点缺陷正方晶格声子晶体的大尺寸压电陶瓷复合换能器

林基艳^{1,2}, 林书玉^{1*}, 王升³, 李耀³

1. 陕西师范大学, 陕西省超声学重点实验室, 西安 710119;

2. 榆林学院信息工程学院, 榆林 719000;

3. 长庆油田分公司第二采气厂, 榆林 719000

*联系人, E-mail: sylin@snnu.edu.cn

收稿日期: 2021-01-06; 接受日期: 2021-03-08; 网络出版日期: 2021-08-18

国家自然科学基金(编号: 11674206, 11874253, 11964040)资助项目

摘要 为了保证大尺寸夹心式压电陶瓷复合换能器的纵向工作效率, 减少纵、横振动之间的强烈耦合, 改善换能器前辐射端面的纵向位移分布均匀度, 本文在大尺寸夹心式压电陶瓷复合换能器的前盖板上, 加工了3行3列与换能器轴向平行的按正方晶格排列的二维空气圆柱孔, 并通过改变3×3超元胞中心空气圆柱孔的半径来引入点缺陷, 构造基于半径异常型点缺陷的二维正方晶格近周期声子晶体. 该设计不仅可以利用晶体在径向的不完全带隙对大尺寸压电陶瓷复合换能器的横向振动进行抑制; 还可以利用点缺陷的Anderson局域化特性, 调控局域声场的强度和相位, 进一步改善前盖板辐射面的位移分布均匀度; 另外, 本文分析了点缺陷空气圆柱孔的结构参数对换能器纵向共振频率以及纵向振动位移分布的影响规律. 仿真结果表明, 基于点缺陷声子晶体的大尺寸压电陶瓷复合换能器能够有效抑制换能器轴向的杂散模态、大幅优化辐射面纵向位移分布, 改善大尺寸压电陶瓷复合换能器的性能.

关键词 近周期声子晶体带隙, 点缺陷, 正方晶格, Anderson局域化特性, 纵向位移分布均匀度

PACS: 43.40.+s, 43.35.+d, 43.38.+n, 63.20.D-, 63.20.-e

1 引言

近年来, 功率超声技术应用日益广泛, 遍及国防、航空、生物工程等各个领域. 超声换能器是功率超声技术的基础, 其性能会直接影响超声处理的效果. 在功率超声领域, 应用最广泛的换能器是纵向夹心式压

电陶瓷复合换能器^[1]. 传统的夹心式压电陶瓷复合换能器基于一维设计理论, 要求换能器的横向尺寸小于所辐射声波波长的1/4, 这在很大程度上限制了换能器的横向几何尺寸和辐射功率^[2]. 近年来随着压电陶瓷复合换能器应用范围的不断扩大, 在一些大功率、高声强的应用中, 为了提高换能器的功率容量和声强,

引用格式: 林基艳, 林书玉, 王升, 等. 点缺陷正方晶格声子晶体的大尺寸压电陶瓷复合换能器. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 094311
Lin J Y, Lin S Y, Wang S, et al. Large-dimension piezoelectric ceramic composite transducer with point-defect, square-lattice phononic crystal (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 094311, doi: 10.1360/SSPMA-2021-0004

需要增大换能器的横向尺寸, 但是增大后的横向尺寸通常会大于纵波波长的 $1/4$, 此时换能器的振动模式表现为横向振动与纵向振动的耦合, 并且耦合振动会随着横向尺寸的增加而逐渐加强, 除纵向谐振模式外, 越来越多的径向及耦合谐振模式被激发, 不仅使得换能器的纵向辐射声功率大幅降低, 还会因振动能量不能均匀传递而导致换能器辐射表面的纵向位移分布不均匀, 严重影响换能器的性能^[3].

为了有效改善大尺寸夹心式压电陶瓷复合换能器的性能, 减少纵、横振动之间的强烈耦合, 保证较高的纵向工作效率, 国内外超声技术工作者进行了积极的研究探索. 文献[4-6]利用耦合振动理论对大尺寸换能器进行理论分析和设计; 文献[7,8]通过在换能器上开螺旋槽、穿锥台形单孔的方式来降低换能器的共振频率、拓宽带宽; 文献[9]通过柔性安装夹具来减小耦合振动的影响, 提高换能器的振幅输出; 文献[10]在换能器前盖板上沿半径方向加工了3个周期穿透式的槽, 以此来改善换能器辐射面的位移分布; 文献[11-17]将传统单一化的PZT压电陶瓷片替换为压电复合陶瓷材料, 从而获得纵向振动模式单一且宽频带的换能器, 但是存在结构复杂, 工艺实现难度较大的缺点.

以上研究均能从一定程度上改善换能器的性能, 但为了降低结构复杂性、进一步增大换能器的尺寸、更加有效地抑制横向振动, 本文引入近周期声子晶体带隙和点缺陷理论对大尺寸夹心式压电陶瓷复合换能器进行了优化设计——在大尺寸夹心式压电陶瓷复合换能器的前盖板上构造了基于点缺陷的正方晶格近周期声子晶体, 利用其方向带隙和点缺陷的安德森局域特性, 有效抑制大尺寸换能器轴向的杂散横向振动模式, 并将声波“俘获”在缺陷单元附近, 有目的地调控声场分布和相位, 进一步改善纵向位移分布均匀度, 保证换能器在大功率使用环境中的性能, 为大尺寸压电陶瓷复合换能器的优化设计提供理论基础和实验依据.

2 基于点缺陷声子晶体的大尺寸压电陶瓷复合换能器的相关基础理论

2.1 振动抑制研究

目前, 我们接触的很大一部分振动和噪声都来自于结构声波的辐射, 而结构体作为组成各种工作平台

和设备的基本部件, 是产生和传播振动和噪声的主要导体和载体, 因此, 结构体的减振降噪研究已经成为声学、力学、机械工程等领域亟需解决的问题^[18]. 为了减少有害振动对结构体的影响, 目前通常采用两种方法——主动振动抑制和被动振动抑制^[19]. 主动振动抑制是人为地引入外部振动控制系统来实现振动的抑制, 但是控制系统的设计非常复杂, 因此主动振动抑制实施较为困难、成本较高、可靠性也较差. 被动振动控制主要通过消振、隔振、阻振等方式来实现对有害振动的抑制. 传统的被动振动抑制具有实现简单、成本低、可靠性高等优点, 但由于其灵活性差、局限性较大且抑制效果不理想等原因, 已经很难满足工程应用上各种新的需求^[20]. 因此, 探索新的、能有效抑制结构体中有害振动的方法已经成为工程技术中迫切需要解决的问题.

结构体中有害振动产生的本质原因是弹性波的传播效应以及结构体中弹性波和周围声学介质间的耦合作用, 因此, 实现有害振动抑制的有效手段是对结构体中弹性波行为的调控^[21]. 近年来, 声子晶体理论的提出和发展为实现“人为操控弹性介质及结构中的波传播”提供了一条新的途径.

声子晶体在特定的频率范围内能抑制甚至禁止弹性波的传播, 这些特定的频率范围被称作带隙^[22]. 但在实际工程应用中, 为了满足某些特定的需要, 可能会制造有限尺寸的周期结构或者具有细小不完整性的周期型结构, 比如, 近周期结构、缺陷等, 这些结构与完美的无限周期结构之间存在一些偏差, 通常将它们称为近周期结构^[23]. 弹性波在近周期结构中传播时, 也会产生声子禁带, 而且带隙内存在更丰富的局域模式. 如果带隙内, 只有某些方向的声波不能通过, 则称该带隙为不完全带隙或者方向带隙; 而如果各个方向的声波全部不能通过, 则该带隙为完全带隙, 即在各方向上都有带隙存在且互相重合^[24,25].

近周期声子晶体结构的材料和几何参数对其带隙特性(带隙的位置、宽度等)的影响最为显著, 因此可以通过改变这些参数来人为地调控近周期声子晶体结构的带隙, 这就为大尺寸压电陶瓷复合换能器中有害振动的抑制提供了一个新思路——将换能器设计成具有径向带隙的近周期声子晶体结构, 利用其径向带隙, 抑制大尺寸压电陶瓷复合换能器中有害的径向弹性波的传播, 从而达到改善大尺寸压电陶瓷复合换能器辐

射面纵向位移分布, 优化其性能的目的.

2.2 晶格

在声子晶体的研究中, “晶格”理论被用来描述声子晶体空间结构的周期性, 与完美声子晶体相同, 近周期声子晶体也可以按周期方向的维数, 分为一维、二维和三维近周期声子晶体^[26]. 其中, 二维近周期声子晶体通常以周期点阵构型为主, 散射体和基体相互连通, 散射体一般采用柱状结构, 可以是实心或空心, 散射体平面排列的形式可以是简单晶格结构, 如三角晶格、正方晶格, 也可以是复式晶格, 如蜂窝晶格^[27-29]. 与其他晶格结构相比, 正方晶格结构简单, 而且能够在较大的几何参数范围内产生较宽的声子带隙^[30]. 因此, 为了降低结构的复杂性, 本研究选择在换能器的前盖板上加工3行3列按正方晶格排列的空气圆柱孔.

2.3 点缺陷

缺陷是指在晶体完整周期结构中引入各种畸变, 导致完整周期性的改变或破坏, 主要分为点缺陷、线缺陷和面缺陷^[31]. 通过在晶格中直接移除某一散射体或改变某一散射体的结构、材料等参数而引入的“微扰”称为点缺陷. 1958年, Anderson提出了著名的Anderson局域现象——当电子受到无序分布的杂质散射时, 电子的德布罗意波的波动方程的解会变得局域化. 后来, 局域化思想相继被引入到光子晶体、近周期声子晶体中. 当近周期声子晶体中存在点缺陷时, 在其带隙范围内会产生所谓的缺陷态, 声波将会被局域在缺陷位置, 且该处的声压共振放大^[32-34]. 缺陷态常常伴随着声波的安德森局域化现象, 即声波的位移或压强等的分布在点缺陷处具有很好的局域性, 且改变缺陷散射体的材料、填充率、半径大小等参数可以实现对缺陷态频率、缺陷态模式、局域化程度等特性的调控, 而不同的缺陷模式对应不同的模场分布和相位^[35], 因此, 可以利用点缺陷的这个特性, 有针对地调控缺陷处声场分布和相位, 进而实现更好地改善大尺寸压电陶瓷复合换能器纵向位移分布均匀度的目的.

3 大尺寸压电陶瓷复合换能器的优化设计

为了进一步增大压电陶瓷复合换能器的辐射面积, 本文采用如图1所示的大尺寸夹心式压电陶瓷复合

图1 大尺寸喇叭形压电陶瓷复合换能器结构示意图

Figure 1 Schematic diagram of large-dimension horn-shaped piezoelectric ceramic composite transducer.

换能器, 振动能量沿换能器的纵向Z轴方向传播, 主要包括后盖板、压电陶瓷晶堆和大尺寸喇叭形前盖板3个部分.

将大尺寸夹心式压电陶瓷复合换能器的工作频率设定在20 kHz附近, 压电陶瓷晶堆选择PZT-4 (Piezoelectric Ceramic Crystal Stack-4), 厚度为8 mm, 外半径设为30 mm, 内半径7 mm, 2片; 后盖板高度为30 mm, 等截面圆柱, 半径为31 mm, 材料为Steel AISI 4340; 前盖板高度为35 mm, 圆锥, 小端半径为31 mm, 大端半径为50 mm, 材料为Aluminum 6063; 换能器的高度总共为81 mm. 在COMSOL Multiphysics里建立压电陶瓷复合换能器模型, 模拟其振动特性, 获得如图2所示的振型图以及如图3所示的前辐射端面纵向位移分布图.

从图2和3可以看出, 由于换能器各部分的横向尺寸都较大, 换能器产生严重的耦合振动, 前盖板辐射面纵向相对位移绝对值从0.1039变化到0.2423, 振幅分布非常不均匀. 由2.1节可知, 将大尺寸压电陶瓷复合换能器的前盖板设计成具有径向带隙的近周期声子晶体结构, 可以有效地抑制有害的径向弹性波传播. 另外, 从图2可以看出, 未优化的大尺寸压电陶瓷复合换能器前辐射面的中心处的位移较小, 由2.3节可知, 点缺陷可以通过将声波局域在缺陷位置来调控声场的强度和位移场大小及相位, 这也为优化大尺寸压电陶瓷复合换能器前辐射端面的纵向位移分布均匀度提供了新的方法——将换能器的前盖板设计成具有中心点缺陷的近周期声子晶体结构, 利用点缺陷的Anderson局域化特性实现对大尺寸压电陶瓷复合换能器辐射面纵向位移分布的优化, 基于此, 本研究对大尺寸压电陶瓷复合换能器进行了优化设计.

图 2 (网络版彩图)大尺寸压电陶瓷复合换能器振型图
Figure 2 (Color online) Vibration modal diagram of large-dimension piezoelectric ceramic composite transducer.

图 3 纵向相对位移分布图
Figure 3 Diagram of longitudinal relative displacement distribution.

3.1 基于点缺陷二维正方晶格近周期声子晶体的大尺寸压电陶瓷复合换能器的设计

在大尺寸压电陶瓷复合换能器的前盖板上加工 3 行 3 列平行于 Z 轴、横截面在 XY 平面内的空气圆柱孔, 将空气圆柱孔按正方晶格排列在铝中形成空气-铝二维正方晶格近周期声子晶体结构; 改变中心空气圆柱孔的半径, 将其半径由 r 变为 r_1 , 且 $r_1 < r$, 其余圆柱孔半径不变, 构造基于单点缺陷的正方晶格近周期声子晶

体, 由于引入缺陷后的近周期系统的对称性被破坏, 因此应该采用超元胞法进行处理(超元胞可以定义为一个包含完整缺陷阵列的超晶格). 构造 3×3 的超元胞结构, 晶格常数为 $3 \times a$, 超晶格结构和基于点缺陷二维正方晶格近周期声子晶体的大尺寸压电陶瓷复合换能器前盖板在 XY 截面的结构示意图如图 4 所示, 基体的高度 h_1 和散射体的高度 h 如图 5 所示.

在图 4 和 5 中, 设相邻两圆柱孔圆心之间的距离 $a = 14 \text{ mm}$, 那么超晶格常数为 $3 \times a = 42 \text{ mm}$, 基体的高度 $h_1 = 35 \text{ mm}$, 散射体空气圆柱孔半径 $r = 7 \text{ mm}$, 中间散射体半径由 7 mm 变为 6 mm , 即 $r_1 = 6 \text{ mm}$, 高度 $h = 15 \text{ mm}$.

理想的声子晶体通常是无限周期的无限大结构, 但是对于实际的工程应用, 只能使用有限的周期结构, 此种结构只会对带隙范围内的振动起到有效的抑制. 因此, 对于有限尺寸的近周期声子晶体结构, 一般使用有限元法仿真结构的振动传输特性, 根据振动传输曲

图 4 包含点缺陷的超晶格结构和引入点缺陷后前盖板的 XY 截面结构示意图
Figure 4 Superlattice structure with a point defect and the schematic diagram of the XY section of the front cover after introducing a point defect.

图 5 包含点缺陷的超晶格结构和引入点缺陷后前盖板的三维立体图
Figure 5 Superlattice structure with a point defect and the three-dimensional view of the front cover plate after introducing a point defect.

线判断振动带隙是否存在、带隙的位置、带隙的宽度等属性^[36]. 本文采用COMSOL Multiphysics来实现对该近周期声子晶体结构的传输特性的仿真. 在近周期声子晶体结构的一侧均匀地施加加速度激励, 在另一侧上拾取响应, 利用COMSOL对计算结果进行处理后, 得到图6所示的X, Y方向的振动传输曲线, 图中加速度幅值小于 10^0 的频率范围即为近周期声子晶体结构的方向振动带隙^[36].

从图6可以看出, 基于点缺陷二维正方晶格近周期声子晶体结构的方向带隙为17.5–19.8 kHz以及20.1–25.4 kHz, 在这些频率范围内, 弹性波出现了大幅度衰减, 即基于点缺陷二维正方晶格近周期声子晶体结构可以对X, Y方向的弹性波的传播起到有效的抑制作用, 从而实现对大尺寸压电陶瓷复合换能器的前辐射端面纵向位移分布均匀度的改善.

在COMSOL中构建基于点缺陷二维正方晶格近周期声子晶体的大尺寸压电陶瓷复合换能器的模型, 计算其Eigenfrequency, 得到如图7所示的系统振型图和如图8所示的前辐射端面纵向相对位移分布图.

从图8可以看出, 基于点缺陷二维正方晶格近周期声子晶体的大尺寸压电陶瓷复合换能器的前辐射端面的纵向相对位移分布变化范围为0.1696–0.1775, 纵向相对位移分布得到了显著优化. 为了更清晰地观察到辐射面纵向位移分布均匀度的改善, 本文选取前辐射

图 6 (网络版彩图)超元胞在X, Y方向的加速度响应曲线
Figure 6 (Color online) Acceleration response curves of supercell in X and Y directions.

图 7 (网络版彩图)基于点缺陷二维正方晶格近周期声子晶体的大尺寸压电陶瓷复合换能器的振型图及辐射面的纵向振动位移分布云图. (a) 振型图; (b) 辐射面纵向振动位移分布云图

Figure 7 (Color online) Vibration modal diagram and radiating surface's longitudinal vibration displacement distribution cloud diagram of the large-dimension piezoelectric ceramic composite transducer based on the two-dimensional square lattice near-periodic phononic crystal with the point defect. (a) Vibration modal diagram; (b) distribution cloud diagram of longitudinal vibration displacement of radiating surface.

图 8 基于点缺陷大尺寸压电陶瓷复合换能器的前辐射端面纵向相对位移分布图

Figure 8 Longitudinal relative displacement distribution diagram of the front radiation end face of the large-dimension piezoelectric ceramic composite transducer based on the point defect.

端面上的任意直径, 计算未优化大尺寸压电陶瓷复合换能器、基于点缺陷二维正方晶格近周期声子晶体的大尺寸压电陶瓷复合换能器的纵向相对位移分布, 结果如图9所示.

从图9可以明显看出, 基于点缺陷二维正方晶格近周期声子晶体结构能够大幅改善换能器前辐射端面纵向位移分布均匀度; 另外, 设换能器前辐射端面总相对平均位移 O_{ave} 为

$$O_{ave} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i,$$

其中, n 是通过Comsol Multiphysics计算获得的前辐射端面任意直径上的纵向相对位移的位置个数(共获得169个数据, 即 $n=169$), 利用式(1)求解可得, 未优化的换能器的总相对平均位移为0.1544, 优化后的换能器的总相对平均位移为0.1721, $0.1721/0.1544=1.115$, 即基于点缺陷二维正方晶格近周期声子晶体结构不仅改善了换能器前辐射端面纵向位移分布均匀度, 还使得总相对平均位移有所提高, 工作效果明显优于未优化前的换能器.

3.2 缺陷点的结构参数对换能器纵向共振频率、纵向位移分布均匀度的影响

半径异常型点缺陷不仅可以调节带隙宽度, 而且会导致禁带范围内共振模态的出现, 通过将声波俘获在缺陷处调节声场和位移的分布. 不同的共振频率会产生不同形态的局域声场分布, 因此可以通过改变缺

图9 (网络版彩图)两种换能器纵向相对位移分布对比
Figure 9 (Color online) Comparison of the longitudinal relative displacement distribution of the two transducers.

陷空气圆柱孔的半径 r_1 来调节点缺陷处的局域声场强度和位移场大小, 当缺陷空气圆柱孔处局域声场与周期圆柱孔处的声场强度相当且相位相同时, 换能器前辐射端面的纵向位移分布就会更加均匀.

为了进一步分析点缺陷结构参数(点缺陷结构参数主要包括点缺陷空气圆柱孔的半径 r_1 、空气圆柱孔高度 h 、缺陷处散射体的形状)对大尺寸压电陶瓷复合换能器的纵向共振频率和纵向位移分布均匀度的影响规律, 本文利用COMSOL Multiphysics进行了仿真分析, 结果如下所示.

图10和11仿真了点缺陷空气圆柱孔的半径 r_1 对基

图10 点缺陷空气圆柱孔的半径 r_1 对换能器共振频率的影响

Figure 10 Influence of radius r_1 of the air cylindrical hole with the point defect on the resonance frequency of the transducer.

图11 点缺陷空气圆柱孔的半径 r_1 对换能器纵向相对位移分布不均匀度 $\Delta\epsilon$ 的影响

Figure 11 Influence of radius r_1 of the air cylindrical hole with the point defect on the longitudinal relative displacement distribution unevenness $\Delta\epsilon$ of the transducer.

于点缺陷二维正方晶格近周期声子晶体的大尺寸压电陶瓷复合换能器共振频率和前辐射端面纵向相对位移不均匀度 $\Delta\epsilon$ 的影响规律, $\Delta\epsilon$ 等于纵向相对位移最大值减去纵向相对位移最小值, 即 $\Delta\epsilon$ 越大, 纵向相对位移分布均匀度越差, $\Delta\epsilon$ 越小, 纵向相对位移分布越均匀. 从图10可以看出, 当复合换能器压电陶瓷晶堆厚度8 mm, 外半径30 mm, 内半径7 mm, 后盖板高度30 mm, 半径31 mm, 前盖板高度35 mm, 小端半径31 mm, 大端半径50 mm, 圆柱孔的高度 $h=15$ mm均保持不变时, 随着 r_1 的增大, 压电陶瓷复合换能器的共振频率逐步减小. 从图11可以看出, 其他参数不变时, $\Delta\epsilon$ 随着 r_1 的增大整体呈现出先减小, 随后增大, 又减小, 再增大的趋势, 即纵向位移分布均匀度随着 r_1 的增大先逐步均匀, 随后逐步不均匀, 接着又变均匀, 最后越来越不均匀, 因此可以得出, r_1 有最佳的取值范围, 太大或太小都会导致换能器前辐射端面纵向位移分布不均匀, 在本设计中, r_1 在5–6 mm之间取值时, 纵向位移分布均匀度最佳.

图12和13分析了空气圆柱孔的高度 h 对换能器共振频率和 $\Delta\epsilon$ 的影响规律. 从图12可以看出, 当其他参数不变时(压电陶瓷晶堆厚度、外半径、内半径、后盖板高度、半径、前盖板高度、小端半径、大端半径均固定不变, 正常空气圆柱孔 r 设为7 mm, 点缺陷空气圆柱孔的半径 r_1 设为6 mm), 随着空气圆柱孔高度 h 的增大, 压电陶瓷复合换能器的共振频率先减小, 再慢慢增大, 最后逐步减小. 从图13可以看出, 随着空气圆柱孔高度 h 的增大, $\Delta\epsilon$ 先减小, 随后增大, 再减小, 再增大, 再减小, 而后增大, 代表纵向位移分布均匀度随着 h 的增加经历了均匀-不均匀-均匀-不均匀-均匀-不均匀的过程, 即 h 的取值一定要在合适的范围内, 太大或太小都将导致换能器纵向位移分布不均匀. 在本设计中, 空气圆柱孔高度 h 设置在13–16 mm之间时, 纵向位移分布最优.

另外, 缺陷散射体的形状不同, 也会大尺寸压电陶瓷复合换能器的纵向共振频率和纵向位移分布均匀度产生影响. 在含点缺陷的超元胞中, 保持缺陷散射体填充率(散射体在晶格中排列的密集程度, 设正常散射体和缺陷散射体在单元胞中的填充率分别为 f_0 和 f_1 , $f_0=\frac{\pi r^2}{a^2}=0.785$, $f_1=\frac{\pi r_1^2}{a^2}=0.577$)不变的情况下, 改变缺陷散射体的形状, 研究缺陷散射体的形状对大尺寸压电

图12 空气圆柱孔的高度 h 对换能器共振频率的影响

Figure 12 Influence of the height h of the air cylindrical hole on the resonant frequency of the transducer.

图13 空气圆柱孔的高度 h 对换能器纵向相对位移分布不均匀度 $\Delta\epsilon$ 的影响

Figure 13 Influence of the height h of the air cylindrical hole on the longitudinal relative displacement distribution unevenness $\Delta\epsilon$ of the transducer.

陶瓷复合换能器的纵向共振频率和纵向位移分布均匀度的影响规律. 缺陷散射体的形状参数如表1所示, 利用COMSOL构建了几种不同形状的缺陷散射体的有限元模型, 如图14所示.

图15给出了基于不同形状缺陷散射体的大尺寸压电陶瓷复合换能器的辐射面纵向位移分布云图, 表2给出了不同形状的缺陷散射体大尺寸压电陶瓷复合换能器的共振频率和前辐射端面纵向相对位移分布范围.

从图15和表2可以看出, 保持点缺陷处散射体的填

图 14 不同形状的点缺陷散射体的几何模型. (a) 圆形点缺陷; (b) 正方形点缺陷; (c) 长方形点缺陷; (d) 椭圆形点缺陷
Figure 14 Geometric models of different shapes of the point defect scatter. (a) Round point defect; (b) square point defect; (c) rectangular point defect; (d) oval point defect.

图 15 (网络版彩图)不同形状的点缺陷散射体的大尺寸压电陶瓷复合换能器的辐射面位移分布云图. (a) 圆形点缺陷; (b) 正方形点缺陷; (c) 长方形点缺陷; (d) 椭圆形点缺陷
Figure 15 (Color online) Displacement distribution cloud diagram of the radiation surface of the large-dimension piezoelectric ceramic composite transducer with different shapes of the point defect scatter. (a) Round point defect; (b) square point defect; (c) rectangular point defect; (d) oval point defect.

表 1 不同形状的点缺陷散射体的几何参数
Table 1 Geometric parameters of the point defect scatter with different shapes

点缺陷散射体的形状	长 (mm)	宽 (mm)
圆形点缺陷(半径)	6	6
正方形点缺陷	10.632	10.632
长方形点缺陷	11.309	10
椭圆形点缺陷(长轴短轴)	6.548	5.5

表 2 不同形状的点缺陷散射体大尺寸压电陶瓷复合换能器的共振频率和前辐射端面纵向相对位移分布范围

Table 2 Resonance frequency and longitudinal relative displacement distribution of front radiation end of the large-dimension piezoelectric ceramic composite transducer with different shapes of the point defect scatter

点缺陷散射体的形状	工作频率 (Hz)	$\Delta\epsilon$
圆柱	18934	0.007892
正方形	18930	0.015791
长方形	18929	0.005491
椭圆形	18928	0.005271

充率相同, 不同形状的缺陷散射体均能大幅地优化大尺寸压电陶瓷复合换能器纵向位移分布, 但是由于不同形状散射体对带隙、局域声场等特性的影响不同, 因此优化程度有所区别, 其中, 正方形点缺陷优化效果相对较差, 椭圆形点缺陷优化效果相对最佳, 而且经过仿真分析发现, 对于长/长轴和宽/短轴不同的缺陷散射体, 当其长和宽或者长轴和短轴之比越小时, 优化效果越佳.

4 结论

本文构造了基于半径异常型点缺陷的二维正方晶格近周期声子晶体结构, 并对大尺寸压电陶瓷复合换能器进行了优化, 研究表明, 基于点缺陷的二维正方晶格近周期声子晶体结构可以很好地改善大尺寸压电陶瓷复合换能器的纵向位移分布均匀度; 同时, 分析了点缺陷空气圆柱孔的半径、空气圆柱孔高度、点缺陷散射体的形状对换能器纵向共振频率和纵向位移分布均匀度的影响规律, 为大尺寸压电陶瓷复合换能器的

优化设计提供了理论基础. 结果表明, 利用二维正方晶格近周期声子晶体结构的带隙特性和点缺陷的Anderson局域化特性, 能够有效地提升大尺寸夹心式压电陶瓷复合换能器的性能.

参考文献

- 1 Lin S Y. Research status and latest progress of power ultrasound technology (in Chinese). *J Shaanxi Normal Univ (Nat Sci Ed)*, 2001, 1: 101–106 [林书玉. 功率超声技术的研究现状及其最新进展. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2001, 1: 101–106]
- 2 Ren S C. Multi-dimensional coupled vibrations of piezoelectric vibrators—Composite piezoelectric vibrators. *Acta Acust*, 1983, 1: 152–161
- 3 Lin S. Design of piezoelectric sandwich ultrasonic transducers with large cross-section. *Appl Acoust*, 1995, 44: 249–257
- 4 Lin S Y. Analysis of the equivalent circuit of piezoelectric ceramic disk resonators in coupled vibration. *J Sound Vib*, 2000, 231: 277–290
- 5 Watanabe Y, Mori E, Imamura A, et al. An analysis of fundamental vibration mode of short column type resonator using apparent elasticity method. *J Acoust Soc Japan*, 1995, 51: 455–462
- 6 Xu J, Lin S. Analysis on the three-dimensional coupled vibration of composite cylindrical piezoelectric transducers. *J Acoust Soc Am*, 2018, 143: 1206–1213
- 7 Bai J, Zhang G, Zhang X. A low-frequency longitudinal vibration transducer with a helical slot structure. *J Acoust Soc Am*, 2019, 145: 2948–2954
- 8 Hu J, He X P. Single hole broadband sandwich transducer (in Chinese). *J Northwest Univ (Nat Sci Ed)*, 2008, 4: 555–559 [胡静, 贺西平. 穿单孔宽带夹心式换能器. 西北大学学报(自然科学版), 2008, 4: 555–559]
- 9 Zhang H, Zhao J, Hou Y, et al. A new method to enhance the tip vibration amplitude output of the high frequency piezoelectric ultrasonic transducer used in the thermosonic bonding. *Sens Actuat A-Phys*, 2019, 294: 116–125
- 10 Wang S, Lin S Y. Optimization design of large size sandwich transducer based on two-dimensional phononic crystal (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2019, 68: 173–178 [王莎, 林书玉. 基于二维声子晶体的大尺寸夹心式换能器的优化设计. 物理学报, 2019, 68: 173–178]
- 11 Xian X J, Lin S Y, Zhang H D. Research on the performance of 1-3-2 type piezoelectric composite ceramic sandwich transducer (in Chinese). *J Shaanxi Normal Univ (Nat Sci Ed)*, 2015, 43: 39–42 [鲜晓军, 林书玉, 张海岛. 基于类1-3-2型压电复合陶瓷夹心式换能器性能的研究. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2015, 43: 39–42]
- 12 Liu D, Yue Q, Deng J, et al. Broadband and high sensitive time-of-flight diffraction ultrasonic transducers based on PMNT/Epoxy 1-3 piezoelectric composite. *Sensors*, 2015, 15: 6807–6817
- 13 Jadidian B, Hagh N M, Winder A A, et al. 25 MHz ultrasonic transducers with lead-free piezoceramic, 1-3 PZT fiber-epoxy composite, and PVDF polymer active elements. *IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Contr*, 2009, 56: 368–378
- 14 Chen Y, Sayer M, Zou L, et al. Fabrication and characterization of lithium tantalate/PZT composite thick film ultrasonic transducers. *MRS Proc*, 1998, 541: 647
- 15 Hou S, Yang X, Fei C, et al. Fabrication of PMN-PT/Epoxy 2-2 composite ultrasonic transducers and analysis based on equivalent circuit model. *J Elec Materi*, 2018, 47: 6842–6847
- 16 Kim K B, Hsu D K, Ahn B, et al. Fabrication and comparison of PMN-PT single crystal, PZT and PZT-based 1-3 composite ultrasonic transducers for nde applications. *Ultrasonics*, 2010, 50: 790–797
- 17 Zhou D, Cheung K F, Chen Y, et al. Fabrication and performance of endoscopic ultrasound radial arrays based on PMN-PT single crystal/epoxy 1-3 composite. *IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Contr*, 2011, 58: 477–484
- 18 Li H Q. Research on Plate/Shell-Cavity Vibro-Acoustical Coupling and Vibration Control Optimization (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. 1–12 [李鸿秋. 板/壳-腔结构声振耦合分析及减振降噪优化研究. 博士学位论文. 南京: 南京航空航天大学, 2011. 1–12]
- 19 Xiao Y. Locally Resonant Structures: Band Gap Tuning and Properties of Vibration and Noise Reduction (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. 4–16 [肖勇. 局域共振型结构的带隙调控与减振降噪特性研究. 博士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 2012. 4–16]
- 20 Song Y B. Research on the Manipulation of Stop Bands and the Properties of Sound and Vibration Control for Periodic Structures (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2015. 5–10 [宋玉宝. 周期结构禁带调控与减振降噪

应用探索研究. 博士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 2015. 5–10]

- 21 Zhang H B. Study on Tunability of the Band Gaps and Their Vibration Reduction Performance of Phononic Crystal Plates (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Changsha: Hunan University, 2016. 7–19 [张洪波. 声子晶体板的带隙调控及减振性能的研究. 博士学位论文. 长沙: 湖南大学, 2016. 7–19]
- 22 Wang G. Research on the Mechanism and Vibration Attenuation Characteristics of Locally Resonant Band Gap in Phononic Crystals (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. 3–12 [王刚. 声子晶体局域共振带隙机理及减振特性研究. 博士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 2005. 3–12]
- 23 Liu X H, Huang D M, Wang X J. Acoustic phonons and their light scattering properties in near-periodic superlattices (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 1997, 9: 200–209 [刘晓晗, 黄大鸣, 王兴军. 近周期超晶格中的声学声子及其光散射特性. *物理学报*, 1997, 9: 200–209]
- 24 Sutter-Widmer D, Deloudi S, Steurer W. Periodic average structures in phononic quasicrystals. *Philos Mag*, 2007, 87: 3095–3102
- 25 Guo F D. Study on the Bandgaps of One-dimensional Nearly Periodic Phononic Crystal Plates (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. 4–18 [郭凤丹. 一维近周期声子晶体板带隙特性研究. 硕士学位论文. 北京: 北京交通大学, 2015. 4–18]
- 26 Kushwaha M S, Halevi P, Dobrzynski L, et al. Acoustic band structure of periodic elastic composites. *Phys Rev Lett*, 1993, 71: 2022–2025
- 27 Page J H, Sukhovich A, Yang S, et al. Phononic crystals. *Phys Stat Sol (B)*, 2004, 241: 3454–3462
- 28 He C, Zhao H, Wei R, et al. Existence of complete band gaps in 2D steel-water phononic crystal with square lattice. *Front Mech Eng China*, 2010, 5: 450–454
- 29 Zhao Y C, Yuan L B. Characteristics of multi-point defect modes in 2D phononic crystals. *J Phys D-Appl Phys*, 2009, 42: 015403
- 30 Zhou X W, Zou X Y, Wang T H, et al. Effective velocity of 2D phononic crystals with rectangular lattice. *Ultrasonics*, 2010, 50: 577–582
- 31 Shelke A, Banerjee S, Habib A, et al. Wave guiding and wave modulation using phononic crystal defects. *J Intel Mater Syst Struct*, 2014, 25: 1541–1552
- 32 Wu F, Hou Z, Liu Z, et al. Point defect states in two-dimensional phononic crystals. *Phys Lett A*, 2001, 292: 198–202
- 33 Zhao Y C, Wu Y B, Yuan L B. Characteristics of the localized modes in 2D phononic crystal with heterostructure point defect. *Phys Scr*, 2009, 80: 065401
- 34 He J, Fan G H, Zhao D X, et al. Influence of point defects on band gaps of Fe-epoxy in two-dimensional phononic crystal. *Adv Mater Res*, 2013, 652-654: 1377–1382
- 35 Sigalas M M. Defect states of acoustic waves in a two-dimensional lattice of solid cylinders. *J Appl Phys*, 1998, 84: 3026–3030
- 36 Wen J H. Vibration Attenuation and Band Gap Characteristics of Phononic Crystals (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. 15–30 [温激鸿. 声子晶体振动带隙及减振特性研究. 博士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 2005. 15–30]

Large-dimension piezoelectric ceramic composite transducer with point-defect, square-lattice phononic crystal

LIN JiYan^{1,2}, LIN ShuYu^{1*}, WANG Sheng³ & LI Yao³

¹ Shaanxi Key Laboratory of Ultrasonics, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China;

² School of Information Engineering, Yulin University, Yulin 719000, China;

³ The Second Gas Production Plant of Changqing Oilfield Branch, Yulin 719000, China

To improve the longitudinal working efficiency of large-dimension sandwich piezoelectric ceramic composite transducers (PccTs), reduce the strong coupling between longitudinal and transverse vibrations, and improve the longitudinal displacement distribution uniformity of the front radiation end of the transducer, three rows and three columns of two-dimensional (2D) air cylindrical holes arranged in a square lattice parallel to the axial direction of the transducer were fabricated on the front cover plate of a large-dimension sandwich PccT. By changing the radius of the air cylindrical hole in the center of the 3×3 supercell, a point defect is introduced to construct 2D square lattice near-periodic phononic crystals based on the abnormal radius point defect. This design can use the incomplete bandgap of the crystal in the radial direction to suppress the transverse vibration of the large-dimension PccT and can use the Anderson localization characteristics of the point defect to adjust the intensity and phase of the local sound field to further improve the uniformity of the displacement distribution of the radiation surface of the front cover plate. In addition, the influence of the structural parameters of the air cylindrical hole with the point defect on the longitudinal resonance frequency and the longitudinal vibration displacement distribution is analyzed. The simulation results show that the large-dimension PccT based on point defect, phononic crystals can suppress the axial stray modal of the transducer, significantly optimize the longitudinal relative displacement distribution of the radiation surface, and improve the performance of large-dimension PccTs.

near-periodic phononic crystals band gap, point-defect, square-lattice, Anderson localization characteristics, longitudinal displacement distribution uniformity

PACS: 43.40.+s, 43.35.+d, 43.38.+n, 63.20.D-, 63.20.-e

doi: [10.1360/SSPMA-2021-0004](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0004)