doi:10. 3969/j. issn. 1671-4172. 2022. 05. 006

矿山开采过程地压活动综合评价分析

石　峰[1,2,3],张　达[1,2,3],吴亚飞[4],李　坤[4],王　平[1,2,3]

(1. 矿冶科技集团有限公司,北京 100160;
2. 中国—南非矿产资源开发利用联合研究中心,北京 102628;
3. 国家金属矿绿色开采国际联合研究中心,北京 102628;
4. 西部黄金克拉玛依哈图金矿有限责任公司,新疆 克拉玛依 834000)

摘　要:以某金矿为研究对象,基于微震监测技术建立地压监测系统,对波速校正后定位结果进行验证,显示定位误差为 3.9 m,较好地满足了安全监测需求,基于监测数据对矿山地压活动进行综合评价。监测结果表明,微震事件集中区域与生产集中区相吻合,对微震事件活动率、能量指数和累积视体积进行时间序列分析,揭示了岩体内部应力能量演化规律,并对微震事件参数幂律特征进行分析。研究结果表明,岩体视在刚度、受力水平均较小,微震事件以小震级为主。最终结合微震各参数分析结果,对地压活动进行综合评价,研究成果对类似矿山地压活动评价分析具有一定借鉴意义。

关键词:地压活动;微震监测;时间序列;幂律特征;综合评价

中图分类号:TD32　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-4172(2022)05-0031-06

Investigation on comprehensive evaluation and analysis of mine ground pressure activities during mining process

SHI Feng[1,2,3],ZHANG Da[1,2,3],WU Yafei[4],LI Kun[4],WANG Ping[1,2,3]

(1. BGRIMM Technology Group,Beijing 100160,China;
2. China-South Africa Joint Research Center for Development and Utilization on Mineral Resources,Beijing 102628,China;
3. National Centre for International Research on Green Metal Mining,Beijing 102628,China;
4. Western Gold Karamay Hatu Gold Mine Co. ,Ltd. ,Karamay Xinjiang 834000,China)

Abstract: A ground pressure monitoring system was established based on microseismic monitoring technology to evaluate the ground pressure activities in a gold mine comprehensively. The wave velocity correction results of the monitoring system were verified, and the positioning error was 3.9 m, which meted the requirements of safety monitoring. The concentration area of microseismic events coincided with the production concentration area. The time series analysis of microseismic event activity rate, energy index, and cumulative apparent volume revealed the evolution characteristic of stress-energy in a rock mass. It showed that the apparent stiffness and stress level of the rock body has small, and microseismic events of small magnitude were the main ones through the analysis of power-law characteristics of microseismic event parameters. A comprehensive evaluation of ground pressure activity was carried out combined with the analysis results of microseismic parameters finally. The research results were of certain reference significance for the evaluation of ground pressure activity in similar mines.

Key words: ground pressure activities; microseismic monitoring; time series; power law characteristics; comprehensive evaluation

收稿日期:2022-05-13
基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0602904);矿冶科技集团青年科技创新基金(04-2228)
作者简介:石　峰(1993—),硕士,主要从事矿山安全(微震)监测和岩石力学等方面的研究工作。

地下矿山开采过程中,地压活动与安全生产密切相关。采矿过程中由于巷道开挖,岩体原始应力平衡被破坏,岩体应力重新分布,内部储存的能量突然猛烈释放,会发生岩爆(冲击地压)等动力灾害现

象,造成严重的人员伤亡和财产损失[1-3]。随着现代社会的高速发展,对矿产资源需求不断加大,矿山开采不断向深部延伸,发生岩体动力灾害的风险随之加大。因此,必须对矿山开采过程中地压活动进行有效监测和评价分析。

岩体破坏前,会向外界释放大量信息,如弹性波、声音、热能等,包含大量破坏前兆信息[4]。微震监测技术可以很好地接收到岩体破坏时释放的弹性波,通过反演获得岩体内部损伤及裂纹发展演化过程,被广泛应用于工程安全监测中[5-7]。国内外研究学者基于微震监测技术对岩体动力灾害进行了大量研究,并取得了一定成果。唐超等[8]针对一起岩体破裂微震定位事件案例,采用震源机制解分析了岩体破坏类型及破裂面方位。魏秀琪等[9]监测隧洞开挖过程中围岩的微震信息,提出了基于微震前兆信息的岩爆要素预测方法,并对岩爆的风险、范围、等级进行了预测。陈炳瑞等[10]获取了岩土工程灾害演化过程的微震信息,自动识别岩石破裂信息,精准定位了岩石破裂震源的位置。李庶林等[11]分析了一次爆破诱发的采空区上覆岩体破坏案例,基于微震定位数据,采用矩张量理论对微震源定位事件进行了震源机制解反演。

由于不同矿山井下开采条件差别较大,地质条件复杂,采用不同参数评价地压活动差异性较大,对应力能量演化与岩体破坏关系揭示较为模糊。此外,对比各种微震参数的地压活动评价方法,主要为微震事件时空演化特征、b 值、能量指数等,分析参数较为单一,而岩体破坏是一个复杂的过程,单一分析参数难以满足现场实际需求[12]。

本文以新疆某金矿为研究对象,基于微震监测系统所监测到的数据,分析微震参数的时序特征和幂律特征,揭示岩体破坏应力能量之间的关系,评估岩体稳定性,进而对矿山地压活动进行综合评价分析。

1 微震监测系统的构建

1.1 矿山概况

新疆某金矿是一个集采、选、冶为一体的黄金生产企业,位于新疆维吾尔自治区西北部,矿区地势比较平缓,北高南低,西高东低,海拔 1 340～1 370 m,相对高差 30 m 左右。主要采用水平分层上向全尾砂胶结充填采矿法,目前主要开采中段为 725、675、625、575 m 四个中段,矿体处于挤压破碎带中,上下盘围岩主要由蚀变凝灰岩、蚀变玄武岩及少量石英脉组成。

矿山开拓深度已经达到 1 000 m,受深部“三高一扰动”影响,井下巷道局部应力集中。此外,随着开采深度的继续增加,地压活动更加明显,地压问题直接影响了矿山安全开采。针对上述问题,建立实时在线地压监测系统,对地压活动进行分析评价尤为重要。

1.2 监测方案设计

基于该金矿地质条件、地压活动主要显现区域、开采计划等因素,采用 IMS 微震监测系统,建立了 24 通道地压监测系统,监测范围包括 725、675、625、575 m 四个中段,具体传感器布置如图 1 所示。针对目前传感器位置布设,采用 IMS 可视化软件 JDI 进行定位误差及灵敏度分析,如图 2 所示,可知定位误差在 10 m 左右,灵敏度在 −2.6 矩震级左右,监测系统设计方案较好地满足了矿山地压监测需求。

图 1 监测台网布置

Fig. 1 Layout of the monitoring station network

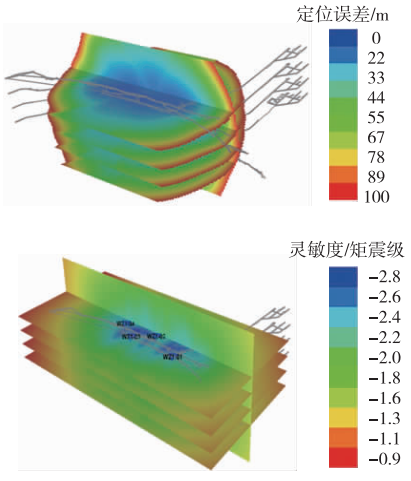

图 2 定位误差及灵敏度分析

Fig. 2 Analysis of positioning error & sensitivity

1.3 定位结果验证

监测系统建成后,通过定点放炮的形式,对比爆破点实际空间坐标和系统监测到爆破事件空间坐标,最终标定出符合矿山实际地质特点的 P 波、S 波波速。波速校正后,再次采用定点爆破的方式对波速校正结果进行验证,如表 1 所示,事件定位误差为 3.9 m,校正后的波速完全满足监测要求。

表 1　验证爆破定位结果

Table 1　Blasting positioning results

爆破地点	爆破参数	实际坐标/m	标定坐标/m	定位误差/m
675 m 中段	孔径 140 mm	x=5 021	x=5 024	3.9
	孔深 5 m	y=5 675	y=5 673	
	爆破药量 10 kg	z=677	z=684	

2　基于微震参数的地压活动规律研究

巷道围岩的大范围破坏实质是岩体内部微小裂隙不断扩展、汇合的结果,微震事件可以较好地反映岩体内部裂隙发展过程,分析微震各参数演化特征,反映矿山地压活动规律,评估岩体稳定性状态。

2.1　微震事件空间分布特征

采矿活动中,岩体内部产生应力集中而破坏,微震事件空间分布特征可以较好地反映岩体应力集中区域。统计 2019 年 1 月至 2019 年 11 月期间微震事件,空间分布如图 3 所示,事件球体颜色表示微震事件发生时间。总体上采场西侧微震事件较多,其中 14～18 线微震事件较为集聚,与该期间矿山生产集中区域相吻合,表明该区域岩体应力较为集中,其他区域由于开采作业强度较小,微震事件数量较少且分布较为分散。

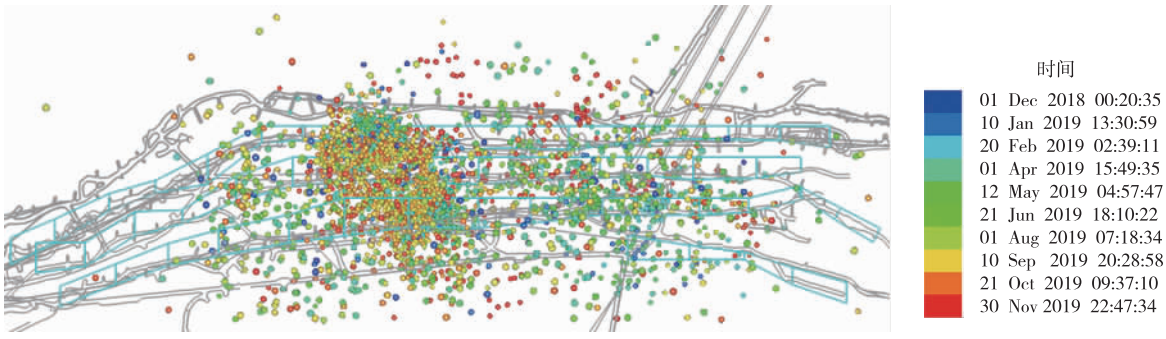

图 3　微震事件空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of microseismic events

2.2　岩体变形分析

通过监测到的微震事件计算岩体位移变形,该监测期间各中段 14～18 线微震事件较多,针对微震事件集聚区域进行变形分析。如图 4 所示,725 、675 m 中段 16～18 线之间位移变形较大,最大变形量为 6.47 mm。结合微震事件空间分布特征,划定 725、675 m 中段 16～18 线为地压活动显现区域,该区域与开采作业面分布位置、开采强度等相关,开采作业活动对地压活动影响较大。

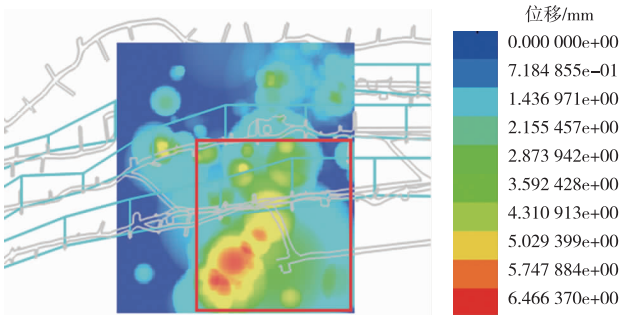

图 4　岩体变形云图

Fig. 4　Cloud chart of rock mass deformation

2.3　微震事件时间序列特征

该期间微震事件累积曲线如图 5 所示,其中下方曲线为单位时间内微震事件数量,即微震事件活动率,上方曲线为累积微震事件曲线。岩体发生破坏时,内部新增大量新裂隙,表现为在短时间内微震事件数量迅速增长。由图 5 可知,2019 年 1 月至 2 月期间微震活动率较弱,随后活动率有小幅度上升;3 月至 5 月期间微震活动率逐渐下降,活动率较弱

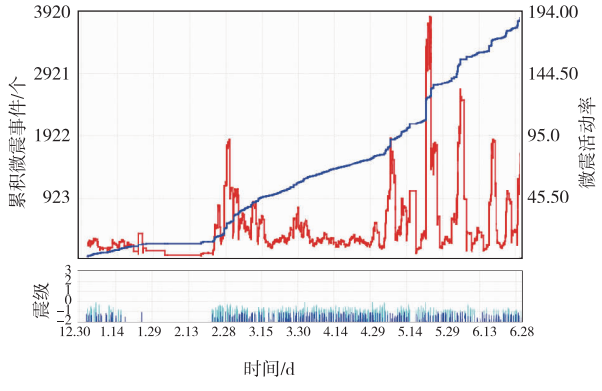

图 5　微震事件时间序列

Fig. 5　Time series of microseismic events

且较为平缓;5 月至 6 月期间微震活动率出现了数次较大增长与下降,微震活动率整体处于较高水平,岩体内部不断出现能量的集聚与释放,当岩体内部储存能量达到一定程度时,岩体将发生破坏,内部能量及时释放。

2.4 能量指数与累积视体积时间序列特征

微震事件能量指数 EI 定义为某事件所产生的实际辐射微震能量 E 与该区域所有事件的平均微震能 $E(M)$之比,计算公式如下[13]:

$$EI=\frac{E}{E(M)} \tag{1}$$

能量指数越大,岩体内部储存的能量越大,岩体发生破坏的可能性越大。岩体发生破坏时,内部储存的能量得到快速释放,能量指数迅速下降,即能量指数的迅速下降可作为岩体发生破坏的前兆信息。

视体积可以用地震矩与静态应力降计算,公式如下:

$$V_A=\frac{M}{2\sigma_A}=\frac{M^2}{2\mu E} \tag{2}$$

式中,M 为震级,σ_A 为视应力,μ 为刚度,在微震分析中,累积视体积曲线变化通常被认为是岩体发生应变的累积变化。

能量指数和累积视体积的变化特征可以反映岩体内部受力状态,能量指数增加并伴随着累积视体积的缓慢增加表示应变硬化过程,能量指数的下降并伴随着累积视体积的快速上升表示应变软化,岩体进入不稳定状态。

图 6 为累积视体积与能量指数变化曲线,2019 年 3 月初累积视体积出现小幅度上升现象,岩体内部产生大量新裂隙,出现裂隙汇合现象。现场表现为岩体小范围破坏,体积变大导致累积视体积出现小幅度上升。能量指数呈周期性"上下跳跃"变化,与矿山开采呈周期性特点相吻合。累积视体积整体变化较为平缓,能量指数未出现突然下降现象,地压活动整体处于稳定状态。

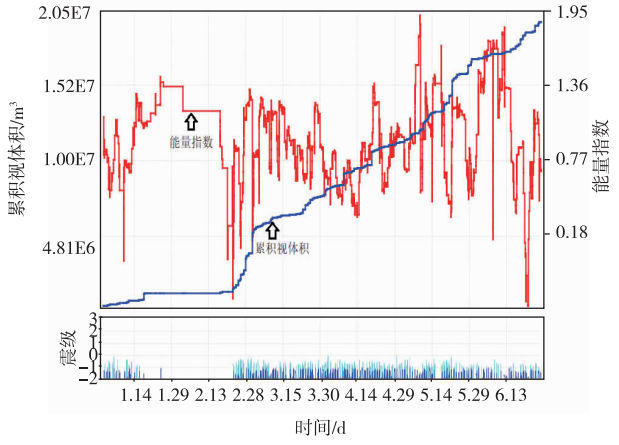

图 6 能量指数与累积视体积时间序列

Fig. 6 Time series of energy index and cumulative apparent volume

3 微震参数的幂律特征分析

两个参量之间的幂律关系表现为一条斜率为幂指数的直线。研究表明,微震能量 E 与震级 M 的对数之间存在幂律关系,地震学上的地震能量与地震矩对数回归曲线为一条直线,计算公式如下:

$$\lg E=c+d\lg M \tag{3}$$

式中,E 为能量,M 为震级,c 反映岩体受力水平,d 反映岩体视在刚度。

图 7 为监测时间段内微震能量与矩震级对数分布曲线图,可知微震能量与矩震级对数呈明显幂律关系,微震能量随矩震级增大而增大。此外,应力水平(y 轴截距)随拟合曲线斜率的增加而减小,即微震活动减弱。应力水平是表征破坏源应力释放的参数,与岩体视在刚度密切相关,岩体刚度越大,破坏过程中释放的能量越大。本周期拟合曲线 c 为−11.9,d 为 1.73,c、d 值均较小,即岩体受力水平和视在刚度均处于较低水平,岩体不会发生大尺度破坏。

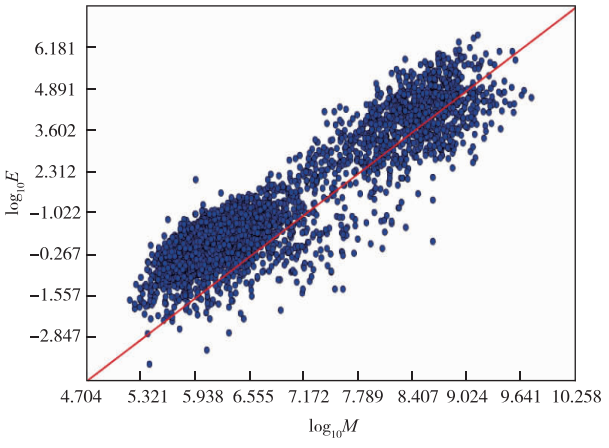

图 7 微震能量与矩震级的对数曲线

Fig. 7 Logarithmic curve of microseismic energy and moment magnitude

图 8 为监测周期内某月微震事件震级与事件频次关系曲线,可知震级较小事件线性特征并不明显,震级较大事件线性特征较强,直线斜率的绝对值即为幂指数。地震学中,震级大于 M 的地震数目 N 可由下式计算:

$$\log_{10}N=a-bM \tag{4}$$

式中,a 为地震活动性参数,b 为一段监测时间内大震级与小震级相对占比,该监测区域内微震事件 b 值演化规律如图 9 所示。b 值呈整体下降趋势,表明微震事件中震级相对较大事件逐渐增多,主要为开采强度的不断增强所致,岩体释放的能量不断增加。但各月 b 值均大于参考值 1[6],b 值较大,未来一段时间内微震事件以小震级事件为主,岩体局部发生小范围破坏,整体处于稳定状态。

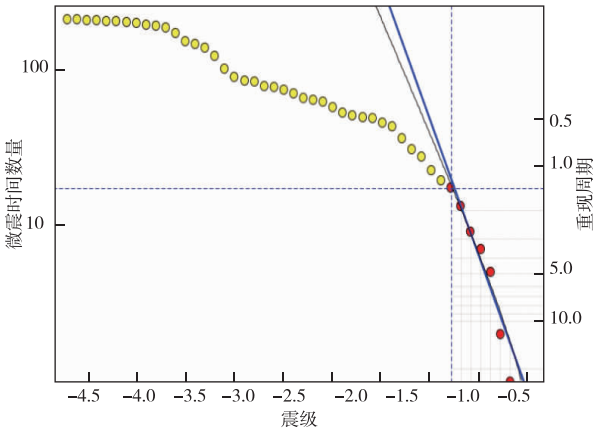

图 8　震级与事件频次关系

Fig. 8　Relationship between magnitude and event frequency

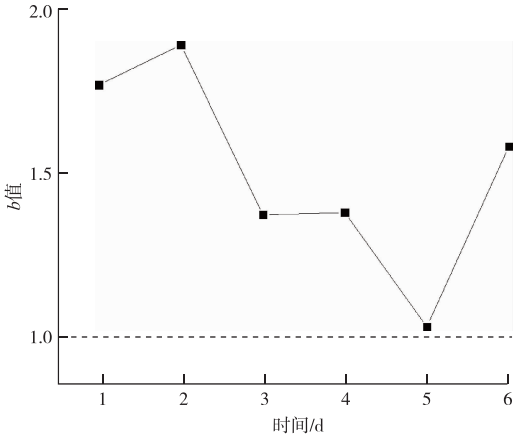

图 9　微震 b 值时间序列

Fig. 9　Time series of microseismic b-value

4　基于微震参数的地压活动综合分析

基于微震各参数分析结果,对矿山地压活动进行综合评估分析,具体如下:

1)微震事件活动率出现数次大幅度上升与下降,岩体内部不断出现能量的集聚与释放,岩体内储存的能量可以不断得到及时释放,岩体内部不会存储较大能量。

2)能量指数没有出现突然下降现象,且累积视体积没有出现迅速上升现象,表明岩体内部裂隙还没有完全融合贯通成较大破裂面,岩体外部没有出现较大变形。

3)微震能量与矩震级的对数较好地表现出幂律特性,岩体受力水平和视在刚度均较小,即潜在危险区域岩体相比于周围其他岩体刚度较小,震源区单位体积岩体弹性变形能释放较少。

4)微震 b 值均大于参考值 1,b 值相对较大,未来一段时间内微震主要以震级相对较小事件为主,现场表现为岩体出现局部小范围破坏。

对比微震各参数分析结果,揭示了岩体内部应力能量演化规律,对地压活动进行综合评价分析,即矿山地压活动趋于稳定,未来不会发生较大地压活动。

5　结论

本文以某金矿为研究对象,基于微震监测技术,分析矿山开采过程中各微震参数演化规律特征,对地压活动进行综合评价分析,主要得出以下结论:

1)微震事件的空间分布特征较好地反映了矿山实际开采情况。微震事件主要分布在 14 ～18 线之间,与矿山生产集中区域相吻合,其中 16 ～18 线变形较大,与开采作业面分布位置、开采强度相关,矿山开采对地压活动影响较大。

2)微震能量与矩震级对数呈明显幂律关系,拟合曲线的斜率和截距表示岩石的视在刚度和受力水平。对于震级较大微震事件,微震事件震级与事件频次线性关系明显,直线斜率的绝对值为幂指数,可以表征不同震级微震事件占比情况。

3)通过分析微震事件活动率、能量指数、累积视体积、受力水平、视在刚度和 b 值,有助于掌握地压活动规律,预测地压发展趋势,对矿山地压活动进行综合评价分析,分析得出矿山地压活动趋于稳定。

参　考　文　献

[1]　钱七虎. 岩爆、冲击地压的定义、机制、分类及其定量预测模型[J]. 岩土力学,2014(1):1-6.
QIAN Qihu. Definition, mechanism, classification, and quantitative forecast model for rockburst and pressure bump[J]. Rock and Soil Mechanics,2014(1):1-6.

[2]　马天辉,唐春安,唐烈先,等. 基于微震监测技术的岩爆预测机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(3):470-483.
MA Tianhui, TANG Chun'an, TANG Liexian, et al. Mechanism of rock burst forecasting based on micro-seismic monitoring technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(3):470-483.

[3]　孙忠铭,刘庆林,余斌,等. 地下金属矿山大直径深孔采矿技

术[M]. 北京:冶金工业出版社,2014.
SUN Zhongming, LIU Qinglin, YU Bin, et al. Large diameter deep hole mining technology in underground metal mine[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014.

[4] 石峰,王平,蔡永顺,等. 矿山深部开采岩体稳定性监测技术研究[J]. 有色金属工程,2020,10(8):113-118.
SHI Feng, WANG Ping, CAI Yongshun, et al. Investigation on monitoring technology of rock mass stability in deep mining[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(8): 113-118.

[5] 石峰,黄发凯,王平,等. 黄山铜镍矿30#矿体开采过程中地表开裂及上覆采空区顶板冒落规律研究[J]. 有色金属(矿山部分),2020,72(1):1-5.
SHI Feng, HUANG Fakai, WANG Ping, et al. Investigation on surface cracking and roof caving in overlying goaf during mining of 30# orebody in Huangshan copper-nickel mine[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2020, 72(1): 1-5.

[6] 石峰,王平,蔡永顺,等. 某矿山地压监测系统建设及预警技术研究[J]. 中国矿业,2020,29(增刊1):141-144.
SHI Feng, WANG Ping, CAI Yongshun, et al. Investigation on the construction of ground pressure monitoring system and early warning technology in a mine [J]. China Mining Magazine, 2020, 29(S1): 141-144.

[7] LIU J P, WANG R, LEI G, et al. Studies of stress and displacement distribution and the evolution law during rock failure process based on acoustic emission and microseismic monitoring[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 132: 104384. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104384.

[8] 唐超,李庶林,周梦婧,等. 基于微震监测的应力场反演方法及其工程应用研究[J]. 岩土工程学报,2021,43(9):1730-1738.
TANG Chao, LI Shulin, ZHOU Mengjing, et al. Stress inversion based on microseismic monitoring and its engineering application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(9): 1730-1738.

[9] 魏秀琪,唐春安,张世超,等. 秦岭隧洞4#支洞微震规律与岩爆预警研究[J]. 地下空间与工程学报,2020,16(6):1866-1874.
WEI Qiuqi, TANG Chun'an, ZHANG Shichao, et al. Research on rules of microseismicity and early warnings of rockburst in 4# branch tunnel of Qinling [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(6): 1866-1874.

[10] 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 Bingrui, FENG Xiating, FU Qiqing, 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.

[11] 李庶林,林恺帆,周梦婧,等. 基于矩张量分析的特大山体破坏前兆孕震机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(10):2000-2009.
LI Shulin, LIN Kaifan, ZHOU Mengjing, et al. Study on failure precursors and seismogenic mechanisms of a large landslide based on moment tensor analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(10): 2000-2009.

[12] 郭晓强,王果,唐绍辉,等. 基于微震的地压灾害预警体系构建与应用研究[J]. 金属矿山,2020(8):164-171.
GUO Xiaoqiang, WANG Guo, TANG Shaohui, et al. Early warning system construction and application of ground pressure disaster based on microseismic parameters[J]. Metal Mine, 2020(8): 164-171.

[13] 李瑞,吴爱祥,王春来,等. 微震监测参数主要特性及关系的研究[J]. 矿业研究与开发,2010,30(6):9-11,59.
LI Rui, WU Aixiang, WANG Chunlai, et al. Study on the major characteristics and relationship of microseismic monitoring parameters [J]. Mining Research and Development, 2010, 30(6): 9-11, 59.

(编辑:郭文晶)