

声子玻璃宽频吸声材料二维模型研究

蒙丹¹, 陈猛¹, 姜恒^{1,2}, 王育人¹

(1. 中国科学院力学研究所微重力实验室, 北京 100190;
2. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 声子玻璃是一种基于网络化局域共振机制的新型水下吸声材料, 不仅可以在宽频 (12kHz-30kHz) 范围内对声波进行有效的强吸收, 同时还具备良好的抗压能力。本文利用有限元方法, 建立了二维虚拟弹簧模型。该模型能够描述声子玻璃的吸声机理与宽频强吸声性能, 计算结果与实验结果相符, 并证实了多尺度单元在不同频率处的强耦合作用是其获得宽频吸声的关键。

关键词: 声子玻璃; 局域共振; 有限元

中图分类号: TB533

文献标识码: A

Investigation of two-dimensional model of phononic glass wideband sound-absorbing materials

MENG Dan¹, CHEN Meng¹, JIANG Heng^{1,2}, WANG Yu-ren¹

(1. Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China.
State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Phononic glass is a new underwater sound-absorbing material based on locally resonances, which exhibited good sound absorption over a wide frequency range as well as good compressive properties. In this paper, the two-dimensional virtual spring model was established to study the locally resonant absorption of phononic glass by using finite element method. The calculations have a good agreement with experiments, and suggested the model could clearly describe the sound-absorbing mechanism and performances. In addition, it can be seen the coupling effect between the resonant units with different sizes is the key to the broadband absorption of phononic glass.

Key words: phononic glass; local resonance; finite element method

0 引言

局域共振声子晶体 (Locally Resonant Phononic Crystal) 具有不同于布拉格散射等周期结构材料的声学特性, 能够控制比自身尺度大两个数量级的声波, 大幅降低了低频声学材料的尺度, 是最近声学材料领域的研究热点^[1]。研究表明, 当考虑材料粘弹性时, 它可以对带隙频率处的声波产生有效吸收, 因此局域共振声子晶体可以用作水下吸声材料^[2,3]。但受吸声机制所限, 直接将其用于水下吸声材料只能在很窄的频率范围内实现强吸声, 这不能满足实际的应用需求。为了解决这一问题, 我们将互穿网络结构引入至局域共振声子晶体中, 将金属散

射体替换为力学性能优异的泡沫金属材料, 将原有高分子组分材料替换为适合水声应用的软硬聚氨酯弹性体材料, 获得了一种新型的水下宽频强吸声材料—声子玻璃^[4-6]。这种材料与局域共振声子晶体最大的区别是共振单元的结构, 在局域共振声子晶体中, 共振单元尺寸均一, 在基体材料中彼此是孤立的^[7-9], 而在声子玻璃中共振单元具有不同的尺寸和构型, 通过互穿网络结构的强链接构成了网络化的局域共振结构。前期的数值计算及实验表明, 由于多尺度局域共振单元间的协同与强耦合作用, 使声子玻璃可以在 12kHz-30kHz 频率范围内对声波产生强吸收效应, 并证实了这种强吸声效应来源于局域共振效应, 宽频效应来源于网络化的结构。同时实验测试还表明声子玻璃具备良好的抗压能力, 这为新型水下吸声材料的设计与制备提供了新思路^[5]。

复杂的结构使声子玻璃吸声性能的影响因素众多, 难以解耦, 很难建立其组分材料力学性能与

收稿日期: 2015-01-10; 修回日期: 2015-03-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No 11202211); 青年项目 (No 11272315); 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室开放课题 (KFJJ14-5 M)

作者简介: 蒙丹(1991-), 女, 贵州都匀人, 硕士研究生, 研究方向为声波超材料。

通讯作者: 王育人, E-mail: yurenwang@imech.ac.cn

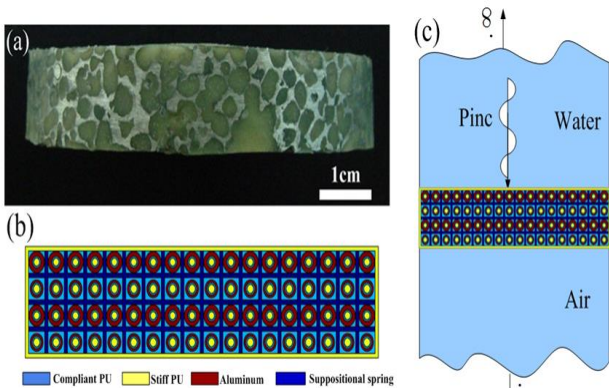
吸声性能的直接联系，这给它的结构设计、组分选择以及性能优化带来困难。在前期的工作中，通过简单的一维质量弹簧模型对声子玻璃的宽频吸声性能的研究表明多尺度单元的协同效应是其获得宽频吸声性能的关键^[4-6]。但模型过于简单，且由于计算方法所限无法给出吸声系数。因此，建立一个能够描述声子玻璃吸声机理与吸声性能的力学模型是十分必要的。

1 基于局域共振的二维虚拟弹簧模型

在本文中，利用有限元方法，基于局域共振吸声机制，建立了二维虚拟弹簧模型来描述声子玻璃的吸声机理与吸声性能。

如图 1 (a) 所示，声子玻璃具有复杂的网络化结构，对这种复杂结构进行物理建模很难实现与实际样品的一致性，另外复杂的物理模型也不便于对其吸声机制展开研究。与传统的局域共振声学超材料的结构进行类比，声子玻璃可以看作是由多尺度局域共振单元构成的网络化结构，其中局域共振单元是由金属环振子、软的聚氨酯、硬的聚氨酯三部分构成。基于这种思想，在局域共振声学超材料的基础上，建立一种近似的虚拟弹簧模型，建模过程如图 1 所示。

图 1 (a) 声子玻璃光学照片；(b) 基于局域共振的虚拟弹簧模型；



(c) 二维虚拟弹簧模型吸声系数计算有限元示意图。

Fig.1 (a) The optical photo of a phononic glass sample; (b)The virtual spring model based on locally resonances; (c)The sketch of sound absorption coefficients calculation with two-dimensional virtual spring model by using finite element method.

图 1 (b) 为在局域共振单元基础上建立的二维虚拟弹簧模型示意图。该模型由两种大小不同的局域共振单元组成，其中单元的平均尺寸及组分材料的比例与真实样品一致，纵向分布 4 组单元，横向分布 18 组单元，在纵向和横向均由虚拟弹簧来描

述网络化的链接。模型尺寸与实测样品一致，其中横向宽度为 56mm，与真实样品直径一致；纵向尺寸为 11mm，与样品厚度一致。样品外围由一层硬聚氨酯包裹，保证与水的阻抗匹配，以减少声波在样品表面的反射。

实现该模型的有限元计算方法如图 1(c)所示。在吸声系数的测试中，由于采用空气背衬的驻波管方法，因此在计算中，声子玻璃两侧流体域分别为水和空气。两侧流体域的边界均采用完美匹配层，模拟无穷大流体区域，防止边界处的声波反射对计算结果造成误差。在固体域中，采用以位移为变量的弹性波动方程，如公式 1 所示：

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\sum_{l=1}^3 \sum_{k=1}^3 c_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \right) \quad (i = 1,2,3) \tag{1}$$

在流体域中采用以声压为变量的声波波动方程，如公式 2 所示：

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = 0 \tag{2}$$

在计算过程，各个组分材料参数取值如下：硬聚氨酯密度 $\rho = 1.076\text{g/cm}^3$ ，杨氏模量 $E = 30\text{MPa}$ ，泊松比 $V = 0.47$ ，损耗因子为 0.3；包覆层软聚氨酯密度 $\rho = 0.898\text{g/cm}^3$ ，杨氏模量 $E = 1.3\text{MPa}$ ，泊松比 $V = 0.49$ ，损耗因子为 0.4；铝基体密度 $\rho = 2.7\text{g/cm}^3$ ，杨氏模量 $E = 77.6\text{GPa}$ ，泊松比 $V = 0.33$ ，损耗因子为 0。虚拟弹簧材料被认为是三种组分材料混合而成，其材料参数可以按照三种材料的填充体积取平均值。计算结果如图 2 所示。

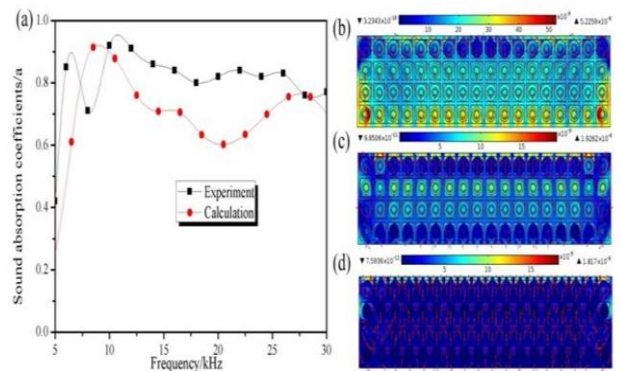


图 2 (a) 孔隙率为 64% 计算与实验结果对比图；

(b) 9kHz, (c) 16.5kHz, (d)28kHz 处模态响应图

Fig.2 (a)The results of the calculation and experiment with 64% porosities ; (b) The responses at 9kHz,(c)at 16.5kHz,(d)and at 28kHz eigenstates

2 结果分析

图 2 (a) 为计算所得的吸声系数曲线, 2 (b) (c) (d) 为声子玻璃在各个频率声波作用下的模态响应。通过图 2 (a) 可以看出, 计算所得吸声曲线与实验结果具有较好的一致性, 两者趋势基本一致。在 6kHz-30kHz 频率范围内, 呈现出宽频吸声效应, 吸声系数都在 0.6 以上, 可以对声波产生有效吸收。与测试结果相比较, 计算结果在中高频处吸声系数较低。造成实验与理论计算差异性可能原因是: 在声子玻璃中局域共振声子单元具有多尺度的分布, 而在计算过程中仅考虑了两种尺寸的单元分布; 另一方面在计算过程中忽略了声波在泡沫金属界面的波形转换作用。

图 2 (b) (c) (d) 分别显示了在 9kHz、16.5kHz 和 28kHz 频率处声子玻璃的模态响应, 可以得到在各个频率声波作用下材料各个部分的位移大小及方向。由图 2 (b) 可以看出在 9kHz 声波的作用下, 最下面一层局域共振单元起主要作用, 该层单元的振动是耗能的最主要方式; 在 16.5kHz 处 (如图 2 (c) 所示), 中间两层局域共振声子单元起主要作用, 这两层大小不等的单元相互耦合振动, 可以对声波产生有效吸收; 在 28kHz 处 (如图 2 (d) 所示), 最上层单元在表面处的纵向振动提供了有效的耗能形式。纵向四列局域共振单元在测试频率范围内, 交替起作用并相互耦合是出现宽频强吸声的主要因素。

3 结论

综上所述, 二维虚拟弹簧模型能够描述声子玻璃的宽频强吸声性能, 计算与实验结果相符, 并证实了多尺度单元在不同频率处的强耦合作用是其获得宽频吸声的关键。

参 考 文 献

- [1] Z. Liu, X. Zhang, Y. Mao, Y. Y. Zhu, Z. Yang, C. T. Chan, P. Shen. Locally resonant sonic materials[J]. Science, 2000, 289(5485): 1734-1736.
- [2] H. G. Zhao, Y. Z. Liu, J. H. Wen, D. Yu, G. Wang, X. Wen. Sound absorption of locally resonant sonic materials. Chinese Physics Letters, 2006, 23(8): 2132-2134.
- [3] H. Zhao, Y. Liu, D. Yu, J. Wen, X. Wen. Absorptive properties of three-dimensional phononic crystal[J]. Journal of sound and vibration, 2007, 303(1): 185-194.
- [4] H. Jiang, M. Zhang, Y. Wang, Y. Hu, D. Lan, B. Wei. A wide band strong acoustic absorption in a locally network anechoic coating[J]. Chinese Physics Letters, 2009, 26(10): 106202 1-4.
- [5] H. Jiang, Y. Wang. Phononic glass: a robust acoustic-absorption material[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2012, 132(2): 694-699.
- [6] H. Jiang, Y. Wang, M. Zhang, Y. Hu, D. Lan, Q. Wu, H. Lu. Wide-band underwater acoustic absorption based on locally resonant unit and interpenetrating network structure[J]. Chinese Physics B, 2010, 19(2): 026202 1-6.
- [7] Z. Liu, C. Chan, and P. Sheng. Three-component elastic wave band-gap material[J]. Physical Review B, 2002, 65(16): 165116 1-6.
- [8] M. Oudich, M. B. Assouar, Z. Hou. Propagation of acoustic waves and waveguiding in a two-dimensional locally resonant phononic crystal plate[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(19): 193503 1-3.
- [9] Z. Liu, C. T. Chan, P. Sheng. Analytic model of phononic crystals with local resonances[J]. Physical Review B, 2005, 71(1): 014103 1-8.