

水下吸声超材料的质量集中效应

马承志^{1,2}, 王立博^{1,2}, 吴九汇^{1,2}

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安;

2. 西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了降低水下吸声超材料的厚度,更加利于水下吸声的实际应用,提出了一种将质量集中效应引入水下薄板型声学超材料的设计思想。一般来说,对于经典的水下薄板型超材料,其单元胞结构是由一个四周固定的薄钢板及固定在薄钢板上方的振子构成,当平面波以一定频率垂直入射到单元胞表面时,会出现一个显著的由振子共振引起的声吸声峰。但是,在保持总质量不变的情况下,将原厚振子精确地划分为相邻的两个薄振子,可以获得类似的吸声性能,同时出现额外的吸声峰,具有多个模态,超材料的厚度会急剧下降,这种现象称为质量集中效应。为了更好地理解吸声的物理机理和优化吸声性能,运用阻抗匹配机理和有限元模拟方法,探讨了重要结构参数对吸声性能的影响。在此基础上,提出了一种多元胞结构,该结构在 200~1 000 Hz 范围内具有良好的宽带吸声效果。该研究为水下低厚度超材料的设计提供了一种有效的方法。

关键词: 水下吸声;质量集中效应;薄板型超材料;低频宽带

中图分类号: TB56 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202112019 **文章编号:** 0253-987X(2021)12-0163-09



OSID 码

Mass Concentration Effect of Underwater Sound-Absorbing Metamaterials

MA Chengzhi^{1,2}, WANG Libo^{1,2}, WU Jiuhui^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To reduce the thickness of underwater sound absorbing metamaterials and facilitate their practical application of underwater sound absorption, a design idea of introducing mass concentration effect into underwater thin-plate acoustic metamaterials is proposed. Generally describing, for the classical underwater thin-plate metamaterial, the unit cell structure is composed of a thin steel plate fixed around and an oscillator fixed on the top of the thin steel plate. When a plane wave is vertically incident on the surface of the unit cell at a certain frequency, there is a significant sound absorption peak caused by oscillator resonance. However, in the case of keeping the total mass unchanged, if the original thick oscillator is accurately divided into two adjacent thin oscillators, similar sound absorption properties can be obtained, additional sound absorption peaks appear at the same time with multiple modes, and the thickness of the metamaterial decreases sharply. This phenomenon is called mass concentration effect. To reveal the physical mechanism of sound absorption and optimize sound absorption performance, the effects of important structural parameters on sound absorption performance are discussed by impedance matching mechanism and finite element simulation. Then a multi-cell structure is

designed, which is endowed with good broadband sound absorption effect within the range of 200—1 000 Hz.

Keywords: underwater sound absorption; mass concentration effect; thin-plate metamaterials; low frequency broadband

共振型声学超材料具有对低频声的良好吸声性能,成为主流的吸声方法之一,近年来得到了广泛的研究。与传统材料相比,共振型声学超材料具有吸声系数高、结构尺寸小等显著优点。然而,诸如膜型超材料(MAMS)^[1-7]、缠绕空间超材料^[8-11]和亥姆霍兹谐振器^[12-16]等几种共振型超材料存在一个主要的障碍,即由于局域共振机制,吸声范围可能仅限于一个狭窄的频带内。因此,如何拓宽吸声带宽是一个值得关注的重要问题。

近年来,共振型超材料的协同耦合特性引起了人们的广泛关注。具体来说,对于 MAMS 结构,主要有两种结构,分别对应于两种协同耦合行为。一种结构是在一个元胞上放几个振子。在此过程中,多个振子可以丰富元胞的共振模态,从而产生更多的吸声峰,使材料的带宽显著拓宽。另一个是多元胞阵列,每个元胞有一个振子产生一个单独的共振峰。通过这种方法,多元胞阵列的总振动幅值在声学虹吸^[17]作用下大大提高,保证了结构在较宽的频率范围内仍能保持较高的吸声水平。受上述方法的启发,近年来在空气中宽带低频吸声的尝试越来越成功^[18],同时水下吸声也有不错的研究进展^[19-30]。但是,如何在水下以低厚度超材料实现低频段吸声仍是我们急需解决的问题。

由于水和空气的特性阻抗差异巨大,这种膜型超材料应该被薄板型超材料取代,这种薄板型超材料是由一块薄钢板和铅块振子组成,薄钢板取代了膜型超材料中的硅胶薄膜,同时,因为钢的刚度是硅胶薄膜的几倍,这意味着为了使结构在相同频率处的达到共振,薄板型超材料需要比膜型超材料中使用更重的振子才能达到低频吸声性能。因此,当截面形状保持不变时,振子的厚度会显著增加,这无疑不利于实际应用。

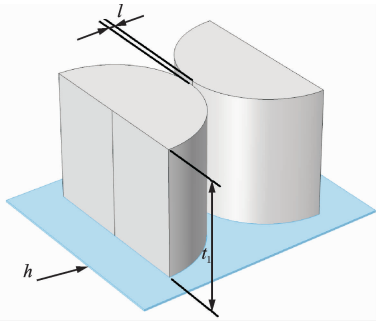
为了实现低厚度的超材料,本文提出了质量集中效应的一般设计概念。传统的薄板型超材料是通过一个厚振子的振动产生吸声峰,而利用质量集中效应的薄板型超材料可以通过相邻两个薄振子集中获得相同的吸声性能,同时出现额外的吸声峰,具有多个模态。这意味着在保持原有吸声性能基本不变的情况下,不仅可以大幅度降低超材料的厚度,还能

提高超材料的吸声性能。同时,分析了分离振子的距离和质量差对吸声系数的影响,并利用声阻抗匹配机理解释了吸声的物理机理。在此基础上,提出了一种多元胞结构,该结构在 200~1 000 Hz 范围内具有良好的宽带吸声效果。

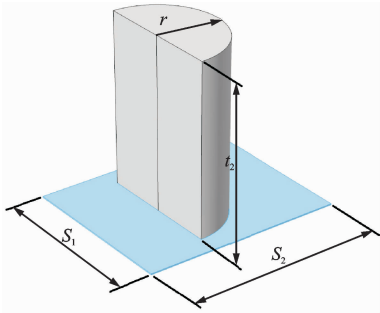
1 基于质量集中效应的模型

1.1 仿真模型

为了说明质量集中效应,图 1 给出了两种结构,具有质量集中效应的双振子结构 M1 和传统的单振子结构 M2。具体而言,M1 结构由 3 部分组成:一块矩形薄钢板、两个相对的半圆型铅块振子,如图 1a 所示。同样,M2 结构也是由 3 部分组成,唯一不同的是只有一个振子固定在钢板上,如图 1b 所示。M1 和 M2 中薄板的宽度、长度和厚度分别为 $S_1=50\text{ mm}$, $S_2=60\text{ mm}$, $h=0.3\text{ mm}$ 。此外,M1 和 M2 中振子的半径均为 $r=19\text{ mm}$,M1 中振子的厚度均为 $t_1=30\text{ mm}$,而 M2 中振子的厚度为 $t_2=60\text{ mm}$,M1 中分离振子之间的距离为 $l=1\text{ mm}$ 。仿真中使



(a) 基于质量集中效应的双振子结构 M1



(b) 单振子结构 M2

图 1 两种结构的仿真模型

Fig. 1 Simulation models of two oscillator structures

用的材料参数如表 1 所示。

表 1 仿真中使用的材料参数
Table 1 Material parameters used in simulation

材料	密度 $\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	杨氏模量 E/Pa	泊松比 ν	损耗因子
钢板	7 870	2.06×10^{11}	0.30	0.05
铅块	11 340	17.00×10^9	0.42	

为了获得该超材料的吸声性能,利用商用有限元软件 COMSOL MultiphysicsTM 5.5 建立了声-固耦合的有限元仿真模型。薄板、振子被定义为固体域,其余部分被定义为声学域;沿元胞结构法线方向,将平面入射波($P=1\text{ Pa}$)垂直地施加于该超材料表面;边界条件设置为固定约束,该约束施加在薄板的外边缘;材料参数和几何尺寸与上述参数保持一致。此外,水的密度和水中的声速分别 $\rho_0=1\,000\text{ kg/m}^3$ 和 $c_0=1\,500\text{ m/s}$ 。

1.2 声场计算模型

图 2 所示为声场简化示意图,根据能量守恒定理,入射声波 I_i 由以下 3 部分组成:反射声波 I_r 、透射声波 I_t 以及声能转化为结构共振后所耗散的能量 I_a 。因此,该超材料所耗散的能量 I_a 可以表示为

$$I_a = I_i - I_r - I_t \tag{1}$$

声强吸声系数 α 定义为 I_a 和 I_i 的比值

$$\alpha = \frac{I_a}{I_i} = 1 - R_1 - T_1 \tag{2}$$

式中: R_1 为声强反射系数; T_1 为声强透射系数^[31]。

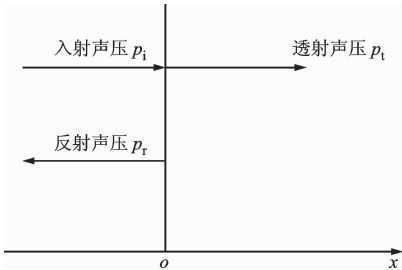


图 2 声场简化示意图

Fig. 2 Schematic diagram of simplified sound field

在不考虑声波传播过程中媒质损耗问题情况下,薄板振子吸声结构的吸声系数 $\alpha \leq 50\%$ ^[32],即

$$\alpha = 1 - \left(2 \times \frac{|p_t|^2}{|p_i|^2} - 2 \times \frac{|p_r|^2}{|p_i|^2} + 1 \right) \leq 50\% \tag{3}$$

此时,由吸声峰值处声阻抗匹配原理可知,声阻抗率表达式为

$$Z_s = R_s + jX_s \tag{4}$$

式中: R_s 为声阻率; X_s 为声抗率。

这里设 $\xi = \frac{Z_s}{\rho_0 c_0}$,称为负载的声阻抗率比,所以 ξ 也可表示成复数形式

$$\xi = x_s + jy_s \tag{5}$$

式中: $x_s = \frac{R_s}{\rho_0 c_0}$ 为声阻率比; $y_s = \frac{X_s}{\rho_0 c_0}$ 为声抗率比。

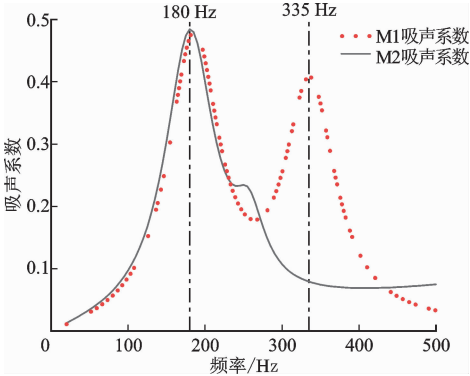
当 $\xi=1$ 时, $x_s=1, y_s=0$,吸声系数 α 达到最大值 0.5,这就说明超材料的吸声系数与它的声阻抗之间有着十分密切的关系。当 $Z_s=\rho_0 c_0$ 时,超材料的结构阻抗与介质的特性阻抗是匹配的,具有良好的吸声性能。

2 质量集中效应的低频多模态宽带吸声物理机理

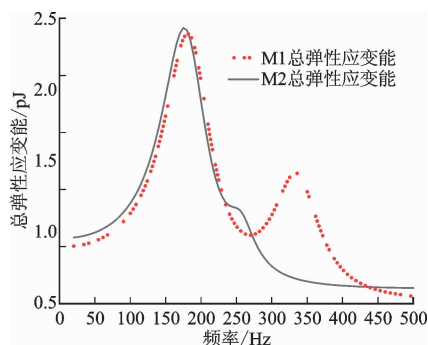
图 3a、3c、3d、3e 分别给出了 M1 和 M2 的吸声系数以及各情况下吸声峰对应的振动模态。由图 3a 可以明显看出,两种结构在 180 Hz 处都产生了一个吸声峰,最大吸声系数几乎相同,为 0.48。此外,M1 在 335 Hz 处出现了另一个吸声峰,吸声系数为 0.405。图 3c、3d、3e 分别给出了结构的振动模态和振幅,可以清楚地看到,在每种情况下,吸声峰都与振子的共振有关。具体来说,在 M1 情况下,第 1 个吸声峰对应于振子内部的强平移运动,第 2 个吸声峰可归因于振子外部的旋转运动。同样,对于 M2 情况,唯一的吸声峰是由振子的强平移运动产生的。

图 3b 为 M1 和 M2 的总弹性应变能。可见,在振子振动的作用下,总弹性应变能在 180 Hz 和 335 Hz 处显著增强,将入射声能转化为弹性应变能后通过结构阻尼进行耗散,从而提高吸声系数。

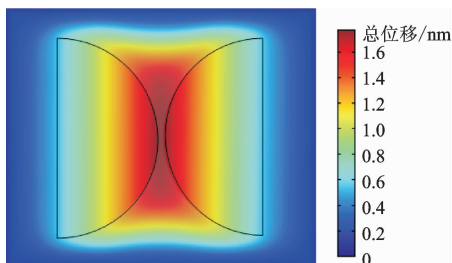
值得强调的是,上述研究中 M2 振子厚度等于 M1 振子的总厚度,这意味着 M1 和 M2 振子的总重量相等。在这种情况下,与 M2 结构相比,通过适当



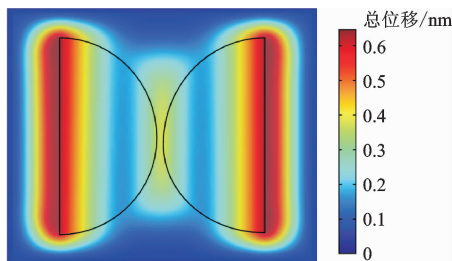
(a) M1 和 M2 的吸声系数



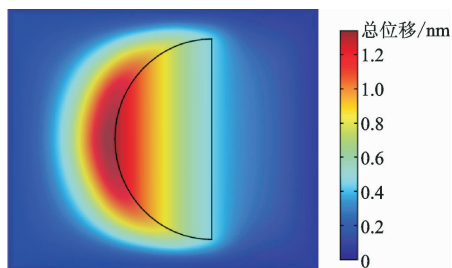
(b) M1 和 M2 的总弹性应变能



(c) M1 在 180 Hz 处的振动模式



(d) M1 在 335 Hz 处的振动模式



(e) M2 在 180 Hz 处的振动模式

图3 质量集中效应作用下的超材料

Fig. 3 Metamaterials under mass concentration effect

设计 M1 的结构可以获得类似的第 1 个吸声峰和 1 个附加吸声峰,同时振子厚度大幅度降低,结构变薄,这种现象可以描述为质量集中效应。

为了更好地研究质量集中效应背后的物理机理,我们对 M1 和 M2 的阻抗特性进行了研究。M1 和 M2 的阻抗特性如图 4 所示。在 M1 中,需要注意 180 Hz 和 335 Hz 两处,180 Hz 时声阻率比 x_s 为 1.52,非常接近于 1,声抗率比 y_s 等于 0。根据声

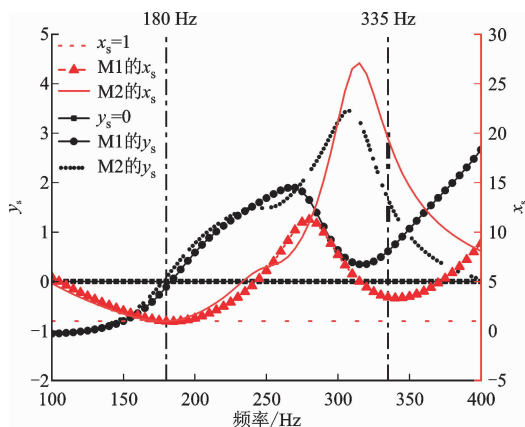


图4 M1 和 M2 的声阻抗率比情况

Fig. 4 Acoustic impedance ratio of M1 and M2

阻抗匹配机理,该处存在一个吸声系数相当高的吸声峰。同时,在 335 Hz 处的声阻率比 x_s 和声抗率比 y_s 都接近理想吸声的假设情况,因此在 335 Hz 时出现另一个吸声峰。与 180 Hz 相比,335 Hz 时的声阻率比和声抗率比分别离 1 和 0 有一定距离。因此,335 Hz 时的最大吸声系数应小于 180 Hz 时的最大吸声系数,这与图 4 的结果一致。

在 M2 结构中有两点需要注意,同样是 180 Hz 和 335 Hz 两处。180 Hz 时的声阻率比为 1.53,声抗率比为 0,可以保证吸声峰具有近乎完美的吸声系数。335 Hz 时的声阻率比和声抗率比远离 1 和 0,意味着在 335 Hz 时不会出现明显的吸声峰,这也可以在图 4 中得到证实。

3 关键参数对吸声性能的影响

3.1 分离振子间距离对吸声情况的影响

首先,为了探究 M1 结构下振子之间的距离 D 对吸声系数的影响,研究了以下几种情况:情况 1.1, $D=0$ mm;情况 1.2, $D=2$ mm;情况 1.3, $D=4$ mm;情况 1.4, $D=6$ mm;情况 1.5, $D=8$ mm。

为了更直观地展示振子间距对吸声性能的影响,对情况 1.1~1.5 的吸声系数和吸声峰的频率进行了总结,如表 2 和表 3 所示。

振子间不同距离的 M1 结构吸声情况的数值模拟结果如图 5 所示。对于第 1 个吸声峰,可以清楚地看出,在 D 不为 0 的情况下,虽然两个振子之间的距离越远,但是吸声系数变化不大。随着 D 从 2 mm 增大到 8 mm,吸声系数从 0.476 减小到 0.461,当 $D=0$ 时,吸声系数为 0.46。具体来说,情况 1.1~情况 1.5 中第 1 个吸声峰的频率分别为 220、180、180、190 和 190 Hz,可以看出,当 D 从 2

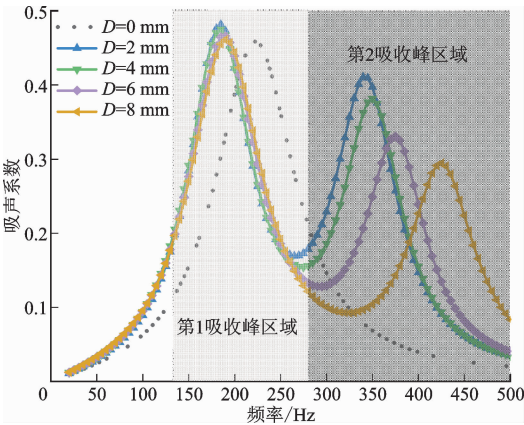


图 5 振子间不同距离的 M1 结构吸声情况

Fig. 5 Sound absorption of M1 structure with different distances between oscillators

mm 增加到 8 mm 时,吸声峰的频率变化不大;当 $D=0$ mm 时,此时两振子合并为一个整体,吸声峰的频率向高频移动,具有良好的吸声性能。

表 2 第 1 个吸声峰的吸声系数和频率

Table 2 Absorption coefficient and frequency of the first absorption peak

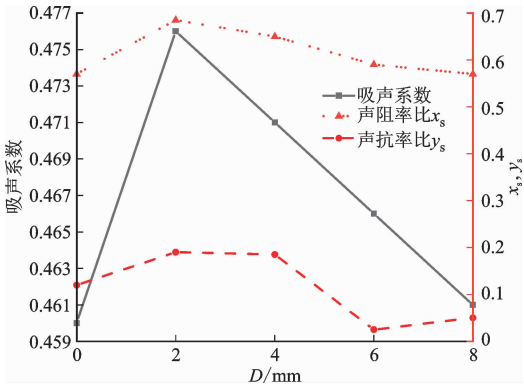
D/mm	吸声系数 α	频率/Hz
0	0.460	220
2	0.476	180
4	0.471	180
6	0.466	190
8	0.461	190

表 3 第 2 个吸声峰的吸声系数和频率

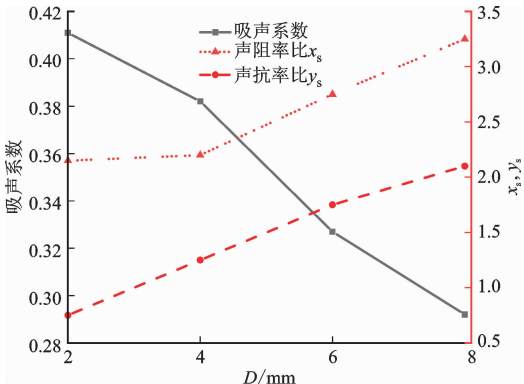
Table 3 Absorption coefficient and frequency of the second absorption peak

D/mm	吸声系数 α	频率/Hz
0		
2	0.411	340
4	0.382	350
6	0.327	370
8	0.292	420

对于第 2 个吸声峰,随着 D 的增加,吸声峰的最大吸声系数和吸声峰的频率都有明显的变化,即随着 D 从 2 mm 增加到 8 mm,吸声峰从 0.41 下降到 0.29,同时,吸声峰的频率向更高的频率范围移动;当 $D=0$ mm 时,由于两振子不相互独立,无法通过振子外部的旋转运动所产生的共振来进行吸声,因此在 0~500 Hz 范围内没有第 2 个吸声峰。



(a)第 1 吸声峰区域



(b)第 2 吸声峰区域

图 6 情况 1.1~1.5 中吸声峰的声阻抗

Fig. 6 Acoustic impedance at the acoustic absorption peak in cases 1.1~1.5

为了充分理解阻抗特性与吸声系数之间的关系,图 6 给出了情况 1.1~1.5 中吸声峰处的阻抗特性。从图 6a 中可以明显看出,随着 D 的增大,阻抗特性略微变化,导致吸声系数略有变化。以 $D=2$ mm 和 $D=4$ mm 为例,来充分理解这种现象。在 $D=2$ mm 的情况下,声阻率比和声抗率比分别为 0.683 和 0.19,当 $D=4$ mm 时,声阻率比和声抗率比分别是 0.644 和 0.18。因此,由声阻抗匹配原理,可以得到不同的吸声系数,分别为 0.476 和 0.471。同样,对于第 2 个吸声峰区域,如图 6b 所示,随着 D 的增大,因为声阻率比和声抗率比分别远离 1 和 0,吸声系数显著降低。

3.2 分离振子间质量差对吸声情况的影响

紧接着,对结构的另一个关键参数振子的质量差进行了深入研究,图 7 所示为不同振子的质量差与吸声系数的关系。值得注意的是,由于所有振子都采用相同的材料和截面面积,不同振子的质量差可以用振子的厚度差 T 来表示,在这里振子的总质量保持不变。

情况 2.1: 30 mm/30 mm,总厚度为 60 mm,厚度差 $T=0$ mm。

情况 2.2: 35 mm/25 mm,总厚度为 60 mm,厚度差 $T=10$ mm。

情况 2.3: 40 mm/20 mm,总厚度为 60 mm,厚度差 $T=20$ mm。

情况 2.4: 45 mm/15 mm,总厚度为 60 mm,厚度差 $T=30$ mm。

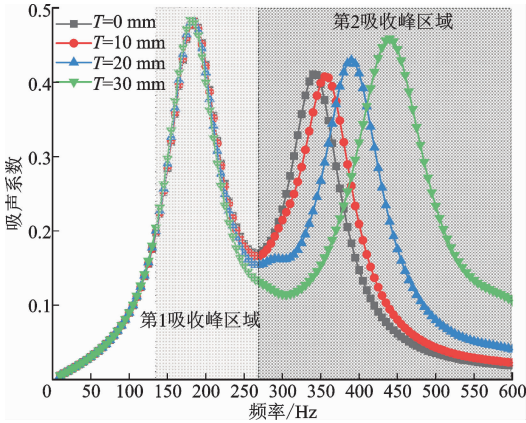


图 7 振子间不同厚度差的 M1 结构的吸声情况
Fig.7 Sound absorption of M1 structures with different thickness differences between oscillators

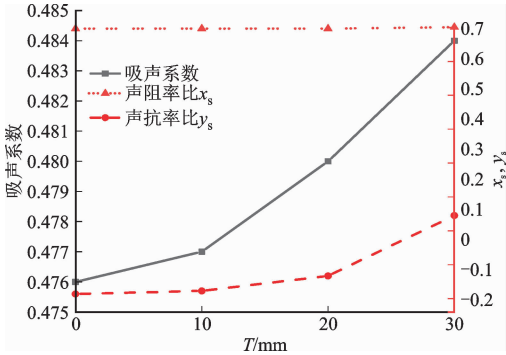
为了更清楚地描述结果,我们总结了情况 2.1~2.4 的吸声系数和吸声峰的频率,如表 4 和表 5 所示。可以清楚地看出,对于第 1 吸声峰区域,随着振子厚度的增加,吸声峰频率不变,吸声系数略有提

表 4 第 1 个吸声峰的吸声系数和频率
Table 4 Absorption coefficient and frequency at the first absorption peak

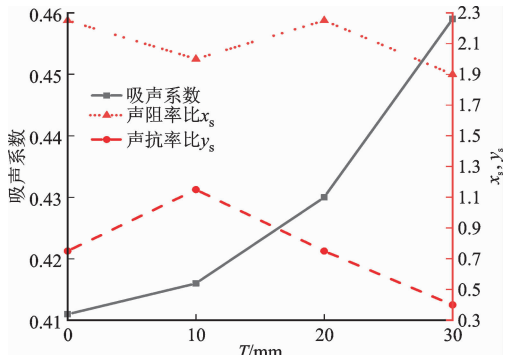
t_1/mm	吸声系数 α	频率/Hz
30	0.476	180
35	0.477	180
40	0.480	180
45	0.484	180

表 5 第 2 个吸声峰的吸声系数和频率
Table 5 Absorption coefficient and frequency at the second absorption peak

t_1/mm	吸声系数 α	频率/Hz
30	0.411	340
35	0.416	360
40	0.430	390
45	0.459	440



(a)第 1 吸声峰区域



(b)第 2 吸声峰区域

图 8 情况 2.1~2.4 中吸声峰的声阻抗
Fig.8 Acoustic impedance at the acoustic absorption peak in cases 2.1~2.4

高。在第 2 个吸声峰区域,随着振子厚度的变化,吸声系数和吸声峰频率的变化显著,吸声系数逐渐提高,频率向高频移动。

结构的阻抗特性与吸声系数的关系,如图 8 所示。在图 8a 中,由于声阻率比和声抗率比变化都很小,所以在第 1 个吸声峰区域的吸声系数几乎没有变化。这里以 $T=10$ mm 和 $T=20$ mm 为例,声阻率比由 0.681 4 变为 0.684 2,声抗率比由 $-0.172\ 2$ 变为 -0.132 。因此,最大吸声系数从 0.477 增加到 0.480。另一方面,对于第 2 个吸声峰区域,同样超材料越满足阻抗匹配条件,吸声效果越好,如图 8b 所示。

4 质量集中效应作用下的多模态低频宽带吸声超材料

基于上述分析,图 9a 给出了一种基于质量集中效应的多模态低频宽带吸声超材料,该超材料由 9 个基本元胞并联布置构成。具体来说,超材料的整体尺寸 $W=150$ mm, $L=180$ mm, $H=30$ mm。

通过对每个元胞结构进行设计,使得每个元胞

在所设计的频率段内能够产生高效吸声效果。通过多元胞的并联布置,在声学虹吸效应的作用下,各个元胞分别在对应共振频率段发生强烈振动如图 9b 所示。通过振型图可以看出,600 Hz 以下的吸声,主要是通过每个元胞中振子内部强平移运动所产生的第 1 吸声峰进行吸声,在 600 Hz 处及以上频率,主要是通过每个元胞中振子外部的旋转运动所产生的第 2 吸声峰进行吸声,从而使得该超材料在各个频率段都具有高效吸声效果以及低的厚度。基于质量集中效应实现了 200~1 000 Hz 的多模态低频宽带吸声效果,如图 9c 所示。

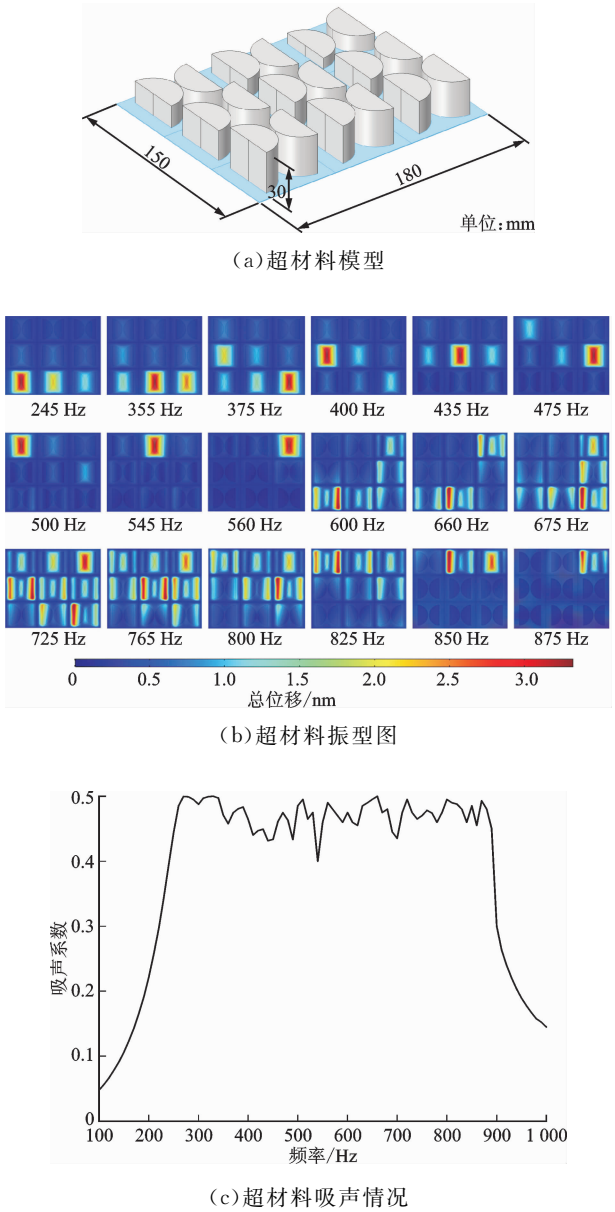


图 9 多模态低频宽带吸声超材料

Fig. 9 Multimodal low-frequency and wide-band sound-absorbing metamaterial

5 结束语

在本研究中,在保持总质量不变的情况下通过将单一振子的高度精确地划分为相邻的两个薄振子,可以获得类似原单一振子的吸声峰和一个附加吸声峰,增加了一个共振吸声模态,吸声性能大大提高,同时振子高度大幅度降低,超材料厚度急剧下降,结构变薄,这种现象我们描述为质量集中效应。我们利用声阻抗匹配机理解释了该超材料吸声的物理机理,探究了分离振子的距离和质量差对吸声系数的影响,得出来非常重要的规律。最后,提出了一种低厚度超材料,该超材料在 200~1 000 Hz 范围内具有良好的宽带吸声效果。总之,基于质量集中效应,将为水下低厚度的多模态低频宽带吸声超材料设计提供有效的指导,显示出巨大的水下声波控制潜力,具有实际工程应用意义。

参考文献:

[1] 吴九汇,马富银,张思文,等. 声学超材料在低频减振降噪中的应用评述 [J]. 机械工程学报, 2016, 52 (13): 68-78.
WU Jiuhui, MA Fuyin, ZHANG Siwen, et al. Application of acoustic metamaterials in low-frequency vibration and noise reduction [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(13): 68-78.
[2] 吴晓,刘崇锐,王轲,等. 声学超结构低频宽带协同耦合高效吸声机理 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53 (10): 122-127.
WU Xiao, LIU Chongrui, WANG Ke, et al. Low-frequency broadband synergistic coupling mechanism of acoustic metamaterials with high efficiency absorption [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53 (10): 122-127.
[3] LEBLANC A, LAVIE A. Three-dimensional-printed membrane-type acoustic metamaterial for low frequency sound attenuation [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 141(6): EL538-EL542.
[4] MA Fuyin, HUANG Meng, WU Jiuhui. Acoustic metamaterials with synergetic coupling [J]. Journal of Applied Physics, 2017, 122(21): 215102.
[5] MA Guancong, YANG Min, XIAO Songwen, et al. Acoustic metasurface with hybrid resonances [J]. Nature Materials, 2014, 13(9): 873-878.
[6] LANGFELDT F, RIECKEN J, GLEINE W, et al. A membrane-type acoustic metamaterial with adjustable

- acoustic properties [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, 373: 1-18.
- [7] MEI Jun, MA Guancong, YANG Min, et al. Dark acoustic metamaterials as super absorbers for low-frequency sound [J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 756.
 - [8] LI Yong, LIANG Bin, TAO Xu, et al. Acoustic focusing by coiling up space [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(23): 233508.
 - [9] XIE Yangbo, KONNEKER A, POPA B I, et al. Tapered labyrinthine acoustic metamaterials for broadband impedance matching [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(20): 201906.
 - [10] WU Xiaoxiao, FU Caixing, LI Xin, et al. Low-frequency tunable acoustic absorber based on split tube resonators [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(4): 043501.
 - [11] CAI Xiaobing, GUO Qiuquan, HU Gengkai, et al. Ultrathin low-frequency sound absorbing panels based on coplanar spiral tubes or coplanar Helmholtz resonators [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(12): 121901.
 - [12] CAI Chenzhi, MAK C M. Acoustic performance of different Helmholtz resonator array configurations [J]. *Applied Acoustics*, 2018, 130: 204-209.
 - [13] MA Fuyin, CHEN Jianyu, WU Jiuhui. Time-delayed acoustic sink for extreme sub-wavelength focusing [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 141: 106492.
 - [14] GUAN Dong, WU Jiuhui, JING Li, et al. Application of a Helmholtz structure for low frequency noise reduction [J]. *Noise Control Engineering Journal*, 2015, 63(1): 20-35.
 - [15] 李竞, 王红赛, 关栋, 等. 含谐振单元和弹性支撑谐振单元的声子晶体低频禁带特性研究 [J]. *人工晶体学报*, 2021, 50(1): 7-12, 31.
LI Jing, WANG Hong sai, GUAN Dong, et al. Low-frequency band gap characteristics of phononic crystal of one-resonator and one-resonator with elastic support [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2021, 50(1): 7-12, 31.
 - [16] LONG Houyou, CHENG Ying, TAO Jiancheng, et al. Perfect absorption of low-frequency sound waves by critically coupled subwavelength resonant system [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(2): 023502.
 - [17] LIU Chongrui, WU Jiuhui, LU Kuan, et al. Acoustical siphon effect for reducing the thickness in membrane-type metamaterials with low-frequency broadband absorption [J]. *Applied Acoustics*, 2019, 148: 1-8.
 - [18] 刘崇锐, 吴九汇. 微穿孔黏性超表面的低频宽带吸声机理 [J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(12): 80-86.
LIU Chongrui, WU Jiuhui. Low-frequency broadband absorption mechanism of micro-perforated lossy meta-surface [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(12): 80-86.
 - [19] 张权, 吴友亮. 一种水下低频吸声尖劈的研制 [J]. *声学与电子工程*, 2014(1): 38-40, 45.
ZHANG Quan, WU Youliang. Development of a kind of underwater low frequency sound absorption wedge [J]. *Acoustics and Electronics Engineering*, 2014(1): 38-40, 45.
 - [20] 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 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2005, 21(4): 46-50.
ZHU Jinhua, WANG Yuansheng, WEN Qingzhen, et al. The development and application of underwater acoustic absorption polymer materials [J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2005, 21(4): 46-50.
 - [21] 王育人, 缪旭弘, 姜恒, 等. 水下吸声机理与吸声材料 [J]. *力学进展*, 2017, 47(1): 92-121.
WANG Yuren, MIAO Xuhong, JIANG Heng, et al. Review on underwater sound absorption materials and mechanisms [J]. *Advances in Mechanics*, 2017, 47(1): 92-121.
 - [22] 程道周, 刘文武, 楼京俊, 等. 消声瓦的吸声机理研究 [J]. *船海工程*, 2007, 36(3): 101-104.
CHENG Daozhou, LIU Wenwu, LOU Jingjun, et al. A study of the absorption mechanism of the anechoic tiles [J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2007, 36(3): 101-104.
 - [23] 刘云路, 曾竟成, 杨金水. 橡胶水下吸声材料的研究进展 [J]. *橡胶工业*, 2016, 63(8): 506-510.
LIU Yunlu, ZENG Jingcheng, YANG Jinshui. Research progress of rubber underwater sound absorbing material [J]. *China Rubber Industry*, 2016, 63(8): 506-510.
 - [24] 石云霞, 奚正平, 汤慧萍, 等. 水下吸声材料的研究进展 [J]. *材料导报*, 2010, 24(1): 49-52.
SHI Yunxia, XI Zhengping, TANG Huiping, et al. Progress of underwater sound-absorbing materials [J]. *Materials Review*, 2010, 24(1): 49-52.
 - [25] 常道庆, 刘碧龙, 郑成诗, 等. 水下薄板吸声结构研究 [C]//中国声学学会 2009 年青年学术会议论文集. 长沙: [s. n.], 2009: 223-224.

[26] ZHAO Honggang, WEN Jihong, YANG Haibin, et al. Backing effects on the underwater acoustic absorption of a viscoelastic slab with locally resonant scatterers [J]. *Applied Acoustics*, 2014, 76: 48-51.

[27] YE Changzheng, LIU Xuewei, XIN Fengxian, et al. Influence of hole shape on sound absorption of underwater anechoic layers [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 426: 54-74.

[28] ZHAO Dan, ZHAO Honggang, YANG Haibin, et al. Optimization and mechanism of acoustic absorption of Alberich coatings on a steel plate in water [J]. *Applied Acoustics*, 2018, 140: 183-187.

[29] MENG Hao, WEN Jihong, ZHAO Honggang, et al. Optimization of locally resonant acoustic metamaterials on underwater sound absorption characteristics [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2012, 331(20): 4406-4416.

[30] ZHANG Yanni, PAN Jie, CHEN Kean, et al. Sub-wavelength and quasi-perfect underwater sound absorber for multiple and broad frequency bands [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2018, 144(2): 648-659.

[31] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础 [M]. 3 版. 南京: 南京大学出版社, 2012: 131-135.

[32] CHEN Yangyang, HUANG Guoliang, ZHOU Xiaoming, et al. Analytical coupled vibroacoustic modeling

of membrane-type acoustic metamaterials: plate model [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2014, 136(6): 2926-2934.

[本刊相关文献链接]

刘红星, 吴九汇. 阶梯型微缝超表面低频宽带吸声特性. 2021, 55(9): 71-79. doi:10.7652/xjtuxb202109008.

徐宜才, 吴九汇. 非对称声学超材料的各向异性反射特性及等效参数. 2021, 55(1): 1-9. doi:10.7652/xjtuxb202101001.

刘波涛, 刘崇锐, 吴九汇, 张奇志. 低频大宽带声学超结构的多阶共振高效吸声机理. 2020, 54(8): 149-156. doi:10.7652/xjtuxb202008019.

周国建, 吴九汇, 路宽, 田秀杰, 黄威, 朱可达. 多态反共振协同型薄膜声学超材料低频隔声性能. 2020, 54(1): 64-74. doi:10.7652/xjtuxb202001009.

刘崇锐, 吴九汇. 微穿孔黏性超表面的低频宽带吸声机理. 2019, 53(12): 80-86. doi:10.7652/xjtuxb201912011.

吴晓, 刘崇锐, 王轲, 蔡永庆, 吴九汇. 声学超结构低频宽带协同耦合高效吸声机理. 2019, 53(10): 122-127. doi:10.7652/xjtuxb201910017.

张俊, 陈卫华, 任树伟, 辛锋先, 陈天宁, 卢天健. 高温环境下梯度多孔金属纤维的吸声性能及优化设计. 2018, 52(1): 143-150. doi:10.7652/xjtuxb201801021.

侯明明, 吴九汇. 迷宫型声学超表面可调参数及其全相位调节. 2018, 52(5): 29-37. doi:10.7652/xjtuxb201805004.

(编辑 杜秀杰)