



采动覆岩卸压瓦斯运储通道属性参数拓扑关系研究

赵鹏翔 卓日升 李树刚 林海飞 常泽晨 贾永勇 金权 刘元嘉

引用本文：

赵鹏翔, 卓日升, 李树刚, 等. 采动覆岩卸压瓦斯运储通道属性参数拓扑关系研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(2): 135–149.
ZHAO Pengxiang, ZHUO Risheng, LI Shugang. Research on the evolution mechanism of the topological relationship of the property parameters of the mining overburden rock pressure relief gas migration channel[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(2): 135–149.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1784>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

卸压瓦斯运移区“孔-巷”协同抽采布置参数优化及高效抽采

Optimization of “hole-drift” collaborative drainage layout parameters and high efficient drainage in pressure relief gas migration area

煤炭科学技术. 2022, 50(2): 137–146 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c32fa046-e2df-4a93-a86d-a80edf917f85>

倾斜厚煤层卸压瓦斯靶向区辨识及抽采关键技术

Key technologies for extraction and identification of gas target area for pressure relief in inclined thick coal seam

煤炭科学技术. 2023, 51(8): 105–115 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0414>

水力冲孔压裂卸压增透抽采瓦斯技术研究

Research on gas extraction technology:hydraulic stamping and hydrofracture to pressure relief and permeability improvement

煤炭科学技术. 2019(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/62c6392e-04d4-4beb-b8b3-fa0a487156e6>

深部开采卸压瓦斯精准抽采体系构建及实践

Construction and practice of accurate gas drainage system for pressure relief gas in deep mining

煤炭科学技术. 2021, 49(5): 1–10 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/81d23517-72dd-4887-b651-227f3509a46a>

基于关键层运动的邻近层卸压瓦斯抽采优化设计方法

Optimization designing method of pressure-relief gas drainage in adjacent layers based on key strata movement

煤炭科学技术. 2021, 49(5): 52–59 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/73389041-a5cc-41d9-b9b2-758df9257ced>

地面钻井抽采被保护层采动区卸压瓦斯技术研究

Study on pressure relief gas drainage technology in mining area of ground drilling in protected layer

煤炭科学技术. 2019(11) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/0d19c692-9246-45b1-b64d-5c0c524b2859>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

赵鹏翔,卓日升,李树刚,等.采动覆岩卸压瓦斯运储通道属性参数拓扑关系研究[J].煤炭科学技术,2024,52(2):135-149.

ZHAO Pengxiang, ZHUO Risheng, LI Shugang, et al. Research on the evolution mechanism of the topological relationship of the property parameters of the mining overburden rock pressure relief gas migration channel[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(2): 135-149.

采动覆岩卸压瓦斯运储通道属性参数拓扑关系研究

赵鹏翔^{1,2,3,4,5},卓日升¹,李树刚^{1,2,3},林海飞^{1,2,3},常泽晨¹,贾永勇⁶,金权¹,刘元嘉⁷

(1. 西安科技大学 安全科学与工程学院,陕西 西安 710054; 2. 教育部西部矿井开采及灾害防治重点实验室,陕西 西安 710054; 3. 西部矿井瓦斯智能抽采工程研究中心,陕西 西安 710054; 4. 新疆工程学院 新疆煤矿灾害智能防控与应急重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830023; 5. 新疆工程学院 新疆煤炭资源绿色开采教育部重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830023; 6. 新疆维吾尔自治区煤炭科学研究所,新疆 乌鲁木齐 830091; 7. 新疆工程学院,新疆 乌鲁木齐 830023)

摘要:煤矿日益加剧的高强度开采过程中,诸多因素综合影响着覆岩裂隙的空间分布特征。覆岩裂隙分布的特征对于解放层开采中的瓦斯治理有着重要的指导意义。通过开展多组二维物理相似模拟试验,探究了不同开采条件下(开采高度、推进速度、关键层层位、煤层倾角)覆岩裂隙网络分布特征及卸压瓦斯运储通道的属性参数,得到了几何参数、裂隙参数的拓扑干系网络。基于复杂网络演化理论可以简化现实干系的拓扑变换,并结合复杂网络特征参数分析运储通道干系结构和因素节点的演化特征,实现了覆岩裂隙网络干系影响因素的定量描述,建立了卸压瓦斯运储通道网络干系结构矩阵及模型。结果表明:卸压瓦斯运储通道的发育范围、贯通度以及分形维数均随着采高、关键层层位及煤层倾角增大而不断扩大;随着推进速度的加快,发育范围却呈现减小的趋势。采高的增加对离层量影响最大,6 m采高相较于4 m时增幅达到146.9%。破断裂隙密度的变化主要受煤层倾角影响,受推速的影响较小,将钻孔布置在高密度区域(破断裂隙密度>4.7条/m),可以有效起到瓦斯截留的作用。研究结果可进一步优化不同因素影响下瓦斯抽采钻孔的布置参数,提高瓦斯抽采效率,从而保证工作面安全高效回采,对实现瓦斯精准绿色抽采具有一定的现实意义。

关键词:卸压瓦斯;运储通道;属性参数;瓦斯抽采;拓扑关系

中图分类号:TD712

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2024)02-0135-15

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

ZHAO Pengxiang^{1,2,3,4,5}, ZHUO Risheng¹, LI Shugang^{1,2,3}, LIN Haifei^{1,2,3}, CHANG Zechen¹, JIA Yongyong⁶, JIN Quan¹, LIU Yuanjia⁷

(1. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. Western Engineering Research Center of Mine Gas Intelligent Extraction, Xi'an 710054, China; 4. Xinjiang Key Laboratory of Coal Mine Disaster Intelligent Prevention and Emergency Response, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, China; 5. Key Laboratory of Xinjiang Coal Resources Green Mining, Ministry of Education, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, China; 6. Xinjiang Uygur Autonomous Region Institute of Coal Science, Urumqi 830091, China; 7. Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, China)

Abstract: Many factors combine to influence the spatial distribution characteristics of overburden fracture during the increasingly intense mining process in coal mines. The characteristics of overburden fracture distribution has important significance in guiding the gas manage-

收稿日期:2023-11-26 责任编辑:宫在芹 DOI: 10.12438/cst.2023-1784

基金项目:国家自然科学基金面上基金资助项目(52174205);新疆维吾尔自治区重点研发专项资助项目(2022B01034-3);陕西省杰出青年科学基金资助项目(2023-JC-JQ-40)

作者简介:赵鹏翔(1987—),男,甘肃兰州人,教授,博士生导师,博士。E-mail: zhp@xust.edu.cn

通讯作者:卓日升(1994—),男,陕西西安人,博士研究生。E-mail: zhuorisheng@163.com

ment in liberated layer mining. Several sets of two-dimensional physical similarity simulation experiments were carried out to investigated the distribution characteristics of overburden fracture network and the property parameters of the pressure relief gas storage and migration channels under different mining conditions (mining height, advancement speed, key layer upon layer and coal seam inclination). The topological network with geometric and fissure parameters was obtained. The topological transformation of the real stem system was simplified based on the theory of complex network evolution, and the evolution characteristics of the stem system structure and factor nodes of the transportation and storage channel was analyzed combined with the complex network characteristic parameters. The influencing factors of the overburden fissure network stem system was quantitatively described, and a matrix and model of the network structure of pressure relief gas transport and storage channel were established. The results indicated that, the development range, through degree, and fractal dimension of pressure relief gas migration and storage channel expand with the increase of mining height, key layer position, and coal seam dip angle. However, the development range shown a decreasing trend with the acceleration of advancing speed. The increase in mining height had the greatest impact on the amount of separation, with a 146.9% increase at 6 m mining height compared to 4 m. The variation in fracture density was mainly influenced by the dip angle of the coal seam, and was less influenced by the advancing speed. Arranging the boreholes in high-density areas (density > 4.7 pieces/m) can effectively act as a gas retention. The research results can further optimize the arrangement parameters of gas extraction boreholes under the influence of different factors, improve the efficiency of gas extraction, so as to ensure the safe and efficient recovery of the working face, which is of certain practical significance for the realization of accurate and green gas extraction.

Key words: pressure relief gas; gas storage and migration channel; attribute parameter; gas extraction; topological relations

0 引言

采动卸压瓦斯运储的主要方式表现为瓦斯在煤岩体裂隙中进行解吸—渗流—升浮—扩散—储集^[1-2]。煤岩体渗透性受内部微细观裂隙影响较大^[3-4], 微细观裂隙在开采扰动作用下逐渐扩展为宏观裂隙, 同时为瓦斯在煤岩体中运储提供了通道与场所^[5-6]。

早在19世纪初期, 国内外学者针对煤岩体裂隙扩展发育特征做了大量研究, 同时通过开展煤岩体力学测试试验研究了裂隙的微观结构特征。首先, 周世宁院士探讨了微细观裂隙的产生及发育机理, 得到裂隙系统是构成瓦斯流动的主要通道^[7]。TIEN^[8]、JHA等^[9]、YASITLI等^[10-11]、XIE等^[12]、SMYTH等^[13]采用数值模拟方法, 分析了煤岩体变形后应力变化规律及内部裂隙发育特征。国内学者齐庆新等^[14-15]采用测窗法和钻孔窥视相结合的方法, 得到了覆岩受采动影响下的内部裂隙分布规律及演化特征。受采动影响, 覆岩裂隙发生扩展、连通构成了卸压瓦斯运储的通道, 使得煤岩层的渗透性得到改善^[16]。近年来, 国内学者对于卸压瓦斯运储通道的定义及识别方法的研究也取得一定的成果, 姜振学等^[17]运用物理实验和现场测量相结合的方法得到不同地质条件下油气的运移方向, 并定义了级差、分隔、流向、流压和断面优势综合作用下的油气优势运移通道。牛彦良等^[18]、魏建平等^[19]、李宏义等^[20]、JIA等^[21]对于油气在岩体中运移特征进行了系统性总结, 并开展了不同影响因素条件下油气运移特性的研究。张勇等^[22-23]将采动影响下的煤岩体中瓦斯流通通道划

分为宏观通道和细观通道, 同时结合岩体断裂力学, 对所划分的区域开展进一步的机理研究^[24-25], 发现瓦斯运移行为主要发生在宏观通道中。李立^[26]从空间尺度上出发, 将瓦斯通道划分为3个区域, 自上而下分别是瓦斯紊流区、瓦斯过渡流通道区以及瓦斯渗流通道区, 并通过UDEC数值模拟方法探究了瓦斯在各区域的流通特性。肖康等^[27]在微观尺度上提出用微粒运移理论来解释卸压瓦斯运储通道的形成机理, 并结合压力损耗规律建立动态孔隙网络模型。基于李树刚教授提出的采动裂隙椭抛带^[28], 刘洪永等^[29]采用数值模拟方法, 开展不同推进速度条件的卸压瓦斯运储通道的演化规律实验, 发现覆岩中的垂向裂隙为瓦斯运移提供主要通道。笔者^[30-31]运用物理模拟和数值模拟相结合的方法探究了开采高度、推进速度等不同因素对采空区空间形态的影响, 深入分析了多因素影响条件下覆岩裂隙网络分布特性, 并采用分形理论将覆岩划分为瓦斯活跃区、瓦斯流通区以及瓦斯富集区^[32]。

近年来, 国内外诸多学者从多个角度, 针对采动覆岩裂隙特征进行了较为有效的表征^[33-34], 系统地阐述了覆岩裂隙网络通常是由主干裂隙延伸、扩展、联通次级裂隙构成, 不同地层岩性和构造条件下的裂隙发育密度、隙宽差异很大, 总结出通常煤岩体裂隙网络具有非均质性、连续性、各向异性和定向性。以上研究从不同角度, 针对不同裂隙网络进行了较为有效地表征, 但都未考虑对裂隙网络性能具有重要影响的开采条件及网络联接状态。覆岩裂隙网络的联接状态多用具有拓扑特征来表示^[35-36], 裂隙网

络可以看作是一系列相互连接的裂隙的集合,用节点和线来表示,每个节点表示一个裂隙,线表示裂隙之间的连接关系。裂隙的属性包括长度、宽度、厚度等。岩石裂隙网络的连接拓扑结构具有局部聚类的特征,在不同开采条件影响下,裂隙网络的外部几何参数及内部裂隙属性参数(破断裂隙密度、离层量、贯通度以及分形维数等)会伴生对卸压瓦斯运储通道影响程度的演变,进一步促进卸压瓦斯运储通道的形成。

因此,笔者采用二维物理相似模拟试验,结合拓扑学方法,从卸压瓦斯运储通道属性参数拓扑关系角度,分析各因素对优势通道属性参数作用,建立卸压瓦斯运储通道网络干系结构模型,表征不同开采条件下卸压瓦斯运储通道的拓扑演化结构,分析其几何特征和裂隙网络发育参数,实现了覆岩裂隙网络干系影响因素的量化描述,为研究覆岩裂隙网络形成、扩展机制提供新的思路,并为优化卸压瓦斯抽采系统布置提供了理论支撑,助力实现卸压瓦斯的精准抽采。

1 试验设计

1.1 试验工作面概况

以山西和顺天池能源有限责任公司15号煤层302工作面作为试验原型。通过查阅前期地质勘探相关资料,发现该矿井地质构造简单,地层总体呈走向北东,倾向北西的单斜构造,地层倾角平缓,一般在15°左右,褶皱构造发育程度较低,多为宽缓褶曲,

工作面内仅有1条不甚发育的断层,不影响工作面的正常布置。

根据矿井岩层钻探数据分析,15号煤层距离K₂灰岩(关键层)平均约20 m,煤层直接顶为泥岩,直接底为铝质泥岩,基本底为泥岩,煤岩物理力学特性如图1所示。该工作面平均煤层厚度为5.1 m,平均煤层倾角为8°,属于近水平煤层,工作面日推进度平均为3 m/d。工作面相对瓦斯涌出量7.8 m³/t,瓦斯压力0.45 MPa,煤层透气性系数为0.87 m²/(MPa²·d),瓦斯含量实测值最大16 m³/t,属于高瓦斯煤层。

1.2 试验设计

为探究不同开采条件下卸压瓦斯运储通道属性参数拓扑关系,采用自主研发智能多角度平面物理相似模拟综合实验台,该实验台主要由动态底座系统、高强度框架搭建系统、智能变角度系统、数据监测采集系统等组成(图2)。

根据已有的相似准则及302主采工作面的实际情况,结合拓扑学理论进一步探究卸压瓦斯运储通道几何、裂隙参数的拓扑关系特征。该工作面的平均推进速度为5 m/d,煤层平均厚度为6.15 m,平均采高为4 m。由于煤层赋存的非均质性、开采条件的复杂性,为更好地模拟现场开采情况,针对采高、推速、K₂层位和倾角4个因素,分别结合矿上实际条件每个因素设计3个梯度,试验设计见表1。

依据302工作面实际开采工艺,结合矿井地质因素设计试验,试验流程如下:

1) 模型搭建。以石膏和淀粉为凝胶剂,河砂为

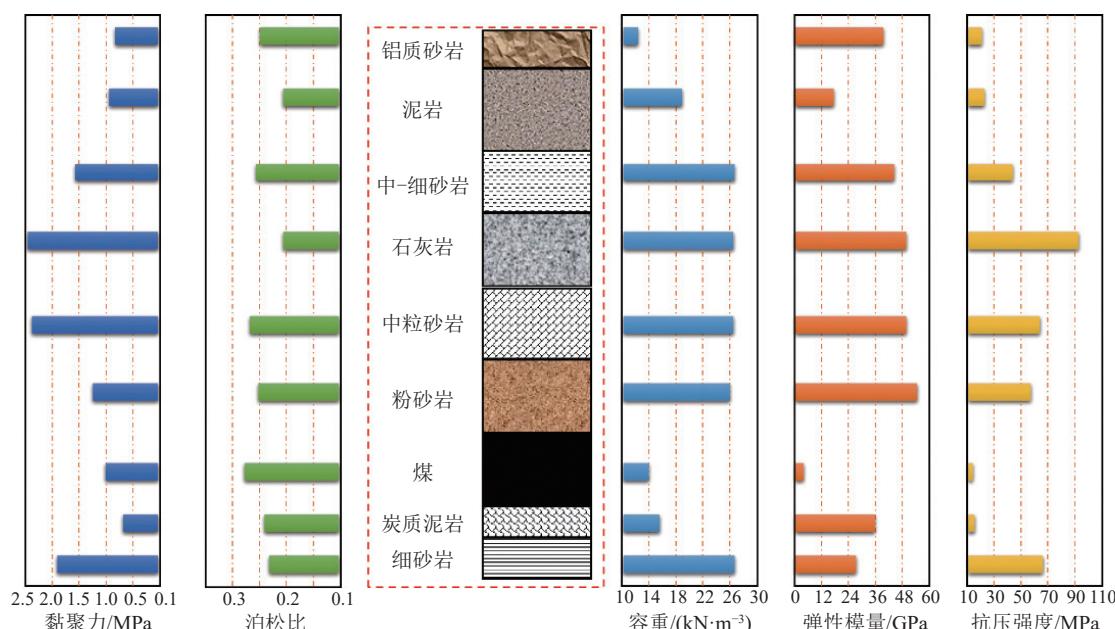


图1 工作面煤岩层物理力学性质

Fig.1 Physical and mechanical properties of prototype coal formations

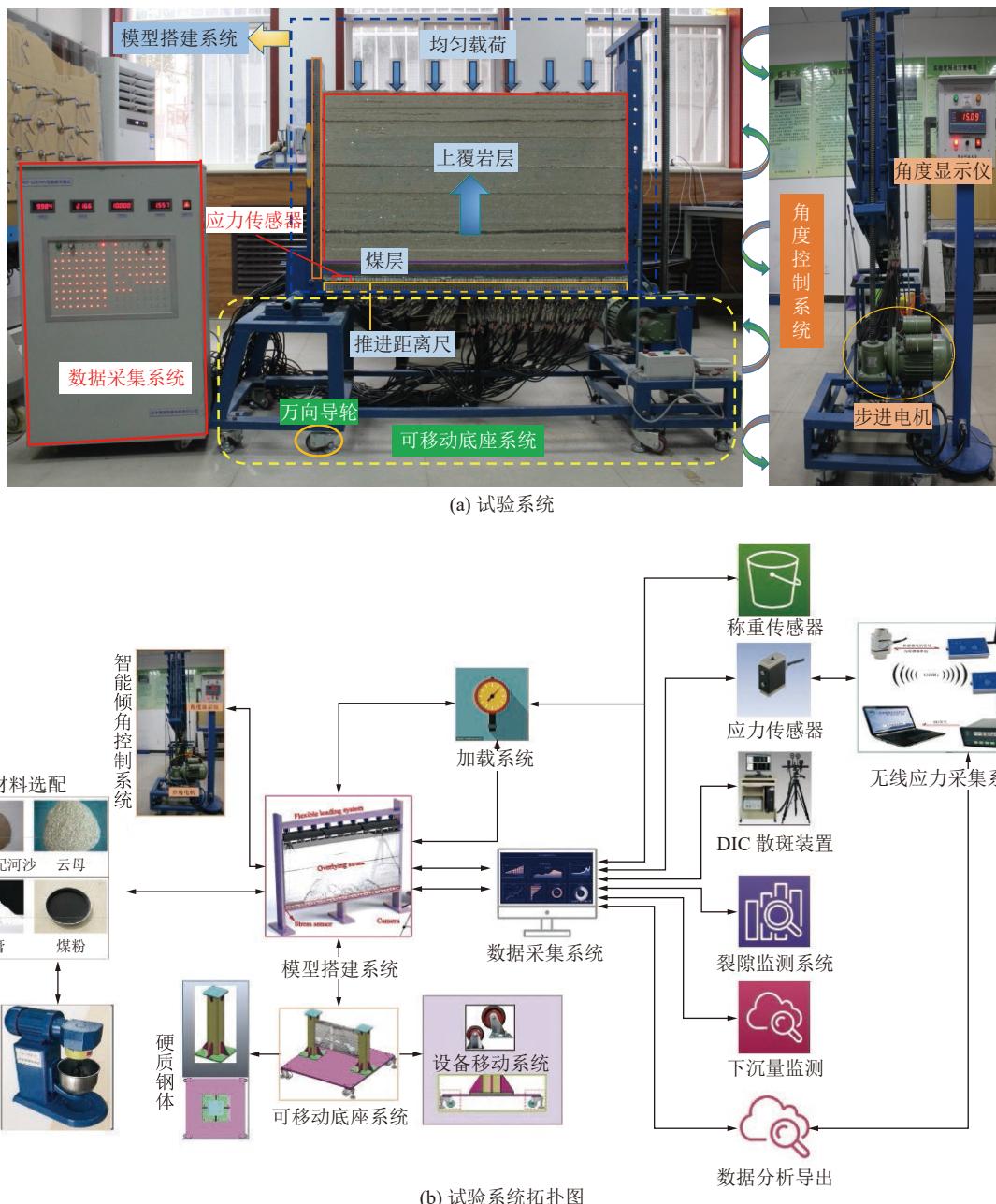


图2 智能多角度平面物理相似模拟综合实验台

Fig.2 Intelligent multi angle plane physics similarity simulation comprehensive experimental platform

表1 试验设计方案

Table 1 Experimental design scheme

尺寸	因素模型			
	开采 高度/m	推进 速度/(m·d ⁻¹)	煤层 倾角/(°)	K ₂ 关键层层位距 离/m
1 100 mm×150 mm× 800 mm	2	3	0	10
	4	5	15	20
	6	7	30	30

骨架。参照相应的配比号,模拟不同条件下岩体特性。每层模拟厚度保证为1 cm,并且分层材料选用

效果较好的云母片,模拟岩层的层理结构,在确保材料相似性的同时也提高了试验测量的准确性。自然风干15~20 d,使得模型充分晾干,并根据工作面埋深对覆岩顶部均匀布置载荷。

2)开采设计。为了去除边界效应的影响,两端分别预留10 cm的煤柱,开切眼距离为8 cm。为了避免来压步距的奇偶性,采取2、3 cm交替开采的设计,推进速度按照时间相似比(1:10)进行计算。

3)数据采集。在试验过程中,分别对底板应力变化及各下沉量的测点位移进行记录,同时测量覆岩采动裂隙起裂位置、长度及张开度,并采用高清摄

像机 Alpha 9 记录采动覆岩裂隙的发育过程。为深入分析不同开采影响条件下覆岩裂隙网络的演化规律提供基础。

1.3 试验结果

通过探究不同影响条件下(采高、推进速度、煤层倾角、关键层位)覆岩裂隙网络分布形态, 分析不同影响因素下瓦斯运储通道分布区域位置(图 3), 得到上覆岩层采动裂隙“纵两带”的演化高度及形态。

采动覆岩“纵两带”在采高、推速、 K_2 层位以及倾角的影响下发育范围不同, 其中裂隙带发育高度受采高影响较大, 6 m 采高条件下裂隙带的发育高度是 2 m 采高的 1.39 倍, 同时裂隙带的变化趋势明显大于冒落带, 如图 3a 所示。

加快推进速度, 裂隙带发育高度逐渐减小。工作面快速的推进导致裂隙发育时间较短, 裂隙发育不充分, 如图 3b 所示。在 3 m/d 的推进速度下, 裂隙带高度发育距离煤层底板 59 m, 分别是 7、5 m/d 的 1.51、1.15 倍, 且裂隙带所占的区域比例由 60% 减小至 38%。

K_2 位于不同层位时, 裂隙的发育及岩层移动并不完全同步, 随着工作面的推进, 覆岩离层及岩层垮落向上发展趋势依赖于关键层层位分布。随着 K_2 距煤层顶板距离的增加, 裂隙带及冒落带发育高度也随之增大, 如图 3c 所示。

不同的煤层倾角主要影响采动裂隙“纵两带”的发育形态, 在倾斜煤层回采过程中由于覆岩不是垂直向下垮落, 因此覆岩的垮落形态呈现不对称变化, 随着煤层倾角的增大, 这种不对称形态变化的愈加明显, 如图 3d, 裂隙带的发育范围也随着煤层倾角的增大而呈现增大的变化趋势。

2 卸压瓦斯运储通道裂隙网络全域拓扑构架

煤岩体在开采扰动影响下, 原始应力重新分布, 导致煤岩体发生弯曲、破裂、垮落、压实等力学行为, 煤岩体经历了形变、损伤、破裂的全过程^[37], 其中裂隙的发育呈现产生、发育、扩展、贯通、张开及压实的空间演化过程, 通过拓扑学的思想将各阶段抽象为节点与线段的连接方式, 便形成了煤岩体裂

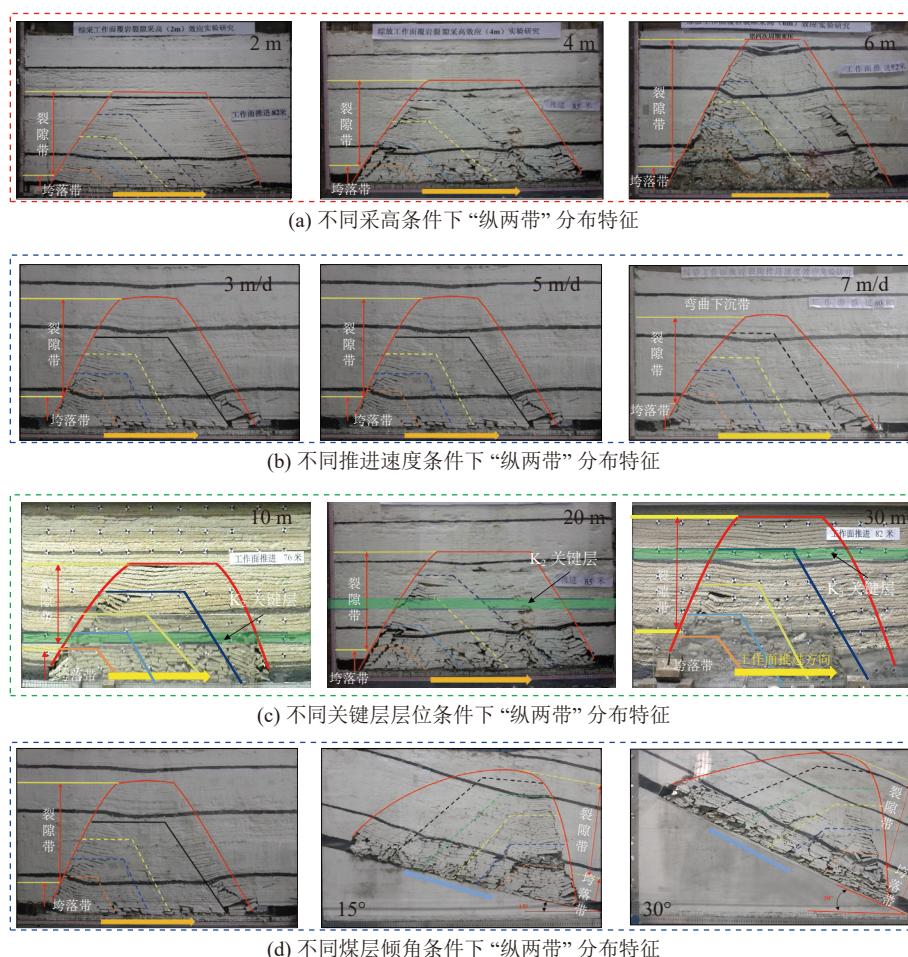


图 3 多因素条件下采动覆岩裂隙“纵两带”分布特征

Fig.3 Distribution characteristics of the “two zones” of the overburden strata

隙拓扑结构。煤、岩中的裂缝网络发育是复杂、无序的,其拓扑结构亦多样变化,不同的拓扑结构会使裂隙网络系统的连续性、连通性等性能产生较大差异,进而对瓦斯运储产生较大影响。要想比较充分地表征岩石裂缝网络,既要考虑裂隙的几何、裂隙参数,还要掌握裂隙网络的拓扑结构。实现采动覆岩卸压瓦斯运移通道的简化表征,可充分描述煤岩体内部裂纹、裂隙的位置、形状及发育情况,能够为覆岩裂隙场中的卸压瓦斯运储通道的孪生映射提供基础,大幅提升瓦斯抽采系统布置的透明度。需要注意的是,实际煤岩体的拓扑网络结构非常复杂,通常需要通过煤岩体性质的测试、煤岩心观察及覆岩钻孔窥视等手段来获得更详细的拓扑结构信息^[38-39]。本文通过开展不同因素下二维物理模拟实验,获得采动覆岩裂隙的拓扑结构分布特征。将煤岩体拓扑结构细分为原生裂纹结构、次生裂隙结构、重新压实结构、离层裂隙结构、破断裂隙结构和网状结构^[40-41]:

1)原生裂纹结构:主要为天然裂纹,原生裂纹结构对瓦斯的渗流有重要影响。

2)次生裂隙结构:裂纹机构遭受拉伸或伸缩应力时,裂纹会以煤岩体应力集中点或弱点开始发育、扩展,形成次生裂隙结构。

3)重新压实结构:当垮落岩体在扰动应力的作用下重新压实,次生裂隙网络结构逐渐闭合,煤岩体形成紧密堆积的结构,这种结构增加了垮落岩体的密度和强度,瓦斯渗流作用减弱。

4)离层裂隙结构:由于上下相邻岩层具有不同的弯曲刚度,在采动应力作用下,相邻岩层出现变形、弯曲、破断及下沉,岩层间出现离层裂隙,这种结构为瓦斯储集提供场所。

5)破断裂隙结构:岩层在张拉破坏或受压屈服后产生破断、回转,破断岩块与相邻岩块产生纵向破断裂隙,这种结构对瓦斯运移起着重要作用。

6)网状结构:煤岩体在开采扰动作用下,离层裂隙与破断裂隙会形成交叉连接的网状结构,这种结构是瓦斯运储通道的重要组成结构。

文中的拓扑结构即指卸压瓦斯运储通道发育网络 M (Mesh)通过映射所表现的抽象结构 M' 。这种简单的拓扑结构的拓扑性质可以类比卸压瓦斯运储通道网络发育的拓扑性质,影响卸压瓦斯运储通道拓扑结构的主要因素包括开采条件、岩层性质等。随着回采作业的进行,裂隙网络拓扑结构也逐渐发育,煤岩体内的原生裂纹结构发育态势较缓,

在采动应力作用下扩展而成的次生裂隙结构逐渐转化为离层裂隙结构和破断裂隙结构,采空区内部垮落岩体的裂隙结构在扰动应力作用下形成重新压实结构,且分布范围随采动作业的进行而不断扩大。同时,离层裂隙和破断裂隙结构逐渐相互贯通成为网状结构,卸压瓦斯在网状结构内发生大量的运移、储集行为,是卸压瓦斯运储的主要场所,如图 4 所示。基于复杂网络演化理论可以简化现实干系的拓扑变换^[42],通过对拓扑网络的可视化探明卸压瓦斯运储网络的演化因素,同时结合复杂网络特征参数实现运储通道干系结构和因素节点的演化特征分析。

3 卸压瓦斯运储通道属性参数拓扑结构特征

为进一步明晰卸压瓦斯运储通道发育特征在不同影响因素下的演化规律,选取运储通道的高度和宽度作为表征其发育范围趋势的几何参数,选取破断裂隙密度、离层量、贯通度以及分形维数的变化特征来定量描述瓦斯运储能力的大小,见表 2。统计、分析不同影响因素下运储通道几何参数和裂隙参数的变化趋势,为进一步分析运储通道干系结构和因素节点的演化特征提供了基础试验数据。

3.1 卸压瓦斯运储通道的几何参数与各因素的拓扑关系特征

3.1.1 卸压瓦斯运储通道高度演化的多因素拓扑架构

卸压瓦斯运储通道的高度直接决定瓦斯抽采钻孔终孔位置的确定,对比不同因素影响下卸压瓦斯运储通道几何参数的变化规律,发现随着采高、 K_2 层位及煤层倾角的增加,卸压瓦斯运储通道的高度发育范围也不断增加,如图 5 所示。

采出空间大,岩层拥有充分的自由垮落空间,卸压瓦斯运储通道不断向上发育,直到发育到 K_2 关键层的位置,表现为采高 6 m 时的瓦斯运储通道高度是 2 m 的 1.17 倍,在 K_2 距煤层顶板 30 m 条件下,通道高度仅发育至 45 m。

工作面快速推进,覆岩裂隙带内过早的出现悬臂梁^[43],从而更早的形成岩层压力拱,因此裂隙网络发育不充分,发育范围增长减缓,3 m/d 推速下的卸压瓦斯运储通道发育高度是 7 m/d 的 1.73 倍。

通过计算绘制不同因素条件下瓦斯运储通道发育高度雷达图,如图 6 所示。发现采高和推速对高度发育影响最大,高度分别发育至距煤层顶板 59.5、57.5 m。而采高 2 m 和推速 7 m/d 时的发育高度仅为 30.2 m 和 37.9 m,高度变化率分别为 1.97% 和

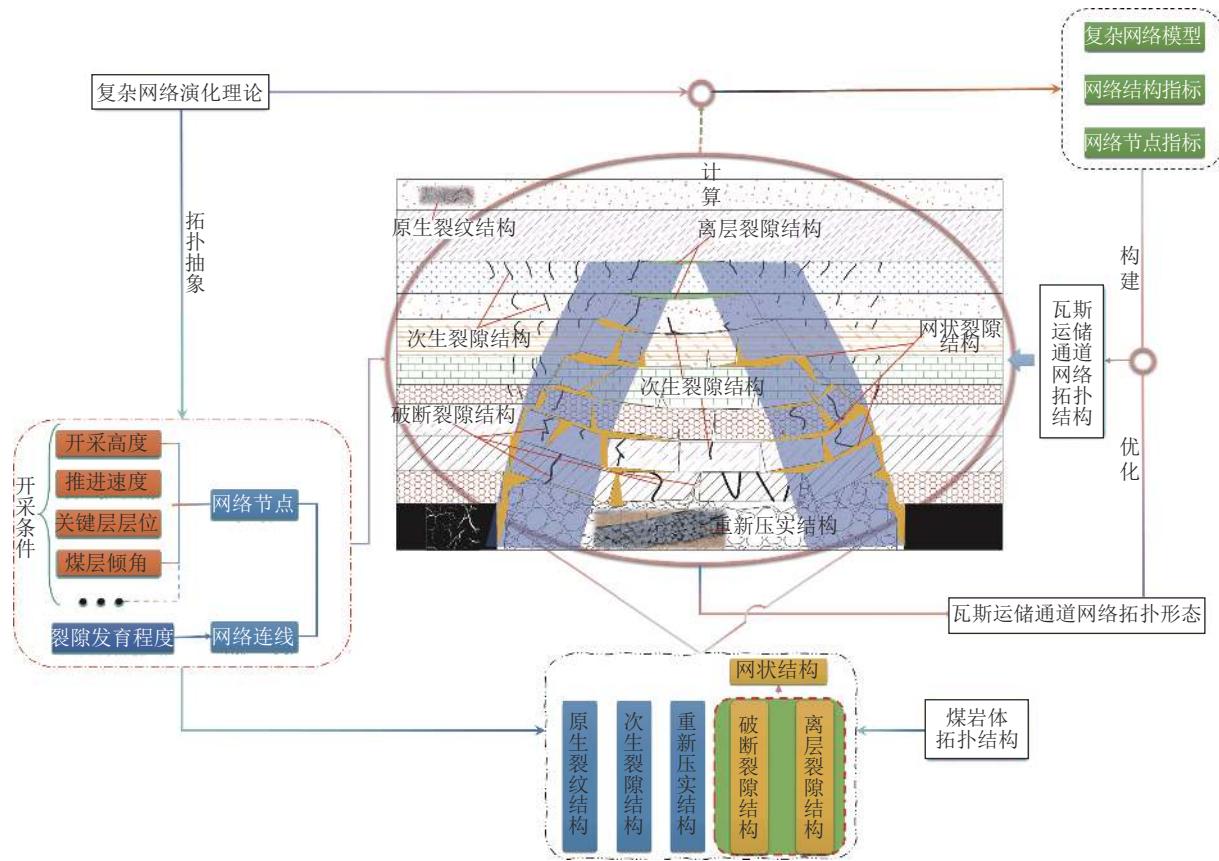


图4 卸压瓦斯运储通道网络拓扑结构
Fig.4 Gas storage and migration channel network topology

表2 不同影响因素下卸压瓦斯运储通道属性参数的选取

Table 2 Selection of attribute parameters of channels under different influencing factors

研究对象	影响因素	属性参数	确定依据
卸压瓦斯运储通道	开采高度	运储通道的高度 H	
	推进速度	几何参数 运储通道的宽度 W	
	关键层层位	破断裂隙密度 ρ_f	
	煤层倾角	离层量均值 \bar{S}	
		裂隙参数 贯通度 D_i	
		分形维数 D_f	

1.52%，而不同倾角和 K₂ 层位下变化率仅为 1.15%、1.21%。采高、倾角、K₂ 层位与瓦斯运储通道高度变化规律成正比，和推速呈反比。

结合不同因素对运储通道高度的影响规律，用通道高度和影响因素作为节点，节点间的关系表示之间的关系，其中线段长度表示关系的紧密程度，实线表示为正相关变化趋势，虚线表示负相关的变化趋势，如图 4 所示。采高对通道的高度影响最大，K₂ 层位对其影响次之，推速和倾角的变化对于通道高度影响最小，其中随着推速加快，卸压瓦斯运储通道发育高度呈现降低的趋势。

3.1.2 卸压瓦斯运储通道宽度演化的多因素拓扑架构

抽采钻孔的偏角主要依据卸压瓦斯运储通道宽度的变化特征来进行设计，不同因素下瓦斯运储通道的宽度变化趋势不同。对比不同因素下卸压瓦斯运储通道宽度变化规律，发现回采前期卸压瓦斯运储通道宽度变化率都较小，快速的发育主要集中在 2~3 次周期来压后，如图 7 所示。

通过绘制瓦斯运储通道宽度变化因素雷达图，如图 8 所示。发现 K₂ 关键层距离煤层越远，覆岩裂隙向上发育受关键层影响越晚，通道内的裂隙有着充分的时间进行横向发育，最宽达到 35.4 m。分析瓦斯运储通道在采空区两侧的几何参数的差异，发现倾角 30°时，内外边界最大可达 12 m，这一差异为卸压瓦斯提供了优质的储集场所，且煤层倾角越大，这种差异越明显。

通过对不同因素下卸压瓦斯运储通道的宽度变化趋势，得到卸压瓦斯运储通道宽度的影响因素影响拓扑关系（图 7），图中“~”为连接折点，用来表示关系微弱的两个节点。可以看出，通道主要受倾角和 K₂ 层位来共同控制，受推速和采高的影响较小。

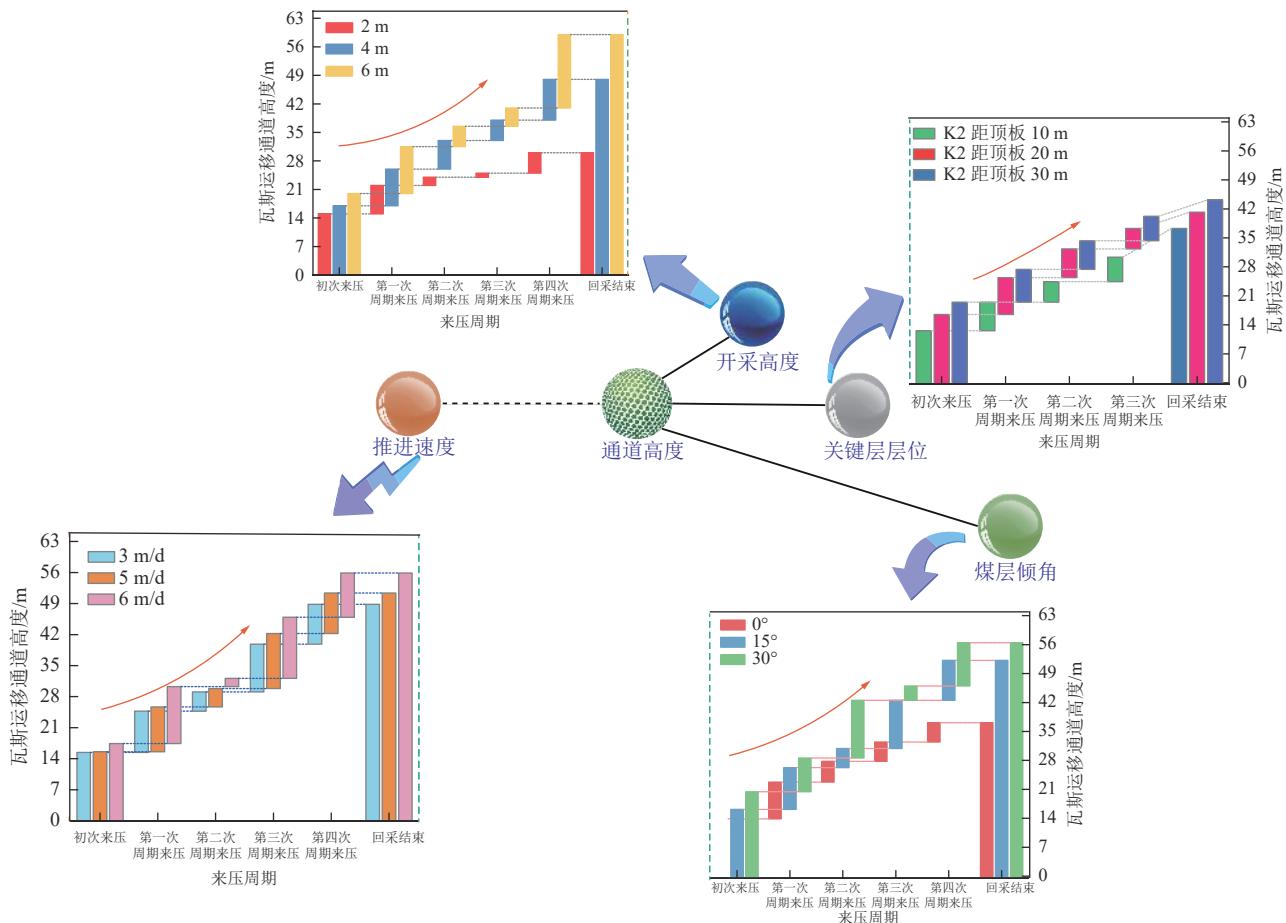


图 5 运储通道高度与影响因素的关系拓扑

Fig.5 Topology of relationship between channel height and influencing factors

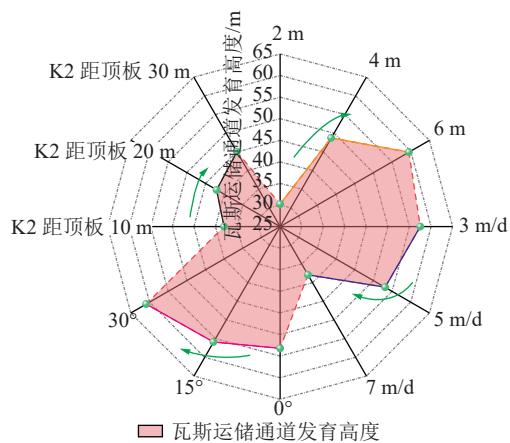


图 6 瓦斯运储通道发育高度因素雷达图

Fig.6 Radar map of channel development height factor

3.2 卸压瓦斯运储通道的裂隙参数与各因素的拓扑关系特征

3.2.1 卸压瓦斯运储通道破断裂隙密度变化规律及拓扑构架

为了定量描述破断裂隙发育的程度, 以裂隙密度 ρ_f (条/m) 表示破断裂隙随工作面推进过程中的变化特征^[44]。依据试验统计数据, 在模型走向方向, 按

10 m 为 1 个计数单元统计该范围内裂隙条数。通过计算绘制不同影响因素下的破断裂隙的密度, 发现破断裂隙密度均发生 4 次突变(图 9)。

随着距煤柱距离增加, 切眼侧与煤壁侧裂隙密度不断增加, 采动裂隙随采空区面积的增加逐步向高位发育。工作面从 35 m 推进至 70 m 时, 此区域内的裂隙密度普遍较低, 说明在采空区中部受上覆载荷的作用, 采动裂隙发生压实、闭合, 破断裂隙密度骤降。可以看出, 裂隙富集区域主要集中在煤壁前后 20 m 范围, 煤壁侧的裂隙数量大于切眼侧, 裂隙密度变化规律呈类“马鞍”状。

结合图 9 破断裂隙分布特征, 得到卸压瓦斯运储通道内破断裂隙密度的影响因素影响拓扑构架(图 10), 发现卸压瓦斯运储通道内破断裂隙密度的变化主要受煤层倾角影响, 受推速的影响较小, 而不同采高下运储通道的破断裂隙密度的变化不显著。破断裂隙密度高的区域瓦斯更易进行运移, 根据多因素条件下破断裂隙密度的变化趋势, 进一步优化瓦斯抽采钻孔终孔位置, 使得终孔位置始终处于高密度区域(破断裂隙密度>4.7 条/m), 有效地起到瓦

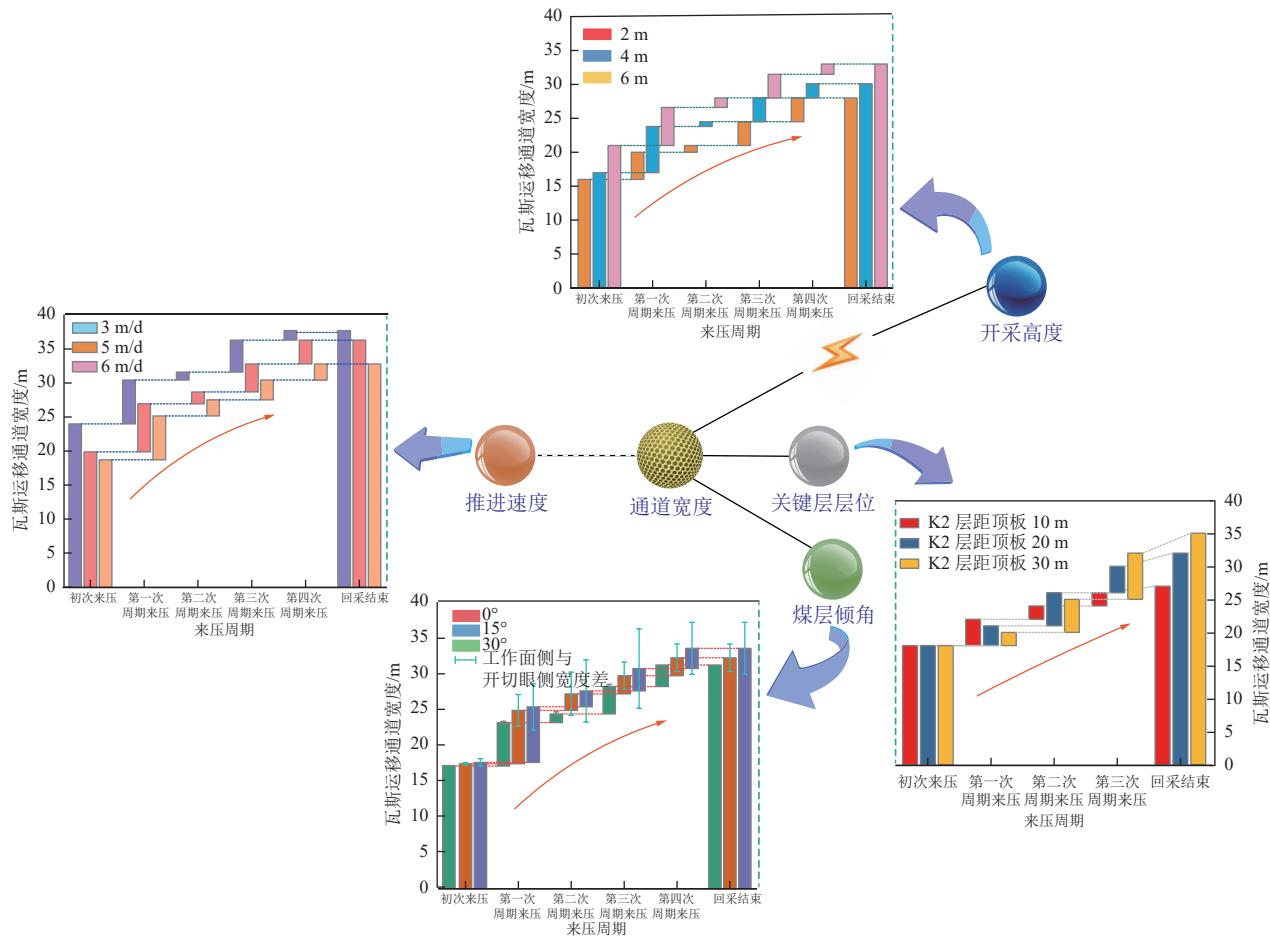


图 7 通道宽度与开采条件关系拓扑图
Fig.7 Topology of channel width versus mining conditions

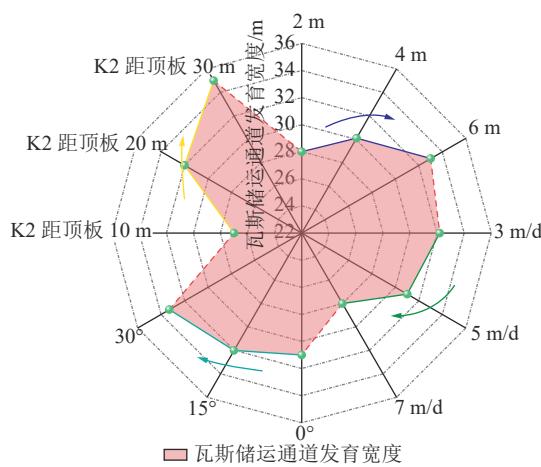


图 8 通道宽度变化因素雷达图

Fig.8 Radar map of variation factors of channel width

斯截留的作用。

3.2.2 卸压瓦斯运储通道离层裂隙的变化规律拓扑特征

以离层量(S)^[31](相邻岩层间的离层高度, m)来定量描述采动过程中卸压瓦斯运储通道中离层裂隙

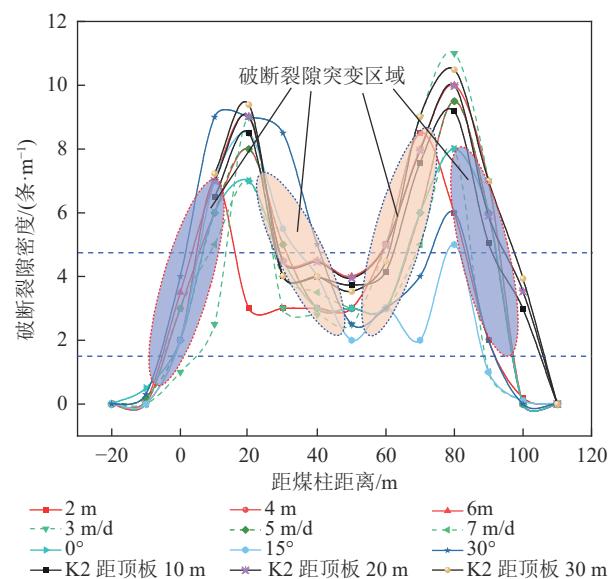


图 9 充分采动时覆岩裂隙破断裂隙密度分布
Fig.9 Distribution of overburden fracture breaking fracture density

的变化特征。根据工作面各岩层间的下沉量, 可得各岩层间的离层量分布, 不同开采条件下上覆岩层

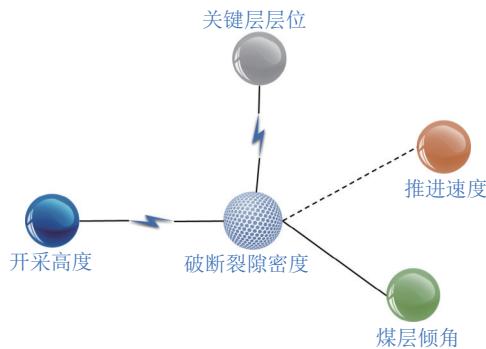


图 10 破断裂隙密度影响因素拓扑干系图

Fig.10 Topological stem diagram of factors influencing fracture density

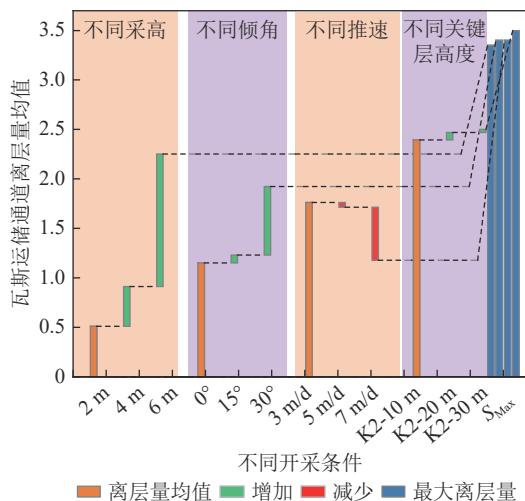


图 11 充分采动时多因素下离层量的变化曲线

Fig.11 Variation curve of overburden detachment volume under multiple factors

离层量随距煤柱距离的变化规律如图 11 所示。

通过计算充分采动时多因素下瓦斯运储通道内离层量的均值(\bar{S})，发现随采高、倾角以及关键层层位的增大， \bar{S} 逐渐升高，如图 10 所示。覆岩在开采扰动下发生岩层间出现离层现象，在岩体压实的区域覆岩离层量较小，而在岩体交接、错落的地方离层量较高，岩层间裂隙张开度也较大($0.5 \text{ m} \leq S \leq 2.0 \text{ m}$)，为气体的储集提供储集场所。对比分析可得，采高的增加对 \bar{S} 的影响最大，6 m 采高时相较于 4 m 采高时增幅达到 146.9%，K₂ 层位的变化对 \bar{S} 影响较小，增幅分别为 3.1%，12.3%。同时，随着推速加快，覆岩发育时间缩小， \bar{S} 呈现降低的变化趋势，7 m/d 推速下 \bar{S} 仅为 1.34 m。

图 12 为卸压瓦斯运储通道内离层量的影响因素影响拓扑干系图，发现离层量主要受采高和煤层倾角影响，推速和 K₂ 层位下离层量变化不明显，如图 12 所示。高离层量的区域靠近煤壁及开切眼侧，此处收应力影响显著，瓦斯运储通道结构变化频繁，

更易实现瓦斯抽采孔(巷)“延伸-破断”自主调节的目的，进而避免孔(巷)伸入采空区过长或过短对瓦斯抽采效果所造成的影响。

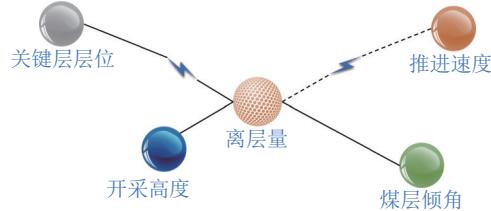


图 12 离层量影响因素拓扑干系图

Fig.12 Topological stem diagram of factors influencing Variation curve

3.2.3 卸压瓦斯运储通道中覆岩裂隙贯通度变化规律及拓扑构架

煤层回采过程中，上覆岩层破断后在采空区弯曲下沉，影响卸压瓦斯运储效果。因此引入破断裂隙贯通度(D_i)^[45]来描述岩层的破断程度及破断裂隙内卸压瓦斯运储能力的强弱，岩层的裂隙贯通度主要受下位岩层碎胀的填充程度、岩层厚度、岩体力学性质以及岩层的周期来压距共同影响。不同采高、推速、煤层倾角以及关键层层位条件下，下位岩层碎胀的填充程度和周期破断距不同，导致不同开采条件下卸压瓦斯运储通道的贯通度呈不同的变化规律，如图 13 所示。

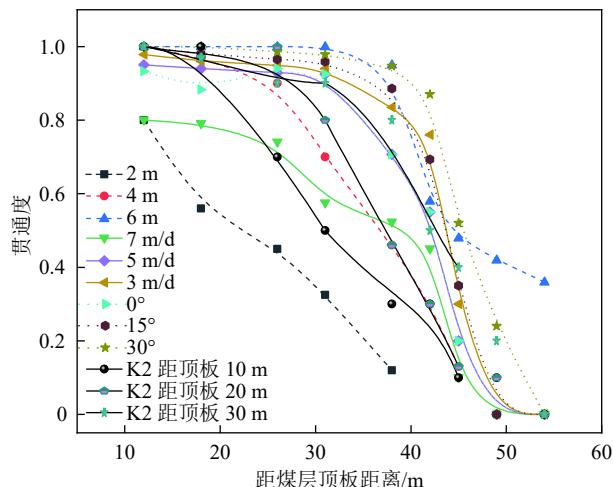


图 13 多因素条件下运储通道贯通度变化规律

Fig.13 Variation pattern of storage and migration channel penetration under different mining conditions

采高直接影响着下位岩层碎胀的填充程度，采高越大，垮落的自由空间越大，岩层的回转角和弯曲曲率越大，岩层破断裂隙的贯通度越大。采高 6 m 时，距离煤层顶板 35 m 处，贯通度出现下降的拐点，而采高 2 m 在距离煤层顶板 15 m 时贯通度出现下

降拐点。 K_2 层位越高，关键层的下位岩层拥有充足的填充空间，自由空间阈值较高，贯通度也随之增大。推速越快，岩体未得到充分的时间发育，卸压瓦斯运储通道发育高度较低， 7 m/d 的覆岩自由空间阈值远小于 3 m/d ，可以看出贯通度与采高及 K_2 层位呈正相关变化趋势，而与推速呈负相关变化趋势。

岩层破断的会转角受岩层周期来压距和煤层倾角共同影响，随着倾角增大，周期破断距逐渐减小^[30]，岩层的破断角度逐渐增大，贯通度逐渐增大，水平煤层的同一高度卸压瓦斯运储通道贯通度仅为倾斜煤层时的 60%。

图 14 为卸压瓦斯运储通道内贯通度的影响因素影响拓扑干系图，发现贯通度受采高影响最大，煤层倾角、 K_2 层位次之，推速对于贯通度影响最小。结合图 13 贯通度变化规律可知，卸压瓦斯运储通道内低贯通度的位置瓦斯难以大量储集。因此，贯通度大的区域岩层破断程度高，同时此处采动裂隙导气能力强，瓦斯运移更为活跃，将孔(巷)的终孔位置动态调整布置在高贯通度区域，有效地提高“截留”瓦斯的浓度，减少了瓦斯抽采效率的波动性。

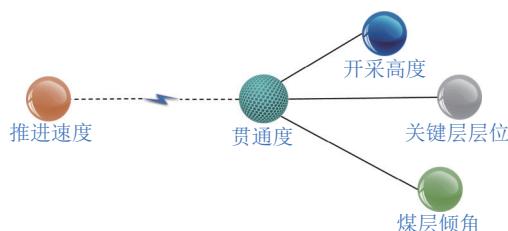


图 14 贯通度影响因素拓扑干系图

Fig.14 Topological stem diagram of factors influencing penetration

3.2.4 卸压瓦斯运储通道分形维数变化规律及拓扑构架

受开采扰动，卸压瓦斯运储通道在自重力和水平应力的作用下随覆岩的垮落、滑移、下沉及断裂而逐渐发育，卸压瓦斯运储通道内的裂隙网络逐步向采空区上方扩展。在周期来压后，岩体出现大面积的弯曲下沉及破断，裂隙网络充分发育，分形维数急剧增大，计算得到不同因素下卸压瓦斯运储通道的分形维数变化规律^[46]，如图 15 所示。

结果表明，随着采高的增加，运储通道分维值有增大的趋势。裂隙网络发育复杂程度为： $6.0 \text{ m} > 4.0 \text{ m} > 2.0 \text{ m}$ 。 K_2 层位越高，卸压瓦斯运储通道有着较多的时间去缓慢发育，分形维数也随着增大，与采高影响下的分形维数变化规律一致。

随着开采的不断前进，裂隙网络在来压后发育

充分，也逐步完善，因此推进速度减缓，裂隙的发育速度逐渐却加快，此时推速 3 m/d 的分形维数逐渐超过 7 m/d ，并且增长趋势最大。可以看出推速越缓慢，卸压瓦斯运储通道发育越完善。

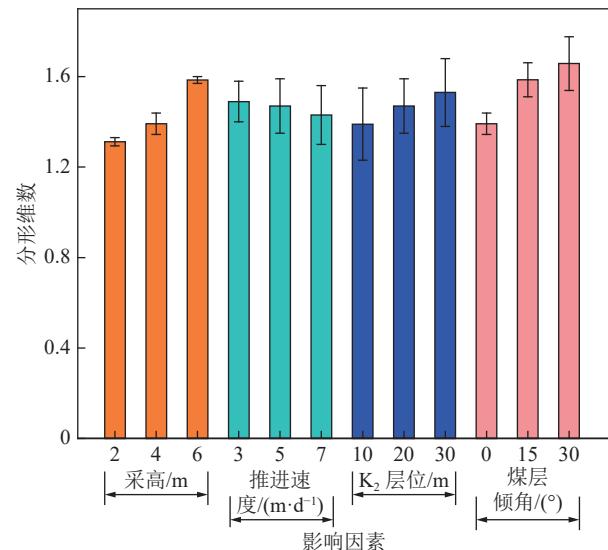


图 15 运储通道的分形维数变化曲线

Fig.15 Variation curve of fractal dimension of channels

通过分析运储通道的分形维数变化趋势以及与影响因素拓扑特征，如图 16 所示。发现随着采高增加，卸压瓦斯运储通道的分形维数逐渐升高，关键层的位置对于卸压瓦斯运储通道分形维数的影响最小，表明在大采高的条件下，裂隙网络发育的更为复杂。分形维数的变化直观表征着裂隙网络的演化趋势，高维区域的裂隙横纵交错复杂，为瓦斯的运储提供良好的场所，明确不同因素下高低维分布区域，可增大孔(巷)的有效抽采距离，避免将孔(巷)在抽采作业中出现坍塌等现象，提高瓦斯的抽采效率。

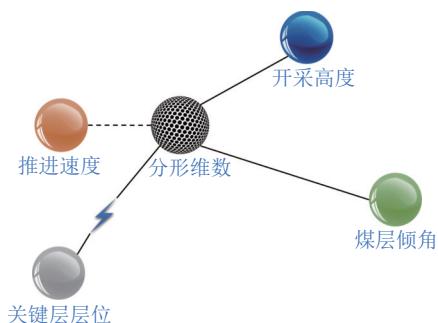


图 16 分形维数与开采条件的关系拓扑图

Fig.16 Topological stem diagram of factors influencing.

4 多因素下卸压瓦斯运储通道网络全域影响干系拓扑因素模型

结合拓扑学方法，从拓扑演化的角度出发^[47-48]，

分析多因素条件下卸压瓦斯运储通道几何参数、裂隙参数的变化规律及拓扑干系结构,实现了覆岩裂隙网络干系影响因素的定量描述,建立了卸压瓦斯运储通道网络干系结构矩阵及模型,如图17所示。煤层开采条件-卸压瓦斯运储通道参数拓扑关系存在多个层次,分别为:①单开采条件下通道不同特征呈现不同的变化关系;②单个通道参数与不同开采条件下的影响规律不同;③分属不同开采条件下,其开采因素的组合也不同;④通道内的不同参数(如:几何参数、裂隙参数等)存在深度并发关系、串联关系、补偿互馈关系等。

拓扑关系	开采高度	关键层层位	煤层倾角	推进速度	其他因素 _j
通道高度	1	2	3	4	N_{i1}
通道宽度	$-\infty$	1	2	3	N_{i2}
破断裂隙密度	$-\infty$	$-\infty$	1	2	N_{i3}
离层量	1	$-\infty$	$-\infty$	2	N_{i4}
贯通度	1	3	2	$-\infty$	N_{i5}
分形维数	2	$-\infty$	3	1	N_{i6}
参数 _i	N_{ij_1}	N_{j_2}	N_{j_3}	N_{j_4}	N_{j_j}

图17 卸压瓦斯运储通道干系网络矩阵

Fig.17 Gas storage and migration channel stem network matrix

层次①②中的拓扑关系可以用数字的大小表示干系紧密程度,数字“1”表示两者相互关系紧密级别第一,“2”表示两者相互关系紧密级别第二,数字的大小直接表示了关系间的紧密程度,其中“ $-\infty$ ”表示开采条件对通道=参数的影响微乎其微。不同开采条件下瓦斯运储通道属性参数间的拓扑关系,可以结合第三章的拓扑图中节点之间的距离进行计算,

在同一条件下,数字的序号从小到大,则表示了此参数与开采条件影响关系逐渐减弱,当节点间拓扑关系出现“~”,表示相互关系极其微弱,在干系网络矩阵中用“ $-\infty$ ”表示。

①②层次处于交互状态,为了明确不同开采条件与卸压瓦斯运储通道的参数特征之间的拓扑关系,需要对干系网络进行统一编码,得到卸压瓦斯运储通道发育干系网络矩阵,如图17所示。通过对干系网络矩阵进行遍历,即可得到卸压瓦斯运储通道不同开采条件下的连接拓扑关系。干系网络关系的统一编码确定了卸压瓦斯运储通道特征参数演化行为因素影响规律,瓦斯抽采系统的布置根据通道参数与开采条件的拓扑关系以及其他规则,进行动态优化调整,从而提高瓦斯抽采效率。为了更为直观地表示二者之间的拓扑关系,同时便于实际工程上的应用,将卸压瓦斯运储通道的干系网络矩阵转化为卸压瓦斯运储通道干系因素结构图,如图18所示。卸压瓦斯运储通道的裂隙发育网络可抽象成有节点和线组成的拓扑结构,以表示运储通道网络发育干系因素影响规律。其中,节点表示主控因素,线可以象征影响因素与运储通道的干系结构。干系紧密程度统一编码确定了开采条件对瓦斯运储通道参数的影响次序,瓦斯抽采工程根据其与开采条件的拓扑关系以及其他规则,进行布置层位、施工工艺的逐时段调节计算,从而优化瓦斯抽采工程对应开采条件下的抽采效果。

根据上述方法,确定卸压瓦斯运储通道不同开采条件下的连接拓扑关系,由此构建卸压瓦斯运储

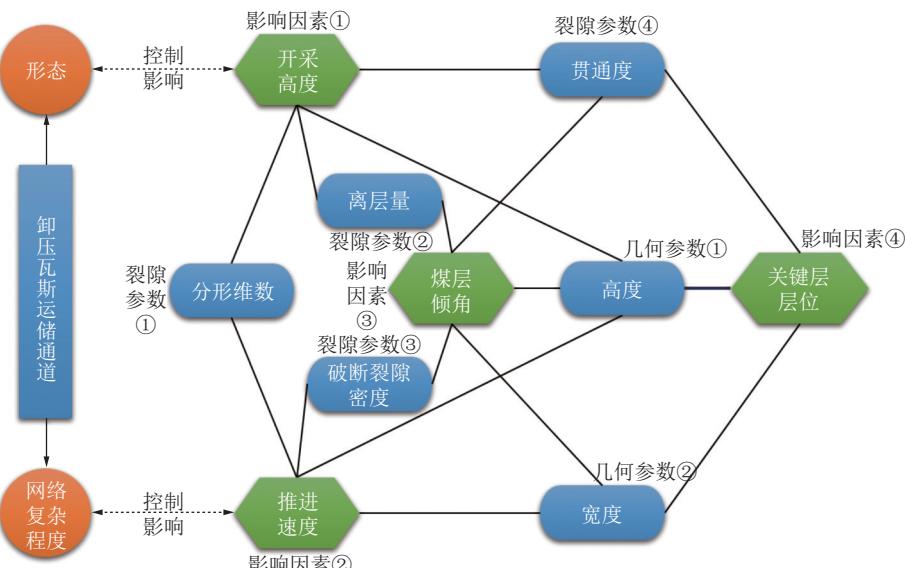


图18 卸压瓦斯运储通道干系因素拓扑模型

Fig.18 Structure of gas storage and migration channel stem factors

通道发育干系网络模型。可以看出卸压瓦斯运储通道的形态由采高、推速、 K_2 层位以及煤层倾角共同决定。

结合上文中试验所分析的数据,发现采高对于高度、离层量以及贯通度影响较大,推速主要影响运储通道的高度、破断裂隙密度,关键层层位主要控制卸压瓦斯运储通道的高度、宽度及贯通度,同时和煤层倾角共同影响运储通道的宽度发育范围,而不同搭配的开采条件综合影响着卸压瓦斯运储通道分形维数的变化趋势,控制着运储通道网络发育的复杂程度,依此为不同开采条件下卸压瓦斯抽采钻孔的布置及优化提供了一定的理论指导作用。

5 结 论

1)通过开展不同因素下二维物理模拟试验,将煤岩体拓扑结构细分为原生裂纹结构、次生裂隙结构、重新压实结构、离层裂隙结构、破断裂隙结构和网状结构,获得采动覆岩裂隙拓扑结构的分布特征。

2)获得卸压瓦斯运储通道内各区的裂隙发育参数(离层量、破断裂隙密度、贯通度、分形维数),掌握了各个参数受不同开采条件的影响规律,计算并绘制出卸压瓦斯运储通道内裂隙参数影响因素干系拓扑图,得到卸压瓦斯运储通道内裂隙网络的分布特征。

3)基于复杂网络演化理论可以简化现实干系的拓扑变换,得到复杂网络特征参数实现运储通道干系结构和因素节点的演化特征分析,掌握卸压瓦斯运储通道的几何参数及裂隙参数的拓扑结构变化特征,构建卸压瓦斯运储通道发育干系网络模型。

参考文献(References):

- [1] 许家林,秦伟,轩大洋,等.采动覆岩卸荷膨胀累积效应[J].煤炭学报,2020,45(1):35–43.
XU Jialin, QIN Wei, XUAN Dayang, et al. Accumulative effect of overburden strata expansion induced by stress relief[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 35–43.
- [2] 杨达明,郭文兵,谭毅,等.高强度开采覆岩岩性及其裂隙特征[J].煤炭学报,2019,44(3):786–795.
YANG Daming, GUO Wenbing, TAN Yi, et al. Lithology and fissure characteristics of overburden in high-intensity mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 786–795.
- [3] 黄庆享,杜君武,侯恩科,等.浅埋煤层群覆岩与地表裂隙发育规律和形成机理研究[J].采矿与安全工程学报,2019,36(1):7–15.
HUANG Qingxiang, DU Junwu, HOU Enke, et al. Research on overburden and ground surface cracks distribution and formation mechanism in shallow coal seams group mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(1): 7–15.
- [4] RAN Q C, LIANG Y P, ZOU Q L, et al. Characteristics of mining-induced fractures under inclined coal seam group multiple mining and implications for gas migration[J]. Natural Resources Research, 2023, 32(3): 1481–1501.
- [5] 侯恩科,袁峰,王双明,等.导水裂隙带发育特征地震识别方法[J].煤炭学报,2023,48(1):414–429.
HOU Enke, YUAN Feng, WANG Shuangming, et al. Seismic identification and development characteristics of water conducting fissure zone in goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 414–429.
- [6] 袁亮,张通,张庆贺,等.双碳目标下废弃矿井绿色低碳多能互补体系建设思考[J].煤炭学报,2022,47(6):2131–2139.
YUAN Liang, ZHANG Tong, ZHANG Qinghe, et al. Construction of green, low-carbon and multi-energy complementary system for abandoned mines under global carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2131–2139.
- [7] 周世宁.瓦斯在煤层中流动的机理[J].煤炭学报,1990,15(1):61–67.
ZHOU Shining. Mechanisms of gas flow in coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 1990, 15(1): 61–67.
- [8] TIEN J. Longwall caving in thick seams[J]. Coal Age, 1998, 103(4): 52–61.
- [9] JHA S N, KARMAKAR S. Thick seam mining-some experience and exaltation. In: singh TN, Dhar BB editors[J]. Proceedings of the international symposium on thick seam mining, India: Dhanbad, Central Mining Research Station, 1992: 191–202.
- [10] YASITLI N E, UNVER BAHTIYAR. 3D numerical modeling of longwall mining with top-coal caving[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(2): 219–235.
- [11] RUTQVIST Jonny, STEPHANSSON Ove. The role of hydromechanical coupling in fractured rock engineering[J]. Hydrogeology Journal, 2003, 11(1): 7–40.
- [12] XIE H P, GAO F. The mechanics of cracks and a statistical strength for rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(3): 477–488.
- [13] SMYTH Michelle, BUCKLEY Michael J. Statistical analysis of the microlithotype sequences in the Bulli Seam, Australia and relevance to permeability for coal gas[J]. International Journal of Coal Geology. 1993, 22: 167–187.
- [14] 齐庆新,李晓璐,赵善坤.煤矿冲击地压应力控制理论与实践[J].煤炭科学技术,2013,41(6):1–5.
QI Qingxin, LI Xiaolu, ZHAO Shankun. Theory and practices on stress control of mine pressure bumping[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(6): 1–5.
- [15] 王永秀,毛德兵,齐庆新.数值模拟中煤岩层物理力学参数确定的研究[J].煤炭学报,2003,28(6):593–597.
WANG Yongxiu, MAO Debing, QI Qingxin. Study on determination of mechanical of rock mass used in numerical simulation[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(6): 593–597.
- [16] 袁亮.深部采动响应与灾害防控研究进展[J].煤炭学报,2021,46(3):716–725.
YUAN Liang. Research progress of mining response and disaster

- prevention and control in deep coal mines [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(3): 716–725.
- [17] 姜振学, 庞雄奇, 曾溅辉. 油气优势运移通道的类型及其物理模拟实验研究 [J]. *地学前缘*, 2005, 12(4): 507–516.
JIANG Zhenxue, PANG Xiongqi, ZENG Jianghui. Research on types of the dominant migration pathways and their physical simulation experiments [J]. *Frontiers of Earth Science*, 2005, 12(4): 507–516.
- [18] 牛彦良. 海拉尔盆地潜山油藏油气沿不整合面、断层和砂体运移的控制因素 [J]. *大庆石油地质与开发*, 2007, 26(2): 27–30.
NIU Yanliang. Controlling factors for hydrocarbon migration along unconformity surface, faults and sandbody in Hailar buried hill reservoirs [J]. *Daqing Petroleum Geology and Development*, 2007, 26(2): 27–30.
- [19] 魏建平, 秦恒洁, 王登科, 等. 含瓦斯煤渗透率动态演化模型 [J]. *煤炭学报*, 2015, 40(7): 1555–1561.
WEI Jianping, QIN Hengjie, WANG Dengke, et al. Dynamic permeability model for coal containing gas [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(7): 1555–1561.
- [20] 李宏义, 姜振学, 庞雄奇. 柴北缘油气运移瓦斯运移通道特征及其控油气作用 [J]. *地球科学*, 2006, 31(2): 214–220.
LI Hongyi, JIANG Zhenxue, PANG Xiongqi. Dominant migration pathway and its control on oil-gas migration in the northern edge of Qaidam Basin [J]. *Earth Science*, 2006, 31(2): 214–220.
- [21] JIA B, WEI J P, WEN Z H, et al. The experimental research on response characteristics of coal samples under the uniaxial loading process [J]. *Acoustical Physics*, 2017, 63(6): 716–722.
- [22] 张勇, 许力峰, 刘珂铭, 等. 采动煤岩体瓦斯通道形成机制及演化规律 [J]. *煤炭学报*, 2012(9): 1444–1450.
ZHANG Yong, XU Lifeng, LIU Keming, et al. Formation mechanism and evolution laws of gas channel in coal and rock [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012(9): 1444–1450.
- [23] 张勇, 张保, 张春雷, 等. 厚煤层采动裂隙发育演化规律及分布形态研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(6): 935–940.
ZHANG Yong, ZHANG Bao, ZHANG Chunlei, et al. Study on dynamic evolution rules and distribution pattern of mining induced fractures of thick coal seam [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2013, 42(6): 935–940.
- [24] 王维华. 基于分形理论的采动覆岩裂隙渗透规律研究 [J]. *煤炭技术*, 2015, 34(9): 208–211.
WANG Weihua. Study on fissure permeability rule of overlying strata influenced by mining based on fractal theory [J]. *Coal Technology*, 2015, 34(9): 208–211.
- [25] 谢和平, 鞠杨, 高明忠. 煤炭深部原位流态化开采的理论与技术体系 [J]. *煤炭学报*, 2018, 284(5): 28–37.
XIE Heping, JU Yang, GAO Mingzhong. Theories and technologies for in-situ fluidized mining of deep underground coal resources [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 284(5): 28–37.
- [26] 李立. 采动影响下煤体瓦斯宏观尺度通道演化机理研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016: 35–48.
LI Li. Micro/macro study on mechanism of gas channel evolution in coal under the affect of mining [D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2016: 35–48.
- [27] 肖康, 穆龙新, 姜汉桥. 基于网络模型的油藏瓦斯运移通道形成微观机制 [J]. *大庆石油地质与开发*, 2017, 15(3): 76–82.
XIAO Kang, MU Longxin, JIANG Hanqiao. Micro-mechanism of gas migration channel formation in reservoir based on network model [J]. *Daqing Petroleum Geology and Development*, 2017, 15(3): 76–82.
- [28] ZHAO P X, ZHUO R S, LI S G, et al. Greenhouse gas protection and control based upon the evolution of overburden fractures under coal mining: A review of methods, influencing factors, and techniques [J]. *Energy*, 2023, 284: 129158–129176.
- [29] 刘洪永, 程远平, 周红星. 综采长壁工作面推进速度对优势瓦斯通道的诱导与控制作用 [J]. *煤炭学报*, 2015, 40(4): 809–815.
LIU Hongyong, CHENG Yuanping, ZHOU Hongxing. Guidance and control effect of drawing speed on excellent gas channel at fully mechanized longwall face [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(4): 809–815.
- [30] ZHAO P X, ZHUO R S, LI S G, et al. Fractal characteristics of gas migration channels at different mining heights [J]. *Fuel*, 2020, 271: 117479–117509.
- [31] ZHAO P X, ZHUO R S, LI S G, et al. Fractal characteristics of methane migration channels in inclined coal seams [J]. *Energy*, 2021, 5: 120127–120157.
- [32] 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应研究 [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 effect of mining height on gas migration excellent channel at fully mechanized working face [J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2019, 36(4): 848–856.
- [33] 赵红亮, 陈剑平. 裂隙岩体三维网络流的渗透路径搜索 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(4): 622–627.
ZHAO Hongliang, CHEN Jianping. Searching for seepage path of 3d network in fractured rock masses [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(4): 622–627.
- [34] 王家臣, 白希军, 吴志山, 等. 坚硬煤体综放开采顶煤破碎块度的研究 [J]. *煤炭学报*, 2000, 25(3): 238–242.
WANG Jiachen, BAI Xijun, WU Zhishan, et al. The research on the fractured blocks of the top coal in the longwall top coal caving technique of the hard coal seam [J]. *Journal of China Coal Society*, 2000, 25(3): 238–242.
- [35] 王路军, 曹志国, 程建超, 等. 煤矿地下水水库坝基层间岩体破坏及突渗力学模型研究 [J]. *煤炭学报*, 2023, 48(3): 1192–1208.
WANG Lujun, CAO Zhiguo, CHENG Jianchao, et al. Mechanical modeling of rock damage and sudden seepage between the base of underground water reservoir dams in coal mines [J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(3): 1192–1208.
- [36] 蒋长宝, 付银兰, 王光淇. 水力压裂煤裂隙网络表征与造缝性能评估试验研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(6): 62–71.
JIANG Changbao, FU Yinlan, WANG Guangqi. Experimental study on characterization hydraulic fracturing coal fracture network and evaluation of fracture forming performance [J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(6): 62–71.
- [37] 李波波, 王斌, 杨康, 等. 煤岩孔裂隙结构分形特征及渗透率模

- 型研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(2): 226–231.
- LI Bobo, WANG Bin, YANG Kang, et al. Study on fractal characteristics of coal and rock pore fissure structure and permeability model[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 226–231.
- [38] 王卫军, 马渝杰, 范磊, 等. 双向极不等压软岩巷道围岩裂隙分布及变形机制研究 [J/OL]. 煤炭学报: 1–16 [2023–11–10]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0913>.
- WANG Weijun, MA Yujie, FAN Lei, et al. Study on fracturedistribution and deformation mechanism of surrounding rock in two-way extremely unequal pressure soft rock roadway[J/OL]. Journal of China Coal Society, 1–16 [2023–11–10]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0913>.
- [39] 余伊河, 马立强, 张东升, 等. 长壁工作面采动覆岩层理开裂机理及侧向裂隙发育规律 [J/OL]. 煤炭学报: 1–15[2023–11–10]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2022.1307>.
- YU Yihe, MA Liqiang, ZHANG Dongsheng, et al. Themechanism of bedding cracking and development laws of lateral fracturein overlying strata induced by longwall mining[J/OL]. Journal of China Coal Society, 1–15[2023–11–10]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2022.1307>.
- [40] 李玮, 孙文峰, 唐鹏, 等. 基于拓扑结构的岩石裂缝网络表征方法[J]. 天然气工业, 2017, 37(6): 22–27.
- LI Wei, SUN Wenfeng, TANG Peng, et al. A method for rock fracture network characterization based on topological structure[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(6): 22–27.
- [41] 张开仲, 程远平, 王亮, 等. 基于煤中瓦斯赋存和运移方式的孔隙网络结构特征表征 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(10): 3680–3694.
- ZHANG Kaizhong, CHENG Yuanping, WANG Liang, et al. Pore network structure characterization based on gas occurrence and migration in coal[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(10): 3680–3694.
- [42] 刘嘉英, 周伟, 姬翔, 等. 基于细观拓扑结构演化的颗粒材料剪胀性分析[J]. 力学学报, 2022, 54(3): 707–718.
- LIU Jiaying, ZHOU Wei, JI Xiang, et al. Dilatancy analysis of granular materials based on mesoscopic topological evolutions[J]. Journal of Mechanics, 2022, 54(3): 707–718.
- [43] 鞠金峰, 许家林, 王庆雄. 大采高采场关键层“悬臂梁”结构运动型式及对矿压的影响 [J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 2115–2120.
- JU Jinfeng, XU Jialin, WANG Qingxiong. Cantilever structure moving type of key strata and its influence on ground pressure in large mining height workface[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 2115–2120.
- [44] 赵鹏翔, 王玉龙, 李树刚, 等. 倾斜厚煤层仰斜综采面覆岩瓦斯缓渗分区域方法及分形特征研究 [J/OL]. 煤炭科学技术: 1–13[2023–11–10]. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1444>.
- ZHAO Pengxiang, WANG Yulong, LI Shugang, et al. Study onthe division method and fractal characteristics of overburden gasslow permeability zone in up-dip fully mechanized face ofinclined thick coal seam[J/OL]. Coal Science and Technology, 1–13[2023–11–10]. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1444>.
- [45] 黄炳香, 刘长友, 许家林. 采动覆岩破断裂隙的贯通度研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(1): 45–49.
- HUANG Bingxiang, LIU Changyou, XU Jialin. Study on the penetration of fractured fissures in mining overburden[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2010, 39(1): 45–49.
- [46] 王羽扬, 李剑, 李元林, 等. 岩溶区顶板沉降特点及覆岩裂隙分形维数变化研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(4): 679–690.
- WANG Yuyang, LI Jian, LI Yuanlin, et al. Study on the settlement characteristics of roof in karst area and the change of fractal dimension of overlying rock fracture[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2023, 40(4): 679–690.
- [47] 司俊鸿, 李潭, 胡伟, 等. 采空区多孔介质等效孔隙网络拓扑结构表征算法研究 [J]. 华北科技学院学报, 2022, 19(1): 1–6.
- SI Junhong, LI Tan, HU Wei, et al. Research on characterization algorithm of equivalent pore network topology structure of porous media in goaf[J]. Journal of North China University of Science and Technology, 2022, 19(1): 1–6.
- [48] 陈小前, 赵勇, 霍森林, 等. 多尺度结构拓扑优化设计方法综述 [J]. 航空学报, 2023, 44(15): 25–60.
- CHEN Xiaoqian, ZHAO Yong, HUO Senlin, et al. A review of topology optimization design methods for multi-scale structures[J]. Journal of Aeronautics, 2023, 44(15): 25–60.