

深部采矿岩爆防治技术与工程实践

任建龙 马志峰

内蒙古准格尔旗力量煤业有限公司大饭铺煤矿 内蒙古 鄂尔多斯 010399

摘要: 深部采矿岩爆防治是保障矿山安全的关键。其防治技术涵盖机理研究、监测预警及主动防控。通过分析岩爆形成机理及影响因素,利用微震、声发射等多源监测技术,构建预警模型实现早期预警。主动防治方面,优化开采工艺、实施动态支护,并采用卸压爆破、水力压裂等技术释放岩体应力。工程实践表明,综合防治方案可显著降低岩爆频率与强度,保障矿山安全生产。

关键词: 深部采矿; 岩爆防治技术; 工程实践

引言: 随着矿产资源开采向深部延伸,高地应力、高温等复杂地质条件使岩爆灾害频发,严重威胁深部采矿作业安全与生产效率。岩爆作为深部岩体在高应力作用下能量突发性释放的动力灾害,其防治需系统融合机理研究、监测预警与主动防控技术。本文聚焦深部采矿岩爆防治,从岩爆机理与影响因素分析出发,探讨多源信息监测预警技术及主动防治技术与装备,并结合工程实践验证防治效果,为深部矿山安全开采提供参考。

1 深部岩爆机理与影响因素分析

1.1 岩爆发生机理

(1) 能量积聚与释放机制: 深部岩体受高地应力作用发生弹性变形,大量弹性能与应变能在岩体内部积聚,当岩体应力达到其极限强度时,岩体结构发生破坏,积聚的能量瞬间释放,转化为岩体的动能和破碎能,推动破碎岩块高速弹射,引发岩爆灾害,能量积聚的多少与释放的速度直接决定岩爆的强度。(2) 动力失稳理论: 深部岩体多表现为脆性特征,在高地应力持续作用下,岩体内部产生微裂隙并不断扩展,结合动态断裂力学原理,当裂隙扩展至临界状态时,岩体发生突发性脆性破坏,失去承载能力,同时伴随应力急剧释放,导致岩体动态失稳,形成岩爆。

1.2 岩爆影响因素

(1) 地质因素: 坚硬完整、脆性强的岩体易积聚能量,诱发岩爆; 断层、节理等地质构造会改变应力分布,形成应力集中区,加剧岩爆风险; 高地应力场是岩爆发生的核心前提,应力大小、方向直接影响岩爆的发生概率与强度。(2) 开采因素: 采深越大,地应力越高,岩爆风险显著上升; 采动强度过大、回采速度过快,会破坏岩体应力平衡,引发应力重分布; 爆破振动会产生附加动力荷载,诱发岩体裂隙扩展,成为岩爆发生的触发因素。(3) 环境因素: 深部高温环境会降低岩

体韧性、增大脆性,提升岩爆敏感性; 渗流压力的变化会改变岩体内部应力状态,削弱岩体强度,加速裂隙发育,间接增加岩爆发生的可能性^[1]。

1.3 深部开采特殊环境效应

(1) 高地应力与高温耦合作用: 高地应力使岩体处于高储能状态,高温进一步加剧岩体脆性劣化,二者耦合作用下,岩体内部微裂隙快速扩展,承载能力大幅下降,显著提升岩爆的发生概率和破坏强度,形成叠加灾害效应。(2) 采动扰动下应力路径动态演化: 深部开采过程中,采动扰动会打破原地应力平衡,导致岩体应力路径呈现动态变化,应力加载、卸载反复交替,使岩体不断积累损伤,当应力演化达到临界状态时,极易触发岩体突发性破坏,诱发岩爆。

2 深部采矿岩爆多源信息监测与预警技术

2.1 监测技术体系

(1) 微震监测: 作为深部岩爆监测的核心技术,通过布置井下微震传感器阵列,捕捉岩体破坏过程中释放的微震信号,实现微震事件的精准定位、能量计算与频次统计,分析能量释放的时空演化规律,精准识别岩爆发生前的能量异常积聚特征,为岩爆预警提供核心能量参数支撑,适用于大范围、远距离围岩稳定性监测。

(2) 声发射监测: 基于岩体受力损伤时产生的声发射信号,通过便携式或固定式声发射传感器,实时捕捉岩体内部裂纹的萌生、扩展与贯通全过程,提取信号幅值、上升时间、振铃计数等特征参数,判断裂纹扩展速率与损伤程度,精准捕捉岩爆发生前的岩体损伤前兆,多用于关键采掘工作面、巷道周围围岩的局部精细化监测。

(3) 应力-应变监测: 采用应力计、应变片、位移计等设备,埋设于巷道围岩关键部位,实时监测岩体应力变化与应变响应数据,跟踪围岩变形速率、累计变形量的动态变化,当应力达到预警阈值或应变出现突变时,及时

发出预警信号，直观反映围岩受力状态与稳定性变化，是岩爆短期预警的重要补充^[2]。（4）电磁辐射监测：利用岩体受力损伤过程中产生的电磁辐射效应，通过电磁辐射监测仪捕捉辐射强度、脉冲频次等参数，结合岩体应力状态，分析电磁辐射信号与岩体损伤程度的相关性，捕捉岩爆发生前的电磁辐射异常突变特征，实现对岩体损伤状态的非接触式实时监测，弥补接触式监测的局限性。

2.2 多参数融合预警模型

（1）基于机器学习的岩爆倾向性分级：整合微震、声发射、应力-应变等多源监测数据，构建SVM、随机森林等机器学习预警模型，通过样本训练与参数优化，实现岩爆倾向性的分级评价（无危险、弱危险、中危险、强危险），精准识别不同危险等级的特征阈值，提升预警模型的分级准确性与适用性。（2）动态权重调整与实时预警阈值设定：结合深部采矿过程中采动扰动、地质条件变化等因素，采用动态权重算法，对不同监测参数的权重进行实时调整，避免单一参数误判导致的预警偏差；基于矿山历史岩爆数据、现场监测数据，采用统计分析方法与数值模拟相结合的方法，设定动态预警阈值，兼顾预警的及时性与准确性，有效降低误报、漏报概率。

2.3 工程案例：某深部矿山监测系统部署

（1）传感器布局优化与数据采集方案：针对该深部矿山采深大、地应力高、岩爆风险高的特点，优化传感器布局，在采掘工作面周边、断层破碎带、巷道交叉口等关键部位，合理布置微震、声发射、应力-应变及电磁辐射传感器，形成“全域覆盖、重点突出”的监测网络；采用无线传输与有线传输相结合的方式，构建实时数据采集系统，设定采集频率与数据过滤标准，确保监测数据的连续性、完整性与准确性。（2）预警模型验证与误报率控制：将构建的多参数融合预警模型应用于该矿山现场监测，通过对比现场实际岩爆情况与模型预警结果，对模型参数进行优化调整，完成模型验证；建立数据异常识别与复核机制，对异常监测数据进行快速核查，结合现场地质条件与开采工况，优化预警阈值，将模型误报率控制在5%以内，实现岩爆的精准、实时预警，为矿山安全生产提供可靠技术保障。

3 深部采矿岩爆主动防治技术与装备

3.1 开采工艺优化

（1）阶段开采顺序设计：开采顺序是岩爆主动防治的基础，直接决定岩体应力分布与能量积聚状态。自上而下开采可逐步释放上部岩体应力，避免下部岩体承受过高附加应力，适配高地应力、高脆性岩体矿山，能有

效缓解应力集中；自下而上开采易导致上部岩体悬空形成应力叠加，仅适用于岩性较软、稳定性较好的深部矿山。实际需结合矿山地质条件、采深及岩体力学参数，科学选择开采顺序，从源头降低岩爆风险。（2）采场结构参数优化：采场参数不合理易引发围岩应力集中，需通过数值模拟与现场试验优化确定。深部采场跨度通常控制在8-12m、高度6-10m，避免大面积空场形成；形状优先采用弧形、圆形，替代传统矩形采场，减少直角部位应力集中，降低岩体破碎与岩爆发生概率，兼顾采矿效率与施工安全。（3）爆破参数控制：爆破振动是岩爆重要诱发因素，需通过参数优化实现减震防护。减震爆破采用毫秒微差起爆、减小单段装药量、增大炮孔间距，降低爆破地震波强度，减少对围岩扰动；光面爆破精准控制炮孔布置、装药量与起爆顺序，使巷道轮廓平整光滑，减少围岩裂隙发育，保留岩体完整性，避免应力突发性释放^[3]。

3.2 动态支护技术

（1）柔性支护系统：针对深部岩体高应力、大变形特征，柔性支护可适应围岩变形并释放部分能量。高强度锚网由高强度锚杆与金属网组成，能有效约束岩体表面变形、防止岩块脱落；让压锚杆具备可控让压性能，围岩变形时可缓慢退让，避免锚杆断裂，同时持续提供支护阻力，平衡岩体应力。（2）能量吸收装置：配套能量吸收装置可消耗岩体变形与应力释放产生的能量，缓解动力冲击。吸能构件采用高强度弹性材料，受岩体挤压时发生塑性变形消耗能量；缓冲垫层铺设于围岩与支护结构之间，既能减少冲击荷载对支护的破坏，又能缓冲应力波传播，降低岩爆破坏强度^[4]。（3）智能支护材料：依托智能材料提升支护自适应能力与耐久性。形状记忆合金锚杆可通过温度触发恢复原始形状，持续提供支护力，适配围岩动态变形；自修复混凝土用于巷道喷层，可自动愈合微裂隙、修复岩体完整性，增强围岩承载能力，减少岩爆诱因。

3.3 应力调控技术

（1）卸压爆破：通过主动爆破释放岩体体积聚应力、优化应力分布。深孔爆破在应力集中区布置深孔，控制爆破强度使岩体适度破碎形成卸压带，降低应力峰值；预裂爆破在巷道或采场周边形成连续预裂面，切断应力传递路径，减少外部应力对核心区域岩体的作用。（2）水力压裂增透卸压：利用高压水劈裂岩体，形成连通裂隙，改变岩体渗透性与力学性质实现卸压。通过压裂孔注入高压水，使坚硬完整的高应力岩体产生水力裂隙，释放弹性能的同时降低岩体脆性，减少突发性破坏，适

配深部坚硬岩体卸压需求。(3)切顶卸压与留矿卸压协同作用:构建协同卸压体系,精准控制应力分布。切顶卸压通过爆破切断采场顶部岩体,使其有序冒落释放上部应力;留矿卸压在采场内部保留部分矿石作为人工矿柱,承担部分围岩应力,缓解周边应力集中,二者协同提升卸压效果,保障采矿安全。

4 深部采矿岩爆防治工程实践与效果评价

4.1 工程背景与岩爆特征

(1)某深部金属矿地质条件与开采历史:该深部金属矿开采深度达1200-1800m,属于典型高地应力矿山,矿区岩体以坚硬脆性花岗岩为主,完整性好、储能能力强,周边发育2条次级断层,地应力场分布不均。矿山已开采30余年,随着采深增加,岩体应力持续升高,近5年频繁发生岩爆灾害,严重影响采矿作业安全与生产进度,亟需实施综合防治工程。(2)岩爆类型及空间分布:该矿山岩爆以爆裂型为主,占比65%,表现为岩体突发性爆裂、伴随大量岩块飞溅,破坏范围集中;弹射型占比25%,多发生于巷道侧壁,岩块小范围高速弹射;抛射型占比10%,多发生于采场空顶区域,破坏性最强。空间上,岩爆主要分布在采场周边巷道、断层破碎带附近及采动应力集中区,深部采掘工作面岩爆发生率显著高于浅部区域。

4.2 综合防治方案实施

(1)监测预警系统部署与数据联动分析:部署微震、声发射、应力-应变及电磁辐射多源监测系统,优化传感器布局,实现矿区全域覆盖;搭建数据联动分析平台,整合多源监测数据,运用机器学习预警模型,设定动态预警阈值,实现岩爆风险实时预警、异常数据快速推送,为防治工程实施提供数据支撑。(2)采场-巷道协同支护体系构建:采场采用高强度锚网+让压锚杆+吸能构件的柔性支护方案,巷道采用锚喷支护+缓冲垫层组合工艺,关键部位增设形状记忆合金锚杆,构建采场-巷道协同支护体系,增强支护结构的抗冲击、抗变形能力,约束岩体变形与破碎^[5]。(3)动态开采工艺调整与卸压工程实施:调整阶段开采顺序为自上而下,优化采场结构参数,减小采场跨度与高度;采用减震、光面爆破

技术,控制爆破扰动;在应力集中区实施深孔卸压爆破与水力压裂卸压工程,结合切顶卸压与留矿卸压协同作用,主动释放岩体应力,降低岩爆诱发风险。

4.3 防治效果评价

(1)岩爆频率与强度降低率:防治工程实施后,矿山岩爆月均发生率从12次降至2次以下,降低率达83.3%;强、中危险等级岩爆完全消除,仅偶发轻微弹射型岩爆,岩爆整体强度显著降低,达到安全开采要求。(2)支护结构稳定性监测:通过长期监测,支护结构最大位移量控制在5mm以内,应力值稳定在设计阈值范围内,无锚杆断裂、喷层开裂等现象,支护体系稳定性良好,有效抵御了岩体变形与冲击荷载。(3)经济效益与社会效益评估:防治后,矿山因岩爆导致的月均停产时间从4.5天降至0.3天,巷道维修成本年均降低78%,大幅提升了生产效率;同时消除了岩爆安全隐患,保障了作业人员生命安全,实现了安全生产与经济效益的双重提升。

结束语

深部采矿岩爆防治是一项复杂且系统的工程。通过深入剖析岩爆机理与影响因素,我们构建了多源信息监测预警体系,实现了对岩爆风险的精准感知与实时预警。同时,主动防治技术与装备的应用,有效降低了岩爆发生的频率与强度。工程实践表明,综合防治方案成效显著,在保障矿山安全生产、提升经济效益方面发挥了重要作用。未来,需持续创新技术,以应对更复杂的深部采矿挑战。

参考文献

- [1]王久玲,张小军.深地采矿工程岩爆预测现状分析及发展趋势研究[J].新疆钢铁,2025,(01):72-74.
- [2]梁伟章,赵国彦.深部硬岩矿山岩爆风险防控技术研究进展[J].岩土力学,2022,43(S2):454-468.
- [3]熊泽华,林金山.基于地应力测量的深部矿区岩爆预测研究[J].现代矿业,2023,39(09):91-94.
- [4]祁云,汪伟,陈森,等.深部矿山巷道岩爆应急管理能力的评估[J].安全与环境学报,2023,23(05):140-141.
- [5]刘志强,宋朝阳.深部矿产资源开采矿井建设模式及其关键技术[J].煤炭学报,2021,46(03):826-828.