

云南某露天矿山边坡稳定性数值分析

梅朴莲¹, 董兴斌²

¹云南省有色地质局三一〇队, 云南 大理

²西南有色大理地基基础工程公司, 云南 大理

收稿日期: 2025年6月5日; 录用日期: 2025年7月10日; 发布日期: 2025年7月24日

摘要

矿山边坡稳定性直接关系到矿山安全生产与经济效益。20世纪60年代后, 受Vaiont水库滑坡等事故的推动, 研究从均质弹性理论转向地质与力学结合的刚体极限平衡法, 强调地质分析与力学机制的融合。现代则更注重土体真实破坏过程的数值模拟。本文针对某露天矿山工程地质及水文地质条件, 结合岩体力学参数与边坡结构特征, 运用霍克-布朗(Hoek-Brown)强度准则将室内岩石力学参数进行计算折减修正转换成边坡宏观岩体力学参数, 采用数值模拟分析方法(FLAC3D有限差分法)对边坡稳定性进行定量分析。通过建立三维地质模型, 考虑岩体非均质性、节理分布、地下水渗漏及开挖扰动等因素, 对边坡各种结构面的空间分布及力学特征的研究, 评价该露天采场边坡的稳定性, 并提出合理的措施建议以确保整个采场的安全服役。

关键词

数值模拟, 露天矿山, 数值模拟分析

Stability Numerical Analysis of Open-Pit Mine Slope in Yunnan

Pulian Mei¹, Xingbin Dong²

¹Geological Team 310 of Yunnan Non-Ferrous Metals Geological Bureau, Dali Yunnan

²Southwest Non-Ferrous Dali Foundation Engineering Company, Dali Yunnan

Received: Jun. 5th, 2025; accepted: Jul. 10th, 2025; published: Jul. 24th, 2025

Abstract

The stability of mine slopes is directly related to the safety production and economic benefits of mines. After the 1960s, driven by accidents such as the Vaiont Reservoir landslide, research shifted from homogeneous elastic theory to the rigid limit equilibrium method that combines geology and

文章引用: 梅朴莲, 董兴斌. 云南某露天矿山边坡稳定性数值分析[J]. 矿山工程, 2025, 13(4): 824-835.

DOI: 10.12677/me.2025.134093

mechanics, emphasizing the integration of geological analysis and mechanical mechanisms. In modern times, more emphasis is placed on numerical simulation of the actual process of soil failure. This article focuses on the geological and hydrogeological conditions of a certain open-pit mine project, combined with rock mechanics parameters and slope structure characteristics. Using the Hoek Brown strength criterion, the indoor rock mechanics parameters are calculated, reduced, and corrected into macroscopic rock mechanics parameters of the slope. The numerical simulation analysis method (FLAC3D finite difference method) is used to quantitatively analyze the stability of the slope. By establishing a three-dimensional geological model and considering factors such as rock heterogeneity, joint distribution, groundwater leakage, and excavation disturbance, the spatial distribution and mechanical characteristics of various structural planes of the slope are studied. The stability of the open-pit mining slope is evaluated, and reasonable measures and suggestions are proposed to ensure the safe service of the entire mining site.

Keywords

Numerical Simulation, Open-Pit Mines, Numerical Simulation Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

该矿山露天采场所在区域为低中山构造侵蚀岩溶地貌, 地势总体北东高、南西低, 最高点标高 2135 m, 最低点标高 1887.09 m (可视为矿区最低侵蚀基准面), 相对高差 247.91 m。矿山最低开采标高 1925 m, 设计最高开采标高 2113 m, 采场边坡最大边坡高度为 188 m, 按照边坡高度等级分类为中高边坡。

该矿山为露天开采, 开采矿体为石灰岩, 为岩溶地层, 主要分布在二叠统栖霞茅口组($P_1q + m$)地层中。呈中厚 - 厚层状产出, 矿体总体产状: $110^\circ \sim 135^\circ \angle 25^\circ \sim 39^\circ$ 。边坡岩体节理裂隙发育, 本次调查采用详细测线法共调查长度 130.8 m, 节理 603 条。不良地质现象主要有冲沟(3 条)、岩溶作用、岩体风化; 特殊性岩土主要有原生红黏土; 现状地质灾害主要有露天采场边坡 BW1 及堆土边坡 BW2。

2. 矿区工程地质及水文地质条件

该矿区属北亚热带季风气候区, 位于昆明市东南部, 宜良县城北西地带, 为低中山构造侵蚀岩溶地貌, 地势总体北东高、南西低, 目前开采矿山形成的人工台阶式边坡标高介于 2051.66 m~1931.08 m 之间, 高差约 120.58 m。区内出露地层主要有石炭系上统马平群(C_3m)、二叠系下统倒石头组(P_1d)、二叠系下统栖霞组(P_1q)、茅口组($P_1q + m$)和第四系残坡积层(Q_4^{el+dl}), 出露岩性较多。区域地质构造较发育, 新构造运动活动较强烈。主要的断裂有南冲断层、麦地断层、宜良断层、张家村断层、万寿山断层、七星村断层等, 主要的褶皱有老猴街向斜、江头村向斜、岚光山向斜等, 根据区域地壳稳定性分区图, 场地抗震设防烈度为 8 度, 设计地震分组为第三组, 设计基本地震加速度值为 0.30 g, 地震动反应谱特征周期 0.35 s [1]。

所处位置隶属南盘江流域, 珠江水系, 区内没有大的地表水体, 在矿区内有一季节性冲沟(观音沟)及其支沟, 场地地表水主要来源于大气降水; 地下水主要以大气降水及地表水渗漏补给, 但补给有限, 迳流与排泄条件较好; 地下水动态变化幅度一般在十多米至数十米之间, 地下水动态类型属过渡类型; 地下水动态主要影响因素为气象因素、地质因素和人为因素; 边坡含水层(带)主要为第四系孔隙含水层、碳

酸盐岩岩溶含水层、碎屑岩裂隙含水层, 含水量受裂隙(孔隙)发育程度及季节因素的影响。

根据工程地质分区将矿山露天边坡分为I区、II区、III区 3 个边坡分区, 对露天边坡进行模拟分析 (图 1)。

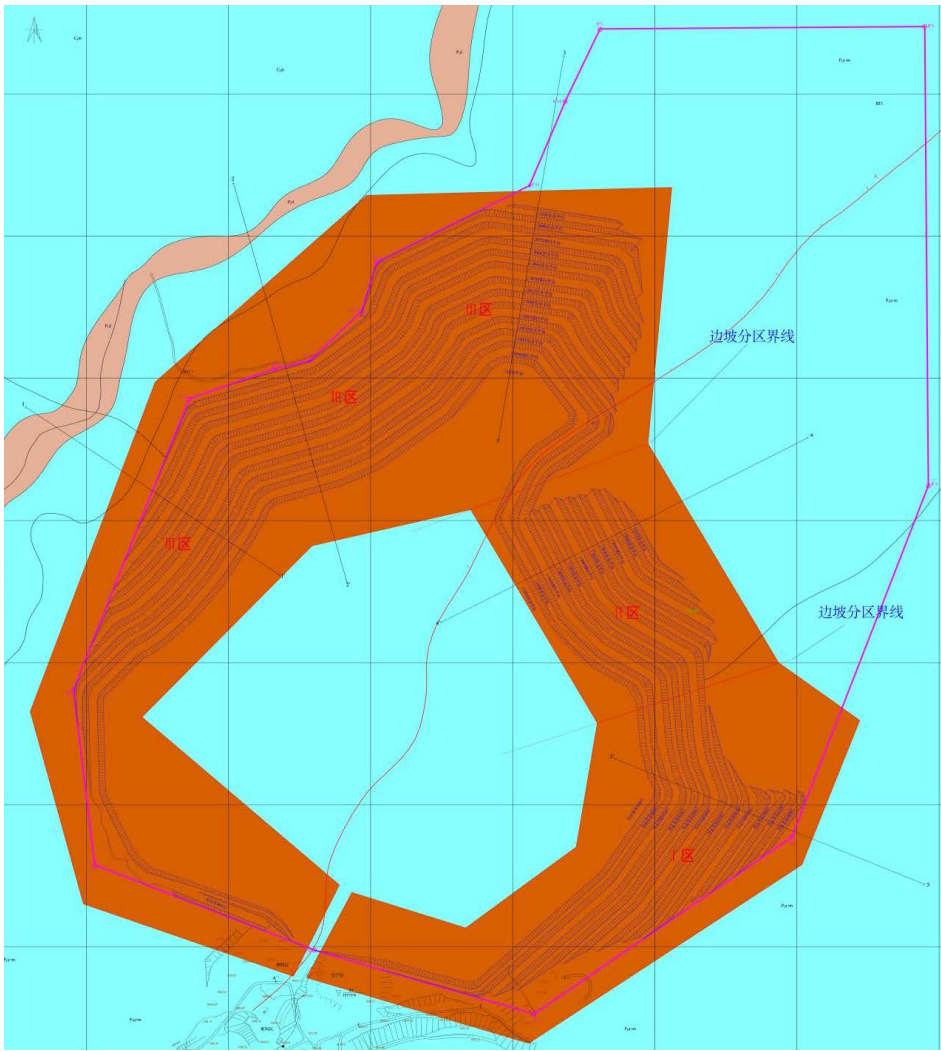


Figure 1. Schematic diagram of slope zoning at the end of mining
图 1. 矿山开采終了边坡分区示意图

组成采场边坡的地层主要有：

- (1) 石炭系上统马平群(C_{3m})：灰色、浅灰色薄层 - 中厚层状灰岩、鲕状灰岩夹白云岩，中等风化，与下覆石炭系中统威宁群(C_{2w})呈整合接触关系，地层厚度 0~48 m。
- (2) 二叠系下统倒石头组(P_{1d})：黑色、深灰色页岩与泥质灰岩、泥灰岩互层，与下覆石炭系上统马平群(C_{3m})整合接触，厚度 219~260 m，分布于矿区北西部。
- (3) 二叠系下统栖霞组、茅口组(P_{1q} + m)：灰色、浅灰色，中厚层 - 厚层状、块状灰岩、白云岩，夹白云质灰岩及少量中层状浅黄色隐晶 - 微粒泥质灰岩，与下覆二叠系下统倒石头组(P_{1d})整合接触，为矿区含矿层位，矿山采石场开采对象，分布于矿区大范围内。
- (4) 第四系残坡积层(Q_{4^{el+dl}})：褐红色、棕红色、褐黄色、灰色粘土，可塑状态。不均匀的混杂 5%~10%

灰岩、砂岩角砾, 亚角形, 粒径 5~20 mm, 与下伏地层为不整合接触, 厚度 0.2~3.0 m, 主要分布在矿区地形低洼处。

3. 采场边坡岩体力学参数的确定

霍克-布朗(Hoek-Brown)强度准则是评估岩石强度的重要经验准则, 尤其在脆性岩石的动态强度分析中具有广泛的应用[2]。

(1) 新霍克-布朗(Hoek-Brown)强度准则

Hoek 和 Brown 在分析 Griffith 理论和修正的 Griffith 理论的基础上, 凭借自己在岩石力学方面深厚的理论功底和丰富的实践经验, 通过对大量岩石三轴试验资料和岩体现场试验成果的统计分析, 于 1980 年在《岩体的地下开挖》一书中提出了最初的 Hoek-Brown 经验破坏准则如下:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{\sigma_3 + \sigma_c + s\sigma_c^2}$$

式中: σ_1 ——岩体破坏时的最大主应力;

σ_3 ——破坏时的最小主应力;

σ_c ——完整岩石试件的单轴抗压强度;

m 、 s ——岩体材料常数, 取决于岩体性质。

此后, 在工程应用中, Hoek-Brown 准则不断得到改进并逐渐完善。2002 年, E. Hoek 对历年来的 Hoek-Brown 准则进行了详细而全面的审视, 并对 m 、 s 、 a 和地质强度指标 GSI (geological strength index) 的关系进行了重新定义, 并提出了一个新的参数 D 来处理爆破损伤和应力松弛。改进后的广义 Hoek-Brown 强度准则可表示为:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a$$

其中:

$$m = m_i \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right)$$

$$s = \exp \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$$

式中: D ——岩体扰动参数, 主要考虑爆破破坏和应力松弛对节理岩体的扰动程度, 取值为 0~1, 对于未受扰动岩体, 取 $D = 0$, 对于严重扰动岩体, $D = 1$;

m_i ——组成岩体的完整岩块的 Hoek-Brown 常数, 反映岩石的软硬程度;

s ——岩体破碎程度。

当用 Hoek-Brown 准则估计节理化岩体强度与力学参数时, 需用 3 个基本参数:

- ① 组成岩体的完整岩块的单轴抗压强度 σ_c ;
- ② 组成岩体的完整岩块的 Hoek-Brown 常数 m_i ;
- ③ 岩体的地质强度指标 GSI。

(2) Hoek-Brown 强度准则参数的确定

- ① 常数 m_i 的确定

把 $\sigma_3 = -\sigma_t$ 和 $\sigma_1 = 0$ 代入 Hoek-Brown 经验准则 $\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{\sigma_3 + \sigma_c + s\sigma_c^2}$, 这里因为是完整岩块, 因此 $s = 1$ 。由此公式, 可以得到:

② 爆破效应对岩体扰动程度 D 值的确定

本研究根据现场围岩节理状况、岩体开挖扰动程度以及相关参考文献, 岩体开挖扰动程度 D 值见表 1。

③ GSI 的确定

GSI 为地质强度指标, 是由 Hoek、Kaiser 和 Brown 于 1995 年建立, 用来估计不同地质条件下的岩体强度。GSI 根据岩体所处的地质环境、岩体结构特性和表面特性来确定。但以往在岩体结构的描述或岩体结构的形态描述中缺乏定量化, 难以准确确定岩体的 GSI 值。为使其描述定量化, 引入岩体质量 RMR 分级法定量确定岩体质量等级。根据 Z. J. Bieniawski 研究认为, 修正后的 RMR 指标值与 GSI 值具有等效关系, 确定修正后的 RMR 指标值, 即得出 GSI 值。

RMR 分级方法是采用多因素得分, 然后求其代数和 RMR 值来评价岩体质量。参与评分的 6 因素是: 岩石单轴抗压强度、岩石质量指标 RQD、节理间距、节理条件、地下水状态和结构面产状对边坡工程的影响。在 1989 年的修正版中, 不但对评分标准进行了修正, 而且对第 4 项因素进行了详细分解, 即节理性状包括: 节理长度、张开度、粗糙度、充填物性质和厚度以及风化程度。以上各参数确定或选取的结果见表 1。

Table 1. D and mi values of limestone

表 1. 灰岩的 D 及 m_i 值

岩性	mi	D	GSI (RMR)
灰岩	15	0.8	43

(3) 岩体力学参数的工程处理结果

本文以室内岩石力学试验为基础, 综合考虑岩体中节理裂隙、边坡岩体结构、地下水和尺寸效应的影响, 对露天矿山边坡岩石质量进行分类与评价, 运用霍克 - 布朗(Hoek-Brown)强度准则将室内岩石力学参数进行计算折减修正转换成边坡宏观岩体力学参数, 推荐最终采用的物理力学参数见表 2。

Table 2. Recommendation table of mechanical parameters of slope rock mass

表 2. 边坡岩体力学参数推荐表

岩性	弹性模量(Gpa)	岩体抗压强度(Mpa)	粘聚力(Mpa)	内摩擦角(°)	泊松比
灰岩	2.32	4.76	0.245	30.93	0.31

4. 边坡稳定性模拟分析

数值模拟方法主要是依据弹塑性力学及数值计算理论, 从岩体的应力应变角度分析、评判岩体的稳定性状况, 进而得到边坡的应力应变数据, 能直观模拟边坡应力应变的发展过程[3]。

本文采用以 FLAC3D 为代表的有限差分法来针对矿体开采条件下露天边坡的有关应力、位移等问题进行研究[4] [5]。

(1) 基于犀牛(Rhino 3D)模型构建

本次数值分析计算对于计算模型的前处理, 结合研究项目石灰岩矿的特点, 本着尽可能反映研究对象特征角度出发, 充分利用 Rhino 3D 软件在建模、网格划分方面的优势性, 进行基础模型的构建。Rhino 3D 具有强大的三维地质建模能力, 用它能够进行复杂地质体的三维可视化建模。本次地表模型、岩层模型等主要在 Rhino 3D 中进行细化, 处理结束后将地表模型等文件保存下来。具体见图 2、图 3。

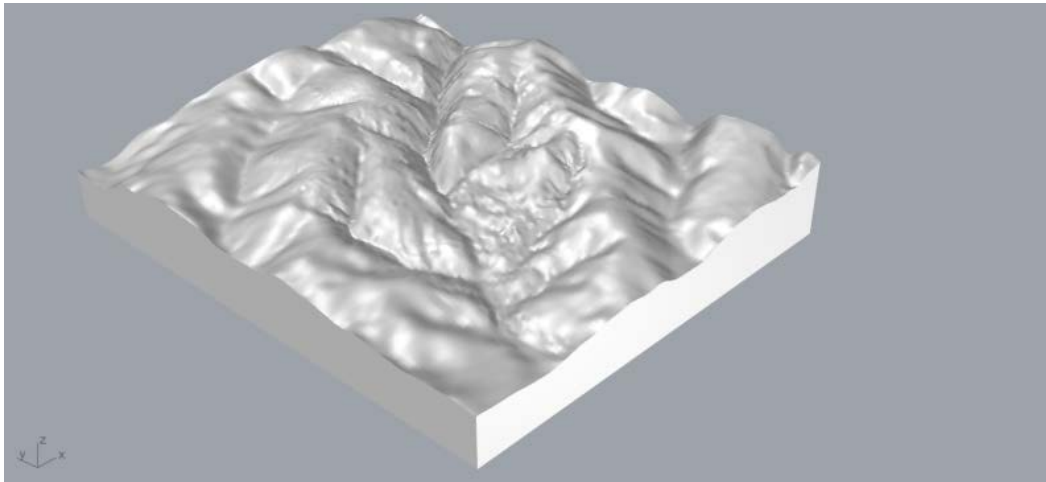


Figure 2. Original geometric model diagram

图 2. 原始几何模型图

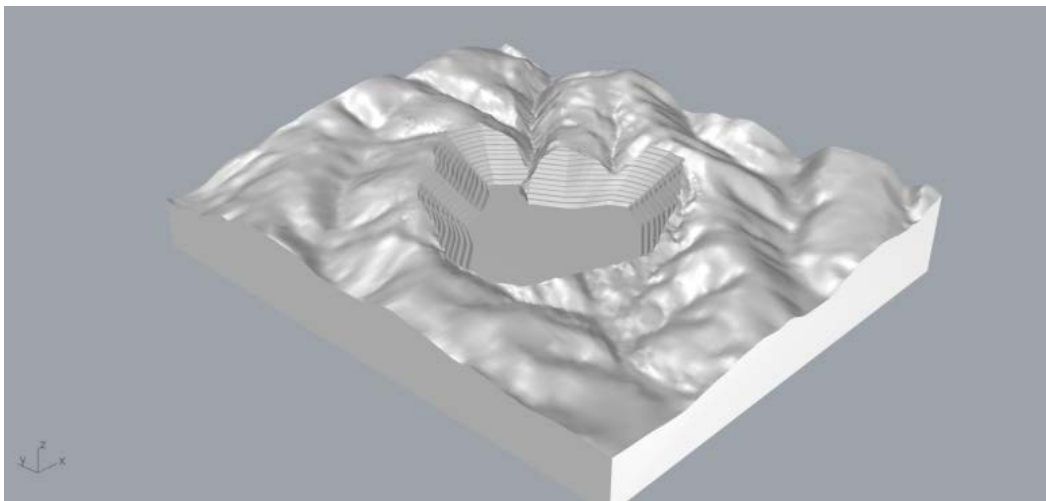


Figure 3. Geometric model after excavation

图 3. 开挖后几何模型图

(2) 计算模型的建立

由于岩体的复杂性和不确定性, 计算模型中不可能完全真实地充分反映和考虑实际的地质条件和岩体结构条件, 也不可能根据实际回采步骤将每个平台逐段写真式地进行回采模拟。为了便于计算, 一次开挖多个平台。

计算域的大小对数值模拟结果有重要的影响, 计算域取得太小容易影响计算精度和可靠性; 而如果取得太大, 则使单元划分太多, 影响计算速度。因此必须取一个适中的计算域。为了满足计算需要和保证计算精度, 本次计算采用的几何模型尺寸尽可能地逼近边坡实际模型尺寸。

计算域边界采取法向位移约束, 由于采动影响范围有限, 在离采场较远处岩体位移值将很小, 可将计算模型边界处位移视为零。因此, 计算域边界采取法向位移约束, 即模型底部所有节点采用 z 方向约束, 模型 x 方向的两端采用 x 方向约束, 模型 y 方向的两端采用 y 方向约束, 模型顶部为自由边界。

采用摩尔 - 库伦模型。模型共划分 174,981 个单元体, 93,081 个节点, 最终生成的网格和建好的模型如图 4~6 所示。



Figure 4. Model grid partition diagram
图 4. 模型网格划分图

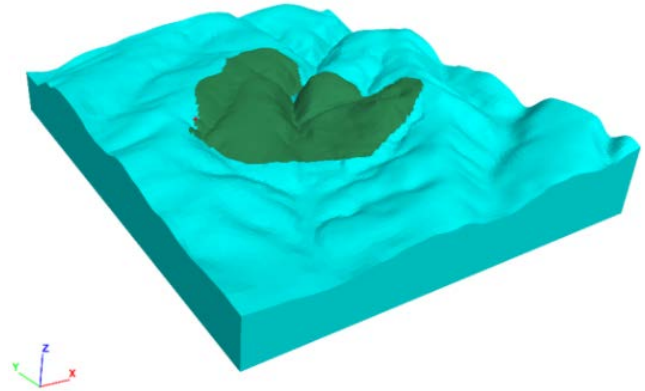


Figure 5. Three-dimensional numerical simulation calculation of the original model in FLAC3D
图 5. FLAC3D 中三维数值模拟计算原始模型

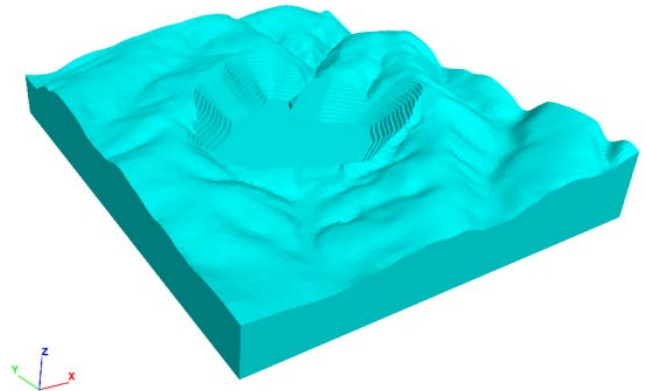


Figure 6. Model structure diagram after slope excavation in FLAC3D
图 6. FLAC3D 中边坡开挖结束后模型结构图

(3) 岩体开挖后的应力分布情况

岩体开挖以后，出现边坡临空面，矿区的初始应力场(地应力场)进行二次分布，产生了次生应力场，边坡面上的岩体应力得到释放，会在边坡表面形成较为明显的应力松弛区，总体应力水平将随之减小，

使得开挖面处的岩体应力场受到较大的扰动。

从最大主压应力分布云图 7~11 可以看出：坡脚所承受的最大主应力为 $-0.25\text{ MPa}\sim 0.25\text{ MPa}$ 。1-1'剖面边坡上覆盖层承受的最大主应力为 $-0.25\text{ MPa}\sim 0.2\text{ MPa}$ ，靠近边坡面下部岩体承受的最大主应力为 $-0.25\text{ MPa}\sim 0.2\text{ MPa}$ ；2-2'剖面边坡上覆盖层承受的最大主应力为 $-0.25\text{ MPa}\sim 0\text{ MPa}$ ，靠近边坡面下部岩体承受的最大主应力为 $-0.25\text{ MPa}\sim 0\text{ MPa}$ ；3-3'剖面边坡上覆盖层承受的最大主应力为 $-0.25\text{ MPa}\sim 0.2\text{ MPa}$ ，靠近边坡面下部岩体承受的最大主应力为 $-0.5\text{ MPa}\sim 0.2\text{ MPa}$ ；5-5'剖面边坡上覆盖层承受的最大主应力为 $-0.25\text{ MPa}\sim 0.15\text{ MPa}$ ，靠近边坡面下部岩体承受的最大主应力为 $-0.5\text{ MPa}\sim 0.15\text{ MPa}$ 。

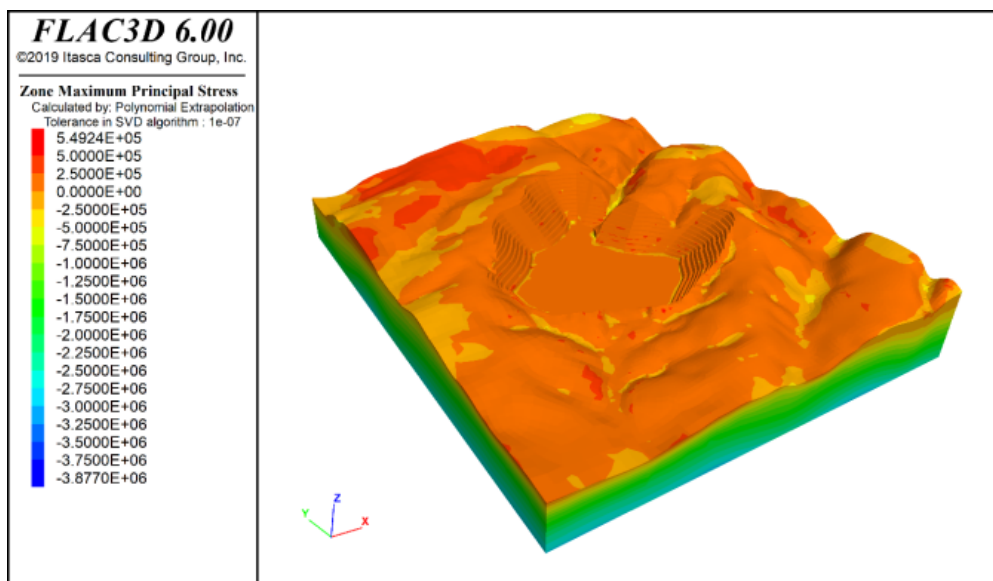


Figure 7. The maximum principal stress distribution cloud diagram of slope rock mass (three-dimensional slope)

图 7. 边坡岩体最大主应力分布云图(三维立体边坡)

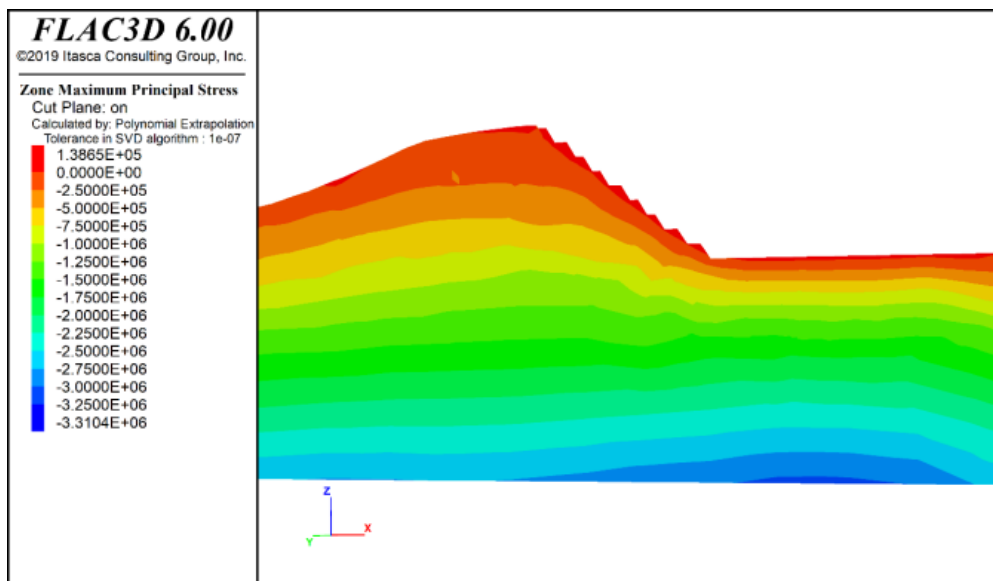


Figure 8. 1-1' section slope rock mass maximum principal stress distribution nephogram

图 8. 1-1'剖面边坡岩体最大主应力分布云图

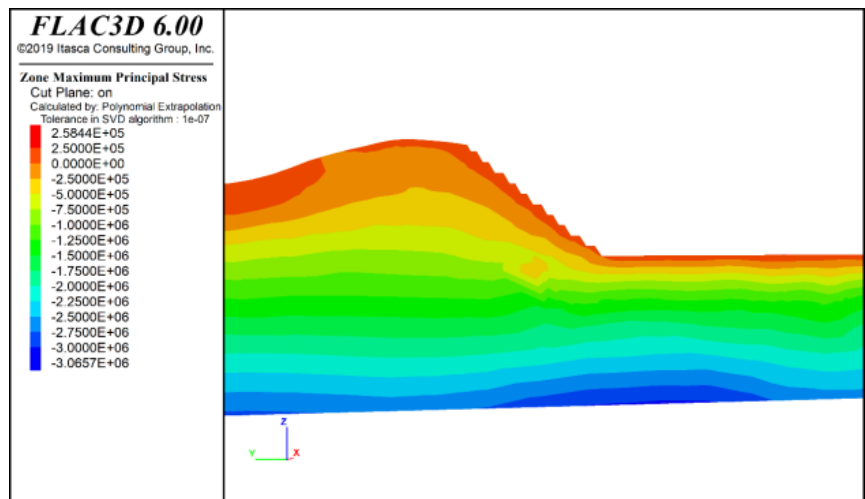


Figure 9. 2-2' section slope rock mass maximum principal stress distribution nephogram
图 9. 2-2'边坡岩体最大主应力分布云图

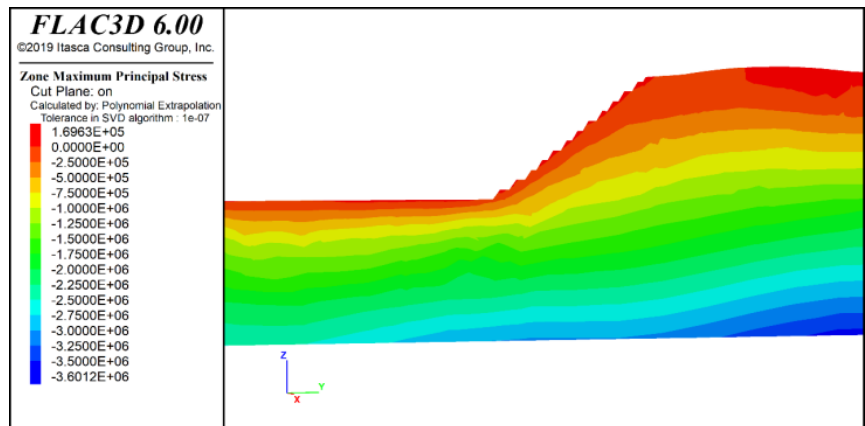


Figure 10. 3-3' section slope rock mass maximum principal stress distribution nephogram
图 10. 3-3'边坡岩体最大主应力分布云图

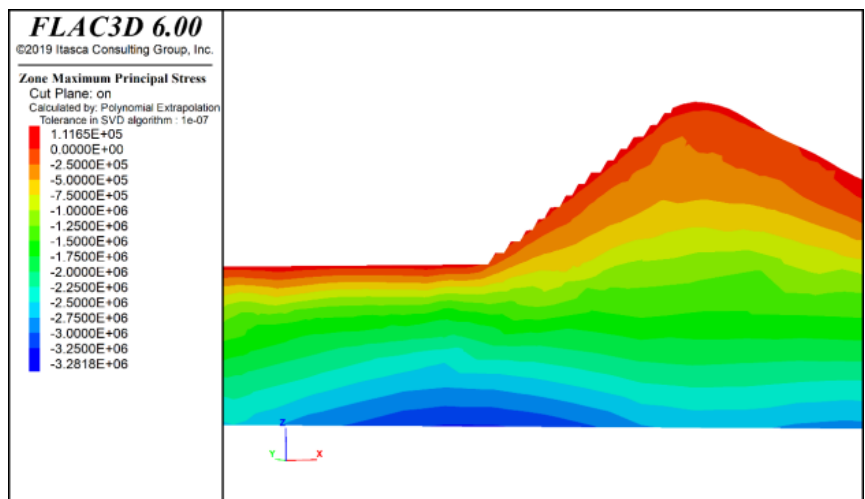


Figure 11. 5-5' section slope rock mass maximum principal stress distribution nephogram
图 11. 5-5'边坡岩体最大主应力分布云图

结论：岩体开挖后，开挖面上均分布有主应力区，且应力值很小，为 0 MPa~0.25 MPa，未超过灰岩岩体的抗拉强度值(5 MPa~25 MPa)，说明边坡岩体发生破坏的可能性小。但随着开挖深度增加，坡高和坡比会发生变化，初期可通过设置适宜宽度的台阶优化剪应力分布，提高稳定性；但超过某峰值后，过陡的坡比会导致坡脚处应力增加，稳定性降低。开挖深度增加还可能揭露控制边坡稳定的主要软弱结构面，降低边坡稳定性，特别是当开挖深度使边坡几何形态发生改变并暴露关键结构面时，破坏风险急剧增加；露天矿开采深度增大和服务年限延长会导致应力重新分布，加剧环境侵蚀和风化作用，长期影响边坡稳定性。建议通过设置合理台阶宽度和分段坡比优化剪应力分布，但需避免局部坡比过陡导致应力集中。

(4) 边坡安全系数和位移分布特征

从边坡位移变形图 12~14，同时结合图 15~17 剖面位移变形云图可以看出：边坡岩体最大垂直位移约 24.7 cm，x 方向最大位移 4.88 cm，y 方向最大位移 14.22 cm。

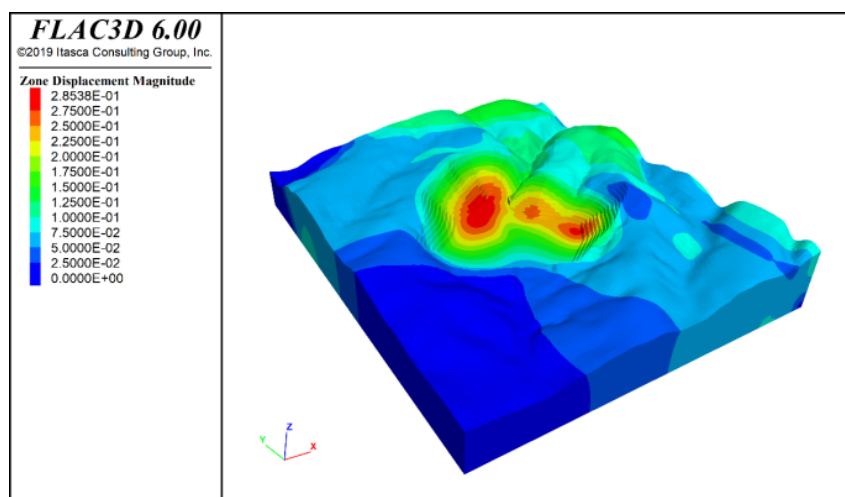


Figure 12. Slope displacement deformation cloud map (three-dimensional slope)

图 12. 边坡位移变形云图(三维立体边坡)

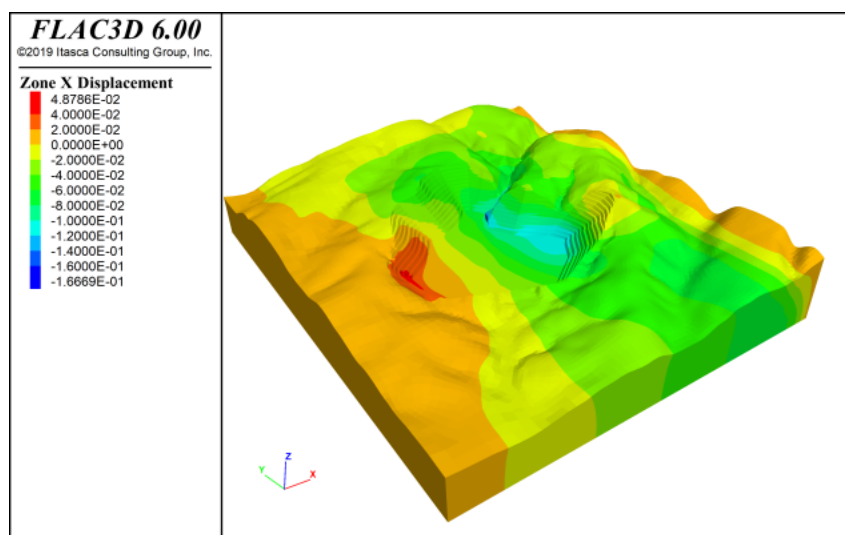


Figure 13. Slope displacement deformation cloud map (X direction)

图 13. 边坡位移变形云图(X 方向)

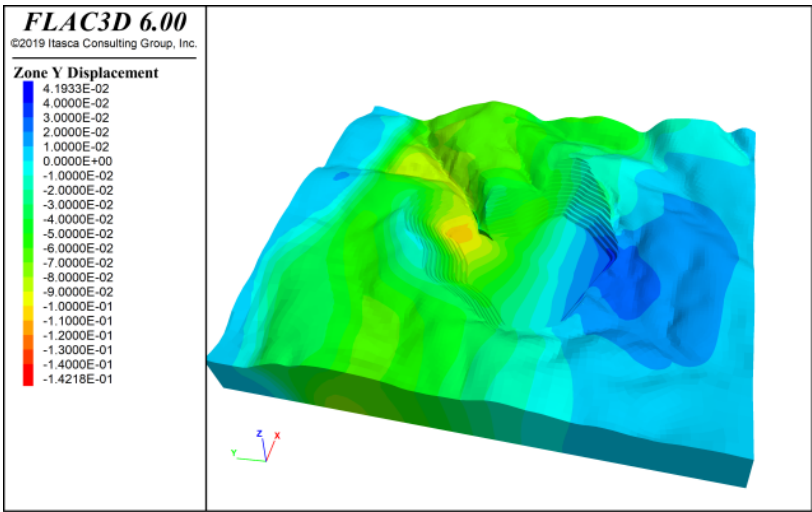


Figure 14. Slope displacement deformation cloud map (Y direction)
图 14. 边坡位移变形云图(Y 方向)

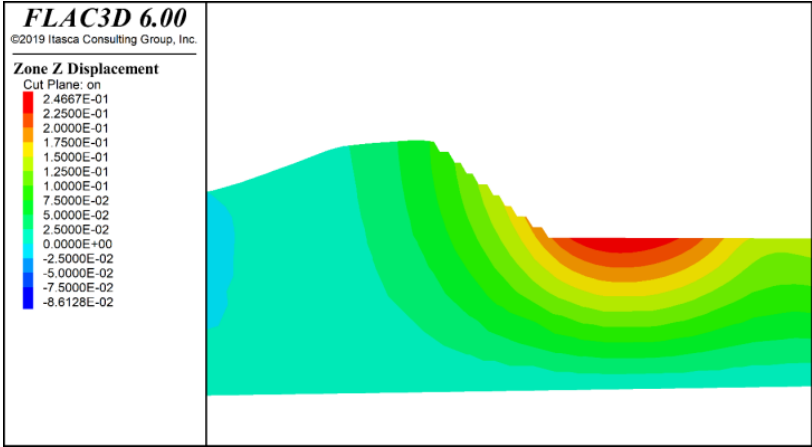


Figure 15. 1-1' section slope displacement deformation nephogram
图 15. 1-1'剖面边坡位移变形云图

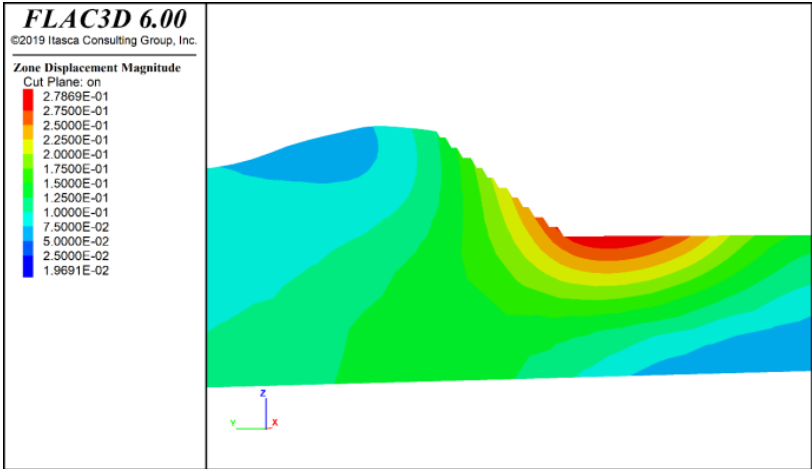


Figure 16. 2-2' section slope displacement deformation Nephogram
图 16. 2-2'剖面边坡位移变形云图

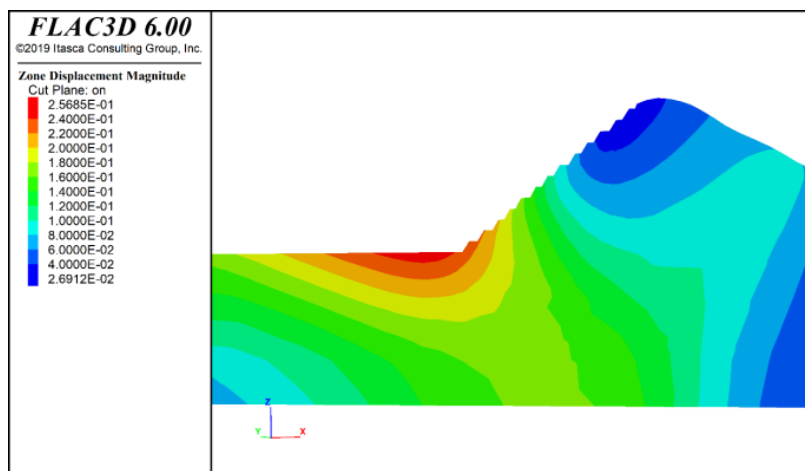


Figure 17. 5-5' section slope displacement deformation nephogram
图 17. 5-5'剖面边坡位移变形云图

结论：相对于采场边坡约 180 m 的高度，位移数值较小。说明开挖对边坡稳定性的影响小，边坡开挖后整体处于基本稳定状态。但开挖深度和岩体参数会通过复杂的相互作用影响边坡稳定性，工程中需综合考虑几何形态变化、岩体参数敏感性和环境因素的长期影响，采取正规性的设计和加固措施。

5. 结论及建议

(1) 通过本次的数值模拟分析可看出：矿山露天采矿工程初步设计的边坡结构参数在各种工况下的边坡安全系数能满足相关规范安全等级要求，边坡处于稳定状态。但是矿区内有断层 F1 通过，断层破碎带宽 10~30 m，加之矿区地层为可溶性碳酸盐岩，存在隐伏岩溶的可能性，故在开采过程中应重视对采矿边坡的监测，发现变形、开裂及较大的隐伏岩溶，需及时进行防治措施，避免进一步引发边坡失稳危害。

(2) 边坡靠帮时，爆破必须采用控制爆破技术及减震技术，如预裂爆破、光面爆破、微差爆破。关于爆破中合理的布孔结构、合理的起爆顺序与微差时间间隔、最大单段药量及总装药量等参数有必要进行现场的爆破效果测试，以达到降低爆破震动强度、改善爆破动力效应、减小爆破对边坡强度损害的目的。

(3) 鉴于露天采场边坡大多处在蠕滑阶段，有必要设置位移监测网对坡体进行监测，同时根据监测结果及时分析坡体状态。

(4) 在生产过程中若发现边坡有渗水，对边坡实施疏水，降低边坡内地下水位，减小地下水对边坡的危害。随着采场加深，深部岩体暴露，受爆破振动、卸荷及风化作用影响，边坡工程及水文地质情况将发生变化。建议进行采场深部边坡勘察工作。

(5) 开展采场爆破振动测试，优化爆破参数，降低爆破振动，减小爆破对边坡稳定性的影响。加强边坡监测，对有潜在失稳征兆的边坡采取治理措施，以达到边坡稳定、安全生产的目的[6]。

参考文献

- [1] GB50011-2010. 建筑抗震设计规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2016.
- [2] 盛佳, 李向东. 基于 Hoek-Brown 强度准则的岩体力学参数确定方法[J]. 采矿技术, 2009, 9(2): 12-14, 41.
- [3] 彭文斌. FLAC3D 实用教程[M]. 北京：机械工业出版社，2011.
- [4] 王涛, 韩焱, 等. FLAC3D 数值模拟方法及工程应用[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2019.
- [5] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京：中国水利水电出版社，2013.
- [6] 高亚辉, 刘允秋. 川西北某露天矿山高陡边坡稳定性数值分析[J]. 世界有色金属, 2022(10): 214-216.