

高强脆性岩石多参量声发射前兆信息及破坏预警策略

陈璐^{1,2}, 董金水^{3*}, 郭利杰^{1,2}, 李庆文⁴, 乔兰⁴

¹ 矿冶科技集团有限公司, 北京, 102628

² 国家金属矿绿色开采国际联合研究中心, 北京, 102628

³ 北京科技大学未来城市学院, 北京, 100083

⁴ 北京科技大学资源与安全工程学院, 北京, 100083

摘要: 深部工程中高强脆性岩石的突发性破坏常导致严重岩体灾害, 其早期预警高度依赖可靠的前兆信号识别。然而, 现有声发射单参数预警方法难以兼顾不同岩性的破坏特征差异, 制约了预警的精准性与时效性。本文以粗粒花岗岩、细粒花岗岩和石英岩为研究对象, 结合单轴压缩试验、声发射监测试验与核磁共振孔隙结构表征, 系统揭示了岩性控制下的力学响应、破坏模式与微破裂演化机制。在此基础上, 构建了融合关联维数、b 值、振铃计数及平均能量重心频率 (AECF) 的多参量声发射前兆指标体系, 并定量分析了各参数在峰值应力前的演化规律及其物理意义。结果表明: 高脆性岩石 (细粒花岗岩和石英岩) 的 AE 前兆信号出现时间显著晚于准脆性岩石 (粗粒花岗岩), 且 AECF 对突发性破坏更为敏感; 据此提出一种岩性适配的分阶段多参数联合预警策略, 可实现对不同脆性岩体破坏的差异化判识。研究成果为深部岩体灾变风险的评价与预警提供了理论支撑与技术路径。

关键词: 高强脆性岩石; 单轴压缩; 声发射; 多参数预警

中图分类号: TU45

收稿日期: 2026-1-29

Multi-Parameter Acoustic Emission Precursory Information and Failure Early-Warning Strategies for High-Strength Brittle Rock

Chen Lu^{1,2}, Dong Jinshui^{3*}, Guo Lijie^{1,2}, Li Qingwen⁴, Qiao Lan⁴

1. BGRIMM Technology Group, Beijing 102628, China.

2. BGRIMM Technology Group, National Centre for International Research on Green Metal Mining, Beijing 102628, China.

3. School of Future City, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China.

4. School of Resources and Safety Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China.

基金项目: 国家重点研发计划 (No: 2024YFC2909500); 北京市科技新星计划 (No: 20230484242)。

作者简介: 陈璐 (1990-), 女, 博士, 高级工程师, 从事岩石力学与工程灾害防控相关研究, ORCID: 0000-0003-4076-2088, E-mail: chenlu@bgrimm.com

*通讯作者: 董金水 (1998-), 男, 在读博士, 从事岩石力学与工程灾害防控相关研究, ORCID: 0009-0000-0378-4857, E-mail: jsdong_l@163.com

Abstract: Deep engineering in high-strength brittle rocks is prone to sudden failure, which often triggers severe rock mass hazards. Early warning relies heavily on reliable identification of precursory signals. However, existing acoustic-emission (AE) single-parameter warning methods cannot simultaneously accommodate failure-feature differences among lithologies, limiting warning accuracy and timeliness. In this study, coarse-grained granite, fine-grained granite, and quartzite were investigated using uniaxial compression tests, AE monitoring, and nuclear magnetic resonance (NMR) characterization of pore structures. The lithology-controlled mechanical responses, failure modes, and microfracturing evolution mechanisms were systematically revealed. On this basis, a multi-parameter AE precursor indicator system integrating correlation dimension, b-value, ring count, and average energy centroid frequency (AECF) was established, and the pre-peak evolution patterns and physical implications of each parameter were quantitatively analyzed. The results show that precursory AE signals in highly brittle rocks (fine-grained granite and quartzite) emerge significantly later than those in quasi-brittle rock (coarse-grained granite), and AECF is more sensitive to sudden failure. Accordingly, a lithology-adaptive, stage-wise multi-parameter joint warning strategy is proposed, enabling differentiated identification of failure in rock masses with different brittleness. These findings provide a theoretical basis and a technical pathway for intelligent assessment and real-time early warning of catastrophic risks in deep rock engineering.

Key words: high-strength brittle rock; uniaxial compression; acoustic emission; multi-parameter early warning

1.引言

随着浅层矿产资源和近地表地下空间的逐渐枯竭,深部地下资源的开发已成为未来资源发展的必然战略方向(蔡美峰等,2021;何满潮等,2024b;李夕兵等,2026)。与浅部工程环境相比,深部地下工程面临着更为复杂的力学和地质条件,深部地下工程普遍呈现所谓的“三高一扰”特征(何满潮等,2022;何满潮等,2024b),即高地应力、高地温、高孔隙水压力以及开挖或采矿活动引起的强烈扰动。在这种极端条件下,地下结构的安全性与稳定性显著降低,极易诱发岩爆(Liu and Li, 2023; 何满潮等,2024a)、片帮(Li et al., 2025)、突水(Zhang et al., 2023)等灾害。

大量工程实践表明,在高弹性应变能储存和强外部扰动的耦合作用下,高强度、高脆性岩体的灾害尤为严重。典型案例包括南非金矿石英岩岩体因长期应力积累和爆破扰动引发的剧烈岩爆(Richardson and Jordan, 2002),加拿大萨德伯里盆地花岗岩地层中的开挖诱发岩爆(Morrison, 1989),以及中国锦屏二级水电站深埋引水隧洞中明显的板裂和岩爆破坏(于群等, 2014)。这些案例一致表明,高强度、高脆性岩石在深部地下环境中极易发生突发性和灾难性的破坏(He et al., 2023; Li et al., 2024)。

要有效预防和预警此类动力破坏,需从根本上理解岩石在加载与扰动过程中的损伤演化规律,尤其要关注宏观破坏前微裂隙的起裂、扩展及能量释放。花岗岩、玄武岩、辉绿岩、石英岩等高强高脆性岩石通常表现出快速的弹性储能,在被破坏时会突然释放能量(Xing et al., 2023; 王云飞等, 2024; 廖安杰等, 2025)。然而,越来越多的证据表明,破坏前兆信号具有显著的岩性依赖性特征,不同岩性岩石的前兆信号在时间尺度和物理属性上均存在明显差

异 (Zhao et al., 2018; Liu et al., 2022; 陈国庆等, 2025)。

先前的研究已证实前兆特征随岩性呈系统性变化 (Li et al., 2021; Zhuang et al., 2024; Xue et al., 2025)。致密且高脆性的岩石 (如花岗岩) 通常表现出较短的前兆发育阶段, 声发射活动集中在峰值应力附近, 并以高能爆发型事件为主; 而存在孔隙发育或原生裂的岩石则倾向于在较低应力水平下产生持续的低幅值前兆信号 (Li et al., 2021; Xue et al., 2025)。此外, 断裂机制的差异导致前兆信号在频谱和统计特征上存在显著不同 (Xue et al., 2025)。尽管如此, 现有研究多聚焦于单一岩性或单个前兆指标, 对不同损伤阶段多参数前兆演化的系统性对比研究仍较为匮乏。

在此背景下, 本研究聚焦于不同岩性的高强脆性岩石, 对比分析了其微观结构特征、力学响应及单轴加载下多类声发射前兆参数的演化规律, 选取的参数包括关联维数、b 值、振铃计数和平均能量重心频率 (AECF)。本研究旨在建立适用于不同岩性的多参数耦合预警框架, 从而为深部地下资源开发中岩体灾害的早期识别和分级预警提供理论支持和方法指导。

2 岩石试样制备与试验方法

本研究选取粗粒花岗岩、细粒花岗岩和石英岩三种高强脆性岩石作为研究对象。试样的制备标准和实验流程严格按照《岩石物理力学性质试验规程》(标准号: DZ/T 0276.1-2015) 执行。每种岩性均选取完整、致密的母岩块体, 以尽可能减小原生缺陷对试验结果的影响。沿相同取样方向钻取并加工标准圆柱试样, 以降低材料各向异性对试验结果的干扰。上下端面经精细研磨后, 端面不平整度控制在 0.02 mm 以内。

试样制备完成后统一编号: 粗粒花岗岩试样编号为 CG-1、CG-2、CG-3; 细粒花岗岩试样编号为 FG-1、FG-2、FG-3; 石英岩试样编号为 Q-1、Q-2、Q-3。其中, 选取 CG-3、FG-3、Q-3 三个试样进行核磁共振 (NMR) 试验, 以表征不同岩性岩石的内部孔隙结构, 为后续声发射前兆行为的解读提供微观结构支撑; 其余 6 个试样进行单轴压缩试验并同步开展声发射监测, 捕捉整个破坏过程中的声发射活动演化特征。

单轴压缩试验采用 MTS 816.04 岩石力学测试系统。声发射监测采用美国物理声学公司 (PAC) 制造的 PCI-2 声发射采集系统。试验前, 对加载系统和声发射监测系统的工作状态进行全面检查。

首先, 采用标准的 Hsu-Nielsen 断铅法对声发射系统进行校验。选用 HB 硬度自动铅笔, 铅芯直径 0.5mm, 裸露长度约 2.5mm, 在试样表面多个预设位置依次进行铅笔芯断裂试验, 铅笔与试样表面夹角约 30°。通过对多次断铅试验中信号幅值、到达时间及波形特征的综合比较发现, 各传感器响应结果基本一致, 说明声发射传感器工作性能满足试验要求。声发射系统的主要采集参数如下: 传感器型号为 R15a, 谐振频率为 150kHz, 阈值为 40dB, 前置放大倍数为 40dB, 外置滤波器 0 dB, 采样频率为 1MHz。之后, 按照伺服控制测试系统的操作规范, 对力传感器、位移测量系统及控制单元进行校验。结果表明, 加载系统力输出稳定、准确, 位移测量系统零点正常、线性响应良好, 控制单元运行可靠, 满足试验要求。

为减小端面摩擦效应, 试样上下端面涂抹凡士林后进行加载。并在每个试样的侧面对称安装两个声发射传感器, 一个作为主传感器, 另一个作为备用传感器, 以确保在传感器发生故障时仍能持续采集数据。传感器与试样表面之间同样涂抹凡士林, 以增强声学耦合效果,

提高声发射信号采集的可靠性。试验开始时环境温度为 27°C、相对湿度为 80%，试验过程中环境条件基本稳定。

加载过程中，首先采用力控模式进行初始预加载，当施加荷载达到 1kN 后，切换为位移控制模式，加载速率恒定为 0.04mm/min，进行准静态加载。试样发生宏观完全破坏且丧失承载能力后停止加载，同步关闭声发射监测系统和岩石力学测试系统，完成试验数据的采集与存储。

3. 核磁共振（NMR）实验结果

为探究不同岩性高强脆性岩石的孔隙结构差异，对粗粒花岗岩（CG-3）、细粒花岗岩（FG-3）和石英岩（Q-3）进行了核磁共振试验，对应的 T_2 弛豫时间谱和孔隙尺寸占比统计结果如图 1（a）-（b）所示。根据岩石孔隙尺寸的常用分类标准，将孔隙分为微孔、中孔和大孔（Yao et al., 2010）。

如图 1(a) 所示，三种岩石的 T_2 谱均呈多峰分布，但峰位、峰强与大孔端响应差异显著，说明其孔隙尺度组成与连通贡献存在明显岩性控制。CG-3 在小孔与中孔区均出现显著峰值，其中中孔峰值更强，并且在大孔区仍可识别弱响应，表明其孔径分布更宽、孔隙结构更为复杂。结合粗粒花岗岩的岩性特征，这种“中孔占优+少量大孔尾部”的谱形可能与较大的矿物晶粒、粒间接触不均一以及较强的晶界/粒间错配有关：粗晶结构使晶界长度尺度更大、局部应变协调更困难，易在晶界、三岔点或不同矿物弹性差异处形成粒间孔隙与微裂隙，从而贡献一定的大孔端信号并拓宽孔径分布。

相对而言，FG-3 的 T_2 信号主要集中于小孔与中孔区，大孔区几乎无响应且整体峰强较低，表明其孔隙以小尺度为主、结构更集中且更致密。这与细粒花岗岩晶粒更细、颗粒排列更紧密、晶界尺度更小且分布更均匀的特点相一致：细晶结构往往使孔隙/裂隙更难发展为较大尺度贯通缺陷，因此大孔贡献很弱。

对于 Q-3 而言，其整体谱形介于两者之间，小孔与中孔响应明显，同时保留一定的大孔端弱信号。这可能是因为石英岩以石英为主、矿物成分更单一，但常见颗粒间胶结和再结晶程度差异以及可能存在的残余粒间边界与微裂隙，导致其孔隙结构表现为“以中孔为主、并伴随一定比例较大孔隙/裂隙”的特征。

图 1(b) 的孔隙体积分数进一步量化了这种岩性差异：CG-3 的中孔占比最高(84.6%)，同时含小孔(15.4%)与少量大孔(1.7%)，体现出粗粒花岗岩受粒间结构控制的多尺度孔隙组合；FG-3 中孔(54.7%)与小孔(45.3%)共同主导且大孔为 0%，反映细粒结构对大尺度孔隙/裂隙形成的抑制；Q-3 中孔(61.1%)为主，小孔(31.3%)次之，并含一定大孔(7.7%)，提示其较大孔隙/裂隙贡献相对更明显。总体而言，CG-3 孔径分布更宽、结构复杂性更强；FG-3 更致密且孔隙集中于小—中孔；Q-3 介于两者之间但保留一定大孔/裂隙成分。

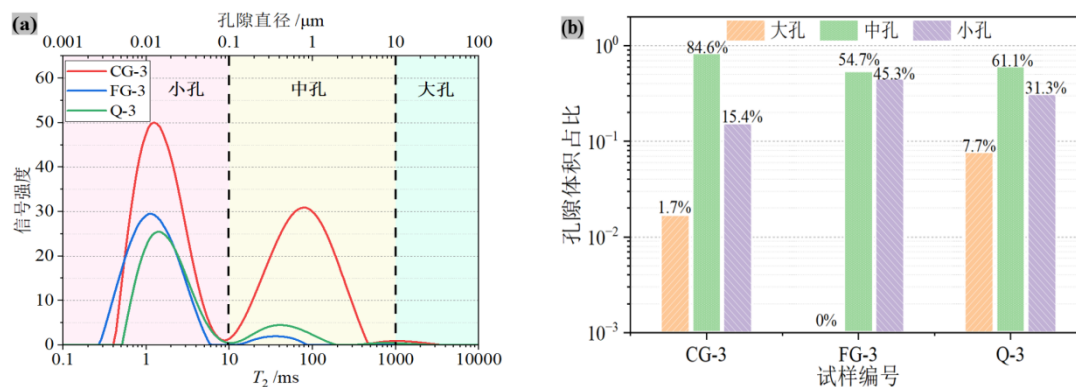


图 1. 不同岩性岩石的 NMR 实验结果: (a) T₂ 弛豫曲线及对应孔径; (b) 岩石内部孔径分布

Fig 1. NMR experimental results of rocks with different lithologies: (a) T₂ relaxation curves and corresponding pore sizes; (b) Internal pore size distribution of rocks

4 岩石破坏过程

图 2 (a) 展示了粗粒花岗岩、细粒花岗岩和石英岩在单轴压缩下的应力—应变曲线。总体来看, 三种岩石在加载初期均经历了初始裂隙闭合 (压实) 阶段, 随后进入准线性弹性变形阶段, 在峰值应力附近均表现出显著的脆性破坏特征。尽管如此, 三者峰值强度、峰前变形特征和峰后承载能力方面仍存在明显差异。

峰值强度方面, 细粒花岗岩的峰值应力最高, 其次是石英岩, 粗粒花岗岩的峰值强度相对较低。这一强度排序与核磁共振试验揭示的孔隙结构特征一致: 细粒花岗岩孔隙尺寸小、内部结构致密, 因此承载能力强; 而粗粒花岗岩孔隙尺寸分布宽、微裂隙更发育, 导致其峰值强度降低。

从应力—应变曲线形态来看, 细粒花岗岩在峰值应力前的准线性弹性段相对较长, 变形高度集中在峰值点附近, 达到峰值应力后应力急剧下降。相比之下, 粗粒花岗岩和石英岩在峰值前表现出更显著的非线性变形, 峰后仍保留一定的残余承载能力, 表明其破坏过程相对渐进, 但残余强度衰减较快, 呈现准脆性特征而非持续的塑性行为。

加载后试样的宏观破坏形态如图 2(b)–(d)所示。CG-1 以轴向劈裂破坏为主, 伴随多条贯通裂纹和次生裂隙, 形成分布广泛且复杂的断裂网络。FG-1 主要表现为单一或少数主导裂纹控制的劈裂破坏, 裂纹扩展路径集中, 断裂面相对平整, 体现出强烈的整体脆性失稳特征。Q-1 通常表现为轴向劈裂与局部剪切破坏相结合的复合破坏模式, 特征为一条明显的主断裂伴随适量的次生裂纹。应力-应变响应与破坏形态的联合分析表明, 不同岩性岩石的宏观力学行为和破坏模式存在显著差异。

本文依据单轴压缩条件下的峰后应力—应变曲线形态、残余承载能力及破坏突发性将不同岩性的岩石区分为“高脆性岩石”与“准脆性岩石”。其中, 高脆性岩石表现为峰后应力快速陡降、残余强度较低、破坏突发性强; 准脆性岩石则表现为峰后应力下降相对较缓、保留一定残余承载能力、破坏过程具有一定渐进性。根据这一标准, 本文将细粒花岗岩归为高脆性岩石, 将粗粒花岗岩和石英岩归为准脆性岩石。

从塑性力学行为来看, 三种岩性在单轴压缩下的应力—应变差异, 本质上反映了裂纹演

化机制和能量释放模式的不同。细粒花岗岩和石英岩在峰前阶段变形快速积累，储存大量弹性性能，一旦达到峰值应力，应力急剧下降，残余承载能力有限，表明塑性变形阶段极短，破坏以瞬时脆性失稳为主，属于典型的高脆性材料。这类岩石在加载过程中通常缺乏有效的塑性缓冲阶段，一旦主导裂纹起裂并贯穿试样，整体承载能力迅速丧失。

相比之下，粗粒花岗岩的矿物颗粒尺寸较大，结构非均质性更强，原生微裂隙和孔隙更发育，在加载过程中促进了裂纹的逐步起裂、稳定扩展和渐进贯通。因此，其峰前非线性变形阶段相对较长，峰后仍保持一定的残余强度，表现出准脆性破坏特征。对于这类岩石，宏观破坏前的损伤演化往往更为持久，能量释放呈分散式，失稳过程具有明显的渐进性。

总体而言，岩石的脆塑性特征与内部孔隙结构和裂纹发育程度密切相关，并在应力-应变曲线形态和宏观破坏模式上清晰体现。致密低孔隙岩石往往表现出强烈的脆性破坏行为，而孔隙尺寸分布较宽、微裂隙发育的岩石更易呈现准脆性或有限塑性特征。这一认识为工程实践中针对各类岩体实施差异化的稳定性评估和灾害防治策略提供了重要依据。

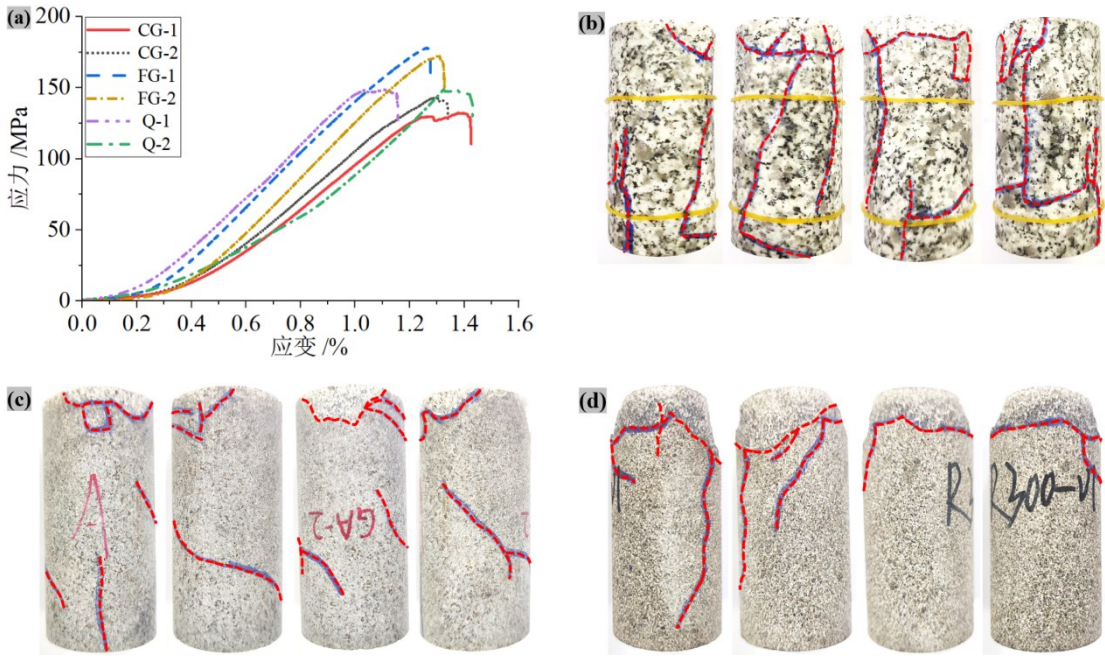


图 2. 不同岩性岩石的应力-应变曲线及破坏后状态：(a) 试样的应力-应变曲线；(b) CG-1 的宏观破坏形态；(c) FG-1 的宏观破坏形态；(d) Q-1 的宏观破坏形态

Fig 2. Stress-strain curves and post-failure states of rocks with different lithologies: (a) Stress-strain curves of the specimens; (b) Macroscopic failure mode of CG-1; (c) Macroscopic failure mode of FG-1; (d) Macroscopic failure mode of Q-1

5. 声发射前兆特征指标

岩石在外部荷载作用下的破坏过程本质上是非线性、多尺度的，表现为裂纹起裂、扩展和贯通的复杂时空演化。单一的声发射参数通常仅能反映损伤过程的一个方面，难以全面、稳健地捕捉岩石从稳定变形到灾难性失稳的内在机制。因此，建立融合统计特征、能量演化、频谱特性和系统复杂性的声发射指标体系，对于提高岩石破坏前兆识别的可靠性和物理可解释性具有重要意义。

考虑到岩石破坏过程中产生的声发射信号具有多尺度、多机制的特点，本研究从系统复杂性、尺度分布、活动强度和频谱演化四个维度构建了声发射前兆指标框架，选取了四个具有代表性的参数：声发射关联维数、b 值、振铃计数和平均能量重心频率（AECF）。需要说明的是，每种岩性均开展了两组重复试验。本文选取 CG-1、FG-1 和 Q-1 作为典型试样进行展示，主要用于突出不同岩性岩石的代表性前兆响应特征。对应重复试样在应力-应变演化、声发射多参数变化趋势及峰前前兆出现阶段上与典型试样总体一致。

5.1 声发射关联维数

声发射关联维数是声发射事件分布时间或空间复杂性的定量表征，常用于描述裂纹演化的无序程度和损伤系统的动态状态。在岩石加载过程中，关联维数的变化与裂纹行为从分散起裂到局部贯通的转变密切相关，能够综合表征破坏前系统复杂性的变化。

采用刘享华等（2022）提出的方法，基于一维声发射时间序列数据，运用 G-P 算法计算关联维数。设加载过程中采集的声发射能量时间序列为：

$$\{x(t)\} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (1)$$

其中， $x(t)$ 为声发射能量时间序列， n 为时间序列长度。为揭示声发射能量演化的内在动力学特征，采用延迟坐标法进行相空间重构。对于给定的嵌入维数 m ($m < n$) 和时间延迟 τ ，重构相空间中的第 i 个状态向量定义为：

$$\mathbf{X}_i = [x_i, x_{i+\tau}, x_{i+2\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau}]^T \quad (2)$$

相应地， $\mathbf{X}_i$ 表示由声发射能量序列中第 i 个采样点出发、按时间延迟 τ 构造得到的嵌入向量。相应的，重构状态向量的总数 N_m 为：

$$N_m = n - (m - 1)\tau \quad (3)$$

为了定量描述重构相空间中状态点的聚类特征，引入关联积分函数 $W(r)$ ：

$$W(r) = \frac{2}{N_m(N_m-1)} \sum_{i=1}^{N_m} \sum_{j=1}^{N_m} H[r - \|\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j\|] \quad (4)$$

其中， $\|\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j\|$ 表示相空间中第 i 个与第 j 个状态向量之间的欧几里得距离， $H[\]$ 为赫维赛德阶跃函数，当自变量为正时等于 1，否则为 0。该函数用于统计距离小于给定尺度 r 的点对数量。计算中， r 并非取单一固定值，而是在一定范围内选取多个尺度，就本文而言 r 的取值范围为：

$$r \in [0.01d_{max}, 0.2d_{max}] \quad (5)$$

其中， d_{max} 为重构相空间中任意两个状态向量之间欧几里得距离的最大值，需要说明的是，该取值范围为经验性取值，其取值依据为，过小尺度易受噪声和样本稀疏影响，过大尺度则易受有限样本长度、边界效应及相关积分饱和影响，因此需避开两端区间。

通过在双对数坐标系中对 $\lg W(r)$ 与 $\lg r$ 关系曲线，可识别近似线性成立的标度区间。通过对该区间进行线性拟合，可以求得关联维数 D ：

$$D = \frac{d \lg W(r)}{d \lg r} \quad (6)$$

通过相空间重构，该方法将一维声发射能量时间序列映射到高维状态空间，从而揭示岩石破坏过程中声发射活动的内在动力学演化规律。关联积分表征了状态点的尺度依赖性密度分布，而关联维数 D 定量描述了吸引子结构的复杂性。

在岩石加载破坏过程中，声发射活动与裂纹的起裂、稳定扩展、不稳定传播及最终贯通密切相关，不同损伤阶段对应着不同的声发射能量释放模式。关联维数能够有效捕捉声发射

系统从相对有序到无序演化、从分散活动到局部失稳的动态转变，是识别岩石破坏前兆的重要分形指标。

采用该方法计算的不同岩性岩石关联维数演化规律如图 3 所示。需要说明的是，关联维数 D 采用滑动数据窗方法计算。由于不同岩石在相同加载时间内的声发射活跃程度不同，因而有效数据窗数量存在差异，最终导致图 3 中不同试样的 D 值个数不完全一致。在单轴压缩下，CG-1、FG-1 和 Q-1 的声发射能量关联维数总体呈现相似的演化趋势，但因岩性差异存在细微区别。具体而言，加载初期，三种岩石的关联维数均维持在相对较高的水平；随着加载进行和应力增加，关联维数总体呈波动下降趋势，并在峰值应力附近急剧降至最小值，这反映了内部微裂隙的逐步扩展、相互作用，最终朝着不稳定破坏的方向有序发展。

三种岩性中，Q-1 的初始关联维数最高（约 0.25），表明其早期声发射活动的混沌程度相对较高，这可能归因于其相对均质致密的结构，导致早期微破裂事件的时间分布更为随机。FG-1 的初始关联维数略低（约 0.14），而 CG-1 的初始值最低（约 0.06），这可能是由于粗粒花岗岩颗粒尺寸较大、粒间非均质性更显著，导致早期裂纹演化更具有序性。需要说明的是，关联维数的绝对数值较低与采用一维声发射能量时间序列及有限的长度有关，因此分析重点在于相对演化趋势而非绝对数值大小。

在峰值应力处，三种岩石的关联维数均降至约 0.005 的最小值。相应的峰值应力出现时间分别为：CG-1 约 1659 s (132.2 MPa)，FG-1 约 1910 s (177.9 MPa)，Q-1 约 1677 s (148.7 MPa)，表明细粒花岗岩在破坏前承受了更高的应力水平和更长的加载持续时间。总体而言，关联维数的持续下降可视为失稳破坏的可靠前兆指标。

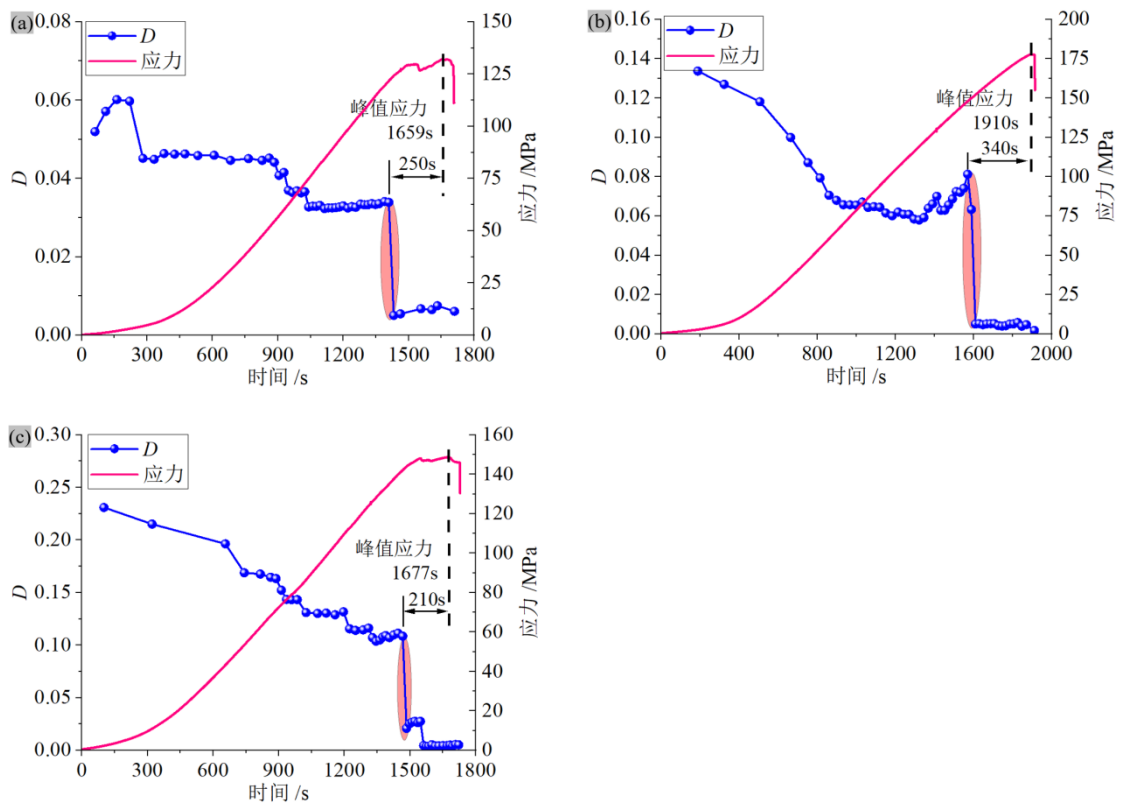


图 3. 不同岩性岩石关联维数的前兆信息：(a) CG-1; (b) FG-1; (c) Q-1

Fig 3. Precursory information of correlation dimension for rocks with different lithologies: (a)

5.2 声发射 b 值

声发射 b 值源于声发射事件幅值或能量的统计分布，反映了小尺度微裂纹活动与大尺度裂纹扩展的相对比例。具体而言， b 值表征了低幅事件与高幅事件的比值： b 值越低，表明高幅事件占比越高，通常意味着材料接近不稳定破坏状态。随着岩石损伤从微裂纹起裂主导的稳定阶段向宏观裂纹扩展控制的不稳定阶段演化， b 值在破坏前通常呈现显著的下降趋势。因此，该参数特别适用于识别破坏前从“数量多但强度弱”的声发射事件向“数量少但强度强”的事件转变的统计特征。

声发射 b 值的确定基于事件幅值与发生频率的统计关系，通常通过频率—幅值分布的线性拟合获得，该关系可采用最初用于表征地震震级分布的古登堡—里克特经验定律描述 (Scholz, 1968)：

$$\log_{10} N = a - bM \quad (7)$$

其中， N 表示震级在 M 至 $M+\Delta M$ 区间内的事件数量， M 为事件震级， a 和 b 为拟合参数，本研究中采用的声发射 b 值即对应式中的参数 b 。将该理论应用于声发射数据分析时，通常采用声发射事件幅值作为震级的等效表征，转换关系为：

$$M = A_{dB}/20 \quad (8)$$

其中， A_{dB} 为声发射事件幅值， M 为对应的震级。

鉴于目前声发射 b 值计算尚无统一标准，且短加载时间内声发射事件数量不足可能导致拟合结果不稳定，本研究采用基于事件计数的滑动时间窗方法。综合考虑幅值—频次统计拟合所需的事件数量及 b 值演化的时序分辨率，选取 4000 个事件作为窗口长度，2000 个事件作为滑动步长，对每个窗口内的数据采用最小二乘法进行线性回归，得到对应的 b 值。 b 值的演化规律如图 4 所示。

如图 4 所示，三种岩石的 b 值在峰前加载的大部分阶段均保持相对稳定或仅出现轻微波动，但在峰值应力前约 200-400s (图中阴影区域) 呈现出显著的下降趋势，表明损伤过程从微裂纹主导转变为宏观裂纹扩展。三种岩性中，细粒花岗岩的 b 值下降幅度更大，下降阶段持续时间更长，表明其失稳前声发射活动的裂纹集中化和有序化程度更高；相比之下，粗粒花岗岩和石英岩的 b 值下降幅度相对较小，意味着破坏前裂纹扩展更分散，裂纹局部化程度较弱。

这些观测结果与前文所述的核磁共振孔隙结构特征和应力—应变分析一致：孔隙结构更致密、原生微裂隙更少的岩石，往往表现出更典型、更集中的脆性破坏行为，这体现在峰值应力前 b 值的下降更为显著。

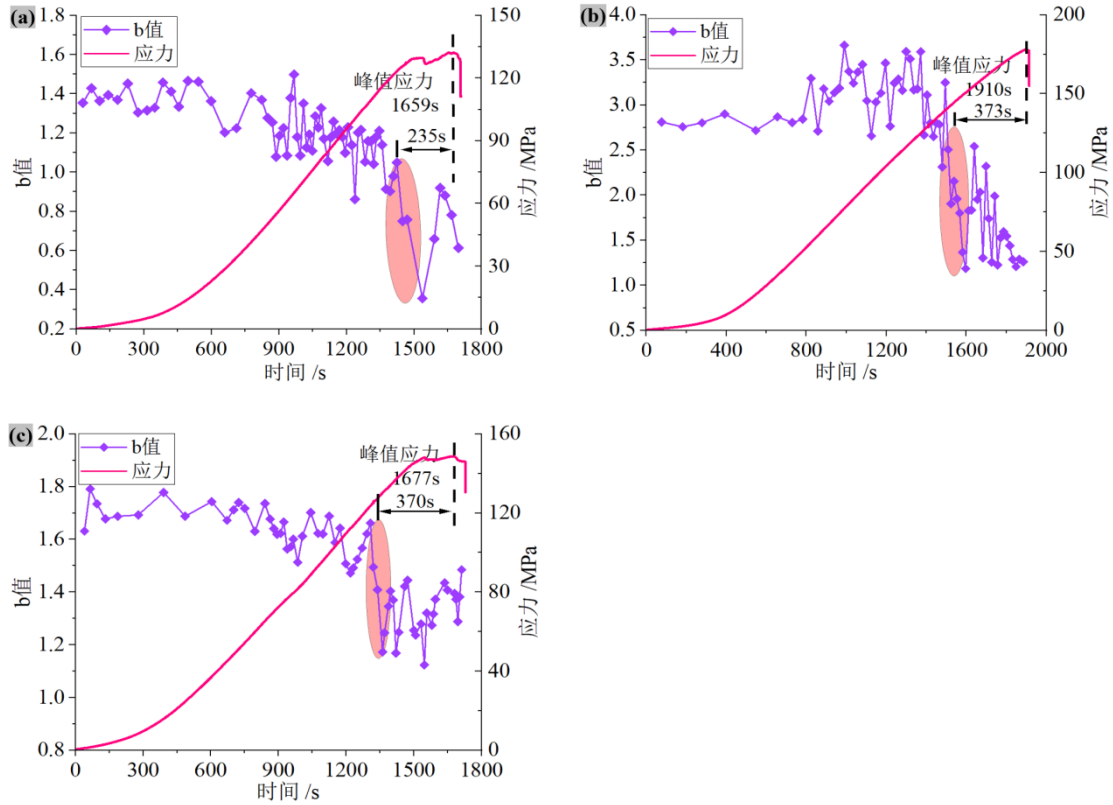


图 4. 不同岩性岩石 b 值的前兆信息: (a) CG-1; (b) FG-1; (c) Q-1

Fig 4. Precursory information of b -value for rocks with different lithologies: (a) CG-1; (b) FG-1; (c) Q-1

5.3 声发射振铃计数

振铃计数是声发射活动最直接的指标之一，既反映了声发射事件的时间发生频率，也体现了裂纹相关活动的强度。加载过程中，振铃计数的突然增加通常与裂纹的快速扩展或贯通相关，因此常被视为损伤破坏过程的基本动态指标。本研究同时考察了瞬时振铃计数和累积振铃计数随应力演化的规律，并将振铃计数的突然激增视为岩石破坏的潜在前兆信号。图 5 展示了三种岩石在加载过程中振铃计数（瞬时和累积）的时间演化特征。

如图 5 所示，瞬时振铃计数在峰值应力前出现显著激增，随后迅速衰减，表明裂纹活动在失稳前瞬间达到峰值强度。与 b 值下降阶段一致，累积振铃计数在阴影区域内呈现急剧增长，表明大量微裂纹逐步扩展并贯通，最终形成宏观裂纹网络。细粒花岗岩和石英岩在激增阶段的振铃计数幅值显著高于粗粒花岗岩，进一步表明其失稳前裂纹扩展更集中、损伤活动强度更高，前兆行为更显著。

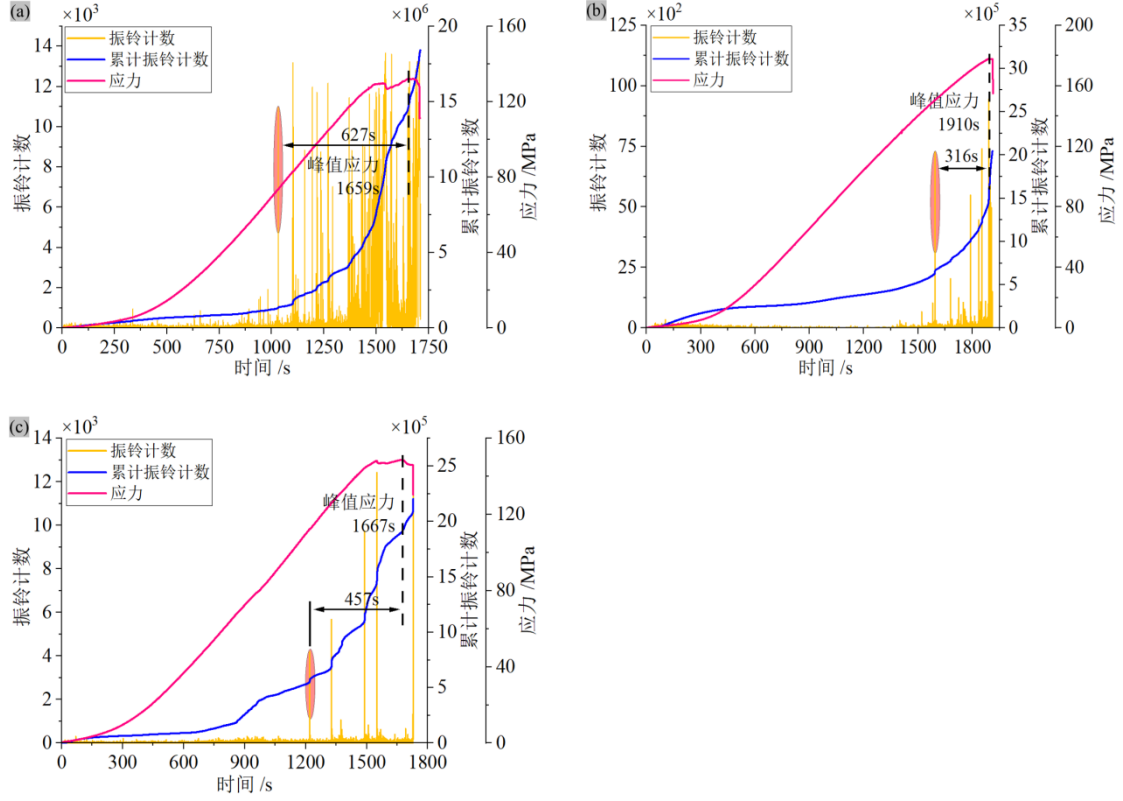


图 5. 不同岩性岩石振铃计数的前兆信息: (a) CG-1; (b) FG-1; (c) Q-1

Fig 5. Precursory information of ringing count for rocks with different lithologies: (a) CG-1; (b) FG-1; (c) Q-1

5.4 声发射平均能量重心频率

能量重心频率是指声发射信号频谱能量分布的加权平均频率,用于表征信号能量在频域中的集中位置,其物理含义可理解为频谱能量分布的“质心频率”。其计算过程为:首先对声发射波形信号进行频域变换,得到各频率点对应的频谱能量分布;然后以频谱能量为权重,对频率进行加权平均,即

$$f_c = \frac{\sum_{i=1}^N f_i E_i}{\sum_{i=1}^N E_i} \quad (9)$$

其中, f_c 为能量重心频率, f_i 为第 i 个频率点, E_i 为该频率点对应的频谱能量, N 为频率点总数。

岩石加载破坏过程中,单个声发射事件的能量重心频率并非恒定不变,而是随着内部裂纹的起裂、扩展和贯通持续演化。不同空间尺度、不同损伤机制主导的裂纹活动表现出不同的频域响应:微裂纹起裂阶段通常以相对低频成分为主,而随着裂纹相互作用增强、快速扩展和逐步贯通,根据损伤机制和加载条件的不同,高频成分可能变得更加显著。因此,声发射能量重心频率总体呈现上升或波动上升趋势。

考虑到单个声发射事件的能量重心频率对瞬时局部开裂和随机扰动较为敏感,本研究采用固定时间窗平均法以获得稳定的演化趋势。为平衡统计稳定性和时间分辨率,选取 10s 作为时间窗长度,具体而言,对连续 10s 时间窗内记录的所有声发射事件的能量重心频率进行统计平均。该方法有效抑制了零星异常事件的影响,同时保留了裂纹发展的整体演化趋势。因此,时间窗口平均后的平均能量重心频率(AECF)能够更稳定、连续地反映加载过程中从微裂纹起裂到宏观裂纹扩展的频谱演化特征。

设 i 个声发射事件的能量重心频率为 $f_{c,i}$,在时间窗 $[t_k, t_k + T]$ ($T=10s$),内共记录 n_k 个声发射事件,则该时间窗内的平均能量重心频率可表示为:

$$\bar{f}_c(t_k) = \frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^{n_k} f_{c,i} \quad (10)$$

其中, $\bar{f}_c(t_k)$ 为第 k 个时间窗内的平均能量重心频率, n_k 为该窗口内的声发射事件数量, $f_{c,i}$ 为第 i 个声发射事件的能量重心频率。

图 6 展示了三种岩石的平均能量重心频率时间演化特征。总体而言,平均能量重心频率在峰值应力前呈现波动上升趋势,在裂纹局部化和扩展阶段(阴影区域)出现突然增加,随后在宏观破坏瞬间表现出短期密集的高频波动。这一行为表明,宏观失稳前裂纹相互作用加剧、损伤演化加速和快速断裂过程导致频谱能量重新分布。需要说明的是,平均能量重心频率的演化反映了裂纹发展过程中断裂机制和活动强度变化对应的声发射信号统计响应,而非与裂纹尺寸的直接一一对应关系。因此,平均能量重心频率可作为识别高强脆性岩石损伤演化阶段和临近失稳的有效频谱指标。

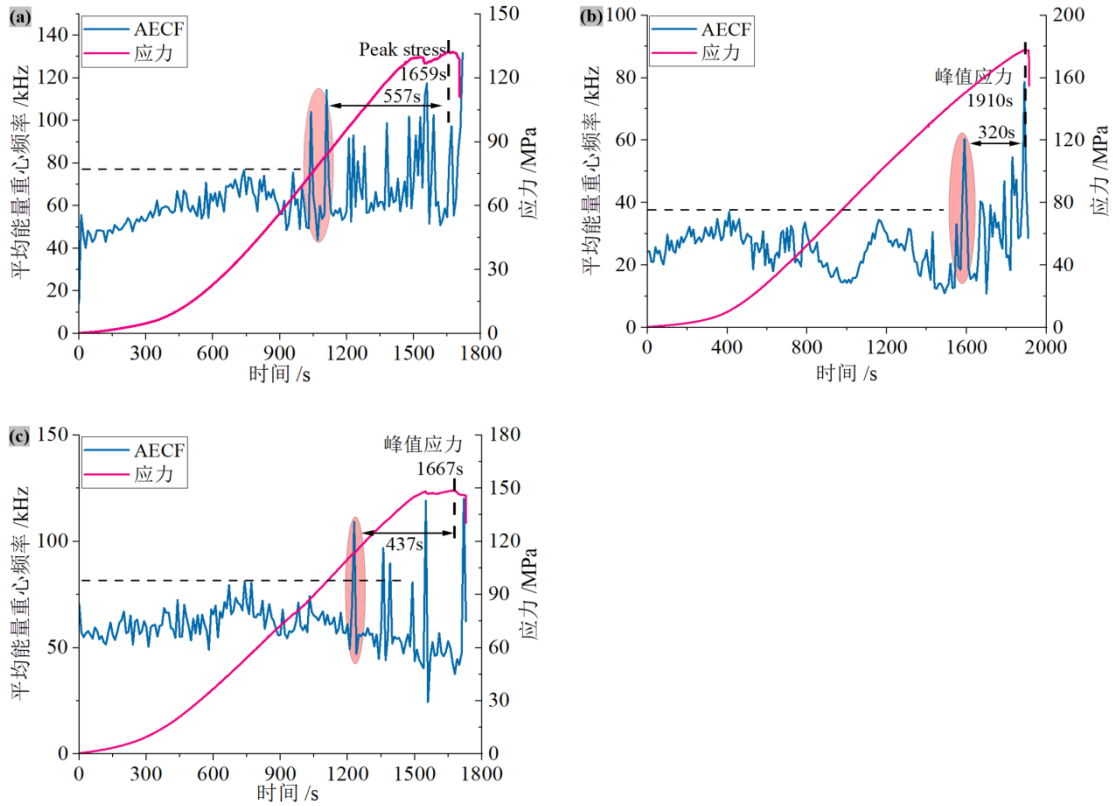


图 6. 不同岩性岩石 AECF 的前兆信息: (a) CG-1; (b) FG-1; (c) Q-1.

Figure 6. Precursory information of AECF for rocks with different lithologies: (a) CG-1; (b) FG-

1; (c) Q-1

将关联维数、b 值、振铃计数和能量重心频率结合分析可见，四类指标在峰值应力前均表现出明显前兆信号，其共同反映岩石由稳定损伤积累阶段向局部化失稳发展阶段的物理演化过程。根据各个参数的含义，关联维数持续下降，表明声发射信号在相空间中的分布由分散逐步向低维集中演化，反映岩石内部裂纹系统由多源、无序扩展向主裂纹控制下的局部化破坏模式转变；b 值下降表明低幅、小能量事件占比降低而高幅、大能量事件占比增加，反映裂纹活动由分散微裂纹主导逐步向局部化裂纹扩展演化；振铃计数突增表明裂纹快速扩展和相互贯通增强，对应岩体进入损伤加速发展阶段；能量重心频率升高则反映声发射信号频谱能量分布向高频侧迁移，表明失稳前裂纹活动方式及局部破裂特征发生明显变化。上述前兆信号的形成，本质来源于加载后期微裂纹大量累积、相互作用增强、局部应力集中加剧以及裂纹并合贯通所引起的损伤演化机制转变。

6. 讨论

表 1 对比了不同岩性岩石在单轴压缩加载过程中，基于四类声发射前兆指标所识别出的破坏预警时间。可以看出，不同指标对岩石失稳的响应存在明显差异，其预警时间在不同岩性岩石中呈现出一定的规律性。

从整体趋势来看，振铃计数与能量重心频率指标在三种岩性中表现出相对更早的预警能力，而关联维数和 b 值指标则更多反映岩石破坏过程中的中晚期结构演化特征。

在粗粒花岗岩中，振铃计数与能量重心频率的预警时间分别达到 627 s 和 557s，显著早于关联维数（250 s）和 b 值（235 s）。根据相关参数的含义，这可能是因为颗粒尺度较大的粗粒花岗岩中，裂纹的早期萌生和能量释放活动较早出现，但空间上呈现分散化特征，使得基于活动强度与频谱特征的指标能够更早捕捉到损伤积累信息，而系统结构类指标（关联维数）对该类分散损伤的响应相对滞后。

细粒花岗岩中，各指标的预警时间整体较为接近，且差异相对较小。这可能是因为细粒花岗岩内部结构致密、裂纹演化路径相对集中，各类声发射特征在损伤积累阶段具有较强的 consistency，裂纹尺度、能量释放和系统结构演化几乎同步发生。

石英岩和粗粒花岗岩表现出类似的特征，其振铃计数（457 s）和能量重心频率（437 s）的预警时间明显早于关联维数（210 s）和 b 值（370 s）。这可能是因为石英岩在破坏前阶段，裂纹一旦起裂便迅速扩展并释放较强能量，导致活动强度型与频谱型指标对破坏前兆更为敏感，而系统结构复杂性指标的提前量相对有限。

从岩石的脆性程度来看，不同岩性的岩石反映出相近的前兆特征。粗粒花岗岩和石英岩属于准脆性岩石，振铃计数和能量重心频率等反映局部活动特征的指标能够较早出现前兆信号，而关联维数和 b 值对其破坏过程的指示更多体现在中后期的结构集中阶段。细粒花岗岩属于脆性岩石，其结构致密、力学均一性较高，裂纹演化过程较为连续，各类声发射特征在破坏前阶段呈现出较好的同步性。

表 1 不同声发射前兆指标的提前预警时间对比

Tab 1. Comparison of Early Warning Lead Times for Different Acoustic Emission Precursory Indicators				
试样编号	关联维数	b 值	振铃计数	AECF
CG-1	250 s	235 s	627 s	557 s

FG-1	340 s	373 s	316 s	320 s
Q-1	210 s	370 s	457 s	437 s

结合前文 NMR 孔隙结构表征结果、应力—应变演化规律及声发射多指标变化特征可以看出，岩石脆性程度对前兆信息的形成方式和响应时序具有显著的相关性。其可能的原因在于，不同脆性程度的岩石在孔隙尺度组成、孔径分布宽度、微裂隙发育程度及结构非均质性等方面存在明显差异，从而决定了内部初始缺陷网络的空间组织方式，并进一步影响裂纹萌生的离散程度、扩展路径的集中性、局部应力重分布过程以及弹性能释放模式，最终表现为峰前阶段声发射前兆参数的不同演化形式。总体而言，脆性较强的岩石，其前兆信息更多表现为短时段内的快速突变；而准脆性岩石，其前兆则更倾向于较长时段内的持续积累与渐进演化。

具体而言，对于典型脆性岩石（细粒花岗岩），其整体孔隙结构较为致密，孔隙尺度较小，裂纹扩展路径相对集中，加载过程中弹性能更易局部集聚并在临近破坏时快速释放。此类岩石在失稳前通常缺乏明显的塑性或损伤缓冲阶段，裂纹一旦达到临界条件便迅速扩展并贯通，因此声发射前兆主要集中在峰值应力前的较短时间窗内，表现为 b 值快速下降、能量重心频率明显升高以及振铃计数短时剧增等特征，呈现出突发性强、同步性较高但持续时间较短的前兆响应模式。

相比之下，准脆性岩石（粗粒花岗岩和石英岩）由于矿物颗粒尺度较大、孔径分布更宽、结构复杂性与非均质性更强，其内部孔隙—微裂隙体系更为离散且具有多尺度特征。该类微观结构使得加载早期更易出现分散化、多源化的局部损伤活动，裂纹萌生与扩展过程具有更明显的渐进性和阶段性，相应的能量释放也更为分散。因此，其声发射活动在较长时间范围内持续增强，振铃计数和能量重心频率往往在峰前较早阶段便开始缓慢演化，能够提供相对提前且持续的预警信息；而关联维数和 b 值则更多在中后期裂纹逐步集中扩展、损伤由分散走向协同失稳时才表现出更为明显的异常变化。

由此可见，岩石内部微观结构越复杂、初始缺陷分布越离散，其裂纹演化越趋于渐进化、多阶段化，对应的前兆信息也越容易表现为提前出现且持续时间较长；而结构越致密均一、脆性越强，裂纹演化越趋于集中失稳，相应前兆则更易表现为临破坏前的快速突变特征。

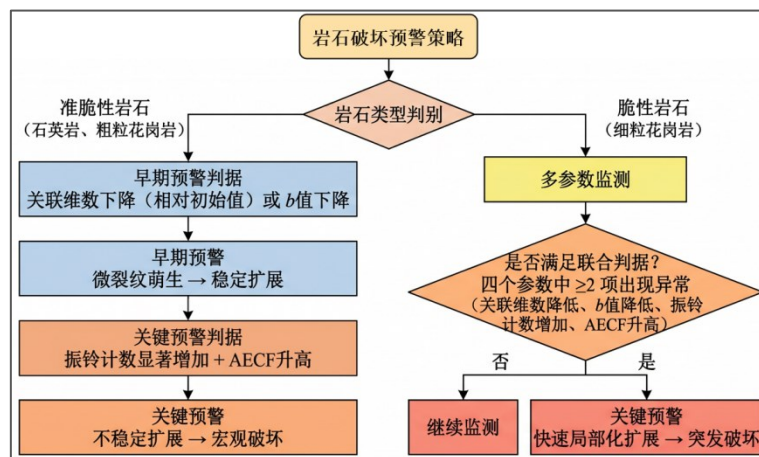


图 7 岩石破坏多参数声发射分阶段预警框架

Figure 7. Multi-parameter acoustic emission stage-by-stage warning framework for rock failure

从工程监测角度看，岩体失稳前兆的识别通常面临监测环境复杂、背景噪声干扰强以及

失稳模式差异显著等问题，单一声发射参数往往难以全面、稳定地表征岩体损伤演化状态。相比之下，关联维数、 b 值、振铃计数和能量重心频率分别从系统复杂性、事件幅值统计、活动强度和频谱能量分布等不同角度反映裂纹演化过程，具有明显互补性。将这些参量综合构建多参量声发射前兆指标体系，有助于降低单一指标误判风险，提高破坏前兆识别的稳健性与可靠性。

进一步地，结合岩体脆性特征及岩性差异，可形成面向不同工程对象的分级预警思路（如图 7）：对于准脆性岩石，如石英岩和粗粒花岗岩，由于内部非均质性较强、裂纹扩展过程相对渐进，可先以关联维数下降或 b 值下降作为早期预警判据，用于识别微裂纹萌生与稳定扩展；进一步以振铃计数显著增加和 AECF 升高作为关键预警判据，用于表征裂纹向不稳定扩展转化及宏观破坏临近。对于脆性岩石，如细粒花岗岩，由于裂纹扩展更集中、峰前异常持续时间较短、破坏突发性更强，更适合采用多参数联合判别方法；当关联维数降低、 b 值降低、振铃计数增加和 AECF 升高等指标中有 2 项及以上同时出现异常时，可判定进入关键预警阶段，否则应继续监测。该策略能够较好反映不同岩石由渐进损伤到临界失稳的演化差异，对提高岩石破坏前兆识别的针对性和可靠性具有一定意义，也可根据不同工程条件下预警指标的优化配置提供参考。

7. 结论

关联维数、 b 值、振铃计数及 AECF 在岩石破坏前均表现出显著异常特征，可作为有效的破坏前兆参数。其中，关联维数整体呈下降趋势， b 值在峰前阶段明显降低，振铃计数在失稳前出现突增，AECF 呈波动上升并在临破坏阶段显著增强，四类指标分别从系统复杂性、裂纹尺度分布、活动强度及频谱特征等不同维度反映了损伤演化过程。

岩石脆性程度对声发射前兆参数的响应形式和时序具有显著影响。高脆性岩石前兆信息主要集中于峰值应力前的短时段内，表现为多参数的同步突变；准脆性岩石则在较长加载阶段内呈现持续演化特征，振铃计数和 AECF 等指标出现时间较早，而关联维数和 b 值的异常主要集中于中后期阶段。

不同岩性岩石的孔隙结构特征存在显著差异，并与其脆性程度表现出一致对应关系。细粒花岗岩孔隙结构致密、以小—中孔为主，脆性最强；粗粒花岗岩孔径分布较宽、结构非均质性较高，表现为准脆性特征；石英岩以中孔为主并含一定大孔/裂隙成分，其力学与破坏特征也表现为准脆性特征。

基于多参量声发射特征及岩性差异，应构建分阶段、多参数联合的岩石破坏预警思路。对于非均质性较强的准脆性岩体，应侧重振铃计数和 AECF 等早期敏感指标；对于脆性突出的岩体，应强化 b 值与能量类指标的协同判识，并结合关联维数的突变特征实现失稳阶段识别，从而提高预警的针对性与可靠性。

8. References

- Cai,M.F.,Duo,J.,Chen,X.S.,et al.,2021.Development Strategy for Co-Mining of the Deep Mineral and Geothermal Resources. *Strategic Study of CAE*, 23(6):43-51. doi: 10.15302/J-SSCAE-2021.06.006 (in Chinese with English abstract).
- Chen,G.Q.,Xu,Q.,Yang,X.,et al.,2025.Fracture Propagation Characteristics and Catastrophic Modes

- of Fractured Rock in Alpine Region under Climate Change. *Earth Science*, 50(4):1585-1598. doi: 10.3799/dqkx.2024.030 (in Chinese with English abstract).
- He,M.C.,Ren,S.L.,Tao,Z.G.,2022.Disaster Prevention and Control Methods for Deep Buried Tunnels. *Journal of Engineering Geology*, 30(6):1777-1797. doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2022-0703 (in Chinese with English abstract).
- He,M.C.,Cheng,T.,Qiao,Y.F.,et al.,2023.A Review of Rockburst: Experiments, Theories, and Simulations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(5):1312-1353. doi: 10.1016/j.jrmge.2022.07.014.
- He,M.C.,Li,J.Y.,Liu,D.Q.,et al.,2024a.Rockburst Mechanism and Control. *Tunnel Construction*, 44(7):1321-1336 (in Chinese with English abstract).
- He,M.C.,Wu,Y.Y.,Gao,Y.B.,et al.,2024b.Research Progress of Rock Mechanics in Deep Mining. *Journal of China Coal Society*, 49(1):75-99. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1400 (in Chinese with English abstract).
- Li,J.Y.,Liu,D.Q.,He,M.C.,et al.,2024.Experimental Investigation on Rockburst Energy Characteristics of True Triaxial Unloading in Sandstone under High Stress. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 57(8):6031-6046. doi: 10.1007/s00603-024-03835-4.
- Li,M.,Tan,X.,Zhang,H.,et al.,2025.Influencing Factors of Rib Spalling in Deep Buried Working Face with Large Mining Height. *Journal of Mountain Science*, 22(10):3901-3912. doi: 10.1007/s11629-024-9077-y.
- Li,S.X.,Xie,Q.,Liu,X.L.,et al.,2021.Study on the Acoustic Emission Characteristics of Different Rock Types and Its Fracture Mechanism in Brazilian Splitting Test. *Frontiers in Physics*, 9:591651. doi: 10.3389/fphy.2021.591651.
- Li,X.B.,Chen,Z.Y.,Chen,J.Z.,et al.,2026.Progress and Prospect of the Synergistic Development of Deep Non-Ferrous Metals and Geothermal Resources. *Metal Mine*, 2026(1):1-12 (in Chinese with English abstract).
- Liao,A.J.,Zhang,Y.,Wang,F.,et al.,2025.Thermal Damage and Energy Characteristics of Sandstone under Real-Time High Temperatures. *Earth Science*, 50(1):286-298. doi: 10.3799/dqkx.2023.206 (in Chinese with English abstract).
- Liu,X.,Xue,Y.,Zheng,Y.,et al.,2022.Research on Failure Precursor Based on Characteristics of Energy Dissipation Rate for Rock. *Frontiers in Earth Science*, 9:812438. doi: 10.3389/feart.2021.812438.
- Liu,X.H.,Zhang,K.,Wu,W.Y.,2022.Investigation on Correlation between Energy Dissipation and Fractal Characteristics of Fragments of Preflawed Sandstone. *Journal of Chongqing University*, 45(2):41-51 (in Chinese with English abstract). doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2020.273.
- Liu,Z.D.,Li,D.Y.,2023.Intelligent Hybrid Model to Classify Failure Modes of Overstressed Rock Masses in Deep Engineering. *Journal of Central South University*, 30(1):156-174. doi: 10.1007/s11771-022-5208-1.
- Morrison,D.M.,1989.Rockburst Research at Falconbridge's Strathcona Mine, Sudbury, Canada. In: Gibowicz,S.J.,ed.,Seismicity in Mines.Birkhäuser, Basel,619-645. doi: 10.1007/978-3-0348-9270-4_21.

- Richardson,E.,Jordan,T.H.,2002.Seismicity in Deep Gold Mines of South Africa: Implications for Tectonic Earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(5):1766-1782. doi: 10.1785/0120000226.
- Scholz,C.H.,1968.The Frequency-Magnitude Relation of Microfracturing in Rock and Its Relation to Earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(1):399-415. doi: 10.1785/BSSA0580010399.
- Wang,Y.F.,Song,M.Y.,Jiao,H.Z.,et al.,2024.Experimental Study on Strength and Rockburst Proneness of Granite under Loading and Unloading. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 6(3):033035. doi: 10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20240520.001 (in Chinese with English abstract).
- Xing,Y.,Gao,F.,Zhang,Z.Z.,et al.,2023.Energy Storage and Release of Class I and Class II Rocks. *Energies*, 16(14):5516. doi: 10.3390/en16145516.
- Xue,R.,Kong,Y.,Feng,J.,2025.The Instability Mechanisms and Precursor Information of Different Type Rocks Based on Acoustic Emission. *PLOS ONE*, 20(5):e0322126. doi: 10.1371/journal.pone.0322126.
- Yao,Y.B.,Liu,D.M.,Che,Y.,et al.,2010.Petrophysical Characterization of Coals by Low-Field Nuclear Magnetic Resonance (NMR). *Fuel*, 89(7):1371-1380. doi: 10.1016/j.fuel.2009.11.005.
- Yu,Q.,Tang,C.A.,Li,L.C.,et al.,2014.Nucleation Process of Rockbursts Based on Microseismic Monitoring of Deep-Buried Tunnels for Jinping II Hydropower Station. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 36(12):2315-2322. doi: 10.11779/CJGE201412021 (in Chinese with English abstract).
- Zhang,L.W.,Wu,J.,Zhang,X.Y.,2023.Mechanism of Water Inrush from the Tunnel Face Induced by Fault and Its Application. *Journal of Central South University*, 30(3):934-946. doi: 10.1007/s11771-023-5283-y.
- Zhao,G.M.,Wang,C.,Liang,D.X.,2018.Comparative Experimental Studies of Acoustic Emission Characteristics of Sandstone and Mudstone under the Impacts of Cyclic Loading and Unloading. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 14(8):1550147718795552. doi: 10.1177/1550147718795552.
- Zhuang,T.,Peng,R.,Zhao,Q.,et al.,2024. Acoustic Emission Characteristic of Sandstone and Sandstone-Like Material under Multi-Path Loading. *PLOS ONE*, 19(1):e0297087. doi: 10.1371/journal.pone.0297087.

附中文参考文献

- 蔡美峰, 多吉, 陈湘生, 等, 2021.深部矿产和地热资源共采战略研究.中国工程科学, 23(6):43-51.
- 陈国庆, 许强, 杨鑫, 等, 2025.气候变化下高寒区裂隙岩石破裂机制及致灾模式.地球科学, 50(4):1585-1598.
- 何满潮, 任树林, 陶志刚, 2022.深埋隧道灾变防控方法.工程地质学报, 30(6):1777-1797.
- 何满潮, 李杰宇, 刘冬桥, 等, 2024a.岩爆机制及其控制.隧道建设(中英文), 44(7):1321-1336.
- 何满潮, 武毅艺, 高玉兵, 等, 2024b.深部采矿岩石力学进展.煤炭学报, 49(1):75-99.

- 李夕兵, 陈祉颖, 陈江湛, 等, 2026.深部有色金属与地热资源协同开发关键技术进展与展望. 金属矿山, 2026(1):1-12.
- 廖安杰, 张岩, 王飞, 等, 2025.实时高温作用下砂岩的热损伤与能量特征.地球科学, 50(1):286-298.
- 刘享华, 张科, 吴文远, 2022.裂隙砂岩破坏过程中的能量耗散与破碎分形特征研究.重庆大学学报, 45(2):41-51.
- 王云飞, 宋梦怡, 焦华喆, 等, 2024.加卸载花岗岩强度与岩爆倾向性试验研究.采矿与岩层控制工程学报, 6(3):033035.
- 于群, 唐春安, 李连崇, 等, 2014.基于微震监测的锦屏二级水电站深埋隧洞岩爆孕育过程分析.岩土工程学报, 36(12):2315-2322. doi: 10.11779/CJGE201412021.