

露天矿延深开采诱发边坡地表变形研究

孙世国, 于磊, 于云鹤

(北方工业大学 土木工程学院, 北京 100043)

摘要:为明确露天矿延深开采对采空区、高陡边坡及地表的影响,以老虎台矿采区为研究背景,利用 MIDAS GTS-NX 软件对老虎台矿 E5800 剖面继续延深开采诱发的边坡变形破坏范围进行了数值模型分析;揭示了露天矿延深开采诱发边坡滑移的机制。研究结果表明,随着露天开采的延深,边坡地表最大水平位移与最大沉降的位置变化逐渐减小,第四次与第一次开采最大下沉点位置对比,向北移动了 13 m,下沉值增大了 57.5%,且露天临空面的增大和侧向约束减小,使边坡岩体应力逐渐向坑内移动,说明地下采区开采受露天矿开采诱发的活化影响对边坡的稳定性影响逐渐增大。考虑到开采过程中会有爆破因素的影响,选取最危险的剖面 N900 对其进行边坡稳定性评价,并针对可能产生的危险情况,提出建立相应的监测手段。

关键词:露天矿;延深开采;边坡;地表;变形;沉降;稳定性评价;监测手段

中图分类号:TD804

文献标志码:A

文章编号:1008-4495(2025)01-0122-07

Study on surface deformation of slope induced by extended deep mining in surface mine

SUN Shiguo, YU Lei, YU Yunhe

(School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100043, China)

Abstract: In order to clarify the influence of extended deep mining of surface mine on goaf, high and steep slope and surface, the mining area of Laohutai Mine was taken as the background. By using MIDAS GTS-NX software, the slope deformation and failure range induced by continuous extended deep mining of E5800 section in Laohutai Mine was analyzed by numerical model. The mechanism of slope slip induced by extended deep mining of surface mine was revealed. The results show that with the deepening of open-pit mining, the position changes of maximum horizontal displacement and maximum settlement on the surface of slope gradually decrease. Compared with the position of the maximum subsidence point of the first mining, the fourth mining moved 13 m to the north, and the subsidence value increases by 57.5%. Moreover, with the increase of the open pit and the decrease of lateral constraint, the stress of the rock mass of the slope gradually moves to the pit, which indicates that the influence of the activation induced by the mining of surface mine in the underground mining area on the stability of the slope gradually increases. Considering the influence of blasting factor in the mining process, the most dangerous section N900 is selected to evaluate the slope stability, and the corresponding monitoring means are put forward in view of the possible dangerous situation.

Keywords: surface mine; extended deep mining; slope; surface; deformation; sedimentation; stability evaluation; monitoring means

随着露天矿进一步向地下延深开采,原来露天开采形成的高陡边坡体与地下采场构成了一个复合的采动系统,这给矿山的安全生产带来新的挑战^[1-6]。目前针对矿山露天开采的研究较多,马伟

民等^[7]通过相似材料模型试验对岩层地表重复采动规律进行探讨,认为多次重复开采下地表变形不同于单一开采,并首次提出了下沉加剧系数的概念。王冠儒等^[8]将单一采动与数次采动的变形情况进行

收稿日期:2023-08-24 修订日期:2023-11-08 DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.20230730

基金项目:中国煤炭科工集团双创资金重点项目(2022-ZD002);国家自然科学基金项目(41772335)

作者简介:孙世国(1959—),男,辽宁抚顺人,博士(后),教授。E-mail:ssg918@163.com。

引用格式:孙世国,于磊,于云鹤.露天矿延深开采诱发边坡地表变形研究[J].矿业安全与环保,2025,52(1):122-128.

SUN Shiguo, YU Lei, YU Yunhe. Study on surface deformation of slope induced by extended deep mining in surface mine[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2025, 52(1): 122-128.



移动阅读下载

对比,得出了地表移动变形的特点。蒯洋等^[9]通过数值模拟建立了井工重复开挖与部分地表变形参数的函数关系。杨文涛^[10]通过模型研究得出了井工多个采区连续和按时序开采诱发地表变形的规律。孙世国等^[11-16]对多个矿井的观测资料进行了分析,总结并提出了露天边坡在井工与露天开采影响下的一般变化规律:边坡岩体的变形程度随着井工开采量的不断增大而持续加剧;在上山走向移动边界与下山走向主截面间位移的沉降值呈现递增的变化规律,体现为边坡角度减小。高士友等^[17]建立了露天矿采场水平推进速度与矿山垂直延深速度关系的数学模型,分析了沿底帮推进、沿矿体底板推进、沿矿体顶板推进等 3 种工作线推进方式下矿山工程发展的关系。刘光伟等^[18]通过建立剥采比与断层落差、产状及煤层厚度数学模型,研究了不同煤柱留设宽度对边坡稳定性的影响。胡颖鹏等^[19]结合极限平衡分析方法,揭示了崩落法开采扰动下的高陡边坡渐进破坏规律,提出了边坡滑移体体积计算方法,以及通过调控回采顺序控制边坡滑移进程,以实现塌陷坑完全承接边坡滑移体的边坡岩移危害控制技术。

抚顺矿业集团有限责任公司老虎台矿地下采区经历了数十次重复开采,形成一定的露天坑。对老采空区进行回填,填充物的力学性能远远低于最初岩体的力学性能,在这种复杂条件下进行露天开采,给矿区带来的负面影响远大于单一露天开采。

笔者重点研究露天矿延深开采对边坡稳定性的影响,划分地表移动和危险边界,将开采的经济效益最大化,为今后抚顺矿业集团下属煤矿的开采提供合理依据,同时也为其他地质条件相似的矿区开采提供一定的参考。

1 工程概况

老虎台矿区位于辽宁省抚顺市南部,煤矿开采标高+101.4~-830.0 m,近 10 年各采区的情况见表 1。

表 1 老虎台矿近 10 年综采工作面汇总

Table 1 List of fully mechanized mining face in Laohutai Coal Mine in recent 10 years

标高/m	工作面编号	开采时间	工作面长度/m	走向长度/m
	43001	2014-06—2016-02	70~90	1 165
-430	43002	2013-07—2015-03	105~135	915
	43003	2015-10—2017-02	75~85	715
-280	28001	2020-02—	105~115	810
	28002			

采区位于老虎台井田中央西翼,工作面标高为-274~-288 m,可采长度为 748.5 m,煤层最大可采高度为 12 m。

2 露天矿延深开采诱发边坡上覆岩体变形规律研究

2.1 模型建立

为研究矿体在开挖过程中地表的变化趋势,将老虎台矿-280 m 水平采区简化为模型中的 4 个矿体进行分步开挖,以 2.5 m 为一个开采高度,分 4 步进行模拟。

将 E5800 剖面作为研究对象,如图 1 所示。

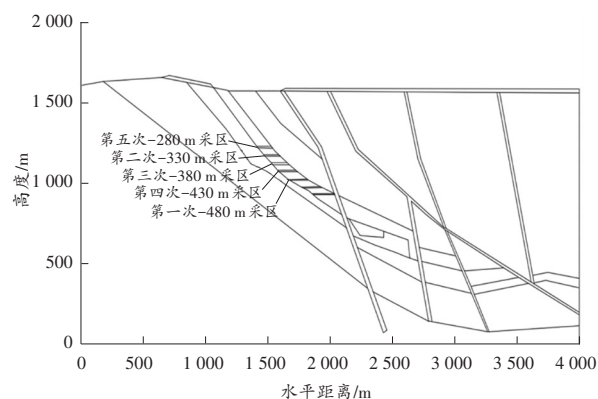
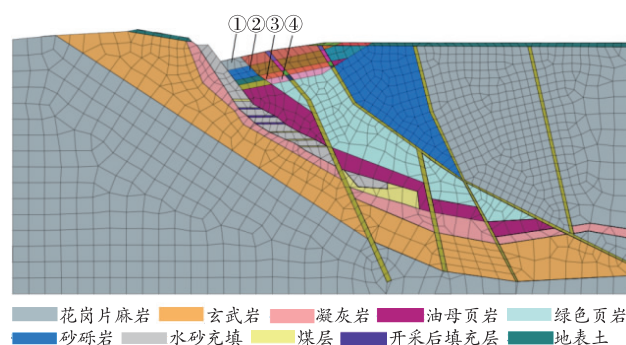


图 1 E5800 剖面图

Fig. 1 E5800 profile

矿体数值模型单元划分如图 2 所示。



注:①第一步露天开采区域;②第二步露天开采区域;
③第三步露天开采区域;④第四步露天开采区域。

图 2 矿体数值模型单元划分图

Fig. 2 Unit division of numerical model of orebody

由于 MIDAS 软件具有较强的三维可视化建模能力,因此采用 GTS NX 对矿体进行建模。在建立模型的过程中,将土层简化为一个连续的整体。模型采用直角坐标系,地下采区矿体的倾向为 X 轴,走向为 Y 轴。模型长度由 E5800 剖面向东西方向各延伸 2 000 m、累计 4 000 m,南北方向宽度为 4 000 m、深度为 1 540 m。模型共有 74 800 个单元、75 480 个

节点。研究区主要岩体为各向同性的弹塑性体,故采用莫尔-库仑准则进行研究计算,边界条件主要包括自动约束和自重。由于矿区在地壳下降比较稳定的地区,矿体接触面上下的 2 层岩层相互平行,接触面产状致密,岩层沉积无间断,所以岩层接触形式为整合接触。

2.2 参数选取

考虑到先前的多次重复采动对矿体的活化影响,使得采区矿体内部的应力场发生变化,应力集中,同时,结合收集到的抚顺市历史地勘资料,需要对经过室内岩石实验和工程类比得出的岩体物理力学参数进行一定程度的修正。弹性模量和密度修正为原状岩土体的 0.85~0.90 倍。

经过综合考量后得出的岩土体物理力学参数见表 2。

表 2 岩土体物理力学参数
Table 2 Physical and mechanical parameters of rock mass

岩土体分类	密度 ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 / GPa	黏聚力 / MPa	内摩擦角 / ($^{\circ}$)
第四系表土	1 855	0.3	0.19	23
绿色页岩	2 560	1.9	0.77	36
油母页岩	2 540	3.5	1.24	34
煤	2 360	0.4	0.48	32
玄武岩	2 695	20.2	4.07	45
花岗片麻岩	2 700	25.2	4.98	56
水砂填充物	105	1.0	0.57	21

露天矿各步开采几何参数见表 3。

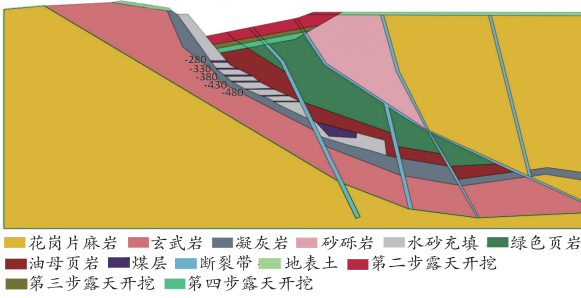
表 3 露天矿各步开采几何参数
Table 3 Geometric parameters of each mining step in open pit

步骤	开采宽度/m	下部坡角/($^{\circ}$)	上部坡角/($^{\circ}$)
第一步	820	12	23
第二步	910	10	31
第三步	745	13	32
第四步	635	12	29

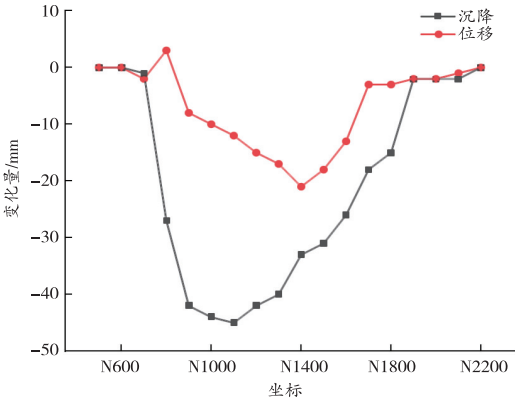
2.3 边坡上覆岩体变形分析

各步露天开采示意图和开采后边坡及地表沉降与水平位移曲线如图 3 所示。

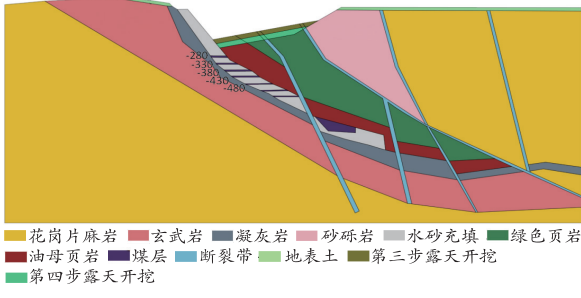
第一步露天开采后边坡及地表沉降与水平位移曲线,最大下沉点位是 N1189、值为 45 mm,基本处于地下采区几何中心位置;最大水平位移点位是 N1395、值为 20 mm,基本处于地下采区-480 m 开采下山边界位置,如图 3(b)所示。



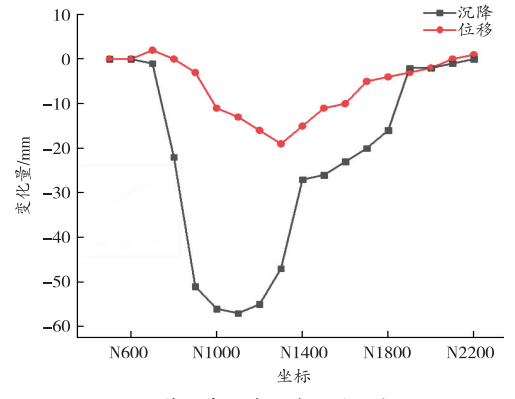
(a) 第一步开采示意图



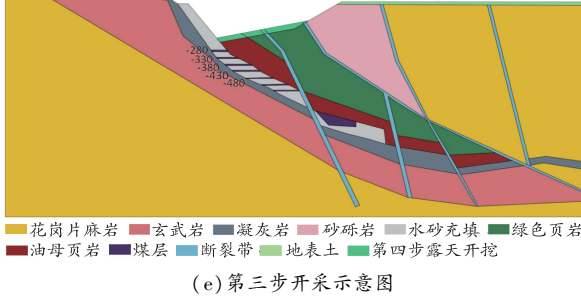
(b) 第一步开采沉降位移曲线



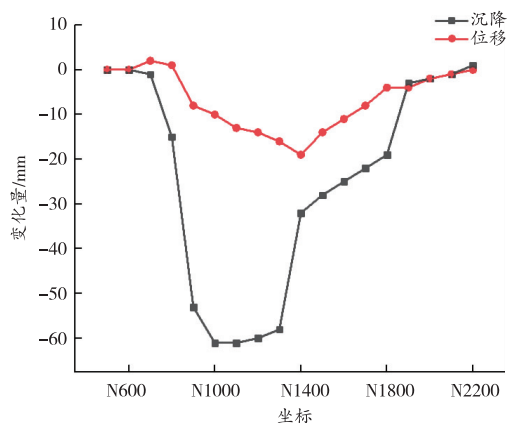
(c) 第二步开采示意图



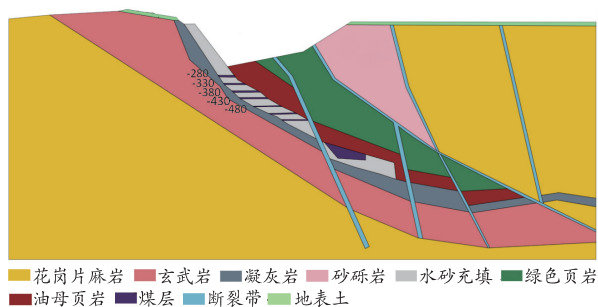
(d) 第二步开采沉降位移曲线



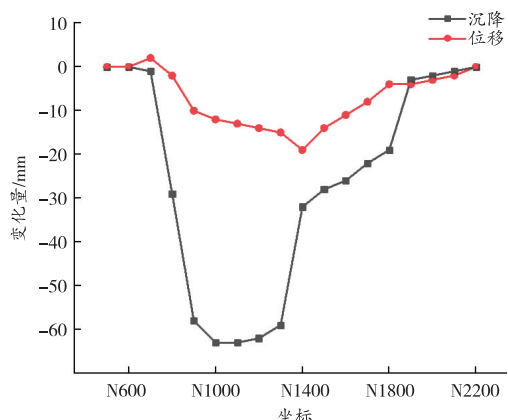
(e) 第三步开采示意图



(f) 第三步开采沉降位移曲线



(g) 第四步开采示意图



(h) 第四步开采沉降位移曲线

图 3 各步露天开采后边坡及地表沉降与水平位移曲线
Fig. 3 Slope and surface subsidence and horizontal displacement curves after each step of open-pit mining

第二步露天开采后边坡及地表沉降与水平位移曲线,最大下沉点位是 N1153、值为 57 mm,相比第一次最大下沉点位置,第二次向北移动了 36 m,且下沉值增大了 42.5%;最大水平位移点位是 N1437、值为 21 mm,比第一步开采最大水平位移向南移动了 42 m,说明露天延深开采坡角增大后受露天临空面的增大和侧向约束减小,边坡向坑内移动,所以移动边界向南侧扩展,即活化效应,如图 3(d) 所示。

第三步露天开采后边坡及地表下沉与水平位移曲线,最大下沉点位是 N1153、值为 61 mm,与第一

次最大下沉点位置对比,向北移动了 36 m,下沉值增大了 52.5%;最大水平位移点位是 N1474、值为 19 mm,与第二步开采对比最大水平位移向南移动了 37 m,如图 3(f) 所示。

第四步露天开采后边坡及地表下沉与水平位移曲线,最大下沉点位是 N1122、值为 63 mm,与第一次最大下沉点位置对比,向北移动了 13 m,下沉值增大了 57.5%;最大水平位移值为 19 mm,位于 N1474,与第三步开采对比最大水平位移位置无变化,如图 3(h) 所示。

露天开采后,边坡及地表下沉曲线、位移曲线如图 4~5 所示。

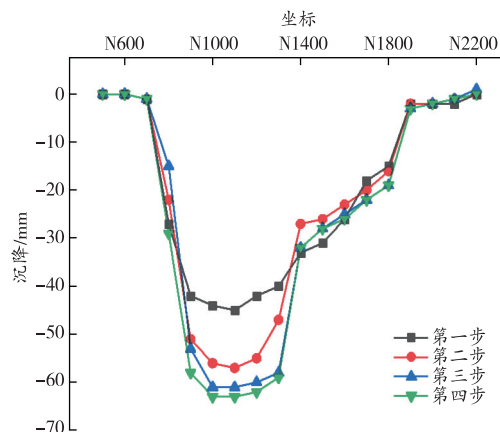


图 4 露天开采后边坡及地表下沉曲线
Fig. 4 Slope and surface subsidence curve after open-pit mining

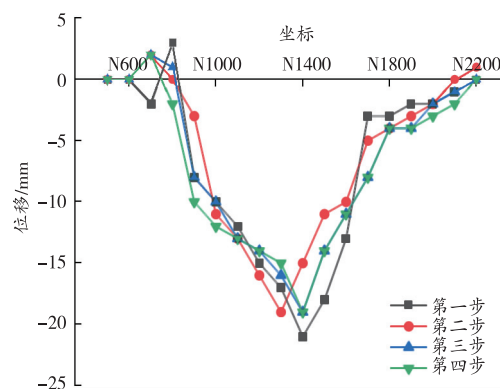


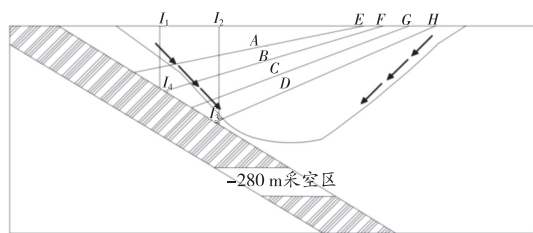
图 5 露天开采后边坡及地表位移曲线
Fig. 5 Slope and surface displacement curve after open-pit mining

由图 4、图 5 可知,随着开采的延深,最大位移与最大沉降位置呈反比例变化,说明露天延深开采坡角增大后受露天临空面的增大和侧向约束减小,边坡向坑内移动,所以移动边界向南侧扩展速率减小,即活化效应。采空区受连续活化影响,空隙空间逐渐减小,但剩余空间继续压密,该过程时间较长。随

着开采的延深,最大位移与最大沉降位置变化逐渐减小,说明露天延深开采坡角增大后,受露天临空面的增大和侧向约束减小,边坡向坑内移动,地下采区放顶煤开采受露天矿开采诱发的活化影响对边坡的稳定性影响逐渐增大。

根据采矿工程的地应力场分布及岩层移动的一般规律,老虎台矿在开采前,所有岩层的应力为 $\{\sigma_0\}$,当进行露天开采后,在开采区影响范围内的各个空间位置上的所有微小单元体的相对位置状态发生改变,此时采区的影响范围内原岩应力为 $\{\sigma_1\}$;当第一次开采停止后,岩层的应力达到稳定,获得重新平衡后的内部应力状态为 $\{\sigma_2\}$ 。如果在此基础上再次进行第二步开采,则新的影响域内的应力状态将会变成 $\{\sigma_3\}$ 、 $\{\sigma_4\}$ 乃至 $\{\sigma_{i+1}\}$,这个过程中所有的 $\{\sigma_i\}$ 都是经由上一次的应力状态 $\{\sigma_{i-1}\}$ 应力重分布而形成的。

老虎台露天延深开采相互作用机理如图6所示。



注:A~D为边坡轮廓线; $I_1 I_2 I_3 I_4$ 为地下采区上山方向支撑区。

图6 露天延深开采相互作用机理示意图

Fig. 6 Interaction mechanism diagram of open-pit deep mining

随着露天开采的进行,边坡坡角及坡高在不断增大,边坡轮廓也从最开始的A线逐步推进到B线,最后逐渐延深到D线。在这个过程中边坡将产生以下影响:

1)边坡岩体本身的应力场分布发生变化,沿地下采区走向工作面两侧的岩体开采数量不同,上山方向一次采掘数量多,下山方向一次采掘数量少或基本不变,而这些状况对于地下采区整体的平衡体系而言,平衡力的外部条件被打破,力系关系也被打破,从而使得平衡体内部发生移动并产生活化。

2)由于露天矿的不断开采,原有地下采区上山方向一侧的承载区的岩柱体积($I_1 I_2 I_3 I_4$)逐渐变小,临空面的面积增大,岩柱自身抵抗负荷的能力下降,这样对边坡体而言就会受到“两增一减”的作用,而边坡本身坡脚处的抗载能力下降,因此潜在的滑坡概率增大。

3 露天延深开采边坡稳定性分析与评价

3.1 边坡稳定性分析

采用最危险滑面 N900 作为计算模型,滑面大小为 1 200 m×600 m,如图7所示。

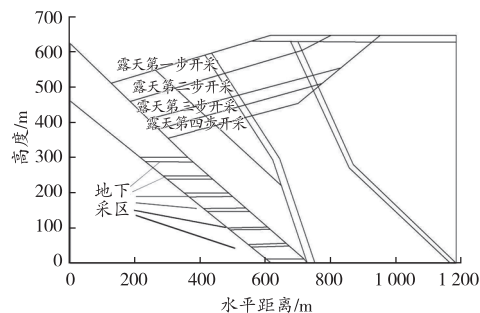


图7 N900剖面图

Fig. 7 N900 profile

在开采过程中需采用爆破等方式,故在计算边坡稳定性的同时也需考虑爆破所产生的瞬时荷载。采用三角形荷载曲线模型加载到炮孔壁上,等效爆破荷载的峰值压力计算公式如下:

$$p_m = p_0 (D/a) \quad (1)$$

$$p_0 = \rho_0 D^2 (d/\phi)^{2\gamma} / 2(\gamma+1) \quad (2)$$

式中: p_m 为等效爆破荷载的峰值压力; p_0 为药包中心爆轰波产生的平均初始压力; D 为炸药爆轰速度; a 为炮孔间距; ρ_0 为装药密度; d 为炮孔直径; ϕ 为药包直径; γ 为等熵指数。

爆破荷载压力正压作用总时间计算公式如下:

$$t_s = 84 (r^{-2\mu})^{1/3} Q^{0.2} / E_v \quad (3)$$

式中: r 为比例半径, $r = R/R_w$; R 为离药包轴线的距离,m; R_w 为装药半径,m; μ 为岩体泊松比; Q 为装药量,kg; E_v 为岩体体积压缩模量,MPa。

由爆破设计方案可知,取炸药密度为 1.15 g/cm³,爆速为 4 000 m/s。计算得到等效爆破荷载峰值压力为 5.40 MPa,作用总时间为 8.00 ms。

N900 剖面边坡模型图如图8所示。

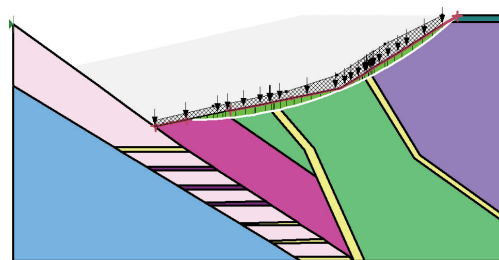


图8 N900剖面边坡模型图

Fig. 8 N900 profile slope model

在爆破荷载影响下,利用 Bishop 法、Janbu 法、

Morgenstern-Price 法分别计算边坡稳定系数,计算结果见表 4。

表 4 N900 剖面爆破作用下边坡稳定性计算结果
Table 4 Calculation results of slope stability under N900 profile blasting

计算方法	Bishop 法	Janbu 法	Morgenstern-Price 法
稳定系数	1.003	0.955	1.022

由表 4 可知,老虎台矿露天延深开采在爆破荷载的影响下,四步开采全部完成后边坡稳定系数最低为 0.955,根据相关规范要求可知,边坡会出现部分失稳。

3.2 边坡稳定性评价

根据 GB 50197—2015《煤炭工业露天矿设计规范》^[20]规定(见表 5),露天开采过程中局部爆破荷载会增大,因此,在正常开采状态下,计算时应添加瞬时爆破荷载,得出边坡稳定系数为 0.955,小于采掘场最终边坡最低稳定系数,由此可知,在开采过程中,边坡存在失稳风险。

表 5 露天矿规程规定边坡稳定系数
Table 5 Slope stability coefficient stipulated in open-pit mine regulations

边坡类型	服务年限/a	稳定系数 K
边坡上有特别重要建筑物或边坡滑落会造成生命财产重大损失者	>20	>1.5
采掘场最终边坡	>20	1.3~1.5
	<10	1.1~1.2
非工作帮边坡	10~20	1.2~1.3
	>20	1.3~1.5
工作帮边坡	临时	1.05~1.20
外排土场边坡	>20	1.2~1.5
内排土场边坡	<10	1.2
	≥10	1.3

4 结束语

1)随着露天矿开采的延深,最大位移矢量及位置变化逐渐减小,露天延深开采坡角增大后,受露天临空面的增大和侧向约束减小影响,边坡向坑内移动,基本指向地下采空区方向,上部不同区域合成后矢量指向不同,说明放顶煤开采地下采空区的空间受到连续活化影响。

2)露天矿延深开采的边坡变形与井采区的相对位置和开挖量有着密切联系,即上山一侧覆岩体被开采剥离掉,导致下山一侧移动体持续活化,并诱发

采空区的继续压密,从地表位移图已明确显示出该特征,当边坡位于主断面下山方向一侧时,对于边坡体而言,矢量合成后应力作用增大,对边坡的稳定性产生不利影响。

3)采用 Bishop 法、Janbu 法及 Morgenstern-Price 法对边坡的稳定性进行评价分析,正常开采状态后的露天边坡基本处于稳定状态,但考虑到露天开采过程中产生的部分爆破荷载,得出边坡稳定系数为 0.955,为提高露天矿延深开采的安全性,须设置边坡监测系统。

4)本研究还存在不足之处。在边坡位移及周边设施监测方面,需要加强如下工作:边坡稳定性监测;矿区周围公路安全的监测;矿区地表周围重要设施的监测;矿区周围民用设施的监测。

参考文献(References):

- [1] LIU C, WANG F F, REN Q Y, et al. Field test of blasting vibration and adjacent slope stability under the influence of blasting vibration in mining[J]. Journal of Vibroengineering, 2023, 25(4): 713-728.
- [2] LI S, ZHAO Z M, HU B Y, et al. Hazard classification and stability analysis of high and steep slopes from underground to open-pit mining[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(18): 11679.
- [3] ZHANG Jinsheng, JIANG Feng. Stability analysis of the southern slope crown in Fushun west open-pit mine[J]. Journal of Research in Science and Engineering, 2023, 5(7): 35-39.
- [4] 陶志刚, 罗森林, 明伟, 等. 露天矿边坡评价分级与爆破振动条件下 MSARMA 法边坡角优化[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(3): 67-75.
TAO Zhigang, LUO Senlin, MING Wei, et al. Evaluation and classification of open pit slope and slope angle optimization by MSARMA method under blasting vibration condition[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(3): 67-75.
- [5] 杜江丽, 岳军红, 陈建平, 等. 基于三维激光扫描仪的矿区边坡变形监测数据的分析处理[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(1): 75-79.
DU Jiangli, YUE Junhong, CHEN Jianping, et al. Analysis and processing of slope deformation monitoring data in mining area based on 3D laser scanner[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2021, 48(1): 75-79.
- [6] 李甲, 王文杰, 尹东. 基于改进灰色 Verhulst 模型的巷道变形破坏预警方法研究及应用[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(2): 66-71.
LI Jia, WANG Wenjie, YIN Dong. Research and application of early warning method of roadway deformation based on improved grey Verhulst model[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(2): 66-71.
- [7] 马伟民, 朱维毅. 岩层和地表重复采动规律的模拟研究[J]. 中国矿业学院学报, 1984, 13(2): 5-17.
MA Weimin, ZHU Wei. A study on ground movement due to multiple mining by model experiment[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1984, 13(2): 5-17.
- [8] 王冠儒, 王强. 重复开采条件下地表移动变形特征的实测分析[J]. 经纬天地, 2016(5): 42-45.

- WANG Guanru, WANG Qiang. Measurement and analysis of surface movement and deformation characteristics under repeated mining conditions[J]. Survey World, 2016(5): 42-45.
- [9] 蒯洋, 刘辉, 朱晓峻, 等. 厚松散层下多煤层重复开采地表移动规律[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(2): 130-136.
- KUAI Yang, LIU Hui, ZHU Xiaojun, et al. Study on surface movement characteristics of repeated mining under thick alluvium[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(2): 130-136.
- [10] 杨文涛. 地下工程开挖对地面环境设施的影响及安全防护措施的研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2021.
- YANG Wentao. Study on the influence of underground engineering excavation on ground environmental facilities and safety protection measures[D]. Beijing: North China University of Technology, 2021.
- [11] 孙世国, 马银阁, 曾志翔. 抚顺西露天矿地下开采诱发地表移动变形规律[J]. 煤矿安全, 2019, 50(3): 222-225.
- SUN Shiguo, MA Yingge, ZENG Zhixiang. Surface movement and deformation induced by underground mining in Fushun western open-pit mine[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(3): 222-225.
- [12] 孙世国, 于云鹤, 杨文涛, 等. 多采区顺序连续开采对地面建构物的影响[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(1): 77-81.
- SUN Shiguo, YU Yunhe, YANG Wentao, et al. Influence of sequential continuous mining in multiple mining areas on surface structures[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(1): 77-81.
- [13] 孙世国, 邓王倩, 刘维东, 等. 地下开采转露天复采复杂采空区顶板厚度的研究[J]. 矿冶工程, 2022, 42(2): 5-8.
- SUN Shiguo, DENG Wangqian, LIU Weidong, et al. Roof thickness of complex goaf in transition from underground to open-pit mining[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42(2): 5-8.
- [14] 孙世国, 于磊. 高边坡变形光纤监测应用现状及发展趋势分析[J]. 现代矿业, 2023, 39(3): 10-13.
- SUN Shiguo, YU Lei. Analysis on the application status and development trend of fiber optic monitoring technology for high slope sliding deformation[J]. Modern Mining, 2023, 39(3): 10-13.
- [15] 孙世国, 杨文涛, 于云鹤, 等. 连续开采对覆岩移动与变形的影响[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(7): 109-112.
- SUN Shiguo, YANG Wentao, YU Yunhe, et al. Effect of continuous mining on the movement and deformation of overlying strata[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(7): 109-112.
- [16] 孙世国, 邵树森, 江俊, 等. 露井同期联采对边坡稳定性的影响规律研究[J]. 矿冶工程, 2020, 40(5): 15-18.
- SUN Shiguo, SHAO Shusen, JIANG Jun, et al. Influence of combined method of opencast and underground mining on slope stability[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(5): 15-18.
- [17] 高士友, 才庆祥, 栗嘉彬, 等. 露天开采多资源矿山工程发展规律[J]. 金属矿山, 2016(1): 17-20.
- GAO Shiyu, CAI Qingxiang, LI Jiabin, et al. Study on development principle of multiple resources opencast engineering[J]. Metal Mine, 2016(1): 17-20.
- [18] 刘光伟, 李鹏, 白润才. 露天矿过断层开采方式及生产能力接续分析[J]. 重庆大学学报, 2015, 38(3): 123-129.
- LIU Guangwei, LI Peng, BAI Runcai. Analysis on mining method and production capacity succession during surface mining through fault[J]. Journal of Chongqing University, 2015, 38(3): 123-129.
- [19] 胡颖鹏, 谭宝会, 丁航行, 等. 露天地下楔形转接过渡诱导冒落控制边坡岩移危害技术研究[J]. 金属矿山, 2024(3): 37-43.
- HU Yingpeng, TAN Baohui, DING Hangxing, et al. Study on the technology of induced caving to control the hazard of slope rock movement in the open-pit underground wedge transition method[J]. Metal Mine, 2024(3): 37-43.
- [20] 煤炭工业露天矿设计规范: GB 50197—2015[S].
Code for design of open pit mine of coal industry: GB 50197—2015[S].
(责任编辑: 樊淑兰)
- =====

(上接第 121 页)

- [30] 范红伟. 综放采空区瓦斯流动规律数值模拟研究[J]. 山西煤炭, 2011, 31(11): 57-59.
- FAN Hongwei. Numerical simulation on gas flow law in mined-out areas with fully-mechanized mining[J]. Shanxi Coal, 2011, 31(11): 57-59.
- [31] 郭旭峰. 高瓦斯矿井综放开采采空区瓦斯治理数值模拟研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2011.
- GUO Xufeng. Numerical simulation study on gas control in goaf of fully mechanized caving in high gas mine[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2011.
- [32] 王斯日古楞. 望云矿采空区瓦斯抽采技术的研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2014.
- WANG Siriguleng. Research on gas extraction technology in goaf of Wangyun Mine[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2014.
- [33] 何磊, 杨胜强, 暴庆丰, 等. Y 型通风方式下采场瓦斯运移规律的数值模拟研究及瓦斯治理分析[J]. 矿业安全与环保, 2011, 38(2): 33-36.
- HE Lei, YANG Shengqiang, BIAO Qingfeng, et al. Numerical simulation of gas migration and gas control in stope under Y-type ventilation[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2011, 38(2): 33-36.
- (责任编辑: 陈玉涛)