



煤炭科学技术 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

煤炭科学技术

顺倾软弱起伏基底内排土场边坡稳定性影响因素分析

王东 潘子龙 胡富国 李苗苗

引用本文:

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(S1): 1–8.
WANG Dong, PAN Zilong, HU Fuguo. Analysis of the Inner dumping slope stability factors affecting with soft rolling and inclined basement[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S1): 1–8.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2525>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

露天矿背斜区内排土场边坡基底处理方式优选研究

Study on optimization of treatment methods for inclined basement of inner dump slope in anticline area of open-pit mine
煤炭科学技术. 2021, 49(2): 77–84 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.010>

降雨工况下露天矿排土场边坡稳定性与治理措施

Stability and control measures of open-pit mine dump slope under rainfall conditions
煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/95733d89-606a-4bea-a203-22a7c886393f>

内排阻水对非工作帮边坡稳定性影响规律研究

Study on influence of water blocking of internal dumping site on stability of non-working slope
煤炭科学技术. 2021, 49(12): 186–191 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/3226e4b6-bfef-4853-b218-8f33ba54dafc>

露天煤矿排土场边坡植被恢复群落稳定性研究

Ecological stability evaluation of revegetation community on open-pit coal mine dump slopes
煤炭科学技术. 2024, 52(1): 334–344 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1933>

露天矿多软弱夹层边坡变形机理与形态优化研究

Study on deformation mechanism and shape optimization of multi-weak interlayer slope in open-pit mine
煤炭科学技术. 2021, 49(6): 189–194 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/7b456f56-e2b1-4a62-8616-889549d00fb0>

基于形态与支挡效应的露天矿到界边坡形态优化

Open-pit mine slope optimization with the morphology and spatial support effect
煤炭科学技术. 2023, 51(4): 66–71 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0781>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

采矿科学与工程



移动扫码阅读

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(S1): 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(S1): 1–8.

顺倾软弱起伏基底内排土场边坡稳定性影响因素分析

王 东, 潘子龙, 胡富国, 李苗苗

(辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 为了更有效地指导内排土场边坡参数的动态优化设计, 最大限度利用内排空间, 结合霍林河南露天矿工程实际, 应用刚体极限平衡法, 分析了边坡形态、基底倾角、断层落差等因素对内排土场边坡稳定性的影响, 获得了规律性认识; 将得到的规律应用于霍林河南露天矿内排土场边坡参数设计, 并应用数值模拟手段进行验证。研究表明: 顺倾软弱起伏基底内排土场边坡稳定性与边坡高度、边坡角、基底倾角呈负相关, 与断层落差呈先降低后升高、与断层相对坡脚距离 L 呈先升高后降低关系; 随着内排土场推进距离的逐渐增加, 边坡滑坡模式由上部边坡沿下盘基底切层–顺层滑动转变为从下部边坡沿上盘基底切层–顺层滑动; 霍林河南露天矿内排土场边坡高度 216 m、边坡角 20° 、基底倾角 5° 的工况下, 断层落差为 30 m 时, 其稳定性系数最小。

关键词: 露天矿; 内排土场; 顺倾基底; 形态优化; 边坡稳定性

中图分类号: TD804

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)S1-0001-08

Analysis of the Inner dumping slope stability factors affecting with soft rolling and inclined basement

WANG Dong, PAN Zilong, HU Fuguo, LI Miaomiao

(College of Mines, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: For the purpose of guiding the dynamic optimized design of side slope parameters of internal dump more effectively, referring to practice of Huolin River South Open-pit Mine, the limit equilibrium method has been utilized to analyze the effect of side slope height, side slope angle, base dip angle and fault throw, and thus the understand of regularity, to the side slope stability of internal dump. The results have then been applied to the design of internal dump side slop of Huolin River South Open-pit Mine with the numerical modelling, so that the verification and following summary are gained: With the gradually increment of dump propulsion distance, the potential slip position of slope will change. Sliding from the upper slope along the bottom of the lower slope would transfer to be sliding along the upper plate base from the lower slope. The side slope height, side slope angle, base dip angle perform negative linear correlation with the side slope stability; Therefore, with the increment of fault throw, the stability would firstly reduce and then raise, which is completely contrary to the relationship to fault relative slope foot distance L ; The stability would reach the minimum under the condition of side slope height, side slope angle and base dip angle equal to 216 m, 20° and 5° respectively; With the difference of fault throw, the distance L , which results in the change of potential landslide mode of dump slope, has also shown difference and increases along the increment of fault throw. As a result, the spatial form of internal dump side slope in downdip undulating basement is clear.

Key words: open-pit mine; inner dump; inclined basement; shape optimization; slope stability

0 引 言

内排土场是近水平、缓倾斜煤层露天开采的必

然产物, 其稳定性关系到矿山安全高效生产^[1]。随着

露天矿产量规模的加大, 外排占地费用随之升高, 为

收稿日期: 2022-10-16

责任编辑: 常 琛

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-2525

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51874160); 辽宁省高等学校创新人才支持计划资助项目(LR2016039); 辽宁省高等学校创新团队支持计划资助项目(LT2018008)

作者简介: 王 东(1978—), 男, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: lntu_wd@163.com

了缩短运距少占土地,降低开采成本,增大经济效益,许多露天煤矿的排弃物料不得不由外排转入内排,内排土场边坡稳定性问题日趋严重,导致发生变形及滑坡灾害频频发生^[2]。如神话宝日希勒露天煤矿、霍林河北露天煤矿内排土场均发生过一定的变形或滑坡现象,给露天矿绿色高效生产带来极大的安全隐患。

近些年来,许多专家学者对边坡稳定性影响因素展开了大量理论与实践探索,取得了丰硕的成果。王东等^[3]通过建立断层作用下滑体的力学模型,推导出顺倾层状边坡分条稳定系数表达式,定量分析断层位置对露天矿顺倾层状边坡稳定性的影响;苏永华等^[4]通过建立降雨入渗分析(LSGA)模型及该模型下边坡稳定性系数表达式来综合考虑湿润层土体含水量分布情况与饱和层内平行于坡面渗流作用对边坡稳定性的具体影响;曹兰柱等^[5-6]采用二维刚体极限平衡与三维数值模拟相结合的方法分析了横采深部开挖角度、内排跟踪距离及断层位置对边坡稳定性的影响;周寿昌^[7]结合我国露天煤矿内部排土经验以及在建露天煤矿的特点,论述了影响内排土场稳定性的排土台阶设置位置和发展方式、地质、水文地质、工程地质等因素。尽管学者们对边坡稳定性影响因素进行了大量研究,但对顺倾软弱起伏基底内排土场边坡稳定性影响因素分析较少,未达到统一的规律性认识。因此,有必要定量分析断层、边坡形态等因素对内排土场边坡稳定性影响规律,用于解决内排土场空间形态优化难题,对实现内排土场安全、高效排土具有重要意义^[8-11]。

综上所述,以霍林河南露天矿内排土场边坡为研究对象,应用刚体极限平衡方法与数值模拟相结合的手段,就顺倾起伏基底排土场边坡稳定性及各项因素对其影响进行分析,揭示内排土场边坡变形特征,设计顺倾起伏基底内排土场边坡空间形态,为类似边坡工程的滑坡防治提供参考。

1 边坡工程地质条件分析

霍林河南露天煤矿年产量为 18 Mt,平均剥采比 $6\text{ m}^3/\text{t}$,年剥离量约为 108 Mm^3 ,内排空间需求量较大。内排土场基底主要由泥岩、不同粒径的砂岩、炭质泥岩、黏土、薄煤层构成。内排土场的基底倾角变化不大,通常在 $0^\circ\sim 10^\circ$,但此研究区域基底受 Fd_{15} 断层影响,形成倾斜起伏内排土场基底。 Fd_{15} 断层走向 NW,倾角 $58^\circ\sim 75^\circ$,最大落差 28 m。典型工程地质剖面如图 1 所示,岩土体物理力学指标见表 1。

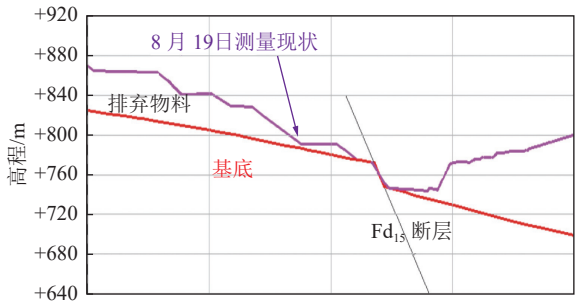


图 1 典型工程地质剖面
Fig.1 Geologic profile of typical engineering

表 1 岩土体物理力学指标
Table 1 Physical and mechanical indexes of rock and soil

岩石	容重 $\gamma/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	黏聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ
排弃物料	1.91	5	24		
砂	1.9	0	20.0~27.5	0.03	0.3
粉质黏土	1.98	32.0	16.87	0.25	0.4
黏土	1.98	18.6	16.03	0.42	0.4

2 顺倾软弱起伏基底内排土场边坡稳定性影响因素定量分析

刚体极限平衡法是当今解决工程实际问题,对边坡稳定性进行定量分析最常用的方法,其基本原理是将岩土体视为刚体,不考虑变形问题,假定滑体各分条块在某种条件下都达到极限平衡状态,将强度折减系数定义为边坡稳定的安全系数。其中简化 Bishop 法是边坡稳定分析考虑土条间相互作用力的圆弧滑动分析法,剩余推力法适用于任意滑面的边

坡稳定性计算,基于这 2 种方法开发二维刚体极限平衡计算软件定量分析内排土场边坡稳定性^[12-14]。

2.1 基底倾角、边坡高度、边坡角对内排土场边坡稳定性影响

结合霍林河内排土场排土状况,确定台阶高度 (24 m)、平盘宽度 (40 m),选择 3 个排弃高度 H (168 m, 216 m, 264 m), 6 个边坡角 $\alpha(15^\circ\sim 20^\circ)$ 和 6 个基底倾角 $\beta(5^\circ\sim 10^\circ)$,分别计算变化坡高 H 、边坡角 α 和基底倾角 β 情况时内排土场边坡稳定性,计算结果如图 2—图 4 所示。

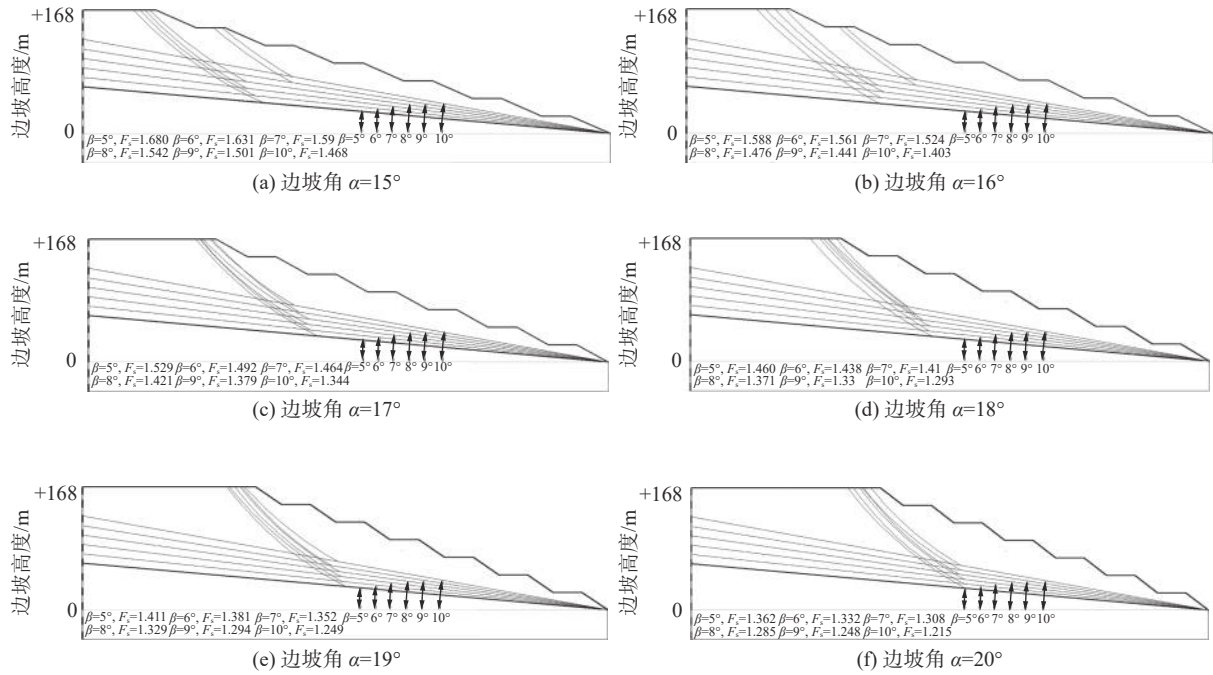


图 2 边坡稳定性在排弃高度 168 m 时的计算结果

Fig.2 Slope stability calculation results at discharge level 168 m

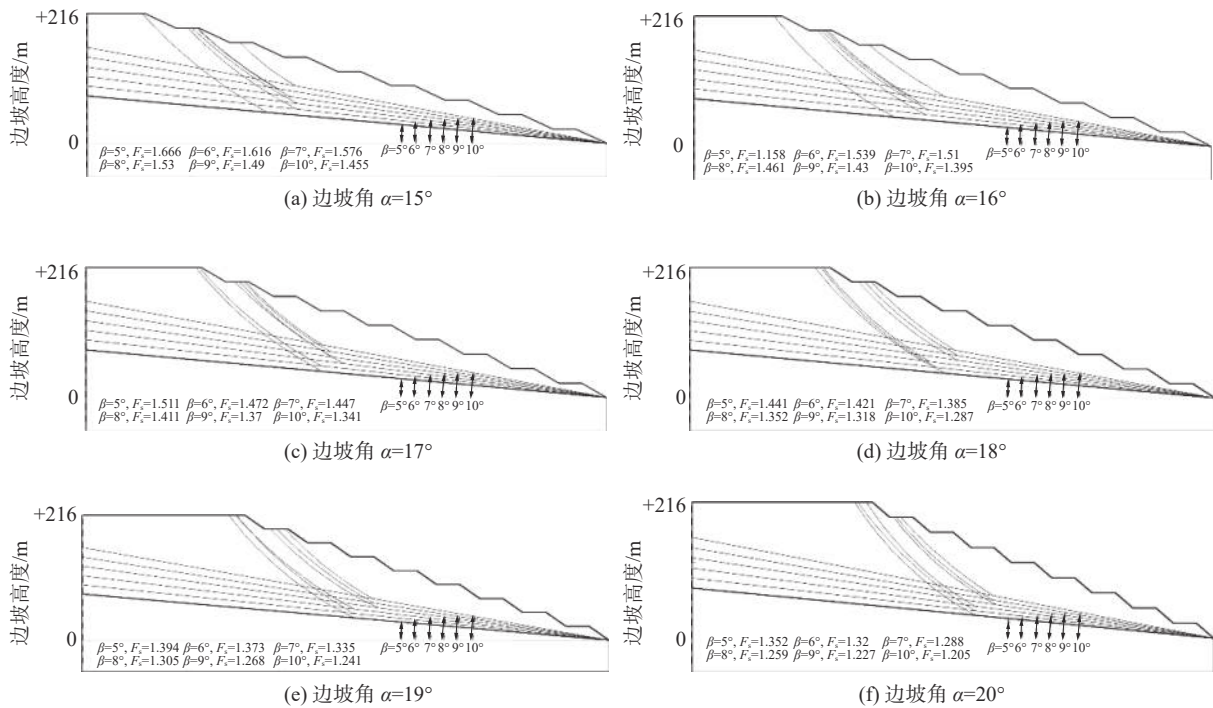


图 3 边坡稳定性在排弃高度 216 m 时的计算结果

Fig.3 Slope stability calculation results at discharge level 216 m

由图 2 ~ 4 可知,在不同边坡高度条件下,边坡稳定性系数随着基底倾角与边坡角的增大而降低,内排土场边坡稳定性明显降低,两者全部近似成线性关系,前者基底倾角每增加 1° ,边坡稳定性平均降低 0.035,后者边坡角每增大 1° ,边坡稳定性平均降

低 0.056,并且通过图 5 得出,相对于基底倾角而言,边坡稳定性系数对边坡角更加敏感(即下降梯度 $\Delta F_s / \Delta \alpha > \Delta F_s / \Delta \beta$)。边坡稳定性随着边坡高度的增加而降低,同时关注下降梯度 ($\Delta F_s / \Delta H$) 可以发现,通过降低边坡高度来提高边坡稳定性的相对效果较差。

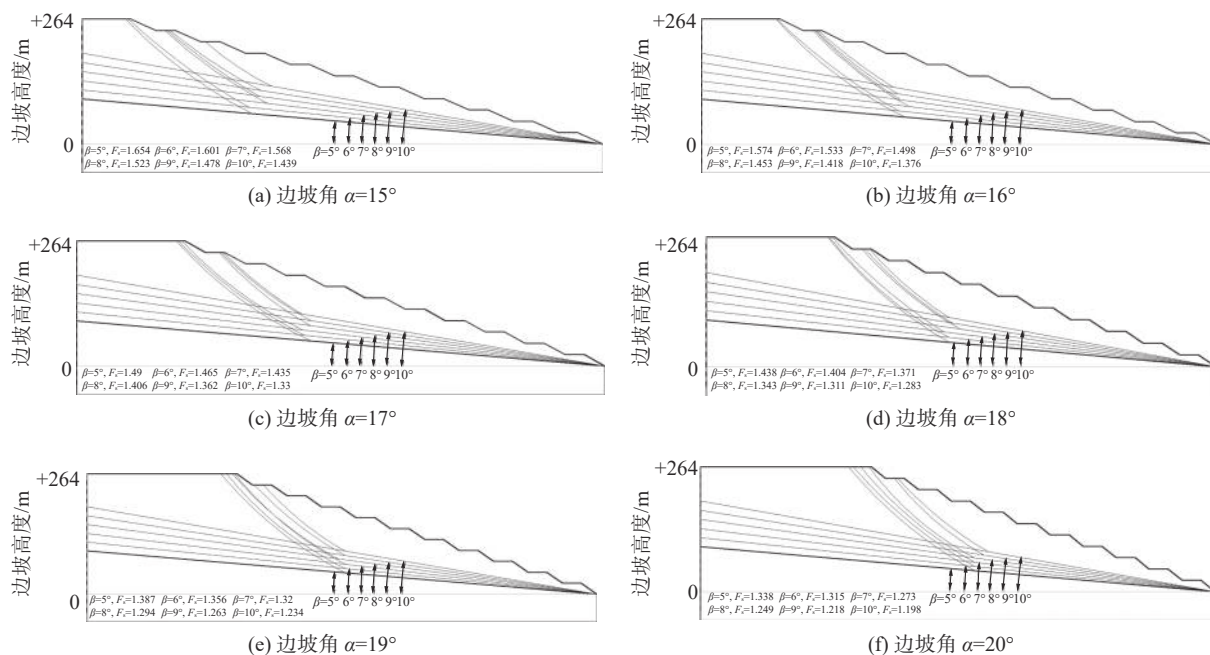


图4 边坡稳定性在排弃高度264 m时的计算结果

Fig.4 Slope stability calculation results at discharge level 264 m

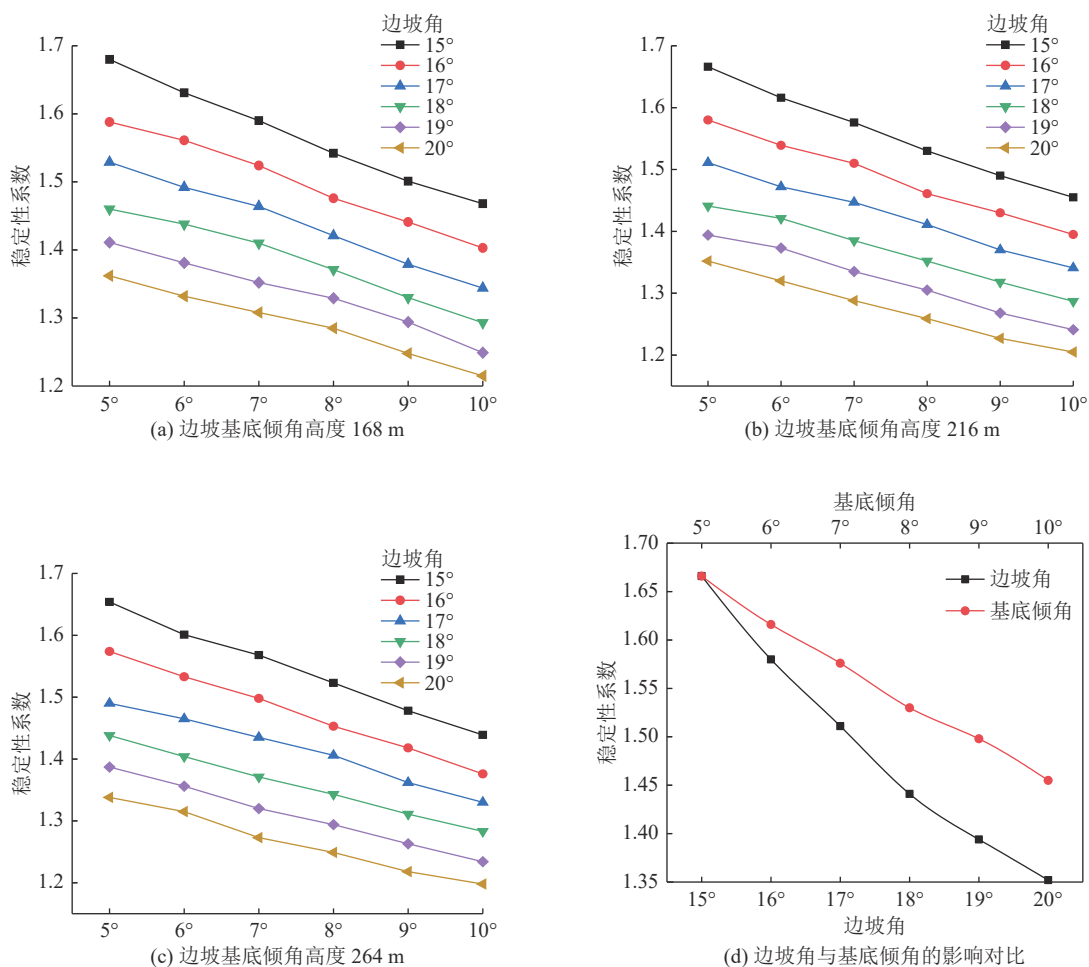


图5 边坡稳定性在排弃标高不同的条件下与边坡角、基底倾角的关系

Fig.5 Relation of slope stability with basal angle and slope angle based on different discharge level

2.2 断层对内排土场边坡稳定性影响

基底形态是影响内排土场稳定性的重要因素之一,而基底断层的相对位置显著改变了排土场基底形态,进而影响排土场边坡稳定性^[15-17]。

在之前研究排土场边坡的 3 个影响因素(边坡高度、边坡角、基底倾角)的基础上,固定边坡高度 $H=216\text{ m}$, 边坡角 $\alpha=20^\circ$, 基底倾角 $\beta=5^\circ$ 和断层倾角 60° , 单独对基底断层与排土场边坡的相对空间位置关系对内排土场边坡稳定性的影响展开研究, 分别计算改变断层落差 $h(20\text{ m}, 30\text{ m}, 40\text{ m})$ 和断层与内排土场边坡坡底线水平距离 $L(100\text{ m}, 150\text{ m}, 200\text{ m}, 250\text{ m}, 300\text{ m}, 350\text{ m})$ 条件下边坡稳定性, 计算结果如图 6 所示。

通过图 6 可知, 内排土场边坡被断层切分为上下两部分, 对于上部边坡而言, 边坡潜在滑坡模式为沿着基底滑动, 然后切穿排土场, 下部边坡潜在滑坡模式为切层-顺层滑动。随着排土场推进距离的逐渐增加, 边坡潜在滑动位置会发生改变, 从上部边坡沿下盘基底切层-顺层滑动转变为从下部边坡沿上盘基底切层-顺层滑动。通过表 2 中的数据得出, 边坡稳定性随着断层落差的增加先降低后升高, 随着断层相对坡脚距离 L 的增加先升高后降低。据此得出, 在边坡高度 216 m 、边坡角 20° 、基底倾角 5° 的情况下, 断层落差为 30 m 时, 稳定性系数最低。

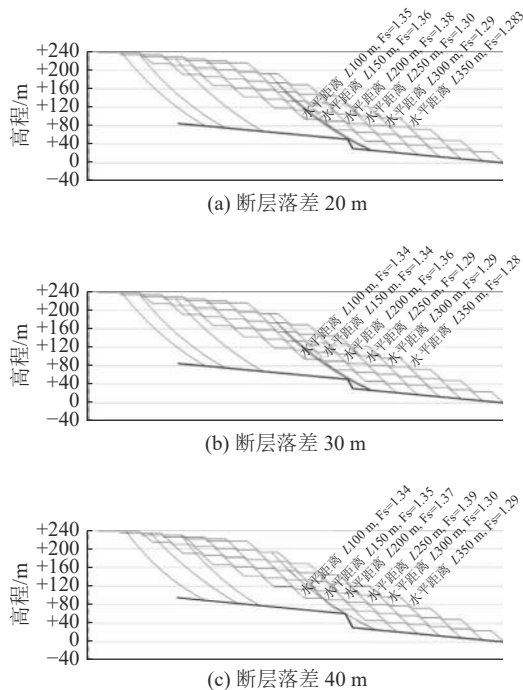


图 6 变化断层落差与相对位置条件下内排土场边坡稳定性计算结果

Fig.6 Calculation results of stability of internal dump slope under varying fault drop and relative position

表 2 不同空间位置断层的边坡稳定性计算结果
Table 2 Calculation results of slope stability in different spatial positions of faults.

L/m	不同边坡高度下 h/m					
	100	150	200	250	300	350
20	1.35	1.36	1.38	1.3	1.29	1.283
30	1.34	1.34	1.36	1.29	1.29	1.28
40	1.34	1.35	1.37	1.39	1.3	1.29

3 边坡空间形态优化及模拟分析

3.1 排土场发展至不同工程位置的边坡形态设计

根据中国矿业大学编制的《霍林河南露天矿开采程序的优化研究》报告确定霍林河南矿内排标高为 $+926\text{ m}$, 台阶高度 24 m 。内排土场边坡稳定性分析时, 选取了 1 个工程位置设计内排土场沿煤层底板推进不同距离时内排土场极限边坡形态, 使得内排土场边坡达到极限位置状态时仍然能够保持稳定。

内排土场基底被正断层 F_{d15} 切断, 断层与上下盘交线落差 23.66 m , 断层倾角 55.09° , 断层倾向与边坡倾向一致。基底被断层切断成上下 2 部分, 上部分基底倾角 $5^\circ \sim 6.3^\circ$, 变化较小, 下部分基底倾角 9.28° 。剖面排土场形态设计至推进距离 300 m 处。排土场边坡形态从紧邻断层位置处开始向前推进 300 m 距离时结束。分别设计各阶段排土台阶高度、平盘宽度以及边坡角, 使其满足安全储备系数。剖面发展至不同工程位置极限边坡形态结果如图 7 所示。

内排土场边坡从边坡紧邻断层位置开始, 推进至不同工程位置时各个阶段参数见表 3, 使边坡形态达到极限状态, 满足安全储备系数, 此时内排土场边坡推进至不同工程位置内排空间最大, 实现经济效益最大化。在顺倾起伏基底排土场向前发展过程中, 边坡稳定性系数呈先增大后减小的规律。通过图 8 可知, 在此剖面推进过程中, 保持边坡稳定性系数近似不变, $F_s \approx 1.20$, 随推进距离增加边坡角呈先增大后减小的规律, 此时验证了顺倾起伏基底内排土场向前发展过程中边坡稳定性随断层相对坡脚距离的增加先增大后减小的规律。

3.2 内排土场发展至不同工程位置的边坡形态模拟分析

刚体极限平衡法最大缺点是计算精度粗糙, 过程复杂, 并且在计算过程中未考虑岩土体内部应力-应变关系, 无法深入分析边坡岩土体内部变形的破坏过程^[18]。因此, 对于复杂的变形破坏机制, 采用数

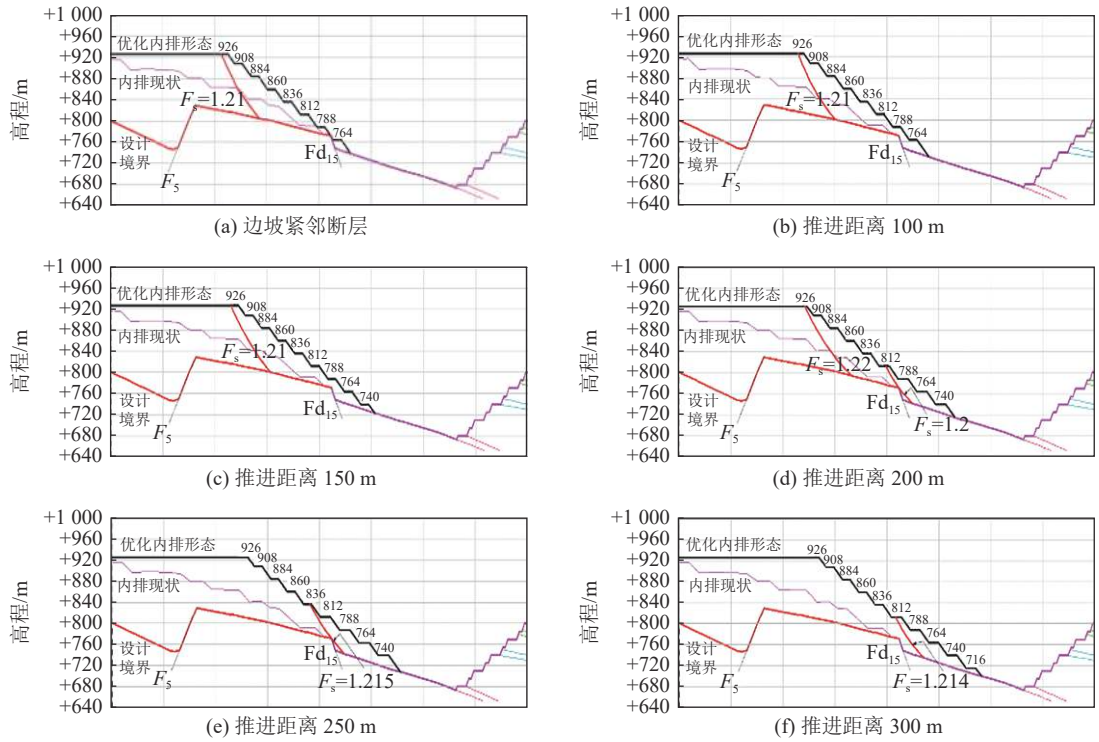


图 7 剖面发展至不同工程位置的极限边坡形态
Fig.7 Profile slope shape in different propelling position

表 3 剖面发展至不同工程位置的内排土场边坡参数

Table 3 Profile of the dump slope developed from different sections to different engineering locations

推进位置	台阶数量	最后一个台阶高度/m	平盘宽度/m	边坡角/(°)	稳定性系数
边坡紧邻断层	8	26.39	29	21.78	1.21
$L=100\text{ m}$	8	32.6	29	21.97	1.21
$L=150\text{ m}$	9	16.58	29	21.24	1.21
$L=200\text{ m}$	9	24.75	+812 水平及以下 38 m +812 水平以上 29 m	20.42	1.20
$L=250\text{ m}$	9	32.38	+812 水平及以下 40 m +812 水平以上 29 m	20.38	1.215
$L=300\text{ m}$	10	15.59	+812 水平及以下 37 m +812 水平以上 29 m	19.90	1.214

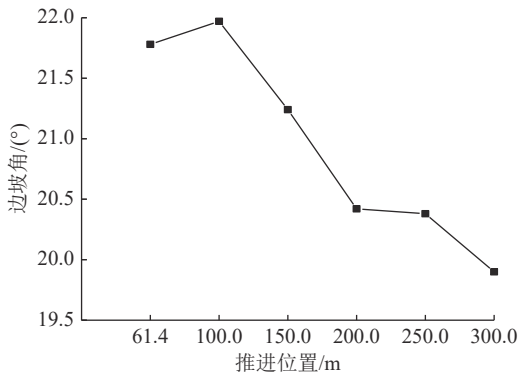


图 8 剖面发展至不同工程位置的边坡角
Fig.8 Profile slope angle in different propelling position

值模拟方法进行计算得出的结果更符合实际^[19]。FLAC^{3D} 程序的基本原理是拉格朗日差分法, 采用了显示拉格朗日算法和混合-离散分区技术, 能够非常准确的模拟材料的塑性破坏和流动, 非常适合解决岩土工程中经常遇到的大变形^[20]。基于此, 本节采用大型岩土分析软件 FLAC^{3D}, 研究霍林河南露天矿内排土场不同断层与边坡空间位置时边坡的稳定性和滑坡模式, 为了降低网格划分对计算结果的影响, 统一建立高 300 m、宽 20 m、长 1 000 m 的数值预设模型。以 0 作为两侧水平位移, 即水平约束为边界条件, 将铅垂位移与底部水平位移设为 0, 采用

底部边界固定的方式进行分析,以重力加载作为模型加载方式,同时,模型坡面及顶部均采用自由

面。推进不同位置时内土场边坡最大位移云图如图 9 所示。

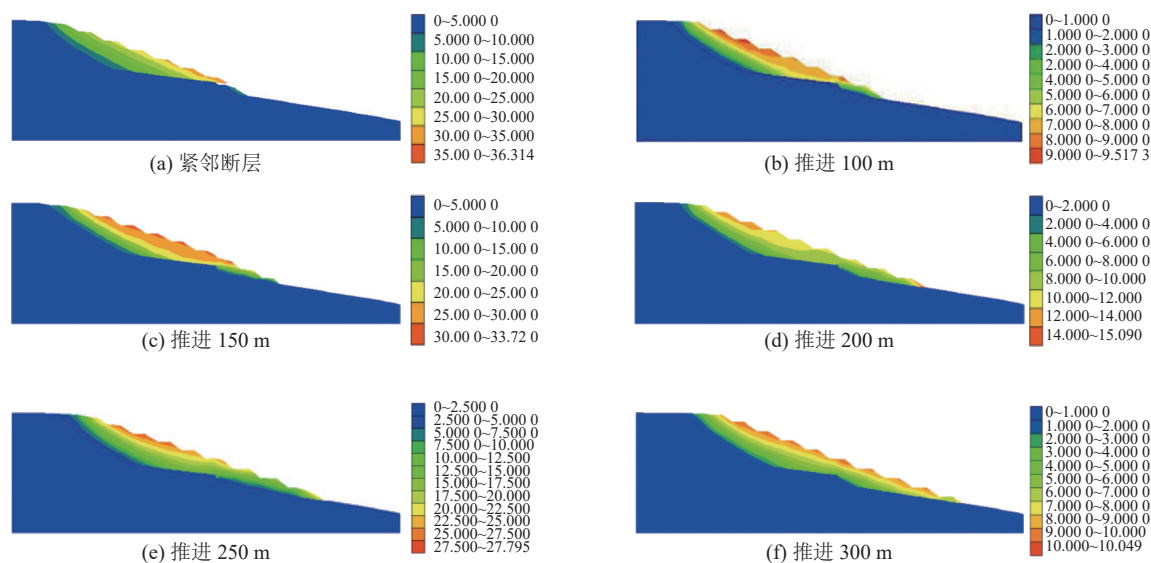


图 9 剖面发展至不同工程位置位移

Fig.9 Displacement nephogram in different propelling position

通过图 9 可知,边坡体内部各点的位移分布规律,断层、基底弱层与边坡面所包络形成的潜在滑体与滑床之间有明显位移,尤其当断层与边坡面相距较近时更为明显,上部岩体位移以下沉为主,下部岩体位移以水平为主,表明滑坡是由于上部岩体在自身重力下发生滑移,进而挤压下部岩体沿基底弱层向临空面滑移而发生的推动式滑坡。对比发展至不同工程位置时边坡的位移云图可知,断层距离坡脚 150~200 m 时,边坡滑移位置发生改变。推进距离小于 150 m 时,以上部剪切圆弧为侧界面—底板基底弱层为底界面相结合的组合滑动,大于 200 m 时,基底弱层的部分区域形成了塑性贯通,此时边坡的滑坡模式是以下部剪切圆弧为侧界面—底板基底弱层为底界面的组合滑动。随着内排土场继续向前推进,断层对内排土场边坡稳定性的影响逐渐降低,断层效应逐渐消失。

4 结 论

1) 顺倾软弱起伏基底内排土场边坡稳定性分析应兼顾边坡形态、断层等多重因素;其稳定性与边坡高度、边坡角、基底倾角呈负相关,与断层落差呈先降低后升高、与断层相对坡脚距离 L 呈先升高后降低关系。

2) 内排土场边坡滑坡模式随排土工程向前发展,由上部边坡沿下盘基底弱层切层—顺层滑动转变为

从下部边坡沿上盘基底弱层切层—顺层滑动。

3) 霍林河南露天矿内排土场边坡高度 216 m、边坡角 20°、基底倾角 5°的工况下,断层落差为 30 m 时,其稳定性系数最小。

4) 霍林河南露天矿内排土场在跨过断层初期,向前推进 150 m 后,应自下向上逐渐增加平盘宽度,减小边坡角,使边坡成折线形,增大本阶段内排空间,实现露天矿高效安全生产。

参考文献(References):

- [1] 王 东,李广贺,曹兰柱,等. 软弱基底内排土场支挡煤柱的力学效应[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 934-941.
WANG Dong, LI Guanghe, CAO Lanzhu, et al. Hyperbolic function-based permeability model of coal under mining stress at deep mine[J]. Journal of China coal society, 2019, 44(3): 934-941.
- [2] 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.
- [3] 王 东,王 珍,曹兰柱,等. 断层位置对露天矿顺倾层状边坡稳定性的影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(12): 83-89.
WANG Dong, WANG Zhen, CAO Lanzhu, et al. Cross section position permanent seasonal stratiform Shapo pseudo sexuality study[J]. Chinese Safety Science Report, 2014, 24(12): 83-89.
- [4] 苏永华,李诚诚. 强降雨下基于Green-Ampt模型的边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2020(2): 1-10.
SU Yonghua, LI Chengcheng. Stability analysis of slope based on

- Green-Ampt model under heavy rainfall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020(2): 1-10.
- [5] 曹兰柱,王 珍,王 东,等. 扎哈淖尔露天煤矿南帮压煤回采边坡稳定性分析[J]. *安全与环境学报*, 2018, 18(1): 113-118.
CAO Lanzhu, WANG Zhen, WANG Dong, *et al.* Analysis of the slope stability of the underlying southern slope coal extraction in Zhahanaoer open-pit mine[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, 18(1): 113-118.
- [6] 曹兰柱,王 珍,王 东,等. 露天矿含断层逆倾软岩边坡滑移模式及稳定性研究[J]. *安全与环境学报*, 2018, 18(2): 457-461.
CAO Lanzhu, WANG Zhen, WANG Dong, *et al.* Study on the sliding mode and stability of counter-dip bedded soft rock slope with fault in surface mine[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, 18(2): 457-461.
- [7] 周昌寿. 露天煤矿内排土场的稳定性[J]. *中国矿业大学学报*, 1992, 21(1): 31-36.
ZHOU Changshou. Stability of open-pit mining inner dump[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1992, 21(1): 31-36.
- [8] 丰定祥,吴家秀,葛修润. 边坡稳定性分析中几个问题的探讨[J]. *岩土工程学报*, 1990, 12(3): 1-9.
FENG Dingxiang, WU Jiayou, GE Xiurun. Some Problems of slope Stability Analysis[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1990, 12(3): 1-9.
- [9] 丁参军,张林洪,于国荣,等. 边坡稳定性分析方法研究现状与趋势[J]. *水电能源科学*, 2011, 29(8): 112-114.
DING Canjun, ZHANG Linhong, YU Guorong, *et al.* Research current situation and development trend of slope stability analysis method[J]. *Water Resources and Power*, 2011, 29(8): 112-114.
- [10] 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.
- [11] 纪玉石. 黄土基底排土场失稳机理与稳定性控制技术研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
JI Yushi. The Instability Mechanism and Stability Control Technology Research on Loess Substrate Dump[D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.
- [12] 曹 平,张 科,汪益显,等. 复杂边坡滑动面确定的联合搜索法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(4): 814-821.
CAO Ping, ZHANG Ke, WANG Yixian, *et al.* Mixed search algorithm of critical slip surface of complex slope[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(4): 814-821.
- [13] 王旭春,管晓明,杜明庆,等. 安太堡露天矿边坡蠕滑区滑动机理与稳定性分析[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(S.2): 312-318.
WANG Xuchun, GUAN Xiaoming, Du Mingqing, *et al.* Analysis of sliding mechanism and stability of creep area of Antaibao Open-Pit Mine slope[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(S.2): 312-318.
- [14] 赵尚毅,郑颖人,邓卫东. 用有限元强度折减法进行节理岩质边坡稳定性分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(2): 254-260.
ZHAO Shangyi, ZHENG Yingren, DENG Weidong. Stability analysis on jointed rock slope rock slope by strength reduction fem[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(2): 254-260.
- [15] 曹兰柱,李亚雷,等. 软弱基底排土场变形破坏治理措施研究[J]. *中国安全科学生产技术*, 2015, 11(8): 83-89.
CAO Lanzhu, LI Yalei, *et al.* Research on control measures for deformation and failure of dump with weak basement[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2015, 11(8): 83-89.
- [16] 王 俊,孙书伟,陈 冲. 饱水黄土基底排土地质力学模型试验研究[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(5): 861-867.
WANG Jun, SUN Shuwei, CHEN Chong. Geo-mechanical model experiment research of dumping site on loess basement[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(5): 861-867.
- [17] 关 铨. 露天矿软弱基底内部排土场稳定性研究[J]. *煤炭科学技术*, 2013, 41(1): 63-65.
GUAN Xin. Study on stability of in pit dump with soft and weak base floor in open pit mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(1): 63-65.
- [18] 寇晓东,周维垣,杨若琼. FLAC3D进行三峡船闸高边坡稳定性分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(1): 6-10.
KOU Xiaodong, ZHOU Weiyuan, YANG Ruqiong. Stability analysis of the high slopes of Three Gorges ship lock using FLAC3D[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(1): 6-10.
- [19] 刘 波,韩彦辉. FLAC 3D原理实例与应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
LIU Bo, HAN Yanhui. FLAC3D principle, instance and application guide[M]. Beijing: China communication press, 2006.
- [20] 黄润秋,许 强. 显式拉格朗日差分分析在岩石边坡工程中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 1995, 14(4): 346-354.
HUANG Runqiu, XU Qiang. Application of explicit lagrangian finite-difference method in rock slope engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1995, 14(4): 346-354.