

基于近似熵谱的碳纤维复合材料层压板 拉伸损伤声发射分析

袁 忠 黄频波 耿文霞

(成都航空职业技术学院,成都 610100)

文 摘 采用近似熵理论分析了碳纤维环氧树脂层压板在拉伸过程中产生的三种典型声发射信号。研究表明基体开裂、脱胶以及纤维断裂这三种信号的近似熵谱特征不同,结合经验模式分解方法解释了三种损伤破坏机制。此外,在经验模式分解的基础上考察了三种声发射信号本征模函数的频谱分布,进一步说明了近似熵在本质上是衡量信号发生新振动模式产生的概率以及在复合材料声发射检测与损伤识别中使用近似熵谱分析的有效性。

关键词 声发射,近似熵,碳纤维复合材料,无序

中图分类号:V258;TB52+3

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.04.015

Acoustic Emission Analysis for Carbon Fiber Composite Materials in Tensile Damage Based on Approximate Entropy Spectrum

YUAN Zhong HUANG Pinbo GENG Wenxia

(Chengdu Aeronautic Polytechnic, Chengdu 610100)

Abstract Three typical acoustic emission signals for carbon fiber epoxy laminate in tensile damage are investigated by approximate entropy theory. The computed results show matrix cracking, debonding and fiber breaking own some different characteristics of approximate entropy spectrum which is construed by empirical mode decomposition (EMD) method. In addition, spectral distribution of intrinsic mode functions for the three kinds of acoustic emission signals is analyzed which further illustrate approximate entropy in essence is measuring the probability of new vibration mode in signal, and demonstrate the effectiveness of using approximate entropy spectrum analysis in acoustic emission detection for composite material.

Key words Acoustic emission, ApEn, CFRP, Disorder

0 引言

先进的碳纤维增强复合材料(CFRP)越来越广泛应用于航空、航天、汽车制造、核能等重要领域,充当结构材料、功能材料抑或结构与功能集成材料。其无损检测与表征已成为设计—制造—在役—维修等工程环节备受关注的技术问题,特别是在在役环节,由于CFRP工作面受到复杂的外载荷以及工况环境,导致其失效难以预测。声发射技术(AE)^[1]是依靠收集材料中局部源能量瞬态产生弹性波的一种无损检测技术,其中局部源一般是裂纹萌生、扩展以及材料弹性变形等。因此声发射技术可以实时监控和追踪在

外加载荷下构件的缺陷并提前或者临近预报构件的破坏。由于缺陷扩展一般产生瞬态非线性的声发射信号,同时复合材料是多界面双组份各向异性的材料,故复合材料的声发射信号处理分析特别是缺陷类型识别显得相当复杂并受到国内外学者广泛地关注和研究。1999年,金周庚等运用线定位、幅度、振铃计数等声发射参数研究了B/AI复合材料试样的变形和断裂过程^[2];2004年,刘怀喜等基于多参数分析并利用神经网络对碳/环氧复合材料声发射信号进行分类^[3];2008年A. Marec利用小波方法对树脂基复合材料损伤声发射信号进行分类^[4];2011年,李海斌

收稿日期:2014-03-17

基金项目:四川省教育厅资助科研项目(13ZB0053)

作者简介:袁忠,1969年出生,副教授,主要从事检测及机电一体化研究与教学。E-mail:541896919@163.com

等结合随机渐进失效分析方法和声发射监测对复合材料单向拉伸试件进行损伤分析^[5]。值得注意的是大多文献分析方法都是基于多参数分析^[6-8],则使得需要收集各种声发射参数构建大量试验样本,同时某些声发射参数存在人为经验与特定材料对其影响,缺乏还原真实的振动机制。因此本文从信号振动本质上出发,采用滑动移除近似熵(MC-ApEn)^[9-12]分析各类声发射信号的无序情况并结合经验模式分解方法表征碳纤维/环氧树脂复合材料的拉伸断裂过程中损伤机制。

1 理论

近似熵是由 S. Pincus 提出,用一个非负值来度量时序信号的复杂程度,近似熵值越高则其复杂程度越高,反之,其复杂水平程度就越低。本质上,计算近似熵的目的就是确定时序的自相似程度,当维数变化时,近似熵可以衡量时序信号发生新振动模式产生的概率大小。由于声发射信号包含许多非线性非平稳随机信号分量,因此我们可以用近似熵描述其特征,进而监视和诊断材料结构损伤情况。

近似熵采用边缘概率分布来区分不同过程而不是重构吸引子或者追求某种收敛。在实际应用中,近似熵有四大优点:

- (1) 所需的原始时序数据少;
- (2) 抗野、抗噪能力强;
- (3) 适合非平稳信号;
- (4) 真实反映振动信号的运行状态。

以下为近似熵的具体算法:

(1) 考虑原始数据序列为 $x(1), x(2), \dots, x(N)$, 将其按顺序转化成 m 维矢量集, 其中

$$\mathbf{X}(i) = [x(i), x(i+1), \dots, x(i+m-1)] \quad (1)$$

$i = 1 \sim N - m + 1$

(2) 定义距离 $d[\mathbf{X}(i), \mathbf{X}(j)]$ 是向量 $\mathbf{X}(i)$ 和 $\mathbf{X}(j)$ 中各自标量元素对应的最大绝对差。

$$d[\mathbf{X}(i), \mathbf{X}(j)] = \max_{k=0 \sim m-1} |x(i+k) - x(j+k)| \quad (2)$$

其中, 需要计算 $\mathbf{X}(i)$ 与其余向量的所有距离 $\mathbf{X}(j)$ ($j = 1 \sim N - m + 1, j \neq i$)。

(3) 给定相似容限 r , 统计每个向量 $\mathbf{X}(j)$ 的 $d[\mathbf{X}(i), \mathbf{X}(j)]$ 小于 r 的数目, 并将它定义为 $N_r^m(i)$, 对于 $i = 1 \sim N - m + 1$, 则有

$$C_r^m(i) = \frac{N_r^m(i)}{N - m + 1} \quad (3)$$

(4) 计算每一个 $C_r^m(i)$ 的自然对数, 并对所有的 i 求其平均值, 记作 $\varphi^m(r)$

$$\varphi^m(r) = \frac{1}{N - m + 1} \sum_{i=1}^{N-m+1} \ln C_r^m(i) \quad (4)$$

(5) 将维数增加到 $m + 1$, 重复前 4 个步骤, 得到 $C_r^{m+1}(i), \varphi^{m+1}(r)$ 。

(6) 理论上, 近似熵定义如下:

$$ApEn(m, r) = \lim_{N \rightarrow \infty} [\varphi^m(r) - \varphi^{m+1}(r)] \quad (5)$$

在实际中, 时序数据点 N 是有限的, 因此用以下统计公式代替

$$ApEn(m, r, N) = \varphi^m(r) - \varphi^{m+1}(r) \quad (6)$$

从上述步骤可以看出, m 和 r 会影响 $ApEn$ 数值的确定。文献[8]给出 m 和 r 的范围是 $m = 1, 2$ 和 $r = 0.1 \sim 0.2SD$ (SD 是时序的标准差) 可以获得合理统计特性。近似熵能够发现时序微妙的变化如信号均值和方差波动, 具有增强和提前预测的能力。但近似熵的缺点在于只能表征整个数据(长度为 N) 的无序程度, 这使得近似熵无法在 N 个数据点内发现奇异的结构突变点。为了克服这种情况, 在近似熵的基础上, 本文选择滑动移除近似熵来分析熵值随时间变化或者临界问题。具体改进算法如下:

(1) 选择移除数据窗口长度 L ;

(2) 从第 i ($i = 1 \sim N - L + 1$) 个数据开始连续按顺序移除长度为 L 个数据, 然后将剩余的数据点合并成一个新的数据序列;

(3) 计算这个新序列的 $ApEn$ 值;

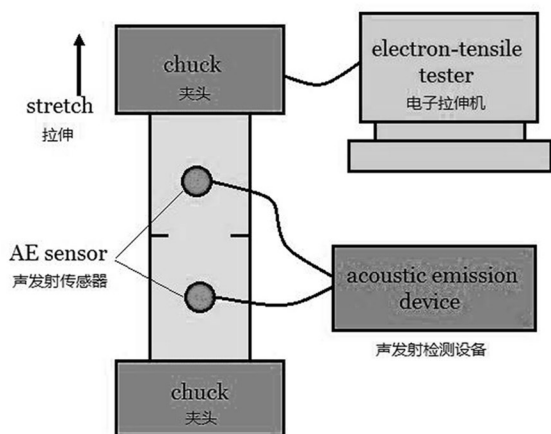
(4) 保持窗口长度不变, 逐步移动窗口, 重复(2)

(3) 步骤, 直到整个序列完成。

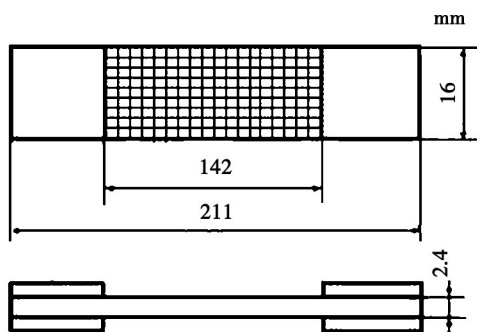
通过(1)~(4)步骤操作, 可以得到一个动态的近似熵序列, 根据数据的动力学性质不同, 它就能够发现出突变点或突变区间。

2 实验分析

如图 1 所示, 用微机控制电子试验机以 2 mm/min 的速率对试样进行加载拉伸, 同时用声发射系统采集拉伸过程中产生的声发射信号。试样是参考 GB/T1447—2005 纤维增强塑料拉伸性能试验方法中 II 型试样型式制作, 尺寸为 $211 \text{ mm} \times 16 \text{ mm} \times 2.4 \text{ mm}$, 并由 0° 和 45° 牌号为航空用 G803/5224 的平纹编织碳布/环氧树脂预浸料交叉对称铺层, 总层数为 16 层, 在试样中间的两侧分别开有 1 mm 的小槽, 以使试样从中间断裂便于分析对比。同时在试样的两端上下两侧分别粘贴 7 层玻璃纤维/环氧树脂复合材料加强垫片以防止夹头在拉伸过程中夹断试样。试验采用济南电子试验机厂生产的 WDW-50 微机控制电子试验机, 声发射信号采集系统为美国物理声学公司生产的 PCI-2 声发射检测设备, 接收传感器是相匹配的 R15 α 传感器, 采样率为 2 MHz , 采样长度为 1 k , 前置放大增益设置为 20 dB , 模拟滤波范围为 $2 \text{ kHz} \sim 3 \text{ MHz}$ 。为消除环境噪声设置门槛值为 45 dB , 用凡士林做耦合剂以及传感器间距为 100 mm 。



(a) 声发射检测系统

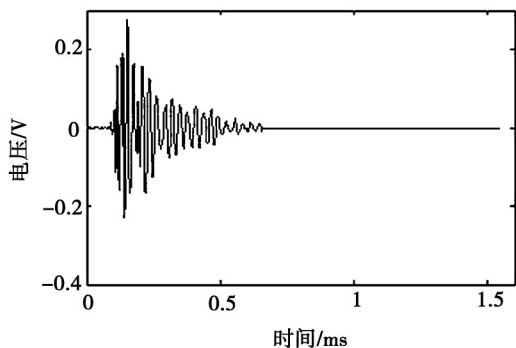


(b) 试样的形状和尺寸

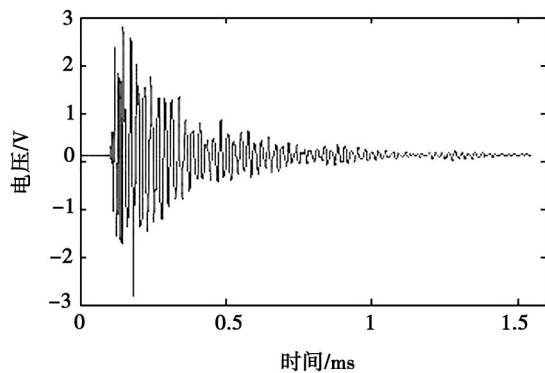
图1 声发射检测系统及试样的形状和尺寸

Fig. 1 Acoustic emission testing system, shape and size of the specimen

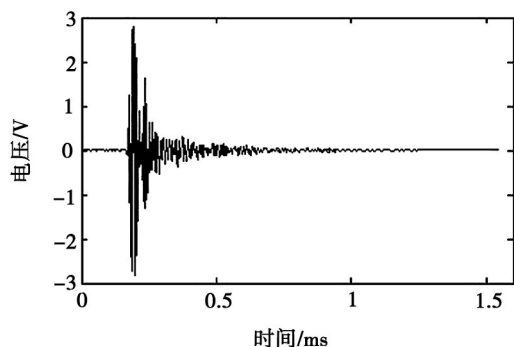
如图2所示,通过前期神经网络分类,可以收集在层压板纵向拉伸失效过程中产生三种典型的声发射信号:环氧树脂基体开裂信号;纤维/基体界面脱胶信号;纤维断裂信号。从幅值上看,基体开裂释放的应力波能量最小,而脱胶和纤维断裂造成的能量泄漏大致相当。只是脱胶信号能在较长时间段上持续高水平能量的释放。若滑动移除窗口 $L=2$, 维数 $m=2$, 阈值 $r=0.20SD$, 则可以获得上述三种信号随时间变化的近似熵谱。



(a) 基体开裂



(b) 纤维/基体界面脱胶



(c) 纤维断裂

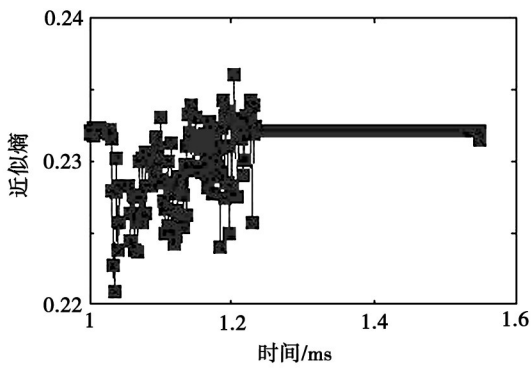
图2 三种典型的声发射信号

Fig. 2 Typical acoustic emission(AE) signals

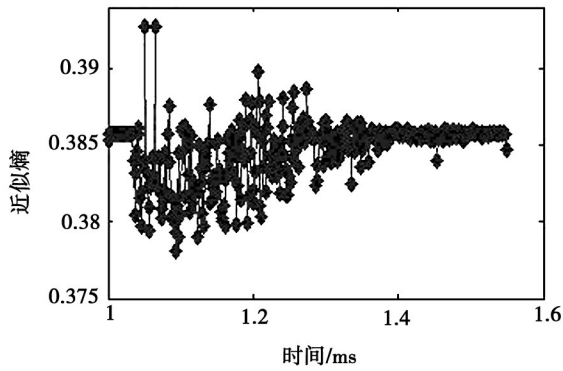
从图3中可以看到三种信号的近似熵水平程度是不相同的且熵谱特征分布各异。对于脱胶 AE 信号,它拥有最高近似熵水平并在较长时间内上下起伏震荡,也就表示在脱胶这种破坏形式中包含很多复杂的振动模式导致信号无序程度偏高,这可能跟脱胶本质上是一种界面失效效应有关,诸如范德华力和化学键发生破坏并在此过程中存在基体连续开裂,纤维错动和抽出行为。

对于基体开裂行为[图3(a)],其近似熵水平处于中等,分布分散且震荡大致均匀。这是由于连续相基体介质均匀,若其开裂,则过程可以看似一系列相干声源此起彼伏发出模式相近的声发射信号分量从而导致熵值水平趋于平均。图3(c)表明纤维断裂产生的 AE 信号近似熵水平最低,也就是说其振动模式最少。其原因可以归咎于纤维断裂是一种强势的瞬间破坏行为,因此只需要有序的短暂的主导振动模式存在即可。

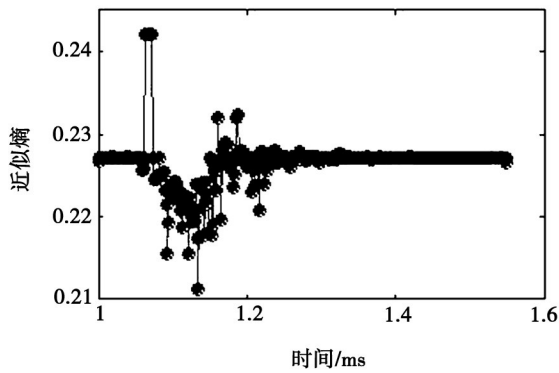
图4可以进一步说明三种 AE 信号振动模式的差异。图4是对三类声发射信号进行经验模式分解(EMD)得到一系列相应的模态函数和残余量。从图中,可以证实纤维断裂信号具有一个主导的本征模函数,而基体开裂信号和脱胶信号则有较多幅值相当的本征模函数。



(a) 基体开裂



(b) 纤维/基体界面脱胶

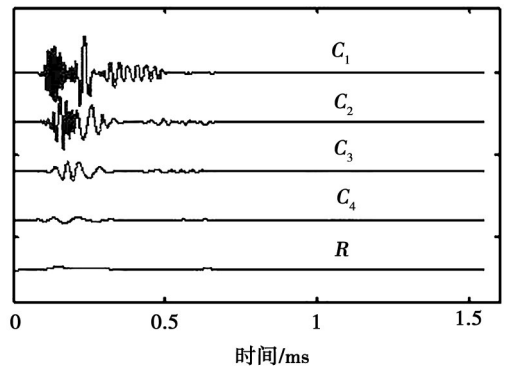


(c) 纤维断裂

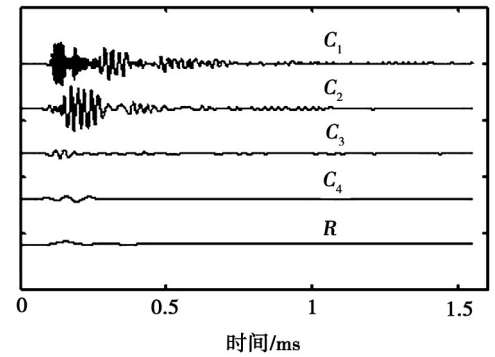
图3 声发射信号的近似熵谱分布

Fig. 3 Approximate entropy spectrums of acoustic emission(AE) signals

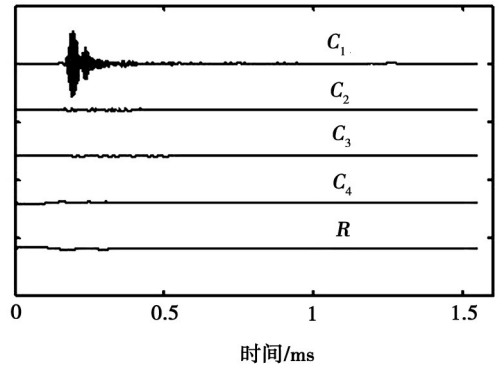
图5是将经验分解得到的一系列本征模函数和残余量重新按式(1)~(6)计算它们的近似熵值。结果表明不同损伤信号的振动模式有不一样的熵值变化。基体开裂的 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 本征模函数熵值相差不多,也证实在基体开裂中,包含的振动模式相似度高。而脱胶信号的 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 本征模函数也表明相似度高,但其函数的无序程度相较于基体开裂是更高的。对于纤维断裂,可以看到主导振动模式 C_1 的近似熵是最低的,即是一个确定性的强势振动行为。同时纤维断裂信号的 C_3 和 C_4 本征模函数的近似熵陡然增大,则表明纤维断裂行为存在较多低频振动模式的扰动。



(a) 基体开裂



(b) 纤维/基体界面脱胶



(c) 纤维断裂

图4 声发射信号的本征模函数

Fig. 4 Intrinsic mode functions(IMF) of AE signals

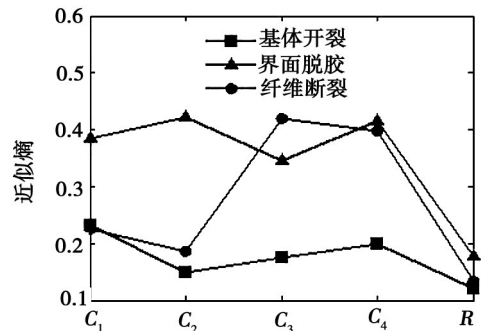


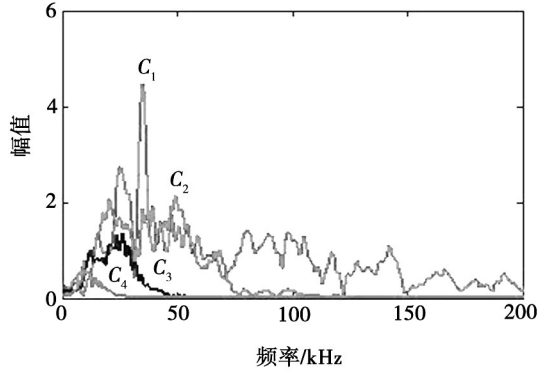
图5 本征模函数的近似熵值

Fig. 5 Approximate entropy values of the intrinsic mode function

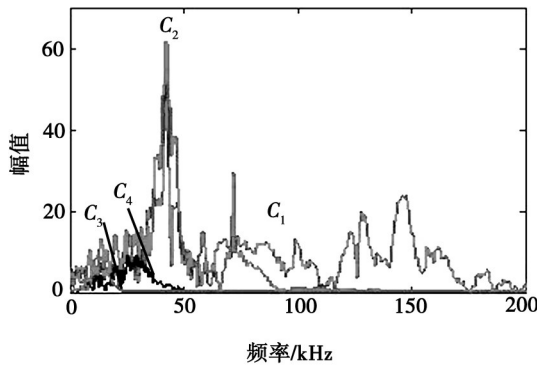
图6是从频谱的角度考察三种损伤信号的(C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4)本征模函数。从幅度上看,开裂声发射信号本征模函数的频谱幅值都比较低,并随着本征阶数

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2014年 第4期

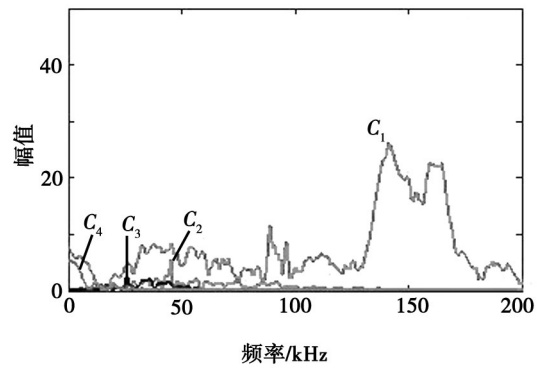
的增加逐渐降低。脱胶信号本征模函数的频谱幅值是最高的,表明释放的能量最高,也反过来讲基体与纤维的界面是复合材料层压板拉伸失效过程中最关键的受力载体。



(a) 基体开裂



(b) 脱胶



(c) 纤维断裂

图6 本征模函数的频谱

Fig. 6 Frequency spectrum of the intrinsic mode function

从图中还可以看到脱胶信号 C_1 和 C_2 本征模函数频谱幅值相当甚至 C_2 的最高幅值高于 C_1 最高幅值幅值,这可能是由于脱胶失效行为需要较多的主导振动模式。对于纤维断裂, C_1 为其主导振动模式,其幅值较大,而其他本征振动模式 (C_2 、 C_3 、 C_4) 的幅值相较而言微乎其微。这也进一步暗合了纤维断裂的有序、确定性行为模式。从频率分布上考虑,可以观察到基体开裂主要频率在低频段 (20 ~ 60 kHz), 而界面脱胶的主频峰相比于基体开裂发生些许后移,同时在 75、150 kHz 左右处的次频峰幅值出现放大增

长。对于纤维断裂,其主导振动模式的频率主要发生在高频段 (150 kHz 左右), 而其余振动模式的频率位于低频 50 kHz 附近,由于主导振动模式 C_1 与其他振动模式在幅值和主频分布上存在很大差异,因此可以考虑其余振动模式的寄生性。总的来讲,从基体开裂到脱胶再到纤维断裂,其声发射振动频率存在后移增大的趋势。

3 结论

(1) 研究表明近似熵可以表征分析碳纤维环氧树脂层压板在拉伸过程中产生的基体开裂、界面脱胶和纤维断裂声发射信号。

(2) 通过经验模式分解和傅里叶频谱分析,三种典型声发射信号具有熵谱特征的内在差异是由信号的本征振动模式不同造成的,其结果也揭示近似熵本质是衡量信号发生新振动模式产生的概率,为复合材料声发射检测与损伤识别分类提供新途径和理论支撑。

参考文献

- [1] Dunegan H L, Harris D O, Tatro C A. Fracture analysis by use of acoustic emission [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1968 (1): 102-122
- [2] 金周庚, 刘哲军, 王健, 等. B/AI 复合材料变形和断裂过程声发射特性[J]. 稀有金属, 1999, 23(3): 161-165
- [3] 刘怀喜, 等. 神经网络在碳/环氧复合材料声发射检测中的应用[J]. 无损检测, 2004, 26(12): 628-632
- [4] Marec A, Thomas J, Guerjouma R. Damage characterization of polymer-based composite materials: multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 22(6): 1441-1464
- [5] 李海斌, 阳建红, 刘承武, 等. 复合材料随机渐进失效分析与声发射监测[J]. 复合材料学报, 2011, 28(1): 223-229
- [6] Kang Yumei, Zhu Wancheng, Chen Gengye, et al. Cross correlation analysis and time delay estimation of acoustic emission signals of rock based on wavelet transform [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 2079-2084
- [7] Wang X H, Zhu C M, Mao H L. Wavelet packet analysis for the propagation of acoustic emission signals across turbine runners [J]. NDT&E International, 2009, 42: 42-46
- [8] 陈昊, 童小燕, 姚磊红, 等. 复合材料层合板低速冲击的声发射研究[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(11): 1558-1560
- [9] 杨璧玲, 张同华, 张慧萍, 等. 基于声发射信号模式识别的 UHMWPE/LDPE 复合材料损伤机制分析[J]. 复合材料学报, 2008, 25(2): 35-41
- [10] 王启光, 张增平. 近似熵检测气候突变的研究[J]. 物理学报, 2008, 57(03): 1976-08
- [11] 金红梅, 何文平, 候威, 等. 不同趋势对滑动移除近似熵的影响[J]. 物理学报, 2012, 61(6): 069201-9
- [12] 金红梅, 何文平, 张文, 等. 噪声对滑动移除近似熵的影响[J]. 物理学报, 2012, 61(12): 129202-9

(编辑 任涛)