

葫芦素煤矿采动覆岩离层发育规律研究

冯子仪, 孟宪伟, 欧阳玉山

河北工程大学地球科学与工程学院, 河北 邯郸

收稿日期: 2026年7月7日; 录用日期: 2026年8月4日; 发布日期: 2026年8月12日

摘 要

为揭示深埋厚煤层开采条件下覆岩离层的易发层位、演化过程及控制机制, 以葫芦素煤矿某工作面为研究对象, 综合采用传递岩梁理论和UDEC离散元模拟方法, 并利用呼吉尔特矿区5个生产煤矿的导水裂隙带裂采比资料进行区域经验校核。结果表明: 第11层粉砂岩、第13层细砂岩、第15层粉砂岩、第17层粉砂岩和第19层粉砂岩为主要潜在离层层位。矿区平均裂采比为23.76, 对应4 m采厚条件下导水裂隙带经验高度约95.04 m; UDEC模拟得到的采动裂隙-离层机械影响上限约120 m, 较经验值高26.26%, 说明力学模型对破坏影响范围的预测具有一定上限性, 不能直接等同于稳定导水通道高度。高位局部离层最高可发育至约202 m, 但与下部裂隙区并非完全贯通。离层演化经历低位缓慢增长、中部快速上移和高位受限稳定三个阶段, 最大开度由推进120 m时的2.53 m减小至推进340 m时的0.69 m, 走向长度最大约142 m。采厚由4 m增至6 m和9 m后, 离层上移提前, 但最高层位仍稳定在202~203 m; 硬型和软硬互层型顶板条件下高位离层可发育至约202 m, 软型顶板条件下约120 m。研究表明, 采厚主要影响离层发育速率和开度, 高位厚硬层的位置及软硬岩层组合控制最高离层层位, 可为类似地质条件下的离层水害辨识提供依据。

关键词

覆岩离层, 层位判别, 采厚, UDEC模拟, 顶板岩性组合

Study on the Development Law of Mining-Induced Overburden Bed Separation in Hulusu Coal Mine

Ziyi Feng, Xianwei Meng, Yushan Ouyang

School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

Received: July 7, 2026; accepted: August 4, 2026; published: August 12, 2026

文章引用: 冯子仪, 孟宪伟, 欧阳玉山. 葫芦素煤矿采动覆岩离层发育规律研究[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(8): 1157-1168. DOI: 10.12677/ag.2026.168103

Abstract

To reveal the prone horizons, evolutionary process, and controlling mechanisms of overburden bed separation under deep-buried thick-seam mining conditions, a working face in the Hulusu Coal Mine was selected as the study area. The transfer rock-beam theory and UDEC discrete-element modelling were employed, and regional empirical validation was conducted using data on the height-to-mining-height ratios of the water-conducting fractured zone from five producing coal mines in the Hujier Mining Area. The results indicate that the 11th siltstone layer, 13th fine sandstone layer, 15th siltstone layer, 17th siltstone layer, and 19th siltstone layer are the main potential bed-separation horizons. The average height-to-mining-height ratio in the mining area is 23.76, corresponding to an empirical water-conducting fractured-zone height of approximately 95.04 m for a mining height of 4 m. The UDEC simulation yields an upper limit of approximately 120 m for the mechanically affected mining-induced fracture-separation zone, which is 26.26% higher than the empirical value. This indicates that the mechanical model provides an upper-bound estimate of the affected failure range and that the simulated height cannot be directly equated with the height of a stable water-conducting pathway. The highest isolated bed separation develops to approximately 202 m above the coal seam, but it is not fully connected to the lower fractured zone. Bed-separation evolution proceeds through three stages: slow growth at low levels, rapid upward migration at intermediate levels, and constrained stabilization at high levels. The maximum opening decreases from 2.53 m at an advance distance of 120 m to 0.69 m at 340 m, while the maximum strike length reaches approximately 142 m. When the mining height increases from 4 m to 6 m and 9 m, upward migration of bed separation occurs earlier, whereas the maximum development horizon remains stable at approximately 202~203 m. Under hard-roof and interbedded soft-hard roof conditions, high-level bed separation can develop to approximately 202 m, whereas under soft-roof conditions, the maximum height is approximately 120 m. These results demonstrate that mining height primarily affects the development rate and opening of bed separation, whereas the position of high-level thick and hard strata and the assemblage of soft and hard rock layers control the maximum bed-separation horizon. The findings may provide a reference for identifying bed-separation water hazards under similar geological conditions.

Keywords

Overburden Bed Separation, Strata Horizon Identification, Mining Height, UDEC Simulation, Roof Lithologic Assemblage

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤层开采后,采空区上覆岩层经历卸压、弯曲、破断和压实,不同岩层因厚度、强度、弹性模量及层间结构面性质差异而产生非协调变形,进而在软硬岩层接触界面、厚硬岩层下部或关键层控制层位形成层间张开空间。关键层理论指出,少数厚硬岩层对上覆岩层整体运动具有主控作用,其破断与承载状态决定覆岩移动的阶段性和空间分区特征[1]-[3]。张鑫等[4]进一步指出,层间差异沉降是离层形成的直接动力。因此,离层既是采动覆岩结构调整的重要表现,也可能成为水体储集、泥砂运移或注浆充填的空间载体。

近年来,采动覆岩离层研究逐步由现象识别拓展至层位定位、致灾条件评价及工程控制。吴永辉等[5]提出大埋深煤层开采覆岩离层层位定位方法;乔伟等[6]强调离层水害应从水源、通道、力源和物源等条件综合判识;徐良骥等[7]揭示了关键层变形、离层空间与地表沉陷控制之间的联系。于思源等[8]和张村等[9]分别从巨厚岩层及西部厚基岩条件出发,分析了采动裂隙与离层的阶段性发育特征。上述研究表明,离层发育不仅取决于采动强度,还受岩性组合和高位承载结构共同控制。

现有研究多以导水裂隙带高度或覆岩整体破坏范围为主要指标,对“连续导水裂隙带”与“高位局部离层”之间的物理差异讨论不足;已有导水裂隙带预测与探测方法虽不断完善[10][11],但将其直接用于高位局部离层判定仍存在概念混用风险。针对上述问题,本文以葫芦素煤矿某工作面为工程背景,采用传递岩梁理论识别潜在离层层位,建立不同采厚及不同顶板岩性组合条件下的 UDEC 模型,并利用同矿井邻近工作面的现场探测结果与经验公式进行验证。在此基础上,进一步量化离层高度、开度和走向长度,讨论其对离层水害评价的工程意义。

2. 工程概况与研究方法

2.1. 工程地质概况

研究对象为葫芦素煤矿某工作面,主要开采 2-1 煤层,煤层平均采厚 4 m,埋深 650 m。根据钻孔 H21 揭露资料,2-1 煤上覆岩层主要由砂质泥岩、粉砂岩、细砂岩和中砂岩等组成,整体呈软硬岩层交替分布特征,为采动后层间变形不协调和离层空间形成提供了地质条件。

2.2. 导水裂隙带高度区域经验估算

由于研究工作面暂缺专门的导水裂隙带现场探测资料,本文采用规范经验方法与区域裂采比类比相结合的方式估算。2017 年《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》¹给出了不同覆岩类型下的经验预测方法[12];考虑西部高强度开采条件下传统经验公式的区域适应性,进一步收集呼吉尔特矿区已生产煤矿的采厚和导水裂隙带高度资料,采用裂采比法开展区域类比。由表 1 可知,除葫芦素煤矿外,其余 4 个生产煤矿的裂采比集中在 24.55~25.04,葫芦素煤矿 2-1 煤裂采比为 19.87,5 个煤矿的整体统计范围为 19.87~25.04,算术平均值为 23.76。按本文 4 m 采厚计算,区域裂采比对应的导水裂隙带高度范围为 79.48~100.16 m,平均预测值为 95.04 m。该结果来源于同一矿区生产矿井资料,可作为研究工作面导水裂隙带高度的区域经验参照。

Table 1. Fracture-to-mining ratio statistics for major producing coal mines in the Hujerte Mining Area
表 1. 呼吉尔特矿区主要生产煤矿导水裂隙带裂采比统计

生产	主采煤层	平均采厚(m)	导水裂隙带高度(m)	裂采比 K
巴彦高勒	3-1	5.67	142.00	25.04
母杜柴登	3-1	4.95	122.57	24.76
门克庆	3-1	4.48	110.00	24.55
石拉乌素	2-2	5.96	146.38	24.56
葫芦素	2-1	4.48	89.00	19.87
平均值	-	-	-	23.76

¹https://www.chinamine-safety.gov.cn/zfxxgk/fdzdgknr/tzgg/201707/t20170703_349044.shtml

2.3. 离层发育层位理论判别

采动覆岩离层的形成，本质来源于相邻岩层弯曲下沉不同步。当上下岩层在采动影响下能够保持协同变形时，可视为共同传递荷载的组合岩梁；当两者因厚度、弹性模量及跨度差异导致挠度不一致时，层间易发生张开并形成离层空间。因此，本文基于传递岩梁理论，从相邻岩层弯曲变形协调性出发，对2-1煤上覆岩层潜在离层层位进行判别。两岩层在自重作用下发生弯曲时，由于下部岩层跨度较大，可取 $L_{\text{下}} = 1.25L_{\text{上}}$ ，下部岩层的跨度和弯矩往往先于上部岩层达到极限。上下两岩层保持同步运动的临界条件为如式(1)所示。

$$E_{\text{下}}m_{\text{下}}^2 \geq \left(\frac{L_{\text{下}}}{L_{\text{上}}}\right)^4 E_{\text{上}}m_{\text{上}}^2 = (1.25)^4 E_{\text{上}}m_{\text{上}}^2 \tag{1}$$

当式(1)不能满足时，下部岩层的挠度增长速度高于上部岩层，二者由协同运动转为分离运动，离层优先形成于变形差异较大的层间界面。将钻孔 H21 揭露的岩层厚度和弹性模量代入判别式，得到表 2 所示结果。

Table 2. Theoretical identification of potential bed-separation horizons
表 2. 潜在离层层位理论判别结果

序号	岩性	厚度/m	弹性模量/GPa	是否发生离层
27	砂质泥岩	15	6.01	否
26	粉砂岩	18	8.46	否
25	细砂岩	12	13.2	否
24	中砂岩	14	16.2	否
23	粉砂岩	14	8.46	否
22	细砂岩	14	13.2	否
21	粉砂岩	8	8.46	否
20	细砂岩	10	13.2	否
19	粉砂岩	4	8.46	是
18	砂质泥岩	24	6.01	否
17	粉砂岩	6	8.46	是
16	砂质泥岩	24	6.01	否
15	粉砂岩	8	8.46	是
14	砂质泥岩	16	6.01	否
13	细砂岩	3	13.2	是
12	砂质泥岩	8	6.01	否
11	粉砂岩	4	8.46	是
10	砂质泥岩	20	6.01	否
9	粉砂岩	14	8.46	否
8	砂质泥岩	24	6.01	否
7	细砂岩	6	13.2	否

续表

6	砂质泥岩	10	6.01	否
5	中砂岩	8	16.2	否
4	细砂岩	6	13.2	否
3	粉砂岩	4	2.71	否
2	砂质泥岩	14	6.01	否
1	2-1 煤	4	2.71	否

由表 1 可知,第 11 层粉砂岩、第 13 层细砂岩、第 15 层粉砂岩、第 17 层粉砂岩和第 19 层粉砂岩具备较明显的离层倾向。上述层位多为 4~8 m 的薄层粉砂岩或约 3 m 的细砂岩,其与相邻厚层砂质泥岩在刚度和采动跨度方面差异明显,易产生“下部岩层先沉降、上部岩层滞后变形”的非协调运动。理论判别结果为后续数值模拟中的重点离层层位识别提供了依据。

3. 数值模拟与结果分析

3.1. 数值模型建立与方案设置

沿工作面走向建立二维 UDEC 离散元模型。模型尺寸为 600 m × 354 m (长 × 高),自下而上划分为 28 个岩层;左右边界约束水平位移,底部边界约束垂向位移。考虑研究区埋深条件和上覆岩层自重作用,在模型上边界施加 8.5 MPa 垂向应力补偿。工作面采用分步开挖方式,每步推进 20 m,总推进距离 400 m,两侧留设不小于 100 m 煤柱,以降低边界效应对计算结果的影响。模型平衡状态见图 1。

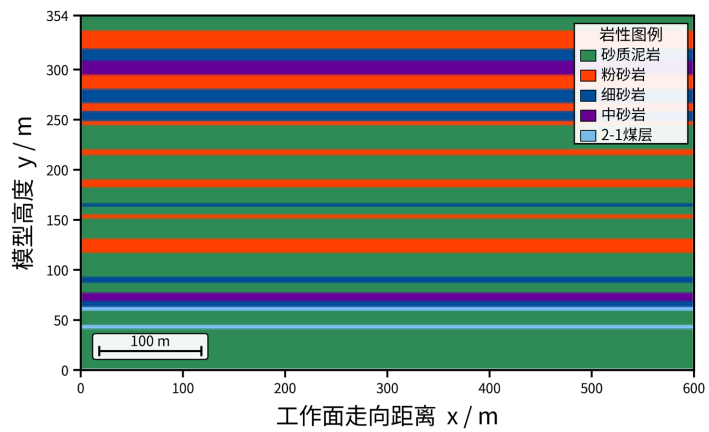


Figure 1. Numerical model and division of rock strata
图 1. 数值模型及岩层划分

数值计算中,岩体采用莫尔 - 库仑本构模型,层间节理采用接触面力学参数描述。模型岩体力学参数主要依据研究区钻孔揭露岩性、相近矿区岩石力学参数并结合 UDEC 计算稳定性综合确定,见表 3。模拟方案包括基准采厚 4 m 以及采厚 6 m、9 m 对比工况;同时将顶板岩性组合概化为硬型、软硬型和软型三类,用于分析岩层强度及软硬组合差异对离层发育层位的影响。

3.2. 离层识别与开度表征方法

为避免将力学裂隙影响范围直接等同于导水裂隙带,本文将数值结果区分为两类指标:一是由煤层顶板向上发育的采动裂隙 - 离层机械影响范围,用于描述岩层破断和层间张开的影响上限;二是位于该

Table 3. Mechanical parameters of rock mass
表 3. 岩体力学参数

岩性	剪切模量/GPa	体积模量/GPa	粘聚力/MPa	内摩擦角/°	抗拉强度/MPa
砂质泥岩	1.76	3.23	1.64	31.8	3.03
粉砂岩	3.88	4.19	6.46	22.65	3.41
细砂岩	4.20	6.10	7.08	23.2	3.64
中砂岩	4.93	8.51	7.92	34.5	4.97
煤层	1.55	1.12	1.67	31.0	2.04

范围上方、与下部裂隙并不完全贯通的高位局部离层。由于模型未设置渗流场，前者仅作为与区域经验高度进行尺度对比的力学指标，不能直接认定为稳定导水通道高度；后者主要反映覆岩结构非协调变形的最高层位。

对层间接触面的法向相对位移进行量化，定义离层开度 $b(x)$ 为上、下相邻岩层在同一水平位置的法向位移差；最大离层开度、有效离层走向长度及单位宽度离层空间面积分别为：

$$b_{\max} = \max[b(x)] \quad (2)$$

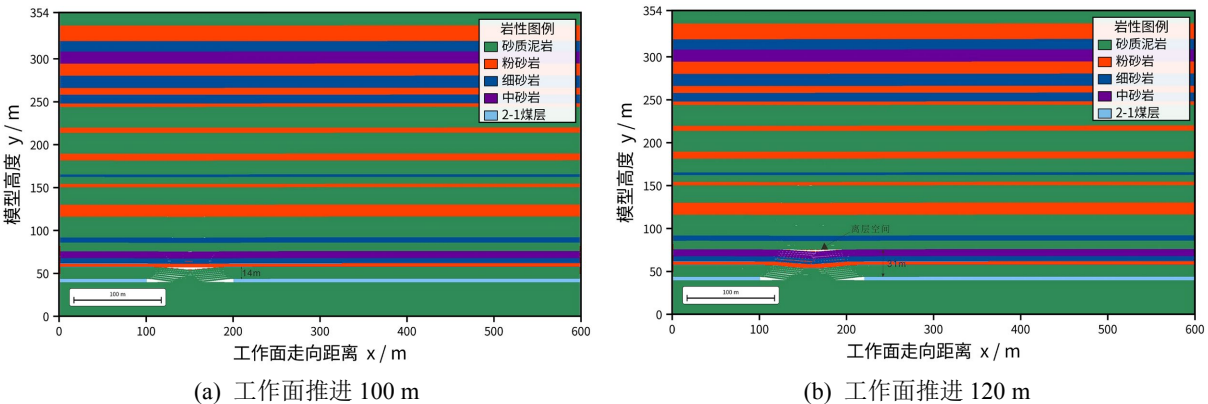
$$Ls = x_2 - x_1 \quad (3)$$

$$As = \int_{x_1}^{x_2} b(x) dx \quad (4)$$

式中： $b_{\max}$ 为最大离层开度，m； Ls 为有效离层走向长度，m； x_1 和 x_2 为有效张开区两端坐标； As 为二维模型中单位工作面宽度对应的离层空间面积， m^2 。本文重点统计 $b_{\max}$ 和 Ls ，并与离层高度联合分析。已有研究已将采动离层量估算及离层开度预测用于覆岩结构与潜在空间评价[13][14]，为本文指标选取提供了方法参考。

3.3.4 m 采厚条件下数值模拟结果分析

4 m 采厚条件下，离层发育与工作面推进距离密切相关，见图 2。推进 100 m 时，直接顶开始垮落，但受两侧煤壁支撑影响，上覆岩层尚未形成明显层间张开；推进至 120 m 时，直接顶基本垮落，基本顶发生弯曲变形，煤层顶板以上约 31 m 处开始出现离层；推进至 160 m 后，基本顶进入周期破断阶段，层向裂隙和竖向裂隙逐渐增多，离层空间发展至顶板以上约 45 m；推进至 220~300 m 时，层间差异沉降增强，离层高度进入快速上移阶段；推进至 340 m 后，离层发育至煤层顶板以上约 202 m，受上部厚硬岩层承载约束影响，离层高度趋于稳定，局部张开空间逐渐受采空区压实作用影响而减小。



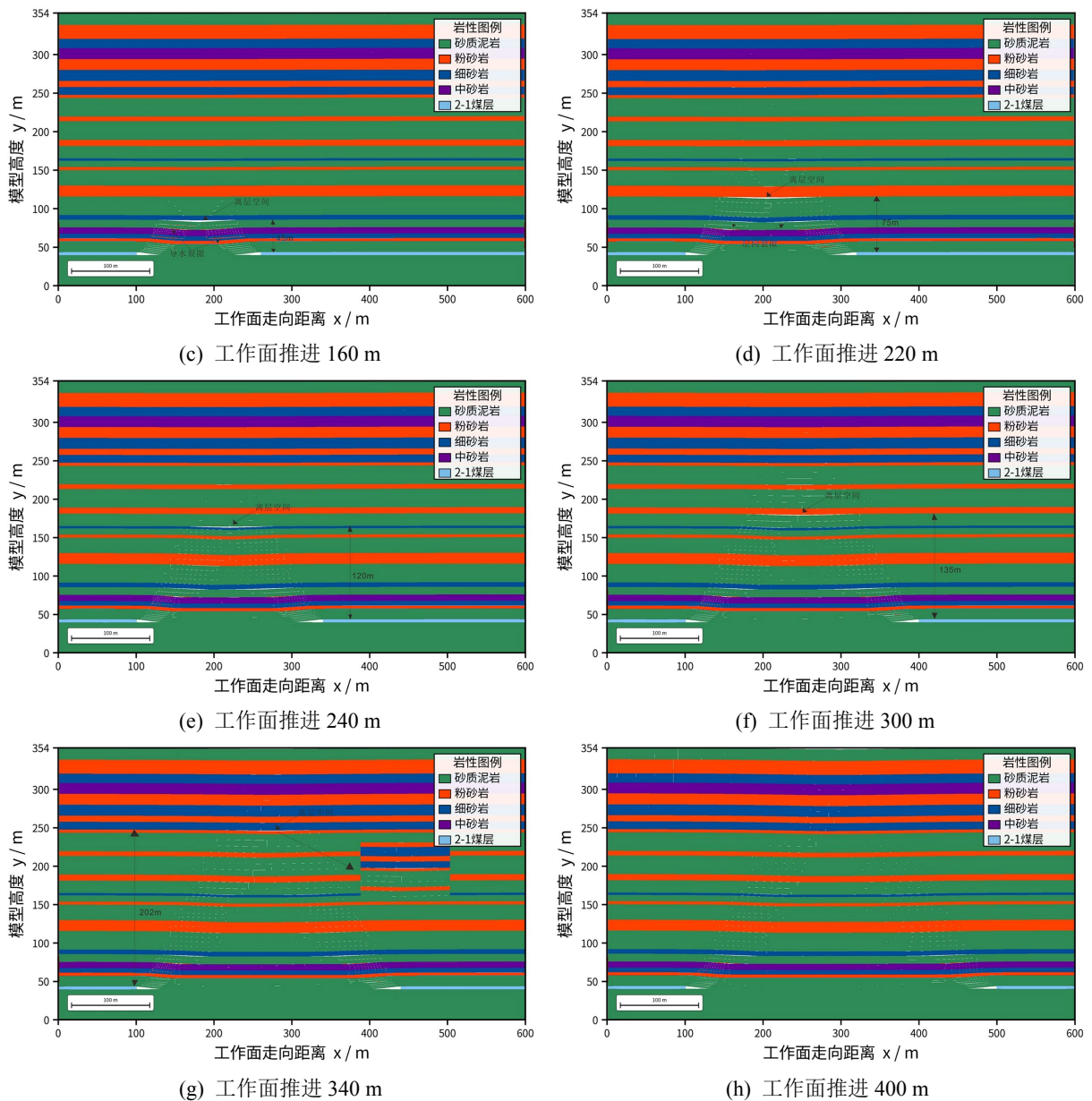


Figure 2. Development characteristics of overburden bed separation at a mining height of 4 m

图 2. 4 m 采厚下覆岩离层发育特征

由图 2 和图 3 可知, 4 m 采厚条件下离层裂隙并非连续均匀上移, 而呈现明显阶段性。0~220 m 阶段, 离层主要受直接顶垮落和基本顶初次破断控制, 发育高度增长相对缓慢; 220~340 m 阶段, 覆岩层间弯曲不同步加剧, 高位硬岩层下方逐渐形成新的张开空间, 离层高度快速增加; 340 m 以后, 离层高度基本稳定在 202 m 左右, 表明上部厚硬岩层对离层继续上移具有明显限制作用。

3.4. 区域经验校核与模型可靠性讨论

为检验数值模型对覆岩破坏尺度和优势离层层位的表征能力, 将 UDEC 计算结果分别与呼吉尔特矿区裂采比区域经验结果和传递岩梁理论判别结果进行对比。区域统计裂采比为 19.87~25.04, 按 4 m 采厚折算的导水裂隙带高度为 79.48~100.16 m, 平均预测值为 95.04 m。

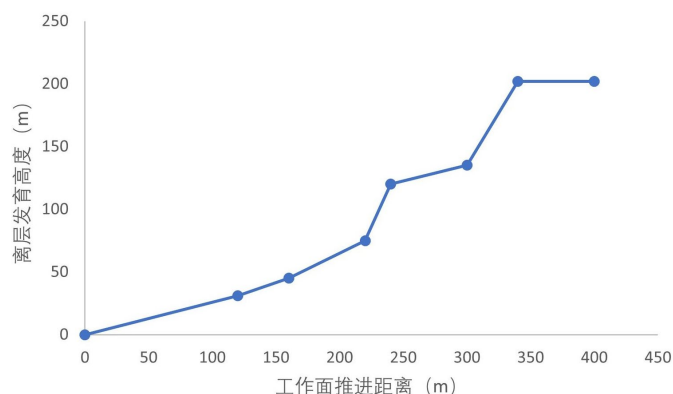


Figure 3. Bed separation height versus advancing distance at a 4 m mining height

图 3. 4 m 采厚下离层发育高度随推进距离变化曲线

UDEC 模拟得到的采动裂隙-离层机械影响上限约为 120 m，对应裂采比为 30.00，较区域平均预测值高 24.96 m，相对偏差为 26.26%。该差异已超过“基本一致”的合理表述范围，因此本文不将 120 m 直接认定为实际导水裂隙带高度，而将其界定为岩层破断、短小裂隙和局部层间张开的综合机械影响上限。区域平均值 95.04 m 则用于表征研究区稳定导水裂隙带的一般发育尺度。

模拟结果偏高主要与评价对象和模型假设有关。区域裂采比反映不同矿井、不同工作面采厚和顶板组合条件下稳定导水裂隙带的统计水平；UDEC 力学模型依据岩层破断和接触面张开识别影响范围，其中部分机械裂隙未必形成稳定水力连通。与此同时，二维平面应变模型未考虑工作面倾向边界和三维围岩约束，岩层组合及节理参数也经过概化，这些因素均可能使模拟的机械影响上限偏大。因此，120 m 应视为偏保守的力学影响上限，而非稳定导水通道高度。

模拟中约 202 m 的结果表示最高局部离层层位。该离层与下部裂隙区之间存在未完全贯通的岩层区段，不能与导水裂隙带经验高度进行直接比较。其合理性主要通过离层层位进行校核：传递岩梁理论识别的第 11、13、15、17 和 19 层在数值模拟中均出现不同程度的层间张开，表明理论判别与模拟结果在优势离层层位方面具有较好一致性。

综合来看，区域裂采比为导水裂隙带的一般尺度提供了经验约束，理论层位判别为高位局部离层的位置提供了结构依据。所建模型可较好用于分析离层演化阶段、相对变化趋势和控制层位，但对导水裂隙带绝对高度的预测存在偏高倾向。因此，后续不同采厚和顶板岩性组合的对比主要强调相对规律，其工程应用仍需结合研究工作面的现场探测资料进一步校正。

3.5. 采厚对离层发育的影响

在顶板岩性组合和边界条件不变的情况下，将采厚由 4 m 增至 6 m 和 9 m。不同采厚工况的最终覆岩破坏形态见图 4，离层高度对比见图 5。三组工况均经历低位起裂、中部快速上移和高位稳定过程，但采厚越大，离层在相同推进距离下越早进入高位层位。6 m 采厚最大离层高度约 203 m，9 m 采厚约 202 m，与 4 m 工况基本一致。

采厚增大使采空区可供覆岩移动的自由空间扩大，直接顶与基本顶的下沉量、弯曲曲率和破断转角随之增大，低位岩层更早达到极限变形状态。从能量角度看，较大采厚对应更大的采出空间和重力势能释放，采动扰动向上覆岩层传递的强度增强，层间法向张开及剪切错动更易发生，因此离层起裂和上移过程明显提前。需要指出的是，本文未直接输出应变能或耗散能时程曲线，上述能量解释属于基于位移和破断响应的机理分析，而非独立的能量定量计算。

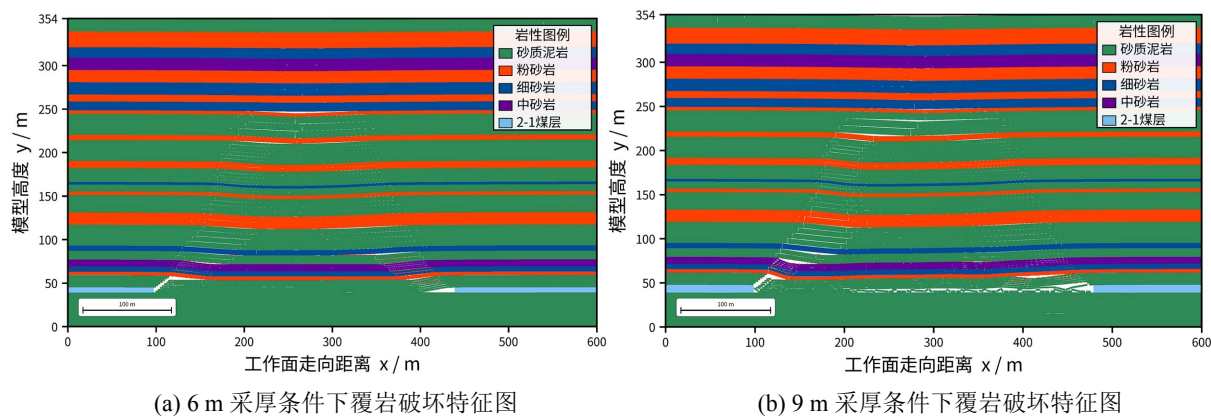


Figure 4. Overburden failure characteristics under different mining heights
图 4. 不同采厚下覆岩破坏特征

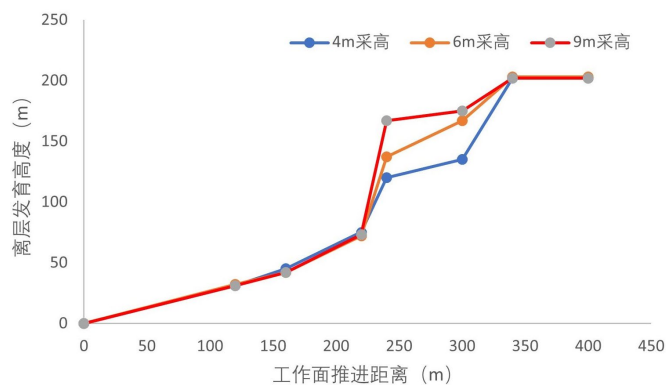


Figure 5. Comparison curves of bed separation height under different mining heights
图 5. 不同采厚下离层高度对比曲线

尽管采厚改变了离层发育速度和阶段转换时间，但三组工况最终均受同一高位厚硬层控制，说明在本文 4~9 m 采厚范围内，采厚主要属于动力强度因素，而高位关键层的位置及承载能力决定最高离层层位。

3.6. 顶板岩性组合对离层发育的影响

为分析岩性强度及软硬组合关系对离层发育的控制作用，将顶板岩性组合概化为硬型、软硬型和软型三类，见表 4。不同顶板岩性组合的覆岩破坏与离层形态见图 6。硬型和软硬互层型顶板条件下，最大离层高度均可达到约 202 m；软型顶板条件下最大离层高度约 120 m。

Table 4. Different roof lithologic assemblages
表 4. 不同顶板岩性组合

岩性组合	顶板组合特征	设置目的
硬型顶板	上覆岩层以砂岩、粉砂岩等较硬岩层为主	分析厚硬岩层承载结构对高位离层的控制
软硬型顶板	砂质泥岩与砂岩交替分布	分析软硬互层条件下层间变形差异
软型顶板	软弱泥质岩层比例较高	分析协调下沉和压实作用对离层的抑制

软型覆岩整体强度较低,采动后低位岩层较早破断并快速垮落,碎胀岩体对采空区的充填和压实作用增强;上、下岩层更容易形成近似同步下沉,层间差异沉降难以持续累积,因此高位离层受到抑制。硬型顶板中,厚硬岩层具有较大的极限跨距和承载能力,其下部岩层先行弯曲、破断,而厚硬层运动滞后,形成较大的层间位移差,离层可向高位发展。

软硬互层型顶板兼具软层变形空间和硬层承载结构:软弱层为下沉和错动提供条件,硬岩层则维持较长时间的悬跨与运动滞后,界面刚度差异使多层位离层更易形成。由此可见,离层高度并不与岩体强度呈简单单调关系,而取决于“厚硬承载层-软弱变形层-层间接触面”的空间组合。

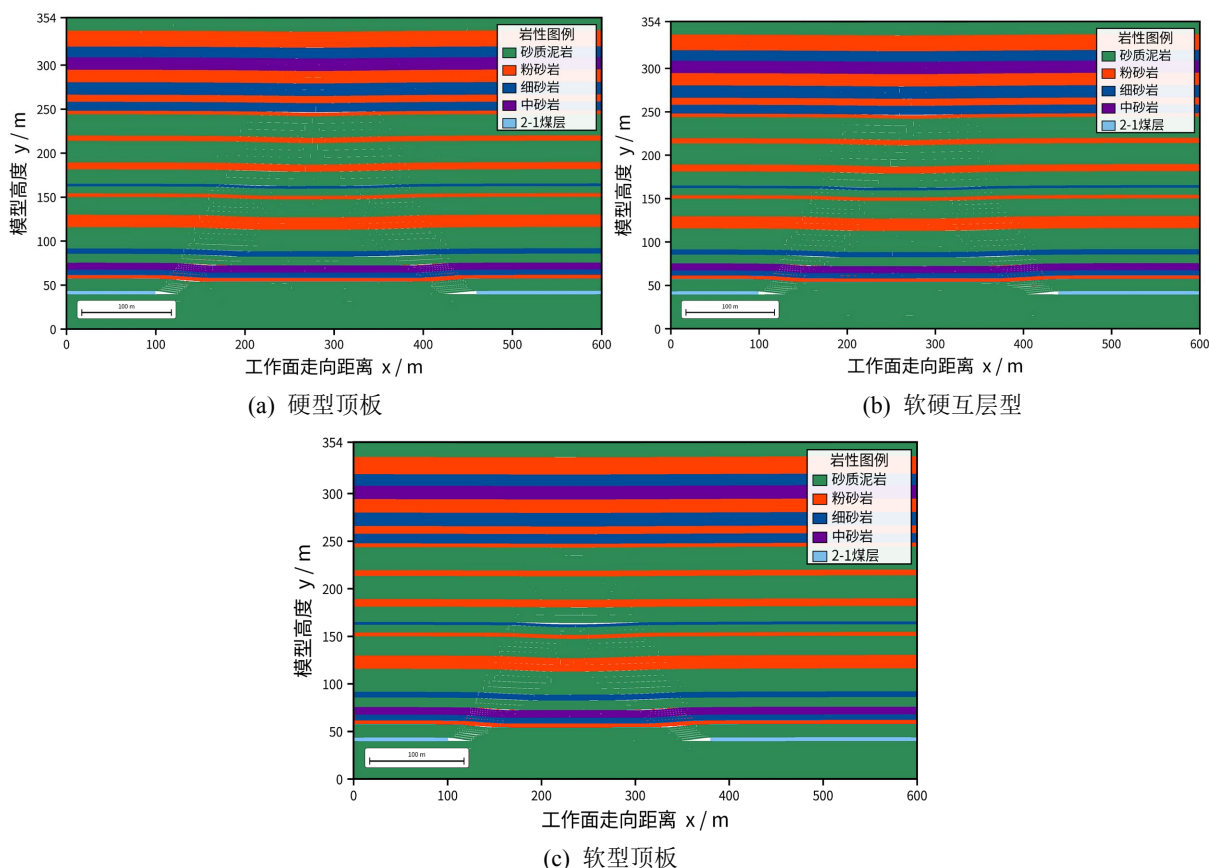


Figure 6. Development characteristics of overburden bed separation under different roof lithological combinations

图 6. 不同顶板岩性组合条件下覆岩离层发育特征

3.7. 离层开度定量特征及水害意义

为补充单纯离层高度指标的不足,对 4 m 采厚工况中优势离层的最大开度和走向长度进行统计,结果见表 5。推进 120 m 时,低位离层最大开度为 2.53 m;随着离层向更高、更硬的岩层迁移,最大开度逐渐减小,推进 340 m 时高位离层开度约 0.69 m。离层走向长度则总体先增大后调整,在推进 300 m 时达到约 142 m。

离层高度增加而开度减小,反映不同层位岩层刚度和承载状态的差异。低位岩层受采空区直接影响,下沉量大且破断转角明显,容易形成较大张开;离层迁移至高位厚硬层下方后,岩层整体性和弯曲刚度增强,其下方虽然可形成较高层位的张开空间,但开度受到承载结构约束。推进后期,采空区逐渐压实及上覆荷载重新分配,使部分既有离层发生闭合或分段化。

Table 5. Statistics of bed separation height, aperture, and strike length under a mining height of 4 m
表 5. 4 m 采厚条件下离层高度、开度及走向长度统计

推进距离/m	离层高度/m	最大开度/m	走向长度/m
120	31	2.53	89
160	45	2.41	118
220	75	1.80	127
240	120	1.68	122
300	135	1.02	142
340	202	0.69	111
400	202	局部闭合, 未取稳定值	局部闭合, 未取稳定值

从水害评价角度看, 离层高度用于确定潜在储水层位, 开度和走向长度则反映可利用空间尺度。较大的离层空间不必然形成水害, 仍需同时满足上覆含水层富水性、垂向裂隙连通性及水压力等条件[15]。本文模型未考虑渗流-应力耦合, 因此表 5 所示开度主要用于评价潜在储水空间, 不能直接换算为突水量或突水危险等级。

3.8. 研究局限性与适用范围

本研究仍存在以下局限性: 第一, UDEC 模型为沿工作面走向建立的二维平面应变模型, 未考虑工作面倾向边界、端头效应及覆岩裂隙三维扩展, 因而不能完全表征离层横向连通范围; 第二, 实际岩层组合经过适度概化, 岩体及节理参数主要依据钻孔资料、相近矿区试验结果及反演校核确定, 尚未充分考虑空间非均质性和参数不确定性; 第三, 本文开度统计基于力学模型的层间几何张开, 未引入含水层水压力、裂隙渗流和软化效应; 第四, 模型校核主要采用区域裂采比资料和理论层位判别, 尚缺少研究工作面的离层仪、钻孔窥视、微震或注水试验等现场监测数据。因此, 本文结论主要适用于与研究区背景相近的近水平、大埋深、厚煤层、软硬互层顶板长壁开采条件。

4. 结论与讨论

(1) 传递岩梁理论判别结果表明, 2-1 煤上方第 11 层粉砂岩、第 13 层细砂岩、第 15 层粉砂岩、第 17 层粉砂岩和第 19 层粉砂岩为主要潜在离层层位。上述层位多为薄层砂岩或粉砂岩, 与相邻厚层泥质岩在厚度和弹性模量方面差异明显, 采动过程中易产生不同步弯曲变形。

(2) 呼吉尔特矿区平均裂采比为 23.76, 对应 4 m 采厚条件下导水裂隙带区域经验高度约 95.04 m。UDEC 模拟得到的采动裂隙-离层机械影响上限约 120 m, 较经验值高 26.26%, 表明力学模型对破坏影响范围的预测具有一定上限性; 120 m 不宜直接等同于稳定导水通道高度。约 202 m 为与下部裂隙区未完全贯通的最高局部离层层位。

(3) 4 m 采厚条件下, 离层演化经历低位缓慢增长、中部快速上移和高位受限稳定三个阶段。最大开度由推进 120 m 时的 2.53 m 逐渐减小至推进 340 m 时的 0.69 m, 走向长度在推进 300 m 时达到约 142 m, 说明离层高度增加并不意味着开度同步增大。

(4) 采厚由 4 m 增至 6 m 和 9 m 后, 离层起裂和向上迁移过程提前, 但最高局部离层层位仍稳定在 202~203 m。在本文 4~9 m 采厚范围内, 采厚主要影响离层发育速率和开度, 高位厚硬层的位置及承载能力控制最高离层层位。

(5) 顶板岩性组合对离层发育具有明显控制作用。硬型和软硬互层型顶板条件下, 高位局部离层可发

育至约 202 m; 软型顶板因早期破断、协调下沉和碎胀压实作用较强, 最高局部离层层位约 120 m。上述结论适用于与研究区条件相近的近水平、大埋深、厚煤层和软硬互层顶板长壁开采条件, 绝对高度仍需结合现场监测进一步校正。

参考文献

- [1] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 岩层控制中的关键层理论研究[J]. 煤炭学报, 1996, 21(3): 225-230.
- [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.
- [3] 许家林, 钱鸣高. 覆岩采动裂隙分布的“O”形圈特征研究[J]. 煤炭学报, 1998, 23(5): 466-469.
- [4] 张鑫, 乔伟, 雷利剑, 等. 综放开采覆岩离层形成机理[J]. 煤炭学报, 2016, 41(S2): 342-349.
- [5] 吴永辉, 秦伟, 苏士杰, 等. 大埋深煤层开采覆岩离层发育层位定位方法研究[J]. 中国矿业, 2024, 33(7): 191-201.
- [6] 乔伟, 刘梦楠, 孟祥胜, 等. 煤矿采动覆岩离层水害致灾因素勘查与预测评价[J]. 煤炭学报, 2024, 49(4): 2031-2044.
- [7] 徐良骥, 张坤, 刘潇鹏, 等. 离层注浆开采关键层变形特征及地表沉陷控制效应[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 931-942.
- [8] 于思源, 王晓振, 沙海洋, 等. 巨厚洛河组下小煤柱双向跳采覆岩离层演化规律[J]. 山西煤炭, 2026, 45(2): 23-30.
- [9] 张村, 任赵鹏, 韩鹏华, 等. 西部矿区厚基岩特大采高工作面导水裂隙带发育特征[J]. 矿业科学学报, 2022, 7(3): 333-343.
- [10] 寻博辉, 吕义清, 姚星. 导水裂隙带发育高度预测模型对比研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(3): 190-200.
- [11] 王晓振, 沙海洋, 于思源, 等. 煤矿采动导水裂缝带高度的预测及探测方法进展[J]. 绿色矿山, 2025, 3(1): 1-13.
- [12] 国家安全生产监督管理总局, 国家煤矿安全监察局, 国家能源局, 国家铁路局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017.
- [13] 崔希民, 高宇, 李培现, 等. 采动覆岩与地表下沉关系模型及离层量估算方法[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 74-82.
- [14] 黄文祥, 刘晓帆, 李红, 等. 多煤层叠加开采覆岩离层演化规律与开度预测研究[J]. 矿业安全与环保, 2025, 52(5): 99-106+118.
- [15] 国家煤矿安全监察局. 煤矿防治水细则[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2018.