DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)07-0154-05

露天矿山开采中碎裂结构岩体边坡深孔位移监测算法

张周爱, 缪卫峰, 田 羽, 李新鹏, 杜勇志, 张佩翼

(国能宝日希勒能源有限公司,内蒙古 呼伦贝尔 021000)

摘 要:在露天矿山开采中,碎裂结构岩体边坡的稳定性监测是预防地质灾害、保障生产安全的关键环节。针对该类边坡内部位移难以精准捕捉的问题,研究一种适用于碎裂结构岩体边坡的深孔位移监测算法。该算法结合光纤光栅测斜管技术采集位移数据,通过绘制边坡位移变化曲线图,反映不同深度及时间维度下的边坡滑动情况。计算坡体下滑速率,并依据速率大小划分绿色、蓝色、黄色、橙色、红色五级预警等级,作为滑坡预警等级判据;并利用斋藤迪孝模型预测边坡最终破坏时间,基于加速蠕变阶段变形量相等的3个时间点,计算边坡最终破坏时间,实现精准监测预警。结果表明,监测区域1的位移量显著大于区域2,位移风险更高,表明滑坡发生可能性更高。所提算法能够实时、准确掌握边坡变形,及时发现潜在滑坡风险,有效避免边坡失稳事故,为矿山安全生产提供有力保障。

关键词:露天矿山开采;碎裂结构岩体;边坡;光纤光栅测斜管;深孔位移监测

中图分类号: TP277;TD176;TU196^{+}.4 **文献标志码**: A **文章编号**: 1003-7241(2026)07-0154-05

Monitoring algorithm for deep hole displacement of fractured rock mass slope in open-pit mining

Zhang Zhouai, Miu Weifeng, Tian Yu, Li Xinpeng, Du Yongzhi, Zhang Peiyi

(National Energy Baorixile Energy Co., Ltd., Hulunbuir 021000, Inner Mongolia, China)

Abstract: The stability monitoring of fractured rock mass slopes in open-pit mining is a key link in preventing geological disasters and ensuring production safety. Aiming at the problem of difficulty in accurately capturing internal displacement of such slopes, a deep hole displacement monitoring algorithm suitable for fractured rock mass slopes is studied. This algorithm combines fiber Bragg grating inclinometer technology to collect displacement data, and by drawing the slope displacement change curve, reflects the slope sliding situation at different depths and time dimensions. It calculates the sliding rate of the slope and classifies it into five warning levels: green, blue, yellow, orange, and red, based on the magnitude of the rate, as a criterion for landslide warning levels; And using the Saito Takataka model to predict the final failure time of the slope, based on three time points with equal deformation during the accelerated creep stage, the final failure time of the slope is calculated to achieve accurate monitoring and early warning. The results indicate that the displacement of monitoring area 1 is significantly greater than that of area 2, and the displacement risk is higher, indicating a higher possibility of landslide occurrence. The proposed algorithm can real-time and accurately grasp slope deformation, timely detect potential landslide risks, effectively avoid slope instability accidents, and provide strong guarantees for mine safety production.

Keywords: open-pit mining; fragmented rock mass; slope; fiber bragg grating inclinometer tube; deep hole displacement monitoring

露天矿山开采作为矿产资源开发的重要方式之一,在全球范围内占据重要地位。然而,随着开采活动的深入,特别是在碎裂结构岩体边坡区域,边坡稳定性问题日益凸显,成为制约矿山安全生产和经济效益的关键因素[1]。

在上述背景下,国内外学者和工程师们开始积极探索新的监测技术,例如,Uhlemann 等[2]提出使用地球物理学进行位移监测,原理是利用岩石、土壤等介质的物理性质差异来探测地下地质结构及其变化。该方法受多种因素影响,如地下介质复杂性、噪声干扰等,导致解释结果可能存在多解性。费新峰等[3]利用合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)对同一地区进行多次成像,将多个时相的SAR图像进行干涉处理,生成干涉图,通过对干涉图中的相位变化进行分析,提取出边坡的形变信息,包括形变量、形变方向等,通过对多个时相的干涉合成孔径雷达(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)干涉图进行比较和分析,得到边坡形变的时间序列数据,进一步分析边坡的稳定性及变化趋势。受合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)卫星侧视成像的影响,InSAR技术监测的地表变形主要是沿雷达视线方向的一维形变,而非三维空间中的真实变形矢量,这可能导致在某些情况下难以

收稿日期:2025-01-14;**录用日期**:2025-02-21

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0501107);国家自然科学基金资助项目(51504241,U1710120)

作者简介:张周爱(1984—),男,工程硕士,高级工程师,研究方向为露天煤矿采矿工程及安全生产管理。

引用本文:张周爱, 缪卫峰, 田羽,等. 露天矿山开采中碎裂结构岩体边坡深孔位移监测算法[J]. 自动化技术与应用, 2026,45(7):154-157,183. (Zhang Zhouai, Miu Weifeng, Tian Yu, et al. Monitoring algorithm for deep hole displacement of fractured rock mass slope in open-pit mining[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(7):154-157,183.)

准确反映边坡的真实变形特征。虎勇等[4]利用初始对准确定导航目标参数的初始值(如姿态、方位、速度和位置),并通过姿态矩阵实时将传感器获取的载体系下的加速度和角速度转换到导航系下,用于计算边坡的位移变化[4]。尽管传感器内部采用了高精度的差分数模转换器和自动补偿算法,但长时间运行和外部环境变化(如温度波动)也可能导致传感器性能下降和误差累积。

因此,开发一种高效、准确的深孔位移监测算法,对于提高边坡监测的精度和效率,保障矿山安全生产具有重要意义。

1 边坡深孔位移监测算法研究

深孔位移监测算法基于高精度传感器技术,通过在边坡内部钻孔并安装测斜管、应变管或其他监测设备,实时采集边坡内部不同深度的位移数据[5]。传感器将位移信号转换为电信号或数字信号,通过数据传输系统发送至数据处理中心进行进一步分析和处理。研究分为三部分,即位移数据采集、边坡稳定性分析与预警。

1.1 光纤光栅测斜管采集数据

边坡深部位移监测作为岩土工程领域的关键技术之一,其重要性不言而喻。它不仅关乎工程结构的安全稳定,还直接影响到周边环境的保护与可持续发展。传统的移动式和固定式测斜仪,作为这一领域的基石,已经积累了丰富的应用经验,并在众多工程项目中发挥了重要作用[6]。然而,随着科技的进步和工程需求的日益复杂化,传统测斜仪的一些固有缺陷逐渐显现,其中数据采集仪器在使用过程中出现的漂移误差问题尤为突出。漂移误差,即测量值随时间发生无规律变化的现象,严重影响了监测数据的准确性和可靠性。对于边坡深部位移这种需要高精度、长时间监测的场景而言,漂移误差的存在无疑是一个巨大的挑战[7]。它不仅可能导致对边坡稳定性状态的误判,还可能延误采取必要工程措施的最佳时机,从而增加工程风险。光纤光栅测斜管作为一种新兴的监测手段,逐渐进入人们的视野并受到广泛关注。光纤光栅测斜管利用光纤光栅的传感特性,通过测量光在光纤中的传播特性变化来反映边坡内部的横向位移情况[8]。相比传统测斜仪,光纤光栅测斜管具有诸多优势。图 1 为光纤光栅测斜管结构示意。

光纤光栅测斜管监测位移是基于应变进行监测的,因为在光纤光栅受到的外界影响因素中,应变是最直接的。具体而言,当光纤光栅被粘贴到待监测的结构表面或内部时,它便成为结构健康状态的“微缩镜”。随着结构的受力状态发生变化,如受到拉伸、压缩、弯曲等形式的应变作用,光纤光栅会随之经历相应的形变。这种形变最直接的表现就是光栅周期(Λ)的改变。在拉伸状态下,光栅周期会增大,因为光纤的纵向伸展使得光栅的栅格间距被拉开;相反,在压缩状态下,光栅周期会减小,光纤的收缩导致栅格间距缩短。与此同时,光纤光栅所经历的这种机械形变还会触发光纤纤芯材料的弹光效应。弹光效应,顾名思义,是光纤材料在受到应力作用时,其光学性质(特别是折射率)发生变化的现象。具体来说,光纤纤芯的有效折射率(n_eff)会随着应变的施加而发生变化。这种变化不仅与应变的类型和大小有关,还受到光纤材料本身的物理性质、光纤的几何结构以及光栅制作工艺等多种因素的影响。光栅周期和有效折射率的双重变化共同作用,导致了光纤光栅反射光谱中心波长的显著偏移。这一波长偏移量成为衡量结构应变大小的直接指标。

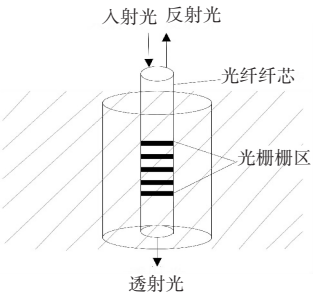


图 1 光纤光栅测斜管结构

Fig. 1 Fiber bragg grating inclinometer tube structure

$$A = \xi_B \cdot B \tag{1}$$

$$B = \frac{\Delta D}{D} = \frac{\Delta E}{E} \tag{2}$$

式中,A 代表光纤光栅反射波中心波长偏移量;ξ_B 代表光栅布拉格光栅应变灵敏度系数;B 代表轴向应变;ΔD 代表光栅周期变化量;D 代表为光栅的周期;E 代表光栅长度;ΔE 代表光栅长度变化量。

基于光纤光栅反射波中心波长偏移量,按照下述公式将其转换为位移量 L。

$$L = \frac{A}{(1-k)\,C_B} \cdot L_0 \tag{3}$$

$$C_B = 2dD \tag{4}$$

式中,k 代表光纤有效光弹系数;L_0 代表光纤光栅测斜管的初始标定长度;C_B 代表光纤布拉格光栅反射波中心波长;d 代表光纤纤芯的折射率。

通过精确测量这一波长偏移,并结合光纤光栅的标定数据和相关的物理模型,可以实现对应变量的定量分析和实时监测。

在待测边坡位置打孔,然后埋入光纤光栅测斜管,光纤光栅传感器通过光纤跳线或光缆与数据采集系统相连[9]。数据采集系统负责接收并处理来自传感器的光信号,将其转换为可读的应变数据并转换位移数据,完成位移数据监测。光纤光栅测斜管表现出了良好的监测效果和广泛的应用前景。它不仅能够有效解决传统测斜仪存在的漂移误差问题,还能够提供更为全面、准确的监测数据,为边坡工程的稳定性评估和安全预警提供有力支持[10]。

1.2 边坡深孔位移监测预警

边坡深孔位移监测预警的主要目的是通过连续、实时地监测边坡内部的位移变化,及时发现边坡稳定性的异常

变化,为工程安全提供预警信息,以便采取必要的工程措施,防止边坡失稳造成的灾害[11]。基于上述采集到的边坡深孔位移数据,绘制边坡位移变化曲线图,了解边坡滑动情况。此外,为了进一步评估边坡的稳定性状况,可以通过计算坡体下滑的速率作为滑坡发生的预警等级判据[12]。

$$P = \frac{L}{\Delta t} \tag{5}$$

式中,P 代表坡体下滑的速率;L 代表位移值;Δt 代表时间间隔。

根据速率大小,划分预警等级,如表 1 所示。

表 1 滑坡预警等级

Tab. 1 Landslide warning level

预警等级	速率范围/(mm·d^{-1})	边坡状态描述	应对措施
绿色预警	<0.5	边坡稳定,风险极低	常规监测,无需特别加强措施
蓝色预警	0.5~1.5	边坡较稳定,风险较低	加强监测频率,密切关注边坡变化,准备应急物资和人员
黄色预警	1.5~5.0	边坡稳定性下降,风险中等	立即启动应急预案,加强边坡巡查,采取必要的工程措施(如加固、排水等)来减缓边坡变形
橙色预警	5.0~10.0	边坡极度不稳定,风险高	立即采取紧急措施,如撤离边坡附近的人员和财产,加强边坡支护,并准备应对滑坡可能带来的次生灾害
红色预警	>10.0	边坡即将滑坡,风险极大	立即发出最高级别预警信号,全面撤离边坡附近所有人员和财产,确保人员安全,并采取一切可能的措施来减轻滑坡可能带来的损失

露天矿山开采中碎裂结构岩体边坡深孔位移监测的目的能够预防滑坡带来的风险,因此在滑坡预警之后,了解滑坡发生的时间也是监测的重点内容[13]。在这里,需要利用斋藤迪孝模型。该方法以土体的蠕变理论为基础,将土体的蠕变过程分为 3 个阶段:缓慢蠕变阶段、稳定蠕变阶段(几乎没有蠕变位移)和加速蠕变阶段[14]。在滑坡预测中,斋藤迪孝模型主要利用边坡的位移-时间监测曲线进行计算。当边坡进入加速蠕变阶段时,可以通过选取该阶段中变形量相等的 3 个时间点(t_1、t_2、t_3),并结合这 3 个时间点对应的位移量,来计算边坡的最终破坏时间($\hat{t}$)。描述蠕变破坏时间与应变速率的关系式如下。

$$\lg \hat{t} = 2.33 - 0.916 \cdot \lg \mu \pm 0.59 \tag{6}$$

式中,μ 代表等速蠕变状态下的应变速率。

在加速蠕变阶段中选取变形量相等的三个时间点,将这三个时间点和对应的位移量代入加速蠕变阶段破坏时间计算公式,计算得到边坡的最终破坏时间。

$$\hat{t} = t_1 + \frac{\frac{(t_2 - t_1)^2}{2}}{(t_2 - t_1) - \frac{t_3 - t_1}{2}} \tag{7}$$

在知道边坡的最终破坏时间之后,为制定详细的紧急疏散计划,明确疏散路线、避难场所以及疏散过程中的安全措施提供重要参考[15]。确保在滑坡发生时,能够迅速、有序地疏散人员和设备,以防止边坡失稳造成的灾害[16-17]。

2 实例分析

2.1 实例概况

选定一处具有碎裂结构岩体的露天矿山边坡作为实验场地,确保实验条件符合实际开采环境,如图 2 所示。

该边坡位于露天矿山开采区域,具有碎裂结构岩体特征,可能存在较高的不稳定性风险。具体情况包括以下几点。

1) 地质条件:边坡岩体破碎,节理裂隙发育,存在软弱结构面。

2) 地形地貌:边坡坡度较陡,高度较大,存在滑坡、崩塌等地质灾害的潜在风险。

3) 气候条件:降雨频繁或季节性强降雨加剧边坡的不稳定性。

4) 开采活动:矿山开采过程中产生爆破震动、机械作业等外力作用,对边坡稳定性造成影响。

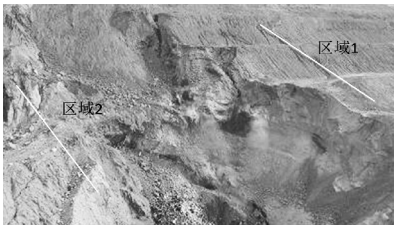


图 2 露天矿山边坡

Fig. 2 Open-pit mine slope

2.2 监测现场布设

光纤光栅测斜管安装步骤如下。

1) 现场勘查与规划:首先,技术人员需对边坡进行现场勘查,确定测斜管的最佳安装位置,考虑地质条件、边坡稳定性、监测需求等因素,绘制详细的钻孔布局图,并标注出钻孔的具体位置、深度、角度等参数。

2) 根据钻孔深度和地质条件,选择合适的钻孔设备,如旋挖钻机、地质钻机等。同时,准备好所需的钻头、钻杆、泥浆泵等配套工具,以及测量仪器——光纤光栅测斜管,确保钻孔过程的顺利进行。

3) 在选定的位置上,使用钻孔设备沿竖向进行钻孔。钻孔过程中,需严格控制钻孔的直径、深度和垂直度。通常,成孔直径设定为 100 mm 左右。钻孔完成后,需使用清水或压缩空气对孔内进行清理,去除孔壁上的泥土、碎石等杂物,确保孔内干净无杂质。同时,使用测量仪器对钻孔的直径、深度和垂直度进行检查,确保满足设计要求。

4) 将测斜管的外管缓缓插入孔内,插入到位后,立即进行回填压实工作。回填材料一般选用细沙、膨润土等易于压实的材料,并逐层回填、逐层压实,以确保外管周围形

成坚固的保护层。

5）待外管周围回填材料充分凝固后（通常需等待一段时间），即可插入测斜管的内管。内管上安装有光纤光栅传感器，用于实时采集边坡的倾斜数据。

6）内管插入后，将光纤光栅传感器与数据采集系统通过光纤跳线或光缆连接好，并进行初步调试和测试。检查传感器的工作状态是否正常、数据传输是否稳定可靠、测量精度是否满足要求等。

7）在确认测斜管安装无误且工作正常后，对管体及连接部分进行封闭保护处理，以防外界环境干扰。

通过以上步骤，光纤光栅测斜管即可成功安装并投入使用，为边坡位移监测提供准确可靠的数据支持。

2.3 边坡位移变化曲线

基于监测到的位移数据，绘制孔深-位移曲线和时间-位移曲线，如图 3 和图 4 所示。

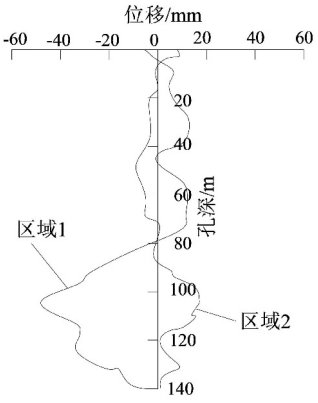


图 3 孔深-位移曲线

Fig. 3 Hole depth-displacement curve

从图 3 可以看出，随着孔深的增加，两条孔深-位移曲线呈现不同的变化，其中监测区域 1 的孔深-位移曲线在 80~140 m 深度范围内的位移量显著增大，这表明该深度处的岩体发生了较大的变形，这也是滑坡即将发生的强烈预警信号。而监测区域 2 的孔深-位移曲线则不同，在整个监测深度范围内都相对平稳，且位移量很小，在特定深度处出现局部的小幅度位移增加，但并未达到监测区域 1 那样的显著程度，这种局部变形表明该深度处的岩体受到了一定的影响，但尚未达到引发滑坡的临界状态，该区域的岩体处于相对稳定的状态。

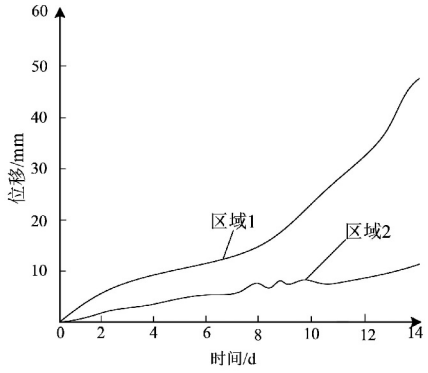


图 4 时间-位移曲线

Fig. 4 Time-displacement curve

从图 4 中可以看出，区域 1 的时间-位移曲线从较为平缓的状态开始呈现出明显的上升趋势，这表明边坡的变形正在加速进行，边坡内部的应力状态正在发生显著变化，边坡的稳定性将逐渐降低，最终可能达到一个临界状态，此时边坡将失去平衡并发生滑坡。而区域 2 的曲线虽然也呈现出波动上升趋势，但上升速率明显慢于区域 1，表明该区域的边坡虽然也在发生变形，但其变形速率相对较慢，边坡的稳定性尚未受到严重威胁。另外，区域 2 的曲线出现局部波动，这些波动主要受到开采活动的干扰。这种缓慢波动上升的趋势仍需持续关注，以防变形速率突然加快导致滑坡发生。

2.4 滑坡预警方案

结合位移数据，基于式（5）计算坡体下滑的速率，同时利用斋藤迪孝模型，计算得到边坡的最终破坏时间，如表 2 所示。

表 2 滑坡预警方案

Tab. 2 Landslide warning plan

边坡区域	名称	参数
边坡区域 1	坡体下滑速率	7.85 mm/d
	边坡状态描述	橙色预警
	破坏时间	0.34 d
	应对措施	加强监测，准备应急响应计划，采取加固措施
边坡区域 2	坡体下滑速率	1.23 mm/d
	边坡状态描述	蓝色预警
	破坏时间	185 d
	应对措施	维持常规监测，准备长期治理方案

从表 2 中可以看出，经过计算，确定了不同边坡的状态，其中边坡区域 1 的风险性要明显大于边坡区域 2，并针对不同的监测结果，给出了不同的方案，这体现了滑坡预警和治理工作的科学性和灵活性，能够根据不同情况采取最合适的措施，以最大限度地减少滑坡灾害带来的损失。

3 结论

在露天矿山开采过程中，碎裂结构岩体边坡的稳定性监测是确保生产安全、预防地质灾害的关键环节。通过深入研究深孔位移监测算法，不仅能够实时、准确地掌握边坡岩体的变形情况，还能为边坡稳定性评估、预警及治理提供强有力的数据支持。算法充分利用了光纤光栅测斜管监测和数据处理方法，实现了对边坡位移的高精度、连续监测。在算法的应用过程中，通过实时监测边坡岩体的位移变化，能够及时发现潜在的滑坡风险，并采取相应的应对措施，有效避免了边坡失稳事故的发生。同时，该算法还为边坡治理方案的制定提供了科学依据，使得治理措施更加精准、有效。

（下转第 183 页）