

# 浅埋煤层重复采动下覆岩运动及裂隙演化规律分析

Analysis on Laws of Overburden Movement and Fissure Evolution Under Repeated Mining of Shallow Coal Seam

白亚光(山西古县金谷煤业有限公司, 邢台 河北 054000)

**摘要:**为了更深入的解析浅埋煤层在重复采动下的覆岩运动规律,通过使用 UDEC 数值模拟方法,对山西某煤矿 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>煤层进行模拟开采,最终得出浅埋煤层重复采动下覆岩运动及裂隙演化规律,并通过二维物理相似模拟实验来验证,结果表明:1<sup>#</sup>煤层开采后,工作面初次来压步距为 30 m,大约每开挖 10 m 形成一次周期来压,周期来压步距约为 10 m;2<sup>#</sup>煤层开采后,工作面初次来压步距为 40 m,大约每开挖 10 m 形成一次周期来压,周期来压步距约为 10 m,2<sup>#</sup>煤层工作面初次来压步距大于工作面初次来压步距。1<sup>#</sup>煤层开采完毕后,1<sup>#</sup>煤层直接顶最大位移量为 1.6 m,裂隙带高度约为 20 m,垮落带为 5 m 左右;2<sup>#</sup>煤层开采完毕后,1<sup>#</sup>煤层直接顶最大位移量为 3.2 m,2<sup>#</sup>煤层直接顶最大位移量为 1.8 m,裂隙带高度约为 73.5 m,垮落带为 15 m 左右。

**关键词:**浅埋煤层;重复采动;覆岩运动;周期来压;下沉量

**中图分类号:** TD325 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2022)02-0060-06

**Abstract:** In order to more deeply analyze the law of overburden movement under repeated mining of shallow coal seam, the UDEC digital simulation method is used to conduct the simulated mining of the 1<sup>#</sup> and 2<sup>#</sup> seams of a certain coal mine in Shanxi Province; finally, the laws of overburden movement and fissure evolution under repeated mining of shallow coal seam are obtained, which is verified by means of two-dimensional physical similarity simulation test. The results show that after the 1<sup>#</sup> coal seam is mined, the working face first weighting step distance is 30 m, for each excavation of approximate 10 m, a periodic weighting is formed and the step distance of periodic weighting is 10m; similarly, after the 2<sup>#</sup> coal seam is mined, the working face first weighting step distance is 40 m, for each excavation of approximate 10 m, a periodic weighting is formed and the step distance of periodic weighting is 10 m. It can be seen that the step distance of the first weighting of the working face of 2<sup>#</sup> coal seam is larger than that of the working face of 1<sup>#</sup> coal seam; after the mining of 1<sup>#</sup> coal seam is completed, the maximum displacement of the direct roof of 1<sup>#</sup> coal seam is 1.6 m, the fissure zone is about 20 m high and the roof-fall zone is about 5 m; after the mining of 2<sup>#</sup> coal seam is completed, the maximum displacement of the direct roof of 1<sup>#</sup> coal seam is 3.2 m, the maximum displacement of the direct roof of 2<sup>#</sup> coal seam is 1.8 m, the fissure zone is about 73.5 m high and the roof-fall zone is about 15 m.

**Key words:** shallow coal seam; repeated mining; overburden movement; periodic weighting; subsidence

## 1 前言

煤层开采后,顶底板岩层的原岩应力遭到破坏,应力随着顶底板岩层的移动和变形重新分布,相较于单一开采,重复采动造成的覆岩破坏、移动和变形更加复杂,因此也带来更加难以解决的矿山压力和

瓦斯抽采等问题<sup>[1-4]</sup>;再加上贵州煤层赋存条件大都比较复杂,具有煤层厚度薄、瓦斯含量较大等特点<sup>[5]</sup>。

目前,对于重复采动下覆岩运动的主要研究有:杨滨滨等<sup>[6]</sup>通过相似模拟实验、数字图像处理技术对近距离煤层重复采动覆岩裂隙的时空演化特征进行分析;张磊等<sup>[7]</sup>使用自制的瓦斯测试仪对煤层群重复采动作用下被保护层的渗流特性进行分析;崔峰等<sup>[8-9]</sup>使用相似模拟、数值模拟、监测设备等对缓倾斜冲击倾向性顶板特厚煤层裂隙演化进行了分析;高林等<sup>[10]</sup>使用数值模拟对近距离煤层群重复采

[作者简介] 白亚光(1990-),男,工程师,从事采掘技术管理相关工作。

[引用格式] 白亚光. 浅埋煤层重复采动下覆岩运动及裂隙演化规律分析[J]. 中国矿山工程,2022,51(2):60-65.

动下半煤岩上山围岩塑性区、应力场与位移场的时空分布进行了分析;吴祥业等<sup>[11]</sup>通过理论分析、数值模拟及现场实测方法,分析了重复采动巷道围岩塑性区及应力时空演化规律,得出重复采动巷道塑性区变化的动-静组合机制;李金雨等<sup>[12]</sup>通过微震系统分析了爆破采动、煤体压出和煤壁片帮的响应特征;张永刚等<sup>[13]</sup>通过理论分析和数值模拟分析的方法分析了厚松散层薄基岩重复采动下的覆岩破坏高度;张明<sup>[14]</sup>通过关键层理论,研究了重复采动下关键层垮落特征。涂敏等<sup>[15]</sup>采用 ANSYS 数值模拟软件对保护层和被保护层间隔较远情况下的下保护层开采过程中,被保护层的应力变化规律以及卸压变形规律,最后得出保护层开采对被保护层的卸压保护范围。高保彬等<sup>[16]</sup>以郭庄煤矿和寺河煤矿为工程背景,运用相似模拟试验和矿井实地现场测定相结合的方法,对下保护煤层开采过程中上保护层煤层及底板透气性变化进行分析,得出下保护层开采过程中中国被保护层透气性系数及瓦斯含量变化动态发展规律。高保彬等<sup>[17]</sup>以郭庄矿中远距离下保护层煤层为工程实际背景,利用 UDEC 数值模拟软件对该矿井开采条件中保护层开采过程期间上覆岩层裂隙演化和瓦斯渗流规律进行模拟研究。通过现场验证比较,得出该条件下的裂隙演化规律和瓦斯压力变化规律。

以上研究往往只分析研究单一问题,缺乏对浅埋煤层和薄煤层重复采动覆岩运动及裂隙演化规律研究。本文通过使用 UDEC 数值模拟软件对山西省煤矿进行重复采动下覆岩运动及裂隙演化规律研究分析,旨在能够有效了解覆岩运动的内在规律,降低煤矿事故的发生。

山西某煤矿矿区面积 27.508 1 km<sup>2</sup>,地形切割适中。可采煤层编号为 D。井田内 D 煤层厚度 0.60~2.91 m,平均 1.32 m,为薄煤层。2#煤层平均煤层厚度 1.8 m,1#、2#煤层间距为 20 m 左右。

## 2 浅埋煤层重复采动数值模拟分析

### 2.1 数值模型的构建

由该煤矿的现场实测和其煤矿的基本赋存条件,依此可以建立一个尺寸长( $x$ )×宽( $y$ )=200 m×100 m 的 UDEC 数值模拟模型,其中工作面倾向为长度方向,走向为宽度方向;模型中的块使用莫尔-库仑准则来描述岩石材料的变形和失效过

程,根据现场实测确定了各岩层的基本物理参数,并且建立了如图 1 所示的模型,力学参数见表 1。



图 1 数值模拟计算模型

表 1 煤岩体物理力学性质参数表

| 岩石名称 | 密度/<br>g·cm <sup>-3</sup> | 体积<br>模量/<br>GPa | 剪切<br>模量/<br>GPa | 内摩<br>擦角/<br>(°) | 抗拉<br>强度/<br>MPa | 内聚力/<br>MPa |
|------|---------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------|
| 泥质灰岩 | 2 300                     | 1.1              | 1.95             | 32               | 1.4              | 1.4         |
| 粗砂岩  | 2 600                     | 2.9              | 1.6              | 36               | 1.0              | 2.1         |
| 泥岩   | 2 300                     | 2.1              | 2.95             | 32               | 2.4              | 3.1         |
| 1#煤  | 1 300                     | 1.3              | 0.9              | 30               | 0.8              | 0.8         |
| 砂质泥岩 | 2 600                     | 1.7              | 1.4              | 33               | 1.8              | 1.2         |
| 粉砂岩  | 2 500                     | 1.9              | 1.67             | 36               | 1.0              | 1.3         |
| 2#煤  | 1 300                     | 1.3              | 0.9              | 30               | 0.8              | 0.8         |
| 泥岩   | 2 300                     | 2.1              | 2.95             | 32               | 2.4              | 3.1         |
| 粗砂岩  | 2 600                     | 2.9              | 1.6              | 36               | 1.0              | 2.1         |

此外,本文着重研究和分析浅埋煤层重复采动下覆岩运动规律,因此布置 2 条横向设置的测线来记录工作面推进不同距离时的各数值的变化,2 条测线分别位于 1#煤和 2#煤上覆岩层位置(直接顶)。

### 2.2 单层煤开采覆岩运动模拟分析

选取 1#煤层开采过程中具有代表性的四个阶段,具体如图 2 所示。对比分析如下:当工作面推进 30 m 时,此时基本顶发生折断和垮落,并且直接顶产生离层破坏,即为初次来压,并且采空区周围岩层发生弯曲变形,裂隙不断发育;工作面推进至 50 m 时,裂隙带高度约为 10 m;工作面推进至 80 m 时,裂隙带高度约为 15 m,工作面推进至 140 m 时,裂隙带高度约为 20 m;随着工作面的不断推进,发现工作面每次向前推进约 10 m,基本顶均会发生周期性破坏,周期来压步距为 10 m 左右,1#煤层开采完毕后裂隙带高度约为 20 m,垮落带为 5 m 左右。

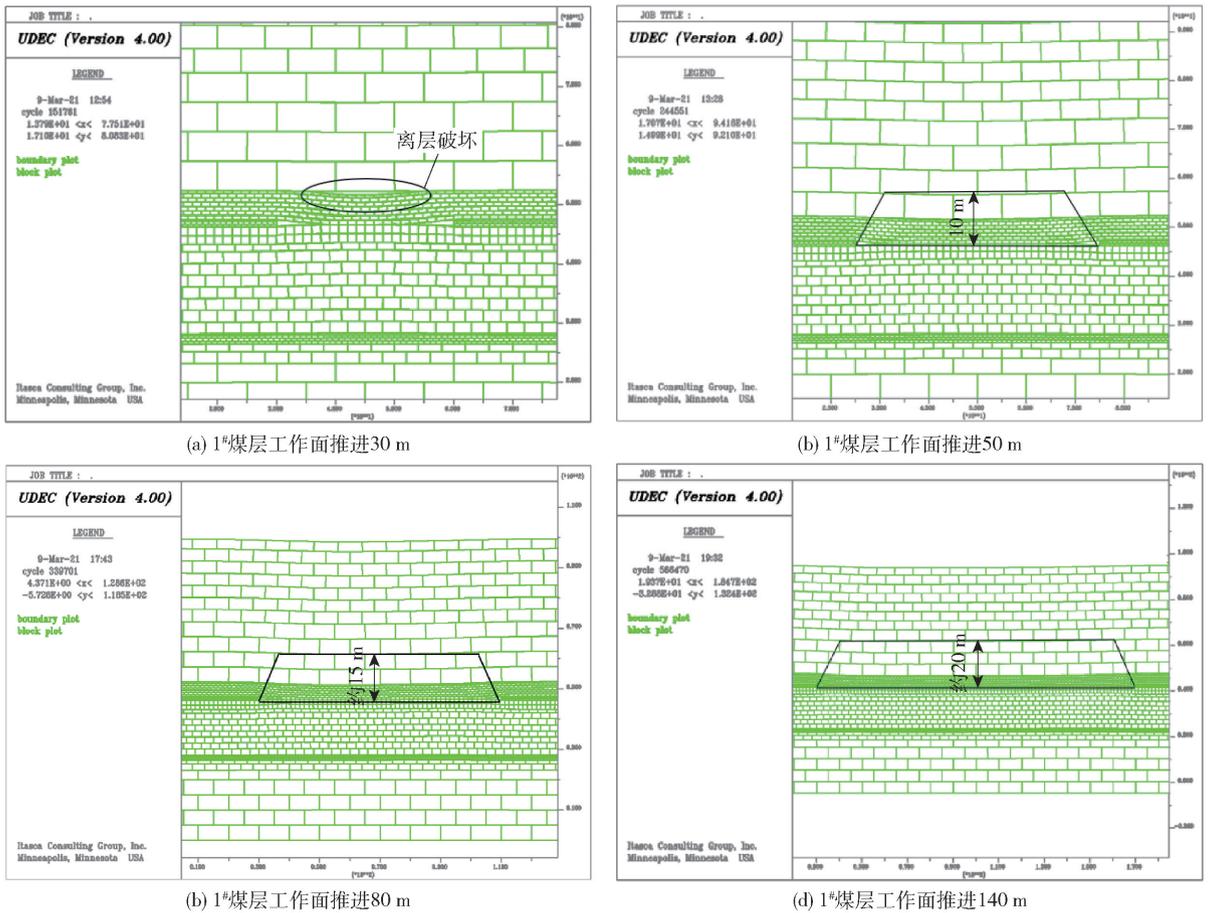


图2 1#煤层工作面推进不同距离覆岩运动情况

根据《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》中可以得知,本煤矿1#煤层上覆岩层为泥岩,覆岩特性为软弱,其冒落带高度和裂隙带高度可使用以下计算公式<sup>[18-19]</sup>:

$$H_k = \frac{100 \sum M}{6.2 \sum M + 10} \pm 2.5$$

$$H_{li} = \frac{100 \sum m}{3.1 \sum M + 6.0} \pm 6.5$$

式中, $H_k$ 为冒落带高度, $H_{li}$ 为裂隙带高度, $\sum M$ 为累计采厚,单层采厚1~3 m,累计采厚不超过15 m, $\pm$ 为误差;代入数据采厚1.3 m可得为4.70~9.70 m,裂隙带高度为6.46~19.46 m。

通过开始设置在1#煤层的观测线,对1#煤层工作面推进不同距离直接顶位移情况进行分析,如图3所示。当工作面推进至20 m时,上覆岩层的最大位移量在0.5 m左右,此时覆岩的运动并不剧烈;当工作面推进至30 m时,此时为初次来压,上覆岩层最大位移量为1.2 m左右,位移变化与之前相比有

着很大的变化;随着工作面的不断推进,上覆岩层位移量也在不断最大,当1#煤层开挖完毕时,上覆岩层位移量最大,约为1.6 m左右。

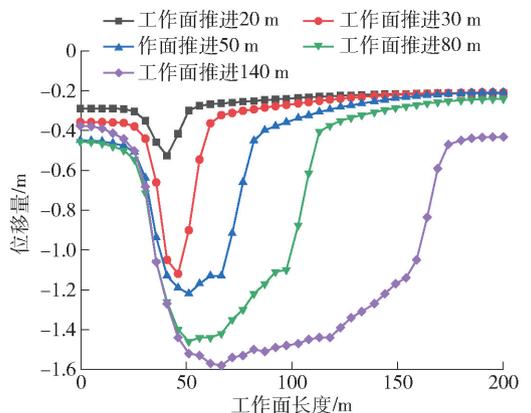


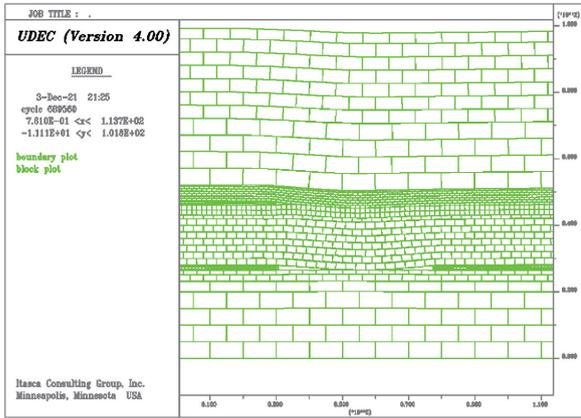
图3 1#煤层工作面推进不同距离覆岩位移情况

### 2.3 重复采动覆岩运动模拟分析

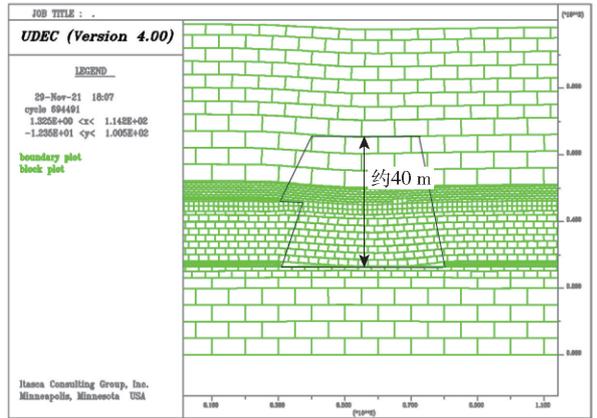
对2#煤层模拟开采不同距离时采空区覆岩运动情况进行分析,选取开采过程中具有代表性的四个阶段,如图4所示,当2#煤层工作面推进至40 m时,基

顶在其自重及上覆岩层载荷的作用下,将沿煤壁发生折断和垮落,即为初次来压;工作面推进至 50 m 时,裂隙带高度约为 40 m;工作面推进至 80 m 时,裂隙带高度约为 60 m,工作面推进至 140 m 时,裂隙带高度

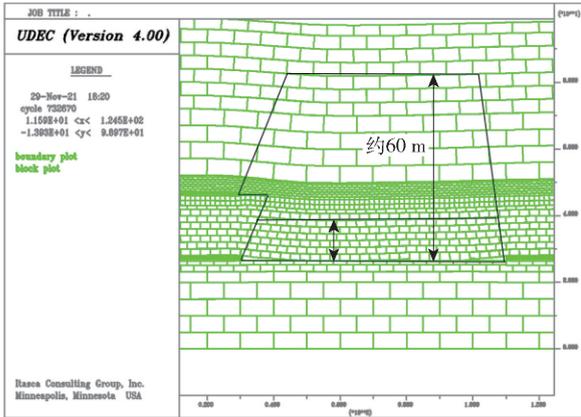
约为 73.5 m;随着工作面的不断推进,发现工作面每次向前推进约 10 m,基本顶均会发生周期性破坏,周期来压步距为 10 m 左右,2#煤层开采完毕后裂隙带高度约为 73.5 m,垮落带为 15 m 左右。



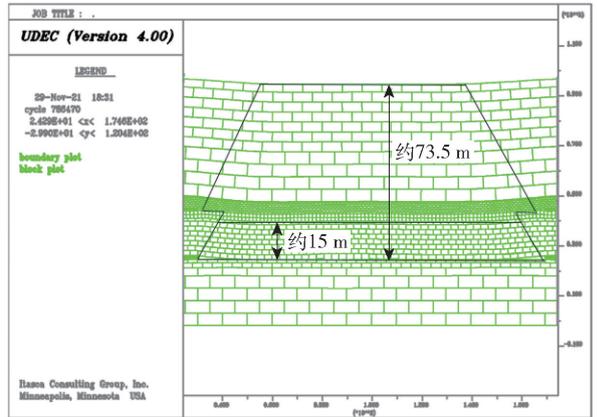
(a) 2#煤层工作面推进40 m



(b) 2#煤层工作面推进50 m



(c) 2#煤层工作面推进80 m



(d) 2#煤层工作面推进140 m

图4 2#煤层工作面推进不同距离覆岩运动情况

通过开始设置在 1#、2#煤层直接顶(煤层上方 2 m 处)的观测线,对 2#煤层工作面推进不同距离直接顶位移情况进行分析,如图 5、图 6 所示,当 2#煤层工作面推进至 30 m 时,1#煤层直接顶的最大位移量在 2 m 左右,2#煤层直接顶的最大位移量在 0.7 m 左右,此时覆岩的运动并不剧烈;当 2#煤层工作面推进至 40 m 时,此时为初次来压,1#煤层直接顶最大位移量为 2.5 m 左右,2#煤层直接顶的最大位移量在 1.7 m 左右,位移变化与之前相比有着很大的变化;随着工作面的不断推进,上覆岩层位移量也在不断增加,当 2#煤层开挖完毕时,1#煤层直接顶位移量最大,约为 3.2 m 左右,2#煤层直接顶位移量最大为 1.8 m 左右,与初次来压相比增加量不大,主要是因为 2#煤层直接顶也受到 1#煤层开采的卸压作用。

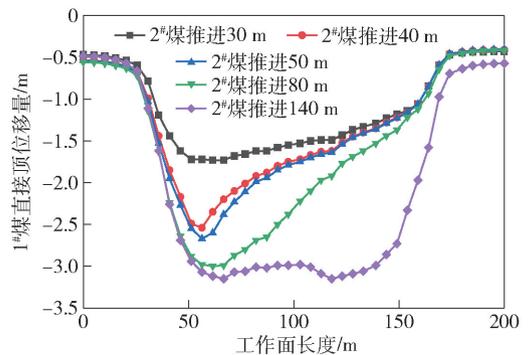


图5 2#煤层工作面推进不同距离1#煤覆岩位移情况

### 3 相似模拟实验

为了进一步验证浅埋煤层采动下工作面顶底板覆岩运动及裂隙演化情况,本文采用相似模拟实验

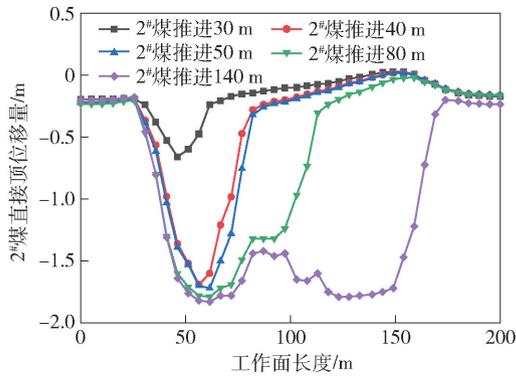


图6 2#煤层工作面推进不同距离2#煤覆岩位移情况

表2 相似模拟实验材料配比

| 岩层   | 厚度/cm | 配比号  | 砂子比例 | 石灰比例 | 石膏比例 | 砂子质量/kg | 石灰质量/kg | 石膏/kg |
|------|-------|------|------|------|------|---------|---------|-------|
| 泥质灰岩 | 10    | 655  | 6    | 0.5  | 0.5  | 37      | 3.08    | 3.08  |
| 粗砂岩  | 10    | 564  | 5    | 0.6  | 0.4  | 37      | 4.44    | 2.96  |
| 泥岩   | 10    | 773  | 7    | 0.7  | 0.3  | 37      | 3.70    | 1.59  |
| 1#煤  | 3     | 1055 | 10   | 0.5  | 0.5  | 11.1    | 0.56    | 0.56  |
| 砂质泥岩 | 6     | 773  | 7    | 0.7  | 0.3  | 22.2    | 2.22    | 0.95  |
| 粉砂岩  | 30    | 955  | 9    | 0.5  | 0.5  | 111     | 6.17    | 6.17  |
| 2#煤  | 4     | 1055 | 10   | 0.5  | 0.5  | 14.8    | 0.74    | 0.74  |
| 泥岩   | 7     | 773  | 7    | 0.7  | 0.3  | 25.9    | 2.59    | 1.11  |
| 粗砂岩  | 20    | 564  | 5    | 0.6  | 0.4  | 74      | 8.88    | 5.92  |

如图7所示的开切眼模拟图和图8所示的相似模拟实验图。

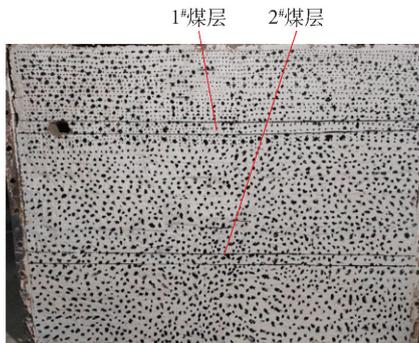


图7 相似模拟实验模拟开切眼

由上图可以看出煤层上方覆岩移动时明显出现“三带”分布,即弯曲带、断裂带、垮落带。通过观察可以看出,垮落带高度为5 m左右,断裂带的高度为10 m左右。与数值模拟分析结果一致,故可证明实验的准确性。但由于之后操作不当导致2#煤层开采失败,故本次相似模拟实验只有单层煤开采数据。

来对覆岩运动情况进行分析与研究。

根据实验要求以及实验室设备限制,结合具体煤矿要求,实验台的煤岩层根据现场煤岩层物理力学参数沿煤层走向进行铺设,最终做出长度1.2 m,宽0.5 m,高1.3 m,两侧分别预留10 cm煤柱保护,具体参数见表2。

本文主要模拟了保护层受开采影响时覆岩移动变化的规律。如果选用高渗透性的相似材料,则会对实验结果造成较大影响,故选用低渗透性的相似材料。在实验过程中,选择石膏作为胶凝剂,相似材料为砂、石膏、腻子粉和水,选用的材料按比例混合,建立实验室二维相似模拟实验模型开挖完毕后得到

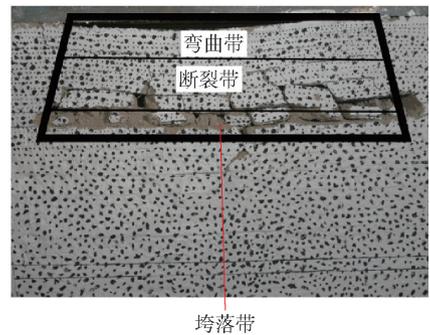


图8 二维相似物理实验模型

## 4 结论

本文使用了 UDEC 数值模拟对该煤矿进行重复采动覆岩运动及裂隙演化规律进行分析研究,得出以下结论:

(1) 1#煤层开采后,工作面初次来压步距为30 m,大约每开挖10 m形成一次周期来压,周期来压步距约为10 m;2#煤层开采后,工作面初次来压步距为40 m,大约每开挖10 m形成一次周期来压,周

期来压步距约为 10 m,可见,2<sup>#</sup>煤层工作面初次来压步距大于工作面初次来压步距。

(2)2<sup>#</sup>煤层开采完毕后,1<sup>#</sup>煤层直接顶最大位移量为 1.6 m,裂隙带高度约为 20 m,垮落带为 5 m 左右;2<sup>#</sup>煤层开采完毕后,1<sup>#</sup>煤层直接顶最大位移量为 3.2 m,2<sup>#</sup>煤层直接顶最大位移量为 1.8 m,裂隙带高度约为 73.5 m,垮落带为 15 m 左右。

### [参考文献]

- [1] 袁亮.我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J].煤炭学报,2016,41(1):1-6.
- [2] 徐小奔,胡祖祥,邢立奋,等.综采工作面上覆岩层位移特征相似模拟[J].工矿自动化,2020,46(1):85-89.
- [3] 梁勇,薛彦平,胡胜勇.近距离煤层群重复采动覆岩破坏规律分析研究[J].矿业研究与开发,2021,41(4):72-75.
- [4] 史博文,白建平,郝春生,等.采动覆岩裂隙动态演化规律的三维模拟[J].煤矿安全,2019,50(7):259-262.
- [5] 李强,吴桂义,孔德中.近距离煤层群重复采动下端冒顶影响因素分析及防治[J].工矿自动化,2021,47(8):41-49.
- [6] 杨滨滨,袁世冲,郑德志,等.近距离煤层重复采动覆岩裂隙时空演化特征研究[J].采矿与安全工程学报,2021:1-9.
- [7] 张磊,阚梓豪,薛俊华,等.循环加卸载作用下完整和裂隙煤体渗透性演变规律研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(12):2487-2499.
- [8] 崔峰,贾冲,来兴平,等.缓倾斜冲击倾向性顶板特厚煤层重复采动下覆岩两带发育规律研究[J].采矿与安全工程学报,2020,37(3):514-524.
- [9] 崔峰,贾冲,来兴平,等.近距离强冲击倾向性煤层上

行开采覆岩结构演化特征及其稳定性研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(3):507-521.

- [10] 高林,王家臣,孔德中,等.动压影响半煤岩上山变形机制及修复技术[J].中国安全科学学报,2020,30(3):67-73.
- [11] 吴祥业,刘洪涛,李建伟,等.重复采动巷道塑性区时空演化规律及稳定控制[J].煤炭学报,2020,45(10):3389-3400.
- [12] 李金雨,雷文杰,赵洪宝,等.重复爆破采动下煤岩冲击破坏的微震响应特征[J].中国矿业大学学报,2019,48(5):966-974.
- [13] 张永刚,刘延欣,武宇亮.厚松散层薄基岩下重复采动覆岩破坏高度综合研究[J].煤炭技术,2017,36(8):72-75.
- [14] 张明,姜福兴,李克庆,等.重复采动停采边界关键层失稳诱发灾害研究[J].中国矿业大学学报,2016,45(5):915-922.
- [15] 涂敏,黄乃斌,刘宝安.远距离下保护层开采上覆煤岩体卸压效应研究[J].采矿与安全工程学报,2007(4):418-421+426.
- [16] 高保彬,刘云鹏,袁东升.下保护层开采上覆煤岩卸压增透机理研究与应用[J].煤炭科学技术,2013,41(7):67-70+74.
- [17] 高保彬,李回贵,王洪磊. UDEC 下保护层开采裂隙演化及瓦斯渗流规律[J].河南理工大学学报(自然科学版),2013,32(5):518-522.
- [18] 李焕,吕自伟,赵亮,等.高位钻孔瓦斯抽放冒落带与裂隙带高度的测定方法[J].现代矿业,2011,27(1):49-51.
- [19] 王福厚.高位钻孔抽放瓦斯冒落带及裂隙带高度确定方法[J].煤炭技术,2008(8):75-76.