

声子玻璃宽频水下强吸声材料研究

王育人, 姜 恒, 陈 猛, 冯亚菲

(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)

摘要: 新型宽频水下吸声材料在规避声呐搜索消声覆盖层、水下声传输系统等方面有着迫切的国家需求。但是现有材料在宽频范围内的强吸声能力和在高静水压力下的吸声特性都无法满足需要。在基础研究上的原理创新性探索和深入研究有利于关键技术问题的解决。为了满足上述要求, 我们结合局域共振型声子晶体和多尺度互穿网络结构, 发展了一种被称为声子玻璃的复合材料。水下吸声系数的测量结果证明声子玻璃具有宽频范围的强吸声性质, 准静态压缩力学测试表明这种材料还拥有对于水下应用至关重要的机械强度。

关键词: 水下吸声; 宽频; 局域共振单元; 互穿网络

中图分类号: TB535⁺.1 **文献标识码:** A

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^[1]。在海洋复杂声场环境下, 水下吸声材料是一种能够吸收声波、降低目标声呐特征信号、使其难以被发现和识别的功能材料, 也是消除多余声波的重要途径, 性能优异的水下强吸声材料在声纳隐身、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^[2-4]。为减弱敌方主动声呐信号而设计的水下强吸声材料通常被称为消声覆盖层或消声瓦。随着电子信息技术和信号处理能力的不断更新, 声纳系统对潜艇等目标的识别与跟踪能力获得了大幅度提高, 只有通过减小潜艇自身的水下声波散射, 才能改善潜艇的隐身性能。铺设消声覆盖层或消声瓦的“安静型潜艇”已成为重要的发展方向之一, 美国、瑞典、俄罗斯、法国等传统海军强国也在安静型潜艇的设计、开发、制备工艺等领域位于世界前列。消声瓦的开发与利用使潜艇在保护国家安全, 提高海军作战能力方面作用越来越明显。而船舶及各种水下航行器运行过程中产生的噪声也是海洋环境污染中的一个突出问题, 虽然对系统进行优化设计可以降低振动与噪声, 但在机械系统日益复杂的今天, 这种办法的难度不断加大。因此, 水下强吸声材料是目前解决人类对海洋的噪声污染中最行之有效手段与途径之一。此外, 海洋环境中的通讯、定位、搜索所使用的仪器设备, 都需要利用水下强吸声材料过滤噪声, 使所需频段的声波作用更为明显。

局域共振型声子晶体 (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^[5-8]。最新的研究表明, 如果考虑局域共振型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^[9-11]。这就意味着局域共振型声子晶体可以用于研究水下吸声材料。但是局域共振型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型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。这种结构也经常应用于生物智能材料领域，是复合材料的重要结构之一^[12]。我们将互穿网络结构引入到局域共振型声子晶体中，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(Phononic Glass)的新型水下宽频强吸声材料。这种材料与局域共振型声子晶体最大的区别是共振单元的结构，在局域共振型声子晶体中，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其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^[13-15]，本文将对我们前期的工作进展进行总结，并讨论声子玻璃吸声性能的影响因素。

2 宽频水下吸声材料研究

根据局域共振型声子晶体的形成机制，在制备声子玻璃时，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^[16]，这种特性可以使声波尽可能多地进入到材料内部。由于聚氨酯的弹性模量可以调节，因此组成声子玻璃中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。

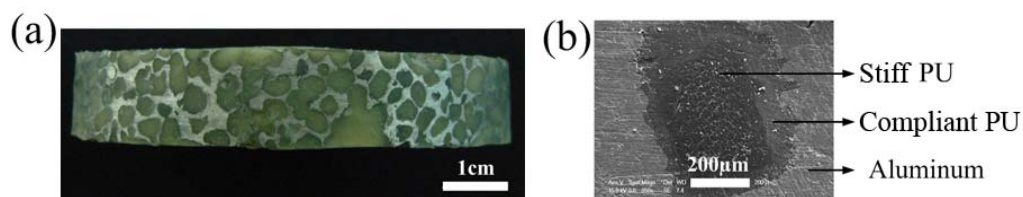


图 1 声子玻璃样品的光学和扫描电镜照片

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。由图 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 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。

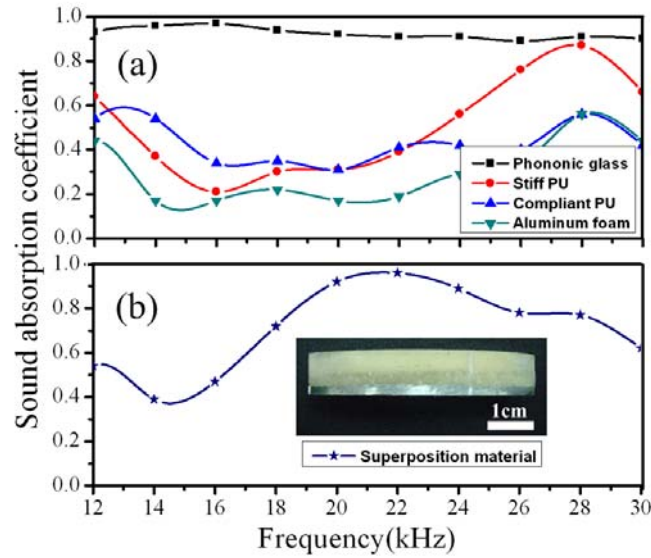


图 2 $\Phi 56 \times 10 \text{ mm}$ 相同尺寸的声子玻璃与其组分材料在 12-30 kHz 频率范围内的水下吸声系数对比

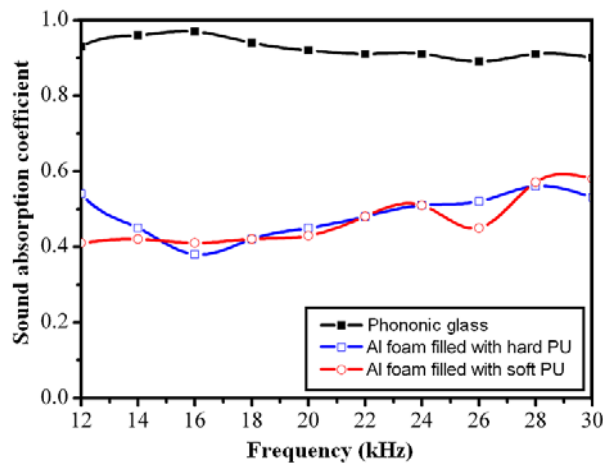


图 3 声子玻璃与只填充一种组分材料泡沫铝基复合材料吸声系数对比

图 3 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 600-9000Hz 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。

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

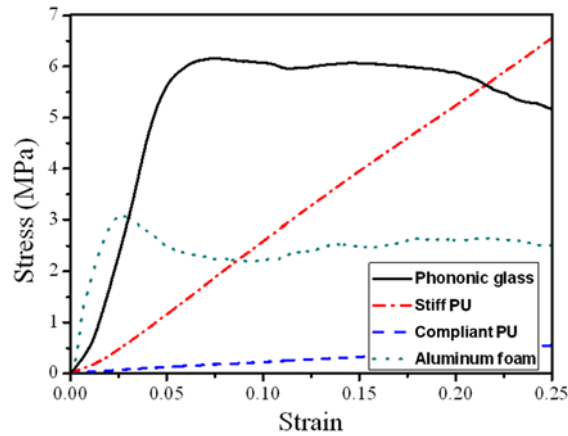


图 4 声子玻璃与组分材料的静态压缩应力-应变曲线

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 4 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 4 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

根据局域共振型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，局域共振单元与互穿网络结构都对声子玻璃的吸声性能有影响。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] 顾金海, 叶学千. 水声学基础. 北京: 国防工业出版社, 1981
- [2] 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.
- [3] Odell D, Hertel K, Nelson C, New acoustic systems for AUV tracking, communications, and noise measurement at NSWCCD-ARD[J]. Lake Pend Oreille, Idaho. *Oceans Conference Record (IEEE)*, 2002, 1 (1): 266-271.
- [4] Heinemann, M., Larraza, A., Smith, K. B. Experimental studies of applications of time-reversal acoustics to noncoherent underwater communications. *J. Acoust. Soc. Am.* 2003, 113 (6), 3111-3116.
- [5] Liu Z Y, Zhang X X, Mao Y, et al. Locally resonant sonic materials[J]. *Science*, 2000, 289(5485): 1734-1736.
- [6] 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): 154302-1-154302-4.
- [7] Hirsekorn M. Small-size sonic crystals with strong attenuation bands in the audible frequency range[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 84(17): 3364-3366.
- [8] Goffaux C, Sánchez-Dehesa J, Levy Yeyati A, et al. Evidence of Fano-like interference phenomena in locally resonant materials[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, 88(22): 225502-1-225502-4.
- [9] Zhao H G, Liu Y Z, Wen J H, et al. Tri-component phononic crystals for underwater anechoic coatings. *Phys. Lett. A*, 2007, 367(3): 224-232.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 贾 贤, 等. 天然生物材料及其仿生工程材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [13] Jiang H and Wang Y R, Phononic glass: a robust acoustic-absorption material[J]. *J Acoust. Soc. Am.*, 2012, 132(2):694-699.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Hladky-Hennion A C, Decarpigny 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.
- [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.