

利民煤矿临空工作面冲击地压监测技术与预警指标分析

令向东¹ 李阳¹ 冯伟¹ 刘国强¹ 张志佳^{2,3}

1.国家能源集团乌海能源公司 内蒙古利民煤焦有限责任公司, 中国·内蒙古 鄂尔多斯 016064

2.辽宁工程技术大学鄂尔多斯研究院, 中国·内蒙古 鄂尔多斯 017010

3.辽宁工程技术大学 矿业学院, 中国·辽宁 阜新 123000

摘要: 针对利民煤矿临空工作面冲击地压风险频发、监测精度不足及预警滞后的问题, 本文系统研究了冲击地压监测技术与预警指标体系。通过对工作面地质结构与应力环境的实测分析, 揭示了临空区应力重分布特征及动力失稳机理。研究基于微震与应力在线监测数据, 构建了多参量协同监测模型, 提出了包括微震能量、频次、应力增速等在内的复合预警指标体系。依托 KJ1287 微震监测系统 and 煤矿冲击地压无线应力监测系统, 对 I030902 工作面进行连续监测与现场验证。结果表明, 该系统能够有效捕捉冲击地压孕育与演化过程中的前兆特征, 监测数据与矿压显现规律高度吻合。优化后的支护及监测方案显著提升了顶底板与两帮变形的控制效果, 实现了由被动应对向主动防控的转变, 为深部煤矿冲击地压监测与安全生产提供了可靠的技术支撑。

关键词: 临空工作面; 冲击地压; 微震监测; 应力在线监测; 预警指标

Monitoring Technology and Early Warning Index Analysis of Rock Burst in Gob-Side Working Faces of Limin Coal Mine

Ling Xiangdong¹, Li Yang¹, Feng Wei¹, Liu Guoqiang¹, Zhang Zhijia^{2,3}

1.Inner Mongolia Limin Coal Co., Ltd., Wuhai Energy Group, CHN Energy, China Inner Mongolia Ordos 016064

2.Ordos Institute of Liaoning Technical University, China Inner Mongolia Ordos 017010

3.College of Mining, Liaoning Technical University, China Liaoning Fuxin 123000

Abstract: In response to the frequent occurrence of rock burst hazards, insufficient monitoring accuracy, and delayed warning in gob-side working faces of Limin Coal Mine, this study systematically investigates rock burst monitoring technologies and early warning index systems. Through in-situ analysis of the geological structure and stress environment of the working face, the characteristics of stress redistribution in the gob-side area and the mechanism of dynamic instability were revealed. Based on microseismic and online stress monitoring data, a multi-parameter collaborative monitoring model was established, and a composite early warning index system was proposed, including indicators such as microseismic energy, event frequency, and stress growth rate. Relying on the KJ1287 microseismic monitoring system and the wireless stress monitoring system for coal mine rock bursts, continuous monitoring and field verification were carried out on the I030902 working face. The results show that the system can effectively capture precursor characteristics during the incubation and evolution of rock bursts, and the monitoring data are highly consistent with the strata pressure behavior. The optimized support and monitoring scheme significantly improved the control effect on roof, floor, and rib deformation, achieving a transition from passive response to proactive prevention and control. This study provides reliable technical support for rock burst monitoring and safe production in deep coal mines.

Keywords: Gob-side working face; Rock burst; Microseismic monitoring; Online stress monitoring; Early warning indicators

0 引言

煤矿冲击地压问题长期制约着我国煤炭行业的安全发展。随着开采深度不断延伸, 地应力水平显著升高, 加之复杂地质条件与高强度开采方式的叠加影响^[1], 冲击地压的发生频率和破坏程度持续上升。近年来, 全国多个矿

区频繁出现煤岩体突发性破坏事件, 造成人员伤亡、设备损毁及生产中断, 暴露出当前防冲体系在风险识别与响应能力上的不足^[2]。研究表明, 融合应力场、震动场与能量场的多参量协同监测模式可显著提升预警可靠性^[3]。例如, 基于 KJ1287 系统的微震监测实践显示, 通过分析煤炮信号

的频谱特征与能量释放趋势,能够在一定程度上捕捉到冲击前兆信息^[4]。能够对微震事件密度、应力变化速率、钻屑量异常等多维度进行指标预警^[5]。

临空工作面冲击地压的发生机制与常规工作面存在显著差异,其风险特征主要源于采空区形成后围岩应力环境的剧烈变化。这种应力重分布不仅增强了局部承载负荷,也使得围岩处于不稳定临界状态,一旦受到外部扰动,极易触发突发性失稳^[6]。特别是在临空侧支承压力影响下,顶板断裂与底板隆起现象频发,进一步削弱了围岩自稳能力^[7]。同时,采煤、掘进与运输等作业活动持续对围岩产生动态扰动,诱发应力场波动和能量积聚,形成静载与动载叠加效应,显著提升冲击倾向性^[8]。由于冲击地压其前兆信号隐蔽、发展迅速,传统单一指标监测方法难以实现精准预警^[9],通过整合微震与应力在线数据,能够更全面识别危险演化趋势。为提升防治效能,需从源头控制应力集中程度,优化开采顺序与支护参数,减少采动扰动强度,保障深部矿井的安全高效开采^[10]。

本研究聚焦于利民煤矿临空工作面冲击地压的监测技术与预警指标体系构建。针对当前冲击地压监测中单一参数难以准确识别危险状态的问题,研究从静载应力场与动载震动场耦合作用出发,系统分析临空工作面在采动扰动下的应力重分布特征及能量积聚释放规律,制定利民煤矿临空工作面冲击地压监测预警临界指标。推动冲击地压防治由被动应对向主动防控转变,为深部矿井安全高效开采提供技术支持。

1 工程概况

1.1 研究背景

内蒙古利民煤焦有限责任公司煤矿 9#、16# 煤层煤岩冲击倾向性鉴定结果为,9# 煤层及其底板均无冲击倾向,顶板为弱冲击倾向性。根据《煤矿安全规程》第二百二十七条和《防治煤矿冲击地压细则》第十四条规定:开采具有冲击倾向性的煤层,必须进行冲击危险性评价。依据《内蒙古煤矿安全监察局鄂尔多斯监察分局》、《内蒙古煤矿安全监察局乌海监察分局》和《鄂尔多斯能源局》颁发的鄂煤安[2021]64 号文件,关于进一步加强部分煤矿冲击地压防治工作的通知,对鄂尔多斯市采深超 400m 未鉴定为冲击地压矿井的煤矿,一律比照冲击地压矿井进行管理。其中要求煤矿必须对煤层、采区、采掘工作面等进行冲击地压危险性评价,并经有关单位和煤矿上级企业审批后实施。内蒙古利民煤焦有限责任公司煤矿目前属于采深超 400m 未鉴定为冲击地压矿井,需比照冲击地压矿井管理。

内蒙古利民煤焦有限责任公司煤矿 I 030902 工作面的地层整体为走向北西、倾向南西单斜构造,倾角为 3~7°。工作面内无陷落柱、岩浆侵入体、断层及节理裂隙等断裂构造分布。I 030902 工作面布置在 9# 煤层内。西侧为井田西部边界保护煤柱,南侧为基本回采完毕的 I 030901 工作面,北侧为未开采区域。9# 煤层南翼 1# 探巷与 I 030902 工作面设计运输顺槽在距 I 0309 采区回风巷 240 m 处贯通。东部为 I 0309 采区回风巷。I 030902 工作面采掘工程平面图,如图 1 所示。

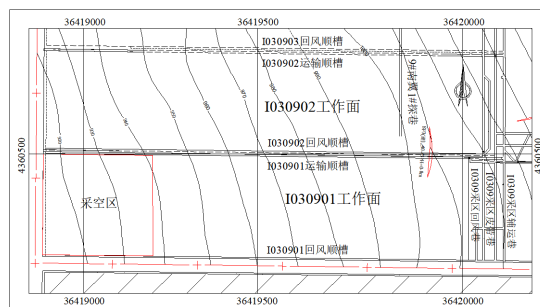


图1 I030902工作面位置图

1.2 工作面强矿压显现情况

利民煤矿 I0309 采区上覆裂隙带内存在两层厚分层坚硬岩层,分别为 6.35m 的粉砂岩和 10.19m 的粗粒砂岩,采区内 I030904 工作面及 I030901 工作面布置在采区巷道东西两侧,目前均已回采完毕。在 I030901 工作面回采过程中,由于双侧采动影响,末采阶段南翼采区巷道三面临空,使该工作面形成孤岛,支承应力叠加形成高应力区,同时上覆坚硬岩层荷载传递效应加剧了 I0309 采区巷道及回采工作面两顺槽的围岩发生严重变形和破坏情况。2023 年 2 月 9 日至 11 日, I030901 工作面推进 1195m,距停采线剩余 19m 时,采区皮带巷辅运巷 1250m 处小范围片帮、漏顶,辅运巷末端 300m 区段底鼓严重,如图 2 所示。因此,预计在 I030902 工作面回采过程中,工作面两顺槽和停采线附近采区巷道将会产生严重变形、甚至大范围破坏的问题。同时由于 I030902 工作面运输顺槽和 I030903 工作面回风顺槽之间留设 5m 窄煤柱,煤柱的高应力集中极有可能引起煤柱两侧大面积片帮,给矿井安全生产管理带来了潜在的安全隐患。

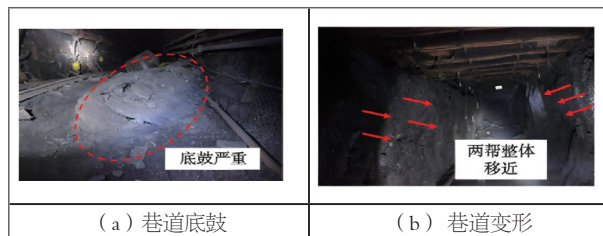


图2 运输巷道两帮及底板变形情况

2 冲击地压监测技术

2.1 微震监测

2.1.1 微震监测系统

利民煤矿区域监测主要采用徐州弘毅科技发展有限公司的 KJ1287 微震监测系统,该系统可对工作面区域进行实时监测,持续开展震源定位、微震能量计算及统计分析等工作,并通过分析矿震活动带的演化规律,对井下大能量事件进行实时预警。目前微震台网共布置 14 个震动传感器。2#、3#、14#、15#、16#、18# 震动传感器为固定点,4#、5#、6#、7#、8#、9#、10#、11# 震动传感器为活动点,其中 14#、15#、16#、18# 震动传感器为原布置,2#、3#、9#、10# 震动传感器为新扩容,4#、5#、6#、7#、8#、10# 震动传感器为新增布置,均安装在回采工作面顺槽、掘进工作面顺槽及附近巷道内,配合大巷内的震动传感器在回采、掘进期间进行监测,保证了区域监测精度。工作面顺槽内的震动传感器安装位置随工作面的推进进行优化。

2.1.2 监测数据统计

通过对 2023 年 12 月~2024 年 12 月的微震能量值、微震频次进行深入分析,12 个月内监测到微震事件总次数为 495 次,监测到微震能量大于 $3 \times 10^3 \text{J}$ 的 64 次,其主要发生在出现在 2024 年 1~8 月份,根据现场实际情况,2024 年 1 月份开始回采 I 030902 工作面,且 I030902 综采工作面微震事件频次及能量较平稳,围岩活动较平稳,应力处于平稳状态,液压支架监测数据处于正常范围内,综合分析工作面暂无应力集中现象,回采过程中严格按照要求加强矿压系统观测。

2.2 应力在线监测

2.2.1 应力在线监测系统

冲击地压的发生是静载和动载共同作用的结果,因此,在对开采诱发动载开展微震区域检测的同时,还应重点检测巷道及工作面周围应力(静载)、支承压力大小及应力集中程度。煤矿冲击地压无线监测系统基于当量钻屑量堆动力灾害进行预警,其机理在于:存在冲击地压危险的区域,在灾害发生前煤体应力会逐步积聚,当应力达到煤体破坏极限时,才有可能发生动力灾害(冲击地压),而此时钻屑量将超过额定的安全指标。

2.2.2 监测布置方案

根据利民煤矿 2025 年采掘接计划及井下生产情况,监测区域为 I 030902 工作面回风顺槽、运输顺槽。采用钻孔应力监测法,应力测点每组分别为 9m 和 15m,9m 采用

SGW-中 42-L9/ 矿用本安型钻孔应力计进行监测,15m 采用 SGV-042-L15 矿用本安型钻孔应力计进行监测。具体监测方案如下:

工作面断层、褶曲等构造带前后 30m 范围内共布置 3 组应力测点,接近老空(巷)区 30m 范围内布置 2 组应力测点,周期来压位置前后 15m 范围内布置 2 组应力测点,多次见方位置前后 15m 范围内布置 2 组应力测点。

3 监测预警指标分析

3.1 微震监测预警指标

KJ1287 微震监测系统自 2022 年 5 月运行监测,根据上述微震监测数据的分析,截至 2024 年 12 月,监测到能量大于 10^3J 的 24 次,最大值为 $6.54 \times 10^3 \text{J}$ 。根据实验室试验并结合矿井实际情况,可先设定预警临界指标初始值,在依据现场实测资料及累积数据对初始值进行修订,最终确定如下冲击危险性预警临界指标。

掘进工作面:掘进迎头 200m 范围内出现单次能量 $\geq 1.0 \times 10^4 \text{J}$ 微震事件,评价为大能量事件预警。掘进工作面 24h 释放总能量 $\geq 2.0 \times 10^4 \text{J}$,评价为工作面日释放总能量预警。掘进工作面掘进期间能量超过 $1.0 \times 10^3 \text{J}$ 日频次 ≥ 5 次,评价为微震频次预警。采煤工作面:工作面前后 200m 及两顺槽向外 50m 范围内出现单次能量 $\geq 1.0 \times 10^5 \text{J}$ 微震事件,评价为大能量事件预警。回采工作面 24h 释放总能量 $\geq 5.0 \times 10^5 \text{J}$,评价为工作面日释放总能量预警。回采工作面回采期间能量超过 $1.0 \times 10^3 \text{J}$ 日频次 ≥ 20 次,评价为微震频次预警。

3.2 应力在线监测预警指标

利民煤矿 I030902 工作面超前支承压力在回风巷影响范围达到 300m,其中工作面超前 50m 范围内回风巷的应力值和应力增加速率均较高,冲击危险性较高;运输巷影响范围达到 100m,其中超前 50m 范围内运输巷应力值和应力增加速率均较高,冲击危险性较高。

为了精准预警,基于概率密度函数和经验法则计算确定应力阈值:回采期间深基点应力值超过 20MPa 时为预警级别;浅基点应力值超过 18MPa 时为预警级别。掘进期间深基点应力值超过 12MPa 时为预警级别;浅基点应力值超过 11MPa 时为预警级别。结合不同区域应力增速数据,回采期间和掘进期间的增速预警区间为大于 3MPa/d 时为预警级别。综合上述参数体系,形成优化后的冲击地压预警判定标准。

4 结语

(1) 临空工作面由于一侧邻近采空区或无支撑空间,

导致煤岩体受力条件不对称,产生显著的应力重分布和集中效应。其力学机制表现为静载高应力背景下叠加动态扰动诱发脆性破裂,即在临空条件下煤岩体发生能量迅速卸载,引发强烈冲击地压灾害。

(2) 在 I030902 工作面安装了 KJ1287 矿井微震监测系统,对冲击地压微震事件进行实时监测。建立了相应的冲击地压预警指标,如单位时间内微震事件次数和累积能量的阈值。

(3) 应力在线监测系统架构及指标分析:构建了工作面应力在线监测系统,在 I030902 工作面及其周边布置多个应力传感器,实现对煤岩体应力变化的连续监测。当应力监测值接近或超过阈值时触发预警,为现场及时采取安全措施提供依据。

参考文献:

- [1] 董书宁,王皓,郭小铭等.煤矿区地下水保治用协同管控理论与关键技术[J/OL].煤田地质与勘探,1-19[2026-05-20].
- [2] 曹安业,杨旭,李庚等.基于知识增强的冲击地压垂域大模型构建及应用[J].煤炭学报,2026,51(04):2436-2450.DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2025.1659.
- [3] 窦林名,田鑫元,曹安业等.我国煤矿冲击地压防治现状与难题[J].煤炭学报,2022,47(01):152-171. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.yg21.1873.
- [4] 左建平,陈岩,宋洪强等.深部煤岩组合体力学特性研究进展[J].煤炭科学技术,2026,54(04):140-158.
- [5] 杨科,袁亮,王同等.深部特殊空间探测-评价-利用技术研究进展[J].煤炭学报,2026,51(01):689-720. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2025.1059.
- [6] 左建平,陈岩,宋洪强等.深部煤岩组合体力学特性研究进展[J].煤炭科学技术,2026,54(04):140-158.
- [7] 康红普,冯彦军,赵凯凯.煤矿水力压裂岩层控制技术及应用[J].采矿与岩层控制工程学报,2026,8(01):31-64.DOI:10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.2026-1011.
- [8] 张俊文,张杨,宋治祥等.煤矿深部煤岩体结构演变致冲机理及结构调控技术研究[J/OL].煤炭学报,1-22[2026-05-20].https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2025.1496.
- [9] 杨垚鑫,曹安业,刘耀琪等.物理先验知识约束的冲击地压危险时序预测方法[J/OL].煤炭学报,1-16[2026-05-20].https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2026.0079.
- [10] 白二虎,王燃烈,郭文兵等.深部充填开采厚硬顶板运移特征及减灾防冲机理[J].煤炭科学技术,2026,54(02):195-206.
- 基金项目:鄂尔多斯市重点研发计划项目(YF20250274);鄂尔多斯市科技“突围”工程“揭榜挂帅”重大项目(JB20251447);鄂尔多斯市标志性创新团队项目(TD20240005)。
- 作者简介:令向东(1974.11-),男,内蒙古鄂尔多斯市鄂托克旗,大学本科,工程师,研究方向:主要从事煤矿采掘技术、冲击地压、地测防治水方面的研究工作。