

DOI: 10.11779/CJGE201605013

固液耦合模式下含断层缺陷煤层回采诱发底板损伤及 断层活化突水机制研究

张培森^{1, 2, 4}, 颜伟^{*1, 4}, 张文泉^{1, 4}, SHEN Baotang³, 王浩^{1, 4}

(1. 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地(山东科技大学), 山东 青岛 266590; 2. 安徽理工大学煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001; 3. 澳大利亚联邦科学研究院(CSIRO), 布里斯班 昆士兰 4069; 4. 山东科技大学矿业与安全工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 针对具体地质条件, 以现场试验数据为基础, 采用相似材料试验及数值模拟相结合的分析方法, 对含断层缺陷煤层回采过程中底板损伤破坏及断层活化规律进行研究, 研究得出: 采用内径不同的水管能够很好地反映底板岩层渗透性的空间差异性, 通过采用调节注水管水柱高度的方式可以控制水压以满足设计要求; 煤层埋深、承压水水压及断层落差越大越易突水, 断层防水煤柱宽度越大越不易突水; 通过试验及模拟计算再现了不同因素影响下煤层回采过程中底板采动裂隙形成、断层活化到突水通道形成的全过程, 揭示了含断层构造底板突水通道的形成机制; 研究结果对承压水上含断层缺陷煤层回采时防水煤柱的留设具有重要的参考价值。

关键词: 固液耦合; 底板损伤; 断层活化; 突水机制

中图分类号: TU485.3; TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)05-0877-13

作者简介: 张培森(1977-), 男, 博士, 副教授, 主要从事采矿工程等领域的教学及科研工作。E-mail: peisen_sky@163.com。

Mechanism of water inrush due to damage of floor and fault activation induced by mining coal seam with fault defects under fluid-solid coupling mode

ZHANG Pei-sen^{1, 2, 4}, YAN Wei^{1, 4}, ZHANG Wen-quan^{1, 4}, SHEN Baotang³, WANG Hao^{1, 4}

(1. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Key Laboratory of Safety and High-Efficiency Coal Mining, Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. CSIRO Earth Science and Resource Engineering, PO Box 883, KENMORE, 4069 QLD, Australia; 4. College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Based on the field test data, the damage and fracturing of the mine floor and the pattern of fault activation during the backstopping of the working face are evaluated by the combined method of similar material tests and numerical simulations. Some conclusions are drawn that the spatial differences of the permeability of the rock stratum floor can be simulated by water pipes with different inner diameters; the water pressure can be modulated by adjusting the height of the water column in the water pipe to meet the design requirements; a higher burial depth of the coal stratum, confined water pressure and throw of the fault promote more chances for water-inrush, while a larger width of the water-resistant coal pillar at the fault helps avoid water-inrush events; and the physical tests and numerical calculations are used to simulate the complete process of the formation of cracks at the floor due to mining, fault activation and formation of water-inrush channel during backstopping, and the mechanism of formation of the water-inrush channel at the floor fault structure is revealed. The conclusions provide significant references for the design of water resistant coal pillar during backstopping of the coal stratum above the confined water with fault defects.

Key words: fluid-solid coupling; floor damage; fault activation; water-inrush mechanism

0 引言

在中国, 随煤炭开采深度及强度的逐年加大, 煤炭开采以15~30 m/a的速度向深部发展, 同时深部煤

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379119, 51109124, 51509149, 41472281); 教育部博士点新教师基金项目(20113718120009); “泰山学者”建设工程专项经费项目; “973”计划前期研究专项项目(2012CB72310401); 山东省高等学校优秀骨干教师国际合作培养项目以及煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室开放基金项目(JYBSYS2014106)

收稿日期: 2015-05-14

*通讯作者

层的赋存条件也越趋复杂，开采难度大大提高，煤矿事故，特别是断层活化突水事故是当前深部开采所面对的主要难题之一^[1-2]。

据不完全统计,2009年—2012年中国煤矿共发生水害事故151起,死亡704人,其中较大水害事故53起,死亡243人,重大透水事故21起,死亡333人,且煤矿突水事故直接与构造有关者占80%以上^[3]。构造突水的原因很多^[4-5],不能仅仅把它看成是一个复杂的力学问题,还与构造自身的性质、承压水的水压值及采动效应等因素有关。断层活化使得断层带以及两盘靠近断层的部位产生新裂隙,同时原有裂隙进一步扩展,最后形成突水通道,为工作面突水提供了重要的条件^[6]。

正确掌握断层活化突水的时间、地点及原因是十分关键的。自 20 世纪 40 年代起,部分专家学者从突水机理和突水条件角度对煤矿水害防治进行研究,如底板安全水压理论^[7]、岩体临界强度理论、突水系数^[8-10]、相对隔水层厚度法、岩水应力关系、强渗通道及板模型理论^[11]等。这些理论虽然从不同角度考虑了底板采动效应及构造因素对底板阻水能力的影响,但多是基于理论解析结论或假设,极少考虑采动效应与突水之间内在联系等关键问题。一些专家学者基于矿山压力理论、水文地质理论和工程地质力学等角度对构造活化进行研究,如“下三带”理论^[12-13]、原位张裂与零位破坏理论^[14]、关键层 (KS) 理论^[15]等,这些理论部分考虑了地质结构及采动效应等关键影响因素,定性阐述了其对底板突水的关联性。HU 等^[16]对底板隐形断层的活化规律进行理论分析,彭苏萍等^[17-19]采用相似模型试验对采动影响下断层的活化机理及断层诱发断裂带的演化规律进行研究,但没有考虑不同压力水体对断层活化突水的影响。李凯等^[20-22]采用多孔介质渗流应力耦合模型分析了采动影响下承压采场底板断层活化的影响规律,张培森等^[23-25]采用固液耦合模式分析了工作面采动过程中断层界面的滑移特性及应力变化规律,许多学者^[26-30]应用数值模拟方法对含断层底板突水机理进行了解释,但多是考虑单一因素对突水影响进行研究,而在承压水上进行采矿作业,断层突水问题应该是在采动效应影响下,围岩的岩性、结构和地质环境等综合作用的结果。因此,采用试验与模拟相结合的方法对断层活化程度与断层产状、水压及采动效应间的关系展开研究,以此来确定安全的断层防水保护煤柱宽度,具有重要的理论意义和实用价值。

本文以某煤矿 F₁₆ 断层为研究对象,采用试验研究、模拟计算及实践应用相结合的综合研究手段对采动诱发断层活化突水的机理进行研究,通过二维固液相似

模拟试验,更加直观地观测工作面采动过程中底板裂隙的发育规律及断层活化的突水过程;采用三维有限差分数值软件 FLAC^{3D}的固液耦合计算模式,研究工作面采动过程中断层上、下盘界面及断层防水煤柱上的位移场、应力场及破坏规律。综合对比分析,揭示在采动应力场和渗流场共同作用下的底板破裂及断层活化突水机理,为确定安全的断层防水保护煤柱宽度奠定基础。

1 地质条件及现场试验

1.1 地质概况

皖北煤电集团某煤矿处于中国安徽省淮北煤田临涣矿区,其地理位置及区域地质概况如图1所示^[31-33]。井田总体构造形态为一轴向由中北部的南北向渐变为南部的北西向的向斜,向斜的轴部呈反S形,地层倾角为10°~20°。全井田共发育组合断层19条,均为正断层,且以近北东向为主。

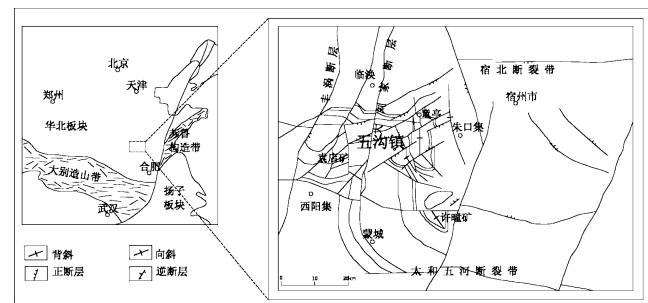


图 1 地理位置图及区域地质概况

Fig. 1 Geographic locations and geological profile

F_{16} 断层为正断层,位于3采区的西北部边界,与1031工作面风巷相邻,且走向基本平行(图2)。由三维地震探测资料(图3)可知, F_{16} 断层错断10煤—奥灰,走向NEE,倾向SSW,倾角70°,落差10~150 m,区内延展长度2.24 km。1031工作面倾斜长度为110 m,开采煤层为10煤,煤层标高为-303~-543 m,平均倾角为8°,平均厚度为3.98 m,煤层底板至灰岩间平均间距为47.2 m。

1.2 试验方案设计

工作面回采导致原岩应力发生变化，断层重新活动，断层的重新活动导致断层带及其附近的岩体中的伴生裂隙发生再扩展，致使其渗透性发生改变，同时高压水的渗透压力也会促使断层带透水能力增强，易于形成突水通道，从而影响底板岩层的应力场及破坏程度，原非导水断层可能转变为导水断层而发生突水。为避免突水或防水煤柱失稳事故，掌握岩体在高压作用下的渗透性及水力劈裂压力等参数至关重要^[34]，且为后续的相似材料试验及模拟计算提供有效的原始资料，因此确定在 1031 工作面风巷内 TZ3 钻场以 T5#

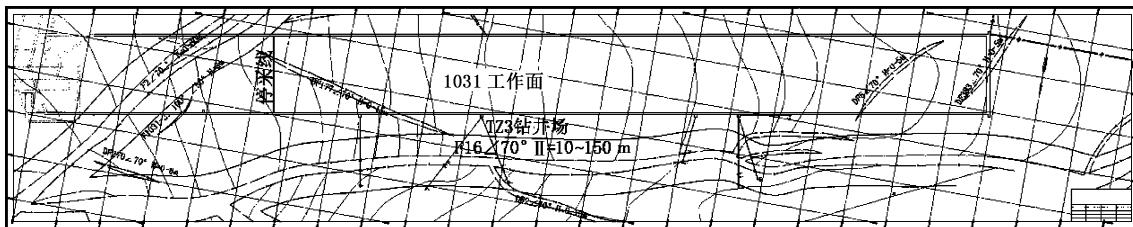


图 2 F16 断层与 1031 工作面空间相对关系平面图

Fig. 2 Spatial relationship between fault F16 and working face 1031

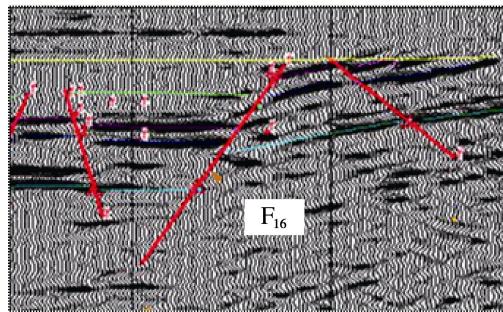


图 3 三维地震资料图

Fig. 3 3D seismic data

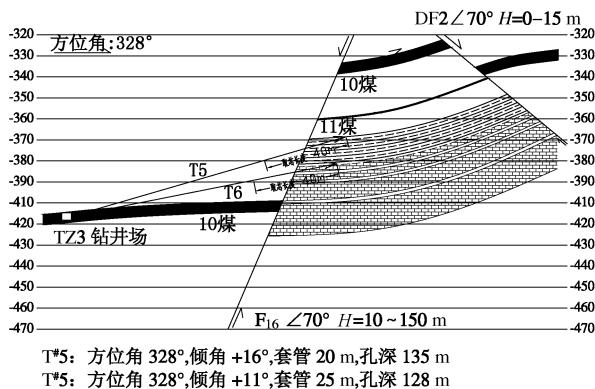


图 4 压水及致裂试验钻孔设计剖面图

Fig. 4 Section of drilling design for hydraulic fracturing tests
钻孔为观测孔, 在 T⁶ 钻孔内 75~83 m 细砂岩段处对 F16 断层进行压水及高压致裂试验, 具体设计参数如图 4 所示。

1.3 压水试验成果分析

工作管路的不均滑可引起试验段压力与孔口间存在压差, 因此, 计算时需考虑管路压力损失 P_{S1} :

$$P_{S1} = \frac{V^2}{2g} \cdot \frac{\lambda L}{d} \quad (1)$$

式中 λ 为水的摩阻系数; L 为工作管长度 (m); d 为工作管内径 (m); v 为工作管内水的流速 (m/s); g 为重力加速度。

工作管内径取 75 mm, 按照不同压力段进行流速计算, 采用式 (1) 计算得管路压力损失如表 1 所示。

表 1 管路压力损失

Table 1 Losses of pipelines pressure

压力/MPa	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	3.0	2.0	1.0	0.0
压力损失 $/(10^{-4} \text{ MPa})$	0	0.75	3.16	7.38	12.8	7.38	3.16	0.75	0

在压水试验过程中, 试验设备与试验段高差为 15 m, 其水柱压力损失 P_{S2} 为 $P_{S2} = \rho gh = 1.0 \times 10^3 \times 10 \times 15 \text{ MPa} = 0.15 \text{ MPa}$ 。

因此, 总压力损失 P_S 为 $P_S = P_{S1} + P_{S2}$ 。

试验共获取了 35 组数据, 经综合分析并扣除总压力损失, 绘得压水试验的 P - Q 曲线, 如图 5 所示。

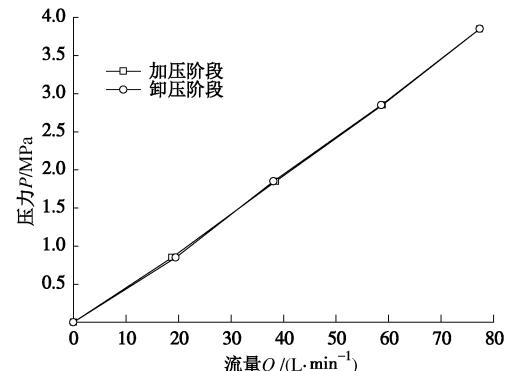


图 5 压水试验流量与压力曲线

Fig. 5 Curve of flow and pressure from hydraulic fracturing test

由图 5 可知, 升压曲线为通过原点的直线, 降压曲线与升压曲线基本重合, 故在整个压水试验过程中渗流状态为层流, 裂隙基本没有发生变化。

$$q = \frac{Q_i}{LP_i} \quad (2)$$

式中 q 为试验段的透水率 (Lu); L 为试验段长度 (m); Q_i 为第 i 阶段的计算流量 (L/min); P_i 为第 i 阶段的试验段压力 (MPa)。

利用最大压力阶段 (第 4 阶段) 的压力值 (P_4) 和流量值 (Q_4), 取试验段长度为 8 m, 采用式 (2) 计算得出试验段的透水率为 2.51 Lu。

$$K = \frac{Q}{2\pi HL} \ln \frac{L}{r_0} \quad (3)$$

式中 K 为岩体渗透系数 (m/d); H 为试验水头 (m);

Q 为压入流量 (m^3/d); L 为试验长度 (m); r_0 为钻孔半径 (m)。

由《水利水电工程钻孔压水试验规程》可知, 当透水率小于 10 Lu 时, 裂隙岩体压水段的渗透系数采用最高压力段数据, 按式 (3) 计算, 计算得出试验段岩体的渗透系数为 $3.59 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。

1.4 高压致裂成果分析

试验段的注入压力 - 时间曲线如图 6 所示。

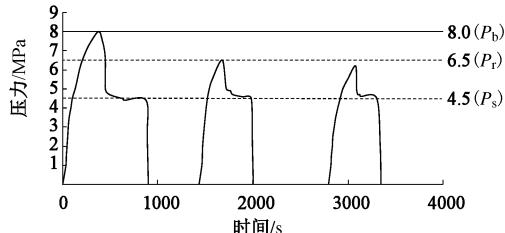


图 6 水压致裂试验注入压力 - 时间曲线图

Fig. 6 Curves of injection pressure and time from hydraulic fracturing tests

由图 6 可知, 试验段内岩体具有明显的脆性性质, 压力很快升高到初次破裂压力 P_b , 并发生破裂, 停止加压后压力迅速下降至裂缝瞬时关闭压力 P_s , 并稳定一段时间。分析可知, 试验段内岩体的初次破裂压力、重张压力 P_r , 瞬时关闭压力及抗张强度 R_m 分别为 8.0, 6.5, 4.5, 1.5 MPa。

2 相似模型试验研究

2.1 试验模型及相似条件

采用的相似材料模拟试验平台的尺寸为长 \times 宽 \times 高 = $1900 \text{ mm} \times 220 \text{ mm} \times 1800 \text{ mm}$ 。针对实际地质资料, 模型取断层倾角为 70° , 落差 70 m, 断层带宽度 2 m, 煤层厚度为 4 m, 煤层和岩层水平铺设。模拟岩层高度为: 断层上盘煤层上方 100 m (包括煤层厚度), 下方 50 m, 断层下盘煤层上方 30 m (包括煤层厚度), 下方 120 m。模型几何相似常数: $C_1 = l_m / l_p = 1 : 100$; 重度相似常数: $C_1 = \gamma_p / \gamma_m = 1 : 1.5$; 相似材料的强度相似常数 (应力比、重力比及水压力): $C_\sigma = C_1 / C_p = 1 : 150$; 时间相似: $C_t = t_m / t_p = 1 : 10$ 。

2.2 测点布设与开采设计

为了研究在工作面回采过程中断层防水煤柱顶、底板及断层界面应力的动态变化规律, 在模型中布置了 12 个应力传感器, 其中测点 $S_1 \sim S_4$ 位于距离煤层底板 5 m 的岩层中, 测点 $S_5 \sim S_8$ 位于距离煤层顶板 2 m 的岩层中, 测点的水平间距皆为 10 m, 测点 S_9 及 S_{10} 与测点 S_{11} 及 S_{12} 分别处于同一水平, 距离煤层顶板分别为 24 m 及 45 m, 且测点 S_9 及 S_{11} 位于断层上盘界面, 测点 S_{10} 及 S_{12} 位于断层下盘界面; 为分析断层上、

下盘滑移的动态变化规律, 在断层上、下盘界面布设 4 个位移监测点, 其中测点 D_1 和测点 D_3 用来监测离煤层不同垂直高度处断层上盘界面的滑移量, 测点 D_2 和测点 D_4 则是用来监测断层下盘界面的滑移量, 距离煤层的距离与同一水平处的应力传感器相一致, 采用全站仪进行位移监测。具体布设情况如图 7 所示。

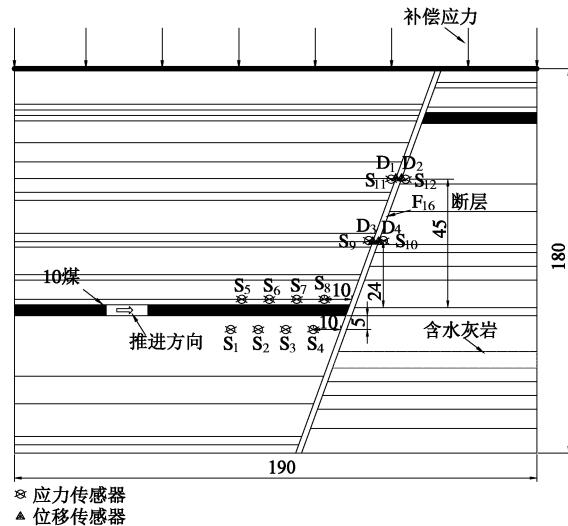


图 7 位移应力测点布置图

Fig. 7 Layout of measuring points for displacement and stress

模型内开采高度为 4 cm, 相当于实际采高 4 m。每 2 h 采一次, 推进 4.8 cm, 相当于每天实际推进 4.8 m。整个模型自开切眼开始开采, 推进到距离断层 30 cm 回采结束。

2.3 含水层模拟及水压控制

为了反映含水岩层中的原生裂隙、岩层之间的固有导水通道及渗透性的空间差异性, 在灰岩含水层内布设 3 根细水管和一根粗水管, 以模拟含水层中的水, 并将水管一端穿过断层, 埋入在断层上盘距离断层 30 cm 及煤层底板下方 10 cm 处的煤层底板中。将水管另一端引出模型架, 作为控制水管中水压的注水管, 通过改变水管中水柱高度来控制所模拟的含水层水压值, 其具体布设情况如图 8 所示。

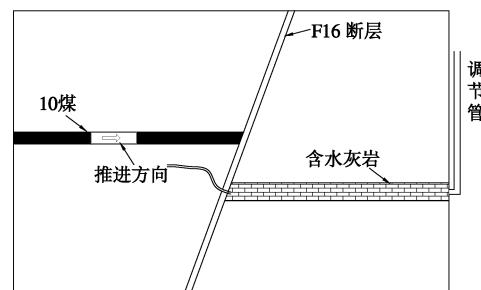


图 8 含水层水压控制模拟示意图

Fig. 8 Simulation of hydraulic control for aquifer

由于受现有的技术手段、试验条件及模拟条件限制, 本次模拟试验只能近似反映承压水压力对地层的

破坏作用, 同时模拟开采过程中水压的变化情况^[35]。

2.4 煤柱顶底应力规律

工作面回采过程中断层防水煤柱顶、底板的垂直应力变化情况如图 9 所示。

从图 9 可以看出, 随着工作面的持续推进, 煤层底板应力都先增大后减少, 且在工作面未到达测点前, 距离工作面较近者变化幅度较大。测点 S₁, S₂ 的数据先后达到峰值, 之后逐渐减小, 直至处于采空区后为零。测点 S₃, S₄ 相对测点 S₁, S₂ 而言, 应力变化量大, 当工作面向断层破碎带推进时, 因断层破碎带具有较大的变形缓冲能力而吸收二次应力, 使得应力传递难以越过断层破碎带向围岩更前方传播, 应力峰值区域被限制在工作面煤壁及断层破碎带一侧煤柱破坏区边界之间, 最后出现更高的应力峰值。

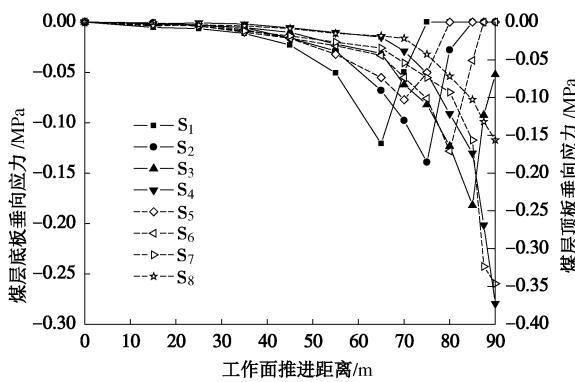


图 9 顶底板应力变化曲线

Fig. 9 Variation of stresses of roof and floor

煤层顶板应力随工作面推进的变化规律与煤层底板应力随工作面推进的变化规律基本一致。测点 S₅, S₆ 应力先后达到峰值, 之后随着工作面的继续推进而逐渐减小, 高集中应力向前延伸。测点 S₆ 所达到的峰值要比测点 S₅ 的大, 测点 S₇ 所达到的峰值比测点 S₆ 所达到的峰值更大, 但测点 S₈ 的应力变化量相对较小, 且已处于破坏区内。这是由于断层带是由煤层回采所导致高应力区向前传播的“屏障”, 临近断层一侧的煤柱及断层带已经完全处于塑性破坏, 而使断层防水煤柱的弹性受压区变小所致。

2.5 断层界面活化规律

断层活化程度主要由采掘活动所导致的断层带内应力变化幅度及断层界面处位移滑移量所决定。为了解工作面推进过程中断层界面应力的变化规律, 本试验在断层上、下盘界面不同高度处水平布置 4 个应力传感器, 测点布置如图 7 所示, 测点 S₉ 及 S₁₁ 与测点 S₁₀ 及 S₁₂ 分别监测断层上、下盘界面距离煤层不同垂直高度处的垂直向应力。图 10 描述了断层界面应力随工作面推进而变化的规律。

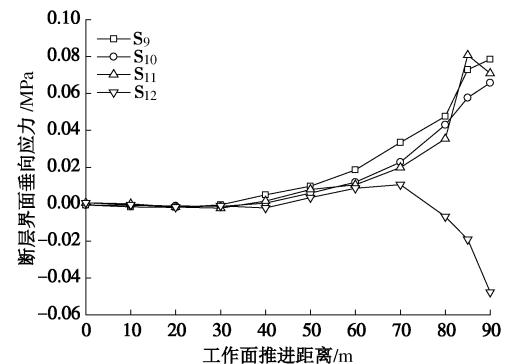


图 10 断层界面应力变化曲线

Fig. 10 Variation of stresses of fault interface

由图 10 可知, 随工作面持续推进, 不同高度处上、下盘断层界面处的垂直向应力都先随之降低, 后随之缓慢增加, 当推进到一定距离后, 距离煤层顶板较远处的应力呈下降趋势。测点 S₉, S₁₀ 分别描述了距离煤层顶板 24 m 处断层上、下盘界面应力随工作面推进而变化的规律, 在工作面推进 30 m 期间, 上、下盘界面的应力皆变化不大, 随工作面持续推进两者都随之增加, 且处于同一推进步距时, 上盘界面的应力大于下盘界面的应力。由测点 S₁₁, S₁₂ 的测试数据可知, 在工作面推进 40 m 期间, 距离煤层顶板 45 m 处断层上、下盘界面的应力随工作面推进而变化的幅度都较小, 随之开始增加, 但相对距离煤层顶板 24 m 处应力变化而言, 仍较小, 当工作面推进到 70 m 时, 下盘界面处的应力开始呈现下降趋势, 而上盘界面的应力一直处于增大趋势, 直到工作面推进 90 m 时, 才开始出现回落。

断层界面处位移滑移量是决定断层活化程度的另一主要指标。图 11 描述了测点 D₁~D₄ 处垂向位移及水平位移随工作面推进而变化的规律。

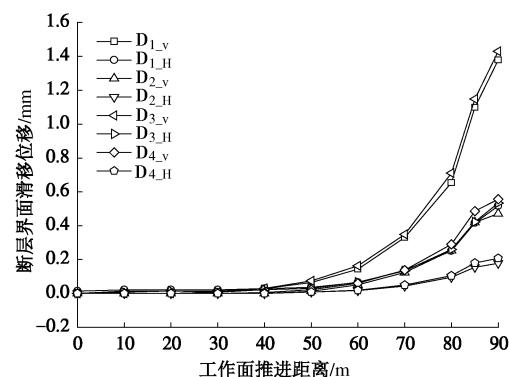


图 11 断层界面监测点运移曲线

Fig. 11 Migrating curves of measuring points of fault interface

从图 12 中可知断层上盘界面垂直及水平位移都比断层下盘界面位移量大, 且无论断层上、下盘, 断层界面垂直位移都比水平位移大。

2.6 不同水压对突水规律的影响

试验时分别向 3 根细水管中注入水, 以不同水头高度, 达到试验所需的压力 1, 2, 3 MPa, 向粗水管中注水, 使其达到 1 MPa。

如图 12 (a) 所示, 在工作面推进到距离断层 40 m 时, 煤层底板没有出现突水现象, 距离煤层底板 10~14 m 深度之间出现若干条长度不同近水平裂纹, 其中与断层带相通的裂隙距离煤层底板约 12~13 m, 长约 5 m。随着工作面的推进, 煤层底板进一步破坏, 当工作面推进到距离断层 35 m 时, 煤层底板出现突水现象, 裂纹长度及宽度都进一步增加, 如图 12 (b) 所示, 细水管中代表 3 MPa 的细水管水柱高度开始下降, 此时, 调节粗水管中水柱高度, 当水柱高度达到 150 cm, 相当于 2.2 MPa 时, 水柱开始下降。当工作面距离断层 32 m 时, 水压 2 MPa 的细水管水柱高度开始下降, 此时, 再调节粗水管中水柱高度, 当水柱高度达到 90 cm, 相当于 1.3 MPa 时, 水柱开始下降, 从图 12 (c) 中可以看出煤层底板突出的水向四周渗透的范围更广, 由此可见突出的水量比先前更大。当工作面距离断层 30 m 时, 水压 1 MPa 的细水管水柱高度开始下降, 此时, 粗水管水柱高度急速下降, 从图 12 (d) 可知煤层底板突出的水量比先前更大, 很快就渗透到采空区, 与断层相通裂隙的长度扩大到约 12 m。由分析可知, 随工作面持续推进, 防水煤柱宽度逐渐减小, 防水煤柱及煤层顶底板出现不同程度的破坏, 当防水煤柱缩小到一定尺寸时, 由于断层带的“屏障”作用, 使得煤柱上方出现更高的集中应力, 造成煤柱及底板破坏程度更加剧烈, 突水的危险性更大。同时, 在其它影响因素相同的情况下, 底板岩层的渗透率越大, 底板突水的危险性越大; 含水层水压越大, 突水的危险性越大。

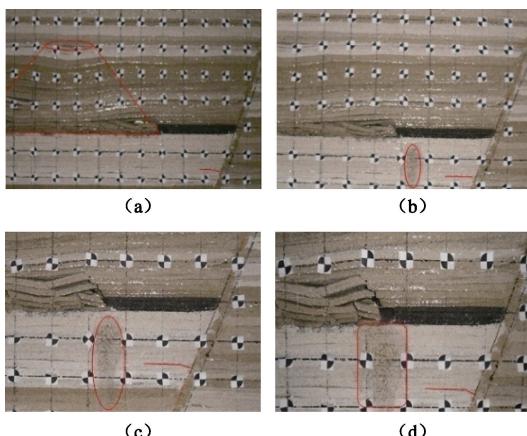


图 12 煤层底板突水过程图

Fig. 12 Process of water inrush of coal floor

3 模拟分析

3.1 计算模型

因工作面推进方向与 F16 断层走向平行, 在不考虑工作面推进过程影响的条件下选取平面应变模型^[27, 29, 36]。针对 1031 工作面具体地质资料, 选取工作面倾斜方向为 X 轴, 工作面推进方向为 Y 轴, 模型的竖直方向为 Z 轴。考虑到边界效应、裂采比、煤层底板破坏深度及计算速度等因素, 最终确定计算模型大小为 730 m×8 m×176 m。网格划分详见图 13, 模型共包括 11250 个单元以及 17640 个节点。

模型四周为水平方向位移约束, 底部为固定约束, 上部界面为应力边界, 其载荷大小由上覆岩层的重力决定^[27]。本文重点研究不同条件下采场底板的破坏分布及渗流特性与断层界面的滑移破坏规律, 在断层带两侧分别植入 interface 单元^[37-38]。模拟开采正断层上盘煤层, 垮落法顶板管理。

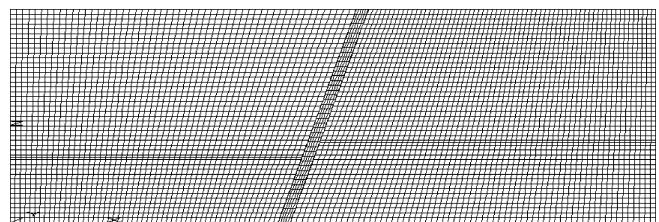


图 13 数值计算模型

Fig. 13 Numerical model

3.2 模型选取及参数确定

由大量岩石力学试验及工程类比可知, 莫尔库仑准则能很好地反映岩石破坏特性^[39], 本次计算选取 MOHR 模型及 FL_ISO 模型^[38]进行分析:

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \quad , \quad (4)$$

式中, σ_1 , σ_3 分别是最大和最小主应力, φ , c 分别是摩擦角和黏结力。当 $f_s > 0$ 时, 材料将发生剪切破坏。在通常应力状态下, 岩体的抗拉强度很低, 因此, 可根据抗拉强度准则 ($\sigma_3 \geq \sigma_t$) 判断岩体是否产生拉断破坏。

根据地质调查和试验研究, 在考虑岩石尺度效应的基础上, 确定模拟计算所采用的主要岩层的物理力学参数如表 2 所示, 界面单元参数如表 3 所示。

3.3 初始应力状态

地应力分布具有很强的空间差异性, 且随时间推移而不断变化, 但相对于采煤工作面的设计基准期来说, 时间因素可以忽略, 可将其视为相对稳定的应力场。垂向地应力 σ_v 由上覆岩层的重力确定:

表2 主要岩层的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of main rock strata

岩性 名称	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	抗拉强度 /MPa	渗透系数 /(cm·s ⁻¹)	孔隙率 n	密度 /(kg·m ⁻³)
灰岩	41.00	27.00	4.0	30	1.75	0.13×10^{-1}	0.52	2760
粉砂岩	17.70	10.60	5.0	32	1.72	3.59×10^{-4}	0.25	2600
煤	1.31	0.71	1.0	28	0.55	4.07×10^{-3}	0.35	1400
细砂岩	23.50	19.20	7.5	35	2.20	1.23×10^{-3}	0.30	2620
断层带	0.27	0.21	1.5	26	0.10	4.07×10^{-2}	0.44	2000

$$\sigma_v = \gamma H \quad , \quad (5)$$

式中, γ 为岩体重度, H 为岩层距离地表的深度。

参考 Brown 等^[40]对世界不同地区地应力量测结果及赵德安等^[41]对中国 578 组实测地应力数据经统计分析, 确定本文所采用的水平地应力为

$$k_{\max} = 673/H + 1.3 \quad , \quad (6)$$

$$k_{\min} = 41/H + 0.4 \quad , \quad (7)$$

$$\sigma_H = k\sigma_v \quad . \quad (8)$$

模型上界面的载荷分布形式简化为均布荷载, 上覆单位岩重 γ 为 22.0 kN/m³, 模型上界面距地表的距离分别为 200, 300, 400, 500, 600, 644 m, 计算时所施加的地应力如表 4 所示。

表3 界面单元参数

Table 3 Parameters of interface cells

切向刚度 /GPa	法向刚度 /GPa	内摩擦角 /(°)	抗拉强度 /MPa
38.5	38.5	32.0	2.2

表4 不同深度初始地应力状态

Table 4 Initial in-situ stress states at different depths

埋深 /m	k_{\max}	k_{\min}	γ (kN·m ⁻³)	σ_v /MPa	$\sigma_{H\max}$ /MPa	$\sigma_{H\min}$ /MPa
200	4.67	0.61	22	4.40	20.53	2.66
300	3.54	0.54	22	6.60	23.39	3.54
400	2.98	0.50	22	8.80	26.25	4.42
500	2.65	0.48	22	11.00	29.11	5.30
600	2.42	0.47	22	13.20	31.97	6.18
644	2.35	0.46	22	14.17	33.22	6.57

3.4 计算方案

现有研究资料表明, 断层界面活化规律与多种因素有关^[5, 27, 37], 且在开采正断层上盘煤层时更容易发生活化^[42], 断层界面刚度对界面活化程度影响较小^[37]及断层倾角越大越易活化^[27]。本文重点分析不同煤层埋深、承压水水压、断层落差及防水煤柱宽度对工作面在断层上盘煤层回采过程中周围岩体、断层带内、断层带界面及防水断层煤柱上的位移场、应力场及破

坏规律, 以揭示在采动应力场和渗流场共同作用下的断层活化和岩体破裂的机理。

根据研究目标, 结合 1031 工作面具体地质资料, 采用正交方法, 共确定 17 个计算方案, 如表 5 所示, 其中模型 2 中的参数由实际地质条件确定。

3.5 监测方案

为了记录影响因素不同对断层上、下盘界面及防水断层煤柱上的位移及应力变化规律, 在断层防水煤柱内布设 12 个垂向位移测点及 11 个垂向应力测点, 其位移及应力测点编号分别为 D₁, D₂, …, D₁₂, S₁, S₂, …, S₁₁。在断层上、下盘界面分别布设 6 个测点, 测点编号分别为 I₁₋₁, I₁₋₂, …, I₁₋₆ 及 I₂₋₁, I₂₋₂, …, I₂₋₆, 断层界面上的测点用于监测其对应位置的法向位移、剪切位移、法向应力及切向应力。具体测点布置位置详见图 14。

表5 计算方案

Table 5 Calculation schemes

模型	煤层埋深 H/m	落差 T/m	水压 P/MPa	煤柱宽度 L/m
1	356	12	2.0	47
2	456	12	2.0	47
3	556	12	2.0	47
4	656	12	2.0	47
5	756	12	2.0	47
6	800	12	2.0	47
7	456	36	2.0	47
8	456	52	2.0	47
9	456	68	2.0	47
10	456	108	2.0	47
11	456	12	1.0	47
12	456	12	3.0	47
13	456	12	3.5	47
14	456	12	2.0	26
15	456	12	2.0	35
16	456	12	2.0	43
17	456	12	2.0	52

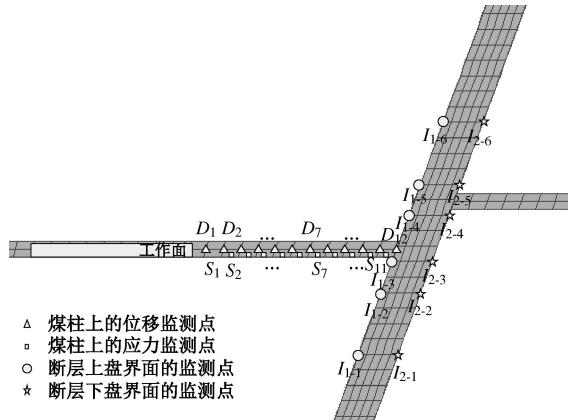


图 14 模拟分析时监测点布设图

Fig. 14 Layout of measuring points for simulation

3.6 断层煤柱的位移应力分析

图 15 中描述了由 17 个计算模型所得到的断层防水煤柱的最大垂向位移值以及各模型所得位移值与模型 2 的比值。由模型 1~6 的计算结果可知, 防水煤柱的最大垂向位移随煤层埋深的增加而增加, 当煤层埋深 $H < 600$ m 时, 煤层埋深每增加 100 m 最大垂向位移相对增加约 0.2 倍, 当煤层埋深 $H > 600$ m 时, 煤层埋深每增加 100 m, 其相对增加约 0.7~1.3 倍。断层落差及含水层水压对最大垂向位移的影响由模型 2 及模型 7~13 可知, 虽然最大垂向位移随含水层水压增加略有增大, 但相对其它影响因素而言, 断层落差及含水层水压对最大垂向位移的影响程度较弱。模型 2 及模型 14~17 中描述了断层防水煤柱宽度对其处的最大垂向位移的影响, 从模型 2 及模型 14~17 中可以看出, 最大垂向位移随断层防水煤柱宽度增加而减少, 但相对减少比率随煤柱宽度单位增加而相对减弱, 相对减少比率从 0.91% 降为 0.23%。

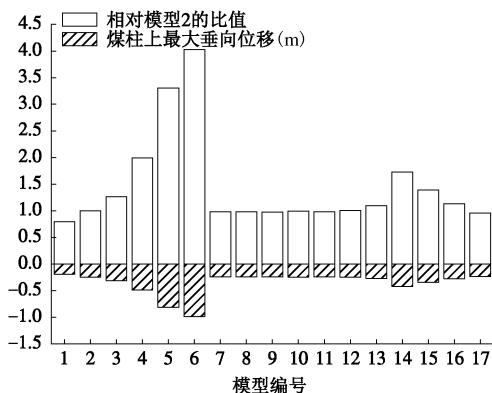


图 15 断层煤柱的最大垂向位移及其相对模型 2 的比值

Fig. 15 Maximum vertical displacement and ratio relative to Model 2 for fault coal pillar

含水层水压、断层落差、煤层埋深及断层防水煤柱宽度对断层防水煤柱的垂向位移影响分别如图 16~19 所示。

图 16~18 中所采用的断层防水煤柱宽度 L , 即 1031 工作面风巷距 F_{16} 断层上盘断煤交线的长度, 为 47 m。由图 16 可知, 断层防水煤柱的垂向位移随含水层水压增加而增大, 当含水层水压 $P \leq 3$ MPa 时, 其增大幅度不大, 但当 $P > 3$ MPa 时, 其相应增大幅度较大; 当含水层水压较小时, 断层防水煤柱的垂向位移随监测点距离 1031 工作面风巷的距离增加都呈现出先增大后减小再增加的趋势, 断层其峰值点距离 1031 工作面风巷的距离都约为 8.69 m, 即 1031 工作面沿其倾斜方向的支承压力峰值点距风巷的距离为 6.52 m, 两者间的距离差值是由于位移测点位于单元的节点上而应力测点位于单元形心所导致, 且当监测点距 F_{16} 断层上盘断煤交线的距离约 17 m 起, 煤柱的垂向位移开始增加; 当含水层水压较大时, 断层防水煤柱的垂向位移随监测点距 F_{16} 断层上盘断煤交线的距离减小而一直增加。图 17 所描述的断层落差对防水断层煤柱的垂向位移的影响规律与图 16 中含水层水压较小时的规律一致, 但因断层落差变化而引起的垂向位移变化幅度相对更小。由图 18 与图 16 的对比可知, 两者所体现处的规律是一致的, 只是由煤层埋深变化而引起的垂向位移变化幅度相对更大, 其所诱

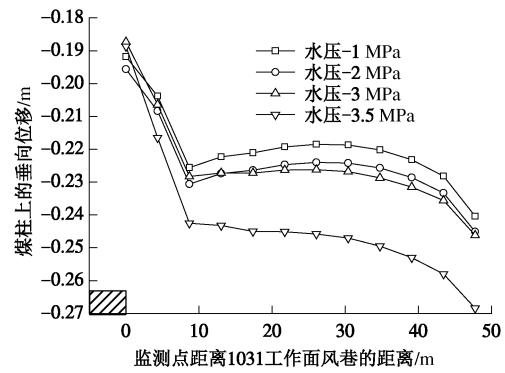


图 16 水压对煤柱垂向位移的影响

Fig. 16 Influence of water pressure on the vertical displacement of coal pillar

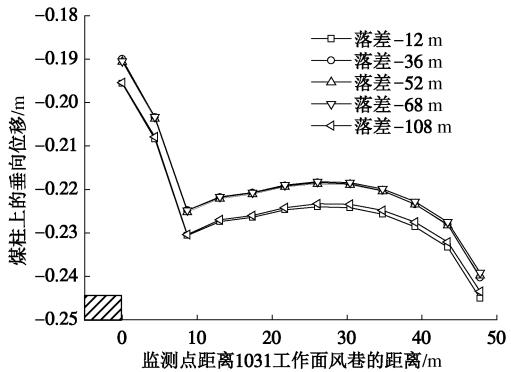


图 17 断层落差对煤柱垂向位移的影响

Fig. 17 Influence of fault throw on the vertical displacement of coal pillar

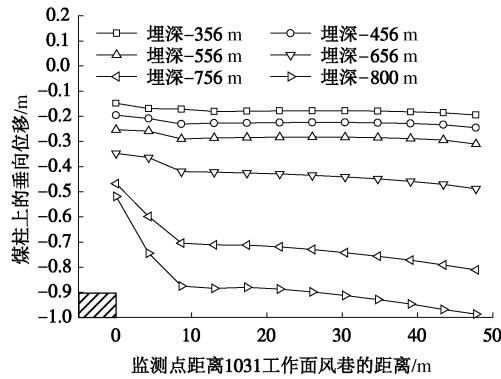


图 18 煤层埋深对煤柱垂向位移的影响

Fig. 18 Influence of burial depth on the vertical displacement of coal pillar

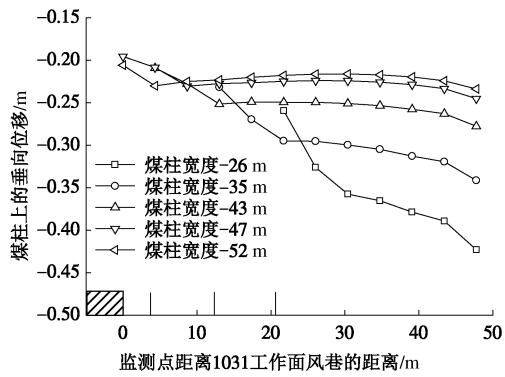


图 19 断层煤柱宽度对其上垂向位移的影响

Fig. 19 Influence of coal pillar width on its vertical displacement
发的断层活化程度更明显。由图 19 可知, 当断层防水煤柱宽度 $L \geq 43$ m 时, 断层防水煤柱的垂向位移随监测点距 1031 工作面风巷的距离增加都呈现出先增大后减小再增加的趋势, 而 $L < 43$ m 时, 煤柱的垂向位移随监测点距离 1031 工作面风巷的距离增加而增大, 且煤柱宽度越小其变化程度越大, 相应的断层活化程度也越大。

3.7 断层界面的位移应力分析

图 20, 21 分别描述了由 17 个计算模型所得到的断层上、下盘界面的最大法向及切向位移。

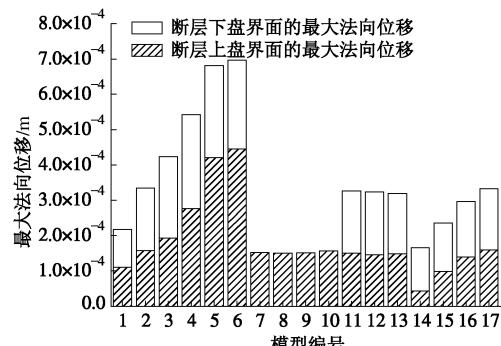


图 20 断层上、下盘界面的最大法向位移

Fig. 20 Maximum normal displacements of interface between hanging wall and footwall of fault

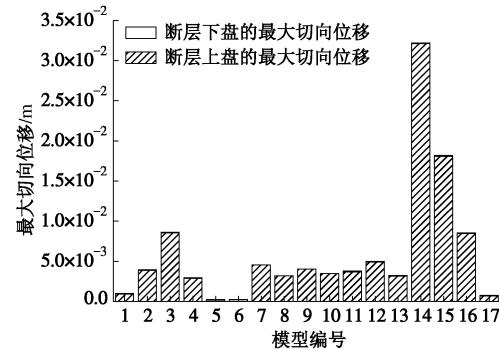


图 21 断层上、下盘界面的最大切向位移

Fig. 21 Maximum tangential displacements of interface between hanging wall and footwall of fault

从图 20, 21 中模型 1~6 可知, 断层上盘界面的最大法向位移随煤层埋深增加而增加, 断层下盘界面的最大法向位移随煤层埋深增加先增加后减少, 且上盘的最大法向位移的相对变化量总体大于下盘, 而断层上盘界面的切向位移随煤层埋深增加先增加后减少, 断层下盘界面的切向位移随煤层埋深增加而增加, 其产生这种现象的原因皆由所对应的应力变化所导致, 且由图 21 可知无论哪种因素所引起的下盘切向位移相对上盘而言皆可以忽略。

断层落差及含水层水压对断层上、下盘界面的最大法向及切向位移的影响分别由图 20, 21 中模型 2、模型 7~13 可知, 断层上盘界面的最大法向及切向位移受断层落差及水压变化的影响很小, 其皆因相应的应力变化量很小所导致, 而断层下盘界面仅在模型 2 中产生法向及切向位移, 且因水压而引起的影响也可以忽略。

图 20, 21 中模型 2、模型 14~17 描述了断层防水煤柱宽度对断层上、下盘界面的最大法向及切向位移的影响, 对比可知, 断层上、下盘界面的最大法向位移皆随煤柱宽度增加而增加, 而最大切向位移皆随煤柱宽度增加而减少, 其皆由相应的法向应力随煤柱宽度增加而增加及切向应力随之增加而减少所导致, 且断层上盘的最大切向位移相对其他位移变化量的比率约 200 倍, 总体而言, 断层界面的活化程度随煤柱宽度的减少而增加。

3.8 塑性破坏状态分析

由于计算方案较多, 限于篇幅有限, 只取因断层防水煤柱宽度不同对工作面底板损伤破坏带及断层活化的影响进行详细说明。图 22 描述了表 5 中模型 2 及模型 14~17 的计算结果, 清晰地反映了因断层防水煤柱宽度缩小而诱发工作面突水的演化过程。由于在工作面煤柱一侧的超前支承压力区与采空区的卸压区之间存在急剧的压力变化, 使得底板在工作面前下方产生破坏, 且含水层上方岩体下部因工作面采动诱发

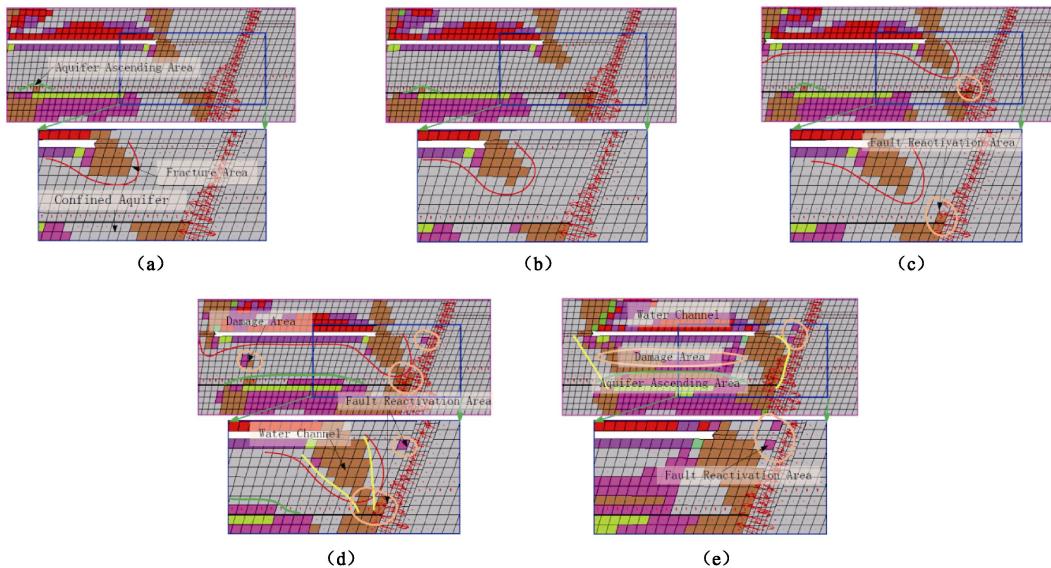


图 22 因断层防水煤柱宽度缩小而诱发突水的演化图

Fig. 22 Evolution of water inrush induced by narrowing width of waterproof pillar of fault

新裂隙发生,即可将产生新裂隙的区域命名为含水层导升区,简称3A区,如图22(a)所示;随断层防水煤柱宽度减少,底板破坏区域进一步向深部岩体延伸,但含水层导升区并没发生太大影响,隔水层尚具备一定的隔水能力,如图22(b)及图22(c)所示;由于断层的存在及工作面采动效应,使得距离断层较近的一侧底板破坏深度相对较大,且近断层侧岩体及断层出现小范围活化,采动破坏区及断层活化区的出现为进一步形成突水通道创造了有利条件,如图22(c)、(d)所示;当断层防水煤柱宽度减少至35 m时,由于矿压和承压水水压的共同作用导致含水层导升区不断扩大,底板破坏区及近断层活化区产生新的裂隙,原有的裂隙进一步扩大而联通,导致导水通道形成,即两条黄色曲线中间区域,诱发工作面渗水,同时底板隔水层内部出现一定程度的损伤,如图22(d)所示;随断层防水煤柱宽度的再减少,底板隔水层岩体完全破坏,断层活化区不断扩大,大范围导水通道形成,诱发工作面高强度突水,如图22(e)所示,与图12对比可知,模拟分析结论与相似材料试验结果存在很好的一致性。

4 结论与探讨

针对具体地质条件,以现场试验数据为基础,采用相似材料模拟及数值模拟相结合的分析方法,对工作面回采过程中底板损伤破坏及断层活化规律进行了研究,得出如下4点结论。

(1)工作面在临近断层时,由于断层带的“屏障”作用,会在煤柱的顶板和底板形成更高的集中应力,因此,靠近断层一侧的煤柱及底板的破坏深度相对较

大,随断层防水煤柱宽度减少,工作面突水危险性成倍增加。

(2)采用内径不同的水管反映底板岩层渗透性的空间差异性,并通过调节注水管水柱高度以达到设计水压,对含水层在相似材料模拟试验中的实现问题进行了很好的尝试,可进一步深入研究;由相似材料模拟试验及数值计算结果综合分析可知,在其它影响因素相同的情况下,底板岩层的渗透率越大,底板突水的危险性越大,且含水层水压越大工作面越易突水。

(3)采用压水试验及致裂试验获得了测试段岩体的渗透性及抗张强度等参数,为相似材料试验及模拟计算的正确分析提供了先决条件,受限于多种因素,测试点数目较少;试验发现岩体在水压作用下的渗透变形现象明显,因此在对承压水体上煤层回采安全性分析时,必须考虑固液耦合效应所带来的不利影响,但如何正确的评价孔隙压力改变与岩体变形间的相互关系需再做进一步的论文分析和试验研究;综合分析相似材料模拟试验及模拟计算的结果可知,采用固液耦合理论对底板承压作用下断层防水安全煤柱留设问题进行分析有助于降低失效风险。

(4)在采动应力场和渗流场共同作用下的底板破坏及断层活化规律与程度与多种因素有关,其中煤层埋深、承压水水压、断层落差及断层防水煤柱宽度对工作面突水通道的形成具有重要影响。煤层埋深、承压水水压及断层落差越大,越易突水;断层防水煤柱宽度越大,越不易突水。仅就此4种影响因素对工作面突水及断层活化的影响程度进行对比分析可知,煤层埋深及断层防水煤柱宽度的影响相对较大,承压水水压次之,断层落差的影响程度最弱;由因断层防水

煤柱宽度缩小而诱发工作面突水的演化过程可知工作面突水的形成机理, 且突水通道的形成最终都可归结为采动岩体损伤、应力场和渗流场的内因影响与联系。

参考文献:

- [1] 黄存捍. 采动断层突水机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010. (HUANG Cun-han. Study on water inrush mechanism of mining fault[D]. Changsha: Central South University, 2010. (in Chinese))
- [2] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803 - 2813. (HE Man-chao, XIE He-ping, PENG Su-ping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803 - 2813. (in Chinese))
- [3] 缪协兴, 刘卫群, 陈占青. 采动岩体渗流理论[M]. 北京: 科学出版社, 2004. (MIAO Xie-xing, LIU Wei-qun, CHEN Zhan-qing. Dynamics of systems of seepage flow in surrounding rock affected by mining[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese))
- [4] 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. (LI Chang-wen, LIU Zheng, GUO Hao-xin, et al. Mechanics analysis on key route of water inrush from fault base on mining dynamics and under pressurized water role[J]. Coal Engineering, 2011, 5: 70 - 73. (in Chinese))
- [5] 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 En-tai. Characteristics of floor water eruption of fault and forecast methods in Yanmazhuang coal mine[J]. Coal Engineering, 2005, 7: 43 - 45. (in Chinese))
- [6] 于广明, 谢和平, 杨 伦, 等. 采动断层活化分形界面效应的数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 1998, 23(4): 396 - 400. (YU Guang-ming, XIE He-ping, YANG Lun, et al. Numerical simulation of fractal effect induced by activation of fault after coal extraction[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(4): 396 - 400. (in Chinese))
- [7] 潘元伯. 关于斯列萨列夫安全水头公式的推导[J]. 合肥工业大学学报, 1986, 8(1): 99 - 103. (PAN Yuan-bo. An inquiry of secure hydraulic head formula of slisalif's[J]. Journal of Hefei Polytechnic University, 1986, 8(1): 99 - 103. (in Chinese))
- [8] 李白英. 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(自然科学版), 1999, 18(4): 11 - 18. (LI Bai-ying. “Down three zones” in the prediction of the water inrush from coalbed floor aquifer-theory, development and application[J]. Journal of Shandong Institute of Mining and Technology (Natural Science), 1999, 18(4): 11 - 18. (in Chinese))
- [9] 刘其声. 关于突水系数的讨论[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(4): 34 - 37. (LIU Qi-sheng. A discussion on water inrush coefficient[J]. Coal Geology & Exploration, 2009, 37(4): 34 - 37. (in Chinese))
- [10] 王计堂, 王秀兰. 突水系数法分析预测煤层底板突水危险性的探讨[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(7): 106 - 111. (WANG Ji-tang, WANG Xiu-lan. Discussion on water inrush coefficient method applied to predict water inrush danger of seam floor[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(7): 106 - 111. (in Chinese))
- [11] 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. (ZHANG Jin-cai, ZHANG Yu-zhuo, LIU Tian-quan. Rock seepage and water inrush of seam floor[M]. Beijing: Geological Press, 1997. (in Chinese))
- [12] 荆自刚, 李白英. 煤层底板突水机理的初步探讨[J]. 煤田地质与勘探, 1980(2): 27 - 29. (XING Zi-gang, LI Bai-ying. Mechanism of water inrush in coal seam floor[J]. Coal Geology & Exploration, 1980(2): 27 - 29. (in Chinese))
- [13] 李白英, 弥尚震. 采矿工程水文地质学[M]. 泰安: 山东矿业与技术出版社, 1988. (LI Bai-ying, MI Shang-zhen. Mining engineering hydrogeology[M]. Tai'an: Shandong Institute of Mining and Technology Press, 1988. (in Chinese))
- [14] 王作宇, 刘鸿泉. 承压水上采煤[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992. (WANG Zuo-yu, LIU Hong-quan. Coal mining above confined aquifer[M]. Beijing: Coal Industry Press, 1992. (in Chinese))
- [15] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 岩层控制中的关键层理论研究[J]. 煤炭学报, 1996, 21(3): 225 - 230. (QIAN Ming-gao, MIAO Xie-xing, XU Jia-lin. Theoretical study of key stratum in ground control[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(3): 225 - 230. (in Chinese))
- [16] HU Xin-yu, WANG Lian-guo, LU Yin-long, et al. Analysis of insidious fault activation and water inrush from the mining floor[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2014, 24: 477 - 483.
- [17] 彭苏萍, 孟召平, 李玉林. 断层对顶板稳定性影响相似模拟试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2001, 29(3): 1 - 4. (PENG Su-ping, MENG Zhao-ping, LI Yu-lin. Influence of faults on coal roof stability by physical modeling study[J]. Coal Geology & Exploration, 2001, 29(3): 1 - 4. (in Chinese))

- [18] 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. (ZUO Jian-ping, CHEN Zhong-hui, WANG Huai-wen, et al. Experimental investigation on fault activation pattern under deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(3): 305 – 309. (in Chinese))
- [19] 李志华, 窦林名, 陆振裕, 等. 采动诱发断层滑移失稳的研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(4): 499 – 504. (LI Zhi-hua, DOU Lin-ming, LU Zhen-yu, et al. Study of the fault slide destabilization induced by coal mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(4): 499 – 504. (in Chinese))
- [20] 李凯, 茅献彪, 陈龙, 等. 采动对承压底板断层活化及突水危险性的影响分析[J]. 力学季刊, 2011, 32(2): 261 – 268. (LI Kai, MAO Xian-biao, CHEN Long, et al. Research on fault activation and risk analysis of water inrush in mining floor above confined aquifer[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2011, 32(2): 261 – 268. (in Chinese))
- [21] 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): 1046 – 1050. (LIU Zhi-jun, HU Yao-qing. Solid-liquid coupling study on water inrush through faults in coal mining above confined aquifer[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(10): 1046 – 1050. (in Chinese))
- [22] 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 Shao-he, ZHU Wei-shen, WANG Shu-fa. Study on the 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))
- [23] 张培森, 杨健, 王明辉, 等. 固液耦合模式下采动诱发断层界面应力变化规律的模拟研究[J]. 中国矿业, 2014, 23(4): 84 – 89. (ZHANG Pei-sen, YANG Jian, WANG Ming-hui, et al. Simulated study on variation of interfacial stress of fault induced by mining under solid-liquid coupling mode[J]. China Mining Magazine, 2014, 23(4): 84 – 89. (in Chinese))
- [24] 张培森, 张文泉, 王明辉, 等. 固液耦合模式下采动诱发断层两盘滑移规律的模拟分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2014, 33(2): 53 – 57. (ZHANG Pei-sen, ZHANG Wen-quan, WANG Ming-hui, et al. Numerical simulation of sliding rule of two plates of fault induced by mining under solid-liquid coupling mode[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2014, 33(2): 53 – 57. (in Chinese))
- [25] 张培森, 杨健, 王明辉, 等. 固液耦合模式下采动诱发断层活化及突水的试验研究[J]. 煤矿安全, 2014, 45(3): 24 – 27. (ZHANG Pei-sen, YANG Jian, WANG Ming-hui, et al. Experimental research on fault activation and water inrush induced by mining under solid-liquid coupling mode[J]. Safety in Coal mines, 2014, 45(3): 24 – 27. (in Chinese))
- [26] 杨天鸿, 唐春安, 徐涛. 岩石破裂过程的渗流特性-理论、模型与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004. (YANG Tian-hong, TANG Chun-an, XU Tao. Flow characteristics during rock failure process-Theory, models and applications[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese))
- [27] 卜万奎, 茅献彪. 断层倾角对断层活化及底板突水的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 386 – 394. (BU Wan-kui, MAO Xian-biao. Research on effect of fault dip on fault activation and water inrush of coal floor[J]. Chinese Journal of rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 386 – 394. (in Chinese))
- [28] FENG Mei-mei, MAO Xian-biao, BAI Hai-bo, et al. Analysis of water insulating effect of compound water-resisting key strata in deep mining[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2007, 17(1): 1 – 5.
- [29] 李连崇, 唐春安, 梁正召. 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. (LI Lian-chong, TANG Chun-an, LIANG Zheng-zhao, et al. Numerical analysis of pathway formation of groundwater inrush from faults in coal seam floor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 290 – 297. (in Chinese))
- [30] YANG T H, LIU J, ZHUA W Z, et al. A coupled flow-stress-damage model for groundwater outbursts from an underlying aquifer into mining excavations[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2007, 44: 87 – 97.
- [31] 谭静强, 琚宜文, 张文永, 等. 淮北煤田中南部大地热流及其煤层气资源效应[J]. 中国科学地球科学, 2009, 34(4): 449 – 454. (TAN Jing-qiang, JU Yi-wen, ZHANG Wen-yong, et al. Structure controls on present geothermal field in Sulin mine area of Huabei[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(4): 449 – 454. (in Chinese))
- [32] 琚宜文, 王桂梁. 淮北宿临矿区构造特征及演化[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版) 2002, 21(3): 286 – 289. (JU Yi-wen, WANG Gui-liang. Tectonic characteristics and evolution of the Sulin mine area in the Huabei coalfield[J].

- Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2002, **21**(3): 286 – 289. (in Chinese))
- [33] WANG Gui-liang, JIANG Bo, CAO Dai-yong, et al. On the Xuzhou-Suzhou arcuate duplex-imbricate fan thrust system[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1998, **72**(3): 228 – 236.
- [34] 蒋中明, 付 胜, 李尚高, 等. 高压引水隧洞陡倾角断层岩体高压压水试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(11): 2318 – 2323. (JIANG Zhong-ming, FU Sheng, LI Shang-gao, et al. High pressure permeability test on hydraulic tunnel with steep obliquity faults under high pressure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, **26**(11): 2318 – 2323. (in Chinese))
- [35] 吴基文, 童宏树, 童世杰, 等. 断层带岩体采动效应的相似材料模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(2): 4170 – 4176. (WU Ji-wen, TONG Hong-shu, TONG Shi-jie, et al. Study on similar material for simulation of mining effect of rock mass at fault zone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, **26**(2): 4170 – 4176. (in Chinese))
- [36] LI Lian-chong, YANG Tian-hong, LIANG Zheng-zhao, et al. Numerical investigation of groundwater outbursts near faults in underground coal mines[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2011, **85**: 276 – 288.
- [37] ATSUSHISAINOKIN, HANI S. MITRI. Dynamic behavior of mining-induced fault slip[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2014, **66**: 19 – 29.
- [38] Itasca Consulting GroupInc. *FLAC^{3D}-Fast Lagrangian analysis of continua*[M]. 4th ed. Minnesota: Itasca Consulting GroupInc, 2009.
- [39] 姜耀东, 王 涛, 赵毅鑫, 等. 采动影响下断层活化规律的数值模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, **42**(1): 1 – 5. (JIANG Yao-dong, WANG Tao, ZHAO Yi-xin, et al. Numerical simulation of fault activation pattern induced by coal extraction[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2013, **42**(1): 1 – 5. (in Chinese))
- [40] BROWN E T, HOEK E. Technical note trends in relationships between measured in-situ stress and depth[J]. *Int J Rock Mech Min Sci and Geomech Abstr*, 1978, **15**(4): 211 – 215. (in Chinese))
- [41] 赵德安, 陈志敏, 蔡小林, 等. 中国地应力场分布规律统计分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(6): 1265 – 1271. (ZHAO Dean, CHEN Zhi-min, CAI Xiao-lin, et al. Analysis of distribution rule of geostress in china[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, **26**(6): 1265 – 1271. (in Chinese))
- [42] 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 Guo-ying, GUAN En-tai, 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))