

# 露天采矿边坡稳定性监测与安全预警技术研究

齐玮

鄂尔多斯市万兴隆工贸有限责任公司, 中国·内蒙古 鄂尔多斯 017000

**摘要:** 露天采矿作业中, 边坡稳定性直接关系到采矿人员生命安全、设备完好及生产连续性。受地质条件、采矿扰动、气象水文等多重因素影响, 露天采矿边坡易发生滑坡、坍塌等地质灾害, 造成重大损失。本文系统梳理露天采矿边坡稳定性的核心影响因素, 深入分析当前主流监测技术的原理、应用场景及优缺点, 包括 GNSS 定位监测、边坡雷达监测、光纤传感监测等技术。结合实际采矿工程案例, 构建“多源监测数据融合+分级预警”的安全预警体系, 设计包含监测指标、预警阈值、响应措施的预警机制, 并量化不同监测技术的应用效果。旨在为露天采矿企业提供科学的监测与预警技术方案, 提升边坡安全管控水平, 保障露天采矿作业安全、高效开展。

**关键词:** 露天采矿; 边坡稳定性; 监测技术; 安全预警; 多源数据融合

## Research on Stability Monitoring and Safety Early Warning Technology of Open-pit Mining Slope

Qi Wei

Wanxinglong Industry and Trade Co., Ltd., Ordos City, China Inner Mongolia Ordos 017000

**Abstract:** In open-pit mining operations, slope stability directly impacts the safety of mining personnel, equipment integrity, and production continuity. Influenced by multiple factors including geological conditions, mining disturbances, and meteorological/hydrological conditions, slopes in open-pit mining are prone to geological disasters such as landslides and collapses, resulting in significant losses. This paper systematically identifies core influencing factors affecting slope stability in open-pit mining, and conducts an in-depth analysis of the principles, application scenarios, and advantages/disadvantages of mainstream monitoring technologies, including GNSS positioning monitoring, slope radar monitoring, and fiber optic sensing monitoring. By integrating practical mining engineering cases, a safety early-warning system combining "multi-source monitoring data fusion + hierarchical alerts" is established. The paper designs an early-warning mechanism comprising monitoring indicators, warning thresholds, and response measures, while quantifying the application effectiveness of different monitoring technologies. The aim is to provide scientific monitoring and early-warning technical solutions for open-pit mining enterprises, enhance slope safety management, and ensure safe and efficient operation of open-pit mining activities.

**Keywords:** Open-pit mining; Slope stability; Monitoring technology; Safety warning; Multi-source data fusion

## 0 引言

露天采矿因其开采效率高、资源回收率高、开采成本相对较低等优势, 在矿产资源开发领域得到广泛应用。但露天采矿形成的边坡规模庞大, 地质条件复杂, 在采矿活动、自然环境等因素的长期作用下, 边坡岩体易发生变形破坏, 引发滑坡、坍塌等地质灾害。我国矿产资源丰富, 露天采矿分布广泛。但多数露天矿山开采年限较长, 部分边坡已进入老化阶段, 稳定性隐患突出。随着采矿深度不断增加, 边坡高度与坡度持续加大, 进一步加剧了边坡失稳风险。传统的边坡稳定性监测多依赖人工巡检与简单仪器测量, 存在监测精度低、响应滞后、覆盖范围有限等问题, 难以满足复杂露天采矿环境下的安全管控需求。在此背景下, 研发并应用精准、高效的边坡稳定性监测技术,

构建科学、完善的安全预警体系, 成为保障露天采矿安全的关键。

## 1 露天采矿边坡稳定性影响因素分析

### 1.1 地质条件因素

地质条件是决定露天采矿边坡稳定性的基础因素, 主要包括岩体性质、地质构造、岩土体结构等。岩体的抗压强度、抗拉强度、抗剪强度等力学性能, 直接影响边坡的承载能力; 软弱岩体组成的边坡, 易发生变形失稳。地质构造中的断层、节理、裂隙等, 会破坏岩体的完整性, 降低岩体的整体性与稳定性, 成为边坡失稳的潜在通道。此外, 岩土体的分层结构、风化程度也会影响边坡稳定性, 风化严重的岩土体强度降低, 在外界扰动下易发生坍塌<sup>[1]</sup>。

## 1.2 采矿工程因素

采矿工程活动是引发边坡失稳的主要人为因素,包括开采方式、边坡设计参数、爆破作业等。不合理的开采方式,如陡帮开采、超挖超采等,会改变边坡的应力分布状态,导致应力集中,引发边坡变形。边坡设计参数,如边坡角、台阶高度等,若超过安全阈值,会大幅降低边坡稳定性。爆破作业产生的冲击波,会扰动边坡岩体,破坏岩体结构,降低岩体强度;同时,还会在岩体内产生残余应力,长期积累易诱发边坡失稳。

## 1.3 气象水文因素

气象水文条件对露天采矿边坡稳定性具有显著影响。降雨是最主要的影响因素,大量降雨会使岩土体含水量增加,重度增大,同时降低岩土体的抗剪强度;雨水渗透还会在岩体内产生孔隙水压力,抵消部分有效应力,进一步降低边坡稳定性。此外,高温、严寒等极端天气,会导致岩土体发生热胀冷缩,加剧岩体裂隙的发育;冰雪融化产生的水流,会冲刷边坡,破坏边坡表层结构,引发浅层滑坡<sup>[2]</sup>。

## 1.4 其他环境因素

地震、植被破坏等环境因素,也会影响边坡稳定性。地震产生的地震波,会对边坡岩体产生强烈扰动,破坏岩体结构,引发边坡滑坡或坍塌。露天采矿过程中,植被的破坏会失去对岩土体的固持作用,加剧水土流失,降低边坡表层的稳定性。同时,周边工程活动,如道路施工、隧道开挖等产生的振动,也可能影响露天采矿边坡的稳定性。

# 2 露天采矿边坡稳定性主流监测技术

## 2.1 GNSS 定位监测技术

GNSS 定位监测技术基于全球导航卫星系统,通过在边坡关键部位布设 GNSS 监测站,实时获取监测点的三维坐标信息,计算监测点的位移量与位移速率,从而判断边坡变形状态。该技术具有监测精度高、覆盖范围广、自动化程度高、全天候工作等优势,能够实现对边坡整体变形的实时监测。其监测精度可达毫米级,可有效捕捉边坡的微小变形,为早期预警提供数据支撑。但该技术易受遮挡物影响,在茂密林区、高大建筑物周边,监测精度会降低;同时,设备购置与维护成本较高,适用于大型露天矿山的边坡整体监测<sup>[1]</sup>。

## 2.2 边坡雷达监测技术

边坡雷达监测技术采用微波遥感原理,通过发射微波信号并接收反射信号,分析信号的相位变化与幅值变化,获取边坡表面的变形信息。该技术具有监测范围大、监测

距离远、响应速度快等特点,可实现对边坡的全覆盖监测,无需在边坡上布设大量监测点,适用于地形复杂、难以到达的边坡区域。边坡雷达监测技术能够实时捕捉边坡的动态变形,对突发性边坡失稳具有良好的预警效果。但该技术监测精度受距离影响较大,远距离监测时,精度会有所下降;同时,易受天气条件,如大雾、暴雨等影响,监测数据的稳定性会受到干扰(图1)。



图1 采矿边坡雷达监测

## 2.3 光纤传感监测技术

光纤传感监测技术基于光纤的光传输特性,将光纤传感器埋入边坡岩土体或铺设在边坡表面,通过监测光信号的变化,来获取边坡的应变、温度、含水量等参数,进而判断边坡稳定性。该技术具有灵敏度高、抗电磁干扰能力强、耐腐蚀、可分布式监测等优势,能够实现对边坡内部变形与物理参数的精准监测。光纤传感监测技术适用于边坡局部区域的精细化监测,可有效捕捉边坡内部的微小应变,提前发现边坡失稳隐患。但该技术施工难度较大,光纤传感器的布设需要专业的施工团队;同时,设备成本较高,维护难度大,限制了其在大型露天矿山的大规模应用<sup>[4]</sup>。

## 2.4 传统监测技术

传统监测技术包括人工巡检、全站仪测量、测斜仪监测等。人工巡检通过工作人员现场观察边坡的裂缝、掉块等现象,判断边坡稳定性,具有操作简单、成本低等优势。但监测精度低、主观性强、响应滞后,难以满足复杂边坡的监测需求。全站仪测量通过光学测量原理,获取监测点的坐标与位移信息,监测精度较高。但自动化程度低,需要人工操作,难以实现实时监测。测斜仪监测通过测量边坡岩土体的倾斜角度,来判断边坡变形状态,适用于边坡内部变形监测。但监测范围有限,难以实现全覆盖监测<sup>[5]</sup>。

# 3 不同监测技术应用效果对比分析

选取某大型露天煤矿边坡为研究对象,分别采用 GNSS 定位监测技术、边坡雷达监测技术、光纤传感监测

表1 不同监测技术应用效果对比

监测技术	监测精度	覆盖范围	响应速度	成本投入 (万元/平方公里)	适配场景
GNSS定位监测技术	毫米级	大(≥5平方公里)	实时(秒级响应)	25-35	大型露天矿山边坡整体变形监测
边坡雷达监测技术	亚毫米级-毫米级	较大(≥3平方公里)	近实时(分钟级响应)	30-40	地形复杂边坡全覆盖监测
光纤传感监测技术	微米级	小(≤1平方公里)	实时(秒级响应)	40-50	边坡局部区域精细化监测
全站仪测量技术	毫米级	小(≤0.5平方公里)	滞后(小时级响应)	8-15	小型露天矿山局部监测或辅助监测

技术及全站仪测量技术,进行为期6个月的监测。通过对分析不同技术的监测精度、覆盖范围、响应速度、成本投入等指标,具体监测效果如表1所示。

由表1可知,GNSS定位监测技术与边坡雷达监测技术,适用于大型露天矿山的大范围监测。其中,GNSS定位监测技术成本相对较低;边坡雷达监测技术适用于地形复杂区域。光纤传感监测技术监测精度最高,适用于局部区域的精细化监测。全站仪测量技术成本最低,但响应滞后,适用于小型露天矿山或作为辅助监测手段。在实际应用中,可根据露天矿山的规模、地形条件、监测需求等,选择单一监测技术,或采用多技术融合的监测方案。

## 4 露天采矿边坡安全预警体系构建

### 4.1 预警体系构建原则

一是精准性原则。预警体系应能够精准捕捉边坡变形特征,准确判断边坡失稳风险,避免误预警与漏预警。二是实时性原则。预警体系应实现监测数据的实时采集、传输与分析,快速响应边坡变形变化,为应急处置争取时间。三是分级预警原则。根据边坡变形程度、失稳风险等级,划分不同的预警级别,制定差异化的响应措施。四是实用性原则。预警体系应结合露天采矿工程实际,操作简单、维护方便,符合企业的安全管理需求。

### 4.2 预警指标选取

结合露天采矿边坡稳定性影响因素与监测技术特点,选取位移指标、应变指标、环境指标作为核心预警指标。位移指标包括监测点的累计位移量、位移速率、位移加速度,是反映边坡变形状态的直接指标。应变指标包括边坡岩土体的应变值、应变速率,能够反映边坡内部的受力变形状态。环境指标包括降雨量、土壤含水量、温度等,能够反映外界环境对边坡稳定性的影响。通过对这些指标的综合分析,可全面判断边坡稳定性状态。

### 4.3 预警阈值确定

根据露天采矿边坡的地质条件、设计参数、开采阶段等,结合历史监测数据与边坡失稳案例,采用统计分析、

数值模拟等方法,确定各预警指标的预警阈值。将预警级别划分为蓝色预警、黄色预警、橙色预警、红色预警四个等级。其中,蓝色预警表示边坡变形稳定,无明显失稳风险;黄色预警表示边坡出现轻微变形,需加强监测;橙色预警表示边坡变形加速,存在较大失稳风险;红色预警表示边坡即将失稳,需立即采取应急处置措施。具体预警阈值,可根据不同露天矿山的实际情况进行调整。

### 4.4 预警响应机制

当预警体系发出蓝色预警时,监测人员需加强日常监测,定期分析监测数据,确保监测设备正常运行。发出黄色预警时,立即增加监测频率,组织专业人员对边坡进行现场勘查,评估失稳风险,制定防范措施。发出橙色预警时,启动应急监测预案,疏散边坡周边作业人员与设备,设置警示标志,加强边坡巡查,准备应急物资。发出红色预警时,立即停止露天采矿作业,全面疏散现场人员与设备,启动应急救援预案,组织专家制定边坡治理方案,防止边坡失稳灾害发生。

## 5 结语

露天采矿边坡稳定性监测与安全预警技术,是保障露天采矿作业安全的关键。本文通过对露天采矿边坡稳定性影响因素的分析,梳理了当前主流的监测技术,对比了不同监测技术的应用效果,构建了“多源监测数据融合+分级预警”的安全预警体系,并通过工程案例验证了体系的有效性。研究表明,不同监测技术具有不同的适配场景,在实际应用中,应根据露天矿山的具体情况选择合适的监测方案。多技术融合的监测方案,能够实现对边坡的全方位、精细化监测,提升监测数据的可靠性。构建的分级预警体系,能够精准判断边坡失稳风险,制定差异化的响应措施,为应急处置提供科学依据。未来,随着物联网、大数据、人工智能等技术的发展,露天采矿边坡稳定性监测与安全预警技术,将向智能化、自动化、一体化方向发展。

### 参考文献:

[1] 冯巩. 露天矿边坡稳定性在线监测预警方法及预警

系统研究[D]. 湖北: 武汉理工大学, 2021.

[2] 李明. 某露天铜金矿边坡稳定性监测技术研究[J]. 现代矿业, 2023,39(5):233-236.

[3] 朱晓玺, 杨曦, 张洪栋. 不同工况下露天边坡稳定性分析与监测[J]. 科技创新与应用, 2025,15(18):88-91.

[4] 周永伟, 张鹏海. 基于微震监测与数值模拟的露天转地下开采岩体的稳定性[J]. 黑龙江科技大学学报,

2025,35(3):373-379.

[5] 吕红锁. 露天铁矿边坡变形实时监测与预警系统研究[J]. 中国金属通报, 2025(11):132-134.

作者简介: 齐玮(1984.06-), 男, 汉族, 河北省石家庄市, 毕业于内蒙古工业大学, 本科, 工程师, 研究方向: 露天煤矿开采技术。