

弱胶结地层巷道地应力数值反演

贾海宾, 苏丽君, 秦 哲

(山东科技大学 土木建筑学院, 山东 青岛 266590)

摘要:在鲁新煤矿巷道断面实测相对收敛位移的基础上,采用弹性位移反分析方法对该巷道围岩的初始应力和围岩参数进行数值反演。利用反演结果进行数值模拟计算,并将所得测点间的相对位移和实测结果进行对比,两者之间吻合较好,说明采用位移反演法进行地应力还原是可行的。根据数值模拟结果和实地现场观测对该矿区在软岩巷道开挖后出现巷道围岩收敛位移大、底鼓、衬砌开裂和锚杆受力效果不好等现象的原因进行分析,并对巷道的支护设计和施工给出建议。

关键词:软岩;位移反分析;巷道收敛;数值模拟

中图分类号:TD353

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2011)05-0030-06

Ground Stress Numerical Inversion of Roadways with Weakly Cemented Strata

JIA Haibin, SU Lijun, QIN Zhe

(College of Civil and Architectural Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: This paper, based on the relatively measured convergence displacement of roadway sections at Luxin coalmine, used the elastic displacement backward analysis method to make a numerical inversion of initial stress and parameters of surrounding rock of the roadway. The numerical simulation was performed in accordance with the above backward analysis data. The comparison between the relative displacement of monitoring points and the simulated data was made, revealing the good agreement between them. The result shows that the displacement inversion method used for the ground stress reduction is feasible. Finally, according to the results of numerical simulation and in situ observations, the reasons why these phenomena, such as the big surrounding rock convergence displacement, the floor heaving, lining cracking and bad effect of the bolt force occurred were analyzed, and providing the proposals for the design and construction of roadway supports.

Key words: soft rock; displacement back analysis; roadway convergence; numerical simulation

地应力资料是各种地下工程稳定性评价、工程设计和施工的重要基础^[1-2],尤其是在采矿工程中,地应力的大小和方向对巷道的走向与围岩的稳定性有极大的影响。在实际工程中,由于测试地区地质条件、测试技术和经费等原因,往往不能进行大规模的地应力测试,甚至不能进行地应力测试,给地下工程的设计和施工带来诸多不便。地应力数值反演方法利用新奥法的基本思想,在巷道施工过程中,对巷道的实时收敛位移进行监测,通过各个监测断面监测点的相对位移,利用位移反分析基本理论对巷道围岩的基本参数和地应力进行反演,为巷道的掘进速度和支护设计的优化提供参考依据。

弱胶结软岩地层在西北内陆如内蒙、新疆、宁夏等地区广泛分布,这些地区煤炭资源储量丰富,将是我国未来煤炭的主产区。但是弱胶结软岩地层具有强度低、弱胶结、易软化、遇水泥化等特点,在软岩地层中进行地应力实测操作困难,花费高而且难以得到期望的结果。另外,巷道在软岩地层中容易出现巷道收敛位移

收稿日期:2011-03-04

作者简介:贾海宾(1986—),男,山东济宁人,硕士研究生,主要从事矿山与城市地下工程方面的研究。

E-mail:251782546@qq.com.

大、底鼓、衬砌开裂等一系列工程难题^[3]。本研究依托位移反分析基本原理,根据鲁新煤矿巷道穿越典型地层的实测收敛结果进行初始地应力反演,得出该地区初始地应力分布情况,分析巷道变形大及其衬砌开裂等现象的原因,为巷道的设计和施工提供依据。

1 研究区地质概况

鲁新煤矿地处内蒙古锡林郭勒盟高原,位于大兴安岭西缘,为大兴安岭山地和内蒙古高原的衔接部位,除丘陵山顶局部出露基岩外,均为第四系表土覆盖。该煤田为晚侏罗-早白垩系陆相沉积型煤田,形成年代较晚,岩石固结程度较差,岩性较松软,往往形成一系列的松散层,煤层及其上覆岩层为层状岩石。井田位于区域构造稳定区,自燕山运动以来除发生地壳整体沉降外,无较大的构造活动,新构造活动微弱,区域稳定性好,煤系上覆松散层厚度较大,岩性较松散,煤系地层岩性变化不大,岩石质量中等。地质构造简单,岩溶不发育,但由于煤层顶底板一般为偏软弱的岩石,给矿井开拓和开采支护带来一定困难。

2 原岩应力反演

鲁新矿井属于软岩地层,岩性多为泥岩和砂岩,岩石具有软弱、遇水软化、弱胶结、易风化等西部软岩特性。在巷道开挖至泥岩、泥砂岩地段时,巷道出现大变形和围岩破坏现象,边墙也出现岩体挤出的破坏情况。后期在巷道出现大变形地段采用“U”形钢支架进行支护,经现场观测,拱顶钢支架被挤压扭曲变形,局部掉块等现象。根据位移反分析参数可识别条件^[4],在巷道穿越典型岩层设置测站,并在每个测站布置相对位移观测点,巷道测站和相对位移观测点布置图如图1、图2所示。

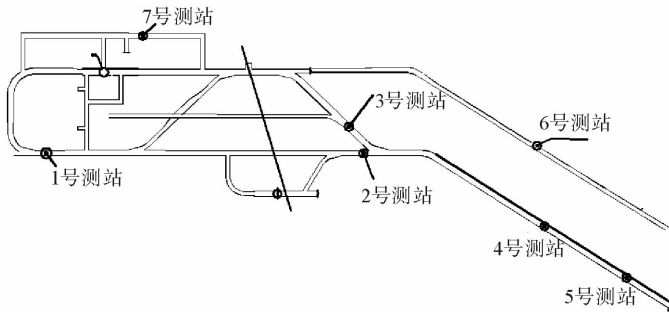


图1 巷道测站分布图

Fig. 1 The distribution of monitoring stations in roadway

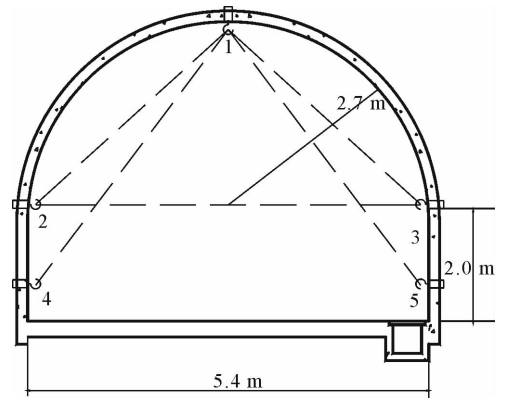


图2 巷道断面的几何尺寸及其测点布置图

Fig. 2 The geometric size and monitoring sites arrangement of the roadway cross-section

2.1 初始地应力反演测站选择

根据现场的实际地质情况,选取3个代表性区域进行地应力分析。在地质分界线以西、以东分别选取图1中1,2,4三个测站进行地应力和围岩参数反演。三个测站分别反映了巷道所在地层的三种不同地质形态,1号测站围岩为岩性较好的火成岩,围岩松动圈不到1 m,属于II类围岩。2号测站处围岩岩性较弱,普氏系数在1~1.5左右,岩性为泥岩,软弱易碎,遇水软化,岩性不均匀。4号测站靠近13煤所在区域,围岩主要为砾质泥岩和炭质泥岩互层,弱胶结、强度低,开挖后围岩易破碎,遇水软化严重,开挖后变形将较大。

2.2 所选测站地应力反演

由弹性位移反演法基本原理可知^[4],根据量测的巷道周边的相对位移可以反求初始地应力和围岩力学参数。对于弹性位移和弹塑性位移反分析,假设理论计算的相对位移 $u_i(X)$,量测的位移为 $\bar{u}_i (i=1,2,\dots,m,m$ 为不同位置的相对位移测线条数)。为了便于利用阻尼最小二乘法进行计算,采用平方和形式的目标函数:

$$F(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^m [u_i(\mathbf{X}) - \bar{u}_i]^2 \quad (1)$$

这里, $\mathbf{X} = [\sigma_x \quad \sigma_z \quad \tau_{xz} \quad E \quad \mu]$, $\sigma_x, \sigma_z, \tau_{xz}$ 为初始应力的 3 个应力分量, E 为弹性模量, μ 为泊松比。根据围岩参数及其地应力可辨别条件, 围岩的弹性模量和地应力不能同时为要辨别的未知量, 根据现有的监测资料可知, 在深度 25~2 700 m 范围内, 初始垂直应力 σ_z 基本等于覆盖岩层的重量 γH (γ 为单位体积岩体的重量, H 为巷道埋深)。这样, 目标函数中的 5 个设计变量就变成 4 个设计变数 $\{\sigma_x, \tau_{xz}, E, \mu\}$ 。用阻尼最小二乘法找出使式(1)最小的一组 \mathbf{X}^* , 就是所要反求的结果。

鲁新矿井水平巷道目前设有 8 个监测站, 监测断面的测点布置如图 2 所示。反演测站所在巷道埋深都在 -300 m, 在巷道开挖后立即开始收敛量测和多点位移计量测, 1, 2, 4 三个测站监测点之间的相对位移实测结果如表 1 所示。

表 1 反演测站测点实测相对位移表

Tab. 1 The measured relative displacements in the back analysis stations

测站	测点相对位移实测值/mm				
	1-2	1-3	1-4	1-5	2-3
1	8.06	9.50	6.38	7.03	20.34
2	50.95	51.02	58.08	59.21	94.85
4	135.60	140.30	/	/	203.10

表 2 测站 2 设计变量 X 的初值表

Tab. 2 Initial values of the design variable X at station 2

参数名称	σ_x /MPa	τ_{xz} /MPa	E /Pa	μ
取值	3.8	0.3	5×10^9	0.3

采用阻尼最小二乘法计算时, 需要对设计变量 X 取一个初始值, 然后应用阻尼最小二乘法进行迭代运算^[5], 当计算所得的数值基本稳定时, 求得的 X 即为所要求的最小值 X^* 。以 2 号测站为例, 根据自重应力场进行估计垂直方向的应力 $\sigma_z = 7.5$ MPa, 水平方向的应力假定为 0.5 倍的垂直应力, 另外岩石的泊松比 μ 对结果的影响较小, 根据地质资料选取 $\mu = 0.3$, 取定值, 具体数值见表 2。

假设 $x(1) = \sigma_x, x(2) = \tau_{xz}, x(3) = E/1\ 000, x(4) = \mu$, 即 $x(1) = 3.8, x(2) = 0.3, x(3) = 5, x(4) = 0.3$, 则代入式(2)阻尼最小二乘法迭代程序计算, 计算结果见表 3。

$$\mathbf{X}^{(k+1)} = \mathbf{X}^{(k)} - \{[\mathbf{A}(\mathbf{X}^{(k)})]^T \mathbf{A}(\mathbf{X}^{(k)} + \lambda \mathbf{I})\}^{-1} [\mathbf{A}(\mathbf{X}^{(k)})]^T f(\mathbf{X}^{(k)}) \quad (2)$$

其中: λ 为适当小的正数, 称阻尼因子; \mathbf{I} 为 $m \times m$ 的单位矩阵, $k = 1, 2, \dots, m$, 表示迭代次数, \mathbf{A} 为目标函数的偏微分矩阵, $\mathbf{X} = [x(1) \quad x(2) \quad x(3) \quad x(4)]^T$ 。

根据以上原理对 1, 4 两个测站进行同样的反演计算, 所得结果如表 3 所示。

3 反演结果数值模拟验证

表 3 反演结果表

Tab. 3 The results of inversions

主要参数	σ_x /MPa	τ_{xz} /MPa	E /Pa	μ
测站 1	6.4	0.26	13.0×10^9	0.25
测站 2	4.5	0.36	3.4×10^9	0.30
测站 4	4.0	0.26	1.5×10^9	0.20

为了验算位移法反演地应力的结果, 并且对巷道围岩稳定性和支护效果作出合理评价, 此处采用有限元差分软件 FLAC^{3D} 对巷道进行锚喷支护施工全过程分析, 分析中需考虑围岩开挖和支护施工过程^[6]。本研究采用摩尔-库伦

塑性模型进行进算验证, 由于巷道所在区域为弱胶结软岩地层, 在进行数值模拟计算时, 对围岩的粘聚力 C 和内摩擦角 φ 进行适当的折减。

巷道形状为直墙半圆拱, 拱顶半圆半径 $R = 2.7$ m, 拱高为 $f = 2.7$ m, 直墙高度 $h = 2$ m, 巷道跨度 $I = 5.4$ m, 处于静水压力状态, 岩体的主要力学参数采用表 3 中的反演结果, 支护结构参数按照现场锚喷支护结构进行选取。计算模型取自地下埋深 300 m 处, 宽和高都取 40 m, 模型采用应力边界条件: 约束硐室长轴两端沿轴向的位移和沿跨度方向的位移和下部边界垂直方向的位移; 模型上表面施加均匀的垂直压应力, 模

型两侧施加随深度变化的水平压应力和水平方向的构造应力。巷道围岩的计算模型及网格划分模型分别见图 3 和图 4。

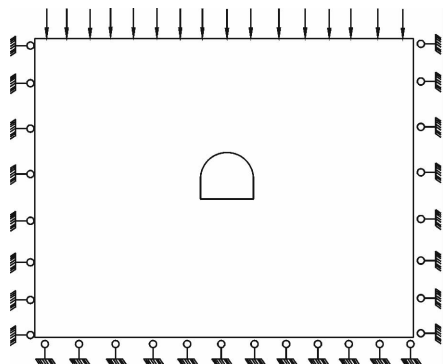


图 3 计算模型图

Fig. 3 The calculating model

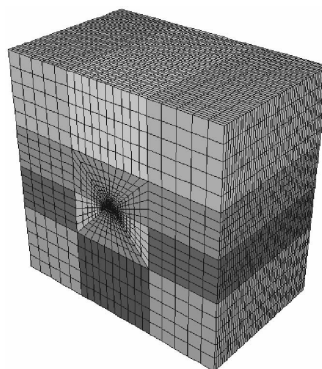


图 4 模型网格划分图

Fig. 4 The grid division of the calculating model

3.1 反演测站数值模拟结果

按照以上数值模拟计算模型进行编程计算^[4],在模拟程序中,编程记录各个测站监测点之间的相对位置随开挖距离的变化,在模拟计算结束时,输出各个监测点之间的相对位移,以便和实测结果进行对比。经计算后,选取设置监测点的一个横剖面,围岩的塑性区分布如图 5 所示,围岩的总位移分布如图 6 所示。

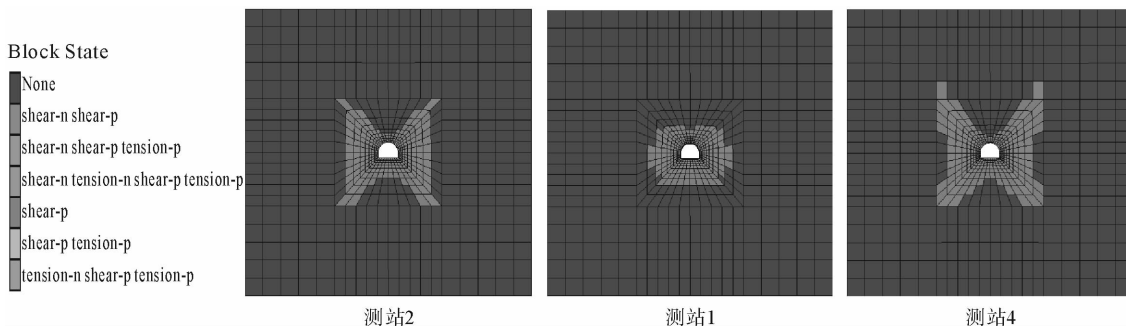


图 5 反演测站围岩塑性区分布图

Fig. 5 Plastic zone distribution of the surrounding rock in inversion stations

从巷道开挖后的围岩塑性区分布图(图 5)和总位移分布图(图 6)可以看出,在现有支护条件下,围岩的塑性区分布都较大,大体范围都在巷道半径的 3~5 倍范围之内,有些区域超过了锚杆的长度,主要表现为测站 2,4 巷道表面位移较大。从图 6 可知,巷道开挖后巷道表面位移均向巷道收敛,测站 2 单侧水平位移在 5 cm 左右,较垂直方向位移较小,底鼓量在 17 cm 左右,测站 4 单侧水平位移在 10 cm 左右,拱顶沉降在 15 cm 左右,底鼓量在 20 cm 左右。测站 1 单侧水平位移在 0.5 cm 左右,底鼓量在 2.5 cm 左右。测站 2,4 与测站 1 相比,巷道表面位移收敛量较大,这主要与巷道围岩岩性有关,测站 1 围岩主要为承载能力较好的火成岩,巷道在开挖后围岩的自承载能力较好。

测站 2,4 的围岩主要为具有软岩特性的泥岩和泥砂岩,围岩自稳能力较差,受地下水的影响较大具有流变特性,在巷道开挖后围岩压力明显,对现有支护及其巷道稳定有极大影响,现场监测结果表明:巷道拱部以上变形剧烈,顶板破碎,开挖后顶板出现离层,上部围岩在重力作用下作用在喷层上,引起喷层开裂,后期追

加 U 型钢支护后,巷道变形量速率变小,巷道趋于稳定。

3.2 测点收敛相对位移对比分析

由 2.2 节可知,在巷道开挖后立即开始收敛量测,在数值模拟计算过程中,也进行编程记录相应点的相对收敛位移,实测结果和模拟结果具体如表 4 所示。

从监测点的实测相对位移与数值模拟结果的对比可以看出,采用位移反演法反演的围岩参数与地应力进行数值模拟的结果与实测结果基本相符,并且模拟结果大于实测结果。造成模拟结果与实测结果偏差的主要原因:①现场布点监测滞后于开挖,在进行监测前围岩已经产生了一定的变形量;②数值模拟所采用的计算模型与应力情况处于理想状态,而实际情况往往受到围岩的岩性、裂隙发育程度、支护结构受力状况、地下水等的影响。由于模拟结果大于实测结果,按照反演结果进行支护设计与施工时,需要有一定的安全裕量,以保证巷道开挖后的稳定。

表 4 测点相对位移实测结果与模拟结果对比表

Tab. 4 The contrast of the measured relative displacements at measuring sites with the numerical simulation results

测站	取值类别	测点相对位移/mm				
		1-2	1-3	1-4	1-5	2-3
1	实测值	8.06	9.50	6.38	7.03	20.34
	模拟值	16.04	11.04	12.50	12.50	29.20
2	实测值	50.95	51.02	58.08	59.21	94.85
	模拟值	55.05	55.03	61.70	62.06	106.14
4	实测值	135.60	140.30	\	\	203.10
	模拟值	148.32	148.26	\	\	257.28

注:在监测过程中,测站 4 仅仅布置了 1,2,3 三个测点。

4 结论与建议

围岩的初始应力对巷道的稳定性起着关键作用,巷道开挖后变形量大小与围岩所受的初始应力的大小、支护情况、围岩的岩性以及地下水的活动有关。通过对鲁新矿巷道初始应力的反演结果可知,该矿区最大主应力为垂直应力,基本等于上覆层的自重应力,水平应力一般为垂直应力的 0.5~0.8 倍,但水平应力对巷道稳定性及变形的影响最大。

在炭质泥岩、泥砂岩等软岩地段,巷道变形量大、持续时间较长,给支护和施工带来不利影响,主要原因是软岩巷道围岩具有较强的蠕变性。围岩变形后得不到及时控制将产生以下不利情况:1)岩石第一阶段的变形可能已经导致松动圈的形成,而根据新奥法支理论,应当尽量避免松动圈的形成和扩展,一旦松动圈形成,会直接作用在支护结构上,压力不仅有来自弹性区的蠕变,而且要支护松动区的松动压力。

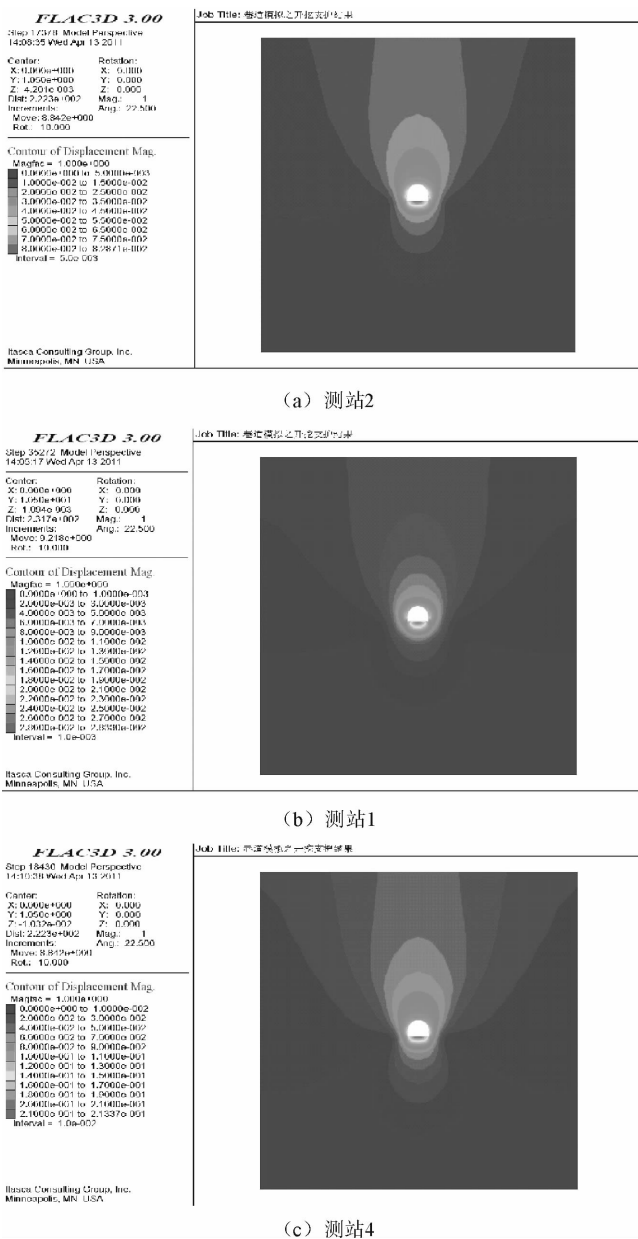


图 6 反演测站围岩总位移分布特征图

Fig. 6 Total displacement characteristics of surrounding rock in inversion stations

2)如不及时控制变形,由于蠕变和松动区的发展,应力峰值向深部转移,必然导致支护结构受力的加大,对支护不利。

基于以上分析以及现场观测、数值模拟结果,对于软岩巷道,应在巷道开挖后立即进行强力支护,减少松动破坏的产生,并采取积极措施防止巷道变形加剧。另外,软岩具有吸水膨胀的特性,在现场应注意地下水防治,减少软岩膨胀对巷道的破坏。鉴于此,建议采用新奥法施工原理,通过现场监测及时进行地应力反演分析,以便对设计和施工进行指导。

参考文献:

- [1]李青麒.初始应力的回归与三维拟合[J].岩土工程学报,1998,20(5):68-71.
LI Qingqi. Regression analysis and 3D fitting of initial stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1998,20(5):68-71.
- [2]杨林德.岩土工程问题的反演理论与工程实践[M].北京:科学出版社,1996.
- [3]何满潮.中国煤矿软岩巷道支护理论与实践[M].徐州:中国矿业大学出版社,1996.
- [4]吕爱钟,蒋斌松.岩石力学反问题[M].北京:煤炭工业出版社,1998.
- [5]郑颖人,赵尚毅,邓楚键,等.有限元极限分析法发展及其在岩土工程中的应用[J].中国工程科学,2006(12):39-61.
ZHENG Yingren,ZHAO Shangyi,DENG Chujian,et al. Development of finite element limit analysis method and its applications in geotechnical engineering[J]. Engineering Science,2006(12):39-61.
- [6]张晨明,朱合华,赵海斌.增量位移反分析在水电地下洞室工程中的应用[J].岩土力学,2004(11):150-153.
ZHANG Chenming,ZHU Hehua,ZHAO Haibin. Application of incremental displacement back analysis to hydropower station underground caverns[J]. Rock and Soil Mechanics,2004(11):150-153.

(上接第 29 页)

- [2]王家臣,杨胜利.采动影响对陷落柱活化导水机理数值模拟研究[J].采矿与安全工程学报,2009,26(2):140-144.
WANG Jiachen,YANG Shengli. Numerical simulation of mining effect on collapse column activated water conducting mechanism[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2009,26(2):140-144.
- [3]宋晓梅.淮北煤田奥陶系灰岩岩溶类型及陷落柱的成因分析[J].淮南矿业学院学报,1997,17(3):6-10.
SONG Xiaomei. The type of karst and forming mechanics of the calumnar callapse of the ordovician system calarenite in Huaibei field[J]. Journal of Huainan Mining Institute,1997,17(3):6-10.
- [4]赵阳升,胡耀青.承压水上采煤理论与技术[M].北京:煤炭工业出版社,2004.
- [5]毕雅静,王国艳,陈姗姗.滕北矿区岩溶陷落柱发育规律探讨[J].矿业安全与环保,2008,35(4):66-68.
- [6]黄大兴,王永功,刘桥一矿陷落柱发育规律及含水性研究[J].中国煤田地质,2005,17(4):35-37.
HUANG Daxing,WANG Yonggong. A study on subsided column developing pattern and water-bearing property in Liugiao No.1 coalmine[J]. Coal Geology of China,2005,17(4):35-37.
- [7]许进鹏.陷落柱活化导水机理研究[D].青岛:山东科技大学,2006.
- [8]刘国林,潘懋,尹尚先.华北型煤田岩溶陷落柱导水性研究[J].中国安全生产科学技术,2009,5(2):154-158.
LIU Guolin,PAN Mao,YIN Shangxian. The study on water conductivity of paleo-sinkholes in North-China-Type coalfields [J]. Journal of Safety Science and Technology,2009,5(2):154-158.
- [9]李连崇,唐春安,梁正召,等.煤层底板陷落柱活化突水过程的数值模拟[J].采矿与安全工程学报,2009,26(2):158-162.
LI Lianchong,TANG Chunan,LIANG Zhengzhao,et al. Numerical simulation on water inrush process due to activation of collapse columns in coal seam floor[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2009,26(2):158-162.
- [10]许进鹏,梁开武,徐新启.陷落柱形成的力学机理及数值模拟研究[J].采矿与安全工程学报,2008,25(1):82-86.
XU Jinpeng,LIANG Kaiwu,XU Xinqi. Mechanics mechanism of forming karst collapse columns and numerical simulation [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2008,25(1):82-86.
- [11]许进鹏,孔一凡,童宏树.弱径流条件下陷落柱柱体活化导水的机理及判据[J].中国岩溶,2006,25(1):35-39.
XU Jinpeng,KONG Yifan,TONG Hongshu. The mechanism and criterion of karst collapse column activating to conduct water under weak runoff state[J]. Carsologica Sinica,2006,25(1):35-39.