

文章编号:0253-9993(2007)10-1046-05

# 承压水上采煤断层突水的固流耦合研究

刘志军<sup>1</sup>, 胡耀青<sup>2</sup>

(1. 黑龙江科技学院 资源与环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150027; 2. 太原理工大学 采矿工艺研究所, 山西 太原 030024)

**摘要:** 在理论分析的基础上, 建立了承压水上采煤的固流耦合数学模型, 并编制了有限元程序, 利用该程序用数值模拟的方法, 系统地分析了各断层要素影响下采场的应力分布规律及突水机理, 得出了断层倾角、断层厚度和断层断距与突水的关系; 采用三元线性回归法, 确立了正、逆断层下临界断层防水煤柱宽度与各断层要素的拟合关系式, 给出了突水判据。

**关键词:** 承压水; 断层突水; 固流耦合模型; 数值方法

**中图分类号:** TD745.21      **文献标识码:** A

## Solid-liquid coupling study on water inrush through faults in coal mining above confined aquifer

LIU Zhi-jun<sup>1</sup>, HU Yao-qing<sup>2</sup>

(1. School of Resources and Environment Engineering, Heilongjiang Institute Science and Technology, Harbin 150027, China; 2. Mining Technology Institute, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** The solid-fluid coupling mathematical model for coal mining above confined aquifer was established after theoretical analysis. Based on this, the finite element program was developed. The working face stress distribution and the water inrush mechanism were researched systematically using numerical simulation method. Relation between different conditions of fault dip angle, fault thickness, fault throw and water-inrush was obtained. The fitted formulas between critical width of fault waterproof pillar and major factors in normal fault and reverse fault were established by using ternary linear regression method, and the water inrush criterion was given.

**Key words:** confined aquifer; water inrush through fault; coupling model between flow and solid; numerical method

我国煤田地质条件复杂, 许多煤矿不同程度地受奥灰岩含水层的威胁, 据统计, 大约有 60% 的煤矿不同程度地受到承压水的影响, 受水害的面积和严重程度均居世界各主要产煤国的首位。大量工程实例表明: 承压水的突出绝大多数与断层有直接关系。煤层突水的研究涉及到岩石力学、水动力学、矿山压力、工程地质学及水文地质学等诸多学科<sup>[1,2]</sup>。带压开采断层突水是在矿井工程地质与水文地质条件下, 采掘扰动和奥灰水共同作用的结果, 只有在工程地质、水文地质具备突水的前提下, 采掘活动才有可能诱发突水。所以, 突水是固流耦合作用的结果, 是固体围岩应力场与渗流场在采掘扰动下耦合作用的结果<sup>[3~8]</sup>。笔者依据以上思路, 根据断层产状要素的不同特点, 从固流耦合的角度出发, 建立了针对承压水上采煤的裂隙岩体水力学模型。通过有限元计算, 详细阐述了断层因素对突水的影响关系。

收稿日期: 2006-11-06      责任编辑: 柴海涛

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50434020); 黑龙江省自然科学基金资助项目 (E200610)

作者简介: 刘志军 (1978-), 男, 内蒙古乌盟人, 助教, 硕士研究生. E-mail: nm\_lzjun@163.com

# 1 固流耦合数学模型

## 1.1 基本假设

(1) 岩体是由基质岩块与裂隙组成的结构体，基质岩体可以简化为均质各向同性的弹性体，其应力应变服从广义虎克定律： $\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} e + 2\mu \varepsilon_{ij}$ ，其中， $\sigma_{ij}$  为总应力张量； $\delta_{ij}$  为 Kronecher 记号； $\lambda, \mu$  为拉梅常数； $e$  为体积变形； $\varepsilon_{ij}$  为总应变。(2) 在岩体基质中微段压力梯度上，渗流服从线性达西定律，即  $q = k \frac{\partial p}{\partial x}$ ，其中， $q$  为流量； $k$  为渗透系数； $p$  为水头压力。(3) 含水层被单相水所饱和，且水为不可压缩流体。(4) 裂隙渗流服从裂隙流的达西定律，即  $q = k_f \frac{\partial p}{\partial s}$ ，其中， $k_f = \frac{b^2}{12\mu}$ ； $b$  为裂隙宽度，是水压和应力的函数； $s$  为裂隙切向坐标。(5) 裂隙变形规律服从 Goodman 节理模型，即  $\sigma'_n = k_n \varepsilon_n, \sigma'_s = k_s \varepsilon_s, \sigma'_n = \sigma_n - p$ ，其中， $\sigma'_n, \sigma'_s$  为裂缝法向和切向有效应力； $k_n, k_s$  分别为裂缝法向与切向刚度； $\varepsilon_n, \varepsilon_s$  分别为裂缝法向与切向变形。(6) 围岩固体骨架在流体作用下，有效应力规律遵守修正的太沙基有效应力规律，即  $\sigma_{ij} = \bar{\sigma}_{ij} + ap\delta_{ij}$ ，其中， $a$  为 Biot 系数； $\bar{\sigma}_{ij}$  为围岩固体骨架有效应力张量。

## 1.2 数学模型

根据上述概化的地质模型，用数学方法推导出描述围岩运动变形的基本偏微分方程组，并给出定解条件。

对于基质岩体系统，有

$$K_x \frac{\partial^2 p}{\partial^2 x} + K_y \frac{\partial^2 p}{\partial^2 y} = S \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial e}{\partial t} + W, \tag{1}$$

$$(\lambda + \mu) U_{j,j} + \mu U_{i,ji} + F_i + (ap)_{,i} = 0, \tag{2}$$

式中， $K_x, K_y$  为基质岩体渗透系数； $S$  为贮水系数； $W$  为源汇项； $U_i$  为岩体  $i$  方向的位移； $F_i$  为  $i$  方向的体积应力。

对于裂隙系统，有

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} \left( k_f \frac{\partial p}{\partial s} \right) + W = 0, \tag{3}$$

$$\delta_n = \frac{\sigma_n - p}{k_n} b, \delta_s = \frac{\sigma_s}{k_n} b, \tag{4}$$

$$\sigma_{ij} = \bar{\sigma}_{ij} + ap\delta_{ij}, \tag{5}$$

式中， $\varphi$  为空隙度； $\delta_n$  和  $\delta_s$  分别为裂隙的法向和切向变形。

由式 (1) ~ (5) 和边界条件组成承压水上采煤固流耦合的数学模型，其方程组为

$$\begin{cases} K_x \frac{\partial^2 p}{\partial^2 x} + K_y \frac{\partial^2 p}{\partial^2 y} = S \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial e}{\partial t} + W, \\ (\lambda + \mu) U_{j,j} + \mu U_{i,ji} + F_i + (ap)_{,i} = 0, \\ \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} \left( k_f \frac{\partial p}{\partial s} \right) + W = 0, \\ \delta_n = \frac{\sigma_n - p}{k_n} b, \delta_s = \frac{\sigma_s}{k_n} b, \\ \sigma_{ij} = \bar{\sigma}_{ij} + ap\delta_{ij}. \end{cases}$$

## 2 采动作用下断层产状与突水的关系

采用以上固流耦合数学模型结合有限元计算方法，对不同断层产状要素作用下带压开采进行数值模

拟,其计算模型简化为图1(由于断层为变量,图中未表现),材料力学特性及各层厚度参见文献[9].

### 2.1 边界条件的处理

根据计算区域,边界条件取位移边界条件,当只考虑自重应力时,两侧采用水平方向固定垂直方向自由的边界;底面垂直约束,水平自由;顶面受上覆岩层地应力,在模型上方施加面载荷,模拟处于采场上部的岩层自重,取均布载荷20 MPa,而取下侧含水层为定水头边界条件,水压为3 MPa.

### 2.2 计算方法

根据实验模型,将图1所示的计算模型进行网格自由剖分,开采步距为20 m,即每开采20 m,计算1次围岩应力,接近断层时步距适当缩小,直到断层或底板失稳突水;而在此期间,流场可按时间步长进行多次循环,如每天开采4 m,那么20 m需5 d的时间,按10 h的等步长计算,需计算12次,即围岩应力场计算1次,渗流场计算12次作为1个大循环.为叙述方便,文中断距专指地层断距,而倾角则是断层面与x轴正向的交角.

对断层倾角(30, 45, 60, 120, 135, 150°)、断距(10, 20, 30 m)及断层带厚度(2, 5, 10, 15 m)3个影响因素进行组合,共对72个计算方案进行模拟计算,以下各取1组进行说明.

### 2.3 各断层要素与突水的关系

#### 2.3.1 断层倾角与突水的关系

断层厚度不变(5 m)、断距不变(10 m)的情况下,变化断层倾角(分别取30, 45, 60, 120, 135, 150°模拟对比),得出不同倾角下断层临界失稳时的应力状态(图2),煤柱破坏的临界宽度为29, 21, 12, 22, 27, 29 m. 断层倾角与临界煤柱宽度的关系如图3所示,文中只列出部分模拟图.

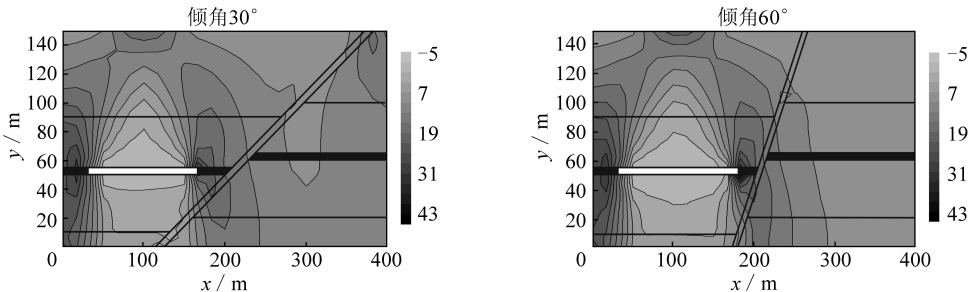


图2 不同倾角破坏临界时 $\sigma_1$ 分布

Fig. 2  $\sigma_1$  distribution in different dip angle of fault when coal pillar critical failure

通过模拟分析可以得出:断层倾角小于90°时,工作面下方煤柱一侧的超前支撑压力与采空区一侧的卸压区之间形成急剧的压力变化带,使得底板在工作面前下方产生破坏;断层带若为导水断层,一旦这一破坏带与下方断层破坏区相交,承压水将从工作面下方涌入,引起突水事故.由图2,3可看出,破坏形式为压破坏.且倾角越大,失稳临界煤柱宽度越小,即断层越不容易突水.

#### 2.3.2 断层厚度与突水的关系

在断层倾角一定(45°)、断距一定(20 m)、断层厚度分别为2, 5, 10, 15 m时,得出不同断层厚度下断层临界失稳时的应力状态(图4),突水临界的煤柱宽度分别为19, 22, 23, 27 m,断层厚度同突水临界煤柱宽度的关系如图5所示.通过模拟分析可得以下

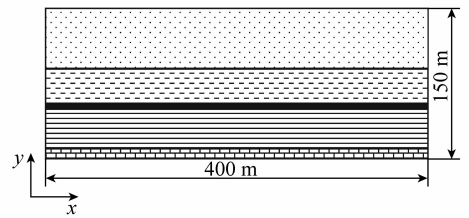


图1 计算模型

Fig. 1 Calculation model

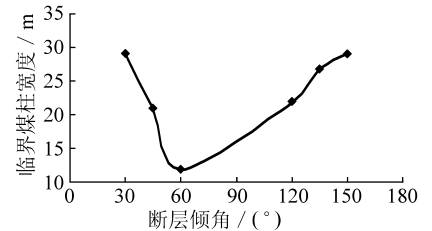


图3 断层倾角与临界煤柱宽度的关系  
Fig. 3 Relation between the dip angle of fault and the critical coal pillar

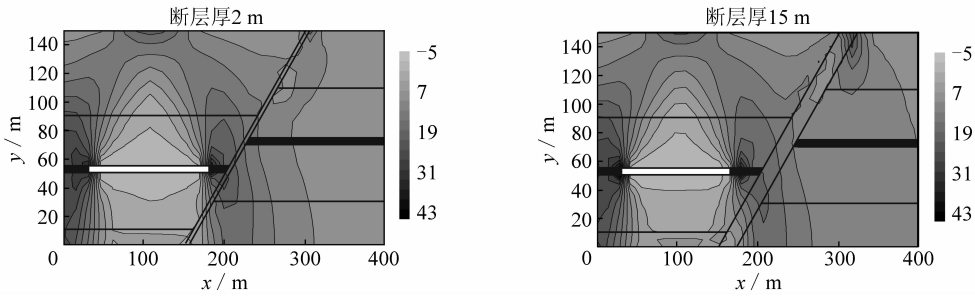


图 4 不同的断层厚度破坏临界  $\sigma_1$  分布

Fig. 4  $\sigma_1$  distribution in different thickness of fault when coal pillar critical failure

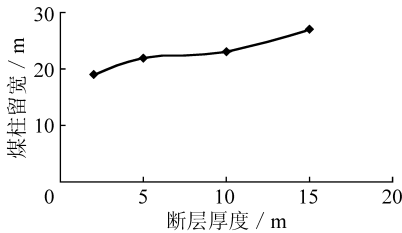


图 5 断层厚度与留宽的关系

Fig. 5 Relation between the thickness of fault and the critical coal pillar

结论：

(1) 由图 5 可知，随着断层厚度的增长，煤柱的临界宽度呈线性增长。随着断层厚度的加大，开挖空间与断层带间的围岩应力集中的范围和岩体破裂范围都明显增大，断层带的“屏蔽”程度增大(图 4)，使底板破裂范围加大，从而形成良好的突水通道，突水几率增大。

(2) 采空区内底板承受垂直向上的静水压力，使底板向采空区内移动，而采场周边岩层承受的是顶部岩层转嫁的垂直向下的压应力，在这对力偶的作用下，采场偏采空区的周边岩层内部产生剪切破坏作用而出现剪切断裂带，当靠近断层弱面时，剪切深度加大，沟通承压水，所以突水点多出现在采场周边附近。

(3) 断层破碎带岩体一般比其两侧的岩体要软弱得多，因而，断层破碎带内的岩体更容易发生变形。断层带的存在阻碍了开挖引起的二次应力的传递，使开挖区与断层带范围内的围岩应力更加集中，集中程度大于无断层时的情况。断层破碎带对围岩采动应力重分布和变形起到了屏障作用。

### 2.3.3 断层断距与突水的关系

在断层倾角一定 ( $30^\circ$ )、断层带厚度一定 (2 m) 的情况下，变化断层断距 (分别取 10, 20, 30 m)，得出不同断距下断层临界失稳时的应力状态 (图 6)，突水临界的煤柱宽度分别为 25, 29, 34 m，断层断距同临界煤柱留设宽度的关系如图 7 所示。因主要影响因素为剪应力作用，以下仅以剪应力变化分析。通过模拟分析可以得出：(1) 随着断层断距的加大，使得所采煤层与下盘承压含水层的距离缩小，承压水沿着较短的破坏区域即可进入工作面。图 7 为断层断距同临界煤柱宽度的关系，说明断距越大，煤柱留设应该越宽，基本呈线性增长。(2) 随断层断距的增大，最大主应力集中范围减小，但集中程度变化不太显著 (甚至会减小)；而突水却变得容易，说明对突水起控制作用的不仅仅是工作面下方主应力的

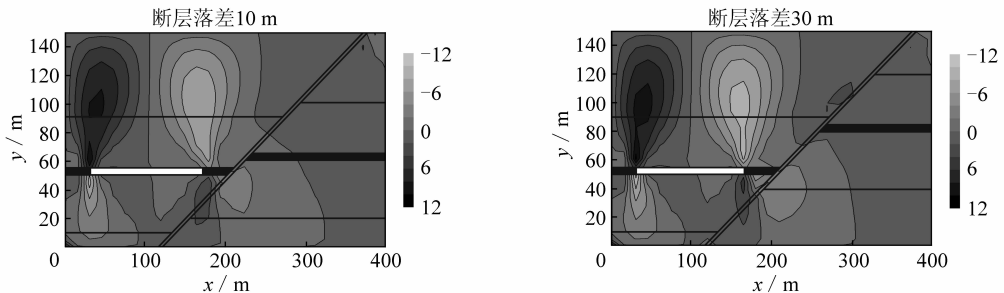


图 6 不同的断层落差破坏临界  $\tau_{xy}$  分布

Fig. 6  $\tau_{xy}$  distribution in different fall of fault when coal pillar critical failure

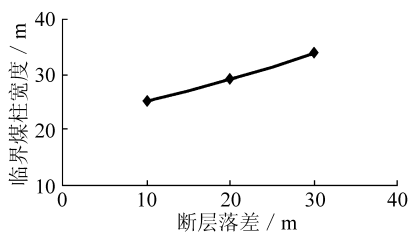


图7 临界煤柱宽度与断层落差的关系

Fig. 7 Relation between the fall of fault and the critical coal pillar

层产生剪切变形和破坏,乃至产生破坏;而随着断层断距增大,应力差也增大,使得变形破坏更加严重,从而发生突水事故。

## 2.4 断层煤柱回归计算

由于断层倾角小于 $90^\circ$ (正断层)时突水是从工作面前方底板,而断层倾角大于 $90^\circ$ (逆断层)时,突水则是由工作面顶板或采空区顶板。其突水机理不同,所服从的关系也不同。采用三元线性回归,对模拟所得结果进行拟合计算可得

$$\tilde{y} = 42.40 - 41.28\sin x + 0.64x_2 + 0.23x_3 \quad (\text{断层倾角小于 } 90^\circ), \quad (6)$$

$$\tilde{y} = 34.74 - 22.40\sin x + 0.61x_2 + 0.37x_3 \quad (\text{断层倾角大于 } 90^\circ), \quad (7)$$

其中, $x$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ 分别为断层倾角、厚度及断距。经检验,其回归效果均是显著的。式(6),(7)即为断层的临界宽度,也即突水判据,在实际应用中,只要根据上式计算出 $\tilde{y}$ 值,如果煤柱的宽度 $\leq \tilde{y}$ ,即发生突水事故,否则不会发生突水事故;在实际采矿过程中,煤柱取值须有一定的安全系数,以确保安全。

## 3 结 语

承压水上采煤问题是一个应力场和渗流场相互作用问题,应该用固流耦合的方法加以解决。本文建立了承压水上采煤的裂隙岩体水力学模型,并编制了有限元程序。通过计算,揭示了承压水上采煤断层突水的影响因素,得出了各断层因素同突水临界煤柱的关系式,为现场断层防水煤柱的合理留设提供了理论依据。

## 参考文献:

- [1] 赵阳升. 矿山岩石流体力学 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994.
- [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.
- [3] 郑少河, 赵阳升, 段康廉. 三维应力作用下天然裂隙渗流规律的实验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18 (2): 133~136.
- [4] 杨 栋, 赵阳升, 段康廉, 等. 广义双重介质岩体水力学模型及有限元模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19 (2): 182~185.
- [5] 郑少河, 朱维申, 赵阳升. 复杂裂隙岩体水力学模型的研究 [J]. 人民长江, 1999, 30 (9): 31~33.
- [6] 杨 栋, 赵阳升. 裂隙状采场底板固流耦合作用的数值模拟 [J]. 煤炭学报, 1998, 23 (1): 27~41.
- [7] 赵阳升, 段康廉, 胡耀青, 等. 块裂介质岩石流体力学研究新进展 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 1999, 18 (5): 459~462.
- [8] 王 媛, 徐志英, 速宝玉. 复杂裂隙岩体渗流与应力弹塑性全耦合分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19 (2): 177~181.
- [9] 刘志军. 承压水上采煤断层失稳突水的研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2004.