

松散堆积体斜坡变形-滑移过程的声发射特征参数演化规律

李龙灿, 吴鑫, 刘永红, 海英, 张满, 张龙梅, 黄成佳

Evolution of the characteristic parameters of acoustic emission from deformation to failure of a loose soil slope

LI Longcan, WU Xin, LIU Yonghong, HAI Ying, ZHANG Man, ZHANG Longmei, and HUANG Chengjia

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202312041>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冻融环境下基于声发射的砂岩各向异性劣化机理分析

Mechanism analysis on anisotropic degradation of sandstone in freeze thaw environment based acoustic emission

刘兵, 郑坤, 王超林, 毕靖, 连帅龙 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(1): 132-142

不同倾角软硬组合岩体破裂演化过程分析

Experimental analysis of failure process in soft-hard combined rock masses at different inclination angles

赵娜, 孟利新, 缪海宾, 张怡斌, 王来贵 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(4): 58-67

黄河上游康杨滑坡堆积体特征及形成机理分析

Analysis on the accumulation deposits characteristics and formation mechanism of Kangyang landslide in the upper reaches of Yellow River

魏刚, 殷志强, 罗银飞, 万利勤, 李春孝 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(2): 1-8

地震与强降雨作用下堆积体滑坡变形破坏机理及防治方案分析

Deformation and failure mechanism and analysis on prevention measures of colluction landslide under earthquake and heavy rainfall

胡爱国, 周伟 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(1): 27-34

阳鹿高速公路K52新滑坡变形特征与成因机理分析

Deformation characteristics and genetic mechanism of a new landslide at K52 of Luyang freeway

陈云生, 刘光彬, 张一铭, 黄海峰, 吴秋军 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(1): 83-91

青海尖扎盆地寺门村滑坡发育特征及成因分析

Characteristics and formation of Simencun Landslides in Jianzha Baisn of Qinghai Province

史立群, 魏刚, 殷志强, 袁材栋, 武新宁, 李振超 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 15-21



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202312041

李龙灿, 吴鑫, 刘永红, 等. 松散堆积体斜坡变形-滑移过程的声发射特征参数演化规律[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(5): 151-159.

LI Longcan, WU Xin, LIU Yonghong, et al. Evolution of the characteristic parameters of acoustic emission from deformation to failure of a loose soil slope[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(5): 151-159.

松散堆积体斜坡变形-滑移过程的声发射特征 参数演化规律

李龙灿¹, 吴鑫^{1,2}, 刘永红¹, 海英¹, 张满¹, 张龙梅¹, 黄成佳¹

(1. 四川师范大学工学院, 四川成都 610101; 2. 四川师范大学西南土地资源评价与监测
重点实验室教育部, 四川成都 610066)

摘要: 松散堆积体在自然界和工业生产中广泛存在, 有复杂的力学性质和相对较高的失稳风险。为研究其在斜坡变形中的滑移失稳过程, 基于声发射技术探究了松散体从静止、蠕变到滑移整个过程中声学特征演化规律。分析松散体在滑移过程中的声发射特征(acoustic emission, AE)参数, 然后结合松散体的状态变化对AE演化阶段进行了划分, 最后结合颗粒图像测速法(particle image velocimetry, PIV)分析和频谱变化进一步验证了松散体滑移过程的AE演化规律。结果表明: 振铃计数和能量随滑移过程而逐渐增大, b 值(小事件数与大事件数的比值)随滑移过程逐渐降低, b 值、振铃计数和能量的滑移阈值为0.2、5 000次和1 500 mV·ms, 其中 b 值对松散体的状态变化更敏感; 频谱重心在临滑移前期有30~50 kHz的降幅, 而后发生震荡变化, 其震荡时间区域正好对应振铃计数和能量数值相对较高及 b 值相对较低的时间区域; 此外松散体滑移前存在一个重要的“窗口期”, 说明AE技术具有识别松散体滑坡前兆的潜力。

关键词: 声发射; 松散堆积体; 滑坡监测; 滑移过程; PIV

中图分类号: P642.22; X936 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2024)05-0151-09

Evolution of the characteristic parameters of acoustic emission from deformation to failure of a loose soil slope

LI Longcan¹, WU Xin^{1,2}, LIU Yonghong¹, HAI Ying¹, ZHANG Man¹, ZHANG Longmei¹, HUANG Chengjia¹

(1. College of Engineering, Sichuan Normal University, Chengdu, Sichuan 610101, China; 2. Key Laboratory
of Southwest Land Resource Assessment and Monitoring, Ministry of Education,
Sichuan Normal University, Chengdu, Sichuan 610066, China)

Abstract: Loose accumulations are widely present in nature and industrial production, possessing complex mechanical properties and relatively high risks of instability. To investigate their sliding instability process during slope deformation, this study explores the evolution of acoustic characteristics throughout the entire process of loose accumulations, from static state,

收稿日期: 2023-12-31; 修订日期: 2024-08-11

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家应急管理部安全生产重大事故防治关键技术项目(Sichuan-0011-2018AQ); 四川省科技计划项目(24NSFSC0343; 2023NSFSC1038)

第一作者: 李龙灿(1994—), 男, 陕西咸阳人, 资源与环境专业, 硕士, 主要从事矿山岩土力学与灾害防治研究。

E-mail: llc412257968@qq.com

通讯作者: 吴鑫(1983—), 男, 四川遂宁人, 岩土工程专业, 博士, 副教授, 主要从事矿山岩土力学与灾害防治研究。

E-mail: xinwu@sicnu.edu.cn

creep to sliding, based on acoustic emission (AE) technology. The AE characteristic parameters of loose accumulations during the sliding process are analyzed, and the AE evolution stages are divided based on the state changes of loose accumulations. Finally, the AE evolution law of the sliding process of loose accumulations is further verified through particle image velocimetry (PIV) analysis and spectral changes. The results indicate that the ringing count and energy gradually increase with the sliding process, while the b -value gradually decreases. The sliding threshold values for the b -value, ringing count, and energy are 0.2, 5 000 counts, and 1 500 mV·ms, respectively, with the b -value being more sensitive to state changes in loose accumulations. The spectral centroid experiences a decrease of 30 ~ 50 kHz in the early pre-sliding stage, followed by oscillatory changes. The time period of these oscillations corresponds to relatively high ringing count and energy values and relatively low b -values. Furthermore, there is an important “window period” before the sliding of loose accumulations, indicating that AE technology has the potential to identify precursors of loose accumulation landslides.

Keywords: acoustic emission ; loose accumulations; landslide monitoring; slip processes; PIV

0 引言

由碎石土、尾矿砂等颗粒材料堆积而成的松散体在自然界和工业生产活动中广泛存在,普遍具有结构松散、孔隙度大、颗粒间结合力差等特点,有复杂的力学性质和相对较高的失稳风险。受自然条件和人类活动等影响,松散体在斜坡地形中更易发生地质灾害。因此如何有效预测斜坡地形松散体边坡滑移破坏的过程对于矿山的生产安全和实际工程项目的实施具有重大意义。目前松散体边坡的监测方式主要有位移监测和变形监测,包含光学遥感、三维激光扫描、GPS、RS 等技术^[1-5]。但以上技术都存在明显局限性,监测范围有限并且对边坡内部变形和滑坡孕育过程情况不能及时掌握。声发射(acoustic emission, AE)是基于声波的发射和检测,并且和检测对象内部结构的断裂或者变形息息相关。由于松散体滑移破坏过程中,其内部松散颗粒间的相互作用力也会产生弹性波,这使得 AE 技术能够识别其信号,及时发现和记录边坡破坏的发展过程,在滑坡灾害前做出有效的预警。因此,AE 技术在近年来的边坡稳定性监测中逐渐得到更多关注。

近年来,针对松散体滑坡的研究重点从滑坡监测技术的相关话题逐渐转向滑坡变形的监测预警和边坡稳定性的相关评估研究^[6-9]。Codeglia 等^[10]提出一种利用 AE 监测边坡稳定性的思路,认为 AE 趋势与内部应力、外部斜坡载荷等有关。Berg 等^[11]在前人研究基础上在加拿大的和平河地区进行了声发射实地试验。Hu 等^[12]提出了用声发射和微震联合监测的方法,并获得了更准确的预测结果。此外,不少学者一直以来针对松散体边坡的组成物质开展室内试验,探寻其在不同试验过程中声发射信号特征,Chen 等^[13]对 BFRP 混凝土粘结滑移破坏过程特征进行了研究。Deng 等^[14]尝试搭建用于

滑坡监测的声发射阵列系统,并进行了相关试验。李文彪等^[15]将声发射用于松散颗粒介质边坡或路堤稳定性研究。胡训健等^[16]模拟了单轴压缩实验中细观结构的非均质性对岩石颗粒的声发射特性的影响。吴鑫等^[17]研究了不同剪切速率下松散颗粒的声发射信号特征。

综上所述,目前关于松散体边坡监测相关研究已取得一定进展,但是其滑移过程的声学规律研究仍不充分。因此本研究将搭建斜坡试验平台,开展松散体模拟滑坡试验,并考虑连续改变装置倾角,监测松散体静止、蠕变到滑移整个过程的声发射信号演化规律,为松散体边坡稳定性监测提供研究思路和数据支撑。

1 试验设计

采用中国 ISO 标准砂(GSB08-1 337)作为试验材料,利用高频振筛机筛分出 0.5 ~ 1 mm 的砂粒作为试验原材料,试件尺寸 $\Phi 61.8 \times 40$ mm。试验装置如图 1—2 所示,主要由升降装置、滑坡装置和声发射数据采集系统 3 个部分组成。

升降装置由滑轮、固定物和绳子组成,滑轮采用不锈钢材质,长度为 85 mm,滑轮轮直径为 25 mm。滑坡装置由 2 个透明的 0.3 m \times 0.3 m \times 0.8 m 的空心长方体模型箱组成。滑坡装置的滑道分为 2 层,底层作为表面层,将试验砂均匀地粘在倾斜滑道上来模拟自然条件下的坡面;上层为堆积层,将试验砂均匀堆放在底层上形成堆积层来模拟松散体。

声发射系统为北京软岛 DS5-16B 多通道声发射仪,采样频率为 3MHz,默认触发阈值为 100 mV,频率范围为 100 ~ 400 kHz,模拟滤波器信号设为直通,储存设置为波形。在滑坡装置安装 3 个陶瓷压电传感器全程记

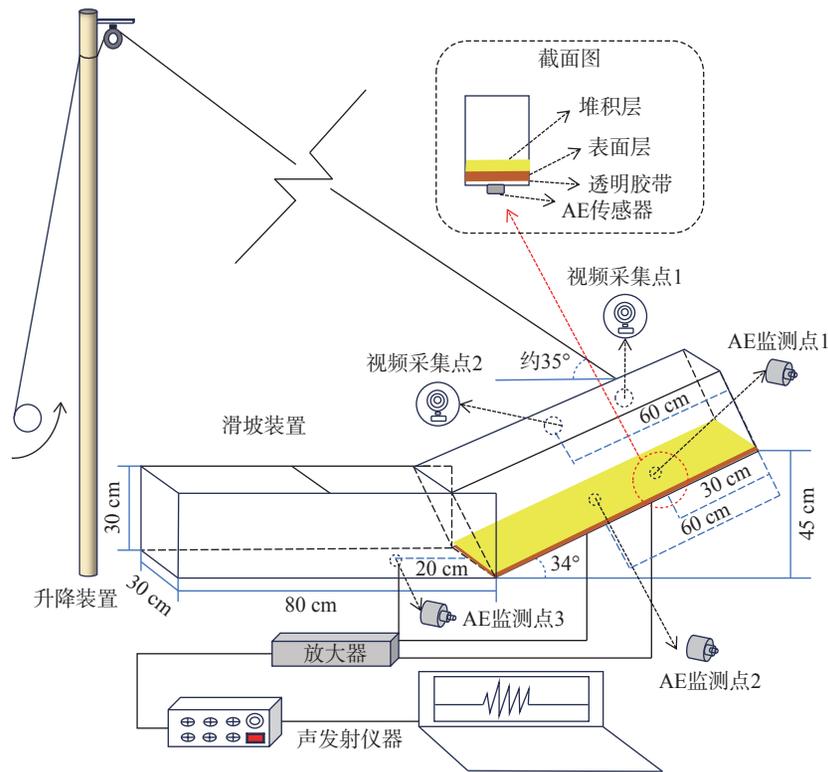


图 1 装置设计图

Fig. 1 Device design diagram



图 2 装置实景图

Fig. 2 Actual view of the installation

率为 1 080 p 的高清摄像头记录试验过程。如图 1 所示传感器设置在倾斜箱体的 300, 600 mm 处的底部背面和水平箱体位置 200 mm 处。摄像头和倾斜箱体的传感器位置相互对应, 在其上方 300 mm 处。

试验开始前将倾斜滑道与水平面的初始高度设置为 450 mm, 并将 400 g 粒径分布为 0.5 ~ 1 mm 的标准砂均匀堆积在倾斜滑道上, 以模拟自然条件斜坡地形上的松散体。在堆放标准砂时要保持滑道上的堆积层不会发生滑移现象。试验装置起始角度为 34°, 试验过程倾角变化范围在 34° ~ 39°。试验开始后, 保持 0.75 mm/s 的速度启动升降装置, 在上升过程中由于倾角不断地发生变化使得松散体经历静止, 蠕变到滑移整个过程。当松散体滑移过程结束后即停止试验同时停止采集相关数据, 通过声发射传感器和高清摄像头分别采集得到松散体的整个滑移过程的信号数据和视频图像。通过多组重复试验研究松散体滑移的启动机制、速度变化、变形特征以及滑移前兆。

本试验进行了 3 组重复试验, 结合布置的 2 个位置互相对应的声发射探头和高清摄像头一共得到了 6 组速度数据。各组速度均值分别为 0.018, 0.013, 0.012, 0.026, 0.011, 0.015 m/s, 标准差为 0.005 6, 平均误差为 0.004 1, 最大误差为 0.010 2, 变异系数为 0.35。变异系

录声发射信号参数与波形信息。传感器型号是 RS-2A, 尺寸为 $\Phi 18.8 \times 15$ mm, 接口类型为 M5-KY, 放大器为 40 dB。该声发射仪能够实现声发射信号的采集、回放、波形处理和声源定位, 并基于阈值法获取时差, 进而采用穷举算法进行定位。同时安装 2 个 30 fps、分辨

数的大小与数据稳定性有着密切的关系。通常情况下, 变异系数越小, 表示数据集中的观测值越稳定, 波动性较小。因此, 本试验误差较小, 结果较为稳定。

2 数据分析

2.1 数据预处理

为研究松散体滑移过程中的 AE 信号规律, 选择了

2 个关键时间节点, 如图 3 所示将整个滑移过程分为 3 个阶段。时间节点选取为视频观察到的颗粒滑动点和滑移点。I 阶段为平稳阶段, 对应滑坡过程中的平稳阶段, 该阶段无滑动现象; II 阶段为蠕变阶段, 对应滑坡过程中的滑动阶段和滑移前阶段, 该阶段能观察到个别及少数颗粒滑动; III 阶段为滑移阶段, 对应滑坡中的滑坡阶段, 该阶段能观察到较多颗粒滑动甚至宏观滑坡现象。

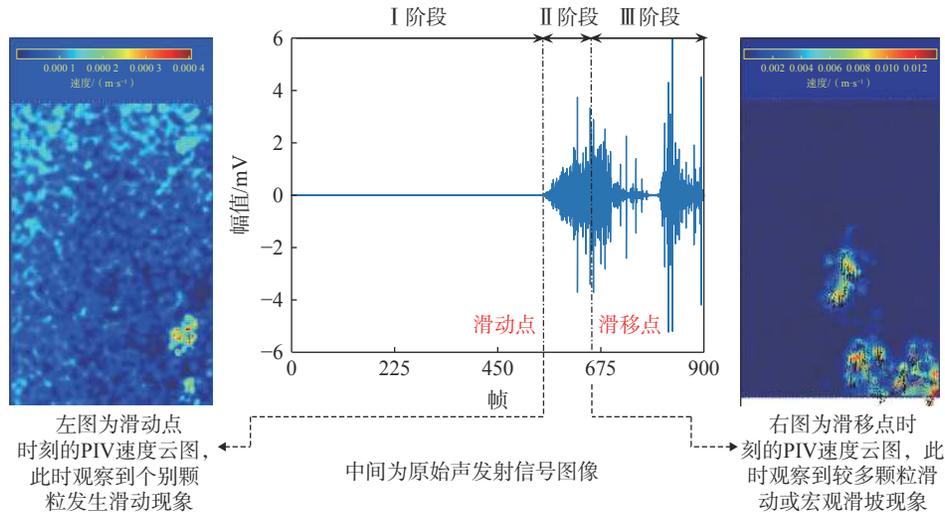


图 3 AE 数据预处理图

Fig. 3 AE data preprocessing chart

2.2 振铃计数及 AE 能量阶段分析

松散体在滑移过程中的 AE 信号特征是: 振铃计数和能量随滑移过程呈现先逐渐增大后衰减, 最终趋于稳定。具体表现如图 4 所示: I 阶段时, 振铃计数保持不变; 在 II 阶段时, 振铃计数逐渐上升, 达到较高点后保持平稳, 此时颗粒间的相互作用力在不断增加, 松散体自身的状态逐渐不稳定, 滑移阈值为 5 000 次, 当振铃计数达到阈值后发生滑移现象。在 III 阶段振铃计数逐渐衰减。此时松散颗粒重新排列或沉降, 从而导致松散体内部结构和稳定性得到改善, 使得振铃计数逐渐减小。若发生二次滑移, 则振铃计数会有波动变化。在滑移结束时, 振铃计数变化逐渐稳定。

滑移过程中 AE 能量释放规律与振铃计数演化规律类似。如图 4 所示, 相比振铃计数, 能量的滑移阈值并不固定, 当能量大于 1 500 mV·ms 后, 易发生滑移现象。试验发生二次滑移的原因是由于松散颗粒之间的相互作用产生的, 遵循 Omori 定律。其反映的是大的断裂声发射信号引发的次生断裂信号行为。在本试验中是随着滑移过程的进行, 松散体内部结构重新发生变化, 使得松散体出现新的不稳定状态进而发生二次滑移现象。

2.3 b 值分析

b 值 (b -value) 是小事件数与大事件数的比值, b 值常作为判定裂隙发展情况的参数^[17]。 b 值的计算公式可表示为:

$$b = \frac{20 \times \lg e}{(A - A_{\min})} \quad (1)$$

式中: e ——自然常数;

A 、 A_{\min} ——平均幅值和最小幅值/mV。

b 值在计算时将其阈值设为 0.004; 频率设置为 3 MHz, 将原始数据划分为 900 组, 每组数据集样本数为 100 000。 b 值随时间的演化规律如图 5 所示, 具体表现为: b 值在滑移过程中逐渐减小, 这是由于滑移过程引起的颗粒间的摩擦和力链重排等事件越来越频繁和显著, 即大事件比例不断增加。随着滑移过程的进行, b 值减小趋势逐渐放缓。 b 值阈值为 0.2, 当 b 值达到阈值后易发生滑移现象; 在 III 阶段 b 值逐渐回升。在滑移结束时, b 值变化逐渐稳定。

2.4 频谱分析

采用快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 对松散体滑移试验 AE 信号数据进行处理得到功率谱,

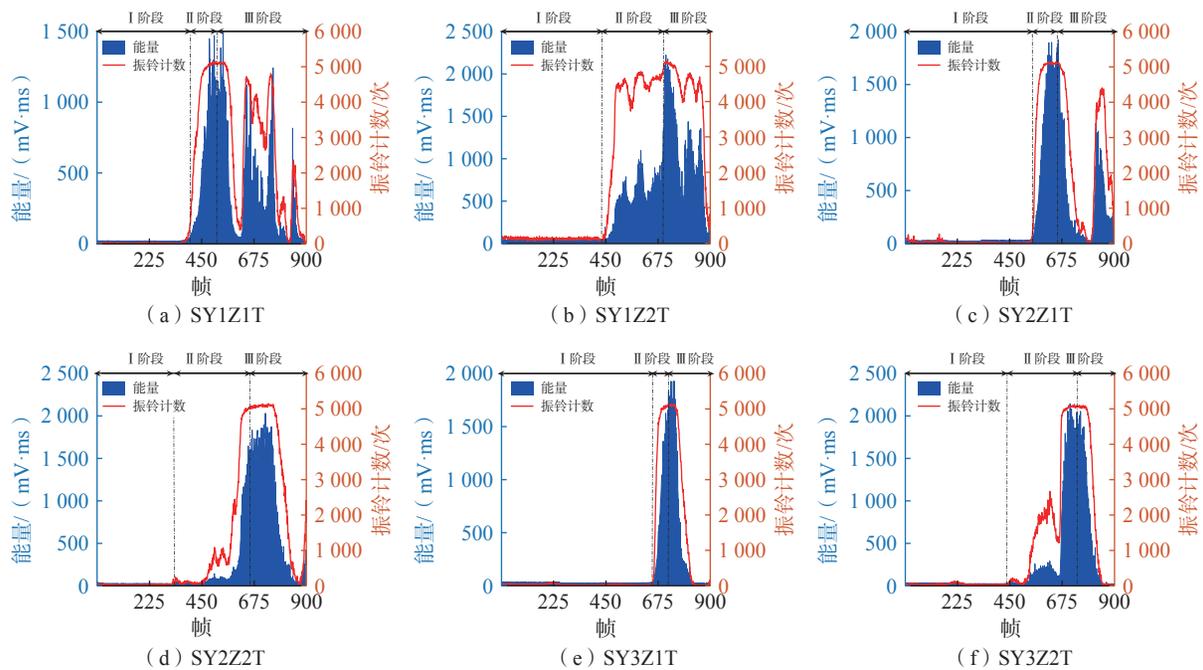


图 4 振铃计数和能量随时间变化图

Fig. 4 Plot of ring counts and energy over time

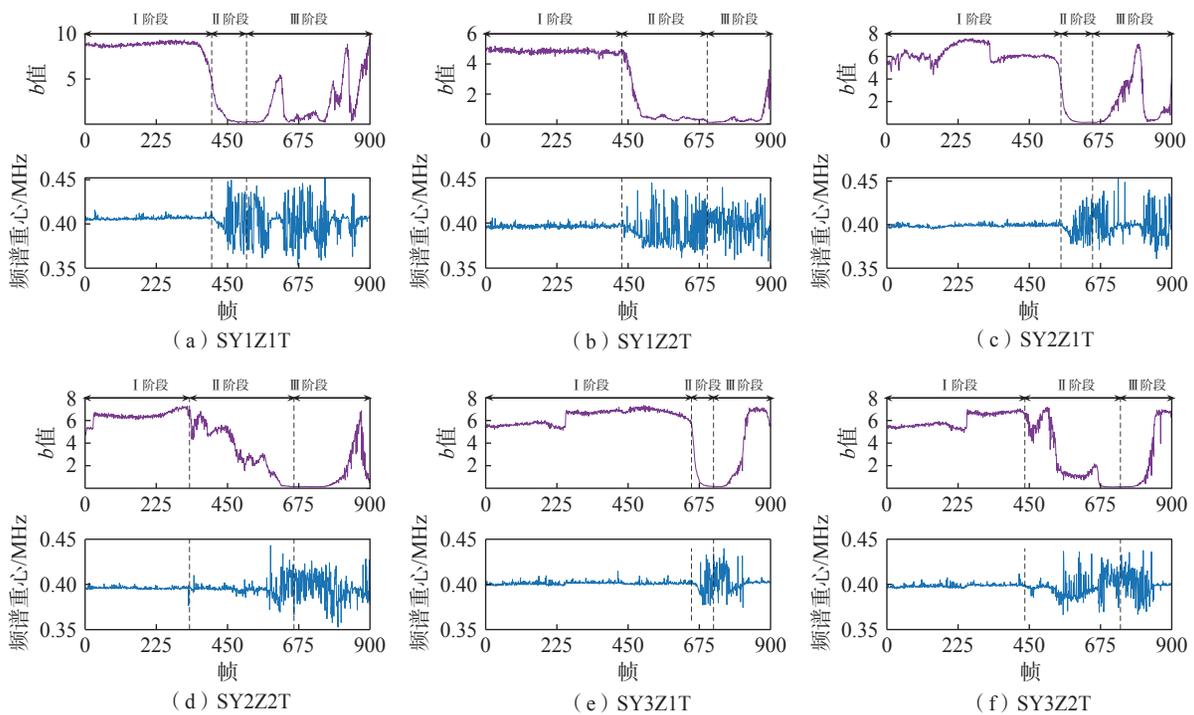


图 5 b 值和频谱重心随时间变化图

Fig. 5 Plot of b-value and spectral centre of gravity over time

进一步获得主频、频谱重心等信息。主频即峰值频率，频谱重心计算公式如下：

$$FC = \frac{\int_0^{+\infty} fP(f)df}{\int_0^{+\infty} P(f)df} \quad (2)$$

式中：FC——频谱重心/Hz；

f——频谱重心的横坐标；

P(f)——信号的功率谱。

频谱重心随时间的演化规律如图 5 所示，在 I 阶段时，频谱重心保持在 400 kHz 左右，此时松散体内部结

构相对稳定,没有明显的内部位移或结构变化。外部应力达到了一个稳定状态,松散体正处于相对静止或受均衡的应力状态。在 II 阶段,频谱重心在临滑移前期已经有 30 ~ 50 kHz 的降幅,说明在该时期松散体已经开始发生微观结构变化或应力分布变化,从而导致越来越多的颗粒开始出现滑动情况。在此之后频谱重心在 350 ~ 450 kHz 之间进行波动变化,这种波动变化预示着松散体内部结构正在不断发生变化,一般与松散体内部微观裂缝扩展、颗粒重新排列或颗粒间压力变化相关,最终导致了宏观滑坡现象的发生。

具体表现为:在 I 阶段时无论是振铃计数、能量、

b 值、频谱重心还是 PIV 分析得到的颗粒速度图像曲线均保持相对稳定。在 II 阶段,振铃计数和能量呈不断上升的趋势, b 值不断减小,频谱重心在临滑移前期有 30 ~ 50 kHz 的降幅,而后过程中频谱重心在 350 ~ 450 kHz 之间进行波动变化。频谱重心的震荡时间区域正好对应振铃计数和能量数值相对较高及 b 值相对较低的时间区域。临近滑移点时,颗粒图像测速法 (particle image velocimetry, PIV) 速度图像曲线开始缓慢增长。其中, b 值变化最早,对松散体的状态变化的更敏感。在 III 阶段,PIV 速度图像曲线先增后减,随着滑移过程结束,各参数变化逐渐归于稳定(图 6—7)。

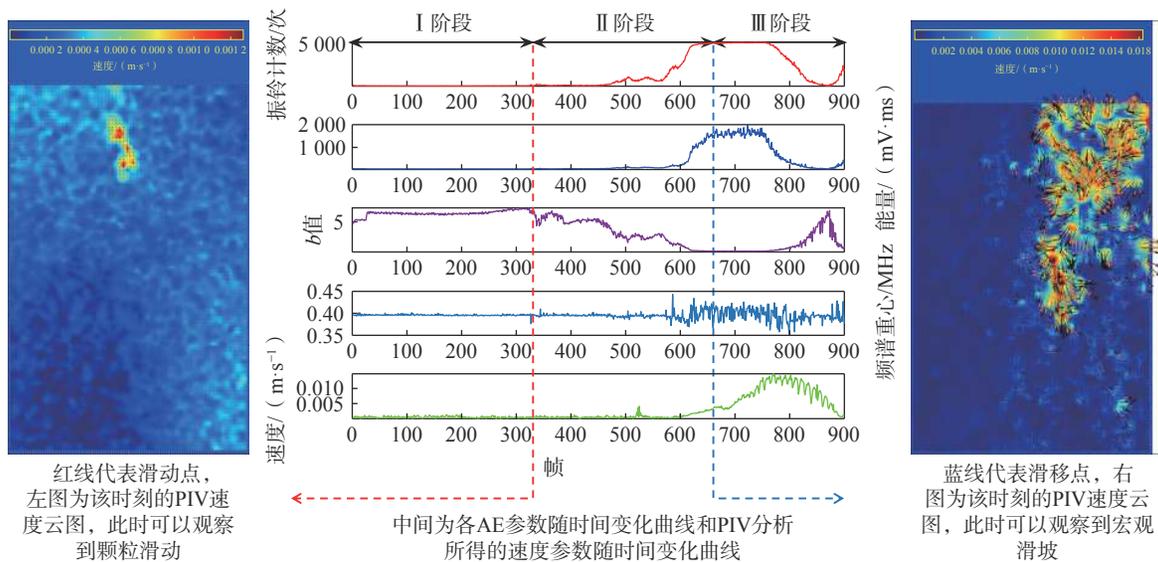


图 6 声发射结合 PIV 滑移过程分析图

Fig. 6 acoustic emission combined with PIV slip process analysis diagrams

此外,还注意到在 II 阶段时,AE 信号变化出现在 PIV 速度变化之前。当松散体发生滑动或滑移行为前,声发射(AE)参数就已经发生了相应的变化。这段 AE 参数变化的时间视为松散体滑坡发生前的“窗口期”,并可能将其用于松散体滑坡预测和预警^[18-20]。

3 滑移阶段预测

AE 试验数据提供了关于松散体的状态变化的声学信号,这些信号可以识别松散体滑坡前的“窗口期”,并作为预测依据。考虑选取 AE 信号参数为预测指标,根据不同阶段 AE 信号参数对应的规律变化来预测松散体滑移过程的不同阶段^[21]。由于 b 值对松散体状态变化较为敏感,所以选取 b 值为基本参数,结合各试验组 b 值演化情况,基于此将松散体滑移过程分为 5 个阶

段。划分依据和计算过程如下:

$$R_b = \begin{cases} R_b5 & b \leq 1 \\ R_b4 & 1 < b \leq 3 \\ R_b3 & 3 < b < 4 \\ R_b2 & 4 \leq b < 5 \\ R_b1 & b \geq 5 \end{cases} \quad (3)$$

式中: R_b ——基于 b 值的预测阶段;

$R_b1 \sim R_b5$ ——滑移阶段 (R_b5), 滑移预警阶段 II (R_b4), 滑移预警阶段 I (R_b3), 滑动阶段 (R_b2) 和平稳阶段 (R_b1), R_b 等级越高表示阶段越危险;

b ——小事件数与大事件数的比值,与滑坡危险程度成反比, b 值越小表示阶段越危险。

预测情况如表 1 所示,滑移点为图 3 右侧竖线,提

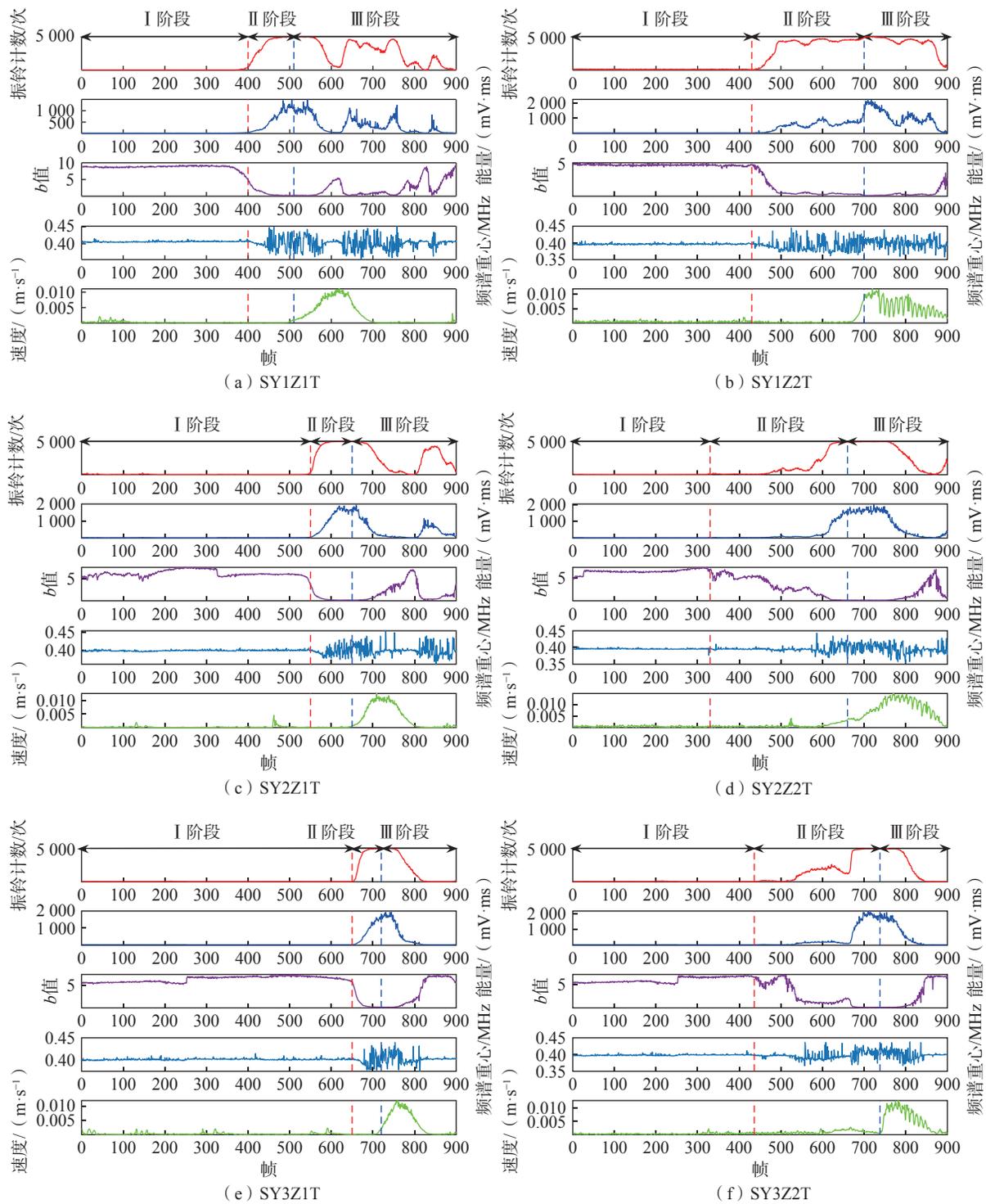


图7 各试验组综合分析图

Fig. 7 Comprehensive analysis charts for each test group

前时间为 b 值第一次到达(3, 4)间的时间点。结果表明预警点(R_b3 对应的滑移预警所致)出现在实际滑移发生之前, 预测的滑移阶段包含了实际滑移阶段, 且所有试验组均符合规律。当达到 R_b5 后, 即使后面阶段发生变化, 仍需警惕后续滑坡现象的发生。说明了 R_b 预测模

型能提前预测松散体滑移现象的发生, 考虑到 b 值门限值的变化性和不确定性, 未来可以建立多种声发射参数预测模型, 并与各类机器学习的方法相结合, 建立新的模型来预测松散体滑移过程, 从而提高预测模型的准确性和可靠性。

表 1 各试验组预测时刻表

Table 1 Predicted timetable for each test group

编号	实际滑移点	滑移预警点	提前时间/帧
SY1Z1T	510	439	71
SY1Z2T	700	486	214
SY2Z1T	650	565	85
SY2Z2T	660	586	74
SY3Z1T	720	672	48
SY3Z2T	738	558	180

注: SY1Z1T 含义为试验 1 组第 1 通道, 下同。

尽管现阶段将声发射技术实际应用于松散体滑坡工程仍有一定的难度, 但可以利用相关技术一些尝试, 如利用有源波导技术, 改进有源、普通波导杆或 WEAD 波导杆等, 克服 AE 信号在非固结材料中的快速衰减, 并将其应用于实际松散体边坡场景, 如渣土场, 尾矿库等, 以开展边坡风险预测预警。

4 结论

(1) 通过连续改变装置倾角, 模拟松散体在斜坡地形上经历从静止到蠕变再到滑移的整个过程, 利用数据挖掘来揭示松散体滑动变形过程中声发射信号的演化规律以及捕捉滑移前兆, 对松散体滑移过程相关研究进行了一定的补充和完善。

(2) 试验数据揭示了松散体滑移前存在一个重要的“窗口期”, 通过声发射技术更早监测到松散体内部的变化信号, 延长预警时间来提高监测和预警系统的效率, 说明 AE 技术具有识别松散体滑坡前兆的潜力。

(3) 本研究可应用于监测由生产活动或开采资源后形成的松散体边坡稳定性, 并在实际生产和工程中及时感知潜在的滑动风险, 从而有助于在地质灾害事故发生前采取及时、有针对性的措施, 最大程度地减少或避免潜在的生命财产损失。

参考文献(References):

- [1] 邓李政, 袁宏永, 张鸣之, 等. 滑坡变形监测预警技术研究进展 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2023, 63(6): 849 - 864. [DENG Lizheng, YUAN Hongyong, ZHANG Mingzhi, et al. Research progress on landslide deformation monitoring and early warning technology [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2023, 63(6): 849 - 864. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 冉林, 马鹏辉, 彭建兵, 等. 甘肃黑方台“10·5”黄土滑坡启动及运动特征分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(6): 1 - 9. [RAN Lin, MA Penghui, PENG Jianbing, et al. The initiation and motion characteristics of the “10·5” loess landslide in the Heifangtai platform, Gansu Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(6): 1 - 9. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 韦忠跟, 徐玉龙, 丁辉, 等. 霍林河北露天煤矿排土场边坡滑坡模式与雷达监测预警 [J]. 现代矿业, 2022, 38(1): 71 - 74. [WEI Zhonggen, XU Yulong, DING Hui, et al. Slope landslide mode and radar monitoring and early warning of dump slope in Huolinhe north open-pit coal mine [J]. Modern Mining, 2022, 38(1): 71 - 74. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 丁保艳, 翟向华, 张卫雄, 等. 大型高位堆积体滑坡稳定性分析与数值模拟 [J]. 地震工程学报, 2022, 44(4): 786 - 793. [DING Baoyan, ZHAI Xianghua, ZHANG Weixiong, et al. Analysis and numerical simulation of the stability of large high-position accumulation landslides [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(4): 786 - 793. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 吴绿川, 王剑辉, 符彦. 基于 InSAR 技术和光学遥感的贵州省滑坡早期识别与监测 [J]. 测绘通报, 2021(7): 98 - 102. [WU Lyuchuan, WANG Jianhui, FU Yan. Early identifying and monitoring landslides in Guizhou Province with InSAR and optical remote sensing [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(7): 98 - 102. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 王琼, 欧元超, 张平松. 基于文献计量的滑坡监测技术现状及趋势分析 [J]. 人民长江, 2022, 53(8): 123 - 132. [WANG Qiong, OU Yuanchao, ZHANG Pingsong. Status and trend analysis of landslide monitoring technology based on bibliometrics [J]. Yangtze River, 2022, 53(8): 123 - 132. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 石爱红, 李国庆, 丁德民, 等. 考虑非饱和土基质吸力的丁家坡滑坡变形机制及稳定性评价 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 141 - 151. [SHI Aihong, LI Guoqing, DING Demin, et al. Deformation mechanism and stability evaluation of Dingjiapo landslide considering the matrix suction of unsaturated soil [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 141 - 151. (in Chinese with English abstract)]
- [8] BAO Han, LIU Li, LAN Hengxing, et al. Evolution of high-filling loess slope under long-term seasonal fluctuation of groundwater [J]. CATENA, 2024, 238: 107898.
- [9] CUI Peng, GE Yonggang, LI Shaojun, et al. Scientific challenges in disaster risk reduction for the Sichuan-Tibet Railway [J]. Engineering Geology, 2022, 309: 106837.
- [10] CODEGLIA D, DIXON N, FOWMES G J, et al. Analysis of acoustic emission patterns for monitoring of rock slope deformation mechanisms [J]. Engineering Geology, 2017, 219: 21 - 31.
- [11] BERG N, SMITH A, RUSSELL S, et al. Correlation of acoustic emissions with patterns of movement in an extremely slow-

- moving landslide at Peace River, Alberta, Canada [J] . *Canadian Geotechnical Journal*, 2018, 55(10): 1475 - 1488.
- [12] HU Wei, SCARINGI G, XU Qiang, et al. Acoustic emissions and microseismicity in granular slopes prior to failure and flow-like motion: The potential for early warning [J] . *grl*, 2018, 45(19): 10.
- [13] CHEN Yuzhi, CHEN Shijie. Experimental study on acoustic emission characteristics of bond-slip for BFRP concrete [J] . *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2020, 56(2): 119 - 130.
- [14] DENG Lizheng, YUAN Hongyong, CHEN Jianguo, et al. Prefabricated acoustic emission array system for landslide monitoring [J] . *Engineering Geology*, 2023, 323: 107185.
- [15] 李文彪, 王轶, 陈新, 等. 基于声发射监测的路堤相似模拟破坏过程分形特征研究 [J] . *公路*, 2017, 62(7): 33 - 38. [LI Wenbiao, WANG Yi, CHEN Xin, et al. Fractal analysis of similar simulation of embankment failure process based on acoustic emission monitoring technology [J] . *Highway*, 2017, 62(7): 33 - 38. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 胡训健, 卞康, 刘建, 等. 花岗岩晶体粒径分布对声发射特性影响的颗粒流模拟 [J] . *煤炭学报*, 2021, 46(增刊 2): 721 - 730. [HU Xunjian, BIAN Kang, LIU Jian, et al. Particle flow simulation of the influence of granite crystal size distribution on acoustic emission characteristics [J] . *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(Sup 2): 721 - 730. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 吴鑫, 罗筱毓, 李龙灿, 等. 不同速率下松散颗粒直剪试验声发射特征研究 [J/OL] . *西南交通大学学报* (2023-09-01) [2023-12-10]. [WU Xin, LUO Xiaoyu, LI Longcan, et al. Experimental research on acoustic emission characteristics of loose particles in direct shear process at different rates [J/OL] . *Journal of Southwest Jiaotong University* (2023-09-01) [2023-12-10]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=Fc1KeZPKhRGwbjFp-Euk0_SSulppLegaQ4PmGickmb16JAOeM33IXiGUdUHHztT-a6sXD8sFH6yOq769YYfppURcvZGYkmmk39NJfwRdMjms7DbwtOn2uR-m4aW4chDbWE3TEVsXC44u9FtUvxxQy27yuWNKdxc6sAk4yPOGcuP1S4Yq_8VZgU6m4VsfM2&uniplatform=NZKPT&language=CHS (in Chinese with English abstract)]
- [18] 陈锡锐, 刘虹强, 杨剑红, 等. 四川宝兴张家沟危岩体稳定性及运动学分析 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2024, 35(2): 81 - 89. [CHEN Xirui, LIU Hongqiang, YANG Jianhong, et al. Analysis of stability and kinematics of the dangerous rock mass in Zhangjiagou, Baoxing, Sichuan Province [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2024, 35(2): 81 - 89. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 冯谕, 曾怀恩, 涂鹏飞. 遗传算法下的滑坡蠕滑位移预测模型研究 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2024, 35(1): 82 - 91. [FENG Yu, ZENG Huaen, TU Pengfei. Research on prediction model of landslide creep displacement on genetic algorithm [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2024, 35(1): 82 - 91. (in Chinese with English abstract)]
- [20] HAERI H, SARFARAZI V, SHEMIRANI A B, et al. Field evaluation of soil liquefaction and its confrontation in fine-grained sandy soils (case study: South of Hormozgan Province) [J] . *Journal of Mining Science*, 2017, 53(3): 457 - 468.
- [21] 李修磊, 谢飞, 陈臣, 等. 基于声发射的张开型单裂隙岩石裂纹扩展行为特性研究 [J] . *水文地质工程地质*, 2024, 51(3): 90 - 101. [LI Xiulei, XIE Fei, CHEN Chen, et al. Investigation of crack propagation behavior of opening single fractured rock based on acoustic emission technology [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2024, 51(3): 90 - 101. (in Chinese with English abstract)]