

煤层底板破坏的断层效应模拟及其在防治水中的应用

冯启言^{1,2}, 周来^{1,2}, 荆升国³, 杨天鸿⁴

(1. 江苏省资源环境信息工程重点实验室(中国矿业大学), 徐州 221008; 2. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 徐州 221116;
3. 中国矿业大学 矿业工程学院, 徐州 221116; 4. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110006)

摘要: 梁北煤矿已发生5次寒武系灰岩底板突水事故, 造成重大经济损失。根据矿井的水文地质条件, 建立了煤层开采的FLAC数值模型, 利用岩石力学及渗流力学理论, 分别模拟了无断层和有断层条件下煤层底板采动破坏带的演化规律, 重点讨论了断裂深度及断层空间位置对底板破坏深度的影响。结果表明, 断层的存在可使底板采动破坏深度增加20%~33%, 断层是突水重点防范区域, 遇断层前10 m直到过断层15 m须加强防治水工作。根据模拟结果设计了梁北矿11041, 11151, 11111三个工作面底板的注浆加固工程, 重点注浆层位分别为底板破坏范围和寒武系顶部裂隙发育带, 注浆工程增强了底板的阻水能力, 实现了工作面的安全回采。

关键词: 底板突水; 断层效应; 底板破坏深度; 数值模拟; 梁北煤矿

中图分类号: P618.11; TD745

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493(2010)01-0019-07

Simulation of Fault Effect on Mining Failure of Coal Seam Floor and Its Application in Water Disasters Control

FENG Qi-yan^{1,2}, ZHOU Lai^{1,2}, JING Sheng-guo³, YANG Tian-hong⁴

(1. Jiangsu Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering, Xuzhou 221008, China;

2. School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

3. School of Mining Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

4. School of Resource and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110006, China)

Abstract: Five water inrush events happened in Liangbei coal mine. The water source was from the confined Cambrian karst aquifer under the coal seam. According to the hydrogeological conditions of Liangbei coal mine, the numerical models, including non-fault and fault models, were established with FLAC package. Based on the theory of rock mechanics and seepage mechanics, numerical simulations were directed for revealing the failure evolution of the seam floor above the high pressure confined aquifer. Different fault factors such as fault depth and location controlling the failure of coal seam floor were discussed. Simulation results showed that failure depth for the fault model increased 20%~33% compared to the non-fault model. The fault zone, especially the area of 10 meters ahead of the fault to 15 meters behind the fault, must be paid more attention to. Accordingly, the grouting reinforced projects were designed for No. 11041, 11151, 11111 working faces in Liangbei coal mine. Targeting the failure zones of coal seam floor and fractures on top of the confined Cambrian karst aquifer, the grouting projects reinforced the water-resisting strength of the coal seam floor, which assured the safe mining in Liangbei coal mine.

Key words: water inrush from seam floor; fault effect; failure depth of coal seam floor; numerical simulation; Liangbei coal mine

收稿日期: 2009-11-04; 修回日期: 2010-01-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(50674025)资助

作者简介: 冯启言, 1964年生, 男, 博士, 教授, 博士生导师, 1984年毕业于南京大学水文地质与工程地质专业, 主要从事煤矿水文地质、环境地质、环境地球化学方面的教学与研究工作; E-mail: fqcumt@126.com

煤层的开采引起应力重新分布并诱发采场围岩破坏,当裂隙波及底板含水层时就可能导致底板突水(杨天鸿等,2003;冯启言,2006)。针对底板突水机制,我国学者开展了大量的研究,并提出了诸多代表性的突水判据理论,其中突水系数法因其物理概念比较确定,公式简单实用,在煤矿生产实践中预测煤层底板突水和解放受承压水威胁的煤炭资源起了积极作用,所以一直沿用至今(段水云,2003)。突水系数(T)可表示为: $T = P/M = P/(H-H_1-H_2)$,其中, P 为底板承受的水头压力, M 为底板有效阻水层的厚度, M 越大,抗突水能力越强,根据“下三带”理论(李白英,1999), $M = H-H_1-H_2$,其中, H_1 为底板采动破坏深度, H_2 为底板含水层原始导升高度,对特定的地质条件下 H_2 相对稳定,因此, M 主要取决于底板采动破坏深度, H_1 越大,底板有效厚度越小,突水危险性越大,而 H_1 的大小与底板岩性、岩层组合、构造裂隙、开采厚度、开采方式等因素有关,尤其是断层裂隙的存在会破坏底板岩层的稳定性,明显增加底板最大破坏深度,降低底板防突能力。统计表明,75%以上的煤矿底板突水事件与断裂构造带有关,另有25%与采动裂隙有关(彭苏萍等,2001),因此,对于煤层底板突水的研究不可忽视断层效应。研究区梁北煤矿主要充水水源为距煤层底板约60 m的寒武系灰岩含水层,在华北地区具有独特性,以往对以奥陶纪灰岩含水层和薄层灰岩含水层为主要充水水源的突水做了大量研究(Wang et al, 2003; Wu et al, 2004; 韩堂惠, 2007; Zhang et al, 2004; 张金才等, 1997),但在寒武系灰岩含水层的突水机制与防治方面的研究很少涉及。本文对断层条件下梁北矿寒灰承压水上煤层底板采动破坏深度进行了数值模拟,在此基础上提出了底板加固改造方案,为矿井防治水提供了依据。

1 梁北煤矿水文地质背景与突水实例

梁北煤矿主采二叠系下统山西组二₁煤。二₁煤为近水平煤层,平均埋深为640 m,平均厚度4.47 m,主要受底板太原组石灰岩含水层及寒武系石灰岩含水层影响。太原组含水层总体为弱含水层,其中太原组上段是由L₁₁—L₈灰岩组成的含水

层,距二₁煤层10 m左右;太原组下段是由L₆—L₁灰岩组成的含水层,揭露的最大厚度58.75 m,最小厚度8.33 m,多数在11 m左右。寒武系石灰岩含水层距太原组下组L₁含水层约10 m,距煤层底板约60 m,富水性强,水头压力达到5 MPa,是矿井突水的主要水源。梁北煤矿自2003年8月试生产至2006年底共发生5次工作面底板突水事件,图1为梁北矿煤层底板涌水量和寒武系含水层观测孔水位历史变化曲线,其中G10, 0149, 0203, 0097, 0093, 01613均为寒武系含水层水文观测孔。由图1可知,梁北矿涌水量急剧上升同时寒武系灰岩含水层水位呈不断下降趋势,涌水量大小直接影响到水位下降的速率,说明寒武系岩溶裂隙水是底板突水的主要水源。

2 底板破坏的断层效应数值模拟

2.1 煤层开采数值模型与计算方法

根据梁北煤矿11041工作面地质条件、底板的地层结构与水文地质特征,建立了煤层开采的FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua,岩土体工程高级连续介质力学分析软件)二维数值模型(见图2)。模型沿走向长度为400 m,上至二₁煤顶板以上87 m,下至寒灰顶界以下15 m。数值模型划分成400×180共72 000个单元,模型水平方向及底边界为固定边界,模型两侧同为固定边界,在模拟内部初始化X方向、Z方向的均布荷载作为模拟底板寒武系灰岩的高承压水值(5.0 MPa)。模型顶边界施加9.8 MPa的等效载荷,相当于约500 m厚的上覆岩层自重压力。模型根据钻孔岩芯岩石力学指标测试结果选取模型力学参数(表1)。

模型计算沿走向自左侧100 m处开始开采,开采煤层每15 m计算一个时间步,共开采10步,将计算得到的应力场、位移场、与实际上覆岩层、底板岩层的力学参数综合比较,确定工作面的初次来压步距以及每时间步底板的塑性破坏区、拉裂区,确定底板岩体的最大破坏深度,同时相应绘出底板的破坏区范围。

2.2 断层数值模型

断层同采空区的位置关系和断层带的透水性,影响底板破坏带的最大破坏深度及破坏特征。本次模拟主要考虑梁北矿工作面断层的断裂

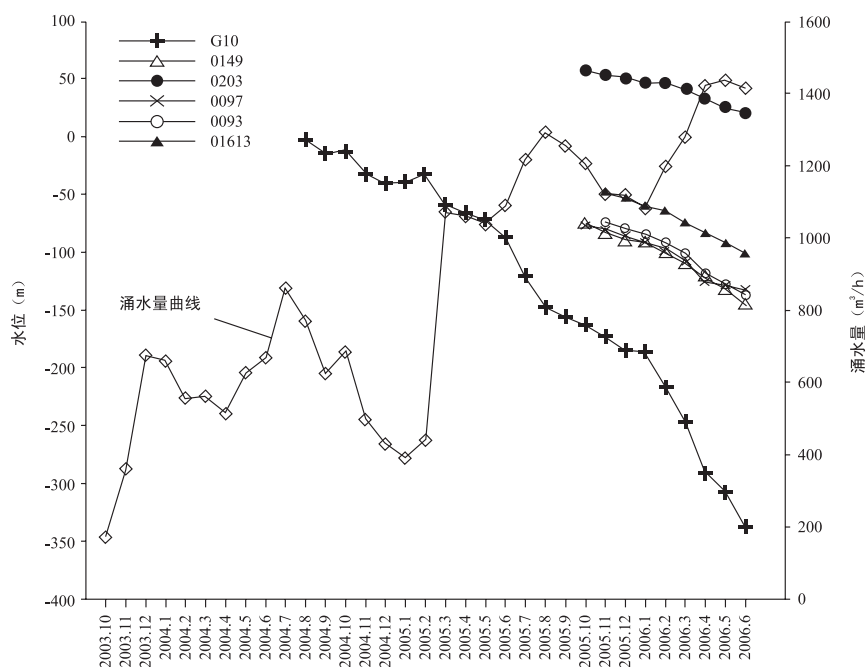


图1 梁北煤矿底板突水过程曲线

Fig. 1 Curve showing the process of water inrush from coal seam floor of Liangbei coal mine

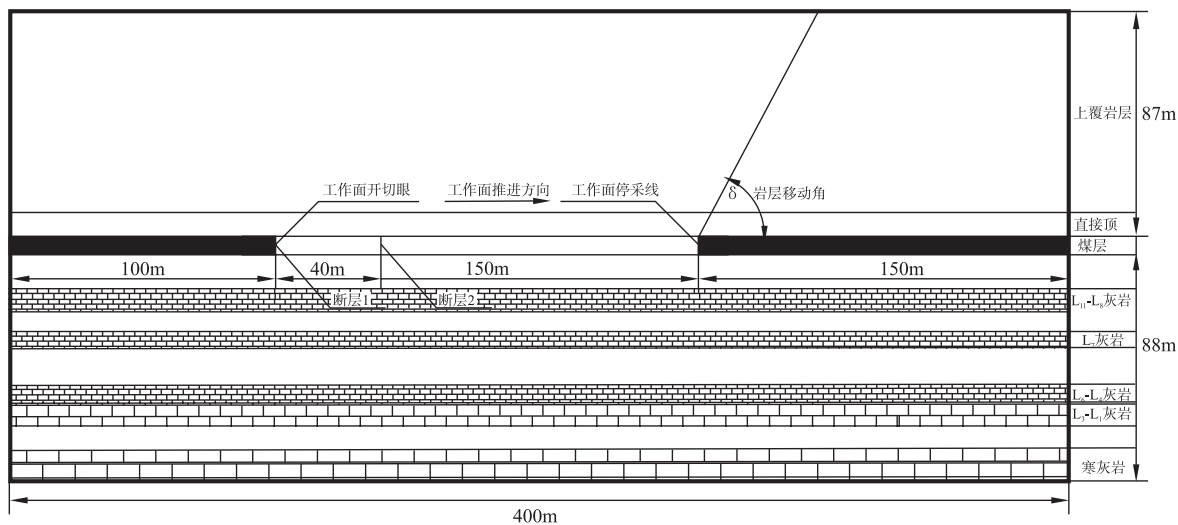


图2 煤层开采模型

Fig. 2 Scheme of coal mining model

表1 主要岩层力学参数

Table 1 Major geomechanical parameters of sedimentary rocks for simulation

岩性	密度/(kg × m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	内摩擦角/°	抗拉强度/MPa	粘聚力/MPa
中砂岩	2650	30	0.21	37	2.9	2.5
煤层	2000	14	0.3	30	1	1.2
砂质泥岩	2600	20	0.29	30	1.2	2.0
L ₁₁ -L ₈ 灰岩	2700	88	0.2	30	3	3
L ₇ 灰岩	2700	88	0.2	30	3	3
L ₆ -L ₄ 灰岩	2700	88	0.2	30	3	3
L ₃ -L ₁ 灰岩	2700	88	0.2	30	3	2.5
寒灰岩	2700	100	0.2	30	3	3

深度及断层位于采矿区的不同位置等因素,建立有断层的数值模型。根据工作面的实际揭露具体情况,断层一般为正断层,断层与岩层的夹角大约为 80° ,断层带宽度为0.5 m,断层的断裂深度一般在10~20 m,由此在无断层模型的基础上考虑了四个断层模型,如图2所示,各模型中断层的具体情况如下:

(1) F1模型 断层倾角为 80° ,断层宽度0.5 m,其断裂深度为10 m,断层位于煤层开切眼处;

(2) F2模型 断层倾角为 80° ,断层宽度0.5 m,其断裂深度为10 m,断层位于距煤层开切眼40 m处;

(3) F3模型 断层倾角为 80° ,断层宽度0.5 m,其断裂深为20 m,断层位于煤层开切眼处;

(4) F4模型 断层倾角为 80° ,断层宽度0.5 m,其断裂深为20 m,断层位于距煤层开切眼40 m处。

断层材料力学参数见表2。对四个模型进行分步开采计算,得出不同位置、断裂深度的断层在开采过程中对底板破坏深度的影响规律。

表2 断层模型力学性质参数
Table 2 Geomechanical parameters of the fault

指 标	法向强度 (k_n/MPa)	切向强度 (k_s/MPa)	摩擦角 $\phi/(\circ)$
数 值	2000	2000	20

2.3 数值模拟结果与讨论

2.3.1 二₁煤底板破坏数值模拟结果分析

二₁煤无断层底板破坏数值模拟结果表明,开采到35 m左右时,工作面出现初次来压,模型中煤壁前方煤体上的应力值高于周围原岩应力值(3~4倍),在这些地方形成局部应力集中区,老顶发生初次垮落。由此根据实际计算的应力结果和塑性破坏区可以看出底板破坏深度和破坏范围,见图3所示。

计算结果显示底板塑性区的分布形态为“马鞍形”分布,在紧靠煤层的采空区底板出现的是拉裂破坏区,而在煤壁和附近的底板是由于应力集中形成的压、剪破坏。从切眼到初始来压,底板破坏深度在不断增加,开采15 m时,底板最大破坏深度为4 m,当开采到30 m时,破坏范围也相应的扩大,底板最大破坏深度达到11 m。当煤层开采到60 m处时,工作面底板岩体在受采动应力、高承压水作用下,破坏深度仍然不断增加,最大破坏深度达到16 m,而采空区的破坏深度达到了11~12 m,此时破坏区已全部波及L₁₁—L₈太灰含水层,对二₁煤的开采构成了突水威胁。当煤层开采到75 m时,底板破坏深度达到17 m,直至150 m处底板水平方向采动破坏范围不断扩大,垂直方向上破坏深度基本不变,最终最大破坏深度达18 m,破

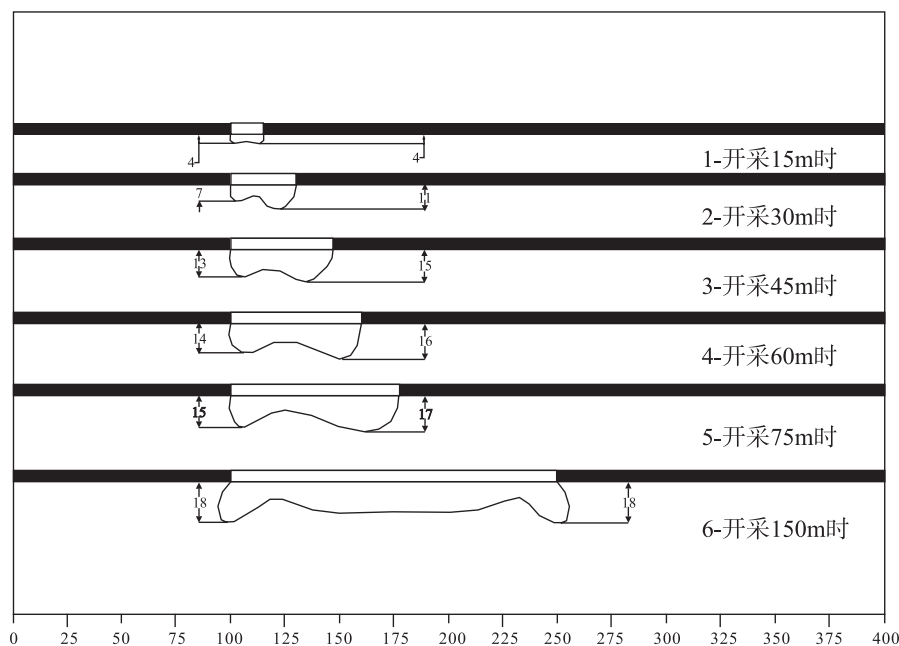


图3 煤层开采过程中底板破坏深度分布图

Fig. 3 Failure of the seam floor for non-fault model

坏区域形状依然为“马鞍形”，此时已经波及整个 L_{11} — L_8 太灰含水层，并且受寒灰水高压的影响，此时是底板岩体最易产生破坏突水的关键时期。

2.3.2 断层对底板破坏深度影响的数值模拟结果分析

断层对底板破坏深度影响的数值模拟结果见图4和表3。

对于F1模型，当工作面开采距切眼15 m时，底板最大破坏深度为5 m，断层的存在，使得最大破坏深度发生在断层带附近的岩层上。由于断层这个弱面的存在，使得断层附近的岩层破坏深度增大。其破坏形成为两侧为“马鞍形”，但在断层附近的破坏形状有一急剧的凸起。与底板无断层存在相比，断层带附近岩层的破坏深度增加了约20%，在水平方向破坏范围没有发生变化。当煤

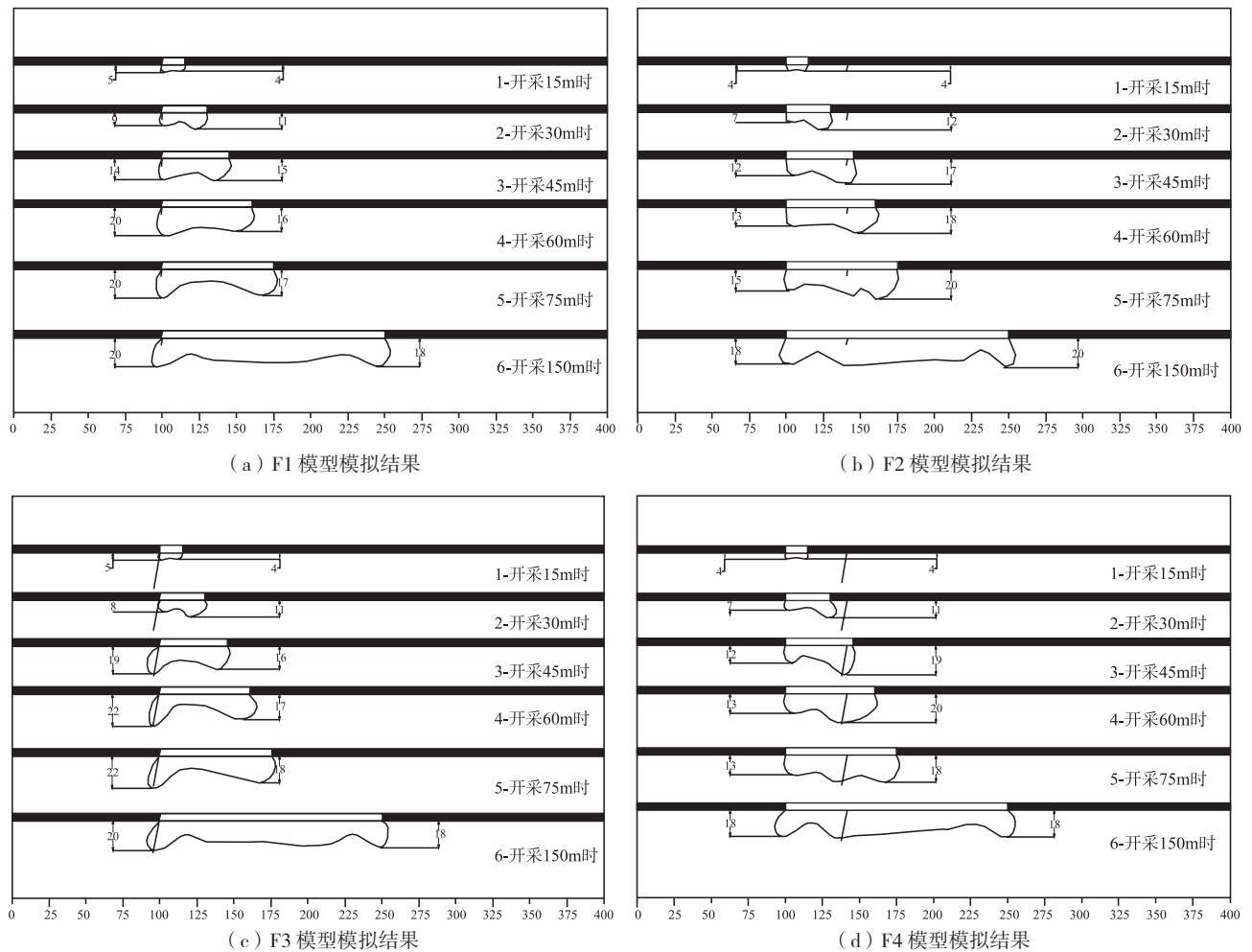


图4 断层影响下底板破坏深度演化图
Fig. 4 Failure evolution of coal seam floor for fault model

表3 断层对底板采动破坏影响模拟结果
Table 3 Modeling results of failure for fault model

模型	断层位置	断裂深度	采动底板最大破坏深度及主要位置					
			开采15m	开采30m	开采45m	开采60m	开采75m	开采150m
F1	煤层开切眼处	10m	5m, 断层处	11m, 煤壁处	15m, 煤壁处	20m, 断层处	20m, 断层处	20m, 断层处
F2	距煤层开切眼40m处	10m	4m, 煤壁处	12m, 断层附近	17m, 断层处	18m, 采空区	20m, 采空区	20m, 煤壁处
F3	煤层开切眼处	20m	5m, 断层处	11m, 煤壁处	19m, 断层处	22m, 断层处	22m, 断层处	20m, 断层处
F4	距煤层开切眼40m处	20m	4m, 煤壁处	11m, 断层附近	19m, 断层处	20m, 断层处	18m, 断层处	18m, 断层处

层开采到30 m时,在附加应力和断层弱面的影响下,底板破坏深度范围在水平和垂直方向上都在扩大。其破坏形状与开采15 m时相似,断层附近的破坏深度增加到9 m,与底板无断层存在相比,破坏深度增加了28.6%,在煤壁处破坏深度为11 m,并已沟通底板 L_{11} — L_8 太灰含水层,构成了突水的威胁。由于断层宽度只有0.5 m,所以还不至于影响煤壁处的破坏深度,只影响断层附近的破坏深度。当工作继续推进,采空区被塌落的上覆岩层所充填,工作面推进到45 m处时,水平方向的破坏范围继续扩大,垂直方向的最大破坏深度与无断层时的破坏深度相同,为15 m,断层处的破坏深度为14 m,由于顶板岩层的塌落充填作用以及断层处于双向受压的弹性区,断层此时对破坏深度没有多大的影响。工作面推进到60 m,75 m和150 m时,底板水平方向的破坏范围继续扩大,最大破坏深度均在断层处。底板最终最大破坏深度为20 m,断层破裂区是突水的主要通道。

F2模型模拟开采到15 m时,最大破坏深度为4 m。当模拟开采到30 m时,底板破坏深度与形状发生了较大变化,在接近断层处底板破坏深度急剧增大,达到12 m,其附近岩层由于断层的存在,水平方向破坏范围增大。当模拟开采到45 m处,工作面跨越断层,底板破坏深度为17 m,相比无断层情况,破坏深度相应增加了13%,此时破裂带已沟通了 L_{11} — L_8 太灰含水层,对煤层底板造成了突水的威胁。当工作面推进到75 m时,破坏深度达到最大值20 m。F3模型开采至15 m,30 m和45 m时,底板最大破坏深度分别为5 m,11 m和19 m,当煤层开采到60 m和75 m时,底板最大破坏深度达到22 m,比无断层时明显增大。F4模型中,工作面推进到60 m处时,底板破坏最大深度达到20 m,最大破坏深度出现在断层处,与无断层相比破坏深度增大了约33%。应力分布表明工作面推过断层15~30 m后,断层的影响逐渐减小,推过50 m后,断层对底板破坏深度基本无影响。

3 工程应用

梁北矿11041工作面走向长563 m,倾斜宽166 m,主要受距煤层底板61.28 m寒武系灰岩含水层突水威胁,且底板裂隙发育,水压为3.5~4.3 MPa,

底板破坏深度18~22 m,11041工作面突水系数为0.076~0.091,大于突水临界值0.06,表明采动条件下寒灰水的水头压力已超出底板的阻水能力,可造成工作面底板突水(刘波等,2007)。为保证该工作面安全回采,梁北矿采用了底板注浆改造工程来增强底板阻水能力。

注浆加固工程从机巷切眼向外30 m处开始施工,平均每隔60 m布置一个钻场,共10个钻场,每个钻场布置3~6个下斜孔,终孔层位在煤层底板破坏范围(煤层垂深20~30 m)和寒武系顶部裂隙带(10~15 m)。底板注浆加固前分别在11041工作面风、机巷进行了瞬变电磁物探,风巷和机巷底板中有多处异常区域,因此,在断层裂隙发育地段钻孔加密,共施工36个钻孔。注浆材料为粘土水泥浆,粘度在25~60 s,注浆终止压力不得低于孔内水压的2.5倍,扩散半径25~30 m,底板注浆改造后又进行了瞬变电磁物探,异常区消失或范围减小,11041工作面安全回采原煤 5.95×10^5 t,未发生突水。之后,梁北矿分别在11111工作面施工97个注浆孔,11151工作面施工66个注浆孔,注浆实施后上述工作面均实现了无突水安全开采。

4 结论

1) 梁北煤矿底板岩层的采动破坏形态总体为“马鞍形”。在无断层条件下,当开采过初次来压后(35 m左右),底板破坏深度急剧增高到11 m,此深度已超过底板直接隔水层的厚度,即已沟通底板 L_{11} — L_8 太灰含水层。当工作面开采到75 m时,底板最大破坏深度达到18 m。

2) 底板断层对底板破坏深度产生重要影响,并且底板破坏深度还与断层的拉裂深度和位置密切相关。断层位于开切眼处,断裂深度为10 m时,其最大破坏深度达20 m。当断裂深度加大到20 m时,其底板破坏深度可达22 m。断层存在使底板破坏深度与无断层情况下相比增加了20%~33%。断层位于采空区中部时,工作面推进至断层前10 m到过断层15 m的范围内,受断层的影响,底板破坏严重,易发生突水事故。推过断层50 m后,断层对工作面的底板破坏深度不再产生影响。

3) 根据采动底板破坏深度的模拟结果,将底板改造的目标层位确定为底板破坏范围和寒武系

顶部岩溶裂隙发育带。对11041, 11111, 11151三个工作面进行了底板注浆改造工程, 注浆后底板防突水能力提高, 实现了工作面的安全回采。

References:

- Duan Shuiyun. 2003. Probe into the calculation formula of coefficient of water bursting from coal seam floor [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, (1): 97–100. (in Chinese with English abstract)
- Feng Qiyang, Yang Tianhong, Yu Qinlei, et al. 2006. Numerical simulation on water-inrush from the seam floor based on the coupled analysis of seepage and damage [J]. *Journal of Safety and Environment*, 6(3): 1–4. (in Chinese with English abstract)
- Han Tanghui. 2007. Karst water prevention and control technology for Ordovician limestone with high pressure water [J]. *Coal Science and Technology*, 35(3): 41–45. (in Chinese with English abstract)
- Li Baiying. 1999. “Down Three Zones” in the prediction of the water inrush from coal seam floor aquifer theory, development and application [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 8(4): 11–18. (in Chinese with English abstract)
- Liu Bo, Feng Qiyang, Meng Lei, et al. 2007. Water Inrush conditions analysis of No. 2 coal seam floor above the Cambrian limestone aquifer in Liangbei coal mine [J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 34(6): 63–66. (in Chinese)
- Peng Suping and Wang Jin'an. 2001. *Safe Coal Mining on the Confined Aquifer* [M]. Beijing: Coal Industry Press. (in Chinese)
- Wang J A and Park H D. 2003. Coal mining above a confined aquifer [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 40(4): 537–551.
- Wu Q, Wang M and Wu X. 2004. Investigations of groundwater bursting into coal mine seam floors from fault zones [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 41(4): 557–571.
- Yang Tianhong, Tang Chun'an, Liu Hongyuan, et al. 2003. Numerical model of the instability-failure process of the coal seam floor due to confined water inrush [J]. *Journal of Geomechanics*, 9(3): 281–288. (in Chinese with English abstract)
- Zhang J and Shen B. 2004. Coal mining under aquifers in China: a case study [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 41(4): 629–639.
- Zhang Jincai, Zhang Yuquan and Liu Tianquan. 1997. *Rock Seepage and Water Inrush from Coal Seam Floor* [M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)

参考文献:

- 段水云. 2003. 煤层底板突水系数计算公式的探讨[J]. *水文地质工程地质*, (1): 97–100.
- 冯启言, 杨天鸿, 于庆磊, 等. 2006. 基于渗流-损伤耦合分析的煤层底板突水过程的数值模拟[J]. *安全与环境学报*, 6(3): 1–4.
- 韩堂惠. 2007. 高压水头下奥灰岩溶水防治技术[J]. *煤炭科学技术*, 35(3): 41–45.
- 李白英. 1999. 预防矿井底板突水的“下三带”理论及其发展与应用[J]. *山东矿业学院学报*, 8(4): 11–18.
- 刘波, 冯启言, 孟磊, 等. 2007. 梁北煤矿二₁煤层底板寒灰突水条件分析[J]. *矿业安全与环保*, 34(6): 63–66.
- 彭苏萍, 王金安. 2001. *承压水体上安全采煤*[M]. 北京: 煤炭工业出版社.
- 杨天鸿, 唐春安, 刘红元, 等. 2003. 承压水底板突水失稳过程的数值模型初探[J]. *地质力学学报*, 9(3): 281–288.
- 张金才, 张玉泉, 刘天泉. 1997. *岩体渗流与煤层底板突水*[M]. 北京: 地质出版社.