

井工开采对露井联合采边坡稳定影响的塑性极限分析

朱建明¹, 张宏涛², 周保精³, 徐金海³

(1. 北京航空航天大学交通科学与工程学院, 北京 100083; 2. 北京科技大学土木与环境学院, 北京 100083; 3. 中国矿业大学矿业工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘 要: 针对目前对露井联合采边坡稳定研究方法的局限性和不足, 首先根据露井联合采边坡稳定的特征, 基于塑性力学上限定理的边坡稳定极限分析方法, 建立了井工长壁开采沉陷岩体的机动位移场, 对沉陷岩体利用塑性极限分析方法建立功能方程。其次, 利用该方法对安太堡南侧排土场下井工开采导致地表沉陷岩体进行了研究, 分析了井工开采产生的沉陷对周围岩体特别是边坡岩体沉陷稳定和边坡稳定的影响, 提出了露井联合采边界参数应以井工开采工作面与边坡台阶的垂直安全距离为依据确定, 其井工矿工作面开切眼位置应以 $Y=74160$ (与露天矿边坡水平距离为 231 m) 为界布置, 才能保证安全高度在 105 m 以上, 实现安太堡南帮在露井联合采下的安全稳定。

关键词: 露井联合采; 塑性力学上限定理; 沉陷岩体; 边界参数; 垂直安全高度

中图分类号: TD31

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2010)03-0344-07

作者简介: 朱建明(1963-), 男, 江苏人, 副教授, 从事边坡与岩石力学研究。E-mail: zjm2000@buaa.edu.cn。

Plastic limit analysis of stability of the open-pit slope subject to underground mining

ZHU Jian-ming¹, ZHANG Hong-tao², ZHOU Bao-jing³, XU Jin-hai³

(1. School of Transportation Science and Technology, Beihang University, Beijing 100083, China; 2 School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology of Beijing, Beijing 100083, China; 3. School of Mining Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Aiming at the current limitations of the method for slope stability under open-underground mining, first of all, according to the characteristics of slope stability under open-underground mining and the limit analysis method for slope stability based on the upper bound theorem of plastic mechanics, a mobile displacement field of submerged rock under longwall mining is established, and in the meantime, the equation for submerged rock is obtained accordingly by using the method of plastic limit analysis. Secondly, the submerged rock of southern Antaibao open-pit slope under open-underground mining is studied by using the method, and the influence of subsidence caused by underground mining on vicinal rock and slope stability are analyzed. The following measures are proposed: the boundary parameter should be established depending on the vertical height of safe mining between mining face and slope bench. Accordingly, the mining face should be bounded by 71460 (Y value) to ensure its vertical height of safe mining to be more than 105 meter, which can guarantee the stability of southern Antaibao open-pit slope under open-underground mining.

Key words: open-underground mining; upper bound theorem of plastic mechanics; submerged rock; boundary parameter; vertical height of safe mining

0 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。目前针对浅埋水平厚煤层的开采, 采用露井联合开采模式在我国的亿t煤炭基地平朔等矿区已被逐渐采用^[1-3]。由于露采边坡与井工开采产生的岩层塌陷移动存在相向交叉, 导致露井联合采之间相互干扰, 从而使露采边坡稳定性受到严重影响^[4-5]。因此露井联合采模式下, 井工开采产生的沉陷对露天矿边坡

稳定安全问题和露井边界参数的优化问题越发引起了人们的关注和重视。

传统的边坡稳定和地基承载力分析方法都基于极限平衡分析的方法(如 Fellenius 法、Bishop 法、Janbu 法、Morgenstern-Prince 法、Spencer 法、Sarma 法等)。

基金项目: 国家自然科学基金项目(50479001); 中煤能源集团公司攻关项目

收稿日期: 2009-01-11

近年来,陈祖煜^[6-8]等在二维和三维领域分别应用塑性力学上限定理对边坡稳定进行了研究,建立比较完整的塑性极限分析理论和方法,并在水电工程领域得到了很好的应用。

由于露井联采涉及沉陷区岩体的损伤辨识,以及沉陷区岩体存在的潜在弱面对边坡稳定的影响,对于这样复杂的复合开采下边坡稳定问题,文献[9]虽然进行了研究,但仍存在一些不足,主要是边坡安全系数计算没有深入考虑沉陷区岩体的影响,其计算结果与实际尚存在差距。因此有必要对上述问题进行分析研究。本文应用基于边坡稳定极限分析方法,通过建立沉陷岩体的机动位移场,对沉陷岩体利用岩土极限分析方法建立功能方程,并利用该方法对安太堡煤矿的沉陷岩体进行了研究分析,分析了沉陷对周围岩体沉陷稳定和边坡稳定的影响。

这里岩土稳定的安全系数采用工程中广泛接受的安全系数的定义,即将材料的抗剪强度参数按 F 缩减后,边坡处于极限状态。

$$\left. \begin{aligned} c_e &= c/F, \\ \tan f_e &= \tan f/F, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, c_e , f_e 为缩减后的黏聚力与内摩擦角。

1 边坡稳定极限分析的上限法

如图1所示为一个处于极限状态的边坡的真实的“破坏机构”,其完全塑性区用 Ω 表示,弹性区用 E 表示,滑裂面用 Γ 表示,表面荷载用 T 表示,滑面上和滑体内的真实应力用 s_{ij} 表示。设边坡的另外一个“假定”的破坏机构 Ω^* 与 Γ^* , 在 Ω^* 与 Γ^* 处处达到极限状态,滑面内与滑面上的应力用 s_{ij}^* 表示。对于这样一个“破坏机构”,边坡稳定的塑性力学的上限定理可表述为 (Donald & Chen)^[6]:

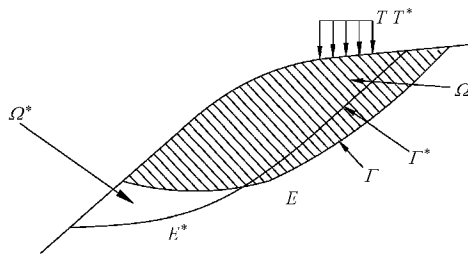


图1 处于极限状态的边坡的“破坏机构”

Fig. 1 “Collapse mechanism” of a slope in limit state

在塑性区 Ω^* 与 Γ^* 上的每一点,按Mohr-Coulomb屈服准则与相关流动法则构筑一个机动许可的应变场 \mathcal{E} 和 \mathcal{E} , 则按下式计算的边坡的极限荷载 T^* 一定不比真实的破坏机构对应的极限荷载 T 小:

$$\int_{\Omega^*} s_{ij}^* \mathcal{E}_{ij} dv + \int_{\Gamma^*} s_{ij}^* \mathcal{E}_{ij} ds = \int_L T^* \mathcal{E} ds + \int_{\Omega^*} W_i \mathcal{E} dv, \quad (2)$$

式中, 左边两项分别为滑坡体 Ω^* 内与滑面 Γ 上的内能耗散, L^* 为外力 T^* 作用的长度。右侧分别为外力与重力所做的功。

当材料服从Mohr-Coulomb屈服准则时,其相应的屈服函数为

$$f(s, t) = t - c - s \tan f. \quad (3)$$

当材料服从相关流动法则时,此时塑性势面与屈服面重合,因此破坏面上的法向塑性速度 V_n 与切向塑性速度 V_s 的大小满足下面的关系式:

$$\frac{V_n}{V_s} = \frac{\partial g / \partial s}{\partial g / \partial t} = \frac{\partial f / \partial s}{\partial f / \partial t} = -\tan f, \quad (4)$$

式中, g 表示塑性势函数。对于相关材料, $g = f$ 。

式(4)表明,对于满足Mohr-Coulomb屈服准则与相关流动法则的材料来说,破坏面上的塑性速度与破坏面的夹角为 f 。如图2(a)所示。

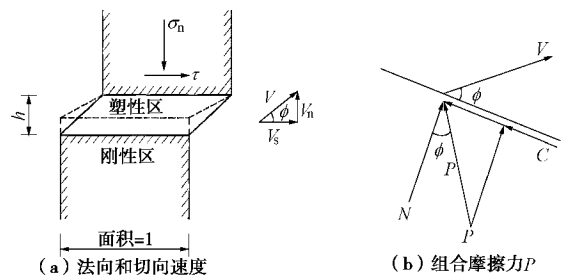


图2 Mohr-Coulomb 相关流动法则和能量耗散

Fig. 2 Mohr-Coulomb associative plastic flow rule and energy dissipation

破坏面上的内力在塑性速度上做的功称为内能耗散。单位面积的内能耗散能为

$$dD = tV_s + sV_n = (t \cos f - s \sin f)V = c \cos f V. \quad (5)$$

若破坏面上存在孔隙水压力 u , 为计算方便,通常将孔隙水压力这一外力所做的功以负号的形式包含在内能耗散的公式(4)中,即

$$dD = (c \cos f - u \sin f)V. \quad (6)$$

式(5)、(6)表明在满足Mohr-Coulomb屈服准则与相关流动法则情况下,可以在不用知道未知应力的情况下得到破坏面上塑性内能耗散。

2 开挖岩体沉陷稳定分析方法

国内外学者对长壁开采引起地面沉陷的研究,主要是对地表位移的研究,一般基于理论模型或经验模型,各自的适用范围也不同。Peng^[10]从静力平衡的角度研究分析了长壁开采对地表边坡稳定的影响,得到了边坡的安全系数。而基于塑性极限分析方法的边坡稳定研究近年来得到了一些学者的重视, Davis^[11]等和 Leca^[12]等分别从极限分析上下限定理出发研究了浅埋隧洞开挖引起的纯剪和纯摩土体的稳定性。

研究如图3 (a) 所示岩体的稳定情况。这里假设沉陷岩体中存在一中性面, 该面内岩体的运动方向是竖直向下的。中性面是虚拟的, 左右两部分岩体破坏速度的竖向分量为中性面速度。如图3 (b) 所示。

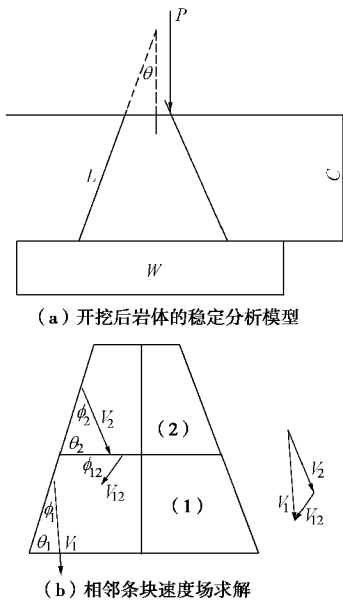


图3 开挖后岩体的稳定及速度场求解

Fig. 3 Rock stability and solution for velocity field after mining

考察图3 (b) 中两个相邻条块, 其塑性速度分别用 V_1 和 V_2 表示, 其界面的相对速度为 V_{12} 。据 Mohr-Coulomb 屈服准则与相关联流动法则, 条块的塑性速度与底滑面夹角为 f , 而相邻条块的相对速度与其交界面的夹角为 f_{12} 。由于速度场是协调的, 条块间不能出现重合或分离现象, 而是闭合的, 于是有下面的式子成立:

$$V_2 + V_{12} = V_1, \tag{7}$$

于是有

$$\frac{V_{12}}{\sin(q_2 + f_2 - q_1 - f_1)} = \frac{V_1}{\sin(q_2 + f_2 - f_{12})} = \frac{V_2}{\sin(q_1 + f_1 - f_{12})}. \tag{8}$$

式 (8) 表明, 对于多块体系统, 若第一个条块的速度场 V_1 已知, 则其它条块的速度与条块间的相对速度均可表示为 V_1 的线性函数。

右边的第一个条块速度 V_r 可以根据左边条块 V_l 的竖向分量求出

$$V_l \sin(q_l + f_l) = V_r \sin(q_r + f_r). \tag{9}$$

然后其它条块的速度与条块间的相对速度同样可表示为 V_l 的线性函数。

可以推广到更一般情况, 假设岩体破坏模式为如图4所示。只要知道左下角第一个条块的速度, 界面和滑面的摩擦角已知的情况下, 所有条块的速度均可以通过速度矢量三角形得到。

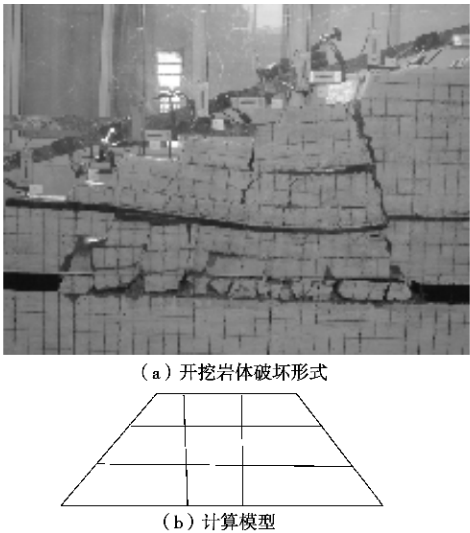


图4 岩体一般破坏形式及计算模型

Fig. 4 Common failure mode and calculating model for rock

3 井工开采沉陷对安太堡南帮边坡稳定影响分析

3.1 井工开采岩体沉陷稳定分析

安太堡南帮是安家岭二号井工矿与安太堡露井联合开采影响的端帮, 是两个露井联采矿井的主要边界。在其端帮下安家岭二号井工矿分别布置了B900、B901、B902、B903等近20个工作面。此井工开采对安太堡南帮边坡稳定性带来了严重影响, 搅乱了安太堡南帮的正常开采顺序, 使其露天双环运输被迫改为单环运输, 极大地增加了安太堡矿的运输成本。其南帮开采顺序经过优化后^[13-14]为B901、B902、B900。利用上述介绍的开采沉陷稳定分析方法, 对B900、B901工作面进行分析, 如图5所示。根据上述开采情况, 分析#9煤的开采顺序为从右向左, 从B901开挖至B900工作面, 主要分析#9煤层开采过程中采空区上方岩体的沉陷稳定性, 得出B900工作面与露天边坡之间的最佳位置关系, 对其后续安太堡南帮下工作面合理位置布置提供决策依据。

露天边坡和开采沉陷岩体的计算模型如图6所示。岩层分布近似为砂岩和黄土两种材料, 计算中采用的材料抗剪强度参数见表1。

表1 沉陷岩体的抗剪强度参数

Table 1 Parameters of shear strength of submerged rock

层号	岩性	重度 $g/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $j/(\text{^\circ})$
1	黄土	1960	0.125	18
2	砂岩	2300	0.250	38
3	粉砂岩	2600	0.500	38
4	#4 煤层	1440	0.040	26

首先对模拟开采推进至200 m（标高1435 m）时，开采上方岩体的稳定性进行计算分析。假设此时开采宽度为200 m。取不同的坍塌角（条块界面强度取为0），得到的沉陷岩体稳定系数如图7所示。结果可知，在界面强度取0时，沉陷稳定系数在坍塌角为90°时达到最小。当界面强度为 $c=200\text{ kPa}$ ， $j=20^\circ$ 时得到的稳定系数与强度为0相比差别不大，说明在界面上的能量耗散不大。

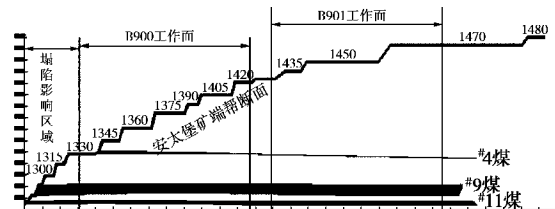


图5 开采剖面地质模型

Fig. 5 Geologic section model of mining

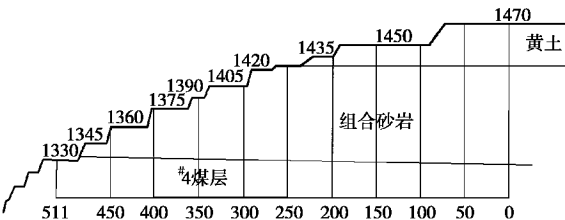


图6 开采后沉陷岩体计算模型

Fig. 6 Calculating model of submerged rock after mining

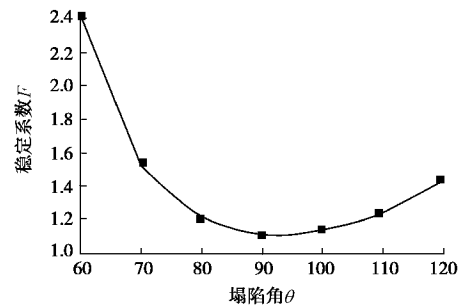


图7 不同坍塌角对应的岩体稳定系数（开采宽度200 m）

Fig. 7 Stability factors of rock corresponding to different angles of subsidence (width of mining is 200 m)

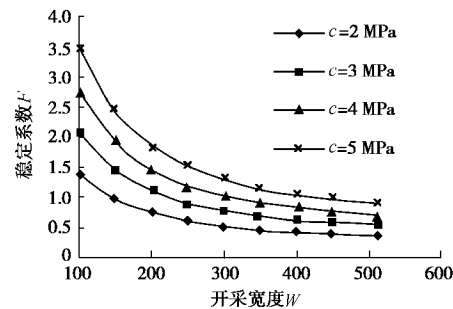


图8 沉陷岩体稳定系数与开采宽度的关系

Fig. 8 Relationship between stability factors of submerged rock and width of mining

随着#9煤层的继续开采，为分析岩体强度参数对岩体沉陷稳定系数的影响，取砂岩强度 $c=2\sim5\text{ MPa}$ ， $j=38^\circ$ ，取坍塌角为90°，得到岩体沉陷的稳定系数与开采宽度的关系如图8（条块界面强度取为0）。

由计算结果可知，砂岩强度 $c=5\text{ MPa}$ 时，当开挖至400 m（标高1375 m）时，此时距地表深度为92 m，开挖上方土体的安全系数为1.04。砂岩强度 $c=4\text{ MPa}$ 时，当开挖至300 m（标高1405 m）时，此时距地表深度为116 m，开挖上方岩体的安全系数为1.03。而随砂岩强度取值的降低，岩体安全系数也随着降低。

文献[14]用FALC数值模拟井下开采过程，当工作面开挖至1390 m，此时距地表深度为105 m时，开采上方岩体完全沉陷，与上述用上限分析方法得到的1405 m左右开始沉陷基本一致。

因此理论分析表明，在安太堡南帮露天与井工联合开采的边界确定，应保证井工开采边界位置处与露天边坡的垂直安全距离在105 m以上，对其后期南帮井工开切眼位置应以 $Y=74160$ （与露天矿边坡水平距离为231 m）为界布置，才能满足上述安全距离。此时露井联合采时露天边坡稳定基本能得到保障。

3.2 岩体边坡稳定敏感性分析

本文采用陈祖煜等应用最优化方法开发的自动寻找最小安全系数和临界滑裂面、临界斜分条模式能力的稳定分析程序（EMU）^[15]分析上述边坡稳定敏感性问题。由于实际的岩土材料在滑动时已经破裂，材料如表2。主要分析了开采过程中土体沉陷对局部和整体露天边坡的影响，并且考虑爆破载荷和降水对边坡稳定性的影响，稳定分析的计算模型如图9，计算结果见表3。

表2 极限分析中采用的岩体力学参数(折减系数为1)

Table 2 Mechanical parameters of rock used in limit analysis

(reduction factor=1)			
层号	岩性	重度 $g/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 c/MPa
1	黄土	1960	0.125
2	组合砂岩	2300	2~5
		内摩擦角 $j/(^\circ)$	
		18	
		38	

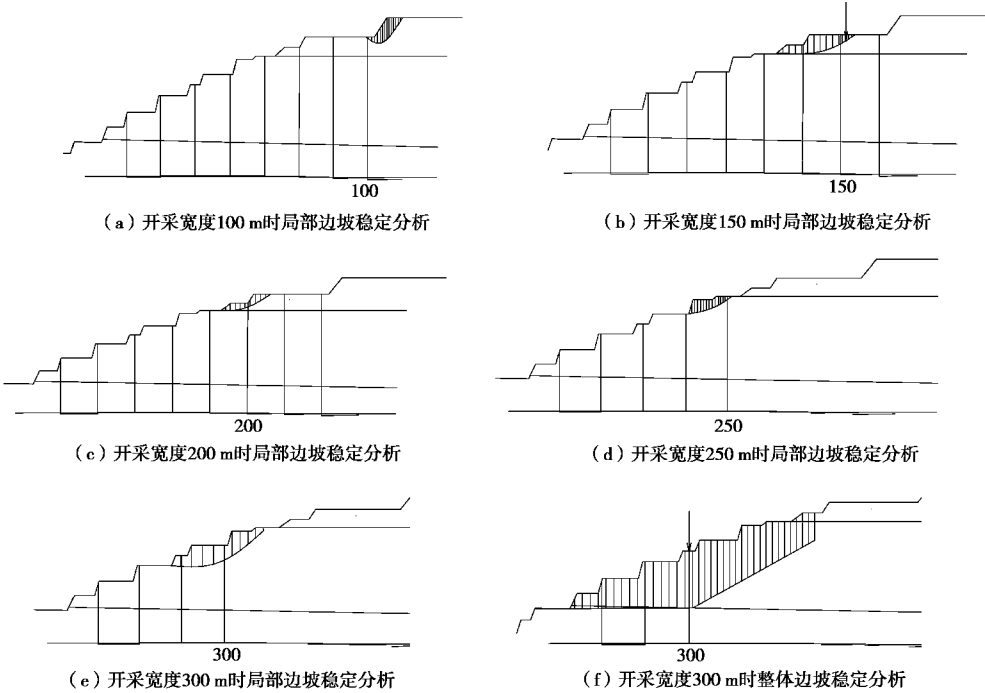
通过考虑自然条件，以及爆破、降水等复杂条件下边坡稳定系数分析显示：当沉陷100 m时，由于此时局部边坡材料为黄土，力学强度参数较低，因此沉陷岩土局部边坡安全系数为1.2~1.6，稳定性比较差，见图9（a）。当沉陷150，250 m时，由于周围没有陡峭边坡，因此沉陷对边坡影响不大，局部和整体边坡安全系数在4.3以上，稳定性好。其余当沉陷300，350，400 m时，由于临近#4煤层，强度参数较低，因此沉陷土体与#4煤层结合形成的主滑面，安全系数相对较低，如图9（f）、（h）、（j）所示。但当沉陷450，500 m时，由于容易形成边坡，此时局部边坡安全系数在

表 3 岩体沉陷后露天边坡的稳定安全系数(考虑爆破和降水)

Table 3 Stability factors of open-pit slope after rock subsided (considering blasting and precipitation)

开采宽度/m	强度折减	安全系数	考虑爆破的安全系数	考虑降水的安全系数
		自然状态	爆破影响	降水影响
100	/1	2.844		
	/2	1.626		
	/3	1.214	1.103	1.185(1.021)*
150	/1	4.504		
	/2	4.494		
	/3	4.333	3.477	4.177(3.252)
200	/1	4.374		
	/2	3.276		
	/3	2.770	2.354	2.702(2.085)
250	/1	6.797		
	/2	5.614		
	/3	5.210		
300	整体边坡	4.569	3.902	4.364(3.578)
	/1	4.914		
	/2	3.809		
350	/3	3.270		
	沿#4 煤	2.674	2.373	2.463(1.922)
400	/1	4.912		
	/2	3.806		
	/3	3.435		
450	沿#4 煤	1.669	1.439	1.618(1.263)
	/1	3.052		
	/2	2.560		
500	/3	2.407	2.148	2.299(1.981)
	沿#4 煤	1.938	1.666	1.851(1.417)
	/1	2.982		
550	/2	2.148		
	/3	1.887	1.442	1.745(1.210)
600	/1	3.875		
	/2	3.263		
	/3	3.062		
整体边坡		2.577	2.314	2.509(2.176)

注：其中带*括号内的结果为考虑降水对强度的影响，进行强度折减（/3.3）得到的结果。



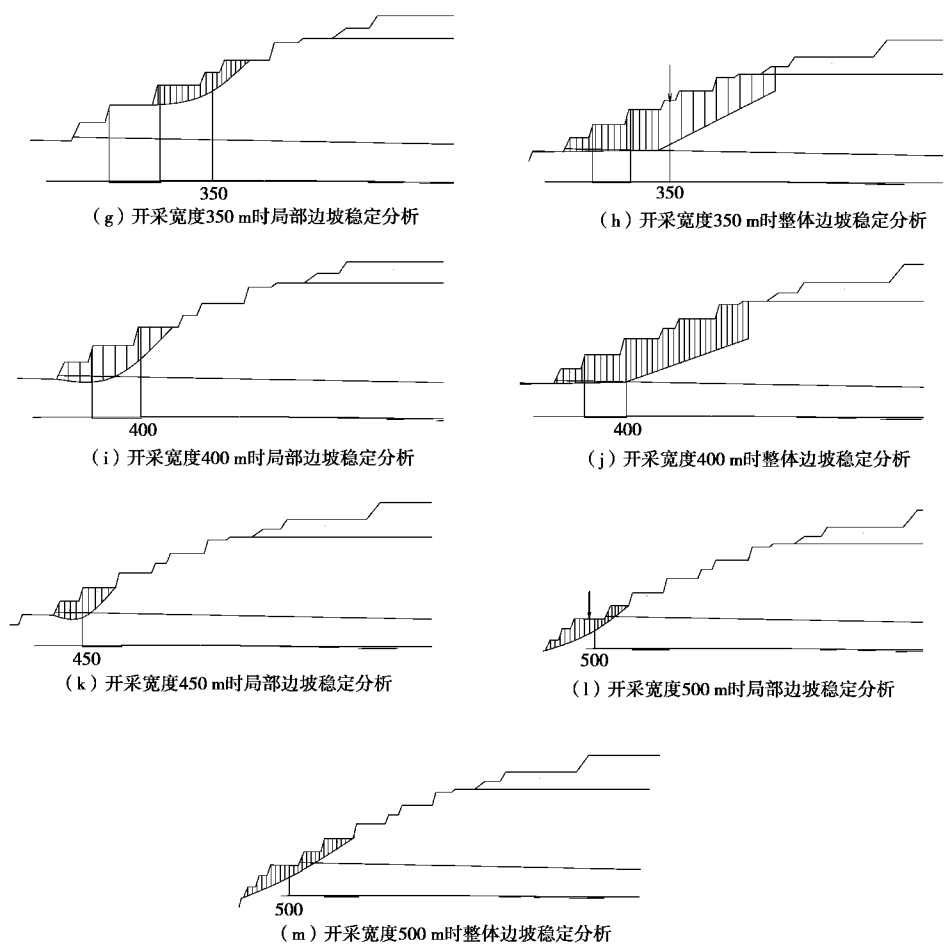


图 9 开采沉陷岩土边坡稳定分析模型

Fig. 9 Analytical model of rock slope stability under mining subsidence

1.9~2.577 之间, 如图 9 (k)、(l), 相对比较稳定。此时主要是长壁开采导致大部分边坡整体沉陷。另一方面, 爆破和降水对边坡的稳定都有不同程度的降低, 其中最危险的情况为沉陷 350 m 和 450 m。

结合开采沉陷稳定性分析和 FLAC 数值计算分析结果^[16], 这里主要以开采宽度 350 m 为边坡稳定的极限状态, 对照图 6 此时井工边界应布置应在露天边坡 1390 平台, 此时垂直安全高度为 105 m, 井工开采工作面即以 $Y=74160$ (与露天矿边坡水平距离为 231 m) 为界布置。因而进一步验证了上述理论分析的结果。

原设计方案以及采用上述优化方法以 $Y=74160$ (与露天矿边坡水平距离为 231 m) 为界布置工作面开切眼位置即垂直安全高度为 105 m 时现场+1405 m 运输平台的边坡现状, 从图中可以看出采用优化方案可以提高边坡的稳定性, 有效地保证了露天开采的边坡安全, 实现露井安全开采。



图 10 原方案+1405 m 平台边坡现状

Fig. 10 Slope status of 1405 stage in original plan

图 10 和 11 分别给出了没有采用上述方法分析的



图 11 优化方案+1405 m 平台边坡现状

Fig. 11 Slope status of 1405 stage in optimization plan

4 结 论

(1) 露井联合实际开采过程表明, 水平厚煤层露井联合采相互影响实际上为岩体边坡的极限平衡问题, 因此本研究在理论研究上首次将塑性极限分析上限的方法引入到露井联合开采过程的研究中, 符合实际开

采过程。

(2)通过对现有露天边坡稳定性和井工开采沉陷区未来露采边坡稳定性分析表明,只要控制好露井联采的边界参数,即现有露天边坡下井工开采关键是保证两者的有效安全高度在 105 m 以上,就能达到其岩体沉陷的稳定系数均大于 1。

(3)安家岭二号井工矿 B900 工作面与安太堡南帮边坡的合理边界应保证其在 1390 平台以上,对于南帮后期二号井工矿工作面开切眼布置应以 $Y=74160$ (与露天矿边坡水平距离为 231 m) 为界布置,才能保证其边界安全高度在 105 m 以上,实现南帮的安全开采。

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:

- [1] 刘勇, 实施露井联合开采加强资源回收[J]. 露天采矿技术, 2004(4): 11 - 12. (LIU Yong. Carry out open-underground mining reinforce resource recovery[J]. Opencast Mining Technology, 2004(4): 11 - 12. (in Chinese))
- [2] 张永成, 王长友. 平朔矿区高产高效矿井设计经验浅析[J]. 煤炭工程, 2006(8): 5 - 7. (ZHANG Yong-cheng, WANG Chang-you. Briefly analyze the experience of high-production and high-effect mine design in PingShuo mining areas[J]. Coal Engineering, 2006(8): 5 - 7. (in Chinese))
- [3] 刘永忠. 安家岭井工矿露天不采区采煤方法的选择论证[J]. 煤炭技术, 2006(9): 42 - 43. (LIU Yong-zhong. Choice argument of mining coal methods of opencut mining non-mining field in Anjialing pithead industry coal mine[J]. Coal Technology, 2006(9): 42 - 43. (in Chinese))
- [4] 牛成俊. 现代露天开采理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 1990. (NIU Cheng-jun, Theory and practice of modern open mining[M]. Beijing: Science Press, 1990. (in Chinese))
- [5] 贺佑国, 王端武, 白占平. 国内外煤矿的发展趋势[J]. 中国煤炭, 1996, 24(8): 13 - 17. (HE You-guo, WANG Duan-wu, BAI Zhan-ping, Development tendency of coal mine in domestic and oversea[J]. China Coal, 1996, 24(8): 13 - 17. (in Chinese))
- [6] DONALD I B, CHEN Z Y. Upper bound solutions in geomechanics[C]// Computational Plasticity, Fundamentals and Applications Proc 4th Int Conf Comp Plas, Barcelona, Spain, 1995: 1797 - 1808.
- [7] CHEN Z, WANG X, HABERFIELD C, YIN J, WANG Y. A three-dimensional slope stability analysis method using the upper bound theorem, part I: theory and methods[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38: 369 - 378.
- [8] CHEN Z, WANG J, YIN J, WANG J, HABERFIELD C. A three-dimensional slope stability analysis method using the upper bound theorem, part II: numerical approaches, applications and extensions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38: 379 - 397.
- [9] 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 Shi-guo, CAI Mei-feng, WANG Si-jing. Study of sliding mechanism for slope due to the excavation from open pit into underground mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(1): 126 - 129. (in Chinese))
- [10] PENG S S, LUO Y. Slope stability under the influence of ground subsidence due to longwall mining[J]. Mining Science and Technology, 1989(8): 89 - 95.
- [11] DAVIS E H, GUNN M J, MAIR R J, et al. The stability of shallow tunnels and underground openings in cohesive material[J]. Géotechnique, 1980, 30(4): 397 - 406.
- [12] LECA E, DORMIEUX L. Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material[J]. Géotechnique, 1980, 30(4): 407 - 416.
- [13] 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(10): 63 - 65. (LIU Xian-quan, ZHU Jian-ming, LU You. Mining order and its optimization analysis under combined model of open-pit with underground mining[J]. China Mining Magazine, 2007(10): 63 - 65. (in Chinese))
- [14] 刘宪权, 朱建明, 冯锦艳, 等. 水平厚煤层露井联和开采下边坡破坏机理[J]. 煤炭学报, 2008(12): 1346 - 1350. (LIU Xian-quan, ZHU Jian-ming, FENG Jin-yan. Mechanism of the slope failure of horizontal thick coal seam under the condition of combined mining[J]. Journal of China Coal Society, 2008(12): 1346 - 1350. (in Chinese))
- [15] 杨健, 陈祖煜, 何传永. 昌马水库右岸山体稳定性研究[J]. 水文地质工程地质, 2004(1): 24 - 26. (YANG Jian, CHEN Zu-yu, HE Chuan-yong. Stability of the right abutment slope of Changma Reservoir[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004(1): 24 - 26. (in Chinese))
- [16] 朱建明, 刘保宽, 徐金海, 等. 露井联系技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009: 19 - 34. (ZHU Jian-ming, LIU Bao-kuan, XU Jin-hai, et al. Open-pit and underground combined mining technology[M]. Xuzhou: China University and Technology Press, 2009: 19 - 34. (in Chinese))