

断裂构造和结构面对露天高陡边坡破坏模式影响研究

王发刚^{1,2,3}, 林洪彬^{2,4}, 刘正宇^{1*}, 余升红¹, 肖祖荣^{1,2,3}, 邹平^{1,2,3}

(1. 紫金(长沙)工程技术有限公司; 2. 紫金矿业集团股份有限公司;

3. 低品位难处理黄金资源综合利用国家重点实验室; 4. 湖南紫金锂业有限公司)

摘要:为研究断裂构造和结构面对露天高陡边坡破坏模式的影响,以湖南某锂多金属矿为工程背景,采用现场调查和理论分析等手段进行调查与分析。矿区断裂构造以近 SN 向断裂为主干构造,其间发育 NE 向断裂、近 EW 向断裂、NW 向断裂、弧形断裂及不同的节理裂隙,构成矿区的基本构造格架;通过现场调查测得岩体结构面产状,统计分析得到不同岩体的优势结构面:粗中粒斑状黑云母花岗岩 3 组、中细粒斑状黑云母花岗岩 2 组和云英岩 2 组;采用赤平投影法分析断裂构造和结构面对露天高陡边坡破坏模式影响。结果表明: F_2 断裂构造在 IV 区可能发生平面破坏;粗中粒斑状黑云母花岗岩第三组优势结构面在 III 区可能发生平面破坏;III、IV 区粗中粒斑状黑云母花岗岩第二组、第三组优势结构面组合,与坡面相切后可能发生楔体破坏。

关键词:断裂构造;结构面;露天矿;高陡边坡;破坏模式;岩芯编录

中图分类号:TD854+.6

文章编号:1001-1277(2025)01-0082-07

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20250113

引言

在矿山、交通、水利水电和建筑等各种工程建设和开发活动中,会形成大量边坡,一旦发生边坡失稳,往往会造成重大人员伤亡和财产损失^[1-3]。边坡稳定性研究是保障边坡安全、稳定运行的关键,而边坡破坏模式分析是稳定性研究的基础^[4-11]。

目前,针对边坡破坏模式方面的研究,杜时贵等^[12]系统全面地找出控制边坡稳定的关键性结构面及其组合,实现露天矿山边坡岩体稳定性的精细分析;宋腾蛟等^[13]研究表明,不同的优势分组方案,可能得到不同的边坡破坏模式;ZHOU 等^[14]研究了边坡可能的破坏模式,结合运动学分析,确定潜在不稳定块体的破坏角;李红毅等^[15]结合边坡雷达监测,研究了凸形边坡滑坡破坏模式;聂兴信等^[16]提出了一种针对露天矿含软弱岩层组高陡复杂边坡的综合分析方法;刘杨等^[17]针对露天矿山面临的边坡安全与经济效益平衡问题,提出了一种以赤平投影分析为基础的台阶坡面角优化方法;彭宗桓等^[18]提出一种结合 t 分布-随机邻近嵌入、主动学习多元自适应回归样条法和物质点法的新方法,识别出边坡失稳具有 4 种不同的破坏模式;孙书伟等^[19]运用底摩擦试验及数值模拟手段,对不同岩层倾角条件下顺层岩质边坡的破坏机制进行对比分析;CHEN 等^[20]针对土石混合体边

坡稳定性和破坏模式进行分析,提出了一种基于微极 Mohr-Coulomb (MC) 模型的二阶锥规划微极连续体有限元法 (mpcFEM-SOCP);张国胜等^[21]基于各向异性的有限元法对边坡潜在失稳破坏模式及稳定性进行了研究。

边坡破坏模式的研究思路是采集结构面产状数据后,聚类分析得到优势结构面,运用赤平投影法进行破坏模式分析。目前,同时考虑断裂构造和结构面 2 种因素作用下边坡破坏模式的研究较少,基于定向钻孔岩芯结构面产状测量转换获取方法仍不太完善。基于此,本文以湖南某锂多金属矿为工程背景,采用现场调查和理论分析的手段开展了断裂构造和结构面对露天高陡边坡破坏模式影响研究,以期为边坡稳定性研究工作提供基础理论支撑。

1 工程概况

某锂多金属矿地处湖南省南部,矿区属中低山区,谷深坡陡,海拔 890~1 241.34 m,相对高差 351.34 m,山脉总体走向北东,V 形沟谷纵横,冲沟或小溪型水系发育。矿区岩性相对单一,出露地层主要为第四系、变质岩及岩浆岩。变质岩岩性主要为云英岩,岩浆岩包括中细粒斑状黑云母花岗岩、粗中粒斑状黑云母花岗岩和少量的二长岩脉、细晶花岗岩脉。

矿山拟采用露天开采,生产能力 500 万 t/a,露天

收稿日期:2024-09-22;修回日期:2024-11-03

基金项目:“十四五”国家重点研发计划项目(2022YFC2903902)

作者简介:王发刚(1997—),男,工程师,硕士,研究方向为矿山岩土工程灾害防控;E-mail:wang_fagang@zijinmining.com

* 通信作者:刘正宇(1973—),男,教授级高级工程师,研究方向为矿山工程地质与安全;E-mail:liu_zhengyu@zijinmining.com

开采生产服务期为 15 a,露天境界最大采深 432 m,最终边坡角 $\leq 47.2^{\circ}$,台阶坡面角 65° 。

2 断裂构造与岩体结构面特征

2.1 断裂构造

矿区内断裂构造以近 SN 向断裂为主干构造,其间发育 NE 向断裂、近 EW 向断裂、NW 向断裂、弧形断裂及不同方向和性质的节理裂隙,构成了矿区基本构造格架。NE 向及 SN 向断裂是主要断裂,而 NW 向断裂是次要断裂,仅发育于矿区中部。矿区断裂构造分布如图 1 所示。

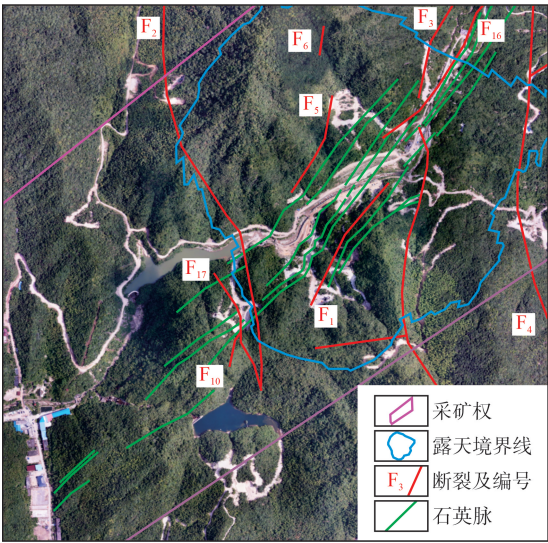


图 1 矿区断裂构造分布示意图

Fig. 1 Fault structure distribution in the mining area

1) 近 SN 向断裂。近 SN 向断裂是矿区内显著的一组断裂构造,是区域性主断裂的分支断裂或次级断

裂,发育于成矿前,是区内主要控岩和导矿构造。该组断裂主要有 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 断裂,其次为 F_5 、 F_7 、 F_{11} 等次级断裂。与成矿关系较密切的主要为 F_2 、 F_3 断裂,区内云英岩型矿体主体分布于二者的夹持部位,隐伏成矿岩体受南北向控岩断裂控制。各断裂特征基本一致,断裂宽度较小,其内发育钾化花岗岩、硅化花岗岩、中低温白色块状石英脉、红色瓷状石英脉、碎裂岩、构造角砾岩、断层泥,局部可见糜棱岩。

2) NE 向断裂。矿区内不发育,多表现为沿 NNE 向—近 SN 向断裂旁侧的次级断裂构造,如 F_{17} 断裂为 F_2 断裂的次级构造。

3) 近 EW 向断裂。矿区内不发育,主要为 F_7 断裂,其次为诸多规模较小的断裂,分布于 NNE 向—近 SN 向断裂旁侧。

4) 弧形断裂。由一组产状平缓、近平行产出的弧形裂隙构成的构造形式,各裂隙在剖面上自上而下似等间距分布。在早期斑状花岗岩中产生了一组剖面上的共轭剪节理,因斑状花岗岩为各向均质体,共轭剪节理相互迁就利用,形成一组近平行产出呈弧形的裂隙带。

2.2 岩体结构面

为查明矿区岩体结构面特征,开展岩体结构面调查测绘和定向钻孔岩芯编录。

2.2.1 岩体结构面调查测绘

本次调查在露天境界范围内开展,结合露天边坡 3 种主要岩体,在地下开采巷道两帮和矿区道路边布置了 5 条测线,调查测绘过程及调查区域见图 2,调查测线布置见表 1。



图 2 各岩性调查区域示意图

Fig. 2 Survey areas of various lithologies

表 1 岩体结构面调查测线布置

Table 1 Survey lines layout on rock mass structural planes

岩性	测线号	测线位置	测线方位/($^{\circ}$)	测线长度/m
中细粒斑状黑云母花岗岩	1 [#]	露天采场西侧公路旁(水电站)	155	20.60
	2 [#]		175	5.80
云英岩	3 [#]	990 m 中段 2 号穿脉及 2-2 充填巷	115/50	12.25
粗中粒斑状黑云母花岗岩	4 [#]	990 m 中段 3 号穿脉开口处	225	12.00
	5 [#]	990 m 中段 3 号穿脉 3-1 充填巷	135	5.45

2.2.2 定向钻孔岩芯编录

定向钻孔岩芯编录目的是划分工程地质岩组和了解岩体结构面。本次共计完成钻孔岩芯编录 1 680.60 m (定向钻孔岩芯编录 1 480.60 m), 岩芯结构面 892 条。现场编录测量了岩芯结构面产状, 对其进行空间坐标系转换后得到岩体结构面的实际产状。

1) 定向钻孔岩芯结构面测量。首先, 定向钻孔过程通过在每一次钻进完成后, 采用钢锥在岩芯底部打点标记 (定向标记点), 取出岩芯后将其按照结构面完整拼合放置在钳形槽上; 其次, 找出岩芯底部圆心点, 并与底部定向标记点连接, 在底部得到经过定向标记点的直径; 之后, 在拼合好的岩芯上

基于直径与岩芯侧表面得到 2 个交点 (与定向标记点同侧或异侧), 以其中的一个交点绘制定向母线, 母线与岩芯轴心线平行; 在完成定向钻孔母线绘制后, 即可将岩芯摆放进岩芯箱运至岩芯库进行编录; 最后, 编录过程采用红蓝记号笔对结构面进行判断 (节理、裂隙用蓝色画“—”表示, 钻进机械破碎用红色画“×”表示), 编录人员将岩芯以钻进方向远离自己的方式拿住, 使用柔性塑料板制作的倾角测量工具, 以母线为起点, 顺时针方向至结构面最低点的夹角为 β , 再使用量角器测得结构面与岩芯轴心线的夹角为 α 。定向钻孔岩芯结构面产状 (α, β) 测量过程见图 3。

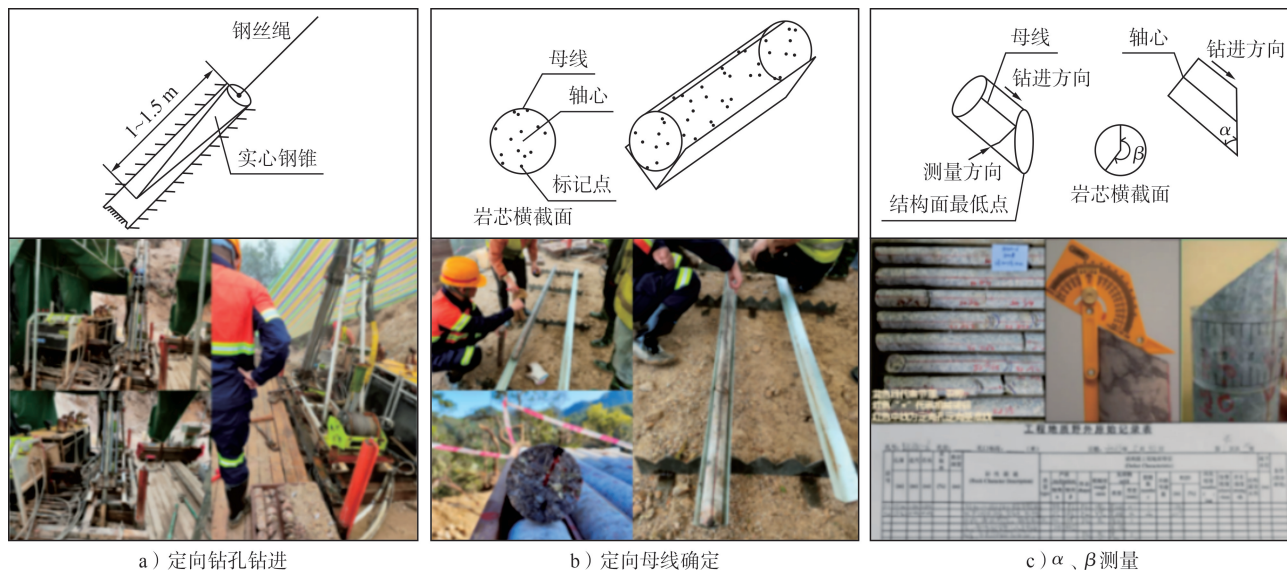


图 3 定向钻孔岩芯结构面测量过程示意图

Fig. 3 Oriented drill core structural planes measurement process

2) 结构面产状转换过程。岩芯编录测量的结构面产状 α, β 需要经过一定的空间坐标转换 (见图 4) 才能得到真实的岩体结构面产状。

(1) 利用钻孔测斜仪在定向钻孔钻进过程中, 隔一定间距测量一次钻孔倾角 θ 和钻孔方位角 γ 。

(2) 假定待测结构面在空间上建立起 2 个空间直角坐标系, 且 2 个坐标系的原点重合于结构面与岩芯轴心线相交点, 即第一坐标系 $OXYZ$ 和第二坐标系 $OX'Y'Z'$; 第一坐标系 Z 轴正方向为竖向向上方向, XOY 平面与水平面重合, Y 轴正方向为地球的正北方向, X 轴正方向为地球的正东方向; 第二坐标系 Z' 轴与岩芯轴心线重合且正方向为定向钻孔钻进反方向, $X'OY'$ 平面与岩芯径向平面重合, Y' 轴过定向母线且正方向指向母线, X' 轴为 Y' 轴绕 Z' 轴以左手法即顺时针旋转 90° 得到。

(3) 以待测结构面作过原点 O , 终点为 n 点的单位法向量 $\vec{on}$, 则 n 点在坐标系 $OXYZ$ 和 $OX'Y'Z'$ 中

的坐标 (x, y, z) 和 (x', y', z') 可表示为:

$$\begin{cases} x = \sin \varepsilon \sin \omega \cdot |\vec{on}| \\ y = \sin \varepsilon \cos \omega \cdot |\vec{on}| \\ z = \cos \varepsilon \cdot |\vec{on}| \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x' = \cos \alpha \sin \beta \cdot |\vec{on}| \\ y' = \cos \alpha \cos \beta \cdot |\vec{on}| \\ z' = \sin \beta \cdot |\vec{on}| \end{cases} \quad (2)$$

式中: ε 为待测结构面的真倾角 ($^\circ$); ω 为待测结构面的真倾向 ($^\circ$); $|\vec{on}|$ 为法向量 $\vec{on}$ 的模, 为 1。

(4) 将第二坐标系 $OX'Y'Z'$ 的 $Y'OZ'$ 平面绕 X' 轴顺时针或逆时针转动 $(90^\circ - \theta)$ 后形成新的坐标系 $OX''Y''Z''$ (称为第三坐标系), 此时第三坐标系 Z'' 轴与第一坐标系 Z 轴重合; 再将第三坐标系 $OX''Y''Z''$ 的 $X'OY''$ 平面绕 Z'' 轴或 Z 轴顺时针或逆时针旋转 γ , 使得 Y'' 轴正方向为地球的正

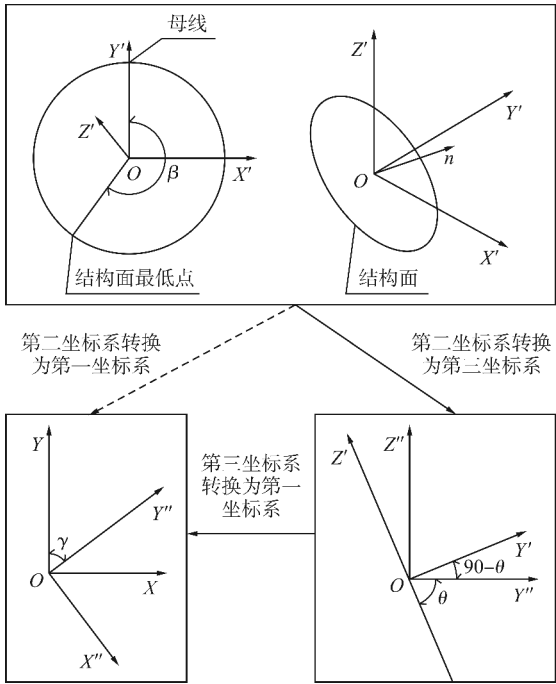


图 4 定向钻孔结构面转换示意图

Fig. 4 Transformation of oriented drill core structural planes
北方向, X'' 轴正方向为地球的正东方向, 即第三坐标系进一步转换后与第一坐标系完全重合。

(5) 根据第二坐标系两次旋转变换到第一坐标系的变换关系, n 点在第二坐标系坐标 (x', y', z') 通过实测的 α 、 β 、 θ 、 γ 表示在第一坐标系的坐标 (x, y, z) , 表达式为:

$$\begin{cases} x = (\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \cos \beta \sin \theta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \theta \sin \gamma) \cdot |\vec{on}| \\ y = (-\cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \beta \sin \theta \cos \gamma - \sin \alpha \cos \theta \cos \gamma) \cdot |\vec{on}| \\ z = (\cos \alpha \cos \beta \cos \theta + \sin \alpha \sin \theta) \cdot |\vec{on}| \end{cases}$$

(3)

表 2 岩体优势结构面统计分析

Table 2 Statistical analysis of dominant structural planes in rock masses

岩体	优势结构面					
	第一组		第二组		第三组	
	产状	占比/%	产状	占比/%	产状	占比/%
粗中粒斑状黑云母花岗岩	33°∠88°	32.19	131°∠85°	32.88	314°∠48°	23.29
中细粒斑状黑云母花岗岩	145°∠75°	41.40	63°∠85°	31.85		
云英岩	27°∠86°	38.19	132°∠88°	50.00		

3 破坏模式影响分析

3.1 边坡分区

根据 GB 51016—2014《非煤露天矿边坡工程技术规范》,结合边坡几何要素,将露天边坡划分为 4 个区:Ⅰ区、Ⅱ区、Ⅲ区和Ⅳ区,边坡分区示意图见图 6。

(6) 结合式(1)和式(3),通过编录实测的 α 、 β 、 θ 、 γ 换算,即可得到待测结构面的真倾角 ε 和真倾向 ω 。

2.2.3 结构面发育特征与优势产状分析

根据现场岩体结构面调查测绘及定向钻孔岩芯编录成果,露天采场岩体结构面发育特征、优势结构面产状统计分析结果如下:

1) 结构面发育特征。

(1) 粗中粒斑状黑云母花岗岩。节理、裂隙闭合,压性为主,极少数压扭性。裂宽最大为 80 mm(石英脉),一般<1 mm。充填物主要为围岩碎屑、绿泥石,少数为高岭土、黑云母和石英,极少数为黄铁矿、褐铁矿。胶结较好—好,调查区域滴水。结构面绝大多数为平直粗糙,少数为平直光滑,极少数为不规则粗糙、弯曲粗糙、弯曲光滑和不规则光滑。

(2) 中细粒斑状黑云母花岗岩。节理、裂隙闭合,压性为主,极少数压扭性。裂宽最大为 20 cm(糜棱岩),一般<1 mm。充填物绝大多数为围岩碎屑、绿泥石和高岭土,少数为黄铁矿、黑云母和石英。胶结较好—好,调查区域较湿润。结构面绝大多数为平直粗糙,少数为平直光滑,极少数为不规则粗糙、弯曲粗糙、弯曲光滑和不规则光滑。

(3) 云英岩。节理、裂隙闭合,压性为主,极少数压扭性。裂宽最大为 50 mm(石英脉),一般<1 mm。充填物绝大多数为铁氧化物、围岩碎屑和高岭土,极少数为石英。胶结较好—好,调查区域滴水—淋水。结构面大多数为平直粗糙,少数为弯曲粗糙和平直光滑。

2) 结构面优势产状统计分析。采用 Dips 软件进行统计分析,得到边坡岩体优势结构面有 2~3 组,以及一些紊乱的结构面(见表 2)。以粗中粒斑状黑云母花岗岩优势结构面统计分析为例,结果见图 5。

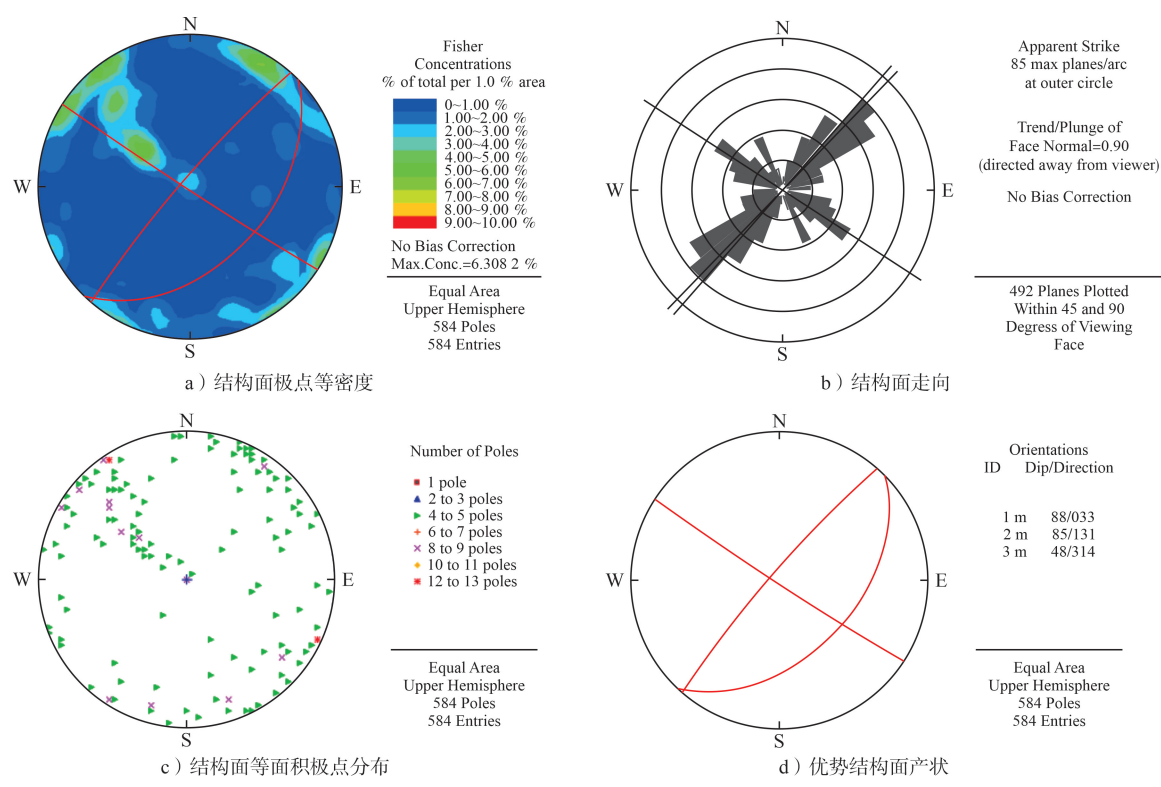


图 5 粗中粒斑状黑云母花岗岩优势结构面统计分析结果

Fig. 5 Statistical analysis results for dominant structural planes of coarse- to medium-grained porphyritic biotite granite

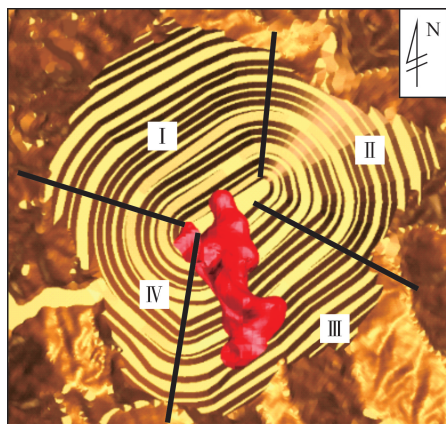


图 6 边坡分区示意图

Fig. 6 Schematic diagram of slope zoning

表 3 边坡分区与断裂构造产状

Table 3 Slope zoning and fault structure occurrences

分区		主要断裂构造	
编号	产状	编号	主要产状
I	151° ∠ 65°	F ₅	111° ∠ 75°
		F ₆	96° ∠ 60°
		F ₃	71° ∠ 65°
II	227° ∠ 65°	F ₄	97° ∠ 70°
		F ₁₆	133° ∠ 61°
		F ₃	98° ∠ 65°
III	315° ∠ 65°	F ₇	172° ∠ 50°
		F ₉	123° ∠ 55°
IV	51° ∠ 65°	F ₂	68° ∠ 60°

将露天边坡各分区边坡主要边坡坡面的产状分别与不同断裂构造产状作赤平投影图(见图 7, ID=1,2,3 为断裂构造产状, ID=4 为边坡面产状), 得到不同分区边坡坡面与断裂构造的组合关系。

由图 7 可知: ① I 区, F₅、F₆ 断裂与坡面走向夹角为 30°~60°, 属基本稳定边坡; ② II 区, F₃ 断裂与坡面走向夹角为 30°~60°, 属基本稳定边坡; F₄、F₁₆ 断裂与坡面走向夹角为 60°~90°, 属稳定边坡; ③ III 区, F₃、F₇、F₉ 断裂与坡面走向夹角为 60°~90°, 属稳定边坡; ④ IV 区, F₂ 断裂与坡面走向夹角为 0°~30°, 存在潜在平面破坏的可能。

3.3 岩体结构面对边坡破坏模式影响

采场边坡主要岩体为粗中粒、中细粒斑状黑云母花岗岩, 云英岩主要分布在露天采场 III 区。根据岩体优势结构面统计分析结果, 中细粒斑状黑云母花岗岩和云英岩 2 组优势结构面倾角均大于设计坡面角 65°, 粗中粒斑状黑云母花岗岩第三组优势结构面倾角(48°) 小于设计坡面角。根据平面破坏与楔体破坏判别标准, 仅粗中粒斑状黑云母花岗岩优势结构面与边坡面组合后, 可能产生平面破坏与楔体破坏。因此, 此次仅定性分析粗中粒斑状黑云母花岗岩产生平面破坏与楔体破坏的可能性。

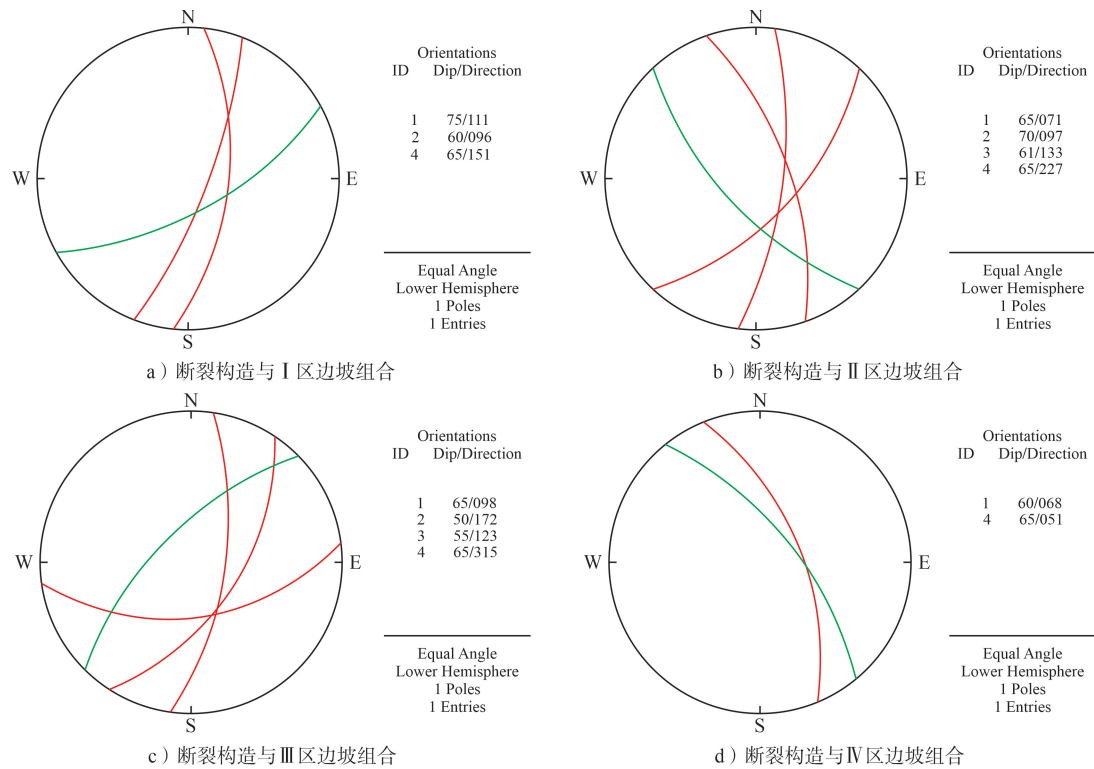


图 7 断裂构造与边坡组合关系

Fig. 7 Combinations of fault structures and slopes

将露天边坡各分区边坡坡面产状分别与不同岩性结构面的优势产状作赤平投影图(见图 8,以粗中粒斑状黑云母花岗岩为例, $ID=1,2,3$ 为岩体优势结

构面产状, $ID=4$ 为边坡面产状),得到不同分区边坡面与岩体结构面的组合关系。

由图 8 可知:

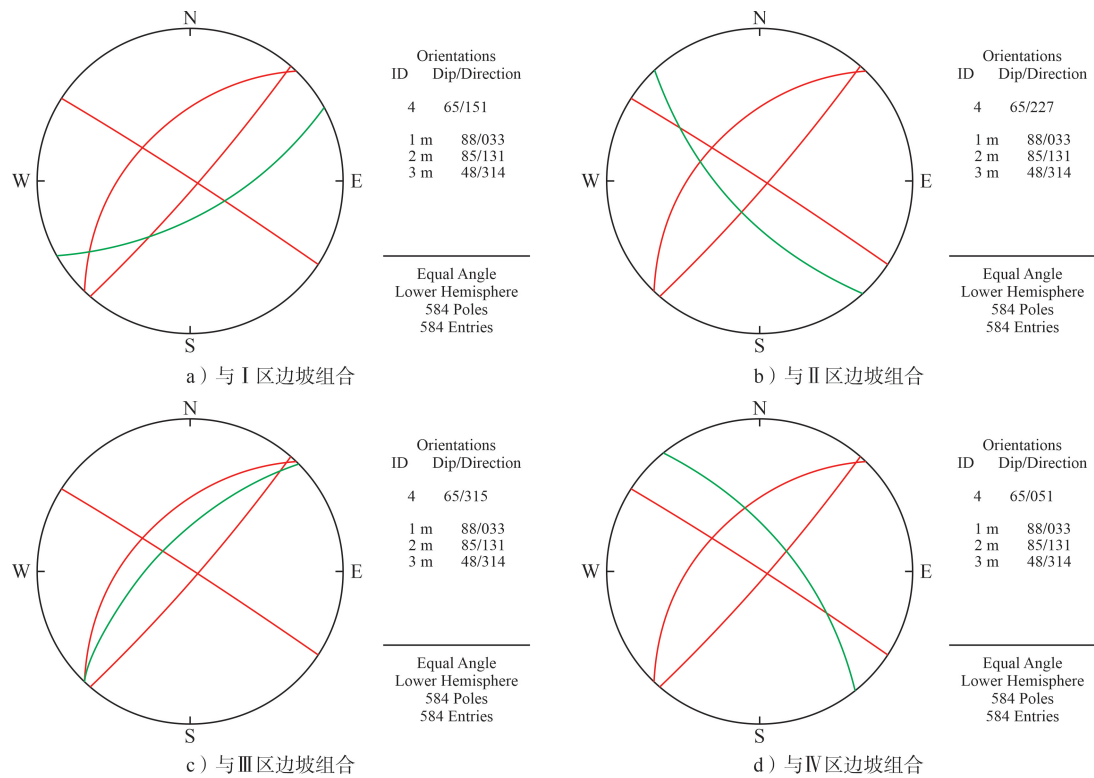


图 8 粗中粒斑状黑云母花岗岩岩组优势结构面与边坡组合关系

Fig. 8 Combinations of slopes and dominant structural planes in coarse- to medium-grained porphyritic biotite granite rock masses

1) 平面破坏分析。①粗中粒斑状黑云母花岗岩第一组优势结构面与Ⅰ、Ⅲ区,第二组优势结构面与Ⅱ、Ⅳ区,第三组优势结构面与Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ区坡面走向夹角均为 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$,属稳定边坡;②粗中粒斑状黑云母花岗岩第一组优势结构面与Ⅱ区、第二组优势结构面与Ⅲ区坡面走向夹角为 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$,属基本稳定边坡;③粗中粒斑状黑云母花岗岩第一组优势结构面与Ⅳ区、第二组优势结构面与Ⅰ区坡面走向夹角为 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$,属稳定边坡;④粗中粒斑状黑云母花岗岩第三组优势结构面与Ⅲ区坡面走向夹角为 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$,存在潜在平面破坏的可能。

2) 楔体破坏分析。①粗中粒斑状黑云母花岗岩第一组和第二组、第一组和第三组、第二组和第三组优势结构面交线走向与Ⅰ、Ⅱ区坡面斜交,走向夹角为 $30^{\circ}\sim 75^{\circ}$,但倾向相反,属稳定边坡;②粗中粒斑状黑云母花岗岩第一组、第二组优势结构面交线走向与Ⅲ区,第一组和第三组优势结构面交线走向与Ⅳ区坡面斜交,走向夹角为 $30^{\circ}\sim 75^{\circ}$,但倾向相反,属稳定边坡。③粗中粒斑状黑云母花岗岩第一组、第三组优势结构面交线走向与Ⅲ区坡面斜交,走向夹角 $<30^{\circ}$,属稳定边坡;④粗中粒斑状黑云母花岗岩第二组、第三组优势结构面交线走向与Ⅲ、Ⅳ区坡面斜交,走向夹角为 $30^{\circ}\sim 75^{\circ}$,存在潜在楔体破坏的可能。

4 结 论

1) 矿区内断裂构造以近 SN 向断裂为主干构造,其间发育 NE 向断裂、近 EW 向断裂、NW 向断裂、弧形断裂及不同方向和性质的节理裂隙,构成了矿区基本构造格架。

2) 通过岩体结构面调查测绘和定向钻孔结构面测量转换,采用 Dips 软件统计得到边坡岩体优势结构面:粗中粒斑状黑云母花岗岩 3 组($33^{\circ}\angle 88^{\circ}$ 、 $131^{\circ}\angle 85^{\circ}$ 和 $314^{\circ}\angle 48^{\circ}$)、中细粒斑状黑云母花岗岩 2 组($145^{\circ}\angle 75^{\circ}$ 和 $63^{\circ}\angle 85^{\circ}$)和云英岩 2 组($27^{\circ}\angle 86^{\circ}$ 和 $132^{\circ}\angle 88^{\circ}$)。

3) 赤平投影法边坡破坏模式分析结果表明: F_2 断裂构造在Ⅳ区可能发生平面破坏;粗中粒斑状黑云母花岗岩第一组、第三组优势结构面在Ⅲ区可能发生平面破坏;Ⅲ、Ⅳ区粗中粒斑状黑云母花岗岩第二组、第三组优势结构面组合,与坡面相切后可能发生楔体破坏。

4) 分析了断裂构造和结构面对露天边坡潜在破坏模式的影响,对大型露天矿山边坡稳定性评估提供客观真实的分析模型,对矿山安全生产管理具有现实意义。

[参 考 文 献]

[1] 李广贺,呼子恒,王东,等.露天矿端帮开采支撑煤柱失稳判据研

究[J].中国安全科学学报,2023,33(9):122-128.

[2] 张凯,张科.基于 LightGBM 算法的边坡稳定性预测研究[J].中国安全科学学报,2022,32(7):113-120.

[3] 冯巩,夏元友,王智德,等.基于位移信息融合的露天矿边坡动态预警方法[J].中国安全科学学报,2022,32(3):116-122.

[4] 谢仁青,刘明淳,姜海涛,等.地震作用下露天矿节理岩质边坡稳定性数值模拟研究[J].黄金,2024,45(7):6-10.

[5] 李福艳.内蒙古八岔沟露天矿采场边坡滑坡灾害治理[J].黄金,2023,44(7):121-124,128.

[6] 陈文胜,胡林韬.边坡倾倒破坏模式的多米诺骨牌模型研究[J].交通科学与工程,2024,40(4):109-115.

[7] 毛强,肖广宁,吕锴,等.降雨强度对干湿循环作用下花岗岩残积土边坡破坏模式的影响[J/OL].水文地质工程地质,1-11[2024-08-26].
<https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202405003>.

[8] 吴顺川,贺鹏彬,程海勇,等.非煤露天矿山岩质边坡稳定性评价标准探讨[J].工程科学学报,2022,44(5):876-885.

[9] 柴利蒙,孙东东,杨天鸿,等.金宝铁矿南帮顺倾边坡滑坡机理研究及治理工程实践[J].黄金,2022,43(12):33-38.

[10] 霍逸康,石振明,郑鸿超,等.软硬互层反倾岩质边坡稳定性影响因素分析及破坏模式研究[J].工程地质学报,2023,31(5):1 680-1 688.

[11] 李其在,董志富,周癸武.大型露天矿岩体工程地质分区及边坡岩土强度参数取值[J].黄金,2023,44(8):35-43.

[12] 杜时贵,雍睿,陈皓轩,等.大型露天矿山边坡岩体稳定性分级分析方法[J].岩石力学与工程学报,2017,36(11):2 601-2 611.

[13] 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/OL].工程地质学报,1-10[2024-08-29].
<https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2022-0592>.

[14] ZHOU X, CHEN J P, CHEN Y, et al. Bayesian-based probabilistic kinematic analysis of discontinuity-controlled rock slope instabilities[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2016,76(4):1 249-1 262.

[15] 李红毅,李永华,高会有.白云鄂博矿区凸形边坡多因素影响下滑坡破坏模式研究[J].中国安全生产科学技术,2023,19(增刊1):98-103.

[16] 聂兴信,吴功勇,张鑫,等.露天矿高陡复杂边坡软弱岩层组“坐落-滑移式”破坏模式研究[J].工业安全与环保,2024,50(5):40-44.

[17] 刘杨,王海军,张长锁,等.基于赤平投影分析的露天矿高边坡台阶坡面角优化研究[J].矿业研究与开发,2024,44(8):83-90.

[18] 彭宗恒,盛建龙,叶祖洋,等.基于 t-SNE-AMARS-MPM 的空间变异性边坡可靠度分析及大变形成破坏模式研究[J/OL].力学学报,1-17[2024-08-26].
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2062.o3.20240807.1242.002.html>.

[19] 孙书伟,李圆,杨晓锐,等.不同岩层倾角顺层状岩质边坡破坏机制研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(7):1 607-1 620.

[20] CHEN X, TANG J B, CUI L S, et al. Stability and failure pattern analysis of bimslope with Mohr-Coulomb matrix soil: From a perspective of micropolar continuum theory[J]. Journal of Central South University, 2023,30(10):3 450-3 466.

[21] 张国胜,董鑫,陈彦亭,等.深凹露天矿顺层边坡稳定性及灾变防控技术研究[J].金属矿山,2023(11):253-260.

(下转第 107 页)

- Journal of Hazardous Materials, 2020, 382: 121111.
- [24] MIYATA S, HIROSE T. Adsorption of N_2 , O_2 , CO_2 and H_2 on hydro-talcite-like system: $Mg^{2+} - Al^{3+} - Fe(CN)_6^{4-}$ [J]. Clays and Clay Minerals, 1978, 26(6): 441-447.
- [25] FROST R L, MUSUMECI A W, BOUZAID J, et al. Intercalation of hydrotalcites with hexacyanoferrate(II) and (III) - a thermo-Raman spectroscopic study [J]. Journal of Solid State Chemistry, 2005, 178(6): 1940-1948.
- [26] YANG K, YAN L G, YANG Y M, et al. Adsorptive removal of phosphate by Mg-Al and Zn-Al layered double hydroxides: Kinetics, isotherms and mechanisms [J]. Separation and Purification Technology, 2014, 124: 36-42.
- [27] MENG Z L, FAN J X, CUI X Y, et al. Removal of perchlorate from aqueous solution using quaternary ammonium modified magnetic Mg/Al-layered double hydroxide [J]. Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 647: 129111.
- [28] OKU M. Kinetics of photoreduction of $Fe(III)$ in solid solution $K_3(Fe, M)(CN)_6$ (where M is Cr, Co) during XPS measurement [J]. Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena, 1994, 67(3): 401-407.

Study on the adsorption performance of MgAl layered double (hydro) oxides for ferrocyanide ions

Wang Xiaoge¹, Wu Bing², Li Binchuan¹, Liu Yafang³, Chen Jianshe¹, Meng Weifen³, Han Qing¹

(1. School of Metallurgy, Northeastern University; 2. Sanmenxia Polytechnic;

3. Sanmenxia Nonferrous Metals Technology Development Center)

Abstract: This study investigates the removal of ferrocyanide ions ($[Fe(CN)_6]^{4-}$) from aqueous solutions using MgAl layered double (hydro) oxides (MgAl-LDH) and their roasting products (MgAl-LDO). MgAl-LDH with different concentrations of CO_3^{2-} and Cl^- intercalates were synthesized by co-precipitation, and various MgAl-LDO were prepared by roasting. The adsorption performance of LDH and LDO for $[Fe(CN)_6]^{4-}$ was explored. The results show that LDH exhibits a rapid adsorption rate, achieving equilibrium within 20 min. LDO has a higher adsorption capacity, reaching a maximum of 234.4 mg/g. The adsorption is effective at pH values between 7 and 12. The adsorbent also demonstrates selective adsorption of $[Fe(CN)_6]^{4-}$ in solutions containing high concentrations of SO_4^{2-} and SCN^- . Mechanism analysis indicates that in LDH intercalated anions, only Cl^- can exchange with $[Fe(CN)_6]^{4-}$, leading to adsorption and forming $Al[FeMg(CN)_6]$. The adsorption of $[Fe(CN)_6]^{4-}$ by LDO is attributed to its "memory effect" with higher CO_3^{2-} content in LDH layers corresponding to greater adsorption capacity of LDO.

Keywords: MgAl layered double (hydro) oxides; intercalated anion; ferrocyanide ion; selectivity; adsorption mechanism; wastewater treatment

(上接第 88 页)

Study on the influence of fault structures and structural planes on failure modes of high and steep open-pit slopes

Wang Fagang^{1,2,3}, Lin Hongbin^{2,4}, Liu Zhengyu¹, Yu Shenghong¹, Xiao Zurong^{1,2,3}, Zou Ping^{1,2,3}

(1. Zijin (Changsha) Engineering Technology Co., Ltd.; 2. Zijin Mining Group Co., Ltd.;

3. State Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Low-grade Refractory Gold Ores;

4. Hunan Zijin Lithium Co., Ltd.)

Abstract: To investigate the influence of fault structures and structural planes on the failure modes of high and steep open-pit slopes, with a lithium polymetallic mine in Hunan Province as an engineering background, the study conducted field surveys and theoretical analyses. The mine area is characterized by a near-SN main fault structure, along with NE fault zones, near-EW fault, NW faults, arc-shaped faults, and various joint fissures forming the basic structural framework of the mining site. Field investigations revealed the occurrences of rock structural planes, and statistical analyses identified dominant structural planes: 3 sets in coarse to medium-grained porphyritic biotite granite, 2 sets in medium to fine-grained porphyritic biotite granite, and 2 sets in greisen. Stereographic projection analysis was employed to assess the impact of fault structures and structural planes on high and steep open-pit slope failure modes. Results indicate that the F_2 fault structure may cause planar failure in Zone IV; only the third set of dominant structural planes in coarse to medium-grained porphyritic biotite granite may result in planar failure in Zone III; and wedge failure may occur in Zones III and IV due to combinations of the second and third sets of dominant structural planes intersecting the slope face.

Keywords: fault structure; structural plane; open-pit mine; high and steep slope; failure mode; core logging