

基于小波变换的木材声发射驻波信号特征研究

罗蕊寒¹,方赛银¹,丁锐¹,赖菲¹,杨洲凌¹,李明^{2,3*},翟梦群^{4*}

(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;4.西北农林科技大学 机械与电子工程学院,陕西 杨陵 712100)

摘要:为研究木材损伤断裂时的声发射(AE)信号所激发的驻波信号特征与木材固有特性之间的关系,采用薄木条折断的方式产生 AE 源,在小波变换的基础上分析驻波频率,并计算纵波传播速率,依据弹性波理论计算出木材顺纹弹性模量(MOE)。首先,在 2 种不同长度的木材试件一端分别加工出 8 根 80 mm×10 mm 的薄木条,通过外加冲击力折断木条以产生 AE 源,通过放置在试件端面的 2 个传感器采集原始 AE 信号,采样频率设定为 500 kHz。然后,根据驻波特性确定原始信号的驻波阶段,进而对该阶段 AE 信号进行 4 层小波分解,依据分解后信号的时频域特征析取驻波信号波形。最后,依据驻波产生原理计算纵波传播速率,并结合弹性波理论计算试件的 MOE。结果表明,拉伸试验测得樟子松和榉木试件的 MOE 分别为 9.30 GPa 和 11.63 GPa,800 mm 樟子松和榉木试件通过驻波计算所得 MOE 分别为 9.37 GPa 和 12.34 GPa,与实测 MOE 的误差分别为 0.75%和 5.24%;600 mm 的樟子松和榉木试件通过驻波计算所得 MOE 分别为 9.31 GPa 和 11.81 GPa,与实测 MOE 的误差分别为 0.10%和 1.55%。

关键词:声发射;小波变换;驻波;时频域分析;顺纹弹性模量

中图分类号:S781.38 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2023)03-0194-09

Research on Standing Wave Signal Characteristics of Wood Acoustic Emission Based on Wavelet Transform

LUO Rui-han¹, FANG Sai-ying¹, DING Rui¹, LAI Fei¹, YANG Zhou-ling¹, LI Ming^{2,3*}, ZHAI Meng-qun^{4*}

(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; 4. College of Mechanical Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the relationship between the characteristics of standing wave signal excited by acoustic emission (AE) signal during wood damage and fracture and the inherent characteristics of wood, the AE source was generated by thin wood strip fracture. Based on the wavelet transform, the standing wave frequency was analyzed and the longitudinal wave propagation rate in the along grain direction was calculated, and then the along grain modulus of elastic (MOE) of wood was calculated according to the elastic wave theory. Firstly, 8 thin wood strips with the size of 80 mm×10 mm were processed at one end of the specimens of two wood species (*Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Zelkova schneideriana*) with different lengths. During the test, an impact force was applied to cause the thin wood strips to break to generate AE sources, and the two sensors were placed on the ends of the specimen to collect the original AE sig-

收稿日期:2021-11-20 修回日期:2022-01-12

基金项目:国家自然科学基金(32160345,31760182)。

第一作者:罗蕊寒。研究方向:木材无损检测。E-mail:843011306@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
翟梦群。研究方向:机电一体专业及特种加工。E-mail:zhaidreams@nwsuaf.edu.cn

nal, and the sampling frequency was set to 500 kHz. Secondly, the stage at which the standing wave in the AE signal occurred was determined according to the characteristics of the standing wave, and then a 4-layer wavelet decomposition was performed on the AE signal at this stage. The standing wave signal features were extracted according to the time-frequency domain characteristics of the decomposed signal. Finally, the longitudinal wave propagation rate was calculated according to the standing wave generation principle, and the MOE of the specimen was calculated combined with the elastic wave theory. The values of MOE of two wood species (*P. sylvestris* var. *mongolica* and *Zelkova schneideriana*) specimens measured by tensile test were 9.30 and 11.63 GPa respectively. The values of MOE of 800 mm specimens of two wood species calculated by standing wave were 9.37 and 12.34 GPa, with errors of 0.75% and 5.24%, respectively. The values of MOE of 600 mm specimens of two wood species calculated by standing wave were 9.31 and 11.81 GPa, with errors of 0.10% and 1.55%, respectively.

Key words: acoustic emission; wavelet transform; standing wave; time-frequency domain analysis; modulus of elasticity along grain

材料在外力或者内力的作用下产生形变或断裂时,以弹性波形式集中释放应变能的现象称为声发射,声发射检测(acoustic emission test, AET)不仅可以对材料内部及表面的应力变化进行动态监测,还可以通过声发射(AE)源定位技术确定损伤位置,为木材无损检测提供极其有效的方法^[1-4]。常用的木材 AE 监测技术是根据 AE 事件的幅值、能量、振铃数以及频率范围等参数来确定木材的损伤过程和损伤状态^[5]。现阶段, AET 已被广泛应用于木材干燥过程裂纹监控与预测^[6-7]、缺陷检测^[8]以及力学性能监测^[9-10]。

木材具有不均匀性和高度各向异性的性质,故不同纹理方向或不同区域的力学性能差异性显著,故仅通过万能力学试验机对局部木材试件进行简单的拉伸试验来测定 MOE 不具代表性和实时性。通过对 AE 信号激发的驻波进行时频域分析,能够获取更客观的信号特征,但驻波信号和 AE 信号通常混叠在一起,很难分出明显的界限。因此,驻波波形及频域特征成为计算木材实时力学性能的关键点。现常用的 AE 信号时频域特征获取方法主要为小波分析法^[11],该方法被用于 AE 源定位^[12]、AE 信号特征分析^[13]等方面的研究。

本文通过采集木材损伤断裂试验中不同位置的 AE 信号,并依据 AE 信号和驻波的特性将原始信号时域波形分为 2 个阶段,前一阶段以突发 AE 信号为主,后一阶段主要体现驻波模式。进而对第 2 阶段的信号通过 4 层小波变换以确定驻波的频率,以此为基础计算木材顺纹弹性模量(MOE),同时通过拉伸试验实测木材顺纹 MOE,以验证驻波计算方法的有效性。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选取常温下气干状态的樟子松(*Pinus sylves-*

tris var. *mongolica*) 和 榉木(*Zelkova schneideriana*) 实木锯材作为试验材料,表面无缺陷,2 种试材密度分别为 $0.41 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $0.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。首先按照顺纹方向将 2 种试材制备成 800 mm(轴向)×60 mm(径向)×30 mm(弦向)的试件,为方便描述试件类型,将该尺寸的樟子松和榉木试件分别记为 M_1 和 M_2 。为体现木材的实际断裂过程,在 M_1 和 M_2 的左端锯出 8 根 80 mm×10 mm×2 mm 的薄木条,并将薄木条与试件连接处的宽度加工至 2 mm,使得断裂产生的 AE 信号源更接近点源, M_1 和 M_2 试件的结构见图 1(a)。待 M_1 和 M_2 折断后,再将 2 种使用过的试件制作成 600 mm(轴向)×60 mm(径向)×30 mm(弦向)的新试件,通过改变试件长度来研究传递媒介长度对驻波频率的影响,将该尺寸的樟子松试件和榉木试件分别记为 M_3 和 M_4 ,同样地,在 M_3 和 M_4 的左端锯出 8 根 80 mm×10 mm×2 mm 的薄木条,并将木条与试件连接处加工成 2 mm 的宽度, M_3 和 M_4 的结构见图 1(b)。

1.2 试验方法

M_1 和 M_2 试件作为试验组 1, M_3 和 M_4 试件作为试验组 2, 2 个试验组均利用砝码自由落体运动时的冲量来折断木条,从而模拟木材断裂点源声发射信号,具体做法是使用 200 mm 无弹性尼龙线将 500 g 的砝码绑在薄木条的尾端小孔,然后将砝码顶端提至薄木条同一水平面,随后松开砝码使其自由落体,便可保证每次折断木条时砝码自由落体高度均为 200 mm,即砝码对薄木条的冲量为 $1 \text{ N} \cdot \text{s}$ ($g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)。为采集薄木条折断后木材中的纵波信号,试验中将传感器 S_1 和 S_2 放在试件的 2 个端面上,保持两传感器在同一直线上,位置见图 1。使用硅脂作为耦合剂涂在木材与传感器的接触面之间,以保证采集信号更为准确。

此时产生的驻波频率成分较为集中,但在微观角度上,梁状木材是由若干根木纤维紧密排列而成,单根木纤维的驻波有若干频率成分,从整体上便可以看作一系列木纤维的驻波组合,故实际驻波频率并非像理论上的那么集中,而会出现一定的分布。木材的端面是驻波最远的 2 个波节,当波数为 1 时,波长最长,频率最小,便称这种频率为驻波基频。

2 结果与分析

2.1 M₁ 和 M₂ 试件中的信号特征

M₁ 和 M₂ 试件木条断裂时产生的 AE 信号见图 4。断裂产生的近似脉冲信号频带较宽,其中高频成分衰减更快,故低频成分更易形成驻波,当驻波一旦形成,不同位置检测的振动波形和振动频率均

相似,便可用高频作为 AE 信号特征,低频作为驻波信号特征。按照波形差异可将 M₁、M₂ 试件断裂原始信号时域分为 a、b 2 个阶段,a 阶段波形表现为高幅值且具有突发性,称为声发射阶段;b 阶段波形表现为低幅值且具有持续性,称为驻波阶段。在 b 阶段仍存在少量突发性的 AE 信号,这是因为宏观断裂产生的应变能会造成断裂点附近木材纤维的二次微观变形或断裂。为研究驻波阶段信号,以 M₁、M₂ 试件两传感器采集的原始信号 b 阶段作为研究对象,由于从原始信号中很难清晰地划分声发射阶段和驻波阶段,所以定义 b 阶段为高能量 AE 现象完全结束之后 10 ms 内的信号,通过 4 层小波分解,获得其近似信号和细节信号时频域特征,图 5 为 M₁ 试件 2 个传感器小波分析图。

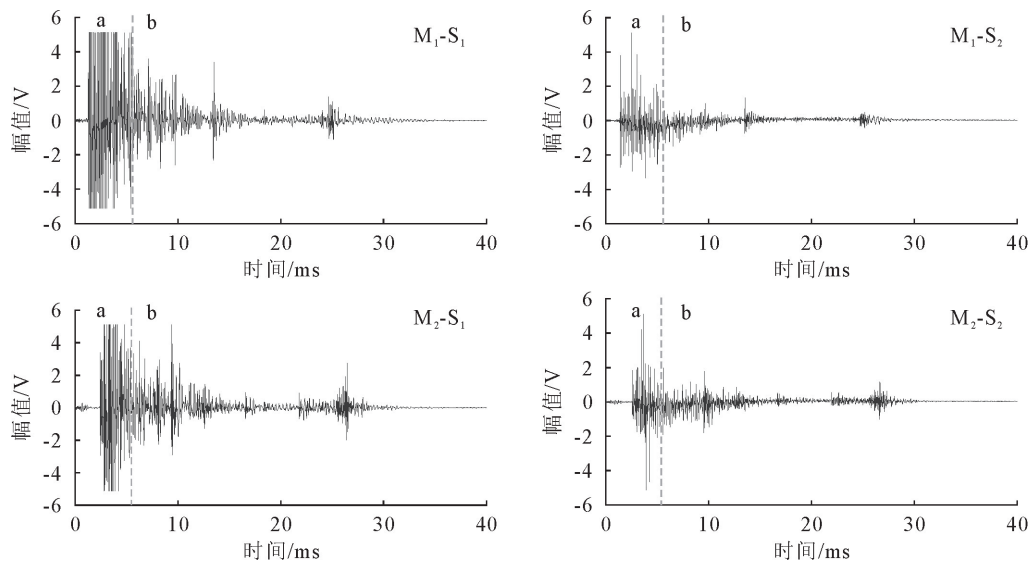


图 4 M₁ 和 M₂ 试件的传感器 S₁ 和传感器 S₂ 原始信号

Fig. 4 Original signals of sensor S₁ and sensor S₂ of M₁ and M₂ specimens

从 2 个传感器的近似信号和细节信号时域图看出,近似信号 a1~a4 均是一段连续性信号,且波形非常相似,表现为持续时间长、衰减慢。而细节信号 d1~d4 则是由多个突发性信号组合而成,波形表现为持续时间短、衰减快。为更清晰地分析小波变换后信号的频域特征,结合频域图列出 M₁ 试件两传感器近似信号和细节信号主频见表 1。

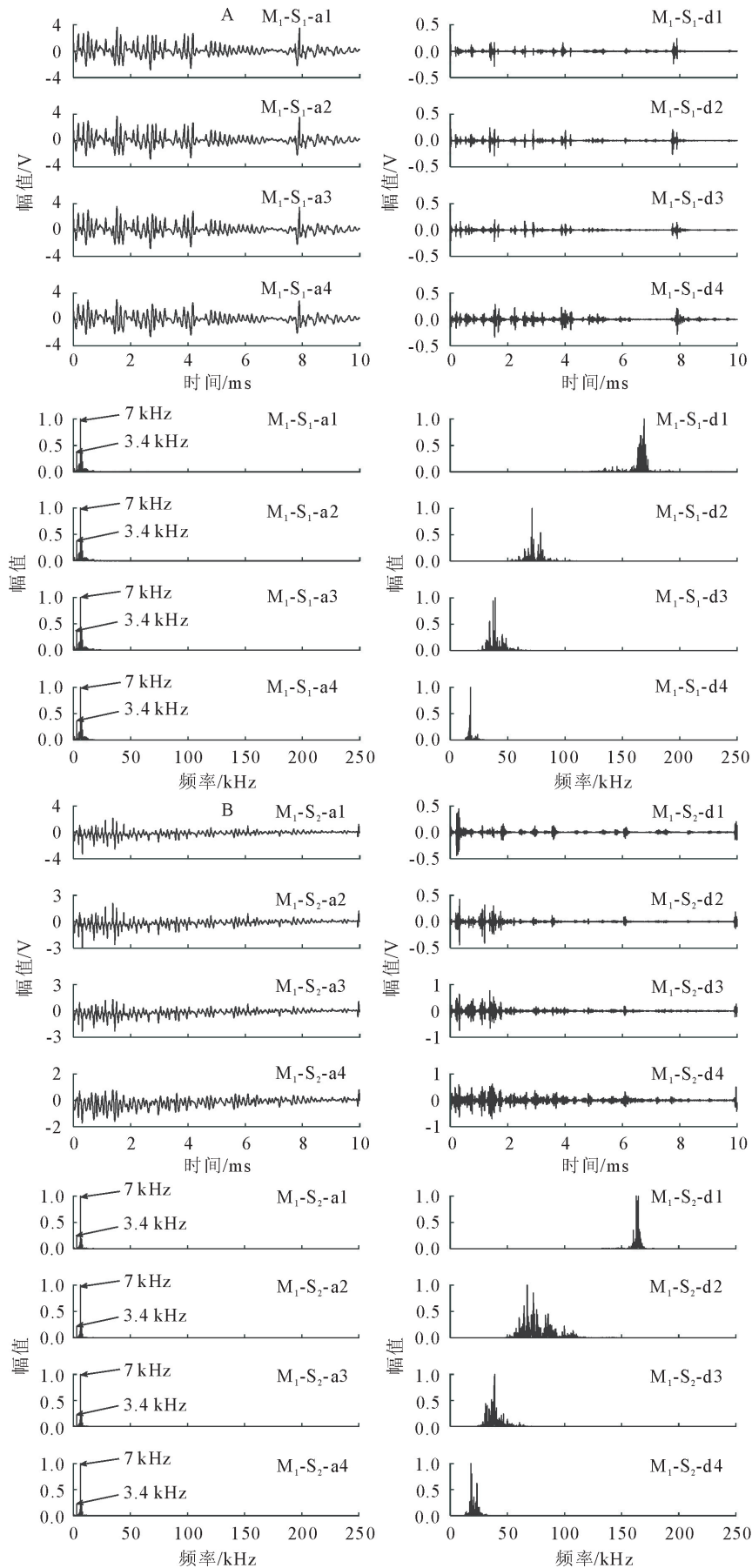
相关研究表明,木材 AE 信号频率在 20~200

kHz,而从细节信号 d1~d4 可以看出,d1 和 d2 的主频分别集中在 165 kHz 和 70 kHz 附近,属于高频段 AE 信号,故认定此类 AE 信号为木材纤维二次断裂产生的断裂 AE(Fracture AE,FAE)信号;d3 和 d4 的主频集中在 40 kHz 和 20 kHz 附近,属于低频段 AE 信号,故认定此类 AE 信号为木材纤维弹性形变产生的形变 AE(Deformation AE,DAE)信号^[14-15]。

表 1 M₁ 试件两传感器近似信号和细节信号主频

Table 1 Approximate signal and detail signal main frequency of two sensors of M₁ specimen kHz

分解层数	S ₁ 传感器			S ₂ 传感器		
	近似信号主频		细节信号主频	近似信号主频		细节信号主频
	n=1	n=2		n=1	n=2	
1	3.40	7.00	168.800	3.40	7.00	162.90
2	3.40	7.00	71.40	3.40	7.00	67.40
3	3.40	7.00	39.20	3.40	7.00	38.80
4	3.40	7.00	17.70	3.40	7.00	18.10



注: A. M_1 试件 S_1 传感器原始信号 b 区域小波分析图; B. M_1 试件 S_2 传感器原始信号 b 区域小波分析图。

图 5 M_1 试件 S_1 传感器和 S_2 传感器小波分析

Fig. 5 Wavelet analysis diagram of S_1 sensor and S_2 sensor of M_1 specimen

但近似信号 a1~a4 的频率范围集中在 0~10 kHz,均具有 3.4 kHz 和 7.0 kHz 2 个频率分布中心。各层近似信号频率均在声发射频率范围之外,频率分布中心极为稳定,由驻波解可知,试件两端面处为驻波最远的 2 个波节,故振动方式一致,便可认定各层近似信号主要成分为驻波信号。在 4 层近似信号频率图中可得出最低主频为 3.4 kHz,该频率便是波数 $n=1$ 的驻波频率,通过公式(5)便可算得纵波速率,并可反推出 7.0 kHz 是波数为 $n=2$ 时

的驻波频率。通过时域幅值可得出,近似信号的幅值均大于细节信号的幅值,说明原始信号 b 阶段驻波成分大于 AE 成分,故使用 b 阶段信号分析驻波是可行的。

为对比不同木材宏观断裂产生的驻波信号,对 M_2 试件产生的原始信号 b 阶段进行小波分解, M_2 试件中经小波变换后所得的近似信号与细节信号的频域见图 6。

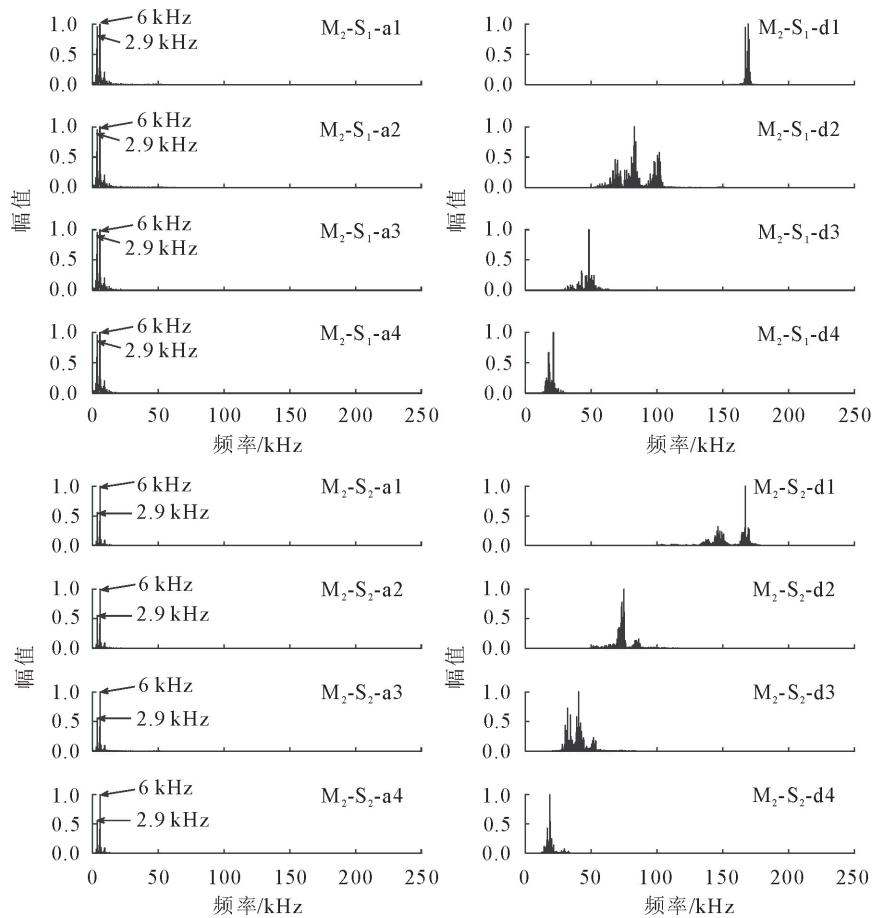


图 6 M_2 试件 S_1 传感器和 S_2 传感器小波分析

Fig. 6 Wavelet analysis diagram of S_1 sensor and S_2 sensor of M_2 specimen

对 M_2 试件的 2 个传感器原始信号 b 阶段进行小波分解后,分析结果与 M_1 试件类似,4 层近似信号均由连续信号组成且波形极为相似,表现为幅值大、衰减小、持续时间长。而 4 层细节信号均由多个

突发信号组成,d1~d4 幅值依次递增,衰减速度变慢。为更清晰地分析小波变换后的频域特征,可结合频域特征列出 M_2 试件 2 传感器近似信号和细节信号主频见表 2。

表 2 M_2 试件两传感器近似信号和细节信号主频

Table 2 Approximate signal and detail signal main frequency of the two sensors of M_2 specimen

分解层数	S_1 传感器			S_2 传感器		
	近似信号主频		细节信号主频	近似信号主频		细节信号主频
	$n=1$	$n=2$		$n=1$	$n=2$	
1	2.90	6.00	169.30	2.90	6.00	167.10
2	2.90	6.00	82.90	2.90	6.00	75.00
3	2.90	6.00	44.40	2.90	6.00	40.50
4	2.90	6.00	21.50	2.90	6.00	18.70

结合频域图和表 2 可得, $d_1 \sim d_2$ 的主频集中在 165 kHz 和 80 kHz 左右, $d_3 \sim d_4$ 的主频集中在 40 kHz 和 20 kHz 左右, 与 M_1 试件 2 个传感器每层细节信号主频范围极为接近, 所以同样认定 $d_1 \sim d_2$ 属于 FAE 信号, $d_3 \sim d_4$ 属于 DAE 信号。 $a_1 \sim a_4$ 均位于 0~10 kHz, 均具有 2.9 kHz 和 6.0 kHz 2 个频率分布中心, 其中 2.9 kHz 为驻波基频, 6.0 kHz 为波数 $n=2$ 时的驻波频率, M_2 试件驻波频率略低于 M_1 试件驻波频率。由文献[15]可知, 造成波速变化的原因在于材料组成成分、结构、孔隙度等差异

性。樟子松为针叶材, 主要结构为管胞和木射线在径向排列整齐、材质均匀。榉木为阔叶材, 主要结构为木纤维、导管分子以及轴向薄壁细胞等在径向不规则排列、结构复杂。故榉木的声阻抗大于樟子松, 榉木波速便小于樟子松。由公式(5)可得, 试件长度固定时, 樟子松的第 n 阶驻波的频率总是大于榉木第 n 阶驻波的频率。

2.2 M_3 和 M_4 试件中的信号特征

改变长度后的 M_3 和 M_4 试件木条断裂时产生的 AE 信号见图 7。

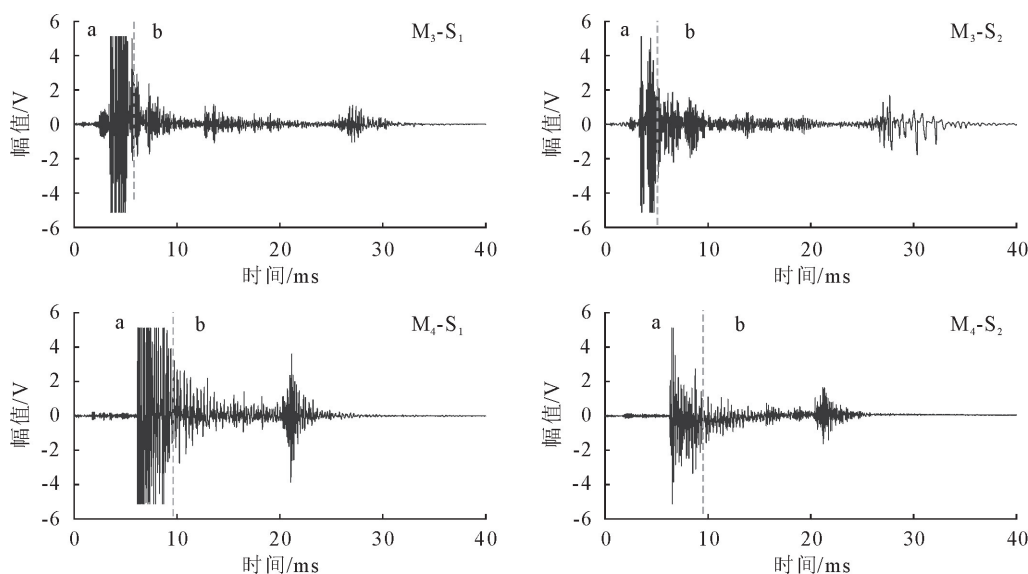


图 7 M_3 和 M_4 试件的传感器 S_1 和传感器 S_2 原始信号

Fig. 7 Original signals of sensor S_1 and sensor S_2 of M_3 and M_4 specimens

在短试件的原始信号时域图中仍能根据波形特征分为声发射阶段和驻波阶段。由于本文针对于驻波频率特性计算纵波速度来确定顺纹 MOE, 而由上文分析可知, 驻波成分主要存在于近似信号中, 且 2 个传感器所采集到的驻波成分相同, 为简单起见, 下文只对 S_1 传感器小波分解后的近似信号进行频域分析。 M_3 试件与 M_4 试件的 S_1 传感器近似信号频域分析见图 8, 两试件驻波特征频率见表 3。

表 3 M_3 和 M_4 试件驻波信号主频

Table 3 The main frequency of M_3 and M_4 specimen standing wave signals kHz

分解层数	M_3 试件 驻波信号主频		M_4 试件 驻波信号主频	
	$n=1$	$n=2$	$n=1$	$n=2$
1	4.30	9.40	4.10	8.00
2	4.30	9.40	4.10	8.00
3	4.30	9.40	4.10	8.00
4	4.30	9.40	4.10	8.00

在 M_3 试件中, 驻波基频为 4.30 kHz, 波数 $n=2$ 的驻波频率为 9.40 kHz。在 M_4 试件中, 驻波基

频为 4.10 kHz, 波数 $n=2$ 的驻波频率为 8.00 kHz。与长试件的结论相同, 樟子松试件驻波成分略高于榉木试件驻波成分, 证明媒介的种类会影响驻波频率。

对比 M_1 、 M_3 和 M_2 、 M_4 的驻波频率可以发现, 材料相同的情况下, 长试件驻波频率均低于短试件驻波频率。这是因为试件变短引起波节距离变小, 便会导致频率升高。

2.3 试件中纵波的传播速率以及木材顺纹 MOE

通过小波分解获取第 n 阶驻波频率后, 依据公式(5)算得入射波速 c 。由于木材属于黏弹性材料, 近似点源的声发射并不会使得木材发生明显的形变, 故将木材近似为泊松比为 0, 便可以使用纵波传播速率计算公式(6)反推出 MOE 计算公式(7)

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (6)$$

$$E = c^2 \rho = \frac{4L^2 f_n^2 \rho}{n^2} \quad (7)$$

式中: E 为弹性模量; ρ 为媒介密度。为减小试验的随机性, 分别在 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 试件上进行 8 次独

立试验,最终分析出各试件中纵波传播速率及顺纹 MOE 见表 4。

表 4 四种试件试验数据分析结果

Table 4 Test data and analysis results of 4 specimens

试件	波数 /n	平均驻波频率 /kHz	平均速率 /(m·s ⁻¹)	平均 MOE /GPa
M ₁	1	3.30	4803.00	9.37
	2	6.75		
M ₂	1	2.83	4189.50	12.24
	2	5.96		
M ₃	1	4.55	4790.50	9.31
	2	9.33		
M ₄	1	3.90	4111.50	11.81
	2	8.04		

由表 4 可得出,不同尺寸的樟子松试件或榉木

试件所产生驻波的最高波数均为 $n=2$,这是因为入射波在传递过程中受到木材黏滞特性的影响,高频的成分衰减迅速,无法产生稳定驻波^[15],故驻波频率均落在 0~10 kHz 的窄频率带内。

在樟子松材料中,M₁ 和 M₃ 试件的纵波平均传播速率分别为 4 803.00 m·s⁻¹ 和 4 790.50 m·s⁻¹,计算出的顺纹平均 MOE 分别为 9.37 GPa 和 9.31 GPa。在榉木材料中,M₂ 和 M₄ 试件的纵波平均传播速率分别为 4 189.50 m·s⁻¹ 和 4 111.50 m·s⁻¹,计算出的顺纹平均 MOE 分别为 12.24 GPa 和 11.81 GPa。

将 2 种木材的哑铃型试件分别进行 3 次独立拉伸试验,以测定木材实际 MOE,来与计算所得 MOE 进行对比,所得试验结果见表 5。

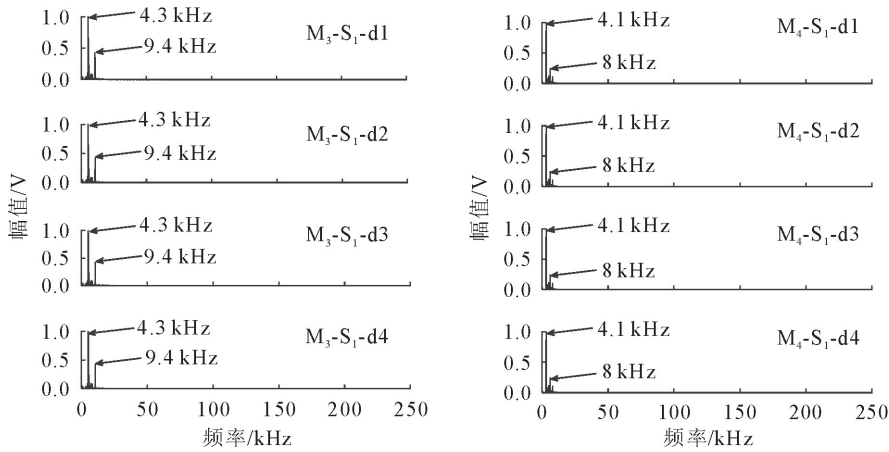


图 8 M₃ 与 M₄ 试件 S₁ 传感器近似信号频域分析

Fig. 8 Frequency domain analysis diagram of approximate signal of M₃ and M₄ S₁ sensor

表 5 拉伸试验所得顺纹 MOE

Table 5 MOE along the grain obtained by tensile test

树种	密度 ρ /(kg·m ⁻³)	顺纹 MOE/GPa			
		试验样品 1	试验样品 2	试验样品 3	均值
樟子松	404.96	9.41	8.69	9.88	9.30
榉木	695.50	11.68	12.42	11.91	11.63

由表 5 可知,拉伸试验所得樟子松顺纹方向平均 MOE 为 9.3 GPa,而榉木顺纹方向平均 MOE 为 11.63 GPa。800 mm 的樟子松和榉木试件中计算所得 MOE 与实测 MOE 的误差分别为 0.75% 和 5.24%;600 mm 的樟子松和榉木试件中计算所得 MOE 与实测 MOE 的误差分别为 0.10% 和 1.55%,证明使用驻波法测算的 MOE 与实际试验所测得的 MOE 基本一致,意味着使用驻波法测量 MOE 具有可靠性。

3 结论与讨论

针对木材损伤时激发的驻波特性,分别使用不

同尺寸的樟子松和榉木试件作为研究对象,深入分析 AE 信号所激发的驻波沿樟子松及榉木试件顺纹方向传播时的时频域特性及传播速率,并应用于木材顺纹 MOE 的计算,并实测木材 MOE 以验证驻波法测量 MOE 的可靠性。基于试验现象得出如下结论。

1)2 种木材损伤 AE 信号所产生的驻波信号,在频率组成和特征分布上基本保持一致,不存在显著区别,并且 2 种尺寸的樟子松试件或榉木试件所产生驻波的最高波数均为 $n=2$,说明高频入射波衰减迅速,无法构成稳定的驻波成分,所以 2 种木材的 600 mm 试件与 800 mm 试件中驻波的主要成分在

0~10 kHz 的低频范围内。

2) 由于樟子松和榉木微观结构上的差异性, 相同尺寸的樟子松试件驻波频率高于榉木, 且相同木材的短尺寸试件的驻波频率高于长尺寸, 证明驻波频率仅与传递媒介的种类、长度有关。

(3) 根据不同尺寸长度的木材试件的驻波成分频率计算所得速度范围接近, 所得平均 MOE 范围接近, 印证了材料本身的纵波速度和力学性能参数只与材料本身属性有关, 并且实测的木材 MOE 与利用驻波频率所求得的 MOE 数值基本一致。

参考文献:

- [1] VERSTRYNGE E, WEVERS M, GHIASSI B, *et al.* Debonding damage analysis in composite-masonry strengthening systems with polymer-and mortar-based matrix by means of the acoustic emission technique[J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(1): 15009.
- [2] 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): 1-15.
- [3] OHUCHI T, HERMAWAN A, FUJIMOTO N. Basic studies on fracture toughness of sugi and acoustic emission[J]. *Journal-Faculty of Agriculture Kyushu University*, 2011, 56(1): 99-102.
- [4] BRUNO C, HONÓRIO Z, RODRIGO D, *et al.* Well log denoising and geological enhancement based on discrete wavelet transform and hybrid thresholding[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2012, 30(3): 242-244.
- [5] 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(3): 97-100.
GUO X L, GUO Y, HU W, *et al.* Acoustic emission characterization of wood base composite materials fracture[J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition*, 2011(3): 97-100. (in Chinese)
- [6] 丁馨曾, 赵海龙, 申珂楠, 等. 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, *et al.* Application of Acoustic Emission Technique in Wood Drying[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2015, 30(3): 242-244. (in Chinese)
- [7] 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(3): 40-43.
DING X K, ZHANG X X, HAO Y H, *et al.* Acoustic Emission Analysis during Drying Small Thin Wood Samples[J]. *China Wood Industry*, 2012(3): 40-43. (in Chinese)
- [8] 豆春峰, 李明, 朱代根. 基于声发射技术模拟蛀木害虫羽化孔洞缺陷检测[J]. *中南林业科技大学学报*, 2021, 41(2): 162-170.
DOU C F, LI M, ZHU D G, *et al.* The detection of hole defects in the simulation of wood borer based on acoustic emission technology[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2021, 41(2): 162-170. (in Chinese)
- [9] 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): 3.
XU H, XUE L F, LIU Y F, *et al.* Application of Acoustic Emission Technique in Detecting Mechanic Performance of Particleboard[J]. *China Forest Products Industry*, 2004, 31(6): 3. (in Chinese)
- [10] RITSCHER F, BRUNNER A J, NIEMZ P. Nondestructive evaluation of damage accumulation in tensile test specimens made from solid wood and layered wood materials[J]. *Composite Structures*, 2013, 95: 44-52.
- [11] 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. (in Chinese)
- [12] 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.
SHEN K N, ZHAO H L, DING X Z, *et al.* Wood acoustic emission signal acquisition and wavelet extraction based on LabVIEW[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2015, 35(4): 125-129. (in Chinese)
- [13] 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*, 2017, 32(2): 247-251. (in Chinese)
- [14] 耿汇泉, 金琤, 周新甲, 等. 基于 X-CT 技术的木材三维孔隙结构评定与量化研究[J]. *森林工程*, 2021, 37(5): 43-49.
GENG H Q, JIN H, ZHOU X J, *et al.* Evaluation and quantification of wood 3 D pore structure via X-CT technology[J]. *Forest Engineering*, 2021, 37(5): 43-49. (in Chinese)
- [15] 云美厚, 李晓斌, 冯磊. 地震波速度影响因素剖析[J]. *石油地球物理勘探*, 2021, 56(6): 1448-1458, 1204. DOI: 10. 13810/j. cnki. issn. 1000-7210. 2021. 06. 026.
YUN M H, LI X B, FENG L, *et al.* Influencing Factors of Seismic Wave Velocity[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2021, 56(6): 1448-1458, 1204. (in Chinese)