

胶合木表面声发射信号特征与传播规律研究

董红平

浙江东方职业技术学院

DOI:10.12238/pe.v2i2.7140

[摘要] 本研究以声发射(AE)技术对胶合木实施无损检测,研究该材料表层的AE信号频域特征,以及沿顺纹和横纹方向上AE信号的传播规律。试验步骤:①采用铅芯折断方式在胶合木试件表面施加人工AE源,采样频率设定为500kHz。②对原始信号实施三层小波变换处理,通过分析每层小波分解后的高频信号来获取AE信号的频域特征。③运用信号相关性分析与时差定位方法计算AE信号传播速率,并依此探讨AE信号在传播过程中能量减损的特性。试验结果:胶合板表面的AE信号主要包含三种不同的频段,且在传递过程有着显著的能量衰减与信号频率变化现象。

[关键词] 胶合木; 马尾松; 声发射; 信号特征; 传播规律

中图分类号: S791.248 文献标识码: A

Research on the Characteristics and Propagation Law of Surface Acoustic Emission Signals from Glued Wood

Hongping Dong

Zhejiang Oriental Vocational and Technical College

[Abstract] This study uses acoustic emission (AE) technology to perform non-destructive testing on laminated wood, studying the frequency domain characteristics of AE signals on the surface of the material, as well as the propagation laws of AE signals along the longitudinal and transverse directions. Test steps:①Apply an artificial AE source to the surface of the glued wood specimen using the lead core breaking method, and set the sampling frequency to 500kHz.②Three layers of wavelet transform are applied to the original signal, and the frequency domain characteristics of the AE signal are obtained by analyzing the high-frequency signal after each layer of wavelet decomposition Using signal correlation analysis and time difference localization methods to calculate the propagation rate of AE signals, and exploring the characteristics of energy loss during the propagation process of AE signals. Experimental results: The AE signals on the surface of plywood mainly consist of three different frequency bands, and there is a significant energy attenuation and signal frequency variation phenomenon during the transmission process.

[Key words] glued wood; Pinus massoniana; Acoustic emission; Signal characteristics; Law of dissemination

胶合木(glulam)作为现代建筑领域中主要的承重材料,其承受日常荷载时的稳定性和应力应变状态直接影响到建筑结构的安全性和耐久性。采用声发射检测(AET, Acoustic Emission Test)能有效监测胶合木动态应力变化。国内外研究学者普遍采用AET事件幅值、振动次数、累计能量等参数来判断木料及木制品的损伤程度^[1]。目前,AET已经被用于木材干燥过程的开裂预测^[2-3]、确定刨花板弹性极限点位置^[4]、层积材拉伸过程损伤监测、木材动态载荷下纤维断裂临界点预测^[5-6]、标定木材损伤过程的断裂过程区^[7]等方面。从已有研究可知,软木开裂时声发射现象增多,伴随更多的微裂,而且随着温度升高,发射频率会有所降低;当木材发生塑性断裂时,则会释放出大量高振幅

的声发射波。

然而,木材这种多孔且不均一的材料各向异性,AE信号在传播过程中表现出不同方向上的显著特征差别。因而,简单以信号幅度大小来判定AE事件显得不够充分。实际上,分析AE信号波形可以揭示AE信号在时频域内真实的特征,但因测量过程和环境噪声的影响,AE信号往往混淆在初始检测信号之中,因此AE信号波形的重构变得尤为关键,它也是AET在木材无损检测应用中的一个核心技术领域。目前对于木材AE信号波形重构的主流方法包括小波分析方法^[8]、经验模态分析法^[9]、中值滤波和奇异值分解混合降噪法^[10]。AE信号波形特征在木材AE信号源定位^[11]、实木AE信号特征分析^[12]等领域得以应用。

AET通常用于评估实木及木制合成材料的损害状况,但对于胶合板而言,此技术的应用性研究还不够深入。鉴于此,本研究将采用铅芯折断的方式在胶合木表面人为施加AE源,并借助小波分析方法探究AE信号在胶合木表面沿顺纹和横纹两个方向的时频域特征,依据信号相关性分析与时差定位方法,计算AE信号传播速率,归纳AE信号在传播过程中能量减损的特性。

1 材料与方法

1.1 实验材料

试验所用的原材料源于国内一家林产品公司生产的胶合板,这种胶合板是用尺寸较小的马尾松(*Pinus massoniana* Lamb)锯材制成,采用EPI(水性高分子异氰酸酯)粘合剂顺纹拼接而成,样本规格为500mm×500mm×15mm(长度×宽度×厚度)。

当前研究显示,木质材料的AE信号主要集中在50~200kHz之间。鉴于此,本研究选定了频带宽度为22~220kHz的SR150N类型声发射单端谐振型传感器,并且配置了增益为40dB前置放大器。遵循香农采样理论,AE信号的采样频率设定在440kHz以上。因此,本研究采用了NI USB-6366型号的高速数据采集卡进行信号采集,该数据采集卡拥有8路模拟输入通道,单通道最大采样率为2MHz。在具体的实验操作中,搭建了一个4通道的信号采集平台,各通道设定的采样频率是500kHz,而采集信号的电压采集范围为(-5V, 5V)。为了保证实验数据的传输和存储质量,基于LabVIEW软件设计了相应的AE信号显示与存储程序,采用文本形式存储实验过程的AE信号,以便于后继在MATLAB中的进一步分析研究,该部分内容不是本文研究的重点,因此不再详细描述。

1.2 实验方法

本研究聚焦于探讨木质材料中声波沿着顺纹和横纹两个不同方向的传递特性,因为这两个方向上传递速度有所不同。实验时采用铅芯折断的方式制造人工声发射源,操作过程是:将直径为0.5mm的铅笔芯与试件表面成30°角放置,并在距离接触点25mm处将其折断,详见图1。

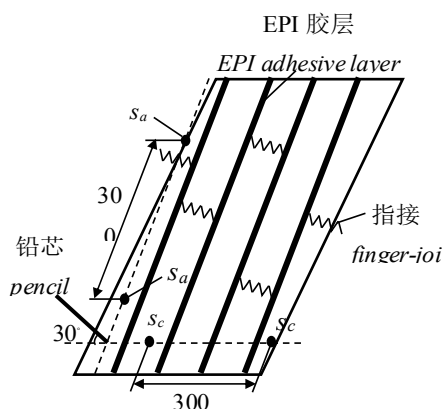


图1 实验方案示意图

本研究采用时差定位法计算AE信号在试件表面的传播速率。具体做法是,布置两个间隔距离为 Δs 的AE传感器,经过信号波形的分析,记录下AE信号到达这两个传感器的时差 Δt ,然后

按照公式 $v = \Delta s / \Delta t$ 计算出AE波的传播速度 v 。本文设定 Δs 为300mm。此外,为了有效避免噪声影响,首先对AE波进行了小波降噪处理,然后采用相关性分析的方法精确定时差 Δt 。图1中顺纹方向的两个AE传感器分别用sa1和sa2表示,而横纹方向的检测器用sc1和sc2表示。

在试验过程中所获得的AE数据,由于受到采集及传输环节噪声干扰,掺杂了大量的噪声元素。鉴于此状况,本研究采用了小波变换法对原始数据进行纯化处理,以便恢复出具有参考价值的AE信号波形。实验有意制造了铅芯折断所引起的AE信号,此类信号相对于背景干扰,应更明显地在小波分析的高频细节部分中体现出来。除此之外,本研究还选用了拥有较高消失矩的ddaubechies小波(db10)作为主要的小波分析函数,目的在于提高小波分析的频域局部化能力。

AE信号通过小波变换,逐级分离低频与高频信号。其中高频部分是细节信号。鉴于本研究所采集的信号样本以500kHz为采样频率,根据香农定理,可侦测的AE信号最高频率为250kHz。考虑到小波变换能提供多层次解析,在连续的解构过程中,每层小波分解所对应的高频信号频率范围依次为:(125kHz, 250kHz), (62.5kHz, 125kHz), (31.25kHz, 62.5kHz), (15.625kHz, 31.25kHz)等。实验使用的型号为SR150N的声发射探测器,其可靠的运行频带介于22kHz与220kHz之间。因此,通过进行三级小波解构,能够覆盖必要的AE信号频率变化范围。

2 结果与分析

2.1 顺纹方向AE信号特征

顺纹方向的两个AE传感器sa1和sa2采集的原始信号波形如图2所示。

sa1和sa2两个信号的频谱图如图3所示,能观察到其能量大多聚焦于10千赫兹以下区域,此部分信号主要由噪声构成。鉴于将AE信号以铅芯折断方式刻意引入,其持续时长甚为短暂,导致其在原信号的频谱图上难以显著辨识。

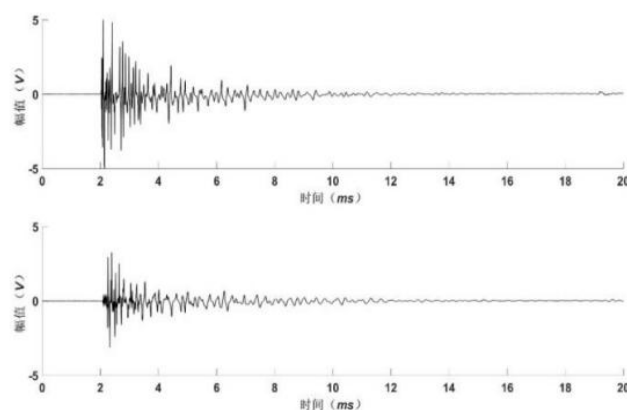


图2 顺纹方向的原始AE信号

综上所述,AE信号波幅显著,在时域波形中能够直观分辨出AE事件,然而,AE信号存在的时间极短,导致在进行频谱分析时无法直接辨识。有鉴于此,本研究利用小波分析技术对原始信号

进行处理,以构建AE信号模型,并将信号sa1和sa2的通过三阶小波分解信号分别如图4、图5所示。

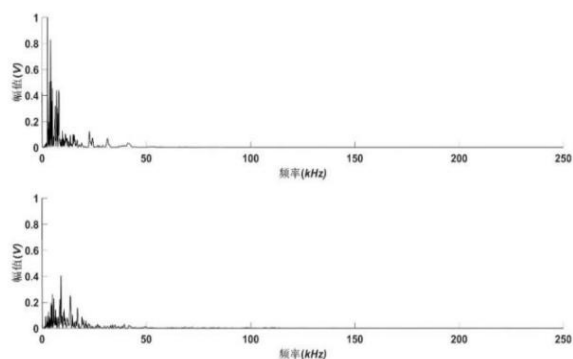


图3 顺纹方向AE信号频谱图

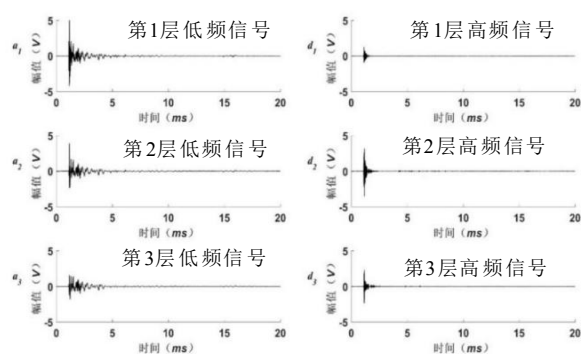


图4 sa1信号的小波分解

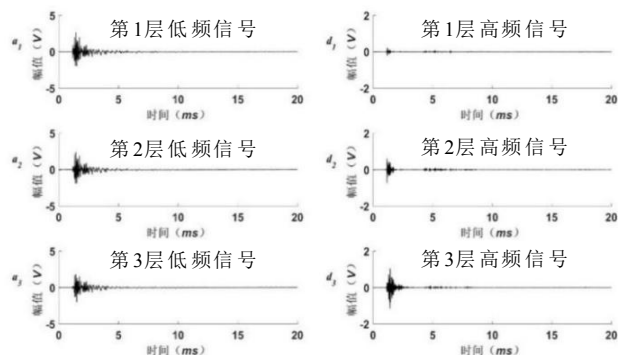


图5 sa2信号的小波分解

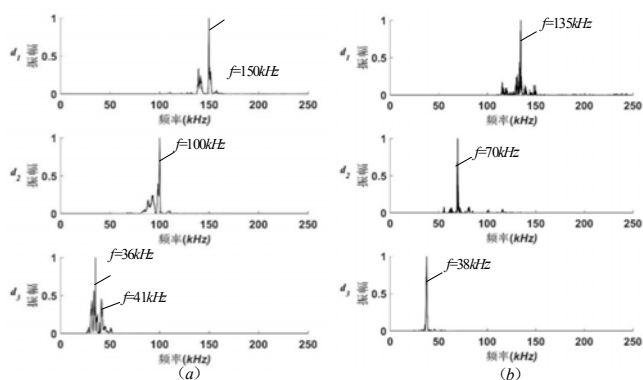


图6 各层高频信号的频谱图 (a)sa1信号; (b)sa2信号

图中左侧为各层小波转换后的低频部分,右侧是高频部分。鉴于AE信号主要反映在小波变换的高频区域,故对sa1和sa2的信号经小波变换后的高频部分进行频域分析,相应的频谱图如图6所示。从频谱图中可以观察到,AE信号主要由三种高频成分构成,sa1的3个AE信号的主频则分别为150kHz、100kHz、36kHz;而sa2的三个AE信号的主频分别为135kHz、70kHz、38kHz。通过对比分析发现,sa2的AE信号频率相对更集中。这一结果表明,在胶合木表面传播时,AE信号的频率会出现改变,尤其是高频AE信号较为明显地倾向于降低,且信号的频率分布趋向集中。

比较图4和图5中对应的sa1和sa2的3个AE信号时域波形发现,sa1信号中对应中心频率在150 kHz和100kHz的AE信号衰减非常明显,中心频率在36kHz的AE信号衰减相对较慢。

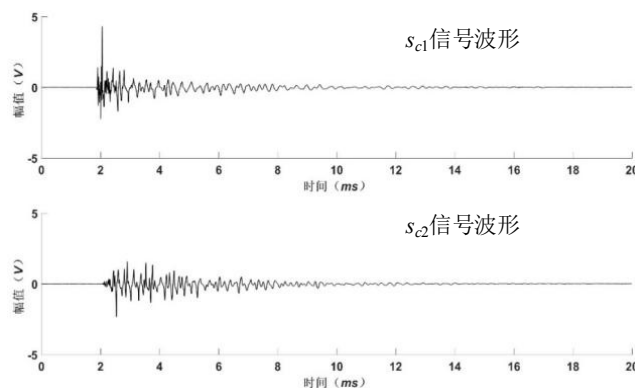


图7 横纹方向的原始AE信号

2.2 横纹方向AE信号特征

横纹方向的两个AE传感器sc1和sc2捕捉到的初始波形图如图7所示,将两个波形分别标示:

为sc1和sc2。与顺纹方向不同,sc1和sc2信号主要是由频率低于15kHz的噪声构成,如图8所示。

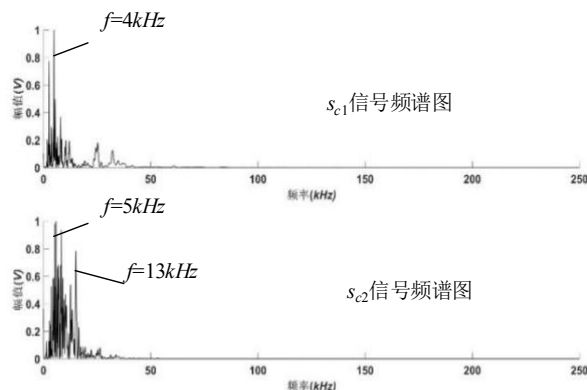


图8 横纹方向AE信号频谱图

信号sc1和sc2的3层小波分解信号分别如图9、图10所示,对信号sc1和sc2小波分解后的高频信号进行频域分析,相应的频谱图如图11所示。从频谱图中可以看出AE信号也主要由3类高频信号组成,其中sc1的3个AE信号的中心频率是173kHz、70kHz、42kHz;sc2的3个AE信号的中心频率是143kHz、67kHz、39kHz。

与顺纹方向AE信号的传播过程类似,前两个较高频率的AE信号衰减更快,比较图6和图11可以发现,与顺纹方向AE信号特征不同,横纹方向每一类AE信号包含的内容更加“丰富”,这主要是AE信号在横纹方向通过的EPI胶层更多,因此,最终的AE信号除了在木材中的传播规律,还体现了在胶层中的传播特性。

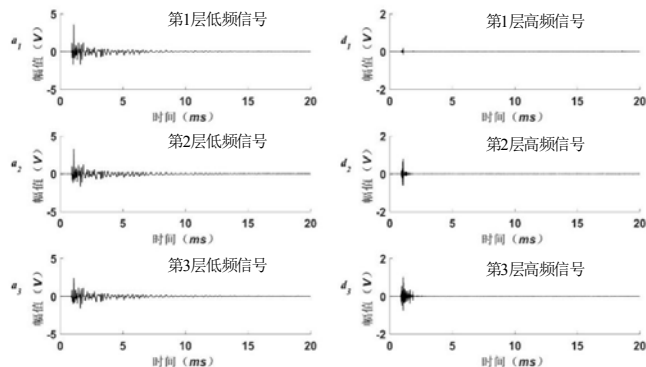


图9 sc1信号的小波分解

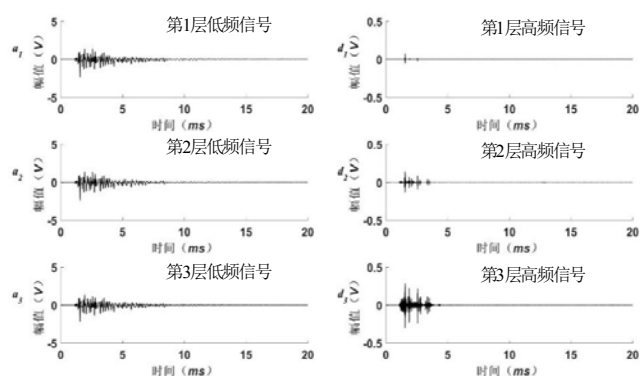


图10 sc2信号的小波分解

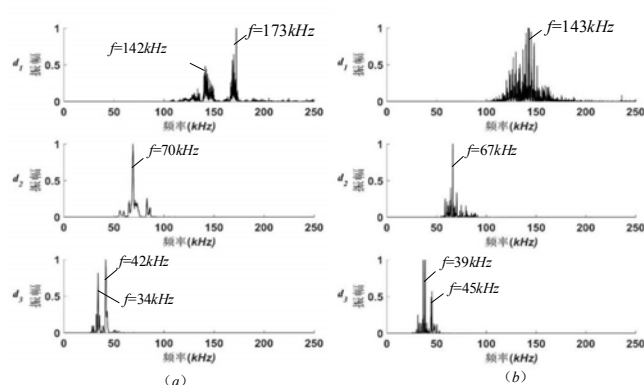


图11 各层高频信号的频谱图 (a) sc1信号; (b) sc2信号

2.3 顺纹和横纹方向AE信号传播规律

本研究通过时差定位技术测量AE波在胶合木表面两个方向上的传播速率,核心步骤是测算AE信号沿既定间隔传播所需的时间差 Δt 。因为本文采用了铅芯折断方式制造人工AE源,所以理论上可以将两个传感器所采集信号波形的峰值差视为 Δt 。通过以上详细分析可知,AE信号实际上是三种不同频段的信号混合体。在信号的传播途中,随着传播距离的增加,AE信号很可能因为背景噪音而难以识别,如图9所示。在这种条件下,只依靠峰

值强度是无法准确判断AE信号产生的具体时刻的。因应AE信号中存在不可预测的噪声,本实验室因此选择采用信号的相关性分析来决定信号的时间差 Δt 。互相关函数主要描述两个信号的相似程度,信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的互相关函数定义为:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau)dt \quad (1)$$

遵循互相关函数定义,显然当 $\tau = \tau_0$ 时,该函数的绝对值 $|R_{xy}(\tau_0)|$ 会达到峰值。这表明,将信号 $y(t)$ 在时间维度上移位 τ_0 个时间单位,便能与信号 $x(t)$ 达到最高程度的匹配。基于此,通过相关函数可以推算AE信号在两个传感器之间的传播时差。例如,在分析顺纹方向上的两个传感器信号sa1和sa2时,可首先依照公式(1)计算出二者之间的互相关函数,然后求出函数绝对值取最大值时的 τ_0 值,此时得出的时间差 Δt 则正是 τ_0 。

鉴于三种不同频率分布的AE信号构成了实际观测到的AE数据,并在前文的分析中发现它们在传输时的振幅衰减显著的类型差异,故本研究采用相关性分析方法,分别测定这三类AE信号的传播时间差,并据此推算出各自的传播速度。表1和表2分别列出了3类AE信号在顺纹和横纹方向上的传播时差和传播速率,表中AEa1表示将sa1小波分解的第1层高频信号和sa2小波分解的第1层高频信号视为同一类AE信号时的分析计算结果,类似的,AEa2和AEa3分别对应于sa1和sa2各自小波分解的第2层和第3层高频信号,表2中的AEc1、AEc2和AEc3则分别对应着沿横纹方向的3类AE信号的分析计算结果。

从表1可以看出,3类AE信号在顺纹方向上的传播速率存在明显差异,其中频率较高的两类AE信号传播快于第3类AE信号,表2则显示3类AE信号在横纹方向上的传播速率不存在显著差异。从数值上看,3类AE信号在顺纹和横纹方向上的传播速率比值分别为3.8、3.8和2.6。

对比顺纹和横纹两个方向上的两个AE传感器的原始信号波形可以看出,随着传播距离的增加,信号幅值明显减小,也就意味着AE信号能量在传播过程中不断衰减。为了研究3类不同AE信号的组成关系以及各自在传播过程中的能量衰减情况,本文对原始信号和3类AE信号进行了能量大小和衰减分析。其中能量的大小用信号的功率表示,根据信号功率的定义,离散信号 $f(n)$ 的功率计算公式为:

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f(n) \quad (2)$$

相应的分析结果如表3和表4所示,表3中的sa代表对顺纹方向上原始信号sa1和sa2的能量分析结果,表4中的sc代表对横纹方向上原始信号sc1和sc2的能量分析结果。AEa和AEc分别表示全部3类AE信号的总能量。

根据表2的数据分析可以得出,在顺纹方向上,传感器sa1采集的原始信号中,全部3类AE信号的总能量仅占原始信号能量的

表1 顺纹方向与横纹方向 AE 信号传播速率比较

顺纹方向 AE 信号传播率		时差 $\Delta t(\mu s)$	距离 $\Delta s(m)$	速度 $v(m/s)$	横纹方向 AE 信号传播率		时差 $\Delta t(\mu s)$	距离 $\Delta s(m)$	速度 $v(m/s)$
	AE_{a1}	140	0.3	2143		AE_{c1}	536	0.3	560
	AE_{a2}	128	0.3	2344		AE_{c2}	484	0.3	620
	AE_{a3}	192	0.3	1563		AE_{c3}	496	0.3	605

表2 顺纹方向与横纹方向 AE 信号能量衰减比较

顺纹方向 AE 信号 能量衰减		功率(mW)		衰减倍 数	横纹方 向 AE 信 号能量 衰减		功率(mW)		衰减倍 数
		传感器 S_{a1}	传感器 S_{a2}				传感器 S_{c1}	传感器 S_{c2}	
	S_a	143.82	62.51	2.30		S_c	41.39	39.22	1.05
	AE_{a1}	2.28	0.05	45.18		AE_{c1}	0.40	0.04	10.00
	AE_{a2}	7.28	0.63	11.62		AE_{c2}	0.47	0.05	9.40
	AE_{a3}	15.71	5.96	2.64		AE_{c3}	6.70	1.34	5.00
	AE_a	25.27	6.64	3.80		AE_c	7.57	1.43	5.29

17.57%, 对应的在传感器sa2中占比10.62%, 其中第3类AE信号在sa1和sa2中分别占全部AE信号能量的62.17%和89.76%。同样根据表4的数据分析可知, 在横纹方向上, 全部3类AE信号的总能量分别占sc1和sc1的18.2%和3.65%, 其中第3类AE信号分别占全部AE信号总能量的88.51%和93.71%。

上述占比数据说明, 从能量的角度来看, AE信号在原始信号中的比重很小, 所以对原始信号进行简单的频谱分析, 根本无法获取AE信号的频率特征信息。此外, 虽然存在3类AE信号, 但是第3类AE信号(中心频率在40kHz左右)的能量是其他两类AE信号能量的十倍以上, 所以可以认为是AE信号的主要成分, 同时由于其他两类AE信号的能量衰减也明显快于此类AE信号, 因此可以将第3类AE信号的传播速率视为AE信号的传播速率。为此, 根据表1和表2的实验结果, 可以近似地得出AE信号在顺纹和横纹两个方向上的传播速率分别为1563m/s和605m/s, 它们的比值为2.6。

依据木质材料的传声特性, 当其密度固定不变的情况下, 顺纹传声速度 v_a 与横纹传声速度 v_c 满足以下关系:

$$\frac{v_a}{v_c} = \sqrt{\frac{E_a}{E_c}} \quad (3)$$

其中, E_a 和 E_c 分别是顺纹和横纹方向上的弹性模量, 通常松木的顺纹弹性模量大致为16000MPa, 横纹弹性模量大致为1000MPa, 两者的比率大概为4。尽管如此, AE信号在胶合木中的传播规律不仅受木材本身的影响, 还必须考虑同属高聚物的EPI胶合层的作用, 尤其是在横纹方向上, AE信号穿越的胶层远多于顺纹方向, 这进一步使得横纹方向上的频率特征更为复杂。根据AE在这两个方向上的传播速度之比来分析, 尽管AE信号在胶合木中的行为与在天然实木中的表现在本质上大致一致, 但是由于胶合层的影响, 其数值特性仍旧会有些许偏差。

3 结论

胶合木沿顺纹方向粘结以后, 获得了更为优越的力学性能, 其机械属性得到显著提升, 使其在当代木构建筑领域被广泛采用。监测胶合木的应力应变的动态变化, 确保其使用的安全性与持久性。而主动式AET作为一项材料无损检测的有效方式, 已为胶合木损伤探测提供了实用的手段。尽管如此, 对于胶合木的声发射信号特性与其传播机制的研究目前尚属早期阶段。基于此, 本研究通过在胶合木表面采用常规铅芯折断方式制造人工AE源, 以此探索AE信号在胶合木表面的传播特性, 并通过一系列实验, 归纳出以下的研究成果:

(1) 突发的AE信号虽然可能引起信号幅值的明显增加, 但鉴于此类AE信号通常持续时间极短, 并容易受到测量时噪音的影响, 它们在分析信号时占比并不高。因此, 只通过对收集的数据做频谱分析是不足以准确掌握AE信号的频域特征。本项研究应用小波变换, 有效地从原始信号里提取并重构AE信号频谱。

(2) 鉴于木材多孔而各向异性, AE信号在传播过程中既会出现能量显著衰减, 亦会使信号频率产生改变。尤其是, AE信号并非由单一频率成分构成。本研究涵盖了三种主要AE信号, 频率跨度从40kHz到170kHz。不同频段的AE信号在能量和传递速度上也各有不同, 当信号沿横纹传播时, 因途经多层胶合物, 胶层数目的增加使得AE信号在特征及传播规律上受到胶层的影响显著。

(3) AE信号在胶合木表面沿顺纹和横纹方向的传播过程基本符合木材的声学特性, 即沿顺纹方向传播的速率高于横纹方向, 但是由于受胶层的影响, 相应的传播速率的比值还与实木中的理论值存在一定偏差。

本研究经由试验初步总结了胶合板的AE信号特征与传播规律, 但对胶合木AE信号特征及传播的具体机制仍需展开更深层次的研究。探究AE信号在胶层中的传播机理是未来研究的重点所在, 此外, 胶合板内部AE信号的传播特性也构成了一个重要的研究方向。

[基金项目]

国家自然科学基金项目(32160345), 2022年度浙江省高等学

校国内访问学者“教师专业发展项目”基于应变能释放规律的木材损伤断裂机理研究(FX2022135)。

[参考文献]

- [1]郭晓磊, 郭勇, 胡伟. 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.
- [2]谢力生. 声发射法在木材干燥中的应用[J]. 林产工业, 2001, 28(3): 38-41.
- [3]丁小康, 张祥雪, 郝燕华. 木材干燥过程中声发射信号分析[J]. 木材工业, 2012, 26(3): 40-43.
- [4]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.
- [5]孙建平, 王逢瑚, 朱晓东. 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.
- [6]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.
- [7]邵卓平, 陈品, 查朝生. 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.
- [8]申珂楠, 赵海龙, 丁馨增. 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, (4): 125-129.
- [9]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.
- [10]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.
- [11]申珂楠, 丁馨增, 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, (4): 77-81.
- [12]于帅帅, 申丽娟, 李杨. 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.

作者简介:

董红平(1981--), 男, 汉族, 湖北天门人, 硕士研究生, 副教授, 研究方向: 声发射技术、电液控制、智能制造。