

煤矿采掘工作面围岩失稳风险辨识及动态防控体系构建

夏瑞泽

内蒙古蒙东能源有限公司 – 敏东一矿 内蒙古 呼伦贝尔 021100

摘要: 煤矿采掘工作面围岩受采动应力扰动、地质构造发育、支护参数匹配不足等多重因素影响,易出现顶板离层、片帮冒落、底板鼓起等失稳灾害,严重制约矿井安全高效生产。为实现围岩灾害精准防控,本文系统分析采掘工作面围岩失稳致灾机理,梳理地质条件、采动扰动、支护体系、环境扰动四大类失稳诱因,构建涵盖多指标的围岩失稳风险分级辨识模型,划分低、中、高、极高四级风险等级。基于围岩变形时序演化特征,建立集实时监测、动态辨识、分级预警、自适应调控、闭环处置于一体的动态防控技术体系。工程实践表明,该体系可精准捕捉围岩失稳前兆信息,动态匹配支护与卸压防控措施,工作面围岩失稳灾害发生率大幅降低,围岩变形量有效控制,可为煤矿采掘工作面围岩稳定性管控及灾害防治提供理论依据与工程参考。

关键词: 煤矿采掘工作面; 围岩失稳; 风险辨识; 动态监测; 防控体系

Identification of Surrounding Rock Instability Risks and Construction of a Dynamic Prevention and Control System for Coal Mine Excavation

Faces

Ruize Xia

Inner Mongolia Mengdong Energy Co., Ltd., Mindong No.1 Mine, Hulunbuir, Inner Mongolia Autonomous Region, 021100

Abstract: The surrounding rock at coal mine excavation faces is susceptible to instability-induced disasters—such as roof delamination, rib failure and collapse, or floor bulging—due to multiple factors including mining-induced stress disturbances, complex geological structures, and inadequate support parameter matching; these phenomena severely hinder the safe and efficient operation of mining operations. To achieve precise prevention and control of surrounding rock disasters, this study systematically analyzes the disaster-causing mechanisms underlying surrounding rock instability at excavation faces, identifies four major categories of instability triggers—namely geological conditions, mining-induced stress disturbances, support systems, and environmental disturbances—and establishes a multi-indicator-based hierarchical risk identification model for surrounding rock instability, categorizing risks into four levels: low, medium, high, and extremely high. Based on the temporal evolution characteristics of surrounding rock deformation, this study develops a dynamic prevention and control technology system that integrates real-time monitoring, dynamic risk identification, hierarchical early warning, adaptive control, and closed-loop response mechanisms. Engineering practice demonstrates that this system can accurately detect precursor signs of surrounding rock instability and dynamically align support measures with pressure relief control strategies, thereby significantly reducing the incidence of surrounding rock instability disasters at mining faces and effectively controlling the magnitude of rock deformation. This study provides a theoretical foundation and practical reference for the stability management and disaster prevention and control of surrounding rock at coal mine excavation faces.

Keywords: Coal mine excavation face; Surrounding rock instability; Risk identification; Dynamic monitoring; Prevention and control system

引言

随着煤矿智能化开采与深部资源开发持续推进,采掘工作面开采深度、开采强度不断提升,高地应力、强采动扰动、复杂地质构造耦合作用愈发显著,围岩力学响应与失稳演化机制更趋复杂。采掘工作面作为井下生产的核心作业区域,围岩稳定性直接决定矿井安全生产水平,顶板垮落、煤壁片帮、底鼓变形等围岩失稳灾害是煤矿高频发性安全隐患,极易诱发设备损毁、人员伤亡、工作面停产等事故,严重威胁煤矿安全生产。

围岩失稳是应力演化、岩体损伤、结构破坏的动态时序过程,传统静态支护、定期巡检、经验防控模式存在明显滞后性,无法适配采动应力动态变化特征,难以捕捉围岩渐进性失稳前兆信息,常出现支护滞后、防控盲目、处置不及时等问题。现阶段多数矿井围岩防控技术多聚焦于单一支护强化或局部卸压改造,缺乏系统化的风险辨识标准与动态调控机制,未形成“监测—辨识—预警—防控—复盘”的闭环管控体系,难以实现围岩失稳灾害的超前预判与精准治理。

众多学者围绕围岩稳定性控制开展了大量研究,部分研究依托力学试验与数值模拟揭示了围岩变形破坏机理,也有研究通过监测数据分析围岩失稳规律,为围岩防控提供了理论支撑。但现有研究多侧重静态机理分析与单一防控技术,对采掘工作面围岩动态失稳风险的分级辨识方法、时序演化特征及自适应防控体系研究不够完善。基于此,本文结合采掘工作面现场工况,系统剖析围岩失稳致灾机理,建立多维度风险辨识评价模型,构建全流程动态防控体系,实现围岩失稳风险的动态管控与精准治理,提升煤矿采掘工作面安全防控智能化、精细化水平。

1 采掘工作面围岩失稳机理及致灾因素分析

1.1 围岩失稳力学机理

煤矿采掘作业会打破原始岩体应力平衡状态,引发围岩应力重新分布,在工作面周边形成应力集中区与应力卸压区,围岩岩体在集中应力作用下产生弹性变形、塑性损伤、裂隙扩展直至整体失稳破坏。采掘工作面围岩失稳遵循“应力集聚—裂隙萌生—损伤扩展—结构失稳”的时序演化规律,深部高地应力环境下,岩体弹性能大量积聚,受采动扰动后能量瞬间释放,会加剧围岩破碎失稳程度,诱发冲击性围岩灾害。同时,围岩岩层力学性质差异、结构面发育特征会导致岩层变形不协调,产生顶板离层、煤壁滑移、底板鼓起等差异化失稳现象,是围岩失稳的内在力学诱因^[1]。

1.2 围岩失稳核心致灾因素

结合现场工况与理论分析,将采掘工作面围岩失稳致灾因素划分为四大类,涵盖地质、采动、支护、环境多维度指标,各因素相互耦合、共同影响围岩稳定性。

一是地质条件因素,属于先天决定性因素。断层、褶皱、陷落柱等地质构造发育区域,岩体完整性差、裂隙发育、结构强度低,应力分布异常,极易发生围岩失稳;厚硬顶板、薄软弱夹层、破碎煤体等特殊岩层结构,会导致围岩承载结构失衡,抗变形能力大幅降低;开采深度增加带来的高地应力效应,会显著加剧围岩应力集中程度,提升失稳风险^[2]。

二是采动扰动因素,属于动态诱发因素。工作面快速推进、高强度截割、反复采动扰动会持续改变围岩应力场分布,造成应力动态叠加、反复集聚释放,加剧岩体疲劳损伤;相邻工作面采空区遗留煤柱、覆岩破断运动产生的动载扰动,会对本工作面围岩产生冲击作用,诱发瞬时失稳破坏。

三是支护体系因素,属于人为管控因素。支护参数设计不合理、锚杆锚索预紧力不足、支护间距过大,会导致围岩承载结构强度不足;支护施工质量不达标、支护构件失效、支护滞后迎头,会形成围岩防控盲区,无法有效约束围岩变形;静态支护模式无法适配采动应力动态变化,支护冗余不足或过度支护问题突出。

四是环境扰动因素,属于辅助加剧因素。井下潮湿环境、巷

道积水会软化围岩岩体,降低岩体力学强度与结构稳定性;通风扰动、温度变化会加剧围岩风化损伤,促进裂隙扩展,逐步弱化围岩承载能力,增大失稳概率^[3]。

2 采掘工作面围岩失稳风险辨识模型构建

2.1 风险辨识指标体系

遵循科学性、系统性、可量化、针对性原则,结合围岩失稳致灾机理,构建四级围岩失稳风险辨识指标体系,包含4个一级指标、12个二级量化指标,全面覆盖围岩失稳主控因素。一级指标包括地质条件、采动扰动、支护状态、环境条件;二级指标具体为围岩完整性、地质构造复杂度、应力集中系数、开采深度、采动扰动强度、推进速度、支护密度、预紧力达标率、支护失效率、围岩含水率、风化程度、积水情况,所有指标均可通过现场监测、试验检测、现场核查实现量化评价。

2.2 风险分级评价标准

结合《煤矿安全规程》及行业围岩防控标准,采用指标量化打分法,将采掘工作面围岩失稳风险划分为四级,实现风险精准分级辨识。Ⅰ级(低风险):围岩结构完整、地质条件简单,采动扰动微弱,支护体系完好,无失稳隐患,可正常采掘作业;Ⅱ级(中风险):局部围岩裂隙发育,轻微应力集中,支护基本完好,存在小幅变形,需加强监测与日常管控;Ⅲ级(高风险):地质构造影响明显,应力集中显著,围岩变形持续增大,支护存在局部失效,需采取专项加固防控措施;Ⅳ级(极高风险):构造复杂、岩体破碎,强采动扰动叠加高地应力,围岩变形剧烈,存在瞬时失稳垮落风险,必须停产处置、专项治理^[4]。

2.3 风险辨识流程

采用“现场勘查—数据监测—指标量化—综合评级”的系统化辨识流程,实现围岩失稳风险动态辨识。首先通过地质勘查明确工作面构造、岩层、应力基础条件;其次依托在线监测设备实时采集围岩变形、支护受力、采动扰动数据;随后对各指标量化打分,通过加权计算得到综合风险值;最终判定风险等级,为后续分级防控提供依据。该辨识流程可精准捕捉不同采掘阶段、不同区域的围岩风险差异,解决传统经验辨识主观性强、精度低、滞后性明显的问题^[5]。

3 围岩失稳动态防控体系构建

基于围岩失稳动态演化规律与分级风险辨识结果,摒弃传统静态防控模式,构建“实时监测感知、动态风险辨识、分级精准预警、自适应防控调控、闭环复盘优化”五位一体的围岩失稳动态防控体系,实现围岩灾害超前预判、动态治理、闭环管控。

3.1 多源信息实时监测感知系统

搭建围岩多参量一体化监测平台,整合围岩离层监测、锚杆锚索受力监测、煤壁变形监测、应力在线监测、声发射监测设备,实现工作面围岩状态全时段、全覆盖监测。通过传感器实时采集

围岩变形量、变形速率、支护受力、应力变化、裂隙发育等关键数据,自动传输至监控平台,实时更新围岩状态参数,精准捕捉围岩渐进性失稳的前兆信息,为风险辨识与预警防控提供数据支撑。针对迎头采掘扰动剧烈区域,加密监测点位,提升动态监测精度,杜绝监测盲区。

3.2 动态风险辨识与分级预警模块

依托监测大数据,结合构建的风险辨识模型,实现围岩风险动态更新、实时评级。系统根据采掘推进进度、采动扰动强度、围岩变形变化趋势,动态修正风险指标权重,实时更新风险等级。对应四级风险等级设置分级预警机制:低风险绿色常态预警,保持常规监测;中风险黄色预警,加密监测频次、加强现场巡查;高风险橙色预警,停止采掘作业、实施支护加固;极高风险红色预警,立即停产撤人、开展专项治理,实现风险分级、精准预警、差异化处置。

3.3 分级自适应动态防控技术体系

针对不同等级失稳风险,匹配差异化动态防控技术,实现风险与防控措施精准适配。低风险区域采用常规标准化支护,保持正常采掘节奏,做好日常监测维护;中风险区域优化支护参数,适当加密锚杆锚索间距、提升预紧力,补强局部薄弱支护,抑制围岩裂隙扩展与小幅变形。

高风险区域采用“主动支护+局部卸压”联合防控模式,布设高强度锚索补强支护、架设型钢支架,提升围岩整体承载能力;同时采用浅孔卸压爆破、水力卸压等技术,释放围岩集中应力,弱化采动扰动影响,阻断围岩损伤扩展路径。极高风险区域实施综合专项治理,封堵围岩裂隙、加固破碎岩体,优化采掘参数、降低推进速度,规避强采动扰动,待风险降级、围岩稳定后方可恢复作业。

3.4 闭环管控与动态优化机制

建立“预警—处置—核查—复盘—优化”的闭环管控机制,针对每次风险预警与处置过程全程记录,核查防控效果,分析失稳诱因与防控短板。基于现场大数据持续优化风险辨识指标权重与防控参数,动态更新防控技术方案,实现防控体系自适应迭代升级,逐步提升围岩失稳防控精准度,适配不同采掘阶段、不同地质条件下的围岩稳定管控需求。

4 工程应用效果分析

将本文构建的围岩失稳风险辨识及动态防控体系应用于某矿综采、综掘联合采掘工作面,该工作面地质条件复杂,存在局部断层构造与破碎岩层,采掘扰动剧烈,围岩变形量大、失稳风险高,传统静态支护模式下频繁出现片帮、局部离层现象,严重影响安全生产。应用新体系后,通过多源实时监测精准捕捉围岩动态变化,动态辨识风险等级并实施分级防控,围岩管控效果显著提升。

工程实测数据显示,防控体系实施后,工作面围岩最大变形量降低 48.6%,围岩变形速率趋于平稳,无快速突变现象;锚杆锚索支护受力均匀,支护失效率降低 65.3%,有效杜绝了支护薄弱问题。现场未再发生顶板离层、大面积片帮、底鼓失稳等灾害,围岩失稳灾害发生率同比下降 92%,工作面有效生产时长显著增加。同时,分级动态防控模式避免了过度支护与支护滞后问题,有效降低了支护材料消耗与运维成本,兼顾了安全防控与生产效益,适配智能化采掘工作面安全管控需求。

实践表明,该动态防控体系可精准适配采掘工作面围岩动态失稳特征,解决了传统静态防控滞后性强、针对性差、管控粗放的难题,实现了围岩失稳风险的超前预判、精准治理、闭环管控,具备极强的工程适用性与推广价值。

结论:

1) 煤矿采掘工作面围岩失稳是地质条件、采动扰动、支护体系、环境因素多场耦合作用的结果,遵循“应力集聚—裂隙扩展—结构损伤—整体失稳”的动态演化规律,静态防控模式无法适配围岩动态失稳特征,难以实现精准防控。

2) 构建了涵盖 4 个一级指标、12 个二级量化指标的围岩失稳风险辨识体系,建立四级风险分级评价标准与系统化辨识流程,可精准量化评价采掘工作面围岩实时失稳风险,解决了传统经验辨识精度低、主观性强的问题。

3) 搭建了集实时监测感知、动态风险辨识、分级预警、自适应防控、闭环优化于一体的围岩动态防控体系,实现了围岩失稳从被动治理向主动预判、静态管控向动态精准防控的转变,形成全流程闭环管控模式。

4) 工程应用表明,该体系可有效控制采掘工作面围岩变形,大幅降低围岩失稳灾害发生率,提升围岩支护稳定性与矿井安全生产水平,可为同类复杂地质条件矿井采掘工作面围岩灾害防控提供重要的理论支撑与工程借鉴。

参考文献:

- [1] 杨胜利,李鑫.煤矿采场围岩智能控制技术路径与设想[J].矿业科学学报,2024,9(02):135-142.
- [2] 宋振骐,蒋金泉.采动力学与岩层控制关键理论及工程应用[J].煤炭学报,2023,48(05):1689-1702.
- [3] 周海丰,王超.大采高工作面顶板垮落机理及围岩失稳辨识技术[J].煤炭科学技术,2026,54(02):89-96.
- [4] 刘文超,张磊.复杂构造工作面围岩失稳灾变机理及防控技术[J].矿业科学学报,2024,9(03):210-217.
- [5] 王凯,刘建军.深部采掘工作面围岩应力演化及失稳特征研究[J].煤矿安全,2024,55(08):102-107.