

许满贵,魏攀,李树刚,等.“三软”煤层综采工作面覆岩运移和裂隙演化规律实验研究[J].煤炭学报,2017,42(S1):122-127. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1518

Xu Mangui, Wei Pan, Li Shugang, et al. Experimental study on overburden migration and fracture evolution law of “three soft” coal seam fully mechanized working-face[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S1): 122-127. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1518

## “三软”煤层综采工作面覆岩运移和裂隙演化规律实验研究

许满贵<sup>1,2</sup>, 魏攀<sup>1,2</sup>, 李树刚<sup>1,2</sup>, 王娇娇<sup>1,2</sup>

(1. 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 教育部西部矿井开采及灾害重点实验室, 陕西 西安 710054)

**摘要:**针对“三软”煤层综采工作面卸压瓦斯治理问题,采用物理相似模拟和 UDEC 数值模拟实验研究了工作面受采动影响后采场覆岩运移规律。同时,采用现场仰斜注水钻孔法和高位钻孔瓦斯抽采浓度监测法对实验结果进行验证。结果表明:在相似材料模拟实验中,对观测面刷白后,能更加清晰地观测到裂隙发育情况;相似材料模拟和 UDEC 模拟结果基本吻合,垮落带和断裂带最大高度分别为 12 和 38 m,则高位钻孔最佳布孔垂距为 20~26 m;现场仰斜注水表明垮落带和断裂带最大高度分别为 10 和 39 m;现场高位钻孔瓦斯抽采浓度监测结果表明,1-2 和 1-3 高位钻孔瓦斯抽采浓度最大,其垂距分别为 24.4 和 20.5 m,验证了物理相似模拟和数值模拟实验方法和结果的正确性和科学性。

**关键词:**“三软”煤层;相似材料模拟;UDEC 数值模拟;现场观测

中图分类号:TD325

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2017)S1-0122-06

## Experimental study on overburden migration and fracture evolution law of “three soft” coal seam fully mechanized working-face

XU Man-gui<sup>1,2</sup>, WEI Pan<sup>1,2</sup>, LI Shu-gang<sup>1,2</sup>, WANG Jiao-jiao<sup>1,2</sup>

(1. School of Safety Science and Engineer, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of West Mines and Hazard Prevention, Ministry of Education, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** For the pressure relief gas governance problems of “three soft” coal seam fully mechanized working-face, a similar physical simulation and UDEC numerical simulation experiments have been conducted to research the stope fracture evolution law of the face affected by mining. At the same time, the field slating backward water injection method and the field high level borehole gas drainage concentration monitoring method were used to verify the experiment results. The results show that the fractured situation can be observed more clearly when the observation plane is white-washed in the similar material simulation experiment, and the similar material simulation is basically consistent with UDEC simulation results. The maximum height of caving zone and fractured zone are 12 m and 38 m, respectively, the best vertical distance between the two bores of high level borehole is 20-26 m. Water injection by slating backward at field indicates the maximum height of caving zone and fractured are 10 m and 39 m, respectively. The results of field high level borehole gas drainage concentration monitoring manifests that 1-2 and 1-3 high level borehole gas drainage concentration is the maximum, which vertical distances are 24.4 and 20.5 m, respectively. It also verified the correct-

收稿日期:2016-10-27 修回日期:2016-12-22 责任编辑:常琛

基金项目:国家自然科学基金科学仪器基础研究专项资助项目(51327007);国家自然科学基金资助项目(51174157)

作者简介:许满贵(1971—),男,陕西宝鸡人,教授,博士。Tel:029-85587450, E-mail:191551709@qq.com

ness and scientificity of similar physical simulation and numerical simulation experiment methods and results.

**Key words:** “three soft” coal seam; similar material simulation; UDEC numerical simulation; field observation

煤层在开采过程中,采空区上覆岩层在垂直方向自下而上形成垮落带、断裂带和弯曲下沉带,简称顶板“三带”<sup>[1-3]</sup>。确定工作面上覆岩“三带”高度,对于含瓦斯煤层在开采过程中卸压瓦斯治理有着十分重要的意义。近年来,我国学者<sup>[4-11]</sup>主要采用理论计算、数值模拟、物理相似模拟实验及现场实测等方法,研究采场覆岩运移和断裂带演化规律,为矿井瓦斯治理提供了切实可行的理论和依据。然而,“三软”煤层渗透率低、百米钻孔瓦斯流量衰减系数小和瓦斯含量分布不均匀使得本煤层抽采可行性较低,而且对“三软”煤层综采工作面覆岩裂隙运移和裂隙演化规律的研究和报道不多见,导致“三软”煤层综采工作面卸压瓦斯抽采很难达到预期效果。

“三软”煤层是指顶板不稳定易冒落、煤层松软坚固性系数小易片帮、底板软抗压强度小、易底臃<sup>[12]</sup>。由表1中煤、岩样抗压强度可知山阳煤矿1501综采面主采5号煤层,为典型“三软”煤层。本文以此为工程背景,采用物理相似模拟和 UDEC 数值模拟方法,研究了采场覆岩运移和裂隙演化规律,得出了“三软”煤层综采采动“三带”高度的实验值,通过现场仰孔注水数据和高位钻孔抽采浓度监测数据对比分析,表明基于采场覆岩运移规律的物理相似模拟实验和 UDEC 数值模拟实验在“三软”煤层综采面的可行性和科学性。同时,在物理相似模拟实验中,将模型观测面整体刷白后,可更加清晰观测煤层回采过程中裂隙变化情况,也不影响实验结果的正确性。

表1 山阳煤矿煤、岩样力学参数测试结果

Table 1 Test results of coal and rock mechanics parameters of Shanyang Coal Mine

岩层类别	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	泊松比	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
顶板	1.382	23.351	24.162	5.86	29.81	0.264	1924
5号煤层	0.641	6.213	9.867	2.21	24.66	0.286	1395
底板	1.421	21.768	20.198	5.74	28.88	0.288	1987

## 1 “三软”煤层采动覆岩运移及裂隙演化物理相似模拟实验

### 1.1 相似材料模拟参数

相似模拟实验以相似理论为基础,采用二维平面模型,沿煤层走向对工作面走向剖面进行开挖模拟,模型铺设高度大于15倍采高时,上覆岩层采用物理相似的配重实现均匀加载。模型几何、时间、容重和泊松比相似常数按实验要求选择,应力及强度相似常数根据相似定理进行确定,最终得到模型的相似常数见表2。

表2 模拟实验主要相似常数

Table 2 Main constants for similar simulation experiment

模型尺寸/ (mm×mm×mm)	相似常数					
	几何	时间	容重	泊松比	应力	强度
3 000×200×1 300	100	10	1.5	1.0	150	150

### 1.2 岩层岩性配比及层厚

山阳煤矿1501工作面主采5号煤层平均厚4 m,平均倾角为3°,工作面倾向长150 m,走向长度2 500 m,平均埋深310 m。根据综合柱状图和有

关计算得到实验模型配比见表3。

表3 实验模型配比

Table 3 Ratio calculation for experiment model

序号	层位	模型厚度/cm	沙子/kg	石膏/kg	大白粉/kg	煤灰/kg
1	5号煤层	4	4.239	0.188	0.754	4.239
2	细粒砂岩	3	8.243	0.471	0.707	
3	砂质泥岩	2	8.373	0.419	0.628	
4	细粒砂岩	2	8.243	0.471	0.707	
5	4号煤	1	4.239	0.188	0.754	4.239
6	中粒砂岩	17	8.243	0.353	0.824	
7	粉砂岩	4	8.243	0.236	0.942	
8	砂质泥岩	9	8.373	0.419	0.628	
9	中粒砂岩	5	8.243	0.353	0.824	
10	粉砂岩	12	8.243	0.236	0.942	
11	砂质泥岩	14	8.373	0.419	0.628	
12	细粒砂岩	7	8.243	0.471	0.707	
13	砂质泥岩	4	8.373	0.419	0.628	
14	粉砂岩	20	8.243	0.236	0.942	
15	砂质泥岩	26	8.373	0.419	0.628	

本次试验以细沙为骨料,石膏和大白粉作为胶结物,云母模拟原生分层。在模型铺设中,基岩部分以

1 cm 作为一层铺设,并且做节理与分层处理。

### 1.3 物理相似模拟实验方案

实验采用西安科技大学西部煤矿开采及灾害防治重点实验室实验平台,开采层铺设上覆岩 126 m,其上 180 m 岩层采用物理相似的配重实现均匀加载,模型两边各留 30 cm 煤柱,开切眼为 8 cm,模型采高 4 cm,每次开挖 2 cm,模型测点布置及开采方式如图 1 所示。

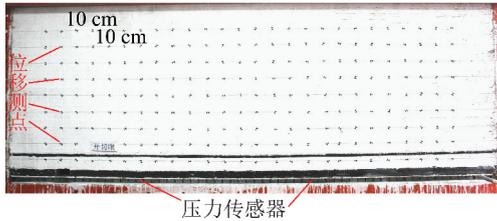


图 1 模型测点及开采方式布置示意

Fig. 1 Measuring points layout and mining method

为研究采场上覆岩层运移及裂隙发育规律,主要采取以下实验方法:

(1) 采用大白粉和石膏水溶液将观测面均匀刷白,以便更清晰地观测裂隙的发育。

(2) 模型底层铺设一层压力传感器,记录煤层开采过程中工作面矿压显现。

(3) 观测面设置 9 排观测线,每排观测线设置 26 个观测点,用于记录煤层采动过程中采场上覆岩层下沉量。

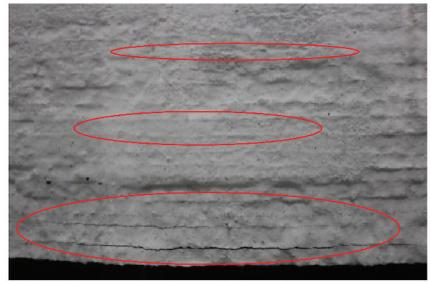
(4) 实验现象以及裂隙发育情况采用拍照和钢尺实测。

根据几何相似比和时间相似常数确定开挖步距和开挖时间间隔。如图 2 所示,在每次开挖完成后,待岩层垮落稳定后拍照记录,在遇到工作面来压等上覆岩层发生巨大运动时,采用钢尺测量每个位移观测点下沉量、垮落带、断裂带高度。

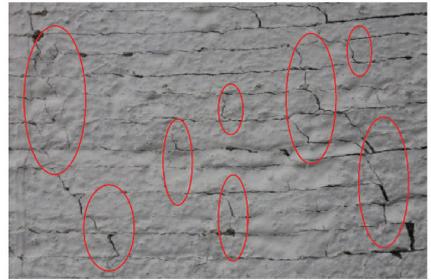
### 1.4 物理相似材料模拟结果

通过对实验观测面刷白后,在实验过程中可清晰观测到开挖后裂隙的发育情况,同时观测到上覆岩层依次发生离层→下沉→下沉量增大→断裂等实验现象。采场上覆岩层发生大范围移动、变形、断裂的直接原因是煤层采动诱发的横向裂隙和纵向裂隙相互贯通,因此,可根据观测到的离层裂隙和纵向裂隙发育情况判断覆岩是否将要断裂或垮落。横向裂隙和纵向裂隙分别如图 2(a),(b)所示。

工作面回采过程中覆岩破坏特征如图 3 所示,从图 3 可以看出:工作面推进 22 m 之后,离层裂隙不断增大;推进至 26 m 时,上部基本顶岩层达到极限,基本顶断裂下沉,出现较大范围冒落,工作面初次来压显现,离层裂隙发育至煤层顶板 19.8 m 处,空洞高度



(a) 横向裂隙



(b) 纵向裂隙

图 2 裂隙图

Fig. 2 Graph of fracture

4 m,岩梁宽度为 15.5 m,如图 3(a)所示。工作面由 26 m 推进到 34 m 过程中,顶板岩层随采随垮,悬空基本顶发生断裂,表明第 1 次周期来压显现,离层裂隙发育至距煤层顶板 21.5 m 处,空洞高度为 3.8 m,岩梁宽度为 15.5 m,如图 3(b)所示。工作面推进 42 m 时,发生第 2 次周期来压,空洞高度为 2 m,空洞处顶板部分形成铰接结构,如图 3(c)所示。推进至 50 m 时,工作面发生第 3 次周期来压,空洞高度为 1.8 m,空洞处岩层已完全铰接,如图 3(d)所示。工作面推进 58 m 时,工作面第 4 次周期来压显现,空洞高度为 1 m,采空区垮落岩石逐渐开始压实,如图 3(e)所示。工作面推进 68 m 时,工作面第 5 次周期来压显现,空洞高度为 0.4 m,如图 3(f)所示。工作面推进 80 m 时,工作面第 6 次周期来压显现,如图 3(g)所示。工作面推进 88 m 时,工作面第 7 次周期来压显现,裂隙闭合,采空区已被逐渐压实,离层裂隙发育至距煤层顶板 63 m 处,破断裂隙发育至距煤层顶板 57 m 处,如图 3(h)所示。

发生第 7 次周期来压后,采空区覆岩在采动过程中基本趋于稳定状态,平均来压步距为 8 m。实验回采结束后,通过测量可得到工作面垮落带最大高度为 9 m,断裂带高度为 34 m。由于“三软”煤层特性,煤层及顶、底板岩层力学性能差,抗拉、抗剪强度较小,岩层易断裂,不易形成铰接结构。因此,根据以上实验现象可见“三软”煤层垮落带垮落岩层较为破碎,裂隙更为发育,且工作面初次来压步距及周期来压步距较小。

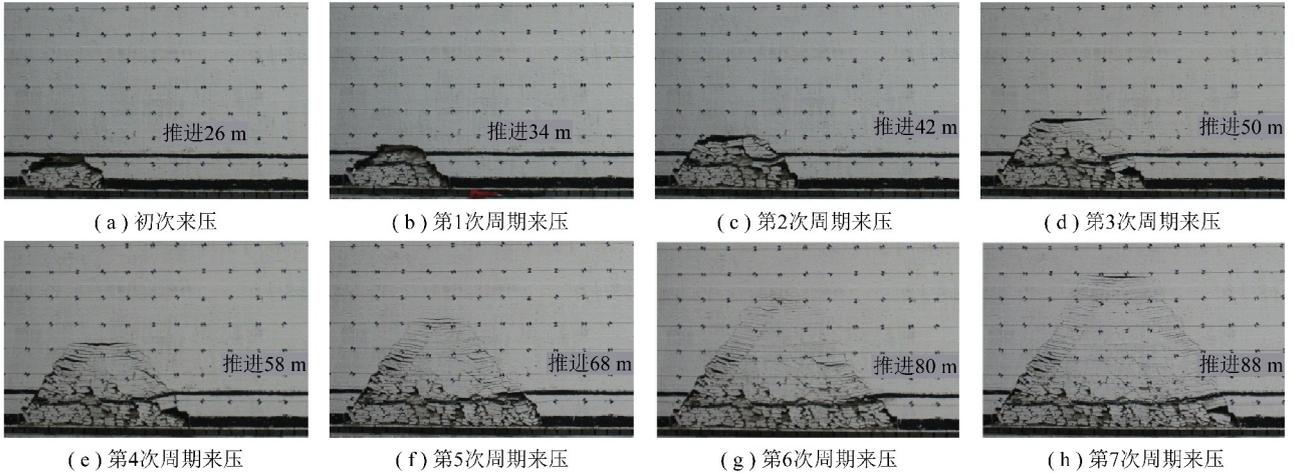


图 3 相似模拟覆岩垮落过程

Fig. 3 Process of overlying strata collapse by the physical similar simulation test

## 2 “三软”煤层采动覆岩运移和裂隙演化运移规律数值实验

### 2.1 数值模型

根据实验目的及数值模拟软件特点,选取 UDEC 离散元数值模拟软件对“三软”煤层综采工作面采场覆岩破坏特征进行模拟。数值模拟模型根据物理相似模拟实验模型建立对应的数值模拟模型,节理参数选取采用 UDEC 节理模型中的库伦滑动理论,利用正交实验法取值,采用直观分析法分析模拟结果。模型节理力学参数见表 4。

### 2.2 覆岩破坏特征

工作面回采过程中采场覆岩破坏特征如图 4 所示。从图 4 可以看出工作面推进至 36 m 时,顶板周

表 4 节理力学参数

Table 4 Joint mechanical parameters

节理类型	法向刚度/ (MPa · m <sup>-1</sup> )	切向刚度/ (MPa · m <sup>-1</sup> )	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa
假节理	9×10 <sup>9</sup>	9×10 <sup>9</sup>	38	1
真节理	9×10 <sup>9</sup>	7×10 <sup>9</sup>	9	0

期垮落,裂隙逐渐向上发育,工作面第 1 次周期来压;工作面推进 54 m 时,工作面第 3 次周期来压,亚关键层破断;工作面推进 90 m 时,工作面第 7 次周期来压,主关键层破断,裂隙闭合,地表下沉形成盆地,采空区被逐渐完全压实。在工作面第 7 次周期来压后,工作面来压趋于稳定,由此可直接得到垮落带最大高度为 12 m,断裂带最大高度为 38 m。

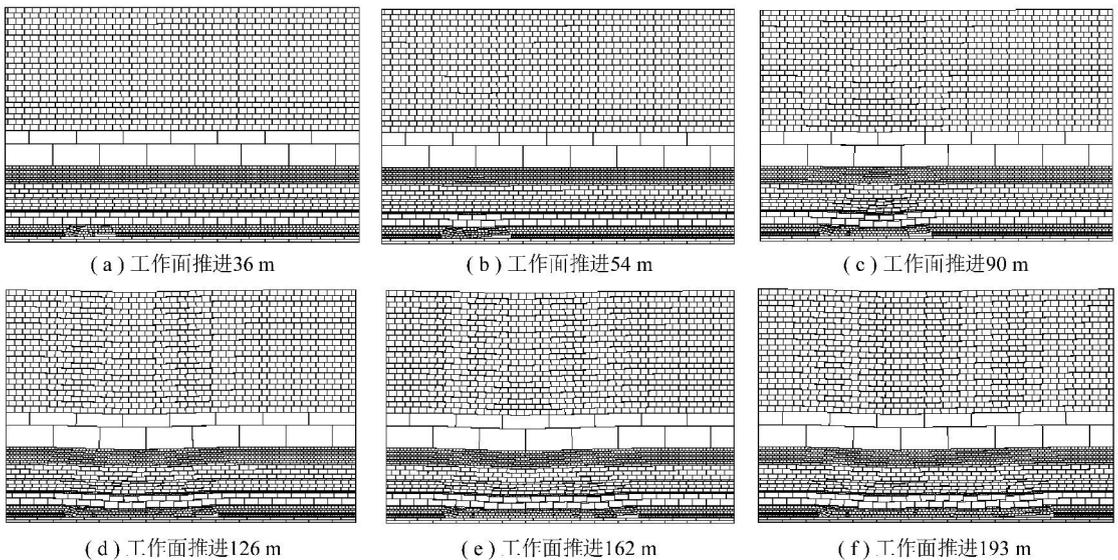


图 4 UDEC 数值模拟覆岩垮落过程

Fig. 4 Process of overlying strata collapse by using the UDEC numerical simulation

### 3 实验结果的现场验证

试验工作面在回采过程中,工作面仅通过通风已远远不能解决瓦斯涌出问题,且工作面上隅角瓦斯严重超限。根据上隅角瓦斯来源,煤矿决定采用高位钻孔对采空区卸压瓦斯进行抽采。通过物理相似材料模拟实验和 UDEC 数值模拟实验结果得到试验“三软”煤层综采工作面垮落带最大高度为 12 m,断裂带最大高度为 38 m。因此根据实验结果,高位钻孔终孔位置距煤层顶板 20~26 m。

#### 3.1 测试原理及方法介绍

##### (1) 测试原理

采用仰斜钻孔注水法是基于采场受采动影响,采空区覆岩垮落形成“竖三带”,因而根据其不同层位的裂隙发育的差异性,可通过钻孔中水在“三带”中的渗透参数来分析裂隙的发育程度,确定“三带”高度。

根据物理相似模拟实验、UDEC 数值模拟实验和仰斜钻孔注水确定的采场覆岩“三带”高度,确定高位钻孔布孔参数,在现场施工高位钻孔对卸压瓦斯抽采,采用瓦斯浓度传感器对各个高位钻孔瓦斯抽采浓度的实时监测,再根据钻孔浓度实时变化情况来判断结论的正确性,同时亦可优化高位钻孔布置参数,提高抽采效率。

##### (2) 钻孔布置

在回风巷距采煤工作面 30 m 处回采煤壁侧施工一个长 5 m、宽 4 m、高 4 m 的钻场,在钻场内向工作面采空区施工两个仰斜钻孔,钻孔开孔高度为 1.6 m 左右,孔径为 113 mm,封孔段孔径为 175 mm,仰斜钻孔参数表如表 4 中 1 号、2 号钻孔所示。1 号和 2 号钻孔垂向探测范围为 7.0~45.9 m,实验得出断裂带最大值为 38 m,因此,本探测方案能覆盖断裂带全范围。

另外,采用此钻场作为高位瓦斯抽采钻场,再施工 1-1、1-2、1-3 和 1-4 高位钻孔对采空区卸压瓦斯抽采,并在每个钻孔中安装瓦斯浓度传感器,钻孔布置参数见表 5。

表 5 钻孔参数

Table 5 Parameters of the drillings

用途	孔号	倾角/ (°)	夹角/ (°)	孔深/ m	距顶板垂 距/m
注水钻孔	1	13	3	65	14.6
	2	35	6	80	45.9
高位钻孔	1-1	30	15	60	30.0
	1-2	24	12	60	24.4
	1-3	20	9	60	20.5
	1-4	16	6	60	16.5

##### (3) 测试方法

施工钻场及 1 号、2 号仰斜注水钻孔,确保两个钻孔穿过预测的垮落带和断裂带,测试段采用封孔器封闭,钻孔中注入静压水,主水管接口处安装流量计,通过分析封闭钻孔段水的压力和流量,推断封闭区段内孔壁裂隙发育情况,再根据孔壁裂隙发育情况判断垮落带和断裂带高度。

通过对 1-1、1-2、1-3 和 1-4 高位钻孔内瓦斯抽采浓度实时监控数据分析,判断垮落带和断裂带高度确定的正确性。

#### 3.2 测试结果分析

##### (1) 仰斜钻孔注水法结果分析

1 号、2 号仰斜钻孔注水流量随钻孔垂深变化曲线如图 5 所示。1 号钻孔探测范围为 7.9~14.6 m,1 号钻孔在 8 m 处钻孔注水流量稍微减小,是因为钻孔刚开始进入采场裂隙场内,随着钻孔深度的增加,在 10 m 处出现了一个突变点,此后流量减小量较小。2 号钻孔探测范围为 22~38 m,2 号钻孔在 22 m 后进入观测范围内,钻孔内出现采动裂隙,因此钻孔流量开始减小,且减小幅度较大,在 28 m 处出现较大突变点,之后注水量基本呈线性减少。根据采空区覆岩“三带”裂隙发育程度及其空间关系,在垮落带和断裂带的分界面会发生流量的突然变化,断裂带与弯曲下沉带之间的流量变化缓慢,且较发育的断裂带的静压注水流量一般大于 60.0 L/min,因此,根据仰斜钻孔注水法测定垮落带的高度为 10 m,断裂带最大高度为 39 m。

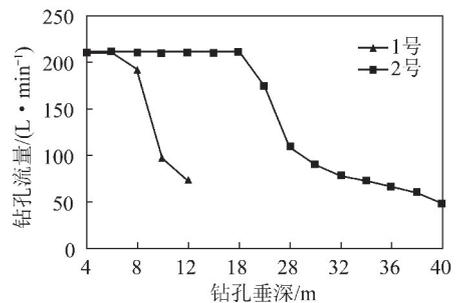


图 5 钻孔流量变化曲线

Fig. 5 Change curves of the volume of the drillings

##### (2) 高位钻孔浓度分析法结果分析

根据表 4 高位钻孔参数施工钻孔对工作面采空区断裂带卸压瓦斯进行抽采,一个星期内各个钻孔每班平均瓦斯浓度如图 6 所示。从图中可以看出 1-2 和 1-3 高位钻孔瓦斯抽采浓度均较大,1-4 钻孔较为次之,1-1 钻孔最小。说明 1-2 和 1-3 高位钻孔距煤层顶板垂距分别为 24.4 和 20.5 m,刚好在计算值 20~26 m 区间范围内。

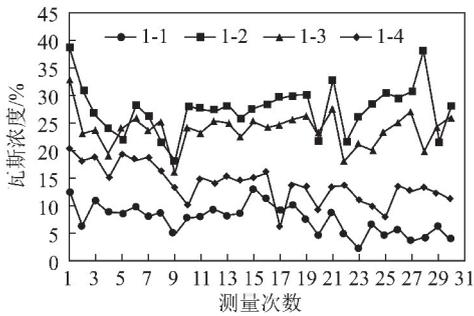


图6 高位钻孔瓦斯抽采浓度

Fig. 6 Gas extraction concentration of the high drilling

### 3.3 现场应用抽采量

根据“三带”测试结果,工作面回风巷已布置高位钻场 12 个,高位钻孔 51 个,累计施工钻孔进尺为 4 860 m,抽放管道内瓦斯浓度为 2% ~ 42%,抽放瓦斯纯量为 1.29 ~ 9.00 m<sup>3</sup>/min,卸压瓦斯抽采总量为 45.82 万 m<sup>3</sup>,有效地降低了工作面上隅角瓦斯浓度。因此根据现场抽采效果,也验证了实验结论的正确性,即垮落带的最大高度为 12 m,断裂带最大高度为 38 m。

## 4 结 论

(1) 采用物理相似模拟和 UDEC 数值模拟方法研究了“三软”煤层综采面采场覆岩运移和裂隙演化规律,并采用现场仰斜钻孔注水法和高位钻孔浓度监测法论证了实验结论的正确性。

(2) 物理相似材料模拟结果与 UDEC 数值模拟结果基本趋于吻合,表明该“三软”煤层综采面垮落带最大高度为 12 m,断裂带高度为 38 m。

(3) 现场仰斜钻孔注水法结果表明,1 号钻孔在 10 m 处出现注水量突变点,表明高度是垮落带与断裂带分界面;2 号钻孔在垂向 39 m 处之后,钻孔注水流量小于 60.0 L/min,表明断裂带最大高度为 39 m。

(4) 根据“三带”测试结果,现已累计卸压瓦斯抽采总量为 45.82 万 m<sup>3</sup>,有效地降低了工作面上隅角瓦斯浓度。同时,验证了实验方法的科学性及可靠性和结论的正确性。

### 参考文献 (References):

[1] 钱鸣高,石平五,许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 北京:中国矿业大学出版社,2010:65-99.

[2] 李振峰,靳晓敏. 应用 UDEC 进行顶板“三带”范围划分的数值模拟研究[J]. 矿业安全与环保,2015,42(4):21-24.

Li Zhenfeng, Jin Xiaomin. Numerical simulation research on scope division of “three-zones” in roof with UDEC[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2015, 42(4): 21-24.

[3] 高保彬,王晓蕾,朱明礼,等. 复合顶板高瓦斯厚煤层综放开采

“两带”动态发育特征[J]. 岩土力学与工程学报,2012,31(S1):3444-3451.

Gao Baobin, Wang Xialei, Zhu Mingli, et al. Dynamic development characteristics of two zones of overburden strata under conditions of compound roof, highly gassy and thick coal seam in full-mechanized topcoal caving faces [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 3444-3451.

[4] 钱鸣高,许家林. 覆岩采动裂隙分布的“O”形圈特征研究[J]. 煤炭学报,1998,23(5):466-469.

Qian Minggao, Xu Jialin. Study on the “O Shape” circle distribution characteristics of mining induced fracture in the overlying strata [J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(5): 466-469.

[5] 张军,王建鹏. 采动覆岩“三带”高度相似模拟及实证研究[J]. 采矿与安全工程学报,2014,31(2):249-254.

Zhang Jun, Wang Jianpeng. Similar simulation and practical research on the mining overburden roof strata “three-zones” height [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(2): 249-254.

[6] 黄汉富,闫志刚,姚邦华,等. 万利矿区煤层群开擦覆岩裂隙发育规律研究[J]. 采矿与安全工程学报,2012,29(5):619-624.

Huang Hanfu, Yan Zhigang, Yao Banghua, et al. Research on the process of fracture development in overlying rocks under coal seams group mining area [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(5): 619-624.

[7] 林海飞,李树刚,成连华,等. 覆岩采动断裂带动态演化模型的实验分析[J]. 采矿与安全工程学报,2011,28(2):298-303.

Lin Haifei, Li Shugang, Cheng Lianhua, et al. Experimental analysis of dynamic evolution model of mining-induced fissure zone in overlying strata [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(2): 298-303.

[8] 徐光,许家林,吕维赞,等. 采空区顶板导水裂隙侧向边界预测及应用研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(5):724-730.

Xu Guang, Xu Jialin, Lü Weiyun, et al. Lateral boundary prediction of water conducting fracture formed in roof and its application [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(5): 724-730.

[9] 施龙青,辛恒奇,翟培合. 大采深条件下导水断裂带高度计算研究[J]. 中国矿业大学学报,2012,41(1):37-41.

Shi Longqing, Xin Hengqi, Zhai Peihe. Calculating the height of water flowing fracture zone in deep mining [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2012, 41(1): 37-41.

[10] 张兴民,于克军,席京德,等. 微地震技术在煤矿“两带”监测领域的研究与应用[J]. 煤炭学报,2000,25(6):566-570.

Zhang Xingmin, Yu Kejun, Xi Jingde, et al. The research and application of microseismic technology in mine fracture and caving zones monitoring [J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(6): 566-570.

[11] 张平松,李俊成,刘世奇,等. 采煤面覆岩破坏动态测试模拟研究[J]. 岩土力学与工程学报,2011,30(1):78-83.

Zhang Pingsong, Li Juncheng, Liu Shiqi, et al. Study of dynamic detection simulation of overburden failure in model workface [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 78-83.

[12] 赵保太,林柏泉. “三软”不稳定低渗透性煤层开采瓦斯涌出及防治技术[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2007:1-2.