

某多金属矿露天开采终了边坡结构参数分析及稳定性验算

刘国寅¹, 孙发院², 丁军明¹, 杜德岗¹, 尹修平¹, 张鲲鹏¹

- 昆明坤泽矿业技术有限责任公司, 云南昆明 650051;
- 云南亚融矿业科技有限公司, 云南昆明 650033

中图分类号: TD824.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2024)04-0074-11
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2024.04.009

摘要 露天多金属矿山的边坡稳定性是确保矿山安全生产和环境保护的关键问题。采用正交实验设计、极限平衡法和FLAC3D数值模拟等方法,对某露天矿山终了边坡的结构参数进行系统分析,并对其稳定性进行验证。通过正交实验设计,考察了不同坡高、坡角和地质条件下的边坡稳定性参数,并结合简化Bishop法和Morgenstern-Price法计算了安全系数。结果表明,在自然条件下,各坡面的安全系数均大于1.17,符合规范要求。为了进一步验证边坡的稳定性,采用FLAC3D数值模拟结合强度折减法进行三维稳定性分析。模拟结果表明,在边坡顶部和表面局部区域存在一定风险,但整体安全系数为1.78,表明边坡处于稳定状态。本研究不仅为露天矿山边坡设计和稳定性评价提供了理论依据和实践指导,也为类似工程项目提供了借鉴,具有提升矿山开采安全性和延长矿山寿命的重要价值。

关键词 边坡稳定性; Bishop法; Morgenstern-price法; 强度折减理论; FLAC3D

中国地表矿藏资源较为丰富,因此露天矿山在数量上占据较大比重。尤其是在东部地区,如山东、河北等省份,以及西部地区的某些盆地和山区,露天矿山相对集中。在这些地区,铁矿石、煤炭等资源的露天开采较为常见^[1-3]。

露天矿山的开采过程会破坏原有地质结构,使得边坡岩层松散、裸露,地表植被覆盖减少,地形地貌发生改变,增加了边坡失稳的风险。特别是在长期露天开采后,边坡岩石可能因为受到剥蚀和重力作用而发生崩塌、滑坡等灾害,这会造成严重的安全问题和经济损失^[4]。因此,边坡稳定性问题对于露天矿山开采至关重要。

在实际工程中,常用的边坡稳定性分析方法包括极限平衡法和数值分析法等。吴礼军等^[5]利用Geo-studio模拟软件模拟了高陡边坡,研究了开采矿体时爆破振动对高陡边坡稳定性的影响,并分析了不同开挖阶段的边坡稳定性; Wang等^[6]采用ABQUS模拟软件,模拟了不同降雨强度条件下边坡稳定情况,发现了边坡稳定性和岩体渗透系数的关系; 任高峰等^[7]使用ANSYS/LS-DYNA模拟软件,对比分析了有无溶洞

两种情况下爆破对边坡的有效应力和损伤等的影响。FLAC2D和FLAC3D相比其他数值模拟软件,更广泛地应用于地质工程、岩土工程和矿山工程,特别是在岩体的边坡稳定性分析领域。Yuan等^[8]将CIVIL3D的二次开发与数值模拟软件FLAC3D相结合,解决了BIM固有的三维边坡稳定性不足的问题。该方法不仅解决了数值分析软件在构建复杂地质模型方面的不足,而且采用多软件协同的比较方法验证了其在边坡工程中的适用性; 杨明财等^[9]将FLAC3D软件结合强度折减法去分析某露天矿山边坡稳定性,并运用多因素灰色关联分析法去分析和计算内摩擦角、黏聚力、抗拉强度、重度、弹性模量和泊松比之间的关联度和这六个因素的敏感性大小; 朱纪朋等^[10]利用FLAC3D模拟软件,分析了某矿山各区域剖面的位移、主应变和剪切应变等,并结合智能检测系统对实际矿山的边坡进行实时监测; Peter^[11]采用FLAC3D软件对脉冲型地震波作用下边坡的动力响应进行了参数分析,数值模拟结果表明,脉冲型地震波对边坡的加速度和速度放大系数影响较大,最大放大系数通常出现在坡顶处,此时边坡发生滑动破坏; Basahel^[12]使用FLAC3D对沙

收稿日期: 2024-04-06

作者简介: 刘国寅(1988—),男,高级工程师,本科,主要从事矿山设计及研究, E-mail: 412143348@qq.com。

通信作者: 孙发院(1991—),男,工程师,本科,主要从事岩石力学及矿山边坡工程研究, E-mail: cumtsfy@qq.com。

特阿拉伯西南部地区的一个节理岩质边坡进行稳定性分析, 生成三维随机节理模型, 以确定不利的主要不连续面的方向对坡面的影响。在采矿中, 它们可以用于模拟地下矿山开采过程中的应力变化、岩体变形和岩层破裂等地质力学问题, 以评估矿山设计方案的稳定性和安全性^[13-15]。

本文通过正交实验设计某多金属矿露天开采终了边坡结构参数, 通过实验结果分析, 选出合理的边坡结构参数, 并采用极限平衡法和 FLAC3D 数值模拟软件对终了露天采场边坡进行了稳定性分析。

1 工程概况及参数

1.1 工程概况

某金属矿山矿区面积约为 2.751 km², 年产量约为 180 万 t, 开采矿种为铜矿、铅锌、金、银矿。经多年采矿作业, 大平掌主采坑露天采场形成了一“C”形边坡。当前(截至 2022 年 12 月), 矿区形成了一定规模的山坡露天采场, 露天采场全貌如图 1 所示, 现状境界剖面位置如图 2 所示。采场顶部位于东南帮,

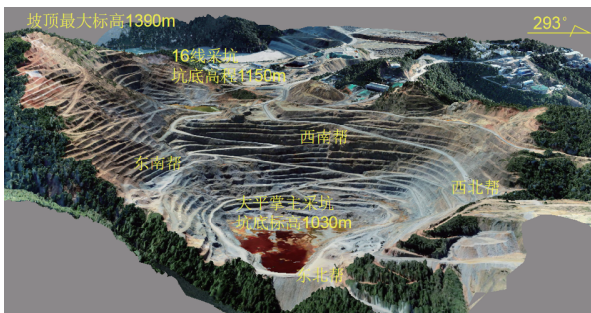


图 1 露天采场全貌
Fig. 1 Full view of the open pit

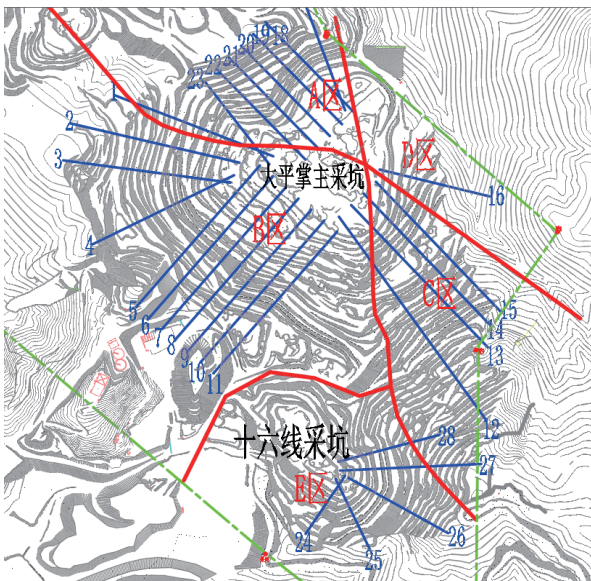


图 2 现状境界剖面位置
Fig. 2 Profile location map of the current realm

其高程为 1 390 m, 现状采场底部高程 1 030 m, 采深为 360 m。全矿露天采场境界标高范围为 910~1 390 m, 采深 480 m, 封闭圈标高为 1 040 m, 露天采场上口尺寸 1 948×953 m, 下口尺寸 110 m×132 m。

西帮边坡角 21°~32°, 边坡高度 137~188 m; 西南帮边坡角 23°~28°, 边坡高度 170~220 m; 东南帮边坡角 21°~26°, 边坡高度 70~298 m; 西北帮边坡角 21°~37°, 边坡高度 82~131 m。

1.2 开采现状

2011 年初, 该铜矿东南部边坡顶部出现了一些裂缝, 此情况发生后, 矿山加强了对边坡的监测, 2011 年 09 月 20 日—2011 年 09 月 30 日变形较大, 之后变形速度趋缓, 逐步趋于稳定。变形破坏范围从 1 100 m 一直延伸到 1 330 m, 垂直高差达到了 230 m, 最远的裂缝超过设计最终境界 125 m, 变形破坏范围比较大, 程度比较深, 有的地方开裂位移上下错动超过了 1 m, 局部出现了坍塌, 大平掌采场东南部边坡出现的破坏为滑坡破坏。2011 年东南帮出现滑坡后, 对东南帮边坡实施了削坡减载的治理措施, 削坡最低标高 1 200 m。但现状边坡东南帮上部开裂变形现象依旧存在, 由于下部凝灰岩挤压出露, 地基沉降, 边坡表面由于整体位移形成裂缝; 西南帮整体边坡角较陡, 但整体边坡高度较低, 未见有影响整体边坡稳定的断层出露, 西南帮边坡现状处于稳定状态; 西帮上部边坡风化严重, 局部有凝灰岩出露, 边坡局部有破坏; 西北帮边坡 1 115 m 标高以上台阶岩层风化严重, 平台有裂缝出现, 局部平台有垮塌; 采区露天边坡与岩层多呈斜交结构, 对边坡稳定性影响程度中等。根据现场调查分析, 除了上述几处局部边坡出现裂缝以及垮塌之外, 其余边坡整体处于稳定状态。

1.3 主要岩体参数

岩体的力学性能是影响边坡稳定性分析的关键因素, 对现场 2 种岩石进行取样, 通过室内物理力学研究和现场原位直剪实验等方式, 结合 Hoek-Brown 强度准则, 考虑了岩体结构面的影响, 得出了岩体的物理力学参数(见表 1)。

表 1 岩体力学参数
Table 1 Parameters of rock mechanics

岩性	密度 ρ (g·cm ⁻³)	黏聚力 c /MPa	内摩擦角 ϕ (°)	变形模量 E /GPa	泊松比 μ
强风化英安岩	2.65	0.033 7	31.5	3.54	0.32
中风化英安岩	2.66	0.126 4	32.5	9.33	0.30
微风化英安岩	2.66	0.164 3	33.4	15.76	0.27
流纹岩	2.91	0.216 3	31.8	16.08	0.25

2 设计边坡结构参数分析及稳定性校核

2.1 正交实验方案设计

预圈境界设计边坡最大高度为 476 m, 按照《非煤露天矿边坡工程技术规范》(GB 51016—2014) 的标准, 可判断此边坡工程的安全等级为 I 级, 自然工况边坡安全系数 F_s 在 1.2~1.25; 地震工况边坡安全系数 F_s 在 1.15~1.2, 爆破工况安全系数 F_s 在 1.18~1.23。

太平掌的优化目标为英安岩、流纹岩边坡, 为此, 结合该铜矿预圈露天境界形成后边坡情况, 对于 100~200 m 边坡以图 2 中 4#剖面为计算基本剖面, 计算边坡高度 130 m; 对于 200 m~300 m 边坡以 12#剖面为计算基本剖面, 计算边坡高度 280 m; 对于 300~400 m 边坡以 15#剖面为计算基本剖面, 计算边坡高度 326 m; 对于 400 m 以上边坡以 20#剖面为计算基本

剖面, 计算边坡高度 476 m。由英安岩和流纹岩组成的边坡进行计算, 本次实验选用 3 因素 3 水平的正交分析, 影响因素水平如表 2 所示, 并选择每个边坡高度至少进行 9 次 ($L_9(3^3)$) 实验。

表 2 英安岩和流纹岩组成的边坡因素水平

Table 2 Slope factor levels for anglo-anglian and rhyolite compositions

因素水平	台阶高度/m	台阶坡面角/(°)	平台宽度/m
1	8	55	4
2	10	60	6
3	12	65	8

2.2 实验方案及结果

从现状剖面中选取边坡高度不同的部分剖面, 按照不同边坡因素进行计算, 其中边坡安全系数通过极限平衡法进行确定, 实验方案计算结果见表 3~表 6。

表 3 边坡高度为 130 m 下实验结果

Table 3 Experimental results under slope height of 130 m

实验编号	台阶高度/m	台阶坡面角/(°)	平台宽度/m	最终边坡角/(°)	实验结果 (安全系数)	
					自然工况	地震工况 (8度设防)
1	8	55	4	41	1.477	1.350
2	8	60	6	38	1.562	1.424
3	8	65	8	35	1.680	1.524
4	10	55	6	39	1.545	1.410
5	10	60	8	37	1.614	1.470
6	10	65	4	50	1.235	1.145
7	12	55	8	37	1.590	1.449
8	12	60	4	48	1.266	1.168
9	12	65	6	47	1.287	1.186

表 4 边坡高度为 280 m 下的实验结果

Table 4 Experimental results under slope height of 280 m

实验编号	台阶高度/m	台阶坡面角/(°)	平台宽度/m	最终边坡角/(°)	实验结果 (安全系数)	
					自然工况	地震工况 (8度设防)
1	8	55	4	40	1.181	1.081
2	8	60	6	37	1.272	1.160
3	8	65	8	35	1.374	1.243
4	10	55	6	38	1.252	1.143
5	10	60	8	36	1.306	1.190
6	10	65	4	50	0.953	0.879
7	12	55	8	37	1.299	1.183
8	12	60	4	48	0.981	0.904
9	12	65	6	47	1.016	0.935

2.3 实验结果分析

图 3 显示了不同边坡高度 (h) 下安全系数 (F_s) 与

最终边坡角 (x) 之间的关系。

对不考虑地震和地震烈度为 8 度的两种情况下的数据进行拟合发现, 安全系数与最终边坡角呈现出

表 5 边坡高度为 326 m 下的实验结果

Table 5 Experimental results under slope height of 326 m

试验编号	台阶高度/m	台阶坡面角/(°)	平台宽度/m	最终边坡角/(°)	试验结果 (安全系数)	
					自然工况	地震工况 (8度设防)
1	8	55	4	40	1.115	1.016
2	8	60	6	37	1.197	1.086
3	8	65	8	35	1.285	1.162
4	10	55	6	38	1.179	1.071
5	10	60	8	36	1.230	1.115
6	10	65	4	50	0.886	0.813
7	12	55	8	37	1.218	1.105
8	12	60	4	48	0.912	0.837
9	12	65	6	47	0.952	0.871

表 6 边坡高度为 476 m 下的实验结果

Table 6 Experimental results under slope height of 476 m

实验编号	台阶高度/m	台阶坡面角/(°)	平台宽度/m	最终边坡角/(°)	实验结果 (安全系数)	
					自然工况	地震工况 (8度设防)
1	8	55	4	40	0.983	0.915
2	8	60	6	37	1.066	0.991
3	8	65	8	35	1.162	1.076
4	10	55	6	38	1.049	0.975
5	10	60	8	36	1.096	1.017
6	10	65	4	49	0.767	0.716
7	12	55	8	36	1.094	1.016
8	12	60	4	48	0.795	0.743
9	12	65	6	46	0.832	0.778

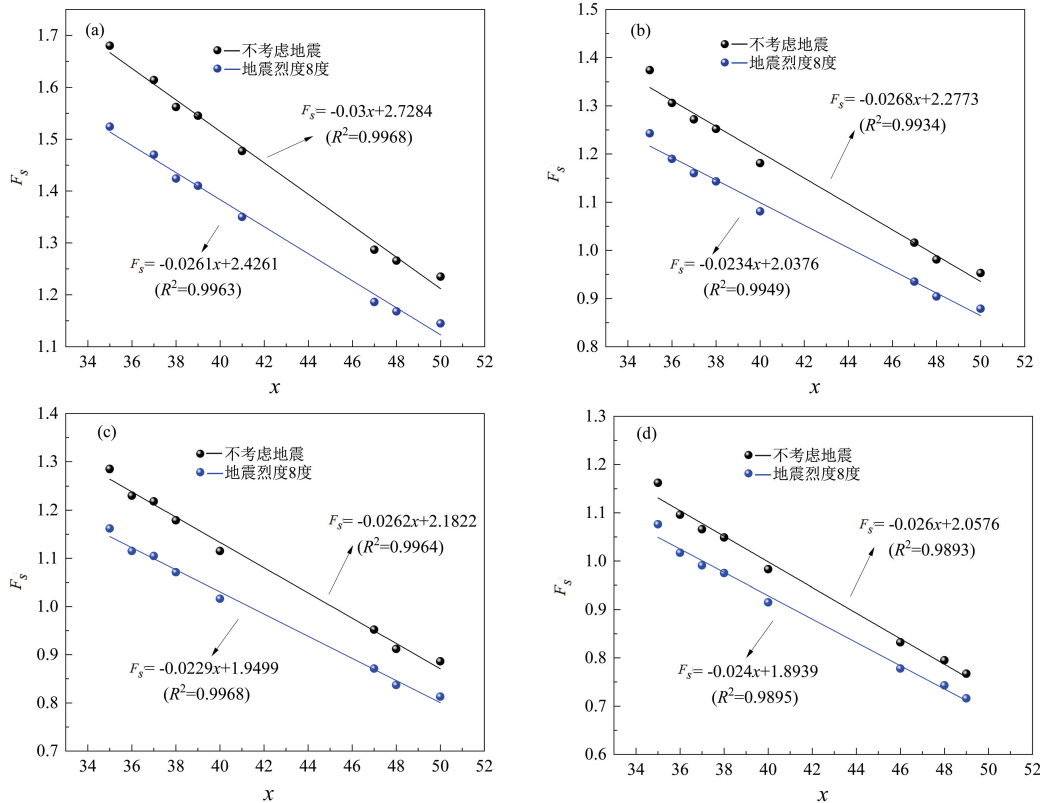


图 3 不同边坡高度下最终边坡角与安全系数关系

Fig. 3 Plot of final slope angle versus factor of safety for different slope heights

明显的线性关系, 相关系数 R^2 均大于 0.98, 表明拟合效果良好, 随着最终边坡角的增大, 安全系数逐渐降低。根据线性回归分析可得到不同边坡高度情况下满足边坡安全要求的最终边坡角最大取值, 如表 7 所示。

表 7 不同边坡高度下最终边坡角最大取值

Table 7 Maximum values of final slope angle for different slope heights

边坡高度/m	100~200	200~300	300~400	>400
最终边坡角/(°)	49	38	34	30

2.4 推荐设计边坡结构参数

结合矿山开采现状, 台阶高 10 m, 安全平台宽度不小于 4 m。通过边坡结构参数优化, 推荐结构参数的分区如图 4 所示, 推荐 A 区台阶坡面角 $\leq 65^\circ$, 最终边坡角 $\leq 39^\circ$; B 区台阶坡面角 $\leq 60^\circ$, 最终边坡角 $\leq 38^\circ$; C 区台阶坡面角 $\leq 60^\circ$, 设计境界边坡角 $\leq 34^\circ$, 最高边

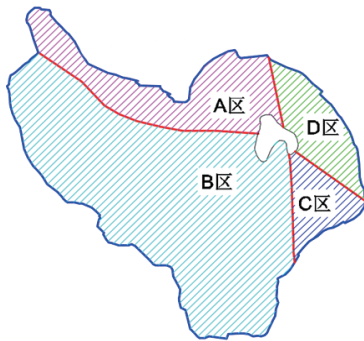


图 4 边坡结构参数的分区
Fig. 4 Partition of slope structural parameters

坡总边坡角 $\leq 29^\circ$; D 区台阶坡面角 $\leq 65^\circ$, 最终边坡角 $\leq 40^\circ$ 。C 区强风化英安岩主要位于边坡上部, 强度较低, 对边坡稳定性影响较大, 边坡下部主要为流纹岩, 强度较高, 因此在满足安全系数要求的情况下, 可适当提高边坡下部流纹岩区域的边坡角。

2.5 设计境界边坡稳定性验算

设计终了境界的台阶高度为 10 m, 运输平台宽度为 15 m, 清扫平台宽度为 8 m。设计 A 区的安全平台宽度为 4~6 m, 台阶坡面角为 $55^\circ\sim 65^\circ$, 最终边坡角 $\leq 39^\circ$; 设计 B 区安全平台宽度为 4~6 m, 台阶坡面角为 $55^\circ\sim 60^\circ$, 最终边坡角 $\leq 38^\circ$; C 区的安全平台宽度为 5~7 m, 台阶坡面角为 $50^\circ\sim 60^\circ$, 最高边坡(480 m)边坡角 $\leq 28^\circ$ (下部设计边坡 $\leq 34^\circ$, 上部现状边坡 $\leq 25^\circ$); 设计 D 区的安全平台宽度 4~6 m, 台阶坡面角 $55^\circ\sim 65^\circ$, 最终边坡角 $\leq 40^\circ$ 。设计各区的最终边坡角与研究推荐边坡角基本一致。设计境界边坡剖面位置如图 5 所示, 边坡安全系数采用极限平衡法中的简化的 Bishop 法和 Morgenstern-Price 法(M-P 法)进行计算, 除 6#剖面上部为复合滑动外, 其余剖面滑面均为圆弧滑动, 所采用力学参数见表 1, 计算结果见表 8。

3 基于强度折减法的 FLAC3D 数值模拟分析

传统的边坡稳定极限平衡法对安全系数 (F_s) 的定义为:

$$F_s = \int_0^l (c + \sigma \tan \phi) dl / \int_0^l \tau dl \quad (1)$$

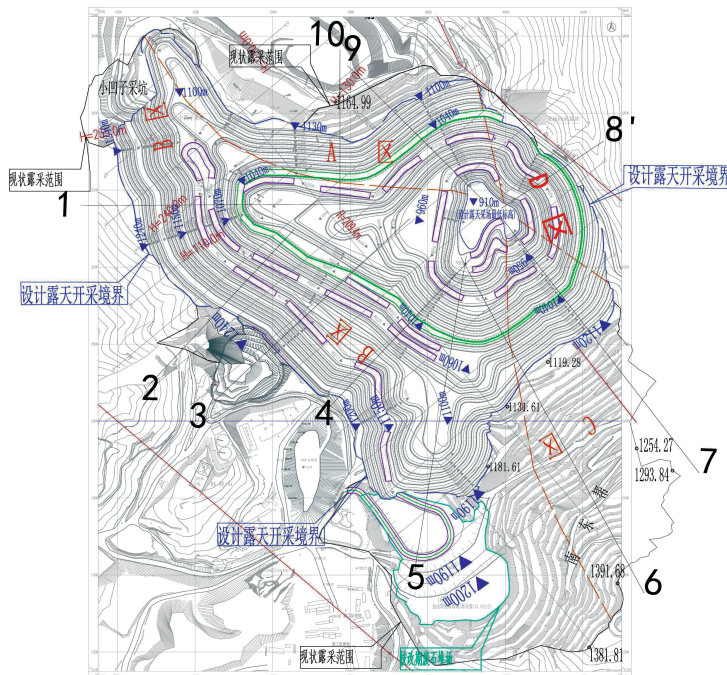


图 5 设计境界的边坡剖面位置
Fig. 5 Location map of slope profiles in the design realm

表 8 设计境界的边坡稳定性计算结果

Table 8 Slope stability calculations for the design realm

边坡分区	剖面编号	边坡高度/m	边坡角/(°)	荷载组合	安全系数		规范允许安全系数	备注
					M-P法	Bishop法		
B区	1	238	36	I	1.226	1.229	1.20	满足规范要求
				II	1.185	1.184	1.18	满足规范要求
				III	1.161	1.159	1.15	满足规范要求
	2	189	34	I	1.367	1.372	1.20	满足规范要求
				II	1.251	1.277	1.18	满足规范要求
				III	1.226	1.25	1.15	满足规范要求
	3	280	31	I	1.283	1.282	1.20	满足规范要求
				II	1.196	1.205	1.18	满足规范要求
				III	1.162	1.158	1.15	满足规范要求
	4	290	32	I	1.291	1.291	1.20	满足规范要求
				II	1.214	1.214	1.18	满足规范要求
				III	1.169	1.167	1.15	满足规范要求
	5	170	34	I	1.445	1.454	1.20	满足规范要求
				II	1.327	1.335	1.18	满足规范要求
				III	1.307	1.315	1.15	满足规范要求
C区	6上部	288	25	I	1.497	—	1.20	满足规范要求
				II	1.372	—	1.18	满足规范要求
				III	1.323	—	1.15	满足规范要求
	6下部	187	35	I	1.3	1.301	1.20	满足规范要求
				II	1.224	1.225	1.18	满足规范要求
				III	1.179	1.178	1.15	满足规范要求
	6整体	475	28	I	1.401	1.399	1.20	满足规范要求
				II	1.31	1.304	1.18	满足规范要求
				III	1.25	1.248	1.15	满足规范要求
7	356	31	I	1.288	1.288	1.20	满足规范要求	
			II	1.191	1.191	1.18	满足规范要求	
			III	1.166	1.165	1.15	满足规范要求	
D区	8	115	37	I	1.625	1.633	1.20	满足规范要求
				II	1.506	1.514	1.18	满足规范要求
				III	1.485	1.492	1.15	满足规范要求
A区	9	253	38	I	1.264	1.263	1.20	满足规范要求
				II	1.189	1.191	1.18	满足规范要求
				III	1.155	1.152	1.15	满足规范要求
	10	165	33	I	1.338	1.344	1.20	满足规范要求
				II	1.221	1.227	1.18	满足规范要求
				III	1.212	1.217	1.15	满足规范要求

注: 荷载组合 I 为自重+地下水; 荷载组合 II 为自重+地下水+爆破振动动力; 荷载组合 III 为自重+地下水+地震力。

式中: c 为黏聚力; σ 为正应力; ϕ 为内摩擦角; τ 为剪应力; l 为滑动面水平宽度。

将公式 (1) 的两边同时除 F_s 后, 变为公式 (2):

$$1 = \int_0^l (c/F_s + \sigma \tan\phi/F_s) dl / \int_0^l \tau dl \quad (2)$$

公式 (2) 表示在滑动面上任意位的剪应力达到了其抗剪强度, 滑动面上岩土体任意一点均处于塑性破坏的临界状态。

有限差分强度折减法同时折减了黏聚力和内摩擦角, 进而使得边坡强度降低, 取边坡极限状态时的

折减系数为安全系数,此时边坡岩土体的强度参数可用公式(3)表示。

$$c_f = c/F_s$$

$$\tan\phi_f = \tan\phi/F_s \quad (3)$$

式中: c_f 为折减后黏聚力; ϕ_f 为折减后内摩擦角。

将强度参数进行不断折减,得到能够使模型处于极限平衡状态的安全系数(边坡的安全系数),即:

$$c_i = c/F_i$$

$$\tan\phi_i = \tan\phi/F_i \quad (4)$$

式中: F_i 为试算的强度折减系数。当某一 F_i 使得模型处于极限平衡状态时,此 F_i 即为安全系数 F_s 。

有限差分强度折减法(FDSR)与传统的边坡稳定极限平衡法(LEM)是土工工程领域常用的两种方法,用于评估边坡的稳定性。在边坡稳定性分析中,FDSR采用数值方法,将边坡体系离散化为有限差分网格,通过模拟多种荷载和边界条件下的行为来评估边坡的稳定性。相较之下,LEM基于静力平衡原理,通过简化边坡形状和考虑外部荷载,以解析方式评估边坡的稳定性。两种方法在原理、计算方式和结果表达上存在显著差异。首先,FDSR通过强度折减因子或荷载与抵抗比来评估边坡的稳定性,能够更全面地考虑土体的非线性和复杂结构,适用于复杂土体结构和荷载情况的分析。相比之下,LEM通常以安全系数表示结果,适用于简单几何形状和已知土体参数的情况。其次,FDSR需要更多的计算资源和时间,因为它是基于数值方法的迭代计算。而LEM计算速度较快,适用于简单边坡情况。最后,FDSR的结果以荷载与抵抗比或强度折减因子来表达,而LEM的结果通常以安全系数表示。这反映了两种方法在稳定性评估方面的不同侧重点。总体来说,FDSR和LEM各有优劣,在不同的边坡工程应用中适合不同的情况。因此,在进行边坡稳定性分析时,应根据具体情况选择合适的方法,以确保对边坡稳定性的准确评估。

在FLAC3D中,强度折减法^[16-17]是一种常用于边坡稳定性分析的方法。在进行强度折减后,剪应变增量是一个重要的参数,它反映了土体在受到外部荷载作用下的变形情况。强度折减法通过模拟降低土体的强度参数来模拟土体的破坏过程。在FLAC3D中,首先需要定义土体材料的强度特性,如摩擦角、内聚力等参数。然后施加荷载和边界条件,模拟土体受力情况。接着,FLAC3D会根据设定的强度特性和荷载情况逐步降低土体的强度参数,模拟土体的破坏过程。在这个过程中,可以跟踪土体各点的剪应变增量,以评估土体的破坏模式和稳定性。分析结果可以帮助工程师更准确地预测边坡的稳定性,为工程设计和施

工提供可靠的依据。因此,结合强度折减和剪应变增量的分析在FLAC3D中具有重要意义,可为工程项目的安全和稳定性提供有效保障。

本次计算模型根据露天开采终了平面图建立,模型长2600m,宽1500m,共有177926个节点、1005223个单元,图6为终了地形计算地形,图7为代表性剖面位置,结构材料采用线弹性本构关系,模型中的上表面设为自由边界(即真实边界),其他五个面都施加了约束。从极限状态边坡的剪切应变增量来分析,计算结果如图8所示,安全系数1.78。



图6 终了地形的计算模型
Fig. 6 Computational modelling of end terrain

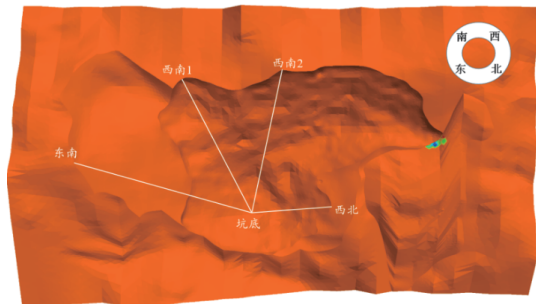


图7 剖面位置
Fig. 7 Computational modelling of end terrain

从图8可知,4个剖面均出现较为明显的局部滑面,其中,东南和西南2剖面滑面位于采场边坡顶部,面积较小;西南1和西北剖面滑面位于较高一侧边坡坡面,边坡整体安全系数为1.78,满足相关规范要求,整体处于稳定状态。

4 结论

(1)根据正交实验设计结果进行分析,选取合适的终了边坡设计参数,即设计境界台阶高10m,安全平台宽度不小于4m,推荐A区台阶坡面角 $\leq 65^\circ$,最终边坡角 $\leq 39^\circ$;B区台阶坡面角 $\leq 60^\circ$,最终边坡角 $\leq 38^\circ$;C区台阶坡面角 $\leq 60^\circ$,最终边坡角 $\leq 29^\circ$;D区台阶坡面角 $\leq 65^\circ$,最终边坡角 $\leq 40^\circ$ 。C区强风化英安岩主要位于边坡上部,强度较低,对边坡稳定性影响较大,边坡下部主要为流纹岩,强度较高,边坡较稳定。

(2)根据终了边坡设计参数,采用极限平衡法中的简化的Bishop法和Morgenstern-Price法对露天采场设计边坡剖面的安全系数进行计算,计算结果表明,其安全系数符合规范要求。

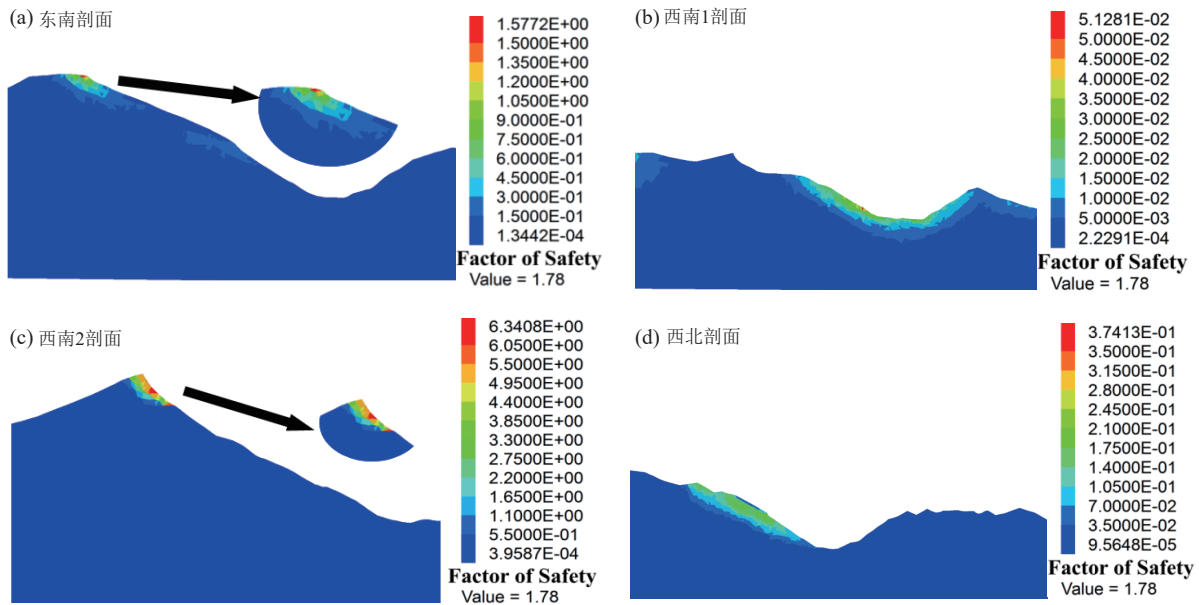


图8 不同剖面剪应变增量

Fig. 8 Shear strain increment in different sections (a-southeast section; b-southwest section 1; c-southwest section 2; d-northwest section)

(3)利用FLAC3D并结合强度折减法对设计终了边坡中几个代表性剖面进行验算,发现几个剖面的坡顶和表面都出现较为明显的局部滑面,但整体处于稳定状态。

参考文献:

- [1] 陈兰兰,夏益强,肖海平,等.露天矿边坡稳定性监测方法研究现状及进展[J].测绘通报,2022(5):7-13.
CHEN L L, XIA Y Q, XIAO H P, et al. Research status and progress of slope stability monitoring methods in open-pit mines[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2022(5): 7-13.
- [2] 李全生.蒙东草原区大型露天煤矿减损开采与生态修复关键技术[J].采矿与安全工程学报,2023,40(5):905-915.
LI Q S. Key technologies for damage reduction mining and ecological restoration of large-scale open pit coal mines in grassland area of eastern inner Mongolia[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(5): 905-915.
- [3] 李鸣庚,张书毕,高延东,等.适用于露天矿时序形变监测的优化DS-InSAR技术[J].金属矿山,2023(1):110-118.
LI M G, ZHANG S B, GAO Y D, et al. Optimized DS-InSAR technology for time series deformation monitoring in open-pit mines[J]. *Metal Mine*, 2023(1): 110-118.
- [4] 代永新,赵武鹏.露天矿超高边坡灾变影响因素与防控关键技术研究综述[J].金属矿山,2016(11):1-9.
DAI Y X, ZHAO W K. Overview of disaster factors critical control technique for super high slope of open-pit mine[J]. *Metal Mine*, 2016(11): 1-9.
- [5] 吴礼军,徐文彬.邻近高陡边坡采矿爆破振动规律及边坡稳定性分析[J].工程爆破,2022,28(4):113-119.
WU L J, XU W B. Analysis of blasting vibration law and slope stability in mining near high and steep slope[J]. *Engineering Blasting*, 2022, 28(4): 113-119.
- [6] WANG Y, LIU X, ZHANG Z, et al. Analysis on slope stability considering seepage effect on effective stress[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2016, 20(6): 2235-2242.
- [7] 任高峰,王鑫,周汉红,等.爆破作用下岩溶对边坡稳定性的数值模拟研究[J].爆破,2023,40(4):192-200.
REN G F, WANG X, ZHOU H H, et al. Numerical simulation of karst effect on slope stability under blasting[J]. *Blasting*, 2023, 40(4): 192-200.
- [8] 王文飞,杨志全,孟祥瑞,等.基于FLAC2D、GPS监测和人工巡视相结合的某矿山排土场边坡稳定性分析[J].有色金属(矿山部分),2023,75(6):80-87.
WANG W F, YANG Z Q, MENG X R, et al. Slope stability analysis of a mine drainage field based on the combination of FLAC2D, GPS monitoring and manual patrolling[J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 2023, 75(6): 80-87.
- [9] 杨明财,盛建龙,叶祖洋,等.基于FLAC3D的露天矿边坡稳定性及影响因素敏感性分析[J].黄金科学技术,2018,26(2):179-186.
YANG M C, SHENG J L, YE Z Y, et al. Analysis of sensitivity factors of open-pit mine slope stability and impact based on FLAC3D[J]. *Gold Science and Technology*, 2018, 26(2): 179-186.
- [10] 朱纪朋,苏怀斌,赵旭阳,等.大型深凹露天矿边坡稳定性研究及智能监测系统应用[J].有色金属(矿山部分),2022,74(5):99-105.
ZHU J P, SU H B, ZHAO X Y, et al. Study on slope stability of large deep concave open-pit mine and application of intelligent monitoring system[J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 2022, 74(5): 99-105.
- [11] PETER B A, ZHANG Y P, HE J X, et al. Evaluating the dynamic response and failure process of a rock slope under pulse-like ground motions[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2023, 14(1): 2167613.
- [12] BASAHEL H, MITRI H. Probabilistic assessment of rock slopes stability using the response surface approach-A case study[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2019, 29(3): 357-370.
- [13] RINALDO G, ROSELLA P T, CLERVIE G. Mitigation measures of debris flow and landslide risk carried out in two mountain areas of North-Eastern Italy[J]. *Journal of Mountain Science*, 2022, 19(6): 1808-1822.

- [14] WANG C L, NI W, ZHANG S Q, et al. Preparation and properties of autoclaved aerated concrete using coal gangue and iron ore tailings[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 104:109–115.
- [15] 张欢, 王玉银, 耿悦, 等. 考虑基体混凝土抗压强度影响的再生粗(细)骨料混凝土干燥收缩模型[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(12): 156–164.
- ZAHNG H, WANG Y Y, GENG Y, et al. Dry shrinkage model for recycled fine and coarse aggregate concrete considering compressive strength of matrix concrete[J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(12): 156–164.
- [16] 孟君. 露天矿边坡稳定性的仿真模拟研究[J]. *世界科技研究与发展*, 2012, 34(3): 379–381.
- MENG J. Simulate research on open-sit steep slope stability[J]. *World Sci-Tech R & D*, 2012, 34(3): 379–381.
- [17] 韩龙强, 吴顺川, 李志鹏. 基于 Hoek-Brown 准则的非等比强度折减方法[J]. *岩土力学*, 2016, 37(S2): 690–696.
- HAN L Q, WU S C, LI Z P. Study of non-proportional strength reduction method based on Hoek-Brown failure criterion[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(S2): 690–696.

Structural Parameter Analysis and Stability Calculation of End-of-pit Slope of a Polymetallic Mine

LIU Guoyin¹, SUN Fayuan², DING Junming¹, DU Degang¹, YIN Xiuping¹, ZHANG Kunhua¹

1. Kunming Kunze Mining Technology Co., Ltd, Kunming 650000, China;

2. Yunnan YaRong Mining Technology Limited Company, Kunming 650093, China

Abstract: The slope stability of open-pit polymetallic mines is the key problem to ensure mine safety and environmental protection. In this paper, orthogonal experimental design, limit equilibrium method and FLAC3D numerical simulation are used to systematically analyze the structural parameters of the end slope of an open-pit mine and verify its stability. Through orthogonal experiment design, slope stability parameters under different slope height, slope Angle and geological conditions were investigated, and the safety factor was calculated by using simplified Bishop method and Morgenstern-Price method. The results showed that under natural conditions, the safety coefficient of each slope was greater than 1.17, which was in line with the standard requirements. In order to further verify the stability of the slope, FLAC3D numerical simulation combined with strength reduction method was used for three-dimensional stability analysis. The simulation results showed that there were some risks in the top and local areas of the slope surface, but the overall safety factor was 1.78, indicating that the slope was in a stable state. This study not only provides theoretical basis and practical guidance for slope design and stability evaluation of open-pit mine, but also provides reference for similar engineering projects, which has important value of improving mining safety and prolonging mine life.

Keywords: slope stability; bishop method; morgenstern-price method; strength reduction theory; FLAC3D

引用格式: 刘国寅, 孙发院, 丁军明, 杜德岗, 尹修平, 张鲲鹏. 某多金属矿露天开采终了边坡结构参数分析及稳定性验算[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(4): 74-84.

LIU Guoyin, SUN Fayuan, DING Junming, DU Degang, YIN Xiuping, ZHANG Kunhua. Structural parameter analysis and stability calculation of end-of-pit slope of a polymetallic mine[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(4): 74-84.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn



作者简介:

刘国寅, 1988 年出生, 汉族, 本科, 采矿高级工程师, 云南宣威人, 昆明坤泽矿业技术有限责任公司总工程师。目前从事矿山相关设计及其管理工作。主持及参与设计项目 100 余个, 其中承担部级安全设施设计的项目 1 项, 担任某矿山全井下充填站设计总师。获部级优秀工程咨询成果奖 2 项, 获省级优秀工程设计奖 5 项, 在核心期刊发表论文 20 余篇。



通信作者简介:

孙发院, 1991 年出生, 汉族, 本科, 采矿工程师, 云南宣威人, 云南亚融矿业科技有限公司露天项目部经理。目前从事矿山岩石力学及边坡工程研究工作。主持及参与矿山科研项目 60 余个, 其中承担部级露天采场边坡稳定性研究项目 3 个。获得实用新型专利 1 项, 在核心期刊发表论文 7 篇。



通信作者简介:

丁军明, 1980 年出生, 汉族, 硕士, 采矿高级工程师, 甘肃通渭人, 2007 年毕业后自主创业成立云南金澜矿业集团, 目前拥有员工 500 余人, 下属企业拥有冶金行业(冶金矿山工程)专业甲级资质、矿山工程总承包壹级资质、建筑工程总承包壹级资质、工程地质勘察、固体矿产勘查等 22 项资质。