

超结构夹芯板及其低宽频振动带隙机理

李锁斌^{1,2}, 魏儒义², 周安安², 李丽霞³, 何彦斌⁴, 李欣⁵

(1. 西安石油大学机械工程学院, 710065, 西安; 2. 中国科学院光谱成像技术重点实验室, 710119, 西安;
3. 西安建筑科技大学机电工程学院, 710055, 西安; 4. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安;
5. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 710018, 西安)

摘要: 针对厚板类结构的低频减振问题, 将超材料/结构概念引入夹芯板中, 提出了一种夹芯型超板——超结构夹芯板, 其结构主要由夹芯型周期基板和内嵌于其中的夹芯型周期振子组成, 具有轻质、高刚度、厚尺度和低宽频振动带隙特性。对其减振机理进行理论研究发现: 夹芯型周期基板的振动模式与夹芯振子的振动模式依据模态叠加原理分别主导系统响应, 当二者的主模态相互耦合时, 振子通过抑制夹芯型周期基板的主模态, 使夹芯型超板中不产生波传播模式, 形成振动带隙; 夹芯振子的刚度模式是影响带隙特性的主要因素, 当其为混合刚度模式时, 可实现带隙位置和带隙宽度一起调节, 形成低宽频振动带隙。仿真结果表明: 所设计的夹芯振子具有串并联刚度特性, 致使振子中出现了两种刚度模式, 分别对带隙位置和带隙宽度同时进行调节, 最终于低频处将完全带隙扩宽了7倍。实验结果表明, 所提出的夹芯型超板集夹芯板与超材料/结构二者优点于一体, 实现了力学承载和低频带隙减振的统一, 具有较好的低宽频减振特性, 为厚板类结构的低频减振提供了新思路与方法。

关键词: 夹芯板; 超结构; 振动带隙; 低频减振; 超材料

中图分类号: TH113.1 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202104009 **文章编号:** 0253-987X(2021)04-0077-09



OSID 码

A New Sandwich Type Metamaterial Plate and Its Mechanism of Low-Frequency Broad Vibration Band Gap

LI Suobin^{1,2}, WEI Ruyi², ZHOU Anan², LI Lixia³, HE Yanbin⁴, LI Xin⁵

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2. Key Laboratory of Spectral Imaging Technology of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China; 3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 4. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 5. National Engineering Laboratory of Low Permeability Oil and Gas Field Exploration and Development, Xi'an 710018, China)

Abstract: The concept of metamaterial is introduced into sandwich plates to solve the low frequency vibration reduction problem of thick plate structure, and a type of sandwich type metamaterial plate is proposed and theoretically studied. The structure of the proposed plate is mainly composed of sandwich type periodic base plate and embedded with sandwich type periodic vibrator, so it has the characteristics of light weight, high rigid, thick scale and low broadband vibration band gap. The generation mechanism of low frequency broadband vibration band gap in sandwich type metamaterial plate is studied by using a finite element method (FEM). It is found

收稿日期: 2020-11-04。 作者简介: 李锁斌(1984—),男,博士,讲师。 基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2019JQ-464, 2017JM5095); 中国科学院光谱成像技术重点实验室开放基金资助项目(LSIT202007W)。

网络出版时间: 2020-12-03

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20201203.1019.002.html>

that the local resonance mode of the sandwich type vibrator and the Lamb wave mode of the sandwich type periodic base plate respectively dominate the system response according to the modal superposition principle. When the main modes of the plate and vibrator are coupled to each other, the vibrator suppresses the main modes of the sandwich periodic base plate to make the waveless propagation mode in the sandwich plate to form vibration band gaps. The equivalent stiffness of the sandwich type vibrator is the main factor affecting the characteristics of the band gap, and when it is a mixed stiffness mode, the position and width of the band gap can be adjusted together to form a low broadband vibration band gap. Simulation results show that the designed sandwich vibrator has the characteristics of serial-parallel stiffness, resulting in two equivalent stiffness modes in the vibrator. The two modes adjust the position and width of the band gap respectively at the same time, and finally widen the complete band gap by 7 times at low frequencies. Experimental results show that this type of plate has a good low broadband vibration damping characteristic. The proposed sandwich superplate integrates the advantages of sandwich plate and meta-material/structure, realizes the unification of mechanical bearing and low-frequency band gap vibration reduction, and provides a new idea and method for low-frequency vibration reduction of thick plate structure.

Keywords: sandwich plate; metamaterial structure; vibration band gap; low frequency vibration reduction; metamaterial

超构材料(metamaterials)作为21世纪一种新的人工智能材料概念,已发展成为一个具有重要工程应用价值和广泛应用前景的前沿科学领域。超构材料虽以材料命名,但实际是一种特殊的人工合成结构^[1-4],通过对其关键子结构的微妙设计,使其在动态响应时可获得自然界材料/结构所不具备的、超常规的、全新的等效物理性质^[5-8],如振动带隙特性,即当振动波通过时,特定频率范围的振动会被抑制。因此,应用超构材料的带隙方法,将大尺度工程结构(如隔振器件或工程结构本身)设计成超结构,利用其自身的振动带隙特性来实现减振,为抑制工程中的有害振动提供了一种全新的思路和方法。

板类结构作为工程中最常用的基本支撑防护单元构件,是产生和传递振动的主要载体和导体,也是噪声的主要传入路径与直接辐射声源,一直以来被看作工程结构振动控制领域里的主要减振对象,需要其具备高比刚度的同时还兼具减振降噪功能。

基于传统减振方法的不足^[9],近年来,人们提出应用超构材料带隙的减振思路,即把板设计成超板(metamaterial plate)^[9-20],通过对其关键子结构的巧妙设计,使其具有自然板不具备的全新物理性质——振动带隙特性,目前已有大量新型结构提出,归纳起来主要有两种:一种为通过在周期性开孔板中填充软材料^[12],或在板面上周期性布置各种吸振器^[10,11,13-14,16-17],或在基板中阵列各种压电材料^[18-20]

而形成的单面型超板;另一种为通过在双层板间周期性布置由软硬材料构成的振子而形成的双面型超板^[15]。然而,这类方法只适用于薄板类结构,无法对厚板类结构进行减振设计,即在保持厚板结构高刚度的同时尽量减小结构质量,使其形成低宽频振动带隙物理特性。

因此,如何解决轻质高刚度厚尺寸板结构在低宽频范围内的振动控制问题,仍然是目前工程振动控制领域里急需突破的一项关键技术。

夹芯板作为一种周期复合结构,原理如图1所示,具有天然的轻质、高刚度、尺寸较厚等结构特点,却不具备全新的振动带隙特性。

是否存在一种新型板,不仅具有夹芯结构的高比刚度等结构特性,同时还具有超结构的带隙特性,即在满足质轻、刚度高、尺度厚等结构特点的同时,还能形成低宽频振动带隙,实现高比刚度、厚尺度和低宽频减振三者的统一。

本文基于超结构理论,结合夹芯结构概念,提出

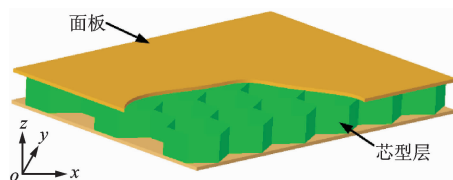


图1 夹芯板

Fig. 1 Schematic of sandwich plate

了夹芯设计减振超结构的思想和方法:将超材料/结构概念引入夹芯板中,通过构建夹芯周期基板(夹芯板)和夹芯振子的方法,获得一种新型减振板——超结构夹芯板/夹芯型超板(本文统称为夹芯型超板);基于此,通过设计一种夹芯型超板结构,在对其带隙特性和形成机理研究的基础上,提出夹芯型超板结构低宽频振动带隙的形成机理,寻求一种带隙调节方法,以便获得能满足工程实际需要的各种低宽频带隙。该研究可为超构材料在工程实际减振中的应用提供方法突破,为厚板类结构的低频减振提供新思路和方法。

1 理论模型及能带计算方法

基于夹芯设计思想,设计了一种夹芯型超板,该结构的形成原理如图 2 所示,其中图 2a 表示夹芯型超板形貌,夹芯型超板是在夹芯型周期基板空腔中周期性地填入夹芯型振子而成;图 2b 表示夹芯型超板的超单元示意图(剖视图);图 2c 表示夹芯型周期基板,图 2d 表示夹芯型周期基板夹芯基单元的形成过程,图 2e 表示夹芯型振子的形成过程。

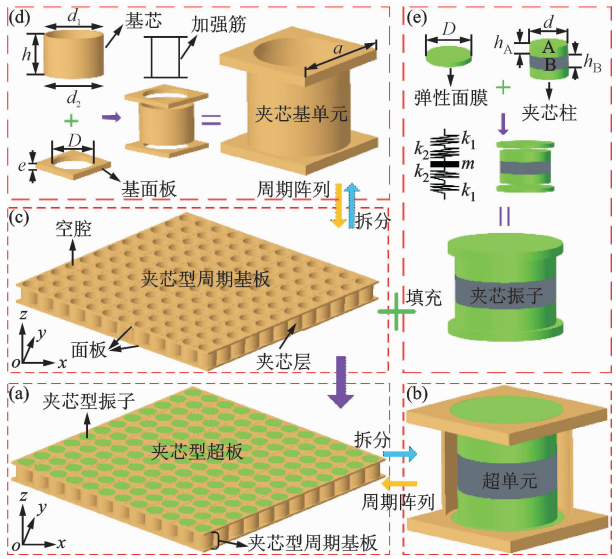


图 2 夹芯型超板结构及其形成原理

Fig. 2 Illustration of the proposed metamaterial plate

夹芯型周期基板由夹芯基单元沿 x 、 y 方向通过周期性阵列而成,结构原理如图 2c 所示,其结构由上下面板、周期性夹芯层及其形成的周期性空腔组成。夹芯基单元由基面板夹基芯构成,结构形成过程原理如图 2d 所示,其中基面板为开孔薄板结构,其厚度为 e ,边长为 a ,孔径为 D ;基芯可为蜂窝结构、泡沫结构甚至点阵结构,为方便分析,该结构中采用薄壁圆柱管结构,沿长度方向具有较大刚度,

起支撑加强作用,其内外径分别为 d_1 和 d_2 ,高为 h 。相比薄壁板/管构件,由开孔基面板夹圆柱管基芯组成的夹芯基单元沿单元厚度方向具有较高刚度;同时,构成夹芯型周期基板的开孔型面板和圆柱管型基芯均为薄壁构件,如壁板厚度可小至 1 mm 及以下,但形成的夹芯型周期基板其板厚却相对较大,板厚度可为 1cm 及以上,于是形成了典型的小尺度/薄壁结构构建大尺度/厚壁结构。因此,通过周期性阵列夹芯基单元构建的夹芯型周期基板为一种夹芯板,具有比刚度高等结构特点。该结构可通过 3D 打印成型,所打印的环氧树脂样板如图 3 所示。

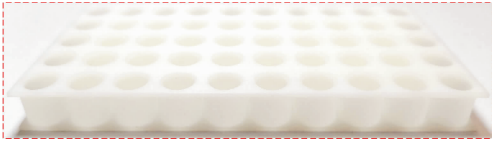


图 3 基于 3D 打印的夹芯型周期基板(5×10)

Fig. 3 Schematic of the sandwich periodic substrate based on 3D printing

夹芯型振子单元由 2 层轻质弹性面膜夹住夹芯柱而成,结构形成过程原理如图 2e 所示,夹芯柱又由轻质弹性表柱 A 和夹芯柱 B 构成,其中弹性面膜相当于弹簧(刚度为 k_1),其直径为 d ,厚度为 e ;表柱 A 和夹芯柱 B 的直径同为 d ,高分别为 h_A 和 h_B ,且分别由轻质弹性材料和高密度材料组成,因此构成的夹芯型振子等价于一个兼具串并联特性的等效质量弹簧系统,其中表柱 A 相当于弹簧(刚度为 k_2),与弹性面膜相互串联形成串联弹簧,夹芯柱 B 相当于块(质量为 m)。该振子结构可通过 3D 打印成型,所打印的样件如图 4 所示,其中弹性面膜和表柱 A 用 8400N 软胶打印,夹芯柱 B 用 316L 钢打印,二者粘接成型。



图 4 基于 3D 打印的夹芯振子样件

Fig. 4 Samples of the sandwich vibrator based on 3D printing

综上所述,夹芯型超板是由超单元沿 x 、 y 方向周期性阵列而成,其中超单元是将夹芯型振子装配于夹芯基单元空腔中形成,夹芯柱悬空于夹芯基单元的空腔内,超单元边长(晶格常数)为 a 。3D 打印的夹芯型超板样件如图 5 所示。

基于周期性理论^[2],以如图 2b 所示的超单元为

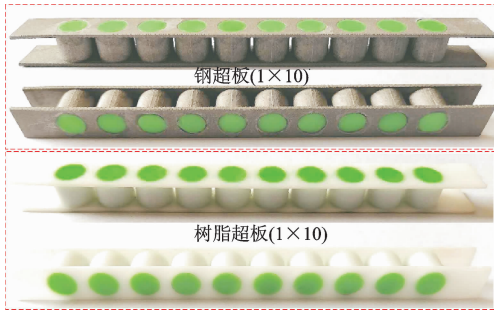


图 5 基于 3D 打印的夹芯型超板样件(1×10)
Fig. 5 Samples of the proposed metamaterial plate based on 3D printing

研究对象,采用有限元方法计算夹芯型超板的能带结构和超单元的振动位移云图,在分析其带隙特性基础上,提出并阐明夹芯型超板中振动带隙的形成机理。计算过程中,在超单元周期方向施加布洛赫周期性边界条件

$$u_i(x+a,y+a) = e^{i(k_x a + k_y a)} u_i(x,y) \tag{1}$$
$$i = x,y,z$$

式中: u 表示位移; k_x 与 k_y 分别表示第一布里渊区内周期性波矢。当波矢沿着第一不可约布里渊区的边界方向进行扫描时,通过计算各个波矢下结构的固有频率和固有振型,最终可得到夹芯型超板的能带结构图和超单元的模态位移云图。

为了进一步说明夹芯型超板的带隙机理,采用有限元方法计算了由 6×6 个超单元沿 xoy 平面组成的有限夹芯型超板结构振动传输谱,在结构一端施加加速度激励信号,从另一端拾取加速度响应信号,并通过式(2)得到有限结构的传输谱

$$T_L = 10\log(\alpha_o/\alpha_i) \tag{2}$$

式中: α_o 和 α_i 表示输出与输入加速度。依次改变激励频率最终得到夹芯型超板的振动传输谱。

2 带隙特性分析

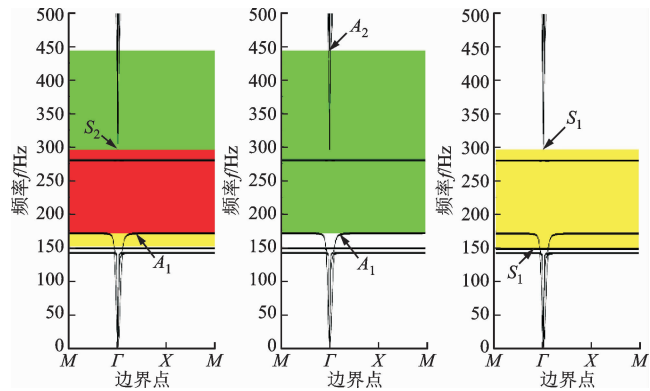
选取超单元参数为 10 mm(超单元的长宽高均为 10 mm),基面板厚 e 为 1 mm,开孔直径为 7 mm,圆柱管基芯壁厚为 0.5 mm,内径为 8.25 mm,高为 8 mm,弹性面膜厚为 1 mm,直径为 7 mm,表柱 A 直径为 5 mm,高为 2.5 mm,夹芯柱 B 直径为 5 mm,高为 3 mm。结构中面板和圆柱管基芯采用环氧树脂,面膜和表柱 A 采用橡胶,夹芯柱 B 采用钢,材料参数如表 1 所示。

计算如图 2b 所示的一个超单元,得到夹芯型超板的能带结构,如图 6 所示。从能带结构中可以看出:在 0~500 Hz 频率范围内,能带主要由结构纵向

表 1 结构材料参数

Table 1 Material parameter values used in the calculations

材料	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E/MPa	ν
环氧树脂	1 180	4 350	0.367 9
钢	7 800	210 000	0.290 0
橡胶	1 300	0.117 5	0.470 0



(a) 完全带隙 (b) 面外子带隙 (c) 面内子带隙
图 6 夹芯型超板能带结构

Fig. 6 Band structures of the proposed metamaterial plate

振动模式形成的面内波能带、横向振动模式形成的面外波能带和局域共振模式形成的平直能带 3 种能带组成,说明夹芯型周期基板中可形成面内和面外两种振动模式,其中,面内振动模式主要为夹芯型周期基板的纵向振动模式,如图 6c 中能带 S_2 的振动模式为夹芯型周期基板的纵向振动模式,面外振动模式主要为夹芯型周期基板的横向振动模式,如图 6b 中能带 A_2 的振动模式,为夹芯型周期基板的横向振动模式;局域共振模式主要为夹芯振子的振动模式,包括:可以和夹芯型周期基板振动模式耦合的局域振动模式,如图 6 中能带 S_1 、 A_1 的振动模式;不能跟夹芯型周期基板振动模式耦合的振动模式,如图 6 中形成平直能带的振子振动模式。

夹芯型周期基板和夹芯振子的两种振动模式依据模态叠加原理,在主导系统主模态的过程中相互耦合,耦合过程中夹芯振子的振动模式通过抑制夹芯型周期基板主模态,使得夹芯型超板中产生了只能抑制面外波的面外子带隙和只能抑制面内波的面内子带隙两种带隙,分别如图 6b 中绿色区域和图 6c 中黄色区域所示,两种子带隙叠加形成完全带隙,如图 6a 中红色区域所示,带隙内夹芯型超板中的所有振动模式均被抑制。

图 6b 中,由夹芯型周期基板的面外振动模式 A_2 与振子的局域共振模式 A_1 相互耦合而成的面外

子带隙,其频率范围为 171~445 Hz,带宽为 274 Hz;图 6c 中,由夹芯型周期基板的面内振动模式 S_2 与振子的局域共振模式 S_1 相互耦合而成的面内子带隙其频率范围为 143~296 Hz,带宽为 153 Hz;图 6a 中,由面内和面外子带隙相互叠加形成的完全带隙,其频率范围为 171~296 Hz,带宽为 125 Hz。

为了说明本文新型超板形成的带隙为低宽频特性,采用有限元法计算了具有相同几何尺寸和材料参数的夹芯型周期基板和非夹芯型超板(单层超板)的能带结构,其中非夹芯型超板由振子填充于周期性开孔板(厚板)中构成,三者的能带结构如图 7 所示。

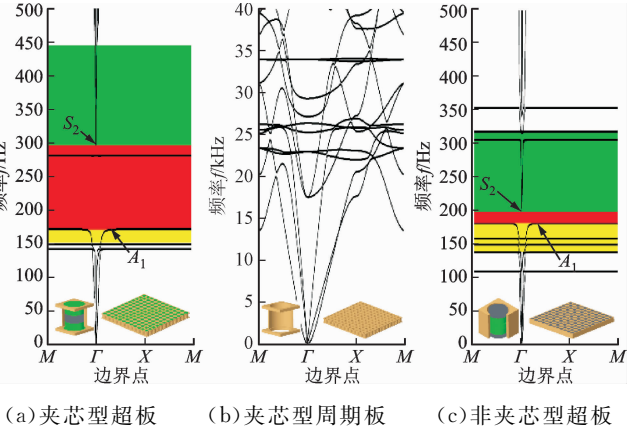


Fig. 7 Band structures of three different plates

3 种板结构带隙的带宽特性对比结果如表 2 所示。

表 2 3 种结构带宽比较

带隙	带宽/Hz		
	夹芯超板	非夹芯超板	夹芯周期板
完全	125	18	0
面内	153	61	0
面外	274	134	0

由表 2 可以看出,在 500 Hz 频率范围内,夹芯型周期基板中无带隙产生;非夹芯型超板中虽有带隙出现,但带宽较窄,完全带隙带宽仅为 18 Hz,同时板质量相对较大;而夹芯型超板形成的完全带隙带宽为 125 Hz,相比非夹芯型超板,带隙被扩大了近 7 倍。因而说明提出的夹芯型超板具有质轻、刚度高和低宽频振动带隙特性。

3 低宽频振动带隙形成机理

为了进一步研究夹芯型超板中低宽频振动带隙的形成机理,提取了面外子带隙和面内子带隙上下边界能带对应的超单元振动模式 A_1 、 S_1 和 A_2 、 S_2 ,以分析揭示其低宽频振动带隙的形成过程机理。

夹芯型超板中面外子带隙上下边界对应的超单元振动模式如图 8 所示,其中带隙下边界能带对应的超单元振动模式如图 8a 所示,带隙上边界能带对应的超单元振动模式如图 8c 所示,将超单元的两种振动模式进行等效,得到其等效理论模型如图 8b 所示,其中夹芯基单元的等效质量用 M 表示,夹芯振子的等效质量(芯柱 B 质量)用 m 表示,由于夹芯振子为一串并联混合等效弹簧,即轻质弹性面膜与轻质弹性表柱 A 相互串联,各自的等效刚度分别为 k_1 和 k_2 ,如图 2e 所示,于是芯柱 B 两端的夹芯振子部分等效刚度 k 均为

$$k = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}$$
 (3)

夹芯振子的总刚度 K 为

$$K = 2 \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}$$
 (4)

当横向振动激励夹芯型超板,夹芯型周期基板的板波模式 A_2 被激活放大成为基板的主模态,表现为基单元沿 z 方向振动,如图 8c 所示,此时夹芯振子处于静止状态,夹芯型周期基板的波模式主导夹芯型超板的响应,于是横向波可按该模式在夹芯型超板中传播,无面外子带隙形成;当激励频率接近夹芯振子固有频率时,夹芯振子的振动模式 A_1 被激活放大成为振子主模态,表现为夹芯振子沿 z 方向振动,如图 8a 所示,此时夹芯基单元处于静止状态,夹芯振子的振动模式主导振子的响应,与夹芯周期基板的振动模式耦合,通过给夹芯型周期基板一个反作用力,抑制了其沿 z 方向的振动模式,致使夹芯型周期基板中波传播模式消失,此时横波无法在

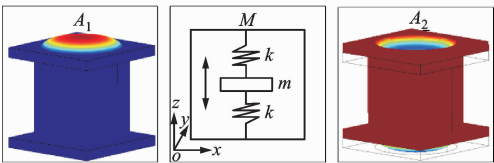


图 8 夹芯型超板超单元面外振动模式

Fig. 8 Total displacement vector fields of resonant mode A_1 and anti-symmetric Lamb mode A_2

夹芯型超板中传播,形成面外带隙。

夹芯振子沿着垂直方向(z 向)振动时,通过轻质弹性圆膜给夹芯基单元作用力,也称耦合力,其计算公式为

$$F = K |A_1| = 2 \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} |A_1| \quad (5)$$

式中: $|A_1|$ 为夹芯振子的主模态位移,属于系统固有特性。因此,夹芯振子与基板的耦合力大小主要取决于夹芯振子的等效刚度。由于芯柱 B 两端的振子并联组成夹芯振子,通过添加轻质弹性表柱 A 使得系数 k_2 增大,于是夹芯振子的总刚度增大,致使耦合力变大,形成宽频带隙。横向带隙的打开位置由夹芯振子的固有频率 f 确定, f 的计算公式如下

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (6)$$

由于芯柱 B 两端的振子各自串联,因此通过添加轻质弹性面膜使得系数 k_1 减小,于是夹芯振子的总刚度减弱,致使夹芯振子的固有频率变小,形成低频带隙。

为了进一步说明该振动子带隙的形成机理,给一个在 xoy 平面内由 6×6 超单元组成的夹芯型超板一端施加沿板厚方向的振动激励,在另一端 A、B 处分别测量其响应。计算该结构在 500 Hz 频率范围内的振动传输特性,结果如图 9 所示。

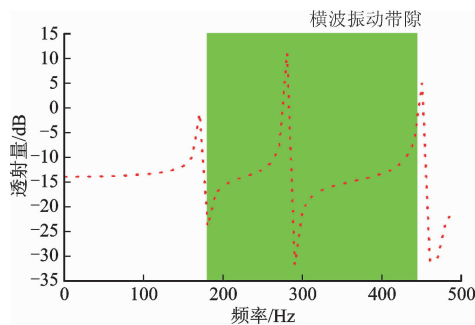


图9 夹芯型超板的振动传输特性

Fig. 9 Vibration transmission characteristic of the proposed metamaterial plate

结合传输特性图提取激励频率在带隙内(图9中绿色区域)超板中振动传播的可视化过程,如图10所示。可以看出:超板中夹芯型周期基板基本保持静止,夹芯振子沿 z 方向振动,吸收耗散了激励能量,使得带隙频率范围内的振动在有限超板中传播时发生了衰减。

同理,提取激励频率在带隙外时超板中振动传播的可视化过程,如图11所示。可以看出:超板中

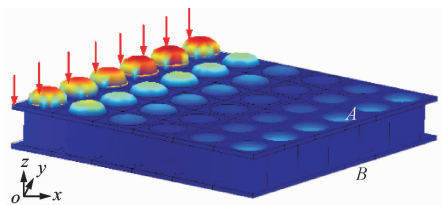


图10 带隙频率范围内的面外激励传输过程

Fig. 10 Transmission process of the out-of-plane excitation in the range of band gap frequency

夹芯振子基本不动,而夹芯型周期基板作为一等效板则按其模态振型进行振动,即输入的振动能量激发夹芯型周期基板的模态,致使基板按振型发生弯曲振动,激励可在夹芯型超板中传播。这进一步说明夹芯型超板中振动带隙的形成是由夹芯振子与夹芯型周期基板的耦合而引起,可对振动进行有效衰减。由图11还可以看出:结构不同面板的减振特性基本一致,即A、B处振动传输特性相同;该结构在提取频率范围内具有较好减振效果。

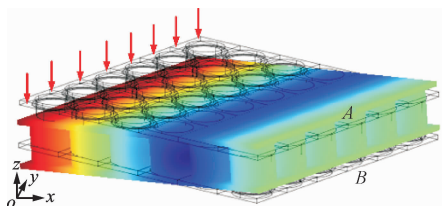
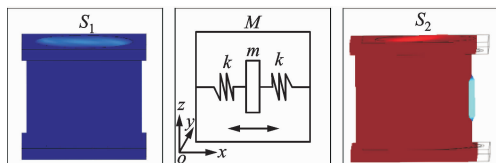


图11 带隙频率范围外的面外激励结构传输过程

Fig. 11 Transmission process of the out-of-plane excitation outside the range of band gap frequency

同理,提取的面内带隙上下边界对应的超单元振动模式如图12所示,其中带隙下边界能带对应的超单元振动模式如图12a所示,上边界能带对应的超单元振动模式如图12c所示。将两种振动模式进行等效,得等效理论模型如图12b所示,相比面外带隙形成时夹芯振子等效模型,该模型(质量-弹簧系统)中等效质量以及弹簧连接形式均不变,但在夹芯振子振动过程中,轻质弹性面膜以纵向振动为主,同时轻质弹性表柱 A 未有效参与振子振动,于是夹芯



(a)下边界模式 (b)理论模型 (c)上边界模式

图12 夹芯型超板超单元面内振动模式

Fig. 12 Total displacement vector fields of resonant mode S_1 and symmetric Lamb mode S_2

振子的等效刚度变小,致使面外子带隙打开位置降至更低,同时其带宽变窄。

当纵向振动激励夹芯型超板,夹芯型周期基板的板波模式 S_2 被激活放大成为基板主模态,表现为基单元在 xoy 平面内振动,如图 12c 所示,此时夹芯振子处于相对静止状态,夹芯型周期基板的波模式主导超板响应,此时纵向波可按该模式在夹芯型超板中传播,无面内子带隙形成;当激励频率接近夹芯振子固有频率时,夹芯振子的振动模式 S_1 被激活放大成为振子主模态,表现为夹芯振子在 xoy 平面内振动,如图 12a 所示,此时夹芯基单元处于静止状态,夹芯振子的振动模式主导振子响应,给夹芯型周期基板反作用力,抑制其沿 xoy 平面内的振动模式,致使夹芯型周期基板中波传播模式消失,此时纵波无法在夹芯型超板中传播,形成面内带隙。

以上对夹芯型超板的理论模型、振动带隙特性及其形成机理进行了说明和理论分析,为了进一步说明其减振特性,对图 5 制备的两种样品的结构减振性能进行了实验测试,测试中通过柔索将样品自由悬挂,采用脉冲力锤对样品一端沿着板厚方向激励,安装在另一端的加速度传感器采集振动输出信号,信号经过测试系统进行数据采集、分析和处理,最终得到样品的振动传输特性,结果分别如图 13 和图 14 所示。从图 13 可以看出,树脂夹芯型超板的振动传输特性曲线在 0~500 Hz 频率范围内与图 9 仿真结果大体一致,即整个带宽内基本均存在衰减,由于测试样品中各个零部件通过粘接装配,结合面处的刚度略有不同,导致仿真和实验结果出现差异。比较图 13 和 14 可以看出,由两种不同材料打印的夹芯型超板,对低宽频范围内的振动均能衰减,说明减振特性主要依赖于结构形式,因此提出的夹芯型超板结构具有较好的低宽频减振特性。

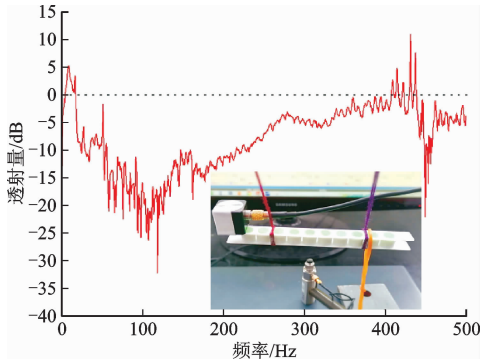


图 13 树脂夹芯型超板的振动传输特性
Fig. 13 Vibration transmission characteristic of the proposed metamaterial plate with epoxy substrate

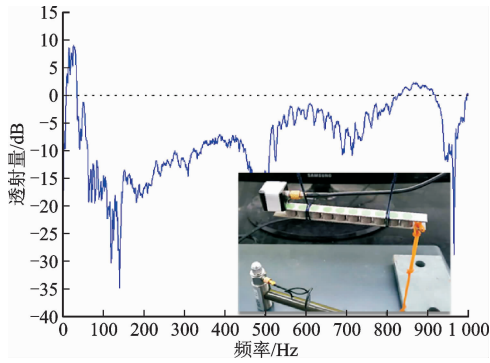


图 14 钢夹芯型超板的振动传输特性
Fig. 14 Vibration transmission characteristic of the proposed metamaterial plate with steel substrate

4 带隙特性的影响规律

通过上述分析可知,夹芯振子是决定带隙特性的主要因素,其固有频率不仅决定着带隙的打开位置,其刚度也间接决定着带隙宽度,于是,通过进一步研究夹芯振子对带隙的影响规律进而提出带隙的调节方法。由于夹芯振子由轻质弹性面膜夹夹芯柱构成,夹芯柱又由轻质弹性表柱 A 夹芯柱 B 构成,因此分别以轻质弹性面膜与夹芯柱直径之比 D/d 和芯柱 B 与表柱 A 直径之比 d_B/d_A 为参数研究夹芯振子对带隙的影响,获得夹芯型振子对带隙特性的影响规律如图 15~图 18 所示。

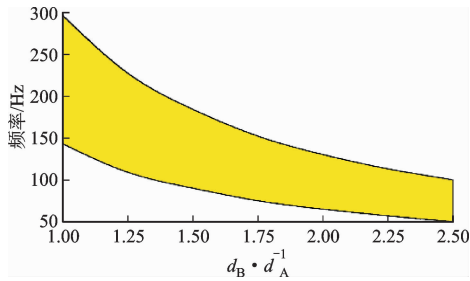


图 15 芯柱与表柱直径之比 d_B/d_A 对面内带隙的影响规律
Fig. 15 Evolution of in-plane BG in the proposed structure with the ratio d_B/d_A

从图 15 和图 16 中可以看出,当芯柱 B 与表柱 A 直径之比 d_B/d_A 从 1 逐渐变化至 2.5 时,夹芯振子变轻,致使夹芯型超板比刚度趋于更大,同时面内带隙和面外带隙的打开位置逐渐降低至更低频,带宽却逐渐变窄,因此,通过调节夹芯柱结构中芯柱与表柱的尺寸关系,可获得目标带隙和结构特性。

从图 17 和图 18 中可以看出,当轻质弹性面膜与夹芯柱直径之比 D/d 从 1.25 逐渐变化至 2.5

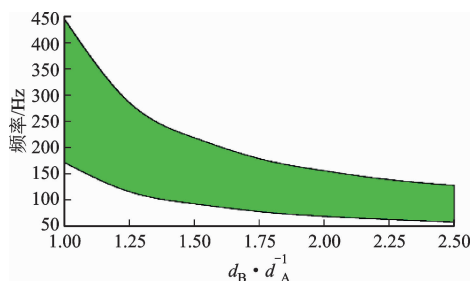


图 16 芯柱与表柱直径之比 d_B/d_A 对面外带隙的影响规律

Fig. 16 Evolution of out-of-plane BG in the proposed structure with ratio d_B/d_A

时,夹芯振子变轻,致使夹芯型超板比刚度趋于更大,面内带隙和面外带隙的打开位置先降低,后升高,最后又回落至更低频,带宽却逐渐变窄。因此,当通过调节夹芯振子结构中轻质弹性面膜与夹芯柱的尺寸关系,可获得目标带隙。

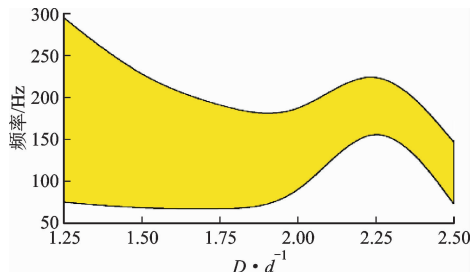


图 17 弹性面膜与夹芯柱直径之比 D/d 对面内带隙的影响规律

Fig. 17 Evolution of in-plane BG in the proposed structure with the ratio D/d

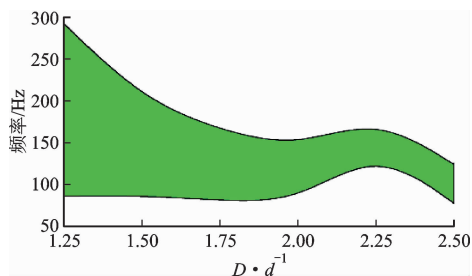


图 18 弹性面膜与夹芯柱直径之比 D/d 对面外带隙的影响规律

Fig. 18 Evolution of out-of-plane BG in the proposed structure with the ratio D/d

5 结 论

基于周期结构带隙理论和夹芯结构概念,提出了夹芯设计减振超结构思想和方法,获得了一种新型减振板——夹芯型超板,通过研究得出如下结论:

(1)通过周期夹芯方法构建的夹芯型周期基板,具有夹芯板的高比刚度等结构优点,同时基板中亦可形成面内和面外两种振动模式,该基板可构建各种具有高比刚度特性的超板;

(2)通过夹芯方法构建的夹芯振子,其刚度具有串并联特点,以其为振子,可构建具有低宽频带隙特性的超板;

(3)由具有高比刚度的厚尺度夹芯型周期基板和具有优异刚度特性的夹芯振子复合组成的夹芯型超板,不仅具有轻质、高刚度和厚尺寸的结构特点,还具有低宽频振动带隙物理特性;

(4)夹芯振子通过抑制夹芯型周期基板的主模态,使夹芯型超板中无波传播模式,形成带隙;夹芯振子的串并联刚度特点,可同时对带隙的位置和宽度进行调节,形成低宽频带隙;通过设计夹芯振子结构,可主动设计目标带隙。

本文提出的夹芯型超板为典型的小尺度构建的大尺度结构,集夹芯结构与超结构二者的优点于一体,有望实现高比刚度、厚尺度和低宽频带隙特性三者的统一。实验结果证明,该结构具有较好的低宽频减振特性,为厚板类结构的低频减振提供了新思路和方法。后续可在本文提出的夹芯型超板基础上,进一步研究泡沫/蜂窝/点阵夹芯型超板的减振特性。

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] LIU Z Y, ZHANG X X, MAO Y W. Locally resonant sonic materials [J]. Science, 2000, 289: 201-205.
- [3] BILLINGS L. Exotic optics: metamaterial world [J]. Nature, 2013, 500(7461): 138-140.
- [4] MAASCH M. Wave propagation in periodic structures [M]. Berlin, Germany: Springer International Publishing, 2016: 26.
- [5] 吴九汇, 马富银, 张思文, 等. 声学超材料在低频减振降噪中的应用评述 [J]. 机械工程学报, 2016, 52(13): 69-78.
- [6] WU Jiuhui, MA Fuying, ZHANG Siwen, et al. Application of acoustic metamaterials in low-frequency vibration and noise reduction [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 52(13): 69-78.
- [6] 李锁斌, 窦益华, 陈天宁, 等. 局域共振型周期结构振动带隙形成机理 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(6): 169-175.

- LI Suobin, DOU Yihua, CHEN Tianning, et al. Formation mechanisms of vibration band gaps in locally resonant periodic structures [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(6): 169-175.
- [7] 吴晓, 刘崇锐, 王轲, 等. 声学超结构低频宽带协同耦合高效吸声机理 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(10): 122-127.
- WU Xiao, LIU Chongrui, WANG Ke, et al. Low-frequency broadband synergistic coupling mechanism of acoustic metamaterials with high efficient absorption [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(10): 122-127.
- [8] GAO Y Q, WANG L F. Ultrawide coupled bandgap in hybrid periodic system with multiple resonators [J]. Journal of Applied Physics, 2020, 127: 204901.
- [9] 宋玉宝, 温激鸿, 郁殿龙, 等. 板结构振动与噪声抑制研究综述 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(15): 66-77.
- SONG Yubao, WENG Jihong, YU Dianlong, et al. Review of vibration and noise control of the plate structures [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(15): 66-77.
- [10] WU T T, HUANG Zigui, 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.
- [11] 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): 3506.
- [12] LI Y G, CHEN T N, WANG X P, et al. Enlargement of locally resonant sonic band gap by using composite plate-type acoustic metamaterial [J]. Physics Letters: A, 2015, 379: 412-416.
- [13] ZHAO H J, GUO H W, GAO M X. Vibration band gaps in double-vibrator pillared phononic crystal plate [J]. Journal of Applied Physics, 2016, 119(1): 377.
- [14] LI S B, CHEN T N, WANG X P, et al. Expansion of lower-frequency locally resonant band gaps using a double-sided stubbed composite phononic crystals plate with composite stubs [J]. Physics Letters: A, 2016, 380(25/26): 2167-2172.
- [15] QUAN D H, SHI Z Y. Band gap properties in locally resonant phononic periodically attached spring mass resonators [J]. Physics Letters: A, 2016, 380(41): 3319-3325.
- [16] 李锁斌, 陈天宁, 奚延辉, 等. 声子晶体板中低频完全禁带的形成机理研究 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(12): 51-57.
- LI Suobin, CHEN Tianning, XI Yanhui, et al. Forming mechanisms of low frequency complete band gaps in phononic crystal plate [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(12): 51-57.
- [17] 李锁斌, 窦益华, 陈天宁, 等. 声子晶体板中低频宽禁带形成机理 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(12): 159-166.
- LI Suobin, DOU Yihua, CHEN Tianning, et al. Forming mechanisms of low frequency broad band gaps in locally resonant phononic crystal plate [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(12): 159-166.
- [18] LI G H, WANG Y Z, WANG Y S. Active control on switchable waveguide of elastic wave metamaterials with the 3D printing technology [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 16226.
- [19] LI G H, MA T X, WANG Y Z, et al. Active control on topological immunity of elastic wave metamaterials [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 9376.
- [20] WANG Y F, WANG Y Z, WU B, et al. Tunable and active phononic crystals and metamaterials [J]. Applied Mechanics Reviews, 2020, 72(4): 040801.

(编辑 刘杨)