

局域共振声学超材料技术进展及应用展望

黄安畏, 吴永鹏, 李忠盛, 孙彩云, 董玲抒, 舒露,
吴道勋, 花泽荟, 罗明波

(西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: 介绍了声学超材料主要有布拉格散射型声子晶体、局域共振型声学超材料等。布拉格散射型声子晶体通常需要其晶格常数与声波波长处于同一数量级时才能产生声波禁带, 从而使得其应用领域受限。局域共振型声学超材料利用其共振单元的共振频率与声波频率接近时所产生的耦合作用而消耗声能, 其尺寸比作用声波波长降低了 2 个数量级, 从而实现了小尺寸声学超材料对长声波的控制。局域共振声学超材料采用特殊的声学结构单元设计, 使其在常规介质中具有一些超常物理特性, 如负折射、负质量密度等; 其在低频段具有声学禁带, 在该禁带频率范围内将阻止声波传递。局域共振声学超材料已发展出了具有谐振特性的声学结构单元、表面附加局域共振单元板结构声学超材料、薄膜型声学超材料等结构形式。局域共振声学超材料的研究和发展为低频降噪提供了新的途径。

关键词: 局域共振; 声学超材料; 低频; 带隙

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.08.009

中图分类号: TJ04 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)08-0045-06

Technical Progress and Application Prospect of Locally Resonant Sonic Metamaterials

HUANG An-wei, WU Yong-peng, LI Zhong-sheng, SUN Cai-yun, DONG Ling-shu, SHU Lu,
WU Dao-xun, HUA Ze-hui, LUO Ming-bo
(Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: Bragg scattering phonon crystal and locally resonant acoustic metamaterials were introduced. In order to generate noise reduction, the lattice constant of Bragg scattering phonon crystal should be of the same order of magnitude as the wavelength of the sound wave, therefore, its application field is limited. Locally resonant acoustic metamaterials consume sound energy by coupling its own resonant frequencies with those of sound waves at close range. Its size is two orders of magnitude smaller than the wavelength of sound wave; thus, the control of low-frequency noise by small-size acoustic metamaterials is realized. Locally resonant acoustic metamaterials have some extraordinary physical characteristic in the conventional medium for their special acoustic structural units, such as negative refraction and negative mass density. Especially in low frequency band, they have acoustic forbidden band in which the sound wave transmission is prohibited. Acoustic structural unit having resonant characteristics has been developed. Surface-mounted resonant element plate structures and thin film acoustic metamaterials are the normal types of locally resonant acoustic metamaterials. Their research and development provide a new method for low-frequency noise control.

KEY WORDS: Locally resonant; acoustic metamaterial; low-frequency noise; sound band

声学超材料最早起源于布拉格散射型声子晶体,即在固体或流体介质中周期引入弹性固体形成的一种新型功能材料。一定频率范围内的声波在该种周期弹性复合介质中传播时,将产生类似光子带隙的声波禁带,从而阻止该频率范围的声波传播。通常布拉格散射型声子晶体的晶格常数与产生禁带的声波波长处于同一数量级时才能产生声波禁带,从而限制了布拉格散射型声子晶体的应用范围^[1-8]。

传统降噪材料或结构对装备运行中所产生的中、高频噪声具有优异的吸/隔声效果,但其对低频噪声的抑制效果较差。同时由于装备对降噪材料的质量以及厚度要求越发严格,使得传统降噪材料的局限性日益突出。

1 传统降噪材料

传统单层隔声材料的隔声性能受质量定律控制,通常,角频率为 ω 的声波在空气中法向作用于厚度为 d 的单层隔声材料上时,其声透射值为:

$$T = \frac{4v \exp(ik_2d)}{(1+v)^2 - (1-v)^2 \exp(2ik_2d)} \quad (1)$$

式中: k_2 为固体中的波矢, $k_2 = \omega / \sqrt{\kappa_2 / \rho_2}$ (κ_2 和 ρ_2 为单层隔声材料的体积模量和密度); v 为隔声材料/空气阻抗比, $v = \sqrt{\frac{\kappa_2 \rho_2}{\kappa_1 \rho_1}}$ (κ_1 和 ρ_1 为空气的体积模量和密度)。

当墙体厚度较小 ≤ 100 mm, 频率低于 1 kHz 时, $k_2d \ll 1$, $v \gg 1$, 式(1)可以简化为:

$$T \cong i \frac{2\sqrt{\kappa_1 \rho_1}}{\omega \rho_2 d} \quad (2)$$

由式(2)可知,当传统隔声材料较薄时,隔声量只受隔声材料的质量 $\rho_2 d$ 影响,同时与声波频率成反比。因此,当隔声材料厚度较薄时,其对低频声波抑制效果有限^[9-10]。

传统的吸声材料/结构主要有多孔吸声材料和共振吸声结构。其中多孔吸声材料主要利用空气黏滞特

性,使部分声能产生声能耗散。同时多孔介质中的空气在声波作用时将出现交替压缩和膨胀而产生热交换,使声能转化为热能。多孔吸声材料虽能够有效隔离噪声中的中高频成分,但对低频噪声效果较差。共振吸声结构主要利用亥姆霍兹共振吸声机理,虽能显著提高低频段内的吸声性能,但通常其厚度需要 ≥ 50 mm 在低频段才具有较好的吸声效果^[11]。

2 局域共振声学超材料

2000年刘正猷提出了局域共振型声子晶体^[12-13],其结构为将较硬的芯球通过包覆层固定在弹性薄膜上形成的局域共振结构。当介质中的声波频率与共振单元的共振频率接近时,共振单元与声波产生强烈的耦合作用,消耗声能。相比产生同样带隙特征的布拉格散射型声子晶体,其尺寸降低了2个数量级,从而实现了小尺寸声学超材料对长声波的控制。

随着声学超材料的发展,局域共振声学超材料发展出了具有谐振特性的声学结构超材料,表面附加局域共振单元板结构声学超材料,薄膜型声学超材料等结构形式。其中,薄膜型声学超材料又分为附加质量振子薄膜型声学超材料和未附加质量振子局域共振薄膜型声学超材料^[14-22]。

3 具有谐振特性的声学结构超材料

具有谐振特性的声学结构超材料为局域共振型声子晶体的最初表现形式,是在传统布拉格散射型声子晶体概念上延伸而来。图1为Z. Liu等设计的具有谐振特性的声学结构超材料原型,其结构为直径5 mm的金属球在其外表面包覆硅胶层后,引入树脂基体中形成的简单立方晶格构型,其晶格常数为 1.55 cm^[12]。通过理论计算以及试验分析,该声子晶体在380 Hz和1340 Hz处存在声波禁带,该禁带范围具有良好的隔声性能。通过Comsol Multiphysics多物理场仿真分析,在该频率下该型声子晶体具有负的有效动质量密度,从而产生了声波禁带。

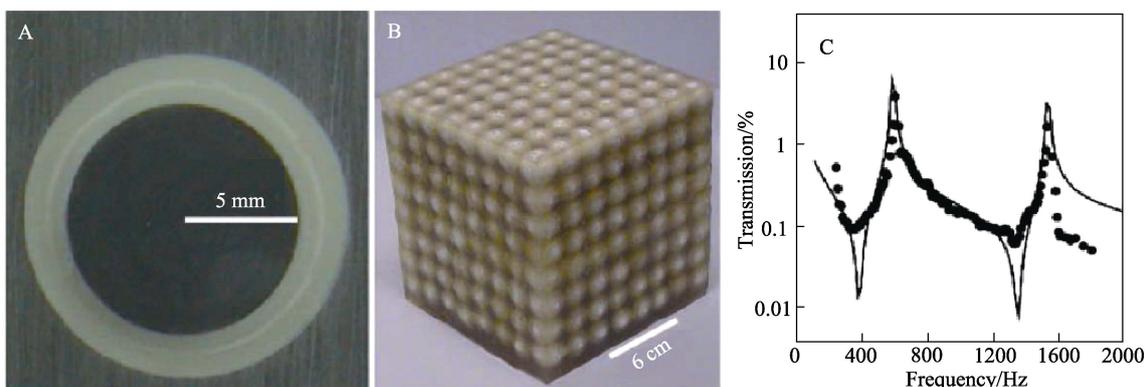


图1 树脂中埋入软材料包覆铅球的声学超材料结构实现原型与隔声曲线

同样，Ding 等将开口空心球埋入海绵机体中，制备出了一种具有负弹性模量的声学超材料^[23-24]，如图 2 所示。通过仿真计算和实验分析发现，该型材料在 900~1500 Hz 之间具有优异的隔声性能。

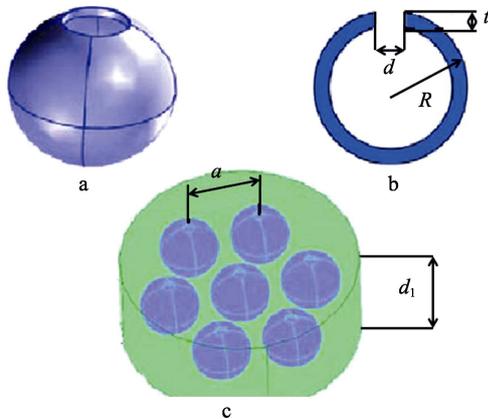


图 2 海绵中埋入开口空心圆球的声学超材料样品及其隔声曲线

4 表面附加局域共振单元板结构声学超材料

各类型装备中大量存在的板结构，在声波或振动激励下，当其共振频率与激励频率一致或接近时，板结构将产生共振而向板外部空间辐射声波，该声辐射波段通常处于低频段。Xiao 等借鉴动力吸振器原理，通过在板表面周期性引入具有谐振特性的局域共振单元形成声学超材料。当该共振单元的固有频率处于板结构产生声透射的质量密度控制区时，能够有效提高板结构在质量控制区的隔声量^[25]。图 3a、b 为梁结构上引入局域共振单元的声学结构，可通过改变梁的长度来调节局域共振单元的固有频率，实现对声波带隙的调整；图 3c 为将质量块引入穿孔弹性材料中构成的局域共振单元，可通过调节质量块的质量改变局域共振单元的共振频率，从而实现对特定波段的隔声控制。隔声效果如图 3d 所示。

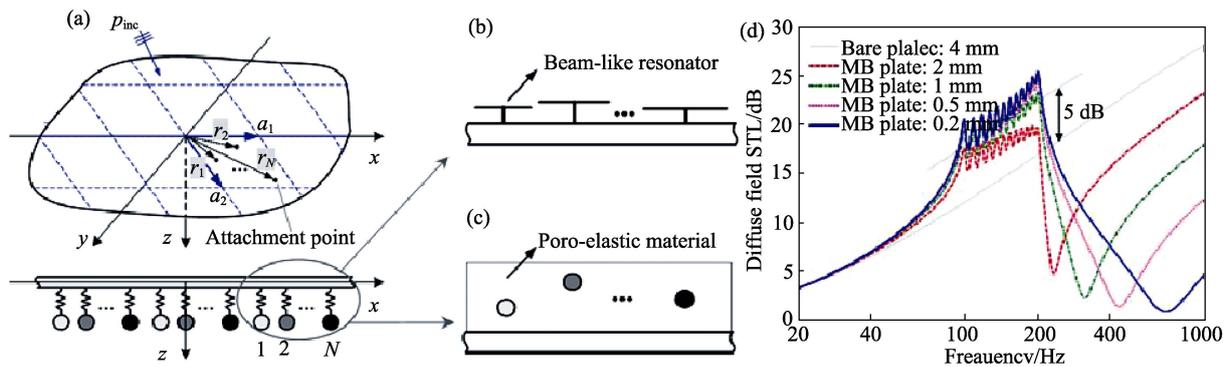


图 3 表面附加局域共振单元板结构示意图与隔声曲线

5 局域共振薄膜型声学超材料

5.1 附加质量振子局域共振薄膜型声学超材料

附加质量振子局域共振薄膜型声学超材料由香港科技大学提出^[26-27]，由附加质量块的弹性薄膜固定在支撑框架中构成。利用质量块和弹性薄膜组成的质量-弹簧系统实现对特定频率的弹性波产生选择性吸收，该材料的典型结构如图 4 所示。

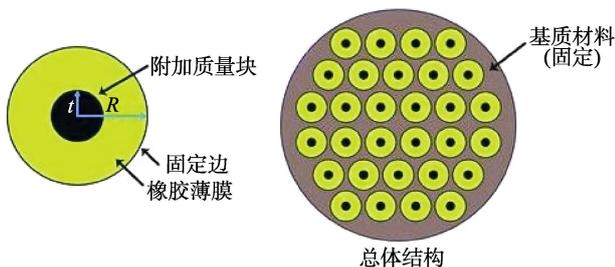


图 4 附加质量块局域共振薄膜型声学超材料典型结构

5.2 未附加质量振子局域共振薄膜型声学超材料

Naify 等将数层厚度为 7.7 μm 且中心开有 ϕ 10 μm 小孔的尼龙薄膜引入芳纶蜂窝芯，再将该复合蜂窝芯材与厚度为 1 mm 的玻璃纤维增强环氧树脂面板复合成蜂窝夹层结构^[30]。经测试，与未安装尼龙薄膜的相比，安装 1 层和 2 层薄膜后，在 50~1600 Hz

香港科技大学已成功开发出了第三代薄膜型声学超材料结构，图 5—7 分别为第一代至第三产品原型^[26-29]。附加质量振子局域共振薄膜型声学超材料可通过调节共振薄膜的张力、附加质量块的质量、位置等实现对不同波段声波的隔离，也可以通过层叠方式实现宽频带隔声。

第三代薄膜型声学超材料结构于 2015 年提出，将金属电极作为附加质量振子引入局域共振薄膜，通过主动调制声波的相位实现了对特定波段声波的控制，为局域共振声学超材料对声波的主动控制开辟了新的思路。

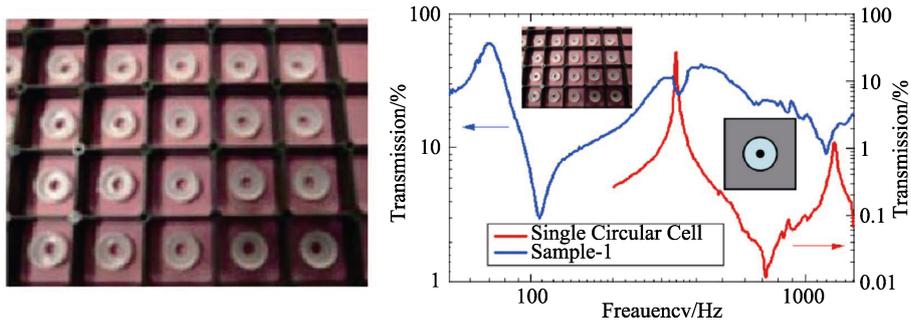


图5 第一代薄膜型声学超材料结构与隔声曲线

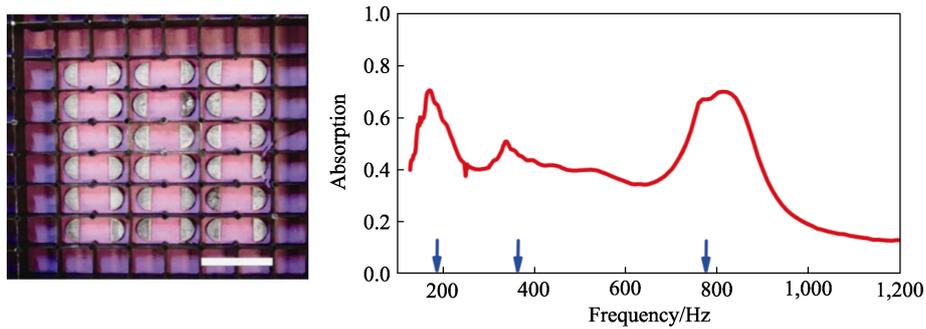


图6 第二代薄膜型声学超材料结构模型及其吸声曲线

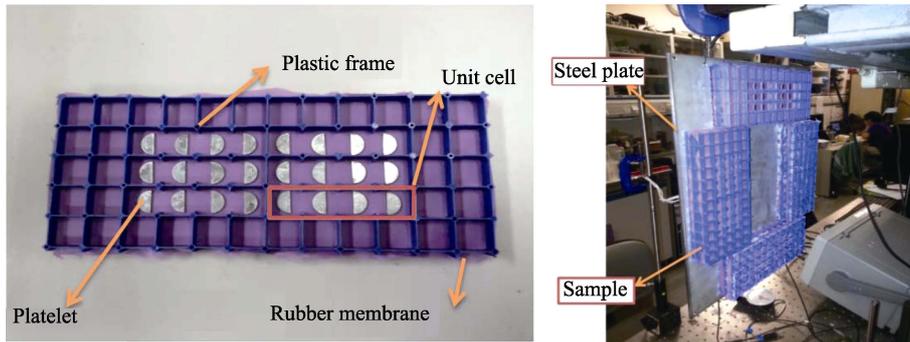


图7 第三代薄膜型声学超材料薄板产品及测试现场图片

频率范围内，传声损失分别增加 2 dB 和 4 dB，吸声系数分别增加 2.5 倍和 1.5 倍。该结构的示意图及其隔声曲线如图 8 所示。

北卡罗莱纳州立大学和麻省理工学院研究人员将厚度约为 0.25 mm 橡胶薄膜与蜂窝芯（蜂窝边长

3.65 mm，高 25 mm）直接复合形成蜂窝夹层结构，同样在未引入质量块的情况下，其传声损失和吸声系数得到了提高^[31]。采用 Comsol Multiphysic 软件仿真计算及隔声测试对比分析发现，相比未引入局域共振薄膜的蜂窝夹层结构，在 50~1600 Hz 频率范围，平

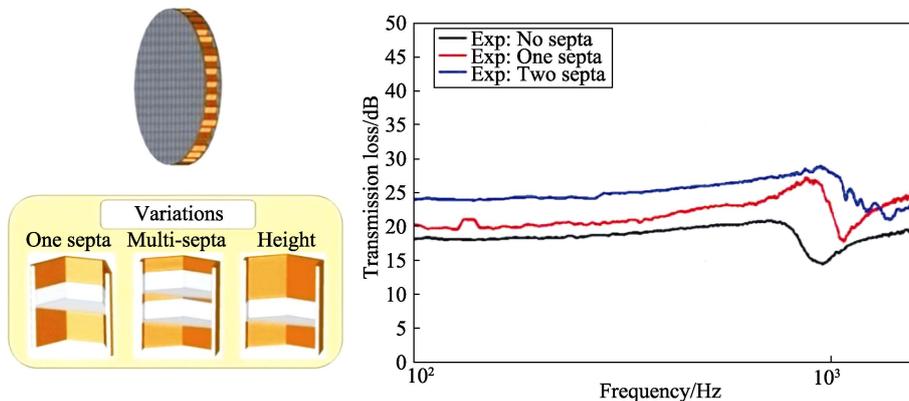


图8 蜂窝薄膜共振吸声结构及隔声曲线

均传声损失由 31 dB 提高到 40 dB, 在 500 Hz 以下的低频段, 平均传声损失大于 50 dB。引入局域共振薄膜的蜂窝夹层结构其面密度增加了约 6%, 但并未影

响蜂窝夹层结构的完整性, 该结构的示意图及隔声曲线如图 9 所示。该材料已应用于飞机机舱的地板和天花板等部位。

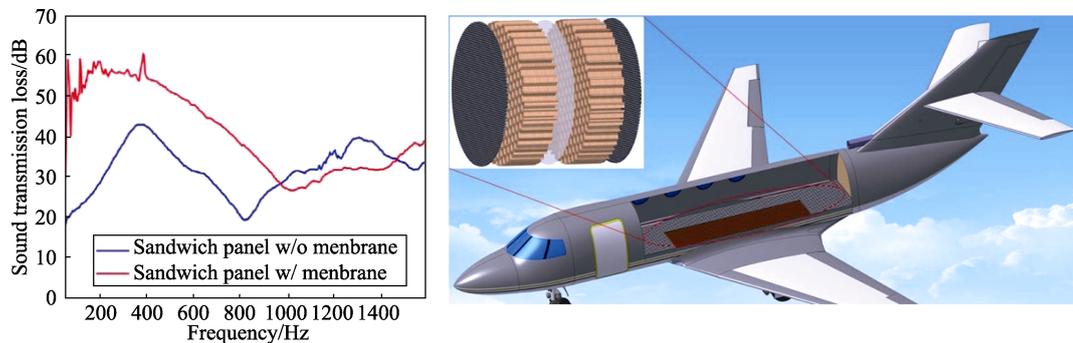


图 9 蜂窝薄膜共振结构、隔声曲线及应用案例

6 结语

随着各类装备向高速、大型、重载以及极端运行环境等方向发展, 驾乘舱室所面临的噪声问题越发严重, 强烈的噪声将危害驾乘人员的健康, 同时影响机载仪器和设备的运行, 并且, 强烈的噪声将使装备的声隐身性能降低, 对其作战性能产生不利影响。

声学超材料在低频段具有声学禁带, 在该禁带频率范围内具有优异的声学性能, 可通过采用多个声学超材料结构单元进行组合或多层声学超材料进行层叠组合实现宽频吸/隔声, 其在各类装备中具有广阔的应用前景。其中, 薄膜型声学超材料是在传统声学夹层结构中引入局域共振模块, 在不影响传统夹层结构的完整性且面密度增加很小的情况下, 大幅提高低频段的吸/隔声性能, 其已在国外的航空产品上实现了小规模应用。

参考文献:

- [1] PIERRE A D. Acoustic Metamaterials and Phononic Crystals[M]. 2016.
- [2] LAKES R. Foam structures with a negative Poisson's Ratio[J]. Science, 1987, 235(4792): 1038-1040.
- [3] LEE S H, PARK C M, SEO Y M, et al. Acoustic Metamaterial with Negative Density[J]. Phys Lett A, 2009, 373: 4464-4469.
- [4] LEE S H, PARK C M, SEO Y M, et al. Composite Acoustic Medium with Simultaneously Negative Density and Modulus[J]. Phys Rev Lett, 2010, 104: 054301.
- [5] 温熙森, 温激鸿, 王刚, 等. 声子晶体[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [6] 郁殿龙, 刘耀宗, 王刚, 等. 二维声子晶体薄板的振动特性[J]. 机械工程学报, 2006, 42(2): 150-154.
- [7] 吴九汇, 张思文, 沈礼. 螺旋局域共振单元声子晶体板结构振动带隙特性研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(10): 62-69.

- [8] CHEN C P, LAKES R S. Holographic Study of Non-affine De-formation in Copper Foam with a Negative Poisson's Ratio-0.8[J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1993, 29(3): 395-399.
- [9] BIES D A, HANSEN C H. Engineering Noise Control: Theory and Practice[M]. Fourth Edition. Florida: CRC Press, 2013.
- [10] 吴九汇. 噪声分析与控制[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2011.
- [11] 丁昌林, 赵晓鹏. 可听声频段的声学超材料[J]. 物理学报, 2009, 58(9): 6351.
- [12] ZHU Zhu, YANG Yang, ZHANG Nian-zhang, et al. Locally Resonant Sonic Materials[J]. Science. 2000, 289: 1734-1736.
- [13] LIU Z M, PANG Y. Effect of the Size and Pressure on the Modified Viscosity of Water in Microchannels[J]. Acta Mech Sinica, 2015, 31: 45-52.
- [14] ZHANG S, XIA C, FANG N. Broadband Acoustic Cloak for Ultrasound Waves[J]. Phys Rev Lett, 2011, 106: 024301.
- [15] HARNE R L, FULLER C R. Modeling of a Passive Distributed Vibration Control Device Using a Superposition Technique[J]. J Sound Vib, 2012, 331: 1859-1869.
- [16] WANG P, CASADEI F, SHAN S, et al. Harnessing Buckling to Design Tunable Locally Resonant Acoustic Metamaterials[J]. Phys Rev Lett, 2014, 113: 014301.
- [17] YAN, C, CHENG L, PAN J. Absorption of Oblique Incidence Sound by a Finite Micro-perforated Panel Absorber[J]. J Acoust Soc Am, 2013, 133: 201-209.
- [18] SONG K, LEE S H, KIM K, et al. Emission Enhancement of Sound Emitters Using an Acoustic Metamaterial Cavity[J]. Sci Rep, 2014, 4: 4165.
- [19] KAINA N, LEMOULT F, FINK M, et al. Negative Refractive Index and Acoustic Superlens from Multiple Scattering in Single Negative Metamaterials[J]. Nature, 2015, 525: 77-81.
- [20] HUANG H H, SUN C T. Wave Attenuation Mechanism in

- an Acoustic Metamaterial with Negative Effective Mass Density[J]. *New Journal of Physics*, 2009, 11: 013003.
- [21] BRUNET T, MERLIN A, MASCARO B, et al. Soft 3D Acoustic Metamaterial with Negative Index[J]. *Nat Mater*, 2015, 14: 384-388.
- [22] TANG Yu-fan, REN Shu-wei, MENG Han. et al. Hybrid Acoustic Metamaterial as Super Absorber for Broadband Low-frequency Sound[R]. *Scientific Reports*, 2017.
- [23] 丁昌林, 赵晓鹏, 郝丽梅, 等. 一种基于开口空心球的声学超材料[J]. *物理学报*, 2011, 60(4): 044301.
- [24] DING C L, ZHAO X P. Multi-band and Broadband Acoustic Metamaterial with Resonant Structures[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, 44: 215402.
- [25] XIAO Y, JIHONG W, WEN X. Sound Transmission Loss of Metamaterial-based Thin Plates with Multiple Sub-wave Length Arrays of Attached Resonators[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2012, 331: 5408-5423.
- [26] YANG Z, MEI J, YANG M, et al. Membrane-type Acoustic Metamaterial with Negative Dynamic Mass[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101: 204301.
- [27] YANG Z, DAI H M, CHAN N H, et al. Acoustic Metamaterial Panels for Sound Attenuation in the 50~1000 Hz Regime[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96: 041906.
- [28] MEI Jun, MA Guan-cong, YANG Min, et al. Dark Acoustic Metamaterials as Super Absorbers for Low-frequency Sound[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 756.
- [29] SUN Liang, AU Yeung, KA Yan, et al. Membrane-type Resonator as an Effective Miniaturized Tuned Vibration Mass Damper[J]. *AIP Advances*, 2016, 6(8): 085212.
- [30] CHRISTINA N, MATT S, STEVE N. Noise Reduction of Honeycomb Sandwich Panels with Acoustic Mesh Caps[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2009, 8: 065002.
- [31] SUI Ni, YAN Xiang, HUANG Tai-yun, et al. A Lightweight Yet Sound-proof Honeycomb Acoustic Metamaterial[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106: 171905.