

文章编号: 1001-4888(2025)04-0387-11

# 点阵夹芯结构局部振动特性分析 及无损检测方法研究\*

杨猛<sup>1</sup>, 周洁<sup>2</sup>, 励争<sup>1</sup>, 冯侃<sup>3</sup>, 陈建霖<sup>1</sup>

(1. 北京大学 工学院, 北京 100871; 2. 东莞理工学院 材料科学与工程学院, 广东东莞 523808;

3. 江苏大学 土木工程与力学学院, 江苏镇江 212013)

**摘要:** 点阵夹芯板因具有高比强度、高比刚度、强抗冲击性等特点而受到广泛的关注。在结构动态力学性能方面, 目前大部分研究仅关注结构整体振动响应, 忽略了点阵桁架局部振动特性对结构动态性能的影响, 而这种影响正是无损检测方法的基础。为研究点阵夹芯结构局部振动特性和无损检测方法, 首先, 本文从数值模拟和实验测试 2 个方面研究点阵桁架对结构中导波传播的影响, 并对波信号进行傅里叶分析和小波变换, 结果表明波信号会集中在某些峰值。然后, 通过分析导波信号和点阵单胞的局部共振模态, 证明了波信号频率峰的位置取决于点阵桁架的振动模态频率, 尤其是拉压轴向振动模态频率。最后, 本文提出了一种利用波信号频率峰位置的变化对点阵桁架进行损伤识别的方法, 并通过数值模拟进行了验证, 结果表明该方法能有效地检测和定位桁架的损伤。

**关键词:** 点阵夹芯结构; 局部振动; 波传播; 损伤识别

**中图分类号:** TB302.5

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7520/1001-4888-24-175

## 0 引言

夹芯结构因在结构轻量化、比刚度和比强度<sup>[1-2]</sup>、抗冲击性<sup>[3-7]</sup>及声学吸收<sup>[8-10]</sup>等方面具有优异性能, 目前在交通、能源和航空航天等领域得到了广泛应用。夹芯结构因其夹芯不同, 可以分为泡沫夹芯结构、蜂窝夹芯结构及点阵夹芯结构等。与传统的蜂窝夹芯和泡沫夹芯相比, 点阵夹芯在功能可定制性和结构设计灵活性上具有明显的优势。目前, 对点阵夹芯结构的研究主要集中在静态和动态特性<sup>[11-14]</sup>、抗冲击隔声隔振<sup>[15-16]</sup>及热传导<sup>[17-18]</sup>等方面。然而, 在针对点阵夹芯结构动力学特性的研究中, 很少关注点阵夹芯局部特性对结构动力学的影响, 而该影响对研究点阵夹芯结构的无损检测有重要意义。

在基于振动<sup>[19-21]</sup>和导波<sup>[22-24]</sup>的无损检测方法中, 对结构动力学特性的研究至关重要。然而, 点阵夹芯的局部特性通常被认为过于复杂, 难以对其进行理论研究。在振动特性分析方面, LOU 等<sup>[25]</sup>从理论上研究了简支夹层梁的自由振动行为; CHEN 等<sup>[26]</sup>对几何非线性引起的复合材料点阵夹芯结构的非线性振动进行了参数化研究; CUI 等<sup>[27]</sup>研究了金属点阵夹芯结构在冲击载荷下的动态响应。在波动特性方面, 已有研究通过数值模拟参数分析了蜂窝夹芯结构中的导波传播<sup>[28]</sup>。然而, 上述研究将点阵

\* 收稿日期: 2024-11-19; 修回日期: 2025-01-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(12102092, 12232001, 11702118)

通信作者: 励争(1964-), 女, 教授, 博士生导师。主要从事实验固体力学、无损检测技术、超材料等研究。Email: lizheng@pku.edu.cn

周洁(1989-), 男, 讲师, 硕士生导师。主要从事实验固体力学、复杂结构无损检测技术等研究。Email: zhoujie@dgut.edu.cn

夹芯板或蜂窝夹芯板均质化<sup>[29]</sup>,并将它们视为等效均匀结构,但这种方法忽略了夹芯的局部不连续性。夹芯的不连续性会影响夹芯结构中的导波传播<sup>[14]</sup>,而导波传播问题是研究点阵夹芯无损检测方法的基础。

由于点阵夹芯板夹芯的大空隙会阻碍超声波传播,因此传统的超声检测方法难以识别夹芯和底面板中的损伤。相比之下,基于振动和导波的无损检测方法在检测点阵夹芯板损伤方面有更大的潜力。然而,点阵夹芯结构的复杂性和损伤类型多样性导致有效的无损检测方法较少。LI等<sup>[30]</sup>发展了间隙平滑方法与 Teager 能量算子相结合的方法来检测点阵夹芯结构中的损伤,该方法抑制了夹芯结构不连续性的影响,但是降低了对小损伤的灵敏度。LU等<sup>[31-32]</sup>采用振动方法研究了金属点阵夹芯板中夹芯的损伤识别。ZHOU等<sup>[19]</sup>利用结构的周期性特征和二维连续小波变换方法,实现了对点阵夹芯结构中脱黏损伤的检测。然而,上述方法<sup>[19,30-32]</sup>均采用抑制点阵夹芯的不连续性对振动响应的影响,导致针对点阵夹芯结构的损伤识别方法复杂且精度较低,且不能用于识别夹芯的局部损伤。在导波检测方面,尽管已有一些方法<sup>[33-34]</sup>用于检测蜂窝夹层结构中的脱黏,但针对点阵夹芯板的损伤检测方法仍很少<sup>[35]</sup>。在点阵夹芯板中,导波会在界面处产生复杂的反射、透射及波形转换等行为,导致难以从波信号中提取损伤信息。本文针对点阵夹芯结构中导波传播问题,采用傅里叶变换(FT, Fourier Transform)和连续小波变换(CWT, Continuous Wavelet Transform)相结合的方式研究波信号,以揭示夹芯的局部振动对波信号的影响,其中 FT 可以提供信号在频域的整体分布,而 CWT 则可以提供信号在时域和频域分布<sup>[36]</sup>。

## 1 点阵夹芯结构中的波传播

典型的点阵夹芯结构是由上下 2 层面板和 1 个点阵桁架夹芯组成的。导波在结构中传播时,会在面板与夹芯的连接处发生波反射、透射和波形转换等相互作用。由于点阵夹芯具有周期性,理论上当导波传至点阵桁架,即可在桁架内来回反射,从而对面板产生周期性和持续性激励。针对这种复杂的波传播行为,本文分别采用有限元数值模拟方法和实验方法进行研究。

### 1.1 点阵夹芯梁中波传播的数值模拟

本文采用有限元软件 ABAQUS 计算点阵夹芯结构中的波传播问题。计算模型为包含  $1 \times 16$  个金字塔形点阵单胞的梁,命名为梁 I,如图 1(a)所示,每个单胞的几何参数如图 1(b)所示,材料的密度、弹

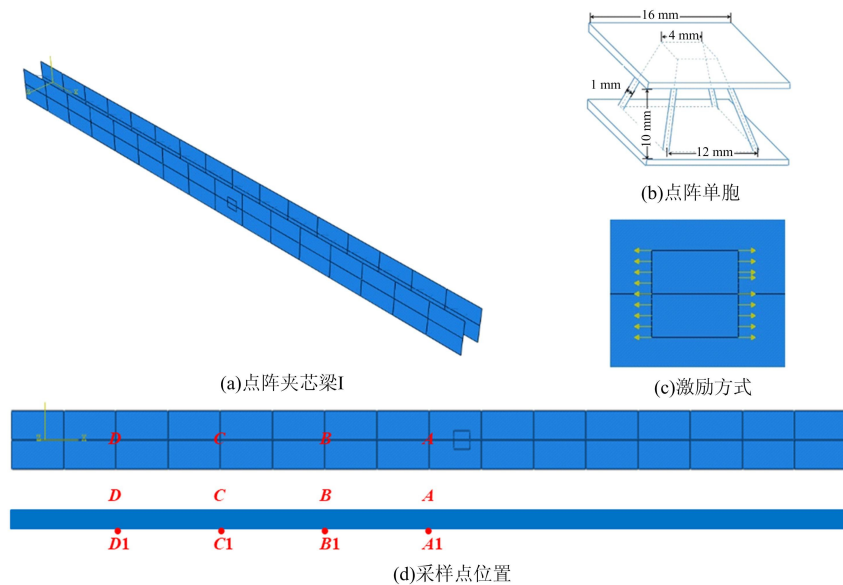


图 1 有限元模型: (a)点阵夹芯梁 I; (b)点阵单胞; (c)激励方式; (d)采样点位置

Fig. 1 FEM model: (a)lattice core sandwich beam I; (b)lattice cell;

(c)excitation method; (d)the distribution of measuring points

性模量和泊松比分别为  $2700 \text{ kg/m}^3$ 、 $70 \text{ GPa}$  和  $0.3$ 。本文选择汉宁窗调制的  $5.5$  周期正弦波信号(中心频率为  $250 \text{ kHz}$ )作为激励信号,信号在时域和频域的分布如图 2 所示(图中幅值代表信号的波动形式,没有单位),此激励信号定义为信号 I,激励方式如图 1(c)所示。分别选择 S4R 单元和 B31 单元作为面板单元和夹芯单元,单元大小选择  $0.5 \text{ mm}$  以保证每个波长长度内至少有 6 个单元。采用显式分析步,计算激励开始后  $0.5 \text{ ms}$  内点阵夹芯结构中的导波传播。8 个采样点选取如图 1(d)所示,采样点 A、B、C、D 位于受激励一侧,而 A1、B1、C1、D1 位于另一侧。在计算结果中提取各采样点的离面位移。

测量点的计算结果如图 3 所示,由图可看出,除了波前的到达时间外,难以从波信号中提取其他有效信息。FT 能将时域信号转换到频域,并在频域中提供信号的完整分布和全局视图,从而可为分析波信号提供新的视角。将图 3 中的信号进行快速傅里叶变换(FFT, Fast Fourier Transform),结果如图 4 所示。与初始激励信号 I 的频率分布(图 4 的黑色虚线)相比,所有波信号集中在特定频率区间,即在  $210 \text{ kHz}$  到  $220 \text{ kHz}$  之间。相比于下面板,上面板的波信号更为复杂,有更多频域峰。这是因为上面板传播的波信号既来源于信号 I,也

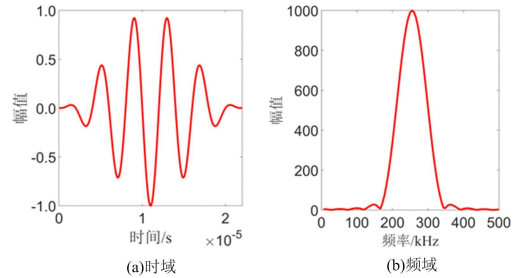


图 2 激励信号 I : (a)时域; (b)频域  
Fig.2 Excitation signal I : (a)time domain; (b)frequency domain

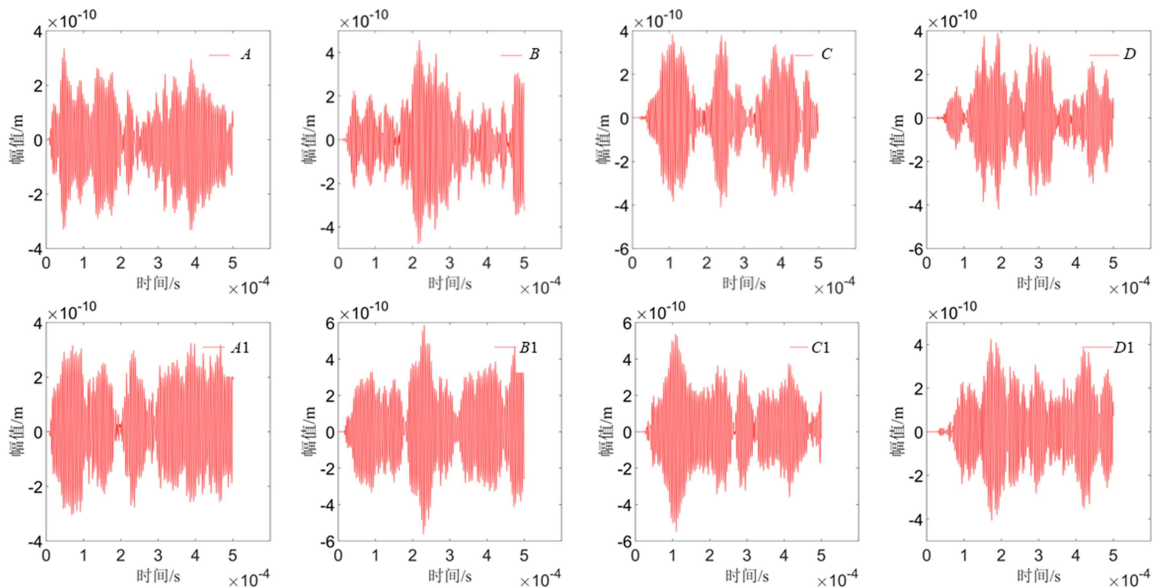


图 3 信号 I 激励的梁 I 的波信号

Fig.3 Wave signals of beam I excited by signal I

来源于桁架的持续性激励;而下面板中的波信号只是由桁架对面板的持续性激励引起的。

在需要同时具备时间和频率分辨率的信号处理时,CWT 比 FT 更有效<sup>[36]</sup>。对任意平方可积函数  $f(t)$  的连续小波变换,CWT 定义为<sup>[37]</sup>

$$Wf(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \tag{1}$$

式中:  $Wf$  为小波变换的结果,即小波系数;  $f$  和  $\psi$  分别为原始信号函数和小波函数;上划线代表函数的复共轭;  $a$  和  $b$  分别为小波函数的尺度因子和平动因子。本文中,选择复 Morlet 小波用于对信号的时频分析,其母函数的表达式为

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{3\pi}} e^{10i\pi t} e^{-\frac{t^2}{3}} \tag{2}$$

通过式(1)计算图 3 中的波信号,可得到小波系数,其模值即波信号在时频域的分布如图 5 所示。

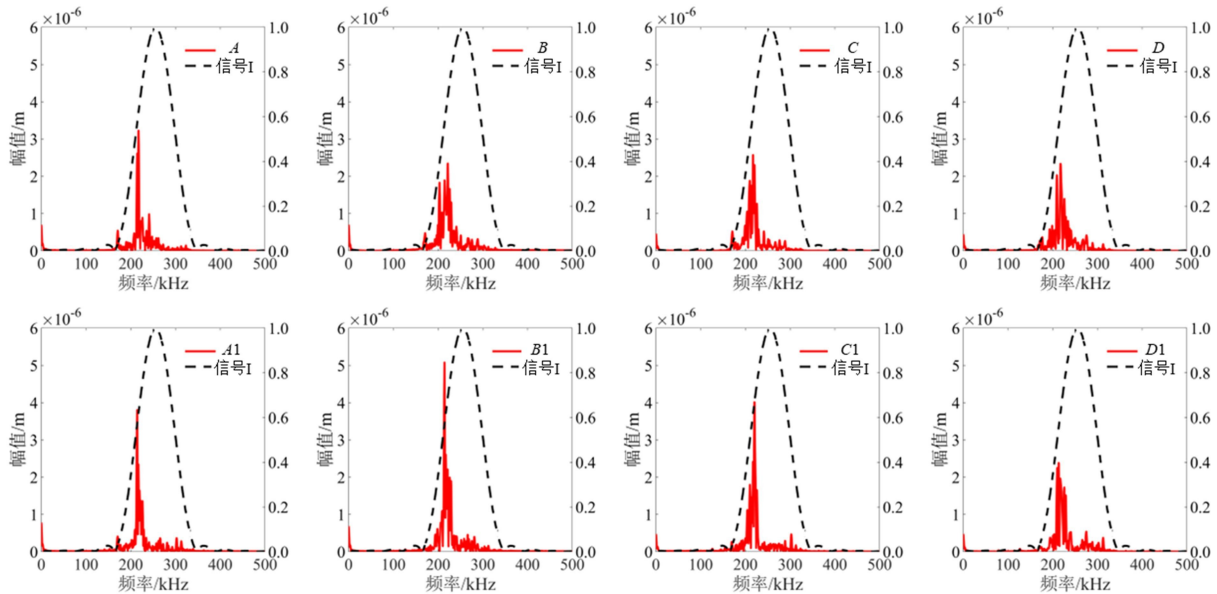


图4 信号 I 激励的梁 I 波信号的 FFT 结果

Fig. 4 FFT results of wave signals in beam I excited by signal I

在图 5 中,所有波信号在 210 kHz~220 kHz 均有明显峰值,而且下面板信号比上面板信号频率范围更为集中。上面板的波信号受到激励信号和点阵夹芯持续性反射波的影响,而下面板的波信号,仅受到点阵夹芯持续性反射波激励,除了靠近边界处 D1 的结果相对复杂外,A1、B1、C1 点在 210 kHz~220 kHz 有明显的大幅值,这些幅值与图 4 中的频率峰相对应。在 FFT 和 CWT 结果中波信号在 210 kHz~220 kHz 频段均有集中的峰值,而实验中是否也会出现相似的现象呢,为此在 1.2 节对点阵夹芯梁中波传播进行了实验测试。

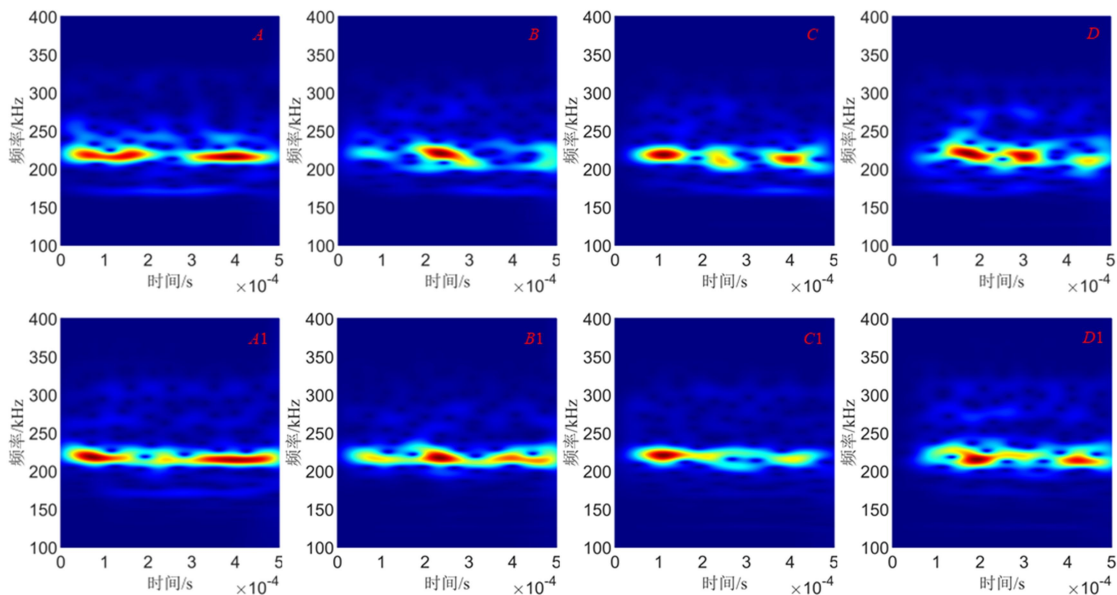


图5 信号 I 激励的梁 I 波信号的 CWT 结果

Fig. 5 CWT results of wave signals in beam I excited by signal I

## 1.2 点阵夹芯梁中波传播的实验测试

在本节中,通过实验研究点阵夹芯结构中的波传播行为,实验装置如图 6 所示。待测试件为金字塔型单胞的点阵夹芯梁,将直径为 5.4 mm、厚度为 1 mm 的压电晶片粘贴于结构中心用于激励波信号。激励信号由信号发生器(RIGOL, DG1022)产生,通过功率放大器(Brüel & Kjær, Type KH7602)放

大,传输至压电片激励结构,并使用扫描式激光多普勒测振仪(SLDV, Polytec, PSV 500)从排列在底部面板中心线上的 45 个测量点获取信号。

首先,选择中心频率为 150 kHz、3 周期汉宁窗调制的正弦波信号作为激励信号,信号在频域中分布于 50 kHz~250 kHz。经过测量,获取了 45 个测量点的波信号,通过 FFT 进行分析,每个波信号的频域分布结果及结果相加的总和如图 7 所示。从图 7 中可以看出,波信号在 173 kHz 附近出现最高峰值,而该频率并不是激励信号的中心频率(150 kHz)成分,这说明频率在 173 kHz 的波占据主导地位。为进一步研究该现象,另选择中心频率为 250 kHz 的激励信号,其频段为 100 kHz~400 kHz,测点波信号的

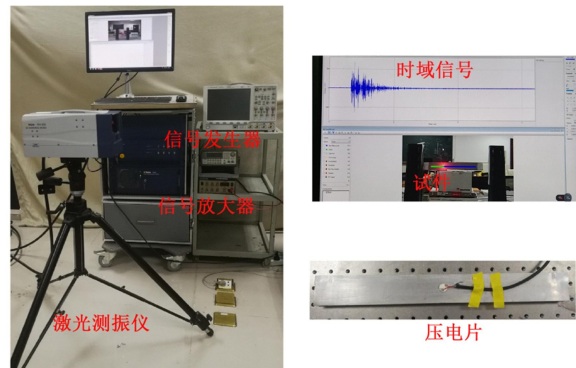


图 6 实验设备  
Fig. 6 Experimental setup

FFT 结果及其结果相加的总和如图 8 所示,最大峰值仍位于 173 kHz 处。图 8 中 173 kHz 的峰值远小于图 7 中的,这是由于激励信号的 173 kHz 成分变小所致。总而言之,实验中点阵夹芯结构中的波信号也集中在某一频段(173 kHz),这与数值模拟的结果是一致的。我们推测这种现象源于点阵夹芯的局部共振对点阵面板产生持续性的激励,为验证这种推测,将在 2.1 节对点阵夹芯的振动特性进行研究。

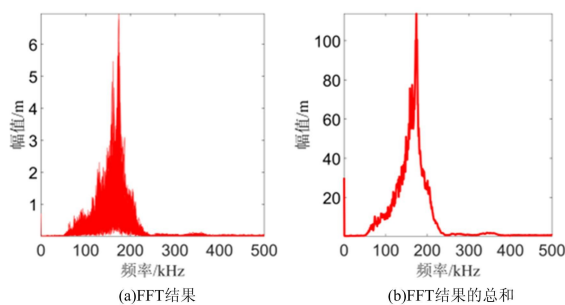


图 7 中心频率 150 kHz 的激励信号的实验结果:  
(a)FFT 结果; (b)FFT 结果的总和

Fig. 7 Experimental results by the excitation signal with central frequency of 150 kHz:

(a)all FFT results; (b)sum of all FFT results

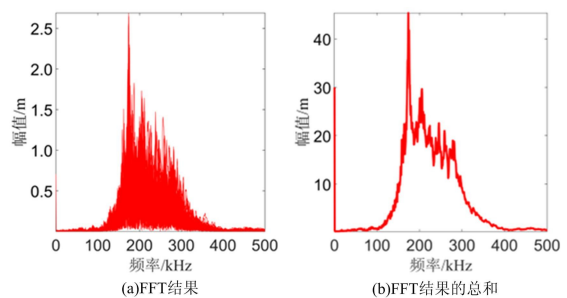


图 8 中心频率 250 kHz 的激励信号的实验结果:  
(a)FFT 结果; (b)FFT 结果的总和

Fig. 8 Experimental results by the excitation signal with central frequency of 250 kHz:

(a)all FFT results; (b)sum of all FFT results

## 2 点阵夹芯对波传播特性的影响

### 2.1 点阵夹芯的局部振动

为研究点阵夹芯的振动特性,通过 ABAQUS 中的频率分析步计算了梁 I 在 200 kHz~250 kHz 的模态振型,结果显示,一系列密集分布的模态振型集中在 214 kHz~220 kHz,振动模式均为点阵夹芯桁架的拉压模态或弯曲模态。梁 I 典型振动模态如图 9 所示,214 kHz 处的模态为桁架梁的弯曲模态,而 220 kHz 处的模态为梁的轴向拉压模态。为了研究桁架局部振动,对点阵单胞进行模态分析,计算其在 200 kHz~300 kHz 的振动模态,桁架局部振动模态如图 10 所示。点阵单胞在 214 kHz 和 220 kHz 处的振动模态(图 10(a)和图 10(b))与梁 I 在图 9 中的模态一致,两图中的振动模态均是点阵夹芯桁架局部振动的结果,模态频率也与图 4 中波信号的频率峰位置一致。其原因是,在 214 kHz 和 220 kHz 的频率下,由于导波激励桁架达到共振状态,使桁架的波信号幅值因共振效应而放大,桁架中波传播会持续激励面板,最终结果是面板的波信号集中在桁架共振的频率上。我们注意到,在图 10(c)中夹芯桁架

在 263 kHz 处也存在弯曲振动模态,而 263 kHz 在激励信号 I 的频率范围内且幅值较大,但图 4 和图 5 的波信号中均未出现明显的 263 kHz 峰值。这表明点阵夹芯桁架的轴向拉压模态可能对面板导波信号的频域分布起主导作用,因为在夹芯桁架的轴向拉压模态频率下,桁架会发生局部共振且会持续激励面板产生较大离面位移,导致面板中的波信号在频域中集中于夹芯桁架的共振频率附近。

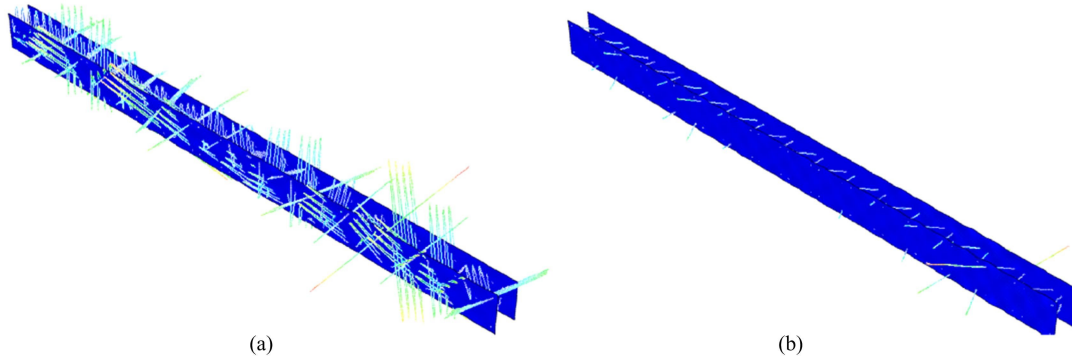


图 9 梁 I 的振动模式: (a)214 kHz; (b)220 kHz

Fig. 9 Vibration modes of beam I : (a)214 kHz; (b)220 kHz

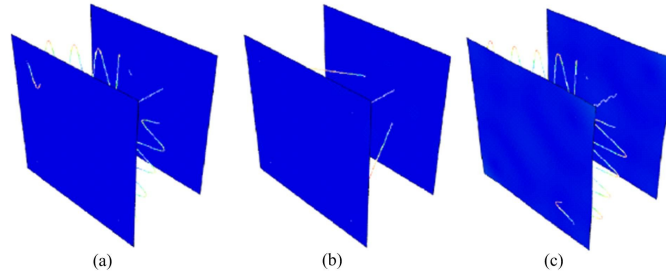


图 10 单胞的振动模式: (a)214 kHz; (b)220 kHz; (c)263 kHz

Fig. 10 Vibration modes of unit cell; (a)214 kHz; (b)220 kHz; (c)263 kHz

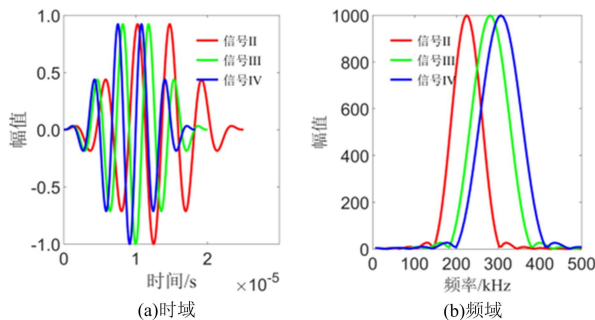


图 11 激励信号 II、III 和 IV 在时频域中的分布

Fig. 11 Time and frequency domains of signal II、III and IV

220 kHz 附近的频率成分:由信号 II 激励的波信号在 220 kHz 处有最大的频率峰;由信号 III 激励的信号在 220 kHz 处也有高幅值,约为信号 II 的 1/3,但 CWT 结果显示波信号有更高幅值的 250 kHz~350 kHz 的频率组分。这是因为激励信号 III 的频率组分在 250 kHz~350 kHz 有高幅值(图 12(b)中 FFT 结果里的黑色虚线);分析激励信号 IV 的结果,尽管图 11(c)中激励信号 220 kHz 的幅值很小,但图 12(c)中的波信号仍在 220 kHz 处有明显的频率峰,这直接说明了 220 kHz 的振动模态对波信号起到主要影响,250 kHz~350 kHz 内的峰值也源于激励信号 IV 的频率分布。图 12 的结果表明,220 kHz 的轴向拉压模态对梁 I 面板的离面位移起到主导作用,即使激励信号中该频率成分幅值很小,也可通过

为了进一步验证桁架轴向拉压模态对面板导波的影响,我们选择 3 个 5.5 周期汉宁窗调制的正弦信号,中心频率分别为 220 kHz、275 kHz 和 300 kHz,并分别命名为激励信号 II、III 和 IV,信号在时频域的分布如图 11 所示(图中幅值无单位)。这 3 个信号均有 210 kHz~220 kHz 的频率组分,但幅值有所不同。

其他条件不变的情况下,用 ABAQUS 分别计算梁 I 在信号 II、III 和 IV 激励下的响应,分析测点波信号,波信号的 FFT 和 CWT 结果如图 12 所示。图 12 中所有波信号均包含

桁架的共振放大作用在面板波信号中有较高幅值, 相比而言, 梁弯曲模态只有较小影响。总之, 点阵夹芯桁架的轴向拉压模态是波信号在频域中分布的主要影响因素。

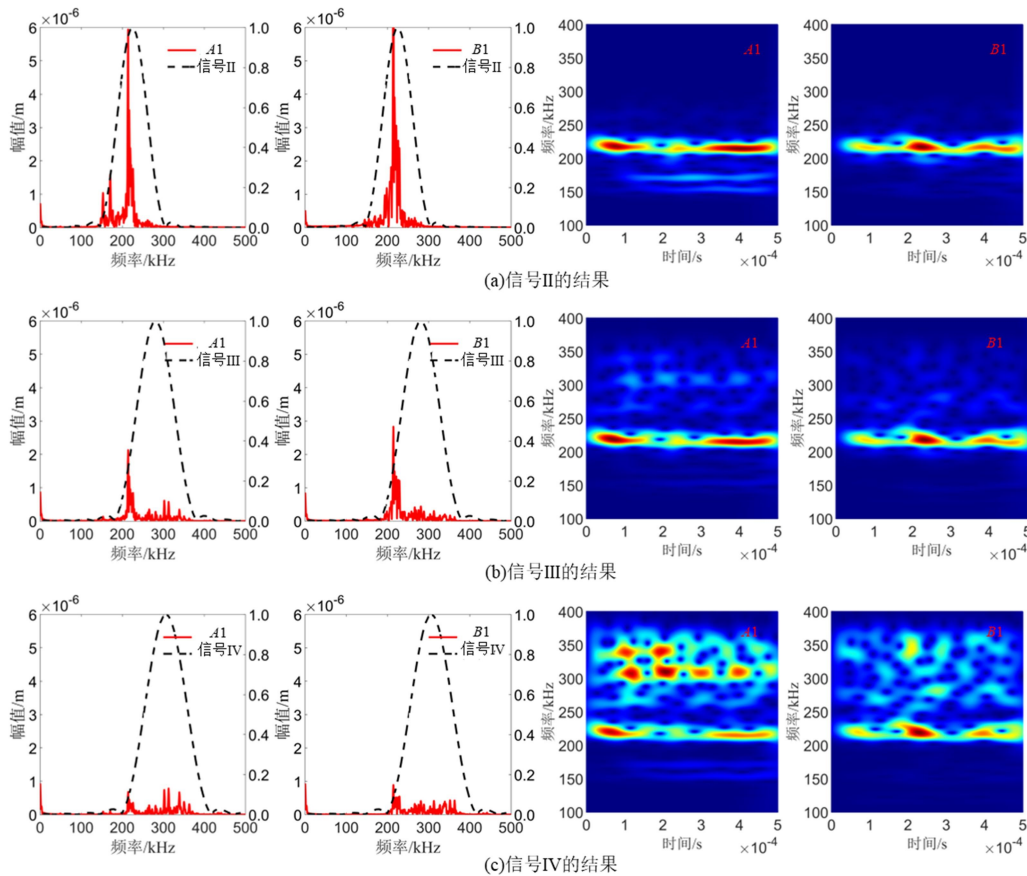


图 12 不同信号激励下的 A1 和 B1 点波信号的 FFT 和 CWT 结果: (a)信号 II; (b)信号 III; (c)信号 IV

Fig. 12 FFT and CWT results of point A1 and B1 excited by: (a)signal II; (b)signal III; (c)signal IV

### 2.2 点阵夹芯的材料参数对结构波传播的影响

本文进一步研究了点阵夹芯的材料参数对波信号的影响。根据梁的振动理论, 梁存在 3 种振动模态, 即轴向拉压模态、扭转模态和弯曲模态, 其模态频率可分别表示为

$$f_1 = k_{n1} \sqrt{\frac{EA}{\rho}}, f_2 = k_{n2} \sqrt{\frac{GI_p}{J}}, f_3 = k_{n3} \sqrt{\frac{EI}{\rho}} \quad (3)$$

式中:  $f_i (i=1, 2, 3)$  分别为梁的拉伸模态、扭转模态和弯曲模态的特征频率;  $E$  和  $G$  分别为梁材料的弹性模量和剪切模量;  $I_p$  和  $I$  为梁截面的极惯性矩和惯性矩;  $J$  为转动惯量;  $\rho$  为材料线密度;  $k_m (i=1, 2, 3)$  是待定系数, 与边界条件、梁长度、模态阶数等因素有关。对夹芯中的梁, 由于边界条件未定, 因此  $k_m$  也无法直接确定, 但对确定的夹芯结构, 边界条件和几何参数是不变的, 因此  $k_m$  是固定常数, 不会改变结构中的波传播。

根据 2.1 的结论, 点阵夹芯桁架的轴向拉压模态是波信号在频域中分布的主要影响因素, 夹芯桁架的轴向拉压模态主导面板波信号频域峰的位置。我们可以通过调控夹芯桁架的弹性模量变化来影响夹芯的轴向拉压模态频率, 从而影响面板波信号频率峰的位置。将点阵夹芯梁 I (图 1) 中夹芯的弹性模量从 70 GPa 减小到 35 GPa, 将修改后的模型定义为点阵夹芯梁 II。由式(3)可知, 由于  $k_m$  是固定常数, 弹性模量降低至原来的 1/2, 则桁架的轴向拉压模态频率应降低至原来的  $1/\sqrt{2}$ , 即从 220 kHz 降至 156 kHz。对梁 II 使用中心频率 150 kHz 的 5.5 周期汉宁窗调制的正弦信号(信号 V)激励, 并将点 A1 和 B1 的波信号进行 FFT 和 CWT, 结果如图 13 所示。

在图 13(a)中, 频域峰集中在 150 kHz~160 kHz, 最高峰恰好出现在 156 kHz; 在图 13(b)中, 信号

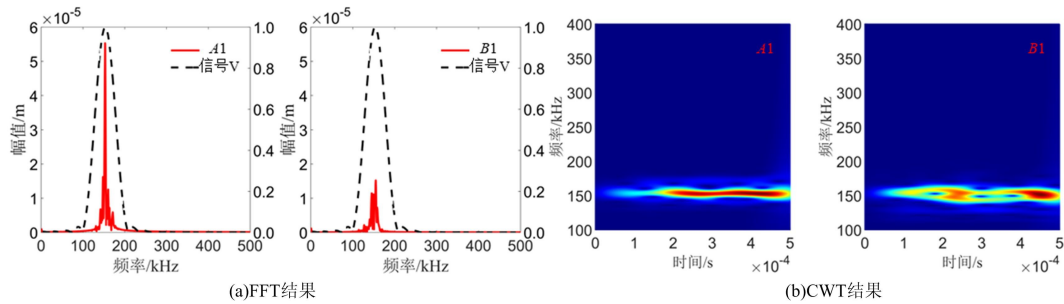


图 13 梁 II 在信号 V 激励下的波信号: (a)FFT 结果; (b)CWT 结果

Fig. 13 FFT and CWT results of beam II excited by signal V at points: (a)FFT results; (b)CWT results  
在频域上集中在 150 kHz~160 kHz。这符合根据式(3)所得出的模态频率与材料参数之间的关系,因此可以证明夹芯的弹性模量对波信号的频率峰位置有显著影响。

### 3 基于波传播的点阵夹芯结构夹芯的损伤识别方法

通常结构损伤会导致刚度的衰减,在点阵夹芯结构中夹芯刚度的减小,会通过改变夹芯桁架轴向拉压振动的模态频率引起面板导波频率峰的改变。基于这一特性,可以通过分析导波信号频率成分的改变来检测夹芯损伤。为验证损伤识别方法的可行性,将点阵夹芯梁 I 中测点 A 和 B 之间的 2 个单胞替换成损伤单胞,损伤单胞桁架的弹性模量为 35 GPa,定义含 2 个损伤单胞的模型为梁 III。

我们对信号 II 激励下点阵夹芯梁 III 中的导波传播进行数值模拟,采样点 A1、B1、C1、D1 波信号的 FFT 和 CWT 结果如图 14 所示。与健康结构梁 I 的结果(图 11(a))相比,图 14(a)中波信号均在 156 kHz 处出现与图 13(a)相同位置的额外峰值,此峰是由于导波在刚度减小的损伤单胞中传播而产生的。夹芯损伤可通过频率峰值的出现来识别,并且损伤的程度可利用式(3)进行计算,损伤位置也可通过频率峰的幅值进行估计(点 B1 处 156 kHz 峰值的幅值明显大于其他点,说明损伤单元更接近点 B1)。点阵夹芯的损伤、屈曲及面板与夹芯之间的界面脱黏是点阵夹芯结构损伤的主要类型,而这些损伤均会导致夹芯轴向振动频率的改变,因此,通过分析面板波信号的频率成分变化可以监测结构夹芯的健康状况,对夹芯损伤、脱黏损伤等实现监测,这个方法为点阵夹芯结构夹芯的损伤识别提供了一种思路。

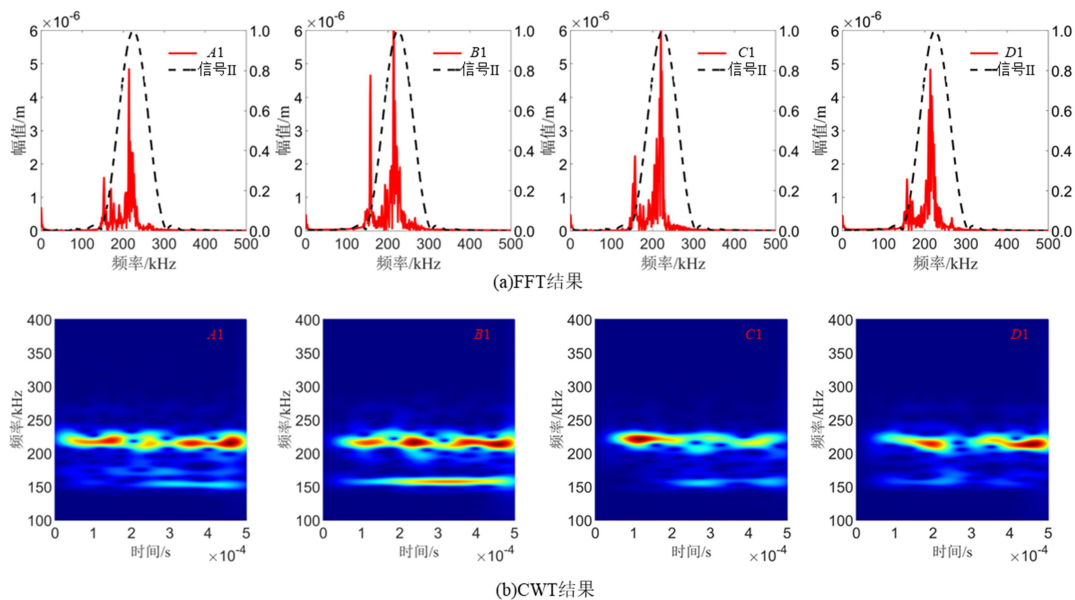


图 14 梁 III 中测点 A1、B1、C1、D1 的结果: (a)FFT 结果; (b)CWT 结果

Fig. 14 Results of points A1、B1、C1、D1 in beam III: (a)FFT results; (b)CWT results

尽管利用新出现的频率峰可以实现夹芯的损伤识别和评估,但仍存在一些局限。首先,本节所提方法仅对夹芯的损伤敏感,无法用于检测面板损伤;其次,损伤位置不能被精确识别;最后,本方法需要获得健康结构中波信号的频域分布作为基准,但实际应用中难以获取基准。尽管波信号包含很多损伤信息,但由于点阵夹芯结构中波的复杂性,分析波信号极具挑战性。在后续工作中,可将深度学习算法应用到分析复杂的波信号,深度学习方法可以通过处理复杂波信号反演结构刚度分布,这也是未来结构健康监测领域的重要方向之一。

## 4 结论

本文研究了点阵夹芯结构中波信号与点阵夹芯局部振动之间的关系,得出以下结论:

1)数值模拟和实验结果表明,点阵夹芯结构面板中的波信号在频域上会集中到特定峰值,这些峰值的位置取决于夹芯桁架的局部振动。

2)夹芯的拉压振动模态频率是面板波信号中频率峰值位置的主导因素,改变夹芯材料属性会导致波信号频率峰的位置改变。

3)针对点阵夹芯结构,可以根据测点波信号频率峰的变化来监测点阵夹芯结构损伤是否存在,且根据频率峰位置幅值等信息能进一步判断夹芯损伤的位置和程度。

### 参考文献:

- [1] 管国阳,刘志昌,胡国平,等. 铝面板厚度对 Nomex 蜂窝夹层结构冲击后弯曲性能影响的试验研究[J]. 实验力学, 2017, 32(4):551-558 (GUAN Guoyang, LIU Zhichang, HU Guoping, et al. Experimental study of the effect of aluminum panel thickness on flexural properties of nomex honeycomb sandwich structure subjected to low velocity impact[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(4):551-558 (in Chinese))
- [2] LEI M, WANG P, DUAN S Y, et al. Novel conformal sandwich lattice structures: Design concept, fabrication and mechanical properties[J]. Thin-Walled Structures, 2024, 199:111806.
- [3] ZHANG J X, ZHOU R F, WANG M S, et al. Dynamic response of double-layer rectangular sandwich plates with metal foam cores subjected to blast loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, 122:265-275.
- [4] QIN Q H, CHEN S J, LI K K, et al. Structural impact damage of metal honeycomb sandwich plates[J]. Composite Structures, 2020, 252:112719.
- [5] YIN H F, ZHANG W Z, ZHU L C, et al. Review on lattice structures for energy absorption properties[J]. Composite Structures, 2023, 304:116397.
- [6] GUO H Y, YUAN H, ZHANG J X, et al. Review of sandwich structures under impact loadings: Experimental, numerical and theoretical analysis[J]. Thin-Walled Structures, 2024, 196:111541.
- [7] DENG Y F, NIU Y J, DU C Z. Research on low-velocity impact resistance of spherical honeycomb sandwich structures[J]. Thin-Walled Structures, 2024, 204:112310.
- [8] PIERRE J, IERVOLINO F, FARAHANI R D, et al. Material extrusion additive manufacturing of multifunctional sandwich panels with load-bearing and acoustic capabilities for aerospace applications[J]. Additive Manufacturing, 2023, 61:103344.
- [9] LI H, HU Y B, CHEN J L, et al. Lightweight meta-lattice sandwich panels for remarkable vibration mitigation: Analytical prediction, numerical analysis and experimental validations[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2022, 163:107218.
- [10] LI H, HU Y B, HUANG H Y, et al. Broadband low-frequency vibration attenuation in 3D printed composite meta-lattice sandwich structures[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 215:108772.
- [11] FAN H L, YANG L, SUN F F, et al. Compression and bending performances of carbon fiber reinforced lattice-core sandwich composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2013, 52:118-125.
- [12] 段晟昱,王潘丁,刘畅,等. 增材制造三维点阵结构设计、优化与性能表征方法研究进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(14):36-48, 57 (DUAN Shengyu, WANG Panding, LIU Chang, et al. Research progress on design, optimization and performance characterization of additive manufactured 3D lattice structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(14):36-48, 57 (in Chinese))

- [13] LI B, LIU Y Q, TAN K T. A novel meta-lattice sandwich structure for dynamic load mitigation[J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2019, 21(6):1880-1905.
- [14] CHEN J S, SUN C T. Wave propagation in sandwich structures with resonators and periodic cores[J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2013, 15(3):359-374.
- [15] 张武昆, 谭永华, 高玉闪, 等. 周期性轻质多孔结构在能量吸收和振动方面的研究进展[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(8):1-19 (ZHANG Wukun, TAN Yonghua, GAO Yushan, et al. Research progress on energy absorption properties and vibration of periodic lightweight porous structures[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(8):1-19 (in Chinese))
- [16] JIA M, DAI N, WANG T W, et al. A compact quasi-zero stiffness metamaterial for energy absorption and impact protection[J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 205:112360.
- [17] WANG X W, WEI K, TAO Y, et al. Thermal protection system integrating graded insulation materials and multilayer ceramic matrix composite cellular sandwich panels[J]. *Composite Structures*, 2019, 209:523-534.
- [18] BHANGALE R K, GANESAN N. Thermoelastic buckling and vibration behavior of a functionally graded sandwich beam with constrained viscoelastic core[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 295(1/2):294-316.
- [19] ZHOU J, LI Z. Damage detection based on vibration for composite sandwich panels with truss core[J]. *Composite Structures*, 2019, 229:111376.
- [20] 李超, 周立成, 刘泽佳, 等. 基于移动主成分分析敏感特征的智能损伤识别方法[J]. *实验力学*, 2024, 39(6):672-684 (LI Chao, ZHOU Licheng, LIU Zejia, et al. A novel intelligent damage identification method utilizing sensitive features extracted by moving principal component analysis[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2024, 39(6):672-684 (in Chinese))
- [21] XU W, ZHU W D, CAO M S, et al. A novel damage index for damage detection and localization of plate-type structures using twist derivatives of laser-measured mode shapes[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2020, 481:115448.
- [22] YUE J K, HONG X B, CUI B, et al. Omni-directional wavenumber dictionary modified imaging method for orthotropic composites damage detection using ultrasonic guided waves[J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 205:112419.
- [23] LI G Y, CHATTOPADHYAY A. Multi-dimensional signal processing and mode tracking approach for guided wave based damage localization in X-COR sandwich composite[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 109:134-149.
- [24] 骆英, 毛雨欣. 一种基于 Lamb 波的智能结构损伤识别方法[J]. *实验力学*, 2022, 37(3):305-314 (LUO Ying, MAO Yuxin. An intelligent structural damage identification method based on Lamb wave [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2022, 37(3):305-314 (in Chinese))
- [25] LOU J, MA L, WU L Z. Free vibration analysis of simply supported sandwich beams with lattice truss core[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2012, 177(19):1712-1716.
- [26] CHEN J N, ZHANG W, SUN M, et al. Parametric study on nonlinear vibration of composite truss core sandwich plate with internal resonance[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, 30(9):4133-4142.
- [27] CUI X D, ZHAO L M, WANG Z H, et al. Dynamic response of metallic lattice sandwich structures to impulsive loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 43:1-5.
- [28] HOSSEINI S M H, GABBERT U. Numerical simulation of the Lamb wave propagation in honeycomb sandwich panels: A parametric study[J]. *Composite Structures*, 2013, 97:189-201.
- [29] RABCZUK T, KIM J Y, SAMANIEGO E, et al. Homogenization of sandwich structures[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2004, 61(7):1009-1027.
- [30] LI B, LI Z, ZHOU J, et al. Damage localization in composite lattice truss core sandwich structures based on vibration characteristics[J]. *Composite Structures*, 2015, 126:34-51.
- [31] LU L L, SONG H W, HUANG C G. Experimental investigation of unbound nodes identification for metallic sandwich panels with truss core[J]. *Composite Structures*, 2017, 163:248-256.
- [32] LU L L, SONG H W, YUAN W, et al. Baseline-free damage identification of metallic sandwich panels with truss core based on vibration characteristics[J]. *Structural Health Monitoring*, 2017, 16(1):24-38.

- [33] SONG F, HUANG G L, HU G K. Online guided wave-based debonding detection in honeycomb sandwich structures[J]. *AIAA Journal*, 2012, 50(2):284-293.
- [34] SIKDAR S, BANERJEE S. Guided wave propagation in a honeycomb composite sandwich structure in presence of a high density core[J]. *Ultrasonics*, 2016, 71:86-97.
- [35] 赵倩, 冯侃. 基于高频动态响应的点阵夹芯结构损伤识别研究[J]. *应用力学学报*, 2023, 40(4):873-882 (ZHAO Qian, FENG Kan. Research on damage identification of lattice sandwich structure based on high frequency dynamic response[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2023, 40(4):873-882 (in Chinese))
- [36] LIU Y, LI Z, ZHANG W. Crack detection of fibre reinforced composite beams based on continuous wavelet transform[J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2010, 25(1):25-44.
- [37] MALLAT S. *A wavelet tour of signal processing*[M]. Amsterdam: Elsevier, 1999.

## Analysis of local vibration characteristics and non-destructive testing methods for lattice sandwich structures

YANG Meng<sup>1</sup>, ZHOU Jie<sup>2</sup>, LI Zheng<sup>1</sup>, FENG Kan<sup>3</sup>, CHEN Jianlin<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, Guangdong, China;

3. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China)

**Abstract:** Lattice sandwich structures have drawn considerable attention in engineering applications owing to their exceptional specific strength, specific stiffness, and outstanding impact resistance. Regarding structural dynamic performance, current research predominantly concentrates on global vibration responses while overlooking the influence of local vibration characteristics of lattice trusses on dynamic behavior as fundamental aspects for nondestructive evaluation techniques. This investigation systematically examined the local vibration properties and damage detection methods for lattice sandwich structures. Firstly, combined numerical simulations and experimental measurements were conducted to analyze the effects of lattice trusses on guided wave propagation characteristics. Signal processing through Fourier analysis and wavelet transform revealed distinct energy concentrations at specific frequency peaks. Furthermore, by correlating the guided wave signals with local resonance modes of lattice unit cells, we demonstrated that these characteristic frequency peaks were intrinsically determined by the vibrational modal frequencies of lattice trusses, particularly their axial compression-tension vibration modes. Based on these findings, an innovative damage identification methodology is developed that utilizes the frequency peak shifts in wave signals for structural integrity assessment. The proposed approach is numerically validated, with results confirming its effectiveness in both damage detection and localization for lattice truss structures.

**Keywords:** lattice core sandwich structure; local vibration; wave motion; damage identification