

# 基于高频动态特性的点阵结构损伤识别研究\*

冯侃<sup>1</sup>, 陆蕾玲<sup>1</sup>, 夏雨<sup>1</sup>, 周天瑜<sup>1</sup>, 赵倩<sup>1</sup>, 励争<sup>2</sup>

(1. 江苏大学土木工程与力学学院 镇江, 212013) (2. 北京大学工学院 北京, 100871)

**摘要** 针对轻质点阵结构中的脱焊损伤,文中采用高频动态响应特性分析方法,通过测量损伤局部处的共振响应,直接对脱焊点进行定位。基于数值方法计算模拟了轻质点阵结构的高频响应,研究了含多个脱焊损伤的点阵结构在高频段内的固有频率和固有振型。结果显示,损伤处将产生明显的局部共振。在实验验证中提出了采用压电片的宽频激励方式,结合扫描式激光测振仪全场测量,计算得到结构在激励频段的频响函数。通过分析频响函数峰值频率对应的固有振型,准确识别出损伤位置。数值与实验研究结果均表明,对轻质点阵结构的高频响应特性进行模态参数识别,可有效识别定位脱焊损伤。

**关键词** 轻质点阵结构;高频动态响应;损伤识别;局部共振

**中图分类号** O329; TB52+3; TH113.1

## 引言

近年来,点阵夹芯结构作为一种具有超轻质、高比强度、高比刚度、超强韧等性能新型多功能材料,广泛应用于航空航天、交通运输、国防军事等领域。点阵材料是微结构有序的多孔新型复合材料,包括2维和3维点阵材料,2维点阵材料主要由多边形进行2维排列,在第三方向拉伸成棱柱,如蜂窝材料等,3维点阵材料则由杆、板等元件按一定规则重复排列构成空间框架结构。作为典型的多孔材料,点阵材料的密度远低于传统固体材料,采用点阵复合夹芯结构比相同性能的传统金属结构质量轻70%<sup>[1]</sup>。

点阵夹芯结构是理想的抗爆炸、弹道冲击的轻质结构材料<sup>[2]</sup>。点阵多孔夹芯结构在冲击荷载下,在内部会产生塑性变形,此动态失稳便可转化为热能,同时吸收掉大部分的冲击能量,对其起到防护的作用<sup>[3]</sup>。利用点阵夹芯结构来代替现有的军事装甲结构便可在保证强度一定时减轻重量并有效提高结构对弹道和爆炸冲击的保护,目前大多数研究均着重于结构的动态响应弹道冲击和爆炸产生的冲击波的冲击。Goldsmith等<sup>[4]</sup>通过一系列准静态和弹道冲击实验,研究了铝蜂窝夹芯结构的变形和破坏机制并给出了几种典型的蜂窝夹芯板的弹道冲击极

限。Skvortosov等<sup>[5]</sup>从能量守恒角度出发,在描述夹芯结构弯曲和剪切变形的两个微分方程的基础上,建立了处理弹道冲击中能量分配的解析模型。Nia等<sup>[6]</sup>研究了金属蜂窝的弹道冲击极限、能量耗散以及破坏区域,并与之前建立的解析模型进行了比较。朱小芹等<sup>[7]</sup>研究了点阵材料夹芯筒支梁在冲击载荷下的动力响应,证实了点阵材料夹芯筒支梁具有良好的抗冲击性能。另一方面,由于点阵材料具有大比表面积,在强迫对流下是优良的传热介质。而若在孔隙率较大的点阵材料中填充隔热纤维<sup>[8]</sup>,便可隔热。此外,点阵材料通过孔壁和连接杆件的振动可以吸收声能,实现隔声功能<sup>[9]</sup>。

然而,由于点阵材料构型复杂,在制造或使用过程中容易形成各类损伤,如杆件的脱焊等典型损伤,这将降低材料的力学承载性能,威胁结构的整体安全性。结构损伤检测技术目前已经比较成熟,如采用导波检测技术<sup>[10-11]</sup>,相控阵检测技术<sup>[12]</sup>等。但对于具有复杂结构的点阵材料,相关的文献及检测方法并不多。Wallach等<sup>[13]</sup>利用数值计算方法讨论了局部杆单元缺失对点阵材料力学性能的影响。Lu等<sup>[14]</sup>在时域下分析了点阵结构的动态响应,并研究了结构中的损伤识别定位。田淑侠等<sup>[15]</sup>分析了损伤引起的点阵结构振型参数的改变,并通过数值模拟验证,实现了点阵结构中脱焊的损伤定位。Li

\* 国家自然科学基金资助项目(1702118,11672004,11520101001);江苏省基础研究计划资助项目(BK20170520);江苏省高校自然科学研究资助项目(17KJB130005)

收稿日期:2019-06-18;修回日期:2019-07-18

等<sup>[16]</sup>针对复合材料点阵结构的单胞缺失、连接杆件断裂等损伤,采用振型平滑法对面板的振型进行损伤识别,准确定位了损伤位置。

目前,针对于点阵结构损伤评估的研究均是采用低阶振型进行识别,一方面是由于高频振动难以激励,另一主要原因是结构的高频响应非常复杂,尤其是对于构型复杂的点阵结构。然而,对于结构中的微小损伤,低频振动往往难以准确的定位损伤,甚至可能漏检损伤的存在。因此,对于点阵结构的损伤检测,迫切需要对其高频动态响应进行研究。笔者采用数值模拟与实验测量相结合的方法,分析了点阵夹芯板在高频激励下的动态性能。同时对结构中的脱焊损伤,分析了其高频响应下的局部振动特性,并以此进行损伤识别。数值模拟与实验检测结果均表明,采用高频激励检测技术能快速有效地对结构中损伤进行定位识别。

## 1 数值分析

对于点阵结构中的脱焊损伤,由于在高频激励下,结构的损伤处将产生局部共振,因此本研究首先通过数值模拟分析了健康与损伤结构在高频下的固有振型。

### 1.1 轻质点阵结构有限元模型

采用数值仿真软件 COMSOL 对正四面体桁架构型的轻质点阵结构建模计算。结构几何尺寸如图 1 所示。图 1(a)为单胞的结构构型示意图,其中包含了 3 个矩形截面的梁,构成正四面体的 3 条棱,每根梁长为 15 mm。上下面板厚度均为 1 mm。图 1(b)显示了轻质点阵夹芯板的整体结构,共包含  $16 \times 10$  个单胞。点阵结构高度为 12.2 mm。为了提高计算效率,笔者采用壳和梁单元进行计算。面板与桁架的材料均为铝,材料参数为:弹性模量  $E=71 \text{ GPa}$ ,泊松比  $\nu=0.33$ ,密度  $\rho=2700 \text{ kg/m}^3$ 。仿真模拟时,对上下两层面板的四边均设为简支边界条件。

为了模拟脱焊损伤,在数值仿真中采用脱开耦合点进行模拟。图 2 显示了包含几种损伤情形的点阵结构。由于损伤引起了结构的变化,与传统低频检测技术不同,在高频激励下,脱焊点处面板的动态特性将显著发生改变,即会产生局部振型。因此本研究将分析结构在高频下的响应,并通过结构的局部共振振型判断脱焊损伤存在的位置。

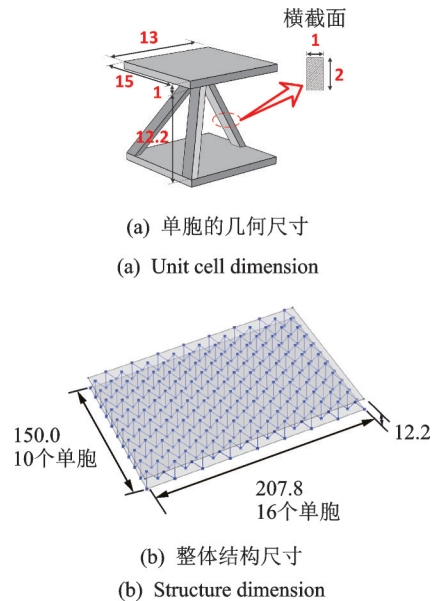


图 1 点阵结构的几何尺寸(单位:mm)

Fig.1 Dimension of the lattice structure(unit:mm)

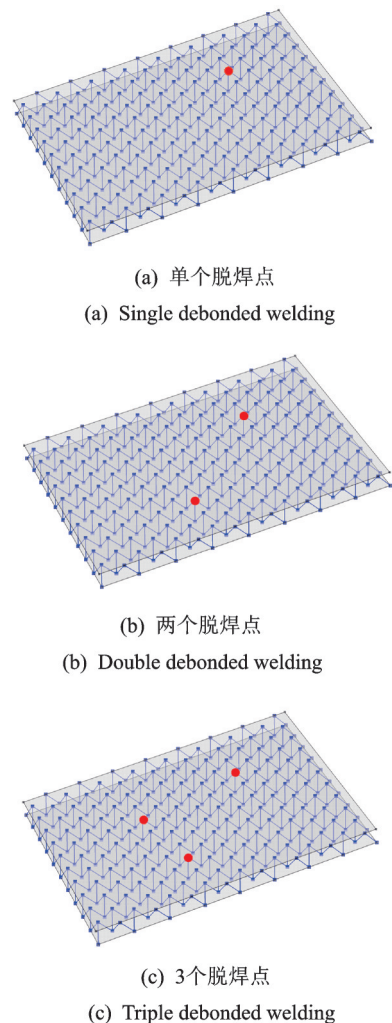


图 2 包含不同脱焊损伤情形的点阵结构(红点为模拟脱焊点)

Fig.2 Lattice structures with different damages (red dots represent the debonded welding)

### 1.2 数值模拟结果

对于脱焊情况下局部自由面板,其局部共振频率近似为该区域面板在简支条件下的一阶固有频率,经计算为 8 kHz。因此本研究分析了结构在 7~9 kHz 间整体结构固有频率。由于局部共振效应,在整体的固有振型中将明显显示出脱焊点的位置。图 3 分别显示了检测频段内,点阵结构在健康时存在 3 种不同脱焊损伤缺陷时的固有频率及固有振型。从图 3(a)中结构健康状态下的固有振型可以看出,在此频段内,结构的动态响应特性仍表现出整体性,即类似于矩形板的固有振型。由于结构中点阵夹层层通过焊点与面板连接,因此在焊点处的振型不光滑。当结构中存在

脱焊损伤时,由于高频激励,损伤处的面板产生了明显的局部共振,如图 3 (b,c,d)中振型所示。因此通过损伤所产生的局部振型,可以直接识别出损伤的位置。需要说明的是,由于产生局部振型,健康与损伤结构相同阶次固有振型之间并没有明显的对应关系,并且在所测频段内的固有频率阶次次数也不一样,这与低频激励时的损伤检测不同,因此不能通过直接比较健康与损伤结构的固有振型差别进行损伤识别。此外,从含损伤的固有振型可以看出,当脱焊点位于固有振型节线处时,如图 3(b)中,右上角损伤在频率 7 788.2 Hz 的固有振型中并不明显。因此,在实际的损伤识别检测中,须选用相对宽的频率信号进行激励,以避免漏检。

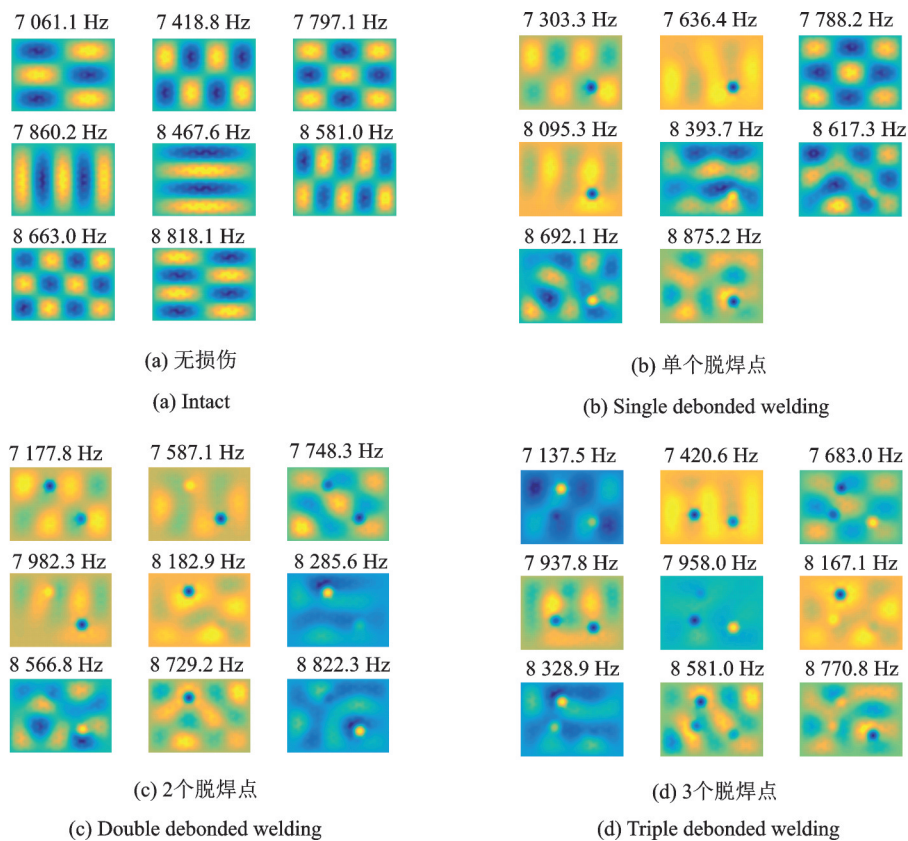


图 3 健康与损伤点阵结构在 7~9 kHz 频段内的固有频率和固有振型

Fig.3 The mode frequencies and mode shapes of intact and damaged structures in 7~9 kHz

## 2 高频动态特性及损伤识别实验

### 2.1 实验件及设备

选取的实验件如图 4 所示。单胞尺寸与数值模拟一致,试件整体结构尺寸为 380 mm×43 mm×12.2 mm,包含 26×3 个单胞。整体实验装置示意图如图 4(a,b)所示。在对健康结构检测后,为了模拟脱焊损伤,在结构中锉断一个杆件与面板的焊点,如

图 4(c)所示。

传统的激励方法,如力锤和激振器,由于频率的限制,很难得到高频的激励信号。为了测量结构在高频下的响应,本研究采用压电片作为激励器,粘贴在试件中心(图 4(c))。为了增强激励信号,将生成的激励信号经 KH 7602M 功率放大器放大,再接至压电片。采用 PSV-500 扫描式多普勒激光测振仪 (scanning laser doppler vibrometry, 简称 SLDV) 测

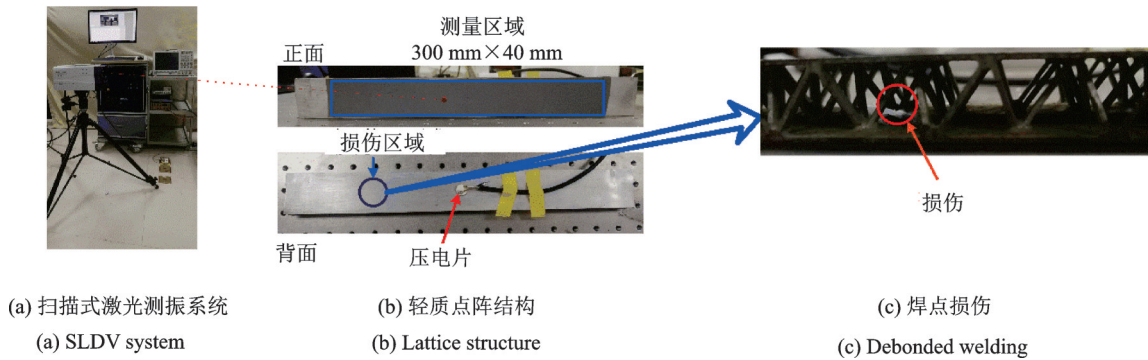


图 4 实验装置及试验件  
Fig 4 Experimental setup and the specimen

量采集点阵结构面板的振动响应。为了提高激光测振检测精度,在试件表面粘贴反光膜以增加反射信号。

对压电片在所测频段的响应进行检测。对压电片激励一组稳态谐振信号,频率为 7~9 kHz,间隔为 50 Hz,直接测量压电片在各个频率激励下的振动响应,并做最大值归一化。测量结果如图 5 所示。图 5 显示了压电片在该频段的响应虽存在一定的波动性,但相对偏差不大,且各频率都有较大的响应,可满足检测激励需求。

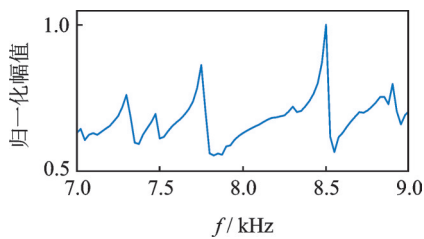
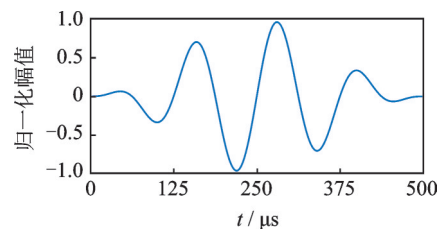


图 5 压电片在 7~9 kHz 频段响应函数  
Fig 5 Frequency response functions of PZT between 7~9 kHz

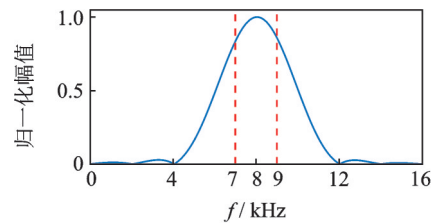
为了激励高频宽频段信号,选取经 Hanning 窗调制的四周期正弦函数为激励信号,中心频率为 8 kHz(图 6(a))。从图 6(b)中可看出,所选的激励信号在检测所需的 7~9 kHz 范围内具有较高的能量分布。

### 2.2 实验检测

采用扫描式激光多普勒测振仪分别测量健康时以及损伤后点阵结构表面的振动响应。测量区域设置为 30 mm x 4 mm,测点间隔为 5 mm,共 549 个测点。为了提高测量精度,每个测点重复测量 5 次取平均。需要说明的是,由于仅测量了点阵结构单侧面板的振动响应,得到的是局部结构的频响函数,即



(a) 时域信号  
(a) Time domain



(b) 频域信号  
(b) Frequency domain

图 6 激励信号  
Fig 6 Excitation signal

$$H(\omega) = Y(\omega) / X(\omega) \quad (1)$$

其中:  $X(\omega)$  和  $Y(\omega)$  分别为激励与检测信号经傅里叶变换后的频域信号。

由于需考虑压电片激励的频响效应,以及激励函数的频谱分布,故有

$$X(\omega) = X_{PZT}(\omega) X_{act}(\omega) \quad (2)$$

其中:  $X_{PZT}(\omega)$  为压电片的频率响应;  $X_{act}(\omega)$  为输入激励的频域信号,即分别如图 5 和图 6(b) 所示。

图 7 显示了健康与损伤结构单侧面板的归一化局部频响函数。从中可以看出,由于损伤的影响,结构频响函数曲线在高频段有较大的改变。因为在高频段产生了局部振型,并不能如低频检测损伤时,分析对应振型固有频率的改变。为了验证采用 4 峰波激励测量频响函数的正确性,对损伤结构受各频率稳态激励情形下的响应进行测量,即分别以单频简

谐作为输入的激励电信号,频率间隔 100 Hz,测量结构在稳态时的响应,如图 7 中菱形点所示。可以看出,采用本方法与稳态激励测得的结果趋势吻合良好,说明用宽频信号激励可以准确测定结构高频响应。由于分别激励单频信号检测非常耗时,且频率间隔较宽,容易遗漏峰值靠近的固有频率,如图中 7.70 与 7.82 kHz 存在两个峰值,采用单频稳态激励时容易漏检。采用宽频的 4 峰波激励信号,仅需一次测量即可得到宽频的频响函数,测量效率将大大提高,同时也可以提高频率检测分辨率。

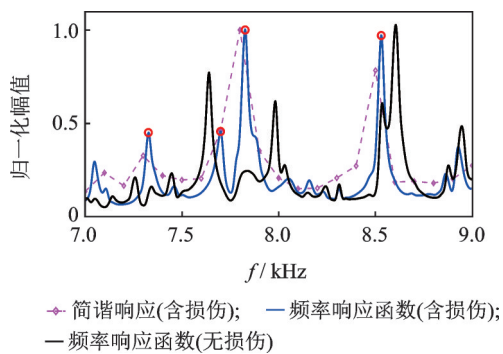


图7 点阵结构单侧面板的频响函数

Fig.7 Frequency response functions (FRF) of single face-sheet of lattice structure

选取损伤结构频响函数中 4 个峰值频率(图 8 中红圈标出, 7.32, 7.70, 7.82, 8.52 kHz), 得到结构对应的固有振型, 如图 8 所示。

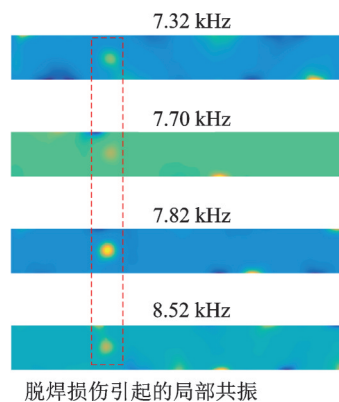


图8 含损伤结构在 7~9 kHz 间的 4 阶固有振型及损伤引起局部振型

Fig.8 The mode frequencies and shapes of damaged structure between 7~9 kHz

与计算结果类似,当结构中出现脱焊损伤时,从图 8 中可以看出,在结构受到高频激励时,将出现局部共振。综合考虑所测频段内各阶固有振型,可以明显标示出脱焊点的位置。与图 4(b)中损伤实际

位置对比看出,文中监测方法可对脱焊损伤位置快速有效识别。需要说明的是,由于检测试件较小,边缘处部分面板没有焊点与夹芯层连接,因此在固有振型中,面板的边缘位置也存在较大的响应,但这并不影响损伤的准确识别。

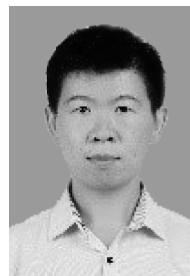
### 3 结束语

笔者提出了一种结构高频响应的测量方法,并将其应用于轻质点阵结构的脱焊损伤识别。通过数值模拟分析可以看出,无损伤的点阵结构在激励频段 7~9 kHz 表现出整体性能,即类似于简支板的固有振型。当结构中存在损伤时,损伤处的面板将产生局部共振,据此即可进行损伤识别。基于数值模拟的结论,实验中采用压电片激励高频宽频段信号。结果表明,本方法可快速有效测量结构在高频段的频率响应。进一步分析结构面板的固有振型,可直接对脱焊损伤位置快速有效识别。对于轻质点阵结构其他类型的损伤,如夹芯层屈曲、单胞缺失等,需要分析损伤引起的局部共振情形,以确定激励频率与检测区域,将在之后的工作中讨论。笔者的研究方法可为结构健康监测与管理提供新的技术支持。

### 参 考 文 献

- [1] EVANS A, HUTCHINSON J, FLECK N, et al. The topological design of multifunctional cellular metals [J]. *Progress in Materials Science*, 2001, 46(3/4):309-327.
- [2] HUTCHINSON J, XUE Z. Metal sandwich plates optimized for pressure impulses [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2005, 47(4/5):545-569.
- [3] XUE Z, HUTCHINSON J W. A comparative study of impulse-resistant metal sandwich plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, 30(10):1283-1305.
- [4] GOLDSMITH W, LOUIE D. Axial perforation of aluminum honeycombs by projectiles [J]. *International Journal of Solids & Structures*, 1995, 32(8/9):1017-1046.
- [5] SKVORTOSOV V, KEPLER J, BOZHEVOLNAYA E. Energy partition for ballistic penetration of sandwich panels [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 28(7):697-716.
- [6] NIA A, RAZAVI S, MAJZOBI G. Ballistic limit determination of aluminum honeycombs-experimental study [J]. *Materials Science and Engineering: A*,

- 2008, 488(1/2):273-280.
- [7] 朱小芹, 刘华. 点阵材料夹芯筒支梁在冲击载荷下的动力响应[J]. 复合材料学报, 2009(1):162-167.  
ZHU Xiaoqin, LIU Hua. Dynamic response of simply supported sandwich beams with lattice truss cores subjected to impulsive loadings[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009(1):162-167. (in Chinese)
- [8] TIAN J, KIM T, LU T, et al. The effects of topology upon fluid-flow and heat-transfer within cellular copper structures[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(14/16):3171-3186.
- [9] ASHBY M, LU T. Metal foams: a survey[J]. Science in China(Series B), 2003, 46(6):521-532.
- [10] 邱雷, 房芳, 袁慎芳, 等. 导波强化裂变聚合概率模型损伤监测方法[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(3):438-445.  
QIU Lei, FANG Fang, YUAN Shenfang, et al. Guided wave and enhanced split merge probability model based on damage evaluation method[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(3):438-445. (in Chinese)
- [11] 王强, 华杰. 集成主被动协同Lamb波结构健康监测技术[J]. 振动、测试与诊断, 2019, 39(1):49-53.  
WANG Qiang, HUA Jie. Research on integrated lamb wave structural health monitoring technology based on the synergism of active and passive methods[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(1):49-53. (in Chinese)
- [12] 王志凌, 袁慎芳, 邱雷, 等. 基于压电超声相控阵方法的结构多损伤监测[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(5):796-801.  
WANG Zhiling, YUAN Shenfang, QIU Lei, et al. Structure multi-damage monitoring based on the piezoelectric ultrasonic phased array [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(5):796-801. (in Chinese)
- [13] WALLACH J, GIBSON L. Mechanical behavior of a three-dimensional truss material [J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38 (40/41) : 7181-7196.
- [14] LU L L, LE J, SONG H W, et al. Damage detection of sandwich panels with truss core based on time domain dynamic responses [J]. Composite Structures, 2019, 211(1):443-454.
- [15] 田淑侠, 陈振茂, 樊江磊, 等. 基于动态响应参数的点阵桁架夹芯板脱焊损伤检测数值方法研究[J]. 应用力学学报, 2016, 33(5):786-791.  
TIAN Shuxia, CHEN Zhenmao, FAN Jianglei, et al. Vibration based debonding defect identification for sandwich plates with pyramidal cores[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2019, 33(5):786-791. (in Chinese)
- [16] 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(1):34-51.



**第一作者简介:**冯侃,男,1985年6月生,博士、副教授。主要研究方向为结构健康监测、超声导波无损检测、复杂结构动态响应性能及数据分析等。曾发表《基于升阶谱有限条法的复合材料壁板结构稳定性分析》(《固体力学学报》2015年第36卷第4期)等论文。

E-mail: fengkan@ujts.edu.cn

## 《机械制造与自动化》杂志简介

□欢迎订阅 □欢迎刊登广告 □欢迎投稿

开本:大16开 双月刊 页码:198页 定价:15元(全年90元) 邮发代号:28-291

国内统一连续出版物号:CN 32-1643/TH 国际标准连续出版物号:ISSN 1671-5276

编辑部地址:江苏省南京市珠江路280号珠江大厦1903室 邮政编码:210018

电话:(025) 84217296 84207048 传真:(025) 84207048 E-mail: editor@njmes.org