

文章编号: 1671-251X(2023)12-0102-07

DOI: [10.13272/j.issn.1671-251x.2023040072](https://doi.org/10.13272/j.issn.1671-251x.2023040072)

# 基于关键层理论的采空区覆岩断裂带有效抽采层位研究

张新杰, 王军, 孙永康, 薛江达, 卞德振

(太原理工大学 安全与应急管理工程学院, 山西 晋中 030600)

**摘要:** 采空区覆岩断裂带有效抽采层位是布置高位抽采钻孔治理邻近层和采空区瓦斯的基础。基于关键层理论, 建立了断裂带有效抽采层位数学模型, 确定了有效抽采层位上下边界: 有效抽采层位的下边界为采空区垮落带之上的第1层关键层, 上边界为采空区上覆岩层高度为10倍采高以下的第1层关键层, 有效抽采层位包含下边界岩层, 不包含上边界岩层。根据断裂带有效抽采层位数学模型计算得出段王煤矿8+9号煤层断裂带有效抽采层位为煤层顶板上方12.6 m处的中砂岩到39.3 m处的4号煤; 根据采空区覆岩断裂带钻孔窥视结果, 得出工作面断裂角约为62°, 破断断裂带高度范围为煤层顶板上方11.5~40.5 m区域。在段王煤矿进行高位钻孔抽采试验, 得出实际的断裂带有效抽采层位为煤层顶板上方13.9 m处的中砂岩到37.4 m处的砂质泥岩。钻孔窥视分析和高位钻孔抽采试验结果均验证了断裂带有效抽采层位数学模型的准确性, 研究成果可为高瓦斯和煤与瓦斯突出矿井的高位抽采工程设计提供理论依据。

**关键词:** 关键层; 断裂带; 有效抽采层位; 瓦斯抽采; 钻孔抽采; 高位抽采

中图分类号: TD712.6 文献标志码: A

A study on the effective extraction layer of overburden fracture zone in  
goaf based on key layer theory

ZHANG Xinjie, WANG Jun, SUN Yongkang, XUE Jiangda, BIAN Dezhen

(College of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Technology,  
Jinzhong 030600, China)

**Abstract:** The effective extraction layer of the overburden fracture zone in goaf is the basis for arranging high-level extraction boreholes to treat adjacent layers and gas in goaf. Based on the key layer theory, a mathematical model for the effective extraction layer in fracture zones is established, and the upper and lower boundaries of the effective extraction layer are determined. The lower boundary of the effective extraction layer is the first key layer above the collapse zone of the goaf, and the upper boundary is the first key layer below 10 times the mining height of the overburden layer in the goaf. The effective extraction layer includes the lower boundary rock layer and does not include the upper boundary rock layer. According to the mathematical model of the effective extraction layer of the fracture zone, it is calculated that the effective extraction layer of the fracture zone in the 8+9 coal seam of Duanwang Coal Mine is from the medium sandstone at 12.6 m above the coal seam roof to the No. 4 coal at 39.3 m. According to the drilling and observation results of the overburden fracture zone in the goaf, the fracture angle of the working face is about 62°. The height range of the fracture zone is 11.5~40.5 m.

收稿日期: 2023-04-23; 修回日期: 2023-12-25; 责任编辑: 盛男。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52004176)。

作者简介: 张新杰(1996—), 男, 河南开封人, 硕士研究生, 研究方向为煤矿安全和瓦斯治理技术, E-mail: [18749889558@163.com](mailto:18749889558@163.com)。

通信作者: 王军(1982—), 男, 山西和顺人, 副研究员, 硕士, 研究方向为煤矿瓦斯及火灾防治理论与技术, E-mail: [wangjun02182@163.com](mailto:wangjun02182@163.com)。

引用格式: 张新杰, 王军, 孙永康, 等. 基于关键层理论的采空区覆岩断裂带有效抽采层位研究[J]. 工矿自动化, 2023, 49(12): 102-107, 113.

ZHANG Xinjie, WANG Jun, SUN Yongkang, et al. A study on the effective extraction layer of overburden fracture zone in goaf based on key layer theory[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(12): 102-107, 113.



扫码移动阅读

above the coal seam roof. A high-level drilling and extraction test is conducted at Duanwang Coal Mine. It is found that the actual effective extraction layer of the fracture zone is from medium sandstone at 13.9 m above the coal seam roof to sandy mudstone at 37.4 m. The results of drilling observation analysis and high-level drilling extraction test have verified the accuracy of the mathematical model of effective extraction layer in the fracture zone. The research results can provide theoretical basis for the design of high-level extraction engineering in high gas and coal and gas outburst mines.

**Key words:** key layer; fracture zone; effective extraction layer; gas extraction; drilling and extraction; high level extraction

## 0 引言

沁水煤田北部大部分矿井存在煤层透气性差的问题, 预抽本煤层瓦斯效果较差, 工作面回采过程中需要通过高位抽采工程抽采采空区覆岩断裂带瓦斯来控制邻近层和采空区瓦斯涌出, 而断裂带有效抽采层位识别是高位抽采工程设计的基础。

许多学者在覆岩断裂带瓦斯抽采有效区域方面进行了研究。钱鸣高等<sup>[1]</sup>、许家林等<sup>[2]</sup>提出了岩层控制的关键层理论, 给出了关键层的判别方法, 揭示了采动覆岩裂隙的发育规律和采动裂隙“O”形圈的分布特征, 并用于指导采空区瓦斯抽采。林海飞等<sup>[3]</sup>、李树刚等<sup>[4]</sup>、赵鹏翔等<sup>[5]</sup>研究了覆岩采动裂隙演化形态与特征, 提出了采动裂隙圆角矩形梯台带模型, 建立了采动裂隙椭抛带理论, 揭示了瓦斯运移优势通道及采高控制机理, 为卸压瓦斯富集区有效抽采提供了理论依据。胡国忠等<sup>[6-7]</sup>采用地面钻孔全柱状原位监测方法, 揭示了覆岩关键层运动的分段特征, 提出了考虑多因素的顶板定向长钻孔瓦斯抽采技术。徐超等<sup>[8]</sup>、张小龙等<sup>[9]</sup>、张礼等<sup>[10]</sup>研究了采动覆岩裂隙发育及渗透率分布特征对采空区及断裂带瓦斯抽采效率的影响, 建立了采动覆岩分形渗透率模型。吴仁伦<sup>[11]</sup>提出了采空区瓦斯卸压运移的“三带”划分, 将采空区上覆煤岩层划分为导气断裂带、卸压解吸带和不易解吸带, 并分析了覆岩关键层结构、工作面长和煤层采高对“三带”范围的影响规律。齐庆新等<sup>[12]</sup>研究了采动条件下裂隙场的形成机制和分布特征, 并对各因素影响裂隙演化的规律进行了定量描述, 指出了采动裂隙场条件下的瓦斯汇集规律。

本文在上述研究的基础上, 基于理论分析与现场经验, 建立了断裂带有效抽采层位的数学模型, 确定了覆岩断裂带有效抽采层位的上下边界, 并通过现场窥视高位钻孔裂隙分布规律及分析高位钻孔抽采浓度变化规律, 验证了数学模型的准确性, 可为高位抽采工程设计提供依据。

## 1 断裂带有效抽采层位数学模型建立

采空区覆岩“三带”演化相似模拟试验如图1所示。采空区覆岩断裂带主要分为离层断裂带和破断断裂带<sup>[13]</sup>。其中破断断裂带内既有离层裂隙又有穿层裂隙, 位于断裂带的下部并与采空区垮落带连通, 是覆岩断裂带瓦斯抽采的有效区域。

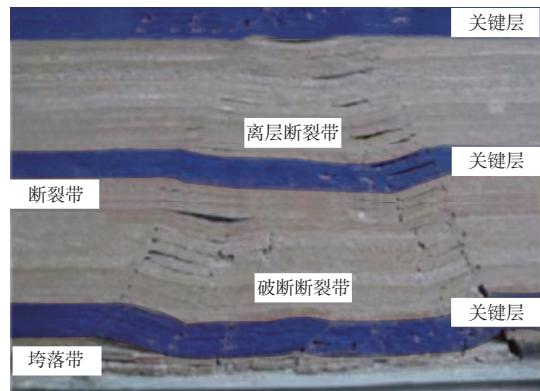


图1 采空区“三带”演化相似模拟试验

Fig. 1 Similarity simulation experiment of evolution of “three zones” in goaf

目前研究覆岩断裂带分布规律的常用方法包括现场探测法<sup>[14-15]</sup>、相似模拟试验法<sup>[16-17]</sup>、数值模拟法<sup>[18-20]</sup>和经验公式法<sup>[21-22]</sup>。本文根据相似模拟试验和现场探测发现, 覆岩中的关键层主要控制着顶板横纵裂隙的发育, 判断控制断裂带发育的关键层位置是确定有效抽采层位的关键。

在关键层判别过程中, 先要根据岩层柱状图中顶板岩性和分布高度进行初步分析。之后, 根据岩层的受力载荷和破断距进一步判断关键层位置<sup>[1]</sup>。

$$\begin{cases} (q_{n+1})_1 < (q_n)_1 \\ l_n < l_{n+1} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{\sum\limits_{i=1}^{n+1} \gamma_i h_i}{\sum\limits_{i=1}^{n+1} E_i h_i^3} < \frac{\sum\limits_{i=1}^n \gamma_i h_i}{\sum\limits_{i=1}^n E_i h_i^3} \\ h_n \sqrt{\frac{2R_{Tn}}{\gamma_n h_n}} < h_{n+1} \sqrt{\frac{2R_{Tn+1}}{\gamma_{n+1} h_{n+1}}} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $(q_n)_1$  为第 1 层岩层自重及其上岩层载荷, kPa;  $l_n$  为上覆第  $n$  层岩层(关键层)的破断距, m;  $\gamma_i$  为上覆第  $i$  层岩层的平均密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $h_i$  为上覆第  $i$  层岩层的平均厚度, m;  $E_i$  为上覆第  $i$  层岩层的弹性模量, MPa;  $R_{Tn}$  为上覆第  $n$  层岩层的抗拉强度, MPa。

$$N_1 = \min \left\{ n \left| \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n h_i > \frac{M}{k-1}, \frac{\sum_{i=1}^{n+1} \gamma_i h_i}{\sum_{i=1}^{n+1} E_i h_i^3} < \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i h_i}{\sum_{i=1}^n E_i h_i^3}, h_n \sqrt{\frac{2R_{Tn}}{\gamma_n h_n}} < h_{n+1} \sqrt{\frac{2R_{Tn+1}}{\gamma_{n+1} h_{n+1}}} \end{array} \right. \right\} \quad (3)$$

式中:  $M$  为煤层采高, m;  $k$  为顶板岩层的平均碎胀系数。

根据现场探测及抽采经验发现, 采空区上覆岩层高度超过 10 倍采高时, 由于关键层的承载控制作用, 其上岩层纵向裂隙发育较少, 更多产生横向离

$$N_2 = \max \left\{ n \left| \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n h_i < 10M, \frac{\sum_{i=1}^{n+1} \gamma_i h_i}{\sum_{i=1}^{n+1} E_i h_i^3} < \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i h_i}{\sum_{i=1}^n E_i h_i^3}, h_n \sqrt{\frac{2R_{Tn}}{\gamma_n h_n}} < h_{n+1} \sqrt{\frac{2R_{Tn+1}}{\gamma_{n+1} h_{n+1}}} \end{array} \right. \right\} \quad (4)$$

2 个关键层之间所有的岩层即有效抽采层位, 有效抽采层位包含下边界岩层, 不包含上边界岩层。

## 2 采空区覆岩断裂带窥视分析

### 2.1 试验工作面概况

山西寿阳段王煤业集团有限公司段王煤矿生产能力为 3.0 Mt/a, 矿井主采 8+9 号和 15 号煤层, 矿井瓦斯等级为高瓦斯, 绝对瓦斯涌出量为 62.08  $\text{m}^3/\text{min}$ 。090507 工作面开采 8+9 号煤层, 平均厚度为 4.4 m, 煤层视密度为 1.52  $\text{t}/\text{m}^3$ , 煤层属于贫瘦煤; 工作面煤层倾角为 0~16°, 平均倾角为 5°, 埋深为 180~414 m; 工作面走向长度为 2 612 m, 倾向长度为 180 m; 工作面采用“U”型布置, 综采放顶煤工艺, 全部垮落法管理顶板。

### 2.2 有效抽采层位分析

根据关键层判别公式, 对 090507 工作面采空区上覆岩层高度为 10 倍采高以下的岩层进行关键层判别, 结果见表 1。

090507 工作面直接顶岩层的平均碎胀系数取 1.35, 根据断裂带有效抽采层位数学模型计算得出采空区垮落带高度为 12.6 m, 其上第 1 层关键层为中砂岩, 工作面采空区上覆岩层高度为 10 倍采高以下的第 1 层关键层为细粒砂岩, 工作面高位钻孔有效抽采层位为 8+9 号煤层顶板上方 12.6 m 处的中砂岩到 39.3 m 处的 4 号煤。

采空区垮落带之上的第 1 层关键层对其上岩层起到承载控制作用, 并将断裂带与垮落带隔离, 成为断裂带有效抽采层位的下边界岩层。采空区垮落带之上的第 1 层关键层  $N_1$  的计算公式为

层, 所以采空区上覆岩层高度为 10 倍采高以下的第 1 层关键层成为断裂带有效抽采层位的上边界岩层。采空区上覆岩层高度为 10 倍采高以下的第 1 层关键层  $N_2$  的计算公式为

表 1 工作面采空区覆岩关键层判别结果

Table 1 Identification results of key layer of overburden in goaf of working face

层号	层厚/m	密度/ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	岩层岩性	关键层位置
1	4.40	1 300	0.3	3	8+9号煤	—
2	8.44	2 300	0.5	5	砂质泥岩	—
3	13.19	2 400	3.0	8	中砂岩	关键层
4	0.50	2 300	0.5	5	泥岩	—
5	0.76	1 300	0.3	3	6号煤	—
6	4.83	2 300	0.5	5	砂质泥岩	—
7	3.80	2 500	2.0	9	细粒砂岩	关键层
8	0.21	2 300	0.5	5	泥岩	—
9	0.58	1 300	0.3	3	5号煤	—
10	6.39	2 300	0.5	5	砂质泥岩	—
11	0.60	1 300	0.3	3	4号煤	—
12	4.89	2 500	2.0	9	细粒砂岩	关键层
13	1.50	2 300	0.5	5	砂质泥岩	—

### 2.3 覆岩断裂带窥视分析

#### 2.3.1 窥视钻孔设计方案

为验证断裂带有效抽采层位数学模型的有效性, 设计在 8+9 号煤层 090509 工作面运输巷布置 2 个窥视钻孔, 观测 090507 工作面采空区上覆岩层垮落带和断裂带分布情况, 进一步确定 8+9 号煤层采空区有效抽采层位的分布规律。钻孔布置如图 2

所示,参数见表2。

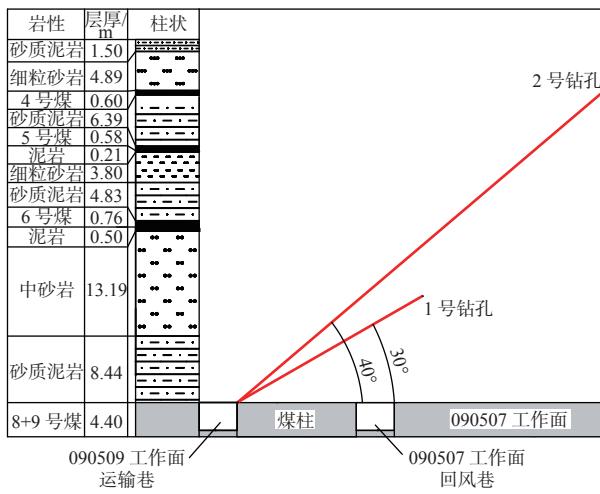


图2 钻孔布置

Fig. 2 Borehole layout

表2 钻孔主要参数

Table 2 Main parameters of borehole

钻孔编号	方位角/(°)	倾角/(°)	终孔深度/m
1	0	30	30
2	0	40	70

### 2.3.2 钻孔窥视结果

1号钻孔实际施工26 m, 钻孔探测成像结果如图3所示。可看出在距孔口0~23 m范围内的围岩完整性较高, 表明该钻孔未进入到断裂带中; 在距孔口23~26 m范围内, 孔壁周围裂隙增多, 破碎加剧, 钻孔施工过程中发生不返渣的情况, 由此可判定该范围内钻孔对应的覆岩顶板进入垮落带。

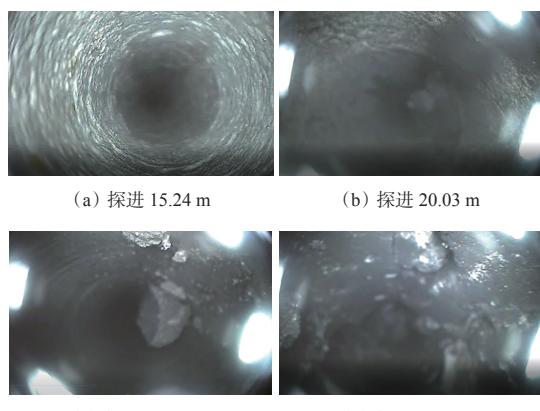


图3 1号钻孔探测成像结果

Fig. 3 Probing imaging results of No.1 borehole

2号钻孔实际施工63 m, 钻孔探测成像结果如图4所示。可看出在距孔口0~33 m范围内的围岩整体完整性较好, 表明该区域处于未受采动影响区域; 在距孔口33~63 m范围内, 孔壁开始出现大量裂隙, 且裂隙分布不规则, 表明钻孔处的顶板处于破

断断裂带; 距孔口63 m之后, 孔壁周围裂隙发育减少, 表明钻孔已经穿过破断断裂带。

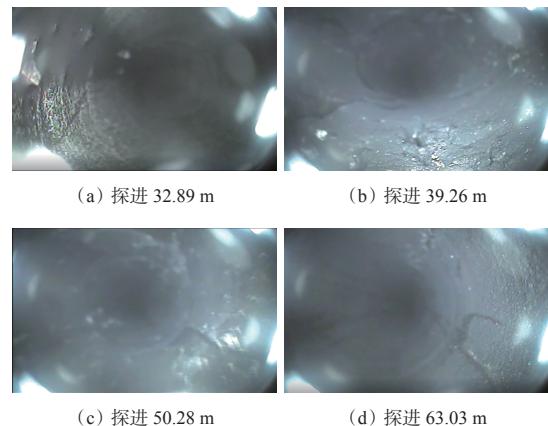


图4 2号钻孔探测成像结果

Fig. 4 Probing imaging results of No.2 borehole

根据现场窥视结果, 破断断裂带和离层断裂带未出现较为明显的边界。根据1号钻孔进入垮落带的位置(图3(c))和2号钻孔进入破断断裂带的位置(图4(a)), 综合判断采空区上覆岩层的破断角约为62°。根据1号和2号钻孔的观测分析, 采空区覆岩破断断裂带的范围为8+9号煤层顶板上方11.5~40.5 m区域。

## 3 断裂带有效抽采层位工业试验

### 3.1 高位钻孔抽采设计

考虑到提高有效抽采段的长度, 将高位钻孔布置成2排, 终孔层位的高度确定为40, 45 m。因此, 在工作面轨道巷顶板上方5 m处布置高位钻场, 在钻场中布置2排共16个高位钻孔, 开孔高度为距煤层顶板6.5 m, 考虑到煤层平均倾角为5°, 2排钻孔倾角分别设计为12, 14°, 控制走向长度为110 m左右。高位钻孔布置如图5所示。

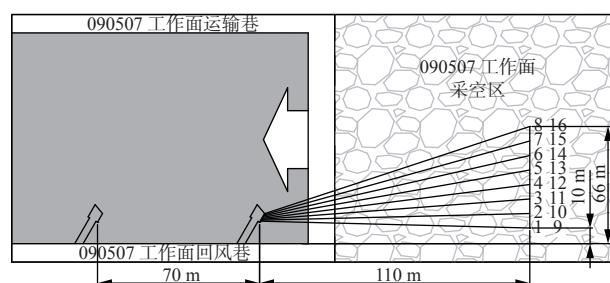


图5 高位钻孔布置

Fig. 5 High level borehole layout

### 3.2 瓦斯抽采效果分析

在工业试验中每组钻孔呈扇形布置, 应用“两堵一注”囊袋进行封孔, 封孔深度为10 m, 在瓦斯抽采过程中各钻孔均未出现漏气现象。对2022年7月

5 日—2022 年 8 月 4 日期间高位钻孔的瓦斯抽采体积分数进行收集整理,选取抽采效果较好和规律较为明显的 6—8 号和 14—16 号钻孔进行分析。高位钻孔瓦斯抽采体积分数如图 6 所示,可看出钻孔瓦斯抽采体积分数曲线基本呈双“马鞍”形,始抽段和衰减段均在高位钻孔有效抽采层位之外,瓦斯抽采体积分数均较小。

8+9 号煤层断裂带有效抽采层位分析如图 7 所示。一般认为通过高位抽采工程抽采覆岩断裂带瓦斯体积分数达 15% 以上时钻孔所在的覆岩层位为断裂带有效抽采层位。图 7 中柱状图斜线充填区域为瓦斯抽采体积分数达 15% 以上的有效抽采层位,范

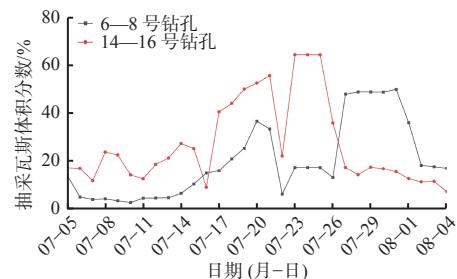


图 6 高位钻孔瓦斯抽采体积分数

围为 8+9 号煤层顶板上方 13.9 m 处的中砂岩到 37.4 m 处的砂质泥岩。通过实际观测确定的有效抽采层位与数学模型确定的有效抽采层位基本一致。

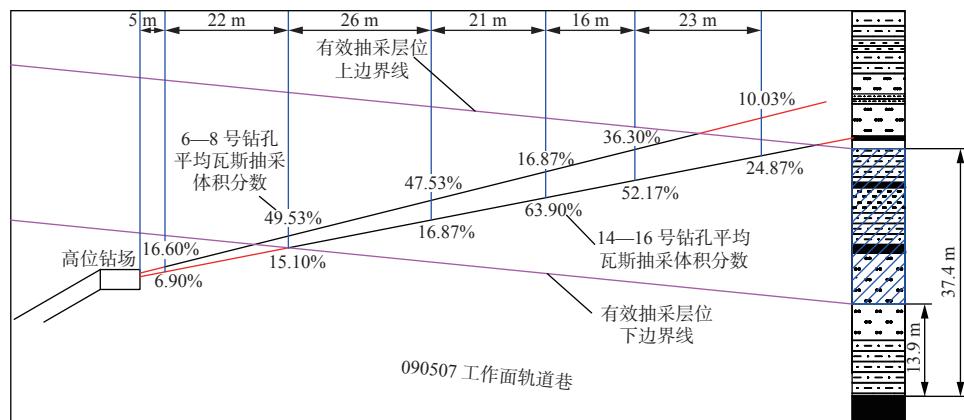


图 7 断裂带有效抽采层位

Fig. 7 Effective extraction layer in fracture zone

#### 4 结论

1) 建立了断裂带有效抽采层位数学模型,得出了有效抽采层位的下边界为采空区垮落带之上的第 1 层关键层,上边界为采空区上覆岩层高度为 10 倍采高以下的第 1 层关键层,其中有效抽采层位包含下边界岩层,不包含上边界岩层。

2) 根据断裂带有效抽采层位数学模型计算得出段王煤矿 8+9 号煤层采空区断裂带有效抽采层位高度范围为顶板上方 12.6~39.3 m。根据 090507 工作面采空区覆岩裂隙窥视结果,得出工作面断裂角约为 62°,破断断裂带高度范围为顶板上方 11.5~40.5 m,验证了断裂带有效抽采层位数学模型的准确性。

3) 根据断裂带有效抽采层位数学模型,在段王煤矿 090507 工作面进行高位钻孔抽采试验。结果表明,8+9 号煤层采空区覆岩断裂带有效抽采层位为顶板上方 13.9 m 处的中砂岩到 37.4 m 处的砂质泥岩,与数学模型确定的有效抽采层位基本一致,取得了很好的应用效果。

#### 参考文献(References):

- [1] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 等. 岩层控制的关键层理论 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.  
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin, et al. Key strata theory in ground control [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003.
- [2] 许家林, 钱鸣高. 覆岩关键层位置的判别方法 [J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(5): 463-467.  
XU Jialin, QIAN Minggao. Method to distinguish key strata in overburden [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(5): 463-467.
- [3] 林海飞, 李树刚, 成连华, 等. 覆岩采动裂隙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.
- [4] 李树刚, 徐培耘, 赵鹏翔, 等. 采动裂隙带时效诱导作用及卸压瓦斯抽采技术 [J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(9): 146-152.  
LI Shugang, XU Peiyun, ZHAO Pengxiang, et al. Aging

- induced effect of elliptic paraboloid zone in mining cracks and pressure released gas drainage technique[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(9): 146-152.
- [5] 赵鹏翔, 卓日升, 李树刚, 等. 综采工作面瓦斯运移优势通道演化规律采高效研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(4): 848-856.
- ZHAO Pengxiang, ZHUO Risheng, LI Shugang, et al. Study on the mining height evolution law of the dominant channel of gas migration in fully mechanized mining face[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2019, 36(4): 848-856.
- [6] 胡国忠, 许家林, 秦伟, 等. 基于关键层运动的邻近层卸压瓦斯抽采优化设计方法[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(5): 52-59.
- HU Guozhong, XU Jialin, QIN Wei, et al. Optimization designing method of pressure-relief gas drainage in adjacent layers based on key strata movement[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(5): 52-59.
- [7] 胡国忠, 李康, 许家林, 等. 覆岩采动裂隙空间形态反演方法及在瓦斯抽采中的应用[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(2): 750-762.
- HU Guozhong, LI Kang, XU Jialin, et al. Spatial morphology inversion method of mining-induced fractures of overburden and its application in gas drainage[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(2): 750-762.
- [8] 徐超, 王凯, 郭琳, 等. 采动覆岩裂隙与渗流分形演化规律及工程应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(12): 2389-2403.
- XU Chao, WANG Kai, GUO Lin, et al. Fractal evolution law of overlying rock fracture and seepage caused by mining and its engineering application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(12): 2389-2403.
- [9] 张小龙, 王飞, 刘红威, 等. 基于采动覆岩三维裂隙场演化规律的地面L型钻井瓦斯抽采技术[J]. *中国安全生产科学技术*, 2022, 18(10): 56-61.
- ZHANG Xiaolong, WANG Fei, LIU Hongwei, et al. Study on gas drainage technology of ground L-type drilling based on evolution law of three-dimensional fracture field in mining overburden rock[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2022, 18(10): 56-61.
- [10] 张礼, 齐庆新, 张勇, 等. 采动覆岩裂隙场三维形态特征及其渗透特性研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(4): 695-705.
- ZHANG Li, QI Qingxin, ZHANG Yong, et al. Study on three-dimensional shape and permeability of mining-induced fractured field in overburden rock[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(4): 695-705.
- [11] 吴仁伦. 煤层群开采瓦斯卸压抽采“三带”范围的理论研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
- WU Renlun. Study on the scope of the "three zones" of gas pressure relief and extraction in coal seam group mining[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2011.
- [12] 齐庆新, 李宏艳, 刘洪永, 等. 采动应力裂隙场时空演化与瓦斯流动场耦合效应[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- QI Qingxin, LI Hongyan, LIU Hongyong, et al. The coupling effect of time-space evolution and methane flow field in mining fissure field[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [13] 许家林, 钱鸣高. 覆岩采动裂隙分布特征的研究[J]. *矿山压力与顶板管理*, 1997, 14(3/4): 210-212.
- XU Jialin, QIAN Minggao. Study of features of distribution of overlaying stratum fractures caused by mining[J]. *Ground Pressure and Strata Control*, 1997, 14(3/4): 210-212.
- [14] 刘瑞瑞, 刘洋, 方刚, 等. 袁大滩煤矿覆岩破坏规律及顶板水害防治对策[J]. *煤矿安全*, 2022, 53(7): 82-91.
- LIU Ruirui, LIU Yang, FANG Gang, et al. Law of overburden failure and roof water damage in Yuandatan Coal Mine[J]. *Safety in Coal Mines*, 2022, 53(7): 82-91.
- [15] 徐刚, 张春会, 张震, 等. 综放工作面顶板灾害类型和发生机制及防治技术[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(2): 44-57.
- XU Gang, ZHANG Chunhui, ZHANG Zhen, et al. Types, occurrence mechanisms and prevention techniques of roof disasters in fully-mechanized top coal caving face[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(2): 44-57.
- [16] 樊玉峰, 肖晓春, 丁鑫, 等. 岩煤结构静动组合加载试验系统研制及应用[J]. *中国矿业大学学报*, 2023, 52(3): 502-512.
- FAN Yufeng, XIAO Xiaochun, DING Xin, et al. Development and application of a testing system for static and dynamic combined loading of rock-coal structures[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2023, 52(3): 502-512.
- [17] 潘立友, 唐鹏, 周脉来, 等. 悬顶结构巷道冲击地压防控研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(4): 42-48.
- PAN Liyou, TANG Peng, ZHOU Mailai, et al. Research on prevention and control of rock burst in entry with suspended roof structure[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(4): 42-48.
- [18] 杨军, 王宏宇, 王亚军, 等. 切顶卸压无煤柱自成巷顶板断裂特征研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(6): 1137-1144.
- YANG Jun, WANG Hongyu, WANG Yajun, et al. Fracture characteristics of the roof in gob-side entry retaining with roof cutting and pressure release[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2019, 36(6): 1137-1144.

- energy in coal mine[J]. *Industry and Mine Automation*, 2021, 47(7): 85-91.
- [13] 刘晓阳, 马新彦, 田子建, 等. 井下金属结构等效接收天线的放电火花安全性研究[J]. *工矿自动化*, 2021, 47(9): 126-130.  
LIU Xiaoyang, MA Xinyan, TIAN Zijian, et al. Research on discharge spark safety of equivalent receiving antenna of underground metal structure[J]. *Industry and Mine Automation*, 2021, 47(9): 126-130.
- [14] 梁伟峰, 孙继平, 彭铭, 等. 煤矿井下无线电波防爆安全功率阈值研究[J]. *工矿自动化*, 2022, 48(12): 123-128, 163.  
LIANG Weifeng, SUN Jiping, PENG Ming, et al. Research on safe power threshold of radio wave explosion-proof in coal mine[J]. *Journal of Mine Automation*, 2022, 48(12): 123-128, 163.
- [15] 孙继平, 彭铭, 潘涛, 等. 无线电波防爆安全阈值研究[J]. *工矿自动化*, 2023, 49(2): 1-5.  
SUN Jiping, PENG Ming, PAN Tao, et al. Research on the safety threshold of radio wave explosion-proof[J]. *Journal of Mine Automation*, 2023, 49(2): 1-5.
- [16] 张勇. 煤矿井下无线射频近场谐振耦合防爆电磁能仿真分析[J]. *煤矿安全*, 2022, 53(8): 134-138.  
ZHANG Yong. Simulation analysis of explosion-proof electromagnetic energy coupled with radio frequency near field resonance in underground coal mine[J]. *Safety in Coal Mines*, 2022, 53(8): 134-138.
- [17] 李褚益. 微波技术与微波电路[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2007.  
LI Chuyi. *Microwave technology and microwave circuits*[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2007.
- [18] 钟顺时. 天线理论与技术[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2015.  
ZHONG Shunshi. *Antenna theory and techniques*[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015.
- [19] EXCELL P S, MADDOCKS A J. Assessment of worst-case receiving antenna characteristics of metallic industrial structures. Part 1: Electrically-small structures[J]. *Journal of the Institution of Electronic and Radio Engineers*, 1986, 56(1): 27-32.
- [20] GB/T 3836.27—2019 爆炸性环境 第 27 部分 静电危害试验[S].  
GB/T 3836.27-2019 Explosive atmospheres-Part 27: Electrostatic hazards-Test[S].
- [21] GB/T 3836.4—2021 爆炸性环境 第 4 部分: 由本质安全型“i”保护的设备[S].  
GB/T 3836.4-2021 Explosive atmospheres-Part 4: Equipment protection by intrinsic safety "i"[S].
- [22] 工业和信息化部. 工业和信息化部关于调整 700 MHz 频段频率使用规划的通知 [EB/OL]. [2023-06-10]. [https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/txy/art/2020/art\\_4d7d0b8cf92b448e9817eea55efb2ea7.html](https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/txy/art/2020/art_4d7d0b8cf92b448e9817eea55efb2ea7.html). Ministry of Industry and Information Technology. Notice of the Ministry of Industry and Information Technology on adjusting the use plan of the 700 MHz frequency band [EB/OL]. [2023-06-10]. [https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/txy/art/2020/art\\_4d7d0b8cf92b448e9817eea55efb2ea7.html](https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/txy/art/2020/art_4d7d0b8cf92b448e9817eea55efb2ea7.html).

(上接第 107 页)

- [19] 卢恒, 张传宝, 仵振华, 等. 综放工作面过空巷矿压显现规律及控制技术研究[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2022, 4(6): 47-59.  
LU Heng, ZHANG Chuanbao, WU Zhenhua, et al. Study on ground pressure and control technology of a fully mechanized top coal caving longwall face passing a pre-driven roadway[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2022, 4(6): 47-59.
- [20] 王同旭, 周永晖, 江东海. 坚硬顶板断裂释放能量及其对煤层扰动影响研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(4): 30-38.  
WANG Tongxu, ZHOU Yonghui, JIANG Donghai. Study on energy released from hard roof fracture and its influence on coal seam disturbance[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology*

- (Natural Science), 2022, 41(4): 30-38.
- [21] 徐刚, 张春会, 蔺星宇, 等. 基于分区支承力学模型的综放工作面顶板矿压演化与压架预测[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(10): 3622-3633.  
XU Gang, ZHANG Chunhui, LIN Xingyu, et al. Predicting ground pressure evolution and support crushing of fully mechanized top coal caving face based on zoning support mechanical model[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(10): 3622-3633.
- [22] 李金华, 郑承先, 谷拴成, 等. 直接顶-基本顶耦合作用下采场顶板断裂力学模型研究与应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(7): 123-129.  
LI Jinhua, ZHENG Chengxian, GU Shuancheng, et al. Research and application of fracture mechanics model of stope roof under the coupling of direct roof and basic roof[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(7): 123-129.