

地下矿山如何应对“地压”风险？ ——蒙古国乌兰矿的监测预警实践

Managing Underground Pressure: A Practical Early Warning System at Wulan Mine, Mongolia

供稿|肖志国¹, 刘小铮², 王安², 席伟^{2,3} / XIAO Zhiguo¹, LIU Xiaozheng², WANG An², XI Wei^{2,3}

内容导读

针对深部地下工程中地压灾害频发、传统监测手段预警精度不足、国外矿山监测系统价格昂贵等问题,本文以蒙古国乌兰矿为例,结合当地实际情况,探索了一套适合该矿的地压管理与监测预警方法。通过构建基于多源信息融合的地压动态监测与预警体系,集成微震监测系统、应力在线监测网络 and 三维位移实时监测装置,形成了覆盖采场、巷道、岩层的立体化监测网络。该监测成果为深部资源安全开采提供了技术支撑,所形成的智能预警方法可为当地类似工程地压防控提供理论依据,对推动蒙古国矿山灾害防治从被动应对向主动预警转变具有重要实践价值,对实现国内矿山技术的国际输出以及推进“一带一路”倡议具有重要意义。

随着全球金属矿山开采深度逐年增加,深部高地应力、复杂地质构造及动力扰动的叠加作用导致地压灾害风险显著升高^[1-4]。据统计,全球深部矿山地压事故造成的经济损失年均超12亿美元。传统地压监测技术(如单点位移计、钻孔应力计)虽能获取局部岩体变形数据,但存在监测维度单一、时空连续性不足等缺陷^[5-6]。近年来,微震监测系统、光纤传感技术及干涉合成孔径雷达(InSAR)遥感监测的发展推动了地压监测向多参数融合方向演进^[7-9],然而实际应用中仍面临3大瓶颈:(1)多源异构数据协同分析算法尚未形成统一标准;(2)预警模型对深部岩体非线性破坏特征的适应性不足;(3)针对特殊地质条件的监测方案缺乏针对性优化。

乌兰矿是蒙古国通过井下开采的唯一、最大多金属铅锌矿山,是该国矿业的重要支柱,其地压管理与监测预警工作显得尤为重要。针对上述问题,本文开展乌兰矿地质特征的多维度地压协同监测方法的研究;通过融合微震事件时空演化、三维应力场重构及岩体声发射特征,构建采动应力传递路径反演模型,旨在解决深部复合构造区地压前兆信息捕捉不完整、预警响应滞后等技术难题,为类似地质条件矿山的地压防控措施提供理论支持与技术范式。

地下矿山地压管理的核心概念

地压是指地下岩体在自重和构造应力作用下产

作者单位: 1. 中铁资源集团有限公司, 北京 100039; 2. 中铁资源集团勘察设计有限公司, 河北 廊坊 065000; 3. 河北省非煤矿山岩土工程技术创新中心, 河北 廊坊 0650001

生的应力场。地下矿山地压管理是指通过一系列技术和管理措施,对矿山开采过程中产生的地压进行监测、分析和控制,以保障矿山安全生产和资源高效回收。地压管理的主要内容包括地压监测、支护设计、采空区处理和地压灾害预警等^[10-11]。

地压管理对于地下矿山安全生产至关重要。有效的地压管理可以预防和控制岩爆^[12]、冒顶^[13]等地质灾害,保障矿工生命安全和矿山设备安全。同时,科学的地压管理能够优化采矿方法,提高资源回收率,减少资源浪费^[14]。此外,合理的地压管理可以延长矿山服务年限,提高矿山经济效益^[15]。

蒙古国乌兰矿地压管理监测系统

乌兰矿地质条件及地压显现特征

乌兰矿位于复杂地质构造带,矿体赋存条件复杂,地应力场分布不均。矿区地表主要出露的岩石为中段的流纹岩,岩体结构复杂,节理裂隙发育,矿区内断裂构造主要为木哈尔断裂,走向北西 340°,倾向南西,产状近直立。该断裂带延长约 400 m,同时发育出宽 10~40 m 断裂破碎带和断层角砾岩。矿区地质图见图 1。

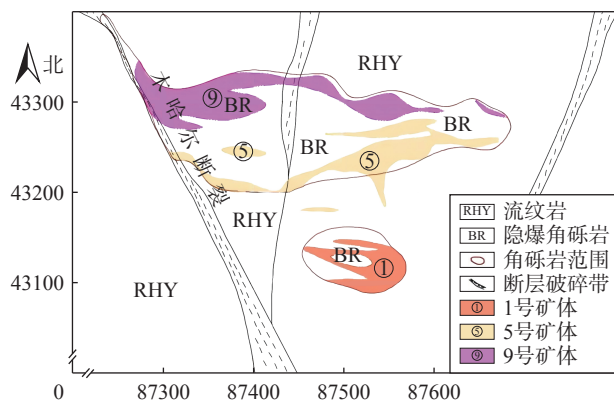


图1 矿区地质图(单位:m)

木哈尔断裂是乌兰矿区的导矿构造。断裂带由若干细密而近于平行的泥化带和构造角砾岩带组成,局部受构造应力严重破坏形成蚀变破碎带。矿区中部见一条派生断裂,内部充填 2~10 m 由流纹岩碎块和细小矿石角砾组成的破碎带;矿区东部见一条北东向次级断裂,充填角砾和岩石碎块,以及硫化物、绿泥石、滑石等成分,形成泥化带。

随着开采深度的增加,乌兰矿地压显现特征日

益明显。高地压显现主要表现为巷道变形加剧、岩爆频发和采空区失稳等问题,对矿工安全和设备造成严重威胁,严重危及整个矿山的安全生产。

乌兰矿地压管理实践

针对乌兰矿复杂的地质条件和地压显现特征,矿山采取了一系列地压管理措施。

在地压监测方面,乌兰矿建立了完善的地压监测系统,包括微震监测、应力监测和位移监测等。通过实时监测和分析地压数据,可实现及时预警和采取应对措施。微震监测系统能够实时监测岩体破裂事件发生的趋势和能量大小,为岩爆预警提供依据。应力监测系统通过埋设应力计,监测岩体应力变化情况。位移监测采用人工监测方式,在主要运输巷、穿脉以及岩体破碎地带、开采揭露面积较大区域布设位移监测点,定期对巷道围岩进行沉降和收敛观测,以有效掌握围岩变形的过程,确保井下开采过程的稳定性和安全性。

在支护设计方面,乌兰矿采用动态支护设计理念,通过综合分析不同区域的地压监测数据与井下位移监测数据,对围岩不稳定区域采用挂网、锚杆以及喷射混凝土等组合方式进行支护,有效控制了巷道变形。

在采空区处理方面,乌兰矿采用充填法开采技术,利用尾砂胶凝系统充填采空区,以减少地压集中和地表沉降。充填材料经过配比优化,具有良好的强度和流动性,能够有效支撑采空区顶板,降低地压集中程度。同时,对关键区域的采空区进行加固处理,防止大规模地压灾害的发生,提高了采空区的稳定性。

乌兰矿地压管理效果评估

乌兰矿微震时间空间分布见图 2,图中圆点颜色代表不同时间段监测到的微震事件,圆点大小代表微震事件能量大小。根据微震监测的事件聚集区域,结合现场生产情况分析表明:微震事件集聚主要由矿山采掘爆破作业、采空区未及时充填、断裂带活化所诱发,现场生产作业情况与微震事件空间分布特征具有较好的一致性。

统计 2022 年 10 月至 2023 年 9 月为期 1 年各中段微震事件数(见图 3),结果表明:监测周期内,从 23 年 1 月开始,945 m 中段每月微震事件数量相

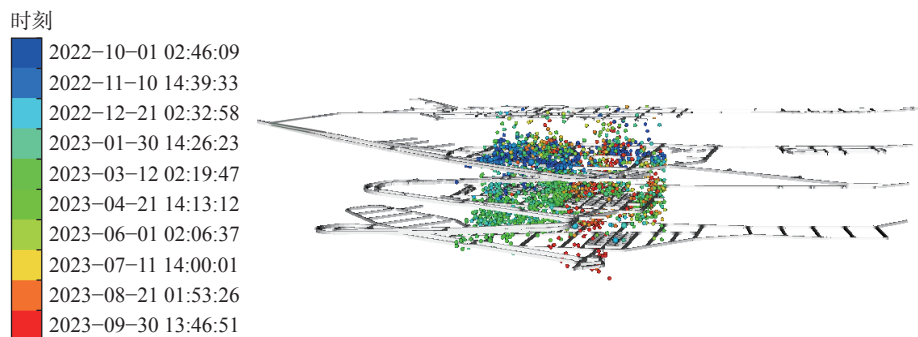


图2 微震时间空间分布侧视图

对较少,且变化较为稳定,表明该中段采空区岩体地压活动较为稳定;885 m和825 m中段每月微震数量较多,尤其是在2023年1—4月期间活动较强。该期间矿山生产活动主要集中在825 m中段4901~4903采场,进行凿岩作业、采矿和底部结构掘进施工,且其底部巷道正在穿过木哈尔断裂带,同时在885 m中段的3901~3903采场进行充填作业。2023年5月,825 m中段掘进巷道穿过木哈尔断裂带后,该中段微震数量有所下降。

在2023年3月8—14日期间,825 m中段木哈尔断裂带区域微震事件数量呈现增加趋势(见图4),监测系统及时发布了地压活动预警信息,建议矿方及时撤出相关施工设施并对周边区域进行警戒。2023年3月17日,该区域发生塌方(见图5),现场岩体破坏区域与微震事件增加区域高度一致,

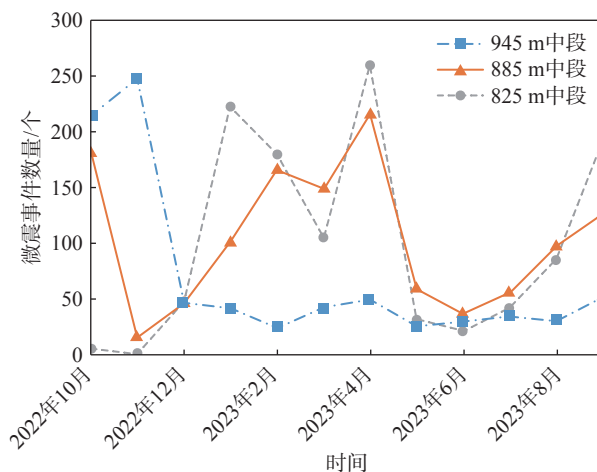


图3 各中段微震事件统计折线图

所采取的应急措施有效避免塌方可能造成的经济损失及人员伤亡,也预防了因地压活动加剧而引发的

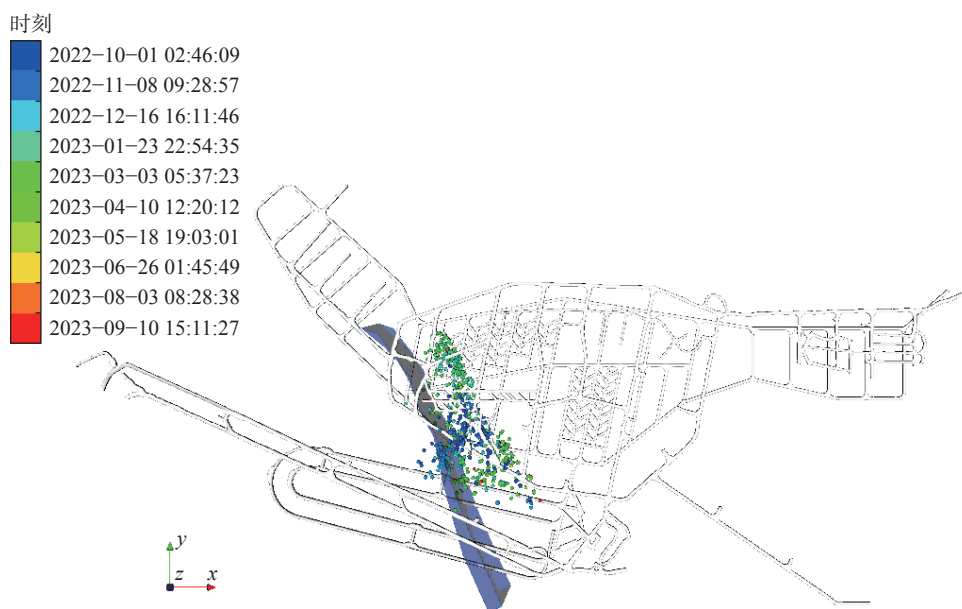


图4 木哈尔断裂带微震事件

安全事故。这一实例充分展示了微震监测预警系统在地压管理中的重要性和实际应用效果。



图5 现场塌方情况记录

实践案例表明：乌兰矿地压管理系统已成功实现了灾害风险的实时监控、精准预警与主动防控。该系统通过构建高可靠地压监测系统与多尺度协同技术，实现了矿山地压灾害的精准监测与智能预警。具体而言，系统采用自主研发的BSN矿用高精度微震监测装备，结合同步挤压小波分析、双差定位等技术，显著提升了微震信号的信噪比和震源定位精度（误差 ≤ 5 m）。通过动态优化台网布置和岩体波速反演，解决了复杂岩体环境下的定位误差难题。系统覆盖1[#]、5[#]、9[#]矿体765 m以上区域，部署32支微震传感器及10支应力计，形成“点面结合”的立体监测网络。

基于云服务平台，实现“系统维护—数据分析—安全预警—灾害防控”全流程闭环管理，结合数值模拟分析验证，优化采场结构参数（顶柱安全厚度15 m、采场宽度15 m）和“隔三采一”回采顺序，有效降低了顶板垮塌风险。地表沉降变形监测数据分析表明，充填法显著抑制了岩体移动。过渡方案通过预留隔离矿柱与废石胶结充填技术，保障了1[#]矿体开采安全，兼顾了铀矿体保护需求。

结束语

乌兰矿的地压管理实践表明，通过建立完善的地压监测系统、采用动态支护设计和实施采空区处理等措施，可以有效控制地压问题，显著提升矿山的安全生产水平。

乌兰矿构建的覆盖采场、巷道、岩层的立体化监测网络，实现了对地压活动的实时监控与预警，有效保障了矿山安全生产，提高了资源回收率并延长了矿山服务年限，为蒙古国当地类似矿山的地压管理提供了有益借鉴，具有广泛推广与应用价值。

参考文献

- [1] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究. 岩石力学与工程学报, 2005(16): 2803
- [2] 杨小聪, 蒋合国. 新质生产力引领深部金属矿山安全高效开采: 以毛坪铅锌矿深部开采实践为例. 中国矿业, 2024, 33(5): 9
- [3] 胡楠. 深部高地应力条件下采场围岩损伤机理与稳定性分析[学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2021
- [4] Wu X Y, Jiang L S, Xu X G, et al. Numerical analysis of deformation and failure characteristics of deep roadway surrounding rock under static-dynamic coupling stress. J Cent South Univ, 2021, 28(2): 543
- [5] 张小华, 张楠楠, 卢泰宏. 矿山地压在线监测系统构建研究与实例. 中国矿山工程, 2019, 48(5): 71
- [6] 许海亮, 魏亚博, 安栋. 钻孔应力计初始应力对围岩应力监测影响的试验研究. 河南城建学院学报, 2025, 34(1): 9
- [7] 冯攀飞, 曹亚利, 赵英杰. 乌东煤矿冲击地压监测预警平台搭建与应用. 金属矿山, 2023(8): 245
- [8] 史志红, 巩思园, 曹远威, 等. 冲击地压多参量智能化监测分析及预警研究. 煤炭工程, 2024, 56(1): 148
- [9] 袁本胜, 王平, 马玉涛, 等. 基于地压监测的采空区稳定性评估方法研究. 有色金属(矿山部分), 2024, 76(1): 92
- [10] 张文革, 王加闯, 董陇军, 等. 岩质边坡微震监测方案优化设计及隐伏危险区域辨识. 金属矿山, 2023, 567: 69
- [11] 王洛锋, 王平, 刘强, 等. 矿山微震监测数据应用与研究. 中国矿业, 2022, 31(1): 257
- [12] 单仁亮, 柏皓博, 孙鹏, 等. 深部岩体结构面动力特性与致灾效应研究进展. 爆炸与冲击, 2025, 45(6): 24
- [13] 马振凯. 剧烈采动巷道围岩力-能演化与冲击地压发生机理研究[学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2024
- [14] 郝英杰, 王春龙, 姜明伟, 等. 缓倾斜中厚矿体上向进路充填采矿方法优化及地压控制研究. 有色金属工程, 2023, 13(5): 114
- [15] 张传柱, 曲展鹏, 刘剑, 等. 急倾斜极薄脉采矿方法试验研究与应用. 黄金, 2016, 37(6): 36

基金项目：中国中铁股份有限公司科技开发重大专项课题资助项目（2025-专项-03）。

作者简介：肖志国（1987—），男，重庆人，中铁资源集团有限公司工作。2019年毕业于东北大学，主要研究方向：地下矿山土木工程。通信地址：北京市海淀区万寿路街道西四环中路16号6号楼；E-mail: 289401730@qq.com。