

基于岩心定向和OTV/ATV技术的露天边坡岩体稳定性研究

周 旭^{1,2}

(1. 中铁建国际投资有限公司, 北京 100049; 2. 杰特苏钨业有限责任公司, 哈萨克斯坦 阿拉木图 050029)

摘要:某露天矿边坡岩体稳定性主要受区内断层和节理裂隙等地质结构影响,为查明岩体结构面分布特征,通过对4个岩土工程勘察钻孔进行Reflex ACT III岩心定向处理,但由于花岗岩侵入体与沉积岩接触带附近的岩体破碎、裂隙发育影响了岩心定向准确率,各钻孔高置信度的岩心定向数据比例仅为8.05%~34.29%。为此,本文采用光学电视图像(OTV)/声学电视图像(ATV)测井技术,通过高分辨率、连续、定向的360°钻孔壁图像有效获取了岩性和构造特征、关系和方向数据,提高了钻孔岩心定向的地质结构信息数据精度。在此基础上,利用赤平极射投影理论,通过动力学分析,发现该露天边坡主要破坏模式是楔形滑动破坏,概率为12.66%~34.99%,其次为平面滑动,概率为3.40%~20.36%,为露天开采边坡控制提供了依据。

关键词:岩心定向;声学电视图像;光学电视图像;赤平极射投影;边坡岩体稳定性

中图分类号:P634;TD804 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)01-0145-07

Stability study of open-pit slope rock mass based on oriented core and OTV/ATV survey

ZHOU Xu^{1,2}

(1. CRCC International Investment Co., Ltd., Beijing 100049, China; 2. Zhetisu Tungsten LLP, Almaty 050029, Kazakhstan)

Abstract: The stability of the slope of an open-pit mine is mainly affected by geological structures such as faults and joint of rock mass. In order to identify the distribution characteristics of the rock mass structural, the Reflex ACT III tools were used to unify the core orientation of 4 geotechnical survey holes. However, the proportion of highly reliable core orientation data for each borehole only 8.05%~34.29%, due to the rock mass fragmentation and joint development near the contact zone between granite intrusions and sedimentary rocks, which affects the accuracy of core orientation. Therefore, this article took OTV/ATV survey to obtain lithology and structural characteristics, relationships and direction data effectively and improve the accuracy of geological structure information data of core orientation, through high-resolution, continuous and oriented 360° borehole wall images. Based on this, failure mode of the open pit mine was studied by equatorial polar projection theory and dynamic analysis. According to the result, the main failure mode is wedge sliding failure, with a probability of 12.66%~34.99%, followed by plane sliding, with a probability of 3.40%~20.36%, which provides the foundation for open-pit mining slope control.

Key words: core orientation; acoustic tele viewer; optical tele viewer; equatorial polar projection; stability of open-pit slope rock mass

0 引言

露天采场边坡稳定性涉及采场安全及采矿连

续性,一直是矿山生产安全管理的重要工作。在边坡稳定性分析方面,国内外主要采用自然地质历史

收稿日期:2024-02-19; 修回日期:2024-07-30 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.01.020

作者简介:周旭,男,汉族,1984年生,高级工程师,博士,从事矿业投资开发、矿山开采等工作,北京市石景山区石景山路20号中铁建设大厦10层,pedrozhu@163.com。

引用格式:周旭. 基于岩心定向和OTV/ATV技术的露天边坡岩体稳定性研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(1): 145-151.

ZHOU Xu. Stability study of open-pit slope rock mass based on oriented core and OTV/ATV survey[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1): 145-151.

法、工程地质类比法、图解法、范例推理法、专家系统法和岩体质量分级法等定性分析法,以及极限平衡法、数值分析方法等定量分析法,和可靠性概率分析、模糊数学、灰色理论等非确定性分析法^[1-5]。各类边坡稳定性分析的基础,是岩体力学性质参数的获取。由于结构面发育的方位、数量、大小以及形态的不同控制了岩体稳定性、破坏模式和破坏程度^[6],其对岩体力学性质的影响经常大于岩体材料本身^[7],因此层理、节理、裂隙等结构面的分布及其力学特性对露天矿边坡稳定性十分重要。为查明岩体结构特征,对地表揭露的岩体直接进行观测和测绘进行描述,对深部岩体则通常采用工程地质钻孔进行勘察。岩心定向技术通过采取直观反映地层原始产状的岩心,可实现基于单孔岩心调查岩石的性质、构造、断层和裂隙等岩体结构空间分布以及各向异性特征,是地质找矿、边坡稳定性研究、油气勘探工作的重要手段^[8-10]。但在钻孔遭遇溶蚀裂隙发育地带、岩石破碎地带、岩石软弱带等复杂地质条件时,取心率不足,岩体结构解译存在局限性,而这些部位又往往是最关键的部位^[11]。通常需要结合钻孔图像测量,以提供更全面和精确的地质信息。

目前,钻孔图像测量常见的两种技术是光学电视图像(Optical Tele Viewer, OTV)或声学电视图像(Acoustic Tele Viewer, ATV)^[12],通过提供高分

辨率、连续、定向的360°钻孔壁图像来定义岩性和构造特征、关系和方向^[13],广泛用于钻孔地质调查、水文地质调查、矿产勘探和开采设计、核废物深地质处置库选址和场址评价、岩石工程等研究领域^[14-18]。与传统的岩心定向方法相比,ATV/OTV采用三轴磁通门磁力计和三轴加速度计用于确定方位角方向和倾角,可以将钻孔偏差和磁偏角的方位应用于解译岩体特征的表观方向,以获得平面特征的真实方向^[19]。不仅如此,ATV/OTV数据通常可以对岩心样品中缺失岩石的断裂带进行虚拟岩心成像^[20],可以直接与定向岩心样品对比,获取更多岩体特征的信息。为准确获取岩性、岩体地质结构分布特征等基础信息,某露天矿采用定向岩心技术和OTV/ATV测量技术对边坡地质勘察钻孔进行了勘测,通过校验整合岩体信息数据,为边坡稳定性分析提供了依据。

1 工程地质钻孔岩心定向

某露天矿区位于向斜构造的东南侧,而该向斜构造是由砂岩和页岩互层组成的奥陶系沉积岩单元组成(如图1所示)。矿区西北部被东北—西南走向的花岗岩侵入,花岗岩与位于侵入体东南方向的蚀变带相关性较强。为调查该露天矿边坡岩体工程地质条件和最终边坡岩体特征,本次共设计4个钻孔,各钻孔底部均与露天坑最终边坡相交。



图1 矿区构造示意

Fig.1 Schematic map of mining area structure

本次岩土工程钻孔全部采用Reflex ACT III岩心定向系统进行岩心定向^[21]。通过钻孔定向测量记录了共计6993个不连续地质结构面的定向数据点(如表1所示),所有钻孔的测井构造数据的定向

高置信度相对较低,其中3号钻孔最高,高置信度是34.29%,而4号钻孔高置信度是8.05%。导致无法有效进行岩心方位定向的原因,一方面是由于钻孔操作不当,岩心定向工具误差等导致岩心无法准确

定向;另一方面,由于岩矿层岩石松散破碎,很难获取完整的、连续的柱状岩心,自然就无法进行岩心定向工作^[4-7]。

表 1 岩心定向节理统计
Table 1 Joints statistics of core directional

钻孔	节理总数/个	开放节理/个	闭合节理/个	无方向/%	低可靠/%	中可靠/%	高可靠/%
1	1831	719	1112	4.56	55.56	21.60	19.47
2	1557	610	947	2.13	58.20	20.20	15.57
3	1586	630	956	3.03	62.79	18.61	34.29
4	2019	931	1088	4.67	56.67	30.61	8.05

2 OTV/ATV 测量

由于 ATV 在钻孔内存水段测井效果优于 OTV,而在干孔段则相反,因此根据各钻孔实际情况,在孔内无地下水段采用 OTV 测井,在孔内存在地下水段采用 ATV 测井。钻孔的解译图像由孔壁成像展开图、3D 虚拟岩心图及结构面产状组成,可清晰地观察到闭合节理、微裂隙,张开型节理面铁质矿物浸染与石英岩脉及部分塌孔现象^[22]。利用 WellCad 软件对每条节理裂隙的深度和产状,包括倾向、倾角以及张开裂隙宽度等进行处理、分析和解译。根据 OTV/ATV 测井图像对应深度,结合 4 个钻孔不同深度采取的岩心情况,对测井数据进行识别和校核。

1 号钻孔采用 OTV 测量,共识别并处理了 236 个节理裂隙数据,优势节理裂隙产状 $170^{\circ}\angle 60^{\circ}$;在钻孔深度 81~88 m 之间,共发现 4 处破碎带,1 处宽度约 40 cm 的主要开放型节理裂隙,1 处局部开放型节理,16 处次级开放型节理,如图 2(a)所示。

2 号钻孔采用 ATV 测量,识别并处理了 468 个节理裂隙数据,主要有 2 组优势节理裂隙为 $140^{\circ}\angle 56^{\circ}$ 和 $70^{\circ}\angle 56^{\circ}$;钻孔深度 66~73 m 之间,共发现 1 处破碎带,呈近北走向,倾角 69.5° ,宽度约 10 cm,21 处次级开放型节理,如图 2(b)所示。

3 号钻孔采用 ATV 测量,识别并处理了 1287 个节理裂隙数据,优势节理裂隙产状 $160^{\circ}\angle 64^{\circ}$ 和 $80^{\circ}\angle 67^{\circ}$;钻孔深度 73~80 m 之间,共发现 1 处宽度约 160 cm 破碎带,岩心损失明显,结合钻孔过程打钻液大量流失,表明钻孔段破碎强烈,还有 1 处主要开放型节理裂隙,呈北西走向,倾角 44° ,15 处次级开放型节理,如图 2(c)所示。

4 号钻孔采用 OTV 测量,识别并处理了 617 个

节理裂隙数据,优势节理裂隙产状 $170^{\circ}\angle 65^{\circ}$ 和 $140^{\circ}\angle 35^{\circ}$;钻孔深度 159~168 m 之间,岩体完整性较好,共发现 4 处局部开放型节理,1 处破碎带,15 个充填的节理裂隙,通过直接获取的图像可见多数为石英脉填充的构造,呈北西走向,倾角 44° ,如图 2(d)所示。

3 岩心定向数据校准

由于 OTV/ATV 测井技术可获得钻孔孔壁各点精确的三维空间坐标,利用测量图像可以对岩心进行准确的定位和定向排列^[23],特别是 OTV/ATV 勘测数据可以更准确地评估高度裂缝或钻孔诱发的破碎区域,这些区域可能会出现传统岩心测井无法准确表征的显著岩心损失区间。因此,将 4 个钻孔中完成的岩心定向编录数据与 ATV/OTV 测井数据相结合,将形成可靠且具有代表性的数据集,用于边坡稳定性分析。在 4 个钻孔中,岩心定向过程记录了共计 6993 个不连续结构面数据,而 ATV/OTV 测井记录了共计 2603 个不连续面,经过综合分析整理最后选定 8329 个数据。其中 1 号钻孔优势节理主要有 4 组,分别为 $64^{\circ}\angle 56^{\circ}$, $115^{\circ}\angle 48^{\circ}$, $158^{\circ}\angle 42^{\circ}$, $210^{\circ}\angle 53^{\circ}$;2 号钻孔优势节理主要有 4 组,分别为 $212^{\circ}\angle 58^{\circ}$, $157^{\circ}\angle 52^{\circ}$, $310^{\circ}\angle 46^{\circ}$, $86^{\circ}\angle 64^{\circ}$;3 号钻孔优势节理主要有 2 组,分别为 $157^{\circ}\angle 27^{\circ}$ 和 $258^{\circ}\angle 24^{\circ}$;4 号钻孔优势节理主要有 3 组,分别为 $207^{\circ}\angle 65^{\circ}$, $297^{\circ}\angle 68^{\circ}$, $41^{\circ}\angle 61^{\circ}$ 。

4 边坡稳定性分析

露天采场最终边界和钻孔位置如图 3 所示。利用赤平极射投影理论,通过 DIPS 动力学分析钻孔所在露天坑边坡台阶稳定性。为符合开采实际,台

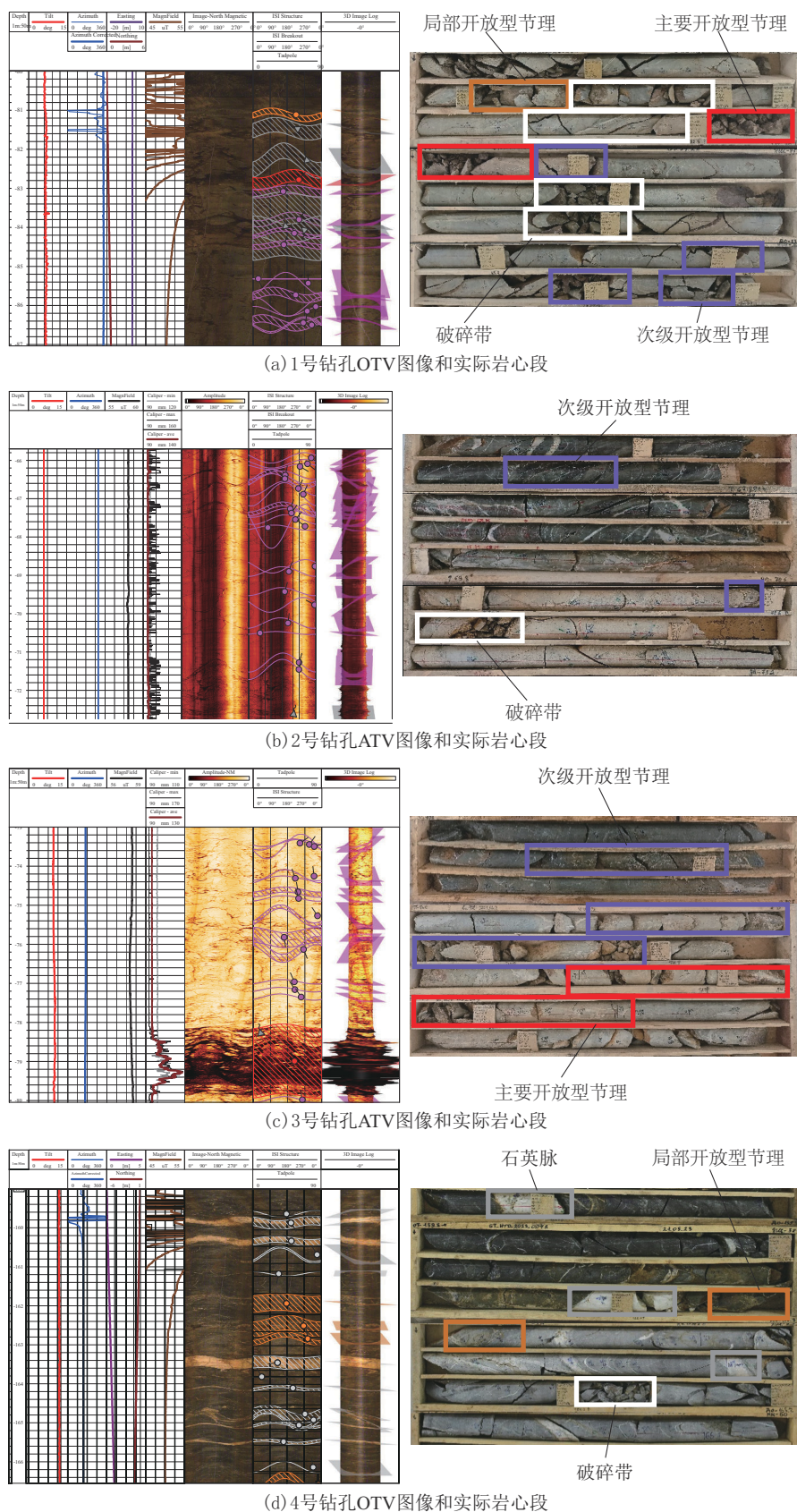


图2 OTV/ATV 图像和岩心段图像

Fig.2 OTV/ATV and core section images

阶坡面角采用 70° 。根据同类岩石经验参数将岩体内摩擦角设置为 30° ,分别进行平面滑动、楔形体滑动和倾倒破坏分析。

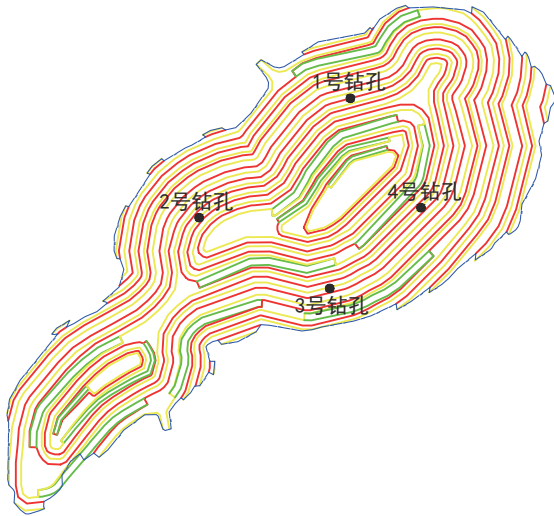


图3 露天采场最终边界和钻孔位置示意

Fig.3 Schematic map of the final boundary of the open pit and the drilling location

4.1 平面滑动破坏模式

在赤平投影中,作1~4号钻孔位置所在露天边坡坡面投影大圆及出露包络线,以结构面内摩擦角为半径作摩擦圆,则出露包络线和摩擦圆包围区域为平面滑动区域,当结构面极点位于阴影区域内,可能发生平面滑动破坏^[24]的情形如图4所示。由图4(b)可见,2号钻孔第3组节理面(3 m) $310^\circ/46^\circ$ 的极点位于平面滑动阴影区域,发生平面滑动概率为94.59%。由图4(c)可见,3号钻孔第1组节理面(1 m) $157^\circ/27^\circ$ 的极点位于平面滑动阴影区域,发生平面滑动概率为74.94%。不过上述2组节理在岩体中数量较少,其走向与边坡走向一致,倾角略缓,对边坡稳定性有一定影响。

4.2 楔形体滑动模式

由于露天边坡中存在多组不同产状原生节理或构造节理结构面组合形成的多面体,边坡滑动可能同时沿某几个结构面向坡面滑动从而形成楔形体。将钻孔1~4号分别作楔形体滑动模式分析,如图5所示。从赤平极射投影角度分析,作楔形体组合结构面和坡面产状的投影大圆,再以 $90^\circ - \varphi$ (φ 为结构面内摩擦角)为半径作摩擦圆,若结构面交线位于月牙形包围区域内,则可能发生楔形体滑动

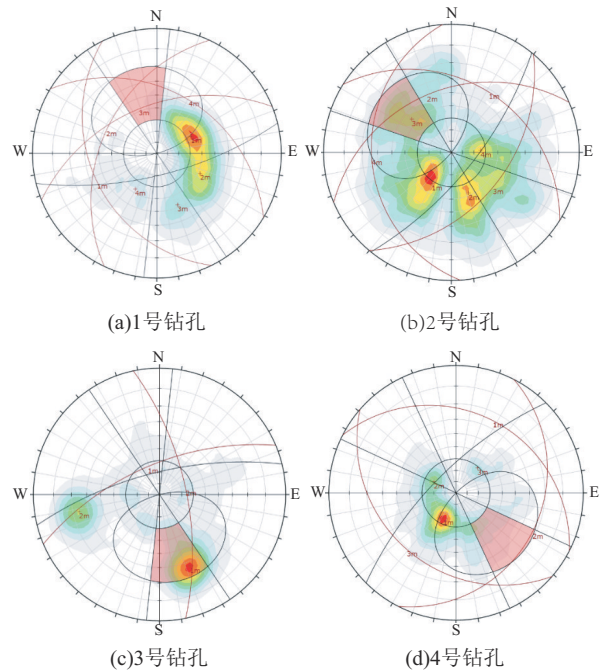


图4 平面滑动破坏分析

Fig.4 Planar sliding failure analysis

破坏^[25]。由图5(c)可见,3号钻孔两组优势结构面(1 m和2 m)交线位于楔形滑动区,其所在边坡发生楔形滑动概率为34.99%,对边坡围岩稳定较为不利。

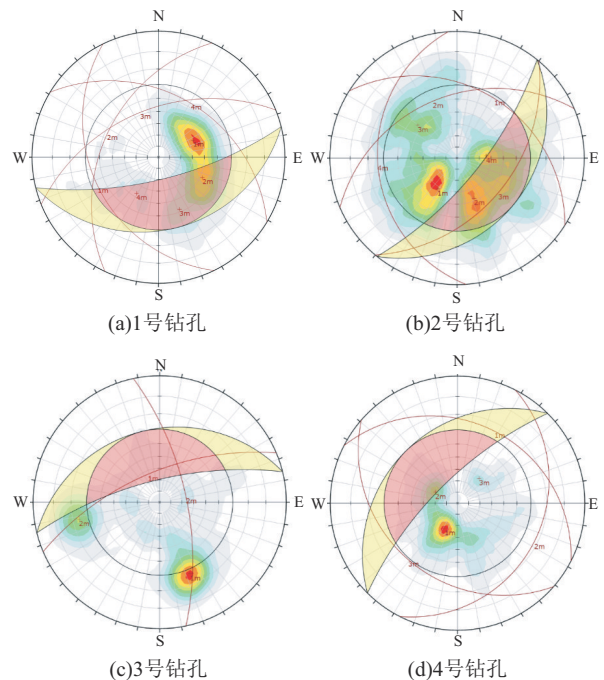


图5 楔形体滑动分析

Fig.5 Wedge sliding failure analysis

4.3 倾倒破坏模式

在层状结构或块状结构边坡中,当主要结构面倾向较陡倾向坡内时,在平缓结构面可能导致倾倒式破坏,尤其在岩体差异风化时岩体倾倒破坏极易产生。将钻孔1~4号分别作倾倒地滑动模式分析,如图6所示。从赤平极射投影角度分析,以坡面投影为大圆,以相同走向及倾角小于坡角产状做另一投影大圆,当结构面极点落入走向交角阴影区域时,将发生倾倒破坏^[23]。由图6(a)可见,1号钻孔第3组节理面 $158^{\circ}/42^{\circ}$ (3 m),走向上与边坡大致平行,倾向相反倾角中等,倾倒破坏概率为29.41%,不过该组节理在岩体中数量较少,对边坡稳定性有一定影响。

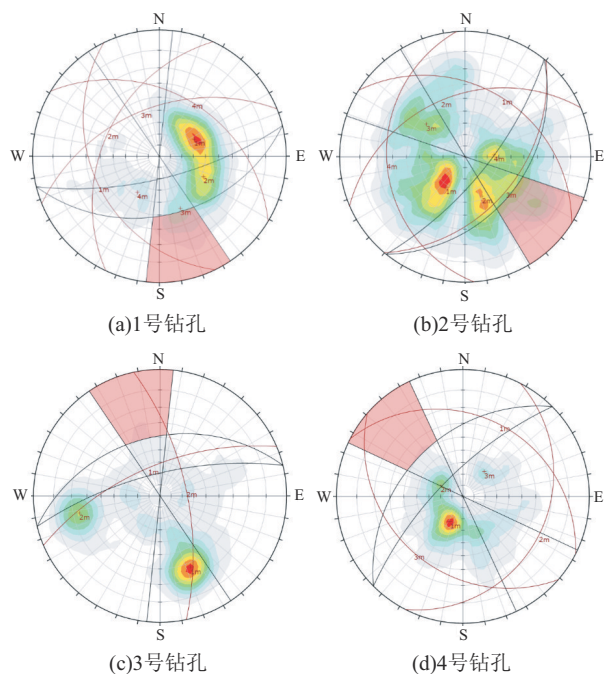


图6 倾倒破坏分析

Fig.6 Toppling failure analysis

通过边坡稳定性动力学分析,该露天边坡主要破坏模式是楔形滑动破坏,其概率为12.66%~34.99%,其次为平面滑动,概率为3.40%~20.36%,发生倾倒破坏的概率较低,为1.09%~5.75%(如表2所示)。

5 结论

(1)该露天矿区岩体节理裂隙比较发育,由于受断裂面的影响,结构面附近岩体节理裂隙较为发

表2 边坡破坏类型和破坏概率统计

Table 2 Slope failure types and probability statistics

钻孔编号	边坡走向/ (°)	破坏概率/%		
		平面滑动	楔形滑动	倾倒破坏
1	166	3.40	12.66	5.75
2	129	9.58	18.44	5.08
3	346	20.36	34.99	3.64
4	315	9.95	20.88	1.09

育,在使用Reflex ACT III工具进行钻孔岩心定向时,受主观因素如操作不当,工具误差或者客观因素如岩心松散破碎、连续性差等影响,而无法有效进行岩心方位定向。

(2)采用ATV/OTV测井技术,结合Reflex ACT III岩心定向和节理裂隙实测,进行了数据校正和筛选,综合整理获得了该露天边坡8329个有效节理面特征参数,克服了传统钻孔地质调查视角受限和准确度不高等缺点,为复杂地质条件下定义岩性和构造特征、关系和方向提供了有效的技术和方法。

(3)利用赤平极射投影理论,通过边坡稳定性动力学分析可知,该露天边坡主要破坏模式是楔形滑动破坏,其次为平面滑动,发生倾倒破坏的概率较低。在采矿作业过程中应加强地下水、爆破震动和边坡角控制,采用安全预警等措施,防止边坡失稳。

参考文献(References):

- [1] 李元松,王玉,朱冬林,等.边坡稳定性评价方法研究现状与发展趋势[J].武汉工程大学学报,2021,43(4):428-435.
LI Yuansong, WANG Yu, ZHU Donglin, et al. Research status and developmental trends of slope stability evaluation method [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2021, 43(4): 428-435.
- [2] 夏元友,李梅.边坡稳定性评价方法研究及发展趋势[J].岩石力学与工程学报,2002,21(7):1087-1091.
XIA Yuanyou, LI Mei. Evaluation method research of slope stability and its developing trend [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 1087-1091.
- [3] 崔华丽,譙鹏志,王佃明.库水位变动情况下库岸边坡稳定性研究——以白鹤滩水电站石圪塔滑坡为例[J].钻探工程,2023,50(5):36-42.
CUI Huali, QIAO Pengzhi, WANG Dianming. Study on stability of reservoir bank slope under fluctuated water level: A case of Shigenao Landslide in Baihetan Hydropower Reservoir [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5): 36-42.
- [4] 杨子跃,王济君,徐鹏.降雨-堆载耦合作用下深厚填土边坡稳

- 定性分析[J]. 钻探工程, 2023, 50(4): 94-102.
- YANG Ziyue, WANG Jijun, XU Peng. Stability analysis of deep fill slope under the influence of rainfall-surge coupling [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4): 94-102.
- [5] 雷世平, 李京泽, 刘磊磊, 等. 基于克里金代理模型与子集模拟的边坡高效可靠度分析[J]. 钻探工程, 2021, 48(12): 107-113.
- LEI Shiping, LI Jingze, LIU Leilei, et al. Slope reliability analysis using Kriging-based Subset simulation [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(12): 107-113.
- [6] 乔兰, 蔡美峰. 新城金矿深部节理裂隙调查及岩体质量分级评价研究[J]. 中国矿业, 2000, 9(4): 70-74.
- QIAO Lan, CAI Meifeng. Investigation and analysis of engineering geological condition in Xincheng gold mine [J]. China Mining Magazine, 2000, 9(4): 70-74.
- [7] 康红普, 司林坡, 苏波. 煤岩体钻孔结构观测方法及应用[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 1949-1956.
- KANG Hongpu, SI Linpo, SU Bo. Borehole observation methods in coal and rock mass and their applications [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 1949-1956.
- [8] 杨泉宁, 杜菊民, 徐明钻, 等. 定向岩芯构造分析及在金矿勘查中的运用[J]. 地质学刊, 2014, 38(3): 479-482.
- YANG Quanning, DU Jumin, XU Mingzuan, et al. Structural analysis of oriented drill core and its application in gold exploration [J]. Journal of Geology, 2014, 38(3): 479-482.
- [9] 凌振武, 刘亚斌, 董树伟, 等. Reflex ACT 岩心定向设备及其工程应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(3): 60-64.
- LING Zhenwu, LIU Yabin, DONG Shuwei, et al. Reflex ACT core orientation device and its engineering application [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(3): 60-64.
- [10] 孙建维. 定向钻孔在矿井地质方面的技术应用[J]. 煤炭与化工, 2022, 45(6): 89-91, 116.
- SUN Jianwei. The technical application of directional drilling hole in mine geology [J]. Coal and Chemical Industry, 2022, 45(6): 89-91, 116.
- [11] 谭显江, 张建清, 刘方文, 等. 高清数字钻孔电视技术研发及其在水电工程中的应用[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(8): 62-66.
- TAN Xianjiang, ZHANG Jianqing, LIU Fangwen, et al. R&D of high-resolution digital borehole TV technology and its application in hydropower project [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(8): 62-66.
- [12] Williams H J, Johnson C D. Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies [J]. Journal of Applied Geophysics, 2004, 55(1/2): 151-159.
- [13] Hasnulhadi A, Kamaruddin H C. Acoustic and optical television borehole logging [C]//Research and Development Seminar 2016. Bangi (Malaysia), 2016: 8-10.
- [14] 邵阳, 汪进超, 韩增强. 数字钻孔摄像技术在页岩气勘探中的应用[J]. 工程勘察, 2020, 48(5): 21-27.
- SHAO Yang, WANG Jinchao, HAN Zengqiang. Application of digital borehole camera technique in shale gas exploration [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2020, 48(5): 21-27.
- [15] 王成虎, 郭启良, 陈群策, 等. 新一代超声波钻孔电视及其在工程勘察中的应用研究[J]. 地质与勘探, 2007, 43(1): 98-101.
- WANG Chenghu, GUO Qiliang, CHEN Qunce, et al. New acoustic borehole televiewer and its application in geotechnical investigation [J]. Geology and Prospecting, 2007, 43(1): 98-101.
- [16] 苏锐, 宗自华, 王驹. 高分辨率声波钻孔电视及其在核废物地质处置深部岩体研究中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2922-2928.
- SU Rui, ZONG Zihua, WANG Ju. Acoustic borehole televiewer with high resolution and its application to deep formation for geological disposal of nuclear waste [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2922-2928.
- [17] Tezuka K, Niitsuma H. Stress estimated using microseismic clusters and its relationship to the fracture system of the Hijiori hot dry rock reservoir [J]. Developments in geotechnical engineering, 2000, 84: 55-70.
- [18] Pollok L, Saßnowski M, Kühnlenz T, et al. Geological exploration and 3D model of the Asse salt structure for SE expansion of the Asse II mine [J]. Mechanical Behavior of Salt IX (Salt Mech IX), 2018(9): 753-763.
- [19] Martel J S. Analysis of fracture orientation data from boreholes [J]. Environmental and Engineering Geoscience, 1999, 5(2): 213-233.
- [20] Rahiman T I H. Digital imaging of geotechnical boreholes: benefits and risks [J]. Australian Geomechanics Journal, 2018, 53(3): 153-161.
- [21] Ureel S, Momayez M, Oberling Z. Rock core orientation for mapping discontinuities and slope stability analysis [J]. International Journal of Research in Engineering and Technology, 2013, 2(7): 1-8.
- [22] 王平, 冯兴隆, 蔡永顺, 等. 基于钻孔超声波成像技术的普朗铜矿钻孔节理分布规律研究[J]. 矿冶, 2019, 28(2): 1-5.
- WANG Ping, FENG Xinglong, CAI Yongshun, et al. Distribution of borehole joints by borehole ultrasonic technology in Pulang Copper deposit [J]. Mining and Metallurgy, 2019, 28(2): 1-5.
- [23] 王晓兵, 王俊卿. 基于孔内电视技术的岩体节理裂隙特征研究[J]. 岩土工程技术, 2021, 35(5): 286-293.
- WANG Xiaobing, WANG Junqing. Characteristics of rock joints and fissures based on borehole television technology [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2021, 35(5): 286-293.
- [24] 吴江伟, 吴鹏程. 攀枝花朱砂南帮边坡稳定性的运动学分析[J]. 现代矿业, 2020, 36(7): 82-84.
- WU Jiangwei, WU Pengcheng. Stability analysis of South slope of panzhuhua Zhu mine based on kinematics [J]. Modern Mining, 2020, 36(7): 82-84.
- [25] 张学东, 刘向飞, 衣雪峰, 等. 岩质边坡稳定性的运动学分析[J]. 水利水电工程设计, 2017, 36(2): 50-53.
- ZHANG Xuedong, LIU Xiangfei, YI Xuefeng, et al. Kinematic analysis of rock slope stability [J]. Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering, 2017, 36(2): 50-53.

(编辑 荐华)