

基于声发射信号信息熵的木材损伤断裂过程研究

丁锐¹, 罗蕊寒¹, 方赛银¹, 赖菲¹, 李明^{2,3*}

(1. 西南林业大学 机械与交通学院, 云南 昆明 650224; 2. 安徽工程大学 高端装备先进感知与智能控制教育部重点实验室, 安徽 芜湖 241000;
3. 安徽工程大学 电气工程学院, 安徽 芜湖 241000)

摘要:为获得木材在弯曲破坏过程中的声发射(acoustic emission, AE)信号特征,从 AE 信号的随机性出发,利用 AE 信号信息熵辨识木材的损伤过程,并研究木材在不同损伤断裂水平下的 AE 信号分布特性。首先,对气干状态的榉木和樟子松试件进行三点弯曲试验,并通过谐振频率为 150 kHz 的 AE 传感器采集原始 AE 信号,采样频率设置为 500 kHz。然后,采用小波变换重构 AE 信号波形,依据无 AE 发生时的信号幅值确定 AE 阈值,统计每秒内超过阈值的次数并作为 AE 活动计数,再以活动计数为随机变量定义 AE 信息熵。最后,依据信息熵值确定应变能释放的转折点,并结合三点弯曲试验的载荷-时间曲线,将木材损伤断裂过程划分为线性变形、非线性变形、宏观断裂 3 个阶段。以 10 ms 为间隔分析并统计 AE 信号的频率,获得木材弯曲破坏过程的 AE 信号频率分布情况,从而揭示不同损伤阶段的 AE 信号特征。结果表明,线性变形阶段,AE 信号表现为低幅值、低频率,主要集中在 30~55 kHz 频段内;非线性变形和宏观断裂阶段,AE 信号中既存在大量的 30~55 kHz 低频信号成分,又存在 100~110 kHz 和 115~130 kHz 的高频信号。研究提出的基于 AE 活动数信息熵能够准确反映应变能释放的集中程度,为木材损伤断裂水平评价提供了客观依据。

关键词:木材;三点弯曲;损伤断裂;AE 活动数;信息熵

中图分类号:S781.38

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2022)05-0210-08

Research on Wood Damage Fracture Process Based on Acoustic Emission Signal Information Entropy

DING Rui¹, LUO Rui-han¹, FANG Sai-yin¹, LAI Fei¹, LI Ming^{2,3*}

(1. College of Machinery and Transportation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China;

2. Key Laboratory of Advanced Perception and Intelligent Control of High-Tech Equipment of Ministry of Education/Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, Anhui, China; 3. School of Electrical Engineering,

Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, Anhui, China)

Abstract: In order to obtain the acoustic emission (AE) signal characteristics of wood during bending failure, the AE signal information entropy was used to identify the damage process of wood from the randomness of AE signal, and the distribution characteristics of AE signal under different damage and fracture levels were studied. Firstly, three-point bending test was carried out on the air-dried beech and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* specimens, and the original AE signal was collected by AE sensor with resonance frequency of 150 kHz, and the sampling frequency was set to 500 kHz. Then, the AE signal waveform was reconstructed by wavelet transform, the AE threshold was determined according to the signal amplitude when no AE occurred, the number of times exceeding the threshold per second was counted as the AE ac-

收稿日期:2021-09-02 修回日期:2021-11-05

基金项目:国家自然科学基金(32160345, 31760182)。

第一作者:丁锐。研究方向:木材无损检测,信号优化处理算法,有限元仿真。E-mail:327201725@qq.com

*通信作者:李明,教授,博士生导师。研究方向:智能控制与优化,木材声发射特性。E-mail:swfu_lm@swfu.edu.cn

tivity counted, and then the AE information entropy was defined with the activity count as the random variable. Finally, according to the information entropy, the turning point of strain energy release was determined, and combined with the load-time curve of three-point bending test, the wood damage and fracture process was divided into three stages: linear deformation, nonlinear deformation and macroscopic fracture. The frequency of AE signal was analyzed and counted at 10 ms intervals, and the frequency distribution of AE signal in the process of wood bending failure was obtained, thus revealing the characteristics of AE signal in different damage stages. The results showed that during the linear deformation stage, AE signals were characterized by low amplitude and low frequency, mainly concentrated in the frequency range of 30~55 kHz. In the stage of nonlinear deformation and macroscopic fracture, there were not only a large number of 30~55 kHz low frequency signals, but also 100~110 kHz and 115~130 kHz high frequency signals in AE signals. The information entropy based on AE activity number can accurately reflect the concentration degree of strain energy release, which provides an objective basis for the evaluation of wood damage and fracture level.

Key words: wood; three-point bending; damage fracture; AE activity number; information entropy

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^[1]。声发射检测技术(acoustic emission testing, AET)是一种动态性的无损检测技术,能够根据材料在载荷作用下产生的 AE 信号,对 AE 源的性质进行实时动态无损评价,为木质材料动态应力和损伤检测提供了有效的途径^[2-4]。

在木材科学领域,常通过 AE 参数分析法对木材的损伤行为进行监测与表征。R. Mohammadi *et al.*^[5]研究了碳/环氧层压复合材料在不同载荷类型下的分层演变行为,并根据累计 AE 能量表征裂纹长度;针对板材在载荷作用下的分层扩展行为, F. J. Rescalvo *et al.*^[6]提出了基于 AE 活性和 AE 强度的杨木板材脱层预测方法;鞠双等^[7]、董红平等^[8]依据瞬时频率统计 AE 事件,利用 AE 事件发生频率及其变化情况评价试件的应力状态和损伤程度。现有关于材料 AE 特性差异研究结果表明,老木材产生的 AE 事件比新木材多,且老木材比新木材经历更长时间的裂纹扩展后才发生最终断裂^[9]。相同加载条件下,针叶材比阔叶材产生更多的 AE 事件,同时会产生更多的微裂,与软木相比,硬木具有更显著的线弹性特性,产生的累计 AE 计数较少^[10]。然而木材的损伤断裂是一个多尺度、非线性的动力学过程,不同损伤阶段产生的 AE 信号差异性较大,利用基于波形简化的参数分析法对材料的损伤程度及演变进行表征时,丢失了最能反映材料 AE 损伤特性的原始波形信息,在反映木材不同损伤阶段的 AE 特性方面不够客观。

本研究以气干状态的榉木(*Zelkova schneideriana*)和樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)为试验材料进行三点弯曲破坏试验,在获取原始

AE 波形的基础上统计 AE 活动数,并与信息熵理论相结合,利用 AE 活动数信息熵与载荷-时间曲线合理划分木材的不同损伤阶段,在此基础上,固定时间间隔对超过阈值的明显 AE 信号进行频域分析,进而客观地研究木材在弯曲破坏过程中不同损伤阶段的 AE 信号特征。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选择气干状态的榉木(阔叶材)和樟子松(针叶材)为试验材料,试件编号为 JM-1、JM-2 和 ZZS-1、ZZS-2。两类试件规格均为 600 mm(轴向)×60 mm(径向)×30 mm(弦向)。气干状态下榉木和樟子松试件的密度、绝对含水率分别为 0.705 g·cm⁻³、14.3% 和 0.458 g·cm⁻³、11.1%。采用 UTM5105 型电子万能力学试验机对试件进行三点弯曲加载试验,加载速度为 2 mm·min⁻¹,跨距设置为 250 mm。利用 NI USB-6366 采集设备及 Lab VIEW 软件自行搭建 2 通道高速数据采集系统,其中,所用传感器为带宽 22~220 kHz 的 SR-150N 单端谐振式 AE 传感器,同时该系统配置了增益为 40 dB 的 PAI 前端放大器,该放大器能有效放大 AE 传感器所检测的信号以实现 AE 信号的长距离传输。由文献[11-12]得知木材的 AE 信号最大频率约为 200 kHz,根据香农采样定理,为不失真地恢复模拟信号,采样频率 f_s 和信号最大频率 f_{\max} 之间应满足 $f_s \geq 2f_{\max}$,故本研究将每个 AE 信号采集通道的采样频率设置为 500 kHz,放大器输出电压范围设置为(-5 V, 5 V)。

1.2 试验方法

由图 1 可见,将传感器 S1、S2 间距 300 mm 放

置于试件上表面,其中传感器 S1 置于距离试件左端面 150 mm 处,通过万能力学试验机在传感器 S1 和传感器 S2 中间位置施加载荷进行三点弯曲试验。试验时,为保证传感器与试件充分耦合,在试件与传

感器之间涂上真空绝缘硅脂,以减少空气介质对试验结果的影响,并利用橡皮筋将传感器固定在试件表面以提供恒定的压力,确保信号采集的准确性。

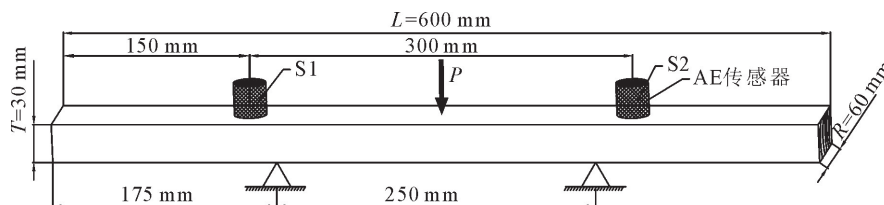


图 1 传感器布置

Fig. 1 Sensor layout diagram

受信号采集与传输过程中的噪声影响,采集的原始信号中存在大量的随机噪声信号,离散小波变换方法具有优良的去噪效果和时频局部化分析能力,可以实现信号去噪的同时重构 AE 信号波形。选用具有较高消失矩阶数的 daubechies 小波 (db10) 作为小波基函数对原始 AE 信号进行 5 层分解,原始信号采集过程中各通道采样频率 f_s 为 500 kHz,根据香农采样定理可知,AE 信号分析频率 $f_h = f_s/2 = 250$ kHz,即理论上可以有效辨识 0~250 kHz 的信号成分,又根据小波多分辨分析原理,小波分解后各层高频细节信号频段分别为 (125 kHz, 250 kHz)、(62.5 kHz, 125 kHz)、(31.25 kHz, 62.5 kHz)、(15.625 kHz, 31.25 kHz)、(7.8125 kHz, 15.625 kHz),……,因而只需要经过 5 层分解就能覆盖 SR-150N 单端谐振式 AE 传感器的全部测量频率范围。

1.3 AE 活动数信息熵

木材在损伤断裂的过程中包含有大量的 AE 信号,可以很好反映木材内部应力变化及其内部损伤情况。本研究以统计每秒间隔内超过阈值的次数作为 AE 活动计数,通过计算 AE 活动数信息熵来表征木材的损伤过程。由于 AE 信号的发生在时间上的分布具有随机特性,若将 AE 信号活动数视为 1 种信息,则根据信息论可知,AE 信号活动数信息熵能够客观反映材料在损伤断裂过程中应变能的集中释放时刻。

为确定 AE 阈值,在三点弯曲试验前,首先采集一段空白噪声信号,以所采集的噪声信号的最大分贝值作为 AE 阈值,认为小于此阈值的都是噪声信号,然后对超过阈值的 AE 信号每时间单位 $t=1$ s 进行 1 次 AE 活动数统计。由于试件在加载过程中持续时间较长,为从更小时间尺度上确定木材损伤断裂过程中的应变能集中释放时刻,将试验时间划分为若干个时长为 $T(T=k \cdot t, k \in N)$ 的子区间,并以各

子区间的 AE 活动数作为信息片段计算其信息熵。

木材在损伤断裂过程中所产生的 AE 源可视为一种离散信源,用随机变量 X 来描述信源输出的消息即 AE 活动数,则将 AE 源抽象后得到的关于每个子区间 AE 活动数的概率空间为

$$\begin{bmatrix} X \\ p(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & \cdots & a_k \\ p(a_1) & p(a_2) & p(a_3) & \cdots & p(a_k) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $p(a_i)$ ($i=1,2,3,\dots,k$) 为子区间内第 1,2,3, ..., k 个 t 时间单位 AE 源所产生的 AE 活动数 a_i 占整个子区间 AE 活动总数的比值,且每 t 时间单位 AE 活动数取值状态的概率 P_i 满足式(2)

$$\sum_{i=1}^k p(a_i) = 1 \quad (2)$$

式中: $0 < p(a_i) < 1$ 。

当 AE 源确定,相应的概率空间即确定。此时,各子区间内的 AE 活动数 a_i 已经发生,则 AE 活动数的自信息为

$$I(a_i) = -\log_2 p(a_i) \quad (3)$$

式中: $I(a_i)$ 为 AE 源所产生的 AE 活动数 a_i 所提供的信息量,不同的 AE 活动数对应的自信息是不同的,所以自信息 $I(a_i)$ 不能作为整个信源的总体信息测度,于是利用自信息 $I(a_i)$ 的数学期望作为信源的平均自信息量,即信息熵。C. E. Shannon^[13] 指出,熵可以将复杂的信息通过定量化表征进行简化处理,可以度量某一状态信息的确定性。因此本研究中,使用 AE 活动数出现的概率 P_i 来表征每秒的 AE 活动数值出现的不确定性。上述概率空间中所有结果 a_i 的平均自信息可以用信息熵表示:

$$H(X) = E \left[-\log_2 p(a_i) \right] = -\sum_{i=1}^k P(a_i) \log_2 P(a_i) \quad (4)$$

式中: $H(X)$ 表示 AE 源产生 AE 信号后每个子区间的 AE 活动数所提供的平均信息量并反映其随机性^[14]。信息熵 $H(X)$ 为单调递减函数,若 H

(X) 越小,则每个子区间所产生的 AE 活动数其随机性越弱,即确定性越强。与此同时,平均信息熵^[15]为评价木材损伤断裂过程中 AE 源所产生 AE 信号随机性的参考依据。当某子时间区间的 AE 活动数信息熵明显低于平均信息熵,说明在该区间 AE 信号发生的确定性较强,即木材损伤过程中应变在该子时间区间内发生了集中释放。

2 结果与分析

2.1 木材损伤阶段辨识

在三点弯曲破坏试验中,由于所采集的 AE 信号数据量较大,试件的破坏过程规律相似,且同一试件上的传感器 S1 和传感器 S2 所采集信号的时频域特征类似,因此本研究以试件 JM-2 和 ZZS-2 上的传感器 S2 所采集到的原始信号为例加以分析。对传感器 S2 所采集的空白噪声信号进行时域分析可知,其所采集的噪声信号的最大电压值为 0.012 6 V(48 dB),故本研究将 0.012 6 V 设置为统计 AE 活动数的阈值。在采用小波分析将传感器 S2 所采集的原始 AE 信号降噪并重构后,对 AE 信号每间

隔 $t=1$ s 进行 1 次 AE 活动数统计。

榉木和樟子松在损伤断裂过程中,两试件对应的载荷-时间变化曲线及每秒的 AE 活动数见图 2。由图 2 可知,榉木和樟子松试件受压过程历时分别为 360 s 和 420 s,以 $T=2$ s 为一个子时间区间对两试件的试验时间进行划分,故榉木和樟子松的试验时间分别划分为 180 和 210 个子时间区间,则每个子时间区间 AE 活动数的概率空间为

$$\begin{bmatrix} X \\ p(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ p(a_1) & p(a_2) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $p(a_i)$ ($i=1,2$) 为子时间区间内第 1、2 秒时 AE 源所产生的 AE 活动数 a_i 分别占整个子区间 AE 活动总数的比值,即发生概率,则该区间的信息熵为

$$H(X) = E \left[l_n \frac{1}{p(a_i)} \right] = - \sum_{i=1}^2 P(a_i) l_n P(a_i) \quad (6)$$

榉木和樟子松整个受压过程的 180 个和 210 个子时间区间的 AE 活动数信息熵统计分别见图 3 和图 4,相应的平均信息熵 $\bar{H}_{T=2} = 0.5$ 。

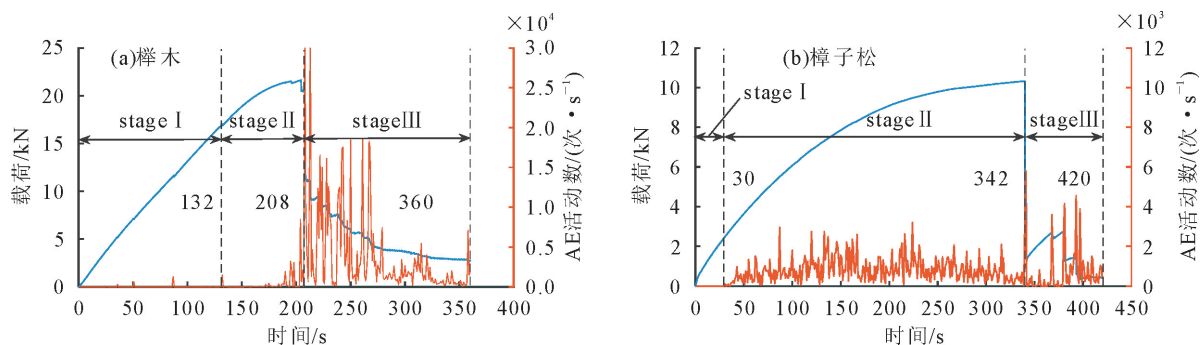


图2 载荷-时间-AE活动数曲线

Fig. 2 Load-time-AE activity number curve

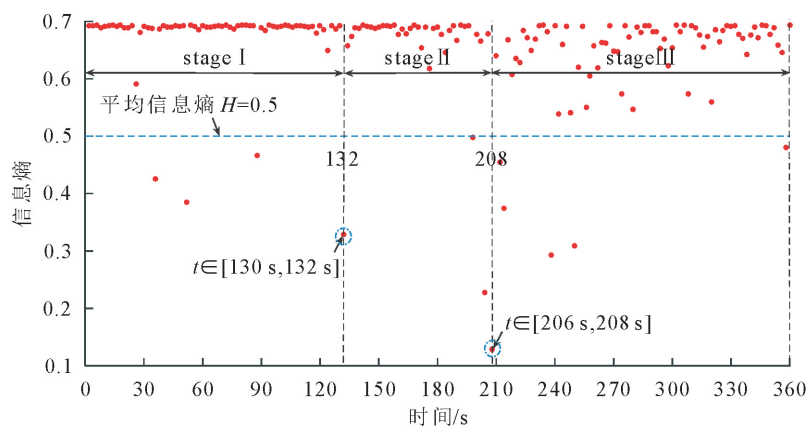


图3 榉木 AE 活动数信息熵

Fig. 3 Information entropy of AE activity of beech

由图 2(a) 中的载荷-时间曲线可知,榉木在 0~100 s 其载荷随时间明显呈线性增加,在 100~150 s

的某个时刻,载荷-时间曲线开始由线性关系转变为非线性关系,说明榉木在 100~150 s 由线性变形阶

段转变为非线性变形阶段。而在 208 s 时,载荷发生突变,说明在此刻榉木开始发生显著宏观断裂。再结合图 3 可知,在 100~150 s,子区间的信息熵最低且低于平均信息熵的时刻为 $t \in [130 \text{ s}, 132 \text{ s}]$ 。由此可知,榉木在 $t \in [130 \text{ s}, 132 \text{ s}]$ 时刻,由线性变形阶段过渡到非线性变形阶段。

与此同时,由图 2(b)中的载荷-时间曲线可知,樟子松在 0~20 s 载荷随时间明显呈线性增加,在 20~50 s 的某个时刻,载荷-时间曲线开始由线性关系转变为非线性关系,即由线性变形阶段转变为非

线性变形阶段,并在 342 s 时载荷发生突变,开始发生显著宏观断裂。再结合图 4 可知,在 20~50 s,子区间的信息熵最低且低于平均信息熵的时刻为 $t \in [28 \text{ s}, 30 \text{ s}]$ 。所以榉木在 $t \in [28 \text{ s}, 30 \text{ s}]$ 时刻,由线性变形阶段过渡到非线性变形阶段。

由此,本研究将榉木和樟子松在弯曲载荷作用下的破坏过程分为 3 个典型阶段:线性变形阶段、非线性变形阶段、宏观断裂阶段,分别对应图 2 中的 stage I、stage II、stage III。两试件对应的原始 AE 信号波形见图 5。

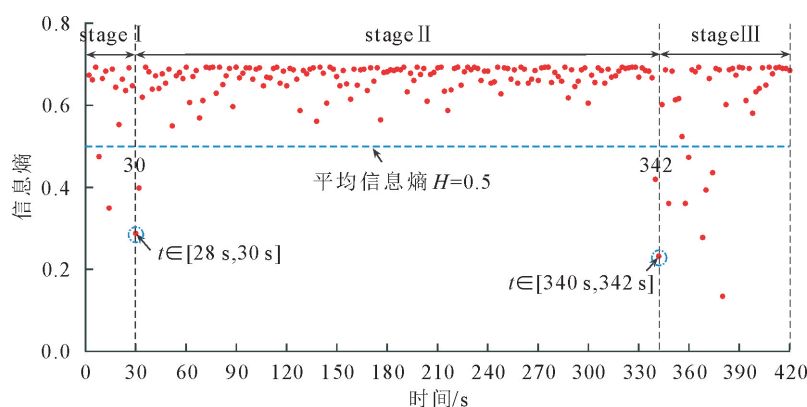


图 4 樟子松 AE 活动数信息熵

Fig. 4 Information entropy of AE activity number of *P. sylvestris* var. *mongolica* wood

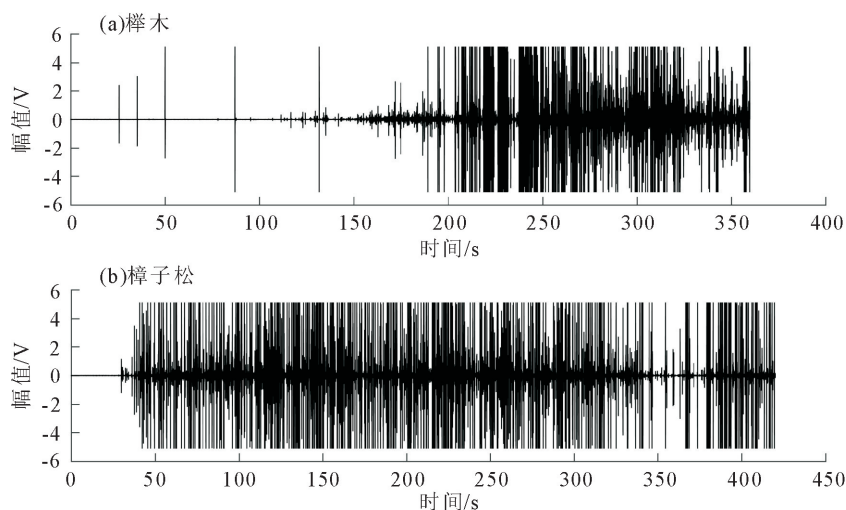


图 5 原始 AE 信号波形

Fig. 5 Original AE signal wave form

由图 2、图 5 可知,榉木在 0~132 s 内处于线性变形阶段,该阶段主要发生线弹性变形,对应的载荷-时间曲线上存在几次微小波动,原始 AE 波形中也存在高幅值的 AE 信号,说明在该阶段材料内部有微裂纹产生;在 132~208 s 内,榉木处于非线性变形阶段,有显著的塑性变形,原始 AE 信号波形中出现了许多低幅值的突发型信号,同时由于内部微裂纹的不断扩展,在该阶段内有一些高幅值 AE 现

象产生。大约在 205 s 时,榉木的载荷-时间曲线出现了 1 次显著的下陷,此时榉木发生了宏观损伤;在 208 s 时,施加的载荷达到了榉木所能承受的强度极限,对应的 AE 活动数达到最大值,榉木开始发生宏观断裂,同时也伴随着新的微裂纹成核与扩展,因此 AE 信号原始波形中的高幅值和低幅值突发型信号交错出现。

与榉木相比,樟子松在线性变形阶段(0~30 s)

持续的时间较短,前期没有任何显著的 AE 信号产生,后期开始有微裂纹产生,出现了一些低幅值的 AE 现象;在樟子松的非线性变形阶段(30~342 s),所产生的 AE 现象与榉木相比仍具有较大的差异:除了有许多低幅值的 AE 信号,还有显著的高幅值 AE 信号产生。这是因为与榉木相比,樟子松的纤维较长,受纤维桥接现象的影响,其非线性特性比较明显^[16],具有更强的韧性,在载荷作用下大量的纤维相互拉扯并出现了微观韧性断裂。因此,原始 AE 信号中有大量的低幅值和高幅值 AE 信号。而榉木由于更具有脆性,在非线性阶段主要是木质纤维之间的相互拉扯出现微观脆性断裂现象,所以榉木在非线性阶段产生的高幅值 AE 信号较樟子松少

得多。到了宏观断裂阶段(342~420 s),由于樟子松内部大量微裂纹的扩展以及新裂纹的形成,导致其发生显著宏观断裂,此时所产生的 AE 信号与榉木相似,均为大量的高幅值 AE 信号。

2.2 不同损伤阶段的 AE 信号频域特征

根据无 AE 发生时的信号幅值确定 AE 阈值,对固定时间内超过阈值的明显 AE 信号进行频域分析,找出其 AE 信号的主频,从而得到木材在弯曲破坏过程中 AE 信号主频在时间上的分布。为从更小时间尺度确定 AE 信号的主频,每间隔固定时间 10 ms 进行一次频域分析,图 6、图 7 分别为榉木和樟子松试件在弯曲破坏过程中不同损伤阶段的 AE 信号主频随时间的分布情况。

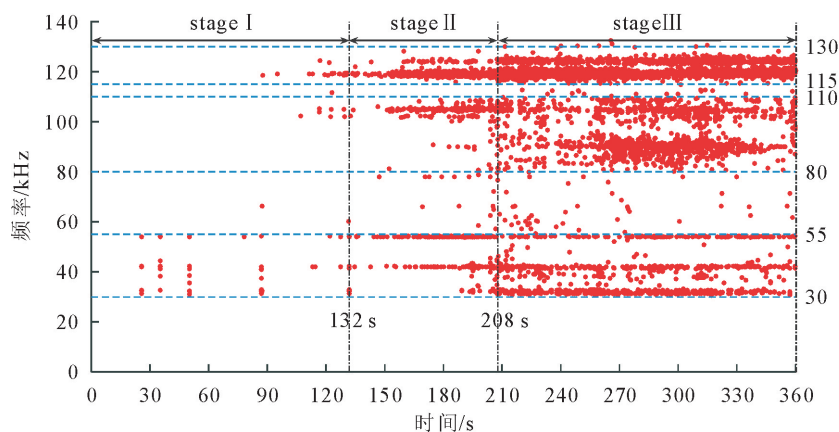


图6 榉木不同损伤阶段 AE 信号主频分布

Fig. 6 Main frequency distribution of AE signal of beech at different damage stages

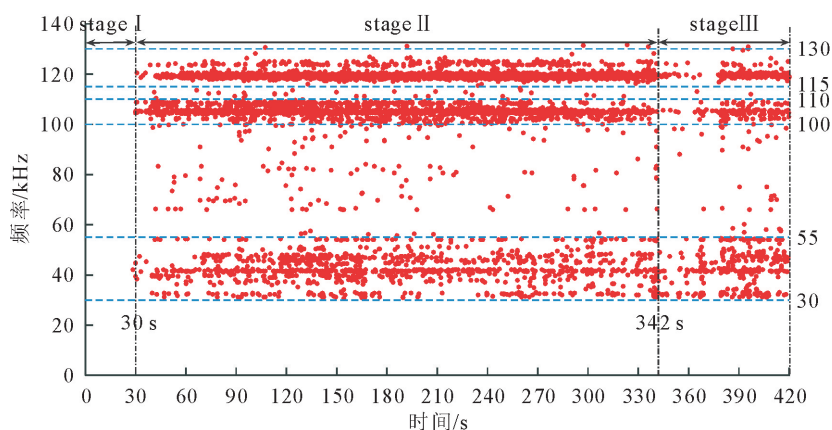


图7 樟子松不同损伤阶段 AE 信号主频分布

Fig. 7 Dominant frequency distribution of AE signals in different damage stages of *P. sylvestris* var. *mongolica*

由图 6 可知,在线性变形阶段,榉木所产生的 AE 信号以低频为主,集中在 30~55 kHz 低频段内。到了非线性变形阶段,由于材料形变及内部微观拉裂,因而产生的 AE 信号中除了存在 30~55 kHz 的低频信号外,还出现了微观断裂引起的 100~110 kHz 和 115~130 kHz 的高频信号成分。而到了宏观断裂阶段,在外部载荷的作用下,榉木发

生了显著的宏观脆性断裂,所产生的 AE 信号主要表现为高频高能量,因而产生了大量的 80~110 kHz 和 115~130 kHz 频段的高频信号。此外,由于榉木受到外部压力的作用,其内部始终存在着纤维断裂现象,这种现象在榉木形变加大时愈发明显。因此,在榉木的非线性变形阶段和宏观断裂阶段均存在 30~55 kHz 的低频信号成分,而这种低频信

号在宏观断裂阶段变得更多。

由图 5 和图 7 可知,在线性变形阶段,樟子松试件所产生的 AE 信号较少,仅存在少量的 40 kHz 左右的低频信号成分,这是因为樟子松的纤维长于榉木,相对于榉木来说更具有韧性,在线性变形阶段仅存在少量的纤维拉扯现象。到了非线性变形阶段,樟子松试件开始产生大量的 AE 信号,与榉木相似,既存在 30~55 kHz 的低频信号,还出现了微观断裂引起的 100~110 kHz 和 115~130 kHz 的高频信号成分。与榉木不同的是,在非线性阶段,樟子松

试件产生的 AE 信号更多,对比图 2 也可以明显看出。相比榉木而言,樟子松材质松脆,内部存在众多空腔,承载能力相对较低,且其纤维较长,更具有韧性,受到挤压的木质纤维并未发生显著的断裂结果,更多的是木质纤维的线性变形和极其微弱的微观拉扯。随着时间的推移,樟子松试件达到其强度极限,发生了宏观断裂。由图 7 可以明显看出,在宏观断裂的前期,试件所产生的 AE 信号明显减少,但是在载荷的持续作用下,到了宏观断裂后期 AE 信号逐渐变多,仍然是 3 个频段的 AE 信号共存。

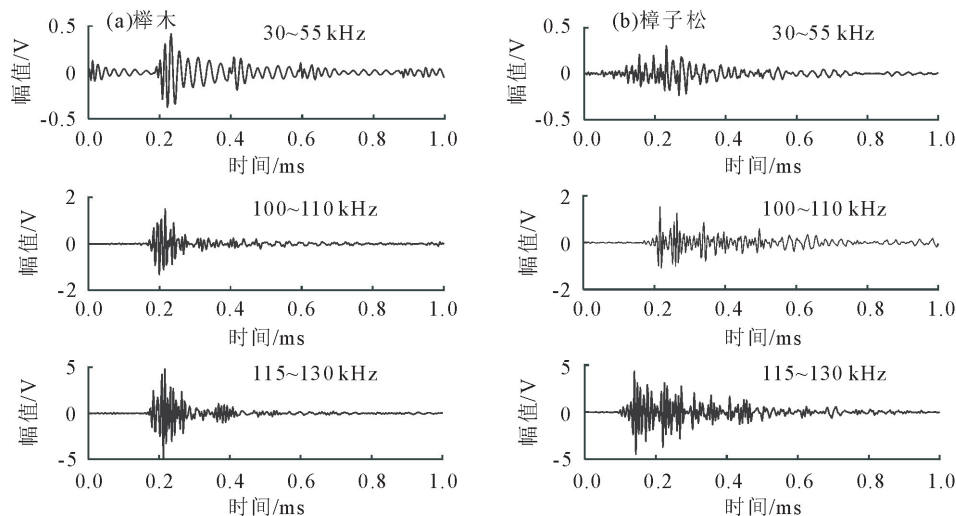


图 8 不同频段的 AE 信号时域波形

Fig. 8 Time domain waveform of AE signal in different frequency bands

图 8 为榉木和樟子松试件在损伤断裂过程中 3 个频段(30~55、100~110、115~130 kHz)的 AE 信号时域波形。由图 8 可以看出,榉木和樟子松在损伤断裂过程中,低频段的 AE 信号主要表现为低幅值、低能量,而高频段的 AE 信号对应的信号幅值较大。另一方面可以看出,榉木和樟子松所产生的 AE 信号在时域上也表现出一定的差异性,樟子松所产生的 AE 信号从时域上看相对于榉木来说更具有连续性,持续时间较长,而榉木由于更具有脆性,所产生的 AE 信号在时域上更多地表现为单个的突发型信号。

3 结论与讨论

木材在三点弯曲破坏过程中,不同损伤断裂水平下对应于不同程度的能量释放,产生丰富的 AE 信号,将 AE 活动数信息熵与载荷-时间曲线相结合划分木材的不同损伤阶段,并间隔固定时间对 AE 信号进行频率分析,获得木材弯曲破坏过程的 AE 信号频率分布情况。

1) AE 活动数信息熵能够准确反映应变能释放的集中程度,为木材损伤断裂水平评价提供了客观

依据。木材的损伤断裂过程中,应变能在线性变形到非线性变形的过渡阶段及非线性变形到宏观断裂的过渡阶段均发生了集中释放,AE 活动数信息熵均明显低于平均信息熵。

2) 木材在损伤断裂过程中主要产生 3 类 AE 信号。线性变形阶段,榉木和樟子松对应的 AE 信号特征均表现为低幅值、低频率,主要集中在 30~55 kHz 的低频范围内;非线性变形和宏观断裂阶段,榉木和樟子松所产生的 AE 信号中既存在大量的 30~55 kHz 低频信号成分,又存在 100~110 kHz 和 115~130 kHz 的高频信号。

3) 榉木和樟子松在损伤断裂过程中所产生的 AE 信号在时频域上表现出一定的差异性:榉木相对于樟子松具有更强的线弹性和脆性,所产生的 AE 信号在时域上更多地表现为单个的突发型信号,而樟子松更多地表现为连续型信号。此外,在宏观断裂阶段,樟子松试件所产生的 AE 信号中还存在 80~100 kHz 的中高频信号成分。

本研究提供了一种寻找木材损伤过程中应变能集中释放时刻的方法,研究了木材不同损伤阶段的 AE 信号特性,未来可进一步研究含水率、密度对木

材损伤过程中 AE 信号特性的影响。

参考文献:

- [1] FRANZISKA B, MICHAELA Z, SERGIO J, *et al.* Damage evolution in wood: synchrotron radiation micro-computed tomography (SR μ CT) as a complementary tool for interpreting acoustic emission (AE) behavior[J]. *Holzforschung*, 2015, 69(8): 1015-1025.
- [2] 丁锐, 罗蕊寒, 赖菲, 等. 基于奇异谱和相关性分析的木材声发射源直线定位算法研究[J]. *西北林学院学报*, 2021, 36(5): 173-178, 245.
DING R, LUO R H, LAI F, *et al.* Straight line location algorithm of wood acoustic emission source based on singular spectrum analysis and signal correlation analysis methods[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2021, 36(5): 173-178, 245. (in Chinese)
- [3] LI M, WANG M, DING R, *et al.* Study of acoustic emission propagation characteristics and energy attenuation of surface transverse wave and internal longitudinal wave of wood[J]. *Wood Sci. Technol.*, 2021, 55: 1619-1637.
- [4] GUO Y, ZHU S, CHEN Y, *et al.* Acoustic emission-based study to characterize the crack initiation point of wood fiber/HDPE composites. [J]. *Polymers*, 2019, 11(4): 701.
- [5] MOHAMMADI R, SAEEDIFAR M, TOUDESHPY H H, *et al.* Prediction of delamination growth in carbon/epoxy composites using a novel acoustic emission-based approach[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2015, 34(11): 868-878.
- [6] RESCALVO F J, RODRÍGUEZ M, BRAVO R, *et al.* Acoustic emission and numerical analysis of pine beams retrofitted with FRP and poplar wood[J]. *Materials*, 2020, 13(2): 435-446.
- [7] 鞠双, 李明, 罗廷芳, 等. 依据瞬时频率的木材损伤过程声发射信号辨识[J]. *东北林业大学学报*, 2020, 48(2): 87-92.
JU S, LI M, LUO T F, *et al.* Acoustic emission signal identification of wood damage process with instantaneous frequency [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2020, 48(2): 87-92. (in Chinese)
- [8] 董红平, 李明. 基于瞬时频率的木材声发射事件辨识与损伤监测[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(2): 229-234.
DONG H P, LI M. Wood acoustic emission event identification based on instantaneous frequency and damage monitor [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(2): 229-234. (in Chinese)
- [9] ANDO K, HIRASHIMA Y, SUGIHARA M, *et al.* Microscopic processes of shearing fracture of old wood, examined using the acoustic emission technique[J]. *Journal of Wood Science*, 2006, 52(52): 483-489.
- [10] REITERER A, STANZL-TSCHEGG S, TSCHEGG E. Mode I fracture and acoustic emission of softwood and hardwood [J]. *Wood Science and Technology*, 2000, 34: 417-430.
- [11] 李杨, 罗廷芳, 于帅帅, 等. 花旗松胶合木梁声发射信号及其传播特征研究[J]. *西北林学院学报*, 2017, 32(5): 197-201, 251.
LI Y, LUO T F, YU S S, *et al.* Signal propagation characteristics of acoustic emission and douglas fir glulam beams [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2017, 32(5): 197-201, 251. (in Chinese)
- [12] 申珂楠, 赵海龙, 丁馨曾, 等. 木材损伤断裂过程声发射信号小波析取[J]. *河南科技大学学报: 自然科学版*, 2015, 36(3): 33-37, 6.
SHEN K N, ZHAO H L, DING X Z, *et al.* Acoustic emission signal wavelet disjunction in wood damage and fracture process [J]. *Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science*, 2015, 36(3): 33-37, 6. (in Chinese)
- [13] SHANNON C E. A mathematical theory of communication [J]. *Bell System Technical Journal*, 1949, 27(4): 379-423.
- [14] 任松, 王乐, 谢凯楠, 等. 基于声发射计数信息熵的页岩拉压破坏临界特征试验研究[J]. *重庆交通大学学报: 自然科学版*, 2020, 39(8): 101-107.
REN S, WANG L, XIE K N, *et al.* Experimental study on critical characteristics of shale tension compression failure based on acoustic emission counting information entropy [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Sciences*, 2020, 39(8): 101-107. (in Chinese)
- [15] 丁勇. 离散型随机变量的平均信息熵[J]. *数学的实践与认识*, 2012, 42(18): 141-146.
DING Y. Mean information entropy for discrete random variables [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2012, 42(18): 141-146. (in Chinese)
- [16] REITERER A, SINN G, STANZL-TSCHEGG S E. Fracture characteristics of different wood species under mode I loading perpendicular to the grain [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2002, 332(1/2): 29-36.