

doi: 10.3788/gzxb20164507.0731002

# 局域共振单元与薄膜复合声子晶体板结构的低频降噪

张佳龙<sup>1</sup>, 姚宏<sup>2</sup>, 杜军<sup>1</sup>, 姜久龙<sup>1</sup>, 董亚科<sup>1</sup>, 祁鹏山<sup>1</sup>

(1 空军工程大学 航空航天工程学院, 西安 710038)

(2 空军工程大学 理学院, 西安 710051)

**摘 要:**提出了一种局域共振单元复合声子晶体板结构,并结合有限元对晶体板结构的带隙特性、隔声性能进行了分析。结果表明,共振带隙的产生是由共振单元与板中传播的弹性波相互耦合造成的,耦合强度直接影响共振频率和带隙宽度,隔声效果与薄膜的厚度直接相关。通过改变薄膜的厚度可以将隔声效果调节到满足机舱飞行员正常驾驶的要求。该结构在 200 dB 以下具有良好的隔振效果,最大隔声量达到 150 dB。该研究为获得良好的隔声效果提供了理论支持,在航空发动机减振降噪方面具有潜在的应用前景。

**关键词:**振动控制;局域共振;声子晶体;隔声效果;减振降噪

中图分类号:O734

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)07-0731002-5

## Reduction of Low-frequency Noise in Phononic Crystal Plates with Composite Locally Resonant Structures and Thin Membrane

ZHANG Jia-long<sup>1</sup>, YAO Hong<sup>2</sup>, DU Jun<sup>1</sup>, JIANG Jiu-long<sup>1</sup>, DONG Ya-ke<sup>1</sup>, QI Peng-shan<sup>1</sup>

(1 Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

(2 Science of College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** A kind of locally resonant phononic crystal plate with composite unite was introduced, and the band gap characteristics and sound transmission loss of the proposed structure were investigated with the finite element methods. It is found that the interaction between the local resonances and the traveling wave modes in the plate results the locally resonant band gap, whose bandwidth and sound insulation effect depend on the interaction strength and the thickness of thin membrane by changing structure parameters. By changing the thickness of the thin membrane, the proposed phononic crystal structure is demonstrated to meet the normal flight. The results show that the structures possess sound insulation effect below 200 dB and highest sound transmission loss up to 150 dB. The study provides a theoretical basis to obtain good sound insulation effect, and has a potential application value in the reducing of noise and vibration in the aero-engine.

**Key words:** Vibration control; Local resonance; Phononic crystal; Sound insulation effect; Reduction noise and vibration

**OCIS Codes:** 310.6870; 160.4236; 160.5298; 350.4238; 350.7420

## 0 引言

发动机产生的噪声影响机体的结构、机载设备的安全<sup>[1]</sup>及飞行员的舒适性。传统的机舱降噪方法有吸声降噪、隔声降噪、使用消声器、阻尼减振降噪等。但是

降噪系统庞大笨重,对低频噪声的控制能力差,且会影响飞行器的整体性能,增加飞机的燃油消耗,不符合现代飞机的发展方向<sup>[2]</sup>。

近 10 年来,薄膜类声超材料研究已成为物理学、力学、声学、材料科学与工程等交叉领域的研究热

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 11447147, 11504429)和陕西省自然科学基金基础研究计划(No. 2015JQ5155)资助

第一作者:张佳龙(1988-),男,硕士研究生,主要研究方向为声子晶体振动与降噪。Email:18392005957@163.com

导师:姚宏(1963-),女,博导,博士,主要研究方向为动力学与控制。Email:yyyyaohong@sohu.com

收稿日期:2015-12-31;录用日期:2016-03-22

<http://www.photon.ac.cn>

点<sup>[3-4]</sup>. 特殊结构的薄膜声学超材料具有超强的低频隔声<sup>[5]</sup>、低频吸声<sup>[6]</sup>、低频减振<sup>[7]</sup>等性能,为低频减振降噪技术开辟了一条新的途径,受到了国内外振动与噪声控制学者的高度重视<sup>[8-9]</sup>. 薄膜类声超材料可以抑制一定频率范围的弹性波,在减振、降噪、隔振及振动滤波器方面具有重要的应用前景<sup>[10]</sup>,为解决机舱降噪问题提出了新的思路. 作为低频吸声体使用时,薄板吸声结构由薄膜和薄膜后的空气层组成一个振动系统,用以吸收共振频率附近的入射声能<sup>[11]</sup>. 薄膜吸声的机理是将声能或者振动能转化为热能而消耗掉,以达到降噪目的. 2010年,香港科技大学研究小组提出了一种轻质薄膜型声学超材料<sup>[12]</sup>,可以在低频宽带(50~1 000 Hz)范围内实现高效隔声. 2011年,Zhu等<sup>[13]</sup>利用Milton模型对二维声学超材料薄板结构进行了研究,提出了一种用于研究弹性超材料微观结构的连续模型,能够很好地评估微观结构连续模型的准确性. Yang等<sup>[14]</sup>发现,薄膜类声超材料(Membrane-type Acoustic Metamaterial, MAM)具有良好声衰减特性,使声波衰减超过40 dB,而且产生带隙频率范围为50~1 000 Hz. 为了获得良好的减振效果,HO等<sup>[15]</sup>通过一系列具有不同尺寸的局域共振单元排列成声子晶体结构,获得的带隙能覆盖了200~500 Hz的频率范围<sup>[16]</sup>. LAI等<sup>[17-18]</sup>基于局域共振机理设计了体和薄膜超材料,解决了低频降噪减振的控制问题.

本文提出的局域共振单元声子晶体板结构在200 dB以下具有良好的隔振效果,最大隔声量达到150 dB,为获得良好的隔声效果提供了理论支撑,在航空发动机减振降噪方面具有潜在的应用前景.

## 1 复合单元模型及带隙计算方法

### 1.1 复合单元模型

声子晶体结构由局域共振单元组成. 图1为二维四组元声子晶体薄板结构横截面图, $z$ 方向垂直于纸

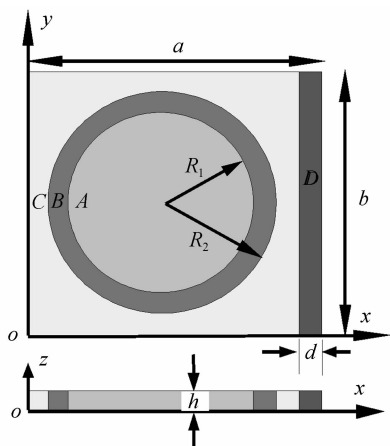


图1 局域共振单元结构

Fig.1 Locally resonant Unit structure

面向上,板厚度沿 $z$ 方向. 圆柱铅球A均匀包覆的橡胶B组成散射体,嵌入在环氧树脂立方体C中,侧面附加薄膜板D构成局域共振复合单元板结构. 图中用变量表示单元结构尺寸:周期性薄板的长度、宽度、厚度分别表示为 $a, b, h$ ,薄膜厚度为 $d$ ,两圆柱体的半径分别表示为 $R_1, R_2$ ,两高度相等均为 $h$ .

### 1.2 带隙计算方法

目前弹性波带隙特性计算方法主要有传递矩阵法、平面波展开法、时域有限差分法、多重散射法、集中质量法及有限元法<sup>[19]</sup>等. 其中有限元法广泛用于工程结构的计算,概念清晰浅显、适用性强、收敛性好. 本文对薄板型声子晶体带隙计算采用有限元软件COMSOL Multiphysics,沿第一布里渊区(见图2)路径 $\Gamma \rightarrow X \rightarrow M \rightarrow \Gamma$ 进行扫描,求解结构的固有频率.

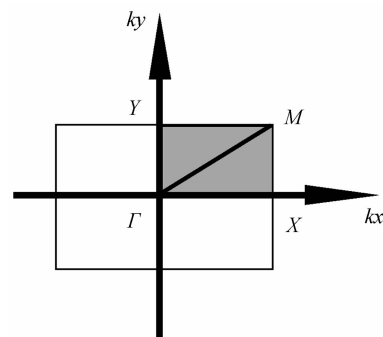


图2 第一布里渊区

Fig.2 First brillouin zone

## 2 局域共振带隙产生机理分析

材料参量及结构尺寸见表1、2. 采用有限元计算能带,不同方向的固有频率按不同方向展开排列,即声子晶体的能带结构,如图3.

表1 材料参量

Table 1 Material parameters

	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$E / (\times 10^{10} \text{ Pa})$	Poisson ratio/ $\mu$
A	11600	4.08	0.369
B	1300	$1.175 \times 10^{-5}$	0.469
C	1180	0.435	0.159
D	980	$2 \times 10^{-5}$	0.490

表2 结构尺寸

Table 2 Structure sizes

	$a / \text{mm}$	$b / \text{mm}$	$d / \text{mm}$	$h / \text{mm}$	$R_1 / \text{mm}$	$R_2 / \text{mm}$
Structure	21	20	1	10	7	8

由板的波动理论可知,有限厚度的板中存在一系列的反对称和对称 Lamb 波模态以及水平剪切波模态<sup>[20]</sup>. 在长波极限范围内,由于波长远大于元胞结构的特征波长,对称的 Lamb 波和水平剪切波在板结构中的传播与均匀板中是一样的,因此在低频段呈线性,能带的斜率代表波速. 从图3可以看出完全带隙(阴影部分)和较多不完全带隙(方向带隙),表明该结构在不

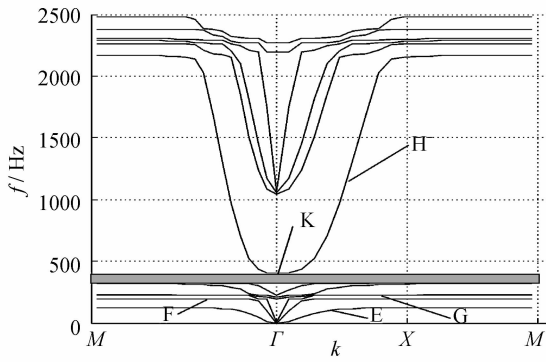


图3 声子晶体板的能带结构

Fig. 3 The band gap of phononic crystal plate

同的方向上具有几乎相同的固有频率。

图4为计算得到的结构对应能带图上的各阶局域共振模态.可以看出,它们分别为等效的“质量—弹簧”系统的平移和扭转振动模式.模态K对应该系统垂直于板方向的振动模式,而模态E为该系统的平移模式,F、G对应扭转振动模式.对于模态E是斜45°的平移(相当于弯扭组合),在垂直和平行方向都有位移.这些模态是振动能量完全被局限在单元内部的“质量—弹簧”共振单元,即局域共振模态.

根据这四个振动模态,单元结构可以简化为图5所示的“质量—弹簧”系统,各阶固有频率由其等效质

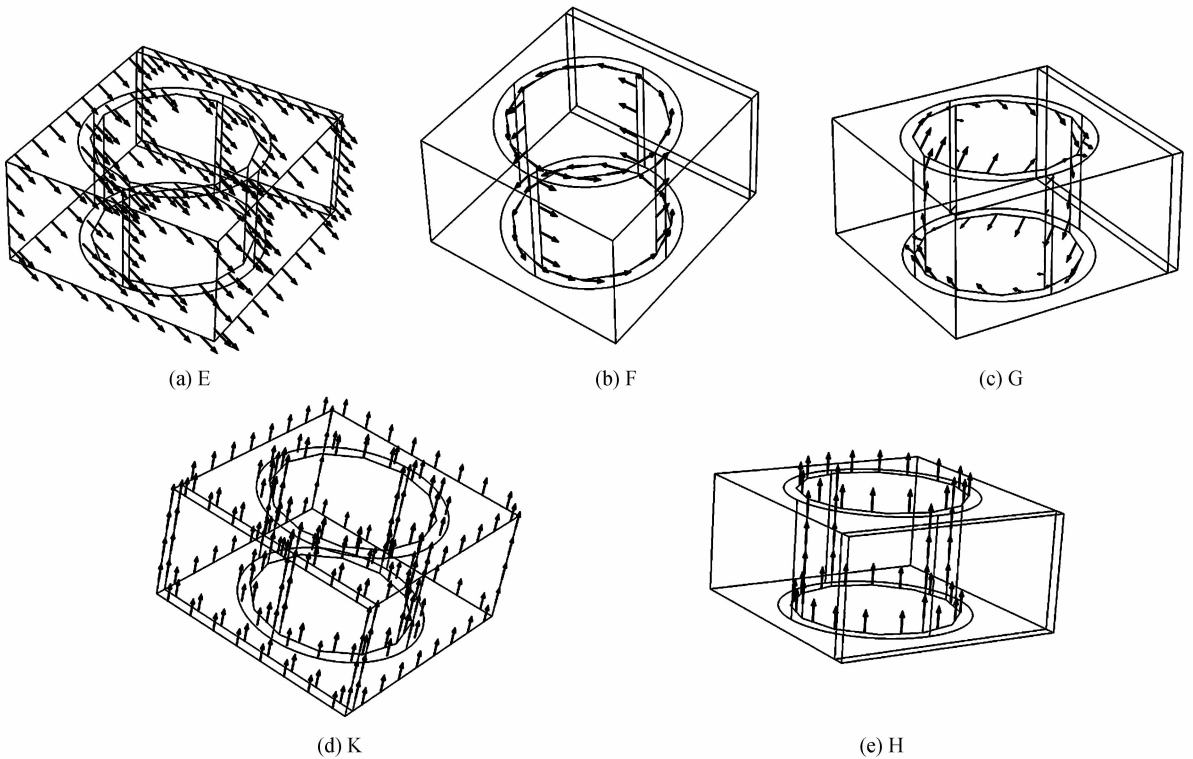


图4 单元结构的各阶局域共振模态,箭头表示位移的相对大小和方向

Fig. 4 The local resonance modes of structure , arrow indicates the relative size and directions

量和等效刚度决定,即

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_e}{M_e}} \quad (1)$$

式中,  $M_e$ 、 $k_e$  分别代表等效质量,等效刚度.

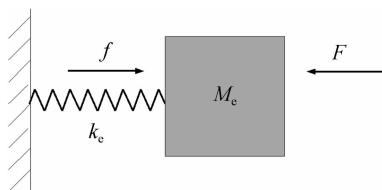


图5 局域共振单元结构的简化模型

Fig. 5 The simplified model of locally resonant phononic crystal

当外部激励频率接近或者等于内部共振单元的固有频率时,局域共振模态被激发,产生一个  $F$ ,而振子

(铅柱芯体)  $M_e$  运动会对其基体产生一个反作用力  $f$ ,使得振动受到抑制,弹性波可以继续传播,不能达到降噪目的.如果弹性波的频率接近或者等于共振单元的固有频率,外部激励与共振单元产生的反作用力大小相等,方向相反,耦合作用增强,则两作用力相互抵消,薄板的振动趋于静止.此时,板阻止弹性波的传播,从而形成带隙.这与动力减振器的原理类似,在反共振点,主系统处于静止状态.当弹性波的频率高于共振单元的固有频率并在一定范围内时,由于薄板受到的激励力与共振单元产生的作用力仍然反向,此时薄板的振动受到很大抑制,抑制作用越强,带隙也就越宽,说明带隙宽度与耦合作用强度有关.由图4可知,局域共振模态H与Lamb波之间都是沿垂直于板方向振动,模态H很容易激发,带隙因能级排斥而相互截断,进而

形成弯曲波带隙. 模态 E 由于在水平和垂直方向都有振动分量, 也会被反对称 Lamb 波激发, 从而形成方向 X→M 的带隙. 由带隙图可知, 标记为 H 的能带决定带隙截止频率. 因此, 带隙的宽带由共振单元和由板中弹性波的传播模式之间的耦合强度决定.

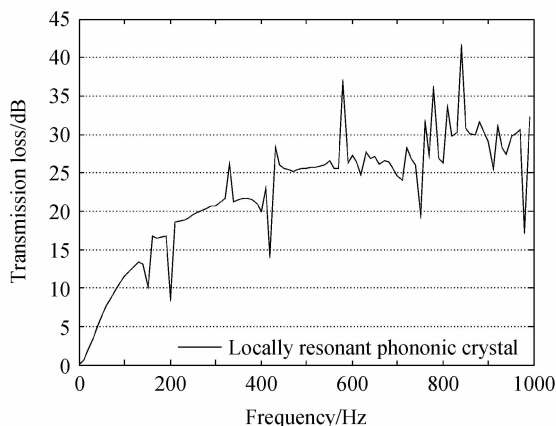
### 3 局域共振复合声子晶体声衰减特性分析

#### 3.1 局域共振板结构吸振机理分析

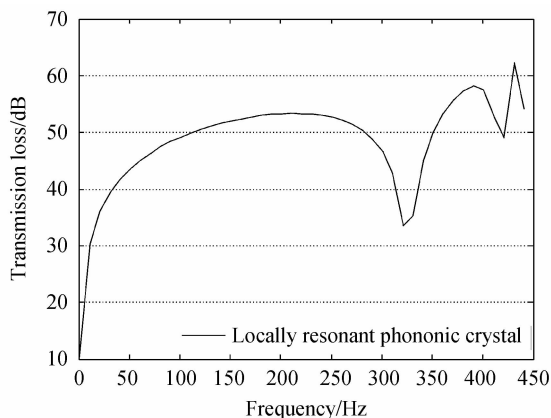
航空发动机产生的噪声入射到该声子晶体板结构表面时, 入射声能的一部分被该结构中薄膜吸收, 一部分被局域化, 只有很少一部分穿过声子晶体继续向前传播. 入射结构表面的声能与投射到另一侧的声能两者的 10 倍对数的差为隔声量, 一般用 TL 表示为

$$TL = 10\log E_i - 10\log E_t = 10\log\left(\frac{E_i}{E_t}\right) \quad (2)$$

式中, TL 为隔声量, 单位为 dB;  $E_i$  为入射声能;  $E_t$  为投射声能. 同种材料, 对于不同频率的声波, 隔声量往往不同. 薄膜、未加薄膜前的声子晶体板结构的隔声量如图 6. 从图中看出, 薄膜在高频段(800~900 Hz)的隔声效果好, 局域共振声子晶体板结构在低频段(320~440 Hz)的隔声效果好; 隔声量分别为 43 dB、



(a) Sound insulation of the thin membrane



(b) Sound insulation of locally resonant phononic crystal

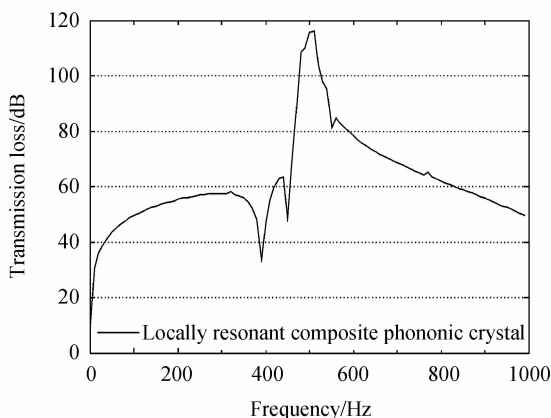
图 6 薄膜和局域共振声子晶体隔声量

Fig. 6 Sound insulation of locally resonant phononic crystal and thin membrane

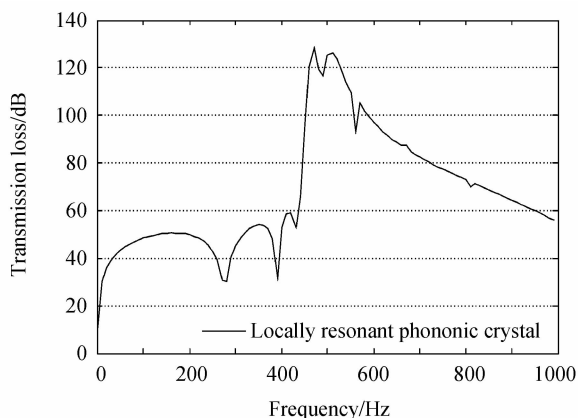
62 dB. 为了达到更好的隔声效果, 将薄膜和声子晶体板结构有机结合起来.

#### 3.2 薄膜厚度对隔声量的影响

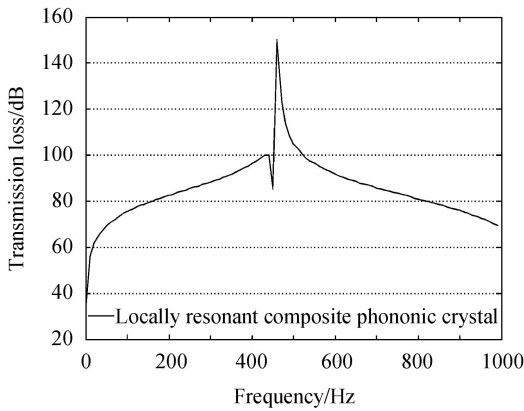
为了进一步分析该局域共振复合声子晶体板结构隔声效果与结构参量的关系, 计算薄膜厚度  $d$  分别为 0.5 mm、1 mm、1.5 mm 时对应的隔声量. 对比结果见图 7. 可以看出, 随着薄膜厚度的增加, 最大隔声量依次增强, 最大为 150 dB, 且比复合前的结构增大 60% 左右; 其共振峰对应的频率分别为 472 Hz、460 Hz、418 Hz, 而且在 400~600 Hz 之间隔振效果最好, 418 Hz 时, 隔声量为 150 dB, 说明在低频时, 被局域共振化. 结果表明, 薄膜的厚度对隔声量有着直接的影响, 薄膜厚度越大, 其吸振效果越好, 减振效果越明显. 复合结构中, 一方面弹性波携带的能量, 一部分被薄膜吸收掉, 另一部分被局域化而使得能量衰减趋于零; 另一方面, 它的变形相当于给共振单元附加一个弹簧, 从而使得声能衰减得更快. 当频率落在局域共振复合结构的第一带隙(阴影部分所示)中, 弹性波禁止传播, 此时的隔声量曲线基本显示最高段(声波不能完全被隔离), 禁带与隔声量曲线相互对应.



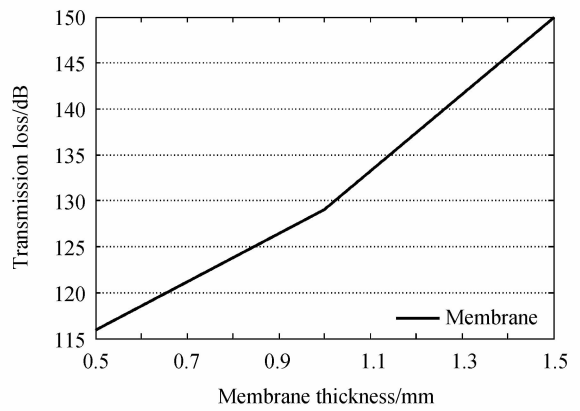
(a)  $d=0.5\text{mm}$



(b)  $d=1.0\text{mm}$



(c)  $d=1.5\text{mm}$



(d) Maximum sound insulation of the different thickness

图7 局域共振复合声子晶体板隔声量和不同厚度  $d$  的最大隔声量

Fig. 7 The sound insulation and the band gap in phononic crystal plates with composite locally resonant structures and the maximum sound insulation of the different thickness

## 4 总结

本文提出的局域共振复合声子晶体板具有良好的中低频隔声特性,振动带隙是由局域共振单元与薄板中传播的弹性波相互耦合产生,带隙宽度不仅与耦合强度有关,还与板的振动方向有关.通过改变结构的尺寸参量(薄膜厚度),可以增大隔声量和带隙宽度,最大隔声量为 150 dB,满足航空发动机降噪减振的需要.该局域共振复合声子晶体板结构,整合了声子晶体和薄膜的特性,为获得良好的隔声效果提供了理论依据和有效方法,在航空发动机减振降噪方面具有潜在的应用前景.

### 参考文献

[1] DENG Ji-hong, WANG Ke, CHEN Guo-ping, *et al.* Study on effect of engine installation metal rubber damper[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, **29**(6): 1581-1585.  
 邓吉宏,王柯,陈国平,等. 金属橡胶减振器用于发动机安装减振的研究[J]. *航空学报*, 2008, **29**(6): 1581-1585.

[2] QIU Jin-hao, YUAN Ming, JI Hong-li, *et al.* Research and application of vibration noise control technology in large aircraft cabin[R]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.  
 裘进浩,袁明,季宏丽,等. 大型飞机舱内振动噪声主动控制技术的研究及应用[R]. 南京:南京航空航天大学,2010.

[3] LAI Y, WU Y, SHENG P, *et al.* Hybrid elastic solids[J]. *Nature Materials*, 2011, **10**: 620-624.

[4] MALDOVAN M. Sound and heat revolutions in phononics [J]. *Nature*, 2013, **503**: 209-217.

[5] 温熙森,温激鸿,郁殿龙,等. 声子晶体[M]. 北京:国防工业出版社,2009.

[6] LIU Z, ZHANG X, MAO Y, *et al.* Locally resonant sonic materials[J]. *Science*, 2000, **289**(5485): 1734-1736.

[7] MEI J, MA G, YANG M, *et al.* Dark acoustic metamaterials as super absorbers for low-frequency sound [J]. *Nature Communications*, 2012, **3**: 756-762.

[8] 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**(4): 041906-

041910.

[9] YANG Z, MEI J, YANG M, *et al.* Membrane-type acoustic metamaterial with negative dynamic mass[J]. *Physical Review Letters*, 2008, **101**(20): 204301-204305.

[10] ZHANG Yu-gang, WEN Ji-hong, WANG Gang, *et al.* Vibration property of periodic arch structure based on finite element method[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, **47**(21): 064-068.  
 张玉光,温激鸿,肖勇,等. 基于有限元法的周期拱形结构振动特性[J]. *机械工程学报*, 2011, **47**(21): 064-068.

[11] 康玉成. 实用建筑吸声设计技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007,163-168.

[12] XIAO Yong, WEN Xi-sen. Locally resonant structures: Band gap tunin and properties of vibration and noise reduction [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.  
 肖勇,温熙森. 局域共振型结构的带隙调控与减振降噪特性研究[D]: 长沙:国防科学技术大学,2012.

[13] ZHU R, HUANG H H. Microstructure continuum modeling of an elastic metamaterial [J]. *International Journal of Engineering Science*, 2011, **49**(12): 1477-1485.

[14] XING Chen, XIAN Chen-xu, SHI Gang-ai, *et al.* Active acoustic metamaterials with tunable effective mass density by gradient magnetic fields[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **105**(7): 071913-071919.

[15] HO K M, CHENG K, YANG Z, *et al.* Broadband locally resonant sonic shields[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **83**(26): 5566-5568.

[16] WU Jiu-hui, ZHANG Si-wen, SHEN Li, *et al.* Low-frequency vibration characteristics of periodic spiral resonators in phononic crystal plates [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, **49**(10): 62-69.  
 吴九汇,张思文,沈礼,等. 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.

[17] LAI Y, WU Y, SHENG P, *et al.* Hybrid elastic solids[J]. *Nature Materials*, 2011, **10**(8): 620-624.

[18] MEI J, MA G, YANG M, *et al.* Dark acoustic metamaterials as super absorbers for low-frequency sound [J]. *Nature Communications*, 2012, **3**(3): 756-762.

[19] 温熙森,温激鸿,王刚,刘耀宗,韩小云等著. 声子晶体[M]. 北京:国防工业出版社,2009.

[20] HSU J C. Local resonances-induced low-frequency band gaps in two-dimensional phononic crystal slabs with periodic stepped resonators[J]. *Journal of Physics D*, 2011, **44**(5): 05540-05546.