

采矿与井巷工程

含隐伏小断层底板采动突水机理数值模拟研究

张拥军¹ 杨登峰² 陈关平¹ 李乾龙¹

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 为得到含隐伏小断层的煤层底板开采中的突水机理, 分析底板裂隙演化及渗流突水通道的形成规律。采用 RFPA^{2D} - Flow 软件分析了含隐伏小断层底板在工作面开采中, 底板岩层破坏、突水通道的形成及突水发生的整个动态发展过程, 得到了开采过程中底板岩层裂隙的产生和扩展演化、损伤破坏区域的形成过程及渗流场的运移过程。结果表明: 底板隐伏小断层活化突水主要分为隐伏小断层活化和活化裂隙区域扩展 2 个阶段。底板不同位置隐伏小断层的裂隙贯通存在差异, 距采空区越近, 隐伏小断层越易活化形成突水通道。随着采空区卸压效果的增加, 隐伏小断层突水的可能性逐步增大。

关键词: 隐伏小断层; 底板突水; 岩层破坏; 突水通道

中图分类号: TD745 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2014)10-0045-03

Numerical Simulation Research on Activation Water Inrush Mechanism of Mining Floor with Concealed Minor Faults

ZHANG Yong-jun¹, YANG Deng-feng², CHEN Guan-ping¹, LI Qian-long¹

(1. School of Civil Engineering, Tsingtao Technological University, Tsingtao 266033, China;

2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to obtain the water inrush mechanism of concealed minor faults in coal seam floor during mining, the authors analyzed the evolution law of the floor crack and the formation law of the seepage water inrush channel regulation. The RFPA^{2D} - Flow software was applied to analyse the dynamic process development of floor rock crack development, perforation failure, the water inrush channel formation and floor water inrush during the process of mining in the concealed faults, crack production and extending, evolution process of the formation damage area and seepage transport progress in the mining were gained. The results showed that there were two stages during the process of concealed minor faults water bursting, the active stage and the fracture zone expanding stage. There were some differences for crack connection of concealed minor faults in the different location of the floor, the nearer to the mined-out area, the more potential minor faults activation formed water inrush channel, with the increasing of goaf unloading concealed minor faults the possibility of water inrush was gradually increased.

Key words: concealed minor faults; floor water inrush; strata damage; water inrush channel

0 引言

矿井水害是制约我国煤炭生产的重要障碍, 大部分的突水事故发生在回采工作面, 由断层引起的突水事故占总数的 80% 以上^[1-4], 尤其是对于落差

小于 5 m 的不规则隐伏小断层, 由于其难于探测, 开采过程中更易造成底板突水, 许多学者针对底板断层突水做了大量的研究^[5-8]。由于大断层的力学特性、产状要素等易于测量, 其研究的理论成果在生产中已经得到了较好的推广和应用^[9-12]。但由于隐

收稿日期: 2014-05-14; 责任编辑: 杨正凯 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2014.10.011

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51234005)

作者简介: 张拥军(1974—), 男, 河南焦作人, 副教授, 博士。Tel: 13156280182, E-mail: zhangyj_bull@163.com

引用格式: 张拥军, 杨登峰, 陈关平, 等. 含隐伏小断层底板采动突水机理数值模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(10): 45-47, 52.

ZHANG Yong-jun, YANG Deng-feng, CHEN Guan-ping, et al. Numerical Simulation Research on Activation Water Inrush Mechanism of Mining Floor with Concealed Minor Faults [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(10): 45-47, 52.

伏小断层的特殊性,仍然沿用和大断层相同的理论进行分析显然是不适用的^[13-14]。因此很有必要深入研究隐伏小断层自身的力学性质、导水特性等因素对于底板突水的影响,科学分析隐伏小断层的采动活化特征及裂隙演化规律,以及底板岩体由隔水层到导水通道的形成过程。文献[15-18]通过理论推导、数值模拟及相似模拟试验方法等在含隐伏小断层底板突水的研究方面也做了许多工作,揭示了煤层开采过程中岩层的破坏过程及采动应力下岩石裂隙的演化特征。但是在采动作用下的小断层活化、损伤区域的形成演化过程以及渗流运移过程等方面还有很多问题值得研究。基于此,笔者采用数值模拟与理论分析相结合的方法,分析含隐伏小断层底板的突水过程,以期为类似工程地质条件,开采受承压水威胁的煤层提供理论依据。

1 底板突水模型建立

对设置隐伏小断层的底板岩体在开采过程中的损伤演化过程和突水特征进行模拟研究,隐伏小断层设置为导水断层。从流固耦合角度分析工作面煤层开采过程中小断层活化、裂隙演化贯通及底板隔水层破坏突水的全过程。在考虑岩石材料非均匀性的条件下,利用二维平面应变模型,以回坡底煤矿地质条件作为依据(表1)^[19],应用RFPA^{2D}-Flow^[20]软件建立含隐伏小断层底板的计算模型(图1),3条小断层分别位于工作面开切眼底板的左边、中间和右边。模型尺寸为480 m×280 m,划分为134 400个单元。煤层开切眼距模型左边界150 m,每步开挖10 m,共开挖15步,累计长度为150 m。模型共分为18个岩层,层间设节理以代表岩层间的弱层。设定180 m高的定水头边界来模拟承压水压力。模型共设置3条不规则的隐伏小断层,分别位于模型左边界上的100、175、250 m处。

2 数值模拟结果分析

2.1 隐伏小断层活化突水过程分析

开采过程中对应声发射图如图2所示,其反映了含隐伏小断层底板破坏直至突水通道形成的动态演化过程。

图1中发生不同损伤的单元用不同颜色表示,白色表示当前步发生剪切破坏的单元,红色表示当前步发生拉伸破坏的单元,黑色为表示前面所有步发生损伤的单元。通过单元的颜色变化可以直观的

分析底板变形破坏及裂隙发育变化规律。

表1 煤岩物理力学参数

煤岩层	厚度/m	弹性模量/MPa	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	内摩擦角/(°)	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
覆盖层	50	2 200	3.2	0.40	30.0	0.25	1 500
粉砂岩	22	4 570	35.4	2.08	38.5	0.21	2 650
中粒砂岩	15	6 580	39.6	1.60	38.5	0.21	2 630
粉砂岩	14	4 571	35.6	2.00	38.4	0.20	2 630
中粒砂岩	8	6 500	30.3	1.52	38.2	0.21	2 620
细粒砂岩	18	4 628	45.6	2.39	39.2	0.22	2 630
中粒砂岩	24	6 594	40.2	1.66	38.9	0.20	2 650
K ₂ 灰岩	10	8 800	74.2	1.91	41.0	0.20	2 780
泥岩	2	6 000	62.8	1.50	36.0	0.22	2 730
10号煤层	3	3 950	26.5	1.30	27.0	0.24	1 420
泥岩	6	6 100	64.2	1.48	35.0	0.23	2 710
11号煤层	4	4 000	27.0	1.32	28.0	0.24	1 420
泥岩	3	6 200	65.3	1.50	36.0	0.21	2 730
砂岩	4	6 755	75.9	1.86	38.4	0.19	2 700
泥岩	10	6 500	68.1	1.50	36.0	0.20	2 730
砂岩	7	6 700	72.3	1.50	38.2	0.20	2 700
泥岩	3	6 600	64.5	1.50	36.0	0.21	2 730
奥灰	47	10 000	99.0	2.10	42.0	0.19	2 890

注:K₂灰岩和奥灰煤岩层渗透系数均为100.0 m/d,孔隙水压力系数均为1.00;其余煤岩层渗透系数均为0.1 m/d,孔隙水压力系数均为0.10。

1) 隐伏小断层的活化阶段在采动应力及承压水共同作用下,工作面推进至30 m时(图2a),左边断层和中间导水断层内的裂隙开始发育,断层出现小范围的活化损伤区域。随着工作面的推进,由于左边断层位于开切眼左边,中间断层位于采空区内,使得中间断层的裂隙扩展速度比左边断层的速度快。活化范围集中在采动破坏失稳区域,这往往为突水通道的形成创造了条件。

2) 隐伏小断层活化区域的扩展阶段。当工作面推进到50 m时(图2b),由于开采活动对原始应力场的破坏作用加剧,在地应力作用下,底板的采动破坏区域逐步扩大,隐伏小断层活化裂隙逐步向工作面方向发展。

3) 导水通道的形成阶段。当工作面推进到100 m时(图2c),断层活化区域进一步扩大,采动破坏区和断层活化区之间的隔水层岩体不断损伤破坏,导水裂隙带不断扩展,最终贯通,形成突水通道(图2d)。底板承压水通过导水通道进入工作面。随着工作面的继续推进,右边小断层裂隙逐渐与底板采动破坏区沟通,当开挖到110 m时,渗流通道贯通。

可见中间断层导水裂隙的贯通,加速了右边断层裂隙的扩展速度。

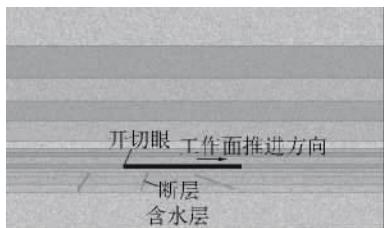


图1 含隐伏小断层底板的计算模型

2.2 渗流过程计算分析

工作面回采对隐伏小断层的渗透特性影响作用

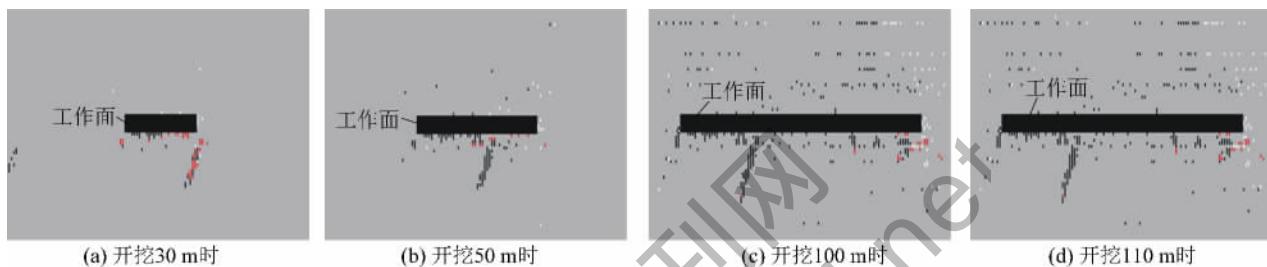


图2 开采过程中弹性模量动态分布及对应声发射图

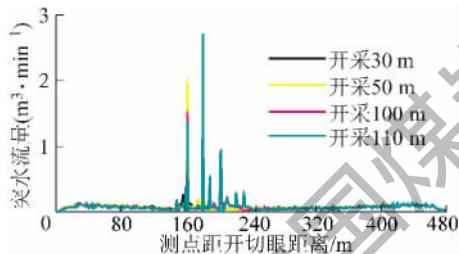


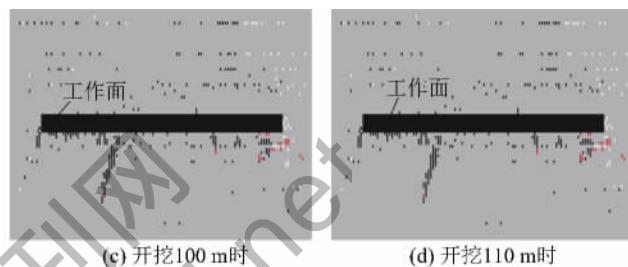
图3 开采过程中突水流量场分布

2) 距离采空区越近的断层,越容易发生活化突水。随着采空区开采卸压强度的增加,发生突水的概率逐步增大。另外,通过突水流量渗流速度可以标示出底板的突水位置。由图3可知,工作面推进到100 m后,中间断层的导水带形成,随着后续开挖,裂隙逐渐贯通,隐伏小断层裂隙通道处突水流量渗流速度从 $0.014 \text{ m}^3/\text{min}$ 增加为 $1.47 \text{ m}^3/\text{min}$ 。当工作面开挖至110 m时,底板突水通道贯通,突水流量瞬间达 $2.78 \text{ m}^3/\text{min}$,发生突水事故。因此可以确定突水位置为距开切眼30 m左右。

3) 当工作面推进到30 m时,底板中间隐伏小断层开始活化,裂隙开始发育;当工作面推进到50 m时,右边的隐伏小断层也开始有裂隙萌生,尤其是中间小断层裂隙发育速度较快,由于此时底板隔水层还有一定的隔水能力,没有引起突水事故;当工作面推进到100 m时,中间隐伏小断层裂隙通道与底

显著,采动应力和承压水作用的整个过程中,水流对裂隙面不断产生冲刷和扩展作用,裂隙萌生、扩展、变宽,使隐伏小断层的渗透性能大幅提高,导致底板隔水岩层的渗透性和完整性降低,开采过程中突水流量场分布如图3所示。

1) 在工作面的整个推进过程中,渗流场与小断层的裂隙扩展方向保持一致,渗流场与隐伏小断层的裂隙场同步演化,且渗流场的方向随着采动裂隙的不断发育,逐渐向底板采空区扩展,直至突水通道形成,突水发生。渗流场的变化范围与裂隙的扩展区域相同。



板采动裂隙贯通,底板隔水岩层发生渗流突变,导水通道形成,发生突水事故。随着工作面的继续推进,右边隐伏小断层裂隙也快速扩展,当工作面开采到110 m之后,右边小断层的导水通道也完全贯通,底板发生突水事故。

3 结论

1) 由模拟结果可知,回坡底煤矿的底板隐伏小断层采动活化突水过程可以分为2个阶段,即隐伏小断层活化阶段和活化裂隙区域扩展阶段。对于分布在底板不同位置的隐伏小断层的裂隙贯通过程,在时间和空间上存在着明显的差异,距离采空区越近的断层,越容易活化突水。随着采空区开采卸压强度的增加,发生突水的概率逐步增大。

2) 底板隐伏小断层的存在降低了底板隔水层的稳定性,而隐伏小断层的数量越多,底板损伤区域越大,底板隔水层的强度越低,在采动应力及承压水压力的耦合作用下,损伤区域的扩展也就越快,底板裂隙贯通的速度越快,隐伏小断层渗透能力加强,越容易诱发底板突水。

3) 揭示了底板采动裂隙和隐伏小断层裂隙贯通过程中渗流场的演化规律,采动和承压水作用下水流对裂隙的冲刷和扩展作用,使渗流场与裂隙场

(下转第52页)

也是重要原因之一。实验室测试结果在岩体工程中具体应用时,除了参考实验室测试数据外,还需要考虑工程现场岩体工程的边界条件、地应力大小、岩石赋存环境、岩石风化破碎程度等因素进行综合确定。该方面的工作尚需不断积累试验资料、总结工程经验。推动岩石力学试验数据在工程应用上由定性评价向定量确定方法的转变,仍是岩石工程领域需要积极探索和研究的重要课题之一。

参考文献:

- [1] 刘建,李鹏,乔丽萍等.砂岩蠕变特性的水物理化学作用效应试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(12):2540-2550.
 - [2] Vasarhelyi B. Statistical Analysis of the Influence of Water Content on the Strength of the Miocene Limestone [J]. Rock Mech Rock Eng 2005,38:69-76.
 - [3] Yilmaz Isik. Influence of Water Content on the Strength and Deformability of Gypsum [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 2010,47:342-347.
 - [4] 杨圣奇,苏承东,徐卫亚.大理岩常规三轴压缩下强度和变形特性的试验研究[J].岩土力学,2005,26(3):475-478.
 - [5] 吴刚,何国梁,张磊等.大理岩循环冻融试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(S1):2930-2938.
 - [6] 代伟,陈建宏,李志江.不同风化程度砂岩力学特性实验研
-
- [7] 尹光志,李小双,赵洪宝.高温后粗砂岩常规三轴压缩条件下力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(3):598-604.
 - [8] 唐明伟,王芝银,孙毅力等.低温条件下花岗岩力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(4):787-794.
 - [9] 朱泽奇,盛谦,冷先伦等.大岗山花岗岩动态力学特性的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(S1):3469-3474.
 - [10] 周翠英,邓毅梅,谭祥韶等.饱水软岩力学性质软化的试验研究和应用[J].岩石力学与工程学报,2005,24(1):33-38.
 - [11] 杨春和,冒海军,王学潮等.板岩遇水软化的微观结构及力学特性研究[J].岩土力学,2006,27(12):2090-2098.
 - [12] 郭富利,张顶立,苏洁等.地下水和围压对软岩力学性质影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(S1):2644-2650.
 - [13] 邓建华,黄醒春,彭结兵等.膏溶角砾岩不同天然含水率情况下力学特性的试验研究[J].岩土工程学报,2008,30(8):1203-1207.
 - [14] 邹翀,王超朋,张文新等.兰渝铁路木寨岭隧道炭质板岩段应力控制试验研究[J].隧道建设,2010,30(2):120-124.
 - [15] 于德海,彭建兵.三轴压缩下水影响绿泥石片岩力学性质试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(1):205-211.
 - [16] 杨文东.复杂高坝坝区边坡岩体的非线性损伤流变力学模型及其工程应用[D].济南:山东大学,2011.

(上接第47页)

同步演化,其变化范围与裂隙场的扩展区域保持一致,可由此推断底板突水位置。

参考文献:

- [1] 王作宇,刘鸿泉.承压水上采煤[M].北京:煤炭工业出版社,1993.
- [2] 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.
- [3] 施龙青,曲有刚,徐望国.采场底板断层突水判别方法[J].矿山压力与顶板管理,2000,17(2):20-24.
- [4] 左建平,陈忠辉,王怀文等.深部煤矿采动诱发断层活动规律[J].煤炭学报,2009,34(3):305-309.
- [5] 卜万奎.采场底板断层活化及突水力学机理研究[D].徐州:中国矿业大学,2009.
- [6] 李凯,茅献彪,李明等.含水层水压对底板断层突水危险性的影响[J].煤矿安全,2011,42(3):1-8.
- [7] 李利平,李术才,石少帅等.基于应力-渗流-损伤耦合效应的断层活化突水机制研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(S0):3295-3304.
- [8] 李青锋,王卫军,朱川曲等.基于隔水关键层原理的断层突水机理分析[J].采矿与安全工程学报,2009,26(1):87-90.
- [9] 李常文,柳峥,郭好新等.基于采动和承压水作用下断层突水关键路径的力学分析[J].煤炭工程,2011(5):70-73.

- [10] 缪协兴,钱鸣高.采场底板突水相似材料模拟研究[J].煤田地质与勘探,1997,25(1):32-34.
- [11] 靳德武,刘英锋,冯宏等.煤层底板突水监测预警系统的开发及应用[J].煤炭科学技术,2011,39(11):14-17.
- [12] 杨善安.采场底板断层突水及其防治方法[J].煤炭学报,1994,19(6):620-625.
- [13] 靳德武.我国煤层底板突水问题的研究现状及展望[J].煤炭科学技术,2002,30(6):1-4.
- [14] 谭志祥.断层突水的力学机制浅析[J].矿业安全与环保,1999(3):21-23.
- [15] 陈忠辉,胡正平,李辉等.煤矿隐伏断层突水的断裂力学模型及力学判据[J].中国矿业大学学报,2011,40(5):673-677.
- [16] 李连崇,唐春安,李根等.含隐伏断层煤层底板损伤演化及滞后突水机理分析[J].岩土工程学报,2009,31(12):1838-1844.
- [17] 黄存捍,黄俊杰,李振华.煤层底板隐伏小断层突水数值模拟[J].煤矿安全,2013,44(10):24-26.
- [18] 黄炳香,刘锋,王存祥.采场顶板尖灭隐伏逆断层区导水裂隙发育特征[J].采矿与安全工程学报,2010,27(3):377-381.
- [19] 杨小刚,刘洋,张壮路.数值模拟在回坡底煤矿底板突水防治中的应用[J].煤田地质与勘探,2008,36(5):58-61.
- [20] 李连崇,唐春安,梁正召等.含断层煤层底板突水通道形成过程的仿真分析[J].岩石力学与工程学报,2009,28(2):290-297.