

基于岩体块体化程度指标的边坡裂隙发育及稳定性分析^①

梁智星¹, 梁智元¹, 邓文轩¹, 陈庆发¹, 王浚名², 黄静毅²

(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: 针对广东大宝山露天台阶边坡裂隙发育及潜在失稳问题, 提出以岩体块体化程度作为岩体完整性的量化指标。基于已有资料划定西帮72个潜在失稳区域, 通过裂隙赋存特征调查与三维裂隙网络建模, 解构岩体结构特征, 并利用块体化程度分析法评估岩体完整性。结果表明: 所有区域裂隙发育完全且延展性良好, 具备形成块体的结构条件; 84.9%的区域优势裂隙组与边坡呈倾角互补等有利组合关系, 显著降低了滑移风险; 97.3%的区域岩体块体化程度小于27, 属于轻度块状化, 岩体完整性较好, 整体稳定性较高。仅6#、46#区域块体化程度值超过27, 达到中度块体化, 岩体结构劣化明显, 抗破坏能力显著下降, 这2块区域存在边坡潜在失稳风险, 应作为大宝山边坡后续灾害防治重点关注区域。

关键词: 边坡稳定性; 裂隙岩体; 台阶边坡; 块体化程度; 岩体完整性; 风险识别; 岩体评价指标

中图分类号: TD854; TD313

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.05.006

文章编号: 0253-6099(2025)05-0034-07

Fracture Development and Stability Analysis of Slopes Based on Rock Mass Blockiness

LIANG Zhixing¹, LIANG Zhiyuan¹, DENG Wenxuan¹, CHEN Qingfa¹, WANG Junming², HUANG Jingyi²

(1. School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China; 2. Guangdong Dabaoshan Mining Co., Ltd., Shaoguan 512127, Guangdong, China)

Abstract: As for fracture development and potential instability in the open-pit bench slopes in Dabaoshan in Guangdong Province, the blockiness was proposed to be taken as a quantitative measure of rock mass integrity. Based on the existing data, 72 potentially unstable zones on the western slope were identified. The structural characteristics of the rock mass were analyzed based on investigation of fracture occurrence characteristics and 3D fracture network modeling, and rock mass integrity was also evaluated by blockiness analysis. It is found that there are fully-developed fractures with good ductility in all the zones, creating the structural conditions for block formation; in 84.9% of the zones, the inclination angle of superior fractures and the slope inclination angle are supplementary, which can significantly reduce sliding risks; in 97.3% of the zones, the blockiness of rock mass is less than 27, indicating mild blockiness, good integrity of rock mass, and overall high stability. There are only rock mass with blockiness over 27 in Zone 6# and Zone 46#, presenting moderate blockiness. In these two zones, the rock mass structure is significantly degraded, leading to reduction in damage tolerance. It is concluded that there are potential risk of slope instability in those two zones, which should be taken as the focus in the subsequent disaster prevention and control for the slopes in Dabaoshan.

Key words: slope stability; fractured rock mass; bench slope; blockiness; rock mass integrity; risk identification; rock mass evaluation index

边坡稳定性对露天矿山安全生产至关重要^[1], 对存在大量裂隙切割的岩质边坡而言, 确保块体稳定就是保障边坡稳定。块体化程度 MB_i 作为一种评价岩体完整性的指标, 能从三维角度反映岩体的破碎程

度^[2], 进而反映存在可移动危险块体的可能性。分析岩体的块体化程度可以作为判断边坡岩体完整性的依据, 进而评估边坡在外部荷载作用下的变形和破坏风险, 对保障露天矿山安全生产具有重要意义。

① 收稿日期: 2025-04-28

基金项目: 岩土力学与工程国家重点实验室开放课题(Z016015)

作者简介: 梁智星(2000—), 男, 四川泸州人, 硕士研究生, 主要从事岩石力学与工程应用研究。E-mail: liangchen4352@163.com

通信作者: 陈庆发(1979—), 男, 河南郸城人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩体结构三维解构理论与技术研究。E-mail: chenqf@gxu.edu.cn

块体化程度是指岩体被裂隙切割成离散块体体系的程度,量化指标为块体百分比 B ,定义为岩体中被结构面切割圈闭形成的块体体积之和与岩体总体积的比值^[3-4]。与传统指标相比,块体化程度指标的优势在于它可以从三维角度评估岩体完整性^[5]。众多学者对块体化程度开展了理论研究:针对块体化程度等级划分不合理、未限定基础应用条件等缺陷,通过借鉴岩石质量指标 RQD、三维块度模数等计算原理对其进行了完善^[6];利用 General Block 软件建立裂隙网络模型及块体识别计算,总结归纳了裂隙延展性统计分布的离散程度对块体化程度的影响^[7];为确定各裂隙参数对块体化程度的影响,基于灰色关联分析法从根本上阐述了块体化程度指标的内在影响机制^[8]。

块体化程度以岩体的内部结构,特别是裂隙、断层等结构面的发育情况为分析对象^[7,9],在工程应用中主要侧重于块体之间的相互作用和稳定性。但在实际工程中,对裂隙岩体仍主要以整体或组合体进行分析,鲜有块体化分析。本文以广东大宝山露天台阶边坡中因裂隙发育而形成的潜在失稳区域为研究背景,通过采区原有工程地质特征区的潜在破坏模式^[10]选择重点区域进行裂隙调查与分析,根据调查分析结

果构建三维裂隙网络边坡模型用于块体化程度统计分析,最后依据块体化程度分级对岩体完整性进行判断。

1 矿山概况

广东大宝山露天矿采场生产规模 330 万 t/a,总采剥量为(2 700~3 000)万 t。矿区面积达 2.907 km²,采场南北方向上部长约 2 400 m、下部长约 1 480 m;采场最高开采标高 985 m、最低标高 433 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。地表高程 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,且均被矿体、断层角砾等物质所填充,至今没有活动迹象,比较稳定。

2 边坡裂隙调查分析

2.1 裂隙调查范围与类型

根据矿山生产要求,圈定的裂隙调查总体范围为大宝山露天采场西帮+697 m 平台至+985 m 平台,台阶高度 24 m,勘探线自南向北从 14 线至 61 线,总面积约为 55 万 m²。裂隙调查总体范围如图 1 所示。

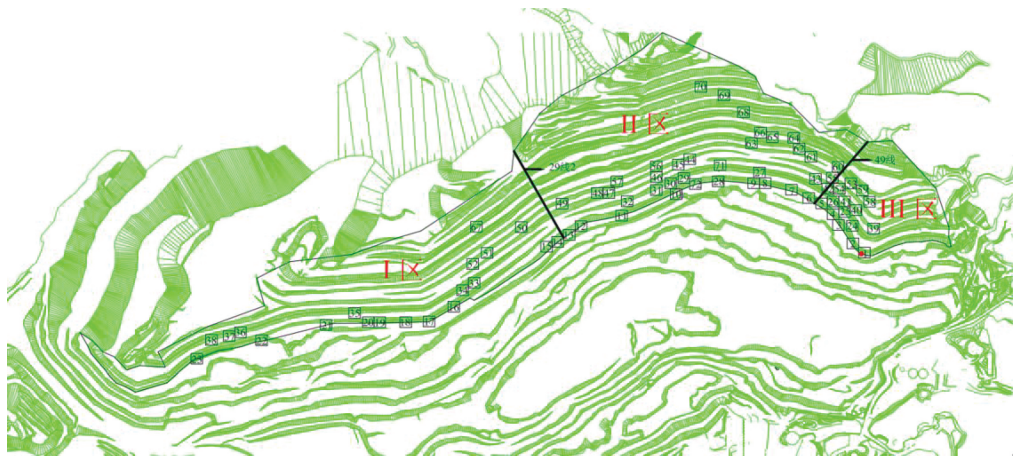


图 1 裂隙调查总体范围

Fig. 1 General scope for fracture investigation

结合裂隙调查范围结构面特征,采用赤平投影分析法分析边坡潜在破坏模式^[11],得到裂隙调查范围内边坡潜在破坏模式以圆弧破坏为主,其次还存在平面破坏、楔形破坏和倾倒破坏^[10]。

岩质边坡的变形与破坏存在不同模式^[12-13],各破坏模式与边坡裂隙特征相对应,如表 1 所示。通过相应的裂隙特征可以判断边坡潜在破坏模式^[14-15],反之,通过边坡的潜在破坏模式亦可判断边坡的裂隙特征。

根据裂隙调查总体范围内可能存在的潜在破坏模式所对应的裂隙特征,确定了裂隙调查的重点区域,以此划定了 72 个裂隙调查区域,各调查区域的具体位置见图 1,部分调查区实景图与利用精测网法^[16]测量得到的裂隙迹线(迹线长 2 m 以上)如图 2 所示。

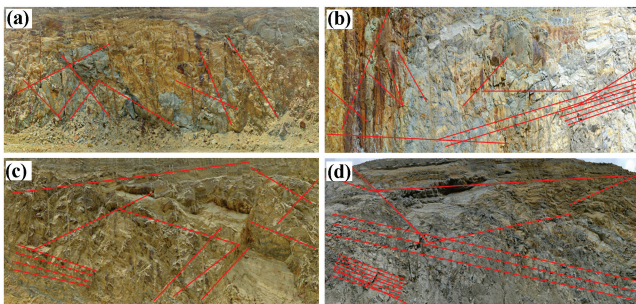
2.2 裂隙调查结果与分析

裂隙特征的分析步骤如下:首先使用 Dips 软件对各调查区域进行裂隙分组,根据裂隙分组得到裂隙组的发育频度,统计出优势组;然后统计裂隙的密集情况

表1 常见边坡破坏模式对应的裂隙特征

Table 1 Fracture features corresponding to traditional slope failure modes

破坏模式	对应裂隙特征
平面破坏	边坡结构面的走向、倾向与坡面基本一致,且边坡角大于结构面的倾角
楔形破坏	边坡存在两组结构面,且结构面的倾向相反,其组合交线的倾向与坡面倾向基本一致,且交线的倾角小于坡角而大于其摩擦角
圆弧破坏	含有均匀松散介质、冲积层、大型岩层破碎带;有3组或多种产状各异的软弱结构面存在,且与边坡面同向;含强风化碎裂结构的岩体;某些强度很低的岩石边坡;软弱结构面的产状各异且均不与边坡面同向;两侧面脱开
倾倒破坏	边坡逆层节理异常发育,且接近垂直边坡方向



(a) 1#区域; (b) 9#区域; (c) 18#区域; (d) 20#区域

图2 部分裂隙调查区域实景图

Fig.2 Actual condition of fractured rock mass in investigated zones

以及连续性情况;最后依据优势结构面与边坡产状的关系及结构面其他统计特征总结分析调查区域的稳定情况^[17]。其中,裂隙组的发育频度是指各组裂隙数目与总数的比值^[18],规定比值大于0.2的组为优势组;边坡产状与优势裂隙产状的夹角小于 30° 时,裂隙不利于边坡稳定性^[19-20]。裂隙密集程度分级标准如表2所示。裂隙连续性分级标准^[21]如表3所示。

表2 裂隙密集程度分级标准

Table 2 Grading of fracture spacing

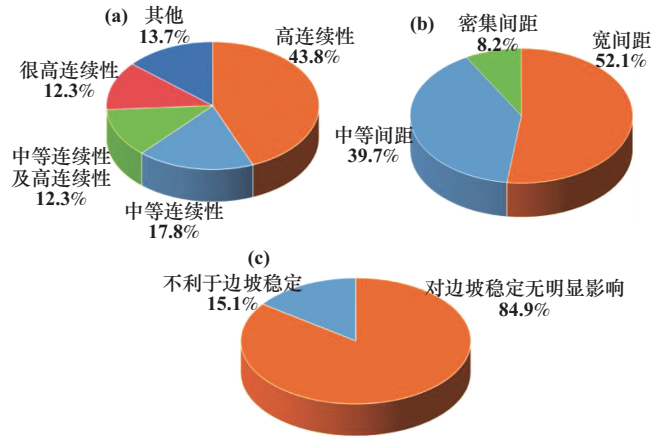
裂隙密集程度	间距/mm
极密集间距	<20
很密间距	20~60
密集间距	60~200
中等间距	200~600
宽间距	600~2 000
很宽间距	2 000~6 000
极宽间距	>6 000

统计所有调查区域的裂隙发育特征,结果如图3所示。在所有的裂隙调查区域中,高连续性裂隙调查

表3 裂隙连续性分级标准

Table 3 Grading of fracture continuity

裂隙连续性分级	迹长/m
很低连续性	<1
低连续性	1~3
中等连续性	3~10
高连续性	10~20
很高连续性	>20



(a) 裂隙连续性情况; (b) 裂隙间距分级; (c) 裂隙对边坡的影响

图3 裂隙发育特征统计

Fig.3 Statistics of fracture development features

区占比较大,裂隙间距主要为宽间距或中等间距,大多数裂隙对边坡稳定无明显影响(边坡产状与优势裂隙产状的夹角小于 30° 时),调查区裂隙总体对边坡稳定性不存在较大威胁。

《工程岩体分级标准》^[22]将评价岩体质量的2个基本因素定为岩体完整性与岩体抗压强度,其中岩体完整性与结构面发育程度密切相关。裂隙间距、迹长(延展性)是影响裂隙发育程度极大的2个因素。裂隙迹长(延展性)越长、间距越小,说明裂隙发育程度越高,岩体完整性越差,反之亦然。当裂隙组数一定时,裂隙发育程度主要与间距和延展性有关,结构面产状、分布类型等参数对裂隙影响较小,甚至可以忽略不计。从各个调查区域的裂隙分组、裂隙间距以及裂隙连续性分析,各个调查区域的裂隙发育程度比较完全,有较好的延展性,并且84.9%的调查区域的优势组裂隙与边坡组合属于有利的组合关系,裂隙对边坡稳定性不存在较大威胁。

3 边坡裂隙岩体结构解构及块体化程度分析

块体化程度采用块体百分比 B 表示,表征单元体是指块体百分比达到基本稳定时岩体的临界尺寸^[23]。

块体百分比越大,表示块体化程度越高、岩体完整性越差。

3.1 边坡裂隙岩体模型构建与分析

基于边坡岩体表面裂隙调查结果,利用 General Block 软件^[24]生成非裸露方向随机裂隙,构建各调查区域三维裂隙网络模型^[25-26],并重构各调查区域台阶边坡岩体结构^[27],再解构各调查区域边坡岩体结构,得到各调查区域的块体总数与复杂块体数,部分结果如表4所示。

表4 部分调查区岩体结构解构结果统计

Table 4 Analysis of rock structure in some investigated zones

调查区编号	块体总数/块	复杂块体数/块
1 [#]	750	39
2 [#]	554	65
3 [#]	1 103	181
4 [#]	868	95
	⋮	
70 [#]	4 076	682
71 [#]	2 432	312
72 [#]	1 950	275

3.2 边坡岩体块体化程度分析

岩体块体化程度评价分析方法计算流程为:① 在选定的研究区域开展结构面数据调查,并利用 Dips 软件统计、分析结构面数据;② 根据结构面分布规律及岩体物理力学性质,确定统计均质区大小;③ 基于均质区尺寸,构建三维岩体模型,进行三维裂隙网络模拟,并解算和识别赋存于岩体内的块体,分别计算各块度范围的块体体积百分比与岩体块体化程度;④ 根据块体化程度分级标准(见表5),确定岩体块体化程度级别^[6]。

表5 裂隙岩体块体化程度分级标准

Table 5 Grading criteria for blockiness of fractured rock mass

块体化程度	块体化程度分级	岩体完整性	工程地质特征
<7	非块状化岩体	完整	结构面间距较大,结构面结合程度好或一般,岩体呈整体状或巨厚层状结构
7~27	轻度块状化岩体	较完整	结构面发育程度较好,结合程度好或一般,岩体呈块状或厚层状结构
27~55	中度块状化岩体	较破碎	有多组较发育的结构面,结合程度差或一般,岩体呈块状或镶嵌碎裂状结构
55~85	块状化岩体	破碎	有多组发育的结构面,结合程度较差,岩体呈块状或碎裂状结构
≥85	严重块状化岩体	极破碎	有较多杂乱无序的结构面,且结合程度很差,岩体被结构面切割成散体状结构

基于裂隙岩体内结构体识别与计算结果,按照 0~0.008、0.008~0.03、0.03~0.2、0.2~1.0、>1.0 m³共5个块度范围^[6]分类统计各块度范围的结构体总体积 V_i ($i=1, 2, \dots, 5$):

$$V_i = \sum_{m=1}^n V_m \quad (1)$$

式中: V_m 为各结构体的体积,m³; n 为第 i 个块度范围内的结构体数量,个。

根据式(1)计算结果,分别计算各块度范围结构体所对应的块体体积百分比 B_i :

$$B_i = \frac{V_i}{V} \quad (2)$$

式中 V 为整个岩体的总体积,m³。

根据式(2)计算结果,计算岩体块体化程度 MB_i :

$$MB_i = B_1 + \frac{1}{2}B_2 + \frac{1}{3}B_3 + \frac{1}{4}B_4 + \frac{1}{5}B_5 \quad (3)$$

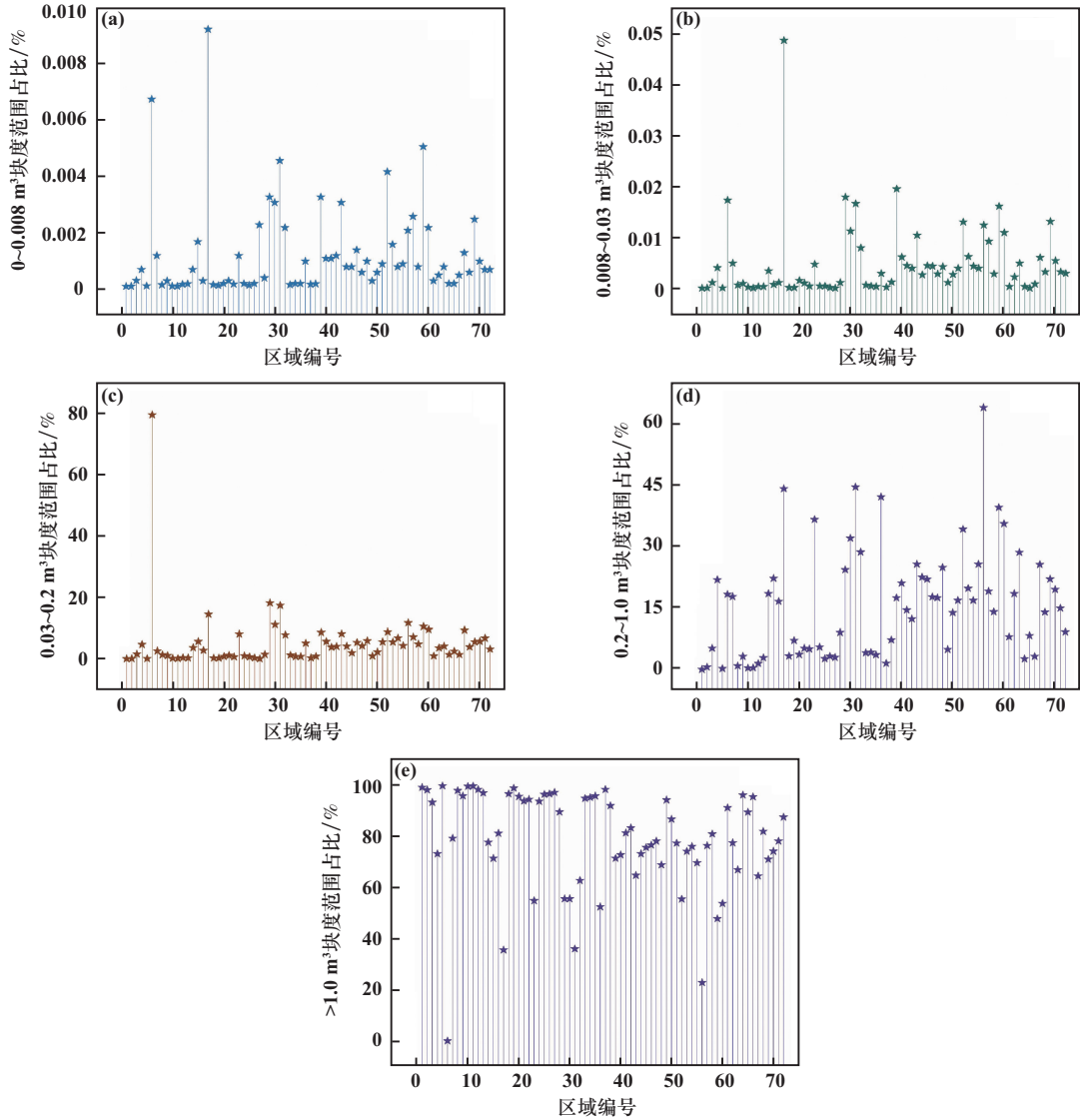
依据岩体结构解构结果,得到各个裂隙调查区不同块度范围结构体所对应的块体体积百分比,如图4所示。各调查区 0~0.008 m³范围内的块体占比极小,均不到 1%;绝大部分调查区 >1.0 m³范围内的裂隙块度占比达到 50%以上,有些区域甚至在 90%以上;6[#]、17[#]、31[#]、56[#]、59[#]调查区以 0.2~1.0 m³范围内的块体为主。

根据图4统计结果,利用式(3)计算得到各个调查区域岩体块体化程度值,如图5所示。由图5可知,裂隙调查区内岩体块体化程度等级呈现显著的空间分布特征:轻度块状化岩体区域占研究区总面积的 97.3%,构成优势分布;中度块状化岩体区域仅占 2.7%,表明边坡岩体完整性较好。6[#]、46[#]调查区岩体块体化程度达到中度等级。由于中度块状化岩体结构面发育程度较高,岩体稳定性相对较差,致使这2个区域潜在失稳风险显著增高。基于灾害防治的优先级原则,建议将 6[#]、46[#]区域作为大宝山地质灾害重点防治区域,采取严密的边坡监测和针对性的防治措施。

4 块体化程度优势分析

块体化程度可以全面反映岩体结构整体性。相较于传统评价指标,块体化程度评价指标具有以下优势:

1) 规避了人为主观判断对最终评价结果的影响。块体化程度评价体系通过应用 Dips 软件对结构面数据进行系统分析与统计处理,结合 General Block 软件构建三维岩体模型,并对岩体结构进行三维重构,从而获取块体化程度分析所需的基础数据。在整个过程中,评价主要依赖于软件工具的应用,显著提升了评价



(a) B_1 统计结果; (b) B_2 统计结果; (c) B_3 统计结果; (d) B_4 统计结果; (e) B_5 统计结果

图4 各调查区域岩体块体化体积百分比

Fig.4 Volume percentage of rock blockiness in each investigated zones

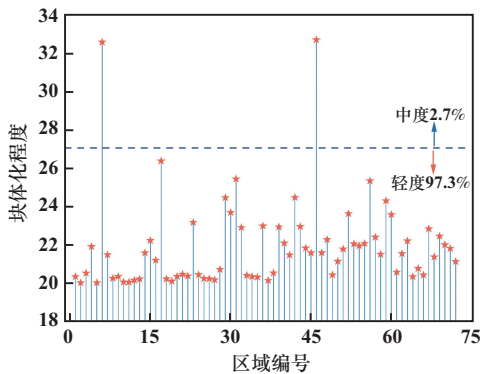


图5 各调查区域岩体块体化程度值

Fig.5 Blockiness of rock mass in each investigated zones

过程的科学性与系统性,有效减少了人为主观因素对分析结果可能产生的干扰。

2) 更全面反映岩体结构。在块体化程度的评价体系中,需要对裂隙的发育程度、结构面产状等进行系统的调查与分析。此外,该评价体系还综合考虑了岩体中岩块的几何形态、大小分布及相互连接状态,能够较为全面地反映岩体的结构特征。

3) 适用范围更广。采用块体化程度对岩体完整性进行评级,主要包括裂隙调查分析与岩体结构解构两个方面。这一方法不仅适用于常规岩体的评价,还能有效应用于复杂地质条件下的岩体分析,特别是在节理或裂隙发育复杂、岩体异质性较强的区域。

5 结论

1) 根据裂隙调查总体范围内可能存在的潜在破坏模式所对应的裂隙特征,选定72个裂隙调查重点区

域,裂隙迹长较长,间距较小,延展性良好,裂隙发育程度比较完全,近85%的区域的的优势组裂隙与边坡的组合关系属于有利组合关系,对边坡稳定性无明显威胁。

2) 基于 General Block 软件的边坡岩体三维重构分析表明,97.3%的调查区域块体化程度小于27,属轻度块体化岩体,完整性较好且失稳风险较低;而6[#]、17[#]、31[#]、46[#]、56[#]、59[#]等区域呈现异常:其中6[#]、46[#]区域块体化程度超过27,达到中度块体化,其余区域因 $>1.0\text{ m}^3$ 块体占比不足50%(以 $0.2\sim 1.0\text{ m}^3$ 破碎块体为主),岩体结构劣化明显,抗破坏能力显著下降。这些异常区域集中体现了边坡潜在失稳风险,应作为大宝山边坡后续灾害防治重点关注区域。

3) 与传统岩体完整性评级指标相比,块体化程度在客观性、全面性和适用性方面均有所提升。通过对大宝山台阶边坡块体化程度的统计分析,高效科学地评估了边坡岩体的完整性,为同类工程实践提供了新颖且合理的评估方法和理论依据。

参考文献(References):

- [1] 卢栋,富国凯,董贤阳,等.不同开挖状态下高陡边坡破坏特征及稳定性研究[J].矿冶工程,2024,44(6):1-5.
LU Dong, FU Guokai, DONG Xianyang, et al. Failure characteristics and stability of high and steep slope under different excavation conditions[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(6):1-5.
- [2] 陈庆发,牛文静,黄仁贵,等.基于块体化程度和物元可拓理论的顶板稳定性分级方法及应用[J].工程科学学报,2015,37(12):1550-1556.
CHEN Qingfa, NIU Wenjing, HUANG Rengui, et al. Roof stability classification method based on blockiness and the matter-element extension theory and its application[J]. Chinese Journal of Engineering, 2015,37(12):1550-1556.
- [3] 刘晓非.裂隙岩体块体化程度研究[D].北京:中国地质大学(北京),2010.
LIU Xiaofei. Study on fragmentation degree of fractured rock mass[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2010.
- [4] 夏露,刘晓非,于青春.基于块体化程度确定裂隙岩体表征单元体[J].岩土力学,2010,31(12):3991-3996.
XIA Lu, LIU Xiaofei, YU Qingchun. Determining representative elementary volume of fractured rock mass based on blockiness analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010,31(12):3991-3996.
- [5] 和大钊,胡斌,姚文敏,等.基于块体化程度和云模型的露天矿边坡稳定性分级评价方法[J].矿冶工程,2017,37(4):6-10.
HE Dazhao, HU Bin, YAO Wenmin, et al. Stability grading method for open pit slope based on blockiness and cloud model[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017,37(4):6-10.
- [6] 陈庆发,牛文静,郑文师,等.裂隙岩体块体化程度评价方法的若干问题修正[J].岩土力学,2018,39(10):3727-3734.
CHEN Qingfa, NIU Wenjing, ZHENG Wenshi, et al. Correction of the problems of blockiness evaluation method for fractured rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018,39(10):3727-3734.
- [7] 夏露,谢娟,于青春.裂隙延展性统计分布离散性对岩体块体化程度REV的影响[J].水文地质工程地质,2019,46(4):112-118.
XIA Lu, XIE Juan, YU Qingchun. Influence of statistical distribution dispersion in the fracture size on blockiness REV of fractured rock masses[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019,46(4):112-118.
- [8] 陈庆发,杨子超,尹庭昌,等.块体化程度指标的内在影响机制[J].岩石力学与工程学报,2020,39(增刊2):3488-3495.
CHEN Qingfa, YANG Zichao, YIN Tingchang, et al. Internal influence mechanism of block degree index[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020,39(S2):3488-3495.
- [9] 谢娟.裂隙大小统计分布离散性对岩体块体化程度REV的影响[D].北京:中国地质大学(北京),2020.
XIE Juan. The influence of statistical distribution dispersion in fracture size on blockiness rev of fractured rock masses[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [10] 刘勇锋,魏杰,魏明尧,等.广东省大宝山矿业公司露天采场边坡稳定性分析[R].北京:中国安全生产科学研究院,2023.
LIU Yongfeng, WEI Jie, WEI Mingyao, et al. Analysis of slope stability of open-pit mining area of Dabaoshan Mining Company in Guangdong Province[R]. Beijing: China Safety Production Science Research Institute, 2023.
- [11] WANG Y, YAO D X, LU H F, et al. Analysis and preventive measures of stereographic projection of stratified rock slope[J]. Advances in Geosciences, 2017,7(5):610-620.
- [12] RAGHUVANSHI T K. Governing factors influence on rock slope stability: Statistical analysis for plane mode of failure[J]. Journal of King Saud University - Science, 2019,31(4):1254-1263.
- [13] RAGHUVANSHI T K. Plane failure in rock slopes: A review on stability analysis techniques[J]. Journal of King Saud University - Science, 2019,31(1):101-109.
- [14] 宋腾蛟,茅献彪,陈剑平,等.复杂结构岩质边坡破坏模式分析中结构面优势分组的影响研究[J].工程地质学报,2025,33(2):595-603.
SONG Tengjiao, MAO Xianbiao, CHEN Jianping, et al. Study on influence of structural planes dominant grouping in complicated structural rock slope failure mode analysis[J]. Journal of Engineering Geology, 2025,33(2):595-603.
- [15] 黄帅,王荣,汪洪祥,等.结构面参数对顺层边坡破坏模式的影响规律[J].金属矿山,2015(10):140-145.
HUANG Shuai, WANG Rong, WANG Hongxiang, et al. Study on influence laws of rock structural plane parameters on failure mode of bedding slope[J]. Metal Mine, 2015(10):140-145.
- [16] 王资平.坝基岩体结构特征分析及程序实现:以如美水电工程为例[D].成都:成都理工大学,2021.
WANG Ziping. Structural characteristics analysis and program realization of dam foundation rock mass[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021.
- [17] 刘博.北京地区公路边坡岩石块体发育规律研究[D].北京:中国地质大学(北京),2020.
LIU Bo. Research on rock block development law of highway slope in

- Beijing area[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [18] 陈东辉. 裂隙岩体的等效结构地质力学模型与结构稳定性分析[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- CHEN Donghui. Equivalent structural geomechanical model and structural stability analysis of fractured rock masses [D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [19] 白云峰, 周德培, 冯君. 顺向坡岩层走向与边坡走向夹角的上限值[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(3): 326-329.
- BAI Yunfeng, ZHOU Depei, FENG Jun. Upper limit of angle between strikes of slope and strata for dip slope[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2005, 40(3): 326-329.
- [20] 柴波, 殷坤龙. 顺向坡岩层倾向与坡向夹角对斜坡稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 628-634.
- CHAI Bo, YIN Kunlong. Influence of intersection angle between trend of slope and strata on stability of bedding slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3): 628-634.
- [21] 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 theory of fractured rock mass [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007.
- [22] 中华人民共和国水利部. 工程岩体分级标准: GB/T 50218—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for engineering classification of rock mass: GB/T 50218—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [23] 王晓明, 杜玉芳, 梁旭黎. 基于非均质系数的裂隙岩体表征单元体研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(2): 55-60.
- WANG Xiaoming, DU Yufang, LIANG Xuli. Investigation of the representative elementary volume of fractured rock mass using the homogeneity index[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(2): 55-60.
- [24] CHEN Q F, YIN T C, JIA H Y. Selection of optimal threshold of generalised rock quality designation based on modified blockiness index[J]. Advances in Civil Engineering, 2019(1): 1340549.
- [25] WEI S Y, LI Y Y, SHANG Y J, et al. Stability analysis of fractured rock mass around underground excavations based on a three-dimensional discrete fracture network[J]. Environmental Earth Sciences, 2022, 81(3): 65.
- [26] WU N, LIANG Z Z, ZHANG Z H, et al. Development and verification of three-dimensional equivalent discrete fracture network modelling based on the finite element method[J]. Engineering Geology, 2022, 306: 106759.
- [27] 陈庆发, 牛文静, 郑文师, 等. 崩落法回采巷道顶板危险区域确定的解构法和数值模拟法[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(5): 1006-1015.
- CHEN Qingfa, NIU Wenjing, ZHENG Wenshi, et al. Deconstruction method and numerical simulation method of determination of tunnel roof's dangerous area in caving stoping process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(5): 1006-1015.

引用本文: 梁智星, 梁智元, 邓文轩, 等. 基于岩体块体化程度指标的边坡裂隙发育及稳定性分析[J]. 矿冶工程, 2025, 45(5): 34-40.

LIANG Zhixing, LIANG Zhiyuan, DENG Wenxuan, et al. Fracture development and stability analysis of slopes based on rock mass blockiness[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(5): 34-40.

(上接第33页)

- [9] ZHANG J, ZHANG A, LI J, et al. Gray correlation analysis and prediction on permanent deformation of subgrade filled with construction and demolition materials[J]. Materials, 2019, 12(18): 3035.
- [10] YANG J Q, CUI Z D. Influences of train speed on permanent deformation of saturated soft soil under partial drainage conditions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 133: 106120.
- [11] SHI L W, YANG Z, WANG D Y, et al. Gradual meso-structural response behaviour of characteristics of asphalt mixture main skeleton subjected to load[J]. Applied Sciences, 2019, 9(12): 2425.
- [12] LI J, ZHANG J H, QIAN G P, et al. Three-dimensional simulation of aggregate and asphalt mixture using parameterized shape and size gradation[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(3): 04019004.
- [13] ZHANG J H, LI J, YAO Y S, et al. Geometric anisotropy modeling and shear behavior evaluation of graded crushed rocks[J]. Construction and Building Materials, 2018, 183: 346-355.
- [14] QIAN J F, YAO Y S, LI J, et al. Resilient properties of soil-rock mixture materials: Preliminary investigation of the effect of composition and structure[J]. Materials, 2020, 13(7): 1658.
- [15] ARULRAJAH A, MOHAMMADINIA A, MAGHOOL F, et al. Tire derived aggregates as a supplementary material with recycled demolition concrete for pavement applications[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 230: 129-136.
- [16] WERKMEISTER S, DAWSON A R, WELLNER F. Permanent deformation behavior of granular materials and the shakedown concept[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2001, 1757(1): 75-81.
- 引用本文: 谢唐新, 何忠明, 黄超. 建筑废弃物-红黏土混合料永久变形试验研究[J]. 矿冶工程, 2025, 45(5): 27-33.
- XIE Tangxin, HE Zhongming, HUANG Chao. Experimental study on permanent deformation of a blend of construction waste and red clay[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(5): 27-33.