

# 近浅埋煤层导水裂隙带发育高度影响因素的数值模拟

刘学生<sup>1</sup>, 张明<sup>1,2</sup>, 宁建国<sup>1</sup>, 谭云亮<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学资源与环境工程学院, 山东青岛 266590; 2. 新汶矿业集团有限责任公司, 山东新泰 271200)

**摘要:**以鲁新矿 11 煤首采面的水文地质条件为背景, 采用 FLAC3D 数值模拟软件, 研究了工作面长度、采高和采煤方法对导水裂隙带发育高度的影响。结果表明: 随工作面长度和采高增加, 覆岩导水裂隙带高度也增加, 但工作面长度对覆岩导水裂隙带高度起主导作用。确定鲁新矿 11 煤首采面合理的工作面长度为 150 m, 采高为 3 m; 开采下分层时, 导水裂隙带约增大 1.5~5.5 m; 与采用分层综采相比, 下分层采用综放开采时, 导水裂隙带发育高度约增加 2~4 m。

**关键词:**工作面长度; 采高; 开采方法; 导水裂隙带高度; 数值模拟

中图分类号: TD325

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2012)05-0031-06

## Numerical Simulation on Influencing Factors of the Developing Height of Water Flowing Fractured Zone in Shallow Seams

LIU Xuesheng<sup>1</sup>, ZHANG Ming<sup>1,2</sup>, NING Jianguo<sup>1</sup>, TAN Yunliang<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. Xinwen Mining Group Co. Ltd, Xintai, Shandong 271200, China)

**Abstract:** Taking the hydrological and geological conditions of the first coalface in No. 11 seam of Luxin coalmine as the background, the effects of face lengths and mining heights on the maximum height of water flowing fractured zone were studied by using FLAC3D software. The simulation results illustrated three important facts. The height of fractured zone increased with the increases of face length and mining height, but the face length played a leading role. The rational face length was 150 m while the mining height was 3 m. The height of fractured zone increased about 1.5-5.5 m when the lower slice was mined, but compared with the slicing fully-mechanized mining method, the height of fractured zone was about 2-4 m larger than that when the fully-mechanized caving method was used in mining of lower slice.

**Key words:** face length; mining height; mining method; height of water flowing fractured zone; numerical simulation

我国华北、东北和华东平原地区普遍有第四系的含水砂层覆盖, 这些地区的浅部煤田开采都存在含水砂层下采煤问题。若煤层的上覆岩层中有多层含水层, 且含水层与隔水层相间排列, 常采用顶疏结合开采<sup>[1]</sup>。由于煤层与上方强含水层距离是一定的, 应控制导水裂隙带的高度, 避免导水裂隙带沟通上方强含水层, 保证安全开采。目前, 确定导水裂隙带高度的方法主要有经验公式计算、相似材料模拟、现场测试以及数值模拟等方法<sup>[2-3]</sup>。

收稿日期: 2012-04-01

基金项目: 教育部长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0843); “矿山灾害预防控制”省部共建国家重点实验室培育基地基金项目; 山东科技大学“矿山压力与岩层控制”创新团队基金项目; 山东科技大学研究生科技创新基金项目(YCB120108)

作者简介: 刘学生(1988—), 男, 山东德州人, 硕士研究生, 主要从事采矿及矿山岩石力学的学习与研究。

E-mail: xuesheng1134@163.com

谭云亮(1964—), 男, 山东临朐人, 教授, 博士生导师, 主要从事采矿及矿山岩石力学方面的研究工作。

鲁新煤矿位于内蒙古锡林郭勒盟,目前尚处于建井阶段,矿井主要可采煤层 4 层(6,9,11,13 煤层),由于 6 煤顶板和 9 煤顶板为富水性强的含水层,距离煤层近,涌水量大,对 6 煤、9 煤开采威胁较大,矿井生产初期开采 11 煤,11 煤发育于煤系地层中部,距 9 煤顶板强含水层约 63 m,埋深 168~256 m,属近浅埋煤层;煤层倾角小于 5°,平均厚度为 10.76 m;顶板有一层 5~40 m 厚的较稳定隔水层,顶、底板围岩强度较低,以粉砂岩、砂质泥岩为主。

为避免导水裂隙带贯通 9 煤顶板强含水层,保证首采面安全开采,利用 FLAC3D 数值模拟软件对该工作面长度、采高和开采方法对导水裂隙带高度的影响进行研究,确定该工作面合理长度、采高和开采方法,对类似矿井的安全开采提供参考。

## 1 模型建立

### 1.1 模型尺寸和边界条件

根据《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》,导水裂隙带发育高度为

$$H_{li} = \frac{100 \sum M}{1.6 \sum M + 3.6} \pm 5.6. \quad (1)$$

其中: $H_{li}$ —导水裂隙高度,m; $M$ —煤层厚度,m。

经计算,首采面导水裂隙带高度预计为 46.1~57.3 m,模型高度确定为 200 m;根据文献<sup>[2,6]</sup>及相似矿井开采经验,工作面推进 300 m 时,导水裂隙带高度基本已经发育到最高。工作面两侧及推进方向留有一定的边界影响区域,最终模型尺寸确定为 300 m×400 m×200 m,即垂直于煤层推进方向为 300 m,沿煤层推进方向为 400 m,竖直方向为 200 m。

为保证计算精度,煤层、工作面底板 15 m 及顶板 50 m 范围内网格划分尺寸应小一些,单元边长小于 2 m,其余部分网格尺寸可适当大一些,单元边长取 3~5 m,单元类型采用 8 节点六面体单元。模型共划分 79 200 个单元,网格划分如图 1 所示。

模型的前后和左右边界施加水平约束,底部边界固定,上部边界自由。

### 1.2 初始应力和物理力学参数

在模型顶部边界施加垂直方向的载荷,载荷大小等于模型上部岩层的自重,根据岩层的实际密度计算得到模型实际的初始垂直应力,考虑侧压力系数 0.5,得到初始水平应力,初始垂直应力云图如图 2 所示。

对不同岩性的岩层各取 3~5 个岩石试件,试件直径不得小于 50 mm,长度不得小于 100 mm。将取回的试件在微控电液伺服万能试验机上进行岩石特性实验,经过计算得到其抗拉强度、粘聚力、内摩擦角、体积模量和剪切模量,求得各岩层的平均参数作为模型中煤岩体的物理力学参数,如表 1 所示。

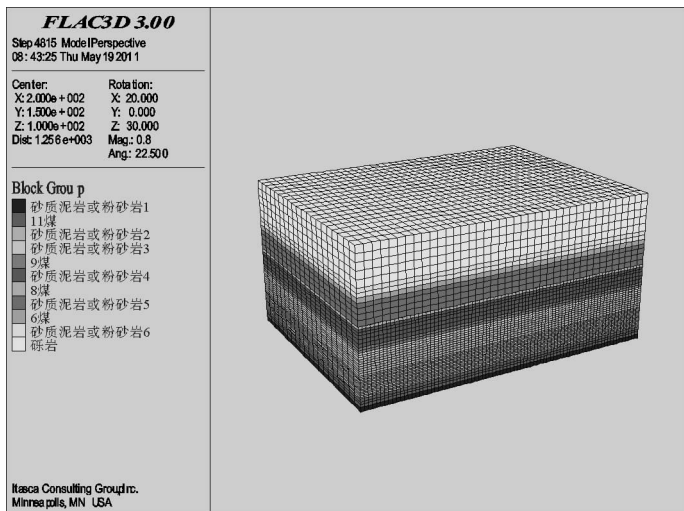


图 1 模型网格划分图

Fig. 1 Model meshing

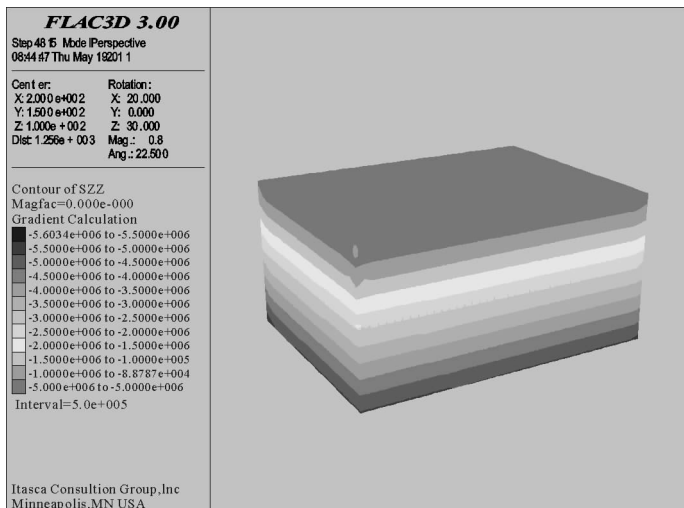


图 2 初始平衡后的垂直应力分布图

Fig. 2 Distribution of vertical stress

表 1 煤岩体物理力学参数表

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of rock mass

岩层名称	岩层厚度/m	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	抗拉强度/MPa	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)
砂质泥岩或粉砂岩 1	5.63	3.125	2.542	0.80	2.5	35.0
11 煤	10.94	2.381	1.163	0.65	1.3	32.9
砂质泥岩或粉砂岩 2	43.67	3.571	2.459	0.74	2.5	35.0
砂质泥岩或粉砂岩 3	7.92	6.667	2.222	0.76	2.5	35.0
9 煤	6.40	2.381	1.163	0.65	1.3	32.9
砂质泥岩或粉砂岩 4	21.83	2.857	2.609	1.00	2.5	35.0
8 煤	3.52	2.381	1.163	0.65	1.3	32.9
砂质泥岩或粉砂岩 5	27.77	10.000	2.143	0.72	2.5	35.0
6 煤	6.35	2.381	1.163	0.65	2.3	32.9
砂质泥岩或粉砂岩 6	11.42	10.000	2.143	0.88	2.5	35.0
砾岩	50.00	2.135	1.668	0.80	2.2	34.0

注:表中部分岩层虽然岩性相同,但由于岩层内局部含有少量的细砂岩、粗砂岩、泥岩及砾岩等,导致其物理力学参数存在较大差距。

### 1.3 本构关系

模型中煤岩体采用摩尔-库伦塑性模型,剪切屈服遵从摩尔-库伦准则,按式(2)计算,即当  $f_s > 0$  时,发生剪切破坏;拉伸屈服通过拉伸强度评价,即当  $\sigma_3 \geq \sigma_1$  时,产生拉伸破坏;采空部分采用 null 单元模拟。

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \quad (2)$$

其中:  $\sigma_1, \sigma_3$ —最大、最小主应力,MPa;  $\varphi$ —内摩擦角, (°);  $c$ —粘聚力,MPa。

## 2 工作面长度对导水裂隙带高度的影响

### 2.1 模拟过程

根据鲁新矿 11 煤首采面的实际情况,本次模拟 11 煤分两层开采,上分层采用综采,采高 2.5~4 m;下分层采用综放,采高 6.94~5.44 m。根据工作面长度和采高不同共进行 6 次模拟,分别为模拟 I~VI,如表 2 所示。

表 2 模拟 I—VI 导水裂隙带发育高度表

Tab. 2 Height of water flowing fractured zone of model I-VI

模拟结果统计	模拟 I	模拟 II	模拟 III	模拟 IV	模拟 V	模拟 VI
工作面长度/m	150	180	200	250	200	180
采高/m	3.0	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5
导高/m	约 36.43	约 61.43	约 64.43	$\geq 183.4$	约 61.43	约 60.43
开采完上分层						
裂采比	12.14	20.48	21.48	$\geq 61.1$	24.57	24.17
保护层/m	约 26.5	约 1.5	贯通	贯通	约 1.5	约 2.5
导高/m	约 41	约 66.5	约 69.5	$\geq 183.4$	约 66.5	约 65
下分层综放开采						
裂采比	3.75	6.08	6.35	$\geq 16.77$	6.08	5.94
保护层/m	约 22	贯通	贯通	贯通	贯通	贯通

注:表中将导水裂隙带高度缩写为导高,以后表中沿用此缩写。

### 2.2 计算结果分析

模拟 I—VI 的部分计算结果如图 3 所示,通过对塑性区的分析,可以确定工作面开采后的覆岩破坏区

域,自煤层顶板由下而上,依次发育拉伸破坏区、拉伸裂隙区、剪切破坏区和未破坏区域。

拉伸破坏区是在双向拉应力作用下,岩层被拉断、垮落的区域;拉伸裂隙区是由于某一方向的拉应力超过了岩体的抗拉强度,而产生一定方向的张裂隙,这些张裂隙的宽度和连通情况不同,对岩体渗透性和破坏程度的影响不同。这两个区域主要分布在采空区上方的拉应力区岩层。由此可以推断,工作面顶板破坏首先是剪切破坏,由此顶板裂隙得到发育,进而发展为拉伸破坏,最终发生断裂、垮落,所以直接顶的垮落为拉伸破坏,可由拉伸破坏和拉伸裂隙区的范围来判断垮落带、裂隙带的发育高度<sup>[4-7]</sup>。

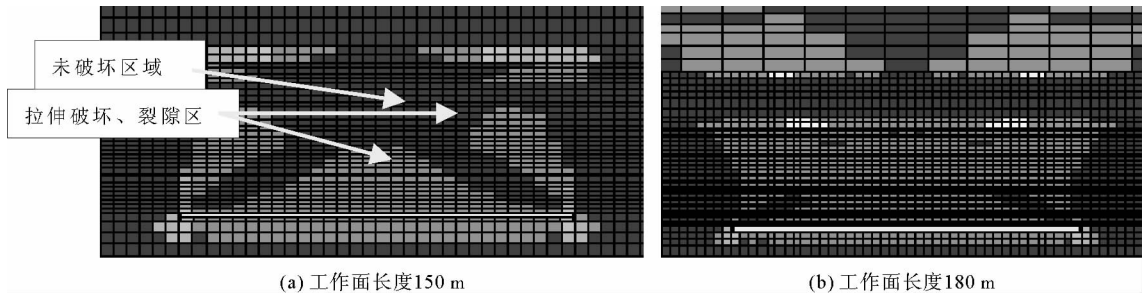


图 3 采场覆岩塑性区分布图

Fig. 3 Distribution of plastic zones

结合模拟 I—VI 的模拟结果,将导水裂隙带发育高度及裂采比整理如表 2 所示,覆岩塑性区发育高度拟合曲线如图 4 所示,可以看出,上分层采高 3 m 时,随着工作面长度的增大,覆岩塑性区发育高度和范围明显增大,即导水裂隙带高度明显增大。当工作面长度为 250 m 时,导水裂隙带发育高度超出模拟岩层范围,沟通 6 煤顶底板及 9 煤顶板含水层;当工作面长度为 200 m 时,导水裂隙带发育高度约为 64.43 m,沟通 9 煤顶板含水层;当工作面长度为 180 m 时,导水裂隙带发育高度约为 61.43 m,极易沟通该含水层;当工作面长度为 150 m 时,导水裂隙带高度约为 36.43 m,距离 9 煤顶板约 26.5 m,不会沟通该含水层。

工作面长度为 150~250 m,上分层采高为 3 m,下分层采用综放开采时,导水裂隙带发育高度有所增加,约增加 4.5~5.5 m。当工作面长度为 150 m 时,导水裂隙带发育高度距 9 煤顶板约 22 m,不会沟通该含水层。

为最终确定合理的工作面长度,当采高减小为 2.5 m 时,考察工作面长度的选取。当工作面长度为 200 m 时,上分层开采完后,导水裂隙带发育高度约为 61.43 m,距 9 煤顶板含水层约 1.5 m,极易沟通该含水层;当工作面长度为 180 m 时,上分层开采完后,导水裂隙带发育高度为 60.43 m,距 9 煤顶板含水层约 2.5 m,极易沟通该含水层。因此,采高 2.5 m 时,工作面长度不能为 180 m 和 200 m。

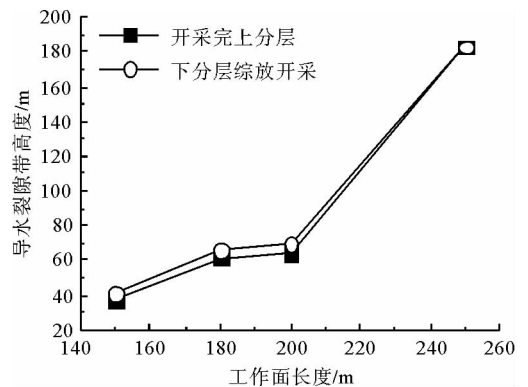


图 4 上分层采高 3 m 导水裂隙带高度拟合曲线图

Fig. 4 Fitting curve of height of water flowing fractured zone

综上所述,在此地质条件下合理的工作面长度应为 150 m。

### 3 采高对导水裂隙带高度的影响

#### 3.1 模拟过程

为研究采高对导水裂隙带高度的影响,模拟上分层采高为 2.5~4 m 时覆岩导水裂隙带的发育高度,根据采高不同进行 4 次模拟,分别为模拟 VII—X,如表 3 所示。

表 3 模拟Ⅶ—Ⅹ导水裂隙带发育高度表

Tab. 3 Height of water flowing fractured zone of model Ⅶ—Ⅹ

模拟结果统计		模拟Ⅶ	模拟Ⅷ(同Ⅰ)	模拟Ⅸ	模拟Ⅹ
采高/m		2.5	3	3.5	4
导高/m		约 35	约 36.43	约 38.43	约 39.43
开采完上分层	裂采比	14	12.14	10.98	9.86
	保护层/m	约 27	约 25.5	约 23.5	约 22.5
	导高/m	约 40	约 41	约 43	约 44
下分层综放开采	裂采比	3.66	3.75	3.93	4.02
	保护层/m	约 22	约 21	约 19	约 18

### 3.2 计算结果分析

将模拟Ⅶ—Ⅹ的模拟结果整理如表 3 所示,拟合曲线如图 5 所示,可以看出,工作面长度为 150 m,上分层采高为 2.5~4 m 时,随着采高的增大,覆岩塑性区发育高度和范围均有所增加,即顶板导水裂隙带发育范围及高度增大,约增大 1.5~4.5 m。

工作面长度为 150 m,上分层采高为 2.5~4 m,下分层采用综放开采时,导水裂隙带发育高度有所增加,约增加 4.5~5 m。

由于 11 煤是首采面,对地质条件并不完全清楚,出于安全考虑,采高应留有一定的安全裕量。综上所述,建议上分层采高为 3 m。

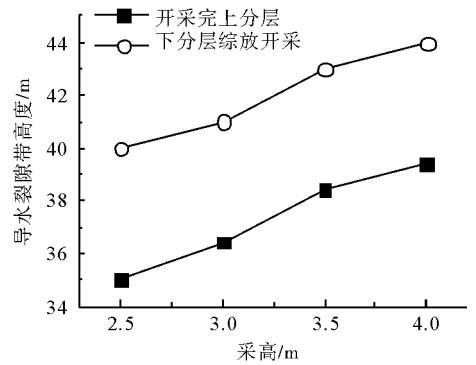


图 5 工作面长度 150 m 导水裂隙带高度拟合曲线图

Fig. 5 Fitting curve of height of water flowing fractured zone

## 4 开采方法对导水裂隙带高度的影响

### 4.1 模拟过程

经初步分析,适合首采面下分层开采的采煤方法有两种,即分两层综采和一次采全高综放开采,为研究两种开采方法对导水裂隙带高度的影响,将模拟Ⅰ—Ⅹ的下分层按分两层综采的方式重新进行计算。

### 4.2 计算结果分析

将模拟Ⅰ—Ⅹ的模拟结果整理如表 4 所示,覆岩塑性区发育高度拟合曲线如图 6 所示。由图 6 可知,上分层采高为 2.5~4 m,工作面长度为 150~250 m 时,上分层开采完后,不论下分层采用综放开采还是分层开采,导水裂隙带发育高度均有所增大;下分层采用综放开采时,导水裂隙带高度约增加 4.5~5.5 m,采用分层开采时,导水裂隙带高度约增加 1.5~2.5 m,即导水裂隙带高度增加幅度不同,采用综放开采比分层开采时,增加幅度略大一些,约增加 2~4 m。

表 4 模拟Ⅰ—Ⅹ导水裂隙带发育高度表(下分层分两层开采)

Tab. 4 Height of water flowing fractured zone of model Ⅰ—Ⅹ

模拟结果统计	模拟Ⅰ	模拟Ⅱ	模拟Ⅲ	模拟Ⅳ	模拟Ⅴ	模拟Ⅵ	模拟Ⅶ	模拟Ⅷ	模拟Ⅸ	模拟Ⅹ
工作面长度/m	150	180	200	250	200	180	150	150	150	150
采高/m	3.0	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.5	3.0	3.5	4.0
下分层 导高/m	约 38.5	约 65	约 68	≥183.4	约 64.5	约 63	约 38	约 38.5	约 40.5	约 41.5
分两层 裂采比	3.52	5.94	6.35	≥16.77	5.9	5.76	3.47	3.52	3.7	3.79
开采 保护层/m	约 23.5	贯通	贯通	贯通	贯通	贯通	约 24	约 23.5	约 21.5	约 20.5

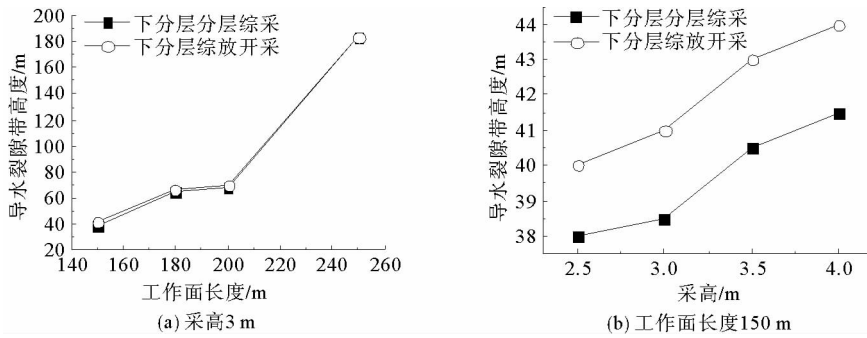


图 6 导水裂隙带高度拟合曲线图

Fig. 6 Fitting curve of height of water flowing fractured zone

当采高为 3m,工作面长度为 150m 时,下分层采用综放开采时,导水裂隙带高度约为 41 m,距 9 煤顶板含水层为 21m,不会沟通该含水层;下分层采用分层开采时,导水裂隙带高度约为 38.5 m,距 9 煤顶板含水层为 23.5 m,也不会沟通该含水层,且安全系数更大。

综上所述,两种方法都是可行的,下分层分两层开采时安全系数更大,建议首采面下分层采用分两层开采的方法进行试采。

## 5 结论

- 1) 采高 3 m,工作面长度为 150~250 m 时,随着工作面长度的增大,导水裂隙带发育高度明显增大。
- 2) 工作面长度为 150 m,采高 2.5~4 m 时,随着采高的增大,导水裂隙带高度随之增大。
- 3) 11 煤首采面的合理工作面长度为 150 m,合理的上分层采高为 3 m。
- 4) 对于厚煤层分层开采,无论下分层采用分层综采还是综放开采,导水裂隙带高度均有所增加;但增幅不同,采用分层综采时,导水裂隙带高度增幅略小。
- 5) 研究了工作面长度、采高和开采方法对首采面导水裂隙带高度的影响,其他因素如采空面积、开采时间、大面积开采、埋深、区段煤柱宽度等的影响规律,还有待进一步研究。

## 参考文献:

[1]徐永圻.煤矿开采学[M].徐州:中国矿业大学出版社,1999:417-425.

[2]王锦山.孤岛工作面上覆岩层变形破坏规律相似试验研究[J].山东科技大学学报:自然科学版,2011,30(5):6-11.  
WANG Jinshan. Similar test research on the law of deformation and failure of overlying strata in an isolated island face[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2011, 30(5): 6-11.

[3]王庆照,蒋升,司马俊杰.厚煤层重复采动覆岩破裂发育规律研究[J].山东科技大学学报:自然科学版,2010,29(4):67-72.  
WANG Qingzhao, JIANG Shen, SIMA Junjie. Study on fracturing and development rules of overlying strata under repeated mining in thick coal seam[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2010, 29(4): 67-72.

[4]张玉军.铁北煤矿松软砂岩含水层下综放开采覆岩破坏及溃砂预测研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2005:41-55.

[5]武雄,汪小刚,段庆伟,等.导水断裂带发育高度的数值模拟[J].煤炭学报,2008,3(6):609-612.  
WU Xiong, WANG Xiaogang, DUAN Qingwei, et al. Numerical modeling about developing high of water flowing fractured zone[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 3(6): 609-612.

[6]靳俊恒,孟祥瑞.1262(1)工作面导水裂隙带发育高度的数值模拟研究[J].煤炭工程,2010(11):68-70.  
JIN Junheng, MENG Xiangrui. Numerical simulation study on development height of water conducted crack zone in 1262(1) coal mining face[J]. Coal Engineering, 2010(11): 68-70.

[7]康永华,黄福昌,席京德.综采重复开采的覆岩破坏规律[J].煤炭科学技术,2001,29(1):22-24.  
KANG Yonghua, HUANG Fuxing, XI Jingde. Overburden failure law of fully mechanized repeated mining[J]. Coal Science and Technology, 2001, 29(1): 22-24.