

地下开采引起围岩间断面变形特征的 软材料小模型研究

卢蓉^{1,2,3}, 马凤山^{1,2}, 郭捷^{1,2}, 郭慧高⁴, 寇永渊⁴

- (1. 中国科学院地质与地球物理研究所 中国科学院页岩气与地质工程重点实验室, 北京 100029;
2. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029;
3. 中国科学院大学 地球科学学院, 北京 100049;
4. 金川集团股份有限公司, 甘肃 金昌 737100)

摘要: 为了研究地下开采引起围岩变形和断层活化现象, 文章采用一种软材料的小模型进行地下开采间断面变形的模拟。模型中通过模拟一个矩形地下采区上方围岩的变形来研究一个水平间断面发生活化后的弯曲现象。模拟结果表明, 间断面上的剪切位移分布具有“双峰”的特征或规律。这种分布特征或规律, 得到了数值模拟结果的验证。同时, 也证明了该方法的有效性。该方法最大的优点是, 可以用小尺寸模型有效模拟在自重体积力作用下开挖引起的围岩变形现象, 具有实验装置简单、实验用时短、操作方便、实验成本低等诸多优点, 是一种值得推广的物理模拟方法。

关键词: 小模型; 结构面; 双峰曲线; 自重应力; 地下开采; 变形模拟

中图分类号: TU45; TP803

文献标识码: A

A SMALL-SCALE MODEL OF SOFT MATERIALS USED FOR STUDYING THE UNDERGROUND MINING INDUCED DISCONTINUITY PLANE DEFORMATION

LU Rong^{1,2,3}, MA Fengshan^{1,2}, GUO Jie^{1,2}, GUO Huigao⁴, KOU Yongyuan⁴

- (1. Key Laboratory of Institute Shale Gas and Geoengineering, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
2. Institute of Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
3. College of Geoscience, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. Jin Chuan Group Co., Ltd, Jinchang 737100, Gansu, China)

Abstract: In order to study surrounding rock deformation and fault activation caused by underground mining, a small-scale model of soft materials is adopted to simulate the discontinuity plane deformation induced by underground mining. The bending of a horizontal discontinuity plane after activation is studied through the model by simulating the deformation of the surrounding rock at the top of a rectangular underground mining area. The simulation results show that the shear displacement distribution on the discontinuity plane has the feature of bimodal curve, which is verified by numerical simulation. At the same time, the validity of this method is proved. The biggest advantage of this method is that the small-

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41772341, 41372323)

作者简介: 卢蓉 (1988-), 女, 在读博士, 从事工程地质与岩土工程研究。E-mail: lurongowo@163.com

通讯作者: 马凤山 (1964-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事地质工程与地质灾害研究工作。E-mail: fsma@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期: 2018-07-17; 修回日期: 2018-08-07

吴芳编辑

scale model can effectively simulate the deformation of surrounding rock caused by underground mining under the action of self-weight stress, with simple experimental equipment, short time, convenient operation and low cost. It is a physical simulation method worth popularizing.

Key words: small-scale model; structural plane; bimodal curve; self-weight stress; underground mining; deformation simulation

0 引言

地下开采在引起围岩变形、破坏的同时, 往往也会导致其中竖井和巷道围岩的变形、破坏, 并且会影响采矿活动的正常进行^[1-3]。这类破坏的主要方式是由开采引起矿山围岩间断面错动导致的竖井井筒错动^[4-6]。通过文献调研可知, 以往大量的研究都是针对开采导致矿山特殊岩层移动以及岩层内部中裂隙发育扩展的^[7-9]。

对地质工程来说, 自重体积力是一种常驻力, 其表现形式主要以外力形式。自重体积力对于研究处于工程状态下地质体来说是一个需要考虑的重要因素^[10-12]。但用现有的材料制作的物理模型普遍存在一个突出的问题, 就是如何模拟被开挖围岩在自重体积力作用下发生可以测量的位移^[13]。曾有学者利用散体材料进行物理模拟实验, 在实验过程中通过顶部施加的外荷载来模拟现实工程条件的外力, 然而若研究对象为前部的岩体, 则所取得的力学行为研究是有偏差的^[14-15]。并且通常在静态模拟情况下, 传统模型尺寸较大, 实验耗时也很长, 成本自然也比较高, 对于开挖引起围岩的变形和位移场的基本特征的观察与测量都很困难, 并且在模型制作上无法满足平面应变的力学条件。

针对以上的考虑, 改进物理模拟实验材料可以解决一些传统实验中存在的问题。针对工程地质实验模拟, 徐嘉谟^[13]利用光弹材料验证材料相变存在着固化压力并之后对材料的配比进行了改进。固化压力的存在在一定程度上可以模拟矿山围岩初期的地应力作用。赵海军^[9]利用软材料模型进行的边坡稳定的实验模拟。将软材料实验应用到实际的地质工程当中。因而软材料小模型在工程地质问题模拟研究中存在应用基础。并且这种软材料模型方法有效性的关键在于, 大大降低了材料的变形模量, 从而增强了开挖引起围岩位移场的可测性。现将这种软材料小模型试验引入

矿山开采围岩移动中来进行研究, 以扩展软材料实验的应用范围。

1 模板与模型的制作

实验主要针对地下工程中矿体开挖引起围岩移动, 进而导致间断面相互错动的地质现象, 以此为模型基础进行实验。软材料实验有别于其他的相似材料模拟实验, 如上文所述, 矿体在地下开采过程中, 自重体积力的作用是非常重要的, 而其他的相似材料都未能凸显自重体积力的作用, 并且软材料的固化压力可以一定程度上来模拟围岩的初始应力(下文中进行讨论)。因此从受力特点上, 实验与实际的工程地质现象具有一定相似性。

将明胶、甘油和水, 按 3:5:12 的重量比熔融后倒入装置内(见图 1)。该装置是由两块平行的钢化玻璃板及板间的支撑木条组成的一个深槽。槽的尺寸, 即长、宽、深分别为 400 mm、30 mm、350 mm。当熔融液体冷凝固化后脱膜, 可得到铸成的模板。该模板的材料比重为 1.149 g/cm³, 弹性模量为 0.01 MPa, 泊松比为 0.4, 并且具有良好的光弹性。在模型中进行间断面和采区的布设, 布设一个长度为 350 mm 的间断面, 并在间断面上下两侧布设剪切位移监测点 19 对, 随后在间断面下部进行开挖。开挖区尺寸为 46.6 mm × 87.5 mm。软材料的物理模型具有整体尺寸较小, 模型轻便, 周期较短, 材料可循环使用, 成本低廉等优点。

2 实验结果

在实验模型中部位置设置软弱间断面, 在间断面上下各 5 mm 位置处布设两排监测点, 通过测得的监测点的位移, 得到间断面的变形(见图 1), 图中红色线和点以及蓝色线和点表示变形前后间断面及监测点所处位置, 间断面上方为上盘, 下方为下盘。间断面上、下盘表面的水平位移与竖直位移如图 2、图 3 所示。

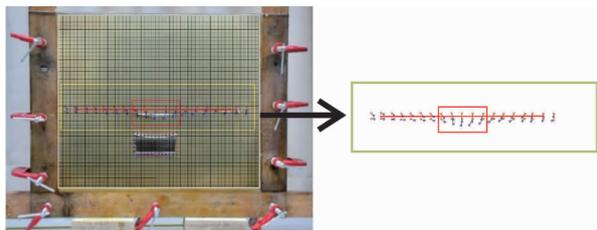


图1 实验装置图

Fig. 1 Photo of the experimental device

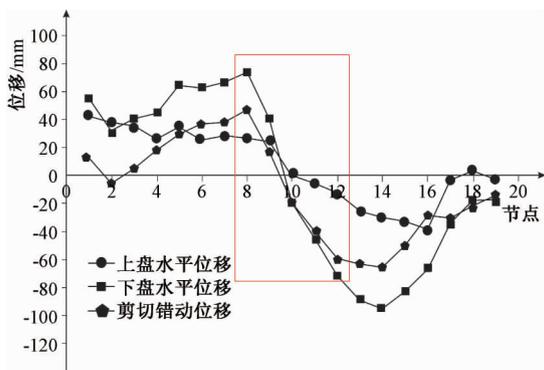


图2 开挖后模型间断面旁侧各点水平位移分布

Fig. 2 Horizontal displacements distribution of each point on the side of the dscontinuity plane after excavation

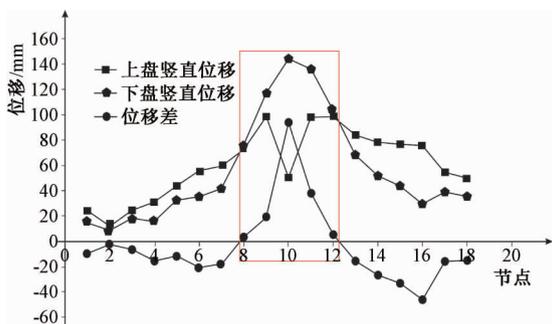


图3 开挖后模型间断面旁侧各点竖直位移分布

Fig. 3 Vertical displacements distribution of each point on the side of the discontinuity plane after excavation

根据水平位移分布曲线可得，在开挖区上方若存在水平间断面（或由软弱面转化而来的间断面），其水平位移分布曲线呈现出双峰特点。通过采取几何中心竖直对称的左右两侧岩体向采空区移动。间断面的上、下盘各点的水平位移都呈现出正负双峰特点，但各自峰值大小有所差别。这样，在每一点位上都会发生不同幅值的剪切错动。对于穿过该间断面的竖井或钻孔都可能被错断。

从竖直位移分量分布曲线可以看出，开挖区正上方的5对观测点出现下盘位移大于上盘位移，并且中心点的上下盘差异更加明显（见图1、图2、

图3中红色框所示的点）。无论是水平位移分量还是竖直位移分量，在开挖区正上方的间断面位置，下盘的位移要比上盘的位移大，并且出现一定的离层现象。上下盘岩层出现明显的相对位移，层间有较大错动。矿体开挖对下盘的岩层的影响表现为，开采区顶部两侧岩体向开采区方向移动，下盘岩层移动程度远大于上盘岩层。因此，在自重体积力的作用下，间断面也表现出对开采扰动的阻隔效果，当然这样的阻隔效应与软弱层的埋深、上覆压力等因素都相关。这种阻隔效应与开挖区附近断层的“屏蔽”机制类似，受直接影响的一侧变形较大，间接影响的一侧变形较小。

数值模拟选用有限元软件 ADINA，利用其大变形较好的模拟对开挖过程及结果进行计算机数值模拟，模拟概化结构见图4。

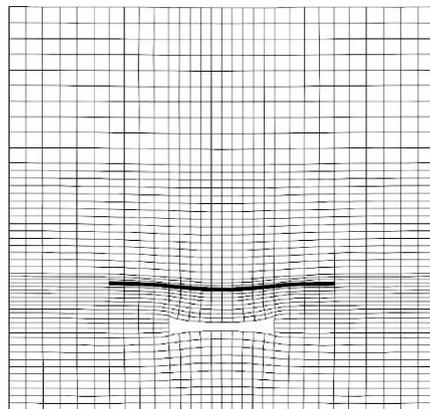
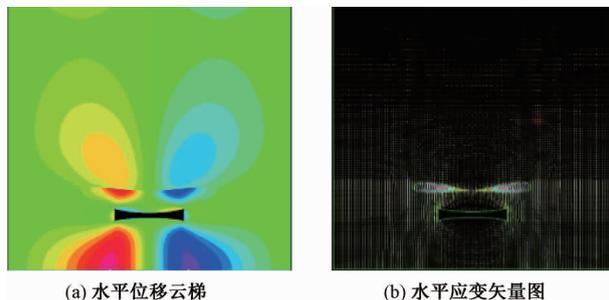


图4 数值模拟网格图

Fig. 4 Mesh diagram of numerical simulation

针对物理模拟实验，研究利用有限元软件对这类问题进行了模拟，在图5中 a、b 为数值模拟的水平位移云图和应变矢量量图。



(a) 水平位移云梯

(b) 水平应变矢量量图

图5 数值模拟结果

Fig. 5 The results of numerical simulation

数值模型中间断面的水平位移与竖直位移的分布特点与物理模型相近，其中水平位移分布曲线的双峰特性以及峰值点的位置更加明显，在开

挖区两侧水平位移分布与竖直位移分布基本对称(见图 6、图 7)。开采区围岩的主压应力大小和取向都随着开采区的几何条件、所在位置发生改变, 在开采影响下, 当围岩低强度结构面上的正应力减小时, 抗剪强度就会降低, 从而使间断面发生相对剪切——滑移。地下开挖引起围岩的移动、变形和破坏都是由近及远逐渐向外扩展的, 开挖引起围岩中每一点应力大小改变也是由近及远的。这种特点也在位移场和应力场的改变特点上体现出来。之所以呈现这种渐变特征是因为周围岩体内发生结构面间的摩擦制动与启动的交替作用。当开挖区一定范围内岩体中存在低强度带时, 该低强度带就会失去强度, 出现变形活化现象。在这个过程中, 由自重体积力所做的功, 一方面消耗在软弱带内的塑性变形上, 也会消耗在出现新裂面后的面间摩擦上, 同时造成低强度带上下盘应力场和位移场不连续分布。

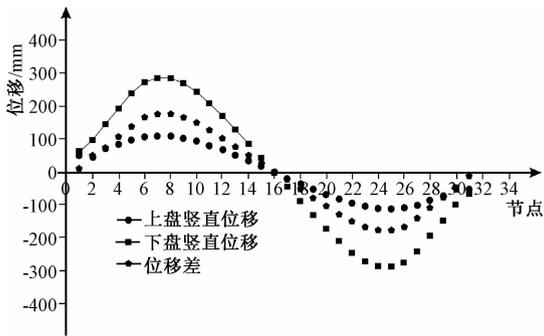


图 6 数值模型水平位移

Fig. 6 Horizontal displacements of the numerical model

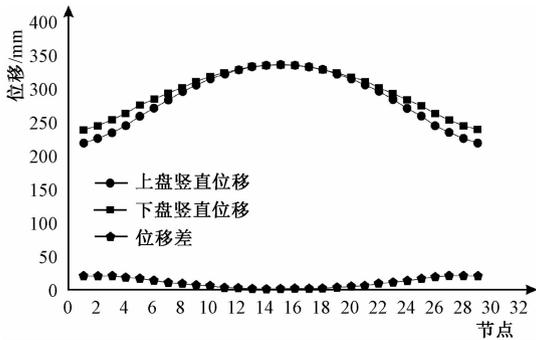


图 7 数值模型竖直位移

Fig. 7 Vertical displacements of the numerical model

3 实验分析

3.1 间断面的强度损失与错动条件

在采矿等实际工程中, 常见的间断面主要有

断层、节理以及岩层间接触面。间断面发生弯曲变形都会伴随沿这一间断面剪切的滑动。发生滑动时, 间断面上不同位置的点剪切位移大小不同, 或者说, 间断面上任意两个相邻点, 无论它们之间的距离大小如何, 剪切位移的大小都不相等。随着采区顶板尺寸或跨度增大, 上部围岩中的低倾角间断面更容易发生弯曲变形。伴随着这种变形, 必然会出现沿间断面的剪切错动现象。如果这种现象发生在岩层间断面间, 就叫层间错动。这种错动会造成竖井、钻孔等的错断, 在这煤系地层及石油开采过程中, 是一种常见的工程地质现象。

较大尺寸间断面在实际工程岩体中是以断层、节理或岩层接触面的形式出现的。在开采条件下, 间断面上的应力分布随间断面产状变化而变化。抗剪强度丧失从而导致间断面相对位移。因此, 剪切错动的产生是以强度丧失为前提的。无胶结强度的间断面在开采过程中受到开采影响, 直接发生错动。而对于低强度间断面, 开采产生的影响首先使该面强度丧失, 成为无强度的间断面, 这是产生错动的必要条件。并且岩层中存在低强度间断面时, 受到开采应力场作用, 低强度区域总是出现应力集中, 也是最易发生变形和强度损失最明显的区域。这个过程就是低强度面向间断面转化的过程。由于这个低强度面向无强度间断面转化过程在一定程度上解释了间断面发生的移动、变形和破坏对开挖事件的滞后及开挖停止后的延时现象。在软材料的模型中, 考虑到明胶的特殊属性, 在设置间断面的过程中, 在间断面之间加入甘油, 基本消除了相互间的摩擦作用, 因此低强度间断面上的强度主要是其粘性的具体表现, 而且间断面的粘性并非固定不变的。一般来说, 岩体中结构面的存在及其力学效应(尤其是剪切和摩擦作用)、岩体本身的流变性都与岩体中水的作用有关, 以及与被开挖岩体的几何条件和重度等条件决定的外力等因素有关。岩体受开挖影响产生变形具有一定的滞后性, 这与岩体中是否存在粘性物质无关, 而多取决于岩壁间的摩擦。岩体变形过程中间断面的摩擦传递是与岩体间断面的粘性有关的, 其受扰动后的变形破坏与岩体移动都是产生扩展特性的。

3.2 模型中的收敛变形分析

地下赋存的岩石材料与人工制成的固体在应

力状态方面有很大差别,例如陶瓷与金属等固体是属于人工制品,因此其初始状态是处于应力为零的状态,这一点与岩体的形成过程和初始状态截然不同。自然形成的岩石往往是在很高的相变压力下固结状态下形成并进行作用,在各项复杂因素的作用过程中,岩石结构以及状态会发生诸如相变一类的变化,最终形成坚硬的固体。通常岩石形成过程中产生较高的初始应力是岩石的一大特点,也被称为“固化压力”。在之后的岩石变形中,固化压力一直对其变形产生影响。由于矿山岩石的固化压力,就产生开采过程中的卸荷回弹现象。在开挖过程中,卸荷作用会使得围岩向临空面移动,因此空区会出现顶沉底臃、两侧收敛的现象。

散体材料进行模拟时不能出现正常收敛底臃现象的主要原因是这种材料其颗粒性是最大的特点。在实际工程中,虽然岩石的模量也较大,但是由于地应力及各项应力的作用,实际的工程中会出现明显的收敛底臃的现象。而在散体材料的模拟实验中,在固结的情况下,颗粒间的黏结力作用是比较大的,并且固结后材料的模量较大,若要使得模型出现收敛底臃的现象,是比较困难的。这也是之前物理模拟中较困难的问题,这个问题在实验中得到了解决。此次实验的铸模过程就是模型中材料从液相转变为固相的过程。自重体积力产生于材料的相变过程中,对于材料性质的影响不仅表现在力学性质上,同时还会影响模型整体的变形行为。在铸模过程中,模板不同高度的材料都记忆了固化压力,其力学性质会受到液相至固相转变时不同深度固化压力的影响,而这样的固化压力是可以用来模拟岩层固结压实过程中所产生的初始应力。在已经固化而成的模板上进行开挖,形成空区的情况下模型中原有的固化压力对采空区进行做功,产生收敛底臃的位移。由于铸模材料的特性是低模量的整体材料,使得做功产生的位移非常明显,易于监测。而在实际矿山中,很多矿体的形成方式为热液侵入冷凝,所以矿体也是经过了一个由液相到固相的相变过程,产生固化压力。当然矿山中矿体与围岩的初始压力除了自身的固化压力外,还包含例如构造应力的其他应力因素。但矿体与围岩的模量相比于矿山的巨大初始应力与地压应力而言,也是属于低模量的材料。这也能从另一个方面验证模型

的适用性。另外,由于固化压力的存在,模型是有不能上下颠倒的,颠倒后,实验结果就会不同。

4 讨论

在经典的力学理论中,两层状接触块体中心下弯所导致的层间间断面的剪切错动。这样错动方式常被用于地下开采层间接触位移受力的问题分析中。间断面剪切位移分布特点是,中心点剪切位移为零,而剪切位移峰值位于端部。这与文中物理模拟实验和数值模拟实验间断面的剪切位移分布不同,主要原因是间断面的约束问题。模拟实验中的间断端部是存在约束限制其位移的。

对于模拟实验而言,尤其是物理模拟实验,通常的做法都是将三维问题转化为平面应变问题进行研究。在平面应变问题的研究中,地表以下则视为半无限空间,因此无论间断面的尺寸又多大,最终的端部都是被约束的,因此,所示的力学模型是不适合进行地下开采中层间错动问题的分析。由于端部约束的存在,开采影响下,间断面在错动的过程中,位移过大时,间断面端部是首先新裂隙的位置,即最易发生破坏的位置。也是断裂力学中研究关键位置。

实际上,在无限大板内,任何一条直线型穿透裂纹在发生向内弯曲时,都会出现“双峰剪切位移分布规律”。如果这种弯曲变形是关于通过裂纹中点,并与其垂直的平面为对阵面,那么,“双峰”也具有几何对称性,如果弯曲变形是不对称的,那么“双峰”也不具有这种对称性,即无论峰值大小和他们所在的点位都是不对称的。

5 结论

通过将软材料小模型试验引入矿山开采围岩移动中来进行研究,根据模拟实验结果及分析得出以下结论:

(1) 软材料小模型实验针对自重体积力作用下地下开采引起围岩中间断面活化变形具有很好的模拟效果。间断面在地下开挖的影响下,上下盘发生剪切错动时,剪切位移分布曲线呈现出正负双峰特点。并且,用数值模拟的方法验证了物理模拟的结果和软材料小模型方法的有效性。是一种值得推广的好方法。

(2) 地下开采引起间断面错动首先应使间断面的强度丧失, 之后才能发生滑移错动, 变形向外扩展。

(3) 地下开采过程中会出现断面顶沉底臃, 两侧收敛的现象, 一定程度上是由于岩体具有初始应力。在模拟实验中, 固化压力一定程度上可以模拟初始应力对模型产生作用, 从而有效的模拟断面收敛的现象。

(4) 物理模拟通常都是将三维问题转化为平面应变问题, 在平面应变问题地下半无限空间的前提条件下, 即便是大尺寸的间断面都应视为端部受到约束, 在发生错动时, 受到约束的端部最易诱发新裂隙的产生, 发生变形破坏。

参考文献/References

- [1] 马凤山, 袁任茂, 邓青海, 等. 金川矿山地表岩移 GPS 监测及岩体采动影响规律 [J]. 工程地质学报, 2007, 15 (S2): 84 ~ 97.
MA Fengshan, YUAN Renmao, DENG Qinghai, et al. GPS monitoring of ground movement and mechanism of underground mining influence in Jinchuan mine [J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15 (S2): 84 ~ 97. (in Chinese)
- [2] 赵海军, 马凤山, 李国庆, 等. 充填法开采引起地表移动、变形和破坏的过程分析与机理研究 [J]. 岩土工程学报, 2008, 30 (5): 670 ~ 676.
ZHAO Haijun, MA Fengshan, LI Guoqing, et al. Analysis and mechanism of ground movement, deformation and fracture induced by underground backfill mining [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30 (5): 670 ~ 676. (in Chinese with English abstract)
- [3] 徐嘉谟. 金川矿山边坡岩体工程地质力学 [M]. 北京: 地震出版社, 1998.
XU Jiemo. Engineering geomechanics of slope rock mass in Jinchuan Mine [M]. Beijing: Seismic Press, 1998. (in Chinese)
- [4] Usanov S V, Mel'nik V V, Zamyatin A L. Monitoring rock mass transformation under induced movements [J]. Journal of Mining Science, 2013, 49 (6): 913 ~ 918.
- [5] Palchik V. Localization of mining-induced horizontal fractures along rock layer interfaces in overburden: field measurements and prediction [J]. Environmental Geology, 2005, 48 (1): 68 ~ 80.
- [6] 李文秀, 郑小平, 王京. 软岩地层地下铁矿开采岩体移动影响范围及变化趋势分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (S): 3673 ~ 3678.
Li W X, Zheng X P, Wang J. Analysis of influenced regions and change trend for rock mass displacement due to mining of iron ore in soft rock strata [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (S): 3673 ~ 3678. (in Chinese)
- [7] 梅松华, 盛谦, 李文秀. 地表及岩体移动研究进展 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (S1): 4535 ~ 4539.
MEI Songhua, SHENG Qian, LI Wenxiu. Research advances in surface and rock-mass movement [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (S1): 4535 ~ 4539. (in Chinese with English abstract)
- [8] 李文秀, 郑小平, 王晶. 软岩地层地下铁矿开采岩体移动影响范围及变化趋势分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (S2): 3673 ~ 3678.
LI Wenxiu, ZHENG Xiaoping, WANG Jing. Analysis of influenced regions and change trend for rock mass displacement due to mining of iron ore in soft rock strata [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (S2): 3673 ~ 3678. (in Chinese with English abstract)
- [9] Zhao H J, Ma F S, Xu J M, et al. Experimental investigations of fault reactivation induced by slope excavations in China [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2014, 73 (3): 891 ~ 901.
- [10] Karmis M, Triplett T, Haycocks C, et al. Mining subsidence and its prediction in an Appalachian coalfield Rock mechanics: theory, experiment, practice [A]. Proceedings of the 24th US symposium rock mechanics [C]. Balkema, Rotterdam: Texas A&M University., 1983, 22: 665 ~ 675.
- [11] Li Y B. Study on the integrated pillarless coal production and methane extraction technology [J]. Advanced Materials Research, 1792, 524 ~ 527; 735 ~ 738.
- [12] Unver B, Yasitli N E. Modelling of strata movement with a special reference to caving mechanism in thick seam coal mining [J]. International Journal of Coal Geology, 2005, 66 (4): 227 ~ 252.
- [13] 徐嘉谟, 李晓, 韩贝传. 露天开挖引起的断层陡坎及其尺寸研究 [J]. 工程地质学报, 2007, 15 (S2): 38 ~ 44.
XU Jiemo, LI Xiao, HAN Beichuan, A study of fault step from open excavation and its size [J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15 (S2): 38 ~ 44. (in Chinese)
- [14] Palchik V. Influence of physical characteristics of weak rock mass on height of caved zone over abandoned subsurface coal mines [J]. Environmental Geology, 2002, 42 (1): 92 ~ 101.
- [15] Liu J K, Dong C, Zhang S Q, et al. Research on the rules of overlying rock movement by similar material simulation in fully mechanized top coal caving mining with high cutting height [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 522 ~ 524: 1419 ~ 1425.