

闪长岩破裂的声发射前兆现象及其裂纹路径演化规律

温晓东¹, 马庆山², 李进鹏¹, 张子程¹, 钟健², 张鹏海^{2*}

(1. 招金矿业股份有限公司; 2. 东北大学资源与土木工程学院)

摘要:为了研究岩石破裂过程中裂纹扩展路径演化规律,基于声发射监测数据,结合矩张量反演、裂纹尺度量化及裂纹拓扑关系量化建立了裂纹扩展路径分析方法,并基于室内声发射试验分析了闪长岩单轴压缩破坏过程。研究表明:闪长岩在受载过程中产生微裂纹的特征尺度为1.06 mm,明显高于矿物颗粒的平均尺度;随着应力的增加,闪长岩试件内部的微裂纹由离散状态逐渐过渡为相互贯通状态,微裂纹相对集中区域更容易演化为宏观裂纹。

关键词:闪长岩;声发射;裂纹演化;岩石破裂;前兆规律

中图分类号:TD313

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2024)04-0009-04

doi:10.11792/hj20240403

引言

声发射(Acoustic Emission, AE)为材料变形或破坏时积蓄起来的应变能所释放的声音的传播现象^[1]。岩石内部微破裂较为复杂,很难实时监测到,但利用声发射技术可以对其进行动态监测,分析研究岩石破裂过程。

对声发射事件时空变化的分析可以增进对岩石因微裂纹萌生、扩展导致破裂的理解。基于对声发射空间定位结果的分析可以推测岩石中破裂位置及裂缝网络复杂程度^[2],例如:AMINZADEH等^[3]基于声发射事件空间位置,利用模糊聚类方法确定了裂缝网络的迁移方向;张鹏海等^[4]基于声发射事件间的空间距离及出现的先后顺序推测了裂纹路径,但该方法没有将裂纹的尺度及裂纹间的拓扑关系考虑在内,降低了路径推测结果的可信度。利用矩张量反演方法可以推断储层水力压裂形成裂纹的破裂机制及裂纹方向^[5]。将声发射事件空间位置、矩张量反演结果与破裂尺度量化相结合,可以建立用于描述储层裂缝空间展布形态的离散裂纹网络,例如:ARDAKANI等^[6]通过量化不同区域离散裂纹网络的拓扑关系来对压裂效果进行分区评价,但由于未考虑震源机制对裂纹尺度的影响,所以拓扑关系的量化存在一定误差。

本文综合考虑破裂机制对裂纹尺度及裂纹间拓扑关系的影响,建立了一种岩石裂纹扩展路径分析方法,并将该方法应用于闪长岩在单轴压缩条件下的破裂过程分析。

1 岩石裂纹扩展路径分析方法

1.1 破裂机制判断方法

根据矩张量反演方法,将震源力矩模型以一个对称的二阶张量的形式表示,则震源诱发的微震波的远场P波初动振幅 $A(x)$ 可以写成:

$$A(x) = \frac{C_s R_e(t, r) e^{\frac{\pi f}{v_p} Q R}}{R} (r_1, r_2, r_3) \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: $A(x)$ 为传感器P波初动振幅; C_s 为传感器响应系数,其包含了传感器自身固有属性与波导介质的材料特性; $R_e(t, r)$ 为考虑传感器朝向 t 与射线传播路径方向(震源与接收点连线方向) r 的反射修正系数; v_p 为P波波速; f 为频率成分,当传播距离较大时,可以将 f 用波拐角频率或主频替代; Q 为岩体P波品质因子; R 为震源至接收点的距离。

当同一个震源诱发的微震波触发超过6个传感器时,通过式(1)可求解出震源的矩张量,并进一步获得裂纹面的运动向量(\mathbf{n})和法向量(\mathbf{l}):

$$\begin{cases} \mathbf{n} = \sqrt{\frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3} \mathbf{e}_1 + \frac{M_2 - M_3}{M_1 - M_3} \mathbf{e}_3} \\ \mathbf{l} = \sqrt{\frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3} \mathbf{e}_1 - \frac{M_2 - M_3}{M_1 - M_3} \mathbf{e}_3} \end{cases} \quad (2)$$

式中: M_1, M_2, M_3 ($M_1 > M_2 > M_3$)为矩张量的3个特征值; $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_3$ 分别为特征值(M_1, M_3)对应的特征向量。

收稿日期:2023-11-02;修回日期:2024-02-25

基金项目:中央高校基本科研业务专项资金项目(N2201015)

作者简介:温晓东(1986—),男,工程师,从事金属矿山采矿技术管理工作;E-mail:19501228@163.com

*通信作者:张鹏海(1987—),男,副教授,博士,从事矿山岩石力学方面的教学与研究工作;E-mail:zhangpenghai@mail.neu.edu.cn

裂纹的破裂机制可以通过裂纹面运动向量与裂纹面间的夹角,也就是张拉角(γ)来直接判断。

$$\gamma = 90^\circ - \arccos(n \cdot l) \frac{180^\circ}{\pi} \quad (3)$$

破裂机制模型示意图如图 1 所示,随着张拉角不断接近 0° ,破裂机制中的剪切分量所占的比例会逐渐增大。当张拉角为 0° 时,破裂机制为纯剪切。随着张拉角不断接近 -90° 或 90° 时,破裂机制中的压缩或张拉分量所占比例逐渐增加。当张拉角为 90° 时,破裂机制为纯张拉。当张拉角为 -90° 时,破裂机制为纯压缩,通常为原生裂纹的压密。

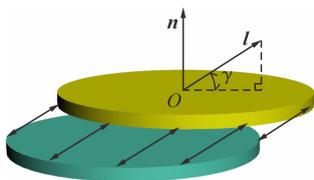


图 1 破裂机制模型示意图

Fig. 1 Schematic model of failure mechanism

1.2 裂纹尺度量化方法

根据地震学理论,裂纹的半径(a)与 P 波或 S 波的拐角频率(f_c)成反比^[7],即:

$$a = K_C \frac{V_C}{f_c} \quad (4)$$

式中: K_C 为依赖于震源模型的常数; V_C 为震源区的 P 波或 S 波波速。

式(4)既可用于剪切裂纹,也可用于张拉裂纹。对于 Brune 剪切模型^[8],只考虑 S 波, K_C 与观察角度无关, $K_C = 0.375$ 。对于 Madariaga 剪切模型^[9], K_C 是观察角度的函数,平均化之后 P 波拐角频率的 $K_C = 0.21$ 、S 波拐角频率的 $K_C = 0.32$ 。Madariaga 剪切模型计算的震源尺度约为 Brune 剪切模型的 56%。在一些矿山及地下岩石工程中, Madariaga 剪切模型算得的震源尺度更加符合实际观察结果^[10-11],因此,本文使用 Madariaga 剪切模型来量化剪切裂纹半径。对于 Sato 张拉模型^[12], K_C 是观察角度的函数,平均化之后 P 波拐角频率的 $K_C = 0.509$ 、S 波拐角频率的 $K_C = 0.633$ 。由于压缩裂纹两侧的岩石基质与张拉裂纹方向相反,故本文对压缩裂纹也使用与张拉模型一致的系数。

对于拉剪或压剪混合裂纹,可采用权重叠加法计算其半径,权重系数通过破裂面处切向运动分量及垂向运动分量所占比例来确定,即:

$$a_{\text{mix}} = \cos^2 \gamma a_s + (1 - \cos^2 \gamma) a_{v_c} \quad (5)$$

式中: a_{mix} 为任意破裂机制裂纹半径; a_s 为将该裂纹视作剪切裂纹时计算的裂纹半径; a_{v_c} 为将该裂纹视作张拉裂纹时计算的裂纹半径。

1.3 裂纹拓扑关系量化方法

考虑到裂纹几何参数的计算误差,将裂纹半径增加 5% 及减小 5% 分别作为裂纹的内外径,按照裂纹相交与否及相交的位置将裂纹间的空间拓扑关系分为相离、相邻及相交 3 种。若两裂纹(圆盘)内径相交则定义为相交,若两裂纹中有一裂纹仅外径与另一裂纹相交(无论内外径)则定义为相邻,若两裂纹完全相离则定义为相离。

1.4 裂纹扩展路径

每个微震源都代表岩石内部对应位置出现了破裂,破裂数量的增加、裂纹的扩展及相互贯通是岩石出现宏观破坏的根本原因。因此,可综合考虑裂纹出现时间、裂纹空间位置、裂纹半径及裂纹间的空间拓扑关系来建立裂纹扩展路径追踪方法,用于分析储层破裂过程中的裂纹空间展布规律。

裂纹扩展路径追踪方法以相交的两裂纹的圆心为端点形成一线段。随着裂纹数量的增加,不断判断新增裂纹与原有裂纹间的拓扑关系,进而完成裂纹扩展路径的更新。

2 试验过程及岩石力学特征

2.1 试件加工及矿物成分

按照 ISRM 规程,将取自吉林省珲春市某金矿的闪长岩大块加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱试件(如图 2 所示),试样两端面平整度偏差在 0.02 mm 内,沿高度方向试样直径误差不大于 0.1 mm ,岩样笔直,轴向角度偏差不超过 0.05° 。

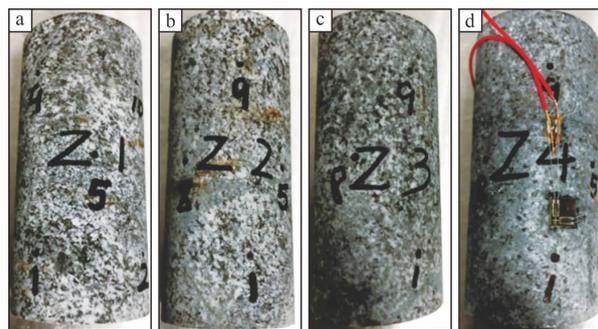


图 2 岩石试样

Fig. 2 Rock specimens

试验所用闪长岩的矿物组成主要为石英(10% ~ 15%)、长石(55% ~ 60%,以斜长石为主,也含有碱性长石)、角闪石和黑云母(25% ~ 35%),部分角闪石被蚀变成黑云母。岩石切面在正交光下的显微照片如图 3 所示。其中,墨绿色矿物为角闪石,淡黄色矿物为石英,灰白色矿物为斜长石和碱性长石,褐色矿物为黑云母,矿物颗粒尺寸为 $0.2 \sim 1 \text{ mm}$ 。

2.2 试验设备及方法

试验设备包含 YAW-2000B 微机控制电液伺服

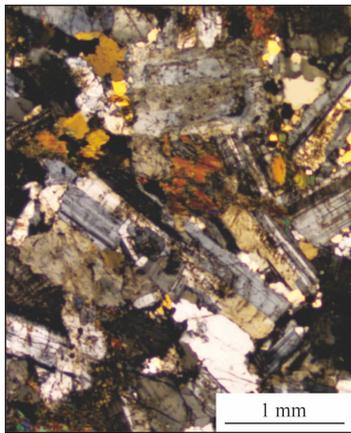


图3 岩石磨片显微镜照片

Fig. 3 Microscope photograph of rock thin section

压力试验机及 PCI - II 型声发射采集系统。声发射监测系统参数设置如下:前置增益 40 dB;频率为 5 ~ 500 kHz;采样频率 1 MSPS;预触发 256;声发射系统的振幅门限值设为 45 dB,以便消除环境噪声对声发射试验的影响。

单轴加载控制采用位移加载方式,以 0.18 mm/min 的速率加载,直至试件破坏。声发射监测采用 12 个 Nano30 型传感器同时采集信号,1 ~ 4 号传感器距岩石试件下端 25 mm,9 ~ 12 号传感器距岩石试件上端面 25 mm,5 ~ 8 号传感器位于试件的中间,距上、下端面均为 50 mm。

本文共进行 4 组试验,闪长岩试样的物理力学参数如表 1 所示,其中弹性模量采用割线弹性模量,选取应力 - 应变曲线直线部分两端点的应力 - 应变进行计算。

表 1 岩石试件的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock specimens

试件编号	抗压强度/MPa	变形参数	
		弹性模量/GPa	泊松比
Z1	85.9	74.26	0.27
Z2	89.0	64.11	0.30
Z3	93.1	79.32	0.27
Z4	89.5	64.54	0.34

3 试验结果及分析

鉴于篇幅有限,以下仅以 Z1 为典型岩石试件进行详细介绍。

3.1 声发射活动特征

根据声发射撞击率随时间的变化可发现岩石试件在破坏前依次经历如下裂纹演化阶段(如图 4 所示):压密阶段($0 \sim 0.3\sigma_c$),裂隙闭合过程中两裂隙面间的摩擦是该阶段声发射信号产生的主要原因;弹性阶段

($0.3\sigma_c \sim 0.7\sigma_c$),岩石变形以基质压缩为主,声发射撞击率处于极低水平;裂纹萌生、稳定扩展阶段($0.7\sigma_c \sim 0.86\sigma_c$),新裂纹逐渐在岩石中出现,引起声发射撞击率的升高;裂纹加速扩展阶段($0.86\sigma_c \sim \sigma_c$),裂纹在岩石内大量出现,导致声发射撞击率明显升高。

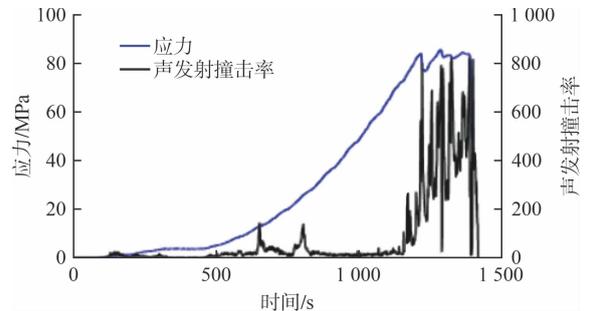


图 4 应力、声发射撞击率随时间的变化过程

Fig. 4 Changes of stress and AE hit versus time

3.2 微破裂尺度分布特征

声发射事件数 - 裂纹直径关系如图 5 所示。由图 5 可知:闪长岩试件在受载过程中产生的微裂纹直径为 0.96 ~ 1.52 mm。其中,直径为 1.00 ~ 1.20 mm 的微裂纹占比在 78% 以上。直径在 1.06 mm 左右的裂纹数量最高,因此,可将 1.06 mm 作为闪长岩试件破裂过程中产生微裂纹的特征尺度,该特征尺度高于矿物颗粒的平均尺度(0.6 mm 左右),说明微裂纹的延伸尺度跨越多个颗粒,通常超过一个矿物颗粒。

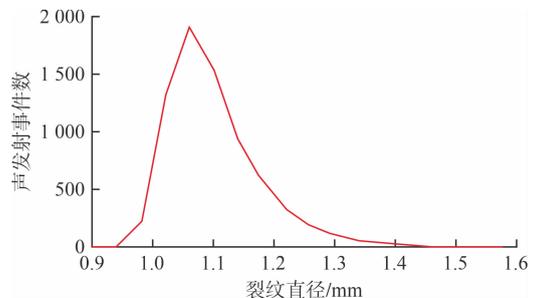


图 5 声发射事件数 - 裂纹直径关系

Fig. 5 AE event number - crack diameter relationship

3.3 裂纹扩展路径演化过程

利用前述裂纹扩展粒径分析方法绘制闪长岩试件的破坏过程,结果如图 6 所示。在加载初期,岩石试件内部的微裂纹呈离散状态,破裂面与破裂面之间不会相互贯通(如图 6 - a)所示);而随着应力的升高,微裂纹开始在局部区域出现相关贯通的现象(如图 6 - b)所示);应力继续上升,导致相互贯通的微裂纹数量不断增加,贯通裂纹的分布范围也随之增加(如图 6 - c)所示),并在岩石宏观破裂前出现大面积的微裂纹相互贯通现象(如图 6 - d)所示),预示着岩石即将破裂失稳。由于岩石本身的非均匀性,微裂纹会在岩石试件内部呈现出明显的空间差异性分布,微裂纹相对集中区域更容易演化为宏观裂纹。

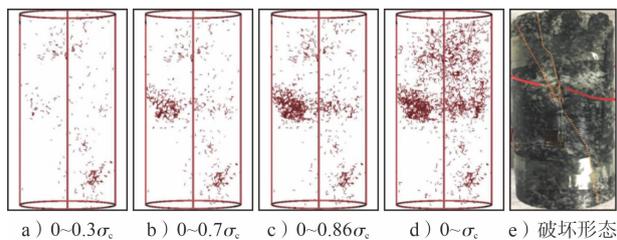


图6 试件裂纹扩展过程

Fig. 6 Crack evolution of specimens

岩石试件在宏观破裂发生时,都未出现自顶端向底端完全相互贯通的裂纹路径,推测其原因为:闪长岩的脆性较高,贯通整个试件的宏观裂纹形成于峰值应力后的瞬间,其形成过程的持续时间十分短暂,声发射设备无法捕捉到可定位的波形信号。

4 结论

本文利用提出的裂纹路径分析方法对闪长岩破裂过程中裂纹路径的演化规律进行了研究,得到以下结论:

1) 闪长岩在单轴压缩条件的破裂过程依次经历压密阶段($0 \sim 0.3\sigma_c$),弹性阶段($0.3\sigma_c \sim 0.7\sigma_c$),裂纹萌生、稳定扩展阶段($0.7\sigma_c \sim 0.86\sigma_c$),以及裂纹加速扩展阶段($0.86\sigma_c \sim \sigma_c$),各阶段的区分应力分别为 $0.3\sigma_c$ 、 $0.7\sigma_c$ 及 $0.86\sigma_c$ 。

2) 闪长岩在受载过程中产生的微裂纹直径为 $0.96 \sim 1.52 \text{ mm}$,微裂纹的特征尺度为 1.06 mm ,明显高于矿物颗粒的平均尺度,说明微裂纹的延伸尺度跨越多个颗粒,通常超过一个矿物颗粒。

3) 随着应力的增加,闪长岩试件内部的微裂纹由离散状态逐渐过渡为相互贯通状态,并在岩石宏观

破裂前出现大面积的微裂纹相互贯通,其中,微裂纹相对集中区域更容易演化为宏观裂纹。

[参考文献]

- [1] 胜山邦久. 声发射(AE)技术的应用[M]. 冯夏庭,译. 北京:冶金工业出版社,1997.
- [2] MAXWELL S C, URBANCIC T I, STEINBERGER N, et al. Microseismic imaging of hydraulic fracture complexity in the Barnett Shale [C] // SPE: Annual Technical Conference and Exhibition, 2002.
- [3] AMINZADEH F, TAFTI T A, MAITY D. An integrated methodology for sub-surface fracture characterization using microseismic data: A case study at the NW Geysers [J]. Computers & Geosciences, 2013, 54 (54): 39 - 49.
- [4] 张鹏海, 张子麟, 李明, 等. 低渗储油层水力压裂裂缝延伸过程及成缝机理 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2019, 40 (5): 140 - 144.
- [5] BAIG A M, URBANCIC T. Microseismic moment tensors: A path to understanding frac growth [J]. The Leading Edge, 2010, 29 (3): 320 - 324.
- [6] ARDAKANI E P, BAIG A M, URBANCIC T, et al. Microseismicity-derived fracture network characterization of unconventional reservoirs by topology [J]. Interpretation, 2018, 6 (2): 49 - 61.
- [7] MENDECKI A J. Seismic monitoring in mines [M]. London: Chapman & Hall, 1997.
- [8] BRUNE J N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes [J]. Journal of Geophysical Research, 1970, 75 (26): 4 997 - 5 009.
- [9] MADARIAGA R. Dynamics of an expanding circular fault [J]. Bulletin of the seismological Society of America, 1976, 66 (3): 639 - 666.
- [10] GIBOWICZ S J, KIJKO A. An introduction to mining seismology [M]. Cambridge: Academic Press, 1994.
- [11] TRIFU C I, URBANCIC T I, YOUNG R P. Source parameters of mining-induced seismic events: An evaluation of homogeneous and inhomogeneous faulting models for assessing damage potential [J]. Pure and Applied Geophysics, 1995, 145: 3 - 27.
- [12] SATO T. A note on body wave radiation from expanding tension crack [J]. Science Reports of the Tohoku University (Series 5 Geophysics), 1978, 25.

Precursory phenomena of acoustic emission and evolutionary laws of crack propagation path in diorite fracturing

Wen Xiaodong¹, Ma Qingshan², Li Jinpeng¹, Zhang Zicheng¹, Zhong Jian², Zhang Penghai²

(1. Zhaojin Mining Industry Co., Ltd.;

2. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University)

Abstract: In order to study the evolutionary laws of crack propagation paths during rock fracturing, a crack propagation path analysis method was established based on acoustic emission monitoring data, combined with moment tensor inversion, crack scale quantification, and crack topological relationship quantification. Through indoor acoustic emission tests, the process of diorite uniaxial compression failure was analyzed. The research results show that the characteristic scale of microcracks generated in diorite during the loading process is 1.06 mm , significantly higher than the average scale of mineral grains. With the increase of stress, the microcracks inside the diorite specimen gradually transition from a discrete state to a coalesced state, and microcrack concentration zones are more prone to evolve into macroscopic cracks.

Keywords: diorite; acoustic emission; crack evolution; rock fracturing; precursory patterns