

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2024.01.017

露天矿扩界工程露天坑及排土场边坡协同稳定性分析

张长锁 刘建博

(矿冶科技集团有限公司, 北京 100160)

摘 要: 采用极限平衡法对某露天矿扩界后露天采场和排土场形成的联合边坡进行不同工况条件下的稳定性分析。结果表明: 扩界后在排土场与采场之间预留出足够安全距离后, 排土场对露天采场边坡的稳定性影响较小; 露天采场一排土场联合边坡中采场边坡在自重+地下水、自重+地下水+爆破振动力、自重+地下水+地震力三种工况下均满足安全系数要求, 采场边坡处于稳定状态; 露天采场一排土场联合边坡中排土场边坡在自重、自重+降雨、自重+地震三种工况下均满足安全系数要求, 排土场边坡处于稳定状态。说明该露天矿扩界方案形成的联合边坡具有安全性, 可保障矿山的生产安全。

关键词: 露天采场; 排土场; 边坡稳定性; 极限平衡法

中图分类号: TD857

文献标志码: A

文章编号: 1005-7854(2024)01-0116-08

Collaborative stability analysis of open-pit and waste dump slope in open-pit expansion project

ZHANG Changsuo LIU Jianbo

(BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China)

Abstract: The limit equilibrium method is used to analyze the stability of the joint slope formed by the open-pit mining area and the waste disposal area after the expansion of a certain mine under different working conditions. The results show that a sufficient safe distance between the dumping site and the mining site is reserved after expanding the boundary, the impact of the dumping site on the stability of the open-pit mining slope is relatively small. In the joint slope of open-pit mining site and waste disposal site, the mining site slope meets the safety factor requirements under three working conditions: self weight + groundwater, self weight + groundwater + blasting vibration force, and self weight + groundwater + seismic force, and the mining site slope is in a stable state. The joint slope of open-pit mining site and waste dump meets the safety factor requirements under three working conditions: self weight, self weight + rainfall, and self weight + earthquake, and the waste dump slope is in a stable state. The joint slope formed by the expansion plan of the mine has safety and can ensure the production safety of the mine.

Key words: open pit; waste dump; slope stability; limit equilibrium method

露天采场和排土场是露天矿山开采过程中不可或缺的组成部分, 其稳定性直接关系到矿山安全生产、周边环境以及人民生命财产安全, 因此, 众多学者针对露天采场和排土场稳定性进行了大量研究。如陈峰等^[1]利用极限平衡理论计算了排土场的极限堆置高度, 并通过 FLAC^{3D} 软件进行了验证。

魏朝爽等^[2]通过 FLAC^{3D} 非线性数值模拟分析了堆排高度对排土场稳定性的影响。黄建君等^[3]进行了排土场堆排设计, 并使用 FLAC^{2D} 和极限平衡法评估了在不同工况下的稳定性。蓝秋华^[4]利用赤平投影法和极限平衡法分析了采场边坡的稳定性。董贺伟^[5]使用 GeoStudio 软件的 SLOPE/W 模块计算了某铁矿边坡在不同工况下的安全系数, 并比较了不同计算方法的适用性和优缺点。洪儒宝等^[6]以某露天大型钼矿为研究对象, 总结提出矿

收稿日期: 2023-09-19

第一作者: 张长锁, 正高级工程师, 主要从事采矿设计研究。

E-mail: zcs024@163.com

山边坡破坏模式,考虑岩体非均匀性和各向异性,运用平面滑动、楔形体、圆弧形和倾倒破坏四种方法建立地质模型,进行稳定性分析,并提出防治措施。孟中华等^[7]采用极限平衡法对某铜钼矿边坡稳定性进行了计算分析,确定了现状边坡稳定状态,为矿山采场今后的决策提供了依据。目前研究大多针对单一排土场或露天采场边坡稳定性,而露天矿在开采过程中,经常会因为场地的限制和排土的需求,将排土场设置在露天采场的周边,从而形成露天采场—排土场联合边坡,其稳定性直接关系到矿山的生产安全,因此,有必要针对露天采场—排土场联合边坡进行稳定性研究,确保矿山安全开采。

某露天金矿按照已有开采设计,露天采场已基本采至设计最终境界,排土场也达到设计库容,矿山即将闭坑。为延长服务期限,近年来对该矿山进行了资源的补充勘探,并于露天采场上盘和深部发现接续资源,计划对此部分资源进行扩界开采。矿山扩界开采设计时,因现有排土场容量已经饱和且征地较为困难,为节省征地费用,设计对现有排土场增高扩容,考虑设计方案的安全性,有必要对扩界后的采场边坡和增高后的排土场边坡稳定性进行分析。因排土场距离露天采场较近,边坡稳定性分析典型剖面选择最容易发生失稳的露天采场—排土场联合剖面。本文结合本矿山实际情况,采用极限平衡法,选取典型剖面对露天采场边坡顶部地表有无堆排废石时的稳定性进行对比分析,对露天采场排土场联合边坡排土场边坡稳定性进行分析,为矿山的扩界工程设计提供理论依据。

1 工程概况

1.1 矿山现状

矿山位于内蒙古北部低山丘陵区,地形较为平坦,总体地势东偏北高、西北和东南渐低,海拔高程一般在 1 005~1 044 m,切割深度小于 20 m,相对高差 39 m。地层岩性为绢云母石英片岩、绿泥石英片岩、黑云母花岗岩,地形低洼处沉积新近系上新统泥岩夹砂砾岩及薄层第四系残坡积物,丘陵顶部基岩裸露。

矿山生产规模为 250 万 t/a,已正常生产 9a,目前形成狭长型露天采坑 1 个,采坑地表长 1 960 m、宽 450 m、封闭圈标高 994 m。有两个坑底,北坑底标高 921 m,已达到设计坑底标高。最

终边坡角约 42°;南坑底标高 932 m,已经接近设计开采最终标高,最终边坡角约 43°。

排土场位于露天采场东北侧,紧邻露天采场,占地面积 87.7 万 m²,废石堆场高度 50 m(1 030~1 080 m),堆存废石 2 890 万 m³,设计库容已经饱和。

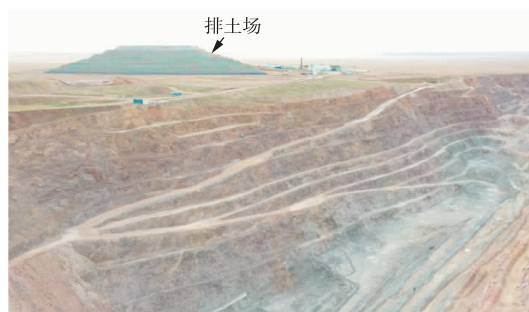


图 1 矿山现状

Fig. 1 Current situation of the mine

1.2 扩界设计方案

为了充分回收露天境界上盘和坑底新探获资源,设计对现状露天采场上盘进行扩界,扩界后露天采场坑底标高 832 m,上口尺寸:南北长 2 000 m,东西宽 515 m;下口尺寸:120 m×35 m。边坡最高标高 1 044.5 m,最大边坡高度 197 m;采场封闭圈标高 994 m,大部分为凹陷露天开采。

为减少征地费用,设计在现排土场基础上进行加高扩容,排土场顶部标高由 1 080 m 增高至 1 120 m,新增容积 1 025 万 m³,满足露天采场扩界排土容量需求。

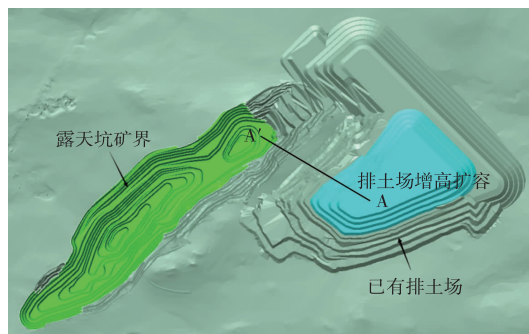


图 2 矿山扩界设计方案

Fig. 2 Design plan for mine expansion

1.3 联合边坡描述

露天采场设计台阶高度 9 m,局部并段为 18 m,台阶坡面角 65°,每隔 2~3 个台阶设清扫平台,清扫平台宽度为 8 m,安全平台宽度为 3~6 m。坡顶标高 1 029 m,坡底标高 868 m,

最终边坡角 38° ，运输道路宽度 12.5 m，坡度 8%。

排土场堆置台阶高度 10 m，边坡总高度 104 m(1 016~1 120 m)，现有平台宽度 6 m，增高扩容平台宽度 15 m，台阶坡面角 25° ，最终边坡角 18° 。

根据《有色金属矿山排土场设计标准》(GB50421—2018)规定，排土场与采场之间已预留出足够安全距离，排土场坡脚距离露天开采境界 75 m。根据图 2 所示，扩界后形成了露天采场-排土场联合边坡，本次分析剖面位置为图 2 中 A-A'，剖面如图 3 所示。

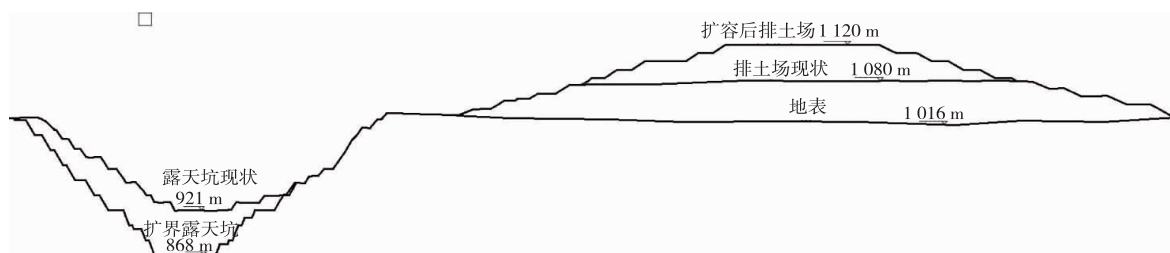


图 3 联合边坡剖面

Fig. 3 Joint slope profile

2 露天采场-排土场联合边坡稳定性分析

2.1 露天采场、排土场边坡物理力学性质

岩石物理力学性质是进行边坡稳定性分析的关键，根据矿山进行的岩石力学试验结果，结合矿区的实际情况、工程地质条件，采用 H-B 准则参数过渡方法、费辛柯法、Georgi 法、岩体质量分类

法、经验折减法，综合确定矿区边坡的岩土体物理力学参数，见表 1。

排土场坡体是由土沙和岩石混合物料堆排而成，分车排弃的土沙和岩石，在顺台阶坡面上分层不明显，松散体又经压实已产生凝聚力。根据《岩土勘察报告》，并参照类似矿山岩土物理力学参数，针对排土场边坡进行稳定性分析计算的岩土物理力学参数选择，见表 1。

表 1 边坡计算所用岩石物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rocks used in slope calculation

序号	岩性	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	弹性模量/MPa	泊松比
1	第四系土	20.4	36	14.8	12.55	0.36
2	强风化花岗岩闪长岩	22.5	291	17.29	13.66	0.35
3	中风化花岗岩闪长岩	23.1	460	21.18	33.74	0.32
4	弱-未风化绢云母石英片岩	25.4	777	32.04	1 406.49	0.26
5	压实废石堆	20.0	15	25.00	64.00	0.20

2.2 边坡安全系数确定及判别标准

2.2.1 露天采场边坡安全系数

《非煤露天矿边坡工程技术规范》(GB 51016—2014)中指出，根据发生或可能发生滑坡崩塌所造成灾害(人身伤亡和经济损失)的严重程度，

将露天矿边坡按表 2 划分为三种危害等级；根据露天矿边坡工程设计边坡高度和边坡灾害等级按表 3 划分边坡工程安全等级。最终在确定边坡安全等级后，不同等级边坡在不同荷载组合下总体边坡的设计安全系数应满足表 4。

表 2 边坡危害等级

Table 2 Slope hazard level

边坡危害等级		I	II	III
可能的人员伤亡		有人员伤亡	有人员伤亡	无人员伤亡
潜在的经济损失/万元	直接	≥100	(50~100)	≤50
	间接	≥1 000	(500~1 000)	≤500
综合评定		很严重	严重	不严重

表 3 边坡工程安全等级划分

Table 3 Classification of safety levels for slope engineering

边坡工程安全等级	边坡高度 H/m	边坡危害等级
I	$H > 500$	I、II、III
	$300 < H \leq 500$	I、II
	$100 < H \leq 300$	I
II	$300 < H \leq 500$	III
	$100 < H \leq 300$	II、III
	$H \leq 100$	I
III	$100 < H \leq 300$	III
	$H \leq 100$	II、III

表 4 不同荷载组合下总体边坡的设计安全系数

Table 4 Design safety factor of overall slope under different load combinations

边坡工程安全等级	边坡工程设计安全系数		
	荷载组合 I	荷载组合 II	荷载组合 III
I	1.25~1.20	1.23~1.18	1.20~1.15
II	1.20~1.15	1.18~1.13	1.15~1.10
III	1.15~1.10	1.13~1.08	1.10~1.05

备注：①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；荷载组合 III 为自重+地下水+地震力。②对台阶边坡和临时性工作帮，允许有一定程度的破坏，设计安全系数可适当降低。

经过上述综合分析，结合矿区实际情况，考虑该边坡下方设备与人员的安全，根据表 2 边坡危害等级划分，此处的边坡危害等级为 I 级。矿区内最终边坡高度为 120~200 m，根据《非煤露天矿边坡工程技术规范》中表 3 边坡工程安全等级划分的规定，此处的边坡工程安全等级定为 I 级。

结合表 4 和矿山实际情况，确定矿区边坡稳定性分析的安全系数取值分别为：

荷载组合 I： $[K] = 1.20$

荷载组合 II： $[K] = 1.18$

荷载组合 III： $[K] = 1.15$

2.2.2 排土场边坡安全系数

《有色金属矿山排土场设计标准》(GB 50421—2018)中根据单个排土场容积和堆置高度按照表 5 对排土场等级划分为四级，本次设计排土场等级为二级。排土场边坡稳定性系数 K 按表 6 选取。

表 5 排土场等级分级

Table 5 Classification of waste dump grades

等级	单个排土场总容积 $V/(\times 10^4 \text{ m}^3)$	堆置高度 H/m
一	$V \geq 10\ 000$	$H \geq 150$
二	$2\ 000 \leq V < 10\ 000$	$100 \leq H < 150$
三	$500 \leq V < 2\ 000$	$50 \leq H < 100$
四	$V < 500$	$H < 50$

表 6 排土场整体安全稳定性标准

Table 6 Overall safety and stability standards for waste dumps

排土场等级	安全标准
一	1.25~1.30
二	1.20~1.25
三	1.15~1.20
四	1.15

备注：①自然工况条件指重力、稳定地下水位、正常施工荷载的组合；②排土场下游存在村庄、居民区、工业场地等设施时，相应区域排土场安全标准应取上限值；③降雨工况下，排土场在上述标准下降低 0.05。地震工况下，降低 0.05~0.10。

排土场主要为人工堆积的散体结构，边坡无结构面发育，受雨水、地震影响较大，根据排土场等级及边坡的工程地质、水文地质等情况，确定的许用安全系数 $[K]$ ：

正常工况： $[K] = 1.20$ ；

地震或降雨工况： $[K] = 1.15$

2.3 计算方法

极限平衡法通过分析岩土体在破坏时刻的力的平衡条件来求解稳定性系数。破坏准则使用莫尔—库仑破坏准则，即：

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \varphi' = c' + (\sigma - \mu) \tan \varphi' \quad (1)$$

式中： τ_f —破坏面上的剪应力； c' —岩土体

的有效粘聚力; σ' 、 σ —破坏面法向上的有效应力和总应力; φ' —岩土体的有效内摩擦角; μ —孔隙水压力。

大部分极限平衡分析方法采用垂直条块划分方案(图4), 每一条块均作为刚体。由于问题的静不定性, 极限平衡法需要引入一些简化假定, 使问题变得静定可解。不同极限平衡分析方法之间的主要差别在于条块之间作用力的处理方法或假定不同, 以及由此导致的平衡条件数的不同。条间力假定分为三种类型:

- 1) 不考虑条块间作用力或仅考虑其中的一个。
- 2) 假定条块间力的作用方向或规定其垂直分量和水平分量的比值。
- 3) 假定条块间力的作用位置。

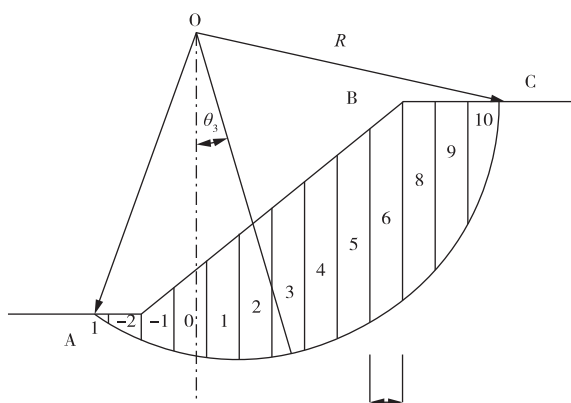


图4 条分法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of slice method

本次对联合边坡中露天采场边坡采用简化 Bishop 法和 Morgenstern-Price(M-P)法进行稳定性分析, 对联合边坡中排土场边坡采用不平衡推力法进

行分析。简化 Bishop 法和 Morgenstern-Price(M-P)法是工程中分析岩质边坡稳定问题常用的两种极限平衡方法, 土质边坡最常见的破坏形式为圆弧形滑动, 而采用不平衡推力法分析圆弧形滑动时, 精度较高, 因此采用不平衡推力法对排土场边坡进行稳定性分析。

Slide 是一款专门用于二维边坡稳定性分析的软件, 它基于极限平衡方法(Limit Equilibrium Method, LEM)来评估土质或岩质边坡的稳定性, 因此本研究借助岩土边坡分析软件 Slide 对露天采场一排土场联合边坡进行稳定性计算分析。

2.4 计算结果

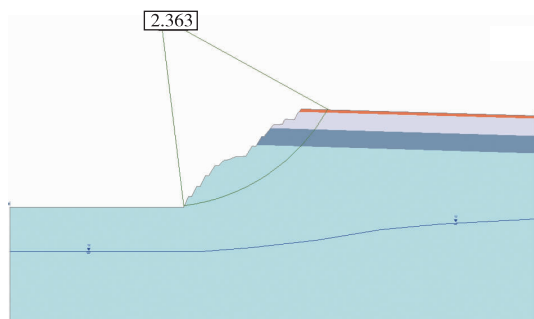
2.4.1 露天采场一排土场联合边坡采场边坡计算结果

根据相关水文地质报告, 该区域虽有基岩裂隙水、碎屑岩类孔隙裂隙水及局部地段松散岩类孔隙水, 但水量较小, 地下水埋深较深, 随季节变化大, 对边坡稳定性影响较小。

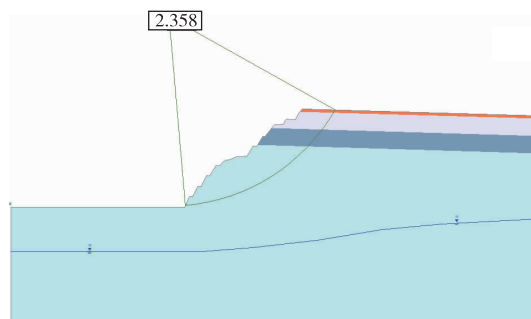
根据《非煤露天矿边坡工程技术规范》(GB 51016—2014)要求, 本次研究爆破振动影响系数为 0.05。

根据相关地质资料, 该区地震动峰值加速度为 0.05 g, 对照地震烈度为 6 度, 属地震微弱区, 最终确定地震影响系数为 0.075。

在上述工况条件下, 分别采用简化 Bishop 法和 Morgenstern-Price(M-P)法对露天采场最终边坡和露天采场一排土场联合边坡中露天采场边坡进行三种工况下(自重+地下水、自重+地下水+爆破振动力、自重+地下水+地震力)稳定性分析, 计算结果见图 5~10 和表 7。



(a)简化Bishop法($F=2.363$)



(b)M-P法($F=2.358$)

图5 采场剖面荷载组合 I (自重+地下水)

Fig. 5 Load combination I of mining area profile (Self weight+Groundwater)

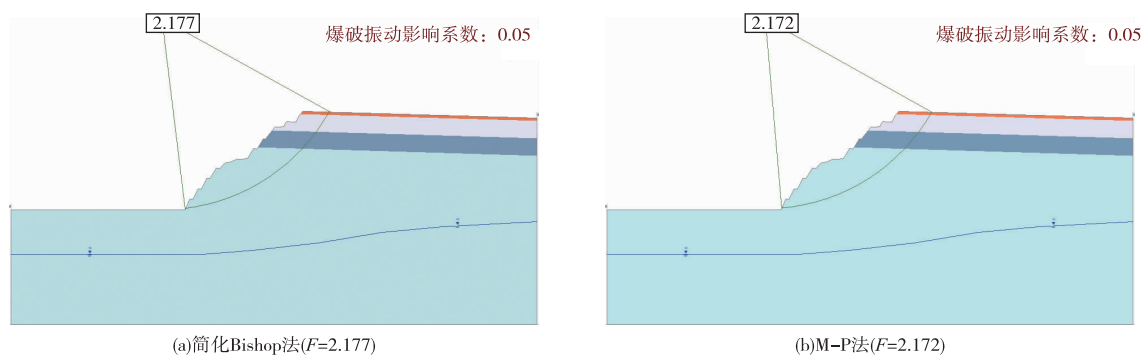


图6 采场剖面荷载组合Ⅱ(自重+地下水+爆破振动力)

Fig. 6 Load combination II of mining area profile (Self weight+Groundwater+Blasting vibration force)

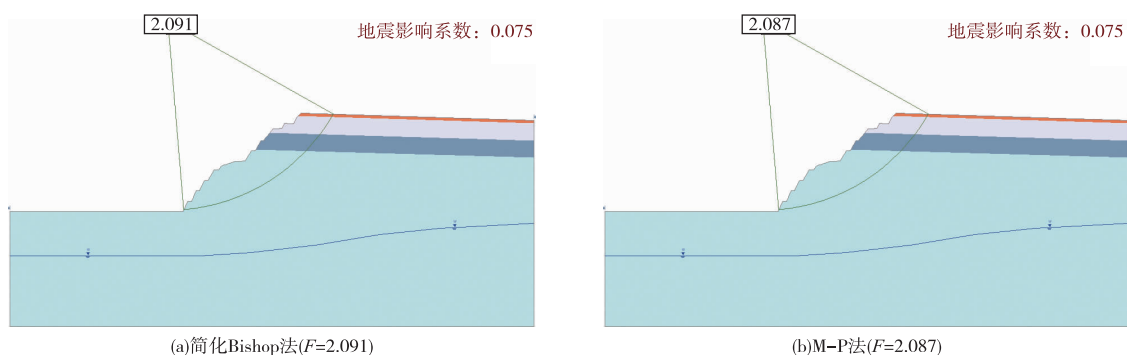


图7 采场剖面荷载组合Ⅲ(自重+地下水+地震力)

Fig. 7 Load combination III of mining area profile (Self weight+Groundwater+Seismic force)

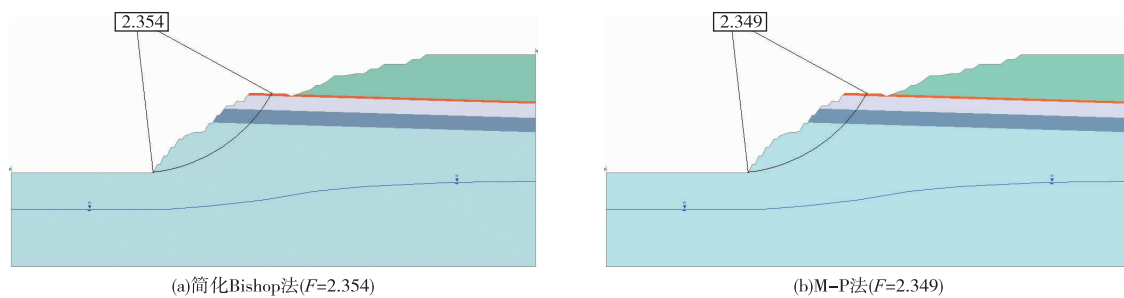


图8 联合剖面荷载组合Ⅰ(自重+地下水)

Fig. 8 Joint profile load combination I (Self weight+Groundwater)

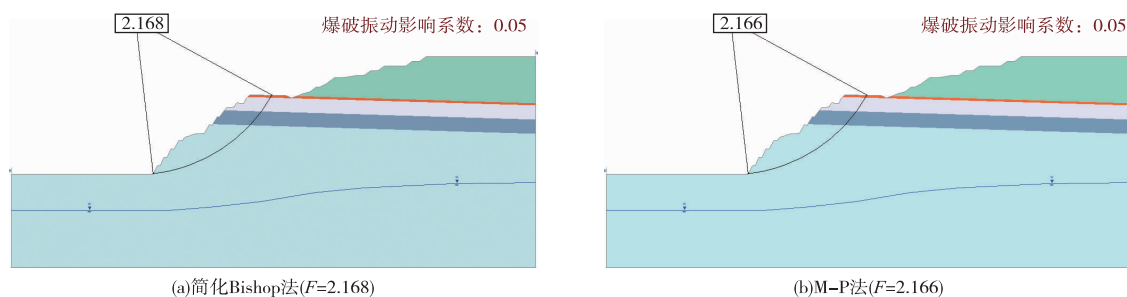


图9 联合剖面荷载组合Ⅱ(自重+地下水+爆破振动力)

Fig. 9 Joint profile load combination II (Self weight+Groundwater+Blasting vibration force)

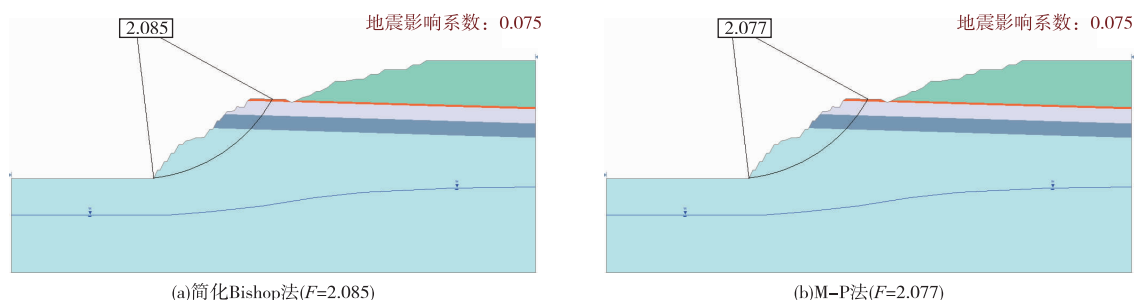


图 10 联合剖面荷载组合Ⅲ(自重+地下水+地震力)

Fig. 10 Joint Profile load combination III (Self weight+Groundwater+Seismic force)

表 7 露天采场边坡稳定性系数计算结果表

Table 7 Calculation results of stability coefficient of open-pit mining slope

剖面	荷载组合 I			荷载组合 II			荷载组合 III		
	稳定性系数		安全系数	稳定性系数		安全系数	稳定性系数		安全系数
	简化 Bishop 法	M-P 法		简化 Bishop 法	M-P 法		简化 Bishop 法	M-P 法	
单一采场边坡	2.363	2.358	1.20	2.177	2.172	1.18	2.091	2.087	1.15
联合边坡—采场边坡	2.354	2.349		2.168	2.166		2.085	2.077	

在考虑了影响边坡稳定的各种因素条件下,对采场最终边坡及露天采场—排土场联合边坡中露天采场边坡的稳定性进行了分析,由上述计算结果可知,在露天开采境界外未进行排土时和进行排土后,露天采场边坡在三种工况下均达到了《非煤露天矿边坡工程技术规范》(GB 51016—2014)规定的安全系数要求,即最终边坡是稳定的。分析计算表明,在此露天开采境界外预留出足够的安全距离后,是否设排土场对露天采场边坡稳定性影响较小,排土场设置前后的边坡稳定性系数变化较小,扩界设计保障了矿山的生产安全。

2.4.2 露天采场—排土场联合边坡排土场边坡计算结果

根据联合边坡排土场边坡可能破坏形式,采用不平衡推力法对联合边坡中排土场边坡进行三种工况下(自重、自重+降雨、自重+地震)稳定性分析,地震工况根据露天采场分析,选取地震影响系数为 0.075;降雨工况按极端连续暴雨使排土场土

体达到完全饱和,基岩渗透深度 10 m 的情况考虑,在工程实际情况中达到土体完全饱和的可能性极小,但根据以往工程实际经验,此极端情况下排土场稳定性系数最低,考虑到联合边坡中排土场等级为二级,排土场边坡破坏后果严重,为确保联合边坡中排土场边坡稳定性计算结果安全可靠,本次稳定性评价仍选取此种出现概率极小的工况进行稳定性计算,作为极端情况可能出现时的参考。

联合边坡典型剖面排土场边坡在不同工况条件下的稳定性分析结果见表 8。

联合边坡最终状态下,排土场边坡在工况 I、II、III 时均大于许用安全系数,潜在滑面均位于人工堆积体下部三个台阶处,且破滑面为沿排土场与第四系交界面滑动,排土场边坡处于稳定状态,计算结果如图 11~13 所示。

通过以上分析可知,露天采场—排土场联合边坡中排土场边坡稳定性系数均大于安全许用系数,设计排土场边坡处于稳定状态。

表 8 露天采场—排土场联合边坡排土场边坡稳定性计算成果表

Table 8 Calculation results of slope stability of the combined slope of open pit mining site and waste dump

计算工况	稳定性系数/ F (不平衡推力法)	安全许用系数 [K]	稳定性状态
工况 I (自重工况)	2.010	1.20	稳定
工况 II (自重+降雨工况)	1.553	1.15	稳定
工况 III (自重+地震工况)	1.663	1.15	稳定

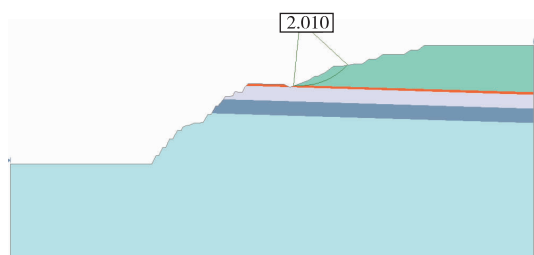
图 11 工况 I 时排土场边坡稳定性分析图($F=2.010$)

Fig. 11 Analysis diagram of slope stability of waste dump under condition I ($F=2.010$)

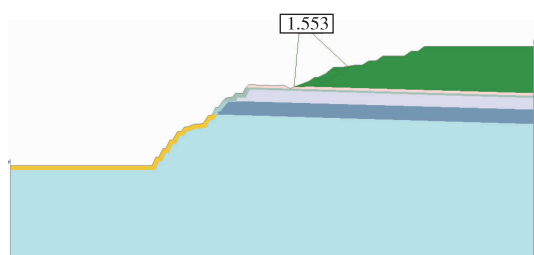
图 12 工况 II 时排土场边坡稳定性分析图($F=1.553$)

Fig. 12 Analysis diagram of slope stability of waste dump under condition II ($F=1.553$)

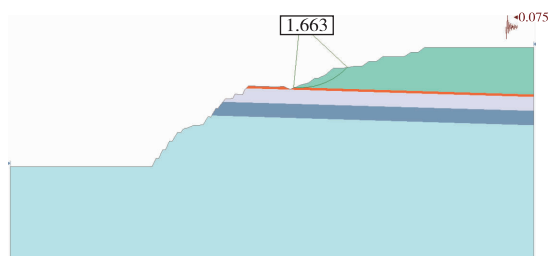
图 13 工况 III 时安全系数稳定性分析图($F=1.663$)

Fig. 13 Analysis diagram of slope stability of waste dump under condition III ($F=1.663$)

3 结论

1) 露天采场和排土场边界相距 75 m, 防护距离符合《有色金属矿山排土场设计标准》(GB 50421—2018)的规定, 且分析计算结果表明, 露天采场及排土场边坡稳定性不会产生相互影响。

2) 以露天采场边坡稳定性系数为指标, 采用极限平衡方法对露天采场一排土场联合边坡中露天采场边坡稳定性进行分析, 论证设计方案给出的联合边坡露天采场边坡的稳定性, 结果表明, 露天采场边坡在上部有无堆排废石时, 采场边坡在三种工况下均达到了《非煤露天矿边坡工程技术规范》(GB 51016—2014)规定的安全系数要求, 即露天采场边坡处于稳定状态。

3) 以排土场边坡稳定性系数为指标, 采用极限平衡法对露天采场一排土场联合边坡中排土场边坡

进行稳定性分析, 论证了设计方案给出的联合边坡排土场边坡的稳定性, 结果表明, 露天采场一排土场联合边坡中的排土场边坡在不同工况下均达到了《有色金属矿山排土场设计标准》(GB 50421—2018)规定的安全系数要求, 即排土场处于稳定状态。

参考文献

- [1] 陈峰, 张斌, 宁辰禹. 某露天镁矿排土场增高扩容及边坡稳定性研究[J]. 矿业工程, 2023, 21(3): 30-33.
CHEN F, ZHANG B, NING C Y. Study on capacity expansion and slope stability of waste dump of a open pit magnesium mine [J]. Mining Engineering, 2023, 21(3): 30-33.
- [2] 魏朝爽, 侯克鹏, 杜俊, 等. 云南某露天矿山排土场边坡稳定性分析[J]. 矿冶, 2014, 23(3): 50-53.
WEI C S, HOU K P, DU J, et al. Analysis of slope stability for a surface mine dump of Yunnan[J]. Mining and Metallurgy, 2014, 23(3): 50-53.
- [3] 黄建君, 刘家文, 陈爱明. 云南某铅锌露天矿山排土场边坡稳定性分析[J]. 有色金属设计, 2022, 49(2): 57-63.
HUANG J J, LIU J W, CHEN A M. Analysis of slope stability for an open-pit lead-zinc waste dump in Yunnan [J]. Nonferrous Metals Design, 2022, 49(2): 57-63.
- [4] 蓝秋华. 国内某矿山露天采场边坡稳定性分析[J]. 现代矿业, 2022(7): 77-79.
LAN Q H. Analysis of slope stability for an open-pit mine in China[J]. Modern Mining, 2022(7): 77-79.
- [5] 董贺伟. 基于极限平衡的不同类型边坡稳定性分析计算方法探讨[J]. 有色金属(矿山部分), 2022, 74(3): 85-90, 107.
DONG H W. Stability analysis and calculation methods for different slope types based on limit equilibrium theory [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2022, 74(3): 85-90, 107.
- [6] 洪儒宝, 简文彬. 露天矿边坡失稳破坏模式及其稳定性研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2016, 68(5): 72-77.
HONG R B, JIAN W B. Failure model and stability of an open-pit slope[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2016, 68(5): 72-77.
- [7] 孟中华, 耿立锋, 刘会林, 等. 某铜钼矿深凹开采边坡稳定性数值分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2018, 70(4): 87-92.
MENG Z H, GENG L F, LIU H L, et al. Slope stability numerical analysis of a copper molybdenum mine with deep concave[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2018, 70(4): 87-92.