基于裂隙场和渗流场融合判识的覆岩分区演化特征及采厚效应

孔祥国[1,2],张　辉[1,2],李树刚[1,2],林海飞[1,2],赵鹏翔[1,2],赵鸿超[3],李　可[4],
王翠霞[1,2],赵天烁[1,2],季鹏飞[1,2],和　递[1,2]

(1. 西安科技大学 安全科学与工程学院,陕西 西安　710054;2. 西安科技大学 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室,陕西 西安　710054;3. 陕西煤业化工技术研究院有限责任公司,陕西 西安　710070;
4. 陕西彬长小庄矿业有限公司,陕西 咸阳　713500)

摘要:明晰采空区卸压瓦斯的流动与聚集规律对保障矿井安全至关重要,本文以彬长矿区某工作面为背景,通过数值模拟探究了不同采厚对覆岩裂隙及瓦斯运移的影响,并结合现场抽采实践进行了验证. 结果表明:工作面采厚与覆岩裂隙的发育程度呈正相关,随着采厚的增加,覆岩的回转空间增大,促进了裂隙的产生,表现为裂隙密度、离层量、分形维数和连通性系数的显著上升;大采厚条件下,卸压瓦斯的运移范围更广,尤其对中高层位瓦斯的运移能力影响更为显著. 基于裂隙发育和瓦斯流动特征,将采动覆岩的卸压瓦斯分布划分为3个区域:低位扩散区、中位浮升区和高位平流区. 通过各区域的裂隙密度、离层量、分形维数、连通性系数和瓦斯富集率的临界值,建立了裂隙场与渗流场融合的判识流程. 研究结果表明:随着采厚从5 m增至15 m,瓦斯运移区域面积平均增加112.6%,其中采厚对中位浮升区和高位平流区面积的促进作用远大于低位扩散区;试验工作面定向钻孔抽采效果良好,钻场纯流量范围为0～14.43 m^3/min;各层位抽采效能排序为:中层位＞低层位＞高层位,钻场卸压瓦斯抽采量占工作面绝对瓦斯涌出量随工作面推进呈阶梯式增长特征. 该结果验证了前述区域划分方法的可行性与钻孔布置的合理性,可为优化瓦斯抽采参数提供理论指导.

关键词:覆岩;卸压瓦斯;裂隙场;渗流场;定向钻孔;瓦斯治理

中图分类号:TD 325　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1000-1964(2026)01-0164-16

Zonal evolution characteristics of overlying strata and mining thickness effect based on integrated identification of fracture field and seepage field

KONG Xiangguo[1,2], ZHANG Hui[1,2], LI Shugang[1,2], LIN Haifei[1,2], ZHAO Pengxiang[1,2], ZHAO Hongchao[3], LI Ke[4], WANG Cuixia[1,2], ZHAO Tianshuo[1,2], JI Pengfei[1,2], HE Di[1,2]

(1. School of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention, Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. Shaanxi Coal and Chemical Technology Research Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710070, China; 4. Shaanxi Binchang Xiaozhuang Mining Co., Ltd., Xianyang, Shaanxi 713500, China)

收稿日期:2025-07-07　　**修回日期**:2025-09-02　　**DOI**:10.13247/j.cnki.jcumt.20250260

基金项目:国家自然科学基金项目(52474251,52204235);西安科技大学优秀青年科技基金(2025YQ2-05)

通信作者:孔祥国(1990—),男,山西省朔州市人,副教授,硕士生导师. E-mail: kxgtudou7218@163.com

引用格式:孔祥国,张　辉,李树刚,等.基于裂隙场和渗流场融合判识的覆岩分区演化特征及采厚效应[J].中国矿业大学学报,2026,55(1):164-179.

KONG Xiangguo, ZHANG Hui, LI Shugang, et al. Zonal evolution characteristics of overlying strata and mining thickness effect based on integrated identification of fracture field and seepage field[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(1): 164-179.

Abstract: Clarifying the flow and accumulation patterns of pressure-relief gas in goafs is essential for ensuring mine safety. In this study, based on a working face in the Binchang mining area, the influence of varying mining heights on overlying strata fractures and gas migration was investigated through numerical simulations, which was verified by gas drainage data at field. The results demonstrate a positive correlation between mining height and the extent of fracture development in overlying strata. As mining height increased, the rotational space for overlying strata expanded, thereby promoting fracture generation, with significant increases in fracture density, separation volume, fractal dimension, and connectivity coefficient. Greater mining heights leaded to expanding of pressure-relief gas migration range, with a more pronounced effect on gas mobility in the middle and upper zones. Based on the characteristics of fracture evolution and gas flow, the distribution of pressure-relief gas in mining-disturbed overlying strata was classified into three distinct zones: the lower diffusion zone, the middle ascending zone, and the upper advection zone. A identifying criterion-integrated approach between the fracture field and seepage field was established using threshold values of fracture density, separation volume, fractal dimension, connectivity coefficient, and gas enrichment rate for each zone. The result shows that as mining height increased from 5 m to 15 m, the spatial extent of gas migration zones expanded by an average of 112.6%. Among them, the promotion effect of mining height on middle ascending zone and upper advection zone is much greater than that of lower diffusion zone. The gas drainage effects of directional drilling in the test working face were good with pure gas flow rate of 0—14.43 m^3/min. Drainage efficiency across zones follows the order: middle zone > lower zone > upper zone. And the ratio of drainage volume of pressure-relief gas about this drilling site to the absolute gas emission of the working face presented stepped growth characteristic. These findings verified the feasibility of proposed zonal classification method and the rationality of borehole layout, offering theoretical support for optimizing gas drainage strategies.

Key words: overburden strata; pressure-relief gas; fracture field; seepage field; directional boreholes; gas control

我国具有“富煤、贫油、少气”的能源赋存结构，煤炭在一次能源生产和消费中的主导地位在短期内不会变化[1]. 目前我国浅部煤炭资源逐渐枯竭，煤炭生产战略向深部转移势在必行，随着煤矿开采深度的不断增加，煤层渗透性随之降低，矿井存在瓦斯压力大及瓦斯含量高的开采难题，因此如何提高瓦斯抽采效率，已成为煤矿领域研究人员亟待解决的关键问题[2]. 采场不同位置的裂隙发育和瓦斯富集程度决定了钻孔抽采能力，因此明晰覆岩采动裂隙演化规律和瓦斯富集规律对瓦斯抽采方案设计具有指导意义.

基于现场实践发现，工作面的开采条件可对覆岩运动及其结构变化产生较大影响，因此业内学者基于不同开采条件下的覆岩结构演化进行了诸多研究. 文献[3]量化了大倾角大采厚采场工作面各区域覆岩采动应力路径的空间分布模式，揭示了采场应力分布和覆岩断裂之间的耦合关系. 文献[4]通过物理相似模拟分析了采动裂隙发育高度、离层量及应变分布规律，探讨了切顶留巷开采顶板结构演变特征及覆岩非对称断裂模式. 文献[5]建立了沿空留巷开采条件下的数值模型，对其覆岩裂隙发育规律进行了研究. 文献[6]基于能量耗散理论，分析了工作面长度、采厚、埋深及推进速度对覆岩能量耗散区空间形态和覆岩损伤度的影响. 文献[7]建立了高位厚硬覆岩破断判据，基于水平地应力场及其转移的影响，研究了工作面宽度、覆岩厚度及上覆荷载对厚硬覆岩初次破断步距的影响规律.

覆岩裂隙演化表现出显著的空间分布差异性，随着覆岩结构理论体系的进一步完善，更多学

者将研究方向从定性描述转向量化表征，基于不同的覆岩裂隙演化参数，系统分析了覆岩采动裂隙单元的演化规律. 文献[8]通过物理相似试验和理论分析，采用分形维数定量表征了巨厚煤层开采邻近采空区覆岩继发性演化规律. 文献[9]基于光-电表征结果，揭示了覆岩变形及离层发育的时空演化机理. 文献[10]采用分布式光纤传感技术，通过构建采场覆岩模型并预埋传感光纤，探究了光纤频移值与工作面来压、覆岩结构演化的对应关系，建立了基于光纤频移值的两带发育表征方法，验证了该技术监测采动覆岩活动特征的可行性. 文献[11]基于分形理论与信息熵理论对覆岩裂隙图像进行了量化分析，以裂隙分形维数、裂隙熵和裂隙率3个特征参数确定了裂隙分布模式. 文献[12]以高瓦斯煤层开采为背景，采用数值模拟方法研究了覆岩裂隙动态演化规律，引入分形几何理论建立了裂隙岩体分形渗透率模型，实现了对瓦斯运移优势通道及渗透率非均匀分布的精细表征.

然而，上述研究多集中于裂隙演化本身的几何表征，并未充分揭示其诱发的流体运移特征. 采动裂隙的发育实质构成了瓦斯运移的关键通道，直接控制卸压瓦斯富集与逸散. 因此，研究重点应由裂隙静态表征向“采动扰动-岩体破裂-气体运移”的动态耦合机制拓展. 近年来，学者们逐渐聚焦于探究采动对覆岩瓦斯渗流场的影响规律，文献[13]通过监测工作面顶板微震变化和工作面瓦斯抽采数据，分析了特厚煤层工作面开采对覆岩瓦斯运移的影响. 文献[14]基于采空区上覆岩层破坏过程分析出断层影响下的覆岩空隙率分布，依照覆岩空隙率分布对Fluent软件参数赋值，分析了小断层影响下采空区的瓦斯运移规律. 文献[15]建立了采空区三维Sigmoid渗透率分布模型，模拟了采空区内的瓦斯流态和浓度分布. 文献[16]建立了采动裂隙环形体三维模型，基于工作面实测数据求解了环形体渗透率. 文献[17]基于采动裂隙环形分布规律，提出高位裂隙环形体模型，进一步描述了裂隙场内的瓦斯富集规律. 文献[18]采用椭抛带微分扫掠数值建模方法，运用Fluent软件对卸压瓦斯在椭抛带内的运移规律进行了研究. 文献[19]基于瓦斯动力学数学模型，分析了保护层开采条件下被保护层透气性系数及煤层瓦斯含量变化特征，表明透气性系数在开采过程中是一个动态发展的过程.

综上，现有研究多聚焦于固定地质与开采参数约束下的覆岩裂隙场或瓦斯渗流场分布规律，而基于不同采厚条件下覆岩裂隙场和瓦斯渗流场融合判识的覆岩分区演化特征研究较少，尚未系统阐明采厚变化对覆岩多场耦合演化机制的影响. 因此，笔者基于陕西彬长某矿综放工作面开采条件，通过数值模拟及理论分析，开展基于裂隙场和渗流场融合判识的覆岩分区演化特征及采厚效应研究，以期为覆岩卸压瓦斯治理提供理论依据.

1 覆岩裂隙场演化规律采厚效应

1.1 试验工作面

试验工作面位于陕西彬长矿区某高瓦斯矿井. 工作面走向长2 901 m，倾向长210 m，可采面积为60.92万 m^2，煤层底板标高介于348～392 m之间，煤层厚度为14～26 m. 采用后退式走向长壁综采放顶煤采煤法，顶板管理采用全部垮落法，平均采厚为10 m，其中割煤高度为3.5 m，放煤高度为6.5 m.

1.2 覆岩裂隙场数值模型构建

采用3DEC模拟软件分析覆岩裂隙演化规律，可以高精度再现岩体从弹性变形到塑性破坏的全过程，特别是对岩块转动、滑移等不连续变形行为具有独特的模拟优势. 基于试验工作面的覆岩结构建立数值模型，模型长330 m，高200 m. 模型左右边界和底面边界为应力约束、顶部为自由边界. 模型层状结构以实际钻孔揭露的地层层序和岩性为依据进行分层、分组构建，并在各岩层内设置适量的节理模拟岩层内的原生裂隙. 模型中的力学参数基于工作面覆岩实际力学试验结果和国内外研究成果进行设计[19-20]，在还原工作面实际地质条件的基础上，确保数值模型与试验工作面覆岩运动一致，从而准确模拟岩石抗压、抗拉以及抗扭转等力学特性. 模型使用Double-Yield本构模型[21]，岩层破坏采用Mohr-Coulumb破坏准则[22]，模型中各岩土层物理力学参数见表1～2. 模拟过程中分别以5.0，7.5，10.0，12.5和15.0 m厚度开挖煤层至同一目标区域（工作面推进至270 m位置），以此表征不同采厚工况，对比分析不同采厚下的覆岩裂隙场演化规律.

表 1　数值模型岩层力学参数

Table 1　Mechanical parameters of rock strata in the numerical model

岩层	模型厚度/m	密度/(kg·m^{-3})	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	内摩擦角/(°)	内聚力/MPa	抗拉强度/MPa
砾岩	7.5	2 220	17.80	12.80	33.00	4.05	1.60
粉砂岩	1.0	2 510	23.40	17.60	36.90	3.47	1.99
含砾粗砂岩	1.0	1 980	27.20	20.40	30.00	3.17	0.24
泥岩	4.0	2 650	8.81	6.07	39.77	1.32	1.52
粗粒砂岩	4.5	2 550	35.60	27.80	35.56	4.05	1.86
砂质泥岩	17.0	2 620	9.87	6.21	35.43	2.18	0.89
泥岩	2.0	2 650	8.81	6.07	39.77	1.32	1.52
粗粒砂岩	4.0	2 550	35.60	27.80	35.56	4.05	1.86
泥岩	4.0	2 650	8.81	6.07	39.77	1.32	1.52
砂质泥岩	2.0	2 620	9.87	6.21	35.43	2.18	0.89
泥岩	2.5	2 650	8.81	6.07	39.77	1.32	1.52
砂质泥岩	3.0	2 620	9.87	6.21	35.43	2.18	0.89
含砾粗砂岩	3.5	1 980	27.20	20.40	30.00	3.17	0.24
细粒砂岩	2.0	2 590	43.70	27.50	39.09	3.32	1.97
泥岩	0.5	2 650	8.81	6.07	39.77	1.32	1.52
中粒砂岩	13.0	2 580	41.50	27.30	39.39	3.34	1.91
粗粒砂岩	3.0	2 550	35.60	27.80	35.56	4.05	1.86
中粒砂岩	3.5	2 580	41.50	27.30	39.39	3.34	1.91
粗粒砂岩	3.0	2 550	35.60	27.80	35.56	4.05	1.86
粉砂岩	11.0	2 510	23.40	17.60	36.90	3.47	1.99
4$^{\#}$煤	5.0	1 500	15.00	4.63	36.15	2.76	0.47
砂质泥岩	3.0	2 620	9.87	6.21	35.43	2.18	0.89

表 2　数值模型节理力学参数

Table 2　Mechanical parameters of joints in the numerical model

岩性	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	内摩擦角/(°)	内聚力/MPa	抗拉强度/MPa
泥岩	1.7	1.7	19.89	0.10	0.47
砂质泥岩	1.8	1.8	17.72	0.45	0.41
粉砂岩	2.7	2.7	18.45	0.06	0.08
细粒砂岩	3.9	3.9	19.55	0.23	0.20
中粒砂岩	3.6	3.6	19.70	0.12	0.11
粗粒砂岩	3.5	3.5	17.78	0.15	0.13
砾岩	6.2	6.2	16.50	0.01	0.02
含砾粗砂岩	5.4	5.4	15.00	0.15	0.13
煤	2.1	2.1	18.08	0.07	0.05

1.3　覆岩裂隙场演化规律

1.3.1　覆岩裂隙演化

采动作用下覆岩裂隙演化是覆岩结构动态变化的体现，其演化规律直接决定了卸压瓦斯的运移通道和富集区域[23]. 因此，深入研究不同采厚下覆岩裂隙时空演化特征，可为优化瓦斯抽采设计提供重要理论支撑和实践指导.

不同采厚条件下的覆岩裂隙分布如图 1 所示，随着不同采厚工作面推进至 270 m，覆岩逐渐形成相对稳定的结构形态. 对比不同采厚条件下煤层覆岩垮落特征发现，采厚对覆岩破坏具有显著影响：采厚越大，覆岩垮落高度越高，且垮落岩块的碎胀系数相应增大，导致采空区充填程度降低. 在裂隙发育方面，覆岩垮落后裂隙自下而上持续扩展，其发育高度最终止于弯曲下沉带底部，且裂隙的空间分布始终呈左右对称的“梯台”型特征，这一基本形态并未因采厚的增加而发生改变. 但由于不同采厚条件下采空区初始空间高度存在显著

差异，导致覆岩垮落后的自由运动空间大小不同，使得裂隙场的发育程度呈现明显区别．具体而言，当采厚为 5.0，7.5 和 10.0 m 时，垮落岩体在重力作用下能够实现较好的二次压实，覆岩中间区域的离层空洞基本闭合，形成较为密实的充填结构；而采厚达到 12.5 和 15.0 m 的工作面，由于冒落带岩层堆积厚度过大，岩块间相互咬合支撑，造成覆岩垮落过程不均匀，在采空区中上部仍保留有未完全闭合的空洞区域．

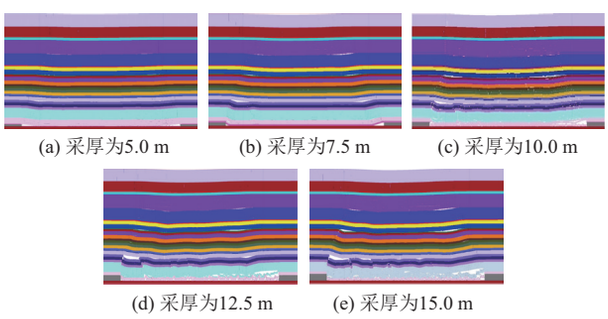


图 1 不同采厚下覆岩裂隙分布

Fig. 1 Fractures distribution of overlying strata with different mining thickness

1.3.2 覆岩裂隙形态分布

当采场覆岩形态稳定时，覆岩裂隙形成的裂隙网络为卸压瓦斯的流动和积聚提供了空间．不同采厚下覆岩裂隙形态出现明显差异，进而影响瓦斯在覆岩中的流动方式．为探究不同采厚与覆岩裂隙形态之间的联系，对不同采厚下的覆岩裂隙图片进行二值化分析，采用裂隙密度[24]和离层量[25]对不同采厚条件下工作面横向离层裂隙和纵向破断裂隙分布特征进行研究，其中离层量为单位距离内上下岩层位移量的差值，裂隙密度为单位距离内覆岩纵向破断裂隙的数量，不同采厚条件下覆岩离层量、裂隙密度分布如图 2 所示．

煤层开采后覆岩形成稳定的裂隙双区分布模式，采空区中部为压实区，该区域岩层呈整体性垮落，具有较好的连续性；而采空区两侧则发育为裂隙区，为覆岩破断裂隙和离层裂隙的主要发育区域．从空间分布来看，切眼侧和停采线侧的裂隙发育程度明显较高，具体表现为更大的离层量和更高的裂隙密度．由图 2 可知，工作面采厚对裂隙发育具有重要影响，在相同推进距离条件下，大采厚工作面的离层量和裂隙密度普遍大于小采厚工作面，当采厚由 5.0 m 增加至 15.0 m 时，离层量峰值由 290 mm/m 增加至 430 mm/m，裂隙密度峰值由 7.6 条/m 增加至 12.1 条/m．裂隙主要发育于关键层应力急剧变化的卸压区域，该区域应力状态显著变化促进了裂隙发育．这种以两侧为主的裂隙分布特征为卸压瓦斯提供了运移和积聚的主要场所．

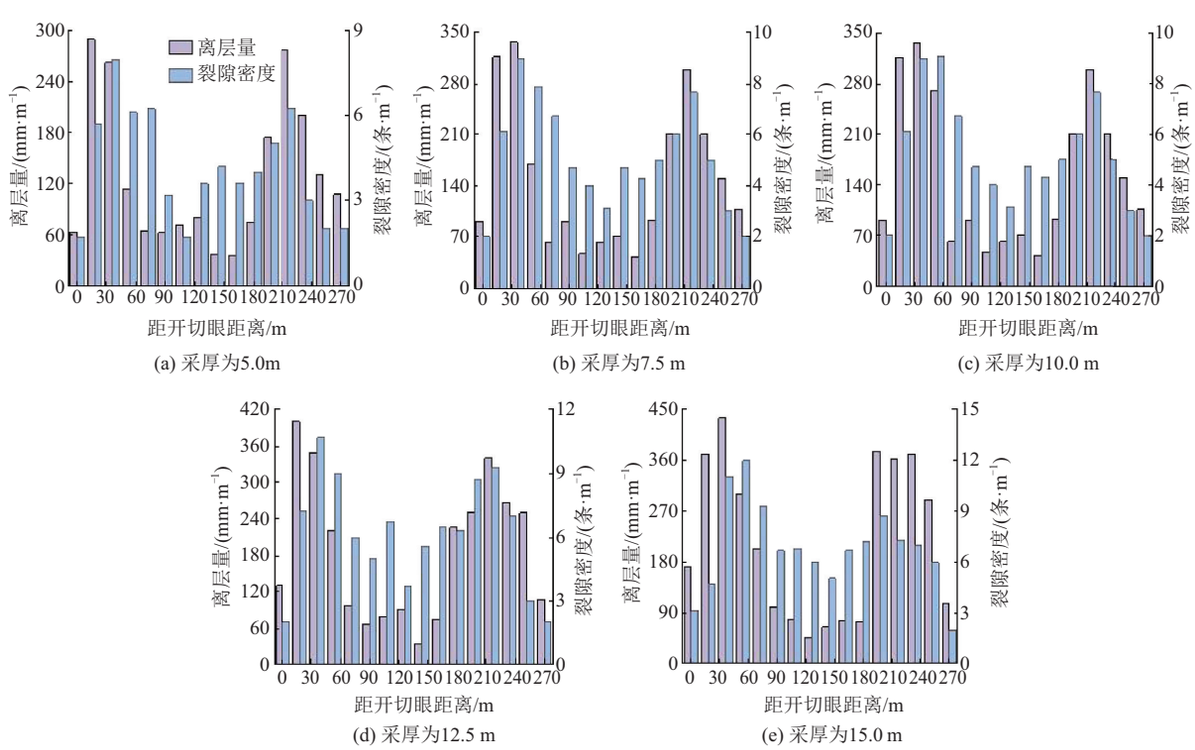


图 2 不同采厚条件下覆岩离层量、裂隙密度分布

Fig. 2 Distribution of overburden separation and fractures density with different mining thickness conditions

1.3.3　覆岩分形维数分布

覆岩裂隙复杂度对卸压瓦斯运储特征有重要作用，为更直观地表征采厚对覆岩裂隙网络复杂度的影响，对各采厚条件覆岩进行分单元分形维数计算[26]，绘制相应的分形维数分布云图，覆岩裂隙分形维数计算公式[27]为

$$D(S)=\lim_{\delta\to 0}\frac{\lg N(\delta)}{\lg(1/\delta)},\tag{1}$$

式中：$D(S)$为覆岩裂隙分形维数；S为所要计算分形维数的裂隙集合；N为覆盖裂隙网络的网格数量；δ为覆盖裂隙网络的网格边长.

不同采厚条件下的覆岩分形维数分布如图 3 所示，通过分析不同采厚条件下覆岩各区域的分形维数变化特征，发现覆岩在变形和垮落过程中，随着采厚的增加，其表面分形维数随之上升. 覆岩裂隙网络的复杂程度与采厚之间存在正相关关系. 在相同采厚条件下，覆岩裂隙发育呈现明显的垂向分带特征. 在靠近煤层的低位区域，岩体破碎程度较高，形成由大量破断裂隙和离层裂隙组成的复杂网络结构，其较高的碎胀性为瓦斯运移创造了良好条件[28]. 随着层位升高至中位区域，部分裂隙逐渐闭合，导致分形维数显著降低，裂隙系统的复杂程度明显减弱，不利于瓦斯的持续渗流. 在裂隙带顶部区域，岩层主要发生弯曲变形，仅发育少量贯通性裂隙，瓦斯运移主要通过离层空间进行. 从空间分布来看，高分形维数区域主要分布在起始边界（切眼）和终止边界的下位及中位覆岩中. 切眼侧由于经历多次周期来压作用，裂隙发育更为充分. 随着采厚增大，切眼附近的分形维数相应提高，模型两端的分形维数差异趋于减小，整体分布范围呈现扩大趋势，这种裂隙发育特征直接影响着瓦斯的运移和积聚过程.

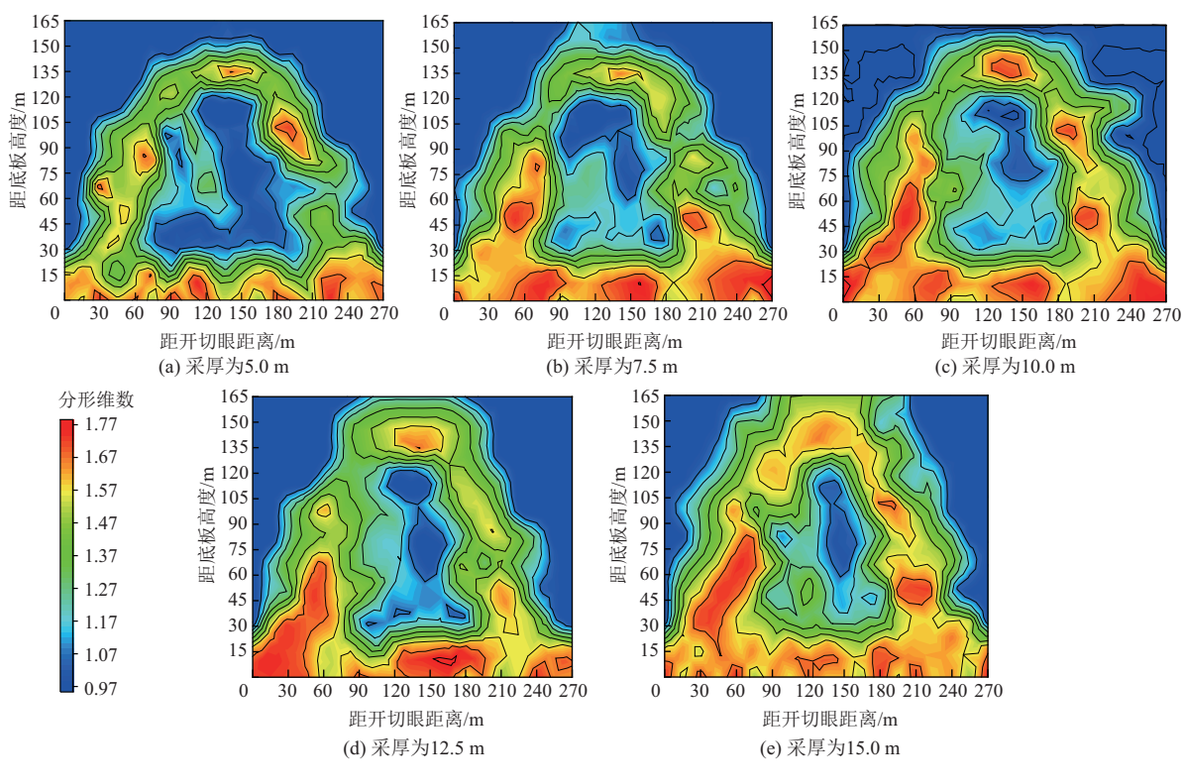


图 3　不同采厚条件下覆岩分形维数分布

Fig. 3　Fractal dimension distribution of overlying strata with different mining thickness conditions

1.3.4　覆岩连通性系数分布

覆岩裂隙间的连通能力是决定瓦斯运移能力的关键，为厘清工作面采厚和覆岩瓦斯运移能力的相关性，本节选取不同采厚条件下各工作面相同推进距离下的覆岩图片进行分域分析，从而量化覆岩连通性系数采厚效应，裂隙网络连通性可以表征为由裂隙相交点数量及裂隙数量决定的参数，具体计算公式[29]为

$$I_{\mathrm{C}}=\frac{N_{\mathrm{node}}}{N_{\mathrm{F}}},\tag{2}$$

式中：I_{C}为覆岩连通性系数；N_{node}为裂隙交点的总数量；N_{F}为裂隙的总数量.

不同采厚条件下的覆岩连通性系数分布如图 4 所示. 由图 4 可知，不同采厚下覆岩裂隙连通性系数差异明显，低层位覆岩内裂隙交叉和贯通现象较为明显. 在距底板高度 0～30 m 之间存在

较大的连通性系数，随着采厚增加，该层位覆岩连通性系数也会发生明显提高，当工作面采厚为5 m时，该层位连通性系数范围为7.7～11.7；当工作面采厚为15 m时，该层位连通性系数范围为9.2～11.7. 在距底板高度30～130 m范围内的覆岩连通性系数分布规律为中间低两边高，中部压实区裂隙量较少且无法贯通形成完整的连通性网络，连通性系数基本较小. 采空区两侧的连通性系数相对较大，可形成瓦斯向上自由扩散的运输区域，造成这种差异的原因是煤层开采后，模型两侧覆岩容易与固定覆岩相互接触形成铰接结构，覆岩不容易堆积压实，容易形成大量裂隙，而采空区中部区域因岩层充分压实，表现出较小的连通性系数. 相比之下，模型两侧区域由于裂隙发育充分，始终保持较高的连通性水平. 随着采厚增加，垮落空间扩大导致更多岩层参与垮落过程，压实效果随之降低，部分压实区连通性系数略有增加.

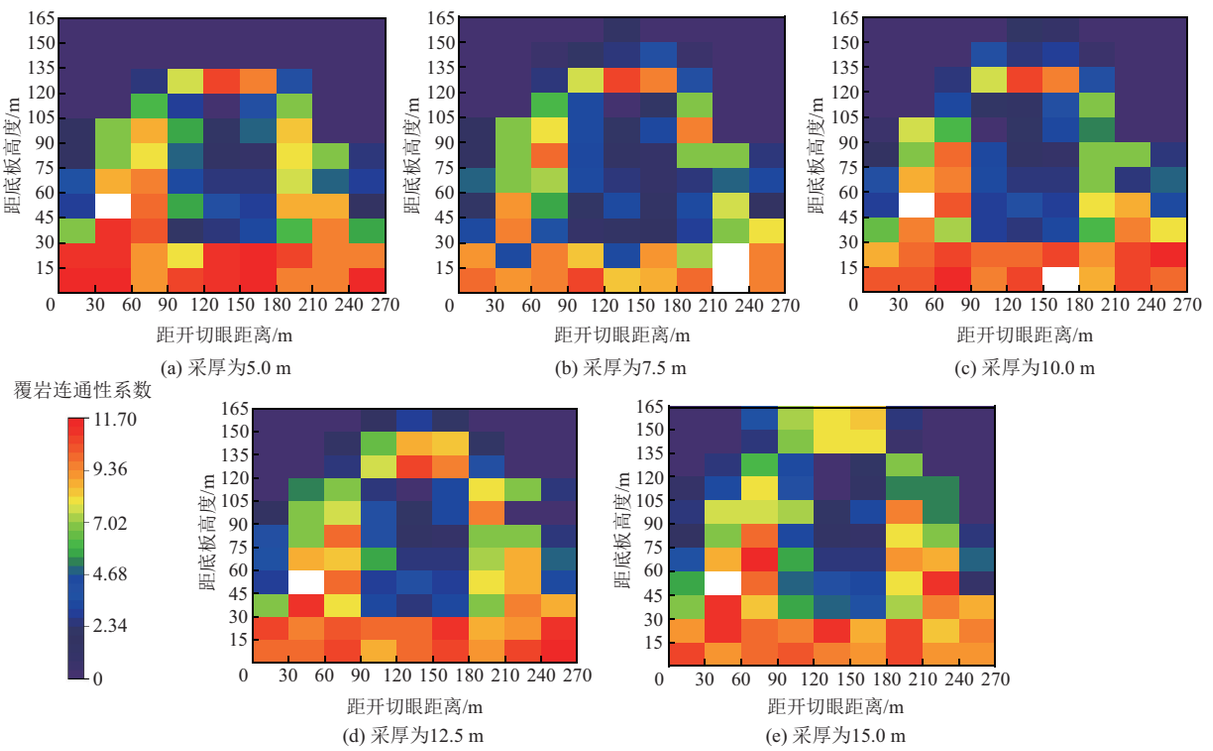


图4 不同采厚条件下覆岩连通性系数分布

Fig. 4 Distribution of the connectivity coefficient in overlying strata with different mining thickness conditions

2 覆岩渗流场演化及采厚效应

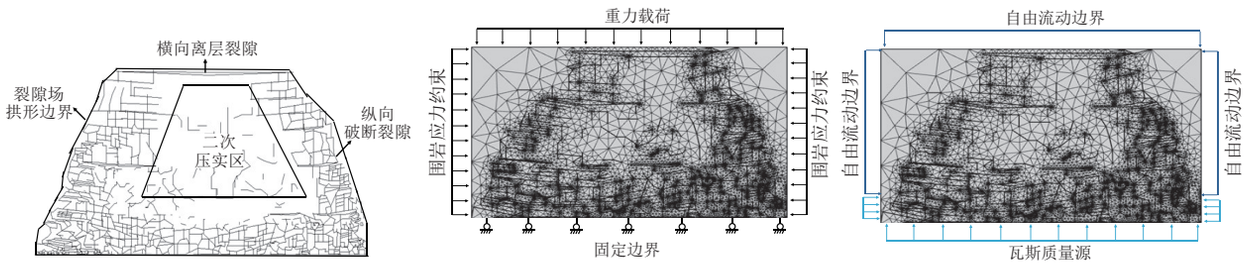
2.1 覆岩渗流场数值模型构建

2.1.1 几何模型

通过CAD软件对不同开采条件下的3DEC裂隙网络图片进行数字化素描，精确提取其中的裂隙几何特征（如图5a所示），并将识别得到的裂隙网络图像导入Comsol Multiphysics软件中，建立特厚煤层覆岩卸压瓦斯运移数值模型. 在数值模型设计中，综合考量边界约束效应、覆岩垮落形态及应力场耦合关系，将模型的数值计算尺寸设计为330 m×200 m（长×高）.

为模拟工作面上覆岩层实际重力和构造应力，在模型上方施加均质载荷，左右两侧施加围岩应力约束，底部为固定边界，如图5b所示. 同时，基于工作面瓦斯涌出量确定模型瓦斯来源，在覆岩两侧煤柱处和采空区底部施加瓦斯质量源项模拟工作面瓦斯涌出，如图5c所示.

为保证模型计算精度与收敛性，本研究采用三角形单元进行网格划分，整体尺寸设置为极细化级别，并在裂隙区域局部加密处理. 以采厚为10 m时为例，覆岩渗流场模型共划分为1 567 551个三角单元、47 673个边界单元及2 752个顶点单元. 模型最小单元质量为0.005 7，平均单元质量为0.862，单元质量分布均匀. 网格密度根据覆岩裂隙发育特征进行调整：中间压实区网格相对稀疏，裂隙发育区域则显著加密. 不同采厚下，网格单元数量与质量存在一定差异，以确保数值模拟的准确性与计算效率.



(a) 特厚煤层覆岩采动裂隙提取结果　(b) 模型应力边界示意　(c) 模型瓦斯边界示意

图 5　模型设计示意

Fig. 5　Model design sketch

2.1.2　基本假设与数学模型

工作面回采作业导致煤层瓦斯原有的吸附/解吸平衡遭到破坏，瓦斯沿着覆岩裂隙网络进行扩散运移. 国内外学者已针对瓦斯在覆岩裂隙中的运移进行了许多研究，根据目前研究成果可以发现，采空区裂隙系统中的瓦斯主要遵循自由扩散规律[30]. 考虑到卸压瓦斯在采动裂隙场中的分布具有明显的非均匀特征，模拟假设瓦斯在裂隙区域内呈均匀分布状态，同时忽略岩石基质对瓦斯运移过程的干扰作用. 假设覆岩裂隙中的卸压瓦斯为理想气体，其流动遵循连续方程、质量守恒方程、动量方程[31].

1)理想混合气体状态方程

将采空区的气体假设为理想气体，气体状态方程为

$$PV=\frac{m}{M}R_0T, \tag{3}$$

式中：P为绝对压力，Pa；V为混合气体体积，m^3；m为混合气体质量，kg；M为混合气体摩尔质量，kg/mol；R_0为普适气体常数，J/(mol·K)；T为绝对温度，K.

2)连续性方程

根据质量守恒定律，将质量守恒方程表示为微分形式，即

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}=0, \tag{4}$$

式中：ρ为流场密度，kg/m^3；u,v,w分别为流速在x,y,z方向上的速度分量，m/s；t为时间，s.

为简化式(4)，引入矢量散度符号div(a)，其表达式为$\mathrm{div}(a)=\partial(ax)/x+\partial(ay)/y+\partial(az)/z$，得：

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho\boldsymbol{U})=0, \tag{5}$$

式中　$\boldsymbol{U}$为速度矢量.

3)瓦斯质量守恒方程

卸压瓦斯运移满足质量守恒定律，其微元体界面处净弥散流量的累计通过量等于质量对时间的变化率. 该规律可用以下表达式[32]进行表示：

$$\frac{\partial(\rho c_g)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho c_g u_i)=-\frac{\partial}{\partial x_i}(J_g u_i)+S_g, \tag{6}$$

式中：u_i为瓦斯在i方向多孔介质中的平均流速，m/s；c_g为瓦斯组分浓度，kg/m^3；S_g为瓦斯源项的额外产生率；J_g为瓦斯的扩散通量，$kg/(m^2\cdot s)$.

4)动量守恒方程

动量守恒方程描述了流体动量变化率与外力的关系. 本研究采用Darcy定律建立气体流动模型，用于求解混合气体在平衡状态下的压力与速度分布；同时，考虑到瓦斯在裂隙场中以溶质形式扩散并具有升浮效应，选用Fick定律构建其扩散模型.

Darcy方程的表达式为

$$v=-\frac{k}{\mu}\left(\frac{\partial p}{\partial z}+\rho g\right), \tag{7}$$

式中：v为渗流速度，m/s；k为渗透率，m^2；μ为黏度，Pa·s；p为孔隙内压力，Pa；g为重力加速度，m/s^2.

Fick定理的表达式[33]为

$$\frac{\partial c}{\partial t}=D\left(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2}+\frac{2}{r}\frac{\partial c}{\partial r}\right), \tag{8}$$

式中：c为溶解质量浓度，kg/m^3；r为极坐标半径，m；D为扩散系数.

2.1.3　模型主要参数

1)空隙率

回采过程中，大量垮落的不规则岩块堆积在采空区，产生大量孔隙空间，而上覆岩层空隙率一般用垮落破碎后岩块之间的空隙体积与采空区总体积之比来表征，根据碎胀系数与上覆岩层空隙率的定义，发现二者关系如下：

$$n=1-\frac{1}{K_p}, \tag{9}$$

式中：n为岩层的空隙率；K_p为岩层的碎胀系数，其计算公式[34]如下：

$$K_p=\frac{V_1}{V_0}=\frac{h_{1n}}{h_n}=1+\frac{W_0+\Delta D_n}{h_n},\quad(10)$$

式中：V_1为岩块破碎堆积后的松散体积，m^3；V_0为岩块在岩体中原位的原岩体积，m^3；W_0为采高，m；h_{1n}，h_n分别为梯度方向第n排测线变形前、后距煤层顶板的距离，m；ΔD_n为第n排测线处覆岩位移值，m.

联立式(9)和式(10)，得到覆岩空隙率计算公式为

$$n=1-\frac{h_n+W_0+\Delta D_n}{h_n}.\quad(11)$$

2)覆岩渗透率

煤层开采后卸压瓦斯在覆岩裂隙内自由移动，覆岩内部的渗流能力是影响卸压瓦斯运移的主要参数，开采扰动对覆岩产生破坏从而改变了覆岩的渗透能力. 为计算出不同开采条件下的覆岩渗透率分布，本文采用文献[12]提出的覆岩分形渗透率计算方法，在不同开采条件下的覆岩分形维数基础上计算覆岩渗透率，覆岩渗透率K计算式[12]如下所示：

$$K=\frac{(K_p-1)^3M_k{}^2[1.5-D(S)]^2}{\rho_0^4 5k_s^2D(S)^2K_p\delta_{max}^4},\quad(12)$$

式中：k_s为岩体表面形状系数，主要反映岩体的形状特征，对于不规则形状，可取值为5；δ_{max}为单个完整岩体的最大特征尺寸，m；M_k为垮落岩体总质量，kg；ρ_0为破碎岩体散体密度，kg/m^3.

基于式(11)～(12)对覆岩空隙率和渗透率进行计算可发现，覆岩内不同区域空隙率和渗透率具有明显差异，从而影响卸压瓦斯在覆岩中运移时的路径选择和富集能力. 为确保数值模型计算结果可靠，模型不同区域的空隙率和渗透率赋值如表3所示，各区域划分如图6所示.

表3 模型各区域空隙率和渗透率

Table 3 Porosity and permeability of each region of the model

区域	空隙率	渗透率/10^{-9} m^2
A	0.10～0.20	20～40
B	0.17～0.29	40～60
C	0.01～0.10	1～5
D	0.17～0.29	40～60
E	0.25～0.35	70～80

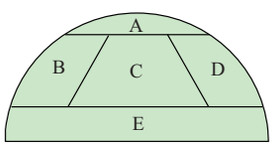


图6 模型各区域示意

Fig. 6 Schematic diagram of each region of the model

为了模拟煤层开采后的瓦斯运移和富集规律，需在COMSOL软件中设置多项相关参数. 本节所需的其他关键参数见表4.

表4 模型其余参数

Table 4 The remaining parameters of the model

参数	数值	参数	数值
温度/K	293	覆岩顶部载荷/MPa	9.26
甲烷密度/$(g\cdot L^{-1})$	0.716	覆岩两侧载荷/MPa	4.63
甲烷动力学黏度/(Pa·s)	1.84×10^{-5}	开切眼侧瓦斯质量源/$(kg\cdot m^{-3}\cdot s^{-1})$	367
甲烷分子质量/$(g\cdot mol^{-1})$	16.043	停采线侧瓦斯质量源/$(kg\cdot m^{-3}\cdot s^{-1})$	321
气体状态常数/$(J\cdot mol^{-1}\cdot K^{-1})$	8.314	遗煤及邻近层瓦斯质量源/$(kg\cdot m^{-3}\cdot s^{-1})$	76

2.2 覆岩渗流场演化规律及采厚效应

煤层采厚的变化对覆岩内卸压瓦斯运移具有显著影响，开采厚度增加会扩大覆岩破坏范围，导致采动裂隙发育程度加剧，从而为卸压瓦斯提供了更多运移通道，覆岩内更容易形成高瓦斯聚集区. 因此，为进一步分析采厚对覆岩卸压瓦斯运移特征的影响，进行不同采厚条件下特厚煤层覆岩卸压瓦斯渗流场模拟，并提取不同采厚条件下瓦斯分布计算结果，如图7所示.

对比不同采厚条件下瓦斯分布，大采厚的卸压瓦斯具有更大的运移范围，这与前文中覆岩裂隙网络分布规律一致. 在相同推进距离条件下，煤层开采厚度增加会显著扩大中、低位区域瓦斯运移范围. 当采空区下部岩层发生断裂后，在原始岩体拉应力和自重作用下产生回转运动，岩块在掉落过程中相互碰撞挤压，导致采空区下部形成更为发育的裂隙网络，为瓦斯气体提供了更充分的运移通道和存储空间，从而促进了瓦斯在低位和中位区域的扩散与升浮作用. 同时随着采厚的增加，覆岩裂隙发育程度也随之增加，导致区域内的渗透率更高，采动卸压瓦斯更容易在该区域内流动和富集. 在特厚煤层中位覆岩区域，岩层断裂后下滑堆积与两侧岩块形成铰接梁结构，裂隙网络发育充分，瓦斯富集空间充足，形成了供卸压瓦斯

纵向运移的中间区域，与采空区上端区域相比，该区域内覆岩贯通度大，裂隙连通能力强，随着采厚的增加，中间区域的横向宽度进一步增大.

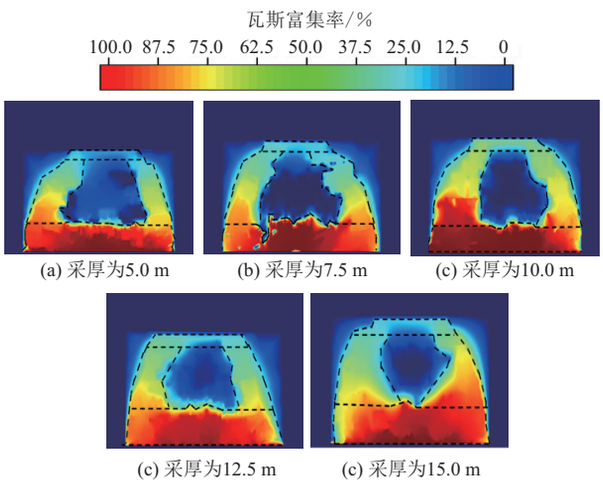


图7　不同采厚条件下特厚煤层采动覆岩卸压瓦斯分布规律

Fig. 7　The distribution law of pressure-relief gas in overlying strata of extra-thick coal seam with different mining thicknesses

3　覆岩多场特征区域划分及判别流程

3.1　覆岩多场特征区域划分

煤层采出后，覆岩由于采动应力被破坏，因覆岩中的裂隙网络是瓦斯运移的主要通道，导致覆岩渗流能力改变，瓦斯在覆岩中的分布存在明显的分区异化现象. 为了提高瓦斯抽采工程的有效性和瓦斯治理效果，以不同区域裂隙发育特征和卸压瓦斯流动特点为依据，将特厚煤层覆岩裂隙场中卸压瓦斯分布区域划分为3个区域：低位扩散区，中位浮升区和高位平流区，如图8所示.

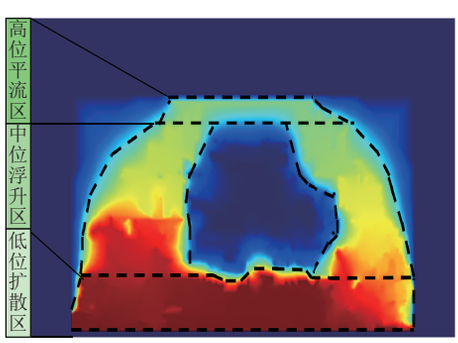


图8　覆岩分区示意

Fig. 8　Schematic diagram of overlying strata zoning

1)低位扩散区

在低位区域内，覆岩变形失稳破坏现象显著影响煤岩体的结构和稳定性. 覆岩垮落造成区域内岩块松散堆积，形成了较大的空隙，丰富发育的覆岩裂隙网络有利于瓦斯流动，区域内瓦斯流动方向变得复杂多变. 同时，由于裂隙的良好渗透性，瓦斯在该区域内的流动效率显著提高，进一步加剧了瓦斯的动态行为. 此外，该区域与两侧上覆岩层之间存在稳定的贯通通道，这些通道为瓦斯快速流动提供了有利条件. 在这种环境下，瓦斯流速较快且流动方向复杂.

2)中位浮升区

该区域内的覆岩表现出良好的连通性和渗透性，部分岩体依然保持完整，未经历大规模破坏. 这样的结构特征为流体运动提供了良好通道，使得瓦斯在该区域内呈现出纵向浮升流动的模式. 这种流动特征使得瓦斯能够在裂隙中快速上升，进而可能导致富集率快速变化，在中位浮升区，瓦斯富集率显著下降.

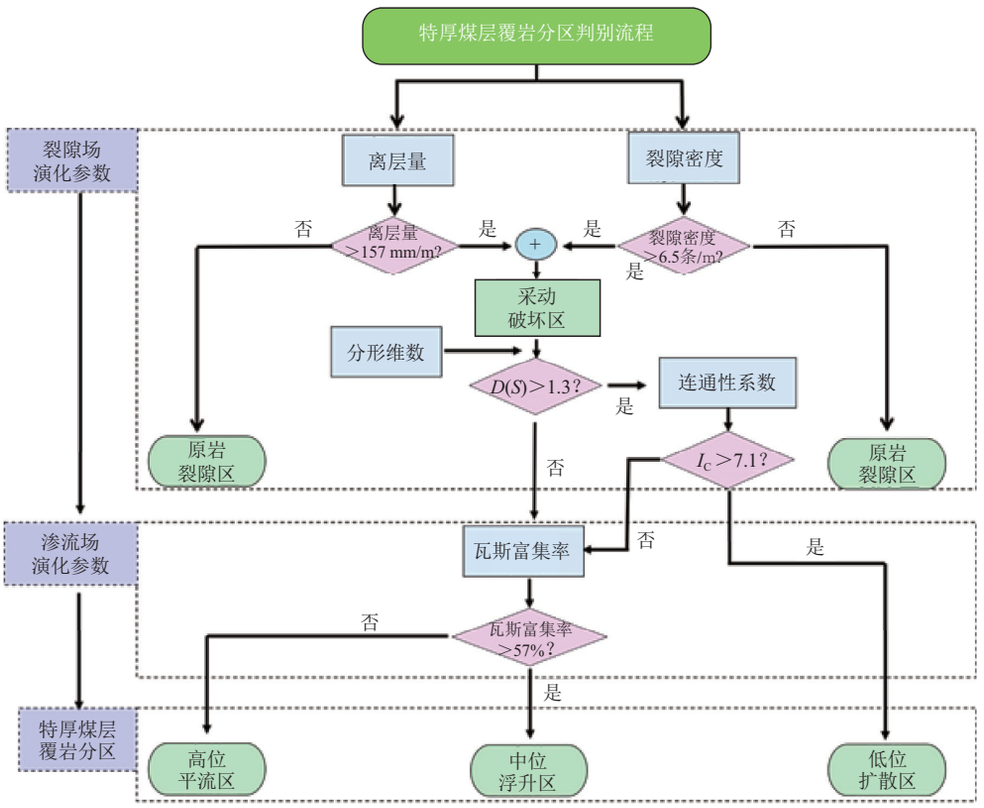
3)高位平流区

弯曲下沉带下方覆岩受开采扰动影响较小且裂隙发育程度低. 在这一区域内，岩体主要受自身重力作用，基本未发生显著破坏或断裂现象. 这种稳定性使得岩体整体结构保持较为完整，裂隙发育程度相对不成熟，裂隙之间相互独立且缺乏有效连通. 瓦斯的流动表现出明显的水平横向流动特性. 由于裂隙发育不充分，瓦斯富集程度相对较低，这可能导致瓦斯在该区域内的迁移和聚集过程较为缓慢. 尽管裂隙发育程度有限，但岩体渗透性在一定程度上发生了变化，煤体渗透率相较于初始状态有所增加.

3.2　覆岩多场特征区域判别流程

特厚煤层覆岩分区判定流程如图9所示，主要分为3个步骤.

第1步：首先对工作面回采结束后采空区裂隙网络特征参数进行分析计算，通过覆岩裂隙密度和离层量临界值，划分采动破坏区和原岩裂隙区范围；根据覆岩裂隙演化规律可知，随着煤层的不断推进，覆岩中间区域会因上覆岩层的填充作用不断被压实，最终原岩裂隙区离层量和裂隙密度分别小于157 mm/m和6.5条/m. 第2步：根据裂隙网络分形维数和连通性系数判断裂隙形态，低位扩散区裂隙网络复杂，与中、高层位裂隙有明显差异，基于区域内分形维数和连通性系数是否分别大于1.3和7.1，判定低位扩散区范围. 第3步：通过对中位与高位覆岩瓦斯富集率的统计，发现在覆岩进入高位平流区后，瓦斯运移与储集能力显著降低. 这主要是由于高位覆岩破碎程度较低，仅发育少量离层裂隙. 基于对高位平流区与中位浮升区边界的计算分析，本研究将瓦斯富集率大于57%作为判别依据，进一步明确了2类区域的分布范围.



注：+表示当离层量和裂隙密度都满足对应的条件后才会触发向下的后续流程.

图 9 覆岩分区判定流程

Fig. 9 Overburden rock partition determination process

3.3 覆岩多场特征区域分布规律采厚效应

特厚煤层瓦斯覆岩分区演化完成后，其空间大小决定了覆岩采动裂隙场运移卸压瓦斯能力，空间越大，可积聚的瓦斯量越大，更有利于提高卸压抽采效率. 为进一步量化特厚煤层覆岩分区演化特征采厚效应，采用图像识别软件提取不同采厚条件下的卸压瓦斯分布区域面积，得到工作面采厚分别与低位瓦斯区、中位升浮区、高位平流区面积的具体影响关系.

不同采厚下特厚煤层采动覆岩卸压瓦斯运移区域面积分布如图 10 所示，当煤层采厚由 5.0 m 增加至 15.0 m 时，卸压瓦斯不同运移特征区域的面积呈线性增加的规律，其中低位扩散区面积由 10 260 m^2 增加至 14 636 m^2、中位浮升区面积由 6 723 m^2 增加至 15 610 m^2，高位平流区面积由 1 219 m^2 增加至 3 206 m^2，增长率分别为 42.6%，132.1%，163.0%，平均增长率为 112.6%. 采厚增加导致覆岩裂隙发育范围增加的同时也会加剧覆岩的破坏程度，从而提高单位面积内裂隙密度和连通能力，这种双重作用使得覆岩瓦斯运移能力得到了显著提升.

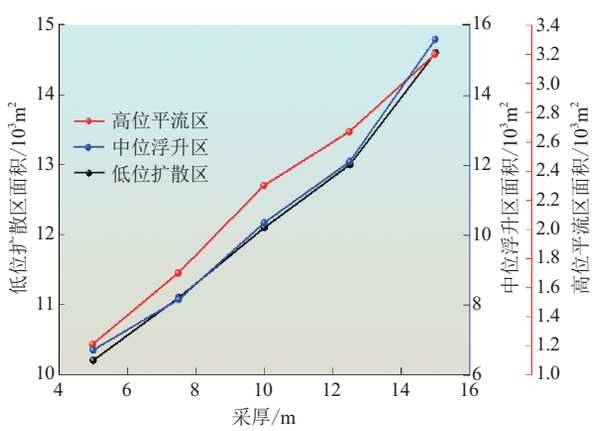


图 10 不同采厚下特厚煤层采动覆岩卸压瓦斯运移区域面积分布

Fig. 10 Area distribution of overburden strata during extra-thick coal seam mining under different mining thickness

随着采厚增加，高位平流区与中位浮升区的瓦斯分布面积增幅显著高于低位扩散区，表明采厚增大对低位扩散区面积的提升效应远弱于对中位浮升区与高位平流区的影响. 因低位扩散区单位面积内的裂隙连通程度基本不会随着采厚增加而增大，已基本处于覆岩裂隙中的最大发育水平，且采厚不会改变低位扩散区水平方向范围，因此

低位扩散区受采厚的促进作用相较其他区域更小.

4　工程应用

4.1　试验工作面钻孔抽采设计

裂隙发育情况和瓦斯运移是控制定向钻孔抽采卸压瓦斯的主控因素,因此设计钻孔抽采参数应该充分考虑特厚煤层覆岩裂隙场和渗流场演化规律[35].定向长钻孔若布置的层位偏低,则极易因低位岩层垮落破坏钻孔而影响瓦斯抽采效率,且钻孔抽采容易受到采空区漏风影响,不利于工作面瓦斯抽采.当定向钻孔布置的层位偏高,则可能会因钻孔终孔层位离覆岩裂隙发育高度存在明显距离,导致钻孔抽采范围内瓦斯量过低而无法满足瓦斯治理要求.因此为保证定向长钻孔处于瓦斯流动富集区域,定向长钻孔层位应布置于覆岩中部区域,随着工作面推进,卸压瓦斯受覆岩压实作用影响向中位浮升区内移动,该区域内采动裂隙密集,有空间富集大量高浓度瓦斯,从而限制瓦斯进一步向高位覆岩运移;同时,该区域内已形成铰接结构,覆岩垮落程度小,钻孔受采动破坏的影响更小,可以最大程度上增加钻孔成孔率,进而保障卸压瓦斯抽采的稳定性,进一步提高瓦斯抽采效率.基于上述内容确定高、中、低多层位钻孔对试验工作面进行立体式抽采,钻孔设计参数如表5所示,其中2,5,9,11号钻孔为低层位钻孔,1,6,7,12号钻孔为中层位钻孔,3,4,8,10号钻孔为高层位钻孔.

表5　定向长钻孔设计参数

Table 5　Design parameters of directional long drilling boreholes

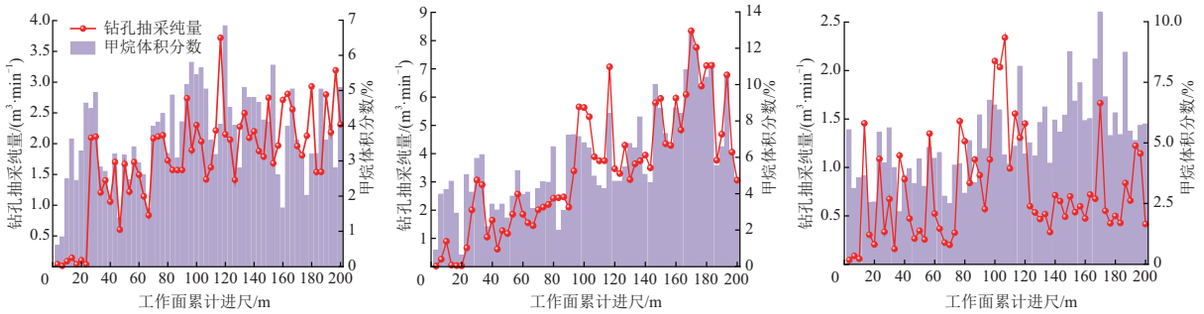
孔号	孔深/m	方位角/(°)	仰角/(°)	孔径/mm	孔高/m	距侧帮距离/m	距顶板高度/m
1	500	241	17	193	2.2	55	17
2	500	243	20	193	2.6	43	13
3	498	245	17	193	2.2	45	20
4	498	247	20	193	2.6	48	25
5	495	249	17	193	2.2	48	10
6	495	251	20	193	2.6	35	18
7	492	253	17	193	2.2	30	15
8	495	255	20	193	2.6	32	23
9	492	257	17	193	2.2	25	12
10	492	259	20	193	2.6	20	22
11	489	261	17	193	2.2	10	6
12	492	263	20	193	2.6	15	14

4.2　瓦斯抽采效果分析

4.2.1　多层位定向长钻孔瓦斯抽采效果分析

各层位钻孔抽采效果如图11所示,试验工作面定向钻孔抽采流量具有显著的层位差异性,其值域范围为0～14.43 m^3/min,对应甲烷体积分数分布在0.5%～12.0%区间,整体抽采效果良好.通过系统分析不同层位钻孔的抽采动态特征可发现,各层位抽采效能排序为:中层位钻孔＞低层位钻孔＞高层位钻孔.抽采趋势整体都经历了2个阶段:抽采前期的波动上升阶段和抽采后期的趋于稳定阶段.

低层位钻孔在抽采初期,尚未进入优势抽采层位,钻孔抽采纯量和甲烷体积分数变化范围较小.随进尺增加,受采动影响,钻孔逐渐进入裂隙发育区,抽采纯量与甲烷体积分数呈波动上升趋势,抽采效果显著提升.随着采面持续推进,受覆岩垮落及塌孔影响,低层位钻孔抽采纯量与甲烷体积分数转入小范围波动阶段.在中层位钻孔抽采初期,该阶段覆岩裂隙尚未发育至终孔层位,抽采能力随裂隙扩展逐步提高.随进尺增加,覆岩裂隙发育至终孔层位,瓦斯大量积聚,抽采纯量和甲烷体积分数趋于平衡状态.由于试验工作面属特厚煤层,覆岩铰接结构空间大、垮落不充分,中层位定向长钻孔不仅成孔率高,且终孔层位瓦斯富集与运移条件良好,其平均抽采纯量与甲烷体积分数达到低层位钻孔的1.17～1.25倍.高层位定向钻孔卸压瓦斯抽采纯量和甲烷体积分数随工作面推进呈波动上升,其终孔位置高,前-中期因裂隙未达钻孔层位,瓦斯量少,抽采效果受工作面周期来压影响,周期来压时煤体释放瓦斯,从而使抽采效果短暂提升,抽采能力随推进距离和裂隙发育高度增加而增强;进入抽采中-后期后,高层位定向钻孔周围岩层应力场逐步达到平衡状态,卸压瓦斯抽采纯量与甲烷体积分数随之趋于稳定,并维持在某一区间.



(a) 低层位钻孔 (b) 中层位钻孔 (c) 高层位钻孔

图 11 多层位钻孔抽采效果

Fig. 11 Extraction effects of multi-layer boreholes

4.2.2 试验工作面瓦斯防治能力考察

试验工作面瓦斯涌出量与抽采量的占比关系见图 12. 在试验工作面抽采期间,此钻场定向钻孔卸压瓦斯抽采量占绝对瓦斯涌出总量的 2%～55%,平均值为 30%. 工作面累计进尺 30 m 之前,仅有部分低层位钻孔位于覆岩裂隙带内,可进行稳定的瓦斯抽采,中高层位钻孔基本处于封闭状态,仅有少量瓦斯通过覆岩原始孔隙渗流进入钻孔内部,抽采效果较差.

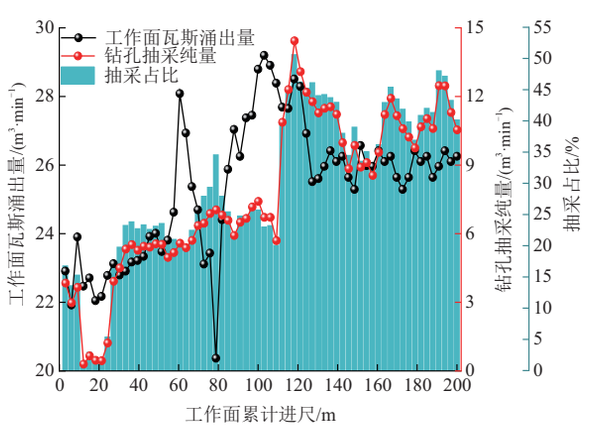


图 12 试验工作面瓦斯涌出量与抽采量的占比关系

Fig. 12 The proportion relationship between gas extraction and gas emission

覆岩采动裂隙发育高度随着工作面的进一步推进而增加,导致瓦斯扩散富集区域逐渐进入中高层位,钻孔抽采范围内可抽采瓦斯量增加,因此钻场整体抽采能力逐渐上升,实现了定向长钻孔治理试验工作面瓦斯的目的. 随着工作面继续推进,采空区裂隙网络进一步发育,富集区内瓦斯量较之前降低,高位钻孔抽采效率降低,钻孔瓦斯抽采纯量不断下降,部分钻孔受到覆岩跨落后的塌孔影响而抽采能力下降,但全部钻孔仍能维持动态平衡,导致钻孔抽采纯量及抽采占比呈现衰减后稳定的变化趋势.

5 结 论

1)基于不同区域裂隙发育特征和卸压瓦斯流动特点,将采动覆岩裂隙场中卸压瓦斯分布区域划分为低位扩散区、中位浮升区和高位平流区;进一步基于不同区域离层量、裂隙密度、分形维数、连通性系数和瓦斯富集率临界值建立工作面覆岩瓦斯渗流场区域判别流程.

2)随着采厚的增大,卸压瓦斯不同运移特征区域的面积呈线性增长,对比不同渗流场区域增长规律,当采厚由 5.0 m 增加至 15.0 m 时,瓦斯运移区域面积平均增加 112.6%,采厚的增加对低位扩散区面积的促进作用明显小于对中位浮升区和高位平流区的影响.

3)试验工作面定向钻孔抽采流量具有显著的层位差异性,其值域范围为 0～14.43 m^3/min,对应甲烷体积分数分布在 0.5%～12.0% 区间,整体抽采效果良好. 通过系统分析不同层位钻孔的抽采动态特征可发现,各层位抽采效能排序为:中层位钻孔＞低层位钻孔＞高层位钻孔,定向钻孔卸压瓦斯抽采量占绝对瓦斯涌出总量的 2%～55%,平均值为 30%.

参考文献:

[1] 李树刚,张静非,林海飞,等.双碳战略中煤气共采技术发展路径的思考[J].煤炭科学技术,2024,52(1):138-153.
LI Shugang, ZHANG Jingfei, LIN Haifei, et al. Thoughts on the development path of coal and gas co-mining technology in dual carbon strategy[J].Coal Science and Technology,2024,52(1):138-153.

[2] 林海飞,季鹏飞,孔祥国,等.我国低渗煤层井下注气驱替增流抽采瓦斯技术进展及前景展望[J].煤炭学报,2023,48(2):730-749.

LIN Haifei, JI Pengfei, KONG Xiangguo, et al. Progress and prospect of gas extraction technology by underground gas injection displacement for increasing flow in low-permeability coal seam in China[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 730-749.

[3] 解盘石，黄宝发，伍永平，等. 大倾角工作面覆岩三维破断运移演化规律研究[J]. 煤炭科学技术，2025，53(2)：12-26.
XIE Panshi, HUANG Baofa, WU Yongping, et al. Three-dimensional fracture migration evolution law of overburden rock in steeply dipping working face[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(2): 12-26.

[4] 林海飞，刘思博，李树刚，等. 切顶留巷贯通相邻采空区覆岩破断特征研究及应用[J]. 采矿与岩层控制工程学报，2025，7(3)：156-169.
LIN Haifei, LIU Sibo, LI Shugang, et al. Research on the characteristics of overlying rock fracturing in roadway maintained by roof cutting and connecting adjacent goaf and its application [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2025, 7(3): 156-169.

[5] 郭惟嘉，王海龙，陈绍杰，等. 采动覆岩涌水溃砂灾害模拟试验系统研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报，2016，35(7)：1415-1422.
GUO Weijia, WANG Hailong, CHEN Shaojie, et al. Development and application of simulation test system for water and sand inrush across overburden fissures due to coal mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(7): 1415-1422.

[6] 杨玉亮，赵毅鑫，张　村，等. 基于能量耗散的高强度开采覆岩裂断损伤表征方法[J]. 采矿与安全工程学报，2025，42(1)：203-217.
YANG Yuliang, ZHAO Yixin, ZHANG Cun, et al. Characterization method of overburden fracture damage in high-intensity mining based on energy dissipation [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2025, 42(1): 203-217.

[7] 林韩祥，冯雪峰，张强勇，等. 高位厚硬岩层破断力学机制分析[J]. 岩土力学，2025，46(4)：1264-1277.
LIN Hanxiang, FENG Xuefeng, ZHANG Qiangyong, et al. Mechanical mechanism of the fracture of high thick-and-hard overburden strata [J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(4): 1264-1277.

[8] 赵鹏翔，裴文博，李树刚，等. 巨厚煤层下分层开采邻近采空区破断岩体分形继发性演化机理[J]. 中国矿业大学学报，2024，53(4)：696-709.
ZHAO Pengxiang, PEI Wenbo, LI Shugang, et al. Fractal secondary evolution mechanism of fractured rock mass in adjacent goaf areas under extremely thick coal seam lower slice mining [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(4): 696-709.

[9] 孙斌杨，袁　亮，张平松，等. 巨厚砾岩下采场覆岩运移与离层演化的光-电感知试验研究[J]. 中国矿业大学学报，2024，53(5)：977-992.
SUN Binyang, YUAN Liang, ZHANG Pingsong, et al. Experimental study on optical-electrical sensing of overburden movement and bed separation evolution in stope under extremely thick conglomerate [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(5): 977-992.

[10] 侯公羽，胡　涛，李子祥，等. 基于分布式光纤技术的采动影响下覆岩变形演化规律试验研究[J]. 岩土力学，2020，41(3)：970-979.
HOU Gongyu, HU Tao, LI Zixiang, et al. Experimental study on overburden deformation evolution under mining effect based on distributed fiber optical sensing technology [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(3): 970-979.

[11] 杨滨滨，袁世冲，郑德志，等. 近距离煤层重复采动覆岩裂隙时空演化特征研究[J]. 采矿与安全工程学报，2022，39(2)：255-263.
YANG Binbin, YUAN Shichong, ZHENG Dezhi, et al. Study on spatiotemporal evolution characteristics of overburden fractures under repeated mining of close-distance coal seams [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(2): 255-263.

[12] 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.

[13] 姜福兴，孔令海，刘春刚. 特厚煤层综放采场瓦斯运移规律[J]. 煤炭学报，2011，36(3)：407-411.
JIANG Fuxing, KONG Linghai, LIU Chungang. Law of gas migration in fully-mechanized caving stope of extra-thick coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 407-411.

[14] 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 affected by small-scale faults [J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 214-230.

[15] 王　伟，程远平，刘洪永，等. 基于 sigmoid 函数的采

空区渗透率模型及瓦斯流场模拟应用[J].采矿与安全工程学报,2017,34(6):1232-1239.
WANG Wei,CHENG Yuanping,LIU Hongyong,et al.Application of goaf permeability model based on sigmoid function and gas flow-field simulation [J].Journal of Mining & Safety Engineering,2017,34(6):1232-1239.

[16] 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 morphological characteristics and seepage properties of mining-induced overburden fracture field [J].Journal of Mining & Safety Engineering,2021,38(4):695-705.

[17] 袁 亮,张平松.煤炭精准开采地质保障技术的发展现状及展望[J].煤炭学报,2019,44(8):2277-2284.
YUAN Liang,ZHANG Pingsong.Development status and prospects of geological guarantee technology for precise coal mining [J].Journal of China Coal Society,2019,44(8):2277-2284.

[18] 丁 洋,宜 艳,林海飞,等.高强开采综放工作面瓦斯浓度空间分布规律研究[J].采矿与安全工程学报,2022,39(1):206-214.
DING Yang,YI Yan,LIN Haifei,et al.Study on spatial distribution law of gas concentration in fully-mechanized caving face under high-intensity mining [J].Journal of Mining & Safety Engineering,2022,39(1):206-214.

[19] 高保彬,刘云鹏,袁东升.下保护层开采上覆煤岩卸压增透机理研究与应用[J].煤炭科学技术,2013,41(7):67-70.
GAO Baobin, LIU Yunpeng, YUAN Dongsheng. Study and application of pressure relief and permeability improvement mechanism of overlying coal and rock mass in lower protective seam mining [J].Coal Science and Technology,2013,41(7):67-70.

[20] 胡青峰,崔希民,刘文锴,等.特厚煤层重复开采覆岩与地表移动变形规律研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2020,2(2):31-39.
HU Qingfeng,CUI Ximin,LIU Wenkai,et al.Law of overburden and surface movement and deformation due to mining super thick coal seam [J].Journal of Mining and Strata Control Engineering,2020,2(2):31-39.

[21] 林海飞,刘思博,双海清,等.沿空留巷开采覆岩裂隙演化规律及卸压瓦斯抽采技术[J].采矿与岩层控制工程学报,2024,6(1):52-64.
LIN Haifei, LIU Sibo, SHUANG Haiqing, et al. Overburden rock fracture evolution law and pressure relief gas extraction technology of gob-side entry retaining mining [J].Journal of Mining and Strata Control Engineering,2024,6(1):52-64.

[22] ZHAO Z D,LIU P,LI Q G,et al.Enhancing coalbed methane recovery using high power ultrasonic excitation:A nano-micro-to-engineering scale study [J].Energy,2025,320:135274.

[23] 赵鹏翔,常泽晨,李树刚,等.倾斜厚煤层开采卸压瓦斯运储区能量耗散结构时变机理研究[J].中国矿业大学学报,2025,54(1):202-214.
ZHAO Pengxiang,CHANG Zechen,LI Shugang,et al.Study on time-varying mechanism of energy dissipation structure in depressed-pressure gas transport and storage area of inclined thick coal seam mining [J].Journal of China University of Mining & Technology,2025,54(1):202-214.

[24] 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.
CUI Ximin,GAO Yu,LI Peixian,et al.Relationships between mining overburden rock and surface subidence and its application to estimate bed separation [J].Journal of China Coal Society,2023,48(1):74-82

[25] LIU J,SUI W,DUAN Z,et al.Quantitative correlation between fracture fractal and overburden deformation due to the multiple layers backfill mining [J].Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2025,84(2):65-65.

[26] 易汉华,康向涛,胡锦国,等.双断层影响下煤层开采覆岩裂隙演化分形特征研究[J].矿业安全与环保,2025,52(2):113-120.
YI Hanhua, KANG Xiangtao, HU Jinguo, et al. Study on fractal characteristics of overburden fracture evolution in coal seam mining under the influence of double faults [J]. Mining Safety & Environmental Protection,2025,52(2):113-120.

[27] 王 刚,陈雪畅,程卫民,等.煤孔裂隙多尺度表征及其对渗透率的影响分析:以中国14个大型煤炭基地为例[J].重庆大学学报,2024,47(4):34-50.
WANG Gang,CHEN Xuechang,CHENG Weimin,et al.Multi-scale characterization of coal pore and fractures and its influence on permeability: Taking 14 large coal bases in China as examples [J]. Journal of Chongqing University,2024,47(4):34-50.

[28] 宋天奇,朱 磊,刘成勇,等.采动过程中覆岩破碎区碎胀性走向分布特征[J].科学技术与工程,2023,23(23):9881-9887.
SONG Tianqi,ZHU Lei,LIU Chengyong,et al.Dis-

tribution characteristics of dilatancy in overburden fracture zone during mining[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(23): 9881-9887.

[29] JAFARI A, BABADAGLI T. Equivalent fracture network permeability of multilayer-complex naturally fractured reservoirs [J]. Transport in Porous Media, 2012, 91(1): 339-362.

[30] 张碧川，邹全乐，冯增朝，等. 基于倾斜煤层采动覆岩卸压边界模型的渗透率空间分布规律[J]. 岩石力学与工程学报，2025，44(3)：638-650.
ZHANG Bichuan, ZOU Quanle, FENG Zengchao, et al. Spatial distribution law of permeability based on the mining-induced stress relief boundary model of inclined coal seam in overlying strata [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(3): 638-650.

[31] 霍丙杰，张松涛，黄宇轩，等. 坚硬顶板特厚煤层采场瓦斯运移规律及抽采参数研究[J]. 采矿与安全工程学报，2024，41(5)：1091-1102.
HUO Bingjie, ZHANG Songtao, HUANG Yuxuan, et al. Study on gas migration law and extraction parameters of hard roof extra-thick coal seam [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(5): 1091-1102.

[32] CAI Y, LI S, KONG X, et al. Fracture evolution of overburden strata and determination of gas drainage area induced by mining disturbance [J]. Sustainability, 2023, 15: 2152.

[33] 刘　鹏，秦跃平，郝永江. 基于密度差驱动流的非线性瓦斯吸附研究：实验与数值解算[J]. 煤炭学报，2018，43(3)：735-742.
LIU Peng, QIN Yueping, HAO Yongjiang. Investigation of non-linear gas adsorption in coal based on density-gradient driven flow: Experiments and numerical solutions [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(3): 735-742.

[34] 杨　军，张家宾，周　帅，等. 无煤柱自成巷采空区顶板碎胀系数测定方法[J]. 煤矿安全，2020，51(4)：142-146.
YANG Jun, ZHANG Jiabin, ZHOU Shuai, et al. Method for determination of mined-out roof expansion coefficient of self-formed roadway without pillar [J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(4): 142-146.

[35] 丁万奇，马振乾，祖自银，等. 基于分形维数的巷道围岩裂隙演化规律研究[J]. 煤田地质与勘探，2021，49(3)：167-174.
DING Wanqi, MA Zhenqian, ZU Ziyin, et al. Research on the evolution law of roadway surrounding rock fissure based on fractal dimension[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(3): 167-174.

（责任编辑　沈春妮　仝　腾）