

# 基于光纤光栅和小波包变换的复合材料板状结构的冲击能量辨识方法

徐忠宣<sup>1</sup>, 张思思<sup>2</sup>, 王玉儒<sup>2</sup>, 张雷<sup>2\*</sup>

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111; 2. 山东大学 控制科学与工程学院, 山东 济南 250062)

**摘要:** 为实现复合材料冲击能量的高效识别, 提出了一种基于光纤光栅(Fiber Bragg grating, FBG)传感器和小波包能量的冲击能量分类方法。首先, 以碳纤维增强聚合物(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)层合板状结构为实验对象进行冲击能量辨识实验系统搭建, 并对复合材料板进行网格区域划分, 将FBG传感器植入复合材料板内部, 建立应变-温度传感器网络。实验系统通过调节落锤高度, 开展5, 10和15 J的CFRP板冲击加载实验。使用FBG传感器对冲击信号进行采集, 并将冲击信号转换为动态应变信号。再通过小波包变换对响应信号数据进行频段分解, 计算各频段能量比, 同时对施加冲击载荷后的复合材料板进行超声损伤分析, 获得不同能量冲击造成的结构损伤程度。最后, 根据频段能量比值筛选出冲击能量分类特征, 实现不同冲击能量的划分并进行验证。实验结果表明, 该方法计算步骤简单, 能量分类准确率可达到88.9%, 具有一定的工程应用价值。

**关键词:** 复合材料; 光纤光栅传感器; 小波包变换; 冲击能量辨识

**中图分类号:** TP274 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/csjs.1671-7449.2025033

**引用格式:** 徐忠宣, 张思思, 王玉儒, 等. 基于光纤光栅和小波包变换的复合材料板状结构的冲击能量辨识方法[J]. 测试技术学报, 2025, 39(3): 267-275.

XU Zhongxuan, ZHANG Sisi, WANG Yuru, et al. Impact energy identification method of composite plate structure based on fbg and wavelet packet transform[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(3): 267-275.

## Impact Energy Identification Method of Composite Plate Structure Based on FBG and Wavelet Packet Transform

XU Zhongxuan<sup>1</sup>, ZHANG Sisi<sup>2</sup>, WANG Yuru<sup>2</sup>, ZHANG Lei<sup>2\*</sup>

(1. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China;

2. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250062, China)

**Abstract:** To identify the impact energy of composite materials efficiently, an impact energy classification method based on fiber Bragg grating (FBG) sensor and wavelet packet energy was proposed. Firstly, the impact load test system was built with the carbon fiber reinforced polymer (CFRP) lamellar structure as the experimental object, and the grid area of the composite plate was divided. The FBG sensor was implanted inside the composite plate to establish the strain-temperature sensor network. By adjusting the height of the drop hammer, the impact loading experiments of 5, 10 and 15 J CFRP plates were carried out. In the

收稿日期: 2024-08-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62273206)

作者简介: 徐忠宣(1982-), 男, 高级工程师, 主要从事轨道车辆轻量化与智能化研究。E-mail: xuzhongxuan@cqsf.com。

\* 通信作者: 张雷(1987-), 男, 教授, 博士, 主要从事智能传感器与检测技术研究。E-mail: drleizhang@sdu.edu.cn。

experiment system, the impact signal was collected and converted into a strain signal by the FBG sensor. Then, the response signal data is decomposed by wavelet packet transformation, and the energy ratio of each frequency band is calculated. At the same time, the ultrasonic damage analysis of the composite plate after the impact load was carried out to verify that the structural damage degree caused by different energy impacts was different. Finally, according to the energy ratio of the frequency band, the classification characteristics of the impact energy were screened to realize the division of different impact energies, and the verification was carried out. The experimental results show that this method has simple calculation steps and an energy classification accuracy of 88.9%, which has certain engineering application value.

**Key words:** composite materials; fiber Bragg grating sensors; wavelet packet transform; impact energy identification

## 0 引言

碳纤维复合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP)是一种以树脂为基体,碳纤维为增强体的先进复合材料,具有质量轻、比模量高、可设计性强等优点,在航空航天、轨道交通、风力发电等领域得到了广泛应用,并正在逐步取代传统材料,在飞机、运载火箭和汽车等装备或产品的结构设计中承担着重要角色,发挥着举足轻重的作用<sup>[1-3]</sup>。

相较于坚固的传统金属结构,复合材料结构在遭遇外部物体冲击时展现出更高的损伤敏感性<sup>[4]</sup>。在实际使用环境中,复合材料结构频繁面临冲击载荷的挑战,这通常引发不同程度的损伤问题<sup>[5]</sup>。例如,飞机在飞行过程中可能遭遇飞鸟和冰雹的撞击,风电叶片在运转时也会受到恶劣环境下石块的冲击,这些冲击作用携带的巨大能量可能直接导致复合材料基体开裂、分层等严重损伤,破坏结构的完整性,进而显著降低其力学性能,影响系统的稳定性<sup>[6-7]</sup>。在极端情况下,甚至可能引发安全事故,对人员安全和设备完整性构成威胁。因此,对复合材料进行冲击载荷监测,评估冲击能量大小是保证复合材料结构安全运行的措施之一,并对复合材料的稳定发展具有重要意义。

在众多传感器元件中,光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器以其高灵敏系数和低损耗等特性脱颖而出,成为载荷监测领域的优选方案<sup>[8-9]</sup>。相比传统电磁传感器,FBG传感器具有体积更小、质量更轻的优势,粘贴或植入材料内部时能够最大限度地减少对结构的干扰;同时,它还具有出色的抗电磁干扰和耐腐蚀能力,在复杂恶劣的环境中仍可以正常工作;此外,FBG传感器还具有强大的复用能力,可以灵活地组成规模不一的传感网络,满足各种场合的传感需求<sup>[10-12]</sup>。因此,FBG传感器成为

复合材料载荷监测的理想选择。

目前,针对冲击载荷的能量识别问题,国内外相关研究成果仍然较为有限。冲击能量辨识的方法主要分为两种,其一是重建冲击力的历史曲线,计算得到的曲线峰值即为冲击力的大小。英国伦敦帝国理工学院Ghajari等<sup>[13]</sup>基于复合材料加筋板的有限元模型,获取冲击仿真信号的频谱数据进行神经网络训练,得到了冲击力的历史曲线数据,通过实验验证,获取了冲击力的大小。日本东北大学Atobe等<sup>[14]</sup>通过开展落锤冲击实验,建立具有冲击力和应变数据映射关系的实验传递矩阵,从而实现对冲击位置和冲击力历史曲线的识别,获取曲线峰值估计冲击载荷大小。重建冲击力的时间曲线提取峰值数据虽然准确,但过程十分复杂。第二种方法是提取冲击响应信号的能量特征,以此进行能量等级划分,从而降低识别难度。南通大学的Lu等<sup>[15]</sup>对传感器的冲击响应信号进行傅里叶变换,从而获取频谱曲线的峰值,确定区分不同能量等级的阈值,实现了对不同冲击能量的等级划分。温州大学的Zhong等<sup>[16]</sup>采用二维多信号分类算法,以最大特征值为能量特征,对梅花传感器阵列的传感器信号进行特征分解,代入神经网络训练,获取复合材料曲线峰值,估计冲击载荷大小,完成了冲击能量等级的评估。

相对于重建冲击力历史,使用信号处理技术提取能量特征进行能量等级划分方法更加简单,并且识别结果足以在复合材料冲击载荷监测的能量预警中发挥作用。但是上述研究使用的能量都很低,所提出的方法对于可致使复合材料发生损伤的较高能量的冲击信号可能不再适用。因此,本文以CFRP层合板结构为研究对象,针对冲击载荷分类的问题,提出基于FBG传感技术和小波包能量的冲击能量分类方法,通过对FBG传感器的冲击响应信号进行小波包能量提取,分析不同频段下的能量分布,比较

和识别不同冲击能量信号的特征差异,实现复合材料冲击能量的辨识。

### 1 CFRP 结构冲击实验系统

以 CFRP 层合板状结构为实验对象搭建冲击实验系统,开展冲击实验。CFRP 板尺寸为 600 mm×600 mm×3.2 mm,由 16 层预浸料堆叠铺设而成,铺层顺序为 [±45/0/0/[90/0]<sub>2</sub>]<sub>2s</sub>,FBG 传感器网络以植入的方式铺设在第 3、4 层的两个 0°铺层之间,传感器网络布局如图 1 所示,共植入 50 只传感器,其中包括 49 只应变传感器和 1 只温度传感器,温度传感器用于温度补偿。

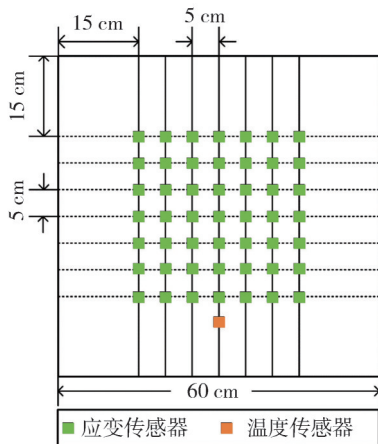


图 1 FBG 传感器布局  
Fig. 1 Layout of FBG sensors

CFRP 结构冲击实验系统包括 CFRP 板、FBG 传感网络、木工夹具、光纤光栅解调仪、落锤试验机和控制电脑,其系统连接示意如图 2 所示。

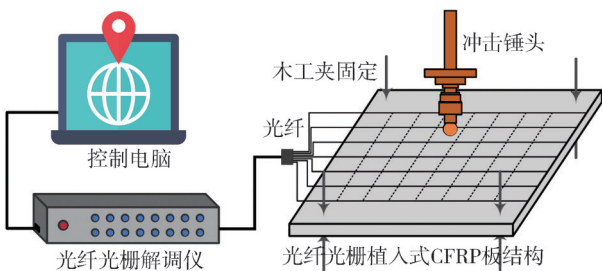


图 2 CFRP 结构冲击实验系统示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of CFRP structural impact test system

利用木工夹具将 CFRP 板固定在落锤试验机的平台上,调整落锤试验机的锤头到指定高度,可实现指定能量的冲击载荷冲击实验板,随后光纤光栅解调仪会采集 FBG 传感网络的中心波长数据,并传送至数据采集系统进行数据处理和存储。

根据重力势能公式  $E=mg\Delta h$  可计算得到指定能量的落锤高度,其中,  $m$  为锤头的质量,且已知锤头

半径为 8 mm,可计算得到锤头质量为 1.9 kg;  $g$  为重力加速度,取  $9.8 \text{ m/s}^2$ 。在本文中,选取 5, 10 和 15 J 冲击能量进行分类研究,各冲击能量对应的落锤高度如表 1 所示。

表 1 3 种冲击能量对应的落锤高度  
Tab. 1 3 kinds of impact energy corresponding to the drop height

冲击能量/J	落锤高度/mm
5	268.53
10	537.06
15	805.59

为实现对复合材料层合板的能量冲击监测,将整个冲击区域划分为  $6 \times 6$  的等面积 36 个网格,并在各网格边界布设 FBG 传感线路,构建传感网络。将所有网格分为 3 组,每组包含 12 个网格。并选取各组网格的中心作为冲击点,分别施加 5, 10 和 15 J 的高能量冲击,每种能量进行 12 次冲击实验。采集到的冲击响应信号通过小波包分解进行能量计算,进一步计算各频段的能量比,以实现冲击能量的分类。具体实验步骤如下:

- 1) 在不施加载荷力的条件下,采集 FBG 传感器原始波长信号;
- 2) 根据落锤位置,设置复合材料结构冲击点,冲击点位于方格中心,固定 CFRP 板结构;
- 3) 调节落锤高度至 268.53 mm,开启冲击实验,并采集得到一组冲击响应信号;
- 4) 在 268.53 mm 的落锤高度下,依次设置落锤冲击位置为预先设定能量为 5 J 的方格中心点,以同样的操作进行冲击和数据采集,共采集 12 组数据;
- 5) 依次修改落锤高度为 537.06 mm 和 805.59 mm,重复步骤 2)~5),总共获取 36 组冲击响应数据;
- 6) 对冲击响应数据分别进行去除基线和温度补偿等操作,得到仅由冲击作用导致的形式为中心波长偏移量的冲击响应数据。

为验证网格划分对冲击能量判断准确性的影响,取同尺寸复合材料层合板做  $4 \times 4$  区域划分,依旧将网格划分为 3 组,其中第 1 组、第 2 组中各包含 5 块网格,第 3 组包含 6 块网格。冲击点选取与冲击能量强度不变,每种能量进行 6 次冲击试验。

## 2 冲击能量分类原理

### 2.1 光纤光栅传感原理

当宽带光注入到光纤光栅内部时,由于布拉格衍射效应,会有一小部分的光发生反射。发生

反射的光满足布拉格谐振方程,由光纤光栅的栅格周期 $\Lambda$ 和有效折射率 $n_{\text{eff}}$ 决定。

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中: $\lambda_B$ 为反射波长,也被称为Bragg波长。在实际应用中,光栅的栅格周期 $\Lambda$ 和有效折射率 $n_{\text{eff}}$ 都受到应变和温度变化的影响。 $n_{\text{eff}}$ 可同时通过热光学和应变光学效应而被修正。因此,由式(1)可知,由应变 $\Delta\epsilon$ 和温度 $\Delta T$ 的变化引起的反射波长位移 $\Delta\lambda_B$ 为

$$\Delta\lambda_B = 2\left(\Lambda \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} + n_{\text{eff}} \frac{d\Lambda}{dT}\right)\Delta T + 2\left(\Lambda \frac{dn_{\text{eff}}}{d\epsilon} + n_{\text{eff}} \frac{d\Lambda}{d\epsilon}\right)\Delta\epsilon. \quad (2)$$

式(2)中的第一项表示温度对Bragg波长的影响,热膨胀效应引起的反射波长位移来源于光栅周期和折射率的改变,温度变化 $\Delta T$ 引起的相对波长位移为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = \lambda_B \left( \frac{dn_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}dT} + \frac{d\Lambda}{\Lambda dT} \right), \quad (3)$$

式中: $\frac{dn_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}dT}$ 为热光系数; $\frac{d\Lambda}{\Lambda dT}$ 为热膨胀系数。光纤光栅Bragg波长和温度基本呈线性关系,在1550 nm附近,Bragg波长的温度灵敏度的数量级约为 $10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。

式(2)中的第二项表示应变对光纤的影响,假设光栅仅在轴向方向受到应变,且光纤材料遵循胡克定律,则由于施加应变而产生的Bragg波长位移为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e)\Delta\epsilon, \quad (4)$$

$$p_e = \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})], \quad (5)$$

式中: $\nu$ 为泊松比; $p_{11}$ 和 $p_{12}$ 分别为纤芯与包层的弹光系数; $p_e$ 为有效弹光系数。当光纤光栅材料确定时, $p_e$ 为一个常数,例如掺锗硅芯光纤的 $p_e \approx 0.22/\mu\epsilon$ 。式(4)可变化为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\Delta\epsilon = K_\epsilon\Delta\epsilon, \quad (6)$$

式中: $K_\epsilon$ 为应变灵敏度系数,表示应变与Bragg波长变化之间的关系。可以看出,Bragg波长变化与应变的关系也是线性的。由式(6)能够大略计算出光纤光栅的应变灵敏度为 $0.78/\mu\epsilon$ ,允许施加到光纤光栅的张力通常在1%左右。当忽略由二阶应变引起的误差,光纤光栅的波长与所受的应变有较好的线性关系。

## 2.2 小波包变换原理

小波包变换可以对小波变换中未被细分的高频部分进行进一步分解,从而提高 $x$ 信号的分辨率,因此在信号处理领域,小波包分析比小波分析具有更

高的灵活性和精确性,适用于多种复杂的信号分析任务<sup>[17-18]</sup>。

小波包函数通常用 $\psi_{j,k}^i$ 表示,其中小波参数 $k$ 、 $i$ 和 $j$ 分别表示调制参数、标度参数和平移参数,小波包函数表示为

$$\psi_{j,k}^i(t) = 2^{j/2} \psi^i(2^j t - k), \quad (i=1, 2, \dots). \quad (7)$$

小波函数 $\psi^i$ 的递推关系为

$$\psi^{2i}(t) = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) \psi^i(2t - k), \quad (8)$$

$$\psi^{2i+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(k) \psi^i(2t - k), \quad (9)$$

式中: $h(k)$ 和 $g(k)$ 分别为来自低通滤波器和高通滤波器的脉冲响应函数。母小波函数是基于 $\psi^1(t) = \psi(t)$ 建立的,满足可逆性和正交性。随后,对原始信号 $y(t)$ 进行 $j$ 层小波包分解,可以得到 $2^j$ 个小波包系数 $c_{j,k}^i(t)$ ,

$$c_{j,k}^i(t) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) \psi_{j,k}^i dt. \quad (10)$$

利用小波包系数重构小波包能量分量函数 $y_{j,k}^i(t)$ , $y_{j,k}^i(t)$ 由小波包函数 $\psi_{j,k}^i$ 线性组合而成。

$$y_j^i(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{j,k}^i(t) \psi_{j,k}^i, \quad (11)$$

$$y(t) = \sum_{i=1}^{2^j} y_j^i(t). \quad (12)$$

小波包函数 $\psi_{j,k}^i$ 具有正交性,满足条件:当 $a \neq b$ 时, $\psi_{j,k}^a(t) \psi_{j,k}^b(t) = 0$ 。因而,原始信号 $y(t)$ 可以看作是 $2^j$ 个小波包分量经过 $j$ 级分解后的和,如式(12)所示。因此,可以计算第 $j$ 级的信号总能量为

$$E_x = \int_{-\infty}^{\infty} y^2 dt = \sum_{m=1}^{2^j} \sum_{n=1}^{2^j} \int_{-\infty}^{\infty} y_j^m(t) y_j^n(t) dt. \quad (13)$$

将式(11)代入到式(13),考虑到小波包函数的正交性, $j$ 级的信号能量 $E_x$ 最终可表示为

$$E_x = \int_{-Y}^Y y^2(t) dt = \sum_{i=1}^{2^j} \int_{-Y}^Y y_j^i(t) dt = \sum_{i=1}^{2^j} E_j^i. \quad (14)$$

$E_x$ 也是不同频段对应的小波包分量能量 $E_j^i$ 之和。在环境激励的作用下,结构损伤会对结构的动力特性产生一定的影响,同时导致结构在各频段的动力响应发生变化。由于能量在时间和频率上具有一致性,结构损伤必然会引发各观测尺度下的频带重新分布。为了得到不同尺度下的信号能量分布,可以采用小波包分解将响应信号分解为 $2^j$ 个频段。随后,通过将各频带的小波包系数转换为能量,计算得到各个频段的能量比,观察并提取不同激励下具有最明显差异的频段能量比作为损伤识别的关键特征。

在式(15)中给出了无量纲的小波包能量比

$\widehat{E}_j$ , 表示各频段能量与总能量的比值。同时, 归一化值  $\widehat{E}_j$  对即使是在噪声污染环境下的结构损伤也非常敏感, 可以反映结构在各个频段的动力特性和结构损伤的发生情况。

$$\widehat{E}_j = \frac{E_j^i}{\sum_{i=1}^2 E_j^i} \quad (15)$$

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 实验数据分析

##### 3.1.1 冲击响应数据

通过调节落锤高度, 设置不同能量的冲击力

冲击 CFRP 板, 采集 FBG 传感器网络的中心波长数据, 对原始中心波长数据进行去除基线和温度补偿等操作后, 为便于后续能量计算, 使得每个信号的能量大小和特征具有一致性, 需将信号截取至相同范围和相同长度。

本文对于信号截取长度的规则设定如下: 以信号绝对值的最大值作为参考点, 在此点前后分别截取 49 个和 100 个点, 从而构成一个长度为 150 的信号序列。图 3 所示为选取的 2 组 3 种冲击能量下, FBG 传感器网络中, 中心波长发生最大偏移的传感器冲击响应信号, 这些信号已经进行了信号截取等预处理操作。

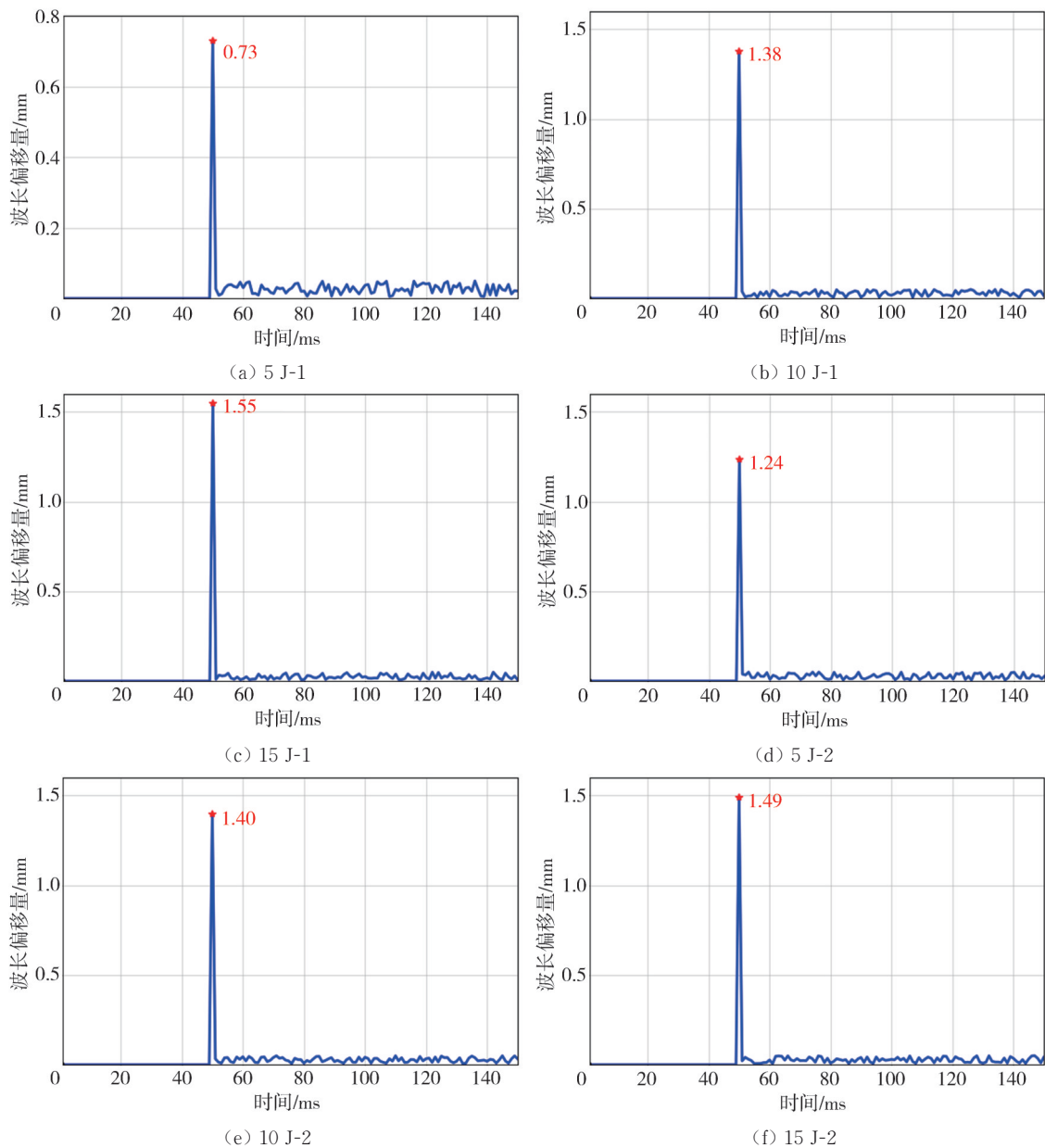


图 3 不同能量的冲击响应信号时域图

Fig. 3 Time domain diagram of impulse response signals with different energies

观察冲击时域信号可知,在高能量的冲击载荷作用下,FBG传感器的中心波长偏移量发生了较大程度的偏移,且随着冲击能量的增大,FBG传感器的中心波长偏移量也随之增大,表明植入到复合材料内部的FBG传感器网络对冲击载荷十分敏感,可用于复合材料冲击载荷的测量。

### 3.1.2 超声损伤分析

对CFRP板进行高能量冲击后,在结构表面,部分冲击点的位置处出现椭圆形的凹陷,未出现其他明显损伤。为分析结构内部是否出现损伤,利用超声波探伤仪对冲击部位进行超声波探测,并与健康状态下的部分超声探测图进行对比,观察复合材料在高能量冲击作用下的内部损伤情况。

本文使用的超声波探伤仪的主机型号为OmniScan MX2,探头为相控阵超声无损检测探头,型号为5L64-NW1,检测结果如图4所示。由图4(a)可知,在CFRP板的健康状态下,对其进行超声探伤检测时,在内部并未发现任何异常现象,这证明了材料内部的完整性。而图4(b)展示的是经过5 J能量冲击后的复合材料超声损伤成像,其结果与健康状态下的复合材料内部保持一致,说明5 J的能量冲击并未对复合材料造成损伤。然而在图4(c)和图4(d)中,可以观察到出现了明显的深色不规则区域,表明10 J能量以上的冲击力会造成结构出现内部损伤。冲击能量越大,发生损伤的范围也随之增大。根据图4(c)、4(d)所展示的冲击实验结果,10 J冲击造成的损伤大小约为25.37 mm×24.22 mm,而15 J冲击导致的损伤大小则约为32.83 mm×31.83 mm,均呈不规则的形状。

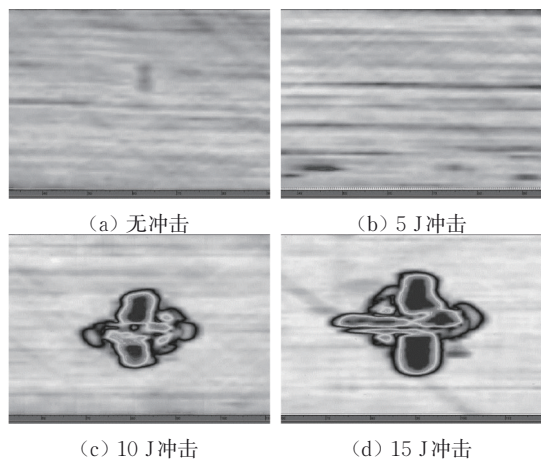


图4 不同能量冲击后的超声探测图

Fig. 4 Ultrasonic detection images after different energy shocks

因此,本文设置的10 J和15 J冲击能量会对CFRP板结构造成程度不等的内部损伤,这些损伤会影响FBG传感信号的频域特征,可根据关键特征的差异实现不同冲击能量的分类。

## 3.2 冲击能量分类特征提取与验证

### 3.2.1 冲击能量分类特征的提取

当结构被破坏时,即便是轻微的损伤,其内部应力波的传递方式也会与健康状态有差异,这种差异会在一定程度上影响响应信号的内在特征。由于小波包能量分量对信号特性的变化极为敏感,所以当结构状态发生变化时,相关频段的分量也会发生相应的变化。因此,可以通过计算并分析各个频段的小波包分量来观察和理解这些变化规律,从而实现冲击能量的分类。

经过多次实验测试,选择“db4”为小波基函数,对一组冲击响应信号中的最大信号进行5层小波包分解,提取各个频段的小波包能量分量并计算小波包能量比,可得到最明显的分类特征。不同冲击能量的冲击响应信号的小波包提取效果如图5所示。因本文中冲击响应信号的小波包能量集中在前10个频段,因此为方便观察,仅绘制前10个频段的小波包能量比。

观察图5(a)~(f)可知,5, 10和15 J的冲击能量下,在32个频带中,第4频带的能量比具有明显差异:随着冲击能量的增加,第4频带的能量比呈现出逐渐减小的趋势。冲击能量为5 J时,第4频带能量占总能量的25%以上;冲击能量为10 J时,第4频带能量占比介于20%和25%,略小于5 J冲击能量;当冲击能量增加至15 J时,第4频带能量比小于20%,进一步降低。

因此,将小波包分解第4频带能量比的大小作为冲击信号能量分类的损伤特征,即:第4频带能量比大于25%信号判断冲击能量为5 J;大于20%且小于等于25%的信号判断冲击能量为10 J;小于等于20%的信号判断冲击能量为15 J。冲击能量等级分类算法流程如图6所示。

### 3.2.2 基于小波包能量的冲击能量分类方法验证

基于图6的分类步骤,对同尺寸复合板所得到的6×6信号组与4×4信号组进行冲击能量分类,分类结果如表2、表3所示。表2中,信号s1~s12为5 J能量的冲击响应信号,s13~s24和s25~s36分别为10 J和15 J能量的冲击信号;表3中,信号s1~s5

为 5 J 能量的冲击响应信号, s6~s10 和 s11~s16 分别为 10 J 和 15 J 能量的冲击信号。第 4 频带小波包能量比(Energy Ratio)用 ER4 表示,“判断结果”列中,“R”表示判断正确,“W”表示判断错误。分析上表可知,在同尺寸复合板不同区域划分下的冲击试验中,5 J 能量的冲击信号全部判断正确。在 6×6 复合板试验中 10 J 能量的 12 组冲击信号中,有 2 组判断失误,分别被判定为 15 J 和 5 J; 12 组 15 J 能量的冲击信号中,同样有 2 组判断失误,均被判定为 10 J,整

体判断准确率为 88.9%。而在 4×4 复合板实验中,10 J 能量的 5 组冲击信号中,仅出现 1 次误判,将 10 J 冲击判断为 15 J 冲击;在 6 组 15 J 能量的冲击信号中,出现 1 次误判,错误地将 15 J 冲击判定为 10 J,整体判断准确率为 94.8%。分析可得,由于更少的网格划分减少了误差累积,提升了信号分类的准确性,因此,网格数较少(4×4)时的判断准确率高于较多网格(6×6)时的判断准确率。网格数量的变化确实会对判断准确率产生影响。

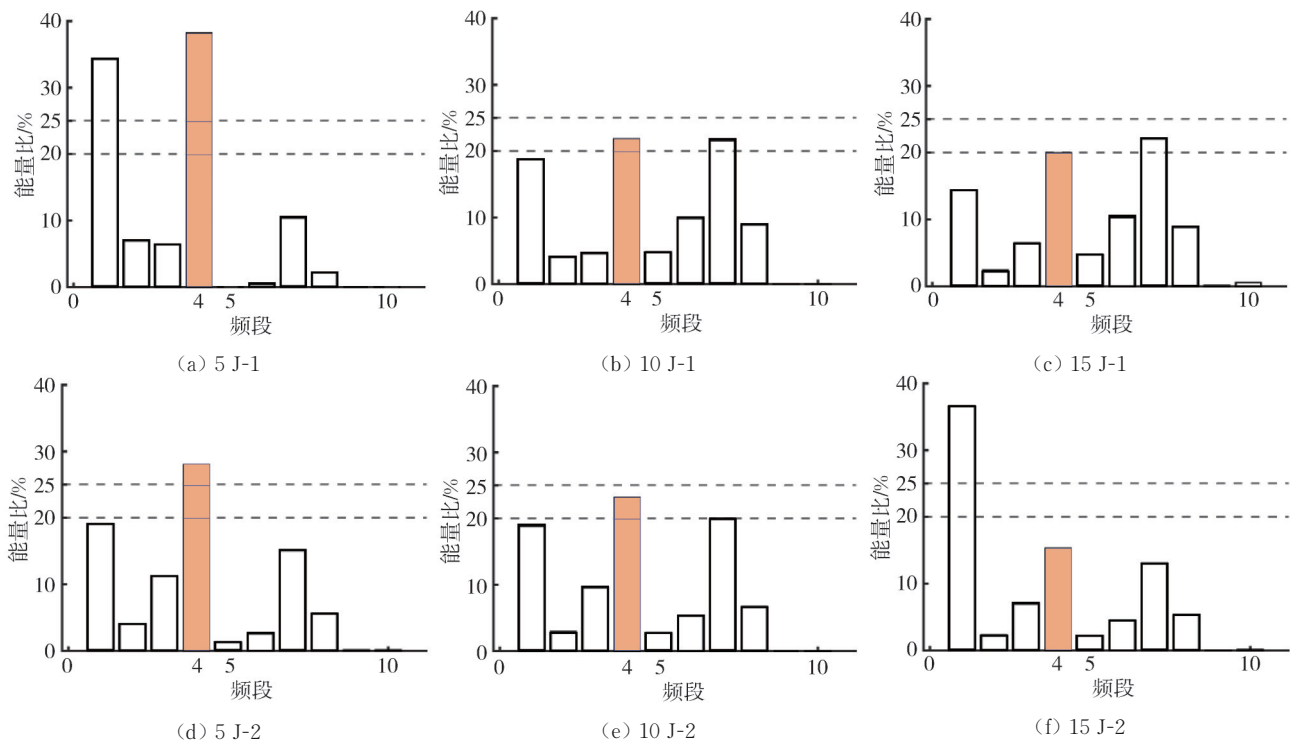


图 5 不同冲击能量响应信号的小波包能量分布

Fig. 5 Wavelet packet energy distribution of different impulse energy response signals

表 2 6×6 信号组冲击信号的 ER4 值和冲击能量分类结果

Tab. 2 The result of ER4 value and impact energy classification of 6×6 signal group

信号	ER4/%	实际能量/J	判定能量/J	判断结果	信号	ER4/%	实际能量/J	判定能量/J	判断结果
s1	38.22	5	5	R	s19	20.24	10	10	R
s2	27.99	5	5	R	s20	24.19	10	10	R
s3	26.23	5	5	R	s21	23.71	10	10	R
s4	29.61	5	5	R	s22	27.25	10	5	W
s5	28.46	5	5	R	s23	24.81	10	10	R
s6	27.16	5	5	R	s24	21.62	10	10	R
s7	25.27	5	5	R	s25	19.96	15	15	R
s8	27.60	5	5	R	s26	15.32	15	15	R
s9	26.16	5	5	R	s27	18.67	15	15	R
s10	25.12	5	5	R	s28	11.52	15	15	R
s11	31.95	5	5	R	s29	14.65	15	15	R
s12	27.30	5	5	R	s30	13.83	15	15	R
s13	21.87	10	10	R	s31	13.91	15	15	R
s14	23.18	10	10	R	s32	19.95	15	15	R
s15	22.05	10	10	R	s33	14.92	15	15	R
s16	23.53	10	10	R	s34	21.98	15	10	W
s17	16.62	10	15	W	s35	19.80	15	15	R
s18	21.20	10	10	R	s36	20.85	15	10	W

表3 4×4信号组冲击信号的ER4值和冲击能量分类结果

Tab. 3 ER4 value and impact energy classification results of 4×4 signal group

信号	ER4/%	实际能量/J	判定能量/J	判断结果	信号	ER4/%	实际能量/J	判定能量/J	判断结果
s1	29.98	5	5	R	s9	21.08	10	10	R
s2	28.12	5	5	R	s10	19.54	10	15	W
s3	30.15	5	5	R	s11	14.59	15	15	R
s4	27.43	5	5	R	s12	16.26	15	15	R
s5	29.01	5	5	R	s13	21.22	15	10	W
s6	21.75	10	10	R	s14	18.80	15	15	R
s7	24.17	10	10	R	s15	14.38	15	15	R
s8	20.94	10	10	R	s16	16.54	15	15	R

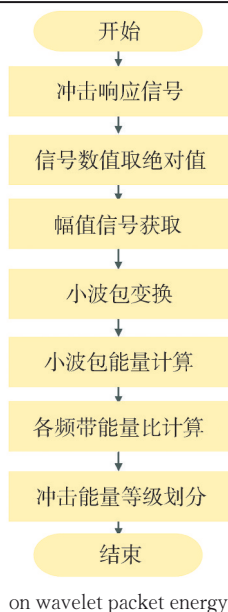


图6 基于小波包能量的冲击能量分类方法流程图

Fig. 6 Impact energy classification method based on wavelet packet energy

本次实验整体准确性较高,总能量分级准确率达到了91.8%,相较于当前主流的同类方法展现出明显优势。现有主流方法包括基于机器学习的视觉识别<sup>[18]</sup>、模态分析、频谱分析<sup>[19]</sup>和声发射法<sup>[20]</sup>等。尽管视觉识别方法的准确度较高,但其训练过程复杂,且难以应用于实际工程环境;而模态分析、频谱分析和声发射法的准确率通常在80%~90%之间,低于本次采用的FBG传感法。此外,FBG传感器在实验中表现出更强的抗干扰能力和高灵敏度,更加适合于复杂工程中的高精度监测需求。因此,本实验方案不仅在准确度上具备显著优势,还在实际应用中具有较高的适用性和可靠性。

经深入分析,导致冲击信号分类出错的原因如下:第一,冲击信号在同一层合板的不同位置采集,而在已冲击的位置内产生的损伤会影响后续其他位置冲击时波长信号的采集,从而干扰后续冲击信号的能量分布,降低能量等级分类的准确度,而当网格的冲击加载点间距增大时,分类信号的干扰减小,

判断准确率相对提高。这表明较少的网格划分可以在一定程度上提升准确性,为后续实验设计提供参考依据;第二,高能量的冲击会引发结构发生较为强烈的振动,导致系统固定装置发生松动,固定方式也会因此改变,这在一定程度上会影响材料内部传感器所感受到的应力变化。

## 4 结束语

本文针对复合材料板状结构冲击载荷辨识的问题,提出了一种基于FBG传感器和小波包能量的冲击能量分类方法。以光纤光栅植入式CFRP板结构为基础搭建了高速冲击实验系统,分别开展了同尺寸复合板不同区域划分下的5, 10和15 J能量冲击实验,采集不同冲击能量的FBG响应信号进行能量等级划分。在6×6区域划分实验中,能量分级的准确率为88.9%,而在4×4区域划分对比实验中,能量等级划分准确率为91.8%,证明在不同区域划分中,能量分级准确度也不相同,且在实验相邻冲击区域核心距离越远时,能量分级准确度更高。该方法不依赖于复合材料的结构参数等先验知识,也无需进行繁琐的模型训练,仅需对响应信号进行小波包能量提取,分析特定频带下的能量分量的占比大小,即可实现不同冲击能量的识别,为复合材料冲击能量识别提供了一种简便且有效的参考手段。尽管在准确率上可能略低于一些更为复杂的模型,但其操作简便、响应迅速,依然具备较高的应用价值,可在工程实际中发挥重要作用。

## 参考文献:

- [1] 苏东敏, 陈友兴, 王召巴, 等. 基于时频分析的CFRP分层缺陷识别研究[J]. 测试技术学报, 2022, 36(3): 185-189.  
SU Dongmin, CHEN Youxing, WANG Zhaoba, et al. Research on CFRP layered defect recognition based on time-frequency analysis [J]. Journal of Test and

- Measurement Technology, 2022, 36(3): 185-189. (in Chinese)
- [2] MUHAMMAD A, RAHMAN M R, BAINI R, et al. Applications of sustainable polymer composites in automobile and aerospace industry[M]//Advances in Sustainable Polymer Composites. Amsterdam: Elsevier, 2021: 185-207.
- [3] GÜEMES A, FERNANDEZ-LOPEZ A, POZO A R, et al. Structural health monitoring for advanced composite structures: a review[J]. Journal of Composites Science, 2020, 4(1): 13.
- [4] 杨宇, 周雨熙, 王莉. 一种集成多个机器学习模型的复合材料结构损伤识别方法[J]. 数据采集与处理, 2020, 35(2): 278-287.
- YANG Yu, ZHOU Yuxi, WANG Li. Integrated method of multiple machine-learning models for damage recognition of composite structures[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2020, 35(2): 278-287. (in Chinese)
- [5] 莫袁鸣, 赵振华, 罗刚, 等. 复合材料层合板冰雹冲击损伤研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(3): 112-121.
- MO Yuanming, ZHAO Zhenhua, LUO Gang, et al. Investigation on damage of composite laminates subject to hail impact[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2020, 34(3): 112-121. (in Chinese)
- [6] 段苗苗, 史文艳, 张晓研, 等. 低速冲击下复合材料层合板损伤试验与模拟[J]. 强度与环境, 2020, 47(2): 26-31.
- DUAN Miaomiao, SHI Wenyan, ZHANG Xiaoyan, et al. Numerical analysis and tests of composite laminates under low-velocity impact[J]. Structure & Environment Engineering, 2020, 47(2): 26-31. (in Chinese)
- [7] SEIFOORI S, MAHDIAN PARRANY A, MIRZARAHMANI S. Impact damage detection in CFRP and GFRP curved composite laminates subjected to low-velocity impacts[J]. Composite Structures, 2020, 261: 113278.
- [8] 路元刚, 王缘, 彭健钦, 等. 迟滞和蠕变补偿的 F-P 滤波器波长解调方法研究[J]. 数据采集与处理, 2018, 33(1): 12-21.
- LU Yuangang, WANG Yuan, PENG Jianqin, et al. Study on F-P filter-based wavelength demodulation method with hysteresis and creep compensation [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2018, 33(1): 12-21. (in Chinese)
- [9] JANELIUKSTIS R, MIRONOV D. Smart composite structures with embedded sensors for load and damage monitoring: a review[J]. Mechanics of Composite Materials, 2021, 57(2): 131-152.
- [10] JANG B W. Robust low-velocity impact localization algorithm on composite plate to dynamic operating conditions using fiber optic sensors[J]. Composite Structures, 2022, 280: 114881.
- [11] 闫洁, 李伟, 姜明顺, 等. 基于光纤光栅传感器的板状结构形态感知与三维重构技术[J]. 中国激光, 2020, 47(11): 231-240.
- YAN Jie, LI Wei, JIANG Mingshun, et al. Shape perception and three-dimensional reconstruction technology of plate structure based on fiber Bragg grating sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11): 231-240. (in Chinese)
- [12] 陈宝杰, 刘佳, 贾平岗, 等. 基于 FBG 温度解耦的光纤法布里-珀罗高温压力传感器[J]. 测试技术学报, 2020, 34(4): 321-326.
- CHEN Baojie, LIU Jia, JIA Pinggang, et al. Fiber-optic Fabry-Perot pressure sensor based on FBG temperature-decoupling for high-temperature applications [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2020, 34(4): 321-326. (in Chinese)
- [13] GHAJARI M, SHARIF-KHODAEI Z, ALIABADI M H, et al. Identification of impact force for smart composite stiffened panels [J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(8): 085014.
- [14] ATOBE S, SUGIMOTO S, HU N, et al. Impact damage monitoring of FRP pressure vessels based on impact force identification [J]. Advanced Composite Materials, 2014, 23(5/6): 491-505
- [15] LU G, LIANG D, XU Y. The energy class discrimination of low velocity impacts on composite material structure by Bragg grating sensor technique[J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(2): 594-598.
- [16] ZHONG Y, XIANG J, GAO H, et al. Impact energy level assessment of composite structures using MUSIC-ANN approach [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2016, 23(5): 825-837.
- [17] 付宝刚, 李红义. 基于小波包能量分布和大小变化的结构损伤识别对比分析[J]. 中国建材科技, 2020, 29(4): 90-95.
- FU Baogang, LI Hongyi. Comparative analysis of structural damage identification based on wavelet packet energy distribution and size change [J]. China Building Materials Science & Technology, 2020, 29(4): 90-95. (in Chinese)

(下转第 283 页)