

文章编号:0253-9993(2013)03-0384-07

# 承压工作面底板破断规律双向加载相似模拟试验

赵毅鑫<sup>1,2,3</sup>,姜耀东<sup>1,3</sup>,吕玉凯<sup>3</sup>,崔志静<sup>3</sup>

(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)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,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:**以峰峰九龙矿承压水上工作面15423N回采时底板鼓起、破断现象为研究对象,通过现场工作面底板岩芯钻取编录、地应力测量及工作面地应力场数值模拟反演,获得了15423N工作面底板岩层赋存及环境应力场特征;在此基础上采用双向加载相似模拟试验平台和基于独立弹簧组构成的承压水载荷模拟装置,对九龙矿承压水上工作面底板破断诱发突水的机理进行了分析;获得了工作面回采过程中,底板不同深度岩层应力及位移场的时空演化特征。

**关键词:**相似模拟;承压水;底板破坏;双向加载;位移场

**中图分类号:**TD823.83 **文献标志码:**A

## Similar simulation experiment of bi-directional loading for floor destruction rules in coal mining above aquifer

ZHAO Yi-xin<sup>1,2,3</sup>,JIANG Yao-dong<sup>1,3</sup>,LÜ Yu-kai<sup>3</sup>,CUI Zhi-jing<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083;2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China;3. School of Mechanics, Architecture and Civil Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** The mechanism of floor heave in the gob adjacent to the working face was analyzed. The aim was to understand the floor heave phenomena happened at No. 15423N working face in Jiulong Coal Mine, Fengfeng mining group. Core logging of floor strata and in-situ stress measurement near the investigated region were carried out. Moreover, the numerical simulation was used to obtain the in-situ stress of No. 15423N working face. Based on these data, a bi-directional loading similar simulation experiment was carried out to analyze the process and mechanism of floor heave of gob near working face above aquifer. A series of spring group were used to simulate the aquifer. The time-space evolution characteristics of stress and displacement field in floor strata were analyzed. The results could be used to explain the mechanism of water inrush accidents in Jiulong Mine.

**Key words:** similar simulation; aquifer; floor destruction; bi-directional loading; displacement field

煤层底板突水是严重影响我国煤矿资源安全开采的重要因素,高承压水体上大范围开采防治底板水已成为关键性难题。近年来,随着矿井开采深度的不断增加,煤层底板奥陶纪灰岩高承压水的危害逐渐加剧<sup>[1-4]</sup>。为此,众多学者对承压水上采煤底板破断规律进行了大量研究,得到许多有价值的结论<sup>[5-11]</sup>。由于该问题在理论研究方面的复杂性和现场观测方面

的困难性,使得通过相似模拟试验研究带压开采突水机理及底板破断规律成为有效的分析手段之一<sup>[12-15]</sup>。然而,在相似模拟试验研究中如何体现底板的应力环境、承压水作用及承压水在沿底板破裂带导升后其对应压力降低等特征是试验能否反映实际问题的关键。目前,对于承压水的模拟有多种方式,主要有采用橡胶水袋模拟含水层<sup>[16]</sup>或选用流固耦合

收稿日期:2012-07-26 责任编辑:常琛

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2010CB226804);国家自然科学基金资助项目(51174213);新世纪优秀人才基金资助项目(NCET-10-775)

作者简介:赵毅鑫(1977—),男,河北乐亭人,副教授。Tel:010-62339851, E-mail:zhaoyx@cumtb.edu.cn

相似材料直接用于承压水导通性试验<sup>[17]</sup>,其中承压水袋制作周期长、压力不易控制及无法模拟底板破坏后承压水导升而产生的赋水灰岩局部水压降低的特征;而选用特制的相似模拟材料并直接采用高压水进行模拟,对于设备的密封性和所选相似材料均有较高要求。另外,在相似模拟中同时施加承压水压力和地应力相对较为复杂,目前仍未见理想的试验系统。

本文主要针对峰峰矿区九龙矿深部承压水工作面15423N回采过程中底板破断规律进行相似模拟试验研究。基于现场地应力实测及数值模拟反演,获取该工作面处的地应力场特征;利用现场底板钻芯和岩石力学测试,获得了各岩层物理力学性质;在此基础上,利用双向加载相似模拟试验系统,结合基于独立弹簧组模拟承压水加载的试验装置,开展了考虑地应力影响条件下承压水上工作面开采底板运移规律的相似模拟试验研究。

### 1 工程背景

峰峰矿区是我国受承压水影响较严重的矿区,影响该矿区开采的含水层既有煤系含水层,也有煤系基底中奥陶系灰岩含水层。煤系含水层中尤其是大青灰岩含水层富水性强,水头压力大,易受奥陶系灰岩含水层的补给,具有疏降水量大、难以疏干的特点,直接威胁着下组煤的开采;而煤系基底奥陶系灰岩含水层属区域性含水层,具有厚度大、补给面积大、富水性强、水头压力大等特征,是影响开采的主要含水层,往往以底板突水的形式涌入矿井,且突水量大。

峰峰矿区九龙矿受深部奥灰水影响较为严重,目前该矿主要开采2号(大青)和4号(野青)煤层。然而,随开采深度增加,深部野青煤层工作面开采时,时常发生承压水上回采工作面底板破断、鼓起甚至突水等灾害现象。截至目前,九龙矿深部野青煤层工作面已回采完15413,15421和15431N三个工作面,每个工作面回采过程中均发生过1~2次底板突水灾害。现在正回采15423N工作面,该工作面埋深743.2~845.7 m,开采煤层厚度1.46 m,回采速度2 m/d,煤层倾角10°~13°,底板为细砂岩。回采中亦出现工作面底板突起、破断等现象。

为研究15423N工作面底板鼓起破断机理,开展了工作面底板岩芯钻取、编录和性质测定。编录结果表明:15423N工作面底板至奥灰含水层间距约100 m,共有34个岩层。工作面底板下方3个含水层,依次为:30.40 m处的山伏青含水层,水压为2~

3 MPa;66.00 m处的大青含水层,水压为5 MPa;104.10 m处的奥灰含水层,水压为9 MPa,如图1所示。

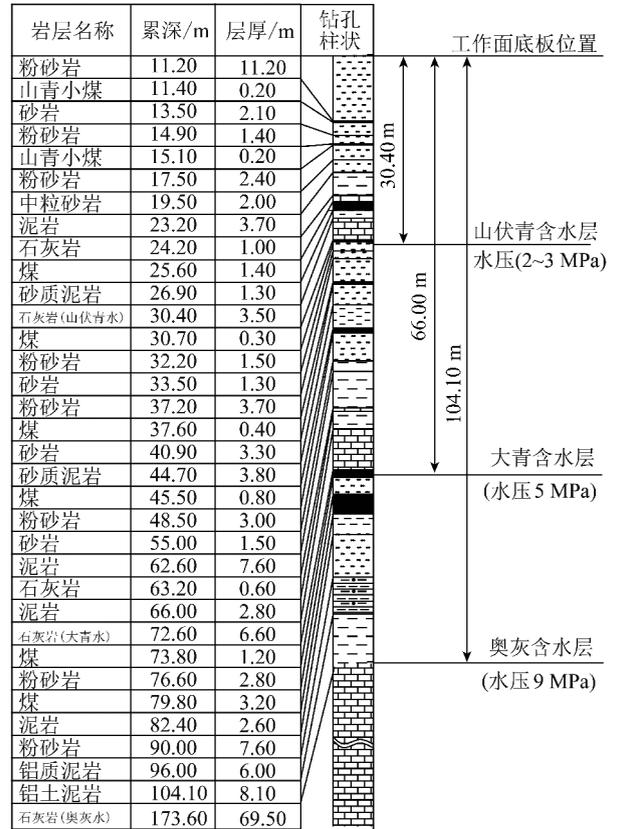


图1 底板岩层综合柱状图

Fig.1 Columnar section of floor strata

### 2 地应力测量及数值反演

为进一步分析九龙矿15423N工作面底板破坏机理,在其周边区域开展了地应力测量。测量发现:最大主应力为近水平方向,为1.2~1.8倍自重应力;最大水平主应力总体上为北西西-南东东向;垂直应力基本上等于上覆岩层自重。图2为4号测点应力解除曲线。周边区域测点地应力实测结果见表1。

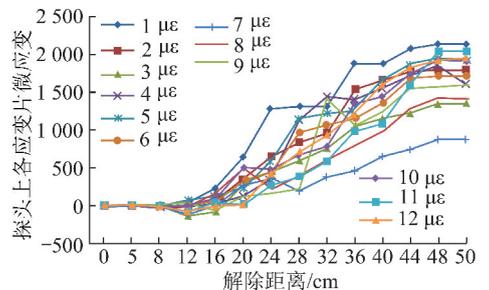


图2 九龙矿4号测点应力解除曲线

Fig.2 Stress relief curves of No.4 in-situ stress test station

根据周边区域地应力测量结果,采用ABAQUS模拟反演15423N地应力场特征,计算结果如图3所

表 1 九龙矿地应力测量结果

Table 1 Results of in-situ stress in Jiulong Coal Mine

| 测点  | 深度/<br>m | 主应力        | 主应力<br>值/MPa | 方位<br>角/(°) | 倾角/<br>(°) | 垂直应<br>力/MPa |
|-----|----------|------------|--------------|-------------|------------|--------------|
| 4 号 | 560      | $\sigma_1$ | 27.2         | 93          | -5         | 15.1         |
|     |          | $\sigma_2$ | 16.3         | 2           | -3         |              |
|     |          | $\sigma_3$ | 15.0         | 238         | -83        |              |
| 5 号 | 750      | $\sigma_1$ | 24.4         | 109         | -22        | 20.3         |
|     |          | $\sigma_2$ | 22.7         | -13         | -52        |              |
|     |          | $\sigma_3$ | 10.0         | 212         | -28        |              |

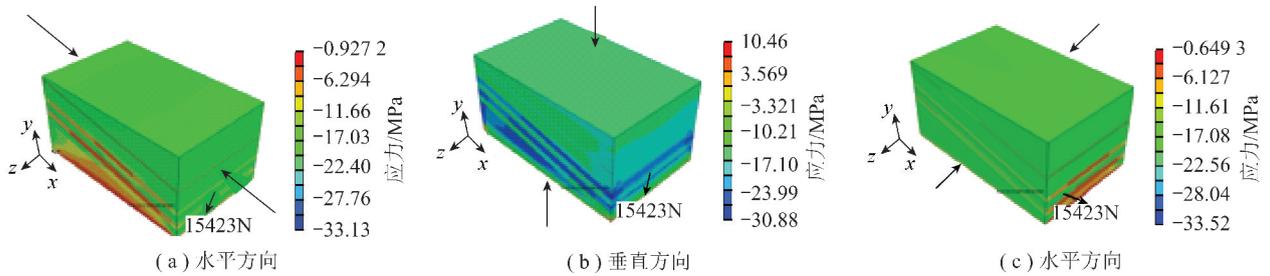


图 3 地应力反演结果

Fig. 3 The results of in-situ stress inversion

中,  $C_l$  为几何相似比;  $Y_m$  为模型高度;  $Y_y$  为实际高度。

(2) 时间相似:  $C_t = T_m/T_y = \sqrt{C_l} = 1/7.75$ , 其中,  $C_t$  为时间相似比;  $T_m$  为模型工作面回采时间;  $T_y$  为现场工作面实际回采时间;

(3) 容重相似比:  $C_\gamma = \gamma_m/\gamma_{yi} = 1/1.5$ , 其中,  $C_\gamma$  为容重相似比;  $\gamma_m$  为模型中第  $i$  层岩层的比重;  $\gamma_{yi}$  为实际该岩层的比重;

(4) 弹性模量与强度相似:  $C_E = C_\sigma = C_l C_\gamma = \frac{1}{100} \times$

$\frac{1}{1.5} = \frac{1}{150}$ , 其中,  $C_E$  为弹性模量相似比;  $C_\sigma$  为单轴抗压强度相似比。

根据实测结果, 试验中水平应力约是垂直应力的 1.3 倍, 即  $\sigma_h/\sigma_v \approx 1.3$ 。

实际模型制作材料主要包括细砂、石灰、石膏及水; 其中材料配比的含义为: 若配比为 6 : 7 : 3 时, 则细砂质量 : 胶 (包括石灰及石膏) 质量为 6 : 1, 而胶中石灰质量 : 石膏质量为 7 : 3; 模型材料详细参数及配比见表 2。

### 3.2 相似模拟试验台的构建

模型试验台由框架系统、加载系统和测试系统构成。试验台尺寸为 160 cm × 160 cm × 40 cm (长 × 高 × 宽), 4 个边界均布置有压头, 如图 4(a) 所示。模型中 4 号煤底板下 5, 10, 15 cm 处布置 3 层压力传感

器。分析发现: 15423N 工作面  $x$  轴方向水平应力介于 22.4 ~ 25.1 MPa,  $y$  轴方向水平应力介于 20.6 ~ 25.3 MPa,  $z$  轴垂直方向应力在 19.8 ~ 22.6 MPa, 水平应力为垂直向应力的 1.04 ~ 1.28 倍。

## 3 双向加载相似模拟试验

### 3.1 模拟试验相似比例的确定

根据相似试验原理, 结合实际情况, 确定试验各相似比如下:

(1) 几何相似:  $C_l = Y_m/Y_y = Z_m/Z_y = 1/100$ , 其

器, 每层设置 10 个测点, 具体位置及编号如图 4(b) 所示; 为采用数字散斑法观测开挖过程中模型表面整体位移场, 在模型表面随机布设了白色斑点。

模型加载由双向加载系统和弹簧组水压加载系统完成。试验中施加垂直载荷 2.82 kN 模拟上覆岩层自重, 水平载荷 3.67 kN, 且水平载荷约为垂直载荷的 1.3 倍。承压水加载装置采用 36 个特定刚度弹簧模拟。2 个弹簧一排, 焊接在一个小钢板上, 共 18 排, 每个弹簧上部均连接一个独立的加载板。这种加载方式既能有效地模拟承压水对底板岩层产生的垂直荷载, 又可模拟承压水上覆岩层鼓起、破断后发生的局部压力降低现象。按每隔 3 h 向前回采 4 cm 的进度模拟工作面开采, 采高 1.46 cm。模拟回采共计 35 次, 总长度为 140 cm。

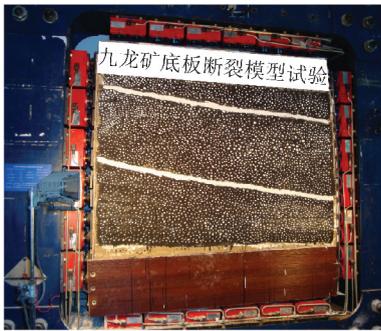
### 3.3 试验结果

分析相似模型中不同压力传感器变化特征可获得开采过程中底板岩层对于位置应力演化规律。图 5 为模型中最下层 3-1, 3-4 和 3-7 测点的应力随回采位置变化曲线, 若按工程现场尺度, 测点 3-1 距切眼 20 m、测点 3-4 距切眼 50 m、测点 3-7 距切眼 80 m。

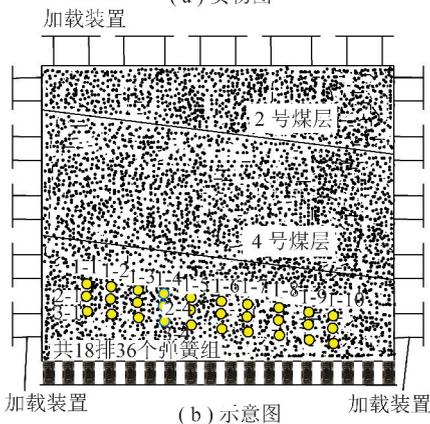
由图 5 可知: 工作面回采 10 m 时, 测点 3-1 应力为 3.988 4 MPa (拉应力为正值)、测点 3-4 应力为 -1.879 15 MPa (压应力为负值)、测点 3-7 应力为 -1.764 1 MPa; 回采 40 m 时, 测点 3-1 应力为

表2 材料参数及配比  
Table 2 Material parameters and of ratios

| 编号 | 岩性   | 累积厚度/cm | 总厚/cm | 层厚/cm  | 配比    | 质量/kg  |       |       |      |
|----|------|---------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|------|
|    |      |         |       |        |       | 砂      | 灰     | 膏     | 水    |
| 20 | 砂质岩  | 116.91  | 8.00  | 2×4    | 6:7:3 | 17.774 | 2.074 | 0.889 | 1.46 |
| 19 | 2煤   | 108.91  | 2.85  | 2.85×1 | 8:7:3 | 18.911 | 2.299 | 0.985 | 2.07 |
| 18 | 中砂岩  | 106.06  | 40.00 | 2×20   | 7:5:5 | 18.144 | 1.290 | 1.290 | 1.45 |
| 17 | 砂泥岩  | 66.06   | 4.20  | 2.1×2  | 8:7:3 | 19.354 | 1.693 | 0.726 | 1.52 |
| 16 | 野青灰岩 | 61.86   | 1.80  | 1.8×1  | 5:6:4 | 15.552 | 1.862 | 1.241 | 1.60 |
| 15 | 4煤   | 60.06   | 1.46  | 1.46×1 | 8:7:3 | 13.455 | 1.177 | 0.505 | 1.99 |
| 14 | 粉砂岩  | 58.60   | 11.40 | 1.9×6  | 8:8:2 | 17.510 | 1.751 | 0.438 | 1.38 |
| 13 | 砂岩   | 47.20   | 2.10  | 2.1×1  | 7:5:5 | 19.051 | 1.361 | 1.361 | 1.52 |
| 12 | 粉砂岩  | 45.10   | 1.40  | 1.4×1  | 9:8:2 | 13.064 | 1.045 | 0.261 | 1.02 |
| 11 | 砂岩   | 43.70   | 2.60  | 2.6×1  | 7:5:5 | 23.587 | 1.685 | 1.685 | 1.89 |
| 10 | 中粒砂岩 | 41.10   | 2.00  | 2×1    | 6:7:3 | 17.774 | 2.074 | 0.889 | 1.45 |
| 9  | 粉砂岩  | 39.10   | 1.50  | 1.5×1  | 6:5:5 | 13.330 | 1.111 | 1.111 | 1.01 |
| 8  | 砂岩   | 37.60   | 1.30  | 1.3×1  | 6:5:5 | 11.552 | 0.963 | 0.963 | 0.94 |
| 7  | 粉砂岩  | 36.30   | 3.70  | 1.85×2 | 6:5:5 | 16.441 | 1.370 | 1.370 | 1.34 |
| 6  | 粉砂岩  | 32.60   | 3.80  | 1.9×2  | 6:5:5 | 16.885 | 1.407 | 1.407 | 1.57 |
| 5  | 砂岩   | 28.80   | 6.50  | 2.17×3 | 6:5:5 | 19.284 | 1.607 | 1.607 | 1.27 |
| 4  | 中青灰岩 | 22.30   | 1.00  | 0.6×1  | 6:5:5 | 8.887  | 0.740 | 0.740 | 0.84 |
| 3  | 粉砂岩  | 21.70   | 7.60  | 2.53×3 | 6:5:5 | 22.484 | 1.874 | 1.874 | 1.84 |
| 2  | 铝质泥岩 | 14.10   | 6.00  | 2×3    | 6:5:5 | 17.774 | 1.481 | 1.481 | 1.45 |
| 1  | 铝土泥岩 | 8.10    | 8.10  | 2×4    | 6:5:5 | 17.774 | 1.481 | 1.481 | 1.45 |



(a) 实物图



(b) 示意图

图4 相似模拟试验台示意

Fig. 4 Schematic diagram of similar simulation experiment

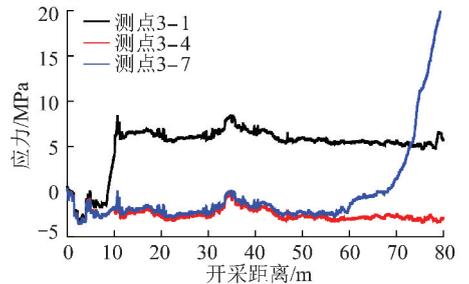


图5 工作面底板第3排3个测点应力变化曲线

Fig. 5 Stress curves of three monitoring points of floor

6.481 15 MPa、测点 3-4 应力为-2.070 9 MPa、测点 3-7 应力为-1.725 75 MPa;回采 70 m 时,测点 3-1 应力为 5.484 05 MPa、测点 3-4 应力为-2.607 8 MPa、测点 3-7 应力为 1.418 95 MPa。当回采至 34.8 m 处,测点 3-1 拉应力达最大值 8.437 MPa;测点 3-4 在工作面回采过程中基本均受压;回采 80 m 时,测点 3-7 拉应力达最大值 19.673 55 MPa。工作面回采过各监测点时,监测点处拉应力达到最大值,说明此时底板易受拉破断。

为深入分析回采时底板不同深度处的应力演化特征,选取测点 1-4(4号煤下方 5 m 处)、测点 2-4(4号煤下方 10 m 处)、测点 3-4(4号煤下方 15 m 处)进行

研究。工作面回采 10.1 m 时,3 个测点应力均发生突增;测点 1-4 应力为 0.536 9 MPa、测点 2-4 应力为 1.879 15 MPa、测点 3-4 应力为 -1.879 15 MPa。工作面回采 45.6 m 时,3 测点应力再次明显波动;测点 1-4 应力为 0.268 45 MPa、测点 2-4 应力为 2.761 2 MPa、测点 3-4 应力为 -2.914 6 MPa,结果如图 6 所示。

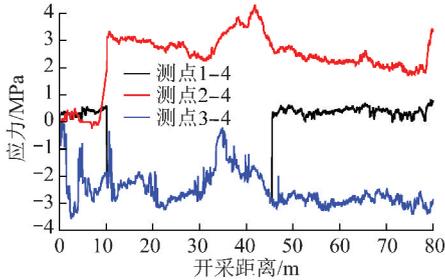


图 6 工作面底板不同深度测点应力变化曲线  
Fig. 6 Stress curves at different depths monitoring points of working face floor

分析发现:距承压水最近的岩层受到的拉应力最小、中间位置受到拉应力最大、离承压水距离最远位置岩层所受拉应力居中,其主要因底板各层位岩性不同和复合加载状态所造成。在工作面回采到监测位置前方约 30 m 距离时,底板应力开始初步增加,当回采至监测点前 10 m 处时,底板应力激增;工作面回采到监测点正上方位置附近时,底板应力再次突增,随后应力变化趋于平稳。

图 7 为不同开采距离时试验模型实物图。不难发现:随开采 4 号煤底板的位移演化特征很难直接被肉眼识别<sup>[18]</sup>。因此,采用数字散斑法对图像进行分析,得到各开采阶段模型整体位移场云图(图 8)。由图 8 可知:当工作面回采 24 m 时,底板位移变化开始显现,回采 84 m 时,底板位移场已非常显著。为较全面掌握回采过程中 4 号煤底板位移场演化规律,提取工作面开采至 104 m 位置时,整体位移场等值线如图 9 所示。

由图 9 可知:开采到 104 m 位置处,4 号煤层工作面底板下覆岩层整体呈向上鼓起状态,且底鼓区域并非均匀,在开采 45.5 ~ 56.0 m 和开采 77 ~ 97 m 下覆岩层向上鼓起较为集中。同时,接近下覆承压水岩层底鼓量较大,距离远的岩层底鼓量较小。

为研究工作面下方同等深度岩层随开采进行的位移变化规律,选取工作面下方 10 m 处,距开切眼 36,76,104 m 三个测点进行研究,观测结果如图 10 所示。可以发现:距开切眼 36 m 处监测点在回采至 0 ~ 36 m 阶段,底板位移基本为 0 m,回采 36 m 时,底板向上位移 0.346 1 m;在回采 36 ~ 60 m 阶段,底板缓慢上鼓,在回采 60 m 时达 0.424 6 m;回采至 60 ~

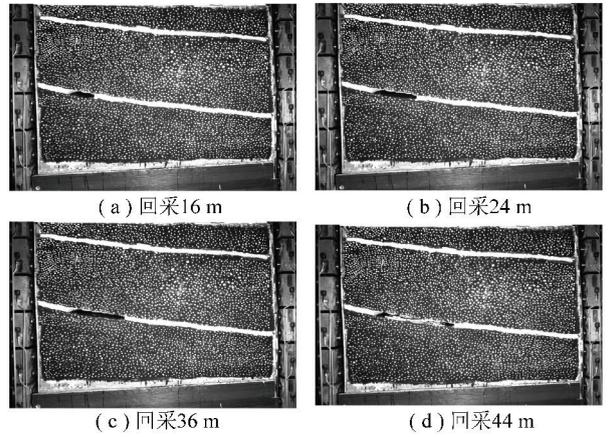


图 7 模型回采部分过程

Fig. 7 Some pictures of model during test process

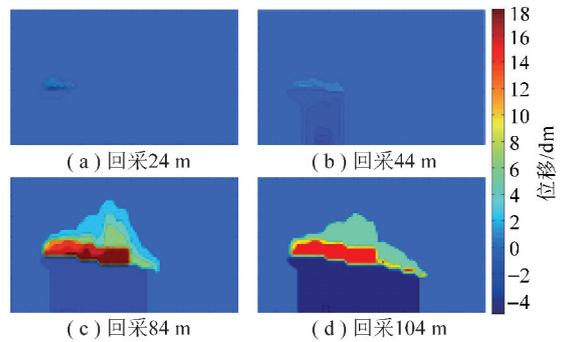


图 8 煤层回采过程部分阶段全场位移场

Fig. 8 Displacement field in the process of coal seam mining

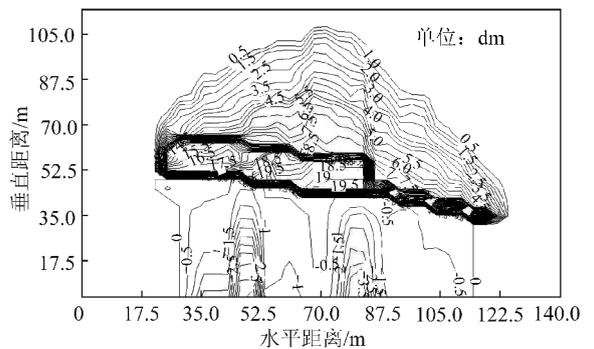


图 9 开采 104 m 时全场位移等值线

Fig. 9 Contours of whole field displacements at extraction distance 104 m

64 m 阶段,底板快速上鼓;回采 64 ~ 80 m 阶段,底板平缓上鼓;回采 80 ~ 84 m 阶段,底板再次急剧上鼓,在回采 84 m 时达 0.613 8 m,随后底板仍保持平缓上升。而距开切眼 76 m 底板监测点位移变化更为急剧:回采 76 m 时,底板向上位移达 0.385 7 m,回采 76 ~ 100 m 阶段,底板快速上鼓,回采 100 m 时达到 0.558 6 m,回采 100 ~ 104 m 阶段,底板急剧上鼓,且在回采 104 m 时达 0.665 m;距开切眼 104 m 处监测点上鼓位移在回采 96 m 时达 0.456 7 m,回采 96 ~

104 m 阶段,底板急剧上鼓,在回采 104 m 时达最大值 0.620 7 m。

分析回采与底部岩层运移关系不难发现:不论回采工作面位置,其附近底板各岩层均有上移现象;在回采工作面后方 30 m 左右,底板各测点处鼓起量明显增加,该结果与井下现场观测结果一致。

与单向加载相似模拟试验结果<sup>[12]</sup>相比,双向加载模型试验所揭示的底板应力及位移变化规律基本相同,即回采至各测点前方 10 m 范围时,底板应力发生突增;回采至各测点附近,采空区底板发生整体上鼓现象。但双向加载模型试验中 4 号煤底板受水平荷载和承压水向上推力联合作用,底板破坏范围和程度均较单向加载模型试验更为明显,即在深部承压水上采煤过程中,水平构造应力在底板失稳破坏过程中发挥着关键作用。

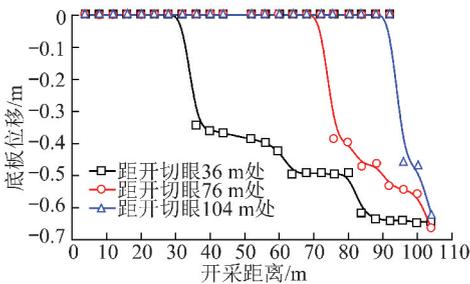


图 10 工作面底板下方 10 m 处各测点位移变化曲线

Fig. 10 Displacement curves of monitoring points at displacement of 10 m from the working face floor

## 4 结 论

(1) 工作面回采对底板各岩层的超前影响范围约为 30 m,即工作面前方 30 m 处底板内测点应力表现出初始增压状态;底板应力开始初步增加,当回采至监测点前 10 m 处时,底板应力激增;而当回采到监测点正上方时,底板各岩层应力突增;15423N 工作面底板距承压水最近的岩层受到的拉应力最小、中间位置受到拉应力最大、离承压水距离最远位置岩层所受拉应力居中,其主要因底板各层位岩性不同和复合受载状态所造成。

(2) 采面后方采空区内 30 m 处底板岩层不同深度的鼓起位移最为明显;随开采推进顶板岩层冒落后,采空区底板岩层受上方冒落区岩层压力,鼓起位移逐渐减小,底板岩层逐渐稳定,该结果与井下观测结果一致。

(3) 基于数字散斑分析的全场位移观测发现:随承压工作面回采,底板呈现整体上移趋势,且随回采距离增大,底臃量也越大;然而,底板上移集中区域是非均匀分布的,其主要由工作面回采距离、底板岩性

和底板受力状态综合决定;同时,接近承压水层区域底臃量较大,远离承压水层区域底臃量较小。

(4) 与针对相同问题的单向加载相似模拟试验结果相比,双向加载相似模拟试验中煤层直接底和基本底岩层受拉应力更为明显;煤层开挖区顶、底板因受水平构造应力影响向采空区收敛变形加剧。

感谢深部岩土力学与地下工程国家重点实验室的李德建老师对本试验的支持和协助。

## 参考文献:

- [1] 彭苏萍,王金安. 承压水体上安全采煤[M]. 北京:煤炭工业出版社,2001: 91-111.  
Peng Suping, Wang Jin'an. Safety coal mine above the confined aquifer[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2001: 91-111.
- [2] 王作宇,刘鸿泉. 承压水上采煤[M]. 北京:煤炭工业出版社,1992: 5-8.  
Wang Zuoyu, Liu Hongquan. Coal mining above confined quifer[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1992: 5-8.
- [3] 施龙青,韩进. 底板突水机制及预测预报[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2004: 85-91.  
Shi Longqing, Han Jin. Floor water inrush mechanism and prediction[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2004: 85-91.
- [4] Peng Suping, Zhang Jincai. Engineering geology for underground rocks[M]. Berlin: Springer, 2009.
- [5] Zhang Jincai, Shen Baohong. Coal mining under aquifers in China: a case study[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41: 629-639.
- [6] Zhang Jincai. Investigations of water inrushes from aquifers under coal seams[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2005, 42: 350-360.
- [7] Wang J A, Park H D. Coal mining above a confined aquifer[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2003, 40: 537-551.
- [8] 王作宇,刘鸿泉. 承压水上采煤学科理论与实践[J]. 煤炭学报, 1994, 19(1): 40-47.  
Wang Zuoyu, Liu Hongquan. Theory and practice of coal mining discipline on confined water[J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(1): 40-47.
- [9] 武强,张志龙,马积福. 煤层底板突水评价的新型实用方法 I-主控指标体系的建设[J]. 煤炭学报, 2007, 32(1): 42-47.  
Wu Qiang, Zhang Zhilong, Ma Jifu. A new practical methodology of the coal floor water bursting evaluating I: the master controlling index system construction[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 42-47.
- [10] 黎良杰,钱鸣高,李树刚. 断层突水机制分析[J]. 煤炭学报, 1996, 21(2): 119-123.  
Li Liangjie, Qian Minggao, Li Shugang. Mechanism of water-inrush through fault[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(2):

- 119-123.
- [11] 李白英. 预防矿井底板突水的“下三带”理论及其发展与应用[J]. 山东矿业学院学报;自然科学版,1999,18(4):11-18.  
Li Baiying. “Down three zones” in the prediction of the water-inrush from coal bed floor aquifer theory, development and application [J]. Journal of Shandong Mining Institute; Natural Science, 1999, 18(4):11-18.
- [12] 姜耀东,吕玉凯,赵毅鑫,等. 承压水上开采工作面底板破坏规律相似模拟试验[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(8):1571-1578.  
Jiang Yaodong, Lü Yukai, Zhao Yixin, et al. Similar simulation test for breakage law of working face floor in coal mining above aquifer [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8):1571-1578.
- [13] 王金安,魏现昊,纪洪广. 双承压水间采煤顶底板破断及渗流规律[J]. 煤炭学报,2012,37(6):891-897.  
Wang Jin'an, Wei Xianhao, Ji Hongguang. Rupture and seepage law of roof-floor strata caused by coal mining between double-bearing aquifers [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(6):891-897.
- [14] 胡耀青,严国超,石秀伟. 承压水上采煤突水监测预报理论的物理与数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(1):9-15.  
Hu Yaoqing, Yan Guochao, Shi Xiuwei. Study on physical and numerical simulation of water inrush prediction theory for coal mining above confined aquifer [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1):9-15.
- [15] 王经明. 承压水沿煤层底板递进导升突水机制的模拟与观测[J]. 岩土工程学报,1999,21(5):546-549.  
Wang Jingming. In-situ measurement and physical analogue on water inrush from coal floor induced by progressive intrusion of artesian water into protective aquiclude [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(5):546-549.
- [16] 冯梅梅,茅献彪,白海波,等. 承压水上开采煤层底板隔水层裂隙演化规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(2):336-341.  
Feng Meimei, Mao Xianbiao, Bai Haibo, et al. Experimental research on fracture evolution law of water-resisting strata in coal seam floor above aquifer [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2):336-341.
- [17] 弓培林,胡耀青,赵阳升,等. 带压开采底板变形破坏规律的三维相似模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(23):4396-4402.  
Gong Peilin, Hu Yaoqing, Zhao Yangsheng, et al. Three-dimension simulation study on law of deformation and breakage of coal floor on mining above aquifer [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23):4396-4402.
- [18] 宋义敏,马少鹏,杨小彬,等. 岩石变形破坏的数字散斑相关方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(1):170-175.  
Song Yimin, Ma Shaopeng, Yang Xiaobin et al. Experimental investigation on failure of rock by digital speckle correlation methods [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1):170-175.