

底板导水裂隙带中含承压水裂隙的力学特性

马锋凯, 肖洪天

(山东科技大学土木建筑学院, 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东青岛 266510)

[摘要] 华北煤田煤系地层的底部为含水丰富的奥陶系灰岩, 该层灰岩与地表水系和煤系地层含水层存在着密切的水力联系。许多大型突水是采掘空间与含水层之间形成突水通道引起的。因此, 分析开采过程中底板岩体中含承压水裂隙的断裂力学特性具有重要意义。本文采用作者提出的数值方法分析了含高压水裂隙在开采过程中的断裂力学特性。假设裂隙面上作用着均匀水压力, 考虑地应力的影响, 采用断裂力学的叠加原理, 分析了采煤工作面推进过程中含承压水裂隙的断裂力学特性, 讨论了开采过程中底板承压水导升。结果表明: 在工作面推进过程中, 位于底板岩层且与含承压水岩层连通的裂隙, 会在承压水水压力和扰动应力的共同作用下, 产生破坏, 导水裂隙带的高度会增加; 这就增加了底板突水的危险性。

[关键词] 煤层开采 底板突水 导水裂隙带 裂隙发育

[中图分类号] TD322.1 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2017)05-0101-06

Ma Feng-kai, Xiao Hong-tian. Mechanical properties of cracks containing confined water in the seam floor [J]. Geology and Exploration, 2017, 53(5): 1010-1016.

0 引言

矿井突水一直是困扰煤矿安全生产的重大问题。随着矿井向深部开发, 煤系底部含水层中承压水水压增高, 矿井受承压水威胁也越来越严重。许多学者从不同角度对受承压水威胁煤层的安全开采开展了研究, 包括综采工作面特大底板突水灾害的发生机理(罗立平等, 2005), 承压水上采煤突水监控的区域预测理论与技术(胡耀青等, 2000), 以采动诱发陷落柱突水为例模拟突水流全过程(杨天鸿等, 2008); 建立隔水关键层矿压模型, 提出可用于指导开发保水采煤技术的隔水关键层原理(缪协兴等, 2008); 进行采动过程中煤层底板岩体渗透性变化的现场试验研究(肖洪天等, 2000)。据统计, 80%以上的矿井突水是由断层引起的, 而一些断层在采前是不导水的。其他类型的矿井突水从本质上来看, 也是在采矿活动和承压水的共同作用下围岩失稳引起的。采掘工作面的向前推进, 采场围岩应力状态的变化和含水层内高压水的作用导致岩体产

生新的裂隙或沿原生裂隙扩展形成新的裂隙。承压水就会沿新产生的裂隙向上导升, 这种现象称为承压水的水力劈裂。在承压水水力劈裂过程中, 裂隙中承压水的渗流还会对断层、薄弱面起到软化作用(王春瑞等, 2004; 刘华, 2015; 王飞等, 2016)。如果承压水的活动波及到采掘工作面, 就会诱发突水。由此可见, 承压水的水力劈裂在矿井突水过程中起到重要的作用, 采矿活动是矿井突水的诱导因素, 承压水的活动是诱发突水的主导因素(冯梅梅等, 2009; 熊祖强等, 2014; 魏世义, 2013)。因此, 研究矿井突水过程中承压水的水力劈裂机理有着重要的理论意义。

本文采用图 1a 所示的简化力学模型, 在该模型中, 考虑了采煤工作面推进过程中煤层底板岩体应力场和裂隙面上承压水压力的共同作用。采用作者提出的数值方法分析了在采场应力和承压水压力的共同作用下, 裂隙的应力强度因子的分布规律。采用断裂准则和应力强度因子的数值结果, 分析了含高压水裂隙的发育规律。这些成果有助于了解含承压水裂隙在采煤工作面推进过程中的力学特性和导

[收稿日期] 2017-01-05; [修改日期] 2017-06-20; [责任编辑] 郝情情。

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(41672219)资助。

[第一作者] 马锋凯(1992 年-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩石工程数值方法方面的研究。E-mail: mafengkai@yahoo.com。

[通讯作者] 肖洪天(1964 年-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事梯度断裂材料断裂力学新型边界元法研究。E-mail: xiaohongtian@tsinghua.org.cn。

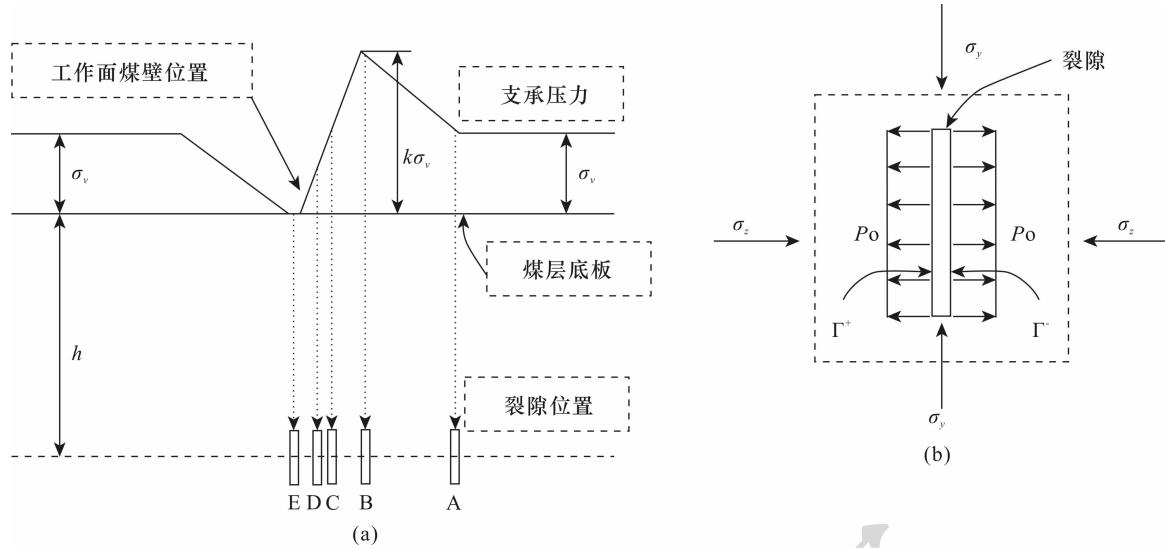


图1 煤层底板含水裂隙的分析模型

Fig. 1 An analytical model for cracks containing confined water in the seam floor

a - 煤层底板支承压力和裂隙的相对位置; b - 裂隙面作用的水压力和受采动扰动的地应力

a - relative positions of the support stress and cracks; b - water pressure on the crack surfaces and in situ stresses disturbed by mining

水裂隙带发育过程。

1 层状材料基本解的间断位移法

以下简单介绍基于层状材料基本解的间断位移法。文献(肖洪天等,2008;肖洪天等,2011)基于层状材料基本解发展了对偶边界元法。该层状材料特点为:无限域层状材料不同材料层之间均为完全粘结,不同岩层之间的层面均平行,由有限厚度层组成的层状材料与上下两个半无限域完全粘结。这种方法仅需在裂隙面上划分单元,使得层状岩体中裂隙的分析大为简化。在分析无限域层状岩体中的裂隙时,对偶边界元法退化为间断位移法。

裂纹面的间断位移记作: $\Delta u_j(Q_{\Gamma^+}) = u_j(Q_{\Gamma^+}) - u_j(Q_{\Gamma^-})$, Γ^+ 和 Γ^- 分别为裂隙的左、右面,如图1b所示,裂隙面的面力记作: $t_j(P_{\Gamma^+})$ 。基于层状材料基本解的间断位移法基本方程为

$$t_j(P_{\Gamma^+}) + n_i(P_{\Gamma^+}) \int_{\Gamma^+} T_{ijk}^*(P_{\Gamma^+}, Q) \Delta u_k(Q) dS(Q) = 0, \\ i, j, k = x, y, z \quad (1)$$

式中, $n_i(P_{\Gamma^+})$ 为源点 P_{Γ^+} 处外法线的方向余弦; $T_{ijk}^*(P_{\Gamma^+}, Q)$ 为新核函数,该函数可由层状材料基本解的面力 t_{ij}^* 经差分计算得到。

式(1)建立了裂隙面上面力和间断位移之间的关系。由于采用了层状材料基本解,式(1)不含沿

层状岩体层面的积分。采用9节点单元离散裂隙面,沿 Γ^+ 将裂隙面离散为 NE 个单元。方程(1)的离散形式为

$$t_j(P_{\Gamma^+}) + n_i(P_{\Gamma^+}) \sum_{e=1}^{NE} \left\{ \sum_{\alpha=1}^9 \Delta u_k^\alpha(Q^\alpha) \right. \\ \left. \int_{\Gamma_e^+} T_{ijk}^*[P_{\Gamma^+}, Q(\xi_1, \xi_2)] g[Q(\xi_1, \xi_2)] N_\alpha[Q(\xi_1, \xi_2)] \right. \\ \left. J(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 \right\} = 0 \quad (2)$$

式中, $N_\alpha (\alpha = 1 - 9)$ 为单元的形函数; $J(\xi_1, \xi_2)$ 为雅克比行列式;为能精确地描述裂隙尖端位移场的变化,式(2)中引入了函数 $g(\xi_1, \xi_2)$ 。

采用三种类型的单元离散裂隙面 Γ^+ ,三种类型单元的形函数 N_α 和函数 g 的具体形式见文献(肖洪天等,2011;肖洪天等,2008)。式(2)中的积分项与裂纹面的法线余弦记可进一步记作

$$G_{jk}^{e\alpha} = n_i(P_{\Gamma^+}) \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 T_{ijk}^*[P_{\Gamma^+}, Q(\xi_1, \xi_2)] \\ g[Q(\xi_1, \xi_2)] N_\alpha[Q(\xi_1, \xi_2)] J(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 \quad (3)$$

该积分中被积函数的奇异性为 $o(r^{-3})$,其中: r 为源点和场点的距离。若点 P 不在积分单元上,可以采用常规的高斯数值方法求得 $G_{jk}^{e\alpha}$;若点 P 在积分单元上,可以采用Kutt型数值积分求得 $G_{jk}^{e\alpha}$ 。该超奇异积分的数值方法见文献(肖洪天等,2008;肖

洪天等,2011)。

式(2)可进一步写为

$$\sum_{e=1}^{NE} \sum_{\alpha=1}^9 \Delta u_k^\alpha G_{jk}^{e\alpha} = -t_j(P_{\Gamma^+}) \quad (4)$$

利用式(4)可得到关于裂纹面结点间断位移的线性方程组。采用高斯消去法解之,可得到裂纹面上结点的全部间断位移。

应力强度因子控制着裂隙尖端的应力和位移场,是描述裂隙断裂力学特性重要参数。可以采用该参数依据断裂准则分析裂隙的扩展。借助应力位移与应力强度因子的关系式,可以建立裂隙的应力强度因子的计算公式。这里采用在裂隙面上接近裂隙尖端的间断位移计算应力强度因子,肖洪天等(2011)给出相应的计算公式。

可以发现,建议的数值方法较传统的间断位移法(Shou et al., 1999; Siebrits et al., 2000; Shou et al., 1997)有独特的优势。上述发展的层状材料的基本解已用于分析层状岩体中裂隙的断裂力学特性(Xiao et al., 2011)。

2 采场推进中含承压水裂隙的简化力学模型

采煤工作面推进过程中底板含承压水裂隙的受力是复杂的。为了便于分析,必须抓住问题的主要特点,建立简化的力学模型。这样能获得主要因素的影响。这里,参考开滦赵各庄矿防治水试验工作面(编号:2137)的地质和开采条件,建立简化的力学模型。煤层底板的岩石为细砂岩,通过参数选取办法(谢云跃等,2015;袁广祥等,2015)取 $E = 56 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu = 0.25$ 。该试验工作面深度为 1000 m ,岩体的容重取 2.7 g/cm^3 ,泊松比为 0.25 。由此可以获得铅直地应力 $\sigma_v = 27 \text{ MPa}$ 和水平地应力 $\sigma_h = 9.0 \text{ MPa}$ 。采煤工作面的超前支承压力是周期性变化的,这里将作用在煤层底板岩体上铅直压力简化为图 1a 所示的分布。

假设在煤层底板岩体中有一矩形裂隙($2a \times 2b$,取 $a = 2 \text{ m}$ 和 $b = 1 \text{ m}$),裂隙面垂直于煤层与底板岩体的界面。随着工作面的推进,垂直于裂隙面的水平应力 σ_z 是不断变化的,假设 $\sigma_z = \alpha \sigma_h$, α 为支承压力的影响系数。取 $\alpha = 1.0, 1.5, 0.8, 0.5, 0.2$,这五种情形分别对应于图 1a 中裂隙位置 A、B、C、D 和 E。该矿奥陶纪灰岩含水丰富,穿越该层灰岩的探水钻孔表明,承压水的压力最大时达到 $p_0 = 9 \text{ MPa}$ 。

根据断裂理论的叠加原理,图 1b 所示的问题等效于裂隙面上作用着压应力 $p = p_0 - \sigma_z$ 的问题,如

图 2 所示。根据选取的 α 值,可获得以下五种情形: $p = 0, -4.5, 1.8, 4.5, 7.2 \text{ MPa}$ 。显然在前两种情形下(A 和 B),裂隙面是闭合的,只有在后三种情形下(C, D 和 E),裂隙才会张开,并有可能扩展形成突水通道。为此,对以下三种情形进行了研究: $p = 1.8, 4.5, 7.2 \text{ MPa}$,并约定 Case 1: $p = 1.8 \text{ MPa}$ (对应于位置 C); Case 2: $p = 4.5 \text{ MPa}$ (对应于位置 D); Case 3: $p = 7.2 \text{ MPa}$ (对应于位置 E)。

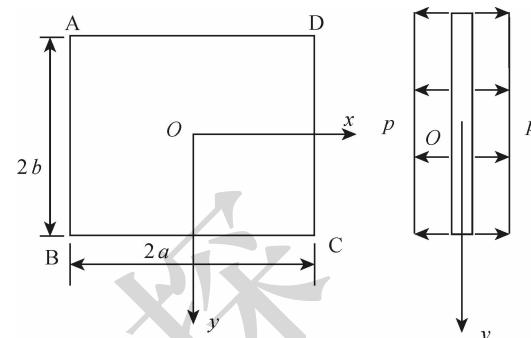


图 2 承受压应力作用的矩形裂隙 ($a = 2b$)
Fig. 2 A rectangular crack subjected to compressive stress ($a = 2b$)

对于图 1 所示的裂隙问题,也可以理解为煤层底板以下深度为 h 处有一裂隙,在煤层工作面推进过程中所经历五个不同状态。

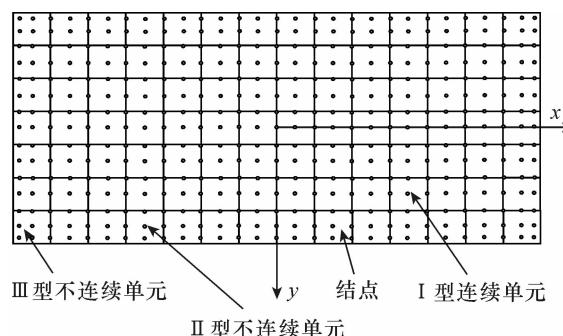


图 3 裂隙面单元网格和不同类型单元的分布
Fig. 3 The element mesh and different types of elements on crack surface

在矩形裂隙一个面上划分单元,单元的网格见图 3 所示。裂隙共离散为 98 个单元,其中有:60 个 I 型单元,34 个 II 型单元,4 个 III 型单元,435 个结点。I 型单元位于远离裂隙尖端的裂隙面上,II 型单元位于裂隙尖端的裂隙面上,III 型单元位于裂隙角点处的裂隙面上。

3 裂隙的张开位移和应力强度因子

3.1 裂隙面的张开位移

图4~6给出了三种情形下(Cases 1~3)裂隙面的张开位移(Crack opening displacement)的等值线。图中可以看出,由于裂隙面承受均匀的压力,裂隙的张开位移关于x和y轴对称;靠近裂隙尖端,张开位移最小,在裂隙面的中心最大。在裂隙面的同一位置,三种情形下,Case 1的张开位移最小,而Case 3的张开位移最大,也就是说随着裂隙面上压应力的增大,裂隙面的张开位移相应地增大。在裂隙面的中心处,Case 1的张开位移为0.109897mm,Case 2的张开位移为0.274742mm,Case 3的张开位移为0.457904mm。

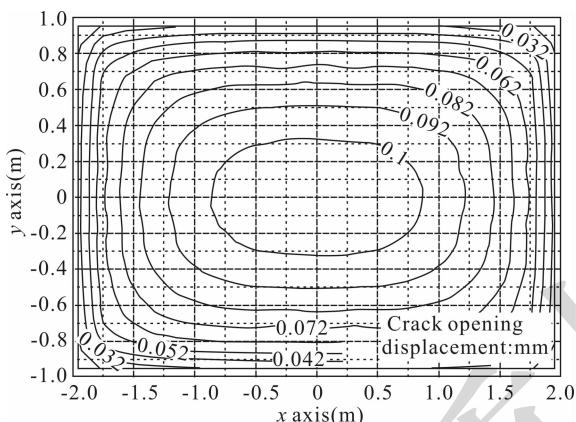


图4 裂隙的张开位移等值线(Case 1,单位 mm)

Fig. 4 The contours of crack opening displacements
(Case 1, unit: mm)

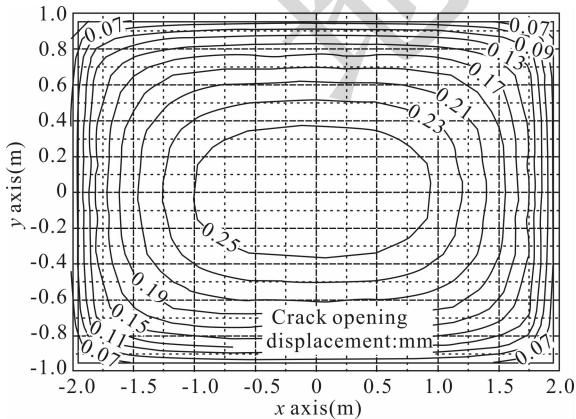


图5 裂隙的张开位移等值线(Case 2,单位 mm)

Fig. 5 The contours of crack opening displacements
(Case 2, unit: mm)

在图4~6中,位移等值线没有画到坐标轴处

(裂隙尖端),而是止于距裂隙尖端0.047619m处,这是因为裂隙尖端附近采用了不连续单元,单元的结点均不在裂隙的尖端,而是在距尖端0.047619m处开始有结点。因此,在结点和裂隙尖端位移值不能直接给出,可以采用插值的方法计算得到。

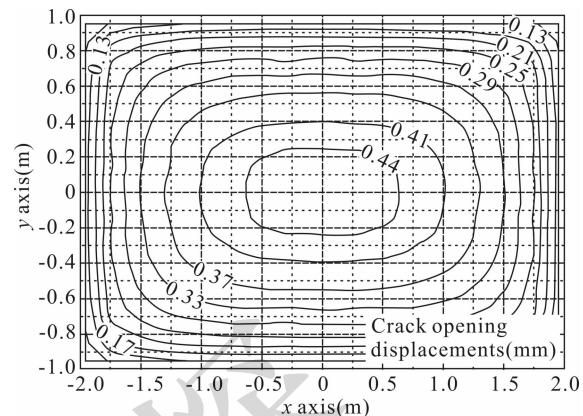


图6 裂隙的张开位移等值线(Case 3,单位 mm)

Fig. 6 The contours of crack opening displacements
(Case 3, unit: mm)

3.2 裂隙尖端的应力强度因子

图7和8给出了裂隙尖端的应力强度因子。考虑对称性,这里仅给出裂隙尖端AB和AD处的应力强度因子。由于裂隙面只有张开间断位移,裂隙仅存在I型断裂模式。从图7和8中可以看出,随着作用在裂隙面上压应力的增大,裂隙尖端的应力强度因子增大。在裂隙尖端AD和AB边中点处应力强度因子最大,向两端逐渐减小,在角点处为零。在短边AB的中点,Case 1的应力强度因子为 $1.4265 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,Case 2为 $3.5662 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,Case 3为 $5.9436 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。在长边AD的中点,Case 1的应力强度因子为 $1.6126 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,Case 2为 $4.0316 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,Case 3为 $6.7193 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

对比裂隙长边和短边尖端的应力强度因子,可以发现:相同荷载下,长边中点的应力强度因子要比短边的大。随着裂隙边长的增长,对应边中点的应力强度因子增加,且趋近于平面应力状态下裂隙的应力强度因子(Weaver et al., 1977),即 $K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$ 。

4 讨论

下面根据上述数据讨论采煤工作面推进过程中含承压水裂隙的断裂力学状态。为讨论裂隙扩展需引入相应岩石的断裂韧度。国际岩石力学学会(ISRM Testing Commission, 1988)制定了岩石断裂韧度

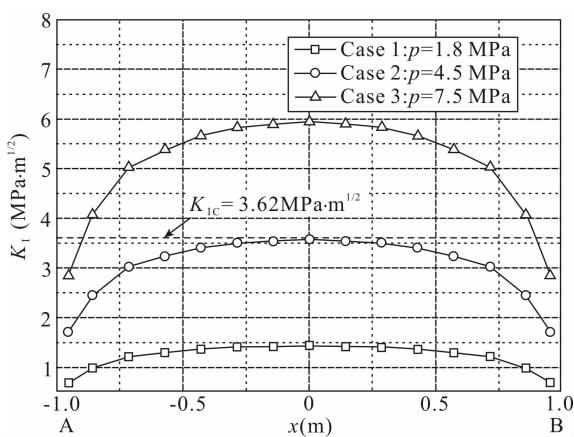


图 7 沿裂隙短边 AB 的 I 型应力强度因子

Fig. 7 Stress intensity factors of type I along the short side AB

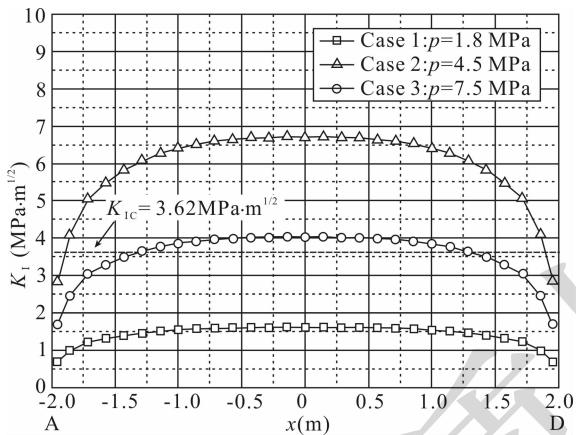


图 8 沿裂隙长边 AD 的 I 型应力强度因子

Fig. 8 Stress intensity factors of type I along the long side AD of a crack

的测试方法,国内学者(Wang et al., 1998)开展了岩石断裂韧度的测试。从众多文献资料来看,不同测试方法得到的断裂韧度 K_{IC} 数据分散。对于砂岩而言,有人用三点弯曲试件测得的 $K_{IC} = 0.31 \sim 0.35 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,而有人用人字形切槽巴西圆盘确定 $K_{IC} = 2.86 \sim 3.62 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。按着 I 型裂纹的断裂准则 $K_I = K_{IC}$,如果采用 K_{IC} 的最小值 $0.31 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,三种荷载情形下,裂隙尖端均处于扩展状态;而采用 K_{IC} 的最大值 $3.62 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,压应力 $p = 1.8 \text{ MPa}$ 作用下,矩形裂隙尖端的应力强度因子均小于 $3.62 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,裂隙不会扩展,而压应力 $p = 4.5$ 和 7.2 MPa 作用下,部分裂隙尖端的应力强度因子超过 K_{IC} ,裂隙处于扩展状态。

为便于分析采场推进过程中含承压水裂隙的状

态,这里取砂岩的断裂韧度 $K_{IC} = 3.62 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。根据图 7 和 8 所示的数据,讨论处于图 1 中不同位置时裂隙的扩展状态:

(1) 若裂隙在位置 A 处,裂隙处于超前支承压
力未扰动区域,垂直于裂隙面的应力和 $p = 0$;此
时,裂隙不会张开。

(2) 若裂隙在位置 B 处,由于裂隙处于超前支
承压力峰值的下部,垂直于裂隙面的应力和 $p =$
 -4.5 MPa ;此时,裂隙闭合。

(3) 若裂隙在位置 C 处,垂直于裂隙面的应力
和 $p = 1.8 \text{ MPa}$;此种情况下,裂隙尖端的 K_I 小于
 K_{IC} ,裂隙稳定,不会扩展。

(4) 若裂隙在位置 D 处,垂直于裂隙面的应力
和 $p = 4.5 \text{ MPa}$;裂隙短边 AB 尖端的 K_I 小于 K_{IC} ,
裂隙不会扩展;而在裂隙长边 AD 尖端在中点附近
的 K_I 大于 K_{IC} ,此时裂隙扩展。

(5) 若裂隙在位置 E 处,垂直于裂隙面的应力
和 $p = 7.2 \text{ MPa}$;裂隙短边 AB 和长边 AD 尖端,除角
点处, K_I 均大于 K_{IC} ,此时裂隙扩展。

由图 7 和 8 可见,裂隙扩展首先从裂隙的长边
中点开始,然后逐渐向角点发展。在采煤工作面推
进过程中,含承压水底板裂隙经历了闭合、张开、扩
展再闭合的四个阶段。根据上述分析,含承压水裂
隙只有处于位置 C、D 和 E 时,裂隙才会扩展,形成
突水通道。起裂后,裂隙扩展路径和扩展长度受到
各种因素的影响。由于承压水压力的减小和围压的
限制,裂隙扩展稳定,不会产生失稳性的扩展(Horii
et al., 1985),即起裂后不会形成通达采空区的突
水通道。突水通道的形成与起裂后裂隙内承压水的
压力和支承压力的进一步变化有关。

在井陉矿区曾从采煤工作面巷道中向煤层底板
打钻孔进行注水试验,发现部分注水钻孔在工作面
推进过程中有注水量增加到自动涌水,从而揭示了
承压水向上导升的现象。上述分析清晰地解释了承
压水向上导升的力学机理。

5 结 论

本文采用已发展的间断位移法分析了采煤工作
面推进过程中含承压水裂隙的断裂力学状态。可以
发现,工作面推进过程中,位于底板岩层且与含承压
水岩层连通的裂隙,会在承压水水压力和扰动应力
的共同作用下,产生破坏,导水裂隙带的高度会上升;
增加了底板突水的危险性。同时发现,裂隙的高度
是否上升不仅与扰动应力大小有关,还与岩层的

断裂力学特性有关。建议的间断位移法是分析裂隙问题的有效工具;接下来进一步发展研究裂隙的扩展过程和突水通道的形成过程。

[References]

- Feng Mei-mei, Mao Yu-ping, Bai Hai-bo, Wang Peng. 2009. Experimental research on fracture evolution law of water – resisting strata in coal seam floor above aquifer [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 02 : 336 – 341 (in Chinese with English abstract)
- Horii H, Nemat-Nasser S. 1985. Compression – induced micro – crack growth in brittle solids: Axial splitting and shear failure [J]. J. Geophys., 90 : 3105 – 3125
- Hu Yao-qing, Zhao Yang-sheng, Yang Dong. 2000. The regional monitor theory and method of water outburst for coal mining over confined aquifer [J]. Journal of China Coal Society, 25 (3) : 252 – 255 (in Chinese with English abstract)
- ISRM Testing Commission. 1988. Suggested methods for determining the fracture toughness of rock [J]. Int. J. Rock Mech. Min., 25 : 71 – 96
- Liu Hua. 2015. Fluid – rock interaction zones and their characteristics of palaeogene and neogene systems in dongying depression [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 34 (2) : 41 – 50 (in Chinese with English abstract)
- Luo Li-ping, Peng Su-ping. 2005. Mechanism study on water – inrush hazard of floor strata in mining on confined aquifer [J]. Journal of China Coal Society, 30 (4) : 459 – 462 (in Chinese with English abstract)
- Miao Xie-xing, Pu Hai, Bai Hai-bo. 2008. Principle of water – resisting key strata and its application in water – preserved mining [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 37 (1) : 1 – 4 (in Chinese with English abstract)
- Shou K J, Siebrits E, Crouch S L. 1997. A higher order displacement discontinuity method for three dimensional elastostatic problems [J]. Int. J. Rock Mech. Min., 34 : 317 – 322
- Shou K J, Napier J A L. 1999. A two – dimensional linear variation displacement discontinuity method for three – layered elastic media [J]. Int. J. Rock Mech. Min. 36 : 719 – 729
- Siebrits E, Crouch S L. 2000. On the paper “A two – dimensional linear variation displacement discontinuity method for three – layered elastic media” [J]. Int. J. Rock Mech. Min., 37 : 873 – 875
- Wang Chun-rui, Xiao Hong-tian. 2004. Safety analysis of coal floor rock masses threatened by confined water in Ordovician limestone [J]. Geology and Exploration, 02 : 90 – 91 (in Chinese with English abstract)
- Wang Fei, Cao Chen-fei, Chen Ji-wen. 2016. Experimental study on microscopic structure and hydraulic features of red – bed soft rock in central Yunnan Province [J]. Geology and Exploration, 52 (6) : 1152 – 1158 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q Z. 1998. Stress intensity factors of the ISRM suggested CCNBD specimen used for mode I fracture toughness determination [J]. Int. J. Rock Mech. Min., 35 : 977 – 982
- Weaver J. 1997. Three dimensional crack analysis [J]. Int. J. Solids Struct., 13 : 321 – 330
- Wei Shi-yi, Chen Xin-ming, Xu Wei. 2013. Research on roadway stabilization passing fault fractured zone above high water pressure of aquifer [J]. Coal Science and Technology, S2 : 8 – 10 (in Chinese with English abstract)
- Xiao H T, Yue Z Q. 2011. A three – dimensional displacement discontinuity method for crack problems in layered rocks [J]. Int. J. Rock Mech. Min., 48 : 412 – 420
- Xiao Hong-tian, Wen Xing-lin, Zhang Wen-quan. 2000. Experimental investigation of floor rock permeability through injecting water in the slicing process [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 25 (2) : 132 – 135 (in Chinese with English abstract)
- Xiao Hong-tian, Yue Zhong-qi. 2008. Dual boundary element analysis of rectangular – shaped crack in graded material [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 40 (6) : 840 – 848 (in Chinese with English abstract)
- Xiao Hong-tian, Yue Zhong-qi. 2011. New boundary element analysis of fracture mechanics in functionally graded mater [M]. Beijing: Higher Education Press : 1 – 278 (in Chinese with English abstract)
- Xie Yun-yue, Xiao Hong-tian, Yan Qiang-gang. 2015. Two – dimensional numerical simulation of macro – mechanical parameters for fractured rock masses [J]. Geology and Exploration, (02) : 376 – 382 (in Chinese with English abstract)
- Xiong Zu-qiang, Wang Xiao-lei. 2014. Similar simulation for breakage law and cracks evolution of working face in coal mining above aquifer [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 05 : 1114 – 1120, 1216 (in Chinese with English abstract)
- Yang Tian-hong, Chen Shi-kuo, Zhu Wan-cheng. 2008. Water inrush mechanism in mines and nonlinear flow model for fractured rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 27 (7) : 1411 – 1416 (in Chinese with English abstract)
- Yuan Guang-xiang, Li Jian-yong, Huang Zhi-quan, Wang Peng-jiao. 2015. On prediction of water inflow into tunnels during engineering surveys [J]. Geology and Exploration, 51 (5) : 0993 – 0998 (in Chinese with English abstract)

[附中文参考文献]

- 冯梅梅,茅献彪,白海波,王 鹏. 2009. 承压水上开采煤层底板隔水层裂隙演化规律的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 02 : 336 – 341
- 胡耀青,赵阳升,杨 栋. 2000. 承压水上采煤突水的区域监控理论与方法 [J]. 煤炭学报, 25 (3) : 252 – 255
- 刘 华. 2015. 东营凹陷古近系 – 新近系流体 – 岩石相互作用分带特征 [J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 34 (2) : 41 – 50
- 罗立平,彭苏萍. 2005. 承压水体上开采底板突水灾害机制的研究 [J]. 煤炭学报, 30 (4) : 459 – 462
- 缪协兴,浦 海,白海波. 2008. 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, 37 (1) : 1 – 4
- 王春瑞,肖洪天. 2004. 受煤层底板承压水威胁的煤层开采安全性分析 [J]. 地质与勘探, 02 : 90 – 91
- 王 飞,曹晨飞,陈吉文. 2016. 滇中红层软岩微观结构及水理特性试验研究 [J]. 地质与勘探, 52 (06) : 1152 – 1158
- 魏世义,陈新明,许延春. 2013. 高承压水过断层破碎带巷道稳定性

- 研究 [J]. 煤炭科学技术, S2:8 - 10
 肖洪天, 温兴林, 张文泉. 2000. 分层开采底板岩体渗透性变化的研究 [J]. 煤炭学报, 25(2):132 - 135
 肖洪天, 岳中琦. 2008. 梯度材料中矩形裂纹的对偶边界元方法分析 [J]. 力学学报, 40(6):840 - 848
 肖洪天, 岳中琦. 2011. 梯度材料断裂力学的新型边界元法分析 [M]. 北京:高等教育出版社:1 - 278
 谢云跃, 肖洪天, 闫强刚. 2015. 裂隙岩体宏观力学参数的二维数值模拟 [J]. 地质与勘探, 02:376 - 382
 熊祖强, 王晓蕾. 2014. 承压水上工作面破坏及裂隙演化相似模拟试验 [J]. 地下空间与工程学报, 05:1114 - 1120 + 1216
 杨天鸿, 陈仕阔, 朱万成. 2008. 矿井岩体破坏突水机制及非线性渗流模型初探 [J]. 岩石力学与工程学报, 27(7):1411 - 1416
 袁广祥, 李建勇, 黄志全, 王朋姣. 2015. 隧道工程勘察阶段涌水预测的问题探讨 [J]. 地质与勘探, 51(05):993 - 998

Mechanical Properties of Cracks Containing Confined Water in the Seam Floor

MA Feng-kai, XIAO Hong-tian

(College of Civil Engineering and Architecture, Shandong Key Lab of Civil Engineering Disaster Prevention & Mitigation, Shandong University of Science & Technology, Qingdao, Shandong 266510)

Abstract: The seam floor of coal fields in North China is Ordovician limestone containing abundant water, which has close hydraulic links with surface water and other aquifers. Many large water inrushes occur because of water inrush paths forming between mining space and aquifers. Therefore, it is of important significance to analyze the mechanical properties of cracks containing confined water in rock bodies of the seam floor. This work analyzed such properties of cracks using the proposed numerical method. It is assumed that the cracks are subjected to uniform pressure and the influence of in-situ stresses disturbed by mining activities is considered. Based on the superposition principle and fracture criteria, the mechanical properties of the cracks having confined water in coal mining were analyzed. The upward development of the zone containing confined water during mining was discussed in details. Results indicate that under the joint action of confined water and coal mining, the cracks directly above an aquifer may grow, the height of the confined water within the aquifer increases and the mining activity may induce water inrushes.

Key words: coal mining, floor water inrush, cracks having confined water, crack growth

