

8-25-2019

## Microseismic test and numerical simulation analysis of floor failure depth of isolated coal mining face

ZHAO Chunhu

*Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China; Shaanxi Key Laboratory of Coal Mine Water Hazard Control, Xi'an 710077, China*

Follow this and additional works at: <https://cge.researchcommons.org/journal>



Part of the [Earth Sciences Commons](#), [Mining Engineering Commons](#), [Oil, Gas, and Energy Commons](#), and the [Sustainability Commons](#)

---

### Recommended Citation

Z. (2019) "Microseismic test and numerical simulation analysis of floor failure depth of isolated coal mining face," *Coal Geology & Exploration*: Vol. 47: Iss. 4, Article 18.

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.017

Available at: <https://cge.researchcommons.org/journal/vol47/iss4/18>

This Hydrogeology, Engineering Geology, Environmental Geology is brought to you for free and open access by Coal Geology & Exploration. It has been accepted for inclusion in Coal Geology & Exploration by an authorized editor of Coal Geology & Exploration. For more information, please contact [380940179@qq.com](mailto:380940179@qq.com).

文章编号: 1001-1986(2019)04-0110-07

# 孤岛工作面底板破坏深度微震测试与模拟分析

赵春虎<sup>1,2</sup>

- (1. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077;
2. 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室, 陕西 西安 710077)

**摘要:** 针对孤岛工作面煤层开采底板损伤问题, 以河北葛泉煤矿 11913 孤岛工作面为研究对象, 采用微震方法分析其底板破坏深度; 并通过数值模拟对首采、跳采及孤岛 3 种工作面回采过程中围岩采动应力与底板破坏的规律进行了对比分析。微震测试结果显示 11913 工作面回采过程中微震事件主要发生在下巷, 识别出工作面最大破坏深度 20~25 m; 基于 COMSOL 的 11912 首采、11914 跳采及 11913 孤岛 3 个工作面数值模拟结果显示, 11912 首采与 11914 跳采条件下煤柱地应力集中状态变化不大, 最大破坏深度小于 11.56 m, 仅发育至工作面底板的注浆改造层内部; 而 11913 孤岛回采条件下, 受到重复采动影响, 工作面两侧煤柱应力集中状态骤增, 最大破坏深度剧增至 23 m, 已发育至煤层底板的本溪组灰岩含水层。研究结果对于华北型煤田下组煤层开采底板破坏规律分析与不同类型工作面回采条件下底板水害防治有一定的参考价值。



**关键词:** 孤岛工作面; 破坏深度; 重复采动; 微震; 数值模拟; 葛泉煤矿; 河北邢台  
**中图分类号:** TD32 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.017

## Microseismic test and numerical simulation analysis of floor failure depth of isolated coal mining face

ZHAO Chunhu<sup>1,2</sup>

- (1. Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China;
2. Shaanxi Key Laboratory of Coal Mine Water Hazard Control, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** Aiming at the damage of coal seam floor caused by mining in isolated coal mining face, taking 11913 isolated coal mining face in Gequan coal mine of Hebei Province as the research object, and using KJ959 coal mine microseismic monitoring system to detect the floor failure depth. It is recognized that the microseismic events mainly occur in the roadway of the isolated coal mining face during the mining process, and the maximum vertical failure depth is about 20~25m; Moreover, using the COMSOL multi-physical field numerical simulation platform, the variation of in-situ stress and failure law of coal seam floor under the conditions of 11912 first coal mining face, 11914 jumping coal mining face and 11913 isolated coal mining face are analyzed. The simulation results show that the in-situ stress concentration state of coal pillars under the conditions of 11912 first mining face or 11914 jumping mining face has little change, and the maximum failure depth is less than 11.56 m, which only develops into the interior of grouting reformation layer. Under the condition of 11913 isolated mining face, the in-situ stress concentration state of coal pillars on both sides of mining face increases sharply due to the influence of repeated mining in mining faces 11912 and 11914, and the maximum failure depth increases to 23 m, which has extended to Benxi limestone aquifer of coal seam floor. The conclusion has certain reference value for the study of floor failure law of North China type coalfield and the selection of grouting transformation horizon under different mining conditions.

收稿日期: 2019-02-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0804103); 天地科技股份有限公司科技创新基金项目(2018-TD-MS069); 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室开放基金(SHJT-16-30.9); 中煤科工集团西安研究院有限公司创新基金项目(2018XAYZD13-1, 2017MS007)

**Foundation item:** National Key R&D Program of China(2017YFC0804103); Science and Technology Innovation Fund of Tiandi Science and Technology Co. Ltd.(2018-TD-MS069); Open Fund of State Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization in Coal Mining (SHJT-16-30.9); Science and Technology Innovation Fund of Xi'an Research Institute of CCTEG(2018XAYZD13-1, 2017MS007)

作者简介: 赵春虎, 1981 年生, 男, 陕西扶风人, 博士, 副研究员, 从事矿井水害防治与矿区环境保护研究工作。E-mail: zhaochunhu@cctegxian.com  
引用格式: 赵春虎. 孤岛工作面底板破坏深度微震测试与模拟分析[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(4): 110-116.

ZHAO Chunhu. Microseismic test and numerical simulation analysis of floor failure depth of isolated coal mining face[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(4): 110-116.

**Keywords:** isolated coal mining face; failure depth; repeated mining; microseismic numerical simulation; Gequan coal mine; Xingtai of Hebei

底板灰岩水是华北型煤田煤层开采主要水害防治对象, 由于煤层采掘空间周围的支承压力向底板内部转移传递, 导致底板发生变形破坏, 大大削减了隔水层厚度, 使底板突水危险性增加<sup>[1-2]</sup>, 开展工作面煤层开采扰动下底板破坏深度研究是评价底板突水危险性和制定工作面底板水害防治措施的重要依据<sup>[3-4]</sup>。

目前煤层底板破坏深度的研究手段主要分为现场实测和计算分析两类, 较为成熟的现场实测手段主要有: 以观测水体漏失量的钻孔冲洗液法<sup>[5]</sup>、井下孔中注水测漏法<sup>[6]</sup>, 直接对裂缝进行观测的钻孔彩色电视、钻孔 CT 等<sup>[7-8]</sup>, 以及以地球物理探测为基础的超声成像及数字测井法等静态探测方法<sup>[9]</sup>。近年来, 利用微震探测岩体微破裂三维空间成为底板破坏深度探测的新趋势, 可从空间和时间上圈定采掘活动引起的次生导水通道空间范围, 实现煤层采掘过程中底板破坏深度的动态监测, 在岩爆(冲击地压)、滑坡等动力灾害监测预警以及煤矿水害防治方面得到较多应用<sup>[10-13]</sup>。底板破坏深度计算分析方法主要包括理论计算、经验公式、数值模拟和相似材料模拟等<sup>[14-16]</sup>, 其中数值模拟能够综合考虑影响底板破坏深度的多种因素, 较为全面地刻画地层结构以及模拟较为复杂的系统边界等, 在定量研究底板破坏规律方面具有一定的优势。

孤岛型工作面由于煤柱两侧临空, 较之煤柱两侧不临空或一侧临空型工作面的巷道煤柱应力集中程度高, 在重复采掘扰动下的煤层底板破坏深度进一步加剧, 增加了底板突水威胁。目前对孤岛工作面底板破坏深度的探测和研究较少, 不利于其安全回采。

笔者以河北邢台葛泉煤矿 11913 孤岛型回采工作面为研究对象, 应用微震监测技术对工作面回采过程中底板破坏深度进行监测识别, 并采用数值模拟技术依次构建 11912 首采、11914 跳采与 11913 孤岛型 3 个工作面煤层开采底板应力场变化与破坏深度数值模型, 对比分析不同开采条件下底板破坏深度发育规律, 为华北型煤田煤层开采底板岩溶水害注浆加固治理的层位优化提供科学依据。

## 1 研究区概况

河北邢台葛泉煤矿上组煤太原组 5 号煤层已开采殆尽, 自 2010 年开始下组煤 9 号煤层的开采, 工作面布置主要采用走向长壁及倾斜长壁等方式, 综合机械化开采。本文研究对象为葛泉煤矿 3 个相邻

工作面 11912、11913 以及 11914, 其煤层底板标高 -100~40 m, 煤层走向倾角约 15°(图 1)。

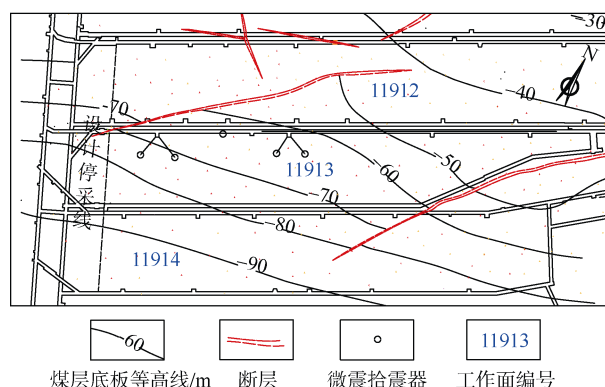


图 1 邢台葛泉煤矿工作面示意图

Fig.1 Diagram of coal mining faces distribution in Gequan coal mine of Xingtai

如图 2 所示, 9 号煤层下伏富水性中等、厚度较薄的本溪组岩溶裂隙含水层(简称“本灰”)以及富水性好、巨厚层状的奥陶系岩溶裂隙含水层(简称“奥灰”), 其中奥灰岩溶水是矿井主要水害防治对象。9 号煤层与本灰之间为砂质泥岩、铝土质页岩类隔水层, 本灰与奥灰之间的粉砂岩、铝土泥岩等软弱岩层是阻止奥灰突水的关键隔水层。两灰岩含水层具有一定的水力联系, 含水层水位标高均在 +20 m 左右, 9 号煤层属带压开采, 存在底板岩溶突水威胁。

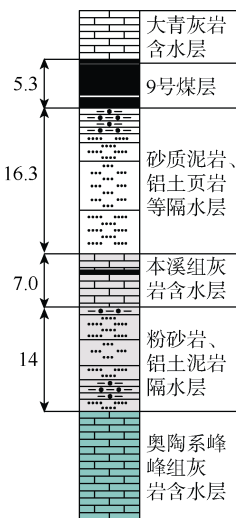


图 2 9 号煤层底板水文地质综合柱状示意图(单位: m)

Fig.2 The hydrogeological column of No. 9 coal seam floor

为防治底板灰岩水害, 葛泉煤矿先后对 11912、11914 等工作面煤层底板隔水层及本灰进行全面注浆改造与加固(注浆深度一般为煤层底板以下 15 m), 注浆改造与加固完成后, 11912 首采面 2013 年回采结束, 随后跳采 11914 工作面, 中间 11913 孤岛工

作面于 2015 年开始回采。孤岛工作面两侧均为采空区,可能出现不同于首采和跳采工作面的底板破坏深度发育规律,为了进一步优化注浆层位,有效防治孤岛工作面底板突水,2015 年矿井应用微震监测技术对 11913 孤岛工作面回采过程中底板破坏深度进行了实时监测。

## 2 底板破坏深度微震测试

### 2.1 微震监测系统构建

采用 KJ959 煤矿微震监测系统<sup>[17]</sup>,试验布置如图 1 所示,分别在 11913 工作面上下两巷煤柱内壁设计施工 1.5 m 的浅孔,两巷交叉部署 8 个微震传感器,间距约 50 m;为提高采动破坏深度在垂向上的定位精度,在工作面上巷钻进的深孔中埋设 4 个微震传感器进行监测,垂深 16~20 m,微震监测系统持续监测 20 d,获得微震事件 881 个。

### 2.2 微震监测结果分析

通过对本次微震监测数据的分析处理,绘制出 11913 工作面回采过程中底板破坏微震事件分布投影图(图 3)。

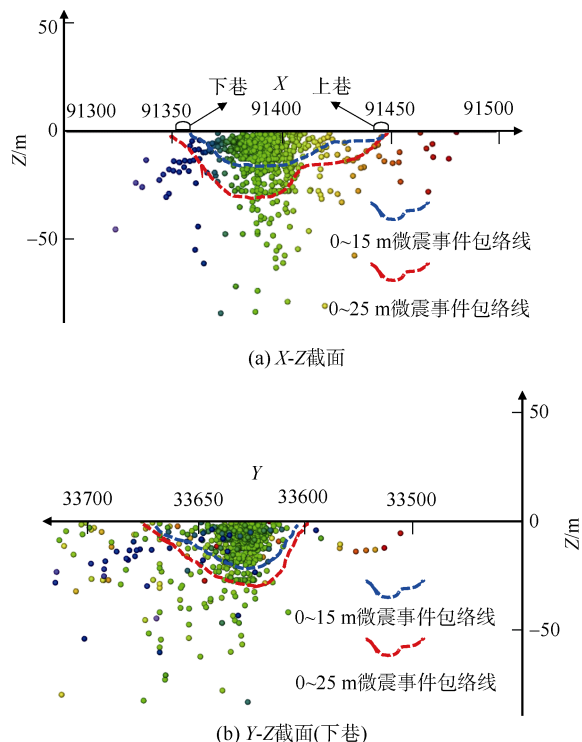


图 3 11913 工作面底板微震事件剖面投影分布图

Fig.3 Microseismic events distribution in coal seam floor profile of 11913 working face

如图 3、图 4 所示,微震事件数目随底板深度的增加呈现出显著的减少趋势,11913 工作面回采过程中大量的微震事件集中在煤层底板以下垂深 0~15 m 区段内,占事件总数的 73.67%,0~25 m 深

度占事件总数的 86.56%,其中 15~20 m、20~25 m 两区段的事件数分别增加了 6.92%与 5.97%;而垂深大于 25 m 以下的微震事件数目显著下降,如 25~30 m、30~35 m 两区段的事件数仅增加了 2.79%与 2.38%,因此,开采形成最大破坏深度识别为 20~25 m。微震主体事件主要集中在 11913 下巷附近,与文献<sup>[18]</sup>中桃园煤矿的监测结论一致<sup>[18]</sup>。结合煤层底板岩性组合特征分析,11913 工作面底板采动裂隙已发育至本溪组灰岩含水层下部,而本溪组灰岩含水层底部赋存较为完整的铝土质粉砂岩、泥岩、粉砂岩等软弱岩层,微震监测结果显示该软弱岩层在一定程度上抑制了底板采动裂隙向下延伸。

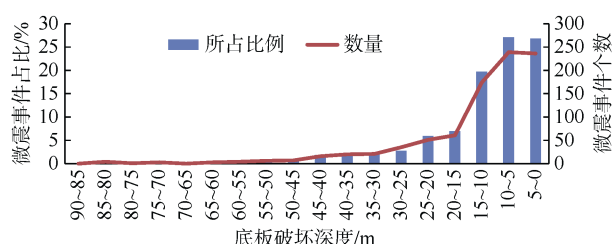


图 4 底板微震事件分布柱状图

Fig.4 Column diagram of microseismic event distribution in coal seam floor

## 3 底板破坏深度数值模拟分析

### 3.1 概念模型

根据葛泉煤矿工作面采掘地质条件,构建研究对象的模型,上边界至地表松散层,下边界至奥灰顶界面以下 50 m,将概念模型由下至上概化为奥灰含水层、低渗透岩层、本溪灰岩层、注浆改造层、9 号煤层(倾角 15°)、基岩层和松散层共 7 层(图 5)。11912、11913、11914 工作面宽度均为 80 m,其中 11912 和 11914 为已采工作面,老空区均为积水区。

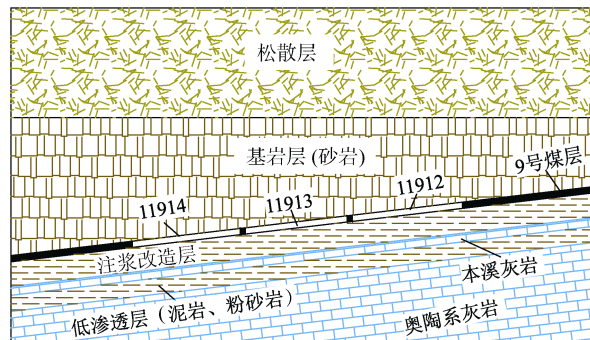


图 5 概念模型示意图

Fig.5 Conceptual model sketch of the study area

### 3.2 数学模型

利用岩体变形与损伤的位移场方程和塑性损伤判据方程组成的数学模型,描述煤层开采扰动下底板围岩应力变化与破坏特征。

岩体变形与损伤的位移场方程表述如下：

$$G \nabla^2 u + \frac{G}{1-2\nu} \nabla * (\nabla u) = 0 \tag{1}$$

式中  $G$  为切变模量, Pa ;  $\nu$  为介质的泊松比(无量纲) ;  $G=2E(1+\nu)$  ,  $E$  为介质弹性模量, Pa ;  $u$  分别为  $x$  轴、 $y$  轴及  $z$  轴方向的位移, m。

岩体塑性损伤判据  $F_1$  采用 Mohr-Coulomb 准则<sup>[19-20]</sup>, 表述如下：

$$F_1 = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - K = 0 \tag{2}$$

式中  $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$$

$$\alpha = \tan \varphi / \sqrt{9 + 12 \tan^2 \varphi}$$

$$K = 3c / \sqrt{9 + 12 \tan^2 \varphi}$$

式(2)为 Mohr-Coulomb 剪应力破坏准则的一种变换形式, 其中  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  为 3 个主应力, Pa ;  $I_1$  为有效应力第一不变量, Pa ;  $J_2$  为有效应力偏量第二不变量, Pa ;  $\alpha$ 、 $K$  分别与岩石的内摩擦角  $\varphi$  和黏聚力  $c$  有关。

3.3 数值模型

利用多物理场数值模拟软件 COMSOL 构建数值模型, 如图 6 所示。为了提高计算精度, 在煤层、采空区、煤层底板的本溪灰岩层及低渗透层均进行了加密剖分。

a. 初始条件

在采掘活动未发生以前, 煤层应力状态保持平衡。在不考虑构造应力的条件下, 其垂直与水平应

力计算公式如下：

$$\sigma_v = \gamma H \tag{3}$$

$$\sigma_h = (\frac{\nu}{1-\nu}) \gamma H \tag{4}$$

式中  $\sigma_v$  为垂直应力, N/m<sup>2</sup> ;  $\sigma_h$  为水平应力, N/m<sup>2</sup> ;  $\nu$  为岩石泊松比 ;  $\gamma$  为岩层平均容重, N/m<sup>3</sup> ;  $H$  为埋深, m。

地应力是一种体力, 模型中根据每个单元的埋深分别应用式(8)和式(9)来计算赋值, 初始位移为零。

b. 边界条件

定义模型底部为“固定边界”, 限制单元在三维空间上的变形, 即位移为 0 ; 采宽较模型研究尺度相对较小, 模型两侧在水平方向变形基本可以忽略, 因而定义为“辊边界”, 即允许边界单元仅在垂向上有位移产生, 水平方向位移为 0 ; 地表与采空区设置为自由边界。模型主要参数如表 1 所示。

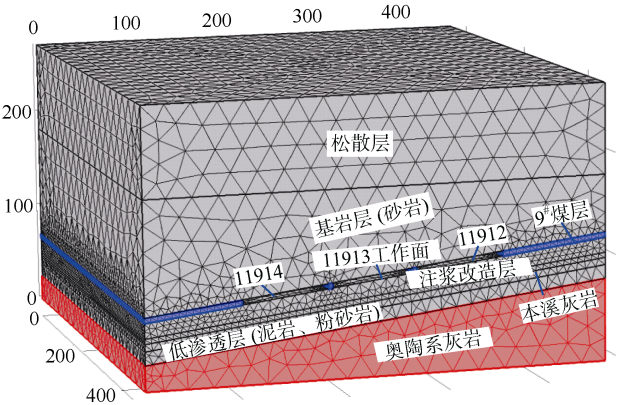


图 6 计算机数值模型(单位: m)  
Fig.6 Computer numerical model

表 1 数值模型主要参数  
Table 1 main parameters of the numerical model

| 岩层        | 容重 $\gamma$ /(N·cm <sup>-3</sup> ) | 弹性模量 $E$ /GPa | 黏聚力 $c$ /MPa | 内摩擦角 $\varphi$ /(°) | 泊松比 $\nu$ |
|-----------|------------------------------------|---------------|--------------|---------------------|-----------|
| 松散层       | 1 360                              | 0.75          | 1.5          | 35                  | 0.42      |
| 基岩层       | 2 580                              | 3.34          | 3.0          | 35                  | 0.26      |
| 注浆改造层     | 2 680                              | 3.53          | 3.3          | 32                  | 0.26      |
| 低渗透泥岩粉砂岩层 | 2 700                              | 2.55          | 2.5          | 39                  | 0.29      |
| 煤层        | 1 350                              | 3.25          | 3.5          | 35                  | 0.32      |
| 灰岩层       | 2 950                              | 3.00          | 2.7          | 30                  | 0.17      |

3.4 模拟结果分析

分析采场底板应力分布规律是研究底板破坏深度和范围的重要前提<sup>[21]</sup>。如图 7 所示, 11912 工作面首采条件下, 工作面采场上、下部一定范围内应力表现形式从采前的压应力状态转变为向采空区的拉应力。受采掘扰动影响, 在采场周边均表现出明显的应力集中

现象, 而且在采场两侧最为明显, 压应力最大值出现在 11912 工作面下巷煤柱附近, 约  $6 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup> ; 随着埋深相对较大的 11914 工作面跳采后, 压应力最大值出现在 11914 工作面下巷煤柱附近, 增加至  $6.7 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup> ; 11913 孤岛工作面形成后, 压应力最大值出现在 11913 工作面下巷煤柱附近, 骤增至  $1.7 \times 10^7$  N/m<sup>2</sup> (表 2)。



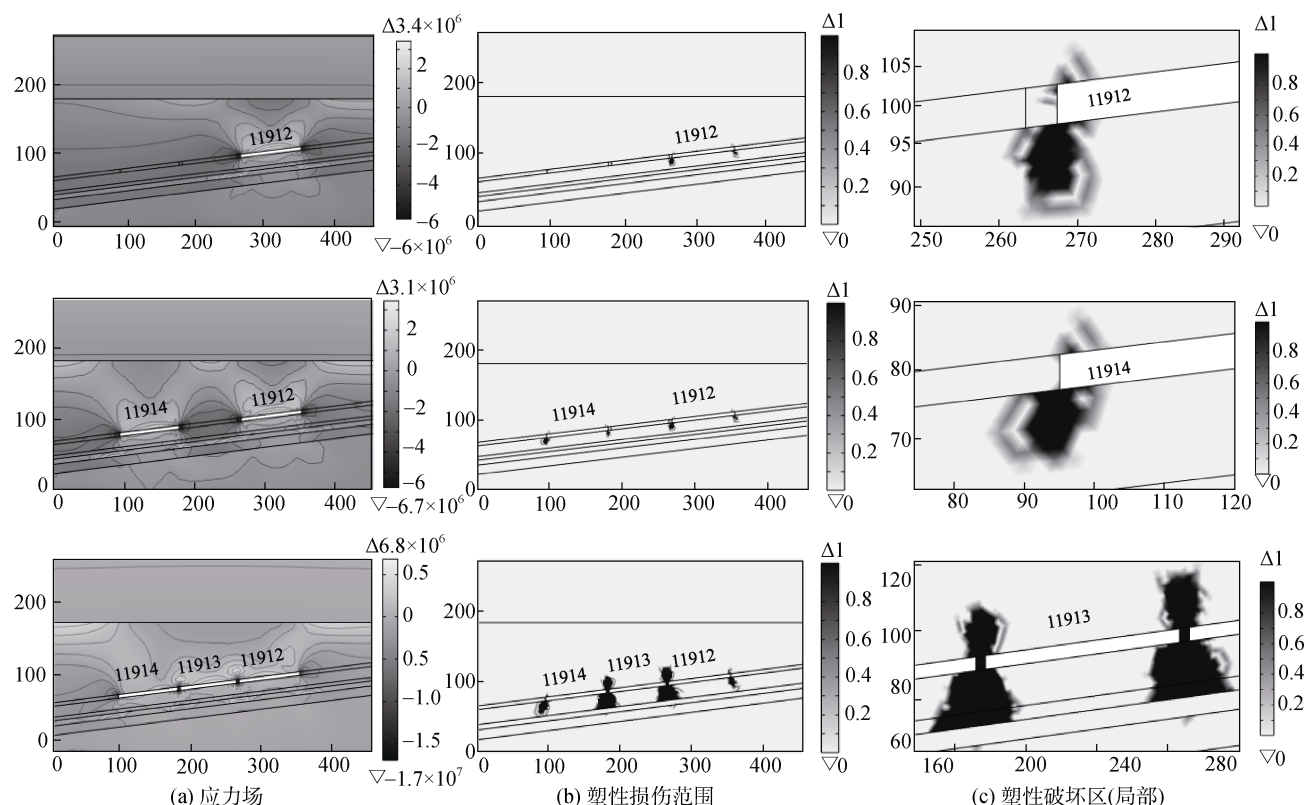


图 7 11912、11914、11913 工作面开采条件下围岩采动应力与底板破坏特征

Fig.7 The in-situ stress and failure depth characteristics under the conditions of 11912、11914 and 11913 coal mining faces

表 2 围岩体应力与破坏深度特征值

Table 2 Eigenvalues of in-situ stress and failure depth of surrounding rock mass

| 工作面开采顺序  | 应力最大值/( $10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ ) | 底板最大破坏深度/m | 破坏深度发育层位                 |
|----------|------------------------------------------------|------------|--------------------------|
| 首采 11912 | 6.0                                            | 10.93      | 注浆改造层内                   |
| 跳采 11914 | 6.7                                            | 11.56      | 注浆改造层内                   |
| 孤岛 11913 | 17                                             | 23.50      | 揭穿本溪组灰岩含水层, 发育至奥灰顶部低渗透层内 |

煤层开采形成底板塑性损伤区, 最大深度出现在工作面煤岩柱两侧<sup>[22]</sup>, 微震监测和模拟结果均显示, 左侧下巷煤岩柱受到的塑性损伤范围稍大于右侧上巷, 主要是因为煤层自身倾角造成了上覆地层向两侧煤岩柱施压强度不同。如表 2 所示, 11912 工作面首采条件下, 采动造成底板最大塑性破坏深度位于 11912 工作面下巷, 约为 10.93 m; 11914 工作面跳采后, 模拟得出最大破坏深度位于 11914 工作面下巷, 最大深度约为 11.56 m, 可见 11914 跳采对 11912 工作面底板破坏影响不大, 首采与跳采工作面采动形成的底板破坏深度仅发育至注浆改造层内。11912 首采与 11914 跳采工作面底板破坏深度的模拟结果, 与 2007 年葛泉煤矿 11912 首采工作面通过底板应力应变观测与压水试验得出破坏深度 11.87~12.40 m 的成果较为一致<sup>[23-24]</sup>, 说明基于 COMSOL 有限元数值分析成果的可靠性较高。

与首采、跳采工作面相比, 11913 孤岛工作面

形成后, 由于受相邻 11912 与 11914 工作面重复开采扰动, 煤柱两侧应力集中程度与底板破坏深度增加明显, 底板破坏最大深度在形成孤岛后延伸至 23.5 m, 与微震识别得出的 11913 工作面最大破坏深度 20~25 m 结果基本一致, 底板破坏深度已发育至煤层底板富水性中等、厚度较薄的本溪灰岩含水层底部。另外由图 7 可以看出, 11913 孤岛工作面底板破坏在奥灰含水层顶部的铝土质泥岩、粉砂岩类软弱地层内延伸受阻, 说明软弱岩层对煤层采动底板破坏发育深度有明显的抑制作用, 降低了强富水奥灰岩溶水沿采动裂隙的突水威胁。

#### 4 结论

a. 通过 KJ959 煤矿微震监测系统测试结果显示, 邢台葛泉煤矿 11913 孤岛工作面回采过程中微震事件主要发生在该工作面下巷, 识别其最大破坏深度为 20~25 m。

b. 通过 11912 首采、11914 跳采及 11913 孤岛 3 种回采条件下围岩体采动应力与底板破坏规律对比分析, 首采与跳采条件下煤柱应力集中状态变化不大, 最大破坏深度小于 11.56 m, 发育至矿井注浆改造加固层内部; 而孤岛回采条件下, 受到重复采动影响, 工作面两侧煤柱应力集中骤增, 最大破坏深度剧增至 23.5 m, 已发育至煤层底板的本溪灰岩含水层。

## 参考文献

- [1] 宋振骐, 蒋宇静, 杨增夫, 等. 煤矿重大事故预测和控制的动力信息基础研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2003.
- [2] 张蕊, 姜振泉, 于宗仁, 等. 煤层底板采动破坏特征综合测试及数值模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(4): 531-537.  
ZHANG Rui, JIANG Zhenquan, YU Zongren, et al. Comprehensive testing and numerical analysis on the failure characteristics of mining coal seam floor[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(4): 531-537.
- [3] 施龙青, 徐东晶, 邱梅, 等. 采场底板破坏深度计算公式的改进[J]. 煤炭学报, 2013, 38(增刊 2): 299-303.  
SHI Longqing, XU Dongjing, QIU Mei, et al. Improved on the formula about the depth of damaged floor in working area[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38 (S2): 299-303.
- [4] 李七明, 翟立娟, 傅耀军, 等. 华北型煤田煤层开采对含水层的破坏模式研究[J]. 中国煤炭地质, 2012, 24(7): 38-43.  
LI Qiming, ZHAI Lijuan, FU Yaojun, et al. A study on coal mining aquifer destruction mode in North China typed coal fields[J]. Coal Geology of China, 2012, 24(7): 38-43.
- [5] 程学丰, 刘盛东, 刘登宪. 煤层采后围岩破坏规律的声波 CT 探测[J]. 煤炭学报, 2001, 26(2): 153-155.  
CHENG Xuefeng, LIU Shengdong, LIU Dengxian. Sound-wave CT detection for failure patterns of surrounding rock after mining[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(2): 153-155.
- [6] 施龙青, 朱鲁, 韩进, 等. 矿山压力对底板破坏深度监测研究[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(6): 20-23.  
SHI Longqing, ZHU Lu, HAN Jin, et al. Monitor study on broken floor depth caused by underground pressure[J]. Coal Geology & Exploration, 2004, 32(6): 20-23.
- [7] 陈继刚, 熊祖强, 李卉, 等. 倾斜特厚煤层综放带压开采底板破坏特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 1): 3018-3023.  
CHEN Jigang, XIONG Zuqiang, LI Hui, et al. Failure characteristics of floor under predssure inclined and extra thick coal seam in full-mechanized top coal caving faces[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S1): 3018-3023.
- [8] 程久龙, 于师建, 宋扬, 等. 煤层底板破坏深度的声波 CT 探测试验研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(6): 576-580.  
CHENG Jiulong, YU Shijian, SONG Yang, et al. Detection of failure depth of coal seam floor by acoustic wave computer tomography[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(6): 576-580.
- [9] 张朋, 王一, 刘盛东, 等. 工作面底板变形与破坏电阻率特征[J]. 煤田地质与勘探, 2011, 39(1): 64-67.  
ZHANG Peng, WANG Yi, LIU Shengdong, et al. Resistivity characteristic of deformation and failure of floor in workplace[J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(1): 64-67.
- [10] 李书奎, 张连福, 张少峰, 等. 微震监测技术在煤层底板突水防治中的应用[J]. 煤矿开采, 2011, 16(5): 94-96.  
LI Shukui, ZHANG Lianfu, ZHANG Shaofeng, et al. Application of micro-seismic monitoring technology in floor water-burst prevention[J]. Coal Mining Technology, 2011, 16(5): 94-96.
- [11] 尹贤刚. 试论基于微震监测技术研究大尺度岩体破坏机理的必要性及意义[J]. 矿业研究与开发, 2013, 33(6): 31-33.  
YIN Xiangang. Discuss of the significance and necessity of studying on the failure mechanism of large-scale rock mass based on micro-seismic monitoring technology[J]. Mining Research & Development, 2013, 33(6): 31-33.
- [12] 姜福兴, 叶根喜, 王存文, 等. 高精度微震监测技术在煤矿突水监测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1932-1938.  
JIANG Fuxing, YE Genxi, WANG Cunwen, et al. Application of high-precision microseismic monitoring technique to water inrush monitoring in coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1932-1938.
- [13] 孙运江, 左建平, 李玉宝, 等. 邢东矿深部带压开采导水裂隙带微震监测及突水机制分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2335-2342.  
SUN Yunjiang, ZUO Jianping, LI Yubao, et al. Micro-seismic monitoring on fractured zone and water inrush mechanism analysis of deep mining above aquifer in Xingdong coalmine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(8): 2335-2342.
- [14] 程爱平, 高永涛, 梁兴旺, 等. 基于未确知聚类法的底板采动破坏深度动态预测[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(5): 739-744.  
CHENG Aiping, GAO Yongtao, LIANG Xingwang, et al. Dynamic forecasting of mining-induced failure depth of floor based on unascertained clustering method[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2014, 31 (5): 739-744.
- [15] 林远东, 涂敏. 采场端部底板破坏深度解析分析[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(3): 25-28.  
LIN Yuandong, TU Min. Resolution and analysis on failure depth of face end floor in coal mining face[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(3): 25-28.
- [16] 李昂, 谷拴成, 陈方方. 带压开采煤层底板破坏深度理论分析及数值模拟—以陕西澄合矿区董家河煤矿 5 号煤层为例[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(4): 56-60.  
LI Ang, GU Shuancheng, CHEN Fangfang. Theoretical analysis and numerical simulation of destroyed depth of coal seam floor during bearing mining: With seam No.5 in Dongjiahe mine,

- Chenghe mining area, Shaanxi as example[J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(4): 56–60.
- [17] 刘毅, 秦鸿刚. 基于微震监测技术的巷道底板监测准确性研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(2): 49–51.
- LIU Yi, QIN Honggang. Study of floor monitoring accuracy based on microseismic monitoring technology[J]. Coal Technology, 2017, 36(2): 49–51.
- [18] 孙建, 王连国, 唐芙蓉, 等. 倾斜煤层底板破坏特征的微震监测[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1589–1595.
- SUN Jian, WANG Lianguo, TANG Furong, et al. Microseismic monitoring failure characteristics of inclined coal seam floor[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1589–1595.
- [19] 王连国, 韩猛, 王占盛, 等. 采场底板应力分布与破坏规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(3): 317–322.
- WANG Lianguo, HAN Meng, WANG Zhansheng, et al. Stress distribution and damage law of mining floor[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(3): 317–322.
- [20] 朱术云, 周海洋, 李新芳, 等. 基于现场实测“三软”煤层采动底板变形破坏机制[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(4): 518–525.
- ZHU Shuyun, ZHOU Haiyang, LI Xinfang, et al. Deformation and failure mechanism of mining floor in “three-soft” coal seam based on field measurement[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013, 30(4): 518–525.
- [21] 刘德君. 采空区的围岩应力分布及其与底板突水的关系[J]. 煤矿安全, 1988(7): 35–39.
- LIU Dejun. The stress distribution of the goaf and its relationship of water inrush[J]. Safety in Coal Mines, 1988(7): 35–39.
- [22] 鲁海峰, 姚多喜. 采动底板层状岩体应力分布规律及破坏深度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(10): 2030–2039.
- LU Haifeng, YAO Duoxi. Stress distribution and failure depths of layered rock mass of mining floor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(10): 2030–2039.
- [23] 徐玉增. 葛泉矿带压开采下组煤底板破坏深度探测研究[J]. 中国煤炭, 2010, 36(4): 48–51.
- XU Yuzeng. A study on the depth of floor damage in lower coal seam mining with water pressure in Gequan coal mine[J]. China Coal, 2010, 36(4): 48–51.
- [24] 白峰青, 李冲, 徐玉增, 等. 葛泉矿带压开采 9 号煤底板突水危险性分析[J]. 煤矿安全, 2010, 41(6): 106–108.
- BAI Fengqing, LI Chong, XU Yuzeng, et al. Analysis of water inrush risk when mining 9# floor under pressure in Gequan coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2010, 41(6): 106–108.

(责任编辑 周建军)