

# 露天坑充填治理过程边坡稳定性分析

Slope Stability Analysis of Open Pit Filling Treatment Process

尚晓明, 李文, 谢盛青(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

**摘要:**某露天矿山由相邻的南、北两个露天坑构成,北露天坑设计最低开采水平为-350 m,南露天坑设计最低开采水平为-50 m,南露天坑计划一年后闭坑。为实现南露天坑的生态恢复,拟计划在南露天坑闭坑后进行尾砂胶结充填,为保证南露天坑充填后不影响北露天坑的正常安全生产,需要对露天坑充填治理过程的边坡进行稳定性分析。采用Geo-Studio软件对南露天坑充填前后的边坡稳定性进行了分析,并考虑充填护坡层厚度、堆排高度、地下水、地震荷载条件等不同工况,研究结果可为南露天坑充填治理及北露天坑安全生产提供依据。

**关键词:**露天坑; 充填; 边坡稳定性

**中图分类号:** TD854 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2023)02-0033-07

**Abstract:** An open pit mine is composed of two adjacent south and north open pits. The lowest mining level of the north open pit is -350 m, and the south open pit is -50 m, and the south open pit is planned to be closed after one year. In order to achieve the ecological restoration of the south open pit, it is planned to carry out the tailings cementation filling after the south open pit is closed. In order to ensure that the filling of the south open pit will not affect the normal and safe production of the north open pit, it is necessary to analyze the stability of the slope during the filling treatment of the open pit. Geo-Studio software is used to analyze the stability of the slope before and after the filling of the south open pit, and different working conditions such as the thickness of the filling revetment, the stacking height, groundwater, and seismic load conditions are considered. The research results can provide a basis for the filling treatment of the south open pit and the safety production of the north open pit.

**Key words:** open pit; filling; slope stability

## 1 前言

随着社会对资源需求的急剧增加,资源开采速度加快,国内越来越多的露天矿山闭坑,部分转入地下开采。露天坑由于地表水与地下水作用,再加上地质结构变化、边坡岩体性质等各方面原因,极易造成塌陷、滑坡、泥石流及水土流失等地质灾害问题,进而严重影响矿区周边的工程和居民正常生产与生活,既造成一定的经济损失,也威胁了矿区周围地区的地质环境与生态环境,影响较大的有2023年2月22日在内蒙古阿拉善盟阿拉善新井煤业公司发生的“2·22”边坡坍塌事故,造成重大人员伤亡。

近些年来,采用充填料浆胶结充填露天坑,然后覆土复垦绿化,可实现矿区环境绿化、美化。国内部分矿山已经因地制宜开展了此类工程,如湖北铜绿

山铜铁矿和河北石人沟铁矿均将充填料浆输送至露天坑进行露天坑胶结充填,取得了良好效果<sup>[1-2]</sup>。

某露天矿山由相邻的南、北两个露天坑构成,南露天坑即将闭坑,计划对闭坑的露天坑进行胶结充填,两个露天坑之间有一道岩墙(隔离梁),故需对岩墙边坡稳定性进行分析,从而确保露天坑充填过程中边坡的稳定性,为南露天坑充填治理及北露天坑安全生产提供依据。

## 2 工程背景

某铁矿是一座大型变质岩型磁铁矿床,整个露天采场长3 600 m、宽400~1 680 m,由南、北两个相邻的露天坑组成。目前北露天坑开采水平为-215 m、南露天坑开采水平为-30 m,南露天坑预计一年后闭坑,北露天坑预计2028年结束,其中,北露天坑设计最低开采水平为-350 m,南露天坑设计最低开采水平为-50 m。

露天坑由于高陡边坡的存在,矿山每年需要投入大量的资金和人力进行边坡治理。为减少矿山运营成本,实现对露天坑的复垦,有必要对露天坑进行治理,其中采用充填料浆胶结充填露天坑,然后覆土

[作者简介] 尚晓明(1983—),男,山西平遥人,高级工程师,从事采矿工程设计工作。

[引用格式] 尚晓明,李文,谢盛青. 露天坑充填治理过程边坡稳定性分析[J]. 中国矿山工程,2023,52(2):33-39.

复垦绿化,国内部分矿山已经有所应用,并取得了良好效果。

根据矿山生产计划,南露天坑要早于北露天坑闭坑,故计划对南露天坑进行尾砂胶结充填。充填工艺为:选矿厂生产的尾砂→充填搅拌站→高浓度胶结尾砂→管道输送→采坑充填。

由于南、北露天坑相邻,两者之间有一道岩墙(隔离梁),为了保证南露天坑充填后不影响北露天坑的正常安全生产,需要对充填后南、北露天坑间的岩墙进行边坡稳定性分析。

研究中主要采用加拿大 GEO-SLOPE 公司开发的 Geo-Studio 软件进行建模分析,该软件适用于模拟和分析岩土工程中的各种状态(如:边坡失稳、地下水渗流、地基沉降、岩土体地震响应等),在岩土、地质、水利、环境、采矿、交通工程等领域均可应用,其中 SLOPE/W(边坡稳定性分析模块)、SEEP/W(渗流分析模块)、SIGMA/W(平面有限元应力应变分析模块)、QUAKE/W(地震动力分析模块)等模块应用较为广泛。

经过多年开采,南露天坑目前正在 -30 m 平台进行开采,最终境界 -50 m,计划一年后闭坑。图 1 所示为南露天坑现状图,图 2 所示为矿体模型与南、北露天坑的相互关系。



图 1 南露天坑现状图

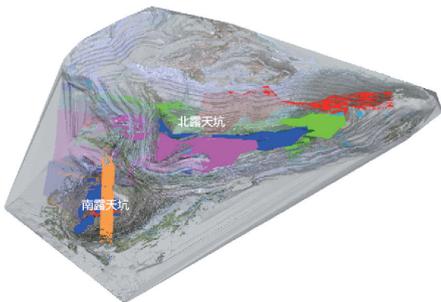


图 2 矿体与露天坑的相互关系图

根据三维激光扫描仪对露天坑的扫描结果,并结合最终开采境界,通过地质建模,采用 Datamine 软件进行露天坑容积计算。坑内容积见表 1,南露天坑 -50 ~ 50 m 的容积为  $920.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

表 1 南露天坑容积

标高/ m	容积/ $10^4 \text{ m}^3$	累计容积/ $10^4 \text{ m}^3$	标高/ m	容积/ $10^4 \text{ m}^3$	累计容积/ $10^4 \text{ m}^3$
-48	3.4	3.4	2.0	16.5	235.2
-46	3.7	7.1	4.0	17.0	252.2
-44	3.9	11.0	6.0	17.4	269.6
-42	4.1	15.2	8.0	17.9	287.5
-40	4.4	19.6	10.0	18.4	305.9
-38	4.6	24.2	12.0	20.1	326.0
-36	4.9	29.1	14.0	21.2	347.2
-34	5.9	34.9	16.0	22.0	369.2
-32	6.8	41.8	18.0	22.9	392.0
-30	7.1	48.9	20.0	23.8	415.8
-28	7.5	56.4	22.0	24.9	440.8
-26	7.8	64.2	24.0	26.7	467.5
-24	8.2	72.3	26.0	29.4	496.9
-22	8.5	80.9	28.0	30.4	527.3
-20	9.0	89.8	30.0	31.1	558.4
-18	11.1	101.0	32.0	31.8	590.2
-16	11.4	112.3	34.0	32.8	623.0
-14	11.6	124.0	36.0	33.7	656.7
-12	11.9	135.9	38.0	34.8	691.5
-10	12.2	148.0	40.0	35.9	727.4
-8	12.5	160.5	42.0	36.8	764.2
-6	12.8	173.4	44.0	37.5	801.7
-4	14.0	187.4	46.0	38.3	840.0
-2	15.3	202.8	48.0	39.6	879.7
0	16.0	218.7	50.0	40.6	920.3

### 3 南露天坑充填边坡岩体稳定性分析

根据露天坑平面位置图,初步确定了图 3 所示的剖面线,该剖面线贯穿南北露天坑且隔离梁北帮边坡最陡处。根据南露天坑充填计划,在开始进行南坑尾砂充填时,此时北露天坑还未开采至最终境界,随着南露天坑的充填,北露天坑继续向下延伸开采直到最终开采境界。考虑到北露天坑开采至最终境界时的边坡更陡,对边坡稳定性更为不利,在此次分析过程中,将以北露天坑的最终开采境界边坡进行建模分析。

根据北露天坑最终开采境界、区域岩层分布以及堆排方案建立了如图 4 所示的南坑充填堆存平面模型,模型中显示的高程数据为当前模型的竖直高

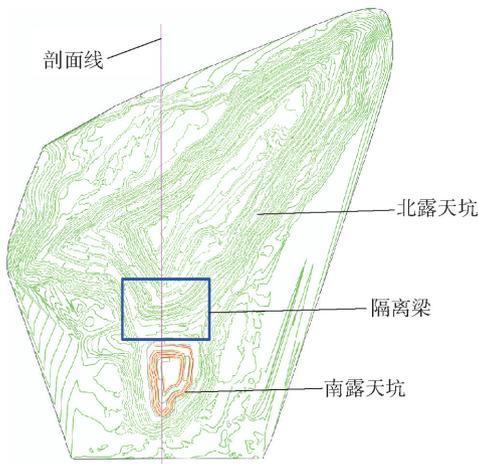


图3 露天坑平面图及剖面线

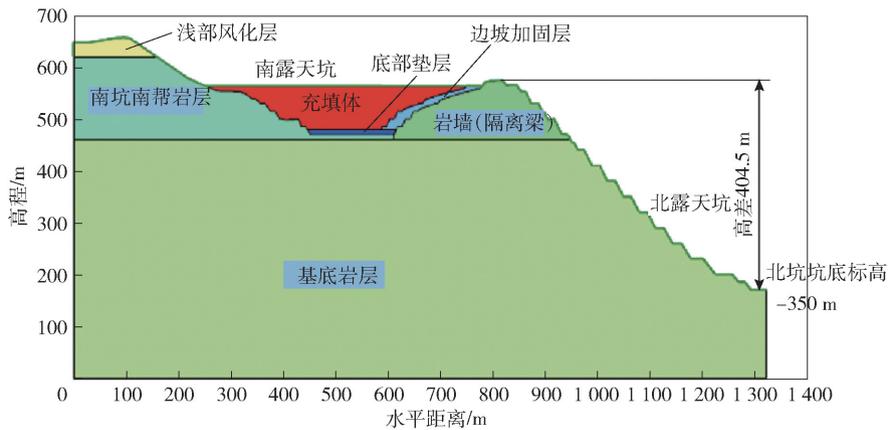


图4 南坑充填堆存平面模型

搅拌站(可根据需要添加新型胶固料,增加泵送设施)→高浓度胶结尾砂→管道输送→采坑充填。由于露天采坑面积较大,整层充填难度很大,为了便于施工及加快脱水,设计采用分层分区充填,分层高度2 m。由于露天坑下方还有部分矿体没有开采,后期会转入地下开采,为隔断露天采坑与井下的水力通道,需在露天采坑坑底形成隔离层。具体工艺为:首先对坑底进行削富填平形成-50 m平台,然后对-50 m平台及-50~-40 m的侧面铺设防渗层,接着采用钢筋网+高强度充填体进行封底,-40 m平台为封底工程,其充填标高为-50~-40 m,封底工程完成后,再进行上部区域的充填。

为加快露天采坑底部充填体脱水,在每分层底敷设3~5根滤水管( $\phi 168 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ ),管壁钻 $\phi 10 \text{ mm}$ 滤水孔,间距 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。在滤水管外面套一层滤水布,避免充填料浆通过滤水孔进入滤水管内。充填滤水通过滤水管排出后,顺着地面自

流至临时水仓。度,并不代表矿区实际海拔高程。根据南露天坑充填计划,待南露天坑开采到海拔高程为-50 m水平时实施尾砂胶结充填,设计堆存高度94 m。南北露天坑间岩墙(隔离梁)北侧边帮为北露天坑开采至最终境界时的形态,北露天坑坑底最终开采境界标高为-350 m,北坑坑底至隔离梁顶部的高差约为404.5 m,隔离梁北帮边坡整体边坡角约为 $41^\circ$ 。

根据充填方案,南露天坑底将采用高强度尾砂(灰砂比1:4,浓度72%)堆存筑底形成底部垫层,南露天坑北帮将采用中等强度尾砂(灰砂比1:8,浓度72%)进行护坡形成边坡加固层,南露天坑其余空间采用干排砂(灰砂比1:20,浓度72%)充填形成充填体。充填工艺为:选矿厂生产的尾砂→充填

流至临时水仓。

南露天坑充填过程从西往东,从北往南顺序充填,并在充填过程于南采坑东南帮形成最低处,最低处设为临时水仓,作为露天采坑汇水以及充填体脱水的集水、排水区。露天坑汇水采用浮船泵站排出采坑。

根据矿山不同区域岩层以及尾砂充填体材料物理力学参数,对模型不同区域赋值材料特性参数,具体参数见表2。

表2 南露天坑尾砂胶结充填模型各区域材料参数

岩体分区	容重/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	黏聚力/ $\text{kPa}$	内摩擦角/ $(^\circ)$
浅部风化层	18	200	34
南坑南帮岩层	26.29	1300	47.0
隔离梁	22.5	400	42.6
基底岩层	26.29	1500	47
底部垫层	19.02	450	36
边坡加固层	19.02	450	36
尾砂充填体	18.4	90	36

### 3.1 露天坑充填前边坡岩体稳定性分析

目前,边坡稳定性分析方法主要有以刚体极限平衡理论为基础的极限平衡法和以有限元(FEM)、有限差分(FDM)为基础的数值分析法。极限平衡法是建立在(刚体)极限状态时的静力基础上,分析边坡各种破坏模式下的受力状态来评价其稳定性。由于该类方法可给出物理意义明确的边坡稳定安全系数以及可能的破坏面,力学模型简单而得到广泛应用。常用的极限平衡分析的主要方法有 Fellenius 法、Bishop 法、Janbu 法、Morgenstern - Price 法、Spencer 法、Sarma 法、平面直线法、推力传递系数法等<sup>[3-4]</sup>。

随着矿山北露天矿进一步向下延伸开采,北露

天坑南帮边坡将不断演化直至到达最终开采境界。图 5 所示为考虑边坡自重 + 地下水(地下水位距坑底 10 m)后的岩墙边坡稳定性分析结果。从图 5 中可以看出,分析采用 Morgenstern Price 法、Janbu 法、Bishop 法和 Ordinary 法计算得到的岩墙边坡安全系数分别为 2.193、1.889、2.207 和 2.217。根据《非煤露天矿边坡工程设计规范》GB 51016—2014 中露天矿边坡按高度和边坡危害等级的划分规则,此分析中岩墙(隔离梁)北帮边坡应按 I 类边坡工程安全等级考虑。根据规范要求,自重 + 地下水荷载条件下 I 类边坡工程的设计安全系数应满足 1.25 ~ 1.20。由此可见,在北露天坑开采至最终境界时岩墙(隔离梁)边帮岩体可处于稳定状态。

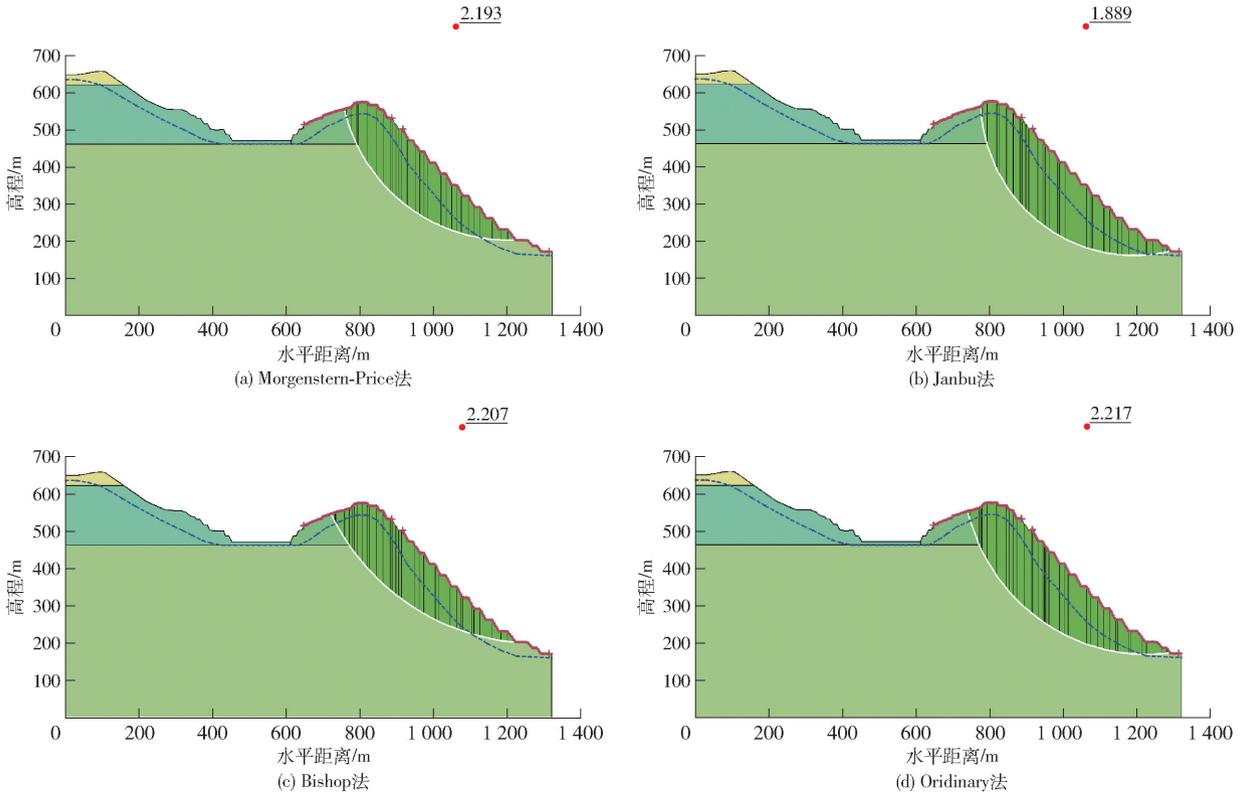


图 5 南露天坑充填前自重 + 地下水条件下岩墙稳定性分析

### 3.2 南露天坑北帮护坡厚度对南北露天坑间岩墙稳定性影响

根据制定的南露天坑充填方案,在南露天坑坑底采用高强度混合砂进行筑底,筑底工程厚度为 10 m。在南露天坑北帮设置有护坡层,需对护坡层厚度进行确定,分析护坡层厚度对南北露天坑间岩墙岩体稳定性的影响。图 6 所示为护坡厚度分别为 0 m、30 m、40 m 和 50 m 情形下岩墙岩体稳定性分析结果(采用 Morgenstern - Price 法)。从图中可以看

出,三种工况条件下北露天坑南帮岩体边坡的安全系数均约为 2.185,说明护坡厚度对南北坑间岩墙稳定性基本无影响。

### 3.3 不同堆排高度南北坑岩墙(隔离梁)稳定性分析

图 7 所示为南露天坑不同堆排时期南北坑间岩墙(隔离梁)稳定性分析结果(采用 Morgenstern - Price 法)。从图中结果可以看出,随着南露天坑尾砂堆存高度从 20 m 增加到 70 m 时南北坑间岩墙的

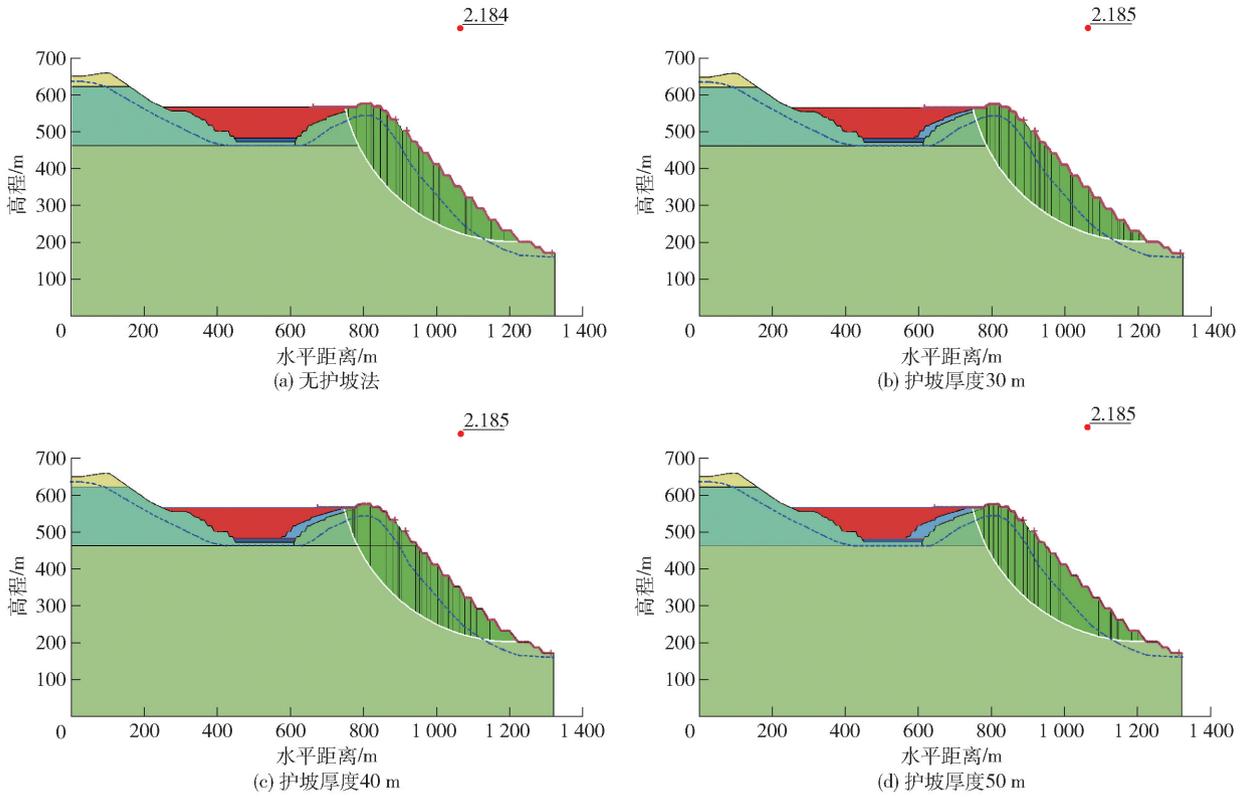


图6 南露天坑不同堆载高度对岩墙稳定性的影响 (Morgenstem-Price 法分析结果)

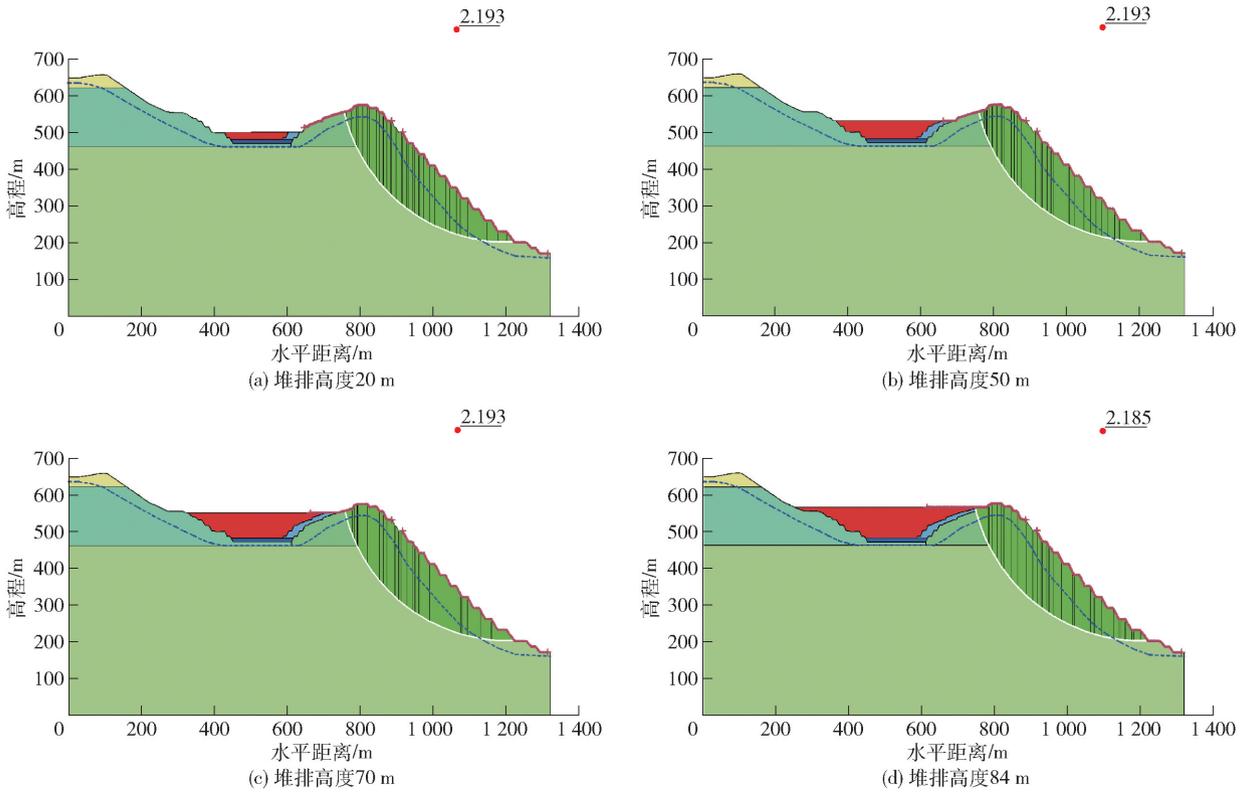


图7 不同堆排时期的南北坑岩墙稳定性

安全系数均为 2.193,与无堆存时的安全系数保持一致。当南露天坑堆排至设计高度(84 m)时,南北坑间岩墙安全系数略有降低,为 2.185。由此可见,在南露天坑不同堆排高度情况下,岩墙(隔离梁)边帮岩体均可处于稳定状态。

### 3.4 地下水+地震条件下充填堆存对岩墙稳定性影响

图 8 所示为建立的边坡网格单元模型(边坡加固层厚度为 30 m),单元尺寸 5 m。根据我国主要城镇抗震设防烈度分组,矿山所在地区抗震设防烈度为 7 度,设计基本地震加速度值为 0.15 g。为了分析不同地震动峰值加速度对南露天坑尾砂充填后岩墙稳定性的影响,在模型底部施加了水平方向的地震加速度时程曲线,具体如图 9 所示,并经动荷载计算后得到不同时刻的安全系数。

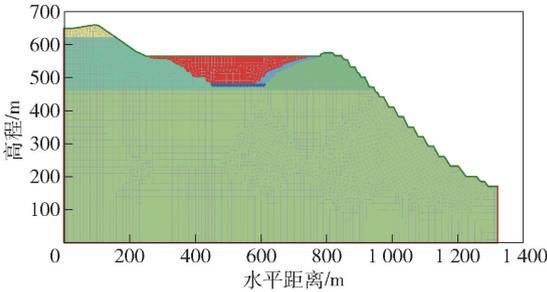


图 8 露天坑二维网格模型

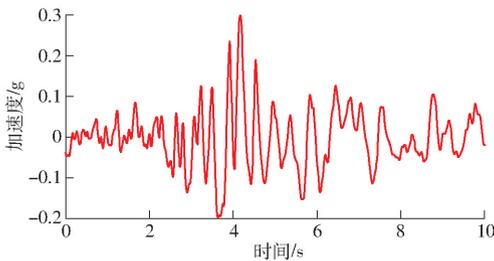


图 9 水平方向地震加速度时程曲线

图 10 所示为考虑地下水位及地震作用(地震设防烈度为 7 度)下南露天坑尾砂充填堆存后南北坑间岩墙边坡的安全系数时程曲线,从图中可以看出,随着地震动荷载的作用,边坡的安全稳定性系数随时间发生波动。该工况条件下边坡最小安全系数约为 1.922。图 11 所示为岩墙边坡稳定性,南露天坑尾砂充填堆存区域无液化现象。根据《非煤露天矿边坡工程设计规范》GB 51016—2014 要求,自重+地下水+地震荷载条件下 I 类边坡工程的设计安全系数应满足 1.20~1.15。可见,此工况条件下南北坑间岩墙边坡仍可保持安全稳定。

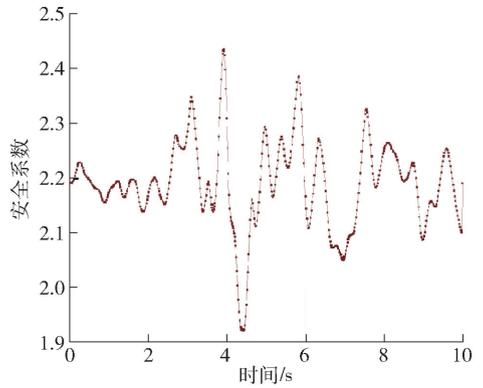


图 10 安全系数时程曲线

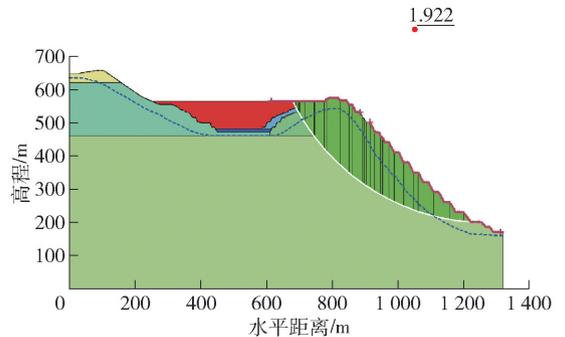


图 11 考虑地下水+地震情形下岩墙边坡稳定性

表 3 中列出了不同强度动荷载作用下南北坑间岩墙岩体边坡安全系数。从表中数据可以看出,随着动荷载强度的增加,岩墙岩体边坡安全系数呈指数趋势降低,具体如图 12 所示。图 13 所示为不同地震动峰值强度条件下南北坑间岩墙最危险滑移面及安全系数。

表 3 不同地震动峰值强度与岩墙最小安全系数关系

地震动荷载 加速度峰值	0.1 g	0.15 g	0.2 g	0.25 g	0.3 g
最小安全系数	2.001	1.922	1.848	1.782	1.724

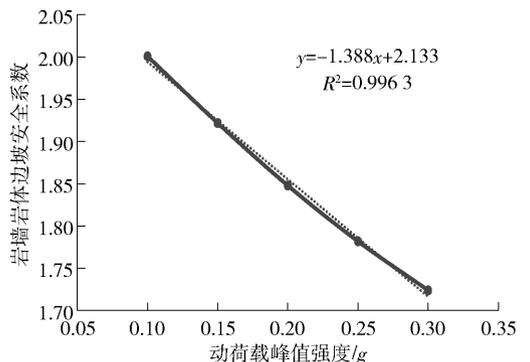


图 12 地震动荷载峰值强度对岩墙岩体边坡稳定性影响

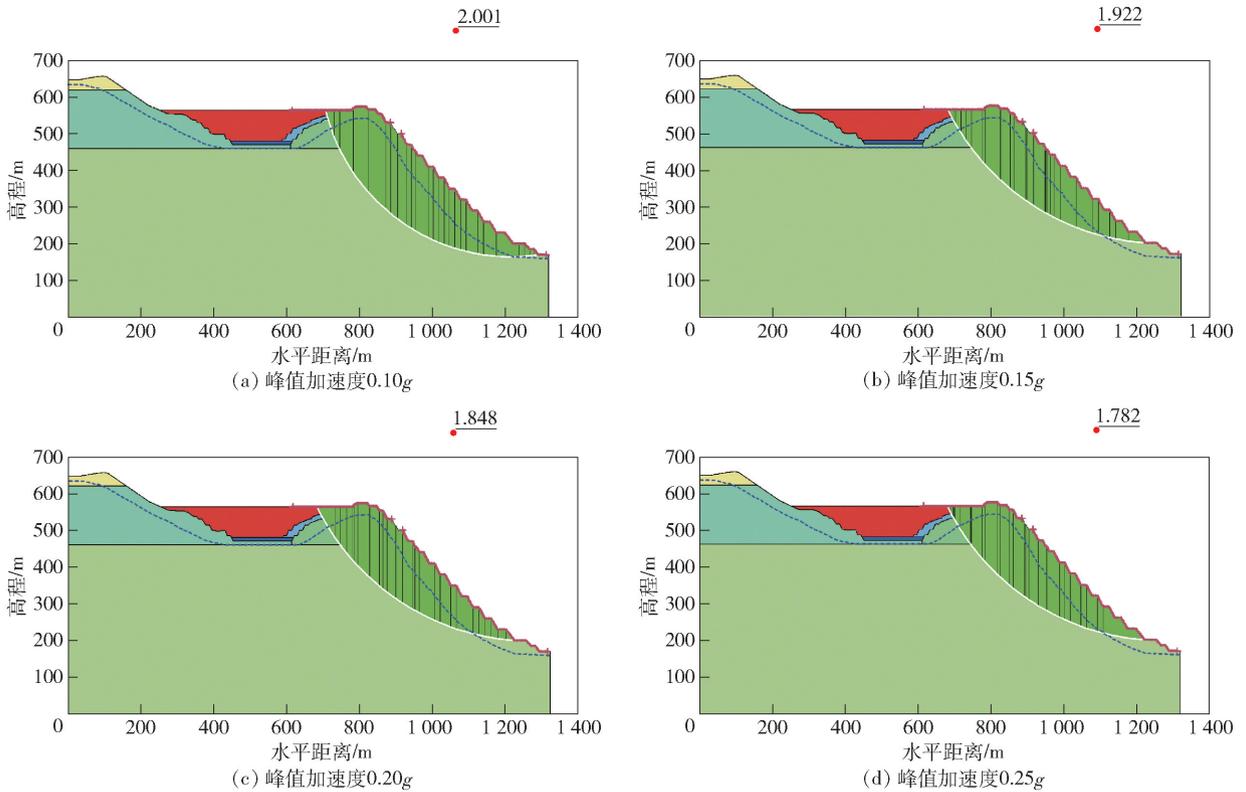


图 13 不同地震动峰值强度条件下南北坑间岩墙最危险滑移面及安全系数

## 4 结论

本文采用 Geo-Studio 软件对矿山南露天坑尾砂充填前后南北坑间的岩墙边坡稳定性进行了分析,分别考虑了地下水、地震等荷载条件以及南露天坑充填不同堆排时期、护坡层厚度等因素对南北坑间岩墙稳定性的影响。结果表明:南露天坑北帮护坡层厚度分别为 30 m、40 m、50 m 且南露天坑尾砂堆存至设计高度时,南北坑间岩墙安全系数均约为 2.185,说明护坡层厚度对岩墙边坡稳定性基本无影响。通过考虑南露天坑不同时期的尾砂堆存高度,发现随着堆存高度的增加,南北坑间岩墙边坡安全系数保持恒定(安全系数为 2.193),当堆排至设计高度时略有下降(安全系数为 2.185)。通过分析南露天坑尾砂堆存后地下水+地震荷载作用下岩墙边

坡稳定性分析发现,在该地区地震设防烈度条件下岩墙边坡最小安全系数约为 1.922,该安全系数高于《非煤露天矿边坡工程设计规范》GB 51016—2014 中相应工况条件下的安全系数设计值要求,南北坑间岩墙边坡可保持稳定。

### [参考文献]

- [1] 卢宏建,梁鹏,杜英男,等. 金属矿山露天坑尾砂胶结充填治理[J]. 金属矿山,2017(4):36-40.
- [2] 廉杰,郑茂兴,武飞,等. 露天坑的治理与综合利用技术研究[J]. 金属矿山,2013(6):134-137.
- [3] 胡宣,刘宏,毛吉成,等. 基于 Geo-Studio 的高边坡稳定性分析[J]. 路基工程,2020(2):35-38.
- [4] 徐冬冬. 边坡生态修复技术探讨[J]. 有色冶金节能,2022,38(3):78-81.