

# 基于带隙特性的手性声学超材料抑振特性研究

杨 洸<sup>1,2</sup>, 裴东亮<sup>1,2</sup>, 徐文帅<sup>1,2</sup>, 闫 阔<sup>3</sup>, 刘 宇<sup>1,2</sup>, 刘瑞霞<sup>1,2</sup>,  
陈 猛<sup>1,2,\*</sup>, 姜 恒<sup>1,2,\*</sup>, 王育人<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 中国科学院力学研究所, 微重力实验室, 北京 100190;  
3. 哈尔滨工程大学, 材料科学与化学工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 声学超材料由于特殊的结构, 可以产生一些新奇的效应。基于局域共振机制, 可以使得声子晶体的带隙明显降低, 从而为低频带隙的形成提供了新的方法。基于声学超材料的带隙特性, 设计了一种轻质的四切向杆手性结构的声学超材料, 能形成多个宽带隙, 可以实现对弹性波(声波)的阻隔, 在减震降噪方面具有广阔的应用前景。

**关键词:** 声学超材料; 四切向杆手性结构; 带隙; 隔振

中图分类号: TB535

文献标识码: A

## 1 引言

声子晶体由于其周期性排列的特性, 在其内部会产生一个周期性势场, 对在声子晶体中传播的弹性波(或声波)产生调制作用, 形成特殊的色散关系, 即能带。在能带的带隙处, 弹性波(或声波)无法在该频率范围传播, 因此, 基于带隙特性的声子晶体为抑振结构设计提供了新的思路。

但是声子晶体的带隙中心频率所对应的的波长与晶格常数处于同一数量级, 利用 Bragg 散射难以降低带隙频率。因此基于声学超材料<sup>[1]</sup>的方法, 可以相应的降低其带隙频率。声学超材料是一种人工合成材料, 其具有自然界材料所没有的新奇特性, 例如: 负有效质量密度<sup>[2-4]</sup>和负有效模量<sup>[5,6]</sup>。负有效质量密度意味着介质加速度方向与其驱动力方向相反; 负有效模量则可以理解为共振产生了一个比入射场大很多的散射场, 从而在压力和体积上产生相反的变化。因此, 由于这些新奇的效应, 使得人们能利用声学超材料对声波进行任意操控, 从而受到研究者的广泛关注。如刘正猷等人<sup>[2]</sup>利用局域共振机制实现了负等效质量超材料, 实现了低频抑振的能力; 沈平等人<sup>[7]</sup>提出了一种多质量局域共振模型, 能产生单极、偶极和四极共振, 从而实现双负的特性。但这些超材料都局限于规则的几何结构, 而且质量都比较大, 对于实际隔振应用不太灵活。

本文提出了一种轻质的, 小尺寸的四切向杆手性结构, 该结构由 ABS 塑料制成。结果发现, 该结构具有多重带隙, 且带隙频率较宽, 具有良好的抑振效果。具体结构如下。

## 2 四切向杆手性结构

在本研究中, 构造了一个四切向杆手性结构, 该结构按照正方晶格周期性排列, 其最简布里渊区为  $\Gamma-X-M-\Gamma$  所示的三角形区域, 如图 1(a) 所示, 对于其中的一个晶格基元, 其包含一个节

点, 四根切向杆, 分别与其他四个节点相连, 该正方晶格的晶格常数为  $a$  ( $a = \frac{2*(R-\frac{t}{2})}{\sin(\theta)}$ ), 如

图 (b) 所示。其中该节点为一个圆形节点，半径为  $R=1.05\text{cm}$ ，然后用四根宽度为  $t=0.1\text{cm}$  的杆与圆形节点相连，使杆的外边缘与圆形节点的边缘相切，按顺时针方向进行排列，每根杆之间呈  $90^\circ$  的垂直关系，且与  $x$  轴（或  $y$  轴）方向呈  $\theta=15^\circ$  角。所以整个结构具有 4 重旋转对称性和手性。

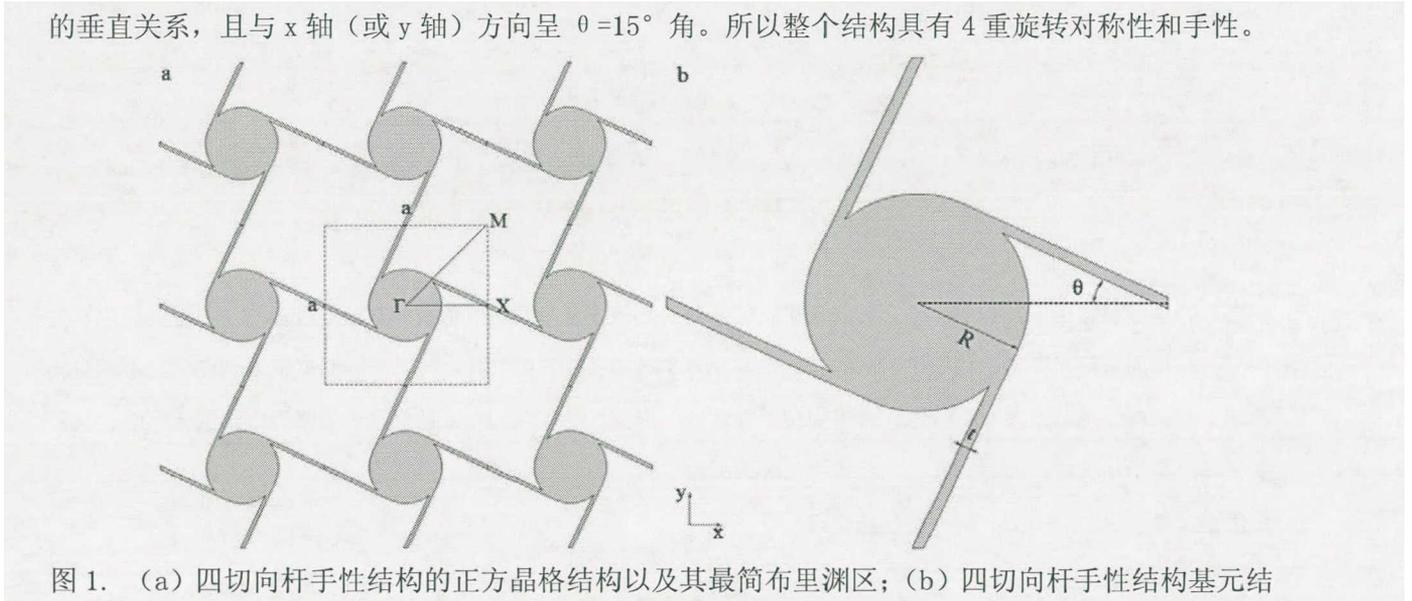


图 1. (a) 四切向杆手性结构的正方晶格结构以及其最简布里渊区；(b) 四切向杆手性结构单元结构，包含一圆形节点和四根切向杆。

利用 COMSOL Multiphysics 有限元软件 (FEM) 对四切向手性结构的能带结构和传输损失进行了计算和研究。对于二维声学超材料，其位移可以分为  $x$ - $y$  平面内和面外位移。在本研究中，只考虑  $x$ - $y$  平面内的位移，在计算中，采用周期性边界条件将计算域简化为一个单元。

基于 Bloch 定理， $u_k(r+R) = e^{ikR}u_k(r)$ ，可以分别在正方晶格的两组对边上分别设置 Floquet 周期性边界条件，从而求解布里渊区边界  $\Gamma-X-M-\Gamma$  上的  $k-\omega$  关系，得到整个结构的色散关系。

在计算传输损失时，在一个方向上设置有限的单元数量，另一个方向设置为周期性边界条件，可实现该方向无限单元的阵列。假设入射平面波在结构的表面传播，可以通过传输系数来确定传输损失。同时，为了减少边界处的反射波，在边界处使用了完美匹配层。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 能带结构

使用以上方法，研究了该结构的能带结构，图 2 是该手性结构的能带图，可以发现存在 4 处比较宽的带隙，第一带隙为  $24543\text{Hz}-35682\text{Hz}$ ，带宽为  $11139\text{Hz}$ ；第二带隙为  $35958\text{Hz}-52158\text{Hz}$ ，带宽为  $16200\text{Hz}$ ；第三带隙为  $52694-61851\text{Hz}$ ，带宽为  $9157\text{Hz}$ ；第四带隙为  $74108\text{Hz}-90370\text{Hz}$ ，带宽为  $16262\text{Hz}$ 。这四处带隙的中心频率所对应的纵波波长分别为： $0.152\text{m}$ 、 $0.103\text{m}$ 、 $0.08\text{m}$ 、 $0.056\text{m}$ ；而四切向杆手性晶格常数为  $0.047\text{m}$ ，均小于四处带隙中心频率所对应的波长，这说明，该结构的带隙是由于局域共振引起的，然而传统的局域共振由于类 Fano 干涉（响应谱具有反对称共振峰），传统的局域共振声超材料的带宽较窄<sup>[8]</sup>。所以该结构的带隙比传统局域共振声学超材料宽的多，因此该结构可实现宽频隔振。

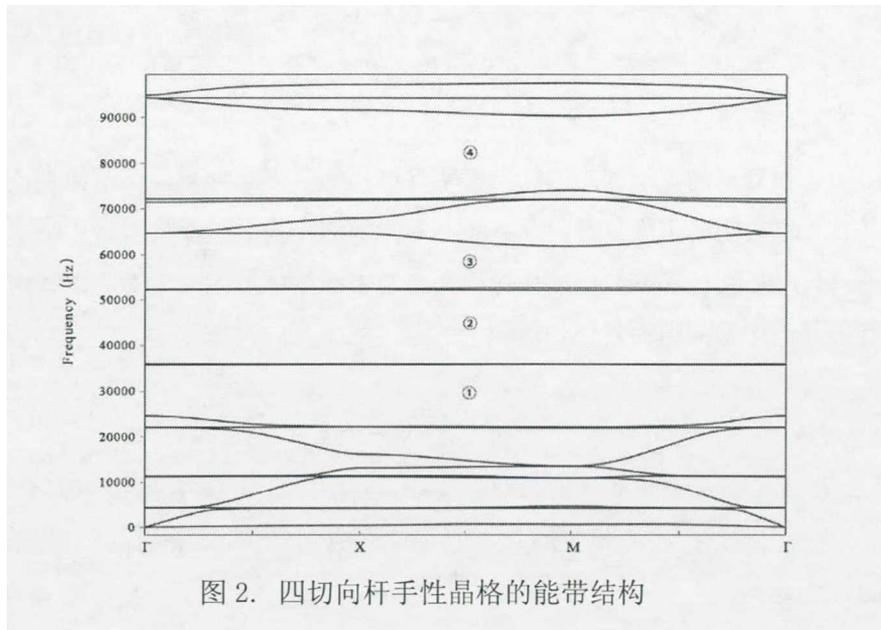


图 2. 四切向杆手性晶格的能带结构

### 3.2 传输损失

另外，利用有限元方法计算了四切向杆手性结构的传输损失，在该计算中，在  $x$  方向设置了 6 个单元，如图 3 (a) 所示。该结构沿  $\Gamma X$  方向的传输损失如图 3 (b) 所示，可以从图中看出在 22400Hz—63200Hz 范围内和 74000Hz-94100Hz 内存在着显著的振动衰减，这与之前能带结构形成的带隙区域范围基本吻合。对于声学超材料，当有效质量密度或有效体积模量为负时，声速就会是一个虚数，波在结构中迅速衰减，形成带隙<sup>[7]</sup>。因此，该结构在隔振材料应用方面很有前景。

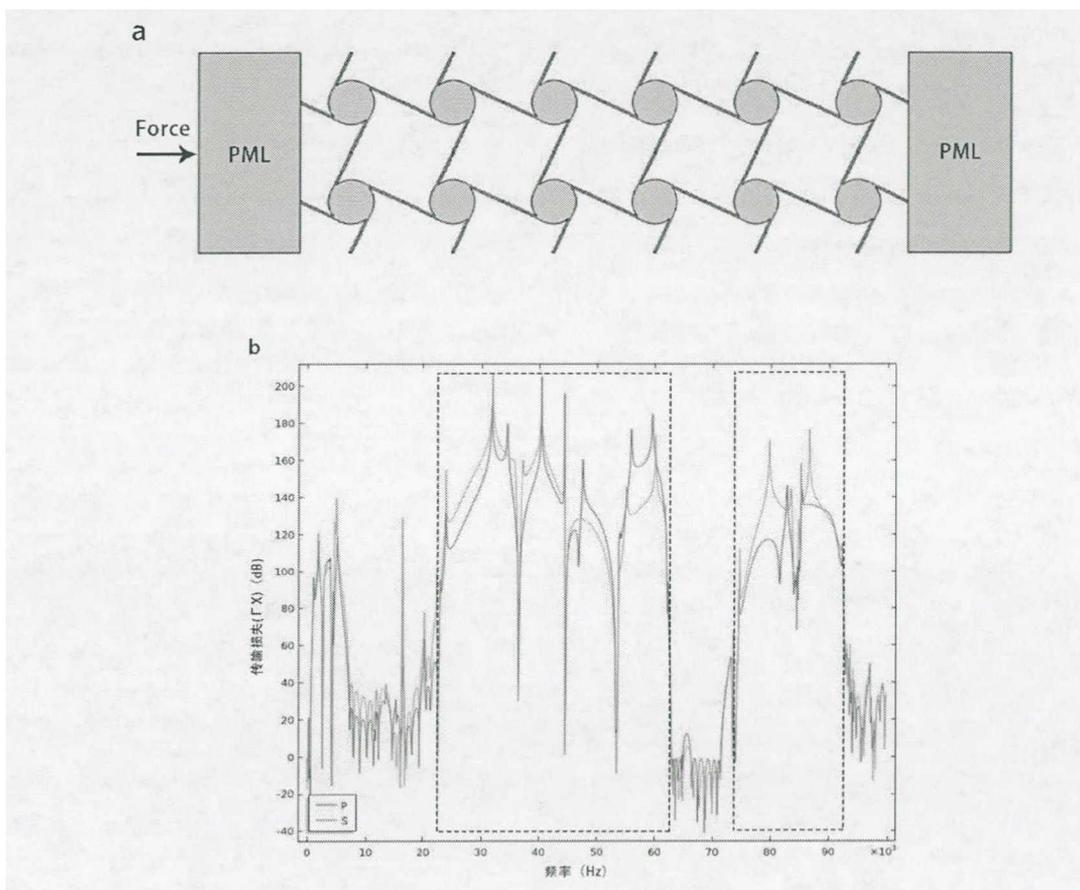


图 3 (a) 用于计算传输损失的模型；(b) 沿  $\Gamma X$  方向的传输损失曲线图，图中 P、S 分别代表纵波和横波。

## 4 结 论

本文提出了一种轻质的, 小型的四切向杆手性结构的声学超材料, 该结构呈正方晶格周期型排列, 其能带具有 4 个较宽的带隙, 带隙中心频率对应的波长均大于晶格常数, 说明该带隙是由于局域共振形成的。另外还测量了该结构的传输损失, 与带隙频率范围基本对应, 该结构具有较宽的隔振性能, 具有十分广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Lu MH, Feng L, Chen YF. Phononic crystals and acoustic metamaterials[J]. Mater Today 2009;12(12):34–42.
- [2] Liu Z, Zhang X, Mao Y, Zhu YY, Yang Z, Chan CT, et al. Locally resonant sonic materials[J]. Science 2000;289(5485):1734–6.
- [3] Yang Z, Mei J, Yang M, Chan NH, Sheng P. Membrane-type acoustic metamaterial with negative dynamic mass[J]. Phys Rev Lett 2008;101(20):204301.
- [4] Lee SH, Park CM, Seo YM, Wang ZG, Kim CK. Acoustic metamaterial with negative density[J]. Phys Lett A 2009;373(48):4464–9.
- [5] Fang N, Xi D, Xu J, Ambati M, Srituravanich W, Sun C, et al. Ultrasonic metamaterials with negative modulus[J]. Nat Mater 2006;5(6):452–6.
- [6] Lee SH, Park CM, Seo YM, Wang ZG, Kim CK. Acoustic metamaterial with negative modulus[J]. J Phys: Condens Mat 2009;21(17):175704.
- [7] Lai Y, Wu Y, Sheng P, et al. Hybrid elastic solids[J]. Nature Materials, 2011, 10(8): 620.
- [8] Goffaux C, Sánchez DJ, Yeyati AL. Evidence of fano-like interference phenomena in locally resonant materials[J]. Phys Rev Lett 2002;88(22):225502.