北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

基于经验模态分解和小波包能量熵的杉木加载过程中细观损伤监测与识别

赵东 马荣宇 于立川 赵健 刘嘉辉

Monitoring and identification of microscopic damage during fir loading based on empirical modal decomposition and wavelet packet energy entropy

Zhao Dong, Ma Rongyu, Yu Lichuan, Zhao Jian, Liu Jiahui

引用本文:
赵东, 马荣宇, 于立川, 赵健, 刘嘉辉. 基于经验模态分解和小波包能量熵的杉木加载过程中细观损伤监测与识别[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(3):123–131. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230365
Zhao Dong, Ma Rongyu, Yu Lichuan, Zhao Jian, Liu Jiahui. Monitoring and identification of microscopic damage during fir loading based on empirical modal decomposition and wavelet packet energy entropy[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(3):123–131. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230365

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230365

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

榫卯结构弯曲破坏时声发射衰减特性与源定位

Acoustic emission attenuation and source location on the bending failure of the rectangular mortise–tenon joint for wood structures

北京林业大学学报, 2017, 39(1): 107–111. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20160150

应用AE和DIC原位监测含横纹裂纹木构件的裂纹演化规律试验研究

Experimental study on in situ monitoring of the evolution law of cracks in wood components with transverse cracks based on acoustic emission and image correlation

北京林业大学学报, 2020, 42(1): 142–148. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190276

整板结构的古筝共鸣面板振动模态的研究

Vibration mode of Guzheng resonance panel with whole board structure

北京林业大学学报, 2021, 43(8): 107–116. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210136

3种边界条件下足尺定向刨花板的模态灵敏度和振动模态研究

Modal sensitivity and vibration mode of full–size oriented strand board panel under three boundary conditions

北京林业大学学报, 2021, 43(12): 105–115. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210264

面向整枝机控制的手势识别技术研究

Gesture control technology based on surface

北京林业大学学报, 2017, 39(2): 117–124. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20160290

基于ROI–CNN的赛罕乌拉国家级自然保护区陆生野生动物自动识别

Automatic identification method for terrestrial wildlife in Saihanwula National Nature Reserve in Inner Mongolia of northern China based on ROI–CNN

北京林业大学学报, 2018, 40(8): 123–131. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180141

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230365

基于经验模态分解和小波包能量熵的杉木加载过程中细观损伤监测与识别

赵 东 马荣宇 于立川 赵 健 刘嘉辉
（北京林业大学工学院，北京 100083）

摘要:【目的】细观损伤是承载木材断裂的主要原因之一。木材的多孔层状结构使其损伤过程变得复杂，针对单一信号处理方法较难充分挖掘木材断裂声发射信号中的细观损伤信息，造成识别信息不充分、不完备的问题。本研究提出通过经验模态分解（EMD）和小波包能量熵结合的信号处理方法，通过声发射无损检测手段，识别杉木加载过程中的细观损伤类型。**【方法】**以杉木为研究对象，进行单轴压缩、双悬臂梁和顺纹拉伸 3 种单一损伤试验，并对其进行加载过程中声发射信号的采集、监测与分析。通过小波包阈值法消除损伤试验中采集的声发射信号噪声，经由 EMD 和相关系数计算，分离出最能体现杉木细观损伤特征的本征模态（IMF）分量，并对 IMF 分量进行基于傅里叶变换的峰值频率分析和小波包能量熵分析，提取杉木细观损伤的特征。**【结果】**（1）EMD 和小波包能量熵结合的信号处理方法能够判断杉木加载过程中声发射信号对应的细观损伤类型与构成。（2）杉木不同细观损伤类型的声发射信号对应不同的小波包能量熵区间：胞壁屈曲与塌溃（0.69 ~ 0.99）、层间开裂（1.57 ~ 1.78）、纤维束断裂（1.92 ~ 2.27）。（3）宏观断口观察和电镜显微分析验证了该方法的准确性。**【结论】**经验模态分解–小波包能量熵法避免了声发射信号模态堆叠的影响，并解决了木材细观损伤复杂且难以识别的问题，为杉木木材断裂的早期诊断方法提供了理论支撑。

关键词：木材细观损伤识别；声发射；小波包变换；能量熵；经验模态分解 (EMD)
中图分类号：S791.27；TV698.1+5 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2024)03−0123−09
引文格式：赵东，马荣宇，于立川，等. 基于经验模态分解和小波包能量熵的杉木加载过程中细观损伤监测与识别 [J]. 北京林业大学学报，2024，46(3)：123−131. Zhao Dong, Ma Rongyu, Yu Lichuan, et al. Monitoring and identification of microscopic damage during fir loading based on empirical modal decomposition and wavelet packet energy entropy[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(3): 123−131.

Monitoring and identification of microscopic damage during fir loading based on empirical modal decomposition and wavelet packet energy entropy

Zhao Dong Ma Rongyu Yu Lichuan Zhao Jian Liu Jiahui
(School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [**Objective**] Microscopic damage is a primary contributor to wood fracture. The intricate porous laminar structure of wood makes the damage process complex, posing challenges in fully comprehending the microscopic damage information within the acoustic emission signal of wood fracture through a single signal processing method. This limitation results in inadequate and incomplete identification information. This study introduced a signal processing approach that combined empirical modal decomposition (EMD) and wavelet packet energy entropy to discern the various types of microscopic damage occurring during the loading process of fir (*Cunninghamia lanceolata*) using acoustic emission nondestructive testing. [**Method**] Three individual damage tests, namely uniaxial compression, double cantilever beam, and parallel tensile were conducted on fir as the study object. Acoustic emission signals were acquired,

收稿日期: 2023−12−20 **修回日期:** 2024−01−26
基金项目: 北京市自然科学基金项目（2182045）。
第一作者: 赵东，教授，博士生导师。主要研究方向：工程力学与仿真、木材无损检测。Email：zhaodong68@bjfu.edu.cn 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学工学院。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

monitored, and analyzed throughout the loading processes. The wavelet packet thresholding method was employed to eliminate noise from the acoustic emission signals recorded during the damage tests. Furthermore, the EMD method, coupled with correlation coefficient calculations, was utilized to isolate the intrinsic mode function (IMF) components, which can fully reflect the characteristics of microscopic damage in fir. Subsequently, Fourier-transform-based peak frequency analysis and wavelet-packet energy entropy analysis were executed on the IMF components to extract the features associated with the microscopic damage in fir. [**Result**] (1) The combination of EMD and wavelet packet energy entropy effectively determined the type and composition of signals corresponding to microscopic damage. (2) Acoustic emission signals of different microscopic damage types corresponded to distinct wavelet energy entropy intervals: buckling and collapse of cell wall (0.69−0.99), delamination (1.57−1.78), and fiber bundle breakage (1.92−2.27). (3) The accuracy of the method was verified by macroscopic fracture and scanning electron microscopy experiments. [**Conclusion**] The combination of EMD and wavelet packet energy entropy can avoid the influence of modal stacking in acoustic emission signals, and resolve the hard problem of recognizing complex microscopic damages in wood. This approach offers theoretical basis for the early diagnosis of fir wood fractures.

Key words: wood microscopic damage identification; acoustic emission; wavelet packet transform; energy entropy; empirical modal decomposition (EMD)

木材作为一种天然、各向异性的材料，其多孔层状结构使其损伤过程变得复杂，从细观结构变化来看可分为多种损伤类型，包括层间损伤和开裂、细胞壁屈曲与塌溃、微裂隙损伤区的形成与扩展、纤维束拔出与断裂等基本形式[1]。已有研究证明采用声发射技术得到的振铃计数、能量[2]等声发射信号特征参数可以对木材受载过程的损伤类型[3]、损伤位置[4]以及损伤过程中裂纹扩展方式[5]进行识别，但是由于试验条件和试件树种不同，导致声发射（acoustic emission，AE）特征参数发生变化，基于 AE 特征参数的木材损伤判定规律适用范围受限。近年来，有学者在声发射波形处理方面进行研究，尝试寻找更加敏感和准确的信号特征[6]，但多数研究仍停留在实验验证阶段，且单一的分析方法往往不能全面反映声发射信号的特征，难以实现对木材断裂的快速、准确、有效的识别。Tu 等[7]采用经验模态分解与其本征模态（intrinsic mode function，IMF）分量的峰值频率进行木材损伤模式识别研究，对木材的细观损伤进行定量识别与判定，但由于经验模态分解（empirical modal decomposition，EMD）会出现模态混叠，导致木材损伤声发射信号通过经验模态分解后的 IMF 分量的频域图存在多峰现象，只通过单一的 EMD 结合波形频域特征难以准确地表征木材细观损伤类型。目前，有学者在岩石[8]、混凝土[9]、金属[10]及其他类型信号[11]的研究中，使用信号处理与波形能量参数相结合的方法，例如改进变模分解–小波包变换、EMD–包络谱特征提取、能量熵与神经网络结合等，进行损伤识别的研究，可以较准确地提取出损伤过程中的信息。

针对以上问题，为了有效、准确地识别木材细观损伤类型，从多角度分析损伤信号特征，本文通过小波包阈值法对试验声发射信号进行处理，滤除其中的噪声，对降噪后的信号进行快速傅里叶变换（fast Fourier transform，FFT）分析得到高频的木材损伤信号。基于 EMD 对非线性、非平稳的损伤信号进行处理，得到含细观损伤信息的不同频段的 IMF 分量，对 IMF 分量的峰值频率与小波包能量熵进行对应分析，解决了 IMF 分量中的模态混叠现象，确定了不同细观损伤对应的小波包能量熵区间，从而准确地识别木材的细观损伤。

本研究基于上述方法，设计了木材在受力过程中产生单一损伤或以单一损伤为主的 3 种试验，从信号频域和小波包能量熵角度分析木材单一损伤的 AE 信号。通过与损伤试件宏观断口观察和扫描电镜（scanning electron microscopy，SEM）图对比分析，验证此方法识别木材单一损伤的准确性，为木材损伤规律的研究提供有力的理论支撑。

1 基本原理

1.1 经验模态分解法

经验模态分解是由学者 Huang 等[12]于 1998 年提出的信号处理方法，基本原理是将信号分解为不同频率的本征模态函数以及一个残余分量，适合非线性、非平稳的信号。公式表示为

$$x(t)=\sum_{i=1}^{n}C_i(t)+r_n \tag{1}$$

式中：$x(t)$为原始信号；$C_i(t)$为 IMF 分量；r_n为残余分量。

1.2　小波包能量熵

信息熵表征了随机对象的总体信息不确定度，其计算公式为

$$H(x) = -\sum_{i=1}^{n} P(x_i)\log_2 P(x_i) \quad i = 1,2,\cdots,n \qquad (2)$$

式中：$H(x)$为信息熵；$P(x_i)$为随机事件x_i产生的概率。

在声发射过程中，AE 幅值是能量的体现，熵可以反映幅值波动的程度，因此能量熵是一种有效的信号分析方法[13]。

木材发生损伤时会释放应变能，能量信息通过声发射信号的形式表征，不同损伤类型释放的能量分布也会不同。依据这一特点，以小波包能量熵为特征参数提取木材损伤声发射信号的特征信息，进而研究小波包能量熵识别木材损伤的声发射信号。

2　材料与方法

2.1　材　料

试件材料为杉木（*Cunninghamia lanceolata*），无天然缺陷，含水率为 10% ~ 12%，分别按照 GB/T 1927—2009《木材物理力学试材采集方法》和 GB/T 1927.2—2021《无疵小试样木材物理力学性质试验方法》进行试材采集、截取与物理力学试验。试件加工尺寸记为长 × 宽 × 高。3 种试件分别为单轴压缩（20 mm × 20 mm × 30 mm）、双悬臂梁（200 mm × 20 mm × 20 mm）、顺纹拉伸试件（370 mm × 20 mm × 15 mm），每组 20 个试件（图 1）。

2.2　研究方法

单轴压缩、顺纹拉伸和双悬臂梁损伤试验的加载装置为电子万能试验机（深圳瑞格尔）。对加载过程中产生的声发射细观损伤信号进行采集与监测，所用监测系统由 DS2 型声发射监测仪（北京软岛时代科技）、RS-2A 型声发射传感器（频率 50 ~ 400 kHz）和前置增益可调放大器（20、40、60 dB）组成。

单轴压缩、顺纹拉伸和双悬臂梁试验后，从试件断裂过程的关键位置取样，其中单轴压缩试样选择加载后试样未与加载头接触的侧面部位，顺纹拉伸试样选择断口部位，双悬臂梁试样选择裂纹张开口部位。根据 SEM 测试样品制备的要求进行脱水、烘干处理，经过贴片和喷金处理后制成 SEM 观察试样，利用扫描电子显微镜（S-3400N Ⅱ，日立中国有限公司）从细观角度观察杉木损伤过程的不同损伤类型。

3　结果与分析

3.1　损伤试验结果分析

通过单轴压缩试验、双悬臂梁试验和顺纹拉伸试验得到载荷–时间曲线（图 2）。经过分析发现，采集的木材损伤全过程声发射信号中，载荷最大时的声发射信号最活跃，而且主要损伤发生在载荷最大时刻到其后的 1.5 ms 时间段内。图 2 是 3 种试验中载荷最大值对应的时刻，分别为 66.73、96.40 和 197.07 s，选取此时刻到其后的 1.5 ms 时间段内的声发射信号进行小波包降噪，对降噪后信号进行分

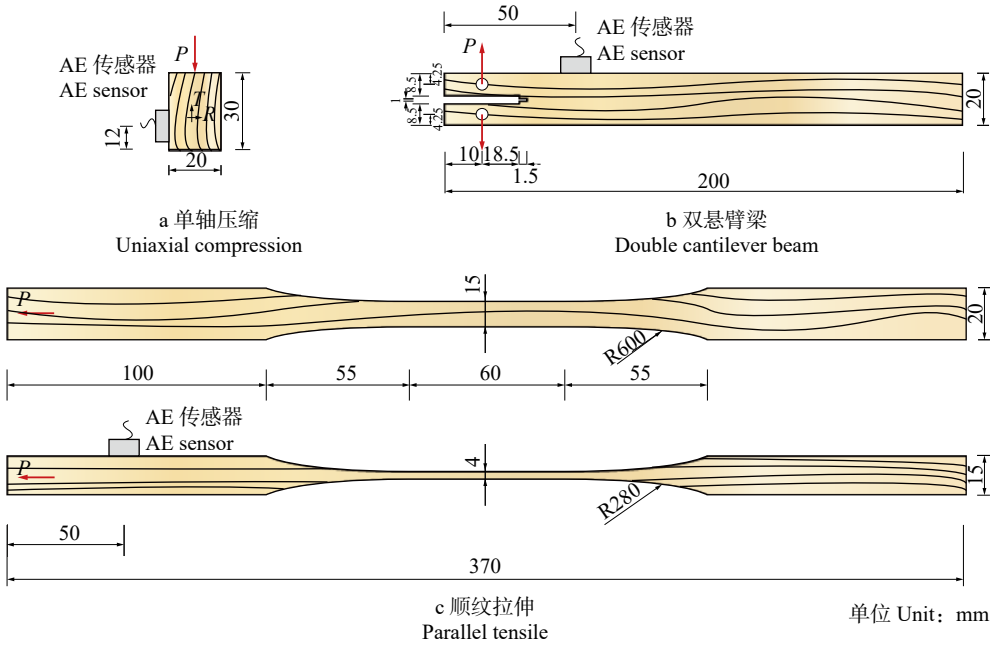


图 1　试件几何形状与尺寸图

Fig. 1　Specimen geometry and dimensions

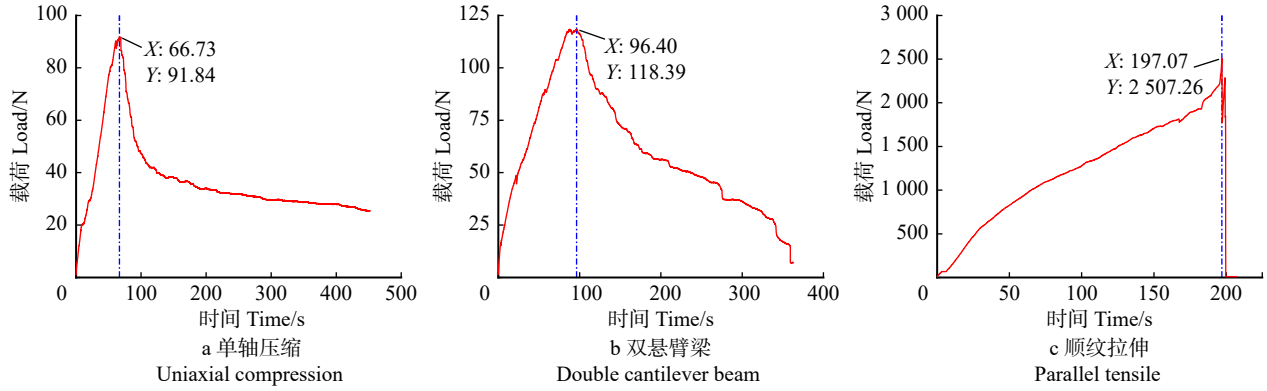


图 2 单一损伤试验的载荷–时间曲线图

Fig. 2 Load-time graphs for single damage tests

析。图 3 中左边为各试验采集的 AE 信号时域图，右边为该信号经傅里叶变换后的频域图。从图 3 可以看出原信号经 FFT 变换后的频域图出现了多峰现象，仅由此难以判定所得信号对应的细观损伤类型，需对信号进行 EMD 分解与小波包能量熵计算，对信号进一步分析。

3.2 数据与信号分析

分别对 3 种试验采集的损伤信号进行 EMD 分解，得到其 7 个 IMF 分量和残余分量，分别计算 IMF 分量和原信号之间的相关系数，结果如表 1 所示。

根据统计学定义，相关系数在 0.75 ~ 1.00 时，代表很强的相关性；介于 0.30 ~ 0.70 之间时，代表适中的相关性；在 0 ~ 0.25 之间表示相关程度比较弱。选取各信号中 IMF 相关系数最高的 IMF 分量 1、2 进行小波包能量熵的计算。从 3 种试验中分别选出 5 组试验的损伤声发射信号，对其进行 EMD 分解以及 IMF1、2 的小波包能量熵计算，其结果如表 2 所示。

已有研究表明，木材在受载断裂过程中，不同的细观损伤类型对应不同的峰值频率（表 3）。

通过单轴压缩试验计算得到的 IMF 分量与原信号之间的相关系数，以及小波包能量熵值如图 4 所示。由表 2 数据可知单轴压缩试验损伤信号的 IMF2 与原信号的相关系数在 0.73 以上，从相关性角度属于强相关，表示原信号所代表的损伤为单一

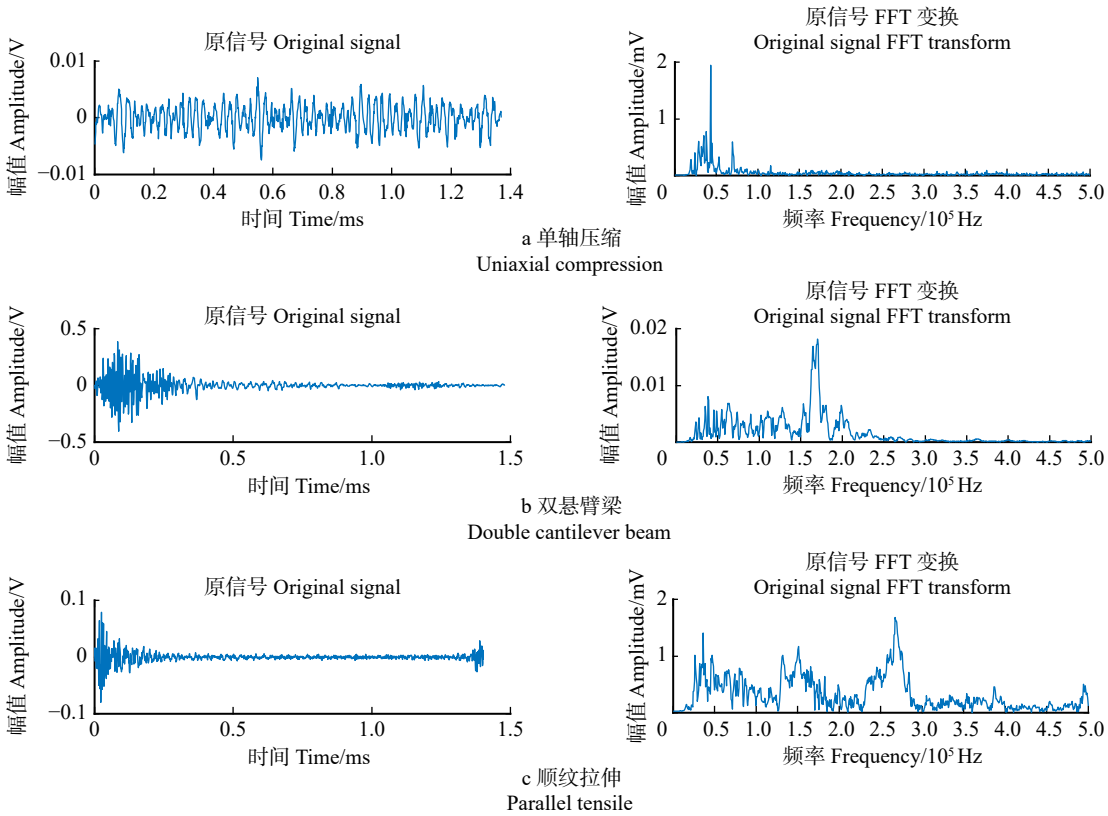


图 3 单一损伤试验中采集的 AE 信号及其 FFT 频域图

Fig. 3 AE signals and their FFT frequency-domain plots acquired in single damage tests

表 1　单一损伤试验 IMF 分量和原信号之间的相关系数

Tab. 1　Correlation coefficients between the IMF components of the single damage test and the original signal

试验类型 Test type	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	残余分量 Residual component
单轴压缩 Uniaxial compression	0.227 0	0.888 5	0.133 8	0.017 0	0.008 0	0.003 9	0.002 8	0.004 5
双悬臂梁 Double cantilever beam	0.945 9	0.375 6	0.034 8	−0.001 5	0.000 5	0.000 2	0.000 2	−0.001 1
顺纹拉伸 Parallel tensile	0.839 4	0.496 8	0.200 6	0.092 3	−0.001 8	−0.003 0	0.000 8	−0.003 2

表 2　单一损伤试验 IMF 分量和原信号之间的相关系数及其小波包能量熵

Tab. 2　Correlation coefficients between the IMF components of the single damage test and the original signal, and their wavelet packet energy entropy

AE信号 AE signal	IMF1相关系数 Correlation coefficient of IMF1	IMF1能量熵 Energy entropy of IMF1	IMF2相关系数 Correlation coefficient of IMF2	IMF2能量熵 Energy entropy of IMF2
UC1	0.363 2	1.869 2	0.923 2	0.699 8
UC2	0.227 0	2.656 9	0.888 5	0.732 4
UC3	0.567 3	1.925 8	0.861 7	0.796 2
UC4	0.338 2	2.159 2	0.853 7	0.835 7
UC5	0.480 8	2.287 3	0.733 2	0.984 3
DCB1	0.945 9	1.576 9	0.375 6	0.987 3
DCB2	0.912 1	1.770 1	0.394 8	1.059 5
DCB3	0.925 8	1.693 8	0.355 1	1.032 6
DCB4	0.929 9	1.749 8	0.329 9	1.034 2
DCB5	0.924 5	1.705 2	0.337 6	1.004 7
PT1	0.839 4	2.046 3	0.496 8	1.639 9
PT2	0.901 3	1.929 2	0.319 2	1.483 9
PT3	0.880 5	2.169 7	0.416 1	1.455 6
PT4	0.863 8	2.203 4	0.424 7	1.590 3
PT5	0.859 5	2.264 7	0.418 6	1.417 9

注: UC1 ~ UC5分别代表单轴压缩试验1 ~ 5; DCB1 ~ DCB5分别代表5组双悬臂梁试验1 ~ 5; PT1 ~ PT5分别代表5组顺纹拉伸试验1 ~ 5。Notes: UC1−UC5 represent the uniaxial compression test 1−5. DCB1−DCB5 represent the double cantilever beam test 1−5. PT1−PT5 represent the parallel tensile test 1−5.

表 3　不同的细观损伤类型对应的峰值频率

Tab. 3　Peak frequencies corresponding to different types of microscopic damage

项目 Item	胞壁屈曲与塌溃 Buckling and collapse of cell wall	微裂隙损伤 Microcrack damage	层间开裂 Delamination	纤维断裂 Fiber breakage
峰值频率 Peak frequency/kHz	20 ~ 80	90 ~ 140	150 ~ 210	250 ~ 350

注: 此表引自参考文献[14]。Note: the table is cited from reference [14].

损伤。从小波包能量熵值角度，IMF2 能量熵值在 0.69 ~ 0.99 之间，由图 4 可知 IMF2 对应的峰值频率为 47 kHz，该峰值频率处于胞壁屈曲与塌溃损伤的特征频率范围(表 3)，表明 IMF2 能够表征单轴压缩试验时试件发生的胞壁屈曲与塌溃损伤，根据分析结果判定小波包能量熵区间 0.69 ~ 0.99 对应胞壁屈曲与塌溃损伤。

通过双悬臂梁试验计算得到的 IMF 分量与原信号之间的相关系数，以及小波包能量熵值如图 5 所示。由表 2 数据可知双悬臂梁试验损伤信号的 IMF1 与原信号的相关系数在 0.91 以上，属于强相关，表示原信号所代表的损伤为单一损伤。IMF1 的小波包能量熵数值在 1.57 ~ 1.78 之间。由图 5 可知 IMF1 对应的峰值频率为 176 kHz，该峰值频率处在层间开裂损伤的特征频率范围(表 3)，表明 IMF1 能够表征双悬臂梁试验时试件发生的层间开裂损伤，故判定小波包能量熵区间 1.57 ~ 1.78 对应沿纹理剥离或张开的层间开裂损伤。

通过顺纹拉伸试验计算得到的 IMF 分量与原信号之间的相关系数，以及小波包能量熵值如图 6 所示。由表 2 数据可知，顺纹拉伸试验损伤信号的 IMF1 与原信号的相关性在 0.83 以上，与原信号有强相关

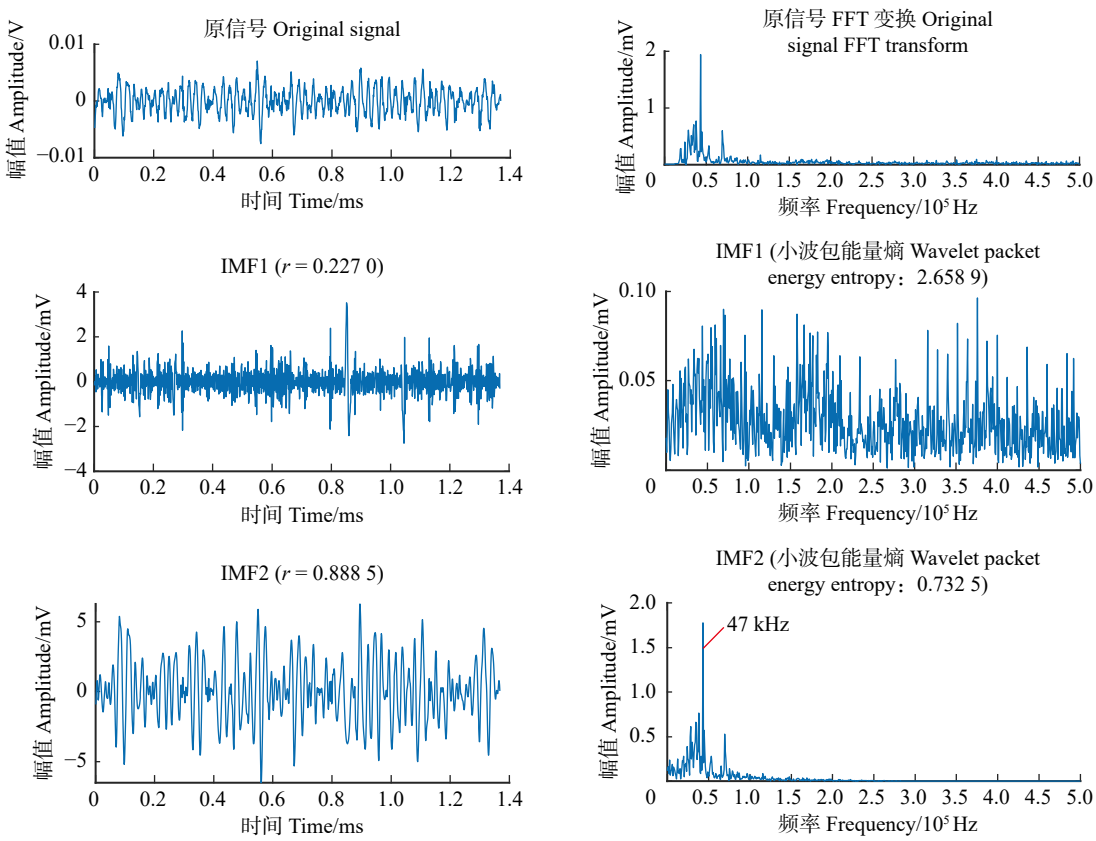


图 4 单轴压缩试验 AE 信号及 IMF 分量频域图

Fig. 4 AE signal and IMF component frequency domain of uniaxial compression test

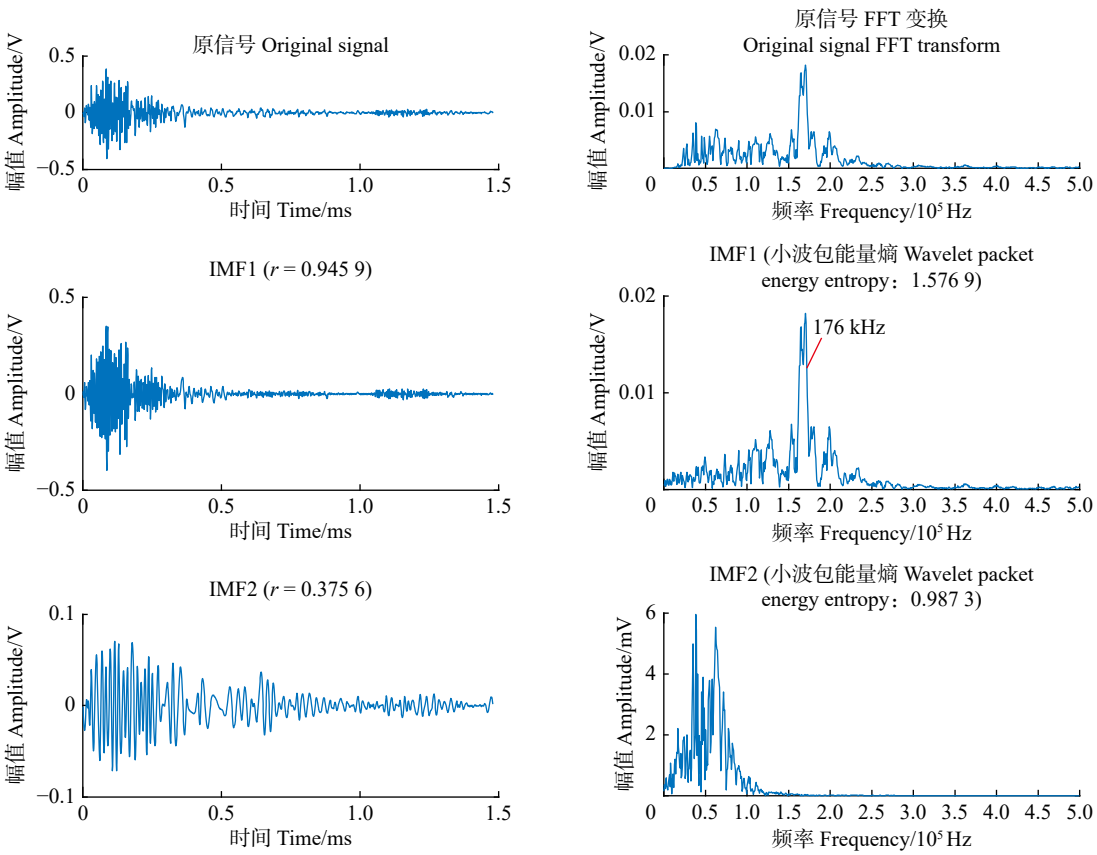


图 5 双悬臂梁试验 AE 信号及 IMF 分量频域图

Fig. 5 AE signal and IMF component frequency domain of double cantilever beam test

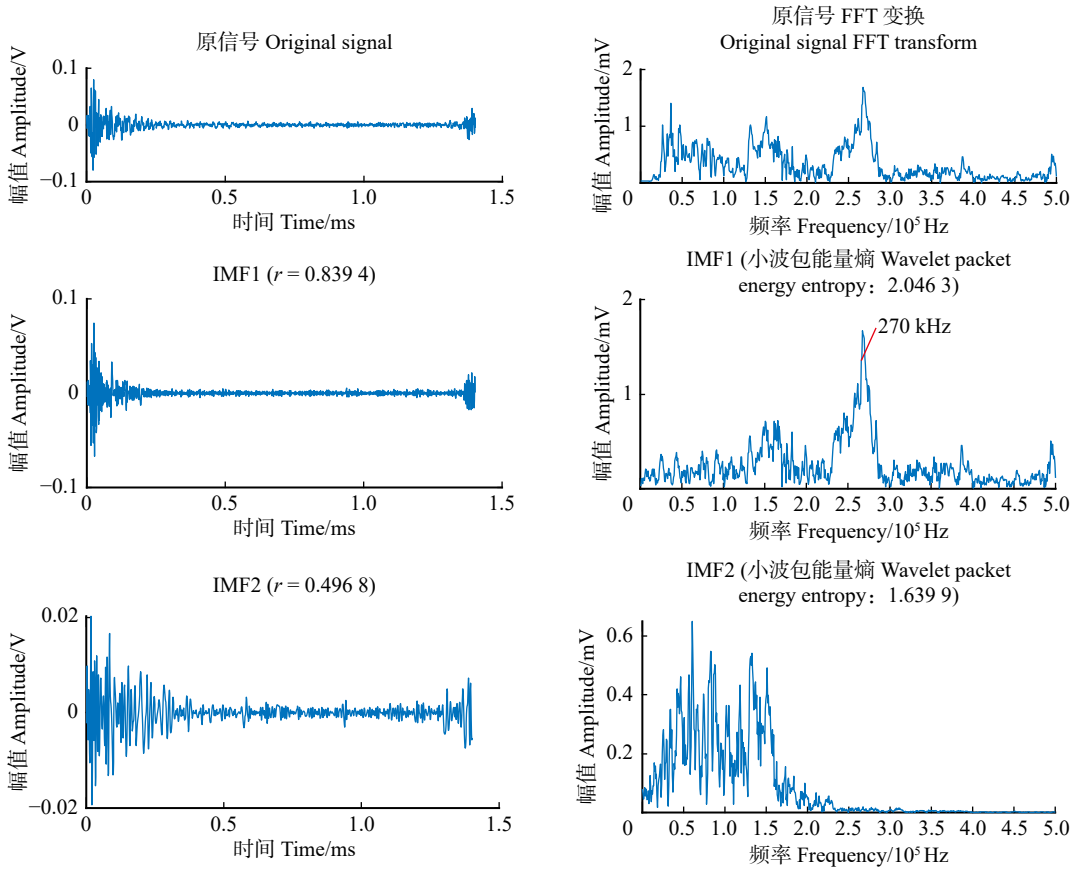


图 6　顺纹拉伸试验 AE 信号及 IMF 分量频域图

Fig. 6　Parallel tensile test AE signal and IMF component frequency domain

性。由图 6 可知 IMF1 的峰值频率为 270 kHz，该峰值频率在纤维束断裂的特征频率范围内（表 3），判断 IMF1 对应的是纤维束断裂损伤。IMF2 与原信号的相关性在 0.50 以下，与原信号有相对较弱的相关性，其小波包能量熵数值在 1.41 ~ 1.64 之间，IMF1、2 叠加可以表征原信号的主要损伤特征。试验数据表明：在顺纹拉伸损伤过程中，除纤维束断裂损伤外，试件也会发生少量层间开裂损伤。这与文献 [14] 的研究结论一致。综合试验数据和理论分析可判定小波包能量熵区间 1.92 ~ 2.27 对应纤维束断裂损伤。

根据上述对 3 种单一损伤或单一损伤为主的木材损伤试验结果的分析，木材不同损伤类型的声发射小波包能量熵存在显著差异。因此，声发射 IMF 分量的小波包能量熵是判断木材损伤类型的有效参数。不同损伤类型与其损伤信号分量的小波包能量熵数值区间的对应关系为：胞壁屈曲与塌溃损伤对应的 IMF 分量小波包能量熵区间为 0.69 ~ 0.99；层间开裂损伤对应的小波包能量熵区间为 1.57 ~ 1.78；纤维束断裂损伤对应的小波包能量熵区间为 1.92 ~ 2.27。

从细观层次分析，木材细胞受拉应力导致的层间开裂属于拉伸损伤；木材细胞受压缩或剪切导致细胞壁塌溃而产生的胞壁屈曲与塌溃属于压溃损伤。已有研究[15]表明：木材在受拉载荷过程中，纤维束会沿最大拉应力方向断裂；在受压载荷过程中，纤维束会因受压应力不均导致微纤丝角改变而断裂。因此，利用小波包能量熵值能够对服役状态下木材细观损伤类型进行准确识别。

3.3　试件宏观破坏观察与微观组织检验

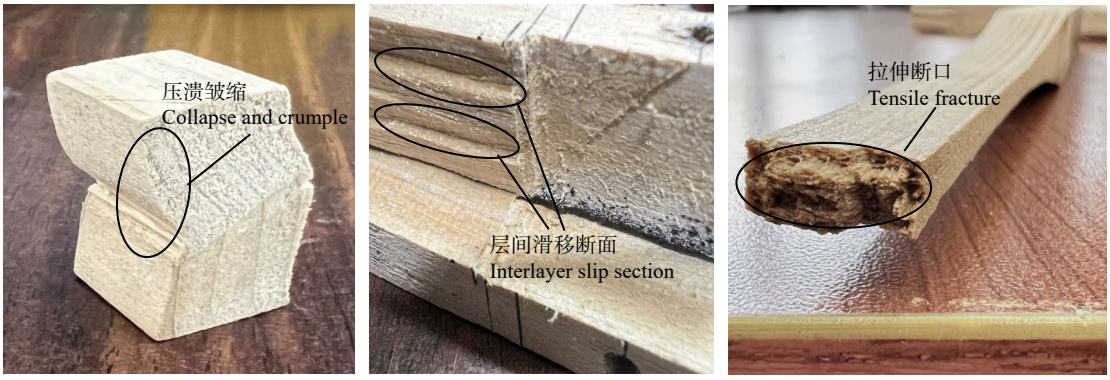
为了验证本文所提出方法的准确性，对单一损伤试验的试件分别进行微观组织检验和宏观破坏观察，并与上述试验结果进行对比。

3.3.1　单一损伤试件宏观损伤观察

3 种破坏试验对应损伤的试件宏观图如图 7 所示。从图 7a 可以清晰看到试件被压溃皱缩，判定木材在单轴压缩试验中的细观损伤形式主要为胞壁屈曲与塌溃损伤；图 7b 可看出试件断面出现了明显的层间滑移现象，判定木材在双悬臂梁试验中的细观损伤形式主要为层间开裂；图 7c 可看出试件经拉伸断裂后宏观断口不均匀，存在层间损伤与纤维束断裂两种形式，判定木材在顺纹拉伸试验中的细观损伤形式主要为纤维束断裂，同时产生少量层间开裂损伤。试件损伤宏观观察结果与单轴压缩、双悬臂梁、顺纹拉伸试验分析结果也一致。

3.3.2　单一损伤试件切片微观组织检验

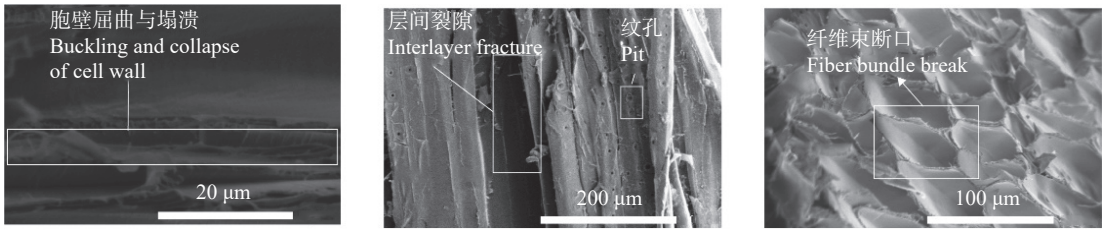
3 种破坏试验对应损伤的 SEM 图如图 8 所示。



a 单轴压缩 Uniaxial compression　b 双悬臂梁 Double cantilever beam　c 顺纹拉伸 Parallel tensile

图 7　单一损伤试件损伤的宏观图像

Fig. 7　Macroscopic image of damage in a single damaged sample



a 胞壁屈曲与塌溃 Buckling and collapse of cell wall　b 层间开裂 Delamination　c 纤维束断裂 Fiber breakage

图 8　单一损伤试验对应损伤的 SEM 图

Fig. 8　SEM maps of damage corresponding to a single damage test

从图 8a 的 SEM 图中可以看到木纤维细胞壁受压屈曲与塌溃，可知在单轴压缩试验所产生的细观损伤形式主要为胞壁屈曲与塌溃损伤；图 8b 可以清晰看到管胞壁上的纹孔，而杉木在层间开裂损伤过程中，会沿纤维方向发生扩展，在细胞壁之间产生层间裂隙，从而出现完整未损坏的纹孔，据此可知在双悬臂梁试验中所产生的细观损伤形式主要为层间开裂损伤；图 8c 的 SEM 图可以看到大量纤维束断裂，同时有少量层间滑移现象，可知顺纹拉伸试验所产生的细观损伤形式主要是纤维束断裂损伤，也有少量层间开裂损伤。试件 SEM 微观组织检验结果与 3.2 中分析得到的不同损伤试验信号对应的细观损伤类型结果一致。

4　结　　论

本研究对杉木分别进行单轴压缩、双悬臂梁和顺纹拉伸的单一损伤试验，对损伤过程中产生的声发射信号进行了处理和分析。采用小波包变换有效地去除了原始信号中的噪声，并通过经验模态分解与小波包能量熵方法获得了不同频段的能量分布情况，确定了损伤频率所在的频段范围。

(1)经验模态分解–小波包能量熵法可以有效判断杉木木材细观损伤的类型和构成。

(2)杉木不同细观损伤类型所对应的声发射信号在小波包能量熵区间上有所差异：胞壁屈曲与塌溃（0.69 ~ 0.99）、层间开裂（1.57 ~ 1.78）、纤维束断裂（1.92 ~ 2.27）。

(3)经验模态分解–小波包能量熵法避免了声发射信号模态堆叠的影响，并解决了木材细观损伤复杂且难以识别的问题，为杉木木材断裂的早期诊断方法提供了理论支撑。

建议在后续研究中增加不同种类的木材和不同尺寸的试件，进一步验证本研究结论的普适性。

参　考　文　献

[1] 邵卓平. 木材损伤断裂与木材细观损伤基本构元 [J]. 林业科学, 2007, 43(4): 107−110.
Shao Z P. Wood damage-fracture and wood meso-damage elements[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43(4): 107−110.

[2] 邵卓平, 陈品, 查朝生, 等. 木材损伤断裂过程的声发射特性与 Felicity 效应 [J]. 林业科学, 2009, 45(2): 86−91.
Shao Z P, Chen P, Zha Z S, et al. Acoustic emission characteristics of damage and fracture process of wood and felicity effect[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(2): 86−91.

[3] 涂郡成, 赵东, 赵健. 应用 AE 和 DIC 原位监测含横纹裂纹木构件的裂纹演化规律试验研究 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(1): 142−148.
Tu J C, Zhao D, Zhao J. Experimental study on in situ monitoring of the evolution law of cracks in wood components with transverse cracks based on acoustic emission and image correlation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(1):

142−148.

[4] 赵小矛, 焦亮亮, 赵健, 等. 榫卯结构弯曲破坏时声发射衰减特性与源定位 [J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(1): 107−111.
Zhao X M, Jiao L L, Zhao J, et al. Acoustic emission attenuation and source location on the bending failure of the rectangular mortise-tenon joint for wood structures[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(1): 107−111.

[5] 王丽宇, 鹿振友, 赵东, 等. 白桦材 LT 型裂纹的演化与增长行为的研究 [J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(2): 59−61.
Wang L Y, Lu Z Y, Zhao D, et al. Crack initiation and propagation in LT specimens of *Betula platyphylla* Suk[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(2): 59−61.

[6] 张美林, 李俊萩, 张晴晖, 等. 基于熵和波形特征的木材损伤断裂过程声发射信号处理 [J]. 林业工程学报, 2022, 7(2): 159−166.
Zhang M L, Li J Q, Zhang Q H, et al. Acoustic emission signal processing and analysis of wood damage and fracture process based on entropy and waveform characteristics[J]. Journal of Forestry Engineering, 2022, 7(2): 159−166.

[7] Tu J C, Yu L C, Zhao J, et al. Damage modes recognition of wood based on acoustic emission technique and Hilbert-Huang transform analysis[J]. Forests, 2022, 13(4): 631.

[8] Liu X L, Liu Z, Li X B, et al. Experimental study on the effect of strain rate on rock acoustic emission characteristics[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 133: 104420.

[9] Verstrynge E, van Steen C, Vandecruys E, et al. Steel corrosion damage monitoring in reinforced concrete structures with the acoustic emission technique: a review[J]. Construction and Building Materials, 2022, 349: 128732.

[10] Li Y, Xu F Y. Structural damage monitoring for metallic panels based on acoustic emission and adaptive improvement variational mode decomposition-wavelet packet transform[J]. Structural Health Monitoring, 2022, 21(2): 710−730.

[11] He K F, Xia Z X, Si Y, et al. Noise reduction of welding crack ae signal based on EMD and wavelet packet[J]. Sensors, 2020, 20: 761.

[12] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Science, 1998, 454: 903−995.

[13] Yang Y, Yu D J, Cheng J S. A roller bearing fault diagnosis method based on EMD energy entropy and ANN[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 294(1−2): 269−277.

[14] Tu J C, Zhao D, Zhao J, et al. Experimental study on crack initiation and propagation of wood with LT-type crack using digital image correlation (DIC) technique and acoustic emission (AE)[J]. Wood Science and Technology, 2021, 55: 1577−1591.

[15] 李柬龙, 陈胜, 李海潮, 等. 轻木细胞壁超微结构与力学性能关系研究 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(2): 115−122.
Li J L, Chen S, Li H C, et al. Relationship between cell wall ultrastructure and mechanical properties of balsa wood[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(2): 115−122.

（责任编辑　吴　娟
责任编委　李文彬）