

局域共振复合单元声子晶体结构的 低频带隙特性研究*

张思文 吴九汇†

(西安交通大学机械工程学院, 西安 710049)

(2012 年 12 月 27 日收到; 2012 年 12 月 27 日收到修改稿)

本文提出了一种新型局域共振复合单元声子晶体结构, 并结合有限元方法对结构的带隙机理及低频共振带隙特性进行了分析和研究. 共振带隙产生的频率位置由所对应的局域共振模态的固有频率决定, 并且带隙宽度与局域共振模态的品质因子及其与基体之间的耦合作用强度有关. 采用局域共振复合单元结构可以实现声子晶体的多重共振, 在低频范围能打开多条共振带隙, 但受到共振单元排列方式的的影响. 由于纵向和横向局域共振模态的简并, 复合单元结构能在 200 Hz 以下的低频范围打开超过 60% 宽度的共振带隙, 最低带隙频率低至 18 Hz. 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.

关键词: 局域共振, 低频带隙, 复合单元, 声子晶体

PACS: 43.20.+g, 43.40.+s, 62.25.Jk

DOI: 10.7498/aps.62.134302

1 引言

在实际生活环境中, 绝大多数的振动源分布在 250 Hz 以下的低频范围^[1]. 科学研究人员一般也将频率在 20—250 Hz 之间的声音定义为低频噪声^[2]. 这些低频振动和噪声由于具有不易衰减, 传播距离远, 穿透能力强的特点, 难以控制和阻隔, 对工业生产、桥梁建筑以及人体都存在很大的危害, 已经成为环境污染的一个新特点^[2]. 特别对于 50 Hz 以下的低频振动和噪声, 容易引起人体肢体和器官的共振, 对人体生理和心理都会造成严重的伤害^[3]. 因此, 设计和研究控制低频振动和噪声的结构和方法已成为人们关注和研究的热点.

弹性散射体周期排列形成的声子晶体结构, 由于具有良好的弹性波带隙及导波特性的, 在减振降噪方面具有广阔的应用前景. 弹性波在声子晶体结构中传播时, 受其内部结构的作用, 在一定频率范围(带隙)内被阻止传播, 而在其他频率范围(通带)

可以无损耗地传播^[4]. 研究认为, 声子晶体带隙产生的机理有两种: Bragg 散射型和局域共振型. 前者主要是结构的周期性起着主导作用, 当入射弹性波的波长与结构的特征长度(晶格常数)相近时, 将受到结构强烈的散射; 而后者主要是单个散射体的共振特性起主导作用. 2000 年, 刘正猷等^[5]首次提出了局域共振型声子晶体的概念. 他们用硅橡胶包裹铅球按照简单立方晶格排列在环氧树脂基体中, 进行了相应的实验. 理论和实验都证实这一单元特征长度为 2 cm 的结构具有 400 Hz 左右的低频带隙, 比同样尺寸的 Bragg 散射型声子晶体的第一带隙频率降低了两个数量级. Liu^[6] 和 Wang^[7] 等对局域共振带隙的产生机理及其影响因素进行了分析, 指出可以通过改变组元的弹性常数来调节共振带隙. 但传统的局域共振结构一般只能在低频打开很窄的共振带隙. 最近十几年, 局域共振型声子晶体由于其优越的低频特性吸引了很多学者的研究, 为了获得更低更宽频段的带隙, 提出了杆状、梁状、层状、板状、膜状等结构形式的声子晶

* 国家自然科学基金(批准号: 51075325)、教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-09-0644)和中央高校基本科研业务费专项资金资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: ejhwu@mail.xjtu.edu.cn

体^[8-16]. Ho 等^[8] 基于局域共振结构原理, 设计了具有不同共振频率结构单元的宽频带声隐身材料, 能屏蔽 200—500 Hz 的声波. Pennec^[11], Oudich^[12] 和 Hsu^[13] 等都证明了在薄板上附加周期排列的圆柱体形成了固态亥姆赫兹共鸣器具有低频共振带隙. 刘敏等^[14] 研究了二维正方形排列圆柱状亥姆赫兹共振腔形成的局域共振型声子晶体的低频带隙特性. Lai^[15] 和 Mei^[16] 等也都基于局域共振机理设计了体和薄膜超材料, 在 100 Hz 以上的低频范围获得了较宽的共振带隙. 但目前获得的带隙频率范围都不能满足阻隔低频振动和噪声的实际需要. 本文首先基于一种“质量块-弹性梁”局域共振结构分析了共振带隙的产生机理及影响因素, 在此基础上提出了新型局域共振复合单元声子晶体结构, 并结合有限元方法分析了复合单元结构的排列方式对低频带隙特性的影响.

2 共振带隙机理及特性

组成局域共振型声子晶体的单元结构如图 1(a) 所示, 方形质量块通过四根回旋折叠弹性梁连接在外围正方形框架上. 其中晶格常数为 a , 方形质量块边长为 b , 外框和弹性梁的宽度分别为 w 和 h , n 表示折叠次数 (即每根弹性折叠梁绕质量块折叠的边数, 不考虑末端连接质量块的短边). 图 1(b) 给出了单元结构的第一布里渊区. 我们采用有限元方法来求解结构的固有频率, 并沿第一布里渊区路径 $M \rightarrow \Gamma \rightarrow X \rightarrow M \rightarrow Y \rightarrow \Gamma$ 进行扫描, 从而得到能带结构. 在计算中考虑了单元结构在 x, y 方向的周期性, 即设定了 Bloch 周期边界条件. 其中, 方形质量块材料为铅, 弹性梁和外围框架都采用有机玻璃 (PMMA) 制作. 材料和尺寸参数分别如表 1 和表 2 中结构 A 所示. 计算得到结构 A 的低频范围能带图如图 2(a) 所示.

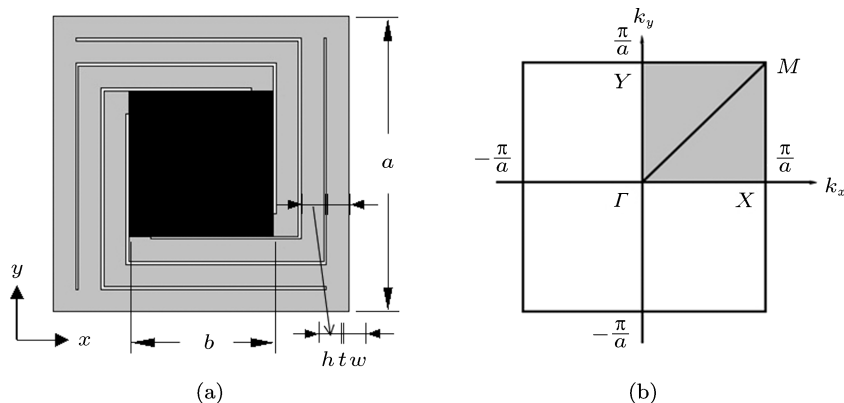


图 1 局域共振声子晶体的单元结构 (a) 单元结构; (b) 第一布里渊区 (阴影部分)

表 1 材料参数

	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	E/GPa	泊松比 ν
铅 (Pb)	11600	40.8	0.369
有机玻璃 (PMMA)	1142	2	0.389

表 2 结构尺寸参数

	a/mm	b/mm	w/mm	h/mm	n	t/mm
结构 A	20	9.8	1.5	1.5	2	0.2
结构 B	20	11.6	1	0.8	3	0.2

从图 2(a) 可以看到, 该结构在 420.5—1097.5 Hz 之间形成了超宽的低频带隙. 为了说明这一超宽低频带隙的形成机理, 图 2(b) 给出了带隙

近平直带的所对应的模式. 带隙下边界 (420.5 Hz 处) 的两条平直带 A_1, A_2 分别对应的是由质量块-弹性梁组成的“质量-弹簧”振动单元的横向和纵向的平移共振模式. 由于振动单元结构的对称性, 横向和纵向两种振动模式是等效的, 因此两种模式在离 Γ 点较远的倒空间范围发生了能带简并. 单元结构在这两种平移共振模式下具有相同的动力学特性, 质量块带动弹性梁运动, 而基体外框几乎保持静止. 这表明, 基体外框可以看作刚性基础, 它的存在使内部振动模式完全被单元结构所局域化. 当这种局域共振模式被基体外框中的振动所激发, 由于共振单元在一个方向上来回振动, 它将在这个方向上与基体外框产生力的作用, 并与基体中的振动形式相互耦合. 在极低频范围 (即长波极限下), 由于行

波的波长远大于单元结构的特征长度, 低频弹性波在结构中的传播行为与在均匀介质中无异, 色散关系呈线性关系, 如图 2(a) 能带结构始于 Γ 点的能带分支. 当频率接近共振单元固有频率时, 单元结构的局域共振模式就会被激起, 基体中传播的行波将与结构局域共振模式发生强烈的耦合作用, 能量不断被交换到共振单元中而被局域化, 不能继续向前传播. 在能带结构中表现为, 代表行波始于 Γ 点的能带被共振平直带截断, 从而形成了共振带隙, 如图 2(a) 能带结构中阴影部分所示. 在共振带隙中, 由于耦合的存在, 行波对基体框架的作用被单元内部局域共振对框架的作用消弱或完全抵消, 因此共振带隙的宽度由局域共振模式的局域化程度 (即品

质因子) 及其与基体之间的耦合作用决定. 当局域共振模式的品质因子较低或与行波的耦合作用较弱时, 将不能打开带隙. 对于 693.2 Hz 处平直带, 它所对应的是由质量块 - 弹性梁组成的共振单元的扭转共振模式 (如图 2(b) 模式 B 所示). 由于这条平直带位于其他的带隙中, 从而形成了一条窄的通带. 在较高频范围, 如带隙上边界 1097.5 Hz 处, 对应的模式如图 2(b) 中模式 C_1, C_2 所示, 质量块位移趋于零, 主要是弹性梁和外框架的振动. 此时, 质量块类似于刚性边界, 基体中的行波在各质量块单元之间发生复杂的多重弹性散射, 这就是周期结构的 Bragg 散射.

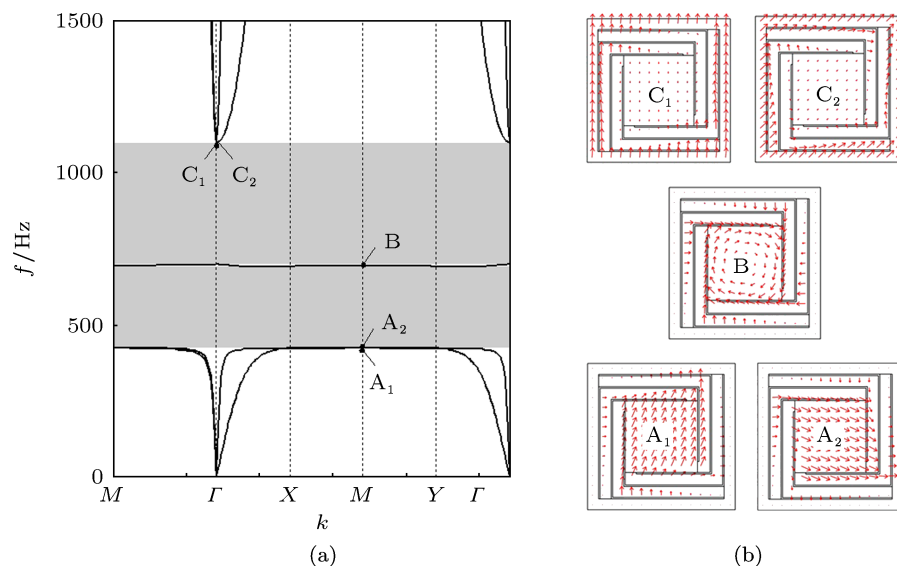


图 2 低频范围的固有频率及模式 (a) 能带结构; (b) 分别是对应能带结构上 A, B, C 三处的振动模式, 其中红色箭头表示了位移的相对大小和方向

根据上述对单元结构共振模式的分析, 不论是平移局域共振模式还是扭转局域共振模式, 基体外框都趋于静止, 而内部相当于一个单自由度系统, 如图 3 所示局域共振单元结构的简化模型. 当振动以弹性波的形式传播到该单元结构时, 会对基体产生力 F 的作用, 而质量块 M_e 的运动同样对基体产生一个反作用力 f , 因此基体在外部激励力 F 和内部反作用力 f 的作用下振动. 当外部激励的频率与内部局域共振单元的固有频率相近时, 内部共振单元发生共振. 由于频率相近, 内部共振单元对基体的反作用力 f 始终与外部激励力 F 反向叠加或完全抵消, 从而使作用在基体上的合力趋于零, 这就是局域共振模式下基体趋于静止的原因. 因此, 振动无法在基体中传播, 而能量被共振单元吸收并局

限在每个单元结构中, 从而形成带隙. 共振带隙的频率位置由局域共振的固有频率决定, 可以根据该振动模式下提供质量部分的等效质量和提供弹性部分的等效刚度来进行估算

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

其中 M_e 为等效质量, K_e 为等效刚度. 在不同的模式下它们代表的等效质量和弹性元件也不同. 对于扭转共振, 它们分别对应相应元件的等效转动惯量和等效扭转刚度. 从表达式 (1) 可知, 改变相应部分的等效质量或刚度就可以调节带隙的频率位置和宽度.

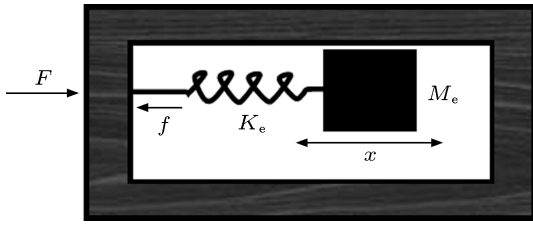


图3 局域共振单元结构的简化模型

为了进一步说明基体外框的存在对振动模式的局域化作用,我们计算和对比了当外框的宽度 w 分别为 1.5, 1.0, 0.5, 0.1 时前三阶能带的平直度,在对比平移共振模态的平直带时只取 $X \rightarrow M \rightarrow Y$ 段

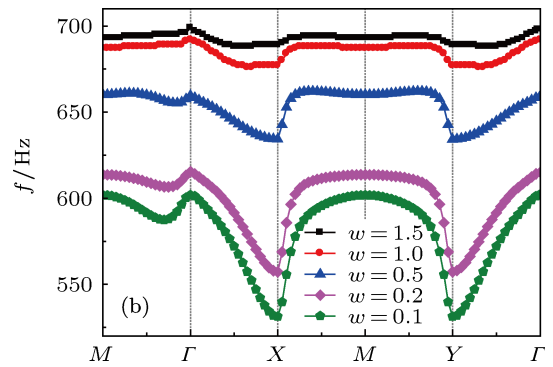
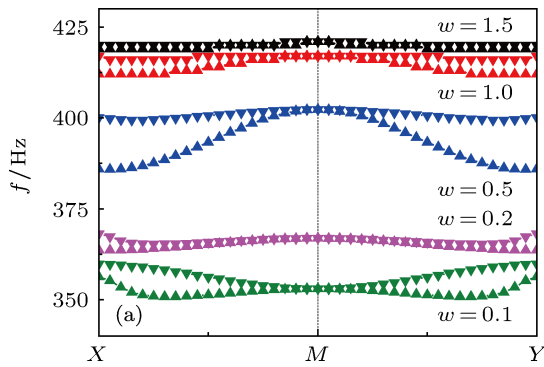


图4 基体外框宽度对前三阶平直带的影响 (a) 平移共振模态平直带,其中带下、上三角标记曲线分别表示第一、二阶平直带;(b) 扭转共振模态平直带(第三阶)

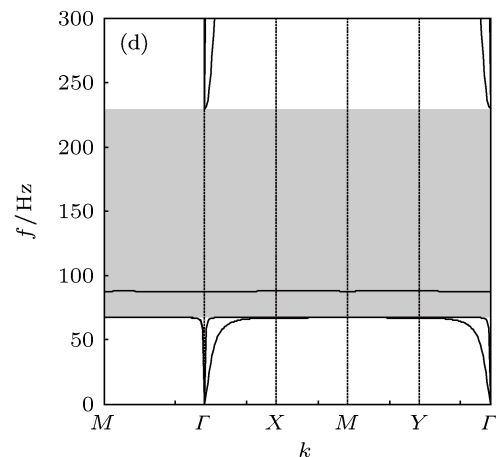
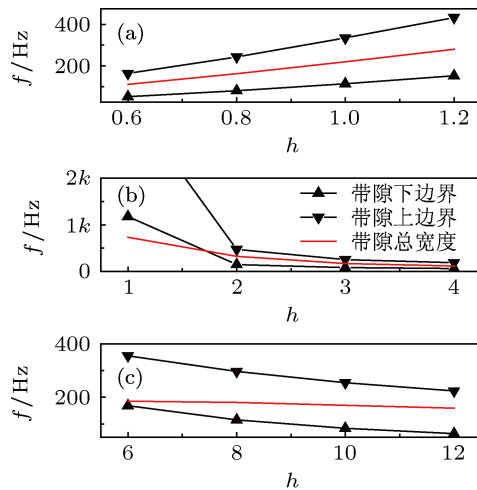


图5 结构参数对共振带隙的影响 (a) 弹性梁厚度;(b) 弹性梁折叠次数;(c) 质量块边长对结构共振带隙的影响,带上、下三角标记的黑色曲线表示共振带隙的上下边界,不带标记的红色曲线表示带隙的总宽度;(d) 结构B在低频范围的能带图

为了深入分析共振带隙频率和宽度与结构参数的关系,我们计算了当某一项结构参数发生改变时结构的能带图.图5(a)—(c)给出了结构第一共振

带隙随弹性梁厚度和折叠次数及质量块边长的变化曲线.由于能带图中的扭转共振平直带处于平移共振模态打开的共振带隙中,而且宽度较窄,我们

忽略了它对带隙宽度的影响. 结果表明, 增加质量块的材料密度, 或减小弹性梁的厚度, 或增加其折叠次数, 都可以有效降低新型局域共振结构的共振带隙频率, 但带隙宽度也随之减小. 为了在 250 Hz 以下的低频范围获得较低和较宽的共振带隙, 我们确定了另外一组单元结构参数, 如表 2 中结构 B 所示. 计算得到的结构能带图如图 5(d) 所示. 可以看到, 该结构在 67—229 Hz 之间打开了较宽的低频带隙.

3 局域共振复合单元结构的低频带隙特性

根据上述分析, 对于单质量块结构单元, 可以简化为由质量块和弹簧组成的单自由度共振单元, 其固有频率由提供质量部分的等效质量和提供弹性部分的等效刚度来决定. 共振带隙就是因为共振单元的局域共振模态与基体行波的强烈耦合作

用而产生的. 但无论如何改变结构的材料和尺寸, 这样的单自由度局域共振单元的都只对应一个平移模态和一个扭转模态的固有频率, 只能打开一条共振带隙. 由此, 我们提出了局域共振复合单元声子晶体结构, 即在一个单元结构中排列多个由弹性梁和质量块组成的共振单元, 共振单元之间的弹性梁相互连接, 而内部的多共振单元与基体外框之间仍保持四边每边一个连接点. 图 6(a) 所示即为将结构 A 的外框中间并排两个原共振单元形成的双质量块局域共振复合单元结构. 图 6(b) 给出了该长方形晶格的第一布里渊区. 沿同样的路径扫描, 我们计算得到了该结构的能带图, 如图 6(c) 所示. 可以清楚地看到, 这样排列的结构在低频范围打开了两条明显的共振带隙, 其中第一共振带隙位于 299.2—348.5 Hz 之间, 第二条共振带隙位于 587.8—933.1 Hz 之间, 共振带隙最低频率比单质量块局域共振单元结构降低了 45.5%.

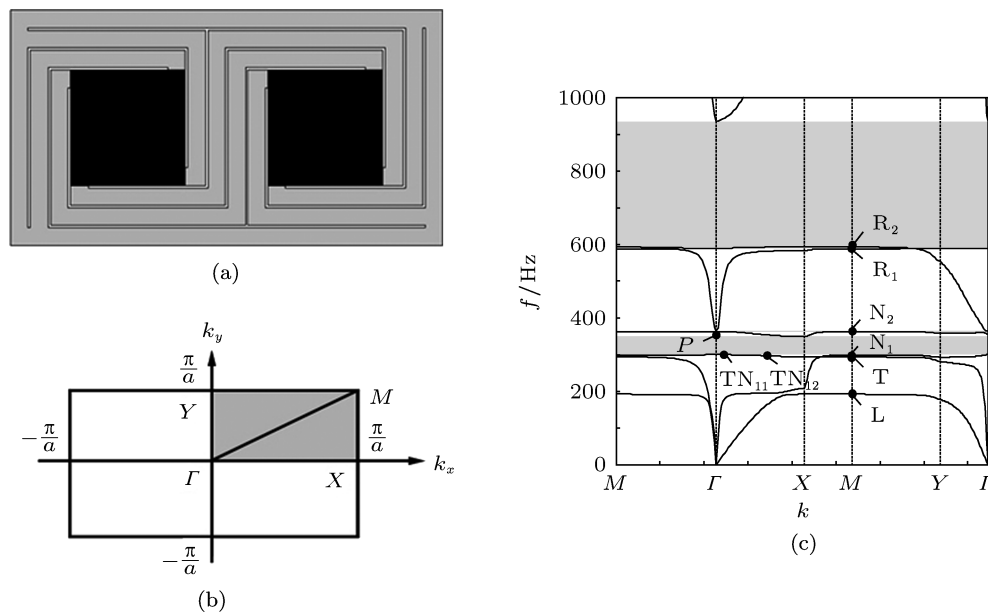


图 6 并排双质量块单元结构及其能带结构 (a) 并排双质量块单元结构; (b) 第一布里渊区; (c) 由并排双质量块单元结构组成的声子晶体的能带图

从图 6(c) 所示能带图可以看到, 从下往上依次在 192 Hz, 293 Hz, 299 Hz, 358 Hz, 586 Hz, 592 Hz 处出现六条完全或者部分布里渊区的平直带, 这表明在这些频率附近的行波容易激起结构内部的局域共振模态. 图 7(a)—(f) 分别给出了它们在高对称点 M 点的局域振动模态, 分别对应双质量块的纵向局域共振模态 (L)、横向局域共振模态 (T)、反

向局域共振模态 (N_1 , N_2) 和扭转局域共振模态 (R_1 , R_2). 由于结构的各向异性, 纵向局域共振的频率比横向低很多, 从而消除了它们的简并. 当基体行波的频率接近纵向局域共振的固有频率 192 Hz 时, 结构纵向局域共振模态将与基体中的纵波成分发生强烈耦合, 而与横波成分耦合很小. 这时基体中的纵波成分虽然被禁止传播, 但横波成分仍然能够

穿过结构继续向前传播, 因此结构在高于纵向而低于横向局域共振模式的固有频率之间的频段, 只支持横波在结构中传播, 不能打开完全带隙. 对于横向局域共振模式 T 与反向局域共振模式 N_1 、扭转局域共振模式 R_1 与 R_2 , 由于它们的固有频率非常相近, 甚至在某些区域趋于简并, 很容易同时被基体行波所激起. 因此, 在高对称点之间它们通常以两种模式的耦合形式存在, 这也取决于两种共振模式的品质因子. 图 7(g) 给出了 ΓX 方向上靠近 Γ 点 TN_{11} 处的共振模式, 可以看出, 它即是横向局域共振模式 T 与反向局域共振模式 N_1 的耦合叠加形式, 由于两种局域共振模式的品质因子相当, 它们的叠加使左侧质量块位移增大, 而右侧质量块的位移相互抵消趋于零. 当远离 Γ 点时, 简约波矢增大, 基体行波更易激起特征长度较短的横向局域共振模式, 这时叠加模式将以横向振动为主, 如图 7(h) 所示的 TN_{12} 点的模式. 这种叠加形式的局域共振模式将与基体行波存在更强烈的耦合作用, 进而打开较宽的共振带隙, 如图 6(c) 中阴影部分所示. 而对于反向局域共振模式 N_2 , 由于它的固有频率接近高对称点 Γ 处的模式 P , 而模式 P 分支是一种

局域扭转共振模式与基体行波同时存在的模式, 它们的耦合不能阻止行波的传播, 因此不能打开共振带隙.

根据上述对局域共振复合单元结构打开多条共振带隙的机理的分析, 增加基体外框所包含的质量块-弹性梁共振单元的数目, 将会使结构拥有更多的局域共振模式, 从而打开更多的共振带隙. 在发生局域共振时, 基体外框同样可以近似为刚性基础, 内部就相当于多自由度系统, 因此在频域具有多个共振峰. 当然打开共振带隙的频率位置和宽度仍然与局域共振模式与基体外框的耦合作用强度有关, 还受到质量块的排列方式的影响. 为了进一步深入分析这些因素对低频共振带隙的影响, 并获得宽度较宽、频率更低的共振带隙, 我们在结构 B 中引入复合共振单元. 计算了外框包围 1×2 , 1×3 , 1×4 , 2×2 , 2×3 , 3×3 排列形式的多个共振单元组成的声子晶体结构的能带图, 并与单质量块局域共振单元结构进行了对比, 低频范围 (250 Hz 以下) 带隙频率范围柱形图和宽度变化曲线如图 8(a) 所示.

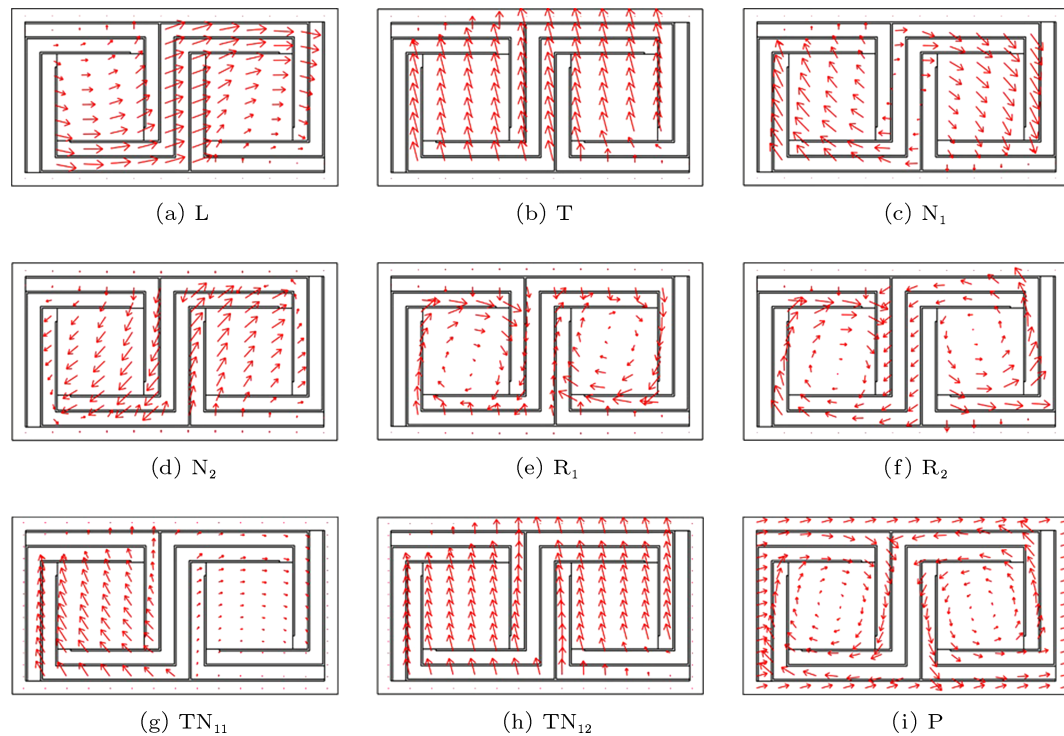


图 7 双质量块局域多共振单元结构振动模式 (其中红色箭头表示位移的方向和相对大小) (a)–(f) 是分别对应于图 5(c) 能带图前六阶平直带在 M 点的振动模式; (g), (h) 是横向局域共振模式 T 与反向局域共振模式 N_1 的耦合叠加形式; (i) 是局域扭转共振模式与基体行波同时存在的模式

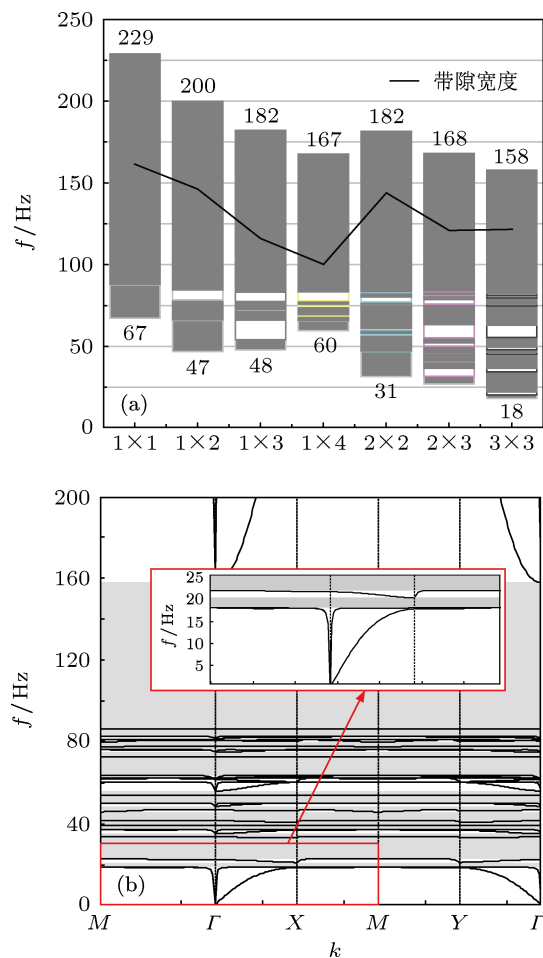


图8 不同排列形式局域多共振单元结构的带隙频率和宽度比较 (a) 1×1 , 1×2 , 1×3 , 1×4 , 2×2 , 2×3 , 3×3 排列形式多核结构在低频范围的共振带隙频率位置及宽度对比, 其中灰色阴影表示共振带隙的范围, 黑色曲线表示 250 Hz 以下低频范围的带隙总宽度变化趋势; (b) 3×3 排列的四质量块局域多共振单元结构组成的声子晶体的能带图, 红色线框为局部放大图

根据图 8(a) 中带隙频率和宽度随结构形式的变化趋势, 对比质量块 - 弹性梁共振单元在纵向排列的情况可知: 当质量块在纵向排列的个数增多时, 共振带隙下边界频率先降低后增大, 上边界频率一直降低, 带隙总宽度随之变窄. 根据对图 5(a) 所示双质量块局域共振复合单元结构的研究可知, 第一共振带隙的下边界由横向局域共振模态所决定. 因此, 随着质量块纵向排列个数的增多, 单元结构的长宽比增大, 单元结构纵向局域共振模态的固有频率比横向的降低得快得多. 而当长宽比过大时, 横向振动的所有质量块并不能保持一致运动, 这时横向局域共振模态的固有频率不会继续降低, 它与基体外框之间的耦合作用也变弱, 因此由其决定的共振带隙频率停止下降甚至消失. 对比 2×2 和 2×3 两种排列形式的局域共振复合单元结构的共振带隙, 也有类似的结果. 对比 1×4 和 2×2 两

种排列形式的局域共振复合单元结构的共振带隙可知: 当纵向和横向排列的质量块个数相同时, 结构具有更低和更宽的低频共振带隙. 这是因为这种情况下单元结构在两个方向上是等效的, 纵向与横向局域共振模态趋于简并, 固有频率同步降低. 这种简并态也同时增强了它与基体行波之间的耦合作用, 从而能打开的更低更宽的共振带隙. 从图中可以看出, 2×2 排列形式的局域多共振单元结构在 200 Hz 以下的带隙总宽度将近 150 Hz, 最低带隙频率为 31 Hz, 这与单质量块局域共振单元结构的最低带隙频率相比, 带隙宽度只降低了 9.3%, 而最低带隙频率降低了 53.7%. 对于 3×3 排列形式的局域多共振单元结构, 图 8(b) 给出了该局域多共振单元结构组成的声子晶体的能带图. 这种形式的结构在 100 Hz 以下就具有高达 27 阶固有频率及其相应的局域共振模态, 它们与基体行波的耦合在低频范围产生了多条共振带隙. 由于各局域共振模态的固有频率都很接近, 打开的共振带隙基本上连成一片, 在 200 Hz 以下的带隙总宽度达 121 Hz, 最低共振带隙低至 18 Hz. 这种复合单元结构, 其最低共振带隙是由六个质量块整体发生局域共振的模态决定的, 因此具有很低的第一阶固有频率. 而且, 纵向和横向排列了相同个数的质量块, 决定最低带隙频率的纵向和横向局域共振模态是简并的 (如图 8(b) 局部放大图所示), 从而能打开很低的共振带隙.

4 结 论

本文提出了一种新型局域共振声子晶体结构, 并对局域共振带隙的产生机理进行了详细的分析, 明确了决定低频共振带隙的频率位置和宽度的因素. 共振带隙的频率位置由所对应的局域共振模态的固有频率决定, 而带隙宽度与局域共振模态的品质因子及其与基体之间的耦合作用强度有关. 通过改变结构参数, 可以调节局域共振模态的固有频率, 使共振带隙最低频率降低至 100 Hz 以下. 在此基础上, 本文发展了局域共振复合单元结构, 通过增加基体外框包含的质量块 - 弹性梁共振单元的个数, 实现了声子晶体结构的多重共振. 通过对局域共振复合单元结构的低频共振带隙的分析和比较, 证实了采用局域共振复合单元结构不断大幅度降低了原有带隙的频率, 而且能在低频范围打开多条共振带隙. 打开共振带隙的频率位置和宽度不仅与局域共振模态的品质因子和它与基体之间的耦

合作用强度有关,还取决于多共振单元在基体外框中的排列形式.共振单元在纵向和横向排列的个数相同时,结构的纵向和横向局域共振模态发生简并,有利于打开更低的共振带隙.局域共振复合单元结构在 200 Hz 以下的低频范围打开超过 60%宽度的

共振带隙,最低带隙频率低至 18 Hz.所提出的新型局域共振声子晶体结构,为获得低频、超低频带隙提供了一种有效的方法,在低频减振降噪方面有潜在的应用前景.

-
- [1] Roundy S 2005 *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **16** 809
 - [2] Liu B, Feng T, Wu X, Huang Z G, Zhu T F 2010 *Noise and Vibration Control* **3** 50 (in Chinese) [刘斌, 冯涛, 吴雪, 黄志刚, 朱腾飞 2010 噪声与振动控制 **3** 50]
 - [3] Tempest W 1976 *Infrasound and Low Frequency Vibration* (London: Academic Press Inc.) p187
 - [4] Wen X S, Wen J H, Yu D L, Wang G, Liu Y Z, Han X Y 2009 *Phononic Crystals* (Beijing: National Defense Industry Press) p2 (in Chinese) [温熙森, 温激鸿, 郁殿龙, 王刚, 刘耀宗, 韩小云 2009 声子晶体 (北京: 国防工业出版社) 第 2 页]
 - [5] Liu Z, Zhang X, Mao Y, Zhu Y Y, Yang Z, Chan C T, Sheng P 2000 *Science* **289** 5485
 - [6] Liu Z, Chan C T, Sheng P 2002 *Phys. Rev. B* **65** 165116
 - [7] Wang G, Shao L H, Liu Y Z, Wen J H 2006 *Chin. Phys.* **15** 1843
 - [8] Ho K M, Cheng K, Yang Z, Zhang X X, Sheng P 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 5566
 - [9] Yu D, Liu Y, Wang G, Cai L, Qiu J 2006 *Phys. Lett. A* **348** 410
 - [10] Wen Q H, Zuo S G, Wei H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 034301 (in Chinese) [文岐华, 左曙光, 魏欢 2012 物理学报 **61** 034301]
 - [11] Pennec Y, Djafari-Rouhani B, Larabi H, Vasseur J O, Hladky-Hennion A C 2008 *Phys. Rev. B* **78** 104105
 - [12] Oudich M, Li Y, Assouar B M, Hou Z L 2010 *New J. Phys.* **12** 083049
 - [13] Hsu J C 2011 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44** 055401
 - [14] Liu M, Hou Z L, Fu X J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 104302 (in Chinese) [刘敏, 侯志林, 傅秀军 2012 物理学报 **61** 104302]
 - [15] Lai Y, Wu Y, Sheng P, Zhang Z Q 2011 *Nature Mater.* **10** 620
 - [16] Mei J, Ma G, Yang M, Yang Z, Wen W, Sheng P 2012 *Nat. Commun.* **3** 756

Low-frequency band gaps in phononic crystals with composite locally resonant structures*

Zhang Si-Wen Wu Jiu-Hui[†]

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 27 December 2012; revised manuscript received 27 December 2012)

Abstract

In this paper, a novel locally resonant structure with composite units is proposed. Formation mechanisms and low-frequency characteristics of the band gaps in the proposed structure are investigated using finite element methods. Frequency positions of band gaps depend on natural frequencies of the corresponding locally resonant modes. And the gap width is related to both the Q factor of the locally resonant modes and the interaction strength in-between the locally resonant structural units. Phononic crystal structures with composite units exhibit multiple resonances and band gaps in low-frequency range, depending on the arrangement of locally resonant units. Due to the mode degeneracy of the vertical and horizontal local resonances, the composite structures possess band gaps below 200Hz with the total gap width more than 60% and the lowest frequency down to 18Hz. The structures and results provide a new effective method for phononic crystal structures to obtain broadband gaps in low-frequency range.

Keywords: localized resonance, low frequency band gaps, composite units, phononic crystals

PACS: 43.20.+g, 43.40.+s, 62.25.Jk

DOI: 10.7498/aps.62.134302

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51075325), the Program for New Century Excellent Talents in University (Grant No. NCET-09-0644), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities.

[†] Corresponding author. E-mail: ejhwu@mail.xjtu.edu.cn