基于点云识别技术的露天矿边坡岩体结构面产状与破坏模式研究①

李家东[1]，赵旭阳[1]，杜坤[2]，李少杰[2]
（1.栾川龙宇钼业有限公司，河南 洛阳 471500；2.中南大学 资源与安全工程学院，湖南 长沙 410083）

摘　要：为提高露天边坡结构面调查效率及破坏模式判识精度，以河南南泥湖钼矿露天边坡为研究对象，将露天边坡划分为 6 个调查分区，采用基于点云识别的节理裂隙调查方法获取各边坡区域岩体结构面产状数据，结合人工测线测量结果对识别精度进行验证。对识别获得的结构面数据进行聚类分析，划分出各边坡分区的优势结构面组，利用赤平投影方法分析优势结构面与边坡的空间组合关系，判定各分区潜在破坏模式。结果表明：点云识别获取的结构面产状数据与人工测量结果具有较好一致性，能够满足边坡结构面调查与分析要求。6 个分区共识别出 14 组优势结构面，其中Ⅰ区、Ⅱ区、Ⅴ区和Ⅵ区各发育 2 组优势结构面，Ⅲ区和Ⅳ区各发育 3 组优势结构面；基于赤平投影分析，不同分区边坡潜在破坏模式存在一定差异，以平面滑动和楔形破坏为主，部分分区表现为单一破坏模式，部分分区则表现为 2 种破坏模式并存。

关键词：露天边坡；边坡稳定性；点云识别；结构面；破坏模式；赤平投影；结构面调查；节理裂隙
中图分类号：TD854；TD313　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.02.003
文章编号：0253-6099(2026)02-0015-06

Research on Occurrence and Failure Modes of Rock Mass Structural Planes in Open-Pit Slopes Based on Point Cloud Recognition Technology

LI Jiadong[1], ZHAO Xuyang[1], DU Kun[2], LI Shaojie[2]
(1.*Luanchuan Longyu Molybdenum Industry Co., Ltd., Luoyang* 471500, *Henan*, *China*; 2.*School of Resources and Safety Engineering*, *Central South University*, *Changsha* 410083, *Hunan*, *China*)

Abstract: To improve the efficiency of structural plane investigation and the accuracy of failure mode identification for open-pit slopes, the open-pit slope of Nannihu Molybdenum Mine in Henan Province was taken for research. The open-pit slopes were divided into 6 sub-areas, and a joint and fissure investigation method based on point cloud recognition was adopted to obtain the occurrence data of rock mass structural planes in each sub-area, and the recognition accuracy was verified by comparing with the manual scanline measurements. Cluster analysis was performed for the recognized structural plane data to divide the dominant structural plane sets in each sub-area. The spatial combination relationship between the dominant structural planes and the slope was analyzed by adopting stereographic projection to determine the potential failure modes of each sub-area. The results show that the occurrence data of the structural plane obtained by point cloud recognition are in good agreement with the manual measurements, which can meet the requirements of slope structural plane investigation and analysis. A total of 14 sets of dominant structural planes were identified in the six sub-areas: two sets of dominant structural planes were developed in each of zones Ⅰ, Ⅱ, Ⅴ and Ⅵ, while three sets of dominant structural planes were developed in each of zones Ⅲ and Ⅳ. Based on stereographic projection analysis, there are certain differences in the potential failure modes of slopes in different sub-areas, mainly in planar sliding and wedge failure modes. It is found that a single failure mode occurs in some part of sub-areas, and a combination of two failure modes occur in others.

Key words: open-pit slope; slope stability; point cloud recognition; structural plane; failure mode; stereographic projection; structural plane investigation; joint and fissure

① **收稿日期**：2025-11-21
基金项目：国家自然科学基金(52374150)
作者简介：李家东(1982—)，男，河南周口人，工程师，主要从事采矿技术、矿山爆破技术、边坡稳定性分析研究工作。E-mail：280730260@qq.com
通信作者：杜坤(1985—)，男，山东泰安人，研究员，博士研究生导师，主要从事深部矿山开采及岩石力学方面的研究工作。E-mail：361242717@qq.com

露天矿开采中,边坡失稳破坏是严重的安全问题。节理裂隙结构面的分布、形态、密度和方向等特征对岩体强度产生严重影响,通常是导致边坡变形和破坏的主要因素之一。因此,对边坡进行全面的工程地质调查和节理裂隙的系统分析至关重要[1-3]。

近年来,遥感技术、三维激光扫描技术和数字化建模技术迅速发展,基于点云数据和数字化建模的露天边坡节理裂隙调查方法逐渐成为研究热点[4]。文献[5]利用遥控飞行系统和数字摄影测量技术对高陡边坡开展倾斜摄影调查,成功提取了结构面信息。文献[6]采用三维激光扫描技术获取岩体露头点云数据,利用几何算法对岩体结构面实现智能识别。文献[7]采用无人机摄影技术建立了边坡岩体的三维点云模型,准确识别了结构面特征信息。文献[8]基于摄影测量调查了边坡结构面基本信息,以此分析块体破坏机制。以上研究为矿山工程稳定性评估和工程设计提供了可靠的技术手段[9]。

本文基于河南南泥湖钼矿露天采场的工程地质背景,利用无人机和便携式摄影设备获得边坡表面岩体的三维点云数据并进行识别,获取矿区结构面特征数据,并结合人工实测结果对识别精度进行验证,在此基础上进一步分析矿区边坡的破坏模式。

1 矿区工程概述

南泥湖钼矿露天采场目前开采标高为+1 432~+1 246 m,最终开采标高为+1 432~+1 042 m,总体地势北高南低。矿区内部主要以结晶变质岩类、岩浆岩类为主,岩性主要表现为黑云母长英角岩、长英角岩、透辉石斜长角岩、矽卡岩及花岗岩等 5 类,力学强度均较高,稳固性均较好。矿区地质构造发育,裂隙张开度小,多被后期充填,破坏了岩体的完整性。因此,断裂构造、裂隙组合结构面是影响岩体稳定的主要因素。对原有地质调查资料进行补充和分析,将露天采场分成 6 个工程地质区域,如图 1 所示。

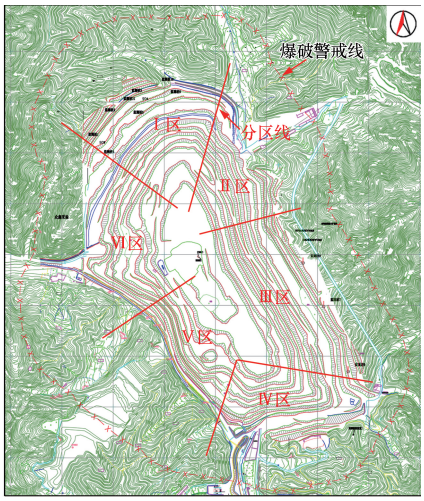


图 1 南泥湖钼矿露天边坡工程地质分区图

Fig. 1 Engineering geological zoning map of open-pit slope in Nannihu Molybdenum Mine

表 1 各分区边坡参数

Table 1 Slope parameters of each zoning area

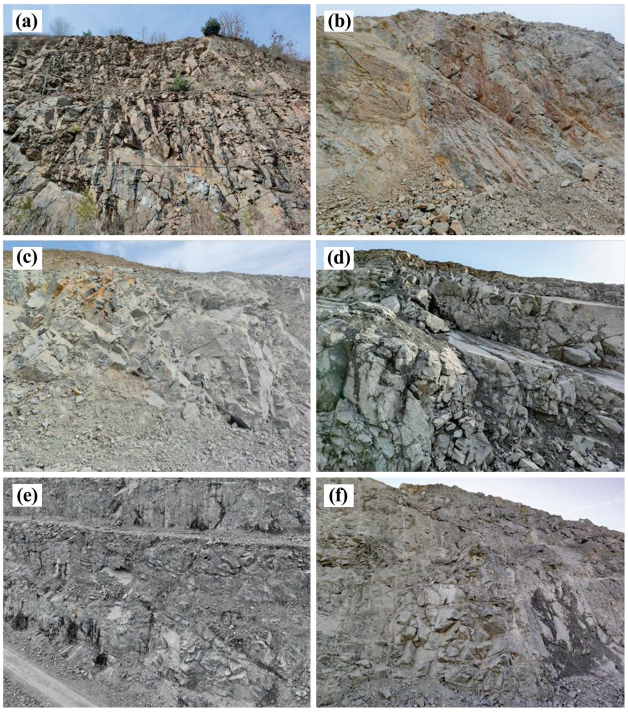
边坡区域	台阶高度/m	台阶角/(°)	节理走向	节理密度/(条·m^{-1})	主要成分
Ⅰ区	12	75	顺向	1~15	长英角岩
Ⅱ区	12	75	顺向	2~19	石英岩
Ⅲ区	12	75	顺向	2~20	长英角岩
Ⅳ区	12	50	顺向	1~17	透辉石长英角岩
Ⅴ区	12	75	顺向	1~15	透辉石长英角岩
Ⅵ区	12	75	顺向	2~25	长英角岩

2 边坡节理裂隙调查

2.1 调查区域

节理裂隙是影响边坡稳定性的重要因素之一,通常可以从节理产状、节理组数、节理间距、粗糙度和节理裂隙宽度等几何参数[10]进行表述。在边坡岩体破坏模式分析中,最重要的就是节理裂隙的产状参数,结合研究区实际情况,各分区边坡参数见表 1。

现场调查边坡区域如图 2 所示。经过现场地质调查发现,矿区内的节理裂隙较为发育,岩体完整性较差,



(a) Ⅰ区; (b) Ⅱ区; (c) Ⅲ区; (d) Ⅳ区; (e) Ⅴ区; (f) Ⅵ区

图 2 现场调查边坡区域

Fig. 2 Investigated areas in field

且部分台阶边坡区域存在滑坡、失稳等问题。

2.2　基于点云识别的节理裂隙调查

南泥湖钼矿矿区正处于生产开挖阶段,台阶边坡爆破后碎石较多,地面基岩露头不连续,缺乏整片大规模出露,难以在地面布置较长的测线。基于此,本文采用三维数字点云露头模型识别结构面为主、局部地面调查为辅的综合手段对现场边坡节理裂隙进行调查分析,克服了传统人工调查方法的局限性,提高对岩体结构面信息的获取效率。

为全面准确捕捉各边坡区域的代表性特征,本文选择长 5~10 m、高 0.5~5 m 的典型边坡区域为研究对象。结合便携式相机与无人机,从多个角度对研究区进行高密度、多视角拍摄,并严格控制相邻照片之间的重叠度,以确保后续三维点云模型重建的完整性与精度[11]。利用摄影测量方法生成高密度点云数据,并进一步构建三维数字点云露头模型,为结构面识别与定量分析提供基础。基于点云识别的露天矿节理裂隙调查方法的流程如图 3 所示。

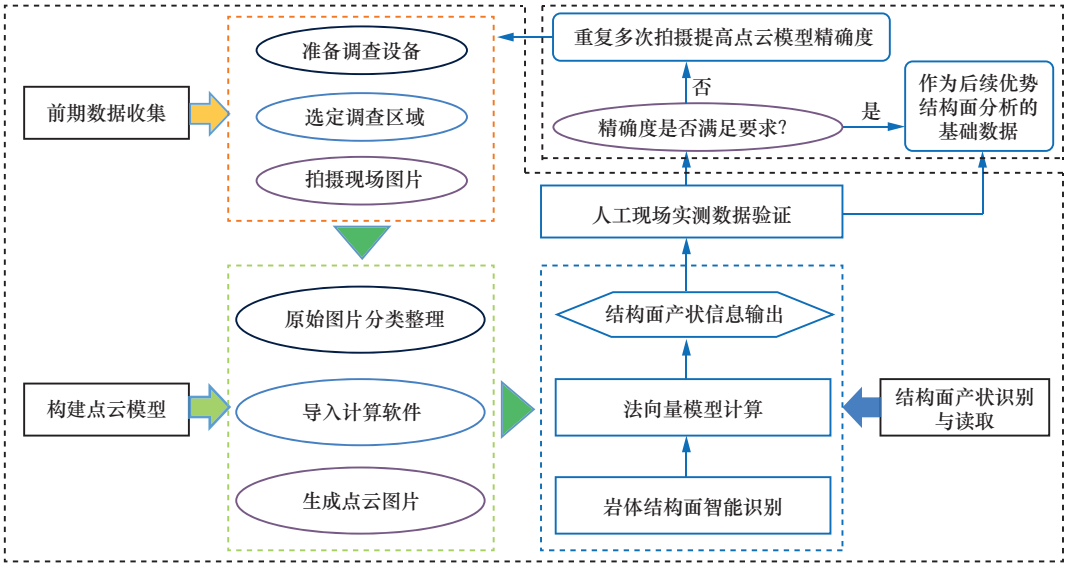


图 3　基于点云识别的露天矿节理裂隙调查方法的流程

Fig. 3　Flowchart for investigating joint and fissure of open-pit mine based on point cloud recognition

在点云处理阶段,首先对高密度点云数据的局部邻域进行主成分分析。在以半径 r 为邻域范围的点集中构建并求解协方差矩阵 $\boldsymbol{C}$:

$$\boldsymbol{C}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(p_i-\bar{p})(p_i-\bar{p})^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

式中:p_i 为邻域内点的三维坐标;$\bar{p}$ 为邻域点的质心。

对矩阵 $\boldsymbol{C}$ 进行特征值分解,可以获得主方向向量,最小特征值对应的特征向量即为局部法向量 $\boldsymbol{n}=(a,b,c)$。随后将具有相似法向量的点云进行区域生长分割,并对每个区域点集采用平面拟合得到结构面方程:

$$ax+by+cz+d=0 \tag{2}$$

$$a^2+b^2+c^2=1 \tag{3}$$

式中:a、b、c 分别为拟合平面单位法向量在 x、y、z 方向上的分量;d 为平面常数项。通过单位化条件式(3)保证拟合平面的唯一性与稳定性。

最后,根据法向量分量计算结构面产状参数:

$$\delta=\arctan\left(\frac{\sqrt{a^2+b^2}}{|c|}\right) \tag{4}$$

$$\alpha=\begin{cases}\arctan\left(\dfrac{b}{a}\right) & a>0,b\geqslant 0\\ \arctan\left(\dfrac{b}{a}\right)+2\pi & a>0,b<0\\ \arctan\left(\dfrac{b}{a}\right)+\pi & a<0\\ \dfrac{\pi}{2} & a=0,b>0\\ \dfrac{3\pi}{2} & a=0,b<0\end{cases} \tag{5}$$

式中:δ 为结构面倾角,(°);α 为结构面倾向,(°)。

通过以上计算,能够在保持点云空间分辨率的前提下,实现对边坡研究区域岩体结构面的自动化识别及其产状数据的定量提取。

2.3　人工现场调查数据验证

为保证点云识别的结构面产状数据的可靠性,采用人工测线法调查进行辅助验证。验证过程中,在 6 个区域内调查并测量了 60 组节理裂隙数据,并与点云识别的数据进行对比分析,如图 4 所示。

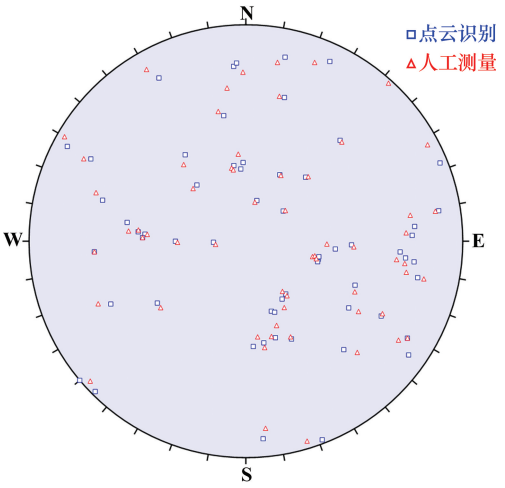
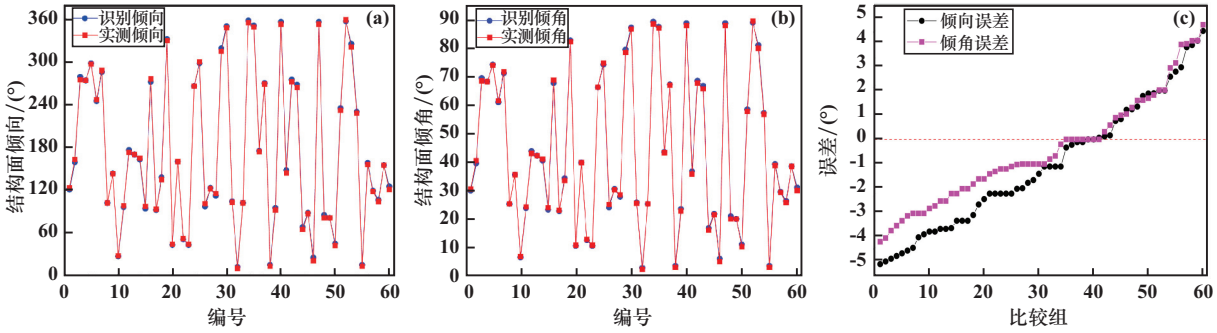


图 4 点云识别与人工测量产状对比

Fig. 4 Comparison of structural plane occurrences between point cloud recognition and manual measurement

从图 4 中可以发现，点云识别的结构面极点分布区域与人工测线法测出的分布区域大致相同。为了更加直观地展现结构面识别效果，将点云识别出的结构面产状与实测结果进行比较，结果如图 5 所示，可以看出点云识别产状和实测产状误差相对较小，结构面产状最大偏差在±5°以内。其中，结构面倾向测量误差范围为[-4.6°，4.0°]，平均误差-1.0°；结构面倾角测量误差范围为[-4.0°，4.7°]，平均误差-0.4°。倾向误差总体上大于倾角误差，主要是因为识别的结构面表面不平整、人工现场测量误差等。

以上结果表明，基于点云识别所得到的结构面产状数据可靠，能够真实反映边坡结构面的空间分布和几何特征，满足实际现场工程应用需求，可作为后续分析各区域优势结构面基础数据。



(a) 倾向比较；(b) 倾角比较；(c) 误差分布

图 5 点云识别结构面产状与实测结构面产状比较结果

Fig. 5 Comparison of structural plane occurrences between point cloud recognition and field measurement

3 边坡岩体破坏模式分析研究

3.1 各分区优势结构面分析

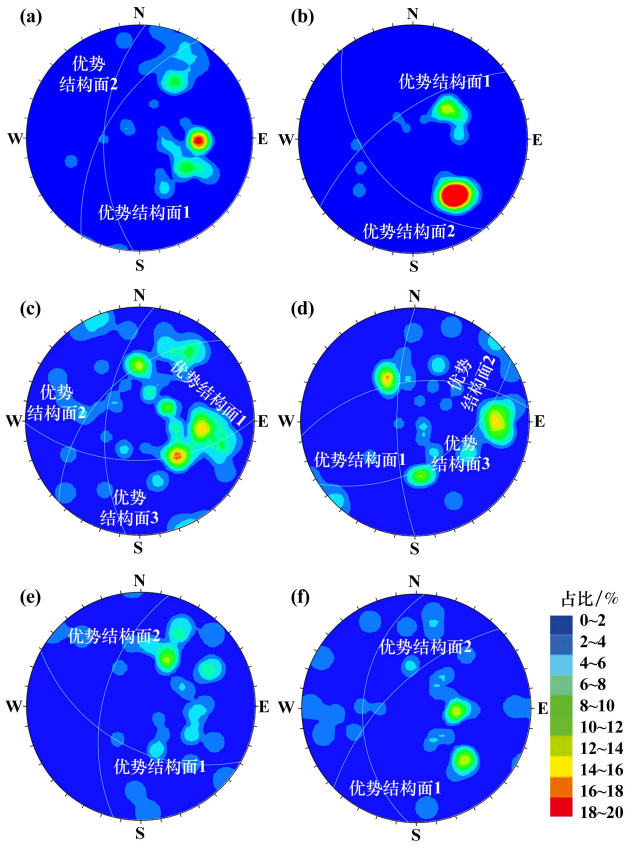
结构面性质很大程度上影响了岩体的稳定性，尤其是优势结构面。通常采用统计学方法确定优势结构面，即同一区间在数量上占优势的结构面，其平均产状可作为代表性产状[12]。利用 Rocscience Dips 统计分析软件处理点云识别的结构面数据，得到各边坡区域结构面等密度图及优势结构面分布图，如图 6 所示。

根据各分区节理等密度图，统计各区域优势结构面组数及产状，如表 2 所示，其中Ⅰ区、Ⅱ区、Ⅴ区及Ⅵ区均存在 2 组优势结构面，Ⅲ区和Ⅳ区存在 3 组优势结构面。

3.2 赤平投影分析

赤平投影分析是判断不同节理裂隙面构成的岩体在特定空间组合中是否存在滑动可能的一种有效研究方法，利用赤平投影方法可以对所研究的边坡失稳破坏模式进行定性判断[13]。该方法通过分析优势结构面优势方向与边坡临空面之间的空间组合关系，进而确定边坡发生平面滑动、楔体破坏及倾倒破坏的可能性。各分区赤平投影破坏模式分析如图 7 所示。

在Ⅰ区，优势结构面 2 与边坡斜交，且断层 Fx6 倾向与坡向一致，均小于台阶坡面角，可能导致边坡台阶发生顺层破坏；优势结构面 1 与断层 Fx1 的组合面倾向与坡向相同，且交点位于坡面线内侧，边坡存在沿 2 组优势结构面发生楔形滑动破坏的可能性。Ⅱ区中优势结构面 1 与断层 F16 组合面倾向与坡向相同，且交点位于坡面线内侧，边坡存在沿 2 组优势结构面发生楔形滑动破坏的可能性。Ⅲ区中优势结构面产状对边坡稳定性影响不大，坡体较为稳定。Ⅳ区中优势结构面 1 与优势结构面 3 组合面倾向边坡体外部，交点位于边坡线内侧，边坡存在沿这 2 组优势结构面发生楔形滑动破坏的可能性；此外，优势结构面 3 属于外倾结构面，其倾角小于台阶坡面角，台阶可能发生顺层破



(a) Ⅰ区;(b) Ⅱ区;(c) Ⅲ区;(d) Ⅳ区;(e) Ⅴ区;(f) Ⅵ区

图 6　边坡区域结构面等密度图及优势结构面分布图

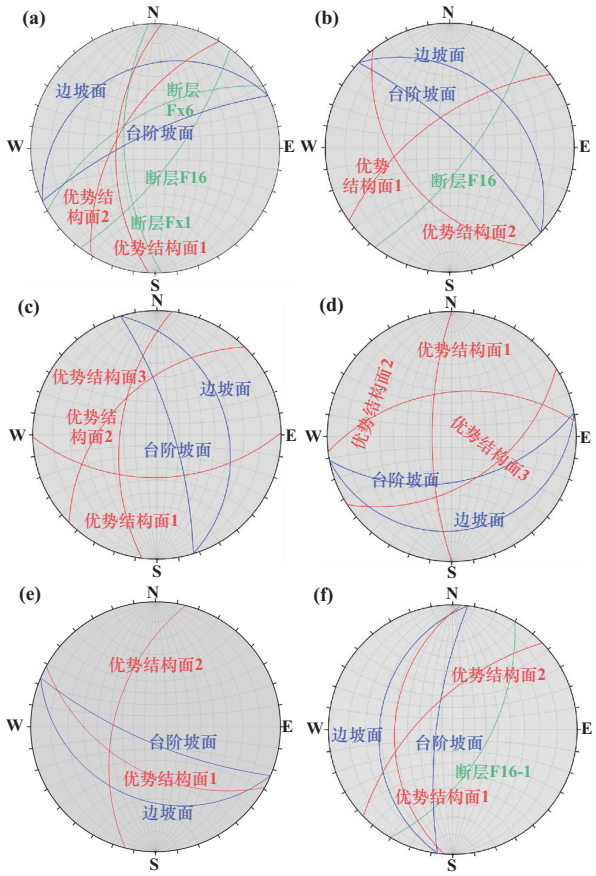
Fig. 6　Contour diagram of joint planes and distribution of dominant structural planes in sub-areas

表 2　各区域优势结构面组数及产状

Table 2　Groups and occurrences of dominant structural planes in each zone

边坡调查区域	总体边坡产状	台阶边坡产状	优势结构面组数	优势结构面产状
Ⅰ区	155°∠23°	155°∠75°	2 组	93°∠55° 121°∠56°
Ⅱ区	273°∠31°	273°∠75°	2 组	144°∠63° 52°∠45°
Ⅲ区	251°∠31°	251°∠75°	3 组	359°∠52° 97°∠57° 135°∠48°
Ⅳ区	349°∠16°	349°∠50°	3 组	72°∠90° 173°∠51° 327°∠48°
Ⅴ区	23°∠29°	23°∠75°	2 组	29°∠50° 104°∠53°
Ⅵ区	97°∠29°	97°∠75°	2 组	94°∠40° 136°∠63°

坏。Ⅴ区中优势结构面 1 倾向与坡向相同,属于外倾结构面,倾角大于总体坡面角但要小于台阶坡面角,台阶可能沿该结构面发生顺层破坏。Ⅵ区中断层F16-1



(a) Ⅰ区;(b) Ⅱ区;(c) Ⅲ区;(d) Ⅳ区;(e) Ⅴ区;(f) Ⅵ区

图 7　各分区赤平投影破坏模式分析

Fig. 7　Failure mode analysis for each sub-areas based on stereographic projection

倾向与坡向相反,对边坡稳定性影响不大;优势结构面 1 倾向与坡向相同,属于外倾结构面,倾角大于总体坡面角但小于台阶坡面角,台阶可能沿该结构面发生顺层破坏;此外,优势结构面 1 与优势结构面 2 组合面倾向坡体外部,交点位于坡面线内侧,边坡台阶存在沿 2 组优势结构面发生楔形滑动破坏的可能性。

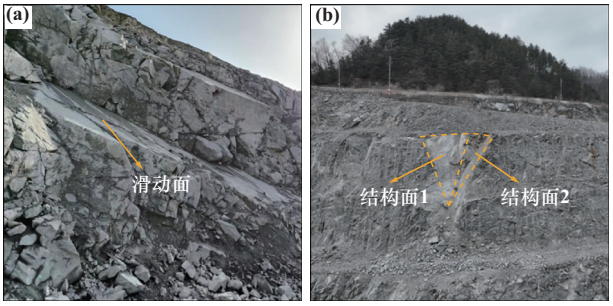
综上分析,顺层边坡及结构面组合切割岩体是边坡失稳的主要破坏形式。赤平投影结果显示,边坡整体沿层面发生大规模平面滑动的可能性较低,但局部台阶边坡存在因结构面组合而诱发楔形滑动的风险。少许台阶坡面受外倾结构面控制,易发生平面滑动失稳。

4　矿区边坡防治措施

根据以上分析,南泥湖钼矿露天边坡主要发生平面滑动和楔形滑动的破坏,如图 8 所示,需要制定相应防治措施,确保边坡稳定性。

露天矿边坡加固措施主要有三类:人工加固法,增强岩体强度法,减少滑动力+增加抗滑力法。常用的

人工加固法有削坡减载法和减重压脚法,主要目的是降低边坡滑体的自重,减少滑塌的风险;增强岩体强度法主要包括疏干排水法和注浆法,旨在提高边坡滑体的黏聚力和内摩擦角;减少滑动力+增加抗滑力法常用锚索(杆)加固法、抗滑桩法和挡墙法,主要是增强露天矿边坡的抗滑能力[14]。



(a) 平面滑动;(b) 楔形滑动

图 8 南泥湖钼矿露天边坡破坏情况

Fig. 8 Failure characteristics of open-pit slope in Nannihu Molybdenum Mine

平面滑动的主要驱动力来自滑体自重和孔隙水压力,而抗滑力主要来源于岩体强度及结构面抗剪强度。楔形滑动通常发生在 2 个或多个节理面相交形成的楔体中,其失稳机制主要受楔体自重、支撑条件及节理组合关系的控制。因此,针对平面滑动,可采用疏干排水降低孔隙水压力,并结合锚索(杆)加固提供额外抗滑力。针对楔形滑动,可采取挡土墙、护坡网等结构性加固措施,增强边坡整体约束力。同时,实时监测边坡变形和位移,及时预警潜在滑动风险、捕捉楔体变形信号,从而在边坡失稳前及时采取主动干预措施。

5 结论

1) 基于矿区现场实际工况的复杂程度,采用无人机和便携式摄影设备对岩体结构面进行调查,获取了边坡结构面产状数据,并通过人工调查进行辅助验证。结果显示,基于点云识别技术所获得的边坡岩体结构面产状数据具有较高的可靠性,可作为后续分析各分区优势结构面基础数据。

2) 通过对点云识别到的结构面数据进行聚类分析,得出了南泥湖钼矿露天边坡各分区的优势结构面组数及所对应的产状。其中,Ⅰ区、Ⅱ区、Ⅴ区和Ⅵ区均识别出 2 组优势结构面,Ⅲ区和Ⅳ区均识别出 3 组优势结构面,表明不同分区边坡岩体结构特征具有一定差异性。

3) 通过赤平投影方法研究优势结构面优势方向与边坡临空面之间的空间组合关系,结合南泥湖钼矿区边坡现场破坏事件,得出边坡的破坏模式主要为平面滑动和楔形破坏。针对 2 种破坏模式,提出了不同的边坡防治措施。

参考文献(References):

[1] 冯鸣. 高陡崖三维建模与岩体节理信息提取研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2020.
FENG Ming. Research on 3D modeling of high steep cliffs and extraction of rock mass joint information[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020.

[2] 李延超,王飞飞,姜安民,等. 含断层构造露天边坡变形破坏特征及稳定性研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):150-154.
LI Yanchao, WANG Feifei, JIANG Anmin, et al. Deformation and failure characteristics and stability of open-pit slopes with fault structure[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):150-154.

[3] 杨洋. 基于三维点云的岩体结构面识别与信息提取研究[D]. 鞍山:辽宁科技大学, 2023.
YANG Yang. Research on identification and information extraction of rock mass structural plane based on 3D point cloud[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2023.

[4] 郭登上,谢谟文,刘卫南,等. 基于三维点云的边坡岩体结构面提取方法与应用[J]. 矿业研究与开发, 2022,42(5):197-202.
GUO Dengshang, XIE Mowen, LIU Weinan, et al. Extraction method of structural plane of slope rock mass based on 3D point cloud and its application[J]. Mining Research and Development, 2022,42(5):197-202.

[5] MENEGONI N, GIORDAN D, PEROTTI C, et al. Detection and geometric characterization of rock mass discontinuities using a 3D high-resolution digital outcrop model generated from RPAS imagery-Ormea rock slope, Italy[J]. Engineering Geology, 2019,252:145-163.

[6] 葛云峰,夏丁,唐辉明,等. 基于三维激光扫描技术的岩体结构面智能识别与信息提取[J]. 岩石力学与工程学报, 2017,36(12):3050-3061.
GE Yunfeng, XIA Ding, TANG Huiming, et al. Intelligent identification and extraction of geometric properties of rock discontinuities based on terrestrial laser scanning[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017,36(12):3050-3061.

[7] 宋琨,仪政,宋琪. 基于无人机 3D 点云的高陡斜坡岩体结构特征[J]. 长江科学院院报, 2024,41(5):103-107.
SONG Kun, YI Zheng, SONG Qi. Rock mass structure model of high and steep slope based on unmanned aerial vehicle 3D point cloud[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2024,41(5):103-107.

[8] KIM D H, GRATCHEV I, BALASUBRAMANIAM A. Back analysis of a natural jointed rock slope based on the photogrammetry method[J]. Landslides, 2015,12(1):147-154.

[9] 王智佼,李勇,尹健斌,等. 节理裂隙对露天采场陡倾边坡稳定性的影响研究[J]. 金属矿山, 2023(10):196-204.
WANG Zhijiao, LI Yong, YIN Jianbin, et al. Influence of joints and fissures on the stability of steep slopes in open-pit stopes[J]. Metal Mine, 2023(10):196-204.

(下转第 27 页)

WANG Zhongyu, JIANG Yongchao, JIA Ruotong, et al. Failure law of rock masses in transition from open-pit to underground mining in Yanqianshan iron mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(1):14-20.

[5] 蒙齐,吴彩燕,曾特林,等. 融合时序 InSAR 与 MIDAS 的露天边坡稳定性分析及预测[J]. 金属矿山, 2024(10):216-223.
MENG Qi, WU Caiyan, ZENG Telin, et al. Analysis and prediction of slope stability in open-pit mines by integrating time series InSAR technique and MIDAS[J]. Metal Mine, 2024(10):216-223.

[6] 耿加波,兰祥,李小双,等. 基于 MatDEM 的露天转地下房柱法开采覆岩与边坡失稳规律研究[J]. 金属矿山, 2024(8):177-182.
GENG Jiabo, LAN Xiang, LI Xiaoshuang, et al. Study on the law of overlying rock and slope instability in open-pit to underground room-pillar mining based on MatDEM[J]. Metal Mine, 2024(8):177-182.

[7] 孙书伟,杨肇熙,贾培智,等. 煤矿地下采空区沉陷诱发边坡破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2025,44(6):1405-1419.
SUN Shuwei, YANG Zhaoxi, JIA Peizhi, et al. Study on failure mechanism of slopes induced by the underground coal mining subsidence[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(6):1405-1419.

[8] 姜安民,董彦辰,江学良,等. 露天转地下开采引起露天采场边坡垮塌数值模拟研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(3):14-17.
JIANG Anmin, DONG Yanchen, JIANG Xueliang, et al. Numerical simulation of open pit slope collapse caused by transition from open pit to underground mining[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(3):14-17.

[9] 李延超,王飞飞,姜安民,等. 含断层构造露天边坡变形破坏特征及稳定性研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):150-154.
LI Yanchao, WANG Feifei, JIANG Anmin, et al. Deformation and failure characteristics and stability of open-pit slopes with fault structure[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):150-154.

[10] 李小双,王运敏,赵奎,等. 金属矿山露天转地下开采的关键问题研究进展[J]. 金属矿山, 2019(12):12-20.
LI Xiaoshuang, WANG Yunmin, ZHAO Kui, et al. Research progress on the key problems in transition from open-pit to underground mining for metal mines[J]. Metal Mine, 2019(12):12-20.

[11] 赵海军,马凤山,郭捷,等. 龙首矿露天转地下开采对边坡岩体稳定性的影响[J]. 煤炭学报, 2011,36(10):1635-1641.
ZHAO Haijun, MA Fengshan, GUO Jie, et al. Effect of open-pit to underground mining on slope stability in Longshou Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2011,36(10):1635-1641.

[12] 陈金龙,饶运章,郑越,等. 基于 Rhino 的大型复杂地质体计算模型建模方法[J]. 矿业研究与开发, 2019,39(11):151-154.
CHEN Jinlong, RAO Yunzhang, ZHENG Yue, et al. A calculation model construction method of large complex geological body based on Rhino[J]. Mining Research and Development, 2019,39(11):151-154.

[13] HOEK E, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(8):1165-1186.

[14] 张姝婧. 露天转地下连续干式充填开采及其对地表岩移影响[D]. 沈阳:东北大学, 2022.
ZHANG Shujing. Continuous dry filling mining from open pit to underground and its influence on surface rock movement[D]. Shenyang: Northeastern University, 2022.

[15] 杜晓丽,马芹永,宋宏伟,等. 煤矿层状岩体压力拱演化规律的相似模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2017,13(2):381-386.
DU Xiaoli, MA Qinyong, SONG Hongwei, et al. Simulation on evolution characteristics of the pressure arch in bedded rock at coal mining[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017,13(2):381-386.

引用本文:刘吉祥,赵钺,沈彦丞,等. 龙首矿露天转地下开采边坡岩体稳定性研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(2):21-27.
LIU Jixiang, ZHAO Yue, SHEN Yancheng, et al. Stability of slope rock mass during transition from open-pit to underground mining in Longshou Mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(2):21-27.

(上接第 20 页)

[10] JABER J, CONIN M, DECK O, et al. Investigation of themechanical behavior of 3D printed polyamide-12 joints for reduced scale models of rock mass[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020,53(6):2687-2705.

[11] MENEGONI N, GIORDAN D, PEROTTI C. Anopen-source algorithm for 3D rock slope kinematic analysis (ROKA)[J]. Applied Sciences, 2021,11(4):1698.

[12] KULATILAKE P H S W, WANG L Q, TANG H M, et al. Evaluation of rock slope stability for Yujian River dam site by kinematic and block theory analyses[J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(6):846-860.

[13] 熊爽,胡斌,姚文敏. 露天石灰石矿山岩质边坡坡角优化设计研究[J]. 矿冶工程, 2018,38(4):32-35.
XIONG Shuang, HU Bin, YAO Wenmin. Optimization design for rock slope angle in open-pit limestone mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2018,38(4):32-35.

[14] 韩光. 露天矿顺层岩质高边坡稳定性及安全控制关键技术研究[D]. 北京:北京科技大学, 2017.
HAN Guang. Study on key technologies of stability and safety control of bedding rock high slope in open pit mine[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017.

引用本文:李家东,赵旭阳,杜坤,等. 基于点云识别技术的露天矿边坡岩体结构面产状与破坏模式研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(2):15-20.
LI Jiadong, ZHAO Xuyang, DU Kun, et al. Research on occurrence and failure modes of rock mass structural planes in open-pit slopes based on point cloud recognition technology[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(2):15-20.