

纪念应崇福院士诞辰 100 周年

基于二维声子晶体结构的大尺寸超声 塑料焊接系统*

王 莎¹ 林书玉^{1†} 段祎林²

(1 陕西师范大学 陕西省超声学重点实验室 西安 710119)

(2 西安石油大学理学院 西安 710065)

摘要 在大尺寸的圆柱形超声塑料焊接系统的工具头上加工周期性槽, 形成一种二维声子晶体结构。对基于二维声子晶体结构的圆柱形工具头进行了声子晶体的带隙分析, 并对优化设计后的该超声塑料焊接系统进行数值模拟。探讨了开槽前后超声塑料焊接系统振型的变化以及工具头输出端面纵振动的位移分布。研究结果表明, 二维声子晶体结构能有效地抑制横向振动, 增强纵向振动, 并均匀输出端面的振幅, 可以实现对超声塑料焊接系统的优化设计。

关键词 声子晶体, 超声塑料焊接系统, 横向振动, 耦合振动

中图法分类号: O426.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2018)05-0811-06

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.05.029

A large-size ultrasonic plastic welding system based on two-dimensional phononic crystal structure

WANG Sha¹ LIN Shuyu¹ DUAN Yilin²

(1 Shaanxi Normal University, Shaanxi Key Laboratory of Ultrasound, Xi'an 710119, China)

(2 School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract The tool head of a large-sized cylindrical ultrasonic plastic welding system is machined with grooves having a periodic structure. A two-dimensional phononic crystal structure is formed. The bandgap of a cylindrical tool head based on a two-dimensional phononic crystal structure is analyzed. After the optimal design, the cylindrical ultrasonic plastic welding system based on the two-dimensional phononic crystal structure is numerically simulated. The variation of the vibration mode of the ultrasonic plastic welding system before and after slotting and the displacement distribution of the longitudinal vibration of the output face of the tool head of the ultrasonic plastic welding system are discussed. The results show that the two-dimensional phononic crystal structure can effectively suppress lateral vibration, enhance longitudinal vibration, and evenly output the amplitude of the end face. The optimal design of the ultrasonic plastic welding system can be achieved.

Key words Phononic crystal, Ultrasonic plastic welder, Lateral vibration, Coupled vibration

2018-06-13 收稿; 2018-08-02 定稿

*国家自然科学基金项目 (11474192, 11674206)

作者简介: 王莎 (1994-), 女, 浙江宁波人, 硕士研究生, 研究方向: 声子晶体。

† 通讯作者 E-mail: sylin@snnu.edu.cn

1 引言

超声塑料焊接系统可以焊熔各种热塑性塑料,焊接时间小于1 s,具有快速、高效、经济等优点。超声波塑料焊接已经广泛应用于汽车、医疗、制药等各个行业^[1-3]。超声焊接系统的工具头在工作频率上应处于纵向振动模态,且其输出端面要有均匀的振幅分布^[4]。对于较大物件的焊接,要求换能器振动系统能够输出较大的超声波功率,因此需采用横向尺寸大于四分之一波长的大尺寸工具头,此时则需要用耦合振动理论来进行理论分析^[5-6]。由于横向振动和纵向振动会产生较强烈的耦合,会导致工具头的输出端面的振幅不均匀,因此减弱甚至消除横向振动具有重大的意义。

声子晶体是一种周期性分布的新型复合功能材料。当弹性波穿过声子晶体时,由于受到周期性排列材料的相互作用,会形成一种分离的特殊色散曲线,色散曲线之间的频率范围称为带隙,而色散关系曲线上的频率范围则称为通带^[7-12]。在带隙频率范围内,弹性波的传播能得到抑制甚至禁止。在所有方向的(第一布里渊区的不同边)波矢 k 的所有取值下,都没有能带存在的频率区域称为完全带隙,在某个方向上(第一布里渊区的某条边)波矢 k 的所有取值下不能存在能带的频率区域称为方向带隙^[13-14]。利用声子晶体的这一特性,通过在大尺寸工具头上加工周期性槽形成二维声子晶体结构,在设计超声塑料焊接系统时,将振动系统的工作频率设计在工具头的横向振动的方向带隙中,使其横向耦合振动得到有效的抑制^[15-18],从而使得纵向的振动模态更加的单一。

2 圆柱形超声塑料焊接系统的理论分析

如图1所示,圆柱形超声塑料焊接系统由夹心式换能器、圆锥形变幅杆以及圆柱形工具头三个单

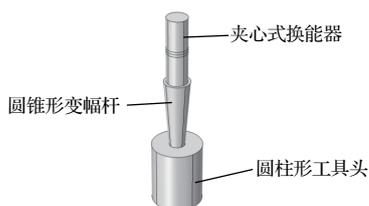


图1 圆柱形超声塑料焊接系统

Fig. 1 Cylindrical ultrasonic plastic welding system

独的共振系统组成,在系统各组成部分的共振频率相同时,才能确保复合系统高效工作。

2.1 夹心式压电换能器理论分析

图2为夹心式换能器结构示意图,主要包括前盖板、压电陶瓷晶堆和后盖板三个部分。本论文设计时采用最简单的等截面圆柱,且横截面积与陶瓷晶堆面积相同,前后盖板采用同种金属材料,换能器的振动位移波节面位于压电陶瓷晶堆的中间,其频率方程为

$$\tan(k_e l_c) = \frac{\rho c_e}{\rho_1 c_1} \cdot \cot(k_1 l_1), \quad (1)$$

式(1)中, $k_e = \omega/c_e$ 、 $k_1 = \omega/c_1$ 分别为压电陶瓷晶堆的波数和前后金属盖板的波数, $c_e = c\sqrt{1 - k_{33}^2 \frac{\tan(kl/2)}{kl/2}}$ 为压电陶瓷晶堆中纵向振动的等效声速, l_c 、 ρ 分别为压电陶瓷晶堆中压电片的长度和密度, c_1 、 l_1 、 ρ_1 分别为前后金属盖板的声速、长度和密度。

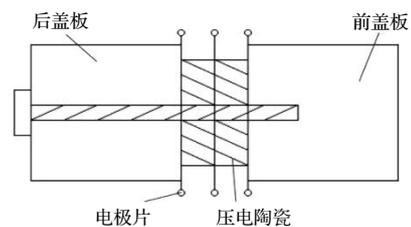


图2 夹心式换能器结构示意图

Fig. 2 Schematic structure of sandwich transducer

2.2 圆锥形变幅杆理论分析

圆锥形变幅杆的频率方程如下所示:

$$\tan(kl) = \frac{kl}{1 + \frac{N}{(N+1)^2}(kl)^2}, \quad (2)$$

由式(2)求出 kl 之后,可由式(3)求出变幅杆的长度 l_p :

$$l_p = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{kl}{\pi}. \quad (3)$$

2.3 圆柱形工具头的耦合振动理论分析

对于大尺寸圆柱形超声波塑料焊接工具头的分析,需要采用耦合振动理论。根据弹性力学理论,在柱坐标情况下,振动体内的任一点的正应力 σ_r 、 σ_θ 、 σ_z 与正应变 ε_r 、 ε_θ 、 ε_z 之间的关系为

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E}[\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)], \quad (4)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E}[\sigma_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_z)], \quad (5)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}[\sigma_z - v(\sigma_r + \sigma_\theta)], \quad (6)$$

其中, E 和 v 分别为材料的弹性模量及泊松系数。在准静态情况下, $\sigma_r = \sigma_\theta$, 由式(4)~式(6)可得

$$E_z = E/(1 - 2v/n), \quad (7)$$

$$E_r = E/[1 - v^2 - nv(1 + v)], \quad (8)$$

其中, $n = \sigma_z/\sigma_r$, 称为振动体内纵向振动与径向振动之间的耦合系数; $E_z = \sigma_z/\varepsilon_z$ 、 $E_r = \sigma_r/\varepsilon_r$ 分别称为振动体在 z 及 r 方向的等效弹性系数。圆柱体的轴对称耦合振动可以看成由两个分振动组成: 一个是细圆柱的纯纵向振动, 另一个是薄圆盘的纯径向振动。这两个振动通过耦合系数 n 相互作用, 并非相互独立, n 的大小决定了二者之间的耦合程度及相互关系。在此基础上, 可得两端自由圆柱体耦合振动的频率方程:

$$\sin(2k_z l) = 0, \quad (9)$$

$$k_r a J_0(k_r a) - (1 - v) J_1(k_r a) = 0, \quad (10)$$

式(9)是长为 $2l$ 的细杆纵振动的频率方程, 式(10)是半径为 a 的薄圆盘径向振动的频率方程。由于考虑了纵向振动与径向振动之间的耦合, 式(9)及式(10)中的波数 k_r 及 k_z 与振动体的几何尺寸有关, 并非常数。其中, $k_z = \omega/C_z$, $k_r = \omega/C_r$, $C_z = (E_z/\rho)^{1/2}$, $C_r = (E_r/\rho)^{1/2}$ 。这里 k_z 、 k_r 及 C_z 、 C_r 分别表示等效的纵向及径向振动的波数及声速, ω 为角频率 ρ 为密度, J_0 及 J_1 分别为零阶及一阶贝塞尔函数。由式(9)、式(10)可得

$$2k_z l = i\pi \quad i = 1, 2, 3, \dots, \quad (11)$$

$$k_r a = R(j) \quad j = 1, 2, 3, \dots, \quad (12)$$

其中, i, j 为正整数, 与圆柱体的各个振动模式相对应。 $R(j)$ 为方程(7)的第 j 个根, 它是泊松系数 v 的函数。根据上述各式可得出决定圆柱体耦合振动的耦合系数及共振频率的方程式:

$$(v+v^2)n^2 - \left[1-v^2 - \left(\frac{l}{a}\right)^2 \frac{4R^2(j)}{i^2\pi^2}\right]n - 2v\left(\frac{l}{a}\right)^2 \frac{4R^2(j)}{i^2\pi^2} = 0, \quad (13)$$

$$\frac{R^2(j)}{4l^2a^2}i^2\pi^2\Omega^2 - \left[\frac{R^2(j)}{a^2} + (1-v^2)\frac{i^2\pi^2}{4l^2}\right]\Omega - 2v^3 - 3v^2 + 1 = 0, \quad (14)$$

其中, $\Omega = C^2/\omega^2$, $C^2 = E/\rho$, C 为细长杆中一维纵振动的传播速度。圆柱体耦合振动的耦合系数及其共振频率不仅决定于振动体的几何尺寸, 而且与振动模式有关。频率方程式(14)确定了振动体的材料、几何尺寸及振动模式三者之间的依赖关系。另外, 当振动体的几何尺寸及振动模式一定时, 由式(13)可得两个耦合系数, 一个大于零, 另一个小于零。耦合系数大于零时, 圆柱体的纵向与径向振动为同相振动; 耦合系数小于零时, 纵向与径向振动为反相振动。

3 基于二维声子晶体结构的圆柱形超声波塑料焊接工具头的带隙分析

对于横向尺寸大于四分之一波长的大尺寸工具头, 由于耦合振动, 圆柱的纵向辐射面的振动位移出现不均匀, 因此需要对径向振动进行抑制。采用在圆柱体上开槽的方式, 形成二维声子晶体, 可以通过设计其带隙, 从而达到抑制横向振动的目的。

建立基于二维声子晶体结构的圆柱形工具头模型, 如图3所示。该工具头的半径为 48 mm, 高度为 120 mm, 在工具头上共加工 6 个槽, 开槽高度为 80 mm, 宽 15 mm, 深 10 mm, 每个槽间圆心角间隔为 60°。采用有限元法计算声子晶体的频率响应曲线, 利用 Comsol Multiphysics 的固体力学模块, 在圆柱形开槽工具头的一端处施加大小为 1 m/s²、方向沿 x 轴的加速度, 在另一端处添加探针, 通过计算探针处的加速度幅值得到加速度频率响应的曲线, 此时得到的带隙为沿着 x 轴方向(半径方向)的带隙, 如图4所示。

通过图4可知, 基于二维声子晶体结构的圆柱形工具头存在带隙, 其中在 20 kHz~23 kHz 附近处带隙较为明显。结合实际应用, 我们将超声塑料焊接系统的工作频率设计在 20 kHz 左右, 刚好在基于二维声子晶体结构的圆柱形工具头的横向带隙范围内, 利用这一方向带隙, 对横向振动进行抑制, 从而增强纵向振动并使得其在工作频率时振动模态更加的单一。

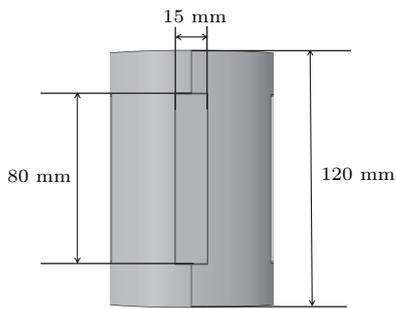


图3 基于二维声子晶体结构的圆柱形工具头模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cylindrical tool head model based on two-dimensional phononic crystal structure

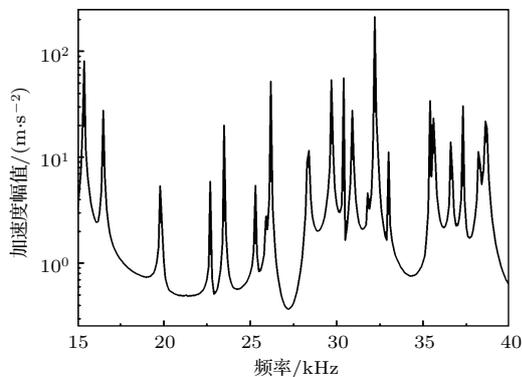


图4 基于二维声子晶体结构的圆柱形工具头的加速度频率响应曲线

Fig. 4 Acceleration frequency response curve of cylindrical tool head based on two-dimensional phononic crystal structure

4 大尺寸超声波塑料焊接系统的数值模拟

基于二维声子晶体结构的圆柱形超声塑料焊接系统的示意图如图5所示。采用有限元法,利用Comsol Multiphysics中的压电器件模块,对基于二维声子晶体结构的圆柱形超声塑料焊接系统进行模拟,尽管预应力螺栓对换能器的影响很大,但为了简化模型,这里不考虑预应力螺栓的影响。设计夹心式换能器前后盖板以及压电陶瓷晶堆的半径为20 mm,前后盖板的高度为60 mm,压电片的高度为5 mm,变幅杆的高度为135 mm,上端面半径为25 mm,下端面的半径为15 mm,工具头的半径为48 mm,高度为120 mm,在工具头上共加工6个槽,开槽高度为80 mm,宽15 mm,深10 mm,每个槽间圆心角间隔为60°。

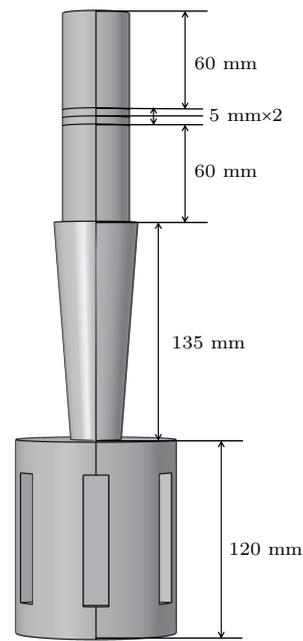


图5 基于二维声子晶体结构的圆柱形超声塑料焊接系统的示意图

Fig. 5 Schematic view of a cylindrical ultrasonic plastic welding system based on a two-dimensional phononic crystal structure

图6和图7分别表示了未开槽圆柱形超声塑料焊接系统的振型图和工具头端面振动位移分布图以及基于二维声子晶体结构的圆柱形超声塑料焊接系统在工作频率时的振型图和工具头端面振动位移分布图。

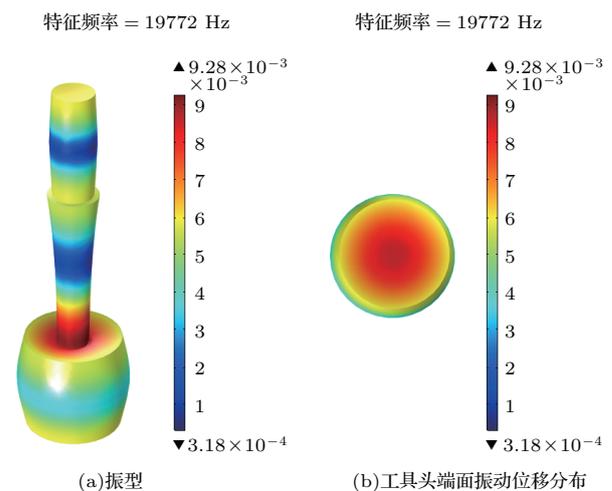


图6 未开槽圆柱形超声塑料焊接系统的振型及工具头端面振动位移分布

Fig. 6 Vibration pattern and displacement map of head surface vibration of unslotted ultrasonic plastic welding system

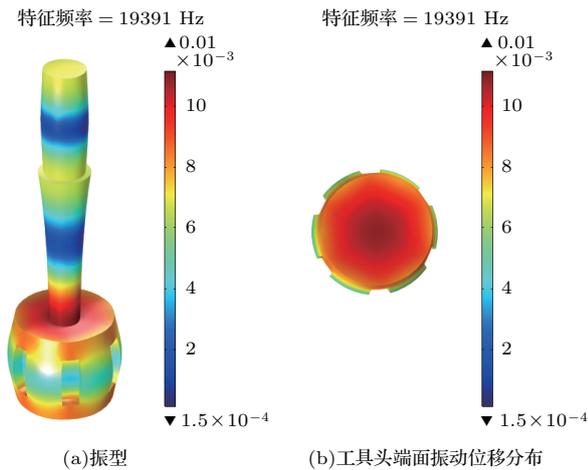


图7 基于二维声子晶体结构的圆柱形超声塑料焊接系统的振型及工具头端面振动位移分布

Fig. 7 Vibration pattern and displacement map of head surface vibration of ultrasonic plastic welding system based on two-dimensional phononic crystal structure

通过观察未开槽圆柱形超声塑料焊接系统以及基于二维声子晶体结构的圆柱形超声塑料焊接系统的振型图,不难发现开槽后圆柱形工具头的输出端面较未开槽圆柱形工具头的输出端面更加均匀。这说明二维声子晶体结构能够在其方向带隙中有效地抑制横向振动,加强纵向振动,使得工具头的输出端面振幅更加均匀,能更有效地进行工作。通过在圆柱形超声塑料焊接系统的工具头上开槽,形成二维声子结构能对其进行优化设计。

为了更明显地观察工具头输出端面的位移分布,计算出超声塑料焊接系统的振型之后在 Comsol Multiphysics 中建立一维图组并选取绘制线图,在未开槽圆柱形的超声塑料焊接系统以及基于二维声子晶体结构的圆柱形超声塑料焊接系统大尺寸工具头端面沿 x 轴正方向过圆心 O 点定义一条截线 (ab 边),如图8所示。采用有限元法分别计算并绘制出工作频率下,上述两种系统的工具头端面在 ab 边上的纵向相对位移,如图9所示。

观察图9不难发现,开槽后工具头输出端面的纵向相对位移更加均匀并且有了一定的提高,当基于二维声子晶体的超声塑料焊接系统的工作频率在其声子晶体的方向带隙范围内时,在该方向弹性波传播得到一定的抑制,使得超声塑料焊接系统工具头的横向振动得到一定抑制。这说明设计圆柱形超声塑料焊接系统的工作频率在工具头的方向带

隙范围内,能有效地抑制横向振动,从而模态更单一,工具头端面的振动更加的均匀,并且提高了纵向振动的位移,实现圆柱形超声塑料焊接系统的优化设计。

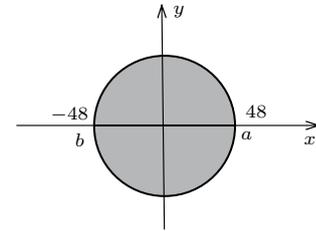


图8 超声塑料焊接系统工具头端面截线示意图

Fig. 8 Ultrasonic plastic welding machine tool head end face line drawing

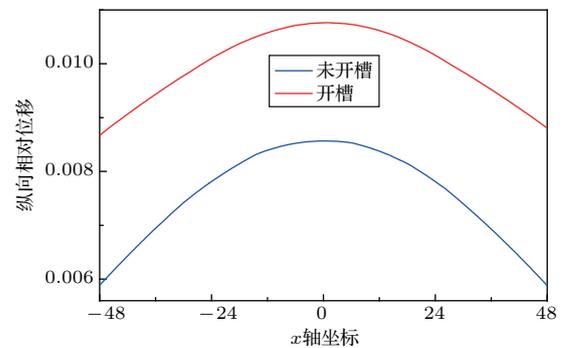


图9 圆柱形超声塑料焊接系统端面纵向位移

Fig. 9 Longitudinal displacement of the end face of a cylindrical ultrasonic plastic welding system

5 结论

本文对基于二维声子晶体结构的圆柱形超声塑料焊接系统进行了研究。利用在超声塑料焊接系统的工具头上加工具有周期性槽的方式形成二维声子晶体,使其横向耦合振动得到有效的抑制,从而使得纵向的振动模态更加的单一,论文分别讨论了圆柱形超声塑料焊接系统的工具头的带隙以及基于二维声子晶体结构的超声塑料焊接系统的振型与端面的纵振动位移。得出以下结论:

(1) 基于二维声子晶体结构的工具头存在明显的带隙,设计超声塑料焊接系统时可将工作频率设计在基于二维声子晶体结构的工具头的带隙范围附近。

(2) 对比未加工二维声子晶体结构槽以及加工二维声子晶体结构槽的圆柱形超声塑料焊接系统

的振型图以及工具头端面的位移分布图,我们发现二维声子晶体结构的圆柱形工具头端面的振幅得到明显的改善,形成较为均匀的振幅。

(3) 比较未加工二维声子晶体结构槽以及加工二维声子晶体结构槽的圆柱形超声塑料焊接系统工具头的纵振动位移图,可知二维声子晶体结构的圆柱形工具头的位移分布更加均匀,且纵向振动的振幅有明显的提高。

参 考 文 献

- [1] Tsujino J, Hongoh M, Yoshikuni M, et al. Welding characteristics of 27, 40 and 67 kHz ultrasonic plastic welding systems using fundamental- and higher-resonance frequencies[J]. *Ultrasonics*, 2004, 42(1-9): 131-137.
- [2] Rani M R, Rudramoorthy R. Computational modeling and experimental studies of the dynamic performance of ultrasonic horn profiles used in plastic welding[J]. *Ultrasonics*, 2013, 53(3): 763-772.
- [3] Hongoh M, Yoshikuni M, Miura H, et al. Configuration of a 30-mm-diameter 94 kHz ultrasonic longitudinal vibration system for plastic welding[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, 43(5B): 2896-2900.
- [4] 梁召峰, 周光平, 莫喜平, 等. 大尺寸圆柱形超声塑焊开槽焊头的设计 [J]. *机械强度*, 2010, 32(4): 617-621.
Liang Zhaofeng, Zhou Guangping, Mo Xiping, et al. Design of large cross-section cylindrical-type ultrasonic plastic welding horns with slots[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2010, 32(4): 617-621.
- [5] 林书玉, 张福成. 有限长各向同性圆柱体耦合振动的研究 [J]. *声学与电子工程*, 1993(1): 22-27.
Lin Shuyu, Zhang Fucheng. Study on coupled vibration of finite length isotropic cylinder[J]. *Acoustics and Electronics Engineering*, 1993(1): 22-27.
- [6] Liu S, Lin S. The analysis of the electro-mechanical model of the cylindrical radial composite piezoelectric ceramic transducer[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2009, 155(1): 175-180.
- [7] 唐一璠, 林书玉. LCR 分流电路下压电声子晶体智能材料的带隙 [J]. *物理学报*, 2016, 65(16): 104-112.
Tang Yifan, Lin Shuyu. Band gaps of the phononic piezoelectric smart materials with LCR shunting circuits[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2016, 65(16): 104-112.
- [8] 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.
Zhang Siwen, Wu Juhui. Low-frequency band gaps in phononic crystals with composite locally resonant structures[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2013, 62(13): 134302.
- [9] Wang G, Wen X, Wen J, et al. Two-dimensional locally resonant phononic crystals with binary structures[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(15): 154302.
- [10] Villa-Arango S, Torres R, Kyriacou P A, et al. Fully-disposable multilayered phononic crystal liquid sensor with symmetry reduction and a resonant cavity[J]. *Measurement*, 2017, 102: 20-25.
- [11] Vasseur J O, Deymier P A, Djafarirouhani B, et al. Absolute forbidden bands and waveguiding in two-dimensional phononic crystal plates[J]. *Physical Review B Condensed Matter*, 2008, 20(8): 439-446.
- [12] Binci L, Tu C, Zhu H, et al. Planar ring-shaped phononic crystal anchoring boundaries for enhancing the quality factor of Lamb mode resonators[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(20): 2596-2512.
- [13] 郁殿龙, 刘耀宗, 邱静, 等. 一维声子晶体振动特性与仿真 [J]. *振动与冲击*, 2005, 24(2): 92-94, 152.
Yu Dianlong, Liu Yaozong, Qiu Jin, et al. Vibration property and simulation of one dimension phononic crystals[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2005, 24(2): 92-94, 152.
- [14] 温熙森. 声子晶体 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [15] Ronda S, Aragón J L, Iglesias E, et al. The use of phononic crystals to design piezoelectric power transducers[J]. *Sensors*, 2017, 17(4): 729.
- [16] Aragón J L, Quinterotorres R, Domínguezjuárez J L, et al. Planar modes free piezoelectric resonators using a phononic crystal with holes[J]. *Ultrasonics*, 2016, 71: 177-182.
- [17] Lucklum R, Ke M, Zubtsov M. Two-dimensional phononic crystal sensor based on a cavity mode[J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2012, 171-172(9): 271-277.
- [18] Wang N, Tsai J M, Hsiao F L, et al. Experimental investigation of a cavity-mode resonator using a micro-machined two-dimensional silicon phononic crystal in a square lattice[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2011, 32(6): 821-823.