

文章编号: 1673-3363-(2016)01-0035-07

# 上下盘开采顺序对断层煤柱采动应力的影响

代进, 蒋金泉

(山东科技大学矿山灾害预防与控制重点实验室, 山东 泰安 271019)

**摘要** 回采巷道沿断层边界布置时, 采用基本顶断裂岩块铰接平衡理论研究了先采断层上盘或先采断层下盘2种开采顺序下, 工作面采空区基本顶荷载在断层两侧的传递规律和差异性; 现场实测了2种条件下断层煤柱及相邻回采巷道的矿压显现特征。研究表明: 断层上盘先行开采时, 断层的载荷传递系数较大, 上盘断层煤柱压力小, 下盘煤体压力较大。断层下盘先行开采时, 断层的载荷传递系数与断层角度有关, 当断层角度较大时, 下盘采空区覆岩载荷可以传递给断层上盘, 下盘断层煤柱压力小, 上盘断层煤体压力大; 当断层角度较小时下盘覆岩载荷难以传递给断层上盘, 下盘断层煤柱压力较大, 上盘煤体压力相对较小。为此, 断层上、下盘开采顺序不同时应留设不同的断层煤柱。

**关键词** 基本顶; 断层; 开采顺序; 压力传递; 煤柱压力

**中图分类号** TD 323      **文献标志码** A      **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2016.01.006

## Influence of mining sequence of hanging wall and foot wall on mining-induced stress of fault coal pillar

DAI Jin, JIANG Jinquan

(Key Laboratory of Mine Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science and Technology, Tai'an, Shandong 271019, China)

**Abstract** The laws and differences of the load transmission of the basic roof over the gob area of the fault's two sides have been studied under the condition of different mining sequence of hanging wall and foot wall, based on the articulated balance theory of the fracture rock mass, with the roadway being arranged along the boundary of the fault. And the characteristics of ground pressure of fault coal pillar and the mining gateway nearby have been studied with the method of field test. The study has shown that the load transmitting coefficient of fault is relatively higher, the hanging wall of coal pillar abutment pressure is low and that the foot wall coal pressure is relatively higher when the hanging wall of fault is firstly mined. However, the load of transmitting coefficient of fault is related with the angle of fault when the foot wall is firstly mined. When the angle of fault is larger, the load of the gob area overlying strata can be transmitted to the hanging wall, so the foot wall of coal pillar abutment pressure is low and the hanging wall coal pressure is higher; while the angle of fault is smaller, the load of the gob area overlying strata can hardly be transmitted to the hanging wall, so the foot wall of coal pillar pressure is higher and the hanging wall coal pressure is relatively lower. Therefore, different widths of the fault coal pillar should be considered according to different mining sequences.

收稿日期: 2014-04-17

责任编辑: 王江涛

基金项目: 国家自然科学基金项目(51574155, 51344009); 山东省自然科学基金项目(ZR2013EEM018)

作者简介: 代进(1959—), 男, 四川省达州市人, 教授, 博士, 从事矿山压力与支护和矿山开采方面的研究。

E-mail: cjxdj123@163.com

Tel: 13468009628

**Key words** main roof; fault; mining sequence; pressure transmission; pillar pressure

当回采工作面边界为断层时, 为了提高回采率, 往往沿断层边界布置回采巷道, 回采巷道与断层之间不留或只留很小的煤柱, 这种布置方法有时候给巷道支护带来一些安全问题。一些研究表明: 断层对矿压分布规律的影响十分明显, 断层附近的回采巷道, 在工作面回采期间承受的支承压力与正常工作面有较大的区别, 在采动的影响下断层易发生活化, 回采巷道顶板难以控制, 一般会出现较大的围岩变形和冒顶, 严重时会产生冲击地压。研究表明: 不但采煤活动对断层活化有影响, 大断面巷道掘进也能活化断层<sup>[1]</sup>。目前, 国内外对断层附近矿山压力显现方面所做的研究工作很多, 大体可分为断层带附近应力分布规律<sup>[2-5]</sup>、断层破碎带内巷道支护方法<sup>[6-8]</sup>、断层活化规律及其引发冲击矿压<sup>[9-11]</sup>等。针对断层上下盘开采顺序对断层煤柱矿压显现影响的研究则较少。影响断层附近压力显现的主要因素仍然是采空区上方基本顶的运动, 需要运用基本顶砌体梁理论<sup>[12-17]</sup>对其进行更为细致的研究。当断层一侧受采动影响时, 采空区上方的基本顶破断岩块形成了砌体梁<sup>[12]</sup>, 将断层一侧采空区基本顶的载荷传递给断层另一侧的煤体, 这种载荷的传递对于断层两盘煤体来说具有不对称性。当断层具有荷载传递性能时, 断层一侧采空区上方基本顶砌体梁载荷的主要部分将通过断层传递给另一盘, 断层与采空区之间的窄小煤柱上的载荷相对较小; 而当断层的荷载传递性能较差时, 采空区一侧上方基本顶岩块载荷的主要部分将施加给断层与采空区之间的断层煤柱, 从而导致在断层煤柱上形成高应力区, 甚至使煤柱完全破坏, 煤柱上方岩层整体沿断层错动失稳, 发生工作面动压现象或冲击危险。为了防止断层冲击矿压, 通常加大断层煤柱尺寸或对断层煤柱进行卸压处理, 然而断层两侧开采顺序的不同, 卸压转移载荷的效果也就不同, 这就需要采用砌体梁理论, 针对先采断层上盘、下盘工作面开采 2 种开采状态, 研究断层上下盘工作面基本顶的载荷传递特征。

## 1 断层上盘工作面基本顶荷载传递特征

断层上盘工作面开采时, 采空区基本顶断块运动后形成的铰接结构如图 1 所示。在断层面面向工作面采空区一侧倾斜的情况下, 采空区基本顶断块形成的力学结构位于断层面、断层煤柱和采空区矸石

上方, 其承受的荷载由断层面、断层煤柱和采空区矸石共同承担。

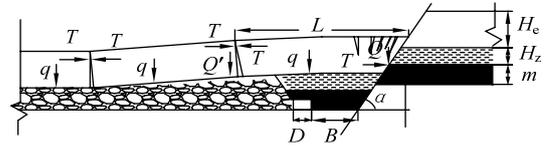


图 1 断层上盘工作面先采动时的采空区基本顶断块结构

Fig.1 Mechanical equilibrium structure of the fracture rock mass of overlying basic roof over the gob area when hanging wall of the fault first mined

根据砌体梁理论<sup>[12-17]</sup>建立的力学平衡方程, 采空区基本顶断块力学结构由煤柱上方基本顶断块和采空区上方基本顶旋转断块挤压形成, 其中采空区基本顶旋转断块载荷的二分之一由采空区矸石承担, 另二分之一由断层煤柱上方基本顶断块传递给断层煤柱及断层面。根据煤柱刚度的大小, 断层面按照一定的压力转递系数  $K$  将断层煤柱上方基本顶断块和二分之一采空区旋转断块的垂直载荷传递到断层的另一侧, 这样通过断层面传递到下盘的采动载荷可按照式(1)计算:

$$Q = K \left( qL + \frac{Q'}{2} \right) = K \left( qL + \frac{qL}{2} \right) = \frac{3KqL}{2} \quad (1)$$

式中:  $Q$  为断层采动一盘采空区基本顶断块结构通过断层面传递给断层另一盘的集中载荷,  $\text{MN/m}$ ;  $Q'$  为采空区基本顶旋转断块传递给断层煤柱上方基本顶断块的载荷,  $\text{MN/m}$ , 按照  $Q' = qL$  计算;  $K$  为断层采动一盘采空区基本顶断块通过断面向断层另一盘传递的载荷系数, 与断层煤柱的完好情况相关, 可按照煤柱尺寸的大小确定, 10301 工作面按照表 1 选取;  $q$  为断层采动一盘煤柱上方基本顶断块单位面积承受的上覆载荷层及本层的总载荷,  $q = \gamma h$ ,  $\text{MN/m}^2$ ;  $\gamma$  为断层采动一盘煤柱上方基本顶断块单位面积承受的上覆载荷层及本层的平均容重,  $0.025 \times 10^6 \text{ N/m}^3$ ;  $H$  为断层断层采动一盘煤柱上方基本顶断块单位面积承受的上覆载荷层及本层的总厚度, 根据工作面综合柱状图计算确定,  $\text{m}$ ;  $l$  为断层采动一盘煤柱上方及采空区基本顶断块的长度, 长度越大影响越严重, 按照长度为周期来压步距计算,  $\text{m}$ ;  $L$  为采空区基本顶旋转断块传递给煤柱上方基本顶断块的长度, 按照周期来压步距计算,  $\text{m}$ 。

未能通过断层面传递的断层煤柱上方基本顶

断块结构的垂直载荷将作用在断层煤柱上，因此煤柱上承受的载荷为断层煤柱上方基本顶断块和二分之一采空区旋转断块的垂直载荷未能传递到断层下盘的部分、断层煤柱和回采巷道上方直接顶岩层载荷，以及断层煤柱和回采巷道上方顶煤载荷 3 部分之和，其表达式为

$$Q_d = \frac{3(1-K)qL}{2} + \gamma_z h_z \left( \frac{h_z c \tan \alpha}{2} + h_d c \tan \alpha + B + D \right) + \gamma_d h_d \left( \frac{h_d c \tan \alpha}{2} + B + D \right) \quad (2)$$

$$q_d = \frac{\frac{3(1-K)qL}{2} + \gamma_z h_z \left( \frac{h_z c \tan \alpha}{2} + h_d c \tan \alpha + B + D \right) + \gamma_d h_d \left( \frac{h_d c \tan \alpha}{2} + B + D \right)}{B} + \gamma H \quad (3)$$

从式(3)可看出：断层煤柱上支承压力的的大小与断层面压力传递系数有很大的关系，一般当煤柱刚度较大时断层的压力传递系数  $K$  较小， $K$  最小为 0；煤柱的刚度较小时断层的压力传递系数  $K$  较大， $K$  最大为 1。如果断层煤柱上的载荷强度过大，将出现断层煤柱冲击的潜在威胁，在一定程度上可以通过断层煤柱的钻孔卸压或注水等方式减小煤柱刚度，增大断层面的压力传递系数，使煤柱上方基本顶断块的载荷更多地通过断层面传递到断层下盘，进而使煤柱的稳定性得以保护，大采高工作面开采也有类似的情况<sup>[15]</sup>。

缩小煤柱的尺寸即减小式(3)中的  $B$ ，将有利于基本顶载荷向断层下盘转移，同时，缩小煤柱尺寸促使煤柱受载达到极限，在较大的荷载作用下降低煤柱的刚度，增大断层面的压力传递系数  $K$ 。当断层面载荷传递系数增大到 1 时，煤柱上方只施加了顶煤和直接顶的载荷，同时也使煤柱的载荷达到极限，此时，煤柱的极限强度并没有改变。当  $B=0$  时相当于取消了断层煤柱，基本顶载荷将全部通过断层面传递到断层的下盘。

兴隆庄煤矿十采区 10301 下东面，采深 500 m，顶煤厚度 6 m，直接顶厚度 10 m，基本顶厚度 20 m，基本顶上方载荷层厚度 30 m，岩石的平均容重 0.025 MN/m<sup>3</sup>，煤层的平均容重 0.013 MN/m<sup>3</sup>，煤层

式中： $Q_d$  为断层煤柱上的载荷，MN/m； $\gamma_z$  为直接顶岩层的容重，0.025×10<sup>6</sup> N/m<sup>3</sup>； $h_z$  为直接顶岩层的厚度，根据工作面柱状图计算确定，m； $\gamma_d$  为顶煤的容重，0.013×10<sup>6</sup> N/m<sup>3</sup>； $h_d$  为顶煤的厚度，根据工作面柱状图计算确定，m； $\alpha$  为断层的角度，根据地质资料确定，(°)； $B$  为断层煤柱的宽度，m； $D$  为断层面附近回采巷道的宽度，m。

这样煤柱上的载荷强度  $q_d$  可用下式计算：

的单向抗压强度为 15 MPa。

如图 2 所示，在工作面的东南部布置了运输巷，该运输巷在 1，2 号测点附近与 F3 号正断层为邻；工作面开采断层的下盘，运输巷布置在下盘煤层中，与断层面之间的断层煤柱 0~10 m。在工作面西北部布置有回风巷，回风巷在 3，4 号测点附近与 F4 正断层为邻，工作面开采断层的上盘，回风巷布置在上盘煤层中，与断层面之间的断层煤柱 0~30 m。

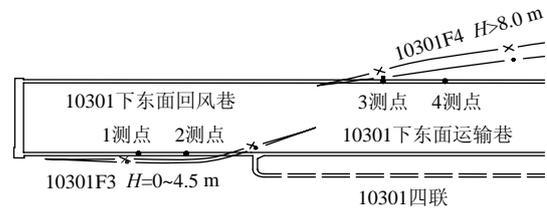


图 2 10301 工作面矿压测点布置

Fig.2 10301 coal face mine pressure measuring points

由于 10301 下东工作面开采 F4 断层的上盘，采空区上覆基本顶岩层所承受的载荷可以通过断面向下盘传递，这样可以减轻工作面与 F4 断层之间的煤柱压力。按照前面的分析，在不考虑断层带宽度影响的条件下，断层的荷载传递系数和通过断面向下盘传递的载荷与断层煤柱尺寸的关系见表 1 和图 3，4。

表 1 不同断层煤柱尺寸下的压力传递系数和向下盘传递的载荷

Table 1 Transfer coefficient and pressure loads transmitted to foot wall of the fault on different fault pillar sizes

煤柱尺寸/m	45	40	35	30	25	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	0
传递系数	0	0.10	0.24	0.36	0.48	0.60	0.66	0.70	0.74	0.80	0.84	0.88	0.92	0.97	1	1
传递载荷/(MN·m <sup>-1</sup> )	0	9	20	28	35	40	42	43	43	45	45	45	45	45	44	41

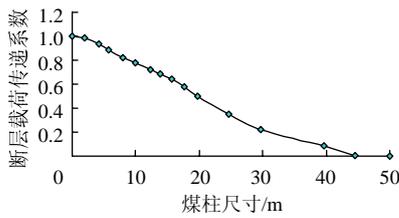


图 3 断层向下盘的传递系数与煤柱尺寸的关系

Fig.3 Relation between transfer coefficient transmitted to foot wall and pillar sizes

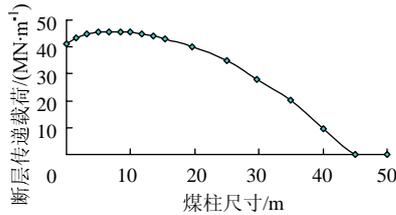


图 4 断层向下盘的传递载荷与煤柱尺寸的关系

Fig.4 Relation between pressure loads transmitted to foot wall and pillar sizes

从图 3, 4 可看出: 当工作面开采断层上盘时, 断层与采空区之间的煤柱越小, 断层传递采空区中的压力就越大; 当煤柱尺寸小到其强度不足以承受采空区基本顶施加的载荷时, 采空区基本顶承受的载荷将全部传递给断层下盘, 此时断层的压力传递系数为 1。由于大部分载荷传递给下盘, 因此, 断层煤柱的压力增加不大, 回采巷道受到的影响较小。在这种条件下, 巷道的运行是安全的。

## 2 断层下盘工作面基本顶荷载传递特征

断层下盘工作面开采时, 采空区基本顶断块运动后形成的铰接结构如图 5 所示。

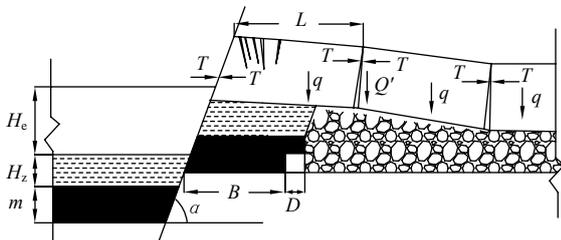


图 5 断层下盘工作面先采动时采空区上方的基本顶断块结构

Fig.5 Mechanical equilibrium structure of the fracture rock mass of overlying basic roof over the gob area when foot wall of the fault first mined

断层面向工作面的外侧倾斜, 采空区基本顶断块形成的力学结构位于断层面的下方, 平行于断层面的滑移推力是否小于垂直于断层面的正压力形成的摩擦阻力, 要视断层面角度的大小。因此, 在这种情况下采空区基本顶断块结构所承受载荷能否通过断层面传递到断层上盘与断层面角度有很大的关系。根据铰接岩块成铰的力学平衡分析<sup>[8]</sup>, 当断层角  $\alpha \leq 90^\circ - \varphi$  时, 不论基本顶旋转块产生多大的水平挤压力, 都不能取得平衡。一般情况下  $\varphi = 38^\circ \sim 45^\circ$ , 只有  $\alpha > 45^\circ \sim 52^\circ$  时, 基本顶断块才有可能在断层面上形成与断层上盘的铰接。即使断层倾角  $\alpha > 45^\circ \sim 52^\circ$ , 还要视断层带的大小和断层带两盘的岩层强度, 如果断层带宽度较大或基本顶的强度较小, 断层带中的小块转动也使得形成力学平衡结构的几率大大减小。只有当断层倾角较大 ( $\alpha > 45^\circ \sim 52^\circ$ ), 基本顶断块较坚硬且断层面断层带较小时, 才能形成稳定的断块铰接点。

根据铰接岩块成铰的力学平衡分析<sup>[8-9]</sup>, 当断层面角度较大时, 平行于断层面的滑移推力较小, 垂直于断层面的正压力形成的摩擦阻力较大, 基本顶断块在断层面上能够形成铰接。这时, 采空区基本顶断块所承担的水平挤压力和垂直载荷都将通过断层面的铰接点向断层面的另一盘传递, 由断层面传递到另一盘的载荷仍然可用式(1)进行计算。

当断层面角度较小时, 平行于断层面的滑移推力较大, 而由正压力形成的摩擦阻力较小, 基本顶断块在断层面上不能够形成铰接。也就是说, 断层煤柱上方基本顶断块的前端在旋转下沉过程中, 很难在断层面上找到能够使自身平衡的支撑点, 基本顶断块在荷载的驱动下将会沿断层面滑移。这样, 采空区基本顶断块所承担的水平挤压力和重力载荷将不能通过断面向另一盘传递。

在断层不传递采空区载荷的条件下, 断层与采空区之间煤柱上承受的载荷为整个基本顶断块结构所承担载荷与直接顶、顶煤载荷的总和, 因此, 煤柱上承受的载荷为

$$Q_d = \frac{3qL}{2} + \gamma_z h_z \left( B + D - h_d c \tan \alpha - \frac{h_z c \tan \alpha}{2} \right) + \gamma_d h_d \left( B + D - \frac{h_d c \tan \alpha}{2} \right) \quad (4)$$

$$q_d = \frac{\frac{3qL}{2} + \gamma_z h_z \left( B + D - h_d c \tan \alpha - \frac{h_z c \tan \alpha}{2} \right) + \gamma_d h_d \left( B + D - \frac{h_d c \tan \alpha}{2} \right)}{B} + \gamma H \quad (5)$$

在这种条件下，断层附近的窄小煤柱是采空区上方基本顶断块不可缺少的支承点，基本顶断块结构所承受的载荷无法向其他地点转移，煤柱上的载荷不可能通过卸压的方式卸掉，煤柱极有可能承受较大载荷而超过煤柱的强度极限，使得回采巷道发生缓慢破坏或发生冲击地压。解决由此产生的问题有 2 个途径：1) 留设足够大的煤柱尺寸，可参考式(5)计算，使煤柱能够承受载荷；2) 采用深孔断顶爆破，解除基本顶断块的力学结构，消除基本顶传递给断层煤柱上的荷载。

根据十采区 10301 下东工作面运输巷的条件，由于该工作面在测点 1 和测点 2 处开采 F3 断层的下盘，采空区上覆基本顶岩层所承受的载荷是否能通过断层面上盘传递，需要视 F3 断层面的夹角和断层带的大小，当断层面不能传递基本顶载荷时，采空区与断层之间的煤柱压力将会变大。按照前面的分析，在不考虑断层带宽度影响的条件下，断层的传递系数和通过断层面上盘传递的载荷值与断层煤柱尺寸的关系图 6, 7 和表 2。

表 2 不同断层角度与断层煤柱尺寸的断层传递系数及向上盘传递的载荷

Table 2 Transfer coefficient and pressure loads transmitted to hanging wall of the fault on different fault angle and pillar sizes

煤柱尺寸/m	45	40	35	30	25	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	1	
传递系数	断层 70°	0	0.10	0.24	0.30	0.46	0.54	0.60	0.64	0.68	0.74	0.78	0.82	0.87	0.92	0.96	1
	断层 52°	0	0.10	0.20	0.30	0.42	0.54	0.58	0.62	0.66	0.72	0.76	0.79	0.85	0.89	0.94	1
	断层 45°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
传递载荷/(MN·m <sup>-1</sup> )	断层 70°	0	9.13	20.40	23.63	33.35	35.78	38.25	39.20	39.95	41.63	41.93	42.03	42.413	42.55	42.00	42.50
	断层 52°	0	9.13	17.00	23.63	30.45	35.78	36.98	37.98	38.78	40.50	40.85	40.49	41.44	41.16	41.13	41.25
	断层 45°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

从图 6, 7 中可看出：当断层角度大于 52°时，工作面开采断层下盘时，断层与采空区之间的煤柱越小，断层传递采空区的压力就越大，当煤柱尺寸小到其强度不足以承受采空区基本顶施加的载荷时，采空区基本顶承受的载荷将全部传递给断层下盘，此时断层的压力传递系数为 1，这一点与工作面开采断层上盘的情况相同，回采巷道受到的影响较小；但是，当断层角度小于 52°时，开采断层下盘，不论断层与采空区之间的煤柱有多大，压力传递系数均为 0，采空区基本顶施加的载荷全部由断层煤柱承担，此时，回采巷道受到的影响较大。

在工作面开采下盘的情况下，还应该考虑断层破碎带对力学传递条件的破坏，如果断层的力学传递条件受到破坏，断层煤柱上的压力将会增大，回采巷道的变形破坏将会更加严重，增加冲击矿压的

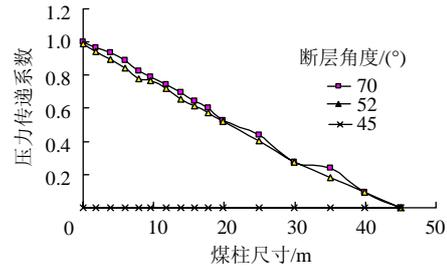


图 6 向上盘的传递系数与断层角度和煤柱尺寸的关系  
Fig.6 Relation between transfer coefficient transmitted to hanging wall and fault angle and pillar sizes

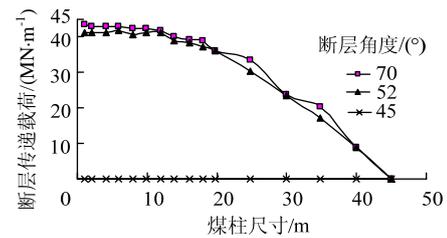


图 7 向上盘的传递载荷与断层角度和煤柱尺寸的关系  
Fig.7 Relation between pressure loads transmitted to hanging wall and fault angle and pillar sizes

可能性。

### 3 上下盘断层煤柱压力显现差异分析

为了分析工作面开采断层上下盘时的断层煤柱及回采巷道压力显现的差异性，在兴隆庄煤矿十采区 10301 下东面回采时，在其回风巷和运输巷分别设置了钻孔应力观测点，观测断层煤柱在采动过程中的应力变化，测点布置如图 2 所示。其中，测点 1, 2 布置在工作面运输巷下帮断层煤柱内，距离工作面切眼分别为 180, 226 m；测点 3 和测点 4 分别布置在工作面回风巷上帮断层煤柱内，距离工作面切眼分别为 310, 376 m。每个测点安设 1 个钻孔应力计，深度 3 m。

如图 8 所示，在 10301 工作面沿着 F3 断层下盘推进时，测点在采动影响范围之外时应力计读数

变化不大,当工作面距离测点小于 30 m 时应力计读数显著增大,最大增大值为 24 MPa。说明工作面采动断层下盘时,断层下盘煤柱中的采动应力升高较快,从巷修情况来看,在工作面推进经过该断层时巷道超前支护范围破坏严重,经历了较大的维修才维持了正常使用。但在工作面推过了断层影响区之后,巷道超前支护范围内的压力显现明显减小,之后巷道未进行任何维修。在工作面沿着 F4 断层上盘推进时,测点在采动影响范围之外时应力计读数变化不大,当工作面距离测点小于 50 m 时应力计读数逐渐减小,最小减小值为 2.3 MPa。说明工作面采动断层上盘时,断层上盘煤柱中的采动应力变化不大,甚至有减小的现象,与工作面经过 F3 的情况相反,在工作面推进经该断层时,巷道超前支护范围压力显现不明显,整个巷道在工作面推进过程中未进行任何维修。

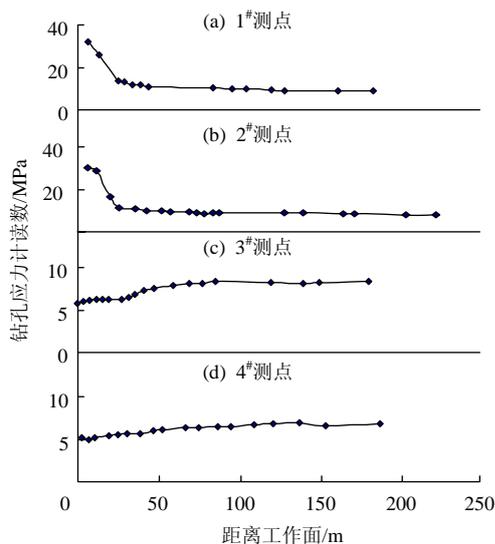


图 8 钻孔应力与工作面距离的关系

Fig.8 Relation between borehole stress and the distance to coal face

## 4 结 论

1) 工作面顺断层布置时,工作面开采过程中断层两侧都会受到采动影响,断层上盘或下盘先行开采顺序不同时,工作面一侧采空区基本顶运动产生的压力会以不同的方式传递给断层的另一盘,断层煤柱及断层另一盘的巷道矿山压力显现有明显的差异。

2) 当断层上盘工作面先开采时,采空区上覆岩层关键层形成的力学结构将大部分载荷传递到断层下盘的煤层上,上盘采空区附近断层煤柱承担的

载荷较小。

3) 当断层下盘工作面先开采时,采空区上覆岩层关键层的力学结构在力学传递性能上具有很大的不确定性。当断层角度大(超过  $52^\circ$ )时,压力拱结构稳定,绝大部分采空区上覆岩层载荷将通过该结构传递到断层上盘一侧煤层上,采空区断层煤柱上的压力较小;当断层角度较小时,压力拱结构很难形成或者很不稳定,采空区断层煤柱承担的载荷较大,或者出现突然加载的冲击现象。

## 参考文献:

- [1] 蒋建平, 章杨松. 正断层倾角变化对其下盘隧道围岩的研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(4): 596-601. JIANG Jianping, ZHANG Yangsong. Study on the influence of dip angles of normal fault on tunnel surrounding rocks in the fault footwall[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(4): 596-601.
- [2] 孟召平, 彭苏萍, 冯玉, 等. 断裂结构面对回采工作面矿压及顶板稳定性的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2006, 34(3): 24-27. MENG Zhaoping, PENG Suping, FENG Yu, et al. Influence of fracture structure plane on underground pressure and roof stability of working face[J]. Coal Geology & Exploration, 2006, 34(3): 24-27.
- [3] 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, 26(6): 561-566. MENG Zhaoping, PENG Suping, LI Hong. Influence of normal faults on the physical and mechanical properties of coal and the distribution of underground pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(6): 561-566.
- [4] 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 & Exploration, 2001, 29(3): 1-4.
- [5] 许进鹏, 宋扬, 程久龙, 等. 小断层的走向长度与断层距关系的数学模型[J]. 煤炭学报, 2005, 30(1): 22-25. XU Jinpeng, SONG Yang, CHENG Jiulong, et al. Mathematics model between strike length and fault throw of hitch[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(1): 22-25.
- [6] 勾攀峰, 胡有光. 断层附近回采巷道顶板岩层运动特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(3): 285-288. GOU Panfeng, HU Youguang. Effect of faults on movement of roof rock strata in gateway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(3): 285-288.

- [7] 肖同强, 柏建彪, 李金鹏, 等. 断层附近煤巷锚杆支护破碎围岩稳定机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(4): 482-486.  
XIAO Tongqiang, BAI Jianbiao, LI Jinpeng, et al. Stabilization mechanism of crushed surrounding rock in coal roadway with bolt support near fault[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(4): 482-486.
- [8] 宋卫东, 赵增山, 王浩, 等. 断层破碎带与采准巷道围岩作用机理模拟研究[J]. 金属矿山, 2004(2): 11-13.  
SONG Weidong, ZHAO Zengshan, WANG Hao, et al. Simulation study on interaction mechanism between fault fracture zone and rock surrounding straight work[J]. Metal Mine, 2004(2): 11-13.
- [9] 潘一山, 王来贵, 章梦涛, 等. 断层冲击矿压发生的理论与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 642-649.  
PAN Yishan, WANG Laigui, ZHANG Mengtao, et al. The theoretical and testing study of fault rock burst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 642-649.
- [10] 李志华, 窦林名, 牟宗龙, 等. 断层对顶板型冲击矿压的影响[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(2): 154-158.  
LI Zhihua, DOU Linming, MU Zonglong, et al. Effect of fault on roof rock burst[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(2): 154-158.
- [11] 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 Zhihua, DOU Linming, LU Zhenyu, et al. Study of the fault slide destabilization induced by coal mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(4): 499-504.
- [12] 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: 84-99.
- [13] 钱鸣高, 缪协兴, 何富连, 等. 采场“砌体梁”结构关键块分析[J]. 煤炭学报, 1994, 19(6): 557-563.  
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, HE Fulian, et al. Analysis the key block of “masonry beam” structure in stope [J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(6): 557-563.
- [14] 钱鸣高, 张顶立, 黎良杰, 等. 砌体梁“S-R”稳定及其应用[J]. 矿山压力与顶板管理, 1998, 15(3): 262-263.  
QIAN Minggao, ZHANG Dingli, LI Liangjie, et al. Masonry beam “S-R” stability and its application[J]. Ground Pressure and Strata Control, 1998, 15(3): 262-263.
- [15] 鞠金峰, 许家林, 王庆雄, 等. 大采高采场关键层“悬臂梁”结构运动型式及对矿压的影响[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 2115-2120.  
JU Jinfeng, XU Jialin, WANG Qingxiong, et al. Cantilever structure moving type of key strata and its influence on ground pressure in large mining height workface[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 2115-2120.
- [16] 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): 225-229.  
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Study of key stratum theory for control[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(3): 225-229.
- [17] 邓喀中, 周鸣, 谭志祥, 等. 采动岩体的破裂规律实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 1998, 27(3): 262-263.  
DENG Kazhong, ZHOU Ming, TAN Zhixiang, et al. Experimental research on the laws of breakdown rock [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1998, 27(3): 262-263.