

# 金属矿山顶板灾害监测预警技术应用分析

蔡松杰 刘志会 郑志刚 王健  
锡林郭勒盟山金白音呼布矿业有限公司  
DOI:10.32629/jsse.v4i1.19107

**[摘要]** 金属矿山开采过程中,顶板灾害是威胁井下作业人员生命安全、制约矿山安全生产的主要灾害类型之一,其具有突发性强、破坏性大、防控难度高的特点。随着我国金属矿山开采深度不断增加,地质条件愈发复杂,顶板失稳引发的冒顶、片帮等灾害事故频发,造成了巨大的人员伤亡和财产损失。监测预警技术作为预防顶板灾害的核心手段,能够实时捕捉顶板变形、应力变化等异常信号,提前发出预警信息,为灾害防控提供科学依据。

**[关键词]** 金属矿山; 顶板灾害; 监测预警技术; 有效应用  
**中图分类号:** TD4 **文献标识码:** A

## Application Analysis of Metal Mine Roof Disaster Monitoring and Early Warning Technology

Songjie Cai Zhihui Liu Zhigang Zheng Jian Wang  
Xilin Gol League Shanjing Baiyinhubu Mining Co., Ltd.

**[Abstract]** During the mining process in metal mines, roof disasters are one of the primary types of hazards that threaten the safety of underground workers and constrain mine safety production. These disasters are characterized by strong suddenness, severe destructiveness, and high prevention and control difficulties. As the mining depth of metal mines in China continues to increase and geological conditions become more complex, frequent disasters such as roof collapses and side wall failures caused by roof instability have resulted in significant casualties and property losses. Monitoring and early warning technology, as a core measure for preventing roof disasters, can detect abnormal signals such as roof deformation and stress changes in real time, issue early warnings, and provide a scientific basis for disaster prevention and control.

**[Key words]** Metal mine; Roof disaster; Monitoring and early warning technology; Effective application

## 引言

金属矿产资源的开发是国民经济建设的重要基础,然而,在开采过程中,顶板灾害始终是威胁矿山安全生产、造成重大人员伤亡和财产损失的主要灾害类型之一。随着我国金属矿山开采深度与强度的不断增大,所面临的地质条件日趋复杂,顶板冒落、片帮等灾害事故的风险亦随之升高。为有效遏制此类事故,实现矿山安全高效开采,发展并应用先进的顶板灾害监测预警技术至关重要。目前,位移、应力、微震及地质雷达等多种监测技术已在金属矿山得到不同程度的应用,在灾害前兆信息捕捉与风险预警方面发挥了积极作用。然而,各类技术在适用条件、监测精度、经济成本等方面各具特点,其实际应用效果也因矿山地质条件与技术管理水平而异。因此,系统梳理主流监测预警技术的原理、应用现状及优缺点,并探讨其优化应用策略,对于提升金属矿山顶板灾害防控能力具有重要的理论与现实意义。

## 1 金属矿山顶板灾害主流监测预警技术及应用现状

### 1.1 位移监测技术

位移监测技术是顶板灾害监测预警的基础技术,主要用于监测顶板岩层、巷道两帮的位移变化,捕捉顶板下沉、离层、片帮等异常信号,其核心是通过各类位移传感器,实时采集位移数据,经数据处理后,判断顶板稳定性。当前主流的位移监测技术主要包括顶板离层仪监测、光纤位移监测、GPS位移监测三种。

顶板离层仪监测是目前金属矿山应用最广泛、最成熟的位移监测技术,分为机械式离层仪和电子式离层仪。机械式离层仪结构简单、成本低廉、操作便捷,主要用于监测顶板岩层的层间离层情况,通过人工读数记录位移数据,适用于中小型金属矿山或监测点较少的区域,但存在监测精度低、数据时效性差、人工劳动强度大等缺点,难以实现实时监测和远程预警。电子式离层仪结合了传感器技术和数据传输技术,能够实时采集顶板离层位移数据,并通过有线或无线方式传输至监测中心,实现数据的实时分析和异常预警,监测精度可达0.1mm,适用于大型金属矿

山或地质条件复杂的区域,但成本较高,对环境适应性要求较高,需定期进行维护校准。

GPS位移监测技术主要用于监测矿山地表及井下顶板的宏观位移变化,通过GPS接收机实时接收卫星信号,计算出监测点的坐标变化,进而得到位移数据。该技术具有监测范围广、定位精度高、无需布线、操作便捷等优点,适用于大型金属矿山的地表位移监测和井下大范围顶板位移监测,能够有效预判大面积冒顶灾害的发生。但该技术受井下遮挡、电磁干扰等因素影响较大,在井下复杂环境中的应用受到一定限制,通常与其他监测技术结合使用。

### 1.2 应力监测技术

应力监测技术主要用于监测顶板岩层的应力分布和变化情况,捕捉应力集中、应力突变等异常信号,预判顶板岩层的失稳风险,其核心是通过应力传感器,实时采集顶板岩层的应力数据,分析应力变化规律,判断顶板稳定性。当前主流的应力监测技术主要包括锚杆(索)应力监测、岩体应力监测两种。

锚杆(索)应力监测是金属矿山顶板应力监测的主要方式,通过在锚杆(索)上安装应力传感器,实时监测锚杆(索)的受力情况,间接反映顶板岩层的应力变化。锚杆(索)作为顶板支护的核心构件,其受力情况与顶板稳定性密切相关,当顶板岩层发生应力集中时,锚杆(索)的应力会显著增加,若应力超过锚杆(索)的承载极限,会导致锚杆(索)断裂,进而引发顶板灾害。该技术操作便捷、成本适中,监测精度较高,能够实时反映顶板支护的受力状态,适用于各类金属矿山的顶板应力监测,目前已成为金属矿山顶板应力监测的常规技术。应选用矿用本安型振弦式压力传感器,量程范围需根据岩层压力理论计算值的1.5倍选定,具备抗电磁干扰特性。

岩体应力监测主要用于监测顶板岩层内部的应力分布和变化情况,通过在顶板岩层中钻孔,植入岩体应力传感器,实时采集岩体应力数据,分析应力变化规律,判断顶板岩层的稳定性。该技术能够直接反映顶板岩层的应力状态,监测精度高,能够捕捉到应力集中、应力突变等异常信号,为顶板灾害预警提供精准的数据支撑,适用于地质条件复杂、应力分布不均的深部金属矿山。但该技术安装难度大、成本较高,钻孔过程中易破坏顶板岩层的完整性,需专业技术人员操作,且传感器易受井下环境影响,需定期进行维护校准。

### 1.3 微震监测技术

微震监测技术是一种新型的顶板灾害监测预警技术,基于微震信号的产生和传播原理,通过微震传感器捕捉顶板岩层破裂、滑动过程中产生的微震信号,分析微震信号的特征参数,判断顶板岩层的破坏程度和失稳风险。该技术能够实现对顶板灾害的早期预警,提前捕捉顶板岩层的微小破裂信号,为灾害防控争取充足的时间,具有监测范围广、灵敏度高、实时性强等优点,适用于深部金属矿山、采空区等区域的顶板灾害监测。

微震监测系统主要由微震传感器、数据采集器、数据传输

设备、分析软件组成,微震传感器布设在顶板岩层或巷道壁上,实时捕捉微震信号,经数据采集器处理后,通过有线或无线方式传输至监测中心,分析软件对微震信号进行分析处理,提取特征参数,判断顶板岩层的破坏状态,当微震信号出现异常时,自动发出预警信息。例如,安科高新院融合激光扫描、微震监测与地质雷达技术,构建顶板三维地质模型,通过布设200余个高精度传感器,实时采集顶板相关参数,数据刷新率高达0.1秒/次,成功预警多起顶板风险隐患。

目前,微震监测技术已在我国多家深部金属矿山得到应用,取得了良好的预警效果,有效降低了顶板灾害的发生频率。但该技术受井下环境干扰较大,微震信号易与爆破震动、设备运行震动等信号混淆,导致预警误判;同时,该技术成本较高,对技术人员的专业水平要求较高,难以在中小型金属矿山广泛应用。

### 1.4 地质雷达监测技术

地质雷达监测技术是一种非接触式的监测技术,基于电磁波的传播原理,通过地质雷达发射电磁波,电磁波在顶板岩层中传播,当遇到岩层界面、破碎带、空洞等异常区域时,电磁波会发生反射,通过接收反射电磁波,分析反射信号的特征,判断顶板岩层的完整性、破碎程度及空洞分布情况,为顶板灾害防控提供科学依据。该技术具有操作便捷、监测速度快、分辨率高、非接触式监测等优点,适用于金属矿山采掘工作面、巷道等区域的顶板监测,能够快速识别顶板岩层的破碎带、空洞等隐患,提前预判顶板灾害风险。

地质雷达监测技术主要用于顶板岩层的前期探测和隐患排查,能够快速掌握顶板岩层的地质情况,为开采工艺优化、支护方案制定提供数据支撑;同时,也可用于顶板灾害的实时监测,捕捉顶板岩层的破碎、空洞等异常变化,及时发出预警信息。该技术在中小型金属矿山应用较为广泛,成本适中,操作便捷,无需专业技术人员即可完成监测工作。但该技术受井下粉尘、湿度等环境因素影响较大,监测深度有限,对于深部顶板岩层的监测效果较差,通常与其他监测技术结合使用。采用地质雷达和钻孔成像技术可有效识别节理、裂隙等软弱结构面的产状、间距和贯通度,评估其对顶板完整性的切割程度,当结构面密度大于3条/米时需加强支护。

## 2 金属矿山顶板灾害监测预警技术应用优化策略

### 2.1 升级监测设备,提升监测精度

加大监测设备投入,淘汰老化、精度低的传统监测设备,采购先进的智能化监测设备,提升监测数据的准确性和时效性。例如,中小型金属矿山可逐步更换电子式离层仪、光纤传感器、高精度微震传感器等设备,替代传统的机械式监测设备;大型金属矿山可引入分布式光纤监测系统、高精度GPS监测系统等先进设备,实现对顶板的全方位、高精度监测。同时,加强监测设备的维护校准,建立完善的设备维护管理制度,定期对监测设备进行维护、校准和检修,确保设备正常运行,减少环境因素对监测精度的影响。此外,选用抗干扰、耐腐蚀、适应井下恶劣环境的监测设备,提升设备的稳定性和使用寿命。例如,

选用具备防水防震设计的传感器,降低井下震动、淋水对设备稳定性的影响;选用抗电磁干扰的光纤传感器,适应井下强电磁环境。

## 2.2 构建数据融合体系,提升预警响应效率

建立完善的监测数据融合机制,整合位移、应力、微震、地质雷达等各类监测数据,实现数据的共享和协同分析,全面、准确地判断顶板稳定性。引入大数据、人工智能等先进技术,构建智能化数据处理分析平台,实现监测数据的实时采集、自动处理、智能分析和自动预警,提升预警响应效率,缩短预警响应时间。例如,利用人工智能算法对监测数据进行分析,识别异常信号,自动发出预警信息,同时结合历史监测数据,预判顶板灾害的发生趋势,为灾害防控提供科学依据。此外,加强监测系统与矿山安全生产管理系统的联动,实现预警信息的实时传递,确保预警信息能够及时传递至井下作业人员和管理人员,快速启动应急处置措施。例如,通过PC端、移动端与井下终端多屏联动,实现预警信息的全方位推送,确保相关人员第一时间接收预警信息并采取处置措施。

## 2.3 优化监测系统,提升系统兼容性和可维护性

规范监测设备和监测系统的规格、通信协议,推动不同厂家的监测设备和监测系统实现互联互通,提升系统兼容性,构建全方位、一体化的监测预警体系。例如,制定统一的监测数据通信标准,确保不同监测系统之间能够实现数据共享和协同分析;同时,优化监测系统的软件功能,简化操作流程,提升软件的实用性和可操作性,定期对软件进行更新升级,适应复杂地质条件下的监测预警需求。此外,加强监测系统的维护管理,建立专业的维护团队,提升维护人员的专业水平,及时对监测系统进行维护和检修,降低维护难度,确保监测系统稳定运行。采用分层分布式架构和冗余链路设计,在主干网络采用双环网拓扑确保可靠性,关键监测节点同时接入有线和无线传输通道,当某条链路中断时可自动切换备用通道,保证数据传输连续性。

## 3 结束语

金属矿山顶板灾害监测预警技术是预防顶板灾害、保障矿山安全生产的核心手段,其应用效果直接关系到井下作业人员的安全和矿山的经济效益。当前,我国金属矿山顶板灾害监测预警技术已形成多元化的监测体系,位移监测、应力监测、微震监测、地质雷达监测等技术广泛应用,有效提升了顶板灾害防控水平。未来矿山企业应结合自身的开采特点和地质条件,选择合适的监测预警技术,优化技术应用方案,加强监测预警管理,不断提升顶板灾害防控水平;同时,政府相关部门应加大扶持力度,推动监测预警技术的创新和升级,促进金属矿山行业的健康、安全、可持续发展。

## [参考文献]

- [1]王社光,刘阳,马宁,等.金属矿山深部采场顶板岩层稳定性研究[J].中国矿业,2026,35(02):266-272.
- [2]辛明禹,刘振振,王炳文,等.基于多元信息数据融合的金属矿山顶板稳定性分析[J].黄金,2025,46(11):40-46.
- [3]刘永强.有色金属矿山主要地质灾害与防治技术研究[J].中国金属通报,2025,(03):203-206.
- [4]张东飞,亚呼甫·依布拉英,王斐,等.充填体荷载作用下金属矿山采空区顶板稳定性分析[J].能源与环保,2023,45(1):309-313+318.
- [5]毛文杰.深部金属矿采场顶板稳定性评价及监测方法研究[D].中南大学,2022.
- [6]张敏.掘进巷道顶板支护的优化及应用[J].山西冶金,2021,44(06):302-303.
- [7]郝英杰,王春龙.金属矿山深井开采过程中的顶板事故浅析[J].世界有色金属,2021,(01):52-53.

## 作者简介:

蔡松杰(1973--),男,汉族,山东临沂人,本科,职称:注册安全工程师,研究方向:矿山安全。