

遗留煤柱诱发岩层破断微震响应及前兆特征

牟文强¹, 李连崇¹, 刘洪磊¹, 余国锋²

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819;

2. 煤炭开采国家工程技术研究院 深部煤炭开采与环境保护国家重点实验室, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 为揭示深井遗留煤柱失稳诱发顶板异常破断及前兆特性, 利用统计方法分析了下层回采岩层动力响应微震特征, 探究了多源参数在岩层破断失稳前兆中的控制特征, 建立了基于关键切线斜率与多参量的强动力响应控制指标模型及预测方法. 结果表明, 基于统计方法可规避震源数据离散性而确定岩层集中损伤区; 动力响应由弱变强的过程中微震具有典型的时间特征: 能量指数呈急剧上升—平稳—急剧下降3个阶段, 累计视体积呈平稳过渡—急剧增长2个阶段, b 值呈减小—低值稳定的趋势. 对比遗留煤柱区矿压显现特征, 以能量指数对数值以及累计视体积的变化率为主控前兆指标, 能量总值、 b 值及矿山压力作为次控前兆指标的响应模型及预测方法具备可行性.

关键词: 动力响应; 微震监测; 震源参数; 变化率; 控制指标

中图分类号: TD 325 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)08-1167-11

Microseismic Response and Precursory Characteristics of Rock Failure Induced by Residual Coal Pillar

MU Wen-qiang¹, LI Lian-chong¹, LIU Hong-lei¹, YU Guo-feng²

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. State Key Laboratory of Deep Coal Mining and Environmental Protection, National Academy of Coal Mining Engineering and Technology, Huainan 232001, China. Corresponding author: LI Lian-chong, E-mail: lilianchong@mail.neu.edu.cn)

Abstract: To reveal the disastrous failure and precursory characteristics caused by the instability of the residual coal pillar under the deep mining, the microseismic (MS) characteristics from the dynamic response of the lower mining strata are analyzed by using the statistical method. The control characteristics of multi-source parameters in the prediction of rock fracture are explored. The key tangent slope and multi-parameters are established as the control index model and prediction method of strong dynamic response of rock stratum. The results show that the data discreteness can be avoided with the statistical method for source parameters and the aggregated damage area of rock stratum can be delineated. In the process of dynamic response from weak to strong, the source parameters have typical time characteristics: the energy index presents three stages: from sharp rise to steady to sharp decline, and the cumulative apparent volume is in the stage of smooth transition to sharp increase, and the b value is in the trend of decreasing to low value and stable. Compared with the ground pressure behaviour characteristics of the residual coal pillar area, the response model and prediction method of taking the logarithm value of energy index and the change rate of cumulative apparent volume trend change as the main control precursor index, and multi-source parameters such as total energy, b value and ground pressure as the secondary control precursor index are feasible.

Key words: dynamic response; microseismic monitoring; seismic parameter; changing rate; control index

收稿日期: 2023-04-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52204089, 52174070); 中国博士后基金资助项目(2022M720680).

作者简介: 牟文强(1991-), 男, 山东滨州人, 东北大学副教授; 李连崇(1978-), 男, 辽宁朝阳人, 东北大学教授, 博士生导师; 刘洪磊(1981-), 男, 山东枣庄人, 东北大学教授, 博士生导师.

煤炭资源为国民经济的发展提供了重要的能源消耗支撑,同时高速发展的社会也使得地下资源的开发高速向深部进军,造成采矿作业的条件日益复杂,“三高一扰动”的特点尤为突出^[1].在工程采场内岩层的动力响应日趋复杂、强烈,对矿井的安全形成了严重的威胁,极易造成突水、煤与瓦斯突出、冒顶、冲击地压等强动力响应灾害的发生^[2].而在发生动力响应前会呈现前兆信息,准确捕捉这些信息则可以实现对岩石破坏过程的预测.因此拾取和搜集岩石破裂信息以实现对其破坏过程的表征,成为有效解决深部地下工程动力灾害的关键^[3].声发射与微震监测作为材料结构微破裂监测技术,被广泛应用于岩石内部裂纹形成、扩展及破裂过程的识别中^[4-6].由于岩体尺度不同、频率差异所产生的声发射、微震、岩爆及天然地震等具有明显差异,但其本质上并没有较大的不同.

岩石在破坏中累计振铃计数等参数的切线增长斜率所存在的平静期特征可以作为岩石破坏的前兆特征^[7-8];能量信号存在“平稳→升高→峰值”的演化规律,而这种斜率变化可以作为煤研石破裂的前兆特征^[9-11];岩石参数的空间变异性与 b 值(矩震级-频度关系拟合得到的直线斜率)存在联系,其可作为岩石破坏或者灾变过程的表征指标^[12].通过室内试验可以发现,岩石在破裂前 AE 参数都会存在明显的突变过程,同时这种变化并不意味着完全强度已经消失,而是存在一个局部至全部的演化过程^[13].

岩石破坏演化特性对研究大型岩体工程有指导意义.陈炳瑞等^[14]提出了综合集成高精度智能微震监测技术应用于岩石工程灾害孕育过程的预警;Feng 等^[15]指出岩体的强动力灾害与地震能量势函数相关,提出基于微震活动和岩爆预警的定量方法;田向辉等^[16]发现冲击过程中微震能量和频次呈现出显著的偏离性趋势特征,实现了预警应用.同时局限于单一参数的随机性,多震源参数的应用不断被研究^[17];Dou 等^[18]基于前兆敏感指标提出了基于优选指标的冲击矿压综合预警模型.而且一般的动力响应也可实现微震预测,Li 等^[19]研究指出岩体损伤或局部破坏风险与 b 值具有典型的对应关系;但并非所有的岩石破坏都会存在明显的前兆,具有“时滞型”破坏特征的岩石频谱具有明显的前兆特征,但是“即时型”的特征参数并不明显^[20].

预测深井地压危险区和危险程度、时空特性

则成为重中之重,现有的技术手段并不能完全适用于多煤层开采遗留煤柱造成的地压灾害预测预警.为此,本文以潘二矿工作面所出现的强动力响应为基础,开展了对上层遗留煤柱诱发的岩层异常破断的震源特征研究,提出了基于聚类方法应用于矿井微震数据统计,建立了关键切线斜率与多参数作为岩层动力响应控制指标的多级预测模型及方法,结合矿压变化及现场反应进一步验证了其可行性,以期对岩层的动力响应防控提供一种新的思路和方法.

1 岩体破裂中的震源参数特征

岩体在受外力作用下的破坏全过程与声发射参数有趋势一致性的关系,捕捉全过程破裂信号的差异性和前兆性,则可为大型岩体的动力破断研究提供有力支撑.岩体破坏的全过程中声发射(acoustic emission, AE)信号会表现出“稳定→爬升→波峰→稳定”的演化过程.岩石在产生初始损伤、屈服、破坏时 AE 信号会产生明显突变,如曲线斜率变化、幅值跳跃或定位点的突增,这种斜率变化也常被应用于岩体破坏预测中.

在矿井生产过程中,原始应力会被打破,顶板受重加载的采动应力作用,顶板岩体在未达到完全破坏之前所表现出的凸起、丛集特征等前兆信息,可应用于采场动力灾害演化的预测中,岩体破裂震源信息可作为岩层劣化的重要参量.当前,常用的震源参数见表 1.

2 工程背景

潘二煤矿坐落于能源之都——淮南市,属于淮南矿业集团的主要开采矿井.2020 年开始矿井回采 12123 工作面.12123 工作面位于潘二煤矿第一水平的西二采区,该工作面上覆煤层 4 煤、5 煤、6 煤、7 煤、8 煤,均已回采完毕,与该煤层间隔 0.3~1.0 m 左右夹研的下伏煤层 1 煤无采掘活动.工作面可采走向长约 1 003 m,倾斜长约 220 m.本工作面 A 组的 3 号煤层厚 0.5~8 m,煤层平均倾角约为 10°,属较稳定煤层.该工作面内布置两条巷道进行综采、回采作业,自由垮落顶板;其下方保留有 2 条瓦斯抽采巷,距离工作面底板约 27 m.工作面回采中共存在 2 种灾害威胁:一是上覆煤层回采后所遗留的煤柱(4~1,5~1,6~1,7~1 煤)存在多层位交叉、回采扰动极易诱发矿山动

力破坏的问题,如图 1 所示.二是 A 组煤受底板奥陶系灰岩水的威胁较大,存在采动诱发突水事故的危险,尤其是在断层、陷落柱等构造发育区域.该矿临近工作面 12223 回采期间,2017 年联巷掘

进过程中误揭一个陷落柱引发了涌水淹井事故.因此工作面布置微震监测系统实时监控顶板板的破坏,预测底板导水裂隙发育、顶板岩层稳定及构造活化状况,指导工作面安全生产.

表 1 震源参数含义与表征^[19,21]
Table 1 Definition and characterization of seismic parameters

震源参数	含义	计算公式	表征特性	预测可行性
总能量 E_j	微震事件发生时所释放的能量大小	$E_j = \sum_{i=1}^{T_j} E_{ij}$	微震强度	强
事件密度 q_i	在单位空间体积内微震事件个数	$q_i = N/V_i$	微震空间分布	较弱
事件率 q_j	在单位时间(天/时)内发生微震事件的个数	$q_j = N/T_j$	微震时间变化	较强
地震势 P	任意形状岩体体积发生非弹性变形	$P = \Delta\varepsilon \times V$	微震强度	较弱
地震矩 M_0	用来表示地震大小的量	$M_0 = PG$	震级大小	较弱
能量密度 e_i	在单位空间体积内微震事件所释放能量大小	$e_i = E/V_i$	能量空间分布	较强
能量指数 I_E	瞬时能量与平均能量之比	$I_E = 10^{-c} (\frac{E}{P^d})$	能量相对值趋势	强
视应力 σ_a	岩体单位非弹性变形对应的能量释放程度,破裂驱动力	$\sigma_a = G \frac{E}{M_0} = \frac{E}{P}$	能量释放程度	较强
视体积 V_a	震源非弹性剪切变形岩体体积	$V_a = \frac{\mu P^2}{E}$	微震强度	强
纵横波能量比 b 值	S 波与 P 波的能量比值 古登堡-里克特模型中矩震级-频度关系拟合得到的直线斜率	E_s/E_p $\lg N(M) = a - bM$	破裂类型 强度分布	较弱 强

注: E_{ij} 为单一事件能量; N 为事件总个数; V_i 为总体积; T_j 为总时间; $\Delta\varepsilon$ 为单位应变; V 为体积; G 为岩体剪切模量; E 为岩体断裂释放的弹性应变能; d, c 为相关系数; μ 为岩体变形刚度; E_s 为 S 波能量; E_p 为 P 波能量; M 为微震矩震级; $N(M)$ 为微震次数.

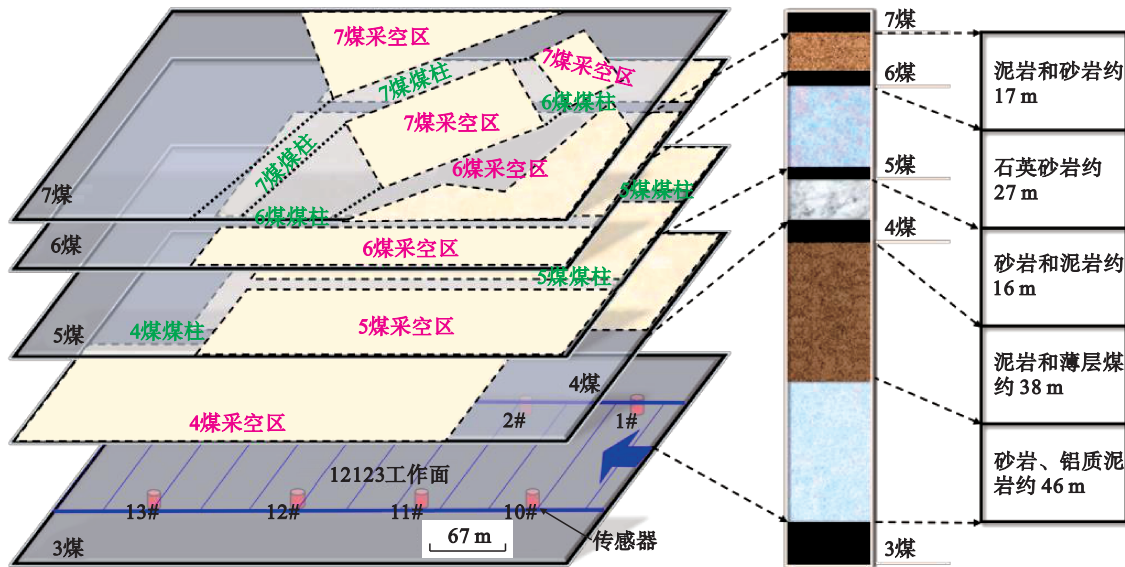


图 1 12123 工作面微震监测布置与顶板岩层示意图

Fig. 1 Schematic diagram of microseismic monitoring layout and roof strata in 12123 working face

在工作面内基于巷道系统构建微震监测系统,实现实时 24 h 连续监测,获取大量微震事件的时空坐标、误差、震级、能量等多项震源参数,并对采集的数据进行滤波处理,提供用户震源信息的完整波形与波谱分析图,通过滤波处理、设定阈值、带宽检波排除噪声事件,自动识别微震事件类型,从而实现对岩层微破裂的识别与定

位.该系统还可以为顶板的回采垮落及稳定性分析提供有力支撑.因此在设计时综合考虑常规顶底板微震信号的特点,基于两条底板岩巷布置 18 个测点:上下底抽巷内各布置 9 个测点;上底抽巷测点为 1~9、下底抽巷测点为 10~18;每条底抽巷内传感器间隔 100~115 m 交错布置,分别在上下底抽巷的进口端的硐室内分别放置 1 个数据采集盒

(帕拉丁盒),工作面生产地质及微震系统位置关系如图 1 所示.

3 顶板动力响应

潘二矿 12123 工作面里段回采期间,日回采进尺一般在 3~4 m/d. 由于采场在不同空间区域和时间段进行不同工序的开采活动,因此对微震事件分布进行时空特征分析. 为了了解微震事件分布与工作面采场生产、地质条件的关系,在监测

实施期间构建了针对该工作面的 3D 互动模型,将各个地层、构造、巷道等信息导入模型内,同时嵌入微震事件在采场内的分布,在此回采期间的微震事件分布如图 2 所示. 通过图 2 可以发现,在回采阶段内微震事件主要分布在顶板岩层内,但在阶段内产生了异常阶段:在如图所示的工作面回采阶段(时间为 2020 年 5 月 16 日—2020 年 5 月 25 日),顶板岩层出现了大能量事件,阶段内顶板发生了异常的动力响应. 根据工作面的施工监测反应,在工作面内上顺槽出现了异常破断现象.

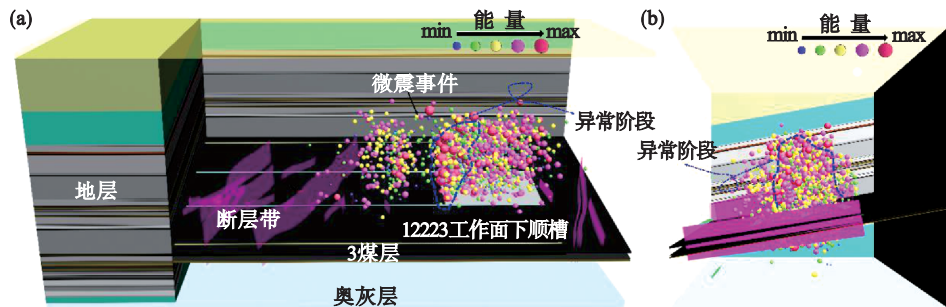


图 2 工作面回采期间的微震事件分布

Fig. 2 Distribution of microseismic events during mining

(a)—透视图; (b)—侧视图.

根据阶段内所发生的事件,对其空间分布特征进行分析. 微震事件的破坏主要是由于岩层在应力扰动下产生的,根据图 1 所示的岩石破坏全过程,而岩层破坏所产生的微震事件分布是具有统计性规律的特征,本文提出了采用统计特性分析

震源参数的方法. 借助 SPSS 软件,利用其内嵌的统计分析程序对前期(2020 年 4 月 24 日—2020 年 5 月 24 日)至发生顶板异常的 1 个月内得到的微震事件分布特征进行自动划分频次分析,空间内微震数据在 x, y, z 方向的集中情况如图 3 所示.

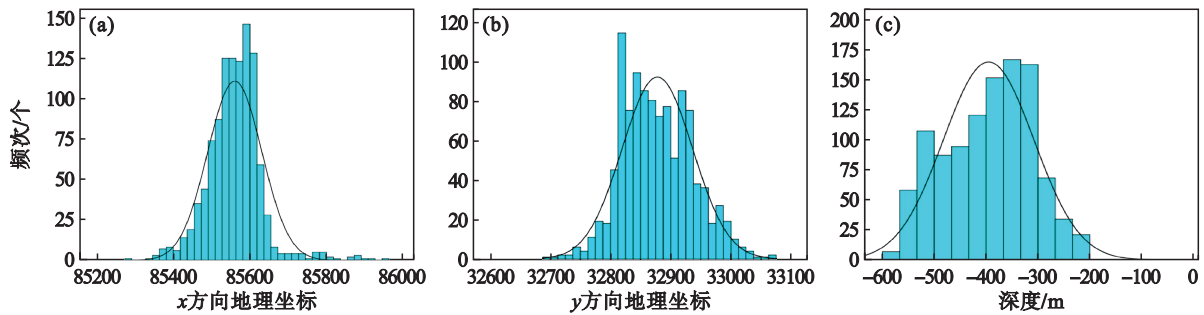


图 3 微震事件空间聚类分布特征

Fig. 3 Clustering distribution characteristics of MS events

(a)—微震事件在 x 方向(东西向)聚类特征; (b)—微震事件在 y 方向(南北向)聚类特征;

(c)—微震事件在 z 方向深度聚类特征.

可以发现,微震事件集中分布区间在东西向、南北向、深度分别为(85 525, 85 650), (32 800, 32 950) 和 (-400, -325) m 的空间内,如图 3 所示. 结合期间在顶板岩层发生的大能量事件,规模性微震破坏发生在垂直区域顶板以上的高度范围为(100, 145) m. 微震事件分布及岩层破断见表 2. 因此,结合期间在顶板岩层发生的大能量事件,基本圈定

了规模性微震破坏发生的时空区域. 时间:2020 年 5 月 16 日—2020 年 5 月 25 日;空间:东西向、南北向分布区间分别为(85 525, 85 650), (32 800, 32 950), 顶板以上的高度范围为(100, 145) m. 该范围岩层内发生了较大规模动力破坏,其相对集中区域的平面位置在靠近 12123 工作面上顺槽一侧,微震监测系统的定位误差值在 10~15 m. 区域

与生产地质复杂条件分布相吻合:回采区处于已回采多煤层(5,6,7)下遗留的顶板交叉煤柱集中区域,随着下组煤的持续回采,采动应力集中可进

一步诱发煤岩体破坏,造成煤层上覆顶板岩层的整体垮落引发其他顶板岩层的破断,从而引发高强度顶板破坏,但未形成冲击灾害.

表 2 微震事件分布与岩层破断
Table 2 Microseismic events distribution and rock fracture

岩层	厚度(最小~最大)/m 平均	图形	岩性描述
7-2煤	0~1.22 0.91		—
砂质泥岩	0.92~7.30 4.59		灰色砂质泥岩
7-1煤	1.30~4.56 2.55		以亮煤为主,顶底板坚硬,中部破碎
泥岩	7.25~16.00 10.50		灰色泥岩或砂质泥岩或细砂岩薄层含菱铁
6-2煤	0~1.97 1.00		粉末状或块状
泥岩	0~5.40 3.20		灰褐色泥岩,见有植物化石碎片
6-1煤	0.63~3.00 1.60		粉末状、内容夹矸0.2 m
砂岩	16.23~33.25 22.38		灰色致密状厚层黏土层,砂质黏土层富含植物化石,底部有菱铁砂层
			灰色黏土层及灰白色细砂岩互层,薄层状明显,成层不规则,含少量植物化石碎片
			灰白色中粒细粒石英砂岩,硅泥质胶结含菱铁矿,云母泥质保体夹薄层状泥质岩,下部砂岩粒度较粗
5-2煤	0~1.18 0.98		块状、粉末状半暗煤
砂泥岩互层	0~5.58 3.50		灰色、浅灰色细砂岩及砂泥岩互层
5-1煤	0.42~1.95 1.10		块状、粉末状半暗煤
砂泥岩互层	4.75~11.75 8.05		砂岩及泥岩,浅灰-灰色细粒砂岩,夹灰白色中粒砂岩或细砂岩与泥岩互层
4-2煤	0.67~1.55 0.90		黑色块状,粉末状半暗煤夹亮煤条带
砂质泥岩	0~2.79 1.75		灰色砂质泥岩
4-1煤	0.48~5.19 3.20		黑色粉末状或碎块状半亮型煤

注:图形中红色实线为事件分布集中域,红色虚线为微震分布及可能的破断.

4 多源参量前兆特征及主控预测模型

4.1 采动震源参数前兆特征

1) 事件能量与频次演化特征.根据表 1,通过识别计算阶段内发生的微震事件,可以得到随时间变化的频次与能量变化曲线,如图 4 所示.在异常时间段的 A 阶段开始,微震的频次在异常前会连续减少到一个低谷期;此阶段内微震事件的能量处于波动稳定阶段.但自 2020 年 5 月 16 日开始至 5 月 24 日的 B 阶段,每天的事件频次仍存在低

谷;该阶段内每天的最大能量值普遍大于 3 000 J,为日常平均数的 2~3 倍,其中在 5 月 22 日增大至 7 500 J,5 月 23 日—24 日衰减至 4 500 J,工作面的单日释放总能量持续剧增,普遍为日常释放总能量的 3~4 倍,于 5 月 24 日达到最大能量 35 000 J.5 月 25 日以后进入 C 阶段的稳定期,微震事件反而出现持续降低稳定期;同时该阶段的能量会再次降回至波动稳定的范围内.所以,自 5 月 16 日开始至 5 月 25 日,连续出现了能量释放的剧增现象,从整体而言,在该阶段内工作面的微震事件频次无明显的前兆预测特征;但事件释放能量在前期稳定期间内维持在一定范围之内,该数值约为 15 000 J.

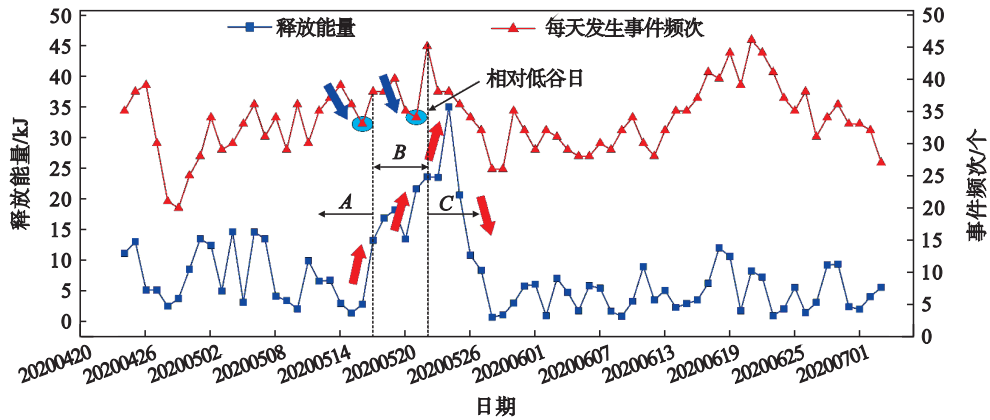


图4 事件频次与能量特征

Fig. 4 Event frequency and energy characteristics

2) 能量指数与累计视体积. 微震事件的能量指数和累积视体积可以反映岩体变形破坏的全过程, 岩石在达到峰值应力而屈服变形破坏之前, 能量指数呈现逐渐增大的过程, 累积视体积逐渐增大, 其变化趋势与岩石峰前应力的变化规律是一致的. 能量指数与视体积的稳步增加表明岩体处于稳定阶段, 处于能量蓄积的应变硬化阶

段. 当岩石达到峰值应力时, 岩石承载能力降低、应力下降、变形增大, 即能量指数下降而累积视体积迅速增多, 岩石发生破坏. 能量指数下降、累积视体积异常上升则表征岩体发生了较大规模破坏. 12123 工作面在此阶段内的能量指数对数值和累积视体积的变化趋势, 如图 5 所示.

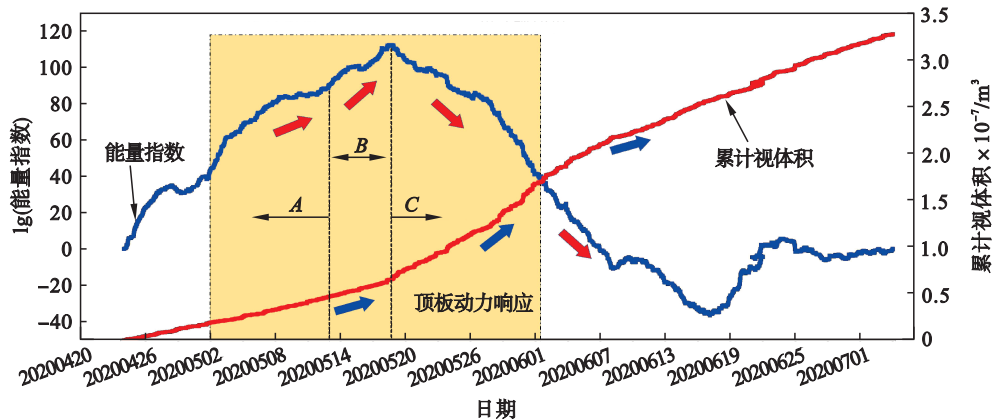


图5 能量指数对数与累计视体积

Fig. 5 Logarithm of energy index and cumulative apparent volume

在发生顶板动力响应的阶段内, 两个参数经历了多种趋势变化特征. 首先在 A 阶段, 能量指数处于低斜率的稳步增长阶段、蓄能期; B 阶段能量指数开始出现小波峰后的骤降, 但是整体依然处于增长阶段; C 阶段的能量指数急剧下降, 在 B 与 C 阶段的交界线为转折点, 此时的时间为 5 月 17 日左右, 则此时为响应期的开始阶段, 于 5 月 19 日、5 月 24 日发生强动力响应.

3) 地震矩与 b 值分布. 大震级事件有所增加主要因为开采逐渐靠近或揭露深部大的断裂和构造, 导致出现能级较大的微震事件. 因此, b 值能够反映岩体的刚度和应力水平, 可以作为大规

模动力灾害发生前的一个判据. 但其适用性也有很大限制: ①对微震活动性减弱的情况往往不敏感; ②在某些工程强烈岩爆洞段, 高震级事件往往伴随着大量低震级事件, 中间震级事件几乎没有.

通过对监测数据中的矩震级提取处理后, 可求得 b 值大小, 如图 6 所示. 采场内的矩震级基本位置在 $-0.5 \sim -4.0$ 之间, 地震活动可以分为 3 个阶段: A 阶段内地震活动矩震级较小、回采区域 b 值较大; 自 A 阶段过渡至 B 阶段时, 地震的矩震级呈增大趋势、 b 值变小, 区域内采动应力诱发岩体损伤或局部破坏的风险在增大, 最低小于 0.5; 进入

C阶段后,矩震级呈减小趋势并降低至波动低值 范围内, b 值呈增大趋势并维持在较大值.

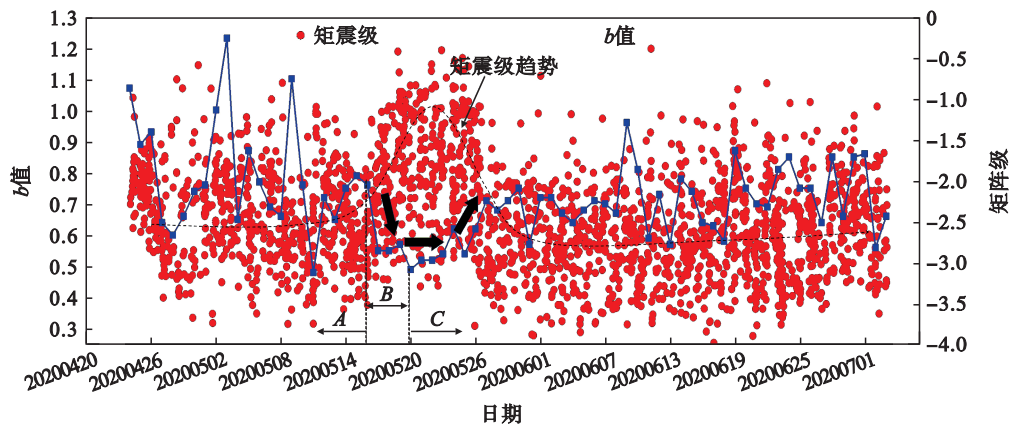


图6 b 值与矩震级分布

Fig. 6 Distribution of b value and moment magnitude

4.2 多源控制指标

顶板岩层内可能发生大的动力响应,震源参数也会发生异常变化,以往采用单一参数的单级方法不能满足矿井的生产需求,则可以将多类参数考虑在内以指标的分级特征发布分级预测.每个矿区、每个矿井、甚至各个工作面都具有地质条件的独一性,单一使用某一震源参数作为控制指标的方法并不能完全满足矿井的需要,在很多情况下单一参数具有不可控性,则可以将多个参数进行综合考虑,总结所存在的共性指标,尝试以多源震源参数作为预测的控制指标.同时,区分各个指标的前兆特征,在主控模型内赋予每个参数不同的定位,设置合理的阈值与验证法则,从而实现对矿井顶板强动力响应的预测分析.

在顶板动力响应强烈发生前,微震表现出一定的共性前兆特征,即一定时间内震源参数较正常期间呈现出显著的偏离特征.微震事件率在强动力响应发生前“具有微震频次会降到较低水平,尤其是冲击前一日,微震活动会减少”的特点^[21],则对于微震事件率来说,其作为一个主要特征参数表象出的是被动特性:即若发生顶板动力灾害前一般在前一天事件发生频次降低,但是并不能作为诱发动力响应的主动因素;若事件频次出现下降就会发生顶板强动力响应现象,那么事件频次可以作为一个被动验证指标.以单日为基准能量,长时间内能量波动维持在稳定范围之内,在顶板异常动力响应阶段内具有明显的持续异常增长,该参数对于选定的时间窗具有不确定性,存在不能实现连续监测、预测的有效性,同时存在遗漏的可能性,总能量可以作为一个主动次控指标.如表1所示的计算方法,在矿井应用中 b

值是监测区域内发生微震事件的统计数据结果,其准确性与所选择的时间窗内发生的实际微震事件有密切关系,较少的样本数据数量、完整性、准确性、时间窗等都会影响 b 值的计算结果,鉴于其计算结果的不确定性,不能实现连续预测的有效性, b 值可以作为一个主动次控指标.

而对于监测周期内的累计视体积和能量指数,可以针对所发生的任一时刻内的事件参数进行拟合计算,得到在所发生的微震事件近周期内的变化规律特性,同时可以发现其在顶板异常相应阶段内具有明显变化:累计视体积增幅变大、能量指数对数值($\lg I_E$)具有明显转折点.岩石从变形产生到最终失稳破坏的全过程,其累计视体积与能量指数具有显著阶段规律,在发生异常时累计视体积(V_a)-时间(t)曲线(以下简称 V_a-t 曲线)一般会经历初期平稳增长阶段→大幅增长阶段→平稳增长阶段. V_a 和 $\lg I_E$ 的双参数特性可以作为分级预测的主动主控指标.

4.3 主控模型及分级预测方法

作为主控指标,能量指数与视体积在发生大的异常前具有明显的分级特征.累计视体积的增长率突增、能量指数的持续增加后骤减表示岩层开始出现异常,但是趋势性的表征不能及时对岩层的异常作出预测,且过多地依赖于人的主观性.以智能化的自动预测为基准,则采用趋势分析是不合适的,具有一定的时滞性,而采用给定触发阈值较为准确.因此基于两个参数随时间的曲线变换特征,则可以将视体积及能量指数随时间的斜率变化直接表征岩层的异常,阐明在发生异常前的征兆特征.斜率定义为以连续发生的特定数量的事件为基础计算后续事件所触发的变

化量,见式(1).微震事件按照时间顺序排列,计算直接量化指标矿山视体积及矿山能量指数随时间的变化率(切线斜率).这种方法既考虑了两个参数在顶板异常时的特征变化,以顶板岩层的实时破裂信号为基础,又将时间因子考虑在内,对顶板岩层的破裂参数进行连续的测定计算.

$$\left. \begin{aligned} e_{i+k} &= K_E [I_{E,i}, I_{E,i+k}], \\ v_{i+k} &= K_V [\sum V_{a,i}, \sum V_{a,i+k}]. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: e_{i+k} 表示第 $i+k$ 个微震事件的能量指数变化率; v_{i+k} 表示第 $i+k$ 个微震事件的累计视体积变化率; K_E, K_V 为求解第 i 个微震事件至第 $i+k$ 个微震事件的能量指数和累计视体积的变化率(切线斜率); $I_{E,i}, I_{E,i+k}$ 分别为第 i 和第 $i+k$ 个微震事件的能量指数; $\sum V_{a,i}, \sum V_{a,i+k}$ 为第 i 和第 $i+k$ 个微震事件的累计视体积.

因此可以计算得到潘二矿 12123 工作面自选定的有效监测数据(序号为 1)以来的所有累计视体积与能量指数的变化率作为控制参量,自 4 月 24 日至 7 月 2 日所获得的 12123 工作面的变化率曲线如图 7 所示.在稳定的阶段内,其变化率的大小维持在基数值的范围内.累计视体积变化率自 5 月 17 日出现了增大超过阈值的现象,随后工作

面内的微震事件的累计视体积变化率出现了多个峰值.同时对于能量指数变化率,在稳定的阶段内,其大小维持在一个特定的阈值范围之上,而自 5 月 17 日出现了小于阈值的现象,同时也出现了低谷.同时可以发现,随着时间增加会出现不同程度的峰值与谷值.因此可以基于变化率的大小建立分级的控制指标.蓝色等级:触发阈值可以设定为 (e_a, v_a) ,若累计视体积变化率 v_{i+k} 大于 v_a ,同时能量指数变化率 e_{i+k} 小于 e_a ,则为初次判断蓝色等级的基础值;黄色等级:触发阈值可以设定为 (e_b, v_b) ,若累计视体积变化率 v_{i+k} 大于 v_b ,同时能量指数变化率 e_{i+k} 小于 e_b ,则为初次判断黄色等级的基础值;橙色等级:触发阈值可以设定为 (e_c, v_c) ,若累计视体积变化率 v_{i+k} 大于 v_c ,同时能量指数变化率 e_{i+k} 小于 e_c ,则为初次判断橙色等级的基础值;红色等级:触发阈值可以设定为 (e_d, v_d) ,若累计视体积变化率 v_{i+k} 大于 v_d ,同时能量指数变化率 e_{i+k} 小于 e_d ,则为初次判断橙色等级的基础值.4个等级指标在进行预测时,还要考虑峰值个数特征及综合单日总能量、 b 值等触发阈值,判断是否存在进一步诱发风险;并利用事件率的低值特征等进行验证.

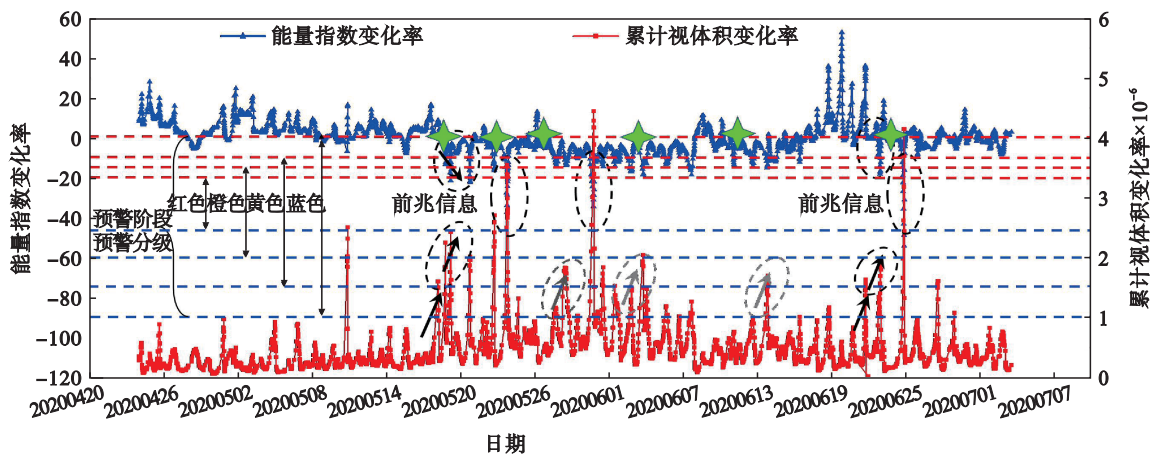


图 7 能量指数与视体积变化率

Fig. 7 Changing rate of energy index and apparent volume

基于所提出的计算方法、给出的阈值参数及判断程序,结合煤矿矿井安全、高效生产的需求,可以进一步得到适合煤矿的多源参数控制的分级预测方法,模型如图 8 所示.微震监测系统实时处理采集得到的微震数据,定位事件所发生的详细信息,获得微震监测得到的采动引起的原始震源参数数据库;数据库导出后运算得到能量指数、视体积、 b 值、能量、事件数等信息;确定每个等级的

震源参数变化率的触发阈值,蓝色 (v_a, e_a) 、黄色 (v_b, e_b) 、橙色 (v_c, e_c) 、红色 (v_d, e_d) ,同时在前三级别每个等级触发阈值后,判断是否满足峰值规律:连续 2 次或者 2 d 出现此类触发现象,若是则触发所对应的等级,然后验证是否存在 b 值与能量异常;而对于橙色、红色两个等级触发后需进一步核实矿压变化来指导是否提高等级.分析矿压变化等指标后,结合微震结果判别岩层异常位置,启动

安全治理预案,同时在不满足每个等级的触发条件后,则降低各等级,指导矿井安全高效生产.

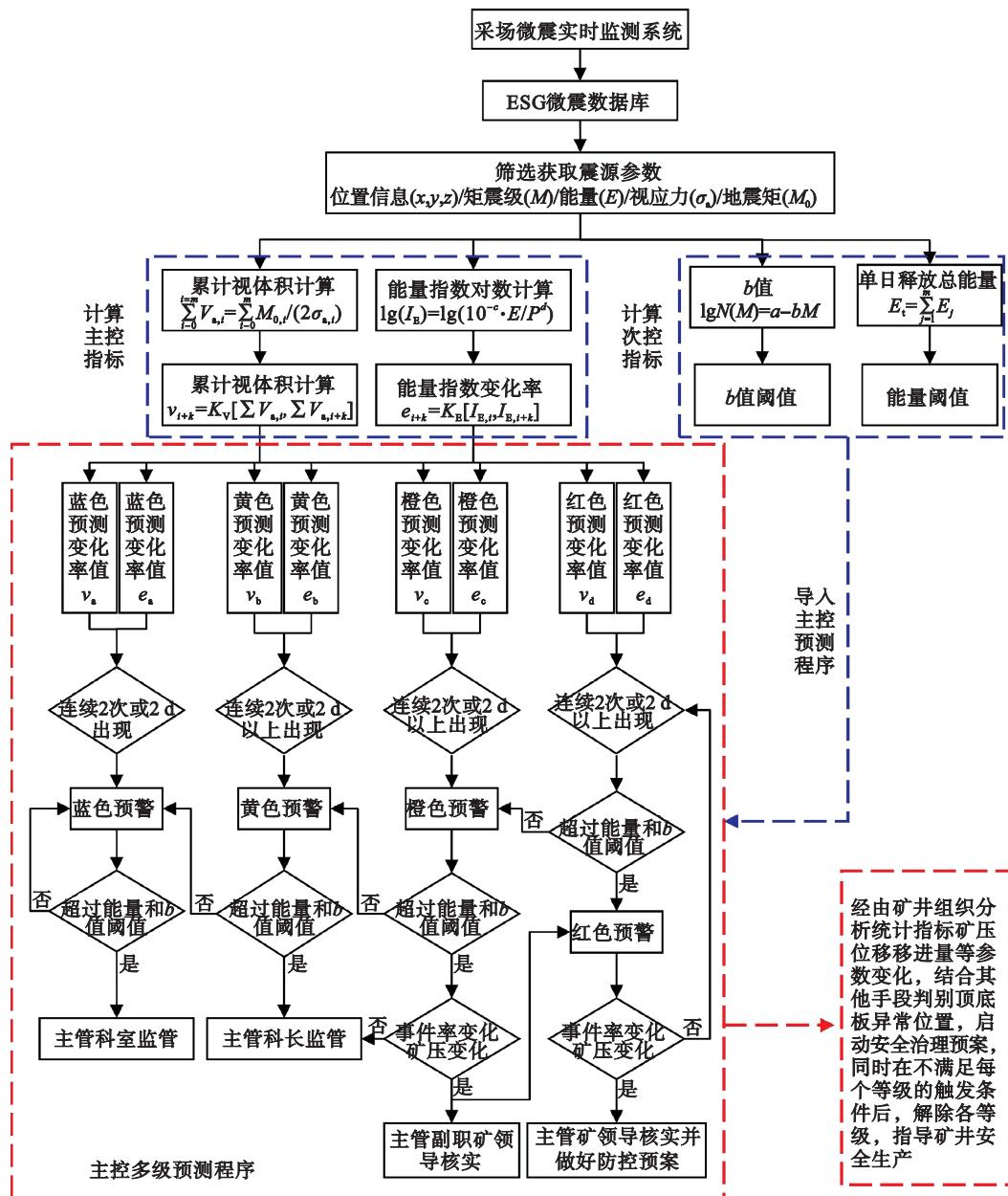


图 8 主控预测模型

Fig. 8 Main controlling prediction model

以潘二矿工作面为例,通过前期里段回采中所发生的微震事件进行各个指标的分析,可以发现在岩层异常时,这些指标具有明显的变化特征(图5~图7):每天的释放能量大于 15 kJ 时表示岩层出现了异常; b 值连续多天持续降低并降低至 0.55 以下表示岩层出现了异常,则可以得到适应潘二矿的阈值参数,见表 3.

4.4 分级预测方法应用分析

根据所提出的分级预测程序,对已监测得到的微震数据进行了分级预测计算,得到了工作面预测等级的触发时间,见表 4. 自进入 5 月份之后,

工作面岩层共发生 4 次蓝色等级、7 次黄色等级、3 次橙色等级、4 次红色等级,基本满足对工作面的全面分级预测要求.

通过表 4 可知,在回采阶段内红色等级所触发的时间为 20200519T0437, 20200520T1758, 20200522T1627, 20200523T1733, 而橙色等级自 20200518T1919 便已经开始发布,5 月 19 日开始顶板岩层发生较大动力响应,即工作面回采现场所出现的异响、顶板岩层碎石掉落等.在 5 月份监测期间,对其工作面内的采动应力分布进行了连续记录分析,如图 9 所示.

表 3 12123 工作面阈值参数
Table 3 Threshold parameters of 12123 working face

参数	阈值确定的范围	预测等级	指标特征
$[v_i, v_{i+k}] \cup [e_i, e_{i+k}]$	$[1E6, 1.5E6] \cup [0, -10]$	蓝色	主动主控
	$[1.5E6, 2E6] \cup [-10, -16]$	黄色	
	$[2E6, 2.4E6] \cup [-16, -20]$	橙色	
	$> 2.4E6 \cup < -20$	红色	
单日能量/kJ	15	异常	主动次控
b 值	0.55	异常	主动次控
事件率	事件数量处于低谷	异常	被动验证

表 4 工作面预测等级的触发时间
Table 4 Trigger time of prediction grade of working face

蓝色等级	黄色等级	橙色等级	红色等级
	20200518T1647		
20200510T2030	20200519T0219		20200519T0437
20200519T0219	20200520T1542	20200518T1919	20200520T1758
20200527T1410	20200521T2356	20200519T0348	20200522T1627
20200528T0638	20200523T1443	20200522T1424	20200523T1733
	20200528T1120		
	20200530T1203		

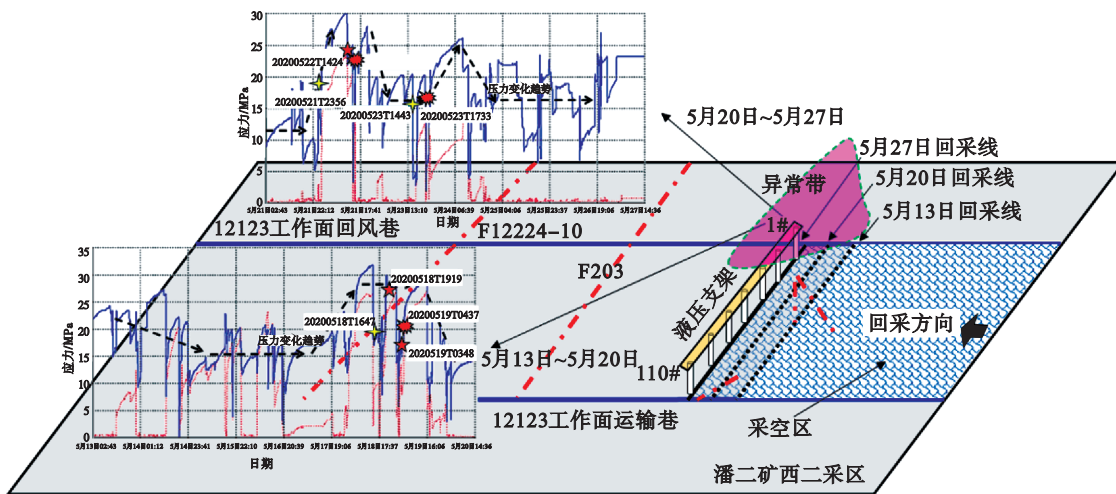


图 9 工作面采动应力分布照片

Fig. 9 Photo of mining stress distribution of working face

5 结 论

1) 岩石发生破裂全过程中具有分级、可表征特性,运用监测所得到的震源参数可以实现对全过程表征,以原有研究为基础对各类震源参数实现预测应用的可行性进行了总结,能量、能量指数、视体积、 b 值具有强可行性,其次为事件率、能量密度、视应力。

2) 以潘二矿 12123 工作面为背景,统计采场内微震事件圈定了诱发的集中破裂顶板空间响

可以看出,自 5 月 17 日起岩层应力呈现明显增大,所发布的触发时间分布在矿压显著变化期内.而在首次发布黄色等级的阶段内岩层已出现过 1 次应力上升的峰值,在首次发布橙色等级时矿压再次达到峰值,并在发布红色等级前出现明显的矿压 2 次波峰.同时,在之后发布的多个红色等级的时段前,采动应力均出现了多次波峰值并在响应时段内存在相同的再次增大趋势,该现象表明了时段内的岩层处于矿山压力集中期,存在诱发强矿山压力显现的可能,进一步验证方法的可行性。

应区,即交叉煤柱集中区分布区间在东西向、南北向、深度分别为 (85 525, 85 650), (32 800, 32 950) 和 (-400, -325) m 的空间内,与生产地质条件分布相吻合;将监测数据代入运算程序,得到了震源参数在采场回采期间的的时间特征:能量指数、视体积为明显的主动突变阶段特征, b 值、能量存在明显的主动峰值特征,事件率具有可对比的被动突变峰值特征,参数的时间特征反映了回采进程。

3) 对能量指数和视体积采取切线斜率的表征处理后作为主动主控指标进行分级处理,利用

b 值、能量为主动次控指标,事件率、矿压变化为被动验证指标,构建了煤矿岩层动力响应分级控制模型及预测运算程序,获得了回采期内的18次触发时间,包括3次橙色和4次红色等级,并通过分析工作面内的矿压显现得到了较好的验证,可以为岩层强动力响应及其时效防控研究提供一种新的思路和支撑。

4) 现有岩层强动力响应微震监测预警方法主要是以能量、矩震级等参数设定预制来进行判断,不能适应复杂的工作面环境,而本文方法在融合了能量的前提下,捕捉了能量指数、视体积以及 b 值等在强动力发生前的前兆信息,准确性高、普适性大。但是受控于现场实际条件,该方法的实际应用效果将在未来监测中继续优化应用。

参考文献:

- [1] Xie H P, Lu J, Li C B, et al. Experimental study on the mechanical and failure behaviors of deep rock subjected to true triaxial stress: a review [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 32(5): 915–950.
- [2] Feng X T, Yang C X, Kong R, et al. Excavation-induced deep hard rock fracturing: methodology and applications [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2022, 14(1): 1–34.
- [3] 韩刚, 窦林名, 张寅, 等. 沿空巷道动力显现影响机制与防治技术研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(4): 730–738, 748.
(Han Gang, Dou Lin-ming, Zhang Yin, et al. Influence mechanism and prevention technology of dynamic manifestation of roadway along goaf [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(4): 730–738, 748.)
- [4] Zhu J, Deng J H. Insights from a combined analysis of acoustic emission signals for water-bearing rocks in four-point bending tests: failure mode classification and strength degradation [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(5): 3843–3855.
- [5] Li Y, Yang TH, Song W D, et al. Movement law and discriminant method of key strata breakage based on microseismic monitoring [J]. *Shock and Vibration*, 2019, 2019: 8652894.
- [6] Mu W Q, Li L C, Zhang Y S, et al. Failure mechanism of grouted floor with confined aquifer based on mining-induced data [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(4): 2897–2922.
- [7] Wang X R, Wang E Y, Liu X F, et al. Failure mechanism of fractured rock and associated acoustic behaviors under different loading rates [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, 247: 107674.
- [8] Su G S, Shi Y J, Feng X T, et al. True-triaxial experimental study of the evolutionary features of the acoustic emissions and sounds of rockburst processes [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(2): 375–389.
- [9] 杨成祥, 陈祥艳, 周建华. 三山岛金矿深埋蚀变硬岩真三轴压缩下的力学性质 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(11): 1599–1606.
(Yang Cheng-xiang, Chen Xiang-yan, Zhou Jian-hua. Mechanical properties of deep buried altered hard rock under true triaxial compression in Sanshandao Gold Mine [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2022, 43(11): 1599–1606.)
- [10] Zhang Y B, Wu W R, Yao X L, et al. Study on spectrum characteristics and clustering of acoustic emission signals from rock fracture [J]. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 2020, 39(2): 1133–1145.
- [11] Zhang X, Tang J P, Pan Y S, et al. Experimental study on intensity and energy evolution of deep coal and gas outburst [J]. *Fuel*, 2022, 324: 124484.
- [12] Ji H G, Chen D S, Su X B, et al. Spatial multifractal and b value characteristics of mine earthquakes under high tectonic stress [J]. *Geofluids*, 2022, 2022: 4610972.
- [13] 赵永, 古旭升, 王述红, 等. 不同岩性岩石单轴压缩破坏共性前兆特征 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2023, 44(9): 1309–1317.
(Zhao Yong, Gu Xu-sheng, Wang Shu-hong, et al. Common precursor characteristics of uniaxial compression failure of rocks with different lithology [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2023, 44(9): 1309–1317.)
- [14] 陈炳瑞, 冯夏庭, 符启卿, 等. 综合集成高精度智能微震监测技术及其在深部岩石工程中的应用 [J]. *岩土力学*, 2020, 41(7): 2422–2431.
(Chen Bing-rui, Feng Xia-ting, Fu Qi-qing, et al. Integration and high precision intelligence microseismic monitoring technology and its application in deep rock engineering [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(7): 2422–2431.)
- [15] Feng G L, Feng X T, Chen B R, et al. Microseismic sequences associated with rockbursts in the tunnels of the Jinping-II hydropower station [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 80: 89–100.
- [16] 田向辉, 李振雷, 宋大钊, 等. 某冲击地压频发工作面微震冲击前兆信息特征及预警方法研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(12): 2471–2482.
(Tian Xiang-hui, Li Zhen-lei, Song Da-zhao, et al. Study on microseismic precursors and early warning methods of rockburst in a working face [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(12): 2471–2482.)
- [17] Ma T H, Tang C A, Tang S B, et al. Rockburst mechanism and prediction based on microseismic monitoring [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 110: 177–188.
- [18] Dou L M, Cai W, Cao A Y, et al. Comprehensive early warning of rock burst utilizing microseismic multi-parameter indices [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2018, 28(5): 767–774.
- [19] Li B, Ding Q F, Xu N W, et al. Characteristics of microseismic b -value associated with rock mass large deformation in underground powerhouse caverns at different stress levels [J]. *Journal of Central South University*, 2022, 29(2): 693–711.
- [20] 陈炳瑞, 魏凡博, 王睿, 等. 西南地区某深埋隧道花岗岩破坏机制与前兆特征研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(3): 469–479.
(Chen Bing-rui, Wei Fan-bo, Wang Rui, et al. Failure mechanisms and precursory characteristics of deep buried granite in a tunnel in Southwest China [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(3): 469–479.)
- [21] 马春驰, 李天斌, 张航, 等. 基于EMS微震参数的岩爆预警方法及探讨 [J]. *岩土力学*, 2018, 39(2): 765–774.
(Ma Chun-chi, Li Tian-bin, Zhang Hang, et al. An evaluation and early warning method for rockburst based on EMS microseismic source parameters [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(2): 765–774.)