

文章编号: 1673-3363-(2014)02-0243-06

近地表倾斜矿体开采地表及覆岩变形破坏模拟

陈陆望¹, 孙瑞¹, 白世伟², 冒海军², 刘金龙³

(1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 3. 合肥学院建筑工程系, 安徽 合肥 230022)

摘要 为了揭示近地表倾斜矿体开采过程中地表及覆岩变形破坏机制,以某铜矿一典型地质剖面为原型,运用物理概化模型试验,联合 UDEC 数值模拟,分析了地表及覆岩变形破坏随不同开采步的变化规律。物理模拟与数值模拟均表明:开采-45 m 以上的矿体,覆岩局部扰动,位移小。当开采-75~-45 m 之间的矿体,覆岩位移加大,陷落区范围逐渐扩大,岩体出现离层,破坏波及地表。如果对预留矿柱进行开采,覆岩整体崩塌,离层显著,覆岩块体出现错动与转动,破坏直达地表。合理采用概化物理模型试验技术,联合数值模拟,可以既直观又准确地模拟地表及覆岩变形破坏的动态演化过程。

关键词 采矿工程;岩石力学;近地表倾斜矿体;覆岩;变形破坏

中图分类号 TD 325

文献标志码 A

DOI:10.13545/j.issn1673-3363.2014.02.013

Simulation on deformation and failure of ground surface and overlying rock caused by extracting inclined ore body near surface

CHEN Luwang¹, SUN Rui¹, BAI Shiwei², MAO Haijun², LIU Jinlong³

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;
2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;
3. Department of Civil Engineering, Hefei University, Hefei, Anhui 230022, China)

Abstract In order to reveal the mechanism of deformation and failure of ground surface and overlying rock caused by the extracting inclined ore body near surface, the paper takes a typical geological section of a copper mine for example. The generalized physical model experiment and UDEC numerical simulation are applied to analyze the change law on deformation and failure of ground surface and overlying rock in different extracting steps. Both the physical model experiment and numerical simulation show that when the ore body is extracted above at -45 m, the local disturbance in the overlying rock will occur with small displacement; when the ore body between -45 m and -75 m is extracted, the displacement will increase and the subsidence area will gradually expand. Consequently, abscission layer appear and the damage spread to surface. If the reserved rock pillars are extracted, the overlying rock will collapse entirely and the abscission layer will become obvious; thus, dislocation and rotation will appear in overlying rock, and the rock failure spread to the ground surface. Rational utilization of generalized physical model experiment, coupled with numerical simulation, will intuitively and accurately simulate the dynamic evolution process on deformation of ground surface and overlying rock.

收稿日期: 2013-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372244); 安徽省自然科学基金项目(1208085QE89, 1308085ME61)

作者简介: 陈陆望(1973-), 男, 湖北省蕲春县人, 副教授, 博士, 硕士生导师, 从事采矿工程方面的研究。

E-mail: luwangchen8888@163.com

Tel: 15956904363

Key words mining engineering; rock mechanics; inclined ore body near surface; overlying rock; deformation and failure

地下采矿所引起的地表变形破坏,关系到地下水资源、地面环境与生态等。由此, B.H.G.Brady 等^[1]对地下采矿引起地表下沉类型及其机理进行了系统研究。任伟中等^[2]运用相似材料物理模拟的方法研究了厚覆盖层条件下地下采矿引起的地表变形陷落特征。舒继森等^[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。高明中等^[4]运用相似材料物理模型试验方法,分析了煤层开采引起的岩体移动和地表沉陷的基本规律。近地表倾斜矿体开采所引起地表与覆岩变形陷落速度快,破坏程度大,是一个有待深入研究的重大课题^[5-8]。对近地表倾斜矿体开采所引起覆岩及地表的力学响应作出符合实际的估计与判断,关系到上覆松散含水层的扰动程度、地表建筑物的损毁程度以及地表环境生态的破坏程度等的科学评价,从而才能有针对性地提出预防与治理措施^[9-10]。

物理模型试验的优点在于它能直观再现矿体开采过程中地表与覆岩变形和破坏特征及其对应状态^[11]。但是,要使模型中各种物理力学参数同时满足相似关系几乎是不可能的,也很难同时考虑复杂边界条件及其他多种因素^[12]。鉴于模型试验的优点以及本研究只注重规律性的认识,选择近地表倾斜矿体的典型开采地质剖面,联合数值模拟,开展地表及覆岩变形破坏模拟,分析预留矿柱分段崩落法采矿的地表与覆岩变形和破坏规律。

1 工程概况

江西铜矿集团东乡枫林铜矿 5[#]矿体是该矿的主要开采矿体,埋藏于-105~-400 m 之间,地面标高+50~+60 m。矿体平均厚度 10~30 m,倾角 55°左右,为倾斜矿体。矿体顶板为一连续的破碎带,岩性为硅化(中)砂岩体,强度低;底板为粉砂岩,岩体结构为块状。赋存地层情况如图 1 所示。

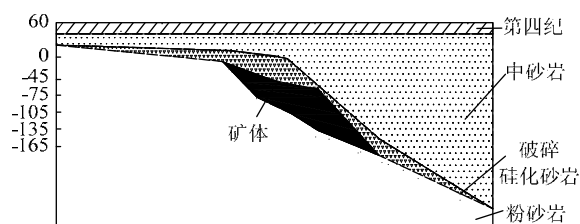


图 1 77 号勘探线地质剖面

Fig.1 Geological section of the no.77 exploration line

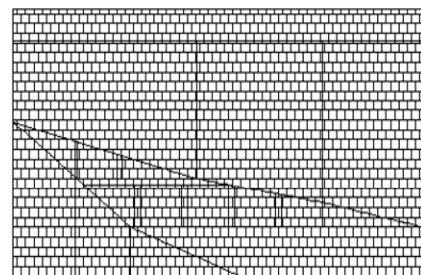
浅部近地表矿体主要分-45 m 以上与-75~-45 m 之间 2 个水平开采。采矿方法为预留矿柱分段崩落法。

2 UDEC 数值模型的建立

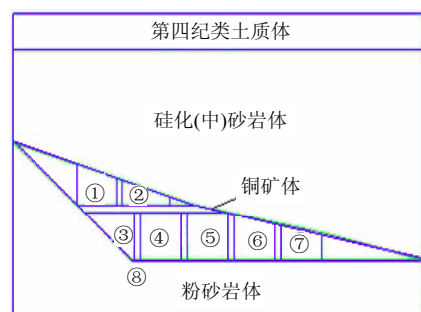
考虑到数值模拟的计算效率和后续物理模型试验的顺利开展,模型尺寸为水平 297 m×垂直 165 m。网格剖分采用水平结构面和垂直结构面,结构面之间相互宽度为 6 m(见图 2)。

模型的左右边界均定义为单约束边界,取 $u=0, v \neq 0$ (u 为水平方向位移, v 为垂直方向位移);下部边界水平和垂直方向的移动较开采矿体上覆岩层的移动小得多,定义为全约束边界,取 $u=v=0$;上部边界水平和垂直方向移动量较大,定义为自由边界,不予约束。根据现场岩体物理力学参数测试结果^[13],数值模拟取各类岩体(含结构面或节理)物理力学参数见表 1。

按开采实情,模拟 8 个开采步,见图 2。先开采-45 m 以上部分的矿体,从左向右开采,其间留 4 m 垂直开采矿柱。-45 m 以上矿体开采完成后,预留 4 m 水平开采矿柱,再开采-75~-45 m 之间的矿体,开采方式同-45 m 以上矿体。最后开采最左边的矿柱。



(a) 数值模型网格



(b) 数值模型岩体分布及矿体开采步

图 2 UDEC 数值计算模型

Fig.2 Computation model of UDEC

表 1 岩体物理力学参数
Table 1 Physical and mechanical parameters of overlying rock

岩体名称	E/GPa	$\varphi/(\text{°})$	c/MPa	μ	σ_t/MPa	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$k_n/(\text{GPa}\cdot\text{m}^{-1})$	$k_s/(\text{GPa}\cdot\text{m}^{-1})$
硅化(中)砂岩体	2.5	33	1.2	0.22	0.7	27		
硅化(中)砂岩体节理		28	1				0.5	0.2
粉砂岩体	7	33	1.8	0.24	0.85	20		
粉砂岩体节理		25	0.5				0.7	0.2
第四纪类土质体	0.8	30	1.2	0.23	0.5	16		
第四纪类土质体节理		30	0.8				0.1	0.05
铜矿体	14	35	2.5	0.22	1	40		
铜矿体节理		40	2				3	3

3 概化物理模型的建立

3.1 模拟参数的概化

研制各类岩体物理模型材料其实是费时、费力、费钱的工作。为方便开展物理模型试验，把 77 号勘探线地质剖面 4 种岩体概化为 1 种岩体，基本参数为： $\gamma=28 \text{ kN/m}^3$ ， $E=1 \text{ GPa}$ ， $\varphi=35^\circ$ ， $c=1 \text{ MPa}$ ， $\mu=0.22$ ， $\sigma_t=0.7 \text{ MPa}$ 。基本参数之间只要能满足以下相似判据式，即可达到物理模拟的效果^[14]：

$$\frac{C_\sigma}{C_\gamma C_l} = 1 \quad (1)$$

$$C_\mu = C_\varphi = 1 \quad (2)$$

$$C_\sigma = C_E = C_c = C_{\sigma_t} \quad (3)$$

式中： C_σ 为应力相似常数； C_l 为几何相似常数； C_γ 为容重相似常数； C_μ 为泊松比相似常数； C_φ 为内摩擦角相似常数； C_E 为弹性模量相似常数； C_c 为内聚力相似常数； C_{σ_t} 为抗拉强度相似常数。

选取模型试验 $C_l=150$ ， $C_\gamma=1$ 。模型框架尺寸为水平 198 cm×垂直 110 cm(相当于工程实际水平 297 m×垂直 165 m，与数值模拟范围相同)。岩体地应力完全由模型材料的自重来模拟，选取 Fe_3O_4 粉末增大容重，经过多组不同配比方案的优选，最终选取 Fe_3O_4 粉末：石膏：石英砂：水：缓凝剂 = 2780：120：556：252：2.5 的物理模型材料^[15]。其物理力学参数为： $\gamma=28 \text{ kN/m}^3$ ， $E=0.6 \text{ GPa}$ ， $\varphi=38^\circ$ ， $c=0.028 \text{ MPa}$ ， $\mu=0.20$ ， $\sigma_t=0.005 \text{ MPa}$ 。参照式(1)~(3)，除 E 值较大外，基本满足概化参数相似的要求。

3.2 物理模型制作

试验专门加工了 2 种用钢板制作的模具，内空尺寸分别为长 200 mm×宽 50 mm×高 30 mm 与长 200 mm×宽 50 mm×高 20 mm。将按优选配方配制的物理模型材料倒入模具中捣实成型，5 min 后即可拆模，即为试块。将试块在室温下晾 24 h，然后

送入 30 °C 的烘房内烘干 7 d。试块制作过程中，尽量保证所有操作步骤相同，以期材料的性能均一与稳定。

制作物理模型是将若干试块砌筑而成。对几类岩体概化并开展物理模型试验，试块接触面的黏结是一项关键的模型试验技术。选取白乳胶与水混合作为试块层面黏结材料。该黏结材料抗剪强度试验采用定滑轮装置测量 c ， φ 值(见图 3)。试验过程是将定滑轮固定，在座垫上放置 2 试块，调整高度后在 2 试块之间涂抹黏结材料，并在滑动试块的垂直上方以堆重物方式施加垂直载荷，引线绕过滑轮连接滑动试块，逐渐增加重物重量直至被拉动，记下垂直载荷和重物重量，即完成一组试验。然后在滑动试块的垂直上方施加不同的垂直载荷，一般进行 5 组试验，即可得到层面胶结材料的 c ， φ 值。白乳胶与水混合采用了不同的混合比与不同的涂抹方式，各自剪切强度试验测试结果请参阅文献^[11]。

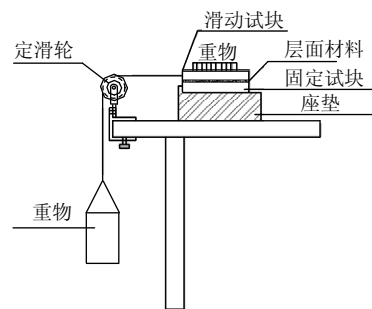


图 3 定滑轮装置示意

Fig. 3 Sketch map of the crown block device

优选其中 6#白乳胶：水 = 1：7 黏结材料，其 $c=0.015 \text{ MPa}$ ， $\varphi=33.0^\circ$ 。选择该种类型的黏结材料，其剪切强度参数弱于概化岩体物理模型材料，在模型试验中可以较好地模拟结构面对岩体强度的弱化作用^[16]。

3.3 测试系统的布设

在物理模型表面布设百分表测量垂直向与水平向位移, 其中地表布置 7 个百分表测点, 覆岩一面布置 8 个百分表测点^[15]。布设百分表测点有限, 难以测得全场位移, 故在覆岩另一面绘出网格。覆岩百分表测点布设在对应网格点上, 见图 4。网格测量时, 固定数码相机在模型前方适当位置, 每一步开采完成后照相, 记录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, 结合百分表位移测量结果, 经过换算后得到了矿体开采每一步完成后的覆岩全场累计位移。



图 4 物理模型表面百分表与网格

Fig.4 Dial gages and grids on model surfaces

4 模拟结果分析

4.1 地表沉陷随开采步的变化规律

根据物理模型地表 7 个测点的百分表测量结果与数值模拟结果, 得到了测点累计垂直位移随开采步的变化关系如图 5 所示。矿体开采过程中, 累计垂直位移值在前 2 步很小, 数值模拟值为-0.020 m, 物理模拟值为-0.012 m (根据百分表测量结果与相似关系换算得到, 下同), 地表面看不出变形陷落范围。第 3 开采步开采完成后, 2 号测点累计垂直位移增加, 数值模拟值为-0.400 m, 物理模拟值为-0.444 m。从第 4 开采步到第 7 开采步开采过程中, 不管是数值模拟值还是物理模拟值, 始终是 2 号测点累计垂直位移较大。但是, 第 8 步开采完成后, 3 号测点累计垂直位移增加幅度比 2 号测点更大, 数值模拟值达到-0.806 m, 物理模拟值达到-0.825 m。图 5 中 1~7 号测点每一开采步累计垂直位移的

数值模拟值与物理模拟值相差控制在 10%以内, 均在地面 1~4 号测点范围内沉陷盆地清晰可见, 沉陷盆地宽度约为 135 m。

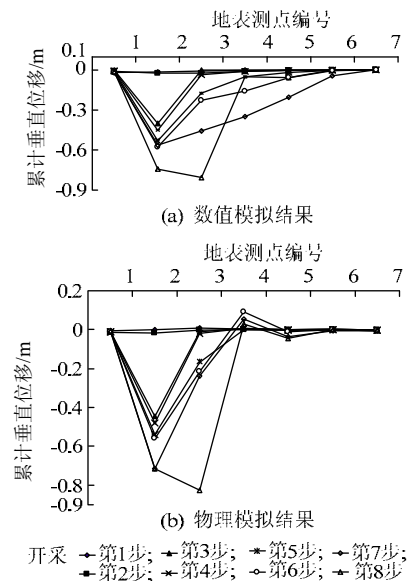


图 5 地表累计垂直位移与开采步的关系

Fig.5 Relationship between accumulated vertical displacement and extracting steps on the ground surface

4.2 覆岩变形破坏随开采步的变化规律

第 2、第 4、第 7 与第 8 这 4 个典型开采步开采完成后覆岩变形破坏的数值模拟结果与物理模拟结果如图 6 所示。在开采-45 m 以上矿体的第 2 步完成后, 数值模拟与物理模拟反映覆岩变形均很小, 覆岩破坏裂隙以断续的层间横向裂隙为主, 裂隙长度在采空区直接顶部最大, 在向上扩展过程中逐渐减小, 尚未波及地表。对-75~-45 m 之间的矿体进行开采后, 数值模拟与物理模拟反映覆岩受扰动范围逐渐扩大, 当第 4 步开采完成后, 采空区与地表之间有一小范围的剪切破坏区, 岩体局部陷落, 并在局部陷落区之上横向和竖向裂隙继续扩展, 并逐渐波及地表。随着对-75~-45 m 之间的矿体进一步开采, 数值模拟与物理模拟反映覆岩扰动规模与程度进一步增大, 当第 7 步开采完成后, 较大范围覆岩产生剪切变形与破坏, 原有的局部陷落区范围扩大, 陷落区之上横向裂纹继续扩展, 出现离层现象, 一小型的沉陷盆地已初具规模。对采空区预留矿柱逐一进行开采使其对覆岩失去支护作用后, 数值模拟与物理模拟反映覆岩变形量急剧增加, 在第 8 步开采完成后, 覆岩发生整体崩塌, 离层显著, 覆岩块体出现错动与转动等, 破坏范围直达模型的地表。

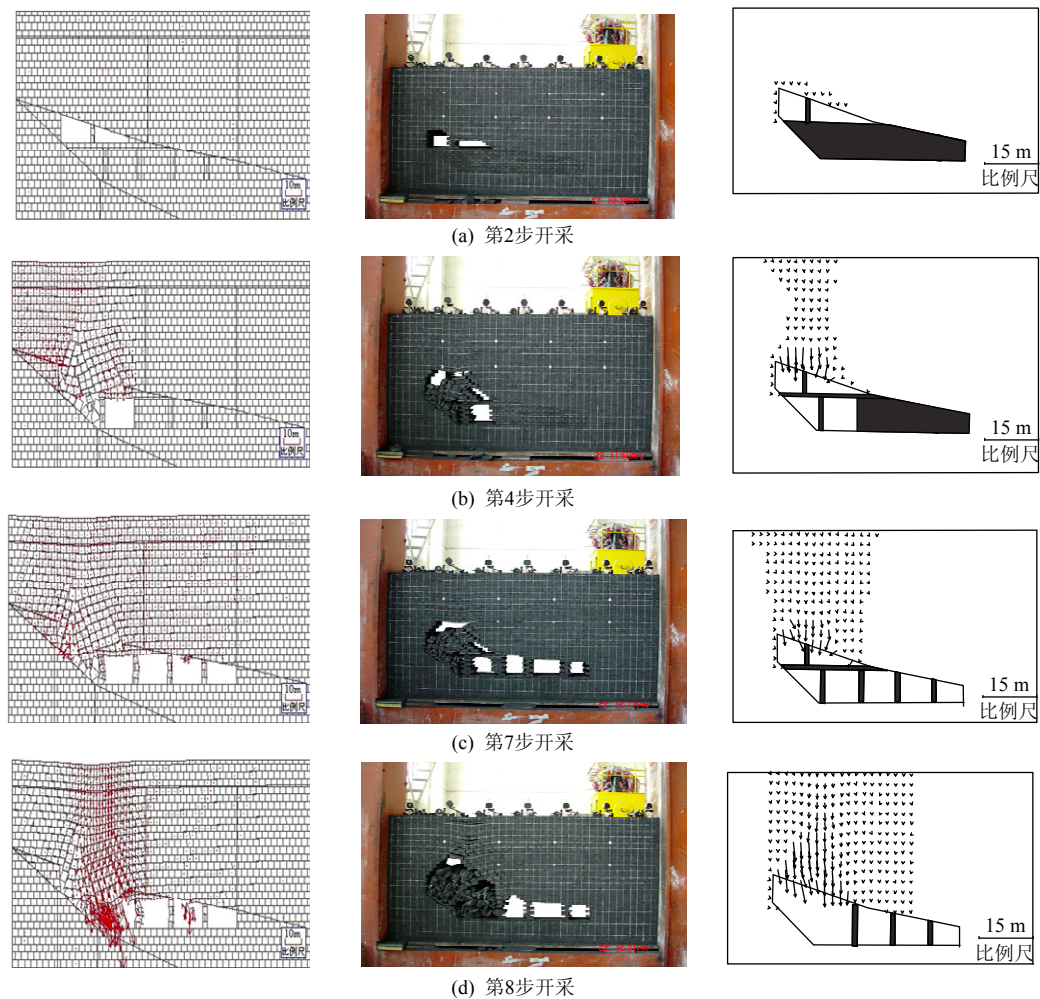


图 6 典型开采步的覆岩变形与破坏(左边为数值模拟结果, 中间与右边为物理模拟结果)

Fig. 6 Deformation and failure of the overlying rock in representative extracting steps

第 2、第 4、第 7 与第 8 这 4 个典型开采步开采完成后覆岩全场累计位移的数值模拟与物理模拟结果如图 6 中的箭头所示(配有比例尺)。在-45 m 以上矿体第 2 开采步完成后, 数值模拟与物理模拟反映覆岩全场累计位移靠近采空区局部较大; 数值模拟当前步最大位移是 0.27 m, 物理模拟当前步最大位移是 0.25 m。对-75~-45 m 之间的矿体进行开采后, 覆岩全场累计位移增大。当第 4 步开采完成后, 采空区与地表之间有一小范围的岩体位移增大明显, 覆岩向采空区方向陷落, 地表能观测到沉降; 数值模拟当前步最大位移为 3.68 m, 物理模拟当前步最大位移为 3.50 m。随着对-75~-45 m 之间的矿体进一步开采, 覆岩开采扰动规模与程度加大。当第 7 步开采完成后, 数值模拟与物理模拟反映较大范围的覆岩产生较大位移, 顶板陷落区范围增大, 地表形成一明显的沉降盆地; 数值模拟当前步最大位移为 3.59 m, 物理模拟当前步最大位移为 3.20 m。

对采空区预留矿柱逐个开采后, 覆岩下沉位移量急剧增加。在第 8 步开采完成后, 覆岩位移更大, 岩体整体崩塌, 地表陷落盆地规模继续增大, 最大下沉点有向右移动的趋势; 数值模拟当前步最大位移为 8.36 m, 物理模拟当前步最大位移为 8.04 m。由此可以看出, 数值模拟与物理模拟每一步开采全场累计位移相差值控制在 10%以内, 2 类模拟结果基本一致。

5 结 论

1) 在基本遵循相似判据的前提下, 采用岩体物理力学参数概化、物理模型材料的优选、岩体结构面强度的模拟等物理模型试验技术, 开展了近地表倾斜矿体地表及覆岩变形破坏物理模型试验概化模拟, 逼真地再现了预留矿柱分段崩落法采矿覆岩变形破坏的动态演化过程。

2) UDEC 数值模拟与物理模拟均揭示: 开采-45

m 以上的矿体, 覆岩局部扰动, 位移小。当开采 -75~45 m 之间的矿体, 覆岩位移加大, 陷落区范围逐渐扩大, 陷落区之上横向裂纹继续扩展, 岩体开始出现离层, 破坏范围波及地表。如果对预留矿柱进行开采, 覆岩整体崩塌, 离层显著, 覆岩块体出现错动与转动等, 破坏直达地表。

3) 合理采用概化物理模型试验技术, 联合数值模拟, 能既直观又准确地模拟开采近地表倾斜矿体地表及覆岩变形与破坏规律。

参考文献:

- [1] BRADY B H G, BROWN E T. Rock mechanics for underground mining[M]. London: George Allen & Unwin, 1985: 454-647.
- [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): 1715-1719.
REN Weizhong, BAI Shiwei, GE Xiurun. 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): 1715-1719.
- [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 Jishen, 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 Mingzhong. Similarity model test of strata movement with steep seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 441-445.
- [5] 何国清, 杨伦, 凌庚娣, 等. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1991: 1-35.
- [6] 郭文兵, 邓喀中, 邹友峰. 岩层与地表移动控制技术的研究现状及展望[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(1): 6-10.
GUO Wenbing, DENG Kazhong, ZOU Youfeng. Research status and prospect of the control technology for surface and overlying strata subsidence[J]. China Safety Science Journal, 2005, 15(1): 6-10.
- [7] 李新强, 高延法, 张庆松. 开采沉陷动态数值仿真研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(1): 86-90.
LI Xinqiang, GAO Yanfa, ZHANG Qingsong. Study on dynamic numerical simulation of subsidence induced by mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(1): 86-90.
- [8] 谢飞鸿, 王锦山, 尹伯悦. 开挖沉陷地表变形可视化计算分析系统研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1202-1206.
- [9] XIE Feihong, WANG Jinshan, YIN Boyue. A visual calculation analysis and evaluation system for surface subsidence induced by mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(7): 1202-1206.
- [9] 陈陆望, 桂和荣, 李一帆. UDEC 模拟厚松散层及超薄覆岩条件下开采防水煤柱覆岩突水可能性[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(1): 53-56.
CHEN Luwang, GUI Herong, Li Yifan. UDEC simulation of the water-pouring probability in exploiting waterproof coal pillars under the conditions of thick loose bed and ultrathin overlying strata[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(1): 53-56.
- [10] 王晓振, 许家林, 朱卫兵, 等. 松散承压含水层水位变化与顶板来压的联动效应及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9): 1872-1881.
WANG Xiaozhen, XU Jialin, ZHU Weibing, et al. Research on connected effect between water level variation of unconsolidated confined aquifer and roof weighting and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(9): 1872-1881.
- [11] 陈陆望. 物理模型试验技术研究及其在岩土工程中的应用[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006.
- [12] 陈陆望, 白世伟, 殷晓曦, 等. 坚硬岩体中马蹄形洞室岩爆破坏平面应变模型试验[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1520-1526.
CHEN Luwang, Bai Shiwei, YIN Xiaoxi, et al. Plane-strain model tests on rock-burst of horseshoe section caverns in hard and brittle rockmass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10): 1520-1526.
- [13] 白世伟, 杨春和, 李一帆, 等. 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.
- [14] LIU J, FENG X T, DING X L, et al. Stability assessment of the Three-Gorges dam foundation, China, using physical and numerical modeling-part I: physical model tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(5): 609-631.
- [15] 陈陆望, 白世伟, 李一帆. 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[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 885-894.
CHEN Luwang, BAI Shiwei, LI Yifan. Model test study on deformation and subsidence of ground surface and surrounding rock caused by exploiting inclining mine near surface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(6): 885-894.
- [16] 刘佑荣, 唐辉明. 岩体力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999: 11-18.