

基于声发射临界慢化特征的木材断裂前兆

翟二壮¹, 李明^{2,3*}, 方赛银^{1*}, 邓婷婷¹, 陈楚敏¹, 王景贵¹, 杜坤¹

(1. 西南林业大学 机械与交通学院, 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: 为预测木材在载荷作用下的微观与宏观破坏行为, 提出基于声发射 (acoustic emission, AE) 信号 b 值 (描述声发射信号的频率分布特性) 和临界慢化 (critical slowing down, CSD) 特征的木材破坏前兆预测方法。首先, 分析载荷加载速率对木材破坏过程的影响, 在木材三点弯试验中分别采用 2 mm/min 和 5 mm/min 2 种加载速率, 以 500 kHz 采样速率采集木材试件破坏过程中释放的 AE 信号。然后, 提出基于 AE 信号幅值划分的改进 b 值计算方法, 将试验产生的 AE 信号分为 3 个等级, 并依此描述载荷作用下木材试件内部裂纹产生与发展过程。最后, 依据 CSD 原理, 提出基于 AE 信号长度相关系数和方差的木材断裂前兆预测方法。研究结果表明, 通过结合不同等级的 b 值分析, 能够反映出试件损伤过程中断裂特性以及微裂纹的产生; 木材发生微观和宏观断裂时, 都会产生 CSD 现象, 体现为 AE 信号相关性系数与方差值的增大; 在不同加载速率下, 当载荷达到极限屈服强度 85% 左右时, 试件均出现显著的 CSD 现象。

关键词: 木材; 声发射; b 值; 微观破坏; 宏观破坏; 临界慢化; 前兆预测; 屈服强度

中图分类号: S781.5; S781.38

文献标识码: A

DOI: 10.7525/j.issn.1006-8023.2026.01.008

Wood Fracture Precursors Based on Critical Slowing Down Characteristics of Acoustic Emission

ZHAI Erzhuang¹, LI Ming^{2,3*}, FANG Saiyin^{1*}, DENG Tingting¹, CHEN Chumin¹, WANG Jinggui¹, DU Kun¹

(1. School of Machinery and Transportation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Key Laboratory of Advanced Perception and Intelligent Control of High-end Equipment, Ministry of Education, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China; 3. School of Electrical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

Abstract: To predict the micro and macro failure behavior of wood under load, a prediction approach of wood damage precursors based on the b-value (describe the frequency distribution characteristics of acoustic emission signals) of the acoustic emission (AE) signal and the critical slowing down (CSD) characteristics was proposed. Firstly, to analyze the impact of load application rate on the wood failure process, two loading rates of 2 mm/min and 5 mm/min were employed in the wood three-point bending experiment, and AE signals released during the damage process of wood specimens were collected at a sampling rate of 500 kHz. Subsequently, an improved b-value calculation approach based on the classification of AE signal amplitude was proposed, and the AE signals generated during the experiment were divided into three levels, and the process of crack generation and development inside the wood specimen under load was described accordingly. Finally, in accordance with the principle of CSD, a prediction method of wood fracture precursors based on the length correlation coefficient and variance of AE signal was presented. The results demonstrated that the combination of different levels of b-values can reflect the fracture features and the generation of microcracks in the damage process of the specimen. CSD occurred when wood cracked at both the micro and macro levels, which was manifested in the increase of the correlation coefficient and variance of AE signal. At different loading rates, when the load reached approximately

收稿日期: 2025-07-11

基金项目: 国家自然科学基金 (32160345); 云南省农业基础联合专项项目 (202501BD070001-030); 云南省基础研究专项 (202201AU070068)。

第一作者简介: 翟二壮, 硕士研究生。研究方向为木材无损检测。E-mail: 946062763@qq.com

*** 通信作者:** 李明, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向为智能控制与优化, 木材声发射特性。E-mail: 1841719811@qq.com
方赛银, 博士, 副教授, 硕士生导师。研究方向为木材无损检测。E-mail: fsy_swfu@163.com

引文格式: 翟二壮, 李明, 方赛银, 等. 基于声发射临界慢化特征的木材断裂前兆[J]. 森林工程, 2026, 42(1): 78-89.

ZHAI E Z, LI M, FANG S Y, et al. Wood fracture precursors based on critical slowing down characteristics of acoustic emission [J]. Forest Engineering, 2026, 42(1): 78-89.

80% of the ultimate yield strength, all the specimens displayed a significant CSD phenomenon.

Keywords: Wood; acoustic emission; b-value; microscopic destruction; macroscopic destruction; critical slowing down; precursor prediction; yield strength

0 引言

木材作为一种绿色环保的可再生材料,被广泛用于建筑结构中。在工程实践中作为支撑结构应用时,不可避免地会发生结构损伤,甚至导致事故。因此对木材进行结构健康动态检测非常重要。声发射(acoustic emission, AE)技术作为一种无损检测方法,能够检测断裂并监测部件的疲劳裂纹扩展,还可用于评估组件的完整性和判断结构损坏的程度^[1]。

当材料受到外力或内力作用产生变形和断裂时,会以瞬态弹性波形式释放出应变能^[2],释放应变能的状态叫AE现象。揭示木材从变形、损伤到断裂破坏的特性,能够从中获得新的木材构造强韧性性能相互关系的认识^[3-5]。Guo等^[6]通过AE事件与时间、载荷的对应关系,基于累积AE事件准确地确定复合材料的裂纹起裂点,并且将木材的损伤过程分为弹性变形、裂纹产生和扩展、断裂3个阶段。Aicher等^[7]采用AE分析方法,通过对云杉进行拉伸实验观察其损伤演化过程,证明了木材微观层面的损伤演化是渐进的、局部的过程。Fotouhi等^[8]通过复合材料进行三点弯曲试验,基于AE能量分布和AE计数分布,对不同程度的分层损伤演变进行研究。因此,为探究材料损伤过程,并且对材料损伤进行前兆预测,本研究通过b值来分析和辨识损伤。

早在1944年,Gutenberg等^[9]提出的地震震级与地震次数之间相互换算的经验公式中首次应用到b值(描述AE信号的频率分布特性)。地震波是指从震源产生向四周辐射的弹性波,这与岩石、木材等材料破坏过程中产生的弹性波相似,因此b值广泛用于评价材料的损伤特性。许多学者利用AE的b值进行了岩石破坏的特征研究^[10-12]。郭鹏飞等^[13]将AE的b值与AE特征参数方差和自相关系数结合分析,将b值突降点确定为岩石破坏前兆特征点。而同样对于木材中,Li等^[14]采集了木材三点弯曲断裂过程中的AE信号,利用b值和震级熵对损伤过程进行评价,证实b值可反映应变能释放状态。Zhang等^[15]采用AE的b值来评价木材试件损伤行为所释放的应变能强度,发现在塑性阶段,木材内部往往伴有细小裂纹。AE的b值在评价材料损伤方面起着非常重要的作用,通过b值的波动能够很好地反映出材料损伤的过程,能够更有效地识别材料的损伤阶段。木材出现裂纹及断裂是危害严重的

破坏行为,会严重影响其使用价值,因此能够提前预测木材的损伤非常重要。

对于自然界复杂的动力系统,系统从某一状态向另一状态转变是一种普遍存在的现象,当系统接近关键过渡时期会出现一种称为“临界慢化”的现象,表现为信号方差和自相关系数的增加^[16-17],这一现象是复杂动态系统的一个重要过渡特征,目前已被应用于许多领域^[18-20]。现已有很多国内外学者基于临界慢化(critical slowing down, CSD)理论对岩石破坏的前兆特征进行了相关研究^[21-25]。刘先林等^[26]对有预制裂隙的砂岩试件开展单轴压缩下的振铃计数/持续时间(AE)试验,从CSD角度研究振铃计数、绝对能量、幅值、峰值频率、上升时间(RA)及RA/AF等AE参数的特征,发现均存在CSD现象。Wei等^[27]对砂岩进行了单轴压缩试验,将AE振铃计数的自相关系数的突然增大和方差的增加作为砂岩试件破坏的前兆信号。而对于木材,在断裂前会出现明显的塑性变形和裂纹扩展,在裂纹萌生并扩展时,也会产生较明显的应变能的释放。本研究通过CSD现象,对木材裂纹产生和宏观断裂的损伤行为进行前兆预测。

为了探究木材损伤破坏过程的CSD现象,对木材损伤断裂过程中产生的损伤行为进行预测,本研究首先通过不同幅值等级的b值来分析试件内部的损伤过程,并将木材损伤过程中,出现裂纹并伴随着应变能明显释放的阶段作为相态转变点;然后结合CSD特征表现出来的自相关系数和方差曲线的变化特征,对木材裂纹产生和宏观断裂的损伤行为进行预测,同时通过临界信号,对木材所承受危险载荷进行估计。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

本研究选取6块气干密度(含水率12%时)、自然状态下的榉木(*Zelkova schneideriana*)为试验材料,分别用S1—S6表示,试件尺寸均为300 mm×20 mm×20 mm(长(L)×宽(W)×高(H))。依据ASTM-D198-21a设定三点弯曲试验参数,采用UTM5105型电子万能力学试验机对试件进行三点弯曲加载试验,针对每个试件采用的加载速率见表1。试验基于NI USB-6366高速采集卡和Lab VIEW软件搭建的1通道AE信号采集系统,选用RS-2A单端谐振式AE传感器,谐振频率为150 kHz,为了实现AE信号远距离的传输,采用增益为

40 dB的PAI前端放大器。由于在木材损伤断裂过程中AE信号的最大频率约为200 kHz^[28],为了保证重建的采集信号不失真,根据香农采样定理,系统的采样频率设置为500 kHz。电压的输出范围设置为(-10 V, 10 V)。

表1 试件密度和加载速率
Tab. 1 Specimen density and loading rate

试件 Specimen	密度/(g·cm ⁻³) Density	加载速率/(mm·min ⁻¹) Loading rate
S1	0.685	2
S2	0.675	2
S3	0.695	2
S4	0.616	5
S5	0.670	5
S6	0.668	5

1.2 试验方法

将木材试件放置在支撑点A、B上,如图1所示,跨距AB设置为220 mm,AE传感器放置在试件的上表面,距离左端面40 mm。通过万能力学试验机对木材试件的中心位置P点施加持续载荷进行三点弯曲试

验。为保证试验过程中传感器与木材的充分接触,隔绝空气介质对AE信号的影响,采用高温绝缘硅脂填充以确保充分耦合,并利用橡胶带将传感器固定在试件表面,确保信号采集的准确性。

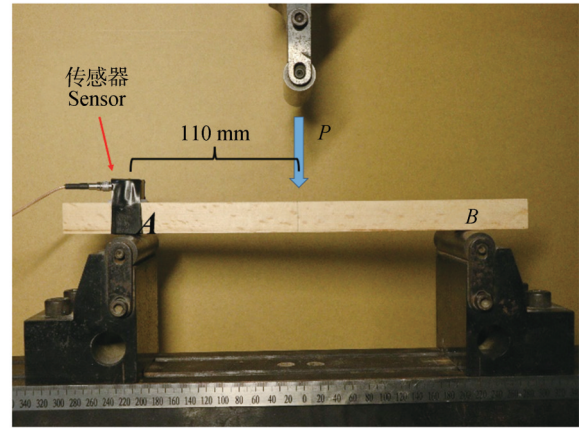


图1 试验照片及试验传感器布置
Fig. 1 Test photo and layout of test sensors

将AE事件幅值转化为分贝值,试验时采集到的噪声信号如图2所示,噪声都在0.0178 V以下,因此针对阈值的设定,可计算的阈值为45 dB。具体计算公式为

$$D = 20 \times \log(u) + 80. \quad (1)$$

式中: D 为阈值; u 为经过40 dB放大的实际电压值。

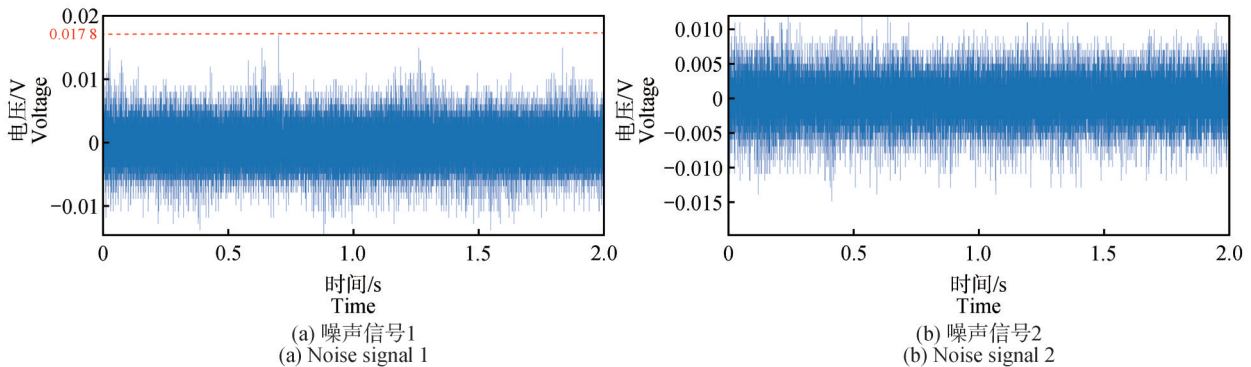


图2 试验时采集到的噪声信号

Fig. 2 The noise signal collected during the experiment

1.3 b值计算方法

1944年 Gutenberg 与 Richter 在研究世界地震活动性时提出了地震震级与频度之间统计关系的著名G-R关系式^[9]为

$$\lg N = a - bM. \quad (2)$$

式中: M 为震级; N 为相应震级的地震次数; a 、 b 为常数。

在木材损伤过程中,受到持续载荷的破坏,在破坏过程中会产生不同高度幅值的AE信号,因此可以将不

同高度的AE的幅值进行划分。本研究所采集到最高幅值为10 V,因此以0.01~10 V为基准将木材损伤过程中产生的AE信号取对数后分为3个等级。本研究阈值为45 dB,具体划分见表2。

在木材损伤过程中,由于受到持续载荷的破坏,因此可以将破坏过程中相应等级的振铃计数 N_i 作为相应震级的频次。本研究将b值公式中震级用不同等级幅值替换掉,这样就可以用不同等级的b值曲线来反映试件在应力作用下的断裂特征。b值(式中记为 b)计

表 2 AE 信号不同等级划分

Tab. 2 Classification of AE signals at different levels

震级 Magnitude	幅值范围/V Amplitude range	分贝值/dB Decibel value
M1	(0.0178, 0.1)	(45, 60)
M2	(0.1, 1)	(60, 80)
M3	(1, 10)	(80, 100)

算公式为

$$b_i = a - \lg N_i \quad (3)$$

式中, a 为常数, 为了避免求得的 b 值为负值, 将常数 a 设置为 6。

在本研究中, 设置 b 值计算的区间长度为 2 s。在此区间长度下, b 值能够反映出木材在受到应力作用下断裂所产生的阶段性特征, 不同幅值等级的 b 值变化趋势能够有效地说明在循环加载过程中材料的损伤程度。

1.4 CSD 特征

通过分析 AE 特征参数的方差和自相关系数随着时间的变化特征, 可为材料的破坏提供一种前兆预测方法。

其中方差是描述样本中数据对均值 \bar{x} 偏离程度的特征量, 记为 s^2 , 其公式为

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4)$$

式中: x_i 为第 i 个数据; n 为样本中数据个数。

自相关系数是描述同一变量不同时刻之间相关性的统计量, 将变量 x 滞后长度为 j 的自相关系数记为 $\alpha(j)$, 公式为

$$\alpha(j) = \frac{\sum_{i=1}^{n-j} \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right) \left(\frac{x_{i+j} - \bar{x}}{s} \right)}{n-j} \quad (5)$$

假定状态变量存在周期为 Δt 的受迫扰动, 在扰动过程中, 平衡的自回归呈近似指数关系, 恢复速率为 λ , 在回归模型中可以描述为

$$y_{n+1} = e^{\lambda \Delta t} y_n + s \varepsilon_n \quad (6)$$

式中: y_n 为系统变量到平衡态的偏离量; ε_n 为符合正态分布的随机量; s 为标准差。若 λ 不依赖于 y_n , 则该过程可以简化, 如果恢复速率 λ 和周期 Δt 与 y_n 无关, 该过程可简化为一阶自回归模型。公式为

$$y_{n+1} = a y_n + s \varepsilon_n \quad (7)$$

式中, a 为自相关系数, $a = e^{\lambda \Delta t}$ 。通过方差 Var 来分析可得公式为

$$\text{Var}(y_{n+1}) = E(y_n^2) + [E(y_n)]^2 = \frac{s^2}{1-a^2} \quad (8)$$

式中, E 为数学运算期望的计算。

当系统向临界点趋近时, 其扰动导致的恢复速率越来越慢, 恢复速率 λ 将趋近于 0, 且自相关系数 a 趋近于 1, 方差趋近于无限大。因此, 方差和自相关系数增大可作为系统趋于临界点的前兆, 并且, 利用方差和自相关系数 2 个参数增大的时间相比, 是否 2 个参数增大时间相近, 可以有效排除伪信号。

为了提高计算效率, 将 10 000 个数据点作为一个子段, 对应 0.02 s, 并将其作为后续处理的基本单位。参考 Zhang 等^[29] 研究结果, 持续时间为 0.02 s 的子段几乎涵盖了所有的潜在信息。因此在数据处理过程中, 将试验数据分成了 0.02 s 子段来进行 CSD 方差和相关系数的计算。

2 结果与分析

2.1 试件三点弯曲试验过程的 AE 信号特征

为了分析载荷与 AE 信号产生的关系, 绘制了 6 个试件在 2 种加载速率下的时间-载荷曲线和 AE 振铃计数的变化过程, 如图 3 所示。由图 3 可以看出, 2 种加载速率最大的区别在于损伤时间, 在载荷达到最高值之后, 振铃计数开始大量增加, 此时木材发生断裂, 然而在断裂之前载荷曲线斜率逐渐减小, 伴随着的是振铃计数逐渐增大。载荷曲线和 AE 振铃计数具有一定的相关性, 载荷曲线的斜率逐渐减小, 同时振铃计数也在逐渐增多。振铃计数能够在一定程度上反映木材的内部损伤状态, 然而不能准确地展示木材断裂损伤过程的各个阶段。

2.2 b 值结果分析

从不同高度等级的幅值下 AE 事件的发生频次来分析试件在加载过程中材料的损伤程度 (M1, M2, M3)。M1 的 b 值变化代表着低幅值事件的产生频次, 其能反映出试件塑性变形过程; M2 的 b 值代表着中等幅值的事件产生频次, 其代表着试件出现了明显的应变能释放, 反映试件内部微裂纹的出现及扩展; M3 的 b 值代表着高幅值事件的产生频次, 表示试件有着大量裂纹出现, 预示着试件即将发生宏观断裂。

图 4(a) 中 S1 试件的 b 值曲线, 低幅值事件 M1 曲线在弹性阶段就已经出现, 并且始终存在于整个阶段, 在 100 s 之后, 开始下降并保持在较低水平波动, 随着塑性变形的增加, 低幅值事件产生的频次增加; 之后随着裂纹萌生, M1 曲线出现上升, 导致低幅值事件转化为高幅值事件, 应变能释放逐渐增加, 在 198 s 开始出现 M2 的 b 值点; 随着裂纹逐渐扩展, 之后到 260 s, M2 出现了低值的点, 同时 M3 出现并下降, 意味着此时试

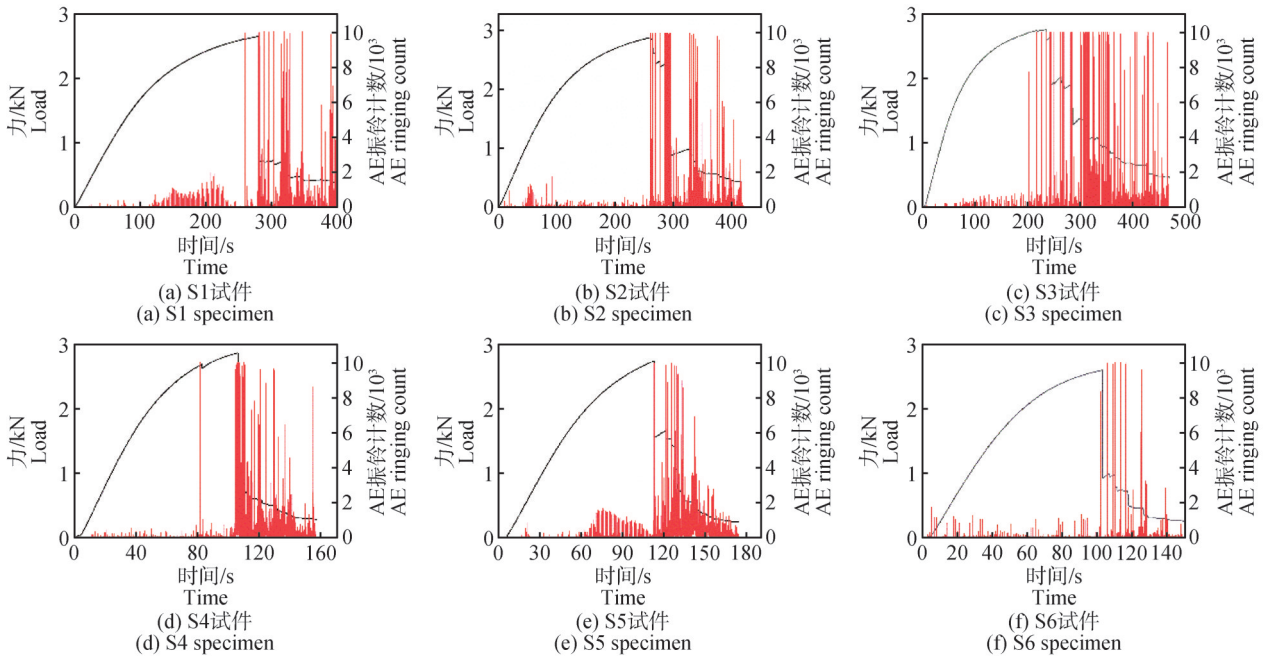


图3 时间与载荷、振铃计数的关系曲线

Fig. 3 Relationship curve graph of time, load, and ringing count

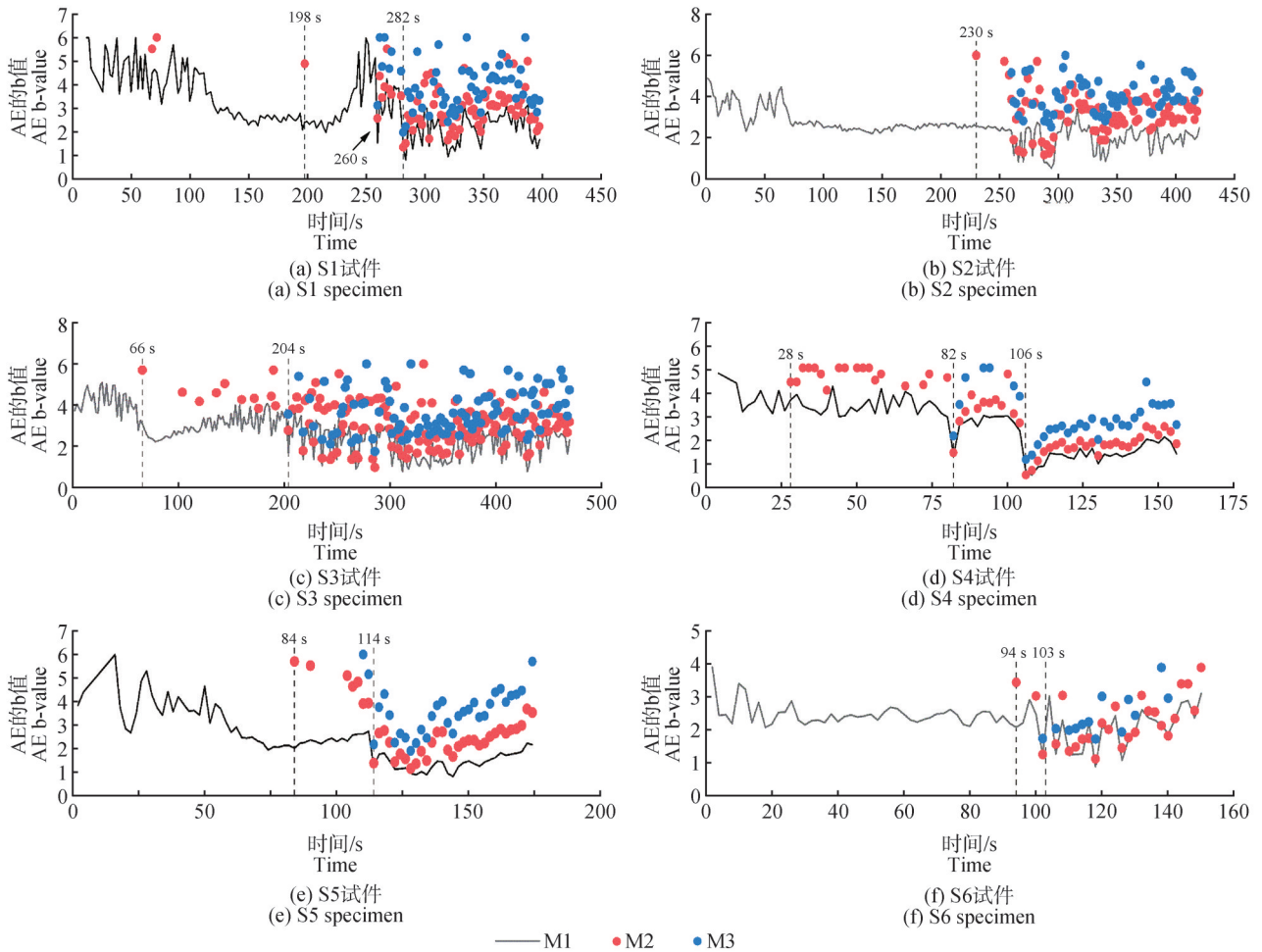


图4 不同加载速率试件b值曲线

Fig. 4 b-value curves of specimens with different loading rates

件有着大量裂纹出现,并伴随着大量应变能释放,直到 282 s,裂纹扩展到一定程度,高幅值事件发生更密集,大量应变能释放,试件发生宏观断裂。由图 4(a)中可以看到,在试件发生明显裂纹损伤以及断裂时,M1、M2 和 M3 都会下降并处在低水平位置,意味着木材在断裂时是由产生大量各种幅值的事件混合发生的,并且伴随着大量能量的释放。由图 4(b)和图 4(c)可知,S3 试件损伤过程与 S1 试件基本一致,S2 试件损伤断裂过程相较于其他试件比较集中,因此在裂纹萌生时,低幅值事件 M1 曲线保持在低水平没有太大波动。

由图 4(d)试件 S4 的 b 值变化曲线分析可得,在加载速率增加后,木材在弹塑性阶段表现出不同的损伤过程,主要表现在弹塑性阶段前期。在加载速率再次增加后,试件在 28 s 就开始出现较多 M2 的散点,说明在高加载速率下,试件在弹塑性阶段前期就有较高幅值的 AE 事件产生,但 M2 处在高水平,说明事件频次较低,此时裂纹就已经开始萌生,并未大量扩展;到 82 s,M1、M2 和 M3 都在低水平出现,此时试件产生了高幅值 AE 事件,并且频次很高,说明此时出现了明显裂纹,并逐渐扩展到 106 s 发生宏观断裂。S5 和 S6 试件与 S4 试件损伤过程相似,区别在于试件之间的差异性而导致中等幅值的事件 M2 产生的时间比较靠后。

由以上分析结果得出,M1 等级的 b 值变化过程能够在一定程度上反映加载速率。加载速率较低时,试件受载荷过程中吸收应变能的能力更好,因此由图 4(a)可知,M1 先下降,到水平波动之后,会有明显的上升;随着加载速率的增加,应变能在塑性过程中释放更加明显,如图 4(d)所示,试件在损伤前期就有着高幅值事件出现,因此 M1 曲线一直保持在较高水平波动,直到出现明显裂纹损伤时才会出现下降。

随着加载速率的增加,木材的塑性变形会加快,在弹塑性阶段出现裂纹时,应变能释放会增加,根据 CSD 理论,也应将其看作一次相态的转变。因此,在木材受持续载荷损伤过程中,不应该只存在宏观断裂一次相态转变的过程,并且裂纹的出现也是木材发生大量塑性变形,造成不可逆损伤的重要过程,因此,对其进行前兆预测尤为重要。

2.3 CSD 特征分析

2.3.1 窗口长度和滞后长度

研究不同窗口长度和滞后长度下 AE 振铃计数序列的自相关系数与方差的差异性。以 S2 和 S4 为例,首先,对于自相关系数曲线,固定窗口长度 100,分别取滞后长度 50、70、100、150,观察不同滞后长度对 CSD 特性的影响;然后,固定滞后长度 100,分别取窗口长

度 50、70、100、150,观察不同窗口长度对 CSD 特性的影响,对于方差曲线,用同样的方式,首先固定窗口长度 150,分别取滞后长度 100、130、150、200,观察不同滞后长度对 CSD 特性的影响;最后,固定滞后长度 150,分别取窗口长度 100、130、150、200,观察不同窗口长度 CSD 特性的影响。

窗口长度和滞后长度不同对自相关系数曲线还是有一定的影响,由图 5 和图 6 中相关性分析可得,在选择不同的序列长度时,出现的峰值高度不同,导致前兆性出现差异。窗口长度太小时,滞后长度太小会使计算的数据长度太短,数据之间波动性放大,导致相关性降低,而过大的滞后长度可能会错过前兆点;窗口长度太大时,滞后长度太小会使计算的数据段出现重复,使相关性增大,但会失去真实性;而过大的滞后长度同样会出现错过前兆点的问题。因此本研究选择相关性曲线的窗口长度 100 和滞后长度 100。可以看到图 5 和图 6 中不同窗口长度和滞后长度的方差曲线基本保持一致,因此不同窗口长度和滞后长度带来的影响可以忽略不计,本研究选择窗口长度 150 和滞后长度 150 来计算方差曲线。

2.3.2 CSD 前兆特征

木材在断裂过程中,主要的能量释放在出现裂纹和宏观断裂阶段,因此通过 b 值将这 2 个损伤过程发生的时间作为相态转变点。由图 7 和图 8 可以看出,在宏观断裂前,AE 振铃计数的方差和自相关系数因大量应变能的累积释放出现了明显增大,可作为表征木材断裂的显著前兆信号。各试件在宏观断裂时间及其前兆信号时间见表 3,可见在宏观断裂前,不同加载速率下的试件相关性和方差都能够很好地展现出前兆信号。

表 3 试件宏观断裂时间及其前兆信号时间

Tab. 3 The macroscopic fracture time of the specimen and the time of its precursor signal

试件 Specimen	宏观断裂时间 Macroscopic fracture time	相关性曲线峰值时间 Peak time of the correlation curve	方差曲线峰值时间 Peak time of the variance curve
S1	282	278	259.5
S2	265	260	262.5
S3	235	182	200.5
S4	106	102	103.5
S5	114	108	113.5
S6	103	100	100.5

对于木材在弹塑性阶段时,由图(4)b 值曲线分析可知,此阶段也会有应变能累积和释放的相态转变过程。由图 7 与图(4)b 值曲线可知,S1 试件在 198 s 裂纹萌生发生相变时,相关性在 174 s 出现峰值,方差在

151.5 s 出现峰值,之后 260 s 出现明显裂纹发生相变,对应相关性和方差也都在 236 s 和 214.5 s 出现峰值; S4 试件加载速率高,因此弹性阶段非常短,塑性变形增加比较快,28 s 之后木材内部就已经出现了较高应变能的释放,但其相关性曲线在 66 s 才出现明显峰值,方差曲线在 70.5 s 也出现了峰值,这说明虽然前期试件塑性变形更快,但也未出现裂纹,直到 82 s 试件 3 种

b 值下降,有明显裂纹产生。但其方差曲线在 13.5 s 后一直有着峰值出现,因此可以看出过快的加载速率使木材塑性变形中应变能释放更加激烈,而过快的能量释放更容易导致伪信号的产生。其他试件同 S1 和 S4 一样,相关性和方差曲线都不同程度地在损伤前出现了峰值。

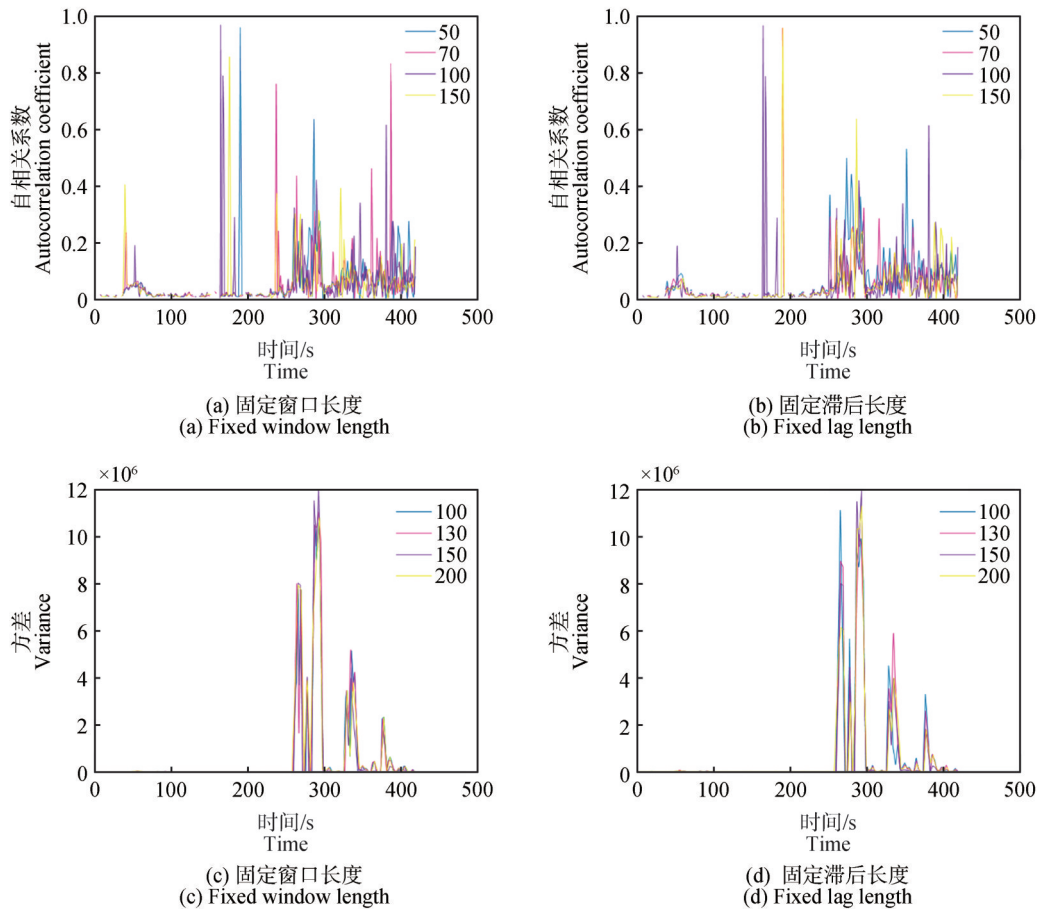


图5 S2 试样方差和相关性曲线不同窗口长度和滞后长度对比

Fig. 5 Comparison of variance and correlation curves of S2 specimen with different window lengths and lag lengths

虽然过快的加载速率加快了木材内部塑性变形的进程,但当木材内部出现损伤时,CSD 现象依然能够很好地预测其应变能变化时产生临界转换的过程,通过 CSD 现象所表现的相关性和方差增大的特征,能够很好地对木材损伤进行前兆预测。

根据 CSD 理论,试件在出现裂纹损伤发生相态转变时,会表征出前兆信号,因此可以根据试件所表征出的前兆信号,来预测试件即将发生相态的转变,也就是试件内部出现裂纹萌生。由表 4 可知,在不同加载速率下,出现前兆特征时,所承受载荷与屈服极限载荷比

值都在 85% 左右,因为木材材料的变异性,并不能确定具体比值。因此当木材在受到极限载荷的 85% 左右时,木材内部就会到达临界状态,如果载荷继续增大,木材内部就可能会出现裂纹,对木材造成不可逆的损伤。

3 结论

本研究对榉木试件分别用 2 种不同加载速率进行了三点弯试验,针对木材损伤特性,通过改进 b 值公式和 CSD 原理对 AE 信号进行分析,得出以下结论。

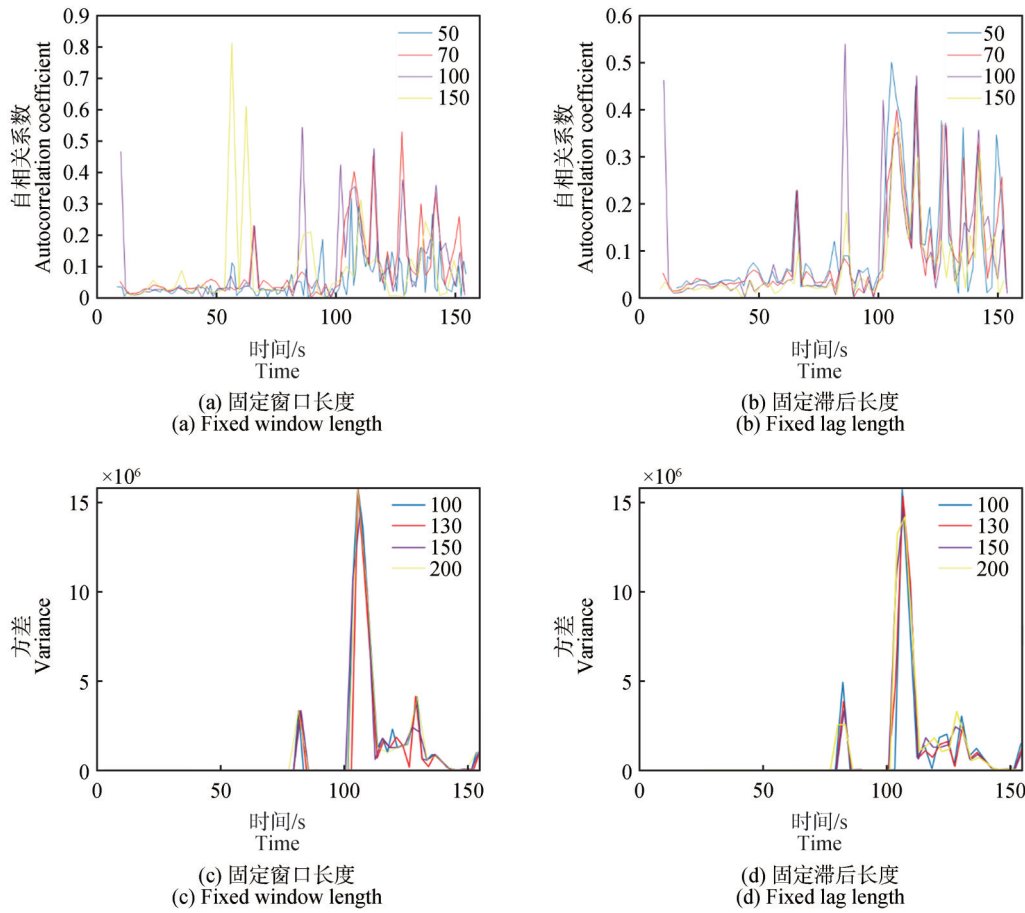


图 6 S4 试样方差和相关性曲线不同窗口长度和滞后长度对比

Fig. 6 Comparison of variance and correlation curves of S4 specimen with different window lengths and lag lengths

表 4 试件相关性曲线出现前兆信号时间时承受载荷占比

Tab. 4 The proportion of load on the specimen when the precursor signal appears

试件 Specimen	前兆信号时间/s Precursor signal time	前兆信号出现时屈服载荷/N Yield load when the precursor signal appears	宏观断裂时间/s Macroscopic fracture time	屈服极限载荷/N Yield ultimate load	比值/% Ratio
S1	174	2294.35	282	2645	86.74
S2	164	2509.53	265	2878	87.20
S3	182	2475.52	235	2769	89.41
S4	66	2429.05	106	2867	84.72
S5	66	2151.72	114	2745	78.39
S6	71	2263	103	2605	86.87

1) b 值分析揭示损伤演化。AE 的 b 值有效关联了事件幅值分布与发生频次, 通过不同高度幅值等级的 b 值曲线相结合分析; 当不同等级 b 值下降, 说明 AE 事件产生频次增加, 应变能释放增加, 试件出现裂纹损伤。通过不同等级的 b 值曲线相结合分析, 能够反映出试件损伤过程中弹塑性阶段微裂纹的产生。并且不

同加载速率下木材的弹塑性阶段损伤具有差异性, 可以通过低幅值等级的 b 值曲线来判断木材承受载荷的速率大小。

2) CSD 现象预测损伤前兆。木材在弹塑性阶段微裂纹萌生时伴随显著的应变能释放, 可视作内部相态转变过程。不同加载速率试件在发生此相态转变

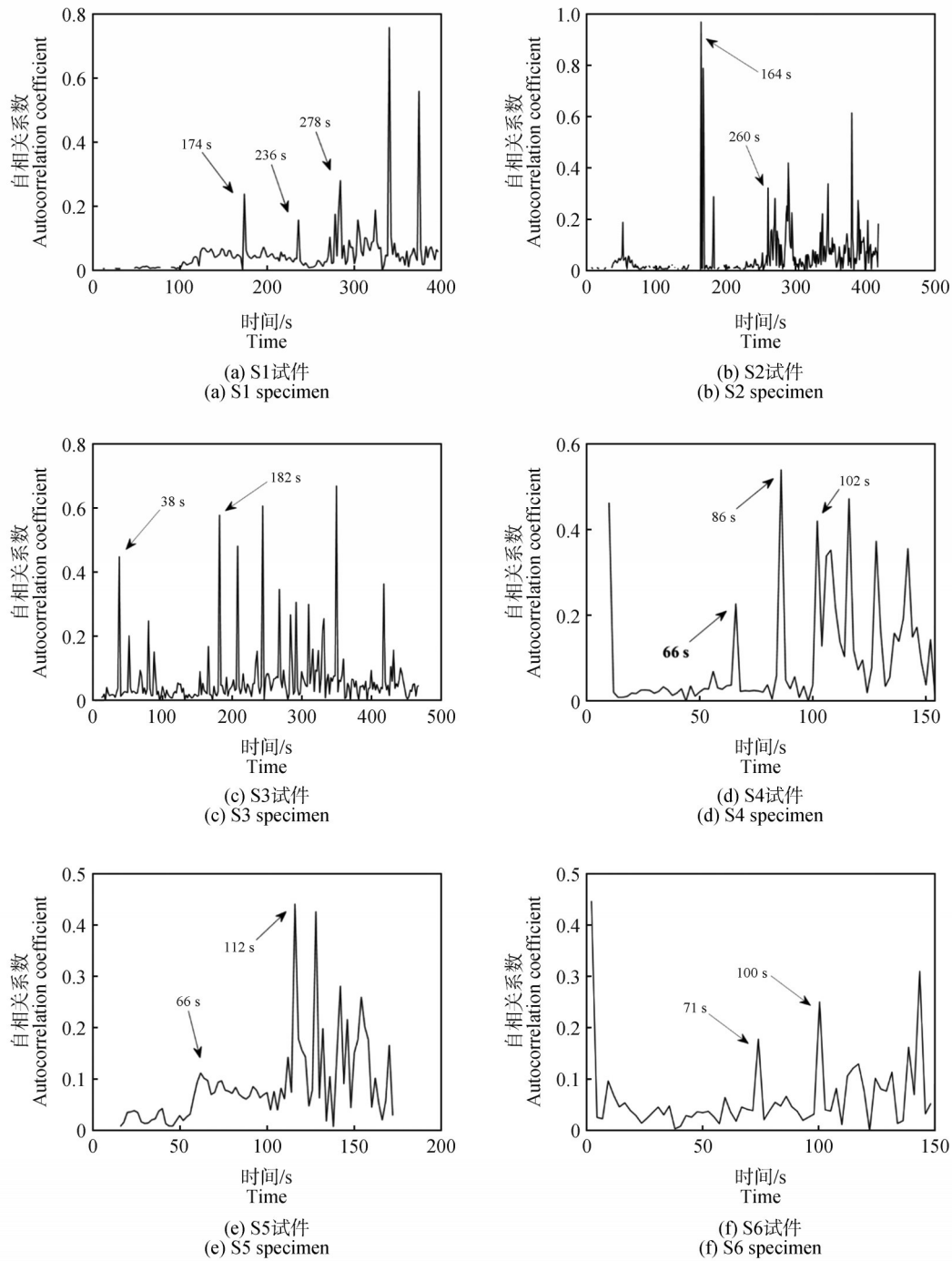


图7 6个试件CSD特征相关性图

Fig. 7 Correlation graph of CSD of six specimens

前,均观测到显著的CSD特征,具体表现为自相关系数增大与方差增大。这表明CSD现象是木材在持续载荷作用下损伤行为的重要前兆信号,可用于预测临近破坏状态。

3) 临界损伤载荷阈值。试验结果表明,无论加载速率如何,当试件承载达到其屈服极限载荷的约85%

时,即出现表征临界状态的AE前兆信号。因此,木材结构在实际应用中承受载荷接近其极限承载能力的85%时,即进入临界损伤状态。此时继续加载将诱发显著微裂纹扩展,导致材料性能严重劣化,使用价值大幅降低。

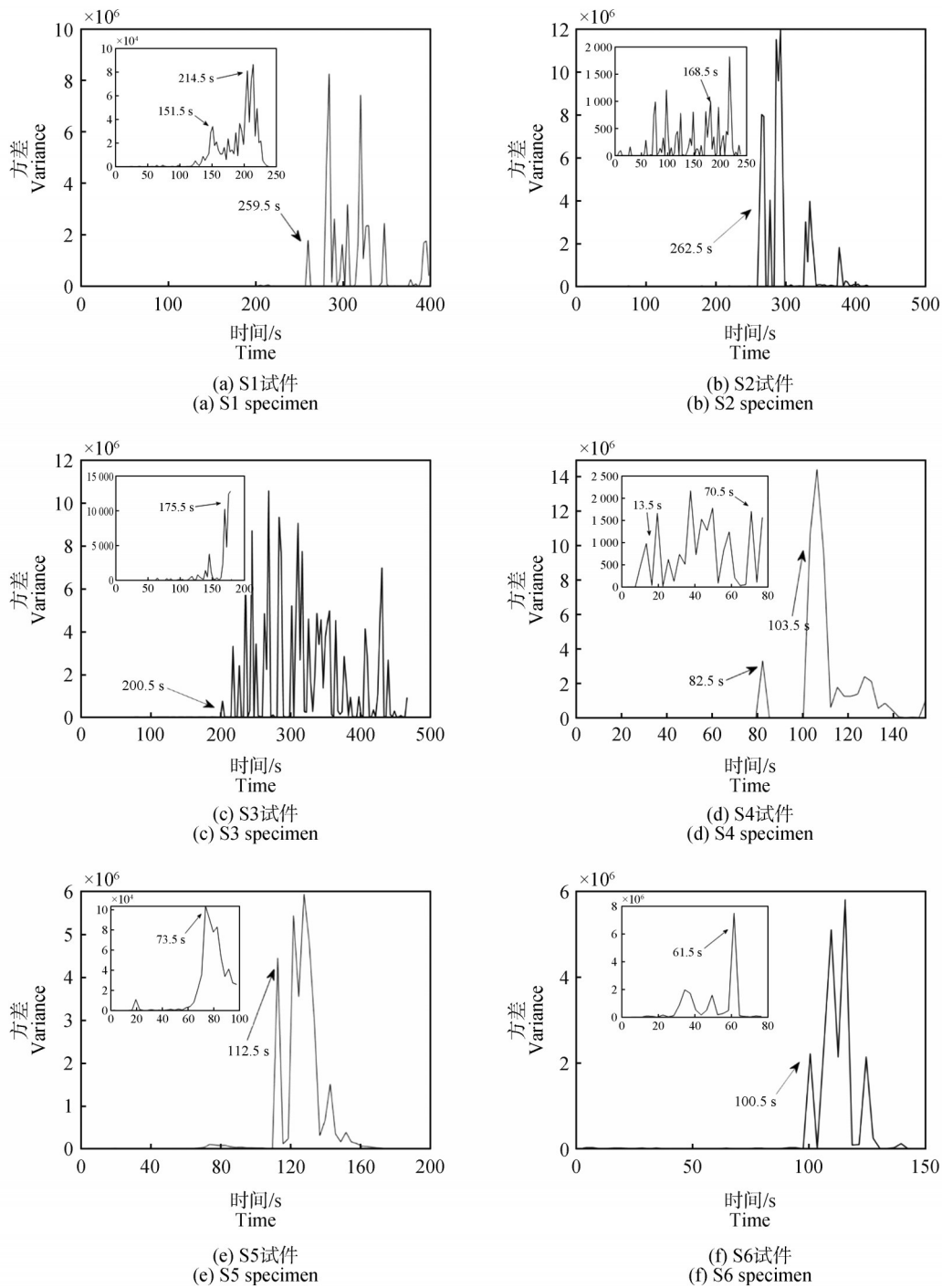


图 8 6 个试件 CSD 特征方差图

Fig. 8 Variance plots of CSD for six specimens

参 考 文 献

[1] HUANG C L, LI M, DENG T T, et al. The information entropy and fractal characteristics of acoustic emissions during wood damage and fracture[J]. Wood Science and Technology, 2022, 56(5): 1315–1330.

[2] BAENSCH F, ZAUNER M, SANABRIA S J, et al. Damage

evolution in wood: Synchrotron radiation micro-computed tomography (SR μ CT) as a complementary tool for interpreting acoustic emission (AE) behavior [J]. Holzforschung, 2015, 69(8): 1015–1025.

[3] 邵卓平. 木材损伤断裂与木材微观损伤基本构元[J]. 林业科学, 2007, 43(4): 107–110.

- SHAO Z P. Wood damage-fracture and wood meso-damage elements [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43 (4) : 107-110.
- [4] SARAVANAKUMAR K, SURESH KUMAR C, ARUMUGAM V. Damage monitoring of glass/epoxy laminates with different interply fiber orientation using acoustic emission [J]. *Structural Health Monitoring*, 2021, 20(2) : 445-455.
- [5] 郭晓磊, 胡伟, 郭勇. 木质材料损伤断裂中声发射特性的研究进展及趋势 [J]. *森林工程*, 2011, 27(1) : 27-30.
- GUO X L, HU W, GUO Y. Research progress on acoustic emission characteristic in damage and fracture process of wood materials [J]. *Forest Engineering*, 2011, 27 (1) : 27-30.
- [6] GUO Y, ZHU S L, CHEN Y X, et al. Acoustic emission-based study to characterize the crack initiation point of wood fiber/HDPE composites [J]. *Polymers*, 2019, 11 (4) : 701.
- [7] AICHER S, HÖFFLIN 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.
- [8] FOTOUHI M, PASHMFOROUSH F, AHMADI M, et al. Monitoring the initiation and growth of delamination in composite materials using acoustic emission under quasi-static three-point bending test [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2011, 30(17) : 1481-1493.
- [9] GUTENBERG B, RICHTER C F. Frequency of earthquakes in California [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1944, 34(4) : 185-188.
- [10] WANG T Z, WANG L X, XUE F, et al. Identification of crack development in granite under triaxial compression based on the acoustic emission signal [J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2021, 17 (1) : 1550147720986116.
- [11] WANG Z H, WANG J C, YANG S L, et al. Failure behaviour and acoustic emission characteristics of different rocks under uniaxial compression [J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2019, 17(1) : 76-88.
- [12] LIU X L, LIU Z, LI X B, et al. Acoustic emission b-values of limestone under uniaxial compression and Brazilian splitting loads [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40 (S1) : 267-274.
- [13] 郭鹏飞, 邱洋, 邓仕伟, 等. 油页岩单轴压缩声发射演化规律及其破坏前兆特征 [J]. *长江科学院院报*, 2024, 41(4) : 166-173.
- GUO P F, QIU Y, DENG S W, et al. Acoustic emission evolution law and failure precursory characteristics of oil shale under uniaxial compression [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2024, 41 (4) : 166-173.
- [14] LI M, ZHAO Y, MAO F L, et al. Study on damage and fracture characteristics of wood based on acoustic emission b-value and seismic magnitude difference entropy [J]. *Journal of Wood Science*, 2024, 70(1) : 13.
- [15] ZHANG X, LI M, FANG S Y, et al. Evaluation of wood damage and fracture behavior based on energy entropy of acoustic emission signals [J]. *Wood Research*, 2024, 69 (2) : 283-296.
- [16] SCHEFFER M, BASCOMPTE J, BROCK W, 等. 临界转换的早期预警信号 [J]. *国际地震动态*, 2009, 39(9) : 1-14.
- SCHEFFER M, BASCOMPTE J, BROCK W, et al. Early-warning signals for critical transitions [J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2009, 39(9) : 1-14.
- [17] DAKOS V, VAN NES E H, D'ODORICO P, et al. Robustness of variance and autocorrelation as indicators of critical slowing down [J]. *Ecology*, 2012, 93(2) : 264-271.
- [18] BECK K K, FLETCHER M S, GADD P S, et al. Variance and rate-of-change as early warning signals for a critical transition in an aquatic ecosystem state: A test case from Tasmania, Australia [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, 123(2) : 495-508.
- [19] DAKOS V, SCHEFFER M, VAN NES E H, et al. Slowing down as an early warning signal for abrupt climate change [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105 (38) : 14308-14312.
- [20] AMITRANO D, GRASSO J R, SENFAUTE G. Seismic precursory patterns before a cliff collapse and critical point phenomena [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(8) : 3141-3145.
- [21] 朱星, 唐垚, 范杰, 等. 基于临界慢化理论的细砂岩破坏前兆试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41 (1) : 53-61.
- ZHU X, TANG Y, FAN J, et al. Experimental study on failure precursors of fine sandstone based on critical slowing down theory [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(1) : 53-61.
- [22] 张昕, 李忠辉, 钮月, 等. 顶板岩石失稳破坏电位临界慢化特征实验研究 [J]. *工矿自动化*, 2018, 44(9) : 26-31.
- ZHANG X, LI Z H, NIU Y, et al. Experimental study on

- electric potential critical slowing down characteristics before unstable failure of roof rocks [J]. *Industry and Mine Automation*, 2018, 44(9):26-31.
- [23] ZHANG X, LI Z H, NIU Y, et al. An experimental study on the precursory characteristics of EP before sandstone failure based on critical slowing down [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2019, 170:103818.
- [24] ZHANG Z H, LI Y C, HU L H, et al. Predicting rock failure with the critical slowing down theory [J]. *Engineering Geology*, 2021, 280:105960.
- [25] LI H R, SHEN R X, QIAO Y F, et al. Acoustic emission signal characteristics and its critical slowing down phenomenon during the loading process of water-bearing sandstone [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2021, 194:104458.
- [26] 刘先林, 范杰, 朱觉文, 等. 单轴压缩下岩桥脆性断裂的临界慢化特征[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(3):166-175.
- LIU X L, FAN J, ZHU J W, et al. Critical slowing-down characteristics of brittle fracture of rock bridge under uniaxial compression [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, 53(3):166-175.
- [27] WEI Y, LI Z H, KONG X G, et al. The precursory information of acoustic emission during sandstone loading based on critical slowing down theory [J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2018, 15(5):2150-2158.
- [28] 丁锐, 罗蕊寒, 方赛银, 等. 基于声发射信号信息熵的木材损伤断裂过程研究[J]. *西北林学院学报*, 2022, 37(5):210-217.
- DING R, LUO R H, FANG S Y, et al. Research on wood damage fracture process based on acoustic emission signal information entropy [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, 37(5):210-217.
- [29] ZHANG M L, ZHANG Q H, LI J Q, et al. Classification of acoustic emission signals in wood damage and fracture process based on empirical mode decomposition, discrete wavelet transform methods, and selected features [J]. *Journal of Wood Science*, 2021, 67(1):67.