

文章编号: 1673-3363-(2014)02-0180-07

断层活化与煤岩冲击失稳规律的实验研究

王涛^{1,2}, 姜耀东^{1,3}, 赵毅鑫^{1,3}, 张韵一³

(1. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083; 3. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要 基于义马千秋煤矿21221回采工作面原型, 设计了过断层的工作面回采相似模型实验, 通过再现断层活化和煤体冲击失稳的物理过程, 研究了采动影响下采场覆岩的运动规律和断层应力演化特征, 分析了煤层开采引起断层活化的机理。研究发现: 邻近断层活化时, 其正应力和剪应力快速增加, 断层滑移危险性增大; 工作面沿上盘开采至距离断层25 m时, 受采动影响断层出现活化; 采动影响增加了断层活化的可能性, 工作面煤体承载力的局部失效是引起断层滑移的重要原因, 断层滑移对工作面煤体的作用形式表现为非稳态的冲击和加卸载作用。

关键词 冲击失稳; 断层活化; 数字散斑; 模型实验

中图分类号 TD 353

文献标志码 A

Experimental research on fault reactivation and relating coal bumps

WANG Tao^{1,2}, JIANG Yaodong^{1,3}, ZHAO Yixin^{1,3}, ZHANG Yunyi³

(1. State Key Lab of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China;
2. Faculty of Resources and Safety Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China;
3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract Based on the prototype of No.21221 face of Qianqiu coal mine, a similar simulation experiment with a fault passing through the mining face is designed. The law of the fault stress evolution and induced overlying strata motion is studied by reproducing the physical process of fault reactivation and coal bumps. Meanwhile the mechanism of fault reactivation under the influence of mining is analyzed. It is observed that the normal stress and the shear stress rapidly increase when the moment is close to fault reactivation, and the risk of fault to slip increases at the same time. Under the mining influence, the fault is easy to reactivate until the working face is 25 meters away from fault along the hanging wall. The mining influence raises the possibility of fault reactivation; the important cause leading to the fault slip is the partial failure of the coal bearing capacity. In addition, the influences of fault slip on the coal act as the unsteady-state impact and the loading-unloading effects.

Key words coal bumps; fault reactivation; digital speckle correlation method; similar simulation

冲击地压是采矿工程中世界性的灾害现象, 从1738年英国的南史塔福煤田发生世界上第1次冲击地压以来, 世界上几乎所有采矿国家都有冲击地压灾害发生。根据冲击地压发生规律的统计分析, 地

收稿日期: 2013-02-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB226801); 国家自然科学基金项目(51174213); 煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放基金项目(SKLCRSM11KFB08); 中国博士后科学基金项目(2013M530770)

作者简介: 王涛(1983-), 男, 河北省定州市人, 博士, 从事岩石力学与采矿工程方面的研究。

E-mail: tao.w@139.com

Tel: 010-62339851

质构造发育的区域往往更容易发生冲击地压灾害，断层便是其中一种重要的诱发冲击地压发生的构造形式^[1-3]，由断层活化引起的冲击地压往往具有冲出煤量大、破坏性强、发生突然而猛烈的特点。2011 年千秋煤矿掘进巷道发生了“11·3”特大冲击地压事故，巷道发生严重的挤压垮冒，将正在该巷作业的矿工封堵或掩埋其中，最终仍造成 10 人遇难，64 人受伤，近 400 m 巷道严重损毁，事故调查组最终认定事故直接原因为开采活动诱发下伏 F16 逆断层活化引发。因此，由断层活化诱发冲击地压问题的研究是十分必要和迫切的。

有学者开展了采动影响与断层活动间关系的研究工作。断层活化与煤岩冲击失稳的相似模型实验研究方面，彭苏萍等^[4]通过 2 组不开采方式下的高角度断层模型分析了顶板岩体的变形和矿压分布规律，观察到了采动影响下的断层活化以及活化引起的断层岩体破裂、煤体支承压力增大等现象。潘一山等^[5]提出了模拟煤岩冲击失稳的新的相似系数 E/λ ，研制了可进行煤岩冲击失稳模拟实验的脆性破坏相似材料，针对开采对煤岩冲击失稳的影响，从正压力降低和剪应力增加的角度进行了巷道和采场断层冲击地压的模拟实验。窦林名等^[6-8]通过一系列相似模型实验研究了采动影响与断层活化之间的关系，分析了断层活化时的微震信号频谱特征，验证了当工作面位于断层下盘时冲击地压危险性高于工作面位于上盘时的危险性的结论。类似的研究还有水电行业硐室岩爆^[9-12]的相似模拟实验，但此类是模拟硐室周围小范围岩体的剥落、弹射，与煤矿开采中煤岩整体冲击失稳具有本质区别。

由于研究侧重点的不同，上述研究并未涉及采动诱发断层活化进而引起煤岩冲击失稳过程的模拟，并且对于采动过程断层及围岩应力的监测只是静态监测，缺乏对开采活动引起断层面上法向应力、切向应力状态变化的具体分析，对开采活动是如何引起断层活化，断层活化又如何影响工作面煤体应力状态的作用机制不清。

鉴于此，本文设计模拟煤层采出、断层活化和煤岩冲击失稳整个断层冲击地压发生过程的相似模型实验，研究开采活动影响下的断层活化规律以及断层滑移过程中工作面煤体应力、断层应力状态的响应，旨在揭示采动影响、断层活化、煤岩冲击失稳之间的作用关系，对生产实际中煤岩冲击失稳问题的防治进行指导。

1 相似模型实验设计

1.1 实验模型及参数

实验原型是河南义马千秋煤矿 2[#]煤层 21221 综放工作面，同时做一般化调整，使实验的结果对具有类似煤层赋存条件的矿井具有借鉴意义。21221 工作面受 F16 压扭性逆冲断层影响，F16 断层北接千秋井田，向东延入跃进、常村井田，向西延入耿村、杨村井田。

21221 综放工作面位于矿井西部二水平 2-1 采区下山西翼，北邻 21201 采空区，平均采深 758.5 m。2[#]煤层位于煤系下部，煤层倾角平均为 10°，平均层厚 16.29 m，顶板为 J₂k₁ 泥岩，底板为 J₂lS₂ 含砾黏土岩及黏土岩。

实验台尺寸为 1800 mm×160 mm×1300 mm。设计几何相似比 100：1，根据相似准则^[15]，确定容重相似比为 1.6，时间相似比为 10。实验模型如图 1，断层倾角 60°，落差 2 m，模拟工作面沿断层上盘向断层方向逐步推进的回采过程。

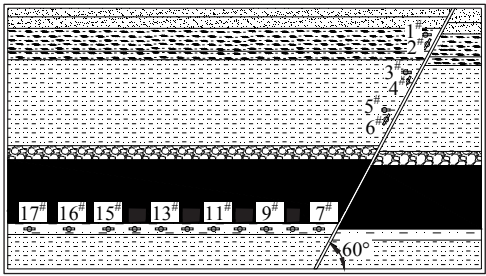


图 1 相似模拟实验模型及应力测点布置
Fig.1 The similarity model and the arrangement of stress-measuring points

实验重点研究开采活动影响下的断层活化规律，因此选定与开采活动关系密切的岩层作为实验相关研究对象，根据实测和整理的现场地质资料确定工作面顶、底板各岩层物理力学性质参数见表 1。

表 1 岩层物理力学性质
Table 1 Physical mechanics parameters of the strata

岩性	密度/ (g·cm ⁻³)	强度/ MPa	弹模/ GPa	泊松比	内摩擦 角/(°)
细砂岩	2 873	45	17.66	0.14	29.2
粉砂岩	2 707	35	23.85	0.19	29.5
细砂岩	2 873	45	17.66	0.14	29.2
粉砂岩	2 707	35	23.85	0.19	29.5
泥 岩	2 461	25	8.8	0.26	30
粉砂岩	2 707	35	23.85	0.19	29.5
2 [#] 煤	1 440	22	3.4	0.16	26.9
粉砂岩	2 707	35	23.85	0.19	29.5
细砂岩	2 873	45	17.66	0.14	29.2

根据模型材料的力学参数，对选定骨料及胶结料进行多次配比实验，最终选定的实验材料配比表见表 2。

表 2 模型实验材料配比
Table 2 Materials matching ratio of the model

岩性	厚度/cm	总质量/kg	配比号			砂/kg	灰/kg	膏/kg	水/kg
			砂	灰	膏				
细砂岩	3	13.997	80	7	3	12.442	1.089	0.467	0.700
粉砂岩	4	18.662	80	6	4	16.589	1.244	0.829	0.933
细砂岩	8	37.325	80	7	3	33.178	2.903	1.244	1.866
粉砂岩	3	13.997	80	6	4	12.442	0.933	0.622	0.700
泥岩	30	139.968	90	7	3	125.971	9.798	4.199	6.998
粉砂岩	5	23.328	80	6	4	20.736	1.555	1.037	1.166
2#煤	22	102.643	90	8	2	92.379	8.211	2.053	5.132
粉砂岩	4	18.662	80	6	4	16.589	1.244	0.829	0.933
细砂岩	12	55.987	70	7	3	49.766	4.355	1.866	2.799

1.2 监测方案

1) 全场位移监测

采用数字散斑相关方法分析整个实验过程中位移场演化规律。在铺设完成后的模型上，间隔 7 cm 布置散斑点，从断层开始向两侧布设，布满全场共计 338 个散斑测点。实验采用大恒 1351UM 型工业相机配合电脑进行实时图像采集，图像采集频率 15 fps，布置散斑测点后的模型及采集系统如图 2 所示。

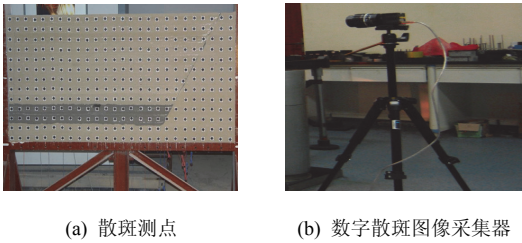


图 2 相似模拟实验散斑测点布置及采集系统
Fig.2 Position of the speckle measuring point and the image gathering system

2) 应力监测

应力测量采用电阻应变式压力盒，主要布置在开挖一侧的煤层底板和断层部位。应力测点布置见图 2，测点间距 10~20 cm，共布置 17 个应力测点，其中 7#~17#为煤层底板应力场测点，每个测点由 1 个压力盒构成，1#~6#为断层应力测点，监测断层上 3 个位置处的正应力和剪应力。断层处的压力盒 2 个为 1 组，压力盒的布置形式如图 3 所示。应力数据采用东华测试公司的 DH5929 型动态电阻应变采集系统，同步连续采样速率分别为 20 kHz。

断层正应力 N 可以直接由 B 压力盒测量得到，剪应力 F 可以根据断层附近一微元体的平衡条件由 A，B 压力盒的测量值计算得到，由竖直方向的平

衡条件 $\Sigma Y=0$ 得：

$$N \cos \theta + F \sin \theta + P_2 = 0 \tag{1}$$

式中： N ， F 为断层上正应力、剪应力，MPa； P_2 为垂直应力，MPa； θ 为断层倾角，(°)。断层倾角取 60°，则可以得到断层面上剪应力计算公式为：

$$F = -(0.5N + P_2) / 0.87 \tag{2}$$

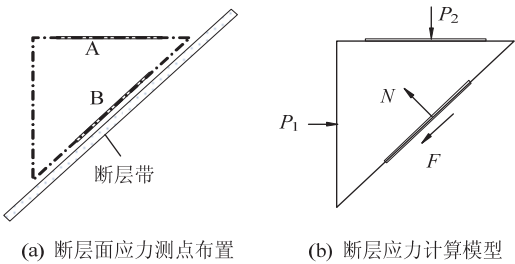


图 3 断层上应力测点布置形式
Fig.3 Strain rosette in the fault zone

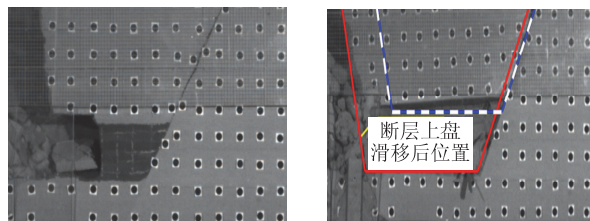
1.3 模型铺设与开采

在计算各分层用料总量的基础上，按照模型中断层两盘比例划分每分层上下盘的分别用料量。铺设模型时首先铺设断层的下盘，完成后进行断层面的处理，最后铺设断层上盘，模型铺设过程中根据预先设定位置埋设应力传感器。

实验过程：回采方向为从断层上盘沿煤层至断层下盘，实验监测系统全程进行监测和数据采集。模型模拟工作面回采过程，自左侧边界开始，每次回采 5 cm，根据相似比，模拟开采进尺 5 m，开切眼至断层位置共需开采 24 步。

当工作面推进至距断层 25 m 的位置时，断层上盘出现“活化”，断层上盘迅速沿断层面整体向左下方滑移。受断层活化影响及上覆岩层的加载作用，煤层突然向外涌出，同时伴随声响出现，并且可以清晰感觉到模型试验台的震动。断层滑动的过

程持续时间极短, 从开始滑移到滑移结束共计不足 2 s。滑移结束后实验模型如图 4 所示, 图中虚线框表示断层上盘滑移前的位置, 实线框表示断层上盘滑移结束后的位置。



(a) 滑移前

(b) 滑移后

图 4 断层滑动前后的模型

Fig.4 The state of the experimental model in the process of the slip

2 采动影响下断层滑移规律

2.1 回采过程的围岩位移场特征

利用 Matlab 编写图像处理程序, 对开采过程中各散斑测点的位移进行计算, 得到各个阶段的散斑测点位移, 将计算的测点位移用云图形式表示, 绘制于变形前的图像上, 得到全场位移场云图。

图 5a 为工作面分别推进 55, 60, 65, 70, 75, 80 m 时全场的位移云图。随着工作面向断层方向的推进, 采空区围岩变形影响范围持续扩大, 顶板位移量持续增加, 顶板垮落现象随着工作面的推进陆续发生。当工作面推进距离距离为 75 m 和 80 m 时, 围岩发生了较大范围的冒落, 位移云图上位移量值大幅增加。

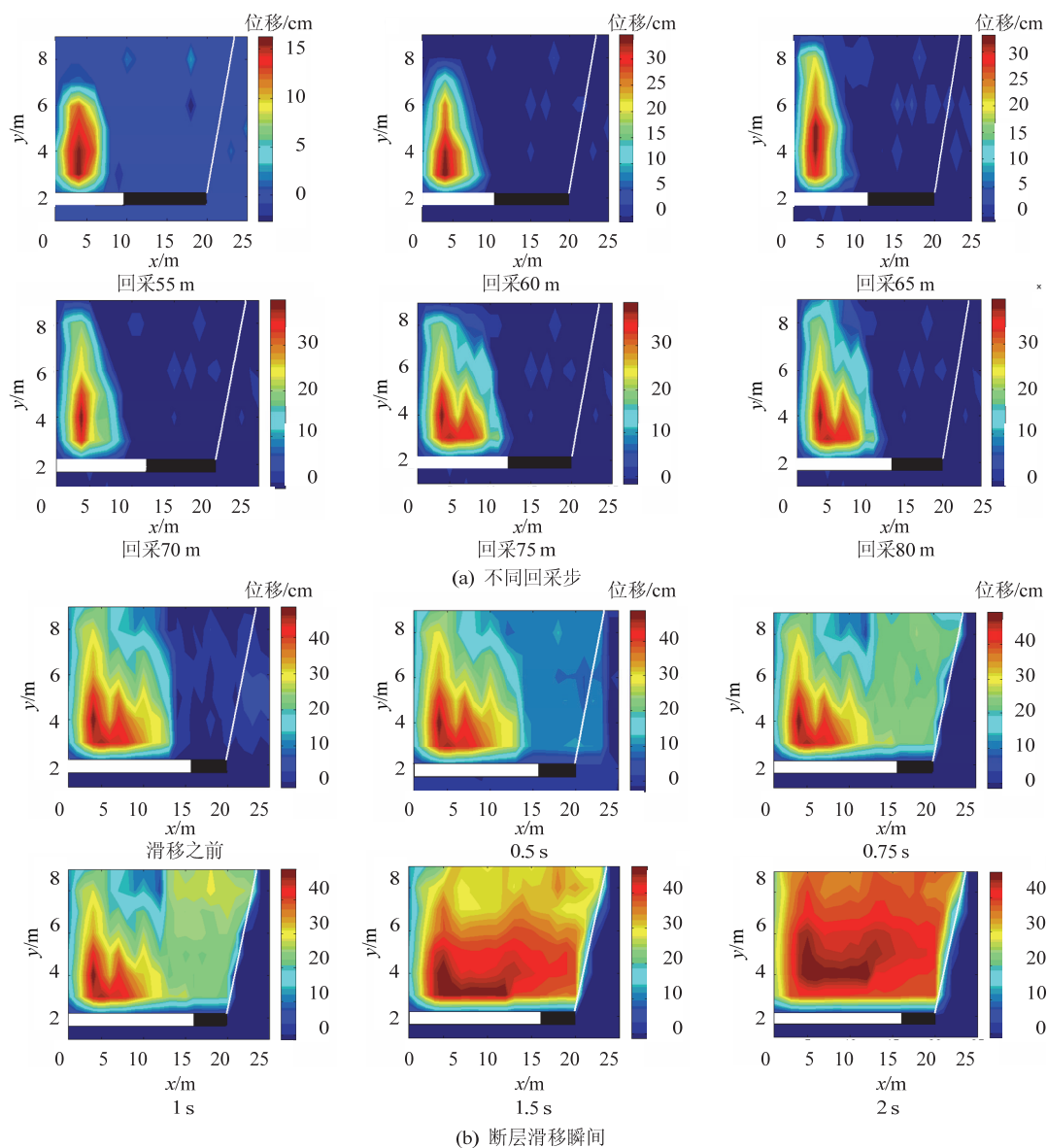


图 5 断层滑移瞬间位移场云图

Fig.5 Displacement nephogram when the fault just slip

2.2 断层活化过程的围岩位移场特征

当工作面推进 95 m, 距离断层 25 m 的时候, 断层上盘沿断层面迅速向左下方滑移。图 5b 为滑移过程中围岩位移场云图。从云图中可以看出, 断层出现活化时, 上盘岩体的位移迅速增加, 沿断层面产生滑移错动, 相比断层上盘的滑移错动量, 断层下盘和煤层底板的位移量极小, 相对稳定。

断层滑移失稳前, 采场最大位移集中在工作面后方 80 m 处采空区上方; 滑移启动后, 整个上盘有位移出现, 但采场位移分布不均匀, 断层面上局部有较大位移; 断层面上位移分布的不均匀性可以看做是由于断层面上不同部位应变能量积累和释放的差异性造成, 断层面上由于接触面性质的非均匀性, 在工作面回采过程中, 受采动影响, 采场围岩的变形会使断层局部出现应变和应力的积累, 而一旦断层的临界平衡状态被打破, 断层面出现滑移, 最先出现破坏和移动的部位将是储存应变能的高应力区, 这也是断层面上局部出现较大位移的原因。

断层滑移过程中, 断层附近下盘的位移并非为 0, 断层面附近存在微小位移, 断层下盘出现位移的原因: 断层滑移过程中, 断层面局部出现极高的正应力和剪应力(在断层应力状态的分析中可以得到验证), 高剪应力的作用下, 断层局部出现较大剪切变形, 滑动过程引起的附加剪应力作用下断层下盘出现了微小位移。断层下盘位移的出现说明断层活化所引起的一系列影响在断层-围岩系统中都有体现。

2.3 顶板下沉量规律

为定量分析围岩位移特征, 考察工作面推进过程中的覆岩运动规律, 尤其是采动影响下断层的活化规律, 在靠近断层处的煤层直接顶选取一测点, 从位移场云图中提取测点的位移值, 分析工作面推进到距断层不同距离时其位移变化规律。同时, 在断层面附近的上下盘各取 1 排测点, 提取其位移值, 计算两盘的错动量, 以定量分析断层滑动位移特征。

图 6 为顶板监测点下沉量曲线, 工作面推进到距断层约 25 m 时, 顶板下沉量迅速增加, 此点所在的直接顶发生坍塌垮落。当工作面推进到距断层 20 m 处时, 断层出现活化, 顶板测点位移迅速增加。

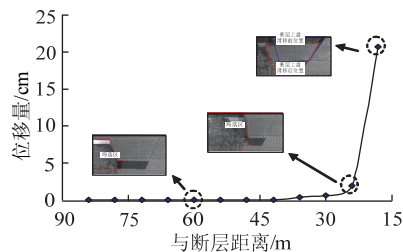


图 6 顶板下沉量曲线

Fig.6 Subsidence curve of the roof

2.4 断层滑移量特征

图 7 为断层滑移量随开采过程的变化曲线, 在工作面推进至距离断层 25 m 时, 断层出现失稳滑动, 滑动位移迅速增加, 滑动量和滑动速度是失稳滑动前的数十倍。

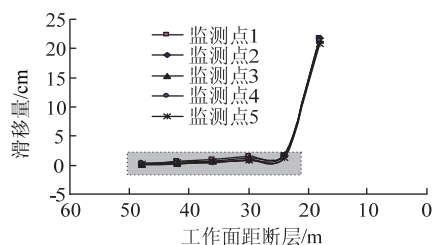


图 7 断层滑移曲线

Fig.7 Slip curve of the fault

在本次模型实验中, 工作面距断层 25 m 是断层产生活化的临界点, 继续开挖则会引起断层的滑移错动, 断层滑移的动态过程持续时间极短, 从滑移的开始到结束, 时间非常短, 数字相机采集系统捕获了这一过程中断层的位移规律。图 8 为断层失稳滑动位移随时间的变化曲线。

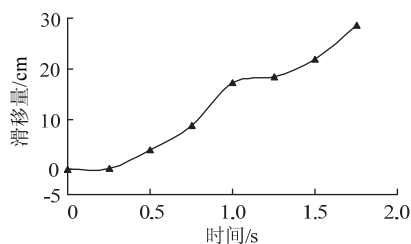


图 8 断层滑移量时间演化规律

Fig.8 Temporal evolution of fault slip

根据曲线形态, 可以发现在断层滑移初期, 基本无明显的滑移变形, 随后断层进入加速滑动期, 断层由近乎静止转为快速滑动, 滑动速度可达到 25 cm/s; 1 s 后断层滑动速度在短暂减缓后又迅速恢

复,直至滑动结束。此过程较好地模拟了断层实际活化的过程:缓慢变形-加速滑动-恢复平静。在开采活动引起的应力重分布和覆岩运动的影响传递至断层时,在采动影响下断层出现缓慢的变形,这一缓慢的变形过程可能伴随煤炮或小型的冲击地压出现;随着采动影响的进一步扩大,断层附近的煤岩体积聚了大量的变形能,达到临界平衡时,断层出现突然滑动,同时对工作面煤岩造成冲击,引起煤体的瞬时涌出,形成冲击地压灾害;围岩系统积聚的能量得以释放后,断层停止滑动,围岩系统趋于静止。

3 采动影响下的断层应力状态

在断层上的应力测点布置如图2所示。5[#], 6[#]压力盒构成A测点, 3[#], 4[#]压力盒构成B测点, 1[#], 2[#]压力盒构成C测点。

图9a为断层正应力随回采过程的变化曲线, 3个测点处的正应力具有不同的演化特征, 在回采阶段初期, 工作面距离断层较远, A, B测点的正应力值基本不变, C测点正应力略有降低, 说明采动

影响下, 断层远端(断层距离开采层较远的部位)最先受到影响, 出现张拉作用; 当工作面与断层距离接近25 m时, A, B测点的正应力开始缓慢增加, 此时应是断层缓慢变形阶段, 应力的缓慢增加恰是变形能量逐渐积累的过程。当工作面继续推进, 断层出现活化, 断层上盘的滑移和扭转使得接近开采煤层的断层处, 正应力快速升高, A测点处正应力增长最快, 增长量最大, 其次为B, C测点处的增长量最小。

图9b为断层剪应力随回采过程的演化曲线, 为论述方便将应力和回采位置关系按照设计的相似比换算成原型中的响应参量。由图可以发现, 随工作面的逐步回采, 剪应力呈上升趋势, 距离开采煤层相对较远的B, C测点, 上升趋势较为明显, 开始上升的启动时间也较早, 而A测点在断层出现缓慢变形时才开始出现上升趋势, 说明开采活动最先影响的是断层远端(距离开采层相对较远的部位), 而在工作面接近断层时, 断层近端的剪应力快速增加, 此部位断层滑移量最大, 滑移危险性最大。

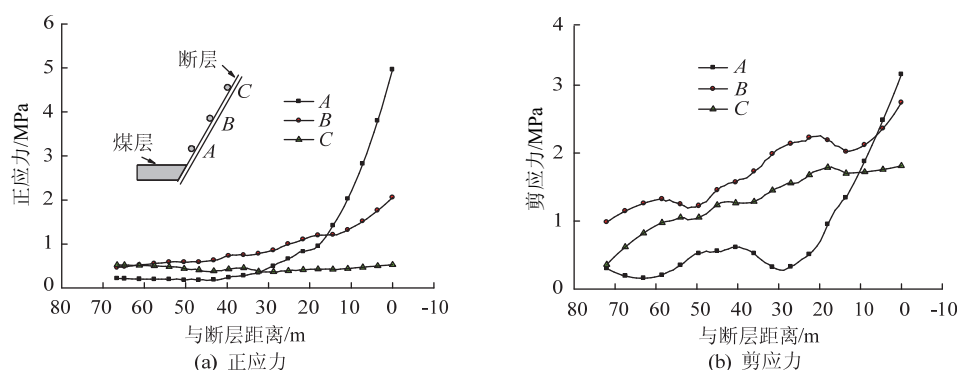


图9 断层应力变化曲线

Fig.9 Stress curve of the fault

4 结论

1) 应用数字散斑相关方法, 进行煤层开采相似模拟实验的位移观测手段, 具有监测实施方便, 数据分析精度高, 处理快的优点。

2) 工作面沿断层上盘开采, 当工作面距离断层25 m时, 受采动影响断层出现活化, 断层面上的滑动位移分布具有非均匀性, 最先出现破坏和滑移的部位是积蓄应变能的高应力区。

3) 断层远端(断层上距离开采层相对较远的部位)最先受到采动影响而出现张拉作用, 使得其应力率先出现变化, 正应力降低, 剪应力升高; 而断层近端的应力则在回采初期无明显变化, 邻近断层活

化时, 其正应力和剪应力开始快速增加, 近端处断层滑移危险性最大, 应力增长最快。

参考文献:

- [1] 章梦涛. 我国冲击地压预测和防治[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2001, 20(4): 434-435.
ZHANG Mengtao. Forecast and prevention of rockburst in China[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2001, 20(4): 434-435.
- [2] 宋义敏, 马少鹏, 杨小彬, 等. 断层黏滑动态变形过程的实验研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(1): 171-179.
SONG Yimin, MA Shaopeng, YANG Xiaobin, et al. Experimental study on the dynamic displacement evolu-

- tion of fault in stick-slip process[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(1): 171-179.
- [3] 潘一山, 李忠华, 章梦涛. 我国冲击地压分布、类型、机理及防治研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1844-1851.
PAN Yishan, LI Zhonghua, ZHANG Mengtao. Distribution, type, mechanism and prevention of rockburst in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1844-1851.
- [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[J]. Coal Geology & Exploration, 2001, 29(3): 1-4.
- [5] 潘一山, 张永利, 徐颖, 等. 矿井冲击地压模拟试验研究及应用[J]. 煤炭学报, 1998, 23(6): 32-37.
PAN Yishan, ZHANG Yongli, XU Ying, et al. Rock burst simulation test and its application[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(6): 32-37.
- [6] 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.
- [7] 李志华. 采动影响下断层滑移诱发煤岩冲击机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009: 36-49.
- [8] 李志华, 窦林名, 陆菜平, 等. 断层冲击相似模拟微震信号频谱分析[J]. 山东科技大学学报, 2010, 29(4): 51-56.
LI Zhihua, DOU Linming, LU Caiping, et al. Frequency spectrum analysis on micro-seismic signal of similar simulation test of fault rock burst[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology, 2010, 29(4): 51-56.
- [9] 李连贵, 徐文胜, 许迎年, 等. 岩爆模拟材料研制及模拟试验分析[J]. 华中科技大学学报, 2001, 29(6): 80-82.
LI Liangui, XU Wensheng, XU Yingnian, et al. Experimental study on simulation materials of rockburst[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2001, 29(6): 80-82.
- [10] 许迎年, 徐文胜, 王元汉, 等. 岩爆模拟试验及岩爆机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1462-1466.
XU Yingnian, XU Wensheng, WANG Yuanhan, et al. Simulation testing and mechanism studies on rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1462-1466.
- [11] 徐文胜, 许迎年, 王元汉, 等. 岩爆模拟材料的筛选试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增刊 1): 873-877.
XU Wensheng, XU Yingnian, WANG Yuanhan, et al. Experimental study on simulation materials of rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(Sup 1): 873-877.
- [12] 何满潮, 苗金丽, 李德建, 等. 深部花岗岩试样岩爆过程实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 865-876.
HE Manchao, MIAO Jinli, LI Dejian, et al. Experimental study on rockburst processes of granite specimen at great depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 865-876.
- [13] 崔广心. 相似理论与模型试验[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990: 85-98.