

山达克铜矿扩帮开采数值模拟分析与边坡监测

杜建春

(中冶集团铜锌有限公司, 北京 100028)

[摘要] 对于露天高陡边坡提高边坡角可以减少矿山的剥离量,是矿山减少开采成本增加矿山经济效益的重要手段之一。但是随着边坡加陡,会使露天边坡安全性能降低,安全风险增加。中冶铜锌公司巴基斯坦山达克南矿体于 2017 年 12 月开采结束,为了增加企业的服务年限以及为寻找新矿体矿产资源赢得时间,对南矿体进行了扩帮研究和设计,提高矿山效益的同时开采风险也进一步增加。本文采用 FLAC3D 软件数值模拟分析,通过对扩帮前后的边坡进行应力、应变分析。模拟边坡扩帮前后的危险区域,为三维激光扫描仪重点监测位置提供监测依据。通过分析监测数据,对潜在滑坡提供预测预报,保证矿上的安全开采。

[关键词] 扩帮开采; 数值模拟; 三维激光扫描仪; 监测预警

[中图分类号] TD804 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2023)02-0038-07

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2023.02.008

0 引言

矿产资源是国民经济建设与社会发展的重要物质基础,伴随着工业革命起始,世界经济极大的发展,对能源物质需求量急剧上升,极大的刺激了资源、能源开发,及水利、交通、城镇化建设等边坡工程体系的日益频繁和广泛应用^[1]。在露天开采方面,随着资源不断开发与利用,大量深凹露天矿山不断涌现,出现了很多高陡的岩质边坡,据统计矿山露天边坡设计在 300 m 以上的一级边坡占比为 34.5%,深凹露天成为世界露天矿山的一种发展趋势,目前世界上最高矿山美国犹他州-宾汉姆铜矿目前矿坑达到了 1 100 m^[2]。追其原因,一方面,随采矿技术与露天装备性能水平的提高,矿山追求经济效益最大化和矿产资源量尽可能回收,露天矿山边坡工程设计常采用极限设计。据统计,对于大型矿山高陡边坡提高整体边坡角 1°,可减少剥离量费用两千万人民币至亿元人民币。尤其近些年来,矿石价格的飞涨,一些矿山对于露天边坡境界重新设计,进行露天边坡扩帮设计或者对挂帮矿回采,对资源量回收,

增加矿山经济收入和延长矿山服务年限。另一方面,露天矿边坡工程复杂多样性具有不同于水利水电、公路边坡具有自身的特点,除矿山岩性本身复杂之外,整个矿山露天从基建剥离、开挖到闭坑之前,露天边坡几乎都是临时边坡处于动态变化之中^[3]。随着开采的推进与岩石的揭露,对岩性变化及矿石储量品位变化的认识不断深化,所以矿山会根据新的勘探成果对境界适当的调整,提高边坡角来符合矿山的实际^[4]。

对于大型高陡露天矿山,提高边坡角和增加开采深度,可以减少剥采比增加矿山服务年限,是矿山减少开采成本增加矿山经济效益的重要手段之一,并且使得矿产资源尽可能回收减少资源的浪费。但是随着边坡角的提高和开采深度的增加,露天边坡的稳定性与安全性越来越差^[5]。如青海德尔尼铜矿高陡边坡在冻融的影响下 2014 年至今前后发生 3 次千万级的滑坡,影响矿山生产,迫使矿山投入大量物力、人力进行滑坡体清理与境界的重新设计。因此,矿山高陡边坡在深部开采过程中提高边坡角与边坡安全的矛盾日益突出。

本文采用 FLAC3D 软件数值模拟分析,通过对山达克铜矿扩帮前后边坡进行应力、应变分析。模拟边坡扩帮前后的危险区域,为三维激光扫描仪重点监测位置提供监测依据。通过分析监测数据,对潜在滑坡提供预测预报,保证矿山的安全开采。

[收稿日期] 2022-12-20

[第一作者] 杜建春(1984—),男,北京市人,工程师,硕士,主要从事金属矿山开采技术管理工作。

[引用格式] 杜建春. 山达克铜矿扩帮开采数值模拟分析与边坡监测[J]. 有色设备, 2023, 37(2): 38-44.

1 矿山概况

山达克铜金矿位于巴基斯坦西南部的俾路支省查盖地区,距巴基斯坦边境小镇塔夫坦(Kuh-i-Taftan)约35 km,距巴基斯坦西部城市达尔坂丁(Dalbandin)约325 km,二十世纪九十年代初由中冶集团承包建设,1995年建成投产,设计采选生产规模为处理矿石12 800 t/d(425万t/a),冶炼能力为20 000 t/a粗铜。由于二十世纪九十年代中后期铜金属价格低迷,巴基斯坦山达克铜金矿自建成投产至今已二十多年,其间虽经历了较长时间的停产(1996—2002年)。同时,巴基斯坦国内缺乏铜矿采、选、冶的生产管理经验,该矿投产后只生产了较短时间便停止生产,整个企业处于停产关闭状态。为了盘活该矿资产,改善巴基斯坦日益恶化的就业状况,支持巴基斯坦的经济建设,2002年中冶集团铜锌有限公司与巴基斯坦政府签订了该矿的租赁经营合同^[6]。

1.1 地质概况

矿区主要出露地层从新至老有中、新生代的浅海、滨海、大陆沉积岩和火山碎屑岩地层,主要有晚白垩纪的海底火山岩形成的Sinjrani和古新世的Jazzak建造,主要由页岩组成,以及始新世的灰岩、泥岩和火山集块岩;渐新世的页岩、粉砂岩、砂岩,中新世的云英闪长斑岩、安山斑岩。

根据地层、岩浆岩与围岩蚀变的关系,南露天采场边坡的岩石,主要有以下七种类型:钾化云英闪长斑岩POT、绢云母化云英闪长斑岩ST、青盘岩化云英闪长斑岩PT、钾化粉砂岩POS、绢云母化粉砂岩SS、青盘岩化粉砂岩PS、青盘岩化闪长岩、安山岩脉PAD。

1.2 水文状况

山达克矿区气候干旱炎热,冬季持续时间短,冻融时间半个月左右,夏季最高气温42℃,平均年蒸发量5 944 mm,平均年降雨量24.41 mm。地下水补给条件极差。南露天采场附近除剪切带和裂隙中含少量水外,没有大的含水构造,从目前已有的少量水文地质资料看,将来露天采场边坡基本上处于无水(地下水)条件。

1.3 扩帮设计

山达克铜金矿南矿体属典型的斑岩型铜矿,矿体呈柱状产出,倾角70°~80°。根据当年完成的岩

石力学研究成果,原设计最终边坡角为45°(758 m标高以上)和42°(758 m标高以下),露天开采境界底长约230 m、宽约100 m、底标高626 m。随着矿山向深部开采,结合露天采场揭露岩体的实地考察,经过重新分析计算得到边坡安全系数较高,可以通过加陡边坡角实现扩帮开采,实现露天采场边帮和底部的残留矿体。扩帮设计开始标高758 m水平,将原设计的626 m台阶向下延伸4个台阶共48 m,矿帮后设计最低标高至578 m,采坑最大采深达到396 m。经过扩帮部分台阶进行并段,将原来西边坡设计758 m标高以下边坡角从42°提高到55°,致使边坡加陡、安全风险增大^[7]。

2 扩帮前后的三维数值模拟分析

山达克铜矿经过扩帮之后758~578 m标高之间边坡角由原来的42°提高到55°,最终形成396 m的高陡边坡,边坡的加高加陡使矿山开采的风险加大,一旦边坡失稳严重威胁到人员与设备的安全,并且会影响矿山连续生产。所以矿山边坡的安全分析尤为重要,随着计算性能的不断提升,全地层建模的三维数值模拟分析已成为边坡稳定性分析主流手段。数值模拟方法在岩土工程应用广泛,主要包括有限元法和离散元法,本文采用有限元FLAC3D软件对扩帮前后边坡进行稳定性计算。主要目的是针对扩帮后边坡及周围岩体的位移、应力分布变化做一个定量分析,并对三维激光重点监测位置作为指导。图1为FLAC的一般求解流程^[8]。

数值模拟所需岩体力学参数见表1所示。

(1) 扩帮之前数值模拟

图2、图3为扩帮前的最大主应力云图及剖面图,山达克铜矿矿区地表比较平整,采场外围无高大自然山体,模型的应力大小受地形的影响,随深度的增加而增大,越接近坡面主应力值越小,在浅部边坡面上有小区域的应力集中。主应力的方向从地表至深部的垂直方向,在边坡深部逐渐转为边坡面的顺坡方向。图4为模型的整体位移云图,边坡岩体的位移主要向采坑临空面和自然下沉移动,山达克铜矿整体岩性条件比较好,以闪长斑岩青盘岩化粉砂岩为主,无第四系土层及松散岩体。且在境界设计中与采矿中采坑的形状近似规整圆形凹露天,与常见高陡边坡在开采中变形及位移主要发生在采场的深部。

表 1 边坡岩体力学参数

岩性	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	粘聚力/MPa	内摩擦角/($^{\circ}$)
第四系堆积层(Q)	1 800	0.045	20
青磐岩化云英闪长斑岩(PT)	2 624	0.73	43.15
绢云母化闪长斑岩(ST)	2 583	0.72	41.49
青磐岩化粉砂岩(PS)	2 757	1.022	31.08
绢云母化粉砂岩(SS)	2 674	1.316	38.72
闪长斑岩(T)	2 605	0.81	48.68
中青磐岩化云英闪长斑岩(MPT)	2 723	0.609	37.9
粉砂岩(S)	2 550	0.275	28.7
中青磐岩化粉砂岩(MPS)	2 657	0.608	38.91
弱青磐岩化粉砂岩(WPS)	2 583	0.345	40.32
钾化云英闪长斑岩(POT)	2 640	0.634	37.36

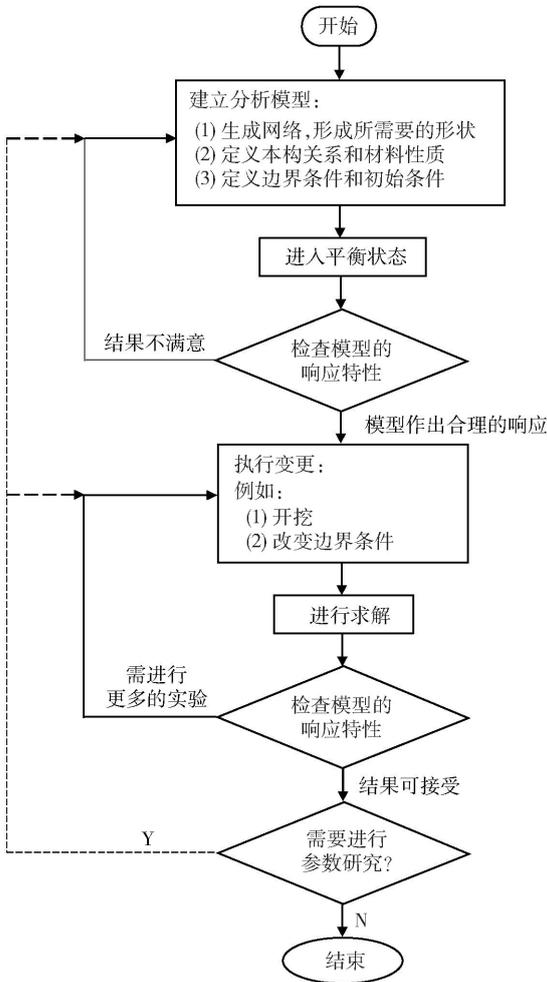


图 1 FLAC 一般求解流程图

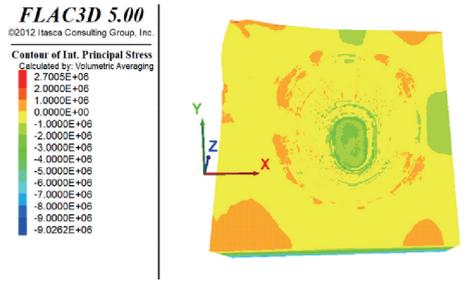


图 2 模型最大主应力云图

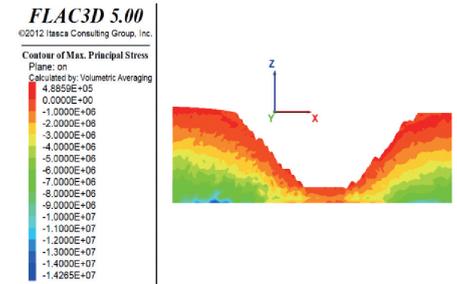


图 3 最大应力剖面图

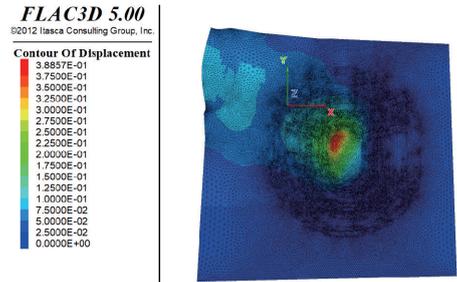


图 4 模型整体位移云图

(2) 扩帮之后数值模拟

山达克铜金矿扩帮设计是将原来设计的坑底标高 +626 m 向下延伸 48 m 至 578 m 标高, 西边坡

758 m 以下整体边坡角由原来的 42° 提高到 55° , 形成高陡边坡。图 5 为扩帮后模型的剪应变增量云

图,经过扩帮后的模型显示在西边坡坑底位置的剪应力增量比较大,最大剪应力增量为 0.12 MPa。图 6、图 7 为模型的 X 方向的位移云图及剖面位移云图,位移情况无论在尺度和范围上都比扩帮之前有所增加,在 X 方向上向临空面移动最大位移 30 cm。

根据数值模拟结果,扩帮之后在西边坡坑底区域剪应力和位移都急剧增加。所以在今后扩帮开采过程中应该把边坡人工巡查及三维激光扫描仪的监测重点区域放在采坑的深部。

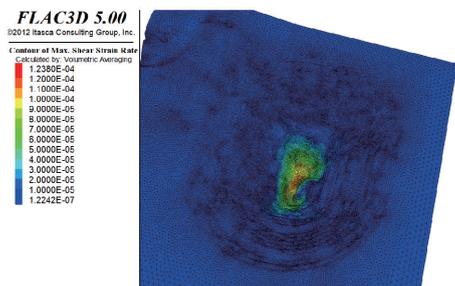


图 5 模型剪应变增量云图

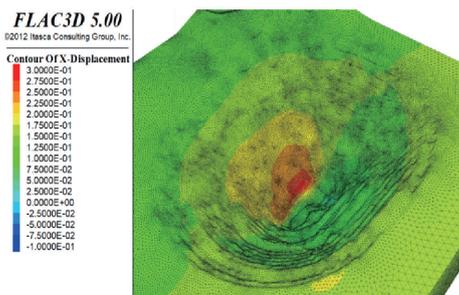


图 6 模型 X 方向位移云图

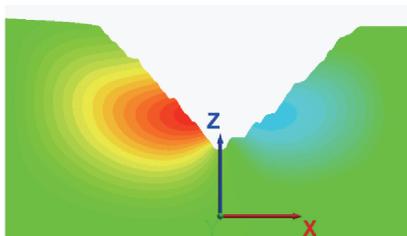


图 7 X 方向位移云图剖面图

3 三维激光扫描仪监测

对于岩质边坡来说,通常边坡失稳破坏从内部岩体破裂逐渐发展至边坡表面引起变形和位移,所以边坡的变形或位移是边坡稳定状态的最直观反映,可以直接用来判断边坡的稳定状态^[9]。目前边坡的表面位移监测类型采集方法主要有接触式监测

方法和非接触式监测方法两种。GPS、大地测量这种传统的接触式点监测手段,首先寻找合适的监测点进行布点,难以适合于复杂地形,对于高陡边坡布点存在困难,并且点监测对于区域性连续获取数据和大区域连接分析具有致命的缺陷^[10]。随着科技技术能力发展,在矿山测量方面边坡雷达、三维激光扫描技术这种非接触测量是测量技术即 GPS 技术之后的又一次技术革命^[11]。三维激光扫描技术又称“实景复制技术”,在复杂的现场和空间对被测物体进行快速扫描测量,获得点云数据。海量点云数据经过三维重构可以再现边坡现状,实现对边坡实时变形监测。铜锌公司根据实际需要引入的 I-Site 8820XR-CT 三维激光扫描仪,该三维激光扫描仪监测边坡具有整体精度高,500 m 的监测距离点云间距为 20 cm 左右,监测精度可达毫米级。非接触式测量对于危险区域可实现全天候无人值守测量,并且测量数据可用于矿上现状测量与外接软件对接建立矿上实体三维模型。

3.1 监测方案与监测预警

根据三维数值模拟的结果,山达克铜矿在扩帮前后位移和潜在边坡失稳区域在西边坡的深部,所以重点关注区域应该在边坡的深部区域。结合三维激光扫描仪的测量倾角与采场的开采布置。将三维激光扫描仪布置在东边坡 +806 m 平台,图 8 为三维激光扫描仪布置位置及可监测范围图。

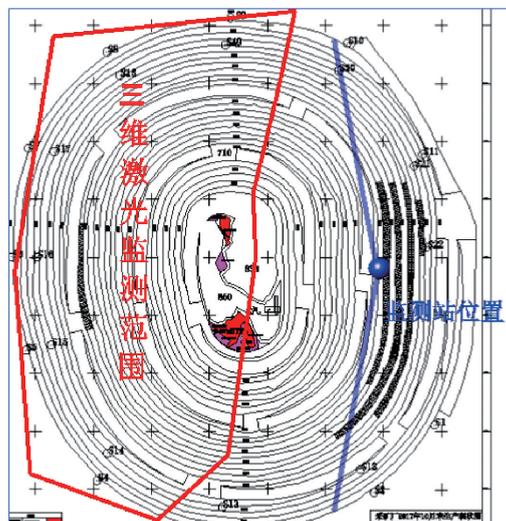


图 8 三维激光扫描仪布置位置图

岩质边坡滑坡预测预报的核心是预报方法与预报判据。预报方法确立之后,如果没有正确的预报

判据,就无法进行准确的预报。主要从累积位移量和位移速率变化率两方面分析评价边坡稳定状态。累积位移量按表 2 划分为 5 个等级。

表 2 边坡监测累积位移等级表

累积位移量	≤50 mm	50 ~ 150 mm	150 ~ 250 mm	250 ~ 350 mm	>350 mm
变形等级	五级	四级	三级	二级	一级

位移速度变化率是监测预警的重要判别标志,是当位移与时间关系曲线上某点的切线与横坐标(时间轴)的夹角 α (简称切线角)成 90° 时,即 $\tan\alpha \rightarrow \infty$ 时,则认为边坡发生破坏。该点所对应的时间

为破坏时间,如图 9 所示。

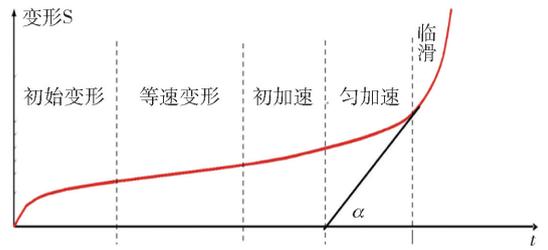


图 9 变形-时间曲线

根据国内外滑坡监测成果,与四级预警机制相匹配,确定了西边坡滑坡监测预警的判据如表 3 所示。

表 3 边坡监测预警判据表

变形阶段	等速变形阶段	初加速阶段	均加速阶段	加加速(临滑)阶段
预警级别	注意级	警示级	警戒级	警报级
警报形式	蓝色	黄色	橙色	红色
处理措施	保持日常监测	对重点部位加强监测和检查	对警戒区域每日巡视检查,作业范围快进快出	受影响范围所有设备人员撤离,设置警戒,24 小时进行监控
地表裂缝(空间)	后缘、两侧及前缘裂缝分期有序形成	地面裂缝逐渐配套、贯通,并最终封闭		后缘裂缝急剧拉开,前缘出现隆起、小崩小落
切线角(时间)	$\alpha \leq 45^\circ$	$45^\circ < \alpha < 80^\circ$	$80^\circ \leq \alpha < 85^\circ$	$\alpha \geq 85^\circ$
加速度(时间)	在一定幅度内震荡			骤然剧增

3.2 重点监测区域

边坡进行变形监测时需划分重点监测区域,以便掌握各不同区域边坡风险等级与危害程度,以利现场施工组织与边坡管理。随着扩帮的进行位移云图的变化,在三维激光扫描后台软件设置的重点监测区域也在不断变化,

重点监测区域和各区块位置示意图 10 所示。

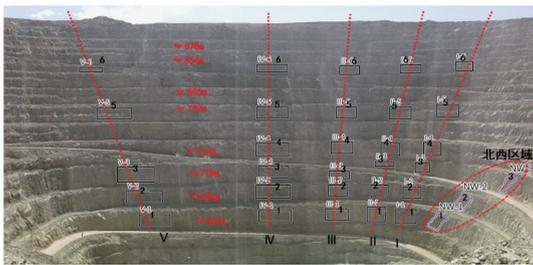


图 10 重点监测区域和各区块位置示意图

3.3 监测结果

三维激光扫描系统可获得监测区域的整体位移分布信息,即位移云图(深色代表位移较大的潜在危险区域,浅色代表位移较小的安全区域)。如图 11 ~ 图 14 所示,图中西边坡 662 ~ 626 m 平台的蓝色区域为前期生产作业区域。该功能可使监测人员能够直观了解监测区域内存在的潜在危险区域,从而有针对性地制订采矿方案,并为制定滑坡应急预案

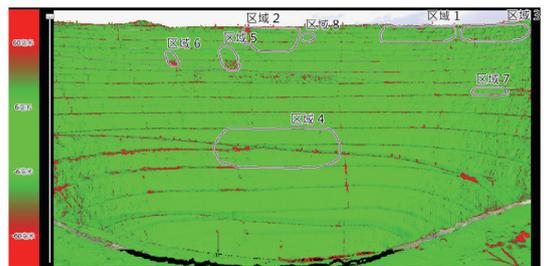


图 11 2018 年 3 月份监测云图(监测初期)

案提供依据。因篇幅有限,本论文仅显示部分年份月份位移云图。

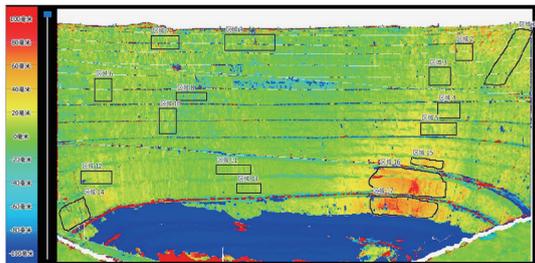


图 12 2019 年 5 月份监测云图(位移突变)

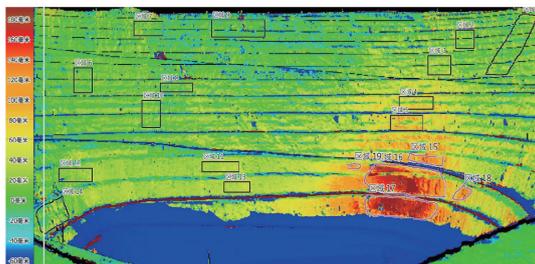


图 13 2020 年 7 月份监测云图

三维激光扫描仪监测边坡是通过间断性发射激光,以高精度距离变化来判断真实位移变化情况来预测和判断边坡是否失稳。以监测初期的位移云为场景,后期位移变化是以初期场景相比较,所以监测初期位移量不大。

在边坡变形监测中,边坡位移量和位移曲线形态是滑坡预测的重要判断标准。因此,累积位移曲线为判断滑坡进入临滑阶段最直接、有效的依据。

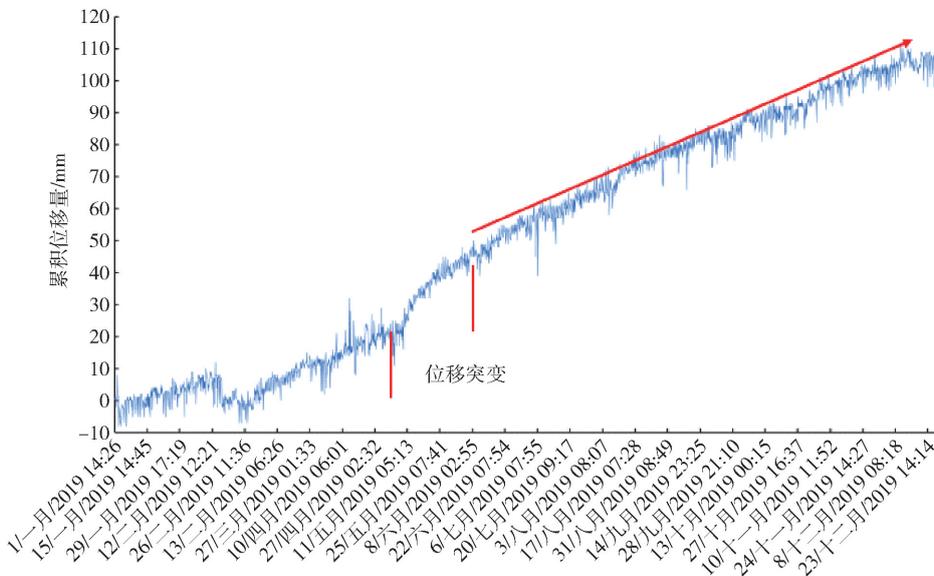


图 15 2019 年重点监测区域位移曲线图

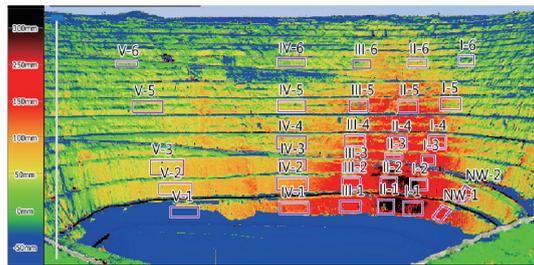


图 14 2021 年 9 月份监测云图

图 12 显示 2019 年重点监测区域位移曲线图,在 5 月份时,位移曲线发生突变,位移曲线与时间轴夹角介于 $45^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 之间,位移曲线进入初加速阶段。在现场踏勘过程中发现 +686 m 平台出现裂缝,位移云图见图 3.5,监测预警级别达到警示级。在上升为警示级后,每周定期巡视 +686 m 平台裂缝区域,要求通过下方设备和人员快进快出。至此以后重点监测区域位移持续匀加速上升,累计位移不断增加,临近扩帮工程结束时最大位移量为 330 mm。所以监测等级上升最大为二级,监测预警级为警戒级。为矿山边坡现阶段风险等级最高区域,需密切关注后续变形发展情况及发展趋势。

4 结论

(1) 本文通过对山达克南矿体经过前后的边坡的应力、位移分布情况进行了数值模拟研究,研究显示扩帮后的西边坡坑底区域剪应力和位移均急剧增加,确定该区域为三维激光扫描仪的重点监测区域。

(2) 矿山通过布设的三维激光扫描仪系统监测对边坡表面的位移变化做了监测,通过分析监测数据,并与预警判别标准对应,保证了矿山扩帮之后的安全生产。

(3) 由位移云图可知,随着监测时间的推移和扩帮的持续推进,南矿体西边坡整体形变持续增加,大规模变形破坏主要集中于采场西北部 +806 m ~ +626 m 平台(其中 +710 m ~ +662 m 平台变形最大)。与数值模拟的结果近似吻合,位移量主要集中在采场的深部,用高精度测量技术也验证了数值模拟的合理性。

[参考文献]

- [1] 杨天鸿,张锋春,蔡美峰,等.露天高陡边坡稳定性研究状及发展趋势[J].中岩土力学,2011,32(4):1438-1444.
- [2] 杨天鸿,解连库,唐春安,等.抚顺西露天矿北帮边坡治理工程效果初步评价[J].岩石力学与工程学报,2005,24(11):1841-1846.
- [3] 孙玉科,杨志法,丁恩保,等.中国露天矿边坡稳定性研

究[M].北京:中国科学技术出版社,1999.

- [4] 蔡美峰.中国金属矿山 21 世纪的发展前景评述[J].中国矿业,2001(1):14-16.
- [5] 蔡路军,马建军,江兵,等.高陡边坡下采矿安全问题分析探讨[J].矿业快报,2006(3):33-35.
- [6] 袁康.山达克南矿段露天坑深部扩帮开采技术研究[J].现代矿业,2019(1):65-68
- [7] 长沙矿山研究院有限责任公司.中冶集团资源开发有限公司山达克铜金矿扩帮工程边坡稳定性及安全风险研究[R].2018.
- [8] 陈育民,徐鼎平.FALC/FLAC3D 基础与工程实例[M].北京:中国水利水电出版社,2009.
- [9] 赵小平,闫丽丽,刘文龙.三维激光扫描技术边坡监测研究[J].测绘科学,2010,35(4):25-27.
- [10] 蔡美峰,李长洪,李军财,等.GPS 在深凹露天矿高陡边坡位移动态监测中的应用[J].中国矿业,2004(9):61-65.
- [11] 王堃宇,王奇智,等.基于三维激光扫描技术的边坡表面变形监测[J].科学技术与工程,2017(1):144-147.

Numerical Simulation Analysis and Slope Monitoring of Extended Slope Mining in Shandake Copper Mine

DU Jian-chun

Abstract: For open-pit high and steep slopes, raising the slope can reduce the amount of mine stripping, and is one of the important means for mines to reduce mining costs and increase mine economic benefits. However, as the slope becomes steeper, the safety performance of the open-air slope will decrease and the safety risk will increase. MCC Copper and Zinc Company Pakistan Sandaknan ore body ended in December 2017. In order to increase the service life of the company and buy time to find new mineral resources in the ore body, the South ore body has been expanded research and design. Using FLAC3D software numerical simulation analysis, through the stress and strain analysis of the slope before and after the expansion. The dangerous area before and after the slope expansion is simulated, and the monitoring basis is provided for the key monitoring position of the 3D laser scanner. Through the analysis of monitoring data, it provides prediction and forecast of potential landslides to ensure safe mining on the mine.

Key words: Extended mining; Numerical simulation; 3D laser scanner; Monitoring and early warning

