

文章编号: 1000 - 7598 - (2006) 06 - 0885 - 05

开采倾斜近地表矿体地表及围岩 变形陷落的模型试验研究

陈陆望, 白世伟, 李一帆

(中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

摘 要: 以某铜矿矿山一典型地质剖面为原型, 运用物理概化模型试验, 采用网格数字摄影测量方法量测模型剖面全场位移, 分析了开采倾斜近地表矿体地表及围岩变形陷落随不同开挖步的变化规律。在模型试验中, 开挖 -75 m ~ -45 m 之间的矿体, 围岩扰动范围及地表下沉位移逐渐增大, 第 7 步开挖完成后, 采空区上方岩体开始出现离层, 第 9 步开挖完成后, 地表 1 ~ 4 测点之间形成一明显沉陷盆地, 最大下沉位移达 825 mm。模型试验研究的结果与现场及离散元数值计算结果基本吻合。

关键词: 采矿工程; 岩石力学; 倾斜近地表矿体; 变形陷落; 模型试验

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

Model test study on deformation and subsidence of ground surface and surrounding rock caused by exploiting inclining mine near surface

CHEN Lu-wang, BAI Shi-wei, LI Yi-fan

(Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Based on the prototype of the representative geological section plane of a copper mine, the physical general model test is made to analyze deformation and subsidence of ground surface and surrounding rock with different excavating steps by grid digital photography which is used to measure full-field displacement of model section plane. In the model test, once mines between -75m and -45m are excavated; the influence zone of surrounding rock and the subsidence displacement of surface become greater and greater. Thus, the rocks above the cavity begin to separate from surrounding rocks after the 7th excavating step and the zone from No 1 testing point to No 4 testing point form a subsidence basin obviously after the 9th excavating step. The result of model test is almost consistent with the result of UDEC(The Universal Distinct Element Code) and the in-situ circumstance.

Key words: mining engineering; rock mechanics; inclining mine near surface; deformation and subsidence; model test

1 引 言

随着国民经济的迅速发展和对矿产资源需求的不断增长, 地下资源开发规模逐渐扩大, 地下采矿引起的地表变形陷落问题, 是一个十分复杂的系统工程问题。文[1]对地下采矿引起的地表下沉类型及其机理进行了系统的研究; 文[2]对厚覆盖层条件下地下采矿引起的地表变形陷落特征, 运用物理模拟的方法进行了研究, 得到了一些规律性的认识; 文[3]采用FLAC程序计算分析了露采和地下采矿共同引起的地表变形规律; 文[4]运用模型试验方法, 对新集三矿西三采区煤层开采引起的岩体移动和地表沉陷的基本规律进行了研究, 得出了急倾斜煤层

重复采动所引起的厚冲积层岩体移动基本规律。

倾斜近地表矿体的开采所引起的地表变形陷落速度快, 对地表破坏程度大, 是一个有待深入研究的重大课题。对倾斜近地表矿体开采过程中所引起的上覆岩体及地表的力学响应作出符合实际的估计和判断, 关系到能否安全、合理开发有限的地下资源。模型试验的优点在于他能够直观地模拟矿体上覆及地表岩体的变形与破坏特征及其状态, 但要使各种物理力学参数同时满足相似关系几乎是不可能的, 也很难同时考虑其他多种因素及复杂的边界条件。鉴于模型试验的优缺点以及本次试验只注重得到倾斜近地表矿体开采的地表及采空区顶板围岩变形与陷落特征的规律性的认识, 笔者根据江西铜

收稿日期: 2005-07-05

作者简介: 陈陆望, 男, 1973年生, 博士研究生, 从事岩土工程物理模型试验研究。E-mail: luwangchen8888@163.com

矿集团东乡枫林铜矿区77号勘探线地质剖面(见图1)进行了物理模型的概化并进行物理模型试验。

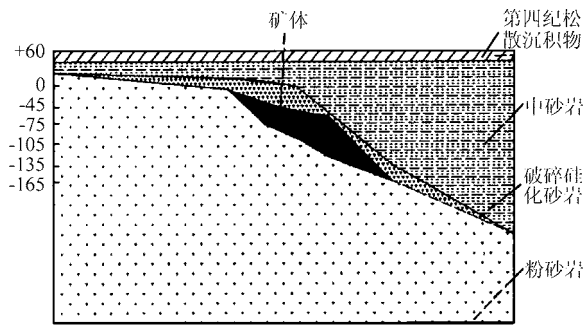


图1 铜矿区77号勘探线地质剖面

Fig.1 Geological profile of #77 reconnoitering line in the copper mine

2 模型试验设计概况

2.1 物理模型的概化

为研究倾斜近地表矿体开采可能引起地表变形的程度、地表陷落盆地的范围以及探讨沉降变形规律和机理,进行了平面应力条件下的物理模型试验。模型试验的几何相似常数 $C_l=150$,重度相似常数 $C_\gamma=1$ 。模型试体的尺寸为水平198 cm×垂直110 cm×厚20 cm(相当于工程实际水平297 m×垂直165 m),模型直立。据实际资料,岩体地应力完全由模型材料的自重来模拟。采矿方法主要模拟预留矿柱分段崩落法。采空区上覆岩层主要为硅化(中)砂岩、粉砂岩、第四纪类土质体与铜矿等,其物理力学参数见表1^[5]。本次模型试验在遵循相似定理的前提下,把上覆岩体概化为一种岩体。选取模型材料配比时,考虑制作较大重度的模型材料,选取 Fe_3O_4 粉末增大重度,经过多组不同成分和不同配比的相似材料方案的优选,最终选取 Fe_3O_4 粉末:石膏:石英砂:水:缓凝剂=2780:120:556:252:2.5的岩体概化相似材料,其基本物理力学参数为:重度 $\gamma=28\text{ kN/m}^3$,弹性模量 $E=0.6\text{ GPa}$,内摩擦角 $\phi=38^\circ$,凝聚力 $c=0.028\text{ MPa}$,泊松比 $\mu=0.20$,单轴抗压强度 $\sigma_c=0.7\text{ MPa}$,除 E 值较大外,基本满足相似要求。制作模型试体是将若干小试块砌筑而成。对几类岩体概化进行物理模型试验,模型小试块接触面的胶结是一关键的模型试验技术。通过对小试块接触面几种胶结材料的抗剪试验,优选出白乳胶:水=1:7胶结材料,其 $c=0.015\text{ MPa}$, $\phi=33^\circ$ 。选择该种类型的粘结材料对模型相似材料概化参数是否遵循相似关系可以起到一定的弥补作用。

表1 各类岩石物理力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rocks

岩体名称	弹性模量 E/GPa	内摩擦角 $\phi/(\text{°})$	凝聚力 c/MPa	泊松比 μ	抗拉强度 σ_t/MPa
硅化(中)砂岩	1.2~2.5	32~35	0.8~1.2	0.19	0.3~0.8
粉砂岩	3.7~7.5	28~30	1.2~1.8	0.24	0.5~1
第四纪类土质体	0.6~1	30~35	0.8~1.2	0.23	0.5~0.8
黄铁黄铜矿	7~14	32~35	1.0~2.5	0.25	0.5~1

2.2 物理模型的测试

在模型体的一表面及地表面布设百分表,其中地表面布设7个百分表测点,围岩中布设8个百分表测点。但是,用百分表等接触式量测位移的方法测点有限,难以测得全场位移,故在模型的另一表面绘出网格。百分表测点与网格布置见图2。各百分表测点都布设在网格交点上,他们之间的对应关系以及百分表测点编号见图3。每个百分表测点均测量垂直向与水平向位移。网格测量时,固定数码相机在模型前方的位置,每一步开挖完成后,进行一次照相,记录模型表面网格点在相片中的确切位置。通过一系列相片反映的网格点位置变化信息,可以测得每一步开挖完成后模型表面较大范围的全场位移。



(a) 百分表布设图



(b) 网络布设图

图2 物理模型表面百分表与网格布设图

Fig.2 Disposal of centimeters and grids on model surface

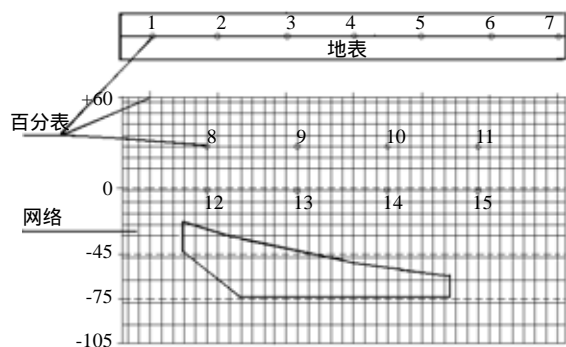


图 3 模型表面网格与百分表对应及百分表测点编号图
Fig.3 Corresponding relationship of centimeters and grids and numbers of measure-points of centimeters

2.3 物理模型开挖模拟

先开挖-45 m 以上部分的矿体,从左向右开采,其间留一 4 m 垂直开采矿柱。-45 m 以上的矿体开挖完成后,预留一 4 m 水平开采矿柱,再开挖-75 ~ -45 m 之间的矿体。开挖方式同开挖-45 m 以上部分的矿体。从左向右分四步完成。最后挖掉矿柱。各开挖步骤如图 4 所示。每完成一步开挖,就相应进行一次位移观测。

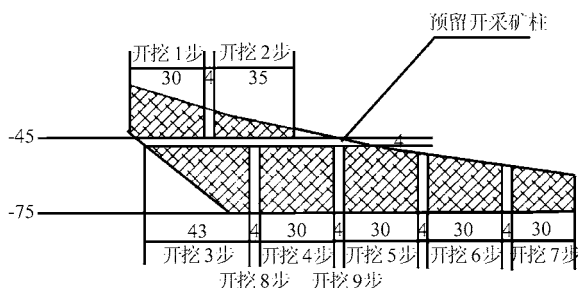


图 4 矿体各开挖步骤示意图
Fig.4 Sketch of all excavating steps of mine

3 随开挖步骤的地表沉陷变化规律

根据模型上端部 7 个测点的百分表和摄影测量结果,得到了随开挖步骤的测点累计下沉位移变化关系,见图 5。在开挖过程中,模型下沉位移在前两步测量值很小,最大累计下沉位移测量值为 -0.080 mm(相当于工程原型的-12 mm),地表面看不出变形错动范围。第 3 开挖步开挖完成后,2 号测点下沉位移稍有增加。从第 4 开挖步到第 8 开挖步开挖过程中,始终是 2 号测点下沉位移较大,但第 9 步开挖完成后,3 号测点下沉位移增加幅度比 2 号测点更大,其累计下沉位移量达到-5.500 mm(相当于工程原型的 825 mm),在 1~4 号测点范围内沉降盆地清晰可见,其间距离为 900 mm(相当于工程原型的 135 m)。实际在矿区现场研究剖面横向

1 000 m 范围内出现一最大下沉深度 1 m 的沉降盆地。图 6 为矿山地表沉陷的实际照片,可以看出模型试验得到的地表沉陷基本上反映了矿山地面沉陷的实际情况。

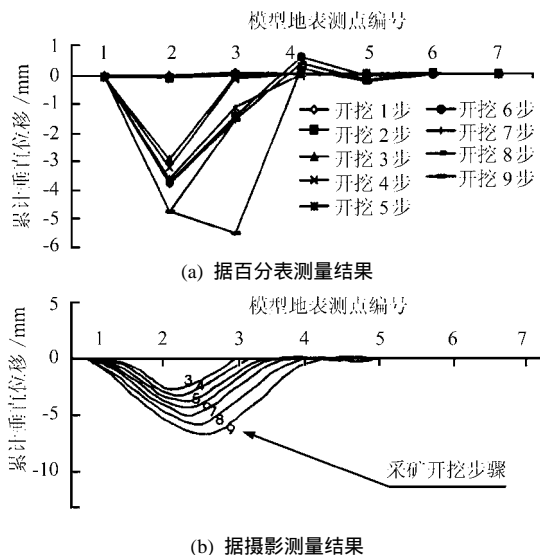


图 5 物理模型地表下沉量百分表实测与网格摄影测量结果图
Fig.5 Result of subsidence of ground surface measured by centimeters and grid photography in physical model



图 6 矿山地表沉陷照片
Fig.6 Photograph of deformation and subsidence on the surface of the mine

4 随开挖步骤采空区顶板变形破坏的变化规律

模型试验过程中,根据关键点(8~15号测点)位移监测结果及摄影测量所反映的位移信息,经过换算以后得到了采矿过程中每一开挖步完成后的采空区顶板的全场位移。根据得到的各步全场位移,可看出采空区顶板变形与破坏过程。图 7 表示的是模型试验第 2、第 4、第 7 与第 9 这 4 个典型开挖步开挖完成后采空区顶板岩体累计全场位移矢量图。图 8 表示相应各开挖步骤的模型破坏情况照片。

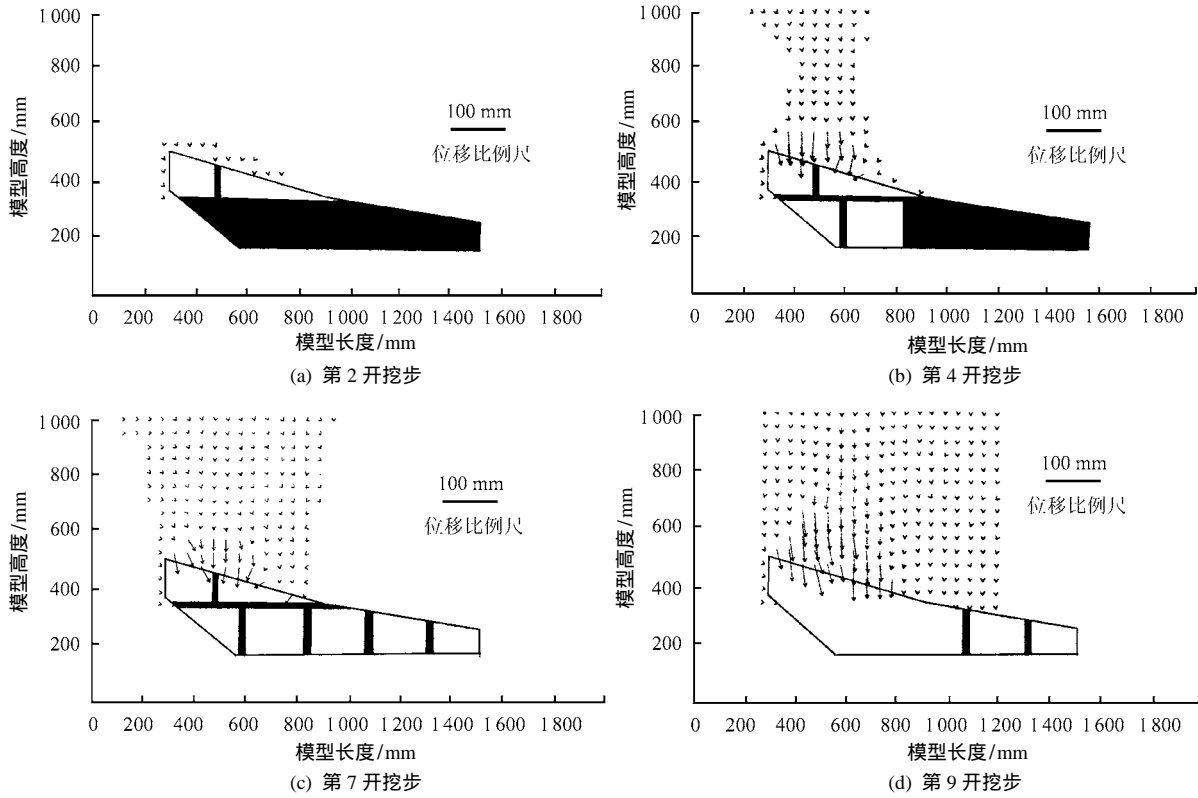


图 7 模型试验典型开挖步骤采空区顶板岩体累计全场位移矢量图

Fig.7 Accumulative full-field displacement vector diagram of the top rocks of mining cavity in representative excavating steps of model test

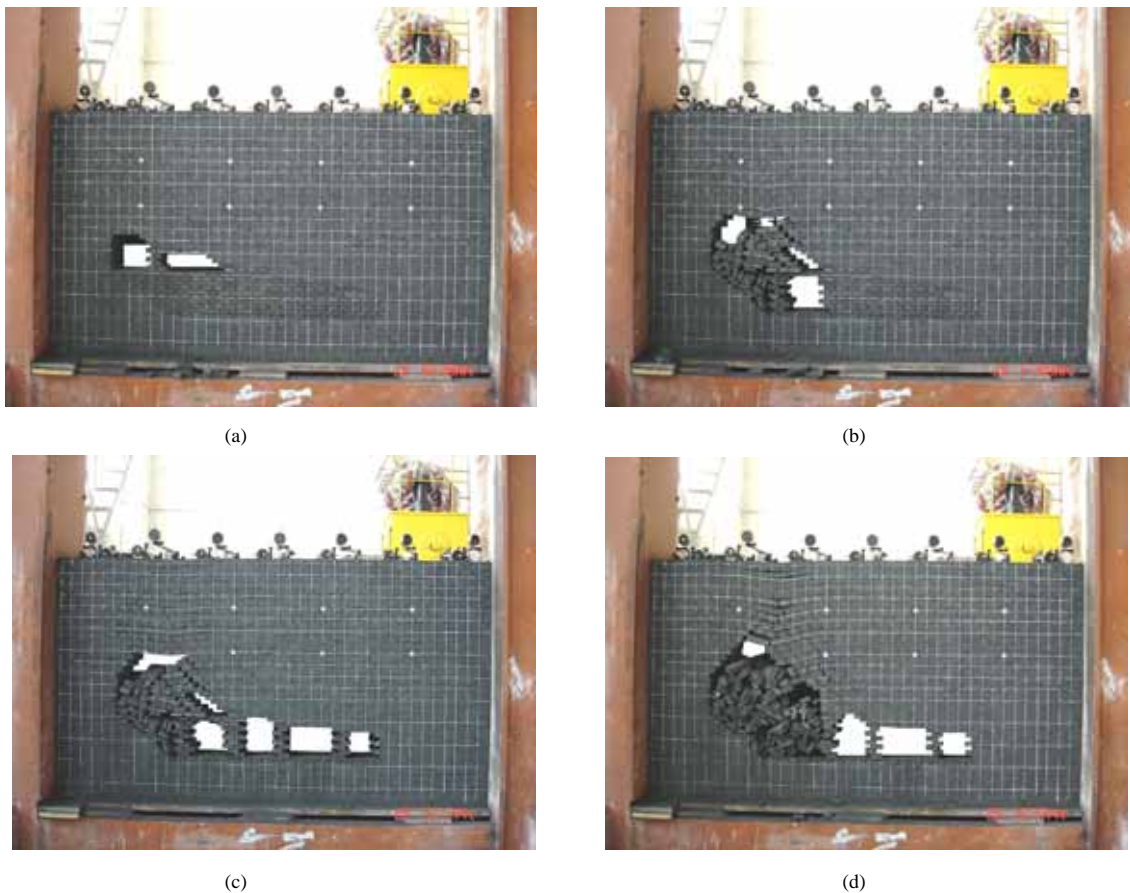
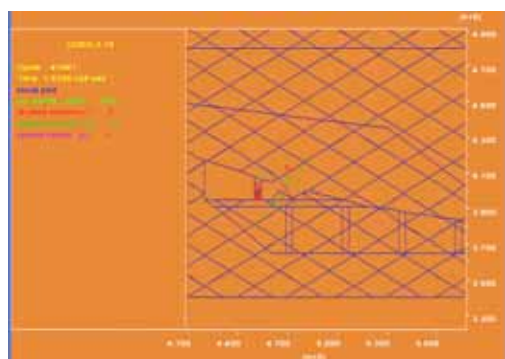
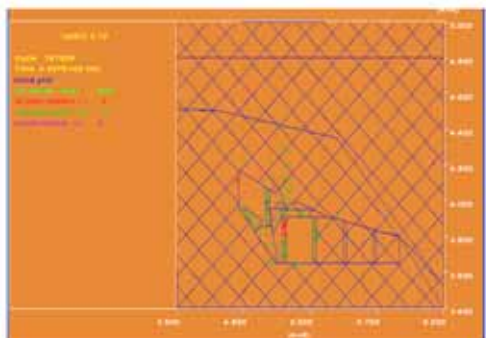


图 8 模型试验典型开挖步骤的顶板破坏照片

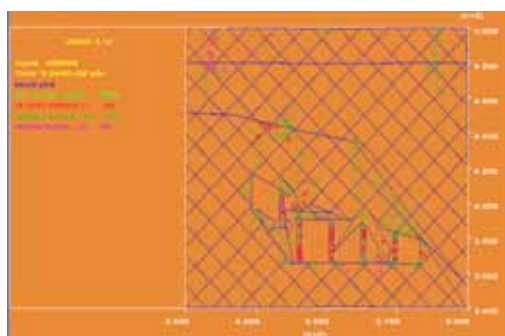
Fig.8 Photographs of destroyed zone of top roof in representative excavating steps



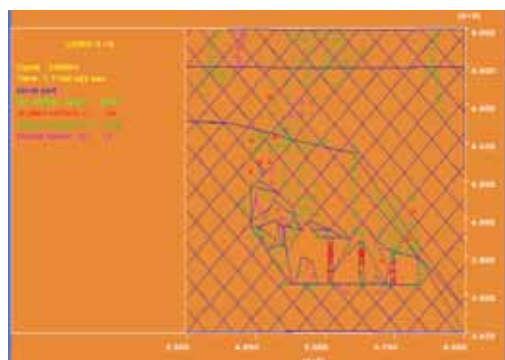
(a) 第 2 开挖步



(b) 第 4 开挖步



(c) 第 7 开挖步



(d) 第 9 开挖步

图 9 计算典型开挖步采空区围岩破坏区

Fig.9 Destroyed zones in the confining rock of mining cavity of representative excavating steps by numeration

由图 7 和图 8 可以看出 模型试验在开挖-45 m 以上矿体后,采空区顶板岩体位移很小,除了采空区顶板局部产生较小移动,其他处围岩位移几乎为 0。对-75 ~ -45 m 之间的矿体进行开采后,采空区

顶板受扰动范围逐渐增大,当第 4 步开挖完成后,采空区顶板与地表之间有一小范围的岩体产生位移,位移矢量方向大部分指向采空区,矿体直接顶板局部围岩位移矢量较大,岩体局部崩落,并在崩落区之上裂纹扩展,采空区附近形成一定范围的破坏区。随着对-75 ~ -45 m 之间的矿体进一步开采,围岩扰动的规模与程度更大,当第 7 步开挖完成后,采空区顶板有一较大范围的岩体产生位移和破坏,位移量及顶板崩落区范围较大,崩落区之上裂纹继续扩展,在采空区上方两侧靠近地表开始出现狭长且垂直于地表的剪破坏区,采空区正上方岩体开始出现离层现象,一小型的沉陷盆地在模型的地表已初具规模。对采空区预留矿柱逐个进行开采使其对围岩失去支护作用后,围岩下沉位移量急剧增加,在第 9 步开挖完成后,围岩产生整体崩塌,采空区顶板围岩位移矢量更大,受扰动的范围更广,采空区上方围岩产生离层、错动,直达模型的地表,表现在地表,形成一较大规模的陷落盆地。

图 9^[5] 显示了采用离散元 UDEC 程序计算矿体开挖采空区顶板变形破坏过程,图 9 的结果同图 8 的模型试验基本吻合。物理模型试验和数值分析从不同的角度得到了相同的结果,反映和揭示了采空区顶板的变形破坏过程和地表沉陷的物理机制。

5 结 语

(1) 模型试验对倾斜近地表矿体地质剖面进行了合理概化,比较逼真地模拟了预留矿柱分段崩落法的采矿过程。

(2) 模型试验采用了百分表与网格摄影两种方法量测位移。百分表测量预设测点水平与垂直位移;网格摄影法在百分表测点已有数据的基础上,得到了各步开挖过程中采空区顶板的全场位移。

(3) 开挖-45 m 以上的矿体,地表几乎无沉降。当开挖-75 ~ -45 m 之间的矿体,地表下沉位移逐渐增大,当第 9 步开挖完成后,地表 1~4 测点之间(相当于直径 135 m)形成一明显沉陷盆地,地表最大下沉位移可以达到 825 mm,与现场基本一致。

(4) 开挖-45 m 以上的矿体,全场位移小,采空区顶板局部扰动。当开挖-75 ~ -45 m 之间的矿体,围岩扰动范围越来越大,第 7 步开挖完成后,采空区正上方岩体开始出现离层现象,对部分预留矿柱进行开挖使其失去支护作用后,围岩产生整体崩塌。模型试验结果与 UDEC 数值计算结果基本吻合。

平衡条件。根据空间结构面的水平投影图图解分析知,由3组结构面和临空面组成的规则四面体状危岩块体顶点 O 在水平面上的投影 O' 位于结构面水平投影所围的 $\triangle ABC$ 范围内,故此处危岩块体的失稳方式为直接塌落。

6 结 论

本文着重介绍了地质-几何简明分析法的基本原理、几何作图分析、块体失稳方式判别和滑移稳定性系数计算,对曼歇3号隧道局部地段危岩块体稳定性进行了分析评价,得出以下结论:

(1) 以地质素描图为出发点,借助几何投影知识的地质-几何简明分析法,可以形象直观地判别危岩块体的几何形态和失稳方式,对于隧道围岩的喷锚支护具有重大的指导意义。

(2) 地质-几何简明分析法在对原有地质-几何作图法进行必要改进和完善的基础上,得出的危岩块体稳定性评价结论更为准确和可靠,丰富和发展了危岩块体稳定性评价的理论方法。

(3) 地质-几何简明分析法在各类地下工程潜在危岩块体稳定性分析中将有着广阔的应用前景,是一种便于工程人员现场掌握的行之有效的简单、实效的方法。

参 考 文 献

- [1] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [2] 谢全敏, 夏元友. 危岩块体稳定性的综合评价方法分析[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 775 - 777, 781.

XIE Quan-min, XIA Yuan-you. Comprehensive assessment method of stability of critical rock-block mass and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23 (6): 775 - 777, 781.

- [3] 刑念信. 地下开挖中的围岩稳定性评价[A]. 见: 中国地质学会工程地质专业委员会. 全国第三次工程地质大会论文集[C]. 成都: 成都科技大学出版社, 1988. 1 249 - 1 252.
- XING Nian-xin. Assessment on stability of surrounding rock mass in underground excavation[A]. In: **Committee of Engineering Geology, Geological Society of China. Collected Works of National 3rd Engineering Geology Convention**[C]. Chengdu: Chengdu Science & Technology University Press, 1988. 1 249 - 1 252.
- [4] 王士天, 黄润秋, 尚岳全, 等. 澜沧江小湾水电站大跨度地下洞室群围岩稳定性研究[R]. 成都: 成都理工学院, 1995.
- [5] Unwedge User's Guide, 3D Visualization of potentially unstable wedges in the rock surrounding underground excavation and calculation of factors of safety and support requirements for these wedges[R]. Toronto: Rocscience, 1992 - 1999.
- [6] 王思敬, 杨志法, 刘竹华. 地下工程岩体稳定性分析[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [7] 刘军. 地下工程围岩块体稳定性研究[博士学位论文 D]. 成都: 成都理工学院, 2001.
- [8] 杨小永. 高速公路隧道围岩稳定性研究[硕士学位论文 D]. 西安: 长安大学, 2004.

上接第 889 页

参 考 文 献

- [1] Brady B H G, Brown E T. Rock Mechanics for Underground Mining[M]. London: George Allen & Unwin, 1985.
- [2] 任伟中, 白世伟, 葛修润. 厚覆盖层条件下地下采矿引起的地表变形陷落特征模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1 715 - 1 719.
- REN Wei-zhong, BAI Shi-wei, GE Xiu-run. Modeling test study on deformation and subsidence of ground surface induced by underground mining with thick overburden[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(10): 1 715 - 1 719.

- [3] 舒继森, Fleurisson J A. 采矿工程与地表位移的关系[J]. 中国矿业大学学报, 1997, 26(4): 30 - 33.
- SHU Ji-shen, Fleurisson J A. Relation between movements of earth's surface and mining engineering[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 1997, 26(4): 30 - 33.
- [4] 高明中. 急倾斜煤层开采岩移基本规律的模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 441 - 445.
- GAO Ming-zhong. Similarity model test of strata movement with steep seam[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(10): 441 - 445.
- [5] 白世伟, 杨春和, 李一帆, 等. 江西铜业集团东乡铜矿开采可视化及围岩稳定性研究[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2005.