

断层构造对露天边坡稳定性的影响及危险边坡预测^①

黄毅, 王祥钦, 徐海

(长沙有色冶金设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410019)

摘要: 某露天钨矿区断层构造十分发育, 可能导致露天开采发生边坡失稳问题。选取贯穿终了境界的 3 条典型断层, 通过融合 Rhino+Griddle 三维地质建模与 FLAC^{3D} 多场耦合模拟技术, 研究多断层耦合效应下露天矿边坡的渐进失稳机理, 并针对终了境界后续的安全问题, 进一步求解边坡在不同工况下的安全系数和搜索相对危险的边坡区域。模拟结果发现: C 区和 D 区的交界处边坡会发生塑性破坏和拉应力集中, 而断层发生局部塑性破坏但不会导致周围边坡发生失稳破坏; 终了境界的边坡位移不大, 最大值位于坡脚且仅 2.44 cm; 终了境界自然工况和降雨工况的安全系数分别为 2.48 和 2.36, 边坡处于稳定状态, 相对危险边坡位于 F1 断层所在的 E 区, 可采取实时监测、预防加固等综合措施, 以保证边坡安全。

关键词: 露天开采; 断层; 边坡稳定性; 边坡位移; 安全系数; 危险边坡预测

中图分类号: TD854

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.05.001

文章编号: 0253-6099(2025)05-0001-07

Impact of Faults on Open-Pit Slope Stability and Prediction of Unstable Slopes

HUANG Yi, WANG Xiangqin, XU Hai

(CINF Engineering Co., Ltd., Changsha 410019, Hunan, China)

Abstract: There are well-developed faults in an open-pit molybdenum mine, which may lead to slope instability during open-pit mining. Three typical faults running through the ultimate boundary were selected to investigate progressive instability mechanism of the slopes in the open-pit mine under coupling effect of multiple faults by integrating Rhino+Griddle 3D geological modeling and FLAC^{3D} multi-field coupling simulation. Furthermore, the safety factors of slopes under different working conditions were calculated, and relatively unstable slopes were also identified for addressing the subsequent safety of the ultimate boundary. The simulation results show that, plastic failure and tensile stress concentration will occur in the slope at the junction of Zone C and Zone D, while local plastic failure will occur in the faults, which, however, won't induce instability failure in the surrounding slopes; there won't be much displacement in the slope at the ultimate boundary, with the maximum displacement (2.44 cm) at the toe of slope; the safety factors of the ultimate boundary of open pit under natural working conditions and rainfall are 2.48 and 2.36 respectively, indicating that the slope is stable. However, slope at Zone E with F1 fault is considered to be with a relatively instability, for which comprehensive measures including real-time monitoring, prevention and reinforcement can be taken to ensure the safety.

Key words: open-pit mining; fault; slope stability; slope displacement; safety factor; unstable slope prediction

露天开采过程中, 长期爆破振动会导致高陡边坡岩体强度降低, 而矿区的地下水、大降雨、复杂地质构造, 尤其是断层、破碎带等可能会成为边坡失稳破坏的诱因。含结构面的边坡比其他边坡更容易发生失稳事故^[1-2]。数值模拟是研究边坡稳定性及其影响因素的成熟方法, 许多学者^[3-10]利用多种数值模拟软件和强

度折减法研究不同工况下的边坡稳定性, 搜索相应的潜在滑移面, 并提出边坡防治方案。既有研究已系统论证了断层对边坡稳定性的显著影响, 但在多断层群动态响应与露天开采扰动耦合作用方面仍需深化, 尤其针对断层密集发育的露天矿山, 其群组化断层空间互馈机制、开挖卸荷与降雨入渗叠加效应下的潜在活

① 收稿日期: 2025-03-05

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC2903905)

作者简介: 黄毅(1988—), 男, 江西赣州人, 硕士, 高级工程师, 从事采矿工艺与岩石力学方面研究。E-mail: huangyi_csu@163.com

通信作者: 王祥钦(1999—), 男, 广东湛江人, 硕士, 助理工程师, 从事采矿与岩石力学方面研究。E-mail: 3251202124@qq.com

化规律尚不明确。

某露天钼矿共有 13 条断裂构造,断裂构造十分发育,在露天开采过程中应着重考虑断层对边坡稳定性的影响。本文以该露天钼矿为背景,聚焦贯穿了境界的 3 条典型断层,通过融合 Rhino+Griddle 三维地质建模与 FLAC^{3D}多场耦合模拟技术,研究多断层耦合效应下露天矿边坡的渐进失稳机理,并为断层群发育矿山的风险分区防控与扰动控制提供理论依据。

1 矿区工程地质和边坡分区

某钼矿位于低山丘陵地区,海拔 350~720 m,相对高差 150~300 m,沟谷呈“U”形或“V”形,山坡坡度一般 20°~30°。区内平均年降雨量 1 637.9 mm,最大年降雨量 2 488.7 mm,最小年降雨量 1 028.5 mm,每年的 4~6 月为丰水期,最大月降雨量 517.6 mm。矿区内发育有较多的山间沟谷溪流,流量一般为 0.11~7.51 L/s,历史洪水位高于现水位约 2 m(标高约 392 m)。风化带主要为强至弱风化带,在不存在构造破碎带影响的情况下,风化带总厚度为 2.22~43.50 m,最大可达 62.62 m,平均厚度为 21.12 m。

矿区的南华系上施组地层分布于西部,占矿区面积的 55%~65%。岩性以白云石英片岩和灰绿色绿泥白云母长石石英岩为主,总体地层产状 265°~295°,倾角 10°~45°,岩层中褶皱、劈理、层间小构造发育。矿区内断裂构造十分发育,有 13 条断裂构造,其中 F1、F5 和 F8 断层的相对位置关系如图 1 所示,这 3 条断层贯穿了境界,受露天开采扰动的最大影响。F1 断层位于北部靠西侧,出露长度大于 800 m,宽度 1.0~2.5 m,走向 85°~100°,倾角 55°~75°;F5 断层位于北部靠东侧,出露长度大于 800 m,宽度 1.0~3.0 m,走向 85°~95°,倾角 52°~78°;F8 断层位于矿区中部,出露长度约 2 200 m,宽度 2.0~2.5 m,走向 85°~100°,倾角 55°~75°。

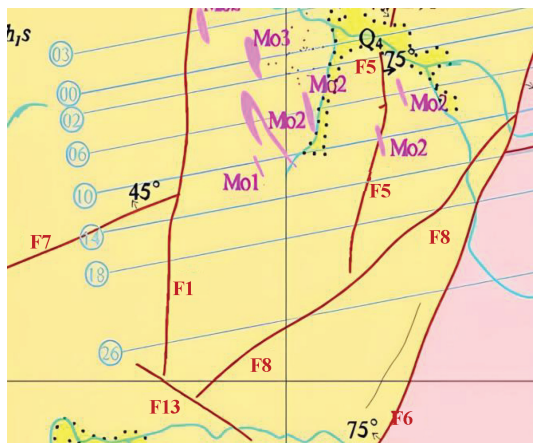


图 1 矿区内断层相对位置

Fig.1 Relative position of faults in mining area

综合考虑设计边坡形态特征、岩体结构特征、工程地质岩组特征、构造发育特征、边坡地下水、边坡破坏类型、工程地质测绘工作程度等因素,对边坡进行工程地质分区,将矿区内要素基本相同或一致的区域划分为同一工程地质分区,包括 A 区、B 区、C 区、D 区和 E 区,如图 2 所示。5 个边坡分区的边坡高度及整体设计边坡角见表 1。

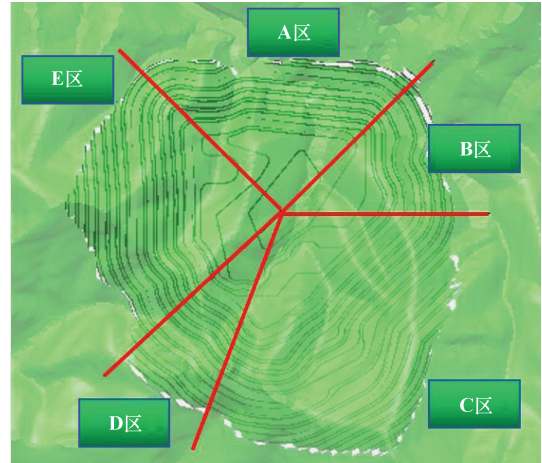


图 2 边坡的具体分区

Fig.2 Zoning map of slopes

表 1 边坡分区信息

Table 1 Slope zoning

边坡分区	边坡设计高度/m	整体设计边坡角/(°)
A	156	43
B	156	49
C	384	44~46
D	276	47
E	324	48

2 数值模拟

采用 AutoCAD、3DMine 以及 Rhino 等软件建立研究区域工程尺度级的三维地质模型。首先,利用当前高精度三维现状地表图得到地表模型,利用设计的最终境界图纸得到最终境界坑,再利用勘探线剖面图得到具体走向和倾角的断层模型。然后利用 Rhino 软件进行全面合并处理,并通过网格剖分工具 Griddle 对曲面模型进行精细化网格剖分和修复报错网格,进而构建全四面体的三维地质网格实体模型。最后导出该矿区的三维数值计算网格模型。

数值模型包括第四系和强风化层、深部围岩、矿体以及 F1、F5、F8 断层。其中,第四系和强风化层厚 21 m,F1、F5、F8 断层各厚 2.5 m,各岩体的力学参数见表 2。模型共有 5 组,共 630 074 个单元、113 185 个单

元节点。模型尺寸为 1 572 m×1 396 m。断层网格尺寸为 2.5~200 m,其余网格尺寸为 20~200 m,由地表到围岩底边界逐渐变大。模型如图 3 所示。

表 2 岩体力学参数

Table 2 Mechanical properties of rock mass

类型	密度/ (kg·m ⁻³)	单轴抗压 强度/MPa	单轴抗拉 强度/MPa	弹性 模量/GPa	泊松 比	强度参数	
						C/MPa	φ/(°)
第四系和 强风化层	2 400	4.5	0.10	7.76	0.31	0.10	32
矿体	2 670	21.2	0.55	27.65	0.20	0.72	38
围岩	2 650	18.5	0.50	25.50	0.21	0.70	37
断层散体	1 800	1.3	0.05	0.20	0.35	0.04	28

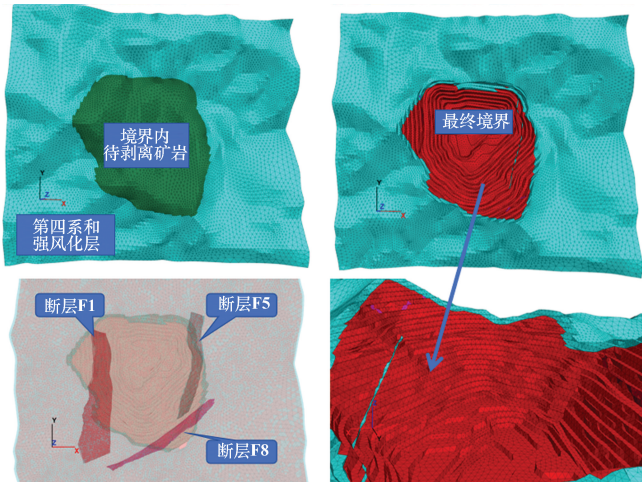


图 3 数值模型

Fig.3 Numerical model

模拟采用节点速度作为模型约束条件,约束四周和底部边界,顶部边界为自由边界。先利用弹性本构模型模拟岩体自重,然后使用莫尔-库仑本构模型模拟矿岩的开采和剥离。通过命令流实现对每组的编号命名,例如将图 3 中境界内待剥离矿岩定义为矿岩组,为避免一次性采剥造成模拟结果失真以及多次采剥的繁琐,对该组矿岩从 480 m 标高开始往下至 80 m 标高每 25 m 垂高进行一次剥离,共进行 16 次采剥和模拟解算,通过塑性区、位移、应力三个角度综合分析露天开采结束后境界内边坡稳定性以及在开挖过程中断层对边坡稳定性的影响。

3 露天开采数值模拟结果分析

3.1 塑性区分析

采剥完成的终了边坡塑性破坏云图如图 4 所示。为便于观察采剥矿岩导致的露天边坡塑性破坏,将在迭代过程中发生剪切破坏且模拟结束后处于稳定状态的区域更换为“None”的颜色。结合图 2 和图 4 可发

现,边坡采剥模拟至 355~330 m(第 6 次采剥)时,D 区和 C 区的交界处边坡开始出现小范围的局部剪切破坏和张拉破坏。边坡采剥模拟至 330~230 m 标高(第 7~10 次采剥),剪切破坏和张拉破坏向露天境界底部以及两侧拓展。在发生剪切破坏的边坡处取剖面分析塑性区的贯通情况时发现,塑性区并未贯穿至地表,说明矿岩在采剥过程中应力重新分布,此处边坡发生了应力集中并造成局部破坏,但不会导致周围边坡发生破坏,边坡并不会发生局部失稳。在实际生产过程中,此处边坡的单次剥离量更小,但也需做好提前支护和预警监测。

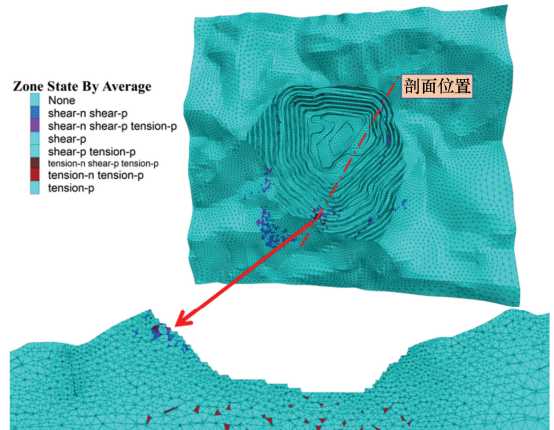
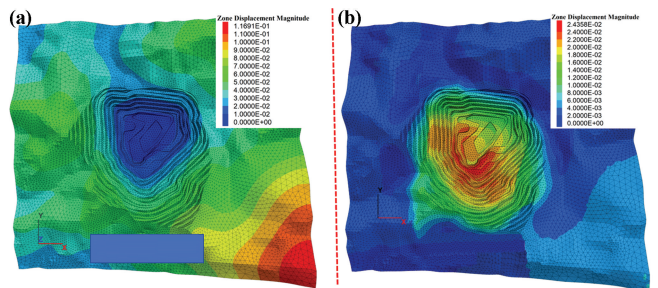


图 4 塑性破坏云图

Fig.4 Plastic failure nephogram

3.2 位移变形分析

在自重阶段边坡位移通常较大,进而导致后续开挖扰动造成的位移不明显,边坡最大位移云图如图 5 所示。自重阶段边坡最大位移约 11.7 cm,境界内边坡位移较小且看不出开挖扰动的影响。将自重阶段产生的位移清零后,仅露天开采活动导致的终了境界内边坡最大位移位于坡脚,约 2.44 cm,边坡顶部的位移大部分在 0.6~1.6 cm 范围内。



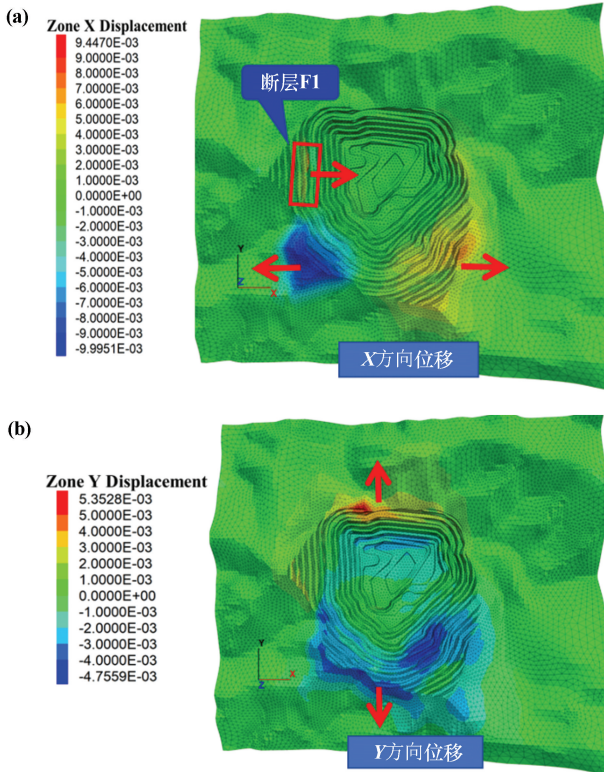
(a) 自重位移未清零; (b) 自重位移清零

图 5 最大位移云图

Fig.5 Maximum displacement nephogram

为进一步观察终了境界边坡的位移方向,对 X 和

Y方向位移进行分析,X方向和Y方向位移云图如图6所示。D区和C区边坡位移值较大,分别为10 mm和9.4 mm,但均朝着边坡内部。E区因断层F1的存在,局部边坡在X方向上朝着境界内自由面变形,但变形值不大,约6 mm。南北两侧边坡在Y方向位移均朝向边坡内部,且变形值不大,约5 mm。由图6可知,露天开挖扰动不会导致边坡发生大变形,边坡基本处于稳定状态。



(a) X方向; (b) Y方向

图6 X方向和Y方向位移云图

Fig.6 Nephogram of displacement in X and Y directions

3.3 应力分析

相较于塑性区,应力云图可以更直观看出由开采活动引起的临近破坏岩体。模拟发现采剥完成的终了边坡最大压应力约3.1 MPa,不会引起边坡压缩破坏。在云图中将压应力赋值为0,得到拉应力云图如图7所示。边坡最大范围的拉应力集中在D区和C区的交界处,包括了终了境界内的最大拉应力值(0.73 MPa)。另外E区F1断层以及E区和A区的交界处也有较大范围的拉应力集中,但数值不大,约0.25 MPa。在D区和C区的交界处取剖面,此处拉应力集中向边坡内部延伸,但内部拉应力不大,为0.3~0.4 MPa。临近破坏以及已经破坏的区域位于此处边坡的表层。

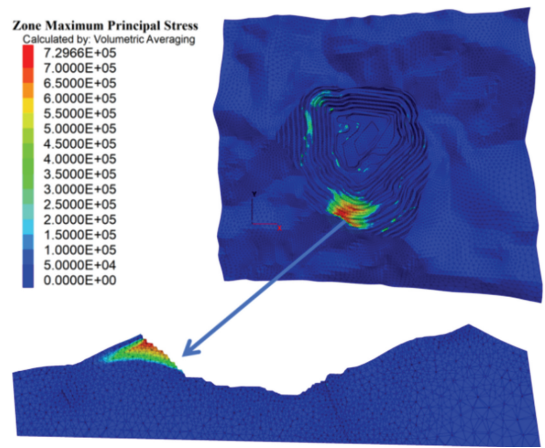


图7 拉应力云图

Fig.7 Nephogram of maximum tensile stress

3.4 综合分析

结合塑性区、最大位移云图以及拉应力云图综合分析,D区和C区交界处有局部塑性破坏贯通,在实际生产中需采取控制措施,另外境界内边坡变形不大,虽然有局部范围的拉应力集中,但终了境界边坡整体上仍能保持稳定。

4 相对危险边坡预测

借助FLAC^{3D}以强度折减法进行边坡模拟,求解边坡安全系数,并搜索该矿区露天开采结束后终了境界边坡的相对危险区域,以便采取预防措施。

4.1 自然工况下的危险边坡预测

露天开采完毕后终了境界边坡在自然工况下模拟的最大位移和最大应变增量云图分别如图8和图9所示。

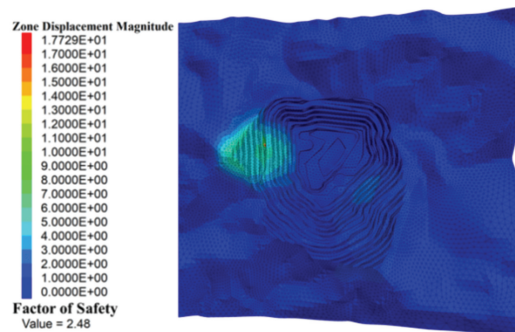


图8 最大位移云图

Fig.8 Maximum displacement nephogram

由图8~9可知,经过多次参数折减,边坡安全系数为2.48,仅从安全系数上看,终了境界可以保持边坡稳定。经过多次折减后,终了境界内最大位移位于E区边坡F1断层处,C区边坡也有较大位移。结合表1

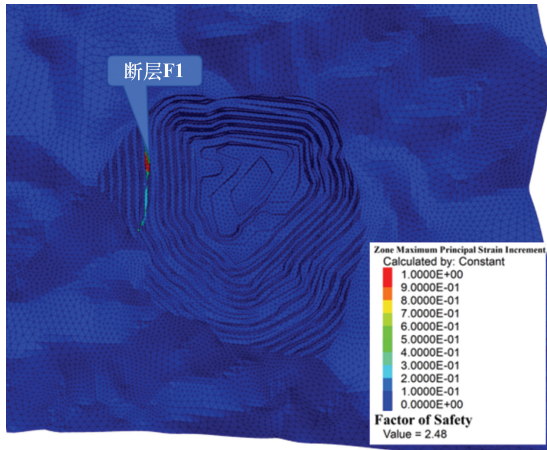


图 9 最大应变增量云图

Fig.9 Nephogram of maximum strain increment

和图 3 分析,E 区和 C 区都是超过 300 m 高的边坡,有断层穿过且边坡角度均较大。虽然 C 区边坡的边坡

高度(384 m)大于 E 区的边坡高度(324 m),但 E 区的边坡角(48°)大于 C 区的边坡角(44°~46°),且断层 F1 的产状比断层 F5 和 F8 更易诱发边坡失稳,因此,E 区边坡的失稳风险比 C 区边坡更大。断层 F1 对 E 区边坡稳定性的影响如图 10 所示。模拟结果显示,在多次强度折减后,强度较弱的 F1 断层产生的位移更大,该断层将率先发生失稳破坏并沿 E 区边坡向下滑动。

根据图 8~10,在发生最大位移和最大应变增量的 E 区取边坡剖面分析边坡破坏模式,该剖面最大位移云图如图 11 所示,最大应变增量云图如图 12 所示。该边坡可能发生的破坏模式为圆弧滑动破坏,在受到大降雨、风化、爆破以及其他扰动因素影响时,将很可能以 F1 断层为诱因,先是 F1 断层发生失稳破坏向下滑落,然后牵引上部边坡岩体向下滑落,最终导致 E 区边坡整体失稳。

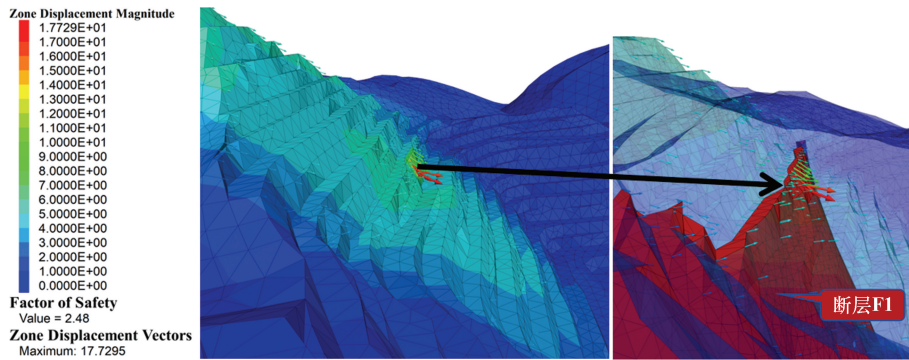


图 10 断层 F1 对 E 区边坡的影响

Fig.10 Influence of F1 Fault on Zone-E slope

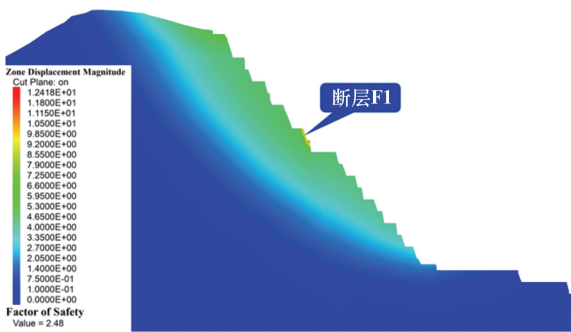


图 11 E 区边坡最大位移剖面云图

Fig.11 Cross-section nephogram of displacement of Zone-E slope

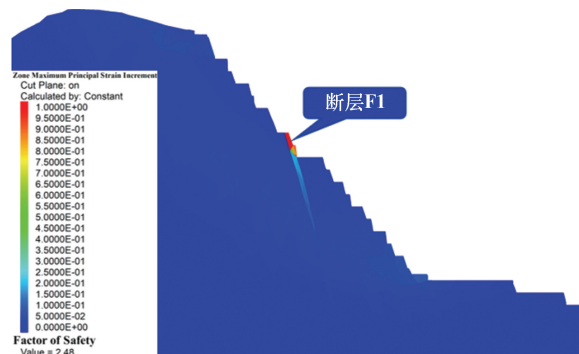


图 12 E 区边坡最大应变增量剖面云图

Fig.12 Cross-section nephogram of maximum strain increment of Zone-E slope

4.2 降雨工况下的危险边坡预测

该矿区每年的 4~6 月为丰水期,降雨会弱化边坡强度甚至进一步激活断层,进而导致边坡失稳,需考虑终了境界在降雨工况下的稳定性并进行流固耦合模拟。降雨工况下渗流场参数见表 3。

为了更贴合实际的降雨工况,通过编写 fish 命令提取该矿区地表的顶点,标记为降雨面顶点,继而通过降雨面添加孔隙压力边界条件,实现降雨模拟。模拟中有少许顶点因模型的缺陷和 fish 命令的不足,导致

未被识别,但基本上可以达到模拟目的,不影响降雨入渗和降雨工况安全系数的模拟结果。

表3 渗流场参数

Table 3 Parameters of seepage field

类型	渗透系数/[$\text{m}^2 \cdot (\text{Pa} \cdot \text{s})^{-1}$]	孔隙率
第四系和强风化层	1×10^{-6}	0.35
围岩	1×10^{-9}	0.05
断层散体	1×10^{-8}	0.10

以 30 cm 积水深的压力作为孔隙压力边界条件,模拟经历 24 h 降雨的终了境界降雨渗流,模拟结果如图 13 所示,沿 C-E 区边坡取降雨渗流剖面,可以发现降雨完全浸透台阶边坡并往下渗透 10~20 m。

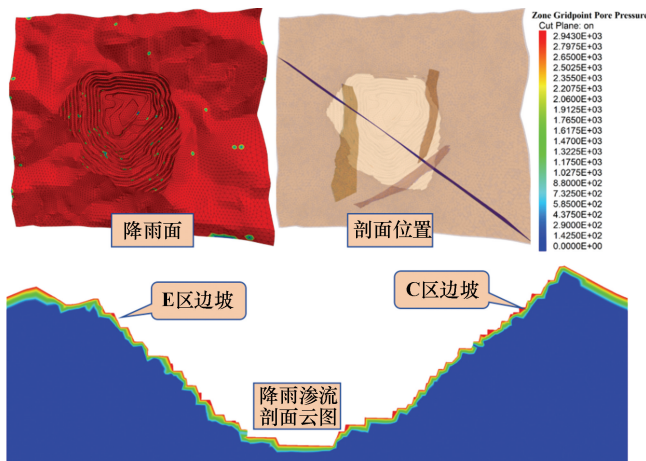


图13 终了境界的降雨渗流

Fig. 13 Rainfall-induced seepage in ultimate boundary

关闭流体计算并开启力学计算后得到流固耦合的模拟结果,关闭降雨使用的大变形状态,以该结果进一步以强度折减法进行安全系数求解。沿图 13 所示的剖面取 E 区边坡的最大位移云图和应变增量云图,如图 14 和图 15 所示。因降雨模拟中启用了大变形,在断层 F1 处有局部岩体滑落的趋势,破坏模式和自然工况下的模拟结果一致,但在降雨工况下,断层的诱发迹象更明显。另外,从图 15 可更明显看出降雨渗流对断层的影响。模拟结果显示,降雨工况下边坡的安全系数为 2.36,说明边坡仍处于稳定状态,但是断层对边坡具有潜在危害。

4.3 防范措施

受地质资料和数值模拟的限制,模拟并未考虑地下水位、可能存在的诱发边坡失稳的未探明弱带和节理或其他隐蔽致灾等因素以及地震工况和爆破工况,实际的安全系数和极端工况的安全系数很可能会更低。但根据现有露天开采的塑性区、变形值以及较大

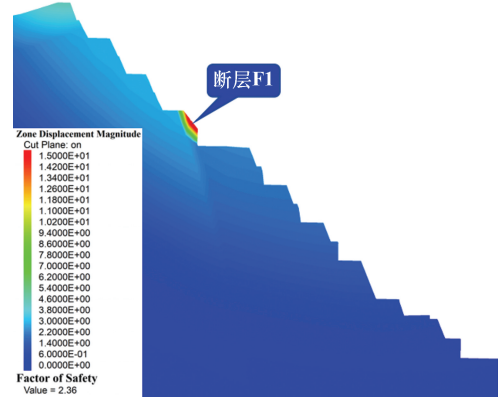


图14 降雨工况下E区边坡位移剖面云图

Fig. 14 Cross-section nephogram of Zone-E slope displacement under rainfall

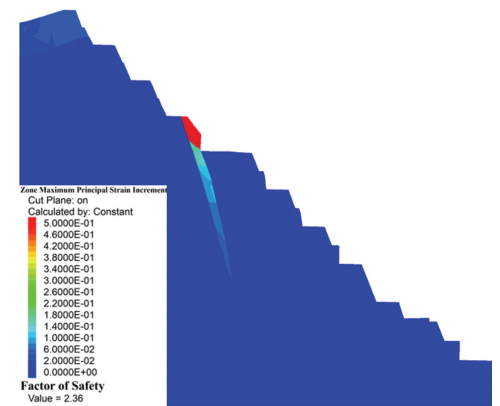


图15 降雨工况下E区边坡应变增量剖面云图

Fig. 15 Cross-section nephogram of strain increment in Zone-E slope under rainfall

安全裕度的安全系数,基本可以确定终了境界在常规工况下处于稳定状态。根据已有的模拟结果,并参考 E 区的边坡高度、边坡角以及 F1 断层,E 区边坡确定是当前相对危险的边坡,其次为 C 区边坡。在实际生产中,应提前安装边坡雷达、GNSS 接收器等边坡监测设备或者利用三维激光扫描、INSAR、分布式光纤等技术^[11-12],借助多种设备或技术手段综合提高边坡监测的准确性,以保证该矿山安全生产和终了境界的边坡安全。

5 结论

1) 露天开采至 355~230 m(模型高度)时,D 区和 C 区的交界处边坡开始出现小范围的局部剪切破坏和张拉破坏,在生产过程中需加以预防。此外,F1、F5、F8 断层发生了局部塑性破坏,但并不会导致周围边坡发生破坏。

2) 露天开采产生的最大位移位于坡脚,其中,

Z方向位移约2.44 cm, X方向位移不超过1 cm, Y方向位移约0.5 cm。需要注意的是, F1断层在X方向上有朝终了境界内部自由面移动的趋势。

3) 终了境界自然工况下的安全系数为2.48, 降雨工况下的安全系数为2.36, 均有较大的安全裕度, 表明终了境界在常规工况下处于稳定状态。相对危险边坡位于F1断层所处的E区, C区边坡危险性次之。

4) 针对断层渗透性强、岩体风化等隐蔽致灾因素以及持续强降雨、地震等极端工况, 建议采取实时监测、预防性加固及风险预警阈值设定等综合措施, 以提升边坡抗风险能力。

参考文献(References):

- [1] 侯俊旭, 杨天鸿, 赵永, 等. 基于微震监测及岩体损伤模型的露天-地下联合开采岩移过程数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(增刊1): 3243-3256.
HOU Junxu, YANG Tianhong, ZHAO Yong, et al. Numerical simulation study on rock movement process of combined open-pit and underground mining based on microseismic monitoring and rock mass damage model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(S1): 3243-3256.
- [2] 张家明. 含软弱夹层岩质边坡稳定性研究现状及发展趋势[J]. 工程地质学报, 2020, 28(3): 626-638.
ZHANG Jiaming. State of art and trends of rock slope stability with soft interlayer[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(3): 626-638.
- [3] 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.
- [4] 王钟钰, 蒋永超, 贾若彤, 等. 眼前山铁矿露天转地下开采岩体破坏规律研究[J]. 矿冶工程, 2025, 45(1): 14-20.
WANG Zhongyu, JIANG Yongchao, JIA Ruotong, et al. Failure law of rock masses in transition from open-pit to underground mining in Yanqianshan Iron Mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(1): 14-20.
- [5] 李延超, 王飞飞, 姜安民, 等. 含断层构造露天边坡变形破坏特征及稳定性研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(4): 150-154.
LI Yanchao, WANG Feifei, JIANG Anmin, et al. Deformation and failure characteristics and stability of open-pit slopes with fault structure[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024, 44(4): 150-154.

- [6] 李兆龙, 张绍飞, 沙原亭. 某露天矿断层发育条件及对边坡稳定影响的研究[J]. 中国铝业, 2024, 48(3): 14-19.
LI Zhaolong, ZHANG Zhaofei, SHA Yuanting. Effect of development conditions of faults on slope stability in a certain open pit mine[J]. China Molybdenum Industry, 2024, 48(3): 14-19.
- [7] 袁飞虎, 朱显峰, 陈德军, 等. 多断层对露天矿高陡边坡稳定性的影响研究[J]. 现代矿业, 2022, 38(11): 82-88.
YUAN Feihu, ZHU Xianfeng, CHEN Dejun, et al. Study on the influence of multi faults on the stability of high and steep slope in open-pit mines[J]. Modern Mining, 2022, 38(11): 82-88.
- [8] 李屹, 夏祥生, 徐继业, 等. 爆破振动作用下含断层边坡动力响应分析[J]. 矿冶工程, 2024, 44(1): 21-24.
LI Yi, XIA Xiangsheng, XU Jiye, et al. Dynamic response of slope with fault under blast vibration[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024, 44(1): 21-24.
- [9] 黄乐源, 田城航, 仇文岗, 等. 降雨作用下三维矿山边坡的力学状态响应[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(6): 70-79.
HUANG Leyuan, TIAN Chenghang, ZHANG Wengang, et al. Mechanical response of 3D mining slopes under effect of rainfall[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(6): 70-79.
- [10] 王希馨, 杨溢, 付俊, 等. 基于块石随机分布模型的土石混合体边坡稳定性研究[J]. 矿冶工程, 2025, 45(1): 7-13.
WANG Xixing, YANG Yi, FU Jun, et al. Stability analysis for soil-rock slope based on rock random distribution model[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(1): 7-13.
- [11] 朱淳, 龚逸非, 宋盛渊, 等. 滑坡多源监测技术及预警模型研究进展与展望[J/OL]. 西南交通大学学报, 1-19[2025-01-15]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1277.U.20240927.1634.009>.
ZHU Chun, GONG Yifei, SONG Shengyuan, et al. Progress and prospects of landslide multi-source monitoring technology and early warning modelling research[J/OL]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1-19[2025-01-15]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1277.U.20240927.1634.009>.
- [12] 韩流, 陈祥宸, 王胆, 等. 露天矿边坡监测预警体系及变形速率阈值确定方法[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(2): 329-338.
HAN Liu, CHEN Xiangchen, WANG Dan, et al. Monitoring and warning system and deformation rate threshold determining method for open-pit mine slopes[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(2): 329-338.

引用本文: 黄毅, 王祥钦, 徐海. 断层构造对露天边坡稳定性的影响及危险边坡预测[J]. 矿冶工程, 2025, 45(5): 1-7.

HUANG Yi, WANG Xiangqin, XU Hai. Impact of faults on open-pit slope stability and prediction of unstable slopes[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(5): 1-7.