

DOI: 10.7652/xjtuxb201910017

# 声学超结构低频宽带协同耦合高效吸声机理

吴晓, 刘崇锐, 王轲, 蔡永庆, 吴九汇  
(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

**摘要:** 针对传统材料难以有效控制低频噪声的问题,提出了一种膜类带腔声学超结构的低频宽带协同耦合高效吸声机理。这种超结构有多个吸声单元,每个吸声单元由两个铝片组成,铝片固定在空气腔上方的硅胶薄膜上。首先利用有限元软件 COMSOL Multiphysics 5.3 计算单元胞的吸声特性,确定吸声结构的尺寸和材料参数;然后通过两元胞结构分析振动模态和吸声机理,解决吸声结构窄带的问题,再分析典型结构参数对协同耦合机理和吸声特性的具体影响规律;最后通过多单元的协同耦合,实现整个频率范围内的宽带吸声。仿真结果表明:通过设计多个单元的协同耦合,可以将不同单元之间的吸声峰值相互错开,使结构的吸声系数在整个低频范围内均匀分布,实现 200~1 000 Hz 范围内连续的吸声宽带,平均吸声系数为 80%左右,实现低频大宽带的优异吸声性能。该研究结果可为低频宽带吸声材料的设计提供一种新的思路,在控制振动和噪声方面具有潜在的应用前景。

**关键词:** 声学超结构;宽带吸声;协同耦合

**中图分类号:** O422.4   **文献标志码:** A   **文章编号:** 0253-987X(2019)10-0122-06

## Low-Frequency Broadband Synergistic Coupling Mechanism of Acoustic Metamaterials with High Efficiency Absorption

WU Xiao, LIU Chongrui, WANG Ke, CAI Yongqing, WU Jiuhui  
(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** A low-frequency broadband synergistic coupling mechanism of membrane-type metamaterials with high efficiency absorption is proposed to solve the problem that traditional materials are difficult to effectively control low-frequency noise. This kind of membrane-type metamaterials consists of multiple units, each unit is composed of two aluminum platelets, and each platelet is fastened on a piece of silicone membrane above an air cavity. Finite element software COMSOL Multiphysics 5.3 is used to calculate the absorption characteristics to determine the structure size and material parameters of the cell. Then the vibration mode and mechanism are analyzed by two cells to solve the narrow band. The influence of typical structural parameters on synergetic coupling mechanism and absorption characteristics is discussed. The broadband sound absorption in the whole frequency range is realized via synergetic coupling of multiple units. The simulations show that the absorption peaks of units can be staggered with each other via synergetic coupling of multiple units, so that the absorption coefficient of this structure is evenly distributed in the whole low frequency range, and the continuous broadband in

the range of 200-1 000 Hz is obtained. The average absorption coefficient is about 80%, and an excellent absorption performance of low-frequency broadband is achieved. Thus a new idea for the design of acoustic metamaterials with low-frequency broadband absorption is presented.

**Keywords:** acoustic metamaterials; broadband sound absorption; synergistic coupling

近年来,由于声学超材料<sup>[1]</sup>具有良好的低频吸声性能,得到了广泛研究。传统吸声材料<sup>[2-4]</sup>以多孔材料、微穿孔板为主,这些材料在低频段的吸声性能较差,要想吸收低频声波,就需要很厚的结构,这无法满足实际应用的需求。与传统材料相比,声学超材料具有更小的结构尺寸和更高的能量耗散率,为低频振动与噪声控制提供了新的思路。在 2000 年,刘正猷教授提出的声学超材料概念<sup>[5]</sup>得到了国内外学者的广泛关注。发展至今,已经涌现出许多新型的超材料,其中部分结构能达到完美吸声,包括薄膜超材料<sup>[6-7]</sup>、薄板超材料<sup>[8-9]</sup>、声学超表面<sup>[10-11]</sup>、空间卷曲型声学超材料<sup>[12-14]</sup>等。这些超材料虽然具有良好的低频吸声性能,但只能在很窄的频带范围内实现,无法形成大宽带的良好吸声,因此实现亚波长厚度的低频大宽带吸声是当前研究的热点之一。

目前,有很多学者研究了通过多个共振单元之间的协同耦合作用来实现不同吸声峰值,从而解决宽带吸声的问题。文献[15]在穿孔板后腔中间位置处放置一个薄膜结构,声波通过孔入射到薄膜表面时,薄膜会振动,产生吸声峰值,由穿孔板和薄膜组成的两自由度复合吸声结构,可以实现 100~800 Hz 范围的低频宽带吸声。文献[16]提出两个并联腔的两自由度结构,由薄板和后腔组成的系统的谐振频率与传统谐振器系统的谐振频率相调谐,将吸收谐振峰一分为二。此外,通过调整谐振腔的尺寸、阻尼等特性,可以提高吸收系数。文献[17]研究了利用同轴环质量引起的多谐振模式间的协同效应,提高了隔声的有效带宽;另外,还利用多单元的协同作用,实现了多个声传输损耗(STL)峰值<sup>[18]</sup>。

本文以单元胞和两元胞结构为对象,研究膜类带腔超结构低频宽带的吸声特性,发现不同单元之间低频宽带协同耦合高效吸声机理,并且验证协同耦合效应是提高吸声系数和拓宽吸声带宽的有效手段。本文的创新之处在于:发现了一种膜类带腔声学超结构低频宽带协同耦合高效吸声机理,将不同单元之间的吸声峰值进行严格地协同耦合,使其在频率上均匀分布,实现完美吸声,进而证明在有限的尺寸内能够有效地吸收低频声波,具有优异的低频吸声性能。

1 单元结构设计与分析

为了解决超结构窄带的问题,本文提出了一种新的吸声结构——薄膜类带腔超结构。以单元胞和两元胞吸声结构为对象,验证多单元的协同耦合作用是提高吸声性能的有效手段,进而实现低频大宽带的完美吸声。

薄膜结构单元由 3 部分组成,分别是矩形硅胶薄膜、两个半圆形质量块和一个充满空气的背腔,如图 1a 所示,薄膜的四周为固定约束。图 1b 为结构的具体尺寸示意图,长度  $W$ 、宽度  $L$ 、厚度  $t$  分别为 36 mm、22 mm、0.2 mm,薄膜上施加预应力  $\sigma_x=\sigma_y=2.2\times10^5$  Pa;两个半圆形质量块附着在薄膜上,半径和厚度分别为 6 mm 和 0.4 mm,两个质量块的间距  $d=15$  mm,背腔的深度为 30 mm。薄膜和质量块的材料性能参数如表 1 所示。

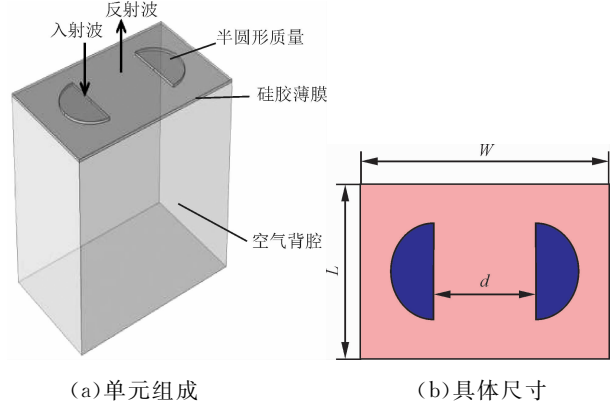


图 1 单元胞薄膜吸声结构

表 1 单元胞结构材料参数

| 组成<br>部分 | 材料 | 质量密度<br>/kg·m <sup>-3</sup> | 杨氏模量/Pa                               | 泊松<br>比 |
|----------|----|-----------------------------|---------------------------------------|---------|
| 薄膜       | 硅胶 | 980                         | $1.9\times10^5+i7.98\times10^2\omega$ | 0.48    |
| 质量块      | 铝片 | 2 700                       | $72\times10^9$                        | 0.35    |

注: $\omega$ 为硅胶薄膜频率。

本文利用有限元软件 COMSOL Multiphysics 5.3 中声固耦合模块,加入几何非线性条件,计算结构的吸声系数。薄膜上下两侧均定义为空气介质, $\rho=1.225$  kg/m<sup>3</sup>, $c=340$  m/s,入射波以平面波的形式从上侧空气层垂直入射到下侧空气层,入射波的

幅值为 1 Pa。该结构的吸声结果如图 2 所示,在低频范围内具有 3 个高吸声峰值,在 450、600、860 Hz 处吸声系数分别为 88%、92%、87%。由于薄膜结构具有一定的阻尼,吸声峰值有一定的带宽,显示出了优异的低频吸声性能。

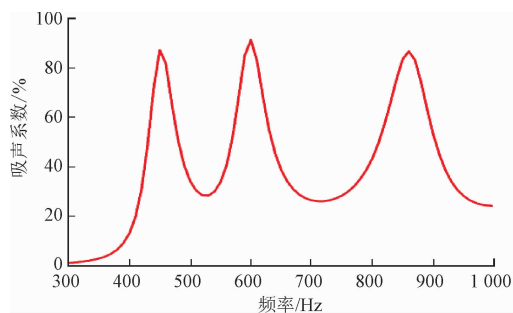
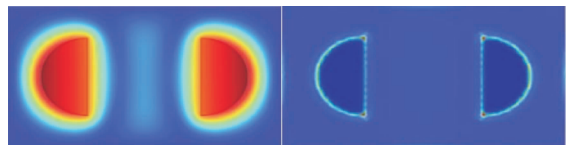
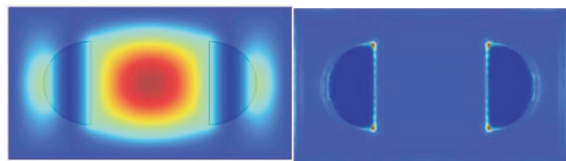


图2 单元胞薄膜结构吸声结果

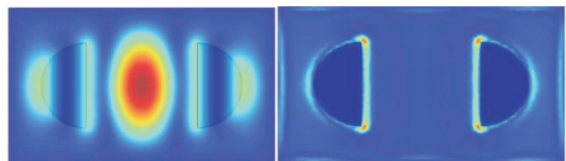
当入射波入射到薄膜表面时,会激发出 3 种不同的模态,并且 3 种模态与 3 个吸声峰值是一一对应的,如图 3 所示。从图中可以看出,第 1 个吸声峰值频率 450 Hz(见图 3a)处对应的振型是质量块的上下振动,第 2 个吸声峰值频率 600 Hz(见图 3c)处对应的振型是质量块的扭振和部分膜在中心的振动,第 3 个吸声峰值频率 860 Hz(见图 3e)处是中心薄膜的振动和部分质量块的扭振。由于质量块和薄膜的振动声能转换成弹性应变能而耗散,图 3 右边一列高亮部分就是能量耗散集中的部位,正好和 3 个吸声峰值处的振动模态一一对应。由于第 1 个吸声峰值频率 450 Hz 对应的是质量块的上下振动,质量块附近的能量耗散最为明显,所以弹性应变能集中在质量块的周围;第 2 个吸声峰值频率 600 Hz 处



(a)  $f=450$  Hz 的模式图 (b)  $f=450$  Hz 的弹性应变能



(c)  $f=600$  Hz 的模式图 (d)  $f=600$  Hz 的弹性应变能



(e)  $f=860$  Hz 的模式图 (f)  $f=860$  Hz 的弹性应变能

图3 前3阶吸声峰值对应模态及弹性应变能分布

对应质量块的扭振,所以质量块的外边缘耗能最为剧烈,是弹性应变能集中的位置;第 3 个吸声峰值频率 860 Hz 处对应着中心薄膜的振动为主,所以质量块的内侧边缘耗能最为明显。通过结构模态图和弹性应变能图可以看出,吸声峰值的出现与结构的振动模态息息相关,能量耗散主要集中在质量块与薄膜的接触处,并且与结构的共振频率完全吻合。

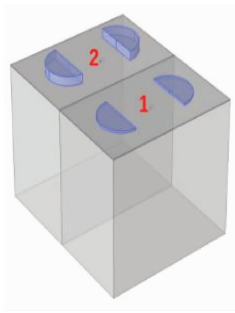
## 2 膜类带腔超结构协同耦合吸声机理

为了实现低频范围内大宽带吸声,需要设计不同的质量块将每个振动模态调节到预先设计好的吸声频率,进而实现完美吸声。由于吸声曲线的峰值和低谷总是成对出现的,低谷的存在会使得吸收频带变窄,吸声效果变差,因此需要引入新的设计概念来提高吸声低谷,这正好可以通过本文的协同耦合机理来实现。

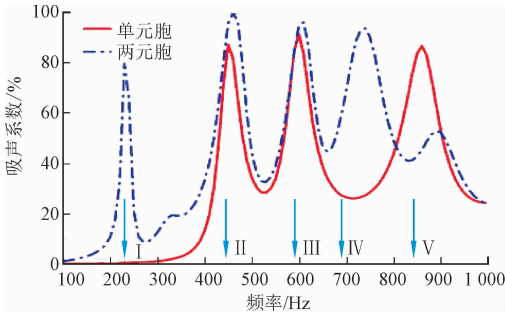
首先设计两元胞并联结构,如图 4a 所示,其中单元 2 的材料参数和结构参数与单元胞所设计参数一致,单元 2 是在单元 1 的基础之上,将厚度由 0.4 mm 增加到 2 mm。两元胞结构的吸声系数和相应的振动模态分别如图 4b 和图 4c 所示,从图中看出,两元胞结构由于具有更多的振动模态从而产生了 5 个吸声峰值,频率分别是 230、460、610、740、890 Hz。值得注意的是,吸声效果比单自由度吸声结构明显有所提高。与单元胞结构对比,两元胞结构多出了两个振动模态,如图 4b 所示,峰值 I 对应的振动模态正好是单元 2 质量块的上下振动,峰值 IV 对应的振动模态是单元 2 的中心薄膜,这就解释了两元胞的结构比单元胞结构多出两个吸声峰值的原因。

在吸声结构中引入单元 2,可以产生新的振动模态,吸声峰值 I 和 IV 的出现使此处对应频率的吸声系数明显提高。如图 4b 所示,正是因为两个单元之间的协同耦合作用在吸声峰值 III 和 V 之间出现了新的峰值 IV,将峰值 III 和 V 之间的低谷提升上去。由于薄膜具有一定的阻尼效果,每个峰值都有一定的带宽,相邻峰值之间的带宽相连使得整个频段的吸声曲线变得平缓,带宽明显拓宽,使整体的吸声性能大大提升,这就是协同耦合吸声机理的作用。

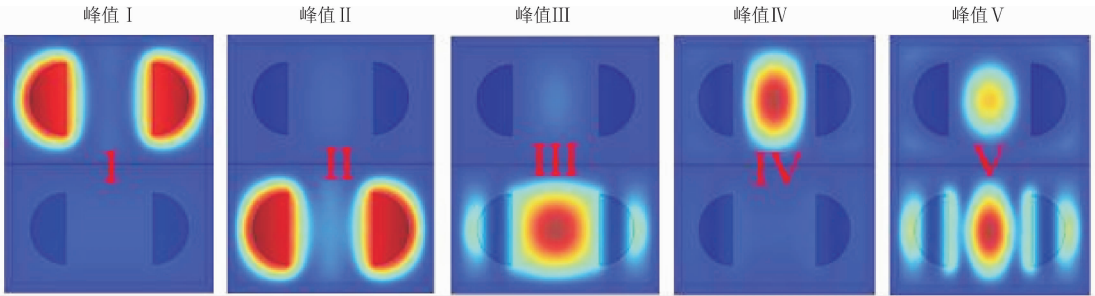
依据并联结构的思路,若多个薄膜质量块结构并联布置,并且每个单元的质量块都设计成不同厚度,就会产生多个振动模态,可以成功地设计出多个吸声峰值。各个单元的质量块需预先调整好,使每个单元的共振频率不一样,就会使吸声峰值相互错开,多个吸声峰值相互连接就会使整体吸声系数变



(a) 两元胞结构模型



(b) 单元胞和两元胞吸声系数对比



(c) 两元胞 5 个吸声峰值的模式图

图 4 两元胞薄膜吸声结构及其吸声特性

得平缓,拓宽低频段内的吸声效果。因此,协同耦合机理是提高吸声系数和拓宽吸声带宽的有效手段。

3 关键参数对吸声性能的影响规律

薄膜类声学超材料能否获得优异的吸声性能与结构的一些关键参数存在必然联系,包括背腔深度、质量块的厚度和薄膜的初始预应力。为了设计出低频大宽带吸声结构,我们必须掌握这些关键参数对吸声性能的影响规律。

为了研究不同腔深对吸声系数的影响规律,对 20、30、40、50 mm 的背腔深度进行仿真分析,结果见图 5。从图中可以看出:背腔深度的改变对第 1 个吸声峰值影响最为显著,随着背腔深度不断增加,第 1 个吸声峰值逐渐往低频移动,吸声峰值逐渐下降。通过观察 30 和 40 mm 背腔深度在第 1 个吸声峰值处的模式,发现质量块的振幅由 3.5  $\mu\text{m}$  降到 3.0  $\mu\text{m}$ 。为了能够更加详细看出这种趋势,在 COMSOL 中对整个薄膜质量块系统的平均位移进行计算,结果如图 6 所示,随着背腔深度的不断增加,第 1 个吸声峰值处的位移幅值不断降低。空气背腔可以类比于弹簧振子系统,背腔深度增加,等效于弹簧刚度减弱,结构的振动幅值随之下降,吸声峰值的频率会随着腔刚度的弱化向低频移动,吸声系数也随着振动幅值的下降而减小。实际工程应用中不仅要满足低频吸声,同时还要保证较

好的吸声效果,所以背腔深度并不是越深越好。

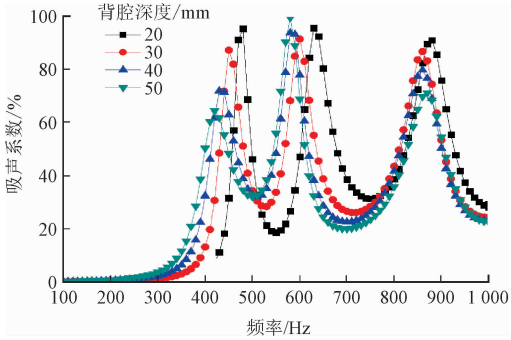


图 5 背腔深度对吸声系数的影响

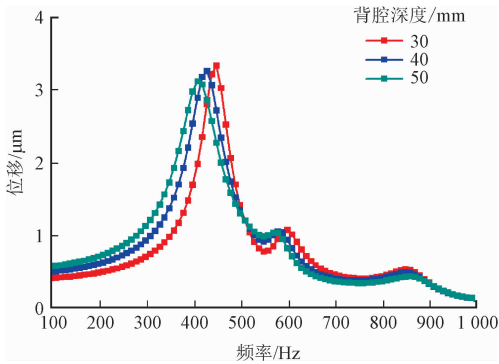


图 6 背腔深度改变对位移的影响

图 7 是在背腔深度为 30 mm 不变的情况下薄膜的预应力对吸声性能的影响。由图可知,随着薄膜预应力从 0.26 MPa 减小到 0.16 MPa,这 3 个峰值的频率均向低频移动,并且 3 个吸声峰值都略微

有所提高。因此,适当地降低薄膜预应力有利于实现结构的低频吸声。图 8 分析了不同质量块的厚度(分别为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mm)对吸声性能的影响,可以看出,随着质量块的厚度不断增加,这 3 个峰值频率显著地移动到更低处,这也有利于低频吸声。通过对吸声性能关键参数的分析,可以得到实际应用中低频宽带吸声结构的最优参数。

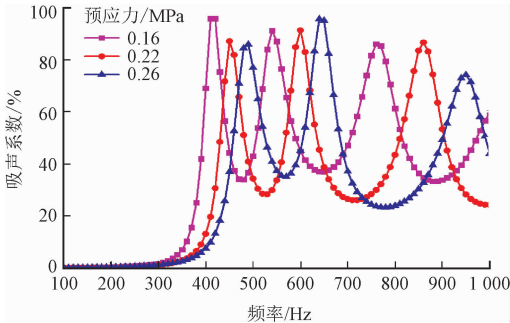


图 7 薄膜的预应力对吸声系数的影响

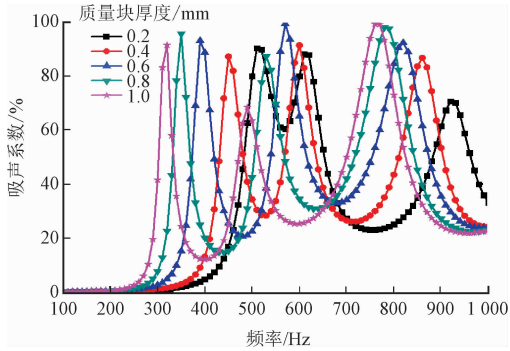


图 8 质量块厚度对吸声系数的影响

4 膜类带腔声学超结构低频宽带验证

基于两元胞协同耦合吸声机理的研究,设计出 12 组薄膜单元并联耦合的方形吸声结构,模型如图 9 所示。本文采用 COMSOL Multiphysics 5.3 构建三维模型,设置空气腔为压力声学模块,入射波以平面波的形式从上方垂直入射到薄膜表面,薄膜的周围边界都为硬声场边界,每个腔体之间设立内部

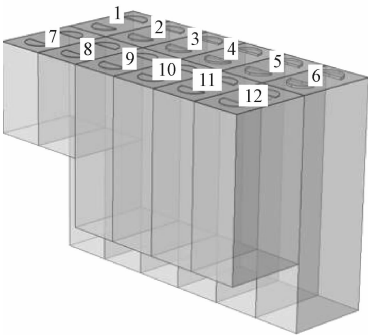


图 9 方形吸声结构模型

硬声场边界,隔离每个腔体。质量块和薄膜为固体力学模块,薄膜的四周为固定约束,每个薄膜初始预应力为  $\sigma_x=\sigma_y=0.22\text{ MPa}$ 。模型网格采取自动标准划分,计算时选取目标频率为 10~1 000 Hz,步长为 5 Hz,并在几何非线性下计算,吸声系数呈收敛状态,证明结果可靠有效。该结构除质量块厚度和背腔深度外,每个单元的材料和结构参数与前文提及的参数保持一致,各个单元的背腔深度及质量块的厚度见表 2。

表 2 吸声结构的具体参数

| 单元 | 背腔深度/mm | 质量块厚度/mm |
|----|---------|----------|
| 1  | 100     | 0.4      |
| 2  | 100     | 0.5      |
| 3  | 100     | 0.6      |
| 4  | 100     | 0.7      |
| 5  | 100     | 0.8      |
| 6  | 100     | 0.9      |
| 7  | 40      | 0.2      |
| 8  | 40      | 0.2      |
| 9  | 70      | 0.3      |
| 10 | 70      | 0.2      |
| 11 | 70      | 0.3      |
| 12 | 70      | 0.4      |

根据协同耦合吸声机理,利用不同单元的协同耦合作用,产生多个共振模式,每个共振模式都会产生吸声峰值,由于质量不一样,各个单元的吸声位置相互错开,在低频范围内产生一个大宽带。从图 10 看出,该吸声结构在 200~1 000 Hz 范围内具有连续的吸声宽带,平均吸声系数为 80%左右,最大吸声系数接近 100%,具有相当优异的吸声性能。

这种协同耦合效应有助于确保结构的吸声系数在目标频率范围内始终保持在较高水平,并且使吸声振幅在下降的时候有效地增大。因此,在低频范围内有很好的宽带吸声效果,既解决了低频的难点问题,同时也解决了宽频的需求,从而实现小尺寸控

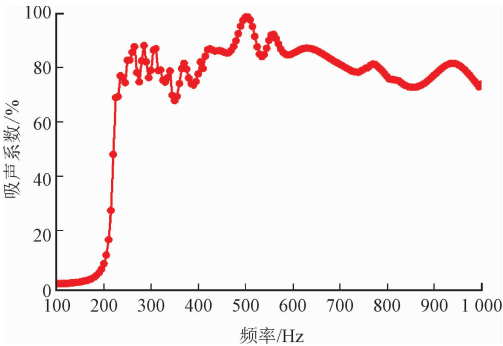


图 10 方形吸声结构的吸声结果

制低频大波长的吸声特性。

## 5 结 论

本文以膜类带腔声学超结构为研究对象,开展了低频大宽带协同耦合高效吸声机理的研究,以所设计的单元胞和两元胞吸声结构为对象,证明单元之间的协同耦合吸声机理是提高吸声系数和拓宽吸声带宽的有效手段。

(1)首先采用 COMSOL 有限元仿真软件,对单元胞结构进行了吸声系数的计算,分析出振动模式是产生吸声峰值的根本原因,增加结构的振动模式可以有效增加吸声峰值的数量,从而实现完美吸声。

(2)通过两元胞结构发现了膜类带腔超结构的协同耦合吸声机理,单元之间的协同耦合能使结构的吸声系数大大提高,并拓宽了低频范围内的带宽,显著提高了吸声体的吸声效果。

(3)基于协同耦合吸声机理,成功设计出在 200~1 000 Hz 范围内连续的宽带吸声超结构,吸声系数平均达到 80% 以上,实现了低频、大宽带的优异吸声性能。

### 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] LIU J, HERRIN D W. Enhancing micro-perforated panel attenuation by partitioning the adjoining cavity [J]. Applied Acoustics, 2010, 71(2): 120-127.
- [3] GUAN Dong, WU Jiuhui, WU Jiangling, et al. Acoustic performance of aluminum foams with semi-open cells [J]. Applied Acoustics, 2015, 87: 103-108.
- [4] 马大猷. 微穿孔板吸声结构的理论和设计 [J]. 中国科学, 1975, 5(1): 38-50.
- [5] LIU Z. Locally resonant sonic materials [J]. Science, 2000, 289(5485): 1734-1736.
- [6] YANG Zhiyu, MEI Jun, YANG Ming, et al. Membrane-type acoustic metamaterial with negative dynamic mass [J]. Physical Review Letters, 2008, 101(20): 204301.
- [7] MEI Jun, MA Guancong, YANG Ming, et al. Dark acoustic metamaterials as super absorbers for low-frequency sound [J]. Nature Communications, 2012, 3: 756.

- [8] MA Fuyin, MENG Huang, WU Jiuhui. Acoustic metamaterials with synergetic coupling [J]. Journal of Applied Physics, 2017, 122(21): 215102.
- [9] 吴九汇, 张思文, 沈礼. 螺旋局域共振单元声子晶体板结构的低频振动带隙特性研究 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(10): 62-69.  
WU Jiuhui, ZHANG Siwen, SHEN Li. Low-frequency vibration characteristics of periodic spiral resonators in phononic crystal plates [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(10): 62-69.
- [10] DING Changling, WANG Zhenru, SHEN Fangliang, et al. Experimental realization of acoustic metasurface with double-split hollow sphere [J]. Solid State Communications, 2016, 229: 28-31.
- [11] MEI Jun, WU Ying. Controllable transmission and total reflection through an impedance-matched acoustic metasurface [J]. New Journal of Physics, 2014, 16(12): 123007.
- [12] GUAN Dong, WU Jiuhui, LI Jing, et al. Application of a Helmholtz structure for low frequency noise reduction [J]. Noise Control Engineering Journal, 2015, 63(1): 20-35.
- [13] JING L, WU J H, GUAN D, et al. Multilayer-split-tube resonators with low-frequency band gaps in phononic crystals [J]. Journal of Applied Physics, 2014, 116(10): 103514.
- [14] 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.
- [15] ZHU X Z, CHEN Z B, JIAO Y H, et al. Broadening of the sound absorption bandwidth of the perforated panel using a membrane-type resonator [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2018, 140(3): 031014.
- [16] SANADA A, TANAKA N. Extension of the frequency range of resonant sound absorbers using two-degree-of-freedom Helmholtz-based resonators with a flexible panel [J]. Applied Acoustics, 2013, 74(4): 509-516.
- [17] NAIFY C J, CHANG C M, MCKNIGHT G, et al. Transmission loss of membrane-type acoustic metamaterials with coaxial ring masses [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110(12): 124903.
- [18] NAIFY C J, CHANG C M, MCKNIGHT G, et al. Membrane-type metamaterials: transmission loss of multi-celled arrays [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 109(10): 104902.

(编辑 杜秀杰)