

# 一种新型声学超材料平板对机械波吸收性能的模拟与实验研究\*

孙宏伟<sup>1)†</sup> 林国昌<sup>1)</sup> 杜星文<sup>1)</sup> P.F. Pai<sup>2)</sup>

1) (哈尔滨工业大学特种环境复合材料技术国防科技重点实验室, 哈尔滨 150001)

2) (Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Missouri, Columbia, MO 65211, USA)

(2011 年 9 月 19 日收到; 2012 年 1 月 15 日收到修改稿)

基于质量 - 弹簧微结构通过光学振动模式对机械波进行选择吸收的原理, 本文设计了一个由集中质量与弹性薄膜构成的二维声学超材料等效平板结构. 利用有限元法对等效平板代表性胞元的振动特性模拟结果表明, 二维超材料平板结构表现出与质量 - 弹簧微结构相同的振动模式. 基于模拟结果, 制作加工了一个正方形超材料平板, 并通过 Polytec 扫描式激光测振仪 (PSV) 对其振动特性进行了试验测试, 结果表明, 本文设计制作的超材料平板可以对频率 157.5 Hz 的机械波进行选择吸收.

**关键词:** 质量 - 弹簧微结构, 光学振动模式, 机械波, 声学超材料等效平板

**PACS:** 43.40.+s

## 1 引言

声学超材料的概念最初是由 Liu 等人<sup>[1]</sup> 在研究局部共振声学材料时提出的, 他们从理论、数值模拟以及实验等多个方面论述了具有负有效体积模量的声学超材料. Sheng 等人<sup>[2]</sup> 通过对局部共振声学材料的周期性结构研究, 得到了从毫米到厘米级具有声波阻频带的微结构. Li 和 Chan<sup>[3,4]</sup> 应用 Berryman<sup>[5]</sup> 提出的有效质量和有效密度的概念, 得到了具有有效体积模量和有效质量密度同时为负的结论. 所得到的负的质量密度意味着, 如果在集中质量上作用力的方向向左, 那么得到的在集中质量上的加速度方向则向右. 由于材料结构的特殊性, 才在宏观上得到作用力的方向与集中质量上面产生的加速度的方向相反的结论. 在同一年, Hirsekorn<sup>[6]</sup> 利用局部相互作用的方法重复了 Liu 的实验结果, 同时提出了一个一阶共振晶格模型. Liu 等人<sup>[2]</sup> 在 2005 年阐述了由 3 个组分构成的复

合声子晶体共振器在低频下的有效质量密度, 同时论述了当频率接近共振频率时, 有效的质量密度可以变为负值. 2007 年, Milton 和 Willis<sup>[7]</sup> 对 Liu 等人提出的模型进行了改进, 使得在确定频率下其有效质量密度也可以为负值. 2009 年, Huang 等人<sup>[8]</sup> 提出了由双质量块和理想弹簧构成胞元, 再由胞元周期性排列构成的声学超材料模型.

目前对声学超材料大多集中于一维杆结构的超材料<sup>[9,10]</sup>, 这些一维超材料中使用的胞元微结构通常由集中质量与理想弹簧构成. 这种胞元微结构可以产生一个有效带隙 (stop band)<sup>[6,11]</sup>, 使某一个频率范围内的声波无法向前传播, 例如文献 [12] 中提出的一种一维超材料梁便可以对沿着梁方向的特定机械波进行吸收. 本文在文献 [12] 的研究基础上, 提出了一种新型的二维超材料平板, 所提出的声学超材料平板结构可以吸收与板方向垂直的机械波, 其原理图如图 1 所示.

本文第 2 节首先简述了质量 - 弹簧微结构对机械波进行吸收的光学振动模式; 第 3 节基于质量 -

\* 中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: HIT.KLOF.2010027) 资助的课题.

† E-mail: sunhw@hit.edu.cn

弹簧微结构吸收机械波的原理, 提出了一个二维声学超材料平板模型, 并通过有限元方法模拟了二维超材料平板对机械波的吸收; 第4节根据所提出的超材料平板模型, 加工制作了一个正方形超材料平板, 并通过扫描式激光测振仪对其吸收机械波的性能进行了试验测试研究.

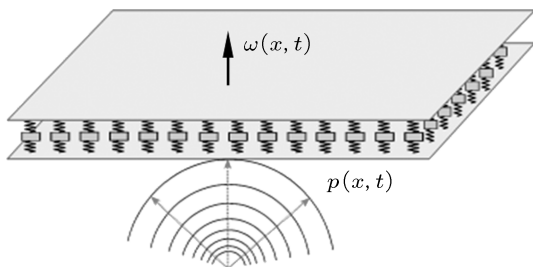


图1 超材料平板结构原理图

## 2 质量 - 弹簧微结构振动特性

文献 [12] 中提出了一个质量 - 弹簧微结构模型, 如图2所示. 当质量 - 弹簧微结构受谐振力  $F(t) \equiv F_0 e^{j\omega_0 t}$  激励作用时 (其中  $t$  代表时间,  $\omega_0$  是激励频率,  $j = \sqrt{-1}$ ), 定义其有效刚度  $\tilde{k}_1$  为

$$\tilde{k}_1 \equiv \frac{F}{u_1} = \frac{F_0}{a_1} = k_1 + \frac{k_2}{1 - \omega^2/\omega_0^2},$$

$$\omega \equiv \sqrt{\frac{k_2}{m_2}},$$
(1)

式中,  $\omega$  是质量 - 弹簧系统的局部共振频率.

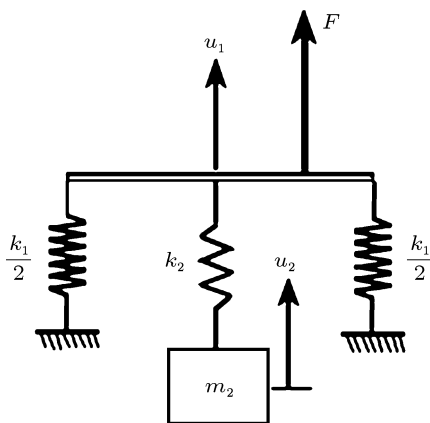


图2 质量 - 弹簧微结构 [12]

在谐振力  $F(t) \equiv F_0 e^{j\omega_0 t}$  激励作用下, 质量 - 弹簧微结构模型发生振动, 其振动模式分

为两种: 一种是声学振动模式, 即  $u_1(t)$  和  $u_2(t)$  同相, 需要满足的条件是  $\omega_0 < \omega$ , 且  $\tilde{k}_1 > 0$  和  $\tilde{k}_1(1 - \omega_0^2/\omega^2) > 0$  (或者  $\omega_0 < \omega$ , 且  $\tilde{k}_1 < 0$  和  $\tilde{k}_1(1 - \omega_0^2/\omega^2) < 0$ ); 另一种是光学振动模式,  $u_1(t)$  和  $u_2(t)$  反向, 需要满足的条件是  $\omega_0 > \omega$ , 且  $\tilde{k}_1 > 0$  和  $\tilde{k}_1(1 - \omega_0^2/\omega^2) < 0$ .

在声学模式振动中,  $u_1(t)$  的振动幅度不会被  $u_2(t)$  的振动所抑制, 此时质量 - 弹簧微结构不会对机械波进行选择吸收. 当振动模式为光学模式时, 由于  $u_2(t)$  的振动相位与  $u_1(t)$  相位相反,  $u_1(t)$  的幅度会得到显著的抑制, 从而实现在光学振动模式下对机械波的选择吸收.

## 3 有限元模拟

基于质量 - 弹簧微结构模型, 本文设计了一个声学超材料平板的等效模型 (如图3所示), 此超材料平板等效模型由硬质平板、弹性薄膜和集中质量构成. 其中, 该等效模型中的集中质量  $m$  相当于质量 - 弹簧子系统的质量  $m_2$ , 而弹性薄膜则相当于质量 - 弹簧子系统弹簧系统. 声学超材料平板等效模型中的有关参数 (如集中质量  $m$  及弹性薄膜的力学参数) 与质量 - 弹簧微结构模型中相关参数之间的关系未在本文中给出, 将在今后进一步研究.

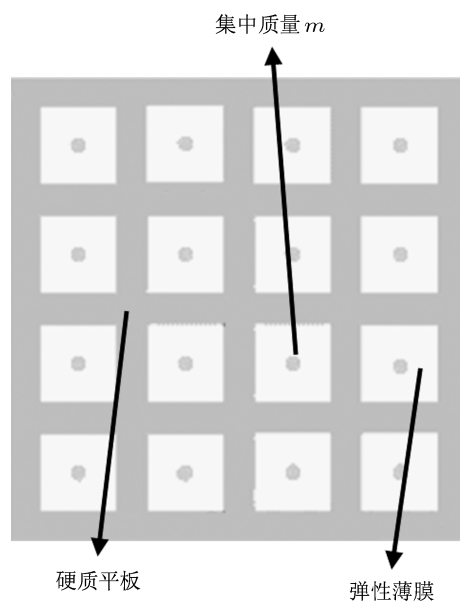


图3 声学超材料平板结构模型

本节的主要目的是通过此等效平板模型, 从数

值模拟 (即有限元模拟) 与试验测试两方面验证本文提出的质量 - 弹簧微结构对机械波振动吸收的有效性.

由于图 3 所示的声学超材料平板模型为周期性结构, 因此在有限元模拟中, 可以以组成结构的胞元为研究对象, 也就是由橡胶薄膜和集中质量组成的结构胞元 (图 4(a) 所示), 其有限元模型如图 4(b) 所示. 由于硬质平板的刚性远远大于弹性薄膜, 因此将硬质平板看成刚体, 弹性薄膜结构四周做固支处理. 有限元模拟通过 Matlab 自编写的程序进行, 胞元的结构尺寸取为  $60\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ ; 弹性薄膜采用橡胶薄膜, 其厚度  $h = 0.5\text{ mm}$ , 杨氏模量  $E = 2 \times 10^5\text{ Pa}$ , 泊松比为  $\nu = 0.49$ , 密度为  $\rho = 980\text{ kg/m}^3$ ; 质量块直径取  $6\text{ mm}$ , 重量  $0.3\text{ g}$ .

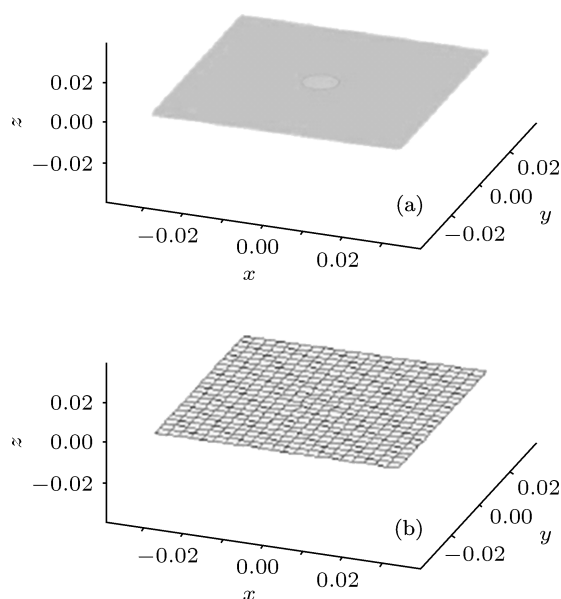


图 4 声学超材料平板 (a) 胞元模型; (b) 有限元模型

图 5 给出了平板胞元结构在第一阶频率 ( $74.382\text{ Hz}$ ) 下的振型, 从图上可以看出, 集中质量  $m$  的振动方向与薄膜的振动方向同相位, 这说明平板胞元对应的振动形式为声学模式. 当传播的声波频率在  $74\text{ Hz}$  附近时, 声学超材料平板不会对其产生吸收.

图 6 给出了平板胞元结构在第五阶频率 ( $162\text{ Hz}$ ) 下的振型, 从图中可以看出, 薄膜的振动方向与集中质量块的振动方向相反 (即  $180^\circ$  反相位), 这说明平板胞元对应的振动形式为光学模式, 也就是说当传播的声波频率在  $162\text{ Hz}$  附近时,

声学超材料平板会对其产生吸收作用.

通过有限元模拟表明, 本文提出的声学超材料平板模型具有两种振动模式: 声学振动模式和光学振动模式, 其中, 光学振动模式可以对机械波进行有效吸收. 从这一点出发, 可以通过光学振动模式来设计具有实际应用价值的声学超材料平板结构.

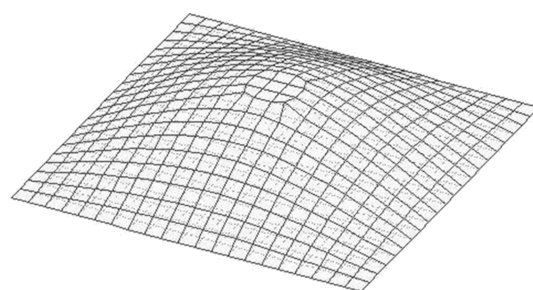


图 5 平板胞元的声学振动模式

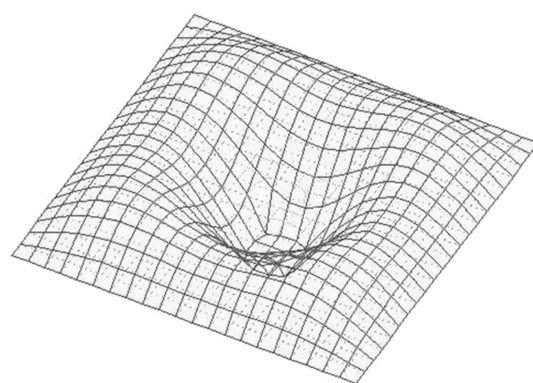


图 6 平板胞元的光学振动模式

## 4 实验研究

### 4.1 声学超材料平板的制作

根据第 3 节中提出的声学超材料平板模型, 选择两片正方形的 FRPP 平板制作成支撑框架. 每块平板上加工 16 个  $60\text{ mm} \times 60\text{ mm}$  的方形开口, 在两块板中间夹持天然橡胶薄膜, 由于薄膜的透气性趋近于零, 可以阻隔平板两边的气流. 橡胶薄膜的密度  $\rho = 980\text{ kg/m}^3$ , 弹性模量  $E = 2 \times 10^5\text{ Pa}$ , 泊松比  $\nu = 0.49$ . 通过薄膜的初始预应力的调节, 等效于调节质量 - 弹簧系统中的弹簧刚度. 在橡胶薄膜中心部位添加一个集中质量  $m$ , 质量  $m$  可以使

用胶黏剂粘贴,但是胶黏剂的收缩会导致薄膜内部应力场的改变,因此这里选用两片磁性材料作为集中质量,将两片磁性材料分别置于橡胶薄膜两侧的中心,通过磁力作用粘在一起.集中质量  $m$  的直径为 6 mm,重量为 0.3 g.图 7 便是制作完成的声学超材料平板.

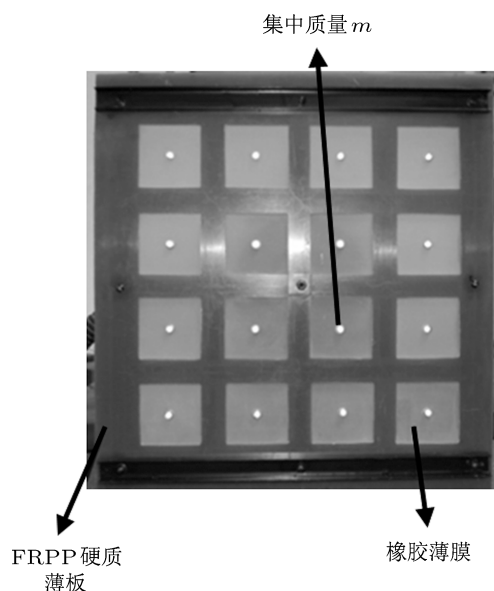


图 7 试验用的声学超材料平板

## 4.2 试验装置

此次实验的目的是验证所制作的声学超材料平板对一定频率的机械波具有吸收的能力.

试验中,利用紧固螺栓将超材料平板结构件固定在激振器上,激振器可以提供频率连续变化的激励力.通过水平尺对超材料平板进行调节,这样就构建了被测机构.试验中采用 Polytec 描式式激光测振仪 (PSV) 对声学超材料平板的振动形式进行测量,图 8 是实验测试系统示意图.实验测试中,周边空气密度  $\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,压力  $P = 1.0 \text{ atm}$  ( $1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ ),声速  $c = 340 \text{ m/s}$ .

## 4.3 测量结果与分析

通过 Polytec 激光测振系统对图 7 试件进行测试,首先应用 FFT 来测试试件的基本振型,采集频率范围为 0—2000 Hz.扫频的实验结果如图 9 所示:

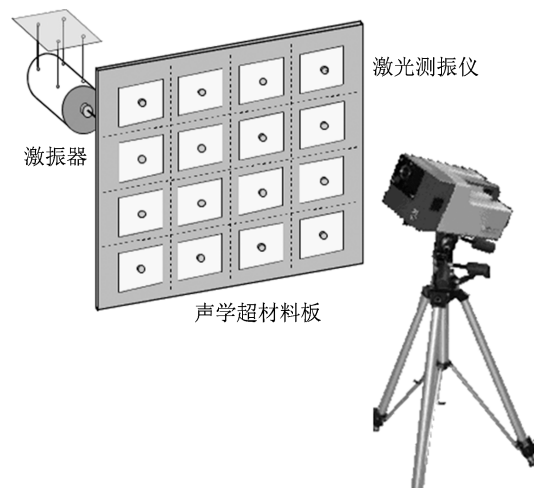


图 8 实验示意图

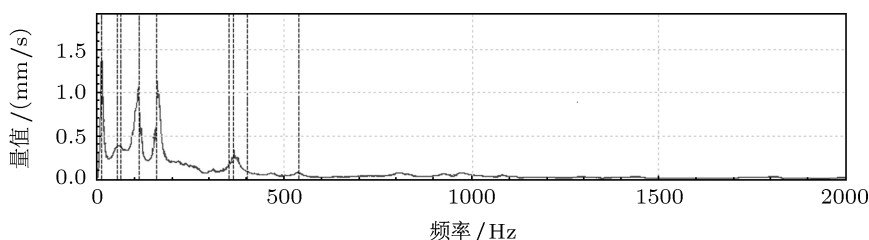


图 9 0—2000 Hz 扫频测试结果

通过 Polytec 自带的分析测试软件可得,振动峰值出现在 10.63 Hz, 67.50 Hz, 71.88 Hz, 107.6 Hz, 157.5 Hz, 351.9 Hz, 368.1 Hz, 401.9 Hz 和 540.0 Hz.根据扫描结果分析得出,声学超材料平板结构试件

中薄膜面内集中质量共发生两次共振,其频率分别为 67.5 Hz 和 157.5 Hz. 67.5 Hz 的振型如图 10 所示,可以看出集中质量和薄膜朝一个方向振动,因此是声学振动模式;而 157.5 Hz 的振型如图 11 所

示,集中质量和薄膜振动方向相反,因此是光学振动模式.由于加工制作过程可能引入各种误差和缺陷,因此导致试验结果与第3节中的有限元模拟结果存在一定的偏差.

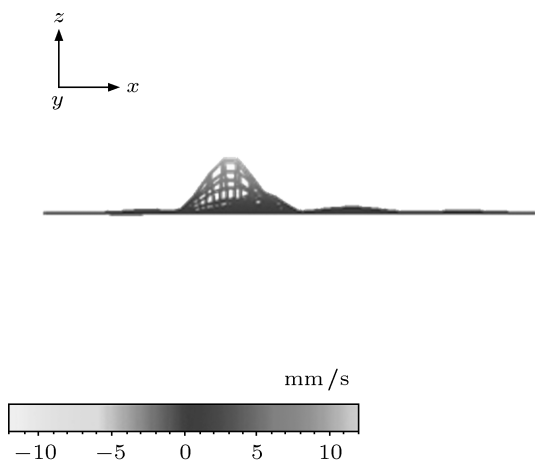


图10 频率为 67.5 Hz 时振型

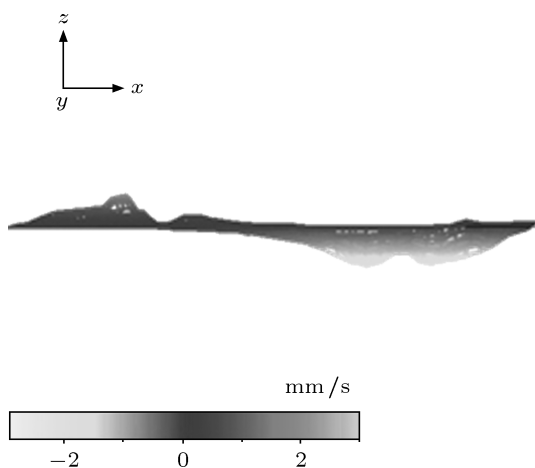


图11 频率为 157.5 Hz 时振型

为了进一步验证两种共振形式的存在,选取激励频率 67.5 Hz 和 157.5 Hz 重复上面实验.图12给出了激励频率在 67.5 Hz 时的振型,从图中可以看出声学振动模式更加明显,即集中质量  $m$  与薄膜振动方向同向.

在图12中已经通过固定频率激励验证了声学模式的存在,采用同样的办法,即当激励频率为 157.5 Hz 时,图13给出了3D振型结果,从图中可以更加清晰地看出,集中质量  $m$  的振动位移方向

与薄膜的振动位移方向为  $180^\circ$  反相,即为光学振动模式.

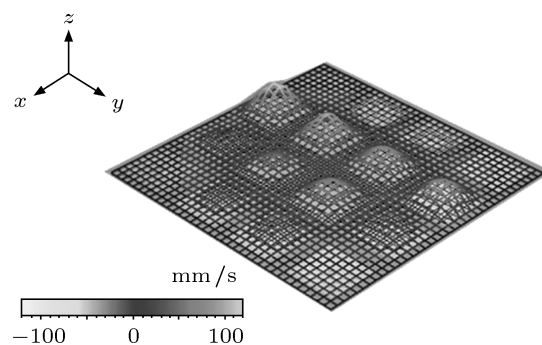


图12 在 67.5 Hz 激励下的振型

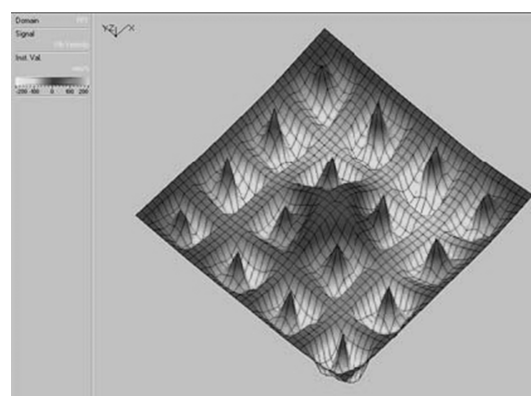


图13 在 157.5 Hz 激励下的振型

本节通过试验研究了声学超材料等效平板对机械波的振动吸收特性,结果表明,等效平板结构具有质量-弹簧微结构的声学振动与光学振动模式.在今后的研究中,若建立声学超材料等效平板结构有关参数与质量-弹簧微结构相关参数之间的关系模型,可以通过有针对性的选择等效平板中的集中质量  $m$  与弹性薄膜的弹性参数,设计出具有对某种频率机械波进行吸收的声学超材料平板.

## 5 结论

基于质量-弹簧微结构模型,本文提出了一个由集中质量和弹性薄膜构成的二维声学超材料等效平板,并通过有限元模拟与试验测试分析了等效平板对机械波振动吸收特性.有限元模拟与试验测试结果表明,由集中质量和弹性薄膜构成的声学超

材料平板具有与质量 - 弹簧微结构相同的声学振动模式和光学振动模式.

本文的研究为构建二维声学超材料提供了一个思路, 即通过合理选择等效平板中的集中质量  $m$

与弹性薄膜, 便可以制作出对不同频率机械波具有吸收的声学超材料. 但前提是建立声学超材料等效平板结构有关参数与质量 - 弹簧微结构相关参数之间的关系模型, 这将在今后进一步开展研究.

- 
- [1] Liu Z, Zhang X, Mao Y 2000 *Sci.* **289** 1734
  - [2] Liu Z, Chan C T, Sheng P 2005 *Phys. Rev. B* **71** 014103
  - [3] Chen H, Chan C T 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 183518
  - [4] Li J, Chan C T 2004 *Phys. Rev. E* **70** 055602
  - [5] Berryman J G 1980 *J. Acoust. Soc. Am.* **68** 809
  - [6] Hirsekorn M 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 17
  - [7] Milton G W, Briane M, Willis J R 2006 *New J. Phys.* **8** 248
  - [8] Huang H H, Sun C T 2009 *Int. J. Eng. Sci.* **47** 610
  - [9] Ding C L, Zhao X, P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6351 (in Chinese)  
[丁昌林, 赵晓鹏 2009 物理学报 **58** 6351]
  - [10] Sheng P, Zhang X X, Liu Z, Chan C T 2003 *Physica B* **338** 201
  - [11] Diaz A R, Haddow A G, Ma L 2005 *Struct. Multidiscip. O.* **29** 418
  - [12] Lin G C, Sun H W, Tan H F, Du X W 2011 *Acta. Phys. Sin.* **60** 034302 (in Chinese) [林国昌, 孙宏伟, 谭惠丰, 杜星文 2011 物理学报 **60** 034302]

# Simulation and experimental study of a metamaterial panel for mechanical wave absorption\*

Sun Hong-Wei<sup>1)†</sup> Lin Guo-Chang<sup>1)</sup> Du Xing-Wen<sup>1)</sup> P.F. Pai<sup>2)</sup>

1) (Key Laboratory of Science and Technology for National Defence, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

2) (Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Missouri, Columbia, MO 65211, USA)

(Received 19 September 2011; revised manuscript received 15 January 2012)

## Abstract

Based on the mechanical wave selective absorption principle of mass-spring microstructures by the optical vibration mode, a two-dimensional acoustic metamaterial panel consisting of lumped mass and elastic membrane is presented. The vibration characteristic simulation of the metamaterial equivalent panel representative cell is performed using the finite element method and the results indicate that the presented 2D metamaterial panel behaves just like regular mass-spring microstructures. Under the guidance of the simulation results, a square metamaterial panel is fabricated and its vibration characteristics are examined using a Polytec scanning laser vibrometer. The test results indicate that the metamaterial panel can efficiently absorb mechanical waves of about 157.5 Hz.

**Keywords:** mass-spring microstructure, optical vibration mode, mechanical wave, acoustic metamaterial equivalent panel

**PACS:** 43.40.+s

---

\* Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. HIT.KLOF.2010027).

† E-mail: sunhw@hit.edu.cn