

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2024.12.010

基于兰姆波的CFRP电池箱冲击损伤评估*

李仲玉^{1,2}, 贺子桐¹, 王剑锋¹, 王兵³, 刘逸群¹, 张君媛⁴

(1. 哈尔滨工业大学(威海)汽车工程学院, 威海 264209; 2. 湖南大学, 整车先进设计制造技术全国重点实验室, 长沙 410082;

3. 哈尔滨工业大学, 特种环境复合材料技术国家级重点实验室, 哈尔滨 150001;

4. 吉林大学, 汽车底盘集成与仿生全国重点实验室, 长春 130025)

[摘要] 兰姆波具有传播距离长、成本低、对损伤敏感性高的特点,为研究碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)电池箱因低速冲击造成的肉眼不可见的冲击损伤提供了巨大的潜力。虽然相对声学非线性参数(relative acoustic nonlinear parameters, RANP)被证明在量化复合材料冲击损伤程度方面有效,但损伤对其影响机制尚未得到探索。本研究采用实验和仿真相结合的方法,首次研究了不同冲击损伤对兰姆波在CFRP电池箱中传播的影响。为此,首先建立电池箱结构的几何模型,然后针对CFRP开展冲击实验,搭建CFRP电池箱损伤-监测的仿真模型,最后研究分层、基体压缩损伤和纤维拉伸损伤等对CFRP电池箱损伤评估参数的影响。结果表明,建立的CFRP仿真模型计算精度可靠,RANP参数对各模式损伤面积敏感,而对于损伤在厚度方向上出现的位置不敏感;损伤会使兰姆波在传播时产生新的频率成分,计算RANP参数能够分析损伤的程度;损伤程度在较低时,RANP参数大小更多取决于分层损伤,一旦损伤超出某个阈值,RANP参数大小更多取决于纤维断裂等CFRP层内损伤。该研究成果对于汽车碰撞安全部件的结构-功能一体化设计具有重要指导价值。

关键词: 电池箱;轻量化;复合材料;冲击损伤;兰姆波

Impact Damage Assessment of CFRP Battery Box Based on Lamb Waves

Li Zhongyu^{1,2}, He Zitong¹, Wang Jianfeng¹, Wang Bing³, Liu Yiqun¹ & Zhang Junyuan⁴

1. School of Automotive Engineering, Harbin Institute of Technology, Weihai, Weihai 264209;

2. Hunan University, National Key Laboratory of Vehicle Advanced Design and Manufacturing Technology for Vehicle, Changsha 410082;

3. Harbin Institute of Technology, National Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Composites in Special Environments,

Harbin 150001; 4. Jilin University, National Key Laboratory of Automotive Chassis Integration and Bionics, Changchun 130025

[Abstract] Lamb waves, with the characteristics of long propagation distance, low cost, and good sensitivity to various damages, offer significant potential for studying the visually undetectable damage caused by low-velocity impact in carbon fiber reinforced polymer (CFRP) battery box. Although relative acoustic nonlinear parameters (RANP) have been shown to be effective in quantifying the degree of impact damage to composite materials, the mechanism by which damage affects them has not been explored. In this study, a combination of experimental and simulation method is used to study for the first time the effect of different impact damages on the propagation of Lamb waves in CFRP battery boxes. To this end, a geometric model of the battery box structure is first established. Then, impact tests are carried out on CFRP, and a simulation model for damage monitoring of CFRP battery boxes is built. Finally, the effect of delamination, matrix compression damage, and fiber tensile damage on the damage assessment parameters of CFRP battery boxes is studied. The results indicate that the established CFRP simulation model is reliable in calculation accuracy, with the RANP parameter being sensitive to the damage area of each

* 山东省自然科学基金青年项目(ZR2023QE336)、湖南大学整车先进设计制造技术全国重点实验室开放基金(32215007)和山东省高等学校青创科技支持计划(2023KJ078)资助。

原稿收到日期为2024年07月01日,修改稿收到日期为2024年08月28日。

通信作者:王剑锋,研究员,博士,E-mail:wjfeee123@163.com。

mode, though not to the damage position in the thickness direction. Damage causes the Lamb wave to generate new frequency components during propagation. The calculation of the RANP parameter can thus analyze the degree of damage. When the degree of damage is low, the size of the RANP parameter depends more on the interlayer shedding damage, and once the damage exceeds a certain threshold, the size of the RANP parameter depends more on the intralayer damage such as the fiber damage of the CFRP. The research results have important guiding value for the structural-functional integrated design of automobile collision safety components.

Keywords: battery box; lightweight; composites; impact damage; Lamb waves

前言

随着汽车工业的不断发展,对于汽车材料的要求也越来越高。碳纤维复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)作为一种轻量化材料,具有高强度、高模量、耐腐蚀性和耐疲劳性等优点,逐渐成为汽车制造业中重要的材料之一,越来越多的专家学者探索CFRP在汽车领域的应用场景^[1-4]。在新能源汽车领域,CFRP有助于减轻车身质量,提高能源利用率,延长电池续航里程,同时有望改善车辆的安全性能。

电池箱是新能源汽车的“心脏”部件,其碰撞安全性能至关重要。电动汽车动力电池包的安全性和可靠性一直是业界关注的热点问题之一^[5]。在动态行驶过程中,电动汽车底部遭受的碰撞是地面碰撞的主要形式。地面障碍物引发的撞击可能导致电动汽车发生严重的火灾事故。全面深入了解碰撞引起的损伤对电池箱的制造以及安全使用具有重要意义。车辆在复杂的道路环境使用过程中,CFRP电池箱底部经常受到道路异物等撞击,撞击能量大小各异,可能造成基体开裂、纤维断裂或分层等目视不可见的冲击损伤(barely visible impact damages, BVID),这些微小损伤对汽车结构安全造成巨大的潜在威胁。因此,在破坏性灾难发生之前对BVID的实时监测显得尤为重要。

基于压电传感器激发的超声导波兰姆波(Lamb waves)的损伤监测系统因耐用、质量轻和功耗低等特点得到广泛应用。除用于金属结构外,兰姆波监测也逐渐用于复合材料结构^[6-7]。通常,基于兰姆波的损伤监测根据导波-损伤相互作用的行为分为线性和非线性方法。兰姆波的线性特征(如飞行时间、波的反射/透射等)通常用于定位损伤。研究发现,冲击损伤可以通过波传播模式的变化进行监测,但信号的解释和位置的估计较为复杂。

与线性超声导波相比,非线性兰姆波对微观损伤更为敏感^[8]。近年来,利用兰姆波响应中出现的高次谐波监测疲劳损伤、微裂纹等其他类型的材料损伤,取得了重大进展。Soleimanpour等^[9]发现导波的基本非对称模式与分层损伤之间相互作用,会产生高次谐波形式的声学非线性特性。Tie等^[10]研究了不同能量冲击下,损伤与相对声学非线性参数的关系,随着冲击能量的增加,相对声学非线性参数增大。Rauter等^[11]通过小波变换处理监测信号,研究结果表明,相比于群速度变化,相对声学非线性参数对冲击损伤更敏感。在基于非线性兰姆波的监测方法中,损伤的存在是通过高次谐波、次谐波、共振频率的偏移和混合频率响应来判断的。虽然通过测量相对声学非线性参数(relative acoustic nonlinear parameters, RANP)不仅能够有效监测CFRP电池箱中BVID的存在,还可以评估BVID的面积,但目前缺乏冲击损伤对CFRP汽车部件中导波传递影响机制的研究。因此,本研究旨在通过实验和仿真方法,研究低速冲击损伤对CFRP电池箱中导波RANP参数的影响,以评估CFRP电池箱的冲击损伤。

1 CFRP电池箱损伤监测理论

1.1 相对声学非线性参数

大量实验表明,基于二次谐波的非线性超声监测技术是一种监测材料微观结构变化的有效工具,在理想的线性材料中,超声波传播时不会产生新的频率成分。然而,实际材料中,特别是存在微观结构缺陷或损伤的材料中,材料的非线性特性会导致超声波在传播过程中产生二次谐波等新的频率成分。

当一个基频超声波(频率为 f)传播通过具有非线性特性的材料时,会产生一个频率为 $2f$ 的二次谐波。二次谐波的产生是由于材料中存在的非线性应力-应变关系。有研究证明二次谐波的振幅与材料

的非线性特性相关^[12-13]。相对声学非线性参数 β 是一个无量纲参数,可在一定程度上定量描述材料的非线性特性。

随着材料的退化或损伤,材料非线性力学行为发生变化,导致波从基波转移到高次谐波,进而引起谐波振幅的变化。为量化这种非线性现象,按照以下方式计算相对声学非线性参数 β :

$$\beta = \frac{A_2}{A_1^2} \quad (1)$$

式中 A_1 和 A_2 分别为基波和二次谐波的幅值,谐波振幅将随着波能从基波转移到高次谐波而发生变化。

1.2 CFRP 电池箱冲击损伤机制

CFRP 电池箱具有高强度和高刚度,但在受到底部异物的冲击载荷作用时,容易诱发复杂的损伤模式,包括基体损伤、纤维断裂、分层等^[14]。

基体损伤是指环氧树脂在冲击载荷作用下产生裂纹。裂纹可以沿着纤维方向(纵向裂纹)或垂直于纤维方向(横向裂纹)扩展,该损伤降低了 CFRP 电池箱的整体刚度和强度;纤维断裂是指当冲击载荷超过纤维的拉伸或压缩强度时,纤维发生断裂,这直接影响材料的承载能力,严重影响电池箱的使用安全;分层意味着不同铺层之间的界面损伤,这是 CFRP 电池箱中最常见的损伤形式之一。分层通常会影响 CFRP 电池箱的结构完整性和剩余力学性能。

由于低速冲击造成的损伤不易察觉且会逐渐累积,导致力学性能严重下降。因此,研究能够反映 CFRP 电池箱损伤程度的实时监测方法对于车辆安全而言至关重要。

2 材料与方 法

2.1 电池箱结构

本文的研究对象为易受道路异物撞击的电动汽车电池箱下箱体,在 Abaqus/Explicit 软件环境中进行有限元分析,建立如图 1 所示的仿真模型。

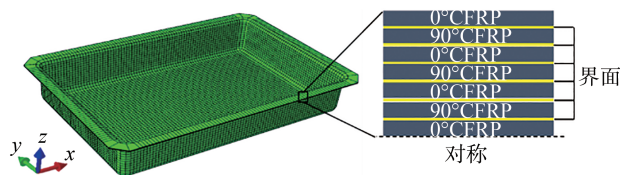


图 1 电池箱下箱体及厚度方向建模细节

其中,电池箱下箱体的长为 400 mm,宽为 260 mm,高为 85 mm。箱体厚度为 2.1 mm。材料为 CFRP,力学特性如表 1 所示。由 14 层单向 CFRP 层铺设而成,铺层顺序设置为 $[0^\circ/90^\circ]_7$ 。整个下箱体通过 Composite layup 方式快速建模,网格类型为 SC8R。

表 1 CFRP 的材料特性

材料参数	数值
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 760
弹性模量 E_1/MPa	103 700
弹性模量 $E_2 = E_3/\text{MPa}$	7 750
泊松比 $\nu_{12} = \nu_{13}$	0.337
泊松比 ν_{23}	0.400
剪切模量 $G_{12} = G_{13}/\text{MPa}$	3 750
剪切模量 G_{23}/MPa	2 750
纵向拉伸强度 X_T/MPa	2 183.17
纵向压缩强度 X_C/MPa	1 100
横向拉伸强度 Y_T/MPa	42.04
横向压缩强度 Y_C/MPa	198
剪切强度 S/MPa	120
纤维拉伸断裂能 $G_n^c/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	10
纤维压缩断裂能 $G_c^c/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	10
基体拉伸断裂能 $G_{mt}^c/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	1
基体压缩断裂能 $G_{mc}^c/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	1

此外,为模拟下箱体在受到冲击后的分层损伤,在电池箱下箱体的不同碳纤维铺层之间引入八节点粘接单元以描述 CFRP 电池箱相邻层之间的粘接界面,共 13 层,网格类型为 COH3D8,力学特性参数如表 2 所示。

表 2 数值模拟中粘接单元参数

材料参数	数值
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 496
拉伸刚度 $K_m/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-3})$	850
剪切刚度 $K_{ss} = K_{tt}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-3})$	850
拉伸强度 t_n/MPa	1
剪切强度 $t_s = t_t/\text{MPa}$	2
拉伸韧性 $G_{tc}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	0.306
剪切韧性 $G_{tnc} = G_{tnc}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	0.632

2.2 冲击实验

为探究 CFRP 在低速冲击下的动态响应,依据美国材料与试验学会标准 ASTM D7136^[15]设计落锤冲击实验。冲击装置主要包括钢质半球形冲击器、载荷传感器、试件夹具、防二次冲击装置等,冲击实验装置如图 2 所示。样件的尺寸是 150 mm × 100 mm,冲击能量为 15 J,冲击位置为 CFRP 面板的几何中

心。载荷-时间曲线等历程通过冲头上的加速度传感器获取,通过载荷-位移曲线积分获得冲击过程的能量-时间曲线。

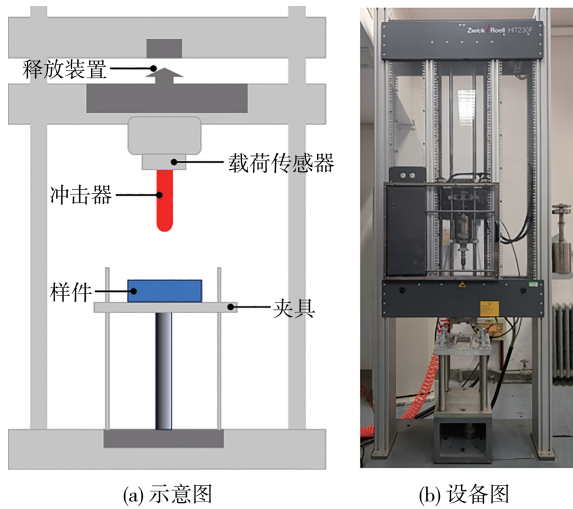


图2 落锤冲击实验装置

2.3 仿真模型

在有限元仿真模型中,为模拟含损伤结构中兰姆波的传播,研究者将损伤采取预置的方法添加至仿真模型中,这种建模策略便于分析不同损伤带来的不同结果,但未能准确表达冲击引起的CFRP电池箱中真实的损伤状态。除此之外,本文还使用了另外一种多分析步建模方法^[16],将冲击损伤的产生和兰姆波的传播放在同一个模型中实现。这种建模思路如图3所示,包括3个步骤。首先,用冲击器以一定的速度冲击CFRP电池箱,使其产生损伤;然后,通过引入消振步骤,使其在很短的时间内重新平衡并达到准静态平衡状态;最后,向电池箱加载等效正弦位移信号,激发非线性信号响应。

首先使用多分析步建模方法研究不同能量冲击损伤与兰姆波非线性特性之间的关联性,再通过预置损伤的方法分别研究不同类型损伤对相对声学非线性参数的影响。

2.3.1 冲击-监测模型

冲击-监测模型是为了研究不同冲击能量下相对声学非线性参数的变化程度。CFRP电池箱下箱体受到质量为5 kg的锥形异物的冲击,通过控制冲击速度来控制冲击能量。

锥形异物对CFRP电池箱的冲击行为是一个动态的过程。在完成冲击模拟后,冲击引起的振动仍将持续一段时间。由于冲击引起的振动幅度远大于

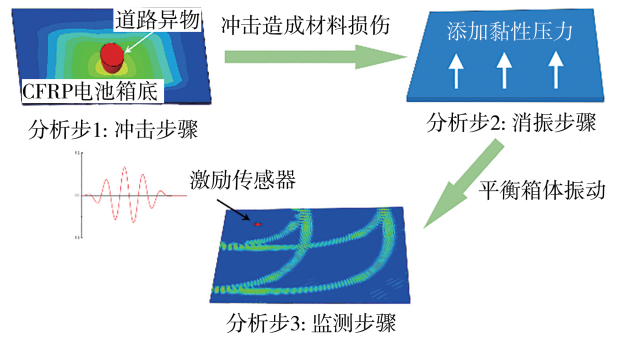


图3 电池箱冲击-监测多分析步建模方法

兰姆波的传播振幅,直接将超声波信号加载到冲击后的CFRP电池箱后,难以有效提取兰姆波的振动信号。因此,有必要在冲击步骤后引入了一个消除振动的步骤,通过在电池箱上加载黏性压力,使CFRP电池箱在受冲击过后迅速稳定下来。

选取CFRP电池箱下表面的中心节点(坐标: $x=200\text{ mm}$, $y=130\text{ mm}$, $z=0$),提取位移-时间曲线,如图4所示。可以看出,在无消振处理时,该节点将持续以较大振幅振动。然而,在模型中引入黏性压力后,该处振动在很短的时间内停止,达到准静态平衡状态。采用消振方法后,使得向冲击损伤后的CFRP电池箱加载兰姆波信号,并正确接收响应成为可能。

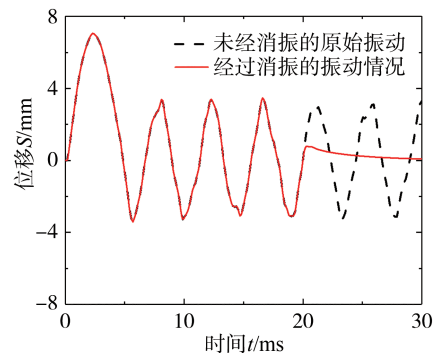


图4 消除冲击引起的电池箱振动

仿真中使用的激励信号是经Hanning窗调制的160 kHz窄带五周期正弦波脉冲。激励信号通过作用于与执行器位置相对应的中心,引入仿真模型。使用Abaqus/Explicit动力学分析,固定步长 10^{-8} s ,总持续时间为1 s。

在仿真分析中,网格质量对兰姆波传播模拟的精度影响较大^[17]。为保证模拟的收敛性和精度,每个波长需要10~20个节点,本研究采用的网格单元

尺寸为2 mm,小于计算所需的阈值网格尺寸,满足兰姆波传播仿真要求。对于传感器布置,如图5所示,包括激励传感器和接收传感器。

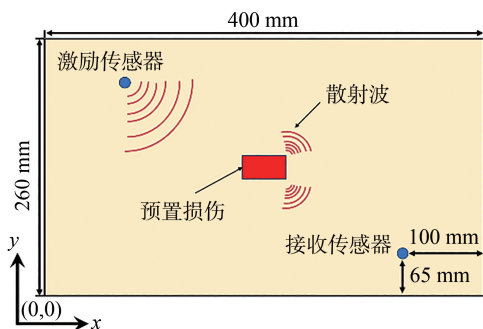


图5 传感器布置示意图

2.3.2 预置损伤-监测模型

由于冲击损伤的复杂性,在研究冲击损伤时有必要对不同类型损伤进行单独分析,这要求在仿真模型中预置单一类型损伤。本文中以基体压缩损伤、纤维断裂损伤及分层损伤作为重要研究对象。

在对CFRP电池箱预置基体压缩和纤维断裂损伤时,采用Camanho提出的复合材料力学性能退化模型^[18],具体形式如下。

基体压缩损伤:

$$\begin{cases} E'_2 = 0.2E_2 \\ G'_{12} = 0.22G_{12}, \nu'_{12} = 0.15\nu_{12} \end{cases} \quad (2)$$

纤维拉伸损伤:

$$\begin{cases} E'_1 = 0.07E_1, E'_2 = 0.07E_2 \\ G'_{12} = 0.07G_{12}, \nu'_{12} = 0.07\nu_{12} \end{cases} \quad (3)$$

式中: E_i 、 G_{ij} 和 ν_{ij} 为CFRP材料完整状态下材料参数; E'_i 、 G'_{ij} 和 ν'_{ij} 为损伤后材料参数。

在预置CFRP电池箱分层损伤时,由于不同铺层间存在单元厚度为零的八节点粘接单元,在特定区域删除该粘接单元,仿真时相邻的碳纤维铺层不通过粘接单元粘连,在仿真中视为分层损伤。

对于各类型损伤而言,在底部碰撞工况发生时,理论上电池箱下箱体的所有铺层界面都有可能发生损伤,为研究在不同铺层位置处发生的不同程度损伤对谐波频域信号的影响,本文设置如下损伤形式:在共14层的CFRP电池箱中选择具有代表性的第1、7和14层,每层设置4种不同面积的损伤,来模拟不同铺层位置发生不同程度的损伤,损伤在不同铺层内均居中放置,具体设置如图6所示。

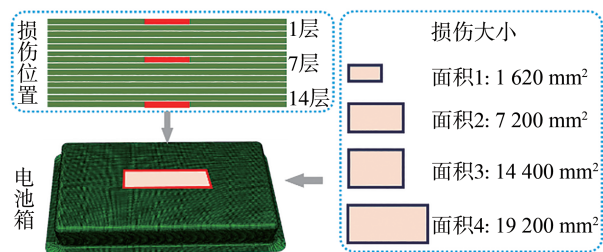


图6 预置损伤大小与位置示意图

3 结果与讨论

3.1 仿真实验

对电池箱使用的CFRP层合板进行落锤冲击实验,冲击能量为15 J,获得载荷-位移($F-d$)和能量-时间($E-t$)曲线,仿真与实验结果对比如图7所示。仿真得到的力学曲线与实验接近,关键力学特征参数之间的最大差异小于8%。因此,仿真模型在精度上满足研究需求,能够用来研究CFRP电池箱的冲击损伤行为。

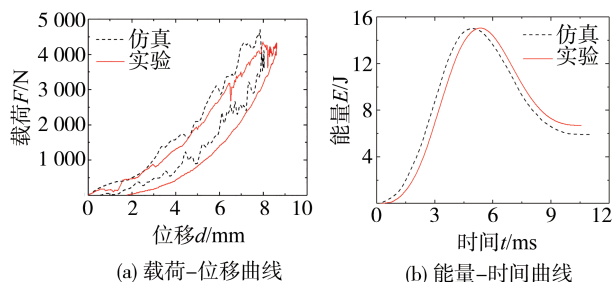


图7 落锤冲击仿真与实验结果对比

学者采用兰姆波对CFRP损伤进行监测,并建立了有效的仿真模型^[19],本文在CFRP层合板中采用相同的材料参数进行仿真建模,对监测计算结果与实验结果进行对比,如图8所示。发现两者吻合度较好,误差小于5%,故损伤监测部分的建模方法在一定程度上能够支撑对CFRP电池箱冲击损伤评估的研究。

3.2 不同能量冲击对电池箱损伤评估参数的影响

图9对比了冲击能量分别为10、15、20和25 J时,CFRP电池箱的基体压缩损伤、纤维拉伸损伤以及分层损伤情况。

基体压缩损伤随着冲击能量的增加,损伤区域增大,四周损伤区域大于中心损伤部分。纤维拉伸

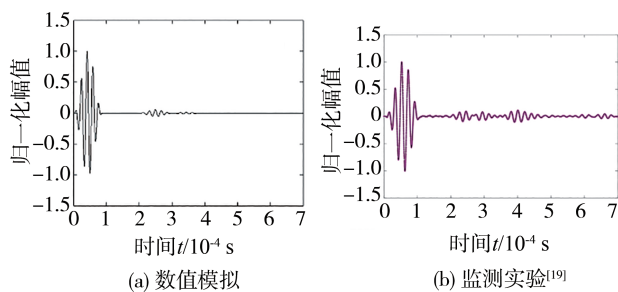


图8 兰姆波监测结果

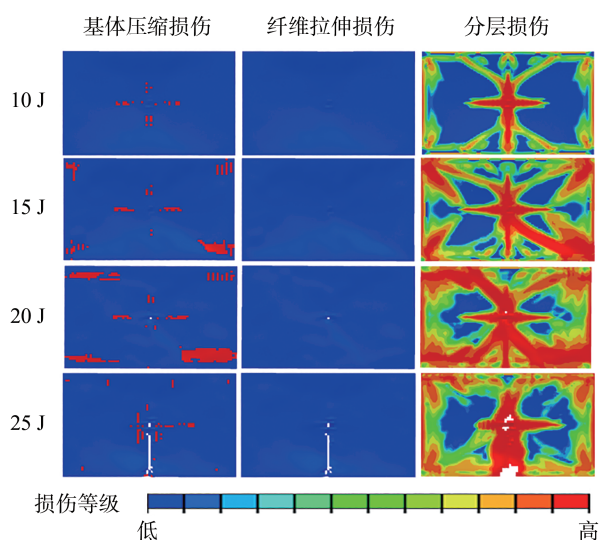


图9 不同冲击能量下各损伤模式损伤程度分析

断裂在数值模拟中伴随网格删除。在20 J的冲击能量下,开始出现网格删除;在25 J的冲击能量下,出现了严重的网格删除,这代表该区域纤维发生失效。分层损伤随着能量的增加,分层面积增大,分层越来越严重。

计算不同冲击能量下兰姆波信号的相对声学非线性参数 β ,并进行归一化处理,如图10所示。参数值随冲击能量逐渐增加,冲击能量从15到20 J,相对声学非线性参数的增幅相较其他能量变化更大,这说明材料失效对相对声学非线性参数的影响较为明显,出现材料失效时,纤维断裂等CFRP层内的失效比层间失效对 β 的影响更大。

3.3 基体损伤对电池箱损伤评估参数的影响

图11展示了不同层出现同样大小损伤时,接收传感器收到的时域信号。无论损伤出现在哪一层,当损伤大小相同时,传感器接收到的时域信号并未出现明显变化。这是由于兰姆波在CFRP电池箱上的传播方向垂直于平面方向,在与不同层相同面积

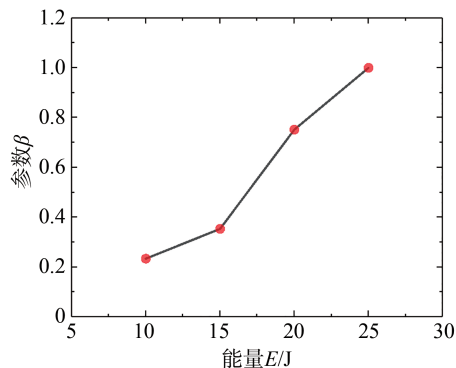


图10 不同冲击能量下的相对声学非线性参数

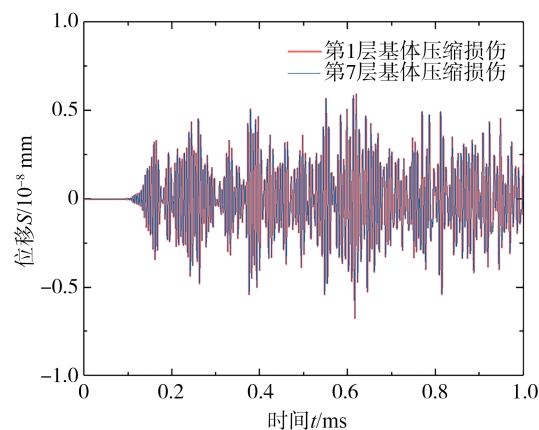


图11 不同层含有基体损伤的时域信号

的损伤相互作用时,会出现基本相同的散射情况。

图12展示了兰姆波在对不同程度的基体压缩损伤进行监测时的时域信号图与频域信号图,分别与完好CFRP电池箱监测情况进行了对比。

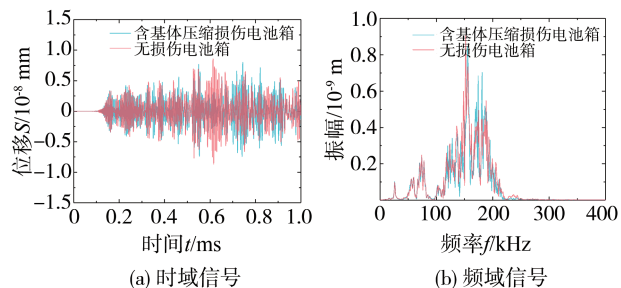


图12 含基体压缩损伤与完好电池箱的兰姆波信号

基体压缩损伤的存在会导致时域信号的变化,这代表损伤改变了兰姆波的传播速度和方向等。但通过分析频域图,在基波频率处,接收信号的数据较为杂乱。材料的非线性特性会导致超声波在传播过程中产生新的频率成分。兰姆波在CFRP电池箱上

传播,由于材料的非线性效应产生了高次谐波,在基频处的幅值较大,在高频处传播弱、幅值较小。基波信号附近的幅值大体相同,但通过放大数据可以看到,在幅值变化上具有可研究的层次感。如图12所示,随着损伤的变大,基波处的幅值大体呈略微下降的趋势。兰姆波在传播过程中因损伤干扰产生二次谐波,且随着损伤面积的增大,相对声学非线性参数呈现逐渐变大的趋势。计算不同基体损伤下的兰姆波信号的相对声学非线性参数 β ,并进行归一化处理,如图13所示。

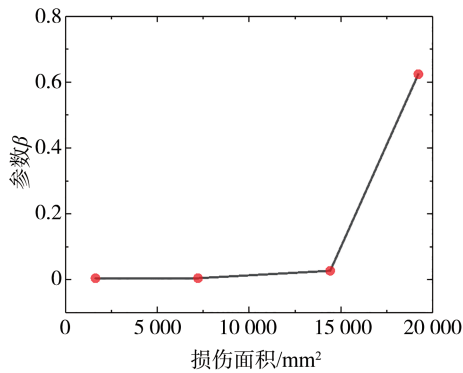


图13 不同面积基体压缩损伤的相对声学非线性参数

3.4 纤维损伤对电池箱损伤评估参数的影响

图14给出了在发生纤维拉伸损伤时,CFRP电池箱发生材料退化,兰姆波的时域频域信号相对于完好电池箱发生的变化。

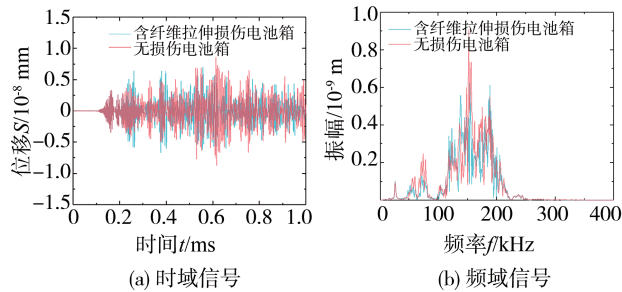


图14 含纤维拉伸损伤与完好电池箱的兰姆波信号

图15展示了相对非线性声学非线性参数,随纤维拉伸断裂损伤面积变化情况。与基体压缩损伤类似,在发生纤维拉伸断裂损伤时,兰姆波的时域信号也发生了较大的时间偏移。频域信号的变化主要集中在基波频率处的幅值,可以看到含有纤维拉伸损伤的电池箱相较于完好电池箱,基波频率附近的幅

值下降,下降程度相较基体压缩损伤的幅度更大。

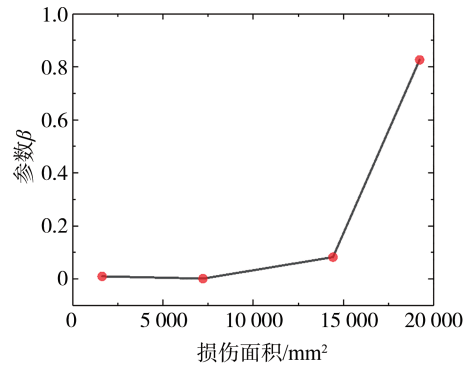


图15 不同面积纤维拉伸下的相对声学非线性参数变化

3.5 分层损伤对电池箱损伤评估参数的影响

图16展示了在发生分层损伤时,兰姆波的时域和频域信号相对于完好电池箱发生的变化。在发生分层损伤时,兰姆波频域信号可以观察到在基波频率处的幅值发生了巨大的变化,生成了更多的频率成分,基波频率附近的曲线更加杂乱,但含有分层损伤的电池箱相较于完好电池箱,基波频率附近的幅值略有增大。图17展示了相对非线性声学参数 β ,随分层损伤面积的变化情况。

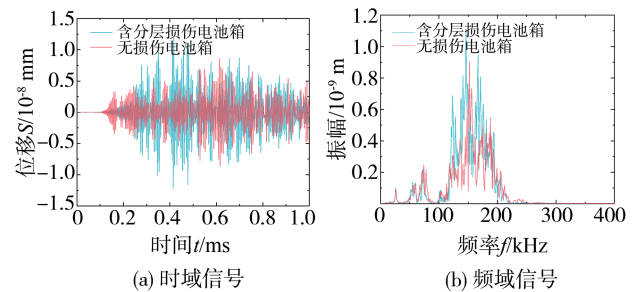


图16 含分层损伤与完好电池箱的兰姆波信号

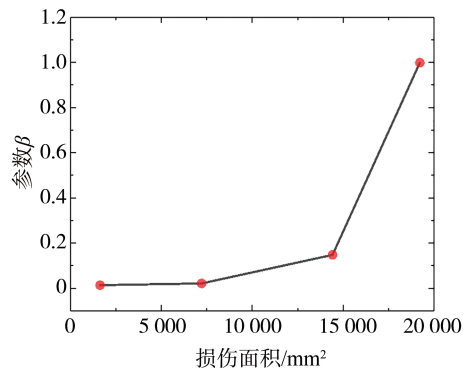


图17 不同面积分层损伤的相对声学非线性参数

对比3种损伤的非线性声学参数 β ,通过归一化处理,如图18所示,发现无论出现何种损伤,相对于较为平缓的增长,在图6中的预置损伤面积4时的 β 会发生较大的增幅。说明在某一损伤阈值后非线性声学参数 β 变化会更加明显。

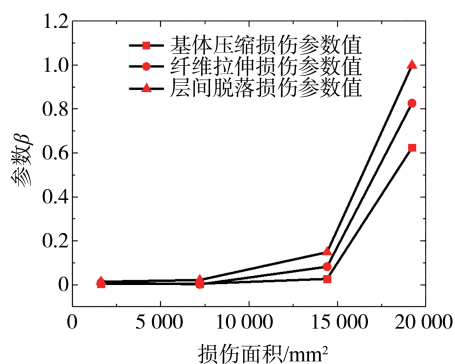


图18 各损伤不同面积下的相对声学非线性参数

高次谐波的产生是由于电池箱材料的非线性特性,在理想情况下,不会有激励频率之外的频率成分出现,但预置损伤会加大CFRP电池箱导波传播的非线性程度。由图18可知,材料的非线性程度随损伤面积的增加而增大,在损伤面积相同时,分层损伤引入的非线性最大,纤维拉伸断裂次之,基体压缩损伤最小。

4 结论

通过搭建CFRP电池箱损伤-监测的仿真模型,对兰姆波传播过程中的谐波变化进行研究,分析了不同损伤对相对非线性声学参数的影响,并得到以下结论。

(1)采用兰姆波对CFRP电池箱进行损伤监测时,由于损伤改变了CFRP材料的非线性,会产生除激励频率外的额外频率成分,大多集中在基波频率和二次谐波等高次谐波附近。

(2)相对声学非线性参数对损伤面积以及损伤类型具有一定程度的敏感性,但对于损伤在厚度方向铺层位置的反映并不理想;在一定损伤程度范围内,相对声学非线性参数的变化幅度较小,一旦损伤程度超过特定阈值后,其参数值会发生突变。

(3)相对声学非线性参数反映了兰姆波在CFRP电池箱传播时的散射情况,在电池箱损伤程度不大时,分层损伤对材料非线性的影响更大,参数值变化更多取决于分层面积;当电池箱损伤程度较大时,参

数值的变化更多取决于CFRP层内的基体或纤维损伤。

本研究仅针对常规环境下电池箱的冲击损伤评估,未考虑温度、湿度等复杂环境因素及车辆运行中电池包经受的动态载荷。未来有必要进一步研究环境和载荷等对损伤评估的影响,以提高兰姆波损伤监测的稳定性和准确性。

参考文献

- [1] 陈静, 彭博, 王登峰, 等. 碳纤维增强复合材料电池箱轻量化设计[J]. 汽车工程, 2020, 42(2): 257-263, 277.
CHEN J, PENG B, WANG D F, et al. Lightweight design of battery boxes made of carbon fiber reinforced composites [J]. Automotive Engineering, 2020, 42(2): 257-263, 277.
- [2] 张君媛, 姜哲, 李仲玉, 等. 基于抗撞性的汽车B柱碳纤维加强板优化设计[J]. 汽车工程, 2018, 40(10): 1166-1171, 1178.
ZHANG J Y, JIANG Z, LI Z Y, et al. Optimal design of carbon fiber reinforced panels for automobile B-pillars based on crashworthiness [J]. Automotive Engineering, 2018, 40(10): 1166-1171, 1178.
- [3] 张君媛, 徐婷婷, 张秋实, 等. 长纤维复合材料乘用车后排座椅骨架轻量化设计[J]. 汽车技术, 2015(8): 10-13.
ZHANG J Y, XU T T, ZHANG Q S, et al. Lightweight design of rear seat frame for passenger cars using long fiber composites [J]. Automotive Technology, 2015(8): 10-13.
- [4] 孙光永, 屈瑞飞, 张慧乐, 等. 基于Taguchi与TOPSIS-熵的车门多目标离散稳健优化研究[J]. 现代制造工程, 2018(3): 11-18.
SUN G Y, QU R F, ZHANG H L, et al. Multi-objective discrete robust optimization of car doors based on Taguchi and TOPSIS-entropy methods [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2018 (3): 11-18.
- [5] 王普毅, 白影春, 林程, 等. 基于EGO加点策略的动力电池包多目标优化[J]. 汽车工程, 2021, 43(10): 1457-1465.
WANG P Y, BAI Y C, LIN C, et al. Multi-objective optimization of power battery pack based on EGO add-point strategy [J]. Automotive Engineering, 2021, 43(10): 1457-1465.
- [6] HE J, LECKEY C A C, LESER P E, et al. Multi-mode reverse time migration damage imaging using ultrasonic guided waves [J]. Ultrasonics, 2019, 94: 319-331.
- [7] 袁慎芳, 王劼, 徐秋慧, 等. 基于导波-高斯混合模型蒙特卡罗迁移度量的结构损伤定量化诊断方法研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(3): 33-39.
YUAN S F, WANG J, XU Q H, et al. Study on structural damage quantification diagnosis method based on guided wave-Gaussian mixture model Monte Carlo migration metric [J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(3): 33-39.
- [8] AYMERICH F, STASZEWSKI W J. Impact damage detection in composite laminates using nonlinear acoustics [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010, 41(9): 1084-1092.

- [9] SOLEIMANPOUR R, NG C T, WANG C H. Higher harmonic generation of guided waves at delaminations in laminated composite beams [J]. *Structural Health Monitoring*, 2017, 16(4): 400–417.
- [10] TIE Y, ZHANG Q, HOU Y, et al. Impact damage assessment in orthotropic CFRP laminates using nonlinear Lamb wave: experimental and numerical investigations [J]. *Composite Structures*, 2020, 236: 111869.
- [11] RAUTER N, LAMMERING R. Impact damage detection in composite structures considering nonlinear Lamb wave propagation [J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2015, 22(1–2): 44–51.
- [12] WANG X, WANG X, NIU X, et al. Application of nonlinear ultrasonic technique to characterize the creep damage in ASME T92 steel welded joints [J]. *NDT & E International*, 2018, 98: 8–16.
- [13] MAO H, ZHANG Y, MAO H, et al. Stress evaluation of metallic material under steady state based on nonlinear critically refracted longitudinal wave [J]. *Results in Physics*, 2018, 9: 665–672.
- [14] BELINGARDI G, VADORI R. Low velocity impact tests of laminate glass–fiber–epoxy matrix composite material plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2002, 27(2): 213–229.
- [15] ASTM Committee D30 on Composite Materials. Standard test method for measuring the damage resistance of a fiber–reinforced polymer matrix composite to a drop–weight impact event: D7136/D7136M–15 [M]. ASTM International, 2015.
- [16] DE LUCA A, CAPUTO F, KHODAEI Z S, et al. Damage characterization of composite plates under low velocity impact using ultrasonic guided waves [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 138: 168–180.
- [17] YANG B, XUAN F Z, CHEN S, et al. Damage localization and identification in WGF/epoxy composite laminates by using Lamb waves: experiment and simulation [J]. *Composite Structures*, 2017, 165: 138–147.
- [18] CAMANHO P P, MATTHEWS F L. A progressive damage model for mechanically fastened joints in composite laminates [J]. *Journal of Composite Materials*, 1999, 33(24): 2248–2280.
- [19] HUO H, HE J, GUAN X. A Bayesian fusion method for composite damage identification using Lamb wave [J]. *Structural Health Monitoring*, 2021, 20(5): 2337–2359.

~~~~~

(上接第2172页)

- [14] 钱凌云, 纪婉婷, 王小灿, 等. 不同应力状态下的高强钢板断裂机理及预测 [J]. *机械工程学报*, 2020, 56(24): 72–80.  
QIAN L Y, JI W T, WANG X C, et al. Research on fracture mechanism and prediction of high–strength steel sheet under different stress states [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(24): 72–80.
- [15] 常浩, 郑颢, 蔡永周, 等. 汽车与行人碰撞中大灯断裂失效模拟的研究 [J]. *汽车工程*, 2022, 44(9): 1437–1446.  
CHANG H, ZHENG H, CAI Y Z, et al. Research on fracture failure simulation of auto headlights in a vehicle–pedestrian crash [J]. *Automotive Engineering*, 2022, 44(9): 1437–1446.
- [16] 马宏越, 肖纳敏, 钱鹏, 等. 非耦合韧性断裂准则及其在航空金属材料中的应用 [J]. *航空材料学报*, 2021, 41(2): 16–31.  
MA H Y, XIAO N M, QIAN P, et al. Uncoupled ductile fracture criterion and its application in aeronautical metallic materials [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2021, 41(2): 16–31.
- [17] 吴长鹏, 谢斌, 潘锋, 等. 汽车动力总成悬置的碰撞失效模拟研究 [J]. *汽车工程*, 2019, 41(1): 36–41, 63.  
WU C P, XIE B, PAN F, et al. A study on crash failure simulation of vehicle engine mounts [J]. *Automotive Engineering*, 2019, 41(1): 36–41, 63.
- [18] ZHANG Y, SHEN F, ZHENG J, et al. Ductility prediction of HPDC aluminum alloy using a probabilistic ductile fracture model [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, 119: 103381.
- [19] 崔跃杰. 7075 铝合金损伤模型研究及应用 [D]. 长春: 吉林大学, 2021.  
CUI Y J. Research and application of 7075 aluminum alloy damage model [D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [20] HOLLOMON J H. Tensile deformation [J]. *Trans AIME*, 1945, 162: 268–290.
- [21] ZHOU B, MENG D H, WU D, et al. Characterization of porosity and its effect on the tensile properties of Mg–6Gd–3Y–0.5 Zr alloy [J]. *Materials Characterization*, 2019, 152: 204–212.
- [22] LIU T S, QIU F, SHU S L, et al. Multilevel microstructure control of cast Al–7.0 Si–4.0 Cu alloy with high strength–toughness synergy via micro–alloying combined with manipulation by in–situ nano–ceramics [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 21: 3248–3261.
- [23] QI M, LI B, ZHANG P, et al. Improvement of mechanical properties of Al–Si–Cu alloy diecastings combined with Cd microalloying and semisolid forming [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 861: 144312.
- [24] BAI Y, WIERZBICKI T. Application of extended Mohr–Coulomb criterion to ductile fracture [J]. *International Journal of Fracture*, 2009, 161(1): 1–20.
- [25] XUE Liang, WIERZBICKI T. Ductile fracture initiation and propagation modeling using damage plasticity theory [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75(11): 3276–3293.