

Numerical Simulation and Preliminary Analysis of pp 62110 Xin Zhuang Zi Mine Mining Area Fault Activation Process

Qun Zhang*, Kehai Huang#

China Coal Technology Engineering Group Chongqing Research Institute, Chongqing
Email: 378555801@qq.com

Received: Jul. 1st, 2014; revised: Jul. 14th, 2014; accepted: Jul. 29th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In order to improve the coal mine production safety in the process of excavation and mining, the precursor of fault activation is predicted reasonably and accurately, and adaptation measures in advance to prevent production accidents are adopted [1]-[3]. Based on numerical simulation of the process of fault activation of pp 62110 Xin Zhuang Zi mine mining area, using RFPA^{2D} to modeling, calculation, and numerical simulation to predict, the influence of coal mining process to the fault and the activation process are analyzed.

Keywords

Fault Activation, RFPA^{2D}, Numerical Modeling

新庄孜矿62110采区断层活化过程的数值模拟与初步分析

张 群*, 黄克海#

中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆
Email: 378555801@qq.com

*第一作者。

#第二作者。

收稿日期：2014年7月1日；修回日期：2014年7月14日；录用日期：2014年7月29日

摘要

为了提高煤矿生产过程中掘进与采动的安全性，合理并较为准确的预测前方断层活化的前兆，提前采取应对措施，避免生产事故的发生[1]-[3]，本文以新庄孜矿62110采区断层活化过程的数值模拟为例，通过使用RFPA^{2D}对其进行建模、计算及数值模拟预测等，进行分析煤矿开采过程对前方断层的影响及活化过程分析。

关键词

断层活化，RFPA^{2D}，数值模拟

1. 引言

研究表明[4]-[6]，在煤矿上的动力灾害中，尤其是在煤矿各种采动中，遇断层的时候瓦斯危害更是尤为突出，由于断层活化引起的煤与瓦斯突出占据了很大一部分，因为在煤层的回采过程中，会引起前方断层的活化，使断层两边或邻近的煤岩体的透气性瞬间发生变化，使瓦斯压力聚变，以引起各种灾害。本文根据新庄孜煤矿 62110 的实际地质条件，通过 RFPA^{2D} 对其采动前方的正断层和逆断层进行模拟计算与分析预测，为采动诱发断层活化研究具有不可或缺的意义。

2. 地质概况

62110 底板巷位于六二采区，是开采 B₁₀ 煤层时底板的抽采巷，又是 B₁₀ 煤层的运输巷道。南起 F₁₀₋₅₍₁₁₎ 断层，北至 F₁₀₋₅₍₈₎ 断层，走向长约 820 m，巷道标高为-683 m。B₁₀ 煤层属半暗~暗淡型煤，灰黑色，玻璃光泽，参差状断口，裂隙较发育，易碎成片状；赋存状况不稳定，煤厚变异系数较大；煤层中上部常发育 1~2 层不稳定粉砂质泥岩、含炭泥岩夹矸，厚 0.3~0.8 m。施工范围内，B₁₀ 煤层与 B₉ 煤层的层间距为 24~29 m。地质构造，62110 底板巷及顺槽位于 F₁₀₋₅₍₁₁₎ 与 F₁₀₋₅₍₈₎ 断层之间，地质构造较复杂，次生断层发育，地应力相对集中，地层产状变化较大，围岩破碎。地层走向 325°~330°，倾角 23°~30°，施工段内将见 F₁₀₋₅₍₁₀₎、Fa 断层，见表 1。

在本采区 B₁₀ 煤层与 B₉ 煤层均按突出煤层管理。62110 底板巷距上覆 B₁₀ 煤层的最小法距预计为 8 m，距下伏 B₉ 煤层的最小法距预计为 9 m，均小于法距 10 m 的规定，因此，必须执行“边探边掘”的措施，在钻探掩护下施工，必要时执行“边抽边掘”，防止误揭煤层和炮后瓦斯超限现象。施工范围内水文地质情况较简单，主要充水因素为顶板砂岩水、构造裂隙水。其为静储量，涌水时表现为先大后小，直至疏干。正常涌水量为 0.5~1.5 m³/h，最大涌水量为 3.0~4.5 m³/h。

Table 1. The table of geological structure
表 1. 地质构造情况表

构造名称	走向	倾向	倾角(°)	性质	落差(m)	对掘进的影响程度
F ₁₀₋₅₍₈₎	210~250	NW	45~75	正	30.0~40.0	有一定影响
F ₁₀₋₅₍₁₀₎	265	NW	50~60	正	3.5	影响较大
F ₁₀₋₅₍₁₁₎	240	NW	65~70	正	5.0~10.0	有一定影响
Fa	235	NW	60~70	正	6.0	影响较大

3. 计算模型的建立

本文主要通过 RFPFA^{2D} 研究煤层回采过程中[7]-[9], 激活前方正、逆断层在各种地质条件的作用下的破坏情况, RFPFA^{2D} 是一个以弹性力学为应力分析工具、以弹性损伤理论及其修正后的 Coulomb 破坏准则为介质变形和破坏分析模块的岩石破裂过程分析系统[10], 它先将岩石介质模型离散化成由细观基元组成的数值模型, 假定离散化后的细观基元的力学性质服从某种统计分布规律, 由此建立细观与宏观介质力学性能的联系。根据煤层顶底板的现场实际情况, 各个因素影响作用的范围和计算机数值模拟计算的特点, 确定了煤层回采各个分层的计算模型见图 1, 模型研究范围为长(X 轴)40 m、高(Y 轴)30 m 的矩形结构体, 边界条件取位移边界条件, 在模型的左右边界施加水平约束固定为零, 模型的底部边界施加垂直约束, 在模型上方施加面荷载以模拟处于采场上部的几百米厚的岩层自重。模型的 X 轴加载方式均为恒为零的位移固定, Y 轴都是通过载荷加载的, 正断层模型垂直压力 7 MPa, 增量为 0; 逆断层模型垂直压力 6 MPa, 增量为 0; 均保持不变作为边界条件。

在首先满足计算模型的准确有效性、实用性的前提下, 再考虑有限元数值计算的简便性, 对计算模型范围内的岩层分层, 进行合并简化考虑, 对物理性质相差不大的岩层, 进行组合, 合并为单一性质岩层。构建了合适的简化模型后, 力学参数的选择就成为一个关键问题。按照岩层的力学性质, 通常所用的指标有弹性模量 E、抗压强度、容重 γ 、内摩擦角 φ 和泊松比 μ 等, 根据新庄孜煤矿柱状图等, 并根据新庄孜矿提供的 62110 采区相应的材料及综合柱状图, 见图 2。

本文所选取的具体岩石力学参数设定见表 2 及表 3, 考虑到现场实际情况, 正、逆断层中的煤层均加入了瓦斯, 断层左边瓦斯压力均为 1 MPa, 右边均为 8 MPa 模型边界的煤层位置瓦斯压力均保持恒定不变。

本文模型的网格单元划分均为 400×300 共 120,000 个单元, 完整的模型加载模拟示意图如图 1。正断层模型中开切眼位于距左边界 13 m 处, 逆断层模型中开切眼位于距左边界 13 m 处, 模拟停采线正逆断层分别位于距右边界 13 m 和 13 m 处。

两个模型均采用修正后的 Coulomb 准则和拉伸截断的库仑准则。两个模型的回采过程均取 4 m 为一步距, 拟定共开挖 4 步。

4. 正断层数值模拟结果研究

1) 断层活化应力迁移过程分析, 由 RFPFA^{2D} 模拟得到了回采过程中影响正断层活化的全过程及活化

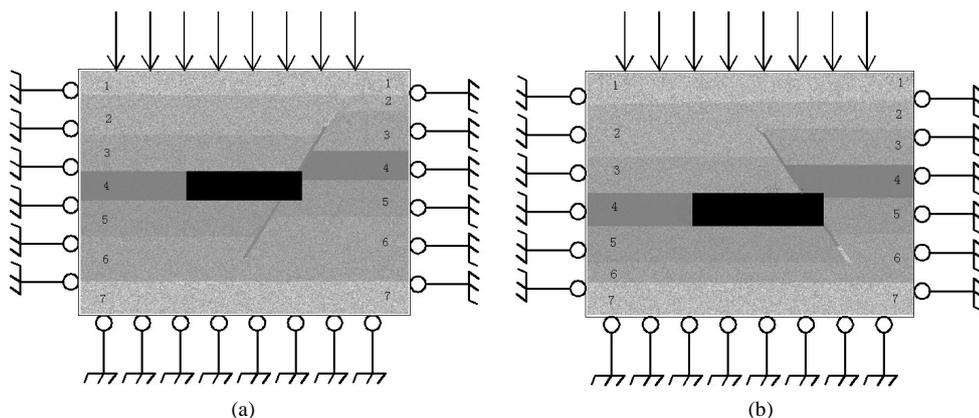


Figure 1. The schematic diagram of the complete model and load the simulation: (a) Normal fault; (b) Reverse fault

图 1. 完整的模型加载模拟示意图: (a) 正断层; (b) 逆断层

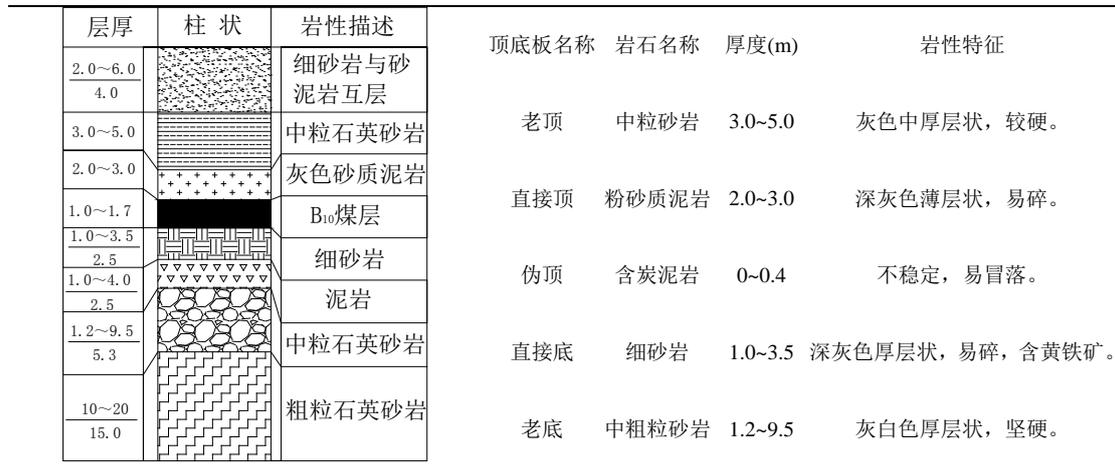


Figure 2. The integrated histogram and the situation of roof and floor

图 2. 综合柱状图及煤层顶底板情况

Table 2. The table of rock mechanics parameters—normal fault

表 2. 模型岩石力学参数表——正断层

层序	厚度(m)	弹性模量(MPa)	抗压强度(MPa)	容重(N/mm ³)	内摩擦角(度)	泊松比	瓦斯压力(MPa)
1	4	12,000	120	2.5	30	0.25	0
2	6.5	9000	90	2.4	32	0.25	0
3	4.5	7000	85	2.3	35	0.2	0
4 左	4	1000	25	1.7	40	0.25	1
4 右	4	1000	25	1.7	40	0.25	8
5	4.5	5500	80	2.3	31	0.23	0
6	2.5	7000	95	2.5	30	0.25	0
7	4	12,000	120	2.5	30	0.25	0
断层		2000	15	2	30	0.3	0

Table 3. The table of rock mechanics parameters—reverse fault

表 3. 模型岩石力学参数表——逆断层

层序	厚度(m)	弹性模量(MPa)	抗压强度(MPa)	容重(N/mm ³)	内摩擦角(度)	泊松比	瓦斯压力(MPa)
1	4	12,000	120	2.5	30	0.25	0
2	6.5	9000	90	2.4	32	0.25	0
3	4.5	7000	85	2.3	35	0.2	0
4 左	4	1000	25	1.7	40	0.25	1
4 右	4	1000	25	1.7	40	0.25	8
5	4.5	5500	80	2.3	31	0.23	0
6	2.5	7000	95	2.5	30	0.25	0
7	4	12,000	120	2.5	30	0.25	0
断层		2000	15	2	30	0.3	0

过程中煤岩层的剪应力分布，新庄孜煤矿 62110 工作面回采前方遇断层导致断层活化及滑移的全过程，通过数值模拟得到了一个较完整的再现，见图 3。根据断层活化与滑移的孕育、发生和发展过程，可将

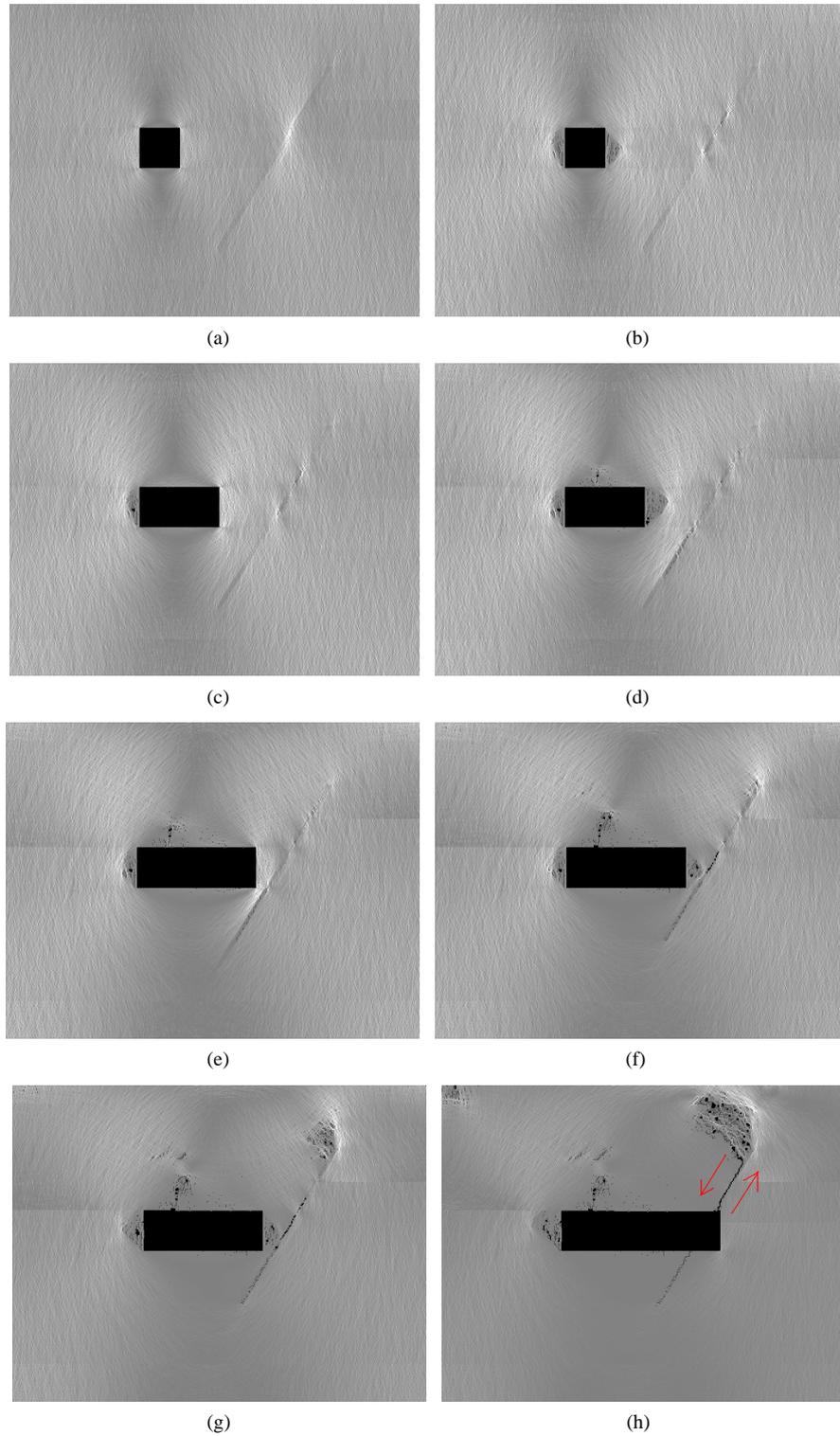


Figure 3. The distribution of shear stress in numerical simulation of normal fault activation
图 3. 数值模拟正断层活化过程的剪应力分布图

整个过程划分为应力集中阶段、应力继续蓄能阶段、应力诱发导致断层微破裂产生、贯通及瓦斯运移阶段和断层活化及上下盘滑移阶段共四个阶段。

①应力集中阶段

应力集中阶段是指第一步回采(回采 4 m)过程中,断层和煤体的初始损伤较小,完整性较好,抗剪模量较大,抗剪能力较强;虽然开切眼左边留有保护煤柱,但周围依然有应力集中的作用,断层附近一定范围内承受的切向力较大,并且回采工作面后方的应力在一定范围内得到了释放,虽然断层附近的受到的切向力较大,但不足以使断层发生破坏,未回采到的煤层及工作面处得顶板仍处于相对稳定的状态,见图 3(a)。在回采继续推进的过程中,由于继续靠近断层,就使得断层受到的切向力不断增大,上下盘煤层于断层处的链接点周围的应力比较集中。集中应力的作用使断层的受力处于非平衡状态,但断层还未发生破坏,断层及两边的煤层的封闭性也较好,应力被慢慢湮灭或阻隔,断层及两边的煤层不发生破坏。

②应力继续蓄能阶段

由于回采的继续向前推进,工作面处得顶板出现一定程度轻微的冒落,断层受到的切向应力不断增大,并且应力集中点,从开始阶段的上下盘煤层于断层处的链接点开始向断层的下方迁移,但仍未达到使断层发生破坏的程度,断层处的应力继续蓄能。此时断层及两边的煤层不发生破坏,见图 3(b)和图 3(c)。

③应力诱发导致断层微破裂产生、贯通及瓦斯运移阶段

随着回采的继续,顶板的承受能力极限慢慢被触及,出现明显的冒落现象,并且工作面前方出现可控制的微型突出或大量煤的破碎,应力集中点继续沿着断层走向下延,徘徊在回采煤层与断层的下连接点附近,见图 3(d)和图 3(e)。

由于在模型中断层左边与右边的煤层中均加入了瓦斯,所以在模拟过程中还发生了瓦斯压力梯度发生了明显的变化,继而导致了瓦斯的运移(渗流)现象的发生,当回采至 10 m 时,由于应力集中的影响,而且断层受到切向应力的作用,正对回采煤层的断层部位开始发生微小破裂,见图 3(f)。伴随着回采的不断增多,在地应力和自重的影响下,由于断层的强度较小,受到的应力更加集中使得断层发生的更严重的破坏,破裂逐渐增多,断层封闭性变差,煤层局部受到应力扰动的影响,导致工作面出现大量的煤体破碎,同时,断层内大量的裂隙产生,最终各裂隙贯通,见图 3(d)、图 3(e)、图 3(f),促使煤层内部的瓦斯压力分布发生显著的变化,见图 4(i)和图 4(j),并造成大量的瓦斯解析与运移等。

④断层活化及上下盘滑移阶段

工作面继续回采,随着断层破裂的逐渐增大,并且破裂是沿着断层面扩展,并且破坏逐渐向断层上

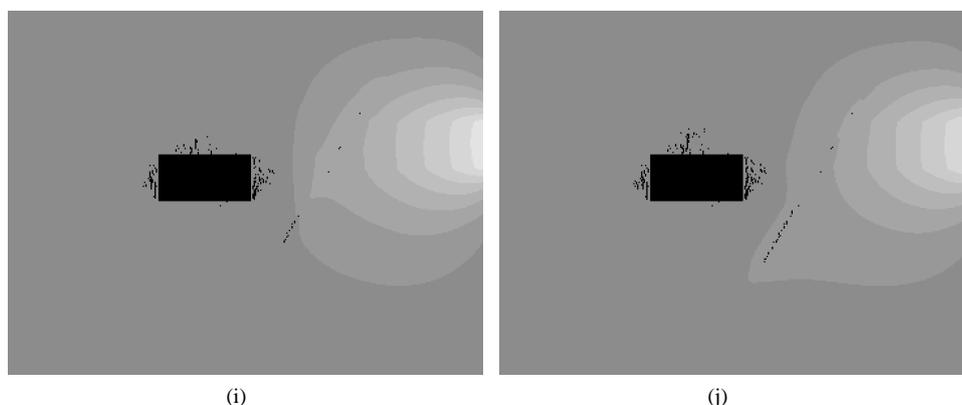


Figure 4. The distribution of gas pressure in the activation process of simulation for normal fault
图 4. 数值模拟正断层活化过程的瓦斯压力分布图

部移动, 靠近断层上端的地方应力继续集中并增大, 如图 3(f), 形成了破裂面或破裂区。煤层顶板受到的应力也不断增大, 产生更多裂隙, 使得煤体更加破碎。当回采到遇断层时, 断层受到的剪切力不断增大, 发生更加严重的破裂, 同时煤层受到的应力更大, 煤体遭受更加严重的破坏, 产生很多煤体碎块。同时, 断层上端出现更为严重的破碎区, 再加上回采煤层的顶板跨落, 最终导致了断层上下盘的相互位移见图 3(g)和图 3(h), 造成了回采诱发断层活化及滑移的最终结果。

不同回采阶段具体的应力分布, 见图 5, 第一次回采时, 工作面相应的已采位置的顶板应力得到了释放, 应力很低, 如图中“回采 2 m”的折线所示, 然而此刻, 在断层处, 即单元号 180 附近位置, 应力突然增大, 出现了较大的应力集中, 为断层活化开始“蓄能”; 第二次回采时, 顶板应力如同第一次的向前延伸, 到达 8 m 左右的已采区域, 同样的应力得到释放, 如图中“回采 7 m”的折线所示, 于此同时断层位置的应力开始向断层两侧开始分散, 尤其是向断层左侧(下盘, 即单元号 130 附近), 靠近回采面的位置集中; 随着回采的继续推进, 顶板应力继续呈现随工作面的推进作持续释放, 如图中“回采 13 m”的折线所示, 所不同的是断层附近的应力迁移到了断层右侧(上盘), 此时, 断层的上下盘均储蓄了足够能量, 并发生活化与滑移, 见图 3(h)。

2) 断层活化过程破坏损伤(声发射 AE)分析, 相比上节讨论的应力分布图, 破坏损伤(AE 声发射)分布图, 能够更加直观的看出拉、压应力的产生与分布情况, 见图 6。从图 6(a)中我们可以清晰的看到, 在回采的第一步, 断层处便开始产生了压应力, 所以断层的上下盘仅仅是在压紧, 而回采面的附近煤层由于产生了拉应力, 而致使煤体产生了微小的破碎; 在图 6(b)中, 也就是第一次回采结束时, 断层处开始产生了拉应力, 虽然在拉、压应力的共同作用, 但是不足以时断层处发生破碎, 同时, 回采面的附近煤层由于产生了拉应力在不断增大; 在回采的第二次回采过程中, 如图 6(c), 断层对应煤层的中部偏上的位置便产生了一定程度的破碎, 同时在回采第一次回采的后方, 煤层也产生了破碎, 这些均为拉、压应力的缓慢释放所导致的结果; 随着第二次回采的继续推进, 见图 6(d)和图 6(e), 断层处的拉、压应力继续向下和上端迁移, 尤其是向下端更为严重, 同时在采面前方也产生大量的拉应力; 到达第三次回采时, 见图 6(f), 基本上整个断层发生了大量的破碎, 断层处大部分的剪应力得到了释放, 处断层上端位置, 基本达到了新的平衡状态; 随着回采的继续增大, 在第三次回采末, 见图 6(g), 断层的上端继而产生大量的拉应力, 同时煤层也产生大量的拉应力, 当到达第四次回采时, 在大量拉应力的破坏下, 断层处出现了大量的破碎, 导致了上下盘的相对位移, 最终导致了断层的活化与滑移现象, 见图 6(h)。

剪应力分布图

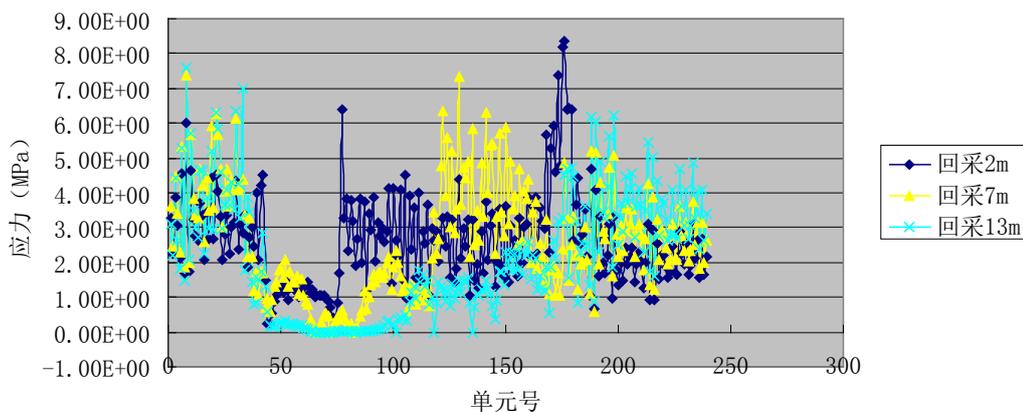


Figure 5. The stress distribution of the activation process of simulation for normal fault

图 5. 数值模拟正断层活化过程的应力分布图

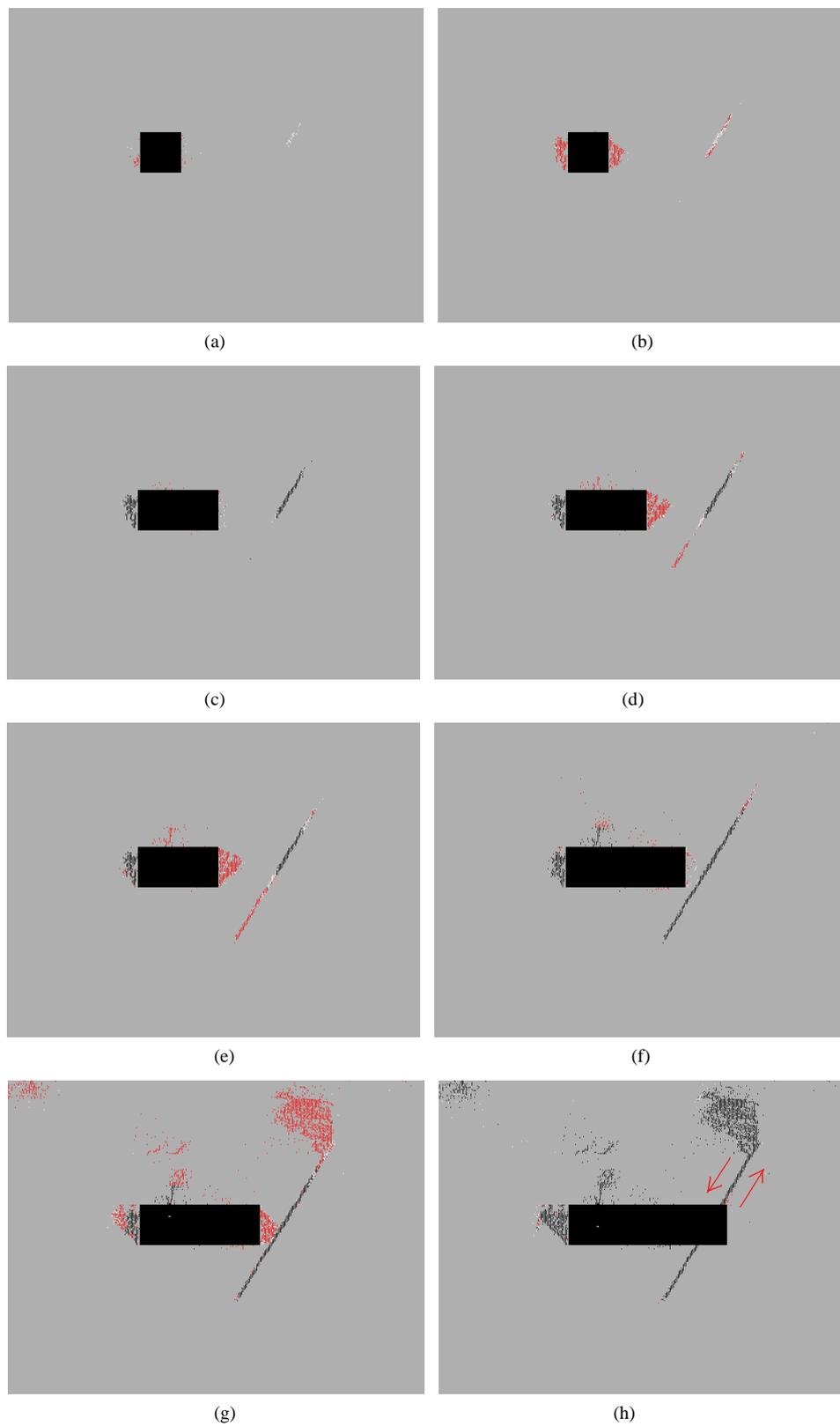


Figure 6. The distribution of AE in the activation process of simulation for normal fault
图 6. 数值模拟正断层活化过程的声发射分布图

3) 断层活化过程的位移分析

在模拟过程的位移图中，我们能清晰的看出顶板处以及断层处随回采的向前推进的位移大小变化情况，见图 7 与图 8。

我们可以看出，图 8 中单元号 175 位置即为断层所处位置在图中的显现位置，断层处的位移以 Y 轴的变化为主，我们能够清晰的看出，随着回采的不断推进，Y 轴方向的位移变化量也在剧增，并同时在单元号 175 附近，及断层处发生尤为显著的跳跃。然而，X 轴方向的位移就相对较小，不过在最后的回采时，产生了和 Y 轴方向同样趋势的位移量，也在单元号 175 附近断层处出现了较为显著的跳跃；至于顶板处的位移变化，X 与 Y 轴的变化量，基本随回采的不断推进相吻合，呈不断增大的趋势，尤其是回采 4 m 的折线，采空区顶板沿 X 轴方向位移跃变尤为突出。从位移图的分布，将断层的活化及滑移的过程更加清晰。

5. 逆断层数值模拟研究结果

1) 断层活化应力迁移过程分析

由 RFPA^{2D} 模拟得到的回采过程中影响逆断层活化的全过程及活化过程中煤岩层的剪应力分布。新庄孜煤矿 62110 工作面回采前方遇断层导致断层活化及滑移的全过程，通过数值模拟得到了一个较完整的再现，见图 9。根据断层活化与滑移的孕育、发生和发展过程，可将整个过程划分为应力集中阶段、

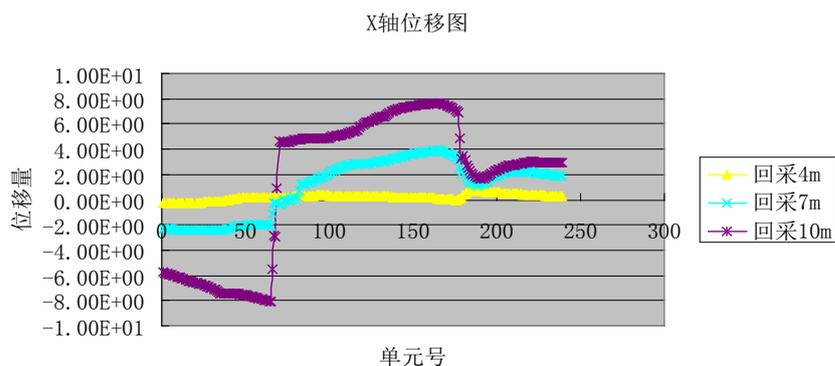


Figure 7. The displacement map X-axis in the activation process of simulation for normal fault

图 7. 数值模拟正断层活化过程的 X 轴位移图

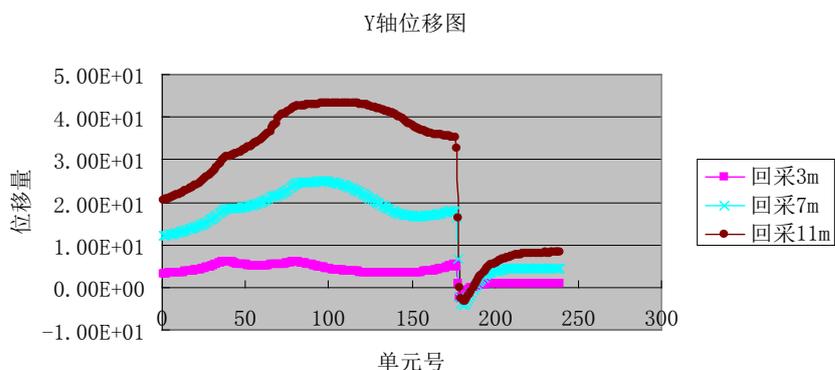


Figure 8. The displacement map Y-axis in the activation process of simulation for normal fault

图 8. 数值模拟正断层活化过程的 Y 轴位移图

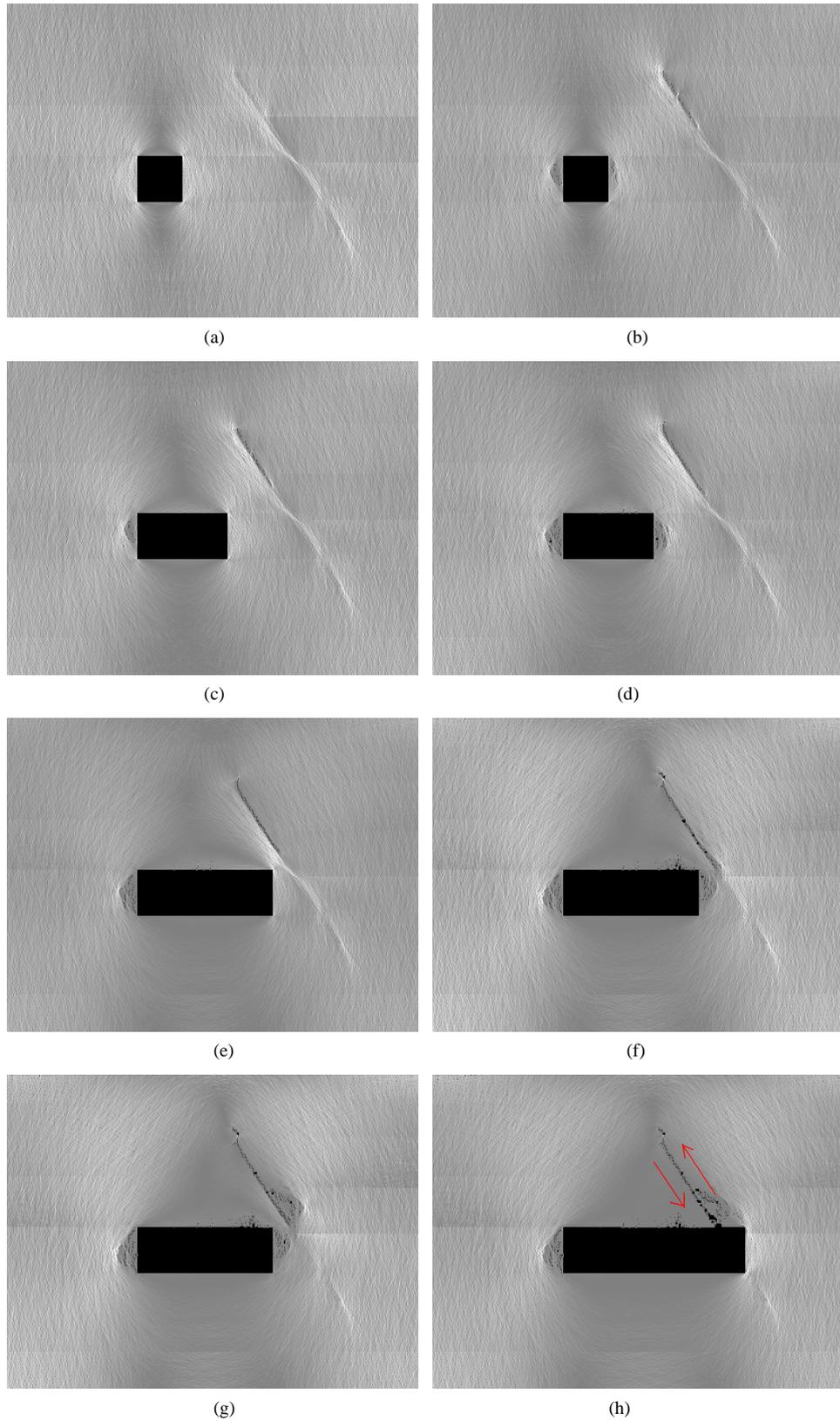


Figure 9. The distribution of shear stress in numerical simulation of reverse fault activation
图 9. 数值模拟逆断层活化过程的剪应力分布图

应力继续蓄能阶段、应力诱发导致断层微破裂产生、贯通及瓦斯运移阶段和断层活化及上下盘转移阶段共四个阶段。

①应力集中阶段

应力集中阶段是指第一步回采(回采 4 m)过程中,断层和煤体的初始损伤较小,完整性较好,抗剪模量较大,抗剪能力较强;虽然开切眼左边留有保护煤柱,但周围依然有很小的应力集中作用,尤其是断层的上端,附近一定范围内承受的切向力较大,上端附近产生了应力集中,虽然断层附近的受到的切向力较大,但不足以使断层发生破坏,未回采到的煤层及工作面处得顶板仍处于相对稳定的状态见图 9(a)。在回采继续推进的过程中,由于继续靠近断层,就使得断层受到的切向力不断增大,应力迁移到了断层上端位置,同时采面的前后方也出现了应力集中,见图 9(b)。集中应力的作用使断层的受力处于非平衡状态,但断层还未发生破坏,断层及两边的煤层的封闭性也较好,应力被慢慢湮灭或阻隔,断层及两边的煤层不发生破坏。

②应力继续蓄能阶段

由于回采的继续向前推进,工作面处的顶板出现一定程度轻微的冒落,断层受到的切向应力不断增大,并且应力集中点,从开始阶段的断层上端开始向下放散,见图 9(c),并且在采面的前后也同时出现一定程度的煤体破碎,见图 9(d),但仍未达到使断层发生破坏的程度,断层处的应力继续蓄能。此时断层及两边的煤层不发生破坏,见图 9(e)。

③应力诱发导致断层微破裂产生、贯通及瓦斯运移阶段

随着回采向前推进的继续,顶板的承受能力极限慢慢被触及,出现明显的冒落现象,并且工作面前方出现大量煤的破碎,断层应力集中点继续沿着断层走向下延,并徘徊在回采煤层顶板与断层的连接点附近集中。当回采至 11 m 时,由于应力集中的影响,而且断层受到切向应力的作用,断层的上部出现了大量破裂,见图 9(f)。伴随着回采的不断推进,在地应力和自重的影响下,由于断层的强度较小,受到的应力更加集中使得断层发生的更严重的破坏,破裂逐渐增多,断层封闭性变差,煤层局部受到应力扰动的影响,导致工作面出现大量的煤体破碎,同时,断层内大量的裂隙产生,最终各裂隙贯通,见图 9(e)和图 9(f),由于在模型中断层左边与右边的煤层中均加入了瓦斯,所以在模拟过程中还发生了瓦斯压力梯度分布的显著变化,见图 10(i)和(j),并伴随着裂隙的贯通,造成大量的瓦斯解析与运移等。

④断层活化及上下盘转移阶段

工作面继续回采,随着断层破裂的逐渐增大,并且破裂是沿着断层面扩展,并且破坏逐渐向煤层移动集中,靠近煤层的地方应力继续集中并增大,见图 9(f)和图 9(j),形成了破裂面或破裂区。煤层顶板受到的

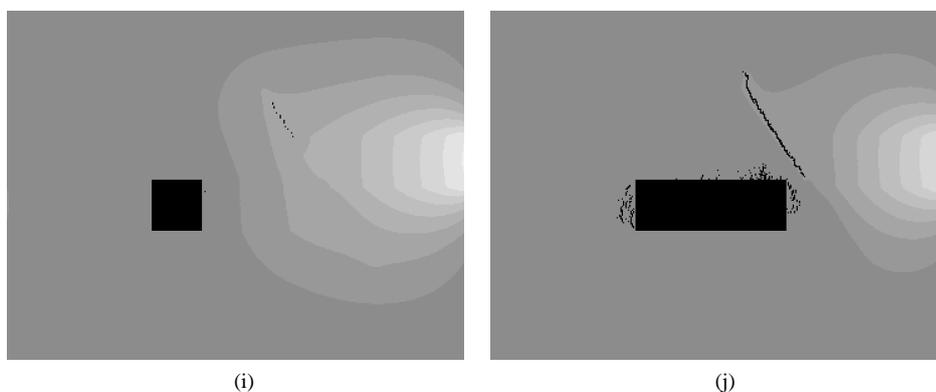


Figure 10. The distribution of gas pressure in the activation process of simulation for reverse fault
图 10. 数值模拟逆断层活化过程的瓦斯压力分布图

应力也不断增大，产生更多裂隙，使得煤体更加破碎，煤体遭受更加严重的破坏，产生很多煤体碎块。同时，断层上端，尤其是中部位置出现更为严重的破碎区，再加上回采煤层的顶板跨落，最终导致了断层上下盘的相互位移见图 9(h)，造成了回采诱发断层活化及滑移的最终结果。

不同回采阶段具体的剪应力分布，见图 11，第一次回采时，工作面相应的已采位置的顶板应力得到了释放，应力很低，如图中“回采 4 m”的折线所示，并且此刻，在断层出现了较大的应力集中，为断层活化开始“蓄能”；第二次回采时，顶板应力如同第一次的向前延伸，到达 8 m 左右的已采区域，同样的应力得到释放，如图中“回采 8 m”的折线所示，于此同时断层位置的应力开始在断层上半部分开始分散，并持续增大集中；随着回采的继续推进，顶板应力继续呈现随工作面的推进作持续释放，如图中“回采 12 m”的折线所示，所不同的是断层附近的应力迁移到了断层靠近回采煤层的连接点附近，此时，断层的上下盘均储蓄了足够能量，并发生活化与滑移，见图 9(h)。

2) 断层活化过程破坏损伤(AE 声发射)分析

相比上节涉及的应力分布图，破坏损伤(AE 声发射)分布图，能够更加直观的看出拉、压应力的产生与分布情况，见图 12。

从图 12(a)中我们可以清晰的看到，在回采的第一步，断层处便开始产生了拉应力，是因为煤层回采使顶板产生了一定的下沉，导致了上部围岩的应力不平衡，进一步致使断层的上部产生了拉应力，同时，采面的前后方也产生了一定的拉应力，见图 12(b)。在第二次回采过程中，见图 12(c)，断层对应煤层的中上部的位置便产生了一定程度的破碎，同时在第一次回采的后方，煤层也产生了破碎，这些均为拉应力的缓慢释放所导致的结果；随着回采的继续推进，见图 12(d)，断层处的拉应力继续向下迁移，同时在采面前方也产生大量的拉应力；到达第三次回采时，见图 12(e)，断层上半部分的破坏继续严重，同时拉应力的范围继续下延，采区的前后方也继续产生拉应力，见图 12(f)。随着回采的继续增大，在第三次回采末，如图 12(g)，断层的上半部分继而产生大量的拉应力，同时煤层也产生大量的拉应力，当到达第四次回采时，在大量拉应力的破坏下，断层处出现了大量的破碎，导致了上下盘的相对位移，最终导致了断层的活化与滑移现象，见图 12(h)。

3) 断层活化过程的位移分析

在模拟过程的位移图中，我们能清晰的看出顶板处以及断层处随回采的向前推进的位移大小变化情况，见图 13 与见图 14。

我们可以看出，图中单元号 175 位置即为断层所处位置在图中的显现位置，断层处的位移以 X 轴的变化为主，我们能够清晰的看出，随着回采的不断增大，X 轴方向的位移变化量在增加，然而，Y 轴方向的位移就相对较小；至于顶板处的位移变化，X 与 Y 轴的变化量，X 轴方向的基本随回采的不断推进

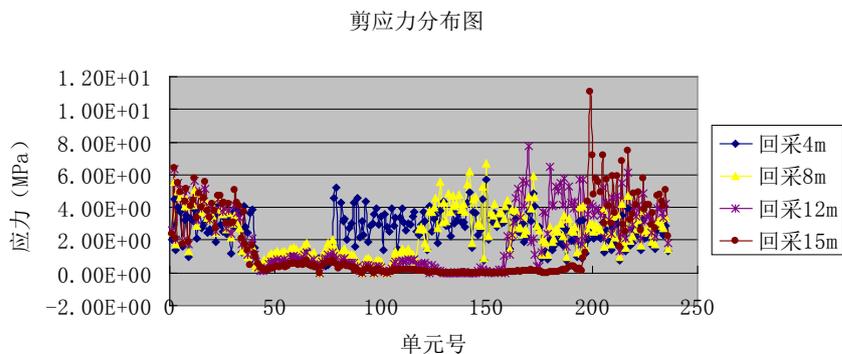


Figure 11. The stress distribution of the activation process of simulation for reverse fault
图 11. 数值模拟逆断层活化过程的应力分布图

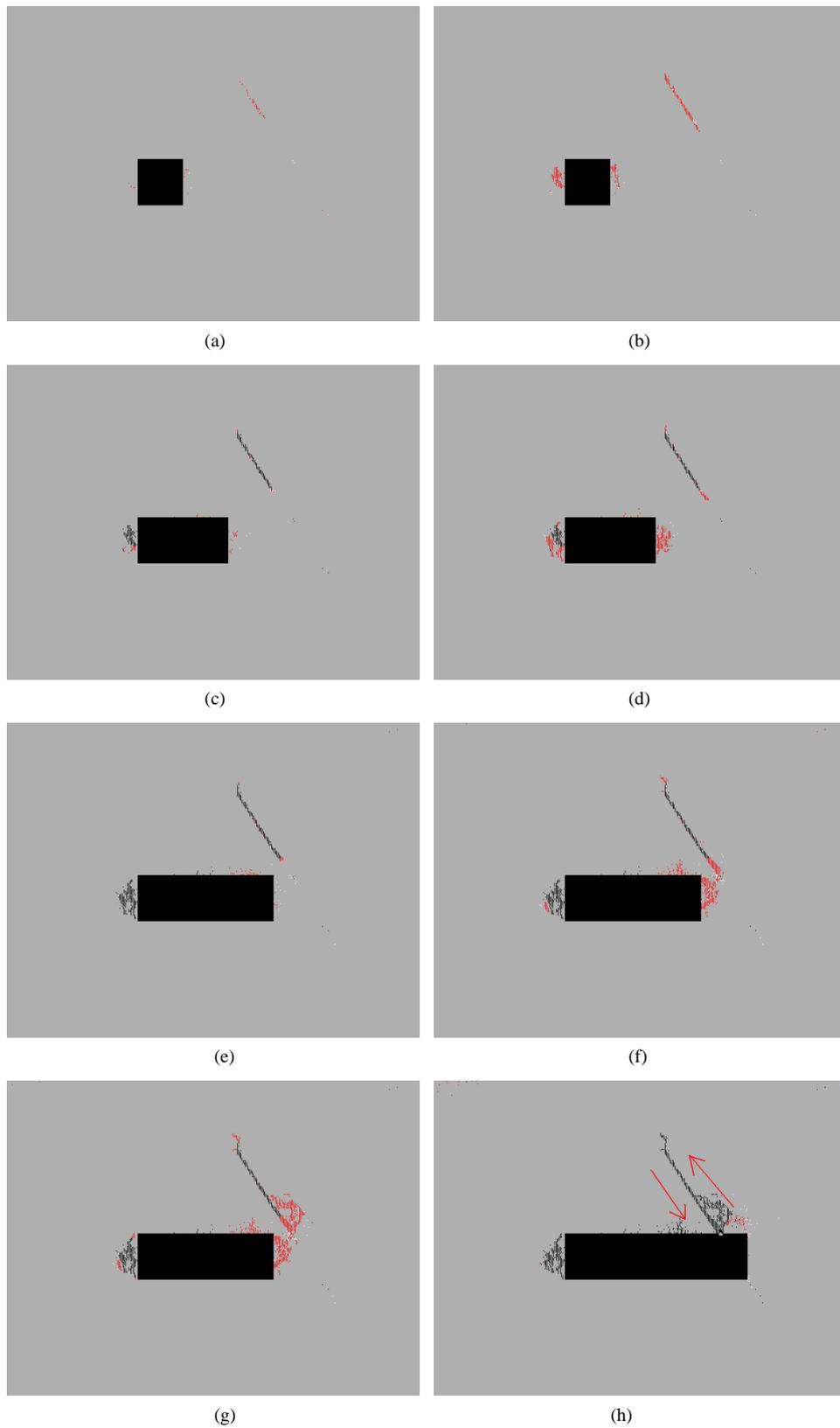


Figure 12. The distribution of AE in the activation process of simulation for reverse fault
图 12. 数值模拟逆断层活化过程的声发射分布图

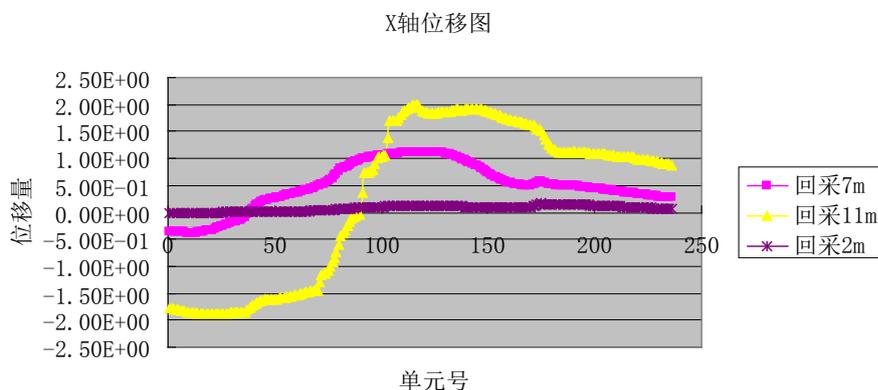


Figure 13. The displacement map X-axis in the activation process of simulation for reverse fault

图 13. 数值模拟逆断层活化过程的 X 轴位移图

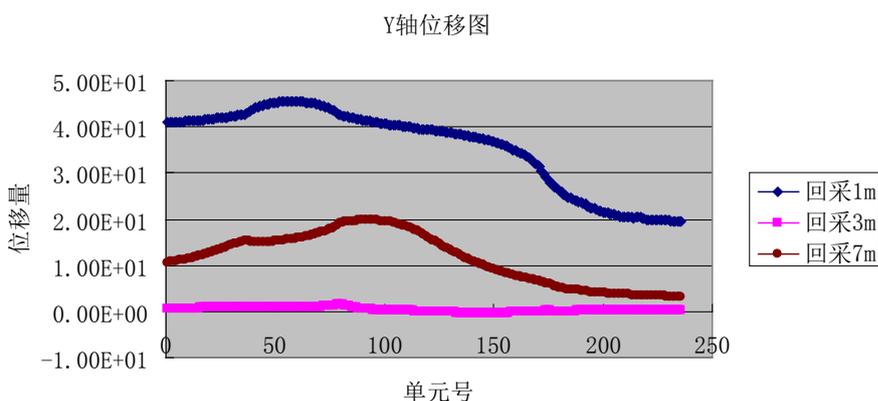


Figure 14. The displacement map Y-axis in the activation process of simulation for reverse fault

图 14. 数值模拟逆断层活化过程的 Y 轴位移图

相吻合，呈不断增大的趋势，Y 轴方向在回采 7 m 处出现了一个反常，初步认为是在前一步回采时顶板在 Y 轴方向已经稳定。从位移图的分布，将断层的活化及滑移的过程更加清晰。

6. 现场实践结果与数值模拟的相互验证

由于新庄孜煤矿安装有 ESG 的微震监测系统，该系统通过安装在巷道及采面附近合适距离与布置方式的微震传感器，来拾取周围煤岩体内的微小裂隙等变化，通过信号分析处理来定位破碎类型及等级 [11]-[13]，可以较好的反应井下采动过程对断层的影响。我们将两者综合比对分析得出，现场的微震系统所反映出的 $F_{10.5}$ 断层的活化与滑移特征，与数值模拟结果基本相吻合，尤其是在断层的上半部分，两者体现的较大的一致性，两者起到了良好的相互验证，见图 15。

7. 结论

本章通过图文并茂的方式，通过使用 RFPA^{2D} 对断层等地质构造进行建模、计算及数值模拟预测，分析断层活化过程，后将微震监测与其作直观的比对，两者相互验证了对方结果的正确性可信性。故 RFPA^{2D} 可以作为一种低成本、有效的、重要的技术手段进行分析煤矿开采过程对前方断层等的影响及活化过程分析，对煤矿安全生产起到重要的指导作用。

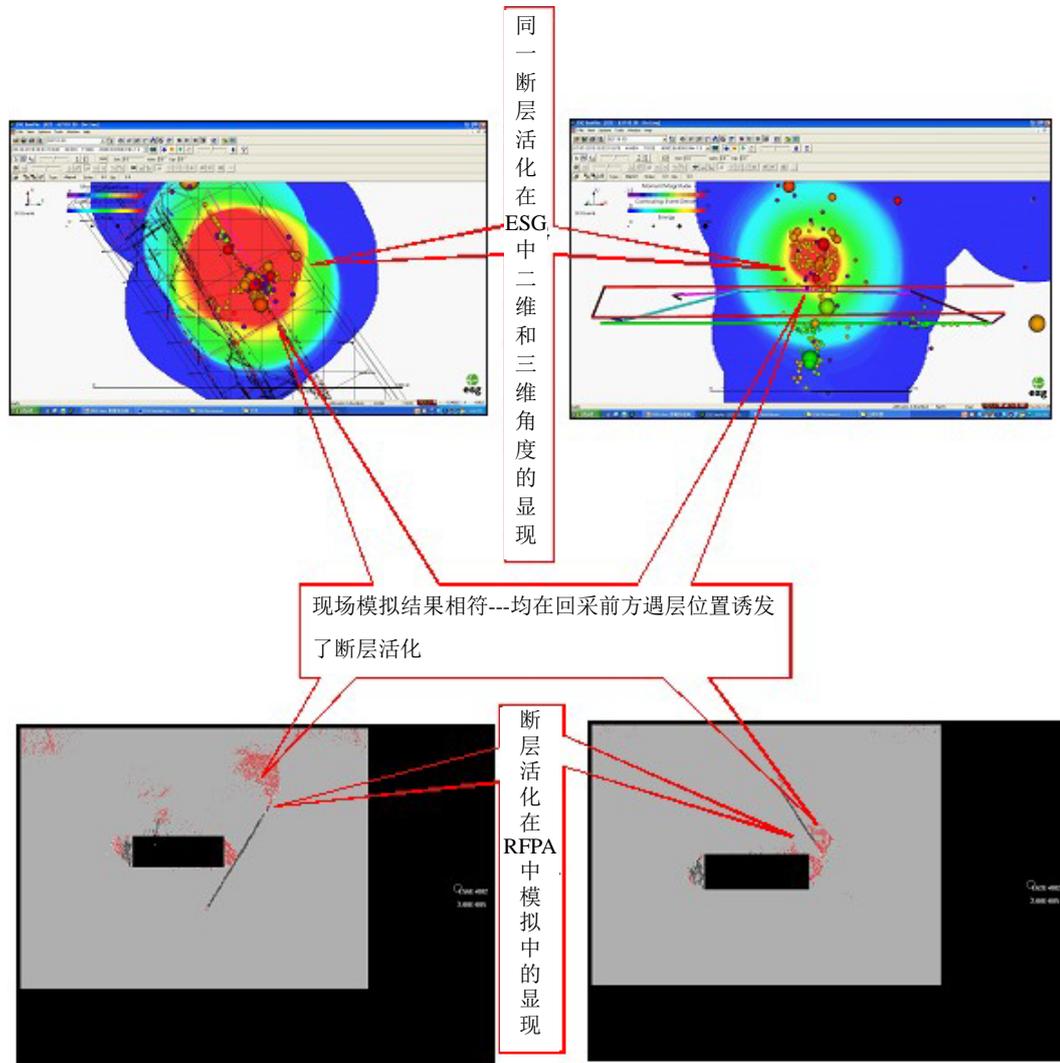


Figure 15. The comparison drawing of results of site monitoring and simulation
图 15. 现场监测结果与模拟结果对照图

参考文献 (References)

- [1] 王玉珏, 王元明 (1999) 断层破碎带的围压应力对巷道的影响与控制. *煤炭科技*, **2**, 35-38.
- [2] 谭周地 (1999) 活动断层的工程地质评定. 工程地质环境. 长春出版社, 长春.
- [3] 李起彤 (1991) 活断层及其工程评价. 地震出版社, 北京.
- [4] 孟召平, 彭苏萍, 冯玉, 雷志勇 (2006) 断裂结构面对回采工作面矿压及顶板稳定性的影响. *煤田地质与勘探*, **3**, 24-27.
- [5] 于广明, 谢和平, 扬伦 (1998) 采动断层活化分形界面效应的数值模拟. *煤炭学*, **4**, 396-399.
- [6] 孟召平, 彭苏萍, 冯玉, 雷志勇 (2006) 断裂结构面对回采工作面矿压及顶板稳定性的影响. *煤田地质与勘探*, **3**, 24-27.
- [7] 朱兴珊, 徐风银 (1995) 回采工作面断层附近岩石突出数值模拟研究. *山东矿业学院学报*, **3**, 26-27.
- [8] 刘咸卫, 曹运兴, 刘瑞, 等 (2000) 正断层两盘的瓦斯突出分布特征及其地质成因浅析. *煤炭学报*, **6**, 571-575.
- [9] 王金安, 刘航, 李铁 (2007) 临近断层开采动力危险区划分数值模拟研究. *岩石力学与工程学报*, **1**, 28-35.
- [10] 唐春安, 王述红, 傅宇方 (2003) 岩石破裂过程数值试验. 科学教育出版社, 北京.

- [11] 李凤琴, 张兴民, 姜福兴 (2006) 煤矿井下微震监测系统及应用. *煤田地质与勘探*, **4**, 68-70.
- [12] 张银平 (2002) 岩体声发射与微震监测定位技术及其应用. *工程爆破*, **1**, 58-61.
- [13] 李庶林 (2009) 试论微震监测技术在地下工程中的应用. *地下空间与工程学报*, **1**, 122-128.