

含隐伏断层煤层底板损伤演化及滞后突水机理分析

李连崇¹, 唐春安¹, 李根¹, 杨天鸿²

(1. 大连理工大学土木水利学院, 辽宁 大连 116024; 2. 东北大学岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁 沈阳 110006)

摘要: 基于对采动岩体流固耦合作用的力学响应以及底板岩体强度退化机制的认识, 针对承压水体上采煤的岩体力学模型, 对底板隔水岩体的长期强度特征进行了分析, 并用数值方法再现了含隐伏小断层底板在采动应力扰动和高承压水共同作用下采动裂隙形成、小断层活化、扩张、突水通道最终贯通形成的全过程。通过对损伤演化、应力场和渗流场的解读, 揭示了开采扰动及水压驱动下完整底板由隔水岩层到突水通道的演化机理, 对突水通道进行时空基准标定, 并着重就小断层发育高度、承压水水压力大小对隔水底板的损伤演化模式及突水滞后时间的影响关系进行了分析探讨, 从岩体强度退化及损伤演化机制的角度, 为承压水体上采煤底板滞后突水的机理分析提供了一些新的认识。

关键词: 损伤; 数值模拟; 小断层; 突水通道; 承压水

中图分类号: TD821

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)12-1838-07

作者简介: 李连崇(1978-), 男, 辽宁朝阳人, 讲师, 博士, 从事岩体热水力耦合作用机理研究。E-mail: li-lianchong@163.com。

Damage evolution and delayed groundwater inrush from micro faults in coal seam floor

LI Lian-chong¹, TANG Chun-an¹, LI Gen¹, YANG Tian-hong²

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Centre for Rock Instability and Seismicity Research, Northeastern University, Shenyang 110006, China)

Abstract: Based on the knowledge of solid-fluid coupling mechanism and strength degradation law of coal seam floor, numerical tests with FEM method are conducted to investigate the long-term characteristics of floor rock mass and the initiation of fractures, activation of faults and formation of groundwater inrush pathways based on the mechanic model for rock mass with weak faults in coal mining above the confined aquifer. With the understanding of stress, damage and seepage flow evolution, the transformation of floor rock mass from water-resisting strata to inrush pathways is clearly illuminated and the groundwater inrush pathways are calibrated. Furthermore, the influence of the height of faults and the magnitude of water pressure on the damage evolution and delayed time of groundwater inrush is studied. And some significantly meaningful guides are provided for the investigation on the mechanism and prevention of delayed groundwater inrush in practice.

Key words: damage; numerical simulation; micro fault; groundwater inrush pathway; confined aquifer

0 引言

影响和制约我国煤炭生产及煤炭产量的最大障碍之一就是矿井水害问题, 尤其是近几年来, 随着矿井向深部的不断延伸, 开采煤层所承受的岩溶含水层水压越来越高, 底板突水的威胁愈发严重。从目前已有的各矿区突水的统计资料来看, 大部分突水事故都是由于构造引起的, 占到各类突水事故的80%之多。因此, 煤矿底板的突水问题的实质就是断层构造的突水问题, 解决这类问题应以断层为主要研究对象。前人在大断层与突水预测方面做了大量的研究工作^[1-5], 但在断层诱发突水机理的研究中, 仍有两方面的研究值

得加强: (1) 小断层诱发的突水机理研究。由于大断层构造属性(包括产状要素、力学性质等)的易测性, 所以其相关的研究成果在实际生产过程中已经取得较好应用, 但对于更多的可能由于中小断层所引起的突水事故, 仍然使用相同的理论进行预测分析显然是不合适的; (2) 断层的滞后突水机理研究。截至目前, 对底板隔水层破坏的时间效应研究的还不够深入, 特别是对含小断裂构造的底板滞后突水机理研究的不多。许多突水往往发生在采后一段时间, 甚至会滞后

基金项目: 国家自然科学基金项目(50909013); 国家自然科学基金项目(50674025); 国家重点基础研究发展计划(2007CB209404)

收稿日期: 2008-09-03

数年。突水与岩体中的断层构造、裂隙、孔隙等的发育情况有密切关系。而在开采扰动和高压水共同作用下, 上述因素是在变化的, 开采活动不仅破坏了原始地应力的平衡, 使地应力重新分布, 而且这种应力重分布会影响到底板岩体的完整性、原生缺陷的扩张的及相应的渗透能力, 而且这种影响不是瞬时的, 存在一种时间效应。因此说, 底板滞后突水理论的研究是煤矿突水防治理论中需要加强的重要部分^[6-9]。

特别是近几年来随着煤矿开采深度的不断加大, 突水问题呈现出越来越复杂的趋势, 因此, 探讨解决新问题的新方法, 再次摆在了人们的面前。基于对底板滞后突水的认识, 本文针对承压水体上采煤的岩体水力学模型, 尝试通过有限元数值模拟, 从一种新的角度来剖析承压水体上采煤滞后突水的力学机理。

1 底板岩体强度退化机制及分析方法简介

带压开采底板突水是在矿井工程地质与水文地质条件下, 固体围岩应力场与渗流场在采掘扰动下耦合作用的结果。但隔水岩体的破坏有一个渐变的过程, 并非在瞬间完成, 笔者认为: 该过程是长期的环境影响及流固耦合作用下, 过水裂隙不断软化扩张, 裂隙逐渐由下向上扩展、承压水导升高度逐渐向上发育, 最终突水通道形成的蠕变破坏过程。就岩石材料本身而言, 岩石是一种典型的高度非均匀地质材料, 其内部缺陷结构的变化发展与时间密切相关。在岩石工程漫长的受载过程中, 多种环境因素(如温度、渗流、化学腐蚀、循环载荷等)都可能带来其力学性能的逐步劣化^[10-12], 一般认为, 岩石蠕变是其微观结构蠕变机制在宏观上的总体表现, Costin 最早用损伤和断裂力学方法, 研究脆性岩石的时效变形和破坏特征, 提出蠕变损伤具有应力阈值的结论; Schmidt 通过岩石静态疲劳试验, 发现在恒定载荷作用下, 试件随着时间发展逐步破坏^[13]; Vemeny 认为岩石临界亚裂纹扩展与时间有关^[14]; Scholz 认为脆性岩石的蠕变现象主要是由于时间效应的岩石微破裂过程; Shao 从材料物理力学性质随时间劣化的角度对岩石蠕变特性进行了模拟研究^[15]。所以从岩石细观结构力学性能的长期劣化机制来研究岩石宏观蠕变行为不失为一种好的研究思路。对煤层底板滞后突水机理的研究, 应着重关注固流耦合作用下底板岩层的流变特性, 采用现场实测和实验室分析的方法, 结合实际开采参数进行数值仿真模拟, 研究在断裂构造影响下的岩体损伤演化过程。

本文的数值分析采用 RFPA^{2D}-Flow 进行,

RFPA^{2D}-Flow 基于连续介质力学和损伤力学原理, 具有应力分析、渗流分析、耦合分析、破坏分析 4 个方面的功能。应力分析采用有限单元法, 破坏分析则根据修正后的库仑(Coulomb)准则(包括拉伸截断 Tension cut-off)来检查材料中是否有破坏单元, 对破坏单元则采用刚度特性退化和刚度重建的办法进行处理^[16]。对于岩石材料流变特性的研究, RFPA^{2D}-Flow 从岩石材料内在物理力学性质随时间劣化及岩石内部细观损伤积累等观点出发, 在细观弹性损伤模型的基础上, 引入细观单元力学特性的退化方程, 从而揭示损伤累计和变形局部化与整体加速蠕变的关系, 展现岩石(体)蠕变破坏过程^[17-18]。

2 煤层底板岩体突水通道形成过程的数值模拟与讨论

本节基于对上述底板断层突水机理的认识, 结合实际开采参数进行数值仿真模拟, 研究在流固耦合作用及时间效应下含隐伏小断层的煤层底板岩体的损伤演化过程。

2.1 计算模型及参数

根据承压水体上采煤的力学模型, 设置了如图 1 所示的计算模型, 模型尺寸为 160 m×100 m。在模型的顶部加 10 m 的上覆岩层, 其重度为松散风化岩层的 20 倍, 用于模拟正常重度下 200 m 厚的上覆岩层的自重应力。承压水水压通过边界传递到煤层的下覆含水层中, 岩体只承受自重应力和水压力。边界条件为: 两端水平约束, 可垂直移动; 底端固定, 设定底端和顶端为隔水边界; 设定 300 m 高的定水头边界来模拟高承压水水压(3.0 MPa)。

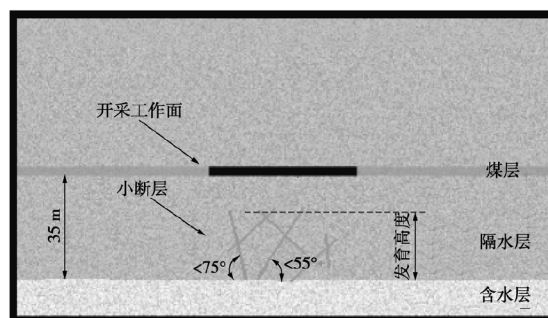


图 1 含隐伏断层采动岩体力学模型示意图

Fig. 1 Sketch of mechanical model for rock mass with micro faults in coal mining

假设煤层底板中发育有隐伏的小断层, 断层产状随机, 按照小断层组发育高度的不同而设置成四种计

表 1 模型参数

Table 1 Mechanical parameters

岩层	弹性模量 E/GPa	抗压强度 f_c/MPa	强度 压拉比	摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	泊松比 ν	重度 $\gamma/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	渗透系数 $K/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	孔隙压力 系数 α
小断层	1.0	2	20	28	0.40	2.3	100.0	0.99
含水层	10.0	15	10	38	0.25	2.5	100.0	0.99
煤层	1.2	4	20	30	0.30	2.1	0.1	0.10
隔水层	3.5	13	10	35	0.25	2.5	0.1	0.10
覆盖层	5.0	12	10	30	0.25	50.0	0.1	0.10

算工况, 即发育高度 $H=8, 12, 20, 25\text{ m}$ 四种工况, 其他模型参数在表 1 中给出。

文献[19]结合蠕变实验, 说明了长期强度的概念, 认为存在一临界强度 σ_c , 当载荷小于 σ_c 时, 变形为稳定蠕变; 当载荷大于 σ_c 时, 为加速蠕变。陈宗基教授称 σ_c 为岩石的长期强度。从岩石材料的强度条件看, 蠕变观测所解释的即是计入时效特征之后岩石的长期强度指标, 文献[20~22]根据蠕变试验分析指出, 岩石长期强度较常规瞬时强度有明显的降低, 相当于瞬时强度的 50%~80%。文献[23]曾研究了 LadDu 花岗岩的强度, 定义不稳定扩展裂纹开始出现的应力为裂隙损伤应力 σ_{cd} , 并指出裂隙损伤应力 σ_{cd} 可能就是岩石的长期强度。本文着重关注的是隔水底板岩体和小断层的时效特征, 这里即以隔水层岩石为例, 确定其长期强度。首先建立一几何尺寸为 $100\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的数值试样, 其力学参数如表 1 的隔水层参数。经单轴压缩数值计算, 得到其单轴抗压强度为 13.1 MPa , 如图 2 所示。从应力应变曲线及声发射的对应关系上, 可看出, 在非线性变形发生时刻, 声发射量开始持续增加, 直到试样破坏时出现大的阶跃。因此可以认定裂纹不稳定扩展的起始应力 $\sigma_{cd} = 9.2\text{ MPa}$, 并将其定义为隔水层岩体的长期强度, 相当于瞬时强度的 70%。

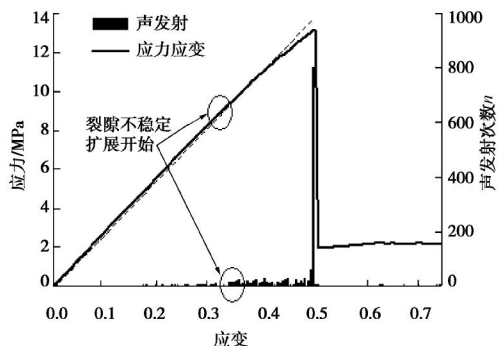
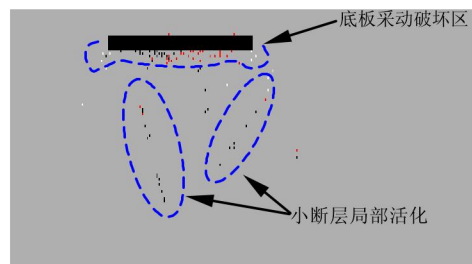


图 2 单轴压缩的应力应变曲线及声发射次数

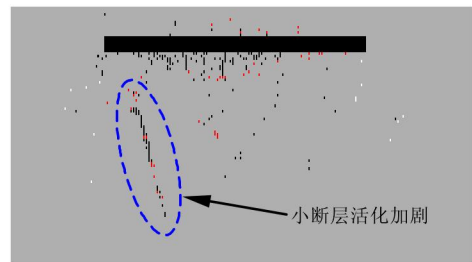
Fig. 2 Stress-strain relation and AE counts in uniaxial compression test

2.2 结果分析及讨论

由于计算方案较多, 限于篇幅有限, 只取一种工况的计算结果进行详细说明。图 3 是数值模拟得到的, 小断层组发育高度为 20 m 的模型的底板损伤破坏的演化图。煤层的不断开采破坏了煤层底板初始的应力平衡状态, 底板出现了明显的采动破坏带如, 图 3 (a) (工作面推进 30 m)。同时由于煤层的开采, 致使小断层上覆的岩层压力得以释放, 因此小断层出现了局部活化。但此时的局部损伤对隔水底板的整体稳定性影响不大。在整个工作面的 50 m 煤层开采完成之后, 虽然底板采动破坏区扩大, 且小断层的活化进一步加剧, 但此时隔水底板的完整性仍然很好、隔水性良好。损伤的加剧为下一步突水通道的形成创造了有利条件, 随着时间推移, 受采动应力和水压的共同作用, 其中最左侧的小断层被完全活化, 且顶部逐渐向上扩展, 范围不断扩大, 最终与底板采动破坏区贯通, 突水通道形成, 此时煤层底板已经完全失去了阻水能力。最右侧的小断层也被完全活化, 并向上扩张, 也有与底板采动破坏区贯通的趋势 (如图 3 (e))。



(a)



(b)

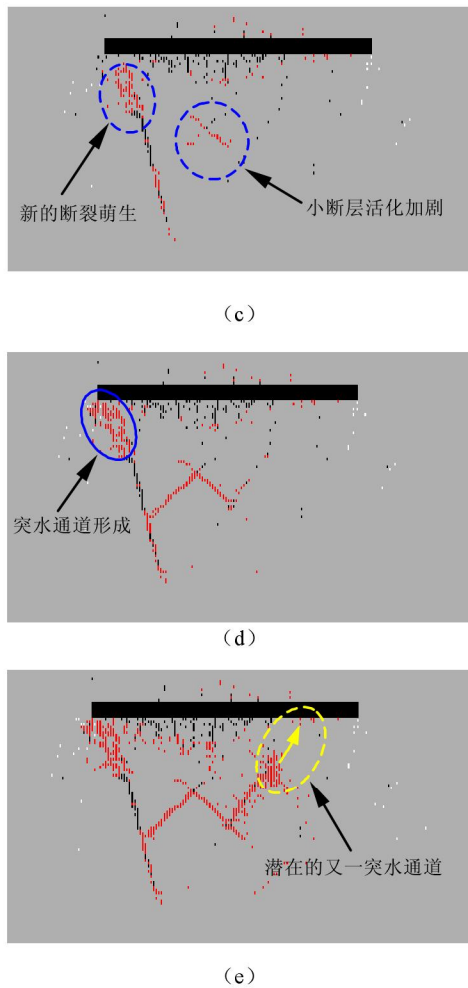


图 3 隔水底板岩体的损伤演化

Fig. 3 Damage evolution in rock mass of coal floor

图 4 是对应的煤层底板的位移变化曲线, 可以看出仅采动诱发的底板位移量有限, 随着底板岩体内微断层的扩张、突水通道的形成, 底板处的最大位移量可达 500 mm 左右。隐伏断层构造的存在破坏了煤层底板的完整性, 降低了隔水岩体本身的强度, 削弱了底板隔水层阻抗变形的能力, 底板在相对较大的变形条件下很容易发生断裂。

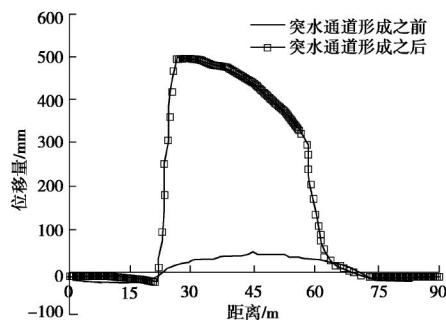


图 4 煤层底板垂直方向位移变化

Fig. 4 Displacement along coal seam floor in vertical direction

图 5 是煤层底板处水流量变化, 该结果图给出了两点信息: (1) 在突水通道形成之前, 如果隔水岩层完整性良好, 即使有小导水断层的存在, 采动破坏区对流量变化的影响有限。(2) 标定了工作面的突水点位置, 突水通道形成之后, 水流量在突水通道处有很大的阶跃。

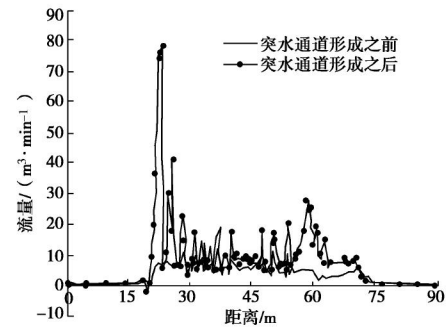


图 5 煤层底板处流量分布

Fig. 5 Seepage flow volume along coal seam floor

图 6 是数值模拟得到的含小断层底板突水通道形成及突水过程。开采活动不仅破坏了原始地应力的平衡, 使地应力重新分布, 而且这种应力重新分布影响到底板岩体的渗透能力, 包括底板岩体中小断层的渗透能力。从图 6 (a) 和 6 (b) 的渗流场对比可以看出, 采动应力对小断层的渗透性影响显著, 在开采完成之后, 几个小断层的渗透性都被大大提高了。在采动应力和底部高承压水作用下, 小断层内的水在相互贯通的裂隙中运动, 具有势能含义的静水压力转变成动能, 使在裂隙内运动的水获得加速度, 对裂隙壁面产生冲刷和扩张作用, 并搬运裂隙中的充填物或破碎物, 原裂隙扩展、新裂隙的生成, 裂隙宽度的变化, 裂隙的相互贯通等, 最终影响到了底板隔水岩体的整体渗透性以及完整性。

可见突水通道形成是一个复杂的损伤演化过程, 岩石材料内在物理力学性质随时间劣化及岩体内部微观损伤积累的最终表现是突水发生, 因此, 隔水底板岩层本身的物理特性、采动影响下的底板破坏区的大小、断层活化程度以及裂隙的扩展过程都影响突水通道的时空位置。

图 7 是不同计算工况下突水发生的滞后时间, 滞后时间服从指数关系, 对于小断层发育高度在 25 m 的情况, 小断层已经发育至底板采动破坏带, 因此易发生即时突水; 而小断层发育高度在 8 m 时, 则突水发生的滞后时间会相对很长。另外, 承压水水压的不同也会影响突水发生的滞后时间。

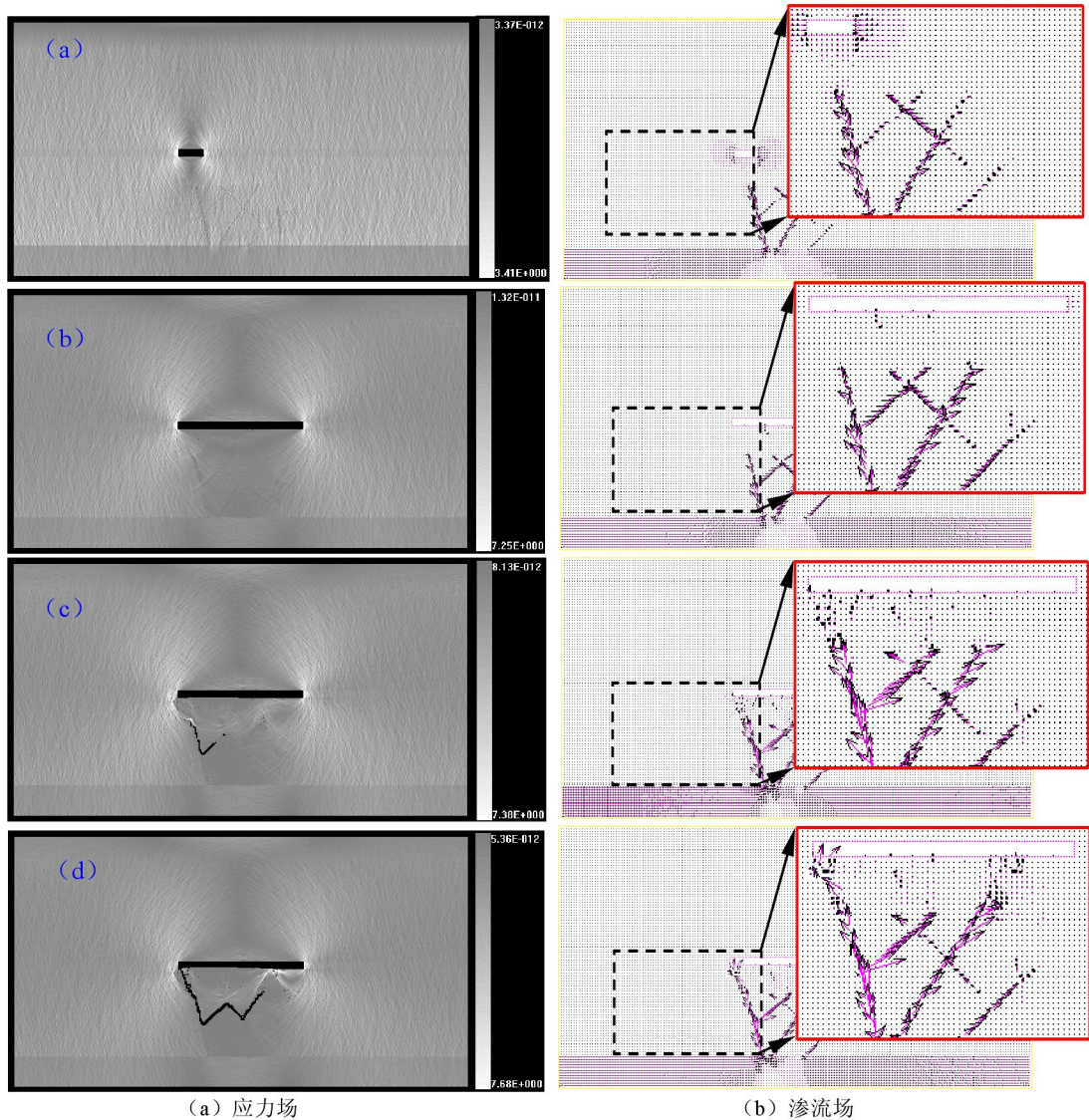


图 6 含小断层底板突水通道形成及突水过程的数值模拟

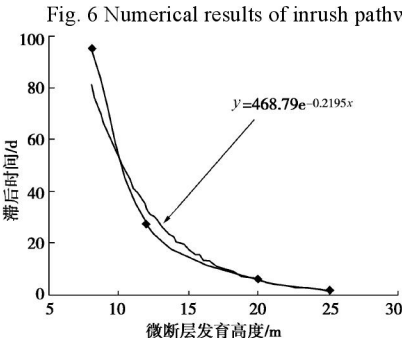


图 7 断层发育高度与突水滞后时间关系
Fig. 7 Relationship between fault depth and delayed time of groundwater inrush

图 8 是针对小断层发育高度为 20 m 的情况，在不同的承压水水压下的突水滞后时间。随着水压力的增大，小断层顶部破坏带高度相应增大，并加快了隔水底板中断层破坏带与采动破坏带的贯通速度。因此

对于承压水体上采煤工程，只有立足于采动岩体的动态力学响应规律，才能从本质上认清滞后突水机制，更好地做到对突水的防治。

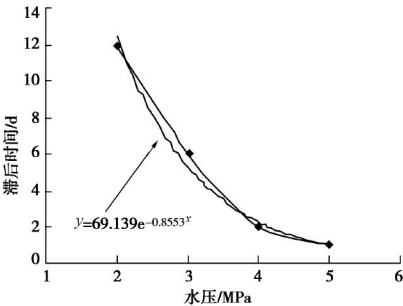


图 8 承压水水压大小与突水滞后时间关系
Fig. 8 Relationship between magnitude of water pressure and delayed time of groundwater inrush

3 结 论

(1) 采动应力和水压力作用下底板突水通道的形成过程是滞后突水机理研究的核心内容和关键问题, 本文的计算模型中没有假定突水通道的任何位置和形状, 但数值模拟自动标定出了突水通道位置, 特别是实现了对突水通道破坏面的起裂、发展和导通的全程跟踪。突水通道是流固耦合作用下岩层裂隙萌生、扩展、贯通时效破坏特征的最终表现。数值模拟从岩石细观结构物理力学性能退化、损伤演化的角度, 对含有隐伏小断层煤层底板的滞后突水机理给予了解释。

(2) 开采致使的地应力重新分布进一步影响到底板岩体的渗透能力, 包括底板岩体中小断层的渗透能力。在采动应力和高承压水作用下, 小断层内的水在相互贯通的裂隙中运动, 由于渗透性的提高, 使在裂隙内运动的水获得加速度, 具有势能含义的静水压力转变成动能, 对裂隙壁面产生冲刷和扩张作用, 这种影响具有时效性, 其最终将影响到底板隔水岩体的整体渗透性以及完整性。

(3) 煤层底板岩体中的小断层的发育程度对突水的滞后时间具有重要的影响。其中断层尺寸较大且发育高度较高的断层对隔水岩层的损伤演化模式、承压水的导升影响较大, 较短的小断层作为对较长小断层的补充亦加快了承压水导升的速度和高度。此外, 承压水水压的大小也直接影响突水发生的滞后时间, 随着承压水水压力的增大, 小断层顶部破坏带高度相应增大, 并加快了隔水底板中断层破坏带与采动破坏带的贯通速度。

参考文献:

- [1] 黎良杰, 钱鸣高, 李树刚. 断层突水机理分析[J]. 煤炭学报, 1996, **21**(2): 119 - 123. (LI Liang-jie, QIAN Ming-gao, LI Shu-gang. Analysis of water inrush induced by faults[J]. Journal of China Coal Society, 1996, **21**(2): 119 - 123. (in Chinese))
- [2] 张金才, 张玉卓, 刘天泉. 岩体渗流与煤层底板突水[M]. 北京: 地质出版社, 1997. (ZHANG Jin-cai, ZHANG Yu-zhuo, LIU Tian-quan. Rock mass permeability and coal mine water inrush[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997. (in Chinese))
- [3] 缪协兴, 刘卫群, 陈占清. 采动岩体渗流理论[M]. 北京: 科学出版社, 2004. (MIAO Xie-xing, LIU Wei-qun, CHEN Zhan-qing. Theory of seepage flow in rockmass induced by mining[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese))
- [4] 施龙青, 韩 进. 底板突水机制及预测预报[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2004. (SHI Long-qing, HAN Jin. Floor water-inrush mechanism and prediction[M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 2004. (in Chinese))
- [5] WU Q, WANG M, WU X. Investigations of groundwater bursting into coal mine seam floors from fault zones[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2004, **41**(4): 557 - 571.
- [6] 刘仁武, 孙景华. 南庄矿大型滞后突水及其原因分析[C]// 全国矿井水文工程地质学术交流会论文集. 北京: 地震出版社, 1992. (LIU Ren-wu, SUN Jing-hua. Analysis on the delayed water bursting in Nanzhuang mine[C]// Proceedings of Chinese Hydrology Symposium on Mines. Beijing: Seismological Press, 1992. (in Chinese))
- [7] 童有德, 叶贵钧. 华北岩溶充水煤矿区底板滞后突水机制及其评价方法[C]// 中国煤炭学会矿井地质专业委员会 2001 年学术年会论文集. 北京: 煤炭工业出版社, 2001. (TONG You-de, YE Gui-jun. Mechanism and methods of delayed water inrush from coal floor with karstic water in Northern China[C]// Proceedings of Annual Symposium of the Mine and Geology Committee of Chinese Society of Coal. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2001. (in Chinese))
- [8] 武 强, 刘金韬, 董东林, 等. 煤层底板断裂突水时间弱化效应机理的仿真模拟研究[J]. 地质学报, 2001, **75**(4): 554 - 561. (WU Qiang, LIU Jin-tao, DONG Dong-lin. Trial analyses and numerical simulations of water-bursting time-effect under coal bed[J]. ACTA Geologica Sinica, 2001, **75**(4): 554 - 561. (in Chinese))
- [9] 武 强, 周英杰, 刘金韬. 煤层底板断层滞后型突水时效机理的力学试验研究[J]. 煤炭学报, 2003, **28**(6): 562 - 565. (WU Qiang, ZHOU Ying-jie, LIU Jin-tao. The mechanical experiment study on lag mechanism of water bursting of fault under coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2003, **28**(6): 562 - 565. (in Chinese))
- [10] 朱珍德, 胡 定. 裂隙水压力对岩体强度的影响[J]. 岩土力学, 2000, **21**(1): 64 - 67. (ZHU Zhen-de, HU Ding. The effect of interstitial water pressure on rock mass strength[J].

- Rock and Soil Mechanics, 2000, **21**(1): 64 - 67. (in Chinese))
- [11] MASUDA Koji. Effects of water on rock strength in a brittle regime[J]. Journal of Structural Geology, 2001, **23**: 1653 - 1657.
- [12] 李建林. 岩石拉剪流变特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(3): 299 - 303. (LI Jian-lin. A test study on tension-shear creep of rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(3): 299 - 303. (in Chinese))
- [13] SCHMIDT R H, LAJTAI E Z. The long-term strength of Lac du Bonnet granite[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1985, **22**: 461 - 465.
- [14] VEMENY J M. A model for nonlinear rock deformation under compression due to sub-critical crack growth[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1991, **28**(6): 459 - 467.
- [15] SHAO J F. Modeling of creep in rock materials in terms of material degradation[J]. Computer and Geotechnics, 2003, **30**: 549 - 555.
- [16] TANG C A, THAM L G, LEE P K K, YANG T H, LI L C. Coupling analysis of flow, stress and damage(FSD) in rock failure[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2002, **39**(4): 477 - 489.
- [17] 李连崇, 徐涛, 唐春安, 朱立凯. 单轴压缩下岩石蠕变失稳破坏过程数值模拟[J]. 岩土力学, 2007, **28**(9): 1978 - 1982. (LI Lian-chong, XU Tao, TANG Chun-an, ZHU Li-kai. Numerical simulation of creep induced progressive failure process of rock under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(9): 1978 - 1982. (in Chinese))
- [18] LI Lian-chong, TANG Chun-an, MA Tian-hui. Research on the closure and creep mechanism of circular tunnels[J]. Journal of Coal Science and Engineering, 2008, **14**(2): 195 - 199.
- [19] 陈宗基. 地下巷道长期稳定性的岩石力学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1982, **1**(1): 1 - 8. (CHEN Zong-ji. The rock mechanics of long-term stability of underground tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1982, **1**(1): 1 - 8. (in Chinese))
- [20] 李永盛. 单轴压缩条件下四种岩石的蠕变和松弛试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, **14**(1): 39 - 47. (LI Yong-sheng. Creep and relaxation of 4 kinds of rock under uniaxial compression tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, **14**(1): 39 - 47. (in Chinese))
- [21] 吴立新, 王金庄. 煤岩流变特性及其微观影响特征初探[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, **15**(4): 328 - 332. (WU Li-xin, WANG Jin-zhuang. Preliminary exploration to rheology and micro-effect characteristics of coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, **15**(4): 328 - 332. (in Chinese))
- [22] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (CAI Mei-feng, HE Man-chao, LIU Dong-yan. Rock mechanics & rock engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [23] MARTIN C D, CHANDLER N A. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1994, **31**(6): 643 - 659.