

Rhino-FLAC^{3D}耦合下的某露天矿高陡岩质边坡稳定性分析

江松^{1,2,3}, 李小普^{1*}, 毛晶⁴, 饶彬舰⁵, 张存良¹, 张超⁶, 王洛锋⁶

1. 西安建筑科技大学资源工程学院, 陕西 西安 710055;
2. 中国矿业大学煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 江苏 徐州 221116;
3. 金属矿山安全与健康国家重点实验室, 安徽 马鞍山 243000;
4. 西安优迈智慧矿山科技有限公司, 陕西 西安 710055;
5. 西安建筑科技大学管理学院, 陕西 西安 710055;
6. 洛阳栾川钼业集团股份有限公司, 河南 栾川 471000



摘要:随着露天矿山开采深度持续增加,高陡岩质边坡的稳定性问题愈发突出,传统的稳定性分析方法在复杂地质条件下存在明显局限性。以某露天矿高陡岩质边坡作为研究对象,提出了一种基于点云数据与Rhino-FLAC^{3D}耦合的稳定性分析方法。首先,采用无人机贴近摄影测量技术,结合SIFT、SFM和MVS技术获取并生成边坡稠密点云;其次,基于处理后的点云数据,利用Rhino软件构建边坡三维几何模型;最后,将模型导入FLAC^{3D}进行分层处理并开展数值模拟,分析边坡的位移分布和应力集中特征,识别出潜在失稳区域,同时计算出安全系数为1.041,该边坡已接近极限稳定状态,与传统分析方法相比,本文方法的分析精度得到显著提升。基于分析结果,提出针对性的边坡防护加固措施。研究表明:所提出的基于点云数据与Rhino-FLAC^{3D}耦合的建模方法能够有效捕捉边坡的细微几何特征和不连续性,可显著提高边坡三维模型的精度,进而获得更可靠的数值模拟计算结果,可满足高陡岩质边坡稳定性分析的工程需求。

关键词:露天矿;高陡岩质边坡;稠密点云;Rhino-FLAC^{3D}耦合;三维建模;稳定性分析

中图分类号:TD32 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2026)03-0674-13 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2026.03.285
引用格式:江松,李小普,毛晶,等.Rhino-FLAC^{3D}耦合下的某露天矿高陡岩质边坡稳定性分析[J].黄金科学技术,2026,34(3):674-686. JIANG Song, LI Xiaopu, MAO Jing, et al. Stability Analysis of High-steep Rock Slope in an Open-pit Mine Using Rhino-FLAC^{3D} Coupling[J]. Gold Science and Technology, 2026, 34(3): 674-686.

露天开采是我国矿产资源开发的主要方式,为我国煤矿、铁矿和有色金属等矿产资源的稳定供应提供了重要支撑。然而,随着矿山开采规模的不断扩大和开采深度的持续增加,露天矿边坡蠕滑区滑塌等地质灾害事故频发,导致边坡失稳,进而造成严重的人员伤亡和财产损失(郭隆基等,2023)。据

不完全统计,在我国露天矿山中,不稳定边坡或具有滑坡隐患的潜在不稳定边坡占边坡总长度的15%~20%,部分矿区甚至高达30%(于庭安等,2008)。因此,边坡工程的稳定性分析一直是矿业工程领域的研究热点。

目前,岩质边坡稳定性分析方法众多,大致可

收稿日期:2025-09-30;修订日期:2026-02-13

基金项目:国家自然科学基金项目“露天金属矿高陡岩质边坡采动裂隙超视距智能识别与演化防控机制研究”(编号:52374136)、中国矿业大学煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室开放研究课题项目(编号:SKLCRSM23KF010)和陕西省重点研发计划项目“基于数据驱动的露天矿高陡岩质边坡智能识别与演化预警研究”(编号:2024GX-YBXM-495)联合资助

作者简介:江松(1990—),男,江西上饶人,教授,博士生导师,从事矿山边坡智能化研究工作。E-mail:jiangsong@xauat.edu.cn

*通信作者:李小普(2000—),男,陕西安康人,硕士研究生,从事矿山边坡智能化研究工作。E-mail:1563379252@qq.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

划分为定性分析和定量分析两大类。其中,定量分析法又划分为确定性分析方法和不确定性分析方法(靳付成,2007);定性分析法主要适用于简单地质条件下的边坡分析,但其受方法本身局限性制约,难以对复杂地质条件下的边坡进行准确、有效的稳定性分析。因此,针对几何形态与地质条件复杂、坡度动态变化的边坡,需采用其他方法进行研究。赵昌鑫(2020)将可靠度理论与极限平衡法耦合,对金堆城露天矿西帮高陡边坡开展稳定性分析;胡接枝(2022)和张飞等(2012)分别采用简化Bishop法和Sarima法精准求解露天矿边坡安全系数,并进行稳定性影响因素敏感性分析;Liu et al (2017)采用多种动力算法对露天矿边坡进行了动力稳定性评价,并明确了各方法的适用范围。在露天矿边坡稳定性评价与数值模拟分析方面,侯克鹏等(2021)提出基于改进FAHP-CRITIC法博弈赋权与正态云模型的边坡危险性评估方法,构建了相应的危险性评估体系;曹仁举等(2020)和Li et al (2015)基于模糊数学理论对多因素影响下的露天矿边坡稳定性进行综合分析评价;还有学者借助FLAC 3D、3D Mine等数值模拟平台,结合多种算法实现了不同工况下露天矿边坡的稳定性分析(何旭等,2021;杨溢等,2025;马勤为等,2025)。

在数据获取和三维模型构建方面,刘汉龙等(2021)指出高分卫星遥感、无人机航测和机载激光雷达测量等新型数据获取技术可大幅提升地质数据的采集精度;Peng et al (2024)和Qin et al (2025)通过融合无人机摄影与三维激光扫描技术,构建了高精度三维地质模型;邓彪等(2024)依托车载激光雷达获取的点云数据,搭建了露天矿场景三维模型。

综上所述,现阶段岩质边坡稳定性分析的理论和方法已取得丰硕成果且日趋完善,但现有研究成果多集中于缓倾边坡,针对高陡岩质边坡稳定性分析的研究相对匮乏。同时,高陡边坡模型构建的数据源存在模糊性、模型与实际边坡适配性不足等问题,易导致分析结果出现偏差。

本文针对高陡边坡模型构建中的数据源模糊性问题,结合国内外相关研究成果,采用无人机贴近摄影这一非接触式测量技术,获取边坡坡面的点云数据,将处理后的点云数据与Rhino-FLAC^{3D}耦合

建模技术结合开展数值模拟,并利用三维有限差分法对边坡稳定性进行分析。

1 工程概况

三道庄钼(钨)矿床位于华北板块南缘构造带与北秦岭板内增生带北侧的衔接部位(图1),地处马超营断裂带与栾川断裂带之间。矿床位于南庄口—三道庄岭箱状背斜区域,区内构造以NW-NW向断裂为主,其次为NNE向断裂。矿区出露地层为新元古界栾川群三川组、南泥湖组和煤窑沟组,为一套浅海相碎屑岩—火山喷发岩—碳酸盐类沉积变质岩系(罗毅甜等,2020)。

本次研究的主要地层为南泥湖组下段(Pt_3n^1)的毕家尖下方采场边坡,该区域地层根据岩性组合可划分为3个岩性段,研究区主要出露南泥湖组下段和中段下部地层。

南泥湖组下段:以石英岩为主,与绢云母片岩呈互层状分布。经角岩化作用改造后,形成石英角岩、长英角岩夹黑云母长英角岩,底部局部区域与薄层石英黑云母片岩呈互层状分布,具体岩性特征分述如下:

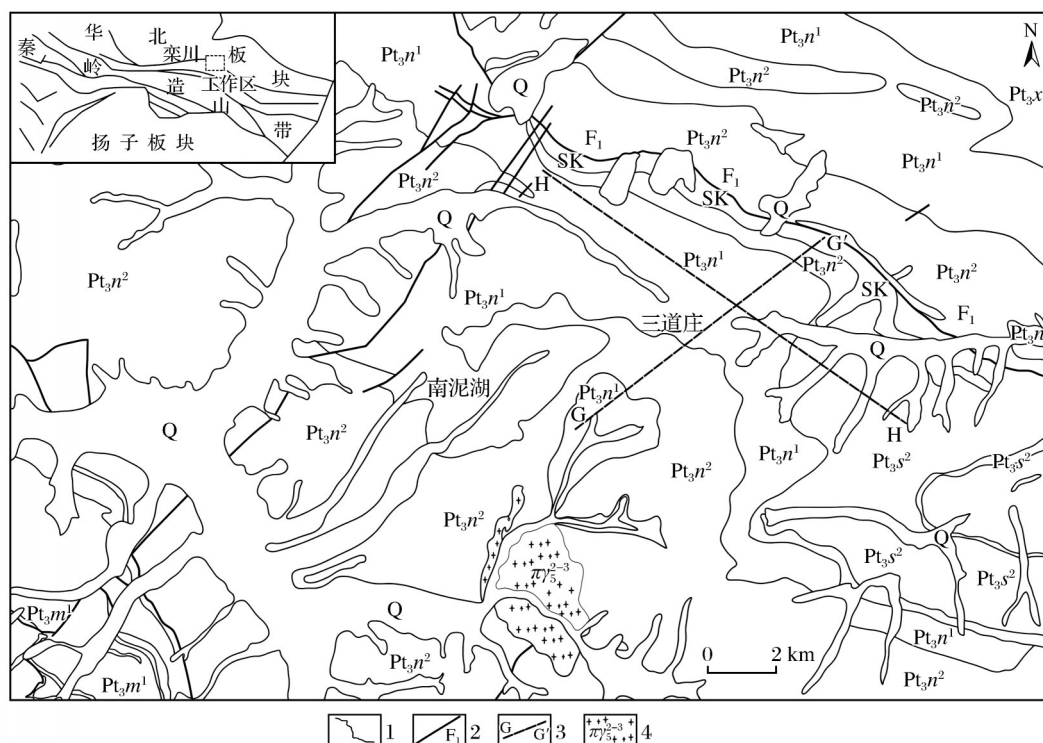
薄—中厚层状石英岩夹长英角岩:岩石呈灰白色,风化后表面为土黄色,具变余砂状结构和块状构造。主要由石英或石英、斜长石组成,含少量黑云母、绢云母、磁黄铁矿、黄铁矿、辉钼矿及微量矿物(托玛琳石、锆英石和榍石等)。该层岩石在三道庄岭一带以石英岩为主,常夹薄层黑云母长英角岩,沿岩层面波痕发育,岩性沿走向变化较大,常渐变为黑云母长英角岩,如从三道庄岭向东至鹅鱼岭南、向西至南泥湖带,石英岩厚度逐渐变薄,而长英角岩和含黑云母长英角岩厚度则逐渐增大。

受褶皱作用的影响,区内岩层产状变化显著,其倾斜方位涵盖NE、NW和SW向,倾角集中在 $50^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 。岩石节理和裂隙发育,构造有利部位可进一步成矿并形成工业矿体,构成次生含矿层;三道庄矿区该含矿层大多已发生氧化,厚度为80~120 m。

毕家尖下方采场边坡为内凹型边坡,边坡朝向由 93° 向 180° 过渡。区内边坡顶部标高为1 575 m,靠帮水平为1 330 m,终了坑底标高为1 198 m,整体边坡角约为 49° ,终了边坡最大垂直高度为377 m。

区内出露岩体从上至下依次为石英岩、斜长石透辉石角岩和矽卡岩。岩层总体呈切坡向展布,受向斜构造的影响,岩层倾角变化剧烈。区域内整体可能发生沿不连续面追踪的折线形滑动。本研究选取标高 1 282~1 574 m 段边坡作为研究对象,将该段矿体划分为 2 层:标高 1 282~1 365 m 段为透辉石斜长石角岩,标高 1 365~1 574 m 段为石英岩。

该段边坡上部(1 390 m 以上)节理组发育特征见图 2,区域内发育 4 组节理,可能沿 J2 节理发生平面滑动破坏,但因 J2 节理倾角较陡,平面滑动破坏仅发生于台阶边坡表层,J1-J2 节理组合可能引发楔形体破坏,区域无弯曲倾倒破坏现象,J3-J4 和 J3-J1-1 节理组合可能产生直接倾倒破坏,但因 J4 和 J1-1 节理发育较差,因此区域不易发生倾倒破坏。



Q-黄土、黏土及砂卵石层;Pt₃m¹-煤窑沟组下段;Pt₃n²-南泥湖组中段;Pt₃n¹-南泥湖组下段;Pt₃s²-三川组上段;Pt₃s¹-三川组下段;
πγ₅²⁻³-斑状二长花岗岩;SK-矽卡岩;1.地质界线;2.断层;3.实测剖面;4.斑状二长花岗岩

图 1 南泥湖—三道庄钼(钨)矿床地质简图(修改自河南省地质局第一地质调查队,1980)

Fig. 1 Geological map of the Nannihu-Sandaozhuang Mo(Wu) deposit (modified after First Geological Survey Team of Henan Provincial Geological Bureau, 1980)

2 无人机点云数据处理及边坡模型构建

2.1 测试方案

选用大疆 Phantom 4RTK 四旋翼无人机对矿山边坡分区开展低空摄影测量。无人机测量系统主要由传感器、云台、镜头和遥控器等组成,系统主要技术参数如表 1 所示。

在测量作业过程中,无人机三维航线的合理规划至关重要。无人机飞行时需动态调整飞行高度,确保与地面物体的垂直距离基本保持恒定,该距离

通常控制在 5~50 m 为宜。该飞行策略可有效保证数字图像地面分辨率(Ground Sampling Distance, GSD)的一致性[图 3(a)]。同时,由于飞行距离较近,GSD 值处于较低水平,使得图像细节更丰富,可大幅提升测量的精度和真实性(符锐,2022)。

本研究将无人机飞行高度设定为距地表约 50 m,航向与旁向重叠率均设为 75%。相机聚焦、光圈等参数依据实时光照条件优化配置,以实现最佳成像效果。在航线规划过程中,优先规避地形障碍物,在保障飞行安全的前提下,力求实现毕家尖

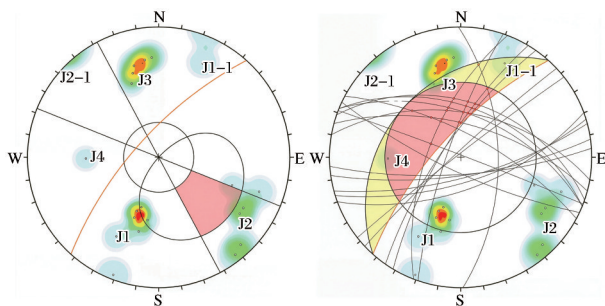


图2 毕家尖下方边坡1390 m以上赤平投影图
Fig. 2 Stereographic projection maps of the slope below Bijiajian at elevations above 1390 m

下方边坡区域的全面覆盖,通过改进的波前算法[式(1)]生成飞行轨迹[图3(b)],同时确保相邻影像具备充足的重叠区域。

$$\min_P \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i} + \lambda \cdot \theta_i \right) \tag{1}$$

表1 无人机参数
Table 1 Parameters of UAV

无人机部件	参数	参数值
大疆 Phantom 4RTK	重量	1.391 kg
	定位精度	垂直:1.5 cm;水平:1 cm
	最大倾斜角度	定位模式:25°;姿态模式:35°
	最大上升速度	自动飞行:6 m/s;手动操控:5 m/s
	最大水平速度	定位模式:50 km/h;姿态模式:58 km/h
	续航时间	30 min
	传感器	1英寸CMOS
相机	镜头	焦距:8 mm/24 mm;光圈:f/2.8-f/11
	总像素	2 048 万
	快门速度	机械:8-1/2000s;电子:8-1/8000s
	照片最大分辨率	4:3:4 864×3 648;3:2:5 472×3 648
	有效画幅	5 472×3 468

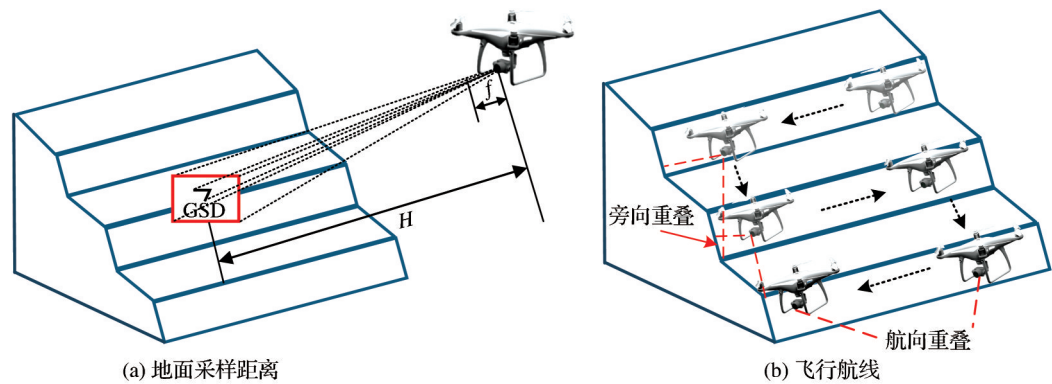


图3 地面采样距离(GSD)及飞行航线示意图
Fig. 3 Ground Sampling Distance (GSD) and flight route diagram

式中: d_i 为拍摄距离; θ_i 为相机倾斜角; λ 为平衡系数。

2.2 点云数据获取及处理

无人机操作见图4(a)、4(b)。受篇幅限制,本文仅针对该矿毕家尖下方采场边坡(标高1 282~1 574 m段)展开详细分析[图4(c)、4(d)]。为获取高精度的边坡地质信息,需对采集的点云数据进行系列处理,核心步骤包括4个方面:数据预处理、SIFT(尺度不变特征变换)图像关键点提取(李波等,2025)、SFM(从运动恢复结构)稀疏点云重构(胡露太等,2024)和MVS(多视图立体视觉)稠密点云重构。

(1)数据预处理:完成相机内部参数标定(含焦距、坐标和镜头畸变等),同时对采集图像的清晰度和完整性进行检验与筛选。

(2)图像关键点提取匹配:关键点为图像中具

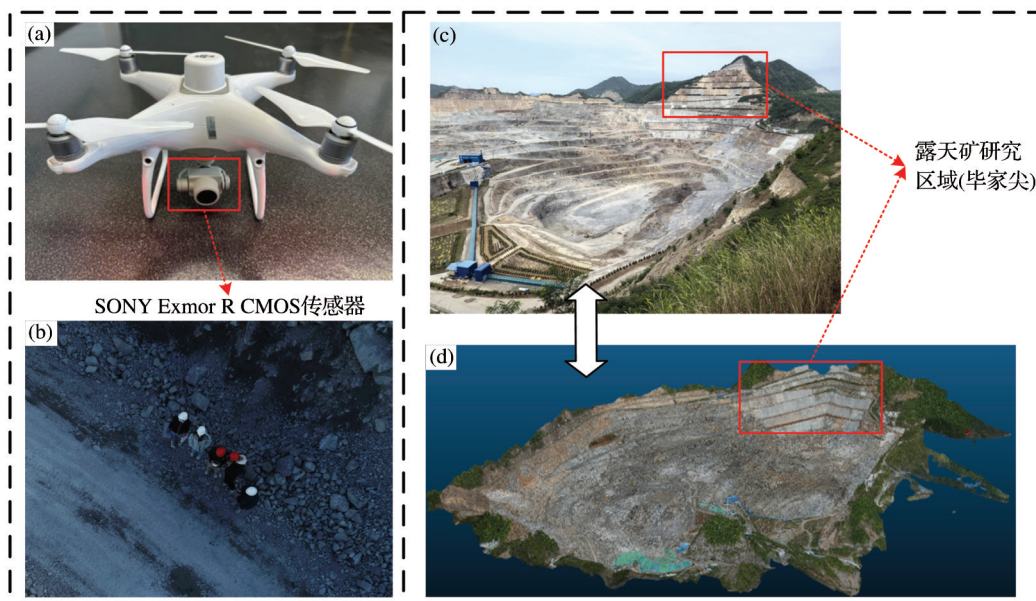


图4 无人机操作及露天矿研究区域

Fig. 4 UAV operation and open-pit mine research area

有独特视觉特征的像素点,如角点、纹理丰富区域等,SIFT算法用于从图像中提取关键点并进行特征描述,能够识别、匹配不同图像中的关键点。该算法提取特征点时具有图像旋转、平移、缩放以及仿射不变型和一定的抗光照强度及视角变化能力(沙鹏等,2022),具体步骤如下:

①尺度空间构建。通过高斯滤波对原始图像进行卷积操作,构建尺度空间:

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * P(x, y) \quad (2)$$

式中: $L(x, y, \sigma)$ 为尺度空间中的图像; (x, y) 为图像中的一个像素位置; $G(x, y, \sigma)$ 为高斯核函数, σ 为尺度参数,用于控制高斯滤波的幅度; $P(x, y)$ 为原始图像数据。高斯核函数 $G(x, y, \sigma)$ 定义为

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

该函数主要用于对图像数据进行卷积变换,以生成不同尺度下的图像表达序列。

②极值点检测。在构建的尺度空间中进行极值点检测,将检测出的极值点作为特征点候选。首先,对相邻尺度的高斯滤波结果进行差分运算,得到高斯差分函数(DoG);其次,在DoG函数的三维空间 (x, y, σ) 中搜索局部极大值点和极小值点。高斯差分函数(DoG)表示为

$$D(x, y, \sigma) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \quad (4)$$

③特征点精确定位与筛选。对 $D(x, y, \sigma)$ 进行二阶泰勒展开,实现极值点位置的亚像素级精确定位;通过自适应Harris角点检测算法(李冰等,2019)过滤边缘不稳定点,完成特征点的筛选。 $D(x, y, \sigma)$ 表示为

$$D(x) = D + \frac{\partial D}{\partial x} \Delta x + \frac{1}{2} \Delta x^T \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} \Delta x \quad (5)$$

式中: $x = (x, y, \sigma)^T$ 为极值点坐标; Δx 为偏移量。

④特征点匹配。以特征点为中心,沿主方向旋转建立局部坐标系,在特征点邻域内计算各点的特征向量。随后,在特征点匹配阶段,本文的关键改进点为:引入无人机机载RTK-GPS/IMU获取的高精度位置与姿态信息作为强约束,构建精确的图像拓扑结构,在该强约束引导下,采用KD-Tree算法(陈紫超等,2025)计算图像间特征点的对应关系,并结合RANSAC算法进行优化,最终完成特征点精准匹配。

(3)SFM稀疏点云重构与MVS稠密点云重构

基于上述匹配完成的特征点,通过SFM技术计算相机位姿并生成稀疏三维点云,进一步采用MVS技术开展稠密点云重建,通过多视角图像深度信息的匹配、融合,生成高精度的边坡稠密三维点云。

经上述步骤处理后,毕家尖下方采场边坡(标高1 282~1 574 m段)共生成点云数量20 421 888个

(图5),为后续边坡三维建模和稳定性分析提供高精度的数据支撑。

2.3 Rhino 边坡三维模型构建

基于获取的边坡稠密点云数据,结合 Rhino 软

件开展边坡三维模型构建,通过精确的几何建模为后续边坡稳定性数值模拟分析提供可靠的技术支撑。首先将点云数据转换为 .txt 格式文件,后续具体步骤如下:

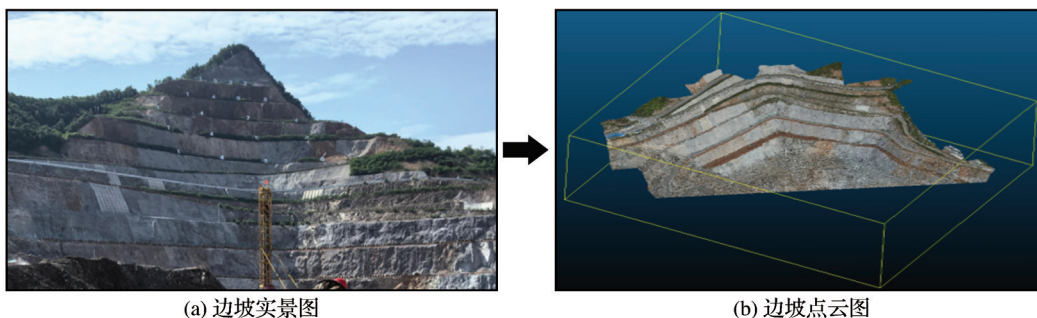


图5 处理后的点云数据

Fig. 5 Processed point cloud data

通过 Rhino 软件“曲面→嵌面”工具,基于点云生成边坡网格表面,关键参数设置为:取样点间距(M)=1(避免因间距过大导致模型失真)、曲面(U)、(V)方向跨距数均为2(保证曲面曲率与边坡实际形态贴合,参数值过大会增加后续网格划分与数值计算负荷)、硬度(F)=1(硬度过高会导致曲面过度平滑,无法贴合边坡原始地质形态)。建模过程中注重图层规范化管理(如单独建立“点云”图层),保持工作区整洁,并通过绘制轮廓线挤出形成三维实体,再利用切割工具对模型边界进行修剪处理。对于模型中的相交对象,采用布尔运算分割进行组合重构。图6(a)中,H、P、V、W分别为三维模型的顶视图、透视图、前视图和右视图。通过二维视图绘制并着色断面,利用双轨扫掠工具沿2条路径同步移动截面轮廓,构建具有特定曲率变化的三维几何形态[图6(b)、6(c)],该过程中需不断调整更改合适断面,优化双轨扫掠效果,最终生成符合工程实际的边坡三维几何模型[图6(d)]。后续利用 Rhino 专用插件 Griddle 对 .3dm 格式的几何模型进行网格划分,并导出 .f3grid 格式网格文件,将该文件导入 FLAC^{3D} 软件后,即可得到边坡稳定性数值计算模型。

3 FLAC^{3D} 三维数值模拟分析

FLAC^{3D} 是岩土工程有限差分数值模拟领域的经典软件,该软件采用显式拉格朗日算法与混合—

离散分区技术,在处理非线性大幅形变问题、模拟岩石沿弱面的滑动变形方面具有显著优势,适用于各类地质条件复杂的工况场景(刘彦鹏,2024)。

Duncan(1996)指出,边坡安全系数的本质为边坡达到临界破坏状态时,岩土体剪切强度的折减程度。通过逐步降低抗剪强度参数,即将黏聚力(c)、内摩擦角(φ)按折减系数(K)进行同步调整,得到修正后的强度参数 c' 和 φ' ,通过迭代计算模拟边坡从初始稳定状态至临界失稳状态的全过程,此时对应的折减系数 K 即为边坡的安全系数。

$$\begin{cases} c' = c/K \\ \varphi' = \arctan(\tan \varphi / K) \end{cases} \quad (6)$$

在基于弹塑性有限差分法的边坡稳定性分析中,采用该渐进式强度折减策略进行数值模拟时,首先选取较小的初始折减系数 K 进行弹性阶段计算,随后逐步增大 K 值开展多工况弹塑性分析,直至边坡达到临界失稳状态。强度折减法的优势是可直接通过强度折减系数确定边坡安全系数,能够动态捕捉边坡渐进破坏过程中塑性区的演化规律,自动识别潜在滑动面的形态与空间位置。

本文以毕家尖下方采场的实际地质条件为工程背景,采用 FLAC^{3D} 数值模拟软件,对标高 1 282~1 574 m 段露天边坡自然工况下的稳定性开展研究。

3.1 模型设置

本次数值模拟的三维模型分组如图7所示。

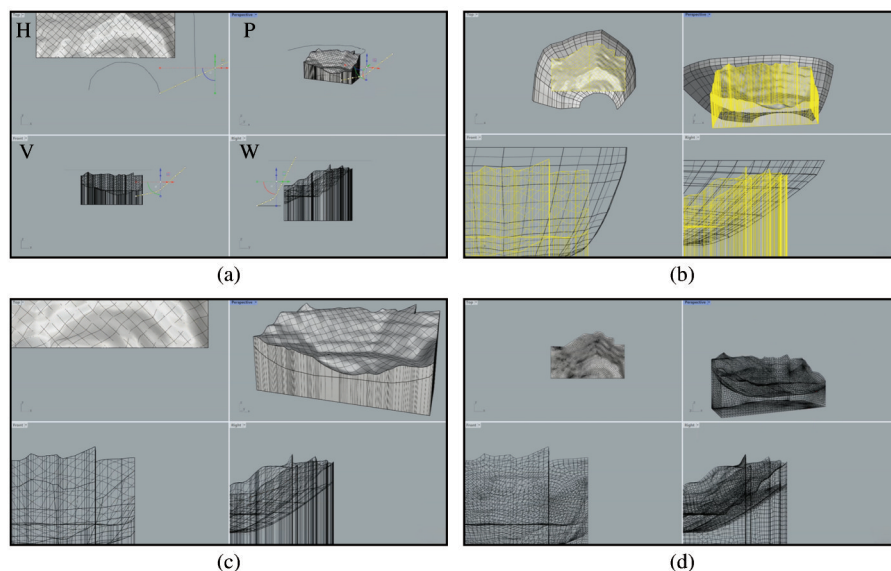


图6 在不同断面进行双轨扫掠

Fig. 6 Double track sweep in different sections

Group“ZG_001”为标高1 282~1 365 m段(透辉石斜长石角岩层),Group“ZG_002”为标高1 365~1 574 m段(石英岩层)。该三维模型由四面体单元构成,尺寸为1 600 m×600 m×500 m(长×宽×高),共包含25 183个节点,126 606个单元。

该模型初始地应力场由岩土体自重形成,初始状态下边坡稳定且无初始位移。模型左右边界约束X方向位移,允许Y、Z方向位移;前后边界约束Y方向位移,允许X、Z方向位移;迭代步长 $\Delta t=7.1 \times 10^{-7}$ s,总步数 $N=20\ 540$ 。

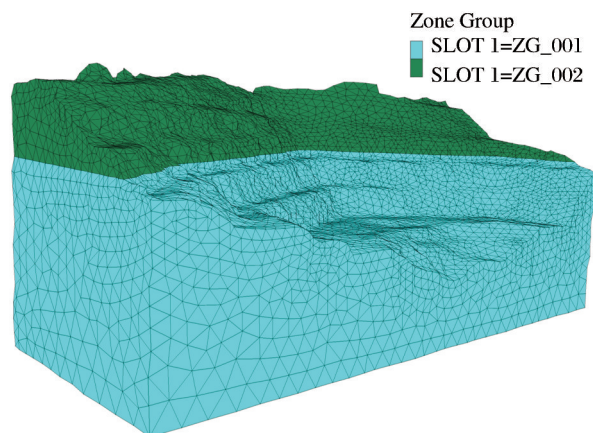


图7 数值模拟三维模型分组

Fig. 7 Numerical simulation of three-dimensional model grouping

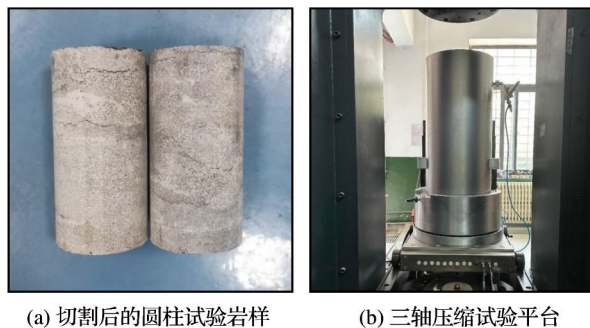
3.2 本构关系的选取

在岩土力学数值模拟中,常用的本构模型准则包括 Mises 准则、Tresca 准则、Druker-Prager 准则和 Mohr-Coulomb 准则等。在众多本构模型中, Mohr-Coulomb 准则因其物理参数易获取并能够较好地反映岩土材料的力学特性,在岩土工程实际应用中被广泛采用。本研究选择 Mohr-Coulomb 准则作为数值模拟的本构模型,通过该准则描述岩土颗粒间挤压和摩擦现象,更准确地模拟边坡在自然应力条件下的破坏和塑性形变过程。

3.3 岩石力学参数确定

针对毕家尖下方采场上述两段标高层位,采用岩芯钻机进行垂直钻孔(与水平方向呈 90°),分别钻取透辉石斜长石角岩和石英岩地层的岩芯,将采集的岩芯通过岩芯切割机切割加工为标准圆柱试验岩样,岩样规格如下:直径为50 mm,高度为100 mm(50 mm×100 mm),如图8(a)所示。通过三轴压缩试验平台模拟地下深部的应力条件,对岩样施加轴向与径向荷载,使其发生压缩破坏,如图8(b)所示。将2种岩性的圆柱试验岩样分别分组,开展三轴压缩试验。

经过上述试验,通过反分析计算与工程地质类比法相结合的方式,综合确定岩体物理力学参数,其余参数参考相关工程经验进行选取。在数值计



(a) 切割后的圆柱试验岩样 (b) 三轴压缩试验平台

图8 切割后的圆柱试验岩样和三轴压缩试验平台
Fig. 8 Cylindrical test rock samples after cutting and triaxial compression test platform

算过程中,岩体均采用不饱参数。计算参数详见表2。

3.4 模拟结果与分析

(1) 位移模拟分析

由图9(a)所示的模拟结果可知,边坡在临界失稳状态 $K=F_s$ 时的位移量级,从最小位移约0.108 mm(蓝色区域)到最大位移约14.614 mm(红色区域)。颜色梯度从蓝色(最小位移,接近-0.23 mm)到红色(最大位移)直观地展示了位移的空间分布特征。位移分布图显示,边坡顶部边缘区域的位移最大,存在潜在的失稳风险。

在进行实际的岩土工程分析时,往往需要综合考虑 X 、 Y 、 Z 方向的位移剖面特征,以便实现对边坡失稳风险的全面、精准评估。图9(b)显示边坡在 X 方向上的最大正向位移约为2.89 mm,这一位移主要集中在顶部区域,相比之下,底部区域的位移较小,表明边坡的顶部可能是潜在的失稳区域。如图9(c)所示,边坡在 Y 方向上的最大正向位移约为0.113 mm,而最大反向位移达到-8.2615 mm,其中,边坡顶部边缘区域呈现出正向位移,而底部中心区域则出现显著的反向位移,说明边坡底部中心存在潜在失稳风险。图9(d)展示了边坡在 Z 方向上的位移情况,最大正向位移为6.5024 mm,最大反向位移为-14.602 mm,从图中可以看出,边坡顶部边缘区域的向上位移最大,而底部左侧区域的向下位移最为显著,反映出该区域存在潜在失稳风险。

综合多维度位移特征分析,并结合区域位移幅度,进一步表明边坡上部位移变化显著,需要重点关注。图10所示为该区域位移三维立体云图(含位移矢量),由图10可知,边坡潜在滑移面主要分布于大位移的红色区域与中低位移的黄色和绿色区域交界处,在滑移面附近,通常能观察到位移突变特征。

表2 岩体物理力学特性参数

Table 2 Physical and mechanical properties parameters of rock mass

岩体	天然密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	抗拉强度/MPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	黏聚力 C/MPa	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ
透辉石斜长石角岩	2.84	7.55	59.73	14.98	68.30	0.10
石英岩	2.80	3.23	39.60	5.12	16.47	0.33

图11和图12分别为边坡在 X 、 Y 和 Z 方向上3个固定点处的History变量监测情况,它们展示了在模拟过程中不同位置的位移随计算步数的变化情况。以全局点g-p 1195处为例,在 X 方向上,位移曲线呈明显波动趋势,位移值在初始阶段快速上升,达到峰值后有所回落,随后再次上升并趋于稳定。这反映出该位置在模拟过程中可能受自然工况下内部多种复杂应力耦合的作用,导致位移变化较为复杂。在 Y 方向上,位移曲线波动幅度处于较小阈值内,位移值全程变化微弱,表明该位置 Y 方向位移整体保持相对稳定。在 Z 方向上,位移曲线呈显著下降趋势,降至最低点后略有回升并趋于稳定,反映该位置在模拟过程中发生较大幅度位移,可能

是由于内部应力重分布或坡体局部破坏所致。

(2) 安全系数计算

由图13可知,当折减系数 K 增大至1.041时,FLAC^{3D}数值计算无法达到平衡状态,边坡模型内的最大剪切应变增量区(可等效为塑性区)从坡脚至坡顶完全贯通,形成连续滑移面,标志着边坡进入失稳状态。边坡的位移量为0~14.905 mm,其中最大位移集中在边坡顶部的红色区域,计算得到边坡整体安全系数为1.041。结合孙玉科等(1988)和殷跃平等(2018)的研究成果及国内外露天矿边坡设计经验,矿山边坡稳定性安全系数通常取值为1.05~1.60。其中,邻近重要基础设施(如铁路、公路和输油管道等)、人口密集区以及对矿区生产安全

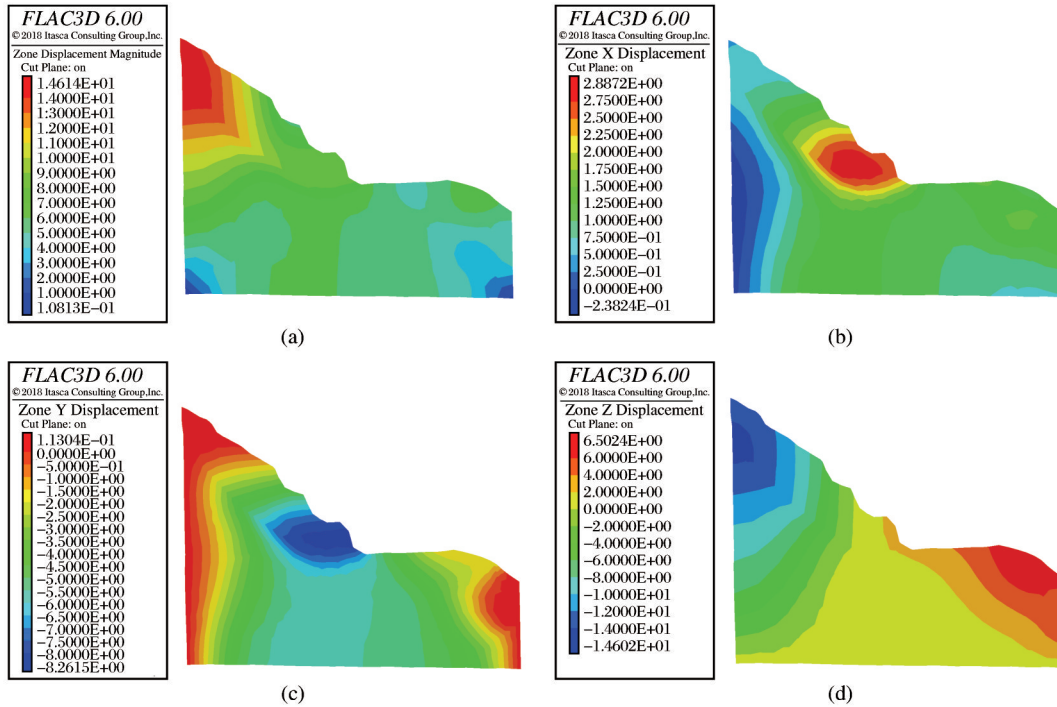


图9 各剖面位移量级模拟图

Fig. 9 Displacement magnitude simulation diagram of each section

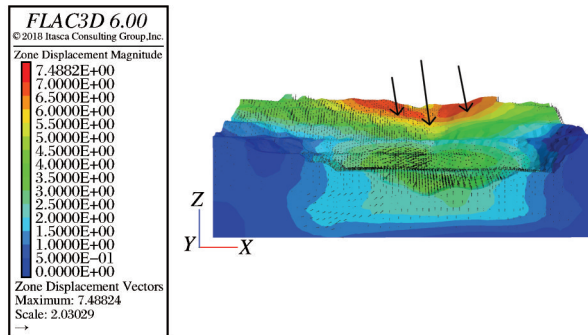


图10 区域位移三维立体云图

Fig. 10 Three-dimensional cloud map of regional displacement

具有重大影响的关键部位等重要边坡工程,其设计安全系数建议取值1.25~1.50。本次计算所得安全系数低于露天矿边坡设计最低限值,表明该边坡已接近极限稳定状态,位移集中区域为边坡核心潜在失稳区域,需作为工程防护的重点部位。

(3) 计算结果对比

由图14可知,传统建模方法采用的二维拉伸模型无法完整表征边坡的细微几何特征,该偏差会直接传递至数值模拟环节,导致边坡应力分布与潜

在滑移面计算结果出现误差。传统方法计算所得安全系数与本文方法相差0.04,充分体现了模型精度对边坡稳定性定量评价结果的关键影响,结合实际工况(图15)分析,本文方法计算所得的位移云图和安全系数结果更贴合边坡实际工程状态,而传统建模方法因对边坡几何形态进行过度光滑化处理,易高估边坡的稳定状态,导致分析结果出现误差。

(4) 模拟结果与建议

本次研究对象为毕家尖下方边坡,对应1365 m

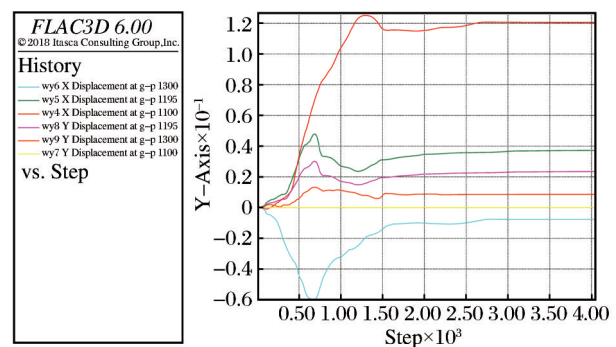


图11 X、Y方向历史轨迹图

Fig. 11 Historical trajectory diagram of X and Y directions

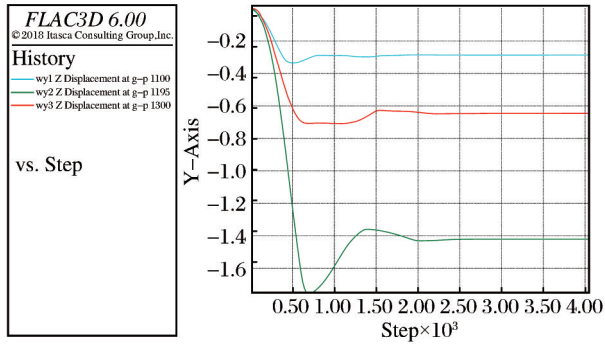


图 12 Z方向历史轨迹图

Fig. 12 Historical trajectory diagram of Z direction

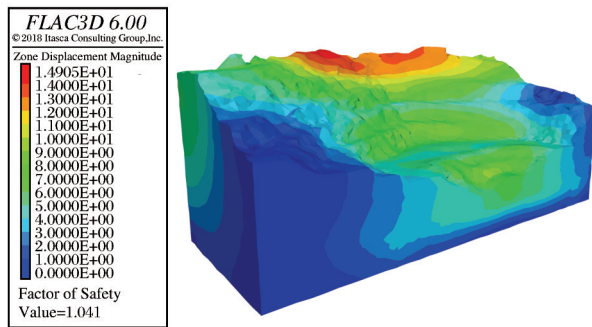


图 13 本文方法安全系数计算结果(末位移云图)

Fig. 13 Calculation results of safety factor using the method in this paper (final displacement cloud map)

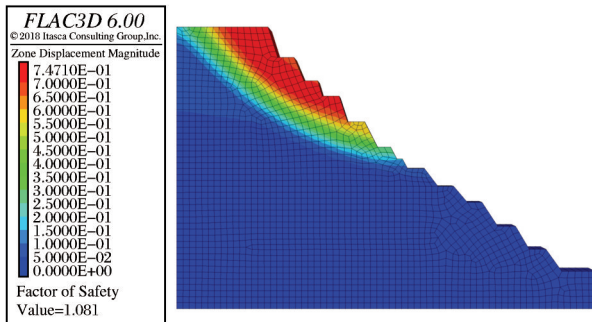


图 14 传统方法安全系数计算结果(末位移云图)

Fig. 14 Calculation results of safety factor using traditional methods (final displacement cloud diagram)

水平以上为南泥湖组下段石英岩,该区域岩层陡倾且为切坡向,石英岩岩体整体强度高于区域内其他岩性。数值模拟结果表明,边坡潜在失稳区域并非均匀分布,主要集中在标高 1 370~1 450 m,局部处在标高 1 306~1 330 m。上述边坡失稳集中区域断层发育且出露部位易发生垮塌,目前标高 1 378~1 450 m 多处位置已进行防护,防护措施以锚网喷、

挡墙等浅表防护为主,因此边坡整体未发生较大范围变形,本次位移分析和安全系数计算结果与现状(图 15)高度吻合。

针对标高 1 330~1 306 m 水平破碎台阶边坡的稳定性问题,由于该区域邻近断层出露带,岩体结构松散、层间破碎带发育显著,导致垮塌风险较高,因此建议采用锚网喷联合支护方案进行加固处理。具体设计依据和参数如下:锚杆的核心作用为穿过破碎岩体,锚固至深部稳定岩层,从而形成复合承载结构;锚杆采用全长固结型,直径 $\Phi=32$ mm,长度 $L=9$ m,布置间距为 3 m $\times$ 3 m,其中最下排锚杆长度保持 9 m 不变(图 16)。同时,为优化边坡结构稳定性,建议将 1 306 m 和 1 318 m 台阶的边坡角调整为 60°,1 306 m 以下区域边坡角则适当增大至 70°。该调整方案是基于“通过改变几何形态以减小下滑力”的岩土力学原理,适度增大台阶边坡角可减小单个台阶上不稳定岩体的体积和自重,从源头上降低边坡失稳风险,实现边坡工程安全性与空间利用率的平衡。

4 结论

针对高陡岩质边坡模型构建过程中存在的模糊性问题,以某露天矿岩质边坡作为研究对象,基于实景稠密点云数据,采用“Rhino-FLAC^{3D}”耦合建模方法,构建了该边坡的三维有限差分数值模型,系统分析了边坡潜在失稳区域分布特征与稳定安全系数,并结合工程实际提出了针对性的边坡防护加固措施与优化建议。主要结论如下:

(1) 基于稠密点云数据的“Rhino-FLAC^{3D}”耦合建模技术,可精准表征高陡岩质边坡的细微几何特征与不连续性,显著提升其三维数值模型的构建精度,为高陡岩质边坡的稳定性分析与灾害预警提供更为科学与可靠的技术手段。

(2) 利用 FLAC^{3D} 有限差分数值模拟,可有效识别高陡岩质边坡的潜在失稳区域,将地质结构薄弱区、应力集中区和外部荷载对边坡稳定性的影响进行可视化表达。

(3) 通过数值模拟可实现边坡稳定安全系数的定量计算,完成对边坡稳定性状态的科学量化评价。基于数值模拟分析结果提出的针对性边坡防

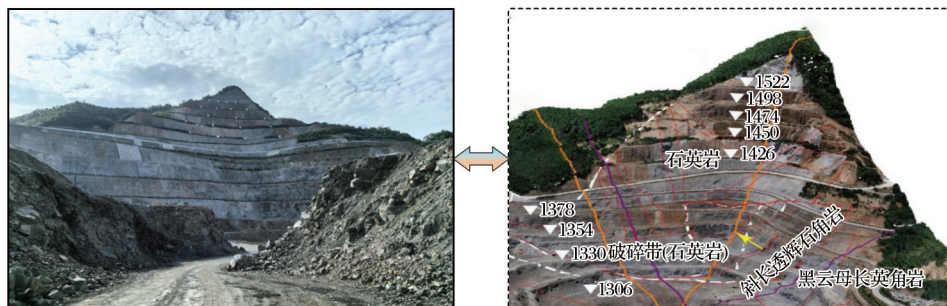


图 15 标高 1 282~1 574 m 岩层揭露情况

Fig. 15 Exposure of rock strata from 1 282 m to 1 574 m in elevation

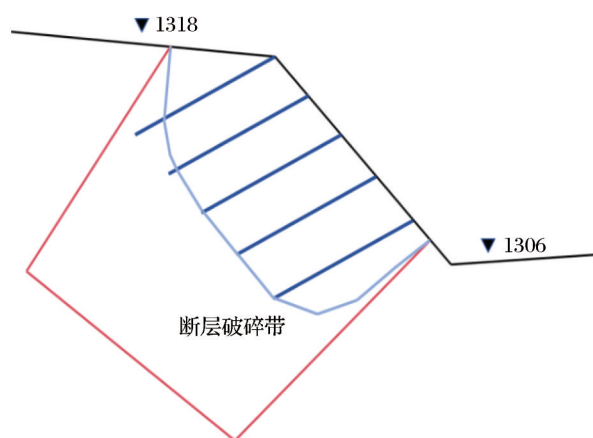


图 16 1 306 m 台阶边坡锚杆支护示意图

Fig. 16 Schematic diagram of 1 306 m step slope bolt support

护加固措施,可有效加强边坡结构稳定性,并为同类高陡岩质边坡的稳定性防控提供工程参考和现实依据。

参考文献 (References):

- Duncan J M, 1996. State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 122(7): 577-596.
- Li W X, Qi D L, Zheng S F, et al, 2015. Fuzzy mathematics model and its numerical method of stability analysis on rock slope of opencast metal mine [J]. Applied Mathematical Modelling, 39(7): 1784-1793.
- Liu X R, Liu Y Q, Lu Y M, et al, 2017. Numerical analysis of evaluation methods and influencing factors for dynamic stability of bedding rock slope [J]. Journal of Vibroengineering, 19(3): 1937-1961.
- Peng H Y, Xie Q, Chen B L, et al, 2024. Failure mode of the haz-

ardous Diaozui rock mass of the Qutang Gorge in the Three Gorges Reservoir area based on a three-dimensional numerical analysis [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 83(4): 100.

- Qin P P, Huang B L, Xu K K, et al, 2025. Three-dimensional geological modelling and long-term stability analysis of high-steep dangerous rock masses based on multisource data integration [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 50(5): e70026.

- 曹仁举, 岳跃宁, 陈绪超, 2020. 基于模糊综合评判的露天矿软岩边坡稳定性分析[J]. 煤炭技术, 39(5): 143-145.
- Cao Renju, Yue Yuening, Chen Xuchao, 2020. Stability analysis of soft rock slope in open pit mine based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. Coal Technology, 39(5): 143-145.

- 陈紫超, 任雯, 吴龙, 2025. KD 树引导的表面曲率驱动钢坯点云简化算法[J]. 激光与光电子学进展, 62(2): 0215006.
- Chen Zichao, Ren Wen, Wu Long, 2025. KD-tree-guided surface-curvature-driven SteelBillet point-cloud simplification algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 62(2): 0215006.

- 邓彪, 吴志刚, 张永风, 等, 2024. 基于车载 LiDAR 的露天矿场景三维模型构建[J]. 矿业工程, 22(2): 66-69.
- Deng Biao, Wu Zhigang, Zhang Yongfeng, et al, 2024. Three-dimensional modeling of open pit mine based on vehicle-mounted LiDAR [J]. Mining Engineering, 22(2): 66-69.

- 符锐, 2022. 高陡裂隙岩质斜坡结构面非接触式测量与稳定性分析研究[D]. 长春: 吉林大学.
- Fu Rui, 2022. Research on Non-contact measurement of discontinuities and stability of high and steep fractured rock slope [D]. Changchun: Jilin University.

- 郭隆基, 何满潮, 瞿定军, 等, 2023. 南芬露天铁矿边坡稳定性分析与牛顿力临滑智能预警[J]. 煤炭科学技术, 51(增刊 1): 9-17.
- Guo Longji, He Manchao, Qu Dingjun, et

- al, 2023. Evolution analysis of slope stability and intelligent early warning of newton force in Nanfen open-pit iron mine [J]. Coal Science and Technology, 51(Suppl.1): 9-17.
- 何旭, 李克钢, 秦庆词, 等, 2021. 某磷矿露天边坡稳定性分析[J]. 矿业研究与开发, 41(9): 25-28. He Xu, Li Kegang, Qin Qingci, et al, 2021. Slope stability analysis of a phosphate open-pit mine [J]. Mining Research and Development, 41(9): 25-28.
- 河南省地质局第一地质调查队, 1980. 河南省栾川县三道庄矿区钼钨矿详细勘探地质报告[R]. 洛阳: 河南省地质局第一地质调查队. First Geological Survey Team of Henan Provincial Geological Bureau, 1980. Detailed geological report on the exploration of the Sandaozhuang Molybdenum and Tungsten deposit, Luanchuan County, Henan Province [R]. Luoyang: First Geological Survey Team of Henan Provincial Geological Bureau.
- 侯克鹏, 王黎蝶, 2021. 基于改进的FAHP-CRITIC法与云理论的露天矿边坡危险性评估模型[J]. 安全与环境学报, 21(6): 2443-2451. Hou Kepeng, Wang Lidie, 2021. Risk assessment model of open-pit mine slope based on improved FAHP-CRITIC method and cloud theory [J]. Journal of Safety and Environment, 21(6): 2443-2451.
- 胡接枝, 2022. 知不拉铜矿露天边坡稳定性影响因素敏感性分析[J]. 中国安全生产科学技术, 18(增刊1): 73-78. Hu Jiezh, 2022. Sensitivity analysis of influencing factors of open pit slope stability in Zhibula copper mine [J]. Journal of Safety Science and Technology, 18(Suppl.1): 73-78.
- 胡露太, 李英冰, 张涛, 等, 2024. 无人机热红外影像快速拼接的改进SFM算法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 47(11): 33-36, 40. Hu Lutai, Li Yingbing, Zhang Tao, et al, 2024. Research on improved SFM algorithm for rapid stitching of UAV thermal infrared images [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 47(11): 33-36, 40.
- 靳付成, 2007. 边坡稳定性分析方法的研究现状与展望[J]. 西部探矿工程, 19(4): 5-9. Jin Fucheng, 2007. Research status and development of slope stability analysis method [J]. West-China Exploration Engineering, 19(4): 5-9.
- 李冰, 吕进来, 郝晓丽, 2019. 基于模板边缘的自适应Harris角点检测算法[J]. 现代电子技术, 42(11): 40-44. Li Bing, Lü Jinlai, Hao Xiaoli, 2019. Adaptive Harris corner detection algorithm based on template edge [J]. Modern Electronics Technique, 42(11): 40-44.
- 李波, 菅美英, 刘天阳, 2025. 基于SIFT与特征点相对位置关系的双目测距方法[J/OL]. 智能计算机与应用, 1-10. Li Bo, Jian Meiyang, Liu Tianyang, 2025. Binocular ranging method based on the relationship between SIFT and relative positions of feature points [J/OL]. Intelligent Computing and Applications, 1-10.
- 刘汉龙, 马彦彬, 仇文岗, 2021. 大数据技术在地质灾害防治中的应用综述[J]. 防灾减灾工程学报, 41(4): 710-722. Liu Hanlong, Ma Yanbin, Zhang Wengang, 2021. Application of big data techniques in geological disaster analysis and prevention: a systematic review [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 41(4): 710-722.
- 刘彦鹏, 2024. 基于FLAC3D的导水裂隙带发育高度模拟研究[J]. 煤, 33(12): 1-4. Liu Yanpeng, 2024. Simulation study on the development height of water-conducting fracture zone based on FLAC3D [J]. Coal, 33(12): 1-4.
- 罗毅甜, 吕古贤, 2020. 河南栾川三道庄钼(钨)矿床构造蚀变岩相分带特征[J]. 地质通报, 39(11): 1773-1782. Luo Yitian, Lü Guxian, 2020. Zoning regularity of the tectonic altered lithofacies in the Sandaozhuang Mo (Wu) deposit, Luanchuan, Henan Province [J]. Geological Bulletin of China, 39(11): 1773-1782.
- 马勤为, 何文, 石文芳, 等, 2025. 爆破条件下三维边坡动力响应特征及稳定性分析[J]. 黄金科学技术, 33(6): 1155-1166. Ma Qinwei, He Wen, Shi Wenfang, et al, 2025. Analysis of dynamic response characteristics and stability of three-dimensional slope under blasting conditions [J]. Gold Science and Technology, 33(6): 1155-1166.
- 沙鹏, 孔德珩, 王绍亮, 等, 2022. 高陡边坡岩体结构信息无人机识别与离散元数值模拟[J]. 工程地质学报, 30(5): 1658-1668. Sha Peng, Kong Deheng, Wang Shaoliang, et al, 2022. Identification of rockmass discontinuities and 3D discrete element modeling of high slope based on unmanned aerial vehicle photogrammetry [J]. Journal of Engineering Geology, 30(5): 1658-1668.
- 孙玉科, 牟会宠, 姚宝魁, 1988. 边坡岩体稳定性分析[M]. 北京: 科学出版社. Sun Yuke, Mu Huichong, Yao Baokui, 1988. Stability analysis of slope rock mass [M]. Beijing: Science Press.
- 杨溢, 李嘉伟, 孙进辉, 等, 2025. 超高排土场边坡稳定性及其破坏规律研究[J/OL]. 安全与环境学报, 1-10. Yang Yi, Li Jiawei, Sun Jinhui, et al, 2025. Investigation of slope stability and failure law in super high dumps [J/OL]. Journal of Safety and Environment, 1-10.
- 殷跃平, 胡时友, 石胜伟, 2018. 滑坡防治技术指南[M]. 北京: 地质出版社. Yin Yueping, Hu Shiyu, Shi Shengwei, 2018. Technical guide for landslide prevention and control [M]. Beijing: Geological Publishing House.

于庭安,戴兴国,2008.露天矿边坡稳定性的安全因素分析[J].矿业安全与环保,35(1):73-76.Yu Ting'an, Dai Xingguo, 2008. Analysis on safety factors of open-pit slope stability[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 35(1):73-76.

张飞,巩志忠,崔志平,等,2012.Sarma法在白云鄂博铁矿边坡稳定性分析中的应用[J].有色金属(矿山部分),64(4):74-78.Zhang Fei, Gong Zhizhong, Cui Zhiping, et al,

2012. Application of Sarma method in slope stability analysis of Baiyunebo iron mine [J]. Nonferrous Metals (Mine Section), 64(4): 74-78.

赵昌鑫,2020.基于极限平衡法露天矿高陡边坡安全可靠性研究[J].中国铝业,44(6):31-35.Zhao Changxin, 2020. The safety of high-steep slope for open-pit mine based on the limit equilibrium method [J]. China Molybdenum Industry, 44(6): 31-35.

Stability Analysis of High-steep Rock Slope in an Open-pit Mine Using Rhino-FLAC^{3D} Coupling

JIANG Song^{1,2,3}, LI Xiaopu¹, MAO Jing⁴, RAO Binjian⁵, ZHANG Cunliang¹, ZHANG Chao⁶, WANG Luofeng⁶

1. School of Resource Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China;
2. State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China;
3. State Key Laboratory of Safety and Health of Metal Mines, Maanshan 243000, Anhui, China;
4. Xi'an Youmai Intelligent Mine Technology Co., Ltd., Xi'an 710055, Shaanxi, China;
5. School of Management, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China;
6. CMOG Group Limited, Luanchuan 471000, Henan, China

Abstract: As the depth of open-pit mining operations continues to increase, the stability of high-steep rock slopes has become a more significant concern, revealing the limitations of traditional stability analysis methods, particularly under complex geological conditions. This study focuses on a high-steep rock slope at a specific open-pit mine and introduces a novel stability analysis approach that integrates point cloud data with Rhino-FLAC^{3D}. Initially, close-range photogrammetry, facilitated by drones and enhanced by SIFT, SFM, and MVS technologies, is utilized to acquire and generate a dense point cloud representation of the slope. Subsequently, using the processed point cloud data, a three-dimensional geometric model of the slope is developed employing Rhino software. In conclusion, the model is integrated into FLAC^{3D} for stratified processing and numerical simulation to examine the displacement distribution and stress concentration characteristics of the slope, identify potential zones of instability, and compute a safety factor of 1.041. This value suggests that the slope is nearing its stability threshold. A comparative analysis with conventional methods demonstrates a marked improvement in accuracy with the proposed approach. Based on the analytical results, specific slope protection and reinforcement strategies are recommended. The findings indicate that the proposed modeling methodology, which integrates point cloud data with Rhino-FLAC^{3D} coupling, effectively captures the nuanced geometric features and discontinuities of the slope, thereby substantially enhancing the precision of the 3D slope model. As a result, more reliable numerical simulation outcomes are achieved, fulfilling the engineering requirements for the stability analysis of high-steep rock slopes.

Key words: open-pit mine; high and steep rock slope; dense point cloud; Rhino-FLAC^{3D} coupling; three-dimensional modeling; stability analysis