

榉木横纹三点弯曲受压声发射损伤模型研究

杨洲凌¹, 黄长林¹, 王明华¹, 丁锐¹, 邓婷婷¹, 李明^{1,2*}

(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 电气工程学院, 安徽 芜湖 241000)

摘要:为探究木材在横纹受压下脆性断裂的损伤演变过程,依据声发射(acoustic emission, AE)事件构建木材损伤变量本构模型。首先,将木材内部等效为若干根互不相关的受压木纤维,每根横纹受压木纤维又可等效为受压微弹簧。然后基于概率思想,在微弹簧的中性层受力分析基础上,假设横纹受压的微弹簧极限应变服从某一分布函数的随机变量,经过分析得到微弹簧的极限应变服从分布函数和木材横纹受压损伤演化方程,以及累计 AE 振铃计数-应变曲线和损伤变量之间关系。最后,通过榉木(*Zelkova schneideriana*)试件三点弯曲 AE 试验得到归一化累计 AE 振铃计数-应变曲线,再利用 Gaussian 曲线拟合出所需参数,进而得到微弹簧的极限应变分布规律和损伤演化方程的表达式,建立三点弯曲受压 AE 损伤模型。结果表明,累计 AE 计数与榉木横纹受压的微观损伤过程是对应的,并且结合 AE 试验数据得出的损伤演化数学模型可以很好地反映榉木横纹受压过程中的损伤演化特征。

关键词:AE 技术;三点弯曲;Gaussian 曲线拟合;数学建模;损伤模型

中图分类号:S781.21

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2022)04-0238-05

Acoustic Emission Damage Model of *Zelkova schneideriana* Transverse Grain Compression Three-Point Bending

YANG Zhou-ling¹, HUANG Chang-lin¹, WANG Ming-hua¹, DING Rui¹, DENG Ting-ting¹, LI Ming^{1,2*}

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

2. School of Electrical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, Anhui, China)

Abstract: In order to explore the damage evolution process of wood brittle fractures under transverse grain compression, a constitutive model of wood damage variables was constructed based on acoustic emission (AE) events. First of all, the interior of the wood was equivalent to several unrelated compressed wood fibers, and each transverse compressed wood fiber could be equivalent to a compressed microspring. Then, based on probabilistic thinking, the force analysis was conducted on the neutral layer of the microspring, from which it was assumed that the ultimate strain of the microspring under the transverse grain obeyed a random variable of a certain distribution function. Through the analysis, the distribution function that ultimate strain of the micro spring obeyed and the damage evolution process of *Zelkova schneideriana* under the transverse grain, as well as the relationship between the cumulative AE ringing count strain curve-the damage variable were obtained. Finally, the normalized cumulative AE ringing count-strain curve was obtained through the three-point bending AE test of *Z. schneideriana* specimen, and the required parameters were fitted by Gaussian curve, then the ultimate strain distribution law and the expression of damage evolution equation of micro spring were obtained, and the AE damage model of three-point bending compression was established. The research results showed that the cumulative AE count corresponded to the micro-

收稿日期:2021-07-30 修回日期:2021-09-14

基金项目:国家自然科学基金项目(31760182)。

第一作者:杨洲凌。研究方向:木材无损检测。E-mail:1505651851@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

scopic damage process of *Z. schneideriana* under compression, and the damage evolution mathematical model derived from the AE test data could well reflect the damage evolution characteristics of the *Z. schneideriana* under the transverse grain compression.

Key words: AE technology; three-point bending; Gaussian curve fitting; mathematical modeling; damage model

木材作为人类可以从大自然直接获取的建筑和生活材料,被广泛应用在人类社会中的方方面面。受木材天然微观构造及在役环境等因素影响,木材在使用过程中难免会发生结构损伤。运用有效技术手段及时获取有关材料结构损伤信息及其演化过程,对于木材的实际工程应用及木质构件的维护具有积极的作用。

声发射检测(acoustic emission, AE)技术作为一种实时动态检测技术,能够依据 AE 信息客观评价材料的结构完整性,近年来,被广泛应用在有关木材断裂演化的研究中^[1-3]。谢启芳等^[4]通过 AE 技术研究了东北落叶松在宏观和细观上的特征,并借此研究了木材顺纹受拉细观损伤的物理机制,得出顺纹拉伸状态下的损伤演化特征与声发射参数之间的关系,构建了木材顺纹受拉状态下的损伤模型;孙建平等^[5]研究山杨在动态载荷下 AE 信号的演变过程,并采用参数分析法研究不同受力阶段木材的 AE 信号特征;邵卓平等^[6]对杉木进行了横纹断裂的单边切口试件三点弯曲试验,发现含有横纹裂纹的木材构件不会因为裂纹尖端应力奇异性而发生低应力破坏,但是木材的缺陷会引起在低应力状态下的顺纹断裂破坏;Leijten 等^[7]对木材横纹受压性能的试验方法以及不同国家设计规范进行了研究,同时验证了 van der Put 提出的木材横纹局部受压的力学模型;Aicher 等^[8]通过 AE 技术研究了云杉木在横纹受拉状态下的损伤演化特征;Lamy 等^[9]通过双悬臂 AE 试验,揭示了声发射信号中含有的能够反映材料裂缝产生和发展的重要信息;Khennane 等^[10]基于不可逆热力学和连续介质力学,建立了基于损伤能释放率的木材顺纹受拉本构模型;张明等^[11-12]通过已有的累计 AE 计数和损伤变量一致的关系,得出了准脆性材料 AE 的损伤模型,进而得到 AE 率和 Kaiser 效应的一般表达式,并给出恒位移速率和恒荷载速率加载方式下声发射率与时间的解析关系。

现有研究较多是在考虑木材在顺纹拉伸载荷作用下的损伤演化模型,而实际工程应用中木材常是作为横向受载的构件,深入研究其在横纹载荷作用下的损伤模型非常有必要的。因此,本研究在已有的木材顺纹受拉损伤演化模型的基础上,对横纹受

压的榉木进行模型分析,建立了榉木的横纹微弹簧束力学模型。然后,通过已建立的模型来研究横纹受压下的榉木内部 AE 信号特征参数及其损伤关系,针对榉木内部横纹受压载荷下损伤过程中的物理变化,得到微弹簧的极限应变分布规律和损伤演化方程的表达式。最后得到榉木横纹脆断 AE 损伤演化模型。

1 材料与方法

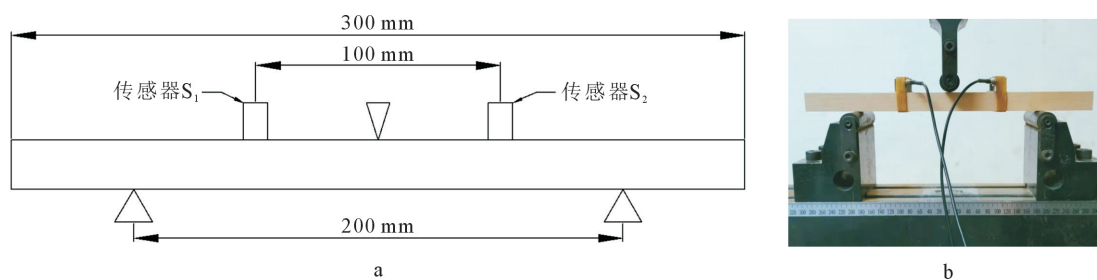
1.1 试验方案

采用欧洲进口的榉木实木锯材为研究对象,榉木属于阔叶树材,木材质地均匀,纤维短,抗压性能佳,常被用于桥梁、建筑等结构用材,相比于针叶树材,榉木断裂行为单一,脆性断裂线性度更好。榉木锯材气干状态下密度为 0.65 g/cm^3 ,绝对含水率为 13.7%。按照试验要求制作一组尺寸大小为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ (径向 \times 弦向 \times 轴向)的试件,表面无干燥开裂现象,在 UTM5105 力学试验机上进行榉木三点弯曲试验。基于 NI USB-6366 高速采集卡和 Lab VIEW 软件自行搭建双通道 AE 信号采集系统,其中传感器为声华 SR 150N 单端谐振 AE 传感器,带宽 $22 \sim 220 \text{ kHz}$,前置放大器增益为 40 dB ^[13]。现有研究表明,榉木的 AE 信号最大频率约为 200 kHz ,依据香浓采样定理,将系统的采样频率设置为 500 kHz ,放大器输出的电压范围为 $(-5 \sim 5 \text{ V})$ ^[14-15]。

试验中,在距离 UTM5105 力学试验机压头 50 mm 处,两端分别放置 1 个传感器,传感器在试件上表面呈中心对称布置,传感器布置示意图如图 1a 所示,试验台实物图如图 1b 所示。为了保证传感器和试件充分耦合,在传感器和试件上涂抹硅胶,装在指定位置,用胶带固定牢固,跨距为 200 mm ,进给速度为 5 mm/min ,设备启动后持续加压,直至榉木试件断裂为止。

1.2 损伤变量定义

假设木材未断裂前的初始横截面积为 A ,木材在受压时发生断裂损伤的横截面积为 A_1 ,木材断裂后的横截面积为 A_2 ;外部施加压力为 $F(\epsilon)$,作用在木材上的应力为 $\sigma(\epsilon)$,木材受压损伤示意图如图 1a 所示。



注:a为传感器布置示意图;b为试验台实物图。

图1 三点弯曲 AE 试验方案

Fig. 1 Three-point bending AE test program

根据力的平衡条件

$$F(\epsilon) = \sigma(\epsilon) \cdot A \quad (1)$$

在损伤力学中,损伤变量表示材料劣化的状态,Kachanov^[16]将损伤变量 $D(\epsilon)$ 定义为 A_1 与 A 的比值:

$$D(\epsilon) = \frac{A_1}{A} \quad (2)$$

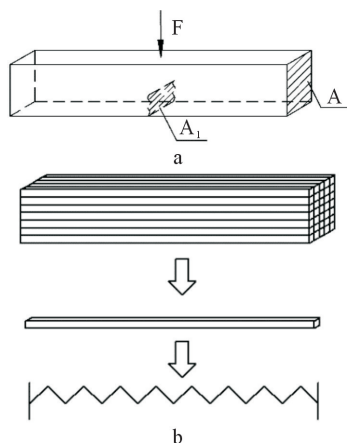
其中:

$$A_1 = A - A_2 \quad (3)$$

所以,式(2)基于木材的横截面积定义了损伤变量的定义。但是,在实际三点弯曲断裂试验中,由于受损的横截面积并不是那么容易测量出来,所以为了更好地得出木材在受压过程中的损伤演化形式,还需要进一步研究论证。

1.3 木材微弹簧

结合木材内部结构相关文献^[4]的研究分析,可以将横纹木材断裂损伤机制等效为木材内部木纤维的断裂(图2)。将木材看作由若干个木纤维组成,微观下一个细小的木纤维又可以看作一个微弹簧(图2b)。



注:a为木材损伤示意图;b为木材纤维模型。

图2 木材模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wood model

1.4 横纹受压微弹簧模型的建立

首先,为了微弹簧模型简便分析起见,对微弹簧

有以下2种假设:1)假设木材中间的微弹簧束是等距且相互独立分布的,并且相互之间无作用力的影响。2)假设所有微弹簧具有弹脆性,且长度和横截面积均相同。

其次,根据材料力学相关理论,在横纹受压时的小变形前提下,木材只受剪切力。其横向木纤维之间只受来自垂直方向上的力,不受水平力。所以可将所有微观上的横截面看作是平面,通过已经分析得到的理论,可以提出一个平面假设:1)假设横截面在受压变形前为平面,变形后依然为平面。2)假设所有横截面始终垂直于纵向直线。

由于在受压过程中,木材的形变是连续的,在由下部纤维的伸长连续过渡到上部纤维的缩短必然有一层纤维长度不变,这层纤维被称作中性层(图3)。

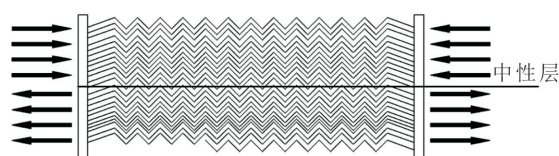


图3 有效受力部分弹簧模型

Fig. 3 Spring model of effective force part

在木材受压弯曲直至底部开始发生断裂过程中,纯弯曲弹簧各点受单应力。应力沿纵向界面由下至上按线性分布,中性层以下部分受横向拉应力,微弹簧横向拉伸;中性层以上部分受横向压应力,微弹簧横向压紧;而在中性轴上既没有拉应力,也没有压应力,即各点应力为零。

将木材微单元取出进行受力分析,如图4所示。对于受横向压力的木材其内部木纤维的纵向应变设为 ϵ ,可得

$$\epsilon = \frac{y}{\rho} \quad (4)$$

式中: ρ 为中性层的曲率半径, y 为计算点到中性层的距离;在材料力学相关理论和胡克定理的基础上,可得

$$\sigma = \frac{My}{I_z} \quad (5)$$

式中: σ 的正负号与坐标 y 的正负号有关, 横截面对于 z 轴的惯性矩 I_z 。在图 3 的坐标系下, 当 y 为正时, σ 为压应力, 微弹簧压缩; y 为负时, σ 为拉应力, 微弹簧伸长。当 $y = y_{\max}$ 时, 即距离中性层最远处时, $\sigma = \sigma_{\max}$ 为最大值。所以在此时木材开始发生断裂, 即微弹簧断裂开始。

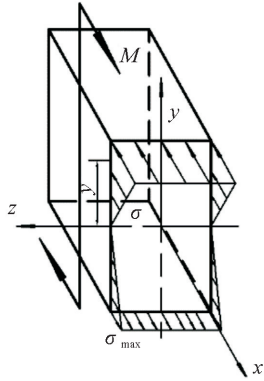


图 4 木材微单元受力模型

Fig. 4 Stress model of wood micro unit

根据文献[4]和相关试验结果, 得出木材横纹受压微弹簧束模型中微弹簧的极限应变 Δ 服从分布函数以及木材横纹受压损伤演化方程为

$$f_{\Delta}(\epsilon) = -2 \frac{a}{c} \left(\frac{\epsilon - b}{c} \right) \cdot e^{-\left(\frac{\epsilon - b}{c} \right)^2} \quad (6)$$

$$D(\epsilon) = a \cdot e^{-\left(\frac{\epsilon - b}{c} \right)^2} \quad (7)$$

式中: a, b, c 为材料常数, 与材料类型有关。即确定了 a, b, c 的值, 也就能得到木材横纹受压损伤演化规律。

2 结果与分析

榉木横纹受压脆断导致内部木纤维断裂所产生的 AE 信号可视为集中在承载界面, 是榉木损伤演变的最直接表现, 分析其信号可以更好地了解榉木内部受压变形过程以及微观上的损伤过程。

假设在榉木横纹受压断裂中, 微弹簧单位面积产生的 AE 振铃计数是 N ; N_1 为完全损伤时的累积 AE 振铃计数; \bar{N} 为均值累计 AE 振铃计数。根据文献[4]可以得出, 榉木横纹受压断裂的损伤演化规律与累计 AE 振铃计数之间的关系

$$D(\epsilon) = \frac{\bar{N}N}{N_1} = \int_0^{\epsilon} f(x) dx \quad (8)$$

$$f_{\Delta}(\epsilon) = \frac{d}{d\epsilon} \left[\frac{\bar{N}}{N_1} \right] \quad (9)$$

式中: \bar{N}/N_1 为归一化处理后的累计 AE 振铃计数-应变曲线, 即损伤演化规律与累计 AE 振铃计数间的关系由此得出。

从图 5 可以看出, 当榉木开始发生脆性断裂时, 此时的 AE 信号明显。榉木受压到临界值, 即弹簧拉伸到临界值。为了进一步分析榉木横纹受压破坏 AE 信号与载荷之间的关系, 同时也为更好地说明可以利用榉木横纹受压 AE 信号特征来对榉木的损伤加以反映, 采用累计 AE 振铃计数-应变曲线进行分析。

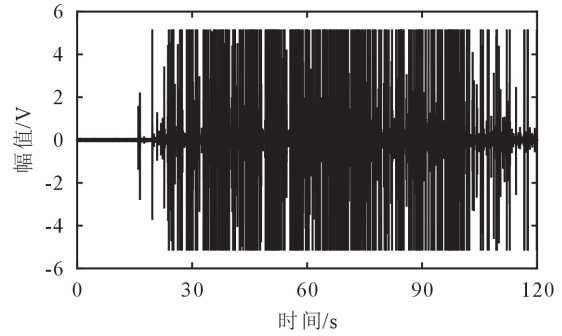


图 5 榉木断裂 AE 信号时域波形

Fig. 5 Time domain waveform of AE signal of *Zelkova schneideriana* fracture

应变反映了榉木在长时间受载荷时其内部断裂的特征, 当单位时间榉木所受载荷增加时, AE 活动强烈, 榉木应变迅速增大。在榉木即将断裂时, 此时的应变会出现一段“平静期”, 说明在断裂之前的单位时间内的 AE 事件数在减少, 这也可以作为榉木断裂的前兆。将试验得到的数据进行处理, 得出应力-应变曲线(图 6a)。

在分析大部分试验数据时, 由于不同数据往往具有不同的量纲和量纲单位, 这样的情况会影响到数据分析的结果。所以需要用到归一化的处理方法, 目的是使得预处理的数据被限定在一定的范围内, 从而消除奇异样本数据导致的不良影响。通过提取出试验结果中载荷对应的累计 AE 振铃计数-应变数据, 再将其进行归一化处理, 用 Gaussian 曲线进行拟合(图 6b)。

通过拟合分析, 在 Gaussian 曲线拟合中可以得到, 相关系数为 0.988 9, 参数 $a_1 = 0.953 6$, $b_1 = 0.175 1$, $c_1 = 0.086 98$ 。

所以弹簧束模型中微弹簧的极限应变分布规律和损伤演化方程的表达式分别如式(10)和式(11)所示

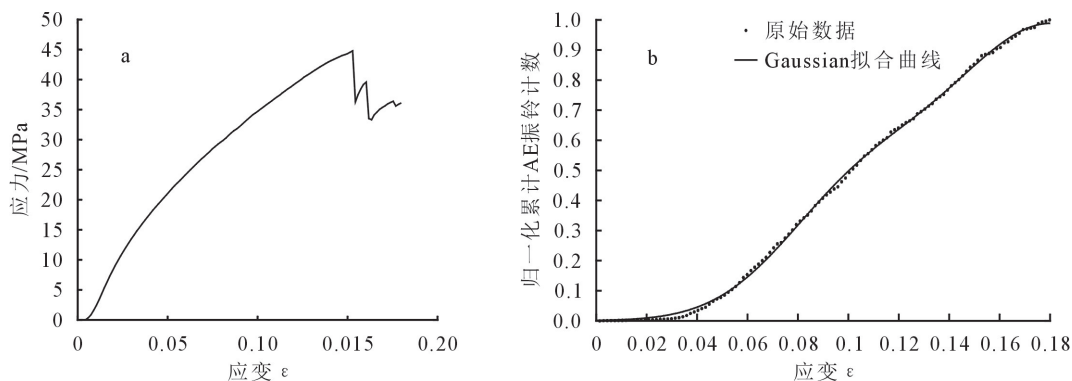
$$f_{\Delta}(\epsilon) = -22 \left(\frac{\epsilon - 0.175 1}{0.086 98} \right) e^{\left(\frac{\epsilon - 0.175 1}{0.086 98} \right)^2} \quad (10)$$

$$D(\epsilon) = 0.959 6 e^{\left(\frac{\epsilon - 0.175 1}{0.086 98} \right)^2} \quad (11)$$

榉木横纹受压破坏实质上经历了一个从微观到宏观的演化过程, 微观损伤从底面中心处(初始缺陷处)开始产生并逐渐向上发生断裂直至试件的宏观破坏。由应力-应变曲线可以看出, 榉木损伤是非线

性的,也说明了榉木微观应变分布的不均匀性,即榉木损伤的非线性实质上是微纤维断裂的非同时性。由归一化累计 AE 振铃计数-应力曲线可以看出,榉木在三点弯曲破坏过程中,累计 AE 振铃计数在不

断增加;当应变到达 0.16 时,累计 AE 振铃计数-应变曲线的斜率开始逐渐减小,说明此时累计 AE 振铃计数的增量也在逐渐减少,也就是单位时间内的 AE 振铃计数在不断降低。



注:a 为榉木三点弯曲应力-应变曲线;b 为归一化累计 AE 振铃计数-应变曲线。

图 6 榉木横纹受压载荷和 AE 特征参数关系

Fig. 6 Relationship between transverse compression load and AE parameters of *Z. schneideriana* specimen

3 结论与讨论

本研究通过将榉木横纹受压力学机制等效为木纤维的脆性断裂以及基于此建立的微观弹簧束模型,建立了榉木三点弯曲受压 AE 损伤模型。榉木三点弯曲试验中所产生的累计 AE 振铃计数是反映榉木损伤的重要特征参数,AE 信号与榉木内部损伤有一致对应关系。AE 信号始终伴随榉木损伤全过程,累计 AE 振铃计数就直接对应着材料不同时间的损伤状态,新的损伤产生一定伴随着新的 AE 信号发生。研究表明,榉木三点弯曲受压破坏的过程就是榉木纤维在受载荷作用下不断发生断裂破坏的过程,即内部微弹簧发生断裂的过程。榉木在发生断裂破坏之前,AE 信号较少,声发射特征不明显;在脆性破坏前的瞬间,产生较多的 AE 信号,反映了榉木受压的脆性断裂。

目前关于木材损伤特征与 AE 信号的研究多为顺纹方向,本研究对榉木横纹受压状态下的木材损伤特征和 AE 信号进行研究,为其他种类木材在横纹方向上的损伤特征和 AE 信号研究提供了参考。此外,未来可以研究木材损伤特征和幅值、能量等其他 AE 信号参数之间的关系,进一步优化木材在横纹方向下的损伤演化模型。

参考文献:

[1] 涂郡成,赵东,赵健.含 LT 型裂纹木梁起裂载荷确定方法的试验研究[J].林业工程学报,2020,5(3):149-154.
TU J C,ZHAO D,ZHAO J. Experimental study for determining method of cracking load of wooden beams with LT crack[J]. Journal of Forestry Engineering,2020,5(3):149-154. (in Chinese)

[2] LI X C,LI M,JU S. Frequency domain identification of acoustic emission events of wood fracture and variable moisture content[J]. Forest Products Journal,2020,70(1):107-114.
[3] 许威,张绍群,陈光伟,等.分形理论在木材断裂研究中的应用与进展[J].木材加工机械,2011,22(6):36-39.
XU W,ZHANG S Q,CHEN G W,*et al.* Application and development of fractal theory on research of wood fracture[J]. Forestry and Grassland Machinery, 2011, 22(6): 36-39. (in Chinese)
[4] 谢启芳,张利朋,王龙,等.东北落叶松材单向顺纹受拉损伤模型[J].湖南大学学报:自然科学版,2017,44(11):109-116.
XIE Q F,ZHANG L P,WANG L,*et al.* Damage evolution model for northeast larch wood under parallel-to-grain tension load[J]. Journal of Hunan University: Natural Science Edition, 2017, 44(11): 109-116. (in Chinese)
[5] 孙建平,王逢瑚,朱晓冬,等.基于声发射技术的木材损伤过程监测[J].福建林学院学报,2006,26(4):344-348.
SUN J P,WANG F H,ZHU X D,*et al.* Application of acoustic emission technology to damage process monitoring of wood under the dynamic loads[J]. Journal of Fujian Forestry College, 2006, 26(4): 344-348. (in Chinese)
[6] 邵卓平,任海青,江泽慧.木材横纹理断裂及强度准则[J].林业科学,2003,39(1):119-125.
SHAO Z P,REN H Q,JIANG Z H. Fracture perpendicular to grain of wood and strength criterion[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39(1): 119-125. (in Chinese)
[7] LEIJTEN A J,LARSEN H J,VAN DER PUT T A. Structural design for compression strength perpendicular to the grain of timber beams[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(3): 252-257.
[8] AICHER S,HOFFLIN L,DILL-LANGER G. Damage evolution and acoustic emission of wood at tension perpendicular to fiber[J]. Holz Als Roh-Und Werkstoff, 2001, 59(1): 104-116.

- Technology, 2016, 50(4): 833-844.
- [64] 李坚. 木材科学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [65] LAINE K, BELT T, RAUTKARI L, *et al.* Measuring the thickness swelling and set-recovery of densified and thermally modified scots pine solid wood[J]. Journal of Materials Science, 2013, 48(24): 8530-8538.
- [66] 李任. 预热条件对毛白杨层状压缩木材形成及其性能影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [67] KOCAEFE D, HUANG X, KOCAEFE Y. Dimensional stabilization of wood[J]. Current Forestry Reports, 2015, 1(3): 151-161.
- [68] GUO J. Changes of wood cell walls in response to hygro-mechanical steam treatment[J]. Carbohydrate Polymers: Scientific and Technological Aspects of Industrially Important Polysaccharides, 2015, 115: 207-214.
- [69] XIAN H, KOCAEFE D, KOCAEFE Y, *et al.* Structural analysis of heat-treated birch (*Betula papyrifera*) surface during artificial weathering[J]. Applied Surface Science, 2013, 264: 117-127.
- [70] GÉRARDIN, P. New alternatives for wood preservation based on thermal and chemical modification of wood—a review[J]. Annals of Forest Science, 2016, 73(3): 559-570.
- [71] DARWIS A, WAHYUDI I, DWIANTO W, *et al.* Densified wood anatomical structure and the effect of heat treatment on the recovery of set[J]. Journal of the Indian Academy of Wood Science, 2017, 14(2): 1-8.
- [72] 高志强, 张耀明, 吴忠其, 等. 加压热处理对表层压缩杨木变形回弹的影响[J]. 木材工业, 2017, 31(166): 24-28.
- [73] SHUOYE, CHEN, EIICHI, *et al.* Shape fixation of compressed wood by steaming: a mechanism of shape fixation by rearrangement of crystalline cellulose[J]. Wood Science & Technology, 2018, 52(5): 1-13.
- [74] INOUE M, NORIMOTO M, OTSUKA Y, *et al.* Surface compression of coniferous wood lumber. 3: permanent set of the surface compressed layer by a water solution of low molecular weight phenolic resin[J]. Journal of the Japan Wood Research Society, 1991, 37(3): 234-240.
- [75] 张云岭. 低分子量三聚氰胺-甲醛树脂固定泡桐压缩木回弹的研究[J]. 木材工业, 1996, 10(6): 15-18.
- [76] 杨霞. 异氰酸酯树脂固定人工林杨木压缩变形的研究[J]. 吉林林业科技, 2006, 35(3): 39-40.

(上接第 242 页)

- [9] 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.
- [10] KHENNANE A, KHELIFA M, BLERON L, *et al.* Numerical modelling of ductile damage evolution in tensile and bending tests of timber structures[J]. Mechanics of Materials, 2014, 68(1): 228-236.
- [11] 张明, 李仲奎, 杨强, 等. 准脆性材料声发射的损伤模型及统计分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2493-2501.
- ZHANG M, LI Z K, YANG Q, *et al.* A damage model and statistical analysis of acoustic emission for quasi-brittle materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2493-2501. (in Chinese)
- [12] 张明, 李仲奎. 准脆性材料破裂过程失稳的尖点突变模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1233-1239.
- ZHANG M, LI Z K. A cusp catastrophe model of unstable failure process of quasi-brittle materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1233-1239. (in Chinese)
- [13] 王明华, 鞠双, 李新慈, 等. 基于 Lab VIEW 的多通道木材声发射信号采集系统[J]. 计算机系统应用, 2020, 29(5): 63-68.
- WANG M H, JU S, LI X C, *et al.* Multi-Channel wood acoustic emission signal acquisition system based on lab VIEW[J]. Computer Systems & Applications, 2020, 29(5): 63-68. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 李新慈, 鞠双, 罗廷芳, 等. 马尾松胶合木胶层对声发射信号传播特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(3): 185-190, 239.
- LI X C, JU S, LUO T F, *et al.* Influence of adhesive layer at massson pine glulam on acoustic emission signal propagation characteristics[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(3): 185-190, 239. (in Chinese)
- [16] 张志研, 赵东. 木材损伤的声发射模式研究[J]. 力学与实践, 2009, 31(2): 74-77.
- ZHANG Z Y, ZHAO D. Study on the acoustic emission model of wood damage[J]. Mechanics in Engineering, 2009, 31(2): 74-77. (in Chinese)