

声子玻璃：一种水下宽频强吸声材料

姜恒^{1,2}, 陈猛¹, 王育人^{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. 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京理工大学, 北京 100081)

摘要: 新型宽频水下吸声材料在规避声呐搜索的消声覆盖层、水下声传输系统等方面有着迫切的国家需求。目前亟需解决静水压下水下吸声材料的宽频强吸声问题。局域共振声子晶体能够在晶格尺寸比相应声波波长小 1-2 个数量级时获得明显的声子带隙, 但是现有研究多针对共振散射单元, 缺乏对结构的系统研究, 这导致它只能在窄频实现强吸声效应。声子玻璃是通过将局域共振单元引入到互穿网络结构中制备而成, 它拥有高机械强度和宽频强吸声性能双重特性, 该研究将为材料在高静水压力下宽频强吸声问题的解决提供新途径。

关键词: 水下吸声; 宽频; 局域共振单元; 互穿网络

中图分类号: V211

文献标识码: A

Phononic glass: A Underwater Wide Band Strong Acoustic Absorption Material

Jiang Heng^{1,2}, Chen Meng¹, Wang Yu-ren¹

(3. Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 100190 Beijing, China; 2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Excellent modern underwater acoustic absorbing materials which can achieve wide-band strong acoustic absorption with structures of small size are urgently needed for their important applications in both military and commercial uses, such as sonar evasion by stealthy coating, underwater acoustic communication system. However, present materials usually exhibit poor acoustics-absorbing property under hydrostatic pressure. This key issue hinders the development of deep-water noise-shielding materials that have wide band strong acoustic absorption under hydrostatic pressure. The lattice constant of locally resonant phononic crystal can be 1-2 orders of magnitude lower than wavelength. The present studies mostly aimed at resonant scattering unit, while there were very few systemic studies on the influence of structural factor. This results in producing strong acoustic absorption just at certain narrow frequency in locally resonant acoustic metamaterials. Phononic glass is proposed which is based on a novel idea of introducing the local resonant units into a random network material structure. It possesses both high mechanical strength and strong underwater sound absorption property in a wide frequency. The research results will be meaningful in wide-band strong acoustic absorption under hydrostatic pressure.

Key word: underwater acoustic absorption, wide frequency, locally resonant unit, interpenetrating networks

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(11202211 和 11272315), 本论文得到爆炸科学与技术国家重点实验室(北京理工大学)开放课题资助, 开放课题编号为 KFJJ14-5M。

作者简介: 姜恒(1980—), 男, 副研究员, 工学博士, E-mail: hengjiang@imech.ac.cn

1 引言

随着陆地资源的逐渐枯竭，人类对海洋的开发与利用越来越重视。由于电磁波在水中传播时能量衰减过快，利用声波作为信息载体在水中完成通讯、定位、搜索等任务就成为唯一选择。在海洋复杂声场环境下，水下吸声材料是消除多余声波的重要途径，在声纳隐身、水声通讯等军民两用技术中有着重要应用，一直都有着迫切的需求^[1-3]。局域共振声子晶体 (Locally Resonant Phononic Crystal) 由于具有不同于类似布拉格散射等周期结构材料的声学特性，能够控制波长比自身尺度大两个数量级的声波，可以大幅度降低低频材料的尺度，是最近十年来声学材料领域的研究热点^[4-7]。最新的研究表明，如果考虑局域共振声子晶体组分材料的粘弹性散射，那么在局域频率范围将出现最大的声吸收^[8-10]。这就意味着局域共振声子晶体可以用于研究水下吸声材料。但是局域共振声子晶体并不考虑在宽频范围内获得局域共振效应，如果直接用于水下吸声，过窄的局域共振吸声频带将不能满足在水下复杂声场环境下对吸声材料宽频强吸声的需求。为了解决这个问题，可以考虑在局域共振声子晶体的基础上引入新结构，并制备适合水下应用的组分材料。互穿网络结构 (Interpenetrating Network Structure) 在自然界非常常见，它普遍存在于哺乳动物的骨骼、肌肉、以及树、植物的组织中。这种结构也经常被应用于生物智能材料领域，是复合材料的重要结构之一。我们将局域共振声子晶体中的共振单元引入到互穿网络结构中，将金属散射体替换为力学性能优异的泡沫铝材料，将原有高分子组分材料替换为耐腐蚀与耐低温性能较好且适合水下应用的软硬聚氨酯弹性体，获得了一种被称为声子玻璃的新型水下宽频强吸声材料^[11]。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，在基体材料中是彼此孤立的，而在声子玻璃中共振单元具有不同尺寸和不同构型，通过泡沫铝和聚合物所形成的强物理连接构成了网络化结构。这些网络化的共振单元将有利于新材料获得宽频强吸声效应。为了对这种材料的性能与吸声机理有更为深入的理解，我们开展了大量的研究工作^[12-14]，本文将对我们前期的工作进展进行总结。

2 宽频水下吸声材料研究

根据局域共振声子晶体的形成机制，我们选择能够构成局域共振弹性模量匹配的泡沫铝、软聚氨酯弹性体和硬聚氨酯弹性体作为声子玻璃的三种组分。最外层的硬聚氨酯弹性体与水的特性阻抗相匹配，根据水下吸声覆盖层理论^[15]，这种特性可以使声波尽可能多的进入到材料内部。由于聚氨酯的弹性模量可以调节，因此组成局域共振单元的软硬两种聚氨酯材料都可以用同一类型的聚氨酯来制备，这将大幅度简化材料的生产与制备工艺。聚氨酯材料还具有较好的耐低温性能，这是其它水声高分子材料无法比拟的。此外，聚氨酯的耐腐蚀性能也很出色，它包覆在外层能够保证泡沫铝不被海水腐蚀，可以延长泡沫铝在海水强腐蚀环境下的使用寿命。

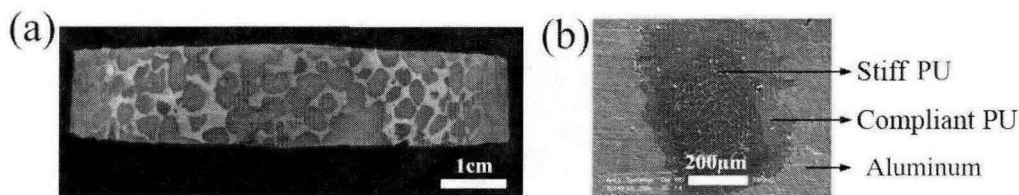


图 1 声子玻璃样品的光学和扫描电镜照片
Fig. 1 Optical and SEM images of a typical phononic glass sample

从图 1 中可以看出声子玻璃样品的整体和内部结构。图 1(a) 中的光学照片显示了声子玻璃样品是固体材

料。图 1(b) 的局部放大的 SEM 图中可以看出，该材料内部具有典型局域共振单元的硬-软-硬三层结构。为了说明结构对声子玻璃吸声效果所起的作用，我们对 1cm 厚该材料和其同样尺寸的组分材料以及叠层材料进行了水下吸声系数对比。

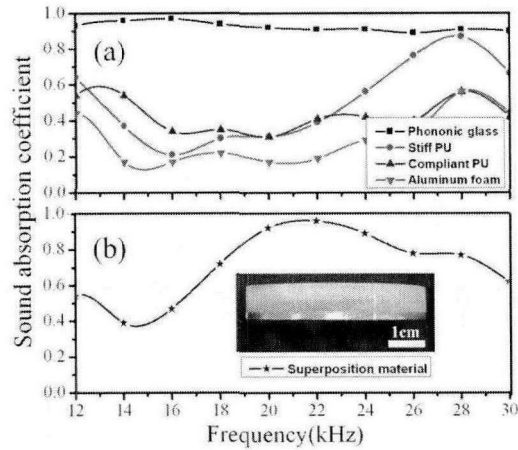


图 2 $\Phi 56 \times 10$ mm 相同尺寸的不同材料在 12-30 kHz 频率范围内的水下吸声系数对比
Fig. 2 Underwater absorption coefficients for different materials that were fabricated with the same dimensions of $\Phi 56 \times 10$ mm in 12-30 kHz

图 2 展示了在 12-30kHz 频率范围内声子玻璃和其它材料水下吸声系数的对比结果。从图 2 (a)可以看出，该材料在 12-30kHz 频率范围内实现了水下吸声系数超过 0.9 的宽频强吸收效应，而其它组分材料在所测量频率范围内的吸声系数都不增高过 0.9。图 2 (b)展示了与声子玻璃具有相同材料组成的叠层材料水下吸声系数，但是这种材料无法实现宽频强吸声。上述结果证实声子玻璃的结构设计起到了关键作用，其宽频强吸声能力并不来源于某一组分材料和简单的材料结构叠加，由局域共振单元与互穿网络结构协同效应相结合的结构设计理念使其获得了优异的水下吸声性能。

为了从机理上研究声子玻璃的宽频强吸声效果，我们首先从模型计算的角度开展了相关研究工作。集中质量法是一种简单而实用的带隙计算方法，在局域共振型声子晶体的研究中被广泛采用的^[16]。它可以简化复杂的计算过程并有效地解释声学机理，尤其适用于具有工程应用背景的材料计算。我们以 1cm 厚新材料中单一尺度的单元结构为研究基础，通过集中质量法估算在不考虑粘弹性变形时这个单元的带隙频率，并以此来研究在考虑组分材料粘弹性变形时，新材料出现强声吸收的频谱范围。

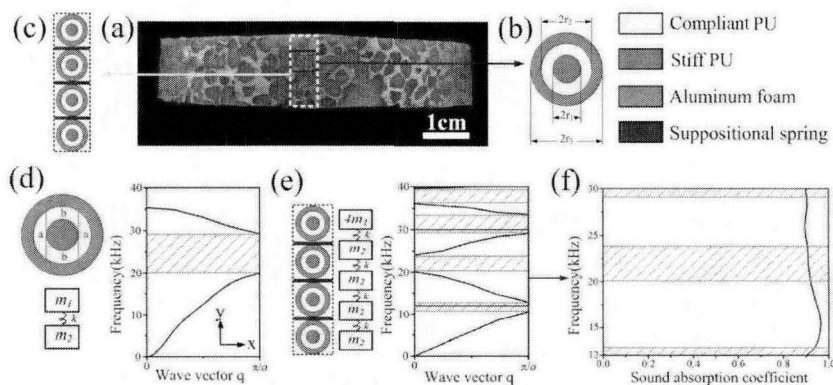


图 3 1cm 厚声子玻璃模型简化过程
Fig. 3 The model simplification process of phononic glass of 1cm thickness

图 3(a)展示了声子玻璃质量弹簧模型的简化过程与数值分析结果，图 3(a)红色线框标出的混乱微结构中

的单元可以被简单抽象为图 3(b) 中由两种同心包覆层组成的同心圆筒。由于声子玻璃的单元之间存在着网络化的协同效应,沿声波入射方向,可以假设单元与单元之间由虚拟弹簧相连,如图 3(c)。根据质量弹簧模型,我们获得了局域共振带隙如图 3(e)所示,它包括了从 11kHz 到 40kHz 中 4 个带隙频率范围。图 3(e) 中被框出部分是新材料 12kHz 到 30kHz 的吸声测量频带,将其放大后得到图 3(f) 中与吸声系数的对应频率。从图 3(e) 中可以看出,我们通过选择一个单元尺度所计算的频率范围涵盖了部分吸声频率,由于声子玻璃内部结构的复杂性,还存在大量不同构型、不同组成的多尺度共振单元,这些不同尺度的共振单元对应着不同的共振频率,如果考虑它们之间的强关联作用,将会出现类似上述的四单元共振带隙频谱,这些对应不同共振频率带隙的叠加将覆盖新材料的整个作用频率范围内,使其可以在宽频获得强声吸收。

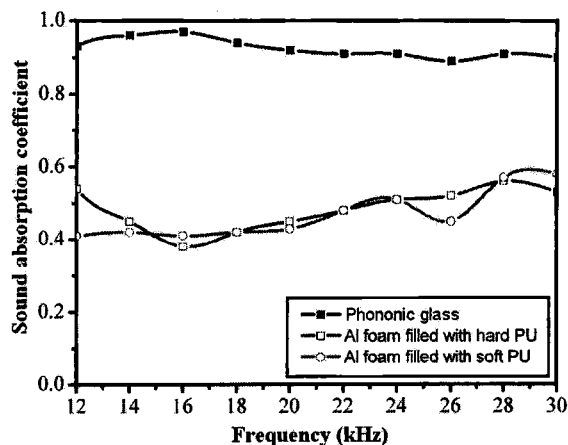


图 4 1cm 厚声子玻璃与两组分复合材料吸声系数对比
Fig. 4 Underwater absorption coefficients of two-component materials and phononic glass of 1cm thickness

图 4 展示了 1cm 声子玻璃与同样厚度、相同泡沫铝基材、只填充软或硬聚氨酯复合材料的吸声系数对比。从对比图中可以看出声子玻璃获得了较好吸声性能,这一效果与前期工作中对结构的设计息息相关。

在声子玻璃中的多尺度局域共振近似单元网络化后,所具有的振动叠加效应将使材料在整体上具有宽频强吸声效应。最近的研究结果证实 4.8cm 厚该材料同样具有低频宽带强吸声效果,从 500Hz-10000Hz 的宽频范围内,吸声效果都在 80%以上。此外,我们还对声子玻璃压力条件下的吸声系数进行了测量,结果表明,在 4.5MPa 下,该材料依然具有较好的吸声效果,这与其具有较好的抗压能力息息相关。

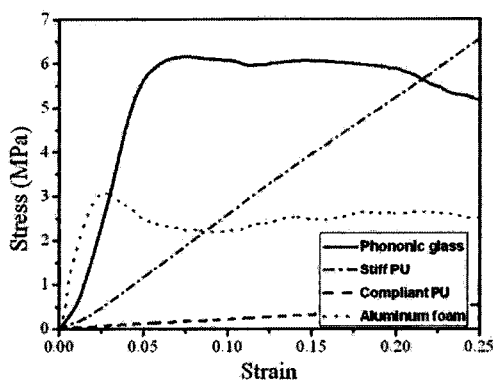


图 5 声子玻璃与组分材料的静态压缩应力-应变曲线
Fig. 5 Compressive stress-strain curves of phononic glass and its component materials

互穿网络结构与局域共振单元的结合使声子玻璃具有了水下宽频强吸声效应,作为水下吸声材料除了要满足宽频吸声要求外,还应该具备一定的抗压性能,以保证在一定的深海压力下材料仍能保持一定的水下吸

声能力。正如前文所述,声子玻璃的设计初衷就是为了能在一定的静水压力下保持良好的吸声性能,采用互穿网络结构一方面是为了增加声子玻璃内部的多尺度共振单元数量,另一方面这种结构也会使材料具备一定的抗压能力,因此,在声子玻璃中泡沫铝除了在吸声时起到局域共振型声子晶体中金属散射体的作用外,还能够起到骨架支撑作用,而软硬两种聚氨酯弹性体与泡沫铝骨架的有机结合将进一步增强这种支撑作用,使声子玻璃具备一定的抗压能力。为了证明经过设计的声子玻璃结构具备一定的抗压缩性,我们对样品进行准静态压缩实验,通过与同样情况下组分材料(泡沫铝、两种聚氨酯弹性体材料)抗压缩能力的比较,来说明声子玻璃结构在抗压缩方面的优势。声子玻璃和其组分材料的应力和应变曲线展示在图5中,从图中可以看出声子玻璃的抗压能力明显优于其它组分材料,这是互穿网络结构可以发挥每个组分相抗压优势的结果。声子玻璃中泡沫铝在失效前拥有弹性刚度,而两个聚氨酯弹性体组分相能对压缩破坏显示出大的应变,可以在基体开裂后提供裂纹桥联,使其在整体上表现出抗压能力^[17]。在塑性变形最初的弹性形变中,由于泡沫铝的抗压缩能力这时远远超过软硬两种聚氨酯弹性体,压缩行为主要发生在泡沫单元壁上,声子玻璃中泡沫铝与聚氨酯弹性体的分界面存在一定的缝隙,因此,这一阶段声子玻璃的压缩行为实际上反映了泡沫铝的压缩行为。但是一旦泡沫铝单元壁与聚氨酯弹性体的缝隙闭合,两种聚氨酯弹性体将对压缩变形施加抵抗力。同时,两种聚氨酯弹性体由于不可压缩性将出现横向形变。横向形变会再次被泡沫铝单元壁阻挡,这种行为反而增加了泡沫铝单元壁对弯曲形变的抵抗力。因此,压缩过程被延缓到压缩力足以破坏泡沫铝单元壁,并使两种聚氨酯弹性体溢出到声子玻璃外为止。图5的测试结果显示,声子玻璃目前可以在最高6MPa的压力下保持完整的效果,如果优化声子玻璃的材料结构与组成,其耐压能力将会进一步提高。

3 结论

根据局域共振声子晶体理论和互穿网络结构,我们发展了一种具有宽频强吸声特性的声子玻璃水下吸声材料。前期的研究工作表明,这种材料同时具有宽频水下强吸声性能和耐压特性。在后续工作中,我们将以此为基础,深入研究各种因素的影响机理,使这种宽频强吸声效应向低频范围拓展。

参考文献

- [1] HINDERS M K, RHODES B A, FANG T M. Particle-loaded composites for acoustic anechoic coatings[J]. *J. Sound Vib.*, 1995, 185(2): 219-246.
- [2] ODELL D, HERTEL K, NELSON C. New acoustic systems for AUV tracking, communications, and noise measurement at NSWCCD-ARD[C]. Lake Pend Oreille, Idaho. *Oceans Conference Record (IEEE)*, 2002, 1 (1): 266-271.
- [3] HEINEMANN M, LARRAZA A, SMITH K B. Experimental studies of applications of time-reversal acoustics to noncoherent underwater communications[J]. *J. Acoust. Soc. Am.* 2003, 113(6), 3111-3116.
- [4] LIU Z Y, ZHANG X X, MAO Y, et al. Locally resonant sonic materials[J]. *Science*, 2000, 289(5485): 1734-1736.
- [5] WANG G, WEN X S, WEN J H, et al. Two-dimensional locally resonant phononic crystals with binary structures[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 93(15): 154302.
- [6] HIRSEKORN M. Small-size sonic crystals with strong attenuation bands in the audible frequency range. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 84(17): 3364-3366
- [7] GOFFAUX C, SANCHEZ-DEHESA J, LEVY YEYATI A, et al. Evidence of Fano-like interference phenomena

- in locally resonant materials[J]. Phys. Rev. Lett., 2002, 88(22): 225502.
- [8] ZHAO H G, LIU Y Z, WEN J H, et al. Tri-component phononic crystals for underwater anechoic coatings[J]. Phys. Lett. A, 2007, 367(3): 224-232.
- [9] ZHAO H G, LIU Y Z, WEN J H, et al. Sound absorption of locally resonant sonic materials[J]. Chin. Phys. Lett., 2006, 23(8): 2132-2134.
- [10] ZHAO H G, LIU Y Z, YU D L, et al. Absorptive properties of three-dimensional phononic crystal[J]. J. Sound Vib., 2007, 303(1-2): 185-194.
- [11] JIANG H, WANG Y. Phononic glass: a robust acoustic-absorption material[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2012, 132, 694
- [12] JIANG H, WANG Y, ZHANG M, et al. Locally resonant phononic woodpile: a wide band anomalous underwater acoustic absorbing material[J]. Appl. Phys. Lett., 2009, 95(10), 104101.
- [13] JIANG H, ZHANG M, WANG Y, et al. A wide band strong acoustic absorption in a locally network anechoic coating[J]. Chin. Phys. Lett., 2009, 26, 106202.
- [14] JIANG H, WANG Y, ZHANG M, et al. Wide-band underwater acoustic absorption based on locally resonant unit and interpenetrating network structure[J]. Chin. Phys. B, 2010, 19(2), 026202.
- [15] HLADKY-HENNION A C, DECAPIGNY J N. Analysis of the scattering of a plane acoustic wave by a doubly periodic structure using the finite element method: Application to Alberich anechoic coatings[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1991, 90(6): 3356-3367.
- [16] JENSEN J S. Phononic band gaps and vibrations in one- and two-dimensional mass-spring structures[J]. J. Sound Vib., 2003, 266(5): 1053-1078
- [17] CHENG H F, HAN F S. Compressive behavior and energy absorbing characteristic of open cell aluminum foam filled with silicate rubber[J]. Scripta Materialia, 2003, 49(6): 583-586.