

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2021104

基于声发射的樟子松锯材表面横波与内部纵波传播特性及能量衰减规律

丁锐¹, 方赛银¹, 罗蕊寒¹, 赖菲¹, 杨洲凌¹, 黄长林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: 为研究不同声发射 (acoustic emission, AE) 模态的传播特性与能量衰减模式, 依据波动理论提出一种木材 AE 信号表面横波与内部纵波析取方法, 进而建立 AE 信号能量衰减模型。首先, 依据 ASTM-E976-2015 通过铅芯折断的方式在樟子松锯材表面产生 AE 源, 并在不同位置采集表面横波与内部纵波的 AE 原始信号, 采样频率设置为 500 kHz; 然后, 采用小波分析方法从原始信号中重构 AE 波形, 分析木材 AE 信号表面横波与内部纵波的传播特性; 最后, 通过指数函数拟合的方法, 构建表面横波与内部纵波能量衰减模型。结果表明: 表面横波与内部纵波在樟子松锯材中传播时 AE 能量均呈明显的指数衰减规律, 但在频率分布和传播速率上均有较大差异。表面横波在传播初始阶段主要分布在以 80.0 kHz 和 113.3 kHz 为中心的两个中高频段内, 随着其在木材表面的传播, 高频信号迅速衰减为低频信号。而内部纵波始终处于相对低频段内, 其平均传播速率约为表面横波的 4.6 倍。

关键词: 声发射; 樟子松锯材; 表面横波; 内部纵波; 小波分析; 能量衰减模型

中图分类号: S781.38; S791.253

文献标识码: A

文章编号: 2096-9694 (2022) 01-0036-07

Propagation Characteristics and Energy Attenuation Law of Surface Shear Waves and Internal Longitudinal Waves in Mongolian Scotch Pine Sawn Timber Based on Acoustic Emission

DING Rui¹, FANG Sai-yin¹, LUO Rui-han¹, LAI Fei¹,
YANG Zhou-ling¹, HUANG Chang-Lin¹, 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-end 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 study the propagation characteristics and energy attenuation modes of different acoustic emission (AE) modes, a method for extracting surface shear waves and internal longitudinal waves of wood AE signals was proposed based on the wave theory. The AE signal energy attenuation model was established. First, according to the ASTM-E976-2015, the AE source was generated on the

收稿日期: 2021-08-05; 修改日期: 2021-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目“基于声发射能量模型的胶合木结构蠕变机理与演变规律研究”(31760182); 国家自然科学基金项目“基于应变能波动传播特性的木材损伤断裂演化机制研究”(32160345)。

作者简介: 丁锐 (1996—), 男, 硕士研究生。Email: 327201725@qq.com

通讯作者: 李明, 男, 教授。Email: swfu_lm@swfu.edu.cn

surface of the sawn timber of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv. by breaking the lead core, and the AE raw signals of the surface transverse wave and the internal longitudinal wave were collected at different positions with the sampling frequency of 500 kHz. Then, the wavelet analysis method was used to reconstruct the AE wave-form from the original signal; the propagation characteristics of the surface shear wave and the internal longitudinal wave of the wood AE signal were investigated. Finally, an exponential function fitting method was used to construct the energy attenuation model of surface shear waves and internal longitudinal waves. The results showed that the AE energy of both the surface transverse wave and the internal longitudinal wave exhibited a significant exponential decay law when propagating in the wood; there were big differences in frequency distribution and propagation rate. In the initial stage of propagation, the surface transverse wave was mainly distributed in the two middle and high frequency bands centered at 80.0 kHz and 113.3 kHz. As it propagated on the surface of the wood, the high-frequency signal quickly attenuated to the low-frequency signal. The internal longitudinal wave was always in a relatively low frequency band, and its average propagation velocity was about 4.6 times that of the surface transverse wave.

Key words: acoustic emission; *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv. sawn timber; surface transverse wave; internal longitudinal wave; wavelet analysis; energy attenuation model

声发射 (acoustic emission, AE) 是指材料局部因能量的快速释放而发出瞬态弹性波的现象, 也称为应力波发射^[1]。声发射检测技术 (acoustic emission test, AET) 作为一种主动的动态无损检测方法, 已被广泛应用于金属、岩石、天然有机高分子材料以及复合材料的缺陷与损伤监测^[2-4]。木材作为一种典型的各向异性材料, 无论是木材表面还是内部发生变形或开裂时, 都会产生相应的 AE 信号。通过 AET 技术对木材 AE 信号析取处理, 可以有效地实现对木材的无损检测。

Diakhate^[5]和 Bucur^[6]采用 AET 技术研究了木材内部裂纹扩展机理及木材各向异性特征与 AE 信号特性之间的关系; 马尾松 (*Pinus massoniana*) 木材 AE 特性与其含水率相关, 随着木材含水率的增加, AE 信号传播速率呈指数衰减^[7]; 在垂直木材纹理的载荷作用下, AE 信号能有效地表征裂纹的萌生与扩展演变过程^[8]。孙建平^[9-10]等利用 AET 技术研究了木质材料在动态载荷下的损伤过程; 鞠双^[11-12]等利用 AET 技术探究木材表面 AE 信号各向异性传播规律, 并依据瞬时频率辨识木材损伤过程 AE 信号; 李杨^[13]等利用 AET 技术研究花旗松 (*Pseudotsuga menziesii*) 胶合木梁声发射信号时频域特征及其传播规律; 王明华^[14]等通过人为制造裂

纹和 AE 源的方式, 利用 AET 技术研究 AE 信号在樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.) 试件表面顺纹方向的传播规律; 申珂楠^[15]和李晓崧^[16]利用 AET 技术实现木材表面 AE 源的定位。现有利用 AET 技术对木材 AE 特性的研究及 AE 源的定位, 大多仅关注木材表面的 AE 信号, 然而受制于木材自身微观构造及试件结构尺寸的影响, AE 信号波在木材中实际传播时是横波与纵波相互混叠并以波包的形式向前传播的。因此, 仅关注于木材表面的 AE 信号并不能析取真实反映木材特性的表变量, 而将表面横波与内部纵波信号单独析取出来进行研究, 不仅可以实现木材表面缺陷及内部损伤的 AE 源定位, 还可利用内部纵波测量木材的弹性模量, 进而有效评价材料的力学性能。

本研究以樟子松锯材为试验材料, 并利用 AE 信号高速数据采集系统, 获取 AE 信号表面横波和内部纵波的原始信号。依据小波分解理论对原始 AE 信号进行分解并重构 AE 波形, 进而研究两种信号的 AE 传播特性。在析取表面横波和内部纵波的试验基础上, 通过改变 AE 源的位置获取不同传播距离下的 AE 信号能量值, 构建表面横波和内部纵波的能量衰减模型, 进一步研究 AE 信号在樟子松锯材中传播时的能量衰减规律。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选择3块气干樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.) 锯材, 试件1尺寸为600 mm (长) × 60 mm (宽) × 30 mm (厚), 试件2和试件3尺寸为500 mm (长) × 60 mm (宽) × 30 mm (厚), 试件密度均为0.46 g/cm³, 含水率为10%。

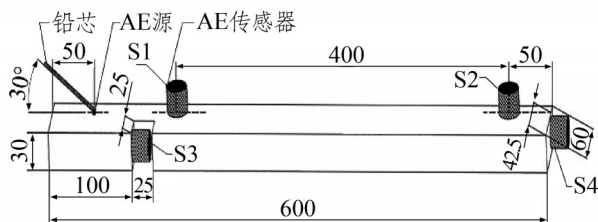
1.2 设备及仪器

利用NI USB-6366采集设备及LabVIEW软件自行搭建4通道高速数据采集系统, 其中传感器为带宽22~220 kHz的SR-150N单端谐振式AE传感器, 同时配置了增益为40 dB的PAI前端放大器。该放大器内部设有降噪装置, 能有效放大信号, 同时减少噪声信号。由文献13得知木材AE信号最大频率约200 kHz, 根据香浓采样定理将每个AE信号采集通道的采样频率设置为500 kHz, 放大器输出的电压范围为(-5 V, 5 V)。

1.3 试验设计

1.3.1 表面横波与内部纵波析取试验设计

为研究表面横波与内部纵波在木材中的传播特性, 利用试件1设计了一种析取表面横波与内部纵波的试验方法, 如图1所示。根据机械波振动理论, 横波的质点振动方向与波的传播方向垂直, 纵波的质点振动方向与波的传播方向平行。因此, 图1中的传感器S1、S2主要检测到的是表面横波, 传感器S3、S4主要检测到的是内部纵波。



图中单位为mm, 下同。

图1 表面横波与内部纵波析取试验示意图

Fig.1 Schematic diagram of surface shear wave and internal longitudinal wave extraction test

采用铅芯折断的方式模拟AE源以获得木材AE信号。为保证试验中AE源的一致性, 所有试验均参照标准ASTM-E 976-2015 “Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response”, 将直径0.5 mm的铅笔

芯与试件表面形成30°角, 在距离接触点2.5 mm处折断。在距离试件1左端面50 mm处的表面上进行铅芯折断产生AE源, 将传感器S1、S2间隔400 mm置于试件长度方向的表面处, 用于采集AE信号中的表面横波。同时, 在距离左端面100 mm的一侧开一个尺寸为25 mm×25 mm×30 mm的槽口, 将传感器S3、S4分别置于试件槽口左侧面和右端面, 以采集AE信号中的内部纵波。为避免槽口对传感器S1、S2、S4采集AE信号的影响, 将传感器S1、S2、S4及AE源置于错开槽口的试件表面处, 且其中心处于同一平面上, 具体位置如图1所示。

1.3.2 AE能量衰减试验设计

为进一步研究表面横波与内部纵波在木材中传播时的能量衰减特性, 设计如下试验方案: 在试件2表面上进行折铅试验产生AE源, 沿试件长度方向依次间隔100 mm等距布置4个传感器于试件宽度的中轴线处, 其中传感器S1放置于距离试件左端面150 mm处。为得到不同声源距离下的AE能量值, 保持4个传感器的位置不变, 沿试件中轴线等距改变AE源的位置。如图2所示, 调整AE源的位置, 使其与传感器S1之间的距离依次为30、40、50、60、70、80、90、100 mm。基于不同AE源距离下4个传感器的能量值, 通过指数拟合的方法, 构建试件AE信号表面横波的能量衰减模型。

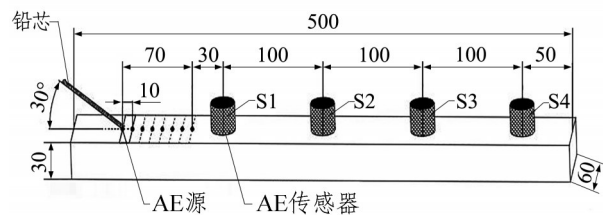


图2 表面横波能量衰减试验示意图

Fig.2 Schematic diagram of surface shear wave energy attenuation test

与此同时, 为了构建试件AE信号内部纵波的能量衰减模型, 沿试件3的长度方向, 在同一侧面上间隔120 mm等距开3个尺寸为25 mm×25 mm×30 mm的槽口, 将传感器S1、S2、S3依次放置于3个槽口左侧面的中心位置处, 传感器S4放置于试件右端面处, 且4个传感器位于同一直线上, 其中传感器S3与传感器S4的间距为120 mm。同样分

别在距传感器 S1 的 30、40、50、60、70、80、90、100 mm 位置的试件表面, 依次进行折铅试验产生 AE 源, 以得到不同声源距离下的 4 个传感器的能量值。AE 源与 4 个传感器的中心处于同一平面上, 具体位置如图 3 所示。

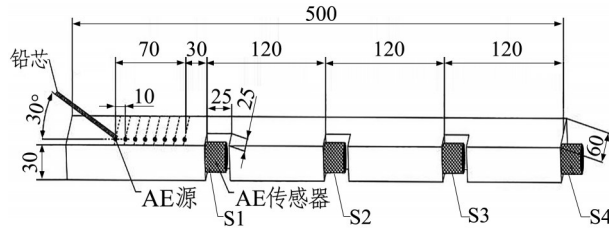


图3 内部纵波能量衰减试验示意图

Fig.3 Schematic diagram of internal longitudinal wave energy attenuation test

1.4 原始AE信号处理方法

受信号采集与传输过程中的噪声影响, 试验所采集的原始AE信号中混有大量噪声信号, 为此, 试验采用小波分析的方法以重构实际的AE信号, 实现信号去噪^[17]。其基本原理是将原始AE信号分解为不同频段的信号, 包括一系列低频近似信号和高频细节信号, 然后根据各频段的时频特性选择能反映真实AE特性的成分进行重构。为提

高小波分析的频域局部化能力, 选择消失矩阵阶数较高的 daubechies 小波 (db10) 作为小波分析的小波基函数, 分解层数为5层。试验中信号的采样频率 f_s 为500 kHz, 根据香农采样定理, 理论上可以辨识0~250 kHz的信号, 又根据小波多分辨率分析原理, 每层小波分解的高频细节信号的频率范围依次为: (125, 250 kHz)、(62.5, 125 kHz)、(31.25, 62.5 kHz)、(15.625, 31.25 kHz)、(7.8125, 15.625 kHz), …… , 因此, 选择5层小波分解即可覆盖试验用传感器的测量频率范围。

2 结果与分析

2.1 表面横波和内部纵波信号特征

由于本试验AE信号源是通过折铅的方式产生的, 相对于噪声信号持续时间短暂, 因此有效的AE信号成分应该反映在小波分解的高频细节部分, 可通过小波分解消除低频段的干扰, 析取高频段有效AE信号。利用db10对原始AE信号进行5层小波分解, 根据各层信号的时频特性, 最终选择第2、3层分别重构4个传感器采集到的AE信号, 并进行归一化处理。试件1上的AE源信号经重构后的信号波形及频谱, 如图4所示。

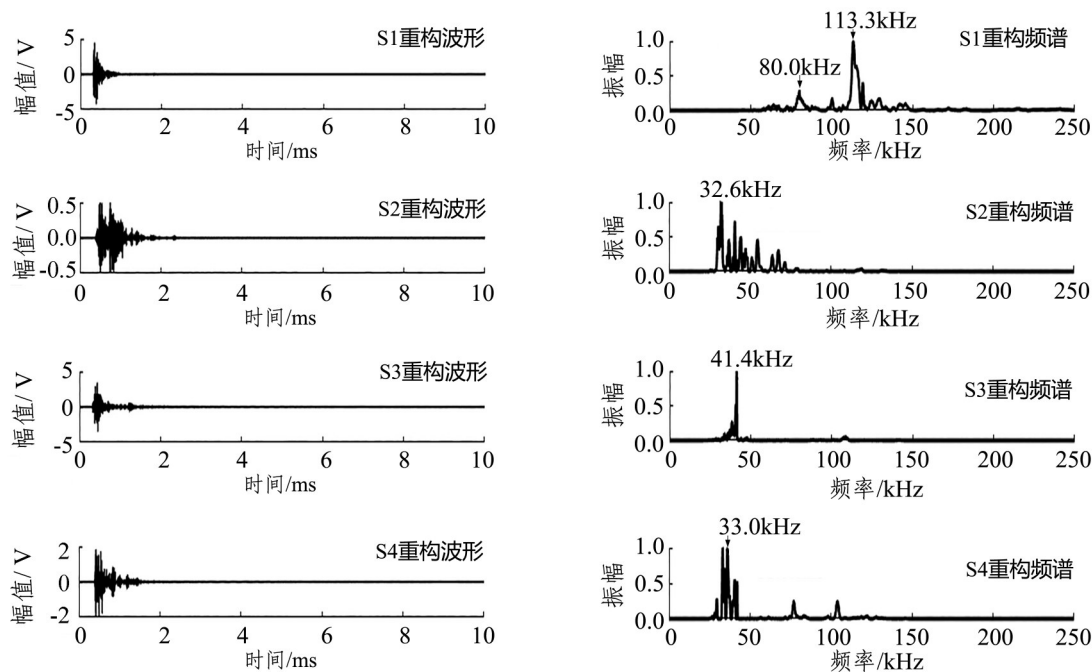


图4 表面横波与内部纵波重构后AE信号

Fig.4 AE signal reconstructed by surface transverse wave and internal longitudinal wave

由图4中传感器S2和S4的时域波形图可以看出,传感器S2的信号幅值比传感器S4的信号幅值更小,说明试材AE信号中表面横波比内部纵波衰减更为严重,这是因为当AE信号沿木材表面传播时,受木材表面空气流体的阻碍,能量衰减大。而当AE信号在木材内部传播时,与木材表面流体之间的接触减少,能量损耗变小。

由图4中4个传感器采集信号的频谱图可知,通过铅芯折断方式产生的AE信号在试件表面传播时,受锯材试件边界影响,AE信号成分较为复杂,分布于一个较广的频率范围,且以高频信号为主。传感器S1所采集的表面横波主要分布在以80.0和113.3 kHz为中心的两个中高频段内,低频信号成分占信号比重则较小。同时,由于木材的多孔结构和黏弹性对一定频段的AE信号具有滤波作用^[14],应力波在黏弹性介质中传播时,黏滞性是引起应力波随时空衰减的主要因素,所以信号高频成分比低频成分衰减更快^[18]。在距离AE源较远的传感器S2所采集表面横波的频率分布中心出现在32.6 kHz附近,高频成分迅速衰减。从传感器S3、S4的频谱图可以看出,传感器S3所采集的内部纵波信号的频率集中分布在41.4 kHz附近,高频信号成分较少,传感器S4所采集的内部纵波信号同样分布在以33.0 kHz为中心的较低频率范围内。因此,内部纵波在木材中传播时是以低频信号为主,相对于表面横波而言,其频率没有显著变化,内部纵波相对来说是一种更稳定的信号波。

2.2 表面横波和内部纵波传播速率

在采用小波分解重构AE信号的基础上,利用信号相关性分析法和时差定位法计算AE信号的传播速率。根据试件1中的AE源与传感器之间的几何关系确定AE信号传播的实际距离 Δx ,再由公式 $v=\Delta x/\Delta t$ 计算AE信号的传播速率 v 。对于传播时差 Δt ,采用信号相关性分析的方法确定,互相关函数主要是描述2个信号的相似程度,信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的互相关函数定义为:

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

根据互相关函数的定义可知,当 $\tau=\tau_0$ 时,互相关函数的绝对值 $|R_{xy}(\tau_0)|$ 取得最大值,则意味着

信号 $y(t)$ 沿时间轴平移 τ_0 个单位后,与信号 $x(t)$ 最相似。为此,通过互相关函数可以间接确定AE信号在2个传感器之间的传播时差 Δt 。为减少试验随机性影响,在试件1表面的AE源位置进行10次独立试验,试验结果列于表1。其中, Δt_1 表示AE信号在传感器S1和S2之间的传播时差, v_1 表示对应的表面横波传播速率; Δt_2 表示AE信号在传感器S3和S4之间的传播时差, v_2 表示对应的内部纵波传播速率。

表1 AE信号传播速率

Tab.1 AE signal propagation rate

试验号	$\Delta t_1/\mu s$	$v_1/m \cdot s^{-1}$	$\Delta t_2/\mu s$	$v_2/m \cdot s^{-1}$
1	364.0	1 098.9	98.0	5 102.0
2	366.0	1 092.9	100.0	5 000.0
3	364.0	1 098.9	94.0	5 319.1
4	340.0	1 176.5	94.0	5 319.1
5	364.0	1 098.9	96.0	5 208.3
6	356.0	1 123.6	96.0	5 208.3
7	340.0	1 176.5	96.0	5 208.3
8	340.0	1 176.5	94.0	5 319.1
9	366.0	1 092.9	100.0	5 000.0
10	380.0	1 052.6	100.0	5 000.0
平均值	358.0	1 118.8	96.8	5 168.4

由表1可知,在樟子松锯材中表面横波、内部纵波的平均传播速率分别为1 118.8、5 168.4 m/s,由于表面横波和内部纵波传播模式的不同,其传播速率存在明显差异,内部纵波的传播速率大约为表面横波的4.6倍。由文献16可知,AE信号在杉木表面传播的速度变化范围为900~1 400 m/s。同时,依据弹性波理论,当木材内产生纵向振动时,根据木材纵向振动时的声波信号传播速率公式计算木材AE信号中的纵波传播速率。

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

式中: E 为材料的弹性模量; ρ 为材料的密度。

由于顺纹木材的弹性模量的范围为9.8~12 GPa,气干状态的樟子松密度变化范围为0.4~0.6 g/cm³,代入公式2中可以得到樟子松木材AE信号中纵波的传播速率在4 041~5 477 m/s范围内。本研究由计算所得樟子松锯材AE信号中表面横波和内部纵波的平均传播速率,均在樟子松木材表面和内部AE信号传播速率的实际范围内。

2.3 表面横波与内部纵波能量衰减模型

为探究樟子松锯材 AE 信号中表面横波与内部纵波的能量衰减规律, 本试验通过改变 AE 源的位置得到不同声源距离下表面横波与内部纵波的能量值。定义 AE 信号的能量 P 为各点信号幅值的平方之和。

$$P = \sum_{i=1}^n (x_i)^2 \quad (3)$$

式中: P —信号的能量值; n —所截取的 AE 信号点数, 本研究截取的 AE 信号时间长度为 0.06 s, 采样频率为 500 kHz, 故 $n=30\ 000$; x_i —各点幅值。

为减少信号随机性影响, 在每个 AE 源处均进行 10 次独立试验, 取其能量的平均值, 试验结果列于表 2。S1~S4 分别为 4 个传感器, 声源距离 d 为 AE 源与传感器 S1 之间的相对距离。

表 2 不同声源距离表面横波、内部纵波平均能量

Tab.2 Average energy of surface shear waves and internal longitudinal waves at different sound source distances

声源距离 d/mm	表面横波能量/($\text{V}^2 \cdot \text{s}$)				内部纵波能量/($\text{V}^2 \cdot \text{s}$)			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
30	1 125.62	285.93	87.62	33.51	1 080.28	321.89	109.37	29.92
40	981.94	257.28	54.74	32.07	1011.77	278.15	100.17	27.43
50	833.96	221.96	48.18	31.20	928.56	218.16	93.60	26.55
60	734.87	193.92	47.35	30.67	891.15	212.61	84.36	26.10
70	594.42	169.88	43.97	28.92	853.16	200.75	80.61	25.69
80	516.92	145.34	41.49	25.79	818.83	189.86	74.94	24.59
90	430.26	125.32	38.17	24.70	700.97	204.20	71.15	22.92
100	356.17	114.97	36.71	28.36	578.58	154.57	69.08	21.21

为构建不同声源距离下的樟子松锯材表面横波与内部纵波的能量衰减模型, 以各个传感器与声源之间的相对距离为变量, 采用指数函数, 对不同声源距离下的每个 AE 传感器所采集信号的平均能量进行数值拟合, 拟合曲线如图 5 所示。

从图 5 可以明显看出, 樟子松锯材 AE 信号中表面横波与内部纵波能量值随着声源距离的增大而减小, 即能量值与声源距离之间呈反比关系。表明 AE 信号中表面横波与内部纵波在木材中传播时, 具有明显的能量衰减特性且呈指数衰减。拟合函数如下:

$$\text{表面横波能量 } P_1 = 1\ 687 e^{-0.01411d} \quad (4)$$

$$\text{内部纵波能量 } P_2 = 1\ 556 e^{-0.00991d} \quad (5)$$

式中: P_1 、 P_2 —不同声源距离下樟子松锯材 AE 信号中表面横波、内部纵波的能量值, $\text{V}^2 \cdot \text{s}$; d —传感器与 AE 源之间的相对距离, mm。

函数 P_1 的拟合度 $R_1^2 = 0.995$, 函数 P_2 的拟合度 $R_2^2 = 0.988$, 说明两个拟合函数能够精确地反映不同声源距离下樟子松锯材表面横波与内部纵波的能量衰减规律。

3 结论

1) 试验依据机械波振动理论, 析取了樟子松锯材 AE 信号中的表面横波与内部纵波, 研究了其传播特性及能量衰减规律。

在 AE 信号传播开始阶段, 表面横波主要分布在以 80.0 和 113.3 kHz 为中心的两个中高频段内,

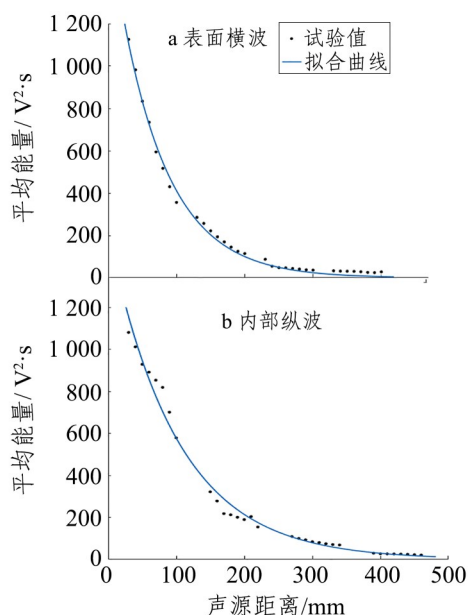


图 5 表面横波及内部纵波能量拟合曲线

Fig.5 Surface transverse wave and internal longitudinal wave fitting curve

内部纵波则分布在以41.4 kHz为中心的相对低频段内。随着AE信号在木材中的传播,表面横波和内部纵波均具有明显的能量衰减特性且呈指数衰减。

在传播后期阶段,受木材的多孔结构和物理特性的影响,高频信号迅速衰减,表面横波和内部纵波均分布在33.0 kHz附近的低频段内。与此同时,由于横、纵波传播模式的不同,表面横波和内部纵波的传播速率存在较大差异。在樟子松锯材中,表面横波和内部纵波的平均传播速率分别为1 118.8 m/s和5 168.4 m/s,内部纵波的传播速率大约为表面横波的4.6倍。

2) 试验探索了表面横波与内部纵波在樟子松木材中的传播特性及能量衰减规律,将来可进一步通过析取表面横波与内部纵波信号,实现木材表面及内部AE源的定位;也可通过构建表面横波与内部纵波的能量衰减模型,研究基于AE能量衰减特性的木材AE源定位。同时,还可利用纵波信号测试木材弹性模量,进而有效评价材料的力学性能。

参考文献:

- [1] Baensch F, Zauner M, Sanabria S J, et al. Damage evolution in wood: synchrotron radiation micro-computed tomography (SRμCT) as a complementary tool for interpreting acoustic emission (AE) behavior [J]. *Holzforschung*, 2015, 69(8): 1015-1025.
- [2] 申珂楠, 赵海龙, 丁馨曾, 等. 声发射技术在木材加工领域的应用 [J]. *世界林业研究*, 2015, 28(1): 56-60.
SHEN K N, ZHAO H L, DING X Z, et al. Application of acoustic emission in wood processing [J]. *World Forestry Research*, 2015, 28(1): 56-60.
- [3] ZHAO J H, SHI Y K, SHAN N, et al. Stabilized fiber-optic extrinsic Fabry-Perot sensor system for acoustic emission measurement [J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, 40(6): 874-880.
- [4] Satour A, Montrésor S, Bentahar M, et al. Acoustic emission signal denoising to improve damage analysis in glass fibre-reinforced composites [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2014, 29(1): 65-79.
- [5] Diakhate M, Bastidas-Arteaga E, Moutou Pitti R, et al. Cluster analysis of acoustic emission activity within wood material: towards a real-time monitoring of crack tip propagation [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, 180: 254-267.
- [6] Bucur V, Declercq N F. The anisotropy of biological composites studied with ultrasonic technique [J]. *Ultrasonics*, 2006, 44(Suppl 1): e829-e831.
- [7] LI X C, JU S, LUO T F, et al. Effect of moisture content on propagation characteristics of acoustic emission signal of *Pinus massoniana* Lamb. [J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2020, 78(1): 185-191.
- [8] WU Y, SHAO Z, WANG F, et al. Acoustic emission characteristics and felicity effect of wood fracture perpendicular to the grain [J]. *Journal of Tropical Forest Science*, 2014, 26(4): 522-531.
- [9] 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. Testing damage process of David poplar under the dynamic loads based on acoustic emission technique [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(9): 89-92.
- [10] 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.
SUN J P, WANG F H, HU Y C. Damage process testing of wood under loads based on acoustic emission and neural network [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(2): 342-347.
- [11] 鞠双, 李新慈, 罗廷芳, 等. 马尾松胶合木表面声发射信号各向异性传播规律 [J]. *林业工程学报*, 2019, 4(2): 48-53.
JU S, LI X C, LUO T F, et al. Anisotropic propagation of acoustic emission signal on surface of *Pinus massoniana* Lamb. glulam [J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2019, 4(2): 48-53.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 王明华, 邓婷婷, 鞠双, 等. 木材表面裂纹对声发射信号传播特性的影响 [J]. *东北林业大学学报*, 2020, 48(10): 82-88.
WANG M H, DENG T T, JU S, et al. Effect of wood surface crack on acoustic emission signal propagation characteristics [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2020, 48(10): 82-88.
- [15] 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, 112.
SHEN K N, DING X Z, ZHAO H L, et al. Acoustic emission signal source localization in wood surface with triangle positioning method [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2015, 43(4): 77-81, 112.
- [16] 李晓崧, 邓婷婷, 王明华, 等. 基于小波与相关性分析的木材声发射源直线定位算法改进 [J]. *林业工程学报*, 2020, 5(3): 138-143.
LI X S, DENG T T, WANG M H, et al. Linear positioning algorithm improvement of wood acoustic emission source based on wavelet and signal correlation analysis methods [J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2020, 5(3): 138-143.
- [17] 鞠双, 李新慈, 罗廷芳, 等. 应用小波分析法对马尾松胶合木表面声发射信号特征检测 [J]. *东北林业大学学报*, 2018, 46(8): 84-90.
JU S, LI X C, LUO T F, et al. Characteristics of acoustic emission signals on the surface of Masson pine gulam with wavelet analysis method [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2018, 46(8): 84-90.
- [18] 王观石, 李长洪, 胡世丽, 等. 岩体中应力波幅值随时空衰减的关系 [J]. *岩土力学*, 2010, 31(11): 3487-3492.
WANG G S, LI C H, HU S L, et al. A study of time-and spatial-attenuation of stress wave amplitude in rock mass [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(11): 3487-3492.

(本文编校 向 琴)