

露井联合采下边坡稳定性及其边界参数优化研究

朱建明¹, 刘宪权², 冯锦艳¹, 吴剑平¹

(1. 北京航空航天大学 岩土工程研究所, 北京 100083; 2. 平朔煤炭工业公司 安太堡露天煤矿, 山西 平朔 036006)

摘要: 采用三维数值模拟程序对露井联合采下的边坡稳定性进行研究, 结果表明, 井工工作面开切眼位置对露天边坡的稳定起到关键作用。利用数值模拟计算方法对边界参数进行优化, 得出当井工开切眼与边坡之间水平距离在原基础上增加 20 m 时, 边坡的整体稳定性将得到明显改善。相似模拟试验同样验证了此优化方案的合理性。此方案已在现场应用, 保证了露天边坡稳定和安全生产。

关键词: 采矿工程; 露井联合采; 数值模拟; 边坡稳定; 开切眼位置

中图分类号: TD 216

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)增 2 - 3971 - 07

STUDY ON SLOPE STABILITY AND OPTIMIZATION OF BOUNDARY PARAMETERS UNDER CONDITION OF COMBINED OPEN-UNDERGROUND MINING

ZHU Jianming¹, LIU Xianquan², FENG Jinyan¹, WU Jianping¹

(1. *Institute of Geotechnical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China*; 2. *Antaibao Open-pit Mine, Pingshuo Coal Industry Company, Pingshuo, Shanxi 036006, China*)

Abstract: 3D numerical program is used to analyze the stability of the slope affected by underground excavation. Research show that the open-off cut position plays a key role in the slope stability. The numerical simulation is conducted to optimize this boundary parameter, and the results shows that the slope stability is improved to ensure the safe production when the horizontal distance between open-off cut and slope increases to 20 m based on the original data. At the same time, the material simulation method is used to make sure of the scheme. The slope is stable when the scheme is adopted in field.

Key words: mining engineering; combined open-underground mining; numerical simulation; slope stability; open-off cut position

1 引言

在矿产资源的开采方法上, 浅部矿层一般采用露天开采法, 对于深部矿层, 采用井工开采方法则具有更好的经济性^[1]。露井联合采模式下, 露天与井工之间的边界参数对露天边帮的破坏程度、范围具

有很大的影响, 为了研究露井联合采模式下露天边帮的变形、破坏规律, 孙世国等^[2~4]提出了在地下与露天复合开采影响下, 2 种采动影响域中的一部分相互重叠, 致使其采动效应相互作用和相互叠加, 从而组成一个复合动态系统。李文秀^[5]针对急倾斜厚大矿体地下与露天联合开采, 利用建立的开采岩体移动和边坡稳定性分析的模糊数学模型, 分析了

收稿日期: 2008 - 06 - 06; **修回日期:** 2008 - 12 - 10

作者简介: 朱建明(1963 -), 男, 1998 年于北京科技大学采矿工程专业获博士学位, 现任副教授, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: jmzhu@263.net

联合开采下地下开采导致的岩体移动变形及对上部边坡稳定性的影响。蓝航等^[6]采用 FLAC^{3D} 程序分析了露天边坡下井工开采导致的露天台阶的破坏规律，指出台阶状边坡地表的水平变形仍然呈现出采空区中间受压，两端受拉的特点，并得出了台阶状边坡在地下开采扰动下的稳定性应考虑采空区的时空效应的规律。上述研究成果主要针对倾斜和急倾斜煤层的联合开采问题，而对水平厚煤层的露井联合开采问题研究不多^[7]。

本文以采用露井联合开采模式的亿吨煤炭基地平朔矿区安太堡南帮为背景，采用 FLAC^{3D} 程序分析露井联合开采条件下井工开采对露天边坡的破坏过程，通过优化分析不同井工开采开切眼的位置对露天边坡稳定性的影响，提出了安太堡南帮露井联合合理的边界参数，为水平厚煤层露井联合开采提供可以借鉴的理论依据，减少经济损失。

2 模拟计算分析

2.1 计算建模

平朔矿区目前主采煤层为 4 和 9 煤层，为水平厚煤层，其中 4 煤平均厚 8 m，9 煤平均厚 13 m，层间距平均为 40 m。根据矿井开采设计，二号井工矿 B401，B402 工作面在空间上和 B903，B904 工作面垂直对应。由于井工开采速度快，上述多个井工工作面开采结束后，安太堡南帮边坡后期将处于井工开采塌陷区范围内，受到井工复合开采扰动的影响，安太堡南帮露天边坡原设计参数很难满足边坡的稳定性要求，边坡的稳定存在一定的隐患。

由于受露井复合采动影响下的边坡岩体变形与破坏机制非常复杂，变形范围和变形量远远超出原有的认识范畴，因此边坡原设计参数的优化问题值得深入研究。

本文研究区域包括 4 煤内 B401，B402 工作面和 9 煤内 B903，B904 工作面，每个工作面长为 240 m，按照设计，4 煤工作面与边坡水平距离最近为 124 m，最远为 209 m；9 煤工作面与边坡的水平距离最近为 178 m，最远为 263 m。

本文拟采用三维有限差分程序 FLAC^{3D} 进行计算，模型横向尺寸为 1 200 m，沿走向尺寸为 1 200 m，高 400 m，从水平标高+1 050 m 一直模拟到地表+1 450 m。图 1 为露天与井工联合开采的模型图。

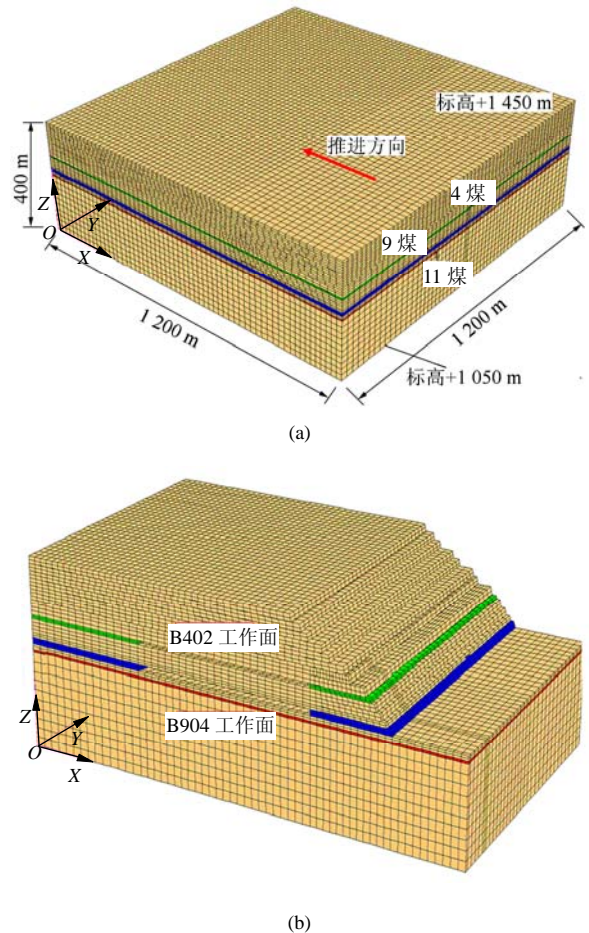


图 1 露井联合开采模型图

Fig.1 Combined open-underground mining model

模型依次开采 B401，B402，B903 和 B904 工作面，在工作面扰动岩体重新自稳后进行露天矿边坡开挖。在标高+1 405，+1 375 和+1 345 m 运输平台上施加荷载。荷载按照运输平台同时通过一辆满载车和一辆空载车的总体重计算得出，动荷载系数取 1.2。

2.2 力学参数

计算中岩体采用理想弹塑性本构模型 Mohr-Coulomb 屈服准则计算。根据现场地质调查和相关研究提供的岩石力学试验结果，模拟计算采用的煤、岩体物理力学参数由表 1^[8, 9]给出。

2.3 边坡稳定性分析

B401 工作面最先开采，受复采扰动影响最大，因此选择通过 B401 工作面的剖面进行边坡稳定性分析。工作面与边坡斜交布置，工作面开切眼与边坡之间的距离不等，因此对边坡的影响程度不同。

图 2 给出了井工转露天开采后 B401 工作面开切眼与边坡水平距离最近(124 m)处最大主应力以

表 1 煤和岩体物理力学参数^[8, 9]

Table 1 Physico-mechanical parameters of coal and rock masses^[8, 9]

层号	岩性	层厚 /m	密度 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
1	黄土	30	1 960	15	0.42	0.125	18	0.012 5
2	风化砂岩	14	2 300	2 000	0.36	2.500	38	0.250 0
3	砂岩	30	2 380	4 200	0.32	3.000	39	0.300 0
4	泥岩	24	2 490	2 800	0.34	2.000	38	0.200 0
5	粉砂岩	12	2 320	4 600	0.32	3.500	36	0.350 0
6	砂岩	12	2 380	5 500	0.30	4.000	40	0.400 0
7	4 煤	8	1 440	1 000	0.38	1.620	36	0.295 0
8	页岩	15	2 450	2 400	0.33	3.000	42	0.300 0
9	粉砂岩	15	2 600	4 800	0.32	5.000	38	0.500 0
10	页岩	10	2 580	3 000	0.35	5.000	38	0.500 0
11	9 煤	13	1 330	1 200	0.36	1.620	39	0.295 0
12	砂岩	10	2 380	6 900	0.28	5.000	41	0.500 0
13	11 煤	5	1 400	1 300	0.35	1.620	36	0.295 0
14	砂岩	12	2 600	12 000	0.25	5.000	44	0.500 0

及破坏场分布。可以看出, 标高+1 405 m 运输平台处于井工开采引起的应力集中区(见图 2(a)), 稳定性较差, 平台的破坏范围与井工上方覆岩破坏相通(见图 2(b)), 易失稳。而运输平台的失稳将直接影响现场生产, 带来巨大的经济损失。

图 3 给出了 B401 工作面内开切眼与边坡水平距离为 144 m 处的最大主应力和破坏场分布。当井工开切眼与边坡的水平距离增加了 20 m 后, 标高+1 405 m 运输平台受到井工开采引起的应力集中影响明显减弱, 且平台的破坏范围与井工上方覆岩破坏相通的范围减小, 平台的稳定得到了一定程度的改善。

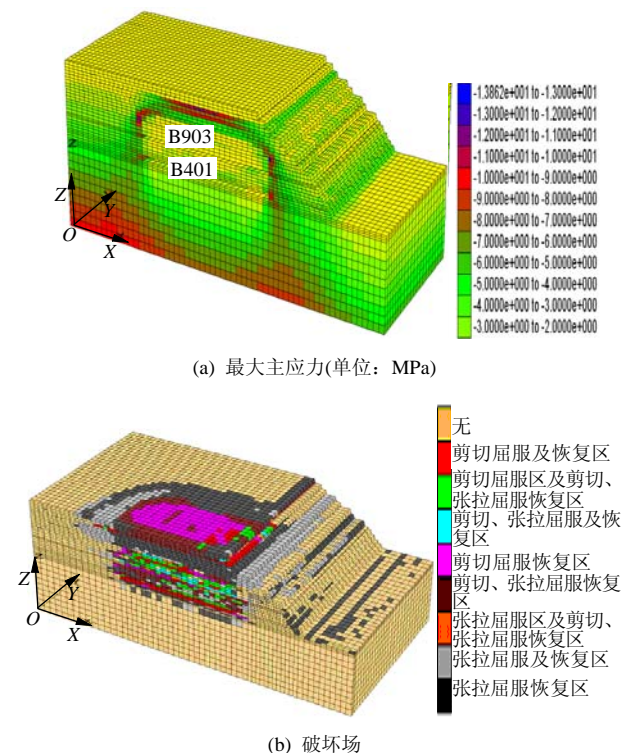


图 2 B401 工作面内开切眼与边坡水平最近距离处最大主应力以及破坏场分布

Fig.2 Distributions of the maximum principal stress and failure zones at the position where the horizontal distance between open-off cut in working face B401 and slope is smallest

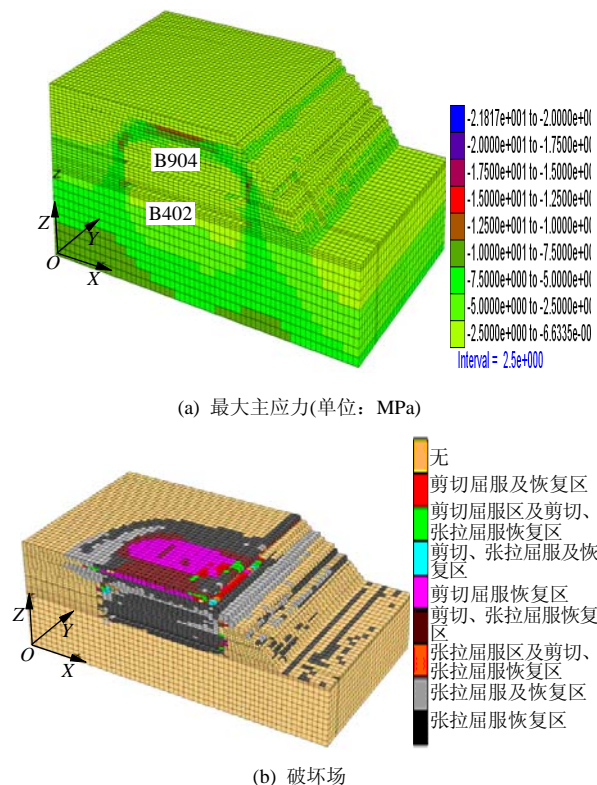


图 3 B401 工作面内开切眼与边坡水平距离 144 m 处最大主应力以及破坏场分布

Fig.3 Distributions of the maximum principal stress and failure zones at the position where the horizontal distance between open-off cut in working face B401 and slope is 144 m

通过上述计算结果分析可知, 原设计边坡参数不能满足井工转露天后的边坡稳定性要求, 标高+1 405 m 运输平台以上边坡处于井工开采引起的塌陷范围内, 稳定性较差。通过对不同剖面的比较可以看出井工开切眼与边坡的水平距离对边坡的稳定性起到了重要的作用, 综合比较各种方案以及经济效益, 建议将井工开切眼的位置远离边坡, 减弱井

工开采对边坡稳定性的影响。

3 井工开切眼位置的优化分析

按照矿相关设计，安太堡南帮井工开采的B401, B402, B903, B904等工作面开切眼位置主要以 $Y = 4371480$ 为界布置，根据上述露井联采过程的三维数值模拟分析表明，露采部分边坡稳定将受到影响，为了安太堡南帮的安全开采和露采边坡的整体稳定，需要对井工开采工作面开切眼合理位置进行优化分析。

3.1 数值模拟优化

3.1.1 计算模型及相关参数

为了简化计算，本文采用二维有限差分计算程序FLAC^{2D}进行计算。图4为井工-露天联采边坡的数值计算模型。为了评价边坡的稳定性，在边坡的运输平台以及力学性质较差的平台处设置了监测点^[10]。

为了减弱井工复合开采对边坡稳定性的影响，将开切眼位置远离边坡，计算中开切眼的平移距离分别取10, 16, 20 m。

3.1.2 边坡稳定性评价分析

(1) 最大主应力场分析

图5给出了井工开切眼平移不同距离后围岩的最大主应力场分布。随着开切眼远离距离的增加，

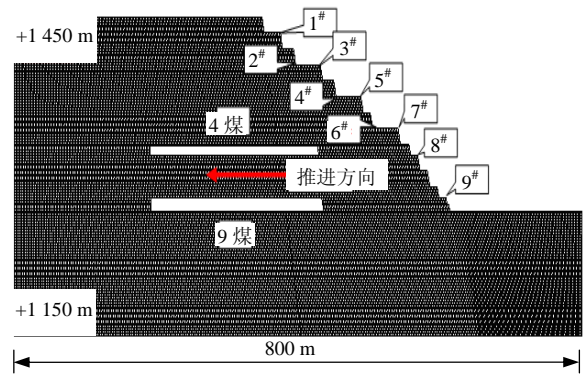


图4 数值计算模型

Fig.4 Model of numerical simulation

上部边坡受到大井工复合开采扰动的影响逐渐减弱。平移20 m后，标高+1405 m运输平台内侧处的应力集中现象基本消失，平台稳定性得到了改善。从应力集中角度分析，开切眼远离边坡对于稳定边坡上部处于井工塌陷范围内的平台起到了很好的作用。

(2) 破坏场分析

图6给出了井工开切眼平移不同距离后围岩的破坏场分布图。随着开切眼距离的增加，边坡表面破坏和井工覆岩破坏逐渐分离。当平移20 m后，边坡开采引起的平台破坏不再与井工引起的塌陷区沟通，边坡坡体表面破坏范围明显减小，边坡的整体

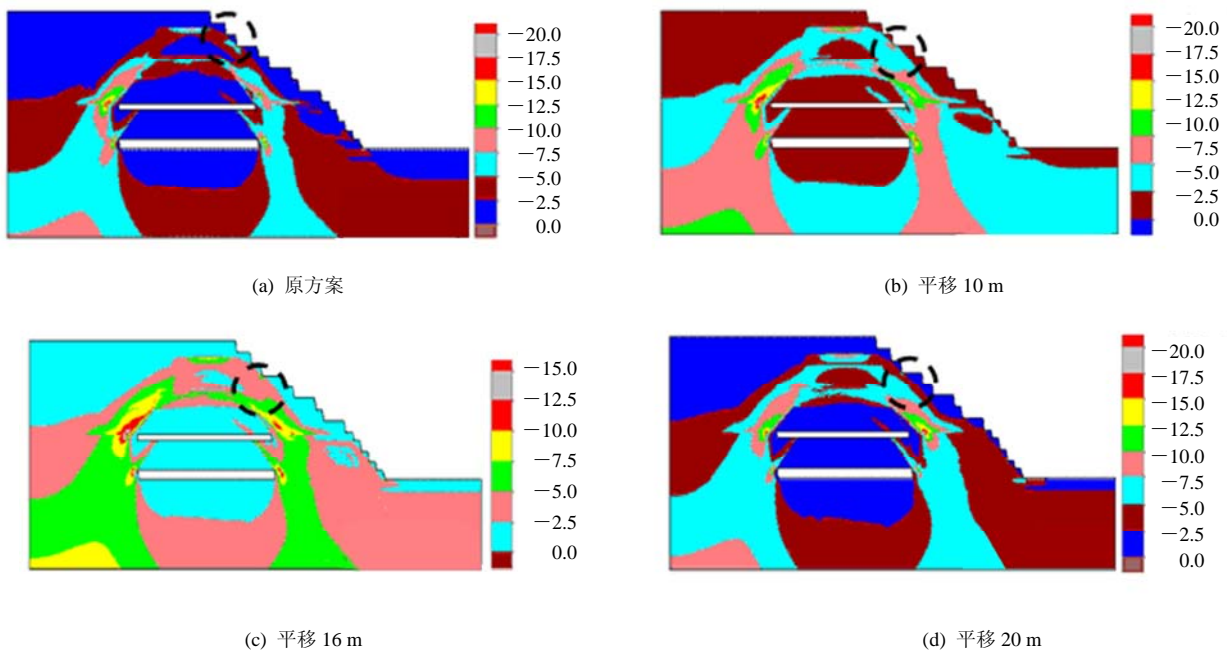


图5 边坡围岩最大主应力场(单位: MPa)

Fig.5 The maximum principal stress in surrounding rock of slope(unit: MPa)

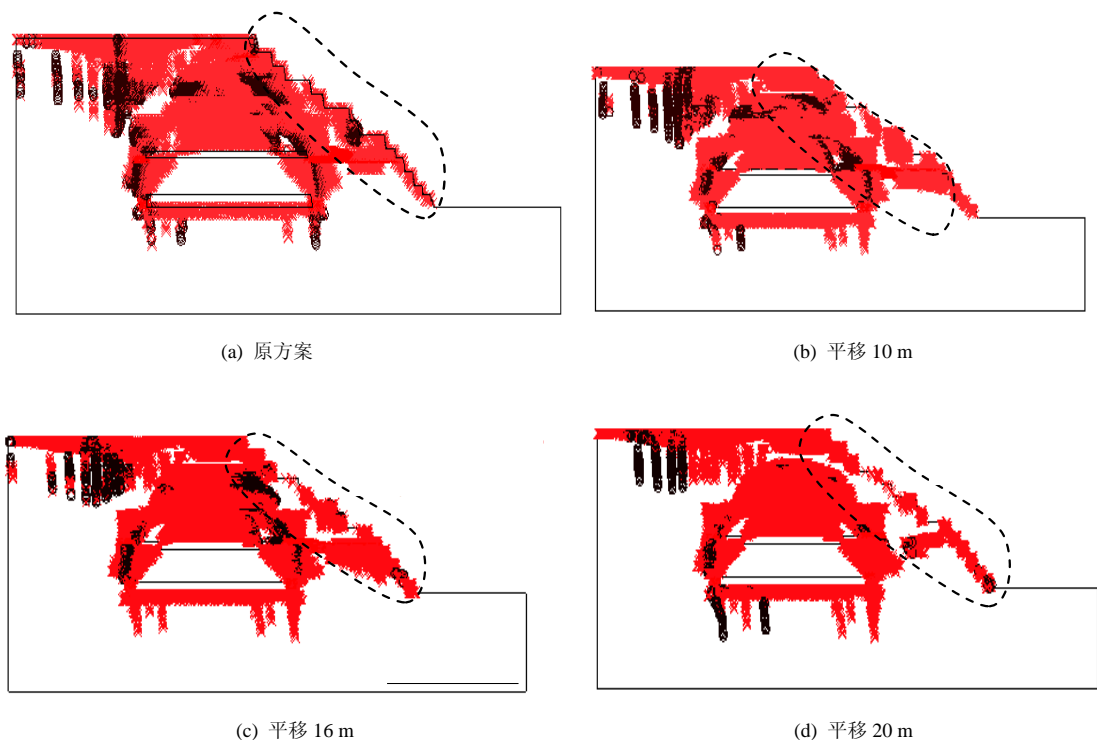


图 6 边坡围岩破坏场

Fig.6 Failure zones in surrounding rocks of slope

稳定性得到很大的改善。

(3) 边坡平台位移分析

边坡上部平台受到井工开采扰动的影响, 以沉降变形为主, 中下部平台以水平变形为主, 因此选择具有代表性的平台进行位移比较。选取受井工影响较大的上部标高+1 405 m 平台比较其垂直位移, 对处于边坡中下部的标高+1 345 m 平台比较其外侧监测点水平位移随时间的变化趋势。

随着开切眼平移距离的增加, 上部平台产生的垂直位移量逐渐减小(见图 7), 中下部平台产生的水平位移量也逐渐减小(见图 8)。开切眼平移 10 和 16 m 时, +1 345 m 平台外侧监测点的变化趋势表明, 边坡开挖结束后, 平台水平位移量仍旧保持增加的变化趋势, 边坡存在滑移的隐患。平移 20 m 时, +1 345 m 平台的水平位移量明显减小, 且在边坡开挖结束后, 监测点的水平位移量保持恒定不再增加, 平台稳定性良好。由此可见, 开切眼位置的平移对于减少上部平台沉降以及消除边坡潜在滑移面起到了积极的作用。

3.2 相似模拟试验优化

为了进一步验证井工开切眼远离边坡方案的可行性, 本文采用相似模拟试验进行了验证。图 9 给

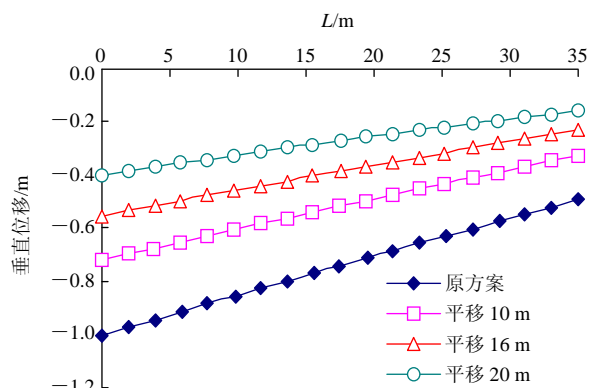


图 7 标高+1 405 m 运输平台垂直位移

Fig.7 Vertical displacements of transport platform at elevation +1 405 m

出了模型的测点布置图以及露井开采后的模型形态。

材料相似模拟试验中, 去除平移 20 m 后坡体上的覆土后, 可以看出, 此时标高+1 390 m 及其上平台避开了破碎带(见图 9(b)), 边坡受到井工开采扰动的影响明显减小, 平台上各点的沉降远小于原设计平台上各点的沉降(见表 2)。本试验验证了井工开切眼位置远离边坡 20 m 有利于边坡整体稳定这一结论的正确性。

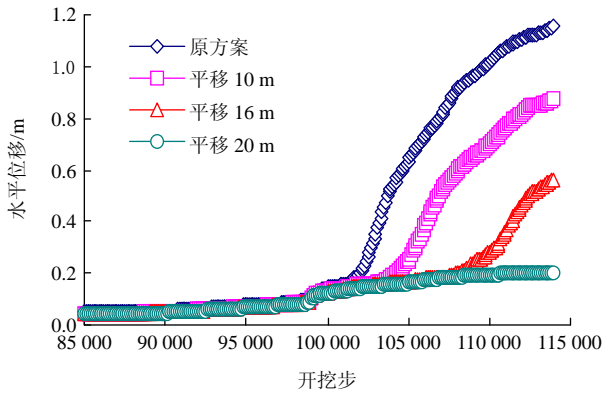
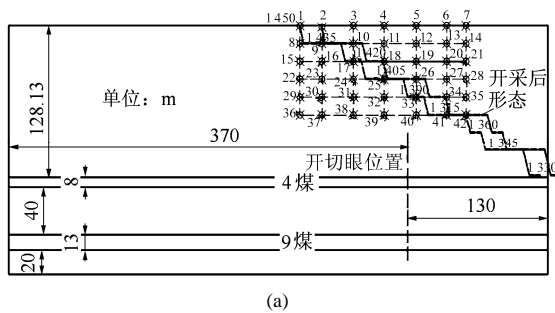
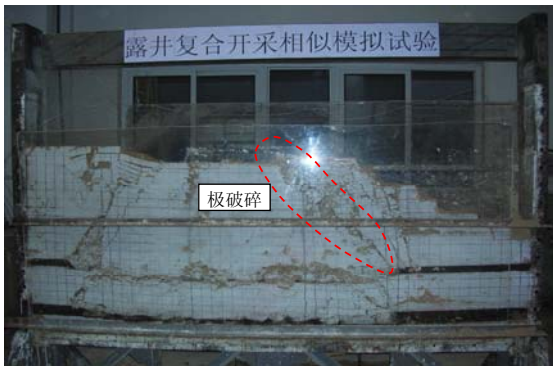


图 8 标高+1 345 m 运输平台水平位移

Fig.8 Horizontal displacement of transport platform at elevation +1 345 m



(a)



(b)

图 9 测点布置图及边坡最终形态

Fig.9 Layout of measuring points and final slope

表 2 边坡平台沉降对比表

Table 2 Comparison of slope platform settlement

测点编号	对应平台标高/m	平台沉降/cm	
		原方案	平移 20 m
2	+1 450	1055.09	578.33
10	+1 435	677.32	442.86
18	+1 420	544.46	263.11
26	+1 405	315.21	15.63
34	+1 390	113.03	13.03
42	+1 375	31.26	5.22

3.3 井工开切眼位置方案设计

由于露天边帮位置一旦确定就较难变更，因此预先确定井工开采开切眼位置对于后期露天开采十分重要。通过数值模拟优化分析以及相似模拟试验，井工矿开切眼位置应由原 $Y = 4374\ 180$ 调整为以 $Y = 4374\ 160$ 为界布置(见图 10)。图 11 分别给出了采用原方案以及优化方案(井工开切眼与边坡的水平距离增加 20 m)处理后的+1 405 m 运输平台，从图中可以看出，采用优化方案可以提高平台的稳定性，有效地保证露天边坡的安全，实现露井安全开采。

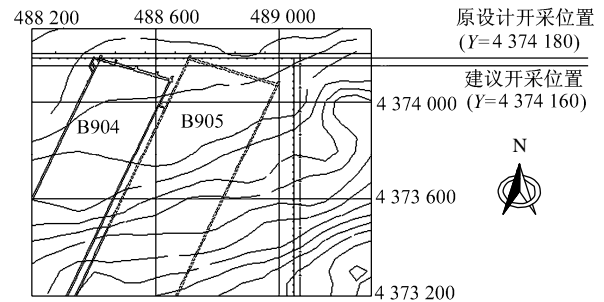


图 10 工作面开切眼位置优化方案

Fig.10 Optimization scheme of position of open-off cut in working face



(a) 原方案



(b) 优化方案

图 11 原方案及优化方案处理后+1 405 m 平台

Fig.11 Platform at elevation +1 405 m after treatment by original and optimal schemes respectively

4 结 论

(1) 受到复合井工开采扰动的影响, 原设计边坡参数不能满足其稳定性要求。

(2) 增加井工开切眼与边坡的水平距离可以减弱井工开采对边坡稳定性的影响。

(3) 本项目中增加井工开切眼与边坡之间的距离, 可以消除边坡上部平台的应力集中现象, 降低边坡的位移量, 有效地减弱了井工开采塌陷对边坡稳定性的影响。

(4) 原井工开切眼位置水平远离边坡 20 m 后, 即以 $Y = 4374\ 180$ 为界布置工作面开切眼, 边坡下部 4 煤层底板处潜在滑移面得以消除, 边坡的整体稳定性得到很好的改善。

以上研究成果, 目前已在安太堡南帮实际开采中得到应用, 并取得了良好的经济效益。

参考文献(References):

- [1] 徐长佑. 露天转地下开采[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1990: 8 - 30.(XU Changyou. Transferred underground mining from open-pit[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 1990: 8 - 30.(in Chinese))
- [2] 孙世国, 蔡美峰, 王思敬. 地下与露天复合采动效应及边坡变形机制[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 497 - 502.(SUN Shiguo, CAI Meifeng, WANG Sijing. Effect of combined underground and open pit mining and deformation mechanism of slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 497 - 502.(in Chinese))
- [3] 孙世国, 王思敬. 地下与露天复合采动影响下边坡岩体稳定性评价方法的研究[J]. 工程地质学报, 1998, 6(4): 312 - 318.(SUN Shiguo, WANG Sijing. A method for evaluation of slope rock mass stability under the combined action of open pit and underground mining[J]. Journal of Engineering Geology, 1998, 6(4): 312 - 318.(in Chinese))
- [4] 孙世国, 蔡美峰, 王思敬. 露天转地下开采边坡岩体滑移机制的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 126 - 129.(SUN Shiguo, CAI Meifeng, WANG Sijing. Study of sliding mechanism for slope due to the excavation from open pit into underground mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(1): 126 - 129.(in Chinese))
- [5] 李文秀. 急倾斜厚大矿体地下与露天联合开采岩体移动分析的模糊数学模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 572 - 577.(LI Wenxiu. Fuzzy mathematics models on rock mass displacements due to open-underground combined mining for thick ore body with steep dip angle[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(4): 572 - 577.(in Chinese))
- [6] 蓝航, 李凤明, 姚建国. 露天煤矿排土场边坡下采动沉降规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(4): 482 - 486.(LAN Hang, LI Fengming, YAO Jianguo. Research on surface subsidence of dump slope induced by mining in open colliery[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2007, 36(4): 482 - 486.(in Chinese))
- [7] 刘宪权, 朱建明, 陆游. 露井联采下井工开采顺序的优化分析[J]. 中国矿业, 2007, 16(10): 63 - 65.(LIU Xianquan, ZHU Jianming, LU You. Mining order and its optimization analysis under combined model of open-pit with underground mining[J]. China Mining Magazine, 2007, 16(10): 63 - 65.(in Chinese))
- [8] 陈忠辉, 谢和平, 王家臣. 综放开采顶煤三维变形、破坏的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 309 - 313.(CHEN Zhonghui, XIE Heping, WANG Jiachen. Numerical simulation of three-dimensional deformation and failure of top coal caving[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3): 309 - 313.(in Chinese))
- [9] 韩放, 谢芳, 王金安. 露天转地下开采岩体稳定性三维数值模拟[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(6): 509 - 514.(HAN Fang, XIE Fang, WANG Jin'an. 3D numerical simulation of the stability of rocks in transferred underground mining from open-pit[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(6): 509 - 514.(in Chinese))
- [10] 蔡美峰, 冯锦艳, 王金安. 露天高陡边坡三维固流耦合稳定性[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(1): 6 - 11.(CAI Meifeng, FENG Jinyan, WANG Jin'an. Three-dimensional hydraulic coupled stability of a high steep open pit slope[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(1): 6 - 11.(in Chinese))