

# 断层采动活化对南方煤矿岩溶突水影响研究

李青锋<sup>1,2</sup>, 王卫军<sup>1,2</sup>, 彭文庆<sup>1,2</sup>, 彭刚<sup>1,2</sup>

(1. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 为防止岩溶因断层活化而引发突水, 探讨断层在采动条件下的活化规律及其对南方煤矿岩溶突水的影响。首先根据断层的形成机制分析各类断层形成的应力环境, 得到断层活化的应力条件; 然后分析工作面推进过程中的采场应力场和岩体运动规律, 次生的垂直应力和水平应力不均衡变化是断层采动活化的主要原因; 最后分析断层采动活化引发岩溶突水的机制, 断层活化导致导水裂隙带高度增加, 从而破坏隔水层导通上覆承压岩溶含水层, 引发矿井岩溶突水事故。

**关键词:** 工程地质; 断层; 采动活化; 岩溶; 突水机制

**中图分类号:** P 642

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2010)增 1 - 3417 - 08

## INFLUENCE OF ACTIVATION FAULT AFTER COAL EXTRACTION ON COAL MINE KARST WATER -INRUSH

LI Qingfeng<sup>1,2</sup>, WANG Weijun<sup>1,2</sup>, PENG Wenqing<sup>1,2</sup>, PENG Gang<sup>1,2</sup>

(1. *Hunan Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China*; 2. *School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China*)

**Abstract:** For scientifically and effectively preventing karst water bursting because of fault activation, both the mining activation rule of fault and coal mine karst water bursting effect by fault activation are studied. First of all, according to the fault formation mechanism, the stress environment of all kinds of fault forming had been analyzed, and the stress condition of coal-seam fault activating had been discussed. Then, based on the law of stress field in stope and motion of the rock mass in the course of mining process, the main reason of fault activating is because of the uneven changes between secondary vertical stress and horizontal stress. Finally, it is analyzed that water-inrush mechanism of karst is initiated by activation of fault after coal extraction. Fault activation leads to the height of water flowing fractured zone increasing, and the karst aquifer is got through because aquifuge is failure, so water inrush accident is occurred.

**Key words:** engineering geology; fault; mining activation; karst; water-inrush mechanism

## 1 引言

在我国南方, 一些二叠煤系的主要矿区, 如涟邵、南桐、天府、合山、丰城、煤炭坝等常受到底

部茅口灰岩、顶部长兴灰岩地下水的威胁, 对正常开采造成危害。这些顶部的长兴灰岩和底部的茅口灰岩距可采煤层的间距从几米到上百米不等, 有些达到几百米, 灰岩中发育的岩溶水对矿井的威胁程度也就有大有小。同时, 又由于南方地区地表水系

**收稿日期:** 2008 - 12 - 19; **修回日期:** 2009 - 03 - 20

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB209400)

**作者简介:** 李青锋(1970 -), 男, 2007 年于中国矿业大学获工程力学专业博士学位, 现任讲师, 主要从事采矿工程、工程检测等方面的教学与研究工作。E-mail: liqingfeng0712@163.com

发达，地下岩溶水与地表水往往有较强的水力联系，因此，一旦发生岩溶突水，控制将十分困难。

南方岩溶区多分布巨厚到块状的纯净碳酸盐岩，多发育有裸露型岩溶，介质可溶性强，受构造应力时易发生稀疏而宽大的裂隙，形成岩溶富水区。通过对湖南煤炭坝矿区井下岩溶突水点调查发现，岩溶突水点多发生在断层带附近，分析其原因主要有2个：一是因岩溶区介质可溶性强，容易受构造应力影响形成较大岩溶富水区；二是断层又构成了岩溶突水的通道。在众多岩溶突水事故中，由采动断层活化引发的岩溶突水危险性更大，且因其具有较强的隐蔽性给煤矿生产带来极大的安全隐患。

对于大、中型断层(或断裂构造)，在采区准备、工作面回采之前就已查明，一般在采区设计中作为采区边界并留设防水煤柱来防止突水，但是如何经济有效的留设防水煤柱仍是值得研究的重大问题。对于断层落差 $<5\text{ m}$ 的小型断层(或断裂构造)，一般只能在回采巷道掘进过程才能探明，对于含水、导水断层，在掘进过程中就必须采取阻、隔、导水措施防止突水灾害的发生；而对于非含水断层、隔水性断层(非导水断层)，若断层可能与含水层导通，必须分析其采动活化性能，在工作面回采过程中采取各种开采技术措施来防止断层采动活化<sup>[1]</sup>。因此，进行断层采动活化及其对南方煤矿岩溶突水影响分析，对于预防南方煤矿突水问题具有重大的理论指导意义。

对于断层采动活化与岩溶突水，许多专家学者进行了非常有意义的探讨。白明洲等<sup>[2]</sup>通过对深埋隧道岩溶突水灾害的地质条件分析认为：碳酸盐岩层的构造特性及其构造应力强度影响岩层的张开程度，岩层(或断层)倾角越陡、构造应力强度越大，岩层(或断层)层面张开程度大，构成地下水运动的良好通道；吴基文等<sup>[3]</sup>的研究结果表明：在煤层回采过程中，随断层煤柱的减小，断层两盘岩体的变形存在差异性，表现出不同的采动效应特征；当煤柱减小到一定数值后将造成断层上、下盘岩体发生相对位移，导致断层“活化”，引发断层导水；赵海军等<sup>[4]</sup>的结果表明：当陡倾断层位于开挖引起的岩体变形的拉张区时，不论是在断层上盘开挖还是下盘开挖，都会使垂直断面产生附加张应力，使其抗剪强度减小，在自重体积力作用下使断层“活化”；李晓昭等<sup>[5]</sup>通过数值模拟表明，对于煤层底板正断层，开挖空间至断裂带的距离对附加应力的分布有显著影响；当开挖空间位于正断层上盘时，岩体开

挖将使断层上盘卸压。本文将分析煤层顶板断层的采动活化规律及其对岩溶突水的影响。

## 2 采动支承压力对活化的影响分析

### 2.1 断层活化性质及应力状态分析

根据张林洪等<sup>[6, 7]</sup>的研究成果，按断层面上位移矢量方向与地表面(水平面)的关系，断层可以分为倾滑断层和走滑断层(或平移断层)，前者又可分为正断层和逆断层，后者又可分为左旋走滑断层和右旋走滑断层，另外还有一种张性断层，其位移矢量方向垂直于断层面，通常位移方向也是水平的，算是平移断层的特例。断层面与3个主应力( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ )的关系可表述如下：走滑断层和张性断层的 $\sigma_2$ 为垂直应力， $\sigma_1$ 和 $\sigma_3$ 为水平应力；逆断层的 $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ 为水平应力， $\sigma_3$ 为垂直应力；正断层的 $\sigma_2$ 和 $\sigma_3$ 为水平应力， $\sigma_1$ 为垂直应力。几种断层类型与主应力关系见图1。

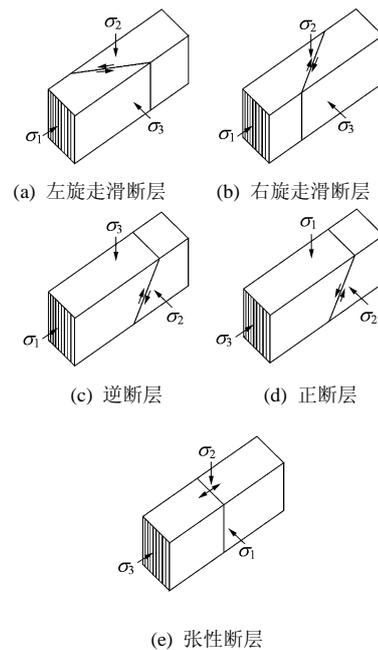


图1 断层类型与主应力

Fig.1 Fault types and principal stresses

断层在煤矿突水中的作用是形成突水通道，即作为顶(底)板含水层与回采(掘进)工作面的导水通道，在非采动条件下，断层是否具有隔水性能主要取决于断层带断裂面力学性质。一般情况下，正断层为张性断层，张性断裂面是由拉伸作用力产生的，张裂程度大，断裂面的充填物孔隙多、孔隙度大，为地下水的运移创造了条件，相对地起导水作用；逆断层为压性断层，由于压性断裂面所受的压应力

最大, 因此其结构面本身及其破碎充填物非常紧密, 其导水性能差, 相对地起隔水作用; 平移断层为扭性断层, 扭性断裂面是由剪切作用力产生的, 结构面内发育有呈闭合型的较窄裂缝, 且延展较远, 发育深度大、层次多, 通常也具有较好的导水性。根据断层性质, 平移断层和正断层常表现为导水断层, 而逆断层表现为隔水断层。

### 2.2 采动支承压力分布规律

随着长壁工作面推进而形成采空区, 采空区上方坚硬岩层在裂缝带内将断裂成排列整齐的岩块, 岩块间受水平推力作用而形成铰接关系, 并在走向方向上形成煤壁支承区(A)、离层区(B)和重新压实区(C), 在走向方向又可分为极限平衡区(D)和弹性区(A), 上覆岩层的重量由采空区和周围的实体煤承担, 如图 2 所示<sup>[8]</sup>。如煤壁支承区内的上覆岩层载荷便由实体煤的边缘部分承担, 从而给这部分煤体增加额外的载荷, 这部分载荷称为煤层的垂直集中载荷(或垂直支承压力)。

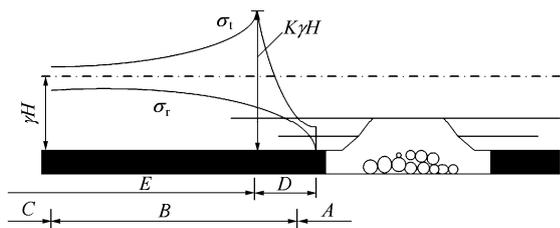
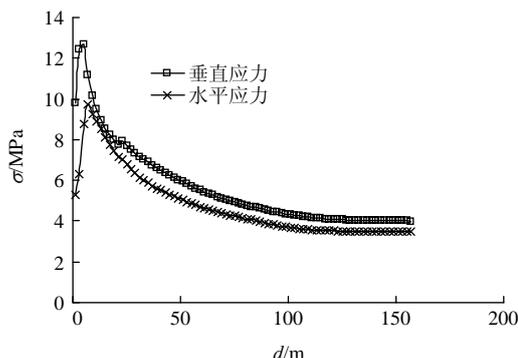


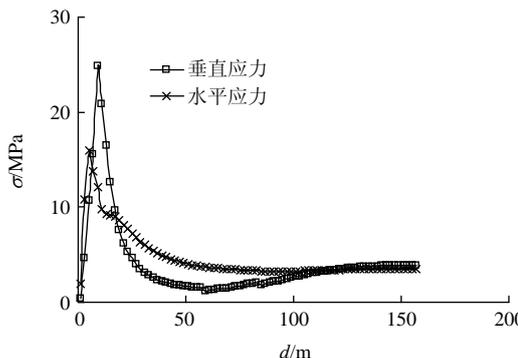
图 2 支承压力的分区示意图<sup>[8]</sup>

Fig.2 Sketch of abutment pressure partition<sup>[8]</sup>

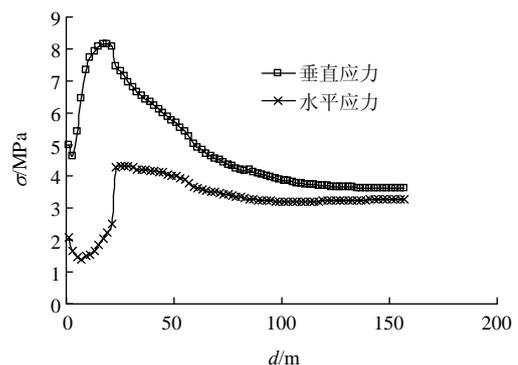
随着工作面的推进, 由于开挖和铰接岩块的水平推力作用, 煤层上方某处直接顶、老顶的垂直应力、水平应力都不断增大; 当工作面推过该处后, 两种应力基本都减小到原岩应力状态。为详细探讨工作面推采过程中, 工作面前方煤层上方岩体各应力分量随工作面推进的变化关系(断层倾向与工作面推进方向相同), 采用 FLAC5.0 数值模拟软件进行了数值模拟, 模拟结果如图 3 所示, 从图 3(a)中可以看出: 直接顶处断层下盘垂直采动应力最大值(12.7 MPa)是垂直非采动应力(4.00 MPa)的 3.2 倍, 而其水平采动应力最大值(9.72 MPa)是水平非采动应力(3.48 MPa)的 2.79 倍; 从图 3(b)中可以看出: 直接顶处断层上盘垂直采动应力最大值(24.9 MPa)是垂直非采动应力(3.89 MPa)的 6.4 倍, 而其水平采动应力最大值(15.9 MPa)是水平非采动应力(3.51 MPa)的 4.53 倍; 从图 3(c)中可以看出: 老顶处断层下盘垂直采动应力最大值(8.17 MPa)是垂直非采动



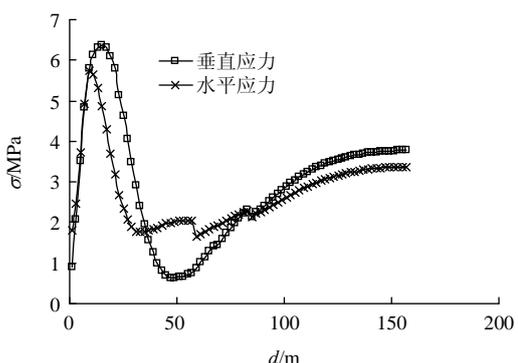
(a) 直接顶(距煤层顶板 5 m)处断层下盘应力分布情况



(b) 直接顶(距煤层顶板 5 m)处断层上盘应力分布情况



(c) 老顶(距煤层顶板 25 m)处断层下盘应力分布情况



(d) 老顶(距煤层顶板 25 m)处断层上盘应力分布情况

图 3 顶板应力随工作面推进距离的变化关系

Fig.3 Relationships between roof stress and direction of face advance

应力(3.63 MPa)的 2.25 倍, 而其水平采动应力最大值(4.35 MPa)是水平非采动应力(3.27 MPa)的 1.33 倍; 从图 3(d)中可以看出: 老顶处断层上盘垂直采

动应力最大值(6.37 MPa)是垂直非采动应力(3.77 MPa)的 1.69 倍, 而其水平采动应力最大值(5.72 MPa)是水平非采动应力(3.37 MPa)的 1.69 倍。显然, 随着工作面的临近, 煤层顶板垂直应力和水平应力都有不同程度的有所增加, 但垂直应力增加的比例比水平应力增加的比例明显要大; 由于断层的影响, 断层上下盘的垂直应力和水平应力增加的幅度不一样, 开采盘的应力增加幅度要明显大于非开采盘; 图 3(a), (c)对比可以看出, 断层距开采煤层顶底板越远, 采动对断层活化影响越弱。

### 2.3 采动应力对断层活化影响的力学分析

从上述原生断层的应力状态来看, 非导水断层活化与导水断层的区别在于其主应力方向发生根本性变化, 如煤矿常见的正断层(导水断层)与逆断层(非导水断层)中, 逆断层的最大主应力方向为近水平方向, 而正断层的最大主应力方向为竖向。故可以认为断层的活化是断层在次生矿山压力(采动应力)作用下主应力方向发生质变的过程, 因此, 断层的活化与采动应力密切相关。对于正断层, 其最大主应力为垂直应力, 采动应力的叠加不会引起岩体主应力方向的较大改变, 但附加的垂直应力会使断层活化加剧。对于逆断层, 其最小主应力为重直应力, 若采动应力的叠加不会引起主应力方向的根本性改变, 则断层不活化; 若采动压力的叠加引起主应力方向的根本性改变, 则断层活化。因此, 在煤矿采矿活动中应加强煤矿原岩应力及次生应力的测量, 为逆断层的活化提供实测依据。

对于断层的某一微小单元, 如图 4 所示。假设其垂直方向的应力为  $\sigma_{yy}$ 、水平应力为  $\sigma_{xx}$ 、微单元段的断层面倾角为  $\alpha$ 、断层面的内摩擦角为  $\varphi$ 、黏聚力为  $c$ 、断层带裂隙中流体压力  $p$ , 则由李青锋等<sup>[9]</sup>的研究成果可得断层上下盘产生相对滑移的条件为

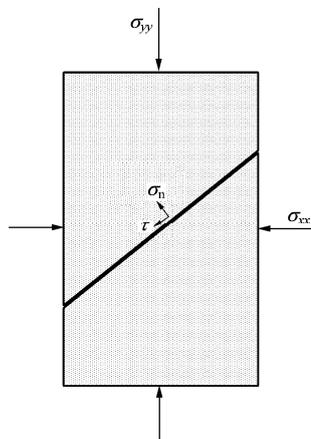


图 4 逆断层滑移力学模型

Fig.4 Mechanical model of reverse fault slipping

$$\sigma_{yy} > \beta \sigma_{xx} + \eta \tag{1}$$

其中,

$$\beta = \frac{\cos \alpha + \sin \alpha \tan \varphi}{\sin \alpha - \cos \alpha \tan \varphi}$$

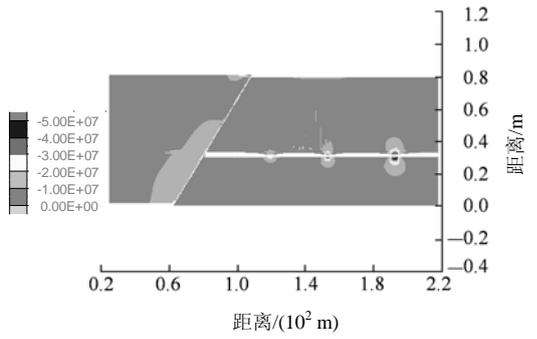
$$\eta = \frac{c - p \tan \varphi}{\sin \alpha - \cos \alpha \tan \varphi}$$

由式(1)可知, 当  $\eta = 0$  时, 只要断层处垂直应力与水平应力的比值大于  $\beta$ , 逆断层活化导水。在非采动状态下, 由于逆断层断层面本身及其破碎充填物非常紧密, 其内摩擦角  $\varphi$  较大, 也即使  $\beta$  值增大, 不易活化, 但在采动条件下, 由图 3 可知, 断层附近岩石的垂直应力与水平应力的比值都大于 1, 当其比值大于  $\beta$  时就使断层采动活化。而对于正断层, 采动后的垂直应力与水平应力的比值继续增大, 更增强了正断层的导水性。另外, 当断层面位于煤层及其上覆直接顶、下伏直接底时, 因断层处于顶板垮落带或底板裂隙带内, 从而直接导水。

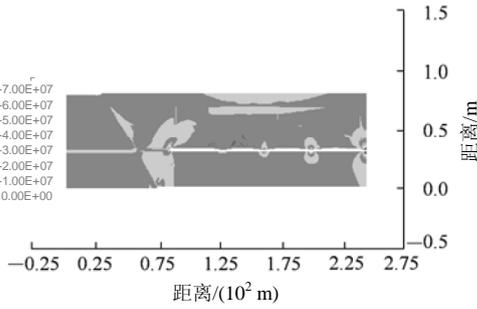
### 3 工作面推进方向对断层活化的影响

前述分析了断层的物理力学性质、断层与开采煤层的相对位置对断层活化的影响, 煤矿的开采实践表明工作面推进方向也与断层活化有极大的相关性, 为探讨工作面推采对断层活化的影响, 根据工作面推进方向与断层倾向的不同进行了数值模拟。最大、最小主应力分布云图分别如图 5, 6 所示。图 7 表示工作面推进方向与断层倾向相反时的顶板应力随工作面推进距离的变化关系曲线。

从图 5, 6 可以看出: 随着工作面向前推进, 前方煤壁区将产生应力集中现象, 其最大、最小主应力的分布区域不仅与煤岩体的物理力学性质有关, 而且与断层倾向有很大关系。当断层倾向与工作面推进方向相同时, 其最大主应力基本沿着断层倾向分布, 且位于断层上盘; 而其最小主应力沿着与断层倾向垂直的方向分布。当断层倾向与工作面推进方向相反时, 其最大主应力主要分布在工作面斜上方(倾斜方向与断层倾向垂直), 但在断层倾向方向也分布有最大主应力; 而其最小主应力沿着断层倾向方向分布。从图 3, 7 可以看出: 当断层倾向与工作面推进方向相同时, 断层带上、下盘的垂直采动应力基本都大于其水平采动应力, 为顶板断层活化创造了有利条件; 而当断层倾向与工作面推进方向相反时, 断层带上、下盘的垂直采动应力并不大于其水平采动应力, 即不利于断层的活化。因此, 当工作面推进方向与断层倾向相同时, 断层最易活化。



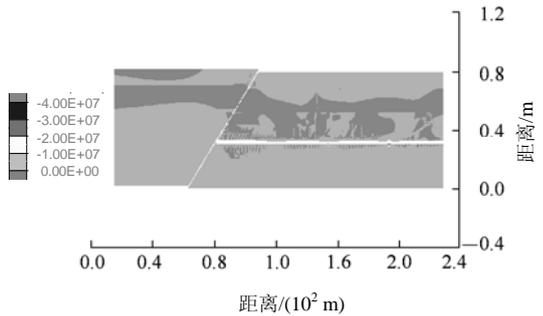
(a) 工作面推进方向与断层倾向相同的情况



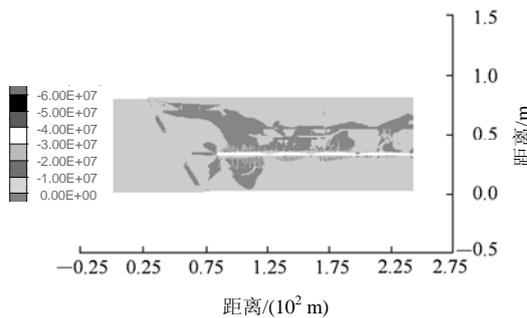
(b) 工作面推进方向与断层倾向相反的情况

图 5 最大主应力分布云图(单位: Pa)

Fig.5 Contours of maximum principle stress(unit: Pa)



(a) 工作面推进方向与断层倾向相同的情况



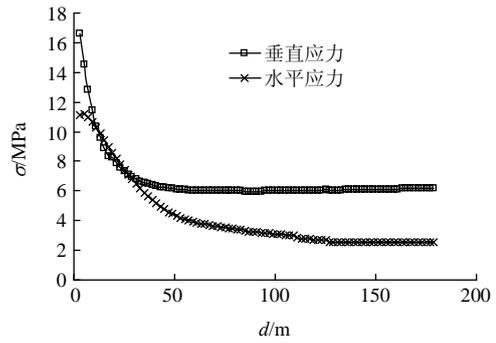
(b) 工作面推进方向与断层倾向相反的情况

图 6 最小主应力分布云图(单位: Pa)

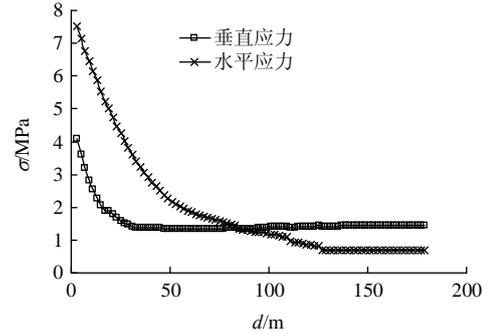
Fig.6 Contours of minimum principle stress(unit: Pa)

### 4 活化断层对岩溶突水的影响分析

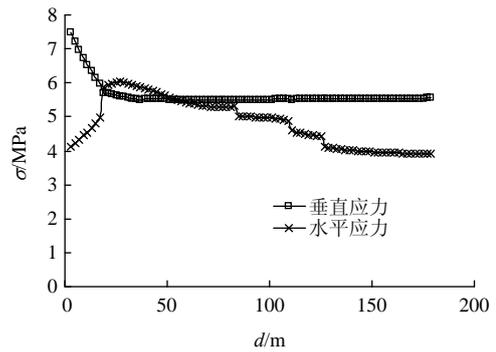
当有断层时, 断层不仅改变断层带及其周围岩体的应力分布及其结构稳定性, 使导水裂隙带高度



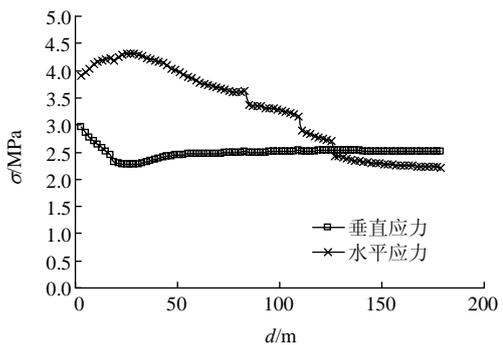
(a) 直接顶(距煤层顶板 5 m)处断层上盘的应力分布情况



(b) 直接顶(距煤层顶板 5 m)处断层下盘的应力分布情况



(c) 老顶(距煤层顶板 25 m)处断层上盘的应力分布情况



(d) 老顶(距煤层顶板 25 m)处断层下盘的应力分布情况。

图 7 工作面推进方向与断层倾向相反时顶板应力随工作面推进距离的变化关系

Fig.7 Relationships between roof stress and direction of face advance when faults tend is opposite to the direction of face advance

比无断层时发育得高; 而且采动压力使断层活化,

活化断层成为岩溶水突水通道。

#### 4.1 断层对顶板稳定性分析

彭苏萍等<sup>[10]</sup>通过相似材料模拟研究了断层活化对顶板稳定性的影响。如图 8 所示,在工作面前方,超前支承压力的方向(垂直支承压力和水平支承压力的合力方向)近似平行于前方断层,导致断层活化,顶板岩体沿断裂结构面发生滑移、回转和破坏失稳,当工作面开采到离断层面 6~15 m 时,由于受采动影响,断层“活化”,形成 Z 字型拉张断裂,断层下盘沿断层面拉伸下沉。



图 8 断层采动活化产生 Z 字形张拉断裂

Fig.8 Z-shaped tensile fracture by activation of fault after coal extraction

从图 8 中看到,由于断层的影响,工作面顶板运动规律发生了变化,改变了顶板变形破坏的连续性,断层面下盘大范围岩层整体下移,工作面上方在正常情况下原本应是整体下沉带内出现了较大的离层,导致工作面出现强烈的矿压显现和导水裂隙带高度的大幅度增加。

#### 4.2 断层对导水裂隙带高度的影响

为分析断层活化对导水裂隙带高度的影响,胡戈等<sup>[11]</sup>通过数值模拟研究了断层对顶板裂隙发育高度的影响。如图 9 所示,当工作面距离断层较远时,导水裂隙带高度为 80 m,和无断层时模拟结果一致,此时断层还没有对导水裂隙带产生影响。当工作面接近断层时,导水裂隙带已经和断层裂隙连通,当工作面推进到断层时,导水裂隙带高度最大,达 140 m。随着工作面推过断层,断层由受拉变为受压,断层内裂隙带高度迅速降低,邻近断层一侧的导水裂隙带高度逐渐接近 80 m 的正常值。

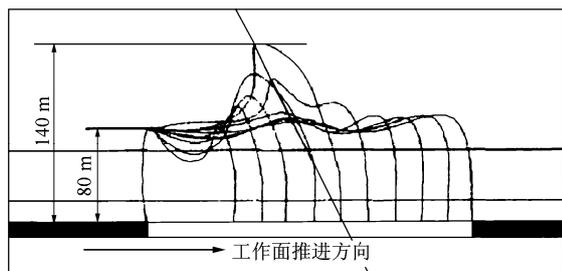


图 9 随工作面推进导水裂隙带高度发展示意图

Fig.9 Height variation of water flowing fractured zone with the advance of working face

## 5 岩溶突水实例分析

### 5.1 突水矿井及工作面概况

塘冲井田由中上石炭统壶天群地层和下石炭统石英砂岩组成中低山地形,地势西北高,东南低,区内岩层出露较好,利于降水入渗补给地下水。井田内含水层主要有中下石炭统梓门桥组(C1z)岩溶承压含水层,该含水层厚度 50~60 m,以及下石炭统测水组(C1c)砂岩裂隙承压含水层,整体水位西北高、东南低,地下水迳流方向由 WN 向 ES。隔水层主要有梓门桥组下部的泥灰岩,厚 10~30 m,其隔水性较好,此隔水层位于开采煤层之上 70~90 m 左右。根据多年的观测,直接向矿井充水的是测水组砂岩裂隙承压含水层水,尤其是 3 煤顶板石英砂岩,该含水层厚度 5~16 m,出露高程较高,裂隙、节理很发育,渗透系数大,开采过程中一经揭露便向工作面涌水,但水量不大,矿井涌水量虽随着开采范围的加大有所增长,但一直稳定在 80 m<sup>3</sup>/h 以下。

2325 工作面位于该矿井西翼,采深 300 m,工作面走向长度 210 m,倾向长度 78 m,煤层倾角 10°~15°,采高 2 m。采用炮采,单体液压支柱支护,三、五控顶,最大控顶距 3.2 m,最小控顶距 1.6 m。

2007 年 8 月 11 日,2325 工作面开采到离断层煤柱边界尚有 3 m 距离时,出现剧烈的矿压显现,约 3 h 后,工作面大量涌水,工作面涌水量由 20 m<sup>3</sup>/h 急剧增加到 450 m<sup>3</sup>/h,造成矿井停产达 15 d。此后,水量有所减小,约 200 m<sup>3</sup>/h,工作面恢复生产大约一个月后,涌水量降低到 150 m<sup>3</sup>/h。

### 5.2 导水裂隙带高度分析

工作面顶板导水裂隙带最大高度(导高)受采高、采空区面积、顶板岩层的结构类型、顶板管理方法、煤层赋存状态和开采深度等多种因素的影响<sup>[12~15]</sup>。2335 工作面采深 300 m,工作面走向长度 210 m,倾向长度 78 m,煤层倾角 10°~15°,采高 2 m,上覆岩层为砂质泥岩、石英砂岩、泥岩等,抗压强度 30~50 MPa,采用全部垮落法管理顶板。由相关规范<sup>[12]</sup>中冒落带与导水裂隙带高度的经验公式计算导水裂隙带高度为

$$H_f = \frac{100\Sigma M}{1.6\Sigma M + 3.6} \pm 5.6 = 23.8 \sim 35.0 \text{ m} \quad (2)$$

因此, 在无断层情况下导水裂隙带不会达到泥灰岩隔水层, 也即不会发生岩溶突水现象。当有断层存在时, 2335 工作面采至距断层煤柱 15 m 时, 石英砂岩(关键层 1)发生周期性断裂(由工作面剧烈的矿山压力显现可判断), 则在工作面前方产生一纵向裂隙, 该组裂隙与断裂面连通, 使采空区上方的粉砂岩、砂质页岩由稳定悬臂梁结构(见图 10)变成可沿纵向采动裂隙面滑移的滑动块, 使泥质灰岩(隔水层)与其下伏的粉砂岩、砂质灰岩间产生离层, 泥质灰岩在上覆载荷作用下产生纵向裂隙与上覆灰岩含水层导通, 岩溶承压水沿纵向导水裂隙渗入工作面(涌水量 20 m<sup>3</sup>/h), 随着渗流水冲刷裂隙带中的泥岩颗粒, 形成涌水通道, 工作面大量涌水(涌水量 450 m<sup>3</sup>/h)。

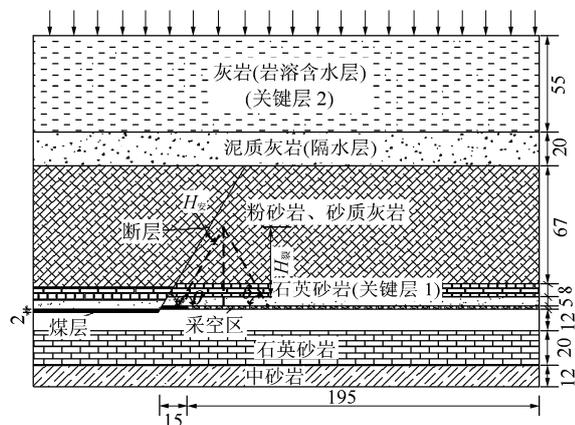


图 10 工作面含水层赋存示意图(单位: m)

Fig10 Schematic diagram of aquifer occurrence in face (unit: m)

### 5.3 断层防水煤柱分析

在工作面两巷掘进过程中, 分别穿过一条倾向正断层, 断层走向基本与工作面平行, 断层面倾角 60°, 落差 2 m, 工作面由下盘向上盘推进, 如图 10 所示。由于该矿井煤层不稳定, 工作面走向长度一般不超过 200 m, 在以往的工作面推进过程中, 没有上覆岩溶含水层突水现象, 所以防水煤柱一般依照底板突水留设, 即按照张金才等<sup>[16]</sup>研究中的断层防水煤柱宽度计算公式计算煤柱宽度为 10.6 m, 故矿井设计的煤柱宽度为 12 m。

对于图 10 所示顶板突水, 其防水煤柱宽度  $L$  计算公式为

$$L = \frac{H_{安}}{\sin \theta} + \frac{H_{裂}}{\tan \theta} + \frac{H_{裂}}{\tan \delta} \quad (3)$$

式中:  $H_{裂}$  为最大导水裂隙带高度(m);  $\theta$  为断层倾角(°);  $\delta$  为岩层沿走向方向的移动角(°);  $H_{安}$  为导水

裂隙带至含水层间防水岩柱的厚度(m), 一般根据矿井的实际观测资料确定, 也可表示为

$$H_{安} = \frac{P}{V} + 10 \quad (4)$$

式中:  $P$  为防水煤层柱所承受的静水压力(MPa),  $V$  为突水系数。

根据矿井实际情况及相邻矿井资料, 取  $H_{安} = 10$  m,  $H_{裂} = 35$  m,  $\theta = 60^\circ$ ,  $\delta = 70^\circ$ , 计算得  $L = 44.5$  m。由此可知, 矿井未考虑断层活化导致有效隔水层厚度降低而设计的断层防水煤柱宽度(12 m)明显偏低, 而按最小导水裂隙带高度(23.8 m)由式(4)计算, 当工作面采至距断层 13.7 m 时, 竖向导水裂隙带直接与断层连通, 导水裂隙带成为突水通道, 导致突水。考虑到静水压力作用, 2335 工作面采至距断层 15 m 时发生突水是必然的。

根据  $H_{裂}$  计算的煤柱宽度  $L_{裂}$  表示为

$$L_{裂} = \frac{H_{裂}}{\tan \theta} \quad (5)$$

## 6 结 论

在有断层存在的情况下, 岩溶突水不仅与有效隔水层厚度有关, 而且与煤矿开采过程中断层的活化密切相关。本文通过分析各类断层形成的应力环境和断层影响带的应力随工作面推进的变化规律, 综合研究了采动条件下断层活化的条件及其影响规律, 分析了活化断层对岩溶突水的影响; 并且通过现场突水案例分析了岩溶含水层随煤矿开采断层活化引发岩溶突水的机制。

(1) 断层的性质决定断层及其影响带范围内的应力状态, 断层的活化就是由一种应力状态向另一种应力状态改变的过程。

(2) 随着工作面的推进, 由于开挖和铰接岩块的水平推力作用, 煤岩体的垂直应力、水平应力都在不断增大, 但垂直应力增加幅度更大, 从而诱发断层的活化。

(3) 煤层开采后, 工作面推进方向与断层倾向的关系直接影响断层及其影响带的应力分布规律, 当工作面推进方向与断层倾向相同时, 断层最易活化突水。

(4) 断层的活化不只是自身导水, 最主要的是断层充水使有效隔水层厚度明显降低; 同时还可能破坏顶板变形破坏的连续性, 引起上覆岩层整体失稳, 导致导水裂隙带高度的大幅增加。工程实例说明,

岩溶突水是有有效隔水层厚度明显降低和导水裂隙带高度的大幅增加 2 种因素共同作用的结果。

### 参考文献(References):

- [1] 王恩营. 煤炭开采中小断层研究的几个问题[J]. 中国矿业, 2006, 15(8): 60 - 62.(WANG Enying. Several problems of little faults study in coal mining[J]. China Mining Magazine, 2006, 15(8): 60 - 62.(in Chinese))
- [2] 白明洲, 许兆义, 王连俊, 等. 深埋隧道岩溶突水灾害的地质条件研究[J]. 铁道工程学报, 2006, 93(3): 21 - 24.(BAI Mingzhou, XU Zhaoyi, WANG Lianjun, et al. Research on the geological condition of karst water bursting disaster in the course of tunnel caving[J]. Journal of Railway Engineer on Society, 2006, 93(3): 21 - 24.(in Chinese))
- [3] 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(增 2): 4 170 - 4 175.(WU Jiwen, TONG Hongshu, TONG Shijie, et al. Study of similar material for simulation of mining effect of rock mass at fault zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.2): 4 170 - 4 175.(in Chinese))
- [4] 赵海军, 马凤山, 李国庆, 等. 断层上下盘开挖引起岩移的断层效应[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1 372 - 1 375.(ZHAO Haijun, MA Fengshan, LI Guoqing, et al. Fault effect due to underground excavation in hanging walls and footwalls of faults[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9): 1 372 - 1 375.(in Chinese))
- [5] 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. The 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))
- [6] 张林洪, 刘荣佩, 周建芬, 等. 构造型水库地震的断裂力学分析[J]. 地震研究, 2002, 25(2): 186 - 191.(ZHANG Linhong, LIU Rongpei, ZHOU Jianfen, et al. Fracture mechanics analysis of tectonic reservoir induced by earthquake[J]. Journal of Seismological Research, 2002, 25(2): 186 - 191.(in Chinese))
- [7] 张鹏程, 汤连生, 邹和平, 等. 岩体节理到脆性断层的形成过程[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2001, 40(3): 100 - 103.(ZHANG Pengcheng, TANG Liansheng, ZOU Heping, et al. The process of formation from Joints rock mass to brittle faults[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2001, 40(3): 100 - 103.(in Chinese))
- [8] 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: University of Mining and Technology of China Press, 2003.(in Chinese))
- [9] 李青锋, 王卫军, 朱川曲, 等. 基于隔水关键层原理的断层突水机制分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(1): 87 - 90.(LI Qingfeng, WANG Weijun, ZHU Chuanqu, et al. Analysis of fault water-inrush mechanism based on the principle of water-resistant key strata[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2009, 26(1): 87 - 90.(in Chinese))
- [10] 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 Suping, MENG Zhaoping, LI Yulin. Influence of faults on coal roof stability by physical modeling study[J]. Coal Geology and Exploration, 2001, 29(3): 1 - 4.(in Chinese))
- [11] 胡戈, 李文平, 刘启蒙, 等. 综放开采过断层顶板破坏规律数值模拟[J]. 能源技术与管理, 2008, (1): 1 - 3.(HU Ge, LI Wenping, LIU Qimeng, et al. Numerical simulation of roof break law in passing fault of fully mechanized caving[J]. Energy Technology and Management, 2008, (1): 1 - 3.(in Chinese))
- [12] 中华人民共和国国家标准编写组. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. Buildings, water, railway and underground coal pillar to stay and set up coal mining order[M]. Beijing: Coal Industry Publishing Press, 2000.(in Chinese))
- [13] 陈荣华, 白海波, 冯梅梅. 综放面覆岩导水裂隙带高度的确定[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(2): 220 - 223.(CHEN Ronghua, BAI Haibo, FENG Meimei. Determination of the height of water flowing fractured zone in overburden strata above fully-mechanized top-coal caving face[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2006, 23(2): 220 - 223.(in Chinese))
- [14] 马亚杰, 武强, 章之燕, 等. 煤层开采顶板导水裂隙带高度预测研究[J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(5): 59 - 62.(MA Yajie, WU Qiang, ZHANG Zhiyan, et al. Research on prediction of water conducted fissure height in roof of coal mining seam[J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(5): 59 - 62.(in Chinese))
- [15] 缪协兴, 浦海, 白海波. 隔水关键层原理及其在保水采煤中的应用研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(1): 1 - 4.(MIAO Xiexing, PU Hai, BAI Haibo. Principle of water-resisting key strata and its application in water-preserved mining[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 37(1): 1 - 4.(in Chinese))
- [16] 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 Jincai, ZHANG Yuzhuo, LIU Tianquan. Rock mass permeability and coal mine water inrush[M]. Beijing: Geological Publishing Press, 1997.(in Chinese))