

断层倾角对断层活化及底板突水的影响研究

卜万奎, 茅献彪

(中国矿业大学 理学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 针对含断层缺陷底板的受力特征, 建立相应的简化力学模型, 分析得到断层面上剪切应力和法向应力表达式, 并研究断层倾角对断层面上剪切应力、法向应力及断层活化的影响规律。同时运用 RFPA^{2D}-Flow 软件, 模拟不同倾角的正断层在采动影响下底板的裂隙分布、渗流分布及采空区底板涌水量变化特征。模拟结果在一定程度上揭示含断层构造底板突水通道的形成机制及断层倾角对底板突水的影响规律。研究表明, 断层倾角越大, 断层越容易活化与突水。研究结果对采场底板含断层缺陷时防水煤柱的留设具有重要的参考价值。

关键词: 采矿工程; 断层倾角; 断层活化; 突水

中图分类号: TD 163; P 64

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)02 - 0386 - 09

RESEARCH ON EFFECT OF FAULT DIP ON FAULT ACTIVATION AND WATER INRUSH OF COAL FLOOR

BU Wankui, MAO Xianbiao

(School of Sciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: According to the stress characteristics of coal floor with faults, corresponding simplified mechanical model is built to obtain the equations of shear stress and normal stress on the fault, as well as the influential rules of fault dip on shear stress, normal stress and fault activation. At the same time, under the circumstances of different normal fault dips, the fracture distributions and seepage distribution of coal floor as well as the variation characteristics of inflow quantity of coal floor in the mined area are simulated with mining carried out by using the RFPA^{2D}-Flow software. The numerical simulation reveals the formation principle of water inrush channel in coal floor with fault structure as well as influential rule of fault dip on water inrush in coal floor. Overall, the results indicate that normal faults with low dip angles are more easily activated to induce water inrush in coal floor, which has an important value in the case of coal floor with faults when waterproof coal pillars are needed.

Key words: mining engineering; fault dip; fault activation; water inrush

1 引言

矿井突水是与瓦斯突出、顶板来压等并列的煤矿开采中的重大灾害之一。近年来, 随着煤矿开采不断向深部延伸及开采强度的日益加大, 煤矿突水

事故发生的频度显著增加。矿井突水事故的原因较多, 但研究表明, 煤矿采场工作面底板突水事故的 79.5% 是发生在具有断层等构造缺陷的底板中^[1]。有关煤矿断层突水机制的研究, 前人已经做了很多工作^[2~11], 为我国煤矿安全状况的改善起到了重要作用。

收稿日期: 2008 - 09 - 10; **修回日期:** 2008 - 12 - 30

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB209400); 国家自然科学基金重点项目(50634050); 高等学校学科创新引智计划(B07028)

作者简介: 卜万奎(1981 -), 男, 2004年毕业于中国矿业大学工程力学专业, 现为博士研究生, 主要从事采动岩体力学与工程方面的研究工作。E-mail: bwk239@126.com

一般地, 在开采正断层上盘煤层时更容易发生突水^[12], 断层活化突水的影响因素众多, 断层倾角是引起突水的主要原因之一^[13]。因此, 本文就断层倾角这一因素对正断层活化及突水的影响进行研究, 以期对断层突水机制有进一步认识及对煤矿安全生产有进一步提高。

2 断层倾角对断层活化机制的力学分析

2.1 断层活化机制的力学分析

煤层开采之前, 岩体处于原始应力的平衡状态下; 而煤层开采后, 处于自然平衡状态的应力场将发生改变, 原岩应力重新分布, 工作面围岩出现应力集中现象。根据矿山压力控制理论^[14]或岩层控制的关键层理论^[15], 在采场推进方向上, 煤层底板支撑压力峰值在工作面煤壁前方和切眼煤壁后方一定距离内, 而采空区底板由于垮落岩体被压实, 其支撑压力逐渐恢复到原岩应力值 γH , 如图 1 所示。

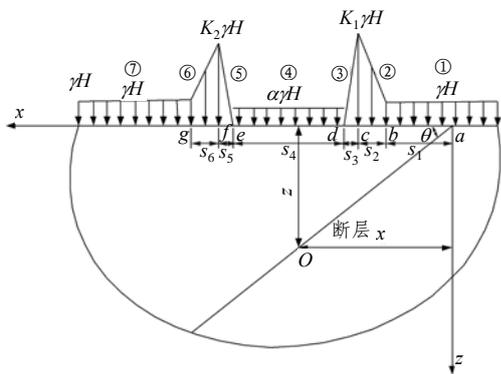


图 1 断层活化机制分析的力学模型

Fig.1 Mechanical model for analysis of fault activation principle

对于长壁开采工作面, 沿工作面推进方向取采场中部围岩体为研究对象, 可近似视其为平面应变问题。假定采场底板岩体为弹性岩体, 采场底板支撑压力如图 1 所示, 其中: ①, ⑦区域为原岩应力分布区, 视为均布载荷; 应力增高区中的应力简化为线性增加(③, ⑤区域); 应力降低区中的应力简化为线性降低(②, ⑥区域); 采空区中由于岩体被压实而作用在底板上载荷简化为均布载荷(④区域), 为原岩应力的 α 倍(取 $\alpha = 0 \sim 1$)。设断层面与 x 轴正向夹角为 θ ; 工作面位于点 d 处, 工作面前方

应力集中系数为 K_1 , 应力峰值点在底板上投影为点 c , 工作面前方应力降低区中降低到原岩应力的点在底板上投影为点 b ; 开切眼位于点 e , 开切眼后方应力集中系数为 K_2 , 应力峰值点在底板上投影为点 f , 开切眼后方应力降低区中降低到原岩应力的点在底板上的投影为点 g ; 断层与煤层的交于点 a 。 ab, bc, cd, de, ef 及 fg 的距离分别为 S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 及 S_6 。断层面上任意一点 O 坐标为 (z, x) 。

根据弹性理论中半平面体边界上受法向分布力的应力分析, 经推导得出作用在采场底板的支撑压力(①~⑦区域)对断层面上任意一点 O 引起的 σ_z , σ_x 和 τ_{zx} 表达式为

$$\begin{aligned} \sigma_z = & \frac{q_0 z(x_b - x)}{\pi[z^2 + (x - x_b)^2]} + \frac{q_0 \arctan[(x_b - x)/z]}{\pi} + q_0 + \\ & \frac{q_0 z [(K_1 - 1)(x - x_b) + S_2] \xi}{\pi S_2 [z^2 + (x - \xi)^2]} \Big|_{x_b}^{x_c} + \\ & \frac{q_0 z [x_b(K_1 - 1) - S_2]x - (K_1 - 1)(z^2 + x^2)}{\pi S_2 [z^2 + (x - \xi)^2]} \Big|_{x_b}^{x_c} + \\ & \frac{q_0}{\pi S_2} \arctan\left(\frac{\xi - x}{z}\right) [(K_1 - 1)(x - x_b) + S_2] \Big|_{x_b}^{x_c} + \\ & \frac{K_1 q_0 z (x_d - x)\xi - x_d x + (x^2 + z^2)}{\pi S_3 [z^2 + (x - \xi)^2]} \Big|_{x_c}^{x_d} + \\ & \frac{K_1 q_0}{\pi S_3} (x_d - x) \arctan\left(\frac{\xi - x}{z}\right) \Big|_{x_c}^{x_d} + \\ & \frac{\alpha q_0}{\pi} \left[\frac{z(\xi - x)}{z^2 + (x - \xi)^2} + \arctan\left(\frac{\xi - x}{z}\right) \right] \Big|_{x_d}^{x_e} + \\ & \frac{K_2 q_0 z (x - x_e)\xi + x_e x - (x^2 + z^2)}{\pi S_5 [z^2 + (x - \xi)^2]} \Big|_{x_e}^{x_f} + \\ & \frac{K_2 q_0}{\pi S_5} (x - x_e) \arctan\left(\frac{\xi - x}{z}\right) \Big|_{x_e}^{x_f} + \\ & \frac{q_0 z [(K_2 - 1)(x_g - x) + S_6] \xi}{\pi S_6 [z^2 + (x - \xi)^2]} \Big|_{x_f}^{x_g} - \\ & \frac{q_0 z [x_g(K_2 - 1) + S_6]x - (K_2 - 1)(z^2 + x^2)}{\pi S_6 [z^2 + (x - \xi)^2]} \Big|_{x_f}^{x_g} + \\ & \frac{q_0}{\pi S_6} [(K_2 - 1)(x_g - x) + S_6] \arctan\left(\frac{\xi - x}{z}\right) \Big|_{x_f}^{x_g} - \end{aligned}$$

$$\frac{q_0 z(x_g - x)}{\pi[z^2 + (x - x_g)^2]} - \frac{q_0 \arctan[(x_g - x)/z]}{\pi} \quad (1)$$

$$\sigma_x = \frac{q_0 z(x - x_b)}{\pi[z^2 + (x - x_b)^2]} + \frac{q_0 \arctan[(x_b - x)/z]}{\pi} + q_0 +$$

$$\frac{q_0 z}{\pi S_2} \ln[z^2 + (x - \xi)^2] \Big|_{x_b}^{x_c} +$$

$$\frac{q_0}{\pi S_2} \arctan\left(\frac{\xi - x}{z}\right) [(K_1 - 1)(x - x_b) + S_2] \Big|_{x_b}^{x_c} -$$

$$\frac{q_0 z}{\pi S_2} \frac{[(K_1 - 1)(x - x_b) + S_2] \xi}{z^2 + (\xi - x)^2} \Big|_{x_b}^{x_c} +$$

$$\frac{q_0 z}{\pi S_2} \frac{x[S_2 - (K_1 - 1)x_b] + (x^2 + z^2)(K_1 - 1)}{z^2 + (\xi - x)^2} \Big|_{x_b}^{x_c} -$$

$$\frac{K_1 q_0 z}{\pi S_3} \ln[z^2 + (x - \xi)^2] \Big|_{x_c}^{x_d} +$$

$$\frac{K_1 q_0}{\pi S_3} (x_d - x) \arctan\left(\frac{\xi - x}{z}\right) \Big|_{x_c}^{x_d} -$$

$$\frac{K_1 q_0 z}{\pi S_3} \frac{(x_d - x)\xi - x_d x + (x^2 + z^2)}{z^2 + (x - \xi)^2} \Big|_{x_c}^{x_d} +$$

$$\frac{\alpha q_0}{\pi} \left[\frac{z(x - \xi)}{z^2 + (x - \xi)^2} + \arctan\left(\frac{\xi - x}{z}\right) \right] \Big|_{x_d}^{x_e} +$$

$$\frac{K_2 q_0 z}{\pi S_5} \ln[z^2 + (x - \xi)^2] \Big|_{x_e}^{x_f} +$$

$$\frac{K_2 q_0}{\pi S_5} (x - x_e) \arctan\left(\frac{\xi - x}{z}\right) \Big|_{x_e}^{x_f} +$$

$$\frac{K_2 q_0 z}{\pi S_5} \frac{(x_e - x)\xi - x_e x + (x^2 + z^2)}{z^2 + (x - \xi)^2} \Big|_{x_e}^{x_f} -$$

$$\frac{q_0 z}{\pi S_6} (K_2 - 1) \ln[z^2 + (x - \xi)^2] \Big|_{x_f}^{x_g} +$$

$$\frac{q_0}{\pi S_6} [(K_2 - 1)(x_g - x) + S_6] \arctan\left(\frac{\xi - x}{z}\right) \Big|_{x_f}^{x_g} +$$

$$\frac{q_0 z}{\pi S_6} \frac{[(K_2 - 1)(x - x_g) - S_6] \xi}{z^2 + (x - \xi)^2} \Big|_{x_f}^{x_g} +$$

$$\frac{q_0 z}{\pi S_6} \frac{x[S_6 + (K_2 - 1)x_g] - (x^2 + z^2)(K_2 - 1)}{z^2 + (x - \xi)^2} \Big|_{x_f}^{x_g} -$$

$$\frac{q_0 z(x - x_g)}{\pi[z^2 + (x - x_g)^2]} - \frac{q_0 \arctan[(x_g - x)/z]}{\pi} \quad (2)$$

$$\tau_{zx} = \frac{q_0 z^2}{\pi[z^2 + (x - x_b)^2]} - \frac{q_0 z}{\pi S_2} \arctan\left(\frac{\xi - x}{z}\right) (K_1 - 1) \Big|_{x_b}^{x_c} +$$

$$\frac{q_0 z^2}{\pi S_2 [z^2 + (x - \xi)^2]} [(K_1 - 1)(\xi - x_b) + S_2] \Big|_{x_b}^{x_c} + \frac{K_1 q_0 z}{\pi S_3} \cdot$$

$$\left[\arctan\left(\frac{\xi - x}{z}\right) + z \frac{x_d - \xi}{z^2 + (x - \xi)^2} \right] \Big|_{x_c}^{x_d} +$$

$$\frac{\alpha q_0}{\pi} \frac{z^2}{z^2 + (x - \xi)^2} \Big|_{x_d}^{x_e} +$$

$$\frac{K_2 q_0 z}{\pi S_5} \left[z \frac{\xi - x_e}{z^2 + (x - \xi)^2} - \arctan\left(\frac{\xi - x}{z}\right) \right] \Big|_{x_e}^{x_f} +$$

$$\frac{q_0 z}{\pi S_6} (K_2 - 1) \arctan\left(\frac{\xi - x}{z}\right) \Big|_{x_f}^{x_g} +$$

$$\frac{q_0 z^2 (x_g - \xi)(K_2 - 1) + S_6}{\pi S_6} \frac{z^2}{z^2 + (x - \xi)^2} \Big|_{x_f}^{x_g} - \frac{q_0 z^2}{\pi[z^2 + (x - x_g)^2]} \quad (3)$$

式中： q_0 为底板垂直方向上的原岩应力， ξ 为变量。

由此可以得到支撑压力作用下断层面上法向应力和剪应力分别为

$$\sigma_N = \sigma_x \sin^2 \theta + \sigma_z \cos^2 \theta + 2\tau_{zx} \sin \theta \cos \theta \quad (4)$$

$$\tau_N = (\sigma_z - \sigma_x) \sin \theta \cos \theta + \tau_{zx} (\sin^2 \theta - \cos^2 \theta) \quad (5)$$

2.2 断层倾角对断层活化的影响

由于式(4), (5)不易化简, 因此, 采用软件编程将其数值化。考虑到采场底板断层岩石为脆性材料, 断层活化过程实际上是断层的开采盘沿断层面产生剪切运动的过程, 其破坏符合压剪破坏机制。因此, 研究断层倾角对断层面上剪应力、法向应力的影响, 即可分析对断层活化的影响。

如图 1 所示, 对于正断层而言, θ 即为断层倾角。因此, 研究断层倾角对断层面上剪应力、法向应力的影响, 即为 θ 取值不同的情况。煤层埋深 $H = 800$ m, 岩层重度 $\gamma = 24.53$ kN/m³, $S_1 = 50$ m, $S_2 = S_6 = 20$ m, $S_4 = 70$ m, $S_3 = S_5 = 10$ m, $K_1 = 3.5$, $K_2 = 2.5$, $\alpha = 0.8$, $z = 0 \sim 150$ m, 而 θ 分别取 25° , 35° , 45° , 55° , 65° , 75° 及 85° 。计算得到断层倾角不同时正断面上的剪应力和法向应力分布, 见图 2, 3。其中图 2 为断层倾角不同时断面上的剪应力分布。图 3 为断层倾角不同时断面上的法向应力分布。

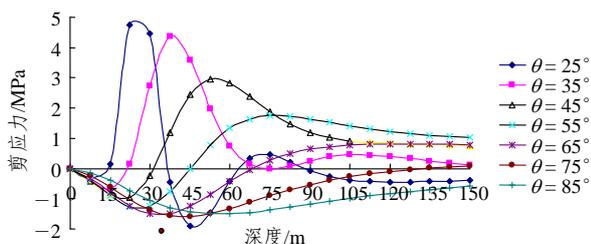


图 2 断层倾角不同时断层面上的剪应力分布

Fig.2 Shear stress distribution on fault with different fault dips

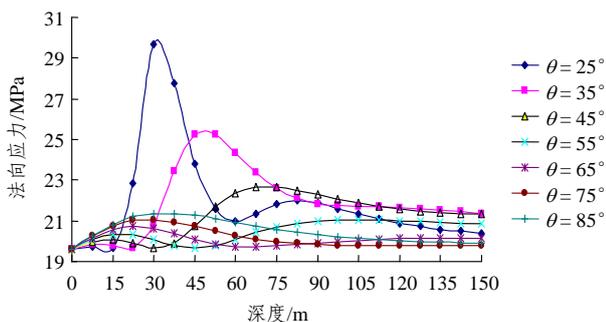


图 3 断层倾角不同时断层面上的法向应力分布

Fig.3 Normal stress distribution on fault with different fault dips

从图 2 可以得出:

(1) 断层倾角越小, 断层面上的剪应力正负交替变化越剧烈。例如 $\theta = 25^\circ$ 时, 深度在 $0 \sim 15$ m 范围内的断层面上剪应力在 $-0.3 \sim 0.0$ MPa 之间变化; 深度在 $15 \sim 35$ m 范围内的断层面上剪应力为 $0 \sim 4.8$ MPa; 而深度在 $35 \sim 60$ m 范围内的断层面上剪应力又为负值; 深度在 $60 \sim 90$ m 范围内的断层面上剪应力却又为正值。

(2) 随着断层倾角的不断增大, 断层面上剪应力变化程度减缓, 而且剪应力峰值也不断减小, 并且剪应力峰值不断向深部移动的趋势。例如 $\theta = 25^\circ$ 时, 剪应力峰值为 4.8 MPa, 剪应力峰值位置在深度为 22.5 m 处; 而 $\theta = 85^\circ$ 时, 剪应力峰值为 -1.5 MPa, 剪应力峰值位置在深度为 50 m 处。

采动条件下, 小倾角正断层在正负交替、峰值较大的剪应力作用下, 产生 2 种结果: ① 断层带内及断层带附近原有裂隙发展; ② 断层带内及断层带附近可能导致新的剪切裂隙产生。这说明相对于大倾角断层来说, 小倾角断层易使正断层带活化, 进而造成突水。

从图 3 可以得出:

(1) 断层倾角越小, 断层面上的法应力变化越剧烈。例如 $\theta = 25^\circ$ 时, 深度在 $0 \sim 15$ m 范围内的断

层面上法向应力变化不明显; 深度在 $15 \sim 60$ m 范围内断层面上法向应力明显增大, 最大为 29.7 MPa; 而深度在 $60 \sim 150$ m 范围内的断层面上法向应力却增幅不大。

(2) 随着断层倾角的不断增大, 断层面上法向应力分布逐渐趋于均匀, 而其峰值不断减小。例如: $\theta = 25^\circ$ 时, 法向应力峰值为 29.7 MPa; $\theta = 85^\circ$ 时, 法向应力峰值仅为 21.3 MPa。

由于正断层属于张性断层, 断层带内破碎岩石松散, 其强度较弱, 其值大约只有正常值的 30% 左右, 容易产生压剪破坏。而小倾角正断层相对于大倾角正断层来说, 在采动影响下断层面上法向应力增幅较大, 法向应力值较大, 故小倾角正断层容易发生压缩破坏, 易形成导水裂隙带, 进而导致透水性增大。由此说明小倾角正断层比较容易活化突水。

3 断层的倾角对断层突水影响的数值模拟

在采动影响下, 断层活化使得断层上、下盘之间由“黏接”状态转化为“断开”状态, 从而为断层成为突水通道提供了条件, 但是断层活化并不是断层成为突水通道的充分条件, 断层成为突水通道的充分条件是断层面中的裂隙张开并连通。这里采用 RFPFA^{2D}-Flow 软件研究正断层倾角对采场底板突水的影响。RFPFA^{2D}-Flow 是一个渗流与应力耦合分析系统, 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, 可以很好地模拟裂隙的萌生、扩展及贯通的过程^[16~22]。

3.1 数值计算模型

采用二维平面应变模型, 水平方向取 500 m, 垂直方向取 200 m, 共 500×200 个单元。模型左、右两侧为水平方向位移约束, 模型底部为铅垂方向位移约束; 含水层左右两侧施加 6 MPa 水压力。因本文重点研究采动条件下采场底板裂隙分布及渗流特性, 所以将距离上盘煤层 95 m 以上直至地表的上覆岩层等效为一重块(简称“等效块”), 厚 20 m, 其质量由上覆岩层厚度及密度来确定, 为了避免等效块对计算结果的影响, 其抗压强度人为增大至 200 MPa。模拟开采正断层上盘煤层, 开挖步距为 5 m, 垮落法顶板管理。根据断层倾角的取值, 建立 8 个数值计算模型(见图 4)。岩层物理力学参数见表 1。

3.2 数值模拟结果

3.2.1 底板破坏与裂隙分布特征

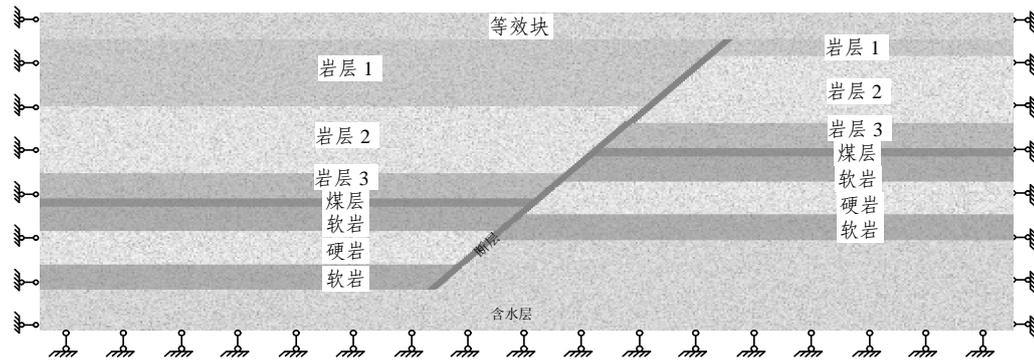


图 4 数值计算模型(断层倾角为 45° 的情况)

Fig.4 Numerical calculation model(a case of fault dip of 45°)

表 1 岩层物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of rocks

岩性	弹性模量/GPa	抗压强度/MPa	泊松比	密度/(g · cm ⁻³)	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	渗透系数/(m · min ⁻¹)	孔隙率
等效块	35	200	0.25	0.8	35	50	6.94 × 10 ⁻⁶	0.01
岩层 1	30	35	0.28	2.4	34	25	6.94 × 10 ⁻⁶	0.01
岩层 2	40	50	0.25	2.5	36	30	6.94 × 10 ⁻⁶	0.05
岩层 3	25	20	0.30	2.3	32	20	6.94 × 10 ⁻⁶	0.03
煤	10	15	0.32	1.4	30	10	2.50 × 10 ⁻²	0.06
软岩	20	25	0.30	2.2	32	18	6.94 × 10 ⁻⁵	0.01
硬岩	40	40	0.25	2.5	38	30	3.47 × 10 ⁻⁴	0.05
软岩	20	25	0.30	2.2	32	18	6.94 × 10 ⁻⁵	0.01
含水层	35	35	0.25	2.4	38	30	6.94 × 10 ⁻²	0.20
断层	5	5	0.35	2.0	15	1	6.94 × 10 ⁻⁴	0.10

煤层开采前，煤层底板岩层中存在着原生裂隙结构面，它们相互交错、杂乱无章的分布，破坏了岩体的完整性。当煤层开采后，在支撑压力作用下，原岩裂隙结构面产生不同程度的扩张、延展，新裂隙的产生及断层带、断层带附近的岩体中裂隙的“活化”，一旦底板产生具有连通性的裂隙结构面与承压含水层相接，承压水便由底板进入工作面，发生突水。

图 5 为采动条件下断层倾角不同时底板破坏及裂隙分布图，图中黑色部分表示裂隙，从图 5 可以得出：

(1) 采动过程中，正断层底板软岩和硬岩均会发生破坏，产生裂隙。如果说软岩的破坏使得底板失去了隔水性能，那么硬岩的破断则使得底板失去了承载能力，两者同时破坏时就使得隔水关键层^[23]失去阻水能力。另一方面，由于断层在采动影响下产生活化，与此同时，含水层中承压水对断层带有软化、水楔及冲刷侵蚀作用，导致切入到含水层中的断层容易产生破坏。

(2) 在其他条件相同的情况下，小倾角正断层较容易产生贯通的裂隙。例如断层倾角为 25°时，采场推进 75 m 时就产生了明显的贯通底板、断层和含水层的裂隙。而断层倾角为 85°时，却在采场推进 110 m 时出现上述贯通裂隙。需要说明的是，在所显示的裂隙分布图中，由于对破坏单元的处理方式问题，使有些覆岩垮落的块体在没有接触或压实情况下，图示只是被简单地描黑处理。

3.2.2 底板渗流分布特征

图 6 为采动条件下断层倾角不同时底板渗流分布及相应的底板垂直渗流速度曲线图，由此可以得出：

(1) 采动影响下，由于含有断层构造的底板产生了贯通底板、断层和含水层的裂隙，渗流不可避免地以绝对优势发生在这些贯通的裂隙中，承压水沿贯通裂隙不断渗透软化并凭借势能由此逐渐渗出到煤层底板。由于断层是岩体内最大的软弱面，在其影响带内，岩石破碎、松散，特别是正断层，挤

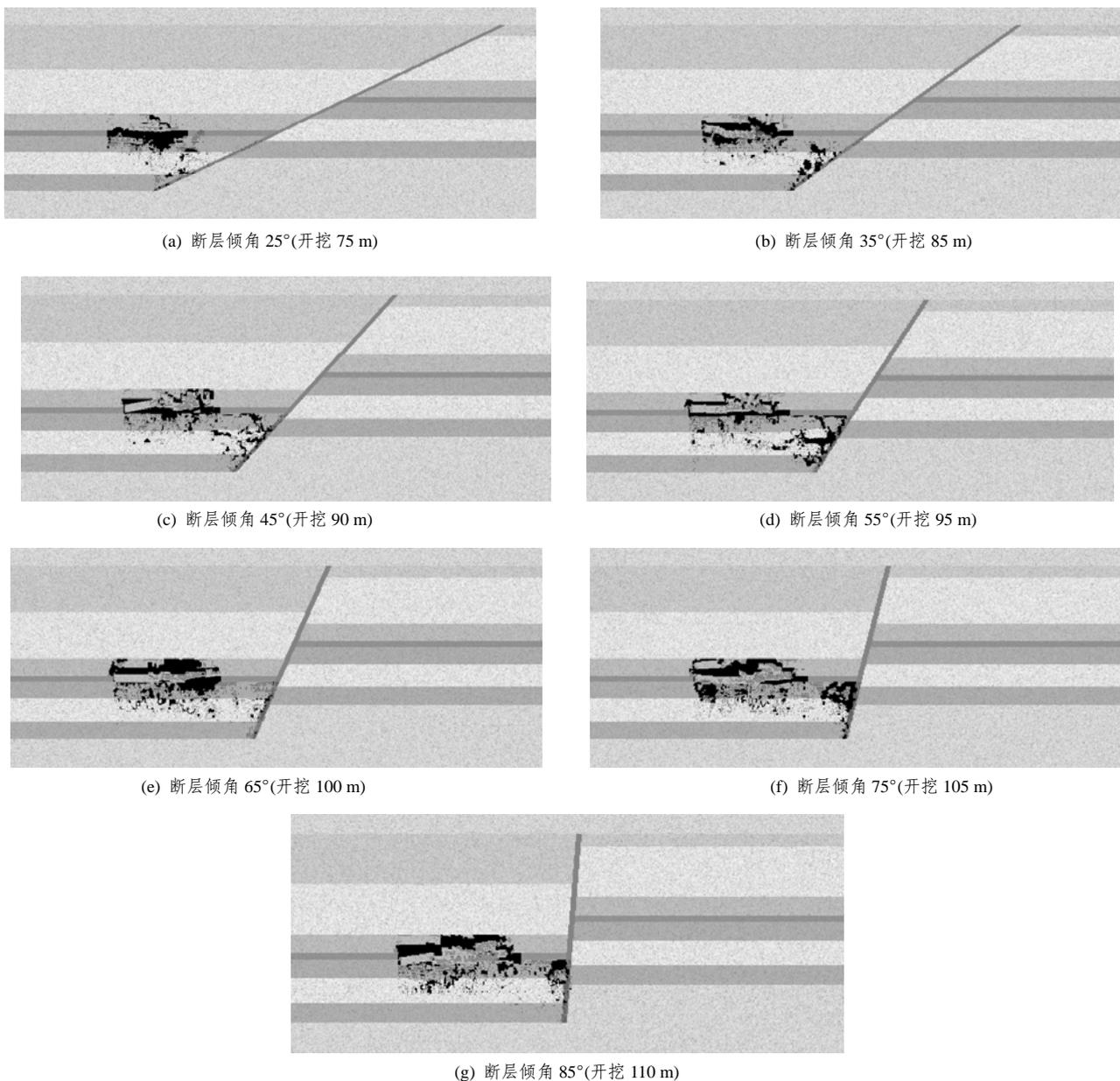


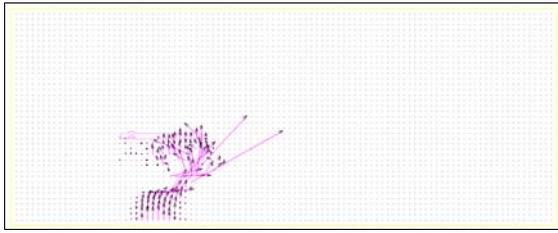
图 5 底板破坏及裂隙分布图
 Fig.5 Failure and fractures distribution of coal floor

压程度低, 张开性好。一旦断层裂隙中有承压水渗流时, 其渗流速度将会发生突变。

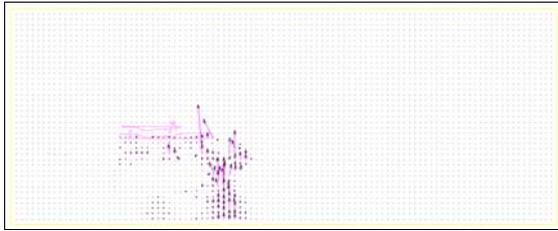
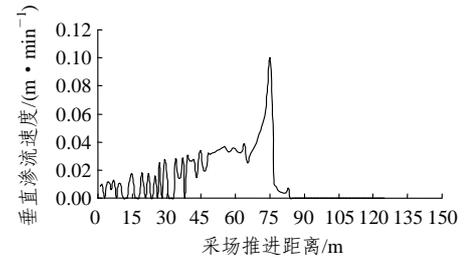
(2) 对于小倾角正断层, 底板渗流主要集中在工作面下方, 而对于大倾角正断层, 底板渗流不仅集中在工作面下方, 在采空区中部也有明显渗流。这是由于小倾角的正断层在较短的推进距离下就产生贯通含水层的裂隙, 且这些裂隙主要分布在工作面下方, 承压水只能沿这一通道流动。对于大倾角的正断层来说, 由于采场推进距离较远, 一方面由于底板破坏深度和范围增加, 另一方面由于承压水对底板的渗流软化及冲刷作用, 煤层底板逐渐形成

一个新的导水通道。

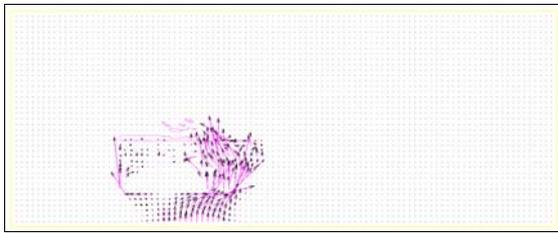
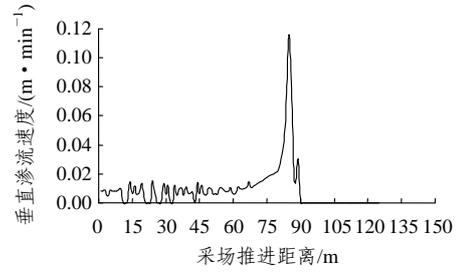
图 7 为断层倾角不同时, 采空区底板随采场推进距离涌水量。从图 7 可以看出, 在开挖初期, 由于工作面距离断层较远, 煤层底板没有形成贯通的导水通道, 底板总涌水量非常小, 不构成突水危险。随着采场的推进, 裂隙的发展、贯通, 底板隔水能力的丧失, 总涌水量迅速增加, 当总涌水量超过 $1.00 \text{ m}^3/\text{min}$ 时, 底板就由原来的渗水变为突水。如断层倾角为 25° 时, 工作面推进 75 m 时, 底板总渗流量达到了 $1.97 \text{ m}^3/\text{min}$, 即此时发生了突水; 对于大倾角的正断层而言, 发生突水的推进距离要远



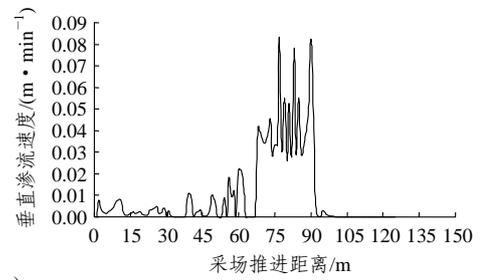
(a) 断层倾角 25°(开挖 75 m)



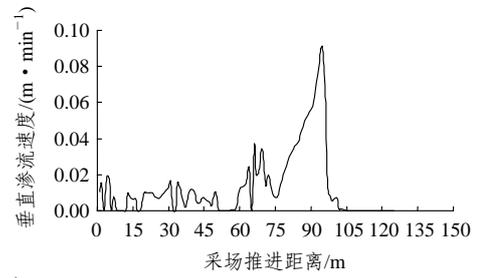
(b) 断层倾角 35°(开挖 85 m)



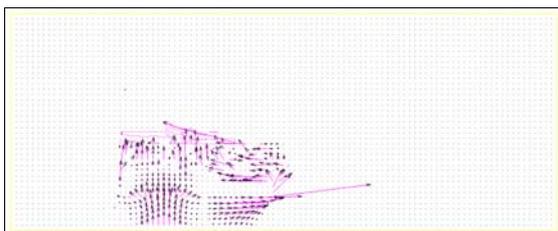
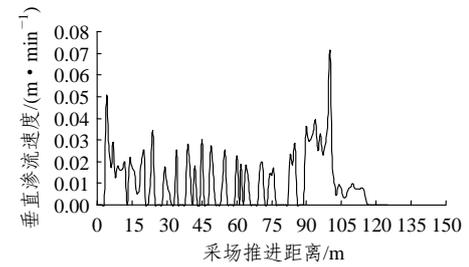
(c) 断层倾角 45°(开挖 90 m)



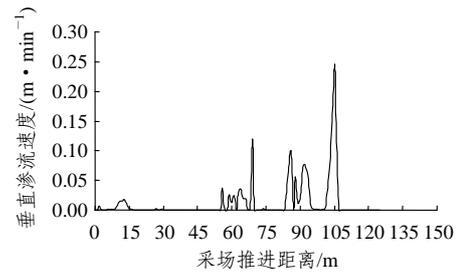
(d) 断层倾角 55°(开挖 95 m)



(e) 断层倾角 65°(开挖 100 m)



(f) 断层倾角 75°(开挖 105 m)



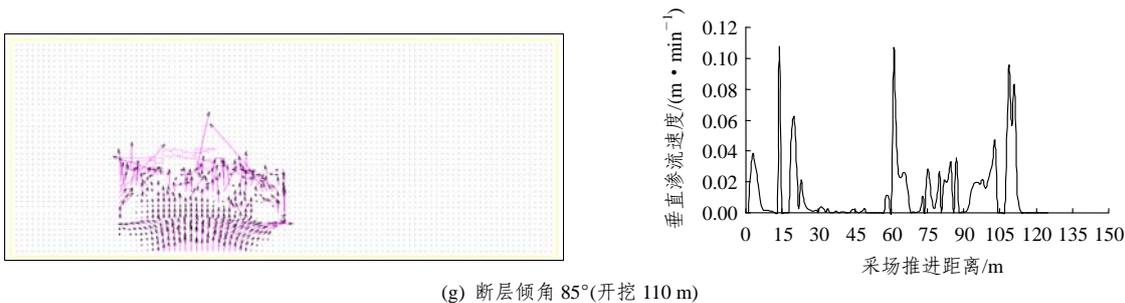


图 6 底板渗流分布(左)与相应垂直渗流速度曲线(右)

Fig.6 Seepage distributions(left) and corresponding vertical seepage velocity curves(right) of coal floor

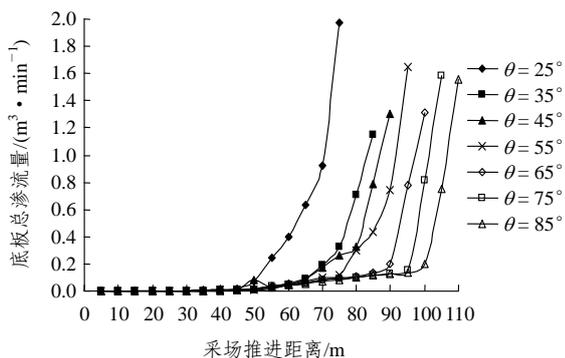


图 7 采空区底板随采场推进距离涌水量

Fig.7 Water inrush quantity of coal floor with advancing distance in mined-out area

一些, 即断层倾角越小, 底板总涌水量达到突水的推进距离就越短, 换句话说, 如果要阻止底板发生突水, 则断层倾角越小时所需要留设的防水煤柱则越宽。

4 结 论

通过研究断层倾角对正断层活化及底板突水的影响, 可以得出以下结论:

(1) 断层倾角的变化, 对断层活化的影响是不同的。断层倾角较小时, 断层面上剪切应力呈正负交替变化, 且峰值较大, 使得断层带围岩内的原有裂隙进一步发育及新的裂隙不断萌生; 小倾角正断层在采动影响下断层面上法向应力变化较大, 法向应力峰值也较大, 容易发生压剪破坏, 易形成导水裂隙带。因此, 相对于大倾角的正断层来说, 小倾角正断层比较容易活化。

(2) 数值模拟表明, 采动过程中, 小倾角正断层的底板容易产生贯通煤层底板、断层和含水层的裂隙, 形成绝对优势的渗流, 且渗流主要集中在工

作面下方。在较短的采场推进距离下, 小倾角正断层底板就由原来的渗水变为突水, 因此, 相对于大倾角的正断层来说, 小倾角正断层较容易引起突水危险, 在实际生产中应留设较宽的防水煤柱。

参考文献(References):

- [1] 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 Xiexing, LIU Weiqun, CHEN Zhanqing. Dynamics of systems of seepage flow in surrounding rock affected by mining[M]. Beijing: Science Press, 2004.(in Chinese))
- [2] 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.(YANG Shan'an. Prevention and control of water-inrush from faults in floor rocks in the workings[J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(6): 620 - 625.(in Chinese))
- [3] 黎良杰, 钱鸣高, 李树刚. 断层突水机制分析[J]. 煤炭学报, 1996, 21(2): 119 - 123.(LI Liangjie, QIAN Minggao, LI Shugang. Mechanism of water inrush through fault[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(2): 119 - 123.(in Chinese))
- [4] 施龙青, 曲有刚, 徐望国. 采场底板断层突水判别方法[J]. 矿上压力与顶板管理, 2000, (2): 49 - 52.(SHI Longqing, QU Yougang, XU Wangguo. Method to determine water inrush from a fault in floor[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2000, (2): 49 - 52.(in Chinese))
- [5] 谭志祥, 周 鸣, 邓喀中. 断层对水体下采煤的影响及其防治[J]. 煤炭学报, 2000, 25(3): 256 - 259.(TAN Zhixiang, ZHOU Ming, DENG Kazhong. Influence of fault on mining under water bodies and its controlling[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(3): 256 - 259.(in Chinese))
- [6] 郑少河, 朱维申, 王书法. 承压水上采煤的固流耦合问题研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 421 - 424.(ZHENG Shaohe, ZHU Weishen, WANG Shufa. Study on coupling problem between flow and solid of mine in confined aquifer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4): 421 - 424.(in Chinese))

- [7] 武强, 刘金韬, 钟亚平, 等. 开滦赵各庄矿断裂滞后突水数值仿真模拟[J]. 煤炭学报, 2002, 27(5): 511 - 516.(WU Qiang, LIU Jintao, ZHONG Yaping, et al. Numeric simulations of water inrush time-effect on faults in Zhaogezhuang coal mine, Kailuan, China[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(5): 511 - 516.(in Chinese))
- [8] 李晓昭, 罗国煜, 陈忠胜. 地下工程突水的断裂变形活化导水机制[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 695 - 700.(LI Xiaozhao, LUO Guoyu, CHEN Zhongsheng. Mechanism of deformation and water conduction of fault due to excavation in water inrush in underground engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(6): 695 - 700.(in Chinese))
- [9] 邱秀梅, 王连国. 断层采动型突水自组织临界特性研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2003, 21(1): 59 - 61.(QIU Xiumei, WANG Lianguo. Study on self-organizing critical character for water inrush from fault induced by mining[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2003, 21(1): 59 - 61.(in Chinese))
- [10] 武强, 周英杰, 刘金韬, 等. 煤层底板断层滞后型突水时效机制的力学试验研究[J]. 煤炭学报, 2003, 28(6): 561 - 565.(WU Qiang, ZHOU Yingjie, LIU Jintao, et al. Mechanical experimental study on lag mechanism of water inrush of fault under coal seam floor[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(6): 561 - 565.(in Chinese))
- [11] 刘志军, 胡耀青. 承压水上采煤断层突水的固流耦合研究[J]. 煤炭学报, 2007, 32(10): 1 046 - 1 050.(LIU Zhijun, HU Yaoqing. Solid-liquid coupling study on water inrush through faults in coal mining above confined aquifer[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(10): 1 046 - 1 050.(in Chinese))
- [12] 武强, 潘国营, 管恩太, 等. 焦作矿区突水灾害研究综述[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1995, 6(4): 44 - 49.(WU Qiang, PAN Guoying, GUAN Entai, et al. A study review of water inrush hazards in Jiaozuo mining region[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1995, 6(4): 44 - 49.(in Chinese))
- [13] 管恩太. 演马庄煤矿断层突水特征及其预测预报方法[J]. 煤炭工程, 2005, (7): 43 - 45.(GUAN Entai. Characteristics of floor water irruption of fault and forecast methods in Yanmazhuang coal mine[J]. Coal Engineering, 2005, (7): 43 - 45.(in Chinese))
- [14] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.(QIAN Minggao, SHI Pingwu. Mining pressure and strata control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003.(in Chinese))
- [15] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.(QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin, et al. Key strata theory in ground control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003.(in Chinese))
- [16] 唐春安, 赵文. 岩石破裂全过程分析软件系统 RFPA^{2D}[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(5): 507 - 508.(TANG Chun'an, ZHAO Wen. RFPA^{2D} system for rock failure process analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(5): 507 - 508.(in Chinese))
- [17] 杨天鸿, 唐春安, 徐涛, 等. 岩石破裂过程渗流特性——理论、模型与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.(YANG Tianhong, TANG Chun'an, XU Tao, et al. Seepage characteristics in rock failure—theory, model and applications[M]. Beijing: Science Press, 2004.(in Chinese))
- [18] 刘俊杰, 陈雄, 张后全, 等. 运用 RFPA^{2D} 数值模拟开采条件下的渗流通道[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1 522 - 1 526.(LIU Junjie, CHEN Xiong, ZHANG Houquan, et al. Numerical simulation of seepage channel with REPA^{2D} under coal mining conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(9): 1 522 - 1 526.(in Chinese))
- [19] 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 instability-failure process of the coal seam floor due to confined water inrush[J]. Journal of Geomechanics, 2003, 9(3): 281 - 288.(in Chinese))
- [20] 杨天鸿, 唐春安, 李连崇, 等. 非均匀岩石破裂过程渗透率演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 758 - 762.(YANG Tianhong, TANG Chun'an, LI Lianchong, et al. Study on permeability evolution in failure process of inhomogeneous rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(5): 758 - 762.(in Chinese))
- [21] 杨天鸿, 唐春安, 梁正召, 等. 脆性岩石破裂过程损伤与渗流耦合数值模型研究[J]. 力学学报, 2003, 35(5): 533 - 541.(YANG Tianhong, TANG Chun'an, LIANG Zhengzhao, et al. Study on model of damage and flow coupling in brittle rock failure process[J]. Acta Mechanica Sinica, 2003, 35(5): 533 - 541.(in Chinese))
- [22] 杨天鸿, 赵兴东, 冷雪峰, 等. 地下开挖引起围岩破坏及其渗透性演化过程仿真[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增1): 2 386 - 2 389.(YANG Tianhong, ZHAO Xingdong, LENG Xuefeng, et al. Numerical simulation on failure process of overburden rock strata and permeability evolution caused by mining excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Supp.1): 2 386 - 2 389.(in Chinese))
- [23] 缪协兴, 陈荣华, 白海波. 保水开采隔水关键层的基本概念及力学分析[J]. 煤炭学报, 2007, 32(6): 561 - 564.(MIAO Xiexing, CHEN Ronghua, BAI Haibo. Fundamental concepts and mechanical analysis of water-resisting key strata in water-preserved mining[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(6): 561 - 564.(in Chinese))