

非煤矿山露天开采边坡安全监测设计研究

Design Research of Slope Safety Monitoring in Non-coal Open-pit Mining

熊赞民, 习泳, 孙家驹, 王恒涛(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

摘要:边坡失稳破坏是露天矿山开采的重大风险,原位监测作为变形信息反馈和边坡破坏预警的手段,对边坡安全风险预报有重要意义。虽然近年来边坡监测技术取得了长足进步,但边坡监测设计依然面临一些瓶颈,如监测系统合理配套设置、预警阈值确定困难等。根据非煤矿山的有关规范,确定边坡监测内容;结合露天矿边坡多源多场安全监测主流的“空-天-地”一体化监测技术,优选安全经济的监测方法;由近年来一些露天开采滑坡的实际监测案例,用四级预警体系,给出了监测设计边坡预警阈值。研究从边坡监测的各个环节出发,形成了基于多源数据的露天开采边坡安全监测整套设计方法。

关键词:露天开采;边坡;安全监测;预警值;设计研究

中图分类号: TD327 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2023)05-0017-05

Abstract: Slope instability and failure are significant risks in open-pit mining. As a means of feedback on deformation information and early warning of slope failure, in-situ monitoring is of great significance for predicting slope safety risks. Although slope monitoring technology has made significant progress in recent years, slope monitoring design still faces some bottlenecks, such as reasonable matching of monitoring systems and difficulties in determining warning thresholds. Determine the content of slope monitoring according to relevant regulations for non-coal mines; Combining the mainstream “air sky ground” integrated monitoring technology of multi-source and multi-site safety monitoring for open-pit mine slopes, select safe and economical monitoring methods; Based on some actual monitoring cases of open-pit mining landslides in recent years, the early-warning threshold of slope monitoring design is given by using the four level early-warning system. The research starts from all aspects of slope monitoring and forms a complete set of design methods for open-pit mining slope safety monitoring based on multi-source data fusion.

Key words: open-pit mining; slope; safety monitoring; early warning value; research of design

1 前言

近年来,随着砂石骨料等建材市场的发展,更多的露采矿山进入建设实施阶段;另一方面,随着现有的金属露天矿山开采延续,边坡高度逐年加大,进而形成深凹露天边坡,安全风险越来越高。露天开采需要对边坡进行稳定性分析,确定合理的设计参数^[1-2],开采过程中,通过边坡监测,获取边坡的变形参数,实现滑坡预报,关键特征参量数据是预报的基础保障^[3],是保证矿山安全生产的重要抓手,通过边坡安全监测,建立边坡失稳风险控制机制,及时发现滑坡风险,降低事故率,对露天开采矿山的安全高效发展具有重要意义。

随着遥感和遥测技术的发展,卫星遥感解译技术、各类航空遥感解译技术、卫星导航定位系统

(GNSS)、雷达差分干涉测量(D-InSAR)等智能化监测技术已在一些矿山得到广泛应用,各类监测技术也在滑坡特定参量监测中发挥着重要作用^[4-8]。

对于非煤露天开采边坡,在相关技术规范里,均涉及到监测内容^[9-10],但对监测项目的要求不尽相同,执行起来有诸多不便;在边坡监测预警值方面,没有明确的规定;在监测系统构成方面,如何合理运用这些先进监测手段,恰当地进行安全监测设计,也是迫切需要解决的问题。

本文综合考虑有关规范的规定,确定边坡的监测内容;通过跟踪露天矿边坡多源多场安全监测主流的“空-天-地”一体化监测技术,优选适合矿山露天开采安全经济的监测方法;由近年来一些露天开采滑坡的实际监测案例,给出了监测设计边坡预警值,提出四级预警及安全控制措施,进而建立滑坡地质灾害安全预警系统,形成经济、有效的监测体系。

研究从边坡监测的各个环节出发,形成了多源数据融合的露天开采边坡安全监测整套设计方法指导露天开采进行安全监测和风险预报,保证矿山安

[作者简介] 熊赞民(1970—),男,博士,注册岩土工程师,主要从事矿山岩土力学与工程的咨询、设计和研究工作。

[引用格式] 熊赞民,习泳,孙家驹,等.非煤矿山露天开采边坡安全监测设计研究[J].中国矿山工程,2023,52(5):17-21.

全生产。

2 监测内容确定

露天开采边坡监测一般包括变形监测、应力监测、振动监测、水文监测。

边坡监测设计依据《非煤露天矿边坡工程技术规范》(下简称非煤规范)《金属非金属露天矿山高陡边坡安全监测技术规范》(下简称高陡规范),针对露天采场到达最终设计开采境界位置时的边坡高度和边坡角,确定安全等级和监测内容。据高陡规范,高陡边坡是指露天开采高度或坡度达到标准规定界限值以上的边坡,200 m以上(含200 m)的为高边坡,坡度大于 42° (含 42°)的为陡坡。

高陡边坡对边坡高度或总边坡角度有限值要求,超过后才适用,因此在监测设计时应首先进行判定。满足非煤规范的前提下,如边坡满足高或者陡的规定,则需要同时满足两项规范的要求。

2.1 边坡安全监测等级

根据相关规定“露天矿靠帮边坡必须进行变形监测,边坡监测的内容和方法应根据边坡安全等级确定”。边坡工程安全等级由边坡高度和边坡危害等级两项指标来确定,分为三级。根据边坡工程安全等级确定监测项目。

根据高陡规范规定“露天矿山采场应结合边坡分区的安全监测等级要求,对边坡变形,采动应力、爆破震动、水文气象和场内视频进行监测”。露天矿山采场边坡依据高度、坡度、地质条件、稳定性等指标确定不同采场边坡安全监测等级,监测等级分为四级。

2.2 监测内容

根据边坡的等级确定的监测项目,如两个规范中任一规定为应测,则按应测项执行。监测项见表1。

由于金属非金属露天开采矿山总边坡角度基本都大于 42° ,因此监测设计时重点考虑两种规范均适用的情况,根据表内要求的内容,选择适宜的监测内容。

表中,变形监测、降雨量和视频监控是必测项,这三项是基础监测项。一、二级边坡需进行边坡应力监测,由于露天开采边坡按坡率法设计,一般无支护结构,因此设计时可不考虑支护结构的应力和变形监测。另根据国家安监局的要求,现状高度200 m及以上的边坡,应当进行在线监测。

表1 根据规范确定的边坡安全监测项目

监测项目	监测内容	边坡工程安全等级(非煤规范)			
		I级	II级	III级	
		采场边坡安全监测等级 (高陡规范)			
		一级	二级	三级	四级
变形监测	表面位移	应测	应测	应测	可测
	内部位移	应测	应测	应测	不测
	边坡裂缝 a	应测	应测	应测	可测
应力监测	边坡应力	应测	应测	可测	可测
	支护结构应力	应测	宜测	可测	可测
	采动应力监测 b	应测	可测	可测	不测
爆破振动	质点速度	应测	应测	可测	可测
	降雨量	应测	应测	应测	可测
水文气象监测	地表水监测	应测	宜测	可测	不测
	渗透压力 c	应测	可测	可测	不测
	地下水	应测	宜测	可测	不测
	视频监控	应测	应测	应测	可测

注:实际应用时注意两本规范并非每级都对应,但均需设置满足各规范等级要求的监测项目。表中列出了等级相同时的监测项目。表中a、b、c为高陡边坡分别满足裂缝条件、地质条件、水文地质时由可测调整为应测项。

3 边坡监测预警值

3.1 边坡稳定状态表征

各等级边坡均需设置变形监测。由于变形监测快速和便利,并具有直观性、准确性,是边坡监测中的最主要内容。因此,选取边坡向临空侧的表面水平位移来表征边坡稳定状态,当边坡出现裂缝后,同步对裂缝进行监测,分析变形值和裂缝参数,共同判定边坡的稳定状态。

对于露采边坡,其变形发展可分为初始变形阶段、匀速变形阶段、加速变形阶段(该阶段又分为加速变形的初期、中期和后期),对应边坡稳定状态、次稳状态、临滑状态和起滑状态,最终形成滑坡。边坡变形阶段如图1所示。

3.2 边坡表面水平位移阈值

需确定与变形量相匹配的预警判据,采用巡视检查与仪器检测相结合的方法,及时检测并掌握边坡稳定性情况,监测工作贯穿全程。相关文献提出了一些边坡破坏前变形速率统计^[11],具体见表2。

相关文献提出了一些边坡滑坡变形加速度临滑预警指标^[12],具体见表3。

在露天开采边坡监测方面,南芬铁矿进行监

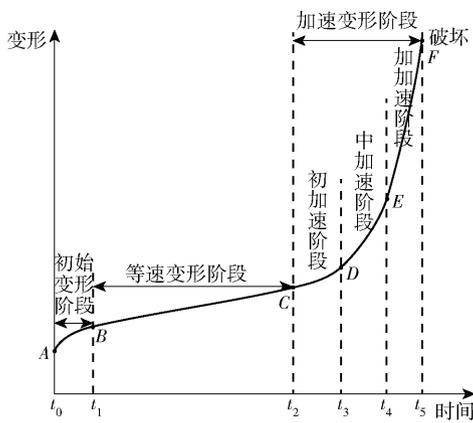


图1 边坡变形各阶段图

表2 边坡破坏前变形速率统计表

矿山名称	破坏前变形速率
酒埠江滑坡	滑坡破坏前1个月,变形速率为10 mm/d左右,裂隙宽度增加10 mm/d左右
(意)瓦依昂滑坡	滑坡破坏前21 d,变形速率为15 mm/d
湖北盐池河磷矿山崩	山崩前32 d,山体岩石开裂变形速率为10 mm/d
宝成铁路李家河滑坡	破坏前22 d平均水平位移速率8.2 mm/d
成昆铁路377号滑坡	滑前水平位移5~10 mm/d
大冶铁矿象鼻山北帮滑坡	滑动前1 d的位移速率大于1 000 mm/d

表3 加速度临滑统计表

名称	加速度临滑预警指标/mm·d ⁻²
鸡鸣寺滑坡	0.45
大冶铁矿东采场滑坡	0.2
智利某露天开采边坡	4.45

测,基于内部应力的摄动力监测对南芬露天铁矿下盘边坡滑体进行边坡预警,应用南芬多源监测系统对南芬2016滑坡进行了预警,相关文献根据安家岭4.2 mm/d,大冶4.0 mm/d,确定大孤山楔形滑坡红色预警值为4.0 mm/d。

根据《金属非金属矿山重大事故隐患判定标准》,不同类型、不同性质、不同特点的露天边坡滑坡,在滑动之前,均会表现出不同的异常(滑坡)现象显示出滑坡的预兆(前兆),发生下列情况均可认为边坡存在滑坡现象。

(1) 边坡出现横向及纵向放射状裂缝。

(2) 坡体前缘坡脚处,出现上隆(凸起)现象,后缘的裂缝急剧扩展。

(3) 位移观测资料显示的水平位移量或垂直位移量出现加速变化的趋势。

边坡存在滑移现象的,即为重大生产安全事故隐患。

根据已经使用的滑坡变形预警判据和滑坡预警研究资料可知,滑坡变形不存在统一的预警指标,在滑坡预警预报时应把握其时间演化规律,根据监测曲线准确地判断边坡所处的变形演化阶段,借鉴已有的滑坡变形速率,将时间演化规律和滑坡地表裂缝的空间分布特征有机结合,综合分析,并据此采取针对性的应对策略和措施。

本文综合分析上述监测数据,将边坡启滑时的水平变形阈值设定为:边坡水平变形累计8 cm、水平变形速率4 mm/d。

目前相关规范中尚无边坡变形的阈值规定值,因此在基建和生产中,需根据边坡实际监测和分析情况,对此阈值进行调整。

3.3 边坡预警值和四级预警级别设定

边坡预警采用四级:一级、二级、三级和四级,分别用红色、橙色、黄色和蓝色表示,一级为最高级别。边坡预警值和四级预警级别见表4。

4 监测体系构建

4.1 监测技术手段

目前露天开采监测逐渐走向智能化,现已发展到天-空-地-内多平台多模式协同观测阶段,主要的监测手段有:

(1)“天域”卫星平台技术:“天域”卫星平台识别技术包括新型识别技术和常规识别技术,常规识别技术主要为卫星遥感解译技术(低分辨率),新型识别技术包括高分卫星遥感解译技术、高分卫星InSAR形变监测技术、卫星热红外遥感地热异常识别技术及多光谱、高光谱卫星岩性识别技术等。

(2)“空域”航空平台技术:“空域”航空平台识别技术包括各类航空遥感解译技术(低分辨率),无人机(机载LiDAR)识别技术。

(3)“地域”地面平台技术:“地域”地面平台识别技术包括常规地面地质调绘、观测与测试等,新型识别技术包括地面三维激光扫描技术(terrestrial laser scanning, TLS)、导航卫星GNSS在线监测技术、雷达卫星D-InSAR监测技术等。

4.2 全天候监测体系

1) 室外监测系统构建

应力监测系统:力学传感器、力学信号采集一发

表4 边坡预警值和四级预警级别表

监测情况	边坡表面位移和裂缝情况	安全控制措施	预警级别	边坡状态	
1	边坡水平位移绝对值3 cm以下, 日变形无明显变形速率	地表或破坏台阶未出现明显拉裂缝	系统正常监测	蓝色	初始变形, 稳定
2	边坡水平位移绝对值在5 cm以下。边坡变形速率在2 mm/d以内	变形拉裂缝总宽度在1 cm以内, 滑塌边界尚不完全具备	完善应急预案, 每周进行稳定性评估	黄色	匀速变形, 次稳
3	边坡水平位移绝对值在8 cm以下。边坡变形速率大于2 mm/d, 在4 mm/d以内, 变形斜率(加速度) ≤ 0 且持续变化	地表或破坏台阶裂缝呈断续展布, 总宽度在2 cm以内, 滑塌边界呈相对连续分布	向主管部门和地方政府报告, 加强公共安全管控, 启动应急预案	橙色	加速变形, 临滑
4	边坡水平位移绝对值在8 cm以上。边坡变形速率在4 mm/d以上, 变形斜率(加速度) $0 \sim 0.5$ mm/d ² , 且持续变化	地表或破坏台阶拉裂缝显著, 裂缝总宽度在2 cm以上, 坡体前缘坡脚处, 出现上隆(凸起)现象, 后缘的裂缝急剧扩展	本地区有关部门发出内部警报, 采场及影响区人员、设备撤离, 禁止通行	红色	滑坡, 启滑

射装置、线·面状灾害信息集中采集和传输设备、卫星发射一体机等。

变形监测系统:GNSS监测系统包含接收机、供电及数据通讯、数据处理软件、防雷四个部分组成,该监测供电一般采用外接太阳能电池进行供电、数据通讯采用移动网络进行数据传输。

边坡雷达监测法是一种非接触面状监测手段。基于微波遥感技术和干涉测量技术,对整个坡面实现高分辨的全覆盖,同时微波具有较强的穿透性,能够在各种极端天气下获取到有效数据。

卫星通讯系统必须安装在与监测点通视条件良好的地方,保证每个监测点的点·面状灾害信息集中采集与传输节点与卫星机距离适中,并且两点之间

必须通视。

2) 室内监测系统构建

室内设备主要有:信号接收器、数据处理分析系统以及一些辅助分析软件。构建监测系统,通过边坡测量数据,分析边坡的稳定状态。

开始扫描监测之后,雷达传感器采集的数据通过网络自动传输到系统软件中,可实时查看监测区域中各个位置或者区域的位移变化,根据实际情况选取监测区域,可设置不同层级限差,根据设定的阈值,进行不同阶段预警,超出限差后可通过邮件、电脑弹屏、声音等多种形式报警。

4.3 安全监测设备选用

常用的监测设备见表5。

表5 边坡安全监测项目一览表

监测项目	监测内容	备选监测设备	说明
边坡变形监测	边坡表面位移	GNSS、雷达监测	基础监测项目,必选。先期布置雷达监测,如变形达黄色预警,增布GNSS监测点
	边坡内部位移	测斜仪、沉降仪	基础监测项目,必选
	边坡裂缝	裂缝计	基础监测项目,必选
采动应力监测	边坡内部应力	土压力计	边坡工程安全等级I、II级,采场边坡安全监测等级一、二级必选
	支护结构应力	锚索锚杆应力计	边坡工程安全等级I、II级,采场边坡安全监测等级一、二级必选
爆破震动监测	边坡质点速度	拾震器	边坡工程安全等级I、II级,采场边坡安全监测等级一、二级必选
水文气象监测	渗流压力	渗压计	边坡工程安全等级I、II级,采场边坡安全监测等级一、二级必选
	地下水水位	水位计	边坡工程安全等级I、II级,采场边坡安全监测等级一、二级必选
	降雨量	雨量计	基础监测项目,必选
视频监测	视频监控	视频球机	基础监测项目,必选。覆盖主要坡面与重点监控区域

4.4 安全监测设计方案

根据前述研究,露天采场的边坡安全监测设计方案如下:

(1)表面位移监测(基础监测项目):边坡表面位移监测采用GNSS监测系统和边坡雷达监测,具有全天候、全时段测量的特点,能实现在线监测,满

足高陡边坡监测要求。

边坡雷达布设应能对陡帮开采边坡面进行全方位监测,一般设置1台即可。

沿陡帮边坡开挖面竖向线性布置,应布置3~4条剖面线。

(2)边坡深部位移监测:按照规范要求,对采场边坡深部位移进行监测。

(3)边坡内部应力监测:按照规范要求,布置边坡内部应力监测点。

(4)爆破振动监测:按照规范要求,矿山在基建期应进行爆破振动监测,部署爆破振动仪。

(5)雨量监测(基础监测项目):用于监测露天采场降雨量,雨量计部署于采场最终境界外稳定区域,设计1台即可。

(6)地下水位监测:根据区域地下水情况,布置在渗流来源方向。

(7)视频监控(基础监测项目):主要应用于宏观视频监控,根据采矿安全管理需求,监控范围应覆盖主要坡面与重点监控区域。

边坡开挖高度小于200 m时,建立临时监测点,达到200 m时,建立在线监测系统。

4.5 安全监测体系动态评价

边坡稳定性的动态评价研究。露天矿边坡客观对象是动态发展的,必须跟踪监测其稳定性;同时主观的稳定性评价随采矿发展也是动态的。

根据监测系统反馈的边坡状态,根据表5各级预警采取不同措施。如边坡出现失稳迹象,在黄色和橙色预警时可选择一些行之有效的边坡加固治理方案,如锚杆加固、边坡卸荷等措施来避免滑坡事件的发生;在红色预警,达到重大事故隐患判定标准时,则需要停止生产,安排人员和设备迅速撤离,防止生命和财产损失。

5 结论

(1)露天边坡安全监测以非煤规范和高陡规范要求确定边坡监测等级,选定监测内容。变形监测、降雨量和视频监控是必测项,这三项是露天开采边坡基础监测项。

(2)提出了“蓝、黄、橙、红”预警级别相匹配的预警判据,边坡起滑的临界值;边坡水平变形累计8 cm、水平变形速率4 mm/d,根据四色预警,针对每级预警采取相应的安全管控措施。

(3)结合目前智能化监测发展现状,提供了安

全监测设计方案。

本文提出了边坡安全监测水平位移各级预警的阈值,但边坡岩体情况复杂,还需要大量的露天边坡数据资料来校核验证、本文提出的阈值可供初步设计监测方案设计使用,实际实施时还需监测单位结合工程具体情况进行调整,并应在实际监测中综合判断。

[参考文献]

- [1] 李全明,付士根,王云海. 露天开采边坡稳定性分析方法及灾害防治措施研究[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(2): 55-60.
- [2] 栾婷婷,谢振华,张雪冬. 露天矿山高陡边坡稳定性分析及滑坡预警技术[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(4): 11-16.
- [3] 唐辉明. 重大滑坡预测预报研究进展与展望[J]. 地质科技通报, 2022, 41(6): 1-13.
- [4] ABELLAN A, VILAPLANA J M, MARTINEZ J. Application of along-range terrestrial laser scanner to a detailed rockfall study at Vall de Nuria (Eastern Pyrenees, Spain) [J]. Engineering Geology, 2006, 88(3): 136-148.
- [5] 何满潮. 滑坡地质灾害远程监测预报系统及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1081-1090.
- [6] Tommaso Carlù, Paolo Farinac, Emanuele Intrinsic, et al. Integration of ground-based radar and satellite InSAR data for the analysis of an unexpected slope failure in an open-pit mine [J] Engineering Geology, 2018, (235): 39-52.
- [7] 何君毅,张社荣,王超,等. UAV 航摄图像融合激光扫描边坡表面位移监测法[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(5): 156-162.
- [8] 程刚,王振雪,李刚强,等. 滑坡一体化全维度监测预警技术进展与展望[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(1): 105-114.
- [9] 应急管理部. 金属非金属露天矿山高陡边坡安全监测技术规范: AQ/T 2063—2018[S]. 北京: 应急管理出版社, 2018.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 非煤露天矿边坡工程技术规范: GB 51016—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [11] 李秀珍,许强,黄润秋,等. 滑坡预报判据研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(4): 5-11.
- [12] 许强,曾裕平. 具有蠕变特点滑坡的加速度变化特征及临滑预警指标研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1099-1106.