

不同填充率时三组元声子晶体缺陷态

易秀英¹, 李雪勇², 周昕²

(1. 湖南科技职业学院 机电系, 湖南 长沙 410118; 2. 湖南工业大学 理学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 运用基于平面波的超元胞方法, 研究作为缺陷引入第三组元材料(四氯化碳)对二维二组元声子晶体(水/水银)带结构的影响。结果表明: 当缺陷柱填充率发生变化时, 原带隙的位置、宽度变化不大; 缺陷带频率主要受第三组元材料物性参数的影响; 当正常插入体填充率发生变化时, 原带隙的位置、宽度都发生了改变, 同时也影响缺陷带的出现, 且这些缺陷态都是局域化的。因此, 在具有宽带隙的二组元体系中引入适当的第三组元线缺陷, 让缺陷带频率落在二组元体系的带隙中, 就可以形成特殊的波导态。声子晶体的这一特性对于声波/弹性波的传播和新的声学应用具有重要意义。

关键词: 声子晶体; 三组元; 线缺陷

中图分类号: O426.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2011)06-0025-04

Defect States in Three-Component Phononic Crystal by Different Filling Fraction

Yi Xiuying¹, Li Xueyong², Zhou Xin²

(1. Electrical and Mechanical Department, Hunan Vocational College of Science and Technology, Changsha 410118, China;

2. School of Sciences, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: By means of the supercell plane wave method, investigated the effect of the third component material as the introduced defect on the band structure of two-dimension two-component phononic crystal (PC). It shows that: when the filling fraction of defect rods changes, defect bands can appear in the primary band gap whose position and width had a minor change; the frequency of the defect states/bands are mainly affected by the third material's physical parameters; When the filling fraction of normal rods changes, defect bands appear in the primary band gap whose position and width had also a major change, and all the defect states are localization. Therefore, adding proper third material as linear defects to the two-component system with wider band gap where defect bands will fall into, some special filter guided states will be formed. This characteristic has a very important significance for acoustic /elastic wave propagating and new acoustic applications.

Keywords: phononic crystals; three-component; linear defect

近年来, 人们对弹性波带隙复合材料——“声子晶体”^[1]产生了浓厚兴趣。这种具有较好隔声、隔振、隐身作用的新型复合材料, 拥有广阔的应用前景。而这些应用大多是基于缺陷状态的, 因此对于缺陷态的研究, 更是引起了人们广泛的关注。目前, 有

关声子晶体缺陷态方面的研究^[2-13]主要集中在对二组元点缺陷和线缺陷的研究, 对于三组元的情况则集中在镀层方面。因此, 本文运用基于平面波的超元胞方法, 研究作为缺陷引入第三组元材料(四氯化碳)对二维二组元声子晶体(水/水银)带结构的影响。

收稿日期: 2011-08-11

基金项目: 湖南科技职业学院青年科研基金资助项目(KJ09011), 湖南省教育厅科研基金资助项目(09C321), 湖南省教育厅基金资助项目(11C0425)

作者简介: 易秀英(1980-), 女, 湖南怀化人, 湖南科技职业学院讲师, 硕士, 主要从事声子晶体方面的研究,

E-mail: luoying1@126.com

1 缺陷柱填充率变化时的带结构

图1给出了三组元体系截面示意图。

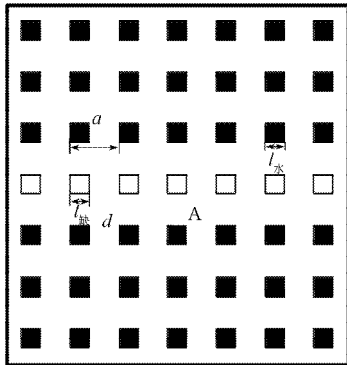


图1 三组元体系线缺陷截面示意图

Fig. 1 Cross section of linear defect in three-component phononic crystals

图中：■代表正常插入体水柱，其质量密度 $\rho_{水} = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，纵波速度 $c_{水} = 1.48 \times 10^3 \text{ m/s}$ ；□代表第三组元四氯化碳缺陷方柱，其质量密度 $\rho_{缺} = 1.595 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，纵波速度 $c_{缺} = 0.938 \times 10^3 \text{ m/s}$ ；A代表基体水银，其质量密度 $\rho_{水银} = 13.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，纵波速度 $c_{水银} = 1.45 \times 10^3 \text{ m/s}$ 。插入体形状为方柱，按

正方形排列，该超胞大小为7方柱×7方柱。 $l_{水}$ 为正常插入体水柱边长， $l_{缺}$ 为第三组元缺陷方柱边长， a 为晶格常数，水柱填充率 $f_{水} = l_{水}^2/a^2$ ，第三组元缺陷方柱填充率 $f_{缺} = l_{缺}^2/a^2$ 。

图2是四氯化碳-水/水银结构中正常插入体水柱填充率 $f_{水} = 0.36$ 不变，缺陷方柱填充率 $f_{缺}$ 取不同值时形成的线缺陷带结构图。图中纵坐标为归一化频率 ω/ω_0 ($\omega_0 = 2\pi c_{水银}/a$)，横坐标为简约波矢 k 。

从图2可看出，带隙宽度并未因 $f_{缺}$ 的变化而改变，其频率范围均为 $0.2894 \omega_0 \sim 0.7613 \omega_0 \text{ Hz}$ ，即稳定的二组元体系提供了一个稳定的带隙宽度。

对图2中所形成的缺陷带而言，当缺陷柱的填充率 $f_{缺} = 0$ 时(如图2a所示)，在带隙中存在2个线缺陷带，且缺陷带的频率分别为 $0.3751 \omega_0 \sim 0.5977 \omega_0 \text{ Hz}$ 和 $0.6222 \omega_0 \sim 0.7520 \omega_0 \text{ Hz}$ ，这与文献[9-10]中所得结论一致；随着 $f_{缺}$ 逐渐增加，缺陷带的频率先逐渐往带隙上下边缘移动，然后又逐渐往带隙中心频率位置移动，在整个过程中，缺陷带的频率范围逐渐变窄、集中。由此可见，缺陷带的频率位置及宽度由缺陷柱的材料和填充率所决定，即缺陷柱的物性参数决定了缺陷带的特征。

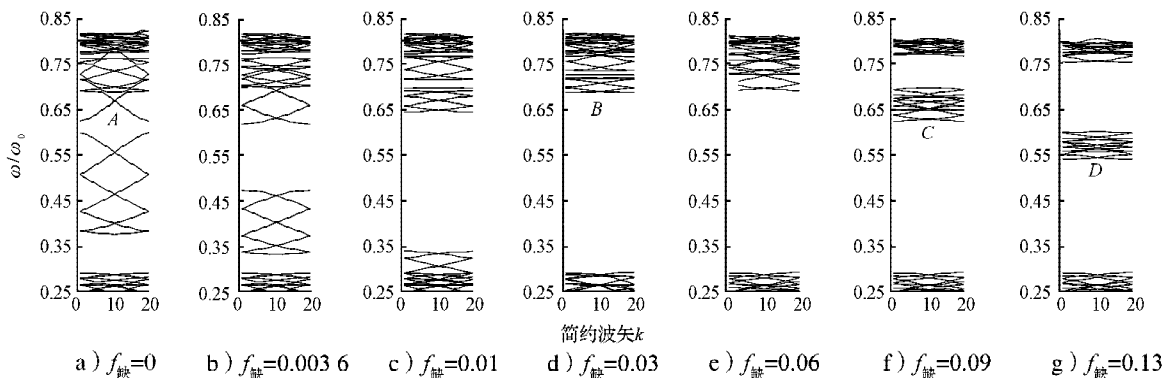


图2 缺陷柱填充率变化时线缺陷带结构图

Fig. 2 Acoustic band structures of linear defect by changing the filling fraction of defect rods

图3给出与图2相对应结构中部分缺陷态特定点处的压强幅度分布图。

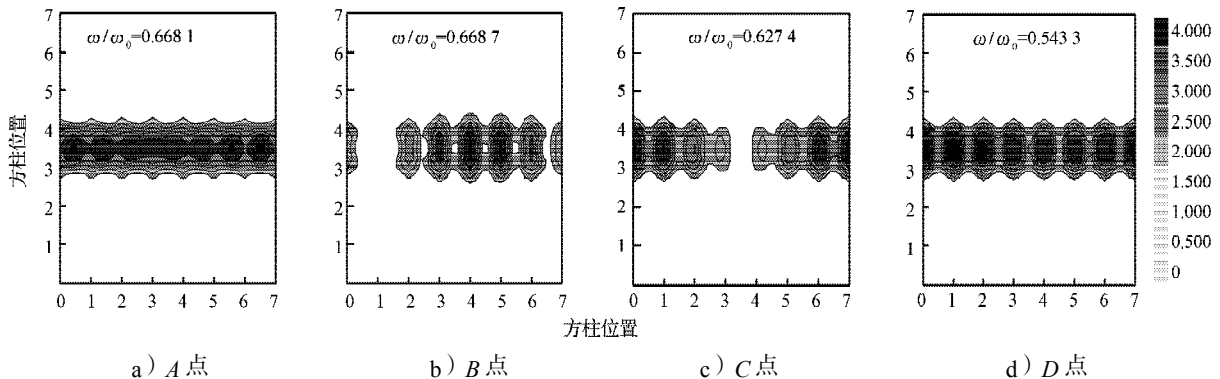


图3 图2中特定点压强幅度分布图

Fig. 3 Pressure amplitude distribution correspond to fig. 2

图 3a 为图 2 中 A 点处的压强幅度分布, 这是由空腔所形成的线缺陷, 表现出较好的波导态特征; 图 3b 为图 2 中 B 点处的压强幅度分布, 此时缺陷态主要局域在中间位置的缺陷柱上; 图 3c 为图 2 中 C 点处的压强幅度分布, 缺陷态主要集中在缺陷柱两头; 图 3d 为图 2 中 D 点处的压强幅度分布, 缺陷态全部局域在缺陷柱所在位置, 是很好的波导态。从图 3b~d 可看出, 其压强幅度分布是在缺陷柱填充率不为 0 时所形成的, 即由第三组元所形成的缺陷态, 虽然缺陷态的压强分布都局域在缺陷柱的位置,

但幅度的局域性随着缺陷柱填充率 $f_{\text{缺}}$ 的增加而逐渐增强。可见, 由第三种材料所形成的缺陷态, 依然表现出了波导态的特征, 这正是第三组元作为缺陷的特征。

2 水柱填充率变化时的带结构

图 4 是四氯化碳-水/水银结构中缺陷柱填充率不变, 正常插入体水柱的填充率取不同值时所形成的线缺陷带结构。

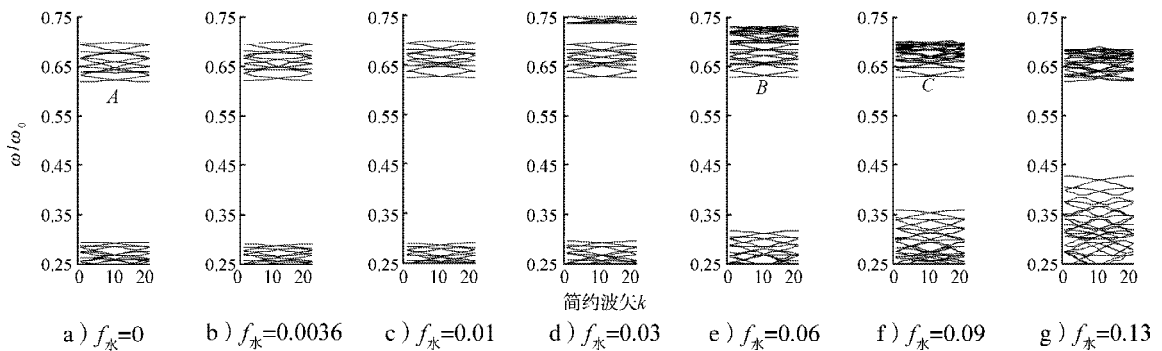


图4 水柱填充率变化时线缺陷带结构图

Fig. 4 Acoustic band structures of linear defect by changing the filling fraction of water rods

从图 4 可看出, 当 $f_{\text{水}}=f_{\text{缺}}=0.25$ 时, 带隙频率为 $0.2959\omega_0 \sim 0.7706\omega_0$ Hz, 缺陷带频率为 $0.6179\omega_0 \sim 0.6911\omega_0$ Hz。可见, 缺陷带的频率宽度由缺陷柱的物性参数所决定, 但此时第三组元材料依然表现出了很好的缺陷态特征。随着 $f_{\text{水}}$ 的增加, 带隙宽度随之逐渐变窄, 当 $f_{\text{水}}=0.64$ 时 (如图 4g 所示), 带隙频率为 $0.4269\omega_0 \sim 0.6184\omega_0$ Hz; 而缺陷带的频率宽度在 $f_{\text{水}} < 0.49$ 时并没有改变, 但当 $f_{\text{水}} \geq 0.49$ 时, 缺陷带的频率宽度随之逐渐变窄 (如图 4e 所示), 直至最后完全消失 (如图 4g 所示)。

料的物性参数所决定的, 但能否在带隙中出现缺陷带, 则跟二组元体系中正常插入体的填充率有关, 若产生的带隙宽度包含缺陷带的频率, 则缺陷带将全部出现在带隙中; 若产生的带隙宽度只包含部分或全部不包含缺陷带的频率时, 则缺陷带将部分或全部消失。可见, 当二组元体系不稳定时, 所提供的带隙宽度也将不稳定, 同时也将导致缺陷带频率宽度的不稳定性, 因此, 要想得到好的缺陷带, 只有选择适当的二组元体系, 才能在带隙中产生宽频率的缺陷带。

由以上分析可知, 由第三种材料所形成的缺陷带, 其本身所能形成的缺陷带频率宽度是由缺陷材

图 5 是与图 4 相对应结构中特定点处的压强幅度分布图。

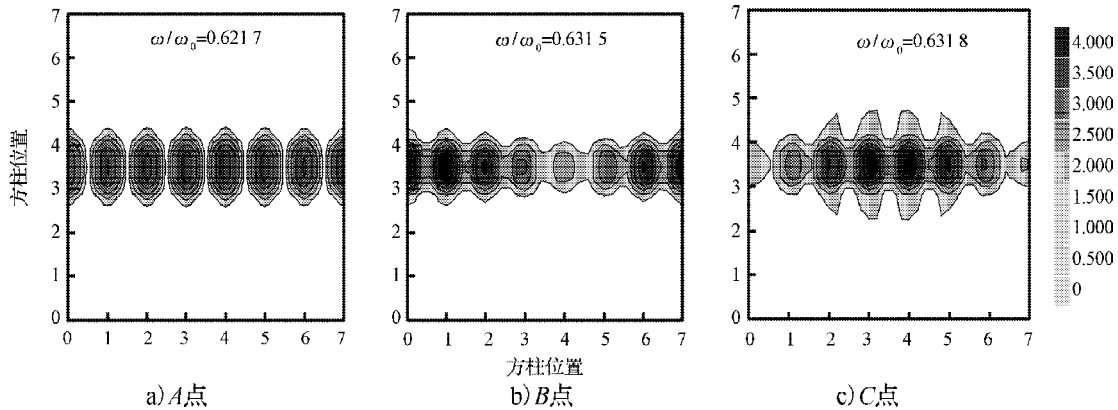


图5 图4中特定点压强幅度分布图

Fig. 5 Pressure amplitude distribution correspond to fig. 4

图 5a 为图 4 中 A 点处的压强幅度分布, 从图中可以看出, 这是局域在缺陷柱位置上的缺陷态, 且局域性较强, 这正是第三组元作为缺陷的特征, 与图 3d 相比, 此时的压强幅度分布的局域性较前者要弱, 可见, 缺陷柱的填充率对缺陷带的影响还是不小; 而其他 2 个图形则是 $f_{\text{水}}=0.49$, $f_{\text{水}}=0.57$ 时的带结构中 B, C 点的压强幅度分布, 对处于同样频率位置上的缺陷带, 在 $f_{\text{缺}}$ 相同, $f_{\text{水}}$ 不同时, 其压强幅度分布依然存在一定差别, 但总的来说都表现出波导态的特征。只是随着 $f_{\text{水}}$ 的增加, 缺陷态的局域性较 $f_{\text{水}}=f_{\text{缺}}$ 时要弱些。整体来看, 图 5 与图 3 相比, 图 5 中的压强幅度分布随着 $f_{\text{水}}$ 的增加而局域性逐渐减弱, 由此可知, 要想得到好的波导态, 除了缺陷柱的物性参数以外, 还需要有宽带隙, 只有这样才能形成好的波导态。

3 结语

本文运用基于平面波的超元胞方法, 研究了材料的填充率变化对三组元 (四氯化碳-水/水银) 声子晶体结构的影响。在三组元声子晶体中, 缺陷柱填充率的改变影响着缺陷带的频率位置和宽度; 正常方柱填充率的改变则影响着带隙的位置和宽度, 同时也影响到缺陷带的出现。因此, 选择合适的结构参数, 将影响到波导态的出现, 这对于声波/弹性波的传播和新的声学应用具有重要意义。

参考文献:

- [1] Kushwaha M S, Halevi P, Dobrzynski L, et al. Acoustic Band Structure of Periodic Elastic Composites[J]. Phys. Rev. Lett., 1993, 71(13): 2022-2025.
- [2] Sigalas M M. Defect States of Acoustic Waves in a Two-Dimensional Lattice of Solid Cylinders[J]. Journal of Applied Physics, 1998, 84(6): 3026-3030.
- [3] Kafesaki M, Sigalas M M, Garcia N. Frequency Modulation in the Transmittivity of Wave Guides in Elastic-Wave Band-Gap Materials[J]. Phys. Rev. Lett., 2000, 85(19): 4044-4047.
- [4] Sigalas M M. Elastic Wave Band Gaps and Defect States in Two-Dimensional Composites[J]. Journal of Acoustical Society America. 1997, 101(3): 1256-1261.
- [5] Kafesaki M, Sigalas M M, Garcia N. Wave Guides in Two-Dimensional Elastic Wave Band-Gap Materials[J]. Physica B: Condensed Matter, 2001, 296(1/2/3): 190-194.
- [6] Khelif A, Djafari-Rouhani B, Vasseur J O, et al. Transmission and Dispersion Relations of Perfect and Defect-Containing Waveguide Structures in Phononic Band Gap Materials[J]. Phys. Rev. B, 2003, 68(2): 024302(8p).
- [7] Wu Fugen, Liu Zhengyou, Liu Youyan. Splitting and Tuning Characteristics of the Point Defect Modes in Two-Dimensional Phononic Crystals[J]. Phys. Rev. E, 2004, 69(6): 066609(4p).
- [8] Wu Fugen, Hou Zhilin, Liu Zhengyou, et al. Point Defect States in Two-Dimensional Phononic Crystals[J]. Phys. Lett. A, 2001, 292(3): 198-202.
- [9] Li Xiaochun, Liu Zhengyou. Coupling of Cavity Modes and Guiding Modes in Two-Dimensional Phononic Crystals[J]. Solid State Communications, 2005, 133(6): 397-402.
- [10] Li Xiaochun, Liu Zhengyou. Bending and Branching of Acoustic Waves in Two-Dimensional Phononic Crystals with Linear Defects[J]. Phys. Lett. A, 2005, 338(3/4/5): 413-419.
- [11] Liu Zhengyou, Zhang Xixiang, Mao Yiwei, et al. Locally Resonant Sonic Materials[J]. science, 2000, 289(5485): 1734-1736.
- [12] Lambin Ph, Khelif A, Vasseur J O, et al. Stopping of Acoustic Waves by Sonic Polymer-Fluid Composites[J]. Phys. Rev. E, 2001, 63(6): 066605(6p).
- [13] 李晓春, 易秀英, 肖清武, 等. 三组元声子晶体中的缺陷态[J]. 物理学报, 2006, 55(5): 2300-2305.
Li Xiaochun, Yi Xiuying, Xiao Qingwu, et al. Defect States in Three-Component Phononic Crystal[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(5): 2300-2305.

(责任编辑: 李玉珍)