

# 花旗松胶合木梁声发射信号及其传播特征研究

李 杨,罗廷芳,于帅帅,申丽娟,李 明\*

(西南林业大学 机械与交通学院,云南 昆明 650224)

**摘要:**针对胶合木梁声发射无损检测问题,研究花旗松胶合木梁声发射信号时频域特征及其传播规律,以及微弱声发射信号的小波分析方法。首先采用 NI 高速数据采集设备及 LabVIEW 软件构建木材声发射信号采集平台,然后通过铅芯折断模拟声发射源,分析声发射信号在表面和厚度方向上的时频域特征及传播速率,最后针对铅芯滑动引起的微弱声发射信号,采用小波分析方法重构声发射信号波形。研究表明,采用铅芯折断模拟声发射源时,花旗松胶合木梁表面和厚度方向的声发射信号频率都集中在 70 kHz 左右,且声发射信号沿表面传播速率更大,但沿厚度方向的信号衰减更加明显。对于“淹没”在噪声中的微弱声发射信号,采用小波分析的方法能够有效重构声发射信号波形。研究结果为花旗松胶合木梁声发射无损检测提供必要的基础理论依据。

**关键词:**花旗松;胶合木梁;声发射;小波分析

**中图分类号:**S781.6      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2017)05-0197-05

Signal Propagation Characteristics of Acoustic Emission and Douglas Fir Glulam Beams

LI Yang, LUO Ting-fang, YU Shuai-shuai, SHEN Li-juan, LI Ming\*

(School of Machinery & Transportation Engineering, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China)

**Abstract:** Aiming at the issue of nondestructive test of the beam made from the glued laminated timber (glulam) of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) based on acoustic emission (AE), time and frequency domain characteristics and propagation of the AE signals of the beam, as well as the application of wavelet analysis method to control the weak AE signals were investigated. Firstly, a wood AE signal acquisition platform was set up by using NI high speed data acquisition equipment and the LabVIEW software. Then the time domain characteristics and propagation velocity of AE signals in the surface and thickness direction by the simulation of AE source under lead core fracture were analyzed. Finally, the wavelet analysis method was used to reconstruct the waveform of AE signal for the weak AE signal caused by the sliding of the lead core. The results showed that the AE signal was mainly concentrated about 70 kHz in the beam when lead core fracture was used. The propagation velocity of AE signal was greater on the surface, but the signal attenuation along the thickness direction was more significant. In addition, as for the “weak” AE signals submerged in noise, the wavelet analysis method could effectively reconstruct the AE signal waveform. The results of the study could provide the necessary theoretical evidence for Douglas fir Glulam AE nondestructive test.

**Key words:**douglas fir; glulam; acoustic emission; wavelet analysis

声发射(AE, acoustic emission)是材料局部源能量快速释放而产生瞬态弹性波的现象<sup>[1]</sup>。工程上

将用仪器探测、记录、分析声发射信号和利用声发射信号推断声发射源的技术称为声发射技术<sup>[2]</sup>,得益

收稿日期:2017-01-13 修回日期:2017-02-10

基金项目:国家自然科学基金项目(31100424);西南林业大学科技创新基金(C16055)。

作者简介:李 杨,男,在读硕士,研究方向:木材声发射信号及其传播特征分析。E-mail:1690065668@qq.com

\* 通信作者:李 明,男,博士,教授,研究方向:智能算法和木材声发射性能。E-mail:swfu\_lm@swfu.edu.cn

于 AE 技术的主动无损检测方式, 目前声发射检测广泛应用于材料的研究、监测飞机构件的强度等方面<sup>[3-4]</sup>。木材作为一种天然可再生资源, 一直以来都是非常重要的建筑材料, 特别是木结构建筑日益推广, 使得安全监测显得非常关键和重要, 为此 AE 技术提供了一种很好的实现手段, 被广泛应用于区分木材的等级、控制木材的干燥过程、检测木材的物理性能和缺陷等方面<sup>[5-7]</sup>。T. Ohuchi<sup>[8]</sup> 等通过不同方向的拉伸试验, 对拉伸开裂过程中木材不同截面产生的 AE 信号特征进行分析和比较。同年, D. Varner<sup>[9]</sup> 等提出了关于识别木材标本在静止弯曲实验下产生的声发射源学说。F. Ritschel<sup>[10-11]</sup> 等通过低于 50% 应力水平下的木材拉伸试验, 研究胶合板层积材和实木 AE 事件的增长区别。丁小康<sup>[12]</sup> 对木材干燥过程中产生的声发射信号进行了采集和特征分析。申珂楠<sup>[13]</sup> 等基于 LabVIEW 软件设计了一种木材 AE 信号小波析取与处理平台。

胶合木(glulam)作为一种常用的木结构建筑用材, 广泛应用于体育馆、大型公共场所的制造。随着胶合木应用的日益增加, 对其应用过程的力学安全性无损监测显得尤为重要, AE 技术作为惟一的主动式无损检测方法, 为此提供了可行有效的实现途径。然而目前 AE 技术在木材及木制品方面的应用主要集中在实木方面, 特别是国内对胶合木的 AE 信号相关研究还少有报道。

目前 AE 技术主要有参数和波形分析 2 种方法<sup>[14]</sup>, 其中参数分析方法相对简单, 但是前提是对我所研究材料的 AE 信号时频域特性有较为充分的了解, 并在此基础上设置相关阈值。然而, 胶合木梁是对小尺寸木材优选后的拼接, 并且存在胶层的作用, 所以与同种的实木材料相比, 其中的 AE 信号及其传播特性更为复杂, 在胶合木 AE 信号的分析过程中大多采用波形分析法。

因此, 本研究选用花旗松胶合木梁(*Pseudotsuga menziesii* glulam)为试验材料, 对胶合木声发射信号及其传播特征进行探索性研究。首先建立一种基于 NI 高速采集设备的声发射信号采集平台, 分析以铅芯连续折断模拟声源时试件表面和内部的 AE 信号特征, 并结合相应数据估算出声发射信号在花旗松表面和内部的传播速率, 最后利用小波分析析取铅芯滑动过程中“淹没”在噪声中的微弱 AE 信号, 为胶合木 AE 信号的降噪提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

以花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)胶合木梁为

研究对象, 所制作的试验试件尺寸为 560 mm×160 mm×120 mm。为了研究花旗松表面和内部 AE 信号的差异, 试验中在花旗松上、下表面各布置 1 个传感器(其中上表面传感器记为传感器 1, 下表面传感器为传感器 2), 同时保证 2 个传感器距离声源的位置均为  $L=120$  mm, 并采用铅芯连续折断两次来人工模拟声源, 各通道的采集电压幅值设置为(-5 V, 5 V), 采样频率为 500 kHz。

### 1.2 试验方法

现有研究表明<sup>[15-17]</sup>, 木材 AE 信号一般集中在 50~200 kHz 范围内, 为此本研究选用 SR150N 声华单端谐振声发射传感器, 其采集频率在 20~220 kHz 之间, 该传感器同时配置了增益为 40 dB 的 PAI 前置放大器, 该放大器内置降噪装置, 能有效放大信号, 同时减少噪声信号。此外, 为了满足香农采样定理的基本要求, 采用 USB-6366 NI 高速采集设备完成信号采集, 该设备的采样频率最高可达 2 MHz(图 1)。



图 1 花旗松声发射采集平台

Fig. 1 Douglas fir acoustic emission acquisition system

在计算胶合木梁 AE 信号的传播速率时, 利用传感器之间的距离差与传感器接收 AE 信号的时间差之比, 其比值即为 AE 信号的平均传播速率。为了确定 AE 信号在试件表面及厚度方向的平均传播速率, 首先通过试验方法测定表面的平均速率, 由于厚度方向不易布置多个传感器, 所以再利用厚度与表面方向 AE 传播速率的关系推导厚度方向的传播速率。试验将声源与传感器共线, 1# 传感器放置在距离声源  $L=120$  mm 处, 2# 传感器放置于距 1# 传感器  $S=180$  mm(图 2), 仍采用铅芯折断人工模拟声发射源。

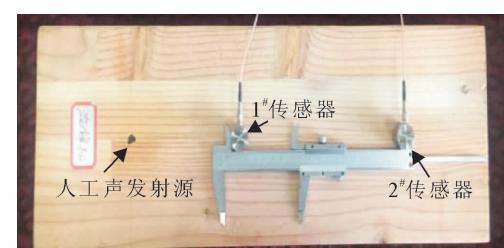


图 2 传感器连接实物图

Fig. 2 Sensor connection diagram

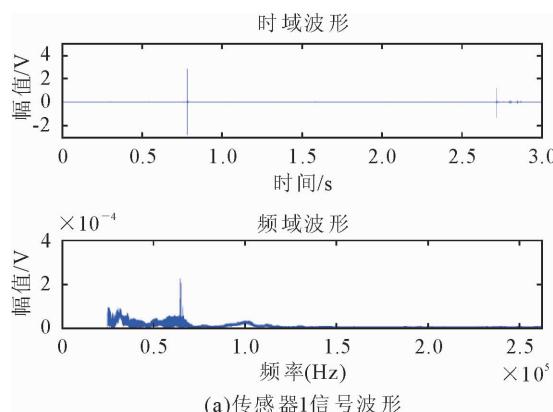
为了进一步对采集的 AE 信号进行时频域分析,同时兼顾软硬件的相容性,研究在 LabVIEW 环境中设计了 AE 信号分析与处理的软件平台,并结合 Matlab 程序对 AE 信号进行小波分解,将信号分解成各个频段的信号,并剔除含有噪声的信号频段,对含有声发射信号频段的信号进行重构,从而将“淹没”在噪声中的 AE 信号析取出来。

## 2 结果与分析

分析 AE 信号的传播特性是利用 AE 技术进行木材无损检测的关键。因此研究以铅芯折断的方式人工模拟声发射源,分析花旗松胶合木表面和厚度方向的声发射信号特征,并研究 AE 信号在表面和厚度方向的平均传播速率。

### 2.1 铅芯折断声发射信号特征

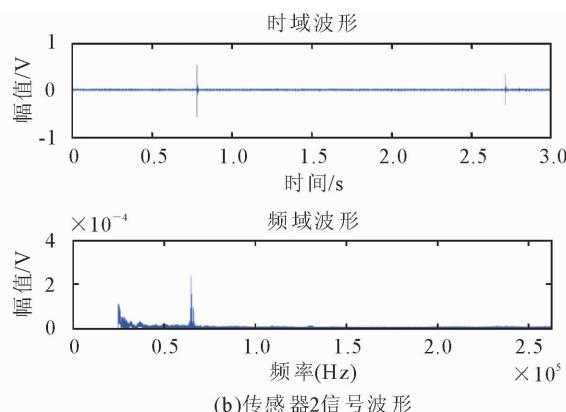
图 3 为 2 个传感器分别采集的声发射信号时域波形和频谱图,因为传感器的采集频率在 20~220



(a) 传感器1信号波形

kHz 之间,因此在进行分析之前滤掉 <20 kHz 信号。通过图 3(a)和图 3(b)的对比可以发现,传感器 1 采集的声发射信号时域波形幅值分布在区间 (-3 V, +3 V) 上,而传感器 2 上声发射信号时域波形幅值的分布区间为 (-1 V, +1 V),因此 AE 信号在花旗松胶合木梁内部传播将受到一定程度的阻碍,从而导致厚度方向采集的 AE 信号时域波形幅值较表面减弱明显。

从频谱图中可以发现,花旗松胶合木梁的声发射信号主要集中在 70 kHz 左右。然而,申珂楠<sup>[13]</sup>等对实木 AE 信号的研究表明,铅芯折断时木材声发射信号主要集中在 150 kHz 左右,因此花旗松胶合木的声发射信号保持了木材的基本特性,但由于胶合木加工时对木材进行优化排列,使得波形分布较为集中;同时受内部胶层影响,厚度方向声发射信号衰减明显。



(b) 传感器2信号波形

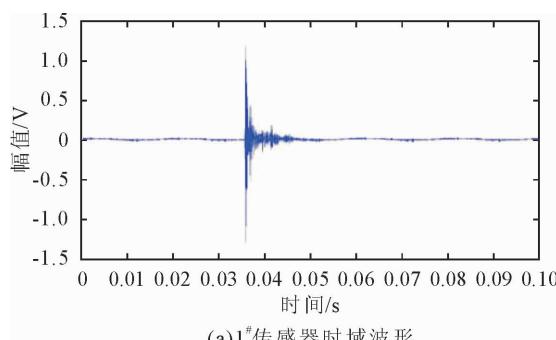
图 3 铅芯连续折断时声发射信号时域波形和频谱图

Fig. 3 Time domain waveform and frequency spectrum of AE signal under the lead core continuity fractured

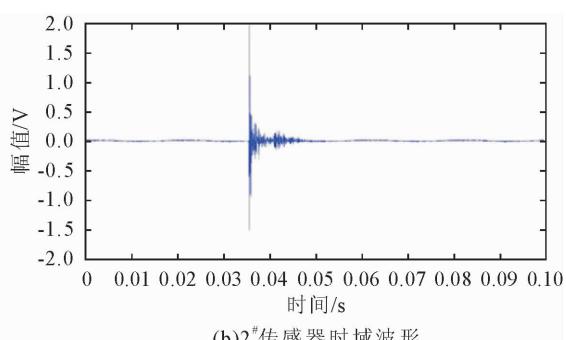
### 2.2 胶合木梁声发射信号传播速率

2 个传感器采集的 AE 信号时域波形如图 4 所示,将时域波形峰值到达 2 个传感器的时间差作为

AE 信号传播的时间差 ( $\Delta t = 0.35 \text{ ms}$ ),由 2 个传感器的距离  $S$  已知,AE 信号在试件表面的平均传播速度  $u = S / \Delta t \approx 514.29 \text{ m/s}$ 。



(a) 1#传感器时域波形



(b) 2#传感器时域波形

图 4 花旗松表面声发射信号时域波形

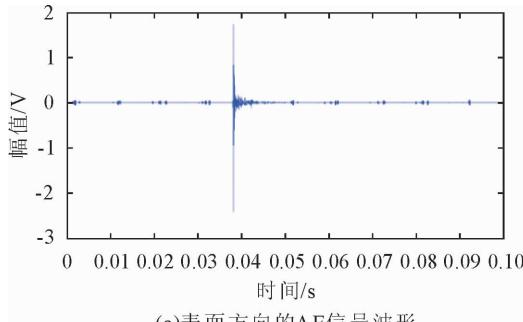
Fig. 4 Acoustic emission signals broadcasting through the surface of Douglas fir piece

为了确定 AE 信号在试件厚度方向的平均传播速率,如图 1 所示的声发射信号采集平台中,将 2 个

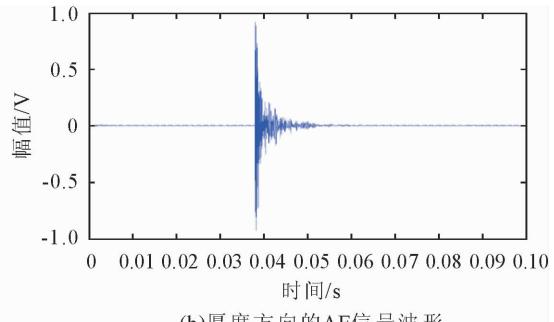
声发射传感器分别置于花旗松上、下表面,由传感器距声发射源的距离相等均为  $L$ ,所以 AE 信号在传

传感器 1 上的传播速率  $v_1$  与在传感器 2 上的传播速率  $v_2$  之比为其时间的反比, 即  $v_1/v_2 = t_2/t_1$ , 因此可通过表面传播速率与 AE 信号峰值时间差来推导厚度方向的传播速率。试验过程中, 同样采用铅芯折断人工模拟声源, 传感器采集的 AE 信号时域波形如图 5 所示, 并计算出波形峰值的时间差  $\Delta t' = 0.05$  ms, 已确定试件表面的 AE 信号平均传播速率  $u$ , 所以放置于试件表面的 1# 传感器接收 AE 信号时间

$t_1 = L/v_1 \approx 0.23$  ms, 由于 1# 传感器与声源均位于试件的上表面, 且胶合木内部存在胶层, 从而降低其内部 AE 信号的传播速度, 延长 AE 信号到达传感器 2 的时间, 因此传感器 2 接收 AE 信号的时间  $t_2 = t_1 + \Delta t' = 0.28$  ms。根据  $v_1$  与  $v_2$  的关系,  $v_2 = v_1 \cdot (t_1/t_2) \approx 422.45$  m/s。本文分别计算出花旗松胶合木梁的 AE 信号在表面和厚度方向的传播速率, 且表面传播速率大于厚度方向传播速率。



(a) 表面方向的 AE 信号波形



(b) 厚度方向的 AE 信号波形

图 5 花旗松表面与内部声发射信号波形

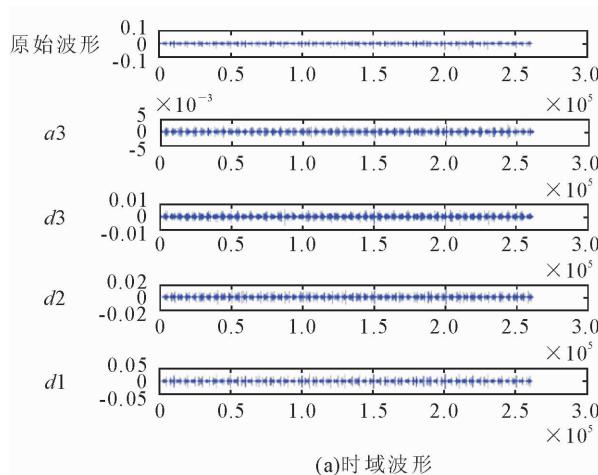
Fig. 5 The AE signal waveform of Douglas fir broadcasting through the directions of surface and thickness

### 2.3 胶合木梁声发射信号小波分析

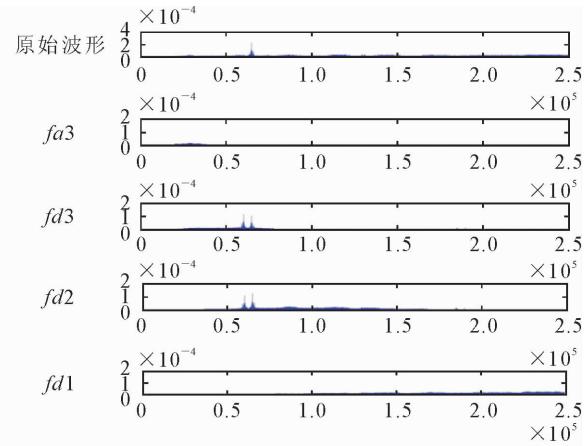
受胶合木内部复杂结构的影响, 声发射信号往往因为衰减严重而“淹没”在噪声中。本试验选用铅芯滑动人工模拟声发射源, 原始时域波形与频谱包含在如图 6 所示的 AE 信号小波分解后各尺度重构时域波形和频谱图中。从图 6 可以发现, 铅芯滑动产生的 AE 信号更为微弱, 且完全覆盖于噪声之中, 因此在对信号进行分析之前, 需要对其进行预处理<sup>[18]</sup>, 将信号从噪声中提取出来, 以便精确地分析

和研究花旗松声发射信号的变化规律及其内部运动频率的分布。

小波分析由于在时域和频域都有良好的特性, 以及对信号的自适应能力, 能在很大程度上消除噪声, 从而保留有用信号, 因此应用小波分析来对声发射信号进行去噪是最佳的方法<sup>[19-20]</sup>。本文从 Daubechies 小波中选择比较常用的 db5 小波作为小波基对采集的信号进行 3 级小波分解, 分解重构后的时域波形与频谱图如图 6 所示。



(a) 时域波形



(b) 频谱图

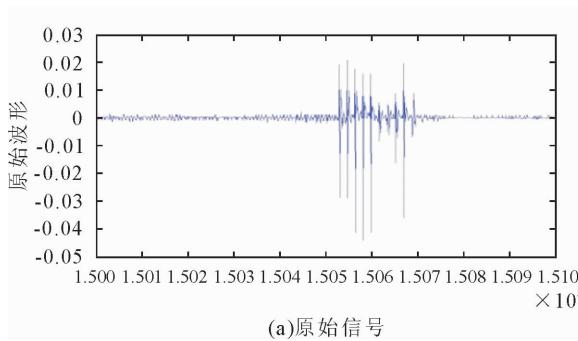
图 6 声发射信号小波分解及重构波形图

Fig. 6 Wavelet decomposition and reconstruction waveform of acoustic emission signal

在图 6 所示的各分解尺度中, 每个尺度的 AE 信号都包含在一定的频率范围内。 $a_3$  表示为第 3 层低频近似部分, 反映声发射信号的变化趋势;  $d_1 \sim d_3$  层为高频细节部分, 反映信号高频成分的组成

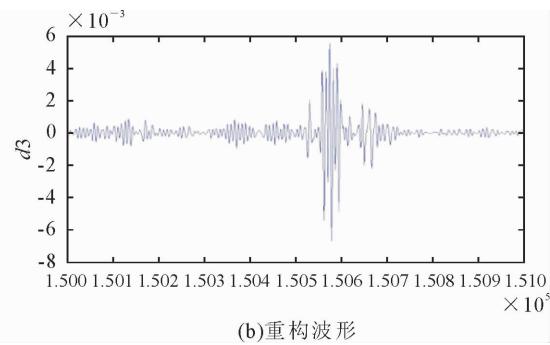
和变化规律。从频谱图中高频层  $d_2$  和  $d_3$  可以看出, 小波变换从噪声中析取 AE 信号, 且保持原始波形中的信号特征。为了更明显地体现小波变换提取微弱声发射信号的过程, 将原始信号与高频层  $d_3$

的时域波形分别截取 0.4 ms(其中包含 1 000 个数据), 截取后的时域波形如图 7 所示, 横坐标表示信号波形的频率。通过图 7(a) 和图 7(b) 对比可以发



(a) 原始信号

现, 高频层 d3 中将“淹没”在噪声中的微弱 AE 信号析取出来, 验证了小波变换在信号提取方面的优势, 并为小波变换对信号的降噪提供依据。



(b) 重构波形

图 7 截取后的声发射信号时域波形

Fig. 7 Time domain waveform of acoustic emission signal after interception

### 3 结论与讨论

通过 NI 高速数据采集卡, 建立花旗松胶合木梁的声发射信号采集平台, 并对 AE 信号的传播特征进行分析。在采用铅芯折断模拟声发射源时, 花旗松声发射信号平稳且主要集中在 70 KHz, 此时信号在花旗松表面的传播速度为 514.29 m/s, 内部的传播速度为 422.45 m/s, 最后利用小波变换对“淹没”在噪声中的 AE 信号进行波形分解重构, 实现胶合木 AE 波形的析取。

声发射技术能够对胶合木内部缺陷进行实时无损检测, 并且小波变换能够有效地对声发射信号进行信噪分离, 为分析胶合木声发射信号特征提供必要的基础。然而由于小波基函数的选取较难且不同的小波基将产生不同的分析结果, 同时小波变换需要处理大量数据, 因此该方法有待改进。

本文仅研究了花旗松胶合木梁的声发射信号波形以及传播特性, 未来可对胶合木表面 AE 信号源定位以及存在不同内部损伤缺陷时的 AE 信号特征进行研究; 同时结合本文对花旗松 AE 信号的研究结果, 建立不同类型胶合木声发射信号的特征参量, 为研究不同材质的胶合木 AE 信号特征提供参考。

### 参考文献:

- [1] BAENSCH F, SAUSE M G, BRUNNER A J, et al. Damage evolution in wood-pattern recognition based on acoustic emission (AE) frequency spectra[J]. Holzforschung, 2015, 69(3): 357-365.
- [2] VERSTRYNGE E, VAN BALEN K, WEVERS M, et al. Detection and localization of debonding damage in composite-masonry strengthening systems with the Acoustic Emission technique[J]. Nature, 2016, 483(7391): 570-575.
- [3] CHACON J L, KAPPATOS V, BALACHANDRAN W, et al. A novel approach for incipient defect detection in rolling bear-
- ings using acoustic emission technique[J]. Applied Acoustics, 2015, 89(89): 88-100.
- [4] 丁簪曾, 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)
- [5] 林兰英, 秦理哲, 傅峰. 微观力学表征技术的发展及其在木材科学领域中的应用[J]. 林业科学, 2015, 51(2): 121-128.  
LIN L Y, QIN L Z, FU F, et al. Development of micromechanical technique and application on wood science[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 30(3): 242-244. (in Chinese)
- [6] 韦鹏练, 廖克波, 符韵林, 等. 山白兰木材干燥特性研究[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(1): 229-231.  
WEI P L, LIAO K B, FU Y L, et al. A study of drying characteristics of *Paramichelia baillonii* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(1): 229-231. (in Chinese)
- [7] 刁海林, 唐继新, 唐贤明, 等. 米老排锯材干燥中试研究[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(6): 168-173.  
DIAO H L, TANG J X, TANG X M, et al. Pilot-scale experiment on the drying of the sawn timber of *Mytilaria laosensis* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(6): 168-173. (in Chinese)
- [8] 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.
- [9] VARNER D, CERNY M, VARNER M, et al. Possible sources of acoustic emission during static bending test of wood specimen[J]. ACTA Univ. Agric. Mendelianae Brun. LX, 2012, 60(3): 199-206.
- [10] RITSCHEL 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(1): 44-52.

(下转第 251 页)

- LIN S P, LIANG Y R. A preliminary exploration of the green system planning in urban aran(Ⅱ)[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(3): 216-218. (in Chinese)
- [8] 王鹏. 城市绿地生态网络规划研究——以上海市为例[D]. 上海:同济大学, 2007.
- [9] 尹海伟, 孔繁花, 祁毅, 等. 湖南省城市群生态网络构建与优化[J]. 生态学报, 2011, 31(10): 2863-2874.
- YIN H W, KONG F H, QI Y, et al. Developing and optimizing ecological networks in urban agglomeration of Hunan Province, China[J]. Acta Ecological Sinica, 2011, 31(10): 2863-2874. (in Chinese)
- [10] 侍昊. 基于RS和GIS的城市绿地生态网络构建技术研究——以扬州市为例[D]. 南京:南京林业大学, 2010.
- [11] 谷康, 曹静怡. 城乡一体化绿地生态网络规划初探[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(1): 175-180.
- GU K, CAO J Y. Preliminary study on green space ecological network planning of urban-rural integration—a case study of Wuhai city[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(1): 175-180. (in Chinese)
- [12] 卜晓丹. 基于GIA的深圳市绿地生态网络构建研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.
- [13] 吴榛, 王浩. 扬州市绿地生态网络构建与优化[J]. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1976-1985.
- WU Z, WANG H. Establishment and optimization of green ecological networks in Yangzhou city[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(7): 1976-1985. (in Chinese)
- [14] 刘滨谊, 王鹏. 绿地生态网络规划的发展历程与中国研究前沿[J]. 中国园林, 2010(3): 1-5.
- LIU B Y, WANG P. Green space ecological network planning evolution and research frontier in China[J]. Chinese Landscape Architecture, 2010, 26(3): 1-5. (in Chinese)
- [15] 安超, 沈清基. 基于空间利用生态绩效的绿色基础设施网络构建方法[J]. 风景园林, 2013(2): 22-31.
- AN C, SHEN Q J. Green space ecological network planning evolution and research frontier in China[J]. Landscape Architecture, 2013(2): 22-31. (in Chinese)
- [16] 孔繁花, 尹海伟. 济南城市绿地生态网络构建[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1711-1719.
- KONG F H, YIN H W. Developing green space ecological networks in Jinan city[J]. Acta Ecological Sinica, 2008, 28(4): 1711-1719. (in Chinese)
- [17] 郭纪光, 蔡永立, 罗坤, 等. 基于目标种保护的生态廊道构建——以崇明岛为例[J]. 生态学杂志, 2009, 28(8): 1668-1772.
- GUO J G, CAI Y L, LUO K, et al. Ecological corridor construction based on target species protection:a case study of Chongming Island[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(8): 1668-1772. (in Chinese)

(上接第201页)

- [11] RITSCHEL F, YANG Z, BRUNNER A J, et al. Acoustic emission analysis of industrial plywood materials exposed to destructive tensile load[J]. Wood Science & Technology, 2014, 48(3): 1-21.
- [12] 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.
- DING X K, ZHANG X X, HAO Y H. Acoustic emission analysis during small thin wood samples[J]. China Wood Industry, 2012, 26(3): 40-43. (in Chinese)
- [13] 申珂楠, 赵海龙, 丁馨增, 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, 2015, 35(4): 125-129. (in Chinese)
- [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(1): 57-70.
- [15] 关佳亮, 陈玲, 刘益嘉, 等. KDP晶体表面波纹度的监测与分析[J]. 制造技术与机床, 2015(9): 126-131.
- GUAN J L, CHEN L, LIU Y J, et al. Monitoring and analysis of KDP crystal surface waviness[J]. Technology and Test, 2015(9): 126-131. (in Chinese)
- [16] 张鹏林, 李梅, 王汝姣, 等. 风电叶片复合材料在三点弯曲过程中的声发射研究[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(4): 21-26.
- ZHANG P L, LI M, WANG R J, et al. Acoustic emission re-
- search of wood-power blades composites in three point bending test[J]. Engineer Plastics Application, 2016, 44(4): 21-26. (in Chinese)
- [17] 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.
- 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. (in Chinese)
- [18] 范博楠, 王海斗, 徐滨士, 等. 强背景噪声下微弱声发射信号提取及处理研究现状[J]. 振动与冲击, 2015, 34(16): 147-155.
- FAN B N, WANG H D, XU B S, et al. Present research situation of the extraction and processing of weak acoustic emission signals understrong background noise[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(16): 147-155. (in Chinese)
- [19] 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. Acoustic emission signal source localization in wood surface with triangle positioning method[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2015, 43(4): 77-81. (in Chinese)
- [20] 周先春, 汪美玲, 石兰芳, 等. 基于小波与重调和方程的扩散去噪模型的研究[J]. 物理学报, 2015, 64(6): 064203-1-064203-9.
- ZHOU X C, WANG M L, SHI L F, et al. Diffusion denoising model based on the wavelet and biharmonic equation[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(6): 064203-1-064203-9. (in Chinese)