

赵建疆,曹兰柱,马文哲,等.露天矿倾斜内排压帮边坡稳定性控制方法研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(2):157-165.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240008

ZHAO Jianjiang, CAO Lanzhu, MA Wenzhe, et al. Research on stability control mining method of open-pit slope with inclined internal discharge tracking pressure wall[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(2): 157-165. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20240008

露天矿倾斜内排压帮边坡稳定性控制方法研究

赵建疆¹, 曹兰柱^{2*}, 马文哲¹, 买吾拉尼江·莫合特尔¹

(1. 国能新疆准东能源有限责任公司 准东露天煤矿, 新疆 昌吉 831100;

2. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 为研究露天矿倾斜煤层下横采内排追踪压帮边坡稳定性控制开采方法, 以准东露天矿首采区东帮边坡为工程背景, 采用二维与三维相结合的方法, 基于极限平衡法和数值模拟方法对东帮边坡稳定性进行分析, 确定内排压帮的最优追踪距离; 基于内排空间利用最大化的工程条件, 建立排土线布置的数学表达式, 确定采场和内排土场工作线布置方案。研究结果表明: 首采区东帮边坡稳定性与追踪距离、边坡角呈负相关, 内排压帮的最优追踪距离为 50 m, 内排工作线布置方向为 22°; 与内排土场工作线及采场工作线平行发展方案相比, 安全与经济效益提升显著。研究结果可为露天煤矿内排追踪压帮技术提供新的解决方案。

关键词: 露天煤矿; 横采内排; 边坡稳定性; 追踪距离; 排土线布置

中图分类号: TD804

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)02-0157-09

Research on stability control mining method of open-pit slope with inclined internal discharge tracking pressure wall

ZHAO Jianjiang¹, CAO Lanzhu^{2*}, MA Wenzhe¹, Maiwulanjiang Moheteer¹

(1. Zhundong Open-pit Coal Mine, Guoneng Xinjiang Zhundong Energy Company Limited, Changji 831100, China; 2. College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to study the stability control mining method of the inner row tracking pressure slope in the inclined coal seam of the open-pit mine, the east slope of the first mining area of the Zhundong open-pit mine is taken as the engineering background. The stability of the east slope is analyzed by combination of two-dimensional and three-dimensional methods, limit equilibrium method and numerical simulation method, and the optimal tracking distance of the inner row pressure slope is determined. Based on the engineering conditions of maximizing the utilization of internal dumping space, the mathematical expression of dumping line layout is established, and the working line layout scheme of stope and internal dumping site is determined. The results show that the slope stability of the east side of the first mining area is negatively correlated with the tracking distance and slope angle. The optimal tracking distance of the internal drainage pressure wall is 50 m, and the direction of the internal drainage working line is 22°. Compared with the parallel development scheme of the working line and stope working line in the inner dump, the safety and economic benefits are significantly improved. The research conclusion can provide a new solution for the technology of tracking pressure and wall in open pit coal mine.

Keywords: open-pit coal mine; horizontal mining and internal drainage; slope stability; tracking distance; layout of soil discharge line

收稿日期: 2024-01-05 修回日期: 2024-03-21 接受日期: 2024-04-11 责任编辑: 朱含露

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52204136)

作者简介: 赵建疆 (1997-), 男, 四川 绵阳人, 助理工程师, 主要从事露天煤矿开采方面的研究。E-mail: 821134536@qq.com

通信作者: 曹兰柱 (1962-), 男, 内蒙古 四子王旗人, 硕士, 教授, 主要从事露天采矿及边坡稳定性方面的研究。E-mail: cao1962@126.com

0 引言

露天矿在生产过程中会将剥离的土壤直接排弃到采场的采空区内,形成内排土场^[1]。内排可以减轻露天矿开采后矿坑的回填压力,有利于生态恢复和治理,为绿色矿山建设提供了极为有效的途径^[2]。此外,相比于外排,内排具有剥离运距短、劳动成本低、耕地占用少、环境友好等优势^[3]。随着露天煤矿横采内排技术的广泛应用,如何科学规划内排土场,以实现内排空间的利用的最大化,成为当前研究的热点问题^[4-6]。

目前,学者们针对内排土场规划设计及内排优化方案进行了研究。王东等^[7]基于开拓开采设计理论和边坡稳定性分析理论,提出了内排土场压脚挂帮并行建设发展理念,该方法有利于快速占据内排空间并减少外排占地,进而提升初期经济效益。张亮等^[8]以某内排土场为工程背景,在原端帮内排方案的基础上,提出了避免剥离物运距“舍近求远”的最优方案。李广贺等^[9]应用有限差分软件FLAC^{3D},基于强度折减理论,对压帮不同高度时的端帮稳定性进行了三维数值模拟。王东等^[10]研究了内排基底倾角、采场工作线方向等相关因素与排土线布置的关系,从理论上揭示了采场工作线布置及边坡角、内排土场边坡角、基底倾角对排土线布置的影响规律。然而,由于地层产状的复杂性,内排工作线布置问题难以求解,因此,确定一种内排土场工作线优化设计方法成为解决该问题的关键。

本文以准东露天煤矿首采区东帮为工程背景,基于AutoCAD等软件和FLAC^{3D}有限元分析软件,采用二维与三维相结合的方法,确定横采内排最

优追踪距离。为最大限度利用内排空间,建立内排土场工作线布置表达式,揭示基底倾角及内排土场边坡角对内排工作线方向的影响规律,为类似工程提供参考。

1 工程背景

准东矿田内发育煤组有A组、B组、C组,分别赋存于八道湾组、西山窑组和石树沟群下亚群中。准东露天煤矿开采的目标层为B煤组,因此本文以B煤组为研究的工程背景。

B煤组赋存于西山窑组中,经钻探工程控制,B煤组的煤层由矿田东部(浅部)的一层巨厚煤层向西部(深部)分叉为两层巨厚煤分层。在局部地段,上分层的下部分出一层中厚煤层,下分层分叉为两层,同时在上述煤层和煤分层的上、下存在不可采薄煤层。B煤组在矿田内发育为3~8个煤分层,煤层平均厚度为72.58 m,按西山窑组平均厚度126.96 m计算,西山窑组含煤系数约为57.16%。其中分布有1~5层可采及局部可采煤层,平均可采总厚度为65.83 m。为方便叙述,将B煤组东部未分叉的单一煤层编号为B_m;将中部分叉的两个煤层中,下部分层编号为B₁,上部分层编号为B₂;在西部分叉成3~4个煤分层的区域中,将上部分层B₂下部的局部中厚煤分层编号为B₂['],将下部分层B₁分叉出的两个薄~中厚煤分层自下而上编号为B₁和B₀。因此,在多煤层分叉区内,自下而上共发育B₀、B₁、B₂[']、B₂四个煤层。基于室内试验,采用理论分析,并结合以往研究成果及滑坡反分析,确定了岩土体物理力学参数,见表1。

表1 岩土体物理力学参数

Tab.1 physical and mechanical parameters of rock and soil

地层岩性	状态	视密度/(kg·m ⁻³)	含水率/%	抗压强度/MPa	内摩擦角φ/(°)	内聚力/MPa
B煤	天然	1.34	47.73	0.46	35.95	0.037
	饱和	1.38			34.41	0.030
泥岩	天然	2.06	12.74	0.83	36.20	0.060
	饱和	2.11			34.25	0.048
粉砂岩	天然	2.07	12.21	2.37	38.04	0.170
	饱和	2.12			36.35	0.136
细砂岩	天然	2.14	8.55	2.15	34.62	0.250
	饱和	2.19			33.02	0.200
B煤底板 (泥岩层)	天然	2.19	9.15	1.56	32.35	0.230
	饱和	2.24			30.46	0.140
弱层	天然				12.57	0.009
	饱和				11.90	0.000

注:含水率为质量分数。

2 倾斜内排压帮方法研究

根据《煤炭工业露天矿设计规范》(GB 50197—2015)^[1](以下简称《设计规范》),内排土场排土台阶的坡底线与采煤台阶坡底线的安全距离宜不小于50 m。水平煤层露天矿内排工作线布置方式见图1(a),煤层呈水平状态,基底倾角为0°,内排工作线平行于采场工作线,既可控制边坡

稳定性,又能最大化利用内排空间;倾斜煤层露天矿的工作线布置方式见图1(b),煤层呈倾斜状态,排土工作线平行于采场工作线,大量内排空间无法及时利用。因此,需优化内排土场工作线布置,避免平行布置内排空间滞后问题,控制边坡稳定性的同时达到强化内排的效果,倾斜内排追踪压帮方案示意图见图1(c)^[10]。

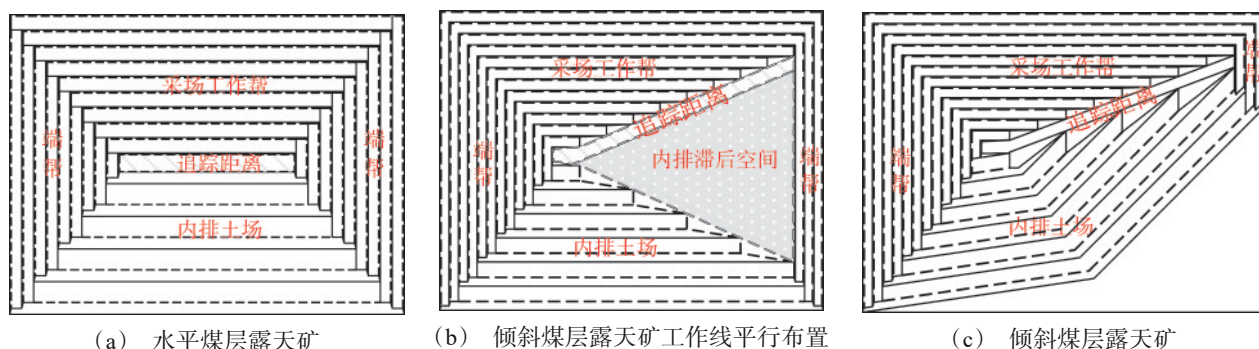


图1 内排工作线布置方式

Fig.1 layout of internal working line

2.1 边坡稳定性分析

(1) 东帮到界边坡二维稳定性分析

边坡安全储备系数是评价边坡稳定性的重要指标。根据《设计规范》对边坡安全系数的规定,采场非工作帮边坡的服务年限在10 a以下时,安全储备系数采用1.1~1.2;服务年限为10~20 a时,安全储备系数采用1.2~1.3;服务年限超过20 a时,安全储备系数采用1.3~1.5^[11]。综合考虑边坡类型、重要性及服务年限等因素,确定东帮边坡的安全储备系数为1.2。

基于工程地质条件的变化情况及地质信息的掌握程度,以基本垂直于煤层底板等高线为原则,选取首采区的东帮边坡稳定性计算剖面位置,如图2所示。针对东帮边坡的潜在滑坡模式,采用刚体极限平衡法中的Bishop法和剩余推力法对原设计到界边坡的稳定性进行分析。基于该露天矿边坡稳定性评价及形态优化结果,以境界剥采比不大于经济剥采比8.0 m³/t为准则,确定各剖面开采境界的工程位置,并对上述工程位置的边坡稳定性进行评价。开采境界优化后,东帮设计到界边坡的稳定性分析结果见表2。

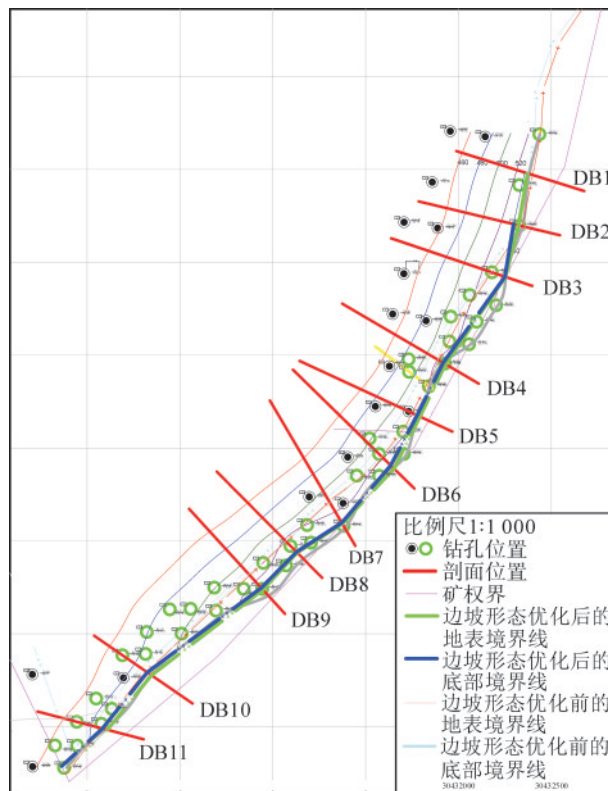


图2 首采区东帮典型计算剖面平面位置

Fig.2 typical calculation section plane location map of the east side of the first mining area

表2 优化后开采境界位置边坡稳定性分析结果

Tab.2 results of slope stability analysis at optimized mining boundary position

剖面	地表境界(距矿权界)/m	底部境界(距矿权界)/m	平盘宽度/m	边坡高度/m	边坡角/(°)	稳定系数	境界剥采比/(t·m ⁻³)
DB1	132	145.06	8	13.9	46.8	1.537	7.483
DB2	41	46.47		15.0	70.0	1.483	7.803
DB3	0	72.93	8、24	46.5	32.5	1.203	3.364
DB4	64	91.94	8	32.8	49.6	1.542	7.803
DB5	32	58.43	8	28.7	47.3	1.240	7.878
DB6	28	32.13		11.3	70.0	1.700	7.663
DB7	15	27.70	8	12.9	45.5	1.590	7.789
DB8	63	67.37		12.0	70.0	1.643	7.826
DB9	161	166.71		15.7	70.0	1.645	7.543
DB10	84	110.00	8	27.5	46.6	1.382	7.951
DB11	180	224.00	8	54.9	51.3	1.344	7.974

(2) 东帮到界边坡三维稳定性分析

根据边坡二维稳定性分析结果可知，当大部分边坡平盘宽度留设为 8 m 时，稳定系数可满足安全储备系数的要求，仅 DB3 剖面区域的边坡需对平盘进行加宽并实施缓坡处理。考虑到深部开采边坡的三维支挡效应明显，可以在二维边坡形态优化的基础上，通过缩短 526 m 标高平盘宽度进一步增大边坡角。DB3 剖面 526 m 标高的平盘宽度为 24 m，边坡角为 32.5°。因此，为分析不同追踪距离以及 526 m 标高平盘不同宽度下的边坡三维稳定性，以获得最优的边坡空间形态，设计了三维模拟方案，见表 3，每个方案对应 5 个追踪距离（50 m、100 m、200 m、300 m、400 m），总计 3 组模拟方案，共建立 15 个模拟模型。

表3 DB3东帮到界边坡形态优化方案

Tab.3 optimization scheme of slope form from DB3 east side to boundary

方案序号	526 m 标高平盘宽度/m	边坡角/(°)
1	24	32.5
2	19	34.0
3	16	35.0

采用基于有限差分原理的 FLAC^{3D} 软件开展数值模拟^[12-15]。首先，在 CAD 中进行二维断面设计，然后在工业设计软件 Rhino 中建立三维模型，利用

Rhino 中网格划分工具 Griddle 进行网格划分并生成网格文件用于 FLAC^{3D} 的计算。为体现端帮边坡的三维效应，分别以 3 组研究方案为模拟对象，建立压帮至地表时不同追踪距离的边坡三维模拟模型。每个模型由东帮、采场工作帮和内排土场组成，追踪距离分别为 50 m、100 m、200 m、300 m 和 400 m。内排土场坡面角 Φ 、工作帮坡面角 β 保持不变（工作帮最小工作平盘宽度为 60 m，内排土场最小工作平盘宽度为 60 m，工作帮坡面角 β 为 70°、内排土场坡面角 Φ 为 33°），只改变工作帮与内排土场之间的追踪距离 L 以及 526 m 标高平盘宽度。为避免边界效应对结果的影响，根据 Goodman 建议设计模型尺寸，将东帮、采场工作帮与内排土场设为自由面，四周设置水平位移约束，底部设置垂直位移约束^[16-17]，东帮到界边坡三维模型见图 3。3 种方案的二维位移云图见图 4~图 6。

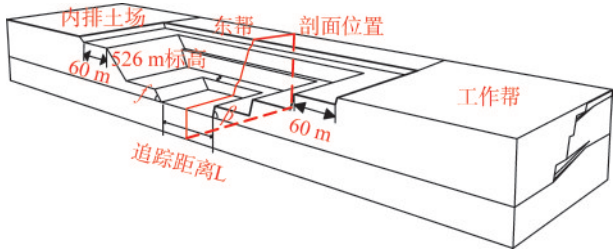


图3 东帮到界边坡三维模型

Fig.3 3D model of the slope to the boundary of the east side



(a) 追踪距离为 50 m



(b) 追踪距离为 100 m

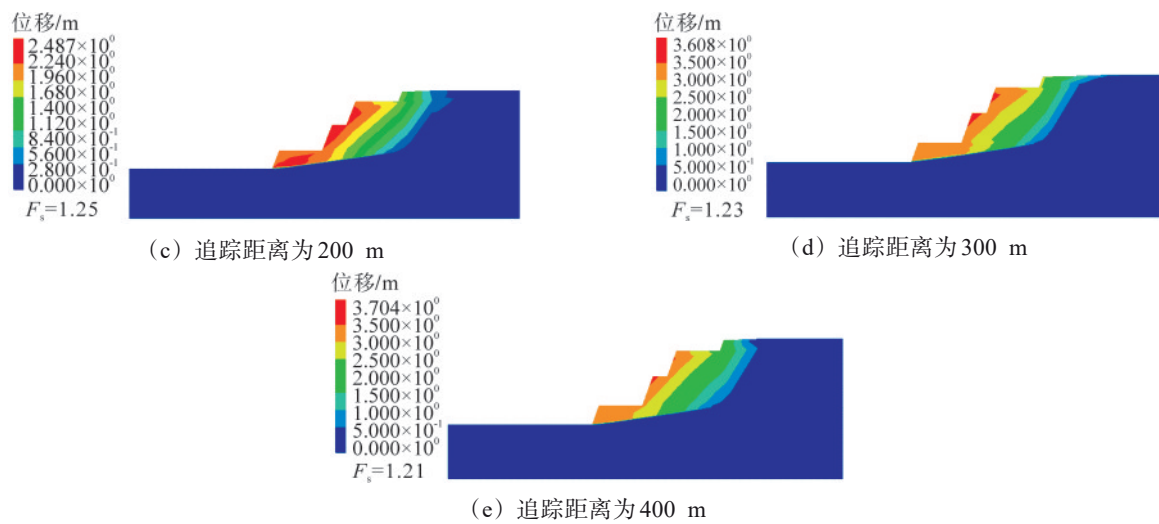


图4 DB3剖面方案1二维位移云图

Fig.4 2D displacement cloud image of scheme 1 of DB3 profile

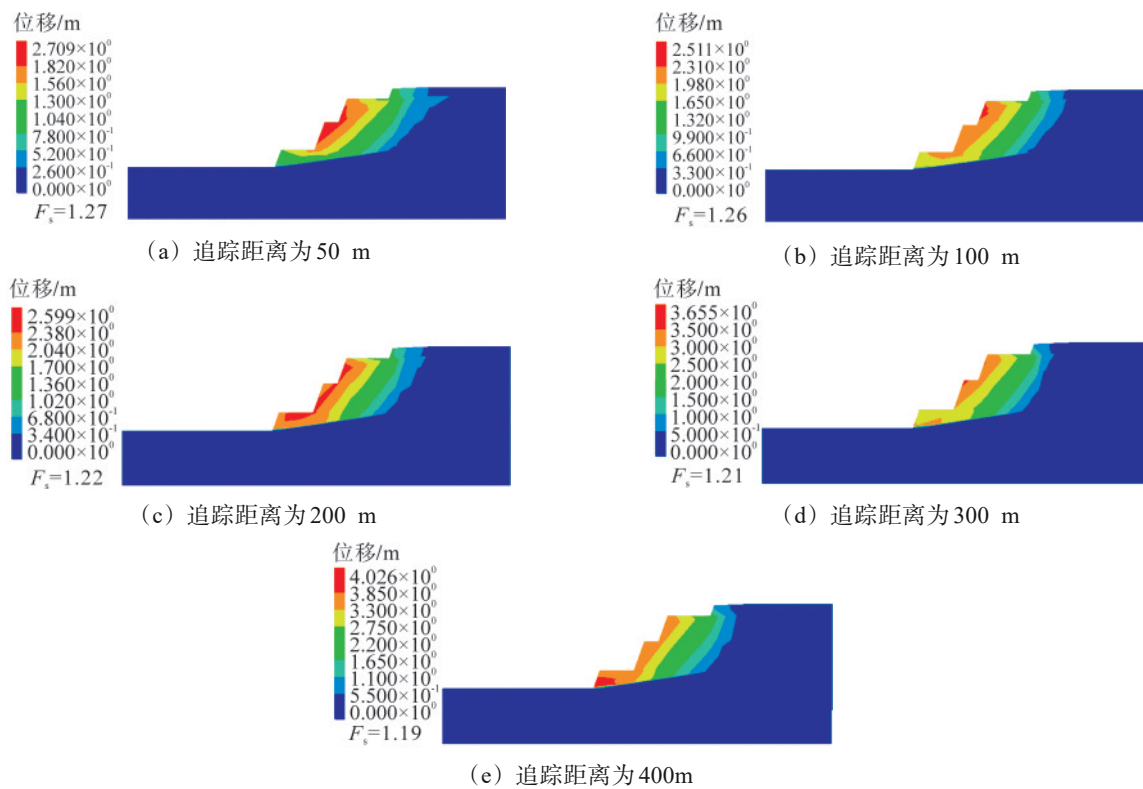
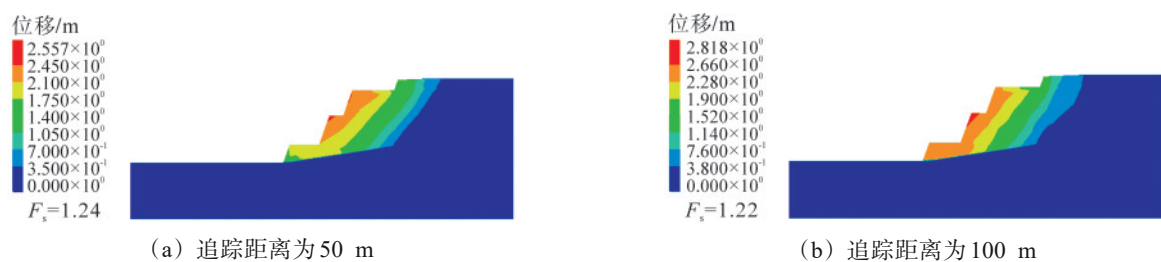


图5 DB3剖面方案2二维位移云图

Fig.5 2D displacement cloud image of scheme 2 of DB3 profile



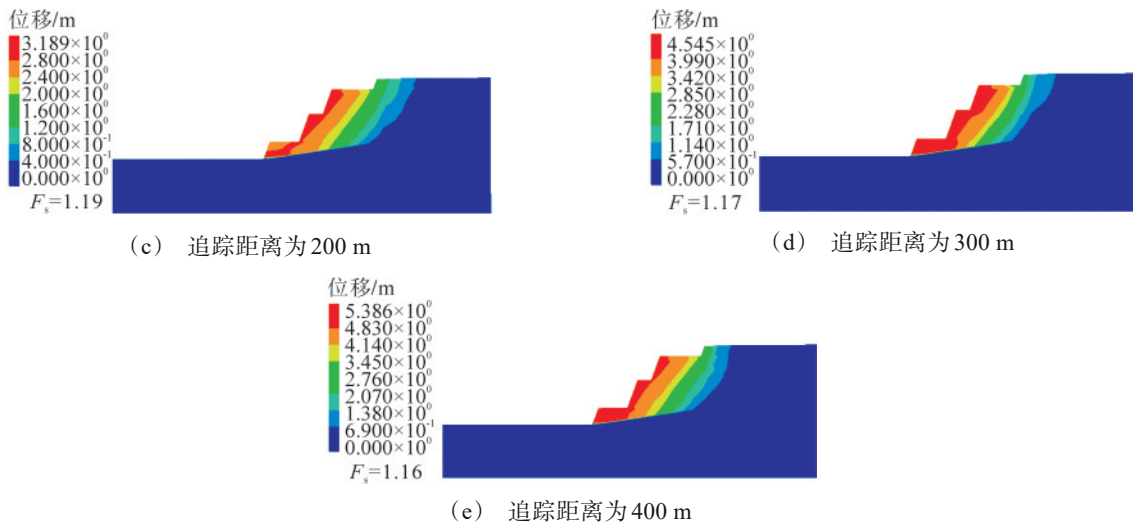


图6 DB3剖面方案3二维位移云图
Fig.6 2D displacement cloud image of scheme 3 of DB3 profile

根据上述DB3剖面3种方案的模拟结果,得到不同追踪距离条件下边坡临界失稳时的变形破坏特征及稳定性系数的变化规律,模拟结果见图7和表4。根据图7中追踪距离(x)与端帮边坡稳定系数 F_s (y)的拟合曲线关系表达式可知,边坡稳定性与追踪距离呈负相关,即随着追踪距离的增大,边坡稳定性逐渐降低。模拟结果表明,随着追踪距离的增大,三维支挡效应逐渐减弱,滑体范围逐渐扩大,边坡稳定性逐渐降低,边坡稳定性与边坡角、追踪距离呈负相关^[18-20]。二维位移云图显示,潜在滑坡模式为以 B_0 煤底板为底界面的切层-顺层滑动,与二维极限平衡法的计算结果基本一致,且滑裂面的位置与形态较为接近,表明计算结果具有较高的可靠性。当追踪距离为50 m和100 m时,方案3满足安全储备系数1.2的要求,边坡角为 35° 。为同时满足开采设备的工作条件、减少运输距离并有效控制边坡稳定性,最终确定追踪距离为50 m。

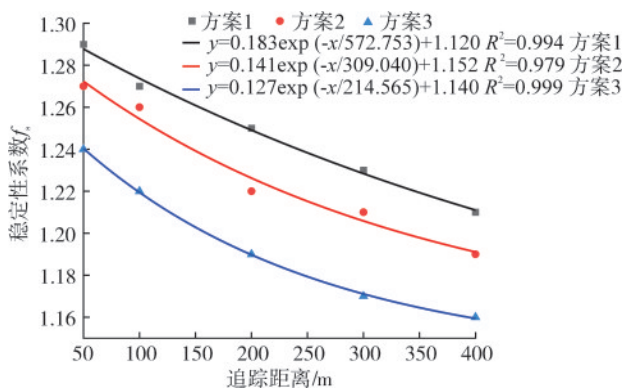


图7 追踪距离对边坡稳定性的影响

Fig.7 influence of tracking distance on slope stability

表4 东帮三维稳定性分析结果

Tab.4 results of three-dimensional stability analysis
of east side

方案	边坡角 $\beta(^{\circ})$	不同追踪距离的稳定性系数				
		50 m	100 m	200 m	300 m	400 m
1	32.5	1.29	1.27	1.25	1.23	1.21
2	34.0	1.27	1.26	1.22	1.21	1.19
3	35.0	1.24	1.22	1.19	1.17	1.16

2.2 内排土场工作线布置

(1) 空间几何计算模型绘制

基于倾斜煤层露天矿内排追踪压帮控制工程条件及三维几何模型,计算模型俯视图见图8。模型分为I区和II区两个区域,通过3Dmine软件中的扩展台阶功能绘制I区的内排土场工作线。由于II区需考虑内排空间利用最大化,因此建立如图9所示的空间几何模型进行计算,图中 θ_p 表示内排土场工作线与端帮的夹角。

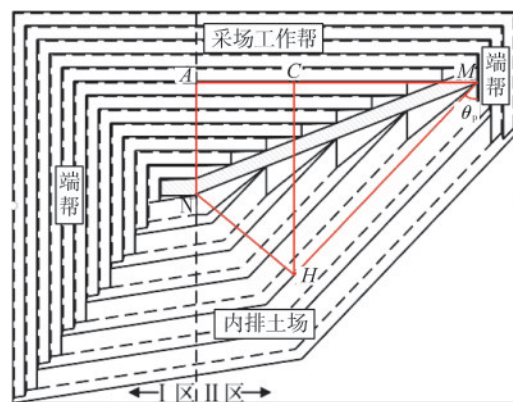


图8 计算模型分区

Fig.8 partition of calculation model

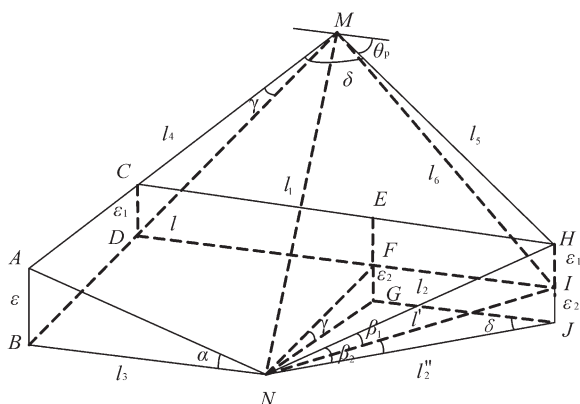


图9 空间几何计算模型

Fig.9 space geometry calculation model

空间几何计算模型见图9。图9中,设内排土场工作线布置方向为 θ_p (排土工作线与端帮的夹角),采场工作帮边坡角为 α ,内排土场边坡角为 β ,基底倾角为 γ 。设排土场最下面台阶在基底处的尖灭点为 N ,内排土场与东帮台阶交线处的最下点为 M ,连接 MN ,长记为 l_1 ;过点 M 和 N 分别作东帮和采场工作帮的垂线,平面交点为 A ,过 A 点向下作垂线与基底交点为 B ,连接 MB 、 NB , AB 长记为 ε , MB 长记为 l , MA 长记为 l_4 ;过点 M 、 N 分别作内排土场工作线的平行线和垂线,平面交点为 H ,连接 MH 和 NH ,长分别记为 l_5 和 l_2 ;过点 H 作垂线与基底交于点 I ,连接 HI 、 MI 和 NI ,长分别记为 ε_1 、 l_6 和 l_2'' ,将与点 N 同一标高处的点记为 J ,连接 NJ 和 IJ ,长分别记为 l_2' 和 ε_2 ;记 $\angle HNI$ 为 β_1 , $\angle JNI$ 为 β_2 ;过点 H 和 I 分别作 AM 和 BM 的垂线交于点 C 和 D ;过 N 点作竖直面垂直于东帮,与基底交线为 NF ,与 CH 线交于点 E ,与 DI 线交于点 F ,过点 F 向下作垂线,将与点 N 同一标高处的点记为 G , $FG=IJ=\varepsilon_2$,记 $\angle FNG$ 为基底倾角 γ 。

(2) 排土线布置方法

设 N 点与Ⅱ区东帮最下面台阶坡底线的标高差为 ε ,则有

$$\begin{cases} l_1' = \varepsilon \cot \beta \\ l_3 = \varepsilon \cot \alpha \\ \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \end{cases} \quad (1)$$

在 $\triangle FNG$ 、 $\triangle GNJ$ 与 $\triangle INJ$ 中有三角函数关系

$$\begin{cases} l_2'' = \varepsilon_2 \cot \beta_2 \\ l_7 = \varepsilon \cot \gamma \\ \sin \delta = l_7 / l_2'' \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)得

$$\sin \delta = \tan \beta_2 \cot \gamma. \quad (3)$$

同理在 $\triangle ABM$ 、 $\triangle MBN$ 与 $\triangle ABN$ 中有三角函数关系

$$\begin{cases} l = \varepsilon \cot \gamma \\ l_3 = \varepsilon \cot \alpha \\ l_1^2 = l^2 + l_3^2 \end{cases} \quad (4)$$

在 $\triangle HNJ$ 、 $\triangle HMI$ 中有三角函数关系

$$\begin{cases} l_2 = \varepsilon / \sin \beta \\ l_3^2 = l_1^2 - l_2^2 \end{cases} \quad (5)$$

联立式(4)、式(5)得

$$l_3^2 = (\varepsilon \cot \alpha)^2 + (\varepsilon / \sin \gamma)^2 - (\varepsilon / \sin \beta)^2. \quad (6)$$

在 $\triangle CDM$ 、 $\triangle HCM$ 中有三角函数关系

$$\begin{cases} l_4 = \varepsilon_1 \cot \gamma \\ \cos \delta^2 = l_4^2 / l_5^2 \end{cases} \quad (7)$$

在 $\triangle HNJ$ 、 $\triangle INJ$ 中由三角函数关系,并与式(1)、式(2)联立得

$$\varepsilon_1 = \varepsilon - \varepsilon_2 = \varepsilon - \varepsilon \tan \beta_2 \cot \beta. \quad (8)$$

由于 δ 与 θ_p 互为余角,因此

$$\delta + \theta_p = 90^\circ. \quad (9)$$

联合式(3)、式(6)~式(9),内排土场工作线布置方向 θ_p 的表达式为

$$\sin \theta_p^2 = \frac{(\cot \gamma - \cos \theta_p \cot \beta)^2}{\cot^2 \alpha + \cot^2 \gamma - \cot^2 \beta}. \quad (10)$$

由式(10)可知,当 $\theta_p=0^\circ$ 时, $\gamma=\beta$ 。即若要实现内排空间利用最大化,基底倾角 γ 应小于内排土场边坡角 β 。

根据补勘方案结果,首采区东帮补充勘探线以南的内排土场基底倾角约为 11.5° ,内排土场边坡角设计为 17.7° ,采场工作帮边坡角设计为 35.0° 。对露天煤矿完全实现内排后进行工程推演,采场工作线与端帮垂直布置,设计两种方案:①内排土场工作线与采场工作线平行发展;②控制追踪距离并充分利用内排空间,采场工作线横向发展,内排土场工作线斜向发展。方案①可直接应用3DMine软件绘制剥采工程平面图,如图10(a)所示。方案②需将采场工作帮边坡角和内排土场边坡角等参数代入式(10),求得内排土场工作线布置方向为 22.0° 。应用3DMine软件,可简捷、

精确地绘制内排追踪压帮控制开采工程平面图,如图 10 (b) 所示。通过对两种方案的内排量进行

对比计算可知,内排土场工作线斜向发展的方案②比方案①多利用约 4 745 万 m³ 的内排空间。

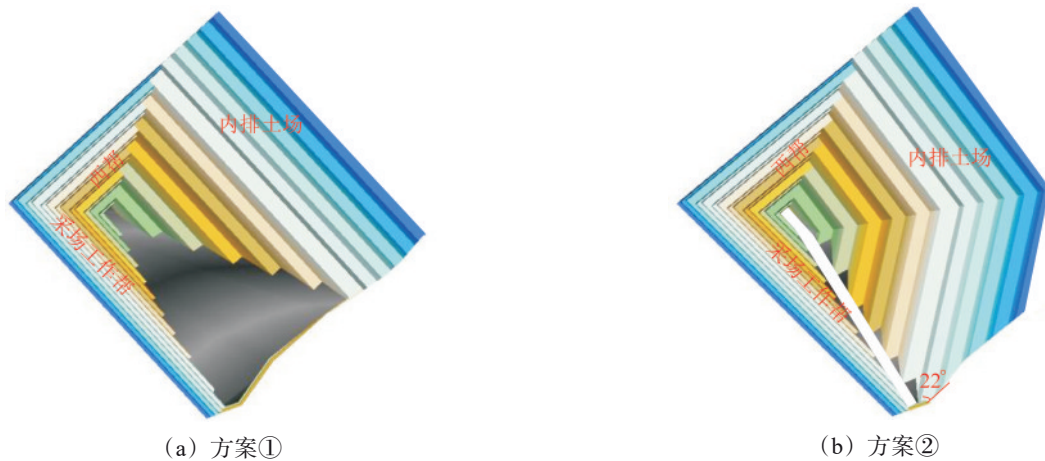


图 10 剥采工程方案

Fig.10 stripping engineering plan

根据年度内、外排土场的运距和提升高程数据预测排土费用,其中内排土场运距为 6 001.75 m,提升高程为 88 m;外排土场运距为 8 527 m,提升高程为 153.75 m。排土费用基础单价为 8.65 元/m³,平均运距每增加 50 m 时单价调整值为 0.03 元/m³,平均高程每增加 5 m 时单价调整值为 0.331 元/m³。

排土费用见表 5。若将多利用的排土空间用于外排土场排土,运输费用约为 112 823.1 万元;若用于内排土场排土,则运输费用约 85 738.64 万元,相比之下可节省运输费用约 27 084.46 万元。因此,采用倾斜内排追踪压帮控制开采方案,实现了安全保障与经济效益的双重提升。

表 5 排土费用

Tab.5 discharge costs

排土方式	年度基础单价 /(元·m ⁻³)	平均运距单价调整 /(元·m ⁻³)	平均高程单价调整 /(元·m ⁻³)	年度综合单价 /(元·m ⁻³)	排土体积/(10 ⁴ ·m ³)	运输费用/万元
外排	8.65	0.03	0.331	23.78	4 745	112 823.10
内排	8.65	0.03	0.331	18.07	4 745	85 738.64

3 结论

(1) 二维稳定性分析结果表明:当多数边坡平盘宽度留设为 8 m 时,稳定性系数可满足安全储备系数 1.2 的要求,仅 DB3 剖面区域的边坡需对平盘进行加宽并实施缓坡处理。

(2) 三维数值模拟结果表明:随着追踪距离的增大,三维支挡效应逐渐减弱,滑体范围逐渐扩大,边坡稳定性逐渐降低。当追踪距离控制在 100 m 以内时,DB3 剖面区域的边坡角可提高至 35°。综合考虑运距及开采设备等要求,最终确定追踪距离控制在 50 m。

(3) 通过倾斜内排追踪压帮控制边坡稳定开采方案,确定了倾斜排土线布置方向角度。该方案不仅提高了东帮的稳定性,还增加了内排空间,创造

经济效益约 27 084.46 万元,实现了安全保障与经济效益的协同提升。

参考文献(References):

- [1] 宋子岭,刘文坊,范军富,等.倾斜基底内排土场边坡稳定性分析[J].金属矿山,2018(2):179-183.
SONG Ziling, LIU Wenfang, FAN Junfu, et al. Analysis of the inner dumping slope stability with inclining basement[J]. Metal Mine, 2018 (2):179-183.
- [2] 李浩荡,余长超,周永利,等.我国露天煤矿开采技术综述及展望[J].煤炭科学技术,2019,47(10):24-35.
LI Haodang, SHE Changchao, ZHOU Yongli, et al. Summary and prospect of open-pit coal mining technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10):24-35.
- [3] 张禹,黄浩轩.哈尔乌素露天煤矿内排土场增高扩容可行性分析[J].中国煤炭,2024(7):70-76.
ZHANG Yu, HUANG Haoxuan. Feasibility analysis of height increase and capacity expansion of inner dump in Haerwusu open-

- pit coal mine[J].China Coal,2024,50(7):70-76.
- [4] 曹兰柱,李广贺,王东,等.露天矿顺倾软弱基底内排土场边坡空间形态优化[J].煤炭科学技术,2018,46(2):163-167.
- CAO Lanzhu, LI Guanghe, WANG Dong, et al. Optimization on spatial morphology slope of in pit dumping site at inclined weak-basement of surface mine[J].Coal Science and Technology,2018,46(2):163-167.
- [5] 周永利,黄浩轩,翟正江,等.露天矿内排土场堆叠过程中边坡形态优化[J].煤矿安全,2019,50(6):263-265,271.
- ZHOU Yongli, HUANG Haoxuan, ZHAI Zhengjiang, et al. Optimization design of slope shape during stacking process of inner dump in open pit mine[J].Safety in Coal Mines,2019,50(6):263-265,271.
- [6] 王胜利,杜明翰.新疆天池南露天矿内排土场高段排土边坡稳定性分析及排土方案[J].露天采矿技术,2023,38(5):78-81,85.
- WANG Shengli, DU Minghan. Analysis of dumping slope stability and dumping scheme of internal dump in Xinjiang Tianchi South open-pit mine[J].Opencast Mining Technology,2023,38(5):78-81,85.
- [7] 王东,李广贺,曹兰柱,等.元宝山露天矿内排土场压脚挂帮并行建设方案[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2019,38(4):289-294.
- WANG Dong, LI Guanghe, CAO Lanzhu, et al. Study on parallel construction plan of the inner dump by the pressing foot and the hanging wall in Yuanbaoshan open-pit coal mine[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2019,38(4):289-294.
- [8] 张亮,丁小华,曹智勇.近水平单一煤层露天矿端帮内排方案优化研究[J].煤炭科学技术,2017,45(4):45-49.
- ZHANG Liang, DING Xiaohua, CAO Zhiyong. Study on optimization of internal dumping of end wall for nearly horizontal open-pit coal mine with single coal seam[J].Coal Science and Technology,2017,45(4):45-49.
- [9] 李广贺,王东,曹兰柱.横采内排追踪压帮高度对端帮稳定性影响研究[J].安全与环境学报,2019,19(1):191-195.
- LI Guanghe, WANG Dong, CAO Lanzhu. Influence of the covering height on the stability of the end slope in the condition of the criss-cross-way exploitation with inner dumping[J].Journal of Safety and Environment,2019,19(1):191-195.
- [10] 王东,李广贺,曹兰柱,等.基于内排空间利用最大化的露天煤矿排土线布置方法[J].煤炭学报,2020,45(9):3150-3156.
- WANG Dong, LI Guanghe, CAO Lanzhu, et al. Method for arranging the working line of internal waste dump in surface coal mining based on maximizing utilization[J].Journal of China Coal Society,2020,45(9):3150-3156.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部.煤炭工业露天矿设计规范:GB50197—2015[S].北京:中国计划出版社,2022.
- [12] 张元杰.FLAC3D在露天矿边坡稳定性分析中的应用[J].煤矿现代化,2017,26(5):99-100,103.
- ZHANG Yuanjie. The application of FLAC3D methods on slope stability analysis in the opencast mine[J].Coal Mine Modernization,2017(5):99-100,103.
- [13] 张其唯,马淑芝,贾洪彪.矿山排土场稳定性评价的FLAC^{3D}方法和刚体极限平衡法对比分析[J].矿业研究与开发,2015,35(6):45-48.
- ZHANG Qiwei, MA Shuzhi, JIA Hongbiao. Comparison and analysis of FLAC^{3D} method and equilibrium limit method in stability evaluation of mine waste dump[J].Mining Research and Development,2015,35(6):45-48.
- [14] 蓝宇.基于数值模拟的露天矿排土场高陡边坡稳定性分析与治理[J].矿业研究与开发,2023,43(3):77-82.
- LAN Yu. Stability analysis and treatment of high and steep slope in open-pit dump based on numerical simulation[J].Mining Research and Development,2023,43(3):77-82.
- [15] 杨志斌.基于蠕变试验下高边坡稳定性模拟研究[J].西安科技大学学报,2023,43(5):988-999.
- YANG Zhibin. Simulation study on stability of high slopes based on creep test[J].Journal of Xi'an University of Science and Technology,2023,43(5):988-999.
- [16] 陈高峰,卢应发,程圣国.边坡稳定性影响因素主成分分析[J].金属矿山,2008(4):123-125,154.
- CHEN Gaofeng, LU Yingfa, CHENG Shengguo. Principal component analysis of influence factors of slope stability[J].Metal Mine,2008(4):123-125,154.
- [17] 李如仁,苏宇祺.基于时序InSAR技术的山区高速公路挖方边坡监测[J].山东科技大学学报(自然科学版),2024,43(6):34-42.
- LI Ruren, SU Yuqi. Monitoring of excavation slopes of mountainous expressways based on time series InSAR technology [J].Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science),2024,43(6):34-42.
- [18] 徐晓惠,姚再兴.内排压脚与边坡稳定性的关系[J].安全与环境学报,2015,15(2):71-76.
- XU Xiaohui, YAO Zaixing. Study on the relationship between the slope stability and the pressing foot by using the internal dumping [J].Journal of Safety and Environment,2015,15(2):71-76.
- [19] 王东,潘子龙,胡富国,等.顺倾软弱起伏基底内排土场边坡稳定性影响因素分析[J].煤炭科学技术,2023,51(增刊1):1-8.
- WANG Dong, PAN Zilong, HU Fuguo, et al. Analysis of the Inner dumping slope stability factors affecting with soft rolling and inclined basement[J].Coal Science and Technology,2023,51(Suppl. 1):1-8.
- [20] 于远祥,秦光,陈盼.露天矿烧变岩高边坡卸荷机理与稳定性研究[J].西安科技大学学报,2023,43(5):941-951.
- YU Yuanxiang, QIN Guang, CHEN Pan. Study on unloading mechanism and stability of high rock slope in burnt rock open-pit mine[J].Journal of Xi'an University of Science and Technology,2023,43(5):941-951.