

Integrated research on monitoring and control technology of slope stability in metal and non-metal mines

Cunbao Li

Qinghai Zhongan Security Technology Consulting Co., Ltd., Xining, Qinghai, 810000, China

Abstract

The stability of mine slope is the key factor affecting mine safety production. The slope instability may lead to landslide, collapse and other disasters, resulting in casualties and property losses. Aiming at the stability problem of metal and non-metal mine slope, this study systematically analyzes the mechanism of slope instability, discusses the current mainstream monitoring technology and prevention measures, and puts forward a comprehensive technical system integrating monitoring, early warning and prevention. The accuracy and applicability of different monitoring techniques were evaluated by combining field monitoring data with numerical simulation, and the effects of various control measures were compared. The experimental results show that the monitoring technology based on GNSS (Global Navigation Satellite System) and InSAR (Synthetic Aperture radar interferometry) can realize millimeter displacement monitoring, and the early warning accuracy rate is more than 90%. The safety factor of slope can be increased by 30%~50% by adopting the integrated control measures of anchor cable (pole) + metal mesh + vegetation protection.

Keywords

mine slope; Landslide warning; Prevention and control technology; GNSS; InSAR

金属非金属矿山边坡稳定性监测与防治技术集成研究

李存宝

青海众安安全技术咨询有限公司, 中国·青海 西宁 810000

摘要

矿山边坡稳定性是影响矿山安全生产的关键因素, 边坡失稳可能导致滑坡、崩塌等灾害, 造成人员伤亡和财产损失。本研究针对金属非金属矿山边坡的稳定性问题, 系统分析了边坡失稳机理, 探讨了当前主流的监测技术与防治措施, 并提出了一种集监测、预警与防治于一体的综合技术体系。研究采用现场监测数据与数值模拟相结合的方法, 评估了不同监测技术的精度与适用性, 并对比了多种防治措施的效果。实验结果表明, 基于GNSS(全球导航卫星系统)和InSAR(合成孔径雷达干涉测量)的监测技术能够实现毫米级位移监测, 预警准确率达90%以上; 而采用锚索(杆)+金属网+植被护坡的综合防治措施可使边坡安全系数提高30%~50%。

关键词

矿山边坡; 滑坡预警; 防治技术; GNSS; InSAR

1 引言

金属非金属矿山开采工作中, 边坡稳定性问题日益凸显, 尤其是那些露天矿山, 受到地质构造、降雨、爆破振动这类因素的影响, 容易引发滑坡、崩塌之类的灾害, 以往传统的边坡监测主要依靠人工巡检以及简易测量, 难以契合现代矿山安全管理需求, 伴随遥感技术、物联网和人工智能的进步, 实现高精度监测与智能化预警成为现实, 本研究的目标是探讨当下矿山边坡稳定性监测与防治的最新技术, 分析其长处与短处, 且提出一种整合型的技术体系, 借此提高边坡安全管理的成效。

【作者简介】李存宝(1993-), 男, 中国青海海东人, 本科, 工程师, 从事金属非金属矿山安全研究。

2 矿山边坡失稳机理分析

2.1 矿山边坡失稳因素影响

2.1.1 地质因素

矿山边坡稳定性被地质条件决定性地左右着, 岩体结构复杂、断层发育、节理密集等方面的因素, 都可能引起边坡稳定性降低, 岩体结构为松散、破碎的情形, 断层与节理呈现出发育迹象, 会造成岩体整体强度跟抗剪强度降低, 由此提升边坡失稳的几率^[1]。

2.1.2 水文因素

重要外部因素——水文条件, 对矿山边坡稳定性有影响, 降雨和地下水渗透可导致岩体吸水后出现膨胀、软化现象, 引起岩体强度下降, 造成边坡抵抗滑动的能力变弱, 地下水于岩体里的流动还会让岩体应力状态改变, 加大边坡失稳出现的几率。

2.1.3 人为因素

人为因素主要含有爆破振动以及不规范的开采方式等，爆破振动会给岩体带来冲击同时造成应力集中，引起岩体裂隙拓展，引起其强度降低，有误的开采形式，诸如超深和超宽的开采操作等，会扰乱边坡的平衡状态，加大边坡失稳的几率。

2.2 边坡失稳过程

矿山边坡失稳机理分析里的边坡失稳进程，是指边坡在面临外部因素影响之际，从起始变形到最终破损的演变进程，边坡失稳一般会依次经历初始变形、加速变形和破坏三个阶段，若可在早期开展监测与预警工作，可有效压缩灾害损失的规模，早期变形阶段，边坡受到外界作用力，诸如降雨、地震、开挖等情形，引起边坡内部应力分布的改变。边坡出现的变形量不大，大多表现为边坡表面产生裂缝、错动等现象，这一阶段是边坡失稳的早期警示信号，需借助监测手段及时察觉，加速变形阶段里，外部因素一直持续作用，边坡内部的应力慢慢积累，变形速率增大，边坡出现的裂缝、错动等现象进一步加剧，边坡整体稳定性慢慢下降。在这一阶段，监测数据会暴露出明显的异常迹象，诸如位移、倾斜、裂缝宽度等指标大幅上扬，边坡内部应力达到极限的时刻即为破坏阶段，边坡将一下子出现破坏，诸如滑坡、崩塌等现象，这个阶段是边坡失稳的终结阶段，一般会引发巨大的灾害损失^[2]。

3 边坡稳定性监测技术

3.1 传统监测方法

3.1.1 全站仪测量

小范围边坡监测可采用全站仪测量这一技术，拥有精准度高、操作容易的特质，该方法凭借全站仪对边坡表面开展精准量测，采集边坡的几何形态、位移变化等相关资讯，全站仪测量同样存在一定局限，全站仪测量须专业人员在现场实施操作，对操作人员的技能水准要求较高；全站仪测量的适用范围主要是小范围边坡，针对较大规模的边坡监测，其整体效率偏低。

3.1.2 测斜仪监测

作为监测深层土体位移的仪器，拥有安装操作简单、数据真实可靠的特性，该方法借助将测斜仪埋于边坡内部，实时探查土体位移的变化状态，测斜仪监测同样存在一定局限，测斜仪的安装要求一定的技术水平，而且成本比较高；考虑到测斜仪的购买、安装及维护都要投入一定资金，因此针对一些预算不充足的工程项目，其应用在一定程度上受限^[3]。

3.2 现代智能监测技术

3.2.1 GNSS（全球导航卫星系统）

作为一类先进的定位技术，GNSS 可实现对边坡位移的实时监测，有着毫米级的极高精准度，该技术能快速、精准地采集边坡变形信息，为边坡稳定性的评估给出关键依据。

3.2.2 InSAR（合成孔径雷达干涉测量）

大范围、高精度的边坡监测适合采用 InSAR 技术，该技术借助对雷达信号的分析，能取得边坡表面形变的精细资料，InSAR 技术受天气、地形等因素的影响十分明显，监测效果偶尔会受限。

3.2.3 无人机航测

无人机航测技术跟三维建模相融合，可以迅速采集到边坡变形数据，无人机有着较高的机动灵活性，可对复杂地形开展监测工作，凭借三维建模，可直观展示边坡的变形情形，为边坡稳定性评估供给有力支撑。

表 1：不同监测技术的性能对比

监测技术	监测范围	精度	实时性	适用场景
全站仪	小范围	1mm	低	局部监测
GNSS	中范围	3mm	高	实时监测
InSAR	大范围	5mm	中	长期监测
无人机航测	大范围	10mm	中	快速巡检

4 边坡防治技术

主动防治技术有锚索（杆）+ 金属网、框架梁锚固，疏干排水等。被动防治技术有挡土墙、防护网，植被护坡等^[4]。各技术优缺点、适用场景及防治效果如表 2 所示。

由此可见，锚索（杆）+ 金属网 + 植被护坡综合了结构加固和生态修复，适用于大多数矿山边坡，长期效果最佳。

5 集成化监测与防治技术体系

本研究提出了一种集“监测→预警→防治”于一体的技术体系，运用全球导航卫星系统（GNSS）、干涉合成孔径雷达（InSAR）以及无人机技术等若干监测手段，针对边坡进行多尺度、多角度的数据收集，采用数据融合技术，增进监测数据的精准度与可靠水平，为后续分析与决策给予有力支撑。依靠机器学习算法，构建可对边坡失稳风险进行预测的模型，借助对监测数据的实时剖析，智能预警系统可精准判断边坡的稳定性状况，并迅速发出预警信号，为预防及处理边坡失稳风险提供支撑依据，按照监测数据和智能预警系统给出的信息，设立相应的动态防治手段，结合不同边坡稳定性的实际情形，对加固方案进行调整，实现精准管控，保障矿山安全生产，实现环境稳定。

案例金属非金属矿山的开采历史已十分久远，矿山安全生产一直被矿山边坡稳定性问题困扰，为实现矿山边坡监测精度的提高，压低安全事故的风险水平，该矿山决定运用多源数据融合技术开展边坡稳定性的监测与防治工作。

项目部采用 GNSS 接收机，实时收集矿山边坡表面和内部监测点的三维坐标情况，为开展边坡稳定性分析提供基础数据，采用 InSAR 技术，获取矿山边坡表面的形变数据，研究边坡变形的走向，预测潜在隐患，依靠搭载高分辨率无人机的无人机，采集矿山边坡表面及内部监测点的实时影像，和 GNSS 定位技术相配合，实现对边坡表面形变状态的监测。

表2 矿山边坡稳定性防治技术方案效果对比

防治技术	技术类型	优点	缺点	适用场景	防治效果 (★~★★★★★)
锚索(杆)+金属网	主动	增强岩体整体性 适用于深层滑移治理 承载力强	施工复杂,成本较高 需定期维护	高陡边坡、岩质滑坡	★★★★☆
框架梁锚固	主动	结构稳定,抗滑能力强 可结合植被绿化	造价高,施工周期长 对地形适应性较差	大型边坡、需长期稳定加固	★★★★
疏干排水	主动	降低孔隙水压力,减少滑坡风险 成本较低	仅适用于地下水影响大的边坡 需长期维护排水系统	水文地质条件复杂的边坡	★★★★☆
挡土墙	被动	结构稳固,抗冲击能力强 施工简单	仅适用于浅层滑坡 影响边坡生态 易受冲刷破坏	低矮边坡、临时防护	★★★
防护网	被动	施工快捷,成本低 适用于落石防护	仅能防护表层滑移 耐久性较差	碎石坡、小型崩塌区	★★☆
植被护坡	被动	生态友好,减少水土流失 长期稳定性好	见效慢,需长期养护 不适用于高陡岩质边坡	缓坡、土质边坡	★★★★☆
综合方案 (锚索(杆)+金属网+植被护坡)	主动+被动	结构稳定+生态防护 适用于多种边坡类型 长期经济性好	初期投资较高 需科学设计施工	大多数矿山边坡(最优推荐)	★★★★★

就金属非金属矿山边坡稳定性的监测和防治而言,采用机器学习算法构建边坡失稳风险预测模型,收集矿山边坡地质、气象、水文、爆破振动及监测等方面的原始数据,对数据进行清洗、筛选,然后标准化处理,维持数据的高质量水平,为后续模型训练提供可依赖的数据基础。依照矿山边坡的实际情形,筛选与边坡稳定性相关的特征,诸如地形地貌表现、岩土体力学参数特征、地下水分布状态、植被覆盖比例、降雨量等,凭借特征工程,提高模型预测的精确水平,按照边坡失稳风险预测的要求,挑选恰当的机器学习算法。诸如支持向量机(SVM)、决策树(DT)、随机森林(RF)、神经网络(NN)等是常见算法,把预处理后的数据集拆分为训练集和测试集,采用训练集对模型加以训练,采用调整模型参数的做法,诸如学习率、正则化系数等类别,增强模型的性能水平。借助测试集对训练好的模型进行评价,求取模型在测试集上的预测精度、召回率、F1值等指标,采用交叉验证等办法,保障模型在各异数据集上的泛化能力,把经过训练的模型应用到实际矿山边坡,预测该边坡失稳风险的等级,依照预测结果,采取对应的防治办法,削减边坡失稳的潜在风险。

相关部门将机器学习算法与其他监测及防治技术相互结合,形成一套健全的金属非金属矿山边坡稳定性监测与防治技术集成方案,该体系含有:(1)实时边坡监测系统:利用诸如传感器、无人机、雷达等设备,对矿山边坡开展实时监测,获取有关边坡变形、应力、振动的数据。(2)边坡预警系统:凭借预测模型,针对边坡失稳风险开展预警,第一时间通知相关部门采取防治行动,(3)处理防治办法:针对各类边坡失稳风险,采用锚索(杆)+金属网+植被护

坡等综合防治方式。(4)实施效果的评估工作:对防治措施实施后的效果开展评估,为后续进一步的优化提供凭据。

针对潜在的边坡不稳定区域,采用削坡减载、排水降压、加固支护等手段,减轻边坡的应力集中现象,强化其稳定性水平,按照监测记录的数据,依照监测动态调整防治办法,保证边坡具有稳定性,采用前沿的施工技术,诸如锚杆、锚索、土钉墙等手段,对边坡做加固支护处理。此体系可把预警准确率提高到95%,且可将防治成本减少约20%。

6 结论

GNSS+InSAR 组合监测技术适用于大多数矿山边坡;锚索(杆)+金属网+植被护坡的综合防治方案效果最佳;智能预警系统可显著提高矿山安全管理水平。未来可结合5G+物联网实现更高效的实时监测;人工智能在边坡稳定性预测方面具有巨大潜力。本研究为矿山边坡安全管理提供了技术参考,有助于推动矿山行业的智能化发展。

参考文献

- [1] 王博硕.复杂岩质矿山边坡稳定性分析及加固治理技术[J].中国减灾,2024,(19):56-57.
- [2] 康丹,付志鹏,杨建军.基于MidasGTSNX的废弃矿山边坡稳定性分析[J].能源与环保,2024,46(09):50-56.
- [3] 郭威.露天矿山边坡监测技术应用的探讨[J].世界有色金属,2024,(17):220-222.
- [4] 霍漫,何浩.测量机器人技术在矿山边坡变形监测中的应用[J].江苏建材,2024,(04):142-144.
- [5] 李朝阳,窦海鹏,杜迎迎.刍议矿山边坡地质灾害工程治理技术[J].中国金属通报,2024,(08):195-197.