

doi: 10.3788/gzxb20164510.1016001

局域共振声子晶体复合结构的隔声特性

杜军, 祁鹏山, 姜久龙, 董亚科, 张佳龙

(空军工程大学 航空航天工程学院, 西安 710038)

摘要:提出一种四振子对称局域共振声子晶体单元结构,通过改变振子的材料组份,使其在不同频率范围内存在完全带隙以及隔声峰;为拓宽结构隔声的频率范围,通过将不同结构复合的方式,使各结构在不同频率段发挥较好的隔声效果,从而实现隔声范围拓宽;采用有限元法研究了影响复合结构隔声效果的关键因素.结果表明,采用不同结构复合的方法能够有效地拓宽结构的隔声范围.该研究为声子晶体的宽频隔声提供了理论参考.

关键词:局域共振;声子晶体;有限元法;带隙;隔声特性

中图分类号: TB 53, TH 113.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)10-1016001-5

Investigation of Sound Isolation in Composite Structure of Local Resonant Phononic Crystals

DU Jun, QI Peng-shan, JIANG Jiu-long, DONG Ya-ke, ZHANG Jia-long

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

Abstract: A local resonant phononic crystal model including four symmetrical vibrators was proposed. By changing the material components of the vibrator, this phononic crystal model could exist band gap and sound isolation peaks in different frequency range. In order to widen the frequency range of the sound isolation, a method was proposed to composite different structures. The structure plays a good sound isolation respectively in different frequency, and the composite structure can realize the widening of sound isolation range. The key factors affecting the sound isolation effect are studied through the finite element method. The results show that, the method can widen sound isolation range effectively, and the research provide an effective theoretical reference for wideband sound isolation of phononic crystals

Key words: Local resonant; Phononic crystal; Finite Element Method; Band gap; Sound isolation characteristics

OCIS Codes: 160.1050; 160.1245; 260.1180; 290.5830

0 引言

对于一些密闭环境如飞机舱室、船舶舱室、汽车内部空间等,噪声问题已严重影响到了人们的身心健康,亟待解决.传统噪声解决方法能很好地解决高频噪声,但对低频噪声效果不好.近年来,关于利用声子晶体实现对噪声控制的研究受到诸多学者的广泛关注^[1-3],声子晶体是一种人工周期性结构晶体,由于其具有弹性波带隙,在带隙频率范围内能够抑制弹性波的传播;同时,带隙频率以外的弹性波则可以正常传播,因而可以

利用其实现对特定频率段噪声的控制.根据带隙的产生机理,声子晶体分为 Bragg 散射型和局域共振型两种^[4-6].2000年,刘正猷等^[7]提出局域共振声子晶体的概念,他们在环氧树脂基体材料中周期性地嵌入由软橡胶包覆的铅球,制备出一种三维三组元局域共振型声子晶体,理论及试验结果表明,该结构在很小的晶格常量下获得了低频带隙,相比同尺寸的 Bragg 散射型声子晶体,第一带隙频率降低了两个数量级,达到了“小尺寸控制大波长”的目的.之后,又有诸多学者设计了各种不同结构的局域共振声子晶体,并对其带隙特

基金项目:国家自然科学基金(No. 11504429)资助

第一作者:杜军(1973-),男,教授,博士,主要研究方向为声子晶体减振降噪. Email: waiyux2014@126.com

通讯作者:祁鹏山(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为声子晶体减振降噪. Email: qipengshan@126.com

收稿日期:2016-04-22;录用日期:2016-06-20

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

性展开了研究^[8-12]. 2012年,国防科学技术大学肖勇^[13]将局域共振结构与实际工程应用中的杆、梁、板等结构很好地结合,提出了几种拓宽带隙的方法. 2013年,哈尔滨工业大学刘晓健^[14]研究了含有 T-square 分形散射体的声子晶体带隙特性. 2013年,张思文等^[15]提出了一种新型局域共振复合单元声子晶体结构,计算表明,3×3个振子组成的单元结构能够将最低带隙频率低至18Hz,这为声子晶体结构获得低频、超低频带隙提供了一种有效的方法;之后,他们又提出了一种螺旋局域共振单元板结构^[16],该结构通过在薄板上螺旋开槽的方式在250Hz以下的低频范围内得到了完全带隙,最低带隙频率低至42Hz. 2014年,Wang等^[17]提出了一种橡胶包覆层离散的二维声子晶体结构,该结构具有很好的带隙特性. 2015年,Gao等^[18]提出了一种双振子的单元结构,该结构由于双振子的存在,振动模式更加丰富,使得该结构在50Hz以下的低频范围内都存在带隙. 从目前国内外的研究情况来看“低频宽带”这个声子晶体重要特点并没能很好地予以解决,而且对于声子晶体隔声范围的拓宽并没有很好的办法.

目前,对于单种局域共振声子晶体结构的研究比较多,而且研究成果也比较丰富;但是对于某种特定的局域共振声子晶体结构而言,其带隙的低频特性与宽频特性往往是不能共存的,因此目前的研究还不能很好地解决低频宽带的难题. 为解决这一问题,本文考虑构建两种乃至两种以上不同类型局域共振声子晶体,使其分别在不同频率段内体现出较好的隔声效果,通过一定的方式将其结合到一起,进而达到“低频宽带”的要求.

1 单元结构及计算方法

图1(a)为四振子对称局域共振单元结构,该结构由A、B、C、D四部分构成,其中A为环氧树脂基体框,B为空气薄层,C为橡胶连接体,D为铅体散射. 晶格常

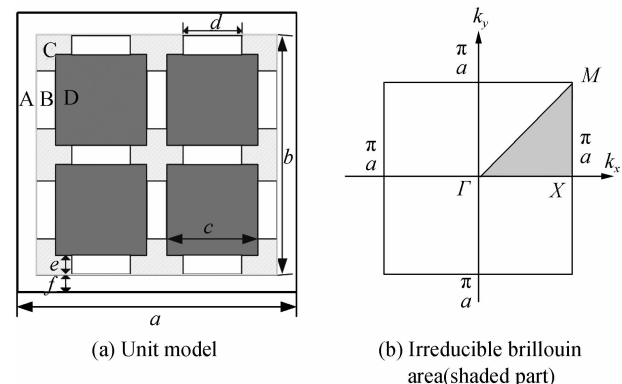


图1 四振子对称局域共振声子晶体结构

Fig. 1 The symmetrical model of local resonant phononic crystal with four vibrators

量为 a ;环氧树脂基体框的内边长为 b ,厚度为 f ;铅散射体边长为 c ;矩形孔的长宽分别为 d 和 e . 具体结构参量及材料参量见表1及表2.

表1 结构参量

Table 1 Structure parameters

a/mm	b/mm	c/mm	d/mm	e/mm	f/mm
20	18	7.5	5.5	1	1

表2 材料参量

Table 2 Material parameters

Materials	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$E/(\times 10^{10} \text{ Pa})$	ν
Epoxy resin	1 180	0.435	0.37
Rubber	1 300	1.175×10^{-5}	0.469
Pb	11 600	4.08	0.369
Steel	7 780	21.06	0.3
Al	2 300	7.76	0.352

本文采用有限元方法求解结构的带隙^[15-16],在周期边界条件中引入 Bloch 波矢 k ,并令其沿不可约 Brillouin 区(如图1(b)阴影部分)边界 $M-\Gamma-X-M$ 扫描,进而计算得到能带结构. 在计算中设定了 x 和 y 方向的 Bloch 周期边界条件. 在计算结构的隔声量时,本文仍借助于 Comsol 有限元软件,通过在结构左侧施加平面波,同时在结构右侧拾取响应,进而得到结构的隔声量曲线.

2 结构带隙及隔声量

如图2为钢振子结构和铝振子结构的带隙及其隔声量. 对于钢振子结构,其在220.7~926.4 Hz 频率范围内存在完全带隙,完全带隙中间由于多个振子之间模式的相互耦合作用,在频率300~400 Hz 之间存在多条平直带,尤其是在330 Hz 频率处,平直带较为集中,从而在隔声量曲线上表现为在330 Hz 附近频率处的局部衰减,这是由于在平直带处结构处于扭转振动模式,没有 x 和 y 方向的合力,因而不能与基体中传播的波相互耦合,同理在400 Hz 以及430 Hz 频率处都表现出了类似的局部衰减. 而对于铝振子结构,其在368.6~977.3 Hz 频率范围内存在完全带隙,完全带隙内同样存在多条平直带,且在隔声量曲线上表现出对应频率处的局部衰减. 同时,由图2(c)可以注意到对于钢振子结构、铝振子结构,其隔声量曲线分别在500 Hz、900 Hz 频率处存在局部衰减,而对应带隙中并没有平直带存在,这可能是由于表面局域态的缘故^[19].

图2(c)为两层结构的隔声量,由图可知,两种结构分别在300~500 Hz、600~800 Hz 频率范围内表现出了较好的隔声峰,虽然在这些频率段内存在局部频率处的衰减,但总体隔声效果还是优于另一种结构的. 因此本文提出通过两种结构复合的方式将两者的优势相结合,最终实现低频隔声与高频隔声相结合,从而拓宽

隔声频率范围. 尽管带隙特性是基于无限周期提出的, 但对于有限周期结构, 其在带隙频段内也会对声波起到明显的抑制作用, 从图 2 就可以看出, 隔声峰的频率范围与带隙较为吻合, 因此这种两种结构复合的设想应当是可以实现的.

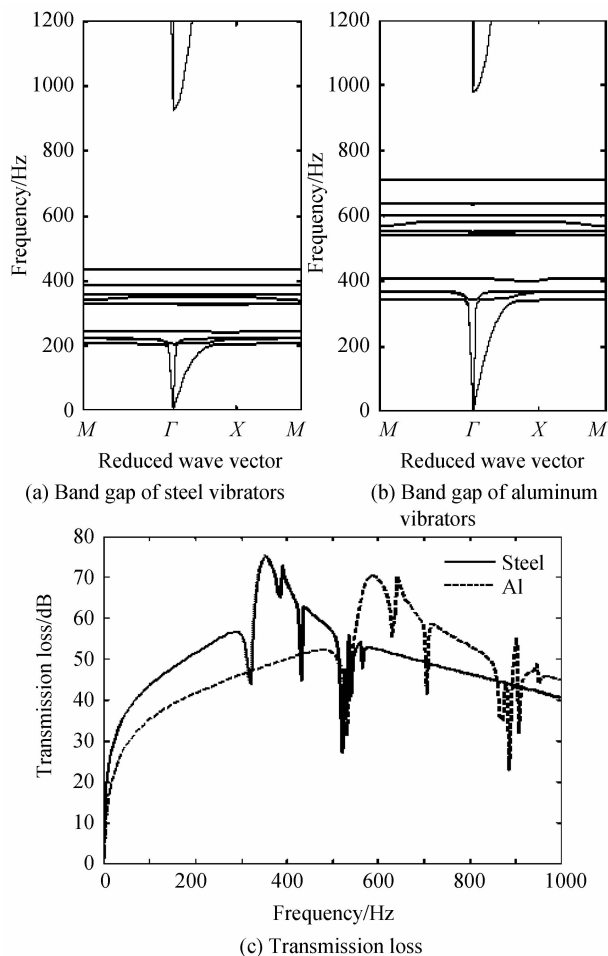


图 2 四振子对称结构

Fig. 2 Symmetrical model with four vibrators

3 层数对结构隔声量的影响

由图 2(c)可知, 由于完全带隙内平直带存在, 使隔声量曲线的峰值处还存在局部较大幅度衰减, 这也一定程度上影响了结构的隔声效果. 本节以钢振子结构为例, 通过增加结构的层数, 研究层数对结构隔声量及局部衰减现象的作用. 图 3 为钢振子结构分别为 1、2、4 层时的隔声量, 由图可知随着层数的增加结构的隔声量也相应的增加. 同时, 虽然通过增加层数使结构的隔声量有一定程度的增加, 且层数越多隔声量越大, 特别是 2、4 层结构, 其在原结构完全带隙中, 平直带频率处的局部衰减幅度明显减小, 说明增加层数确实能在一定程度上改善结构的局部衰减, 但这种局部衰减现象依然存在, 并没有根除; 而且 2、4 层结构由于表面局域态的作用, 在 300 Hz 频率附近出现了新的衰减.

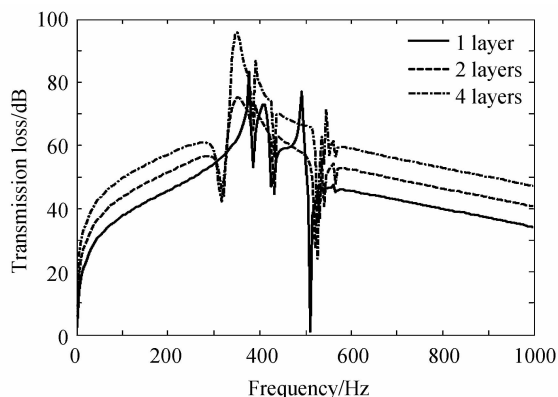


图 3 钢振子结构层数对隔声量的影响

Fig. 3 Effect of layers of steel vibrators structure on transmission loss

显然, 隔声量曲线中存在的局部衰减现象并不能简单通过层数的增加予以解决, 而且增加层数的同时必然导致结构体积和质量增大, 这显然与工程实际应用中所要求的“轻质、小尺寸”的初衷是不相符的.

4 复合结构隔声量研究

为了拓宽结构的隔声范围, 并期望解决隔声量曲线中存在的局部衰减的问题, 本节以钢振子结构和铝振子结构为例, 研究二者复合以后结构的隔声效果, 具体做法是: 由钢振子结构产生较低频率的带隙, 同时由铝振子结构产生较高频率的带隙. 考虑到两种结构之间可能还存在着相互作用, 因此二者的复合还不仅仅是简单的叠加, 复合方式的改变也会对复合结构的隔声量产生较大的影响. 为使研究对比科学合理, 同时结构尺寸不至于过大, 本文以两层结构为例, 研究复合方式、薄空气层厚度及低频结构对复合结构隔声量的影响.

4.1 复合方式对隔声量的影响

采用两种复合方式研究结构隔声量的变化, 第一种是钢振子结构和铝振子结构的直接复合, 二者分别在相对较低频段、较高频段具有更好的隔声效果; 第二种复合方式是在第一种方式的基础上, 在二者中间插入 1 mm 厚度的薄空气层, 从而减小两种结构的相互作用. 为使复合结构隔声效果更具说服力, 本文以 2 层钢振子结构作对比, 从而能更好地体现出复合结构的特点, 图 4 为复合结构的隔声量.

从图 4 可以看出, 对于第一种直接复合的方式, 其在 300~900 Hz 频率范围内出现多个隔声峰值, 相比于 2 层钢振子结构, 其在 500~1 000 Hz 频率段内的隔声量明显较好, 隔声效果在整体上也体现出了低频隔声与高频隔声相结合的特点, 在一定程度上也实现了拓宽隔声范围的预期效果, 同时复合结构的质量也有一定程度的降低; 但由于两种结构的带隙在 400 Hz 频率附近都存在平直带, 二种结构相互作用, 同时考虑到表面局域态的作用, 因此导致复合结构隔声量在 400~500 Hz 频率段内出现了较大幅度衰减.

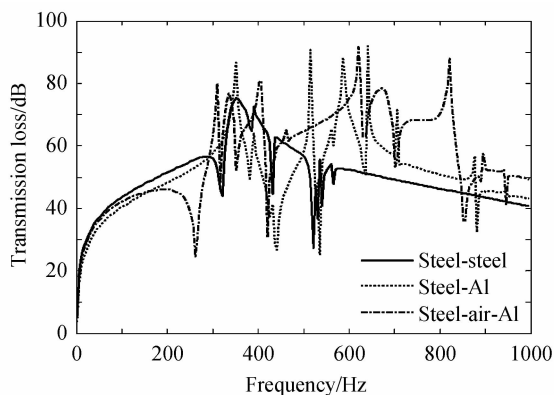


图4 复合方式对隔声量的影响

Fig. 4 Effect of composite methods on transmission loss

而对于第二种复合方式,空气层的引入在一定程度上确实改善了结构的隔声量,尤其是在400~500 Hz频率范围内,隔声量的局部衰减明显改善.同时,在600~800 Hz频率段内,结构隔声量明显增加,基本与1层铝振子结构的隔声量一致,如图2(c);同时在200~300 Hz频段内又出现隔声量的局部衰减.这是因为空气层的引入使两种结构之间的作用程度大大减小,从而能够体现出各自的特点,铝振子结构在高频段的隔声优势能较好地发挥出来,同时由于表面局域态以及带隙中存在的平直带的作用,使低频段内的局部衰减现象较明显地在隔声量曲线中反映出来.

4.2 薄空气层厚度对隔声量的影响

为了进一步说明薄空气层对于复合结构隔声量的影响,本节以“钢-空气-铝”复合结构为例,改变薄空气层厚度使其分别为0.5 mm、1 mm、1.5 mm,分别计算结构的隔声量.薄空气层厚度的变化会导致两种结构之间作用程度的改变,进而影响复合结构的隔声量.

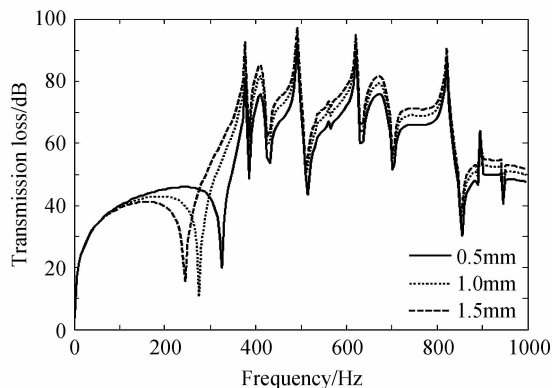


图5 薄空气层厚度对隔声量的影响

Fig. 5 Effect of thickness of the thin air layer on transmission loss

图5为不同薄空气层厚度时,复合结构的隔声量.由图可知,随着薄空气层厚度的增加,在500 Hz~1 000 Hz频率段内,结构的隔声量也小幅度增加,这是由于空气层也耗散了一部分能量,从而使隔声量略有增加.但在500 Hz以下的频率段内,空气层厚度的增

加却导致复合结构隔声效果变差,而且随着薄空气层厚度的增加,隔声量的局部强衰减频率向低频移动.分析其原因,一方面是由于增加薄空气层厚度,导致两种结构之间的作用程度减弱,从而单个结构特性更容易独自体现出来,低频处的强衰减对应于钢振子结构带隙特性中的平直带;另一方面,低频结构的表面局域态也被激发.这两方面的原因导致低频结构的局部衰减频率向低频方向移动,且随着空气层厚度的增加,该局部衰减频率逐步接近低频结构带隙中的最低平直带频率.显然,薄空气层厚度的变化对低频结构的影响更大,因此在这种复合方式中,低频结构起主导作用.

4.3 低频结构对隔声量的影响

由4.2节的讨论分析可知,薄空气层对低频结构的影响较大,本节在4.2节所述结构的基础上,通过改变低频结构的材料参量,使其分别为铅、铜、钢,同时保持两种结构之间1 mm空气层不变,讨论低频结构对复合结构隔声量的影响.图6为三种不同低频结构时,复合结构的隔声量.

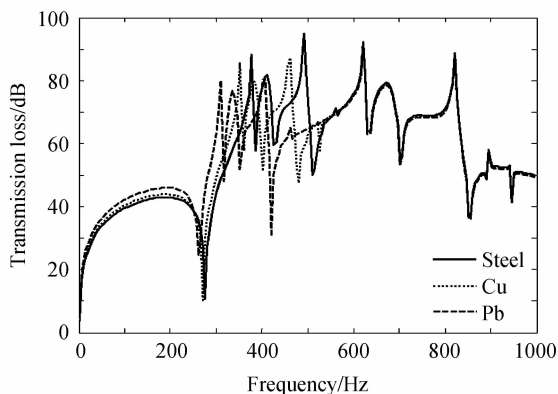


图6 低频结构对隔声量的影响

Fig. 6 Effect of low frequency structure on transmission loss

由图6可知,由于高频结构没有发生变化,同时两种结构之间存在1 mm的薄空气层,使高、低频结构之间的相互作用较小,因此在500~1 000 Hz频段内,三种结构的隔声量几乎一致.而在500 Hz以下频率段内,由于不同结构的带隙中存在的平直带的频率不同,同时表面局域态的程度也不同,因此其局部衰减存在的频率以及衰减程度也会发生变化.

随着低频结构所采用材料密度的增加,其在300 Hz频率附近的局部衰减逐渐向低频移动,同时此处衰减程度减弱;而在400 Hz频率附近的衰减程度则随着密度的增加而增强.在300 Hz频率处,隔声量曲线的局部衰减对应于相应带隙图中的平直带,由于结构振子的密度越大,其相应的谐振频率越低,因此其相应带隙图中平直带的频率也较低,同时衰减程度取决于平直带处结构扭转振动的程度.而在400 Hz频率处,由于带隙中平直带较集中,各平直带对应的扭转振动模式之间存在复杂

的耦合作用,导致隔声量曲线在该频率附近的局部衰减分布较多,且衰减程度也不一致。

5 结论

本文提出了一种四振子对称局域共振单元结构,在此基础上,使结构的散射体分别为钢和铝,从而两种结构能在不同频率范围内体现出带隙特性,并计算了两种结构的隔声曲线,分析了层数变化对结构隔声量的影响.为进一步拓宽结构的隔声范围,本文提出了一种将两种结构复合的方式,并讨论了复合方式、薄空气层厚度及低频结构对复合结构隔声量的影响.结果表明:钢振子结构在 220.7~926.4 Hz 频率范围内存在完全带隙,其隔声量曲线在 300~500 Hz 频率范围内存在隔声峰值;铝振子结构在 368.6~977.3 Hz 频率范围内存在完全带隙,其隔声量曲线在 600~800 Hz 频率范围内存在隔声峰值;但由于完全带隙内存在平直带以及表面局域态的作用,使隔声量曲线存在局部衰减现象.增加结构的层数可以使结构的隔声量得到一定程度的提高,但局部衰减现象依然存在,而且增加层数的同时也会激发新的表面局域态.“钢-空气-铝”复合结构具有最佳的隔声效果,既能减小两种结构之间的相互作用,又能很好地发挥出各自的隔声优势,使复合结构在较宽的频率范围内都能体现出较好的隔声效果.随着薄空气层厚度的增加,在不同频率段内,复合结构的隔声量变化也体现出不同的特点.改变低频结构振子密度的,其局部衰减的频率以及程度都会相应地改变.文章提出的方法为声子晶体隔声范围的拓宽提供了一定的理论指导,同时在实际工程应用方面也有一定的参考价值.但是结构还存在振子质量偏大的问题,对于质量要求较高的场合还需进一步研究。

参考文献

- [1] LIU Z Y, CHAN C T, SHENG P. Analytic model of phononic crystals with local resonances[J]. *Physical Review B*, 2005, **71**(1): 014103.
- [2] YANG Z, DAI H M, CHAN N H, *et al.* Acoustic metamaterial panels for sound attenuation in the 50-1000Hz regime[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **96**(4): 041906.
- [3] XIAO Y, WEN J, WEN X. Sound transmission loss of metamaterial-based thin plates with multiple subwavelength arrays of attached resonators[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2012, **331**(25): 5408-5423.
- [4] 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.
- [5] LI Jian-bao, WANG Yue-sheng, ZHANG Chuan-zeng. Finite element analysis and design of band structure for two-dimensional phononic crystals microcavity[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2010, **39**(3): 649-655.
李建宝,汪越胜,张传增.二维声子晶体微腔能带结构的有限元分析设计[J].人工晶体学报,2010, **39**(3): 649-655.
- [6] DONG Hua-feng, WU Fu-gen, MOU Zhong-fei. Effect of

basis configuration on acoustic band structure in two-dimensional complex phononic crystals [J]. *Journal of Physics*, 2010, **59**(2): 754-758.

董华锋,吴福根,牟中飞.二维复式声子晶体基元配置对声学能带结构的影响[J].物理学报,2010, **59**(2): 754-758.

- [7] LIU Z, ZHANG X, MAO Y, *et al.* Locally resonant sonic materials [J]. *Science*, 2000, **289**(5485): 1734-1736.
- [8] GU Yong-wei. Optimization design and simulation of locally resonant phononic crystal[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
顾永伟.局域共振声子晶体的优化设计与模拟[D].上海:上海交通大学,2009.
- [9] SHU Hai-sheng, GAO En-wu, LIU Shao-gang, *et al.* Vibration band gaps of a kind of serial combined rod of phononic crystals[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, **33**(16): 194-200.
舒海生,高恩武,刘少刚,等.声子晶体串联组合杆振动带隙研究[J].振动与冲击,2014, **33**(16): 194-200.
- [10] YANG Z, DAI H M, CHAN N H, *et al.* Acoustic metamaterial panels for sound attenuation in the 50-1000Hz regime[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **96**: 041906.
- [11] ROMERO-G V, SANCHEZ-P J V, GARCIA-R L M. Tunable wideband bandstop acoustic filter based on two-dimensional multiphysical phenomena periodic systems[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, **110**: 014904.
- [12] RAYISA P, MOISEYENKO, LIU J F, *et al.* Blazed phononic crystal grating [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**: 034108.
- [13] XIAO Y. Locally resonant structures; band gap tuning and properties of vibration and noise reduction[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
肖勇.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.
- [14] LIU X J. Calculation and analysis of the band structure of new style phononic crystals[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
刘晓健.新型声子晶体结构的带隙计算及分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [15] ZHANG S W, WU J H. Low-frequency band gaps in phononic crystals with composite resonant structures [J]. *Journal of Physics*, 2013, **62**(13): 134302.
张思文,吴九汇.局域共振复合单元声子晶体结构的低频带隙特性研究[J].物理学报,2013, **62**(13): 134302.
- [16] WU Jiu-hui, ZHANG Si-wen, SHEN Li. Low-frequency vibration characteristics of periodic spiral resonators in phononic crystals plates [J]. *Journal of mechanical engineering*, 2013, **49**(10): 62-69.
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.
- [17] WANG Kai, LIU Ying, YANG Qin-shan. Tuning of band structures in porous phononic crystals by grading design of cells[J]. *Ultrasonics*, 2015, **61**: 25-32.
- [18] GAO N S, WU J H, YU L. Research on bandgaps in two-dimensional phononic crystal with two resonators [J]. *Ultrasonics*, 2015, **56**: 287-293.
- [19] XIAO W. Characteristic study of band gaps in phononic crystal type periodic composite structures [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
肖伟.声子晶体周期复合结构禁带特性研究[D].武汉:华中科技大学,2007.