

露天和地下联合开采引起矿山岩层 移动规律的数值模拟研究

黄平路, 陈从新

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 分别利用有限元和离散元法对金山店铁矿进行二维数值模拟研究, 得出在考虑和不考虑民采 2 种情况下的地表变形规律和矿体围岩移动规律。计算结果表明, 地下开采在采空区周围形成椭圆形松动区, 椭圆的长轴与矿体的倾向基本一致。民采不会与地下采空区形成“通天”现象, 而且对地下开采形成的松动区大小影响很小。民采造成矿体上部岩体的应力重分布, 虽没有明显增大地表的沉降范围, 但是增加民采点附近的地表沉降量, 而且大大增大了地表岩层的水平移动。

关键词: 采矿工程; 有限元法; 离散元法; 地下开采; 岩层移动

中图分类号: TD 31, O 241

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 2 - 4037 - 07

NUMERICAL SIMULATION RESEARCH ON ROCK MOVEMENT CAUSED BY SURFACE MINING AND UNDERGROUND MINING

HUANG Pinglu, CHEN Congxin

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Illegal mining has a great influence on stability of mines. In the paper, two-dimensional numerical simulation on Jinshandian underground iron mine is carried out by using finite element method and discrete element method. The regulations of surface deformation and surrounding rock movement with/without illegal mining are obtained, respectively. The obtained results indicate that an elliptic disturbed zone is formed around underground gob and the major axis of ellipse is parallel with the tendency of the orebody. Gobs formed by illegal mining and underground mining will not connect. In addition, illegal mining has little influence on the size of underground disturbed zone. Because of stress redistribution caused by illegal mining, the size of surface subsidence increases near surface gob; and horizontal displacement of surface increases greatly, but the range of surface subsidence is almost found without change.

Key words: mining engineering; finite element method; discrete element method; underground mining; rock movement

1 引言

由于矿山地下开采引起的地表变形涉及到地表

居民点和重要设施的保护问题, 所以对不同采矿方法、采矿工艺和技术参数下矿区地表陷落、变形情况进行预测就成为采矿设计的基础^[1]。非法民采是指没有通过国家相关部门批准, 在毫无技术指导的

收稿日期: 2006 - 08 - 24; **修回日期:** 2006 - 10 - 31

作者简介: 黄平路(1980 -), 男, 2002 年毕业于武汉理工大学资源与环境工程学院采矿工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土力学与工程方面的研究工作。E-mail: hpl1980@163.com

情况下在矿区矿体埋藏比较浅、易开采的地方对矿体进行直接开采，一般为露天开采。非法民采由于其没有对围岩安全稳定性等因素进行考虑而进行滥采，从而对矿山地下开采的稳定性具有重要影响，因此研究非法采民这种形式的露天开采对岩层移动规律的影响是十分必要的。李文秀^[2]针对于急倾斜厚大矿体提出了露天和地下联合开采岩体移动分析的模糊数学模型；胡伟等^[3、4]研究了露天和地下联合开设置安全保留层的参数计算与优化问题；孙世国等^[5]探讨了露天转地下开采时露天边坡的滑移机制。由于矿山开采周期较长，对岩层移动的研究只能通过地质力学模型试验或数值模拟进行预测性研究，很难得到实际验证，为此本文以金山店铁矿为例采用数值计算的方法研究了露天和地下联合开采用下矿区岩层的移动规律。

金山店铁矿东区拟采用崩落法进行开采，在-270 m 水平开始放顶，设计放顶高度为 18 m，采矿预计年下降速度为 14 m。目前金山店东区的民采主要有 1[#]，2[#]两个民采点，现已采到-130 m 水平(见图 1，A₁~F₄为分区代号)，总回采矿量约 100 万 t。由于无法得到非法开采的详细情况，在模拟民采时，认为民采是由地表开始，沿矿体垂直向下开采。本次计算的主要内容是综合分析开采现状，确定考虑和不考虑民采 2 种情况下各水平回采结束时矿体上部岩层的移动变形情况。

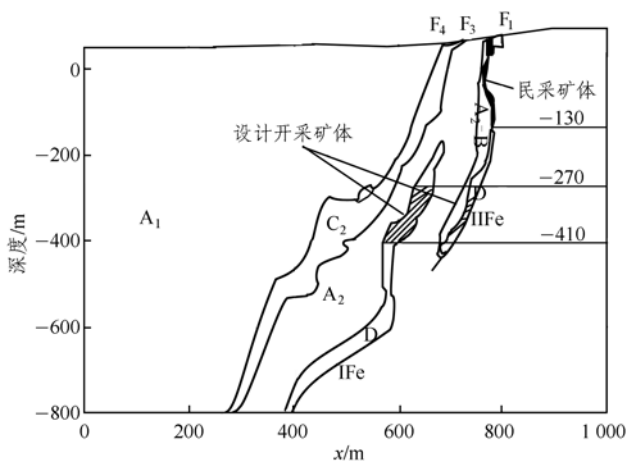


图 1 32[#]剖面地质图

Fig.1 Geological profile of section #32

2 二维有限元计算

有限元法是一种基于连续介质理论的，发展比较成熟的数值计算方法。本次二维有限元非线性计算采用大型通用有限元软件 ANSYS，它主要采用四

边形单元模拟岩体和矿石，按理想弹塑性体处理，采用 Drucker-Prager 屈服准则^[6、7]。

2.1 计算模型

由于民采的情况十分复杂，在考虑民采对沉降和移动范围影响时，分别计算了不考虑和考虑民采 2 种情况下的地表变形和岩层移动规律。由于 1[#]，2[#]两个民采点分别位于 32[#]剖面线两侧，研究选取了 32[#]剖面线所处剖面作为本次计算剖面。民采是由地表开始，沿矿体垂直向下开采，已采至-130 m 水平，考虑民采影响时，在建立 32[#]剖面模型后，先进行民采的模拟，即对该剖面-130 m 水平~地表的矿体进行开采，然后再按设计开采方案进行开采。

计算范围是根据先前所做的移动角、陷落角研究预估的开采影响范围，并在水平和垂直方向上分别进行适当延伸确定的^[1]。计算剖面所取范围：水平方向长为 1 400 m，垂直方向从地表~-800 m 水平。模型的节点总数为 12 513 个，岩体及矿石单元总数为 8 298 个。

2.2 计算参数

计算中采用的岩体力学参数如表 1 所示。初始地应力场按自重应力场考虑，计算体的边界条件指定为单方向位移等于 0 的位移边界条件，即分别指定其在 x, y, z 方向上的位移为 0。在初始地应力场存在的条件下，模拟地下开采过程采用 ANSYS 中的 EKILL 命令，即杀死单元法。用 EKILL 命令杀死单元时，并不是把单元体删除掉，而是把被开挖单元的刚度乘以一个很小值，使死单元的质量、荷载等产生的效果都近似为 0^[6~8]。

表 1 岩体物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of rock masses

分区代号	介质	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	E/GPa	μ	c/MPa	$\phi/(\text{°})$
A ₁	角页岩	27	20	0.25	2.0	50
C ₁	岩浆岩	27	20	0.25	2.0	50
A ₂	角页岩	26	6	0.30	1.0	45
B	大理岩	26	6	0.30	1.0	45
C ₂	岩浆岩	27	20	0.25	1.5	50
D	矿石	34	4	0.35	0.7	38
F ₁ , F ₃ , F ₄	断层					26

2.3 计算结果

根据上述计算方案得出计算的结果如图 2~5 和表 2 所示。

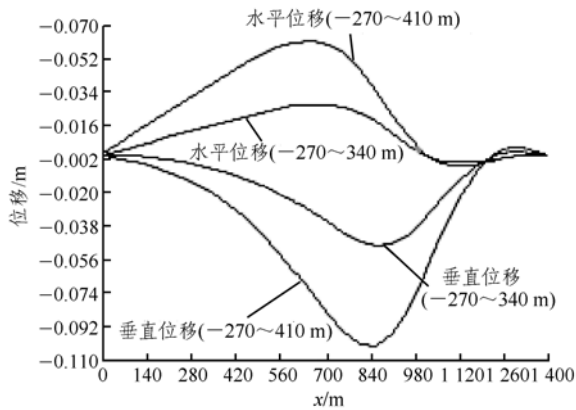


图 2 有限元计算得出的不考虑民采情况下的水平和垂直位移图(-270~-340 m, -270~-410 m)

Fig.2 Horizontal and vertical displacements of surface at the excavation step without considering illegal mining obtained by ANSYS(-270~-340 m, -270~-410 m)

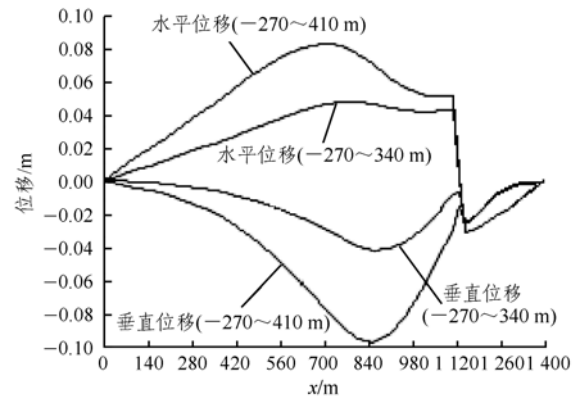
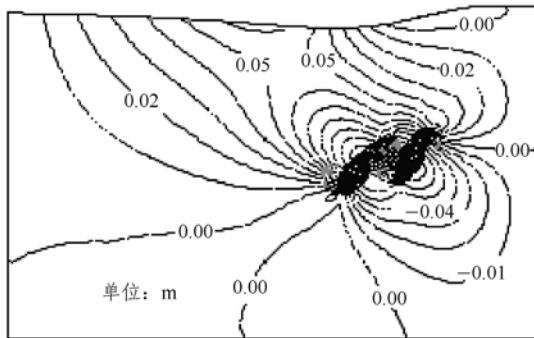
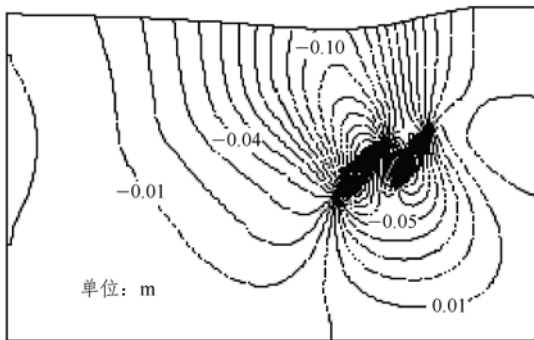


图 4 有限元计算得出的考虑民采情况下的水平和垂直位移图(-270~-340 m, -270~-410 m)

Fig.4 Horizontal and vertical displacements of surface at the excavation step considering illegal mining obtained by ANSYS(-270~-340 m, -270~-410 m)



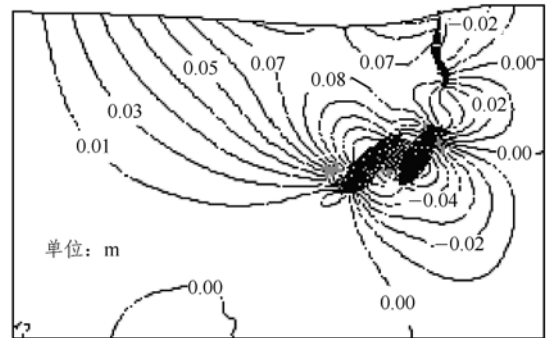
(a) 水平位移



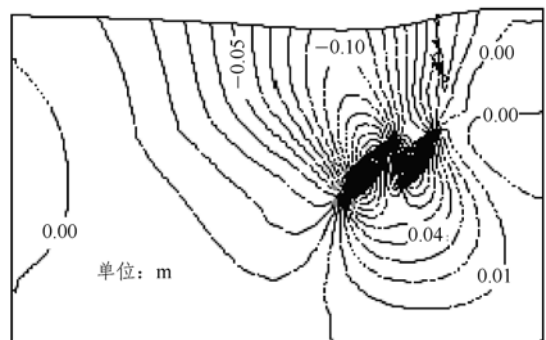
(b) 垂直位移

图 3 有限元计算得出的不考虑民采情况下-270~-410 m 水平的水平和垂直位移等值线图

Fig.3 Horizontal and vertical displacement field at the excavation step from -270 m to -410 m without considering illegal mining obtained by ANSYS



(a) 水平位移



(b) 垂直位移

图 5 有限元计算得出的考虑民采情况下-270~-410 m 水平的水平和垂直位移等值线图

Fig.5 Horizontal and vertical displacement field at the excavation step from -270 m to -410 m considering illegal mining obtained by ANSYS

3 二维离散元计算

离散元法是由 P. A. Cundall 于 1971 年提出的一种基于牛顿第二定律的岩石力学计算分析方法。该

方法适合于节理比较发育的岩体, 在采矿工程、隧道工程以及放矿力学等方面具有重要的作用。是目前最好的、有效的模拟和分析矿山引起的围岩松动和冒落等行为的计算方法之一^[9~11]。UDEC 是针对

表 2 考虑和不考虑民采两种情况下的地表位移有限元计算结果比较

Table 2 Comparison of surface displacement computed by ANSYS under two different conditions

开采水平/m	最大沉降/cm		最大水平位移/cm	
	不考虑民采	考虑民采	不考虑民采	考虑民采
-270~-284	-1.415	0.519 1	-2.471	3.465
-270~-298	-2.026	0.922 5	-2.464	3.613
-270~-312	-2.798	1.437 0	-2.469	3.780
-270~-326	-3.738	2.047 0	-3.059	4.065
-270~-340	-4.897	2.759 0	-4.230	5.174
-270~-410	-10.300	6.213 0	-9.728	8.263

非连续介质开发的平面离散元程序，在数学求解方式上采用了有限差分法，力学上则增加了对接触面的非连续力学的模拟。因此，UDEC 被普遍用来研究非连续面占主导地位的工程问题^[12, 13]。

3.1 计算模型

计算所选取的剖面与二维有限元计算分析时选择的剖面相同，即位于 32#剖面。为便于比较，模型的大小选择与有限元模型相同，对民采的处理方案也相同。32#剖面离散元块体模型如图 6 所示。

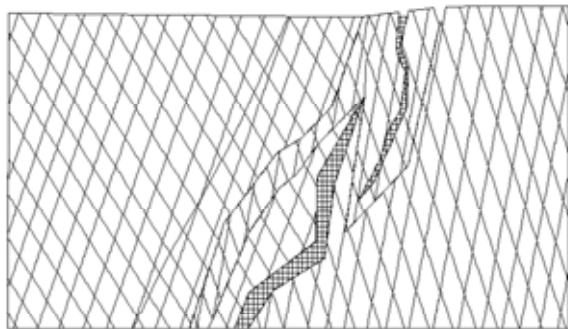


图 6 32#剖面离散元块体模型图

Fig.6 Analysis zones model of section #32

3.2 计算参数

计算中采用的岩石力学参数除表 1 所列取之外，所需其他岩体力学参数如表 3 所示。各岩性分区根据地质统计结果所选取的 2 组优势节理面参数如表 4 所示，离散块体计算节理面的参数如表 5 所示。初始地应力场按自重应力场考虑，计算体的边界条件指定为单方向位移为 0 的位移边界条件，即分别指定其在 x, y, z 方向上的位移为 0^[1, 14]。

表 3 离散元计算所需其他岩体力学参数

Table 3 Mechanics parameters of rock masses employed by UDEC

分区代号	介质	块体分割节理号	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa	抗拉强度 /MPa	剪胀角 /(^{\circ})
A ₁	角页岩	1	20	0.25	0.40	0
C ₁	岩浆岩	1	20	0.25	0.40	0
A ₂	角页岩	2	6	0.30	0.20	0
B	大理岩	2	6	0.30	0.20	0
C ₂	岩浆岩	3	20	0.25	0.30	0
D	矿石	4	4	0.35	0.10	0
F ₁ , F ₃ , F ₄	断层		5		0.05	

表 4 2 组优势节理面参数

Table 4 Parameters of two dominant joint sets

分区代号	节理组 a			节理组 b		
	倾向/(^{\circ})	倾角/(^{\circ})	间距/m	倾向/(^{\circ})	倾角/(^{\circ})	间距/m
A ₁	190	70	21.0~16.0	4	60	21.0~16.0
C ₁	5	80	26.0~17.0	190	70	26.0~17.0
A ₂	190	70	18.0~13.5	4	60	18.0~13.5
B	190	70	21.0~13.5	4	60	21.0~13.5
C ₂	5	80	17.0~16.0	190	70	17.0~16.0

表 5 离散块体计算时节理面参数

Table 5 Computing parameters of joint sets

节理编号	对应岩体弹性模量/GPa	K_n /($N \cdot m^{-1}$)	K_s /($N \cdot m^{-1}$)	ϕ /(^{\circ})	黏结力 /($N \cdot m^{-1}$)
1	20	1.8×10^9	9.0×10^8	50	1.0×10^6
2	6	5.3×10^8	2.7×10^8	45	5.0×10^5
3	20	1.8×10^9	9.0×10^8	50	7.5×10^5
4	4	3.6×10^8	1.8×10^8	38	3.5×10^5
5		3.6×10^8	1.8×10^8	26	9.0×10^4

3.3 计算结果

根据上述计算方案得出的二维离散元的计算结果如图 7~11 和表 6 所示。

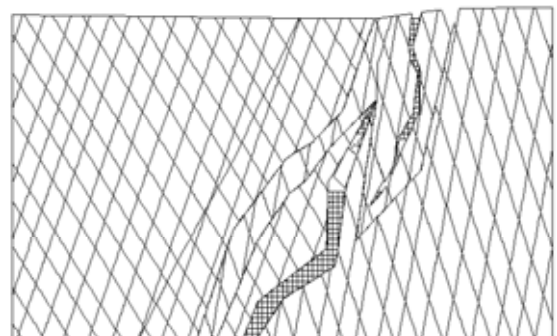
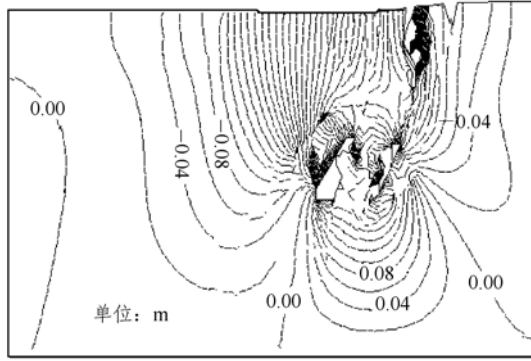
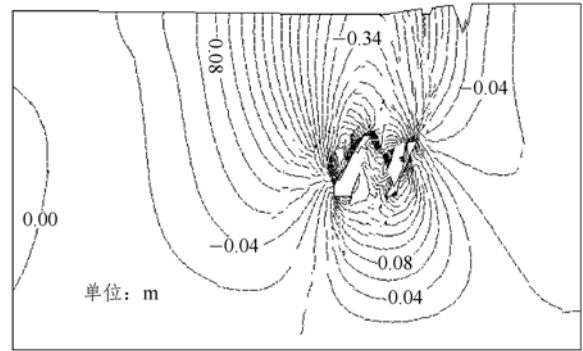


图 7 不考虑民采情况下得到的块体变位图(-270~-410 m)

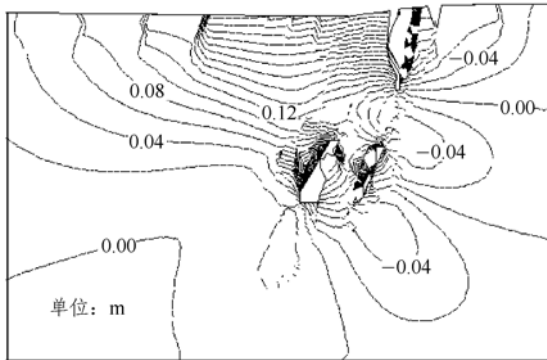
Fig.7 Block state at the excavation step from -270 m to -410 m without considering illegal mining



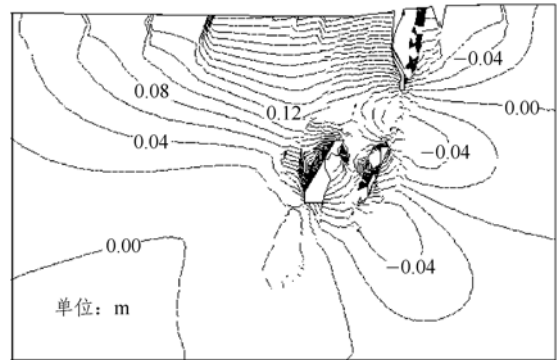
(a) 水平位移



(a) 水平位移



(b) 垂直位移



(b) 垂直位移

图 8 离散元计算得出的不考虑民采情况下-270~-410 m 水平下的水平和垂直位移等值线图

Fig.8 Horizontal and vertical displacement field at the excavation step from -270 m to-410 m without considering illegal mining obtained by UDEC

图 10 离散元计算得出的考虑民采情况下-270~-410 m 水平下的水平和垂直位移等值线图

Fig.10 Horizontal and vertical displacement field at the excavation step from -270 m to-410 m considering illegal mining obtained by UDEC

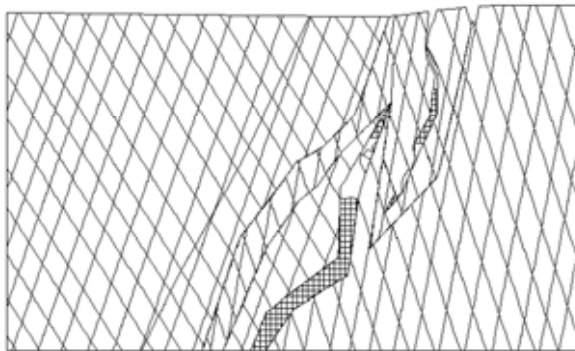


图 9 考虑民采情况下得到的块体变位图(-270~-410 m)

Fig.9 Block state at the excavation step from -270 m to -410 m considering illegal mining

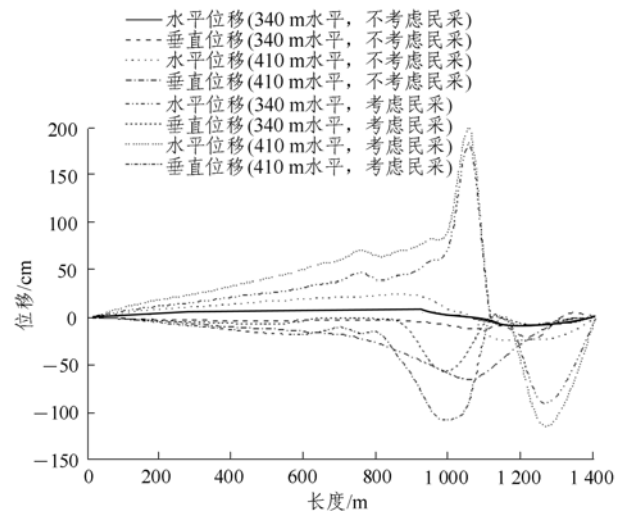


图 11 离散元计算得出的地表位移图

(-270~-340 m、-270~-410 m)

Fig.11 Horizontal and vertical displacements of surface at the excavation step from -270 m to -340 m and -270 m to -410 m obtained by UDEC

4 计算结果分析

有限元法是以连续介质力学为基础的数值计算方法, 而离散元法是以非连续介质力学为基础, 可以模拟材料的大变形、大位移, 在发生地表塌陷的

表6 不考虑和考虑民采两种情况下的地表位移离散元
计算结果比较

Table 6 Comparison of surface displacement computed by
UDEEC under two different conditions

开采水平/m	最大沉降/cm		最大水平位移/cm	
	不考虑民采	考虑民采	不考虑民采	考虑民采
-270~-284	-2.83	-27.9	1.45	162
-270~-298	-3.67	-31.7	2.11	167
-270~-312	-5.88	-34.4	3.64	171
-270~-326	-8.23	-37.9	5.06	173
-270~-340	-10.4	-54.7	6.78	182
-270~-410	-32.8	-108.0	18.3	198

地方，岩体可以产生很大的位移，并且这种位移沿着地表是不连续的。2种计算方法所得结果有很大差异，而实际情况介于它们之间的可能性比较大^[1]。

比较分析有限元和离散元所得的计算结果，可以得到如下结论：

(1) 民采从地表沿矿体倾向开采至-130 m水平形成的采空区与从-270 m起采形成的地下采空区没有造成“通天现象”。

(2) 从有限元还是离散元计算得到的位移等值线图都可以看到，地下开采形成的采空区周围等值线高度密集，结合离散元计算得到的块体变位图，不难发现地下开采在采空区周围形成了松动区，松动区的形状基本为椭圆形，椭圆的长轴与矿体的倾向基本一致。从离散元计算得到的变位图还可以看到松动区内有块体松动或崩落现象。

(3) 根据离散元计算得到的位移等值线图和块体变位图，可以得出民采和地下开采形成的围岩松动范围(见图12)，由此可发现民采对地下开采形成松动区的形状和大小几乎没有影响。

(4) 无论是民采形成的采空区还是地下开采形成的采空区，矿体围岩的总体移动方向指向采空区并且离采空区越近，移动量越大。

(5) 矿区的地质条件，即围岩、矿体的走向以及节理的分布和走向决定了矿体的上盘岩体无论是水平位移还是垂直位移都明显高于下盘岩体，说明下盘岩体稳定性明显高于上盘。

(6) 民采造成了矿体上部岩体的应力重分布，但在开采至-410 m水平时并没有造成沉降范围的明显增大，但是增加了民采点附近地表的沉降量。

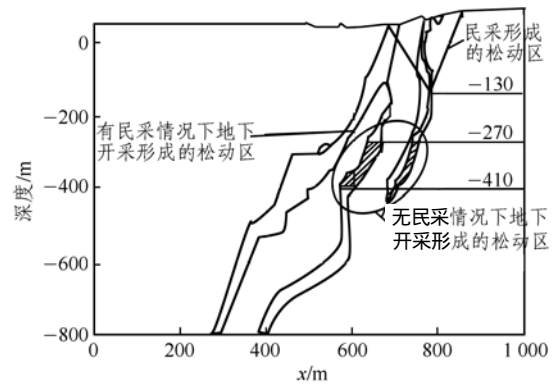


图12 考虑和不考虑民采两种情况下的松动范围示意图
(-270~-410 m, 单位: m)

Fig.12 Disturbed zones at the excavation step from -270 m
to -410 m under two different conditions(unit: m)

(7) 由于民采在地表至-130 m水平形成了一定范围的采空区，水平构造应力的释放使得此地表的水平位移增加明显，水平位移方向指向此采空区。

(8) 随着开采深度的增加，民采对沉陷和移动范围的确定影响逐渐变小，但是当开采深度不是很大时，民采造成了局部范围岩体的大变形，对地表构筑物的稳定性具有相当的危害。

5 结 论

本文以金山店铁矿为例，分别利用有限元和离散元方法进行了考虑和不考虑民采2种情况下的地下开采二维数值模拟，得到了地表变形和矿体围岩的移动规律。通过对比分析2情况下的计算结果所得到的结论不仅为该铁矿确定地表沉陷和移动范围、民采对采矿工程的总体影响评价提供了有效依据，而且理论上探讨了非法民采和地下采矿联合引起矿山岩层移动变形规律以及民采对岩层移动的附加影响规律。

参考文献(References) :

[1] 葛修润, 白世伟, 陈从新, 等. 金山店铁矿东区地下开采的地表变形问题及其控制对策研究[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1999.(GE Xiurun, BAI Shiwei, CHEN Congxin, et al. The Earth's surface deformation induced by underground mining in the eastern area of Jinshandian iron mine and its countermeasure researches[R]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1999.(in Chinese))

- [2] 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 rockmass 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))
- [3] 胡伟, 周爱民. 露天地下联合采矿联合保留层参数的自组织优化[J]. 矿业研究与开发, 2002, 22(1): 7 - 9.(HU Wei, ZHOU Aimin. Self-organizing optimization of the parameters of the jointly reserved layer for combined open pit and underground mining[J]. Mining Research and Development, 2002, 22(1): 7 - 9.(in Chinese))
- [4] 李发本, 刘志祥. 露天与地下联合开采安全隔层厚度研究[J]. 矿业研究与开发, 2006, 26(2): 20 - 21.(LI Faben, LIU Zhixiang. Research on the thickness of safe partition pillar for combined underground and opencast mining[J]. Mining Research and Development, 2006, 26(2): 20 - 21.(in Chinese))
- [5] 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 on 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))
- [6] 郑颖人, 张玉芳, 赵尚毅, 等. 有限元强度折减法在元磨高速公路高边坡工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3 812 - 3 817.(ZHENG Yingren, ZHANG Yufang, ZHAO Shangyi, et al. Application of strength reduction FEM to Yuanjiang—Mohei expressway cut slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3 812 - 3 817.(in Chinese))
- [7] 李俊平, 周创兵, 李向阳. 下凹地形下采空区处理方案的相似模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 581 - 586.(LI Junping, ZHOU Chuangbing, LI Xiangyang. Similarity simulation of disposal scheme for abandoned stope under the sunken topography[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(4): 581 - 586.(in Chinese))
- [8] 乔兰, 王双红, 蔡美峰. 某地下矿岩层及地表移动规律的有限元模拟研究[J]. 金属矿山, 2000, 4(4): 23 - 25.(QIAO Lan, WANG Shuanghong, CAI Meifeng. Finite element modeling of ground movement and surface subsidence in a underground mine[J]. Metal Mine, 2000, 4(4): 23 - 25.(in Chinese))
- [9] 王泳嘉, 邢纪波. 离散单元法及其在岩土工程中的应用[M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1991.(WANG Yongjia, XING Jibo. Discrete element method and its application in geomechanics[M]. Shenyang: Northeastern University Press, 1991.(in Chinese))
- [10] 张向东, 常春, 王泳嘉, 等. 连续开采下上覆岩层移动的离散元模拟[J]. 山西矿业学院学报, 1997, 15(1): 20 - 26.(ZHANG Xiangdong, CHANG Chun, WANG Yongjia, et al. Simulation of overlaid strata movement with discrete element method in continuous mining[J]. Shanxi Mining Institute Learned Journal, 1997, 15(1): 20 - 26.(in Chinese))
- [11] 麻凤海, 王泳嘉. 地层沉降控制的可变形离散单元模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 176 - 179.(MA Fenghai, WANG Yongjia. Imitation of stratum subsidence control with deformable discrete element method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(2): 176 - 179.(in Chinese))
- [12] SUNG O C, SO-KEUL C. Stability analysis of jointed rock slopes using the Barton-Bandis constitutive model in UDEC[J]. International Journal Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(Supp.): 581 - 586.
- [13] RAJINDER B, KAARE H. Parametric study on a large cavern in jointed rock using a distinct element model(UDEC-BB)[J]. International Journal Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(1): 17 - 29.
- [14] 郑榕明, 陈文胜, 葛修润, 等. 金山店铁矿地下开采引起地表变形规律的离散元模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1 130 - 1 135.(CHENG Yungming, CHEN Wensheng, GE Xiurun, et al. Modelling of ground surface subsidence at Jinshandian iron mine by discrete element method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8): 1 130 - 1 135.(in Chinese))