

文章编号:1007-2780(2015)02-0234-06

可调谐的宽频带负体弹模量吸声超构材料

陈怀军^{1*}, 赵文霞¹, 郝长春²

- (1. 宁夏师范学院 物理与信息技术学院,宁夏 固原 756000;
2. 陕西师范大学 物理学与信息技术学院,陕西 西安 710119)

摘要:以局域共振思想为理论基础、亥姆霍兹共振器为结构单元,设计了一种可调谐的负体弹模量宽频带吸声超构材料。通过调节亥姆霍兹共振器开口孔径大小,调节超构材料的谐振频率。利用 COMSOL 多物理场仿真软件,模拟计算声学超构材料的透射谱;通过提取参数法,计算声学超构材料的体弹模量。计算结果表明:在谐振频率附近声学超构材料在实现负体弹模量的同时,还具有优良的吸声性能;将双层亥姆霍兹共振器周期性排列,构建了一种频率范围在 970 ~ 1 300 Hz 的宽频带吸声超构材料。在吸声频带内,声透过率最低达到-22 dB,吸声效果良好。采取将不同谐振频率亥姆霍兹谐振单元多层排列的方式构建超构材料,可以实现可听声频段任意带宽的负体弹模量和吸声。这种声学超构材料的提出能为宽频带负体弹模量吸声超构材料的设计提供一种全新的思路。

关 键 词:亥姆霍兹共振器;宽频带;负体弹模量;吸声;超构材料

中图分类号:O 0429 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20153002.0234

Tunable broadband sound absorbing metamaterial with negative modulus

CHEN Huai-jun^{1*}, ZHAO Wen-xia¹, HAO Chang-chun²

- (1. *School of Physics & Information Technology, Ningxia Normal University, Guyuan 756000, China;*
2. *School of Physics & Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China*)

Abstract: Based on the concept of local resonance, a kind of tunable broadband sound absorption metamaterial consisting of helmholtz resonator (HR) with negative modulus was designed. The resonant frequency of the metamaterial can be tuned by changing the bore diameter drilled in the HR. The transmission curve of the metamaterial was simulated by using COMSOL Multiphysics, and then the modulus of the metamaterial can be obtained via extraction method. Simulation results confirm that the present metamaterial can accomplish negative modulus at the resonant frequency, simultaneously showing excellent property of sound absorption. A kind of metamaterial with broadband sound absorption from 970 to 1 300 Hz was constructed by periodically arraying two layers of HRs. Excellent

收稿日期:2014-10-13;修订日期:2014-10-25.

基金项目:国家自然科学基金(No. 21402114);宁夏自然科学基金(No. NZ13209, No. N214277);宁夏高等学校科学研究项目(No. NGY2013109, 宁教高[2014]222);宁夏师范学院重点科学研究项目(No. ZD2011002)

* 通信联系人, E-mail:chenhuaijun79@163.com

sound absorption appears in the sound absorption band with minimum transmission -22 dB. Metamaterial with any wanted bandwidth of negative modulus and sound absorption in audio-frequency range can be obtained by periodically arraying multilayers of HRs with different resonant frequencies. It is expected that the proposed metamaterial will significantly contribute to the design of broadband negative modulus and sound absorption metamaterial.

Key words: helmholtz resonator;broadband;negative modulus;sound absorption;metamaterial

1 引 言

随着社会的不断发展和城市规模的日益扩大,各类噪声污染日益严重,消除噪声成为迫切需要解决的严重问题,也是一个难题。现有的吸声材料通常存在吸声频带窄和吸声效率低的缺点,声学超构材料(acoustic metamaterial, AM)的出现有望从根本上克服吸声材料的上述不足:在谐振频率附近,AM 出现负体弹模量的同时,还具有超强的吸声性能;通过设计 AM 单个谐振单元的谐振频率并将其多层排列,可以实现宽频带吸声。

自从前苏联物理学家 Veslago 教授提出左手材料(left-handed metamaterials, LHMs)的概念,并经由英国帝国理工大学的 Pendry 教授和美国杜克大学的 Smith 教授相继通过实验实现了 LHMs 以后^[1],LHMs 迅速发展为电磁超材料,并实现了包括负折射、平板聚焦、超分辨成像、完美吸收等在内的诸多奇异物理现象。将电磁超材料的思想引入到声学领域,提出了 AM 的概念。与光子晶体和声子晶体的“波长”尺度不同,AM 的结构尺寸远小于声波波长,是“亚波长”尺度的。2000 年,香港科技大学的 Liu 等人提出局域共振思想,实现了有效质量密度为负值^[2]。局域共振思想的提出,为 AM 的发展奠定了理论基础。负体弹模量主要通过亥姆霍兹共振器(helmholtzresonator, HR)实现^[3]。2006 年,美国麻省理工学院的 Fang 等人利用亚波长的 HR,在超声波段首次实现了负体弹模量^[4]。随着 AM 的快速发展,AM 实现了与电磁超材料类似的奇异物理现象,例如负折射^[5]、平板聚焦^[6]、亚波长成像^[7]、完美吸收^[8]、隐身斗篷^[9-11]等。AM 在生物医学超声诊断、声准直、水下兵器隐身、消除噪声等方面具有广阔的应用前景。

相比常规吸声材料,以 HR 为结构单元的 AM 在噪声消除方面存在巨大优势。在发生谐振

时,声场能量主要存储在 HR 内部,AM 因此具有良好的吸声性能,甚至能使噪声完全吸收。AM 发生谐振时,同时会实现负体弹模量:HR 内部的声媒质以本征频率谐振,致使外界声场的声压力方向与空气膨胀压缩的步调相反,产生负体弹模量。目前的负体弹模量 AM 存在制作困难、不易调频以及难以实现三维材料等困难。本文提出了一种立方体铝质 HR 模型,可以有效解决上述问题:通过在空心铝质立方体上钻孔的方式可以获得空心立方体 HR,制作容易;通过改变空心立方体 HR 的钻孔数目、钻孔孔径大小、立方体容积等参数,可以任意调节空心立方体 HR 的谐振频率;以空心立方体 HR 为结构单元,很容易制备成三维吸声材料。

2 样品模型和仿真计算

本文所用的 AM 结构单元为铝质开孔立方体 HR,其立体图和横截面如图 1(a)和 1(b)所示。HR 的开口孔径、厚度、空腔体积分别为 $2r$, t 和 $v = l^3$ 。根据声传输线理论,HR 可以等效成 L-C 谐振电路:其空腔等效为声容 $C = \frac{v}{\rho_0 c_0^2}$,开口孔颈部分等效为声感 $L = \frac{\rho_0 d_{\text{eff}}}{S}$ 。其中 ρ_0 和 c_0 分别为空气的质量密度和声速, v 是空心立方体 HR 的空腔

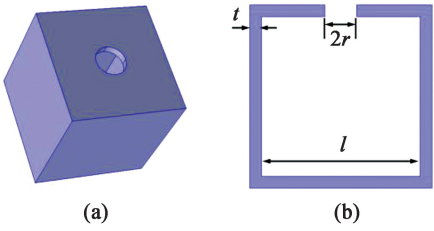


图 1 (a) HR 立体结构示意图;(b) HR 横截面示意图.

Fig. 1 (a) 3D view of HR;(b) Cross-sectional view of HR.

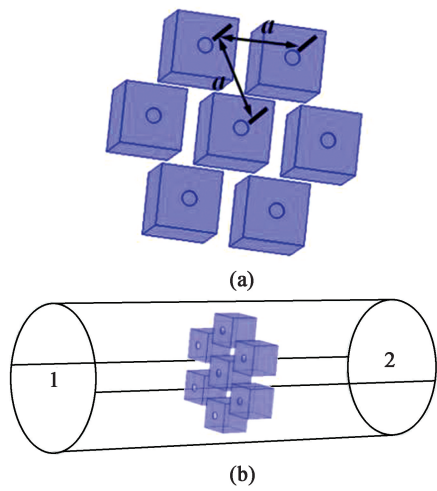


图 2 (a)HR 周期性排列构成 AM,晶格常数 $a = 30$ mm;(b) AM 在声阻抗管中的仿真计算模式。
Fig. 2 (a) AM composed of periodical HRs with the lattice constant $a = 30$ mm. (b) Simulation model of the AM in the acoustic impedance tube.

体积, $S=\pi r^2$ 是 HR 的开口孔横截面积,开口孔的等效长度表达式为 $d_{\text{eff}}=t+1.8\sqrt{2r}$ 。L-C 电路的

谐振频率为 $f=\frac{1}{2\pi\sqrt{L\cdot C}}=\frac{c_0}{2\pi\sqrt{\frac{vd_{\text{eff}}}{S}}}$ 。由谐振

频率的表达式以及上述的 v, S, d_{eff} 与 r 的关系可知,通过改变 HR 的开口孔径 $2r$ 的数值,可以改变 HR 的谐振频率。本文选用 HR 的空腔内径和厚度分别是 $l=20$ mm 和 $t=1$ mm。

将 HR 周期性排列,制备成超构材料,如图 2 (a)所示。HR 排列的晶格常数 $a=30$ mm。仿真计算时,应用 COMSOL Multiphysics 仿真软件声学模块的频域模式。仿真条件设置如下:将 AM 放置在半径为 50 mm,长度 1 000 mm 的声阻抗管的中部,阻抗管的边界设置为硬质边界条件。端口 1 设置为声源,辐射声压为 1 Pa 的平面波,如图 2(b)所示。网格尺寸设置为正常。

3 结果与分析

3.1 不同开口孔径对 AMs 谐振频率的影响

首先构建 4 种均是由单一开口孔径 HR 组成

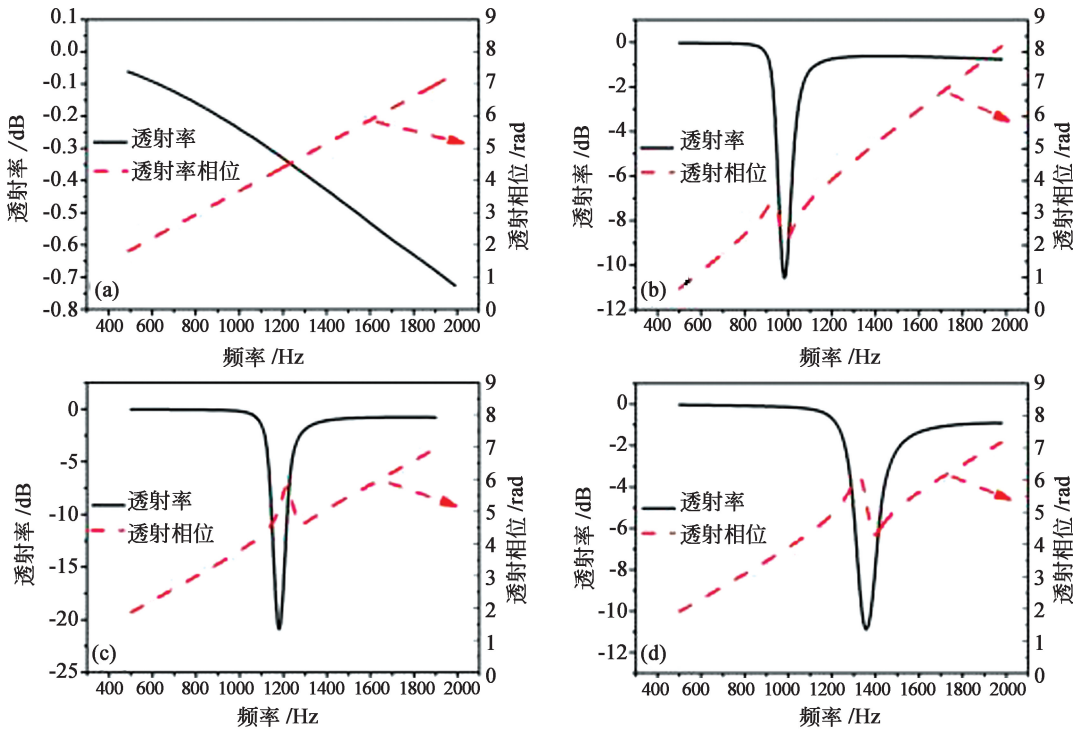


图 3 不同开口孔径 HR AM 的透射谱和透射相位曲线。(a)~(d)中 HR 的开口孔径分别为 $2r=0$ cm, $2r=3$ mm, $2r=4$ mm 和 $2r=5$ mm。

Fig. 3 Transmission spectra and phases of the AMs composed of HRs with different diameters. (a) $2r=0$ mm, (b) $2r=3$ mm, (c) $2r=4$ mm, and (d) $2r=5$ mm.

的 AM。4 种 AM 中的 HR 开口孔径 $2r$ 分别为 0 mm、3 mm、4 mm 和 5 mm。不同开口孔径 AM 的透射谱和透射相位曲线如图 3 所示。从图 3 中可以看出,除了由不开孔 HR 构成的 AM 以外,其他 3 种 AM 在不同频率处均出现一个透射谷,并且每一个透射谷对应频率的附近发生了透射相位扭转。透射谱和透射相位曲线的这种性质表明,在透射谷附近,空气在 HR 内部发生了谐振。与之相比,由不开孔 HR 构成的 AM 没有出现透射谷,透射相位也没有出现扭转。说明不开孔 HR 没有发生谐振,谐振是由开孔的 HR 引起的。开口孔径分别为 3 mm、4 mm 和 5 mm HR 构成的 3 种 AM 对应的谐振频率分别是 980 Hz、1 180 Hz 和 1 361 Hz。随着 HR 开口孔径的增大,AM 谐振频率向高频移动。上述谐振规律与谐振频率的理论表达式相对应:在不改变谐振单元 HR 的空腔容积 v 及厚度 t 情况下,开口孔的面积 S 增大,谐振频率增高。

3.2 负有效体弹模量

图 4 表示的是开口孔径为 4 mm 的 HR 在谐振和非谐振两种状态下的声压分布情况。声压分布清楚地表明,在谐振频率 1 180 Hz 附近,HR 内部声压远大于外部声压,表明 HR 内部聚集了大量能量;而在远离谐振频率的 300 Hz,HR 内

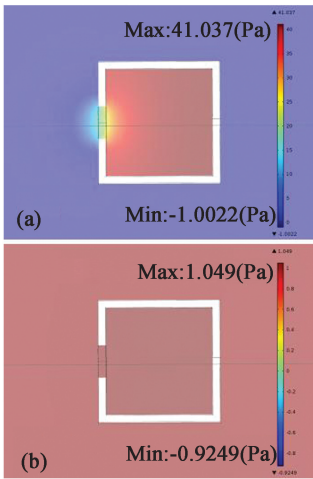


图 4 (a)谐振频率 1 180 Hz 时 HR 内部的声压分布。(b)非谐振频率 300 Hz 时 HR 内部的声压分布。

Fig. 4 Pressure field distributions of HR AM at (a) the resonant frequency of 1 180 Hz and (b) the non-resonant frequency of 300 Hz.

部声压跟外界声压基本相同,声场能量在 HR 内部和外部均匀分布。谐振状态下,由于 HR 内部存储了大量声能,HR 内部的空气会以本征模式振动,此时会发生反常而有趣的物理情景:HR 内部空气受外界声压压缩时,发生膨胀;受外界声压拉伸时,发生压缩。HR 内部空气受力压缩和膨胀的模式跟正常情况完全相反,导致了负体弹模量的产生。

通过参考文献[12],我们可以得到声学折射率 n 和阻抗值 Z 的表达式:

$$n = \frac{\pm \arccos\left\{\frac{1}{2T}[1 - (R^2 - T^2)]\right\}}{kd} + \frac{2\pi m}{kd}, \tag{1}$$

$$Z = \pm \sqrt{\frac{(1+R)^2 - T^2}{(1-R)^2 - T^2}}, \tag{2}$$

其中: k 是声波数, d 是样品的厚度, m 是虚部分支数。通过式(1)和(2),可以得到 AM 的体弹模量表达式: $\frac{1}{E} = \frac{n}{ZE_0}$ 。其中, E_0 是空气的体弹模量。

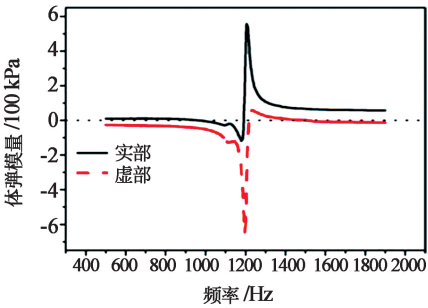


图 5 开口孔径为 4 mm 的 HRAM 的体弹模量。
Fig. 5 Modulus of the AM composed of HRs with diameter 4 mm

图 5 表示的是开口孔径为 4 mm 的 HR 组成的 AM 的体弹模量。从图中可以看出,在谐振频率 1 180 Hz 附近,体弹模量的实部为负值。

3.3 宽频带吸声 AM

由 HR 的谐振频率公式和图 3 所示的透射谱可知,HR 的开口孔径大小跟谐振频率密切相关。在谐振频率处由于 HR 内部存储了大量声场能量而导致透射率下降,从而在谐振频率附近形成良好的吸声效果。鉴于 HR 的上述特性,我们通过改变图 1(b)中 HR 开口孔径的大小来改变 HR 的谐振频率。随着外界声场频率的变化,使不同孔径的

HR 在不同频率依次谐振,最终实现宽频带吸声。按照上述思路,我们将图 2(a)中单层排列的 7 个 HR 谐振单元的开口孔径数值由原来的同一大小分别设置成如下两种等差数列排列:第一种排列中,最小孔径 3 mm,最大孔径 4.2 mm,公差 0.2 mm;第二种排列中,最小孔径 3.1 mm,最大孔径 4.3 mm,公差 0.2 mm。即第二种排列的每个 HR 孔径比第一种排列大 0.1 mm。

两种 AM 的透射谱如图 6(a) 和 6(b) 表明,

两种透射谱均产生了 7 个窄带的透射吸收谷。从前面分析可知,7 个窄频带透射谷是由单层排列中的 7 个 HR 分别单独谐振产生的。由于第二种排列的 7 个 HR 孔径比第一种排列的 HR 孔径大,所以第二种排列的 7 个谐振频率比第一种 HR 排列的 7 个谐振频率均有 20 Hz 左右的蓝移。如图 6(c)所示,将两种排列的透射谱放在同一图中进行对比,这种由于 HR 开口孔径的变化而引起的谐振频率的移动表现得更加明显。

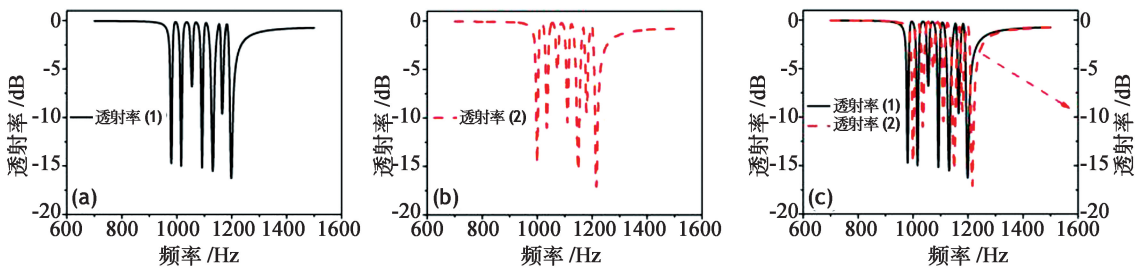


图 6 单层 7 个开口孔径按等差数列排列的 HR AM 透射谱。(a) HR 开口孔径最小值 3 mm,最大值 4.2 mm,孔径公差 0.2 mm;(b) HR 开口孔径最小值 3.1 mm,最大值 4.3 mm,孔径公差 0.2 mm;(c) 两种 AM 的透射谱。

Fig. 6 Transmission spectra of the single-layered AM consisting of seven HRs, the diameters of which change as arithmetic progression. The minimum values, maximum values and tolerance are (a) 3 mm, 4.2 mm and 0.2 mm; (b) 3.1 mm, 4.3 mm and 0.2 mm; (c) Transmission spectra of the two AMs.

图 6 展示了一种设计宽频带吸声材料的途径:HR 之间孔径变化越小,对应的各个谐振频率差别也越小。在 HR 孔径变化足够小的情况下,多个窄频带透射谷将会相互叠加,最终形成宽频带吸声。将上述两种开口孔径逐渐变化的单层 HR 按图 7(a)排列成相距 40 mm 的上下两层。双层排列中 HR 开口孔径最小值为 3 mm,最大值为 4.3 mm,半径公差 0.1 mm。图 7 (b)是双层 HR 排列的透射谱,由于各个 HR 单独谐振产生的透射谷相互叠加,形成了 970~1 300 Hz 宽频吸声。在吸声带宽范围内,最低声透过率

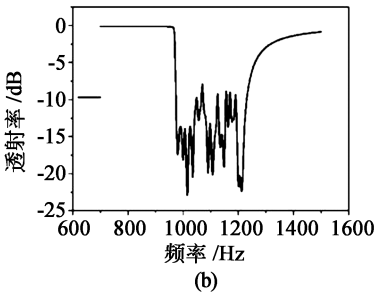
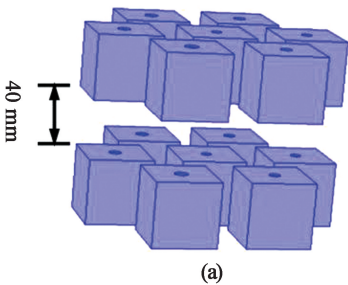


图 7 (a)双层开口孔径按等差数列排列的 HRAM. (b)双层 HR AM 的透射谱。

Fig. 7 (a) AM with double layers of HRs with diameters changing as arithmetic progression; (b) Transmission spectrum of the bi-layered HR AM.



仅为-22 dB,吸声效果良好。在现实应用中,可以同时改变 HR 的空腔体积、开口孔径大小以及增加排列层数,从而实现任意带宽的超强吸声。

4 结 论

基于局域共振思想,并根据 HR 的谐振特点,研究了 HR 的开口孔径跟谐振频率之间的关系:HR 的开口孔径越大,谐振频率越高。阐述了谐振频率附近产生负体弹模量的原因,并通过声

压分布表明,在谐振频率附近声场能量主要集中在 HR 内部从而产生低的声能量透过率。通过改变 HR 的孔径分布构建了一种 970~1 300 Hz、最低声透过率为-22 dB 的宽频带吸声材料。本文提出的这种构建宽频带吸声超构材料的方法,对噪声控制具有重要的现实应用价值。

参 考 文 献:

[1] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. *Science*, 2001, 292 (5514): 77-79.

[2] Liu Z Y, Zhang X X, Mao Y W, *et al.* Locally resonant sonic materials [J]. *Science*, 2000, 289: 1734-1736.

[3] Hu X H, Ho K M. Homogenization of acoustic metamaterials of Helmholtz resonators in fluid [J]. *Phys. Rev. B*, 2008, 77: 172301(1-4).

[4] Fang N, Xi D J, Xu J Y, *et al.* Ultrasonic metamaterials with negative modulus [J]. *Nat. Mater.*, 2006(5): 452-456.

[5] Bongard F, Lissek H, Mosig J R. Acoustic transmission line metamaterial with negative/zero/positive refractive index [J]. *Phys. Rev. B*, 2010, 82:094306 (1-11).

[6] Zhang S, Yin L L, Fang N. Focusing ultrasound with an acoustic metamaterial network [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 102: 194301(1-4).

[7] Li J, Fok L, Yin X, *et al.* Experimental demonstration of an acoustic magnifying hyperlens [J]. *Nat. Mater.*, 2009(8): 931-934.

[8] Mei J, Ma G, Yang M, *et al.* Dark acoustic metamaterials as super absorbers for low-frequency sound [J]. *Nat. Commun.*, 2012(3): 756-760.

[9] Popa B I, Zigoneanu L, Cummer S A. Experimental acoustic ground cloak in air [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2011, 106: 253901(1-4).

[10] Stenger N, Wilhelm M, Wegener M. Experiments on Elast in Cloaking in Thin Plates [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2012, 108: 014301.

[11] Zigoneanu L, Popa B, Cummer S A. Three-dimensional broadband omnidirectional acoustic ground cloak [J]. *Nat. Mater.*, 2014(13): 352-355.

[12] Fokin V, Ambati M, Sun C, *et al.* Method for retrieving effective properties of locally resonant acoustic metamaterials [J]. *Phys. Rev. B*, 2007, 76: 144302(1-5).