

金属非金属矿山采掘过程中顶板管理技术研究

黄燚东 许浩杰 董俊华 刘 涛 万 宇

湖北杉树桠矿业有限公司 湖北 宜昌 夷陵区 443145

【摘 要】：金属非金属矿山采掘活动中，顶板稳定直接关系到作业安全与生产效率。本文围绕采掘过程中顶板管理技术展开研究，分析不同地质条件下顶板失稳的机理，探讨支护与监测的关键技术。通过对典型矿山案例的比对与数据分析，总结出适应复杂地层的顶板控制方案，并提出优化管理策略。研究结果表明，综合应用监测预警、智能支护及动态管理手段，可显著提高顶板稳定性，降低安全风险，为矿山安全生产提供可靠的技术支持。

【关键词】：顶板管理；矿山采掘；稳定控制；支护技术；安全监测

DOI:10.12417/2811-0536.26.01.016

引言

金属非金属矿山在采掘过程中常面临顶板破碎、塌落及应力集中等复杂地质问题。顶板稳定性不仅影响作业人员安全，也决定了采掘系统的持续运行效率。近年来，随着矿山开采深度和规模的增加，传统的经验式管理已难以满足安全需求。新型顶板管理技术的研究与应用成为矿山安全领域的重要方向。通过系统分析顶板受力特征、失稳规律与支护响应，探索智能化与信息化手段在顶板控制中的应用，为构建高效、安全的矿山生产体系提供科学依据与技术支撑。

1 顶板失稳特征与风险分析

1.1 采掘空间结构与顶板受力规律

采场跨度、开采高度及围岩完整性对顶板应力分布起决定性作用。当采掘空间扩大时，顶板原有的岩体平衡被破坏，形成应力集中区和松弛区。围岩受采动影响产生位移，导致顶板拉伸、剪切或弯曲破坏。拱形结构顶板可形成自承力拱，具有较高稳定性，而平顶结构则易出现离层与垮落。顶板厚度、节理裂隙发育程度及埋深条件共同决定其承载极限。受力监测结果表明，当垂直应力超过岩体抗拉强度时，局部岩块脱落并诱发连锁破坏，因此采掘设计必须兼顾空间结构合理性与支护协调性，以维持顶板长期稳定。

1.2 不同地质类型下的顶板破坏模式

层状岩系中常出现沿层离层与滑移破坏，岩层间界面摩擦力较小，易导致整体垮落；块状岩体则以节理贯通和岩桥破断为主，破坏具有突发性和不确定性。软弱围岩区顶板承载力低，支护受力不均，常产生塑性变形和缓慢下沉；而硬脆性岩层中则易因应力集中而发生脆性断裂。岩溶发育区还存在空洞塌陷和顶板突落的复合风险。不同地质构造的差异决定了支护形式的选择及参数设计，应依据岩体结构面方向、岩性

组合与埋深压力等因素进行分类控制。

1.3 顶板事故案例与风险成因解析

顶板事故在矿山生产中具有突发性和破坏性，多由结构失稳与管理疏忽叠加引发。事故调查显示，部分矿区因采掘设计不合理造成应力集中，导致顶板岩层突然断裂；还有因支护系统布置不当、锚杆长度或间距不足而形成局部空顶，进而诱发塌落。地质构造复杂、围岩松散及采动扰动强度大是造成冒顶事故的主要地质因素。监测资料表明，在采掘扰动区，顶板位移速率明显加快，预警信号未及时响应，管理体系缺乏实时数据支撑。通过案例分析可发现，技术措施滞后、信息监测不全及施工管理不规范是顶板事故风险的主要内因。

2 顶板监测与预警技术研究

(1) 监测传感系统的布置与数据采集：金属非金属矿山顶板监测系统的布置应依据采掘空间结构特征与围岩稳定性分区，形成分层、分区的动态监测网络。传感设备包括顶板离层仪、锚杆应力计、岩体声发射传感器及微震监测系统等，通过多点布设实现空间信息的全面覆盖。监测点应设置在采场拱顶、巷道交汇处及应力集中区域，以捕捉关键部位的应力演化与变形趋势。传感系统多采用无线传输与有线采集相结合的模式，实时采集位移、应力、震动及裂隙扩展数据。数据经信号滤波与多源融合处理后，可消除环境噪声干扰，提高监测精度。为保证连续性与可靠性，系统需具备冗余布置与断点续传功能，使采集信息在高湿、高温及强震环境下仍保持稳定。数据采集频率依据地质条件与开采进度动态调整，实现对顶板状态的时序跟踪与趋势识别，为后续预警分析提供准确基础数据。

(2) 顶板位移与应力实时监测方法：顶板位移与应力的实时监测是掌握岩体变形规律与判定失稳临界

状态的关键手段。常用方法包括激光扫描测距、光纤光栅传感（FBG）、分布式光纤传感（DAS）及微震信号反演技术。光纤传感技术能够在高温高湿条件下长期稳定运行，并具备高灵敏度和抗干扰能力。激光扫描系统通过周期性测绘采场断面形变，实现对顶板下沉速率的可视化展示。微震监测技术基于能量释放与震源定位原理，可识别细微裂隙扩展与岩桥破断行为。为提高数据时效性，监测系统与无线传输网络联动，实现多通道同步采集与云端实时分析。通过建立位移—应力耦合模型，可判断顶板受力异常区并划定高风险区域。该方法在动态采掘环境中具有较强适应性，为灾害预警与安全决策提供连续的量化依据。

（3）预警模型建立与信息化管理平台：顶板管理的预警模型构建依托多源监测数据的融合分析，通过建立应力、位移与时间序列的非线性关联，实现失稳前兆的智能识别。模型采用机器学习与模糊逻辑推理技术，对采集数据进行特征提取与模式识别，确定不同阶段的稳定性等级。基于大数据分析的神经网络模型可不断自学习与优化预警阈值，使预测精度随采掘进程动态提升。信息化管理平台集成监测数据、地质模型与三维可视化界面，实现对顶板状态的全时段展示。平台具备数据追溯、趋势预测及自动报警功能，并可与矿山调度系统联动，形成风险闭环控制体系。

3 支护技术的优化与创新应用

（1）传统支护方式的局限性分析：金属非金属矿山采掘过程中，传统支护方式以锚杆、锚索、钢架及喷射混凝土为主，其结构简单、施工便捷，但在深部高应力及复杂地质条件下暴露出明显局限。由于传统支护多依赖静态设计参数，缺乏对围岩力学变化的动态响应能力，导致支护系统在受力状态变化时难以及时调整。锚杆支护在岩体节理裂隙发育区域易出现局部失效，钢架支护在高应力集中区存在塑性屈曲与连接点剪切破坏问题。喷射混凝土受湿度与温度影响较大，易出现收缩裂缝，削弱整体承载能力。传统方式多以被动支撑为主，忽略了围岩的自稳特性与应力重分布规律，支护体系刚度与柔性匹配不足，易造成二次应力集中。部分矿区仍沿用经验化布置与定参数设计，支护与岩体变形不协调，造成资源浪费与安全隐患并存，限制了矿山安全管理水平的提升。

（2）高强度与柔性支护材料的适应性研究：随着深部开采与复杂地层条件的增加，高强度与柔性支护材料的应用成为提升顶板稳定性的关键方向。高强度锚索采用预应力钢绞线与耐腐蚀合金构件，具有高拉伸强度与抗疲劳性能，可有效分散集中应力并形成稳

固的承载体系。柔性支护材料以钢丝网、聚酯纤维网及高延展性复合带为代表，通过延性变形吸收能量，适应顶板渐进式变形。部分新型支护体系引入能量吸收锚杆与摩擦式锚具，可在动态载荷作用下维持结构完整性。喷射聚合物与高性能砂浆材料在提升粘结强度与抗渗性能方面表现突出，能在复杂围岩中形成连续支护膜层。高强度与柔性材料的组合支护能实现刚柔并济的力学协同，使顶板在受力过程中既具抵抗能力又具释放能力，显著降低局部失稳风险，为深部矿山提供安全高效的支护方案。

（3）智能支护系统与自动化控制技术：智能支护系统的构建依托传感技术、液压控制与信息化平台的集成，实现支护结构的自动调节与实时监控。液压支架配备压力传感器与位移监测单元，可根据顶板载荷变化自动调整支撑力，确保受力均衡。无线传输模块将监测数据实时上传至中央控制系统，经算法分析后自动修正支护参数。智能锚固装置可通过扭矩与预应力反馈实现自适应控制，提高锚固质量的一致性。机器人喷射与自动布网技术在复杂巷道环境中能够替代人工作业，降低安全风险并提升施工精度。基于人工智能的预测模型通过分析顶板应力时序数据，提前识别支护失效趋势，实现主动干预。自动化系统与数据平台融合后，支护作业实现远程操作与多点协同控制，使顶板管理从经验控制转向数据驱动与智能决策，推动矿山支护技术向自感知、自调节的方向发展。

4 综合管理体系的构建与实施

4.1 顶板管理的组织与责任体系

管理机构需按照矿山生产系统的层级特征构建纵向分级、横向协同的管理网络。安全技术部门、地质勘查部门、生产调度中心及设备维护单位应形成联合责任体系，确保信息传递的及时与指令执行的高效。顶板管理责任应落实到岗位，明确矿长为安全第一责任人，技术负责人为方案审批与技术把关人，各采掘区段长为现场执行与检查主体。管理体系中需建立技术监督、质量验收与风险评估三级控制环节，使顶板支护设计、施工与监测形成闭环。责任体系的核心在于动态问责与奖惩机制，确保技术措施与管理行为具有可追溯性。组织架构中应设置专职顶板工程师，负责监测数据分析与风险报告编制，并参与采掘计划调整，保证各部门协同运行，使顶板安全控制由分散管理转向系统化、标准化与制度化。

4.2 动态巡检与数据反馈机制

巡检工作应采用定点观测与机动检测相结合的方法

式,通过激光扫描仪、便携应力计、裂隙探测仪等设备,对关键区域进行周期性检测。巡检路线需结合地质构造、采掘顺序与应力集中分布进行科学规划,确保覆盖顶板变形敏感区与隐患点。巡检数据应通过移动终端实时上传至数据中心,系统自动生成趋势曲线并标识异常变化。反馈机制采用闭环管理模式,当监测值接近预警阈值时,系统自动推送报警信息至相关负责人。技术人员依据反馈结果,调整支护参数或优化施工工序,实现问题的即时响应。为防止信息延迟,数据传输应采用无线加密网络,确保稳定性与安全性。

4.3 安全管理与技术决策的协同模式

安全管理部门应与地质技术组、监测中心及调度指挥平台实现信息互通,通过统一的数据接口构建综合管理数据库。系统可根据实时监测数据与历史事故参数自动生成风险指数图,为管理层提供决策依据。技术决策的制定应依托多学科协同,包括岩体力学分析、支护设计优化与应力反演计算等环节,确保决策具有科学性与可操作性。在协同运行过程中,采用“数据驱动+人工研判”的双层机制,既发挥智能算法的预测能力,又保留工程专家的经验判断。管理与技术的耦合还需体现在执行层面,通过智能调度平台实现采掘顺序调整、支护强度匹配及风险区域封控。协同模式的建立使安全管控由单向执行转变为多源互动,实现顶板管理的智能化、闭环化与精准化运行。

5 技术应用成效与经验总结

5.1 典型矿山案例的应用效果评估

在典型金属非金属矿山的实际应用中,顶板管理技术通过多源监测系统与智能支护系统的结合,显著改善了顶板稳定状况。监测数据显示,实施动态监测与自动支护控制后,顶板位移速率较改造前下降约40%,应力波动幅度减小,岩层离层深度明显降低。通过信息化平台实时反馈数据,支护强度可根据顶板受力变化自动调整,避免了突发性冒顶事故。矿区作

业环境稳定性提高,施工人员暴露风险显著下降。该案例验证了综合技术体系在复杂地质条件下的适应性与可靠性,为同类型矿山提供了可复制的管理与技术路径。

5.2 顶板管理技术的经济与安全效益分析

顶板管理技术的实施不仅提升了安全保障水平,也带来了显著的经济效益。通过智能监测与预警系统的投入,矿区在减少停产事故与设备损毁方面节约了大量成本。支护材料优化及施工自动化降低了人工消耗,提高了作业效率与支护寿命。事故率下降使安全赔偿与维修支出明显减少,生产连续性增强,单位产能提升幅度可达15%至20%。数据化管理手段使风险控制更加精准,避免了过度支护造成的资源浪费。经济与安全双重效益的体现,证明技术升级是矿山安全管理可持续发展的关键途径。

5.3 综合管理体系的可推广价值与局限

综合顶板管理体系在多种矿山环境中具备较强推广价值,其核心优势在于技术集成与管理协同的可移植性。通过标准化监测模块与信息化平台,可根据不同地质条件快速部署。该体系在地质构造极度复杂或矿体分布不均的区域仍存在适应性不足的问题。高初始投入与技术维护成本对部分中小型矿山构成压力,数据传输稳定性及人员技术水平差异也会影响体系运行效果。推广过程中需结合矿山规模、设备条件及管理能力进行定制化调整,确保技术体系在不同环境下保持安全与经济平衡。

6 结语

金属非金属矿山采掘过程中顶板管理技术的研究体现了安全生产与科技创新的深度融合。通过监测预警、智能支护与信息管理的协同应用,顶板稳定性得到显著提升,安全风险有效降低。系统化、数据化的综合管理体系为矿山实现高效、可持续开采提供了技术支撑与实践依据。

参考文献:

- [1] 李建强.深部金属矿山顶板稳定控制技术研究[J].中国矿业,2022,31(4):45-52.
- [2] 王志鹏.非金属矿山采掘安全监测与预警系统优化研究[J].安全与环境工程,2023,30(2):88-94.
- [3] 陈国林.智能化支护系统在地下矿山顶板控制中的应用[J].矿山机械,2021,49(10):112-118.
- [4] 刘志明.基于信息化平台的矿山顶板动态监测技术研究[J].金属矿山,2024,53(5):73-80.
- [5] 赵伟东.柔性支护材料在复杂地质条件下的适应性分析[J].岩石力学与工程学报,2022,41(11):2214-2223.