

文章编号: 1673-3363-(2012)02-0239-06

煤层开采对第四系松散含水层影响的研究

焦阳, 白海波, 张勃阳, 韦晓琪, 戎虎仁

(中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要 为了分析煤层开采对第四系松散含水层的影响, 选择潞安矿区漳村矿为试验现场, 通过浅部至深部煤层开采顶板导水裂隙发育高度的理论分析、数值模拟和实际观测资料对比, 研究采高6 m, 采动导水裂隙发育规律及对松散含水层的影响。结果表明: 煤层埋深小于110 m区段, 导水裂隙可突破第四系底部黏土隔水层而发育至第四系松散含水层, 并对该含水层造成破坏; 煤层埋深介于110~190 m区段, 导水裂隙仅发育至基岩风化带, 风化裂隙水可进入采场, 对第四系底部松散含水层水影响较小; 煤层埋深大于190 m区段, 采动导水裂隙发育限制在完整基岩内, 仅将顶板砂岩裂隙水引入采场。据此分析, 漳村矿对采高6 m、埋深大于190 m的中深部煤层的开采对第四系松散含水层几乎无影响。

关键词 第四系; 含水层; 导水裂隙; 数值模拟

中图分类号 TD 325 **文献标识码** A

Research on the Effect of Coal Mining on the Aquifer of Quaternary Loose Soils

JIAO Yang, BAI Hai-bo, ZHANG Bo-yang, WEI Xiao-qi, RONG Hu-ren

(State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract In order to make a comprehensive analysis of coal mining on the aquifer of Quaternary loose soils, Zhangcun coal mine in Lu-an mining area has been chosen to be the research field. After theoretical analysis, numerical simulation and actual observation data contrast, we have found the rule of the water flowing when mining 6 m thickness of coal seam in condition of analyzing the mining of shallow coal to deep coal. The results show that as follows: In the region where the depth of coal seam is less than 110 m, the water flowing fracture would break the aquifer of Quaternary loose soils by breakthrough the water-resisting layer at the bottom of the Quaternary and develop to the artesian aquifer; Though the fissure water in weathered zone could reach to the coalface through the water flowing fracture which has developed to the weathered zone, and there is little impact to the aquifer of Quaternary loose soils in the area that the depth of coal seam between 110 m to 190 m; If the depth of coal seam is more than 190 m, the water flowing fracture only exist in the intact bedrock, and the sandstone fissure water over the roof could flow into the coalface. According to the analysis, the mining in

收稿日期: 2011-03-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB209400); 国家自然科学基金项目(50974115); 高等学校学科创新引智计划项目(B07028)

作者简介: 焦阳(1988-), 男, 山西省晋城市人, 硕士, 从事岩石力学和渗流力学方面的研究。

E-mail: jy19880103@126.com Tel: 13814428760

Zhangcun coal mine where the depth of coal seam with 6 m height more than 190 m, there is almost no any influence to the aquifer of Quaternary loose soils.

Key words Quaternary; the aquifer; water flowing fracture; numerical simulation

随着产量和开采强度的不断增加,煤炭开采带来的环境问题愈来愈突出,其中水资源的破坏问题最为明显^[1-2],尤其在很多浅埋煤层矿区,出现了采后居民水井干涸、吃水困难等问题。因此,钱鸣高院士等在提出“煤矿绿色开采”理论体系时,着重强调了“保水采煤”的问题^[3-5],掌握煤层开采的覆岩导水裂隙的动态演化规律是“保水采煤”的关键之一^[6-8]。目前,国内外学者针对不同地质条件下煤层开采的覆岩导水裂隙发育规律、影响范围及探测方法展开了大量研究,并通过理论推导、数值模拟和现场实测等方法对导水裂隙发育高度及其影响因素进行了探索,取得了一定研究成果。缪协兴、浦海等运用数值模拟软件 RFPA^{2D} 模拟了综放采动覆岩的冒落过程,得到了采动覆岩的破断垮落规律和采空支撑压力的动态分布规律^[9];白海波、陈荣华等对自开切眼至充分采动全过程覆岩随工作面推进时的变形、冒落情况进行了数值模拟,并得到了与现场实测结果相吻合的覆岩裂隙带高度^[10];姚邦华等通过建立双煤层重复采动模型,模拟、研究得到重复采动可引起原有煤层覆岩裂隙再发育的结论^[11]。但是,现有研究大多关于采动裂隙对顶板砂岩裂隙水或老空积水的影响,若采动裂隙导通第四系松散含水层,对居民的生活会造成严重影响,甚至会引发突水灾害。

为此,选择潞安矿区漳村矿为试验现场,针对煤层开采对第四系松散含水层水的影响问题,建立力学模型,运用数值模拟软件 RFPA^{2D} 模拟、研究不同埋深煤层开采覆岩的破断和裂隙发育规律,结合现场钻探实测结果对比验证,对煤层开采对第四系松散含水层的影响进行分区评价,指导漳村矿的安全生产。

1 漳村井田地质概况

漳村井田位于潞安矿区中部东缘,地势西高东低,第四系厚度从西向东逐步减薄,地层总体呈一向西倾斜的单斜构造,地层产状一般为 3°~7°。该区第四系松散层厚 0~66.10 m,平均厚度为 21.70 m,底板距 3[#]煤层 0~300 m 左右,井田浅表含水层主要

为第四系孔隙含水层,包括潜水含水层和承压含水层,是周围居民用水的主要来源;基岩风氧化带发育深度一般在 50~80 m 左右,为富水性弱至中等的含水层,还有煤层顶板砂岩裂隙弱含水层。主要隔水层为第四系底部厚 8~10 m 的黏土层,煤层顶板泥岩、砂质泥岩层等,对于风化裂隙水和第四系沙层孔隙水而言,3[#]煤层顶板碎屑岩整体可作为隔水岩体。3[#]煤层为漳村矿目前主要可采煤层,其厚度大且层位稳定,厚度 5.34~7.88 m,平均厚度 6.57 m,结构简单,局部复杂,一般含夹矸 1~2 层。

2 漳村井田顶板裂隙演化模拟

为研究漳村矿开采对第四系松散含水层的影响,结合煤层顶板岩层结构等地质和水文地质条件与采场布置、开采工艺等分析,根据经验值初步将矿井开采范围划分为已开采结束的矿井浅部、中部与目前正在和将要开采的矿井深部,分别进行数值模拟。

采用岩石破裂过程分析系统 RFPA^{2D},该软件能够通过材料的非均匀性来模拟材料的非线性,以及利用单元弱化来模拟材料变形、破坏的非连续性,可用于研究岩石(岩体)材料从微观损伤到宏观破坏的全过程。应用该软件模拟煤层开采时,随着采场推进,覆岩的变形、破裂、移动全过程,最终得到不同埋深煤层开采时,覆岩导水裂隙带的发育高度。

2.1 浅部煤层顶板裂隙演化模拟

根据当地浅部煤层某小煤矿采面内的 117[#]等钻孔柱状及矿区岩石力学测试资料,经岩层概化合并等处理方法,整理得出浅部煤系地层力学参数(表 1),建立数值计算模型。该区域附近 3[#]煤埋深 84 m,煤厚 6 m,直接顶为厚 5 m 的页岩。模拟水平方向为 220 m,垂直方向为 110 m,以 10 m 为步距,从左向右推进 100 m。模型基元取 1×1 m,总基元数 24 200 个。模拟中,岩层与岩层之间设有强弱不等的层理,所取单元弹模、单轴抗压强度等均按 Weibull 随机分布,岩层的均质系数取 3~10,泊松比取 0.2。

表 1 浅部岩性及力学性能表

Table 1 Mechanical parameters and lithology for rock strata of the shallow coal

地层岩性	埋深/m	弹性模量/MPa	抗压强度/MPa	密度/(kg m ⁻³)
黄土	0~15	2000	10	1700
页岩	15	13000	35	2200
中粒砂岩	18	22000	45	2500
页岩	35	13000	35	2200
中粒砂岩	42	22000	45	2500
砂质泥岩	51	18000	40	2400
细粒砂岩	63	21000	42	2500
页岩	79	13000	35	2200
3 [#] 煤	84	3000	10	1500
细粒砂岩	90	21000	42	2500
砂质页岩	98	18000	44	2300

由图 1, 2 分析可知：随着 3[#]煤采场的推进，顶板裂隙不断向上发育，裂隙带高度随着推进距离的增加而增高。当采场推进到 100 m 时，顶板裂隙已破坏第四系底部黏土隔水层而进入第四系松散含水层，且抵达地表。野外实际调查证实：采动裂隙直达地表，工作面上方的地表池塘水和第四系松散含水层水因此被疏干。

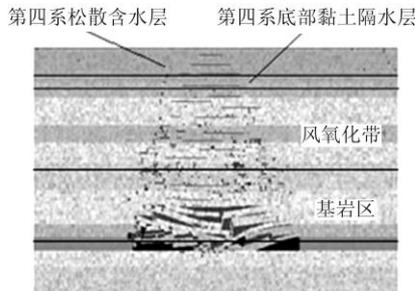


图 1 浅部煤层采动后覆岩破断垮落图

Fig.1 The failure of overlying rock mass after mining of the shallow coal

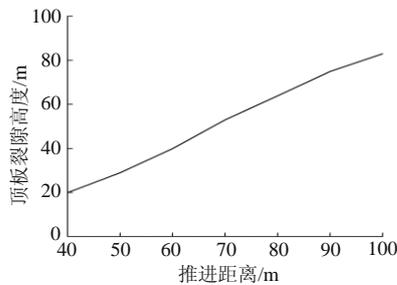


图 2 浅部煤层覆岩裂隙带高度变化曲线

Fig.2 Change of the height of the shallow coal's water flowing fractured zone

2.2 中部煤层顶板裂隙演化模拟

经导水裂隙带经验公式估算，结合整理出的漳村矿中部 1205 工作面附近的漳-1[#]等钻孔柱状资料，模拟井田中部煤层顶板的裂隙演化规律(表 2)。该区域附近 3[#]煤埋深 110 m，煤厚 6 m，直接顶为厚 11 m 的砂质泥岩。模拟水平方向为 200 m，垂直方向为 145 m，以 10m 为步距，从左向右推进 130 m。模型基元取 1×1 m，总基元数 29 000 个。数值模拟计算方法与浅部煤层模拟类似。

表 2 中部岩性及力学性能表

Table 2 Mechanical parameters and lithology for rock strata of the middle coal

地层岩性	埋深/m	弹性模量/MPa	抗压强度/MPa	密度/(kg m ⁻³)
黄土	0-17	2000	10	1700
中粒砂岩	17	22000	45	2500
泥岩	23	12000	30	2200
中粒砂岩	37	22000	45	2500
砂质泥岩	46	18000	40	2400
细粒砂岩	55	21000	43	2500
泥岩	78	12000	30	2200
中粒砂岩	87	22000	45	2500
砂质泥岩	99	18000	40	2400
3 [#] 煤	110	3000	10	1500
砂泥互层	116	17000	42.5	2350
细粒砂岩	126	21000	43	2500

由图3, 4可知：顶板裂隙带高度会随着3[#]煤采场的推进而不断增加。当采场推进到125 m时，顶板裂隙已穿过基岩和风氧化带而发育至第四系底部黏土隔水层，裂隙带高度为102 m。但采场的继续推进并没有导致裂隙再向上发育，说明：第四系底部黏土隔水层的存在减少了煤层开采对第四系松散含水层的直接影响，故此黏土隔水层可作为第四系孔隙水的隔水关键层^[12-13]。

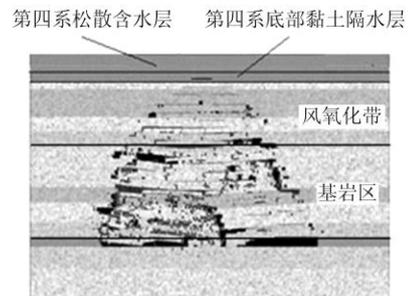


图 3 中部煤层采动后覆岩破断垮落图

Fig.3 The failure of overlying rock mass after mining of the middle coal

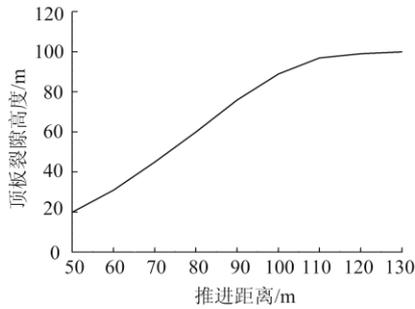


图 4 中部煤层覆岩裂隙带高度变化曲线
Fig.4 Change of the height of the middle coal's water flowing fractured zone

当地居民所反映出“个别压泵井和机井干涸”的主要原因：1) 浅部煤层的开采使得第四系松散层水被疏干；2) 煤层采动造成的地表拉张裂隙发育深度约为12~15 m，潜水与其下第四系承压水间的黏土隔水层因此遭到破坏，潜水水位下降；3) 由于采动裂隙与风化裂隙导通，风化裂隙中的地下水被快速导入井下，使得以抽取基岩风化裂隙水为主的部分机井逐渐干涸。

2.3 深部煤层顶板裂隙演化模拟

根据漳村矿深部 2103 工作面附近的 508#等钻孔柱状及矿区岩石力学测试资料，利用同前的方法整理得出深部煤系地层力学参数（表 3），并建立数值计算模型，模型顶部的 150 m 岩层等效均布载荷为 3 MPa。

表 3 深部岩性及力学性能表

Table 3 Mechanical parameters and lithology for rock strata of the deep coal

地层岩性	埋深/m	弹性模量/MPa	抗压强度/MPa	密度/(kg m ⁻³)
砂质页岩	150	18000	46	2300
页岩	170	13000	35	2200
中粒砂岩	200	22000	60	2500
砂质页岩	250	18000	46	2300
中粒砂岩	265	22000	60	2500
页岩	278	13000	35	2200
砂质泥岩	296	18000	45	2400
页岩	304	13000	35	2200
3#煤	318	3000	10	1500
中粒砂岩	324	22000	60	2500
砂质页岩	339	18000	46	2300

该区域 3#煤埋深 318 m，煤厚 6 m，直接顶为厚 14 m 的页岩。模拟水平方向为 300 m，垂直方向为 200 m，以 10 m 为步距，从左向右推进 150 m。

基元取 1×1 m，总基元数 60 000 个。模拟中，岩层与岩层之间同样设置强弱不等的层理，所取单元弹模、单轴抗压强度等按 Weibull 随机分布，岩层的均质系数取 5 左右，泊松比取 0.25。

由图 5、6 可分析得到：当采场推进到 120 m，顶板裂隙不再向上发育，最终发育高度为 108 m。因此，在井田深部区域，导水裂隙发育高度不足以沟通上覆的第四系松散含水层，但地表拉张裂缝的发育仍然使潜水和大气降水大量渗入第四系下部的承压孔隙含水层，影响潜水水位。

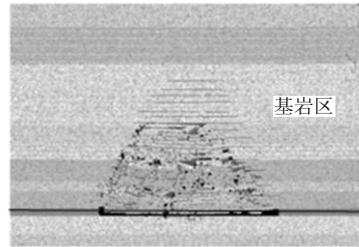


图 5 深部煤层采动后覆岩破断垮落图
Fig.5 The picture of the failure of overlying rock mass after deep coal mining

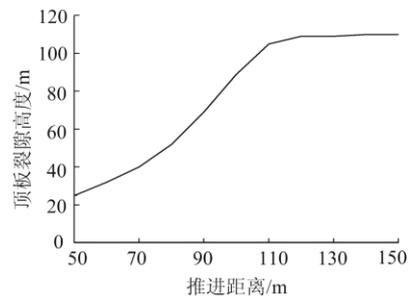


图 6 深部煤层覆岩裂隙带高度变化曲线
Fig.6 Change of the height of the deep coal's water flowing fractured zone

3 导水裂隙带高度对比分析

3.1 经验公式推导

根据冒落带与导水裂隙带最大高度经验公式：煤层倾角在 2°~8°；岩石抗压强度为 20~40 MPa；按照分类，覆岩为砂质页岩、泥质砂岩、页岩等坚硬型顶板，且顶板管理方法为全部垮落。取采高 M=6.5 m，煤层开采分层数 n=1，冒落带最大高度 H_c 为

$$H_c = (3 \sim 4)M = 19.5 \sim 26 \text{ m} \quad (1)$$

导水裂隙带高度 H_f 为

$$H_f = \frac{100M}{3.3n + 3.8} + 5.1 = 96.65 \text{ m} \quad (2)$$

3.2 现场实测检验

漳村矿经过分析周边小煤矿及农村水井的调查资料和多年连续观测证实，早期漳村矿对井田浅部的开采及井田东北区域小煤矿对更浅埋煤层的开采严重破坏了第四系松散含水层，造成了含水层水位的大幅度下降，出现了当地民井干涸、居民吃水难等问题。

漳村矿经过对 1205 工作面附近布置钻孔的观测和分析，结果表明：中部煤层开采引发的导水裂隙仅可发育至第四系底部黏土隔水层，对第四系松散含水层并未造成影响和破坏。

漳村矿在 2103 工作面相邻的 2105 工作面分别施工 K₁、K₂ 和 K₃ 号观测孔，根据钻孔冲洗液消耗量变化及孔内水位的变化情况，对 2105 综放工作面导水裂隙发育高度进行了钻探、水位、消耗量等简易水文观测和注水试验，研究煤层采动的导水裂隙发育规律和影响范围，见图 7。

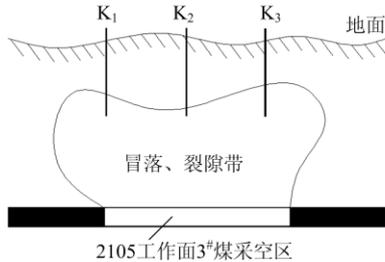


图 7 观测覆岩裂隙高度钻孔示意图

Fig.7 Sketch map of overlying strata fractures observation with drilling

漳村矿 2105 工作面导水裂隙带现场探查的实际结果表明：深部煤层开采的导水裂隙带一般发育高度在 110 m，远未抵达第四系底部的黏土隔水层，对第四系松散含水层和基岩风化裂隙水未造成影响。

3.3 对比分析

数值模拟计算、经验公式推导与现场实测结果综合对比，如表 4 所示。

表 4 导水裂隙带高度对比

Table 4 The comparison between the height of the water flowing fractured zone

	数值模拟 一般高度(108 m)	经验公式计算 (96.65 m)
与现场实测值的 相对误差(110 m)	1.9%	13.8%
误差分析	考虑岩层层数及其 力学参数较多	顶板岩层结构差异， 模型概化

根据煤层底板等高线图，对采动裂隙影响第四系松散含水层的范围和方式进行了划分（图 8）：煤层埋深小于 110 m 地段（图 8 虚线右侧区域），3[#]煤采后的导水裂隙会发育到第四系松散含水层，并与地表裂缝导通，使第四系孔隙水和大气降水渗入井下；煤层埋深介于 110~190 m 地段（图 8 虚线与现实之间区域），顶板裂隙仅会贯通至风氧化带，最高到达第四系底部黏土隔水层，风氧化带中的裂隙水会渗入井下；而煤层埋深大于 190 m 地段（图 8 实线左侧区域），导水裂隙发育限制在未风化的基岩内，且最终高度在 110 m 左右，第四系孔隙水和风化裂隙水均不会直接进入采场，但地表裂缝会使潜水水位下降，导致以抽取潜水为主的浅井干涸。

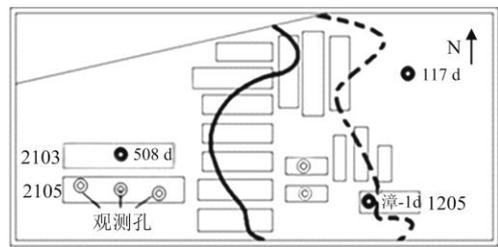


图 8 导水裂隙带沟通范围示意图

Fig.8 The region communicated by the height of the water flowing fractured zone

依据划分结果，潞安矿区漳村矿合理分析了井田内浅表第四系松散含水层水资源枯竭以及水位下降的原因，并通过相关手段和措施解决了当地居民吃水难等问题，确保了区域内深部煤层的顺利开采。

4 结 论

1) 根据漳村矿不同埋深煤层采动导水裂隙发育高度，划分出采动对第四系松散含水层的影响带：埋深小于 110 m 煤层的开采将疏干第四系松散含水层水；埋深介于 110~190 m 煤层的开采可疏干风化裂隙水，在第四系底部黏土隔水层的保护下，对第四系松散含水层影响不大；埋深大于 190 m 煤层的开采仅疏干顶板 110 m 左右高度内的砂岩裂隙水，对第四系松散含水层几乎无影响。

2) 当煤层开采导水裂隙发育高度不足以突破第四系底部黏土隔水层时，第四系松散含水层不会受到采动影响；煤层埋深对顶板采动裂隙的发育高度影响在 2~3 m。

3) 采用 RFPA^{2D} 软件模拟不同埋深煤层采后的

覆岩导水裂隙发育高度与现场实测结果误差在 2% 左右, 只要选用适当的岩石力学参数, 数值模拟结果较经验公式计算更接近实际。

参考文献:

- [1] 白海波, 缪协兴. 水资源保护性采煤的研究进展与面临的问题[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(3): 253-262.
BAI Hai-bo, MIAO Xie-xing. Research progress and major problems of water preserved coal mining [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(3): 253-262.
- [2] 白海波, 茅献彪, 唐军华, 等. 潞安矿区煤水共采技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 395-402.
BAI Hai-bo, MAO Xian-biao, TANG Jun-hua. et al. Research on simultaneous exploitation of coal and groundwater in Lu'an coalfield [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 395-402.
- [3] 钱鸣高, 许家林, 缪协兴. 煤矿绿色开采技术[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(4): 343-347.
QIAN Ming-gao, XU Jia-lin, MIAO Xie-xing. Green technique in coal mining [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(4): 343-347.
- [4] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 资源与环境协调(绿色)开采及其技术体系[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(1): 1-5.
QIAN Ming-gao, MIAO Xie-xing, XU Jia-lin. Resources and environment harmonics (green) mining and its technological system [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(1): 1-5.
- [5] 缪协兴, 钱鸣高. 中国煤炭绿色开采研究现状与展望[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(1): 1-14.
MIAO Xie-xing, QIAN Ming-gao. Research on green mining of coal research in China: current status and future prospects [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(1): 1-14.
- [6] 安泰龙, 王连国, 浦海, 等. 浅埋煤层导水裂隙带发育规律的数值模拟研究[J]. 矿业研究与开发, 2010, 30(1): 33-49.
AN Tai-long, WANG Lian-guo, PU Hai, et al. Numerical simulation on growth of water flowing fractures in overburden strata of shallowly buried coal seam [J]. Mining Research and Development, 2010, 30(1): 33-49.
- [7] 范钢伟, 张东升, 卢鑫, 等. 浅埋煤层采动导水裂隙动态演化规律模拟分析[J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(5): 18-23.
FAN Gang-wei, ZHANG Dong-sheng, LU Xin, et al. Simulation analysis on water conducted porosity dynamic evolution law in shallow depth seam after mining operation [J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(5): 18-23.
- [8] 王双美. 导水裂隙带高度研究方法概述[J]. 水文地质工程地质, 2006(5): 126-128.
WANG Shuang-mei. A brief review of the methods determining the height of permeable fracture zone [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006(5): 126-128.
- [9] 浦海, 缪协兴. 综放采场覆岩冒落与围岩支撑压力动态分布规律的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1122-1126.
PU Hai, MIAO Xie-xing. Analysis of breakage and collapse of thick key strata around coal face [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1122-1126.
- [10] 陈荣华, 白海波, 冯梅梅. 综放覆岩导水裂隙高度的确定[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(2): 220-223.
CHEN Rong-hua, BAI Hai-bo, FENG Mei-mei. Determination of the height of water flowing fractured zone in overburden strata above fully-mechanized top-coal caving face [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(2): 220-223.
- [11] 姚邦华, 周海峰, 陈龙. 重复采动下覆岩裂隙发育规律模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(3): 443-446.
YAO Bang-hua, ZHOU Hai-feng, CHEN Long. Numerical simulation about fracture development in overlying rocks under repeated mining [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(3): 443-446.
- [12] 缪协兴, 浦海, 白海波. 隔水关键层原理及其在保水采煤中的应用研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(1): 1-4.
MIAO Xie-xing, PU Hai, BAI Hai-bo. Principle of water-resisting key strata and its application to water-preserved mining [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 37(1): 1-4.
- [13] 缪协兴, 陈荣华, 白海波. 保水开采隔水关键层的基本概念及力学分析[J]. 煤炭学报, 2007, 32(6): 561-564.
MIAO Xie-xing, CHEN Rong-hua, BAI Hai-bo. Fundamental concepts and mechanical analysis of water resisting key strata in water preserved mining [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(6): 561-564.

561-564.