

DOI: 10.11779/CJGE202106010

单轴荷载作用下砂岩的破裂与速度结构层析成像

郑强^{1, 2, 3}, 徐颖^{*2}, 胡浩¹, 钱佳威³, 宗琦², 谢平⁴

(1. 安徽理工大学深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001;
3. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026; 4. 淮南矿业(集团)有限公司顾北煤矿, 安徽 淮南 232150)

摘要: 受载岩石内的破裂程度随荷载的增大而增加, 同时伴有速度结构的变化。采用声发射(AE)监测单轴荷载作用下的砂岩, 依据AE信号特征, 将加载过程划分为3个阶段, 并分析不同阶段内受载砂岩的破裂规律。最后, 基于延时双差层析成像技术, 反演各阶段间和阶段内的速度结构。结果表明: 在受载砂岩的3个阶段中, 速度结构依次经历先小幅增加后逐渐减小, 最后迅速降低。比较各阶段内分段间的速度结构变化, 第I阶段内分段间增加的区域最多, 且增幅最大; 而第III阶段内的两分段间的变化规律则与之相反。此外, 考虑岩石的非均质性, 在裂缝的作用下, 部分区域的岩块脱离受载砂岩形成“单体”, 且随着荷载的继续增加, 仍会出现速度结构增加的现象。基于延时双差层析成像技术反演的速度结构, 不仅再现了受载过程中砂岩的速度结构演化, 同时也可表征任一截面受载岩石的破裂程度和影响范围。本文的研究成果, 可为受载岩体的稳定性评估和危险性预警提供一定的参考。

关键词: 速度结构; 演化; 延时双差层析成像; 声发射; 破裂

中图分类号: TU457 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)06-1069-09

作者简介: 郑强(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事岩体稳定性监测等方面的研究。E-mail: qiangqz@163.com。

Fracture and tomography of velocity structures of sandstone under uniaxial loads

ZHENG Qiang-qiang^{1, 2, 3}, XU Ying², HU Hao¹, QIAN Jia-wei³, ZONG Qi², XIE Ping⁴

(1. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. Laboratory of Seismology and physics of Earth's Interior, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 4. Gubei Coal Mine, Huainan Mining Group Co., Ltd., Huainan 232150, China)

Abstract: The extent of fracture in the loaded rock increases with the increase of the loads, accompanied by changes in velocity structure. To monitor the fracture laws of sandstone under uniaxial loads, the acoustic emission (AE) is adopted. According to the characteristics of the AE signals, the loading process is divided into three stages, and the fracture laws of loaded sandstone at different stages are analyzed. Besides, based on the time-lapse double-difference tomography, the velocity structures between and within each stage are inverted. The results show that within the three stages of the loaded sandstone, the velocity structures of sandstone increase slightly at first, then decrease gradually, and in the end decrease rapidly. Comparing changes of the velocity structures between the segments at each stage, the region increases most at the first stage with the largest increase, while the change laws between the two segments at the third stage are the opposite. In addition, due to the heterogeneity of the rock, the rock blocks in some areas are separated from the loaded sandstone to form a "single body" under the influences of fractures. As the loads continue to increase, the velocity structures will still increase. Based on the time-lapse double-difference tomography, not only the evolution of the velocity structures of the sandstone during the loading process can be reproduced, but also the fracture degree and influence range of the loaded rock at any section can be characterized. The research results may provide some references for the stability assessment and danger warning of the loaded rock mass.

Key words: velocity structure; evolution; time-lapse double-difference tomography; acoustic emission; fracture

0 引言

高陡岩质边坡广泛存在于大型露天矿山、巨型水电站和山地公路等岩土工程中, 其稳定性对工程的进展和人身的安全至关重要。高陡岩质边坡诱发的地质

基金项目: 国家自然科学基金项目(51374012, 52074009); 安徽省自然科学基金青年项目(1908085QE184)

收稿日期: 2020-07-08

*通信作者(E-mail: yxu@aust.edu.cn)

灾害具有失稳突发性，影响范围广，经济损失大以及预测难等特点^[1]，是掣肘工程安全与经济的主要平衡点之一，也是当下研究的热点。

荷载作用下的岩体，其内部的裂隙逐渐发育、扩展和贯通，同时释放出可被传感器接收的蕴含丰富岩石力学特征的弹性波^[2]，深入分析这些波形信号对研究高陡岩质边坡的稳定性和速度结构的演化十分必要。AE监测技术就是基于这一原理对受载岩体进行连续、实时的监测^[3]。许多学者通过该技术研究了岩石的细观力学特征^[4]、宏观破坏规律^[5]和临界破坏前兆识别^[6]等；也有学者采用数值模拟^[7-8]和断层扫描^[9]的方式，分析了受载岩石的损伤规律和破坏特征。这些研究成果为工程的安全生产提供参考依据。此外，对受载岩体内裂缝的扩展及走势的研究还可以继续深化，采用新技术对受载岩石的速度结构进行层析成像，这不仅可以丰富荷载作用下岩石内速度结构演化的方式，还能验证受载岩石内的破裂规律和裂隙扩展的走势，为岩质边坡的稳定性监测和风险评估提供参考。

以岩质边坡为工程背景，徐奴文^[10]分析了锦屏Ⅰ级水电站边坡微震事件b值的变化规律，预判该地区岩质边坡的稳定性，并划分危险等级；此后徐奴文等^[11]又借助RFPA有限元，再现了白鹤滩水电站岩质边坡内裂纹的发育、走势及破裂机制。陈国庆等^[12]采用声发射装置，研究了不同长度的开放型岩桥裂纹的贯通机理，得出裂纹的走势与主裂纹的扩展特征。刘黎旺等^[6]通过重构岩石的矿物晶体模型，采用声发射技术分析受载岩石的破裂机制，得出宏观破裂面的形成与矿物晶体内的裂纹走势有关这一结论。文志杰等^[13]由应变能密度出发，对非均质岩石进行AE监测试验，构建了考虑均质度和加卸载影响的损伤本构模型。李斌等^[14]基于声发射技术验证了层理倾角影响砂岩的破坏模式，并得出砂岩破坏时的起裂角，随施载方向与层理面之间的夹角呈各向异性。

上述学者通过声发射和微震监测的方式，分析了荷载作用下岩石的力学响应规律和震源定位，实现对岩质边坡的稳定性监测。但仅仅对微震事件响应位置的分析，无法直接评估岩体的稳定性，同时，对岩体内速度结构演化的时空关系不能够既准确又直观地把握。因此，需要引入新理论、新技术，完善基于AE监测技术受载岩石内的破裂规律和速度结构演化。

在大型岩体的速度结构成像方面，双差层析成像技术的应用较为广泛，也为各区域岩体内速度结构的演化提供可靠的依据。赋存于自然界的岩体，受地质构造、自然灾害和人类采掘活动的影响，其内部含有不同程度和形式的弱面^[15]。由于节理和裂隙的存在，岩体

的波速降低，且弱面的宽度和长度越大，其纵波速越低。此外，由岩石力学理论可知，受载岩体内裂隙的规模和尺度，随荷载的增大而增加^[16]。因此，在不同应力的作用下，岩体内的速度结构不断演化。当应力水平达到岩体的承载极限时，岩体内的裂隙进入不稳定扩展阶段^[17]，此时，速度结构的变化达到最大。采用反演速度结构的方式，分析岩体的承载状态，并在破坏失稳前做出预警。

许多学者^[18-19]结合区域地震的P波参数，利用双差层析成像技术联合反演岩体的速度结构，构建了可靠的三维结构。探究速度结构与地震活动之间的规律，进一步为区域地震活动的机理研究和防灾减灾工作提供参考。传统的层析成像处理方法是将从两个时间段得到的地震波波速直接相减。但由于不同时间段内数据质量和数量的不同，对于大型岩体的速度结构反演，误差在许可范围内，而对于室内试验的岩样，由于其特殊的试验条件和尺寸，应进一步改进算法，提高算法精度。

本文对传统的双差层析成像技术进行改进和完善，摒弃了用于构建事件对的不同事件必须来自同一时间段的局限，从两个不同时间段构建事件对，评估速度结构演化。然后，对震源位置与速度结构的变化进行联合反演。结合绝对走时数据和事件对的相对到时差分数据，通过最小化模型差异以及不同时间段的到时残差，同时反演多个数据集。该技术可直接使用由波形互相关测量到的差分到达时间，来精准地描绘区域速度结构的演化。尤其是当岩体尺寸较小时，这种优势更加突出，对速度结构的反演也与工程实际中岩体内的破裂规律和裂隙扩展的走势更吻合。

本文采用AE监测的方式，采集单轴荷载作用下砂岩内释放出的波形信号，按照AE信号的规律对砂岩的受载过程进行划分，阐述受载砂岩的破裂规律。然后，基于延时双差层析成像技术，对波形信号进行速度结构层析成像，验证由AE监测到的受载岩石内不同应力阶段的破裂规律，并分析不同应力水平阶段岩石内速度结构的演化。

1 基本原理

延时双差层析成像技术，在精细分析区域速度结构方面有其独特的优势，将双差震源定位方法与常规震源层析成像方法相结合，集两者优点于一体，克服了常规层析成像方法中由于绝对到时数据误差产生的弥散现象。设微震m到传感器s的到达时间为 T_s^m 为

$$T_s^m = \tau^m + \int_m^s \mu dl \quad , \quad (1)$$

式中， τ^m 为震源始动时间， μ 为射线慢度场矢量， dl

为路径积分元。震源坐标 (x_1 , x_2 , x_3)、射线慢度场矢量、震源始动时间和积分路径均未知, 走时与震源位置之间是非线性的, 利用泰勒级数使式(1)线性化, 因此实测与理论波形走时残差 γ_s^m 为

$$\gamma_s^m = \sum_{p=1}^3 \frac{\partial T_s^m}{\partial x_p^m} \Delta x_p^m + \tau^m + \int_m^s \delta \mu ds \quad . \quad (2)$$

同样, 微震 n 到传感器 s 的走时为 T_s^n , 实测与理论波形走时残差为 γ_s^n , 走时残差之差为^[18-19]

$$\begin{aligned} \gamma_s^m - \gamma_s^n &= \sum_{p=1}^3 \frac{\partial T_s^m}{\partial x_p^n} \Delta x_p^n + \tau^n + \\ &\quad \int_m^s \delta \mu ds - \left(\sum_{p=1}^3 \frac{\partial T_s^n}{\partial x_p^n} \Delta x_p^n + \tau^n + \int_n^s \delta \mu ds \right) \quad , \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $\gamma_s^m - \gamma_s^n$ 称为双差, 即事件对(m , n)的实测走时差分与理论走时差分的残差之差, 通过地震目录或波形互相关技术可求解实测走时残差之差^[20]。设震源 m 和 n 组成震源事件对, 两者间距足够近, 则到达同一传感器 s 的路径近似一致, 即震源对(m , n)所在的震源附近, 其速度不均匀性引起的路径异常与此震源对的相对位置无关^[21], 则式(3)近似为

$$\gamma_s^m - \gamma_s^n = \sum_{p=1}^3 \frac{\partial T_s^m}{\partial x_p^n} \Delta x_p^n + \tau^n - \left(\sum_{p=1}^3 \frac{\partial T_s^n}{\partial x_p^n} \Delta x_p^n + \tau^n \right) \quad . \quad (4)$$

式(4)即为传统的双差层析成像的基本算法。而延时双差层析成像技术是将数据分成不同的时间段, 然后在每个时间段进行速度结构层析成像。这种方法对每个时间段进行层析成像, 通过减去相邻两个时间段的速度模型, 来获得速度变化, 以便在每个时间段都有不同的数据分布。

在延时双差层析成像技术中, 由事件对构造差分时间的地震事件来自同一时间段。具体而言, 式(3)中的事件 m 和事件 n 来自同一时间段。在求解两个时间段之间速度变化时, 要求事件 m 和事件 n 属于两个不同的时间段。假设事件 m 发生在时间段 1, 事件 n 发生在时间段 2, 可以修改式(3)中的层析成像系统:

$$\begin{aligned} \gamma_s^m - \gamma_s^n &= \sum_{p=1}^3 \frac{\partial T_s^m}{\partial x_p^n} \Delta x_p^n + \tau^n + \\ &\quad \int_m^s \delta \mu_1 ds - \left(\sum_{p=1}^3 \frac{\partial T_s^n}{\partial x_p^n} \Delta x_p^n + \tau^n + \int_n^s \delta \mu_2 ds \right) \quad . \end{aligned} \quad (5)$$

式(3)与式(5)的主要区别是针对不同的时间段 1 和 2, 慢度扰动 $\delta \mu_1$ 和 $\delta \mu_2$ 不同, 且事件 m 和事件 n 属于不同的时间段。基于延时双差层析成像技术的式(5), 事件对的选择是根据它们的空间距离而不是时间间隔, 要求一个事件对中的两个事件位于两个不同的时间段。而对于传统的双差层析成像, 用于构造差分到达时间的事件对的平均空间间隔要求不能太大^[22-23]。

这种要求对于事件对的选择有局限, 且不能识别所选事件对是否合适, 因此, 对结果的精度干扰也较大。而延时双差层析成像技术, 在不同时间段受不同数据分布的影响较小, 提高了震源定位的精确度。同时利用弹性波相对和绝对走时数据, 实现三维速度结构反演, 且反演结果优于传统的双差层析成像方法。

2 试验方法

2.1 试件的制备

本次试验的岩石试件采用原位取样法, 取自浙江省舟山市大皇山露天采石场的高陡岩质边坡。取出的岩样按照国际岩石力学学会指定的标准, 经切割打磨后制备成尺寸为 50 mm × 100 mm (直径×高度) 的标准圆柱体试件。为了避免加载过程中出现的应力集中, 还应保证经打磨后, 试件两端承压面平整度公差小于 0.02 mm, 且试件轴线垂直于端面而其偏差不超过 0.001 rad。将制备好的试件分别编号, 依次为 S-1, S-2, S-3, S-4 和 S-5。

2.2 试验过程

本次试验采用 MTS816 岩石力学试验系统和北京软岛科技 DS5 系列全信息声发射信号分析仪两套系统(图 1(a), 1(b))。MTS 系统能实时记录并存储试件的应力、应变和时间等参数, 声发射监测系统能够实时记录并存储与声发射事件相关的各种参数。本次试验每个试件采用 8 个传感器探头采集 AE 信号, 实现对 AE 信号的实时监测和三维定位。实验前, 以铅笔芯为模拟源进行断铅试验, 确定传感器位置的合理性。在已知坐标的砂岩表面进行断铅, 然后对采集到的声发射信号进行分析并定位, 不断调整, 直到由声发射信号反演出的定位与断铅的实际坐标相吻合为止。此外, 断铅试验还可以检测传感器对信号源的响应程度, 同时排除外部机械噪音的干扰, 校准后开始试验。通过断铅试验精准确定试件的声速, 并完成传感器位置的校准。通过多次计算, 最终测定本次试验砂岩的平均纵波波速为 3424 m/s。

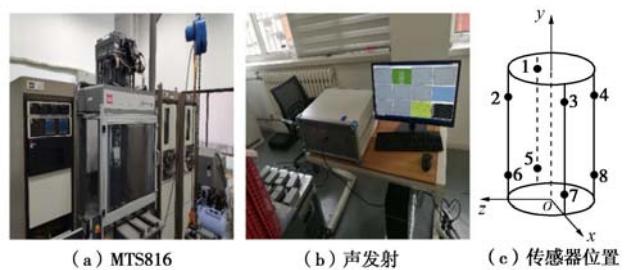


图 1 试验系统及传感器探头布置

Fig. 1 Experimental system and arrangement of sensor probes

为了保证后期反演速度结构的准确性和减少因

AE 传感器偏差带来的误差, 针对不同砂岩试件, 传感器的布设位置必须相同。传感器的布设位置如图 1(c)所示, #1—#4 传感器距离岩石上端面均为 15 mm, #5—#8 传感器距离岩石下端面也均为 15 mm。

单轴加载试验和 AE 监测试验同步进行, MTS 以轴向加载速率为 0.5 KN/s 的加载方式对砂岩施加荷载, 并实时记录和存储力学试验参数; AE 信号放大器设置为 40 dB, 每个通道的阈值设置为 100 mV, 采样频率为 3 MHz。AE 监测系统对 8 个传感器监测到的信号进行处理和存储, 得到单轴荷载作用下砂岩的波形参数和红色 AE 源定位标记。

3 试验结果分析

3.1 声发射信号分析

根据试验结果计算出砂岩的平均单轴抗压强度为 56.43 MPa, 应力 - 应变曲线如图 2 所示。在分析 AE 波形信号时, 从回放的波形文件可以看出, 波形起跳点的拾取存在误差, 尤其是当波形信号的始波变化缓慢且频率较低时, 这种误差更明显(图 3)。因此, 对波形修正后再进行信号分析和速度结构成像会更加精确。通过分析 AE 数据, 得到荷载作用下砂岩的力学性能、破裂规律以及 AE 事件的响应位置。对于速度结构的演化, 则需要进一步处理 AE 信号, 然后利用延时双差层析成像技术才能实现。将声发射 DAT 格式的波形文件转换为万泰微地震数据处理软件(DPS)所需的 ME 文件, 然后通过 DPS、FORTRAN 计算地震初动震源机制程序和 MATLAB 导出地震目录, 最后采用延时双差层析成像技术反演速度结构。

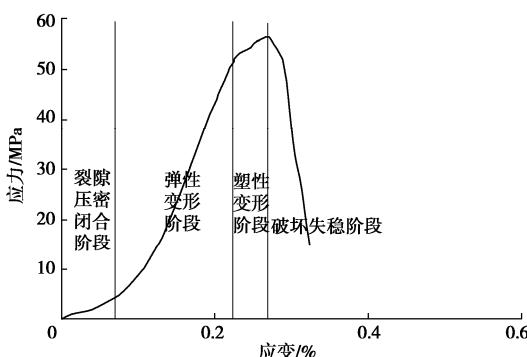


图 2 受载砂岩的应力 - 应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of loaded sandstone

通过分析荷载作用下砂岩的 AE 信号, 得到砂岩的时间—应力—声发射能量—累计撞击计数 4 个参量之间的关系, 如图 4 所示。累计撞击计数可用于表征试件的破裂程度^[3], 其增幅变化依次如图中 I, II, III 三个阶段。累计撞击计数的增长率在第 II 阶段最小, 而能量幅值的最大值在第 I 阶段最小, 但这两者的值在第 III 阶段均最大。

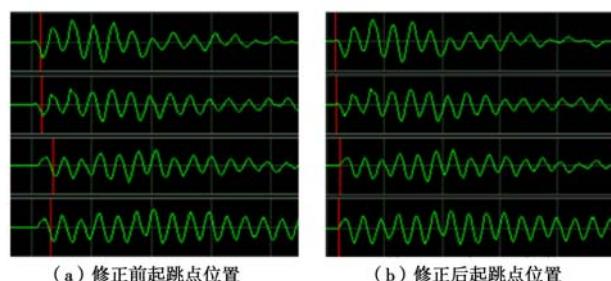


图 3 波形起跳点修正前后对比图

Fig. 3 Comparison before and after correction of waveform take-off point

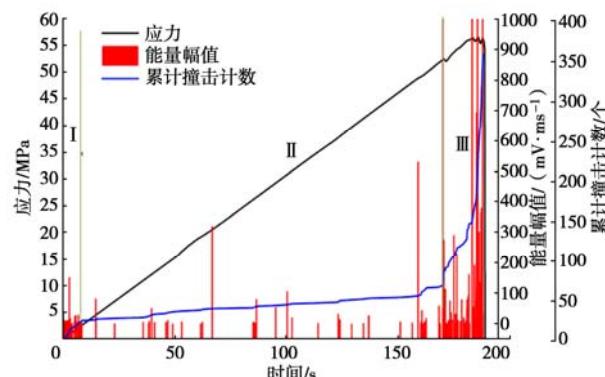


图 4 砂岩试件应力与 AE 参量关系图

Fig. 4 Relationship between stress and AE parameters of sandstone

荷载作用下的砂岩经历了裂隙压密闭合阶段、弹性阶段、塑性阶段和破坏失稳阶段(阶段划分如图 2 所示), 其中 AE 信号的第 I, II 阶段分别对应岩石应力 - 应变曲线中的裂隙压密闭合阶段、弹性阶段, 第 III 阶段包含塑性阶段和破坏失稳阶段。在低应力水平下, 随机分布于岩石内的原生孔隙被压密闭合, 并触发 AE 信号。由于岩石内的原生孔隙较多, 因此, AE 事件较多, 累计撞击计数也较大, 但在尺度上比裂纹扩展小, 所以, AE 能量幅值最低。

随着荷载的持续增加, 岩石进入弹性变形阶段。此时, 岩石内的固体矿物颗粒起主要承载作用, 且变形可随外力撤除而恢复。继续加载, 砂岩内少量的固体矿物颗粒与胶结基质间过渡面开始起裂, 但胶结基质尚未开裂。因此, AE 能量幅值比第 I 阶段大, 但累计撞击计数增长幅度最小。

持续加载, 在裂纹尖端效应影响下, 起裂的过渡面逐渐扩展, 胶结基质中的裂纹也开始扩展^[24], 岩石进入塑性变形阶段和破坏失稳阶段, 即 AE 信号的第 III 阶段。伴随着胶结基质开裂的裂纹扩展诱发次生裂纹, 在外力的作用下, 裂纹呈指数级增加, 并逐渐贯通形成主裂纹, 直至最后完全破坏失稳。与前两个阶段相比, 这一阶段裂纹的尺度与规模都明显增大。因此, AE 能量幅值和累计撞击计数的增幅均达到最大。

为了探究 AE 监测下受载砂岩内 AE 事件的响应位置, 依据 AE 信号的规律, 将 AE 事件进行分段定位, 如图 5 所示, 从左至右依次为 I, II, III 三个阶段。通过 AE 事件定位分析可知, 从第 I 阶段到第 II 阶段砂岩内的 AE 事件较少, 这是由于第 II 阶段受载砂岩处于弹性变形阶段, 这一阶段的变形随外力撤除后可恢复。当受载砂岩进入塑性变形阶段以及破坏失稳阶段时, 试件内裂纹迅速扩展, 砂岩内的 AE 事件在短时间内急剧增加。因此, 第 III 阶段 AE 事件密度较高。

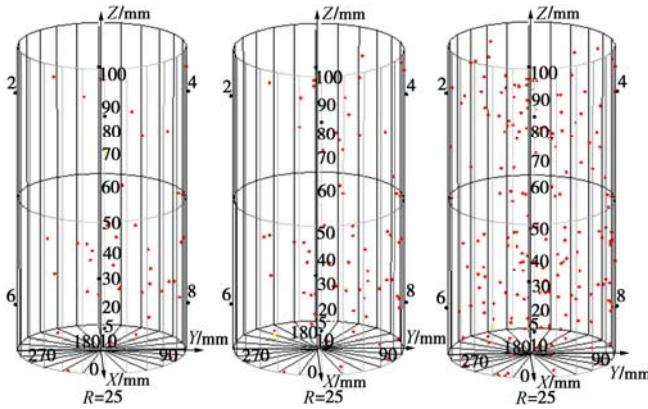


图 5 不同阶段受载砂岩内 AE 事件定位图

Fig. 5 Location of AE events in loaded sandstone at different stages

基于 AE 信号分析受载砂岩的破裂机理, 符合荷载作用下岩石的力学特征, 也与邓朝福等^[25]、曾鹏等^[26]的研究结论一致, 同时佐证了此次试验中 AE 监测结果的准确性。但由于岩石是不透明的介质, 无法直观地看到受载岩石内不同应力阶段的破裂过程与裂隙扩展走势。受载岩石速度结构的演化伴随着岩石破裂的整个过程, 通过 3 个以上传感器接收到的波形信号, 即可反演出岩石的速度结构变化。而速度结构的演化是表征受载岩石内裂隙的扩展程度, 且可以根据需要, 反演出受载岩石内任一截面的速度结构演化过程, 使得不透明的岩石介质可视化。受载岩石的破裂过程又与裂隙扩展的规模和尺度密切相关。因此, 速度结构的演化能直观地表征受载砂岩的破裂规律。

虽然根据 AE 事件的定位结果可以看到 AE 事件响应的位置, 但对于受载岩石的破裂规律与裂隙的扩展走势不能精准且直观地描述。采用反演速度结构的方式, 能很好地解决上述不足。此外, 在大型岩体工程中, 精准地判别岩体破裂范围, 可以对防灾减灾工作提供有价值的参考。延时双差层析成像技术, 对受载砂岩进行速度结构层析成像, 一方面验证 AE 监测结果的合理性, 另一方面能阐述受载砂岩的破裂机理。

3.2 速度结构演化

天然存在的岩石, 其速度结构与成岩环境、物理力学性质等有关, 无外力作用时波速保持不变, 但在

荷载作用下, 其内部速度结构发生改变。低应力时原生孔隙被压密闭合使岩石密度变大, 从而使波速增加, 随着继续施加荷载而产生的裂隙以及体积的扩容使得密度降低, 且荷载越大岩体内的裂隙越大, 波速也越低。相关研究成果表明^[19, 21, 27], 受载岩体内的速度结构变化与岩体的破裂程度呈正相关。

基于延时双差层析成像技术, 对受载砂岩进行速度结构层析成像。将改进了的理论算法, 代入 Tommo-DD 程序中^[20-21]反演速度结构。为了更深入地分析不同受载阶段砂岩速度结构的演化, 按照 AE 信号规律划分的 3 个阶段分别进行速度结构层析成像, 并在每阶段内再次划分。一方面为了体现 3 个阶段间的破裂规律和速度结构演化的过程, 将未受载状态到第 I 阶段的速度结构演化如图 6 (a) 所示, 从第 I 阶段到第 II 阶段的演化和第 II 阶段至第 III 阶段的演化分别如图 6 (b), (c) 所示。这样不仅能分析不同阶段间砂岩内速度结构的演化, 还能掌握同阶段内速度结构演化的规律。另一方面为了能再现每个阶段内的演化过程, 将 I, II, III 三个阶段中的每个阶段再次划分为两部分, 并依次将各阶段内两分段间的演化分别如图 7 (a), (b), (c) 所示。将各分段内的同一力学性能的 AE 事件单元化考虑, 依据各分段间速度结构的演化, 来验证受载砂岩的破裂规律与裂隙扩展走势。由于篇幅限制, 同时, 为了便于比较, 所截平面均取平面 $x=0$, 实际工程中可以根据所需取相应的截面。在图 6, 7 中, 蓝色部分表示速度结构增大的区域, 红色部分表示速度结构减小的区域, 且颜色越深表明速度结构变化越大。

为了反映阶段内和阶段间的速度结构演化, 在比较 AE 信号特征 3 个阶段间的速度结构演化外, 同时, 在每一个阶段内也进行反演。通过阶段内的再划分, 能掌握速度结构在整个受载过程的演化规律, 需要注意的是, 演化过程是根据所划分阶段或分段的初、末时刻间, 反演受载砂岩的速度结构。当然, 也可以根据需要, 对任一时间段内任一截面的速度结构进行反演。由于篇幅限制, 本文只针对 AE 信号特征的 3 个阶段进行反演。

由延时双差速度结构层析成像的结果可知, 除第 I 阶段部分区域的速度结构增加外, 其余阶段都是降低的。其中, 第 III 阶段降幅最大, 第 II 阶段降幅最小, 即单位时间内岩石的破裂程度在第 III 阶段最大, 第 II 阶段最小。各阶段内划分的两个分段间, 除第 I 阶段两分段间有增有减, 在第 II、III 两个阶段内的分段间, 绝大部分区域的速度结构都是降低的, 分段间速度结构的增减幅度都比阶段间的小。此外, 通过层析成像的结果能够直观地看出各阶段、各分段内速度结构增减区域以及增减的幅度。

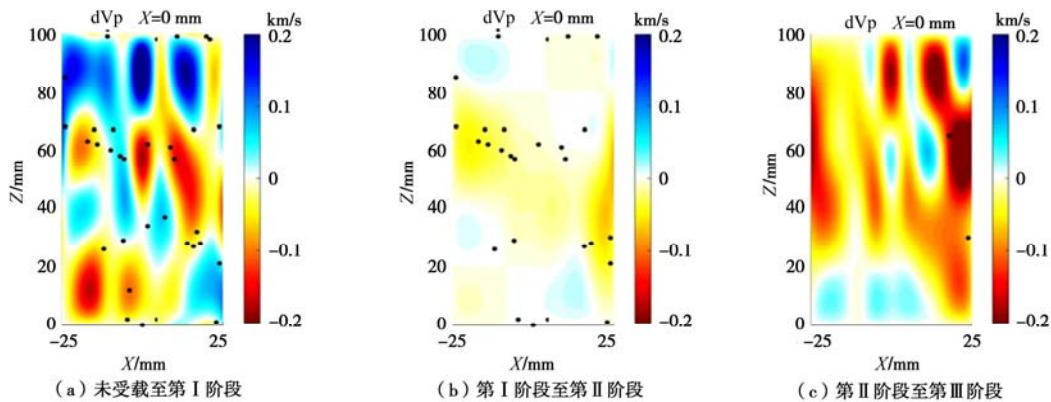


图 6 受载砂岩不同阶段间的速度结构的演化

Fig. 6 Evolution of velocity structures of loaded sandstone at different stages

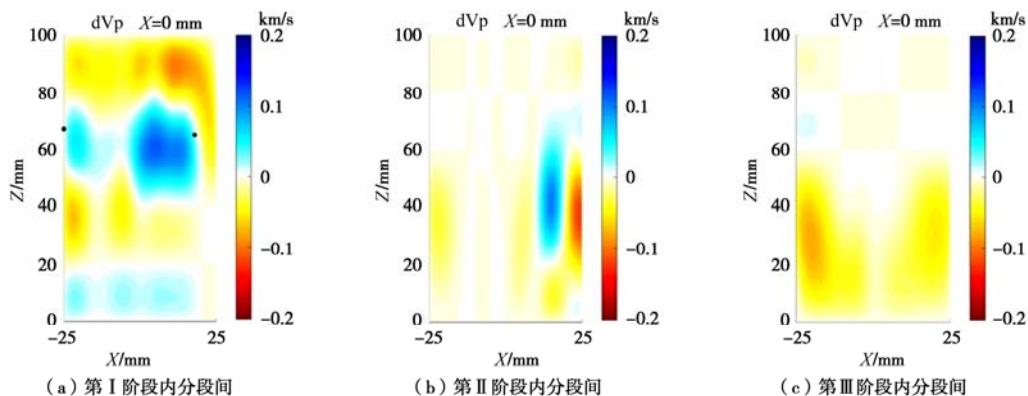


图 7 受载砂岩不同阶段内分段间的速度结构的演化

Fig. 7 Evolution of velocity structures between segments of loaded sandstone at different stages

第 I 阶段, 岩石内的原生孔隙在低应力作用下被压密闭合, 岩石的密度增大, 速度结构也增加。因此, 图 6 (a) 中有速度结构增加的区域且增幅较大。实际上岩石是非均质的, 部分区域在成岩活动过程中存在原生空洞, 尺寸上较孔隙大很多, 当施加的外荷载较低时, 即会发生少许尺度较小的破裂。所以, 在部分区域速度结构增加的同时伴有少量区域的速度结构降低。对比这一阶段内的分段, 可以看出第一分段的速度结构的增幅较大。这说明裂隙的压密闭合, 主要在这一阶段的前半部分, 这也与 AE 监测的结果相吻合。如图 4 所示, 第 I 阶段的增长曲线是凸曲线, 即前半部分增长率快而后半部分较慢。比较图 6 (a) 和图 7 (a) 可知, 速度结构增加区域主要发生在第 I 阶段的第一分段, 而速度结构降低区域主要发生在第二分段。此外, 部分区域的速度结构先减小后增大。这是由于在较低应力的作用下, 原生裂隙尚未完全闭合, 随着荷载的增加裂隙闭合, 速度结构也增加。第 I 阶段的速度结构的变化主要与岩石的物理性质和成岩环境相关。

第 II 阶段, 岩石内主要以速度结构降低为主, 同时伴有少量区域速度结构的增加, 且变化幅度都较低。

这一阶段内, 岩石处于弹性变形阶段, 固体矿物颗粒起主要承载作用, 同时出现少许第 I 阶段未完全闭合的原生孔隙和原生裂隙的压密闭合, 以及部分区域固体矿物颗粒与胶结基质间过渡面的起裂, 但起裂的尺度比破坏失稳阶段的裂纹扩展小很多。所以, 这一阶段速度结构主要以降低为主且降幅较小, 同时也存在小范围未变化的区域, 如图 6 (b)。第 II 阶段两分段间的速度结构层析成像如图 7 (b), 变化幅度也较小, 且比第 I 阶段两分段间的变化幅度小。因为, 弹性阶段内的变形随外力撤除而恢复, 很少有裂纹的发育与扩展。该阶段的第一分段伴有少量的原生孔隙和原生裂隙的压密闭合, 速度结构在局部区域是增加的。第二分段伴有部分固体矿物颗粒与胶结基质间过渡面的起裂, 速度结构降低。因此, 前后两分段相比, 降低幅度较大, 但这一阶段与第 I 阶段相比降低幅度却较小。

第 III 阶段, 岩石内过渡面的裂纹, 在尖端效应的作用下开始起裂, 同时也诱发胶结基质内次生裂纹的形成和扩展, 直至迅速贯通岩石破坏失稳, 尺度和规模均比前两个阶段大。因此, 速度结构降低的幅度较大范围也更广, 如图 6 (c) 所示。不难发现, 在这一

阶段仍看到少许小幅增加的区域。这是因为在这一阶段内, 岩石内有较大的裂隙产生, 使得部分岩块在周围裂隙的作用下, 局部“脱离”岩石成为一个“单体”, 在荷载作用下会出现部分速度结构增大的情况, 若继续施加荷载, 则“单体”仍经历 I, II, III三个阶段。所以, 这一阶段速度结构降低幅度较大, 并伴有部分区域速度结构的少量增加。如图 7(c)所示, 比较这一阶段前后两个分段, 速度结构降幅较小。在破坏失稳阶段, 岩石内的裂纹多且尺度大, 抵抗变形的能力也骤减。在第二分段内, 岩石基本处于峰后阶段, 各“单体”在荷载的作用下逐步“脱离”岩石, 因此, 第二分段的速度结构增长较小。

通过分析不同应力水平阶段岩石速度结构的增减, 对 AE 监测的岩石破裂进行验证, 这也证明延时双差层析成像技术的可靠性。此外, 在岩石处于弹性阶段内, 破裂程度与速度结构呈绝对正相关, 但当岩石内出现主裂纹或裂隙较大时, 破裂程度与速度结构关系呈现正相关而非绝对正相关。当裂隙较大时, 弹性波在岩石内传播的速度降幅更大。因此, 虽然不是绝对正相关, 但呈对应关系, 且降低幅度与岩石的破裂程度相吻合^[28]。延时双差速度结构层析成像技术再现了单轴荷载作用下岩石内速度结构的演化, 并验证了受载砂岩的破裂规律, 为高陡岩质边坡的破裂规律的研究和速度结构的演化提供一种新的思路, 对工程现场的安全预警有一定的参考价值。

4 讨 论

(1) 单轴荷载作用下岩石的破裂规律, 是研究岩石力学特征最基本、最成熟的方法。有学者结合新设备、新技术来探究岩石的损伤和破裂规律^[10, 29], 但都是通过构建岩石的本构模型来表征破裂程度。与工程实际相结合时, 需要针对不同的工程环境做相应的调整。作为一种研究技术, 其适用范围较为局限, 且无法做到按需定位和直观地阐述破裂程度和范围。虽然, 本文采用较为常见的 AE 监测系统, 但同时引入延时双差速度结构层析成像技术, 分析监测到的波形信号, 能直观地看到不同受载阶段, 岩石内不同区域间速度结构的增减幅度的大小和区域所占比例, 从而反映出整个受载过程中岩石内的破裂规律和破裂范围。对预测岩体的破裂程度和危险性预警开拓了新的方法, 也可根据反演的结果, 对破裂程度较大的区域采取解危措施。

(2) 基于受载岩石的层析成像, 分析破裂规律和速度结构的变化, 目前主要通过 AE 监测技术, 构建相对波速的方式, 来反映加载过程中的波速变化, 并

对岩石破坏的前兆特征进行分析^[26]。但对于整个加载过程, 没有分析岩石内速度结构的演化, 也无法更直观和分区域地动态反演岩石内的速度结构。本文通过对受载岩石速度结构层析成像的方式, 有效地解决上述局限。此外, 蔡武等^[30]采用微震系统监测采场, 并借助矩阵张量反演的方法, 对采场进行层析成像, 但用于构建事件对的震源信号来自同一时间段。而延时双差速度结构层析成像技术选取不同时间段内的不同事件构建事件对, 模型的差分到达时间残差最小化, 尤其是对于小尺寸试件, 后者有更精确的解。

(3) 限于现有试验设备, 本文只开展了单轴荷载作用下岩石的速度结构演化, 下一步将以考虑围压状态的复杂工程环境为研究背景, 探究三轴应力作用下岩石的破裂规律与速度结构演化。

5 结 论

本文采用 AE 监测系统, 分析荷载作用下的砂岩在不同应力阶段释放出的波形信号, 得到了荷载作用下砂岩的破裂规律, 并基于延时双差层析成像技术对受载砂岩进行速度结构层析成像, 得到受载砂岩在不同阶段、不同分段间速度结构的演化规律, 进一步反映单轴荷载作用下砂岩的破裂规律。

(1) 荷载作用下的砂岩, 其内部释放出的波形信号依据 AE 信号特征划分为 3 个阶段, 分别对应岩石应力 - 应变曲线的裂隙压密闭合阶段(第 I 阶段)、弹性阶段(第 II 阶段)、塑性阶段和破坏失稳阶段(第 III 阶段), 分别由裂隙压密闭合、过渡面裂纹扩展与胶结基质起裂和岩石内裂纹迅速扩展引起的, 且在第 III 阶段破裂程度增幅最大, 增长率也最快。基于延时双差层析成像技术, 受载砂岩的速度结构依次经历先小幅增加后逐渐减小, 最后迅速降低的 3 个阶段, 反映出的破裂规律与 AE 监测的结果一致, 也与传统的岩石力学特性相吻合。

(2) 在速度结构层析成像的 3 个阶段内, 各分段的速度结构均以降低为主, 且降低区域的比例从第 I 阶段至第 III 阶段逐渐增加。在各阶段内的分段间, 第 I 阶段内, 分段间的速度结构增加的区域最多, 且增幅最大; 而第 III 阶段内的两分段间的变化规律则与之相反。

(3) 通过延时双差层析成像技术反演的速度结构, 可对受载岩石任意应力水平下任一截面进行反演, 且能直观的表征 AE 信号各阶段间、各分段间的速度结构增减区域的比重及变化幅度。同时, 也反映了受载砂岩的破裂范围和尺度。在高陡岩质边坡中可采用声发射实时监测岩体内的波形信号, 通过速度结构反

演评估岩体的稳定性。

参考文献:

- [1] 岑夺丰, 黄 达, 黄润秋. 岩质边坡断续裂隙阶梯状滑移模式及稳定性计算[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(4): 695 – 706. (CEN Duo-feng, HUANG Da, HUANG Run-qiu. Step-path failure mode and stability calculation of jointed rock slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(4): 695 – 706. (in Chinese))
- [2] SAROGLOU C, KALLIMOGIANNIS V. Fracturing process and effect of fracturing degree on wave velocity of a crystalline rock[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017, **9**(5): 797 – 806.
- [3] ZHENG Q, CHENG Y, ZONG Q, et al. Failure mechanism of different types of shotcrete based on modified Weibull distribution model[J]. Construction and Building Materials, 2019, **224**: 306 – 316.
- [4] BRAUN P, GHABEZLOO S, DELAGE P, et al. Theoretical analysis of pore pressure diffusion in some basic rock mechanics experiments[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, **51**: 1361 – 1378.
- [5] 陈建功, 贺 虎, 张永兴. 巷道围岩松动圈形成机理的动静力学解析[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(12): 1964 – 1968. (CHEN Jian-gong, HE Hu, ZHANG Yong-xing. Dynamic and static analysis of mechanism of loosen zone in surrounding rock of tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(12): 1964 – 1968. (in Chinese))
- [6] 刘黎旺, 李海波, 李晓锋, 等. 基于矿物晶体模型非均质岩石单轴压缩力学特性研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(3): 542 – 550. (LIU Li-wang, LI Hai-bo, LI Xiao-feng, et al. Research on mechanical properties of heterogeneous rocks using grain-based model under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(3): 542 – 550. (in Chinese))
- [7] 陈俊桦, 张家生, 李新平. 考虑岩体完整程度的岩石爆破损伤模型及应用[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(5): 857 – 866. (CHEN Jun-hua, JIANG Jia-sheng, LI Xin-ping. Model of rock blasting-induced damage considering integrity of rock mass and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **38**(5): 857 – 866. (in Chinese))
- [8] 彭 瑞, 欧阳振华, 孟祥瑞, 等. 逆断层附近非均匀应力场声发射测试与巷道稳定性数值分析[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(3): 509 – 518. (PENG Rui, OUYANG Zhen-hua, MENG Xiang-rui, et al. Acoustic emission testing of nonuniform stress in strata near reverse faults and numerical analysis of stability of roadways[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(3): 509 – 518. (in Chinese))
- [9] HE T M, ZHAO Q, HA J, et al. Understanding progressive rock failure and associated seismicity using ultrasonic tomography and numerical simulation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, **81**: 26 – 34.
- [10] 徐奴文. 高陡岩质边坡微震监测与稳定性分析研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011. (XU Nu-wen. Study on Microseismic Monitoring and Stability Analysis of High Steep Rock Slope[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese))
- [11] 徐奴文, 李彪, 戴峰, 等. 基于微震监测的顺层岩质边坡开挖稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(10): 2089 – 2097. (XU Nu-wen, LI Biao, DAI Feng, et al. Stability analysis of bedding rock slopes during excavation based on microseismic monitoring[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(10): 2089 – 2097. (in Chinese))
- [12] 陈国庆, 陈毅, 孙祥, 等. 开放型岩桥裂纹贯通机理及脆性破坏特征研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(5): 908 – 915. (CHEN Guo-qing, CHEN Yi, SUN Xiang, et al. Crack coalescence and brittle failure characteristics of open rock bridges[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(5): 908 – 915. (in Chinese))
- [13] 文志杰, 田雷, 蒋宇静, 等. 基于应变能密度的非均质岩石损伤本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(7): 1332 – 1343. (WEN Zhi-jie, TIAN Lei, JIANG Yu-jing, et al. Research on damage constitutive model of inhomogeneous rocks based on strain energy density[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(7): 1332 – 1343. (in Chinese))
- [14] 李斌, 黄达, 姜清辉, 等. 层理方向对砂岩断裂模式及韧度的影响规律试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(10): 1854 – 1862. (LI Bin, HUANG Da, JIANG Qing-hui, et al. Fracture pattern and toughness of layered sandstone influenced by layer orientation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(10): 1854 – 1862. (in Chinese))
- [15] 刘新荣, 许彬, 刘永权, 等. 频发微小地震下顺层岩质边坡累积损伤及稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(4): 632 – 641. (LIU Xin-rong, XU Bin, LIU Yong-quan, et al. Cumulative damage and stability analysis of bedding rock

- slope under frequent microseisms[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **45**(4): 632 – 641. (in Chinese))
- [16] 王 鹏, 楚文杰, 陈 磊, 等. 大型地下洞室岩梁开挖主要工程地质问题及处理措施讨论[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(11): 2165 – 2172. (WANG Peng, CHU Wen-jie, CHEN Lei, et al. Main engineering geological problems and treatment measures of large underground cavern rock beams during excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(11): 2165 – 2172. (in Chinese))
- [17] 王春来, 侯晓琳, 李海涛, 等. 单轴压缩砂岩细观裂纹动态演化特征试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(11): 2120 – 2125. (WANG Chun-lai, HOU Xiao-lin, LI Hai-tao, et al. Experimental investigation on dynamic evolution characteristics of micro-cracks for sandstone samples under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(11): 2120 – 2125. (in Chinese))
- [18] 吴海波, 申学林, 王 杰, 等. 三峡库区上地壳三维速度结构的双差层析成像研究[J]. 地球物理学报, 2018, **61**(7): 2802 – 2814. (WU Hai-bo, SHEN Xue-lin, WANG Jie, et al. Three-dimensional velocity structure of upper crust in the Three Gorges Reservoir area derived from double-difference tomography[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, **61**(7): 2802 – 2814. (in Chinese))
- [19] 华雨淋, 吕 彦. 腾冲火山及周边地区双差层析成像[J]. 地球物理学报, 2019, **62**(8): 2982 – 2990. (HUA Yu-lin, LÜ Yan. Double differential tomography of the Tengchong volcano and adjacent areas[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, **62**(8): 2982 – 2990. (in Chinese))
- [20] ZHANG H J, THURBER C H. Double-difference tomography: the method and its application to the Hayward fault, California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, **93**(5): 1875 – 1889.
- [21] ZHANG H J, THURBER C. Development and applications of double-difference seismic tomography[J]. Pure and Applied Geophysics, 2006, **163**(2/3): 373 – 403.
- [22] 马昭军, 刘 洋. 地震波衰减反演研究综述[J]. 地球物理学进展, 2005(4): 1074 – 1082. (MA Zhao-jun, LIU Yang. A summary of research on seismic attenuation[J]. Progress in Geophysics, 2005(4): 1074 – 1082. (in Chinese))
- [23] 齐 诚, 赵大鹏, 陈 颛, 等. 首都圈地区地壳 P 波和 S 波三维速度结构及其与大地震的关系[J]. 地球物理学报, 2006(3): 805 – 815. (QI Cheng, ZHAO Da-peng, CHEN Yong, et al. 3-D P and S wave velocity structures and their relationship to strong earthquakes in the Chinese capital region[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, **49**(3): 805 – 815. (in Chinese))
- [24] BOLLA A, PARONUZZI P. Numerical investigation of the pre-collapse behavior and internal damage of an unstable rock slope[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, **53**: 2279 – 2300.
- [25] 邓朝福, 刘建锋, 陈 亮, 等. 不同含水状态花岗岩断裂力学行为及声发射特征[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(8): 1538 – 1544. (DENG Chao-fu, LIU Jian-feng, CHEN Liang, et al. Energy release law during the damage evolution of water-bearing coal and rock and pick-up of AE signals of key pregnancy disasters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **39**(8): 1538 – 1544. (in Chinese))
- [26] 曾刊 鹏, 刘阳军, 纪洪广, 等. 单轴压缩下粗砂岩临界破坏的多频段声发射耦合判据和前兆识别特征[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(3): 509 – 517. (ZENG Peng, LIU Yang-jun, JI Hong-guang, et al. Coupling criteria and precursor identification characteristics of multi-band acoustic emission of gritstone fracture under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(3): 509 – 517. (in Chinese))
- [27] ZHANG J, ZHANG H J, CHEN E H, et al. Real-time earthquake monitoring using a search engine method[J]. Nature Communications, 2014, **5**: 5664. <https://doi.org/10.1038/ncomms6664>.
- [28] ZHANG H J, WANG F, Myhill R, et al. Slab morphology and deformation beneath Izu-Bonin[J]. Nature Communications, 2019, **10**: 1310. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09279-7>.
- [29] 黄 达, 张晓景, 顾东明. “三段式”岩石滑坡的锁固段破坏模式及演化机制[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(9): 1601 – 1609. (HUANG Da, ZHANG Xiao-jing, GU Dong-ming. Failure pattern and evolution mechanism of locking section in rock slope with three-section landslide mode[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(9): 1601 – 1609. (in Chinese))
- [30] 蔡 武, 窦林名, 李振雷, 等. 矿震震动波速度层析成像评估冲击危险的验证[J]. 地球物理学报, 2016, **59**(1): 252 – 262. (CAI Wu, DOU Lin-ming, LI Zhen-lei, et al. Verification of passive seismic velocity tomography in rock burst hazard assessment[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, **59**(1): 252 – 262. (in Chinese))