

青年论坛

# 采动作用下水对断层带岩体损伤活化影响分析

于秋鸽<sup>1,2</sup>, 张华兴<sup>1,2</sup>, 邓伟男<sup>1,2</sup>, 张刚艳<sup>1,2</sup>

(1. 煤炭科学研究总院 开采研究分院, 北京 100013; 2. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部, 北京 100013)

[摘 要] 采动影响下的断层活化是损伤累积作用下断层带岩体原始裂隙发育扩展的结果并与断层带岩体性质密切相关。为了研究断层原生水的存在对断层活化的影响, 根据断裂力学建立水压作用下断层带岩体裂隙损伤发育力学模型, 分析了断层水对断层活化的影响并利用 FLAC<sup>3D</sup> 内置 fish 语言进行固液耦合数值模拟验证。研究结果表明: 断层水的存在将会导致断层带岩体裂隙面正应力降低, 裂隙更容易发育扩展而增加了采动影响下断层活化的可能性。

[关键词] 断层活化; 断层原生水; 裂隙损伤发育; 固液耦合; 岩体性质

[中图分类号] TD313 [文献标识码] A [文章编号] 1006-6225 (2019) 01-0153-04

## Influence of Rock Damage and Excitation within Fault Zone by Water under Mining Influence

YU Qiu-ge<sup>1,2</sup>, ZHANG Hua-xing<sup>1,2</sup>, DENG Wei-nan<sup>1,2</sup>, ZHANG Gang-yan<sup>1,2</sup>

(1. Mining Institute, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

2. Coal Mining & Designing Department, Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China)

**Abstract:** Fault excitation under mining was the results of primary fracture development within fault zone under damage accumulation, and closely related with fault rock mass character. In order to study the influence that fault primary water to fault excitation, fracture development mechanics model under water pressure of fault zone rock was built, the influence that fault water to fault excitation and then solid and fluid coupling simulated verified by Fish language of FLAC<sup>3D</sup> software, the results showed that the normal stress of fracture would be decreased as fault water, and then fracture would expanding easily and the feasibility of fault excitation under mining influence was increased.

**Key words:** fault excitation; fault primary water; fracture development; solid and fluid coupling; rock mass character

断层是矿山开采活动中经常遇到的地质构造之一, 断层通常具有一定的宽度, 断层带内岩体主要以砂砾岩、角砾岩在伊利石、蒙皂石、伊蒙、混层、绿泥石以及少量的其他黏土类矿物, 比如高岭石和独沸石的胶结作用下形成<sup>[1-2]</sup>, 断层带岩体裂隙发育并且断层带岩体内往往含水, 断层的存在破坏了岩层的连续性和完整性, 一直以来都是影响煤矿安全开采的重要因素, 比如冲击矿压、矿井突水、地表在断层露头处的台阶式下沉等很多矿井灾害与开采损害都是因为开采造成断层活化导致的<sup>[3-5]</sup>。目前, 关于采矿造成断层活化机理的研究比较多, 朱广安等将断层视为地层中的弱面, 基于关键层理论建立了断层面正应力和剪应力计算公式并认为开采造成的断层面正应力和剪应力变化是断层活化的直接原因<sup>[6]</sup>; 黎良杰等认为断层活化突水机理是因为断层两盘在关键层部分产生了过大的

张开位移或在关键层部位导致强度破坏<sup>[7]</sup>; 张华兴、吴侃等认为在开采沉陷学中断层活化是因为开采造成断层面产生离层空间<sup>[8-9]</sup>。但以往的研究通常将断层视为一个面而较少研究断层带岩体性质对断层活化的影响, 并且通常不考虑水的作用, 而水对岩体不仅有物理作用还具有化学作用<sup>[10]</sup>。断层带岩体一般比较破碎, 存在很多原始裂隙, 采动影响下的断层活化应是断层带岩体损伤累积而导致裂隙发育扩展的结果。本文以断层带岩体内单个原始小裂隙为研究对象, 利用断裂力学建立水压作用下断层带岩体裂隙发育扩展力学模型, 分析断层水的存在对断层带岩体裂隙损伤扩展的影响。

### 1 断层带岩体裂隙扩展判别准则

断层带岩体裂隙随机分布, 以图 1 所示的断层带岩体中长度为  $2a$  的单个原始小裂隙为研究对象。

[收稿日期] 2018-10-27

[DOI] 10.13532/j.cnki.cn11-3677/td.2019.01.034

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (51604151); 国家自然科学基金面上资助项目 (51874177); 天地科技开采设计事业部青年基金 (KJ-2018-TDKCZL-10)

[作者简介] 于秋鸽 (1989-), 男, 河南信阳人, 博士研究生, 从事开采深陷方面的研究工作。

[引用格式] 于秋鸽, 张华兴, 邓伟男, 等. 采动作用下水对断层带岩体损伤活化影响分析 [J]. 煤矿开采, 2019, 24 (1): 153-156.

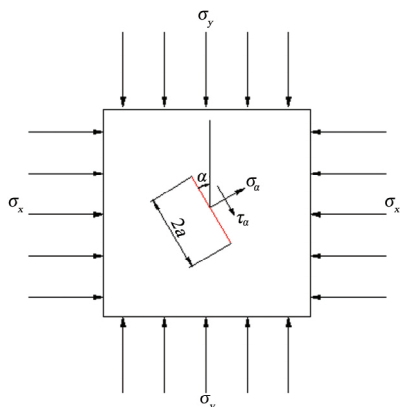


图 1 断层带岩体单裂隙力学模型

对裂隙面进行应力状态分析可知裂隙面所受正应力  $\sigma_\alpha$  和剪应力  $\tau_\alpha$  分别为<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} \sigma_\alpha = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\alpha \\ \tau_\alpha = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\sigma_x$  为采动造成的断层带岩体的水平应力, MPa;  $\sigma_y$  为采动造成的断层带岩体的垂直应力, MPa;  $\alpha$  为裂隙与垂直方向的夹角, ( $^\circ$ )。

由 (1) 式可知, 裂隙面上既受正应力, 又受剪应力, 裂隙扩展规律应属于 I-II 型。针对于裂隙 I-II 型复合扩展, 裂隙尖端应力强度因子为<sup>[12]</sup>:

$$\begin{cases} K_I = -\sigma \sqrt{\pi a} \\ K_{II} = \tau \sqrt{\pi a} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $K_I$  为 I 型裂隙扩展时裂隙尖端应力强度因子,  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ;  $K_{II}$  为 II 型裂隙扩展时裂隙尖端应力强度因子,  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ;  $\sigma$  为裂隙面有效正应力, MPa;  $\tau$  为裂隙面有效剪应力, MPa。

当裂隙面有效正应力为拉应力时, 裂隙扩展应属于拉剪扩展, 当裂隙面有效正应力为压应力时, 裂隙面扩展属于压剪扩展。针对于复合型裂隙扩展判别准则, 有最大周向应力理论, 应变能密度因子理论及能量释放率理论, 但这些准则普遍计算繁琐, 本文裂隙扩展采用工程中近似裂隙扩展准则。

针对 I-II 拉剪复合型, 其裂隙扩展判别准则可表示为<sup>[13]</sup>:

$$K_I + K_{II} = K_{Ic} \quad (3)$$

式中,  $K_{Ic}$  为 I 型裂隙扩展韧度,  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

针对 I-II 压剪复合型, 其裂隙扩展判别准则可表示为<sup>[14]</sup>:

$$\lambda K_I + |K_{II}| = K_{IIc} \quad (4)$$

式中,  $\lambda$  为压剪参数, 取决于岩石的压剪特性, 一

般由实验测定;  $K_{IIc}$  为 II 型裂隙扩展韧度,  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

## 2 水对断层带岩体裂隙扩展影响分析

当断层带岩体裂隙内存在压力为  $p$  的孔隙水并且假定孔隙水沿裂隙各个方向的作用力相等时, 裂隙面有效正应力为:

$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\alpha - p \quad (5)$$

由式 (2)、(5) 可知: 当断层带岩体含水时将会导致裂隙面有效正应力  $\sigma$  减小, 裂纹尖端的应力强度因子  $K_I$  增大。

当断层带岩体裂隙为未闭合裂隙时, 裂隙水压力对裂隙面上的剪切力没有影响; 当断层带岩体裂隙为闭合裂隙时, 裂隙水压力将在裂隙面产生反方向的剪切应力  $\tau_w$  为:

$$\tau_w = (\sigma_\alpha - p) \tan \varphi + c \quad (6)$$

因此未闭合和闭合裂隙面有效剪应力为:

$$\begin{cases} \tau = \tau_\alpha = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha \text{ (未闭合裂隙)} \\ \tau = \tau_\alpha - \tau_w = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha - \left( \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\alpha - p \right) \tan \varphi - c \text{ (闭合裂隙)} \end{cases} \quad (7)$$

由式 (2)、(7) 可知: 当断层带岩体裂隙为未闭合裂隙时, 孔隙水压力对裂隙尖端应力强度因子  $K_{II}$  不产生影响; 当断层带岩体裂隙为闭合裂隙时, 孔隙水压力将导致裂隙尖端应力强度因子  $K_{II}$  增大。由式 (3)、(4) 可知: 无论断层带岩体裂隙是拉剪还是压剪扩展, 当裂隙尖端应力强度因子增大时, 裂隙将更容易扩展, 也就是说当断层带岩体含水时对断层损伤活化具有促进作用。

## 3 数值模拟验证

根据峰峰矿区某矿工作面具体采矿地质条件建立数值模型, 工作面走向长 600m, 倾斜长 100m, 煤层平均厚度 5m, 平均埋深 525m, 煤层倾角  $0^\circ$ , 松散层厚度 20m。在工作面西北部揭露正断层, 断层落差 10m, 倾角  $70^\circ$ , 断层带宽度 5.6m。断层走向近似与工作面倾向平行, 留设断层保护煤柱 50m, 工作面近似垂直于断层走向推进。断层与工作面的相对位置关系如图 2 所示。

根据工作面附近钻孔资料, 工作面上覆岩层及实测岩性参数如表 1 所示。

建立模型大小为 1328.98m $\times$ 300m $\times$ 625m (长 $\times$ 宽 $\times$ 高), 考虑到沉陷影响范围, 模型四周各留设

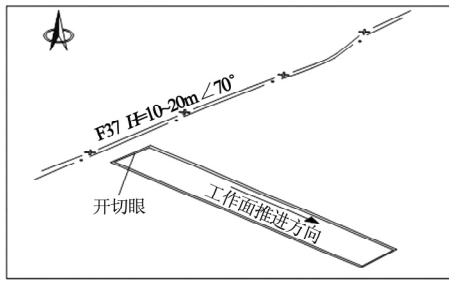


图 2 断层与工作面相对位置关系

表 1 工作面上覆岩层及其岩性参数

岩性	厚度 /m	内摩擦角/( $^\circ$ )	剪切模量/GPa	体积模量/GPa	黏聚力 /MPa	抗拉强度 /MPa
松散层	20	15	0.0038	0.0083	0.3	0.002
砂质泥岩	200	42	3.5	3.56	1.7	2
泥岩	150	43	6.61	8.89	11.23	4.53
粉砂岩	100	43	4.3	4.58	6.82	2.35
中细砂岩	50	44	0.86	0.81	2.6	1.2
煤层	5	20	0.13	0.26	0.7	0.9
底板细砂岩	100	39	6.55	8.39	7.59	1.9
断层带	5.6	15	0.0038	0.0083	0.3	0.002

一定宽度的保护煤柱，模型除了上边界外全部采用固定约束，建立三维地质模型如图 3 所示。

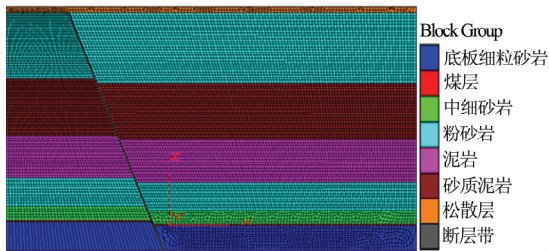


图 3 工作面三维地质模型

为了研究断层带岩体含水情况对断层面离层空间的影响，在图 3 所示的断层带岩体中注水，分别取断层带岩体和其余层状岩体的渗透率为  $1.02 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ ， $1.02 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ ；水的密度为  $1 \text{ kg/m}^3$ ；水的体积模量为  $0.1 \text{ GPa}$ <sup>[15]</sup>。孔隙水压力  $p$  采用 FLAC<sup>3D</sup> 内置 fish 语言设定，代码如下：

```
def_pp
    _pnt = gp_head
    loop while _pnt # null
    if gp_group (_pnt, 1) = 'duanceng' then
        _xpos = gp_xpos (_pnt)
        _ypos = gp_ypos (_pnt)
        _zpos = gp_zpos (_pnt)
        _zbz = h; 设置断层带水头高度为 h
    if _zpos > _zbz then
        gp_pp (_pnt) = 0
        gp_sat (_pnt) = 0
    else
```

```
        gp_pp (_pnt) = (_zbz - _zpos) *
(9.8) * 1000
        gp_sat (_pnt) = 1
    endif
else
        gp_pp (_pnt) = 0
        gp_sat (_pnt) = 0
    endif
    _pnt = gp_next (_pnt)
end_loop
end
@_pp
```

采用固液耦合模式分析采动作用下断层带岩体是否含水对断层带岩体损伤活化的影响。在开采沉降中，断层活化在地表的表现形式为地表在断层露头处产生台阶式下沉，故而本文以地表在断层露头处的下沉值大小来反映断层带岩体含水情况对断层活化的影响。断层带岩体不同含水情况对应的地表下沉值如图 4 所示。

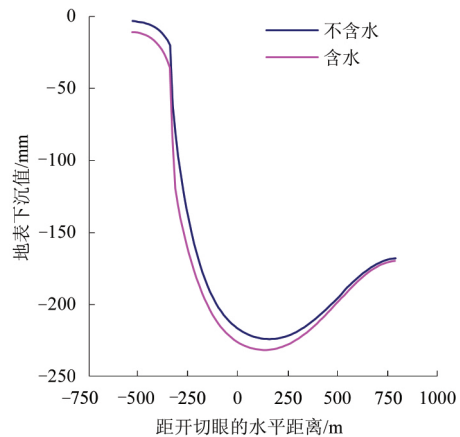


图 4 断层带岩体不同含水情况下的地表下沉曲线

由图 4 可知，当断层带岩体含水时，煤层开采造成的地表在断层露头处的台阶下沉落差更大，这也说明断层带岩体含水时，断层带岩体在采动影响下更容易损伤活化，文献 [16] 利用现场实测也发现断层原生水的存在对断层活化具有促进作用，进一步验证了研究结果正确性。

#### 4 结 论

(1) 当断层带岩体裂隙面既存在正应力又存在剪应力时，断层带岩体裂隙扩展属于 I - II 型，基于断裂力学推导得到 I - II 型裂隙扩展时裂隙尖端应力强度因子表达式。

(2) 断层带岩体裂隙扩展与裂隙尖端应力强度因子正相关，当断层带岩体裂隙为未闭合裂隙

时,断层原生水的存在仅使 I 型裂隙尖端强度因子增加;当断层带岩体裂隙为闭合裂隙时,断层原生水的存在使 I、II 型裂隙尖端强度因子都增加。

(3) 利用 FLAC<sup>3D</sup> 内置 fish 语言对断层带岩体进行固液耦合计算,当断层带岩体含水时,采动造成断层露头处的地表台阶下沉值更大,说明在采动影响下断层原生水的存在对断层活化具有促进作用。

#### [参考文献]

- [1] 孟召平,彭苏萍,黎洪. 正断层附近煤的物理力学性质变化及其对矿压分布的影响 [J]. 煤炭学报, 2001 (6): 561-566.
- [2] 张雷,何昌荣. 粘土矿物的摩擦滑动特性及对断层力学性质的影响 [J]. 地球物理学进展, 2014, 29 (2): 620-629.
- [3] 李志华,窦林名,陈国祥,等. 采动影响下断层冲击矿压危险性研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39 (4): 490-495, 545.
- [4] 朱光丽,张文泉,张贵彬,等. 采动诱发断层活化导水试验研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38 (11): 3163-3172.
- [5] 戴华阳. 地表非连续变形机理与计算方法研究 [J]. 煤炭学报, 1995 (6): 614-618.
- [6] 朱广安,窦林名,刘阳,等. 采动影响下断层滑移失稳的

- 动力学分析及数值模拟 [J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45 (1): 27-33.
- [7] 黎良杰,钱鸣高,李树刚. 断层突水机理分析 [J]. 煤炭学报, 1996 (2): 119-123.
- [8] 张华兴,仲惟林. 受断层影响的地表移动计算 [J]. 煤炭学报, 1995 (2): 163-166.
- [9] 吴侃,蔡来良,陈冉丽. 断层影响下开采沉陷预计研究 [J]. 湖南科技大学学报 (自然科学版), 2008, 23 (4): 10-13.
- [10] 连会青,夏向学,冉伟,等. 新型流固耦合相似模拟材料的抗水性实验研究 [J]. 煤矿开采, 2015, 20 (1): 12-16.
- [11] 刘鸿文. 材料力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [12] 郇正能. 应用断裂力学 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.
- [13] 李宗利,张宏朝,任青文,等. 岩石裂纹水力劈裂分析与临界水压计算 [J]. 岩土力学, 2005 (8): 1216-1220.
- [14] 周群力,刘格非. 脆性材料的压剪断裂 [J]. 水利学报, 1982 (7): 63-69.
- [15] 陈育民. FLAC/FLAC<sup>3D</sup> 基础与工程实例 [M]. 北京: 水利水电出版社, 2009.
- [16] 蒋建平,章杨松,阎长虹,等. 地下工程中岩移的断层效应探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002 (8): 1257-1262.
- [17] 冯冰. 深埋破碎岩体劈裂渗透及卸压诱导注浆扩散机制 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.

[责任编辑: 李青]

(上接 92 页)

护体,选取维护带宽度 20m,第四系松散层移动角  $\varphi=45^\circ$ ,基岩走向移动角  $\delta=70^\circ$ ,计算得到气井受护边界外侧保护煤柱水平垂直距离为 90m。

(2) 在气井保护煤柱外侧局部开采后,气井地表会发生明显的裂缝破坏,气井套管与井壁间将形成裂隙,易形成不同含水层间的导水通道;气井上段直至井口将向采空区一侧发生移动和弯曲,气井套管、输气管道等发生一定的弯曲变形和附加弯曲应力;气井在煤层上部一定范围内承受较为集中的竖向拉伸变形的影响,有导致气井套管发生拉伸破坏的风险;井口地表变形对井口附属设施的安全运行形成一定威胁。总体来看,气井保护煤柱开采对气井的正常运行和使用产生不利影响,存在气井套管、内部管道及附属设施发生局部破坏的风险。整体来看,气井保护煤柱局部开采不可行,为了确保生产安全,建议为气井留设全尺寸保护煤柱。

(3) 分析是在假定气井设计和施工质量无缺陷、气井套管自身质量无缺陷的条件下进行的分析,若气井在某些方面存在缺陷或质量问题时,或已受其他煤矿采动影响,将对气井和矿井的生产形成更为不利的影响。因此在采动影响前应着重对煤

层覆岩内部气井孔斜及位置进行核实,掌握气井在岩层内的轨迹,若气井在岩层内部偏移量过大,需对保护煤柱尺寸进行相应调整;生产过程中应加强气井破坏引起的灾害防治工作。

#### [参考文献]

- [1] 王金国,李慧平,陈盼. 煤矿井田内废弃油井治理的探索与实践 [J]. 煤炭技术, 2014, 33 (4): 262-265.
- [2] 梁顺. 长壁开采区内垂直页岩气井稳定性研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- [3] 刘名阳. 煤矿采空影响区油气管道的危险性评价 [D]. 西安: 西安科技大学, 2009.
- [4] 张永琴. 采动影响下天然气井套管变形破坏机理与保护煤柱合理留设 [D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [5] 孙海涛. 采动影响下地面钻井的变形破坏机理研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [6] 刘扬,何秀清,王彦兴. 井下套管弯曲变形的数值模拟 [J]. 大庆石油学院学报, 2005, 29 (5): 35-37.
- [7] 徐立雄. 泥岩段套管损坏机理的有限元分析计算 [D]. 成都: 西南石油学院, 2005.
- [8] 赵昱,彭振华. 煤矿采空区油气管道安全保护与管理 [J]. 石油工业技术监督, 2009, 25 (6): 5-8.

[责任编辑: 徐乃忠]