

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2021133

木材损伤的 Kaiser 点声发射信号分形特征研究

黄长林¹, 邓婷婷¹, 杨洲凌¹, 方赛银¹, 丁锐¹, 赖菲¹, 李明²

(1. 西南林业大学, 云南昆明 650224; 2. 安徽工程大学, 安徽芜湖 241000)



摘要: 针对木材在重复荷载下的 Kaiser 效应问题, 采用 Felicity 比辨识高低载荷状态, 并通过声发射 (acoustic emission, AE) 信号关联维数表征不同载荷下 Kaiser 点的分形特征。首先, 将采样频率设置为 500 kHz, 采集木材试件在重复荷载下的 AE 信号, 其中载荷间隔设定为 300 N。

然后, 依据噪声信号设定 AE 振铃的阈值为 48 dB, 参考美国增强塑料声发射检测委员会 (CARP) 准则定义“明显” AE 信号并计算 Felicity 比, 依此标定 Kaiser 和 Felicity 效应所对应的载荷阶段。最后, 利用 G-P 算法计算 Kaiser 点处 AE 信号的关联维数 D , 作为不同阶段 Kaiser 点的辨识指标。结果表明: 通过 Felicity 比能明显区分高低载荷状态, 并且在 Kaiser 与 Felicity 效应两个阶段的 Kaiser 点 AE 信号的关联维数 D 存在显著差异; Kaiser 效应阶段内, D 值变化范围为 0.8346~1.4895, 而过渡到 Felicity 效应阶段后, D 值变化范围增大到 1.7038~3.6602。

关键词: 木材声发射; Kaiser 效应; Felicity 比; AE 振铃计数; Kaiser 点; 关联维数

中图分类号: S781.38; TS62

文献标识码: A

文章编号: 2096-9694 (2022) 02-0036-06

Fractal Characteristics of Kaiser Point Acoustic Emission Signal in Wood Damage

HUANG Chang-lin¹, DENG Ting-ting¹, YANG Zhou-ling¹, FANG Sai-yin¹,
DING Rui¹, LAI Fei¹, LI Ming²

(1. Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China;

2. Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, Anhui, China)

Abstract: To understand the Kaiser effect of the wood component under repeated loading, the Felicity ratio was used to identify the high and low loading states. The fractal characteristics of Kaiser point under different loading were characterized by the correlation dimension of the acoustic emission (AE) signal. Firstly, when the frequency was 500 kHz, the AE signals of the wood specimens were collected under repeated loading, where the load interval was set to 300 N. Then, according to the noise signal, the threshold of AE ringing was set as 48 dB, and the “obvious” AE signal was defined based on American Council for Acoustic Emission Testing of Reinforced Plastics criterion. The Felicity ratio was calculated to calibrate the load stages corresponding to Kaiser and Felicity effects. Finally, the correlation dimension D of AE signal at Kaiser point was calculated through G-P algorithm as the identification index of Kaiser point at different stages. The results showed that the high and low loading states could be clearly

收稿日期: 2021-09-17; 修改日期: 2021-11-03

基金项目: 国家自然科学基金“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); “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)。

作者简介: 黄长林 (1997—), 硕士研究生。Email: 1559684494@qq.com

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

distinguished by the Felicity ratio. There was a significant difference in the correlation dimension D of AE signal at the Kaiser point of Kaiser and Felicity effects. During the Kaiser effect stage, the D value varied from 0.8346 to 1.4895, while after the transition to the Felicity effect stage, the D value varied from 1.7038 to 3.6602.

Key words: wood acoustic emission; Kaiser effect; Felicity ratio; AE ringing count; Kaiser point; correlation dimension

材料的变形、损伤和断裂过程是能量的积累和释放过程,当材料或构件在载荷作用下发生损伤时,能量以应力波的形式释放,即声发射(acoustic emission, AE)现象^[1]。可以通过AE信号的分析来评估材料的损伤以及内部缺陷,实现对检测对象的实时动态无损检测^[2]。根据AE检测理论,对材料进行重复加载时,重复载荷到达原先所加最大载荷之前不发生明显AE现象,这种AE不可逆性质称为Kaiser效应;反之,重复载荷到达原先所加最大载荷之前就有明显的AE现象,则称为Felicity效应。Kaiser效应和Felicity效应是反映材料损伤历史的重要标志^[3]。Felicity比,即重复加载时发生明显AE现象的载荷与原最大载荷之比,能较好地反映材料原先受损或结构缺陷的严重程度,成为材料损伤或内部缺陷严重性的评判指标。

木材作为一种天然可再生的环保材料被广泛应用,当其作为承载结构在实际工程中应用时难免发生结构性损伤,对其进行健康动态监测尤为重要。声发射技术(acoustic emission technology, AET)为木材结构健康的动态监测提供了有效的技术手段,既可以评价构件的完整性,判断结构的损伤程度;又可以实时监测运行中的设备或受力构件,及时发现问题,且不破坏监测对象。AET已成为研究热点,利用AET研究木材Kaiser效应能进一步明确材料的损伤历史及损伤程度,对于木质材料构件的安全使用及在役结构的健康监测、视情维护具有积极的作用。

目前Kaiser效应的研究主要集中在金属和岩石领域,鲜见针对木材损伤的研究。金属材料的相关研究表明,材料的受力方向对Kaiser效应有显著影响,通过Kaiser效应可以反映材料的受力历史,进而对材料的结构损伤进行有效评价^[4-5]。而在岩土科学领域,利用岩石的AE能量变化、AE累计

振铃计数等AE特征参数确定Kaiser效应点的出现位置,进而评价岩石内部微结构面的破坏程度^[6-7]。Kaiser点是指AE信号出现明显增加的点^[8],表明此时材料已开始出现损伤,采用分形理论中的关联维数 D 可以表征Kaiser点的损伤情况。目前关联维数在复合材料和金属材料的损伤检测方面应用较多,如Silva等^[9]研究不同复合材料产生AE信号的分形特征,利用关联维数来判断材料的失效程度。ZHOU和FENG等^[10-11]采用分形理论来表征风力机叶片和齿轮的损伤程度,提取不同损伤类型下的AE信号特征,并计算关联维数 D ,判断在役构件的损伤程度,避免因检修更换不及时而发生安全事故。赵奎等^[12]研究证明AE过程不仅具有分形特征,而且还能利用关联维数识别Kaiser点的特征。YANG等^[13]基于材料损伤和分形特性,提出了损伤表达式,并构建了考虑材料损伤与分形特征的AE模型,进一步明确了关联维数与AE信号之间的关系。

在参考其他材料应用技术的基础上,笔者以三点弯曲试验为基础探究重复载荷下的木材AE信号特征。采用Felicity比对木材承受的载荷状态进行划分,确定每段载荷内木材的损伤状态;再将分形理论应用于木材的损伤检测中,利用关联维数明确Kaiser点的损伤特征,为AET技术在木材损伤检测中的应用提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

3种阔叶树材:榉木(*Zelkova schneideriana*)、梧桐(*Firmiana simplex*)、白榆(*Ulmus pumila*);

3种针叶树材:樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.)、柏木(*Cupressus funebris*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)。

上述6种木材的气干密度分别为0.64、0.72、0.57、0.36、0.35和0.40 g/cm³。依据GB/T 1940—2009《木材冲击韧性试验方法》制作若干尺寸为300 mm×20 mm×20 mm、表面无缺陷且含水率10%~12%的试件。

1.2 试验设备

加载设备为UTM5105型万能力学试验机，最大加载压力为100 kN，功率为1.5 kW。为了获取试验过程产生的AE信号，基于USB-6366 NI高速采集卡和LabVIEW软件搭建2通道AE信号采集系统，信号采样频率设置为500 kHz，其中AE传感器型号为SR 150N，带宽为22~220 kHz，前置放大器为40 dB，输出端电压范围为±5 V。

1.3 试验方法

采用三点弯曲试验，在试件中间位置施加重复载荷，试件跨距为200 mm，2个AE传感器相距100 mm（如图1所示），试验机的加载速度设定为5 mm/min。为了保证传感器与木材试件接触充分，隔绝空气介质对AE信号的影响，采用高温绝缘硅脂以确保与试件表面充分耦合，并用橡胶带将传感器固定，保证采集信号的稳定。设定重复载荷以300 N叠加，直至木材断裂。

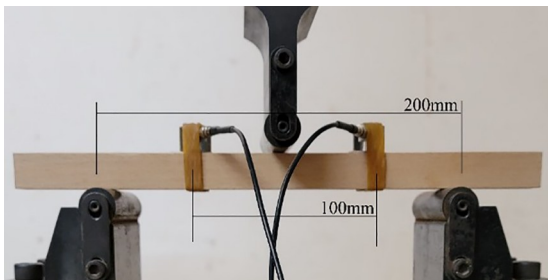


图1 三点弯曲试验AE传感器布置图

Fig.1 AE sensor layout in three-point bending test

1.4 关联维数计算方法

在分形理论中最常用的参数就是关联维数 D ，对系统的时间过程行为反应敏感，能较好地反映系统动力学特性。1983年Grassberger和Procaccia提出的G-P算法是定义和计算关联维数的经典方法^[14-15]。木材三点弯曲试验过程中的AE信号可看作一个一维单变量的时间序列，从信号序列角度来看具有一定的分形特征。在采集多次重复载荷作用下木材AE信号的基础上，运用关联维数方法

对其进行分形表征，进而研究其关联维数与木材损伤过程的变化规律。计算Kaiser点的关联维数，以此来区分处于高、低载荷阶段内的Kaiser点。

在三点弯曲试验中得到的AE信号是一维的时间序列，为了将一维的时间序列映射到 m 维的欧氏空间中，采用时间差法来重构相空间，按时间间隔 τ 从时间序列中取数作为矢量的分量，由此可以构造出一批矢量，即：

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & X_1 + \tau & \cdots & X_1 + (m-1)\tau \\ X_2 & X_2 + \tau & \cdots & X_2 + (m-1)\tau \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_N & X_N + \tau & \cdots & X_N + (m-1)\tau \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： m —重构的相空间维数； X_i ($i=1, 2, \dots, N$)—重构后的相空间矢量； τ —延迟时间； N —重构后的相空间矢量个数， $N=n-(m-1)\tau$ ； n —原时间序列的长度。

任选 m 维相空间中点集 $\{X_i\}$ ($i=1, 2, \dots, N$)的一点 $X_i=\{x_i, x_{i+\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau}\}$ 作为参考点，计算 $N-1$ 个点到他的距离，则可以统计出落于以点 X_i 为中心、以小标量 r 为半径的体积元中点的数量，从而得到关联函数 $C(r)$ ：

$$C(r) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} [H(r - \|X_i - X_j\|)] \quad (2)$$

式中： $H(r)$ 为Heaviside阶跃函数。

$$H(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases} \quad (3)$$

$C(r)$ 为关联积分满足对数线性关系，反映相空间中两点之间的距离小于 r 的分布概率，适当调整 r 的取值范围，即得到关联维数 D 。

$$D = \frac{\ln C(r)}{\ln r} \quad (4)$$

因此，画出双对数曲线 $\ln C(r)$ 和 $\ln r$ ，取其线性度较好的部分，对其进行最小二乘法线性拟合，拟合直线的斜率即为对应时间序列的关联维数 D 。在计算关联维数 D 值时，嵌入维数 m 和延迟时间 τ 的选取至关重要，根据分形理论，一般采用饱和关联维数法和自相关函数法来分别确定。 D 值标志着材料破坏形式有序性，依此可以区分高、低载荷下的Kaiser点，判断材料内部损伤的程度。

2 结果与讨论

2.1 三点弯曲试验

在三点弯曲试验条件下木材试件承受横向重复载荷 300 N，每加载一次后，将试件静置一段时间待其恢复，再进行下一次加载。在弹性变形阶段，在去除载荷后，试件会恢复原有状态；随着重复载荷的增加，试件逐渐发生损伤断裂，直至完全断裂。6种木材均取密度相同的3个试件进行测试，最大承载力 $F_{\max}$ 列于表1。

表1 重复载荷作用下6种木材最大承载力

Tab.1 Maximum load bearing capacity of six species wood under repeated loading /N				
树种	$F_{\max-1}$	$F_{\max-2}$	$F_{\max-3}$	平均值
柏木	1 572	1 800	1 120	1 497
樟子松	1 221	1 238	1 232	1 230
杉木	1 270	1 020	1 462	1 251
白榆	2 290	2 278	1 710	2 093
榉木	2 767	2 893	2 376	2 679
梧桐	1 444	1 866	2 120	1 810

表1显示树种、密度相同的3个试件的 $F_{\max}$ 也有较大差异，如柏木试件 $F_{\max}$ 相差676 N。由于塑料与木材都属于高分子聚合物，可参考美国增强塑料声发射监测委员会CARP推荐的标准来定义“明显”AE现象：当载荷增加10%时，AE超过20个振铃计数，就可以说明有明显的AE现象发生。为了确定AE振铃的阈值，在试验开始前采集一段AE信号，依据该段信号的幅值将阈值设定为48 dB。依据声发射检测理论，当AE振铃计数超过20发生“明显”AE现象时，计算相应的Felicity比（后一次加载出现AE现象时的载荷 P_{AE} 与原最大载荷 $P_{\max}$ 之比，即 $P_{\text{AE}}/P_{\max}$ ），结果如图2所示。

第1次加载无对照，不计算Felicity比。无论阔叶树材还是针叶树材试件第2次加载，其Felicity比都大于1，表明加载过程中载荷到达300 N时未出现明显AE现象，此载荷阶段以前处于Kaiser效应。在第3次加载中，柏木和杉木试件的Felicity比小于1，表明这两种材料已经进入Felicity效应阶段，此时损伤加重，试件开始进入高载荷阶段，已超过木材弹性范围，且产生不可逆损伤。随着重复载荷持续增加，在载荷超过900 N后，图2a中3种阔叶树材和图2b中樟子松试件进入Felicity效

应阶段，木材内部损伤进一步加剧，且逐步衍生为宏观损伤，图2中所对应的点即为Kaiser点。

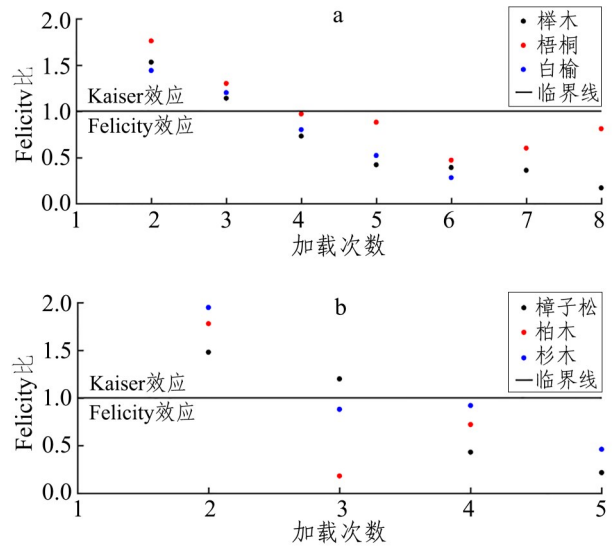


图2 重复载荷下6种木材的Felicity比
Fig.2 Felicity ratio diagram of six species wood under repeated loading

木材在低载荷阶段内无明显损伤，去除载荷作用，会恢复到加载前的状态，对其力学性质也无明显影响，处于Kaiser效应阶段。而在超过低载荷阶段向高载荷阶段过渡时，开始进入不可逆损伤阶段，此阶段虽然木材表面未见宏观裂纹，实则内部已发生细微损伤，主要表现为纤维的滑移错位，以及原有裂隙的延伸、扩展。木材进入高载荷阶段后，开始发生宏观损伤，随着载荷持续的增加，出现宏观裂纹直至完全断裂，失去其原有的力学性能。在高载荷阶段内，未达到前一次所加最大载荷即发生明显AE现象，属于Felicity效应阶段。

2.2 Kaiser点关联维数D计算

采用G-P算法计算Kaiser点的关联维数D，首先利用自相关函数确定 τ 值，再利用饱和关联维数法来确定最适合的相空间维数 m ，随着 m 的增加，拟合曲线的斜率慢慢增大，直至斜率不再发生明显变化，基本接近饱和状态。选取接近饱和状态时的 m 值，此时拟合曲线的斜率反映了系统的关联维数D的大小。本研究中当 m 大于5时，拟合曲线的斜率基本保持不变，所以将 m 设置为5，来计算Kaiser点对应AE信号的关联维数D。

图3为6种木材 Kaiser 点 AE 信号的 $\ln C(r)/\ln r$ 关系曲线, 其中 r 表示两条曲线线性拟合的相关系数, 该值越大表明拟合程度越高, 其中最小 r 值达到0.9879。而当 r 值大于0.95时, 表明木材在三点弯曲加载条件下的 AE 信号具有明显的分形特

征^[16]。每种木材试件的图a和图b均显示 Kaiser 效应阶段的 Kaiser 点, 图c和图d展示Felicity效应下的 Kaiser 点。对比发现, 6种木材试件 Kaiser 效应阶段内的关联维数 D 值, 都小于 Felicity 效应阶段内的关联维数 D 值。

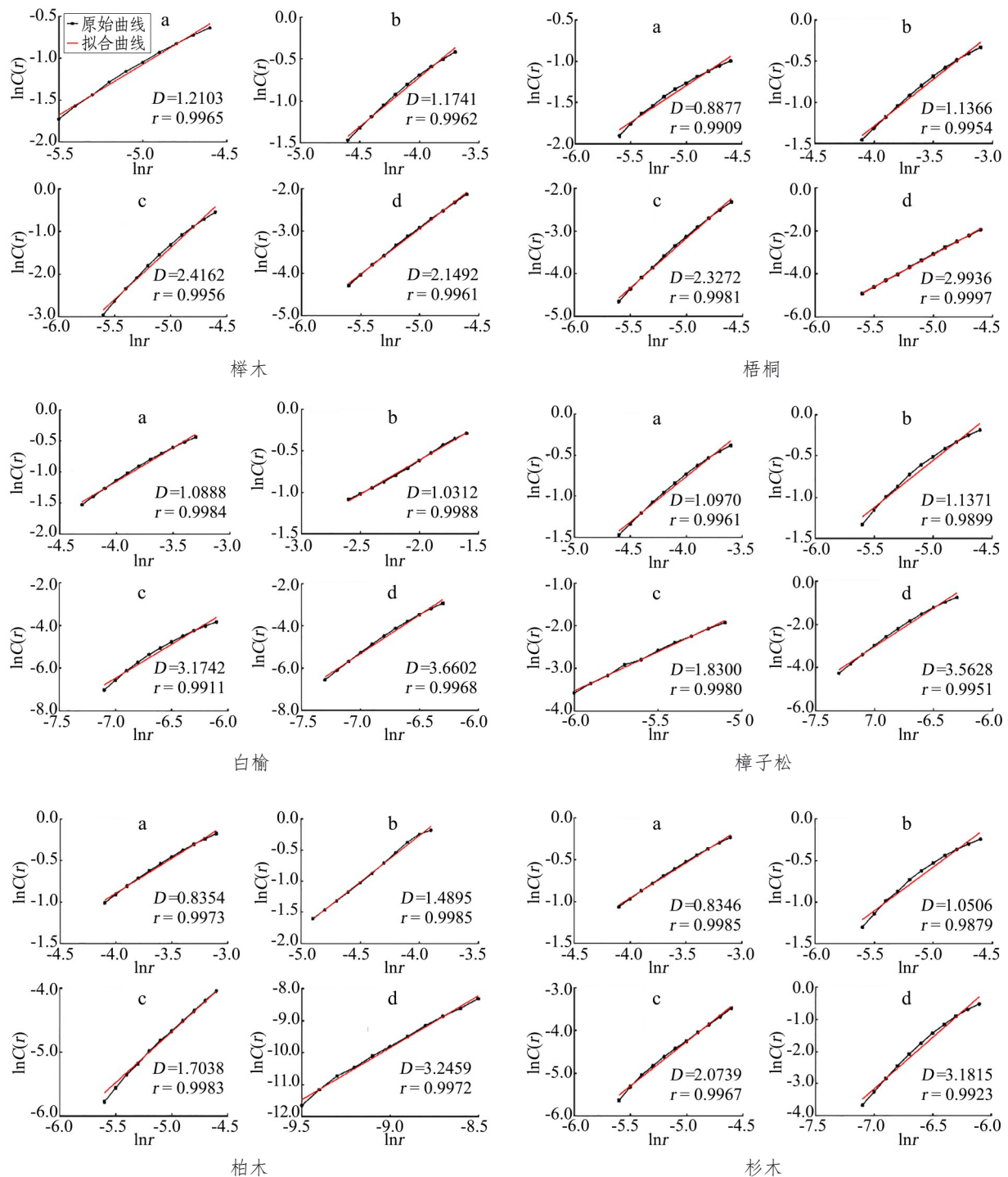


图3 6种木材 Kaiser 点关联维数拟合曲线

Fig.3 Fitting curve of six materials' Kaiser point correlation dimension

关联维数 D 表征材料破坏的有序度以及混沌特性, 其值越小, 表明材料内部破坏的有序度越高, 破坏以材料原有裂隙扩展、延伸为主, 损伤程度较小, 进一步证明低载荷阶段满足Kaiser效应; 反之则破坏更无序, 混沌特性更加明显, 损伤更加严重, 符合Felicity效应阶段的特性。从而进一步证明Felicity效应阶段的损伤更加严重, 因此可将Felicity效应阶段对应的相对载荷作为安全临界载荷, 视为在役构件是否需要维修或更换的重要指标。

3 结论

1) 本试验采用三点弯曲试验对6种木材进行重复载荷试验, 同时采集AE信号并对其进行特征分析。

研究结果表明, 利用Felicity比能有效辨别木材Felicity和Kaiser效应所对应的高低载荷阶段, 低载荷阶段内都满足Kaiser效应, 此时木材主要发生内部微损伤; 而在超过低载荷阶段的临界值, 即达到高载荷阶段, 此阶段内均满足Felicity效应, 表明木材即将出现宏观断裂。利用分形理论分析各种木材Kaiser点的分形特征, 并对其进行拟合计算关联维数 D , 所有曲线的拟合系数均大于0.95。处于低载荷阶段内的Kaiser点 D 值明显小于高载荷阶段内的 D 值, 表明通过Felicity比来划分高低载荷阶段是可行的。

2) 试验只探索了Kaiser点的关联维数 D , 未研究木材完整的损伤过程, 将来可进一步探究木材完整损伤过程中关联维数 D 的变化, 从而分析木材损伤过程, 实现对木材损伤程度的准确检测。

参考文献:

- [1] 邵卓平, 陈品, 查朝生, 等. 木材损伤断裂过程的声发射特性与Felicity效应[J]. 林业科学, 2009, 45(2): 86-91.
SHAO Z P, CHEN P, ZHAO C S, et al. Acoustic emission characteristics of damage and fracture process of wood and felicity effect[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(2): 86-91.
- [2] 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 College of Forestry, 2006, 26(4): 344-348.
- [3] 成阳, 阳能军, 龙宪海, 等. 碳/环氧复合材料拉伸损伤声发射Felicity效应研究[J]. 无损检测, 2012, 34(11): 54-56, 80.
CHENG Y, YANG N J, LONG X H, et al. Study of acoustic emission felicity effect on tensile damage of carbon/epoxy composite[J]. Nondestructive Testing, 2012, 34(11): 54-56, 80.
- [4] 刘婷, 毛汉领, 黄振峰, 等. 金属材料声发射Kaiser效应的混沌特性分析[J]. 振动与冲击, 2017, 36(12): 50-54.
LIU T, MAO H L, HUANG Z F, et al. Chaotic characteristics of Kaiser effect of metal acoustic emission[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(12): 50-54.
- [5] 张颖, 李彬, 刘爱玲, 等. 韧性金属Kaiser效应方向独立性的实验研究[J]. 实验力学, 2015, 30(6): 779-784.
ZHANG Y, LI B, LIU A L, et al. Experimental study of Kaiser effect direction independence in ductile metal[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(6): 779-784.
- [6] 陈宇龙, 魏作安, 张千贵. 等幅循环加载与分级循环加载下砂岩声发射Felicity效应试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(2): 226-230.
CHEN Y L, WEI Z A, ZHANG Q G. Experimental study on Felicity effect of acoustic emission in rock under cyclic loading and tiered cyclic loading[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(2): 226-230.
- [7] 石凯, 梅甫定, 程明胜, 等. 循环加载高应力对大理岩Kaiser效应影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(12): 2906-2916.
SHI K, MEI F D, CHENG M S, et al. Experimental study on the effect of high stress cyclic loading on Kaiser effect in marble[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(12): 2906-2916.
- [8] 杨东辉, 赵毅鑫, 滕腾, 等. 砂岩破裂失稳声发射临界特征与Kaiser点识别研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(1): 218-230.
YANG D H, ZHAO Y X, TENG T, et al. Study on critical characteristics of acoustic emission in sandstone fracture instability and Kaiser point recognition[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(1): 218-230.
- [9] SILVA F E, GONÇALVES L L, FERREIRA D B B, et al. Characterization of failure mechanism in composite materials through fractal analysis of acoustic emission signals[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2005, 26(2): 481-494.
- [10] ZHOU B, CHEN C Z, GU Q, et al. An identification method of appearances and expansion of fatigue crack in the wind turbine blade based on fractal feature[J]. Advanced Materials Research, 2012, 591-593: 2123-2126.
- [11] FENG Z P, ZUO M J, CHU F L, et al. Gear crack assessment using correlation dimension[J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, 29-32: 1627-1633.
- [12] 赵奎, 王更峰, 王晓军, 等. 岩石声发射Kaiser点信号频带能量分布和分形特征研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3082-3088.
ZHAO K, WANG G F, WANG X J, et al. Research on energy distributions and fractal characteristics of Kaiser signal of acoustic emission in rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 3082-3088.
- [13] YANG J, ZHENG Y N, WANG H J. Modifications and statistical analysis of acoustic emission models based on the damage and fractal characteristics[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018(2): 1-6. DOI:10.1155/2018/1898937.
- [14] Grassberger P, Procaccia I. Measuring the strangeness of strange attractors[J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 1983, 9(1/2): 189-208.
- [15] Grassberger P, Procaccia I. Characterization of strange attractors[J]. Physical Review Letters, 1983, 50(5): 346-349.
- [16] 赵奎, 周永涛, 曾鹏, 等. 三点弯曲作用下不同粒径组成的类岩石材料声发射特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 3107-3114.
ZHAO K, ZHOU Y T, ZENG P, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of rock-like materials with different particle sizes under three-point bending[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 3107-3114.

(本文编校 向 琴)