

基于超声导波信号的复合材料铝蜂窝夹芯结构损伤检测

齐万年, 张佳奇*, 白洛嘉

大连交通大学詹天佑学院(中车学院), 辽宁 大连 116028

DOI:10.61369/ERA.2026040042

摘 要 : 针对复合材料铝蜂窝夹芯结构损伤, 本文首先通过有限元仿真软件建立复合材料铝蜂窝夹芯结构模型, 并分别设置无损状态与含损伤状态, 模拟导波在结构中的传播过程。激励信号采用中心频率为 150kHz 的 5 周期汉宁窗调制正弦波, 对比无损与损伤状态下信号波形的差异, 再进行包络分析并通过时域能量计算构建损伤因子。制备含不同尺寸预制裂纹的试件, 利用压电陶瓷传感器布置构成传感器检测路径, 实现结构损伤检测。仿真和试验验证结果表明, 上述方法能够有效诊断出复合材料铝蜂窝夹芯结构碳纤维面板损伤, 构建的损伤因子与缺陷尺寸呈显著正相关。研究结果验证了导波反射特征在复合材料铝蜂窝夹芯结构损伤识别中的应用潜力。

关 键 词 : 复合材料; 铝蜂窝; 夹芯结构; 超声导波; 损伤因子

Ultrasonic Guided Wave Signals Damage Detection of Composite Aluminum Honeycomb Sandwich Structures

Qi Wannian, Zhang Jiaqi*, Bai LuoJia

Zhan Tianyou College of Dalian Jiaotong University (CRRC College), Dalian, Liaoning 116028

Abstract : For damage in composite aluminum honeycomb sandwich structures, this study first establishes a finite element model of the structure using simulation software, configuring both intact and damaged states to simulate guided wave propagation. The excitation signal is a 5-cycle Hanning window-modulated sine wave with a center frequency of 150 kHz. By comparing waveform differences between intact and damaged signals, envelope analysis is performed, and a damage index is constructed based on time-domain energy calculation. Specimens with prefabricated cracks of varying sizes were prepared, and piezoelectric ceramic sensors were arranged to form detection paths for structural damage inspection. Simulation and experimental results demonstrate that the proposed method can effectively diagnose damage in the carbon fiber face sheets of the composite aluminum honeycomb sandwich structure, with the constructed damage index showing a significant positive correlation with defect size. The findings validate the potential of guided wave reflection characteristics for damage identification in such structures.

Keywords : composite; aluminum honeycomb; sandwich structures; guided waves; damage index

引言

为了适应城市的快速发展, 适应更加绿色低碳耗能的出行方式, 轻量化成为了轨道交通技术领域的追求^[1]。在保证车辆性能的前提下尽可能减轻车身重量、降低运行能耗, 是实现轨道车辆绿色化、低碳化的关键技术。近年来, 地铁列车越做越轻, 不断地被力学优化的合金材料已经发挥到了性能极限, 必须要找到一种综合型的优良材料。通过反复论证, 中车四方股份公司选择了将碳纤维复合材料应用到“CETROVO1.0 碳星快轨”的设计上。

在此背景下, 碳纤维增强复合材料因其卓越的高比强度、高比刚度、可设计性及抗疲劳性, 被视为实现突破性轻量化的理想材料。其各向异性特征更有利于通过铺层优化来匹配车体复杂的载荷工况。对于大型车体结构件(如侧墙、车顶), 单一 CFRP 层合板可能面临刚度不足、成本高昂或抗冲击性能弱的问题。复合材料铝蜂窝夹芯结构融合了二者的优势。与原钢制车体相比, 碳纤维铝蜂窝车体减重了 33.39%, 体现出明显的减重效果。对比两种车体, 碳纤维铝蜂窝车体在刚度、强度和应变等性能方面具有突出的优势^[2]。该结构凭借其卓越的比强度、比刚度及出色的能量吸收特性, 已成为实现下一代列车车体突破性轻量化的首选方案之一。然而, 该结构的多材料

基金项目: 辽宁省博士科研启动基金计划项目(2025-BS-0452)

作者简介: 齐万年(1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事超声导波无损检测研究。

通讯作者: 张佳奇(1993-), 男, 博士, 主要从事复合材料结构健康监测研究, zhangjq@djtu.edu.cn

界面（纤维 / 基体、面板 / 芯层）与复杂的内部微观构造（蜂窝孔格），使其在制造工艺（如树脂浸润不均、蜂窝芯拼接、面板 - 芯材脱粘）与服役过程（如低速冲击导致的内部损伤、疲劳载荷引发的界面退化）中，极易产生多种隐蔽于内部的缺陷。然而，CFRP / 铝蜂窝结构的非均质性和不透明性，使得传统检测手段完全失效，而破坏性取样检查又与结构的完整性和使用需求相悖。这一矛盾，将先进的无损结构健康监测技术推向了至关重要的位置。目前已知的结构健康监测技术^[3]大致有如下几类：磁粉探伤检测技术、X 射线检测技术、涡流检测技术、超声导波探伤检测技术等。其中超声导波无损检测系统主要由信号激励单元、导波换能器阵列、信号接收与采集模块构成^[4]。2004 年，Mian 等^[5]应用短超声波脉冲 - 红外表面成像技术来评估石墨 / 环氧树脂复合材料的疲劳损伤，该技术使用短脉冲声波注入材料使裂纹表面产生摩擦加热，裂纹处的热量扩散到样品表面。这些技术项目的研究经验显示：在复合材料结构运行过程中，结构的运行状态（形状、温度场、应变场等）和损伤情况（位置、严重程度、扩展趋势等）是表征结构健康状况的主要信息^[6-7]。

本文主要介绍的就是利用超声导波为铁路车辆提供智能化的在线实时监测与健康状态评估支持，并可实现整车结构的全生命周期预测与安全维护，通过有限元仿真技术对车体局部结构进行建模仿真，通过模拟特定模式导波的激励与接收，选出适用于监测的导波参数，制备含人工预制损伤的试件，得到数据并进行分析。

一、复合材料铝蜂窝多层结构超声导波传播

（一）有限元仿真

本小节采用有限元软件进行有限元仿真，模拟超声导波在复合材料铝蜂窝多层结构中的传播特性。建立布设有传感器的复合材料铝蜂窝多层结构有限元模型，如图1所示。复合材料板利用 T300 碳纤维复合材料制成，厚度为 1mm，板长 150mm，板宽 60mm，面板采用 8 层单向铺层结构，具体的铺层角依次为 0° 、 45° 、 90° 、 -45° 、 -45° 、 90° 、 45° 、 0° 。材料属性为：密度 1760kg/m^3 ，纵向弹性模量 E_1 为 135GPa ，横向弹性模量 E_2 为 9GPa ，泊松比为 0.3。铝蜂窝结构采用边长为 3mm 的正六边形组成，厚度为 18mm，材料属性为：密度 2700kg/m^3 ，弹性模量 E 为 69GPa ，泊松比为 0.33。传感器选取为超声导波领域常用的压电陶瓷传感器（Piezoelectric transducer, PZT），其工作原理是通过压电效应实现电信号和机械振动信号的转换，具有小型化和可嵌入性的优点^[8]。考虑到与损伤的相互作用，选取可激励沿传播方向振动超声导波的“d31”PZT 传感器，即在传感器垂直方向施加电压可以得到水平方向上的位移。将 2 个尺寸为 $\phi 3\text{mm} \times 0.25\text{mm}$ 的 PZT 传感器布置在复合材料板的表面用以模拟激励和接收超声导波，传播路径长度为 138mm。

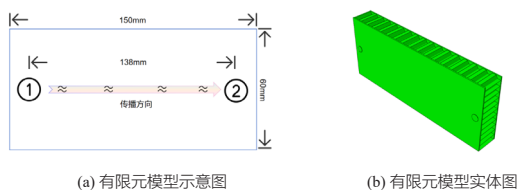


图1 有限元模型

Fig.1 Finite element model

激励信号采用激励中心频率为 150kHz 的 5 周期汉宁窗调制的正弦信号进行激励，激励信号时域图及其频域图如图 2 所示。

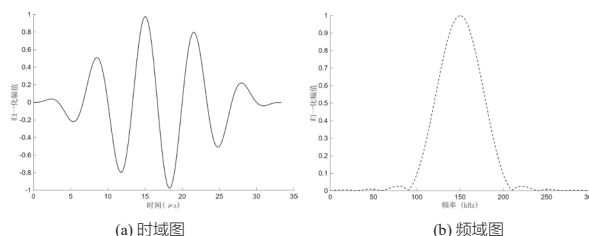


图2 5周期 150kHz 激励信号

Fig.2 The 5-cycle excitation signal with the excitation frequency of 150kHz

已有研究表明时间步长的选取会对导波传播仿真结果的准确性造成影响，仿真计算的准确性呈现与时间步长大小负相关的特征，即随着时间步长的减小，数值解的收敛性及结果可信度逐步提升，但是过小的时间步长会造成计算资源过度消耗，研究人员对此进行了研究并建立了适用于超声导波有限元仿真的时间步长选取准则^[9]。

$$\Delta t_{\max} = \frac{1}{20F} \quad (1)$$

其中 $\Delta t_{\max}$ 是时间步长最大值， F 是导波激励频率。本研究采用的激励频率为 150kHz，本次仿真选择时间步长 $0.2\mu\text{s}$ ，小于式 (1) 的时间步长最大值，符合准则要求。

无损模型传播云图如图 3 所示，为复合材料铝蜂窝夹芯结构无损模型传播云图，可以清晰观察到导波在钢轨内部沿轴向传播的过程，波前形态连续、传播路径单一，未出现明显反射或干涉现象，说明模型激励设定与网格划分合理，仿真结果具有良好的物理可解释性与稳定性，验证了无损状态下导波传播路径的完整性。接收信号及其希尔伯特包络图如图 4 所示，成功接收到导波信号。

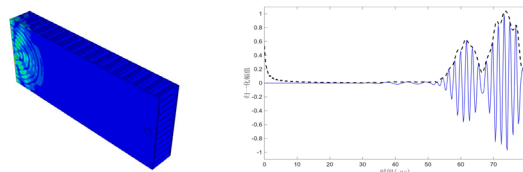


图3 有限元模型仿真传播云图

Fig.3 Simulation propagation cloud map of finite element model

图4 有限元模型仿真信号结果

Fig.4 Simulation signal result of finite element model

(二) 响应信号测量试验

本文试验件选取样件为碳纤维面板-铝制蜂窝夹芯结构,面板为长160mm宽60mm厚度1mm的碳纤维板构成,夹芯厚度18mm,为边长3mm的正六边形铝质蜂窝结构构成,并按图1传播路径设置压电传感器,左侧1号传感器为激励传感器,右侧2号传感器为接受传感器,两传感器圆心距离为150mm,如图5所示。实验中超声导波的激励和采集使用的设备是由信号发生器、功率放大器、信号接收器和多路开关转换器等硬件和相应的控制软件组成的系统,通过系统发生中心频率为150kHz的5周期汉宁窗调制的正弦信号,对PZT传感器进行激励产生超声导波,并进行信号采集。本文实验结果表明,成功在碳纤维复合材料/铝蜂窝夹层板结构中激励并接收到了清晰的超声导波信号。接收信号及其希尔伯特包络图如图5所示。信号的稳定获取,验证了所选压电传感器、布置方案及激励参数的有效性,标志着基于超声导波的检测方法在该类复杂结构中具备可行的物理基础。

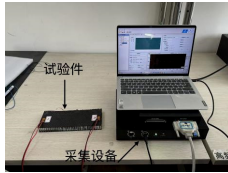


图5 试验设置
Fig.5 Experimental setup

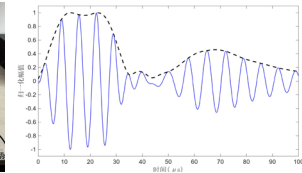


图6 试验测量信号
Fig.6 Experimental measurement signal

二、基于基准信号对比的损伤检测方法

(一) 基准信号与损伤信号

平板类结构的超声导波损伤识别通常采用“一发一收”(pitch-catch)的方法^[10],其基本原理通过空间分布的多个传感器实现相互激励与信号接收,从而在结构内部构建特定长度的导波传播路径。当导波在介质中传播时,若遇到结构不连续特征即结构损伤,将发生显著的相互作用,这种相互作用会导致导波传播特性发生改变,通过实时监测和分析导波信号的特征参数变化,即可实现对结构损伤的表征与评估。

对于激励-接收导波信号分析,典型的导波信号可以定义为激励信号及无损的基准信号、有损的损伤信号和两者间的差异信号即散射信号,用于本文损伤识别方法的导波信号如图7所示。

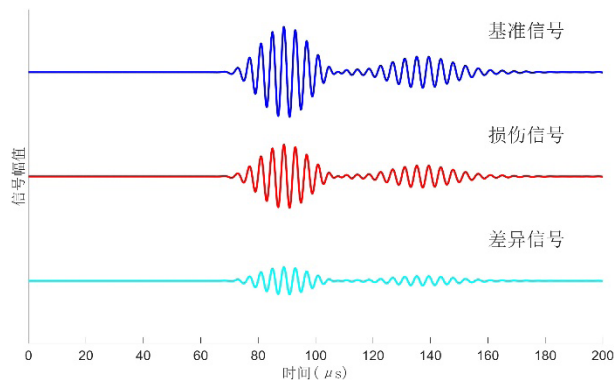


图7 用于损伤识别的导波信号
Fig.4 Guided wave signals for damage identification

(二) 损伤识别原理

损伤导致导波传播发生改变,具体表现为信号特征参数产生差异如幅值衰减、波形畸变或传播时间偏移等特征变化。因此本文通过计算损伤因子(Damage Index, DI)来表征导波传播路径上的信号变化差异进而实现损伤识别。本文选取损伤信号时域能量与基准信号时域能量差异这种方法计算损伤因子^[11]:

$$DI_{SDT} = (E_d - E_i) / E_i \quad (2)$$

下标‘i’代表基准信号、‘d’代表损伤信号,式中E表示信号的时域能量,其根据时域信号来计算,即时域信号有效段的所有数据点的平方和再开方:

$$E = \sqrt{\sum s_i^2(t)} \quad (3)$$

上述两种损伤因子反映了信号的幅值变化以及导波波速的改变导致的信号差异^[12]。

三、验证及结果分析

(一) 损伤设置

基于无损模型基础上,在复合材料板中间位置设置三组长度分别为10 mm、20 mm、30 mm的裂纹缺陷,模拟导波在不同长度裂纹情况下的传播行为。裂纹采用几何切除方式建模,缺口方向垂直于传播方向,宽度设置为1 mm,位置参数如表1所示。采用无损模型仿真参数进行仿真运算,以无损模型仿真参数为基准信号,对以下三种不同那个损伤程度的模型进行信号采集。

表1 损伤参数

Tab.1 Damage parameters

模型编号	深度/mm	宽度/mm	长度/mm
1	贯穿	1	10
2	贯穿	1	20
3	贯穿	1	30

同时验证试验在图5所示位置切割模拟损伤,损伤长度分别为10mm、20mm和30mm。损伤定位示意图如图8(a)所示,试验件设置如图8(b)所示。

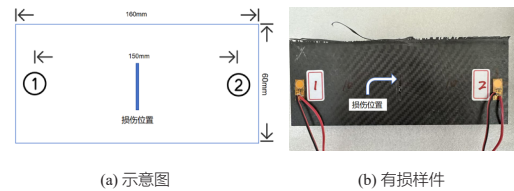


图8 试验损伤设置

Fig.8 Experimental amage setting

(二) 结果对比分析

仿真接收导波信号及其希尔伯特包络如图9(a)所示,试验采集导波信号结果及其希尔伯特包络如图9(b)所示。仿真结果可以看出从10mm损伤到30mm损伤,接收到的信号强度依次减小,实验中采集到的信号强度也依次减小。

基于对比分析,仿真与实验数据呈现出相同的规律性趋势:随着预设损伤尺寸从10mm增至30mm,系统所采集到的超声导波响应信号强度呈现依次衰减的分布特征。仿真与实验观测结果

具有一致性。

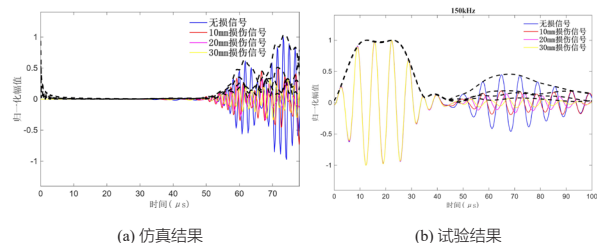


图9 有损超声导波信号

Fig.9 Damaged guided wave signals

进而基于导波信号数据根据式 (2) 计算得到各损伤尺寸下的损伤因子, 如图10所示。其中图10(a)为仿真验证结果, 图10(b)为试验验证结果。通过对比仿真与实验数据可以确认, 损伤因子均随预设损伤尺寸的增加而呈现单调递增趋势, 表明二者之间存在显著的正相关关系。尽管受仿真模型与实体试件在几何尺度、边界条件及材料参数简化等方面存在差异的影响, 所获得的损伤因子具体数值有所不同, 但其随损伤扩展而持续上升的变化规律具有一致性。这一结果验证了数值模型在反映损伤敏感特征变化趋势上的有效性。

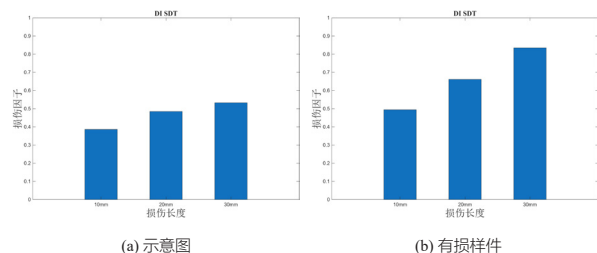


图10 损伤因子对比图

Fig.10 DI comparison

四、结束语

本文针对复合材料铝蜂窝夹芯结构损伤识别进行了超声导波应用研究, 通过有限元建模仿真有效模拟了超声导波在该复杂多层结构中的传播, 并利用压电陶瓷传感器布置构成传感器检测路径实现试验响应信号测量。基于信号有效波包区域的时域能量, 通过计算检测信号与基准信号的时域能量差异构建损伤因子, 进而实现该结构损伤的识别。分别通过含损伤有限元模型仿真和预制损伤样件试验, 验证该方法的损伤识别能力, 仿真和试验数据均表明构建的损伤因子与缺陷尺寸呈显著正相关, 一致的变化趋势有效证明了该指标对结构损伤的敏感性。本研究为后续轨道交通领域先进复合材料结构的在线健康监测提供了一种有效的技术思路。

参考文献

- [1] 王彤, 桑旭, 舒承程, 等. 疲劳强度驱动的地铁车辆车体轻量化设计 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2026, 49(01): 44-48+53. DOI: 10.16212/j.cnki.1672-1187.2026.01.007.
- [2] 马嘉欣. 碳纤维蜂窝夹芯结构车体强度分析及优化. 2024. 大连交通大学, MA thesis. doi: 10.26990/d.cnki.gsltc.2024.000444.
- [3] 金哈申. 关键结构区域内损伤及其扩展的超声导波定量监测方法研究 [D]. 厦门大学, 2021. DOI: 10.27424/d.cnki.gxmd.2021.000346.
- [4] 李涵, 夏浩. 超声导波技术在化工压力管道无损检测中的应用 [J]. 化工管理, 2025, (32): 113-116. DOI: 10.19900/j.cnki.ISSN1008-4800.2025.32.029.
- [5] ian A, Han X, Islam S, Newaz G. Fatigue damage detection in graphite/epoxy composites using sonic infrared imaging technique. Compos Sci Technol 2004; 64(5): 657 - 66
- [6] Qing XLP, et al. "A real-time active smart patch system for monitoring the integrity of bonded repair on an aircraft structure." Smart Materials & Structures 15.3(2006): N66-N73. doi: 10.1088/0964-1726/15/3/N03.
- [7] Qing P X, Beard S, Shen B S, et al. Development of a real-time active pipeline integrity detection system [J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(11): 115010 (10pp). DOI: 10.1088/0964-1726/18/11/115010.
- [8] Qing X., Li W., Wang Y., et al. Piezoelectric transducer-based structural health monitoring for aircraft applications [J]. Sensors, 2019, 19(3): 545.
- [9] Moser F., Jacobs L.J., Qu J. Modeling elastic wave propagation in waveguides with the finite element method [J]. NDT & E International, 1999, 32(4): 225 - 234.
- [10] Giurgiutiu V. Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors [M]. Elsevier, 2014..
- [11] WU Zhanjun, LIU Kehai, WANG Yishou, et al. Validation and evaluation of damage identification using probability-based diagnostic imaging on a stiffened composite panel [J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 2014, 26(16): 2181-2195.
- [12] LIU Kehai., MA Shuyi., WU Zhanjun., et al. A novel probability-based diagnostic imaging with weight compensation for damage localization using guided waves [J]. Structural Health Monitoring, 2016, 15(2): 162 - 173.