裂隙岩质台阶边坡危险块体的确定及其稳定性分析①

梁智元[1]，陈光木[2]，赵兴[2]，李启斌[2]，王浚名[2]，陈庆发[1]
（1.广西大学 资源环境与材料学院，广西 南宁 530004；2.广东省大宝山矿业有限公司，广东 韶关 512127）

摘　要：以广东大宝山露天边坡 29 线附近的+793～+817 m 范围内的台阶边坡为研究对象，在相关地质数据的基础上，首先，建立了边坡三维裂隙网络模型，对台阶边坡的岩体结构进行三维解构分析，得到了边坡体内块体位置分布信息数据；其次，构建了台阶边坡三维离散裂隙网络模型，分析了在裂隙及重力作用下的边坡位移形变量，圈定出台阶边坡的潜在滑移区域；再次，结合块体位置分布信息与潜在滑移区域，确定出危险块体 1 和危险块体 2；最后，借助赤平投影法分析了危险块体的稳定性。分析结果表明：危险块体 1 可能发生楔形滑动，危险块体 2 可能发生双面滑动但概率较小；边坡整体稳定性差，建议采取注浆+锚索+格构梁的措施对边坡进行防治。

关键词：边坡稳定性；裂隙岩体；台阶边坡；危险块体；赤平投影；稳定性分析；三维解构
中图分类号：TD851　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.03.017
文章编号：0253-6099(2026)03-0130-07

Identification and Stability Analysis of Dangerous Blocks in Fractured Rock Bench Slopes

LIANG Zhiyuan[1], CHEN Guangmu[2], ZHAO Xing[2], LI Qibin[2], WANG Junming[2], CHEN Qingfa[1]
(1.*School of Resources and Metallurgy, Guangxi University, Nanning* 530004, *Guangxi, China*; 2.*Guangdong Dabaoshan Mining Co., Ltd., Shaoguan* 512127, *Guangdong, China*)

Abstract: The bench slope within the elevation range from +793 m to +817 m near Line 29 of the Dabaoshan open-pit slope in Guangdong was taken as the research object, and a 3D fracture network model of the slope was firstly established based on relevant geological data and was used to conduct a 3D deconstruction analysis of the rock mass structure of the bench slope. Thereby the data on the location and distribution of blocks within the slope body were obtained. Secondly, a 3D discrete fracture network model of the bench slope was constructed to analyze the displacement and deformation of the slope under the action of fractures and gravity, delineating the potential sliding areas of the bench slope. Thirdly, the dangerous block 1 and dangerous block 2 were identified by combining the block location and distribution information with the potential sliding areas. Finally, the stability of the dangerous blocks was analyzed using the stereographic projection method. The analysis results show that the dangerous block 1 may experience wedge sliding, while the dangerous block 2 may experience double-plane sliding but with a low probability. Since the overall stability of the slope is poor, it is recommended that a combined measure of grouting, anchor cables and lattice beams should be adopted for slope prevention and control.

Key words: slope stability; fractured rock mass; bench slope; dangerous block; stereographic projection; stability analysis; 3D deconstruction

边坡稳定性分析是保障边坡安全建设的必要工作[1-2]。裂隙发育的露天边坡往往存在由裂隙间组合相交切割形成的不同块体，此类边坡通常具有不连续、多变及各向异性的特点，边坡内部发育的裂隙及其形成的块体对边坡的稳定性产生严重影响[3]。由于边坡内部块体的复杂性，此类边坡往往不能简单地被看作一个整体进行稳定性分析[4]。确定边坡内部的危险块体并分析其稳定性，是裂隙岩质边坡稳定性分析

① **收稿日期**：2025-12-07
基金项目：2024 年广西壮族自治区级新工科研究与实践项目(XGK202404)
作者简介：梁智元(2000—)，男，广西南宁人，硕士研究生，从事岩石力学与工程应用研究。E-mail：1887600255@163.com
通信作者：陈庆发(1979—)，男，河南郸城人，博士，教授，博士研究生导师，从事岩体结构三维解构理论与技术研究。E-mail：chenqf@gxu.edu.cn

的关键环节,也是后续边坡精准防治的重要前提,利用关键块体理论能很好地解决该类问题。

关键块体理论是一种围绕结构平面的分析方法,核心是找出关键性块体,探究岩体结构性的破坏机制,并制定合理的支护加固措施[5-6],其研究对象主要为岩体工程中首先失去稳定性的块体。该理论在裂隙岩体工程中得到了广泛应用[7-9]。围绕关键块体理论及其在岩质边坡稳定性分析中的应用,已有学者从不同方向展开了研究。部分学者将块体识别与滑动面判别相结合,提出了异形滑动面搜索方法[10],为从块体识别过渡到失稳模式判断提供了逻辑支撑。也有研究利用 3DEC 离散元软件模拟不同优势结构面组合下关键块体的失稳过程[11],但这类模拟多针对简化后的结构面组合,难以系统反映实际裂隙分布的复杂性。在解析方法方面,全空间赤平投影与矢量计算被用于多结构面控制下的关键块体搜索[12],突破了传统定性分析的模糊性,然而该方法仍属刚体极限平衡范畴,在复杂条件下的适用性有限。针对倾倒失稳模式,有学者提出了简化半离散元算法[13],在临界滑动区确定与渐进破坏分析方面具有优势,但该方法仅适用于倾倒破坏,对楔形滑动、双面滑动等更常见的失稳模式适用性不足。为克服经典块体理论无法获取实际危险块体位置与体积的缺陷,半确定性块体理论被提出[14],但其仍依赖几何参数的确定性输入,忽视了节理参数的统计变异性。另有研究将节理随机概率模型引入块体理论[15],分析了关键块体的滑动概率,但仅考虑了节理长度的随机性,未将倾向、倾角、裂隙宽度等多参数的概率分布纳入综合分析。在关键块体理论的基础上,文献[16-17]将经典关键块体理论中“结构面无限延伸”的假设扩展为有限尺度裂隙,发展了一般块体理论,并开发了 GeneralBlock 软件,为识别岩体内所有被裂隙切割形成的块体提供了新的方法。

综上所述,关键块体理论及其相关数值模拟、解析方法和随机修正技术在岩质边坡稳定性分析中已取得显著进展。但是对于复杂裂隙岩体中裂隙随机切割形成的块体,特别是在台阶边坡这类具有多级坡面的工程场景中,仍缺乏系统的三维空间定位与危险块体筛选方法。为此,本文以广东大宝山露天边坡 29 线附近的+793~+817 m 范围内的台阶边坡为研究对象,依据 GeneralBlock 软件,对台阶边坡岩体结构进行三维解构,以识别所有块体;在此基础上,依据关键块体理论和数值模拟确定台阶边坡潜在滑移区域以及赋存在台阶边坡体内的危险块体,并借助赤平投影法分析危险块体的稳定性。

1　工程背景

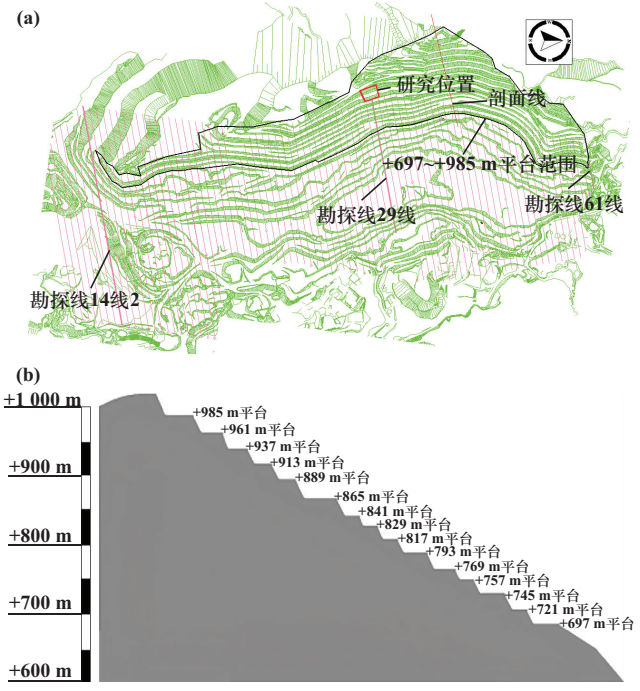
1.1　矿山概况

广东大宝山露天边坡开采区长约 2 450 m,宽约 880 m,设计开采最高标高+985 m,最低标高+433 m,最大采深 552 m,作业台阶高度 12 m,终了并段台阶高度 24 m,采用山坡露天+凹陷露天开采方式,+649 m 以上为山坡露天开采,分台阶自上而下顺序开采。通过剥离,形成了数个终了平台,即 697、721、745、757、769、793、817、841、865、889、913、937、961、985 m 平台,目前生产作业最低平台为+625 m。

矿区属岭南中低山构造侵蚀地貌,地形较陡,山系总体呈南北走向。地面高程为+300~+1 020.41 m,相对高差 300~700 m。矿床位于大宝山向斜盆地中,产状较平缓,岩性较单一,无软弱夹层。东西向、北东向断裂破碎带生成于成矿前,且都被矿体、断层角砾等物质所充填,至今没有活动迹象,比较稳定。

1.2　台阶边坡的确定

根据大宝山露天边坡的实际情况,本文以大宝山露天采场西帮边坡+697~+985 m 平台(勘探线自南向北从 14 线 2 至 61 线,总面积约为 55 万 m^2)为研究范围,选取 29 线附近+793~+817 m 的台阶边坡作为研究对象。边坡整体情况以及所选台阶边坡的位置如图 1 所示。



(a) 边坡平面图;(b) 边坡剖面图

图 1　边坡整体情况及研究位置

Fig. 1　Overall situation of slope and research location

1.3 裂隙数据获取

采用表面裂隙和边坡岩体内部裂隙联合调查方法获取所选台阶边坡的裂隙数据;采用精测网法获取台阶边坡表面规模较大的裂隙信息,即布设长度为 100 m 调查测网进行裂隙调查分析并开展地质素描;利用激光测距仪测量裂隙 2 个端点的坐标;采用素描法绘制所有边坡坡面的裂隙;利用罗盘测量并记录现场裂隙产状;采用全景钻孔摄像技术[18]获取台阶边坡内部裂隙信息,即在边坡顶部打入垂直钻孔,通过全景钻孔摄像设备对孔壁进行拍摄,形成二维全景图像,然后对全景图像进行坐标转换和逆变换,可得到真实钻孔孔壁图像的裂隙信息,包括倾向、倾角和裂隙宽度等;最后结合测网坐标系得到钻孔裂隙坐标。现场裂隙数据获取示意图如图 2 所示。

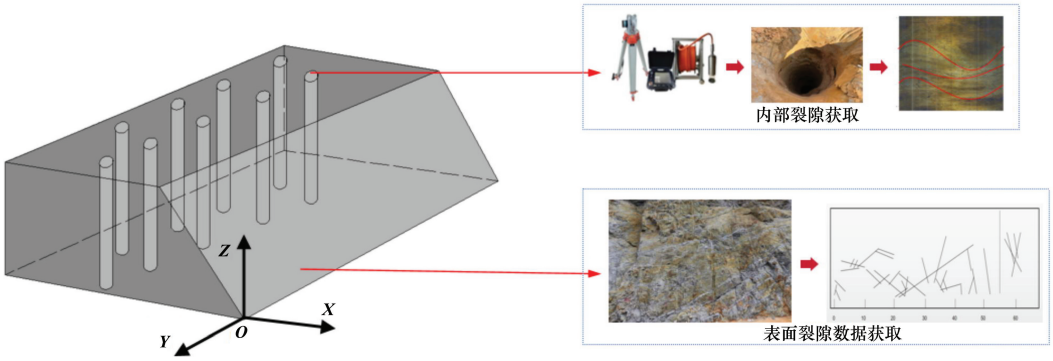


图 2 现场裂隙数据获取示意图

Fig. 2 Schematic diagram of on-site fracture data acquisition

基于上述裂隙数据获取方法,开展 29 线附近 +793~+817 m 范围内台阶边坡裂隙调查,现场获取了 364 组裂隙数据。经统计以及相关数据转化,现场得到的台阶边坡裂隙数据如表 1 所示。

表 1 台阶边坡裂隙数据

Table 1 Fracture data of bench slope

编号	坐标			半径/m	产状	
	X/m	Y/m	Z/m		倾向/(°)	倾角/(°)
1	−45.2	−0.2	36.9	1.13	155	81
2	−45.4	−0.5	36.4	0.72	355	71
3	−45.4	−0.8	36.3	0.42	173	27
4	−45.3	−0.8	36.5	0.48	165	88
5	−45.4	−0.9	36.4	0.25	343	63
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
360	−3.3	−92.8	9.2	2.40	350	15
361	−3.0	−91.3	8.3	2.86	350	15
362	−2.7	−91.3	7.4	4.52	350	15
363	−2.0	−87.9	5.5	3.14	305	60
364	−2.1	−88.9	5.7	3.62	305	60

由表 1 可知,获得的裂隙数据涉及所有台阶边坡,满足本文研究需要。通过产状和裂隙直径分析,该台阶边坡存在大量小裂隙,裂隙相交切割岩体,容易形成较多规模较小的复杂块体。

2 边坡模型构建

2.1 边坡三维裂隙网络模型

基于表 1 中的裂隙数据,利用 GeneralBlock 软件建立模型,输入裂隙参数,构建台阶边坡三维裂隙网络模型,如图 3 所示。



图 3 台阶边坡三维裂隙网络模型

Fig. 3 3D fracture network model of bench slope

由图 3 可知,模型左侧至中部裂隙密布,岩体破碎程度高,形成了左-中部破碎区域,右侧裂隙不发育,同时岩体中还有数条贯穿上下台阶的长裂隙,左侧岩体被裂隙切割,并被裂隙贯通切割为一级岩体块碎裂结构,右侧同为裂隙面切割形成的一级岩体块碎裂结构,但较左侧相对完整。

2.2 边坡三维离散裂隙网络模型

2.2.1 边界条件

边坡模型左、右、后侧在 X、Y、Z 轴方向上不产生位移,边坡表面在 X、Y、Z 轴方向上允许产生位移,模型底部为固定边界,边坡模型整体初始位移均为 0,隐患台阶边坡在重力作用下发生位移和变形,重力加速度 g 取 10.0 m/s^2。

2.2.2　岩石与结构面力学参数

通过室内外岩石力学试验,得到岩石力学参数和结构面力学参数,分别如表 2 和表 3 所示。

表 2　岩石力学参数

Table 2　Rock mechanics parameters

弹性模量/MPa	泊松比	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa	容重/(t·m^{-3})
2.75	0.25	12.00	38.00	12.00	2.66

表 3　结构面力学参数

Table 3　Mechanical parameters of structural plane

结构面刚度	摩擦角/(°)	黏滞力/Pa
1×10^9	5	0.2×10^5

2.2.3　模型构建

利用 3DEC 离散元模拟软件与 GeneralBlock 软件进行关联参数对接[19],结合边界条件及岩石与结构面力学参数,形成台阶边坡三维离散裂隙网络模型,如图 4所示。台阶边坡存在裂隙切割作用明显的区域(图中圆圈区域),由于裂隙的相交切割作用,台阶边坡岩体被切割成许多块体,边坡表面呈破碎结构。

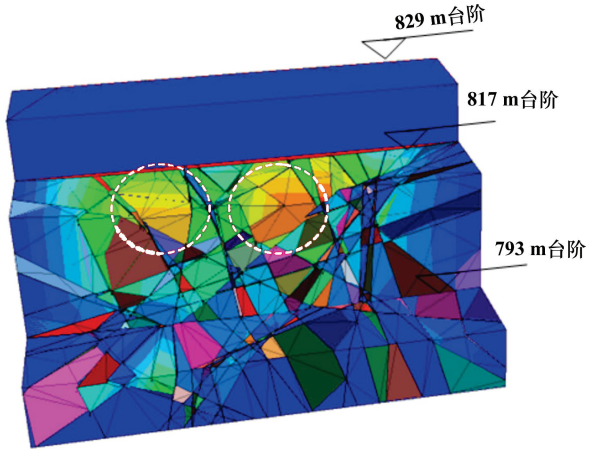


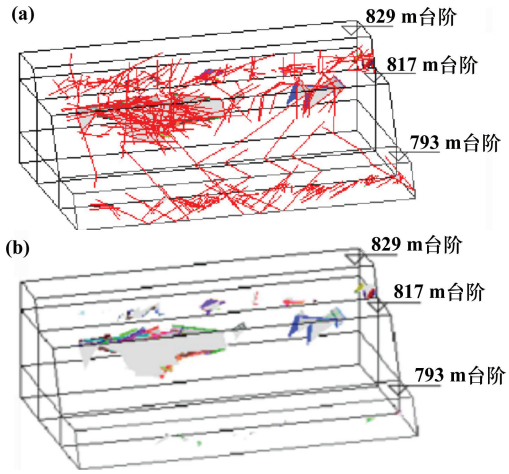
图 4　台阶边坡三维离散裂隙网络模型

Fig. 4　3D discrete fracture network model of bench slope

3　边坡危险块体的确定及结果分析

3.1　边坡岩体结构解构分析

采用裂隙岩体结构解构理论[20]对台阶边坡岩体结构进行解构,结果如图 5 所示,共生成 22 324 个块体,总块体体积为 2 255.565 m^3,最大块体体积为 87.171 m^3。结果表明,台阶边坡岩体因裂隙发育产生大量的危险块体,坡肩岩体尤为破碎,呈现碎裂状结构,易发生规模性块体失稳。受采矿爆破、工程开挖等不利因素的扰动,危险块体可能会发生楔形滑移、双面滑移,引发周围破碎岩体掉落,最终在台阶边坡引起大面积圆弧滑坡。



(a) 裂隙迹线和块体;(b) 台阶边坡块体分布

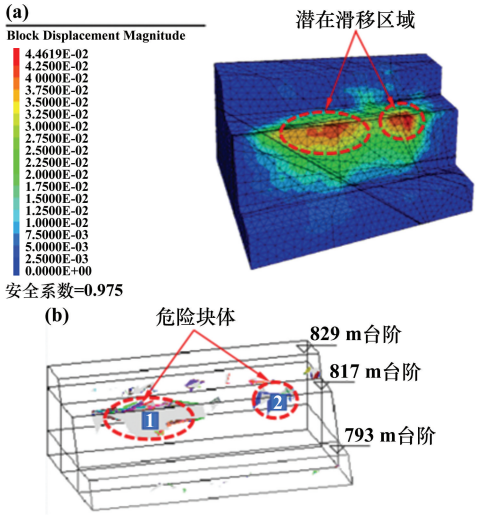
图 5　台阶边坡岩体结构解构结果

Fig. 5　Deconstruction results of rock mass structure of bench slope

3.2　边坡危险块体的确定

确定台阶边坡危险块体的步骤如下:首先,对台阶边坡进行岩体结构解构分析,确定台阶边坡块体的数量以及块体分布;其次,模拟台阶边坡在裂隙与重力作用下的变形滑移,圈定台阶边坡潜在滑移区域;最后,将台阶边坡岩体结构解构的结果与台阶边坡数值模拟相结合,确定处于潜在滑移区域的块体,即台阶边坡危险块体。

基于上述方法,利用位移量圈定台阶边坡潜在滑移区域,即坡面顶部模型中 $X=40$ m 与 $X=70$ m 附近位置;在潜在滑移区域识别出了影响台阶边坡稳定性的危险块体,为方便后续分析,将其命名为危险块体 1、危险块体 2,如图 6 所示。



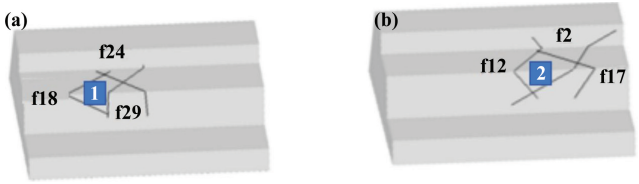
(a) 潜在滑移区域;(b) 危险块体

图 6　危险块体确认

Fig. 6　Identification of dangerous blocks

3.3 边坡危险块体稳定性分析

根据危险块体确定结果，采用 GeneralBlock 软件确定控制危险块体的主要贯穿裂隙[17]，如图 7 所示。其中，危险块体 1 的稳定性主要受贯穿裂隙 f18，f29，f24 控制，危险块体 2 的稳定性主要受贯穿裂隙 f2，f17，f12 控制。控制危险块体的裂隙参数如表 4 所示。



（a）危险块体 1；（b）危险块体 2

图 7 控制危险块体的主要贯穿裂隙

Fig. 7 Main penetrating fractures controlling dangerous blocks

表 4 控制危险块体的裂隙参数

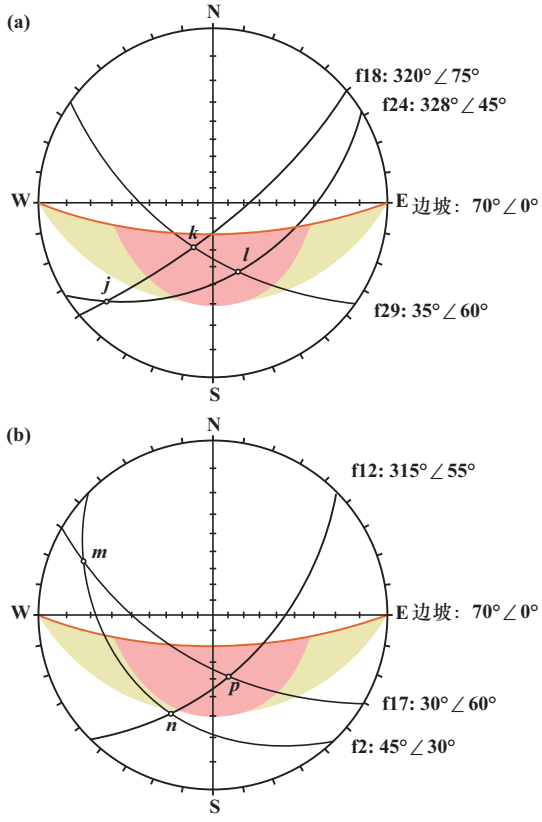
Table 4 Fracture parameters controlling dangerous blocks

危险块体	主要控制裂隙	裂隙坐标			裂隙产状
		X/m	*Y*/m	*Z*/m	
1	f18	−45.1	−16.0	37.1	320°∠75°
	f24	−45.1	−17.0	37.2	328°∠45°
	f29	−44.9	−21.8	37.6	35°∠60°
2	f2	−43.8	−87.9	40.5	45°∠30°
	f12	−43.7	−74.6	41.0	315°∠55°
	f17	−43.8	−90.9	40.5	30°∠60°

由表 4 可知，控制危险块体的裂隙产状各异，且相互交切，共同控制着危险块体的滑动方向，说明所确定的控制危险块体的主要裂隙符合实际情况。

采用赤平投影法分析危险块体 1、危险块体 2 的稳定性，如图 8 所示。

边坡坡向的投影线与内摩擦角圆会形成一个潜在破坏区域（即图 8 中阴影区域），当裂隙的投影交点越靠近该区域，说明发生破坏的概率越大[21]。由图 8（a）可知，裂隙 f18、f29、f24 与边坡不存在小角度斜交，说明裂隙 f18、f29、f24 的方向与边坡方向差异较大，单独存在的情况下对边坡稳定性影响不大；然而，裂隙 f18、f29、f24 的投影圆交点 *j*、*k*、*l* 均位于边坡内侧，也就是两两裂隙组合交线的倾角比边坡面的倾角缓，且交线方向与坡面方向比较一致，块体处于失稳状态，可能会发生楔形滑动；且裂隙 f29 分别与裂隙 f18、f24 的投影圆交点 *k*、*l* 均位于潜在破坏区域内，说明危险块体 1 发生楔形滑动的概率较大，处于不稳定状态。由图 8（b）可知，裂隙 f2、f17、f12 与边坡不存在小角度斜交，说明裂隙 f2、f17、f12 的方向与边坡的方向存在较大差异，边坡发生沿裂隙面滑动破坏风险很小，并且裂隙 f2、f17 的投影圆交点 *m* 位于边坡外侧，该两两结构面交线的倾角比边坡面陡，处于稳定状态；但裂隙 f17 与 f12、f2 与 f12 的投影圆交点 *p*、*n* 均位于边坡内侧，也就是两两裂隙的组合交线倾角比边坡面的倾角缓，块体可能会沿着该两条交线发生失稳，发生双面滑动；然而，裂隙 f2、f12 的投影圆交点并不处于潜在破坏区域内，说明危险块体 2 发生双面滑动的概率较小，但仍处于不稳定状态。



（a）危险块体 1；（b）危险块体 2

图 8 危险块体赤平投影图

Fig. 8 Stereographic projection of dangerous blocks

综合分析认为，大宝山露天边坡 29 线附近的 +793～+817 m 范围内的台阶边坡存在危险块体 1 与危险块体 2，并且二者处于不稳定状态，因此该范围内的台阶边坡为不稳定。

采用 3DEC 对边坡稳定性进行数值模拟，模拟结果如图 9 所示。边坡坡面存在较大范围的变形位移，最大位移位于边坡的中左侧及中右侧，为 4.46 cm，并以此为中心向两侧逐渐扩散；在裂隙相互切割作用下，岩体结构延续性受到一定影响，边坡岩体存在变形延续性问题，在外力作用下（如降雨、振动等），可移动关键块体发生失稳，可能会导致边坡形成大规模链式滑坡；边坡整体安全系数为 0.975，依据《非煤露天矿边坡工程技术规范》（GB 51016—2014），边坡安全系数标准值为 1.25，表明该台阶边坡稳定性不足，存在失稳

风险,需要采取必要措施进行针对性加固。

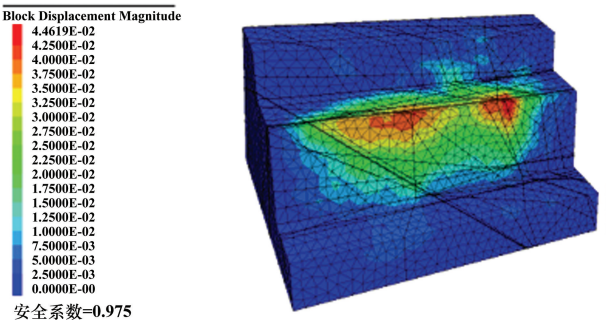


图 9　边坡稳定性数值模拟结果

Fig. 9　Numerical simulation results of slope stability

综上所述,采用赤平投影法与 3DEC 分析所得大宝山露天边坡 29 线附近的+793～+817 m 范围内的台阶边坡稳定性结果相近,边坡整体处于不稳定状态。

基于以上分析结果,为增加边坡的稳定性,预防关键裂隙被风化以及雨水侵蚀,根据实际边坡环境以及使用要求,建议采取注浆+锚索+格构梁的措施对边坡进行防治。

4　结论

1) 基于大宝山露天边坡 29 线附近+793～+817 m 范围内的台阶边坡及裂隙数据,通过 GeneralBlock 软件建立台阶边坡三维裂隙网络模型,并对台阶边坡岩体结构进行解构,共生成 22 324 个块体,总块体体积为 2 255.565 m^3,最大块体体积为 87.171 m^3。

2) 利用 3DEC 软件构建台阶边坡三维离散裂隙网络模型并进行数值模拟,位移量圈定了台阶边坡潜在滑移区域,结合边坡岩体结构解构的结果确定了影响台阶边坡稳定性的危险块体 1、危险块体 2。

3) 基于赤平投影法分析,控制危险块体 1 的裂隙组合交线的倾角比边坡面倾角缓,块体处于失稳状态,可能会发生楔形滑动;控制危险块体 2 的裂隙组合交线的倾角比边坡面的倾角缓,但投影圆交点并不处于潜在破坏区域内,块体沿着该两交线发生失稳的概率较小。边坡整体稳定性差,建议采取注浆+锚索+格构梁的措施对边坡进行防治。

参考文献(References):

[1] 刘亮,徐森民,王迪,等. 基于最优边坡角的露天矿山边坡稳定性分析与安全评价研究[J]. 中国矿业, 2024,33(增刊 2):98-104.
LIU Liang, XU Senmin, WANG Di, et al. Research on slope stability analysis and safety evaluation of open-pit mine based on optimal slope angle[J]. China Mining Magazine, 2024,33(S2):98-104.

[2] 祝经中,朱飞. 某露天矿山高边坡稳定性分析研究[J]. 中国矿业, 2024,33(增刊 1):124-127.
ZHU Jingzhong, ZHU Fei. Analysis and research on high slope stability of an open-pit mine[J]. China Mining Magazine, 2024,33(S1):124-127.

[3] 黎炬锋,吴庆禄,余文龙. 基于三维块体切割分析及块体理论的高陡硬岩边坡稳定性分析[J]. 公路工程, 2023,48(3):116-123.
LI Jufeng, WU Qinglu, YU Wenlong. Stability analysis of high steep hard rock slope based on three-dimensional block cutting analysis and block theory[J]. Highway Engineering, 2023,48(3):116-123.

[4] 王衍汇. 某高速铁路高陡边坡破坏机理及稳定性研究[J]. 铁道勘察, 2021,47(6):60-65.
WANG Yanhui. Study on failure mechanism and stability analysis of a high steep slope of a high speed railway[J]. Railway Investigation and Surveying, 2021,47(6):60-65.

[5] 李蕾. 基于关键块体理论的矿山边坡节理变形机理研究[D]. 唐山:华北理工大学, 2018.
LI Lei. Study on deformation mechanism of mine slope joint based on key block theory[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2018.

[6] 韩冰,孙辉,冯现大,等. 基于关键块体组方法的岩石边坡整体稳定性分析研究[J]. 工程技术研究, 2018,3(8):165-167.
HAN Bing, SUN Hui, FENG Xianda, et al. Study on overall stability analysis of rock slope based on key block group method[J]. Engineering and Technological Research, 2018,3(8):165-167.

[7] 赵建海,李福佳,刘艳章,等. 基于关键块体的井巷围岩稳定性分析及支护研究[J]. 中国矿业, 2024,33(增刊 1):304-311.
ZHAO Jianhai, LI Fujia, LIU Yanzhang, et al. Stability analysis and support research of shaft and roadway surrounding rock based on key blocks[J]. China Mining Magazine, 2024,33(S1):304-311.

[8] 邱伟,杨红涛,罗雨,等. 隧道开挖过程中关键块体快速识别及应用[J]. 施工技术, 2019(增刊 1):571-574.
QIU Wei, YANG Hongtao, LUO Yu, et al. Rapid recognition and application of key blocks in tunnel excavation[J]. Construction Technology, 2019(S1):571-574.

[9] 邬爱清. 基于关键块体理论的岩体稳定性分析方法及其在三峡工程中的应用[J]. 长江科学院院报, 2019,36(2):1-7.
WU Aiqing. Series methods of analyzing rock mass stability based on key block theory and their applications to Three Gorges project[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019,36(2):1-7.

[10] 王述红,李忠,侯钦宽,等. 基于 GeoSMA-3D 的岩质边坡异形滑动面搜索方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2024,45(8):1159-1166.
WANG Shuhong, LI Zhong, HOU Qinkuan, et al. Search method for irregular sliding surface of rock slope based on GeoSMA-3D[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2024,45(8):1159-1166.

[11] 康志强,邵陆航,李蕾. 基于 3DEC 数值模拟的矿山边坡关键块体稳定性研究[J]. 金属矿山, 2018(8):137-141.
KANG Zhiqiang, SHAO Luhang, LI Lei. Study on stability of key blocks in mine slope based on 3DEC numerical simulation[J]. Metal Mine, 2018(8):137-141.

[12] 龚芯磊. 基于块体理论的多结构面控制下岩质边坡关键块体研究[J]. 贵州地质, 2023,40(2):193-200.
GONG Xinlei. Research on key rock mass of rock slope controlled by multiple structural planes based on rock mass theory[J]. Guizhou Geology, 2023,40(2):193-200.

[13] AZARAFZA M, AKGÜN H, GHAZIFARD A, et al. Key-block based analytical stability method for discontinuous rock slope subjected to toppling failure[J]. Computers and Geotechnics, 2020,124:103620.

[14] LIU T X, DENG J H, ZHENG J, et al. A new semi-deterministic block theory method with digital photogrammetry for stabilityanalysis of a high rock slope in China[J]. Engineering Geology, 2017,216:76-89.

[15] TIAN Q, FU H. Block theory rock joint length modifying and slope stability analysis[C]//Slope Stability and Earth Retaining Walls, 2011.

[16] XIA L, YU Q C, CHEN Y H, etal. GeneralBlock: A C++ program for identifying and analyzing rock blocks formed by finite-sized fractures[C]//Environmental Software Systems. Infrastructures, Services and Applications. Cham: Springer, 2015:512-519.

[17] 于青春,薛果夫,陈德基. 裂隙岩体一般块体理论[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007.
YU Qingchun, XUE Guofu, CHEN Deji. General block method of fractured rock mass[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007.

[18] 岳攀,钟登华,吴含,等. 基于LHS的坝基岩体三维裂隙网络模拟[J]. 水力发电学报, 2016,35(10):93-102.
YUE Pan, ZHONG Denghua, WU Han, et al. Simulations of 3-D fracture networks in rock mass of dam foundation using Latin hypercube sampling[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016,35(10):93-102.

[19] 陈庆发,郑文师,牛文静,等. 裂隙岩体几何与力学尺寸效应的关联性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019,38(增刊1):2857-2870.
CHEN Qingfa, ZHENG Wenshi, NIU Wenjing, et al. Correlation of the geometrical and mechanical size effects of fractured rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019,38(S1):2857-2870.

[20] 陈庆发,古德生. 地下矿山岩体结构解构理论方法及应用[M]. 长沙:中南大学出版社, 2016.
CHEN Qingfa, GU Desheng. Theory and methods of deconstruction on rockmass structure for underground mine[M]. Changsha: Central South University Press, 2016.

[21] 陈荣国. 基于极射赤平投影法的露天开采矿山边坡稳定性分析方法[J]. 福建地质, 2025,44(1):69-74.
CHEN Rongguo. Slope stability analysis method of open-pit mining based on stereographic projection method[J]. Geology of Fujian, 2025,44(1):69-74.

引用本文:梁智元,陈光木,赵兴,等. 裂隙岩质台阶边坡危险块体的确定及其稳定性分析[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):130-136.
LIANG Zhiyuan, CHEN Guangmu, ZHAO Xing, et al. Identification and stability analysis of dangerous blocks in fractured rock bench slopes[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):130-136.

《矿冶工程》征订启事

《矿冶工程》(双月刊)由长沙矿冶研究院有限责任公司、中国金属学会主办,面向国内外公开发行。本刊是中国期刊方阵“双效期刊”、全国中文核心期刊、中国科技核心期刊、CACJ中国应用型核心期刊,是集学术性和技术性于一体的综合性刊物,已被中国知网(CNKI)、万方数据库、重庆维普资讯、长江文库等全文收录,是国外多家知名检索机构的检索对象。

《矿冶工程》读者对象是采矿、选矿、冶金、材料、地质、化工等系统的有关生产人员、院校师生和管理人员。主要栏目为采矿、选矿、冶金、材料、矿冶行业企业管理等,内容新颖,是开拓、激发创造力的良师益友。

《矿冶工程》编辑部承接彩色、黑白及文字广告业务,欢迎各企事业单位来电来函联络。

《矿冶工程》真诚欢迎新、老订户向全国各地邮局订阅本刊,也可直接向编辑部订阅。邮发代号:42—58,大16开,定价20元/册,全年6册共120元。

地　　址:湖南省长沙市麓山南路966号
邮　　编:410012
电　　话:(0731)88657070/88657176/88657173
传　　真:(0731)88657186
E-mail:kuangyegongchengzz@163.com

联 系 人:黄小芳
开户名称:矿冶工程杂志(长沙)有限公司
开户银行:工商银行长沙左家垅支行
账　　号:1901013009201095502
网　　址:http://www.kygczz.com