



## 废弃工作面遗留煤层气扰动储层空间划分

杨兆彪 王家琛 杨彦群 秦勇 李国富 董志勇 孟祥昊

### 引用本文:

杨兆彪, 王家琛, 杨彦群, 等. 废弃工作面遗留煤层气扰动储层空间划分[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 243–255.

YANG Zhaobiao, WANG Jiachen, YANG Yanqun. Spatial division of abandoned mine methane reservoir: Taking 12501 working face of Tunlan Coal Mine as an example[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 243–255.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.20221560>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 煤层气储层相对渗透率试验及数值模拟技术研究进展

Research progress of relative permeability experiment and numerical simulation technique in coalbed methane reservoir  
煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 192–205 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0835>

#### 晋城矿区废弃矿井采空区煤层气地面抽采研究进展

Research progress on surface drainage of coalbed methane in abandoned mine gobbs of Jincheng Mining Area  
煤炭科学技术. 2022, 50(1): 204–211 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6f9a3691-b7fb-4cfa-889f-363b9fadb0c>

#### 准噶尔盆地南缘急倾斜储层煤层气多层合采产出模拟研究

Simulation study of multilayer coalbed methane production in steeply inclined reservoirs in the southern edge of Junggar Basin  
煤炭科学技术. 2022, 50(7): 199–205 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a315fb4e-c911-45d0-8757-401a99ce2442>

#### 受废弃油井影响的回采工作面风险评价与防治措施研究

Study on risk assessment and prevention measures of mining face affected by abandoned oil well  
煤炭科学技术. 2020, 48(6) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f992d090-1c48-4961-a0ba-cbb27b1b9f72>

#### 叠置含气系统煤层气开采物理模拟试验方法研究

Study on physical simulation test method of coalbed methane production in superimposed gas-bearing system  
煤炭科学技术. 2021, 49(1): 225–233 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.01.018>

#### 工作面过上覆遗留煤柱致灾机理及超前区域防治技术研究

Disaster mechanism during passing of working face under overlying remnant coal pillar and advanced regional prevention technology  
煤炭科学技术. 2023, 51(9): 46–54 <https://doi.org/10.12438/cst.2022-1373>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

## 地球科学与测绘



移动扫码阅读

杨兆彪,王家琛,杨彦群,等. 废弃工作面遗留煤层气扰动储层空间划分——以屯兰煤矿 12501 工作面为例[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 243–255.

YANG Zhaobiao, WANG Jiachen, YANG Yanqun, *et al.* Spatial division of abandoned mine methane reservoir: Taking 12501 working face of Tunlan Coal Mine as an example[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 243–255.

## 废弃工作面遗留煤层气扰动储层空间划分

## ——以屯兰煤矿 12501 工作面为例

杨兆彪<sup>1</sup>,王家琛<sup>1</sup>,杨彦群<sup>2</sup>,秦 勇<sup>1</sup>,李国富<sup>3</sup>,董志勇<sup>2</sup>,孟祥昊<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏 徐州 221008; 2. 山西焦煤集团公司技术中心, 山西 太原 030024;

3. 煤与煤层气共采国家重点实验室, 山西 晋城 048000)

**摘 要:** 废弃矿井扰动空间精确划分是遗留煤层气资源评价和开发利用的重要基础, 以山西西山矿区屯兰煤矿 2 号煤 12501 工作面为例, 采用应力场数值模拟、裂隙场数值模拟和物理相似模拟的方法, 综合研究了采动过程中及采空区稳定后的应力场、裂隙场的分布规律。研究结果显示: 物理相似模拟与数值模拟吻合度高, 综合以上 3 种方法, 最终将 12501 废弃工作面遗留煤层气扰动储层空间划分为底板裂隙区、重新压实区、导气裂隙区和承压区。底板裂隙区位于煤层中工作面的正下方, 整体采动裂隙发育区域呈现出靠近开采煤层为底面的倒梯形台, 裂隙场数值模拟结果显示其垂向深度为 22.3 m, 其深度为开采煤厚的 5.58 倍。承压区位于工作面四周的未开采煤储层, 在工作面倾向的边界起分别向外延伸 70 m, 在工作面走向的边界起分别向外延伸 100 m 的位置上, 数值模拟结果显示承压区煤储层垂向应力峰值为远大于煤层原始状态的应力数值, 但小于垂层煤样的平均抗压强度。导气裂隙区主体位于开采煤层工作面边缘区域, 底部为高度约为 13.2 m 的岩层垮落带, 紧邻垮落带上部为高约 33.6 m 的岩层断裂带, 断裂带内竖向裂缝不断扩展贯通离层裂缝。导气裂隙区整体形状为梯形台, 其高度为开采煤厚的 11.7 倍。重新压实区主体分布于开采工作面采空区的中间部分, 倾向宽度为 110 m, 走向长度为 1 268 m。此区域主要为弯曲垮落的覆岩构成, 整体形状为梯形台, 位于导气裂隙区内部。导气裂隙区为遗留煤层气资源的开发有利区。

**关键词:** 废弃工作面; 遗留煤层气; 扰动储层; 空间划分; 数值模拟; 相似物理模拟

中图分类号: P618

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)02-0243-13

## Spatial division of abandoned mine methane reservoir: Taking 12501 working face of Tunlan Coal Mine as an example

YANG Zhaobiao<sup>1</sup>, WANG Jiachen<sup>1</sup>, YANG Yanqun<sup>2</sup>, QIN Yong<sup>1</sup>, LI Guofu<sup>3</sup>, DONG Zhiyong<sup>2</sup>, MENG Xianghao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Coalbed Methane Resources & Reservoir Formation Process, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. Technical Center, Shanxi Coking Coal Group Co., Ltd., Taiyuan 030024, China; 3. State Key Laboratory of Coal and Coalbed Methane Co-mining, Jincheng 048000, China)

**Abstract:** The accurate division of the disturbance space of abandoned mine methane(AMM) reservoir is an important basis for the evaluation, development and utilization of AMM resources. In this paper, taking the No. 2 coal 12501 working face of Tunlan Mine in the Xishan mining area of Shanxi as an example, numerical simulation of stress field, numerical simulation of fracture field and physical similarity simulation are used. The distribution law of stress field and fracture field during the mining process and after the goaf is stabilized is comprehensively studied. The research results show that the physical similarity simulation and the numerical simulation have a high de-

收稿日期: 2022-10-10

责任编辑: 常 琛

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1560

基金项目: 山西省科技重大专项揭榜资助项目 (20191101016); 山西省科技重大专项资助项目 (20201102001); 国家自然科学基金资助项目 (42272195)

作者简介: 杨兆彪(1980—), 男, 河北张家口人, 教授, 博士生导师。E-mail: zhaobiaoyang@163.com

gree of agreement. Combining the above three methods, the CBM disturbance reservoir space in the abandoned working face 12501 is finally divided into floor fracture area, recompaction area, gas conduction fracture area and bearing fracture area. The floor fissure area is located just below the working face in the coal seam. The overall mining fissure development area presents an inverted trapezoidal platform with the bottom surface close to the mined coal seam. The numerical simulation results of the fissure field show that its vertical depth is 22.3 m, Its depth is 5.58 times the thickness of the coal mined. The pressure-bearing area is located in the unexploited coal reservoir around the working face. It extends 70 m outward from the boundary of the working face inclination and 100 m from the boundary of the working face strike. The numerical simulation results show that the peak value of vertical stress of coal reservoir in the pressure bearing zone is much larger than the stress value of the original state of the coal seam, but smaller than the average compressive strength of the coal sample in the vertical seam. The main part of the gas-conducting fissure area is located at the edge of the coal seam working face. The bottom is a rock caving zone with a height of about 13.2 m, and the upper part of the caving zone is a rock stratum fault zone with a height of about 33.6 m. The vertical cracks in the fault zone continue to expand and penetrate through. Separation cracks. The overall shape of the gas-conducting fracture area is a trapezoidal platform, Its height is 11.7 times the thickness of the coal mined.. The main body of the recompaction area is distributed in the middle part of the goaf of the mining face, with a dip width of 110 m and a strike length of 1 268 m. This area is mainly composed of curved and caving overlying rocks, and the overall shape is a trapezoidal platform, which is located inside the gas-conducting fracture area. The gas-conducting fracture area is a favorable area for the development of legacy coalbed methane resources.

**Key words:** abandoned working face; AMM; disturbed reservoir; spatial division; numerical simulation; similar physical simulation

## 0 引言

在国家“双碳目标”背景下,能源转型及环境保护日益受到重视。2021年11月发布的格拉斯哥气候公约,明确指出,减少煤炭消费,减少非二氧化碳温室气体甲烷等的排放。废弃矿井煤层气(AMM—Abandoned Mine Methane)开发兼具绿色天然气高效利用及防止甲烷泄漏减少温室气体的作用,而越来越受到重视。废弃矿井煤层气是从已经报废(停采)的煤矿中抽采残留、聚集在地下扰动煤岩层中的煤层气并加以利用<sup>[1-2]</sup>。

而废弃矿井扰动空间精确厘定是遗留煤层气资源评价和后期开发利用的基础<sup>[3-4]</sup>。不同采煤工艺形成的采空区形态不一样,目前常用的有长臂式垮落法采煤。国内外学者对其煤层开采扰动地层的演化规律进行了深入的研究<sup>[5-8]</sup>,国内刘天泉院士、钱鸣高院士等学者<sup>[7-8]</sup>提出了“横三区”“竖三带”的认识,即水平方向上可以划分为卸压区、承压区和原位区,垂向上可划分为弯曲下沉带、断裂带和垮落带,其中采动裂隙场形成的“O”形圈是遗留煤层气的主要富集空间。煤矿开采扰动同样会导致主采煤层底板发生扰动。前人对下伏地层进行区带划分,垂直方向上将底板分为三维卸压带、一维卸压带和原始应力带,水平方向上沿煤层开采方向分为原始应力区、压缩区、膨胀区、恢复区和重新压实区<sup>[9]</sup>。前人在废弃矿井扰动空间划分已取得了卓有成效的进展。但这些主要是为井下采矿安全生产服务的,目前针对废弃矿井遗留煤层气开发,仍需要更进一步精确厘定其空间分带特征。

山西省是煤炭大省,截止2017年底,生产及在建矿井数为1 026处。截止2019年底,山西省历年关闭煤矿总计约801处,总面积约1 600 km<sup>2</sup><sup>[10]</sup>。山西省有开发利用价值的煤炭采空区面积约2 052 km<sup>2</sup>,预测残余采空区煤层气资源量约726亿m<sup>3</sup>,其中7个煤层气含量较高的矿区(西山、阳泉、武夏、潞安、晋城、霍东、离柳),采空区面积达870.92 km<sup>2</sup>,预测煤层气资源量约303.95亿m<sup>3</sup><sup>[11]</sup>。截至2018年底,在晋城矿区晋圣永安宏泰、岳城、侯村等煤矿和西山矿区屯兰、马兰、东曲等煤矿以及阳泉矿区乐平、红土沟等煤矿共钻井110余口,运行60余口,单井平均日产气量约1 300 m<sup>3</sup>,年产气量约0.28亿m<sup>3</sup>,累计利用量0.82亿m<sup>3</sup>(折纯量),累计创造产值达1.56亿元<sup>[12]</sup>。

以西山矿区屯兰煤矿南5盘区2号煤废弃的12501工作面为研究对象,采用应力场数值模拟、裂隙场数值模拟和相似物理模拟等3种方法,综合研究了废弃工作面不同扰动空间的应力场和裂隙场特征,在此基础上精确划分了废弃工作面各扰动空间,指出导气裂隙区为遗留煤层气资源的开发有利区。为后期遗留煤层气资源评价及地面煤层气抽采井位优选提供了重要的基础。

## 1 屯兰煤矿地质背景

屯兰煤矿为国家级重点煤矿,属于高瓦斯矿井。矿井原始设计产能为400万t/a,2005年后核定生产能力为500万t/a。屯兰井田主要含煤地层为石炭系上统太原组和二叠系下统山西组,共含煤16层。二叠系下统山西组含01、02、03、1、2、3、4号和4下号8层煤层,称为上组煤,其中02、2和4号3层煤

为可采煤层。石炭系上统太原组含 6、7、8、8a、8b、9 号和 10 号、11 号 8 层煤层，称为下组煤，其中 6、7、8 号和 9 号 4 层煤为可采煤层。

屯兰煤矿内地层走向 30°~60°，倾向南西，倾角 2°~15°，井田东西方向宽约 9.9 km，南北方向长约 10.6 km，井田总面积约为 73.3 km<sup>2</sup>。区内构造形态主要受南西倾伏、北及北东向南的波浪状单斜构造的控制，使得区块内宽缓褶皱较少发育而大量的次一级小型波状褶曲发育，区块内 NE 走向高角度正断层多且成组出现，一般呈阶梯或地垒状形式，具有明显的规律性。

屯兰煤矿 12501 废弃工作面位于矿区内南五盘区东北部边界处，工作面与南四盘区相邻，北西向与

南五盘区回风巷相接，与 12503 和 12505 工作面采空区相邻，西南方与 12503 工作面相邻，且 12501 工作面为区域内首采工作面，工作面地表位于白草塔进风井南侧，对坡村以东，高升村以北 (图 1)。12501 工作面回采 2 号煤层厚度为 4 m 左右，工作面埋深为 397 m，地表标高为 1 120 m 左右，走向长度为 1 700 m 左右，倾向长度为 180 m 左右，工作面总面积为 306 000 m<sup>2</sup>。煤层开采方式为走向长壁开采，于 2013 年 3 月开始采煤，于 2014 年 9 月停止开采，工作面内的 2 号煤层倾角约为 2°左右，为近水平煤层。工作面煤工业储量为 168 万 t，可采储量为 156 万 t，实际回采率为 93%。煤层损失总量为 9 万 t，其中落煤损失量 1.4 万 t，地质损失量为 7.6 万 t。

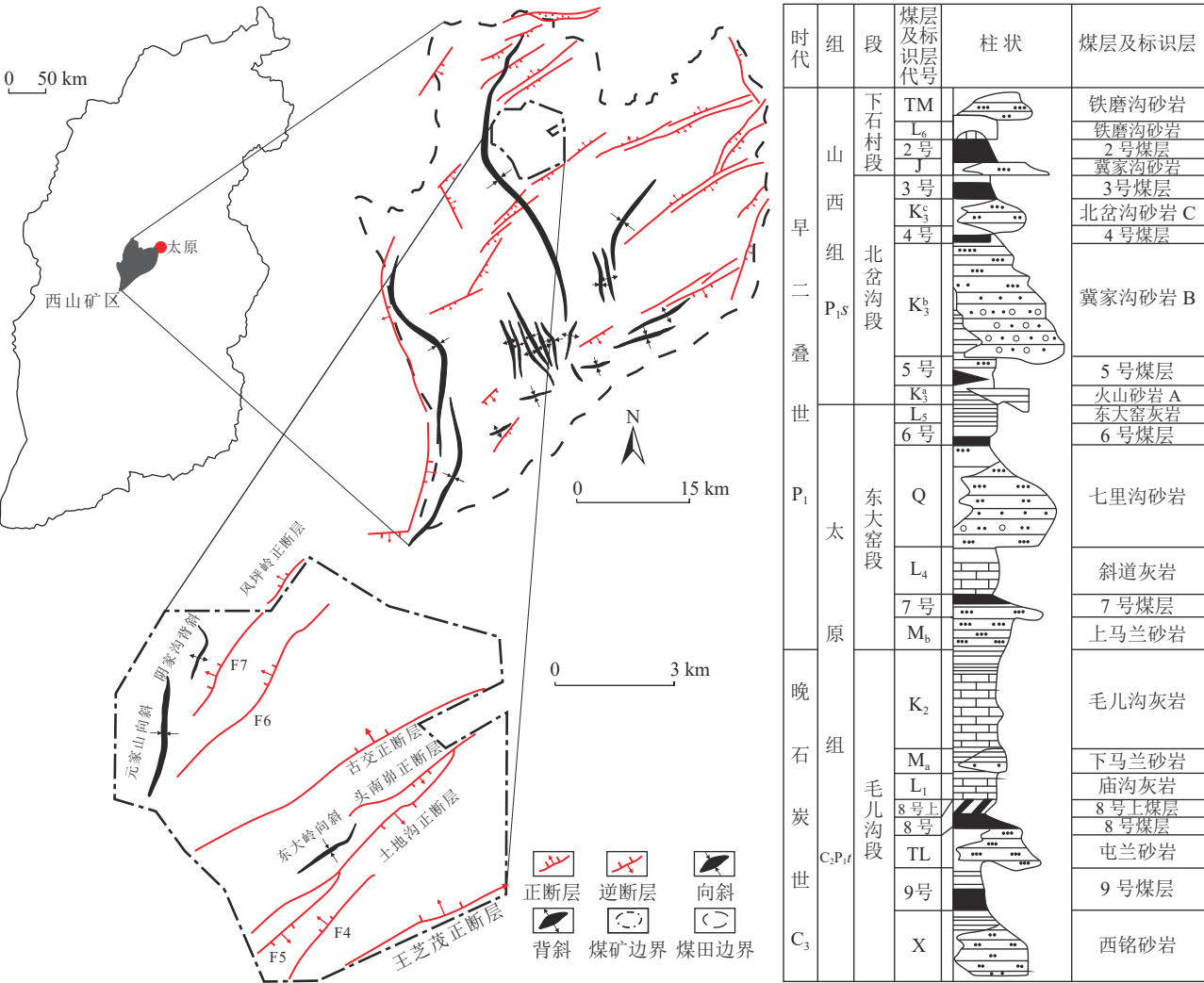


图 1 屯兰煤矿 12501 工作面位置及屯兰矿含煤地层柱状图  
Fig.1 Position of 12501 working face and histogram of coal-bearing strata in Tunlan Mine

2 研究方法

主要基于 FLAC<sup>3D</sup> 进行废弃工作面应力场模拟，UDEC 进行废弃工作面裂隙场模拟和废弃工作面相

似物理模拟。

2.1 FLAC<sup>3D</sup> 模拟

FLAC<sup>3D</sup> 为依泰斯卡公司开发的应用有限差分



方法的数值模拟软件,使用该软件的 6.0 版本,软件应用的是显式拉格朗日算法和混合-离散分区技术(Fast Lagrangian Analysis of Continua),可较好地模拟岩层的大变形<sup>[13]</sup>。根据工作面实际开采中出现的情况,可以将受开采扰动的地层按应力状态分为 3 类,应力值与原始状态相同的原始应力区;应力值大于原始状态的承压区;应力值小于原始状态的卸压区。基于研究区真实地质资料和工作面开采工程资料建立模型,并进行模拟开挖,研究地层开采扰动条件下应力分布特征<sup>[14]</sup>。

根据屯兰煤矿 12501 工作面基本情况,在 FLAC<sup>3D</sup> 中建立地质模型。软件内工作面地质模型沿 Y 方向长度为 2 100 m,其中工作面开采长度为 1 700 m,于工作面 Y 轴方向在其前后预留 200 m 的保护煤柱;模型沿 X 方向宽度为 380 m,包括工作面开采宽度 180 m 及两侧预留的 100 m 宽的保护煤柱。预留保护煤柱经过预模拟验证,可以很好消除边界效应对应力场模拟结果的影响。根据相关研究资料可知,煤层开挖上覆岩层扰动区最大范围为 120 m,下伏地层扰动区最大范围为 50 m,因此建立的三维地质模型沿垂直方向的总厚度为 174 m,模型中工作

面以上地层高度为 120 m,下伏地层深度为 50 m,工作面开采高度为 4 m。模型生成完毕后,进行网格划分工作,并且针对工作面附近的围岩模型进行网格加密,最终模型网格划分后单元个数约为 30 万个(图 2)。

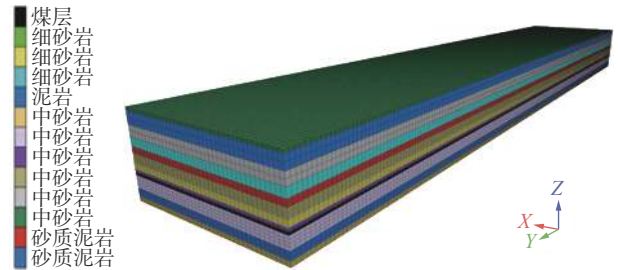


图 2 屯兰煤矿 12501 工作面三维地质模型  
Fig.2 Three-dimensional geological model of 12501 working face in Tunlan Mine

基于煤样三轴压缩实验获得的数据和煤矿钻孔取芯的煤层围岩力学测试数据,计算煤层和开采扰动范围内围岩的体积模量、抗拉强度、剪切模量、黏聚力、内摩擦角等数值模拟需要的参数并对照地层岩性表进行汇总(表 1)。

表 1 数值模型不同层位对应力学参数

Table 1 Numerical model Mechanical parameters corresponding to different layers

岩性	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	体积模量/MPa	剪切模量/GPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa
砂质泥岩	2 642	6 755	3.83	33	4.43	1.46
中砂岩	2 752	8 630	4.96	31	5.63	3.47
细砂岩	2 675	6 500	5.60	33	5.90	3.88
煤	1 380	2 310	1.63	18	1.88	0.52
泥岩	2 530	3 125	2.56	32	3.89	1.17

2.2 UDEC 裂隙场模拟

UDEC 为依泰斯卡公司开发的一款二维空间描述离散介质力学行为的数值模拟软件,本文使用该软件的 7.0 版本。UDEC 擅长于解决地质问题中非连续模型的离散破坏情景,该软件能够模拟煤层开采过程中节理和裂隙场的发育展布特征<sup>[15]</sup>。参照屯兰煤矿 12501 工作面实际尺寸,选取沿走向方向先开采的工作面东南侧采空区进行开挖模拟,该区域长 750 m。建立的 UDEC 模型尺寸为 750 m×174 m,其中垂向上下伏岩层 50 m,开采煤层厚 4 m,上覆岩层 120 m(图 3)。在模型前后两侧分别预留 100 m 煤柱,以消除边界效应。在不影响数值模拟结果的基础上,优化模型以简化模型运算量。

建立的模型中单元体遵循 Mohr-Coulomb 准则

计算。针对工作面及围岩真实力学参数给模型不同岩层赋值,假定同一岩层力学参数相同。UDEC 建模时先对岩层进行划分,然后在岩层内对同一岩性的岩层的节理进行划分,岩层的岩石力学参数与 FLAC<sup>3D</sup> 中相同,节理力学强度参数见表 2,开挖计算前对模型施加初始应力并固定左、右及下边界,运算至模型初始应力场平衡<sup>[16]</sup>。

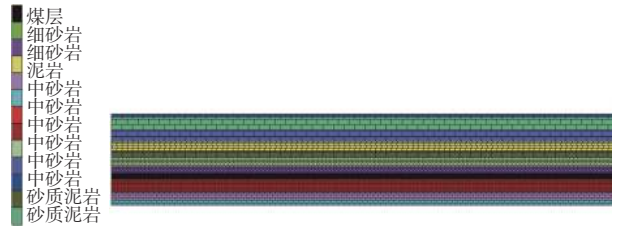


图 3 屯兰煤矿 12501 工作面 UDEC 模型  
Fig.3 UDEC model of 12501 working face in Tunlan Mine

表 2 岩石节理面力学参数  
Table 2 Mechanical parameters of rock joint surface

类型	法向刚度/GPa	剪切刚度/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
砂岩	38.40	15.40	9.50	20.00	2.50
泥页岩	15.20	6.00	2.70	15.00	0.80
煤层	9.60	3.40	0.80	14.00	0.52

工作面开采厚度为 4 m, 开采距离沿走向长度为 750 m, 分 8 次开挖, 前 7 次开挖步长为 100 m, 最后一次开挖步长为 50 m。选取不同开挖尺度的模型进行覆岩裂隙发育和破坏规律研究。

### 2.3 相似物理模拟

相似模拟试验需要使实验室搭建的模型和原型在各种性质上满足一定的相似关系, 具体可以分为几何相似、容重相似、动力相似等。模型几何相似比为 1 : 100, 模型容重相似比  $\beta_\gamma$  为 1 : 1.35, 模型掘进时间相似比  $\beta_t$  为 1 : 10, 模型应力载荷相似比  $\beta_\sigma$  为 1 : 135。

本次相似模拟试验平台位于中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 相似模型架总厚度为 30 cm, 可搭建模型部分最高为 180 cm; 其上部为 16 个液压顶并排组成的覆岩应力加载系统 (图 4), 加载系统控制器使用余姚实杭立数字仪表厂生产的 HLGK-Y100 数显压力表, 可以加载垂向应力范围为 0 ~ 1 MPa; 模型两端长度为 250 cm, 其中模型出露部分长度为 210 cm, 两边各有 20 cm 的部分在模型架支撑柱的凹槽内部, 主要起支撑作用。



图 4 相似模型架上部应力加载系统

Fig.4 Stress loading system on top of similar model frame

相似试验原型为屯兰煤矿 12501 工作面及上下相邻的地层, 由于实际地质情况相对比较复杂, 有少许层位厚度过于小, 不适宜体现在相似模型中, 根据工作面的钻孔资料, 对各煤系地层进行优化, 并汇总确定相似模型各层位信息 (表 3)。结果显示, 12501 工作面煤层采高为 4 m, 围岩以中砂岩为主, 有少部分泥岩地层, 主要属于较坚硬的地层。

表 3 相似模拟试验原型地层统计

Table 3 Similar simulation experiment prototype stratigraphic statistics

编号	岩性	单层层厚/m	累计厚度/m	单层密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
1	中砂岩	6.72	134	2 720
2	砂质泥岩	24.45	127.28	2 645
3	中砂岩	22.06	102.83	2 740
4	细砂岩	17.15	80.77	2 665
5	砂质泥岩	12.5	63.62	2 642
6	中砂岩	18.29	51.12	2 752
7	细砂岩	11.83	32.83	2 675
8	中砂岩	5	21	2 752
9	细砂岩	2	16	2 675
10	2号煤	4	14	1 380
11	中砂岩	10	10	2 762

试验的填充材料为细粒河砂和云母粉, 胶结材料为碳酸钙和石膏, 并使用水来使得材料混合。根据最终确定的试验方案, 相似模型中煤层材料配比方案为河砂与碳酸钙与石膏为 70 : 5 : 5, 中砂岩的材料配比方案为河砂与碳酸钙与石膏为 30 : 3 : 7, 细砂岩的材料配比方案为河砂与碳酸钙与石膏为 30 : 5 : 5, 砂质泥岩的材料配比方案为河砂与碳酸钙与石膏为 40 : 3 : 7。根据试验方案在靠近开采煤层的地层内按 2 cm 一小层进行分层, 远离工作面的覆岩按 3 cm 一小层进行划分。由于下伏岩层破坏程度较于覆岩弱, 主要观察其内竖向裂隙的发育情况, 故下伏岩层按 5 cm 一小层划分。最终确定后的模型高 134 cm, 厚度为 30 cm, 开挖方向长度为 250 cm, 其中开挖距离长共 180 cm (图 5)。并布置应力监测和位移监测点。

## 3 结果与讨论

### 3.1 FLAC<sup>3D</sup> 模拟结果

模型竖向应力沿 Y 方向上基本呈两端对称分布, 故在 Y 方向取模型一侧 (90 ~ 990 m) 做一系列间距为 100 m 的剖面图, 剖面图的位置为 Y=90 m, Y=190 m, Y=290 m, Y=390 m, Y=490 m, Y=590 m, Y=690 m, Y=790 m, Y=890 m, Y=990 m。

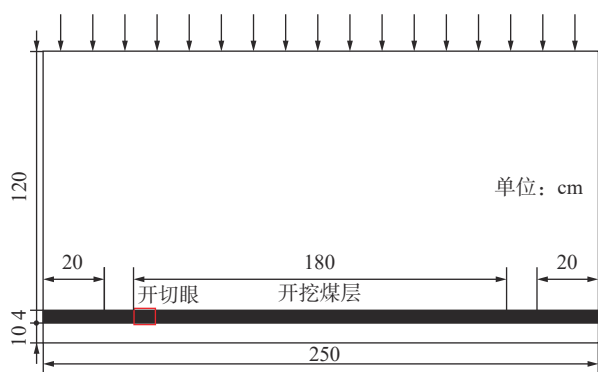


图5 相似模拟试验模型布局设计

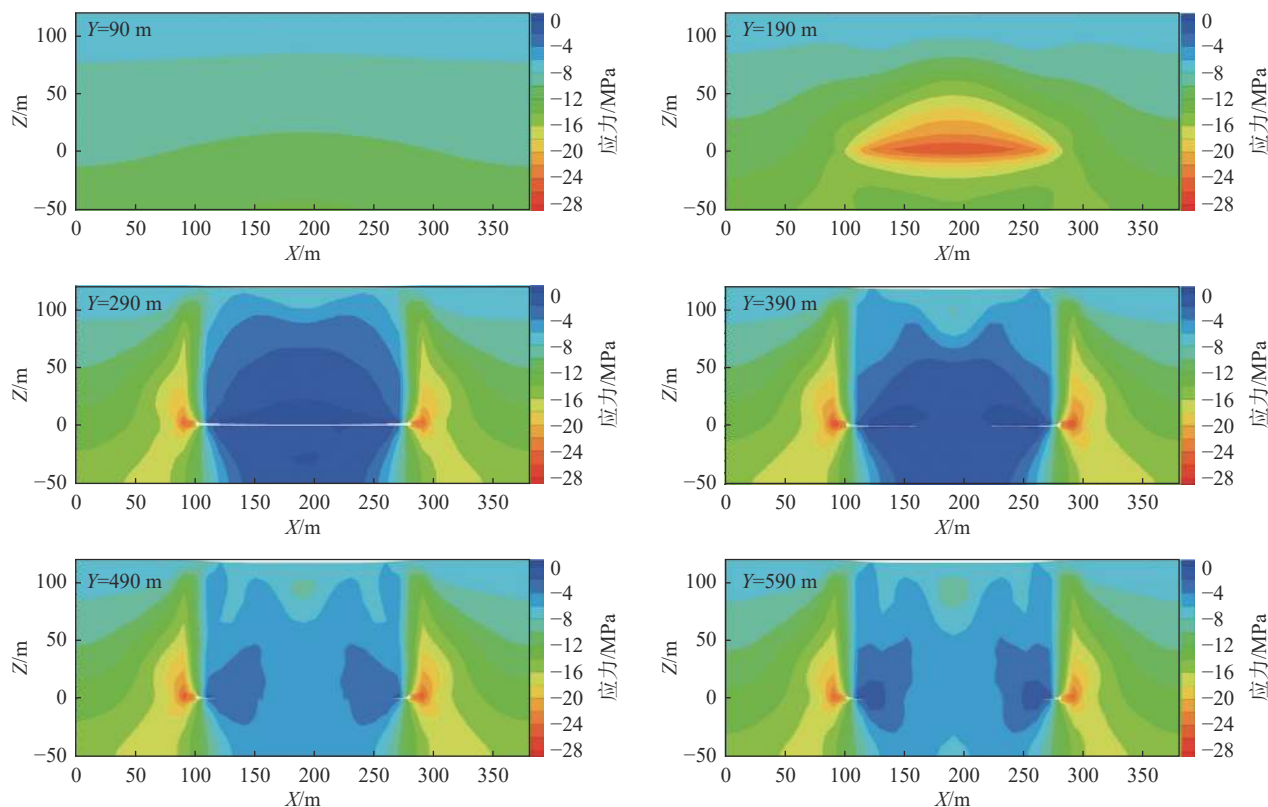
Fig.5 Similar simulation experiment model layout design

690 m,  $Y=790$  m,  $Y=890$  m,  $Y=990$  m, 以研究废弃工作面覆岩垂向应力沿工作面走向的分布特征。

通过  $Y$  方向上不同位置的剖面图的应力分布云图观察 (图 6), 当  $Y \leq 90$  m 时, 处于工作面外侧较远处, 地层竖向应力状态与初始状态相同, 属原始应力

状态区。当  $Y=90$  m 时, 与初始应力状态比, 该位置下伏地层 ( $Z < 20$  m) 的竖向应力逐渐增大, 发生局部小幅应力集中的现象, 岩层受煤层开采的影响较弱。当  $Y=190$  m 时, 此位置与工作面边界较近, 地层的竖向应力明显增大, 与初始应力状态相比, 其竖向出现承压应力状态。

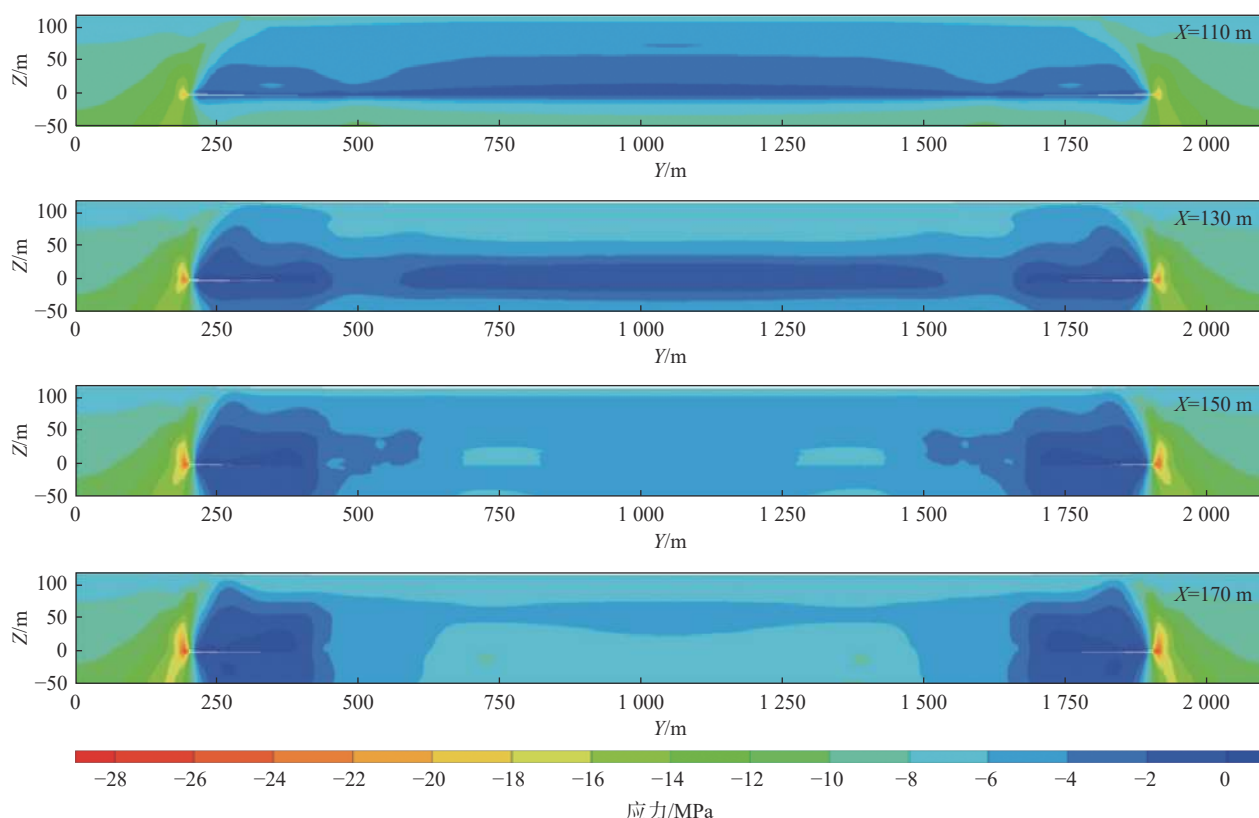
由横向剖面图 (图 6) 可知, 当  $390 \text{ m} \geq Y \geq 290$  m 时, 开挖煤层围岩的垂向应力趋近于 0, 处于完全卸压状态, 与开挖煤层走向边界距离减小导致此状态出现。工作面内侧的岩层由于煤层缺失产生向下垮落的趋势, 使得采区两边地层呈卸压状态。卸压区底面为工作面, 区域整体形态为正梯形台, 下伏地层整体形态为倒梯形台, 覆岩卸压区竖向范围大于下伏岩层卸压区范围。在  $Y > 390$  m 范围, 卸压区的范围逐渐减小, 工作面部的垂向应力逐渐恢复, 但仍小于原岩应力, 这是由于上覆岩层垮落后重新压实, 产生局部的应力集中。

图6  $Y$  方向不同位置切面垂向应力分布Fig.6 Vertical stress distribution of different sections in  $Y$  direction

沿倾向  $X$  方向, 岩层的垂直应力同样呈对称分布 (图 7), 其中模型  $X < 100$  m 和  $X > 280$  m 的区域为围岩, 因此沿  $X$  方向取模型一侧 (100 ~ 280 m) 做剖面图, 剖面图的位置为  $X=110$  m,  $X=130$  m,  $X=150$  m,  $X=170$  m。

倾向方向 ( $X$  方向) 和走向方向 ( $Y$  方向) 上垂直应力分布特征类似。  $X=110$  m 处, 承压区域开始在两侧出现。当从  $X=130$  m 时, 卸压地层范围最大, 卸压程度越靠近边界越大。从  $X=150$  m 到中心  $X=170$  m, 卸压地层中间发生应力集中, 卸压区分布范围逐渐



图 7  $X$  方向不同位置切面垂向应力分布Fig. 7 Vertical stress distribution of different positions in  $X$  direction

减小,该现象存在于工作面中部两侧的岩层,呈梯形分布,下伏岩层受采动的影响范围小于上覆岩层。

岩层垂向应力的分布在模型  $Z$  方向上呈轴对称分布。模型高 170 m ( $-50 \sim 120$  m),开采的 2 号煤层位于  $0 \sim 4$  m,沿岩层  $Z$  方向做一系列间距为 30 m 的剖面剖面图,剖面图的位置为  $Z = -40, -10, 20, 50, 80$  和 110 m。

观察工作面扰动区  $Z$  方向剖面图可发现(图 8),岩层卸压区的分布范围呈先增大后减小的趋势。卸压区的边界为开采煤层工作面的边界,岩层中存在一个由底边相同的上覆岩层内正梯形平台和下伏岩层内倒梯形平台组成的组合卸压区,并且越接近开采煤层垂向应力越小,卸压程度越显著。

在组合卸压区中间存有一个垂向应力自下而上先增大后逐渐减小的重新压实区。当  $Z = -10$  m 时,仅在工作面走向两侧边界的区域呈完全卸压状态,其他区域趋近于原岩应力大小。当  $Z > 110$  m 时,岩层的垂直应力趋近于原始地层的应力大小,表明该区域受煤层采动影响较弱。

综合上述应力场模拟结果,可以得出如下结论:

①工作面走向方向( $Y$ 方向)两侧的围岩承压区延伸至工作面外 100 ~ 110 m,该方向工作面内两侧边缘

完全卸压区分别长约 216 m。②工作面倾向( $X$ 方向)围岩承压区长约 70 m,工作面两侧的完全卸压区分别长约 35 m,故工作面采空区内重新压实区长约 1 268 m,宽约 110 m。③工作面垂向( $Z$ 方向)泄压上部最高约 80 m,为开采煤层的 20 倍,下部约 50 m,为开采煤层 12.5 倍。

### 3.2 UDEC 裂隙场模拟

根据模拟结果进行分析,发现工作面开挖 200 m 后,工作面直接顶和基本顶大范围变形垮落,形成明显垮落带和断裂带,垮落带高度为 10.32 m,采空区中间部位形成高度 60 m 左右的覆岩地层沉降区,断裂带中最高的离层裂隙位于 64.23 m 处,断裂带中穿层裂隙发育高度大约为 41.36 m,以上为离层裂隙区,离层裂隙密度和规模均较小。

工作面开挖 300 m 后,采空区中间部位出现约长度 110 m 左右的重新压实区,该区域内裂隙被重新压实,并且区域两侧的断裂带总高度衰减,采空区中间部分穿层裂隙发育的最大高度减小到 38.23 m,其上离层断裂带高度约为 55.32 m,且离层裂隙密度变小,开合度变小。

模型开挖 400 m 根据模拟结果显示,重新压实区范围伴随开挖不断扩展,断裂带高度无明显变化。



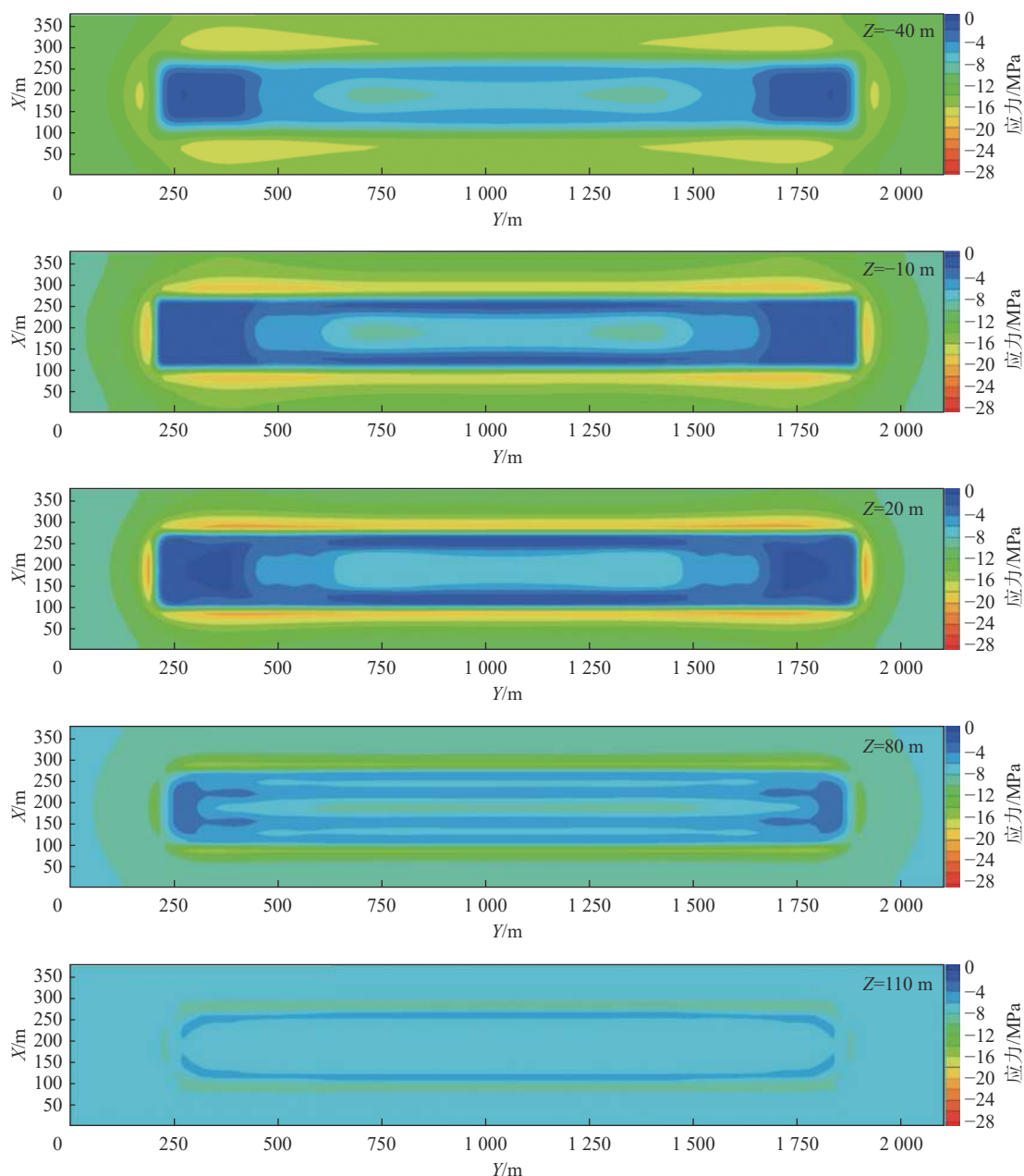


图 8 Z 方向不同位置切面垂向应力分布

Fig.8 Vertical stress distribution of different positions in Z direction

模型开挖 600 m 时,重新压实区两侧的穿层裂隙区继续延展至高度 41.65 m 位置,该区内离层裂隙进一步扩展,上方为离层裂隙区,离层裂隙进一步闭合,密度进一步减小。

模型挖完后,等待重新压实区稳定,根据模拟结果可知发现整个采空区中部重新压实区两侧的垮落带高度约为 12.85 m,穿层裂隙发育最大高度约为 46.03 m,离层裂隙发育最大高度约为 62.33 m,底板裂隙最大扩展距离为 22.3 m(图 9)。

### 3.3 相似物理模拟

根据相似物理模拟结果,在工作面开采的前 20 m,

覆岩没有发生明显变化,基本顶结构保持稳定,煤层直接顶由于应力卸载和岩层自重作用产生了长度约 2~3 m 的水平裂缝,但岩层未发生明显位移(图 10)。

继续开挖煤层至 30 m,上覆岩层开采距离增加导致直接顶在自重作用下发生微小弯曲,并且岩层内发育较为明显的裂缝,裂缝沿水平方向展布。离层裂缝宽度最大处约 2 cm,但直接顶未发生垮落。开挖至 40 m 过程中,上覆岩层离层裂缝伴随开挖进一步扩展,直接顶向下弯曲程度加大,离层裂缝宽度扩展至 3 cm 左右。伴随煤层卸压作用和开采扰动进一步增强,上覆岩层的离层裂缝之间可见长度约

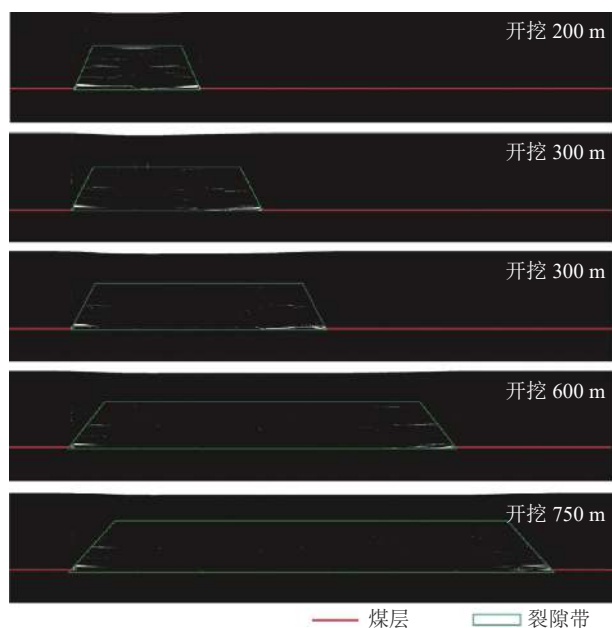


图 9 模型开挖不同长度裂隙带发育

Fig.9 Model excavation of different lengths of fracture zone development

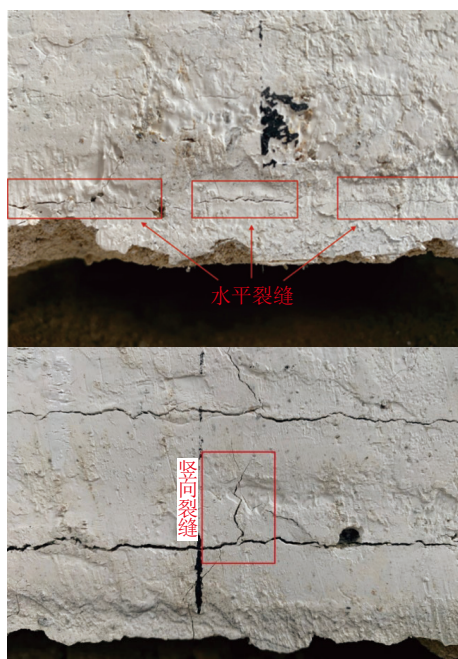


图 10 开挖 20 m 时岩层出现的水平裂缝,开挖 40 m 时覆岩发育的竖向裂缝

Fig.10 Horizontal cracks in rock strata when excavating 20 m and vertical cracks in overburden strata when excavating 40 m

1 m 的竖向裂缝发育,如图 10 所示。

继续开挖煤层,在开挖至 50 m 的过程中,煤层覆岩直接顶经历初次来压,离层裂缝进一步延伸,主离层裂缝两侧同时出现大规模竖向裂缝,并且快速扩展贯通离层裂缝,进而导致部分煤层上覆岩层发生失稳并经历初次垮落,垮落覆岩位于采空区中部,垮落岩层距煤层顶板高度约为 4 m,未垮落部分的上

覆岩层弯曲程度加大,主离层裂缝上移至距离煤层顶板约 8 m 处(图 11)。



图 11 煤层开挖至 50 m 处覆岩初次垮落

Fig.11 Coal seam excavation to 50 m at the first collapse of overlying strata

开挖至 60 m 过程中,主离层裂缝不断扩展延伸,覆岩在应力及自重作用下弯曲程度加大,并且伴随竖向裂缝的不断扩展,煤层直接顶进一步垮落,主离层裂缝上移并加宽,垮落带高度增加至距离煤层顶板约 9 m 处,垮落带内破碎岩石自由堆积,其整体形态为梯形。弯曲下沉岩层内竖向裂缝密度最大为 2 条/m,主离层裂缝上移至距离煤层顶板约 15 m 处(图 12)。

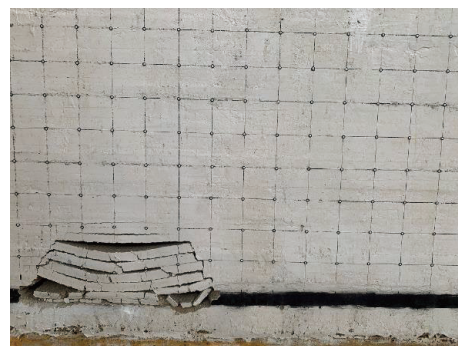


图 12 煤层开挖 60 m 时开采煤层覆岩大范围垮落

Fig.12 Large-scale caving of overlying strata in mining coal seam when excavating 60 m

煤层开挖至 70 m 过程中,开采扰动区岩层经历周期来压,煤层上覆岩层初次大范围垮落,直接顶完全垮落,垮落带高度距离煤层顶板 9.8 m。基本顶部分垮落,弯曲下沉带距离煤层顶板高度约 22.5 m。煤层继续开挖至 100 m 的过程中,在挖至 88 m 时上覆岩层再次经历周期来压,基本顶发生明显位移,开挖结束后,上覆岩层主离层裂缝上移至距离煤层顶板 43.2 m 处,弯曲下沉带高度 49.6 m。

煤层从 60 m 开挖至 100 m 的过程中,可以观察到基本顶岩层从弯曲下沉到形成导气断裂带的动态过程,覆岩整体变化趋势如图 13 中红框所示,在挖



至 70 m 时原本的弯曲岩层开始出现明显的离层裂缝, 密度最大为 3 条/10 m; 开挖至 80 m 时离层裂缝沿水平方向扩展, 裂缝开口逐渐变大, 弯曲岩层内竖向裂缝同时扩展; 在开挖至 90 m 过程中, 岩层内竖

向裂缝继续扩展贯通为穿层裂缝, 成为连接不同高度平行展布离层裂缝的通道 (图 14); 开挖至 100 m 时, 观察到大量穿层裂隙贯通离层裂隙, 并最终形成距离煤层顶板高度约 34.8 m 的导气断裂带。

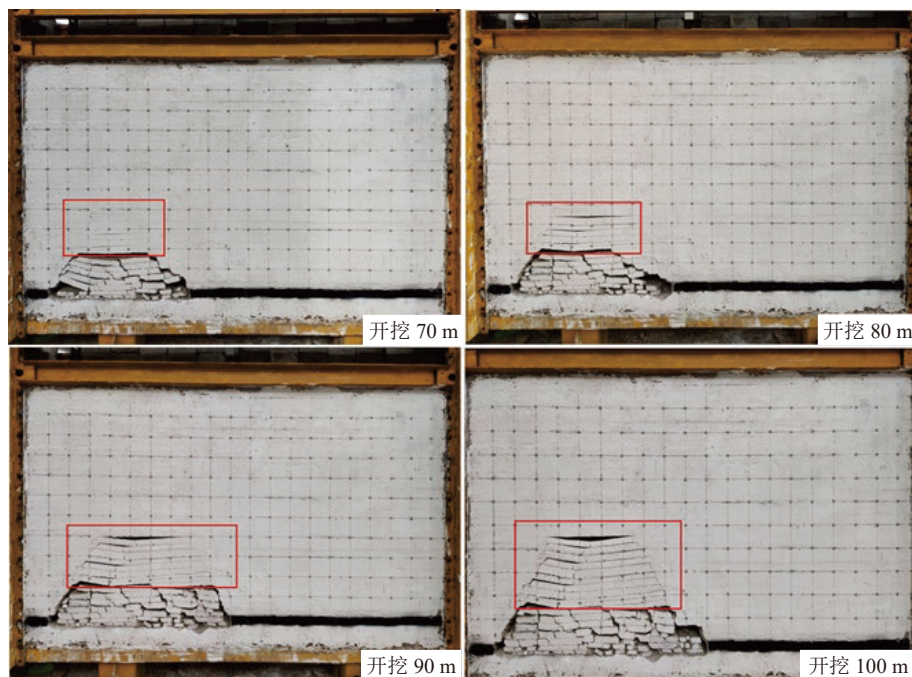


图 13 煤层开挖过程中覆岩弯曲下沉过程

Fig.13 Curved subsidence process of overlying strata during coal seam excavation

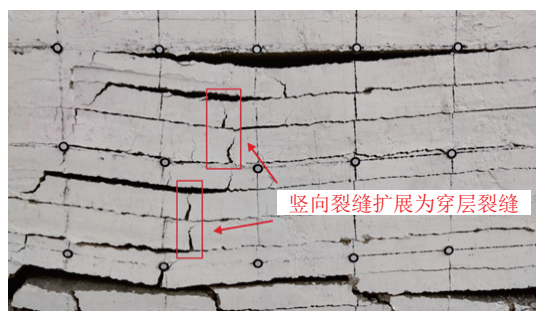


图 14 煤层开挖至 90 m 过程中竖向裂缝扩展为穿层裂缝

Fig.14 Extension of vertical cracks into translamellar cracks during excavation of coal seam to 90 m

煤矿开挖至 140 m 过程中, 主离层裂缝上移至距离煤层顶板 55.4 m 处, 弯曲下层带距离煤层顶板高度为 64.8 m, 穿层裂隙大量发育的导气断裂带高度为 38.9 m。伴随煤层开挖, 煤层上覆岩层开采扰动区边界裂隙呈阶梯状沿展, 水平方向离层裂隙宽度在垂向上随高度增加而逐渐衰减, 开采扰动影响范围整体呈现出梯形。

在煤层开挖至最终的 180 m 时, 煤层上覆岩层进一步扩展, 最终覆岩开采扰动区底部垮落带高度 13.24 m, 穿层裂隙和离层裂隙密集贯通发育的导气

断裂带高度为 47.13 m, 最终稳定后为 46.8 m, 这与 UDEC 数值模拟结果 46.03 结果基本吻合。其上离层裂隙宽度随垂向高度的增加而明显逐渐衰减, 弯曲下沉带延伸至距离煤层顶板 112.5 m 高度 (图 15)。在模型开挖结束后, 持续观察开采扰动区内岩层变化情况, 发现在模型开挖结束后弯曲下沉带以 0.3 m/h 的速度继续向上延伸, 并且此过程中, 导气断裂带上部的离层裂隙逐渐闭合。

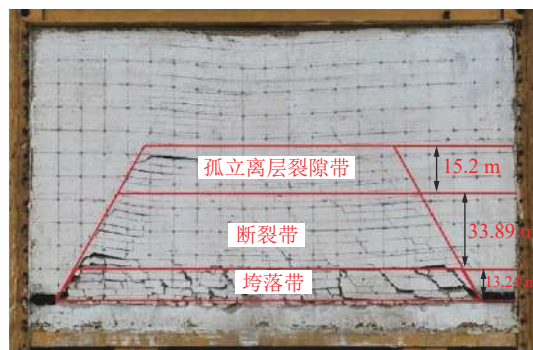


图 15 煤层开挖稳定后相似模型

Fig.15 Similar model after excavation stabilization of coal seam

在煤层开挖过程中, 上覆岩层发生了明显的破坏和移动, 开采扰动裂隙大量发育, 而开挖煤层底板

在卸压作用的影响下也会发生底鼓现象,进而产生一定数量的裂隙,经过观察,模型底板中裂隙以竖向裂隙为主,长度集中于 8~10 m,平均裂隙密度为 0.3~0.4 条/m。底板裂隙呈现出采空区中部较少,两侧较多的分布规律,开采煤层底板区域同样可以成为遗留煤层气资源的赋存空间。

### 3.4 遗留煤层气储层扰动空间区带划分

根据前文针对煤矿开采扰动区的数值模拟和相似模拟研究结果,分析扰动区内应力场和裂隙场分布规律后,对 12501 工作面遗留煤层气资源赋存空间进行精确的边界确定和区带划分,最终将 12501 工作面分为底板裂隙区、重新压实区、导气裂隙区和承压区(图 16)。其中依靠应力场模拟结果确定承压区,依靠裂隙场模拟及相似物理模拟最终确定底板裂隙区、重新压实区和导气裂隙区。

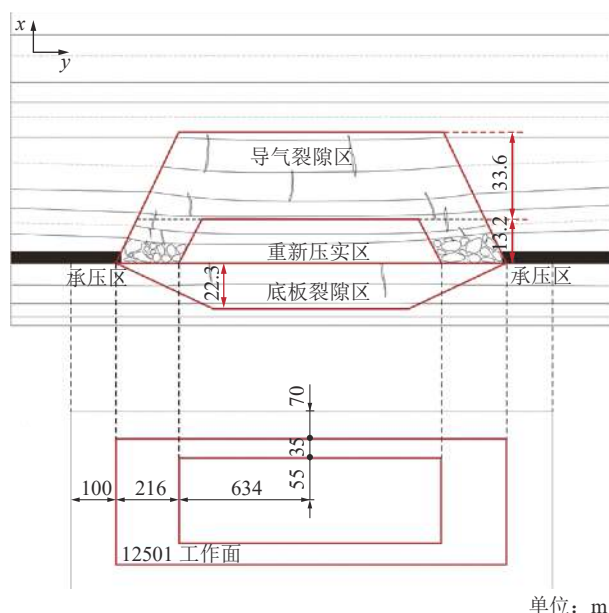


图 16 12501 工作面开采扰动区带划分

Fig.16 12501 working face mining disturbance zone division

1) 底板裂隙区。观察室内相似模拟模型开挖结果发现,由于工作面煤层开采的卸压作用,其底板会一定程度向上发生鼓起,并发育各个方向的裂缝,底板裂缝分布具有一定的规律性,采空区两边靠近煤壁部分的底板裂缝发育密集,偶见近水平发育的离层裂缝;采空区中部下方的底板岩层因为上部垮落岩石和弯曲下沉岩层的压实作用,采动裂缝出现部分的闭合现象,采空区中心部位水平裂缝基本完全闭合,有部分竖向裂缝在模型开挖结束后保留。根据数值模拟结果,底板裂隙区位于煤层中工作面的正下方,整体采动裂隙发育区域呈现出靠近开采煤层为底面的倒梯形台,中间部分与重新压实区紧邻,裂隙场数值模拟结果显示其垂向深度为 22.3 m,为

开采煤厚的 5.58 倍。在底板裂隙区影响深度范围内,如果分布有煤层,也会由于垂向卸压作用,促成煤层气的解吸-扩散-渗流,在浮力作用下,向上运移 2 次成藏。

2) 承压区。根据 FLAC<sup>3D</sup> 模拟揭示的开采扰动区应力分布特征,承压区位于工作面四周的未开采煤储层,在工作面倾向的边界起分别向外延伸 70 m,在工作面走向的边界起分别向外延伸 100 m 的位置上,数值模拟结果显示承压区煤储层垂向应力峰值为 29.36 MPa,远大于煤层原始状态的应力数值,但小于三轴实验中垂层煤样的平均抗压强度,结合相似模拟中边界应力监测点的结果,此部分煤层受到持续的采动应力,处于承压状态。承压区是遗留煤炭资源最为丰富的区域,也是采空区遗留煤层气的主要释放来源,在扰动空间内压力差和浓度差的作用,承压区未开采煤层将源源不断地释放煤层气进入导气裂隙区。

3) 导气裂隙区。根据开采扰动裂隙场数值模拟和室内相似模拟结果,导气裂隙区主体位于开采煤层工作面边缘区域,紧靠未开采煤层的采空区外围部分,此区域的煤层覆岩由于卸压作用发生不同程度的垮落和断裂。在开挖过程中,此区域内的岩层同步发生大范围弯曲下沉,区内岩层整体破坏程度有随工作面距离增加而减弱的趋势,并在底部形成高度约为 13.2 m 的岩层垮落带,其内有部分遗留煤块和破碎覆岩呈现堆积状态。

紧邻垮落带上部为高约 33.6 m 的岩层断裂带,断裂带内竖向裂缝不断扩展贯通离层裂缝,并且越靠近垮落带位置的裂缝数量和密度越大,形成了游离态可以运移聚积的导气裂隙区,同时处于该高度带内的其他煤层也会发生卸压作用,进而解吸释放,此区域为遗留煤层气资源开发的有利区,主要在于该区域由于卸压作用形成了大量的裂隙,为煤层气的二次富集提空了空间,同时扰动空间内存在着煤层气的动态解吸运移,游离态煤层气在浮力作用下动态聚集于导气裂隙区的顶部区域。导气裂隙区整体形状为梯形台,底面外围为 12501 工作面边界,内部到重新压实区外围。导气裂隙区高度为开采煤厚的 11.7 倍。

4) 重新压实区。在相似模拟试验煤层开挖过程中,采场中部地层出现明显的重新压实作用,岩层在自重的作用下弯曲下沉形成重新压实区,区域主体分布于开采工作面采空区的中间部分,倾向宽度为 110 m,走向长度为 1 268 m。此区域主要为弯曲垮



落的覆岩构成,整体形状为梯形台,位于导气裂隙区内部。重新压实区在煤层开挖后先经历卸压作用成为完全卸压区,随后由于岩层不规则垮落堆积和上覆岩层弯曲下沉而出现一定程度的应力恢复,其内裂缝被一定程度压缩,但最终稳定状态时其应力水平仍未恢复至原岩状态,呈现部分卸压状态,此区域内以竖向穿层裂缝为主,该区域区由于各种原因遗留煤炭总量为9万t,为遗留煤层气资源的主要赋存

来源。

在12501工作面开切眼一端靠近开采起始位置处布置有一口采空区井XSTCK-02,其日气产量5000 m<sup>3</sup>以上,已稳产5年左右,甲烷体积分数在60%左右,为高产井。此井所处位置在导气裂隙区,且在整个工作面上属于高部位,大量遗留煤层气向该处运移富集,这为XSTCK-02长时间稳定高产提供了重要基础(图17)。

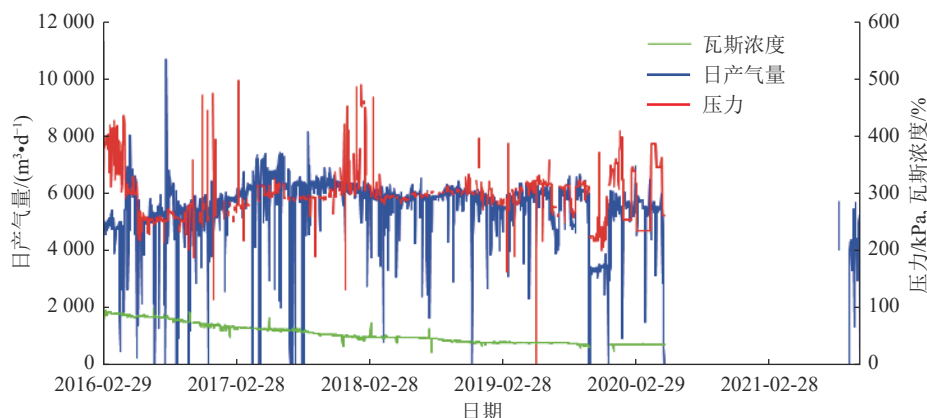


图17 XSTCK-02井排采曲线

Fig.17 XSTCK-02 well drainage curve

## 4 结 论

1) 物理相似模拟与数值模拟吻合度高,综合3种方法,最终将12501废弃工作面遗留煤层气扰动储层空间划分为底板裂隙区、重新压实区、导气裂隙区和承压区。

2) 底板裂隙区位于煤层中工作面的正下方,整体采动裂隙发育区域呈现出靠近开采煤层为底面的倒梯形台,裂隙场数值模拟结果显示其垂向深度为22.3 m,为开采煤厚的5.58倍。

3) 承压区位于工作面四周的未开采煤储层,在工作面倾向的边界起分别向外延伸70 m,在工作面走向的边界起分别向外延伸100 m的位置上,数值模拟结果显示承压区煤储层垂向应力峰值为远大于煤层原始状态的应力数值,但小于垂层煤样的平均抗压强度。

4) 导气裂隙区主体位于开采煤层工作面边缘区域,底部为高度约13.2 m的岩层垮落带,紧邻垮落带上部为高约33.6 m的岩层断裂带,断裂带内竖向裂缝不断扩展贯通层裂缝。导气裂隙区整体形状为梯形台,其高度为开采煤厚的11.7倍。重新压实区主体分布于开采工作面采空区的中间部分,倾向宽度为110 m,走向长度为1268 m。此区域主要为弯曲垮落的覆岩构成,整体形状为梯形台,位于导气裂

隙区内部,导气裂隙区为遗留煤层气资源的开发有利区。

## 参考文献(References):

- [1] 孟召平,师修昌,刘珊珊,等.废弃煤矿采空区煤层气资源评价模型及应用[J].煤炭学报,2016,41(3):537-544.  
MENG Zhaoping, SHI Xiuchang, LIU Shanshan, et al. Evaluation model of CBM resources in abandoned coal mine and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 537-544.
- [2] 王家琛,杨兆彪,秦勇,等.废弃矿井遗留煤层气资源次生富集成藏研究现状及展望[J].煤田地质与勘探,2022,52(4):35-44.  
WANG Jiachen, YANG Zhaobiao, QIN Yong, et al. Research status and prospects of secondary enrichment and accumulation of residual coalbed methane resources in abandoned mines[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 52(4): 35-44.
- [3] KARACAN C Ö, WARWICK P D. Assessment of coal mine methane(CMM) and abandoned mine methane(AMM) resource potential of longwall mine panels: Example from northern Appalachian basin, USA[J]. International Journal of Coal Geology, 2019, 208: 37-53.
- [4] KARACAN C Ö. Modeling and analysis of gas capture from sealed sections of abandoned coal mines[J]. International Journal of Coal Geology, 2015, 138: 30-41.
- [5] YAVUZ H. An estimation method for cover pressure reestablishment distance and pressure distribution in the goaf of longwall coal mines[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(2): 193-205.

- [6] ISLAM M R, HAYASHI D, KAMRUZZAMAN A B M. Finite element modeling of stress distributions and problems for multi-slice longwall mining in Bangladesh, with special reference to the Barapukuria coal mine[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2009, 78(2): 91–109.
- [7] 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(5): 20–23.  
QIAN Minggao, XU Jialin. Study on the “o-shape” circle distribution characteristics of mining-induced fractures in the overlaying strata[J]. *Journal of China Coal Society*, 1998(5): 20–23.
- [8] 刘天泉. 矿山岩体采动影响与控制工程学及其应用[J]. *煤炭学报*, 1995(1): 1–5.  
LIU Tianquan. Influence of mining activities on mine rockmass and control engineering[J]. *Journal of China Coal Society*, 1995(1): 1–5.
- [9] 杨 威. 煤层采场力学行为演化特征及瓦斯治理技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.  
YANG Wei. Mechanical behavior evolution of mining stope and gas control technology[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.
- [10] 苏育飞, 张庆辉, 胡晓兵. 山西省关闭煤矿资源普查方法及资源开发利用重要性评述[J]. *中国煤炭地质*, 2020, 32(9): 79–87.  
SU Yufei, ZHANG Qinghui, HU Xiaobing. Review on Importance of prospecting method and exploitation, utilization for closed coalmine resources in Shanxi Province[J]. *Coal Geology of China*, 2020, 32(9): 79–87.
- [11] 贾 伟. 山西省煤炭采空区煤层气资源调查评价报告[R]. 2018.
- [12] 赵向东. 山西省废弃矿井采空区煤层气地面抽采实践[J]. *中国煤层气*, 2020, 17(1): 35–38, 34.  
ZHAO Xiangdong. Practice of coalbed methane surface extraction in goaf of abandoned mine in shanxi province[J]. *China Coalbed Methane*, 2020, 17(1): 35–38, 34.
- [13] 兰泽全, 张国枢. 多源多汇采空区瓦斯浓度场数值模拟[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(4): 96–101.  
LAN Zequan, ZHANG Guoshu. Numerical simulation of gas concentration field in multi-source and multi-congruence goaf[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(4): 96–101.
- [14] 刘振岭, 郑忠亚. 采空区煤体自燃温度场演变模拟试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(8): 114–120.  
LIU Zhenling, ZHENG Zhongya. Simulation test study on temperature field evolution of coal spontaneous combustion in gob[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(8): 114–120.
- [15] 王 磊, 王树明, 陈 星, 等. 文家坡矿煤层顶板离层动态发育特征 UDEC 数值模拟研究[J]. *采矿技术*, 2021, 21(5): 109–112.  
WANG Lei, WANG Shuming, CHEN Xing, *et al.* UDEC numerical simulation study on dynamic development characteristics of coal seam roof separation in wenjiapo mine[J]. *Mining Technology*, 2021, 21(5): 109–112.
- [16] 王二雨, 戴雨馨, 王文才, 等. UDEC 数值仿真方法在矿山岩体力学实验教学中的应用[J]. *实验技术与管理*, 2021, 38(9): 220–223.  
WANG Eryu, DAI Yuxin, WANG Wencai, *et al.* Application of UDEC numerical simulation method in experimental teaching of mine rock mass mechanics[J]. *Experimental Technology and Management*, 2021, 38(9): 220–223.