



移动扫码阅读

朱敬忠,刘启蒙,刘 瑜,等.断层活化特征及防隔水煤柱合理化留设研究[J].煤炭科学技术,2022,50(8): 166-171.  
ZHU Jingzhong, LIU Qimeng, LIU Yu, *et al.* Research on activated fault characteristics and rational design size of water-proof coal pillar[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(8): 166-171.

# 断层活化特征及防隔水煤柱合理化留设研究

朱敬忠<sup>1,2</sup>,刘启蒙<sup>2</sup>,刘 瑜<sup>3</sup>,范佳俊<sup>2</sup>,杨 森<sup>2</sup>

(1.中国矿业大学 资源与地球科学学院,江苏 徐州 221116;2.安徽理工大学 地球与环境学院,安徽 淮南 232001;  
3.安徽理工大学 深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室,安徽 淮南 232001)

**摘 要:**目前浅部煤炭可采储量开挖殆尽,以井工开采的煤矿正逐渐向深部含煤地层区域延伸,因面临深部“高温、高压、高瓦斯”及复杂地质构造的威胁,井下作业环境变得十分恶劣。虽然通过钻探、物探手段及巷道开挖对煤矿安全生产构成较大影响的深部隐伏断层构造进行探查,但矿井对断层性质及采动影响下断层活化等基础资料掌握程度不足。在设计断层防隔水煤(岩)柱留设尺寸阶段,往往存在断层煤(岩)柱留设过大或过小的问题,造成生产期间煤炭资源可开采量的降低,或诱发断层水害事故。以宿州煤电集团界沟煤矿 F6 断层为研究对象,从断层的含(导)水性、采动影响下断层活化特征、煤层顶板岩性特征及导水裂隙带发育高度等方面综合分析研究煤层防隔水煤柱宽度留设问题。利用基于有限元理论的 COMSOL Multiphysics (CM) 数值模拟、理论计算及矿井生产验证等多方法,确定最合理的防隔水煤柱尺寸。研究表明:F6 断层在未扰动状态下表现为富水性弱,导水性差,但当工作面继续向再前推进至距断煤交线 20 m 时断层带附近岩层因受集中应力作用而发生塑性破坏,断层导水性质发生变化。基于以上综合分析最终确定 F6 断层防隔水煤柱合理留设宽度为 36.13 m。研究成果对界沟煤矿安全效益和经济效益的最大化提供一定的技术保障。

**关键词:**断层活化;防隔水煤柱;断层水害;煤柱宽度

中图分类号:TD745 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2022)08-0166-06

## Research on activated fault characteristics and rational design size of water-proof coal pillar

ZHU Jingzhong<sup>1,2</sup>, LIU Qimeng<sup>2</sup>, LIU Yu<sup>3</sup>, FAN Jiajun<sup>2</sup>, YANG Sen<sup>2</sup>

(1.School of Resource and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2.School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3.State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** The shallow coal resources have been almost completely excavated, and the coal mines are gradually extending to the deep coal-bearing strata currently. Due to the threat of “high temperature, high pressure and high gas” and complex geological structure in the deep strata, the underground operation environment becomes very harsh. Although the deep concealed fault structure, which has a great influence on the safety production of coal mine, is explored by drilling, geophysical exploration and roadway excavation, the basic information of fault properties and fault activation under the disturbance of mining isn’t well grasped by the mine. In the stage of designing the retaining size of fault coal (rock) pillars, the problem of retaining size of fault coal (rock) pillars is usually too large or too small, which leads to the decrease of coal resources during production, or the fault water disaster induced by fault activation. Taking F6 fault of Jiigou coal mine of Suzhou Coal and Electricity Group as the research target, this paper comprehensively analyzes and studies the width of waterproof coal pillar in coal seam from the aspects of water-containing/conducting properties of faults, characteristics of faults activation under the disturbance of mining, lithological characteristics of coal seam roof and development height of water-conducting fracture zone. Utilizing COMSOL Multiphysics (CM) numerical simulation based on finite element theory, theoretical calculation and mine production verification methods, the most reasonable size of

收稿日期:2021-10-02 责任编辑:常 琛 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2020-1371

基金项目:安徽省自然科学基金资助项目(1908085ME145)

作者简介:朱敬忠(1990—),男,安徽淮南人,博士研究生。E-mail:algzj0801@126.com

waterproof coal pillar is determined. The study shows that F6 fault is featured by weak water abundance and poor water conductivity in undis-  
turbed state. However,when the working face continues to advance 20 m away from the intersection line of fault and coal,the rock strata near  
the fault zone suffer plastic failure due to concentrated stress,and the water conductivity of the fault changes. On the foundation of the above  
comprehensive analysis,it is finally determined that the reasonable reserved width of waterproof coal pillar of F6 fault is 36.13 m. The results  
of this study provide a certain technical guarantee for the maximization of safety and economic benefit in Jiegou coal mine.

**Key words:** fault activation ;waterproof coal pillar; fault water disaster; width of coal pillar

# 0 引 言

由于我国华北型煤田水文地质条件复杂,综采  
工作面在推进过程中会受到底板高承压水的威  
胁<sup>[1-2]</sup>。据统计,工作面 80%左右的突水事故均发  
生在断层破碎带附近<sup>[3]</sup>。因此,科学准确认识和分  
析采动过程中断层活化特征,留设合理的阻隔水  
煤(岩)柱能阻止断层活化突水,保证矿井的安全高  
效生产。目前,许多研究学者对断层活化及阻隔水  
煤(岩)柱合理留设问题展开了大量的研究。乔伟  
等<sup>[4]</sup>研究在断层两盘下方开采时不同水压力作用  
下的断层活化突水的试验模型,解释了断层活化突  
水的过程。王进尚<sup>[5]</sup>利用水力压裂的方法对断层  
煤柱的留设情况进行了研究分析。易伟欣等<sup>[6]</sup>在  
对经验公式加以修正,得出新的理论计算公式,并分  
析了断层构成导水通道的突水机理。吴俊达等<sup>[7]</sup>、  
赵春波等<sup>[8]</sup>利用相似材料模拟及数值模拟,对断层  
活化特征、渗流特性及断层防水煤柱的留设进行系  
统的分析研究,得出断层煤柱的合理留设宽度。HU  
等<sup>[9]</sup>将根据不同的水文地质条件将断层进行分类,分

析了与断层有关的水害类型,并提出疏水降压,合理留  
设煤岩柱,底板注浆等水害治理方法。

笔者以界沟煤矿地质条件为基础,利用  
COMSOL Multiphysics( CM) 数值模拟试验对工作面  
回采过程中断层活化特征以及应力演化规律进行系  
统分析<sup>[10-11]</sup>,并通过计算优化了断层防水煤柱合理  
留设宽度,最终确定了断层防水煤柱留设宽度,为承  
压水上含断层工作面的安全回采问题提供了理论技  
术参考。

# 1 工程概况

界沟煤矿位于童亭背斜西翼、五沟向斜的南段,  
主体构造为一宽缓的向斜盆地,地层倾角在 10°~  
25°,平均 16°。矿井共有 4 个采区,即东一采区、中  
央采区、西一采区和西二采区。全区共有 180 条断  
层,以正断层为主,落差大于 100 m 的断层有 3 条。  
南北两端分别被北东向正断层界沟断层、李家断层  
所切割;局部有次级起伏,断裂构造较发育,断层走  
向以北东向为主,其次是北西向。区内暂未发现岩  
浆岩,构造复杂程度中等<sup>[12]</sup>,如图 1 所示。

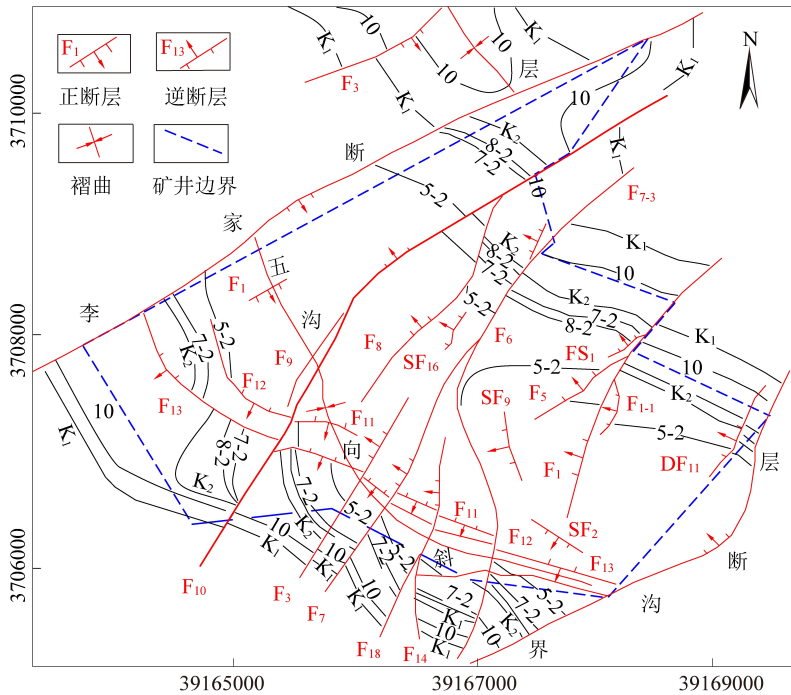


图 1 矿井构造纲要图

Fig.1 Sketch of coal mine tectonic

研究对象 F6 为正断层,位于区内中南部,两端延伸出境,斜切矿井,走向 NE,倾向 NW,倾角  $45^{\circ} \sim 75^{\circ}$ ,落差 15~115 m,延展长度>3 000 m,错断  $5_1 \sim 10$  煤,三维地震和钻孔控制的查明断层,西一采区 10 煤层位于 F6 正断层上盘,10 煤地层降至与对盘富水性的太灰含水地层“对接”,矿井在 10 煤开采时已部分揭露,开采在留设断层防水煤柱的情况下,未发生较大突水现象。

2 F6 断层性质及导水性分析

根据钻探揭露资料,断层破碎带厚度 0.68~5.88 m,一般多为泥质充填,岩性较混杂,主要为泥岩、粉砂岩及少量砂岩。剪切挤压和褶皱现象严重,岩芯较破碎,泥岩呈糜棱状,砂岩呈碎块状、角砾状,胶结性好。穿过该断层的 11-4 号,13-1 号和 42-13 号钻孔在钻探过程中也未发生漏水漏浆等异常现象。

井下采用矿井瞬变电磁法(TEM)、并行直流电法、矿井震波超前探测技术(MSP)对断层赋水性超前探测,断层赋水性弱。巷道掘进过程中已在多处揭露断层时均未有出水现象或仅有少量短时滴水。同时,为查明矿区内主要断层的导水性,利用水 2 孔对研究对象东侧的 F5 正断层破碎带做了抽水试验,该断层性质与 F6 断层的性质类似。抽水试验结果表明,断层破碎带抽无水,说明在自然条件下,断层富水性极弱、导水性差。因此,F6 断层在初始状态下表现为富水性弱、导水性差的性质。

3 断层活化的数值模拟

在天然地应力平衡状态下,不导(含)水断层或导水性弱的断层起到阻隔承压水的作用,倘若一旦在开挖巷道或煤层回采过程中,扰动破坏影响可能会波及至断层破碎带,使断层带的初始应力发生变化,产生塑性变形,出现原有裂隙的发展和次生裂隙的张开,形成导水通道,使高承压水涌入到井下生产作业区,断层由导水性弱或不导水向导水过渡是一个缓慢的过程<sup>[13-15]</sup>。为研究 F6 断层活化规律特征,运用 COMSOL Multiphysics 有限元数值模拟方法对采动诱发断层破碎带活化过程进行分析。

3.1 数值计算几何模型

F6 断层为中央采区与西一采区分界断层,根据矿区 AA 勘探线剖面知,断层落差为 80 m,倾角为  $70^{\circ}$ ,10 煤层底板与太灰含水层顶板之间的垂距为 50 m,煤层近似水平,平均煤厚为 2.3 m,断层带厚度约为 2.5 m。

工作面回采期间,当综采液压支架前移时,支架

后方的顶板岩层随之垮落。为模拟实际情况,在进行向前推进时,对上一个回采段距内进行填充,建立如图 2 所示的几何模型,模型尺寸为 200 m×360 m。

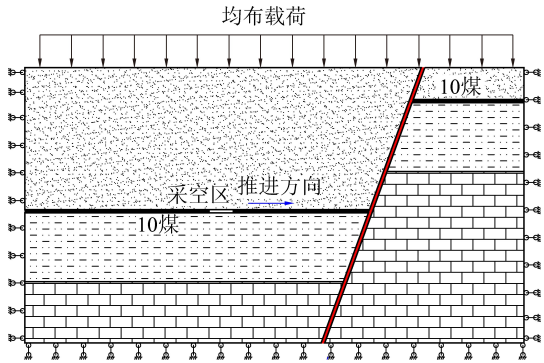


图2 几何计算模型  
Fig.2 Geometric calculation model

模型共分为 4 层,从上往下依次为覆岩层、10 煤层、隔水层、底部太灰含水层。底部约束垂直方向的位移,左右两侧约束水平方向的位移。顶部以 10.0 MPa 载荷均匀作用在模型上边界,模型底层为太原组灰岩含水层,其含水层的孔隙水压力为 5.0 MPa。左右边界和上边界为对称隔水边界。模型的各岩层的弹性模量  $E$ 、泊松比  $\mu$ 、密度  $\rho$ 、黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  等物理力学性质见表 1。

表 1 岩石基本力学参数  
Table 1 Basic mechanical parameters of rock

岩层	$E/\text{GPa}$	$\mu$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$c/\text{MPa}$	$\varphi/(^{\circ})$
覆岩	17.6	0.19	2 630	1.7	0.7
煤层	10.0	0.32	1 340	1.56	0.49
隔水层	14.3	0.22	2 560	2.4	0.69
含水层	15.0	0.25	2 580	4.0	0.52
断层	10.0	0.35	2 000	2.4	0.26
充填体	0.1	0.42	2 000	0.05	0.26

3.2 工作面推进对断层活化的影响

随着工作面持续往断煤交线方向不断推进,工作面顶底板及断层处的围岩应力发生变化,首先在顶底板出现塑性变形破坏区域,当靠近断层时,塑性变形的应力波及至煤层底板处的断层,使其局部发生塑性变形破坏,如图 3 所示。

由图 3a 和图 3b 中可以看出,当工作面回采至距断煤交线 60 m 和 40 m 时,底板塑性破坏未影响至断层,断层带内岩石没有发生塑性破坏。在图 3c 中,当采场推进至距断煤交线 30 m 时,煤层采掘扰动引起的剪应力与断层煤柱静应力叠加效应不显著,表现为下部断层开始出现塑性应变的征兆。工作面继续向再前推进 10 m,即距断煤交线 20 m 时(图



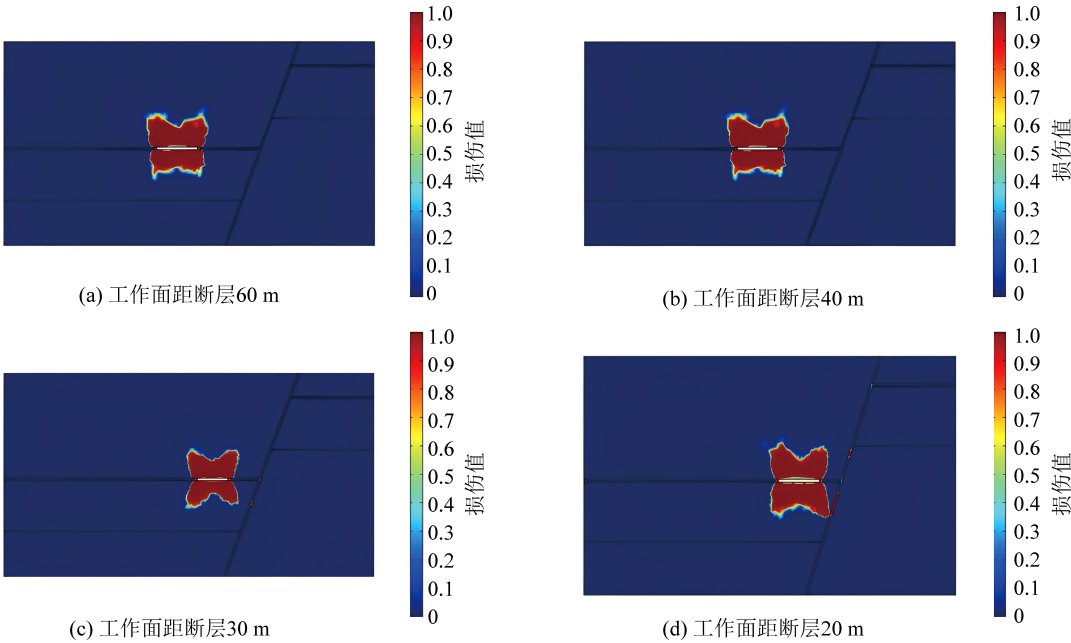


图 3 工作面推进期间煤层顶底板及断层塑性破坏区分布

Fig.3 Plastic failure distribution of coal seam floor and fault during mining

3d),以水平方向采空卸载与竖直方向加卸载形式的采动应力与断层煤柱的静载应力相互叠加,致使断层处出现应力集中区,表现为断煤交线上下出现塑性破坏,且随继续开挖塑性破坏区域面积会继续增大,断层开始出现明显的活化。

4 留设断层阻隔水煤(岩)柱

留设断层阻隔水煤(岩)柱是预防断层水害的主要手段之一,它关系到矿井安全和高效生产。合理的防水煤(岩)柱宽度不仅可以阻止地下水通过断层涌入矿井,还可以提高煤炭资源的利用率、确保安全开采<sup>[16-17]</sup>。

4.1 安全阻隔水煤(岩)柱的确定

$H_a$ 应根据矿井实际观测资料来确定,即通过总结本矿区在断层附近开采时发生突水和安全开采的地质、水文地质资料,计算其水压与阻隔水煤柱厚度的比值( $T_s=P/M$ ),并将各点之值标到以  $T_s=P/M$  为横轴,以埋藏深度  $H_0$  为纵轴的坐标纸上,找出  $T_s$  值的安全临界线<sup>[18]</sup>。 $H_a$ 也可以按下列公式计算:

$$H_a = \frac{P}{T_s} + A \tag{1}$$

式中, $P$  为阻隔水煤(岩)柱所承受的实际水头值,MPa; $T_s$  为临界突水系数,MPa/m; $A$  为保护带厚度,一般取 10 m。

本矿区如无实际突水系数,可参考其他矿区资料,但选用时必须综合考虑隔水层的岩性、物理力学性质、巷道跨度或工作面的空顶距、采煤方法和顶板

管理方法等一系列因素。安全阻隔水煤柱  $H_a$  可采用由超静定梁模型推导出来的斯列萨列夫公式确定<sup>[19-20]</sup>,其计算公式为

$$H_a = \frac{l(\sqrt{\gamma^2 l^2 + 8K'_p P} - \gamma l)}{4K'_p} + A \tag{2}$$

其中, $l$  为巷道底宽或回采工作面最大控顶距离,一般取 20~30, m; $K'_p$  为隔水层的平均抗拉强度,MPa; $\gamma$  为隔水层的平均重量,MN/m<sup>3</sup>。

4.2 阻隔水煤(岩)柱宽度的确定

由于 F6 断层上盘的 10 煤层直接与对盘太灰含水层接触,根据《煤矿防治水细则》附录六-三的规定,煤层与强含水层或导水断层接触阻隔水煤柱留设的情况。要分析煤层最高导水裂隙带高度( $H_d$ )是否高出对盘含水层顶面。

依据《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》对于导水裂隙带计算规定<sup>[21]</sup>,当煤层顶板岩性为中硬砂岩、泥质灰岩、砂质页岩、页岩时,其计算公式为

$$H_d = \frac{100 \sum M}{1.6 \sum M + 3.6} + 5.6 \tag{3}$$

当煤层顶板为软弱的泥岩或泥质砂岩时,导水裂隙带高度计算公式为

$$H_d = \frac{100 \sum M}{3.1 \sum M + 5.0} + 4 \tag{4}$$

其中, $\sum M$  为累计采厚。

由揭露 F6 断层的 11-4 号,13-1 号及 42-13 号钻孔岩性柱状图可知,10 煤顶板以中硬的粉砂岩,

砂岩为主,10 煤层平均厚度为 2.3 m。经计算导水裂隙带高度约为 37.2 m。由图 4 可知,含水层顶面低于导水裂隙带。

由采区内长观孔灰岩水位观测资料知,太灰水位平均标高为-113.17 m,根据煤层底板标高计算出 F6 断层上下盘 10 煤底板水压值 3.77、2.97 MPa。为治理 10 煤底板灰岩水害问题,在采区内已实施了地面区域治理工程,按照隔水层完整无构造破坏时的突水系数临界值 0.1 MPa/m 计算<sup>[22]</sup>。利用式(1)和式(2)分别计算安全防水煤(岩)柱  $H_a$ , 计算结果见表 2。

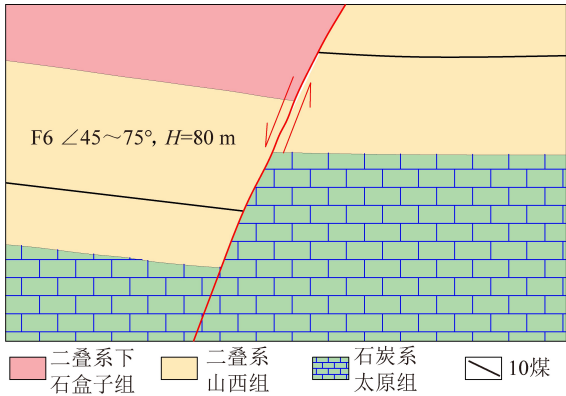


图 4 F6 断层剖面图  
Fig.4 Cross section profile of F6 fault

表 2 安全防水煤柱计算结果

位置	$H_a/m$		
	式(1)	式(2)	取值
上盘 10 煤	47.7	28.3	38.0
下盘 10 煤	39.7	26.1	32.9

由于断层下盘 10 煤底板与灰岩含水层顶板垂距较远,底板破坏带不会波及至下部灰岩含水层,只需留设 20 m 的防水煤柱即可。在中央采区回采工作面与断层之间留设均大于 20 m 的防水煤柱,6 个工作面现已安全回采完毕,未发生突水事故。

西一采区 10 煤位于 F6 断层上盘,采区内 10 煤工作面暂未形成,由前述知,采区内开展了灰岩水害治理工作后,将 F6 断层作为不导水断层,计算防水煤柱的留设尺寸,但不得小于 20 m。如图 5 所示,防水煤柱留设宽度为

$$L=L_1+L_2 \tag{5}$$

其中, $L_1=h/\tan \alpha$ 。 (6)

$$L_2=H_a/\sin \alpha-h/\tan \theta \tag{7}$$

式中, $h$  为断层上盘含水层层面高出下盘煤层底板的高度,m, $M=32.2$  m; $\alpha$  为岩层塌陷角,(°),取值

为 75°; $\theta$  为断层倾角,(°),取值为 70°。  
经计算,断层防水煤柱留设宽度  $L=36.13$  m,当考虑灰岩水顺煤层方向上的压力时,则按《煤矿防治水细则》附录六之二公式:

$$L=0.5KM\sqrt{\frac{3P}{K_p}} \tag{8}$$

式中, $L$  为煤柱宽度,m; $M$  为煤层厚度或者采高,m; $P$  为水头压力,MPa。 $K_p$  为煤层的抗拉强度,一般为 0.2~1.4,MPa; $K$  为安全系数,一般取 2~5。

根据 2020 年 5 月科研高校提交的 7、8、10 煤岩冲击倾向性鉴定报告知,10 煤层的抗拉强度约为 0.5 MPa,经计算断层防水煤柱宽度为 27.35 m。基于以上 2 种方法计算的结果,取最大值 36.13 m 作为断层防水煤柱留设的宽度。

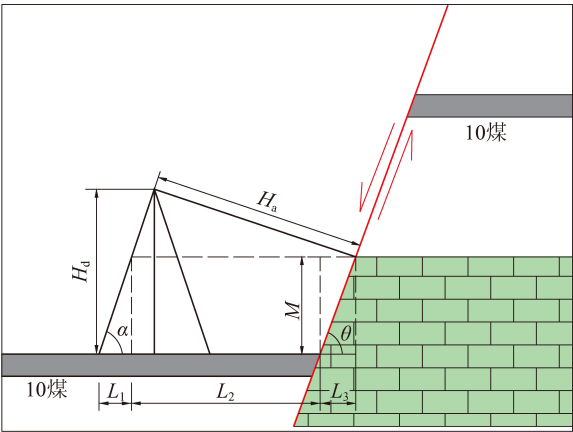


图 5 防水煤柱留设宽度  
Fig.5 Width of waterproof coal pillar

5 结 论

1) 通过对 F6 断层活化规律特征的模拟研究,说明了随着工作面不断向断煤交线方向推进,断层带附近应力和应变发生变化,岩层出现塑性变形区域。

2) 结合矿区水文工程地质资料,分析计算了 F6 断层上盘 10 煤的导水裂隙带发育高度,经计算  $H_d=37.2$  m。同时,确定断层两盘的安全防水煤岩柱尺寸,在《煤矿防治水细则》、《煤矿防治水手册》及“三下开采规范”等规定原则上,最终优化 F6 断层防水煤柱的留设宽度。

3) 在界沟煤矿初步设计报告中要求落差在 50~100 m 和大于 100 m 的断层需要分别留设 50, 100 m 的防水煤柱。通过分析 F6 断层防水煤柱合理留设宽度为 36.13 m,较原设计缩小了 13.87 m,增加回采煤炭资源约 42.7 万 t,直接经济效益约 2.6 亿元。

## 参考文献(References):

- [1] 董书宁,郭小铭,刘其声,等.华北型煤田底板灰岩含水层超前区域治理模式与选择准则[J].煤田地质与勘探,2020,48(4):1-10.  
DONG Shuning, GUO Xiaoming, LIU Qisheng, *et al.* Model and selection criterion of zonal pre-act grouting to prevent mine water disasters of coal floor limestone aquifer in North China type coalfield[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(4): 1-10.
- [2] XIAO Lele, WU Qiang, NIU Chao, *et al.* Application of a new evaluation method for floor water inrush risk from the Ordovician fissure confined aquifer in Xiayukou coal mine, Shanxi, China[J]. Carbonates and Evaporites, 2020, 35: 97.
- [3] 尹会永,翟玉涛,赵翠月,等.我国矿井断层防水煤(岩)柱留设研究现状与展望[J].煤矿安全,2020,51(5):187-191.  
YIN Huiyong, ZHAI Yutao, ZHAO Cuiyue, *et al.* Research status and prospect of fault waterproof coal (Rock) column design in China[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(5): 187-191.
- [4] 乔伟,胡弋,李文平.综放开采断层活化突水渗-流转换试验研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(1):30-37.  
QIAO Wei, HU Yi, LI Wenping. Experimental study on the conversion from seepage to flow of water inrush aroused by fault activation in fully mechanized top-coal caving[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(1): 30-37.
- [5] 王进尚.基于水压致裂法的断层防水煤柱合理留设研究[D].太原:太原理工大学,2012.  
WANG Jinshang. Study on reasonable retainment of fault waterproof pillar based on hydro-fracturing method[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012.
- [6] 易伟欣,崔钰婕.弱水性断层防水煤柱的留设[J].河南理工大学学报(自然科学版),2015,34(1):46-52.  
YI Weixin, CUI Yujie. Setting of waterproof coal pillar on weak water conductivity fault[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2015, 34(1): 46-52.
- [7] 吴俊达,解建,孙亚楠,等.承压水上工作面采动诱发断层活化及煤柱留设研究[J].煤炭工程,2020,52(5):133-137.  
WU Junda, XIE Jian, SUN Yanan, *et al.* Mining-induced fault activation and pillar retention of working face above confined water[J]. Coal Engineering, 2020, 52(5): 133-137.
- [8] 赵春波,赵志刚,宋文成.含断层构造采动底板岩体突水过程数值模拟[J].矿业研究与开发,2018,38(7):80-84.  
ZHAO Chunbo, ZHAO Zhigang, SONG Wencheng. Numerical Simulation on the Process of Water Inrush from Mining Floor with Fault Structure[J]. MINING R & D, 2018, 38(7): 80-84.
- [9] HU Weiyue, DONG Shuning, LI Yan. Water hazard control technology for safe extraction of coal resources influenced by fault zone[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2011: 1-10.
- [10] 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 Xianbiao, 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.
- [11] 陆银龙,王连国.含断层煤层底板损伤破坏演化数值模拟及微震监测研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(1):38-44.  
LU Yinlong, WANG Lianguo. Modeling and microseismic monitoring of damage and failure evolution of faulty coal seam floor[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(1): 38-44.
- [12] 黄芳友,张文永,徐胜平.临涣矿区界沟煤矿工程地质条件研究[J].中国煤炭地质,2008,20(7):55-58.  
HUANG Fangyou, ZHANG Wenying, XU Shengping. Engineering geological condition study of jieyou coalmine, linhuan mining area[J]. Coal Geology of China, 2008, 20(7): 55-58.
- [13] 任政,张科学,姜耀东.采动下逆断层活化过程中工作面应力场响应研究[J].煤炭科学技术,2021,49(9):61-68.  
REN Zheng, ZHANG Kexue, JIANG Yaodong. Research on response of stress field in working face during the thrust fault activation process under mining disturbance[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 61-68.
- [14] 蔡武,窦林名,王桂峰,等.煤层采掘活动引起断层活化的力学机制及其诱冲机理[J].采矿与安全工程学报,2019,36(6):1193-1202.  
CAI Wu, DOU Linming, WANG Guifeng, *et al.* Mechanism of fault reactivation and its induced coal burst caused by coal mining activities[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(6): 1193-1202.
- [15] HU Yang, SU Jian, LIU Weiqun, *et al.* The evolution and prevention of water inrush due to fault activation at working FACE No. II 632 in the Hengyuan Coal Mine[J]. Mine Water and the Environment, 2019, 38: 93-103.
- [16] 董永,孟祥瑞,高召宁.断层影响下防水煤柱留设合理宽度研究[J].煤炭科学技术,2014,42(S):241-243.  
DONG Yong, MENG Xiangrui, GAO Zhaoning. Study on design of coal pillar rational width for prevent water-inrush under influence of fault[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(S): 241-243.
- [17] 孙洪超.采动断层活化应力演化与煤柱留设研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.  
SUN Hongchao. Study on activated stress evolution of mining faults and coal pillar setting-up[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [18] 国家安全生产监督管理总局,国家煤矿安全监察局.煤矿防治水细则[M].北京:煤炭工业出版社,2018.
- [19] 武强.煤矿防治水手册[M].北京:煤炭工业出版社,2013.
- [20] 杨志斌.斯列萨列夫公式在矿井水害防治中的应用分析[J].煤矿安全,2016,47(9):190-193.  
YANG Zhibin. Application Analysis of Слесарев Formula in Mine Water Hazard Prevention[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(9): 190-193.
- [21] 国家安全生产监管总局,国家煤矿安监局,国家能源局,国家铁路局.建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[M].北京:煤炭工业出版社,2017.
- [22] 赵成喜.淮北矿区深部岩溶突水机理及治理模式[D].徐州:中国矿业大学,2019.  
ZHAO Chengxi. The water inrush mechanism and governmental mode of deep karst in Huai Bei Mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.