的波为SV波, 质点振动发生在与波传播方向相平行的面内的波为SH波. 根据经典的波动理论^[89,90], 可知在无限大空间的界面处P波和SV波是耦合的, 而SH波是与之解耦的. 解耦的SH波是标量波, 它与同为标量波的声波的控制方程和波动解的形式有很大的相似性. 因此, 可以很容易将声学超构表面的概念直接拓展到SH波. 体波超构表面通常是设计于块体材料中的一个薄层, 通过设计薄层的力学属性, 来调节透过(或反射)该薄层(体波超构表面)体波的相位和幅值. 被调控的体波与薄层和其表面边界相互作用后, 仍然是体波. 下面我们将从最简单的SH波超构表面开始介绍弹性波超构表面及其相关理论.

2.1 拓展的广义斯涅尔定律

研究者通过在两种介质的交界面设计周期的人工界面, 在传统的斯涅尔定律上增加了相位梯度这一新的自由度, 可以实现所谓的广义斯涅尔定律^[42]. 基于该定律, 打破了传统的光波和声波的调控方式, 实现对入射波和反射波任意方向的调控. 对于SH波, 从经典的波动力学可知, 入射到两种不同介质的界面时, 其反射波和折射波会服从斯涅尔定律. 由于切向动量的连续性, 斯涅尔定律预测了入射角和反射角相等($\theta_i = \theta_r^{(C)}$)以及入射角与折射角之间的关系($n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t^{(C)}$). 这种角度之间的关系取决于两种介质的折

图 1 (网络版彩图) 几类常见弹性波的介质结构

Figure 1 (Color online) Several kinds of typical elastic wave medium structures.

射率 n_1, n_2 .

如图2所示, 在介质1和介质2(垂直于纸面方向无限大)的交界面处设计特殊的人工结构, 使SH波(质点运动方向垂直于纸面)入射到表面后, 形成的反射波或透射波有一个相位突变, 而且这样的相位突变与 x 轴坐标有关. 人工结构的厚度一般小于波长, 这样的结构称为超构表面. 超构表面位于 $y=0$ 的平面, 其透射波透过表面后(或入射波经表面反射后)附加一个随 x 轴变化的相位. 通过附加随坐标 (x, z) 变化的相位, 该二维调控问题也可以拓展到三维调控问题. 根据费马原理^[42], 可以导出二维情况的透射角(或反射角)与入射角满足的关系. 设 A 点和 D 点的坐标分别为 (x_A, y_A) 和 (x_D, y_D) , 波从 A 点发出后入射(入射角为 θ_i)到表面 O 点 $(x, 0)$, 经透射(透射角为 θ_t)到达 D 点, 总相位变化为

$$\Phi(x) = \phi(x) + k_1 \sqrt{(x - x_A)^2 + y_A^2} + k_2 \sqrt{(x - x_D)^2 + y_D^2}, \quad (1)$$

其中, $\phi(x)$ 是波阵面在超构表面的相位跳变, k_1 和 k_2 分别是介质1和2中的波矢. 由式(1)可知, 不同的 O 点位置, 会导致从 A 点到 D 点有不同的波程, 从而有不同的

图 2 (网络版彩图) 广义斯涅尔定律原理图, 界面 $y=0$ 处有一个相位突变Figure 2 (Color online) Schematic diagram of the generalized Snell's law. There is a phase shift at the interface of $y=0$.

总相位. 从 A 点到 D 点有很多条路径, 根据费马原理, 波从 A 点经人工结构传播到 D 点的真实路径为传播时间最小的一个, 由于频率一定时波在介质中的传播速度一定, 即真实路径为波程最小的一个. 从波动的角度, 波程的变化对应于相位的变化, 因此, 我们可以理解为从 A 点透射到 D 点的真实路径为使其总相位 $\Phi(x)$ 取极值的一个, 即满足

$$\frac{d\Phi(x)}{dx} = 0. \quad (2)$$

将式(1)代入式(2), 可以得到

$$k_{2(1)} \sin \theta_{t(r)} - k_1 \sin \theta_i = \frac{d\phi(x)}{dx}, \quad (3)$$

上式即为所谓的广义斯涅尔定律. 式(3)中, 引入设计的相位分布 $\phi(x)$, 则可任意调控透射角. 如果不存在相位分布, 即 $d\phi(x)/dx=0$, 式(3)就退化为传统的斯涅尔定律: $k_2 \sin \theta_t = k_1 \sin \theta_i$. 需注意的是, 入射角和相位梯度均有正负, 一般设相位梯度增大的方向为 x 轴正方向. 同理, 可以求出对于反射角的广义斯涅尔定律, 与式(3)相同, 仅需将式中的 k_2 和 θ_t 分别改为 k_1 和 θ_r .

上述的广义斯涅尔定律, 是对解耦的SH波, 利用费马原理推导所得与声波的广义斯涅尔定律一致. 而对于P波和SV波, 从波动控制方程可知, 它们是耦合的. 当P波(或SV波)单独入射到超构表面, 透射波(或反射波)会产生模式转换, 一种波型的部分能量会转换到另一种波型, 导致透射场和反射场均会同时存在P波和SV波, 式(3)的广义斯涅尔定律将被改写为

$$\begin{aligned} k_1^{(P)} \sin \theta_i &= k_{1(2)}^{(P)} \sin \theta_{r(t)}^{(P)} - \frac{d\phi(x)}{dx} \\ &= k_{1(2)}^{(SV)} \sin \theta_{r(t)}^{(SV)} - \frac{d\phi'(x)}{dx}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中第三项 $k_{1(2)}^{(SV)} \sin \theta_{r(t)}^{(SV)} - \frac{d\phi'(x)}{dx}$ 为模式转换项, 其中 $\phi'(x)$ 为模式转化的SV波在单胞中的相位跳变.

2.2 对体波的调控

对于解耦的SH波, 如图3(a), 在无限大空间中通过设计人工层结构, 能使透射的SH波发生空间的相位梯度跳变, 根据方程(3), 从而实现对其调控. 为了能够在人工层结构中使SH波产生特定的相位跳变, 一个简易的方法是引入波导单胞结构^[74]. 如图3(a), 这些波导单胞结构均由两种不同的材料复合构成, 每个波导单胞的总长(图3(a)中的 h)固定, 通过改变其中材料的占比, 相当于改变波导单胞中SH波的平均相速度, 从而对SH波通过波导单胞后的相位进行调节. 对于透射型超构表面, 除了满足单胞相位的特定空间分布, 还需使每个单胞保持均一的高透射率, 这样才能保证超构表面调控的透射波场不会扭曲和变形. 该波导单胞透射率高低的决定因素是两种材料交界面的阻抗匹配度, 所以材料的选择成为该类超构表面性能好坏的关键因素. 综上所述, 为了获得高的调控性能, 波导单胞的两种材料必须满足: (1) 最大化匹配两材料界面间的阻抗; (2) 在单胞长度为亚波长的范围内, 能够通过改变材料占比, 实现单胞相位跳变的范围为 $0 \sim 2\pi$.

在传统的材料中, 能够找到这样的两种材料, 例如

铝合金和铅铋材料^[74], 通过它们构成的超构表面厚度小于波长的53%, 透射率大于0.9. 如图3(a), 设计的弹性波超构表面可以任意调控垂直入射和斜入射SH波的传输方向. 除了用传统材料设计波导构成弹性波超构表面外, 也可以用智能材料, 例如电流变材料, 来构成上述的可调波导^[91]. 给每个波导施加不同的电场, 从而改变每个波导中SH波的相速度, 实现相位的空间梯度变化. 对这种波导设计, 不需要改变单胞结构, 仅需调控每个单胞上的外加电场, 就能实现透射波不同角度的偏折. 但是对这些由不同材料复合而构成单胞的研究, 没有考虑实际应用中界面的粘接处理, 粘接层对特定频率范围的影响, 也是一个值得进一步研究的问题. 在今后的研究中也可以用人工设计的单相材料超结构进行波导设计, 通过改变几何尺寸等效出不同的相速度^[92,93], 从而避免存在不同材料间的粘接界面.

对于垂直入射的P波或SV波的调控, 由于在单胞中不存在模式转换, 其广义斯涅尔定律的形式几乎和SH波的一致, 仅需要考虑透射场中的模式转换. 同样可以用上述两种不同材料复合构成波导单胞的思想来

图3 (网络版彩图)体波超构表面. (a) 调控SH波^[74]; (b) 空间分离SV波和P波^[72]

Figure 3 (Color online) Body wave metasurface. (a) Manipulating SH waves ^[74]; (b) splitting SV waves and P waves ^[72].

设计超构表面^[94]. 特别是针对垂直入射的SV波, 除了设计上述双材料构成的波导单胞, 还可以设计如图3(b)所示的单相材料构成的变宽度波导单胞^[72]. 当SV波垂直入射到波导单胞后, 如图3(b)所示, y 方向上的两波导边界, 会使SV波转换为波导中的弯曲波模式. 这样可以改变波导的宽度去调节弯曲波的相速度, 从而调节透射波导的SV波的相位跳变. 该结构的另外一大优点是, 可以分离垂直入射的P波和SV波, 因为该结构对于垂直入射的P波, 界面阻抗几乎是匹配的, P波能够直接全透过而不受结构的影响, 而SV波透过该超构表面会发生偏折, 这样就可透射场实现SV波和P波的空间分离. 需注意的是, 以一定透射角传输的透射波, 会在超构表面外边界处发生模式转换. 该模式转换得到的波型, 其透射角可以根据公式 $\sin\theta_t^P/\sin\theta_t^S=c_P/c_S$ 求得^[95]. 对于斜入射的P波或SV波, 由于阻抗不匹配, 在超构表面的入射界面处也会发生模式转换, 这些由模式转换而来的波型在单胞中的相位跳变, 即式(4)中 $\phi'(x)$ 项, 目前仍不能准确预测.

以上对于各种体波的调控, 基本思想是调节波导单胞中单一体波(SH波, SV波或P波)的相速度, 从而改变单一体波的透射相位, 实现相位的空间梯度分布, 进而基于广义斯涅尔定律调控透射角(或反射角). 除了设计梯度相位来调控体波的异常折射和反射, 还可以通过时间反演得到相位分布^[41], 去实现更多形式的波场调控, 如聚焦(相位满足双曲线函数空间分布)、Airy波束、全息成像等. 最近, 通过拓扑优化设计超构表面^[96-98]也被提出, 这是提高超构表面性能的有效途径之一. Rong等人^[97]基于拓扑优化的系统设计方法, 实现了对体波的频率编码多功能操控.

目前对体波超构表面的研究并不完善, 正如上面所述, 对于P波和SV波耦合的调节, 还没有全面的深入理论分析, 如P波和SV波斜入射到超构表面, 模式转换后的波, 其相变如何耦合、如何转变等, 是有待解决的关键问题之一. 这些体波的调控技术, 具有明显的工程应用价值, 能为基于弹性波传播的结构损伤监测和传感器件研究提供新的思路.

3 板波超构表面

板类结构中, 纵波与横波在其中传播, 因上下两平

行表面所限, 会叠加组合形成对称型(最低阶模式为S0波)和反对称型(最低阶模式为A0波)的兰姆波. A0兰姆波或S0兰姆波遇到界面不连续, 会发生模式转换. 图4展示了1 mm厚的铝板中S0兰姆波、A0兰姆波、面内纵波、弯曲波和瑞利波的频散曲线^[90]. 如图4所示, 在低频中弯曲波和A0兰姆波的波速与面内纵波和S0兰姆波的波速是一致的, 随着频率增加, 它们的区别增大. 这表明在低频中弯曲波近似于A0兰姆波模式, 而面内纵波近似于S0兰姆波模式. 在高频段, 如图4所示, 瑞利表面波的波速与S0和A0兰姆波的波速一致.

弯曲波是薄板在横向载荷作用下的弯曲变形所产生, 它是工程中最常见的一类波型, 具有广泛的工程应用背景, 如板类结构减振、振动集能和结构健康监测等. 这使得调控弯曲波的超构表面设计成为该研究领域的一大热点, 目前大部分弹性波超构表面的研究都集中于此. 值得注意的是板中也可以产生面内P波, 面内SV波和面内SH波, 它们一般用于结构损伤监测, 另外板中面内P波和面内SV波也可替代无限大体中的P波和SV波来研究, 从而简化相关调控P波和SV波的试验模型. 板类结构中面内P波和SV波的调控也需要考虑它们之间的模式耦合.

3.1 被动板波超构表面

设图2中介质1和介质2均为板结构, 将适用体波的广义斯涅尔定律(3)中波数改为板波的波数 k_0 . 修正后的式(3)将适用于板波. 板波超构表面的设计重点在于, 如何设计人工单胞结构去调节板波的透射相位, 并保

图4 板厚为1 mm铝板的频散曲线^[90]

Figure 4 Dispersion curve of the aluminum plate with a thickness of 1 mm [90].

持所有单胞的透射率具有一致性. 美国普渡大学Semperlotti教授课题组^[78]在板中设计了黑洞槽锥形柱单胞, 提出了模式转换超构表面, 如图5(a)所示, 首次将声学超构表面的概念拓展到了弹性波超构表面. 当A0兰姆波入射, 遭遇到黑洞槽锥形柱结构, 会发生弱的局域共振, 导致部分A0兰姆波模式转换为S0兰姆波. 利用改变谐振体的等效质量, 从而设计了不同的透射S0兰姆波的空间相位分布, 来调控透射S0波的波阵面, 并通过实验验证了在板中S0兰姆波的异常折射, 如图5(a)所示. 但由于透射S0波是由模式转换而来, 较低的转换效率导致了小于25%^[71]的透射率, 限制了该设计结构的性能. 从A0波到S0波这个模式转换过程, 对单胞结构的对称性比较敏感. 如图5(a)中的一个非对称的锥形柱单胞结构, 当它沿板的中性面对称放置, 则在透射场中由模式转换而来的S0波的相位会发生 π 的跳变, 而幅值保持不变. 这种方式可以极大简化设计的难度, 因为仅仅需要设计单胞的相位在 $0 \sim \pi$ 的小范围变化即可. 很多简单的设计可以满足此要求, 例如在板中开槽并调节凹槽的位置^[99,100], 或在板上粘接单柱结构

并调节柱的位置等方式来构成单胞, 从而实现此类模式转换超构表面设计. 紧随普渡大学Semperlotti教授课题组^[78]的工作, Liu等人^[71]提出在薄板上开zigzag槽的弯曲波超构表面, 如图5(b), 他们分析了消逝模式会一定程度地补偿zigzag槽单胞结构的失配阻抗, 从而提高单胞的透射率, 并设计了特定的单胞结构透射相位的空间分布, 实验实现了弯曲波的振源幻象. Zigzag槽结构本质上增大了弯曲波在单胞结构中传播的波程, 从而改变透射波的相位, 尽管利用弯曲波消逝模式能补偿部分的失配阻抗, 然而大量的开槽会导致单胞结构的等效刚度和质量同时减小, 很难使所有单胞具有均一的高透射率. 另外, 超低的结构刚度, 也限制了其在承载板类结构中的应用.

为了获得高透射率的弹性波超构表面, 韩国首尔大学Kim教授课题组^[79]通过在板中设计开槽单胞结构, 如图6(a), 将局域共振体的等效质量和等效刚度完全解耦, 提出了全透射的薄板面内纵波超构表面, 并实验实现了面内纵波的偏折和聚焦. 但该设计只能保证纵波垂直入射同时垂直透射单胞结构时, 能近似全透

图5 (网络版彩图) (a) 模式转换板波超构表面^[78]; (b) zigzag型弯曲波超构表面^[71]

Figure 5 (Color online) (a) Mode-conversion plate wave metasurface^[78]; (b) flexural wave metasurface with the zigzag structure^[71].

图 6 (网络版彩图) (a) 面内纵波超构表面^[79]; (b) 不同厚度波导超构表面^[68,69]; (c) 柱状弯曲波超构表面^[80,101]

Figure 6 (Color online) (a) In-plane P wave metasurface^[79]; (b) flexural wave metasurface with different-thickness waveguides^[68,69]; (c) pillared flexural wave metasurface^[80,101].

射。一旦单胞组合为超构表面, 被偏折的透射波的垂直矢量发生改变, 超构表面的界面阻抗不再匹配, 导致在该界面处产生模式转换, 诱导出SV波, 从而降低透射波的透射率。另外对于斜入射的纵波, 也会在超构表面的入射界面产生模式转换, 无法被全透射地调控。换句话说, 该设计只能保证纵波垂直入射单胞结构时近似全透射, 而对于单胞整合的超构表面却很难实现单模式波的全透射调控。针对上述的不足, 本文作者^[80]提出了一种简单的柱状超构表面, 如图6(c)所示, 实现了弯曲波的近全透射调控, 首次实验展示了对垂直和斜入射弯曲波的高效调控能力(包括负折射)。其亚波长单胞结构由多个柱状谐振体串联而成, 可以简单地理解为每个谐振体均近似阻抗匹配, 只能引起小的相位跳变。但是将它们串联成阵列, 近似的阻抗匹配可以使单胞具有高的透射率, 同时也能使所有谐振体产生的相位跳变累加来达到 2π , 从而实现单胞总相位跳变在 $0\sim 2\pi$ 范围内可调。解析和模拟的方法得到该类单胞中透射波的平均透射率^[101]约为0.97, 如图6(c)所示。从等效理论的角度, 也可以理解为由不同高度的柱状谐振体构成的阵列, 不同程度地增大了单胞中弯曲波的等效波数, 从而使单胞产生了不同的相位跳变。基于

类似的原理, Zhang等人^[102]通过串联多个3D打印的U型单元来构成单胞, 将其周期阵列为超构表面, 同样实现了对弯曲波的高性能调控。

重庆大学胡宁教授课题组^[66]用两种材料的复合梁构成弹性波超构表面, 并结合Mindlin板理论, 解析求解了弯曲波通过单胞结构的相位和幅值特性。该设计思想与上述双材料单胞构成的体波超构表面设计思想类似, 均是通过改变单胞中两种材料的占比, 来改变单胞中弯曲波的平均相速度, 从而得到不同的透射相位。同样基于类似的思想, Tian等人^[67]设计单胞为单相材料, 用两种不同厚度的梁复合成波导单胞。由于弯曲波在不同厚度梁中的相速度不同, 通过控制两类梁材料在单胞中的占比, 来获得弯曲波在单胞中不同的平均相速度, 从而调节透射相位的空间分布。其构成的超构表面实现了偏折、聚焦和声钳等功能。由于透射型超构表面需要保证每个单胞具有一致性的高透射率, 因此在这些单胞中需要使两类梁的厚度差异尽量小, 来保证它们交界面的阻抗尽量匹配。但小的厚度差异会导致单胞的长度需要大于波长的几倍, 才能使单胞的相位跳变范围满足需要的 $0\sim 2\pi$, 因此该类结构尺寸比较大, 无法设计为亚波长。本文作者^[69]也提

出一种单相材料单胞, 如图6(b)所示, 其与上述设计的区别是, 单胞中波导只有一种厚度, 没有上述不同厚度波导交界面的阻抗失配, 但是设计结构和主板交界面存在阻抗失配. 可以通过改变波导的厚度, 来调节单胞中波的相速度. 解析求解了单胞结构的透射相位和幅值特性, 最后实验验证了设计的超构表面对弯曲波的偏折^[69]和分波^[68]. 上述三类超构表面的单胞均是非共振结构, 尽管其结构简单但尺寸偏大, 不易实现亚波长. 另外, 北京大学李法新教授课题组^[70]用变宽的梁结构构成超构表面, 调节了板中的SH0导波, 并实验验证了对SH0波束的偏折和聚焦. 其单胞调控相位的机理是入射到梁波导中的SH0波, 由于梁的边界影响会转化为弯曲波模式, 而改变梁波导的宽度, 可以改变梁波导中弯曲波的相速度, 从而改变透射SH0波的相位. 在损伤检测领域, 板中SH0导波由于其非频散特性能够稳定自身波型, 从而能大大降低工程中检测的复杂性, 目前基于该导波的检测技术已成为最具前景的损伤检测方法之一.

3.2 可调板波超构表面

上述被动板波超构表面的单胞设计方法可以归纳为三类: 改变单胞中波的波程^[71,87]; 改变单胞中波的平均相速度^[66-70]; 利用单胞的局域共振^[78-80]. 这些设计的结构参数都是根据弹性波的目标频率来确定, 尽管

超构表面的相位梯度可以用离散的单胞相位来近似实现, 从而导致具有一定的带宽^[84], 但是这个带宽仍是极有限的. 因此研究者提出了一些具有可调节能力的超构表面来拓宽工作带宽, 同时这些可调节的超构表面, 不需重新加工结构即能实现多功能调控, 以增强设备功能的灵活性.

Li等人^[81]提出了基于四个压电片组成功能单胞的可调节弹性波超构表面, 来对A0兰姆波进行调控. 如图7(a)所示, 其超构表面的压电片外接一个可调分流电路, 通过改变电路的电学参数来改变单胞内的弹性波等效波数, 从而对单胞相位进行空间分布设计. 基于类似的思路, Xia等人^[103]利用外接分流电路的可调超构表面, 实现了板中SH0波的调控. 美国密苏里大学黄国良教授课题组^[82]介绍了一类引入压电主动反馈的可编程弹性波超构表面, 如图7(b)所示, 可以实时调控弯曲波, 该工作首次实验验证了可调超构表面的调控性能. 单胞由传感器和作动器构成, 基本设计思想是传感器接收到入射波信号, 根据所需透射波的相位反馈, 通过作动器二次激发弯曲波. 尽管该设计的主动超构表面具有好的调控效果, 但设计的复杂性较高, 应用成本大, 另外低功率的作动器, 很难用于调控大型结构中的波或者高能量的波. 最近, 天津大学汪越胜教授课题组^[104]也提出了类似“鱼骨”结构的可调单胞, 对弯曲振动主导的板波进行调控, 如图7(c)所示. 该结构

图7 (网络版彩图) (a) 分流电路可调超构表面^[81]; (b) 可编程超构表面^[82]; (c) “鱼骨”可调超构表面^[104]

Figure 7 (Color online) (a) Tunable elastic metasurface with a shunt circuit^[81]; (b) programmable elastic metasurface^[82]; (c) tunable multifunctional fish-bone elastic metasurface^[104].

没有利用外接电路, 调控性能具有相对高的鲁棒性. 通过旋转单胞内两侧的螺母, 能够连续改变单胞结构的等效刚度, 从而改变其等效波数来调节透射波的相位.

目前, 这些可调弹性波超构表面研究在基础理论、分析工具及实验验证等方面仍有许多问题可以探讨, 例如如何降低分流电路中电学参数对弹性波相位和幅值调控的敏感性, 如何利用低功率的作动器结合反馈系统, 来主动调控高能量的弹性波, 如何提高电路控制单胞性能的鲁棒性等.

3.3 新概念板波超构表面

最近, 研究者也探索了一些引入新物理概念的弹性波超构表面. 自从超材料出现以来, 对其无序效应的研究就已经成为一个重要的研究方向^[105~107]. 对无序效应的研究可以分为两大类: 第一类是关注无序与有序结构之间的性能差异, 如通过无序效应使超材料的带隙变宽^[108], 诱导光子超材料的拓扑态转变^[109]等; 第二类是关注无序和有序结构之间的性能一致, 通过无序效应使弹性波超材料的带隙特性独立于材料的空间分布^[110], 与有序材料一致, 具有强的鲁棒性. 因此, 深入研究无序效应, 不仅能丰富其物理属性^[111~113], 还能提高超材料的性能^[106,114]. 尽管无序效应的研究在超材料中已经取得了广泛的关注和大的进展, 然而在弹

性波超构表面领域中尚未见报道. 本文作者^[115]提出了无序弹性波超构表面的概念, 如图8(a)所示, 通过建立解析模型揭示了无序效应的物理机制: 发现当柱子反射系数小于低反射边界的值时, 柱间距不再影响单胞对透射波幅值和相位的操控, 单胞操控弯曲波的功能与柱间距解耦, 产生了无序效应, 需要指出的是, 这是一类非共振的新型无序模型, 传统的无序模型(结构无序不影响带隙)主要基于局域共振, 因此两者具有很大的区别. 解析和模拟结果一致展示, 在解耦条件下透射弯曲波的相变仅与单胞内柱子谐振体的个数有关, 且近似为线性关系, 而透射幅值与谐振体的位置解耦, 并几乎近似为单位1(全透射). 通过实验验证了该无序超构表面调控波的有效性. 该超构表面的无序效应也为设计弹性波可重构超构表面提供了新的思路.

在航空航天等工程领域, 板结构是主要的承载结构之一. 然而, 在超材料和超构表面的研究中, 大多数研究者设计的板状超材料和超构表面都需要在原板面上进行大量的开槽或钻孔, 来避免相邻单胞间的耦合干涉以独立地设计单胞, 这必然会对主体板结构的强度和刚度造成一定的破坏. 为了克服这一缺点, 本文作者提出了一种单胞耦合弹性波超构表面^[116]. 揭示了单胞间有利耦合和不利耦合的内部机理, 并指出由于聚焦型超构表面连续的相位变化使得所有相邻单胞间

图 8 (网络版彩图) (a) 无序弹性波超构表面^[115]; (b) 非局部弹性波超构表面^[117]

Figure 8 (Color online) (a) Disordered elastic metasurface^[115]; (b) nonlocal elastic metasurface^[117].

仅有有利耦合, 因此不需要在单胞间开槽, 即可获得高性能的聚焦. 实验验证了所设计超构表面(厚度仅为波长的0.495倍)的偏折和聚焦功能. 提出的新概念性设计可以在不破坏原基板结构的条件下, 有效地操控基板中的弹性波, 拓宽了单胞间的耦合干涉在弹性波超材料或超构表面中的应用.

另一方面, 起源于光学的非局部超构表面概念, 最近也被拓展到了弹性波超构表面, 非局部机制可以拓宽弹性波超构表面的带宽^[117]. 如图8(b)所示, 通过设计的柔性元件连接相邻的单胞, 单胞间会产生非局部耦合力使相位梯度曲线成为入射波波数的函数. 作者通过半解析和数值模拟相结合的方法, 探索了相关设计参数的识别及其对性能影响的评估. 通过考虑板中全反射设计, 对非局域超表面概念进行了数值仿真和实验测试. 实验结果验证了非局域设计概念的可行性及其拓宽被动弹性波超构表面带宽的能力.

4 超构表面的应用

上述大部分的研究重点均是单胞结构的设计, 通过调节其相位的空间分布, 从而来调控弹性波的传播方向, 和实现聚焦、分波等功能. 目前对弹性波超构表面的研究也已逐渐开始面向工程应用. 例如, 长期以来, 人们认为纵向弹性波和剪切弹性波之间的模式转换只能在一定的入射角下产生. Kim等人^[83]通过在板结构边界设计平均长度约为P波波长一半的梯度波导谐振子, 构成亚波长反射型超构表面, 实现了板结构中入射P波在 $19^\circ \sim 90^\circ$ 的大入射角范围内, 全部模式转换为剪切SV波, 为结构健康监测信号处理技术提供了新的思路. 本文作者^[84]也成功地将亚波长的弹性波超构表面应用于弯曲波能量的非对称传输, 无需利用透射波的模式转换或内部损耗等传统方法, 实验验证了通过双层亚波长超构表面的组合调控, 在5152~6651 Hz范围内, 正方向入射能量传输率可达90%左右, 而反方向入射能量能被完全阻挡. 最近, Li等人^[118]也提出了基于+1和-1阶衍射的单层亚波长超构表面, 实验验证了设计的超构表面实现弯曲波能量的非对称传输.

除了结构损伤监测和能量传输方面的应用, 弹性波超构表面另一个极具潜力的应用是低频减振. 自20世纪50年代初以来, 振动抑制研究课题一直受到广泛

关注. 传统的振动抑制方法主要分为被动抑振和主动抑振. 被动抑振方法^[119~121]以在结构上附加大量阻尼减振器为代表, 难以满足结构轻质化的要求. 主动抑振方法^[122~125]是基于反馈响应, 通过作动器向主体结构施加控制力, 振动控制系统的结构复杂, 鲁棒性差. 作为新一代的振动抑制方法, 声学黑洞技术^[126~130]可以通过附加少量阻尼来吸收传播波(以弯曲波为主), 推动了轻质化结构减振技术的发展. 然而, 声学黑洞技术在低频时只具有微弱的阻尼效应, 很难应用于大多数以低频振动为主的结构减振. 作为一类新型的振动抑制方法, 在板类结构上铺设人工周期结构(传统力学超材料)^[129,131,132]可以产生禁带, 来隔离不同频段内的振动能量. 然而, 仅仅是其单胞的尺寸为亚波长, 而由许多个周期单胞构成的整体结构的尺寸仍然远远大于波长. 因此在使用该类非亚波长结构来调控波长接近米量级的低频弹性波时, 结构的设计尺寸依然太大, 很难适应实际器件的微小化和轻质化需求. 最近弹性波超构表面的出现, 为亚波长轻质结构减振提供了新的思路, 有望推进低频减振技术的发展.

美国普渡大学Semperlotti教授课题组通过调节亚波长局域共振超构表面的相位梯度, 使之小于 $4\pi/\lambda$ ^[85,133], 以使所有角度入射的波都超过透射临界角, 从而发生全反射来进行振动隔离. 如图9(a)所示, 他们用圆柱空腔结构上表面的亚波长超构表面结构隔离了圆柱腔壁结构的振动, 从而在工作频率为5738 Hz时, 有效地实现了其中心处连杆的减振, 重要的是该超构表面的厚度仅为波长的五分之一. 进一步他们基于超构表面的非局域效应拓宽了一定带宽^[117], 实验验证了在3550~4550 Hz范围内具有减振效果.

本文作者通过粘贴外部约束阻尼层, 将阻尼损耗系统引入到超构表面设计, 系统研究了弯曲波的吸收问题. 首次提出了损耗型吸振超构表面概念^[134], 如图9(b)所示. 实验验证了在340~1000 Hz(大于1.5倍频程)的低频率范围内, 设计的超构表面均具有很强的准全向高效吸收弯曲波的能力(能量吸收率高于90%). 另外还提出了减小结构厚度的一般性方法, 可以在减小弹性波超构表面厚度的同时, 保持不变的高能量吸收率. 通过利用该方法来改进的超构表面, 在340~1000 Hz频率范围内, 其厚度均小于波长, 只有最大波长的0.57, 有望通过进一步优化设计来实现结构尺寸达到深度亚波长.

图 9 (网络版彩图)弹性波超构表面的应用. (a) 振动隔离^[133]; (b) 振动吸收^[134]

Figure 9 (Color online) Application of elastic metasurface. (a) Vibration isolation^[133]; (b) vibration absorption^[134].

减小弹性波超构表面的厚度尺寸, 以及获得更低频率、更大带宽的完美吸收将是这个研究方向今后工作的重点.

5 展望

本文从调控不同类型弹性波的角度, 分类综述了近年来弹性波超构表面的研究进展, 重点介绍了工作原理、存在的不足以及相应的工程应用前景. 纵观弹性波超构表面的研究现状, 可以发现, 还有一些有待解决的关键问题和值得我们思考的地方.

(1) 随着研究工作的深入, 研究人员发现广义斯涅尔定律对解释一些涉及高阶衍射的新现象不再有效, 如入射角超过所谓的临界角^[135,136]和一些不被期望的泄漏波^[48,74]. 对于声波的高阶衍射, 衍射通道的方向和强度需要通过更一般性的方法——衍射定理^[137]和模式耦合方法^[138-141]去预测. 最近基于这些方法, 研究者揭示了各种涉及新的声学物理现象的衍射机理. 几个典型的例子包括, 基于高阶衍射的声学非对称传输^[52]、

声学吸收^[136,142]以及通过改变超栅相位梯度单胞个数的奇偶性可以转换高阶衍射的异常透射和反射行为^[143].

声学领域对超构表面涉及的高阶衍射机理研究已取得了显著进展, 然而在弹性波超构表面领域, 几乎所有的研究还仅仅基于简单的广义斯涅尔定律, 大多研究目标仍局限在普通的一阶衍射, 对于高阶的弹性波衍射的机理还没有得到系统的研究. 由于弹性波与声波本质上存在的差异, 如更多的自由度, 更复杂的波动控制方程, 揭示弹性波超构表面涉及的高阶衍射机理将更具挑战性. 这是目前弹性波超构表面研究中存在的关键问题之一. 最近本文作者拓展了声学中的模式耦合方法, 建立了研究弯曲波衍射的理论方法^[120], 初步地研究了弯曲波的衍射行为.

(2) 目前大多数对弹性波超构表面的研究, 仅仅对单一弹性波波型的调控做了一般性的研究, 而对于模式转换形成的混合波型调控没有进行深入讨论, 其耦合机理、转换波型的相位探测, 以及模式转换对调控波场性能的影响等, 都是值得深入研究的课题.

(3) 发展新的机理并结合优化方法, 设计深度亚波

长尺寸(一般小于十分之一波长)的弹性波超构表面,使之能够频带更宽、灵活性更强地调控各类低频、不同波型的弹性波,补充和促进传统力学超材料^[29,131,132]对低频弹性波的调控技术,将是这个研究方向今后工作的重点。

(4) 对于各类弹性波超构表面,针对结构中的高阶衍射波,建立高阶衍射理论与模式转换相结合的波动控制理论体系,对波动的复杂现象进行更有深度的探索,是弹性波超构表面研究的另一个发展方向。

(5) 对于可调弹性波超构表面的研究,在基础理论、分析方法及实验验证等方面有许多可以探讨的问题。例如,对于压电控制的可调超构表面,如何降低其控制电路的电学参数对单胞结构调控波相位和幅值的敏感度;如何利用低功率的作动器结合反馈系统设计超构表面,来主动调控高能量的弹性波,如何提高电路控制超构表面单胞性能的鲁棒性等。压电控制的可

调超构表面与传统的能够产生可调力学属性的压电控制力学超材料^[144~147]相比,更多地考虑了弹性波可调的传播方式和整体结构的亚波长特性,虽然弹性波超构表面在可调单胞的外接分流电路和主动控制电路设计方面有很多共性。

(6) 传统力学超材料在损伤检测^[7,8,148],结构减振^[1~3]和振动能量收集^[4~6]的应用中取得了一定进展,但目前超构表面与实际应用相结合的研究还比较少,应当推进弹性波超构表面在工程领域中具体的应用研究。例如,目前弹性波超构表面的研究对象几乎均是无限大结构(在有限大结构的边界加PML(完美匹配层),来消除结构边界的反射,将有限大结构等效为无限大结构来研究),研究结果难以直接应用于工程实际的有限大结构,因此弹性波超构表面要得到工程应用,其研究必须要考虑边界反射的影响,解决有限大结构中波动的调控问题。

参考文献

- 1 Zhou W, Wu Y, Zuo L. Vibration and wave propagation attenuation for metamaterials by periodic piezoelectric arrays with high-order resonant circuit shunts. *Smart Mater Struct*, 2015, 24: 065021
- 2 Wang G, Chen S. Large low-frequency vibration attenuation induced by arrays of piezoelectric patches shunted with amplifier-resonator feedback circuits. *Smart Mater Struct*, 2016, 25: 015004
- 3 Reynolds M, Daley S. An active viscoelastic metamaterial for isolation applications. *Smart Mater Struct*, 2014, 23: 045030
- 4 Oh J H, Seung H M, Kim Y Y. Doubly negative isotropic elastic metamaterial for sub-wavelength focusing: Design and realization. *J Sound Vib*, 2017, 410: 169–186
- 5 Li K, Rizzo P, Bagheri A. A parametric study on the optimization of a metamaterial-based energy harvester. *Smart Mater Struct*, 2015, 24: 115019
- 6 Yan X, Zhu R, Huang G, et al. Focusing guided waves using surface bonded elastic metamaterials. *Appl Phys Lett*, 2013, 103: 121901
- 7 Gliozzi A S, Miniaci M, Bosia F, et al. Metamaterials-based sensor to detect and locate nonlinear elastic sources. *Appl Phys Lett*, 2015, 107: 161902
- 8 Tian Y, Shen Y, Rao D, et al. Metamaterial improved nonlinear ultrasonics for fatigue damage detection. *Smart Mater Struct*, 2019, 28: 075038
- 9 Liu Z, Zhang X, Mao Y, et al. Locally resonant sonic materials. *Science*, 2000, 289: 1734–1736
- 10 Oh J H, Seung H M, Kim Y Y. Adjoining of negative stiffness and negative density bands in an elastic metamaterial. *Appl Phys Lett*, 2016, 108: 093501
- 11 Oh J H, Kwon Y E, Lee H J, et al. Elastic metamaterials for independent realization of negativity in density and stiffness. *Sci Rep*, 2016, 6: 23630
- 12 Hewage T A M, Alderson K L, Alderson A, et al. Double-negative mechanical metamaterials displaying simultaneous negative stiffness and negative Poisson's ratio properties. *Adv Mater*, 2016, 28: 10323–10332
- 13 Wu Y, Lai Y, Zhang Z Q. Elastic metamaterials with simultaneously negative effective shear modulus and mass density. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 105506
- 14 Yao S, Zhou X, Hu G. Experimental study on negative effective mass in a 1D mass-spring system. *New J Phys*, 2008, 10: 043020
- 15 Chen Y, Hu G, Huang G. A hybrid elastic metamaterial with negative mass density and tunable bending stiffness. *J Mech Phys Solids*, 2017, 105: 179–198

- 16 Zhu R, Liu X N, Hu G K, et al. A chiral elastic metamaterial beam for broadband vibration suppression. *J Sound Vib*, 2014, 333: 2759–2773
- 17 Nobrega E D, Gautier F, Pelat A, et al. Vibration band gaps for elastic metamaterial rods using wave finite element method. *Mech Syst Signal Processing*, 2016, 79: 192–202
- 18 Lee H J, Lee J K, Kim Y Y. Elastic metamaterial-based impedance-varying phononic bandgap structures for bandpass filters. *J Sound Vib*, 2015, 353: 58–74
- 19 Dolling G, Enkrich C, Wegener M, et al. Simultaneous negative phase and group velocity of light in a metamaterial. *Science*, 2006, 312: 892–894
- 20 Sukhovich A, Jing L, Page J H. Negative refraction and focusing of ultrasound in two-dimensional phononic crystals. *Phys Rev B*, 2008, 77: 014301
- 21 Zhu R, Liu X N, Hu G K, et al. Negative refraction of elastic waves at the deep-subwavelength scale in a single-phase metamaterial. *Nat Commun*, 2014, 5: 5510
- 22 Sang S, Sandgren E, Wang Z. Wave attenuation and negative refraction of elastic waves in a single-phase elastic metamaterial. *Acta Mech*, 2018, 229: 2561–2569
- 23 Liu X N, Hu G K, Huang G L, et al. An elastic metamaterial with simultaneously negative mass density and bulk modulus. *Appl Phys Lett*, 2011, 98: 251907
- 24 Zhou X, Hu G. Analytic model of elastic metamaterials with local resonances. *Phys Rev B*, 2009, 79: 195109
- 25 Dong H W, Zhao S D, Wang Y S, et al. Topology optimization of anisotropic broadband double-negative elastic metamaterials. *J Mech Phys Solids*, 2017, 105: 54–80
- 26 Wang Y F, Wang Y S, Zhang C. Two-dimensional locally resonant elastic metamaterials with chiral comb-like interlayers: Bandgap and simultaneously double negative properties. *J Acoust Soc Am*, 2016, 139: 3311–3319
- 27 Wang Y F, Wang Y S, Laude V. Wave propagation in two-dimensional viscoelastic metamaterials. *Phys Rev B*, 2015, 92: 104110
- 28 Xiao Y, Wen J, Wen X. Sound transmission loss of metamaterial-based thin plates with multiple subwavelength arrays of attached resonators. *J Sound Vib*, 2012, 331: 5408–5423
- 29 Fang X, Wen J, Bonello B, et al. Ultra-low and ultra-broad-band nonlinear acoustic metamaterials. *Nat Commun*, 2017, 8: 1288
- 30 Zhou W, Wu B, Muhammad B, et al. Actively tunable transverse waves in soft membrane-type acoustic metamaterials. *J Appl Phys*, 2018, 123: 165304
- 31 Zhou W J, Li X P, Wang Y S, et al. Spectro-spatial analysis of wave packet propagation in nonlinear acoustic metamaterials. *J Sound Vib*, 2018, 413: 250–269
- 32 Lu K, Wu J H, Jing L, et al. The two-degree-of-freedom local resonance elastic metamaterial plate with broadband low-frequency bandgaps. *J Phys D-Appl Phys*, 2017, 50: 095104
- 33 Zhang Y Y, Wu J H, Hu G Z, et al. Flexural wave suppression by an elastic metamaterial beam with zero bending stiffness. *J Appl Phys*, 2017, 121: 134902
- 34 Li S, Dou Y, Chen T, et al. Evidence for complete low-frequency vibration band gaps in a thick elastic steel metamaterial plate. *Mod Phys Lett B*, 2019, 33: 1950038
- 35 Hou Z, Assouar B M. Tunable solid acoustic metamaterial with negative elastic modulus. *Appl Phys Lett*, 2015, 106: 251901
- 36 Hou Z, Ni H, Assouar B. P T-symmetry for elastic negative refraction. *Phys Rev Appl*, 2018, 10: 044071
- 37 Zhang H K, Zhou X M. Mechanics concepts and advances of acoustic metamaterials design (in Chinese). *Chin J Solid Mech*, 2016, 5: 387–397 [张宏宽, 周萧明. 声波超材料设计的力学原理与进展. *固体力学学报*, 2016, 5: 387–397]
- 38 Zhu R, Liu X N, Hu G K, et al. Microstructural designs of plate-type elastic metamaterial and their potential applications: A review. *Int J Smart Nano Mater*, 2015, 6: 14–40
- 39 Liu X, Hu G. Elastic metamaterials making use of chirality: A review. *Strojniški vestnik-J Mech Eng*, 2016, 62: 403–418
- 40 Wang Y F, Wang Y Z, Wu B, et al. Tunable and active phononic crystals and metamaterials. *Appl Mech Rev*, 2020, 72: 040801
- 41 Assouar B, Liang B, Wu Y, et al. Acoustic metasurfaces. *Nat Rev Mater*, 2018, 3: 460–472
- 42 Yu N, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction. *Science*, 2011, 334: 333–337
- 43 Yu N, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces. *Nat Mater*, 2014, 13: 139–150

- 44 Sun S, He Q, Xiao S, et al. Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves. *Nat Mater*, 2012, 11: 426–431
- 45 Yang Y, Jing L, Zheng B, et al. Full-polarization 3D metasurface cloak with preserved amplitude and phase. *Adv Mater*, 2016, 28: 6866–6871
- 46 Zhang J, Kosugi Y, Otomo A, et al. Active metasurface modulator with electro-optic polymer using bimodal plasmonic resonance. *Opt Express*, 2017, 25: 30304–30311
- 47 Wan X, Jiang W X, Ma H F, et al. A broadband transformation-optics metasurface lens. *Appl Phys Lett*, 2014, 104: 151601
- 48 Xie Y, Wang W, Chen H, et al. Wavefront modulation and subwavelength diffractive acoustics with an acoustic metasurface. *Nat Commun*, 2014, 5: 5553
- 49 Zhu Y, Hu J, Fan X, et al. Fine manipulation of sound via lossy metamaterials with independent and arbitrary reflection amplitude and phase. *Nat Commun*, 2018, 9: 1632
- 50 Xie B, Tang K, Cheng H, et al. Coding acoustic metasurfaces. *Adv Mater*, 2017, 29: 1603507
- 51 Li Y. Acoustic metasurfaces (in Chinese). *Physics*, 2017, 11: 721–730 [李勇. 声波超构表面. *物理*, 2017, 11: 721–730]
- 52 Li Y, Shen C, Xie Y, et al. Tunable asymmetric transmission via Lossy acoustic metasurfaces. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 035501
- 53 Li Y, Jiang X, Li R, et al. Experimental realization of full control of reflected waves with subwavelength acoustic metasurfaces. *Phys Rev Appl*, 2014, 2: 064002
- 54 Fan S W, Zhao S D, Cao L, et al. Reconfigurable curved metasurface for acoustic cloaking and illusion. *Phys Rev B*, 2020, 101: 024104
- 55 Fan S W, Wang Y F, Cao L, et al. Acoustic vortices with high-order orbital angular momentum by a continuously tunable metasurface. *Appl Phys Lett*, 2020, 116: 163504
- 56 Qi S, Li Y, Assouar B. Acoustic focusing and energy confinement based on multilateral metasurfaces. *Phys Rev Appl*, 2017, 7: 054006
- 57 Zhu X, Li K, Zhang P, et al. Implementation of dispersion-free slow acoustic wave propagation and phase engineering with helical-structured metamaterials. *Nat Commun*, 2016, 7: 11731
- 58 Li J, Shen C, Diaz-Rubio A, et al. Systematic design and experimental demonstration of bianisotropic metasurfaces for scattering-free manipulation of acoustic wavefronts. *Nat Commun*, 2018, 9: 1342
- 59 Ma G, Yang M, Xiao S, et al. Acoustic metasurface with hybrid resonances. *Nat Mater*, 2014, 13: 873–878
- 60 Li Y, Assouar B M. Acoustic metasurface-based perfect absorber with deep subwavelength thickness. *Appl Phys Lett*, 2016, 108: 063502
- 61 Yang M, Chen S, Fu C, et al. Optimal sound-absorbing structures. *Mater Horiz*, 2017, 4: 673–680
- 62 Merkel A, Theocharis G, Richoux O, et al. Control of acoustic absorption in one-dimensional scattering by resonant scatterers. *Appl Phys Lett*, 2015, 107: 244102
- 63 Jiménez N, Romero-García V, Pagneux V, et al. Quasiperfect absorption by subwavelength acoustic panels in transmission using accumulation of resonances due to slow sound. *Phys Rev B*, 2017, 95: 014205
- 64 Jiménez N, Huang W, Romero-García V, et al. Ultra-thin metamaterial for perfect and quasi-omnidirectional sound absorption. *Appl Phys Lett*, 2016, 109: 121902
- 65 Huang S, Zhou Z, Li D, et al. Compact broadband acoustic sink with coherently coupled weak resonances. *Sci Bull*, 2020, 65: 373–379
- 66 Zhang J, Su X, Liu Y, et al. Metasurface constituted by thin composite beams to steer flexural waves in thin plates. *Int J Solids Struct*, 2018, 162: 14–20
- 67 Tian Z, Yu L. Elastic phased diffraction gratings for manipulation of ultrasonic guided waves in solids. *Phys Rev Appl*, 2019, 11: 024052
- 68 Xu Y, Cao L, Peng P, et al. Beam splitting of flexural waves with a coding meta-slab. *Appl Phys Express*, 2019, 12: 097002
- 69 Xu Y, Cao L, Yang Z. Deflecting incident flexural waves by nonresonant single-phase meta-slab with subunits of graded thicknesses. *J Sound Vib*, 2019, 454: 51–62
- 70 Qiu H, Chen M, Huan Q, et al. Steering and focusing of fundamental shear horizontal guided waves in plates by using multiple-strip metasurfaces. *Europhys Lett*, 2019, 127: 46004
- 71 Liu Y, Liang Z, Liu F, et al. Source illusion devices for flexural lamb waves using elastic metasurfaces. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 034301
- 72 Su X, Lu Z, Norris A N. Elastic metasurfaces for splitting SV- and P-waves in elastic solids. *J Appl Phys*, 2018, 123: 091701
- 73 Shen X, Sun C T, Barnhart M V, et al. Elastic wave manipulation by using a phase-controlling meta-layer. *J Appl Phys*, 2018, 123: 091708
- 74 Cao L, Yang Z, Xu Y. Steering elastic SH waves in an anomalous way by metasurface. *J Sound Vib*, 2018, 418: 1–14
- 75 Xu Y, Li Y, Cao L, et al. Steering of SH wave propagation in electrorheological elastomer with a structured meta-slab by tunable phase

- discontinuities. *AIP Adv*, 2017, 7: 095114
- 76 Zeng L, Zhang J, Liu Y, et al. Asymmetric transmission of elastic shear vertical waves in solids. *Ultrasonics*, 2019, 96: 34–39
- 77 Su Y C, Chen T, Ko L H, et al. Design of metasurfaces to enable shear horizontal wave trapping. *J Appl Phys*, 2020, 128: 175107
- 78 Zhu H, Semperlotti F. Anomalous refraction of acoustic guided waves in solids with geometrically tapered metasurfaces. *Phys Rev Lett*, 2016, 117: 034302
- 79 Lee H, Lee J K, Seung H M, et al. Mass-stiffness substructuring of an elastic metasurface for full transmission beam steering. *J Mech Phys Solids*, 2018, 112: 577–593
- 80 Cao L, Yang Z, Xu Y, et al. Deflecting flexural wave with high transmission by using pillared elastic metasurface. *Smart Mater Struct*, 2018, 27: 075051
- 81 Li S, Xu J, Tang J. Tunable modulation of refracted lamb wave front facilitated by adaptive elastic metasurfaces. *Appl Phys Lett*, 2018, 112: 021903
- 82 Chen Y, Li X, Nassar H, et al. A programmable metasurface for real time control of broadband elastic rays. *Smart Mater Struct*, 2018, 27: 115011
- 83 Kim M S, Lee W R, Kim Y Y, et al. Transmodal elastic metasurface for broad angle total mode conversion. *Appl Phys Lett*, 2018, 112: 241905
- 84 Cao L, Xu Y, Assouar B, et al. Asymmetric flexural wave transmission based on dual-layer elastic gradient metasurfaces. *Appl Phys Lett*, 2018, 113: 183506
- 85 Zhu H, Walsh T F, Semperlotti F. Total-internal-reflection elastic metasurfaces: Design and application to structural vibration isolation. *Appl Phys Lett*, 2018, 113: 221903
- 86 Ruan Y, Liang X, Hu C. Retroreflection of flexural wave by using elastic metasurface. *J Appl Phys*, 2020, 128: 045116
- 87 Xu Y, Yang Z, Cao L. Deflecting Rayleigh surface acoustic waves by a meta-ridge with a gradient phase shift. *J Phys D-Appl Phys*, 2018, 51: 175106
- 88 He Y, Chen T, Song X. Manipulation of seismic Rayleigh waves using a phase-gradient rubber metasurface. *Int J Mod Phys B*, 2020, 34: 2050142
- 89 Rose J L. *Ultrasonic Waves in Solid Media*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 10
- 90 Giurgiutiu V. *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors*. London: Academic Press, 2007
- 91 Xu Y, Cao L, Peng P, et al. Spatial waveguide mode separation for acoustic waves in a meta-slab composed of subunits with graded thicknesses. *J Appl Phys*, 2019, 126: 165110
- 92 Lee S W, Oh J H. Single-layer elastic metasurface with double negativity for anomalous refraction. *J Phys D-Appl Phys*, 2020, 53: 265301
- 93 Lee S W, Seung H M, Choi W, et al. Broad-angle refractive transmodal elastic metasurface. *Appl Phys Lett*, 2020, 117: 213502
- 94 Zhang J, Su X, Pennec Y, et al. Wavefront steering of elastic shear vertical waves in solids via a composite-plate-based metasurface. *J Appl Phys*, 2018, 124: 164505
- 95 Yuan S M, Chen A L, Cao L, et al. Tunable multifunctional fish-bone elastic metasurface for the wavefront manipulation of the transmitted in-plane waves. *J Appl Phys*, 2020, 128: 224502
- 96 Rong J, Ye W. Multifunctional elastic metasurface design with topology optimization. *Acta Mater*, 2020, 185: 382–399
- 97 Rong J, Ye W, Zhang S, et al. Frequency-coded passive multifunctional elastic metasurfaces. *Adv Funct Mater*, 2020, 30: 2005285
- 98 Ahn B, Lee H, Lee J S, et al. Topology optimization of metasurfaces for anomalous reflection of longitudinal elastic waves. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 2019, 357: 112582
- 99 Xu W, Zhang M, Ning J, et al. Anomalous refraction control of mode-converted elastic wave using compact notch-structured metasurface. *Mater Res Express*, 2019, 6: 065802
- 100 Xu W, Zhang M, Lin Z, et al. Anomalous refraction manipulation of lamb waves using single-groove metasurfaces. *Phys Scr*, 2019, 94: 105807
- 101 Cao L Y. Elastic metasurface design and its manipulation of flexural wave (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2020 [曹礼云. 弹性波超构表面设计及其对弯曲波的调控. 博士学位论文. 西安: 西北工业大学, 2020]
- 102 Zhang J, Zhang X, Xu F, et al. Vibration control of flexural waves in thin plates by 3D-printed metasurfaces. *J Sound Vib*, 2020, 481: 115440
- 103 Xia R, Yi J, Chen Z, et al. *In situ* steering of shear horizontal waves in a plate by a tunable electromechanical resonant elastic metasurface. *J Phys D-Appl Phys*, 2020, 53: 095302
- 104 Yuan S M, Chen A L, Wang Y S. Switchable multifunctional fish-bone elastic metasurface for transmitted plate wave modulation. *J Sound Vib*,

- 2020, 470: 115168
- 105 Baboux F, Ge L, Jacqmin T, et al. Bosonic condensation and disorder-induced localization in a flat band. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 066402
 - 106 Conley G M, Burresi M, Pratesi F, et al. Light transport and localization in two-dimensional correlated disorder. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 143901
 - 107 Nau D, Schönhardt A, Bauer C, et al. Correlation effects in disordered metallic photonic crystal slabs. *Phys Rev Lett*, 2007, 98: 133902
 - 108 Celli P, Yousefzadeh B, Daraio C, et al. Bandgap widening by disorder in rainbow metamaterials. *Appl Phys Lett*, 2019, 114: 091903
 - 109 Liu C, Gao W, Yang B, et al. Disorder-induced topological state transition in photonic metamaterials. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 183901
 - 110 Rupin M, Lemoult F, Lerosey G, et al. Experimental demonstration of ordered and disordered multiresonant metamaterials for lamb waves. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 234301
 - 111 Asatryan A A, Botten L C, Byrne M A, et al. Suppression of anderson localization in disordered metamaterials. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 193902
 - 112 Bellani V, Diez E, Hey R, et al. Experimental evidence of delocalized states in random dimer superlattices. *Phys Rev Lett*, 1999, 82: 2159–2162
 - 113 Rahimzadegan A, Arslan D, Suryadharma R N S, et al. Disorder-induced phase transitions in the transmission of dielectric metasurfaces. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 015702
 - 114 Gérardin B, Laurent J, Derode A, et al. Full transmission and reflection of waves propagating through a maze of disorder. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 173901
 - 115 Cao L, Yang Z, Xu Y, et al. Disordered elastic metasurfaces. *Phys Rev Appl*, 2020, 13: 014054
 - 116 Cao L, Yang Z, Xu Y, et al. Pillared elastic metasurface with constructive interference for flexural wave manipulation. *Mech Syst Signal Processing*, 2021, 146: 107035
 - 117 Zhu H, Patnaik S, Walsh T F, et al. Nonlocal elastic metasurfaces: Enabling broadband wave control via intentional nonlocality. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2020, 117: 26099–26108
 - 118 Li B, Hu Y, Chen J, et al. Efficient asymmetric transmission of elastic waves in thin plates with lossless metasurfaces. *Phys Rev Appl*, 2020, 14: 054029
 - 119 Kerwin Jr E M. Damping of flexural waves by a constrained viscoelastic layer. *J Acoust Soc Am*, 1959, 31: 952–962
 - 120 Sun J Q, Jolly M R, Norris M A. Passive, adaptive and active tuned vibration absorbers—A survey. *J Mech Des*, 1995, 117: 234–242
 - 121 Warburton G B. Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters. *Earthquake Engng Struct Dyn*, 1982, 10: 381–401
 - 122 Moheimani S O R. A survey of recent innovations in vibration damping and control using shunted piezoelectric transducers. *IEEE Trans Contr Syst Technol*, 2003, 11: 482–494
 - 123 Niederberger D, Morari M. An autonomous shunt circuit for vibration damping. *Smart Mater Struct*, 2006, 15: 359–364
 - 124 Dubay R, Hassan M, Li C, et al. Finite element based model predictive control for active vibration suppression of a one-link flexible manipulator. *ISA Trans*, 2014, 53: 1609–1619
 - 125 Agnes G. Active/passive piezoelectric vibration suppression. 1994, doi: 10.1117/12.174112
 - 126 McCormick C A, Shepherd M R. Design optimization and performance comparison of three styles of one-dimensional acoustic black hole vibration absorbers. *J Sound Vib*, 2020, 470: 115164
 - 127 Tang L, Cheng L, Ji H, et al. Characterization of acoustic black hole effect using a one-dimensional fully-coupled and wavelet-decomposed semi-analytical model. *J Sound Vib*, 2016, 374: 172–184
 - 128 Ma L, Cheng L. Topological optimization of damping layout for minimized sound radiation of an acoustic black hole plate. *J Sound Vib*, 2019, 458: 349–364
 - 129 Krylov V V, Winward R E T B. Experimental investigation of the acoustic black hole effect for flexural waves in tapered plates. *J Sound Vib*, 2007, 300: 43–49
 - 130 Pelat A, Gautier F, Conlon S C, et al. The acoustic black hole: A review of theory and applications. *J Sound Vib*, 2020, 476: 115316
 - 131 Assouar M B, Senesi M, Oudich M, et al. Broadband plate-type acoustic metamaterial for low-frequency sound attenuation. *Appl Phys Lett*, 2012, 101: 173505
 - 132 Oudich M, Li Y, Assouar B M, et al. A sonic band gap based on the locally resonant phononic plates with stubs. *New J Phys*, 2010, 12: 083049
 - 133 Zhu H, Walsh T F, Semperlotti F. Experimental study of vibration isolation in thin-walled structural assemblies with embedded total-internal-reflection metasurfaces. *J Sound Vib*, 2019, 456: 162–172

- 134 Cao L, Yang Z, Xu Y, et al. Flexural wave absorption by lossy gradient elastic metasurface. *J Mech Phys Solids*, 2020, 143: 104052
- 135 Liu B, Ren B, Zhao J, et al. Experimental realization of all-angle negative refraction in acoustic gradient metasurface. *Appl Phys Lett*, 2017, 111: 221602
- 136 Zhou J, Zhang X, Fang Y. Three-dimensional acoustic characteristic study of porous metasurface. *Composite Struct*, 2017, 176: 1005–1012
- 137 Larouche S, Smith D R. Reconciliation of generalized refraction with diffraction theory. *Opt Lett*, 2012, 37: 2391–2393
- 138 Liu B, Jiang Y. Metasurface-based angle-selective multichannel acoustic refractor. *Appl Phys Express*, 2018, 11: 057301
- 139 Mei J, Wu Y. Controllable transmission and total reflection through an impedance-matched acoustic metasurface. *New J Phys*, 2014, 16: 123007
- 140 Hou Z, Fang X, Li Y, et al. Highly efficient acoustic metagrating with strongly coupled surface grooves. *Phys Rev Appl*, 2019, 12: 034021
- 141 Shen C, Cummer S A. Harnessing multiple internal reflections to design highly absorptive acoustic metasurfaces. *Phys Rev Appl*, 2018, 9: 054009
- 142 Fang Y, Zhang X, Zhou J. Acoustic porous metasurface for excellent sound absorption based on wave manipulation. *J Sound Vib*, 2018, 434: 273–283
- 143 Fu Y, Shen C, Cao Y, et al. Reversal of transmission and reflection based on acoustic metagratings with integer parity design. *Nat Commun*, 2019, 10: 2326
- 144 Zhu R, Chen Y Y, Wang Y S, et al. A single-phase elastic hyperbolic metamaterial with anisotropic mass density. *J Acoust Soc Am*, 2016, 139: 3303–3310
- 145 Zhu R, Chen Y Y, Barnhart M V, et al. Experimental study of an adaptive elastic metamaterial controlled by electric circuits. *Appl Phys Lett*, 2016, 108: 011905
- 146 Chen S, Wang G, Wen J, et al. Wave propagation and attenuation in plates with periodic arrays of shunted piezo-patches. *J Sound Vib*, 2013, 332: 1520–1532
- 147 Zhang H, Wen J, Xiao Y, et al. Sound transmission loss of metamaterial thin plates with periodic subwavelength arrays of shunted piezoelectric patches. *J Sound Vib*, 2015, 343: 104–120
- 148 Zhu R, Yasuda H, Huang G L, et al. Kirigami-based elastic metamaterials with anisotropic mass density for subwavelength flexural wave control. *Sci Rep*, 2018, 8: 483

Advances in the study of elastic metasurfaces

CAO LiYun, YANG ZhiChun & XU YanLong

Institute of Structural Dynamics and Control, School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

The development of elastic metasurfaces, which are ultra-thin metamaterials, has opened new possibilities for realizing extraordinary wave manipulation, particularly for elastic waves at low frequencies. First, according to different types of elastic wave modes, we introduce the basic concept, working principle, and latest research indications of elastic metasurfaces. In addition, we discuss the existing problems in the current research of elastic metasurfaces. Then, we focus on engineering applications of these metasurfaces, including mode separation, energy transmission, and vibration isolation at low frequencies. Finally, suggestions are put forward for future research work.

elastic metasurface, metasurface, mechanical metamaterial, subwavelength, vibration isolation

doi: [10.1360/SST-2020-0447](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0447)