

断层活化扰动围岩变形规律

江山山¹, 王拓^{2*}

(1. 安徽神源煤化工有限公司 邹庄煤矿, 安徽 淮北 235000;
2. 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: 断层区域顶板岩石较为破碎, 连续性、完整性差, 工作面过断层期间矿山压力显现严重, 严重影响工作面安全生产。以邹庄煤矿 7401 工作面为工程背景, 通过相似模拟试验分析, 对过断层期间的工作面顶板垮落形态、围岩变形规律、断层区域顶板滑移情况进行分析。得到如下结论: 工作面推进至断层区域时, 直接顶上方顶板整体沿断层面有一定滑移; 断层区未放出的煤对顶板有支撑作用, 减小了对顶板的活化作用; 断层滑移影响范围主要是距煤层 5~20 m 的直接顶和老顶, 上下盘最大滑移量为 75 mm, 距煤层 20 m 以上的顶板范围没有明显滑移变形。

关键词: 正断层; 开采扰动; 围岩变形; 断层滑移

中图分类号: TD325 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2023)02-0001-08

Deformation Law of Surrounding Rock Disturbed by Mining During Fault Crossing

JIANG Shanshan¹, WANG Tuo²

(1. Zouzhuang Coal Mine, Anhui Shenyuan Coal Chemical Co., Ltd., Huaibei 235000, China;
2. Anhui University of Science and Technology, State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mine, Huainan 232001, China)

Abstract: The roof rock in the fault area is relatively broken, with poor continuity and integrity. The mine pressure appears seriously when the working face passes through the fault, which seriously affects the safety production of the working face. Taking the 7401 working face of Zouzhuang Coal Mine as the engineering background, through the analysis of similar simulation test, this paper studies the roof collapse shape, surrounding rock deformation law and roof slip in the fault area during the fault period. The conclusions are as follows: when the working face advances to the fault area, the whole roof above the direct roof slides along the fault plane. The unreleased coal in the fault area supports the roof and reduces the activation of the roof. The influence range of fault slip is mainly the direct roof and main roof 5~20 m away from the coal seam. The maximum slip amount of the upper and lower wall is 75 mm, and there is no obvious slip deformation in the roof more than 20 m away from the coal seam.

Keywords: normal fault; mining disturbance; surrounding rock deformation; fault slip

新型能源的发展和利用仍在探索阶段, 作为全球最大的煤炭消费国, 煤炭对我国经济发展仍起着支撑作用, 对于维护我国社会稳定和促进国民经济又好又快可持续发展有着特殊重要的意义。

收稿日期: 2022-04-01

基金项目: 安徽省高校自然科学基金资助项目(KJ2021A0453); 安徽理工大学人才引进研究启动基金资助项目(13210673); 国家自然科学基金青年基金资助项目(52204081); 国家自然科学基金面上资助项目(52174105); 安徽省重点研究开发项目资助(202004a07020045)

* 通信作者, E-mail: 287281447@qq.com

在工作面开采过程中,往往会遇到许多复杂的地质构造,例如断层构造.由于断层区域顶板较为破碎,且破坏顶板的连续性,导致顶板应力分布不规律,使顶板支护变得十分困难,并且大大增加顶板事故的发生概率,给工作面的安全开采带来很大影响^[1-5].同时,在断层附近区域,通常存在极高的水平构造应力,断层附近采场受到构造应力作用明显,且断层附近煤岩体内将会储存大量弹性应变能^[6-10].孟召平等^[11]通过观测正断层附近煤岩体显微裂隙、孔隙的状态,揭示正断层对煤岩体物理力学性质的影响;孙玉宁等^[12]认为断层的存在可改变巷道顶板冒落的一般规律,容易引起工作面的冒顶和突然来压;杨磊等^[13]认为,在断层附近煤岩体比远离断层面而未受断层影响处的煤岩体的抗压强度和转磨强度平均降低 75%左右;姜耀东等^[14-15]结合数值模拟对断层位置处的应力和内能变化规律进行研究.

本文针对邹庄煤矿大采高综放工作面采矿地质条件,以 7401 工作面 F315 断层为工程背景,围绕工作面过断层期间矿压显现规律展开研究,研究结果可对指导 7401 工作面过断层期间安全开采提供理论依据.

1 试验过程

1.1 试验设备

本次相似模拟试验采用平面模型实验台(如图 1 所示)进行模型铺设开挖试验,使用 YE-2539 高速静态应变仪(如图 2 所示)记录埋设压力盒数据在开采过程中的变化,采用数字摄影测量技术观测位移变化,使用 PhotoInfor 软件进行分析.



图 1 平面模型试验装置



图 2 YE-2539 高速静态应变仪

7401 工作面 F315 断层为正断层,断层走向 12° ,倾角 80° ,最大落差 5.4 m,煤层顶底板均为粉砂岩,煤层厚度 6.4 m,采煤机割煤高度 3 m,放煤高度 3.4 m.工作面煤层直接顶为 5.3 m 的粉砂岩,直接底为 2.1 m 细砂岩,开采采用直接破岩的方法,上盘开采至断层面时,向上倾斜 7° 直接破岩直下盘煤层.

本次试验模拟采深为 260 m,模型铺设自煤层底板-煤层-顶板总厚 66 m 的岩层,煤层厚 6 m.模拟巷道断面为矩形,宽 5 m,高 3.2 m,断面面积为 16 m^2 .

取模型几何相似比 α_1 :

$$\alpha_1 = y_m / y_p = z_m / z_p = 1/50.$$

式中: y_m, z_m 为相似模拟试验模型的长度和高度; y_p, z_p 为现场模拟范围的长度和高度.

容重相似系数 α_γ :

$$\alpha_\gamma = \gamma_{mi} / \gamma_{pi} = 0.6.$$

式中: γ_{mi}, γ_{pi} 分别为模型和现场岩石的容重.

弹性模量相似系数 α_E :

$$\alpha_E = 1/83.$$

采用气动装置加载,模型参数见表 1.

表1 模型参数

模型比例尺	模型厚度/m	模型宽/m	模型高/m	时间系数	容重系数	力学相似系数
1/50	0.12	1.38	1.32	$1/\sqrt{50}$	0.6	1/83

本次试验模型选择的相似材料:骨料为普通细粒河砂(粒径小于3 mm),胶结材料为石膏、水泥、碳酸钙,分层材料为云母粉.对于煤,由于容重小,加进适量的锯末以减少相似材料的容重.

相似材料的配比试验是相似材料模拟试验的基础工作.经过反复试验,调整材料组成的比例,以达到力学相似的要求.具体围岩的力学参数见表2.

表2 相似材料力学参数

岩性名称	模型/kPa	原型/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
粉砂岩	41.90	285.0	7.37	0.25
细砂岩	47.30	321.8	5.94	0.23
砂质泥岩	70.80	481.6	4.02	0.28
中砂岩	73.70	501.4	5.01	0.31
泥岩	37.20	253.1	3.54	0.30
石灰岩	70.30	478.2	5.21	0.28
砂质泥岩	59.60	405.4	4.02	0.28
中砂岩	37.20	253.1	5.01	0.25
粉砂岩	60.20	409.5	7.49	0.28
细砂岩	38.30	260.5	6.74	0.23
粉砂岩	4.16	28.3	7.37	0.25
煤层	21.20	154.2	2.81	0.32
粉砂岩	53.90	366.7	5.94	0.25

铺设的相似模型如图3所示.模型在铺设时,遵循先铺下盘再铺上盘的原则,掌握好断层落差高度,在模型架后面挂一条模拟断层倾向的线,沿线断开,下盘比上盘高12 cm.自煤层底板开始,逐层称取相似材料,干拌均匀后,加水拌匀,倒入模型架,铺平锤实.先铺设下盘岩层,铺设好后,在断层面撒上云母粉,模拟断层结构面,下盘制作好后再铺设上盘岩层.每层铺好后,在层面上撒上云母粉,模拟层理间结构面,再依次铺设上层岩层.

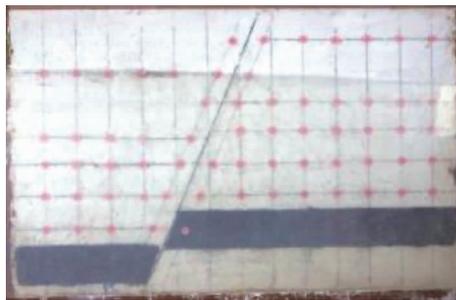


图3 相似模拟试验模型

1.2 测点布置

试验中,压力盒、测点布置如图4所示.根据模型尺寸,水平方向共设置5条观测线,分别对准上盘、下盘监测的关键层位,分别为煤层顶板的粉砂岩、细砂岩、中砂岩以及砂质泥岩,层中间隔高度为距煤层顶板5,15,27,36,56 cm,垂直方向每隔10 cm设置1条竖直观测线,观测上覆岩层垮落情况,在断层线两侧5 cm位置布置2条断层位移监测线,检测断层上下盘的滑移变形.在煤层顶板中埋设压力盒,通过压力盒的应变量来反映煤层支承压力的变化情况,压力盒的位置在距煤层顶板5 cm处,下1号~下4号压力盒距断层线10 cm,下5号压力盒距测点40 cm,上1号~上5号测点距煤层顶板15 cm.

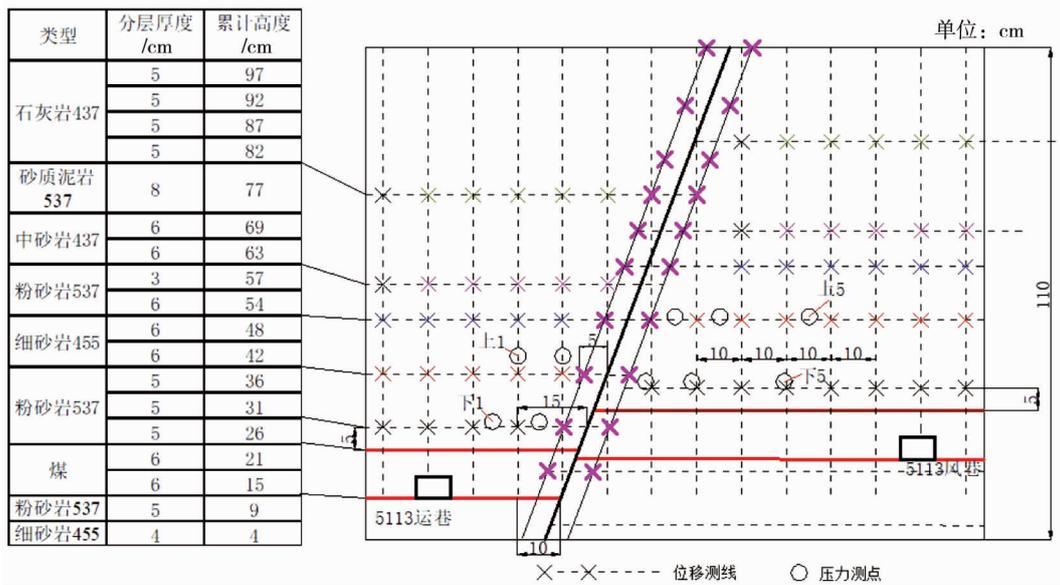


图4 测点布置

1.3 开挖过程中岩层运移变化

上盘煤层开挖至断层面以及过断层区域的岩层运移模型图如图5和图6所示。开挖时,定点拍摄记录上覆岩层的运移变化规律,每次开挖100 mm(对应现场比例每次开挖5 m)。模型开挖从煤层的上盘开采至断层面,由图5可以看出:初始状态的煤层顶板和断层面没有移动,处于原始界面形态;随着工作面向前推进,顶板开始出现微小的裂隙。工作面推进至断层面时,改变采高为3 m,倾角为 10° ,从煤层的上盘开采至断层面。由图6可以看出:初始状态的煤层顶板和断层面没有移动,处于原始界面;随着工作面向前推进,顶板开始出现微小的裂隙。



图5 开挖至断层面

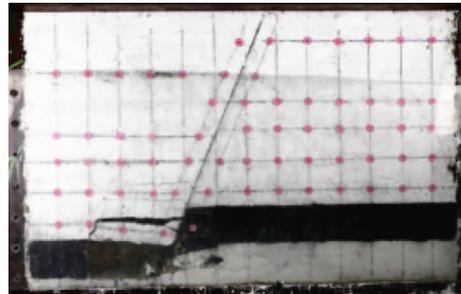


图6 开挖过断层区域岩石断面

由于是从煤层上盘向煤层下盘过渡,断层下盘顶板岩石处于靠近断层的活化带,从图6可以看出:工作面顶板推进至断层面时,直接顶出现垮落,直接顶上方的老顶出现裂隙,裂隙发育至断层面截止,说明断层带对于煤层上方顶板的裂隙形成和发育有一定影响。

图7为上盘煤层开挖至下盘煤层的模型图和云图。从图7a可以看出:工作面过渡区开采时,顶板裂隙进一步发育,过渡区遗留的煤层随采随垮,上盘煤层老顶裂隙扩大,出现明显的离层现象,断层区垮落的煤体和岩体对上盘煤层直接顶断裂部分有一定的支撑作用,顶板有明显的下沉,但不是完全接底,形成一个类似砌体梁式的结构,说明断层上盘顶板在失去液压支架支撑后,有较为明显的下沉,但不是随采随垮。由图7b也可以看出:工作面推进后顶板有一定的下沉,云图颜色加深,顶板下沉量变大。

图8为工作面过渡至下盘煤层时出现的半煤岩断面,工作面上方的煤体已经可以通过放顶煤放出。从图8a中可以看出:工作面半煤岩断面上方的煤体已经采出,下盘煤层靠近断层处顶板出现离层。位移云图也显示留煤区云图颜色较浅,分布很稀疏,顶板位移明显颜色加深。

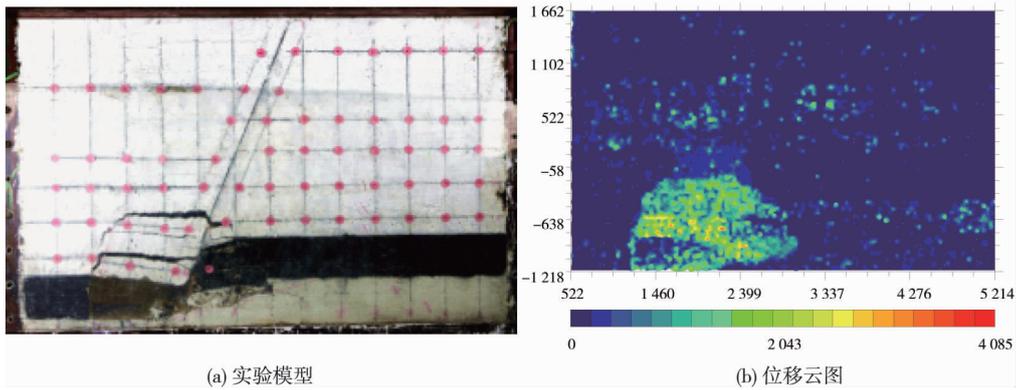


图 7 开挖至下盘煤层部分

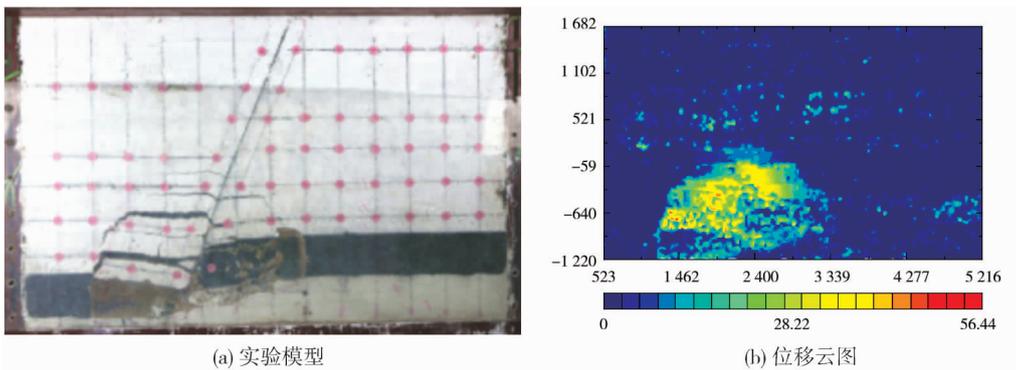


图 8 开挖下盘煤层第一步

工作面沿下盘继续推进的模型及云图如图 9 和图 10 所示.从图 9 和图 10 中可以看出:上盘煤层顶板工作面向前推进,顶板离层现象逐渐加大,顶板逐渐沿着断层面有向下滑移的趋势;随着工作面向前推进,下盘煤层顶板的裂隙进一步向上发育,在下盘遗留煤区给顶板提供一定的支撑,使顶板有一定的悬顶,可以减少对工作面支架的压力,当工作面上方悬顶足够长时,顶板出现破断垮落.

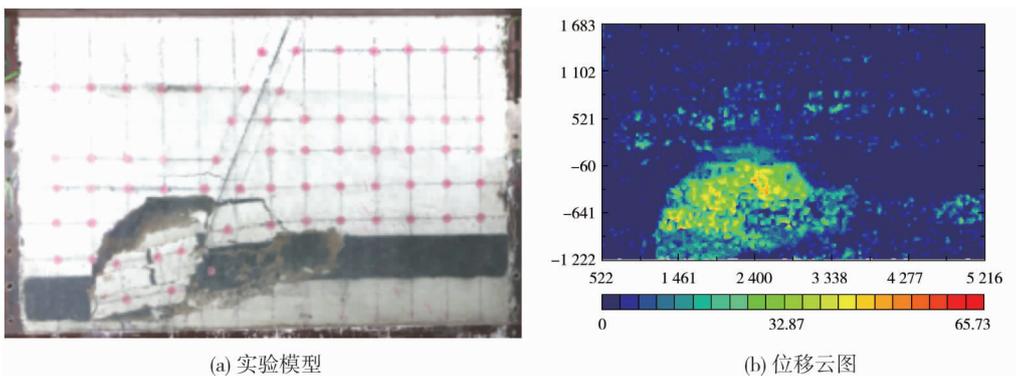


图 9 开挖下盘煤层顶板初次断裂

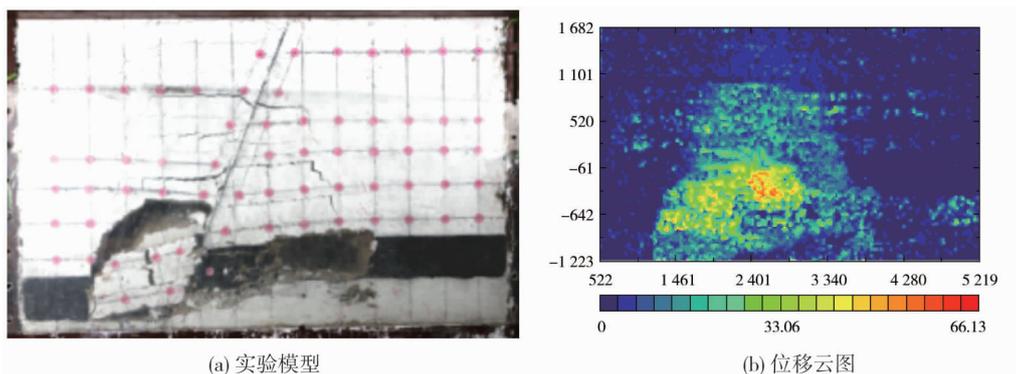


图 10 开挖下盘煤层

图 11 给出了工作面推进完成后顶板的垮落形态.由图 11 可知:(1)整体来看,经历工作面推进、顶板下沉和采空区压实等过程后,顶板进一步下沉破断,直接顶随采随冒,裂隙不断起裂、扩展和贯通,顶板离层逐渐向上发育,出现规律性的破断垮落,采空区顶板不断下沉和压实;(2)上盘煤层工作面推进后直接顶垮落,直接顶上方顶板整体沿断层面有一定的滑移位移;(3)留煤区对其上方顶板有一定的支撑作用,断层区的顶板下沉较少,由于留煤区的支撑作用,下盘顶板沿留煤区右侧断裂,同时减小断层区对顶板的活化作用;(4)顶板冒落的岩石上部位置为规则排列状态并不是杂乱无章,靠近下部的碎胀系数较大,而靠近上部岩层的碎胀系数较小.



图 11 工作面推进完成

2 工作面顶板位移变化规律

2.1 测线随工作面开采位移变化

对 5 条测线分别进行检测,检测对应推进至断层面位置、过断层区域位置、开始推进下盘煤层区域位置、下盘煤层推进 40,70,80 m(80 m 即为开采完成)位置的位移,得出煤层上方顶板随工作面推进的位移变化图,如图 12~图 14 所示.

图 12 为第一条测线随工作面推进煤层顶底板的位移变化曲线,图中曲线分别对应推进至断层面位置、过断层区域位置、开始推进下盘煤层区域位置、下盘煤层推进 40,70,80 m 位置的位移变化曲线.由图 12 可知:过断层上盘煤层区域时,上盘顶板下沉最大为 45 mm,顶板沿断层面滑移量较小,下盘煤层顶板几乎无影响,没有可见的裂隙;随着工作面开始推进下盘煤层,断层面的整体性进一步遭到破坏,断层整体的支撑能力下降,致使上盘煤层顶板失去有效支撑顶板完全垮落,直接顶和老顶的位移有明显的增大,大于 140 mm(对应现场实际约 2.8 m),下盘煤层顶板位移也逐渐增加,但增加的幅度不大,说明下盘煤层顶板受断层的影响较小;随着工作面远离断层区域,断层的活化性降低,上盘煤层顶板的位移趋于稳定,下盘煤层顶板开始出现周期性破断,破断距离约为 20 cm(对应现场实际约 10.0 m).

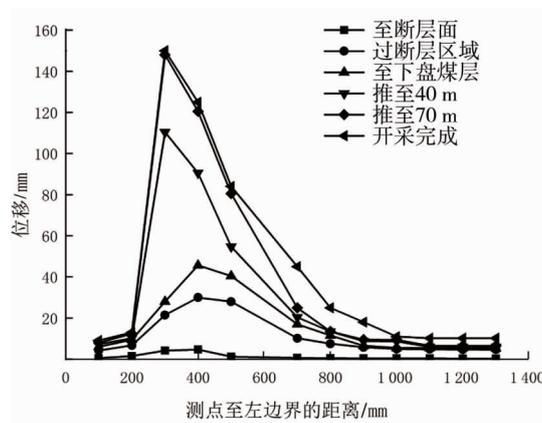


图 12 第一条测线随工作面开采位移变化

图 13 和图 14 为距煤层上方 25,34 cm 的 2 条测线随工作面推进煤层顶底板的位移变化曲线.从图中

可以看出:直接顶和老顶的变形量很小,最大下沉量在上盘煤层顶板处,达到 22 mm,下盘煤层变形量很小;随着工作面推进下盘煤层,上盘煤层顶板下沉有一定增加,工作面沿下盘推进 80 m 后,下盘煤层顶板的下沉量和离层范围都扩大,相似模型两边边界部分顶板下沉量都很小,无裂缝出现。

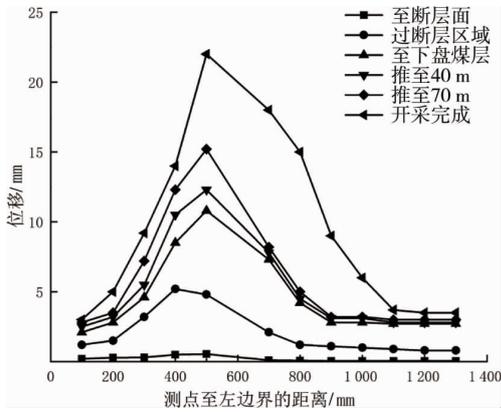


图 13 第三条测线随工作面开采位移变化

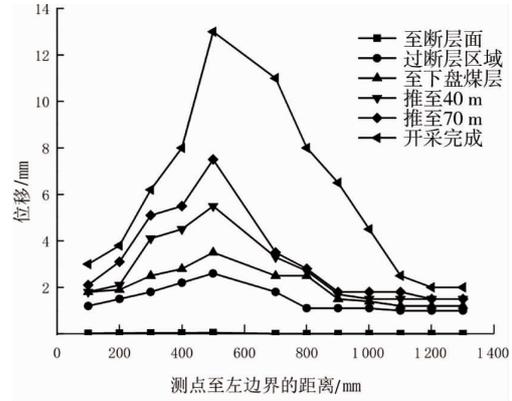


图 14 第四条测线随工作面开采位移变化

2.2 断层滑移量变化

在断层面上布置 6 排测点,检测对应推进至断层面位置、过断层区域位置、开始推进下盘煤层区域位置、下盘煤层推进 40,60,80 m 位置以及推进完成时的断层面滑移量变化情况,得出断层滑移量随工作面推进的变化情况,如图 15 所示.从图 15 中可以看出:

- 1) 工作面由上盘煤层推进至断层面时,断层位移区仅限于在煤层上方 5 m(5 m 为实际现场尺度,按照相似比计算得到,以下同理)的范围,位移量很小,为 15 mm;
- 2) 推进过断层区域时,断层的下沉量扩大至 50 mm,断层裂隙在距煤层 20 m 范围内都有出现;
- 3) 推进下盘煤层时,断层区失去下盘煤层的支撑作用,位移进一步扩大,最大位移达到 75 mm,断层区出现垮落现象,主要影响范围在距煤层 20 m 内,距煤层 20 m 以上断层面有一定滑移出现,但位移都在 5 mm 以下;
- 4) 工作面完成推进后,断层的滑移量在直接顶范围,即距煤层 5~10 m 内位移增加幅度很大,达到 80 mm,断层的滑移量增加主要体现在距煤层 20~35 m,断层滑移量增加至 30 mm,距煤层 35~50 m 内的顶板滑移较为稳定,整个过程小于 10 mm.

综合上述可知:从煤层上盘开采至断层面开始变坡的开采方法,对断层的滑移变形影响主要集中在距煤层 5~20 m 的直接顶和老顶,断层的最大滑移量为 75 mm(对应现场实际约 1.5 m),距煤层 20 m 以上的顶板范围,断层没有明显滑移变形;煤层下盘对断层有一定的支撑作用,当失去下盘煤层的支撑时,断层的滑移变形有较大幅度增加。

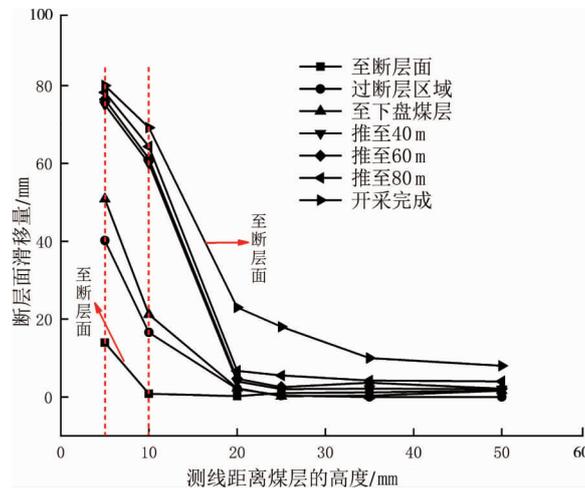


图 15 断层滑移量变化

3 结论

1) 过断层上盘煤层区域时,顶板沿断层面滑移量较小,下盘煤层顶板几乎无影响,没有可见的裂隙;开采下盘煤层,导致断层整体的支撑能力下降,直接影响上盘顶板稳定性,直接顶和老顶的位移有明显的增大,大于 2.8 m.

2) 随着工作面远离断层区域,断层的活化性降低,上盘煤层顶板的位移趋于稳定,下盘煤层顶板开始出现周期性破断,破断距离约为 10 m.

3) 断层区未放出的煤对顶板有支撑作用,减小了对顶板的活化作用;断层滑移影响范围主要是距煤层 5~20 m 的直接顶和老顶范围,上下盘最大滑移量为 1.5 m,距煤层 20 m 以上的顶板范围没有明显滑移变形.

参考文献:

- [1] 韦庆亮,李彦斌,谷攀,等.综采工作面过断层顶板破坏机理及控制技术[J].煤炭工程,2020,52(4):52-57.
- [2] 翟明华,刘人太,沙飞,等.深井工作面断层滞后突水机制与防治关键技术[J].煤炭科学技术,2017,45(8):25-31.
- [3] 王琦,李术才,李智,等.煤巷断层区顶板破断机制分析及支护对策研究[J].岩土力学,2012,33(10):3093-3102.
- [4] 王志强,黄鑫,苏泽华,等.临近断层工作面采动诱冲规律研究[J].中国安全生产科学技术,2021,17(5):67-72.
- [5] WANG T, MA Z. Research on strain softening constitutive model of coal-rock combined body with damage threshold[J]. International Journal of Damage Mechanics,2021,31(1):22-42.
- [6] 齐高臣,李鹏,王彦敏.综采工作面初采过断层顶板控制技术[J].煤炭科学技术,2014(S1):112-114.
- [7] 李云龙.掘进巷道过断层的顶板支护与安全监管[J].山东煤炭科技,2017(8):45-46.
- [8] 颜恭彬.含断层煤层顶板采动效应数值模拟研究[J].煤炭技术,2018,37(10):94-97.
- [9] 田中福.大直径顶板高位定向钻孔在复杂地层钻进工艺的应用分析[J].煤炭技术,2020,39(9):33-35.
- [10] 张敦喜,杨张杰,王庆牛,等.采煤工作面断层超前治理技术研究[J].煤炭科学技术,2021,49(3):30-36.
- [11] 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(3):24-27.
- [12] 孙玉宁,周建荣,韩春晓,等.回采巷道顶板事故浅析[J].采矿与安全工程学报,2005,22(1):36-38.
- [13] 杨磊,张西斌,李春元,等.极软煤层大采高工作面遇断层煤壁稳定性研究[J].煤炭工程,2011(10):77-79.
- [14] 任政,姜耀东,张科学.采动影响下逆断层阶段性活化诱冲机制[J].煤炭学报,2020,46(S2):618-625.
- [15] 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.