



煤炭科学技术 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

煤炭科学技术

小断层影响下的采空区瓦斯运移规律研究

张学博 王攀 王豪

引用本文:

张学博, 王攀, 王豪. 小断层影响下的采空区瓦斯运移规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 214–230.

ZHANG Xuebo, WANG Pan, WANG Hao. Study on gas migration law in goaf under the influence of small faults[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 214–230.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0672>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

小断层活化对采空区上覆岩层破坏及渗透性影响

Effect of small faults activation on failure and permeability of overburden strata in goaf

煤炭科学技术. 2022, 50(2): 75–85 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/677092dd-eab7-46d7-a908-ab063acc25d4>

煤与瓦斯突出两相流运移规律研究进展

Research progress on the two-phase flow migration law of coal and gas outburst

煤炭科学技术. 2023, 51(8): 129–139 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1826>

采动覆岩卸压瓦斯运储通道属性参数拓扑关系研究

Research on the evolution mechanism of the topological relationship of the property parameters of the mining overburden rock pressure relief gas migration channel

煤炭科学技术. 2024, 52(2): 135–149 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1784>

煤岩体突水通道中骨料沉积运移规律研究

Study on the migration law of aggregate sediment in the water inrush channel of coal rock mass

煤炭科学技术. 2023, 51(8): 200–207 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0986>

高位巨厚覆岩运移规律及矿震触发机制研究

Study on movement law of extremely thick strata and triggering mechanism of mine earthquakes

煤炭科学技术. 2023, 51(3): 10–20 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1613>

煤矿封闭采空区瓦斯发电气源储量预测方法研究

Research on prediction method of gas source reserve for gas power generation in closed goaf of coal mine

煤炭科学技术. 2019(6) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/08c012d1-c235-4d64-b771-6b0d83792b49>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

张学博, 王攀, 王豪. 小断层影响下的采空区瓦斯运移规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 214–230.
ZHANG Xuebo, WANG Pan, WANG Hao. Study on gas migration law in goaf under the influence of small faults[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 214–230.

小断层影响下的采空区瓦斯运移规律研究

张学博^{1,2,3,4}, 王攀¹, 王豪¹

(1. 河南理工大学安全科学与工程学院, 河南焦作 454003; 2. 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室, 河南焦作 454003; 3. 煤炭安全生产河南省协同创新中心, 河南焦作 454003; 4. 河南神火煤电股份有限公司, 河南永城 476600)

摘要:在煤矿开采过程中, 小断层会导致采空区瓦斯聚集成瓦斯富集区, 对生产安全具有很大威胁, 因此有必要研究小断层影响下的采空区瓦斯运移规律。通过 UDEC 数值模拟采空区上覆岩层破坏过程, 从而计算小断层影响下采空区上覆岩层的空隙率, 并利用 FLUENT 软件数值模拟开采过程中考虑小断层影响的采空区瓦斯运移规律。研究表明: ①工作面距离小断层 20 m 远处, 小断层从顶部首先出现滑移现象, 采空区上覆岩层的位移开始受到断层的影响; 工作面到达断层时, 由于断层滑移, 上盘岩体在断层面滑移产生回转现象, 支撑着采空区岩层, 覆岩垮落位移量出现大幅度减小, 并且岩层垮落出现滞后现象; 小断层的影响范围有限, 工作面过小断层 60 m 之后, 采空区上覆岩层位移规律逐渐恢复正常。②通过分析含小断层采空区上覆岩层位移特征, 得到了采空区上覆岩层位移及其拟合公式, 计算得到了三维空隙率分布规律: 垮落带范围内, 覆岩空隙率在 4 个隅角位置最大, 并且断层靠近进回风巷的位置也出现了空隙率增高; 裂隙带范围内, 除断层靠近进回风巷的位置空隙率较大, 其他位置空隙率相对较低且变化不明显。③获得了小断层影响下的采空区瓦斯运移规律: 在工作面距离断层 50 m 远处, 采空区瓦斯运移几乎不受断层的影响; 在工作面推进至断层时, 瓦斯沿着断层及其附近的高空隙率覆岩产生的优势逃逸通道向采空区深部运移, 同时上盘的瓦斯也向深部转移导致大量瓦斯积聚在断层下盘, 可能导致瓦斯随漏风流入工作面及回风巷; 在工作面过断层 50 m 时, 采空区瓦斯继续向上隅角附近转移; 工作面过断层 100 m 时, 采空区上覆岩层瓦斯运移出现回转现象, 上隅角和下盘垮落带瓦斯体积分数高。

关键词:小断层; 瓦斯运移; 覆岩移动; 采空区

中图分类号: TD712

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)04-0214-17

Study on gas migration law in goaf under the influence of small faults

ZHANG Xuebo^{1,2,3,4}, WANG Pan¹, WANG Hao¹

(1. College of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Henan Province Gas Geology and Gas Control Key Laboratory, Jiaozuo 454003, China; 3. State Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean-Efficiency Utilization, Jiaozuo 454003, China; 4. Henan Shenhua Group Co., Ltd., Yongcheng 476600, China)

Abstract: In the process of coal mining, small faults can lead to the accumulation of gas in the goaf, forming a gas enrichment zone, which poses a great threat to production safety. Therefore, it is necessary to study the gas migration law in the goaf under the influence of small faults. By using UDEC software to numerically simulate the failure process of the overlying strata in the goaf, the porosity of the overlying strata under the influence of small faults is calculated, and FLUENT software is used to numerically simulate the gas migration law in the goaf considering the influence of small faults during the mining process. Research has shown that: ① the working face is 20 m away from the small fault, and the sliding phenomenon first appears from the top of the small fault, and the displacement of the overlying rock layer in the goaf begins to be affected by the fault; When the working face reaches the fault, due to the sliding of the fault, the hanging wall

收稿日期: 2023-05-23

责任编辑: 常琛

DOI: 10.12438/cst.2023-0672

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52274186, 52274187), 河南理工大学博士基金资助项目(B2019-56)

作者简介: 张学博(1981—), 男, 河南民权人, 副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: zhxbhpu@163.com

rock mass undergoes a rotation phenomenon on the fault surface, supporting the rock strata in the goaf. The displacement of the overlying rock collapses significantly, and the rock strata collapse lags behind; The influence range of small faults is limited, and after the working face passes through the small fault for 60 m, the displacement law of the overlying strata in the goaf gradually returns to normal. ② By analyzing the displacement characteristics of the overlying strata in the goaf containing small faults, the displacement of the overlying strata in the goaf and its fitting formula were obtained. The three-dimensional porosity distribution law was calculated: within the range of the caving zone, the porosity of the overlying strata is the highest at four corner positions, and there is also an increase in porosity near the inlet and outlet air tunnels of the faults; Within the fracture zone, except for the position where the fault is close to the inlet and return air roadway, the porosity is relatively low and the change is not significant in other positions. ③ Obtained the gas migration law in the goaf under the influence of small faults: At a distance of 50 m from the fault in the working face, the gas migration in the goaf is almost not affected by the fault; When the working face advances to the fault, the gas migrates along the advantageous escape channel generated by the high porosity overlying rock near the fault towards the deep part of the goaf. At the same time, the gas in the hanging wall also transfers towards the deep part, causing a large amount of gas to accumulate in the lower wall of the fault, which may cause the gas to flow into the working face and return air roadway with the leakage air; When the working face passes through a fault of 50 m, the gas in the goaf continues to transfer towards the vicinity of the upper corner; When the working face passes through a fault of 100 m, the gas migration in the overlying strata of the goaf shows a turning phenomenon, and the gas concentration in the upper corner and lower wall caving zones is high.

Key words: small faults; gas migration; overburden movement; goaf

0 引言

我国一次能源消费占比中,煤炭占比为 56.8%,这种格局短期内不会改变^[1]。在煤炭开采过程中,瓦斯仍是影响安全生产的主要因素之一,而瓦斯抽采是煤矿瓦斯灾害防治的主要手段。程志恒等^[2]通过数值模拟研究了采空区顶板裂隙演化规律,揭示了采空区高位走向长钻孔瓦斯高效抽采机制。赵鹏翔等^[3]针对矿井地质条件、瓦斯赋存特征,开展长距离定向长钻孔与高抽巷协同抽采技术,有效地控制了综采工作面瓦斯超限。孟召平等^[4]结合采空区围岩变形破坏规律,探索了煤矿采空区煤层气地面抽采关键技术。

随着浅表煤层开采殆尽,采面深度逐渐加深,开采遇到的地质条件越来越复杂,遇到断层或者褶皱等的概率更高,并且由于深部采动应力效应更明显,断层的影响也更剧烈。断层大小分级标准主要与断层落差有关,而断层落差是指某地质历史时期垂直于断层走向的剖面上两盘对应层之间的铅直距离^[5]。对于厚度为 5 m 以下的煤层,当断层落差小于煤层厚度时,可以认定其为小断层。小断层断裂带的普遍存在对开采工作面的施工设计、生产安全以及生产效率等均造成不可忽视的影响^[6-7],查明小断层对采空区覆岩移动和瓦斯运移规律的影响至关重要。

学者针对断层对煤矿开采的影响进行了大量研究^[8-9]。断层在我国广泛分布^[10],并且研究人员发现断层在煤与瓦斯突出事故中往往起着不可忽视的作用。刘咸卫等^[11]基于平顶山东部矿区的正断层的统

计分析,发现正断层上盘的瓦斯突出占比高、强度大,正断层上盘对瓦斯突出的控制作用较下盘更为显著。邵强等^[12]认为逆断层最有利于煤与瓦斯突出。高魁等^[13]认为在挤压应力作用下,压扭性封闭性逆断层区域煤体裂隙发育,应力控制着瓦斯向裂隙发育区运移和聚集,使其成为高压瓦斯富集区。彭守建等^[14]通过实验表明瓦斯运移改变了煤体的力学性质,即降低了含瓦斯煤的强度,加速了其破断进程,煤体破断程度越高,其内部瓦斯解吸量越大,释放出来的能量越多。肖鹏等^[15]研究发现瓦斯在断层断块内部及正断层带外侧边界表现出明显的积聚特性。李普等^[16]通过 COMSOL 数值模拟软件,对距离断层不同距离回采时煤层工作面的地应力、瓦斯压力分布和瓦斯迁移规律进行了研究。孔胜利等^[17]通过实测数据发现工作面瓦斯涌出量与地质构造存在密切的联系,在靠近大断层和局部小断层时瓦斯涌出量显著增加。曹佐勇等^[18]对某工作面进行分析发现,应力集中区存在瓦斯富集现象,且应力集中范围与瓦斯积存范围表现一致,煤层区域性瓦斯赋存明显受断层控制。研究者们大多通过应力状态对断层瓦斯赋存进行研究,而很少有通过研究含小断层的采空区上覆岩层破坏特征来研究采空区的瓦斯运移情况。

通过 UDEC 数值模拟采空区上覆岩层破坏过程,从而得到小断层影响下的采空区覆岩移动特征,然后计算小断层影响下采空区上覆岩层的空隙率,并利用 FLUENT 软件数值模拟了开采过程中考虑小断层影响的采空区瓦斯运移规律,研究成果对优化含有断层的采面瓦斯抽采钻孔布置有重要指导意义。

1 小断层影响下的采空区覆岩位移分布

1.1 小断层影响下的采空区上覆岩层走向位移分布规律

1.1.1 地质模型与模拟方法

本文模型以河南某矿 25030 工作面为工程背景。该工作面水平标高-780 m, 地面标高+37.5 m, 工作面标高-725~-635 m。工作面煤层厚度 0.5~3.2 m, 平均厚度 2.2 m, 煤层结构简单; 煤层倾角 2°~15°, 平均 11°; 走向长 1 022 m, 倾斜长 195 m。煤层顶底板岩层情况见文献 [19], 煤层、岩层模型力学参数见表 1。

结合工作面实际煤岩层情况及模拟需要, 物理模型尺寸确定为 500 m(长)×60 m(高)。假设断层穿过整个煤岩层, 倾角为 45°, 水平断距 4 m, 铅直距离 1 m。为了提高模型的适用性和规律的直观性, 选取煤层水平标高为-780 m, 地面标高+37.5 m, 模拟煤层埋深 817.5 m, 假设混合岩层理论密度为 2 500 kg/m³, 模型顶部埋深为 817.5-60+14=771.5 m, 重力加速度取 9.81 m/s², 埋深×密度×重力加速度可计算得模型上边界均匀施加 18.9 MPa 的垂直应力, 即煤层顶部均匀施加 20.4 MPa 的垂直应力, 左右边界水平位移设为零, 下边界垂直位移设为 0。采用摩尔-库伦模型, 左边界留 150 m 煤柱以消除边界效应, 从 150 m 处开采 200 m 长的工作面至 350 m 处, 每步开采 10 m, 平衡后继续开采下一步。为了研究方便, 分别在距离煤层底板 2、14、21、28、41 m 处设置位移监测线 L₁~L₅ (图 1)。沿煤层走向开采模型及边界条件示

意如图 2 所示。

UDEC 数值模拟软件是一种离散元数值模拟软件, 针对非连续介质的平面离散单元数值模拟方法, 它已经在岩土、采矿、地质等领域得到广泛应用^[20]。本文利用该软件进行数值模拟, 其具体流程方法见文献 [21]。

1.1.2 小断层影响下的采空区上覆岩层走向方向位移分布

根据数值模拟分析结果, 采空区上覆岩层沿煤层走向方向的位移分布如图 3 所示。

工作面在开采 120 m 左右遇到断层, 由图 3 可知, 采空区上覆岩层下沉量在断层附近均不同程度地减小, 距离底板越远, 下沉量减小的幅度和范围越大。距离底板 2 m 的岩层, 断层处的最小下沉量为 1.48 m; 距离底板 41 m 处的岩层, 断层处的最小下沉量为 1.39 m。距离底板 2 m 的岩层, 断层影响的下沉量减小的范围为 32 m; 距离底板 41 m 处的岩层, 断层影响的下沉量减小的范围为 60 m。

工作面推进 100 m, 距离断层 20 m, 距离底板 41 m 处的岩层首先受到断层的影响。随着工作面推进, 岩层自上而下受到断层影响, 岩层下沉量出现明显减小。过断层 60 m 后, 距离底板 41 m 的岩层下沉量由平均 1.88 m 骤减至 1.39 m; 距离底板 28 m 的岩层, 下沉量由平均 1.91 m 骤减至 1.41 m; 距离底板 21 m 的岩层, 下沉量由平均 1.94 m 骤减至 1.43 m; 距离底板 14 m 的岩层下沉量由平均 1.96 m 骤减至 1.51 m; 距离底板 2 m 的岩层, 下沉量由平均 1.99 m

表 1 煤层及覆岩力学性质

Table 1 Mechanical properties of coal seam and overburden

| 岩性 | 厚度/m | 密度/(kg·m ⁻³) | 体积模量/GPa | 剪切模量/GPa | 黏聚力/MPa | 抗拉强度/MPa | 内摩擦角/(°) |
|------|------|--------------------------|----------|----------|---------|----------|----------|
| 砂质泥岩 | 5 | 2 500 | 66.62 | 26.35 | 18.00 | 3.8 | 39 |
| 细砂岩 | 2 | 2 700 | 78.84 | 24.44 | 25.00 | 3.2 | 43 |
| 铝质泥岩 | 5 | 2 500 | 70.62 | 28.35 | 16.00 | 3.8 | 37 |
| 砂质泥岩 | 8 | 2 500 | 66.62 | 26.35 | 18.00 | 3.8 | 34 |
| 粉砂岩 | 7 | 2 355 | 70.92 | 26.55 | 14.00 | 3.8 | 39 |
| 砂质泥岩 | 4 | 2 500 | 66.62 | 26.35 | 16.00 | 3.1 | 34 |
| 泥岩 | 3 | 2 250 | 54.39 | 22.27 | 19.00 | 3.8 | 30 |
| 粉砂岩 | 6 | 2 700 | 78.84 | 24.44 | 25.00 | 3.2 | 41 |
| 细砂岩 | 6 | 2 355 | 62.92 | 26.55 | 1.04 | 1.1 | 27 |
| 煤 | 2 | 1 450 | 10.55 | 10.54 | 0.80 | 0.8 | 16 |
| 粉砂岩 | 4 | 2 355 | 62.92 | 26.55 | 1.24 | 1.1 | 35 |
| 细砂岩 | 8 | 2 700 | 78.84 | 24.44 | 25.00 | 1.2 | 41 |
| 断层 | — | 2 000 | 2.00 | 2.00 | 0.50 | 0 | 18 |

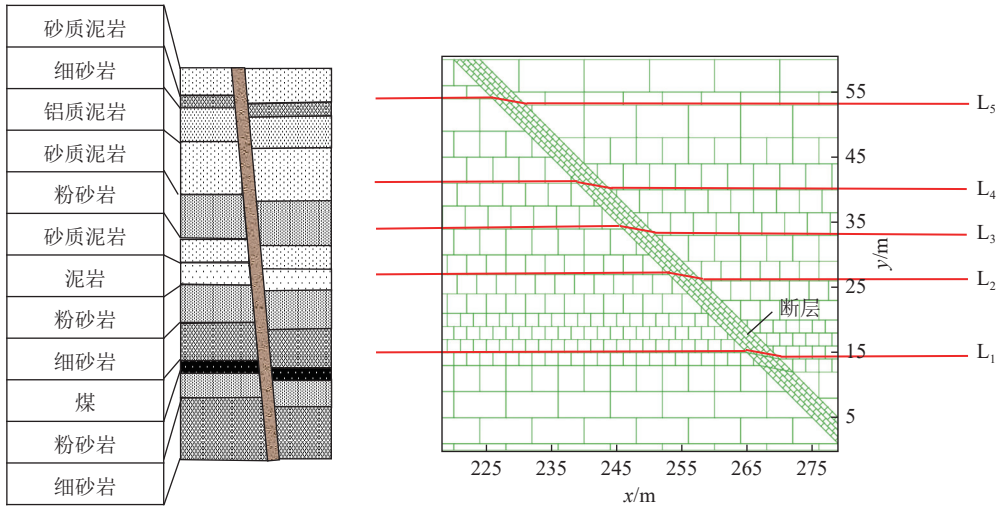


图 1 UDEC 数值模拟地质模型示意

Fig.1 UDEC schematic diagram of numerical simulation geological model

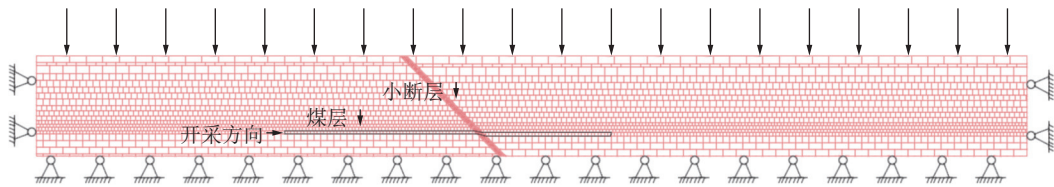


图 2 沿煤层走向开采模型及边界条件示意

Fig.2 Schematic diagram of excavation model and boundary conditions along the coal seam strike

骤减至 1.48 m。

随着工作面远离断层，覆岩下沉量受断层影响逐渐消失，下沉量逐渐恢复正常，但是上盘覆岩下沉量明显小于断层下盘下沉量。这是由于工作面从断层下盘向断层面推进，断层下盘的覆岩比上盘提前受到激活，覆岩沿着断层面出现滑移现象，上盘覆岩前部首先受到采动影响发生弯曲，但由于下盘覆岩的滑移填充阻碍上盘覆岩下沉，导致上盘覆岩在断层面附近以弯曲为主，岩层下沉量骤减。

结合已有研究结论，认为垮落带和断裂带分界线如图 4 所示。在未受断层扰动时，垮落带高度为 8 m，断裂带高度为 29 m。受到断层影响时，断层对上盘覆岩影响较大，上盘断层附近垮落带高度为 14 m，断裂带高度为 32 m。断层的存在，对断层附近上盘覆岩的影响较大，使其下沉量减小，并使垮落带和断裂带高度增加，垮落带高度增加的更明显。在工作面远离断层之后，覆岩的下沉规律又恢复如初，呈现与下盘远端相同的下沉规律。

1.2 小断层影响下的采空区上覆岩层倾向位移分布规律

1.2.1 物理模型

由于断层为倾斜状态，倾向不同位置的剖面与

断层相交的位置也不同，为了研究不同断层位置高度对采空区上覆岩层倾向方向位移的影响，根据 25030 工作面概况，煤层倾角 $2^{\circ} \sim 15^{\circ}$ ，平均 11° ，倾斜长 195 m，建立模型如图 5 所示、图 6 和图 7 所示。

模型尺寸为 400 m(长) \times 100 m(高)，假设断层走向与煤层倾向方向一致，在煤岩层倾向剖面图中，断层显示为一个岩层条带，且随着剖面的位置在煤层走向方向上变化，断层带在剖面图上的高度也会变化。

针对不同的断层位置，设计了图 5、图 6 和图 7 三种模型，为避免边界效应的影响，结合 25030 工作面作业规程，开采位置确定为距离左边界 100 m，开采距离为沿煤层方向一次开采 200 m，模型左边界、右边界和下边界为固定边界，上方均匀施加 19.1 MPa 垂直应力模拟煤层埋深-817.5 m。分别数值模拟了断层距离煤层底板垂直高度为 2, 24 和 36 m，以研究断层不同位置高度对采空区上覆岩层倾向方向位移的影响。

1.2.2 倾向剖面断层位置对采空区上覆岩层位移特性的影响

在距离煤层底板高度 2, 14, 21, 28 及 41 m 处设置 5 条测线以监测覆岩的下沉量，监测结果如图 8 所示。

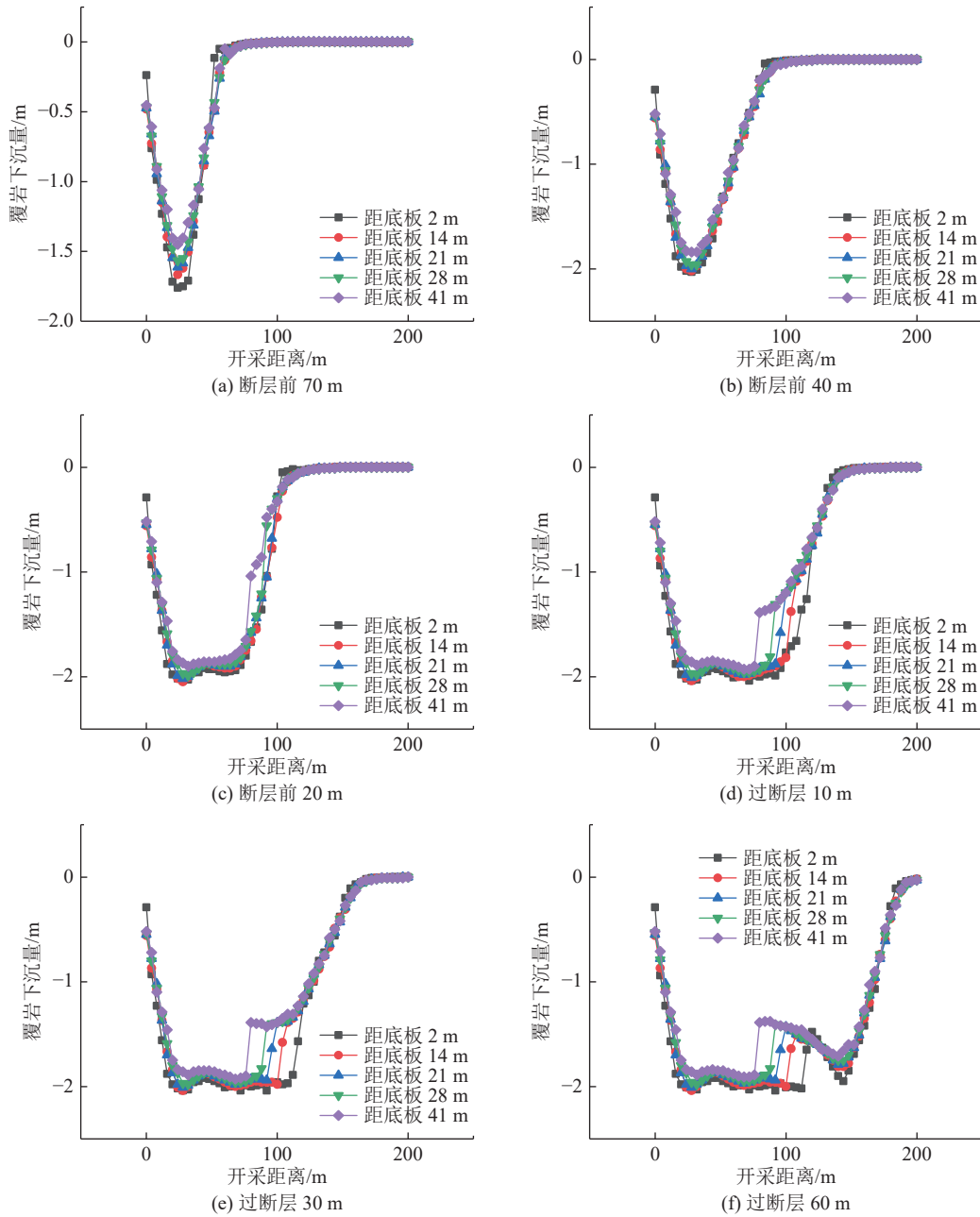


图3 考虑小断层影响的采空区上覆岩层走向位移分布

Fig.3 Displacement distribution of the strike direction of overlying rock layers in goaf considering the influence of small faults

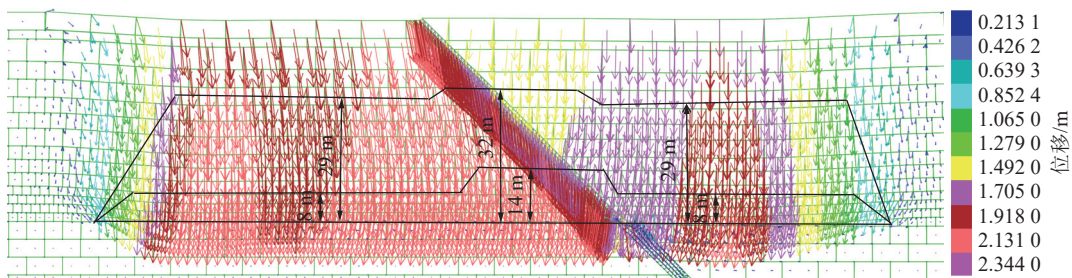


图4 覆岩垂直“三带”划分简图

Fig.4 Vertical “three zones” division diagram of overburden rock

如图8所示,对上述测线监测数据进行可视化处理之后可以明显发现,随着断层的位置变化,采空

区覆岩的下沉量几乎不受影响,所以可以排除断层高度对采空区上覆岩层位移特征的影响,可以使用

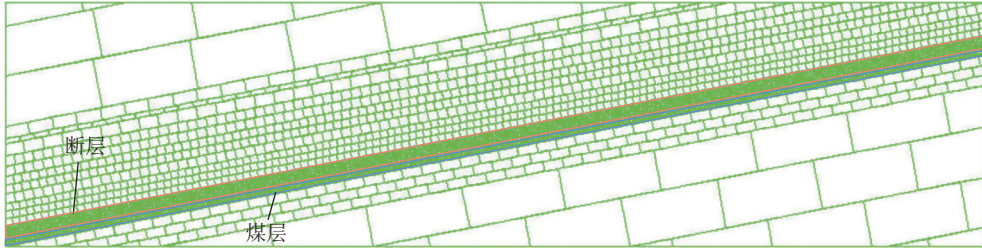


图 5 断层距离煤层底板高度 2 m 的倾向物理模型

Fig.5 Physical model of the tendency of the fault at a height of 2 m from the floor of the coal seam

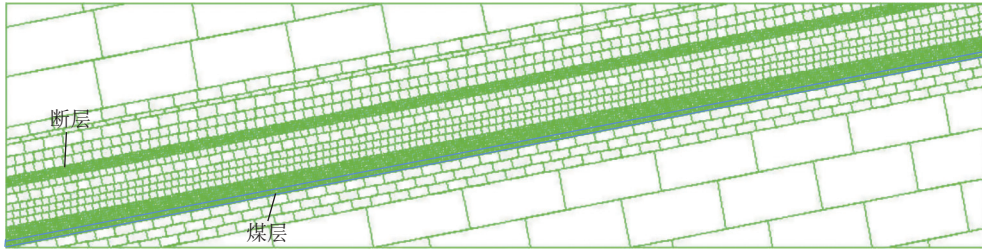


图 6 断层距离煤层底板高度 24 m 的倾向物理模型

Fig.6 Physical model of the tendency of the fault at a height of 24 m from the floor of the coal seam

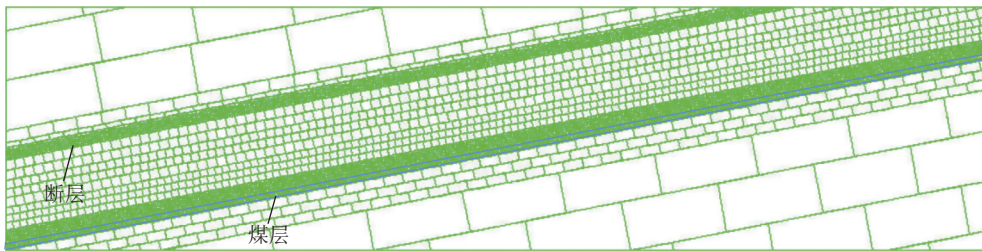


图 7 断层距离煤层底板高度 36 m 的倾向物理模型

Fig.7 Physical model of the tendency of the fault at a height of 36 m from the floor of the coal seam

统一的方程表达采空区上覆岩层的位移。

$$W_i(l) = \frac{l_i}{l_{\max}} \quad (1)$$

1.2.3 考虑断层影响的采空区上覆岩层倾向位移量系数

由于采空区上覆岩层倾向方向上的位移量基本不受断层的影响, 所以为了方便计算采空区的孔隙率, 将采空区上覆岩层倾向方向的位移无因次化, 转化为位移量参照系数, 具体转化方法为

式中, $W_i(l)$ 为沿煤层倾向覆岩位移量系数; l_i 为沿煤层倾向覆岩位移; l_{\max} 为沿煤层倾向方向覆岩位移最大值。

根据采空区上覆岩层的位移数据监测结果, 计算出采空区上覆岩层的位移系数如图 9 所示。

图 9 中拟合曲线公式依次为

$$\begin{aligned} W_1(l) &= 0.0459 + 0.03832l - 5.54142 \times 10^{-4}l^2 + 3.22428 \times 10^{-6}l^3 - 4.58294 \times 10^{-9}l^4 - 1.17378 \times 10^{-11}l^5 \\ W_2(l) &= 0.10573 + 0.01514l + 9.73618 \times 10^{-5}l^2 - 3.67455 \times 10^{-6}l^3 + 2.74267 \times 10^{-8}l^4 - 6.67433 \times 10^{-11}l^5 \\ W_3(l) &= 0.10951 + 0.01353l + 1.21119 \times 10^{-4}l^2 - 3.66433 \times 10^{-6}l^3 + 2.61095 \times 10^{-8}l^4 - 6.2355 \times 10^{-11}l^5 \\ W_4(l) &= 0.03133 + 0.01537l + 4.63705 \times 10^{-5}l^2 - 2.52764 \times 10^{-6}l^3 + 1.90381 \times 10^{-8}l^4 - 4.71243 \times 10^{-11}l^5 \\ W_5(l) &= 0.11378 + 0.01294l + 8.62522 \times 10^{-5}l^2 - 2.71305 \times 10^{-6}l^3 + 1.88503 \times 10^{-8}l^4 - 4.51094 \times 10^{-11}l^5 \end{aligned} \quad (2)$$

1.3 考虑小断层影响的采空区空隙率分布规律

1.3.1 空隙率计算方法

上覆岩层空隙率分布, 代表着其内部的孔隙和离层间隙的分布情况, 查明孔、裂隙分布, 需要计算破碎后的岩体体积与原岩体积的差值占破碎岩体体积的比例, 用下式表示:

$$\phi = \frac{V_2 - V_1}{V_2} = \frac{h_{i+1} - h_i - M_i}{h_{i+1} - h_i} = \frac{(H_{i+1} + W_{i+1}) - (H_i + W_i) - M_i}{(H_{i+1} + W_{i+1}) - (H_i + W_i)} \quad (3)$$

式中, ϕ 为空隙率; V_1 为原岩体积; V_2 为破碎岩体积; h_i 为第 i 层岩石下沉后高度; H_i 为第 i 层岩石下沉前

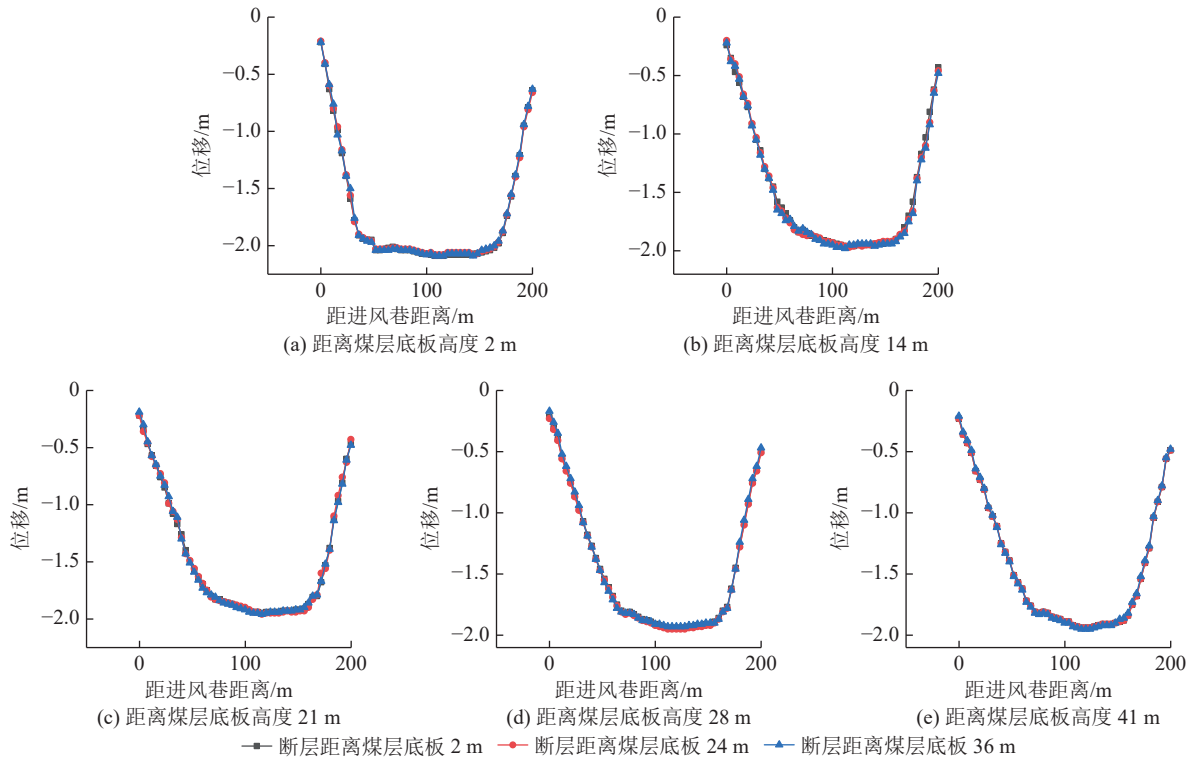


图8 不同断层位置的采空区覆岩监测线位移

Fig.8 Displacement of overburden monitoring line in goaf with different fault locations

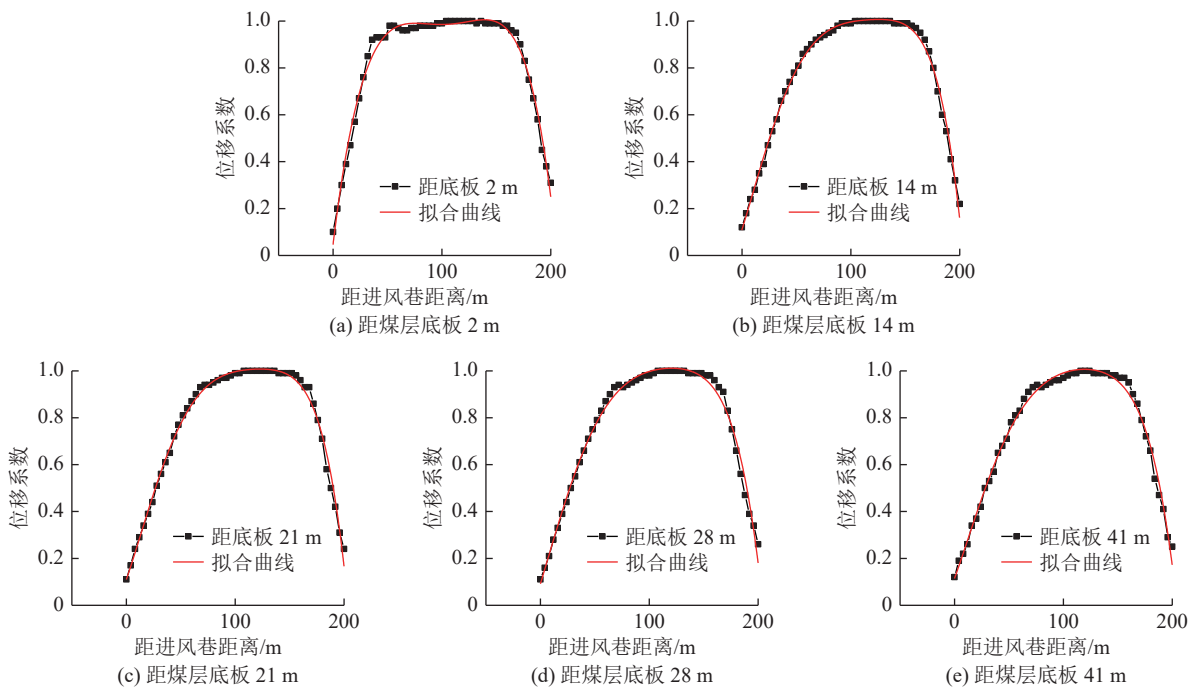


图9 距底板不同高度岩层下沉量系数拟合

Fig.9 Sinking coefficient fitting of strata with different heights from the floor in dip direction

高度; H_{i+1} 为第 $i+1$ 层岩石下沉前高度; W_i 为第 i 层岩石下沉量; M_i 为第 i 层原岩厚度。

1.3.2 考虑小断层影响的采空区上覆岩层空隙率分布规律

根据采空区上覆岩层走向方向和倾向方向位移

量和无因次化位移量系数,可以利用公式计算出采空区上覆岩层的空隙率分布情况如图 10、11 所示。

1) 垮落带空隙率分布规律。垮落带范围内,采空区空隙率在 4 个隅角的位置最高,越往中部空隙率越小,由 0.215 逐渐减小至 0.001;受到断层影响的

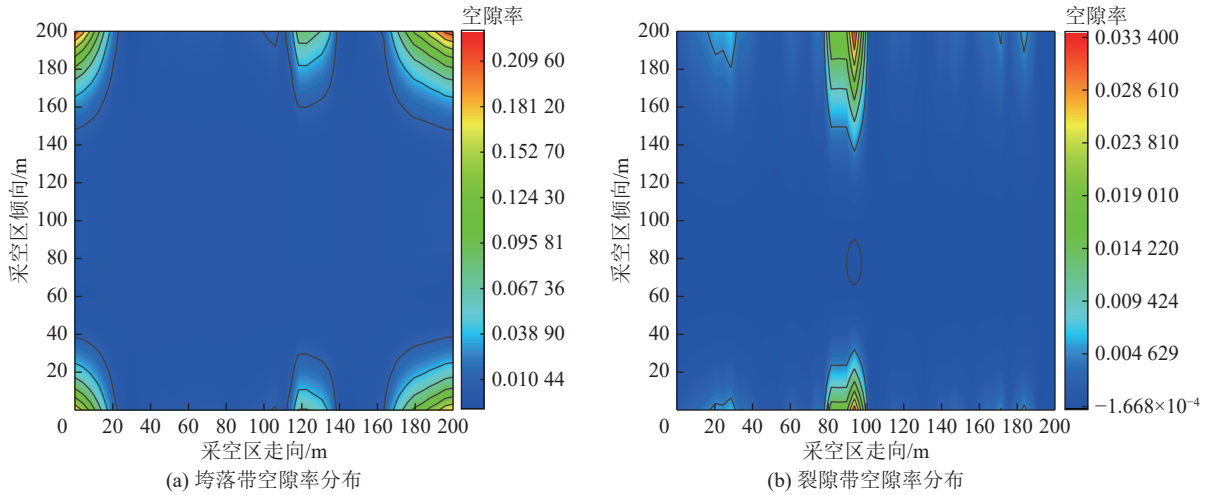


图 10 采空区上覆岩层空隙率分布
Fig.10 Distribution of void ratio of overlying rock layers in the extraction area

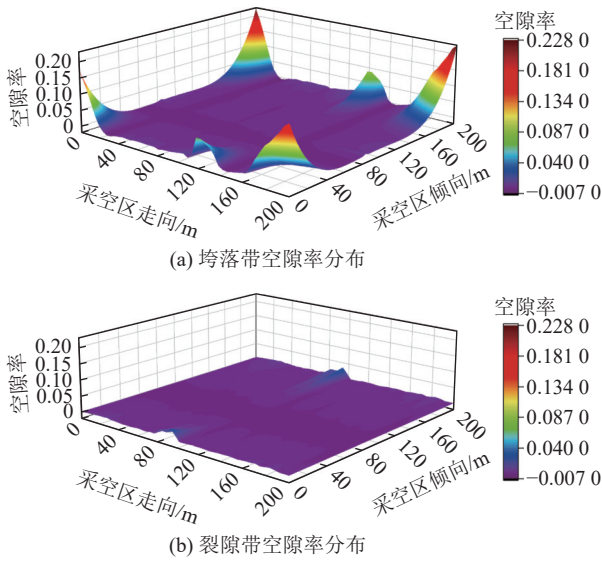


图 11 采空区上覆岩层空隙率分布

Fig.11 Distribution of void ratio of overlying rock layers in the extraction area

位置,空隙率相对于周边岩层偏高,由 0.003 增加到 0.083,而位于采空区中部的断层由于岩层压紧压实,空隙率相对较小。进风巷一侧的最大空隙率为 0.176,明显小于回风巷一侧的最大空隙率 0.220,这是因为工作面煤层采出后,采空区上、下端煤壁支撑,两端垮落岩石膨胀碎裂程度大,另外受倾角影响,采空区上部垮落岩石向下端滑移、充填,下部垮落岩石压实程度相对更高,空隙发育程度相对更低,因此,由采空区两端至中下部,空隙率逐渐降低。

2) 裂隙带空隙率分布规律。采空区上覆岩层裂隙带内,断层所在区域空隙率整体比非断层区域要高,断层区空隙率由附近的 0.005 增加到最大为 0.034,

位于回风巷一侧,断层影响的空间率升高的区域大小约为走向 20 m、倾向 50 m;进风巷一侧的断层附近空隙率升高程度相对较低,空隙率最大为 0.025,影响区域约为走向 20 m,倾向 25 m。呈现这种形态的原因为,断层附近的岩体沿着断层产生滑移和弯曲,再加上煤壁的支撑作用,从而使断层附近靠近边缘的岩层空隙发育程度增加,同时由于煤层倾角的存在,使得靠近进风巷一侧的岩层空隙发育程度比回风巷一侧更低。

2 考虑小断层影响的采空区瓦斯运移研究

在井下开采工作中,伴随着工作面推进,采空区瓦斯涌出,如果处理不当将会对现场人员和生产设备产生不可挽回的损失,因此势必要查明采空区瓦斯随生产过程的运移规律,特别是遇到断层等构造时的采空区瓦斯运移和分布规律,以及时采取瓦斯抽采等措施保障现场施工的安全,保证工作人员和生产设备免受瓦斯灾害。由于现场测试不容易开展并且容易受到开采工作的影响,越来越多的研究者采用数值模拟的方法来还原现场的实际情况以开展实验^[22-24],也能较好的反映客观规律。

2.1 物理模型及参数设置

根据前文的研究结果,结合现场的实际情况,对采用 U 型通风方式的工作面做出如下简化:

1) 不考虑工作面割煤机、液压支架等设备,忽略矿井周期来压对采空区气体运移的影响,将采空区气体流动简化为稳态流场,仅考虑通风方式、工作面漏入采空区漏风量对采空区气体运移规律的影响。

2) 将工作面、进风巷和回风巷简化为规则长方

体,将采空区简化为矩形体,考虑到主要研究工作面及采空区区域流场规律,选取进风巷和回风巷长度为50 m。

2.1.1 物理模型参数

根据25030工作面作业规程,并对模型进行合理简化,确定模型尺寸参数为

1)工作面:长(倾向 y) \times 宽(走向 x) \times 高(z)=200 m \times 6 m \times 3.4 m;

2)进、回风巷:长(走向 x) \times 宽(倾向 y) \times 高(z)=50 m \times 3.4 m \times 3.4 m;

3)采空区:长(走向 x) \times 宽(倾向 y) \times 高(z)=200 m \times 200 m \times 60 m; 150 m \times 200 m \times 60 m; 100 m \times 200 m \times 60 m;

50 m \times 200 m \times 60 m。

4)工作面倾角:0°。

2.1.2 网格划分及监测线设置

由于物理模型相对比较规则,采用六面体网格进行网格的划分。考虑到网格质量对数值模拟结果的影响、计算时间和计算精度等因素,通过对比选择网格尺寸大小为1.7 m。建立了工作面推进至距离断层50 m、到达断层、过断层50 m及过断层100 m时4个物理模型如图所示,共划分131102, 233 998, 387752和551092个网格单元。并在模型中添加如图12所示测线(图12中, in, h代表测线编号),以监测瓦斯体积分数在采空区的具体分布情况。

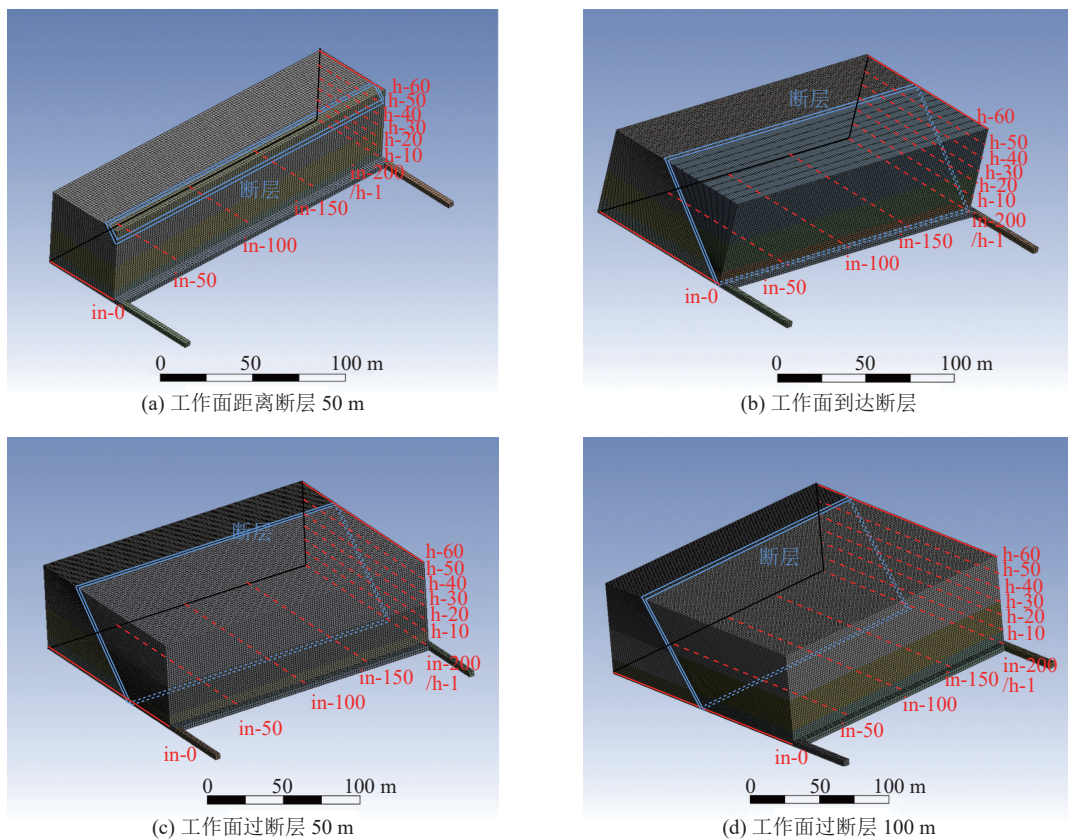


图12 采空区物理模型

Fig.12 Physical model of extraction area

2.1.3 边界条件

1)进风巷入口为求解模型的入口,选取速度入口边界条件,工作面现场实测风速为1.92 m/s;通风风流设置沿进风巷入口均匀、垂直进入;通风风流气体积分数为21%,瓦斯体积分数为0。

2)回风巷出口设置为压力出口(Pressure-outlet):根据阻力测定结果设置为-117.2 Pa。

3)壁面边界条件:采空区与工作面固定壁面设置为无滑移边界条件(速度分量 $u=v=w=0$),所有壁

面都为绝热状态。

4)工作面与采空区交界面:工作面与采空区交界面设置为多孔介质内部面。

5)工作面壁面粗糙度:将工作面壁面粗糙度常数 C_s 设置为默认值0.5,粗糙度厚度 K_s 设置为0。

6)源项:根据25030工作面作业规程可知,工作面瓦斯涌出量为7.72 m³/min,采空区瓦斯涌出量为11.93 m³/min。

7)采空区渗透率:按照前文得出的采空区空隙

率分布计算得出。

2.2 工作面推进过程中的含小断层采空区的瓦斯运移规律

2.2.1 工作面推进至距离断层 50 m 时采空区瓦斯分布

工作面推进至距离断层 50 m，采空区出现第 1 次周期来压现象，采空区上覆岩层空隙率增大，此时采空区瓦斯分布如图 13 所示。

由图 13 可知，由于距离断层的较远，采空区内

部漏风风量也比较小，瓦斯在断层附近积聚现象不是很明显，工作面进风仅能影响到工作面后方采空区不足 25 m。由覆岩移动规律可知：此时采空区上覆岩层几乎不受断层的影响，断层活化刚刚开始，断层顶部开始出现滑移现象，附近岩体空隙率增加，但是由于空隙率增加的范围过小，导致工作面漏风并不能有效影响到断层附近。由图 14 及图 15 可知，靠近回风巷的采空区垂直方向上，距离底板 30 m 处的瓦斯体积分数最高，且分布范围广，在这个高度上

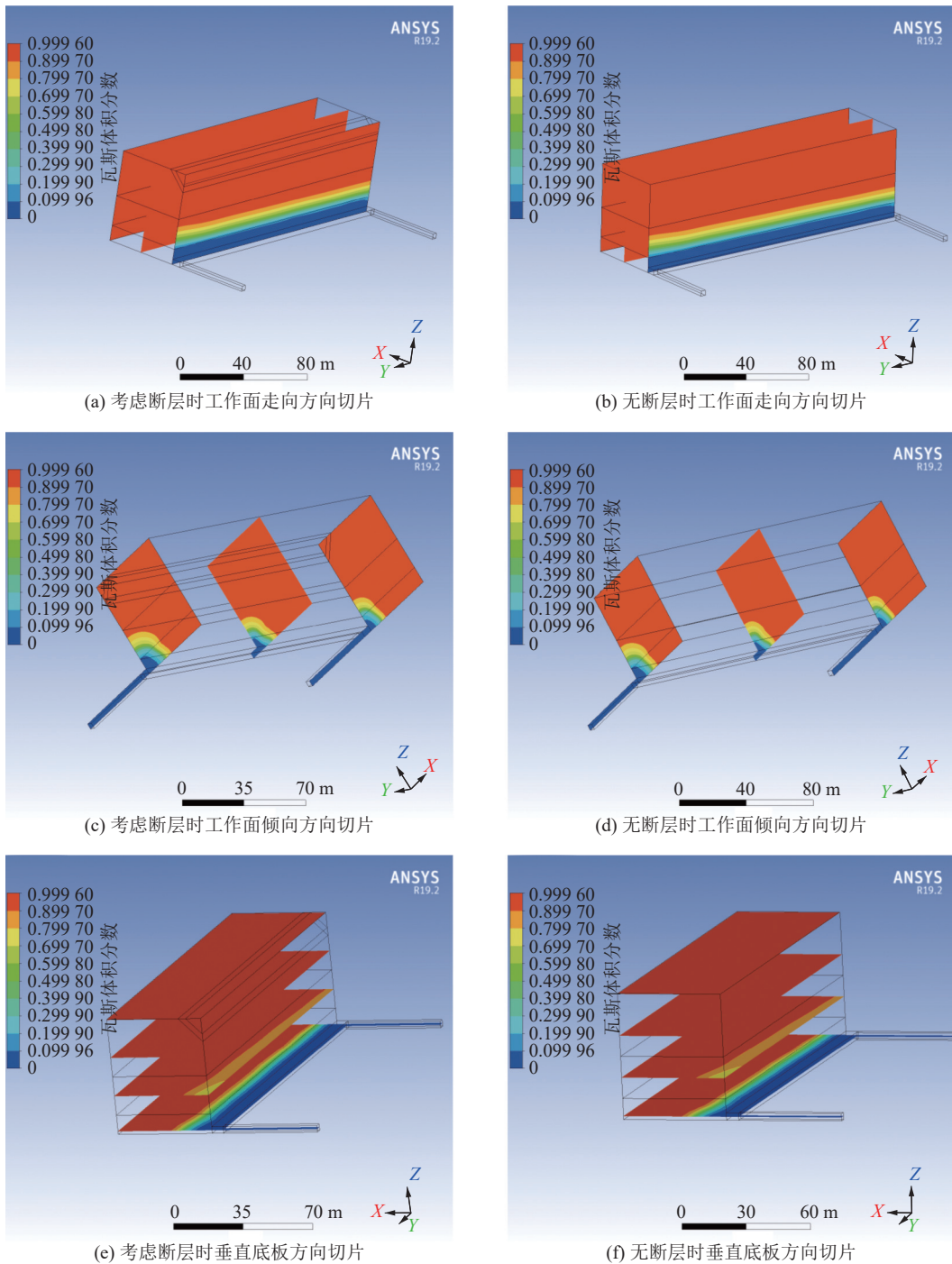


图 13 工作面距离断层 50 m 采空区瓦斯分布

Fig.13 Gas distribution in the working face 50 m from the fault

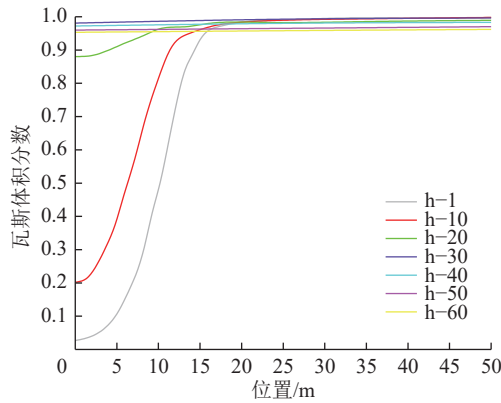


图 14 工作面距离断层 50 m 时回风巷侧采空区不同高度的瓦斯分布

Fig.14 Gas distribution of goaf gas at different heights in the goaf area of the return air lane when the working face is 50 m away from the fault

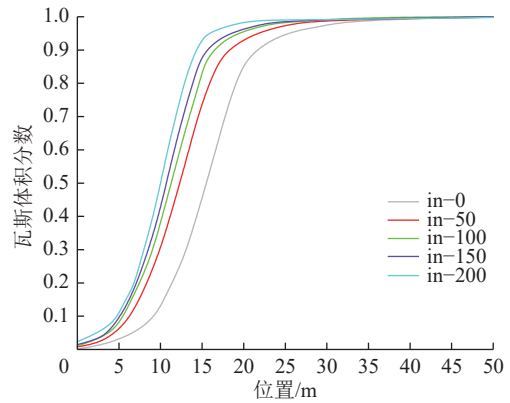


图 15 工作面距离断层 50 m 时进风巷上方不同距离的采空区瓦斯分布

Fig.15 Distribution of goaf gas at different distances above the air intake lane when the working face is 50 m away from the fault

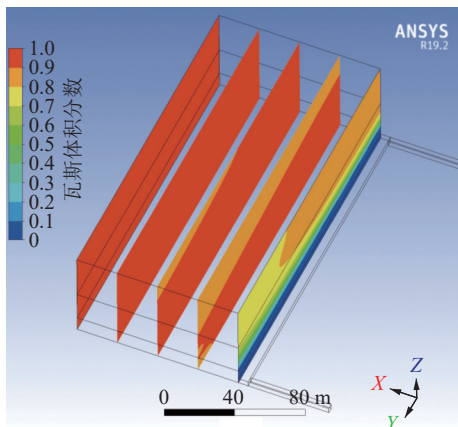
布置瓦斯抽采钻孔最经济高效。

2.2.2 工作面推进至断层时采空区瓦斯分布

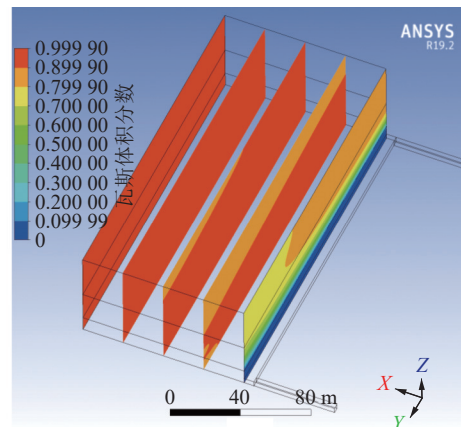
当工作面推进至断层时,工作面上方岩层下沉位移量突然减小,此时采空区瓦斯分布如图 16 所示。

由图 16 可知,由于断层的存在,影响到了周围采空区上覆岩层的空隙率,导致出现瓦斯逃逸通道,断层上盘位置瓦斯体积分数明显比无断层时较小,

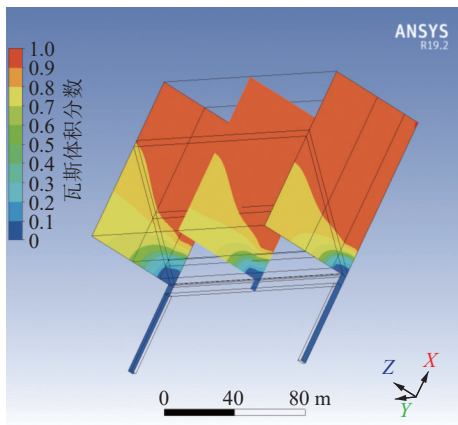
瓦斯通过断层及附近空隙率增大区域向更深处采空区运移。当瓦斯随着工作面漏风进入采空区深处,风流受到的阻力越大,就会产生瓦斯积聚现象,直至工作面漏风无法影响到采空区瓦斯运移。由图 16 还可知,此时工作面漏风能影响到的范围比无断层的采空区更大,高浓度瓦斯积聚在断层下盘(图 17、18),由于断层与工作面连通,此时一旦出现高顶等现象,



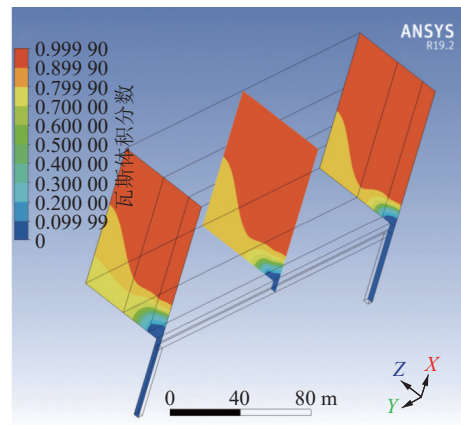
(a) 考虑断层时工作面走向方向切片



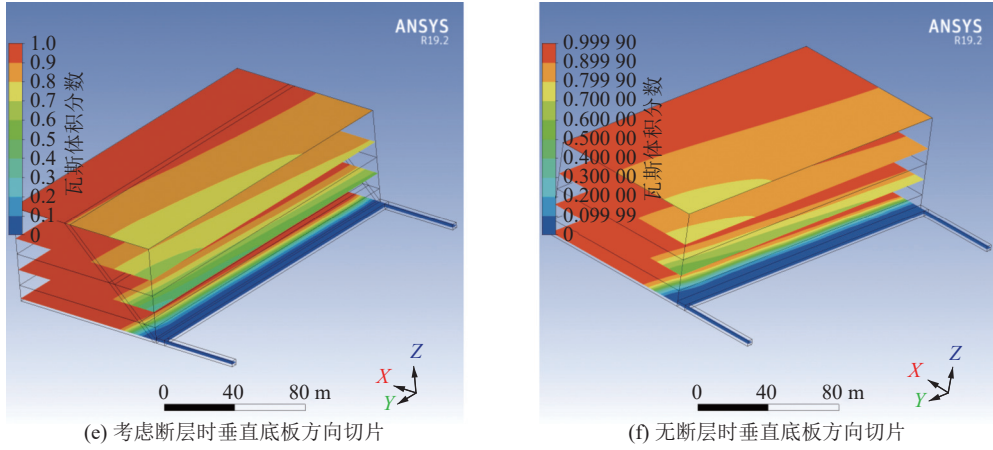
(b) 无断层时工作面走向方向切片



(c) 考虑断层时工作面倾向方向切片



(d) 无断层时工作面倾向方向切片



(e) 考虑断层时垂直底板方向切片

(f) 无断层时垂直底板方向切片

图 16 工作面到达断层时采空区瓦斯分布

Fig.16 Gas distribution in goaf when the working face reaches the fault

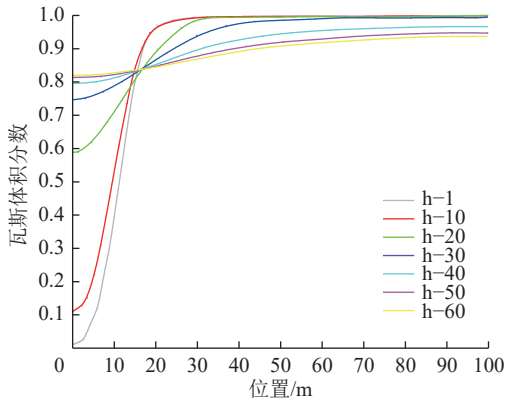


图 17 工作面到达断层时回风巷侧采空区不同高度的瓦斯分布

Fig.17 Gas distribution at different heights in the goaf area of the return wind lane when the working face reaches the fault

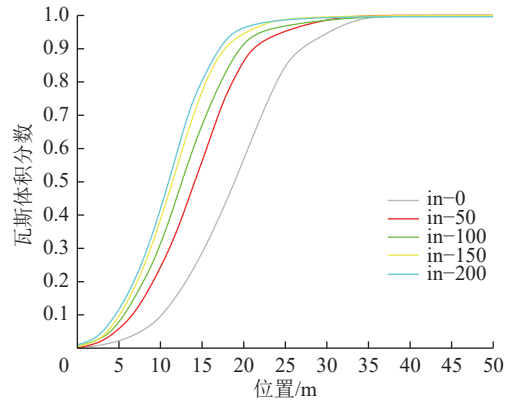


图 18 工作面到达断层时进风巷上方不同距离的采空区瓦斯体积分数

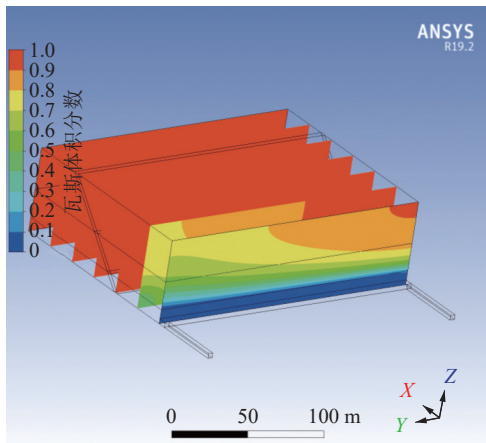
Fig.18 The distribution of goaf gas at different distances above the intake lane when the working face reaches the fault

瓦斯就会形成聚集，威胁到工作面人员的安全，因此要时刻注意采空区顶板管理和瓦斯监测。

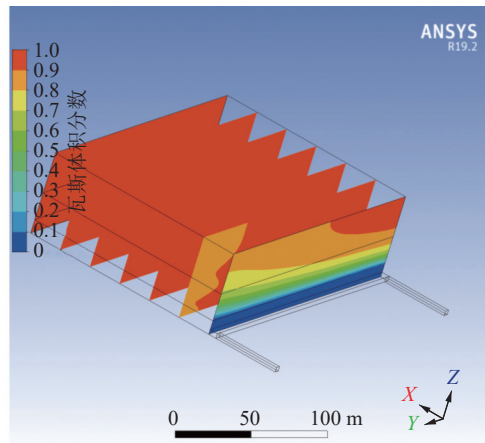
2.2.3 工作面推进至过断层 50 m 时采空区瓦斯分布
工作面推进至过断层 50 m 时，断层对采空区上

覆岩层位移特征的影响基本结束，此时采空区瓦斯分布如图 19—21 所示。

由图 19—21 可知，当工作面推进到过断层 50 m 处时，断层导致采空区局部空隙率增大仍然会影响



(a) 考虑断层时工作面走向方向切片



(b) 无断层时工作面走向方向切片

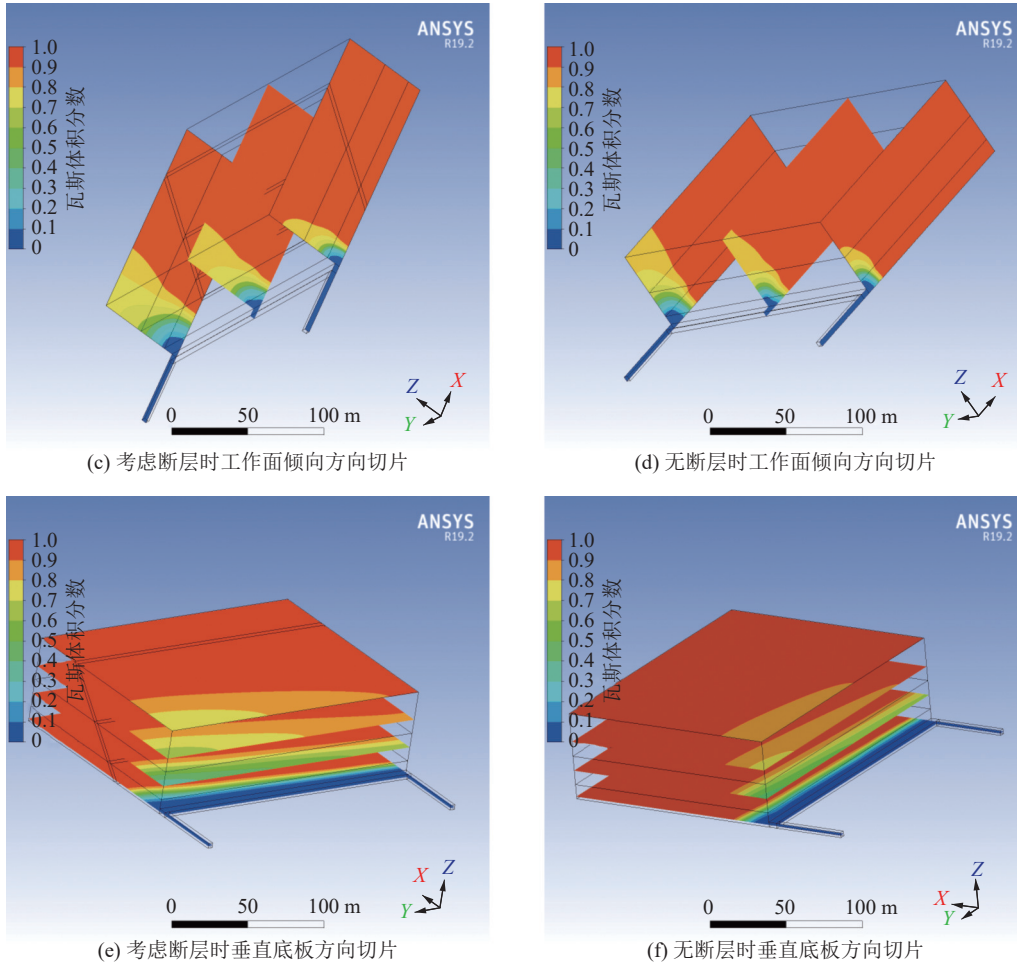


图 19 工作面过断层 50 m 采空区瓦斯分布

Fig.19 Gas distribution in the 50 m mining area of the working face over the fault

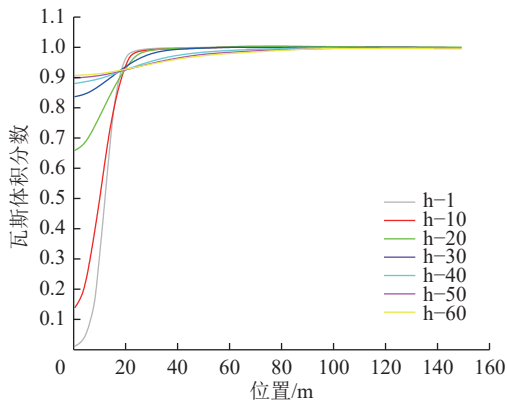


图 20 工作面过断层 50 m 时回风巷侧采空区不同高度的瓦斯体积分数

Fig.20 Gas distribution at different heights in the goaf area of the return air lane side when the working face passes the fault by 50 m

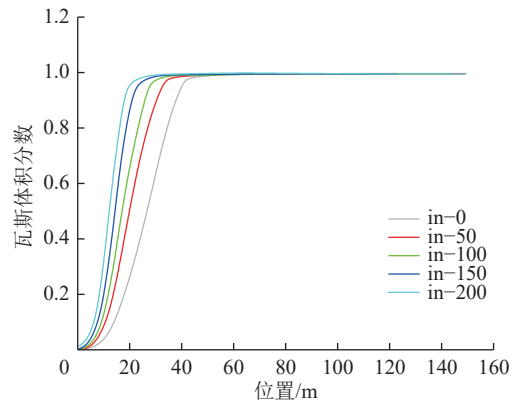


图 21 工作面过断层 50 m 时进风巷上方不同距离的采空区瓦斯分布

Fig.21 The distribution of goaf gas at different distances above the air intake lane when the working face passes 50 m through the fault

采空区内部瓦斯运移,具体表现为:采空区瓦斯从工作面进风侧向采空区上隅角运移,瓦斯体积分数逐渐减小,靠近工作面的采空区瓦斯体积分数相对于没有受到断层影响的采空区瓦斯体积分数更小,工

作面漏风在工作面走向和倾向上影响范围更大。

2.2.4 工作面推进至过断层 100 m 时采空区瓦斯分布
工作面推进至过断层 100 m 时,采空区上覆岩层位移特征基本平稳,采空区空隙率基本不再变化,

此时采空区瓦斯分布如图 22 所示。

由图 22 可以发现，断层的存在导致上盘采空区瓦斯沿着断层产生的优势通道向深部上隅角方向转移，导致瓦斯过多的积聚在上隅角附近，而从工作面来的风流又携带瓦斯沿着断层裂隙向上隅角运移，导致上隅角瓦斯体积分数越来越高。采空区风流只

有一部分流向断层下盘，导致断层下盘瓦斯大多数只能依靠自身扩散和少部分采空区漏风渗流，不利于瓦斯扩散的进行，形成了上方瓦斯分布范围小，下方瓦斯分布范围大的不利场景 (图 23、24)，靠近回风巷的采空区走向方向瓦斯体积分数快速上升，甚至有可能导致煤与瓦斯突出等危险发生，此时应

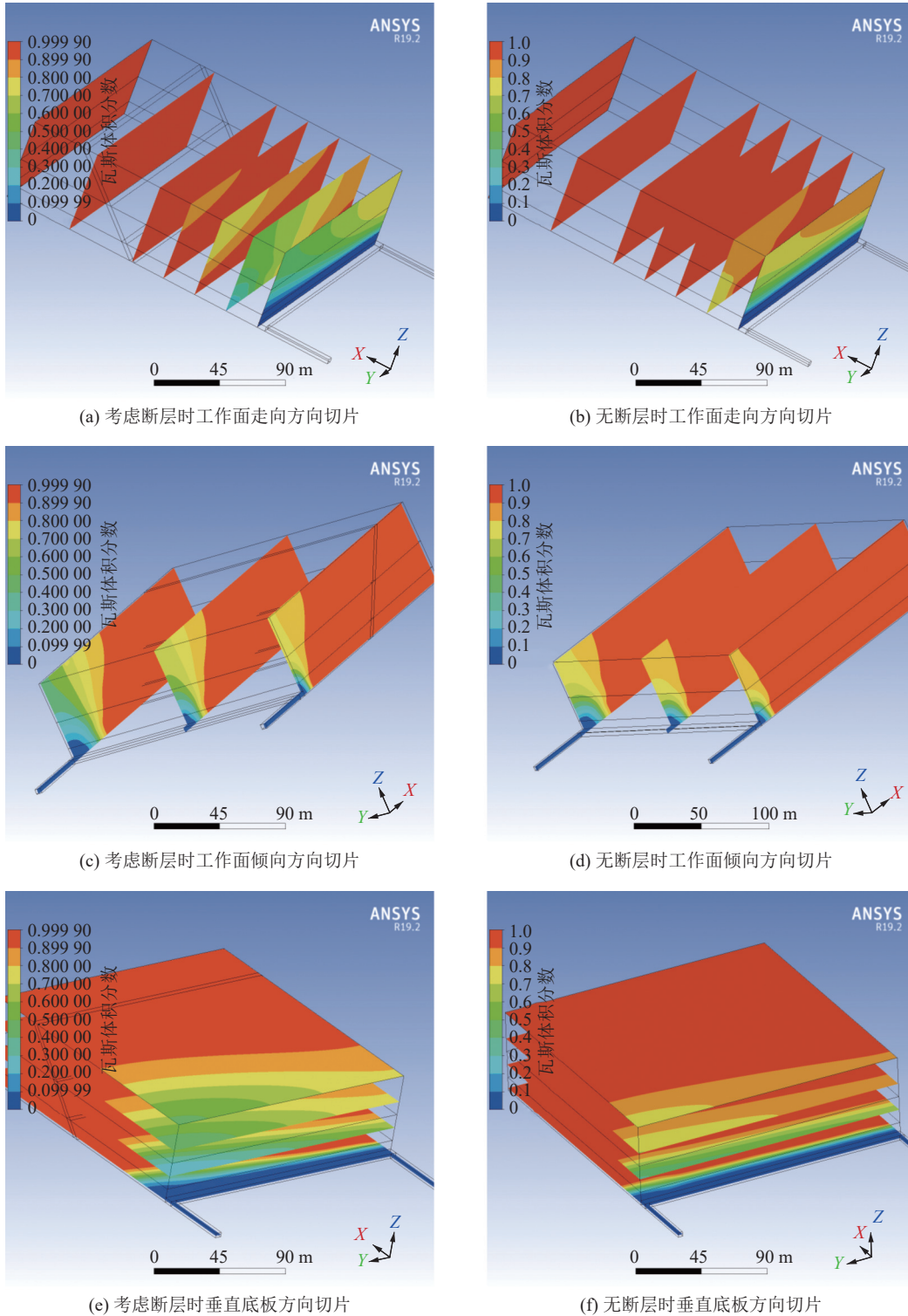


图 22 工作面过断层 100 m 采空区瓦斯分布

Fig.22 Gas distribution in the 100 m mining area of the working face over the fault

及时采取措施排除采空区内部的瓦斯,利用瓦斯抽采管路降低瓦斯体积分数。

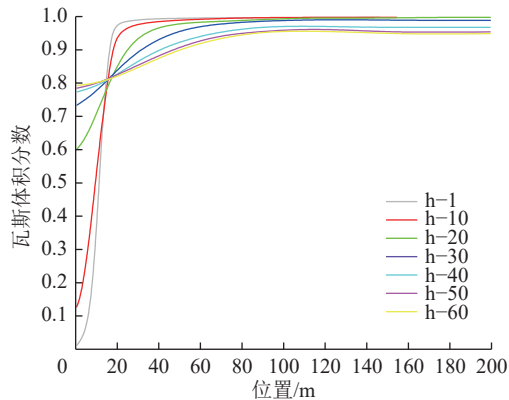


图23 工作面过断层100 m时回风巷侧采空区不同高度的瓦斯分布

Fig.23 Gas distribution at different heights in the goaf area of the return air lane side when the working face passes through the fault of 100 m

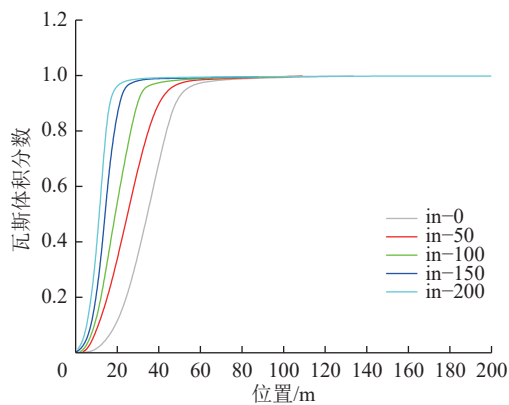


图24 工作面过断层100 m时进风巷上方不同距离的采空区瓦斯分布

Fig.24 Gas distribution of goaf at different distances above the intake lane when the working face is 100 m over the fault

2.3 瓦斯抽采钻孔优化建议

结合工作面推进过程中的采空区瓦斯分布形态,对于考虑小断层影响的采空区瓦斯抽采钻孔设计提出了以下优化建议:

1) 当工作面推进至距离断层50 m时,断层的影响作用并不显著,此时钻孔设计仍然可以按照基本的规律进行,钻孔终孔位于工作面后方25~50 m处,靠近裂隙带顶端距离煤层底板约29 m的位置。

2) 当工作面推进到达断层时,断层与工作面相沟通,瓦斯抽采钻孔应穿过断层布置到断层下盘,距离工作面50~100 m,靠近裂隙带顶端距离煤层底板约29 m的位置。

3) 当工作面推过断层50 m远,此时采空区覆岩

开始不受断层的影响,采空区瓦斯抽采钻孔应布置在靠近回风巷50 m之内的裂隙带顶端,位于工作面后方25 m,高度约32 m。

4) 当工作面推过断层100 m远,瓦斯抽采钻孔应布置在工作面后方至少50 m,靠近裂隙带顶端距离煤层底板约29 m。

3 结论

1) 数值分析了小断层影响下的采空区上覆岩层破坏特性。在工作面距离断层20 m时,断层顶部开始出现滑移现象,采空区上覆岩层的位移开始受到断层的影响;采面到达断层时,由于断层滑移,上盘岩体在断层面产生回转现象,支撑着采空区岩层,覆岩位移量大幅度减小,岩层垮落出现滞后;采面过断层60 m,覆岩受到断层的影响逐渐减弱,位移逐渐符合无断层开采覆岩移动规律。

2) 获得了小断层影响下的采空区上覆岩层空隙率分布规律。垮落带范围内,采空区空隙率在4个隅角最高,越往中部空隙率越小,由0.220逐渐减小至0.001,进风巷一侧的最大空隙率为0.176,明显小于回风巷一侧的最大空隙率0.220;受到断层影响的区域,覆岩空隙率相对周边岩层偏高,由0.003增加到0.083,而位于采空区中部的断层影响区由于岩层压紧压实,空隙率相对较小。采空区上覆岩层裂隙带内,断层影响区空隙率比非断层影响区要高,位于回风巷一侧的空隙率由非断层影响区的0.005增加到断层影响区最大的0.034,进风巷一侧的断层附近空隙率升高程度相对较低,空隙率最大为0.025。

3) 揭示了小断层影响下的采空区瓦斯时空演化规律:①在采面距离断层50 m远处,采空区上覆岩层瓦斯运移几乎不受断层的影响;②在采面推进至断层时,瓦斯随着漏风沿着断层影响区产生的优势逃逸通道向采空区深部运移,下盘的瓦斯体积分数大,可能随漏风沿着下盘与工作面连接处流入工作面及回风巷;③在采面过断层50 m时,采空区瓦斯继续向上隅角附近转移;④采面过断层100 m时,采空区上覆岩层瓦斯运移沿着断层裂隙带出现回转现象,上隅角和下盘垮落带瓦斯体积分数大。根据采空区瓦斯时空演化规律,提出了采空区抽采瓦斯高位钻孔的优化建议:随着开采进度的不同,采空区瓦斯抽采高位钻孔的分布位置应在采面后方25~100 m,距离回风巷50 m以内,靠近29~32 m的高度。根据采空区瓦斯运移数值模拟结果,提出了开采进程中不同阶段的瓦斯抽采高位钻孔优化措施,

可以为企业的瓦斯抽采高位钻孔设计提供一定的参考价值。

参考文献(References):

- [1] 匡立春, 邹才能, 黄维和, 等. 碳达峰碳中和愿景下中国能源需求预测与转型发展趋势[J]. 石油科技论坛, 2022, 41(1): 9-17.
KUANG Lichun, ZOU Caicai, HUANG Weihe, *et al.* China's energy demand forecast and transformation development trend under the vision of carbon peak carbon neutrality[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2022, 41(1): 9-17.
- [2] 程志恒, 卢云, 苏士龙, 等. 采空区顶板高位走向长钻孔高效抽采瓦斯机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(2): 136-142.
CHENG Zhiheng, LU Yun, SU Shilong, *et al.* Mechanism study on high efficiency gas drainage of high level strike long boreholes in gob roof[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(2): 136-142.
- [3] 赵鹏翔, 康新朋, 李树刚, 等. 卸压瓦斯运移区“孔-巷”协同抽采布置参数优化及高效抽采[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2): 137-146.
ZHAO Pengxiang, KANG Xinpeng, LI Shugang, *et al.* Optimization of “hole-drift” collaborative drainage layout parameters and high efficient drainage in pressure relief gas migration area[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 137-146.
- [4] 孟召平, 李国富, 杨宇, 等. 晋城寺河井区煤矿采空区煤层气地面抽采关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 240-247.
MENG Zhaoping, LI Guofu, YANG Yu, *et al.* Study on key technology for surface extraction of coalbed methane in coal mine goaf from Sihe Wells Area, Jincheng[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 240-247.
- [5] 赵孟为. 断层生长指数探讨[J]. 石油实验地质, 1989(3): 250-254.
ZHAO Mengwei. Exploration of fault growth index[J]. Petroleum Experimental Geology, 1989(3): 250-254.
- [6] 左建平, 陈忠辉, 王怀文, 等. 深部煤矿采动诱发断层活动规律[J]. 煤炭学报, 2009, 34(3): 305-309.
ZUO Jianping, CHEN Zhonghui, WANG Huaiwen, *et al.* The law of fault activity induced by deep coal mining[J]. Journal of Coal Science, 2009, 34(3): 305-309.
- [7] 姜耀东, 潘一山, 姜福兴, 等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 205-213.
JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, *et al.* The mechanism and prevention of rock burst in coal mining in China[J]. Journal of Coal Science, 2014, 39(2): 205-213.
- [8] 钱鸣高, 缪协兴, 黎良杰. 采场底板岩层破断规律的理论研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(6): 55-62.
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, LI Liangjie. Theoretical study on the fracture law of mining floor rock layers[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(6): 55-62.
- [9] 于广明, 谢和平, 杨伦, 等. 采动断层活化分形界面效应的数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 1998, 23(4): 62-66.
YU Guangming, XIE Heping, YANG Lun, *et al.* Numerical simulation study on fractal interface effect of mining induced fault activation[J]. Journal of Coal Science, 1998, 23(4): 62-66.
- [10] 蓝航, 陈东科, 毛德兵. 我国煤矿深部开采现状及灾害防治分析[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 39-46.
LAN Hang, CHEN Dongke, MAO Debing. Analysis of the current situation and disaster prevention of deep coal mining in China[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 39-46.
- [11] 刘咸卫, 曹运兴, 刘瑞, 等. 正断层两盘的瓦斯突出分布特征及其地质成因浅析[J]. 煤炭学报, 2000, 25(6): 571-575.
LIU Xianwei, CAO Yunxing, LIU Rui, *et al.* Analysis of the distribution characteristics and geological causes of gas outburst in the two sides of normal faults[J]. Journal of Coal Science, 2000, 25(6): 571-575.
- [12] 邵强, 王恩营, 王红卫, 等. 构造煤分布规律对煤与瓦斯突出的控制[J]. 煤炭学报, 2010, 35(2): 250-254.
SHAO Qiang, WANG Enying, WANG Hongwei, *et al.* Control of coal and gas outburst by structural coal distribution patterns[J]. Journal of Coal Science, 2010, 35(2): 250-254.
- [13] 高魁, 乔国栋, 刘健, 等. 构造复杂矿区煤与瓦斯突出瓦斯地质分析[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(1): 119-124.
GAO Kui, QIAO Guodong, LIU Jian, *et al.* Geological analysis of coal and gas outburst in complex mining areas[J]. Chinese Journal of Safety Sciences, 2019, 29(1): 119-124.
- [14] 彭守建, 许江, 尹光志, 等. 煤岩破断与瓦斯运移耦合作用机理的试验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 2024-2028.
PENG Shoujian, XU Jiang, YIN Guangzhi, *et al.* Experimental study on the coupling mechanism between coal rock fracture and gas migration[J]. Journal of Coal Science, 2011, 36(12): 2024-2028.
- [15] 肖鹏, 吴铭川, 双海清, 等. 煤系正断层带影响下的煤层瓦斯赋存规律[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(10): 16-25.
XIAO Peng, WU Mingchuan, SHUANG Haiqing, *et al.* The occurrence pattern of coal seam gas under the influence of normal fault zones in coal measures[J]. Coal Field Geology and Exploration, 2022, 50(10): 16-25.
- [16] 李普, 张小东. 构造区回采煤层瓦斯迁移规律分析[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(10): 93-101.
LI Pu, ZHANG Xiaodong. Analysis of gas migration law in coal seams extracted from structural areas[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(10): 93-101.
- [17] 孔胜利, 杨洋, 贾音, 等. 煤层瓦斯赋存特征及其关键地质因素影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(7): 53-58.
- [18] 曹佐勇, 何学秋, 王恩元, 等. 隐伏逆断层带的瓦斯涌出规律及控制因素研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(3): 657-662.
CAO Zuoyong, HE Xueqiu, WANG Enyuan, *et al.* Study on the Law and Control Factors of Gas Emission in Hidden Reverse Fault Zones[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2018, 35(3): 657-662.
- [19] 张学博, 王豪, 沈帅帅. 小断层活化对采空区上覆岩层破坏及渗透性影响[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2): 75-85.
ZHANG Xuebo, WANG Hao, SHEN Shuaisai. The impact of

- small fault activation on the failure and permeability of overlying strata in goaf[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(2): 75-85.
- [20] 王卫华, 李夕兵. 离散元法及其在岩土工程中的应用综述[J]. *岩土工程技术*, 2005(4): 177-181.
WANG Weihua, LI Xibing. Summary of discrete element method and its application in geotechnical engineering[J]. *Geotechnical Engineering Technology*, 2005(4): 177-181.
- [21] CUNDALL PA. UDEC-a generalized distinct element program for modelling jointed rock[J]. Report PCAR-1-80, Peter Cundall Associates, European Research Office, US Army Corps of Engineers, 1980.
- [22] 蒋金泉, 武泉林, 曲 华. 硬厚岩层下逆断层采动应力演化与断层活化特征[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(2): 267-277.
JIANG Jinquan, WU Quanlin, QU Hua. Stress evolution and fault activation characteristics of reverse faults under hard and thick rock layers[J]. *Journal of Coal Science*, 2015, 40(2): 267-277.
- [23] 石佳林, 胡千庭, 罗永江, 等. 不同断层倾角下煤系断层应力场演化规律研究[J]. *矿业安全与环保*, 2023, 50(1): 1-8.
SHI Jialin, HU Qianting, LUO Yongjiang, *et al.* Study on the evolution law of coal measures fault stress field under different fault dips[J]. *Mining Safety and Environmental Protection*, 2023, 50(1): 1-8.
- [24] 崔洪庆, 姚念岗. 不渗透断层与瓦斯灾害防治[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(9): 1486-1489.
CUI Hongqing, YAO Niangang. Impermeable faults and gas disaster prevention and control[J]. *Journal of Coal Industry*, 2010, 35(9): 1486-1489.