

DOI: 10.7652/xjtuxb201612009

声子晶体板中低频完全禁带形成机理研究

李锁斌^{1,2}, 陈天宁^{1,2}, 奚延辉^{1,2}, 王小鹏^{1,2}

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安;

2. 西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对固体基局域共振型声子晶体中难以出现 100 Hz 以下的完全弹性波禁带问题,提出了一种新型声子晶体板,其结构由锥形复合散射体周期性阵列于一个二维二组元声子晶体板两边构成。采用有限元方法对其禁带特性和禁带形成机理进行理论研究,获得了声子晶体板中低频完全禁带的形成机理以及禁带调节规律。研究发现,不同形式的板波模式与对应的局域共振模式依据模式叠加原理相互耦合成面内、面外两种禁带,二者叠加形成完全禁带;散射体振子的等效弹簧质量系统耦合是难以产生低频完全禁带的主要原因。研究结果表明:新型声子晶体板中散射体振子的等效弹簧质量系统可被引入的橡胶填充体解耦,致使面内、面外禁带分离;引入的锥形复合散射体可使相互分离的面内、面外禁带被同时单独调节至低频发生重叠,最终生成了一条频率范围为 59~103 Hz 的低频完全禁带。研究结果和结论可将声子晶体应用于工程结构低频减振中。

关键词: 声子晶体板;低频完全禁带;低频禁带机理;低频减振

中图分类号: O799 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)12-0051-07

Forming Mechanisms of Low-Frequency Complete Band Gaps in Phononic Crystal Plate

LI Suobin^{1,2}, CHEN Tianning^{1,2}, XI Yanhui^{1,2}, WANG Xiaopeng^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A novel phononic crystal plate is proposed to obtain a complete band gap below 100 Hz for the application of localized resonance phononic crystals (LRPCs) to the reduction of low-frequency vibration control in engineering. The structure of the plate is composed of double-sided taper composite stubs which are deposited on a 2D locally resonant PC plate, and its theoretical properties are studied. The dispersion relationship, the power transmission spectrum and the displacement fields of the eigenmode are calculated using a finite element method. It is shown that the coupling between the local resonance mode and the Lamb wave mode follows the modal superposition principle and is responsible for the formation of the band gaps. Moreover, the spring-mass system of the resonator is decoupled by introducing the rubber filler, and then the out-of-plane band gap and the in-plane band gap are adjusted into the same lowest frequency range respectively. As a result, the frequency range of the generated complete band gap is between 59 Hz and 103 Hz due to the overlap between the in-plane and out-of-plane band gaps. This study

收稿日期: 2016-05-26。 作者简介: 李锁斌(1984—),男,博士生;陈天宁(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 长江学者和创新研究团队发展计划资助项目(IRT1172);国家自然科学基金资助项目(51275377)。

网络出版时间: 2016-10-19 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20161019.1112.002.html>

provides an effective way for phononic crystals to obtain complete band gaps in low-frequency range (below 100 Hz), and has potential application to the reduction of low frequency vibration.

Keywords: phononic crystal plate; low-frequency complete band gap; forming mechanism of low-frequency band gap; vibration reduction

声子晶体是由散射体周期性排列于基体中形成的一种新型人工周期性复合材料或结构,当弹性波通过时,部分频段会被抑制,这种特性称为声子禁带^[1-3]。声子禁带的存在使得声子晶体具有广泛的潜在应用价值,例如工程减振^[4],因此近二十多年来对声子晶体的研究受到了广泛关注^[5]。

目前,声子禁带有两种产生机理,分别为布拉格散射机理^[6]和局域共振机理^[7]。由布拉格散射产生的声子禁带,其波长与结构周期为同一数量级,禁带位置和带宽取决于散射体几何形状、结构对称性以及散射体与基体材料的弹性比^[8-9],这便导致低频禁带需采用大尺寸结构。由局域共振产生的声子禁带,其波长比布拉格禁带低两个数量级,禁带位置和宽度主要取决于散射体的振子特性,因此突破了布拉格禁带的低频限制,可基于小尺寸来控制大波长,实现低频禁带。

由于局域共振型声子晶体中存在低频局域共振禁带,所以其有望应用于工程结构低频减振领域^[10]。板结构被广泛应用于工程结构中,因此近年来对声子晶体板的研究成为热点^[11-17]。弹性波在板中的传播称为兰姆波。声子晶体板有平直型和带边型两种。平直型声子晶体板由均匀板上开孔或在孔中填充散射体而形成,研究表明,此类声子晶体板较难得到低频禁带^[11]。带边型结构^[12]由带边(例如柱状散射体)周期性阵列于均匀基板上组成。已有学者对带边的组成材料^[13]、几何形状^[14-15]以及单双边布置形式^[16]对禁带特性的影响分别进行了研究。另有学者将单边结构基板替换为二维二组元声子晶体板,发现其更易获得低频宽带的声子禁带^[17]。

由于兰姆波主要存在面内和面外两种振动模式,分别与振子的不同局域共振模式耦合,形成面内和面外禁带。对于已提出的声子晶体板结构^[11-17],在面内、面外局域共振模式的等效弹簧质量系统中,其等效刚度和等效质量均由散射体的同一物理元件提供,例如经典型声子晶体板^[15],如图 1 所示。其中:结构元胞如图 1a 所示;散射体振子面内、面外局域共振模式的等效弹簧质量系统分别为 K_1-M_1 和 K_2-M_2 ,如图 1b 所示。系统的等效刚度 K_1 、 K_2 由圆柱散射体 A 提供,等效质量 M_1 、 M_2 由圆柱散

射体 B 提供,振子的等效弹簧质量系统完全耦合,进而面内、面外禁带难以被同时调节于低频处相互重叠,致使完全禁带打开位置均高于 150 Hz,而工程实际中,振动频率大多低于 100 Hz^[18]。因此,如何通过对散射体振子的等效弹簧质量系统进行解耦,使面内、面外禁带可被单独调节至低频范围并发生重叠,进而形成一打开位置低于 100 Hz 的低频完全禁带,这对声子晶体应用于低频结构减振中显得尤为重要。目前,这一问题尚未得到解决。

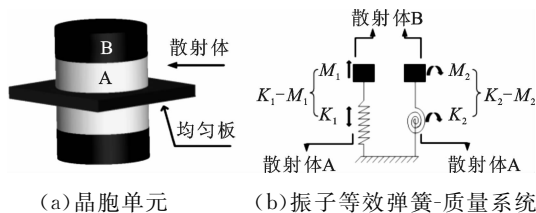


图 1 经典型声子晶体板

将橡胶填充体和复合锥形散射体引入到经典型双边声子晶体板^[15]中,构造出了一种新型声子晶体板结构,在对振子等效弹簧-质量系统解耦的基础上,可分别调节面内、面外禁带,使二者于低频处重叠,进而得到一条 100 Hz 以下的低频完全禁带。

1 模型与计算方法

新型声子晶体板的具体结构如图 2 所示。图 2a 表示部分结构,由锥形复合散射体周期性阵列于一个二维二组元声子晶体板两边构成;图 2b 表示晶胞单元,其中锥形复合散射体单元包括 A 与 B 两部分,分别由橡胶和钢材料构成,基体单元由将橡胶材料填充于环氧树脂板孔中形成的二维二组元声子晶体板单元构成;图 2c 表示结构几何参数,包括晶格常数 a ,基板厚度 e ,橡胶填充体,直径为 D ,锥形复合散射体,底面直径为 d_{low} 、顶面直径为 d_{up} 、散射体 A 高度为 h_A 、散射体 B 高度为 h_B 。结构材料参数

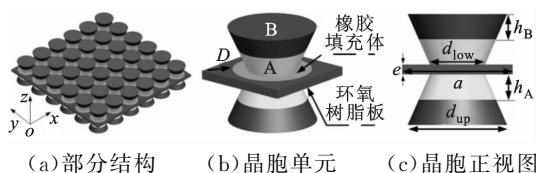


图 2 新型声子晶体板结构

见表 1。

表 1 结构材料参数			
材料	$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$E/10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$	泊松比
环氧树脂	1 180	4 350	0.367 9
钢	7 800	21 000	0.29
橡胶	1 300	0.117 5	0.47

为了研究结构的禁带特性与形成机理,采用有限元方法计算了结构能带结果与振动模式。有限元计算采用 Comsol Metaphysics 3.5a 软件。基于结构周期性,以图 2b 所示的单个晶胞单元作为计算对象。计算过程中, z 方向施加应力自由边界条件,基于布洛赫周期性条件

$$u_i(\boldsymbol{x}+\boldsymbol{a},\boldsymbol{y}+\boldsymbol{a})=\mathrm{e}^{\mathrm{i}(k_x\boldsymbol{a}+k_y\boldsymbol{a})}u_i(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}),i=\boldsymbol{x},\boldsymbol{y},\boldsymbol{z}$$

(1)

式中: u 表示位移; $\boldsymbol{x}$ 、 $\boldsymbol{y}$ 和 $\boldsymbol{z}$ 表示位置矢量; k_x 与 k_y 表示第一布里渊区内周期性波矢,于 x 、 y 方向施加了周期性边界条件。波矢沿着不可约布里渊区边界点 $M-\Gamma-X-M$ 进行扫描,求解各个波矢下结构的本征频率和对应本征模态,得到声子晶体板结构的能带结构图和单元振动模态。为了进一步证明结构能带计算结果,采用有限元方法计算了由 6 个元胞沿 x 方向组成的有限周期声子晶体板振动传输谱,结构一端施加加速度激励信号,另一端拾取加速度响应信号。通过式(2)得到有限结构的传输谱

$$T_L=10\lg(\alpha_o/\alpha_i)$$

(2)

式中: α_o 和 α_i 表示输出与输入的加速度。依次改变激励频率,最终得到结构传输谱。

2 计算结果及分析

计算过程中,结构各个参数设置为 $D=8\text{ mm}$, $e=1\text{ mm}$, $a=10\text{ mm}$, $h=5\text{ mm}$ ($h_A=h_B=2.5\text{ mm}$), $d_{\text{up}}=9\text{ mm}$, $d_{\text{low}}=5\text{ mm}$ 。

新型声子晶体板能带结果如图 3 所示。在频率 0~400 Hz 范围内,存在 14 条能带,分别为板波模式能带和由振子局域共振产生的平直模式能带。其中:板波模式包括以对称兰姆波模式为主的面内模式(如图 3a 中能带 S_2 、 S_4)和以非对称兰姆波模式为主的面外模式(如图 3a 中能带 A_2);平直模式能带包括与板波模式发生耦合的平直模式能带(如图 3a 中能带 S_1 、 S_3 、 A_1)和不能与板波模式发生耦合的平直模式能带(如图 3a 中能带 f_4)。两种模式耦合形成对应的面内和面外禁带,两种禁带相互重叠形成完全禁带。

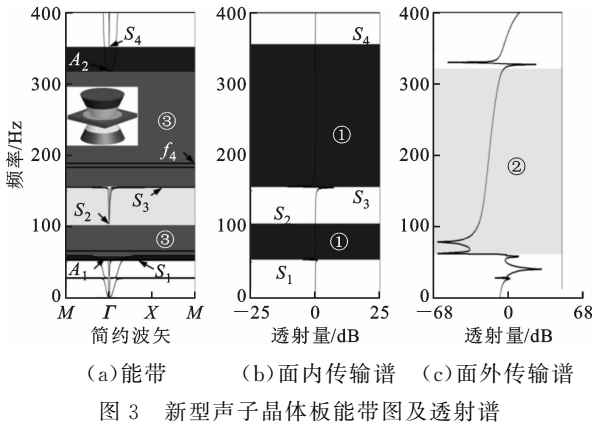


图 3 中包含 2 条面内禁带(图 3b 中①号区域表示),1 条面外禁带(图 3c 中②号区域表示)和由二者重叠形成的 2 条完全禁带(图 3a 中③号区域表示)。第 1 条面内禁带由面内模式 S_2 与对应的平直模式 S_1 耦合而成,禁带范围为 53~103 Hz,绝对带宽为 50 Hz;第 2 条面内禁带由面内模式 S_4 与对应的平直模式 S_3 耦合而成,禁带范围为 154~352 Hz,绝对带宽为 198 Hz;1 条面外禁带由面外模式 A_2 与对应的平直模式 A_1 耦合而成,禁带范围为 59~318 Hz,绝对带宽为 259 Hz;第 1 条完全禁带由第 1 条面内禁带与第 1 条面外禁带重叠而成,禁带范围为 59~103 Hz;第 2 条完全禁带由第 2 条面内禁带与第 1 条面外禁带重叠而成,禁带范围为 154~318 Hz。带宽用绝对带宽与禁带中心位置之比得到的相对带宽表示,对应的第 1、2 条完全禁带相对带宽分别为 54%和 69%。为了进一步验证能带计算结果,分别计算了结构面内和面外振动传输谱,结果分别如图 3b 和图 3c 所示。可以看出,禁带范围内均出现了弹性波的衰减,进而验证了能带计算结果。为了比较,进一步计算了经典型声子晶体板^[15]和由通过引入锥形复合散射体形成的过渡型声子晶体板的能带结构,结果分别如图 4、图 5 所示。在 0~800 Hz 频率范围内,二者均只有一条完全禁带出现,其频率范围分别为 217~405 Hz 和 321~469 Hz,禁带起始位置均高于 100 Hz。

比较 3 种结构能带结果可以发现:经典型声子晶体板在引入双边锥形复合散射体后,其面内、面外禁带均移向低频,但完全禁带仍由第 2 条面内禁带与第 1 条面外禁带叠加而成;进一步引入橡胶填充体后,第 1 条面外禁带继续向低频移动,最终与第 1 条面内禁带重叠,进而产生一条低于 100 Hz 的低频完全禁带。

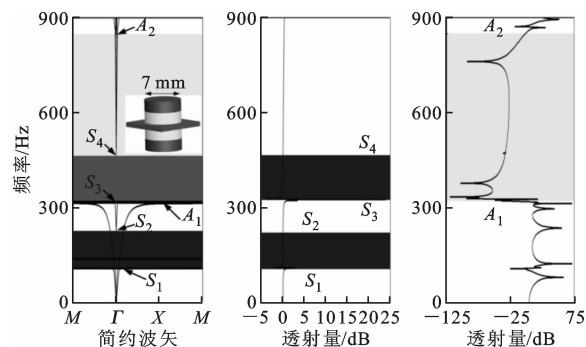


图4 经典型声子晶体板能带图及透射谱

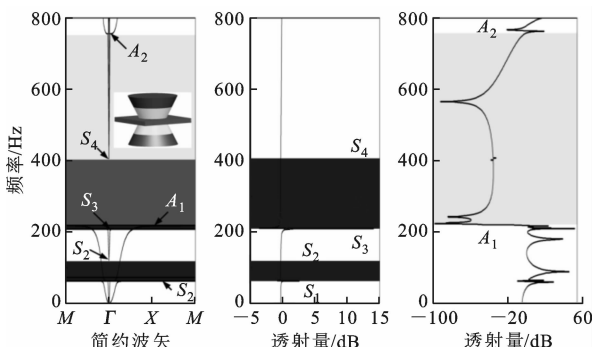


图5 过渡型声子晶体板能带图及透射谱

3 低频完全禁带形成机理

为了进一步探讨新型声子晶体板中低频完全禁带形成机理,分别提取了3种声子晶体板能带结构中第1条面外、面内禁带上下边界对应的单元振动模式 A_1 、 S_1 和 A_2 、 S_2 。

3种声子晶体板面外禁带上下边界对应的单元振动模式位移云图如图6所示,图中 A_1 为单元局域共振模式,对应禁带下边界; A_2 为单元面外振动模式,对应禁带上边界。当面外波激励时,模式 A_2

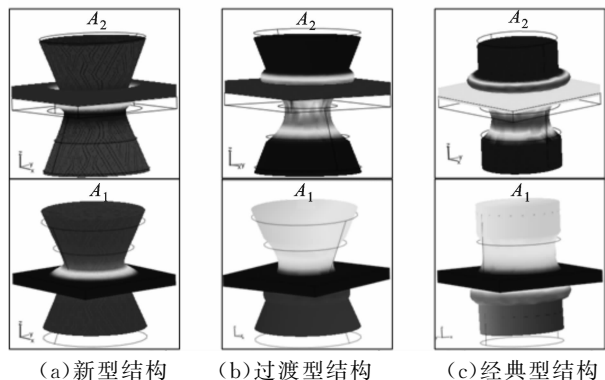


图6 单元面外振动模式

激活后放大成为主模态,此时基板沿 z 方向运动,而散射体基本保持静止,因此面外波可通过基板面外振动模式在声子晶体板中传播;当激励频率接近散射体固有频率时,模式 A_1 激活后放大转换为主模态,此时振子沿 z 方向且通过橡胶填充体给基板一个作用力,其大小正比于振子振幅(约正比于放大因子)、橡胶填充体刚度,进而阻止了基板沿 z 方向运动,抑制了基板面外振动模式,致使面外波无法在声子晶体板中传播,第1条面外禁带打开;在面外禁带内(平直能带 A_1 上方区域),局域共振模式 A_1 始终保持为主模态,反作用力持续作用于基板上,基板面外振动模式继续被抑制。依据模态叠加原理^[19]

$$x = \eta_{A_1} + \eta_{A_2} + \cdots + \eta_{A_n} \quad (3)$$

式中: x 表示响应; η_{A_n} 表示模式 A_n 的参与因子。当激励频率逐渐远离振子固有频率时,模式 A_1 的放大因子逐渐变小,其参与因子 η_{A_1} 变小,振子振幅随之减弱,致使作用于基板上的反作用力逐渐变小,最终消失,此时第一条面外禁带关闭。该形成原理可视化过程如图7所示,共包含4个过程。当有限结构基板右端激励频率接近振子固有频率时,参与因子 η_{A_1} 约等于放大因子,此时模式 A_1 激活后放大成为主模态,致使波传播被抑制,即结构左端基板保持静止,如图7过程1所示;当波激励频率逐渐远离振子固有频率时,放大因子变小而导致参与因子 η_{A_1} 逐渐变小,此时模式 A_2 转换为主模态,致使激励被传播,即结构右端基板末端出现微幅运动,如图7过程4所示。

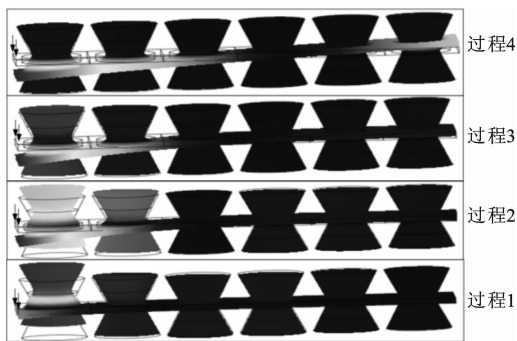


图7 禁带形成过程机理

面外禁带打开位置由局域共振模式 A_1 的固有频率决定,模式 A_1 的振动过程可理解为一等效弹簧-质量系统(K_1-M_1),其固有频率由下式确定

$$f_1 = 1/[2\pi(K_1/M_1)^{1/2}] \quad (4)$$

式中: K_1 表示系统刚度(压缩或拉伸); M_1 表示系统集中质量。对于经典型和过渡型声子晶体板,系统

刚度 K_1 由单个散射体 A 提供,系统集中质量 M_1 由单个散射体 B 提供。相比柱形散射体,锥形散射体的等效刚度较小,但系统等效质量 M_1 保持不变,于是过渡型声子晶体板面外禁带可被调节至低频;对于新型声子晶体板,散射体沿 z 方向做整体运动,同时受橡胶填充体约束,且固有频率不为 0,依据振动力学中的刚体模态概念,将散射体的这种振动模式命名为“类刚体模态”,此时系统集中质量 M_1 由整个散射体提供而变大,系统等效刚度 K_1 由橡胶填充体提供,于是该型板的面外禁带可调节至更低频。

3 种声子晶体板第 1 条面内禁带上下边界对应的单元振动模式位移云图如图 8 表示。图中 S_1 为单元局域共振模式,对应禁带下边界; S_2 为单元面内振动模式,对应禁带上边界。当面内波激励时,模式 S_2 激活后放大成为主模态,此时基板沿 xy 平面运动,面内波可通过基板面内振动模式在声子晶体板中传播;当频率接近散射体振子固有频率时,模式 S_1 被激活放大转换为主模态,振子沿垂直于 xy 平面的面内摆动,产生一个反作用力,且通过橡胶填充体给基板一个作用力,其大小正比于振子振幅(约正比于放大因子)与橡胶填充体刚度,进而阻止了基板沿 xy 平面运动,抑制了基板面内振动模式,致使面内波无法在声子晶体板中传播,第 1 条面内禁带打开。禁带(平直带 S_1 上方区域)内,局域共振模式 S_1 始终保持为主模态,反作用力持续作用于基板上,进而抑制面内波通过。依据模态叠加原理^[19]

$$x = \eta_{S_1} + \eta_{S_2} + \cdots + \eta_{S_n} \quad (5)$$

式中: η_{S_n} 表示模式 S_n 的参与因子。当激励频率逐渐远离振子固有频率时,模式 S_1 的放大因子逐渐变小,导致参与因子 η_{S_1} 变小,振子振幅随之减弱,致使作用于基板上的反作用力逐渐减小,最终消失,第一面外禁带关闭。

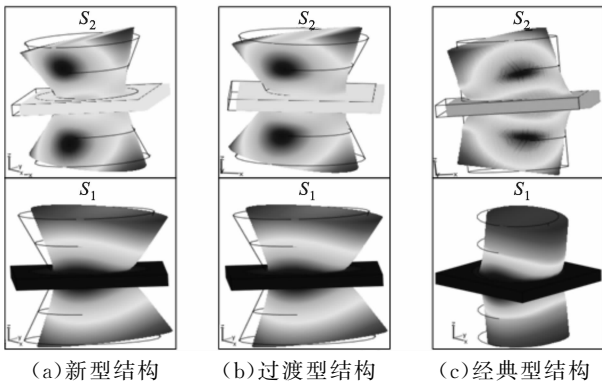


图 8 面内振动模式

禁带打开位置由单元共振模式 S_1 决定,其振动过程可理解为一等效弹簧-质量系统(K_2-M_2)。对于 3 种声子晶体板,系统等效刚度 K_1 均由单个散射体 A 提供,等效质量 M_2 均由单个散射体 B 提供。由于锥形散射体等效刚度小于柱形散射体,因此可将面内带隙调节至低频。

从以上分析可以得出,对于带边型声子晶体板,其散射体振子的等效弹簧-质量系统包含 K_1-M_1 与 K_2-M_2 这 2 个子系统。子系统 K_1-M_1 中特定的局域共振模式与反对称兰姆波振动模式依据模态叠加原理耦合产生面外禁带;子系统 K_2-M_2 中特定的局域共振模式与对称兰姆波振动模式依据模态叠加原理耦合产生面内禁带;禁带打开位置取决于子系统固有频率。

相对子系统 K_1-M_1 与 K_2-M_2 相互耦合的经典型声子晶体板,在新型声子晶体板中,橡胶填充体的引入使得子系统 K_1-M_1 与 K_2-M_2 相互解耦,如图 9 所示。系统中等效刚度 K_1 由橡胶填充体提供, K_2 由散射体 A 提供,等效质量 M_1 由整个散射体提供, M_2 由散射体 B 提供,于是面内、面外禁带可被单独调节;同时,“类刚体模态”形成,系统等效质量 M_1 增大,等效刚度 K_1 减小,于是将面外禁带调至低频;锥形散射体引入,使得等效刚度 K_2 减小,于是将面内禁带调至低频;最终,面内面外禁带在低频处发生相互重叠,进而产生了一条低于 100 Hz 的完全禁带。

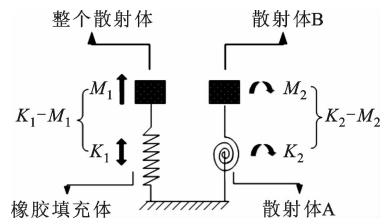


图 9 新型结构散射体振子的等效弹簧-质量系统

4 散射体参数对低频禁带影响规律

由上述分析可知,锥形复合散射体可同时影响“类刚体模态”的集中质量 M_1 和面内振动模式的等效刚度 K_2 ,因此,锥形复合散体为调节禁带的主要因素,于是将进一步研究锥形复合散射体对面内、面外禁带的影响规律。以散射体 B 的高度 h_B 为影响参数,研究锥形复合散射体对面内、面外禁带的影响规律。

4.1 散射体 B 高度对面外禁带的影响规律

当散射体 B 高度 h_B 从 0 逐渐变化为 5 mm 时,

面外禁带的变化规律如图 10 所示。可以看出,随着高度 h_B 增大,面外带隙打开位置逐渐移向低频(从 118 Hz 降到 51 Hz),同时带宽逐渐变宽。

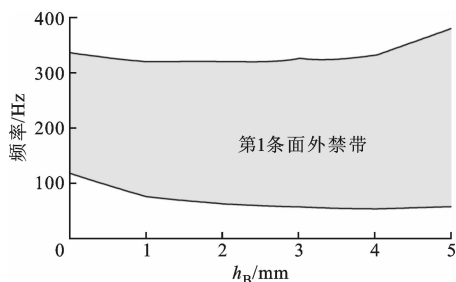


图 10 散射体 B 高度对面外禁带的影响规律

由低频禁带形成机理可知,面外禁带打开位置由子系统 K_1-M_1 的固有频率决定,固有频率大小主要由“类刚体模态”确定,当 h_B 逐渐增大时,“类刚体模态”的等效质量 M_1 逐渐增大,等效刚度 K_1 保持不变,于是子系统 K_1-M_1 固有频率减小,面外禁带移向低频。其可视化机理如图 11 所示。

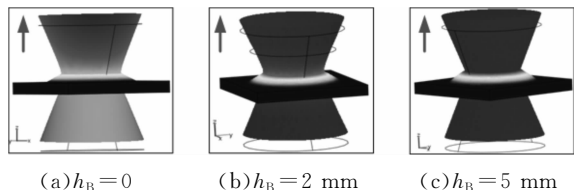


图 11 面内局域振动模式(类刚体模态)随 h_B 的变化规律

此过程中,由于双边的引入,散射体的“类刚体模态”与板波振动模式的耦合随着 h_B 的增大而增大,导致禁带变宽。

4.2 散射体 B 高度对面内禁带的影响规律

当散射体 B 高度 h_B 从 0 逐渐变为 5 mm 时,第 1、2 条面内禁带的变化规律如图 12 所示。可以看出,随着 h_B 增大,二者先向低频移动,之后又移向高频,同时禁带逐渐变宽。

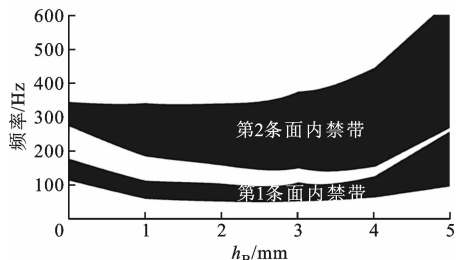


图 12 散射体 B 高度对面内禁带的影响规律

由低频禁带形成机理可知,面内禁带打开位置由子系统 K_2-M_2 的固有频率决定,当 h_B 开始增大(不大于 4 mm)时,等效刚度 K_2 减小,等效质量 M_2 增大,子系统 K_2-M_2 的固有频率减小,面内禁带移

向低频;当 h_B 进一步增大(大于 4 mm)时,沿 xy 平面出现“类刚体模态”,此时橡胶填充体替代散射体 A 成为子系统 K_2-M_2 的等效刚度,其大小等于橡胶填充体的横向刚度,致使 K_2 变大,其增幅大于 M_2 ,进而导致子系统 K_2-M_2 的固有频率增大,面内带隙移向高频。其可视化机理如图 13 所示。

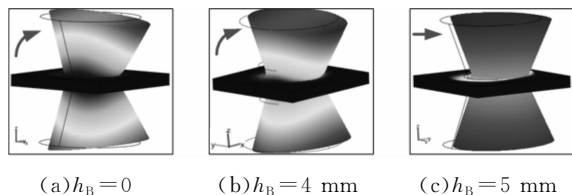


图 13 面内局域振动模式随散射体 B 高度 h_B 的变化规律

此过程中,由于双边的引入,局域共振模式与兰姆波模式的耦合随着 h_B 的增大逐渐增大,导致禁带变宽。

5 结 论

在分析传统型声子晶体板结构特性的基础上,提出了一种新型声子晶体板结构,通过对其禁带特性的研究,最终提出了声子晶体板中低频完全禁带的形成机理和禁带调节规律,并得出如下结论。

(1)低频完全弹性波禁带的频率范围为 59 ~ 103 Hz。

(2)研究发现,系统主振型在局域共振模式与板波振动模式二者间的相互切换决定着禁带的打开与关闭。

(3)新结构中通过引入橡胶填充体解耦了振子的等效弹簧-质量系统,进而实现了对面内、面外禁带进行单独调节;形成的“类刚体模态”可将面外禁带单独调节至低频。进一步引入双边复合锥形散射体,可将面内禁带调节至低频。最终,面内、面外禁带相互重叠,产生了一条低于 100 Hz 的完全禁带。

(4)复合锥形散射体可同时影响“类刚体模态”和面内振动模式,通过调节散射体参数可对结构低频完全禁带进行调节。

研究表明,声子晶体可应用于工程结构低频减振领域,研究结论可为得到低频完全禁带提供理论参考。

参考文献:

- [1] SIGALAS M, ECONOMOU E N. Elastic and acoustic wave band structure [J]. Journal of Sound and Vibration, 1992, 158(2): 377-382.
- [2] SIGALAS M, ECONOMOU E N. Band structure of

- elastic waves in two dimensional systems [J]. Solid State Commun, 1993, 86(3): 141-143.
- [3] 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: 1-30.
- [4] LI Xiaochun, LIU Zhengyou. Coupling of cavity modes and guiding modes in two-dimensional phononic crystals [J]. Solid State Commun, 2005, 133(5): 397.
- [5] LI Fengming, WANG Yize. Elastic wave propagation and localization in band gap materials: a review [J]. Science China, 2012, 55(10): 1734-1746.
- [6] KUSHWAHA M S, HALEVI P, DOBRZYNSKI L, et al. Acoustic band structure of periodic elastic composites [J]. Physical Review Letters, 1993, 71(13): 2022-2025.
- [7] LIU Zhengyou, ZHANG Xixiang, MAO Yiwei, et al. Locally resonant sonic materials [J]. Science, 2000, 289(5485): 1734-1736.
- [8] GORISHNYY T, ULLAL C K, MALDOVAN M, et al. Hypersonic phononic crystals [J]. Physical Review Letters, 2005, 94(11): 3035.
- [9] ZHOU Xiaozhou, WANG Yuesheng, ZHANG Chuanzeng. Effects of material parameters on elastic band gaps of two-dimensional solid phononic crystals [J]. Journal of Applied Physics, 2009, 106(1): 014903.
- [10] HO K M, CHENG C K, YANG Z, et al. Broadband locally resonant sonic shields [J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(26): 5566-5568.
- [11] CHEN J J, HAN X, LI G Y. Asymmetric Lamb wave propagation in phononic crystal slabs with graded grating [J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(18): 184506.
- [12] WU T T, HUANH Z G, TSAI T C, et al. Evidence of complete band gap and resonances in a plate with periodic stubbed surface [J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(11): 111902.
- [13] PENNEC Y, DJAFARI-ROUHANI B, LARAB I, et al. Low-frequency gaps in a phononic crystal constituted of cylindrical dots deposited on a thin [J]. Physical Review: B, 2008, 78(78): 104105.
- [14] HSU J. Local resonances-induced low-frequency band gaps in two-dimensional phononic crystals slabs with periodic stepped resonators [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2011, 44(5): 55401-55409.
- [15] ZHANG Siwen, WU Jiuhui, HU Zhiping. Low-frequency locally resonant band-gaps in phononic crystal plates with periodic spiral resonators [J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(113): 163511.
- [16] ASSOUAR M B, OUDICH M. Enlargement of a locally resonant sonic band gap by using double-sides stubbed plate [J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(12): 123506.
- [17] LI Yinggang, CHEN Tianning, WANG Xiaopeng, et al. Enlargement of locally resonant sonic band gap by using composite plate-type acoustic metamaterial [J]. Physical Letters A, 2015, 379(5): 412-416.
- [18] ROUNDY S. On the Effectiveness of vibration-based energy harvesting [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2005, 16(16): 809-823.
- [19] THOMSON W T, DAHLEH M D. Theory of vibration with applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 81-82.

[本刊相关文献链接]

- 张凯, 陈天宁, 王小鹏. 非阻塞性颗粒阻尼器内部的颗粒莱顿弗罗斯特现象. 2016, 50(8): 15-19. [doi: 10.7652/jxtxb201608003]
- 蔺彦虎, 赵宁, 彭艳军. 具有循环对称特点的耦合结构振动特性分析. 2016, 50(7): 68-74. [doi: 10.7652/jxtxb201607011]
- 周建星, 孙文磊, 曹莉, 等. 行星齿轮传动系统碰撞振动特性研究. 2016, 50(3): 16-21. [doi: 10.7652/jxtxb201603003]
- 刘雅琳, 上官博, 徐自力. 千摩擦阻尼对失谐叶盘系统受迫振动的影响. 2016, 50(2): 111-117. [doi: 10.7652/jxtxb201602019]
- 郭涛, 管志成, 孙光普, 等. 调频振子-液体联合水平减振的流固耦合机理研究. 2016, 50(1): 28-33. [doi: 10.7652/jxtxb201601005]
- 权双璐, 刘杰, 韩罗峰, 等. 一种机械系统非线性类别辨识方法. 2015, 49(12): 104-111. [doi: 10.7652/jxtxb201512017]
- 郭涛, 李国君. 内嵌晃荡液体减振的流固耦合分析. 2014, 48(9): 117-122. [doi: 10.7652/jxtxb201409020]
- 毛阳, 陈志勇, 史文库, 等. 磁流变液双质量飞轮扭振减振特性研究. 2014, 48(6): 127-133. [doi: 10.7652/jxtxb201406022]
- 张超, 陈天宁, 王小鹏, 等. 颗粒阻尼线性离散元模型参数的选取方法. 2014, 48(3): 96-101. [doi: 10.7652/jxtxb201403018]

(编辑 武红江)