

一种双频和宽频超表面材料的探索研究



丁昌林,史剑兵,董仪宝,赵晓鹏

西北工业大学, 陕西 西安 710129

摘要: 本文设计并研究了一种亚波长厚度、宽带高效的吸声超表面材料,有望应用于航空噪声和振动的控制。首先提出了一种基于局域共振机理的开口空心球(SHS)人工微结构,理论分析和仿真计算表明这种结构的超表面材料在共振频率附近具有较强的吸声率;然后,将不同尺寸的SHS整合在一个结构中设计出嵌套开口空心球(NSHS),在空气基底中制备出NSHS超表面材料可以同时双频段实现高效率的吸声效应;最后,增加海绵基底后,这种超表面材料可以实现500~1200Hz的宽频吸声效应。

关键词: 声学超表面; 双频吸声; 宽频吸声; 开口空心球; 嵌套开口空心球; 局域共振

中图分类号:V250.3

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2022.05.011

航空机舱内减振降噪是目前亟待解决的实际问题。机舱内噪声传声方式包括空气传声和结构传声,噪声的来源成分为航空发动机噪声、湍流边界层噪声、舱内噪声源(次要),一般的噪声频率成分有宽带和尖峰两种,峰值集中于0~800Hz^[1]。航空发动机噪声包括风扇噪声、喷流噪声、燃烧室噪声、发动机振动辐射的噪声等。湍流边界层噪声是飞机飞行过程中气流流过机体表面引起的气流压力扰动产生的。对于固定翼飞机来说,作用于机身外部的湍流边界层压力场是舱内宽频噪声的主要来源,包含起落架、增升装置、机翼前缘与后缘和附在机身上的湍流层等。舱内噪声源包括环控系统、液压系统、压力安全阀以及电子机械设备等。相对外部声源来讲,机舱内部声源声压级相对较小。

当前,飞机舱内降噪的方法分为被动降噪和主动降噪两种。主动降噪是通过设置次级声源或振源来消除噪声源的干扰,其优点是减振特性随噪声源特性的变化而改变。但是缺点也很明显,降噪频带较窄。主动降噪主要用于降低低频噪声的场合,对于中高频这类宽频带降噪效果不是很明显。被动降噪是通过改善噪声源降低噪声、优化传递路径增大传递损失^[2-4]。主要措施包括吸声、隔声、阻尼、动力吸振器。其中,吸声方法是主要降噪方法,吸声降噪效率

依赖于优质的吸声材料,吸声材料对声音的吸收或消除大多是将声能转化为热能、振动能等其他形式,再将能量耗散。传统的吸声材料包括纤维和泡沫等多孔吸声材料,还有薄板、穿孔板和微穿孔板等基于亥姆霍兹共振器等共振吸声材料^[5-8]。

传统的方法在航空器的减振降噪^[9-11]问题上有一定的限制,需要借助于新的设计思想提高减振降噪的效率。声学超表面材料是一种人工设计的材料,具有亚波长厚度、低损耗、等效参数范围广(可以灵活地从正值调控至负值范围)等特点,可以实现对声波更大范围的调控,而噪声和振动主要以波的形式传播^[12-13]。因此,超表面材料为控制噪声和振动提供了更多方法。2000年,Liu等^[14]提出了声学的局域共振思想,为声学超材料的发展奠定了理论基础。声学超材料的结构单元是“亚波长”尺度的,其声学参数可以从正值区域拓宽至负值区域,主要通过改变其单元的几何结构和尺寸来调节。在局域共振思想指导下,研究者们提出了负质量密度、负弹性模量^[15-16],以及双负声学超材料^[17]等概念,并实现了对声波的反常调控,包括完美吸声、亚波长成像、声学隐身、声波准直、各向异性质量密度和声超常透射等奇异效应^[18]。后来,声学超材料发展至声学超表面

收稿日期: 2021-12-18; 退修日期: 2022-01-15; 录用日期: 2022-03-11

基金项目: 航空科学基金(2018ZF53071)

引用格式: Ding Changlin, Shi Jianbing, Dong Yibao, et al. Exploratory research on a dual-band and broadband metasurface materials[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(05): 76-81. 丁昌林,史剑兵,董仪宝,等. 一种双频和宽频超表面材料的探索研究[J]. 航空科学技术, 2022, 33(05): 76-81.

材料^[19-21],通过设计合适的局域共振超原子,引入相关的共振耦合,仅通过单层超原子结构单元就可以实现超常性质,包括高效率吸声效应^[22]。声学超表面具有超薄、低损耗、低造价、高度集成性等优点。

虽然超表面材料具有很多优点,但是这种材料是基于局域共振机理设计的,只能在共振频段附近具有吸声效应,即工作频带太窄限制了其在工程实践中的应用。本文基于共振耦合机理,提出一种嵌套开口空心球模型设计多频段吸声超表面材料,这种结构具有亚波长厚度,可以在双频段和宽频段实现高效率的吸声,为航空领域的减振降噪提供一种新的设计思路和方法。

1 开口空心球结构的吸声效应

1.1 模型分析

开口空心球(SHS)是一种在空心球一侧钻一个圆形孔洞的结构,图1(a)和图1(b)分别表示SHS的二维(2D)截面图和三维(3D)立体示意图。SHS是一种亥姆霍兹共振腔,具有局域共振性质,可以等效为声学L-C等效电路,其球形空腔可以看作声容 C_a ,其开口孔洞等效为声感 L_a 。根据前期工作结果^[23-24],在共振频段,当声波入射至SHS时,球形空腔内会存储大量的声能,这些存储的声能会受限制地从开口孔洞处强烈地释放出来,从而引起声媒质的共振效应。此时,所有的入射声波将被阻止前进,在透射端产生透射吸收峰,且在共振频段材料的等效弹性模量为负值。

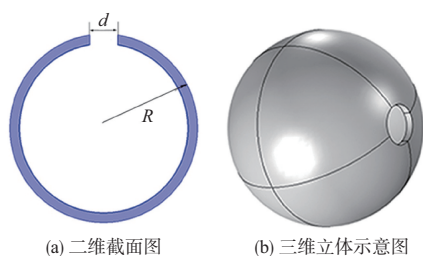


图1 开口空心球结构

Fig.1 Structure of split hollow sphere

1.2 试验和仿真分析

为了进一步研究其吸声特性,本文利用3D打印技术制备了SHS单元,所选的材料为光敏树脂,球直径为50mm,壁厚为1.6mm,开口孔洞直径为8mm,将SHS在空气基底中周期排列制备出SHS超表面材料。将材料放置于阻抗管(北京声望声电技术有限公司,SW422)内测试其吸声特性。测试装置如图2所示,包括两个传声器、两根内径100mm阻抗管、声源(喇叭)、四通道数据采集分析仪、功率放大器和

计算机,测试的频段为400~1600Hz。扬声器发出的声波信号在阻抗管中以平面波的形式传播,试验测试样品经过密封处理放置于两阻抗管中间,样品后端的阻抗管是实心的,即样品紧贴着硬质基板。利用两个麦克风测试管中固定位置的声压,该套装置参照国家标准GB/T 18696.2—2002,通过传递函数法计算得到样品的吸声系数。

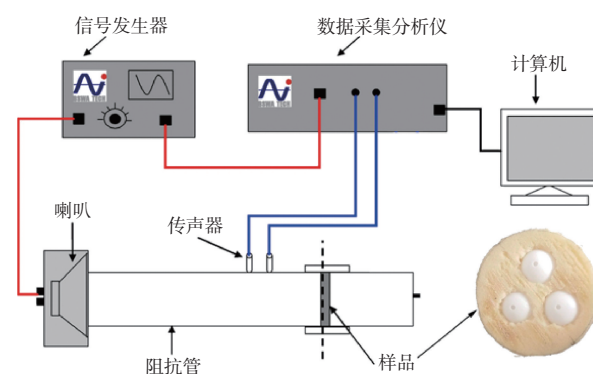


图2 吸声测试装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of sound absorption testing system

试验测试的SHS样品的吸声曲线如图3(a)所示,从图中可以很明显能看出吸收峰,且吸收峰刚好位于SHS的共振频率500Hz附近。通过加入海绵基底可以增加吸收率,在共振频率吸收率能达到95%以上。为了进一步说明说明试验结果,我们利用基于有限元的COMSOL Multiphysics 5.3a多物理场耦合软件仿真计算了其吸声性质。在仿真软件中选择声学模块进行三维模型设计,在频域内选择压力声学 and 声-热黏性模块进行仿真计算,SHS内部设置为空气,空气密度为 1.25kg/m^3 ,声速为 343m/s 。球壁材料设置为塑料,其密度为 980kg/m^3 ,弹性模量为 $2 \times 10^8\text{Pa}$,泊松比为0.4,入射压力场声压为1Pa。将SHS放置于波导管中,管壁边界为硬质边界条件,球壁和空气之间的边界设置为声-热黏性声学边界。经过计算得到的吸声曲线如图3(b)所示,在SHS的共振频率500Hz附近也出现了吸收峰,与试验结果一致。只是最大吸收率只有80%左右,分析原因在于SHS内部介质的仿真设计不是很准确,内部热黏滞损耗不够大,导致吸收率不高。通过仿真的结果可以看出,SHS材料能出现较强的吸收主要因为SHS结构的共振,当SHS发生共振时,体腔内存储的大量声能会从开口孔洞中突然释放出来。在释放的过程中,会出现空气媒质的强烈振动,由于空气的热黏滞效应,空气介质的强烈振动会产生大量的热损耗,从而将入射声波的能量转化为SHS内部的热量引起损耗,产生高效率的声吸收。

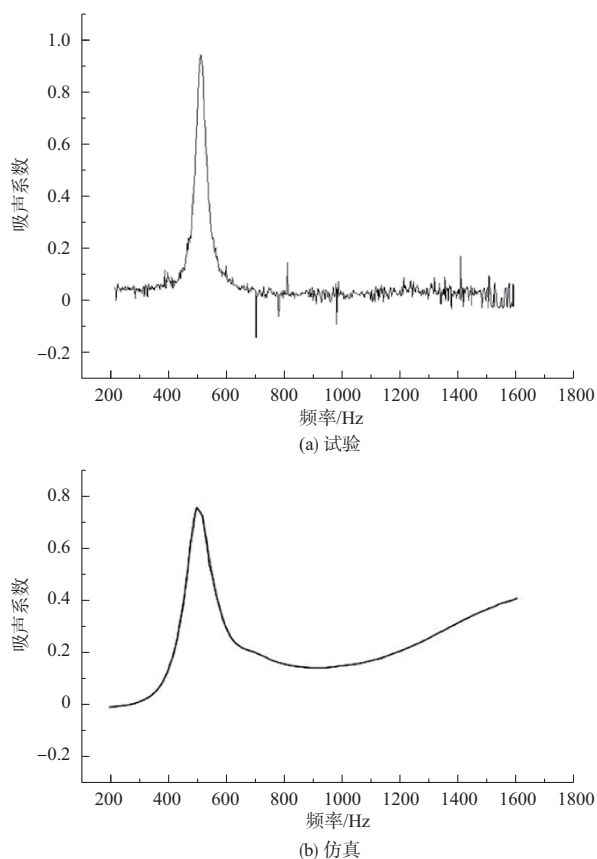


图3 开口空心球超表面材料的吸收曲线

Fig.3 Absorption curves of SHS metasurface materials

2 嵌套开口空心球的吸声效应

2.1 模型分析

将不同SHS按同心球方式嵌套在一起设计成嵌套开口空心球(NSHS),其可以实现不同谐振单元的耦合,NSHS的二维截面图和三维立体图如图4所示。相当于两个不同尺寸的开口空心球耦合在一个结构中。根据其透射性质可知^[25],耦合以后的NSHS会出现两个共振的透射低谷,且均不由内部两个SHS的共振引起,而是由共振耦合引起的。这种耦合效应可以通过改变开口孔洞的夹角、内外空心球的空腔半径和开口孔洞大小进行调节。

2.2 试验和仿真结果分析

利用COMSOL软件仿真计算了不同NSHS的吸声特性,首先设计NSHS的外球直径为50mm、内球直径为40mm;外球的开孔直径为10mm,外壁厚1.6mm,内球的开孔直径为8mm,内壁厚1mm。图5(a)为此模型的仿真结果,横坐标代表频率,纵坐标代表吸声系数。从图可以看出,这种结构同时两个频段出现吸收峰,在500Hz处吸声

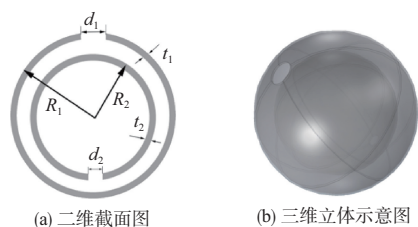


图4 嵌套开口空心球(NSHS)结构

Fig.4 Structure of nested SHS

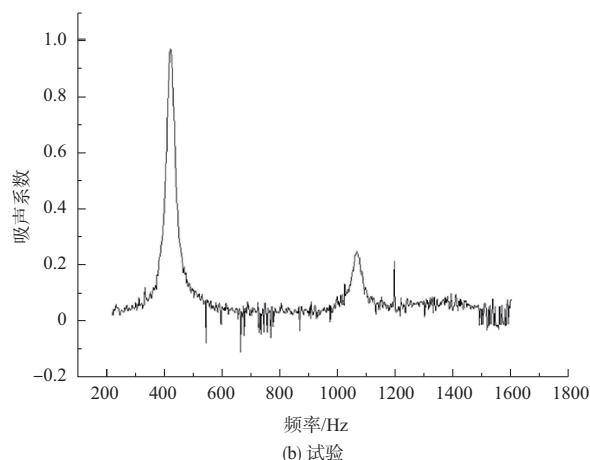
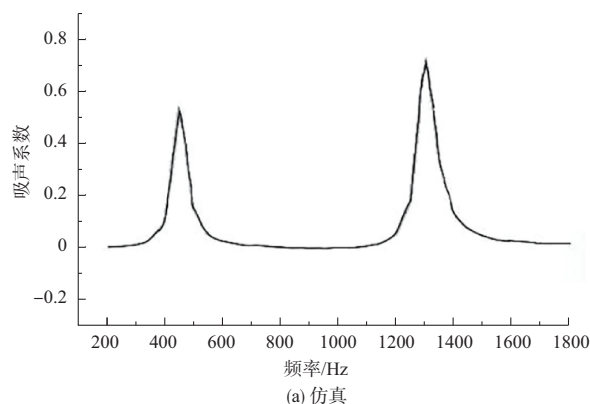


图5 外球直径为50mm的NSHS超表面材料吸声系数曲线

Fig.5 Absorption curves of NSHS metasurface material with 50mm external sphere diameter

率可达到55%,在1310Hz处吸声率可达到75%,整体结果不是很理想,在试验中利用3D打印技术制备出相同尺寸的NSHS结构,所选的基础材料为光敏树脂,为了能够支撑住两个开口空心球,在内部做了个小圆柱形支架,通过仿真表明内部支架对结构性能影响很小。将样品直接通过胶水固定在图2所示的吸声装置中测试其吸声特性,结果如图5(b)所示。这种结构制备的超表面材料在频率400Hz附近

有95%以上的吸声效果,在频率1080Hz处却只有20%左右的吸声频率。试验与仿真的效果有一点偏差,说明这种尺寸的NSHS并不适合实现双频段的高效吸声材料。

为了实现更好的耦合效应,设计了尺寸更小的NSHS结构,其外球直径为40mm,内球直径为30mm,外球的开孔直径10mm,外壁厚1mm,内开口6mm,壁厚1mm,用COMSOL软件研究了基于该结构的超表面材料的吸声效果,如图6(a)所示。从图可以看出,在频率700Hz处有78%的吸声效果,而在1700Hz处却有80%的吸声效果,足够大的开孔直径以及合理的球腔大小可以实现更好的共振耦合,从而在双频段实现更好的吸声效应。为了验证仿真的结构,利用3D打印技术制备了相同结构尺寸的NSHS超表面材料,并将结构排列在空气中,在如图2所示的吸声装置中测量了其吸声曲线,如图6(b)所示,在谐振频率520Hz附近有98%以上的吸声效果,在频率1200Hz处有80%以上的吸声效果。对比图6(b)发现,吸声系数有了很大的提升,但

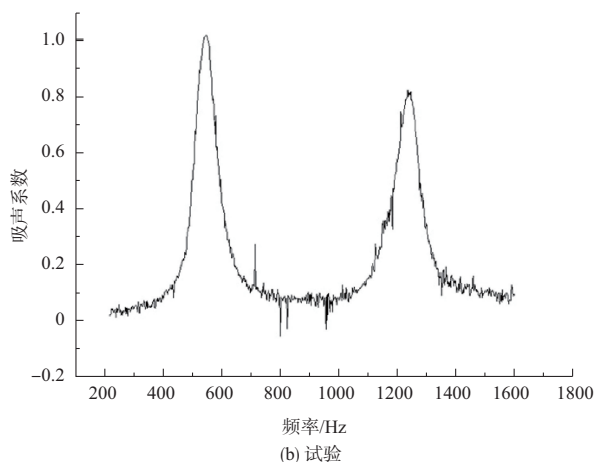
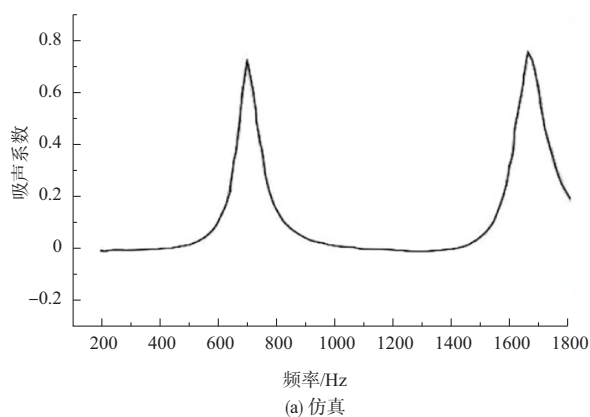


图6 外球直径为40mm的NSHS超表面材料的吸声曲线
Fig.6 Absorption curve of NSHS metasurface material with 40mm external sphere diameter

也与仿真效果有一点偏差。相对于外球径为50mm的NSHS超表面材料的仿真和试验吸声结果,该样品的仿真和试验结果很好,可以在双频段实现较高效率的声吸收。初步分析原因如下:(1)结构尺寸太大,使得在较高频率下共振不强烈,对声波能量的吸收较少。(2)内球开口孔径太大导致共振与外界空气对流太大,降低了吸声效果。即合理的开孔大小能得到较强的共振耦合效应,从而提升吸声效果。

若将外球直径为40mm的NSHS结构排列在40mm厚的海绵基底中,按图2右下角图的方式制备成超表面材料样品,可以得到如图7所示的吸声曲线。此时,在500~1200Hz频带范围内,材料的吸声率大于90%,实现了宽频带的高效吸声,从而将双频带的吸声材料转化为宽频带的吸声材料。这种吸声材料可用于飞机机舱的减振降噪。

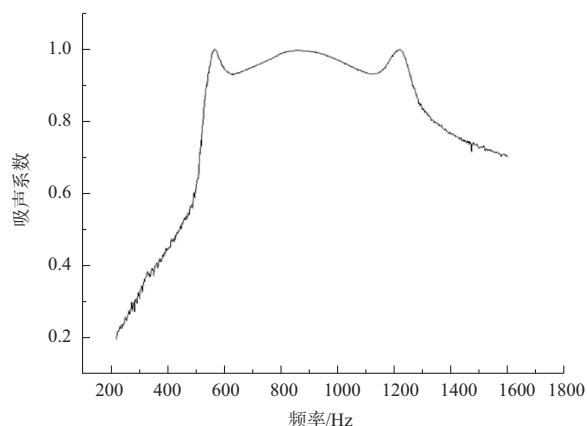


图7 外球直径为40mm的NSHS超表面材料的吸声曲线
Fig.7 Absorption curve of NSHS metasurface material with 40mm external sphere diameter and two layers' sponge matrix

3 结束语

本文利用SHS作为局域共振单元,研究了其共振吸声效应,在共振频率处具有窄频的高效吸声效应,进一步将SHS这种共振单元组合在一起设计了NSHS结构。仿真和试验表明,基于这种结构的材料具有亚波长厚度,且通过设计合理的结构尺寸,可以得到强烈的共振耦合效应,从而实现双频段高效吸声效应。通过加入双层海绵基底,NSHS超表面材料可以在低频500~1200Hz范围内实现宽频带的高效吸声效应,吸声率大于90%。这种材料有望为航空减振降噪问题提供新的设计思路和方法。

参考文献

- [1] 左孔成,陈鹏,王政,等.飞机舱内噪声的研究现状[J].航空学报,2016,37(8):2370-2384.
Zuo Kongcheng, Chen Peng, Wang Zheng, et al. Research status of aircraft interior noise[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(8): 2370-2384. (in Chinese)
- [2] 刘文艳.某型机座舱降噪技术研究[J].科技视界,2013(18):5-6.
Liu Wenyan. Research on noise reduction technology of a certain aircraft cabin[J]. Science & Technology Vision, 2013 (18): 5-6. (in Chinese)
- [3] 李晨曦,胡莹,韩峰,等.飞机机体表面声压及舱内降噪优化设计[J].应用声学,2019,38(5):876-885.
Li Chenxi, Hu Ying, Han Feng, et al. Sound pressure distribution on the external surface of an aircraft and the optimization of the cabin acoustic design[J]. Journal of Applied Acoustics, 2019, 38(5): 876-885. (in Chinese)
- [4] 姚起杭,黄文超,马小俊.运12飞机客舱降噪技术研究[J].航空学报,1992(9):543-547.
Yao Qihang, Huang Wenchao, Ma Xiaojun. Investigation of cabin noise reduction in the Y12[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1992 (9): 543-547. (in Chinese)
- [5] 罗乖林,王晋军.飞机舱内噪声综合治理技术[J].北京航空航天大学学报,2010,36(7):808-811.
Luo Guailin, Wang Jinjun. Integrated methods for cabin noise control[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(7): 808-811. (in Chinese)
- [6] 孙旭东,王鹏.浅析吸声材料的研究与展望[J].科学技术创新,2019(5):151-152.
Sun Xudong, Wang Peng. Research and prospect of sound absorbing materials[J]. Scientific and Technological Innovation, 2019(5): 151-152. (in Chinese)
- [7] 于丽新,李响,齐笑言,等.吸声材料及声能转化研究现状分析[J].节能技术,2017,35(2):156-161,187.
Yu Lixin, Li Xiang, Qi Xiaoyan, et al. Sound absorbing materials and sound energy conversion[J]. Energy Conservation Technology, 2017, 35(2): 156-161, 187. (in Chinese)
- [8] 苑改红,王宪成.吸声材料研究现状与展望[J].机械工程师,2006(6):17-19.
Yuan Gaihong, Wang Xiancheng. Research status and prospect of sound absorbing materials[J]. Mechanical Engineer, 2006 (6): 17-19. (in Chinese)
- [9] 梁春华,孙广华.商用飞机发动机先进降噪技术[J].航空科学技术,2011,22(4):48.
Liang Chunhua, Sun Guanghua. Advanced noise reduction technology for large commercial aircraft engines[J]. Aeronautical Science & Technology, 2011, 22(4): 48. (in Chinese)
- [10] 徐悦.航空发动机尾喷流微喷降噪技术研究进展[J].航空科学技术,2011,22(2):52.
Xu Yue. Research progress on aeroengine jet noise reduction by microjet[J]. Aeronautical Science & Technology, 2011, 22 (2): 52. (in Chinese)
- [11] 顾金桃,高飞,王美燕,等.飞机典型壁板隔声特性试验研究[J].航空科学技术,2019,30(9):96-100.
Gu Jintao, Gao Fei, Wang Meiyan, et al. Experimental research on sound transmission loss of aircraft typical panels[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(9): 96-100. (in Chinese)
- [12] 龙厚友.基于声学超材料的低频声吸收体研究[D].南京:南京大学,2019.
Long Houyou. Research on absorber for low-frequency sound based on acoustic metamaterials[D]. Nanjing: Nanjing University, 2019. (in Chinese)
- [13] 李锦超,张进,程营,等.声学Mie共振及其应用[J].物理,2017,46(11):731-739.
Li Jinchao, Zhang Jin, Cheng Ying, et al. Acoustic Mie resonance and its applications[J]. Physics, 2017, 46(11): 731-739. (in Chinese)
- [14] Liu Z, Zhang X, Mao Y, et al. Locally resonant sonic materials [J]. Science, 2000, 289: 1734.
- [15] Yang Z, Mei J, Yang M, et al. Membrane-type acoustic metamaterial with negative dynamic mass[J]. Physical Review Letters, 2008, 101: 204301.
- [16] Fang N, Xi Dongjuan, Xu Jianyi, et al. Ultrasonic metamaterials with negative modulus[J]. Nature Materials, 2006, 5: 452.
- [17] Yang Min, Ma Guancong, Yang Zhiyu, et al. Coupled membranes with doubly negative mass density and bulk modulus[J]. Physical Review Letters, 2013, 110 (13) : 134301.

- [18] Cummer S A, Christensen J, Alu A. Controlling sound with acoustic metamaterials[J]. *Nature Reviews Materials*, 2016, 1: 16001.
- [19] Xie Y, Wang W, Chen H, et al. Wavefront modulation and subwavelength diffractive acoustics with an acoustic metasurface[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5553.
- [20] Ding C, Chen H, Zhai S, et al. The anomalous manipulation of acoustic waves based on planar metasurface with split hollow sphere[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2015, 48 (4): 045303.
- [21] Ding C, Wang Z, Shen F, et al. Experimental realization of acoustic metasurface with double-split hollow sphere[J]. *Solid State Communications*, 2016, 229: 28-31.
- [22] Ma G, Yang M, Xiao S, et al. Acoustic metasurface with hybrid resonances[J]. *Nature Materials*, 2014, 13 (9): 873.
- [23] Ding C, Hao L, Zhao X. Two-dimensional acoustic metamaterial with negative modulus[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108: 074911.
- [24] Ding C, Zhao X. Multi-band and broadband acoustic metamaterial with resonant structures[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, 44: 215402.
- [25] Chen H, Ding C. Simulated and experimental research of multi-band acoustic metamaterial with a single resonant structure[J]. *Materials*, 2019, 12: 3469.

Exploratory Research on a Dual-band and Broadband Metasurface Materials

Ding Changlin, Shi Jianbing, Dong Yibao, Zhao Xiaopeng

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China

Abstract: The paper designs and study its a sound absorption metasurface materials with subwavelength thickness and broadband high-efficiency, which may be applied to aeronautical noise and vibration reduction. Firstly, the paper presents an artificial microstructure of split hollow sphere (SHS). The theoretical analysis and simulated calculation demonstrate that this structure has acoustic resonant effect. The SHS materials reveal strong sound absorption near the resonant frequency. Then, nested SHS (NSHS) model can be designed by integrating two different sized SHS into a single structure. The NSHS metasurface materials fabricated by arranging designed NSHS in air matrix present high-efficient sound absorption in two frequency band simultaneously. Finally, the NSHS materials with sponge matrix achieve broadband high sound absorption in low frequency range of 500-1200Hz.

Key Words: acoustic metasurface; dual-band sound absorption; broadband sound absorption; SHS; NSHS; local resonance

Received: 2021-12-18; **Revised:** 2022-01-15; **Accepted:** 2022-03-11

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(2018ZF53071)