

一种具有承载和抗冲击的手性超结构带隙特性与减振性能研究



林华刚^{1,2,3}, 张成旭^{1,3}, 宋海征^{1,3}, 王攀¹, 王建强⁴

1. 西北工业大学, 陕西 西安 710129
2. 西北工业大学深圳研究院, 广东 深圳 518063
3. 西北工业大学 高效清洁动力装置全国重点实验室, 陕西 西安 710072
4. 中国飞机强度研究所, 陕西 西安 710065

摘要:超材料结构由于其轻质、可承载、减隔振等特性得到广泛关注,但带隙范围窄的问题依然存在,手性结构可以降低系统的对称性,增强各向异性,使结构中更容易出现弹性波带隙。为了解决工程中的冲击和振动问题,本文提出了一种具有低宽频带隙的负泊松比手性超材料结构,能有效衰减低频弹性波,提高承载及抗冲击能力。基于布洛赫(Bloch)定理,建立了超材料结构带隙理论模型,通过对带隙边界处振型分析揭示带隙产生机理。利用三维色散面、频率等频线、相速度和波的传播方向,讨论了波在结构中的传播特性。数值计算了手性超材料结构的力学特性及振动传递损失,并与3D打印手性结构试验进行对比分析。结果表明,该结构具有卓越的承载能力和抗冲击性能,能够产生多条低宽频带隙,在带隙范围内的传递损失可达到-85dB,为抑制工程中的低宽频振动提供了一种新的解决途径。

关键词:超材料; 手性结构; 带隙特性; 隔振

中图分类号: V250.3

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.03.003

超材料作为人工设计的独特结构,因其具有自然界中的材料所不具备的特性,以及较强的可设计性^[1],引起了研究者的兴趣^[2]。由于其独特的功能,超材料已应用于许多工程场景,如航空航天结构的降噪^[3]和隔振^[4]等。研究人员发现,超材料可以根据应用环境来进行人工设计,基于这一思路,在近十年的研究中,具有周期性特性的超材料引起了研究者的极大兴趣,而这种改变结构设计的思路仍然是实现具有特殊功能超材料的一大挑战^[5]。

手性结构在复合超材料结构和单相超材料结构的设计中具有重要的指导作用。王啸坤等^[6]通过简单的一步热解法合成了C/Co复合超材料,观察到其具有优异的介电频散性能以及吸波性能,利用全介质超材料的设计对吸收体的宏观结构进行了优化。此外,具有手性特征的结构在吸振方面的设计灵活性也得到了很大的发展,如基于手性和反手性单

元胞的独特几何形状^[7],可以设计具有抗疲劳、抗载荷断裂、抗压痕和能量吸收的超材料结构^[8]。Spadoni等^[9]对六方手性晶格的声子性质进行了全面研究,发现手性结构在减少声音传输和隔振方面具有巨大的潜在优势,其设计灵活性为改善不同应用中的结构性能提供了选择。徐时吟等^[10]研究了六韧带手性结构的能带特性,并对其进行了参数化分析,讨论了结构的尺寸与填充物对手性结构带隙特性的影响规律。朱大巍等^[11]研究了手性声学覆盖层对加筋板的低频振动和声辐射特性的影响。虽然人们对手性结构的带隙机理及带隙调控规律已经有了一定认识,但是关于手性结构的波传播特性以及力学特性分析研究还较少,本文针对承载与抗冲击要求,以及低宽频减振需求,提出了综合手性结构和周期结构的手性超材料结构。特别关注了波传播的相速度,这是手性结构超材料中一个重要但较少被探索的方面。相速度直

收稿日期: 2024-07-08; 退修日期: 2024-10-16; 录用日期: 2024-12-13

基金项目: 航空科学基金(20220015053005); 中央高校基本科研业务费专项资金(5000240291); 广东省自然科学基金(2022A1515110177, 2024A1515011978)

引用格式: Lin Huagang, Zhang Chengxu, Song Haizheng, et al. Study on the bandgap characteristics and vibration reduction performance of a chiral superstructure with load and impact resistance[J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(03): 20-30. 林华刚, 张成旭, 宋海征, 等. 一种具有承载和抗冲击的手性超结构带隙特性与减振性能研究[J]. 航空科学技术, 2025, 36(03): 20-30.

接决定了材料在特定频率下的带隙宽度和位置。

本文提出的负泊松比手性超材料结构具有低频带隙特性及优越的力学性能。首先提出手性超材料结构并建立带隙方程,分析不同类型周期结构的带隙特性与力学特性,探讨带隙产生的机理;继而研究由手性超材料结构单胞组成的有限周期结构的振动传递特性,并与试验结果对比,验证在带隙范围内的隔振效果。

1 手性超材料结构设计与带隙

本文设计的手性超材料结构单胞(见图1)可以概括为弧形结构(见图1(a))和手性结构(见图1(b))两部分。手性超材料结构可看作边长为 a 的正方形单元格,手性结构的厚度为 t_1 ,弧形结构的厚度为 t_2 ,手性结构韧带夹角为 α ,中心圆半径为 R_1 ,手性结构四角为半径 r 的1/4圆,弧形结构四边的圆弧半径为 R_2 ,其圆心与手性结构中心圆心的距离为 L ,弧形结构四角为半径 R_3 的1/4圆。

提出的手性超材料结构由多个周期性单胞组成(见图2),在水平方向上,每个节点与相邻的两个节点之间的夹角 θ 均为 0 ,且两个节点的中心距离定义为 H 。因此,将单位晶格矢量 e_1 用于定义单胞结构的周期性,可以通过晶格矢量的线性组合 $m_1e_1+m_2e_2$ 来确定任意胞元的位置。

$$e_1 = [H \cos \theta \quad H \sin \theta]^T = [H \quad 0]^T \quad (1)$$

$$e_2 = [-H \cos \theta \quad H \sin \theta]^T = [-H \quad 0]^T$$

式中, H 为两单胞间的横向距离。因此, $m_1e_1+m_2e_2$ 可以表示为

$$\begin{cases} m_1e_1 = m_1[H \quad 0]^T \\ m_2e_2 = m_2[-H \quad 0]^T \end{cases} \quad (2)$$

将参考单胞的位置设为 $(0,0)$,则单胞内任意点 G 的位置 (m_1, m_2) 可以通过式(3)表示

$$L_G(m_1, m_2) = L_G + m_1e_1 + m_2e_2 \quad (3)$$

式中, L_G 为参考单胞内 G 点的相应位置。

根据布洛赫(Bloch)理论,传递过程中幅值的变化与单胞在结构中的位置无关。设定波的传播频率为 ω ,并设参考单胞部分位于单胞范围内的 G 点,则波的位移表示为

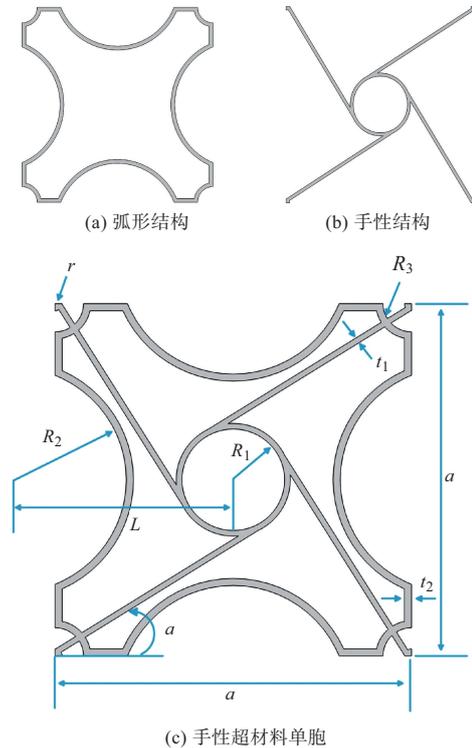
$$q(L_G) = q_0 e^{i(\omega t - k \cdot L_G)} \quad (4)$$

式中, q_0 为波的幅值, k 为波矢量, $k = [k_1, k_2]$, k_1, k_2 为波数。

若以 G 点为参照点, $r(m_1, m_2)$ 处 Q 点的位移相对应的坐标可以通过式(5)表示

$$q(r) = q(L_G) e^{ik(r-L_G)} = q(L_G) e^{n_1k_1 + n_2k_2} \quad (5)$$

此时元胞的简谐振动方程能够表示为



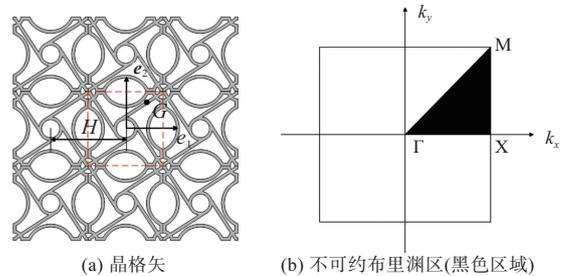
(c) 手性超材料单胞

图1 结构示意图

Fig.1 Structural diagrams

$$(\mathbf{K}_f - \omega^2 \mathbf{M}_f) \mathbf{q}_f = \mathbf{F}_f \quad (6)$$

式中, \mathbf{K}_f 为单胞的刚度矩阵; \mathbf{M}_f 为单胞的质量矩阵; \mathbf{q}_f 为对应节点位置所出现的位移矢量; \mathbf{F}_f 为广义层面的矢量。每组Bloch波矢 (k_x, k_y) 对应一组特征值和特征矢量,通常取值在第一布里渊区,如图2所示。因特征频率在布里渊区边界极值,波矢 k 仅需沿不可约布里渊区边界扫描,本征频率 ω 随波矢的变化曲线即为色散曲线(能带图),能带结构图中无特征值的频率区域为带隙。



(a) 晶格矢

(b) 不可约布里渊区(黑色区域)

图2 晶格矢图和布里渊区

Fig.2 Lattice vector diagram and Brillouin zone

2 弧形结构、手性结构与手性超材料结构对比分析

为了验证负泊松比手性超材料结构的力学性能与带隙

特性,分别对图1中三种胞元构成的整体结构进行数值讨论:第一种是弧形结构,第二种是手性结构,第三种是手性超材料结构。整体结构由单胞进行 3×3 的方式排列且赋予40mm的厚度,并在上、下表面添加尺寸为 $150\text{mm}\times 40\text{mm}\times 2\text{mm}$ 的长方体面板形成。材料均采用尼龙1010,密度、杨氏模量和泊松比分别为 ρ 、 E 和 ν ,几何参数与材料参数见表1。针对形成的三种整体结构,在上表面施加相同的压力进行承载能力分析,如图3、图4所示,发现手性超材料结构所受到的最大应力以及最大变形最小分别为36MPa和14mm,其次是弧形结构。在进行冲击模拟时,在结构上方

表1 几何参数和材料参数

Table 1 Geometric and material parameters

几何参数/mm						材料参数	
a	50	R_1	7.2	r	1	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	1300
t_1	0.8	R_2	16	L	31	E/Pa	1×10^9
t_2	1	R_3	4	$\alpha/(\circ)$	32	ν	0.37

40mm处设置一个刚性球以10m/s的速度向下跌落。冲击工况下的应力应变结果如图5、图6所示,手性超材料结构所受最大应力和发生的最大变形最小,分别为8MPa和1.8mm。同时对三种结构进行屈曲稳定性分析,结果如图7所示,手性超材料结构的临界屈曲载荷最大为1695.3N,弧

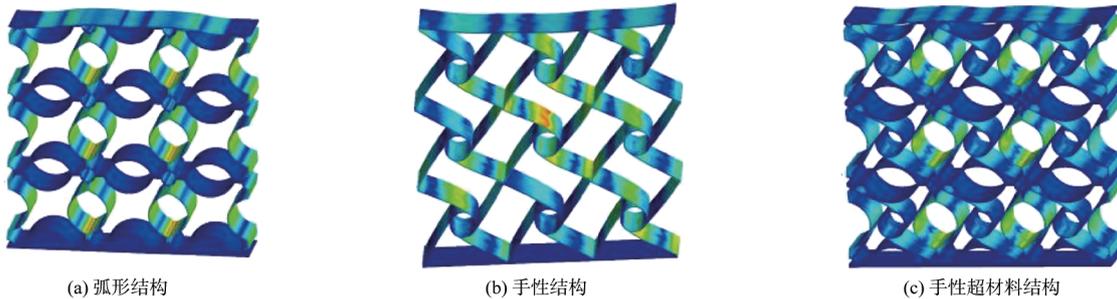


图3 承载应力图(单位: MPa)

Fig.3 Load bearing stress diagram(Unit: MPa)

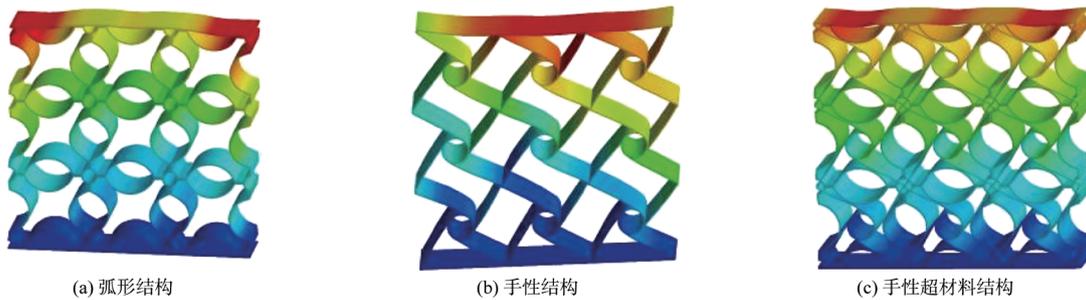


图4 承载变形图(单位: mm)

Fig.4 Diagram of deformation under load(Unit: mm)

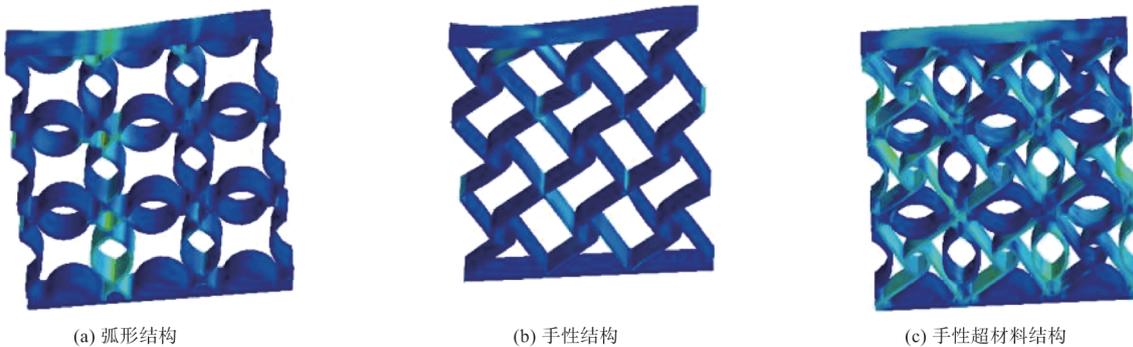


图5 冲击应力图(单位: MPa)

Fig.5 Stress diagram under impact(Unit: MPa)

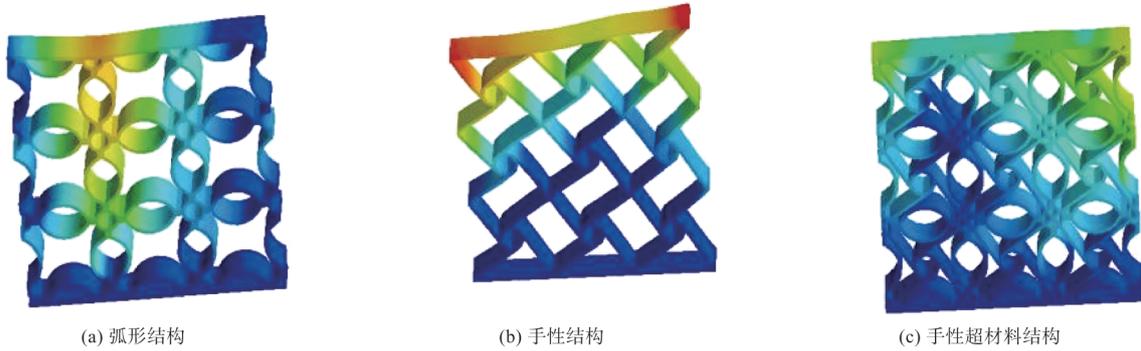


图6 冲击变形图(单位: mm)

Fig.6 Diagram of deformation under impact(Unit: mm)

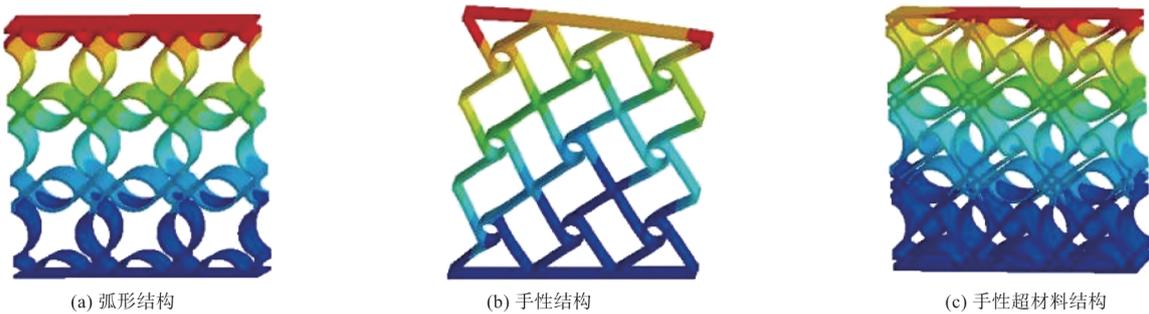


图7 屈曲分析图(单位: mm)

Fig.7 Buckling analysis diagram(Unit: mm)

形结构的临界屈曲载荷最小为411.33N,手性超材料结构的稳定性最好。由此可以看出,本文提出的负泊松比超结构在承载和抗冲击方面具有很大的优势。

图8给出了弧形结构、手性结构以及手性超材料结构的带隙曲线。能带图的横坐标0~3分别表示为 Γ -X-M- Γ ,波矢 k 的扫描路线为 Γ -X-M- Γ 。结果发现,0~2750Hz范围内,弧形结构存在两个完整的带隙,分别为685~967Hz和1546~1759Hz,带宽分别为282Hz和213Hz;手性

结构存在三条带隙,分别为661~751Hz、1228~1371Hz和1630~1987Hz,带宽分别为90Hz、143Hz和357Hz;本文提出的超材料结构有三条完整带隙,分别为623~1038Hz、1095~1163Hz和1627~2311Hz,带宽分别为415Hz、68Hz和684Hz。研究发现,手性超材料结构的第一条带隙变得更宽,起始频率更低;第二条带隙相比手性结构,起始频率降低但带宽变小;第三条带隙与前两者相比,手性超材料的第三条带隙更宽且起始频率低于手性结构。

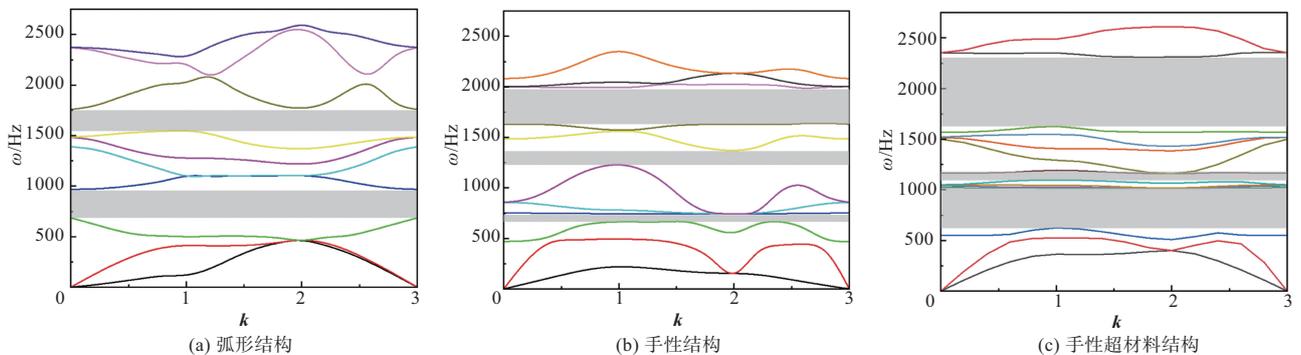


图8 三种结构的带隙图

Fig.8 Band gap diagrams for three structures

3 手性超材料结构的带隙特性分析

3.1 能带结构与振动模式分析

为了深入了解手性超材料结构的色散行为及带隙形成原因,绘制了单胞的第一带隙和第三带隙上、下边界所对应的模态振型。能带图的纵坐标采用无量纲频率 $\Omega=\omega/\omega_0$,其中, ω_0 为手性超材料结构第三阶色散曲线的最大值,其数值为623Hz。图9(a)~图9(l)中,黑色线条表示单元的原始形状,彩色线条表示单元的变形形状,红色箭头的大小和方向表示结构相对于原始位置的位移距离和方向。

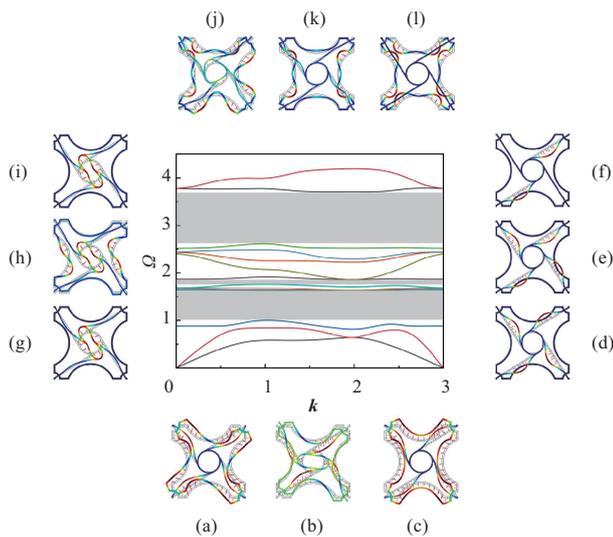


图9 带隙及其带隙边界的振型

Fig.9 Band gap diagram and vibration mode of its band gap boundary

图9(a)~图9(f)分别展示了第一带隙上、下边界在 Γ 、X和M点的模态振型。从图9中可以发现,第一带隙下边界的 Γ 点振型外部整体向右旋转,而中间部分基本保持不动;X点外部旋转带动内部结构旋转;M点振型外部在y方向上呈现上下拉伸趋势,中间部分基本不动。结构的中间部分开始抑制整体振动,打开了第一条带隙。第一带隙上边界的 Γ 、X和M点的振型表现为外部整体不动,而中间连接外部的韧带部分开始发生旋转变形,这意味着第一条带隙的结束,弹性波开始在结构中传播。

图9(g)~图9(l)分别展示了第三带隙上、下边界 Γ 、X和M点的模态振型,发现第三带隙下边界的 Γ 、X和M点外部基本保持不动,中间部分有呈向左的旋转变形,结构的外侧开始抑制中间结构的变形,意味着第三条带隙的开始。第三带隙上边界的 Γ 、X和M点,发现外部结构开始变形,振动开始传递,意味着第三条带隙的截止。

通过对带隙振动模态的分析得出以下结论:第一条带隙的产生是内部结构开始抑制整体手性结构的振动传播,从而使整个手性超材料结构无法传播振动,第一条带隙的截止相应的内部结构开始产生振动,从而带动整个手性结构振动。第三条带隙的产生是外部结构开始抑制整体手性结构的振动传播,从而使整个手性超材料结构无法传播振动,第三条带隙的截止是外部结构开始产生振动从而带动整个手性超材料结构振动。分析表明,两条带隙的产生机理完全相反。

3.2 色散表面与相速度

本节将通过相速度和色散表面分析结构中的波传播,相速度可以很好地表示弹性波相的传播速度,可以表示为

$$C_p = \frac{\omega}{k} \mathbf{u} \quad (7)$$

式中, $k=|\mathbf{k}|$, \mathbf{u} 为波矢量 \mathbf{k} 的方向矢量

$$\mathbf{u} = \frac{\mathbf{k}}{k} \quad (8)$$

使用三维色散表面可以更直观地显示传输带隙信息,如果两个三维色散表面之间存在带隙,则它们之间会形成明显的间隙。如图10(a)和图10(b)所示,能带带隙图的带隙位置对应于色散表面带隙的位置。为了研究弹性波在手性超结构中的传播特性,从图10(a)中选取几个特定的三维色散表面进行分析,如图11、图12所示。图11(a)是第三个三维色散面,图11(b)、图11(c)分别是其相应频率等值线的分布图和频率轮廓线图。从频率等值线的分布可以看出,频率等值线在水平和垂直两个方向上变化迅速,频率等值线为极不规则的多边形。图11(d)显示了 $\Omega=0.88$ 、0.89和0.90时的相速度。相速度分布用黄点、紫点和绿点表示。相速度在 30° 、 120° 、 210° 和 300° 方向上明显较大,因此弹性波的相位在这些方向上传播迅速,而且随着频率的增加,相速度逐渐减小,意味着第一条带隙即将打开,弹性波的传播逐渐被抑制。

图12(a)为第四维色散表面,图12(b)为频率等值线分布,图12(c)为频率轮廓线图,频率越大,轮廓越圆。图12(d)中相速度随频率的增加而增大,波的相位传播方向也发生改变,在 $\Omega=1.634$ 时,波的相位传播方向开始从水平和垂直两个方向改变成对角线方向,这表明频率不仅可以影响相速度的大小,还可以改变相速度的传播方向。相速度随着频率的增加而增加,说明第一条带隙已经关闭,弹性波的传播不再被抑制。

4 振动传递损失

本节探索手性超材料超结构的振动传递损失。如图13

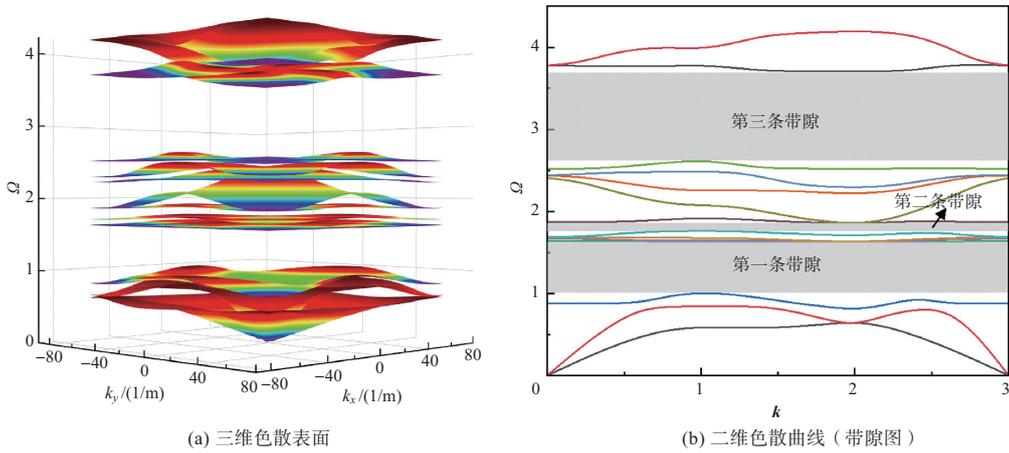


图10 色散关系与能带结构

Fig.10 Dispersion relationship and band structure

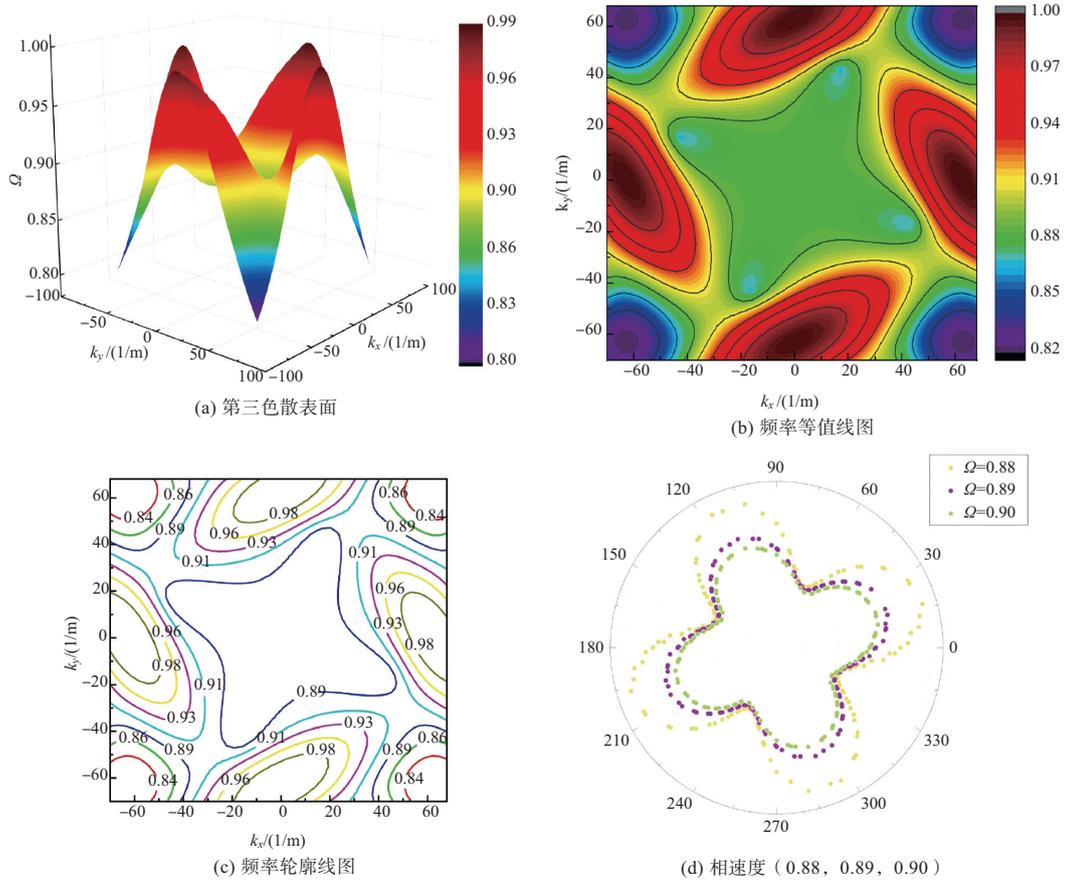


图11 第三色散表面数据图

Fig.11 Third dispersion surface data graph

所示,该结构由3×3个周期单胞组成。在结构的上端施加激励,下端计算振动响应。对于任一频率,通过得到的输入端和输出端的加速度响应,计算相应的振动衰减频率范围,与无限周期计算得到的弹性波带隙理论解进行比较。其中,传递损失定义 T ,根据频响函数可表示为

$$T = 20 \lg \left(\frac{X_{out}}{X_{in}} \right) \tag{9}$$

计算了 $R_2=16\text{mm}$ 和 13mm 的传递损失。结果如图14所示,发现传递损失曲线中的衰减区域与能带结构中带隙区域完全对应,且带隙区 T 值较小,通带区 T 值较大,表明

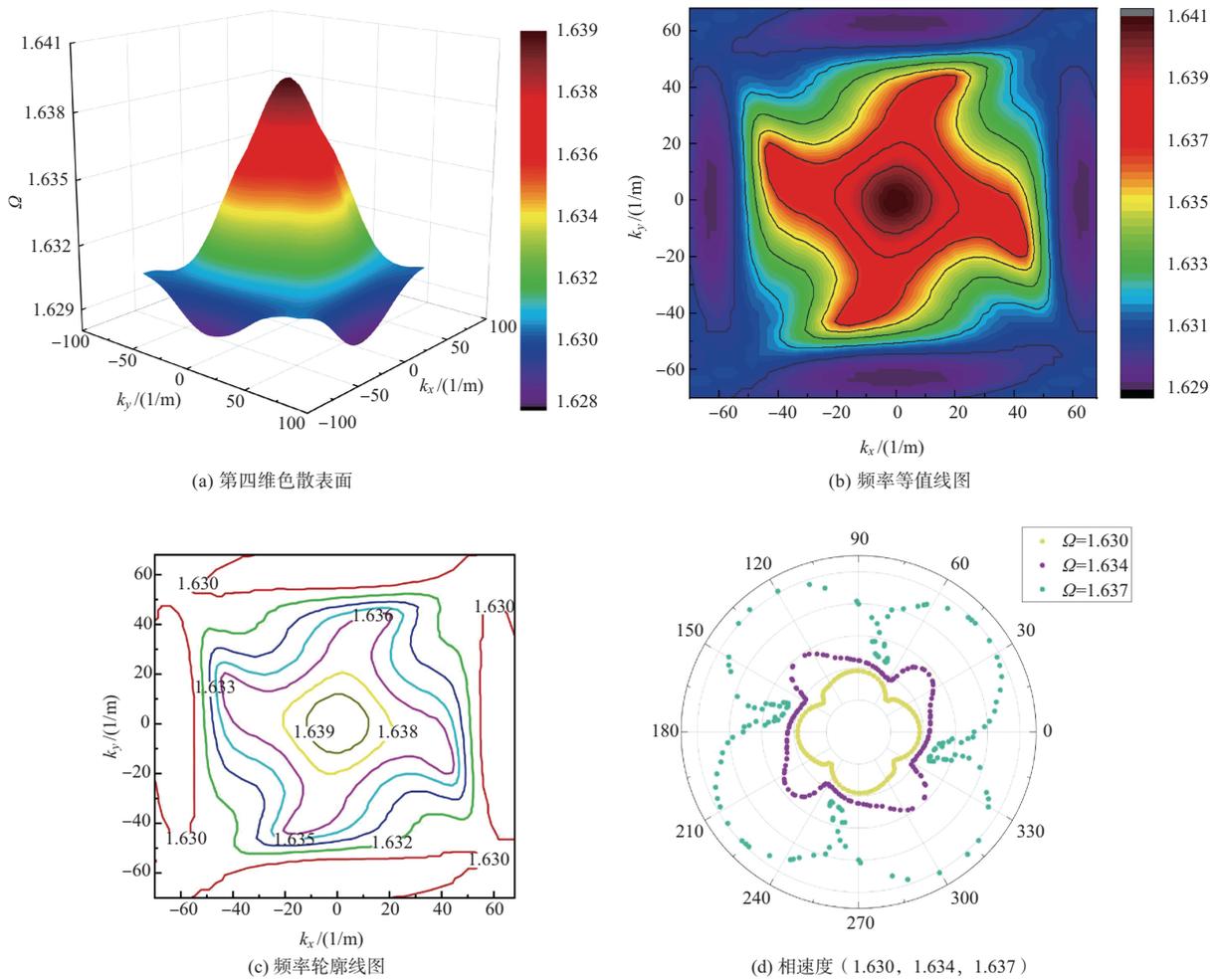


图12 第四色散表面数据图

Fig.12 Fourth dispersion surface data graph

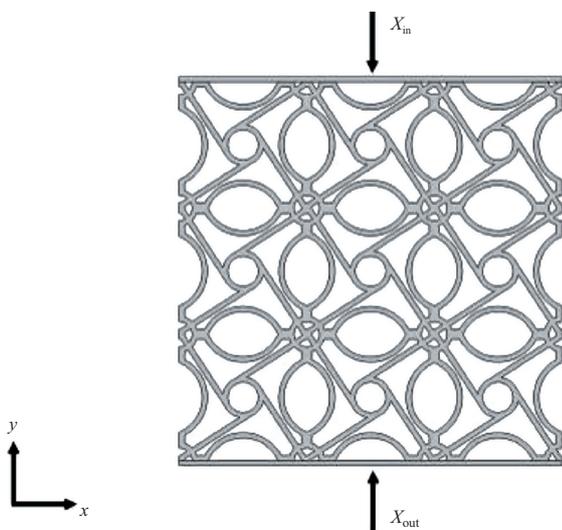


图13 3×3周期超材料结构

Fig.13 3×3 period metamaterial structure

3×3周期的超材料结构具有预期的隔振效果。为了进一步说明所设计结构的振动衰减情况,分别在通带和带隙范围内取三个点,得到了这三个频率对应的振动传输情况。如图15所示,红色箭头代表位移方向,在 $\Omega=2.8$ 时,发现激励产生的振动几乎贯穿了整个结构,验证了通带范围内弹性波的传播基本不受抑制,相反地,在 $\Omega=1.3$ 和 2.8 时,振动在整个结构中的传播被明显抑制,这解释了结构带隙的存在对振动的衰减有很好的作用,即抑制了波的传播。

通过设计不同几何参数讨论对传递损失的影响,绘制了 T 等值线图,如图16所示,图中颜色代表传递损失的效果,浅黄色效果最差为30dB,深蓝色效果最佳为-150dB。从中发现,四边圆弧半径 R_2 相对于其他参数来说,传递损失的效果较差,因为图中的深蓝色区域较少,浅蓝色区域较多,而其他参数深蓝色居多,在带隙范围内传递损失效率基本达到了最大值。

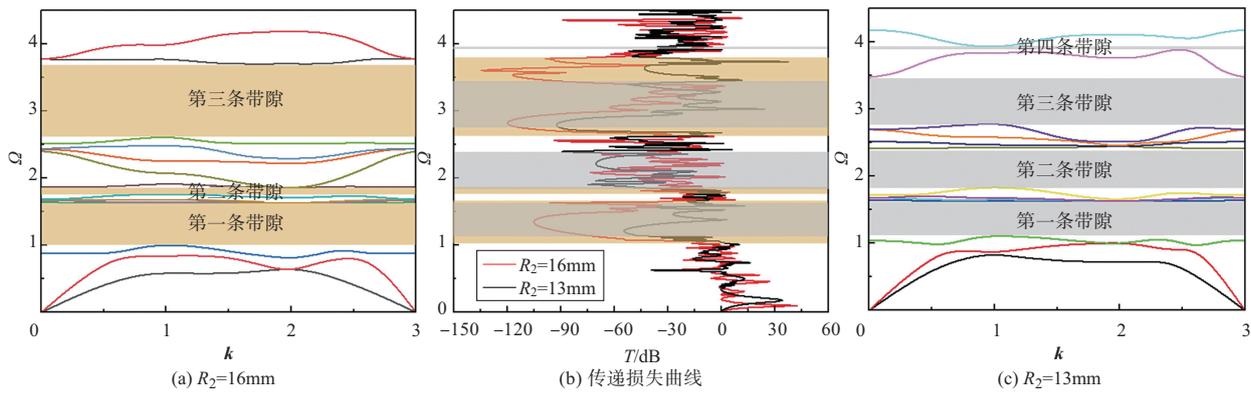


图14 带隙图与传递损失曲线图对比

Fig.14 Comparison between bandgap diagram and transfer loss curve diagram

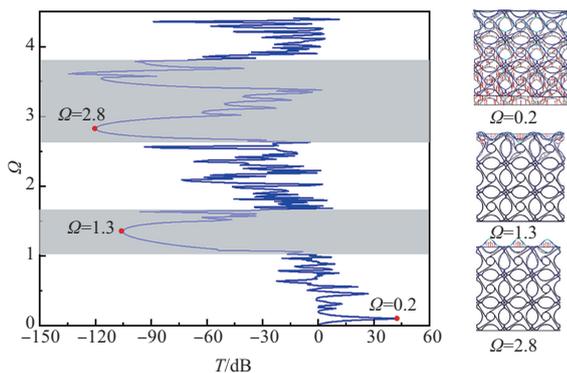


图15 传递损失和振动传输位移变化

Fig.15 Transmission loss and vibration transmission displacement change

5 试验验证

采用3D打印的方式加工出试验样件(见图17),样件尺寸 $a=50\text{mm}$, $t_1=t_2=2\text{mm}$,试验研究本文所提手性超材料结构的减振性能。试样由弹性绳悬挂,模拟自由边界条件。动态信号发生器产生一定频率范围内的振动信号传输到激振器,激振器顶杆作用在试件上使结构产生振动。安装在激励点的加速度传感器测量输入信号,再利用输出点的加速度传感器测量结构振动响应信号(两个输出点,分别位于输入点的对面和侧面),最后将获取到的数据处理获得结构的传输特性。

图18结果显示,灰色区域表示带隙部分,是基于无限大结构获得的带隙区域,黑线表示具有 3×3 周期的手性超材料结构理论计算得到的传递损失曲线,红线表示通过振动响应试验获得的传递损失曲线。研究发现,振动响应试验获得的传递损失曲线在带隙范围为 $1450\sim 3324\text{Hz}$ 和

$3489\sim 3624\text{Hz}$ 内有明显的衰减,并且与仿真计算的传递损失曲线中的衰减范围较为吻合,证明了理论计算结果的正确性和有效性。

6 结论

本文通过将弧形结构与手性结构相结合,提出了一种负泊松比手性超材料结构。通过数值分析,研究了所提出结构单元的带隙特性,以及有限尺寸结构的振动传递损失特性,揭示了带隙形成机理与波传播规律。通过研究,得出以下结论:

(1)手性超材料结构比起单一的周期结构和手性结构,不仅在承载能力和抗冲击能力方面有所增强,而且能够产生更加低频宽频的弹性波带隙。

(2)通过研究带隙上下边界的振型,分析了带隙的产生机理。对三维色散表面和相速度进行分析,讨论了波的传播特性,结果表明临近带隙下边界的相速度随着频率升高而减小,临近带隙上边界的相速度随着频率升高而变大。

(3)不同几何参数振动传递分析的数值研究表明,该结构单元在带隙范围内具有良好的减振性能,试验验证了理论结果的正确性,也证明了所提出的结构可在声学超材料结构和其他工程应用中减缓弹性波的传播。

AST

参考文献

[1] 王毓玉,王志刚,王惠添,等.基于超材料的自适应变体结构技术研究进展[J].航空科学技术,2024,35(5):45-59.

Wang Chengyu, Wang Zhigang, Wang Huitian, et al. Research progress on adaptive variant structure technology based on metamaterials [J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35 (5): 45-59.(in Chinese)

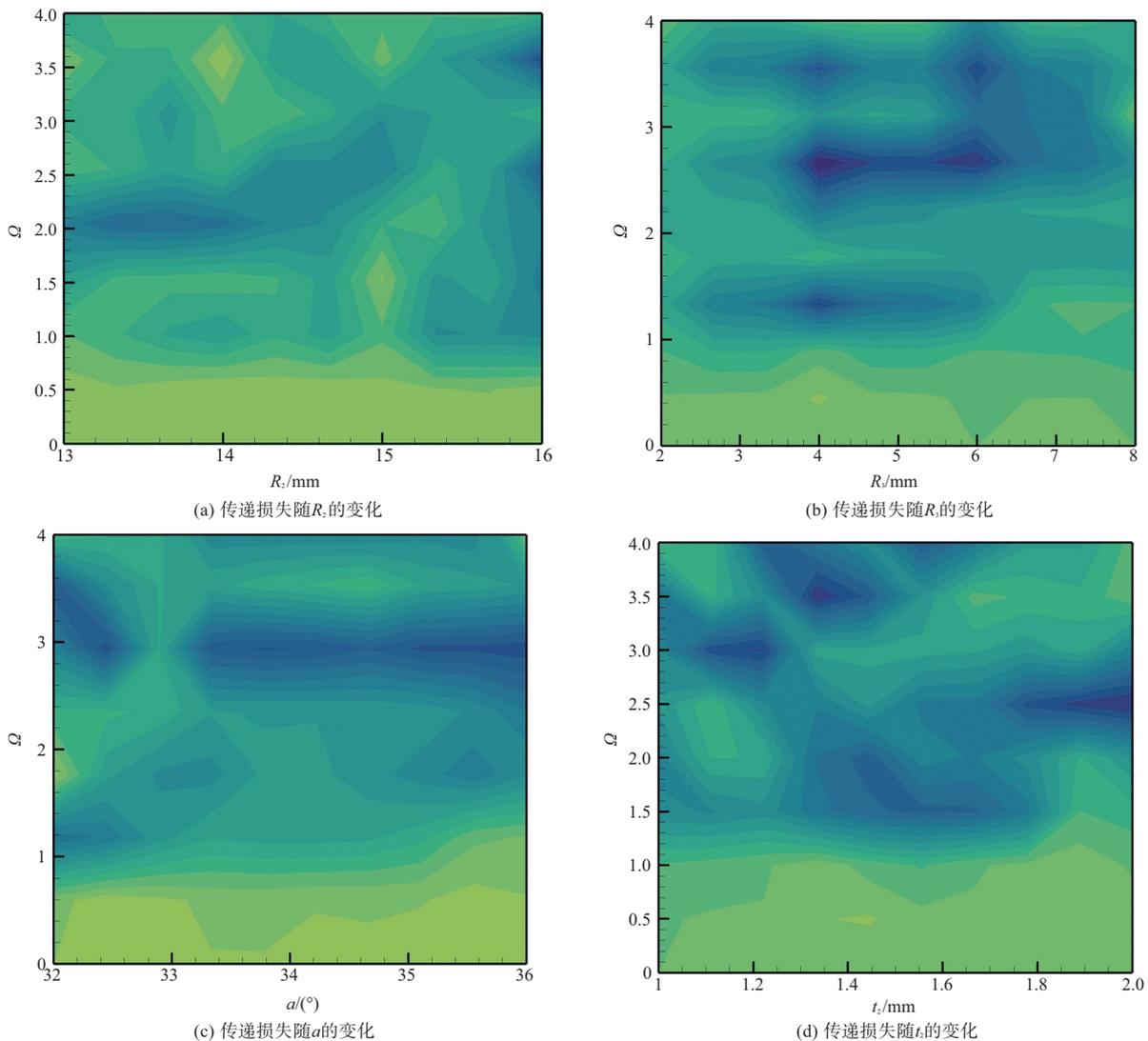


图 16 传递损失随各个参数变化的等值线图

Fig.16 Contour map of transmission loss with parameter variation

- [2] Lei Bao, Tie Juncui. Tunable, reconfigurable, and programmable metamaterials [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2020, 62(1): 9-32.
- [3] Cai Mengna, Tian Hongyan, Liu Haitao, et al. Low frequency sound insulation performance of asymmetric coupled-membrane acoustic metamaterials [J]. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 2019, 15(5): 1006-1015.
- [4] Zhu Rui, Liu Xiaoning, Hu Gengkai, et al. A chiral elastic metamaterial beam for broadband vibration suppression[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2014, 333(10): 2759-2773.
- [5] Tan Ting, Yan Zhimiao, Zou Hongxiang, et al. Renewable energy harvesting and absorbing via multi-scale metamaterial systems for Internet of things[J]. *Applied Energy*, 2019, 254: 113717.
- [6] 王啸坤, 过劭超, 梁磊磊, 等. 基于超材料设计实现C/Co复合材料的超宽带吸收[J]. *红外与毫米波学报*, 2024, 43(1): 91-97. Wang Xiaokun, Guo Mengchao, Liang Leilei, et al. Ultra wideband absorption of C/Co composite materials based on metamaterial design [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2024, 43 (1): 91-97.(in Chinese)
- [7] 耿一田, 郭英男, 袁伟, 等. 拓扑结构对二维手性负泊松比结构抗冲击性能的影响[J]. *航空工程进展*, 2024(5): 32-47. Geng Yitian, Guo Yingnan, Yuan Wei, et al. The influence of topological structures on the impact resistance of two-dimen-

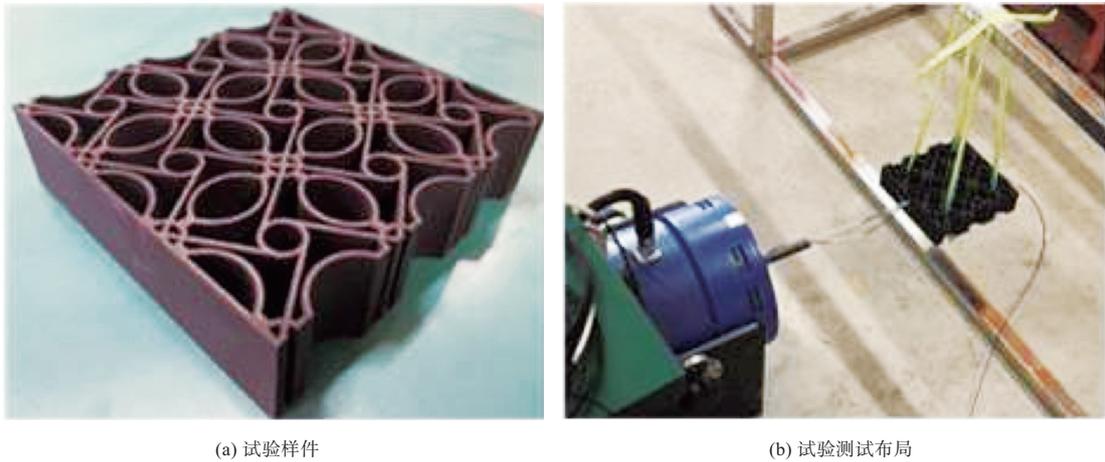


图 17 试验测试

Fig.17 Experimental testing

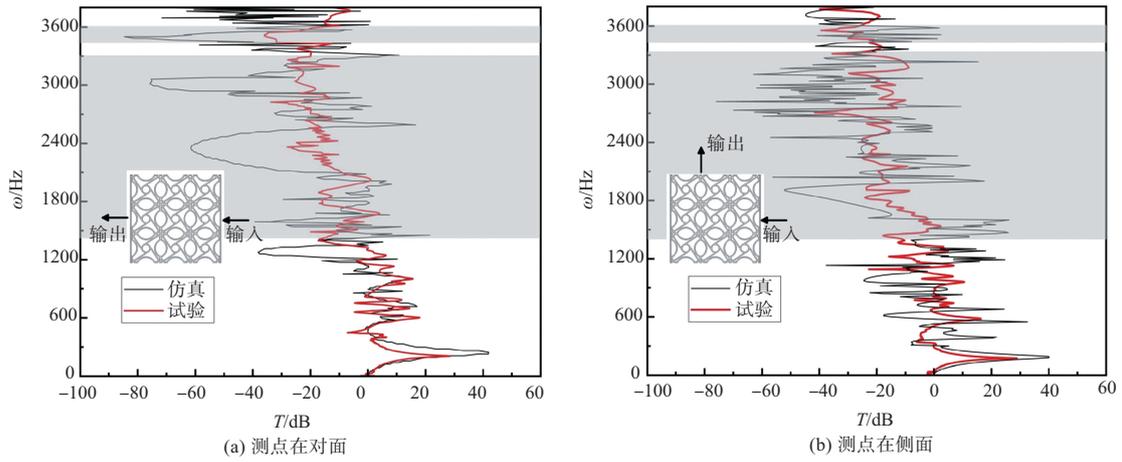


图 18 试验与仿真数据对比

Fig.18 Comparison of experimental and simulation data

sional chiral negative Poisson's ratio structures[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024(5): 32-47.(in Chinese)

- [8] Gatt R, Caruana-Gauci R, Attard D, et al. On the properties of real finite-sized planar and tubular stent-like auxetic structures [J]. Physica Status Solidi (b), 2014, 251(2): 321-327.
- [9] Spadoni A, Ruzzene M, Gonella S, et al. Phononic properties of hexagonal chiral lattices[J]. Wave Motion, 2009, 46(7): 435-450.
- [10] 徐时吟, 黄修长, 华宏星. 六韧带手性结构的能带特性[J]. 上

海交通大学学报, 2013, 47(2): 167-172.

- Xu Shiyin, Huang Xiuchang, Hua Hongxing. Band characteristics of chiral structures with six ligaments[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2013, 47(2): 167-172. (in Chinese)
- [11] 朱大巍, 黄修长, 华宏星. 敷设手性覆盖层加筋梁低频振动和声辐射特性[J]. 振动与冲击, 2014, 33(11): 178-183.
- Zhu Dawei, Huang Xiuchang, Hua Hongxing. Low frequency vibration and acoustic radiation characteristics of reinforced beams with chiral covering layer [J]. Vibration and Impact, 2014, 33 (11): 178-183. (in Chinese)

Study on the Bandgap Characteristics and Vibration Reduction Performance of a Chiral Superstructure with Load and Impact Resistance

Lin Huagang^{1,2,3}, Zhang Chengxu^{1,3}, Song Haizheng^{1,3}, Wang Pan¹, Wang Jianqiang⁴

1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China

2. Research & Development Institute of Northwestern Polytechnical University in Shenzhen, Shenzhen 518063, China

3. State Key Laboratory of Clean and Efficient Turbomachinery Power Equipment, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

4. Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China

Abstract: Metamaterial structure has attracted wide attention due to its lightweight, weight bearing and vibration isolation, but the problem of narrow band gap range still exists. The chiral structure can reduce the symmetry of the system, enhance the anisotropy, and make the elastic wave band gap more easily to appear in the structure. In order to solve the impact and vibration problems in engineering, this paper proposes a negative Poisson's ratio chiral metamaterial structure with a low bandwidth gap, which is used to effectively attenuate low-frequency elastic waves, improve load-bearing and impact resistance capabilities. Based on Bloch's theorem, a theoretical model of band gap in metamaterial structures was established, and the mechanism of band gap generation was revealed through the analysis on vibration modes at the boundary of the band gap. The propagation characteristics of waves in structures were discussed using three-dimensional dispersion surfaces, frequency contour lines, phase velocities, and wave propagation directions. The mechanical properties and vibration transfer losses of chiral metamaterial structures were numerically calculated and compared with 3D printed chiral structure experiments. The results show that the structure has excellent load-bearing capacity and impact resistance, and can generate multiple low-frequency bandgaps. The transmission loss within the bandgap range can reach -85dB , which provides a new solution for suppressing low broadband vibrations in engineering.

Key Words: metamaterials; chiral structure; band gap characteristics; vibration isolation

Received: 2024-07-08; **Revised:** 2024-10-16; **Accepted:** 2024-12-13

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (20220015053005); Fundamental Research Funds for the Central Universities(5000240291); Guangdong Provincial Natural Science Foundation (2022A1515110177,2024A515011978)