

单轴压缩作用下岩石 脆性破裂机制的声发射识别*

范财源¹, 孟范宝^{1,2}, 刘金锋^{1,2,3}

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 珠海 519082
2. 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广东 珠海 519082
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082

摘要: 监测和识别岩石变形过程的微破裂发育, 有助于理解其脆性破裂机制以及预防工程灾害。基于声发射监测技术, 对比分析了砂岩和花岗岩的单轴压缩破裂过程。基于声发射 RA-AF 裂纹分类准则, 提出了裂纹分类参数累计曲线法, 依据累计曲线斜率 k 值变化 ($-1 \sim 1$) 可推断出岩石破裂过程中张拉裂纹 ($k=1$) 和剪切裂纹 ($k=-1$) 的发育阶段, 进而识别脆性破裂机制。宏观破裂特征显示, 砂岩发生单斜面剪切破坏, 花岗岩发生劈裂破坏。声发射撞击数、 b 值等特征参数分析表明, 两种岩石脆性破裂过程中微破裂释放的弹性能的频数与能级特征相似, 无法区别二者破裂机制。然而, 累计曲线法结果显示, 砂岩存在裂纹分类参数累计和线性增长 ($k=0.66$)、非线性增长 (k 降低至 0) 和非线性降低 (k 降低至 -0.37) 等 3 个阶段, 而花岗岩仅存在线性增长 ($k=0.83$) 和非线性增长 (k 降低至约 0.5) 两个阶段。微观结构显示, 破坏砂岩的剪切带由翼型张拉裂纹组成, 暗示张拉裂纹发育先于剪切裂纹发育。综合分析表明, 张拉裂纹发育首先主控砂岩的变形, 随后剪切裂纹发育增强, 直至第 3 阶段剪切裂纹发育主控并导致剪切破坏; 而花岗岩在变形第 2 阶段受张拉裂纹发育主控并发生劈裂破坏。基于声发射监测技术, 裂纹分类参数累计曲线法有效识别了单轴压缩条件下的两种基本破裂模式, 为识别复杂应力条件下岩石的脆性破裂过程和机制提供了简单途径。

关键词: 声发射; 微裂纹发育; 裂纹类型; 破裂过程; 破裂机制

中图分类号: TU458 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2023)03-0014-11

Characterization of brittle failure modes of rocks under uniaxial compression using acoustic emission

FAN Caiyuan¹, MENG Fanbao^{1,2}, LIU Jinfeng^{1,2,3}

1. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
2. Guangdong Provincial Key Lab of Geodynamics and Geohazards, Zhuhai 519082, China
3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China

Abstract: Monitoring and distinguishing the development of microcracks in deformed rocks are helpful to understand the likely brittle failure mechanisms, which is essential for preventing rock engineering disasters. In this study, uniaxial compression experiments were performed on sandstone and granite samples to study the failure processes inversely by acoustic emission (AE) monitoring. Macroscopically, the sandstone samples exhibited a shear faulting mode while the granite samples an axial splitting

* 收稿日期: 2022-07-15

录用日期: 2022-09-05

网络首发日期: 2023-02-27

基金项目: 广东省自然科学基金(2021A1515012202)

作者简介: 范财源(1999年生), 男; 研究方向: 岩石破坏过程及声发射; E-mail: fancy@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 刘金锋(1985年生), 男; 研究方向: 高温高压岩石力学; E-mail: liujinf5@mail.sysu.edu.cn

mode. These two modes, however, cannot be clearly distinguished using the traditional AE methods via hits and the b value, as these parameters can reflect the frequency and energy level characteristics of elastic energy released during the cracking process only. Therefore, we propose a crack cumulative summation curve method, following the RA-AF crack classification method, which can successfully inverse and distinguish the possible different microcracking processes in deformed rock from the pure tensile microcrack development ($k=1$) to the pure shear microcrack development ($k=-1$) according to the variance of curve slope k value (i.e., $-1\sim 1$). Inversed results show that during deformation to brittle failure, the tensile microcracks development first dominates the deformation of sandstone (i.e., $k=0.66$), followed by a transition between the development of the tensile and shear microcracks (i.e., k decreased to 0), and finally by strongly developed shear microcracks (i.e., k decreased to -0.37 from 0) dominating shear faulting. In contrast, the granite sample showed a macroscopic axial splitting mode, as no strong development of shear microcracks was observed, i.e., k remains greater than 0, decreasing to 0.5 from 0.83. The combined effects suggest these two failure modes can be clearly distinguished by strongly developed shear microcracks in rock near failure. Microscopic observation performed on the failure sandstone clearly illustrated wing tensile cracks in the shear fracture zone. This supports our inversed results that macro shear fracturing of sandstone was formed upon the initiation of the tensile microcracks, followed by the development of the shear microcracks. This suggests AE monitoring using our proposed crack cumulative summation curve method can properly distinguish the development of microcracks and accordingly failure modes in the deformed rocks, and may be used for further study on understanding the failure process of rocks upon complex loading conditions.

Key words: acoustic emission (AE); microcracks development; crack mode; failure process; failure mechanism

岩石的脆性破坏是工程地质灾害中的重要问题, 识别其破坏机制有助于灾害防治。岩石在单轴压缩条件下表现出多种破裂模式(Basu et al., 2013; Yin et al., 2018), 其中轴向劈裂和剪切破坏作为常见破坏形态(伍法权等, 2021), 其破裂机理已被研究多年(Peng et al., 1972; Bažant et al., 1997; Szwedzicki, 2007; Fakhimi et al., 2015)。由于岩石内部存在着大量孔隙、矿物解理和原生裂隙等可能缺陷, 其变形破坏被认为是内部微裂纹发育、扩展、汇聚直至宏观断裂的过程(肖洪天等, 2001), 微观不连续性(Lei et al., 2004; Mahabadi et al., 2014)和应力诱发的微破裂(Li et al., 2015)对岩石试件的破裂模式有重要影响。岩石的轴向劈裂现象被认为是原始裂纹缺陷发生剪切破裂(II型裂纹)时, 张拉裂纹(I型裂纹)在尖端成核并呈翼型形态扩展的结果, 翼型裂纹扩展朝着压缩应力轴增长, 形成轴向贯通面(Holzhausen et al., 1979; Horii et al., 1985)。数值模拟表明(Fakhimi et al., 2015), 轴向劈裂破坏也受控于单轴压缩试验中加载板的刚度、岩石试件与加载板之间的摩擦系数等条件。剪切破坏则被解释为一系列小尺度翼型

裂纹扩展并出现汇聚作用的结果(Horii et al., 1985), 是张拉微裂纹发育、扩展、汇聚的宏观表现(Healy et al., 2006)。Li et al. (2015)对岩石单轴压缩过程进行了三维多尺度高分辨率数值模拟, 破裂模式形态学的详细研究支持了这一观点。然而, 已有的破裂机理模型和数值模拟研究, 缺少实验室试验中真实岩石试件破坏过程的详细认识和验证。

声发射是岩石内部微破裂行为以弹性波形式释放应变能的现象, 为识别岩石材料变形过程中的微破裂行为和破裂机制提供了丰富的信息(Lockner, 1993)。基于声发射定位技术, Townend et al. (2008)和Fortin et al. (2009)研究了常规三轴条件下砂岩表现出脆性剪切断裂和延性压实带等破坏模式(Wong et al., 2012)的微破裂空间分布特征。基于声发射裂纹信息参数RA与AF值(Ohno et al., 2010; Aggelis et al., 2011)和矩张量反演的震源机制解(Ohtsu, 1991), 王春来等(2019)研究了砂岩试件的单轴压缩变形过程, 认为存在3个裂纹演化阶段, 前两个阶段以张拉裂纹发育为主, 最后阶段以剪切裂纹发育为主, 并主控试件破坏。储超群

等(2021)发现花岗岩在单轴压缩变形过程中,张拉裂纹所占百分比增加,主控了试件岩爆破坏。Zhao et al.(2021)和 Yao et al.(2019)分析了砂岩和煤岩表现出不同破裂模式时的裂纹类型差异,表明剪切破坏为特征的试件在变形过程中有最多的剪切裂纹声发射信号。这些研究表明,基于声发射信号的裂纹类型提取与岩石试件破裂模式之间有较高一致性,有效提高了对岩石内部微裂纹发育特征和破裂机制的认识。

然而,采用声发射定位技术(Lockner et al., 1991;艾婷等,2011;李天斌等,2015)和矩张量反演方法(王春来等,2019;储超群等,2021)识别岩石的破坏过程及其破坏模式,依赖于多个传感器(至少需4个传感器)的声发射信号监测,其实验操作及数据处理过程较为复杂(Ohtsu, 1991),如何使用单个传感器监测数据有效识别岩石的破坏模式则成为一个重要研究方向(Du et al., 2020; Zhang et al., 2020)。其中,仅依赖于一个传感器监测数据的RA-AF裂纹分类准则在理解破坏模式研究中被广泛应用(Yao et al., 2019; Zhao et al., 2021),但当前仍局限于计算岩石变形过程中不同阶段的裂纹信号数量或占比(Triantis, 2018; Muñoz-Ibáñez et al., 2021; 储超群等, 2021),以此获得大致的裂纹发育过程,这种阶段划分具有一定主观性且可能忽略了脆性剧烈破坏短暂过程中的裂纹发育行为。此外,单轴或三轴压缩条件下岩石脆性剪切破坏过程被推测存在张拉微裂纹大量发育及其相互作用(Li et al., 2015; Healy et al., 2006),但缺乏更多的实验观测验证。因此,有必要提出有效的声发射方法,区分识别岩石破坏前的关键微裂纹发育过程,并辅助识别轴向劈裂破坏与剪切破坏(Basu et al., 2013; 伍法权等, 2021)。

砂岩(邹才能等,2012)和花岗岩(Zhang et al., 2019)作为重要资源储层岩石,不同条件下的力学特性与破坏机制已有大量研究,然而在单轴压缩条件下,其破裂机制仍未被较好地识别,特别是如何基于声发射信号进行识别。因此,本文针对这两种岩石进行单轴压缩实验,并使用声发射技术监测岩石变形破坏过程。在分析了常用声发射特征参数的基础上,基于RA-AF裂纹分类准则提出一种简单有效的分析方法,即裂纹分类参数累计曲线法,以期更好地推断并识别岩石变形过程中的张拉裂纹和剪切裂纹发育行为,从而理解岩石脆性破裂机制。

1 样品与实验

本文使用砂岩和花岗岩圆柱体样品各至少4个进行实验和分析,重复样品实验结果相似,选择代表性样品展示裂纹分类参数累计曲线法的有效性以及关于破坏模式识别的新见解。砂岩样品高度56.9 mm,直径25.0 mm,密度2.21 g/cm³,孔隙率为17.5%,纵波波速为2 488 m/s。其矿物成分以石英、高岭石和钾长石为主,含少量黑云母。花岗岩样品高度50.2 mm,直径24.9 mm,密度2.65 g/cm³,孔隙率为0.6%,纵波波速为5 001 m/s。其矿物成分以钠长石、钾长石和石英为主,含少量金云母。试件高径比及加工精度满足《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)。试验加压设备采用MTS E45.305型号万能材料试验机,最大荷载300 kN,试验采用0.005 mm/s位移速率(苏承东等, 2009; 刘泉声等, 2018)加载,直至试件破坏。试件应变由电阻应变片测量,试件表面粘贴4对竖横应变片,取测量均值得到轴向应变 ε_1 和横向应变 ε_2 ,根据 $\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_2$ 得到体积应变 ε_v 。声发射监测采用北京软岛时代科技有限公司研发的DS5-8型号声发射仪,采集试件变形过程中内部的微破裂信号。用硅脂在试件两侧各黏合固定1个RS-2A型传感器,中心频率为150 kHz,频率范围为50~400 kHz。前置放大器设为40 dB增益,信号采样率为3 MHz。依据测试结果,声发射信号背景噪音小于5 mV,精度足以满足本研究需求。原始波形经50~400 kHz带通滤波(与传感器频带一致),提取参数时砂岩试件的阈值设置为20 mV,花岗岩试件则设置为35 mV。采用两个传感器通道可避免某一个传感器在试验过程中出现松动而信号缺失,下文无特别说明时,以其中一个通道的数据进行分析展示。

2 岩石的脆性破裂差异

砂岩和花岗岩的应力应变曲线见图1,其中砂岩受力变形过程表现出典型的压密、弹性段、微破裂稳定至非稳定发展特征,在应力达到峰值后迅速破坏,表现出典型脆性破坏特征。砂岩峰值强度为29.1 MPa,花岗岩为178.2 MPa。相比砂岩,花岗岩强度高约6倍,轴向应变曲线更加线性,表现出更强的脆性,体积应变则在更高的应力水平才发生膨胀行为。实验后两个试件的破裂形态不同(图2),砂岩表现出单斜面剪切破坏,花岗岩则为轴向劈裂破坏。由于花岗岩分裂为多个

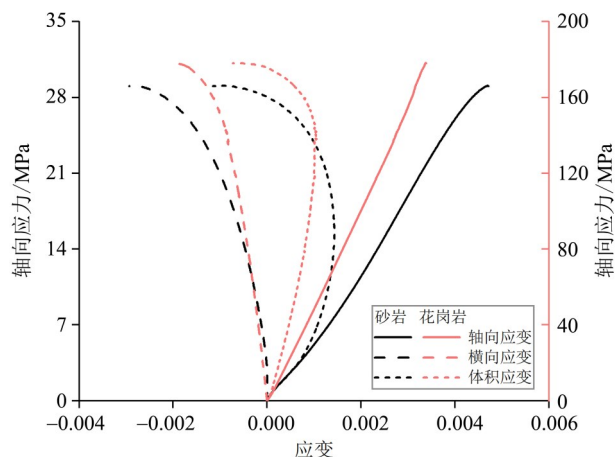


图1 砂岩和花岗岩试件的单轴压缩应力-应变曲线

Fig. 1 The stress-strain curves under uniaxial compression loading for sandstone and granite samples



图2 单轴压缩破坏后岩石照片

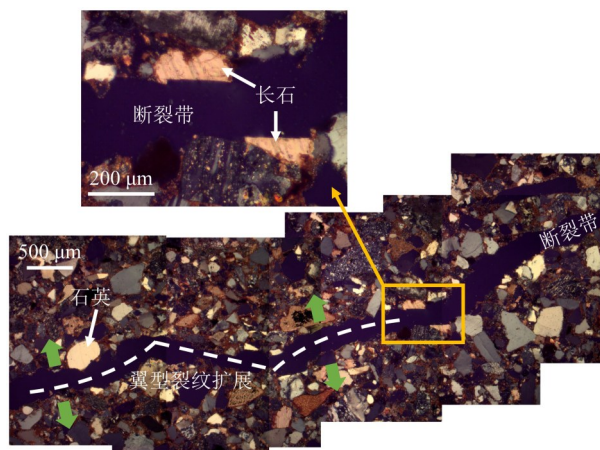
Fig. 2 Photographs of the failure samples after uniaxial compression showing (a) shear faulting of sandstone and (b) axial splitting of granite

试件块(图2b花岗岩为试件块拼凑而成),其断裂带形态的显微观察意义不大,因此仅对砂岩垂直剪切断裂带的纵剖面进行薄片显微观察(图3)。砂岩的剪切断裂带存在典型的翼型张拉裂纹扩展形态和具有位移错动特征的矿物剪切形态,可观察到长石矿物断裂,而石英颗粒基本保持完整。

尽管砂岩和花岗岩的应力应变曲线有一定差异,表明了岩石内部微破裂过程不同,但不能明确揭示破裂模式差异的本质。因此,下面将基于单轴压缩实验过程中的声发射监测,分析识别两种破裂模式背后的机制差异。

3 声发射特征参数演化

声发射基本特征参数包括幅值、撞击数、能



矿物断裂海和翼型断裂,左右方向为压缩应力方向。

图3 破坏砂岩纵剖面的剪切断裂带显微形态(正交偏光)
Fig. 3 Microscopic images of the sandstone failure sample under orthogonal polarized microscope, showing wing cracks and mineral fractures in the shear fracture zone

量和频率等,反映了岩石变形过程弹性能释放产生的声波的多个维度特征,且参数之间具有一定相关性(张艳博等,2016)。由于撞击数直接反映了岩石内部微破裂的活动特征,因此以撞击数参数为例进行分析。图4展示了砂岩和花岗岩在单轴压缩过程中的声发射累计撞击数和撞击率(每秒内的撞击数)结果,表明砂岩和花岗岩有相似的撞击数信号增长趋势。随着轴向荷载的增加,累计撞击数在前期较长时间内增长缓慢,撞击率较低,表明岩石内部微破裂活动非常少,大致对应了裂隙压密和弹性变形阶段。随后撞击率以指数线性趋势增长,累计撞击数以非线性趋势逐渐快速增长,指示了岩石从稳定裂纹发育到不稳定裂纹发育的微破裂活动特征。在岩石破坏后,累计撞击数不再快速增长,保持稳定。

累计撞击数反映了微破裂活动的数量,图4显示花岗岩破坏后累计撞击数比砂岩高约11倍,表明在单轴压缩过程中花岗岩内部的微破裂活动比砂岩更为强烈。这种差异可能源于岩性及结构的差异,花岗岩为结晶岩,且以长石和石英等硬质矿物为主,变形主要伴随矿物晶内或粒间微裂纹发育,微破裂释放的弹性波更易传播并被监测。而后者为沉积岩,高岭石黏土矿物形成的胶结结构(见图3)一定程度上降低了矿物粒间或晶内微破裂,弹性波释放继而减少。然而,由于撞击数增长过程相似,破裂机制的差异不能被阐明。

为进一步分析微破裂活动差异,采用描述破裂活动震级-频度关系式(Scholz,1968a)的 b 值参数

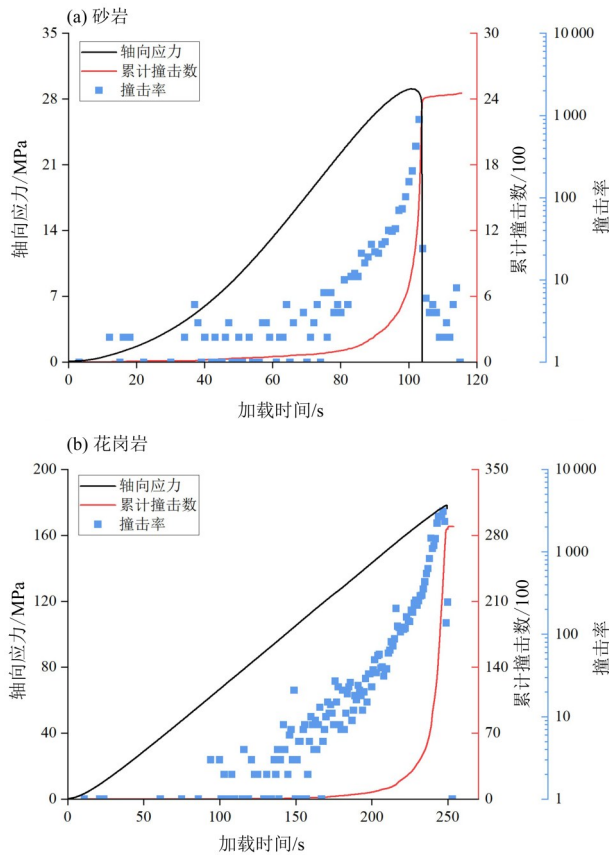


图4 砂岩和花岗岩轴向应力与声发射撞击数信号的响应
Fig. 4 Development of axial stress and AE hits (and hit rate) with loading time measured for (a) sandstone and (b) granite samples

表征岩石试件破坏过程。 b 值指示了一定时间内岩石内部微破裂活动的强弱。 $b > 1$ 表明此时间段微破裂活动尺度较小且稳定, $b < 1$ 则表明大尺度微破裂信号占比大,微破裂相互作用剧烈,常作为岩石失稳破裂的前兆(Lei et al., 2000)。采用最大似然法评估 b 值及其标准误差(Shi & Bolt, 1982),计算方法见公式(1)和(2)。计算窗口取撞击数总量的10%,即砂岩为245个,花岗岩为2 890个,移动步长为窗口的一半。

$$b = \frac{\log_{10} e}{(\bar{M} - M_c)}, \quad (1)$$

$$\sigma_b = \frac{b^2}{\log_{10} e} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}{n(n-1)}}, \quad (2)$$

式中 b 为估算参数; e 为自然指数, \bar{M} 为信号窗口内的平均震级(震级 M 以 $A/20$ 作为替代, A 为信号幅值), M_c 为最小震级, M_i 为信号窗口内第 i 个信号的震级, σ_b 为 b 值标准误差, n 为计算窗口撞击数。

岩石临界失稳前的破坏过程对破裂模式有重

要影响(Davidsen et al., 2021),因此基于图4的撞击数结果,在图5仅展示了2个试件在临近峰值以及峰后区域的 b 值和能率(每0.5 s声发射信号的能量和)。总体上,砂岩(图5a)的 b 值相比花岗岩(图5b)更高,能率则更低。砂岩和花岗岩的 b 值在误差线范围外均显示出先小幅下降(见图中箭头标记,其中花岗岩有2次)再上升的过程,最终在破坏前大幅降低至1以下,即砂岩 b 值从 $1.56(\pm 0.10)$ 降低至 $0.85(\pm 0.05)$,花岗岩 b 值从 $1.13(\pm 0.02)$ 降低至 $0.70(\pm 0.01)$ 。能率与 b 值下降有很好的对应关系, b 值下降时,能率升高,并在 b 值大幅降至最低时,能率增至最大。因此,每一次 b 值下降代表大尺度微破裂活动增多的同时,也指示了微破裂释放的弹性能增大。 b 值和能率随加载时间的变化表明了砂岩受力变形过程伴随的微破裂活动尺度相比花岗岩更弱。两者在破坏前局部区域临近失效的裂纹缺陷产生一次或两次相对大尺度的微破裂活动,但试件整体变形仍然保持稳定。当临近破坏时, b 值降到最低,高震级高能量的微破裂活

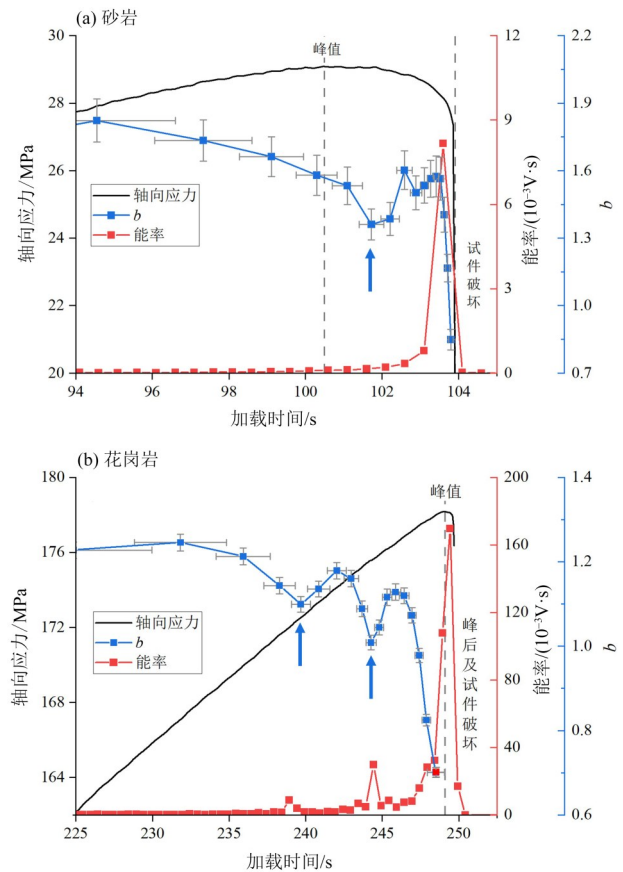


图5 砂岩和花岗岩临近峰值应力及峰后的 b 值和能率特征
Fig. 5 Development of axial stress, energy rate, and b value with loading time at an interval between near and post failure measured for (a) sandstone and (b) granite samples

动显著增加, 剧烈的裂纹扩展、汇聚作用形成宏观贯通面, 导致试件完全失稳破裂。

前人对岩石破坏失稳前 b 值下降现象的物理机制已有一定认识(Lei et al., 2000; Wu et al., 2017; Huang et al., 2021), 一种可能的物理过程是微裂纹从张拉型为主转为剪切型为主(Lei et al., 2000), 大量微裂纹信号在时空分布中存在团簇现象(李浩然等, 2014; Davidsen et al., 2021), 并以剪切带的形态出现(Wu et al., 2017)(图6)。然而, 本文花岗岩存在显著 b 值下降却表现为宏观轴向劈裂破坏, 因此该物理解释并不具有唯一性。另一种合理解释(Lei et al., 2000)是岩石处于不稳定受荷变形状态时, 裂纹扩展相互作用显著增强, 从而导致短时间内大尺度裂纹扩展、汇聚行为增多, 表现为 b 值下降, 而与裂纹类型和空间团簇特征无关。因此, 尽管 b 值演化及其可能物理机制显示了两种岩石的微破裂活动的强度变化, 但没有显著特征揭示出破裂机制的差异。下面将基于声发射信号的裂纹类型, 提出一种分析微裂纹发育过程的有效方法, 以识别砂岩剪切破坏和花岗岩轴向劈裂破坏的机理差异。

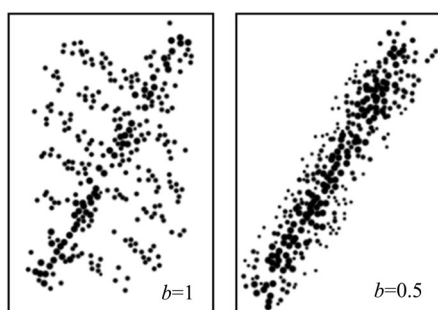


图6 不同 b 值状态下微破裂(实心点)空间分布特征示意图(根据Wu et al., 2017修改)

Fig. 6 Schematic diagram of spatial distribution of microcracks (indicated by dot) in deformed rock at different b values (after Wu et al., 2017)

4 微裂纹发育过程的声发射识别

4.1 裂纹分类参数累计曲线法原理

岩石内部的微裂纹行为可简化为张拉裂纹(I型)和剪切裂纹(II型), 两种裂纹的发育过程对宏观破裂有重要控制作用。声发射信号携带着声发射震源特征, 基于多通道监测的简化矩张量法可反演震源的时空位置和破裂类型(Ohtsu, 1991), 从而认识岩石破坏过程和控制机理(Lockner et al., 1991; Lockner, 1993; Lei et al., 2000; Davidsen et al.,

2021)。然而, 矩张量方法依赖于多传感器监测且其处理方法复杂。部分学者探究了如何基于单个通道声发射数据分析岩石的破坏过程(Yao et al., 2019; Zhao et al., 2021), 基于宏观特定断裂(剪切或张拉)过程的识别和声发射信号的比对, 发现张拉裂纹具有低RA值(上升时间/幅值, ms/V)和高AF值(振铃计数/持续时间, kHz), 而剪切裂纹具有高RA值和低AF值(Ohno et al., 2010; Aggelis et al., 2011), 并提出RA-AF裂纹分类准则识别声发射信号裂纹类型, 其示意图见图7。该简化裂纹分类方法的有效性得到了矩张量反演结果的验证(Ohno et al., 2010; 王春来等, 2019; 储超群等, 2021), 因此也广泛应用于分析裂纹发育过程(Yao et al., 2019; Zhao et al., 2021)。

然而, 分隔线的选择直接影响裂纹类型的识别(图7), 多位学者做了深入分析(Du et al., 2020; Zhang et al., 2020; Zhu et al., 2022)。Ohno et al. (2010)对比了矩张量反演和RA-AF参数法, 表明RA:AF=1:200可获得最准确的裂纹分类结果。Zhang et al. (2020)最近提出使用声发射主频特征获得RA:AF分隔线的最佳值, 表明压缩条件下脆性岩石的分割线应在1:100~1:500范围中选取。因此, 本文选择1:200分割线将声发射信号划分为两种裂纹类型, 该依据已在页岩(Meng et al., 2016; Wang et al., 2017)和花岗岩(Dong et al., 2021)等岩石脆性破坏中得到应用。

AF: 振铃计数 / 持续时间; RA: 上升时间 / 幅值

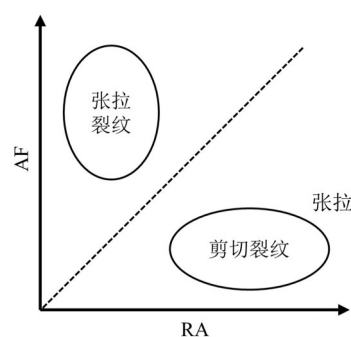


图7 RA-AF裂纹分类方法示意图

Fig. 7 Schematic diagram showing RA-AF crack classification (RA: rise time/amplitude, AF: count/duration)

在上述RA-AF裂纹分类基础上, Meng et al. (2016)提出将张拉裂纹声发射信号标记为1, 剪切裂纹声发射信号标记为-1, 按照声发射时间序列将信号标记值累加, 得到加载过程的裂纹信号累计求和结果。Meng et al. (2016)将其与轴向应变相

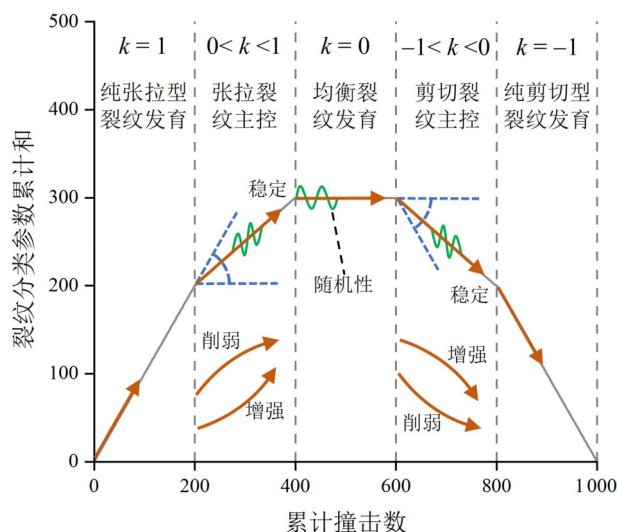
联系,发现在临近破裂前累计和降低至负值,进而判断该时期岩石试件最终受剪切裂纹控制破坏。然而该方式仅能显示裂纹发育趋势,不能阐明张拉和剪切裂纹对岩石变形破坏的主控作用及其如何转变。因此,本文在 Meng et al.(2016)的基础上提出裂纹分类参数累计曲线法,将累计和绘制在累计撞击数(非时间维度)作为横轴的空间域中,累计撞击数代表微裂纹行为的先后序列维度,累计和趋势显示了张拉裂纹和剪切裂纹的数量增长特征,反映出两种裂纹的竞争发育过程,因此能够识别两种微裂纹在发育、扩展、汇聚等整个过程中对岩石变形的主控作用。

图 8 显示了裂纹累计曲线可推断出的 5 种裂纹发育过程,依据斜率 k 值大小($-1 \sim 1$),依次为:

A) $k=1$, 纯张拉型裂纹发育,即岩石变形过程中仅有张拉裂纹发育,没有剪切裂纹发育;

B) $0 < k < 1$, 张拉裂纹主控,张拉裂纹发育的数量大于剪切裂纹,对岩石的变形起到主控作用。在该过程中,根据 k 值恒定、增加或降低可分为稳定型和不稳定型,即根据张拉裂纹发育速率相比剪切裂纹恒定、增强或削弱,对应于稳定、增强或削弱的张拉裂纹主控过程;

C) $k=0$, 均衡裂纹发育,即两种裂纹发育速率相同,裂纹信号数量也相当,对试件变形的贡献相同;



橙色箭头指示累计和增长趋势,蓝色线指示趋势的斜率范围,绿色波浪线指示曲线中的小尺度随机性。

图 8 裂纹分类参数累计曲线示意图

Fig. 8 Schematic diagram of crack cumulative summation curve showing inverted five types of microcrack developments with different k values

D) $-1 < k < 0$, 剪切裂纹主控,剪切裂纹发育的数量大于张拉裂纹,对岩石的变形起到主控作用,也可分为稳定、增强或削弱 3 种状态;

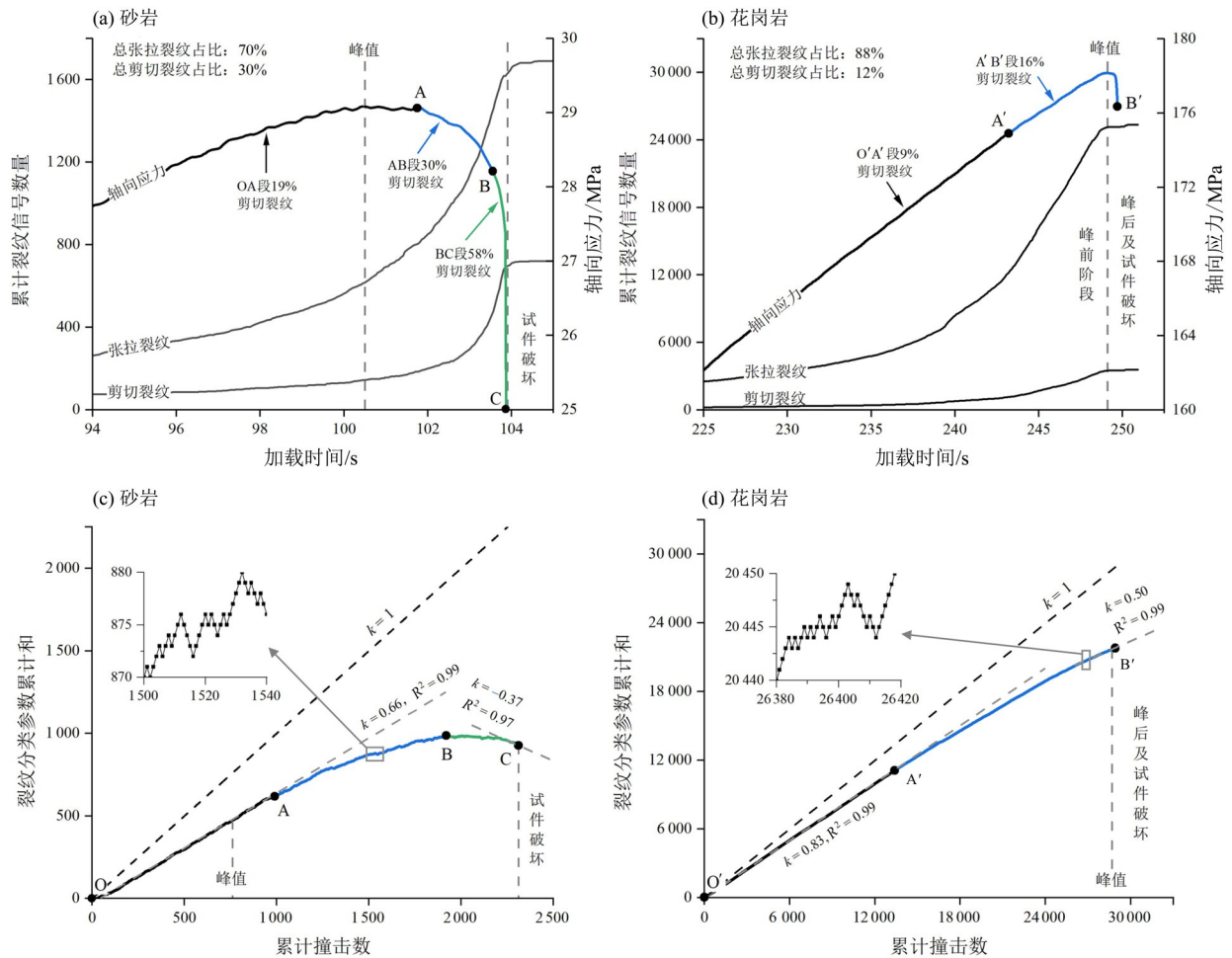
E) $k=-1$, 纯剪切型裂纹发育,即岩石变形过程中仅有剪切裂纹发育,没有张拉裂纹发育。

因岩石具有较强的异质性,受力变形时两种裂纹常共存共同发育,可以推测上述 A 和 E 型过程在单轴压缩条件下很难存在, B~D 型过程则是主要形式。此外,该累计曲线在微裂纹活动先后序列中获得,而试件内部微裂纹的时空分布具有一定随机性(Scholz, 1968b; Davidsen et al., 2021),在曲线局部放大时将呈现增加和减小交替的过程(见图 8 绿色波浪线),这种微小浮动不具有良好稳定的指示作用,因此不作为微裂纹发育特征过程的识别依据。

4.2 微裂纹发育过程分析结果

砂岩和花岗岩试件张拉裂纹和剪切裂纹信号累计数量随着加载时间的演化分别见图 9a 和图 9b,为分析临近破坏过程,图中仅展示临近峰值以及峰后区域。两种裂纹的数量在砂岩和花岗岩变形过程中均在非线性增长,且张拉裂纹数量保持超过剪切裂纹。计算表明,整个破坏过程中砂岩张拉裂纹信号占比 70%,剪切裂纹信号占比 30%,而花岗岩则分别为 88% 和 12%,张拉裂纹占比均大于剪切裂纹,但在岩石破坏前的一定时间内,两种裂纹信号的相对发展需要进一步确认。

图 9c 和图 9d 分别显示了砂岩和花岗岩在受力变形至破坏整个过程的裂纹分类参数累计曲线结果。砂岩以峰后 A 和 B 点为分界划分为 3 个特征阶段(对应应力阶段见图 9a),花岗岩则以峰前 A' 点为分界划分为 2 个特征阶段(对应应力阶段见图 9b)。砂岩 OA 段包括整个峰前和短暂峰后阶段,累计曲线保持线性增长,斜率 $k=0.66$ (拟合相关系数 $R^2=0.99$)。在 AB 段 k 值从 0.66 降低至 0,累计曲线以非线性趋势增长。在 BC 段 k 值从 0 缓慢降低至 -0.37 ($R^2=0.97$),累计曲线以非线性趋势降低。根据图 8 的 5 种微裂纹发育过程示意图,砂岩经过了稳定的张拉裂纹发育主控阶段、削弱的张拉裂纹发育主控阶段(即剪切裂纹发育在增强)和增强的剪切裂纹发育主控阶段。花岗岩累计曲线在 O'A' 段斜率 $k=0.83$ ($R^2=0.99$),保持线性增长;在 A'B' 段(含短暂峰后) k 值从 0.83 降低至 0.50($R^2=0.99$),以非线性趋势增长,表明花岗岩经历了稳定的张拉裂纹发育主控阶段和削弱的张拉裂纹发



(a)和(b)为累计裂纹信号对轴向应力的响应,分段点AB和A'来自于(c)和(d),(c)和(d)为裂纹分类参数累计曲线。

(a) and (b): Development of axial stress and cumulative crack signal number with loading time.

(c) and (d): Crack cumulative summation curve .

图9 砂岩和花岗岩的声发射微裂纹信号计算结果

Fig. 9 Calculation of microcrack signals for sandstone (a, c) and granite (b, d)

育主控阶段。根据上述特征阶段划分,分段裂纹信号占比计算显示,砂岩剪切裂纹信号占比在OA、AB和BC段分别为19%、30%和58%(见图9a),花岗岩剪切裂纹信号占比在O'A'和A'B'段分别为9%和16%(见图9b标注),表明砂岩剪切裂纹主控阶段同时对应了剪切裂纹信号占比超过张拉裂纹,这进一步证明了裂纹分类参数方法的有效性,很好地解释了砂岩表现为剪切破坏而花岗岩为劈裂破坏的宏观特征。

相比花岗岩,砂岩在第1阶段张拉裂纹发育对变形的主控作用更弱(斜率为0.66,小于0.83);反之,剪切裂纹发育则稍强。在第2阶段张拉裂纹和剪切裂纹共同发育并竞争的过程中,砂岩的剪切裂纹发育增强至与张拉裂纹相当的水平,而花岗岩仅有小幅增强,最终在张拉裂纹主控阶段发生

劈裂破坏。砂岩则完全进入第3阶段,剪切裂纹发育对试件变形破坏发挥主控作用,与宏观剪切破坏特征一致,分段裂纹信号占比也支持了这一推断。

因此,裂纹分类参数累计曲线法推断显示了砂岩和花岗岩整个受力变形过程中张拉裂纹和剪切裂纹的发育过程,累计曲线的斜率指示了两种裂纹发育对岩石变形的控制作用,斜率的变化能够清楚识别不同的裂纹发育主控阶段之间的转变,有效识别了砂岩和花岗岩表现出不同宏观破裂模式的微观裂纹发育过程差异。分析结果表明,剪切裂纹发育增强并最终能否对岩石变形发挥主控作用(即是否存在砂岩裂纹累计曲线的BC段),是岩石脆性破坏表现出单斜面剪切断裂或劈裂的判别依据。然而,该观点仅建立在砂岩和花岗岩多

个单轴压缩的实验数据上, 累计曲线的 k 值变化对二者破坏模式的反映具有普适性, 对于其他岩石是否仍然适用, 仍需更多试验研究。

此外, 砂岩剪切裂纹发育主控阶段仅短暂存在于峰后临近破坏前, 在此之前试件变形长期受张拉裂纹发育主控, 指示出强烈的剪切裂纹发育可能是长期张拉裂纹发育的结果, 大量张拉裂纹相互作用促进剪切裂纹的剧烈发育。图3破坏后砂岩的显微结构也显示剪切带由翼型张拉裂纹组成, 暗示张拉裂纹对形成宏观剪切断裂的促进作用。因此, 基于微观结构特征, 结合本文方法的推断结果, 支持了张拉微裂纹大量发育并相互作用促进剪切裂纹发育, 继而导致宏观剪切破坏的破裂过程模型(图10)。

5 结 论

为识别岩石的脆性破裂机制, 本文结合应力-应变、微观观察和声发射数据, 对比了多种声发射参数特征, 对砂岩和花岗岩在单轴压缩条件下的变形破裂过程和破裂机制进行了详细分析, 得到以下结论:

1) 单轴压缩后, 砂岩和花岗岩分别表现为单斜面剪切破坏和轴向劈裂破坏, 微观结构显示砂岩剪切带由翼型张拉裂纹组成。声发射撞击数、 b 值和能率参数表明, 变形过程中花岗岩的微破裂

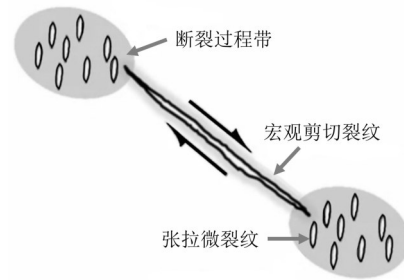


图10 破裂过程示意图(修改自Li et al., 2015), 显示张拉微裂纹相互作用诱发宏观剪切裂纹
Fig. 10 Schematic illustration of fracturing process (after Li et al., 2015), showing that the macro shear fracturing is induced by tensile microcracks interaction

活动相比砂岩更加剧烈, 但和应力应变数据类似, 无法识别出两种岩石的破裂机制。

2) 基于声发射RA-AF裂纹分类准则, 首次提出了裂纹分类参数累计曲线法, 依据曲线斜率变化, 可推断出完整的5种裂纹发育过程。分析表明, 砂岩经历3个阶段: 稳定的和削弱的两个张拉裂纹主控阶段, 以及增强的剪切裂纹主控阶段, 而花岗岩仅经历了前2个阶段, 这种阶段差异有效区分了宏观剪切破坏和劈裂破坏。因此, 裂纹分类参数累计曲线法弥补了当前识别岩石破裂机制的声发射单通道参数方法空缺, 为研究复杂应力条件下岩石的破裂过程提供了简单途径。

参考文献:

- 艾婷, 张茹, 刘建锋, 等, 2011. 三轴压缩煤岩破裂过程中声发射时空演化规律[J]. 煤炭学报, 36(12): 2048-2057.
- 储超群, 吴顺川, 曹振生, 等, 2021. 基于声发射技术的花岗岩破裂特征试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 52(8): 2919-2932.
- 李浩然, 杨春和, 刘玉刚, 等, 2014. 花岗岩破裂过程中声波与声发射变化特征试验研究[J]. 岩土工程学报, 36(10): 1915-1923.
- 李天斌, 陈子全, 陈国庆, 等, 2015. 不同含水率作用下砂岩的能量机制研究[J]. 岩土力学, 36(S2): 229-236.
- 刘泉声, 魏莱, 雷广峰, 等, 2018. 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, 40(10): 1782-1789.
- 苏承东, 高保彬, 南华, 等, 2009. 不同应力路径下煤样变形破坏过程声发射特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 28(4): 757-766.
- 王春来, 侯晓琳, 李海涛, 等, 2019. 单轴压缩砂岩微观裂纹动态演化特征试验研究[J]. 岩土工程学报, 41(11): 2120-2125.
- 伍法权, 乔磊, 管圣功, 等, 2021. 小尺寸岩样单轴压缩试验尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 40(5): 865-873.
- 肖洪天, 周维垣, 2001. 脆性岩石变形与破坏的细观力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 20(2): 151-155.
- 张艳博, 梁鹏, 田宝柱, 等, 2016. 花岗岩灾变声发射信号多参量耦合分析及主破裂前兆特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 35(11): 2248-2258.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2013. GB/T 50266—2013 工程岩体试验方法标准[M]. 北京: 中国计划出版社.
- 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等, 2012. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 33(2): 173-187.
- AGGELIS D G, SOULIOTI D V, SAPOURIDIS N, et al., 2011. Acoustic emission characterization of the fracture process in fibre reinforced concrete[J]. Construction and

- Building Materials, 25(11): 4126–4131.
- BASU A, MISHRA D A, ROYCHOWDHURY K, 2013. Rock failure modes under uniaxial compression, Brazilian, and point load tests[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 72(3): 457–475.
- BAŽANT Z P, XIANG Y, 1997. Size Effect in Compression Fracture: Splitting Crack Band Propagation[J]. Journal of Engineering Mechanics, 123(2): 162–172.
- DAVIDSEN J, GOEBEL T, KWIAŁTEK G, et al., 2021. What controls the presence and characteristics of aftershocks in rock fracture in the lab? [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 126(10): e2021JB025539.
- DONG L, CHEN Y, SUN D, et al., 2021. Implications for rock instability precursors and principal stress direction from rock acoustic experiments[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 31(5): 789–798.
- DU K, LI X, TAO M, et al., 2020. Experimental study on acoustic emission (AE) characteristics and crack classification during rock fracture in several basic lab tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 133: 104411.
- FAKHIMI A, HEMAMI B, 2015. Axial splitting of rocks under uniaxial compression [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 79: 124–134.
- FORTIN J, STANCHITS S, DRESEN G, et al., 2009. Acoustic emissions monitoring during inelastic deformation of porous sandstone: Comparison of three modes of deformation [J]. Pure and Applied Geophysics, 166(5): 823–841.
- HEALY D, JONES R R, HOLDSWORTH R E, 2006. Three-dimensional brittle shear fracturing by tensile crack interaction[J]. Nature, 439(7072): 64–67.
- HOLZHAUSEN G R, JOHNSON A M, 1979. Analyses of longitudinal splitting of uniaxially compressed rock cylinders [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 16(3): 163–177.
- HORII H, NEMAT-NASSER S, 1985. Compression-induced microcrack growth in brittle solids: Axial splitting and shear failure[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 90(B4): 3105–3125.
- HUANG Z, GU Q, WU Y, et al., 2021. Effects of confining pressure on acoustic emission and failure characteristics of sandstone[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 31(5): 963–974.
- LEI X L, KUSUNOSE K, RAO M V M S, et al., 2000. Quasi-static fault growth and cracking in homogeneous brittle rock under triaxial compression using acoustic emission monitoring [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 105(B3): 6127–6139.
- LEI X L, MASUDA K, NISHIZAWA O, et al., 2004. Detailed analysis of acoustic emission activity during catastrophic fracture of faults in rock[J]. Journal of Structural Geology, 26(2): 247–258.
- LI G, LIANG Z Z, TANG C A, 2015. Morphologic interpretation of rock failure mechanisms under uniaxial compression based on 3D multiscale high-resolution numerical modeling[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 48(6): 2235–2262.
- LOCKNER D A, 1993. The role of acoustic emission in the study of rock fracture [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 30(7): 883–899.
- LOCKNER D A, BYERLEE J D, KUKSENKO V, et al., 1991. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite[J]. Nature, 350(6313): 39–42.
- MAHABADI O K, TATONE B S A, GRASSELLI G, 2014. Influence of microscale heterogeneity and microstructure on the tensile behavior of crystalline rocks[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 119(7): 5324–5341.
- MENG F, GE H, YAN W, et al., 2016. Effect of saturated fluid on the failure mode of brittle gas shale [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 35: 624–636.
- MUÑOZ-IBÁÑEZ A, DELGADO-MARTÍN J, HERBÓN-PENABAD M, et al., 2021. Acoustic emission monitoring of mode I fracture toughness tests on sandstone rocks [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 205: 108906.
- OHNO K, OHTSU M, 2010. Crack classification in concrete based on acoustic emission[J]. Construction and Building Materials, 24(12): 2339–2346.
- OHTSU M, 1991. Simplified moment tensor analysis and unified decomposition of acoustic emission source: Application to in situ hydrofracturing test[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 96(B4): 6211–6221.
- PENG S, JOHNSON A M, 1972. Crack growth and faulting in cylindrical specimens of chelmsford granite [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 9(1): 37–86.
- SCHOLZ C H, 1968a. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 58(1): 399–415.

- SCHOLZ C H, 1968b. Microfracturing and the inelastic deformation of rock in compression[J]. *Journal of Geophysical Research* (1896–1977), 73(4): 1417–1432.
- SHI Y, BOLT B A, 1982. The standard error of the magnitude–frequency b value[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72(5): 1677–1687.
- SZWEDZICKI T, 2007. A hypothesis on modes of failure of rock samples tested in uniaxial compression[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 40(1): 97–104.
- TOWNEND E, THOMPSON B D, BENSON P M, et al., 2008. Imaging compaction band propagation in Diemeltstadt sandstone using acoustic emission locations[J]. *Geophysical Research Letters*, 35(15): L15301.
- TRIANIS D, 2018. Acoustic emission monitoring of marble specimens under uniaxial compression. Precursor phenomena in the near–failure phase[J]. *Procedia Structural Integrity*, 10: 11–17.
- WANG M, TAN C, MENG J, et al., 2017. Crack classification and evolution in anisotropic shale during cyclic loading tests by acoustic emission[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 14(4): 930–938.
- WONG T F, BAUD P, 2012. The brittle–ductile transition in porous rock: A review[J]. *Journal of Structural Geology*, 44: 25–53.
- WU S, GE H, WANG X, et al., 2017. Shale failure processes and spatial distribution of fractures obtained by AE monitoring[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 41: 82–92.
- YAO Q, CHEN T, TANG C, et al., 2019. Influence of moisture on crack propagation in coal and its failure modes[J]. *Engineering Geology*, 258: 105156.
- YIN P F, YANG S Q, 2018. Experimental investigation of the strength and failure behavior of layered sandstone under uniaxial compression and Brazilian testing[J]. *Acta Geophysica*, 66(4): 585–605.
- ZHANG Y, ZHAO G F, 2019. A global review of deep geothermal energy exploration: from a view of rock mechanics and engineering [J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo–Energy and Geo–Resources*, 6(1): 4.
- ZHANG Z H, DENG J H, 2020. A new method for determining the crack classification criterion in acoustic emission parameter analysis[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 130: 104323.
- ZHAO K, YANG D, ZENG P, et al., 2021. Effect of water content on the failure pattern and acoustic emission characteristics of red sandstone [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 142: 104709.
- ZHU J, DENG J, CHEN F, et al., 2022. Failure analysis of water–bearing rock under direct tension using acoustic emission[J]. *Engineering Geology*, 299: 106541.

(责任编辑 秦社彩)