

某煤矿导水裂隙带发育高度计算

杨艳国¹, 吴庆伟¹, 石亚军¹, 王宏召²

1. 辽宁工程技术大学矿业学院, 阜新 123000
2. 中交煤气热力研究设计院有限公司, 沈阳 110026

摘要 某煤矿北翼充填采区地层以奥陶系灰岩作为含煤地层基岩, 其上覆岩层中第四系孔隙承压含水层全区发育, 研究充填开采后导水裂隙带发育高度对实现安全开采具有重要意义。本文以等效采高为基础, 利用理论计算、数值模拟、相似材料模拟3种方法对某煤矿导水裂隙带发育高度进行预测, 得出导水裂隙带高度分别为 12.72, 12.50, 14.28 m。结果表明: 3种预测方法相比较具有良好的吻合性, 对某矿井的水体下安全开采实际工程实践提供了重要的理论依据。

关键词 等效采高; 水体下; 数值模拟; 相似材料模拟; 导水裂隙带

中图分类号 TD745

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.03.004

Calculation on the Height of Water Flowing Fractured Zone in a Coal Mine

YANG Yanguo¹, WU Qingwei¹, SHI Yajun¹, WANG Hongzhao²

1. College of Mining Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China
2. CCCC Gas & Heat Research and Design Institute Co., Ltd, Shenyang 110026, China

Abstract The layer of the North wing filling mining area in a certain coal mine uses the Ordovician limestone as coal-bearing strata rock, the Quaternary pore confined aquifer in the overburden is developed. Study the height of water flowing fractured zone after filling is significant to achieve safety mining. This study is based on equivalent mining height, using three methods of theoretical calculation, numerical simulation and similar material simulation to forecast the height of water flowing fractured zone in a certain coal mine, respectively. It is obtained that the heights of water flowing fractured zone are 12.72, 12.50 and 14.28 m, respectively. The result indicates that the three methods match well by comparison, and it provides important theoretical basis to mining engineering practice under water in a certain coal mine.

Keywords equivalent mining height; under water; numerical simulation; similar material simulation; water flowing fractured zone

导水裂隙带高度的预计是煤矿水体下采煤设计和保水采煤的基础和前提。近年来, 对许多水体下采煤开展了更加深入的研究, 取得了大量突破进展^[1-6]。何国清等^[7]总结了导水裂隙带高度的经验计算公式; 刘秀英等^[8]利用相似材料模拟实验研究采空区冒落带、裂隙带、弯沉带岩体裂隙分布的分型规律; 赵经彻等^[9]应用内外煤层周围岩体内部应力场理论对网下综放、全厚综放、分层开采等多种不同开采条件下冒落带岩层的发育厚度、导水裂隙发育高度进行研究分析, 建立了相应数学计算模型。水体下采煤主要是进行充填开采, 而充填开采后顶板破坏的研究国内外并不多见, 属于起步阶段。本文利用理论计算、数值模拟、相似材料模拟

方法, 预测导水裂隙带高度。将裂隙带最大高度作为计算防水煤柱垂高的参数, 由此确定某煤矿防水煤柱的垂高, 以提高矿井煤炭资源的利用率。

1 矿井水文地质概况

根据某煤矿矿区水文地质背景和现有的技术条件, 选择北翼充填采区的12煤层作为模拟对象。井田位于下辽河平原东侧, 形成东北部高, 西南部低的平缓地势, 煤系地层完全处于第四系地层覆盖下的隐伏煤田。北翼充填采区的地表主要为村庄、高速公路及水田, 马峰河从该区域东南部穿过, 整体为东北高、西南低的平缓地势。采区地层以奥陶系灰岩作为

收稿日期: 2013-10-30; 修回日期: 2013-12-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51204089)

作者简介: 杨艳国, 博士, 研究方向为矿井开采理论与技术, 电子信箱: 591009403@qq.com

引用格式: 杨艳国, 吴庆伟, 石亚军, 等. 某煤矿导水裂隙带发育高度计算[J]. 科技导报, 2014, 32(3): 34-38.

含煤地层基岩,其上覆岩层中第四系孔隙承压强含水层全区发育,为井田主要含水层,该层以中部黏土为界,上部含水层顶覆厚层黏土,透水性良好,综合柱状见图1。下部含水层覆于底部黏土之上,组织松散。底部黏土2~18 m,由西南向东北增厚,第四系全区厚度大于6.08 m,单位涌水量27.97~43.148 L/(s·m),渗透系数52.45~151.09 m/d,为极强富水性含水层。岩石力学参数如表1所示。

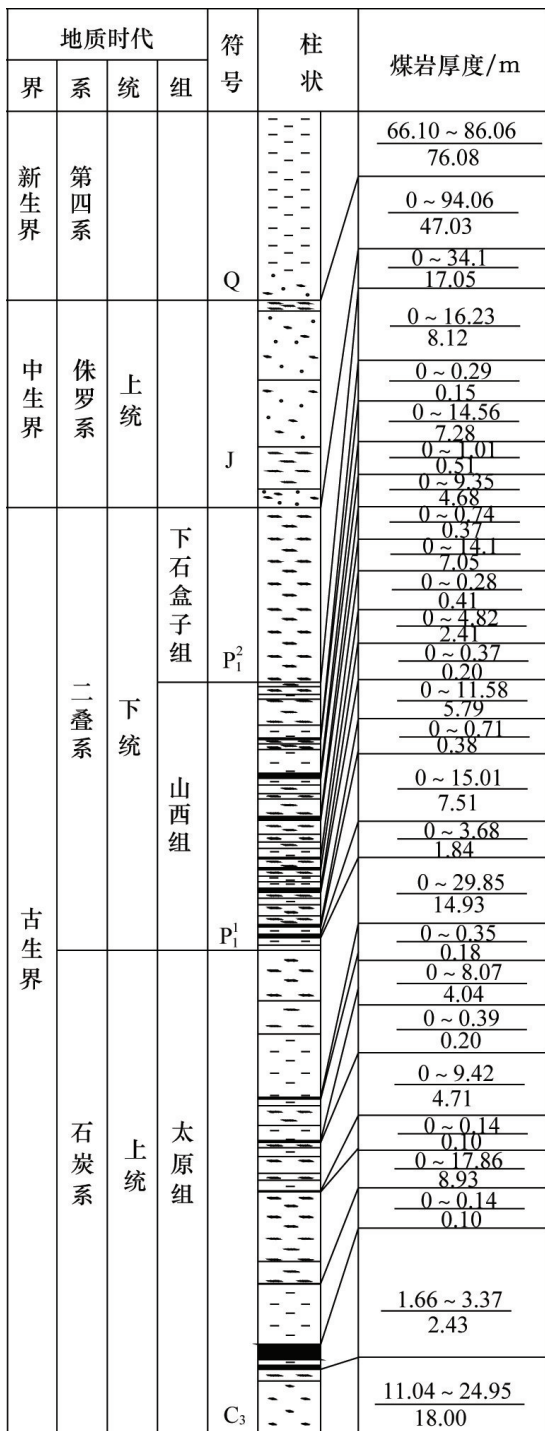


图1 北翼充填采区地层综合柱状
Fig. 1 Stratigraphic column of Beiyi backfill

2 等效采高的确定及导水裂隙带高度的理论计算

采高是允许顶底板移近的空间(高度)。等效采高是充填开采顶底板允许移近的空间(高度),即相当于直接开采等效采高这一厚度的煤层。顶底板允许移近的高度应该包括充填体欠接顶高度,支架后充填体前的顶底板移近量和充填体的压缩量,即顶底板移近量=充填体欠接顶高度+架后顶底板移近量+充填体的压缩量。北翼充填采区12煤层厚度为2.5 m。等效采高计算公式为

$$M_e = (h_m + h_i)(1 - B) + BM \quad (1)$$

式中, h_m 为充填之前顶底板的移近量; m ; h_i 为充填体欠接顶量, m ; B 为充填体压缩率; M 为采厚, m 。

由实测可知:顶底板移近量为0.15 m,充填体的压缩率为3.65%,充填体的欠接顶量为0.317 m,根据式(1)得到等效采高 M_e 为0.541 m。导水裂隙带最大高度经验公式见表2,煤层分层数 n 为1,经实测,北翼充填采区的岩石抗压强度在20~40 MPa之间,根据表2中计算公式得到导水裂隙带最大高度为

$$H_{11} = \frac{100M}{3.3n + 3.8} + 5.1 = 12.72 \text{ m}$$

3 导水裂隙带高度的 UDEC 数值模拟计算

为了进一步研究北翼充填采区边界防水煤柱开采后上覆岩层移动破坏的深度,在理论分析的基础上,运用数值模拟的方法对采场进行模拟分析,为导水裂隙带高度的预测进一步提供理论依据。

3.1 模型的建立

在整个模型中共划分了6种不同尺寸的“岩层”,由上至下长×高分别为:3.459 m×3.459 m,2 m×2 m,1 m×1 m,0.541 m×4 m,3 m×3 m,4 m×7 m,共400万个单元,建立采场的初始模型。

3.2 边界及加载条件

根据 UDEC 模拟软件的特点和模拟的目的,模型的边界条件确定如下:

- 1) 由于模型左右边界基本上处于原岩状态,因此施加水平约束,即设定边界水平的位移量为零;
- 2) 模型底部边界也处于原岩状态,在底部边界约束设为水平、垂直位移量均为零约束;
- 3) 模型顶部边界为自由边界。

根据金尼克理论,地壳中任意一点的垂直应力为 $\sigma = \gamma h$, γ 为容重, h 为采深,计算得到模型上部边界的垂直应力为 $\sigma = 3.89 \text{ MPa}$,水平应力是垂直应力的1.2~1.5倍,由于本井田地质构造简单,因此,这里取水平应力是垂直应力的1.2倍。根据模型边界载荷条件,工作面模型顶部施加4.68 MPa,垂直方向设定自重载荷。

3.3 模拟结果

在模拟过程中,采用自然垮落法管理顶板,回采高度为等效采高0.541 m,每次循环进尺2.4 m,依次开挖。最终模拟结果如图2所示。

表 1 岩石力学参数

Table 1 Rock mechanics parameters

岩性	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/ MPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	抗拉强度/ MPa
细砂岩	2690	20983.75	0.20	5.7	32.4	4.61
泥岩	2670	3261.55	0.26	3.1	29.1	3.52
泥质粉砂岩	2690	16700	0.19	4.6	26.0	2.65

表 2 导水裂隙带最大高度经验公式

Table 2 Experiential formula of water conducted fissure height

煤层倾角/($^{\circ}$)	岩石抗压强度/MPa	岩石名称	经验公式
40 ~ 60	40 ~ 60	辉绿岩、石灰岩、硅质石英岩、砾岩、砂砾岩、砂质页岩等	$H_{li} = \frac{100M}{2.4n + 2.1} + 11.2$
		砂质页岩、泥质砂岩、页岩等	$H_{li} = \frac{100M}{3.3n + 3.8} + 5.1$
0 ~ 54	20 ~ 40	风化岩石、页岩、泥质砂岩、黏土岩、第四系和第三系松散层等	$H_{li} = \frac{100M}{5.1n + 5.2} + 5.1$

注: M 为累计采厚, m ; n 为煤层分层层数。

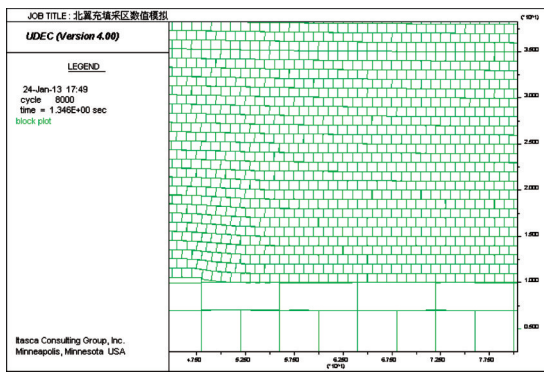


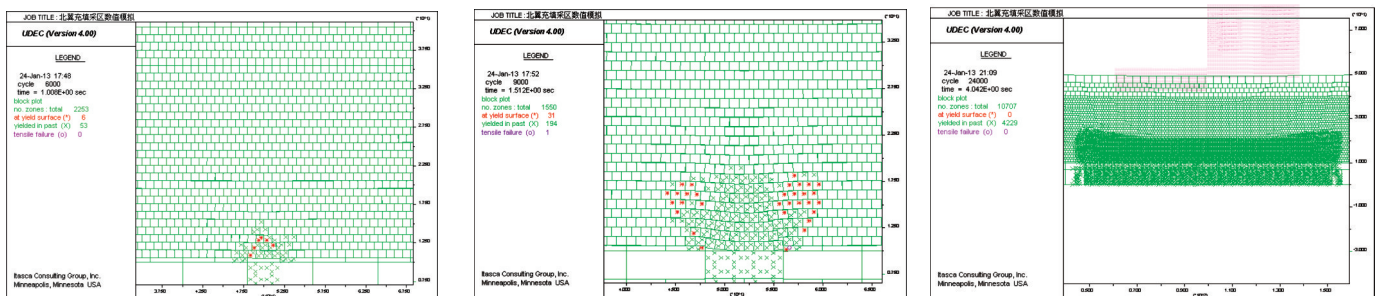
图 2 数值模拟最终结果

Fig. 2 Final result of numerical simulation

模型中煤层采出后,上覆岩层由于受向下弯曲的拉应力和各层间的物理力学参数差异较大且向下弯曲不同步而

产生裂隙,即产生塑性破坏区。当工作面推进到 8、20、38 m 时,顶板的塑性破坏高度为 5.2、8.9、12.50 m;当工作面推进到 38 m 时,导水裂隙带高度不再增加,并呈现“马鞍形”,推进过程如图 3 所示。煤层开采后,上覆岩层由于受采动影响内部应力发生变化,顶板 y 方向受力曲线如图 4 所示。当工作面推进到一定距离时,上覆岩层所受的应力超过岩层本身所承受的强度极限,导致岩层失稳破坏,产生塑性破坏区,即导水裂隙

从图 4 可以明显看出工作面矿山压力显现规律,周期来压布局在 23 ~ 26 m 之间,此结果与现场实测结果相吻合,说明此模型能够再现现场的实际情况,是训练成熟的模型。并且在图 3 中可以明显看出煤层的上覆岩层应力变化,从覆岩应力突然减小的分界线到模型的底部的距离为 23.04 m,又煤层顶板距离模型底部 10 m,采高是 0.541 m,因此可以预测出此时的导水裂隙带的发育高度为 12.50 m。



(a) 8 m

(b) 20 m

(c) 38 m

图 3 工作面推进 8、20、38 m 时的顶板破坏情况

Fig. 3 Damage of roof when push 8, 20, 38 m

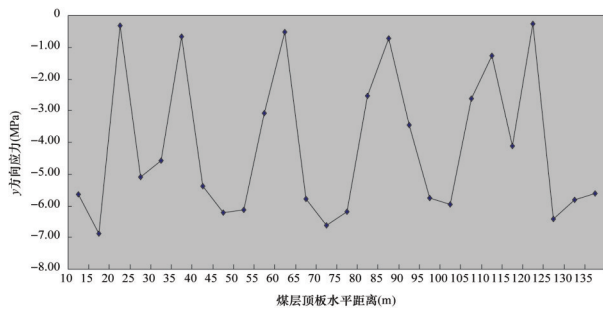


图4 煤层顶板y方向受力曲线

Fig. 4 Stress curve in y direction on roof of coal seam

4 导水裂隙带发育高度的相似材料模拟

为更准确地预测某煤矿北翼充填采区导水裂隙带发育高度,在理论计算、数值模拟基础上,根据充填采区开采的地质条件,建立相似材料物理实验模型。

根据实验室条件和研究需要,选用立式平面模型实验台。各相似常数分别为:长度比 $\alpha_l=125$,密度比 $\alpha_r=1.5$,强度比 $\alpha_s=187.5$,时间比 $\alpha_t=11.2$ 。模型装填尺寸为5000 mm×300 mm×1500 mm。模型上边界距地表35 m,通过杠杆装置加载等效于35 m厚的自重应力0.95 MPa。加载系统需要外

加载荷模拟模拟岩层上边界距地表的平均累深为35 m岩层重量,模型实际加载压力为0.76 kN。本次模拟的观测方法包括压力传感器连续监测法、直接量测法、数字摄像法。

测试系统是BW-5微型压力盒利用YJZ-32A智能数字应变仪实现应力实时监测,在相似材料模型中布设两排应力测点,如图5所示。通过对监测数据进行筛选、整理,得到工作面推进距离和应力集中系数的关系如图6所示。根据矿井实际岩层的厚度变化,相似材料模拟模型岩层厚度有10、15、20、25、29、32、35、40 mm不等,各岩层之间均以云母粉作为其分界材料,模型由下而上夯实碾压铺设,相似材料模型全景如图7所示。

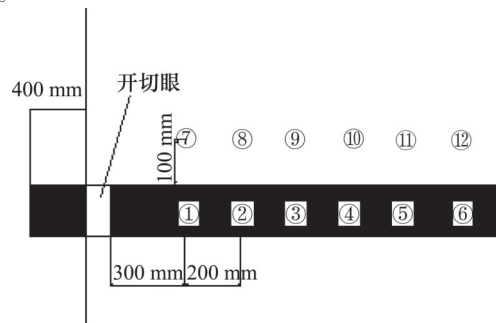
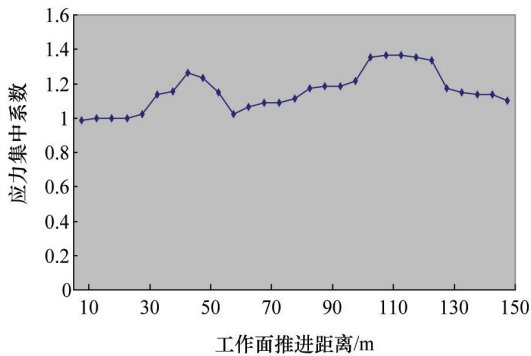
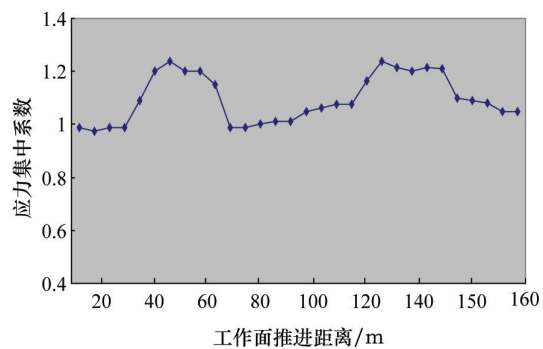


图5 应力测点布置

Fig. 5 Arrangement of stress test points



(a) 1号通道



(b) 7号通道

图6 工作面推进距离和应力集中系数的关系

Fig. 6 Relationship between forward distance and stress concentration factor

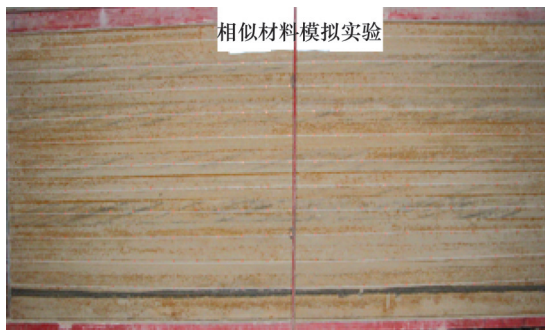


图7 相似材料模型全景

Fig. 7 Picture of resemble material simulation

由于顶板周期来压时应力变大,即应力集中系数也相应变大。从图6所示的工作面推进距离和应力集中系数的关系中可知,周期来压距离为21 cm,即实际为26.25 m,与矿井实测较吻合,因此相似材料模型能够反映现场实际情况。

从模型左边界400 mm的位置开挖,试验中模拟推进速度为30 min开挖50 mm。如图8所示,煤层开采后导水裂隙带岩层的破坏主要是沿层面的离层或开裂、以及垂直或斜交于层面的开裂或断裂。底部的岩层,层与层之间开裂明显,分层性好,垂直或倾斜裂隙发育,且多为断裂裂隙。横纵向裂隙连通性较好,岩层的连续性较差。上部的岩层,层与层之间的开裂较小。导水裂隙带高度在18.5 cm左右,即实际开采过程中的

导水裂隙带高度为 23.1 m 左右。由于开挖厚度为 7 cm, 实际采高为 0.875 m。导水裂隙带是采高的 26.4 倍。按照这一比例, 计算当等效采高为 0.541 m 时的导水裂隙带高度为 $0.541 \text{ m} \times 26.4 = 14.28 \text{ m}$ 。

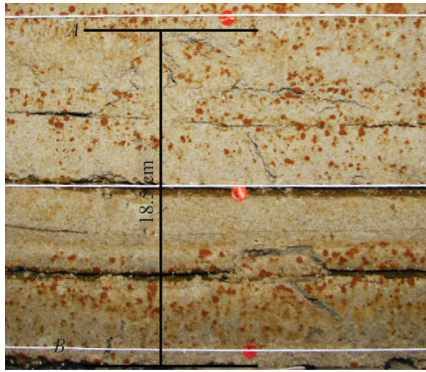


图 8 导水裂隙带发育层位

Fig. 8 Developing stratum of water flowing fractured zone

5 应用实例

为验证理论计算、数值模拟和相似材料模拟结果, 在某煤矿的北翼充填采区采用钻孔实测的方法验证上述结果的准确性。共设置 4 个钻孔, 分别为: 66-17、66-12、37 和 75 号钻孔, 4 个钻孔分别在 N-1201、N-1211、N-1215 和 N-1212 充填面上。从表 3 中可以看出, 钻孔 66-17、66-12、37、75 测得导水裂隙带高度分别为 8.24、13.78、11.25、12.21 m。

表 3 裂隙带高度现场实测结果

Table 3 Result of fractured zone height measurement

充填面 编号	孔号	采厚/m	钻孔位置	裂隙带 高度/m
N-1201	66-17	1.79	1201 回顺边界	8.24
N-1211	66-12	1.53	输油管道附近	13.78
N-1215	37	0.70	北翼回风巷一段 边界	11.25
N-1212	75	0.88	采面中部	12.21

6 结论

通过对某煤矿北翼充填采区导水裂隙带高度的理论计算、数值模拟、相似材料模拟实验研究, 在进行资料分析与整理的过程中, 得出以下几点结论:

1) 理论计算和数值模拟、相似材料模拟预测导水裂隙带高度的结果相吻合, 分别为 12.72、12.50、14.28 m。实测最大值 12.21 m 与预测最大值 14.28 m 相差很小, 较符合实际, 为顶板水害预测和预防提供科学依据;

2) 该研究方法同样适用于本矿区的其他工作面, 而且

对其他矿区也有借鉴意义;

3) 研究结果为确定某煤矿上覆岩层导水裂隙带高度以及类似地质条件下煤炭开采防水煤柱的设计提供了设计依据。

参考文献(References)

- [1] 孙亚军, 徐智敏, 董青红. 小浪底水库下采煤导水裂隙发育监测与模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 238-245.
Sun Yajun, Xu Zhimin, Dong Qinghong. Monitoring and simulation research on development of water flowing fracture for coal mining under xiaolangdi reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 238-245.
- [2] 许家林, 朱卫兵, 王晓振. 基于关键层位置的导水裂隙带高度预计方法[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 762-769.
Xu Jialin, Zhu Weibing, Wang Xiaozhen. New method to predict the height of fractured water-conducting zone by location of key strata[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 762-769.
- [3] 邓喀中, 谭志祥, 张宏贞, 等. 长壁老采空区残余沉降计算方法研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(10): 1601-1605.
Deng Kazhong, Tan Zhixiang, Zhang Hongzhen, et al. Research on calculating method of residual subsidence of longwall goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(10): 1601-1605.
- [4] 胡小娟, 李文平, 曹丁涛, 等. 综采导水裂隙带多因素影响指标研究与高度预计[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 613-620.
Hu Xiaojuan, Li Wenping, Cao Dingtao, et al. Index of multiple factors and expected height of fully mechanized water flowing fractured zone[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4): 613-620.
- [5] 许家林, 王晓振, 刘文涛, 等. 覆岩主关键层位置对导水裂隙带高度的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 380-385.
Xu Jialin, Wang Xiaozhen, Liu Wentao, et al. Effects of primary key stratum location on height of water flowing fracture zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 380-385.
- [6] 施龙青, 辛恒奇, 翟培合, 等. 大采深条件下导水裂隙带高度计算研究[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(1): 37-41.
Shi Longqing, Xin Hengqi, Zhai Peihe, et al. Calculating the height of water flowing fracture zone in deep mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(1): 37-41.
- [7] 何国清, 杨伦, 凌庚娣, 等. 矿山开采沉降学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1991, 4.
He Guoqing, Yang Lun, Ling Gengdi, et al. Mining subsidence theory [M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Publisher, 1991.
- [8] 刘秀英. 采空区上覆岩体裂隙分形规律的实验研究[J]. 太原科技大学学报, 2009, 30(5): 428-431.
Liu Xiuying. Experiment Research on the fractal law of the upper rock's crack of goaf[J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2009, 30(5): 428-431.
- [9] 赵经彻, 陶廷云, 刘先贵, 等. 关于综放开采的岩层运动和矿山压力控制问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(2): 37-44.
Zhao Jingche, Tao Tingyun, Liu Xiangui, et al. On movement of strata and strata pressure control in the fully mechanized mining with sublevel caving[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(2): 37-44.

(责任编辑 刘志远)