

微震监测技术在崩落法与充填法协同开采中的应用*

李宏业¹, 武拴军², 王永定², 龙卫国², 龚臻², 谭宝会³, 杨宁³, 贾凯跃³

(1.金川集团工程建设有限公司矿山工程分公司, 甘肃 金昌市 737100;

2.金川集团股份有限公司龙首矿, 甘肃 金昌市 737100;

3.西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳市 621010)

摘要:金川龙首矿西二采区为贫矿资源区,最初设计采用下向分层胶结充填法开采,但在生产后期由于开采成本的原因,将上部中段改用无底柱分段崩落法开采,从而在采区内形成了上部中段崩落法与下部中段充填法同时进行采矿作业的复杂局面。由于崩落法的地压活动规律及分布特点与充填法存在较大差异,为确保整个西二采区的稳定性,建立了立体包裹式微地震监测台网,对上、下中段的采场实现全面监测,同时自主研发了微地震安全监测平台,实现了微震信号的自动识别与分类、微震事件高精度定位及自动预警等功能。利用所建立的微地震系统对西二采区的整体稳定性进行实时动态监测。微地震监测结果表明,在两种采矿方法协同开采过程中,上部崩落法采场回采进路处于稳定状态,采场顶板胶结充填体发生冒落形成覆盖层,下部中段胶结充填法采场整体处于稳定状态。

关键词:微地震监测;协同开采;崩落法;充填法;采场稳定性

中图分类号:TD85 **文献标识码:**A

文章编号:1005-2763(2024)06-0228-06

0 引言

目前我国地下金属矿山的开采正处于“由浅至深、由易至难、由富至贫”的关键转型期^[1],在一个矿区内采用单一采矿方法进行回采的传统模式已难以实现矿产资源安全、经济、高效、充分回收的目标。近年来,协同开采理念的提出为化解这一难题提供了一条重要途径^[2-4],该理念的核心在于将不同采矿方法在同一矿区内进行最大程度整合,从而在多种采矿方法构成的复合采场中实现矿产资源的充分利用。崩落法和充填法是地下金属矿山常用的两种采矿方法,鉴于崩落法和充填法在地表沉降管控、经济效益及采矿效率等方面具有明显的互补作用,在当

前金属矿床的开采条件、矿石品位、市场经济以及矿山环保等因素变得更为复杂和紧迫的背景下,实现这两种采矿方法的机动转变或协同开采就更具实际意义。然而,这两种采矿方法对采场围岩稳定性的要求完全不同,因而所引发的地压活动特征及其分布规律也完全不同^[5-7],当这两种采矿方法在同一矿区内协同采矿时,应严格掌控地压活动情况,确保整个矿区的生产安全。

近年来微地震监测技术被广泛应用于矿山安全监测之中,并且已发展为一种主流的安全监测方法^[8-10]。如2001年,兴隆庄煤矿通过微地震监测技术实现了对断裂带和垮落面积的有效判断^[11]。2003年,凡口铅锌矿建立了一套微地震系统对矿山地压活动情况进行监测,从而对矿井岩层稳定性进行研判^[12]。查华胜等^[13]通过微地震监测技术对潘二煤矿底板突水微震信号及类水流震荡信号进行监测分析,对监测和预警矿山突水事故起到了很好的指导作用。北洛河铁矿为解决矿区周边私营矿山越界开采产生的隐患问题,设计了一套微地震监测系统,该监测系统能够较为准确的对目标区域的采矿活动进行监测和掌控,获得了较好的现场应用效果^[14]。李海港等^[15]将微地震监测技术应用于赣南钨矿残矿资源回收的安全监测,确保了采场残矿的安全回收。总体而言,微地震监测技术目前已在我国矿山领域得到广泛应用,但受监测台网布置形式、传感器精度、数据处理算法以及工程地质复杂程度等因素的影响,目前微地震监测技术在事件的自动定位、定位精准度及数据自动分析及预警等方面仍有待进一步提高。

* 收稿日期:2023-09-15

基金项目:镍钴资源综合利用国家重点实验室开放课题(GZSYS-KY-2021-022)。

作者简介:李宏业(1969—),男,青海乐都人,硕士,高级工程师,主要从事采矿技术及矿山工程建设管理等方面的工作,E-mail:2426638971@qq.com。

通信作者:龙卫国(1987—),男,四川仪陇人,硕士,高级工程师,主要从事地下矿山采矿技术及管理工作,E-mail:814405947@qq.com。

金川集团的龙首矿西二采区上部中段采用崩落法开采,下部中段采用充填法开采,为确保西二采区的整体稳定性,构建了微地震监测系统,自主研发了数据分析平台及可视化显示软件,实现了微地震事件的自动分析及定位,通过该系统对采场稳定性进行实时监控,确保了西二采区各采场的作业安全。

1 工程背景

西二采区最初采用下向分层胶结充填法进行开采,上部设置了1554 m回采中段、下部设置了1430 m回采中段,采取双中段同时作业的开采模式,设计年产量165万t。2016年,由于矿石价格处于低位,该采区的矿石品位较低,采用生产成本较高的胶结充填法回采贫矿资源使得矿山承受了较大的经济压力。为适应市场经济,经矿山和设计单位深入分析研判后,决定将上部1554 m中段的胶结充填法改为成本较低的无底柱分段崩落法,而下部中段则继续采用胶结充填法开采,如图1所示,此时西二采区将呈现出上部1554 m中段无底柱分段崩落法与下部1430 m中段胶结充填法协同开采的复杂局面。

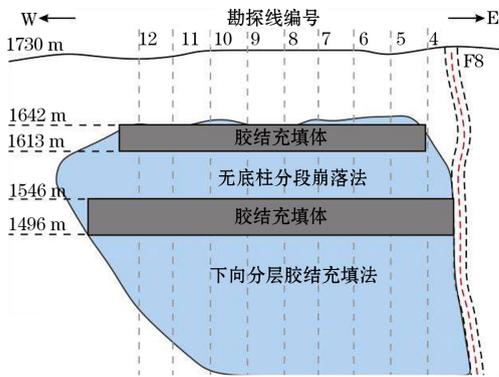


图1 西二采区崩落法与充填法协同开采方案示意

Fig.1 Collaborative mining scheme of caving method and backfill mining method in West No.2 mining area

无底柱分段崩落法和胶结充填法的采场地压活动规律及分布特点各不相同。理论上来说,对于上部中段无底柱分段崩落法采场而言,随着各分段的回采,矿体中的地压将逐渐释放并向上、下盘转移,因此需要掌握地压的发展过程。同时崩落法采场在开采过程中还需要诱导采场顶板胶结充填体自然冒落形成覆盖层,因此需要掌握采场顶板的冒落进程及冒落范围等信息,确保顶板冒落过程中不对崩落法采场和下部中段胶结充填采场产生地压危害。而

对于下部中段胶结充填法采场而言,采场地压属于一个逐渐累积的过程,在回采过程中需要使顶板胶结充填体假顶始终保持稳定状态,这也是确保上部中段崩落法安全开采的关键所在。因此西二采区在上部中段崩落法与下部中段充填法同时作业过程中,整个采区的地压活动将变得十分复杂,实时掌握西二采区的地压活动情况,对于西二采区整体稳定性的分析评估至关重要。

2 西二采区微地震监测台网设计

2.1 传感器的布置

为了实现对西二采区崩落法采场和充填法采场全面地压监测的目的,研究分析后将微地震传感器布置在1650 m、1554 m、1494 m和1430 m等4个水平,每个水平各布置4个三分量传感器,其中1650 m和1554 m水平的传感器主要用于监测上部中段崩落法采场地压活动情况,1494 m和1430 m两个水平的传感器主要用于监测下部中段充填法采场地压活动情况。在每个水平上,利用4个传感器将采场环绕包裹起来,最终4个水平所构成的传感器矩阵将上部中段崩落法采场和下部中段充填法采场全面包裹起来,构成了立体包裹式监测台网。西二采区微地震传感器空间分布位置如图2所示。

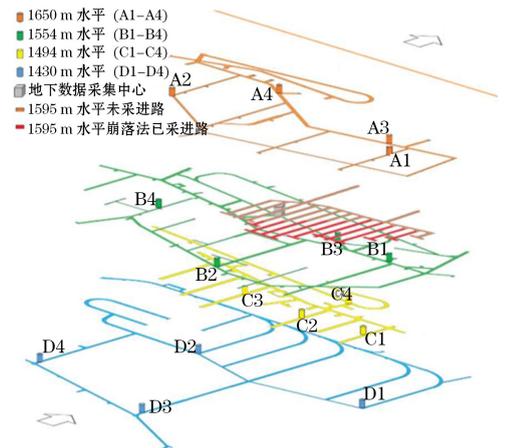


图2 西二采区微地震传感器的空间分布示意

Fig.2 The schematic diagram of spatial distribution of microseismic sensors in West No.2 mining area

微地震监测数据采集中心布置在1554 m水平休息硐室内,所有传感器采集到的微地震信号通过布设在巷道和通风井中的数据电缆传送到1554 m采集中心,并被连续实时存储下来。同时,井下微地震数据采集中心采集到的数据通过光纤传输至龙首

矿地表调度室,井下微地震数据采集中心与地面调度室 PC 机的时间设置为与因特网时间同步,工作人员可在地表实时查看井下监测到的微地震波形和微地震监测系统的运行状态。

2.2 监测系统的硬件设备

由于矿山地下情况复杂、工业环境噪音较多,监测系统的抗噪性能和稳定性至关重要。西二采区微地震监测系统使用了成都测振公司生产的微地震数据采集记录仪器、特制三分量传感器、信号传输电缆及远程数据传输光纤模块等设备。

3 微地震智能监测平台研发

3.1 微地震信号的智能识别与剔除

由于井下生产作业的复杂性,微地震系统每日收集大量的微地震信号,但其中大部分信号是由井下常规生产作业所产生,如生产放炮、车辆运行、放矿作业以及人员走动等等,因此需要在这些庞大的信息中将那些具有岩石破裂特征的微地震信号筛选出来并进行分析和定位,若依靠人工筛选,这无疑将是一件十分繁琐且工作量巨大的任务。

为了自动识别岩石破裂微地震事件,研发了微地震数据智能清理程序,在实现微地震事件的智能清理前,首先需要对井下各类微地震信号进行收集和整理。经前期大量试验和分析研究,最终将井下收集到的各类微地震事件信号分类如下。

(1) 较强能级的岩石破裂微地震事件:这些事件会触发 4 个及以上传感器,且这些传感器分布在不同水平,从信号特征来看,这些事件大多具有剪切信号特征。

(2) 低能级岩石破裂微地震事件:这些事件通常触发了相邻的 1~3 个传感器,且从信号特征来看,这些事件大多具有剪切信号特征。

(3) 生产爆破事件:这些事件产生非常强并具有长延时的削波信号,通常被多个水平面的传感器接收到,很容易被识别剔除。

(4) 与机械设备作业相关的岩体振动信号:如放矿、轨道运输、机械撞击、凿岩台车、铲车运行等引起的岩石振动信号,这些信号大多出现周期性重复,也很容易被识别剔除。

(5) 电噪声信号:具有明显谐波或脉冲信号特征。

在掌握了井下各类微地震信号的来源及其特征

后,便可通过算法程序对其进行智能筛选和清理,最终只保留具有岩石破裂特征的微地震信号。

3.2 微地震事件定位算法

微地震监测的基本要求之一是确定微地震事件的空间分布及发生时刻。为了实现微地震事件的定位,就必须采用监测区内的地震波速度模型。由于西二采区内地质结构复杂,有矿体、围岩、充填体及断层构造等,使得地震速度分布难以确定。

在本监测系统中,采用了测区平均速度模型,该平均速度模型的建立采用了 2019 年 5 月 28 日在崩落法采场 1595 m 水平首次切割拉槽大爆破所产生的微地震信号。该次爆破地震波在每个传感器处的到达时间都非常清晰,读取精度达到 0.5 ms。图 3 显示了该爆破信号到达各传感器位置的时间与距离的关系,进而从拟合直线上获得在该测区的 P 波速度为 4.30 km/s。

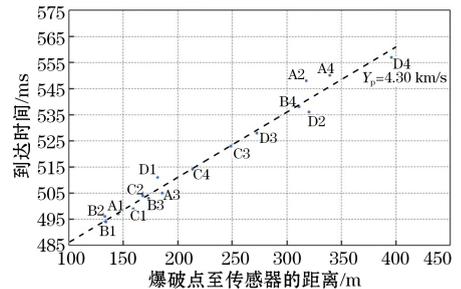


图 3 各传感器接收到微地震信号的时间与距离关系

Fig.3 The relationship between the time and distance of the microseismic signal received by each sensor

通过拟合求得的地震波速度对该爆破位置进行反演,获得的定位坐标与爆破事件实际坐标之间的误差仅在 3 m 以内,表明所求得的 4.30 km/s 的地震速度可以用于矿区岩石破裂微地震事件的定位,且具有较好的定位精度。后期在对定位参数继续优化和震波速度模型精细刻画的基础上,使西二采区微地震系统自动化定位结果准确率可达 90%,定位误差小于 10 m。

3.3 微地震监测结果智能化处理及显示平台

为了对所监测和定位的微地震事件进行直观显示,以便于矿山安全生产管理,自主研发了微地震监测结果智能化处理及显示平台,显示平台以三维 WebGIS 模块页面为主体进行展示,具有免安装的优点,能够在不同设备上通过浏览器对微地震事件进行查看和调阅,该平台主界面见图 4。

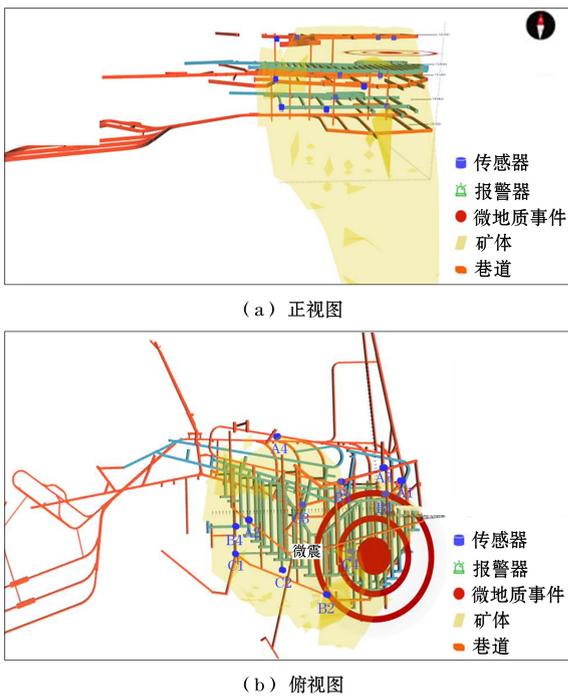


图4 西二采区微地震监测系统显示平台
Fig.4 The display platform of microseismic monitoring system in West No.2 mining area

微地震监测结果智能处理工作站主要分为4个模块,分别为自动化定位参数设置、三维展示模块、预警分析模块与数据推送模块。

(1) 自动化定位参数设置。平台可以实时接收矿井下数据采集仪上传的数据,通过内置自动化数据转换模块将上传的 ist 格式的数据文件转化为 sgy 格式的文件,并通过自动化定位参数功能进行实时处理,获得定位结果。

(2) 三维展示模块。平台以三维 DEM 地图为基础地图,并以自动化生成的三维巷道模型和三维地质体为主体,将通过自动化定位模块得到的定位结果以三维效果进行展示,本模块能够实现缩放、平移、旋转、浏览等基础操作。地图上展示的微地震传感器以及微地震定位各水平巷道都添加了标签,用作信息提示。

(3) 预警分析模块。平台内置预警模块具有自动预警功能,当平台通过自动定位结果获取微地震累计事件数后,通过聚类分析在时间序列内统计该区块微地震事件数,判别是否进行预警,如需预警则在页面右上角展示预警信息,并会播放预警铃声,并保持响铃持续时间 30 s。当 1 d 之中发生的岩石破裂微地震事件超过 15 个时,微地震事件显示图标将

由绿色转换为红色。

(4) 数据推送模块。平台内置数据推送模块支持自动化数据上传。当平台通过自动化定位模块获取新的微地震数据后,会将微地震数据与事件定位结果自动推送到云端微地震安全监测平台。此外,模块将自动检测微地震数据是否上传成功,如未成功将自动进行储存,直至上传成功。

4 现场应用

龙首矿西二采区微地震监测台网于 2019 年年初建成,上部中段无底柱分段崩落法采场于 2019 年 5 月底投入生产,微地震监测系统也随之投入使用。在监测初期主要依靠人工对微地震信号进行识别和筛选,在后期随着微地震数据自动化处理平台的不断完善,逐渐实现了微地震信号的自动化处理。

在上部中段崩落法采场首采分段(即 1595 m 分段)开采过程中,微地震监测系统记录到在崩落区附近发生了 36 148 个小能量级微地震事件以及 73 个较大能级(触发 3 个及以上不同高程的传感器)微地震事件。其中 70 个较大能级事件发生在崩落采场的直接顶板 1610~1630 m 之间,另外 3 个发生在 1650 m 水平上面,而下部中段胶结充填采场及其附近则未监测到较大能级的岩石破裂事件。这表明在崩落法首采分段开采过程中,采场顶板胶结充填体发生了冒落,回采进路放出充填体也证明了上部充填体的冒落。冒落范围主要在 1610~1630 m 之间,充填体的开裂已经延伸至 1650 m 水平,而在此过程中下部充填采场保持稳定状态。

崩落法采场第二段 1580 m 水平于 2020 年 8 月投入生产。在 1580 m 分段回采过程中,微地震监测系统在崩落回采区域及其附近共监测到 316 个较大能级微地震事件,其中 171 个较大能级事件发生在 1610 m 水平附近,另外 145 个发生在 1630 m 水平左右。在此过程中,下部充填采场及其附近依旧未监测到较大能级的岩石破裂事件。崩落法采场 1580 m 分段与下部充填法采场 1494 m 水平协同开采过程中,监测到的强微地震事件及其分布位置如图 5 所示。分析监测结果可知,随着崩落法采场第二分段的开采,顶板胶结充填进一步充分冒落,按研究预期形成覆盖层,崩落法采场回采进路和下部中段充填采场均处于稳定状态。

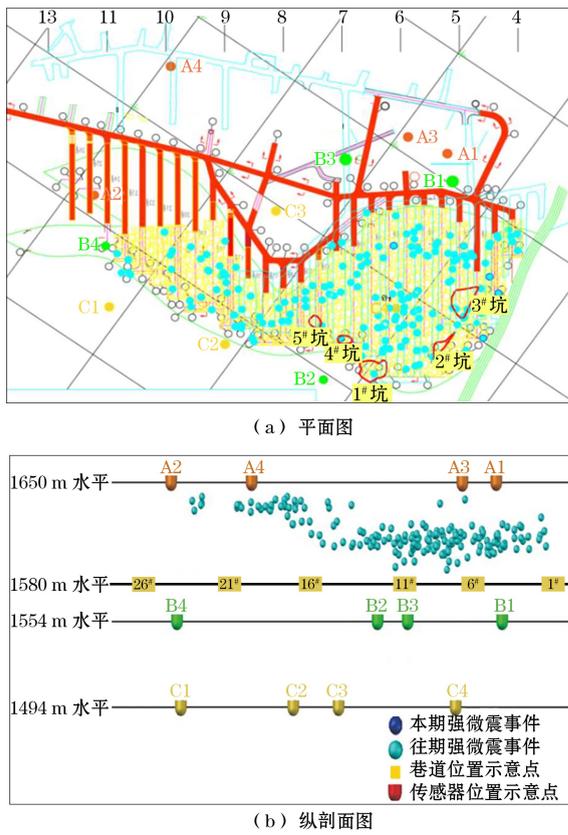


图5 崩落法与充填法协同开采过程中监测到的微地震事件

Fig.5 The microseismic events monitored during the collaborative mining by caving method and backfill mining method

西二采区崩落法与充填法协同开采从2019年5月开始至今,各采场均实现了安全生产,表1展示了2019年1月至2023年12月崩落法采场与充填法采场的产量发展情况,可以看出,崩落法采场的产能从最初的16万t/a发展到近100万t/a,而下部充填法采场的产能始终维持在70万t左右。在此过程中,通过微地震监测系统对整个西二采区的地压活动进行实时动态监控和预警,保障了崩落法与充填法在同一采区内的安全高效协同开采。

表1 西二采区崩落法与充填法协同开采的产量情况
Table 1 Production situation of collaborative mining by caving method and backfill mining method in west No.2 mining area

时间	崩落法采场产量/t	充填法采场产量/t
2019.1—2019.12	160 000	700 000
2020.1—2020.12	300 000	750 000
2021.1—2021.12	680 000	750 000
2022.1—2022.12	870 000	770 000
2023.1—2023.12	950 000	780 000

采矿生产实践表明,在龙首矿西二采区建立的微地震监测系统,对于西二采区复杂采矿局面下的地压管控和采场稳定性评判起到了很好的指导作用。

5 结论

(1) 金川集团龙首矿西二采区在崩落法与充填法同时作业过程中地压活动复杂,为实现采区地压活动的实时动态监控,建立了立体包裹式微地震监测台网,并自主研发了微地震智能监测平台,在复杂监测环境下实现了微地震事件的智能筛选、处理、定位及预警。

(2) 微地震监测结果显示,在西二采区崩落法与充填法协同开采过程中,岩石破裂微地震事件主要发生在崩落法采场顶板以上,表明随着崩落法回采的推进,顶板胶结充填体冒落形成覆盖层,而崩落法采场回采进路及下部中段充填法采场均处于稳定状态。

(3) 生产实践表明,龙首矿西二采区的微地震监测系统对于该采区复杂采矿局面下的地压活动情况起到了很好的监控作用,监测结果对采区稳定性的分析和评判具有重要指导意义,但监测系统的自动预警功能及预警阈值的确定仍有待进一步研究和完善。

参考文献(References):

[1] 吴爱祥,王勇,张敏哲,等.金属矿地下开采关键技术新进展与展望[J].金属矿山,2021,50(1):1-13.
WU Aixiang, WANG Yong, ZHANG Minzhe, et al. New development and prospect of key technology in underground mining of metal mines[J]. Metal Mines,2021(1):1-13.

[2] 陈庆发,黄昊.基于协同的协同开采科学内涵诠释[J].金属矿山,2022(5):37-44.
CHEN Qingfa, HUANG Hao. Interpretation of scientific connotation of synergetic mining based on synergetics[J]. Metal Mine,2022(5):37-44.

[3] 何斌全,李仲泽,陈国辉,等.柿竹园多金属矿露天-地下协同开采安全稳定分析[J].矿业研究与开发,2023,43(4):1-10.
HE Binquan, LI Zhongze, CHEN Guohui, et al. Analysis on safety and stability of open-pit and underground collaborative mining in Shizhuyuan polymetallic mine[J]. Mining Research and Development,2023,43(4):1-10.

[4] 贾稳宏,余龙哲,黄永祥,等.金川三矿区中段协同开采下分段巷道变形破坏特征研究[J].矿业研究与开发,2022,42(11):67-73.
JIA Wenhong, YU Longzhe, HUANG Yongxiang, et al. Study on the deformation and damage characteristics of segmental roadway under collaborative mining of multi-level in Jinchuan No. 3 mine area [J]. Mining Research and Development,2022,42(11):67-73.

[5] 肖益盖,王星,杨家冕.深部复杂难采矿体崩落法开采地压数值模拟分析[J].矿业研究与开发,2016,36(2):4-7.

- XIAO Yigai, WANG Xing, YANG Jiamian. Numerical simulation on ground pressure of caving mining complex troublesome orebody with great depth[J]. Mining Research and Development, 2016, 36(2): 4-7.
- [6] 李庶林,胡静云,周爱民,等.崩落法上覆厚大岩层崩落及破裂特性综合研究[J].岩石力学与工程学报, 2016, 35(9): 1729-1739.
- LI Shulin, HU Jingyun, ZHOU Aimin, et al. Comprehensive research on character of collapse and fracture of thick and large overburden rock in cave mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(9): 1729-1739.
- [7] 牛猛,刘勇锋,侍爱国,等.金川集团二矿区超深矿井地压分布规律研究[J].现代矿业, 2019, 35(9): 37-42.
- NIU Meng, LIU Yongfeng, SHI Aiguo, et al. Study on ground pressure distribution law of ultra-deep mine in No.2 mining area of Jinchuan group[J]. Modern Mining, 2019, 35(9): 37-42.
- [8] LEGGE N B, SPOTTISWOODE S M. Fracturing and microseismicity ahead of a deep gold mine stope in the pre-mnant and remnant stages of mining[C]//Proc. 6th ICRM Congress, Montreal, Canada: International Society for Rock Mechanics, 1987: 1071-1077.
- [9] 刘强,魏银鸿,王平,等.自然崩落法顶板稳定性监测分析与预警研究[J].中国安全生产科学技术, 2021, 17(8): 91-96.
- LIU Qiang, WEI Yinhong, WANG Ping, et al. Study on roof stability monitoring analysis and early warning by natural caving method[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(8): 91-96.
- [10] 李健,吴顺川,高永涛,等.露天矿边坡微地震监测研究综述[J].岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊 2): 3998-4013.
- LI Jian, WU Shunchuan, GAO Yongtao, et al. Review of slope micro-seismic monitoring in open-pit mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 3998-4013.
- [11] 李楠.微震震源定位的关键因素作用机制及可靠性研究[D].徐州:中国矿业大学, 2014.
- LI Nan. Research on mechanisms of key factors and reliability for microseismic source location[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [12] 李庶林,尹贤刚,郑文达,等.凡口铅锌矿多通道微震监测系统及其应用研究[J].岩石力学与工程学报, 2005, (12): 2048-2053.
- LI Shulin, YIN Xiangang, ZHENG Wenda, et al. Research of multi-channel microseismic monitoring system and its application to Fankou Lead-Zinc Mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(12): 2048-2053.
- [13] 查华胜,张海江,连会青,等.潘二煤矿 A 组煤层底板灰岩水害微震监测[J].煤炭学报, 2022, 47(8): 3001-3014.
- CHA Huasheng, ZHANG Haijiang, LIAN Huiqing, et al. Microseismic monitoring on limestone water inrush at coal seam floor for group a coal layer of Pan'er Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 3001-3014.
- [14] 汪光德,王荣军,周超群,等.北沼河铁矿微震监测系统建设与应用研究[J].矿业研究与开发, 2020, 40(9): 159-164.
- WANG Guangde, WANG Rongjun, ZHOU Chaoqun, et al. Study on building and application of microseismic monitoring system in Beiminghe Iron Mine[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(9): 159-164.
- [15] 李海港,李仕杰,郑小龙,等.采空区隐患影响下的残矿协同开采技术研究[J].金属矿山, 2020(5): 26-33.
- LI Haigang, LI Shijie, ZHENG Xiaolong, et al. Study on synergetic mining technology of residual ore under hidden influence of goaf[J]. Metal Mines, 2020(5): 26-33.

Application of Microseismic Monitoring Technology in the Collaborative Mining Process of Caving Method and Backfill Mining Method

LI Hongye¹, WU Shuanjun², WANG Yongding², LONG Weiguo²,
GONG Zhen², TAN Baohui³, YANG Ning³, JIA Kaiyue³

(1. Mining Engineering Branch of Jinchuan Group Engineering Construction Co., Ltd., Jinchang, Gansu 737100, China; 2. Longshou Mine, Jinchuan Group Co., Ltd., Jinchang, Gansu 737100, China; 3. School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China)

Abstract: The West No.2 mining area of Longshou Mine in Jinchuan is a lean mineral resource area. The mine was originally designed as a downward layered cemented filling method for mining, but in the later stage of production, due to mining cost reasons, the mining of upper section was changed from filling method to sublevel caving method. As a result, a complex situation of simultaneous mining operations between the caving method in the upper section and filling method in the lower section occurred in the mining area. Due to the significant differences in the activity and distribution characteristics of ground pressure between the caving method and the filling method, in order to ensure the stability of the entire West No.2 mining area, a three-dimensional wrapped microseismic monitoring network was established to achieve comprehensive monitoring coverage for the upper and lower sections of the mining area. At the same time, a user-friendly microseismic safety monitoring platform was independently developed, achieving functions such as automatic identification and classification, high-precision positioning, and automatic warning of microseismic signals. Real-time dynamic monitoring was conducted on the overall stability of the West No.2 mining area using the established microseismic system. The monitoring results show that during the collaborative mining process of the two mining methods, for the upper section mined by caving method, the mining drift in stope is in a stable state, and the cemented filling body on the roof of the mining area collapses and forms a covering layer, and for the lower section mined by filling method, the stope has an overall stable state.

Key words: Microseismic monitoring, Collaborative mining, Caving method, Backfill mining method, Stope stability