

THE CHINESE JOURNAL OF GEOLOGICAL HAZARD AND CONTROL

中国科技核心期刊 《中国科学引用文数据库》来源期刊 Caj-cd规范获奖期刊

## 广州炭步石灰石大型露天矿边坡危岩体崩落行为分析

赵建军

Analysis on kinematic behavior of potential large-scale rockfall in the Tanbu limestone open-pit mine in Guangzhou City, Guangdong Province

ZHAO Jianjun

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202401007

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

## 基于AHP-3DEC的危岩落石危险性分区与评价

Hazard zoning and assessment of rockfalls based on AHP-3DEC 石润, 李嘉雨, 陈明浩, 贾哲强, 邱晓东 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(3): 127-135

## 危岩体精细调查与崩塌过程三维场景模拟

Comprehensive analysis of hazardous rock mass and simulation of potential rockfall processes using 3D terrain model: A case study of the high cut slope near damsite of a hydropower station in southern China 王明辉,曹熙平,谯立家 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(6): 86–96

## 四川名山白马沟危岩体稳定性评价与落石轨迹分析

Stability evaluation and rockfall trajectory analysis of the Baimagou dangerous rock mass in Mingshan County of Sichuan Province 张永海, 谢武平, 罗忠行, 翟世斌 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(4): 37-46

## 危岩带稳定性分析与落石轨迹预测

Stability of dangerous rockmasses and prediction of rockfall trajectory: A case study at Wansui Mountain in Ganzi County of Sichuan Province

王渝源, 张友谊, 王云骏 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(3): 12-25

## 四川宝兴张家沟危岩体稳定性及运动学分析

Analysis of stability and kinematics of the dangerous rock mass in Zhangjiagou, Baoxing, Sichuan Province 陈锡锐, 刘虹强, 杨剑红, 艾其凯, 钟波, 蔡国军 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(2): 81-89

## 无人机技术在超高陡边坡危岩体半自动识别中的应用

Application UAV technology semi-automatic identification dangerous rock masses on ultra-high steep slopes 程雨柯, 李亚虎, 夏金梧, 侯赠, 陈娜 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(1): 143–154



关注微信公众号,获得更多资讯信息

#### DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202401007

赵建军. 广州炭步石灰石大型露天矿边坡危岩体崩落行为分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(3): 9-17.

ZHAO Jianjun. Analysis on kinematic behavior of potential large-scale rockfall in the Tanbu limestone open-pit mine in Guangzhou City, Guangdong Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(3): 9-17.

# 广州炭步石灰石大型露天矿边坡危岩体崩落行为分析

## 赵建军

(广东省地球物理勘查院,广东广州 510800)

摘要:广州炭步石灰石矿山经30余年开采,形成了最高约195m的台阶式超高边坡。2012—2022年,矿区发生边坡及危 岩体崩塌灾害26起,调查发现坡面仍存有16处危岩体。矿山露天边坡存在的崩塌灾害风险,已威胁到矿山的生产活 动。开展危岩体崩落行为分析,对制定矿山危岩体崩塌防范措施意义重大。文章以WY3、WY11危岩体为研究对象,采 用 Rockfall 数值模拟软件,设置1000kg重量落石,从同一起点分50次崩落,计算落石的崩落轨迹、弹跳高度、运动动能等 行为。结果表明:84%以上落石可达坡脚线,落石弹跳高度为5~15m,落石最大总动能302.3~399.2kJ。计算落石崩落轨 迹与研究区实际发生落石轨迹相符。Rockfall的崩落行为数值模拟分析成果为矿山危岩体落石危险性分区及防护措施选 择提供了有效的数据支撑,文章研究也为大型露天矿山边坡危岩体崩落行为研究提供了具体案例参考。 关键词:危岩体;崩落行为;Rockfall;数值模拟;落石轨迹;危险性分区

中图分类号: P642.21 文献标志码: A 文章编号: 1003-8035(2025)03-0009-09

## Analysis on kinematic behavior of potential large-scale rockfall in the Tanbu limestone open-pit mine in Guangzhou City, Guangdong Province

#### ZHAO Jianjun

(Guangdong Provincial Institute of Geophysical Exploration, Guangzhou, Guangdong 510800, China)

**Abstract:** The Tanbu limestone mine in Guangzhou has been in operation for over 30 years, resulting in the formation of a series of terraced slopes, with the highest reaching approximately 195 m. Between 2012 and 2022, the mining area experienced 26 incidents of slope and dangerous rock body collapses. Recent investigations have identified 16 remaining dangerous rock bodies on these excavated slopes. The risk of slope collapse in this open-pit mine poses a significant threat to ongoing mining operations. Analyzing the collapse behavior of these dangerous rock masses is of great significance for developing effective preventive measures for the collapse of dangerous rock mass in mines. This study focuses on the WY3 and WY11 dangerous rock mass, using Rockfall numerical simulation software. A 1 000 kg rockfall was simulated, released from the same starting point 50 times to calculate its fall trajectory, bounce height, kinetic energy, and other related behaviors. The results indicate that over 84% of the falling rocks reached the foot of the slope, with the bounce heights ranging between 5 and 15 m and total kinetic energy between 302.3 and 399.2 kJ. The simulation results closely matched the actual historical paths observed in the study area. The numerical simulation results of these rockfall behaviors based on the Rockfall software

provide valuable data to support the identification of rockfall risk zones and the selection of appropriate protective measures. This study also offers a specific case reference for the analysis of rockfall behavior of dangerous rock masses in large open-pit mine slopes.

Keywords: rock mass; kinematic behaviors of potential rockfall; Rockfall; numerical simulation; rockfall track; risk zoning

#### 0 引言

危岩体是受多组结构面控制,已出现可能发生坠落、 滑移、倾倒等变形破坏的岩体,是潜在的崩塌体<sup>[1-2]</sup>。 矿山开采等形成的高陡岩质边坡,受节理裂隙等结构面 发育的影响及矿山开采卸荷、爆破振动等因素影响,更 易形成危岩体,引发崩塌地质灾害<sup>[3-5]</sup>。因此,开展危岩 体落石运动行为研究,可以为制定矿山边坡防护措施提 供依据,具有极为重要的作用。

危岩体识别、稳定性分析与评价、崩落轨迹、危险 范围预测、风险评价及工程防治措施等国内外研究较 多。霍磊晨等<sup>[6]</sup>应用 PSO-SVM 算法开展危岩体识别方 法试验与工程应用研究,以期为现场建立一套基于时 域、频域与能量等多层次动力学指标的危岩体识别方 法与评价指标体系。孙敬辉等「"以重庆甑子岩边坡为 研究对象,采用 Rockfall 数值模拟崩塌落石运动轨迹、 能量、速度等,以此评价落石风险及危险性等级。何宇 航等[8]通过对九寨沟景区悬沟危岩体的威胁范围、危害 对象及承灾体特征分析,应用了矩阵法评价危岩体风险 性。许强等<sup>[9]</sup>采用了蒙特卡洛法对四川丹巴县双拥路 危岩崩塌的稳定性及多种工况失稳概率进行了研究,应 用 Rockfall 软件模拟落石轨迹,并提出了单体危岩崩塌 的风险评价方法。Shi 等<sup>[10]</sup>采用块体离散元法(DEM) 模拟计算云南某公路边坡危岩体不同工况安全系数。 Sengani 等<sup>[11]</sup>南非林波波大学地质采矿研究人员以林波 波 R518 公路为研究对象,进行了落石稳定性分析,建立 了改进的落石危害矩阵图,并利用 Rockfall 软件分析了 坡高、植被密度、坡角、落石速度等参数对落石发生的 影响。Erfen等<sup>[12]</sup>马来西亚沙巴大学研究人员利用 Rockfall 模拟落石终点距离、弹跳高度及障碍物设置, 对岩质边坡失稳风险进行评估。Bourgeois 等<sup>[13]</sup>美国斯 波坎采矿研究部人员从坡高、坡角、坡体材料和岩石尺 寸因子,分析了露天矿边坡落石轨迹相关影响参数。上 述国内外研究丰富了危岩体崩落轨迹影响参数与落石 风险性评价方法,但无法精准定义落石的运动行为,合 理防治措施的确定依据不足。

Rockfall 软件能够快速获得人为规定的剖面上落石

的到达概率、弹跳高度、运动速度和能量等结果,本文用 Rockfall 来模拟计算落石行为,为合理防治措施选择和防治工程设计提供参考。

广州炭步石灰石矿是深凹大型露天矿,地面标高 -50~202.95 m,东、西、南侧为山坡,中间低,向北开口 呈土箕型,至 25 m标高水平连成一个采场。矿山开采 已形成长约1010 m、宽约730 m、最低开采标高约-50 m 的椭园形凹坑。2002 年 9 月—2023 年 5 月,矿山完成 了-110~-80m 延深勘查、矿产资源开发利用方案及边 坡稳定性分析等专题报告。

前人对危岩体开展的系列研究及专项勘查、边坡 稳定性分析等工作,为本文研究奠定了重要的地质基 础。本次研究工作建立在地质调查、高分辨率实景三 维模型、激光点云数据结构面全自动群聚分析等基础 上,获取相关数据、图表等素材,选取代表性地质断面, 基于 Rockfall 数值模拟危岩体崩落行为,研究落石运动 轨迹、弹跳高度、动能等,划分潜在威胁区及危险性等 级,并提出相应防范措施。

#### 1 研究区地质背景

## 1.1 矿山边坡基本概况

矿山分台阶开采,矿体部分台阶高 15 m,中风化层 台阶高度 10 m,第四系表土层台阶高度 8 m,最终边帮 角为 46°。目前已形成了 85,70,55,40,25,10,-5,-20, -35,-50 m 十个较为规范台阶。2012 年矿山对西侧边 帮进行扩帮开采,2020 年矿山对北部、东南部、南部及 西南部边帮进行扩帮开采,目前矿山主要是在矿区东南 部、南部及西南部进行扩帮开采。2012—2022 年,矿区 发生边坡及危岩体崩塌事件 26 起,造成矿区交通道路 及排水系统毁坏或堵塞,威胁矿山来往车辆和作业人员 的安全。

#### 1.2 地质环境概况

1991—2020年, 研究区年平均降雨量1889.3 mm, 极端年最大降雨量2865.0 mm, 日最大降雨量383.4 mm (2010年4月8日), 最大小时降雨量127 mm(2017年5 月7日)。每年4—9月为雨季, 降雨量占全年降雨量 的77.68%。

· 10 ·

研究区出露的地层为下石炭统石磴子组第四段上 层粉砂岩与炭质页岩(C<sub>1</sub>s<sup>4-2</sup>)、下石炭统石磴子组第四 段下层(C<sub>1</sub>s<sup>4-1</sup>)泥质灰岩与炭质页岩、下石炭统石磴子 组第三段灰岩(C<sub>1</sub>s<sup>3-1</sup>)、下石炭统测水组砂页岩与石英砂 岩(C<sub>1</sub>c)、上三叠统小坪组砂页岩与石英砂岩(T<sub>3</sub>x)及第 四系残坡积黏性土。

研究区地下水类型主要有松散岩类孔隙水、层状 岩类裂隙水、碳酸盐岩类岩溶裂隙水,对边坡影响较大 的是岩溶裂隙水。目前矿山最低处已开采至-50m水 平标高,盖层早已剥离,地下含水层已充分暴露,地下水 类型已由原承压水转变为潜水。地下水主要由大气降 水补给,经坡面排泄或裂隙下渗至集水坑,由水泵抽排 到矿区排水沟排放。研究区边坡汇水面积约1.025 km<sup>2</sup>, 最大小时汇水量约130175 m<sup>3</sup>,需密切关注连续强降雨 造成短暂地下水位急剧抬升对边坡稳定性不利影响。

1.3 危岩体基本特征

研究区共发现危岩体 16 处, 编号 WY1—WY16, 除 WY2 位于东侧自然斜坡, 其余均位于开采形成的断面上, 其规模以中小型为主、个别为大型, 稳定性较差—差, 危险性中等—大。危岩体分布见图 1、典型危岩体发育形态照片见图 2。

#### 2 危岩体稳定性分析与运动过程模拟

2.1 稳定性分析

危岩体的分布、稳定性由结构面、岩体完整性及坡 面特征<sup>[14-16]</sup>等控制,本文选择研究区典型倾倒式崩塌 WY3、滑移式崩塌 WY11 共两处危岩体分析评价其稳 定性。

## 2.1.1 定性分析

WY3位于东侧边坡标高-3~30m处(图1)。边坡 坡向264°、坡角70°,岩层产状95°∠42°,主要发育产 状85°∠80°一组节理裂隙。WY11位于西侧边坡标高 -40~38m处,边坡坡向95°~105°、坡角55°~80°,岩 层产状240°~260°∠45°~50°,主要发育两组节理裂 隙,L1:40°∠60°,L2:110°∠75°。采用赤平投影分析单 一结构面、结构面组合体与边坡倾向、坡角的稳定性关 系,结果见图3。由图可知:WY3危岩体单一结构面与 结构面组合体均与边坡坡向相反,属于稳定结构面,但 L1节理近直立,被层面切割后易发生倾倒式崩塌,见 图4(a);WY11危岩体两组节理及层面单一结构面中, L2为顺坡向结构面,倾角≤坡角,为不稳定结构面,调 查时发现局部底部存在临空面,易发生滑移式崩塌, 见图4(b);L1与L2组成的楔形体交棱线的倾向与坡 向斜交,倾角小于边坡坡角,属于不稳定结构,易发生 崩塌。

## 2.1.2 定量评价

据现场调查, WY3 潜在破坏模式为倾倒式崩塌、 WY11 潜在破坏模式为滑移式崩塌。按照《崩塌防治工 程勘查规范(试行)》(T/CAGHP 011—2018),对于危岩 重心位于危岩底面中点外侧的倾倒式崩塌,采用式(1) 计算;对于后缘有陡倾角裂隙的滑移式崩塌,采用 式(2)计算。按照《崩塌防治工程设计规范(试行)》 (T/CAGHP 032—2018),稳定性计算有现状工况(天然 自重+裂隙水压力+地面荷载)、暴雨工况(饱和自重+裂 隙水压力+地面荷载)及地震工况(自重+裂隙水压 力+地面荷载+地震力)。研究区地震烈度为VI度,稳定 性计算不用考虑地震工况,暴雨强度重现期 50 a、24 h 最大降雨量 291.3 mm。稳定性计算结果评价见表1。

$$F_{\rm s} = \frac{\sigma_{\rm t} b^2}{6[Q_{\rm h} h_0 + (G + Q_{\rm v})e] + 2Vh_{\rm w}}$$
(1)

$$F_{\rm s} = \frac{\left[(G+Q_{\rm v})\cos\theta - (Q_{\rm h}+V)\sin\theta - U\right]\tan\varphi + cL}{(G+\theta_{\rm v})\sin\theta + (Q_{\rm h}+V)\cos\theta} \quad (2)$$

式中:F<sub>s</sub>——稳定性系数;

 $\sigma_{\rm t}$ ——岩体抗拉强度/kPa;

- b——后缘裂隙延伸段下端到基座顶面前缘的水 平距离/m;
- V——裂隙水压力/(kN·m<sup>-1</sup>);
- h<sub>w</sub>——裂隙充水高度/m;
- U——滑面水压力/(kN·m<sup>-1</sup>);
- L-----滑面长度/m;
- c——滑面黏聚力/kPa;
- *φ*——滑面内摩擦角/(°);
- *θ*——滑面倾角/(°);

 $Q_{\rm h}$ 、 $Q_{\rm y}$ ——水平与垂直地震荷载/(kN·m<sup>-1</sup>);

G——危岩的重量/(kN·m<sup>-1</sup>);

e——块体重心偏心距/m;

2.2 危岩体运动过程模拟

危岩体从高处向下崩塌,其崩落运动轨迹与岩块形状、山坡坡度、坡体岩性、坡面形态及植被发育状况等因素有关<sup>[16-19]</sup>,落石只有在坡度小于约27°时,才停积于坡脚;随坡度增大,可表现为滑动、滚动、跳跃和自由崩落等方式,大部分或全部运移至坡脚。

## 2.2.1 计算原理

危岩体失稳破坏后的运动模拟计算采用 Rockfall 软件进行,计算原理简述如下。



图 1 研究区地形地质与危岩体分布图



## (1)假设条件

①危岩体运动时,被视为一质点,不考虑空气阻力 作用;

②沿坡面滚动时,将危岩体视为具有一定质量和惯 性矩的球体; ③计算运动轨迹时,不考虑危岩体尺寸大小,其质 量仅用于计算运动动能;

④将坡面同一类岩土体的受荷动力性能视为常数。 (2)碰撞运动轨迹

设危岩体以初始速度 $(v_{0x}, v_{0y})$ ,从坡面 $(x_0, y_0)$ 处



(a) WY4 危岩体

(b) WY8 危岩体





(a) WY3 危岩体



图 3 边坡危岩体赤平投影分析结构图

Fig. 3 Stereographic projection analysis of dangerous rock mass structures on the slope



(a) WY3 倾倒式崩塌

(b) WY11 滑移式崩塌

图 4 危岩体潜在破坏模式 Fig. 4 Potential failure modes of dangerous rock masses

基本稳定

不稳定

スロールコードでに上てい昇中のス Table 1 Evaluation table for stability calculation of dangerous rock masses												
危岩体编号	破坏模式	防治工程等级	工况	稳定性系数	稳定性评价							
	倾倒式	Ι	天然	1.36	基本稳定							
WY3			暴雨	0.98	不稳定							

**在些体验它被让答**还从非

天然

暴雨

脱离母岩向下崩落,危岩体运动轨迹为式(3)。

I

滑移式

$$\begin{cases} x = x_0 + v_{0x}t \\ y = y_0 + v_{0y}t + \frac{1}{2}gt^2 \end{cases}$$
(3)

1 27

0.91

危岩体撞击坡面前的瞬时速度(v<sub>lx</sub>, v<sub>ly</sub>)分解到坡 面的法向与切向速度见式(4)。

$$\begin{cases} v_{1N} = (v_{1y})\cos(\theta) - (v_{1x})\sin(\theta) \\ v_{1T} = (v_{1y})\sin(\theta) + (v_{1x})\cos(\theta) \end{cases}$$
(4)

式中: v<sub>IN</sub>、v<sub>IT</sub>——岩块碰撞前沿坡面法向、切向速度/ (m·s<sup>-1</sup>);

*θ*——山坡坡角/(°)。

岩块撞击坡面遭受变形与摩擦2种能量损失,碰撞 坡面后沿坡面法向与切向的速度见式(5)。

$$\begin{cases} v_{2N} = R_N v_{1N} \\ v_{2T} = R_T v_{1T} \end{cases}$$
(5)

式中: R<sub>N</sub>、 R<sub>T</sub>—法向、切向回弹系数。

(3)滚石动能计算

岩块在山坡上的运动遵守能量守恒定律,滚落时 将所具有的势能转变为摩擦能和动能,滚石动能(*E*)见 式(6)。

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \left(1 - \frac{\mu}{\tan\alpha}\right)mgH \tag{6}$$

式中:m——滚石质量/kg;

- H——滚石降落高度/m;
- μ——摩擦系数;
- *α*——坡角/(°);
- v——滚石速度/(m·s<sup>-1</sup>)。
- 2.2.2 计算剖面与计算参数选取
  - (1)计算剖面

选取 WY3、WY11 两处危岩体计算剖面, WY11 危 岩体工程地质剖面见图 5。

(2)计算参数选取

现场可见已发单块落石重量 600~1 500 kg, 结合坡



体裂隙发育切割岩体状况, 计算落石重量按 1 000 kg 选取, 模拟暴雨工况崩落行为。灰岩坡面法向阻尼系数  $(R_n)$ 取 0.38、切向阻尼系数 $(R_t)$ 取 0.88, 开采平台法向 阻尼系数 $(R_n)$ 取 0.29、切向阻尼系数 $(R_t)$ 取 0.80。边 坡摩擦角(q)取 30°, 落石初始速度 $(v_0)$ 取 0。模拟试验 次数为 50 次。

#### 2.2.3 计算结果

WY3、WY11 危岩体失稳沿坡面运动轨迹见图 6、 图 7,落石终点水平位置见图 8、图 9,最大弹跳高度与 崩落距离关系见图 10、图 11,总动能与崩落距离关系 见图 12、图 13。



## 2.3 讨论

对 WY3 从高度 64.1 m、距坡脚线水平距离 63 m 处开始滚落, 共进行 50 次落石模拟: 落石崩落水平距离 为 35~110 m, 其中 70~88 m 处共 42 块、概率为 84%, 35~40 m 处共 3 块、概率为 6%, 100~110 m 处共 5 块、 概率为 10%; 落石弹跳高度多为 5~15 m, 相应水平距 离为 16~72 m, 最大弹跳高度 16.85 m, 相应水平距离 为 64 m; 落石动能多为 100~300 kJ, 相应水平距离为

WY11



图 8 WIS 洛石绘点小千位直图







Fig. 9 Horizontal location of rock end-points for WY11



Fig. 10 Bounce height envelope for WY3

20~80m, 最大动能为 399.2 kJ。

对 WY11 从高度 71.9m、距坡脚线水平距离 68 m



Fig. 13 Total kinetic energy envelope for WY11

处开始滚落,共进行 50 次落石模拟:落石崩落水平距离 为 39~90 m,其中 71~90 m 处共 42 块,概率为 84%, 39~45 m 处共 8 块、概率为 16%;落石弹跳高度多 为 5~15 m,相应水平距离为 20~81 m,最大弹跳高度 18.97 m,相应水平距离为 67 m;落石动能多为 60~ 230 kJ,相应水平距离为 10~82 m,最大动能为 302.3 kJ。

大部分落石终点水平距离与崩落点至坡脚线水平 距离基本接近,即落石可崩落至开挖边坡最低一级边坡 坡脚线一带;少部分落石于开挖边坡中部平台即停止运 动;个别最远可运动至距坡脚线外 47m。

从现场落石调查来看(图 14),重 1 300 kg 危岩体 从高度 H=55.25 m 处自由滚落,崩落至水平距离 D= 62.12 m 的矿山平台道路后停止运动,其崩落轨迹与 模拟 WY11 从高 71.9 m 处开始滚落,停止于水平距离 71~90 m 处基本一致,模拟计算成果与实际发生崩落 点相符。 · 16 ·



图 14 实测落石运动距离 Fig. 14 Measured rockfall movement distance

## 3 危岩体失稳模拟成果的应用

根据危岩体失稳模拟成果、现场调查及研究区地 质环境条件,依据表2评价要素对研究区危岩体失稳危 险性进行分区。研究区地质环境复杂程度以中等为主, 落石灾害危险程度中等,落石点密度中等,落石点规模 小—中等,矿山处于开采阶段,危岩体崩落主要危害对 象为矿区一般道路、作业人员与车辆,受威胁人数约 20人,潜在经济损失处于100~500万,综合评定危岩 体失稳危险性为中等区。

对危岩体落石模拟所得运动距离、弹跳高度、运动动能及落石集中区等进行分析,建议在矿山+55m、-35m标高平台各设置一道高5mRXI-100型柔性被动防护网进行落石拦截。RXI-100型防护网最大防护能

	表 2 危岩体失稳危险性分级标准表
Table 2	Standard table of instability risk classification for dangerous rock masses

危险性 分区级别	地质环境 条件复杂 性程度	落石灾 害危险 性程度	落石点 密度	落石点 规模	地质灾害危害程度		
					受威胁对象		潜在经济
					设备、道路或建筑物	人数/人	损失/万元
危险性大区	复杂—中等	大	大—中等	大—中等	主要设备作业区、矿区主要交通道路、 办公楼、厂房	>30	>500
危险性中等区	中等—简单	中等—小	大—中等	大—中等	一般设备区、矿区一般道路、附属建筑物	>3 ~ ≤30	>100~ ≤500
危险性小区	简单	小	小	小	无重要设备及其它建筑物	≤3	≤100

量 1 000 kJ, 造价低、安装方便, 能对落石进行有效拦截, 减轻研究区落石带来的安全隐患。

#### 4 结论

(1)选取 WY3、WY11 两处危岩体,设置重量为 1000 kg 落石,从同一起点崩落,进行的 50 次模拟计算 结果表明 84% 以上落石可抵达坡脚线,崩落轨迹为弹 跳式抛物线,弹跳高度 5~15 m,最大总动能 302.3~ 399.2 kJ。模拟结果与实际落石运动轨迹相符,其分析 结果较为可靠。

(2)根据获得的落石集中区、落石弹跳高度与崩落 距离的关系、落石运动动能与崩落距离的关系等,结合 危岩体失稳危险性分级标准,判定研究区危岩体失稳危 险性为中等区。

(3)根据落石运动的总动能、速度、崩落轨迹、最大 弹跳高度等提出在矿山+55 m、-35 m标高平台各设置 一道高 5 m RXI-100 型柔性被动防护网进行落石拦截, 以减轻落石可能带来的安全生产隐患。

#### 参考文献(References):

[1] 冉涛,文宝萍,苏昌,等.湖北五峰赵家岩崩塌形成机理

分析 [J].水文地质工程地质, 2012, 39(6): 114-118. [RAN Tao, WEN Baoping, SU Chang, et al. Analysis of the formation mechanism of the Zhaojiayan rock fall in Wufeng County, Hubei Province [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(6): 114-118. (in Chinese with English abstract)]

- [2] 王琦, 胡亚净, 宋伟利, 等. 岩溶山区危岩稳定性分析及 危害性预测——以贵州松桃县长冲危岩体为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(1): 75-84. [WANG Qi, HU Yajing, SONG Weili, et al. Stability analysis and hazard prediction of dangerous rock masses in karst mountainous area: A case study of Changchong dangerous rock mass in Songtao County, Guizhou Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(3): 6 - 11. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 曾启强,王立朝,刘伟,等.广州地区岩质边坡崩塌影响范围计算方法初探[J].水文地质工程地质,2023,50(5):159-168. [ZENG Qiqiang, WANG Lichao, LIU Wei, et al. Calculation methods of the collapse influence range of a simple rock slope in the Guangzhou area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5):159-168. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 许强,黄润秋,殷跃平,等.2009年6.5重庆武隆鸡尾山

崩滑灾害基本特征与成因机理初步研究[J].工程地 质学报,2009,17(4):433-444. [XU Qiang, HUANG Runqiu, YIN Yueping, et al. The Jiweishan landslide of June 5, 2009 in Wulong, Chongqing: Characteristics and failure mechanism [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(4):433-444. (in Chinese with English abstract)]

- [5] 陈泰江,向欣,章广成.落石冲击棚洞结构冲切特性研究[J].工程地质学报,2023,31(1):199-206.[CHEN Taijiang, XIANG Xin, ZHANG Guangcheng. Hertz theory based study on punching characteristics of rockfall impacting on shed-tunnel structure [J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(1):199-206. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 霍磊晨, 杜岩, 谢谟文, 等. 基于多层次动力学指标的危 岩体识别方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(增 刊2): 3124-3131. [HUO Leichen, DU Yan, XIE Mowen, et al. Unstable rock mass identification method based on multi-level dynamic parameters [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(Sup 2): 3124 - 3131. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 孙敬辉,石豫川.重庆甑子岩崩塌落石动力学特征及危险性分区[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(3):
  6-11. [SUN Jinghui, SHI Yuchuan. Dynamics and hazard zoning of collapse and rockfall in Zengziyan, Chongqing [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(3): 6-11. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 何字航,裴向军,梁靖,等.基于 Rockfall 的危岩体危险范围预测及风险评价——以九寨沟景区悬沟危岩体为例[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(4):24-33. [HE Yuhang, PEI Xiangjun, LIANG Jing, et al. Risk assessment and range prediction of dangerous rockmass based on rockfall: A case study of the Xuangou Collapse [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4):24-33.(in Chinese with English abstract)]
- [9] 许强,陈伟.单体危岩崩塌灾害风险评价方法——以四 川省丹巴县危岩崩塌体为例 [J].地质通报,2009,28(8): 1039-1046. [XU Qiang, CHEN Wei. Risk assessment method for single rockfall geo-disaster: A case study on the rockfall in Danba County, Sichuan, China [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(8): 1039 - 1046. (in Chinese with English abstract)]
- [10] SHI Chong, YANG Bo, ZHANG Yiping, et al. Application of discrete-element numerical simulation for calculating the stability of dangerous rock mass: A case study [J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(12): 1-8.
- [11] SENGANI F, MULENGA F. An improved hazard assessment chart for rock falls in near vertical blocky rock environments [J]. Environmental Earth Sciences, 2021,

80(18):647.

- [12] ERFEN H S, MUSTA B. Rock endpoints and barriers estimation of slope failure in pinousuk gravel slopes using Rockfall simulation [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 1103(1): 012033.
- [13] BOURGEOIS J, WARREN S, ARMSTRONG J. Utilization of statistical analysis to identify influential slope parameters associated with rockfall at open pit mines [J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2023, 40(4): 1101 – 1112.
- [14] 张雄伟,杨泽,周晓超,等.青麦地大型石灰岩露天矿高 陡边坡结构面特征及其对边坡稳定性的影响[J].贵 州大学学报(自然科学版),2022,39(2):66-72.[ZHANG Xiongwei, YANG Ze, ZHOU Xiaochao, et al. Structural plane characteristics of high-steep slope and its influence on slope stability in Qingmaidi large limestone open-pit mine[J]. Journal of Guizhou University(Natural Sciences), 2022, 39(2):66-72.(in Chinese with English abstract)]
- [15] 毛元静,李瑶,和大钊,等.露采矿山台阶边坡结构面特性与破坏机制分析[J].中国地质灾害与防治学报,2017,28(3):39-45. [MAO Yuanjing, LI Yao, HE Dazhao, et al. Structural planes characteristics and failure mechanism for open-pit mining bench slope [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(3): 39 45. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 王万禄,王黎蝶,侯克鹏,等. 岩体结构面调查及对采场稳定性的影响分析[J].现代矿业, 2022, 640: 111-118.
  [WANG Wanlu, WANG Lidie, HOU Kepeng, et al. Investigation of rock mass structural plane and it's influence on stope stability [J]. Modern Mining, 2022, 640: 111-118. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 傅少君,陈乾锐,祝桥桥,等.边坡滚石运动影响因素浅析[J].武汉大学学报(工学版),2009,42(6):795-798.
  [FU Shaojun, CHEN Qianrui, ZHU Qiaoqiao, et al. On factors influencing kinematical properties of rockfall slopes [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009,42(6):795-798. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 陈宇龙.滚石运动过程中关键参数的影响分析[J].岩 土工程学报, 2013, 35(增刊2): 190-196. [CHEN Yulong. Influence of key factors on trajectories of rockfalls [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Sup 2): 190-196. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 黄润秋,刘卫华.平台对滚石停积作用试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(3):516-524.[HUANG Runqiu, LIU Weihua. Platform resistent test on rolling rock blocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3):516-524.(in Chinese with English abstract)]