

泡沫金属对声子玻璃吸声性能的影响研究

陈 猛¹, 姜 恒¹, 王育人^{1*}, 吕世金², 冯亚菲¹

(1 中国科学院微重力重点实验室, 中国科学院力学研究所, 北京 100190;

2 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082)

摘要: 水下吸声材料需要在宽频范围内实现对声波的强吸收性质, 文章通过考虑材料的粘弹性时, 在局域共振声子晶体中引入互穿网络结构来制备一种新型的小尺度水下宽频强吸声材料——声子玻璃(Phononic glass)。泡沫金属是声子玻璃的组分材料之一, 研究其对声子玻璃吸声性能的影响有着重要意义。文中利用均一孔径的泡沫铜制备了一种声子玻璃, 利用有限元方法对该声子玻璃的声共振频带进行估算, 并将实验结果与泡沫铝基声子玻璃进行了对比。结果表明基于均一孔径泡沫金属的声子玻璃不具有宽频效应, 当金属部分的质量增大时, 声子玻璃共振吸声频带向低频移动, 与计算结果一致。

关键词: 声子玻璃; 互穿网络; 水下吸声; 有限元

中图分类号: TB535⁺.1 **文献标识码:** A

1 引 言

在最近十年中, 由于可以在晶格尺寸比相应声波波长小两个数量级时获得明显的声子带隙, 局域共振声子晶体(LRPC)获得了人们的广泛关注^[1-6]。最新的理论计算表明, 当考虑材料的粘弹性形变时, 位于声子带隙的局域共振频率将产生最大的粘弹性能量损耗。这也为开发新型的水下吸声材料提供了新的思路^[7-9]。局域共振型声子晶体只能在某一窄频范围内获得对声波的强吸收, 满足不了宽频强吸收的吸声材料的要求。为了解决这一问题, 我们在局域共振声子晶体中引入一些互穿网络结构, 制备了一种小尺度宽频强吸声的水下声隐身材料——声子玻璃^[10-12]。这种新型的水下消声覆盖层是由具有互穿网络结构的泡沫铝和两种弹性模量不同的聚氨酯制备而成的结构功能复合材料, 为了从物理学的角度说明了声子玻璃的吸声机制, 我们利用集中质量法和质量弹簧模型估算了这种材料可能出现的共振带隙, 计算结果表明: 互穿网络结构和局域共振声子单元对局域共振互穿网络消声覆盖层宽频强吸声性能有着决定性的作用。

从局域共振声子晶体概念提出至今, 局域共振型声子晶体在理论研究、数值模拟、实验与应用研究等方面都有了一定的发展, 在理论计算上的主要方法有多重散射法, 平面波展开法, 时域有限差分法, 传递矩阵法和集中质量法。其中多重散射法主要针对球形和柱形散射体, 应用具有一定的局限性; 平面波展开法是声子晶体中带隙结构常用算法, 但当材料参数差异较大时, 收敛较慢; 时域有限差分法主要存在数值色散和稳定性问题; 而传递矩阵法大多针对一维的声子晶体体系; 由于其可以将复杂的问题简单化, 集中质量法在工程上有着广泛的应用。集中质量法主要将需要计算的连续介质质量集中在某几个质量点上, 将连续的系统问题转化成离散的数学问题。有限元方法是基于集中质量的思想, 对于复杂的复合结构易于建模, 同时具有很好的收敛性, 在研究局域共振声子

晶体带隙结构、传输响应及局域共振器件设计等方面有着无可比拟的优势。针对声子玻璃这种特殊结构的复合材料，由于其内部结构复杂，传统的声子晶体研究方法均不适应。而有限元方法便于建模，是研究声子玻璃吸声特性的重要手段。

泡沫金属作为声子玻璃的组分材料，为其提供了互穿网络的结构和多尺度效应，是其实现宽频强吸声的关键，研究泡沫金属对局域共振互穿网络消声覆盖层吸声性能的影响有着重要意义。为了进一步研究泡沫金属对局域共振互穿网络消声覆盖层吸声性能的影响和声子玻璃的吸声机理，本文在以前的工作基础上，利用孔径尺寸均一的泡沫铜制备了一种声子玻璃，并基于有限元方法对其吸声带隙做出了估算。

2 实验部分

局域共振声子单元是由三种弹性模量不同的材料复合而成，在制备时首先利用弹性模量低的软高分子材料包覆密度较大的金属散射体，然后将其埋在硬的高分子基体当中。声子玻璃是由局域共振单元与互穿网络结构有机地复合在一起，在制备时首先利用 MDI 和 HTPB 使用两步法制备了两种弹性模量不同的聚氨酯，然后利用软的聚氨酯包覆具有互穿网络结构泡沫铜，最后将其埋在硬的聚氨酯中。基于泡沫铜基声子玻璃中泡沫铜、软聚氨酯和硬聚氨酯的体积比为 1: 4: 5。所制备声子玻璃的光学照片如图 1 所示。

由图 1 可以看出所制备的声子玻璃是一块均匀的体材料，三种组分材料被互穿网络结构有机地结合在一起。由图 1 (a) 和图 1 (b) 对比可以看出，泡沫铜基声子玻璃的局域共振声子单元的尺寸大小是均一的，大小约为 1cm，泡沫铝基声子玻璃的尺寸则是一个很宽的范围，具有多尺度的效应。声脉冲管法是传统的水声探测技术，它可以利用标准方法(中华人民共和国国家标准 GB/T 5266-2006)测量声反射系数，再通过计算得到材料的吸声系数。本文利用中国科学院声学研究所声学计量站的脉冲声管测试系统在空气背衬模式下来对声子玻璃进行测量与计算的。水下吸声系数测试结果如图 2 所示。



图 1 声子玻璃的光学照片(a) $\Phi 56 \times 1 \text{cm}$ 泡沫铝基声子玻璃(b) $\Phi 56 \times 1 \text{cm}$ 泡沫铜基声子玻璃光学照片

从图 2 中可以看出，泡沫铝基声子玻璃的吸声性能整体上优于泡沫铜基声子玻璃。泡沫铝基声子玻璃在 12-30 kHz 有一个宽频强吸声带，吸声系数在 0.9 以上，而泡沫铜基声子玻璃仅在 10-15 kHz 获得一个很窄的吸声带。造成两种声子玻璃吸声性能差别的主要原因是，泡沫铝基声子玻璃的局域共振声子单元具有很宽的尺寸分布，具有多尺度的效应，而泡沫铜基声子玻璃的局域共振声子单元尺寸是均一的，无多尺度效应，因而泡沫铝基声子玻璃具有宽频吸声带而泡沫铜基声子玻璃只具有一个很窄的吸声带。根据局域共振声子晶体的理论和计算，第一吸声带的起始频率为 $w = \sqrt{\frac{k}{m}}$ ，由于铜的密度比铝的密度大，泡沫铜基声子玻璃的起始频率应该小于泡沫铝基声子玻璃的起始频率，也

就是泡沫铜基声子玻璃的低频吸声性能应该优于泡沫铝基声子玻璃。但是从图 2 中可以看出，在低频(5-10 kHz)泡沫铝基声子玻璃与泡沫铜基声子玻璃吸声效果相差不大。造成这种现象的原因是，均一孔径的泡沫铜的空隙率为 91%比泡沫铝的空隙率 80%大，也就是泡沫铝金属部分的体积比泡沫铜的金属部分体积大造成泡沫铝金属部分的质量比泡沫铜金属部分的质量相差不大。吸声带隙的起始频率是由空隙率和金属部分的密度共同决定的。

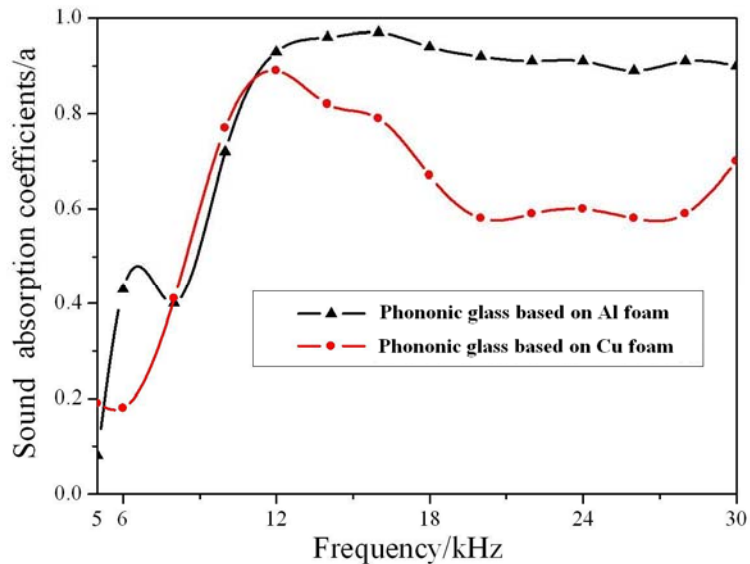


图 2. 1cm 厚泡沫铜基与泡沫铝基声子玻璃吸声系数对比图

在实验的基础上，为了进一步研究声子玻璃的吸声机理，利用有限元方法对泡沫铜基声子玻璃的吸声带隙做了进一步的研究。

3 计算部分

选取声子玻璃中一个单元进行近似计算，根据声子晶体具有周期性和平移对称性，在利用有限元方法对声子晶体带隙开展研究中，通常只需要建立其中一个单胞模型，然后利用周期性边界条件来表征其在某一个方向的平移周期性。图 3 所示为本文所研究的二维局域共振声子晶体一个单胞示意图，其构成为在铜外层包裹一层软的硅橡胶然后埋在硬橡胶中。其中铜半径为 0.18cm，包覆层厚度为 0.18cm，晶格常数 a=1cm。

弹性波在固体中传播方程为：

$$-\rho\omega^2 \mathbf{u} - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{F} \quad (1)$$

当计算其本征频率时，公式 (1) 左端为 0。考虑到

二维局域共振声子晶体在 XY 平面内为无穷大面板，故采用平面应变近似假设及 $\epsilon_z = 0$ 。此时，其应力与应变的关系可以被两个相互独立的方程描述：

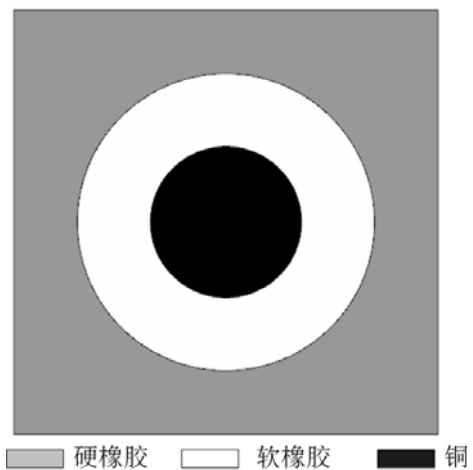


图 3 二维声子玻璃单胞示意图

$$\begin{cases} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{cases} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{cases} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{cases} = \begin{bmatrix} \mu & 0 \\ 0 & \mu \end{bmatrix} \begin{cases} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{cases} \quad (3)$$

考虑到其在 XY 方向均具有平移周期性，故在上下和左右边界分别采用周期性边界条件：

$$\begin{aligned} u_1 &= u_2 \exp(i\vec{k} \cdot \vec{a}) \\ v_1 &= v_2 \exp(i\vec{k} \cdot \vec{a}) \end{aligned} \quad (4)$$

采用自由剖分三角形网格，经划分 1102 个单元即可得到很好的收敛性。计算结果如图 4 所示。

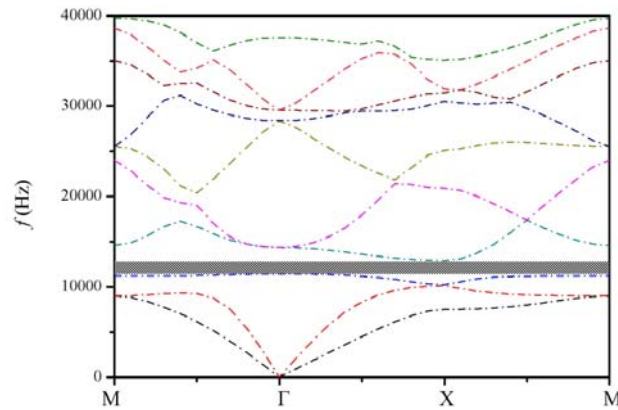


图 4 有限元计算带隙示意图

由计算带隙图 4 可以看出，经有限元方法计算得到的带隙出现在第 3th 和 4th 从 11.4kHz 到 12.95kHz。根据局域共振声子晶体的理论，当考虑粘弹性时在声子带隙出现的位置实现对声波的强吸收，由此可以看出，通过计算只能得到一个声子带隙，和实验结果相符合。

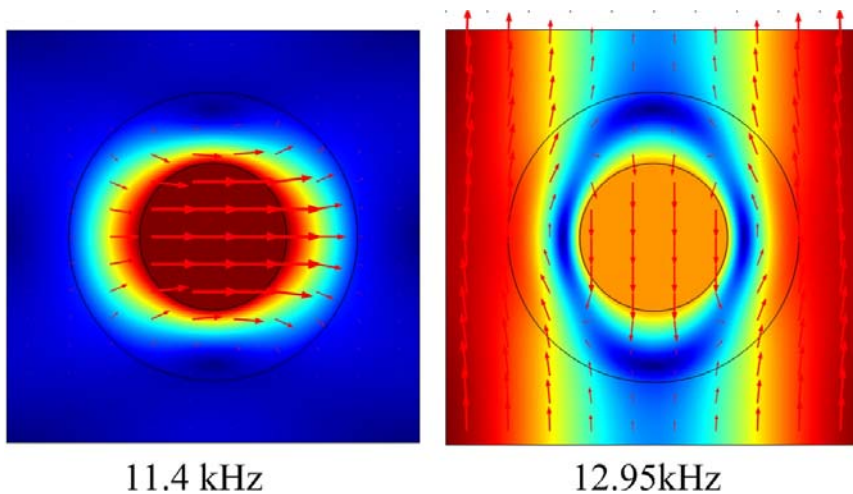


图 5 有限元计算截至频率处振动模态

带隙处振动模态如图 5 所示，在下频带处，只有散射体的振动，在上频带时是散射体与基体的相对振动，与已有的文献具有较好的一致性。同时也可以看出，当考虑粘弹性时，在带隙附件由于散射体的振动是一种有效的耗能机制，故在带隙附近会对声波进行有效吸收。

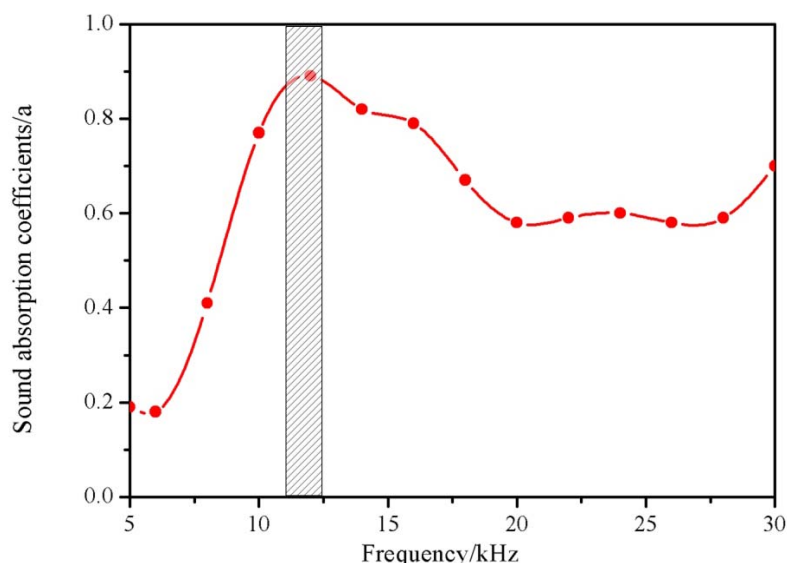


图 6 实验与计算结果的对比如

计算和实验结果如图 6 所示，通过实验测试得到声波的吸收峰位于 12 kHz 左右，通过有限元计算得到的带隙处于 11.4kHz 到 12.95kHz。可以看出计算和实验结果是一致相符的。通过计算也可以看出，均一孔径的泡沫铜基局域共振互穿网络消声覆盖层只有一个声子带隙出现，和实验结果相符，同时该实验也可以解释泡沫铝基声子玻璃宽频强吸声性能。

4 结 论

与泡沫铝基局域共振声子晶体相比，泡沫铜基局域共振声子晶体只有一个窄的声波吸收带，声子玻璃低频吸声性能与金属部分的密度和空隙率有关。利用有限元方法对其吸声带隙进行了计算，带隙处于 11.4kHz 到 12.95kHz，计算和实验结果是具有较好的一致性。

参 考 文 献

- [1] Liu Z Y, Zhang X X, Mao Y, et al. Locally resonant sonic materials[J]. Science, 2000, 289(5485): 1734-1736
- [2] Wang G, Wen X S, Wen J H, et al. Two-dimensional locally resonant phononic crystals with binary structures[J]. Physical Review Letters, 2004, 93(15): 154302-1-154302-4
- [3] Hirsekorn M. Small-size sonic crystals with strong attenuation bands in the audible frequency range[J]. Applied Physics Letters, 2004, 84(17): 3364-3366
- [4] Goffaux C, Sánchez-Dehesa J, Levy Yeyati A, et al. Evidence of Fano-like interference phenomena in locally resonant materials[J]. Physical Review Letters, 2002, 88(22): 225502-1-225502-4
- [5] Yu D, Liu Y, Qiu J, Zhao H, et al. Experimental and Theoretical Research on the Vibrational Gaps in Two-Dimensional Three-Component Composite Thin Plates[J]. Chin. Phys. Lett., 2005, 22-
- [6] Liu Z, Yang S, and Zhao X, Ultrawide Bandgap Locally Resonant Sonic Materials[J]. Chin. Phys. Lett., 2005, 22: 3107.

- [7] Zhao H G, Liu Y, Wen J H, Yu D L, and Wen X S, Tri-component phononic crystals for underwater anechoic coatings[J]. Phys. Rev., 2007, A **367**, 224.
- [8] Zhao H G, Liu Y, Wen J H, Yu D L, Wang G, and Wen X S, Sound Absorption of Locally Resonant Sonic Materials[J]. Chin. Phys. Lett., 2006, 23: 2132.
- [9] Zhao H G, Liu Y, Yu D L, Wang G, Wen J H, and Wen X S. Absorptive properties of three-dimensional phononic crystal[J]. J Sound Vib., 2007. 303, 185.
- [10] Jiang H and Wang Y R, Phononic glass: a robust acoustic-absorption material[J]. J Acoust. Soc. Am., 2012, 132(2):694-699
- [11] Jiang H, Wang Y R, Zhang M L, Hu Y P, Lan D, Wu Q L, Lu H T, Wide-band underwater acoustic absorption based on locally resonant unit and interpenetrating network structure[J]. Chin. Phys. B, 2010, 19(2): 026202-1-026202-6
- [12] Jiang H, Zhang M L, Wang Y R, Hu Y P, Lan D, Wei B C, A wide band strong acoustic absorption in a locally network anechoic coating[J]. Chin. Phys. Lett., 2009, 26: 106202-1-106202-4