

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.02.007

承压水上煤层底板采动效应数值模拟研究

凌力, 曹祚省, 孟森松, 饶迁根

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 针对淮南煤田某矿412采区开采1煤时受承压水的威胁, 从采区的水文地质与工程地质条件出发, 建立数值计算模型, 并利用FLAC数值分析软件对开采过程中煤层底板应力、破坏区及突涌水情况进行分析与评价, 为安全开采提出相应建议。

关键词: 煤层底板; 数值模拟; 承压水; FLAC

中图分类号: TD745

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2013)02-0030-04

Numerical Simulation on Mining Effect of Coal Seam Floor above Confined Aquifers

Ling Li, Cao Zuoxing, Meng Sensong, Rao Qiangen

(School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of the threat of confined water to coal No.1 in 412 mining area of a Huainan coal mine, a numerical calculation model is built according to the area hydrogeology and engineering geology condition. The coal seam floor stress, destruction area and water inrush conditions in mining process are analyzed and appraised through FLAC. The suggestion is presented for the safe mining.

Keywords: coal seam floor; numerical simulation; confined water; FLAC

0 引言

我国煤炭资源的开发受水害威胁严重, 尤其是随着开采深度的增加, 开采速度和开采规模的加大, 来自煤层底部高承压水的危害加剧。因此煤矿底板突水的预测和防范, 是煤矿开采中的难点问题。从最早提出的突水系数理论到“下三带”理论、原位张裂与零位破坏理论以及后来的关键层理论等^[1-2], 许多专家在这一领域做了大量的理论分析^[3]、现场测试、相似材料^[4]和数值模拟^[5-6]分析, 为矿井水的预测与防治工作打下了基础。随着计算机技术的发展, 采用数值模拟来分析特定矿井条件下承压水上采煤工程中底板变形、破坏及突涌水问题具有耗时

少、针对性强等特点。

淮南煤田某矿412采区主采煤层标高为-786 m以下, 是该矿由浅部转入深部开采的首采区, 其拟开采煤层底板隔水层较薄, 受下部太原组灰岩水威胁较大。本文以现有地质条件为依据, 采用FLAC^[7]数值分析软件对该采区在现有工程地质和水文地质条件下开采时, 煤层底板应力、破坏区及突涌水问题进行分析与评价, 为开采工作提出相应建议。

1 412采区概况

412采区主采1号煤层(以下简称1煤), 采区内1煤底板标高为-786~-980 m, 岩层倾向西南, 倾角

收稿日期: 2013-01-05

作者简介: 凌力(1968-), 男, 湖南醴陵人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为岩体力学与工程水文地质,

E-mail: 1119108457@qq.com

为6~9°；底板厚度为17.9~25.5 m，平均21.4 m。岩层从上往下主要由3段组成，见图1。上段为砂质泥岩段，厚度较薄，约2 m，局部缺失；中段为细砂岩段，厚度较大，为1煤底板岩层的主要组成部分，平均厚度为13.5 m；下部为泥岩段，主要由灰黑色泥岩组成，平均厚度为7.8 m。泥岩段以下为太原组灰岩段，灰岩段水量大且与下部奥陶组灰岩水相通，平均水压 $p_w=4.8$ MPa，该层内的承压水对1煤的安全开采构成较大威胁。



图1 1煤底板岩层柱状简图

Fig. 1 Rock column diagram of No.1 coal floor

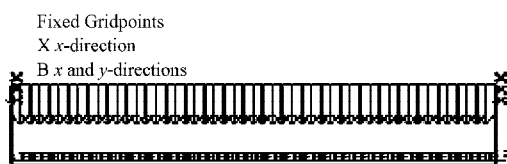
2 计算模型的建立及边界条件

不照搬钻孔揭露的地层情况，又能使所建计算模型尽可能反映矿井现场地质条件，本次412采区1煤底板采动效应数值模拟过程中，对原始条件采用如下假设：

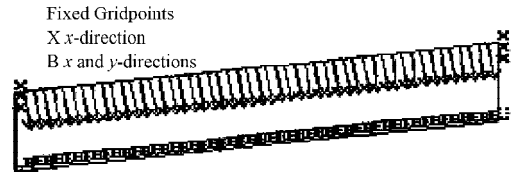
- 1) 采用补偿荷载来代替模型高度上方岩层和第四系松散层；
- 2) 岩组内岩土材料假定为均匀连续介质；
- 3) 采用自重应力场作为原始应力场。

为了使计算模型符合受承压水上采煤工程的问题本质，创建了走向和倾向2类基本平面计算模型。模型内开挖体尺寸小于开挖体边界到模型边界的距离，以消除边界效应。走向模型用来模拟采煤工作面开挖过程中，底板岩体的应力变化情况和底板破坏深度及特征。倾向模型用来模拟工作面切眼及其两侧风、机巷，中部采空区，下部煤层底板岩体的应力变化情况和底板破坏深度及特征。2种模型都选用Mohr-Coulomb塑性本构模型和Mohr-Coulomb屈服准则。

模型边界条件为：模型底部边界采用固定 x, y 方向的全约束边界；模型顶部采用自由边界；模型左、右两侧采用 x 方向固定， y 方向自由边界，具体情况如图2所示。



a) 走向模型



b) 倾向模型

图2 模型的边界条件示意图

Fig. 2 Boundary conditions of the model

3 计算参数的选择

为了使数值模拟过程中岩体物理、力学参数尽可能与现场工程实际相符，采用损伤力学理论^[8]将室内试验得到的岩石物理力学参数经换算修正后作为本次模拟的参数，如表1所示。

表1 1煤顶底板岩体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of No.1 coal roof and floor rock mass

序号	岩石类型	重度 / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 / MPa	泊松比	内聚力 / MPa	内摩擦角 / ($^\circ$)
1	细砂岩	26.5	2 600	0.10	12.7	45.0
2	煤层	14.0	2 000	0.36	2.0	25.0
3	砂质泥岩	26.4	2 130	0.22	6.6	17.0
4	细砂岩	26.2	2 270	0.06	13.8	33.3
5	泥岩	26.5	1 732	0.16	5.4	18.2
6	灰岩	27.5	4 000	0.11	12.0	38.0

4 计算方案与模拟计算过程

在承压水上采煤时，煤层底板的破坏深度和开采前后的底板应力分布特征，是底板水防治工作最关注的内容。本次数值模拟根据412采区水文地质、工程地质条件和开采方案展开，从开切眼开始到采煤工作面不断向前推进过程中，对不同工作面宽度和承压水压力下底板岩体的应力分布和破坏状态进行模拟分析。计算中采用的参数如下：

- 采煤工作面开挖长度为10, 20, 30, 40, 50 m；
- 采煤工作面宽度为30, 60, 90, 120 m；
- 底板承压水压力为4.8 MPa。

根据计算模型的几何尺寸进行网格划分，给对应层位的网格赋予岩体的各项物理力学参数，建立模型并施加荷载，计算过程中初始应力场按如下条件实现：

1) 底板岩体的竖向应力 σ_z 按岩体自重应力($\sigma=\lambda H$)和承压水压力 p_w 确定；

2) 根据现场测量结果，该采区的底板岩体的水平应力 $\sigma_x=4.4$ MPa, $\sigma_y=8.3$ MPa，模型内水平应力的变化量可按泊松效应计算，

$$\Delta\sigma_x = \Delta\sigma_y = 0.242\Delta\sigma_z$$

设定好各参数后即可进行各开采阶段底板岩体的应力场和破坏场研究。

5 模拟计算结果与分析

5.1 底板破坏深度及应力状态

5.1.1 沿走向剖面的模拟结果

沿走向剖面的模拟结果见图3。由图可知，当采煤工作面开挖长度为10, 20, 30, 40, 50 m时，其底板岩体的破坏深度分别为5.2, 7.0, 9.5, 10.0, 10.2 m。由此可见，起初破坏深度随工作面向前推进而不断增大，当采煤工作面开挖长度超过30 m（相当于周期来压）以后，其底板岩体破坏深度相对稳定，维持在10.0 m左右。周期来压时（采煤工作面开挖30 m后），受顶板垮落及充填的影响，底板破坏区没有扩大。

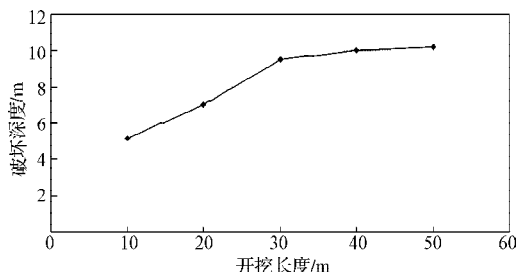


图3 底板破坏深度与工作面开挖长度的关系

Fig. 3 Relationship of floor failure depth and the length of working face excavation

5.1.2 垂直走向剖面的模拟结果

垂直走向剖面的模拟结果见图4。由图可知，当工作面长度为30 m时，其底板岩体破坏深度为8.5 m；当工作面长度为60 m时，其底板岩体破坏深度为11.5 m；当工作面长度为90 m时，除底板岩体破坏深度为14 m外，在承压水上部岩体中还出现高度为2 m的原位张裂破坏区域；当工作面长度为120 m时，其底板破坏深度为15.5 m，原位张裂高度为6.5 m，此时底板已破坏至承压含水层顶面。

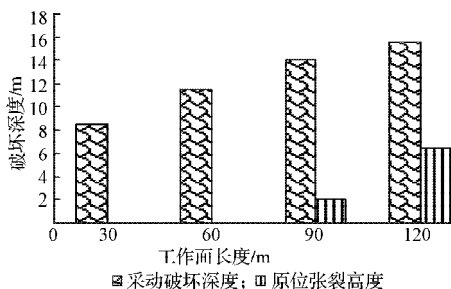


图4 工作面长度与采动破坏深度及原位张裂高度的关系

Fig. 4 Relationship of working face length to breakage depth and in-situ tensile fracture height

5.1.3 顶板初次来压阶段底板岩体应力状态

老顶初次来压发生在采煤工作面开挖长度约为

30 m时。由于初次来压阶段顶板岩体活动较剧烈，导致煤壁附近岩体及工作面支架压力增长很快，支撑压力的增大造成底板岩体破坏加剧，此时易引起煤层底板突涌水。

图5为老顶初次来压阶段煤层底板承压含水层压力 $p_w=4.8$ MPa时，沿煤层走向方向的最小主应力 σ_{min} 的分布情况。

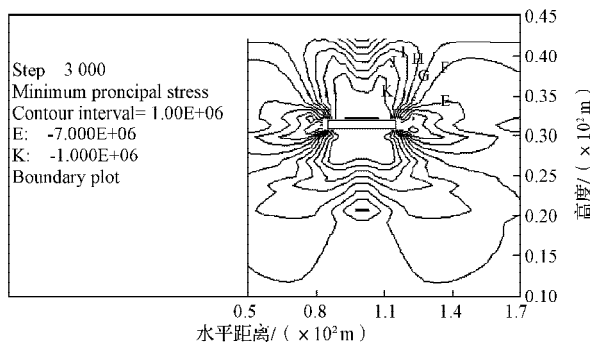


图5 采煤工作面开挖30 m时底板应力分布图

Fig. 5 The distribution diagram of coal floor stress at mining face length of 30 m

由图可知，当工作面开挖长度为30 m时，水平应力在工作面煤壁附近的底板岩体内出现宽约24 m的应力集中区，应力最大值为-13.2 MPa，是原岩应力的1.6倍；工作面后方采空区范围下底板岩体在竖向出现应力降低的现象，采空区和煤壁下方底板岩体内水平最小主应力的变化呈“八”字形，表现为煤壁下方大，采空区下方小的特点。

5.1.4 承压水压力对底板岩层破坏深度的影响

为了研究承压水压力大小对底板破坏深度的影响，当工作面斜长为90 m时，分别讨论水压力 p_w 为0, 3.0, 4.0, 4.8 MPa时底板岩体的破坏情况。当采煤工作面宽度超过90 m时，水压力对底板破坏深度的影响较明显。当 $p_w=3.0$ MPa时，底板岩体内无原位张裂区，随着水压的增大，底板岩体逐渐出现原位张裂区，范围也不断加大，从而导致底板承压水导升带高度增大，有效隔水层厚度减小，如图6所示。

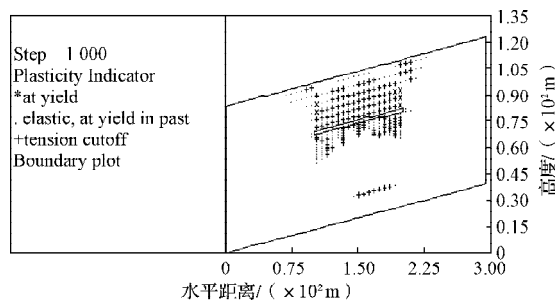


图6 水压力对底板岩体破坏区影响模拟计算结果

Fig. 6 Simulation result of water pressure impact to floor rock mass breakage area

5.2 有效隔水层厚度计算

有效隔水层厚度定义为^[1]

$$h_2 = H - h_1 - h_3 - h_4,$$

式中: H 为底板岩体隔水层总厚度;

h_1 为采动底板破坏带深度;

h_3 为原位张裂带厚度;

h_4 为承压水导升带高度。

H 取 412 采区 1 煤底板岩体平均厚度 21.4 m。由 412 采区高密度电法探测结果可知,在底板岩体内含水异常区存在原始导高,导升带高度为 2~4 m,本次可取平均值 $h_4=3$ m。根据前述数值模拟结果计算有效隔水层厚度,结果见表 2。

表2 不同开采条件下的有效隔水层厚度

Table 2 The effective thickness of water-resisting layer under different mining conditions

工作面宽度 /m	30	60	90	120
有效隔水层厚度 /m	9.867	6.867	2.367	0

由表可知,412 采区在正常情况下仅适宜使用较小工作面宽度,当工作面宽度大于 90 m 后极易引起突涌水。因此,本采区若要使用 90 m 以上的长臂式回采方式开采 1 煤,则须对底板进行注浆加固且经安全评估后方可生产,否则极易引起突水事故。

6 结论

通过对 412 采区承压水上煤层底板采动效应数值模拟结果分析,可得以下结论:

1) 当采煤工作面开挖长度小于 30 m 时,其底板岩体的破坏深度随工作面向前推进而不断增大,超过 30 m 以后,维持在 10 m 左右。

2) 底板破坏深度随工作面长度的增大而增大并出现原位张裂破坏区域。

3) 工作面开挖后,采动应力在工作面煤壁附近出现应力集中区,在工作面后方采空区范围下出现降低的现象。

4) 在其它条件不变的情况下,承压水水压越大,原位张裂高度越大。

5) 正常情况下 412 采区仅适宜使用较小工作面宽度,当工作面宽度大于 90 m 以后极易引起突涌水。

参考文献:

[1] 虎维岳. 矿山水害防治理论与方法[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2005: 30-193.

Hu Weiyue. Mine Water Prevention and Control Theory and Method[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2005: 30-193.

[2] 臧思茂, 张德辉, 李刚. 煤层开采对底板的破坏规律及其水害防治技术[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2011, 30(3): 341-344.

Zang Simao, Zhang Dehui, Li Gang. Failure Characteristics of Floor Result from Mine and Preventive Treatment Technology of Mine Water Disaster[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2011, 30(3): 341-344.

[3] 王学文, 李海梅, 关英斌. 煤层底板采动过程中的应力、应变分析及研究[J]. 煤炭工程, 2003(8): 50-51.

Wang Xuewen, Li Haimei, Guan Yinbin. The Analysis and Research of Stress and Strain in Coal Seam Floor Mining Process[J]. Coal Engineering, 2003(8): 50-51.

[4] 弓培林, 胡耀青, 赵阳升, 等. 带压开采底板变形破坏规律的三维相似模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4396-4402.

Gong Peilin, Hu Yaoqing, Zhao Yangsheng, et al. Three-Dimensional Simulation Study on Law of Deformation and Breakage of Coal Floor on Mining Above Aquifer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4396-4402.

[5] 李运成, 吴基文, 胡雷. 完整水平层状结构底板采动效应研究[J]. 矿业安全与环保, 2006, 33(2): 17-19.

Li Yuncheng, Wu Jiwen, Hu Lei. Research on Mining Effect of Intact and Horizontally-Bedded Floor Stratum[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2006, 33(2): 17-19.

[6] 杨天鸿, 唐春安, 刘红元, 等. 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, 2003, 9(3): 281-288.

Yang Tianhong, Tang Chun'an, Liu Hongyuan, et al. Numerical Model of the Instability-Failure Process of the Coal-Bed Floor Due to Confined Water Inrush[J]. Journal of Geomechanics, 2003, 9(3): 281-288.

[7] 刘波, 韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 1-273.

Liu Bo, Han Yanhui. FLAC Principle, Instance and Application Guide[M]. Beijing: China Communications Press, 2005: 1-273.

[8] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 50-153.

He Manchao, Jing Haihe, Sun Xiaoming. Soft Rock Engineering Mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2003: 50-153.

(责任编辑: 邓光辉)