

基于改进尖点突变理论的裂隙砂岩破裂 预警模型研究

雷瑞德^{1, 2, 3}, 周林森¹, 顾清恒², 郭伟耀⁴, 马庆⁵, 胡超¹, 李怀宾²

(1. 四川轻化工大学 土木工程学院, 四川 自贡 643000; 2. 安徽理工大学 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001; 3. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制全国重点实验室, 重庆 沙坪坝 400044; 4. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590; 5. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘要: 为探究裂隙岩石变形破坏过程中的关键前兆信息特征及损伤状态预警模型, 对含不同几何构型的预制裂隙砂岩开展一系列单轴压缩试验, 分析裂隙砂岩声发射参量及能量演化机制, 建立基于多指标融合的尖点突变预警模型, 从控制因子和判别函数响应特征角度对试样破坏突变过程进行分析。采用最大似然估计法(MLE)和 Davidon-Fletcher-Powell (DFP) 算法求解模型, 并引入前兆响应系数和前兆响应应力比对比分析基于声发射能量方差、声发射 b 值、弹性能耗散比等单一指标模型和多指标融合模型的预警效果。结果表明: 耗散能呈现出非线性缓慢上升→缓慢下降→骤然上升 3 个演变阶段; 试样趋近失稳破坏前, 声发射 b 值急剧减小, 声发射参量方差突增, 弹性能耗散比曲线由上升迅速转为下降, 这些突变过程可作为岩石破坏的早期预警指标; 对比基于声发射能量方差、声发射 b 值和弹性能耗散比的破裂前兆信息, 其平均前兆响应系数分别为 9.19%, 8.26% 和 6.72%; 另外, 平均前兆响应应力比分别为 92.54%, 92.70% 和 95.84%; 改进后的综合指标预警模型比单一指标模型的预警区间明显变小, 并减少了误报和漏报的可能性; 多指标融合预警模型具有良好的鲁棒性, 预警区间位于 $(0.96 \sim 0.98) \sigma_p$, 前兆响应系数在 5.55%~10.20% 范围, 前兆响应应力比在 93.62%~97.75% 范围。

关键词: 岩石力学; 尖点突变理论; 声发射; 弹性能耗散比; 预警模型

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2025)10-2638-16

Catastrophe warning model in flawed sandstone based on improved cusp mutation theory

LEI Ruide^{1,2,3}, ZHOU Linsen¹, GU Qingheng², GUO Weiyaoyao⁴, MA Qing⁵, HU Chao¹, LI Huaibin²

(1. College of Civil Engineering, Sichuan University of Science and Engineering, Zigong, Sichuan 643000, China; 2. Key Laboratory of Safety and High-efficiency Coal Mining, Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 3. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 4. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 5. School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: To investigate the key precursor information characteristics and damage state early warning model in the

收稿日期: 2025-01-20; **修回日期:** 2025-06-11

基金项目: 安徽理工大学煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室开放基金项目(JYBSYS202306); 重庆大学煤矿灾害动力学与控制全国重点实验室开放基金项目(2011DA105287-FW202407); 中国博士后科学基金资助项目(2023MD744136)

Supported by the Opening Project of Key Laboratory of Safety and High-efficiency Coal Mining, Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology (Grant No. JYBSYS202306), Opening Project of State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University (Grant No. 2011DA105287-FW202407) and China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2023MD744136)

作者简介: 雷瑞德(1988-), 男, 2021年于重庆大学矿业工程专业获博士学位, 现任副教授、硕士生导师, 主要从事岩石力学方面的研究工作。E-mail: leiruide123@163.com。通讯作者: 顾清恒(1989-), 男, 博士, 现任讲师、硕士生导师。E-mail: 2021165@aust.edu.cn

DOI: 10.3724/1000-6915.jrme.2025.0050

deformation and failure process of fractured rock, a series of uniaxial compression tests were carried out on prefabricated fractured sandstone samples with different geometric configurations. Also, the acoustic emission (AE) and energy mechanism of fractured sandstone were analyzed, and a catastrophe mutation early warning model based on multi-index fusion was established. The failure and mutation process of the sample were analyzed from the perspective of control factor and discriminant function response characteristics. The maximum likelihood estimation (MLE) and Davidon-Fletcher Powell (DFP) algorithm methods were adopted to solve the model. The precursor response coefficient and the precursor response stress ratio were introduced to comparatively analyze the early warning effect of the single-index model based on AE energy variance, AE b -value, elastic energy dissipation ratio, and the multi-index fusion model. The results show that the dissipative energy presents three stages: slow rise, slow decline and sudden rise. Before the sample approaches instability failure, the AE b -value decreases sharply, the AE parameter variance increases abruptly, and the elastic energy dissipation ratio curve changes rapidly from rising to falling. These sudden changes can be regarded as early warning indicators of rock failure. The average precursory response coefficients defined by AE energy variance, AE b -value and elastic energy consumption ratio are 9.19%, 8.26% and 6.72%, respectively. In addition, the corresponding average response stress ratios are 92.54%, 92.70% and 95.84%, respectively. The early warning range of the improved multi-index early warning model is smaller than that of the single index model, and the possibility of false alarms and missing alarms is reduced. The multi-index fusion warning model has good robustness. The early warning interval is within $(0.96 - 0.98)\sigma_p$, the precursory response coefficient is between 5.55% and 10.20%, and the precursory response stress ratio ranges from 93.62% to 97.75%.

Key words: rock mechanics; cusp mutation theory; acoustic emission; elastic energy dissipation ratio; warning model

1 引言

裂隙岩体是岩土工程中常见的天然地质材料, 具有明显的各向异性和非均质性。裂隙岩体中的不连续体在地壳运动、工程开挖以及各类载荷扰动下易诱发局部区域损伤成核, 最终导致岩体破断失效。大量试验研究和现场调查表明, 工程灾害的发生(如隧道坍塌、矿井塌陷、岩质边坡失稳等)与岩体破裂失稳过程密切相关^[1-4]。如果能对裂隙岩体的早期损伤进行科学监测及预警, 就能有效地控制损伤的发生, 确保岩体结构稳定。因此, 从监测信号中提取岩体变形破裂的关键特征信息和前兆指标, 对于揭示岩体失稳破裂机制及预警预测具有重要的科学意义和工程实践价值。

声发射是一种无损被动监测技术, 能够对岩石内微裂纹的全过程进行实时连续捕捉^[5]。近年来, 众多学者借助声发射技术从多个角度表征和分析固体材料的裂纹类型及特征, 例如, K. Ohno 和 M. Ohtsu^[6]以混凝土为研究对象, 采用基本参数衍生的参数(上升时间/振幅 RA 和计数/持续时间 AF)定性地把裂纹断裂模式分为拉伸破断和剪切破断, 但是裂纹破裂的具体时间及裂纹模式演化的先后顺序仍

未知。随后, L. N. Y. Wong 和 Q. Q. Xiong^[7]基于简化格林函数矩张量分析法得到拉伸和剪切微裂纹的时空演化规律, 并揭示了拉剪混合裂纹的演化特征。在声发射参数统计和频谱特征演化方面, M. Y. Bhuiyan 等^[8]以航天材料为研究对象, 根据波形变化规律分析疲劳裂纹扩展特征, 发现波形演变与边界条件、裂纹扩展密切相关。B. Poddar 和 V. Giurgiutiu^[9]以板状结构试样为研究对象, 认为随机统计方法不利于预测裂纹扩展, 而从声发射波形信号中提取裂纹相关的信息更可靠。朱振飞等^[10]以裂隙花岗岩为研究对象, 采用波形分析方法得到声发射频谱特征, 并揭示声发射信号与裂纹扩展的内在联系。在震源反演机制方面, 赵兴东等^[11]基于盖格尔定位算法反演含裂隙花岗岩岩样的裂纹扩展, 获得了岩样内裂纹扩展空间方位及空间曲面的分布形态, 进一步揭示脆性岩石断裂失效机制。王笑然等^[12]通过点源远场 P 波矩张量法量化了微裂纹类型、空间位置及扩展方向, 进一步揭示了裂隙煤样加载过程中微裂纹的震源失效机制。

由于裂隙岩体渐进破坏现象的复杂性, 单纯从试验结果的声发射信号或能量曲线很难对岩体从完整结构发展到主裂纹贯通出现突变的这一过程进行早期预警。因此, 大量学者基于理论模型对岩体破

裂状态进行了预测评估。E. H. Zhang 等^[13]基于声发射和全视场监测技术,结合突变理论,分析了砂岩破坏的突变特性和早期预警区间,构建了基于突变理论的岩石失稳预警模型并验证了其合理性和适用性。徐晓冬等^[14]进行了红砂岩的三轴压缩试验,基于尖点突变理论建立了岩石损伤状态预警模型,结果表明其建立的预警模型比声发射预警方法中声发射静默期或累积声发射能量率突变出现的时间更早。G. J. Liu 等^[15]基于尖点突变理论,推导出了 2 种符合突变理论控制变量参数和状态变量参数的岩体失稳判据,建立了隧道穿越断层带时围岩稳定性的预测和监测方法,精确实现了围岩变形破裂预警。陈国庆等^[16]以不同裂纹长度的裂隙花岗岩为研究对象,发现存在热像异常和温度-时间异常 2 种前兆现象,且二者统一。K. W. Cao 等^[17]以砂岩为研究对象提出了一种基于红外热图像的定量分析指标,得到上升和下降的热红外剪胀前兆比例因子 (HTPSE) 值分别为 0.4 和 0.6。

上述研究侧重于分析岩石破坏过程中的能量、应变场、温度场、声发射等单一预警指标的演化特征。实际上,岩石破裂是一个复杂的多物理场耦合过程,涉及声学、力学、温度变化等多种因素的共同作用,单一指标不能充分反映破裂的特征。此外,单一指标容易受到噪声和异常数据的干扰,增加了预测的随机性与不确定性^[18-20]。因此,亟需构建多指标融合方法预测裂隙岩石失稳破裂。基于随机微分方程和概率密度函数来改进尖点突变模型,借助归一化方法消除多源监测数据量纲差异,并通过熵权法对输入指标进行赋权。在此基础上开展裂隙砂岩单轴压缩试验,并基于声发射 b 值、声发射能量方差和弹性能耗散比作为裂隙砂岩破裂前兆指标。通过以弹性能耗散比构建的单一指标预警模型与基于声发射能量、声发射计数和弹性能耗散比建立的综合预警模型进行对比,并采用前兆响应系数 (PRC) 和前兆响应应力比 (PRSR) 对预警模型进行评价。

2 多指标融合尖点突变模型

2.1 尖点突变理论

突变理论是用来解释复杂系统中不连续性和质变现象的数学理论,由法国数学家 R. Thom^[21]提出。岩石在变形破裂过程中呈现出的多个稳定平衡状态、临界点附近的突变和迟滞效应与尖点突变模型的特征相符合,因此,本文采用尖点突变理论来揭

示裂隙砂岩的破断失效机制。

在尖点突变理论中,系统的行为可以用势函数来描述。应用最广泛的尖点突变模型是由 2 个控制因子 μ , ν 和一个状态因子 x 组成,其势函数的形式为^[22]

$$g(x, \mu, \nu) = x^4 + \mu x^2 + \nu x \quad (1)$$

系统的平衡方程由式(1)确定,在无扰动的情况下,系统的状态随时间变化的平衡面方程为

$$\frac{\partial g}{\partial x} = 4x^3 + 2\mu x + \nu = 0 \quad (2)$$

对标准势函数求二阶导数可得奇异点集方程:

$$\frac{\partial^2 g(x)}{\partial x^2} = 0 \quad (3)$$

将式(2)和(3)联立求解,消去 x 获得判别函数 Δ :

$$\Delta = 27\nu^2 + 8\mu^3 \quad (4)$$

图 1 展示了尖点突变模型函数关系^[23]。当 $\mu > 0$ 时,曲线仅能从顶部叶面移动到底部叶面(或从底部叶面移动到顶部叶面)。当 $\mu < 0$ 时,相位点落在中间叶边缘,系统处于稳定与不稳定之间的临界状态。若 $\Delta > 0$, 势函数仅存在一个实根,系统处于稳定状态;若 $\Delta < 0$, 系统处于不稳定状态^[23]。

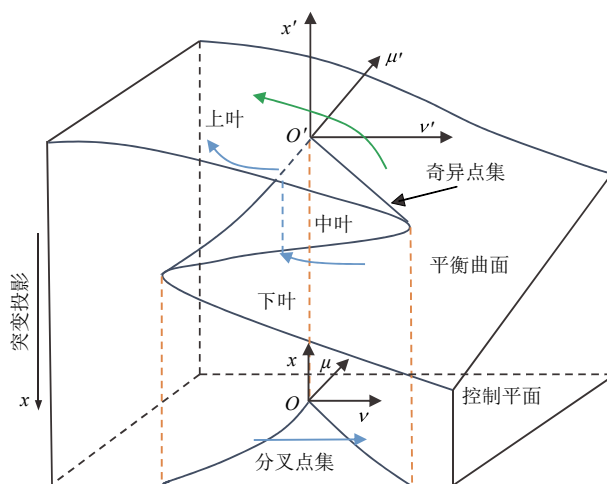


图 1 尖点突变模型函数关系示意图^[23]

Fig.1 Schematic diagram of cusp mutation model function relationship^[23]

假设输入变量与时间的映射关系为 $f(t)$, 利用泰勒公式进行展开, 获得手动选择时间节点的多项式系数, 并代入尖点突变分岔集以获得选取时间节点的 Δ 值。在迭代求解过程中, 局部误差会逐步增大, 泰勒级数越大模型的突变时间序列就越准确, 但手动选择的计算量也会随之增大。J. X. Zhang 等^[23-25]研究表明五阶泰勒级数能满足模型计算精度的要

求, 并且计算量相对较小。因此, 本文采用五阶泰勒级数法:

$$f(t) = \sum_{r=0}^4 \frac{d^r f}{dt^r} t^r = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 \quad (5)$$

式中: t 为时间; r 为展开形式指标; a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 为待定系数。

为了求解待定系数, 对式(5)进行变换, 令 $t = x - m$, 整理变换后公式得

$$f(x) = a_0 - a_1 m + a_2 m^2 - a_3 m^3 + a_4 m^4 + (a_1 - 2ma_2 + 3a_3 m^2 - 4a_4 m^3)x + (a_2 - 3a_3 m + 6a_4 m^2)x^2 + (a_3 - 4ma_4)x^3 + a_4 x^4 \quad (6)$$

式中: m 为变换常数。

将式(6)与式(5)进行对比, 得到 $m = \frac{a_3}{4a_4}$, 把 m 代入式(6)整理得

$$f(t) = \left(\frac{a_1}{a_4} - \frac{a_2 a_3}{2a_4^2} + \frac{a_3^3}{8a_4^3} \right) x + \left(\frac{a_2}{a_4} - \frac{3a_3^2}{8a_4^2} \right) x^2 + x^4 \quad (7)$$

结合式(1)与式(7)可得

$$\left. \begin{aligned} \mu &= \frac{a_2}{a_4} - \frac{3a_3^2}{8a_4^2} \\ \nu &= \frac{a_1}{a_4} - \frac{a_2 a_3}{2a_4^2} + \frac{a_3^3}{8a_4^3} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

将式(8)代入式(4)得到 Cardan 函数:

$$A_1 = 27 \left(\frac{a_1}{a_4} - \frac{a_2 a_3}{2a_4^2} + \frac{a_3^3}{8a_4^3} \right)^2 + 8 \left(\frac{a_2}{a_4} - \frac{3a_3^2}{8a_4^2} \right)^3 \quad (9)$$

2.2 改进的尖点突变理论

在实际应用中误差和噪声会影响模型的结果, 为减小随机噪声带来的误差影响, L. Cobb 和 S. Zacks^[26]引入了随机微分方程, 并以概率密度函数的形式描述系统在固定 μ 和 ν 条件下 x 的分布:

$$f(x|\mu, \nu) = \psi \exp(x^4 + \mu x^2 + \nu x) \quad (10)$$

式中: ψ 为归一化常数。

设输入变量为 $(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$, 输出变量为 Y , 则 μ 和 ν 为 n 维输入变量的线性组合。 x 为输出变量的线性变换:

$$\left. \begin{aligned} \mu &= b_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i \\ \nu &= c_0 + \sum_{i=1}^n c_i X_i \\ x &= a_0 + a_i Y \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: b_0, c_0 和 a_0 为常数项; b_i, c_i 和 a_i 为线性变换系数。

结合式(4)和(11)得到判别函数为

$$A_2 = 27 \left(c_0 + \sum_{i=1}^n c_i X_i \right)^2 + 8 \left(b_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i \right)^3 \quad (12)$$

对式(12)中系数及常数项采用最大似然估计法进行计算, 设 $\theta = \{a_0, a_1, b_0, b_1, b_2, \dots, b_n, c_0, c_1, c_2, \dots, c_n\}$, 其似然函数为

$$L(\theta|x) = P(x_i|\theta) = \prod_{i=1}^n P(x_i|\theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i|\theta, u_i, v_i) \quad (13)$$

式中: θ 为模型参数, $P(x_i|\theta)$ 为在给定参数下的概率。

本文采用 Davidon-Fletcher-Powell (DFP) 算法得到参数的估计值, 该算法不需要通过直接计算耗费计算机资源, 而是通过更新矩阵来近似计算二阶导数的逆, 显著降低了计算的复杂性, 适用于求解岩石破裂这种无约束的大规模优化问题^[27]。DFP 算法流程图如图 2 所示。图中, k 为常数; H_0 为初始正定矩阵, 即单位矩阵; ε_0 为收敛值, 取 $\varepsilon_0 = 10^{-4}$; $L(\theta_k)$ 为目标函数在 x_k 处的梯度; θ_k 为模型参数向量 θ 在第 k 次迭代时的取值; P_k 为第 k 次迭代的搜索方向; H_k 为第 k 次迭代的海森矩阵; α_k 为步长; S_k 为步长向量; y_k 为梯度变化向量; S_k^T 为 S_k 的转置向量。

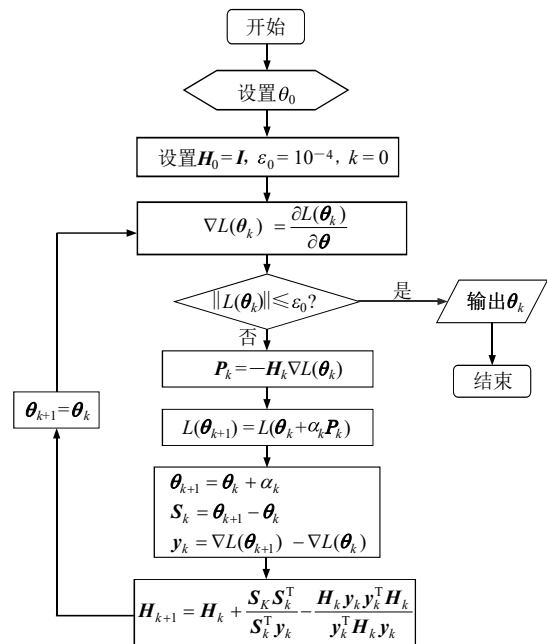


图 2 DFP 算法流程图

Fig.2 Flowchart of DFP algorithm

2.3 多源监测信息预处理

由于不同类型数据之间存在不同的量纲,为消除建模过程中量纲差异的影响,对试验过程中获得的多源监测信息进行归一化处理^[28]。正向指标和负向指标的计算公式分别为

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{in}\}}{\max\{x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{in}\} - \min\{x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{in}\}} \quad (14)$$

$$x'_{ij} = \frac{\max\{x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{in}\} - x_{ij}}{\max\{x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{in}\} - \min\{x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{in}\}} \quad (15)$$

式中: x'_{ij} 为归一化后样本值; x_{ij} 为样本值,表示第 i 个输入特征的第 j 个数据的数值。

由于不同的输入特征对模型影响程度不同,直接使用未赋权的特征可能会导致重要信息丢失。熵权法是一种客观赋权方法,其核心思想是通过各指标的信息熵来反映其对整体评价的贡献程度,避免人为主观因素的影响。因此,本文选择熵权法对输入特征进行赋权^[29]。

首先,对原始数据进行标准化处理,得到标准化矩阵:

$$p_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{j=1}^n x'_{ij}} \quad (16)$$

式中: p_{ij} 为标准化矩阵。

随后,计算第 i 个指标的熵值:

$$e_i = -k \sum_{j=1}^n x'_{ij} \ln x'_{ij} \quad (17)$$

$$k = \frac{1}{\ln n} \quad (18)$$

式中: e_i 为每个指标的信息熵, n 为样本总数。

计算每个指标的信息效用值:

$$d_i = 1 - e_i \quad (19)$$

式中: d_i 为每个指标的信息效用值。

根据信息效用值,确定每个指标的权重:

$$w_i = \frac{d_i}{\sum_{i=1}^m d_i} \quad (20)$$

式中: w_i 为各输入特征的权重, m 为输入特征数量。

3 裂隙砂岩单轴压缩试验研究

3.1 砂岩试样制备

本文研究的砂岩取自华蓥山余脉中梁山地区露头,该系地层属于上二叠统龙潭组和长兴组及三叠系嘉陵江组。测试砂岩为中等颗粒,其颗粒大小在 0.15~0.25 mm 范围,天然状态下,砂岩表观颜色为浅灰色,视密度为 2 428 kg/m³。X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)结果表明,测试砂岩的矿物成分主要包括石英 41.7%,钾长石 4.7%,方解石 2.5%,伊利石 21.8%,斜长石 24.7%,沸石 3.6%和其他矿物 1%,如图 3 所示。为减小试样物理力学特性之间的差异,测试岩样均取自于同一块砂岩。将砂岩切成高度为 136 mm,宽度为 68 mm,厚度为 25 mm 的长方体试样,试样 6 个面的加工精度严格按照国际岩石力学学会测试标准^[30],两端面的平整度不低于 0.05 mm。

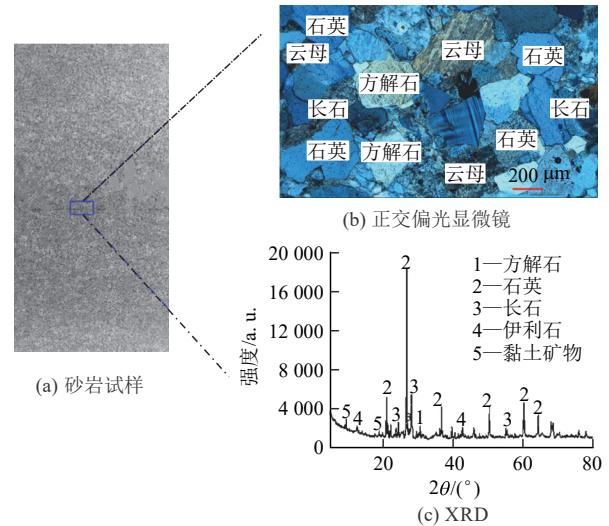


图3 砂岩试样的矿物成分

Fig.3 Mineral components of tested sandstone

为进一步降低试验结果的离散性,首先剔除表面有明显层理或裂纹的试样,然后筛选出纵波波速和密度均接近的试样进行水刀切割加工预制裂纹,详细的加工过程如图 4 所示。为了便于叙述,文中试样的命名方式采用字母和数字结合的形式,以 FS15-0 为例,FS 代表裂隙砂岩,15 代表裂隙倾角,其裂隙倾角 α 为 2 条平行裂隙与水平方向的夹角;0 代表岩桥角度,其岩桥角度 β 为 2 条平行裂隙内端连线与水平方向的夹角。裂隙砂岩的预制裂纹长度和岩桥长度分别为 14 和 16 mm。裂隙倾角 α 分别为 15°, 45° 和 75°, 对应的岩桥角度 β 分别为 0°, 45° 和 75°。

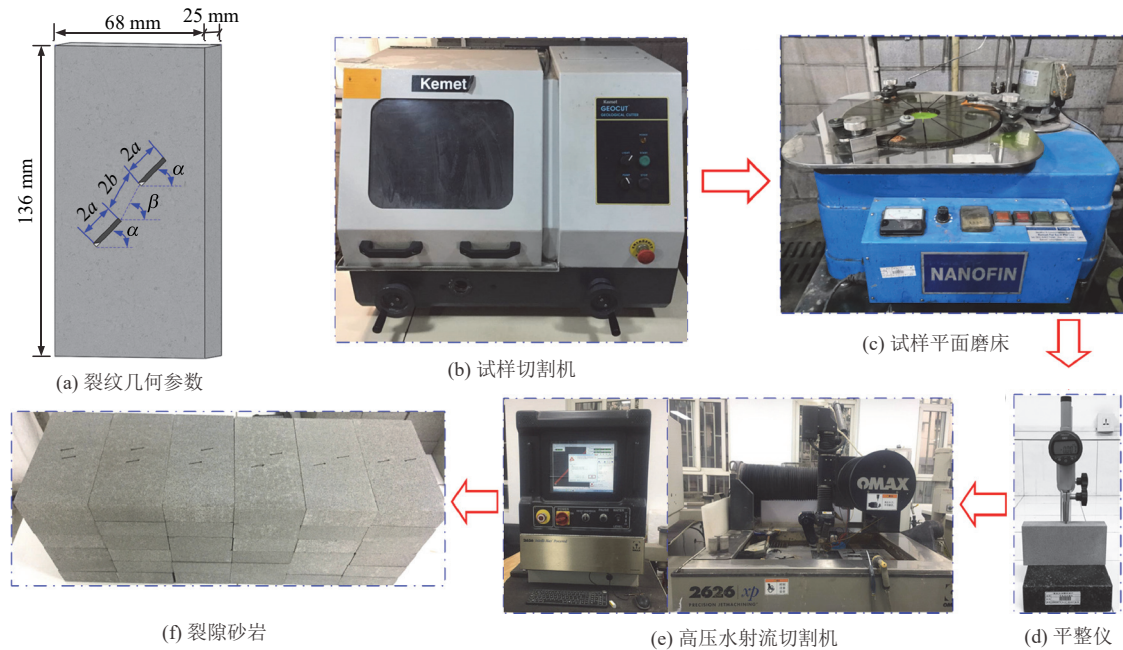


图4 裂纹几何参数及试样制备过程

Fig.4 Crack geometric parameters and preparation process of tested sandstone

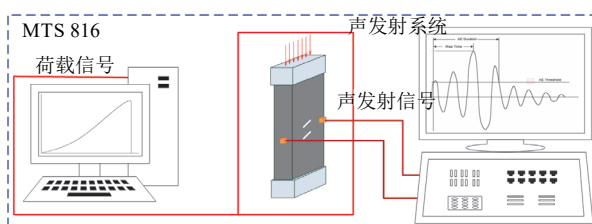
30°, 60°, 90°, 120°和150°。

3.2 单轴压缩试验装置

单轴压缩试验在煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室开展, 所采用设备包括MTS816 液压伺服试验机配套美国物理声学公司生产的声发射仪。整个试验系统主要由MTS816 加载单元和声发射系统组成, 如图5所示。



(a) 试验装置



(b) 试验装置示意图

图5 单轴压缩试验装置图

Fig.5 Test apparatus of uniaxial compression

加载系统主要由控制面板、加载单元和数据采集单元组成, 其中轴向荷载最大承载力为2 600 kN, 整个加载过程采用位移控制, 加载速率为0.1 mm/min。同时, 借助声发射系统对微裂纹演化过程进行实时监测。声发射传感器型号为NANO-30, 谐振频率为140 kHz, 系统的采样率为1 MHz。为降低加载过程中机器和环境产生的噪音, 并结合断铅试验测试结果, 最终, 声发射系统采集信号的门槛值设为45 dB, 前置放大器为40 dB, 2个探头平行固定在试样两端。为确保声发射探头和被测试样表面良好接触, 探头和试样之间采用凡士林作为耦合剂。

4 裂隙砂岩破裂前兆特征分析

4.1 基于声发射 b 值前兆识别分析

声发射技术已广泛应用于实验室和现场研究岩石的损伤演化以及鉴别加载过程中裂纹的失效机制^[31-32]。以往对地震事件的监测和统计研究发现, 大振幅地震事件发生的概率低于小振幅地震事件, 研究还发现大震级地震事件与振幅之间服从幂指数分布^[33]:

$$\lg N = a - bM \quad (21)$$

式中: N 为振幅大于声发射波形振幅 A_{dB} 的声发射撞击数; M 为地震震级; a 为常数, 由测试环境中

的背景噪音决定; b 为小振幅事件相对大振幅事件的比例。 $-b$ 在几何上表示为频率对幅值的斜率, b 值的变化与裂纹发育密度密切相关, 它是评价裂纹断裂演化的一个重要参数。

由于自然地震与室内岩石失稳破坏具有相似性, 因此, 大量学者对室内混凝土或脆性岩石加载过程中产生的裂纹特征也采用 b 值的方法来表征其断裂损伤, 并对式(21)进行修正:

$$\lg N = a - b'A_{\text{dB}} \quad (22)$$

$$A_{\text{dB}} = 10 \lg A_{\text{max}}^2 = 20 \lg A_{\text{max}} \quad (23)$$

式中: A_{max} 为声发射事件的峰值振幅。

结合式(22)和(23)可知, 修正的 G-R 公式可表达为

$$\lg N = a - b \frac{A_{\text{dB}}}{20} \quad (24)$$

图 6 为 3 个典型裂隙砂岩试样轴向应力、声发射 b 值及声发射能量随时间的变化规律^[3]。需要说明的是, 图 6 中 b_1 和 b_2 两条曲线分别为 2 个声发射

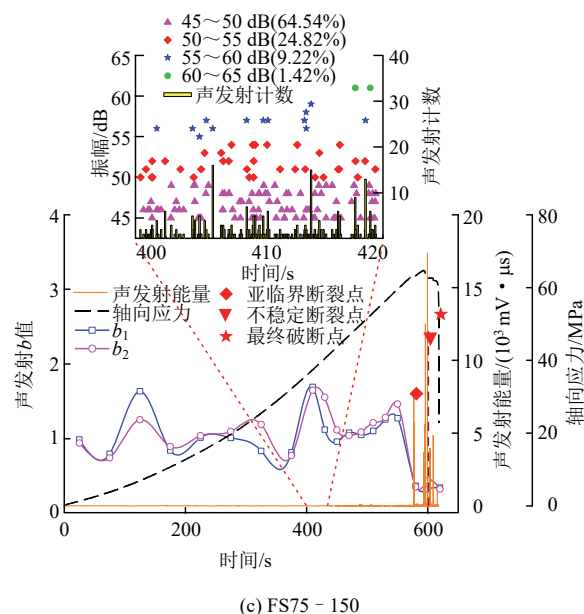
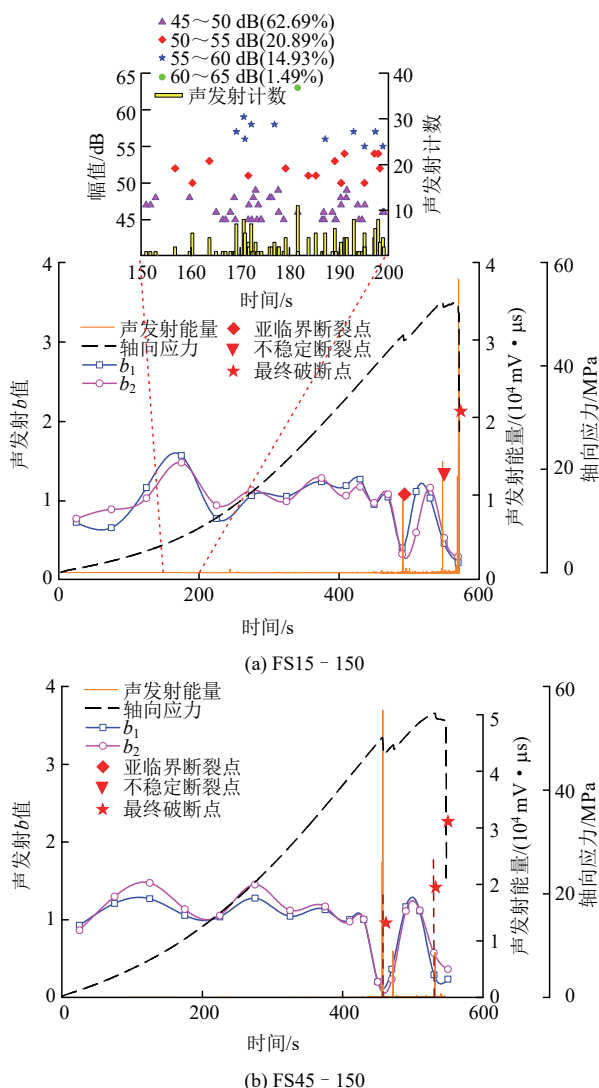


图 6 典型砂岩试样 b 值、声发射能量及轴向应力随时间演化规律^[3]

Fig.6 Evolution of b -value, AE energy and axial stress versus time for typical sandstone specimen^[3]

探头的监测结果。总体而言, 声发射 b 值在初始加载阶段波动较大, 同时该阶段的声发射 b 值相对其他阶段较大, 表明试样内出现大量小尺度裂纹事件, 对应加载过程的压密阶段。接下来, 波动趋势逐渐平缓, 声发射 b 值在 1 附近变化, 预示着试样进入线弹性阶段。随后, 再次出现较大波动, 声发射 $b < 1$, 预示试样内出现大尺度断裂, 对应屈服加载阶段。

从图 6(a)可以看出, 在加载初始阶段, 声发射 b 值出现突增, 该现象的主要原因是初始孔裂隙闭合和小震级声发射事件占比例较大, 从而导致 b 值增大。另外, 从局部放大图可知, 该阶段小幅值事件占优, 该现象也较好验证了初始加载阶段试样内主要发生小尺度的破裂。随着荷载的增加, 声发射 b 值在 150~200 s 范围达到最大值, 平均值约为 1.52。随后, 声发射 b 值呈现出轻微降低, 平均值约为 1.1。同时, 声发射信号相对稳定, 没有出现大量级的能量信号, 也说明砂岩内微裂纹在不断积聚。当声发射能量较大时, 对应的 b 值急剧减小, 表明砂岩内形成了宏观裂纹。随着荷载进一步增加, 先前出现宏观裂纹的局部区域再次被压实, 导致砂岩内部形成新的“支撑体”, 故声发射能量急剧下降, 对应的 b 值出现明显增加。当试样趋近峰值应力时, 声发射 b 值急剧下降, 预示着试样内大量宏观裂纹进一步扩展、集聚和贯通。当试样完全失去轴向支撑能力时, b 值降至最低值, 同时试样内释放的声

发射能量达到最大值。从图 6(b)可知, 在初始加载至 300 s, 声发射 b 值在 1.0~1.5 范围波动明显。随后, b 值波动趋于稳定, 表明该阶段未出现宏观裂纹。随后, b 值急剧降至最小值, 2 个通道的声发射 b 值最小值分别为 0.363 和 0.233, 预示试样内出现宏观裂纹。

图 6(c)为典型试样 FS75-150 的 b 值和声发射能量随加载时间的演化规律。总体来看, 变形破坏过程中声发射 b 值在 0.255~1.693 范围变化, 平均值为 1.015。与图 6(a)和(b)类似, b 值在加载初期阶段波动较大, 在 0.7~1.6 范围。随后, 在 175~375 s 范围, b 值在 0.7~1.0 范围轻微波动。在 400 s 左右时, b 值逐渐增加, 且达到最大值, 表明前期阶段产生的微裂纹再次被压实。同时, 从声发射幅值演化特征得知小振幅信号占优。在接下来的 125 s, b 值再次出现小幅度波动, b 值的最小值分别为 0.268 和 0.255。对比图 6(a), (b)和(c)可知, 3 种工况下的声发射 b 值均在早期前兆阶段呈现出轻微的降低, 亚临界断裂和极限失稳断裂阶段呈现出急剧降低趋势。总之, 声发射 b 值演化能够准确地识别岩石在整个加载过程中的亚临界断裂点、不稳定断裂点和最终破断点。

4.2 基于声发射参量方差前兆识别分析

临界慢化是统计物理学的概念, 当系统由一种状态转变为另外一种状态时, 在临界点附近会出现有利于新相态而发生离散和波动的现象^[34]。近年来, 临界慢化理论也被应用到岩石断裂失稳的研究中, 故本文借助声发射参数方差来探究加载过程中裂隙岩石失稳破坏的临界慢化特征。

当系统趋近临界点时, 小振幅扰动的恢复速率逐渐变慢, 当恢复速率趋近 0 时, 自相关系数趋近 1, 同时, 方差将趋近无穷大。因此, 临界慢化中的方差常常被用于研究系统趋近临界点的前兆参数, 其表达式为

$$D = S^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (25)$$

式中: D 为方差; x_i 为系统中某个变量的第 i 个数; $\bar{x}$ 为试样内数据的均值; N 为系统产生变量的总数。

图 7 为典型裂隙砂岩声发射能量方差在整个加载阶段的演化特征, 需要说明的是, 图中方差演化曲线的窗口长度和滞后步长分别为 300 和 200。从图中明显看出, 在关键断裂特征点处, 声发射能量方差曲线出现了突增现象。另外, 对比较大值方

差的演化特征发现, 峰前阶段相对于应力降较多试样(见图 7(a)和(b))来说, 应力降较小试样(见图 7(c))的大幅度方差波动主要聚集在峰值附近。尽管 3 种声发射参数均能较好地识别加载过程中的亚临界断裂点、不稳定断裂点和最终失稳断裂特征点, 但该方法与声发射 b 值、声发射参数率作为前兆指标的判定方法类似, 只能从定性角度分析裂隙岩石的断裂失效机制。

4.3 基于弹性能耗散比前兆识别分析

岩石受压变形破坏过程实质上是能量变换的过程, 外荷载以机械能的形式输入到岩石中转变为耗散能和弹性应变能^[35-37]。假设岩石受压破坏过程是

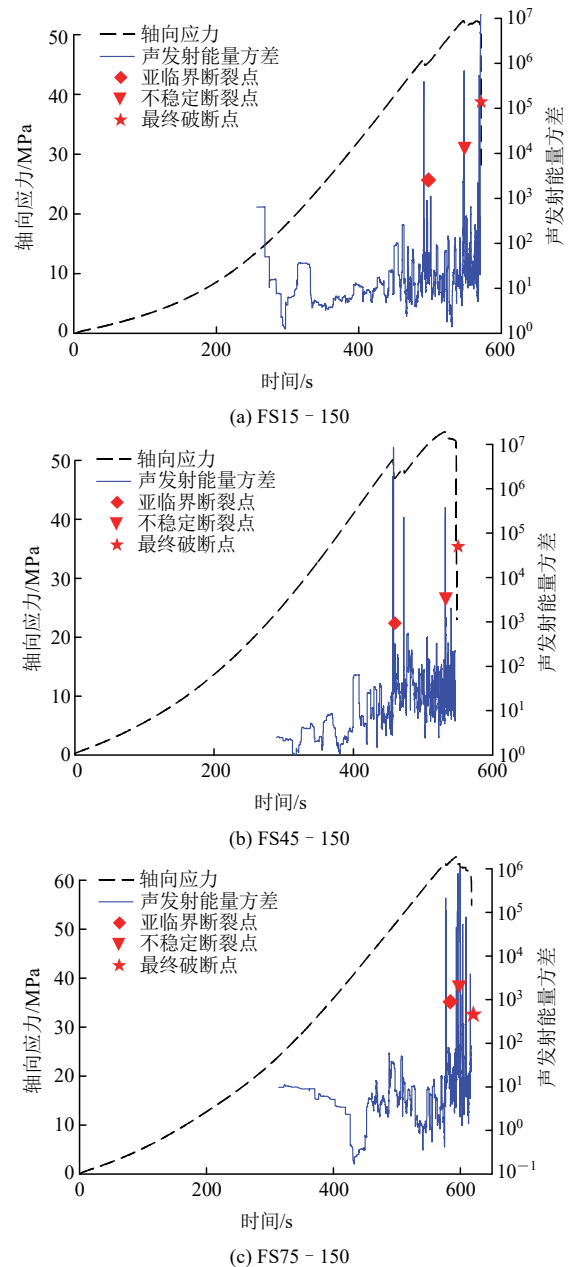


图 7 典型砂岩试样声发射参数的临界慢化方差演化特征
Fig.7 Critical slowing variance features of AE parameters for typical sandstone specimens

一个独立且不与外界进行能量交换的热力学系统，由热力学第一定律可知：

$$U = U^d + U^e \quad (26)$$

式中： U 为试样总能量， U^d 为耗散能， U^e 为弹性应变能。

在单轴压缩条件下，试样总能量计算公式为

$$U = \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon \quad (27)$$

式中： σ 为轴向应力， ε 为轴向应变。试样弹性应变能的计算公式为

$$U^e = \frac{\sigma^2}{2E_0} \quad (28)$$

式中： E_0 为弹性模量。

弹性能耗散比是指材料在变形过程中耗散的能量与储存的弹性应变能之比，能够反映材料在加载过程中的能量损失效率，弹性能耗散比的临界点可作为岩石的强度失效判据，进而根据耗散比方法可确定早期预警信息^[38]。为进一步揭示裂隙砂岩变形破坏过程中能量演化机制，通过对加载过程中耗散能与弹性应变能的比值 R 进行定义：

$$R = \frac{U^d}{U^e} \quad (29)$$

利用式(27)~(29)，得到典型裂隙砂岩变形破坏过程中的总能量、弹性应变能和耗散能，如图8所示。总体来说，三者的变化规律不一致，弹性应变能与总能量演化曲线类似，在峰前阶段二者呈现出逐渐增加的趋势。在加载初期，由于预制裂隙的存在，导致耗散能的增加远远大于弹性应变能，因此弹性能耗比快速增加。随着应力的增加试样进入线弹性阶段，外界输入的能量主要以弹性应变能的形式储存于试样中，弹性能耗散比曲线出现下降的趋势。随着荷载持续增加，试样内部开始生成裂纹并逐渐扩展，弹性能耗散比曲线增长速率逐渐变大。当试样达到储能极限时，耗散能急剧增加，大量能量以耗散能的形式释放。弹性能耗散比曲线由下降迅速转为上升，试样发生失稳破坏。因此，文中把弹性能耗散比的临界点定义为早期预警点。在峰后阶段，应变能在峰值处急剧下降。耗散能的演变规律与弹性应变能不同，耗散能经历了非线性缓慢上升→缓慢下降→骤然上升3个阶段。缓慢上升趋势主要是由于加载初期裂纹变形控制试样总的变形量，微孔洞、裂纹闭合消耗能量较多。当微裂纹逐渐被压实后，耗散能呈非线性演变趋势；当荷载超过临界点时，即出现破裂前兆，耗散能急剧增加。

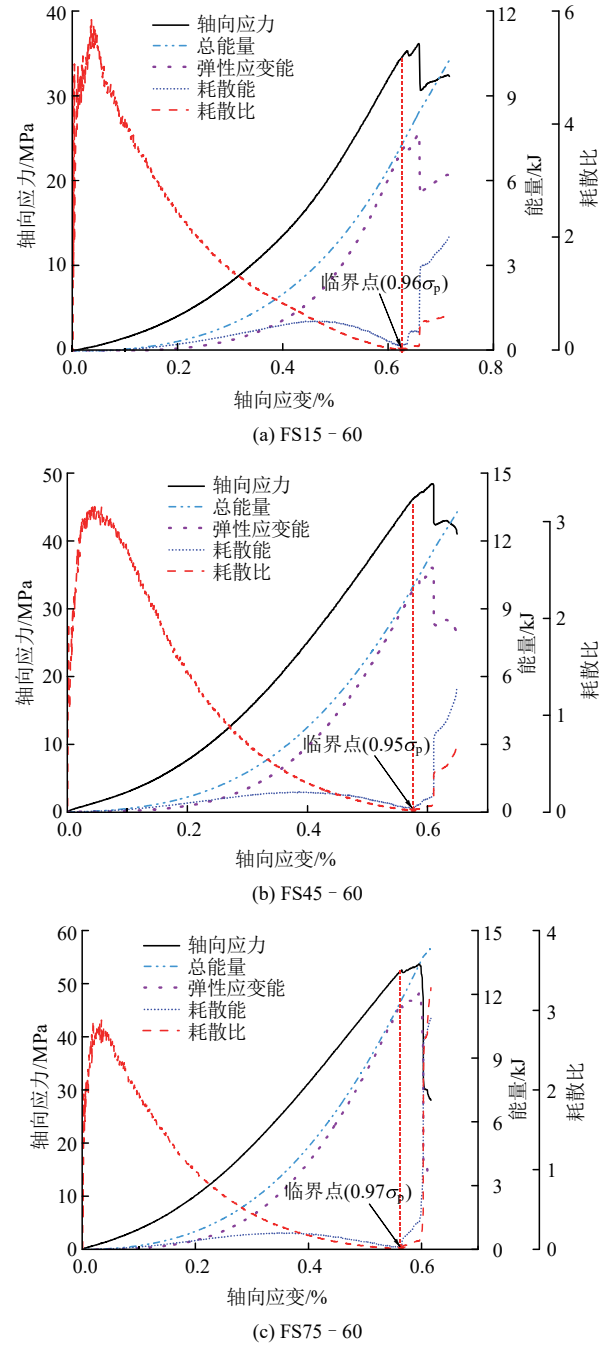


图8 典型裂隙砂岩能量演化特征

Fig.8 Energy evolution of typical flawed sandstone

F. Q. Gong 等^[39]的研究表明任意应力水平下能量转换的过程可以反映岩石的弹性变形和塑性损伤程度，其计算公式为

$$\lambda = \frac{U^e}{U} \quad (30)$$

$$\eta = \frac{U^d}{U} \quad (31)$$

式中： λ 和 η 分别为弹性应变能占比和耗散能占比。

根据式(30)和(31)计算典型裂隙砂岩弹性应变能和耗散能占比，如图9所示。在加载初期，内部

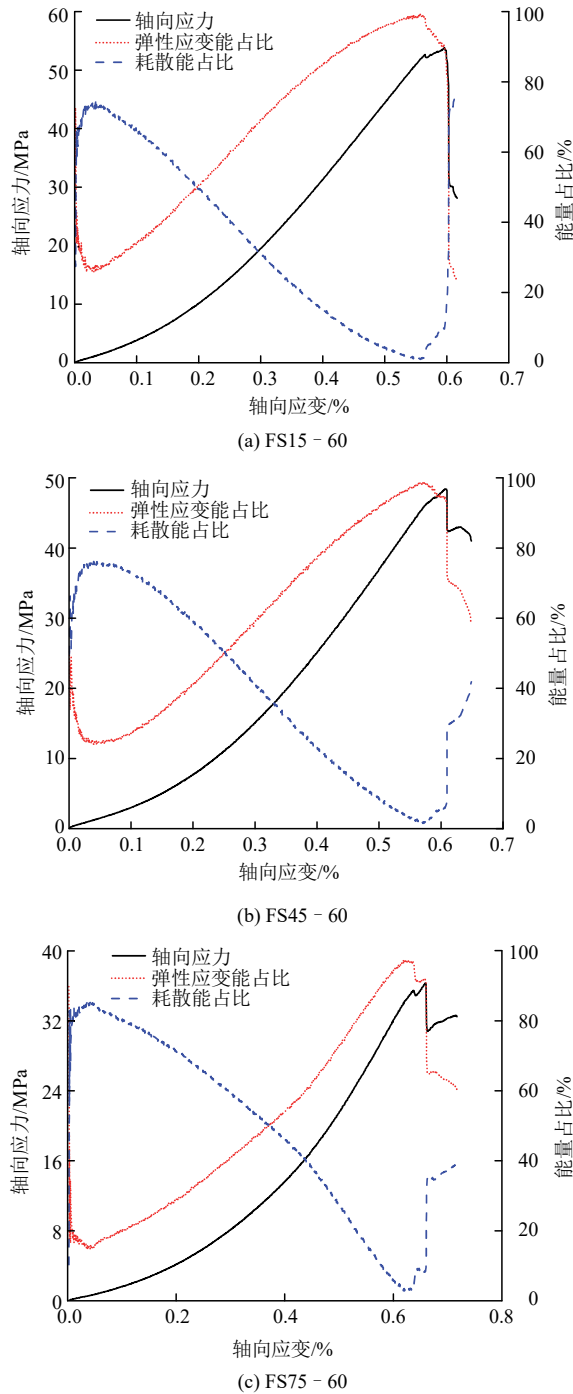


图9 典型裂隙砂岩能量占比曲线

Fig.9 Energy proportion curves of typical sandstone

缺陷的闭合会耗散外界输入的部分能量, 导致耗散能占比有所增大。随着加载持续, 耗散能随变形增加呈非线性增大趋势, 且耗散能占比大于弹性应变能占比, 主要由于砂岩内部的微裂隙发生闭合与摩擦所引起的。在砂岩内部的微裂隙和预制裂隙完全闭合后, 随着荷载的增大, 耗散能占比逐渐减小。此时, 输入的总能量部分以弹性应变能的形式继续储存, 试样损伤较小。耗散能占比有所上升而弹性应变能占比急剧下降, 但变化速率较小, 这主要是

由于在该阶段试样内部少量微裂纹的产生导致部分更多的输入机械能以耗散能形式释放。当达到峰值强度后, 岩石进入宏观破坏阶段。耗散能演化曲线出现急剧增大, 而弹性应变能演化曲线表现为急剧减小, 这是由于内部裂纹迅速扩展贯穿, 导致砂岩丧失承载能力, 积聚在砂岩内的弹性应变能迅速以耗散能的形式释放, 从而引起耗散能曲线出现急剧突增现象。

5 裂隙砂岩破裂综合预警模型

5.1 模型特征

以 FS15-60 为例, 模型输入特征包括损伤变量、弹性能耗比、声发射计数和声发射能量。其中损伤变量为式(11)中的输出变量, 而弹性能耗比、声发射计数和声发射能量为式(11)中的输入变量。在砂岩变形破裂过程中, 裂纹的萌生、扩展和贯通会伴随一系列声发射事件。声发射信号密度与材料内部损伤过程密切相关, 累积声发射信号越大, 通常表明材料内部的损伤程度越高。设累积声发射参量 E_c 为从初始加载到当前时刻所有声发射事件的总和, 损伤变量 D 为累积声发射事件与参考事件的比值。损伤变量的计算公式为

$$D = \frac{E_c}{E_f} \quad (32)$$

式中: E_f 为材料完全破坏时的累积声发射事件。

为验证本文建模的合理性对加载全过程损伤变量进行非参数估计。图 10 展示了加载过程中损伤变量的概率密度非参数估计特征。非参数估计的核函数选用高斯核, 带宽设置为 0.2, 图 10(a)中概率密度的多峰特征表明损伤变量可能会发生突变。由图 10(b)可知, 损伤变量在区间[0, 1]内的分布是非均匀的。在 0.23~0.26 和 0.87~0.90 范围的频数较低, 表明在这些区间内样本较少, 此区间损伤变量发生了突变。在外荷载作用下, 试样内部的微裂纹逐渐闭合, 这种闭合会改变材料的局部应力分布, 导致损伤变量突变。微裂纹闭合往往发生在应力水平较低的区域, 或者在加载过程的早期阶段。因此, 0.3~0.4 范围内损伤变量的突变可能是由微裂纹闭合引起的。当损伤变量的高值区接近 1 时, 材料进入破裂的临界状态, 通常意味着材料接近失效点, 此时概率密度函数可能会显著下降, 反映出样本逐渐离开该区间。0.87~0.90 范围的概率密度下降的原因是试样内微裂纹逐渐连接形成宏观裂纹, 导致该区间的损伤变量稀疏, 概率密度函数值的下降。

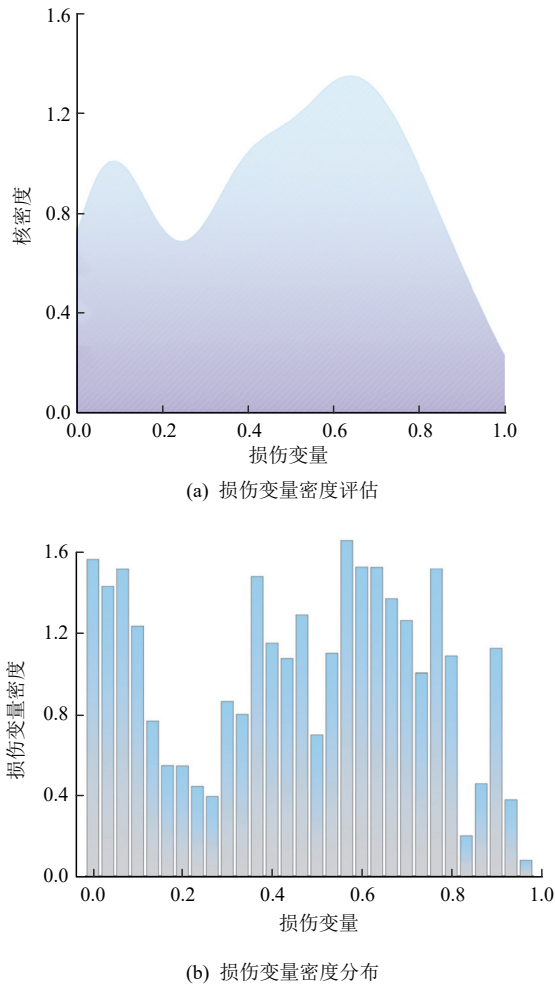


图 10 损伤变量非参数估计结果

Fig.10 Results of non-parametric estimation for damage variables

5.2 模型验证

5.2.1 单一指标预警模型

在岩石受载过程中, 裂纹扩展和孔洞闭合导致能量耗散和储存的动态变化。当裂纹扩展达到某一临界点时, 能量耗散急剧增加, 使系统势函数突变, 控制因子和判别函数变为负值, 表明系统的应力状态和能量分布发生显著变化, 试样产生较大损伤。此外, 控制因子和判别函数小于 0 时, 表明试样内微裂纹已经扩展到一定程度, 岩石整体结构的稳定性降低。

由于篇幅限制, 本文仅列出弹性能耗散比作为单一指标预警模型的输入特征。通过最小二乘法将弹性能耗散比与加载时间拟合得到式(9)中待定参数值, 文中的窗口长度和步距分别设置为 20 和 10 s, 计算结果如图 11 所示。从图 11(a)可以看出, 预警区间位于峰值应力后的裂纹不稳定扩展阶段, 表明某些工况下单一指标预警模型可能无法在失稳前触

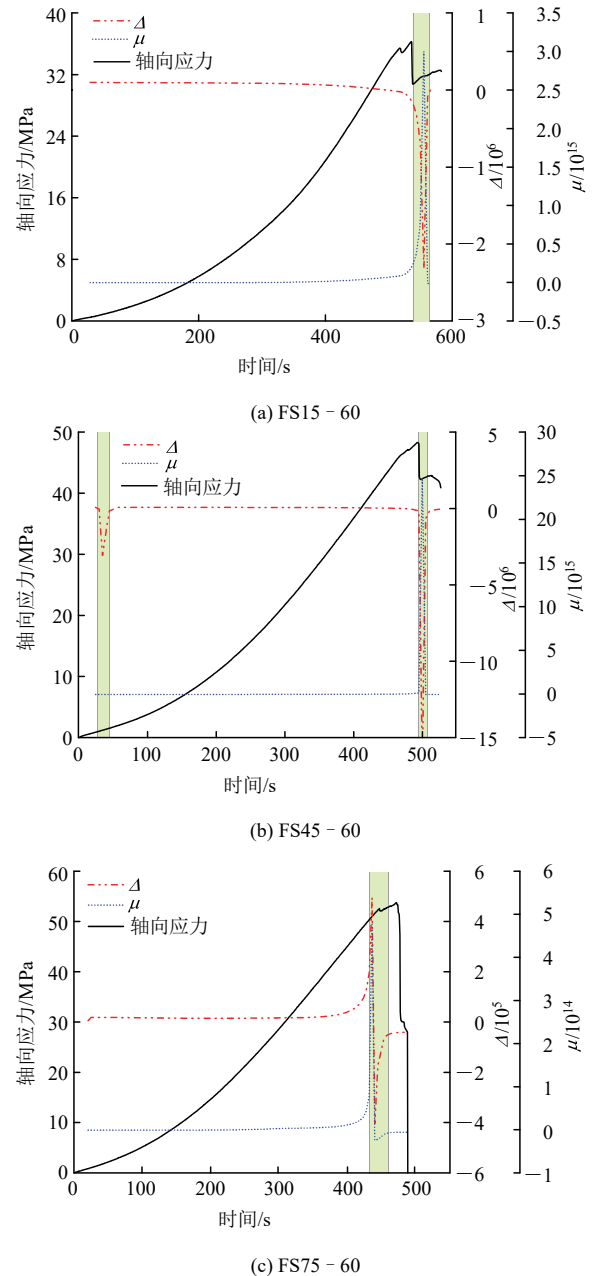


图 11 典型裂隙砂岩单一突变指标演化特征

Fig.11 Evolution of single mutation indexes in typical flawed sandstone

发预警。图 11(b)在加载早期出现了一次控制因子和判别函数均小于 0 的情况, 该现象可能是由于试样在早期加载阶段发生局部破裂导致试样储能能力降低, 耗散能迅速增加, 试样内部微元结构出现塑性变形, 从而出现“假失稳”的现象。

5.2.2 综合预警模型

基于式(20)~(26)计算 3 组典型试样的声发射能量权重、声发射计数权重和弹性能耗散比权重及标准化前后数据范围的统计结果, 如表 1 所示。

借助 Python 利用最大似然估计法对 $\theta = \{a_0,$

表 1 3 组典型裂隙砂岩试样的权重统计结果

Table 1 Statistical results of weights of three typical flawed sandstone samples

试样 编号	原始数据范围			归一化后数据范围			权重		
	声发射能量	声发射计数	弹性能耗散比	声发射能量	声发射计数	弹性能耗散比	声发射能量	声发射计数	弹性能耗散比
FS15 - 60	0~2 381	0~927	0.001~5.521	0~1	0~1	0~1	0.393	0.301	0.306
FS45 - 60	0~2 554	1~603	0.001~3.187	0~1	0~1	0~1	0.397	0.299	0.304
FS75 - 60	0~1 437	1~938	0.001~2.974	0~1	0~1	0~1	0.341	0.349	0.310

$a_1, b_0, b_1, b_2, b_3, c_0, c_1, c_2, c_3\}$ 进行计算, 得到尖点突变模型的平衡方程为

$$\left. \begin{aligned} \mu &= 6.24 \times 10^5 + 5.61 \times 10^6 X_1 + 6.46 \times 10^6 X_2 - \\ &\quad 5.11 \times 10^6 X_3 \\ \nu &= 5.19 \times 10^6 + 7.14 \times 10^6 X_1 + 9.32 \times 10^6 X_2 + \\ &\quad 2.51 \times 10^6 X_3 \\ x &= 12.81 - 3.13 \times 10^3 Y \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

将式(33)代入式(11)和(12), 得到多参量预警模型的判别函数:

$$\Delta_2 = 27(5.19 \times 10^6 + 7.14 \times 10^6 X_1 + 9.32 \times 10^6 X_2 + 2.51 \times 10^6 X_3)^2 + 8(6.24 \times 10^5 + 5.61 \times 10^6 X_1 + 6.46 \times 10^6 X_2 - 5.11 \times 10^6 X_3)^3 \quad (34)$$

图 12 展示了典型裂隙砂岩多指标融合尖点突变模型结果。控制因子和判别函数曲线由正值变为负值的区间预示着试样即将发生突变, 该区间即为预警区间^[40-42]。另外, 尖点突变模型的判别函数和控制因子的突变预示着岩石损伤的开始, 它比声发射参量前兆法更早地预测岩石损伤。融合多个监测指标的尖点突变模型可以更全面地反映岩石的损伤状态。图 12 中的预警区间均位于 $(0.96 \sim 0.98)\sigma_p$, 展现出较高的敏感性与准确性。

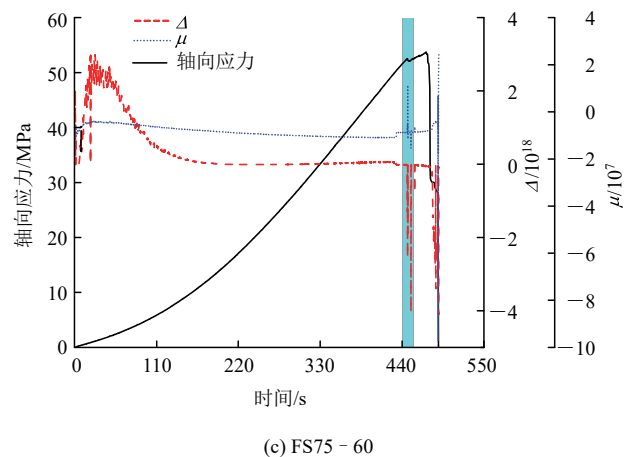
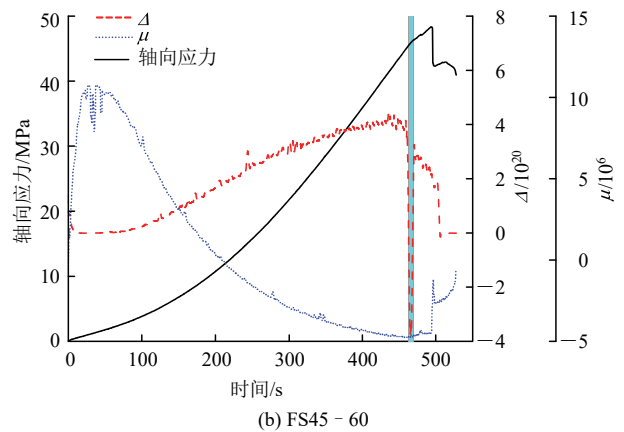
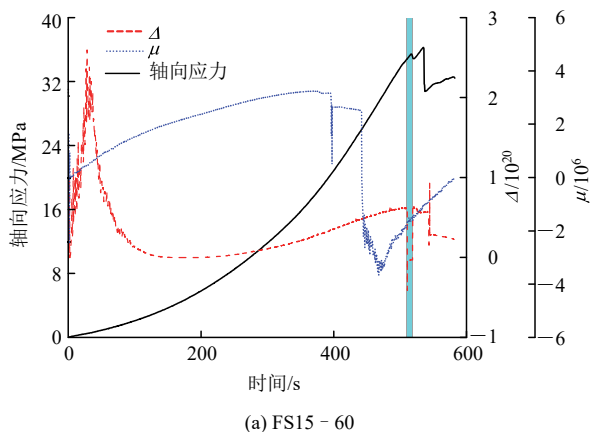


图 12 典型裂隙砂岩多个突变指标演化特征

Fig.12 Evolution of multiple mutation indexes in typical flawed sandstone

对比图 11 和 12 可以发现, 改进后的预警模型比单一指标模型的预警区间范围明显变小, 并减少了误报和漏报的可能性, 能够更好地适应多变的环境。但多指标突变模型建模过程相对复杂, 需要考虑多个指标的权重分配和融合方式。

5.3 预警方法评价

为进一步评价不同预警方法的预警效果, 采用前兆响应系数(PRC)和前兆响应应力比($PRSR$)^[43], 计算公式分别为

$$PRC = \frac{T_p - T}{T} \quad (35)$$

$$PRSR = \frac{\sigma_p}{\sigma_t} \tag{36}$$

式中： T_p 为发生主破断时刻， T 为预警时刻， σ_p 为峰值应力 σ_t 为预警时刻对应的应力。

不同预警方法的 PRC 和 $PRSR$ 计算结果如表 2 所示，由表中计算结果可知，基于综合预警模型的平均 PRC 值为 6.53%，低于其他模型结果。同时，基于综合预警模型的平均 $PRSR$ 值为 96.27%，高于其他模型，表明基于综合预警模型方法具有较高的准确性和可靠性。为进一步分析不同预警方法的效

果，将 PRC 和 $PRSR$ 计算结果的平均值绘制成雷达图，如图 13 所示。由图 13 可知，综合指标预警模型的评价效果优于单一指标预警模型。此外，在单一预警模型中，基于弹性能耗散比构建的模型评价效果优于其他指标。然而弹性能耗散比方法依赖于力学响应，容易产生测量误差，并且预警区间较小，可能影响预警结果。巩妮娜等^[44-45]提出的预警方法在所有试样工况中均出现了“假失稳”现象。相反，融合多个监测指标的尖点突变模型可以更全面地反映岩石的损伤状态，能够更好地适应多变的环境。

表 2 不同预警方法的 PRC 及 $RPSR$ 结果
Table 2 The PRC and $RPSR$ results of different early-warning methods

试样 编号	单一指标预警模型										综合指标预警模型	
	基于声发射 b 值		基于声发射能量方差		基于弹性能耗散比		基于声发射参量 ^[44]		基于能量占比 ^[45]		$PRC/\%$	$PRSR/\%$
	$PRC/\%$	$PRSR/\%$	$PRC/\%$	$PRSR/\%$	$PRC/\%$	$PRSR/\%$	$PRC/\%$	$PRSR/\%$	$PRC/\%$	$PRSR/\%$		
15 - 0	8.27	91.12	7.87	91.76	6.81	95.60	9.20	96.40	7.21	92.33	5.55	97.75
45 - 0	7.34	90.78	8.83	92.76	6.61	95.80	8.70	96.30	8.09	93.17	6.30	96.60
75 - 0	9.09	96.24	11.73	92.87	7.31	95.50	8.30	96.20	11.5	92.50	6.40	96.70
15 - 30	8.57	91.45	8.03	91.89	6.61	96.70	9.00	96.40	7.40	93.14	6.10	96.75
45 - 30	7.73	90.97	9.01	92.70	6.71	96.80	8.40	96.30	8.12	93.17	6.40	96.80
75 - 30	9.17	96.13	10.95	93.02	7.01	96.50	8.50	96.20	11.24	92.71	9.30	96.60
15 - 60	8.27	91.12	7.87	91.76	2.07	99.86	6.50	92.04	7.21	92.33	5.57	94.44
45 - 60	7.34	90.78	8.83	92.76	0.98	99.62	6.79	91.45	8.09	93.17	6.44	93.62
75 - 60	9.09	96.24	11.73	92.87	11.15	91.54	10.21	94.49	11.50	92.50	10.20	94.44
15 - 90	8.11	91.23	7.92	91.74	7.40	94.60	9.10	96.30	7.41	92.65	6.10	96.77
45 - 90	7.30	90.72	8.65	92.98	7.10	94.50	8.30	96.10	8.06	93.15	6.60	96.60
75 - 90	9.02	96.27	10.02	93.15	7.30	95.40	8.40	96.20	11.15	92.91	6.10	96.60
15 - 120	8.34	91.32	7.99	91.63	7.10	94.40	8.20	96.10	7.15	92.53	6.00	96.75
45 - 120	7.11	90.65	8.42	92.83	7.00	96.50	8.10	96.00	7.89	92.80	6.20	96.71
75 - 120	8.90	96.05	10.36	93.21	7.80	95.60	8.50	96.10	11.04	92.86	6.20	96.60
15 - 150	8.41	91.12	8.03	91.76	7.10	95.50	8.60	96.10	7.40	92.54	5.72	96.68
45 - 150	7.63	90.55	8.91	92.60	7.20	95.40	8.50	96.00	8.00	92.90	6.21	96.76
75 - 150	8.96	95.87	10.19	93.40	7.70	95.30	8.30	96.10	11.15	92.78	6.20	96.60
均值	8.26	92.70	9.19	92.54	6.72	95.84	8.42	95.60	8.87	92.79	6.53	96.27

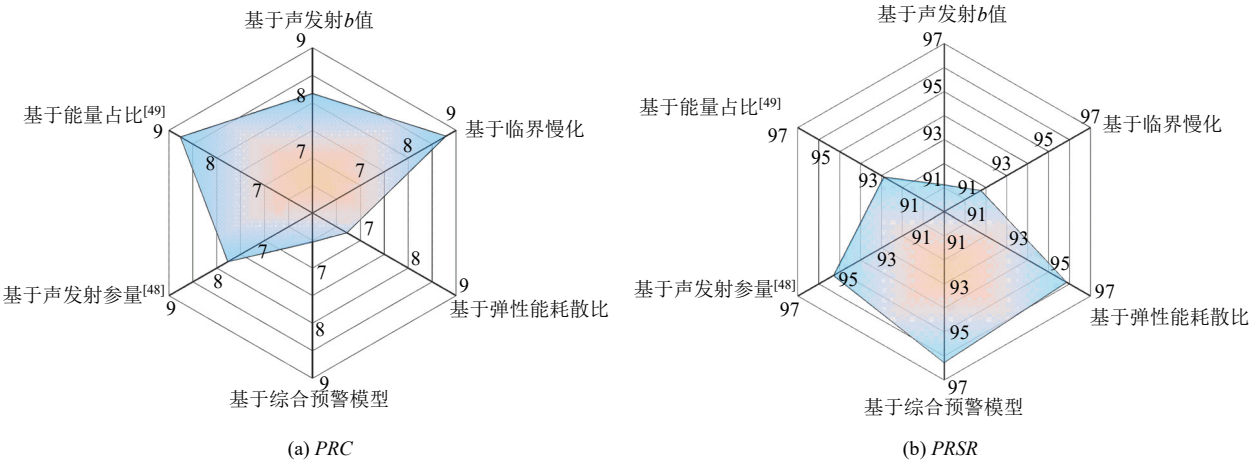


图 13 不同预警方法的 PRC 和 $PRSR$ 平均值(单位: %)
Fig.13 The average values of PRC and $PRSR$ results of different early-warning methods(unit: %)

尽管本文所构建的改进尖点突变理论模型具备一定的预警能力,且预警效果较为理想,但仍存在一定的局限性。首先,基于尖点突变理论和声发射时间序列的早期预警模型研究中,常用泰勒展开式对声发射参量或机械能时间序列进行展开而获得尖点突变模型函数表达式,但泰勒式展开精度难以保证^[46]。其次,模型参数的选择过于依赖经验,具有一定的主观性,可能影响模型的客观性和普适性。此外,本文以声发射技术作为监测手段,模型中的声发射 b 值、声发射能量方差和声发射计数来源于声发射监测数据。声波在岩体内衰减迅速,限制了其传播距离,难以监测深部岩体的破裂行为,这可能导致破裂前噪声的影响被放大。

针对预警模型的不足,亟需开展对应的改进措施:一是引入数据驱动方法,利用遗传算法、粒子群优化等方法选择最适合工程现场复杂工况的参数,从而降低人为因素对模型精度的影响;二是基于循环神经网络^[47]、卷积神经网络^[48]和去趋势波动分析^[49]等处理信号,以实现噪声的有效滤除,提高模型的抗干扰能力;三是综合运用微震监测、电磁辐射或光纤传感等多种监测手段,弥补单一依赖声发射监测的局限性,进一步提升模型的可靠性和适用性。

另外,地下工程巷道围岩所受地质环境极其复杂,矿物重结晶以及热应力的影响导致巷道围岩中形成大量内部裂隙^[50-51]。构建含内部裂隙或孔洞试样的综合预警模型,对明晰围岩破裂致灾机制具有重要意义。不同类型的预制裂隙对岩石破坏模式、裂纹扩展路径及应力释放规律的影响显著不同^[52]。本文仅基于改进尖点突变理论构建含贯穿型裂隙砂岩破坏的综合预警模型。因此,后续研究将采用3D打印或薄片插入技术进一步探讨裂隙或孔洞位于试样内部工况时对岩石力学特性的影响,并构建泛化能力更强的综合预警模型。

6 结 论

本文开展了不同几何构型预制裂隙砂岩单轴压缩同步声发射监测试验,构建了基于声发射能量方差、声发射 b 值、弹性能耗散比等单一指标模型和多指标融合模型,并引入前兆响应系数和前兆响应应力比对比分析了单一指标模型和多指标模型的预警效果。主要结论为:

(1) 在低应力水平阶段,声发射 b 值相对较大,

表明小尺度裂纹事件占优,而声发射参量方差幅值较小且演化相对平稳;在趋近峰值强度时,声发射 b 值急剧下降,表明大破裂尺度事件占优,同时声发射参量方差的幅值急剧增大,预示着试样即将发生破裂。

(2) 裂隙砂岩变形破裂过程中的耗散能与弹性应变能呈现出相反的演变规律,耗散能经历了非线性缓慢上升→缓慢下降→骤然上升3个阶段,此外,弹性能耗散比曲线由上升变为下降的阶段可视为其破裂前兆点。

(3) 基于声发射 b 值、声发射能量方差和弹性能耗散比构建的单一预警模型,其对应的平均前兆响应系数(PRC)分别为 8.26%, 9.19%和 6.72%;同时,平均前兆响应应力比($PRSR$)分别为 92.70%, 92.54%和 95.84%。

(4) 基于声发射能量方差、声发射 b 值和弹性能耗散比构建的综合预警模型,不仅减小了误报和漏报的风险,而且消除了“假失稳”预警区间的问题,其预警区间均位于 $(0.96 \sim 0.98)\sigma_p$, PRC 和 $PRSR$ 平均值分别为 6.53%和 96.27%。同时,需要说明的是,本文模型的训练数据主要来源于室内测试,缺少工程实测数据,故模型在面对复杂噪声环境时的鲁棒性尚需进一步评估。

参考文献(References):

- [1] CHEN L X, GUO W Y, JIANG Y J, et al. Experimental study on influence of lithology on directional propagation law of type-I cracks[J]. Journal of Central South University, 2023, 30: 3 322 - 3 334.
- [2] NIU Y, HU Y J, WANG J G. Cracking characteristics and damage assessment of filled rocks using acoustic emission technology[J]. International Journal of Geomechanics, 2023, 23(4): 04023013.
- [3] LEI R D, BERTO F, HU C, et al. Early-warning signal recognition methods in flawed sandstone subjected to uniaxial compression[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2023, 46(3): 955 - 974.
- [4] 张庆贺, 袁 亮, 方致远, 等. 基于多元监测信息融合的含裂隙类岩石材料破坏规律和预警方法[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(4): 797 - 807.(ZHANG Qinghe, YUAN Liang, FANG Zhiyuan, et al. Failure law and early warning method of precast fractured rock specimen based on multi monitoring information fusion[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2022, 39(4): 797 - 807.(in Chinese))
- [5] ISHIDA T, LABUZ J F, MANTHEI G, et al. ISRM suggested method for laboratory acoustic emission monitoring[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50: 665 - 674.

- [6] OHNO K, OHTSU M. Crack classification in concrete based on acoustic emission[J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(12): 2 339 – 2 346.
- [7] WONG L N Y, XIONG Q Q. A method for multiscale interpretation of fracture processes in Carrara marble specimen containing a single flaw under uniaxial compression[J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2018, 123(8): 6 459 – 6 490.
- [8] BHUIYAN M Y, LIN B, GIURGIUTIU V. Acoustic emission sensor effect and waveform evolution during fatigue crack growth in thin metallic plate[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2018, 29(7): 1 275 – 1 284.
- [9] PODDAR B, GIURGIUTIU V. Detectability of crack lengths from acoustic emission using physics of wave propagation in plate structures[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2017, 36: 41.
- [10] 朱振飞, 陈国庆, 肖宏跃, 等. 基于声发射多参量分析的岩桥裂纹扩展研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(4): 909 – 918.(ZHU Zhenfei, CHEN Guoqing, XIAO Hongyue, et al. Study on crack propagation of rock bridge based on multi parameters analysis of acoustic emission[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(4): 909 – 918.(in Chinese))
- [11] 赵兴东, 李元辉, 袁瑞甫, 等. 基于声发射定位的岩石裂纹动态演化过程研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(5): 944 – 950.(ZHAO Xingdong, LI Yuanhui, YUAN Ruifu, et al. Study on crack dynamic propagation process of rock samples based on acoustic emission location[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(5): 944 – 950.(in Chinese))
- [12] 王笑然, 李楠, 王恩元, 等. 岩石裂纹扩展微观机制声发射定量反演[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(7): 2 627 – 2 643.(WANG Xiaoran, LI Nan, WANG Enyuan, et al. Microcracking mechanism of sandstone from acoustic emission source inversion[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(7): 2 627 – 2 643.(in Chinese))
- [13] ZHANG E H, ZHOU B K, YANG L, et al. Failure characteristic analysis and warning method of sandstone based on catastrophe theory[J]. *Mining, Metallurgy and Exploration*, 2023, 40(5): 1 865 – 1 877.
- [14] 徐晓冬, 孙光华, 姚旭龙, 等. 基于能量耗散与释放的充填体失稳尖点突变预警模型[J]. *岩土力学*, 2020, 41(9): 3 003 – 3 012.(XU Xiaodong, SUN Guanghua, YAO Xulong, et al. A cusp catastrophe warning model for instability of backfill based on energy dissipation and release[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(9): 3 003 – 3 012.(in Chinese))
- [15] LIU G J, PENG Y X, WU L, et al. Stability prediction of surrounding rock in tunnel crossing fault zone based on cusp catastrophe theory[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2024, 28: 4 146 – 4 157.
- [16] 陈国庆, 潘元贵, 张国政, 等. 节理岩桥裂纹扩展的热红外前兆信息研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(10): 242 – 250.(CHEN Guoqing, PAN Yuangui, ZHANG Guozheng, et al. Thermal infrared precursor information of crack propagation for rock bridges[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(10): 242 – 250.(in Chinese))
- [17] CAO K W, MA L Q, ZHANG D S, et al. An experimental study of infrared radiation of sandstone in dilatancy process[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 136: 104503.
- [18] CAO K W, XU Y J, KHAN N M, et al. A comprehensive model for evaluating infrared radiation and acoustic emission characteristics of sandstone fracture[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2023, 283: 109217.
- [19] DUAN S Q, ZHAO G C, JIANG Q, et al. Multi-index fusion database and intelligent evaluation modelling for geostress classification[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2024, 149: 105802.
- [20] TAO K, ZHENG W. Real-time damage assessment of hydrous sandstone based on synergism of AE-CT techniques[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2018, 91: 465 – 480.
- [21] THOM R. Structural stability and morphogenesis: An outline of a general theory of models[M]. London: W. A. Benjamin, Inc, 1977: 38 – 96.
- [22] CHENG H M, YANG X B, LAN Y Q. Investigating rock mutation characteristics and damage state warning model based on energy conversion[J]. *Energy Science and Engineering*, 2024, 12(3): 1 221 – 1 232.
- [23] ZHANG J X, SUN J Q, ZHAO H B, et al. Study on rock mass stability criterion based on catastrophe theory[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 5: 1 – 7.
- [24] 赵康, 敖文强, 伍俊, 等. 不同初始缺陷条件下尾矿胶结充填体损伤突变预警分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(10): 2 400 – 2 411.(ZHAO Kang, AO Wenqiang, WU Jun, et al. Early warning analysis of damage mutation in tailings cemented backfill under different initial defect conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(10): 2 400 – 2 411.(in Chinese))
- [25] GUO C X, FAN L F, HAN K H, et al. Progressive failure analysis of shallow circular tunnel based on the functional catastrophe theory considering strain softening of surrounding rock mass[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 131: 104799.
- [26] COBB L, ZACKS S. Applications of catastrophe theory for statistical modeling in the biosciences[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1985, 80(392): 793 – 802.
- [27] LI P, REN X D, LI J. Damage assessment of concrete via acoustic emission and mesoscopic damage constitutive model[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2024, 303: 110133.
- [28] DAI J J, LIU J F, ZHOU L L, et al. Crack pattern recognition based on acoustic emission waveform features[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(2): 1 063 – 1 076.
- [29] 王迎超, 尚岳全, 孙红月, 等. 基于熵权-理想点法的岩爆烈度预测模型及其应用[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(2): 218 – 221.(WANG Yingchao, SHANG Yuequan, SUN Hongyue, et al. Research and application of rockburst intensity prediction model based on entropy coefficient and ideal point method[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(2): 218 – 221.(in Chinese))

- [30] ISRM Testing Commission. Suggested method for determining tensile strength of rock materials[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1978, 15(3): 99 – 103.
- [31] MOGI K. Magnitude-frequency relations for elastic shocks accompanying fractures of various materials and some related problems in earthquakes[J]. *Bulletin of the Earthquake Research Institute University of Tokyo*, 1962, 40: 831 – 853.
- [32] ISHIDA T, KANAGAWA T, UCHITA Y. Acoustic emission induced by progressive excavation of an underground powerhouse[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 71: 362 – 368.
- [33] GUTENBERG B, RICHTER C. Seismicity of the earth and associated phenomena[M]. Princeton: Princeton University Press, 1949: 1 – 68.
- [34] SCHEFFER M, BASCOMPTE J, BROCK W, et al. Early-warning signals for critical transitions[J]. *Nature*, 2009, 461: 53 – 59.
- [35] 孟庆彬, 辛学奎, 宋子鸣, 等. 巷道开挖过程中围岩能量耗散特征[J]. *采矿与安全工程学报*, 2024, 41(1): 142 – 150.(MENG Qingbin, XIN Xuekui, SONG Ziming, et al. The energy dissipation characteristics of surrounding rock during roadway excavation[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2024, 41(1): 142 – 150.(in Chinese))
- [36] ZHAO Y, DANG S, BI J, et al. Energy evolution characteristics of sandstones during confining pressure cyclic unloading conditions[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(2): 953 – 972.
- [37] ZHENG Q Q, QIAN J W, LI P F, et al. Dynamic energy evolution and fragmentation characteristics of damaged rock under impact compression loading[J]. *Applied Geophysics*, 2024, 21(2): 232 – 245.
- [38] 高美奔, 李天斌, 陈国庆, 等. 基于岩石峰前起裂及峰后特征的脆性评价方法[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(4): 762 – 768.(GAO Meiben, LI Tianbin, CHEN Guoqing, et al. Brittleness evaluation method based on pre-peak crack initiation and post-peak characteristics of rock[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(4): 762 – 768.(in Chinese))
- [39] GONG F Q, ZHANG P L, XU L. Damage constitutive model of brittle rock under uniaxial compression based on linear energy dissipation law[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 160: 105273.
- [40] QIAO C, GUO Y H, LI C H. Study on rock burst prediction of deep buried tunnel based on cusp catastrophe theory[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2021, 39(2): 1 101 – 1 115.
- [41] 徐 恒, 王贻明, 吴爱祥, 等. 基于尖点突变理论的充填体下采空区安全顶板厚度计算模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(3): 579 – 586.(XU Heng, WANG Yiming, WU Aixiang, et al. A computational model of safe thickness of roof under filling body based on cusp catastrophe theory[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(3): 579 – 586.(in Chinese))
- [42] LI G, LUO Z Y, WU C Z, et al. Integrated early warning and reinforcement support system for soft rock tunnels: A novel approach utilizing catastrophe theory and energy transfer laws[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2024, 150: 105869.
- [43] 赵 菲, 孟世卓, 刘冬桥, 等. 基于声发射信号特征的花岗岩岩爆破破坏前兆信息研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(11): 2 669 – 2 868.(ZHAO Fei, MENG Shizhuo, LIU Dongqiao, et al. Failure precursor of granite rockburst based on acoustic emission signal characteristics[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(11): 2 669 – 2 868.(in Chinese))
- [44] 巩妮娜, 胡少伟, 范向前, 等. 基于灰色 - 尖点突变理论的钢筋混凝土I-II复合型断裂过程分析[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(1): 37 – 43.(GONG Nina, HU Shaowei, FAN Xiangqian, et al. Mixed mode I-II fracture process of reinforced concrete based on grey and cusp catastrophe theory[J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(1): 37 – 43.(in Chinese))
- [45] 徐晓冬, 孙光华, 姚旭龙, 等. 基于能量耗散与释放的充填体失稳尖点突变预警模型[J]. *岩土力学*, 2020, 41(9): 3 003 – 3 012.(XU Xiaodong, SUN Guanghua, YAO Xulong, et al. A cusp catastrophe warning model for instability of backfill based on energy dissipation and release[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(9): 3 003 – 3 012.(in Chinese))
- [46] LI B L, WANG E Y, LI Z H, et al. Automatic recognition of effective and interference signals based on machine learning: A case study of acoustic emission and electromagnetic radiation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2023, 170: 105505.
- [47] DI Y Y, WANG E Y, LI Z H, et al. Method for EMR and AE interference signal identification in coal rock mining based on recurrent neural networks[J]. *Earth Science Informatics*, 2021, 14: 1 521 – 1 536.
- [48] LI B, WANG E Y, SHANG Z, et al. Deep learning approach to coal and gas outburst recognition employing modified AE and EMR signal from empirical mode decomposition and time-frequency analysis[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, 90: 103942.
- [49] REN F Q, GAO Z Y, MA K, et al. Rockburst probability early warning method based on integrated infrared temperature and acoustic emission parameters[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2025, 189: 106097.
- [50] WANG Y T, XING D Y, YU M L, et al. Experimental study of internal deformation in 3D solids with embedded parallel cracks during the fracture process using multi-material 3D printing and stereo digital image correlation[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2025, 137: 104884.
- [51] WANG Y F, WANG H J, ZHU Z D, et al. Propagation and fracture mechanism of an internal crack in brittle solid based on 3D-ILC under uniaxial tension[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2025, 139: 105019.
- [52] 王文海, 蒋力帅, 何 鑫, 等. 基于砂型 3D 打印的复杂节理岩体变形破坏特征试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(3): 754 – 767.(WANG Wenhai, JIANG Lishuai, HE Xin, et al. Experimental study on deformation and failure characteristic of complex jointed rock mass based on sand-powder 3D printing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(3): 754 – 767.(in Chinese))