

露天转地下开采岩体稳定性三维数值模拟

韩放 谢芳 王金安

北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083

摘要 露天转地下开采围岩应力和工程尺度同时影响着地下工程和露天边坡的稳定性. 通过三维数值模拟, 揭示了露天边坡内地下开采采场周围和边坡的力学环境, 探讨了围岩移动变形、应力分布和破坏机理, 分析了边坡稳定性状况. 研究表明, 在扰动边坡下进行地下开采, 坡脚处的局部弧形破坏区将进一步恶化, 但不会影响边坡的整体稳定性. 由于边坡的卸荷作用, 导致采场上覆岩层成拱机制减弱, 采空区覆岩存在整体垮冒的可能性.

关键词 露天转地下开采; 边坡; 稳定性; 三维数值模拟

分类号 TD325

随着露天开采的不断进行, 浅部地表的可开采资源不断减少, 深凹露天开采逐渐过渡转为地下开采势在必行. 在 1970—1990 年间, 西方国家的矿山总数从 1 020 座增加到 1 200 座, 增加了 17.6%, 而露天转地下的矿山从 48 座增加到 98 座, 增长了 104%^[1]. 随着我国深凹露天矿开采的结束, 越来越多的矿山将转入地下开采. 目前, 人们对单一的露天开采和地下开采已做了大量的研究和实践, 对单一露天开采边坡岩体的稳定性及变形规律和单一地下开采上覆岩体稳定性及地表变形规律有了深刻的认识^[2-6], 而对露天转地下开采次生应力场对岩体力学场的影响机理的研究还很少. 由于露天开采时对岩体的应力场造成扰动, 采动结束一段时间后应力达到一个新的平衡. 在高边坡存在的基础上进行地下开采, 再次对岩体造成扰动, 形成二次扰动. 其对上覆岩体稳定性的影响既不同于单一的露天开采, 又不同于单一的地下开采, 第二次采动影响岩体的应力分布, 根据国内外露天转地下开采矿山的经验, 边坡稳定性要比单纯露采时降低 10%~20%^[7], 可诱发上部边坡体的滑移^[8], 对矿山安全生产造成危害. 采用二维数值模拟不能够模拟出开采的空间采动影响效果, 因此采用三维数值模拟, 对露天转地下开采边坡岩体和采场围岩力学变化规律以及稳定性进行分析研究, 以便给工程施工提供理

论依据, 减少工程损失和人员伤亡.

1 工程概况

矿区原始地形较平坦, 有极少的低丘陵, 最大地势起伏约 100m. 露天矿东西长 6.6km, 南北宽 2.2km, 面积 14.52km², 开采标高—400m. 该区地层主要为第四纪松散砂、土、砾石层, 下第三纪古新世及始新世的含煤系地层, 下白垩纪龙凤坎组地层及下伏的太古带花岗片麻岩结晶基底.

经过近百年的开采, 该矿上部含煤量近于枯竭, 下部却蕴藏着丰富的煤层. 由于露天开采形成了高边坡, 从经济和安全角度考虑, 该矿转入地下开采. 矿区边坡的几何形态见图 1, 地质剖面见图 2.

地下采面位于井田西北部, 标高—297.5m 以上, 埋深在露天边坡下 200m 以上, 采场埋深由西向东逐渐变浅, 在 E100 处几乎出露于地表. 东西走向长 1 075m, 南北宽 40~70m, 开采面积约 56 757m². 东部以 E100 为界, 西部到 W987 为止, 南北部边界分别为露采边坡界面和煤层顶板.

北部边坡有 F₁ 断裂构造通过, F₁ 断层为逆冲和右旋移动断层, 南翼牵引褶曲构造. 断裂走向近东西, 倾向北, 倾角 50°, 压扭性断裂, 断裂破碎带西宽东窄, 数米到数十米不等, 主要由紫红色断层泥组成, 隔水性能良好. 牵引主向斜北翼的绿色泥岩倒转陡倾, 并夹有多层软弱褐色页岩夹层, 呈软弱互层结构的岩体. 采区是在特定的不良地质构造条件下进行设计和开采的.

收稿日期: 2005-12-16 修回日期: 2006-02-24

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金 (No. 20040008025)

作者简介: 韩放(1962—), 男, 高级工程师, 博士

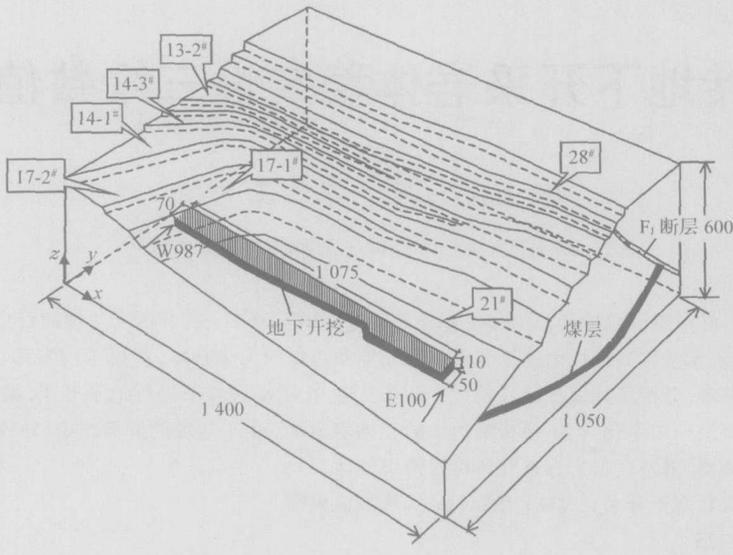


图1 三维边坡计算简图(单位: m)

Fig.1 Schematic plot of the 3D model of the slope (Unit: m)

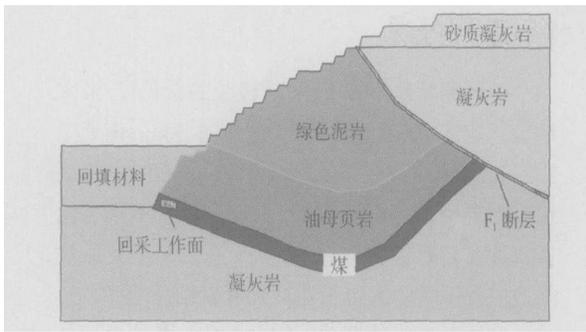


图2 地质剖面图

Fig.2 Geologic sectional profile

模型(如图4). 考虑到岩石的尺寸效应, 对岩石实验参数进行了适当的折减, 计算采用的岩石力学参数和断层力学参数分别见表1和表2.

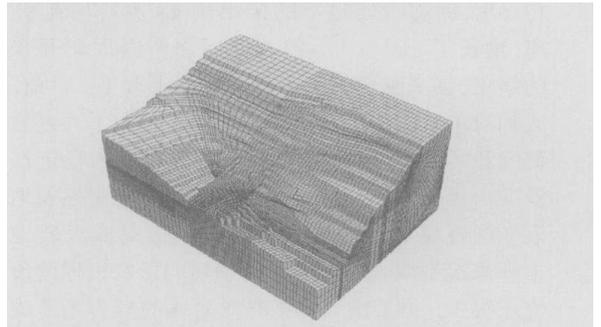


图3 地下开挖前边坡图

Fig.3 Slope before underground mining

2 模拟计算

2.1 模型建立

计算采用三维有限差分程序FLAC^{3D}. 计算模型 x 方向长 1400m, y 方向宽 1050m, z 方向高 600m. 共划分为 156 118 个单元, 168 188 个节点. 模型侧面限制水平移动, 底面限制垂直移动, 上部为自由面. 图3为地下开挖前三维数值模型.

依据现场取样和岩石力学实验结果, 岩石在不同围压条件下具有明显的弹塑性变形特征. 当岩石发生破坏后, 表现为应变软化特征, 即随着变形的继续发展, 残余强度逐渐降低, 最终下降到峰值强度的 20%左右. 因此, 采用非线性应变软化

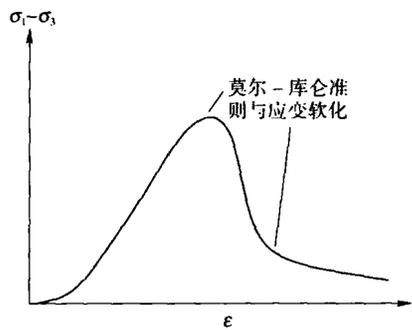


图4 岩石的力学特性

Fig.4 Mechanical character of rocks

表 1 岩石力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rocks

岩石名称	体积质量, $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量, E / MPa	泊松比, ν	内摩擦角, $\varphi / (^{\circ})$	粘结力, c / MPa	抗拉强度, σ_T / MPa
人工填土	2200	20	0.30	32	0.1	0.001
绿色泥岩	2200	1200	0.24	35	1.25	1.25
油母页岩	2100	3400	0.26	33	1.9	1.0
煤	1300	1200	0.30	35	1.25	0.8
凝灰岩	2400	10500	0.23	45	4.5	2.15
砂质凝灰岩	2600	6000	0.28	43	3.75	1.5

表 2 断层力学参数

Table 2 Mechanical parameters of a fault

断层名称	法向刚度, $K_n / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1})$	切向刚度, $K_s / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1})$	摩擦角, $\varphi / (^{\circ})$	粘结力, c / MPa	抗拉强度, σ_T / MPa
F_1	2200	1500	26	0.4	0.0001

2.2 模拟过程

严格按照边坡开挖历史逐年进行开挖模拟, 真实反应地下开采前岩体的力学场状态, 为研究地下开采后岩体力学场的变化规律及稳定性分析提供现实可靠的依据. 地下采区范围如表 3 所示, 模拟计算分步进行开挖: 前 60 m 按照每步推进 10 m 进行计算, 分为 6 步; 60 ~ 420 m 基本按照每步推进 20 m 进行计算, 分为 18 步; 420 ~ 575 m 基本按照每步推进 40 m 进行计算, 分为 4 步; 575 ~ 1075 m 按照每步推进 50 m 进行计算, 分为 10 步. 地下开采整个计算共分为 38 步, 49 000 个时步.

表 3 地下开采范围

Table 3 Underground mining range

走向开采范围/m	开采宽度/m	开采高度/m
0 ~ 235	70	20
	70	10
235 ~ 275	变窄	10
275 ~ 345	55	10
345 ~ 420	变窄	10
420 ~ 770	40	10
770 ~ 1075	50	10

2.3 计算结果与分析

数值模拟可定性分析力学场演变规律和岩体的稳定性, 但难以位移量作为边坡稳定状态的定量判断标准. 应用数值模拟着重分析边坡内地下开采上覆岩体和采场周围岩体力学场变化规

律, 综合位移速度、相对位移、破坏场、剪切应变等多种因素对边坡及采场周围岩体稳定性进行定性研究.

2.3.1 应力场分析

地下采区在边坡下 200 m 内, 属于浅部开采. 采区上部覆盖油母页岩、绿色泥岩和人工回填料, 由于岩土体较软, 在开采过程中采空区上部压力拱^[9]成拱机制较弱, 岩体重量全部作用在采区上方, 由工作面围岩和支架承担. 岩体均处于压应力状态, 应力分布符合自上而下逐渐增大的基本规律, 在 N580 ~ N870 范围内岩体应力呈倾斜分布, 与边坡倾斜相一致. 其他区域基本呈水平分布, 与边坡开挖应力分布规律相同. 采场周围应力在 2.5 MPa 到 5.0 MPa 之间, 如图 5 所示.

2.3.2 位移场分析

(1) 边坡地表沉陷规律. 地下开采部分地段处于边坡回转处的下方, 此处边坡位移较大, 故截取该处剖面对边坡地表沉陷规律进行研究. 图 6 和图 7 分别给出了沿工作面走向和垂直工作面走向剖面地下开采前后边坡地表沉陷情况. 从沿工作面走向剖面看, 在采区上方边坡全部受到开采影响, 沉陷最大值为 35 cm, 出现在距工作面开切眼水平距离 234 m 的边坡处. 在垂直于工作面走向剖面上, 采面下帮一侧边坡影响范围为 125 m, 上帮一侧边坡影响范围达到 240 m, 地表沉陷最大值并非出现在采区的中部, 而是出现在采区偏边坡底的一侧, 距采面中部 8 m 处, 最大下沉值为 32.8 cm. 图 7 还可看出, 地下开采对边坡岩体水平移动影响范围与垂直移动影响范围大体相同, 边坡主要以垂直位移和沿 y 方向的水平位移为主, 沿 y 方向的水平位移略小于垂直位移.

(2) 边坡重要干线位移量及移动速度分析. 位移和移动速度是表征边坡稳定性的重要指标, 因此以地表位移最大的剖面为研究对象, 分析重

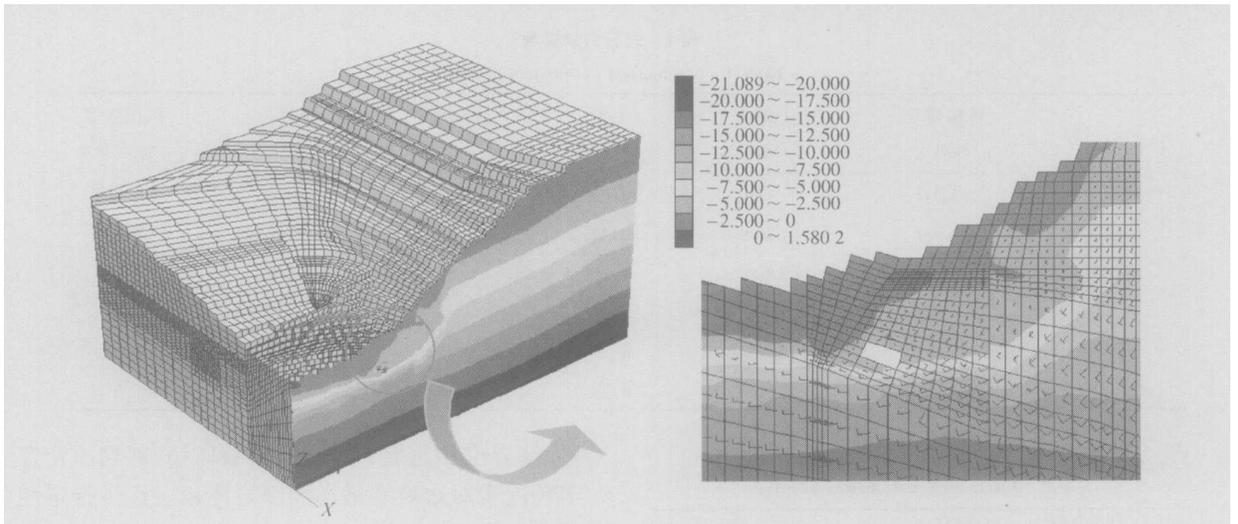


图5 最大主应力场及应力矢量场
Fig 5 Maximum principal stress and vectors

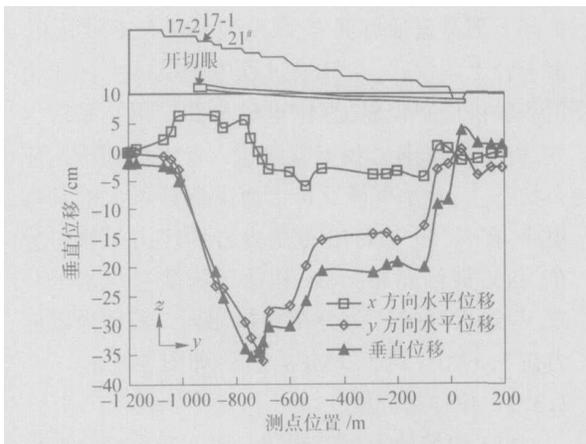


图6 沿工作面走向边坡地表沉降
Fig 6 Surface subsidence along the working face

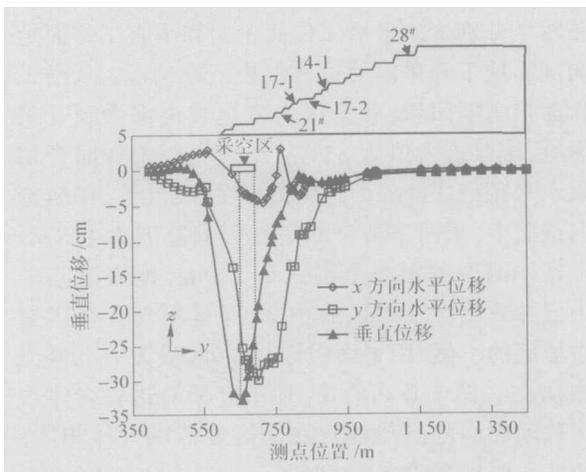


图7 垂直工作面走向边坡地表沉降
Fig 7 Surface subsidence across the working face

情况下,地下开采造成边坡产生一定的位移,随工作面远离各干线边坡岩体移动速度均趋于零,因此不会影响边坡的稳定性,边坡整体处于稳定状态.另外,也说明了逆断层的存在不会影响边坡的稳定性.

表4 地下开采结束后剖面监测点位移和速度统计表

Table 4 Displacement and velocity of tracing points on the section profile of the slope after underground mining

位置	y 方向最大水平位移/cm	y 方向速度/ $(\mu\text{m}^{\circ}\text{s}^{-1})$	z 方向最大垂直位移/cm	z 方向速度/ $(\mu\text{m}^{\circ}\text{s}^{-1})$	
28#	阳角	0.52	0.76	0.32	0.50
	阴角	0.45	0.57	0.27	3.60
14-1#	阳角	3.55	8.70	1.55	4.88
	阴角	3.35	8.22	1.51	4.96
17-2#	阳角	8.92	54.59	2.19	18.63
	阴角	5.37	37.11	1.86	98.94
17-1#	阳角	9.08	41.88	2.51	18.96
	阴角	9.06	38.59	2.59	19.78
21#	阳角	22.2	82.32	6.86	33.93
	阴角	14.6	42.48	3.27	21.06

(3) 上覆岩体移动规律. 图8和图9是采区上覆岩体受地下采动影响位移发展情况. 采区上方30m范围内为计算模拟的冒落带. 在工作面前方150m处,采区上覆岩体首先受到采动的影响产生水平移动,工作面前方120m处围岩开始产生垂直位移. 工作面推过后顶板垂直位移迅速增加,采空区上覆岩体以垂直位移为主. 工作面后方465m处覆岩垂直移动趋于平稳. 水平移动

要运输干线所在的边坡移动及其稳定情况(见表4). 结果表明,在不考虑渗流和降水等因素的

增加较缓, 采面后方 500 m 覆岩水平位移趋于稳定. 图中表明, 采空区上覆岩体自下而上(冒落带以上)垂直位移逐渐减小、水平位移逐渐增大, 边坡处水平位移最大为 26.98 cm, 但仍小于它的垂直位移(31.7 cm). 由垂直位移图可以看出, 下位岩体位移大于上位岩体位移, 说明上覆岩体已产生离层现象.

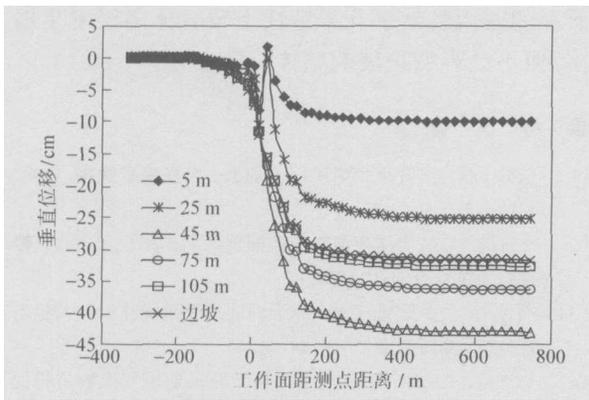


图 8 采区覆岩垂直位移

Fig 8 Vertical displacement of the roof strata above the mining panel

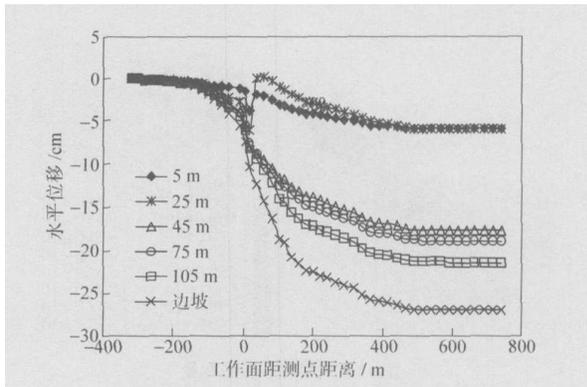


图 9 采区覆岩水平位移

Fig 9 Horizontal displacement of the roof strata above the mining panel

2.3.3 破坏场分析

图 10 和图 11 是剖面岩体破坏场情况. 由图可见, 地下开采是在边坡局部曾经发生破坏的情况下进行的, 该破坏带呈圆弧形, 从坡脚处向坡体内部扩展, 采区位于破坏带下部. 由于露天开采的影响, 岩体卸载主要发生剪切破坏, 靠近边坡处局部发生拉伸破坏.

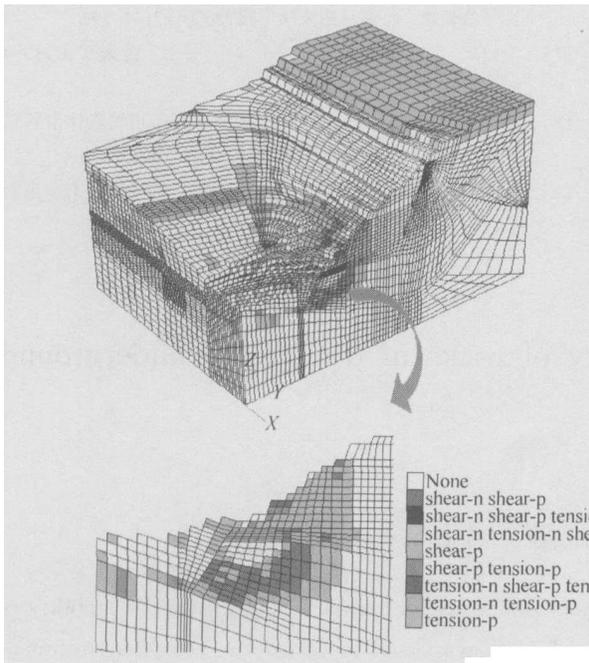


图 10 地下开采前剖面破坏场分布

Fig 10 Failure zones before underground mining

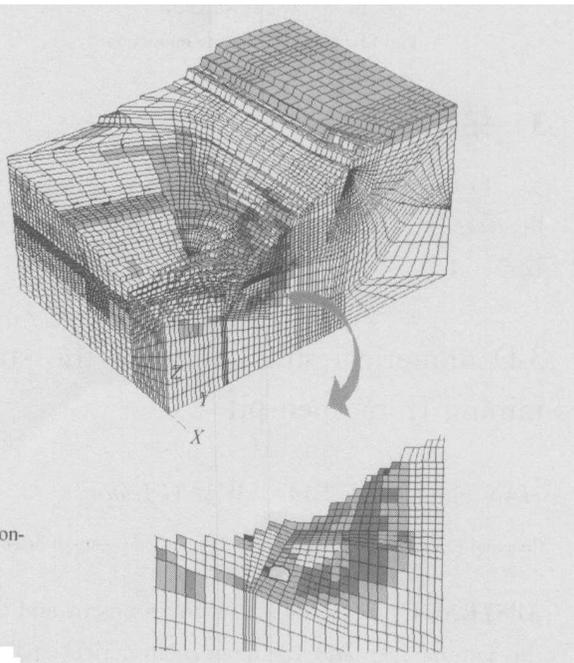


图 11 地下开采后剖面破坏场分布

Fig 11 Failure zones after underground mining

图 12 和图 13 显示, 当工作面推进至该剖面时, 采空区上部围岩至边坡处剪切应变增量和剪切应变率较大, 分别达到 3.67×10^{-7} 和 $2.5 \times 10^{-7} s^{-1}$, 说明当工作面推过时, 采空区上部围岩卸荷, 由于在不同方向岩体卸荷不均匀造成应力差, 从而剪应力变大. 当达到岩体强度极限时发

生剪切破坏, 破坏带直通边坡表面. 采空区四周围应力达到岩体抗拉强度造成岩体的拉伸破坏. 上部拉破坏区与边坡处拉破坏区相连. 综合前面对于采空区上部不同深度围岩相对位移的分析可知, 采空区上覆岩体垮落.

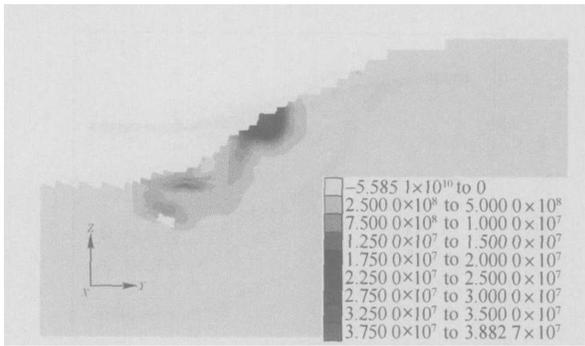


图 12 剖面剪切应变增量

Fig 12 Shear strain increment on section

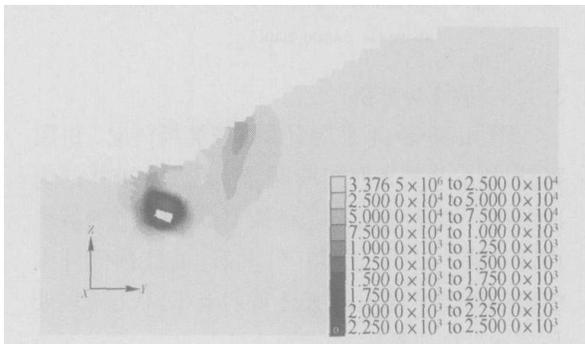


图 13 剖面剪切应变率

Fig 13 Shear strain rate on section

3 结论

(1) 边坡下浅部地下开采, 由于围岩卸荷作用, 采空区上覆岩体成拱机制较弱, 覆岩稳定性较差。

3-D numerical simulation on the stability of rocks in transferred underground mining from open-pit

HAN Fang, XIE Fang, WANGJinan

Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

ABSTRACT Both the stress environment and the size of underground excavation influence the stability of the mining face and the slope. Numerical analysis of $FLAC^{3D}$ was used to reveal the stress environment around the excavation in the slope, discuss the strata movement, stress distribution and failure mechanism, and analyze the stability of the slope affected by underground excavation. The results show that local curved failure zones may become worse during underground mining under the disturbed slope, but the stability of the slope as a whole will not be changed. For the unloading effect, the arching mechanism in the roof strata is weakened, and the probability of catastrophic collapse exists in roof strata above the mining zone.

KEY WORDS transferred underground mining from open-pit; slope; stability; 3-D numerical simulation

(2) 地下采动使远离工作面的煤层上部围岩水平方向先受到扰动, 当工作面推过该区域时垂直移动显著, 水平移动缓慢增大, 工作面远离该区域时垂直移动先趋于稳定。

(3) 逆断层的存在不会影响边坡的稳定性。

(4) 综合边坡移动速度、围岩相对位移量、破坏场、剪切应变等多因素分析边坡稳定性, 认为所研究的露天转地下开采造成上覆岩体离层发生塌落, 但不会影响边坡的整体稳定性。

参 考 文 献

- [1] 佚名. 联合法开采金属矿床的前景. 世界采矿快报, 1998, 14(7): 22
- [2] 孙世国. 边坡岩体内部变形监测现状与未来发展方向. 勘察科学技术, 1998(2): 39
- [3] 冯锦艳, 王金安, 蔡美峰. 露天高陡边坡角优化设计及稳定性分析. 中国矿业, 2005, 14(4): 45
- [4] 陈清运, 蔡嗣经, 明士祥, 等. 地下开采地表变形数值模拟研究. 金属矿山, 2004(6): 19
- [5] 徐水太, 饶运章, 潘建平. 地下开采引起地表移动和不均匀沉降的机理分析. 有色金属, 2004, 56(2): 19
- [6] 宋卫东, 王金安, 匡忠祥. 程潮铁矿淹井前后采场溜井稳定性数值模拟. 北京科技大学学报, 2000, 22(4): 292
- [7] 李鼎权. 论露天转地下开采的若干特点. 金属矿山, 1994(2): 9
- [8] 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. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 126
- [9] 钱鸣高, 刘昕成. 矿山压力及其控制. 北京: 煤炭工业出版社, 1984: 85