

基于光纤光栅的冲击激励声发射响应机理与定位方法研究

张法业 姜明顺 隋青美 吕珊珊 贾磊

Acoustic emission localization technique based on fiber Bragg grating sensing network and signal feature reconstruction

Zhang Fa-Ye Jiang Ming-Shun Sui Qing-Mei Lü Shan-Shan Jia Lei

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 66, 074210 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.074210

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.074210>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于光克尔效应的径向光束匀滑新方案

[A novel radial beam smoothing scheme based on optical Kerr effect](#)

物理学报.2016, 65(9): 094207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094207>

基于六角格子光子晶体波导的高效全光二极管设计

[High efficiency all-optical diode based on hexagonal lattice photonic crystal waveguide](#)

物理学报.2016, 65(6): 064207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.064207>

外腔镜非线性运动对激光回馈应力测量系统精度的影响及修正

[Correction of error induced by nonlinear movement of feedback mirror in laser feedback stress measurement system](#)

物理学报.2015, 64(8): 084208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084208>

用于直接驱动的快速变焦新方案

[A novel fast zooming scheme for direct-driven laser fusion](#)

物理学报.2015, 64(5): 054209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054209>

单光子调制锁定 Fabry-Perot 腔

[Fabry-Perot cavity locked by using single photon modulation](#)

物理学报.2012, 61(20): 204203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.204203>

专题: 光纤传感

基于光纤光栅的冲击激励声发射响应机理与定位方法研究*

张法业 姜明顺 隋青美[†] 吕珊珊 贾磊

(山东大学控制科学与工程学院, 济南 250061)

(2016年10月9日收到; 2017年3月27日收到修改稿)

在对冲击激励声发射应力波在铝合金板上的传播机理进行分析的基础上, 利用ABAQUS软件构建了钢球冲击铝合金板几何模型, 仿真分析了冲击应力波传播过程. 理论分析了冲击应力波与FBG传感器的作用机理, 基于边缘滤波原理构建了声发射传感系统, 采集冲击激励声发射应力波, 建立了声发射区域定位模型, 提出了基于扩散映射与支持向量机(SVM)的声发射区域定位方法并进行了实验验证. 在 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的铝合金板上对36个测试区域进行了多次声发射区域定位实验, 实验结果表明, 扩散映射结合SVM的定位结果较优, 区域定位精度为 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$, 定位正确率为97.5%, 耗时0.781 s. 研究结果为声发射区域定位检测提供了一种有效方法.

关键词: 光纤光栅, 声发射传感, 冲击定位, 支持向量机

PACS: 42.79.-e, 42.82.Bq, 43.40.+s, 43.60.+d

DOI: 10.7498/aps.66.074210

1 引言

在声发射(acoustic emission, AE)定位系统中, 声发射传感器是实现声发射信号检测和定位的关键部件之一^[1-4]. 光纤光栅声发射传感器以其良好的绝缘性、结构紧凑、安装方便、易构建传感器网络等突出优势, 非常适合在声发射检测和定位系统中应用^[5-7]. 目前, 国内外学者对声发射源定位算法和声发射信号特征提取算法做了大量研究. Shrestha等^[8]利用6只光纤光栅声发射传感组成的传感阵列探测复合材料冲击响应, 结合参考数据库算法实现了复合材料机翼声发射定位; Hafizi等^[9]研究了近红外光纤光栅声发射传感器冲击响应机理, 并在 $160\text{ mm} \times 800\text{ mm}$ 的复合材料板上进行了实验验证; Jiang等^[10]对光纤光栅

传感器超声激励引起声发射的响应原理进行了研究, 并在 $150\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ 的铝合金板上通过断铅实验验证了其正确性. Cheng等^[11]使用两只声发射SR150检测转子试验机的轴承摩擦损伤引起的声发射信号, 以两个信号的互相关系数和信号能量作为BP小波神经网络的算法输入, 以摩擦损伤位置为输出, 构建了基于BP小波神经网络的轴承摩擦损伤模型并进行了实验验证; Jiang等^[12]利用代数重建技术和3D图像技术实现了声发射定位; Sadegh等^[13]利用遗传算法结合人工神经网络提取轴承不同润滑条件下的声发射信号特征, 实现了轴承不同润滑工况的正确识别. 但是, 以上研究多集中在声发射源定位算法和特征提取方法上, 尚缺乏对冲击激励声发射传播机理和光纤布拉格光栅(FBG)声发射响应机理的深入研究.

在研究冲击应力波传播机理和FBG响应机理

* 国家自然科学基金(批准号: 41472260)、山东省自然科学基金(批准号: ZR2014FM025)、山东大学基本科研业务费资助项目(批准号: 2016JC012)和山东大学青年学者未来计划项目(批准号: 2016WLJH30)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: jiangmingshun@sdu.edu.cn

的基础上,使用钢球冲击铝合金板模拟声发射源,利用ABAQUS软件构建了钢球冲击铝合金板几何模型,仿真分析了冲击应力波的传播过程.采用光纤光栅传感器和边缘滤波原理构建传感系统,采集冲击激励声发射应力波,建立声发射区域定位模型,提出了基于扩散映射(diffusion maps, DM)与支持向量机(SVM)的区域定位方法并进行了声发射区域定位实验验证.

2 声发射定位系统

2.1 冲击应力波铝合金板传播分析

当四边固支铝合金板受到自由落体钢球的冲击,钢球刚接触到铝合金板表面时,应力波主要集中在冲击点附近,且有向四周扩散的趋势;接着,应力波开始向四周均匀扩散,呈多层环形分布;当环形扩散的应力波碰到铝合金板边界之后被反弹向中心传播,反弹回来的应力波在中心汇聚并相互叠加.为验证应力波的传播特性,利用ABAQUS软件构建了钢球冲击铝合金板的几何模型,如图1所示.在铝合金板的四角设置4个观测点,采集应力波传播到各观测点时的波形.

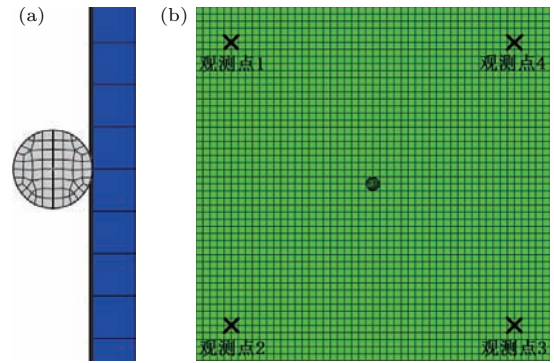


图1 钢球冲击铝合金板几何模型 (a) 钢球冲击铝合金平板示意图; (b) 观测点布置示意图

Fig. 1. The model of ball impacted aluminum alloy plate: (a) the schematic of ball impact aluminum alloy plate; (b) the schematic of observation point arrangement.

表1 模型参数
Table 1. Model parameters.

参数名称	数值
板的长度/mm	300
板的宽度/mm	300
板的厚度/mm	2
板的密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2.6
钢球质量/g	26
钢球密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	7.8
冲击高度/mm	260

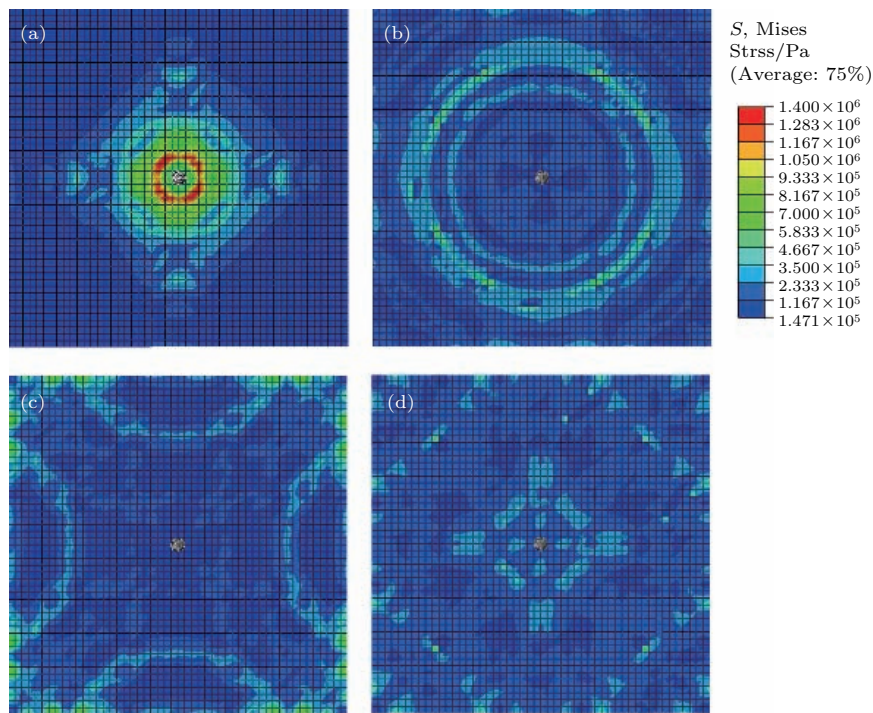


图2 冲击应力波传播过程 (a) 产生; (b) 环形扩散; (c) 反弹; (d) 中心叠加

Fig. 2. The propagation process of shock wave: (a) Generating; (b) annular diffusion; (c) rebound; (d) center stacking.

在仿真实验过程中, 模型的参数设置如表 1 所列.

钢球冲击铝合金板中心时, 铝合金板表面应力波传播过程的仿真结果和观测点 4 采集到的冲击应力波的波形分别如图 2 和图 3 所示.

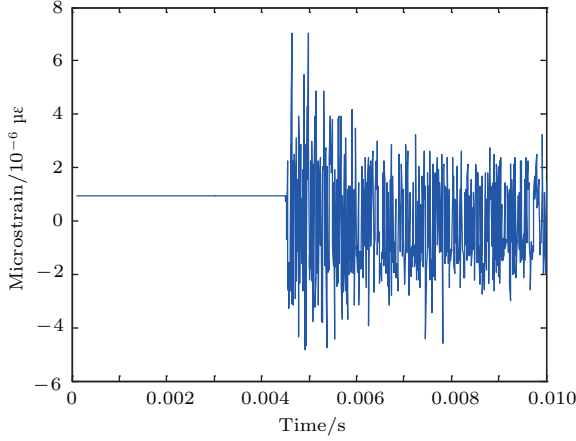


图 3 S4 处冲击应力波形图

Fig. 3. Impact stress waveform at S4.

2.2 冲击应力波与 FBG 作用机理分析

根据耦合模理论, FBG 传感基本原理^[14-16]可表示为

$$\lambda_{B0} = 2n_{\text{eff}0}\Lambda_0, \quad (1)$$

式中, λ_{B0} 为布拉格光栅反射波长, $n_{\text{eff}0}$ 为光纤的有效折射率, Λ_0 为光栅周期.

在未受外界物理量作用的情况下, FBG 的纤芯轴向有效折射率为

$$n_{\text{eff}}(z) = n_{\text{eff}0} - \Delta n \sin^2\left(\frac{\pi}{\Lambda_0}z\right), \quad z \in [0, L], \quad (2)$$

式中, z 为光纤轴向上某一点, L 为光纤光栅长度, Δn 为折射率最大调制系数.

冲击形成的声发射应力波的应变场理论模型可表示为

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_m \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_s} - w_s t\right), \quad (3)$$

式中, ε_m 为振幅, $2\pi/\lambda_s$ 为波数, w_s 为角频率, λ_s 为声发射应力波在介质中的波长.

FBG 与冲击应力波的相互作用示意图见图 4.

当冲击应力波作用于 FBG 时, 对 FBG 的影响主要体现在两个方面: 一是对 FBG 几何尺寸的调制, 即几何效应; 二是由弹光效应引起的光纤纤芯有效折射率的变化. 这两方面的影响都会直接引起 FBG 波长的改变.

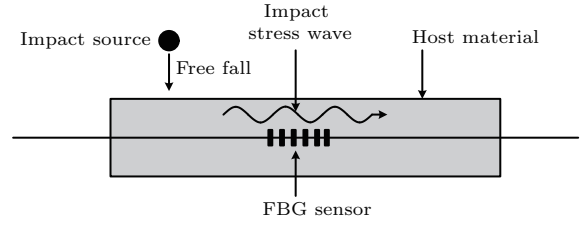


图 4 FBG 与声发射应力波相互作用示意图

Fig. 4. The interaction of FBG and Impact stress wave.

首先考虑几何效应的影响. 当 FBG 受到冲击应力波作用时, 轴向尺寸发生变化, 表现为光纤轴向坐标的改变. 设在冲击作用下导致 z 点变化为 z' , 则

$$\begin{aligned} z' &= f(z, t) = z + \int_0^z \varepsilon(\xi) d\xi \\ &= z + \varepsilon_m \frac{\lambda_B}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_s} - w_s t\right) + \varepsilon_m \frac{\lambda_B}{2\pi} \sin(w_s t), \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $z \in [0, L]$, $\int_0^z \varepsilon(\xi) d\xi$ 为冲击应力波引起的位移.

反解 (4) 式得到 $z = f^{-1}(z', t)$, 代入 (2) 式, 则此时光栅折射率为

$$n'_{\text{eff}}(z', t) = n_{\text{eff}0} - \Delta n \sin^2\left(\frac{\pi}{\Lambda_0} f^{-1}(z', t)\right). \quad (5)$$

其次, 分析弹光效应的影响. 要获得完整的有效折射率模型, 弹光效应的影响亦需考虑. 在冲击应力波作用下, 由弹光效应引起的有效折射率变化为

$$\begin{aligned} \Delta n'(z', t) &= -\left(\frac{n_{\text{eff}0}^3}{2}\right) \cdot [P_{12} - \sigma(P_{11} + P_{12})] \\ &\quad \times \varepsilon_m \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_s} z' - w_s t\right), \end{aligned} \quad (6)$$

式中, P_{ij} 为弹光系数, σ 为泊松比.

综合 (5) 式和 (6) 式, 可得冲击应力波调制下光纤光栅有效折射率为

$$\begin{aligned} n'_{\text{eff}}(z', t) &= n_{\text{eff}0} - \Delta n \sin^2\left(\frac{\pi}{\Lambda_0} f^{-1}(z', t)\right) - \left(\frac{n_{\text{eff}0}^3}{2}\right) \\ &\quad \times [P_{12} - \sigma(P_{11} + P_{12})] \\ &\quad \times \varepsilon_m \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_s} z' - w_s t\right). \end{aligned} \quad (7)$$

由 (7) 式可知, n'_{eff} 的表达式非常复杂, 但当冲击应力波波长 λ_s 远小于光栅长度 L , 即 $\lambda_s/L \gg 1$ 时,

(7)式可简化为

$$n'_{\text{eff}}(z', t) = n_{\text{eff}0} - \Delta n \sin^2 \left(\frac{\pi}{\Lambda_0 \cdot [1 + \varepsilon_m \cos(w_s t)]} z' \right) - \left(\frac{n_{\text{eff}0}^3}{2} \right) \cdot [P_{12} - \sigma (P_{11} + P_{12})] \times \varepsilon_m \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda_s} z' - w_s t \right). \quad (8)$$

(8)式可进一步简化为

$$n'_{\text{eff}}(z', t) = n'_{\text{eff}0}(t) - \Delta n \sin^2 \left(\frac{\pi}{\Lambda'_0(t)} z' \right), \quad (9)$$

式中,

$$n'_{\text{eff}0}(t) = n_{\text{eff}0} - \left(\frac{n_{\text{eff}0}^3}{2} \right) \cdot [P_{12} - \sigma (P_{11} + P_{12})] \times \varepsilon_m \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda_s} z' - w_s t \right), \quad (10)$$

$$\Lambda'_0(t) = \Lambda_0 \cdot [1 + \varepsilon_m \cos(w_s t)]. \quad (11)$$

结合(1)式, FBG波长可改写为

$$\lambda_B(t) = \lambda_{B0} + \Delta \lambda_0 \cos(w_s t), \quad (12)$$

式中,

$$\Delta \lambda_0 = \lambda_{B0} \varepsilon_m \left\{ 1 - \left(\frac{n_{\text{eff}0}^2}{2} \right) \times [P_{12} - \sigma (P_{11} + P_{12})] \right\}. \quad (13)$$

从(12)式可以看出, 在冲击应力波的波长远大于光栅长度时, FBG传感器的反射光谱被冲击应力波调制的过程是一个FBG波长发射漂移的过程, 即FBG可有效感知冲击引起的声发射应力波.

2.3 声发射检测与定位系统搭建

声发射定位系统主要由未经平坦的放大自发辐射(ASE)光源、分路器、环行器、光电转换及放大电路、数据处理单元、4只FBG传感器和示波器组成, 系统框图如图5所示. 为实现声发射信号的快速解调, 利用ASE光源线性段作为边缘滤波器, 结合边缘滤波解调原理构建光纤光栅解调系统, 其工作示意图见图1中虚框部分. 当声发射信号作用于FBG引起其反射峰出现漂移时, 由于ASE光源斜边滤波的调制, 反射峰的强度产生相应变化. 这种变化通过光电转换及放大电路转化成电压信号的变化, 最后, 经过数据处理单元滤波处理后在示波器显示信号波形.

在铝合金板上划分 p 个正方形区域作为待识别定位区域, 若将每个正方形区域作为一个类别, 标记为 $S = \{1, 2, \dots, p\}$, 则可以将声发射区域定位问题转换为 v -SVC多分类问题, 通过 v -SVC多分类算法予以解决^[17,18]. 选用300 mm×300 mm×2 mm的铝合金板4边固支于实验台上. 在铝合金板上划分36个30 mm×30 mm的正方形区域作为待识别声发射区域, 如图6所示.

FBG传感器的波长选择在ASE光源光谱曲线斜率最大的1533—1536 nm单调区间内, 光栅中心波长选定为1534 nm. 在铝合金板4个对角黏贴FBG传感器, 黏贴位置分别为FBG1(30, 270), FBG2(30, 30), FBG3(270, 30)和FBG4(270, 270), 黏贴时预紧力分别拉伸至1534.552, 1534.586, 1534.565, 1534.577 nm. 采用质量为26 g的钢球作为声发射模拟装置, 以自由落体的方式进行垂直冲击, 冲击高度为260 mm, 对应的冲击能量为0.065 J, 冲击速度为2.24 m/s.

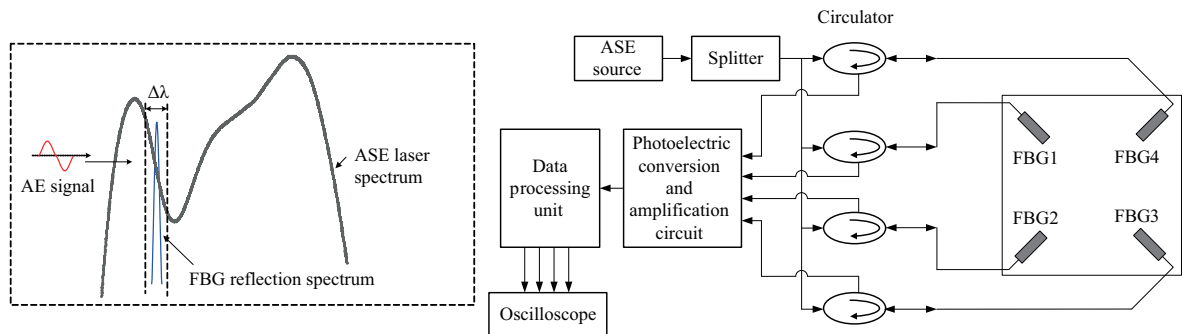


图5 声发射定位系统框图

Fig. 5. The diagram of AE location system.

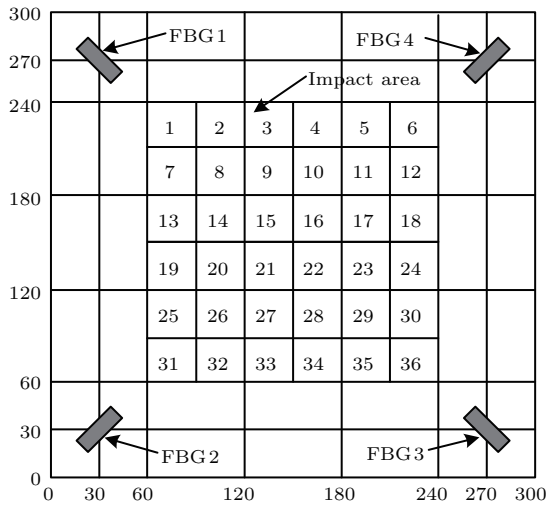


图6 铝合金板声发射区域示意图

Fig. 6. Layout of plate AE region on aluminum alloy.

3 声发射定位实验及结果分析

3.1 声发射信号特征提取

用钢球依次冲击图6所示的铝合金板上标号为1, 8, 15, 22, 29, 36的正方形区域, 以FBG传感器监测的声发射信号为例探索声发射区域与信号特征之间的关系. 在实验中, 由于声发射信号微弱, 易使FBG传感器检测到信号含有噪声干扰, 因此, 选用小波分析的方法去除噪声, 小波基函数选择具有较少非对称性、处理效果较好的sym8函数. 首先, 以4只FBG传感器监测区域8产生的声发射信号为例, 进行小波去噪. 图7给出了FBG1传感器检测声发射信号去噪前后的对比图, 从图中可以发现信号有明显优化. 去噪前声发射信号的信噪比为3.1, 去噪后声发射信号的信噪比为20.4, 信噪比提高了5倍多.

然后, 利用(14)式和(15)式分别计算去噪后信号的振荡能量 E 和波形指标 SHA , 结果如图8所示.

$$E = \frac{1}{2(N_2 - N_1)} \sum_{i=N_1}^{N_2} |f(iT) - f(T_0)|^2, \quad (14)$$

$$SHA = \frac{RMS}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i|}, \quad (15)$$

式中, $N_1 = 0, 1, 2, \dots, n$, $N_2 = 0, 1, 2, \dots, n$, 且 $N_2 \geq N_1$; T 为信号采样间隔时间; n 为总采样点

数; $f(T_0)$ 为声发射信号初始状态; x_i 为声发射信号采样值; $RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i^2}$ 为信号的标准差.

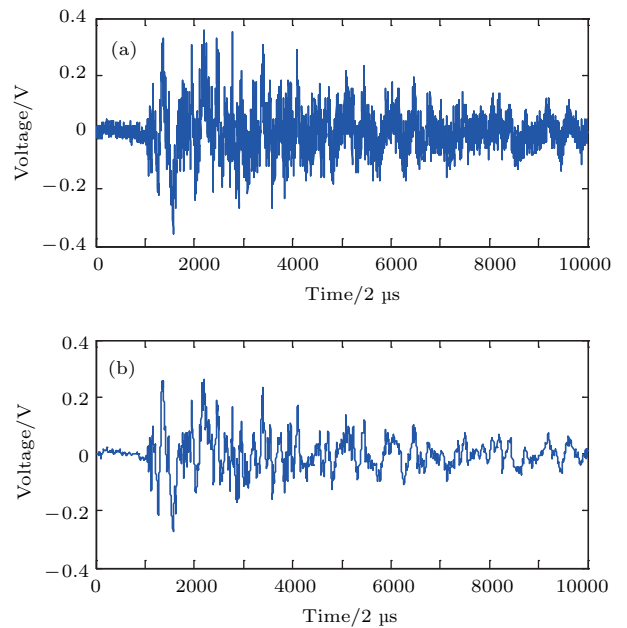


图7 小波去噪前后声发射信号对比图 (a)原始信号; (b)去噪信号

Fig. 7. Comparison of AE signal before and after wavelet domain denoising: (a) Original signal; (b) denoised signal.

采用同样方法对FBG传感器监测的上述6个位置的声发射信号进行处理. 为直观清晰地观察去噪后信号的振荡能量、波形指标与声发射区域的关系, 图9给出了区域8和区域15产生的声发射信号的振荡能量和波形指标的分布, 图9(a)代表区域8声发射信号小波去噪后振荡能量的分布; 图9(b)代表区域8声发射信号小波去噪后波形指标的分布, 图9(c)代表区域15声发射信号小波去噪后振荡能量的分布; 图9(d)代表区域15声发射信号小波去噪后波形指标的分布. 分析图9发现: 使用钢球冲击铝合金板的不同区域, FBG传感器所监测到的声发射信号经小波去噪后, 各信号的振荡能量和波形指标均存在差异, 说明FBG传感器所监测的铝合金板声发射信号的振荡能量和波形指标与声发射区域有关. 因此, 提取声发射信号经小波去噪后信号的振荡能量和波形指标作为信号特征, 可以用来进行声发射区域定位.

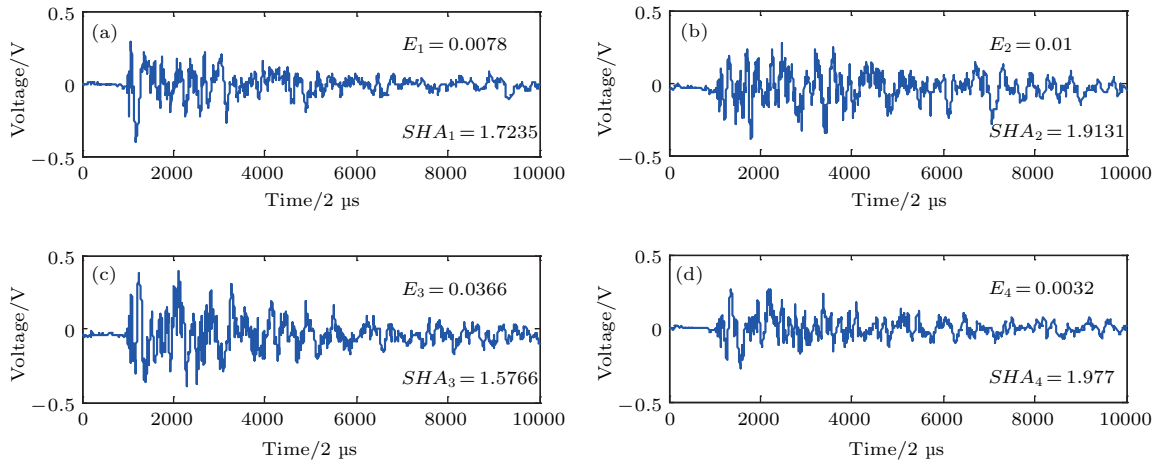


图8 区域8的声发射信号去噪后的波形图 (a) FBG1; (b) FBG2; (c) FBG3; (d) FBG4

Fig. 8. Denoised AE waveforms of area 8: (a) FBG1; (b) FBG2; (c) FBG3; (d) FBG4.

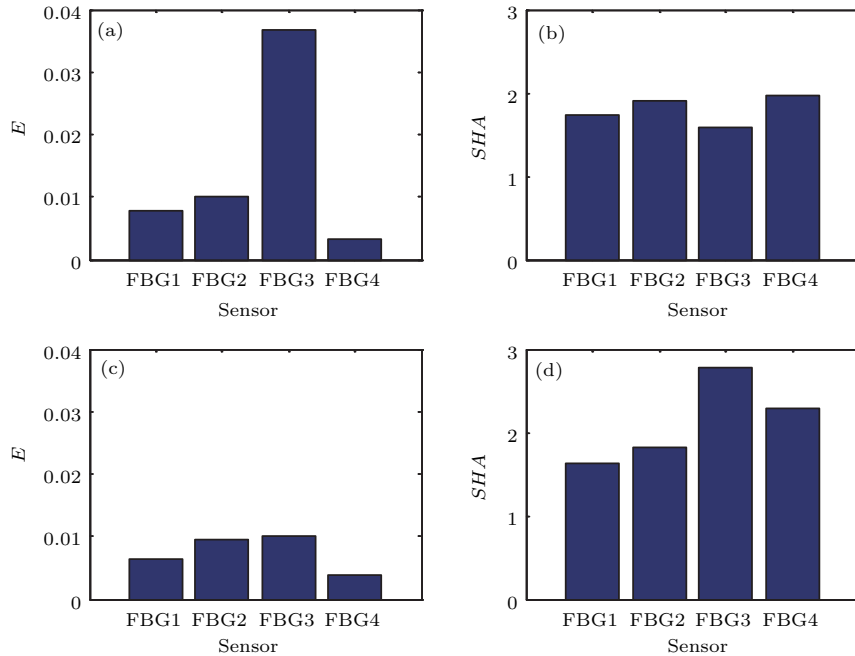


图9 不同区域声发射信号特征的对比 (a) 区域8振荡能量; (b) 区域8波形指标; (c) 区域15振荡能量; (d) 区域15波形指标

Fig. 9. The comparison chart of AE signal feature at different area: (a) Vibration energy of area 8; (b) waveform indicator of area 8; (c) vibration energy of area 15; (d) waveform indicator of area 15.

3.2 声发射信号区域定位识别

使用钢球依次冲击图6所示的铝合金板上划定的36个声发射区域各30次, 获得1080个实验样本. 首先, 采用随机选取样本的方式, 选取720个样本作为多分类机模型的训练样本, 样本大小为 720×8 ; 选取剩余的360个样本作为测试样本, 样本大小为 360×8 . 为提高声发射定位效率, 采用非线性降维方法扩散映射对训练样本和测试样本进

行降维, 定义样本数据集中数据 x_i 和 x_j 之间的 t 步扩散距离^[19-21]为

$$D^{(t)}(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_k \frac{(p_{ik}^{(t)} - p_{jk}^{(t)})^2}{\psi(x_k)^{(0)}}},$$

$$\psi(x_k)^{(0)} = \frac{m_i}{\sum_j m_j},$$

$$m_i = \sum_j p_{ij}, \quad (16)$$

式中, $p_{ij}^{(1)} = \frac{w_{ij}}{\sum_k w_{ik}}$ 为 Markov 状态转移矩阵 $\mathbf{P}^{(1)}$ 的元素, $w_{ij} = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2}\right)$ 为关系矩阵 \mathbf{W} 的元素, $\psi(x_k)^{(0)}$ 表示 Markov 扩散过程的稳态分布.

在保持扩散距离的条件下, 提取低维流形 \mathbf{Y} . 根据 Markov 随机路的谱图理论可知, \mathbf{Y} 由下式的 d 个非平凡主特征向量构成:

$$\mathbf{P}^{(t)}\mathbf{v} = \lambda\mathbf{v}, \quad (17)$$

最大特征值 $\lambda_1 = 1$ 是平凡的, 舍弃其对应的特征向量 \mathbf{v}_1 , 得到低维流形

$$\mathbf{Y} = \{\lambda_2\mathbf{v}_2, \lambda_3\mathbf{v}_3, \dots, \lambda_{d+1}\mathbf{v}_{d+1}\}. \quad (18)$$

对训练样本和测试样本分别进行降维处理, 以降维后训练样本进行训练, 建立 DM-SVM 多分类机模型; 利用降维后的测试样本, 对建立的 DM-SVM 多分类模型进行验证. 将测试样本代入 DM-SVM 多分类模型进行声发射区域识别, 结果如表 2 和图 10 所示.

表 2 声发射区域识别结果
Table 2. Recognizing results of AE region.

样本大小 降维前	样本大小 降维后	识别结果		
		误判数	正确率/%	耗时/s
360 × 8	360 × 3	9	97.5	0.781

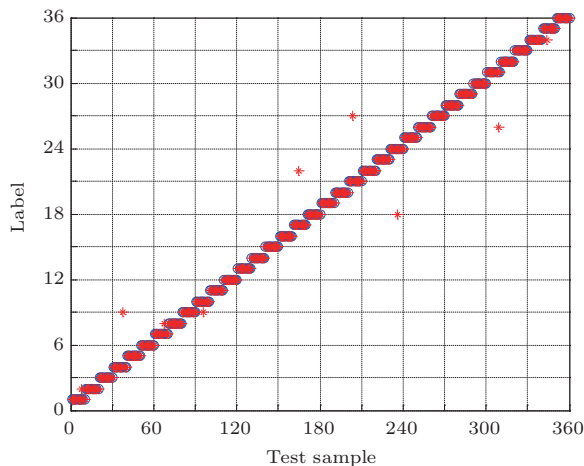


图 10 声发射区域识别结果图

Fig. 10. Identification results of AE region.

从表 2 和图 10 可以看出: 对待测试的 36 个声发射区域各 10 次模拟实验 (共计 360 次) 中, 基于

DM-SVM 多分类机声发射区域识别算法的定位正确率为 97.5%, 耗时 0.781 s. 分析区域定位错误的 9 次实验, 发现基于 DM-SVM 多分类机的声发射区域识别算法将其定位于实际声发射区域的相邻区域内 (如第 8 次实验将实际声发射区域 1 错误地定位于声发射区域 2), 属于工程应用可接受的范围. 因此, 实验表明基于 DM-SVM 多分类机的声发射区域定位系统具有可行性, 区域识别精度为 30 mm × 30 mm.

4 结 论

在分析冲击激励声发射应力波的传播机理和 FBG 响应机理基础上, 使用钢球冲击铝合金板模拟声发射源, 利用 ABAQUS 软件构建了钢球冲击铝合金板的几何模型, 仿真分析了冲击应力波的传播过程. 理论分析了冲击应力波与 FBG 传感器的作用机理, 基于边缘滤波原理构建了声发射传感系统, 采集冲击激励声发射应力波, 建立了声发射区域定位模型, 提出了基于扩散映射与支持向量机的区域定位方法, 克服了现有方法需要使用大量样本进行训练或定位所需信号特征向量的维数较大的问题. 对 36 个测试区域声发射区域进行了定位实验验证, 仅用时 0.781 s, 区域识别精度为 30 mm × 30 mm. 新方法可进一步推进光纤光栅声发射传感在结构健康监测上的工程应用.

参考文献

- [1] Zhang J R, Ma H Y, Yan W J, Li Z J 2016 *Appl. Acoust.* **105** 67
- [2] Loutas T H, Panopoulou A, Roulias D, Kostopoulos V 2012 *Expert Syst. Appl.* **39** 8412
- [3] Wiggins S M, Leifer I, Linke P, Hildebrand J A 2015 *Marine and Petroleum Geology* **68** 776
- [4] Fu T 2014 *Ph. D. Dissertation* (Haerbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [付涛 2014 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [5] Yu F M, Okabe Y, Wu Q, Shigeta N 2016 *Composites Sci. Technol.* **135** 116
- [6] Gao X, Zhang X P, Li N, Xin P 2014 *Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology China* September 24–36, 2014 p1203
- [7] Munoz V, Vales B, Perrin M, Pastor M, Welmane H, Cantarel A, Karama M 2016 *Composites Part B* **85** 68
- [8] Shrestha P, Kim J, Park Y, Kim C 2015 *Composite Struct.* **125** 159

- [9] Hafizi Z, Epaarachchi J, Lau K 2015 *Measurement* **61** 51
- [10] Jiang M S, Sui Q M, Jia L, Peng P, Cao Y Q 2012 *Optoelectron. Lett.* **8** 220
- [11] Cheng X M, Zhang X D, Zhao L, Deng A D, Bao Y Q, Liu Y, Jiang Y L 2014 *Comptes Rendus Mecanique* **342** 229
- [12] Jiang Y, Xu F Y, Xu B S 2015 *Mechanical Systems and Signal Processing* **64** 452
- [13] Sadegh H, Mehdi A, Mehdi A 2016 *Tribology International* **95** 426
- [14] Li Z B, Ma H L, Cao Z S, Sun M G, Huang Y B, Zhu W Y, Liu Q 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 053301 (in Chinese) [李志彬, 马宏亮, 曹振松, 孙明国, 黄印博, 朱文越, 刘强 2016 物理学报 **65** 053301]
- [15] Jin Z W 2014 *M. S. Dissertation* (Shandong: Shandong University) (in Chinese) [金中薇 2014 硕士学位论文 (山东: 山东大学)]
- [16] Cao Y, Pei Y W, Tong Z R 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 024206 (in Chinese) (in Chinese) [曹晔, 裴庸惟, 童峥嵘 2014 物理学报 **63** 024206]
- [17] Gu B, Sun X, Sheng V S 2016 *IEEE Trans. Neural Networks & Learning Systems* **1** 1
- [18] Scholkopf B, Smola A, Williamson R, Bartlett 2000 *Neural Comput.* **15** 1207
- [19] Lafon S, Lee A B 2006 *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intellig.* **28** 1393
- [20] Nadler B, Lafon S, Coifman R R, Kevrekidis I G 2006 *Appl. Computat. Harmonic Anal.* **21** 113
- [21] Jia B, Yu B T, Wu Q, Yang X S, Wei C F, Law R, Fu S 2016 *Neurocomputing* **189** 106

SPECIAL TOPIC — Optical Fiber Sensor

Acoustic emission localization technique based on fiber Bragg grating sensing network and signal feature reconstruction*

Zhang Fa-Ye Jiang Ming-Shun Sui Qing-Mei[†] Lü Shan-Shan Jia Lei

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

(Received 9 October 2016; revised manuscript received 27 March 2017)

Abstract

Based on the analysis of the propagation mechanism of acoustic emission stress waves caused by impact excitation on aluminum alloy plates, The geometrical model of steel ball impacted aluminum alloy plate was built by ABAQUS software, and the stress wave propagation process is simulated and analyzed. The stress wave propagation process is simulated and analyzed and an acoustic emission sensing system based on the principle of edge filtering is constructed. The acoustic emission stress waves were collected to establish the acoustic emission region localization model. The localization method of acoustic emission region based on diffusion mapping and support vector machine is proposed and verified experimentally. Multiple acoustic emission localization experiments were performed on an aluminum alloy plate of 300 mm × 300 mm × 2 mm, which was divided into 36 test area. The results show that the localization accuracy is 30 mm × 30 mm and the positioning accuracy was 97.5%, while consuming 0.781 s. The study provides an effective method for acoustic emission localization.

Keywords: fiber Bragg grating, acoustic emission sensing, impact location, support vector machine

PACS: 42.79.-e, 42.82.Bq, 43.40.+s, 43.60.+d

DOI: [10.7498/aps.66.074210](https://doi.org/10.7498/aps.66.074210)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41472260), the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (Grant No. ZR2014FM025), the Fundamental Research Funds of Shandong University, China (Grant No. 2016JC012), and the Young Scholars Program of Shandong University, China (Grant No. 2016WLJH30).

[†] Corresponding author. E-mail: jiangmingshun@sdu.edu.cn