基于弹性力学的超构材料

阮居祺, 卢明辉*, 陈延峰, 祝世宁

南京大学固体微结构国家重点实验室与材料科学与工程系, 南京 210093

* E-mail: luminghui@nju.edu.cn

收稿日期: 2014-09-10; 接受日期: 2014-09-26

摘要 近年来以微结构为基本构造单元的人工超构材料, 由于具有自然材料所不具备的可设计的奇异物性, 在材料学、声学、光学、电磁学以及信息能源等领域具有巨大的发展潜力. 超构材料的研究脱胎于电磁超构材料, 但是近年来在声学、热学、静电、静磁学以及弹性力学领域取得了飞跃的发展, 大大拓展了超构材料的研究领域. 借助 Milton 图重点阐述了基于弹性力学的新型超构材料的超常特性及其主要类别: 例如具有负的质量密度和负弹性模量的声学超构材料, 具有负泊松比的拉胀超构材料, 具有剪切模量 $G=0$ 的反胀超构材料, 以及高强度的超轻材料等新奇的人工超构材料. 不仅如此, 还结合变换力学着重描述了声波和弹性波在这类弹性力学超构材料中的传播特性, 以及详细阐述了负弹性参数超构材料界面的声表面波的特征及其物理效应. 最后结合弹性力学超构材料在我国的研究现状, 对利用弹性力学超构材料和声波超构材料操纵弹性波和声波的传播以及开发设计新型弹性力学超构材料等问题作了总结与展望, 希望推进此类材料在诸多研究领域的应用.

关键词

弹性力学
声子晶体
超构材料
拉胀材料
变换力学

1 引言

超构材料即以微结构为基本构造单元的人工材料, 具有很多自然材料不具备的可设计超常物性. 超构材料的基本物性取决于其微结构单元的特性(如形状因子与手性、共振与激发)以及微结构单元在空间的分布(如间距、耦合、对称性).

光子晶体^[1]、电磁超构材料和变换光学等新材料与新方法可以用于调控光波和电磁波的激发、传播与耦合特性. 由于弹性波类似电磁波都能用经典的波动方程描述, 其物理原理及数学方法上的相似性直接导致了声超构材料、变换声学等概念的出现. 近年来声子晶体作为体弹模量或质量密度等弹性参数可

周期性调制的一类人工复合材料, 可像光子晶体调控光波一样调控弹性波的激发、传输与耦合, 进而调控整个材料宏观的力学、声学特性^[2]. 研究者不仅能改变声子晶体中的人工点阵(或叫“超晶格”), 还能人为地设计每个格点位置上的“人工原子”. 于是声子晶体的概念进一步拓展到了声学超构材料. 在这类材料中, 单体共振源于单个“人工原子”, 它能与源自晶格对称性的布拉格共振协同产生很奇异的力学和声学特性.

目前一些研究人员认为声学超构材料是有着超常规声学效应的、尺寸远小于波长的结构单元构成的人工复合结构材料, 其可在长波极限下反演得到相应的有效弹性参数. 但是另一些学者认为声学超构

引用格式: 阮居祺, 卢明辉, 陈延峰, 等. 基于弹性力学的超构材料. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 1261–1270

Ruan J Q, Lu M H, Chen Y F, et al. Metamaterial based on elastic mechanics (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 1261–1270, doi: 10.1360/092014-102

材料这一概念应当拓展到包含声子晶体在内的所有具有奇异性能的人工复合结构材料^[3]。声学超构材料可展现出许多奇异的物理现象和效应,如声波的低频带隙^[4]、负折射^[5]、隐身^[6]等。所谓基于弹性力学的超构材料泛指具有超常规力学性能的一类人工复合材料,该类材料的弹性力学性能不仅受限于其微结构组分,还强烈依赖于它的结构。因此基于弹性力学的超构材料包含声学超构材料,它能展示出均匀材料不具备的奇异弹性力学性能:如负密度、负弹性模量、各向异性密度张量、负泊松比等。这类材料将在材料学、声学、结构力学、建筑学、地震学等学科领域具有重要研究价值,同时在新型材料、信息、能源技术方面会有重要应用。特别要注意的是,由于服役环境和条件不同,针对弹性力学超构材料的研究将不仅涉及静态的弹性力学问题,也会涉及流体中的声波传播和弹性体中固体弹性波的传播问题。

2 流体声波超构材料的奇异特性

首先讨论没有剪切应变和横波传播的流体(包含气、液体)中声波的传播问题。流体介质中的声波散射体可以是传统的均匀声学材料或人工设计的弹性力学超构材料。传统的均匀介质声学材料一般没有负密度和负弹性模量,通常其弹性参数几乎没有色散效应,频率和波矢量的关系往往满足线性色散关系。传统的人工复合材料其有效密度或弹性模量常用常规 Berryman 公式^[7]描述,采用填充率来几何平均。这种方法仅仅适用于静态弹性力学或满足低频近似条件的情形,而针对高频动态声传播,共振效应会导致弹性参数的奇异色散行为以及负质量密度或弹性模量。

弹性固体的质量密度依赖于偏振方向和波的传播方向,需通过严格的力矩阵形式描述。理论上有两个较简单模型,即谐振子系统中的 Lorentz 振荡模型和类似自由电子 Drude 模型^[8],分别对应于不同的共振频、共振吸收带宽和色散关系。其中共振频率由固有弹性参数和固有质量密度决定。关于声超构材料的 Lorentz 振子模型,香港科大的沈平课题组利用由外部包裹软橡胶的铅球构成的简单立方晶体,在低频实现了全方向三维带隙,对应负的密度。该带隙对应波长远大于结构周期,可见其并非源于布拉格散射机制,而是源于局域的 Lorentz 共振^[4],它具有有限的负密度带宽。而基于 Drude 模型的弹性超

构材料,会在低于其固有频率时显示宽带的负质量密度,可用于抗震隔声。这种类似金属表面等离子体激元的负质量密度,有利于在其结构表面激发声学波。

采用局域共振单元获得的负密度或负模量的带宽一般较窄,故考虑用其它方式获得频率响应较宽的负参量。用侧壁开有小孔的管子可以实现负模量,而用中间带有较大质量小振子的薄膜横振动可以获得负有效密度。将这两种结构组合之后可以在一维上实现宽频响应的双负参数^[9]。利用不同阶数的 FP 共振,沿波传播方向和垂直波传播方向的有限长狭缝的 FP 共振分别对应于密度和弹性模量共振,可实现有效的零质量密度^[10]。香港城市大学 Li 课题组^[11]采用迷宫结构,在不增加结构整体尺寸的情况下增加了声的传播路径,利用该结构调节传输波的透反射相位可以构建超构表面^[12]。

此外,将各向异性的单元引入声学超构材料后能使材料的有效密度或有效弹性模量呈现各向异性^[13],有助于利用变换声学方法实现声的隐身^[14],并且利用宽频响应单元能很好地实现声超透镜^[15]或双曲透镜^[16]。通常有效弹性参数都是通过局域共振或有效平均来实现的,采用的是等效媒质近似。而另一种方法是利用能带工程理论分析声子晶体的色散、等频线、态密度,进而分析声波在其内部传播的规律。通过透反射系数的有效介质反演,可以得到长波近似下声子晶体的等效参数。一般声子晶体的带隙意味着存在单负的有效参数^[17]:负有效密度或负有效弹性模量。而布里渊区边界布拉格散射导致的强色散通常意味着各向异性弹性密度或弹性模量,由于能带折叠导致的负斜率色散则可能对应着双负的有效参数及负折射率。

上述流体声波超构材料都是被动式的,最近研究人员考虑利用压电材料主动地调制有效参数,在管子内部引入压电膜来实现反馈可控的有效密度^[18],在管子旁的亥姆霍兹腔内引入压电膜来实现可控的有效模量,这种主动式超构材料对于声控微流芯片等新型超声器件的设计具有重要意义。

3 弹性力学超构材料的奇异特性

介于结构力学在国民经济中的重要性,基于弹性力学的超构材料其另一个研究趋势是静态弹性力学超构材料。一般通过体积模量 B 和质量密度 ρ_0 描述

气、液体中弹性波的传播行为. 气、液体只支持纵向偏振的压力波, 而固体支持纵、横向的弹性波. 其中剪切模量 G 与横波模式密切相关, 其在理想气、液体中为 0. 而一般固体弹性模量为张量形式, 往往用泊松矩阵描述. 对于各向同性介质, 泊松矩阵可退化为固体力学中的泊松比 ν 形式. 对于各向同性介质的特殊情况有 $B/G = 1/3(\nu+1)/(0.5-\nu)$. 对于传统的弹性力学材料, B 和 G 值均为正, 这限定了 ν 的可能区间为 $[-1, 0.5]$. 从 Milton 图^[19](图 1)可看出, 每种各向同性材料对应图中一个点. 一般常见弹性固体的 $\nu \approx 0.3 \sim 0.5$, $B/G \approx 2$, 这意味着体积模量与剪切模量的数量级相同, 即它们都位于图中对角线处. 通常情况下气、液体具有有限的体积模量 B , 但剪切模量 G 为 0, 等价于: $B/G \gg 1 \Leftrightarrow \nu \approx 0.5$. 那么是否还存在其他类型的弹性材料呢? 通过人工超构材料的设计, 人们发现了拉胀超构材料^[20]和反胀超构材料, 具有奇异的泊松比.

各项同性材料的体积模量 B 和剪切模量 G 对应 Milton 图中的一个点. 绝大多数普通材料分布在其对角线附近. 理想气、液体和反胀超构材料的 $G = 0$, 分布于纵坐标轴上. 理想临界流体和拉胀超构材料的 $B = 0$, 分布于横坐标轴上.

3.1 拉胀超构材料

通常将 $\nu < 0$ 或甚至在相对极限 $B/G \ll 1 \Leftrightarrow \nu \approx$

图 1 Milton 图

-1 下的弹性超构材料称为拉胀材料. 早在 1987 年, 研究人员提出了一种 $\nu < 0$ 的三维泡沫, 称其为拉胀材料, 即表示一拉就胀^[21]. 活骨组织就是一种天然的各向异性拉胀材料实例. 此外英国科学家设计制备了 $\nu = -0.7$ 的多孔聚四氟乙稀树脂, 拉胀性显著. 目前设计拉胀材料主要采用两种方法, 一种是基于高分子结构的设计和合成, 从分子水平上合成拉胀高分子网络; 另一种是利用介观和宏观拉胀网络结构, 通过筛选和成型工艺来设计制备拉胀材料. 后一种方法还可以采用受拉力作用的主链棒状液晶高分子, 令其发生翻转, 使得链状体系胀开, 形成拉胀性. 最近, 研究人员考虑如何利用超构材料的思想来设计、制备拉胀材料. 例如, 德国的 Wegener 课题组^[22]设计了一种特殊的凹型领结单元, 当沿 z 轴方向施加压力时, 其将沿 z 轴和 x 轴方向收缩. 泊松比的符号和大小可通过 α 角控制, 当 α 为 90° 时泊松比为 0, 小于 90° 时泊松比为负. 故可在制备过程中调控 α 进而调控材料泊松比(可为正负值也可趋近于 0). 这个基本的领结型单元可组合成一个二维模型系统和三维(各向异性)弹性力学超构材料. 得益于材料 3D 打印技术和双光子吸收立体加工技术的发展, 从宏观到介观尺度上可利用这样的基元结构设计出一系列新型的弹性力学超构材料, 通过调控 α 角, 甚至可构造出正负泊松比交替的新型宏观声子晶体或弹性超构材料, 它们将展现特殊的性能: 尤其可期待其界面处的弹性力学性能、动态响应下的界面波特性以及奇特的非线性响应. 此外该组还设计了一种基于顶点相连的旋转结构单元的拉胀材料^[23], 探索 $\nu = -1$ 时的极端情况. 对其一侧施加压力, 其内部发生了旋转且沿两个正交方向均发生了结构收缩. 受拉胀球玩具的启发, 一个具有 24 个独立圆形孔槽的 Buckling ball(其顶点连接处可旋转)也显示了奇特的拉胀性, 具有加压结构压缩的特征(图 2).

3.2 反胀超构材料

反胀超构材料(如五模式材料)是一种显示出理想流体行为的人工三维结构固体材料, 它难以压缩却极易变形. 五模式是指该材料 6 分量弹性张量中有 5 个为 0 的本征值(只有 1 个非 0). 五模式材料概念最早由 Milton 于 1995 年提出, 2012 年由德国的 Wegener 小组^[20]利用激光直写技术制备, 由点接触的双锥结构构成. 在长波极限下, 该材料显示了明显的各向同

图2 具有24个独立圆形孔槽的 Buckling ball

受拉胀玩具球的启发, 该 Buckling ball 具有24个独立的圆形孔槽, 顶点连接处存在一定的旋转扭矩, 在外力作用下可以表现出明显的压缩与拉伸效应, 呈现出奇特的拉胀特性.

性流体性质, 支持单模式的弹性压缩纵波, 同时却具有超各向异性的弹性模量. 此外, 沿该材料的立方体对角线方向压缩时, 其横向几乎无形变(剪切模量为0), 类似于 $\nu \approx 0.5$ 的理想流体. 相信该类反胀超构材料(或叫超构流体)将会在流体声学 and 变换声学中具有重要应用前景. 荷兰莱顿大学的 Paulose 等人^[24]利用拓扑学模式原理模拟力学超构材料中的位错(图3), 起始立方晶格中的每一个引入点(黄)在最终的形变晶格中均有4个键合, 但却呈现出了三角形或五边形的特殊区域, 这意味着位错的存在.

3.3 超轻材料

在很多实际应用中人们希望材料具有高的杨氏模量 ϵ 和低的静态质量密度 ρ , 但是 ρ 减小往往引起 ϵ 的大幅度减小. 研究表明, 一种光固化铜电镀机械网状材料并不满足 $\epsilon \propto \rho^3$ 的普适关系, 而是满足 $\epsilon \propto \rho^2$ 的异常关系^[25]. 该材料结构显示弹性骨架中含有大量空气. 这种材料的过剩质量密度为 0.9 mg cm^{-3} , 小于室温下空气的质量密度(1.2 mg cm^{-3}), 表现出优越

的隔热性能. 后来, 航空石墨^[26]的过剩质量密度进一步降低至 0.2 mg cm^{-3} . 最近利用石墨烯、碳管制备气凝胶引起了广泛关注, 该类材料具有较高的弹性模量, 但质量密度较低. 当其在空气中振动时由于大量的微型气孔和微纳结构, 其和空气的摩擦损耗将大大易于常规材料. 一般而言, 其粘滞阻性和局域微孔中的声压强度是正相关的, 因此这将大大增加摩擦损耗, 可能是一种理想的吸声材料.

最近, 莱顿大学的 Florijn 等人^[27]制备出了一种力学超构材料(图4), 其表现出单调、非单调与滞回特性. 研究发现这些特性来源于一个破缺的旋转对称性, 它导致沿这些超材料两主轴向出现了变形高度非线性耦合.

此外美国亚利桑那州立大学的 Lv 等人^[28]根据传统的折纸艺术制备出了一种基于周期性的 Ron Resch 管折纸结构以及非周期的 Miura-ori 折纸结构的力学超构材料, 研究了该类材料的 Ron Resch 不同对称模式支撑结构的基本几何与刚度特性, 以及它的承载能力, 并显示了 Miura-ori 模式下中异常的正负泊松比共存现象, 这导致了该模式下有趣的剪切行为和无穷大体积模量. 此外, 研究还发现在 Ron Resch 模式下呈现出了异常强大的承载能力(图5), 这归功于其独特的折叠方式. 这些研究为探索这种基于新奇的折纸结构的力学超构材料提供了新的途径.

4 弹性力学超构材料中波的传播特性

4.1 声波在流体声子晶体中的传输特性

声子晶体可按弹性波种类划分为两类, 一类是用流体作为背景的流体波声子晶体, 另一类是用弹

图3 力学超构材料中位错的拓扑学模拟

(a) 展现了一个基矢为 a_1 和 a_2 的正方晶格; (b) 展现了(a)图中经 2×2 晶胞(黄色顶点与蓝色连键)修饰后得到的扭曲正方晶格, 其中拓扑极化矢量 $P_1 = -a_1 + a_2$; (c) 展示了正方晶格中一个由三斜方(1区域)和五斜方(2区域)相邻构成的位错, 其柏氏矢量(图中实线箭头) $b = -(a_1 + a_2)$, 相错偶极矩 d (图中虚线箭头)连接三斜方与五斜方区域; (d) 为与(a)图中同样修饰方式得到的扭曲晶格, 起始正方晶格中的每一个引入点(黄)在最终的形变晶格中均有4个连键, 但却呈现出了三角形或五边形的特殊区域, 这意味着位错的存在. (引自文献^[24])

图 4 Biholar 薄板极化方向的对换

首先沿 x 轴向对一个 biholar 薄板(孔径 $D_1 = 7$ mm, $D_2 = 10$ mm, 孔间距 $P = 10$ mm)进行均匀的压缩, 该材料会发生明显的 x -轴向极化; 此时再施加沿 y 轴向的均匀压缩, 该材料的极化方向出现了明显的对换, 且同时表现出了奇特的力学性能。(引自文献[27])

图 5 Ron Resch 模式下的巨大承载能力

(a) 为一个受轴向压缩载荷的 Ron Resch 管, 其旁为受压前的截面顶视图及其侧面形貌放大图; (b) 归一化的轴向压缩力相对于一个轴向应变的曲线图, 其中插图展示了不同应变条件下的三种代表形态的截面图与侧面形貌放大图, (a)和(b)中的尺度相同; (c) 描述了一个 Ron Resch 圆顶经顶向压缩载荷后变为完全坍塌形态的过程, 旁插图为其三轴对称模式支撑结构示意图; (d) 该照片展示了 Ron Resch 结构在完全压缩态呈现出的异常承载能力, 旁插图为该结构的放大图; (e) 展示了坍塌状态前后的三轴对称模式结构, 其中插图为失稳形态, 显示由于 buckling 弯曲导致尖端变平坦; (f) 一个 Ron Resch 板 3 轴对称模式支撑结构的第一阶 buckling 弯曲模态的有限元模拟图; (g) 一个 Ron Resch 板六轴对称模式支撑结构的第一阶 buckling 弯曲模态有限元模拟图。(引自文献[28])

性固体作为背景的弹性波声子晶体. 物理上看, 前者背景中不存在声波的剪切张量模式, 仅支持纵声波, 而后者背景是弹性固体, 存在压缩的纵波和剪切的横波.

声子晶体展现出了一系列新奇的物理效应: 例如弹性波会局域在声子晶体的点缺陷中, 或在线缺陷中以缺陷模式传播. 研究者发现了三维流体声子

晶体带隙中的隧穿现象^[29], 并且在二维流体波声子晶体中狄拉克点附近有颤动拍频效应^[30]: 在频率为狄拉克点频率时, 声波通过声子晶体的透射率反比于声子晶体的厚度. 香港科大和南京大学的研究组还分别利用声子晶体的三重或四重简并狄拉克点实现了零折射率现象, 并观测到了由此引起的相速度无限大、声波隐身、声任意波导弯曲现象等奇等效

应^[31]. 不仅如此, 声子晶体带隙边也展示了许多新奇的物理效应: 比如声波传播路径的异常折射、强的群速度色散和超棱镜分频现象. 研究者通过调节流体波声子晶体布里渊区的色散, 同时从理论和实验上实现了声波负折射效应. 南京大学的研究人员还利用声子晶体中高能带不同布洛赫波模式的能带交叠, 在流体波声子晶体中观测到声波的双折射, 同时观测到声波的双负折射和单一点源的双成像干涉效应^[5]. 此外, 流体波声子晶体可看作是一种新的奇异流体, 声波在其中的传播不同于传统的各向同性流体^[32]. 最近研究人员利用声子晶体的带隙效应和各向异性能带, 设计了基于非线性频率转换和波矢量跃迁的声单向传输整流器件和相应的二极管元件^[33].

4.2 负弹性参数超构材料界面的声表面波

声表面波由于亚波长色散关系, 有效波长变短, 故其空间分辨率提高, 传播波速变慢, 器件尺寸减小, 对于亚波长成像、小型化亚波长器件集成等具有重要意义. 传统的声表面波一般存在于流体/固体界面的瑞利表面波和兰姆波, 或存在于固体/固体界面的斯通利波. 但声超构材料不同于传统的各向同性流体, 其可能具有负有效质量和负有效弹性模量, 在其界面处可能形成一种新的类似金属表面等离激元的表

面声波^[34]. 虽然该声表面倏逝波的元激发依然还不清晰, 但两者均具有亚波长的色散特征和表面局域场增强的相似性. 由于其亚波长色散关系, 如何激发声表面倏逝波是需要考虑的重要问题. 人们可采用全反射或声栅耦合, 以及亚波长点声源等具有高波矢分量倏逝波来激发声表面倏逝波. 例如通过减小传统声子晶体的厚度至单“原子”层, 可利用该单层声子晶体实现二维波的束缚. 声表面倏逝波不仅能在声栅和空气的界面激发, 还能在声子晶体表面激发. 在带隙中, 声子晶体可看成是具有单负参数的有效介质. 其表面共振态可用超原胞或格林函数方法计算^[35]. 根据这种理论, 声表面倏逝波能通过声子晶体表面近场附近放置点源或用大角度入射的平面波, 在具有带隙的有限声子晶体的表面上激发.

声表面倏逝波具有亚波长的色散关系, 支持纵波模式, 并具有局域场增强效应, 将会导致声波增强透射^[36]、增强吸收、共振隧穿和声波自准直辐射等新颖的物理效应^[37](图 6), 这些效应可应用于阵列换能器件和相控声纳器件的小型化、盲点消除、提高辐射方向性等性能改进.

此外声表面倏逝波也在体块声学超构材料中起到重要作用, 例如负折射和亚波长聚焦. 为了得到超过瑞利极限的分辨率, 必须在成像过程中尽可能收

图 6 声波的自准直辐射效应

左 a 声表面倏逝波引起一维狭缝声栅的异常透射效应, 在特定波长处其透射率接近于 1, 大大增强于常规单缝衍射的透射率. 右图由周期凹槽激发的声表面倏逝波导致狭缝声波的自准直效应, 超过 80 个周期. 右图(a), (b), (c)三图从左到右分别为实验, 数值模拟和动力学散射叠加模型计算的结果, 三者非常吻合. (引自文献[37])

集倏逝波信息. 由声学双负超构材料组成的超透镜中, 声表面倏逝波在空气-结构界面处激发, 并被周期结构耦合到远场从而对远场成像有贡献. 另外, 利用声学超构材料的各向异性密度张量可实现具有强各向异性的双曲型透镜, 它可在远场实现亚波长信息的放大和超分辨成像. 故如何实现声波亚波长成像, 不论对于基本声成像理论的研究、医学超声成像、HIFU 超声诊断治疗、声纳指向性能的改进、提高扫描角度等实际应用都具有重要意义.

4.3 弹性波在超构材料中的传播特性

对于超声检测、换能器、地震声波、通讯用声表面波器件、声表面波传感器等应用, 需要关注固体弹性波. 弹性模量张量往往决定于固体材料的晶体对称性, 因此固体弹性声波的激发、传播和耦合比流体复杂很多, 但对于材料的超声无损检测、换能器的设计而言显得非常重要.

对于固体声波的激发, 换能器背衬材料和阻抗匹配材料的设计和制备至关重要. 关于阻抗匹配材料, 过去使用钨粉微粒材料混合环氧树脂等聚合物, 亚波长微粒可用几何平均近似方法来分析. 但现在可采用超构材料的思想来研究亚波长散射颗粒介质中超声波传播问题. 微粒和聚合物的混合可看成是一种新型的复合微结构材料, 考虑微粒的散射特性和其与周围固体的摩擦、粘滞阻性等相互作用, 可提供阻抗匹配材料的新型设计理论与方法. 不仅如此, 关于阻抗匹配材料, 过去主要采用 KLM 方法进行层状匹配层的设计, 然而弹性波的变换声学将会为宽带阻抗匹配材料的设计提供新的思路. 新的超声耗散机制, 对于设计新型消声瓦结构、新型吸波抗噪材料、新型高强度高损耗抗震材料和新型宽带吸音材料等实际应用非常重要, 尤其是低频、亚波长的吸收. 而人工微结构的引入将有利于设计薄层、宽带的新型吸波材料.

固体表面声波对于叉指表面波换能器和表面地震波均有重要的研究意义. 在此侧重讨论如何将传统的声表面波叉指换能器结合新型的人工微结构材料设计, 实现微波集成、声表面波^[31]新型传感器等新型器件. 例如在压电晶体表面设计制备孔状、柱状结构的 2D 声子晶体, 可形成表面波的能带结构, 操纵表面波的色散, 轻易实现表面声波和体波的耦合, 而且它可以形成各种声表面波带隙和波导、微腔结构,

能很好地操纵叉指表面波的传播, 实现分频、分束、干涉、慢声、延迟、空间频散等信号的处理功能, 这将极有利于同微波器件的集成. 同样频率下, 声波波长远小于微波波长, 有利于微波的亚波长器件集成和传输线网络尺寸缩减; 此外使用声波能降低器件的温度敏感性并提高抗辐射性能. 更重要的是, 压电晶体材料表面的 2D 声子晶体等人工结构, 作为新的载体将提供各种核酸抗体、蛋白质抗体、化学反应的微反应平台, 这些微反应平台反应引起的结构变化, 将引起叉指传输信号的变化, 并且该结构将极易和微流体芯片集成, 故声表面波声子晶体器件可作为化学反应和生物检测的新型传感器件.

最后讨论地震波的传播和操纵问题, 最近韩国、法国的一些研究工作表明, 通过在地下打孔洞或制备类似 Helmholtz 共振腔的结构构成一定阵列排布, 或结合变换声学的设计, 将能有效地吸收地震波能量, 或能一定程度上反射地震波. 这种通过设计宏观尺度的结构来吸收地震波或反射地震波的方法, 一定程度上能保护一些重要城市建筑免受地震波的损害, 具有非常重要的意义. 地震可通过纵向压缩(或“主”)波、横向剪切(或“次要”)波和表面瑞利波对地球表面造成破坏性影响. 其中瑞利波的波长范围(数米至数百米)与房屋等敏感基础设施的尺寸最为接近, 故具备更强的破坏能力. 瑞利波的行为可形象的用双调和方程描述. 故从原则上讲, 只需考虑其中涉及到的斗篷隐身问题. 当然, 目前的实验还只是一定程度范围内的演示实验, 如果考虑更多的细节问题, 土壤可表现出内衰减性并有可能在地震条件下表现出非线性行为等, 故还需要结合地震学家、建筑学家等更顶层的设计, 从而推动这一研究领域的发展.

5 变换声学和变换弹性力学

基于声学和弹性力学超构材料的研究发展, 变换声学在控制声波传播时所需的苛刻材料参数得到了满足, 其中隐身受到了极大的关注. 目前主要有两种方法设计流体声波隐身所需的超构材料. 一种是设计声学电路网络结构, 类比电路方程来设计声波的串联电感和并联电容, 通过改变亥姆霍兹共振器^[6]的尺寸来匹配理论计算的有效密度和弹性模量. 另一种是结合变换声学和线性坐标变换设计出各向异性的材料参数, 通过在长波近似下调制多孔塑料

板^[14]的尺寸来实现所需的材料参数. 目前在水和空气中都成功验证了声波的隐身效果, 这种调节材料有效参数的方法可应用到其他变换声学的领域, 例如设计声波全向吸收体、声全向偶极辐射、声波幻象或在声波中实现类光的一些新奇效应等. 此外, 五模式反胀超构流体的强各向异性弹性模量、各向同性密度, 将使得声学变换的材料参数更容易设计和制备. 而弹性力学的变换, 由于剪切横波和纵波的耦合, 常使得其波动方程不满足形式不变性. 为了解决这个问题, 还需考虑如何将偏振控制于纵波. 例如美国华盛顿特区国家研究中心的 Layman 等人^[38]从理论上说明了当 B/G 值从较小的 100 增大至 1000 时, 将从本质上导致弹性斗篷呈现完美的隐性能. 上述变换都基于单纯的被动结构, 用主动式超构材料或许也可实现弹性体的隐身或新变换.

6 弹性力学超构材料在中国的研究现状

虽然声子晶体和声超构材料的研究最早源于欧洲, 但华裔科学家的相关研究也起着非常重要的推动作用. 如香港科大的沈平、陈子亭等人提出了 CPA 方法构建固体多壳层结构和气泡结构的超构材料设计方法; 沈平等人还利用薄膜共振设计了低频宽带的强吸收, 为低频消噪隔音提供了重要应用基础; 美国加州伯克利大学的张翔研究组提出了利用 Helmholtz 腔阵列构造负弹性模量超构材料; 香港城市大学的李赞桓提出了迷宫结构的亚波长共振超构材料. 在关于声子晶体能带计算、声波负折射的研究方面, 南京大学的陈延峰, 武汉大学的刘正猷等课题组都做了重要工作. 此外南京大学在声单向传输、声整流效应、声非互易传输方面做了许多开创性工作, 引起了国际学术界的广泛重视, 其中声单向的工作获得了《科学》、《自然材料》、《今日材料》和美国物理评论快报的广泛报道, 并推动了光波单向传输研究的进一步热潮.

弹性力学超构材料和声学超构材料涉及材料固体力学、声学、超声内耗等学科领域, 是一个由华裔科学家做出重要贡献和推动的新兴学科. 今后需重点研究这种非均匀人工复合结构材料体系的声、弹性波传播和应力应变分布问题. 目前国内专门从事人工超构材料用于声学或结构力学工程应用研究的人员和财力投入不足, 相应的组织和会议对此问题的

关注也非常不足. 近两年由于固体力学、声子学和热学的相关性, 同济大学李保文教授等人举办了国际声子学和热能科学会议, 以此推动声超构材料、声子学与热能科学的发展.

7 总结与展望

7.1 利用弹性力学超构材料和声波超构材料操纵声波和弹性波传播

基于人工结构的表面波是准二维波并有复杂的本征模式, 计算这些能带结构的方法还需要发展. 同时, 制造这些器件化的表面波声子晶体和声学超构材料也是一个具有挑战的研究课题, 因为这需要集成高频声源、电声探测技术和集成微加工工艺. THz 频率的声子带隙效应已在胶体声子晶体中被观测到^[39], 这个频率范围介于低频体振动和原子热振动之间, 对应于纳米材料的集体振动. 利用硅基高频声子晶体, 可调控硅基薄片的热导率, 从而较大幅度提高硅材料的热电系数, 这对于研究纳米体系中的声子和其他电子、准粒子的相互作用具有重要意义.

人工声子带隙材料可以考虑与仿生学结合, 比如人耳识别系统、果蝇定向系统、蝙蝠定位系统. 利用声学超构材料并通过变换声学的方法将地震波牵引到人烟稀少区, 从而降低地震灾害对人类城市的打击. 将声学超构材料应用到高铁、地铁, 减小噪音, 减小高铁车轮对铁轨的破坏作用. 吸声材料无论对于音频声学还是水下超声的吸声层、消声瓦的设计、制备以及最终应用都很重要. 最近香港科大沈平等通过声学超构表面的设计, 结合局域共振单元, 实现了一个薄层、低频、宽带的明显吸声效应^[40], 同时如何将其设计推广到水声学领域值得关注研究.

7.2 开发设计新型的弹性力学超构材料

目前弹性力学超构材料种类繁多, 诸如有负密度或负弹性模量的超构材料、具有一定刚性的反胀材料、具有负泊松比的拉胀材料以及密度随电致或压致相变的新型智能材料等. 利用这些新奇的弹性超构力学材料有利于操控弹性波的传播、激发、耦合等性质, 设计出新型器件. 例如利用负密度材料来补偿头骨阻抗失配, 实现超声波穿透头盖骨, 这对于发展脑部超声研究和诊断具有重要意义. 再如研究负密度材料和正密度材料的界面表面声波对于异常声透

射、声准直、声隧穿的研究也非常有意义. 而设计负泊松比, 以及各向异性密度张量的超构流体等对于弹性波、流体声波的变换隐身、新型换能器阻抗匹配层的设计也起着非常重要的作用.

此外, 超构材料的思想不仅对应于材料常规的

弹性力学参数, 如密度、弹性模量等. 同时也启发人们对其它弹性力学参数, 如压电系数、粘滞系数、吸声系数、非线性压电增益系数等的设计和调控. 这将促进诸如人工压电材料、新型非超声内耗型的吸声介质、新型声阻抗匹配材料和超粘滞材料等的研究.

参考文献

- 1 John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Phys Rev Lett*, 1987, 58: 2486–2489
- 2 Kushwaha M S, Halevi P, Dobrzynski, et al. Acoustic band-structure of periodic elastic composites. *Phys Rev Lett*, 1993, 71: 2022–2025
- 3 Ao X Y, Chan C T. Complex band structures and effective medium descriptions of periodic acoustic composite systems. *Phys Rev B*, 2009, 80: 235118
- 4 Liu Z Y, Zhang X X, Mao Y W, et al. Locally resonant sonic materials. *Science*, 2000, 289: 1734–1736
- 5 Lu M H, Zhu S N, Ming N B. Negative birefractive of acoustic wave in a sonic crystal. *Nat Mater*, 2007, 6: 744–748
- 6 Zhang S, Xia C G, Fang N. Broadband acoustic cloak for ultrasound waves. *Phys Rev Lett*, 2011, 106: 024301
- 7 Berryman J G. Long-wavelength propagation in composite elastic media I. Spherical inclusions. *Acoust Soc Am*, 1980, 68: 1809–1819
- 8 Park J W, Park B, Kim D, et al. Determination of effective mass density and modulus for resonant metamaterials. *J Acoust Soc Am*, 2012, 132: 2793–2799
- 9 Lee S H, Park C M, Seo Y M, et al. Composite acoustic medium with simultaneously negative density and modulus. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 054301
- 10 Fleury R, Alu A. Extraordinary sound transmission through density-near-zero ultranarrow channels. *Phys Rev Lett*, 2013, 111: 055501
- 11 Liang Z X, Li J S. Extreme acoustic metamaterial by coiling up space. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 114301
- 12 Silva A, Monticone F, Castaldi G, et al. Performing mathematical operations with metamaterials. *Science*, 2014, 343: 160–163
- 13 Zigoneanu L, Popa B I, Starr A F, et al. Design and measurements of a broadband two-dimensional acoustic metamaterial with anisotropic effective mass density. *J Appl Phys*, 2011, 109: 054906
- 14 Popa B I, Cummer S A. Homogeneous and compact acoustic ground cloaks. *Phys Rev B*, 2011, 83: 224304
- 15 Zhu J, Christensen J, Jung J, et al. A holey-structured metamaterial for acoustic deep-subwavelength imaging. *Nature Phys*, 2011, 7: 52–55
- 16 Li J S, Fok L, Yin X B, et al. Experimental demonstration of an acoustic magnifying hyperlens. *Nat Mater*, 2009, 8: 931–934
- 17 Liu Z Y, Chan C T, Sheng P. Analytic model of phononic crystals with local resonances. *Phys Rev B*, 2005, 71: 014103
- 18 Baz A. The structure of an active acoustic metamaterial with tunable effective density. *New J Phys*, 2009, 11: 123010
- 19 Milton G W. Composite materials with poisson's ratios close to -1. *J Mech Phys Solids*, 1992, 40: 1105–1137
- 20 Kadic M, Buckmann T, Stenger N, et al. On the practicability of pentamode mechanical metamaterials. *Appl Phys Lett*, 2012, 100: 191901
- 21 Lakes R. Foam structures with a negative poissons ratio. *Science*, 1987, 235: 1038–1040
- 22 Buckmann T, Schittny R, Thiel M, et al. On three-dimensional dilational elastic metamaterials. *New J Phys*, 2014, 16: 033032
- 23 Babae s, Shim J, Weaver J C, et al. 3D soft metamaterials with negative poisson's ratio. *Adv Mater*, 2013, 25: 5044–5049
- 24 Paulose J, Chen B G, Vincenzo V. Topological modes bound to dislocations in mechanical metamaterials. *ArXiv preprint* 2014, arXiv: 1406.3323
- 25 Schaedler T A, Jacobsen A J, Torrents A, et al. Ultralight metallic microlattices. *Science*, 2011, 334: 962–965
- 26 Mecklenburg M, Schuchardt A, Mishra Y K, et al. Aerographite: Ultra lightweight, flexible nanowall, carbon microtube material with outstanding mechanical performance. *Adv Mater*, 2012, 24: 3486–3490
- 27 Florijn B, Coulaïs C, Hecke V M. Programmable mechanical metamaterials. *ArXiv preprint*, 2014, arXiv: 1407.4273
- 28 Lv C, Krishnaraju D, Konjevod G, et al. Origami based Mechanical Metamaterials. *Sci Rep*, 2014, 4, doi:10.1038/srep05979
- 29 Yang S X, Page J H, Liu Z Y, et al. Ultrasound tunneling through 3D phononic crystals. *Phys Rev Lett*, 2002, 88: 104301
- 30 Zhang X D, Liu Z Y. Extremal transmission and beating effect of acoustic waves in two-dimensional sonic crystals. *Phys Rev Lett*, 2012, 101: 174301
- 31 Huang X Q, Lai Y, Hang Z H, et al. Dirac cones induced by accidental degeneracy in photonic crystals and zero-refractive-index materials. *Nat Mater*, 2011, 10: 582–586
- 32 Torrent D, Sanchez-Dehesa J. Anisotropic mass density by radially periodic fluid structures. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 174301
- 33 Liang B, Guo X S, Tu J. An acoustic rectifier. *Nat Mater*, 2010, 9: 989–992

- 34 Li X F, Ni X, Feng L A, et al. Tunable unidirectional sound propagation through a sonic-crystal-based acoustic diode. *Phys Rev Lett*, 2011, 106: 084301
- 35 Ambati M, Fang N, Sun C, et al. Surface resonant states and superlensing in acoustic metamaterials. *Phys Rev B*, 2007, 75: 195447
- 36 Zhao D G, Liu Z Y, Qiu C Y, et al. Surface acoustic waves in two-dimensional phononic crystals: Dispersion relation and the eigenfield distribution of surface modes. *Phys Rev B*, 2007, 76: 144301
- 37 Zhou Y, Lu M H, Feng L, et al. Acoustic surface evanescent wave and its dominant contribution to extraordinary acoustic transmission and collimation of sound. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 164301
- 38 Layman C N, Naify C J, Martin T P, et al. Highly anisotropic elements for acoustic pentamode applications. *Phys Rev Lett*, 2013, 111: 024302
- 39 Cheng W, Wang J J, Jonas U, et al. Observation and tuning of hypersonic bandgaps in colloidal crystals. *Nat Mater*, 2006, 5: 830–836
- 40 Ma G C, Yang M, Xiao S W, et al. Acoustic metasurface with hybrid resonances. *Nat Mater*, 2014, 13: 873–878

Metamaterial based on elastic mechanics

RUAN JuQi, LU MingHui, CHEN YanFeng & ZHU ShiNing

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

In recent years, artificial metamaterials base on micro structures are showing huge development potential in fields of materials science, acoustics, seismology and information technologies, due to their devisable physical singularities which do not exist in natural materials. The study of metamaterial was born out of electromagnetic metamaterial. Nowadays, metamaterials have achieved a big leap forward with developments in the fields of acoustic, thermal, static, static magnetic and elastic mechanics, which greatly expand their study fields. With the help of a Milton graph, we focus on the extraordinary characteristics of novel elastic mechanics-based metamaterials and their species, such as acoustic metamaterials with negative mass density and elastic modulus, auxetic metamaterials with negative Poisson's ratio, inverse bulging metamaterials with shear modulus $G=0$ and ultra-light materials with high strength. In addition, combining with the transform mechanical, this paper focuses on the propagation characteristics of acoustic and elastic waves in this elastic mechanics metamaterial and then elaborated the characteristics and physical effects of surface acoustic waves in the interface of metamaterials with negative elasticity parameters. Finally, we make a summary and prospect of the development of metamaterials combining with the elastic mechanics metamaterial research condition in China, such as metamaterial and acoustic metamaterial operating acoustic and elastic wave propagation using the elastic mechanics, design and development of a new type of elastic mechanics metamaterial. We hope this will help to accelerate the application of this metamaterial in many research fields.

elastic mechanics, phononic crystals, metamaterial, auxetic materials, transform mechanics

doi: 10.1360/092014-102