

采矿与岩层控制工程学报

JOURNAL OF MINING AND STRATA CONTROL ENGINEERING



高应力巷道围岩板裂岩爆模拟试验及声发射频域研究

常新科 吴顺川 程海勇 代风 张侦锐

Experimental study and acoustic emission frequency domain analysis of spalling-rockburst in high-stress tunnel surrounding rock

CHANG Xinke, WU Shunchuan, CHENG Haiyong, DAI Feng, ZHANG Zhenrui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.yszt-1022>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于真三轴卸载试验不同倾角组合煤岩力学特性研究

Mechanical properties of coal and rock with different dip angles based on true triaxial unloading test

采矿与岩层控制工程学报. 2024, 6(2): 023037–023037 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20231222.001>

岩样破裂过程声发射参数特征与时频特性分析

Analysis of acoustic emission parameters and time–frequency characteristics in the process of rock sample fracture

采矿与岩层控制工程学报. 2023, 5(1): 013015–013015 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20220923.003>

基于声发射的含锚固缺陷节理试样单轴压缩破裂机制研究

Investigation on fracture mechanism of anchored rock with anchor defect and existing joint under uniaxial compression based on acoustic emission

采矿与岩层控制工程学报. 2024, 6(4): 043038–043038 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.2024.04.003>

基于AO优化VMD–小波包的岩石破裂声发射信号去噪算法

Modified denoising algorithm of rock fracturing acoustic emission signal based on AO optimized VMD–wavelet packet

采矿与岩层控制工程学报. 2023, 5(6): 063067–063067 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20230825.001>

深部直墙拱形巷道围岩板裂破坏的试验研究

Experimental study on spalling failure of rock in deep arch roadway with vertical walls

采矿与岩层控制工程学报. 2024, 6(4): 043032–043032 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.2024.04.013>

煤应变型冲击破坏尺寸效应声发射特征试验研究

Experimental study on the size effect of acoustic emission characteristics of coal strainbursts

采矿与岩层控制工程学报. 2023, 5(3): 033031–033031 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20230428.001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

常新科, 吴顺川, 程海勇, 等. 高应力巷道围岩板裂-岩爆模拟试验及声发射频域研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024, 6(6): 063025.

CHANG Xinke, WU Shunchuan, CHENG Haiyong, et al. Experimental study and acoustic emission frequency domain analysis of spalling-rockburst in high-stress tunnel surrounding rock[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(6): 063025.

高应力巷道围岩板裂-岩爆模拟试验及声发射频域研究

常新科^{1,2,3}, 吴顺川^{1,2,3}, 程海勇^{1,2,3}, 代风^{1,2,3}, 张侦锐^{1,2,3}

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 自然资源部高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室, 云南 昆明 650216; 3. 云南省高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室, 云南 昆明 650216)

摘要: 为了揭示高应力环境下巷道围岩的板裂-岩爆破坏机制, 针对深埋巷道赋存的“高地应力+应力调整”环境, 在实验室内对含圆形通孔的灰岩试样进行真三轴试验。试验过程中, 采用微型摄像机和声发射监测系统记录试样孔洞产生的宏观破坏现象及其内部微观损伤释放的瞬态弹性波。通过快速傅里叶变换将声发射波形从时域转换到频域, 建立了表征频率能量迁移特性的FR参数, 重点研究了巷道围岩的板裂-岩爆破坏过程及其对应的声发射频域信息演化规律。研究结果表明: 巷道围岩的板裂-岩爆破坏过程可分为平静阶段、小颗粒弹射阶段、板裂剥落阶段和岩爆喷射阶段; 在板裂-岩爆过程中, 垂直应力引起的张性破坏和水平应力引起的剪性破坏共同作用, 导致了“V”形岩爆坑的形成; 通过声发射峰值频率和频率质心可将信号进一步分为低频信号、次低频信号、次高频信号和高频信号, 分别对应岩石内部不同的裂纹尺度和破坏模式; 不同频率信号的共现现象和FR参数的阶跃特征, 反映了岩石内部结构的剧烈变化; 岩爆的发生主要取决于围岩的应力状态和岩体的储能极限, 板裂作为岩爆的充分不必要条件, 促进了岩爆的演化。

关键词: 岩石力学; 真三轴试验; 板裂-岩爆; 声发射; 频域信息

中图分类号: TU458

文献标志码: A

文章编号: 2096-7187(2024)06-3025-14

Experimental study and acoustic emission frequency domain analysis of spalling-rockburst in high-stress tunnel surrounding rock

CHANG Xinke^{1,2,3}, WU Shunchuan^{1,2,3}, CHENG Haiyong^{1,2,3}, DAI Feng^{1,2,3}, ZHANG Zhenrui^{1,2,3}

(1. School of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geocological Restoration in Plateau Mountainous Area, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Kunming 650216, China; 3. Yunnan Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geocological Restoration in Plateau Mountainous Area, Kunming 650216, China)

Abstract: To elucidate the spalling-rockburst mechanisms in tunnel surrounding rock under deep, high-stress environments, true triaxial loading tests were conducted on limestone specimens with circular through-holes.

收稿日期: 2024-05-20

修回日期: 2024-06-21

责任编辑: 施红霞

DOI: 10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.yszt-1022

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51934003, 52304132); 云南省重大科技资助项目(202202AG050014)

作者简介: 常新科(1994—), 男, 甘肃嘉峪关人, 博士研究生, 主要从事岩石力学试验与岩石类材料声发射技术等方面的研究工作。E-mail: changxinke@foxmail.com

通信作者: 吴顺川(1969—), 男, 安徽无为, 教授, 博士, 主要从事岩土工程、采矿工程等方面的研究和教学工作。E-mail: wushunchuan@ustb.edu.cn

These experiments simulated the conditions of deep-buried tunnels subjected to "high geostress + stress adjustment". A micro-camera and an acoustic emission(AE) monitoring system were used to record the macroscopic failure phenomena around the boreholes and the transient elastic waves released by micro-damage. The AE waveforms were transformed from the time domain to the frequency domain using Fast Fourier Transform (FFT), and the frequency energy migration was characterized by establishing the FR parameter. The study focused on the spalling-rockburst failure process and the evolution of frequency-domain acoustic emission signals. Results indicate that the spalling-rockburst process of the surrounding rock can be divided into four stages: the quiet stage, particle ejection stage, spalling detachment stage, and rockburst ejection stage. Tensile damage induced by vertical stress and shear damage caused by horizontal stress jointly contribute to the formation of a "V"-shaped rockburst crater. The peak frequency and frequency centroid of AE signals classify them into four types: low-frequency, sub-low-frequency, sub-high-frequency, and high-frequency signals, corresponding to different crack scales and damage modes in the rock. The co-occurrence of these frequency signals and the stepwise changes in FR parameters reflect significant internal structural changes within the rock. Rockburst occurrence is primarily determined by the stress state of the surrounding rock and the energy storage capacity of the rock mass. While spalling is a sufficient but not necessary condition for rockburst, it accelerates its evolution.

Key words: rock mechanics; true triaxial test; spalling-rockburst; acoustic emission; frequency-domain information

深部工程存在于复杂的高地应力环境中, 围岩的稳定性是深部资源开采的安全基础^[1-4]。在深部工程的建设过程中, 采场、巷道、硐室等开挖边界会在强卸荷或其他外界扰动作用下形成次生应力场, 其破坏过程一般由开挖边界向远离开挖边界发展, 在应变能的急剧转化与释放过程中易诱发板裂-岩爆破坏。板裂破坏会促使围岩形成薄板状结构, 在外界扰动下可进一步发展成岩爆破坏^[5-6]。岩爆作为深部硬岩工程建设中突出的灾害类型, 具有发生频度高、预测难度大、破坏力强等特点^[7-8]。随着我国资源开采及地下岩体工程向深部发展, 巷道围岩发生板裂-岩爆破坏日益凸显, 深入研究高应力环境下巷道围岩板裂-岩爆破坏的互动演化机制, 成为深部工程建设及防灾减灾亟需解决的关键问题。

实验室的模拟试验是研究巷道围岩板裂-岩爆破坏的重要方法^[9-10]。由于真三轴试验能够提供独立且互不相等的三向荷载作用 ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$), 模拟自然状态下的岩体应力, 学者们的试验方法从单轴、双轴、常规三轴、直接剪切和劈裂霍普金森压杆逐步向真三轴试验发展。DU 等^[11]通过真三轴试验分析了不同 σ_2 和 σ_3 条件下的岩石破坏机制; 罗丹旒等^[12]对长方体试样进行单面临空的真三轴试验, 分析了花岗岩板裂-岩爆的演化过程; GONG^[13]、王

炆^[14]等采用微型摄像机记录了含圆形通孔和含椭圆形通孔试样板裂-岩爆的演化过程; 司雪峰等^[15]对立方体试样开展了先加载、后钻孔卸荷的模拟试验, 实现了圆形隧洞在内部卸荷条件下的板裂-岩爆破坏; 刘冬桥^[16]、赵光明^[17]等利用真三轴试验机研究了扰动荷载对岩石能量积聚和耗散的影响。这些基于真三轴试验的研究成果丰富了对围岩板裂-岩爆机制宏观现象的理解。然而, 上述研究主要依赖于传统的宏观观测手段, 缺乏对微观裂纹演化过程的细致监测。在实验室测试过程中, 若能利用先进的监测技术从微观层面获取围岩内部裂纹的动态发展状态, 将有助于进一步揭示围岩板裂-岩爆破坏之间的互动机制。

声发射 (Acoustic Emission, AE) 技术是现有监测技术中的一种重要方法, 其能实时、连续地记录岩石内部由微损伤萌生、发育、聚合释放的瞬态弹性波, 提供关于裂纹发育、扩展及贯通的详细信息, 因此被广泛应用于各类岩石力学试验中, 是目前公认从微观层面监测岩石内部动态变化的有效手段^[18-20]。关于 AE 信号的分析方法主要集中在波形时域参数分析和频域频谱分析两个方面。AE 信号时域参数分析提供了关于岩石破裂行为及损伤程度的定性描述^[21-23]; AE 信号频域信息包含了岩石

受力状态、微观结构、物理力学性质和其组合特征等信息^[24-25], 因此能更好地反映岩石在板裂-岩爆演化过程中的内部结构状态及其综合性质。杨丽蓉等^[26]运用时频算法对岩石断裂前的 AE 信号进行分析, 获得了内部裂隙的扩展状态; HUO^[27], WANG^[28] 等表明 AE 频谱的特征点与岩石板裂-岩爆的破坏模式及裂纹特征都存在紧密联系。这些研究表明, AE 信号的频域频谱分析在揭示微观裂纹动态和破坏模式方面具有重要作用。这为理解岩石在高应力条件下的破坏行为提供了新的视角。然而, 目前关于含圆形通孔试样在真三轴试验条件下发生板裂-岩爆破坏的 AE 频域研究相对较少, 且主要集中于 AE 主频的分析。在数据分析过程中, 仅关注单一的 AE 主频参数可能会忽视频域信息的全局特征。因此, 有必要展开更全面的 AE 频域分析, 以研究板裂-岩爆破坏时的裂纹扩展和能量释放机制, 从而为高应力环境下围岩板裂-岩爆破坏的预测与防治提供科学依据。

笔者采用宏观-微观相结合的研究思路, 以云南省某金属矿地下 1 000 m 埋深的采场巷道围岩为样本, 在实验室制备成含圆形通孔的正立方体试样, 基于真三轴试验机、微型摄像机和 AE 监测系统, 模拟深部巷道围岩在高应力环境下发生的板裂-岩爆破坏, 实时记录其宏观和微观信息。重点研究巷道围岩板裂-岩爆宏观破坏现象及其微观 AE 频域信息演化规律, 以揭示板裂-岩爆破坏间的互动机制。

1 真三轴试验设计

1.1 试样制备

按照中国岩石力学与工程学会发布的《岩石真三轴试验规程》^[29], 在实验室将云南省某金属矿地下 1 000 m 埋深采场巷道取样的灰岩制备成含圆形通孔 ($\phi 50$ mm) 的正立方体 (边长 100 mm) 试样, 尺寸偏差 ± 0.1 mm, 端面不平整度偏差 ± 0.02 mm, 相邻两面垂直偏差 $\pm 0.25^\circ$, 相对端面不平行度偏差 ± 0.02 mm, 如图 1 所示。

1.2 试验设备

试验系统由真三轴试验机、微型摄像机和 AE 监测系统组成。真三轴试验机水平方向 (x, y 轴) 可施加的最大荷载为 3 000 kN, 垂直方向 (z 轴) 可施加的最大荷载为 5 000 kN, 可对试样施加三向六面

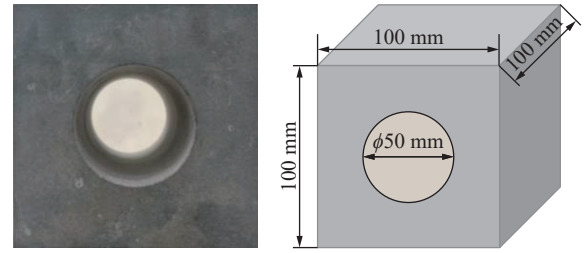


图 1 灰岩试样

Fig. 1 Limestone specimen

荷载作用, 实时采集试样的应力与变形。微型摄像机帧速率为 60 fps, 可安装在试样封装体内, 记录试样孔洞产生宏观破坏的完整过程。AE 信号采集系统采用 DS-16C 全信息采集仪, 可实时记录试样损伤释放的全部瞬态弹性波。AE 传感器型号为 RS-2A, 中心频率为 150 kHz, 频谱响应在 50~400 kHz 相对平坦, 可有效避免高频谐振效应。试验现场如图 2 所示。

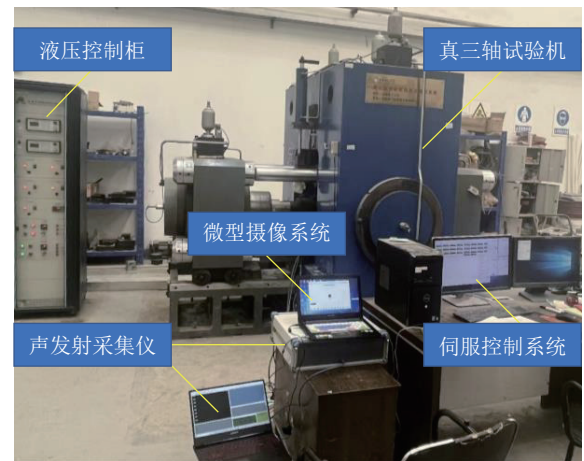


图 2 试验现场

Fig. 2 Test site

1.3 试验方案

在实际工程中, 巷道布置方向有沿最大水平主应力、最小水平主应力及与最大水平主应力斜交 3 种^[30]。本次试验结合现场情况, 主要模拟 1 000 m 埋深下巷道沿最大水平主应力方向布置时发生的板裂-岩爆破坏。采用 STEPHANSSON 等^[31] 根据实测结果获得的地应力计算公式:

$$\begin{cases} \sigma_v = \gamma H \\ \sigma_H = 0.044 4H + 6.7 \\ \sigma_h = 0.032 9H + 0.8 \end{cases} \quad (1)$$

式中, γ 为岩体平均容重, 27 kN/m³; H 为岩体埋深, 1 000 m; σ_v , σ_H 和 σ_h 分别为垂直应力、最大水平主应

力和最小水平主应力, MPa。

通过式 (1) 计算可得垂直应力 $\sigma_v=27.0$ MPa, 最大水平主应力 $\sigma_H=51.1$ MPa, 最小水平主应力 $\sigma_h=33.7$ MPa。为了给试样提供更稳定的围压, 确保每次试验条件的一致性, 在真三轴试验过程中, 对两个水平主应力 σ_H 和 σ_h 进行取整处理, 即 $\sigma_H=50$ MPa, $\sigma_h=30$ MPa, 其中, 最大水平主应力、最小水平主应力、垂直应力方向分别与笛卡尔坐标系的 x, y, z 轴方向相同。

试验开始前, 将微型摄像机固定在含圆形通孔金属压块的中心, 工作时开启光源补偿, 录制角度与试样 σ_H 方向相同。鉴于试验装置结构限制以及将 AE 传感器直接固定在试样表面可能存在的板裂-岩爆冲击风险, 决定将 8 个传感器组成的监测阵列固定在施加水平围压的金属压块表面, 每个金属压块表面安装 2 个传感器。在传感器固定过程中使用真空硅脂对各接触面之间进行了声学耦合, 确保信号的有效传递。这种布设方式能够保障传感器在加载过程中的稳定性和安全性, 同时避免了高频信号的损失^[32]。真三轴试验的 AE 信号采样参数见表 1。真三轴压力机加载方式采用应力控制, 速率为 0.1 MPa/s。试验开始时, 同步启动力学试验系统、视频录制系统和 AE 信号采集系统, 确保各系统的试验数据在时间尺度上的一致性。

表 1 声发射信号采样参数

Table 1 Acoustic emission signal sampling parameter

采样率/MHz	前置放大器/dB	阈值/dB	PDT/ μ s	HDT/ μ s	HLT/ μ s
2.5	40	54	150	150	300

注: PDT 为峰值鉴别时间; HDT 为撞击鉴别时间; HLT 为撞击锁闭时间。

深部岩体在开挖完成后, 围岩受力状态可视为“高地应力+应力调整”的组合作用^[15, 33-34], 因此, 本文在孔洞产生明显宏观破坏现象后, 将垂直方向的加载方式调整为分级加载控制。加载路径可进一步分为初始应力加载控制、垂直荷载连续加载控制和垂直荷载分级加载控制。试样初始应力状态及真三轴试验加载路径如图 3 所示。

(1) 初始应力加载控制。首先, 以 0.1 MPa/s 的加载速率, 沿 x, y, z 轴方向将试样同步加载至垂直应力($\sigma_v=27$ MPa)状态; 然后, 保持 z 轴方向的垂直应力(σ_v), 以相同的加载速率, 沿 x, y 轴方向将试

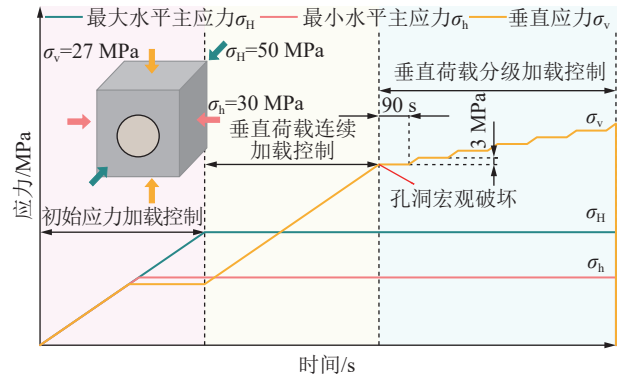


图 3 试样初始应力状态及真三轴试验加载路径
Fig. 3 Initial stress state of specimen and loading path of true triaxial test

样同步加载至初始最小水平主应力($\sigma_h=30$ MPa)状态; 最后, 保持 y 轴方向的最小水平主应力(σ_h)和 z 轴方向的垂直应力(σ_v), 再以相同的加载速率, 沿 x 轴方向将试样加载至初始最大水平主应力($\sigma_H=50$ MPa)状态。

(2) 垂直荷载连续加载控制。保持 x 轴方向的最大水平主应力(σ_H)和 y 轴方向的最小水平主应力(σ_h), 以相同的加载速率, 沿 z 轴方向连续增加垂直荷载, 直至试样孔洞产生明显宏观破坏现象。

(3) 垂直荷载分级加载控制。将 z 轴方向加载方式调整为分级加载控制, 每级增加 3 MPa, 保载时间为 90 s, 待试样孔洞结构断裂后停止试验。

2 试样宏观破坏分析

通过常规岩石力学试验测试, 灰岩试样的平均单轴抗压强度为 87.08 MPa, 平均抗拉强度为 5.66 MPa, 平均弹性模量 84.60 GP, 平均泊松比 0.23, 平均内摩擦角 38.71°, 平均黏聚力 27.42 MPa。为减少试验过程中产生随机误差, 开展了 3 次平行试验。图 4 为灰岩试样真三轴试验实际加载应力路径。

由图 4 可知, L-1 试样、L-2 试样和 L-3 试样孔洞产生明显宏观破坏现象时的垂直应力分别为 80.00, 70.00, 85.00 MPa, 对应的时间分别为第 1010.70, 937.86, 1086.36 s, 分别经历了 7 级、9 级和 8 级分级加载控制, 从宏观破坏现象出现至孔洞结构断裂所需的垂直应力增量分别为 18.01, 24.02, 21.01 MPa, 最终破坏时所需的垂直应力为 98.01, 94.02, 106.01 MPa。基于各试样整体试验结果较为一致, 限于篇幅, 本文仅选取 L-3 试样作为代表性结果进行系统性描述。

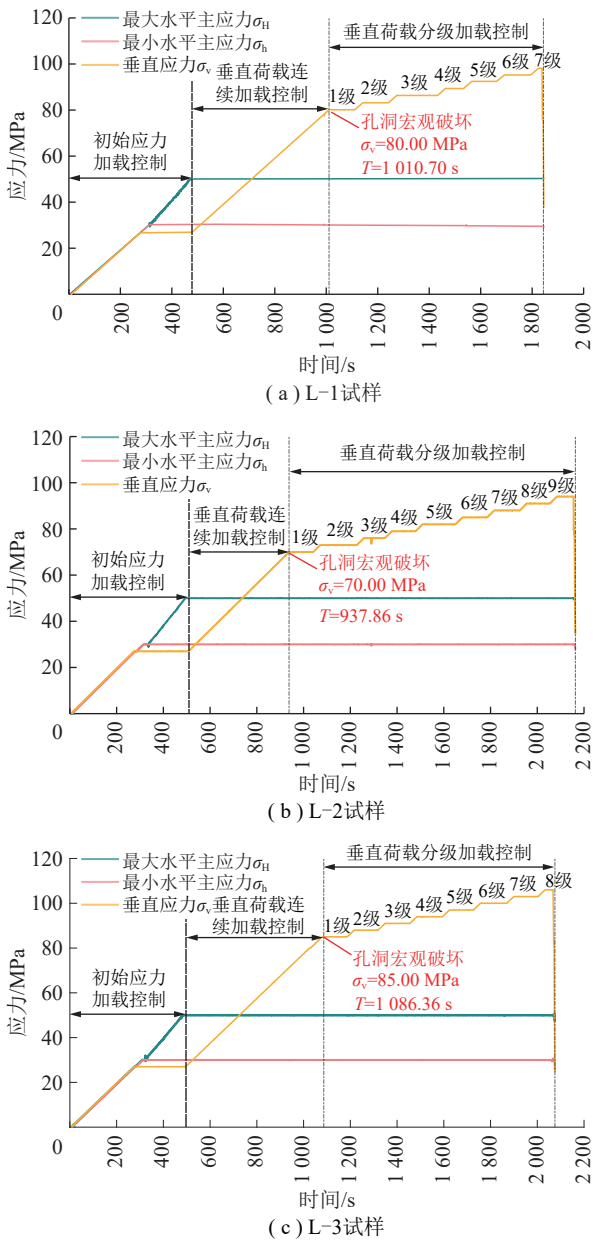


图4 灰岩试样真三轴试验实际加载应力路径

Fig. 4 Real loaded stress path curves of true triaxial tests on the limestone specimen

2.1 试样破坏过程分析

微型摄像机完整地记录了试样孔洞发生的小颗粒弹射、局部开裂、板裂破坏、岩片剥落、损伤贯

通和岩爆喷射等宏观破坏现象。笔者结合试样的实际加载应力,从微型摄像机记录的视频数据中提取了试样孔洞发生的典型宏观破坏特征,如图5所示。

分析图5可知,在初始应力加载控制阶段,试样结构处于逐步压紧的状态,当 σ_v 达到22.44 MPa时,孔洞顶部的松散小颗粒被逐步增加的三向荷载挤压掉落(图5(a));在试样达到初始应力状态时,孔洞结构未出现明显宏观破坏现象(图5(b));随后,试样进入垂直荷载连续加载控制阶段,当 σ_v 达到88.07 MPa时,在微型摄像机监视屏幕上观测到了右侧洞壁产生的小颗粒剧烈弹射现象(图5(c))。

在试样进入垂直荷载分级加载控制阶段后,当 σ_v 增加至90.99 MPa时,右侧洞壁产生了1条与孔洞轴向平行的裂纹,该裂纹在荷载的进一步作用下表现出向孔洞轴向继续延伸的趋势(图5(d));当 σ_v 达到94.00 MPa时,右侧洞壁发生了板裂破坏,破坏形成的薄片状岩屑逐步剥落。随着板裂破坏范围的进一步扩大,右侧洞壁上的损伤区域沿孔洞轴向相互贯通。在此期间,左侧洞壁未发生明显宏观破坏现象(图5(e)~(f))。

左侧洞壁发生明显开裂的时刻为第1521.70 s,此时右侧洞壁在原有的损伤区域上产生了新的板裂破坏,损伤区域表现出向临空面屈曲的特征,但由于试样存在的黏聚力,形成的大尺寸岩片并未完全剥落(图5(g));当 σ_v 达到99.40 MPa时,左侧洞壁和右侧洞壁相继发生了剧烈的板裂破坏,并表现出明显的层裂特征,形成的薄片状碎屑连续地剥落,滑向孔洞底部(图5(h));当 σ_v 达到106.00 MPa时,左侧洞壁的板裂破坏区域发生初次贯通,右侧洞壁的板裂破坏区域则在原有基础上形成二次贯通,破坏范围也进一步向远离开挖边界扩展(图5(i))。DIEDERICHS^[35]认为板裂破坏会导致围岩发生屈曲变形,为应变型岩爆能量的突然释放创造条件。

在第8次分级保载期间,即试验进行到第2062.72



(a) 第228.52 s($\sigma_v=22.44$ MPa)

(b) 第500.00 s(初始地应力)

(c) 第1319.19 s($\sigma_v=88.07$ MPa)

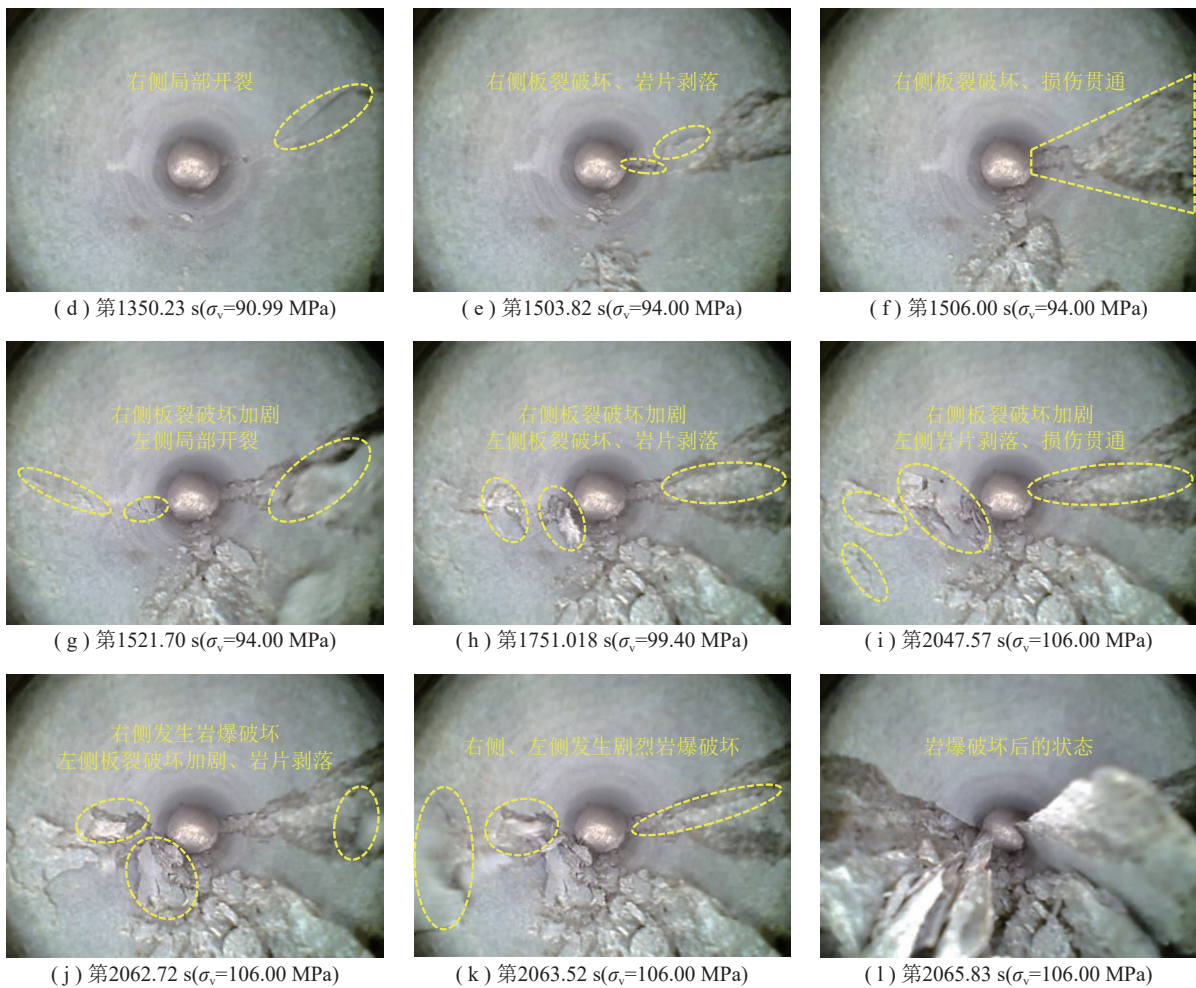


图5 灰岩试样孔洞损伤破坏演化过程

Fig. 5 The whole process of rockburst evolution in the limestone specimen of the borehole

s 时, 试样孔洞发生了岩爆破坏, 孔洞两侧的岩屑剧烈地向临空面喷射, 当试验进行至第 2063.52 s 时, 这种岩屑喷射现象进一步加剧, 并伴有清晰声响, 如图 5(j)~(k) 所示; 当试验进行至第 2065.83 s 时, 孔洞两侧产生的碎屑尺寸明显增大。在岩爆发生后, 孔洞结构发生断裂破坏, 破坏后的试样在孔洞底部堆积着大量的薄片状岩屑 (图 5(l))。

综上可知, 灰岩试样在初始应力加载控制阶段, 其内部结构处于逐步压紧状态, 表现为孔洞顶部的松散小颗粒被挤压掉落。在垂直荷载连续加载控制阶段, 内部结构仍较为稳定, 未产生明显的宏观破坏现象。在垂直荷载分级加载控制阶段, 发生在孔洞壁上的各类宏观破坏现象相继产生, 具体表现为小颗粒弹射、板裂破坏、损伤贯通、层裂并向临空面屈曲以及剧烈的岩屑喷射。因此, 从宏观角度可以将灰岩试样孔洞板裂-岩爆破坏过程分为 4 个典型阶段, 即平静阶段、小颗粒弹射阶段、板裂剥落

阶段、岩爆喷射阶段。

值得一提的是, 图 5 中试样右侧洞壁发生的板裂-岩爆破坏相比左侧更为剧烈。然而, 在真三轴试验条件下, 当预制的圆形通孔位于试样正中心时, 其两侧的破坏情况理论上应当完全对称, 但由于岩石是一种天然的非均质材料, 内部存在着不同尺寸的缺陷, 受各向异性、尺寸效应及试验设备等因素的影响, 试验中很难观测到孔洞两侧同步破坏的现象, 这与大多数试验^[15, 30-34]的破坏情况相一致。

2.2 试样破坏形态分析

为进一步研究灰岩试样孔洞洞壁板裂-岩爆破坏后的损伤形态, 在试验结束后清理了堆积在孔洞底部的岩石碎屑, 具体破坏形态如图 6 所示。

由图 6 可知, 灰岩试样的两侧洞壁均发生了板裂-岩爆破坏, 并在洞壁上形成了 1 条与试样尺寸近似相等的“V”形岩爆坑。在岩爆坑表面分布着许多与 σ_v 方向平行的裂纹, 裂纹长度与其距开挖边

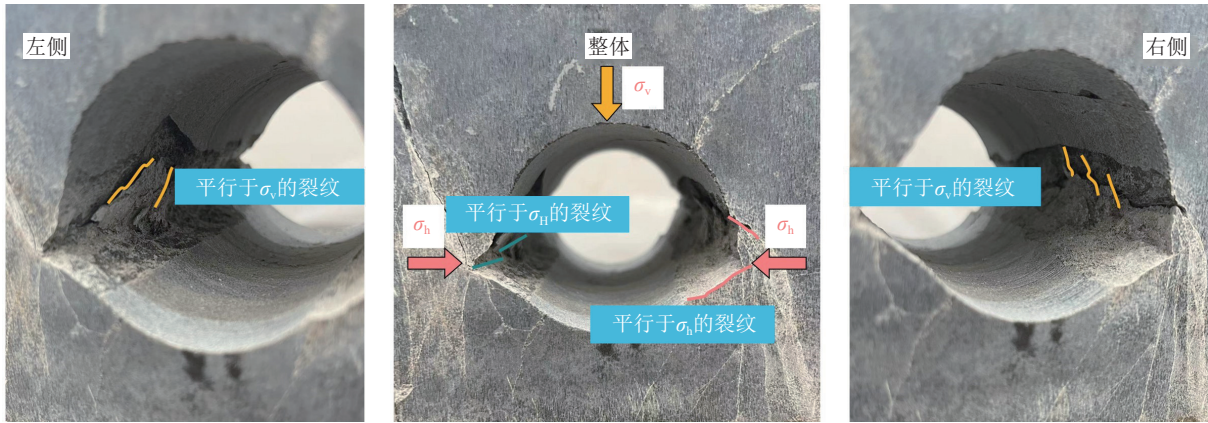


图6 灰岩试样洞壁板裂-岩爆破坏形态

Fig. 6 Limestone specimen borehole spalling-rockburst damage pattern

界的距离成负相关,即距离开挖边界越远,裂纹长度越短。进一步分析可知,这些裂纹与岩爆坑的最终形态密切相关,是岩爆坑呈现出“V”形的关键因素。此外,在岩爆坑内部和岩爆坑尖端还分布着一些与 σ_H 和 σ_h 方向平行的裂纹,分析认为这些裂纹与试样水平方向的剪切作用相关,是围岩板裂破坏呈现层裂特征的主要原因。

在外界荷载作用下,当围岩的应力集中超过其抗拉强度时,内部结构首先会萌生出与 σ_v 方向平行的张性裂纹,导致围岩发生板裂破坏。围岩水平方向的主应力则会直接作用在板裂结构上,产生剪性破坏,使其呈现层裂特征。张性裂纹与剪性裂纹的相互交织、封闭,共同决定了屈曲的岩屑尺寸,为岩爆发生提供了必要的物质基础。在岩爆发生时,这些尺寸不一的岩屑就会随着能量的突然释放向临空面喷射,最终在洞壁上形成“V”形岩爆坑。

3 声发射信号频域信息分析

在真三轴试验条件下,灰岩试样内部结构会在荷载作用下发生变化,释放出不同频率、不同能量的AE信号。通过对岩石破坏释放的AE信号进行频域分析,可以从微观角度分析板裂-岩爆破坏过程中内部结构的动态损伤发育状态。

在进行AE信号频域分析前,将AE传感器全部通道(CH1~CH8)采集的数据,依次进行触发传感器通道重复判定、相邻事件幅值衰减判定、相邻事件能量衰减判定和相邻事件撞击锁闭时间判定,可以筛选出由同一AE事件诱发的波形集合。图7为真三轴加载过程的第19.0334 s至第19.0338 s时,各通道采集到的同一AE事件诱发的波形集合。

由图7可知,由于波形传播路径的不同,导致各通道采集到的波形形态存在一定差异,但通过结合各通道记录的到达时间、幅值、能量等特征参数,可以在频域分析过程中实时、动态调整分析通道,匹配出最能反映AE源本征特征的优势AE事件。在第19.0334 s至第19.0338 s时,CH4通道记录的AE波形到达时间最早、幅值最高、能量最大,因此该通道记录的信号即为表征AE源的优势事件。

3.1 声发射信号频谱信息提取方法

AE信号属于能量信号,根据DIRICHLET条件^[36]可直接通过离散时间傅里叶变换进行频谱分析。频谱分析中包含幅频谱和相频谱,在AE频域频谱分析中最常用的是幅频谱。

对于采样长度为 N 的AE信号 $x[n]$,离散时间傅里叶变换公式为

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi}{N} nk} \quad (2)$$

式中, k 为频率索引; e 为自然对数的底; j 是虚数单位($j^2=-1$)。

快速傅里叶变换^[37]是离散傅里叶变换的快速算法。通过快速傅里叶变换,可以获取AE信号的幅频谱。峰值频率(Peak Frequency, PF)和频率质心(Frequency Centroid, FC)是幅频谱中最具代表性的两个频域参数,反映了AE信号频率及能量的分布特点。PF通常也被称为AE主频,是AE信号幅频谱图中峰值幅值对应的频率;FC是一个加权平均值,表征频率能量的相对占比,FC计算公式^[38]为

$$f_{FC} = \int_0^k f X[k] dk / \int_0^k X[k] dk \quad (3)$$

式中, f 为频率; $X[k]$ 为快速傅里叶变换的结果。

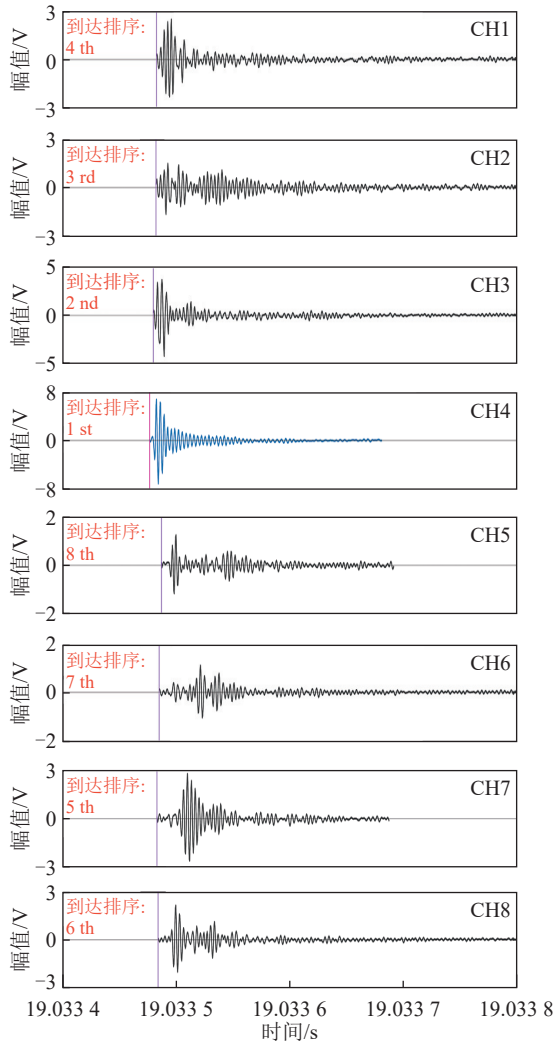


图7 同一声发射事件诱发的波形集合

Fig. 7 Waveform comparison of a single acoustic emission event across multiple channels

笔者借助 MATLAB 软件进行编程, 对灰岩试样释放的全部 AE 信号进行快速傅里叶变换 (该算法在数据长度为 2^N 时可以显著地提高计算效率, N 为正整数), 将其从时域转换到频域, 从而获得其幅频谱。图 8 为试验过程中某一 AE 信号 PF 和 FC 的提取计算过程。该 AE 信号幅频谱中的峰值幅值为 6.98 V, 对应的峰值频率 PF 为 118.41 kHz, 经式 (3) 计算该信号的 FC 为 273.87 kHz。

3.2 声发射信号频域信息分布特征

基于反映 AE 信号频率特性的 PF 和 FC 参数, 选择高斯核函数进行核概率密度估计, 通过构建平滑的概率密度曲线, 对 PF 和 FC 的分布特征进行分析, 如图 9 所示。核概率密度估计方法有助于显示 AE 信号在频域内的自然聚集趋势, 可以进一步将灰岩试样板裂-岩爆演化过程中的 AE 信号细分为

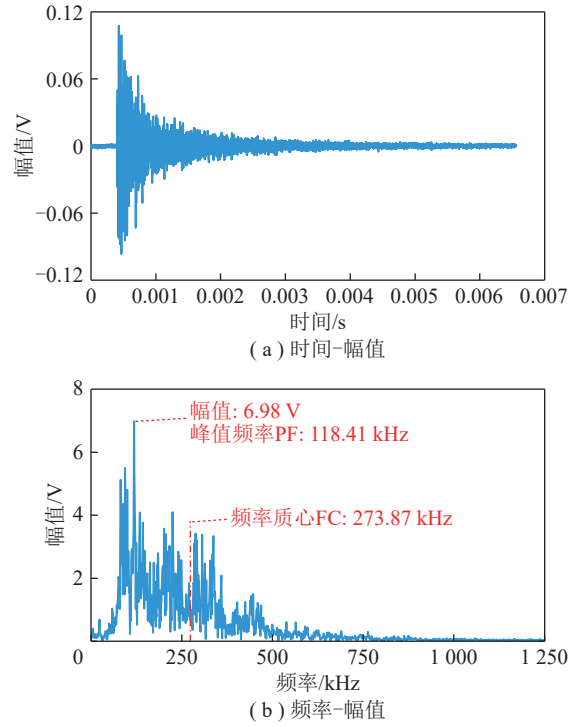


图8 声发射信号频域信息提取过程

Fig. 8 Frequency domain information extraction process of acoustic emission signal

4类 (Class1~Class4), 分别对应低频、次低频、次高频和低频信号, 具体统计结果见表 2。

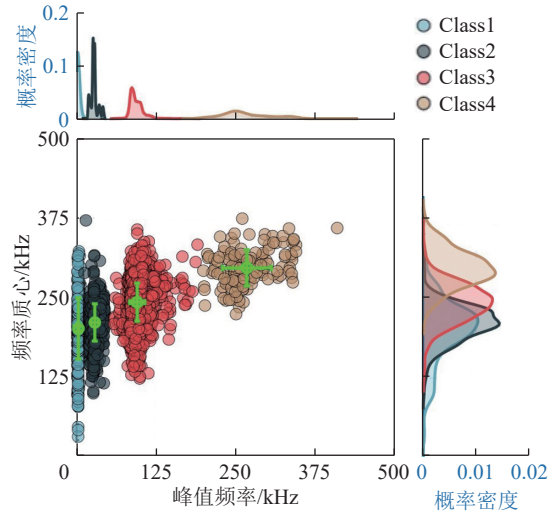


图9 声发射信号频域信息分布特征

Fig. 9 Characteristics of frequency domain information distribution of acoustic emission signals

分析图 9 和表 2 可知, Class1~Class4 信号 PF 分布区间相互独立, 分布范围随频率的增加逐步扩大, 各类信号的众数 (概率密度函数曲线峰值) 均小于其平均值。相反的, FC 分布区间相互重叠, 分布范围随频率的增大逐步缩小, 平均值则随频率的增

表 2 声发射信号频域信息统计结果
Table 2 Statistical results of frequency domain information of acoustic emission signals

类别	峰值频率 PF/kHz			频率质心 FC/kHz		
	均值	众数	分布范围	均值	众数	分布范围
Class1	2.85	2.59	[1.22, 10.99]	200.89	214.52	[30.59, 322.30]
Class2	28.56	26.99	[12.21, 45.17]	210.55	212.02	[98.77, 370.99]
Class3	95.08	87.67	[58.59, 189.82]	242.24	246.26	[122.09, 356.60]
Class4	267.24	249.31	[198.98, 408.94]	296.30	288.95	[223.44, 373.85]

大逐步增大, 众数则无明显规律。总的来说, Class1 信号 PF 和 FC 的平均值最小, PF 分布范围最窄, FC 分布范围最广; Class4 信号 PF 和 FC 的平均值最大, PF 分布范围最广, FC 分布范围最窄; Class3 信号数量占比最多, Class4 信号数量占比最少。各类信号的 FC 均高于 PF, 表明灰岩试样板裂-岩爆破坏释放的 AE 信号其高频成分携带了较多的能量, 这种情况与 AE 源的裂纹特征有关。

由于各类信号的 FC 分布区间相互重叠, 难以直接进行对比分析, 因此, 需要将其转换到同一尺度进行定性分析。归一化处理不会改变数据的物理含义, 只是将其映射到[0, 1]区间, 转换为无量纲的纯数值, 解决了不同数据在同一尺度下的可比性^[39]。AE 信号的 FC 归一化表达式为

$$FC_n = (FC - FC_{\min}) / (FC_{\max} - FC_{\min}) \quad (4)$$

式中, FC_n 为归一化的频率质心; FC_{\min} 和 FC_{\max} 分别为频率质心的最小值和最大值。

将归一化的 FC 按等份分为 (0, 0.25], (0.25, 0.50], (0.50, 0.75] 和 (0.75, 1.00), 分别对应低 FC、次低 FC、次高 FC 和高 FC。FC 的数值反应了频率成份和能量的集中程度, 较高水平的 FC 表示信号的高频成分占优, 较低水平的 FC 则表示信号的低频成分占优。归一化 FC 在各类信号中的占比统计结果如图 10 所示。

由图 10 可知, 围岩板裂-岩爆破坏过程中的 Class3 信号占比最多, 且能量成分最为丰富, 代表了岩石内部微裂纹的持续发育和扩展状态; 较低频率信号 (Class1 和 Class2) 与缓慢、低能事件相关, 代表了岩石内部原生孔隙、裂隙的压密闭合; 高频信号 (Class4) 则与快速、高能事件相关, 代表了围岩发生的板裂-岩爆破坏。

3.3 声发射信号频域信息演化特征

为了进一步分析试样板裂-岩爆演化过程中

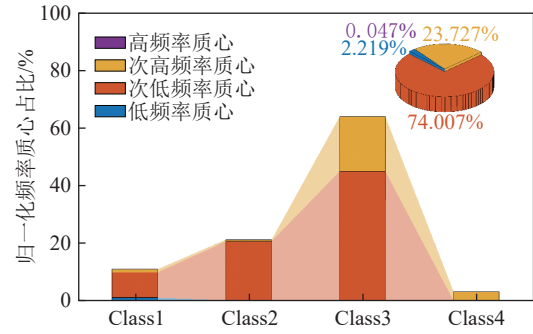


图 10 各类信号归一化频率质心占比统计结果

Fig. 10 Normalised frequency centroid percentage statistics results

AE 频率能量的演化特征, 建立了反映频率能量迁移特性的 FR 参数。FR 为单位时间内平均 FC 与平均 PF 的比值, 其计算公式为

$$FR(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n FC_i(t) / \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n PF_i(t) \quad (5)$$

式中, $FC_i(t)$ 为 t 时刻 AE 信号的第 i 个频率质心; $PF_i(t)$ 为 t 时刻 AE 信号的第 i 个峰值频率; n 为 t 时刻的 AE 事件数。

灰岩试样在真三轴试验条件下的 AE 信号频域信息演化特征如图 11 所示。图 11 中圆圈的颜色代表了不同频率的信号, 圆圈尺寸则代表信号归一化 FC 的高低。

由图 11 可知, 灰岩试样板裂-岩爆演化过程的各个阶段对应着不同频率的 AE 信号。其中, 次高频信号几乎贯穿试验全过程 (绿色实线); 在试验加载的过程中还出现了不同频率信号的共现现象, 分别发生在试验的第 19 s、第 1500 s 和第 2060 s 附近 (黑色虚线), 在这些关键时刻产生的信号具有较高的 FC 值。频率成分及其能量分布的复杂化预示着试样内部结构产生的剧烈变化。

在初始应力加载控制阶段, AE 信号较为密集, 且 PF 相对分散, FR 呈现出相对剧烈的波动特征。这是因为灰岩试样受到三向荷载作用, 试样内部的原生孔隙及微裂隙被压密闭合, 矿物颗粒不断地发生重新排列以适应新的应力状态, 剧烈的晶格错动使得该阶段 AE 信号频域信息呈现出复杂化的特征。随着试样被压实, 高频和低频信号不再出现, FR 波动特征也变得相对平稳, 预示着试样晶格错动减弱。但在此期间, 即板裂-岩爆破坏过程的平静期阶段, FR 出现了 2 次明显的阶跃特征, 其出现的时间刚好提前于孔洞顶部松散小颗粒被挤压掉落的时刻。

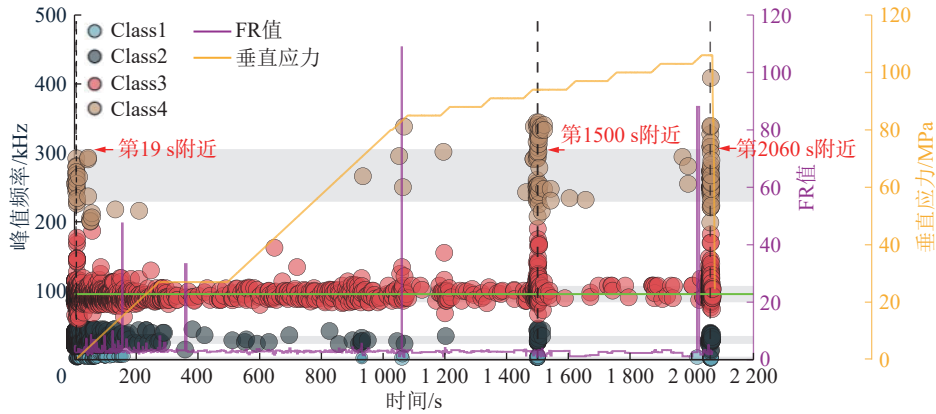


图 11 声发射信号频域信息演化特征

Fig. 11 Characteristics of information evolution in the frequency domain of acoustic emission signals

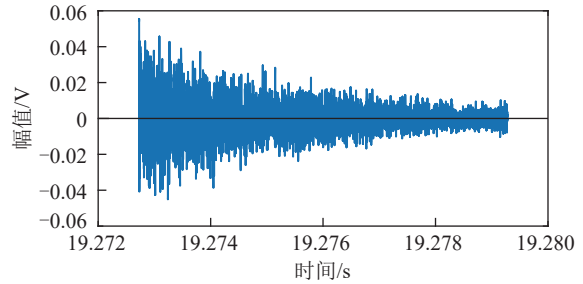
这表明 FR 参数对试样内部结构产生的剧烈变化具有极高的灵敏性, 宏观破坏通常滞后于微观损伤的发育。

在垂直荷载连续加载控制阶段, AE 信号频域演化特征相对稳定, 仅在 σ_v 达到 85.00 MPa 时, 不同频率的信号才相继涌现, FR 也再次出现了阶跃特征, 这与试样即将进入小颗粒弹射阶段, 即孔洞发生明显宏观破坏的时刻相对应。

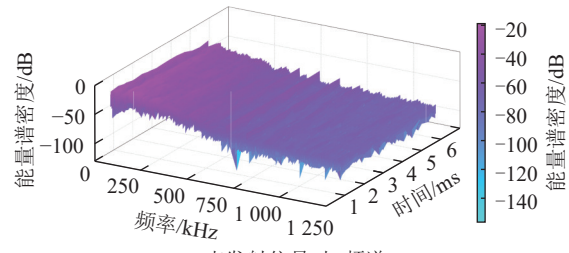
在垂直荷载分级加载控制阶段, 试验加载到第 1500 s 和第 2060 s 附近时, 不同频率信号的共现现象和 FR 阶跃特征再次出现, 分别对应着试样发生的板裂-岩爆破坏, 这进一步证实了 FR 参数对试样内部结构产生的剧烈变化具有极高的灵敏性。

为了探究板裂-岩爆破坏过程中不同频率信号的共现时刻的频率能量演变特征, 在这些关键时间范围内筛选了持续时间最长的 AE 信号进行了时-频分析, 获得了信号能量谱密度和时-频脊 (信号能量在时-频平面上分布的高能量区域), 如图 12~14 所示。

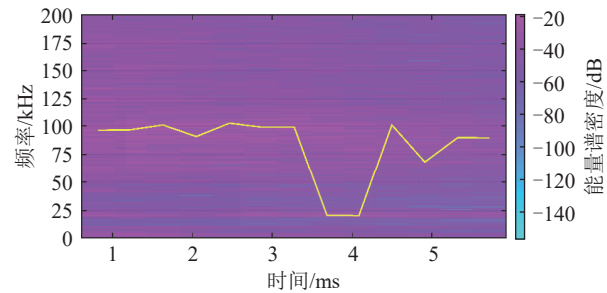
分析图 12~14 可知, 第 19 s 的 AE 信号为突发型信号, 波形幅值较低, 能量谱密度集中在 100 kHz 附近, 在时-频脊演化过程中出现了跌落特征; 第 1500 s 的 AE 信号同样为突发型信号, 但波形幅值较大, 能量谱密度稳定在 100 kHz 附近; 第 2060 s 的 AE 信号则为连续型信号, 波形幅值较大, 能量谱密度集中在 100 kHz 附近, 在时-频脊演化过程中出现了攀升特征。综合来看, AE 信号在岩爆破坏发生前多为突发型信号, 在岩爆破坏期间多为连续型信号。波形幅值的大小与试样内部破坏强度相关, 第 19 s 时主要是原生孔隙的压密、闭合, 第



(a) 声发射信号



(b) 声发射信号时-频谱

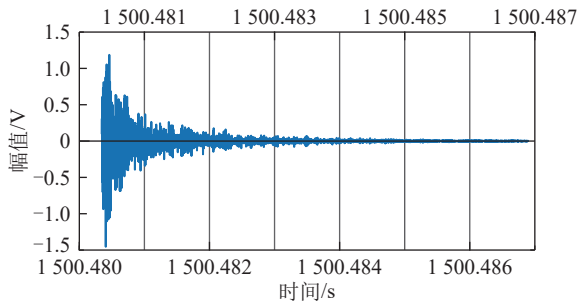


(c) 声发射信号时-频脊

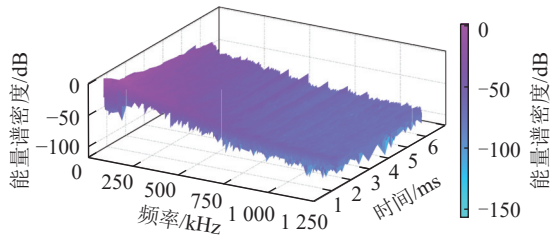
图 12 第 19 s 声发射信号时-频演化特征

Fig. 12 Time-frequency evolution characteristics of the 19th second acoustic emission signals

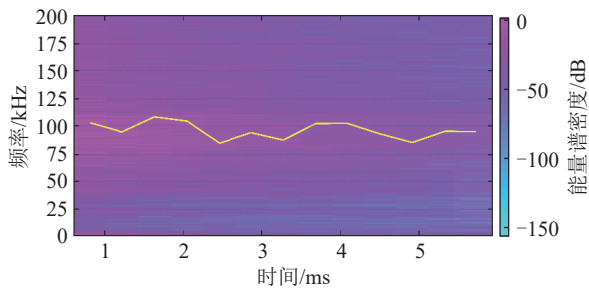
1500 s 时为围岩发生的板裂破坏, 第 2060 s 时则为围岩发生的岩爆破坏。这 3 个时刻的峰值能量谱密度均集中在 100 kHz, 具有一定的相似性, 但在时-频脊的演化特征上表现出明显的差异。原生孔隙的压密、闭合事件速率较慢, 能量较小; 岩爆破坏事件速率较快, 能量较大, 二者的时-频脊表现出了相



(a) 声发射信号



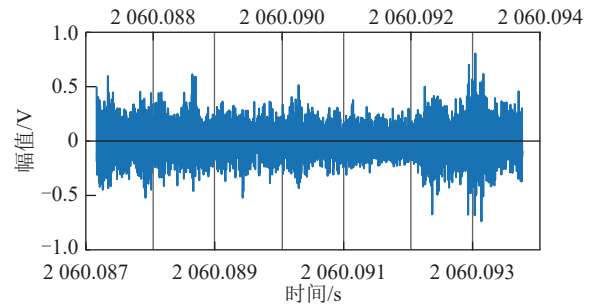
(b) 声发射信号时-频谱



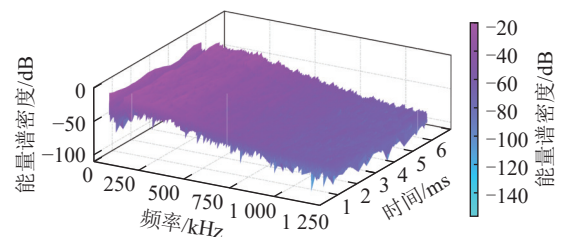
(c) 声发射信号时-频脊

图 13 第 1500 s 声发射信号时-频演化特征

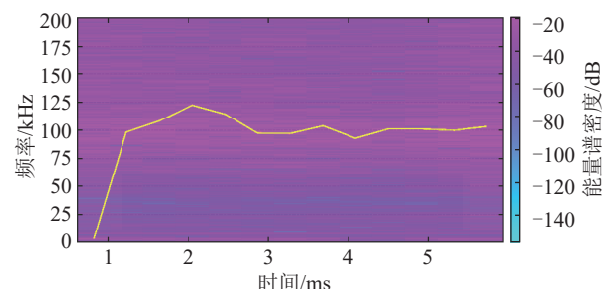
Fig. 13 Time-frequency evolution characteristics of the 1500th second acoustic emission signals



(a) 声发射信号



(b) 声发射信号时-频谱



(c) 声发射信号时-频脊

图 14 第 2060 s 声发射信号时-频演化特征

Fig. 14 Time-frequency evolution characteristics of the 2060th second acoustic emission signals

反的特征。板裂破坏则由持续作用的张性和剪性荷载导致,时-频脊特征较为稳定。

综上所述,不同的频率信号代表了灰岩试样内部不同的破坏模式和裂纹尺度。低频和次低频信号主要集中在灰岩试样压密的平静期,代表了原生孔隙的压密、闭合;次高频信号占比最多,且连续出现在试样板裂-岩爆破坏过程的各个阶段,这主要与晶粒或颗粒之间的摩擦滑移事件相关,代表了内部结构持续发生微观损伤;高频信号占比最少,主要分布在试样板裂剥落和剧烈岩爆破坏期间,代表了宏观裂隙的扩展、贯通。

板裂与岩爆表现出很强的相关性,板裂可作为岩爆的充分条件,其能促进岩爆的演化,但不是岩爆的必要条件。这是因为板裂的层裂特征会创造新的弱面或裂隙面,降低围岩整体强度,增加局部应力集中,为岩爆积累能量和提供必要的物质基础。因此,在板裂破坏发生后更易出现岩爆破坏。然而,

岩爆破坏不一定需要板裂破坏作为先决条件,岩爆主要取决于围岩的应力状态和岩体的储能极限,在其他裂纹扩展机制影响下同样可以诱发岩爆破坏。在地下工程建设中,围岩原有的应力状态通常会在强卸荷或其他外界扰动作用下发生改变,形成局部的应力集中区,并储存一定的弹性能。当围岩的次生应力超过岩体强度、积累的弹性能超过岩体储能极限时,在二者的相互耦合作用下,岩体就会突然地释放出大量能量并引发连锁反应,使得围岩结构迅速断裂发生岩爆。因此,板裂破坏是岩爆破坏的充分不必要条件,理解这一点对制定有效的岩爆预防和控制措施至关重要。

4 结论

通过对含圆形通孔灰岩试样进行真三轴试验,模拟了巷道围岩在“高应力+应力调整”状态下发生板裂-岩爆破坏的过程,从宏观-微观角度分析了板

裂-岩爆破坏间的互动机制, 获得的主要结论如下:

(1) 从宏观角度可以将灰岩试样孔洞发生板裂-岩爆的破坏过程分为 4 个典型阶段: 平静阶段、小颗粒弹射阶段、板裂剥落阶段和岩爆喷射阶段。垂直应力产生张性破坏是灰岩洞壁形成的“V”形岩爆坑的关键因素, 而水平主应力产生的剪性破坏是导致板裂破坏呈现层裂特征的主要原因。

(2) 通过声发射信号的峰值频率和频率质心可将信号分为 4 类: 低频信号、次低频信号、次高频信号和 高频信号, 分别对应试样原生孔隙的压密、微裂隙的萌生、内部结构持续发生微观损伤以及试样宏观裂隙的扩展与贯通。

(3) 通过 FR 参数的演化特征可以反映频率能量的迁移状态, 声发射不同频率信号的共现现象和 FR 值阶跃特征, 对试样内部结构产生的剧烈变化具有极高的灵敏性。

(4) 板裂与岩爆表现出很强的相关性, 可作为岩爆的充分不必要条件, 并在一定程度上促进了岩爆的演化。岩爆的发生主要取决于围岩的应力状态和岩体的储能极限。

参考文献 (References):

- [1] GONG F, DAI J, XU L. A strength-stress coupling criterion for rockburst: inspirations from 1114 rockburst cases in 197 underground rock projects[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 142: 105396.
- [2] XIAO P, LI D, ZHAO G, et al. Characteristics and mechanism of rockburst at five deep gold mines in Jiaodong Peninsula of China[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2023, 171: 105574.
- [3] 宫凤强, 何志超. 钻孔卸压防治岩爆机理的试验研究进展与展望[J]. *隧道与地下工程灾害防治*, 2023, 5(2): 1-23.
GONG Fengqiang, HE Zhichao. Progress and prospect of experimental research on the mechanism of rockburst prevention and control by drilling pressure relief[J]. *Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering*, 2023, 5(2): 1-23.
- [4] 刘剑, 周宗红, 刘军, 等. 基于主成分分析和改进 Bayes 判别的岩爆等级预测[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2022, 4(5): 053014.
LIU Jian, ZHOU Zonghong, LIU Jun, et al. Prediction of rockburst grade based on principal component analysis and improved Bayesian discriminant analysis[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2022, 4(5): 053014.
- [5] 罗勇, 宫凤强. 深部硬岩巷道围岩板裂破坏试验研究进展与展望[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(6): 46-60.
LUO Yong, GONG Fengqiang. Research progress and prospect of laboratory test of rock spalling in deep hard rock roadway[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(6): 46-60.
- [6] 陈绍杰, 冯帆, 李夕兵, 等. 复杂开采条件下深部硬岩板裂化破坏试验与模拟研究进展和关键问题[J]. *中国矿业大学学报*, 2023, 52(5): 868-888.
CHEN Shaojie, FENG Fan, LI Xibing, et al. Research progress and key issues of laboratory test and numerical simulation for slabbing failure in hard rock under complex mining conditions[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2023, 52(5): 868-888.
- [7] LUO S, GONG F. Evaluation of energy storage and release potentials of highly stressed rock pillar from rockburst control perspectives[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2023, 163: 105324.
- [8] 吴顺川. 岩石力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2021.
WU Shunchuan. *Rock mechanics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2021.
- [9] GONG F, WANG Y, WANG Z, et al. A new criterion of coal burst proneness based on the residual elastic energy index[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 31(4): 553-563.
- [10] SI X, GONG F. Strength-weakening effect and shear-tension failure mode transformation mechanism of rockburst for fine-grained granite under triaxial unloading compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 131: 104347.
- [11] DU K, YANG C, SU R, et al. Failure properties of cubic granite, marble, and sandstone specimens under true triaxial stress[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 130: 104309.
- [12] 罗丹旒, 卢思航, 苏国韶, 等. 含预制单裂隙花岗岩的真三轴单面凌空岩爆试验研究[J]. *岩土力学*, 2023, 44(1): 75-87.
LUO Danni, LU Sihang, SU Guoshao, et al. Experimental study on rock burst of granite with prefabricated single crack under true-triaxial stress condition with a free face[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(1): 75-87.
- [13] GONG F, LUO Y, LI X, et al. Experimental simulation investigation on rockburst induced by spalling failure in deep circular tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 81: 413-427.
- [14] 王炆, 何满潮, 刘冬桥, 等. 深部椭圆形洞室围岩冲击岩爆实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(11): 2214-2228.
WANG Yang, HE Manchao, LIU Dongqiao, et al. Experimental study on impact rockburst of surrounding rock in

- deep elliptical caverns[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(11): 2214–2228.
- [15] 司雪峰, 宫凤强. 深部高应力圆形隧洞内部卸荷条件下岩爆模拟试验和强度弱化效应研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(2): 276–289.
SI Xuefeng, GONG Fengqiang. Rockburst simulation tests and strength-weakening effect of circular tunnels under deep high stresses and internal unloading conditions [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(2): 276–289.
- [16] 刘冬桥, 胡天祥, 王炆, 等. 动载频率对砂岩冲击岩爆影响的实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(7): 1310–1324.
LIU Dongqiao, HU Tianxiang, WANG Yang, et al. Experimental study of the effect of loading frequency on the impact rockburst of sandstone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(7): 1310–1324.
- [17] 赵光明, 刘之喜, 孟祥瑞, 等. 真三轴循环主应力作用下砂岩能量演化规律[J]. *岩土力学*, 2023, 44(7): 1875–1890.
ZHAO Guangming, LIU Zhixi, MENG Xiangrui, et al. Energy evolution of sandstone under true triaxial cyclic principal stress[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(7): 1875–1890.
- [18] CHANG X, WU S, WANG J, et al. Investigating the comprehensive index of acoustic emissions and fractal characteristics of damage of red sandstone based on information entropy[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2024, 43(2): 1–22.
- [19] 王杰, 袁国涛. 不同加载速率下深部砂岩的声发射与破裂响应特征[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2023, 5(4): 043024.
WANG Jie, YUAN Guotao. Acoustic emission and fracture characteristics of deep sandstone under different loading rates[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2023, 5(4): 043024.
- [20] 常新科, 吴顺川, 程海勇, 等. 细砂岩声发射全波形特征及频谱分析[J]. *长江科学院院报*, 2022, 39(7): 118–125.
CHANG Xinke, WU Shunchuan, CHENG Haiyong, et al. Full-waveform characteristics and frequency spectrum of acoustic emission for fine sandstone[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2022, 39(7): 118–125.
- [21] AKDAG S, KARAKUS M, TAHERI A, et al. Effects of thermal damage on strain burst mechanism for brittle rocks under true-triaxial loading conditions[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51: 1657–1682.
- [22] 刘崇岩, 赵光明, 许文松, 等. 高应力巷道岩爆过程及时空演化规律试验研究[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(3): 998–1008.
LIU Chongyan, ZHAO Guangming, XU Wensong, et al. Experimental study on rockburst and its spatio-temporal evolution criterion in high stress roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(3): 998–1008.
- [23] 李楠, 陈鹏, 李炎, 等. 岩石真三轴分级加载声发射与波速演化规律试验研究[J]. *金属矿山*, 2023(5): 144–154.
LI Nan, CHEN Peng, LI Yan, et al. Experimental study on the evolution of acoustic emission and wave velocity of rock under true triaxial step-loading[J]. *Metal Mine*, 2023(5): 144–154.
- [24] WANG C Y, CHANG X K, LIU Y L, et al. Mechanistic characteristics of double dominant frequencies of acoustic emission signals in the entire fracture process of fine sandstone[J]. *Energies*, 2019, 12(20): 3959.
- [25] 王创业, 常新科, 刘沂琳, 等. 单轴压缩条件下大理岩破裂过程声发射频谱演化特征实验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(S1): 51–62.
WANG Chuangye, CHANG Xinke, LIU Yilin, et al. Spectrum evolution characteristics of acoustic emission during the rupture process of marble under uniaxial compression condition[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(S1): 51–62.
- [26] 杨丽荣, 黎嘉骏, 江川, 等. 岩样破裂过程声发射参数特征与时频特性分析[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2023, 5(1): 013015.
YANG Lirong, LI Jiajun, JIANG Chuan, et al. Analysis of acoustic emission parameters and time-frequency characteristics in the process of rock sample fracture[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2023, 5(1): 013015.
- [27] HUO M, XIA Y, LIU X, et al. Frequency domain analysis of AE waveforms in rockburst specimens under different stress gradients[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2023, 82(7): 273.
- [28] WANG C, CAO C, LIU Y, et al. Experimental investigation on synergetic prediction of rockburst using the dominant-frequency entropy of acoustic emission[J]. *Natural Hazards*, 2021, 108(3): 3253–3270.
- [29] 中国岩石力学与工程学会. T/GSRME 007—2021 岩石真三轴试验规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Chinese Society for Rock Mechanics Engineering. T/GSRME 007—2021 Technical specification for true triaxial test of rock specimen[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [30] 宫凤强, 罗勇, 司雪峰, 等. 深部圆形隧洞板裂屈曲岩爆的模拟试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(7): 1634–1648.
GONG Fengqiang, LUO Yong, SI Xuefeng, et al. Experimental modelling on rockburst in deep hard rock circular tunnels[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(7): 1634–1648.

- neering, 2017, 36(7): 1634–1648.
- [31] STEPHANSSON O, SÄRKKÄ P, MYRVANG A. State of stress in Fennoscandia[A]. ISRM International Symposium[C]. ISRM, 1986: ISRM-IS-1986-002.
- [32] FENG G L, MA Q, HE Zhou, et al. Time-delayed failure process of granite and its energy evolution and acoustic emission characteristics[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 157: 107854.
- [33] 何满潮, 刘冬桥, 宫伟力, 等. 冲击岩爆试验系统研发及试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(9): 1729–1739.
HE Manchao, LIU Dongqiao, GONG Weili, et al. Development of a testing system for impact rockbursts[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(9): 1729–1739.
- [34] 梁鹏, 张艳博, 孙林, 等. 基于 CT 扫描的巷道岩爆洞壁破坏特征实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(S1): 2612–2622.
LIANG Peng, ZHANG Yanbo, SUN Lin, et al. Experimental study on damage characteristics of tunnel wall after rockburst based on CT scanning[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(S1): 2612–2622.
- [35] DIEDERICHS M S. The 2003 Canadian Geotechnical Colloquium: Mechanistic interpretation and practical application of damage and spalling prediction criteria for deep tunnelling[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, 44(9): 1082–1116.
- [36] JENKINS W K. Fourier methods for signal analysis and processing[M]. *Digital Signal Processing Fundamentals*, CRC Press, 2017.
- [37] COOLEY J W, TUKEY J W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series[J]. *Mathematics of Computation*, 1965, 19(90): 297–301.
- [38] GROSSE CU, OHTSU M, AGGELIS DG, et al. Acoustic emission testing: basics for research-applications in engineering[M]. Springer Nature, 2021: 45–48.
- [39] 张艳博, 梁鹏, 刘祥鑫, 等. 基于多参量归一化的花岗岩巷道岩爆预测试验研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(1): 96–104.
ZHANG Yanbo, LIANG Peng, LIU Xiangxin, et al. An experimental study of predicting rockburst in granitic roadway based on multiparameter normalization[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(1): 96–104.