

# 水下吸声机理与吸声材料

王育人<sup>1,†</sup> 缪旭弘<sup>2,\*</sup> 姜恒<sup>1</sup> 陈猛<sup>1</sup> 刘宇<sup>1</sup>  
徐文帅<sup>1</sup> 蒙丹<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院力学研究所, 中国科学院微重力重点实验室, 北京 100190

<sup>2</sup> 海军装备研究院舰船所, 北京 100016

**摘要** 随着我国加速实施海洋强国战略, 对先进水下吸声材料的需求日益迫切. 与空气吸声不同, 水下的高静水压力和复杂的海洋环境对水下吸声材料提出了更为苛刻的要求. 吸声问题的本质是如何将弹性能高效地转化为热能或其他形式能量. 本文综述了主要以聚合物分子内摩擦机制及界面耗能机制为基础的传统水下吸声材料. 传统水下吸声材料面临的主要是其在低频及高静水压力下吸声性能差的问题. 这是因为: 一方面受质量密度定律的限制, 有限厚度的水下吸声材料无法有效吸收水中传来的低频声波; 另一方面, 在高静水压力下, 弹性材料如高分子聚合物会变“硬”, 从而大大降低了声波弹性能的转换效率. 随着局域共振理论及超材料概念的提出, 发展出了一系列新型水下吸声材料, 为解决水下吸声材料遇到的难题提供了新思路. 局域共振理论的特点是可以用小尺度结构控制长波声波的传播, 从而可以解决低频吸声问题. 本文重点综述了局域共振理论, 以及由此发展出的声子木堆、声子玻璃等新型水下吸声材料. 声子玻璃材料在局域共振理论基础上, 通过引入多孔金属骨架结构提高了材料的抗压性能, 从而解决了高静水压力下材料吸声性能变差的问题. 本文最后对水下吸声材料未来发展方向进行了展望.

**关键词** 水下吸声材料, 水下吸声性能, 局域共振, 声子玻璃

中图分类号: O422.4 文献标识码: A DOI: 10.6052/1000-0992-16-008

收稿日期: 2016-02-25; 录用日期: 2016-09-19; 在线出版日期: 2016-11-11

<sup>†</sup> E-mail: yurenwang@imech.ac.cn

<sup>\*</sup> E-mail: miaoxhlz@sina.com

引用方式: 王育人, 缪旭弘, 姜恒, 陈猛, 刘宇, 徐文帅, 蒙丹. 水下吸声机理与吸声材料. 力学进展, 2017, 47: 201703

Wang Y R, Miao X H, Jiang H, Chen M, Liu Y, Xu W S, Meng D. Review on underwater sound absorption materials and mechanisms. *Advances in Mechanics*, 2017, 47: 201703

© 2017《力学进展》版权所有

## 1 引言

由于电磁波在水中传播时能量衰减过快, 因此声波是目前在海洋中唯一能够远距离传播的能量形式, 也是完成水下通讯、定位、搜索等任务的唯一信息载体 (顾金海和叶学千 1981). 在海洋复杂声场环境下, 水下吸声材料是消除多余声波、控制声波传播的重要途径, 在声呐隐身、水声通讯等军民两用技术中有着重要应用 (Odell et al. 2002, Heinemann et al. 2003, 缪旭弘和王振全 2005). 党的十八大以来, 我国首次正式提出了建设海洋强国的战略目标, 发展先进水下吸声材料具有现实的紧迫性.

水下吸声材料可以依据吸声机制的不同划分为传统水下吸声材料和新型水下吸声材料. 传统水下吸声材料包括纯聚合物水下吸声材料、微粒填充型水下吸声材料、空腔谐振型水下吸声材料、阻抗渐变型水下吸声材料及多孔水下吸声材料等. 吸声机制主要指声波在吸声材料内部传播时的能量损耗机制. 传统水下吸声材料的吸声机制主要以声波在材料 (一般为聚合物基材料) 内部引起的分子内摩擦以及声波在不同介质界面上的耗能机制为基础. 传统水下吸声材料面临的主要问题是其在低频及高静水压力下吸声性能差.

近年来, 随着局域共振理论的提出, 发展出了以局域共振吸声机制为基础的新型水下吸声材料. 与传统水下吸声材料相比, 新型水下吸声材料能够打破质量密度定律限制, 实现对低频声波的有效吸收 (姚耀中和林立 2007, 王光荣等 2001, 张文毓 2010). 同时, 通过对材料结构的设计, 可以实现高静水压力的宽频强吸声性能, 如后文将要介绍的声子玻璃水下吸声材料.

本文第二部分介绍了水下吸声材料的基本原理, 第三部分介绍了各类传统水下吸声材料及其吸声机制, 第四部分对基于局域共振吸声机制的新型水下吸声材料进行了重点介绍, 在第五部分讨论了水下吸声材料未来重要的发展方向, 第六部分进行了总结和展望.

## 2 水下吸声材料的基本原理

### 2.1 水下吸声物理过程

水下吸声过程可以看成是水中的声波透过水/吸声材料表面, 进入吸声材料内部并被吸收的过程 (马大猷 2004, 张海澜 2007). 声场在固/液界面处通常要满足一定的边界条件, 如果界面是非常坚固的壁面, 流体不能穿越边界, 称为刚性边界条件. 特别是当边界处压强为零时, 则称之为自由边界条件. 如图 1 所示, 在两种介质中内部声场需满足波动方程, 在界面处两种介质的声压和法向速度连续.

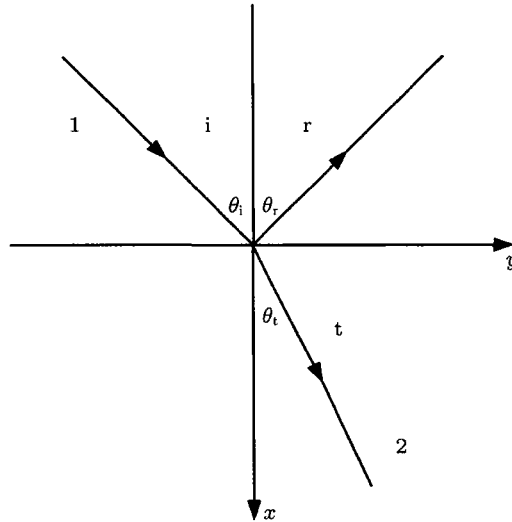


图 1

平面波在平面界面上反射和透射的一般规律 (张海澜 2007), 其中,  $i$  代表入射波,  $r$  代表反射波,  $t$  代表透射波,  $\theta_i$ ,  $\theta_r$ ,  $\theta_t$  分别代表入射角、反射角、折射角

利用反射波和透射波的声压, 得到声压反射系数

$$R_P = \frac{A_r}{A_i} = \frac{Z_{2n} - Z_{1n}}{Z_{2n} + Z_{1n}} \quad (1)$$

声压透射系数

$$T_P = \frac{A_t}{A_i} = \frac{2Z_{2n}}{Z_{2n} + Z_{1n}} \quad (2)$$

其中,  $A_i$ ,  $A_r$ ,  $A_t$  依次代表入射声压、反射声压和透射声压.  $Z_{1n}$  和  $Z_{2n}$  分别代表入射声压和透射声压与法向质点速度之比, 被称为声阻抗率, 它们不但与介质有关, 还与波的传播方向有关.

当弹性波由流体介质进入固体介质中时, 由于两种介质属性差异较大, 导致流固介质之间的声阻抗严重不匹配, 从而产生更为复杂的物理过程. 金属材料 and 无机非金属材料通常可以处理为硬声场边界, 声波在边界处发生全反射. 对于橡胶材料, 其密度和水差不多, 故可以在界面处发生反射和透射等物理过程. 如图 2 所示, 与流体中仅仅存在纵波不同的是, 固体中的声波存在纵波和横波两种模式, 故在界面处会发生纵横波转换.

由界面处法向位移连续及应力连续条件, 可以得出反射系数和透射系数分别为 (Gaubaud et al. 1984)

$$r_\varphi = \frac{Z_{2P} \cos^2 2\theta_{tS} + Z_{2P} \sin^2 2\theta_{tS} - Z_{1P}}{Z_{2P} \cos^2 2\theta_{tS} + Z_{2P} \sin^2 2\theta_{tS} + Z_{1P}} \quad (3)$$

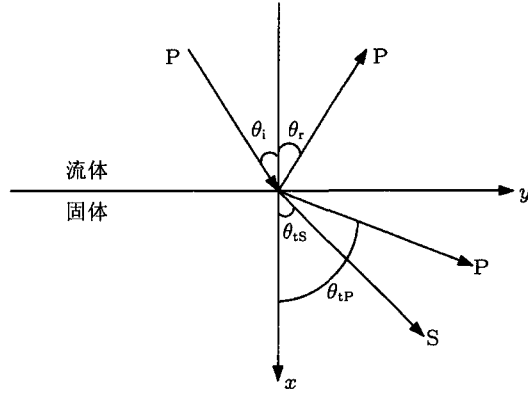


图 2

流体与固体界面的波形转换(张海澜 2007). 其中, P 和 S 分别代表压缩波和剪切波,  $\theta_i$  和  $\theta_r$  分别代表入射角和反射角,  $\theta_{tS}$  和  $\theta_{tP}$  分别代表剪切波和压缩波的折射角

$$t_\varphi = \frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot \frac{2Z_{2P} \cos 2\theta_{tS}}{Z_{2P} \cos^2 2\theta_{tS} + Z_{2P} \sin^2 2\theta_{tS} + Z_{1P}} \quad (4)$$

$$t_\psi = -\frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot \frac{2Z_{2P} \cos 2\theta_{tP}}{Z_{2P} \cos^2 2\theta_{tP} + Z_{2P} \sin^2 2\theta_{tP} + Z_{1P}} \quad (5)$$

其中,  $r_\varphi$  为反射系数,  $t_\varphi$  代表压缩波的透射系数,  $t_\psi$  代表剪切波的透射系数,  $\rho_1, \rho_2$  分别代表材料 1 和材料 2 的密度,  $Z_{1P}, Z_{2P}$  代表材料 1 和材料 2 的阻抗,  $\theta_{tS}$  代表剪切波的折射角度. 可以看出反射系数和折射系数与入射角和两种介质的声阻抗密切相关, 另外, 当入射声波与界面垂直时, 不产生折射横波.

吸声系数

$$\alpha = 1 - t^2 - r^2 \quad (6)$$

其中,  $r$  代表透射系数,  $t$  代表反射系数.

由式 (3)~式 (6) 可知, 材料的吸声性能与材料的厚度、材料的特性阻抗密切相关. 材料特性阻抗与材料的密度和材料内部声速有关, 同时还与材料流阻有关, 流阻值过高或过低都会影响吸声材料性能. 材料层与刚性面间的空气层厚度也会对吸声性能产生影响, 当材料与刚性层间存在空气层时, 相当于增大了材料的有效厚度, 会改变低频噪声的吸收效果, 此外, 材料所处环境的温度、湿度、气流以及材料表面处理效果等都会对吸声性能产生影响.

## 2.2 影响水下吸声材料吸声性能的主要因素及计算测试方法

与空气介质吸声材料不同, 水下吸声材料的研究需重视海洋环境带来的一些重要影响因素. 首先, 需减少水下吸声材料在界面处的声反射. 由式 (3) 可以看出, 这要求

水下吸声材料的表面声阻抗与水的特性阻抗相匹配,这样才能使大部分的入射声波能量进入水下吸声材料中。其次,进入的声波能量要被有效的吸收,需要水下吸声材料内部具有有效的声吸收机制。除此之外,水下吸声材料同时还需要具备抗压性、耐腐蚀性、耐低温性等性能。从实际应用需求出发,还要求水下吸声材料可以对声波在宽频范围内具有强吸声性能。因此,材料的界面特性、组分、内部结构及吸声机制是影响水下吸声材料吸声性能的主要因素。

对水下吸声材料特性的计算方法繁多,每一种方法都有各自的特点,主要包括传递矩阵法 (transfer matrices, TM) (Dowling 1992, Esquivel-Sirvent & Cocolletzi 1994, Sigalas & Soukoulis 1995)、平面波展开法 (plane wave expansion, PWE) (Sigalas 1997, 1998; 吴福根和刘有延 2002)、多重散射法 (multiple scattering theory, MST) (Kafesaki & Economou 1999, Psarobas et al. 2000, Modinos et al. 2001, Mei et al. 2003, Cai & Williams 1999)、有限时域差分法 (finite difference time domain, FDTD) (Cao et al. 2004)、集中质量法 (lump-mass, LM) (温激鸿等 2005, Jensen 2003, Wang et al. 2004) 以及有限元法 (finite element method, FEM) (Langlet et al. 1995, Khelif et al. 2006) 等。

对水下吸声材料的设计和评估需要进行材料声学与力学性能的测试,声学测试方法主要有脉冲管法、自由场法和压力罐近场法等,对其力学强度的测试主要采用静态压缩试验。其中,脉冲管法是在充满水的刚性厚壁金属管中发射、传播和接收脉冲声波,适用于小尺寸圆柱样品的测量;自由场法主要是在消声水池中对较大尺寸样品的吸声系数进行测试;压力罐近场法通常是在充满水的刚性密闭罐中测量材料或者构件的声学性能。脉冲管法相对比较简单,尤其适合小尺寸样品测试,是水声材料吸声系数测量中最为通用的一种测量手段。

### 3 传统水下吸声材料

#### 3.1 纯聚合物水下吸声材料

均质高分子聚合物水下吸声材料一般常用橡胶和聚氨酯,它们的密度与水相似,很容易实现特定的水声功能要求(高玲和尚福亮 2007, 周洪等 2004)。高分子材料具有很强的可设计性,可以通过改变链段比例、支链的数量或者分子间结合力来改变材料的声学特性,在水声领域中有着广泛的应用。

合成橡胶是水声工程使用最广泛的材料 (Boulanger & Hayes 1997), 常见的有氯丁橡胶、丁基橡胶和丁苯橡胶等。可以通过选取不同的胶料以及配合剂, 设计出不同种类的橡胶, 实现不同的声学功能。橡胶材料具备优异的物理、化学性能以及易硫化成型等特点。同时, 具有高的黏弹性和优良的阻尼特性, 体积压缩模量远大于剪切模量, 泊松比近似为 0.5, 可以兼顾良好的吸声与阻尼性能。

聚氨酯材料是新型的聚合物类水下吸声材料, 在水声系统中具有较好的应用和发展前景 (周成飞 2005). 以英国为代表的北约国家一般采用聚氨酯类吸声材料作为潜艇的消声瓦使用 (唐劲松和张春华 1999). 聚氨酯材料的分子主链通常是由软段和硬段镶嵌组成, 分子链间有很强的物理和化学交联作用, 再加上具有大量的氢键, 使其呈现微相分离结构而拥有较高的阻尼损耗因子, 且可以通过调节软硬链段比例来实现在宽温域范围内的高阻尼性能, 进而提高吸声性能 (Kishi et al. 2004). 聚氨酯软段可选聚环氧丙烷二醇 (PPG)、聚四氢呋喃二醇 (PTMG)、聚己二酸二乙二醇 (PDEA)、聚己二酸乙二醇 (PEAG) 等, 一般来讲, 软段越柔顺, 越容易发生微相分离, 吸声性能越好. 聚氨酯硬段通常由二异氰酸酯和小分子二元醇、三元醇、二元胺、醇胺等扩链剂构成 (傅明源和孙酣经 1994).

橡胶和聚氨酯这类黏弹性高分子材料的吸声机制可以归结为黏滞吸收、热传导吸收及分子弛豫吸收 3 种方式 (陈月辉 2004, 朱世成和钟爱升 2006). 黏滞吸收是指声波在介质中传播时, 由于质点的运动速度不同产生了速度梯度, 相邻质点间发生相对运动使声能不断地转化为热能. 这一过程是不可逆的, 它主要发生在两种介质接触面处. 热传导吸收是指声波在介质中传播时, 由于介质质点疏密程度不同使介质各处温度有所差异, 存在温度梯度, 从而使相邻质点间产生热交换. 此过程也是不可逆的, 也通常发生在介质接触面处. 分子弛豫吸收通常是指在声波传播过程中, 介质的分子振动与声波的传播不同步, 其应变响应的相位落后于声波传播响应. 这一现象通常也是不可逆的, 它主要发生在介质的内部. 描述均质高分子材料声学属性的物理量一般有声阻抗、声速、损耗因子、复模量等.

对单一均质材料而言, 根据无限大厚度均匀弹性体的吸声理论, 声波在材料表面处的反射系数可以表示为 (Pedersen et al. 1982, Gaunaurd 1977, Easwaran & Munjal 1993)

$$|r| = \sqrt{(\eta^2/4)/(4 + \eta^2/4)} \approx \eta/4 \quad (7)$$

其中,  $r$  为反射系数,  $\eta$  为材料的损耗因子 (损耗模量与储能模量的比值). 性能优异的水下吸声材料不仅要求有高的损耗因子, 而且要求特性阻抗与水的声阻抗匹配, 尽可能的减少声波在吸声材料表面处的反射. 由式 (7) 可以看出, 材料的反射系数随着损耗因子的增大而增大, 损耗因子越大, 与水的阻抗越容易失配, 反射系数随之增大. 因此对于均质材料来讲, 阻抗匹配与吸声性能存在矛盾. 为了维持吸声材料的高损耗特性, 同时尽可能减少声波反射, 就必须在均质材料内部加入特定的声学结构, 这使得均质高分子吸声材料在水下吸声中的应用受到限制. 同时对于均质高分子材料, 其衰减系数与频率的平方成正比, 它往往需要较大的材料尺寸才能对低频声波产生有效吸收, 这使得均质高分子水下吸声材料往往比较笨重. 另外均质高分子吸声材料强度一

般较低、不耐静水压力,难以满足深海高静水压力环境对吸声材料的要求。

### 3.2 微粒填充型水下吸声材料

微粒填充型吸声材料通常是在黏弹性均质吸声材料中添加各种有机或无机物粒子、中空小球以及金属粉末、空气空腔、玻璃微球等散射体,利用散射体与声波的相互作用实现对声波的有效衰减(Wang et al. 2007)。当声波在基体材料中传播时,遇到这些结构通常会发生散射作用,改变声波的传播路径,并发生波形转换,使部分损耗小的纵波转换为损耗大的剪切波而被具有黏弹性的吸声材料有效吸收。由于声速度梯度与温度梯度可以在基体和散射体两种材料接触面处达到极大值,添加一定数量的粒子也可以提高黏滞性声衰减以及热传导声衰减效应,这些都能够增强材料水下声吸收能力。另外,在均质高分子基体中添加硬质散射结构例如铝粉或中空玻璃珠,在提高吸声性能的同时也可以提高材料整体的抗压强度。

由于能够改善吸声特性,微粒填充型吸声材料在制备及理论计算方面都有广泛的研究。Wstinghouse 公司为改善材料在静水压力下的吸声性能,利用压缩刚性的聚苯乙烯球分散在聚氨酯基体中,制备了一种在静水压力下仍能维持良好吸声性能的微粒填充型吸声材料(蔡俊等 2007)。Hinders 等(1995)研究了填充金属粒子的水下吸声材料对弹性波的散射衰减与吸收,给出了填充粒子尺寸与材料吸声性能之间的关系。Philip 等(2004)研究了填充碳纤维晶须和多孔分子筛的橡胶材料吸声性能,实现了对千赫兹频段声波的强吸收。对于微粒填充型吸声材料的理论计算研究,可以归纳为含有散射体的黏弹性材料对声波的散射问题。在研究中往往通过散射理论得到材料的等效密度和等效模量,即这种复合材料虽然从微观上看是非均匀的,但从宏观上,其对声波散射的总体效果可以与某种均匀材料等效,并结合传递矩阵法等声传播理论开展吸声系数等声学性能的理论计算。Gaunaurd 等运用散射法较系统地研究了各种工况下材料参数的等效方法,如基体为固体或流体,散射体为固体、流体或真空时的工况,并考虑了材料阻尼、环境压力、散射体尺寸以及分布密度等对材料声学特性的影响(Sergeeva et al. 1996, Gaunaurd & Überall 1978, Gaunaurd et al. 1984, Gaunaurd 1989)。在国内,研究者应用含空腔结构材料的等效物理参量方法,模拟了在不同物理参数(密度、复弹性模量)的橡胶中掺入不同种类、不同孔隙率的微粒时吸声系数曲线(王仁乾和马黎黎 2004),并分别仿真了含实心粒子和空心粒子复合材料的吸声性能以及衰减特性,阐明了不同散射结构对水下吸声材料吸声性能的影响,为吸声材料的设计和结构优化提供了参考依据。

尽管微粒填充型吸声材料比高分子均质材料在吸声性能上有了明显的改进,但是由于填料分布的无规性,无法实现对声波的有效控制,并且由于添加的粒子是分散在基体材料中的,其自身的特点被占大多数的基体材料所稀释,无法发挥各组分材料的

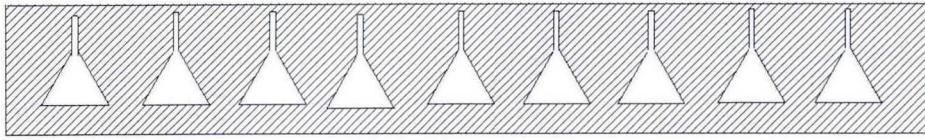


图 3

孔隙谐振吸声材料结构示意图 (汤渭霖等 2005, 谭红波等 2003)

优势. 另外依赖于高分子基体的本征黏弹性吸声, 微粒填充型吸声材料往往需要较大的尺寸才会对低频声波进行有效的吸收, 这些特点都使其在水下吸声中的应用受到了限制.

### 3.3 空腔谐振型水下吸声材料

孔隙谐振吸声材料 (图 3) 是通过在均质吸声材料内部引入球形、圆柱形、圆锥形以及喇叭形等声学孔隙结构制成的水声功能材料 (汤渭霖等 2005, 谭红波等 2003), 它主要利用孔隙谐振、波形转换以及高分子材料的本征特性来实现对声波的有效吸收. 孔隙谐振吸声材料可最早追溯到 20 世纪 40 年代, 德国在二战时期开始在常规潜艇的外壳上加装一层合成橡胶吸声体, 称为“Alberich”消声瓦. 为了规避主动声呐 (频段 9~18 kHz) 的侦查, 它通过在 30 mm 厚度丁苯橡胶中置入直径 2~5 mm 的圆柱形空腔, 利用声波入射时产生的孔隙谐振来吸收声能. 二战之后, 各国研究者对球形腔、圆柱腔、圆锥腔以及复合过渡形孔隙的谐振吸声材料进行了广泛的研究. 研究表明含有气泡和空腔的吸声材料可以在常压下获得较大的吸声系数, 能够对特定频率范围内的水声信号进行有效吸收 (Hladky-Hennion & Decarpigny 1991, Lee et al. 2005); 而复合过渡型孔隙如喇叭腔可以在较宽的频率范围内产生谐振, 而且还有阻抗渐变的作用, 能够有效减少声波反射, 可以在整个频段上改善材料的吸声效果.

孔隙谐振吸声材料的吸声机理一直是研究的热点, 该问题的研究主要集中在谐振吸声、波形转化吸声和声波散射吸声 3 个方面. 孔隙谐振能使材料的压缩形变转变为剪切形变, 这种剪切形变主要发生在孔的周围, 因而它的吸声频率与腔体的固有谐振频率有关. 研究表明腔体的谐振频率与它的结构参数即基体剪切模量有关: 随着细管长度以及穿孔系数的增大, 谐振峰的位置向低频方向移动, 同时吸声带宽变窄; 孔隙容积变大时吸声峰也将向低频移动, 但影响较小; 圆柱空腔的纵向谐振频率大体上与剪切波的波速成比例, 当剪切模量增大时, 谐振峰往高频移动; 剪切损耗因子不会改变谐振频率位置, 但较大的损耗因子会改善谐振时的吸声性能. 波形转换也是孔隙谐振材料中重要的耗能方式, 声波在材料中主要以纵波和剪切波两种形式传播, 它们在传播过程中能量的衰减则分别由材料的体积模量损耗因子和剪切模量损耗因子决定, 而材



料的体积模量损耗因子很小几乎可忽略不计,但剪切损耗因子一般较大,所以在水下吸声材料中需要掺入杂质和小尺度孔隙以形成各种界面,纵波碰到这些界面便会发生波型变换,使纵波变换成剪切波进而增大了声能损耗.另外,孔隙结构倾斜的界面也使声波在传播过程中不断发生反射或散射,改变了传播方向,并增大了传播路径,这对较高频率的吸声十分有利.同时渐变过渡型孔隙还能够满足阻抗从水到艇壳的渐变,使得声波在水与材料的界面上反射减小,大部分能进入材料内部被有效吸收.

为获得孔隙结构内部的吸声机制,研究者建立了多种有效的数学模型.有研究考虑了散射体之间的多次散射影响,研究了散射体为圆柱形管栅和椭圆柱形管栅的孔隙谐振吸声材料的声学特性 (Burke & Twersky 1966, Brigham et al. 1977, Audoly & Dumery 1990).也有研究利用波导理论研究了含多重细长管栅的黏弹性介质在水中的声学特性 (Vovk et al. 1976, Radlinski & Simon 1982, Radlinski 1989),理论计算结果与实验结果具有较好的一致性. Lakhtakia 等 (1986, 1988) 利用 Fourier-Bessel 展开式和 T 矩阵理论研究了含有圆柱腔体弹性介质的声学特性,并分别分析了 SH 波或 P, SV 波入射时的反射以及透射特性,但该模型仅适用于低频情况. Achenbaeh 和 Mikata (1986, 1987, 1988) 对含双周期分布球腔或圆杆的弹性固体进行了研究,得到了简谐波入射时的通带和禁带. Gaunaurd (1977, 1985) 对“Alberich”型吸声材料的孔隙振动行为进行了研究,并指出如果表面层材料较硬时,谐振吸声就主要是依靠孔壁的径向振动;如果表面层材料相对较软时,谐振吸声就主要取决于表面层弯曲振动的贡献;当表层的硬度与穿孔层相差不大时,则两种振动对谐振吸声的贡献均不可忽略.在国内,陈建平 (2007) 利用了均匀圆柱中弹性波的计算方法建立了复合过渡型孔隙材料的理论模型,并应用这一理论模型计算分析了不同孔隙结构形式的水下吸声材料的吸声性能,给出了孔隙结构和不同材料参数对水下吸声材料吸声性能影响规律.赵敏兰和朱蓓丽 (1996) 应用声波散射和黏弹性介质力学的基本理论,把含球形或圆柱形空腔的橡胶材料看成具有等效密度和等效动态弹性模量的均匀材料;把含渐变空腔的穿孔层分成多层结构,每层内空腔可近似为短圆柱,较好地模拟了孔隙谐振吸声材料的吸声特性.何世平等 (2006) 和汤渭霖等 (2005) 将覆盖层单元近似为黏弹性的圆柱管,利用黏弹性 Kelvin-Voigt 模型,分析了声波在正入射情况下含有圆柱形空腔的覆盖层的反射及吸声特性.白国峰 (2003) 针对阻抗过渡结构和谐振吸声结构利用解析方法讨论了多种等效声学模型,如变截面波导声传播模型和发泡材料等效参数模型等.

孔隙谐振吸声材料较好地解决了低频吸声的问题,已在各国的潜艇上得到了广泛应用.但由于孔隙谐振吸声材料通常是在高分子橡胶基体上留有孔隙一类的声学结构,这使得这类吸声材料强度较低,不耐静水压力.随着潜艇巡航深度的增大,孔隙谐振吸声材料的内部孔隙将在水压下发生变形,使共振和反共振频率均向高频移动,低频吸声效果变差,丧失吸声功能.

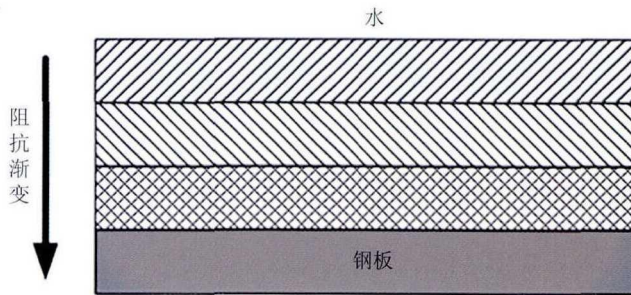


图 4

阻抗渐变型水下吸声材料结构示意图 (Emery 1995)

### 3.4 阻抗渐变型水下吸声材料

阻抗渐变型水下吸声材料 (图 4) 通常是采用阻抗渐变的均质材料组成的梯度复合材料, 它的表面等效阻抗与水的特性阻抗匹配, 并随材料的厚度增大逐步增大对声波的损耗, 这样能够有效降低声波在材料表面处的反射, 提高材料整体的吸声效率. 在对复合吸声材料的研究中发现, 在高频时可以通过阻抗匹配减少反射系数, 在低频时可以通过调整各层材料厚度, 有效解决反射波在材料界面处干涉而出现反射峰. 阻抗渐变复合吸声材料结构简单, 工艺成型好, 可以通过结构优化设计而获得良好的吸声效果, 因此在实艇上有着广泛的应用. 例如, 复合加芯层材料可以通过对内部芯层以及各层材料的设计, 获得良好的吸声和力学性能, 能够直接替代钢结构用作水下壳体, 也能应用于声学硬背衬的非耐压壳体和声学软背衬的舵、指挥台围壳等壳体结构, 从而实现承载和隐身一体化设计.

阻抗渐变型水下吸声材料主要还是依靠材料内部的黏弹性内摩擦和弹性弛豫过程对声波产生损耗, 其耗能机理与均质材料一致. 对于黏弹性复合吸声材料, 一般采用基于分层介质系统的传递矩阵法进行理论计算研究 (Cervenka & Challande 1991). 将黏弹性复合吸声材料近似简化为二维模型, 根据各层介质的动态力学性能和几何参数, 构建分层传递矩阵模型, 可以求得在不同入射角度下材料的反射系数和透射系数. 当考虑三维激励压力下黏弹性复合材料的声学特性时, 也可以建立三维传递矩阵模型研究它的吸声性能 (杨雪等 2007). 由于黏弹性复合吸声材料与均质材料吸声机理一致, 耗能机制相对单一, 需要较大尺度材料才能对低频声波进行有效吸收, 因此其应用也有一定的局限性.

### 3.5 多孔水下吸声材料

多孔泡沫材料主要包括纤维材料、高分子泡沫材料以及泡沫金属材料, 它们通常

具有质量小、比强度高、比刚度高以及能量吸收高等优点,因此被广泛应用于吸声材料 (Lefebvre et al. 2008, Arenas & Crocker 2010). 目前关于多孔泡沫材料的研究大部分都集中在空气介质吸声研究上,而对于其在水下吸声中的应用研究较少 (Lu et al. 1999, Han et al. 2003, Chen et al. 2001). 开孔泡沫铝的水下吸声系数测试表明,吸声系数随着孔径的减小和样品厚度的增大而增大,孔隙率为 75%~80% 之间的泡沫铝结构吸声系数最好,但低频吸声效果较差 (Wang et al. 2007, 王晓林 2007).

多孔泡沫材料大多是开孔材料,由于其内部具有大量的细微孔隙,且孔隙彼此贯通并通过表面与外界相通,当声波入射至材料内部时,会激发孔内流体振动,振动流体与多孔材料内壁发生相对运动,由于流体介质的黏滞性,在微孔内产生相应的黏滞阻力,迫使这种相对运动产生摩擦耗能,从而将动能转化成热能实现声能衰减. 一般采用 Biot 等效介质理论对多孔泡沫材料的吸声性能进行描述 (刘颖 2002). Biot 将充满水的多孔介质看作两个互相渗透的“有效介质”,系统中有固体波和流体波. 利用等效介质理论假设可以将多孔吸声材料等效为黏滞流体,其中,声速和黏滞吸声性能与孔隙率等参数相关. 虽然多孔吸声材料尤其是泡沫金属材料具有轻质高强度等优点,可以抗静水压力,但是由于吸声机制所限,低频吸声性能较差. 再加上泡沫金属材料不耐海水腐蚀等原因,使其在水下吸声中的应用受到很大限制.

#### 4 新型水下吸声材料

现有用于消声覆盖层的水下吸声材料以含有声学空腔的橡胶材料为主,当静水压力较小时,静水压力不会造成消声覆盖层的吸声性能大幅降低,因此其具有一定的水下吸声作用. 但是当静水压力增大时,将导致以橡胶为主的水下吸声材料弹性模量增大,使水下吸声效果明显下降. 此外,以橡胶为主的水下吸声材料是线性声学材料,往往需要较大的材料尺寸才能实现对低频声波的吸声控制,随着声纳探测逐渐向低频范围拓展,如何实现小尺度材料对低频声波的吸收控制也是亟需解决的关键问题.

由于海洋环境下的声学材料需同时具备抗压、耐腐蚀、耐低温等性能,这就给水下声学材料的设计增大了难度. 目前,以含有声学空腔的橡胶材料为主设计的水下吸声材料理论基础是空腔谐振、材料耗能等原理,尽管在常压下中高频段具有一定的水下吸声效果,但是还面临以下关键技术问题有待突破:

- (1) 在不增大材料厚度与自重情况下,如何实现低频强吸声性能;
- (2) 如何在低频宽带范围内保证水下吸声材料的强吸声效果;
- (3) 如何在深海静水压下保持水下吸声材料较好的吸声性能.

局域共振机制能够打破质量密度定律,实现小尺度材料对长波长声波的控制,可以用于水下吸声机制研究,所构成的材料被称为局域共振声子晶体或局域共振声子

结构. 然而, 这种材料存在对声波的调控频带过窄、高分子基体会使其吸声性能随静水压力升高迅速失效等问题, 制约了在水声领域的进一步发展. 因此, 引入新的声学机制用于水下吸声材料的设计研发十分必要. 超材料 (metamaterials) 是指一类具有超常物理性质的人工复合结构或复合材料, 分为电磁超材料和声学超材料, 它起源于科学家早期对力学问题的探索 (周萧明等 2007), 研究历史可以追溯到 Lamb (1904) 和 Pocklington (1905) 所提出的机械系统 (例如某种悬挂的链结构) 能够在反方向获得相速度与群速度. 声学超材料可以通过调整弹性模量、剪切模量和质量密度等物理参数进行设计, 并可以通过构筑装置和系统控制弹性波的传播, 能够表现出天然材料所不具备的力学性质 (Veselago & Narimanov 2006), 目前被广泛研究的声波左手材料、负模量材料和局域共振声子晶体等都被称作声学超材料 (汪越胜 2006). 声学超材料不仅在空气介质中用途广泛, 在海洋环境水下吸声材料领域也有广阔的应用前景.

#### 4.1 局域共振吸声理论

局域共振声学超材料是在声子晶体的研究中发现的新型人工周期材料. 声子晶体是以半导体材料和光子晶体为基础的一种新型声学材料, 具有与之类似的周期性结构和带隙特性. 声子晶体内部通常分布着规则排列的单元, 这些单元的弹性常数、质量密度等参数都呈周期性变化. 1992 年, Sigalas 和 Economou (1992) 利用球形散射体埋入某一基体材料中形成三维周期点阵结构, 首次在理论上证实了弹性波带隙的存在. 1993 年, Kushwaha 等 (1993) 利用平面波展开法在研究镍/铝二维固体周期复合介质时第一次明确提出了声子晶体的概念, 并获得了剪切方向上的弹性波带隙结构, 同时明确提出声子晶体的带隙特性在减振降噪中具有应用前景. 1995 年, 研究者对西班牙马德里的一座具有 200 年多年历史的雕塑“流动的旋律”进行了声学特性测试 (如图 5 所示), 第一次从实验角度证实了弹性波带隙的存在 (Martinezsala et al. 1995). 从此, 声子晶体的研究引起了人们的广泛关注. 对于局域共振声子晶体来讲, 在特定频率的弹性波激励下各个散射体产生共振, 并与弹性波长波行波产生相互作用, 从而抑制弹性波的传播并产生带隙. 由于局域共振带隙的产生取决于散射体本身的共振特性, 其带隙频率与单个散射体固有的振动相关, 而和散射体的排列形式无关, 这就打破了布拉格散射型声子晶体在获得声波带隙时对尺度的要求, 很容易以较小尺度实现对长波长声波的控制 (Liu et al. 2000). 进一步的研究表明, 局域共振型声子晶体要获得声波带隙并不要求严格的周期结构, 这是布拉格散射型声子晶体所无法实现的 (Sheng et al. 2003), 这些特性使局域共振型声子晶体具有更为广阔的应用前景.

图 6 是局域共振型声子晶体的单元结构与对应的带隙频率范围. 图 6(a) 给出了局域共振单元结构的横截面图, 图 6(c) 和 图 6(d) 是其对应的带隙频率范围. 局域共振型声子晶体结构单元由硬环氧树脂基体 - 软硅橡胶层 - 硬质铅球三层结构组成, 可以看

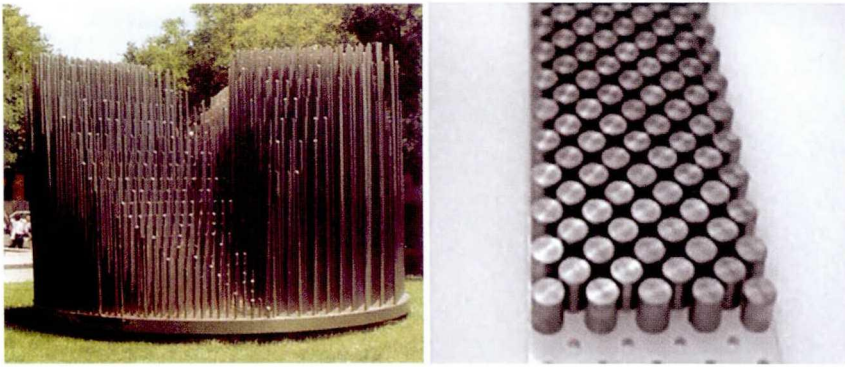


图 5

传统声子晶体周期结构 (赵敏兰和朱蓓丽 1996)

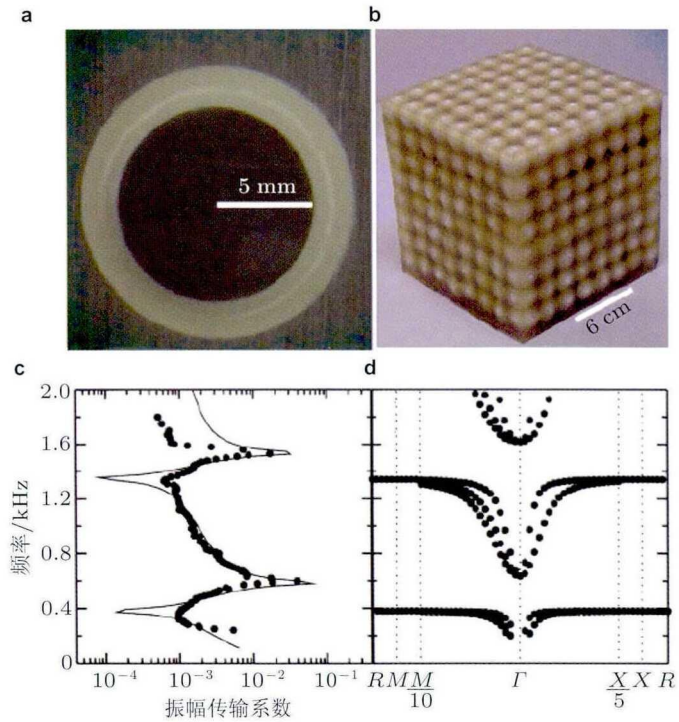


图 6

(a) 局域共振声子晶体基本结构单元 (包裹着的铅球) 的横截面, (b)  $8 \times 8 \times 8$  的局域共振型声子晶体, (c) 和 (d) 局域共振声子晶体能带图 (Liu et al. 2000). 其中, (d) 中横坐标上的  $R, M, M/10, \Gamma, X/5$  分别代表最小布里渊区边界坐标

作是一个由振子和弹簧组成的共振系统, 其固有谐振频率可以表示为  $\omega_0 = (k/M)^{1/2}$ . 其中,  $k$  表示软橡胶对应的弹簧刚度系数,  $M$  是中心铅散射体的质量.  $\omega_0$  对应于局域共振带隙的中心频率. 可以看出, 降低软橡胶的杨氏模量 (即减小弹簧的刚度系数) 或者增大中心散射体的质量都能够实现低频范围的声波禁带. 但是由于类 Fano 干涉现象的存在, 当不考虑结构因素影响时, 频率处于局域共振带隙内的声波衰减较小, 带隙宽度一般也较窄 (Goffaux et al. 2002, 2004).

在大多数局域共振声学超材料的研究中, 通常忽略了材料的黏弹性, 在实际应用中并不可取. 由于局域共振声学超材料的基体材料和包覆层材料通常是由高分子材料构成, 它们往往具备良好的黏弹性. 在考虑黏弹性情况下, 材料的拉梅常数为复数, 可以表示成  $\lambda = \lambda e - i\lambda v$ ,  $\mu = \mu e - i\mu v$ , 这里被  $e$  和  $v$  所描述的实部和虚部分别指材料的弹性模量和损耗模量. 当不考虑材料的黏弹性损失时, 拉梅常数是实数, 局域共振型声子晶体表现出全反射的特性; 但是当考虑材料的黏弹性时, 拉梅常数就变成复数, 局域共振声学超材料在带隙频率处表现出对声波的强吸收效应 (Zhao et al. 2006). 利用这一声吸收特性, 局域共振声学超材料可以被用作水下吸声材料, 进而改善现有水下吸声材料的低频吸声性能.

基于局域共振声学超材料声吸收特性, 研究者开展了一系列局域共振水下吸声材料的研究. Zhao 等 (2006, 2007) 进一步证实, 三维局域共振声学超材料所具有的强吸声特性可以用于水下吸声材料的研究; Liu 等 (2008) 研究了声波在黏弹性二维声子晶体中的传播, 指出基体材料的黏弹性对声波的传播有较大影响; Jiang 等 (2009) 发现, 如果将梯度木堆结构引入到局域共振声学超材料中, 可以实现对声波的宽频强吸收, 这种材料被命名为局域共振声子木堆, 为研究声波的宽频吸收机制提供了新途径; Zhao 等 (2010) 从数值分析和实验上研究了局域共振声学超材料的低频强吸声特性, 但是测试结果显示吸声系数超过 0.7 的频率范围很窄; Wen 等 (2011) 利用有限元方法系统研究了局域共振声学超材料的吸声机理, 并指出局域共振效应及波形转换是其获得强吸声的关键; Meng 等 (2012) 通过引入梯度结构对局域共振声学超材料的水下吸声性能进行了优化, 使吸声频率得到了一定的拓宽, 也从侧面证实了结构参数可以有效拓宽声学超材料的强吸声频率范围; 同时, Jiang 等 (2009, 2010, 2012) 将多尺度木堆结构纵向网络连接, 提出了具有耐压和宽频强吸声双重特性的声子玻璃; Oh 等 (2013) 研究了分别埋入空气和金属单元所构成的黏弹性声学超材料对声波的衰减和耗散机制; Zhao 等 (2014) 研究了在不同背衬下局域共振声学超材料的水下吸声性能, 指出背衬会影响材料的水下吸声性能. 这些研究为新型水下吸声材料的设计与制备奠定了研究基础, 并提供了新的研究思路和方法.



## 4.2 声子木堆水下吸声材料

随着研究的不断深入, 水下吸声材料的发展已经向低频宽带方向迈进, 但是由于局域共振声学超材料的本征属性, 带隙宽度过窄, 无法满足水下宽频强吸声要求. 扩宽局域共振带隙的一般方法是通过调控组分材料弹性常数匹配和局域共振单元的几何结构, 这些做法大多基于改变局域共振单元的本征属性, 而且扩宽效果不是很明显. 利用多尺度的局域共振单元将多个带隙进行叠加实现宽频效果, 但制造工艺复杂. 从局域共振吸声机制上看, 实现宽频强吸声的要点是, 在宽频范围内产生更多的不同频率点上的共振模式. 一个可行的方法是在一个晶格基元中引入多个共振子, 通过各个共振子之间的相互耦合作用, 产生新的共振形式, 进而用于带隙调整和扩宽. 传统声学超材料通常只具有简单晶格类型, 相邻共振子之间仅存在相位的差别, 并没有相关性运动, 即没有强耦合作用. 因此, 为了增强共振子之间的耦合作用, 在局域共振声学超材料中需引入复杂的晶格类型, 进而拓宽带隙, 实现宽频强吸声.

Chen 等 (2016) 发现, 可依据木堆结构构建局域共振声学超材料. 这种新型声学超材料具有复式晶格, 一个单胞内包含有两种正交的共振子, 如 图 7 所示. 计算结果表明, 共振子单元之间存在强耦合作用, 这种耦合作用可以打开一个宽频的带隙并适用于所有极化状态的波 (图 8).

对于木堆结构局域共振声学超材料, 下带隙对应振动模式为正交杆中一个杆的振动, 截止频率可以用下式估算

$$f_3 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_E}{m}} \quad (8)$$

其中,  $k_E$  为压缩模量的函数,  $m$  为散射体的质量. 上带隙对应振动模式为平行于  $Y$  方向的杆沿  $Y$  方向振动, 同时垂直于  $Y$  方向的杆保持静止. 带隙截止频率可以用下式估

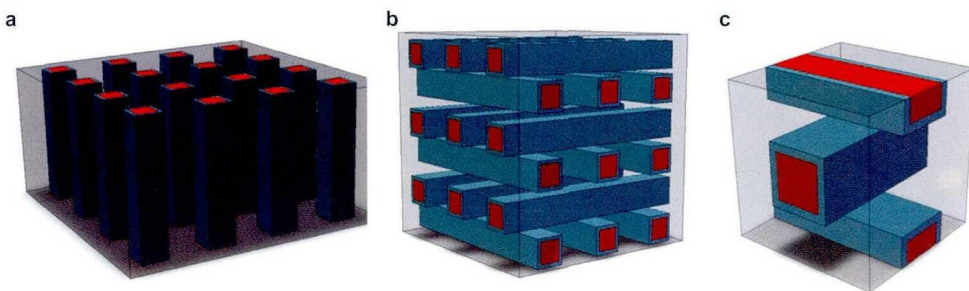


图 7

声子木堆结构示意图 (Chen et al. 2016)

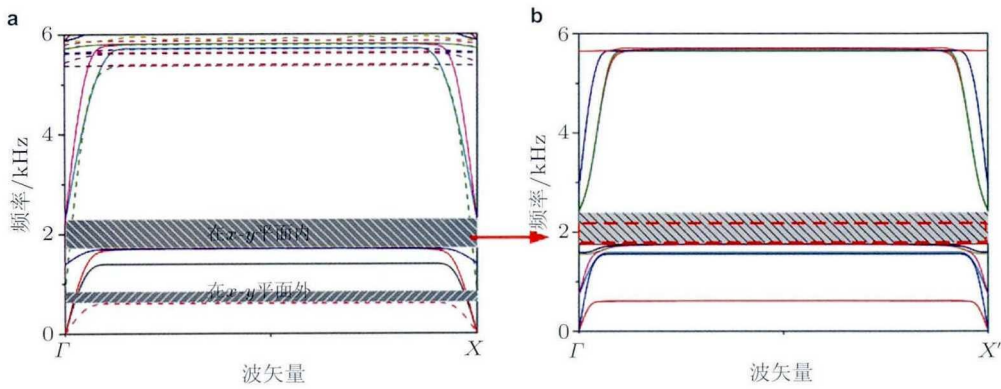


图 8

(a) 二维声子晶体带隙示意图, (b) 声子木堆结构带隙示意图

算

$$f_4 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(mk_G + Mk_E + mk_E) + (mk_G + Mk_E + mk_E)^2 - 4k_Gk_E}{2Mm}} \quad (9)$$

其中,  $k_E$  为压缩模量的函数,  $k_G$  为剪切模量的函数,  $M$  为基体的质量,  $m$  为散射体的质量. 振动杆周围软层发生压缩变形, 而静止杆与运动基体之间发生剪切变形. 可以看出, 在上带隙振动模态处正交振子之间存在强耦合效应, 这种耦合效应来源于压缩共振与剪切共振的共同作用. 正是由于这种耦合效应, 当波沿  $Z$  方向传播时, 会打开一个宽频的带隙, 这个带隙适用于所有极化状态的波.

为了验证该机制的可行性, Jiang 等 (2009) 研制成功了局域共振声子木堆材料. 声子木堆的内部结构和样品实物照片如图 9 所示, 基本单元是包覆有聚氨酯软层的复合钢杆. 在我们的样品中, 复合钢杆有 3 种不同的尺度. 声子木堆是由 3 种复合钢杆按一定规律堆砌复合而成, 如图 9(a) 所示. 其中, 软聚氨酯弹性体和钢杆的体积比是 3:1.

图 10 展示了在同一频率范围内局域共振声子木堆和其他材料的水下吸声系数对比结果. 从图中可以看出局域共振声子木堆在 5~30 kHz 频率范围内获得了比其他材料高的平均吸声系数, 从 8 kHz 开始它实现了水下吸声系数超过 0.8 的宽频强吸收效应, 而其他对比材料在测量频率范围内的吸声系数都低于 0.8, 这一结果证实, 木堆结构有利于宽频强吸声性能的产生.

#### 4.3 声子玻璃水下吸声材料

传统聚合物基水下吸声材料的吸声机制以分子内摩擦机制为主, 这就要求高分子链之间有足够自由运动的空间, 但在深海高静水压作用下聚合物会变“硬”, 使得吸声性能大幅下降.



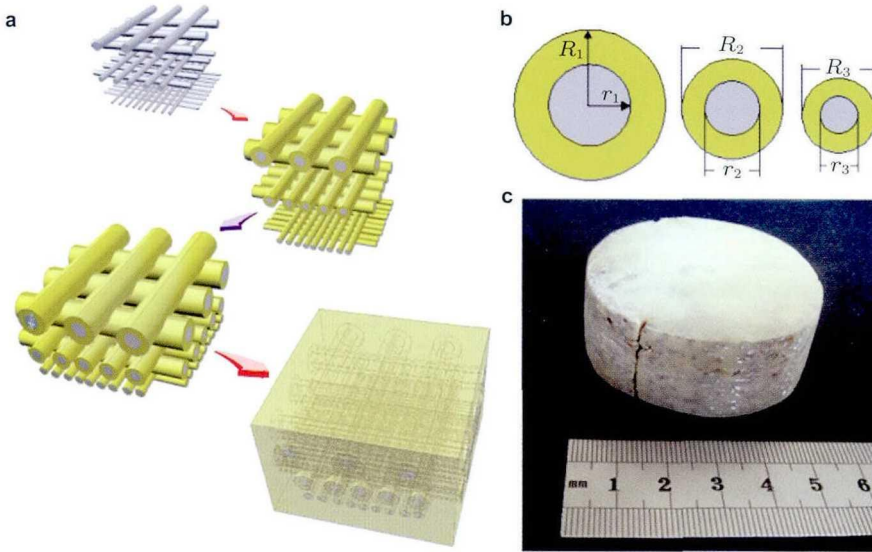


图 9

局域共振声子木堆样品的光学照片与合成路线示意图 (Jiang et al. 2009)

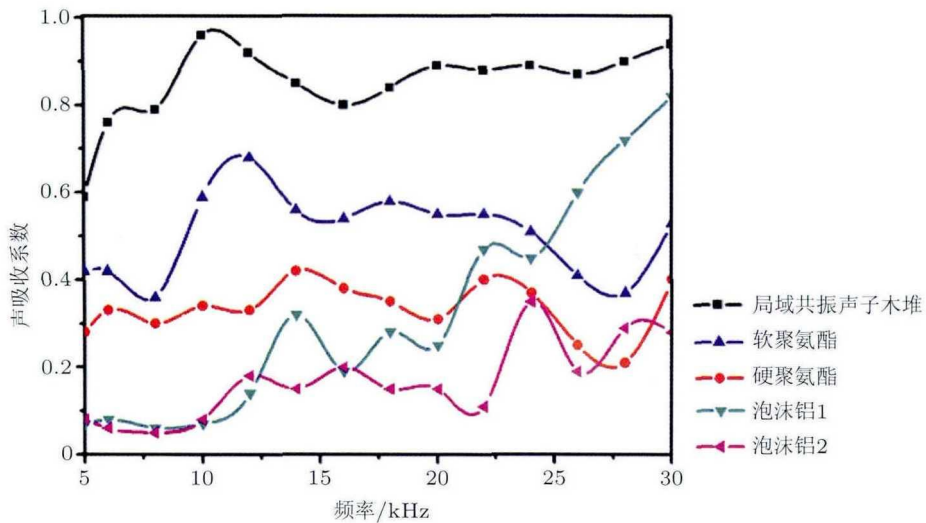


图 10

相同尺度的声子木堆和其他材料在 5~30kHz 频率范围内的水下吸声系数对比 (Jiang et al. 2009)

为了实现水下吸声材料在高静水压下的宽频强吸收效应, Jiang 等 (2009, 2010, 2012) 提出了一种基于互穿网络结构的金属/聚合物复合水下吸声材料, 称为声子玻

璃 (phononic glass). 声子玻璃是一种以金属骨架为基体的复合材料, 因此大大提升材料的抗压强度. 同时, 通过互穿网络结构设计, 在声子玻璃中构建了各种类局域共振结构基元, 而且这些结构基元之间实现了物理连接, 大大增多了共振模态, 拓宽了共振吸收频带范围. 普通的共振吸声谱 (如声子晶体型吸声材料) 特征是在某些孤立的频点附近出现强的窄带吸声峰. 与此不同, 声子玻璃共振吸声谱表现出连续的宽频吸收峰特征. 声子玻璃具有共振吸声、分子内摩擦吸声、界面耗能等多种吸声机制. 因此, 在保持较高材料强度的前提下仍具备宽频强吸声能力, 为解决长期困扰人们的高静水压下的声吸收问题开辟了新思路.

图 11 给出了声子玻璃水下宽频强吸声材料的外部与内部结构, 从图中可以明显分辨出声子玻璃具有的互穿网络结构.

图 12 展示了 1 cm 厚度声子玻璃水下宽频强吸声材料与同厚度组分材料、叠层材料的吸声系数对比, 从图 12 可以看出这种声子玻璃中含有大量多尺度局域共振近似单元, 这些单元结构不仅与局域共振型声子晶体中的单元结构相似, 而且也是由硬 - 软 - 硬 3 种组分材料所组成.

图 13 展示了 1 cm 厚度、相同泡沫铝基材、但采用简单填充软或硬聚氨酯所获得的复合材料吸声系数对比的结果. 从图中可以看出, 声子玻璃型水下宽频吸声材料获得了较好吸声性能, 这一效果与结构的设计有关.

在声子玻璃水下宽频强吸声材料中存在着大量不同形状、不同尺度的局域共振近似单元, 由于每个独立单元对应一个共振频率范围, 这些呈统计分布的多尺度局域共振近似单元网络化后, 将使材料在整体上具有宽频强吸声效应.

声子玻璃水下宽频强吸声材料中, 3 种组分材料相互穿插, 形成了两种聚氨酯弹性体材料骨架和一种金属骨架, 这 3 种骨架彼此紧密相连, 提高了材料整体的力学性能, 可以使材料在高静水压下依然保持宽频强吸声效应, 图 14 展示了该材料较好的抗压性能. 此外, 由于聚氨酯弹性体包覆在最外层, 还会使声子玻璃具有良好的耐腐蚀性能与耐低温性能.

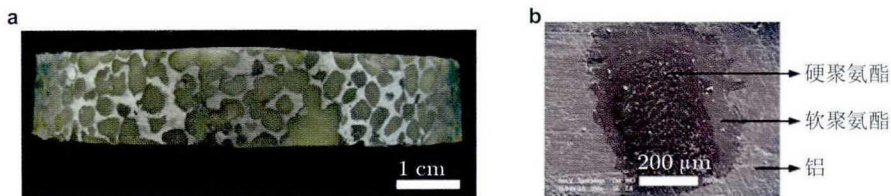


图 11

声子玻璃光学和扫描电子显微镜照片 (Jiang et al. 2012)

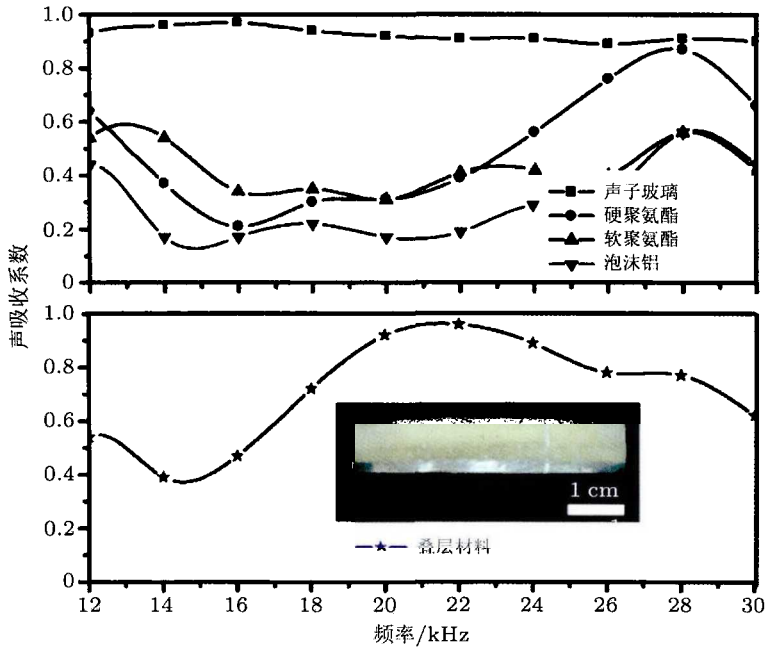


图 12

声子玻璃与其他材料吸声性能对比 (Jiang et al. 2012)

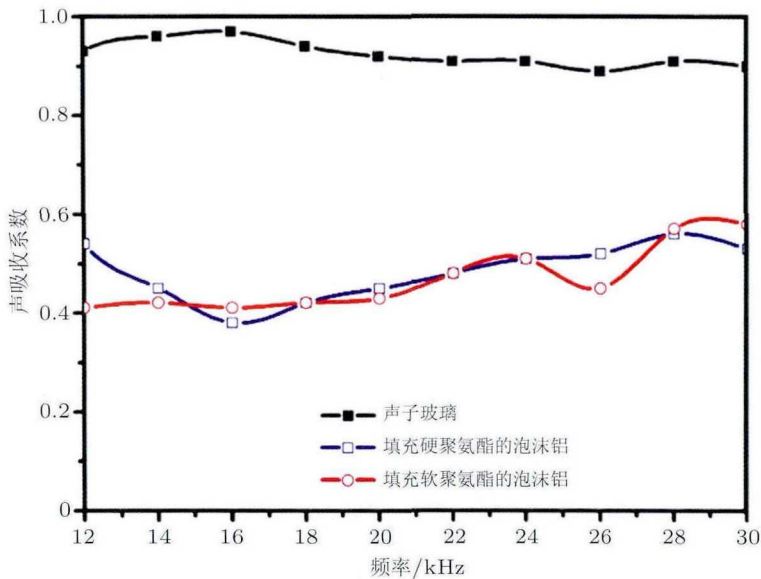


图 13

声子玻璃与填充单一聚氨酯泡沫铝基复合材料吸声系数对比 (Chen et al. 2014)

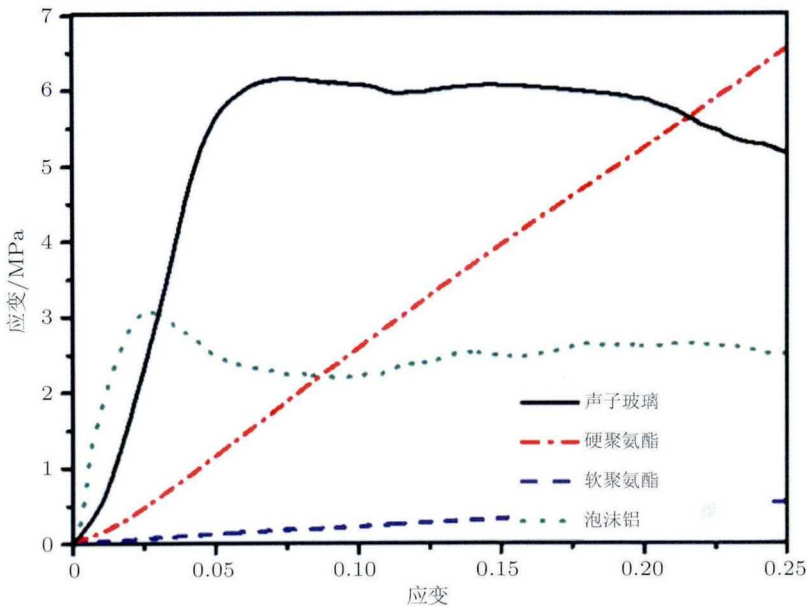


图 14

声子玻璃与组分材料的抗压性能对比 (Chen et al. 2014)

图 15 展示了不同静水压下 4.8 cm 厚声子玻璃的宽频强吸声效果, 而相同厚度的现有水下吸声材料并不具备这种性能。

## 5 水下吸声材料未来发展方向

### 5.1 薄膜型声学超材料

Yang 等 (2008) 提出了一种简单的薄膜型声学超材料模型, 该模型是由张紧的薄膜与附加质量块构成的微结构周期性排列构成, 其边界由刚性框架固定, 理论计算及实验表明, 在前两阶振型之间存在某个振动频率, 该频率处薄膜面内位移为零, 即有效质量密度为负值, 声波将在该频率处发生全反射. 将薄膜型声学超材料与赫姆霍兹共鸣腔相结合, 也可以设计出具有双负特性的声学超材料. 基于薄膜型声学超材料的结构构型, Mei 等 (2012) 在薄膜上覆盖有对称的刚性薄板, 设计了可以在低频范围 (100~1000 Hz) 内有效吸收声波的超材料, 其对应的低频声波波长比薄膜厚度大 3 个数量级. 进一步的理论计算表明, 刚性薄板的摆动使薄膜周边产生较大的弹性弯曲能量密度, 这种振动形式能够有效降低耦合辐射, 使薄膜整体能量密度比入射波能量密度大 2~3 个数量级, 形成一种空腔状态, 实现宽频吸声. 随后, Sheng 等利用杂化态薄膜声学超材料设计了一种声学超表面 (Ma et al. 2014), 它通过阻抗匹配实现在某一频

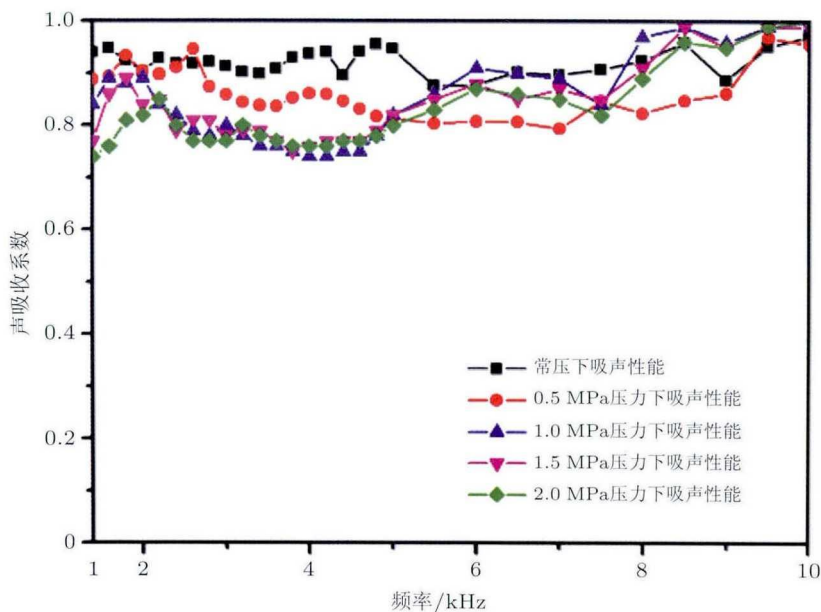


图 15

声子玻璃在不同静水压下的吸声性能 (Chen et al. 2014)

率处对声波的完美吸收, 且该吸收频率可调. 与三组分声学超材料相比, 薄膜型声学超材料能够以更小的材料尺度控制低频声波, 且结构形式更为简单, 适用于制备低频吸声材料, 但目前大多数的薄膜类吸声超材料都是基于空气介质. 随着水声换能器技术的发展, 如何将薄膜声学超材料引入水下吸声材料, 实现小尺度对低频声波的有效吸收是未来重要的发展方向.

## 5.2 声学超级吸收体

随着声学超材料的发展, 其内涵得到进一步拓展, 涵盖了各向异性材料. 基于坐标变换, 通过类比于宇宙黑洞与电磁波吸收体, 研究者设计了一种二维圆柱形超级吸收体, 它通过圆柱壳层引导声波螺旋式地传播到中间腔体, 不产生背散射, 在宽频范围内实现对声波的强吸收 (Climente et al. 2012). 然而, 受限于制备技术以及实验技术的局限性, 仅在数值计算上实现了超级吸收体. 超级吸收体可以在宽频范围内实现声波强吸收, 如何基于坐标变换将超级吸收体引入水下吸声材料, 实现对声波的高效吸收也是未来重要的发展方向.

## 6 结论

水下吸声材料研究走过了近百年的研究历程, 从中我们可以看出, 大的技术进步

总是伴随着原理性的突破而产生. 传统水下吸声材料基本上是根据高分子聚合物的分子内摩擦机制和共振声腔原理而设计的, 目前仍然是世界上大多数潜艇消声覆盖层采用的材料. 随着局域共振理论和声学超材料概念的提出, 近年发展出了一系列新型水下吸声材料, 代表着未来水下吸声材料的发展方向. 然而, 新型水下吸声材料步入工程化应用, 仍然有很长的路要走, 面临着诸多实际工程技术问题需要解决. 新概念、新原理的提出固然重要, 在材料工程化道路上努力坚持, 解决实际工程问题, 更为难能可贵. 只有这样, 才能让科学创新思想服务于社会需求.

致谢 国家自然科学基金项目 (11202211, 11602269) 和中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) (XDB22040301) 资助.

## 参考文献

- 白国锋. 2003. 水下消声覆盖层吸声机理研究. [硕士论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学 (Bai G F. 2003. Research of the absorbing mechanism of the underwater anechoic coatings. [Master Thesis]. Haerbin: Harerbin Engineering University).
- 蔡俊, 李亚红, 蔡伟民. 2007. PZT/CB/PVC 压电导电高分子复合材料的吸声机理. 高分子材料科学与工程, **23**: 215-218 (Cai J, Li Y H, Cai W M. 2007. Study on acoustic absorption mechanism of piezoelectric and electrical conductive polymeric composite PZT/CB/PVC. *Polymer Materials Science And Engerning*, **23**: 215-218).
- 陈建平. 2007. 消声瓦声学性能计算方法研究. 噪声与振动控制, **4**: 123-126 (Chen J P. 2007. Study on the computation method of anechoic tile acoustical characteristic. *Noise and Vibration Control*, **4**: 123-126).
- 陈毅, 刘晓宁, 向平, 胡更开. 2016. 五模材料及其水声调控研究. 力学进展, **46**: 201609 (Chen Y, Liu X N, Xiang P, Hu G K. 2016. Pentamode material for underwater acoustic wave control. *Advances in Mechanics*, **46**: 201609).
- 陈月辉. 2004. 声学功能橡胶. 特种橡胶制品, **25**: 55-62 (Chen Y H. 2004. Acoustics functional rubber. *Special Purpose Rubber Products*, **25**: 55-62).
- 傅明源, 孙酣经. 1994. 聚氨酯弹性体及其应用. 北京: 化学工业出版社 (Fu M Y, Sun H J. 1994. Polyurethane Elastomers and Application. Beijing: Chemical Industry Press).
- 高玲, 尚福亮. 2007. 吸声材料的研究与应用. 化工时刊, **21**: 63-69 (Gao L, Shang F L. 2007. Development and applications of sound-absorbing materials. *Chemical Industry Times*, **21**: 63-69).
- 顾金海, 叶学千. 1981. 水声学基础. 北京: 国防工业出版社 (Gu J H, Ye X Q. 1981. Underwater Acoustics Foundation. Beijing: National Defense Industry Press).
- 何世平, 汤渭霖, 何琳, 汤智胤. 2006. 变截面圆柱形空腔覆盖层吸声系数的二维近似解. 船舶力学, **10**: 120-127 (He S P, Tang W L, He L, Tang Z Y. 2006. Analysis of acoustic characteristics of anechoic coating containing varying sectional cylindrical cavity. *Journal of Ship Mechanics*, **10**: 120-127).
- 刘颖. 2002. 冲击载荷作用下含液饱和和多孔介质中应力波传播问题的研究. [博士论文]. 大连: 大连理工大学. (Liu Y. 2002. Stress wave propagation in fluid-saturated porous media under impact loading. [PhD Thesis]. Dalian: Dalian University of Technology).
- 马大猷. 2004. 现代声学理论基础. 北京: 科学出版社, 241-245 (Ma D Y. 2004. Modern Acoustic Theory

- Foundation. Beijing: Science Press, 241-245).
- 缪旭弘, 王振全. 2005. 舰艇水下噪声控制技术现状及发展对策//第十届船舶水下噪声学术讨论会 (Miao X H, Wang Z Q. 2005. Ship underwater noise control technology present situation and development countermeasures//Proceedings of the 10th Symposium on Ship Underwater Noise).
- 谭红波, 赵洪, 徐海亭. 2003. 有限元法分析空腔周期分布黏弹性层的声特性. 声学学报, **28**: 277-282 (Tan H B, Zhao H, Xu H T. 2003. Sound characteristics of the viscoelastic layer containing Periodic cavities by the finite element method. *Acta Acustica*, **28**: 277-282).
- 汤渭霖, 何世平, 范军. 2005. 含圆柱形空腔吸声覆盖层的二维理论. 声学学报, **30**: 289-295 (Tang W L, He S P, Fan J. 2005. Two-dimensional model for acoustic absorption of viscoelastic coating containing cylindrical holes. *Acta Acustica*, **30**: 289-295).
- 唐劲松, 张春华. 1999. 水声工程的新进展——欧洲 UDT 99 观感. 应用声学, **18**: 5-10 (Tang J S, Zhang C H. 1999. Development in underwater acoustic engineering—a survey of UDT Europe'99. *Applied Acoustics*, **18**: 5-10).
- 汪越胜. 2006. 声带隙功能材料的科学问题及力学思考. 固体力学若干新进展//第一届全国固体力学青年学者研讨会论文集, 北京: 清华大学出版社, 323-342 (Wang Y S. 2006. Scientific problems and mechanical thinking of acoustic band gap material. Some new progress in solid mechanics//Proceedings of the first national seminar for young scholars of solid mechanics. Beijing: Tsinghua University Press, 323-342).
- 王光荣, 游蕾. 2001. 潜艇隐身衣——消声瓦. 现代舰船, **1**: 24-25 (Wang G R, You L. 2001. Submarine invisibility cloak—anechoic tile. *Modern Ships*, **1**: 24-25).
- 王仁乾, 马黎黎. 2004. 吸声材料的物理参数对消声瓦吸声性能的影响. 哈尔滨工程大学学报, **25**: 288-294. (Wang R Q, Ma L L. 2004. Effects of physical parameters of the absorption material on absorption capability of anechoic tiles. *Journal of Harbin Engineering University*, **25**: 288-294).
- 王晓林. 2007. 金属多孔材料吸声板的优化模型. 声学学报, **32**: 116-121 (Wang X L. 2007. An optimized model for porous metal sound absorbers. *Acta Acustica*, **32**: 116-121).
- 温激鸿, 王刚, 刘耀宗, 郁殿龙. 2005. 基于集中质量法的一维声子晶体弹性波带隙计算. 物理学报, **53**: 3384-3388 (Wen J H, Wang G, Liu Y Z, Yu D L. 2005. Lumped-mass method on calculation of elastic band gaps of one-dimensional phononic crystals. *Acta Physica Sinica*, **53**: 3384-3388).
- 吴福根, 刘有延. 2002. 二维周期性复合介质中声波带隙结构及其缺陷态. 物理学报, **51**: 1434-1438 (Wu F G, Liu Y Y. 2002. Acoustic band gaps and defect states in two-dimensional composite materials. *Acta Physica Sinica*, **51**: 1434-1438).
- 杨雪, 王源升, 余红伟. 2007. 多层高分子复合结构斜入射声波吸声性能. 复合材料学报, **23**: 21-28 (Yang X, Wang Y S, Yu H W. 2007. Sound absorption properties of multilayered polymer composites for oblique incidence. *Acta Materiae Compositae Sinica*, **23**: 21-28).
- 姚耀中, 林立. 2007. 潜艇机械噪声控制技术综述. 舰船科学技术, **29**: 21-26 (Yao Y Z, Lin L. 2007. A review of control of mechanical noise for submarines. *Ship Science and Technology*, **29**: 21-26).
- 张海澜. 2007. 理论声学. 北京: 高等教育出版社, 199-201 (Zhang H L. 2007. Theoretical Acoustics. Beijing: China Higher Education Press, 199-201).
- 张文毓. 2010. 国外消声瓦的研究与应用进展. 船舶, **21**: 1-4 (Zhang W Y. 2010. Overseas research and application of the silence tile. *Ship and Boat*, **21**: 1-4).
- 赵敏兰, 朱蓓丽. 1996. 用等效参数法研究含球形空腔弹性体的吸声性能. 噪声与振动控制, **5**: 11-14 (Zhao M L, Zhu B L. 1996. Acoustic properties analysis of elasticity with a spherical cavity using equivalent parametric method. *Noise and Vibration Control*, **5**: 11-14).



- 周成飞. 2005. 聚氨酯水声材料研究进展. 聚氨酯工业, **19**: 1-4 (Zhou C F. 2005. Recent development in the underwater acoustic materials of polyurethane. *Polyurethane Industry*, **19**: 1-4).
- 周洪, 黄光速, 陈喜荣, 何显儒. 2004. 高分子吸声材料. 化学进展, **16**: 450-455 (Zhou H, Huang G S, Chen X R, He X R. 2004. Advances in sound absorption polymers. *Progress in Chemistry*, **16**: 450-455).
- 周萧明, 蔡小兵, 胡更开. 2007. 左手材料设计及透明现象研究进展. 力学进展, **37**: 517-536 (Zhou X M, Cai X B, Hu G K. 2007. Advances in left-handed material design and transparency phenomenon. *Advances in Mechanics*, **37**: 517-536).
- 朱世成, 钟爱升. 2006. 橡胶材料和结构在低频耐压吸声上的一些认识与设想. 橡塑资源利用, **1**: 10-18 (Zhu S C, Zhong A S. 2006. Some understanding and ideas on sound absorption and proof pressure under low frequency of rubber material and structure. *Rubber and Plastics Resources Utilization*, **1**: 10-18).
- Achenbach J D, Kitahara M. 1986. Reflection and transmission of an obliquely incident wave by an array of spherical cavities. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **80**: 1209-1214.
- Achenbach J D, Kitahara M. 1987. Harmonic waves in a solid with a periodic distribution of spherical cavities. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **81**: 595-598.
- Arenas J P, Crocker M J. 2010. Recent trends in porous sound-absorbing materials. *Sound & vibration*, **44**: 12-18.
- Audoly C, Dumery G. 1990. Modeling of compliant tube underwater reflectors. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **87**: 1841-1846.
- Boulanger P, Hayes M. 1997. Wave propagation in sheared rubber. *Acta mechanica*, **122**: 75-87.
- Brigham G A, Libuha J J, Radlinski R P. 1977. Analysis of scattering from large planar gratings of compliant cylindrical shells. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **61**: 48-59.
- Burke J, Twersky V. 1966. On scattering of waves by the infinite grating of elliptic cylinders. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on Antenna & Propagation*, **14**: 465-480.
- Cai L W, Williams J H. 1999. Large-scale multiple scattering problems. *Ultrasonics*, **37**: 453-462.
- Cao Y, Hou Z, Liu Y. 2004. Finite difference time domain method for band-structure calculations of two-dimensional phononic crystals. *Solid State Communications*, **132**: 539-543.
- Cervenka P, Challande P. 1991. A new efficient algorithm to compute the exact reflection and transmission factors for plane waves in layered absorbing media (liquids and solids). *The Journal of the Acoustical Society of America*, **89**: 1579-1589.
- Chen G P, He D P, Shu G J. 2001. Underwater sound absorption property of porous aluminum. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **179**: 191-194.
- Chen M, Jiang H, Feng Y, Wang Y. 2014. Investigation of locally resonant absorption and factors affecting the absorption band of a phononic glass. *Applied Physics A*, **117**: 2067-2072.
- Chen M, Meng D, Zhang H, Jiang H, Wang Y. 2016. Resonance-coupling effect on broad band gap formation in locally resonant sonic metamaterials. *Wave Motion*, **63**: 111-119.
- Climente A, Torrent D, Sanchez-Dehesa J. 2012. Omnidirectional broadband acoustic absorber based on metamaterials. *Applied Physics Letters*, **100**: 144103-144103-4.
- Ding C L, Zhao X D, Hao L M, Zhu W R. 2011. Acoustic metamaterial with split hollow spheres. *Acta Physica Sinica*, **4**: 044301.
- Dowling J P. 1992. Sonic band structure in fluids with periodic density variations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **91**: 2539-2543.
- Easwaran V, Munjal M L. 1993. Analysis of reflection characteristics of a normal incidence plane wave on



- resonant sound absorbers: A finite element approach. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **93**: 1308-1318.
- Emery P A. 1995. New cladding material. UDT, 527-531.
- Esquivel-Sirvent R, Coccoletzi G H. 1994. Band structure for the propagation of elastic waves in superlattices. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **95**: 86-90.
- Gaunaud G C, Callen E, Barlow J. 1984. Pressure effects on the dynamic effective properties of resonating perforated elastomers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **76**: 173-177.
- Gaunaud G C, Überall H. 1978. Theory of resonant scattering from spherical cavities in elastic and viscoelastic media. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **63**: 1699-1712.
- Gaunaud G C. 1977. Sonar cross section of a coated hollow cylinder in water. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **61**: 360-368.
- Gaunaud G C. 1989. Elastic and acoustic resonance wave scattering. *Applied Mechanics Reviews*, **42**: 143-192.
- Gaunaud G. 1977. One-dimensional model for acoustic absorption in a viscoelastic medium containing short cylindrical cavities. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **62**: 298-307.
- Gaunaud G. 1985. Comments on absorption mechanisms for waterborne sound in Alberich anechoic layers. *Ultrasonics*, **23**: 90-91.
- Goffaux C, Sánchez-Dehesa J, Lambin P. 2004. Comparison of the sound attenuation efficiency of locally resonant materials and elastic band-gap structures. *Physical Review B*, **70**: 1-6.
- Goffaux C, Sánchez-Dehesa J, Yeyati A L. 2002. Evidence of fano-like interference phenomena in locally resonant materials. *Physical Review Letters*, **88**: 1-4.
- Guenneau S, Movchan A, Pétursson G, Ramakrishna S A. 2007. Acoustic metamaterials for sound focusing and confinement. *New Journal of physics*, **9**: 1-18.
- Han F, Seiffert G, Zhao Y, Gibbs B. 2003. Acoustic absorption behaviour of an open-celled aluminium foam. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **36**: 294.
- Heinemann M, Larraza A, Smith K B. 2003. Experimental studies of applications of time-reversal acoustics to noncoherent underwater communications. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **113**: 3111-3116.
- Hinders M K, Rhodes B A, Fang T. M. 1995. Particle-loaded composites for acoustic anechoic coatings. *Journal of Sound and Vibration*, **185**: 219-246.
- Hladky-Hennion A C, Decarpigny J N. 1991. Analysis of the scattering of a plane acoustic wave by a doubly periodic structure using the finite element method: Application to Alberich anechoic coatings. *Journal of the Acoustical Society of America*, **90**: 3556-3367.
- Hsu J C, Wu T T. 2007. Lamb waves in binary locally resonant phononic plates with two-dimensional lattices. *Applied Physics Letters*, **90**: 1-3.
- Huang H H, Sun C T. 2012. Anomalous wave propagation in a one-dimensional acoustic metamaterial having simultaneously negative mass density and Young's modulus. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **132**: 2887-2895.
- Jensen J S. 2003. Phononic band gaps and vibrations in one-and two-dimensional mass-spring structures. *Journal of Sound and Vibration*, **266**: 1053-1078.
- Jiang H, Wang Y, Zhang M, Hu Y, Lan D, Zhang Y, Wei B. 2009. Locally resonant phononic woodpile: A wide band anomalous underwater acoustic absorbing material. *Applied Physics Letters*, **95**: 104101.

- Jiang H, Wang Y. 2012. Phononic glass: a robust acoustic-absorption material. *The Journal of the Acoustical Society of America* **132**: 694-699.
- Jiang H, Zhang M, Wang Y, Hu Y, Lan D, Wei B. 2009. A wide band strong acoustic absorption in a locally network anechoic coating. *Chinese Physics Letters*, **26**: 1-4.
- Jiang H, Wang Y, Zhang M, Hu Y, Lan D, Wu Q, Lu H. 2010. Wide-band underwater acoustic absorption based on locally resonant unit and interpenetrating network structure. *Chinese Physics B*, **19**: 1-6.
- Kafesaki M, Economou E N. 1999. Multiple-scattering theory for three-dimensional periodic acoustic composites. *Physical Review B*, **60**: 11993-12001.
- Khelif A, Achaoui Y, Benchabane S, Laude V, Aoubiza B. 2010. Locally resonant surface acoustic wave band gaps in a two-dimensional phononic crystal of pillars on a surface. *Physical Review B*, **81**: 1-7.
- Khelif A, Aoubiza B, Mohammadi S, Adibi A, Laude V. 2006. Complete band gaps in two-dimensional phononic crystal slabs. *Physical Review E*, **74**: 1-5.
- Kishi H, Kuwata M, Matsuda S, Asami T, Murakami A. 2004. Damping properties of thermoplastic-elastomer interleaved carbon fiber-reinforced epoxy composites. *Composites Science and Technology*, **64**: 2517-2523.
- Kushwaha M S, Halevi P, Dobrzynski L, Djafari-Rouhani B. 1993. Acoustic band structure of periodic elastic composites. *Physical Review Letters*, **71**: 2022.
- Lai Y, Wu Y, Sheng P, Zhang Z Q. 2011. Hybrid elastic solids. *Nature materials*, **10**: 620-624.
- Lakhtakia A, Varadan V V, Varadan V K. 1986. Reflection characteristics of an elastic slab containing a periodic array of elastic cylinders: SH wave analysis. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **80**: 311-316.
- Lakhtakia A, Varadan V V, Varadan V K. 1988. Reflection characteristics of an elastic slab containing a periodic array of circular elastic cylinders: P and SV wave analysis. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **83**: 1267-1275.
- Lamb H. 1904. On group-velocity. *Proc. London Math. Soc.*, **S2-1**: 473-479.
- Langlet P, Hladky-Hennion A C, Decarpigny J N. 1995. Analysis of the propagation of plane acoustic waves in passive periodic materials using the finite element method. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **98**: 2792-2800.
- Lee Y Y, Lee E W M, Ng C F. 2005. Sound absorption of a finite flexible micro-perforated panel backed by an air cavity. *Journal of Sound and Vibration*, **287**: 227-243.
- Lefebvre L P, Banhart J, Dunand D. 2008. Porous metals and metallic foams: current status and recent developments. *Advanced Engineering Materials*, **10**: 775-787.
- Liu X N, Hu G K, Huang G L, Sun C T. 2011. An elastic metamaterial with simultaneously negative mass density and bulk modulus. *Applied Physics Letters*, **98**: 1-3.
- Liu Y, Yu, Zhao H, Wen J, Wen X. 2008. Theoretical study of two-dimensional phononic crystals with viscoelasticity based on fractional derivative models. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **41**: 1-7.
- Liu Z, Zhang X, Mao Y, Zhu Y Y, Yang Z, Chan C T, Shen P. 2000. Locally resonant sonic materials. *Science*, **289**: 1734-1736.
- Lu T J, Hess A, Ashby M F. 1999. Sound absorption in metallic foams. *Journal of Applied Physics*, **85**: 7528-7539.
- Ma G, Yang M, Xiao S, Yang Z, Shen P. 2014. Acoustic metasurface with hybrid resonances. *Nature Materials*, **13**: 873.

- Martinezsala R, Sancho J, Sánchez J V, Gomez V, Llinares J, Meseguer F. 1995. Sound-attenuation by sculpture. *Nature*, **378**: 241.
- Mei J, Liu Z, Shi J, Tian D. 2003. Theory for elastic wave scattering by a two-dimensional periodical array of cylinders: An ideal approach for band-structure calculations. *Physical Review B*, **67**: 1-7.
- Mei J, Ma G, Yang M, Weng W, Shen P. 2012. Dark acoustic metamaterials as super absorbers for low-frequency sound. *Nature Communications*, **3**: 132-136.
- Meng H, Wen J, Zhao H, Wen X. 2012. Optimization of locally resonant acoustic metamaterials on underwater sound absorption characteristics. *Journal of Sound and Vibration*, **331**: 4406-4416.
- Mikata Y, Achenbach J D. 1988. Interaction of harmonic waves with a periodic array of inclined cracks. *Wave Motion*, **10**: 59-72.
- Modinos A, Stefanou N, Psarobas I E, Yannopoulos V. 2001. On wave propagation in inhomogeneous systems. *Physica B: Condensed Matter*, **296**: 167-173.
- Odell D, Hertel K, Nelson C. 2002. New acoustic systems for AUV tracking, communications, and noise measurements at NSWCCD-ARD, lake pend oreille, Idaho. *Oceans Conference Record (IEEE)*, **1**: 266-271.
- Oh J H, Kim Y J, Kim Y Y. 2013. Wave attenuation and dissipation mechanisms in viscoelastic phononic crystals. *Journal of Applied Physics*, **113**: 1-3.
- Oudich M, Assouar M B, Hou Z. 2010. Propagation of acoustic waves and waveguiding in a two-dimensional locally resonant phononic crystal plate. *Applied Physics Letters*, **97**: 1-3.
- Pedersen P C, Tretiak O, He P. 1982. Impedance-matching properties of an inhomogeneous matching layer with continuously changing acoustic impedance. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **72**: 327-336.
- Pennec Y, Djafari-Rouhani B, Larabi H, Vasseur J O, Hladky-Hennion A C. 2008. Low-frequency gaps in a phononic crystal constituted of cylindrical dots deposited on a thin homogeneous plate. *Physical Review B*, **78**: 1-8.
- Philip B, Abraham J K, Varadan V K, Natarajan V, Jayakuman V G. 2004. Passive underwater acoustic damping materials with Rho-C rubber-carbon fiber and molecular sieves. *Smart Materials and Structures*, **13**: 99-104.
- Pocklington H C. 1905. Growth of a wave-group when the group-velocity is negative. *Nature*, **71**: 607-608.
- Psarobas I E, Stefanou N, Modinos A. 2000. Scattering of elastic waves by periodic arrays of spherical bodies. *Physical Review B*, **62**: 1-19.
- Radlinski R P, Simon M M. 1982. Scattering by multiple gratings of compliant tubes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **72**: 607-614.
- Radlinski R P. 1989. Scattering from multiple gratings of compliant tubes in a viscoelastic layer. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **85**: 2301-2310.
- Sainidou R, Djafari-Rouhani B, Pennec Y, Vasseur J O. 2006. Locally resonant phononic crystals made of hollow spheres or cylinders. *Physical Review B*, **73**: 1-7.
- Sergeeva L M, Skiba S I, Karabanova L V. 1996. Filler effect on formation and properties of interpenetrating polymer networks based on polyurethane and polyesteracrylate. *Polymer International*, **39**: 317-325.
- Sheng P, Zhang X, Liu Z, Chan C. 2003. Locally resonant sonic materials. *Physica B: Condensed Matter*, **338**: 201-205.
- Sigalas M M, Economou E N. 1992. Elastic and acoustic wave band structure. *Journal of Sound and Vibration*, **158**: 377-382.

- Sigalas M M, Soukoulis CM. 1995. Elastic-wave propagation through disordered and/or absorptive layered systems. *Physical Review B*, **51**: 2780-2789.
- Sigalas M M. 1997. Elastic wave band gaps and defect states in two-dimensional composites. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **101**: 1256-1261.
- Sigalas M M. 1998. Defect states of acoustic waves in a two-dimensional lattice of solid cylinders. *Journal of Applied Physics*, **84**: 3026-3030.
- Veselago V G, Narimanov E E. 2006. The left hand of brightness: past, present and future of negative index materials. *Nature Materials*, **5**: 759-762.
- Vovk I V, Grinchenko V T, Kononuchenko L A. 1976. Diffraction of a sound-wave by a plane grating formed by hollow elastic bars. *Soviet Physics Acoustics-ussr*, **22**: 113-115.
- Wang C N, Tse C C, Chen S K. 2007. On analysis of passive underwater acoustic damping materials. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, **30**: 251-257.
- Wang G, Wen J, Liu Y, Wen X. 2004. Lumped-mass method for the study of band structure in two-dimensional phononic crystals. *Physical Review B*, **69**: 1-6.
- Wang G, Wen X, Wen J, Shao L, Liu Y. 2004. Two-dimensional locally resonant phononic crystals with binary structures. *Physical Review Letters*, **93**: 1-4.
- Wang X. 2007. Porous metal absorbers for underwater sound. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **122**: 2626-2635.
- Wen J, Zhao H, Lv L, Yuan B, Wang G, Wen X. 2011. Effects of locally resonant modes on underwater sound absorption in viscoelastic materials. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **130**: 1201-1208.
- Wu T T, Huang Z G, Tsai T C, Wu T C. 2008. Evidence of complete band gap and resonances in a plate with periodic stubbed surface. *Applied Physics Letters*, **93**: 1-3.
- Yang Z, Mei J, Yang M, Chan N H, Shen P. 2008. Membrane-type acoustic metamaterial with negative dynamic mass. *Physical Review letters*, **101**: 1-4.
- Yilmaz C, Hulbert G M, Kikuchi N. 2007. Phononic band gaps induced by inertial amplification in periodic media. *Physical Review B*, **76**: 1-9.
- Zhang S, Yin L, Fang N. 2009. Focusing ultrasound with an acoustic metamaterial network. *Physical Review letters*, **102**: 1-4.
- Zhao H G, Liu Y Z, Wen J H, Yu D, Wang G, Wen X. 2006. Sound absorption of locally resonant sonic materials. *Chinese Physics Letters*, **23**: 2132-2134.
- Zhao H, Liu Y, Yu D, Wen J, Wen X. 2007. Absorptive properties of three-dimensional phononic crystal. *Journal of sound and vibration*, **303**: 185-194.
- Zhao H, Wen J, Yang H, Lv L, Wen X. 2014. Backing effects on the underwater acoustic absorption of a viscoelastic slab with locally resonant scatterers. *Applied Acoustics*, **76**: 48-51.
- Zhao H, Wen J, Yu D, Wen X. 2010. Low-frequency acoustic absorption of localized resonances: Experiment and theory. *Journal of Applied Physics*, **107**: 1-5.

(责任编辑: 胡更开)

## Review on underwater sound absorption materials and mechanisms

WANG Yuren<sup>1,†</sup>    MIAO Xuhong<sup>2,\*</sup>    JIANG Heng<sup>1</sup>    CHEN Meng<sup>1</sup>  
LIU Yu<sup>1</sup>    XU Wenshuai<sup>1</sup>    MENG Dan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100190, China

<sup>2</sup> Naval Academy of Armament, Beijing 100016, China

**Abstract** As China accelerates the implementation of the marine power strategy, the demand for advanced underwater sound-absorbing materials has become increasingly urgent. Unlike air absorption, the high hydrostatic pressure and complex marine environment impose more stringent requirements regarding underwater sound-absorbing materials. The essence of the sound absorption problem is how to efficiently transform elastic energy into heat or other forms of energy. This paper reviews the traditional underwater sound absorbing materials based on both the intramolecular friction and the energy dissipation mechanisms. The main problem of traditional underwater sound-absorbing material is attributable to its poor sound absorption performance under low frequency and high hydrostatic pressure. On the one hand, this is because the underwater sound-absorbing material is of limited thickness. Besides, due to the limitation of the mass density law, it cannot effectively absorb the low-frequency sound waves from the water. On the other hand, elastic material, such as polymer, becomes “hard” under high hydrostatic pressure, thus the conversion efficiency of acoustic elastic energy is greatly reduced. With the development of local resonance theory and the concept of metamaterials, a series of new underwater sound absorbing materials have been produced, which provide new ways to solve the problems encountered in developing underwater sound absorbing materials. The local resonance theory states that a small-scale structure can control the spread of long sound waves. Therefore, it can solve the problem of sound absorption at low-frequencies. This paper focuses on the theory of local resonance, the development of new sonar wood and phonon glass, and other novel underwater sound-

---

Received: 25 February 2016; accepted: 19 September 2016; online: 11 November 2016

† E-mail: yurenwang@imech.ac.cn

\* E-mail: miaoxhlz@sina.com

Cite as: Wang Y R, Miao X H, Jiang H, Chen M, Liu Y, Xu W S, Meng D. Review on underwater sound absorption materials and mechanisms. *Advances in Mechanics*, 2017, 47: 201703

© 2017 *Advances in Mechanics*.

absorbing materials. Based on the local resonance theory, the phonon glass material can improve the compression performance by introducing the porous metal skeleton structure, and solve the problem of poor sound absorption performance under high hydrostatic pressure. At the end of this paper, the future development of underwater sound-absorbing materials is explored.

**Keywords** underwater sound absorption materials, underwater sound absorbing, local resonance, phononic glass



王育人, 中国科学院力学研究所研究员、所长特别助理, 学位委员会主任、中国科学院微重力重点实验室主任, 哈尔滨工程大学超轻合金与表面教育部重点实验室学术委员会委员. 主要研究方向为微重力材料科学、声波超材料及水下吸声材料, 先后承担了科技部 973 计划项目、国家自然科学基金项目、中国科学院重大装备项目课题、中国科学院方向性项目课题等.