

露天矿山边坡稳定性监测与安全防护对策研究

蓝健生¹ 丘永富¹ 林远鹏²

1 新疆紫金黄金有限公司

2 紫金矿业建设有限公司

DOI:10.32629/jsse.v4i2.19960

[摘要] 露天矿山边坡稳定性直接关系到矿山生产安全与人员设备安全。本文围绕边坡变形机理、监测技术、预警判据、防护措施及管理体系展开系统研究。首先分析边坡岩体结构、失稳模式及影响因素,阐明变形演化规律。然后综述表面位移、深部位移及辅助监测技术,构建多参数监测体系。在此基础上提出监测数据处理、变形速率评判及分级预警方法。进而论述坡面防护、抗滑支挡、减载压脚等防护技术。最后从监测系统运维、风险分级管控及应急管理流程方面构建安全管理体系。通过系统研究形成涵盖监测预警与防护管理的技术方案,为露天矿山边坡安全提供理论支撑。

[关键词] 露天矿山; 边坡稳定性; 监测技术; 预警判据; 安全防护

中图分类号: TD4 **文献标识码:** A

Research on Open-pit Mine Slope Stability Monitoring and Safety Protection Countermeasures

Jiansheng Lan¹ Yongfu Qiu¹ Yuanpeng Lin²

1 Xinjiang Zijin Gold Co., Ltd.

2 Zijin Mining Construction Co., Ltd.

[Abstract] The stability of open-pit mine slopes directly affects the safety of mine production, personnel, and equipment. This paper conducts a systematic studying on slope deformation mechanisms, monitoring technologies, early warning criteria, protective measures, and management systems. Firstly, it analyzes the slope rock mass structure, instability modes, and influencing factors lucidate the deformation evolution laws. Then, it reviews surface displacement, deep displacement, and auxiliary monitoring technologies to construct a multi-parameter monitoring system. On this basis, methods for monitoring dat processing, deformation rate evaluation, and graded early warning are proposed. Furthermore, protective technologies such as slope protection, anti-slide support, and unloading and toe reinforcement are discussedly, a safety management system is constructed from the aspects of monitoring system operation and maintenance, risk grading control, and emergency management processes. Through systematic research, a technical scheme covering monitoring, eawarning, and protection management is formed, providing theoretical support for the safety of open-pit mine slopes

[Key words] Open-pit mine; Slope stability; Monitoring technology; Early warning criteria; Safety protection

引言

露天矿山开采形成的高陡边坡在自重、爆破、降雨等作用下易发生变形破坏,严重威胁矿山安全生产。边坡失稳具有突发性和隐蔽性,单纯依靠经验判断难以有效防控风险,需建立系统的监测与防护体系。当前边坡稳定性研究涉及岩体力学、监测技术、数据分析等多个领域,但各环节之间的衔接尚不完善,缺乏从机理到监测再到防护管理的完整技术链条^[1]。本文从边坡变形机理出发,系统梳理监测技术与方法,建立预警判据,提出防护措施,并构建安全管理体系,旨在形成一套科学实用

的边坡稳定性监测与防护对策方案,指导露天矿山边坡安全管理实践。

1 边坡变形机理与失稳模式

1.1 边坡岩体结构与变形特征

露天矿山边坡由多种岩性及结构面发育状况不同的岩体形成,这些岩体的结构决定了边坡变形与破坏的形式^[2]。层状岩体,块状岩体以及碎裂岩体等不同的结构类型有着明显的力学响应特点,边坡变形一般会经过初始蠕变,匀速变形以及加快变形这三个阶段,各个阶段的变形速度和位移量存在规律性的改变情

况, 节理裂隙的产状, 密度及其填充物性质会直接影响岩体的强度和变形模量, 而软弱结构面常常是变形开始的地方, 边坡变形还具备时间效应, 在恒定荷载的影响下, 岩体会不断发生蠕变直至最终遭到破坏。

1.2 主要失稳模式及其力学机制

边坡失稳模式包含平面滑动, 楔形体滑动, 圆弧滑动和倾倒破坏这四种基本类型, 平面滑动沿着单个结构面产生, 要求结构面的倾向同坡面相同, 而且其倾角要小于坡角, 滑面抗剪强度不够是关键因素^[3]。楔形体滑动受两组结构面交叉线所支配, 当该交叉线在坡面上显现出来, 而且其倾角大于摩擦角的时候就会出现失稳现象, 圆弧滑动常见于土质边坡或者破碎的岩体之中, 破坏面大致呈圆弧形状, 这种形态由岩体自身的抗剪强度决定, 而倾倒破坏则出现在陡峭倾斜的层状岩体里, 由于重力的影响, 岩层朝着坡外方向弯曲并断裂开来, 层间发生位移以及拉应力聚集起来成为主要的力学原理。

2 边坡稳定性监测技术与方法

2.1 表面位移监测技术

表面位移监测属于边坡稳定性监测的基本手段, 可用来把握边坡整体的变形趋向与变形幅度, 全球导航卫星系统能够对执行对监测点的三维位移测量, 其精度可达到毫米级别, 很适合露天矿山边坡展开长时间不间断的监测^[4]。测量机器人依靠自动照准技术, 可以针对诸多棱镜目标定期实施观测, 从而得到边坡表面位移场的分布情况, 合成孔径雷达干涉测量技术无需在实地布置测量点就能获取大面积边坡的变形信息, 比较合适边坡开展快速全面的检查监测, 表面位移监测所获的数据体现出边坡宏观的变形特性, 是判定边坡踏入加快变形时期的关键依据, 所以监测点应当设置在主要剖面以及变形较为敏感的部位。

2.2 深部位移与内部变形监测

深部位移检测用于获取边坡内部不同深度的变形分布情况, 从而显示滑动面的位置以及变形的发展过程, 钻孔测斜仪经由测量测斜管各个深度处的水平位移, 可以精准地确定滑动面的深度和位移量, 这属于深部位移检测的一种常见方法。固定式测斜仪具备自动化的连续检测能力, 适合对重点部位实施即时的变形观测, 时域反射技术依靠同轴电缆对剪切变形的敏感特性, 能够分布式的监测钻孔内部的变形位置及程度, 多点位移计可测量钻孔内众多锚固点之间的相对位移, 进而得到岩体内部拉伸或者压缩变形的特性, 内部变形监测能察觉到表面还未表现出来的深层变形, 给早期警报提供重要信息。

2.3 地下水、爆破振动等辅助监测

地下水和爆破震动属于诱发边坡失稳的关键要素, 针对它们展开监测属于完善监测体系的核心部分, 地下水位监测需设置测压管及孔隙水压力计来掌握边坡内部水头的分布状况及其变化规律, 降雨时水位的反应特点对于考量边坡稳定性颇具价值^[5]。爆破震动监测利用三向速度传感器记录爆破引发的质点峰值振动速度和主要频率, 以此评定爆破给边坡岩体造成的扰动情况, 降雨量监测能为边坡稳定性分析给予输入参数, 并配合

渗流模型来推断地下水位的变动趋势, 把辅助监测数据同变形监测数据融合加以分析, 可以更为精准地判定边坡的稳定状况以及发生失稳的可能性。

3 监测数据分析与预警判据

3.1 边坡变形速率与稳定性评判

变形速率属于评定边坡稳定性最为直观的指标, 不同的速率范围对应着不同的稳定状况, 边坡的变形速率低于某个阈值的时候处于稳定状态, 这种变形主要表现为蠕变, 并不会发展成失稳破坏。随着变形速率不断增大而进入中等变形阶段, 此时边坡大致稳定, 不过要加大监测力度, 当变形速率超越临界值时便进入快速变形阶段, 边坡的稳定性明显下降, 必要采取紧急应对措施, 变形加速度同样具备重要的判别价值, 加速度为正值显示变形正在加快, 失稳的风险也随之增大^[6]。把变形速率, 位移量以及变形持续时间关联起来, 可以形成多参数综合评判模型, 依靠变形速率来执行稳定性评判的方法较为简单又实用, 很符合矿山现场操作的需求。

3.2 滑坡预警阈值与分级预警体系

预警阈值是评判边坡风险等级以及启动应急响应的定量依据, 要遵照边坡特性来合理设置, 位移阈值包含单日变形量, 累计位移量以及变形速率这三种类型, 单日变形量阈值对于突然出现的变形比较灵敏, 速率阈值常常采用将经验值和边坡统计特征值相融合的办法来确定, 可以设立起蓝色, 黄色, 橙色, 红色这样四级的警报, 蓝色警报意味着变形正在加快速度, 就要加大监测的频率并且去现场巡视, 黄色警报显示变形变得越发剧烈, 应当召集技术人员来分析造成这种情况的原因, 并准备好应急所需的物资, 橙色警报显示出边坡存在很大的不稳定风险, 所以要约束边坡区域内的各种施工活动, 红色警报则表明边坡马上就会失去稳定, 必须马上疏散人员和机械设备, 并且执行应急预案。分级预警体系达成了从监测到应急的梯次响应。

4 边坡安全防护的技术对策

4.1 坡面防护与排水控制技术

坡面防护重点在于阻止表层岩体发生风化剥落及小规模垮塌现象, 以守护边坡浅层的稳定性, 喷射混凝土护坡适合于岩体破碎且易风化的边坡, 其经由封闭坡面来隔断水气侵蚀^[7]。柔性防护网系统存在主动网或者被动网两种形式, 其中主动网紧靠坡面以约束岩块, 而被动网则用以拦截滚落的石块, 植被护坡依靠植物根系来加固表层土体, 并且改良坡面景观生态, 排水调节属于边坡防护的主要举措, 在边坡顶部以及平台处设置截水沟, 以此来阻挡坡外径流并缩减入渗量。坡面排水沟和仰斜排水孔被用来疏排坡体内部的地下水, 减小孔隙水压力, 综合排水系统可以明显提升边坡在降雨情况下的稳定性。

4.2 抗滑支挡与锚固加固技术

抗滑支挡结构能够给予抗滑力来协调边坡下滑力, 适用于中型规模滑坡的治理工作, 其抗滑桩需穿过滑动面并深深扎进稳固的岩层之中, 以承担位于桩前方滑坡所施加的推力以及桩后方土壤所产生的压力, 按照悬臂梁或者弹性地基梁的设计

原理来进行施工建设。挡土墙存在多种形式,比如重力式,悬臂式以及扶壁式等,它们凭借自身的重量以及基底与地面之间的摩擦力来对抗滑移现象的发生,锚固加固技术借助锚杆或者锚索把不稳定的岩体固定在深层较为稳定的岩体之上,从而产生一种积极的作用力。预应力锚索具备较大的锚固力,适用在高陡边坡的关键加固区域,锚杆和格构梁配合使用时,可以建成整体性的加固结构,改良边坡的应力分布情况,抗滑支挡和锚固加固结合使用,其治理效果会更好。

4.3 减载压脚与爆破控制技术

减载压脚这种工程措施要从改变边坡的几何形态开始,以此来提升稳定性,减载就是从边坡上部移除一些岩土体,从而减轻下滑的荷载和下滑力,这是一种治理深层滑动的有效办法^[8]。压脚则是在坡脚处加堆载荷,加重抗滑部分的重量,以加强阻滑力,它适合于坡脚岩体强度比较低的边坡,削坡整形能够减缓边坡整体的坡度或者改善台阶的相关参数,进而减小下滑的推动力,爆破控制技术经由改良爆破参数来减小对边坡的干扰破坏,预裂爆破和缓冲爆破会在边坡轮廓面上产生裂缝面,打断爆破应力波的流传途径,保障保留岩体的完整性,控制单段的最大药量并采取毫秒延期起爆,可以减小爆破产生的震动强度。

5 边坡安全监测与安全防护管理体系

5.1 监测系统布设与运维管理

监测系统的布设需遵照针对性,层次性与经济性原则,按照边坡的重要程度及其风险等级来制定监测方案,对于重要的边坡要搭建自动化即时监测系统,并设置表面位移,深层位移,地下水位等监测设备,而一般边坡则可以采取人工定时监测的方式,布置简单的监测点以削减创建成本^[9]。监测点的设置应当包含边坡的关键断面以及变形易发区,针对重点部分还要加强设置监测点,监测系统的管理维护涉及定期对设备实施检定校准,保证数据采集传送畅通无阻并及时解决出现的故障,要形成监测设备台账,其中记载设备型号,安装日期,保养情况等相关信息,自动化监测系统还要有备用电源和通信渠道,从而在恶劣环境中得以持续运行。

5.2 安全风险分级管控与巡检制度

安全风险分级管控按照边坡稳定状况和失稳后果把边坡划分到不同的风险级别当中,高风险边坡存在变形加快或者警报的情况,要加大监测频次,并且采取工程治理手段。中风险边坡处在匀速变形时期,应当维持常规监测,还要定时考量其稳定性变动情形,而低风险边坡基本上没有变形或者变形极小,按照每年一次的频率来做一般性检查,巡视检查制度是风险控制在实际

操作中的执行办法,平常的巡视工作由当前班次的工作人员来承担,主要留意坡面出现的裂缝,掉落物,渗水之类的不正常情况,专业的巡查则由技术人员依照每周或者每月的安排去执行,并且参照监测得到的数据展开全面剖析^[10]。巡检若出现异常,需马上上报,并组织复核,一旦确认风险加剧,就要启动相应的管控措施。

6 结语

露天矿山边坡稳定性监测及安全防护要形成起包含机理分析,监测警报直至防护管理的技术体系。文章全面论述了边坡变形机理与失稳形式,创建起把表面位移,深层位移和附加监测融合的综合监测手段,给出了依靠变形速率的分级警报准则,探讨了坡面排水,抗滑锚固,卸载压脚等防护办法,塑造起牵涉监测运维,风险分级以及应急管理的安全体系。各环节相互衔接形成闭环管控流程,可为露天矿山边坡安全提供系统化技术支持,对提升矿山边坡防灾减灾能力具有实践指导价值。

[参考文献]

- [1]尹磊,张俊岭.露天铁矿边坡监测与预警技术的应用研究[J].中国金属通报,2025,(11):96-98.
- [2]苏学权.露天矿山边坡稳定性与生态修复协同技术研究[J].中国金属通报,2025,(10):40-42.
- [3]孔浩宇.基于SSA-BP网络模型的金川露天矿边坡监测预警系统研究[D].安徽理工大学,2024.
- [4]杨一豪.强降水渗流作用下某露天矿高陡边坡稳定性研究[D].广西大学,2024.
- [5]贺路.流固耦合作用下露天转地下矿山边坡失稳及加固研究[D].中国矿业大学(北京),2024.
- [6]孙晓鲲.呼伦贝尔草原露天矿区韧性机制及增韧关键技术研究[D].中国矿业大学(北京),2024.
- [7]李勇波.测量技术在露天矿山采场边坡安全中的应用与发展[J].中国金属通报,2021,(10):7-8.
- [8]李万涛,张海永,赵凯,等.研山铁矿顺倾边坡滑坡危害成因分析及治理措施[J].现代矿业,2020,36(08):211-213.
- [9]周训兵,幸贞雄.排土场与采场边坡对比分析及灾害监测预警技术探讨[J].化工矿物与加工,2017,46(10):64-67.
- [10]孙厚广,李世海,冯春,等.露天矿边坡安全管理SEA模式及其应用研究[J].金属矿山,2016,(03):151-155.

作者简介:

蓝健生(1988--),男,畲族,福建省龙岩市人,本科,中级注册安全工程师,研究方向:采矿、安全。