

DOI: 10.11779/CJGE201911018

单轴压缩砂岩细观裂纹动态演化特征试验研究

王春来¹, 侯晓琳¹, 李海涛², 张书江³, 陶志刚⁴

(1. 中国矿业大学(北京)能源与矿业学院, 北京 100083; 2. 煤炭科学技术研究院有限公司安全分院, 北京 100013; 3. 山西冀中能源集团矿业有限责任公司, 山西 太原 030032; 4. 中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 岩石细观裂纹的动态演化特征作为岩石破坏的重要信息, 其研究对于分析岩爆的孕育过程及预测岩石动力灾害发生有着重要意义。采用应力分析和声发射参数方法, 研究了砂岩在单轴压缩条件下的细观裂纹的强度动态演化特征。试验结果表明, 应力与砂岩细观裂纹扩展诱发声发射(AE)事件的强度特征有较好的阶段性变化规律, 将峰前裂纹动态演化划分为三个阶段。进一步分析裂纹的类型特征, 提出三阶段四维演化过程分析方法。细观裂纹多为张拉型, 随着时间的增加, 细观裂纹向剪切型裂纹转变, 裂纹数量迅速增加, 裂纹强度逐渐增大。提出将第三阶段AE事件出现的高强度、高RA、低AF特征作为砂岩破裂失稳的定性预警条件。通过矩张量反演对比分析了细观裂纹数量和类型的动态演化。

关键词: 裂纹演化; 细观裂纹; 声发射; 矩张量; 预警

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2019)11-2120-06

作者简介: 王春来(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩爆预警与控制方面研究。E-mail: tswcl@126.com。

Experimental investigation on dynamic evolution characteristics of micro-cracks for sandstone samples under uniaxial compression

WANG Chun-lai¹, HOU Xiao-lin¹, LI Hai-tao², ZHANG Shu-jiang³, TAO Zhi-gang⁴

(1. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Safety Technology Branch, CCTEG China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 3. Shanxi Jizhong Energy Group Mining Industry Co., Ltd., Taiyuan 030032, China; 4. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The dynamic evolution characteristics of micro-cracks are the important information of rock failure for their significance in analyzing the failure process of rockburst and predicting the rock dynamic hazard. The uniaxial compression tests are conducted on sandstones, while their stress and the intensity characteristics of acoustic emission (AE) are analyzed to study the dynamic evolution process of crack. The results show that the stress variation and the intensity characteristics of AE events have a consistent segmented transformation pattern, which is used to divide the evolution process into three phases. A four-dimensional evolution method is proposed based on the further analysis of the characteristics of crack type. The micro-cracks are mostly tensile. With the increase of time, the micro-cracks change to shear-type cracks, the number of the cracks increases rapidly, and their intensity increases gradually. It is proposed that the AE events occurring with high intensity, high RA and low AF characteristics in the third phase are used as the qualitative prediction of rock failure. By comparing the inversion results of the moment tensors, the dynamic evolution characteristics of the micro-cracks are obtained.

Key words: crack evolution; micro-crack; acoustic emission; moment tensor; prediction

0 引言

随着岩土工程向深部的推进, 地下工程面临高应力等复杂的赋存条件。在开挖过程中, 围岩体内部应力集中产生裂纹, 随着裂纹的增多与聚集, 岩石产生断裂并发生失稳, 由此诱发的岩爆等动力灾害严重影响岩土工程的安全生产。因此, 对围岩破坏过程的细观裂纹特征进行分析, 在研究围岩破裂特征、预警岩

爆等动力灾害发生方面有重要意义。

材料在应力作用下发生错动, 产生的弹性波在介质中传播, 以声发射(AE)信号的形式被监测记录下

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0804201); 国家自然科学基金项目(51574246); 孙越崎杰出学者项目(800015Z1138); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2011QZ01)

收稿日期: 2019-01-07

来。因此, AE 技术可以监测围岩体内部裂纹的发育扩展情况, 刻画冲击地压等动力灾害的孕育、发生过程。作为一种无损监测工具, AE 技术被广泛运用在岩石损伤监测, 为围岩失稳参数特征演化分析、前兆信息识别与灾害预警等研究提供了重要的数据^[1-3]。

基于声发射参数, Wang^[4]通过分析单轴压缩下花岗岩试件的 AE 能量变化描述岩石的动态失稳过程; 王笑然等^[5]分别用声发射计数、主频等参数变化描述压缩条件下煤样预制裂纹的扩展过程; Moradian 等^[6]通过撞击参数描述了微裂纹成核到宏观裂纹开裂的阶段演化。但是, 基于单参数的分析忽略了声发射波形中其他信息, 不能全面反映灾害发生的前兆演化特征。采用多参数进行综合分析, 学者研究不同加载路径下硬岩破坏的前兆信息和裂纹演化特征^[7-8]。根据不同的波形特征, Ohtsu 等^[9]利用 RA - AF (上升时间峰值振幅比 - 计数持续时间比) 关系将弯曲测试中的声发射事件划分为张拉型和剪切型裂纹事件。在压缩条件下, 周子龙等^[10]发现花岗岩在受 60% 抗压强度载荷以上, 受到侧向扰动后发生破坏的 RA 值增高。顾义磊等^[11]对页岩进行三轴压缩试验, 发现了 RA 关联维数在峰后呈现“突降—波动”的规律。目前对砂岩单轴压缩下 RA - AF 裂纹峰前演化特征研究较少。

基于波形特征的矩张量反演理论, 可以计算定位采场动力灾害震源的破裂类型和破裂大小、方向等信息^[12]。吴顺川等^[13]根据矿区微震监测分析得到采场破坏面的破裂类型等信息。矩张量反演结果在室内试验得到很好的验证, 如拉伸、剪切、压缩等破坏试验^[14-16]。

本文以典型脆性砂岩为研究对象开展单轴压缩破裂试验, 模拟轴向应力集中引发材料失稳型冲击地压。利用声发射波形多参数分析细观裂纹强度与类型的动态演化特征, 结合应力路径斜率变化分阶段分析细观裂纹动态演化特征, 探讨岩石宏观破坏规律, 提出砂岩破裂失稳的多参数预警条件。以矩张量反演理论验证方法的有效性。

1 试验试样与设备

本次试验采用的岩石试样取自山西组下段岩层, 为典型的细砂岩, 见图 1。试样主要含硅、钙、黏土和氧化铁, 粒度分布不均匀, 胶结物为硅质和碳酸盐质胶结, 胶结较为充分。考虑矩张量反演要求有效接收数据的传感器数量至少 6 个。因此, 采取直径较大的圆柱试样降低探头密度, 避免较大裂纹出现导致有效传感器数量不足, 实验采用了直径 70 mm, 长度 140 mm 的圆柱形试样。加工后, 试件两端不平行度不大于 0.02 mm。试验前采用波速测量检验试件完整性, 试验得到试件的平均单轴抗压强度为 51.21 MPa。



图 1 细砂岩试样

Fig. 1 Test samples of sandstones

试验主要由力学加载系统和声发射监测系统组成。加载设备为深部岩土力学与地下工程国家重点实验室 (北京) 2000 kN 岩石三轴刚性压力试验机, 设备稳定性好, 精度高。单轴压缩破裂试验采用位移加载方式控制, 直至试样破坏, 加载速率为 0.1 mm/min。

声发射监测系统包括美国物理声学公司 (PAC) 的 Express 8 型普通 AE 模式信号采集分析系统, 具有 16 位模数转换器, 10 MHz 采样率; PAC 公司的 PCI-II 型矩张量模式信号采集系统, 采样率最高可达 40 MHz。传感器均为 Nano 30 传感器, 前置放大器为 1220 A-AST 型。为保证获得有效数据, 声发射传感器布置方案见图 2。其中, 字母代表普通 AE 模式传感器序号, 数字代表矩张量反演模式传感器序号。传感器与试件之间采用适量耦合剂填充以保证接触充分。根据现场环境测试, 声发射阈值为 45 dB, 采样频率为 1 MHz, 前置放大器增益设为 40 dB。力学加载过程中声发射监测系统始终实时同步。

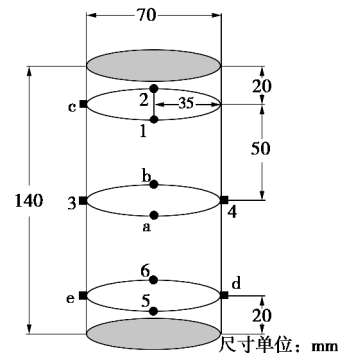


图 2 传感器布置

Fig. 2 Layout of sensors

2 细观裂纹特征理论

2.1 声发射参数特征

声发射信号由材料内部错动产生, 一次撞击被探头记录为一个声波文件, AE 信号参数如图 3 所示。

将幅值和能量参数作为裂纹的强度特征进行分析。在裂纹事件中, AE 信号的幅值 $A^{[17]}$ 表示为

$$A = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left(\frac{r_i}{10} A_{i_{\max}} \right)^2} \quad (1)$$

式中 $A_{i_{\max}}$ 为第 i 个声发射传感器接收到撞击波形的最大振幅 (V); r_i 为声发射震源距第 i 个传感器的距

离 (mm); k 为参与事件定位的传感器数量。

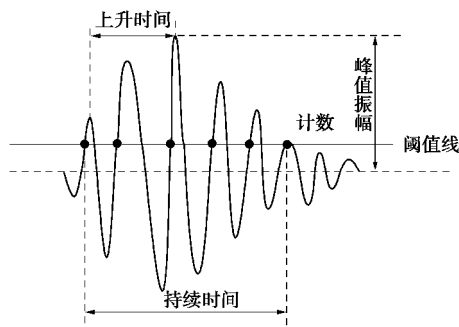


图 3 AE 信号参数

Fig. 3 Parameters of AE signals

参考里氏地震计算方法, 忽略参照点震级量, 降低事件能量大小的尺度, 取震级 A_s [18] 为

$$A_s = \lg A \quad (2)$$

以相同方法得到撞击率分级 H_s 和能级 E_s 。

2.2 RA - AF 裂纹分类特征

Ohtsu 等 [9] 基于声发射波形参数对岩石类材料的破坏类型进行研究, 发现岩石的裂纹类型和 RA - AF 之间存在较好的关联。参考日本混凝土协会推荐标准 [19], 得到 RA - AF 裂纹类型分类方法见图 4。

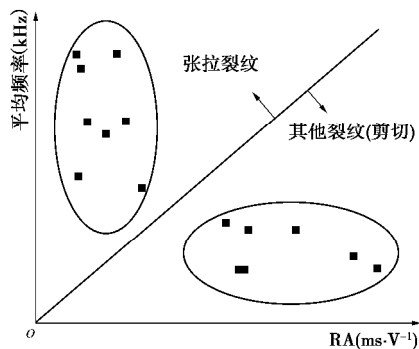


图 4 RA - AF 裂纹类型分类

Fig. 4 Crack classification by RA-AF

其中, RA 为上升时间与峰值振幅的比值, AF (平均频率) 为计数与持续时间的比值, 见公式 (3), (4)。图 4 分类线下方裂纹 RA 值较大, 平均频率较小。

$$RA = \text{上升时间} / \text{峰值振幅} \quad (3)$$

$$AF = \text{计数} / \text{持续时间} \quad (4)$$

2.3 矩张量反演裂纹分类特征

以 Ohtsu 提出的矩张量分析理论计算裂纹类型 [12]。当震源为同步震源时, 单元体各方向上的体力可采用矩张量 $M_{ij}(x, t')$ 表示, 与震源 x 处在 t' 时刻 j 方向的点力在 x 处 t 时刻 i 方向上的位移场 $u_i(x, t)$ 建立线性关系。可以推导出形如公式 (5) 的矩张量表达式:

$$M_{ij} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式 (5) 中, m_{ij} 为常数, 代表二阶矩张量 M_{ij} 的分量。式 (5) 可进一步分解为各向同性部分 (ISO)、纯双力偶 (DC) 和补偿线性适量偶极成分 (CLVD) 三部分, 代表膨胀、剪切和两个无矩双力偶叠加, 见公式 (6) [12]。

$$M_{ij} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} \text{tr}(M) & 0 & 0 \\ 0 & \text{tr}(M) & 0 \\ 0 & 0 & \text{tr}(M) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I_1^* + \frac{I_3^*}{2} & 0 & 0 \\ 0 & -I_1^* - \frac{I_3^*}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{I_3^*}{2} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{I_3^*}{2} & 0 \\ 0 & 0 & I_3^* \end{pmatrix} \quad (6)$$

式 (6) 中, tr 为迹, $I_i^* = I_i - \text{tr}(M)/3$, 其中 I_1, I_2, I_3 分别为矩张量的 3 个特征值。根据式 (7) 求解式 (6) 三项所占比例, 当 $A \geq 60\%$ 时为剪切型破裂, $A \leq 40\%$ 时为张拉型破裂, $40\% < A < 60\%$ 时为混合型破裂。

$$\begin{cases} 1 = A + B + C, \\ I_{\text{int}} / I_{\text{max}} = 0 - B/2 + C, \\ I_{\text{min}} / I_{\text{max}} = -A - B/2 + C. \end{cases} \quad (7)$$

式 (7) 中, A 为纯双力偶成分, B 为补偿线性适量偶极成分, C 为各向同性成分, $I_{\text{min}}, I_{\text{int}}, I_{\text{max}}$ 分别为特征值的最小值、中间值和最大值。

3 砂岩细观裂纹动态演化

3.1 细观裂纹强度特征演化

为更好地观察裂纹演化规律, 对试件应力大小归一化, 根据应力加载路径和声发射能量、幅值特征的变化, 将试件的细观裂纹演化分为 3 个阶段 (对应 I, II, III), 以试件 S6 为例进行分析, 见图 5。

由图 5 可以看出, 裂纹的能量和振幅强度动态演化过程有较好的阶段性变化规律。在 375 s 处, 应力曲线斜率第一次降低, 演化进入第二阶段, 此阶段裂纹的能量强度逐渐降低, 裂纹的振幅逐渐集中于中等强度。在 480 s 处, 应力曲线斜率第二次降低, 演化进入第三阶段, 高能量强度特征的裂纹突然出现, 大量低能量强度特征的裂纹聚集在该阶段, 不同振幅强度特征的裂纹突然出现, 大量中等强度特征振幅开始聚集。

在其他试件中也观察到同样的情况, 一般来说, 随时间推进, 各阶段的载荷曲线斜率逐渐降低, 阶段总时长变短, 各阶段内裂纹的能量和幅值逐渐密集, 事件主要集中在第三阶段。

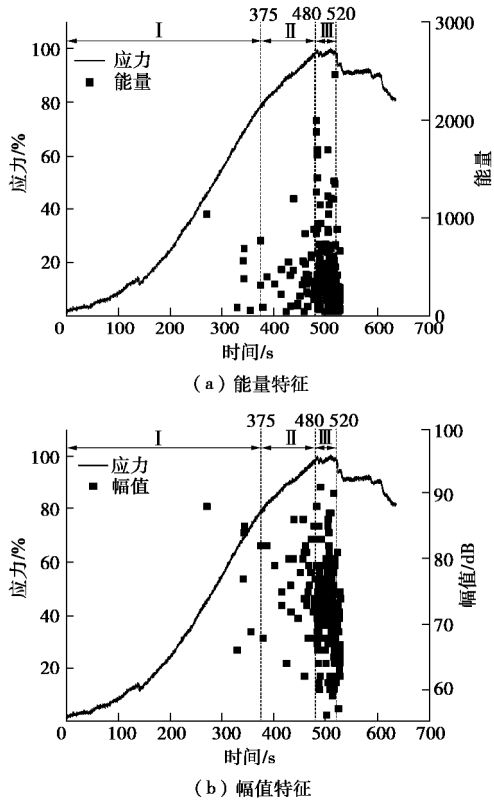


图 5 微观裂纹的强度特征

Fig. 5 Intensity characteristics of micro-cracks

3.2 RA - AF - E(A)动态演化

以试件 S4 为例, 对裂纹能级和震级进行线性回归分析, 得到能量和振幅的强度特征关系, 见图 6。

对本次所有试样的裂纹强度特征关系进行回归, 得到的相关系数平均为 0.96。因此, 可以采用能级和震级相互代替表示裂纹的发生强度, 根据测试试样能级和震级强度范围, 定义能级 0~1.5 级为低等强度, 1.5~3 级为中低等强度, 3~4.5 级为中等强度, 4.5 级以上为高等强度。参考文献[20], 根据试样裂纹 AF 和 RA 数值的实际分布, 定义 AF 与 RA 比值为 10 的直线作为裂纹类型分类线。在此基础上建立 RA - AF - E(A) 动态演化分析方法, 对砂岩试样进行分析, 结果见图 7。

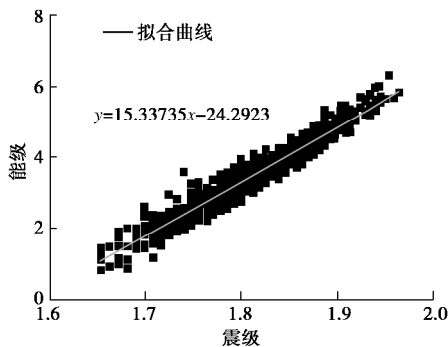


图 6 能级 - 震级回归分析

Fig. 6 Regression analysis of energy level and magnitude

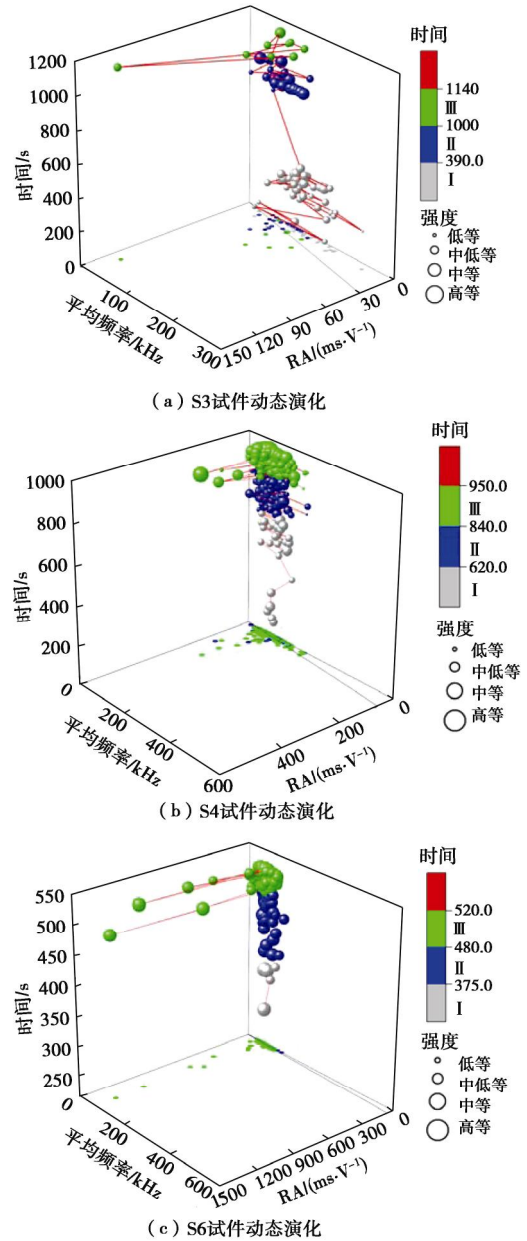


图 7 微观裂纹的 RA - AF - E(A)分析

Fig. 7 RA-AF-E(A) analysis of micro-cracks

以试件 S6 为例, 对裂纹 RA - AF 关系进行分析。可以看出: 裂纹多分布于低 RA 区域, 以张拉型裂纹为主, 对应 RA 值分布在 0~15 ms/V 之间, AF 分布在 45~130 kHz 之间; 剪切型裂纹的数量较少, 其 RA 值远高于张拉型裂纹 RA 值, AF 值低于张拉型裂纹的 AF 中间值。

由图 7 可知, 3 个试件在前两阶段的裂纹以低 RA 值的张拉型裂纹为主。随着时间的推移, 裂纹类型特征从低 RA 值向高 RA 值移动, 伴随 AF 值的降低, 裂纹从张拉型向剪切型转变。在第三阶段均出现高 RA、低 AF 的异常剪切裂纹。从裂纹强度特征来看: 在第一阶段初始时以少量中低强度的裂纹为主, 随后进入一段静默期, 再次出现时裂纹增多, 以低等到中低等强度为主, 裂纹之间强度特征有差异; 第二阶段

裂纹数量增多，以中等强度为主，强度特征差异不明显；第三阶段裂纹数量剧增，强度增大，以中等和高强度为主，同时存在低能量裂纹。

其余试件也表现出相似的规律。在裂纹动态演化过程中，裂纹强度逐渐变大，其中剪切型裂纹的强度相对张拉型裂纹强度较大。试件破坏前的第三阶段总时长较短，且出现特征明显的高强度、高 RA、低 AF 裂纹。因此，可以将此特征信息视为砂岩失稳的定性预警条件。

3.3 矩张量反演

采用矩张量理论对试件裂纹类型进行反演，结果见图 8。由于普通 AE 模式需要 4 个以上通道的波形信号即可获得裂纹事件，但矩张量反演则需要同时获得至少 6 个通道的信号，所以二者监测到的裂纹数不在同一数量级上。

以试件 S6 为例，在第一阶段加载初期，低撞击率分级事件离散分布，伴随强度不一的剪切型和张拉型裂纹。然后，撞击率分级数值突然提高，并连续出现四个裂纹，对应 RA - AF - E (A) 第一阶段静默期后裂纹的出现。

随后，撞击率分级和裂纹数量开始增加。矩张量反演结果得到张拉错动裂纹数高于剪切型裂纹，与 RA - AF - E (A) 分析结果一致。

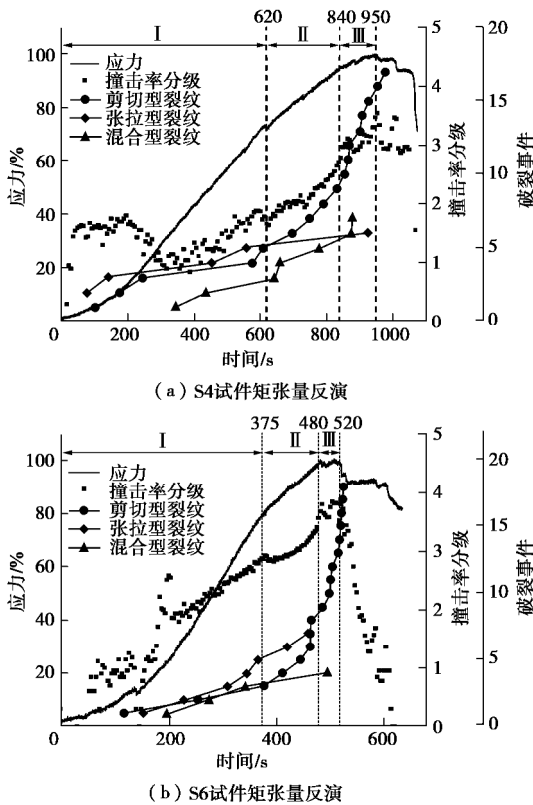


图 8 矩张量反演结果

Fig. 8 Inversion results of moment tensors

在 375 s 细观裂纹演化进入第二阶段。在该阶段

内，撞击率斜率相对降低后呈指数增加，剪切裂纹数量快速增长，对应图 7 第二阶段裂纹逐渐密集的现象，矩张量反演结果显示裂纹以张拉型为主。在 480 s 细观裂纹演化进入第三阶段。撞击率分级不再有明显提高，RA - AF - E (A) 分析和矩张量反演结果均显示，该阶段裂纹事件以剪切型为主，呈指数形式急剧增长。试件主要以剪切破坏的形式失稳。试件破坏和矩张量反演结果对比见图 9。

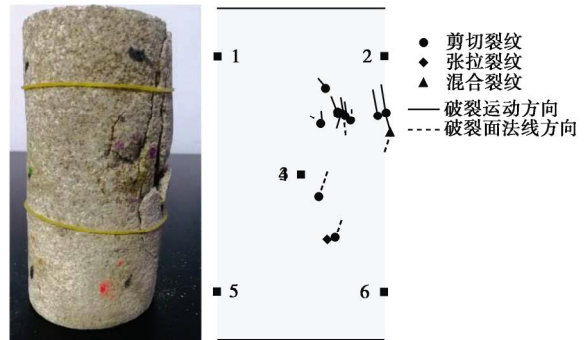


图 9 试件 S6 破坏与矩张量反演对比图

Fig. 9 Failure and inversion results of moment tensors of sample S6

4 结 论

通过应力与声发射分析，研究了砂岩在单轴压缩条件下的细观裂纹动态演化特征，得到以下结论：

(1) 采用位移加载控制时，试件峰前应力路径的斜率与裂纹能量、撞击、幅值、类型参数的动态演化有很好的三阶段对应关系。

(2) 在细观裂纹演化过程中，裂纹能级和震级的线性正相关系数平均为 0.96，两者可以相互替代表示细观裂纹的发生强度。

(3) RA - AF - E (A) 和矩张量反演结果显示，单轴压缩下，前两个阶段的裂纹以张拉型为主；在第三阶段，剪切裂纹数量快速增加，主导试件的破裂失稳。

(4) 第三阶段裂纹出现的高强度、高 RA、低 AF 特征可以作为预警砂岩失稳、灾害发生的定性预警条件。

参考文献:

[1] MANGUAL J, ELBATANOUNY M K, ZIEHL P, et al. Acoustic-emission-based characterization of corrosion damage in cracked concrete with prestressing strand[J]. *Aci Materials Journal*, 2013, **110**(1): 89 - 98.

[2] BEHNIA A, CHAI H K, SHIOTANI T. Advanced structural health monitoring of concrete structures with the aid of acoustic emission[J]. *Construction & Building Materials*,

- 2014, **65**(4): 282 - 302.
- [3] WANG Chun-lai. Identification of early-warning key point for rockmass instability using acoustic emission/microseismic activity monitoring[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2014, **71**(5): 171 - 175.
- [4] WANG Chun-lai. Evolution, monitoring and predicting models of rockburst[M]. Singapore: Springer, 2018.
- [5] 王笑然, 王恩元, 刘晓斐, 等. 裂隙砂岩裂纹扩展声发射响应及速率效应研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, **37**(6): 1446 - 1458. (WANG Xiao-ran, WANG En-yuan, LIU Xiao-fei, et al. Macro-crack propagation process and corresponding AE behaviors of fractured sandstone under different loading rates[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, **37**(6): 1446 - 1458. (in Chinese))
- [6] MORADIAN Z, EINSTEIN H H, BALLIVY G. Detection of cracking levels in brittle rocks by parametric analysis of the acoustic emission signals[J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 2016, **49**(3): 785 - 800.
- [7] 刘泉声, 魏 莱, 雷 峰, 等. 砂岩裂纹起裂损伤强度及脆性参数演化试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, **40**(10): 1782 - 1789. (LIU Quan-sheng, WEI Lai, LEI Feng, et al. Experimental study on damage strength of crack initiation and evaluation of brittle parameters of sandstone[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **40**(10): 1782 - 1789. (in Chinese))
- [8] 丛 宇, 冯夏庭, 郑颖人, 等. 不同应力路径大理岩声发射破坏前兆的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, **38**(7): 1193 - 1201. (CONG Yu, FENG Xia-ting, ZHENG Ying-ren, et al. Experimental study on acoustic emission failure precursors of marble under different stress paths[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(7): 1193 - 1201. (in Chinese))
- [9] OHTSU M, ISODA T, TOMODA Y. Acoustic emission techniques standardized for concrete structures[J]. *Journal of Acoustic Emission*, 2007, **25**: 21 - 32.
- [10] 周子龙, 李国楠, 宁树理, 等. 侧向扰动下高应力岩石的声发射特性与破坏机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, **33**(8): 1720 - 1728. (ZHOU Zi-long, LI Guo-nan, NING Shu-li, et al. Acoustic emission characteristics and failure mechanism of high-stressed rocks under lateral disturbance[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, **33**(8): 1720 - 1728. (in Chinese))
- [11] 顾义磊, 王泽鹏, 李清淼, 等. 页岩声发射 RA 值及其分形特征的试验研究[J]. *重庆大学学报*, 2018, **41**(2): 78 - 86. (GU Yi-lei, WANG Ze-peng, LI Qing-miao, et al. Laboratory study on RA value fractal feature of shale acoustic emission under conventional triaxial compression[J]. *Journal of Chongqing University*, 2018, **41**(2): 78 - 86. (in Chinese))
- [12] OHTSU M. Simplified moment tensor analysis and unified decomposition of acoustic emission source: Application to in situ hydrofracturing test[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, **96**(B4): 6211 - 6221.
- [13] 吴顺川, 黄小庆, 陈 钊, 等. 岩体破裂矩张量反演方法及其应用[J]. *岩土力学*, 2016, **37**(增刊 1): 1 - 18. (WU Shun-chuan, HUANG Xiao-qing, CHEN Fan, et al. Moment tensor inversion of rock failure and its application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, **37**(S1): 1 - 18. (in Chinese))
- [14] GROSSE C U, FINCK F. Quantitative evaluation of fracture processes in concrete using signal-based acoustic emission techniques[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2006, **28**(4): 330 - 336.
- [15] REINHARDT H W, XU S. Experimental determination of K_{IIC} of normal strength concrete[J]. *Materials & Structures*, 1998, **31**(5): 296 - 302.
- [16] AGGELIS D G. Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters[J]. *Mechanics Research Communications*, 2011, **38**(3): 153 - 157.
- [17] ZANG A, WAGNER F C, STANCHITS S, et al. Source analysis of acoustic emissions in Aue granite cores under symmetric and asymmetric compressive loads[J]. *Geophysical Journal International*, 2010, **135**(3): 1113 - 1130.
- [18] 张鹏海. 基于声发射时序特征的岩石破裂前兆规律研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015: 44 - 48. (ZHANG Peng-hai. Study on precursory law prior to rock failure based on acoustic emission time order[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015: 44 - 48. (in Chinese))
- [19] COMMITTEE R T. Recommendation of RILEM TC 212-ACD: acoustic emission and related NDE techniques for crack detection and damage evaluation in concrete[J]. *Materials & Structures*, 2010, **43**(9): 1177 - 1181.
- [20] ALDAHDOOH M A A, BUNNORI N M. Crack classification in reinforced concrete beams with varying thicknesses by mean of acoustic emission signal features[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, **45**: 282 - 288.