

基于瞬时频率的木材声发射事件辨识与损伤监测

董红平¹,李 明^{2*}

(1. 绍兴职业技术学院 机电工程学院,浙江 绍兴 312000;2. 西南林业大学,云南 昆明 650224)

摘 要:为了从能量的角度客观评价木材损伤程度,依据应变能释放产生的声发射(AE)信号特征,提出一种基于信号瞬时频率的 AE 事件辨识方法,并依据 AE 事件的发生密度从能量的角度进行损伤动态监测。采用小波分析的方法对原始信号进行降噪预处理,用经验模态分解(EMD)进行波形重构。依据 AE 信号的频率分布特征将 AE 信号分为 2 类,并对应地定义 DAE 和 FAE 2 类 AE 事件。通过 Hilbert 变换获得 AE 信号的瞬时频率,依据瞬时频率计算 2 种 AE 事件发生的密度,依此判断和预测木材的应力变化及损伤趋势。结果表明,FAE 信号频率明显高于 DAE 信号频率,并且当 DAE 事件密度维持较高水平时,意味着材料以弹性形变为主;相反当 FAE 事件密度维持较高水平时,说明材料正在发生频繁的断裂,从而为木材损伤程度的研判提供评价依据。

关键词:声发射;损伤;瞬时频率;木材

中图分类号:S781.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2020)02-0229-06

Wood Acoustic Emission Event Identification Based on Instantaneous Frequency and Damage Monitor

DONG Hong-ping¹, LI Ming^{2*}

(1. School of Mechanical and Electrica Engineering, Shaoxing Vocational & Technical College, Shaoxing 312000, Zhejiang, China;
2. Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: In order to evaluate damage state of wood from the aspect of strain energy, acoustic emission (AE) signal released by strain energy was used to monitor stress level of wood. Specifically, AE events were redefined according to instantaneous frequency of AE signals. And then, the density of AE events was calculated to estimate the damage degree. Firstly, a four-channel signal acquisition system was built for AE signal collection and its software was programmed in LabVIEW. After the raw AE signal was collected by the system, wavelet analysis method was used to filter noise and reconstruct AE waveform. Then, the re-constructed AE signal was dealt with empirical mode decomposition (EMD) to reduce the noise level. Secondly, two types of AE signals were defined by their frequency characters. Two kinds of AE events were defined by two types of AE signals. One was denoted FAE that was caused by fracture, and the other was DAE caused by fibers deformation in this paper. At last, instantaneous frequency of AE signal was obtained through Hilbert transform. Meanwhile, the density of each AE event was used to evaluate the damage de-gree and its growing trend. From the test results, the frequency of FAE was obviously higher than that of DAE. Higher density of DAE event meant that the damage was mainly caused by elastic deformation. Cor-respondingly, higher density of FAE event meant that the damage was mainly caused by fracture. With in-stantaneous frequency, a new definition of AE event was proposed in this paper. Especially, quantity and

收稿日期:2019-06-13 修回日期:2019-07-03

基金项目:国家自然科学基金项目(31760182)。

作者简介:董红平,男,硕士,讲师,研究方向:智能制造、声发射技术、电液控制。E-mail:31856321@qq.com

* 通信作者:李 明,男,教授,博士,博士生导师,研究方向:智能控制与智能优化算法、声发射无损检测、电液控制。E-mail:572721868@qq.com

density of AE event could reflect the stress level and damage degree of wood.

Key words: acoustic emission; damage; instantaneous frequency; wood

材料在受外力或内力作用产生变形或断裂时,以弹性波的形式释放应变能的现象称为声发射(acoustic emission, AE)。声发射检测(acoustic emission test, AET)作为一种无损检测方法,为木质材料动态应力和损伤检测提供了有效的途径。比较常用的方法是根据 AE 事件的幅值、振铃总数、累计能量等参数判断木材和木质材料的损伤程度^[1-4]。目前, AET 已经被用于木材干燥过程的开裂预测^[5-6]、确定刨花板弹性极限点位置^[7]、层积材拉伸过程损伤监测^[8-9]、木材动态载荷下纤维断裂临界点预测^[10-13]、标定木材损伤过程的断裂过程区^[14]等方面。现有研究表明,针叶树材开裂过程会产生更多的 AE 事件,同时会产生更多的微裂^[15],并且随着温度上升,木材 AE 事件的数量呈现下降趋势^[16],在木材的韧性断裂阶段会产生大量高振幅的 AE 信号^[17]。

然而,木材作为多孔性材料,具有不均匀性和各向异性的自然属性,仅通过检测信号的幅值判断 AE 事件的发生存在明显的不足。通过对 AE 信号波形的分析则能够获取更加全面客观的时频域特征,但是受噪声信号影响, AE 信号通常“隐藏”在原始检测信号中。因此, AE 信号波形重构成为 AET 在木材无损检测中的应用关键技术。现有木材 AE 信号波形重构方法主要是小波分析方法^[18]、经验模态分析法^[19]、中值滤波和奇异值分解混合降噪法^[20]等。 AE 信号波形特征被用于木材 AE 信号源定位^[21]、实木 AE 信号特征分析^[22]等方面的研究。

本研究对木材损伤断裂过程中的 AE 原始信号进行滤波和降噪处理后重构 AE 信号波形,并依据 AE 重构波形的频域特性确定不同 AE 事件的特征频率,进而在对 AE 信号重构波形进行 Hilbert 变换的基础上,通过瞬时频率统计不同类型 AE 事件的数量并计算相应的事件发生密度,最后利用 AE 事件发生密度及其变化情况评价木材损伤过程中的应力状态。由于木材 AE 信号本质上是一种非线性、非平稳过程,而经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)算法为非线性和非平稳过程分析提供了完全自适应的分析方法,特别是分解后的固有模态函数(intrinsic mode functions, IMF)具有明确的物理意义。所以在对原始 AE 信号进行滤波和小波重构预处理后,再对 AE 重构波形进行 EMD 分解,最终获得用于 Hilbert 变换的 AE 信号波形。

1 材料与方法

采用干燥至绝干状态且无明显缺陷的云南铁杉(*Tsuga dumosa*)作为试验材料,并制作成尺寸为 580.0 mm×50.2 mm×17.2 mm 的试件备用。进而通过三点弯曲试验对试件进行力学破坏,力学试验设备为三思纵横 UTM5105 电子万能试验机,其最大试验力为 100 kN,跨度为 200 mm,加载速度设定为 1 mm/min。为了获取真实的原始 AE 信号波形,采用 NI USB-6366 高速采集设备自行搭建 4 通道 AE 信号采集平台,传感器选用 SR 150N 单端谐振声发射传感器,其信号带宽为 22~220 kHz,同时配备了增益为 40 dB 前置放大器,每个通道的最高采样频率为 2 MHz,采集信号的电压范围为(-5V, 5V)。现有相关研究表明,木材 AE 信号主要分布在 50~200 kHz 范围内,根据香农采样定理, AE 信号采集系统的每通道的采样频率设置为 500 kHz。

首先采用高通滤波和小波变换的方法对原始信号进行降噪处理,依据 AE 传感器的带宽选用切比雪夫 I 型高通滤波器滤除 22 kHz 以下的检查信号,滤波器的阻带边缘频率设为 22 kHz,通带边缘频率设为 24.5 kHz。对于滤波后的 AE 信号再通过小波重构的方法进行降噪处理,本研究选定具有较高消失矩阶数的 *daubechies* 小波(*db10*)作为小波基函数。根据小波多分辨率分析原理,选择 5 层小波分解就能够完全覆盖 AE 传感器的检测范围。

对小波重构的 AE 信号,进一步采用 EMD 算法进行降噪处理。通过 Hilbert 变换获得 AE 信号的瞬时频率,根据不同 AE 信号的频率范围,统计 AE 事件的数量,并计算每个时刻的 AE 事件密度,并依此判断木材损伤过程的应力状态。

2 结果与分析

2.1 三点弯曲力学试验

试验测得试件的弯曲弹性模量和抗弯强度分别为 7.550 6 GPa 和 61.2 MPa。三点弯曲力学试验的载荷-挠度曲线如图 1 所示,为了分析应力与 AE 事件的关系,还绘制了相应的载荷-时间曲线(图 2)。从图 2 可以看出,在 245 s 左右试件开始出现明显的断裂。

整个试验过程的原始 AE 信号波形如图 3 所示,信号采用频率为 500 kHz,即每秒采集 5×10^5 个数据,因此图 3 包含了 3×10^8 个数据。

从图 2 可以看出,试件从 245 s 才开始出现明显的宏观断裂,图 3 则显示在 215 s 出现了强烈的 AE 信号,这就意味着 AE 信号在一定程度上能够预报损伤断裂的发生。尽管如此,在此之前的 AE 信号幅值上并没有显著的差异,所以仅仅通过时域的 AE 波形还无法直接判断和分辨 AE 事件的发生,这也说明现有参数法中依据时域阈值定义 AE 事件的方法缺乏必要的物理依据,因此需要从信号的频域上重新定义和辨识 AE 事件。

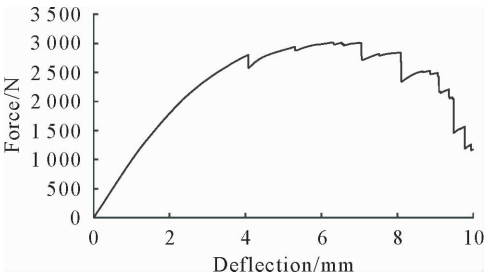


图 1 三点弯试验的载荷-挠度曲线

Fig. 1 Force-deflection curve of the three-point bending test

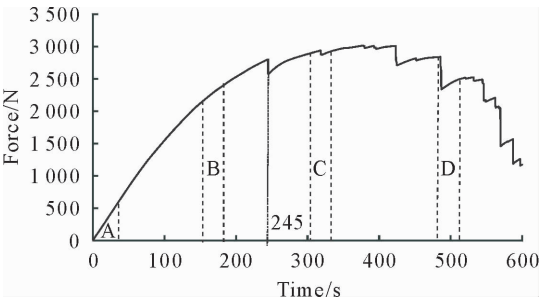


图 2 三点弯试验的载荷-时间曲线

Fig. 2 Force-time curve of the three-point bending test

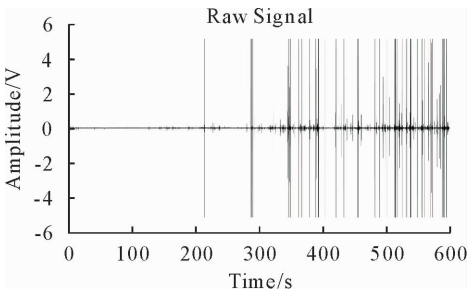


图 3 AE 信号原始波形

Fig. 3 Original waveform of acquisition AE signal

2.2 滤波与小波重构 AE 信号波形

由于信号采样频率较高,无法直接对整个时间长度的信号进行处理,为此在分析 AE 信号特征时截取 2^{14} (32.768 ms) 长度的数据进行滤波和小波变换处理。

首先从原始信号中截取一段以断裂产生的 AE 信号为主的片段,也就是包含较大幅值的 AE 信号波形。为此,本研究从 286.94 s 开始截取信号并进行滤波和小波分析处理,事实上从时域波形上可以看出该时间段发生了强烈的 AE 信号(图 4)。图 4

自上而下分别是原始 AE 信号、滤波后的 AE 信号、小波重构的 AE 信号波形。

为了突出不同频率成分的比重,对信号频谱的幅值进行了归一化处理。从图 5 可以看出,该段 AE 信号主要由 2 种频率成分构成,其中 165 kHz 左右的信号对应着较大幅值的 AE 信号,微观上可以视为因木材细胞胞壁断裂引起的较高能量的 AE 信号^[17],本研究称此类 AE 信号为断裂 AE(fracture AE,FAE)信号;另一类 AE 信号主要分布在 36 kHz 左右,此类 AE 信号幅值较小且持续时间短,微观上可以认为是木材胞壁层面损伤或层裂而引起的试件变形^[17],本研究称此类 AE 信号为形变 AE(deformation AE,DAE)信号。

图 5 可以非常清楚地确定 FAE 信号的特征频率,但是对 DAE 的特征频率范围的确定仍不够充分,为此,再次截取试验初期从 2.4 s 开始的一段数据进行分析。从图 6 可以看出,信号幅值明显变小,这个阶段仍处于弹性变形阶段,因此主要以 DAE 信号为主,对应的小波重构 AE 信号的频谱如图 7 所示。

从图 7 可以看出,首先出现了频率在 165 kHz 的 FAE 信号,从图 6 看出其对应的幅值较小,所以在频谱中表现为次要成分,此类 FAE 信号可以解释为试验初期由试件内部微裂产生的 AE 信号。此外,大部分 DAE 信号的频率分布在 36~56 kHz。

图 4 和图 6 截取了 2 次具有代表性的 AE 信号,此外,本研究还随机截取了若干同样长度的 AE 信号进行分析,结果均是包含 2 个主要成分,特别是 FAE 信号基本集中在 165 kHz,DAE 信号则主要分布在 30~60 kHz 的低频段。

为了说明 2 种 AE 信号的波形差异,本研究从 286.942 7 s 开始截取了 10 ms 的信号波形。从图 8 可以清晰地分辨 FAE 和 DAE 2 类 AE 信号,FAE 信号的幅值大、频率高;DAE 信号的幅值小、频率低。

2.3 EMD 分解与 AE 事件统计

由于小波重构及其频谱分析仍然是一种全局处理方法,只能提供信号所包含的频率成分,无法给出信号在每个时刻的频率值。为此,本研究在对重构 AE 信号进行 EMD 分解后,采用 Hilbert 变换的方法获得信号的瞬时频率,再依据瞬时频率判断不同 AE 事件的发生。根据前面的分析可知,通过信号的频率特征能够明显区分木材损伤过程产生的 2 类 AE 信号。为此,本研究相应地根据频率特征定义 FAE 和 DAE 2 种 AE 事件,并且将 FAE 事件的频率范围设定为(160、170 kHz),DAE 事件的频率范围设定为(30、60 kHz),即 AE 信号的瞬时频率在相

应的范围内,则认为发生对应的 AE 事件。上述 AE 事件频率范围的设定只会影响事件数量的统计,不会影响后面的应力分析,因此不再对频率范围的设定作过多的解释。

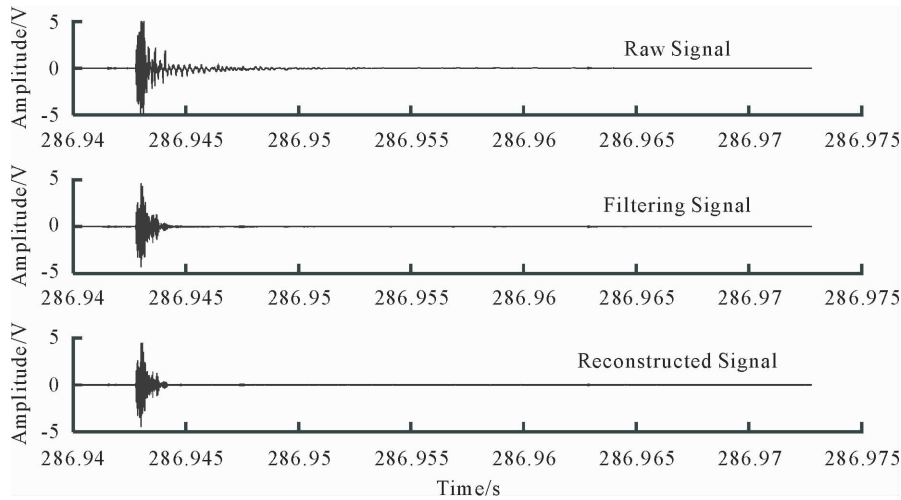


图 4 断裂产生的 AE 波形

Fig. 4 AE waveform generated by fracture

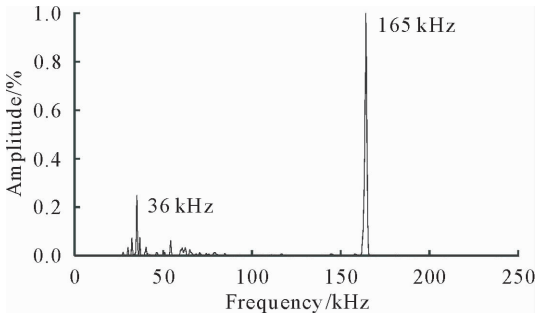


图 5 小波重构信号的频谱

Fig. 5 Spectrum of wavelet reconstruction signal

因为 EMD 分解具有非常明确的物理意义,IMF 分量反映了信号在每个时刻的固有特性。因此,本研究根据 IMF 分量与原信号的相关性来确定主分量,即将相关性最强的 IMF 分量作为主分量用于判断和统计 AE 事件。为了说明不同信号处理方法对 AE 信号的影响,本研究随机截取了 214 长度的原始信号进行处理,信号波形如图 9 所示,自上而下分别是原始信号、滤波后的信号、小波重构信号、EMD 分解处理后的信号波形。从图 9 可以看出,EMD 分解处理后的 AE 信号更加明显。

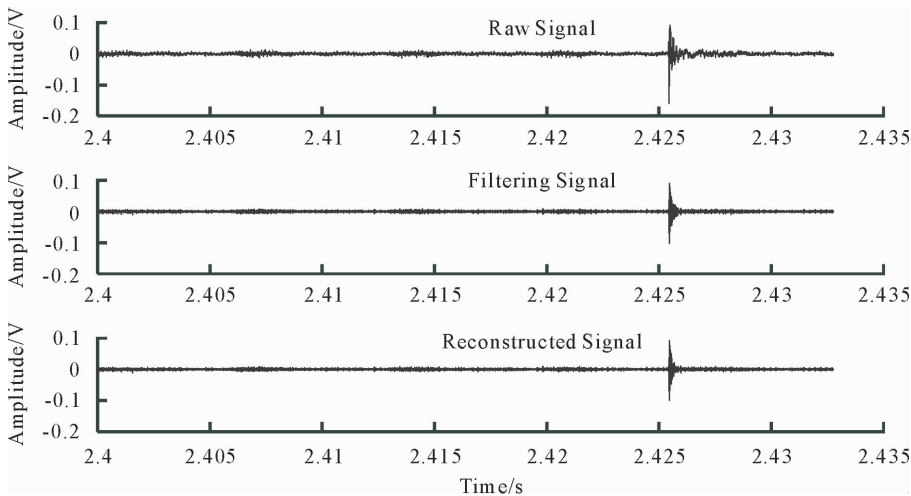


图 6 试验初期的 AE 信号波形

Fig. 6 AE waveform at the beginning of the test

由于 AE 信号的数据量过于庞大,很难一次性完成相关信号处理。为此,本研究将原始信号按照 50 ms 的跨度截成 12 000 个小段信号,分别对小段信号进行滤波、重构、EMD 分解后,通过 Hilbert 变换获得瞬时频率,并根据事先确定的 FAE 和 DAE 的频率范围,分别统计不同 AE 事件的数量,进一步

计算 AE 事件发生的密度。最终将所有小段信号的计算结果“拼接”成完整的 AE 事件密度变化曲线(图 10)。图 10 上半部分是 DAE 事件发生的密度曲线,下半部分是 FAE 事件的密度曲线。

从图 10 可以看出,250 s DAE 和 FAE 的事件密度的平均水平发生了突变,这与图 3 所示的 245 s

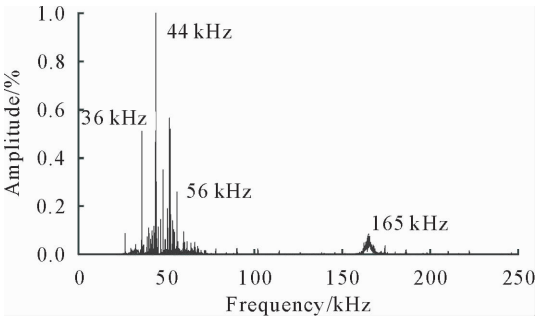


图 7 初期小波重构 AE 信号频谱

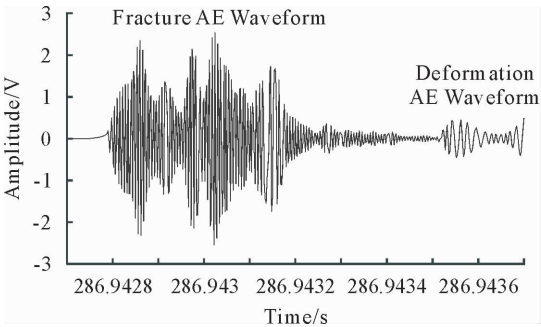


图 8 2 种 AE 信号波形

Fig. 7 Spectrum of wavelet reconstruction AE signal at the beginning of the test

Fig. 8 Two kinds of AE waveform

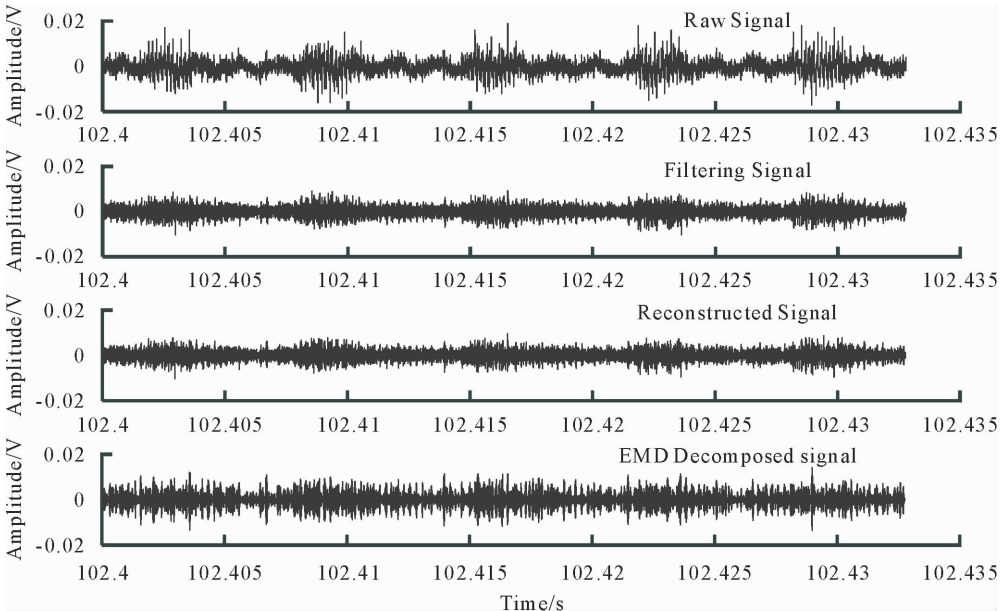


图 9 EMD 处理后的 AE 波形

Fig. 9 AE waveform processed by EMD method

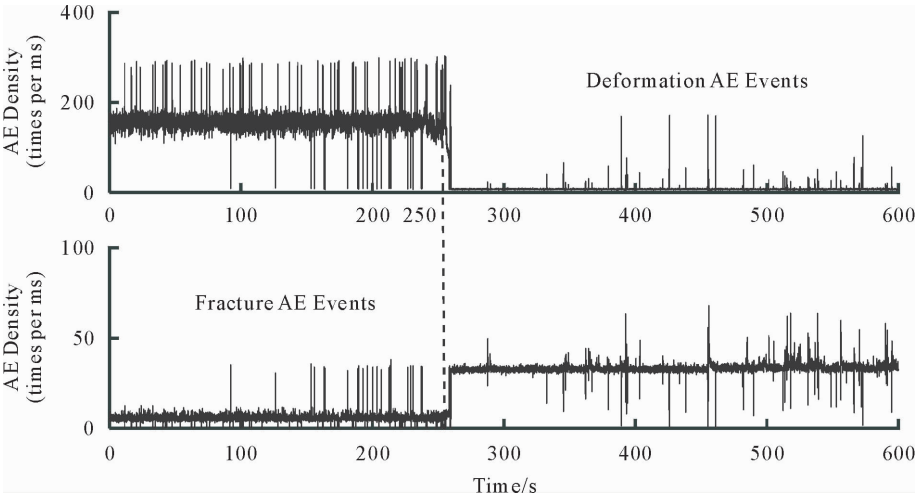


图 10 AE 事件密度 (0~600 s)

Fig. 10 Density of AE events (from 0 to 600 seconds)

发生明显断裂情况基本吻合,说明无论是 DAE 还是 FAE 事件密度平均水平的突变都能够反映木材断裂的发生。250 s 以前,DAE 事件发生密度始终保持较高的水平,而相应的 FAE 事件发生密度较

低,说明该阶段以弹性形变产生的 AE 信号为主,相反,250 s 后 2 种 AE 事件的密度水平发生转换,也就意味着该阶段以断裂产生的 AE 信号为主。从图 10 可以看出,在发生断裂前 FAE 的事件密度密集

出现“尖峰”，意味着内部和表面的微观开裂不断发生，可以作为判断试件是否将要发生断裂的依据。

3 结论

本研究提出了一种依据瞬时频率定义 AE 事件的新方法，并用于木材损伤过程的应力分析与状态监测。木材损伤过程主要产生 2 类 AE 事件，分别是由断裂产生的 FAE 事件，以及由弹性形变产生的 DAE 事件。当 DAE 事件密度维持较高水平时，意味着试件以弹性形变为主，相反当 FAE 事件密度维持较高水平时，说明试件在发生频繁的断裂。特别在弹性形变阶段，当 FAE 事件密度发生密集突变时，预示着试件将产生宏观的断裂，从而为木材损伤的微观断裂提供依据。未来可以根据不同类型 AE 信号的传播规律及相应的 AE 事件的发生密度，进一步研究木材损伤过程应变能的释放和扩散规律，建立基于能量的木材损伤预测模型。

参考文献：

[1] AICHER S, HÖFFLIN L, DILLLANGER G. Damage evolution and acoustic emission of wood at tension perpendicular to fiber [J]. *HolzalsRoh-und Werkstoff*, 2001, 59(59):104-116.

[2] CHEN Z, GABBITAS B, HUNT D. Monitoring the fracture of wood in torsion using acoustic emission[J]. *Journal of Materials Science*, 2006, 41(12):3645-3655.

[3] OHUCHI T, HERMAWAN A, FUJIMOTO N. Basic studies on fracture toughness of sugi and acoustic emission[J]. *Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University*, 2011, 56:99-102.

[4] 郭晓磊, 郭勇, 胡伟, 等. 木基复合材料破坏过程中声发射特性的研究[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2011, 35(3):97-100.

GUO X L, GUO Y, HU W, *et al.* Study on acoustic emission characteristics of wood matrix composites during damage [J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition*, 2011, 35(3):97-100. (in Chinese)

[5] 丁馨曾, 赵海龙, 申珂楠. 声发射技术在木材干燥中的应用与发展[J]. *西北林学院学报*, 2015, 30(3):242-244.

DING X Z, ZHAO H L, SHEN K N. Application and development of acoustic emission technology in wood drying [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2015, 30 (3):242-244. (in Chinese)

[6] 丁小康, 张祥雪, 郝燕华, 等. 木材干燥过程中声发射信号分析[J]. *木材工业*, 2012, 26(3):40-43.

[7] 徐慧, 薛联凤, 刘云飞. 声发射技术在刨花板力学性能检测中的应用[J]. *林产工业*, 2004, 31(6):19-21.

[8] RITSCHER F, BRUNNER AJ, NIEMZ P. Nondestructive evaluation of damage accumulation in tensile test specimens made from solid wood and layered wood materials[J]. *Composite Structures*, 2013, 95(1):44-52.

[9] RITSCHER F, YANG Z, BRUNNER AJ, *et al.* Acoustic emission analysis of industrial plywood materials exposed to destructive tensile load[J]. *Wood Science & Technology*, 2014, 48(3):1-21.

[10] 孙建平, 王逢瑚, 朱晓东, 等. 动态载荷下基于声发射技术的杨木破坏过程检测[J]. *林业科学*, 2006, 42(9):89-92.

SUN J P, WANG F H, ZHU X D, *et al.* Poplar damage process detection based on acoustic emission technology under dynamic loading [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42 (9):89-92. (in Chinese)

[11] 彭杰, 冯海林, 方益明, 等. 多通道木才无损检测设备设计[J]. *森林工程*, 2017, 33(1):47-51.

[12] 孙建平, 王逢瑚, 胡英成. 基于声发射和神经网络的木材受力损伤过程检测[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(2):342-347.

[13] 牟洪波, 王世伟, 戚大伟, 等. 基于灰度共生矩阵和模糊 BP 神经网络的木材缺陷识别[J]. *森林工程*, 2017, 33(4):40-43, 54.

[14] LAMY F, TAKARLI M, ANGELLIER N, *et al.* Acoustic emission technique for fracture analysis in wood materials[J]. *International Journal of Fracture*, 2015, 192(9):57-70.

[15] REITERER A, STANZL-TSCHEGG S E, TSCHEGG E K. Mode I fracture and acoustic emission of softwood and hardwood [J]. *Wood Science & Technology*, 2000, 34(5):417-430.

[16] BERG J E, GRADIN P A. Effect of temperature on fracture of spruce in compression, investigated by use of acoustic emission monitoring[J]. *Journal of Pulp & Paper Science*, 2000, 26(8):294-299.

[17] 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, CHA C S, *et al.* Acoustic emission characteristics and felicity effect in wood damage and fracture [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(2):86-91. (in Chinese)

[18] 申珂楠, 丁馨曾, 赵海龙, 等. 木材表面声发射信号源的三角形定位方法[J]. *东北林业大学学报*, 2015, 43(4):77-81.

SHEN K N, DING X Z, ZHAO H L, *et al.* Triangular positioning method of acoustic emission signal source on wood surface [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2015, 43(4):77-81. (in Chinese)

[19] 徐锋, 刘云飞, 宋军. 基于中值滤波-SVD 和 EMD 的声发射信号特征提取[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(12):2712-2719.

[20] 徐锋, 刘云飞. 基于 EMD-SVD 的声发射信号特征提取及分类方法[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2014(6):1238-1247.

[21] 申珂楠, 赵海龙, 丁馨曾, 等. 基于 LabVIEW 的木材声发射信号采集与小波析取[J]. *中南林业科技大学学报*, 2015, 35(4):125-129.

[22] 于帅帅, 申丽娟, 李杨, 等. 云南松表面声发射信号采集与特征分析[J]. *西北林学院学报*, 2017, 32(2):247-251.

YU S S, SHEN L J, LI Y, *et al.* Acoustic emission signal acquisition and characteristic analysis of *Pinus yunnanensis* surface [J]. *Journal of Northwest Forestry College*, 2017, 32(2):247-251. (in Chinese)