

煤矿顶板事故预防与控制技术的优化策略

邵文杰, 毛文涛, 杜宝弘, 王忠义, 樊永金

(山东能源集团兖矿能源东滩煤矿, 山东 邹城 273500)

摘要 煤矿顶板事故直接威胁作业人员生命安全, 常引发大规模人员伤亡和设备损毁, 同时造成采掘工作面瘫痪、生产中断及瓦斯泄漏等次生灾害, 导致直接经济损失与恢复成本激增。从技术经济角度分析, 优化控制策略可提升资源回采率, 减少无效支护投入, 实现安全效益与经济效益的协同提升。此外, 顶板事故预防是矿山工程地质学与岩体力学理论实践化的关键环节, 需通过动态监测与数值模拟技术精准识别风险区域。随着智能化矿山建设推进, 顶板安全控制需与物联网、大数据等技术深度融合, 推动传统安全管理模式向风险预控型转变。

关键词 煤矿顶板事故; 支护设计; 多维度动态监测网络; 自适应智能支护系统; 应急响应协同机制

中图分类号: TD7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.32.033

0 引言

煤矿顶板事故的频发源于地质条件复杂性与开采工艺动态性的双重挑战。在复杂地质条件下, 顶板岩层呈现非线性变形、节理裂隙发育等特征, 传统监测手段难以全面反映应力场与位移场的动态变化, 导致风险识别滞后。同时, 开采扰动(如工作面推进速度、采高变化)会引发顶板应力重新分布, 而现有支护设计多基于静态力学模型, 未充分考虑岩体动态劣化特征, 导致支护力传递效率降低。此外, 风险评估方法粗放, 未动态考虑地质条件变化对顶板稳定性的影响, 难以指导精准防控。因此, 亟需构建覆盖监测、评估、支护与应急的全流程优化体系, 以适应现代化矿山安全生产需求。

1 煤矿顶板事故预防与控制的必要性

煤矿顶板事故作为矿山开采中最常见且危害严重事故类型之一, 其预防与控制的必要性源于多重维度的深层需求。从安全生产本质看, 顶板失稳导致的冒顶、片帮等事故直接威胁作业人员生命安全, 可能引发大规模人员伤亡和设备损毁, 而通过科学预防可显著降低事故概率, 保障井下作业的基本安全条件。从技术经济角度分析, 顶板事故常造成采掘工作面瘫痪、生产中断, 甚至引发瓦斯泄漏等次生灾害, 导致直接经济损失与恢复成本激增, 而优化控制策略可提升资源回采率, 减少无效支护投入, 实现经济效益与安全效益的协同提升。

进一步而言, 顶板事故的预防是矿山工程地质学与岩体力学理论实践化的关键环节。复杂地质条件下顶板岩层的非线性变形、节理裂隙发育等特征, 要求通过动态监测与数值模拟技术精准识别风险区域, 为

支护设计提供理论依据。同时, 随着智能化矿山建设推进, 顶板安全控制需与物联网、大数据等技术深度融合, 构建实时感知—预警—处置的闭环管理体系, 推动传统安全管理模式向风险预控型转变^[1]。此外, 从社会责任维度, 强化顶板事故防控是落实企业安全生产主体责任、维护矿工职业健康权益的必然要求, 对促进煤炭行业可持续发展具有战略意义。

2 煤矿顶板事故预防与控制技术的现有局限性

2.1 监测手段滞后, 实时性不足

现有顶板监测主要依赖人工巡检和传统点式传感器(如压力计、位移计), 存在监测频率低、覆盖范围有限的问题。人工巡检易受主观因素影响, 且无法连续监测; 点式传感器仅能获取局部数据, 难以全面反映顶板应力场和位移场的动态变化。尤其在地质条件复杂区域(如断层、软弱夹层), 局部应力突变可能被漏检, 导致预警延迟, 无法及时干预。

2.2 支护设计僵化, 适应性差

现行支护设计多基于经验公式或静态力学模型, 未充分考虑顶板岩体的非均质性和动态劣化特征。例如: 锚杆支护参数(长度、间距)通常按均质岩层假设确定, 但实际顶板中存在层理、节理等结构面, 导致支护力传递效率降低。此外, 传统支护材料(如金属支架)的刚度与岩体变形不匹配, 在冲击载荷下易发生脆性破坏, 而可变形支护系统(如让压锚杆)的应用仍缺乏规范指导, 难以适应不同地质条件。

2.3 风险评估粗放, 精准度低

现有风险评估方法多采用定性评分或简单数值模拟, 未动态考虑开采扰动对顶板稳定性的影响。例如:

基于安全检查表的评估体系权重固定,未根据工作面推进过程中的地质条件变化(如煤层厚度突变、含水层渗透)调整风险等级。数值模拟方面,软件多假设岩体为连续介质,忽略了节理裂隙的渗透-损伤耦合效应,导致模拟结果与实际垮落形态偏差较大,难以指导精准防控。

2.4 应急响应低效,联动性弱

当前应急管控体系存在“重预案、轻执行”问题,应急预案多以文本形式存在,未与智能化监控系统联动。例如:顶板离层预警后,人员撤离路线规划仍依赖人工判断,未集成GIS空间分析技术实现动态最优路径生成。同时,应急救援装备(如快速支护装置)的井下部署缺乏科学性,导致事故发生后装备到达现场时间过长,延误救援时机。此外,事后分析多聚焦于直接原因,未通过事故案例复盘优化防控策略,导致同类事故反复发生。

3 煤矿顶板事故预防与控制技术的优化策略

3.1 构建多维度动态监测网络

针对传统监测手段覆盖范围有限、数据更新滞后的问题,需整合分布式光纤传感、微震监测与三维激光扫描技术,构建覆盖顶板全空间的动态监测体系。

分布式光纤传感技术可通过在巷道顶板连续敷设光缆,实时采集应变与温度数据。光缆中的每个点均能感知岩体微小变形,当顶板出现裂缝扩展或应力集中时,局部光纤的折射率发生变化,系统通过分析光信号衰减特征,精确定位裂缝位置并评估扩展速度。同时,温度数据可辅助判断是否存在局部渗水或岩体风化现象,为风险预警提供多参数支撑。

微震监测系统通过在巷道内布置多组三分量检波器,捕捉岩体破裂产生的弹性波信号。利用波速层析成像技术,可反演顶板内部应力分布状态,识别高应力聚集区。结合声发射定位算法,系统能提前数小时预警潜在垮落区域,为支护调整或人员撤离争取时间。

三维激光扫描仪可按固定周期对顶板表面进行全断面扫描,生成高精度点云数据。通过对比不同时期的扫描结果,可量化顶板离层量、下沉量及曲面变形趋势。对于凸起或凹陷等异常形变,系统自动标记并关联至地质构造图,辅助分析变形与断层、节理的空间关系。

上述三组数据通过边缘计算节点实时融合,利用机器学习中的随机森林算法,构建顶板失稳多因素耦合预警模型。模型输入参数包括应变变化率、微震事件频次、离层发育速度等,输出为顶板垮落风险等级及建议处置措施。该体系实现了从单一参数监测到多

物理场协同感知的转变,显著提升了风险识别的准确性与时效性。

3.2 开发自适应智能支护系统

为解决传统支护设计难以适应顶板动态劣化的问题,可研发基于物联网的智能锚杆系统。该锚杆杆体内部集成高精度压力传感器与光纤位移计,前者可实时监测锚杆轴向受力变化,后者通过测量杆体与孔壁的相对位移,精准捕捉顶板下沉速率。数据通过内置的无线传输模块,以低功耗广域网形式上传至地面控制平台,确保井下复杂环境下信号稳定传输。

当地面平台接收到异常数据时,系统自动启动分级响应机制:若监测到支护力持续衰减但未达临界值,平台远程控制锚杆尾部液压装置,动态调整预紧力,恢复支护强度;若顶板位移速率超过阈值,则立即触发让压机构,通过弹簧或液压缓冲装置释放部分能量,避免锚杆因过载而断裂。同时,系统向附近作业人员发送声光预警,提示撤离至安全区域。

针对软弱夹层或断层带等地质薄弱区,采用可伸缩金属网与高分子注浆材料联合支护方案。金属网由高强度钢丝编织而成,网片间通过弹性连接件连接,允许顶板小幅变形而不破坏整体结构。注浆材料选用双组分聚氨酯,通过专用注浆泵注入岩体裂隙,遇水后快速固化形成柔性胶结体,既填充空隙又增强岩体粘聚力。在施工过程中,先铺设金属网并固定于顶板,再通过钻孔向裂隙带注浆,待材料固化后形成“网—浆—岩”复合支护层,有效控制软弱层滑移^[2]。

该系统通过“硬件感知—软件分析—机械执行”的闭环控制,实现支护参数随顶板状态动态调整,显著提升复杂地质条件下的支护可靠性。

3.3 建立地质—开采耦合风险评估模型

为突破传统风险评估的静态局限,需构建地质条件与开采工艺的动态耦合分析模型。

首先,采用地质雷达与钻孔电视技术联合探测顶板岩层结构。地质雷达通过发射高频电磁波,根据反射信号时差与振幅变化,识别层理界面、断层及裂隙发育带;钻孔电视则利用高清摄像头下放至钻孔内部,直观获取岩芯完整性、节理倾角及填充物特征。两种技术数据经三维建模软件融合,生成包含岩层产状、节理密度、软弱夹层分布等参数的精细化地质模型,为后续分析提供基础数据支撑。

其次,将地质模型导入数值模拟平台,结合开采工艺参数进行动态模拟。输入变量包括工作面推进速度、采高、支护类型及密度等,模拟顶板在开采扰动下的应力重新分布过程。通过有限元法或离散元法计算,可直

观呈现顶板弯曲下沉、离层发育及垮落形态，并输出关键位置的应力集中系数、位移变化曲线等量化指标。

最后，基于模拟结果开展敏感性分析，识别影响顶板稳定性的关键风险因子。例如：当煤层倾角较大时，顶板易沿层理面发生滑移；采高增加会导致悬顶面积扩大，加剧垮落风险。针对不同风险因子，制定差异化防控措施：对高倾角煤层，采用锚索加固顶板与上覆岩层连接；对大采高工作面，优化液压支架支护强度并缩短移架步距。该模型通过持续更新地质探测数据与开采参数，实现风险评估的动态修正，显著提升评估结果与实际工况的匹配度^[3]。

3.4 优化应急响应协同机制

针对应急处置中多部门联动效率低的问题，需构建“监测—预警—处置”全流程一体化平台。当顶板动态监测系统触发预警后，平台立即启动应急响应程序：

首先，基于井下人员定位系统数据，结合三维地质模型与实时监测的顶板变形信息，自动规划最优撤离路线，避开高应力集中区、积水段及已发生垮落的危险区域，并通过井下防爆终端向作业人员发送声光报警与逃生指令，同步显示撤离路径及安全集合点位置。

其次，平台调度附近移动式支护车与救援机器人赶赴事故点。移动式支护车配备快速伸缩液压支架，可在 10 分钟内完成临时支护结构搭建，防止二次垮落扩大事故范围；救援机器人搭载高清摄像头与气体检测模块，可深入塌方区域探测被困人员位置，并传输现场影像至指挥中心，为后续救援提供决策依据。

在日常管理中，需强化应急预案的实战化训练。每月组织多工种联合演练，模拟顶板大面积垮落、人员被困等场景，重点检验调度系统响应速度、设备调配效率及人员协同能力。演练后，通过视频回放与数据复盘，优化撤离路线规划逻辑与设备调度优先级^[4]。此外，利用 VR 技术开展沉浸式应急培训，模拟顶板裂缝扩展、支架失稳等突发状况，训练作业人员快速判断风险、正确使用自救器及协作避险的技能，提升全员应急处置水平。该机制通过技术赋能与常态化演练，实现应急响应从“被动应对”到“主动防控”的转变，显著缩短事故处置时间，降低次生灾害风险^[5]。

3.5 推广基于案例推理的防控经验库

为解决顶板事故事后分析碎片化、防控经验难以复用的问题，需构建基于案例推理的智能化经验库。

首先，系统化收集国内外典型顶板事故案例，涵盖不同地质条件（如软岩、厚煤层、断层带）、开采工艺（综采、炮采）及支护类型（锚网索、液压支架）的场景。每例案例需详细记录事故前兆特征（如顶板

离层量、微震频次）、应急处置措施（调整支护参数、强制放顶）及最终效果（是否二次垮落、人员伤亡情况），形成结构化知识条目。

其次，利用知识图谱技术构建案例关联网络。以“地质条件—开采参数—风险类型—处置方案”为节点，通过语义分析提取案例间的隐性关联。例如：将“煤层倾角大于 25° 且节理密集”的地质特征与“锚杆排距过大导致的滑落事故”关联，形成可追溯的因果链。当监测系统预警类似风险时，系统通过特征匹配算法快速检索历史案例，推荐经过验证的防控方案，如缩短锚杆排距、增加锚索密度或采用预应力桁架支护。

最后，建立经验库动态更新机制。鼓励一线技术人员通过移动终端上传现场处置案例，包含问题描述、采取措施及实施效果。上传案例经专家审核后纳入知识库，形成“实践—反馈—优化”的闭环。定期组织案例研讨会，分析不同措施的适用边界（如某措施在硬岩中有效，但在软岩中可能加剧离层），推动防控策略因地制宜调整。

该经验库通过案例复用与持续迭代，将碎片化经验转化为系统性防控知识，提升事故预防的精准性与可操作性。

4 结束语

煤矿顶板事故预防与控制的优化需从技术、管理、应急三方面协同推进。通过构建多维度动态监测网络，可实现顶板状态的实时感知与风险预警；开发自适应智能支护系统，能显著提升复杂地质条件下的支护可靠性；建立地质—开采耦合风险评估模型，可突破传统评估的静态局限；优化应急响应协同机制，能缩短事故处置时间，降低次生灾害风险。未来，随着物联网、大数据等技术的深度应用，煤矿顶板事故防控将向智能化、精准化方向持续发展，为煤炭行业安全生产提供坚实保障。

参考文献：

- [1] 赵广轩, 赵德龙. 煤矿顶板事故特征及规律研究 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2024(19):40-42.
- [2] 陈堃, 谭吉玉, 丁元春. 煤矿顶板事故的知识发现及灾害链网络分析 [J]. 煤矿安全, 2024, 55(08):249-256.
- [3] 崔海海. 采煤工作面顶板事故防治措施研究 [J]. 能源与节能, 2025(03):185-187, 191.
- [4] 马秋聪, 卢晗, 朱春. 煤矿顶板事故分析与防治对策研究 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2024(12):100-102.
- [5] 牛晋宇. 采煤工作面顶板事故原因及其防治措施研究 [J]. 能源与节能, 2024(02):283-285, 289.