



水声超材料研究进展

张燕妮^{1*}, 陈克安¹, 郝夏影^{2,3}, 程营⁴

1. 西北工业大学航海学院, 海洋声学信息感知工信部重点实验室, 西安 710072;

2. 中国船舶科学研究中心, 船舶振动噪声重点实验室, 无锡 214082;

3. 江苏省绿色船舶技术重点实验室, 无锡 214082;

4. 南京大学物理学院, 近代声学教育部重点实验室, 南京 210093

* 联系人, E-mail: yanni.zhang@nwpu.edu.cn

2019-10-31 收稿, 2020-02-03 修回, 2020-02-05 接受, 2020-02-10 网络版发表

国家自然科学基金(11874303, 11504324)、陕西省自然科学基金(2018JQ1001)、西安市科学技术协会青年人才托举计划、中央高校基本科研业务费专项(3102019HHZY030024)和高等学校学科创新引智计划(B18041)资助

摘要 水声材料的应用是潜艇等水下航行器实现声隐身及提升声探测性能的关键所在. 近年来, 随着声学超材料的蓬勃发展, 各种类型的水声超材料也被提出. 相比空气声, 水中声波波长更长, 传播损耗却小得多, 故水声比同频率空气声更难以控制; 此外, 水介质的密度和声阻抗比空气介质大得多, 常规金属不能再被视为刚性而变成弹性体, 且水对结构的流体负载不能忽略, 故水声超材料的设计和性能预测更为复杂. 本文综述了近年来水声超材料的发展历程, 主要针对吸收型、去耦型、聚焦型三类与潜艇声隐身和声探测密切相关的水声超材料, 对其分类、基本特性、物理机理、研究动态等进行了详尽归纳和总结, 并对其发展中面临的难题和趋势进行了探讨和展望. 相比传统材料, 水声超材料展现出众多超常声学特性, 但仍存在低频宽带声波调控能力有限、不能有效兼顾大静压等环境要素、加工工艺不足等问题. 未来研究中应着力克服上述不足, 朝着低频宽带、全向、大平面尺度、亚波长厚度、轻量化、大耐压及多功能复合、环境适应性等方向发展, 以更好地实现工程化应用.

关键词 水声超材料, 声隐身, 去耦, 吸声, 声聚焦, 减振降噪

声学性能是潜艇等水下航行器最重要的指标之一, 主要包含声隐身和声探测两个方面. 声隐身的目的: 一是降低其辐射噪声级, 以减小被敌方被动声呐发现的概率及其作用距离; 二是降低其声目标强度, 以增加敌方主动声呐的探测距离. 声探测的关键在于提高潜艇声呐系统的性能或其信噪比, 其中最主要的任务是增加水听器阵列的增益和减小近场自噪声. 以上任务可借助在艇壳表面敷设一层或多层声学材料(或称声学覆盖层)来实现. 按照具体要实现的声功能, 这些水声材料可分为吸收型、去耦型、反声型、隔声型、透声型等.

水声材料包括的范围非常广泛, 包括金属、橡

胶、塑料、泡沫塑料、增强塑料等^[1], 可为天然均质材料, 也可根据需求或工作频率来加工定制. 其中, 吸收型水声材料通常由橡胶或聚氨酯等高分子材料组成, 用于增加舰艇结构表面吸收的声能量, 提高其隐蔽性^[2]. 去耦型水声材料通常为多层柔性材料, 如软橡胶敷设在航行器表面^[3], 在壳体与水之间造成阻抗失配, 来降低或阻断舰载设备振动向外的辐射噪声^[4]. 反声型水声材料一般用于声呐基阵结构的声障板, 其特性阻抗一般远大于海水(声硬障板)或远小于海水(声软障板)的特性阻抗^[5,6], 其主要作用是提高障板表面的声聚焦/反射能力, 从而提高声呐水听器的灵敏度. 隔声

引用格式: 张燕妮, 陈克安, 郝夏影, 等. 水声超材料研究进展. 科学通报, 2020, 65: 1396–1410

Zhang Y N, Chen K A, Hao X Y, et al. A review of underwater acoustic metamaterials (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 1396–1410, doi: [10.1360/TB-2019-0690](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0690)

型水声材料用于阻断舰艇内部噪声向外的传播。透声型水声材料则相反,要求材料有优良的水下透声性能,一般用于声呐罩透声窗^[7]。目前传统水声材料主要面临对低频声波的调控能力差、体积与重量较大,以及耐压性能差的问题。

声学超材料是一类具有很多常规天然材料所不具备的超常声学特性的人工复合结构。2000年, Liu等人^[8]提出局域共振声子晶体的概念,打破了传统声学结构遵循的质量密度定律,通过调控局域共振单元的有效质量和刚度控制其带隙宽度,将吸声频率降低两个数量级,实现了小尺寸对大波长的控制。自此,各种类型的声学超材料蓬勃涌现,从最初的三组分局域共振超材料到薄膜超材料^[9~11]、迷宫超材料^[12~15]、梯度指数超材料^[16~18]、仿生超材料^[19~21]、主动/被动复合超材料^[22~24],到近年引起广泛关注的声学黑洞超材料^[25~28]、拓扑超材料^[29~32]、非厄米超材料^[33~35]及石墨烯超材料^[36,37]等。但大部分研究集中在对空气声的调控,关于水声超材料及其声波调控的理论和实验研究相对较少,这主要是由于:(1)从水介质自身角度,一方面,水中声波波长更长,是同频率空气声波波长的近5倍,因此水声尤其是低频水声较同频率的空气声更难以控制;另一方面,声波在水中的损耗比空气中小得多,难以利用其损耗进行声波吸收或调控。(2)从水与结构耦合的角度,一方面,水介质的声阻抗相比空气介质的要大得多,常见金属(如钢)不能再被视为刚性而变成弹性体,其中除了纵波,还包含不同极化方向的剪切波;另一方面,水的密度大,水对结构的流体负载作用不能忽略^[18,38],因此增加了材料设计和性能预测的复杂度。(3)从实验角度,水声实验从场地到仪器也比空气声实验要复杂和昂贵许多。这些都不同程度制约了水声超材料的发展。

水声超材料的研究可追溯到20世纪90年代。1995年, Milton和Cherkaev^[39]首次提出弹性性质与液体相仿的五模材料(pentamode material, PM)。2008年, Norris^[40]基于变换声学提出基于五模材料的声隐身理论,为利用五模材料实现声波调控奠定了基础,也引起了各国研究者对五模材料本身及利用其进行声波控制的研究浪潮^[40~45]。五模材料具有固体形态、宽频等特点,被认为是水声环境中具有重要潜在应用价值的一类水声超材料^[45]。近年来,随着各国对海洋开发利用的步伐加快和制海权的争夺,对船舶海洋工程装备和材料提出了更高要求,水声超材料也受到越来越多研究者的重

视。Li和Chan^[46]通过水中放置的软橡胶球阵列,将双负介质由电磁学推广到声学领域,指出负的有效模量和密度分别来自同一结构的单极和偶极共振,并进一步指出双负介质所具有的一些奇异性质,如负折射率和亚波长声聚焦等。自此,各种具有负折射率的空气声^[47]和水声超材料蓬勃涌现^[48~51]。如Brunet等人^[50]利用随机散布在水基凝胶中的橡胶微珠,设计了一种具有负折射率的水声超材料,实验结果表明,这些微珠的Mie共振可产生负折射率。Hou等人^[52]利用水中周期穿孔黄铜板,将Fabry-Perot共振和Wood anomaly产生的透射增强现象从电磁波引入至声学范畴,并进行了水池实验验证。He等人^[53]指出,声波入射到水声透明环氧薄板阵列会产生显著的声反射增强,该增强与周期阵列产生的衍射无关,是由单个薄板Lamb波模态的共振激发产生。He等人^[30]通过有效控制环状声振子的耦合强度,将拓扑声子晶体引入水声调控范畴,构造受保护的赝自旋依赖的声传输,类比于量子自旋霍尔效应,来实现声波沿不同边界的传输。

水声超材料包含的类型众多,要实现的声调控功能各异,由于篇幅有限,本文主要聚焦被动水声超材料,对与潜艇隐身及其声呐水声探测功能密切相关的三类水声超材料,即吸收型水声超材料、去耦型水声超材料及水声聚焦超材料的发展动态进行回顾、总结和展望。

1 吸收型水声超材料

作为水声吸声材料,一方面要求特性阻抗与水相匹配以尽量减小表面处的反射,另一方面要求有较高的损耗因子使绝大部分入射声波能被有效吸收^[54]。传统水声吸声材料一般采用橡胶和聚氨酯类均质高分子聚合物。然而对均质材料的吸声来说,材料表面声反射系数与其损耗因子成正比^[55],即损耗因子越大,反射系数越大,与水的阻抗匹配越差,故阻抗匹配的要求与高损耗之间存在矛盾,因此须在均质材料内部引入特定声学结构,以保证与水阻抗匹配的同时增加材料对入射声波的衰减^[54]。目前吸声结构主要包括微粒填充型、孔腔谐振型、夹芯复合型、阻抗渐变型等^[54,56]。吸声机理包括黏弹性损耗吸声、散射吸声、波型转换吸声、谐振吸声等^[56]。目前,这些传统水下吸声材料主要面临两方面的问题,一是低频吸声能力差的问题。由于常见均匀水声材料(如金属、橡胶等)在小变形条件下属于线性材料范畴,其动力学响应函数线性正比于

时间变化率, 而其黏滞力则正比于响应函数随时间的变化率^[9], 因此材料耗散功率正比于响应函数随时间变化率的平方, 即正比于频率的平方^[9]. 故频率越低, 材料对入射声波的固有耗散越低, 吸声越微弱. 二是高静水压下吸声变差的问题. 这是由于一方面, 橡胶聚氨酯等高分子聚合物在大静水压力下会变“硬”, 使得声能对弹性能的转换效率大大降低^[56]; 另一方面, 目前广泛用于水下吸声材料并具有一定低频吸声性能的是含有各种声学空腔的橡胶材料, 随着静水压力的增加, 这些材料内部空腔将在水压下产生较大形变, 使其谐振峰往高频移动, 丧失低频吸声性能^[56]. 因此, 亟须开发耐水压、低频、宽带的新型水声吸声材料.

从吸声机理上看, 目前水声吸声超材料主要可分为局域共振型水声吸声超材料和非共振型水声吸声超材料.

1.1 局域共振水声吸声超材料

局域共振型超材料利用局域共振原理产生的低频带隙来实现低频共振吸声, 吸声频率比布拉格散射作

用的频率降低两个数量级. 国防科技大学Zhao等人^[57,58]首次将局域共振理论引入水声吸声材料的设计, 通过在黏弹性聚合物中填充软橡胶层包覆的金属核作为局域共振子, 观察到了局域共振频率处显著的水声吸声增强. 通过调节局域共振散射体的不同形状、偏心角等, 可调节局域共振频率的位置及该频率处的吸声带宽(图1(a)~(c))^[59,60]. 此外, 聚合物后加不同性质的背衬板可显著影响吸声效果. 如加钢背衬板可引入一个低频弹簧质量模态, 对应频率可低于局域共振频率. 其中, 钢背衬板整体等效为质量, 复合介质等效为弹簧, 该模态频率处吸声达到峰值, 钢板越厚, 该吸声峰越往低频移动^[61]. 考虑到含单一局域共振子的超材料带隙宽度过窄, 可通过多层不同局域共振频率的超材料叠加或采用单层具有多个尺寸(局域共振频率)的共振子来拓宽低频水声吸声频带^[62,63].

此外, 考虑到软橡胶层包覆的金属核作为单自由度局域共振子的局限性, Zhang等人^[64,65]提出将单个或周期排列的有限尺寸弹性薄板作为分布式散射体/多模态局域共振板, 敷设在含有钢背衬板的高阻尼柔性橡

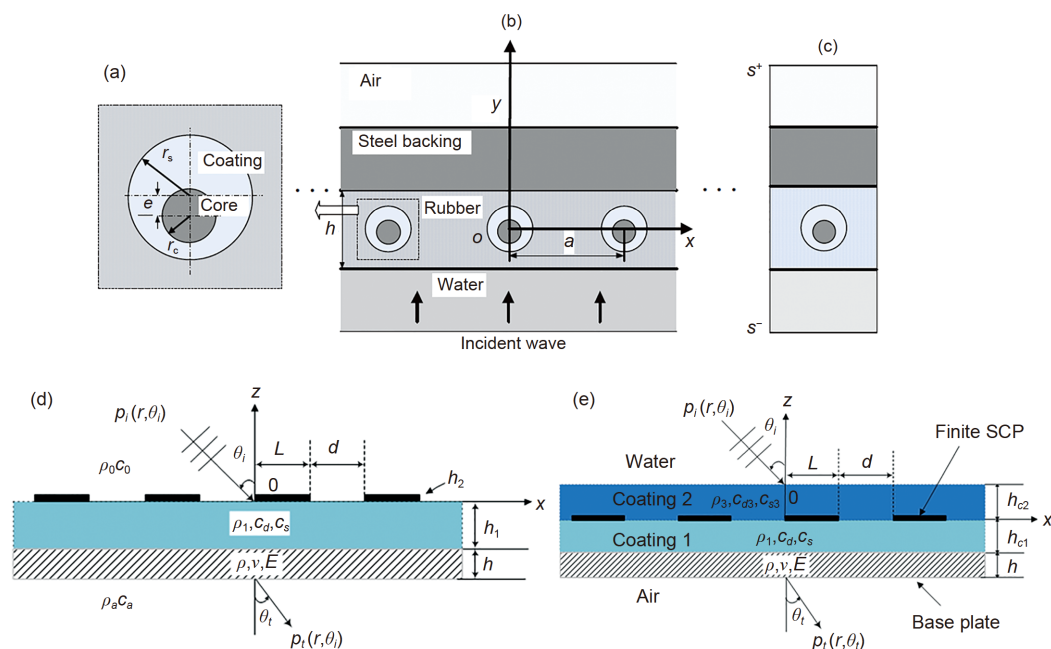


图1 (网络版彩色)局域共振水声吸声结构. (a) 局域共振水声吸声超材料单元^[60]; (b) 具有钢被衬的局域共振水声吸声超材料^[60]; (c) 具有钢被衬的局域共振水声吸声超材料单元^[60]; (d) 具有钢背衬的柔性去耦层湿表面敷设周期弹性薄板阵列^[65]. Copyright © 2015, Acoustic Society of America; (e) 周期弹性薄板阵列内嵌于具有钢背衬的两层软硬橡胶层之间^[66]. Copyright © 2017, Acoustic Society of America
Figure 1 (Color online) Locally resonant acoustic metamaterials for underwater absorption. (a) A unit cell of locally resonant sound absorption metamaterials^[60]; (b) locally resonant sound absorption metamaterials with steel backing^[60]; (c) a unit cell of locally resonant sound absorption metamaterials with steel backing^[60]; (d) attaching periodic elastic plate array to the water interface of the compliant rubber^[65]. Copyright © 2015, Acoustic Society of America; (e) embedding periodic elastic plate array into interface of a hard and a compliant rubber layer backed by a steel plate^[66]. Copyright © 2017, Acoustic Society of America

胶层湿表面(图1(d)). 利用钢背衬引起的质量弹簧模态的共振、有限尺寸薄板(周期阵列)对声波的(相干)绕射及附近多个局域模式的(相干)共振, 实现了多个低频频带水声吸声的增加. 此外, 当有限尺寸薄板嵌入两层不同性质弹性层之间(图1(e)), 复合介质内局域模态的种类和数量变得更为丰富, 除钢背衬引起的低频质量弹簧模态及内弹性层半波长处的纵波波导模态(垂向, 全局模态), 还包括各薄板附近与弯曲波有关的局域模态, 及上下两层弹性层内产生的垂向和水平法向的局域模态. 这些模态与薄板阵列产生的相干绕射波进行叠加或耦合, 可实现多个甚至宽频范围水声吸收的显著增强^[66]. 此外, Sharma等人^[67]研究了弹性层内同时包含周期性空腔(真空)和金属钢球填充物时的水声吸收, 仿真结果表明, 腔体的单极共振和金属球的偶极共振及钢背衬引起的质量弹簧共振的组合也可使吸声系数在宽频范围显著增加.

传统局域共振结构依靠调节多个单自由度局域共振模式的参数特征, 使其在多个共振频率处的模态产生叠加, 其带隙扩宽效果非常有限. 实现宽频强吸声一个可行方法是在局域共振声学超材料中引入复杂的晶格类型, 即在一个晶格基元中引入多个局域共振子, 通过各个振子之间的强耦合作用产生新的共振形式, 进而用于拓宽带隙, 实现宽频强吸声^[56]. Jiang等人^[68]和Chen等人^[69]将梯度木堆结构引入局域共振声超材料中, 使之具有复式晶格, 即一个原胞内含有两种正交的共振子(图2(a)~(c)). 结果表明, 共振子单元之间存在强耦合作用, 可打开一个宽频带隙实现对声波的宽频强吸收. Jiang和Wang^[70]利用泡沫铝骨架包裹不同性质聚氨酯高分子材料, 并通过互穿网络结构设计构建了具有宽频强吸声和耐压双重特性的声子玻璃. Shi等人^[71]提出局域共振单元内含多层局域共振结构时的水声超材料(图2(d), (e)), 仿真结果表明, 单元内多个局域共振模态耦合可拓宽带隙或造成多个带隙.

Zhang等人^[72,73]将多个不同尺度弹性薄板单元作为局域共振板(locally resonant plates, LRPs)以一定梯度结构排列, 内嵌至弹性基体结构内构成复式晶格单元(图2(f), (g)). 理论与仿真结果表明, 引入的LRPs不仅可使弹性层内等效声速变慢, 使得吸声峰往低频移动, 该设计还在一个单元内引入了多个不同类型的局域共振模式, 每种模式可包含多个共振模态, 大大丰富了单元内共振模式的种类和数目. 通过调节单元内与各LRP相关的多个不同类型局域共振模式的耦合可有效拓宽吸

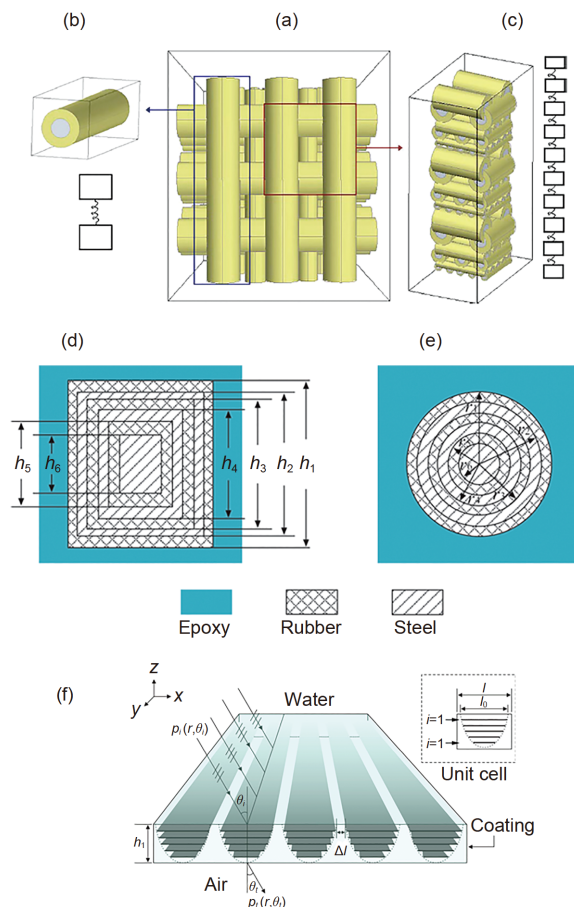


图2 (网络版彩色)具有复式晶格单元的局域共振水声吸声超材料. (a)~(c) 局域共振声子木堆结构及其简化模型^[68], Copyright © 2009, AIP Publishing; 单元内含3层传统局域共振子(d)、圆柱局域共振子(e)的局域共振声超材料^[71]; (f) 内含宽度梯度变化的多尺度矩形薄板散射体的水下近似完美吸声体^[72], Copyright © 2018, Acoustic Society of America

Figure 2 (Color online) Locally resonant acoustic metamaterials of complex lattices for underwater absorption. (a)~(c) Locally resonant phononic woodpile and its simplified model^[68]. Copyright © 2009, AIP Publishing. A unit cell of the locally resonant acoustic metamaterial with three-layered conventional scatterers (d) and cylindrical scatterers (e)^[71]; (f) the quasi-perfect underwater sound absorber containing multi-scale rectangular plates with gradiently changed widths^[72]. Copyright © 2018, Acoustic Society of America

声频带, 6 cm厚的该材料可实现对1 kHz左右及以下声波的低频宽带广角完美/近似完美吸收, 对应材料厚度可小于入射波长的1/20.

另一方面, 薄膜超材料通过刚性框架固定的张紧薄膜与其上附加的质量块构成, 其共振频率处弹性薄膜的整体能量密度比入射声波大2~3个数量级, 故其与三组分局域共振声学超材料相比, 可以更小的厚度吸收更低频率的声波^[9,10], 但目前薄膜超材料的研究大多

局限于空气声。王鹏等人^[74]尝试将薄膜超材料引入到水下低频声吸收,制备了薄膜型水声超材料样品。试验结果表明,1 mm左右的薄膜型水声超材料能够对波长大于自身尺寸两个数量级以上的声波进行有效吸收。但薄膜型超材料存在的长期稳定性差、共振强度不够高等缺点,使其真正作为水下吸声材料存在较大的应用难度。

由于局域共振的固有属性,局域共振吸声超材料目前还面临吸声频带较窄,且针对水声吸收能力不够强的缺点。从其吸声机理上看,如何利用亚波长尺度材料在低频宽带范围内产生多个频率连续分布的局域共振模式,并促使尽可能多个共振模式产生强耦合,在拓宽吸声频带同时实现强吸声,是该型吸声材料实现低频宽带水下强吸声的关键,也是难点所在。

1.2 非共振水声吸声超材料

多孔泡沫材料主要包括纤维材料、泡沫材料和泡沫金属材料等,用于吸声的泡沫材料通常为开孔,内部含有无数彼此贯通的孔隙。声波入射时激励空隙内流体振动,振动的流体运动过程产生黏滞损耗及热弹性阻尼吸声。目前,多孔泡沫大多用于空气声的吸收,用于水下吸声较少^[75,76]。泡沫金属材料相对传统橡胶材料具有轻质、高强度等优点^[56],但存在不耐腐蚀及低频吸声效果较差等缺点。陶瓷泡沫材料则具有耐腐蚀和高强度特性。Xu等人^[77,78]先后研究及测试了开孔SiC泡沫陶瓷材料孔内充不同介质时的水声吸声性能。声管测试结果表明,孔内完全含水虽有利于阻抗匹配,但孔内水的低黏滞阻力不利于水声吸收;孔内部分含水可一定程度改善结构表面的阻抗匹配条件及孔内的黏滞吸收;孔内充满硅油则可进一步增加孔内黏滞损耗,实现500~4000 Hz吸声系数大于0.8。需指出的是,虽然该材料样件厚度较小,其吸声需依赖于材料背后的刚性背衬。

梯度指数超材料利用散射体相对于周围介质密度的变化来控制结构的局部折射率,从而控制进入材料的声波到达材料内部被损耗,实现非共振的宽带吸声。美国海军实验室Naify等人^[79]基于声学黑洞原理和多重散射法,设计制备了一种面向全向水声吸收的声速梯度指数圆柱壳(图3),实验结果表明,该梯度指数材料具有低的反射率,可使各个方向入射声波进入到圆环中心。在此基础上,Wang等人^[80]对梯度指数圆柱壳内含中空吸收核的水声吸收和声散射效果进行了研究,

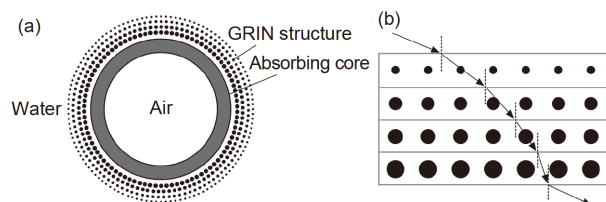


图3 含中空吸收核的水下梯度指数全向吸声体^[80]。(a) 横截面;(b) 梯度结构中波的传播路径示意图

Figure 3 An gradient refractive index (GRIN) underwater absorber with an absorbing core for omnidirectional sound^[80]. (a) Cross section; (b) the propagation path of acoustic waves in the GRIN structure

仿真结果表明,该结构可有效抑制更低频(2~4 kHz)声波的背向散射,实现低频宽带水声吸收。海军工程大学王源升等人^[81]利用聚合物溶解过程中会形成浓度梯度高分子溶液,研究和测试了梯度高分子溶液在频率、聚合物厚度、梯度结构的变化时对反射声衰减效果的影响规律。声管实验表明,存在一个最佳浓度,水声信号在其中存在多次反射和吸收,声衰减最佳。尽管因其优良的宽频吸波能力备受青睐,但梯度指数超材料对低频声波的吸收能力还有待提高,另外还存在对设备及制备工艺要求高,性能受制备工艺影响较大等缺点。

另一方面,声学超构表面是由多个亚波长尺度超原子表面阵组成的一种新型人工声学结构,通过调控入射和折射表面上的相位突变来实现对声波的灵活调控,相比传统的三维声学超构材料,拥有超薄、平面特性和可任意方向操控声波传播等优点^[82]。Mei等人^[83]通过橡胶和水的材料组合设计了一种声学超表面,仿真结果表明,厚度为入射波长0.15倍的该结构,可对法向入射的低频窄带水声声波实现近似完美吸收,该结构对斜入射声波($0^\circ \sim 50^\circ$)也有较好的吸收性能。Lee等人^[84]提出一种黏滞声学超表面,通过在黄铜块基座上刻出一系列均匀或非均匀的深凹槽可将入射声波转化为漩涡和熵模态,来达到2~5 MHz水下宽频吸声的目的,且其吸声系数对静水压力不敏感。

关于其他新型非共振水声吸材料,Yuan等人^[85]提出一种基于石墨烯微片-橡胶复合的水声吸声材料,水声管测试结果表明,该结构可通过石墨烯微片的高比表面积导致的阻尼损耗增加及其高的热传导率实现对2~30 kHz水声吸收的增强,并兼具良好的力学性能。Gao和Zhang^[86]提出黏弹性层内嵌螺旋金属环的水声超材料,有限元结果表明,22 cm厚的该结构可使中低频纵波向剪切波发生有效波形转换,并通过基体黏弹性损耗,实现1 kHz以下低频宽带吸声。

2 去耦型水声超材料

去耦型水声材料多采用柔性黏弹材料,如软橡胶,直接敷设在艇板表面来隔离水下结构表面振动向流体介质的传递,从而降低向流体中的辐射噪声^[87],要求材料密度和纵波声速足够小、损耗因子足够大^[3,88],以在结构和水之间造成阻抗失配,并将结构/水界面反射回的能量消耗在材料内。此外,为了增加降噪的有效性,并兼顾吸隔声等要求,常常在黏弹性材料中加入空腔等散射体^[89]。对表面敷设柔性去耦层的水下艇板结构而言,在低频时艇板、去耦层和水分别等效为质量、弹簧和质量,在其共振频率处存在噪声放大区^[38,90-92]。固然材料加厚或采用多层结构^[93-96]可使该共振峰往低频移动,但结构也因此变得厚重,如何实现轻质前提下的低频减振降噪仍是一个科学和工程难题。

2.1 孔腔型去耦水声超材料

Tao等人^[4]运用等效介质法研究了内含圆柱或圆锥形孔腔的水下柔性去耦覆盖层板的降噪机理,指出降噪主要来自去耦层的隔振作用,并指出低频板振动的增加量大于去耦层振动的衰减量是导致低频振动和声辐射增加的原因。黄凌志等人^[89]在去耦覆盖层中引入二维横向空腔,对其去耦机理进行了分析。结果表明,带横向空腔的覆盖层能有效增强基板在中高频时的力阻抗,从而更好地抑制基板的振动。Huang等人^[97]为进一步改善传统孔腔型材料的去耦特性,引入周期复杂轴对称空腔并对其形状进行优化设计。结果表明,该方法相比传统去耦材料可进一步改善去耦性能。孔腔型去耦水声超材料固然具有轻质及有效的中高频去耦能力,其低频抑振及隔振能力仍很微弱,难以起到去耦的作用。

2.2 局域共振型去耦水声超材料

相比于局域共振型水声吸声超材料,局域共振型去耦水声超材料是近年才发展起来的一类水声超材料。Huang等人^[98]首次将单自由度周期局域共振子引入至去耦材料中,采用等效介质理论研究了有限平板上敷设该去耦材料时的结构振动及辐射噪声,仿真结果表明,局域共振频率附近的低频降噪效果较为明显。王东涛等人^[99]研究了内嵌局域共振子的手性覆盖层的振动声辐射,指出局域共振子和手性覆盖层间的耦合作用决定该结构对振动的抑制或放大,当局域共振子的旋

转振动和手性结构整体振动方向相同时,局域共振子可明显增强手性结构覆盖层对振动的衰减。其对声辐射的抑制主要来自于其振动衰减作用。局域共振型去耦水声超材料的研究目前主要依靠理论及数值仿真的手段,尚缺乏有效的实验验证。

2.3 梯度去耦水声超材料

相比于水下吸声,梯度材料用于水下降噪的研究报道的较少。陶猛等人^[90]将每层柔性去耦覆盖层近似为均匀流体,分析了阻抗渐变的多层柔性覆盖层的降噪机理,指出阻抗渐变的多层结构因多个反射界面损耗,故比单层效果更好,但对比不渐变的多层结构,低频仍存在声辐射放大区。海军工程大学Zhang等人^[100]提出一种功能梯度材料作为潜艇非耐压壳,有限元和边界元结果表明,该结构可降低300 Hz以下潜艇辐射噪声,并可减轻结构重量,但其并未指出内在的降噪机理。与吸声型梯度超材料类似,梯度去耦超材料还存在低频效果较差的缺点。

2.4 负泊松比去耦水声超材料

负泊松比材料也称拉胀材料,即在轴向拉伸时,在纵向上发生膨胀,而在轴向受压时,在纵向上产生收缩。负泊松比材料在抗剪切性及能量吸收性等方面较传统材料有更大优势,因此可用于减振吸声。上海交通大学张梗林等人^[101]采用钢和复合材料,设计了具有宏观正泊松比和负泊松比效应的船用蜂窝隔振器,如图4(a), (b),有限元计算结果表明,结构在低频(50 Hz以下)具有良好的隔振性能,其中负泊松比材料性能更优。

2.5 手性去耦水声超材料

手性结构作为一类特殊的负泊松比多孔结构,具有高剪切刚度、负等效质量密度等特性。朱大巍^[102]研究了在加筋板湿表面敷设不同性质手性覆盖层对其振

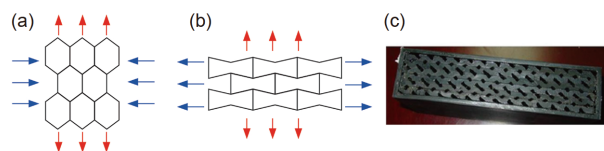


图4 (网络版彩色)多孔去耦声超材料。(a)正泊松比蜂窝结构^[101], (b)负泊松比蜂窝结构^[101], (c)手性覆盖层^[104]
Figure 4 (Color online) Porous decoupling acoustic metamaterial. (a) Honeycomb structure^[101], (b) re-entrant Honeycomb structure^[101], (c) chiral porous coating^[104]

动声辐射的影响规律. 仿真和实验研究表明, 该方法可降低声辐射面的法向振速并改变振速分布, 从而实现降噪, 并可通过协调手性声学覆盖层变形机制和周期禁带特性抑制加筋板的声辐射. Zhu等人^[103]及张林芳和黄修长^[104]还对充满膨胀聚苯乙烯泡沫(expanded polystyrene, EPS)的手性覆盖层(图4(c))敷设在加筋板湿表面时的声辐射进行了研究. 结果表明, EPS泡沫可增强手性多孔覆盖层的阻尼效应, 改善手性覆盖层的低频声辐射性能. 尽管如此, 负泊松比材料(包括手性结构)大多具有较高的孔隙率, 因此存在刚度和硬度低的缺点, 其优良的减振降噪和能量吸收等往往以牺牲材料的强度和硬度为代价^[105]. 尽管可通过增强的方式提高其强度和硬度, 但负泊松比效应及其带来的减振降噪效应可能消失, 这使得其在实际工程中尤其是在水下的应用受到制约.

3 水声聚焦超材料

传统水声聚焦方法包括曲面自聚焦、声透镜聚焦及相控阵聚焦, 一般来说其结构尺寸较大且后两种制作成本较高. 水声聚焦超材料的兴起, 使得小尺寸、低成本实现水声聚焦成为可能. 按照水声聚焦超材料对声波的汇聚原理的不同, 可分为衍射型水声聚焦超材料、折射型水声聚焦超材料及反射型水声聚焦超材料.

3.1 衍射型水声聚焦超材料

衍射型水声聚焦超材料依靠超材料产生的衍射声场的相长干涉来实现声聚焦, 主要包括各种基于超材料的波带板和分形透镜. 波带板主要指菲涅尔波带板(Fresnel zone plates, FZP), 相对传统折射透镜具有重量轻、平面结构及易于加工等优势. FZP主要包括Soret型FZP和相位反转型FZP两种, 前者由声透明和不透明条带相间组成, 其中不透明条带用于反射/过滤掉与透明条带相位相反的声成分, 从而造成相长干涉. 以往Soret型FZP水声透镜需依靠高阻抗材料作为不透明条带来抑制通过交替带的透射波, 对低频声波需采用较大较重的结构. 减轻透镜重量的一个可行方法是采用低阻抗失配材料造成声波在软边界的反射, 如Calvo等人^[106]提出一种超薄FZP水声透镜, 非透声区用软的硅橡胶敷设在透声橡胶基底表面构成. 仿真和实验结果表明, 该结构可实现对200 kHz声波聚焦增益大于20 dB. Rubio等人^[107]提出一种穿孔金属波带板超声透镜, 相比FZP透镜可有效抑制旁瓣. Chen等人^[108]近期

研发出一种具有宽带(95~125 kHz)水声聚焦能力的超表面衍射透镜, 由含有宽度优化的多个亚波长同心孔槽的薄钢板构成, 其聚焦原理在于声衍射和耦合, 但并未涉及对斜入射声波的聚焦效果.

Soret型FZP通常需使用高反射条带来反射/过滤掉与透明条带相位相反的声成分, 因此聚焦效率较低. 相位反转型FZPs则将高声反射条带由相位反转区域代替, 理想情况下可将透镜效率提高4倍. Tarrazó-Serrano等人^[109]提出一种相位反转型FZPs, 其相位补偿区域由3D打印的高分子聚乳酸组成, 实验结果表明, 该透镜在1 MHz相比传统FZP聚焦增益提高了4 dB, 但仍存在聚焦频率单一的问题. 另一方面, 分形透镜基于具有自相似几何特征的分形超材料, 其能在宽频范围内展示出亚波长特性及自相似的多带响应, 但大多局限于空气声范畴. 针对水声聚焦, Tarrazó-Serrano等人^[110]提出基于多元康托集分形的超材料平面透镜, 可实现多焦点和多频率水声聚焦, 并进行了实验验证. 尽管如此, 目前衍射型声透镜仍集中在水下超声范畴, 鲜有涉及水下低频及宽频范围声波聚焦的衍射型透镜出现.

3.2 折射型水声聚焦超材料

折射型水声聚焦超材料基于各种形式的水声透镜, 依靠对折射率的调控来实现将前方入射声波汇聚至其后方焦点处, 主要包括共振型和梯度指数型水声透镜/聚焦超材料.

3.2.1 共振型水声透镜

共振透射型水声聚焦超材料利用结构局域共振原理实现对透射声的聚焦增强. Li和Chan^[46]首次通过水中放置的软橡胶球阵列实现了双负水声介质, 指出负的有效模量和密度分别来自同一结构的单极和偶极共振; 并指出利用双负介质可实现如负折射率和亚波长声聚焦等. Zhang等人^[111]利用具有负有效模量的亚波长Helmholtz共振子平面阵首次通过实验观察到水下超声聚焦. Zhou等人^[112]应用杂化共振子相对运动产生的负折射率及表面态来分别聚焦传播波和倏逝波, 实现了突破衍射极限的水下超声聚焦.

Chen等人^[113]基于星形拉胀晶格结构提出一种水下平板型声学超透镜超材料, 仿真结果表明, 该结构可利用杂化模态产生的双负特性产生超过衍射极限的更低频率(9380 Hz)的水声聚焦. 浙江大学Tuan等人^[114]提出一种由“+”形钢柱阵列组成的正方形晶格组成的二维水声透镜, 可实现15~25 kHz的三维水声聚焦, 并进

行了水池实验验证. 总的看来, 共振型水声透镜利用结构中的模态共振原理来实现对透射声的聚焦, 因此存在聚焦频带较窄且易受材料损耗影响的缺点.

3.2.2 梯度指数型水声透镜

相比共振透射型声透镜超材料通常频带较窄且易受材料损耗影响, 梯度指数透镜通过改变渐进晶格的几何形状或组成成分来改变局部折射率, 无需借助共振, 因而可实现宽带声聚焦, 但聚焦频率较高, 且大部分研究局限在空气声聚焦. 关于水声聚焦, 美国海军研究中心的Martin等人^[115]基于不锈钢圆柱阵列设计了一种适用于20 kHz频率范围的水声梯度指数透镜, 最大增益3 dB, 实验结果与多重散射法所得聚焦结果一致.

传统水声透镜存在透镜材料与水阻抗失配带来的透声能量低的问题^[116], 要提高透射率和水声增益, 须采用与水阻抗接近的透镜材料^[41,42,117], 如五模材料. Su等人^[41]基于梯度五模材料提出了一种水声透明透镜, 可实现20~40 kHz的宽带声聚焦, 最大增益为5 dB(图5(a)~(d)). Martin等人^[117]利用水中放置的中空充气铝圆柱管阵列, 实现了水声透明梯度材料的宽频水声透镜, 工作频率在5 kHz以上, 最大增益超过7 dB. Tian等人^[42]基于与频率无关的广义Snell定律, 提出了可工作在小于5.5 kHz低频范围的亚波长水声透明超表面, 其应用速度梯度来控制折射波方向, 应用五模超材料来实现阻抗匹配增强透射率, 仿真结果表明, 该结构可实现宽带水声调控(如反常折射和亚波长尺度声聚焦等). 美国密歇根大学的Popa^[118]提出一种基于高阻抗及低损耗介质的被动超流体材料. 通过线性改变该材料阻抗从等于到数倍高于周围介质阻抗, 可实现7~105 kHz范围的宽带水声增强, 增幅可达8.7 dB.

3.2.3 其他新型水声透镜

传统透镜多采用单相材料, Xia等人^[119,120]基于软硅材料内嵌树脂或PMMA有机玻璃, 提出高透射率人工复合材料平板透镜, 该透镜通过树脂或PMMA厚度的变化调控板的相位实现水下0.62 MHz的超声聚焦, 并得到了实验验证. 此外, 相比传统水声增强依靠声喇叭来放大入射的声压信号, 美国斯蒂文斯理工学院Donskoy联合美国海军作战中心的Cray^[121]则另辟蹊径, 在传统声压喇叭APH基础上提出声质点振速喇叭AVH, 其作用是放大接收到的振荡的声质点振速, 并设计了一系列AVH对其水中增益和指向性进行了研究^[122]. 仿真结果表明, 这些AVH结构可在尺寸远小于波长时产生宽带信号增益, 最低频率可低至几Hz, 但最大增益

不超过喇叭口与咽喉的半径比, 且未涉及斜入射时的增益研究.

3.3 反射型水声聚焦超材料

目前水声聚焦超材料大多属于折射型和衍射型(针对透射声波), 针对反射声波聚焦的反射型超材料研究则相对较少, 且大多局限于空气声^[123~125]. 因为针对水声聚焦, Wu等人^[126]提出反射型超声聚焦超表面, 仿真和实验结果表明, 该结构可通过黄铜板表面不同深度汇聚凹槽产生的双曲反射相位剖面实现0.45~0.55 MHz的宽带水声聚焦. 尽管如此, 该方法仅对中高频或超声范围的水声聚焦有效, 低频水声聚焦/增强的研究仍非常匮乏. 此外, 目前水声聚焦超材料普遍存在焦点位置不固定, 且焦距随频率变化等缺点, 这给实际中水听器阵元的布放增加了难度.

Zhang和Pan^[64]提出在具有钢背衬的黏弹性层湿表面局部敷设有限尺寸弹性薄板作为信号调节板(signal conditioning plate, SCP), 仿真结果表明该结构可显著增加SCPs附近多个局域共振频率处的水声增益, 最高可达11 dB以上. 在此基础上, Zhang等人^[65]又提出去耦层表面周期性敷设SCPs的方法. 仿真结果显示, 该方法可在较宽频带显著改善SCP表面附近的水声增益, 低频时各SCP表面附近的水声增益较差, 而相邻SCP之间增益却有所增加. 根据实际中水听器阵模制在弹性层内的特点, Zhang和Pan^[66]还提出将周期性SCPs阵列嵌入至透声覆盖层与去耦覆盖层之间(图5(e)). 仿真结果表明, 该方法可通过透声层产生的阻抗匹配及SCPs阵列作为弹性声栅聚焦效应, 产生213~21.3 kHz低频超宽频声波的强聚焦效应, 水声增益最高可达近30 dB(图5(f), (g)). 同时声聚焦平面(点)相对固定, 即聚焦在内嵌的周期性SCPs的两个端点附近(图5(g)). 这可有利于实际中水听器阵元的布放, 即置于SCPs的两个端点处. 总的说来, 反射型水声聚焦超材料可不依赖于阻抗匹配层, 对来波直接调控, 因此可以更轻更薄, 具有广阔的发展前景.

4 总结与展望

水声材料是发展海洋装备的基础和重要支撑, 具有广阔的应用发展前景. 水声超材料在空气声超材料、光学超材料、电磁超材料等的启示和带动下及海洋安全的迫切需求下, 已取得了一定的进展, 但其发展尚处于初期. 然而, 因其展现出众多奇特超常的声学特

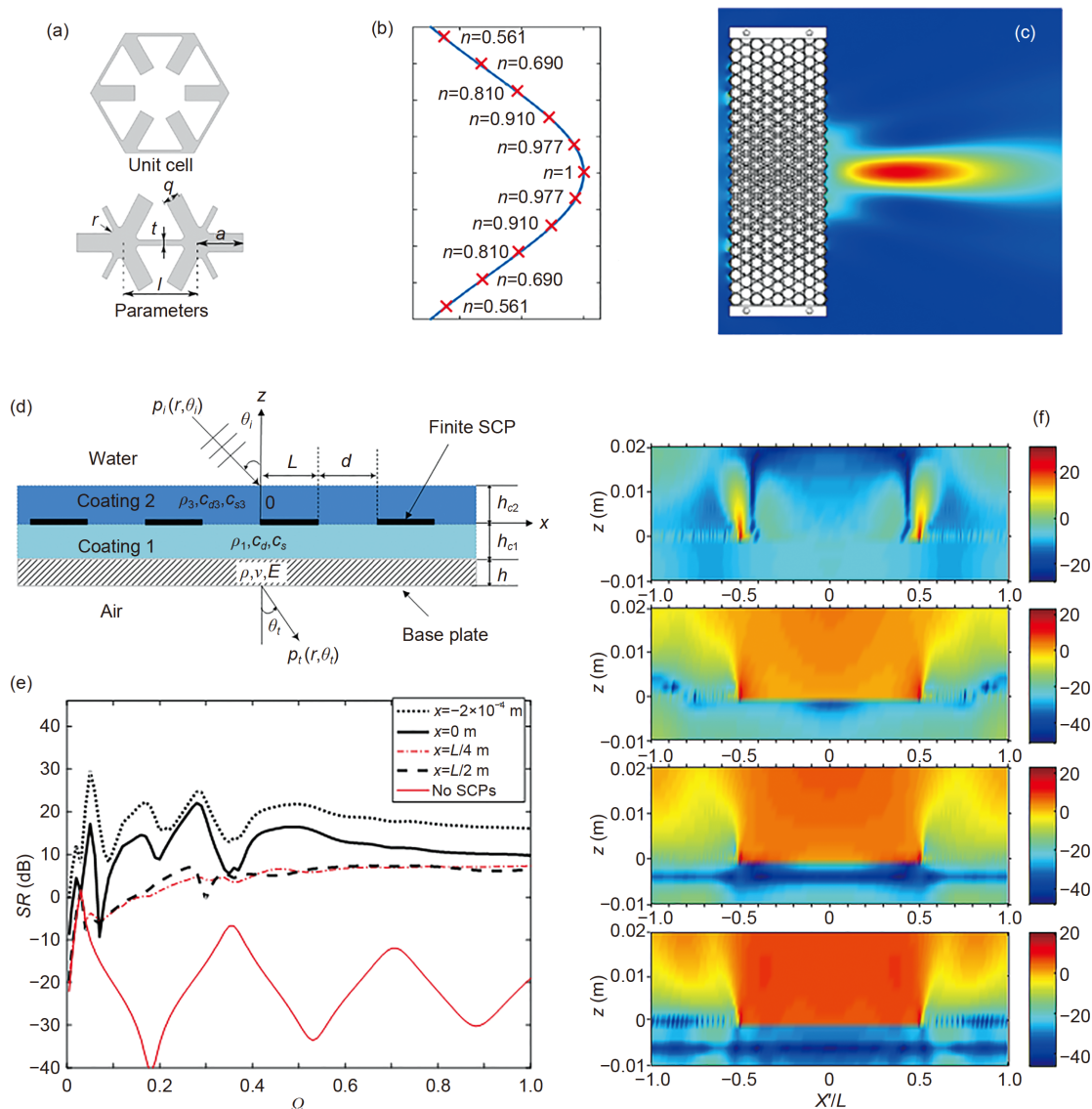


图 5 (网络版彩色)水声聚焦超材料. (a)~(c) 五模梯度透镜^[41]: (a) 单元结构及参数; (b) 透镜中离散化的折射率分布; (c) 对 20 kHz 垂直入射平面波的归一化透射声强. Copyright © 2017, Acoustic Society of America. (d) 具有背衬板的两层软橡胶层间嵌入弹性薄板 SCPs 构成的反声超材料^[66]; (e) SCP 表面附近信号增益的频谱^[66]; (f) 信号增益在其峰值频率处的空间分布^[66]. Copyright © 2017, Acoustic Society of America

Figure 5 (Color online) Acoustic metamaterials for underwater sound focusing. (a)~(c) Gradient index pentamode lens^[41]: (a) Structure and parameters of a unit cell; (b) discretized index distribution within the lens; (c) normalized transmitted intensity for a plane wave normally incident from the left side at 20 kHz. Copyright © 2017, Acoustic Society of America. (d) The reflective metamaterial made by embedding periodic elastic plate array into interface of a hard and compliant rubber layers backed by a steel plate^[66]; (e) the frequency spectra of the signal ratio around the SCP surface^[66]; (f) the spatial distributions of the signal ratios at the peak frequencies^[66]. Copyright © 2017, Acoustic Society of America

性, 代表了未来水声材料的发展方向. 本文以与潜艇隐身及其声呐水声探测功能密切相关的三类水声超材料(吸收型、去耦型及聚焦型水声超材料)的发展动态为框架, 详细探讨和总结了各类超材料对水下声场调控的物理机理及调控效果, 希望为水声材料领域的研究者们提供参考.

相较于传统水声材料, 水声超材料在性能上已取

得了一定突破, 但离水下目标声探测和声隐身的实际需求还有较大距离, 仍然存在诸多问题需解决, 总结起来主要是以下几个方面.

(1) 低频或低频宽带效果不理想, 目前水下吸声和声聚焦主要集中在中高频甚至超声频率范畴, 针对低频尤其是低频宽带声聚焦和吸声的研究较少, 尤其针对 1 kHz 以下水下低频宽带声波调控的研究甚少.

(2) 缺乏对斜入射声波吸收和聚焦的研究, 目前吸声和聚焦研究主要针对法向垂直入射声波, 实际中入射声波可存在于不同方向, 需开发具有全向声波调控能力的水声超材料。

(3) 缺乏大尺度样件制作与测试的研究。受制作工艺、周期等的限制, 目前对大尺寸超材料的加工能力不足。目前水下吸声测试多为水声管中的小样测试, 其吸声性能难以反映真实环境下的吸声能力。鲜有消声水池中大样实验研究的报道。

(4) 未能有效兼顾结构强度、质量及耐压性等环境要素。如何在增加材料厚度及重量并不牺牲材料强度前提下提升其对水下结构振动及声波的衰减、吸

收和聚焦能力, 实现小尺寸、轻量化、高耐压强度下的低频水声调控尚是一项难题。

(5) 基于水下空间的限制, 往往要求一定厚度的水声材料能同时具备多重声功能, 如能在去耦的同时又能实现吸声及(或)声聚焦, 然而目前还缺乏对亚波长尺度下多功能复合水声超材料的设计开发。

总之, 目前水声超材料正朝着低频、宽带、全向、大平面尺度、亚波长厚度、轻量化、大耐压及多功能复合型、环境适应性的方向发展。此外, 水声超材料在迈向工程化的进程中还需进行全局水声结构设计优化, 才能充分发挥单一水声材料的优良性能, 使总体声学性能达到最优。

参考文献

- Wang R J. Handbook of Underwater Acoustic Materials (in Chinese). Beijing: Science Press, 1983 [王荣津. 水声材料手册. 北京: 科学出版社, 1983]
- Zhu P L, Huang X C. Key Technology of Submarine Stealth: The Design of Acoustic Coating (in Chinese). Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2012 [朱培丽, 黄修长. 潜艇隐身关键技术: 声学覆盖层的设计. 上海: 上海交通大学出版社, 2012]
- Ko S H. Reduction of structure-borne noise using an air-voided elastomer. *J Acoust Soc Am*, 1997, 101: 3306–3312
- Tao M, Tang W L, Hua H X. Noise reduction analysis of an underwater decoupling layer. *J Vibr Acoust*, 2010, 132: 061006
- Hao H Q. Gain influence for a reflection baffle (in Chinese). *Appl Acoust*, 2011, 30: 187–192 [郝浩琦. 影响反声障板增益的因素. 应用声学, 2011, 30: 187–192]
- Yang H, Xiao Y, Zhao H, et al. On wave propagation and attenuation properties of underwater acoustic screens consisting of periodically perforated rubber layers with metal plates. *J Sound Vibr*, 2019, 444: 21–34
- Yu M S, Li D S, Gong L, et al. Design of sandwich acoustic window for sonar dome (in Chinese). *Acta Acust*, 2005, 30: 427–434 [俞孟萨, 李东升, 龚莉, 等. 声呐罩夹芯式透声窗的声学设计研究. 声学学报, 2005, 30: 427–434]
- Liu Z, Zhang X, Mao Y, et al. Locally resonant sonic materials. *Science*, 2000, 289: 1734–1736
- Mei J, Ma G, Yang M, et al. Dark acoustic metamaterials as super absorbers for low-frequency sound. *Nat Commun*, 2012, 3: 756
- Yang M, Ma G, Yang Z, et al. Coupled membranes with doubly negative mass density and bulk modulus. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 134301
- Ma F, Wu J H, Huang M, et al. A purely flexible lightweight membrane-type acoustic metamaterial. *J Phys D-Appl Phys*, 2015, 48: 175105
- Liang Z, Li J. Extreme acoustic metamaterial by coiling up space. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 114301
- Li Y, Liang B, Tao X, et al. Acoustic focusing by coiling up space. *Appl Phys Lett*, 2012, 101: 233508
- Cheng Y, Zhou C, Yuan B G, et al. Ultra-sparse metasurface for high reflection of low-frequency sound based on artificial Mie resonances. *Nat Mater*, 2015, 14: 1013–1019
- Liu J, Li L, Xia B, et al. Fractal labyrinthine acoustic metamaterial in planar lattices. *Int J Solids Struct*, 2018, 132–133: 20–30
- Climente A, Torrent D, Sánchez-Dehesa J. Sound focusing by gradient index sonic lenses. *Appl Phys Lett*, 2010, 97: 104103
- Yuan B, Cheng Y, Liu X. Conversion of sound radiation pattern via gradient acoustic metasurface with space-coiling structure. *Appl Phys Express*, 2015, 8: 027301
- Martin T P, Naify C J, Skerrett E A, et al. Transparent gradient-index lens for underwater sound based on phase advance. *Phys Rev Appl*, 2015, 4: 034003
- Miniaci M, Krushynska A, Movchan A B, et al. Spider web-inspired acoustic metamaterials. *Appl Phys Lett*, 2016, 109: 071905
- Ma F, Wu J H, Huang M, et al. Cochlear bionic acoustic metamaterials. *Appl Phys Lett*, 2014, 105: 213702
- Zhao L, Zhou S. Compact acoustic rainbow trapping in a bioinspired spiral array of graded locally resonant metamaterials. *Sensors*, 2019, 19: 788
- Kundu A, Berry A. Active sound control with smart foams using piezoelectric sensor/actuator. *J Intell Mater Syst Struct*, 2011, 22: 1771–1787
- Wang W, Thomas P J. Low-frequency active noise control of an underwater large-scale structure with distributed giant magnetostrictive actuators. *Sens Actuat A-Phys*, 2017, 263: 113–121
- Kim B S, Kwon S, Jeong S, et al. Semi-active control of smart porous structure for sound absorption enhancement. *J Intell Mater Syst Struct*,

- 2019, 30: 2575–2580
- 25 El-Ouahabi A A, Krylov V V, O'Boy D J. Experimental investigation of the acoustic black hole for sound absorption in air. In: Proceedings of the 22nd International Congress on Sound and Vibration, Florence, Italy, 2015
 - 26 Conlon S C, Fahline J B, Semperlotti F. Numerical analysis of the vibroacoustic properties of plates with embedded grids of acoustic black holes. *J Acoust Soc Am*, 2015, 137: 447–457
 - 27 Zhang Y, Chen K, Zhou S, et al. An ultralight phononic beam with a broad low-frequency band gap using the complex lattice of acoustic black holes. *Appl Phys Express*, 2019, 12: 077002
 - 28 Zhang Y, Chen K, Cheng Y, et al. Lightweight-high-stiffness vibration insulator with ultra-broad band using graded double-leaf acoustic black holes. *Appl Phys Express*, 2020, 13: 017007
 - 29 Zhang X, Xiao M, Cheng Y, et al. Topological sound. *Commun Phys*, 2018, 1: 97
 - 30 He C, Li Z, Ni X, et al. Topological phononic states of underwater sound based on coupled ring resonators. *Appl Phys Lett*, 2016, 108: 031904
 - 31 Zhang Z, Wei Q, Cheng Y, et al. Topological creation of acoustic pseudospin multipoles in a flow-free symmetry-broken metamaterial lattice. *Phys Rev Lett*, 2017, 118: 084303
 - 32 Ma G, Xiao M, Chan C T. Topological phases in acoustic and mechanical systems. *Nat Rev Phys*, 2019, 1: 281–294
 - 33 Longhi S, Gatti D, Della Valle G. Non-Hermitian transparency and one-way transport in low-dimensional lattices by an imaginary gauge field. *Phys Rev B*, 2015, 92: 094204
 - 34 Achilleos V, Theocharis G, Richoux O, et al. Non-Hermitian acoustic metamaterials: Role of exceptional points in sound absorption. *Phys Rev B*, 2017, 95: 144303
 - 35 Zhang Z, Rosendo López M, Cheng Y, et al. Non-Hermitian sonic second-order topological insulator. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 195501
 - 36 Torrent D, Mayou D, Sánchez-Dehesa J. Elastic analog of graphene: Dirac cones and edge states for flexural waves in thin plates. *Phys Rev B*, 2013, 87: 115143
 - 37 Zhu H, Liu T W, Semperlotti F. Design and experimental observation of valley-Hall edge states in diatomic-graphene-like elastic waveguides. *Phys Rev B*, 2018, 97: 174301
 - 38 Zhang Y, Pan J. Underwater sound radiation from an elastically coated plate with an embedded and distributed inhomogeneity. *J Acoust Soc Am*, 2015, 137: 2915–2926
 - 39 Milton G W, Cherkaev A V. Which elasticity tensors are realizable? *J Eng Mater Tech*, 1995, 117: 483–493
 - 40 Norris A N. Acoustic cloaking theory. *Proc R Soc A*, 2008, 464: 2411–2434
 - 41 Su X, Norris A N, Cushing C W, et al. Broadband focusing of underwater sound using a transparent pentamode lens. *J Acoust Soc Am*, 2017, 141: 4408–4417
 - 42 Tian Y, Wei Q, Cheng Y, et al. Broadband manipulation of acoustic wavefronts by pentamode metasurface. *Appl Phys Lett*, 2015, 107: 221906
 - 43 Sun Z, Jia H, Chen Y, et al. Design of an underwater acoustic bend by pentamode metafluid. *J Acoust Soc Am*, 2018, 143: 1029–1034
 - 44 Li Q, Viperman J S. Three-dimensional pentamode acoustic metamaterials with hexagonal unit cells. *J Acoust Soc Am*, 2019, 145: 1372–1377
 - 45 Chen Y, Liu X N, Xiang P, et al. Pentamode material for underwater acoustic wave control (in Chinese). *Adv Mech*, 2016, 46: 201609 [陈毅, 刘晓宁, 向平, 等. 五模材料及其水声调控研究. *力学进展*, 2016, 46: 201609]
 - 46 Li J, Chan C T. Double-negative acoustic metamaterial. *Phys Rev E*, 2004, 70: 055602
 - 47 Ding Y, Liu Z, Qiu C, et al. Metamaterial with simultaneously negative bulk modulus and mass density. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 093904
 - 48 Fok L, Zhang X. Negative acoustic index metamaterial. *Phys Rev B*, 2011, 83: 214304
 - 49 Chen H, Li H, Zhai S, et al. Ultrasound acoustic metamaterials with double-negative parameters. *J Appl Phys*, 2016, 119: 204902
 - 50 Brunet T, Merlin A, Mascaro B, et al. Soft 3D acoustic metamaterial with negative index. *Nat Mater*, 2015, 14: 384–388
 - 51 Chen H, Zhai S, Ding C, et al. Acoustic metamaterial with negative mass density in water. *J Appl Phys*, 2015, 118: 094901
 - 52 Hou B, Mei J, Ke M, et al. Tuning Fabry-Perot resonances via diffraction evanescent waves. *Phys Rev B*, 2007, 76: 054303
 - 53 He Z, Peng S, Hao R, et al. Extraordinary acoustic reflection enhancement by acoustically transparent thin plates. *Appl Phys Lett*, 2012, 100: 091904
 - 54 Zhu J H, Wang Y S, Wen Q Z et al. The development and application of underwater acoustic absorption polymer materials (in Chinese). *Polym Mater Sci Eng*, 2005, 21: 46–50 [朱金华, 王源升, 文庆珍, 等. 水声吸声高分子材料的发展及应用. *高分子材料科学与工程*, 2005, 21: 46–50]
 - 55 He Z Y, Zhao Y F. Fundamental of Acoustic Theory (in Chinese). Beijing: National Defense Industry Press, 1981 [何祚镛, 赵玉芳. 声学理论基础. 北京: 国防工业出版社, 1981]
 - 56 Wang Y R, Miao X H, Jiang H, et al. Review on underwater sound absorption materials and mechanisms (in Chinese). *Adv Mech*, 2017, 47: 92–121 [王育人, 缪旭弘, 姜恒, 等. 水下吸声机理与吸声材料. *力学进展*, 2017, 47: 92–121]
 - 57 Zhao H, Liu Y, Wen J, et al. Tri-component phononic crystals for underwater anechoic coatings. *Phys Lett A*, 2007, 367: 224–232
 - 58 Zhao H, Wen J, Yu D, et al. Low-frequency acoustic absorption of localized resonances: Experiment and theory. *J Appl Phys*, 2010, 107: 023519

- 59 Wen J, Zhao H, Lü L, et al. Effects of locally resonant modes on underwater sound absorption in viscoelastic materials. *J Acoust Soc Am*, 2011, 130: 1201–1208
- 60 Zhong J, Wen J H, Zhao H G, et al. Effects of core position of locally resonant scatterers on low-frequency acoustic absorption in viscoelastic panel. *Chin Phys B*, 2015, 24: 084301
- 61 Zhao H, Wen J, Yang H, et al. Backing effects on the underwater acoustic absorption of a viscoelastic slab with locally resonant scatterers. *Appl Acoust*, 2014, 76: 48–51
- 62 Meng H, Wen J, Zhao H, et al. Optimization of locally resonant acoustic metamaterials on underwater sound absorption characteristics. *J Sound Vibr*, 2012, 331: 4406–4416
- 63 Yang H B, Li Y, Zhao H G, et al. Acoustic anechoic layers with singly periodic array of scatterers: Computational methods, absorption mechanisms, and optimal design. *Chin Phys B*, 2014, 23: 104304
- 64 Zhang Y, Pan J. Underwater sound scattering and absorption by a coated infinite plate with a distributed inhomogeneity. *J Acoust Soc Am*, 2013, 133: 2082–2096
- 65 Zhang Y, Huang H, Zheng J, et al. Underwater sound scattering and absorption by a coated infinite plate with attached periodically located inhomogeneities. *J Acoust Soc Am*, 2015, 138: 2707–2721
- 66 Zhang Y, Pan J. Enhancing acoustic signal response and absorption of an underwater coated plate by embedding periodical inhomogeneities. *J Acoust Soc Am*, 2017, 142: 3722–3735
- 67 Sharma G S, Skvortsov A, MacGillivray I, et al. Sound absorption by rubber coatings with periodic voids and hard inclusions. *Appl Acoust*, 2019, 143: 200–210
- 68 Jiang H, Wang Y, Zhang M, et al. Locally resonant phononic woodpile: A wide band anomalous underwater acoustic absorbing material. *Appl Phys Lett*, 2009, 95: 104101
- 69 Chen M, Meng D, Zhang H, et al. Resonance-coupling effect on broad band gap formation in locally resonant sonic metamaterials. *Wave Motion*, 2016, 63: 111–119
- 70 Jiang H, Wang Y. Phononic glass: A robust acoustic-absorption material. *J Acoust Soc Am*, 2012, 132: 694–699
- 71 Shi K, Jin G, Liu R, et al. Underwater sound absorption performance of acoustic metamaterials with multilayered locally resonant scatterers. *Results Phys*, 2019, 12: 132–142
- 72 Zhang Y, Pan J, Chen K, et al. Subwavelength and quasi-perfect underwater sound absorber for multiple and broad frequency bands. *J Acoust Soc Am*, 2018, 144: 648–659
- 73 Zhang Y, Pan J, Chen K, et al. Ultrathin quasi-perfect absorber for low-frequency and broadband underwater sound. In: INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, Inter Noise 19, Madrid, Spain, 2019, 259: 632–646
- 74 Wang P, Li H W, Ren W W, et al. The experimental investigation on the acoustic absorption performance of the membrane metamaterial underwater (in Chinese). In: Proceedings of the 27th National Conference on the Application of Vibration and Noise, 2016. 217–221 [王鹏, 李宏伟, 任伟伟, 等. 薄膜型水声超材料吸声特性试验研究. 见: 第二十七届全国振动与噪声应用学术会议论文集, 2016. 217–221]
- 75 Cheng G P, He D P, Shu G J. Underwater sound absorption property of porous aluminum. *Colloids Surfs A-Physicochem Eng Aspects*, 2001, 179: 191–194
- 76 Wang X. Porous metal absorbers for underwater sound. *J Acoust Soc Am*, 2007, 122: 626–635
- 77 Xu W, Jiang C, Zhang J. Underwater acoustic absorption of air-saturated open-celled silicon carbide foam. *Colloids Surfs A-Physicochem Eng Aspects*, 2015, 471: 153–158
- 78 Xu W, Jiang C, Zhang J. Improvement in underwater acoustic absorption performance of open-celled SiC foam. *Colloids Surfs A-Physicochem Eng Aspects*, 2015, 482: 568–574
- 79 Naify C J, Martin T P, Layman C N, et al. Underwater acoustic omnidirectional absorber. *Appl Phys Lett*, 2014, 104: 073505
- 80 Wang C, Li S D, Zheng W G, et al. Acoustic absorption characteristics of new underwater omnidirectional absorber. *Chin Phys Lett*, 2019, 36: 044301
- 81 Wang Y S, Yang X, Zhu J H, et al. The underwater sound attenuation of gradient polymer solutions (in Chinese). *Polym Mater Sci Eng*, 2005, 21: 129–132 [王源升, 杨雪, 朱金华, 等. 梯度高分子溶液的声衰减. 高分子材料科学与工程, 2005, 21: 129–132]
- 82 Assouar B, Liang B, Wu Y, et al. Acoustic metasurfaces. *Nat Rev Mater*, 2018, 3: 460–472
- 83 Mei J, Zhang X, Wu Y. Ultrathin metasurface with high absorptance for waterborne sound. *J Appl Phys*, 2018, 123: 091710
- 84 Lee H, Jung M, Kim M, et al. Acoustically sticky topographic metasurfaces for underwater sound absorption. *J Acoust Soc Am*, 2018, 143: 1534–1547
- 85 Yuan B, Jiang W, Jiang H, et al. Underwater acoustic properties of graphene nanoplatelet-modified rubber. *J Reinf Plast Compos*, 2018, 37: 609–616
- 86 Gao N, Zhang Y. A low frequency underwater metastructure composed by helix metal and viscoelastic damping rubber. *J Vibr Control*, 2018, 25:

538–548

- 87 He S P, He Y A, Zhang W Q, et al. Theoretical discussion on evaluation indicators of noise reduction performance of flexible coating (in Chinese). *Acta Acust*, 2014, 39: 177–184 [何世平, 何元安, 张文群, 等. 去耦覆盖层降噪性能评价指标的理论探讨. *声学学报*, 2014, 39: 177–184]
- 88 Ko S H, Pyo S, Seong W. *Structure-Borne and Flow Noise Reductions (Mathematical Modeling)*. Seoul: Seoul National University Press, 2001
- 89 Huang L Z, Xiao Y, Wen J H, et al. Analysis of decoupling mechanism of an acoustic coating layer with horizontal cylindrical cavities (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2015, 64: 154301 [黄凌志, 肖勇, 温激鸿, 等. 一种含横向圆柱形空腔的声学覆盖层的去耦机理分析. *物理学报*, 2015, 64: 154301]
- 90 Tao M, Tang W L, Fan J. Mechanism analysis of noise reduction by compliant decoupling layers (in Chinese). *J Ship Mech*, 2010, 14: 421–429 [陶猛, 汤渭霖, 范军. 柔性去耦覆盖层降噪机理分析. *船舶力学*, 2010, 14: 421–429]
- 91 Zhang Y, Pan J. Underwater sound radiation from an elastically coated plate with a discontinuity introduced by a signal conditioning plate. *J Acoust Soc Am*, 2013, 133: 173–185
- 92 Zhang Y, Huang H, Pan J. Underwater sound radiation from an elastically coated infinite plate with periodic inhomogeneities of finite width. *J Acoust Soc Am*, 2017, 142: 91–102
- 93 Ebenezer D D, Abraham P. Effect of multilayer baffles and domes on hydrophone response. *J Acoust Soc Am*, 1996, 99: 1883–1893
- 94 Kim S H, Hong S Y, Song J H, et al. Acoustical characteristic predictions of a multi-layer system of a submerged vehicle hull mounted sonar simplified to an infinite planar model. *Int J Naval Arch Ocean Eng*, 2012, 4: 96–111
- 95 Kim S H, Hong S Y, Song J H, et al. Predictions of acoustical characteristic for a flank array sonar simplified to planar multi-layer system. In: *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 2015, 10: 439–448
- 96 Yuan B, Chen M, Liu Y, et al. Experimental and theoretical analysis for a fluid-loaded, simply supported plate covered by a damping and decoupling composite acoustic coating. *Shock Vibr*, 2017, 5: 1–12
- 97 Huang L, Xiao Y, Wen J, et al. Optimization of decoupling performance of underwater acoustic coating with cavities via equivalent fluid model. *J Sound Vibr*, 2018, 426: 244–257
- 98 Huang L Z, Xiao Y, Yang H B, et al. Analysis of underwater decoupling properties of a locally resonant acoustic metamaterial coating. *Chin Phys B*, 2016, 25: 024302
- 99 Wang D T, Zhu D W, Huang X C, et al. Influences of internal resonances on the vibration and sound reduction of chiral layer coating (in Chinese). *Noise Vibr Contrl*, 2015, 35: 22–25 [王东涛, 朱大巍, 黄修长. 局域共振对手性覆盖层振动和声辐射抑制的影响. *噪声与振动控制*, 2015, 35: 22–25]
- 100 Zhang Y B, Ren C Y, Zhu X. Research on vibration and sound radiation from submarine functionally graded material nonpressure cylindrical shell. *Adv Mater Res*, 2013, 690: 3046–3049
- 101 Zhang G L, Yang D Q, Zhu J W, et al. Performance analysis of a novel marine honeycomb vibration isolator (in Chinese). *Chin J Ship Res*, 2013, 8: 52–58 [张梗林, 杨德庆, 朱金文. 船舶船用新型蜂窝隔振器减振性能分析. *中国舰船研究*, 2013, 8: 52–58]
- 102 Zhu D W. Numerical and experimental research on the structural noise mechanism of the chiral coating (in Chinese). Doctor Dissertation. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015 [朱大巍. 手性声学覆盖层结构降噪机理及实验研究. 博士学位论文. 上海: 上海交通大学, 2015]
- 103 Zhu D, Huang X, wang Y, et al. Experimental and numerical research on the underwater sound radiation of floating structures with covering layers. *Proc Inst Mech Eng Part C-J Mech Eng Sci*, 2015, 229: 447–464
- 104 Zhang L F, Huang X C. Experimental study on underwater acoustic radiation suppression performance of a kind of chiral porous coating (in Chinese). *Noise Vibr Contrl*, 2017, 37: 63–68 [张林芳, 黄修长. 一种手性声学覆盖层的水下抑声性能实验研究. *噪声与振动控制*, 2017, 37: 63–68]
- 105 Ren X, Zhang X Y, Xie Y M. Research progress in auxetic materials and structures (in Chinese). *Chin J Theor Appl Mech*, 2019, 51: 656–687 [任鑫, 张相玉, 谢亿民. 负泊松比材料和结构的研究进展. *力学学报*, 2019, 51: 656–687]
- 106 Calvo D C, Thangawng A L, Nicholas M, et al. Thin Fresnel zone plate lenses for focusing underwater sound. *Appl Phys Lett*, 2015, 107: 014103
- 107 Rubio C, Fuster J M, Castiñeira-Ibáñez S, et al. Pinhole zone plate lens for ultrasound focusing. *Sensors*, 2017, 17: 1690
- 108 Chen J, Rao J, Lisevych D, et al. Broadband ultrasonic focusing in water with an ultra-compact metasurface lens. *Appl Phys Lett*, 2019, 114: 104101
- 109 Tarrazó-Serrano D, Pérez-López S, Candelas P, et al. Acoustic focusing enhancement in Fresnel zone plate lenses. *Sci Rep*, 2019, 9: 7067
- 110 Tarrazó-Serrano D, Castiñeira-Ibáñez S, Candelas P, et al. Numerical simulation and laboratory measurements on the influence of fractal dimension on the acoustic beam modulation of a Polyadic Cantor Fractal lenses. *Appl Acoust*, 2019, 148: 119–122
- 111 Zhang S, Yin L, Fang N. Focusing ultrasound with an acoustic metamaterial network. *Phys Rev Lett*, 2009, 102: 194301
- 112 Zhou X, Assouar M B, Oudich M. Acoustic superfocusing by solid phononic crystals. *Appl Phys Lett*, 2014, 105: 233506
- 113 Chen M, Jiang H, Zhang H, et al. Design of an acoustic superlens using single-phase metamaterials with a star-shaped lattice structure. *Sci Rep*,

- 2018, 8: 1861
- 114 Ruan Y, Liang X, Wang Z, et al. 3-D underwater acoustic wave focusing by periodic structure. [Appl Phys Lett](#), 2019, 114: 081908
 - 115 Martin T P, Nicholas M, Orris G J, et al. Sonic gradient index lens for aqueous applications. [Appl Phys Lett](#), 2010, 97: 113503
 - 116 Hladky-Hennion A C, Vasseur J O, Haw G, et al. Negative refraction of acoustic waves using a foam-like metallic structure. [Appl Phys Lett](#), 2013, 102: 144103
 - 117 Mori K, Miyazaki A, Ogasawara H, et al. Numerical analysis of sound pressure fields focused by phase continuous Fresnel lens using finite difference time domain method. [Jpn J Appl Phys](#), 2007, 46: 4990–4997
 - 118 Popa B I. Broadband sound pressure enhancement in passive metafluids. [Phys Rev B](#), 2017, 96: 094305
 - 119 Xia X, Ke M, Liu Z, et al. Focusing of ultrasonic waves in water with a flat artificial composite plate. In: 2017 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 2017. 17334311
 - 120 Xia X, Cai F, Li F, et al. Planar ultrasonic lenses formed by concentric circular sandwiched-ring arrays. [Adv Mater Technol](#), 2019, 4: 1800542
 - 121 Donskoy D M, Cray B A. Horns as particle velocity amplifiers. [J Acoust Soc Am](#), 2011, 130: EL311–EL315
 - 122 Donskoy D M. Directionality and gain of small acoustic velocity horns. [J Acoust Soc Am](#), 2017, 142: 3450–3458
 - 123 Li Y, Jiang X, Li R, et al. Experimental realization of full control of reflected waves with subwavelength acoustic metasurfaces. [Phys Rev Appl](#), 2014, 2: 064002
 - 124 Qi S, Li Y, Assouar B. Acoustic focusing and energy confinement based on multilateral metasurfaces. [Phys Rev Appl](#), 2017, 7: 054006
 - 125 Qi S, Assouar B. Ultrathin acoustic metasurfaces for reflective wave focusing. [J Appl Phys](#), 2018, 123: 234501
 - 126 Wu X, Xia X, Tian J, et al. Broadband reflective metasurface for focusing underwater ultrasonic waves with linearly tunable focal length. [Appl Phys Lett](#), 2016, 108: 163502

Summary for “水声超材料研究进展”

A review of underwater acoustic metamaterials

Yanni Zhang^{1*}, Ke'an Chen¹, Xiaying Hao^{2,3} & Ying Cheng⁴¹ Key Laboratory of Ocean Acoustics and Sensing, Ministry of Industry and Information Technology, School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;² Key Laboratory of Ship Vibration and Noise, China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China;³ Jiangsu Green Ship Technology Key Laboratory, Wuxi 214082, China;⁴ Key Laboratory of Modern Acoustics, Ministry of Education, School of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China* Corresponding author, E-mail: yanni.zhang@nwpu.edu.cn

Underwater acoustic materials are the key to the noise and vibration reduction, stealth, reception and amplification of underwater acoustic signal. However, conventional underwater acoustic materials usually suffer from the weakness of great bulk, heavy weight and poor resistance to hydrodynamic pressure. The advancement of the acoustic metamaterials (AMMs) has provided new insights into fixing these problems, and a variety of underwater AMMs are proposed accordingly.

This article reviews the history and the developments of underwater AMMs and the difficulties that existed in the developments of underwater AMMs as compared with the AMMs in air. The focuses are the three types of AMMs which are closely associated with the underwater acoustic stealth and signal reception & amplification of hull-mounted sonar, i.e., the AMMs for sound absorption, AMMs for decoupling and those for sound focusing. The classification, physical mechanisms and controlling effects of those three types of underwater AMMs are reviewed in details.

The AMMs for underwater sound absorption can be divided into local-resonance (LR) and non-resonance types. The LR types take advantages of the local resonance principle with the controlling wavelengths orders of magnitude greater than the physical dimension of a unit. To overcome the intrinsic narrow-band limitations of LR and broaden the bandwidths, efforts have been made to utilize multilayer LR-AMMs or multi-size LRs, attach/embed elastic plate scatter on/into elastically coated plate, or introduce complex lattices with multiple (coupled) LRs, etc. The non-resonance types are based on non-resonance mechanisms such as viscous loss, heat conduction, macromolecular relaxation or a combination of them. These AMMs mainly include porous metals and nonmetal materials, gradient AMMs and acoustic meta-surfaces, etc. The AMMs for underwater decoupling mainly use acoustically soft AMMs to decouple the vibration of the base structure from adjacent fluid. These AMMs contain the acoustic coating embedded with various cavities or local resonators, gradient coating, re-entrant honeycomb structure or structure with negative Poisson's ratio and chiral porous coating, etc. The sound-focusing AMMs are categorized into diffractive, refractive and reflective types. The diffractive types focus underwater sound through constructive interference of diffracted waves, which mainly include all kinds of zone plates and fractal lens. The refractive types are mainly based on various acoustic lens and focus sound by controlling the refraction index of the materials. The reflective types focus sound by modulating the reflective waves, including the recently-proposed reflective acoustic meta-surfaces and acoustic coatings with attached/embedded periodically distributed signal conditioning plates, etc.

Finally, the conclusions and drawbacks of the above AMMs are summarized. It is pointed out that although the present underwater AMMs have achieved some encouraging results, they are still confronted with several key problems such as the realizations of low-frequency and broadband, omnidirectional, subwavelength, lightweight and hydrostatic pressure resistant sound manipulations, the manufacture and testing of large AMM samples, and the environmental adaptations requirements. Therefore, there is still a long way for the current underwater AMM toward the real application. The trend and outlook toward future underwater AMMs are also presented. It is hoped that this review could provide guidelines to the design and realization of future materials demanded for underwater acoustic stealth and detection.

underwater acoustic metamaterials, sound stealth, decoupling, sound absorption, sound focus/amplification, noise and vibration reduction

doi: [10.1360/TB-2019-0690](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0690)