



软硬互层覆岩结构影响卸压瓦斯运储区交叉融合的厚度比效应

赵鹏翔 裴文博 李树刚 林海飞 卓日升 常泽晨 邵秋冬 马晓川

引用本文:

赵鹏翔, 裴文博, 李树刚, 等. 软硬互层覆岩结构影响卸压瓦斯运储区交叉融合的厚度比效应[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(2): 163–177.

ZHAO Pengxiang, PEI Wenbo, LI Shugang. Structure of soft and hard interbedded overburden rock under the influence of thickness ratio affects the cross fusion of pressure relief gas transportation and storage area[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(2): 163–177.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0282>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

基于关键层理论的切顶留巷下覆岩裂隙分布特征研究

Characterization of fissure distribution of overburden rock under roof cutting and entry retaining based on key strata theory

煤炭科学技术. 2024, 52(5): 102–113 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1368>

特厚煤层开采卸压瓦斯储集区演化特征分析及工程应用

Evolution characteristics analysis and engineering application of pressure-relieved gas reservoir in extra-thick coal seam mining

煤炭科学技术. 2023, 51(2): 173–182 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2020-1291>

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>

煤层倾角对仰斜工作面覆岩压实区裂隙演化规律的影响

Dip angle effect of coal seam on crack propagation rule of compacted area at fully-mechanized rise mining face

煤炭科学技术. 2021, 49(11): 65–72 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/1b3c8626-c046-43da-8d18-c7d5f9605f87>

综采工作面覆岩压实区裂隙动态演化规律影响因素分析

Analysis and application of fracture evolution law of overburden compacted area on fully-mechanized mining face under multiple factors

煤炭科学技术. 2022, 50(1): 95–104 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e08afc7e-8f5d-412a-b51d-5130c2e2e994>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

赵鹏翔, 裴文博, 李树刚, 等. 软硬互层覆岩结构影响卸压瓦斯运-储区交叉融合的厚度比效应[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(2): 163–177.

ZHAO Pengxiang, PEI Wenbo, LI Shugang, *et al.* Structure of soft and hard interbedded overburden rock under the influence of thickness ratio affects the cross fusion of pressure relief gas transportation and storage area[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(2): 163–177.

软硬互层覆岩结构影响卸压瓦斯运-储区交叉融合的厚度比效应

赵鹏翔^{1,2,3,4}, 裴文博¹, 李树刚^{1,2,3}, 林海飞^{1,2,3}, 卓日升¹, 常泽晨¹, 邵秋冬⁵, 马晓川³

(1. 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西部矿井瓦斯智能抽采工程研究中心, 陕西 西安 710054; 3. 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; 4. 新疆维吾尔自治区煤炭科学研究院 新疆煤及煤层气工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830091; 5. 新疆昌吉市荷泽腾达矿业有限责任公司 荷泽腾达煤矿, 新疆 昌吉 831100)

摘要: 为掌握软硬互层覆岩结构影响卸压瓦斯运-储区交叉融合的厚度比效应, 以不同厚度比的软硬互层覆岩结构为试验对象, 利用二维物理相似模拟试验平台, 开展软硬互层覆岩结构裂隙演化及破断机制试验, 并结合分形理论定量描述软硬互层覆岩结构裂隙分布特征, 根据采动覆岩椭圆带理论, 同时引入回转角、贯通度、裂隙率等特征参数, 研究软硬互层覆岩结构瓦斯运移区和储集区交叉融合动态变化特征受软硬互层结构厚度比的影响。试验结果表明: 瓦斯的运-储区内外边界和运-储交界分别位于分形维数、裂隙贯通度、破断回转角与裂隙率的突变区域, 运移区破断回转角大于 2.07° , 储集区破断回转角为 $1^\circ \sim 2.07^\circ$ 。瓦斯运移区和储集区破断裂隙贯通度分别为 $0.6 \sim 1.0$ 和 $0.2 \sim 0.6$; 根据瓦斯运-储区裂隙率、回转角、贯通度的变化, 确定瓦斯运移区、储集区与交叉融合区边界, 裂隙率、回转角、贯通度呈现先快速减小, 后减小速率明显减缓, 最后减小速率再次增大的趋势; 软硬互层覆岩经历运-储区开始形成、运移区与储集区首次出现、交叉融合区初次形成、交叉融合区扩大、运-储区与交叉融合边界逐渐模糊5个时期, 最终形成完整的椭圆抛物带状的覆岩裂隙场; 建立软硬互层覆岩结构瓦斯运-储区厚度比效应量化表征模型, 同时根据瓦斯运-储区表征参数确定其边界及状态判定流程, 确定软硬互层覆岩结构上覆岩层裂隙演化及破断机制。

关键词: 软硬互层; 瓦斯运-储区; 交叉融合; 厚度比效应; 覆岩裂隙

中图分类号: TD712

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)02-0163-15

Structure of soft and hard interbedded overburden rock under the influence of thickness ratio affects the cross fusion of pressure relief gas transportation and storage area

ZHAO Pengxiang^{1,2,3,4}, PEI Wenbo¹, LI Shugang^{1,2,3}, LIN Haifei^{1,2,3}, ZHUO Risheng¹, CHANG Zechen¹, SHAO Qiudong⁵, MA Xiaochuan³

(1. School of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Western Mining Gas Intelligent Extraction Engineering Research Centre, Xi'an 710054, China; 3. Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Prevention, Control and Emergency Response to Coal Mine Disasters, Xinjiang College of Engineering, Urumqi 830023, China; 4. Xinjiang Uygur Autonomous Region Coal Research Institute, Xinjiang Coal and Coalbed Methane Engineering Technology Research Centre, Urumqi 830091, China; 5. Heze Tengda Coal Mine, Xinjiang Changji Heze Tengda Mining Co., Ltd., Changji 831100, China)

Abstract: In order to grasp the thickness ratio effect of soft and hard interbedded overburden structure on the cross-fusion of pressure relief gas transportation and storage area, the soft and hard interbedded overburden structure with different thickness ratios was taken as the

收稿日期: 2024-09-28

策划编辑: 常琛

责任编辑: 王晓珍

DOI: 10.12438/cst.2024-0282

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFC3009004); 新疆煤炭资源绿色开采教育部重点实验室开放课题资助项目(KLXGY-KA2404); 国家自然科学基金面上资助项目(52174205)

作者简介: 赵鹏翔(1987—), 男, 甘肃兰州人, 教授, 博士生导师, 博士(后)。E-mail: zhpchs@sina.com

通讯作者: 裴文博(2000—), 男, 甘肃兰州人, 硕士研究生。E-mail: 1320919457@qq.com

test object, and the two-dimensional physical similarity simulation experiment platform was used to carry out the crack evolution and breaking mechanism experiment of soft and hard interbedded overburden structure. Combined with the fractal theory, the fracture distribution characteristics of soft and hard interbedded overburden structure were quantitatively described. According to the theory of mining overburden elliptic paraboloid zone, the characteristic parameters such as rotation angle, penetration degree and fracture rate were introduced to study the dynamic change characteristics of cross-fusion of gas migration area and reservoir area in soft and hard interbedded overburden structure affected by the thickness ratio of soft and hard interbedded structure. The experimental results show that the internal and external boundaries of the gas transport-storage area and the transport-storage boundary are located in the mutation areas of fractal dimension, fracture penetration, fracture rotation angle and fracture rate, respectively. The fracture rotation angle of the migration area is greater than 2.07° , and the fracture rotation angle of the reservoir area is $1^\circ \sim 2.07^\circ$. The fracture connectivity of gas migration area and reservoir area is $0.6 \sim 1.0$ and $0.2 \sim 0.6$, respectively. According to the changes of fracture rate, rotation angle and penetration degree in gas transportation-reservoir area, the boundary of gas migration area, reservoir area and cross fusion area is determined. The fracture rate, rotation angle and penetration degree decrease rapidly at first, then the decrease rate slows down obviously, and finally the decrease rate increases again. The overlying strata of the soft and hard interbedded strata experienced five periods: the formation of the transport-reservoir area, the first appearance of the migration area and the reservoir area, the first formation of the cross-fusion area, the expansion of the cross-fusion area, and the gradual blurring of the transport-reservoir area and the cross-fusion boundary. Finally, a complete elliptical parabolic banded overburden fracture field was formed. The quantitative characterization model of thickness ratio effect of gas transport-storage area in soft and hard interbedded overburden structure is established. At the same time, the boundary and state determination process are determined according to the characterization parameters of gas transport-storage area, and the fracture evolution and fracture mechanism of overlying strata in soft and hard interbedded overburden structure are determined.

Key words: soft and hard alternant strata; gas transport-storage area; cross fusion; thickness ratio effect; overburden fissure

0 引 言

在煤层开采中,其上覆岩体为层状岩体,所有层状岩体具有连续间距不等平行层面的结构特征,由于沉积物质成分的差异造成层状岩体岩性的差异,从而部分表现为软硬互层^[1]。软硬互层岩体是指当 2 组或多组以上的具有较大强度差异的互层状结构岩体,研究软硬互层结构采动覆岩裂隙演化特征,揭示顶板为软硬互层类型煤层开采时,卸压瓦斯运-储区域演化机理,定量描述瓦斯运移的路径与瓦斯储存的位置,为研究采空区卸压瓦斯分布与煤层安全开采提供依据^[2-5]。

目前,国内外对于软硬互层岩体结构展开了大量的研究。赵平劳等^[6]通过对层状岩体弹性模量进行试验研究及理论计算,得到层状岩体单向抗压的本构关系。刘立等^[7]研究层状复合岩体特殊力学性质,得到不同层状复合岩体的特殊变形与破坏特性,随着层间厚度的减小,岩体抗变形能力随之降低。穆成林等^[8]通过研究层状围岩突变失稳破坏过程,最终建立了符合实际的层状岩体的破坏分析方法以及失稳判据。李昂等^[9]以软硬互层状岩体为研究对象,研究互层状岩体的变形特征、强度特征及破坏机制,得到随软弱夹层所占体积比的增加,破坏载荷总体呈现下降的趋势。康玉梅等^[10]通过研究不同厚度比下的软硬互层岩体的力学性质,得到强度较大的岩体易产生张拉破坏,强度较小的岩体易产生剪切

破坏。刘新荣等^[11]研究“软+硬”“硬+软+硬”组合体的宏观剪切力学特征。陈宇龙等^[12]结合复合岩体破坏的理论分析,采用离散单元法研究软硬互层岩体抗压强度与弹性模量,得到抗压强度与弹性模量随界面倾角的增大而呈现先减小后增大。姚池等^[13]通过数值模拟得到软硬互层结构的抗压强度各向异性的特征。同时国内外学者对采动覆岩裂隙网络演化特征及其形态的研究展开了大量的研究,李杨杨等^[14]研究由于采动影响,原生裂隙对覆岩移动及破断裂隙发育特征,覆岩中发育形成“Z”形离层空间,且均与原生裂隙、采动裂隙互相贯通形成导水通道网络。余伊河等^[15]通过岩层弯曲下沉特征以及组合梁理论,提出张拉离层裂隙和剪切错动裂隙发育的判断特征。胡国忠等^[16]研究了工作面开采过程中覆岩运移的演化过程,得到了覆岩采动裂隙空间形态发育特征。张礼等^[17]研究采动覆岩裂隙场特征,构建了“采动裂隙环形体”内外边界及判别方法。ZHAO 等^[18-20]通过引入分形维数,得到工作面的采动裂隙在不同分区内的分形维数演化规律,基于采动裂隙椭抛带理论,构建采动卸压瓦斯优势通道采高效应的空间形态模型。孟祥军等^[21]通过对倾斜煤层采动影响上覆岩层垮落过程中微震事件的现场观测,掌握采动上覆岩层的裂隙发育形态及演化趋势,得出裂隙发育形态呈现非对称椭抛带。蒋金泉等^[22]研究了高位关键层下覆岩采动裂隙对瓦斯运移规律的影响,得到主关键层下存在采空区卸压裂隙发育

区。FENG 等^[23-24]通过物理模拟试验将采空区瓦斯流动空间自上而下划分为瓦斯高浓度区、瓦斯过渡区、瓦斯富集区和瓦斯无流区 4 个区域,并指出这些区域的边界始终呈“V”形特征。张开仲等^[25]构建了基于瓦斯赋存和运移方式的孔隙网络特征的表征模型。李树刚等^[26-28]通过物理相似模拟试验,在瓦斯运移优势通道的基础上,研究卸压瓦斯运移及富集区的演化规律,得到瓦斯运移优势通道内离层裂隙面积占比呈现底部最大,顶部次之,中部最小的分布规律。

软硬互层岩体是在煤矿开采过程当中经常遇到的特殊不良地质构造,软硬互层岩体是指由 2 组及 2 组以上的强度差异较大的互层状地质结构组成的岩体^[29]。现有的研究多集中在普通的岩体结构中,针对软硬互层岩体开采过程中瓦斯运储区演化的厚度比效应研究较少,软硬互层岩体厚度比决定了岩层破断与贯通,对顶板为软硬互层类型煤层开采过程中运-储区演化产生重要影响。为此通过物理相似模拟试验,模拟软硬互层岩体结构在煤层开采过程中破断与运移特征,揭示不同软硬互层厚度比影响下覆岩瓦斯运-储区裂隙演化规律,得到在不同软硬互层厚度比影响下覆岩瓦斯运-储区域边界划分及其判定流程,为瓦斯抽采钻孔布置参数的优化提供一定的理论指导。

1 试验设计

1.1 软硬互层结构判别

根据软硬互层岩体分类特征,从岩层厚度、软化系数、自由膨胀率、软硬岩层厚度组合比例、力学行

为、宏观构造等方面进行判别,笔者研究煤层上覆岩体,主要从软硬岩层厚度组合比例、力学行为两方面进行判别。

1.1.1 岩层厚度组合比例条件

对于单层岩层,其厚度一般大于 1.0 m,对于软硬互层,其厚度比应满足:

$$\frac{1}{3} \leq \frac{h_{yi}}{h_{ti}} \leq 3 \quad (1)$$

式中: h_{yi} 为第 i 层硬岩层厚度, m; h_{ti} 为第 i 层软岩层厚度, m。

1.1.2 岩层力学性质

对于软硬互层结构,其邻近层岩层单轴饱和抗压强度应满足:

$$1.5 \leq \frac{\sigma_{yi}}{\sigma_{ti}} \quad (2)$$

式中: σ_{yi} 为第 i 层硬岩层单轴饱和抗压强度, MPa; σ_{ti} 为第 i 层软岩层单轴饱和抗压强度, MPa。

1.2 物理相似模拟试验设计

为了研究采动影响下上覆岩层裂隙演化特征,利用二维平面相似模拟试验平台开展试验,研究不同硬岩与软岩厚度对覆岩瓦斯运-储区裂隙演化规律的影响,引入厚度比的概念,及互层结构硬岩层相对于软岩层的厚度的比值,揭示顶板为软硬互层类型煤层开采时,不同厚度比软硬互层覆岩结构对裂隙演化的影响。采用如图 1 所示的模型结构。平面模拟试验台主要由框架、加载及监测系统 3 个部分组成。搭建模型尺寸为 1 100 mm×140 mm×700 mm。岩层垮落位移由布置的监测点与原先位置对比进行监测,岩层垮落形态通过工业级摄像机记录。

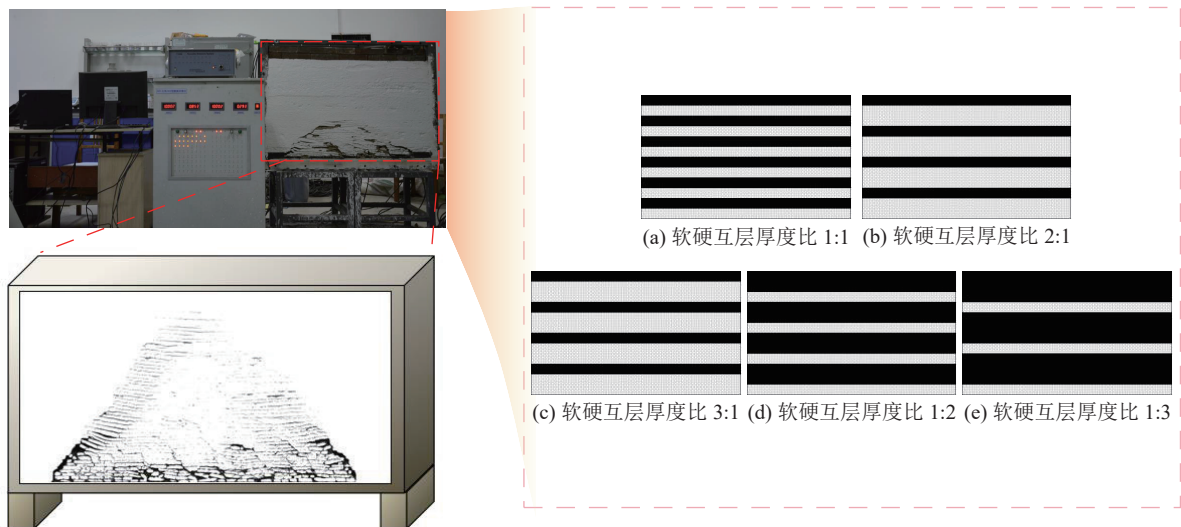


图 1 软硬互层物理相似模拟试验模型

Fig.1 Physical similarity simulation experiment model of soft and hard interbedded layers

本次试验运用相似定理来模拟煤层开采过程中的基本性质与相似特征,准确模拟工作面实际的开采条件。通过相似定理作为试验基础,选取相似常数制作物理相似模拟试验,采用的材料为:细河沙、石膏、大白粉、云母片、水^[30-32]。其中细河沙为骨料,石膏和大白粉为胶结材料,云母片为分层材料。根据试验台实际情况并计算确定相似常数,几何相似参数为 100,容重相似参数为 1.5,时间相似常数为 14,试验模拟相似常数见表 1,模型岩层分布及材料配比见表 2。

在物理相似模拟模型两边预留 20 m 的煤柱,以时间相似比 1 : 10 进行循环推进,根据循环 20、30 mm 模拟工作面开采,在每次周期来压前后通过工业级高速摄像机采集裂隙图片。

2 软硬互层覆岩结构影响瓦斯运-储区裂隙演化特征

2.1 软硬互层覆岩结构裂隙动态演化特征

通过试验获得工作面推进过程中覆岩裂隙,利用软件对邻近采空区裂隙进行分区划定,如图 2 所示,将其划分为纵向 1 ~ 20 区和横向 1 ~ 20 区。通过工业级高速摄像机拍摄开采过程中的覆岩图片,对 400 个区域的覆岩裂隙图导入到自主研发的分形维数计算软件,得到不同区域的分形维数,分析软硬互层覆岩结构裂隙动态演化特征。

表 1 试验模拟相似常数

Table 1 Test simulation similarity constant

试验台尺寸/ (mm×mm×mm)	相似常数				
	几何	容重	应力	泊松比	时间
1 100 × 140 × 700	100	1.5	150	1	14

表 2 软硬互层厚度比 1 : 1 物理相似模拟试验岩层分布及材料配比

Table 2 Soft and hard interbed thickness ratio 1 : 1 physical similarity simulation test rock layer distribution and material ratio

岩层属性	岩层	厚度/cm	材料用量/kg			分层厚度/cm
			沙子	石膏	大白粉	
硬岩	中砂岩	3	2.116	0.091	0.212	1
软岩	泥岩	3	2.149	0.081	0.188	1

计盒维数法,又称盒维数,设在面积为 R^2 的平面上有平面子集 F ,且以 F 平面做边长为 δ 的网格,则 F 子集与网格相交的方格数 $N_\delta(F)$ 为平面 F 在标度 δ 下的盒数。 F 在 δ 下的极限存在,则该极限为平面 F 的分形维数。设 F 为 R^2 上的任意非空有界子集,将 R^2 划分为 δ 尽可能小的方形网格,则 F 的盒维数定义为

$$D_B = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\lg N_\delta(F)}{-\lg \delta} \tag{3}$$

得到随着工作面的推进,不同区域的软硬互层

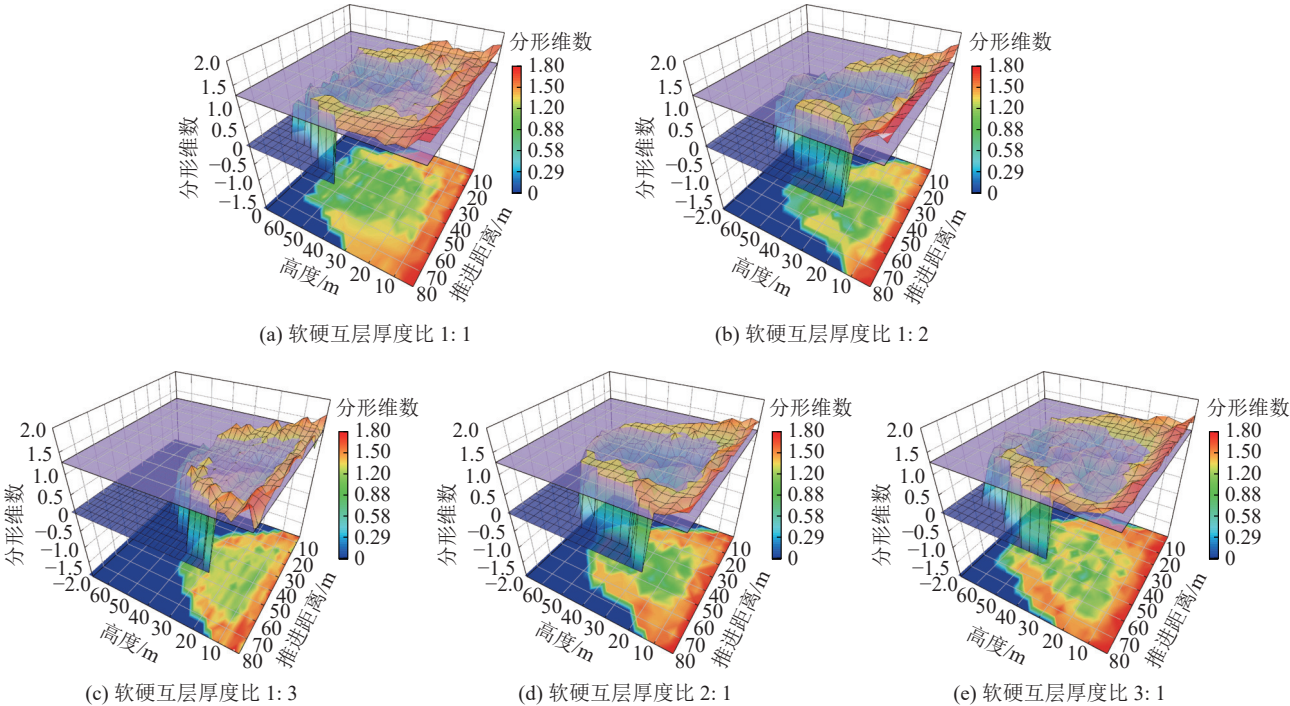


图 2 软硬互层覆岩裂隙分形维数分布

Fig.2 Fractal dimension distribution of soft and hard interbedded overlying rock fracture

覆岩裂隙的分形维数呈现不同的变化形态。近工作面侧的分形维数随开采均保持在 1.25 左右,在近开切眼侧的采空区分形维数由原来的 1.75 逐渐向 1.25 降低。而随着工作面的不断推进,压实区位置大部分区域分形维数减少。

软硬互层覆岩裂隙分形维数分布如图 2 所示,不同厚度比影响下的软硬互层覆岩分形维数均发生较大的变化,通过分形维数的变化情况定量描述软硬互层覆岩中瓦斯运-储区及软硬互层覆岩压实区的区域边界。通过分形维数区域演化特征,得到瓦斯运-储区分形维数值大于 1.25,软硬互层覆岩压实区分形维数小于 1.25。覆岩裂隙为瓦斯运移提供通道,软硬互层覆岩压实区由于破断岩体回转变形空间较小,使得部分裂隙闭合,瓦斯运移受阻。裂隙区由于铰接结构存在,回转变形空间较大,为瓦斯运移提供丰富的运移通道。

2.2 软硬互层覆岩结构瓦斯运-储区破断回转角变化特征

通过物理相似模拟试验,得到软硬互层覆岩结构受采动影响下的岩层破断情况,通过分析岩体破断特征,进一步研究软硬互层覆岩瓦斯运-储区及软硬互层覆岩裂隙演化情况。软硬互层覆岩结构受采动影响,会在岩层中形成回转变形空间,由于软、硬岩层刚度以及厚度比的不同,随煤层的不断开采,硬

岩层可能会不完全破断,呈现出断续性的互层结构,不完全破断的硬岩层会产生较小的回转变形空间,为卸压瓦斯储集提供空间。

通过物理相似模拟试验,得到不同测线处的下沉量曲线,如图 3 所示。下沉量曲线存在明显的拐点,下沉曲线两拐点之间线段的整体斜率对应倾角为该岩层破断回转角^[33],两拐点区域为采动裂隙主要发育的区域,煤壁与开切眼上方的曲率最大,可以得到破断回转角影响裂隙发育区域主要集中在卸压瓦斯运-储区域内。当回转角较大时,岩层会产生较大的破断回转变形空间,为瓦斯运-储提供通道和区域。

如图 4 所示,随高度的增加,覆岩回转角逐渐减小,裂隙逐渐减少。冒落带回转角较大,最大值为 4.83° ,岩层产生的回转变形空间大,破断裂隙贯通整个岩层,形成瓦斯运移通道。裂隙带回转角在 $0.89^\circ \sim 2.91^\circ$,破断回转角随距离顶板的高度的增加而逐渐减小,减小速度随距顶板高度逐渐减小。

随着软硬互层覆岩厚度比的增大,各测线处的回转角均逐渐增大,这是由于厚度增大后,软岩层占比增大,岩层产生的张拉力减小,回转变形空间增大。通过分析回转角,得到回转角为 2.07° 时,岩层在此处产生的曲率较大,岩层弯曲后产生的张拉力使得岩层产生较大的回转变形空间,为卸压瓦斯运移提供

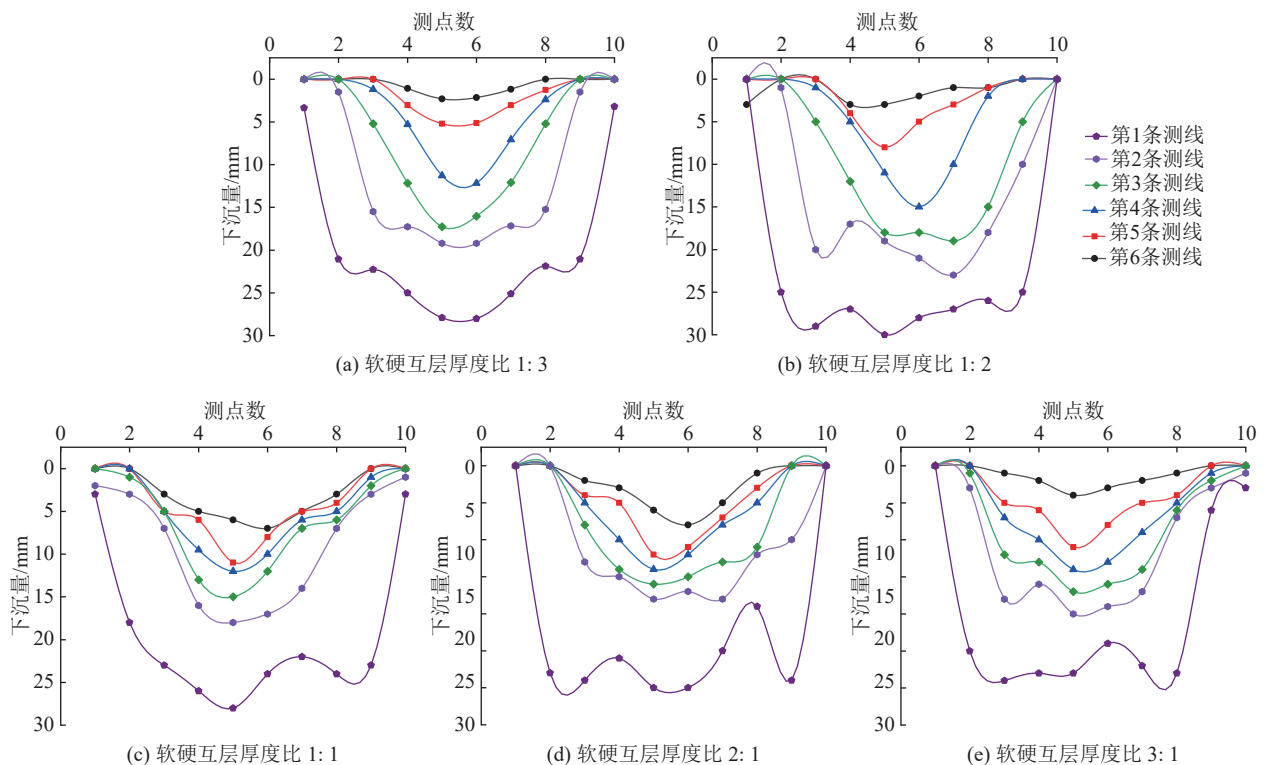


图 3 软硬互层覆岩下沉量变化

Fig.3 Change of subsidence of soft and hard interbedded overburden rock

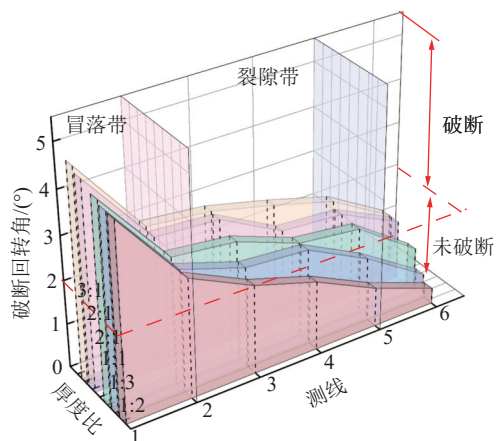


图 4 软硬互层覆岩回转角变化特征

Fig.4 Variation characteristics of rotation angle of soft and hard interbedded overburden rock

通道。

2.3 软硬互层覆岩结构瓦斯运-储区裂隙贯通度变化特征

通过物理相似模拟试验,得到软硬互层覆岩裂隙演化特征,分析软硬互层覆岩随采动影响的破断特征,有弯曲下沉、未完全破断、破断贯通 3 种状态。为了可以通过定量化的方法表征软硬互层覆岩结构卸压瓦斯运-储区内部的瓦斯运移能力的强弱,引入贯通度的概念^[34-35]。

随着软硬互层覆岩高度的增加,瓦斯运-储区的贯通度呈现减小趋势(图 5),初期贯通度快速减小,该区域岩层破断裂隙丰富,为瓦斯运移提供通道。交叉融合区内贯通度减小速率明显减缓,该区域岩层未完全破断贯通,瓦斯气体通过完全破断贯通的裂隙向上运移,在未完全破断区域聚集。储集区贯通度随高度急剧减小,为瓦斯储集提供区域。在煤层回采后,运移区贯通度均大于 0.6,软硬互层覆岩

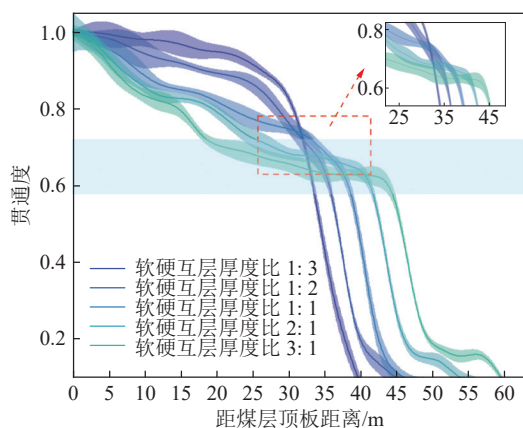


图 5 软硬互层覆岩贯通度变化

Fig.5 Change of penetration degree of soft and hard interbedded overburden rock

破断裂隙发育良好。储集区随着覆岩高度的增加,贯通度急剧减小,破断裂隙贯通度减小到 0.2 左右,该区域内瓦斯向上运移能力急剧减弱,卸压瓦斯开始储集。

3 不同厚度比软硬互层覆岩结构瓦斯运-储区影响机制

3.1 软硬互层覆岩结构瓦斯运移区和储集区岩体周期性破断演化规律

3.1.1 硬软互层覆岩结构模型破断贯通特征

在软硬互层结构中,硬岩抗压强度更大,所以硬岩层在软硬互层覆岩结构中起到承载主体与骨架的作用。当起到关键控制作用下的软岩完全破断后,裂隙向上发育,硬岩层随采动逐渐产生裂隙直至破断,其上部软岩层随后产生大量裂隙。通过分析软硬互层覆岩结构模型,得到破断裂隙多出现在瓦斯运移区与储集区,以此来研究瓦斯运移区和储集区岩体周期性破断演化规律。

3.1.2 硬软互层覆岩结构周期性破断机制

硬岩层强度高,多呈现明显的脆性破坏,软岩层则由于强度较低,表现出明显的塑性破坏。通过以上分析,引用应力强度因子判断硬岩层是否破断,是否为瓦斯运移和储集提供通道与空间。引用应变强度因子判断软岩层是否破断,是否为瓦斯运移和储集提供通道与空间。

硬岩层使用应力强度因子作为判断指标,根据固支梁模型,最大拉应力为

$$\sigma = \frac{ql_c^2}{2h^2} \quad (4)$$

式中: l_c 为周期来压后裂隙最大高度岩梁长度, m; h 为岩梁厚度, m; q 为所受载荷, N/m。

覆岩破断悬伸长度及岩梁长度与工作面推进距离如下:

$$l_c = l_a - 2 \sum_{j=1}^m l'_j \quad (5)$$

式中: l_a 为工作面推进距离, m; j 为周期来压时垮落岩层层数; l'_j 为各岩层破断后悬伸长度, m。

将式(4)代入到式(5)中,得到第 j 层硬岩层破断时工作面临界开采长度为

$$l_{yj} = 2 \sum_{j=1}^m l'_j + \sqrt{\frac{2\sigma h^2}{q}} \quad (6)$$

式中: l_{yj} 为第 j 层硬岩层破断时工作面临界开采长度, m。

由于软岩层其抗变形的能力更强,故通过使用

应变强度因子判断软岩层是否完全破断。通过固支梁理论,得到软弱岩层最大水平拉伸变形值 ω_{\max} 为

$$\omega_{\max} = \frac{3ql_b}{8Eh^2} \quad (7)$$

式中: l_b 为岩体长度, m; E 为岩层弹性模量, Pa。

将式(7)代入到式(5)中,得到第 i 层软岩层破断时工作面临界开采长度为

$$l_{rj} = 2 \sum_{j=1}^m l'_j + h \sqrt{\frac{8E\omega_{\max}}{3q}} \quad (8)$$

式中: l_{rj} 为第 j 层硬岩层破断时工作面临界开采长度, m。

根据砌体梁理论,在煤层开采后,如果覆岩悬顶面积超过了岩层自身的极限,岩层就会产生破坏。对于软硬互层覆岩结构,当软、硬岩层岩梁发生张拉破坏后,由于存在水平推力,相邻的岩块之间就会产生铰接结构,表现出砌体梁的结构特征。

软硬互层覆岩结构破断裂隙发育过程如下图所示

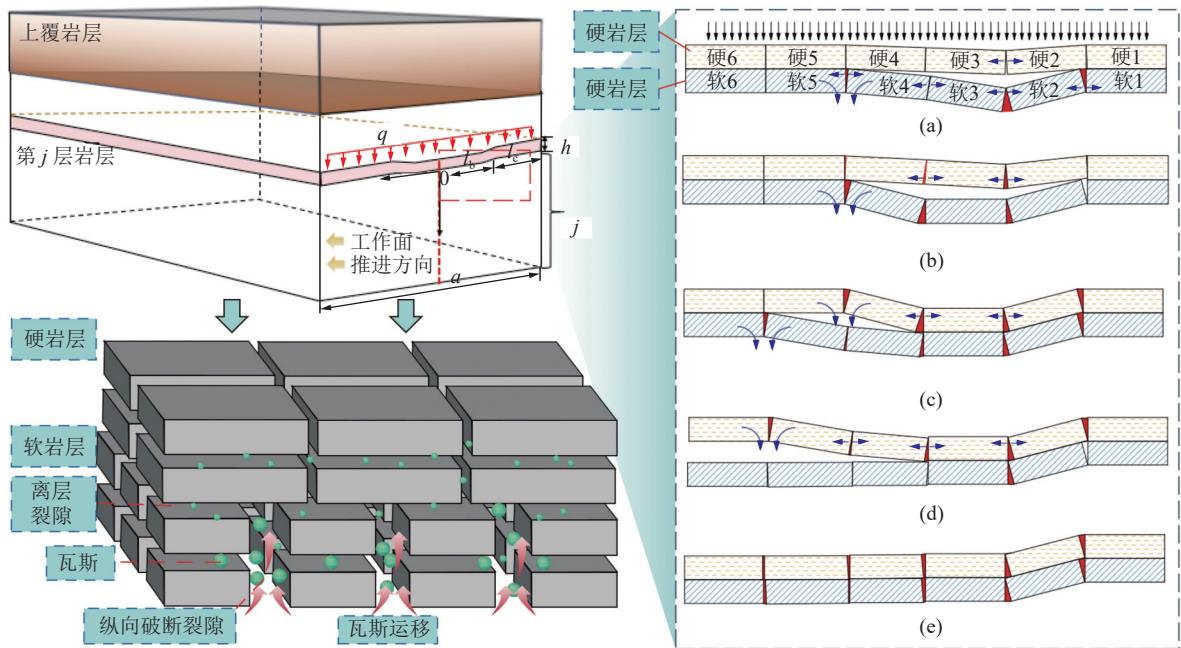


图 6 软硬互层覆岩裂隙演化模型

Fig.6 Fracture evolution model of soft and hard interbedded overburden rock

3.2 软硬互层覆岩结构瓦斯运移区和储集区交叉融合动态变化特征

不同厚度比下的软硬互层覆岩不同周期来压下降移区与储集区的高度与宽度如图 7 所示。随软硬互层厚度比的增大,运移区与储集区的高度和宽度都产生了明显的增大,且随工作面的不断推进,运移区与储集区的高度宽度都随之增大。得到随着软硬互层覆岩结构厚度比的增大,瓦斯运移区的高度和

示,其过程为:①随着工作面推进,对于软岩层,工作面推进距离还未大于其破断时临界开采强度,岩块软 2 与软 3 由于自身旋转,在其上部形成离层裂隙,如图 6a 所示,此时开始形成储集区;②工作面继续推进,推进距离大于软岩层破断临界开采强度,产生塑性形变,软岩层岩梁发生破断,产生竖向破断裂隙,硬 2 与硬 3 在重力作用下开始旋转,离层裂隙增大,如图 6b 所示,此时储集区开始向上移动;③当工作面开采距离大于硬岩层临界开采强度,产生脆性形变,硬岩层岩梁发生破断,产生竖向破断裂隙,下部软岩层破断裂隙进一步发育,其最大扰度值小于下部自由空间高度,软岩层开始贯通,如图 6c 所示,此时储集区向上移动,该位置形成新的运移区;④随工作面继续推进,硬岩层破断裂隙进一步发育,硬 4 与硬 5 岩层继续旋转下沉,如图 6d 所示,此时运移区开始向上移动;⑤硬岩层下部存在自由空间,硬岩层开始贯通,如图 6e 所示,此时运移区向上移动。

宽度存在明显的同步规律性增大,随着厚度比的增大,运移区和储集区高度和宽度都呈现出明显的增大,但由于随着上覆岩层高度的增加,更容易形成悬臂梁结构,裂隙的发育空间受到限制,运移区发育增大速度减小。

通过引入裂隙率、回转角、贯通度来定义运移区与储集区裂隙分布特征,量化表征瓦斯运-储区相互交叉融合的动态演化过程。裂隙率 R_f 通过裂隙面积

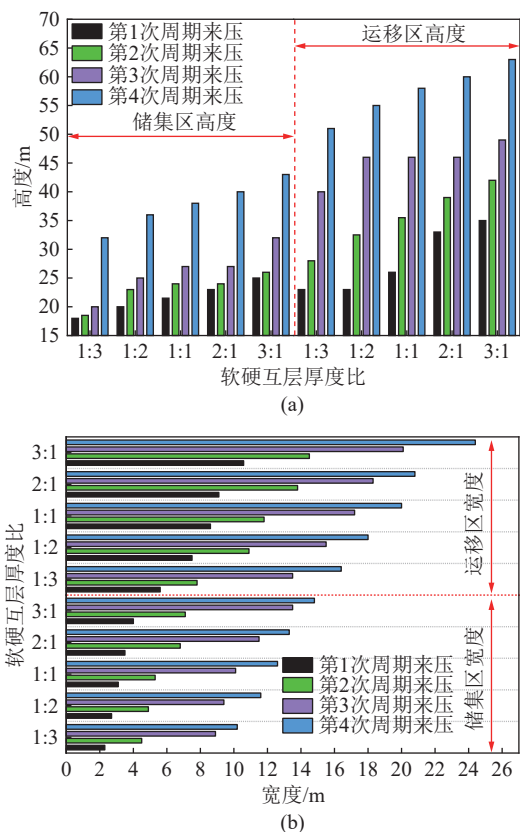


图 7 软硬互层覆岩运-储区动态变化特征

Fig.7 Dynamic change characteristics of soft and hard interbedded overburden rock transport-storage area

与研究区域面积之比来计算,通过裂隙提取软件 PCAS,将软硬互层覆岩裂隙提取出来计算裂隙面积,PCAS 可识别图像中的各种孔隙和裂隙,并得到各种几何参数和统计参数。通过计算得到裂隙率^[35],裂隙率计算公式如下

$$R_f = \frac{S_f}{S_a} \times 100\% \quad (9)$$

式中: R_f 为某区域内裂隙率; S_f 为区域裂隙面积, m^2 ; S_a 为所研究区域的总面积, m^2 。

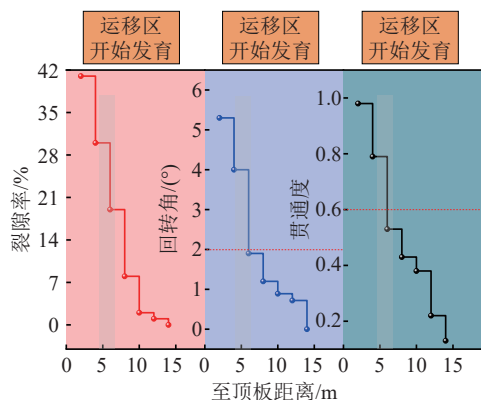
裂隙率表明不同区域裂隙的分布情况,对每次周期来压覆岩裂隙图像竖向划分为 10 个单元计算裂隙率,同时对每一测线处的贯通度与回转角进行计算。通过分析裂隙率、贯通度与回转角,判断随周期来压的覆岩裂隙演化与瓦斯运移区、储集区的交叉融合动态演化情况。

如图 8a 所示,瓦斯运-储区开始逐渐形成,初次来压时,采空区内回转变形空间较小,瓦斯在采空区内流动不规律,瓦斯以运移为主,裂隙率、回转角、贯通度随距底板高度逐渐减小。在距底板 5.6 m 以上,裂隙率减小速率逐渐放缓,回转角减小到 2° 以下,贯通度减小到 0.6 以下。软岩层其最大挠度值小于其下部自由空间高度,使其完全破断为瓦斯运移提供通道,由于硬岩层产生的张拉应力使得岩层未完全破断,裂隙向上发育受阻。

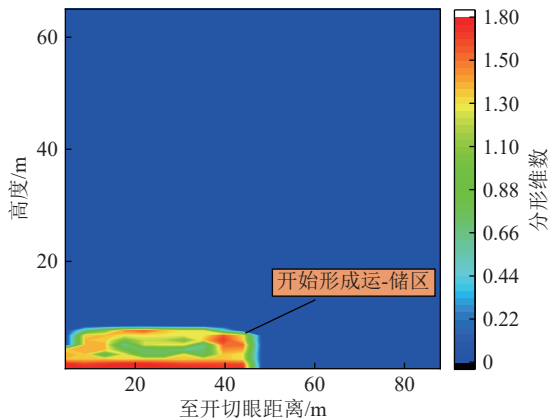
如图 8b 所示,瓦斯运-储区形成,第 1 次周期来压后,上覆岩体大面积垮落,裂隙快速发育,最大值达到 40%。裂隙不断向上发育,瓦斯运移区与储集区形成,通过贯通度与回转角判断两者边界位置距底板 12 m,此时其上部由于硬岩层弯曲拉应力小于岩石的抗拉强度,其弯曲下沉且未破断,软岩层整体破断垮落,软硬岩层之间形成离层为瓦斯储集提供区域。

如图 8c 所示,第 2 次周期来压时,垮落面积增大,形成较多破断岩体铰接结构,裂隙发育程度增大,而由于岩体垮落、破断、滑移作用的影响,部分裂隙闭合,裂隙率最大值减小到 38%,瓦斯运移区与储集区边界间形成交叉融合区域。裂隙率、回转角、贯通度先快速减小,随后减小速度减缓,而后减小速度又逐渐增大的趋势,在距离底板 18 m 处为运移区与储集区相互交叉融合的区域。

如图 8d 所示,第 3 次周期来压,瓦斯运移区与



(a) 初次来压



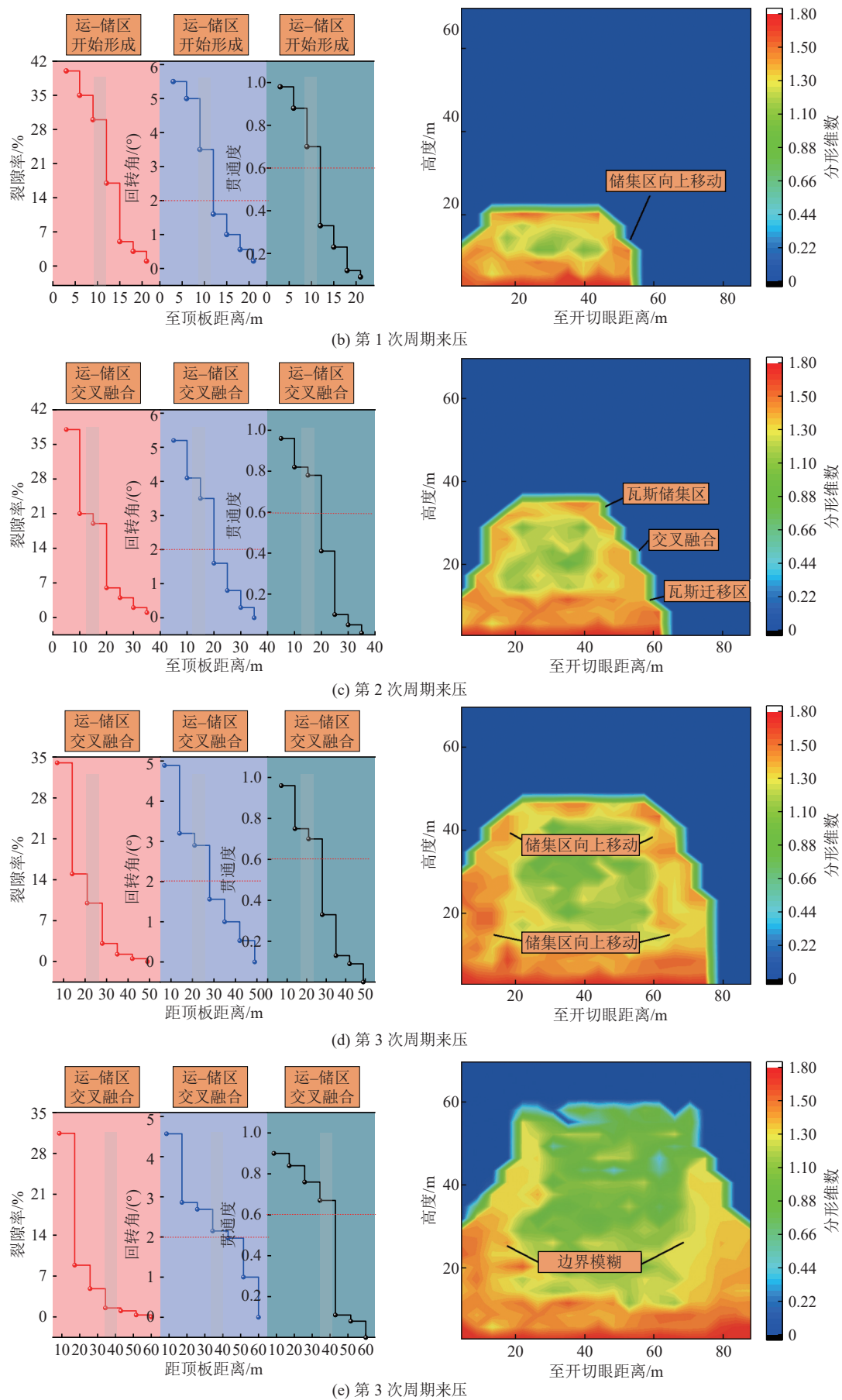


图 8 软硬互层覆岩交叉融合动态变化特征

Fig.8 Dynamic change characteristics of cross fusion of soft and hard interbedded overlying strata

储集区第 2 次交叉融合, 软硬岩层形成的空洞逐渐压缩减小, 交叉融合区域位置的转移至距底板 24 m 处, 表示瓦斯运移区面积逐渐向上移动, 同时储集区面积逐渐扩大, 由于上部垮落岩体对下部岩体不断挤压, 部分裂隙闭合, 裂隙率与贯通度、回转角在运移区减小速率逐渐变大。

如图 8c 所示, 第 4 次周期来压, 交叉融合区转移至距底板 35 m 处左右, 瓦斯运移区与储集区域逐渐增大, 边界区域裂隙率、贯通度、回转角减小值较小, 两区域边界逐渐模糊, 边界逐渐混合, 空洞面积进一步减小。

裂隙率、回转角、贯通度是判断运储区及交叉融合区域的特征参数, 裂隙率、回转角、贯通度先剧烈减小而后减小趋势减缓, 最后又再度增大, 由于交叉融合区处裂隙场的无序程度增大, 原来的储集区岩层发生不完全的破断, 使得一部分瓦斯无法继续向上移动, 该区域总体表现为裂隙率、回转角、贯通度减小速率突变的区域, 该范围形成瓦斯运移区和储集区相互交叉融合的区域。

3.3 软硬互层覆岩结构瓦斯运-储区交叉融合厚度比效应演化机理

3.3.1 软硬互层覆岩结构交叉融合厚度比效应特征分析

随着工作面的推进, 软硬互层覆岩结构裂隙场不断演化, 不断发育与闭合, 形成复杂的裂隙场结构, 引入分形维数确定瓦斯运-储区外部边界, 同时根据软硬岩层破断贯通特征确定运-储区内部边界, 划分瓦斯运移区及储集区。

在上覆岩层垮落的开始阶段, 采空区内部结构较为混乱, 开始形成储集区、运移区, 随着工作面推进, 储集区与运移区交界处岩层受到挤压开始产生破断裂隙, 储集区与运移区开始交叉融合, 由于岩层未完全贯通, 导致部分瓦斯不能向上运移而开始聚集, 形成运-储区的交叉融合区域。当岩层完全破断贯通时运-储区开始完全融合, 逐渐演化为运移区, 随着储集区向上移动, 运移区不断向上扩展, 表现出“形成储集区-区域交叉融合-运移区向上扩展”的动态演化过程。如图 9 所示, 蓝色、橙色岩层分别为

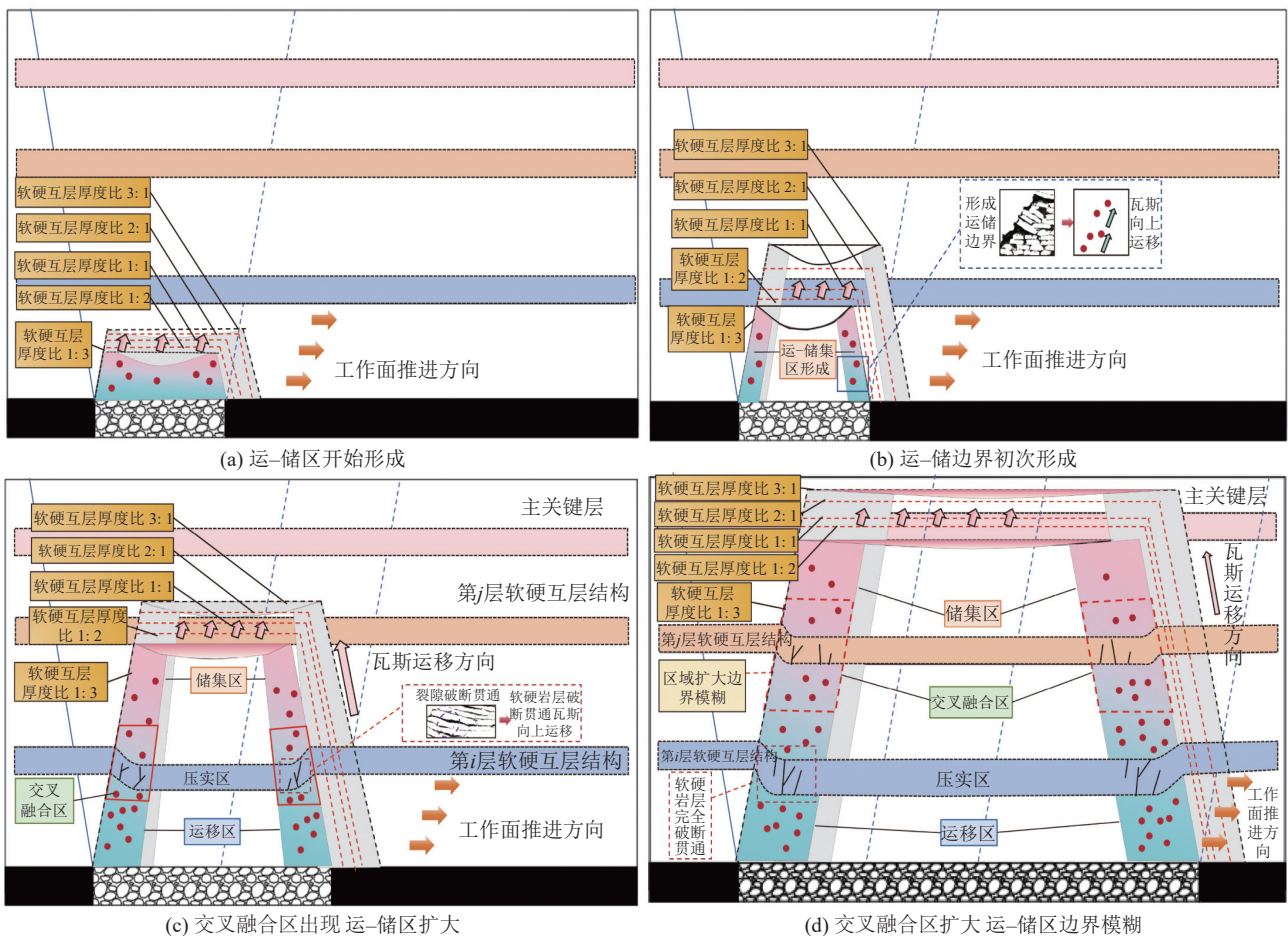


图 9 软硬互层覆岩交叉融合动态变化过程

Fig.9 Dynamic change process of cross fusion of soft and hard interbedded overburden rock

第 i, j 层软硬互层结构, 随工作面推进, 第 2、3 次周期来压后该部分岩层开始破断贯通, 上覆岩体向上发育。

如图 9a 所示, 初次垮落后, 运-储区边界还未形成, 瓦斯以运移为主。随工作面推进, 瓦斯开始向上运移, 此时运-储区初次形成, 但运储区边界还不明显, 如图 9b 所示。随工作面不断推进, 运移区与储集区边界逐渐明显, 储集区与运移区边界处两者开始交叉融合, 储集区逐渐演化为运移区。交叉融合区内软硬岩层结构逐渐完全破断贯通, 促使储集区上移, 原储集区演化为运移区, 运移区、交叉融合区域逐渐扩大, 如图 9c 所示。工作面继续推进, 瓦斯运-储区表现出“破坏-交叉融合-形成”的周期性演化特征, 运-储区与交叉融合区边界逐渐模糊, 最后形成趋于稳定的覆岩裂隙场, 如图 9d 所示。

通过对比不同软硬岩层厚度比下的交叉融合区边界, 得到随着软硬岩层厚度比的增大, 交叉融合区上下边界高度逐渐增大。交叉融合区高度及宽度从大到小范围如图 10 所示, 依次为: 软硬岩层厚度比 $3:1 >$ 软硬岩层厚度比 $2:1 >$ 软硬岩层厚度比 $1:1 >$ 软硬岩层厚度比 $1:2 >$ 软硬岩层厚度比 $1:3$ 。

3.3.2 软硬互层覆岩结构交叉融合厚度比效应量化表征

为了量化软硬互层覆岩结构瓦斯运-储区在不同软硬厚度比影响下交叉融合的整体过程, 通过物理相似模拟试验的结果, 以工作面推进方向为 x 轴, 垂直方向为 y 轴, 垂直于工作的方向为 z 轴, 得到如图 11 所示的瓦斯运-储区空间模型。

工作面推进距离与推进速度、推进时间有关, 工作面推进距离如下

$$b = vt \quad (10)$$

式中: b 为工作面推进距离, m; v 为工作面的推进速度, m/d; t 为工作面推进的时间, d。

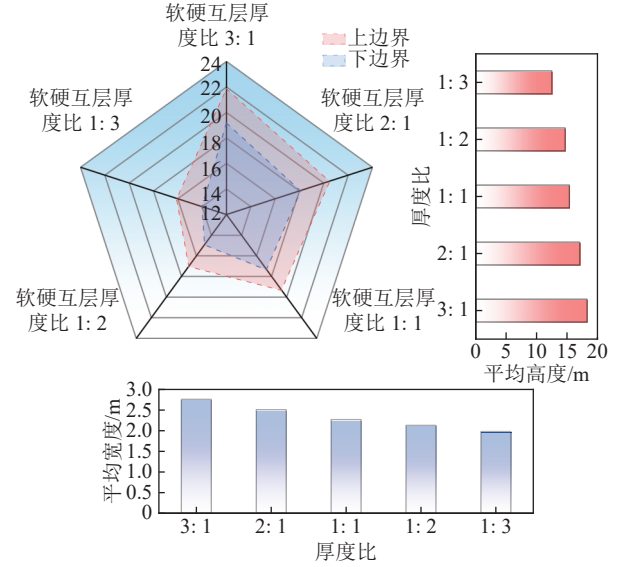


图 10 不同厚度比运-储区交叉融合区域特征

Fig.10 Characteristics of cross fusion area of transportation-storage area under different thickness ratios

通过分析得到, 得到裂隙带发育高度为

$$h_2 = M + \alpha(\beta + 1)h' \quad (11)$$

式中: h_2 为裂隙带高度, m; M 为直接顶厚度, m; α 为硬岩层厚度, m; β 为软硬互层厚度比, m; h' 为岩层厚度, m。

随工作面推进, 上覆岩层不断垮落, 前一周期来压的裂隙带逐渐压实形成压实区, 则压实区最大高度即为前一周期来压时裂隙带最大高度, 则:

$$h_1 = M + (\alpha - 1)(\beta + 1)h' \quad (12)$$

式中: h_1 为压实区发育高度, m。

在直角坐标系中, 可得到椭抛带的数学方程:

$$\begin{cases} \frac{4x^2}{a^2} + \frac{4y^2}{b^2} = -\frac{z-h_{1i}}{h_{1i}} \\ \frac{(2x-A_1+A_2)^2}{(a-A_1-A_2)^2} + \frac{(2y-B_1+B_2)^2}{(b-B_1-B_2)^2} = -\frac{z-h_{2i}}{h_{2i}} \end{cases} \quad (13)$$

构建以软硬互层厚度比、裂隙率和裂隙熵为指

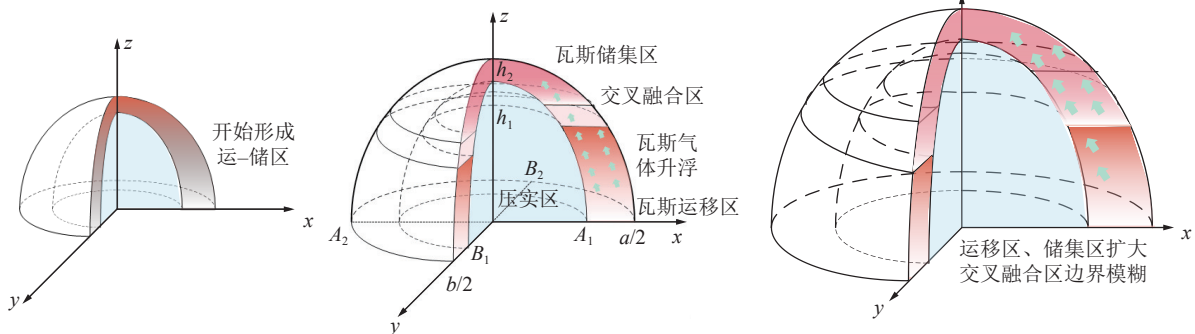


图 11 瓦斯运移区和储集区空间模型

Fig.11 Gas migration zone and reservoir space model ratios

标参数的瓦斯运-储区交叉融合厚度比效应数学

模型:

$$\begin{cases} (R_f \pi)^2 (vt)^4 x^2 + 16 S_f^2 y^2 = -4 S_f^2 (vt)^4 \frac{z - M - (\alpha - 1)(\beta + 1)h'}{M + (\alpha - 1)(\beta + 1)h'} \\ \frac{(2x - L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2)^2}{[4 S_f - R_f \pi vt (L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2)]^2} + \frac{(2y - L_3 \cos \theta_3 + L_4 \cos \theta_4)^2}{[R_f \pi vt (vt - L_3 \cos \theta_3 - L_4 \cos \theta_4)]^2} = -\frac{z - M - \alpha(\beta + 1)h'}{(R_f \pi vt)^2 [M + \alpha(\beta + 1)h']} \end{cases} \quad (14)$$

式中: a 为工作面宽度, m; b 为工作面推进距离, m; K_{i-1} 为第 $i-1$ 层岩层破断碎胀系数; A_1 、 A_2 为内椭抛带与开切眼、工作面的距离, m; B_1 、 B_2 为工作面进、回风巷处内椭抛带与侧帮的距离, m; x 为工作面走向长度, m; z 为断裂带发育高度, m; L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 为开切眼、工作面、进风巷与回风巷上方破断后岩块长

度, m; θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 为开切眼、工作面、进风巷与回风巷垮落岩块的破断角, ($^\circ$)。

3.3.3 软硬互层覆岩结构瓦斯运-储区判断流程

基于上述的软硬互层覆岩结构瓦斯运-储区特征, 对其区域状态进行判定, 判定方法如图 12 所示, 内容如下:

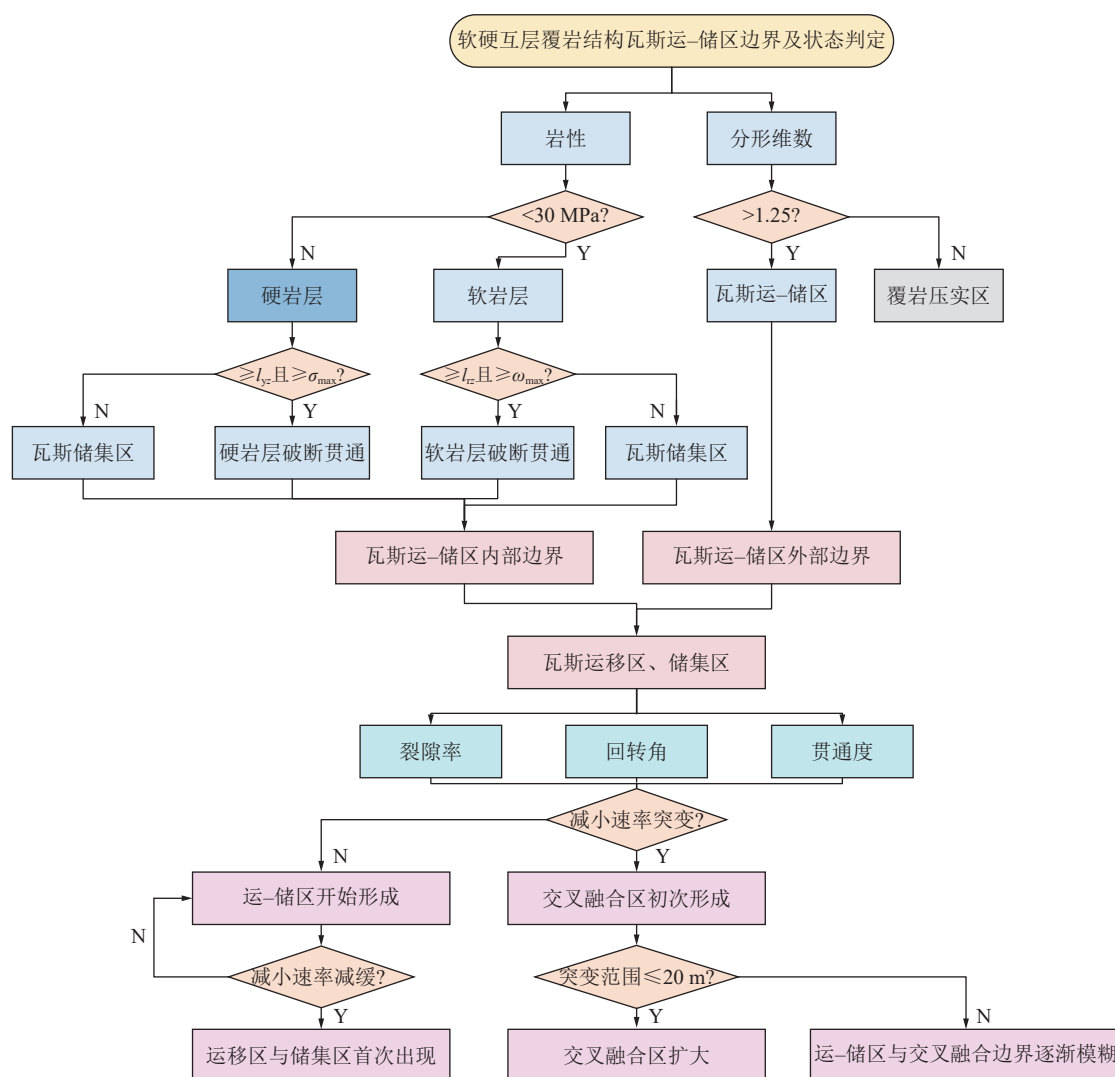


图 12 瓦斯运移区和储集区状态判定流程

Fig.12 Gas migration area and reservoir area state determination process

1) 通过对比覆岩裂隙场的分形维数值的大小。当分形维数值大于 1.25, 同时硬岩层最大拉应力、硬岩层破断时工作面临界开采长度、软弱岩层最大水平拉伸变形值、硬岩层破断时工作面临界开采长度

均大于临界值时, 裂隙开始向上发育, 以此来判断瓦斯运-储区边界。

2) 通过裂隙率、回转角、贯通度的变化情况对瓦斯运移区、储集区边界进行判定, 通过裂隙率、回

转角、贯通度某一阶段的变化情况对交叉融合演化情况进行判断。

采空区上覆软硬互层覆岩结构随工作面推进,裂隙场不断经历发育、闭合,初期裂隙率、回转角、贯通度较小,从运-储区开始到储集区形成,上覆岩体逐渐开始破断贯通,区域内裂隙率与回转角、贯通度急剧增大,而后随着运移区出现,储集区与运移区交界开始交叉融合,当区域内贯通度增大,随之完全破断贯通后形成运移区,随工作面推进向运移区演化,演化过程出现“形成储集区-区域交叉融合-运移区向上扩展”的动态过程,最终形成完整的椭抛带状的裂隙场结构,该区域内裂隙丰富,为瓦斯运移和储集提供场所。通过研究上覆软硬互层覆岩结构卸压瓦斯运移区和储集区交叉融合演化规律,掌握不同厚度比下的软硬互层岩体的瓦斯流向和储集,揭示瓦斯运-储区交叉融合的演化机理,对工程实际中软硬互层覆岩这种特殊地质构造的卸压瓦斯分布和实现瓦斯富集区定向精准抽采具有重要意义。

4 结 论

1)通过二维物理相似模拟试验,得到不同软硬互层厚度比下的软硬互层覆岩裂隙分形维数、下沉量、回转角和贯通度变化特征,发现瓦斯运-储区分形维数值大于1.25。运移区破断回转角大于 2.07° ,储集区破断回转角为 $1^{\circ} \sim 2.07^{\circ}$ 。瓦斯运移区和储集区破断裂隙贯通度分别为 $0.6 \sim 1$ 和 $0.2 \sim 0.6$,同时在贯通度为0.6处移区和储集区开始融合。随软硬互层厚度增大,瓦斯运-储区面积逐渐增大,破断裂隙发育高度的增长速度随软硬互层结构厚度比值的增大而逐渐增大,瓦斯运移通道明显扩大。

2)通过分形维数结合硬岩层最大拉应力、硬岩层破断时工作面临界开采长度、软弱岩层最大水平拉伸变形值、硬岩层破断时工作面临界开采长度均大于临界值时,裂隙开始向上发育,确定瓦斯运-储区边界。根据瓦斯运-储区裂隙率、回转角、贯通度的变化,确定瓦斯运移区、储集区与交叉融合区边界。裂隙率、回转角、贯通度呈现先快速减小,后减小速率明显减缓,最后减小速率再次增大的趋势,经历运-储区开始形成、运移区与储集区首次出现、交叉融合区初次形成、交叉融合区扩大、运-储区与交叉融合边界逐渐模糊5个时期。

3)根据采动覆岩椭抛带理论,研究软硬互层覆岩结构瓦斯运移区和储集区交叉融合动态变化特征受软硬互层结构厚度比的影响,演化过程出现“形成

储集区-区域交叉融合-运移区向上扩展”的动态过程,建立软硬互层覆岩结构瓦斯运-储区厚度比效应量化表征模型,同时根据瓦斯运-储区表征参数确定其边界及状态判定流程,确定软硬互层覆岩结构上覆岩层裂隙演化及破断机制展开研究,为实现软硬互层覆岩结构开采过程中卸压瓦斯定向精准抽采提供理论依据。

参考文献(References):

- [1] 丁恩理,刘越,吴继敏,等. 软硬互层状类岩石试样力学特性的三轴试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(S1): 39-46.
DING Enli, LIU Yue, WU Jimin, et al. Triaxial test study on the mechanical properties of soft-hard interbedded rocklike specimens[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(S1): 39-46.
- [2] 袁亮. 我国煤炭主体能源安全高质量发展的理论技术思考[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 11-22.
YUAN Liang. Theory and technology considerations on high-quality development of coal main energy security in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 11-22.
- [3] 钱鸣高,许家林,王家臣. 再论煤炭的科学开采[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 1-13.
QIAN Minggao, XU Jialin, WANG Jiachen. Further on the sustainable mining of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 1-13.
- [4] 孙钦平,赵群,姜馨淳,等. 新形势下中国煤层气勘探开发前景与对策思考[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 65-76.
SUN Qinpeng, ZHAO Qun, JIANG Xinchun, et al. Prospects and strategies of CBM exploration and development in China under the new situation[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 65-76.
- [5] 赵鹏翔,常泽晨,李树刚,等. 厚煤层采空区定向孔分域抽采研究及应用[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(1): 70-79.
ZHAO Pengxiang, CHANG Zechen, LI Shugang, et al. Research and application of directional drilling sub area extraction in thick coal seam goaf[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(1): 70-79.
- [6] 赵平芳,姚增. 层状结构岩体的复合材料本构模型[J]. 兰州大学学报, 1990, 26(2): 114-118.
ZHAO Pingfang, YAO Zeng. The composite material constitutive model of bedded rocks[J]. Journal of Lanzhou University, 1990, 26(2): 114-118.
- [7] 刘立,梁伟,李月,等. 岩体层面力学特性对层状复合岩体的影响[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(2): 187-191.
LIU Li, LIANG Wei, LI Yue, et al. Influence of mechanical characteristic of bedding surface on stratified composite rock mass[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(2): 187-191.
- [8] 穆成林,裴向军,路军富,等. 基于尖点突变模型巷道层状围岩失稳机制及判据研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(6): 1429-1435.
MU Chenglin, PEI Xiangjun, LU Junfu, et al. Study on the instability criterion of layered rock mass failure based on the cusp cata-

- strophe theory[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(6): 1429–1435.
- [9] 李昂, 邵国建, 苏静波, 等. 软硬互层状岩体的室内单轴压缩试验及数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(6): 533–538.
- LI Ang, SHAO Guojian, SU Jingbo, et al. Uniaxial compression test and numerical simulation for alternatively soft and hard interbedded rock mass[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(6): 533–538.
- [10] 康玉梅, 谷今, 魏梦琦. 不同加载速率下软硬互层类岩石力学及声发射特性[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2023, 44(3): 399–407.
- KANG Yumei, GU Jin, WEI Mengqi. Mechanical properties and acoustic emission characteristics of soft-hard interbedded rocks under different loading rates[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2023, 44(3): 399–407.
- [11] 刘新荣, 何春梅, 刘树林, 等. 高频次微小地震下顺倾软硬互层边坡动力稳定性研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(3): 430–438.
- LIU Xinrong, HE Chunmei, LIU Shulin, et al. Dynamic stability of slopes with interbeddings of soft and hard layers under high-frequency microseisms[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(3): 430–438.
- [12] 陈宇龙, 张宇宁, 李科斌, 等. 单轴压缩下软硬互层岩石破裂过程的离散元数值分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(4): 795–802, 816.
- CHEN Yulong, ZHANG Yuning, LI Kebin, et al. Distinct element numerical analysis of failure process of interlayered rock subjected to uniaxial compression[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(4): 795–802, 816.
- [13] 姚池, 李瑶, 姜清辉, 等. 应力作用下软硬互层岩石破裂过程的细观模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(8): 1542–1551.
- YAO Chi, LI Yao, JIANG Qinghui, et al. Mesoscopic model of failure process of interlayered rock under compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(8): 1542–1551.
- [14] 李杨杨, 朱慧聪, 张士川, 等. 采动诱发的含原生裂隙覆岩运移及涌(淋)水时空信息特征试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 129–139.
- LI Yangyang, ZHU Huicong, ZHANG Shichuan, et al. Study on overlying strata containing primary fractures migration and spatial-temporal characteristics of water gushing (leaching) caused by mining field disturbance[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 129–139.
- [15] 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]. 煤炭学报, 2023, 48(S2): 527–541.
- YU Yihe, MA Liqiang, ZHANG Dongsheng, et al. The mechanism of bedding cracking and development laws of lateral fracture in overlying strata induced by longwall mining[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(S2): 527–541.
- [16] 胡国忠, 李康, 许家林, 等. 覆岩采动裂隙空间形态反演方法及在瓦斯抽采中的应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 750–762.
- HU Guozhong, LI Kang, XU Jialin, et al. Spatial morphology inversion method of mining-induced fractures of overburden and its application in gas drainage[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 750–762.
- [17] 张礼, 齐庆新, 张勇, 等. 采动覆岩裂隙场三维形态特征及其渗透特性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(4): 695–705.
- ZHANG Li, QI Qingxin, ZHANG Yong, et al. Study on three-dimensional shape and permeability of mining-induced fractured field in overburden rock[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(4): 695–705.
- [18] ZHAO P X, ZHUO R S, LI S G, et al. Fractal characteristics of methane migration channels in inclined coal seams[J]. Energy, 2021, 225: 120127.
- [19] 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 mining height evolution law of the dominant channel of gas migration in fully mechanized mining face[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(4): 848–856.
- [20] 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.
- [21] 孟祥军, 赵鹏翔, 王绪友, 等. 大倾角高瓦斯煤层采动覆岩“三带”微震监测及瓦斯抽采效果[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 177–185.
- MENG Xiangjun, ZHAO Pengxiang, WANG Xuyou, et al. “Three zones” microseismic monitoring and analysis of gas drainage effect of overlying strata in gob of high dip high gas seam[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 177–185.
- [22] 蒋金泉, 王普, 郑朋强, 等. 高位硬厚岩层下采动裂隙和支承压应力演化特征及其对瓦斯运移的影响[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(4): 624–631.
- JIANG Jinquan, WANG Pu, ZHENG Pengqiang, et al. Evolution characteristics of mining-induced fracture and abutment stress under high-position hard thick stratum and its effect on gas migration[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(4): 624–631.
- [23] FENG G R, HU S Y, LI Z, et al. Distribution of methane enrichment zone in abandoned coal mine and methane drainage by surface vertical boreholes: A case study from China[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 34: 767–778.
- [24] FENG G R, ZHANG A, HU S Y, et al. A methodology for determining the methane flow space in abandoned mine gobs and its application in methane drainage[J]. Fuel, 2018, 227: 208–217.
- [25] 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.
- [26] 李树刚, 刘李东, 赵鹏翔, 等. 倾斜厚煤层卸压瓦斯靶向区辨识及抽采关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 105-115.
- LI Shugang, LIU Lidong, ZHAO Pengxiang, et al. Key technologies for extraction and identification of gas target area for pressure relief in inclined thick coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 105-115.
- [27] 李树刚, 刘李东, 赵鹏翔, 等. 综采工作面覆岩压区裂隙动态演化规律影响因素分析[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 95-104.
- LI Shugang, LIU Lidong, ZHAO Pengxiang, et al. Analysis and application of fracture evolution law of overburden compacted area on fully-mechanized mining face under multiple factors[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 95-104.
- [28] 李树刚, 徐培耘, 林海飞, 等. 倾斜煤层卸压瓦斯导流抽采技术研究及工程实践[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(5): 1001-1008.
- LI Shugang, XU Peiyun, LIN Haifei, et al. Technology research and engineering practice of pressure-relief gas diversion extraction in inclined coal seams[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(5): 1001-1008.
- [29] 郭文兵, 娄高中, 赵保才. 芦沟煤矿软硬交互覆岩放顶煤开采导水裂缝带高度研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(3): 519-526.
- GUO Wenbing, LOU Gaozhong, ZHAO Baocai. Study on the height of water-conductive fracture zone in alternate overburden of soft and hard with top coal caving mining in Lugou coal mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(3): 519-526.
- [30] 李树刚, 赵波, 赵鹏翔, 等. 煤炭瓦斯固气耦合相似材料瓦斯吸附特性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(3): 634-642.
- LI Shugang, ZHAO Bo, ZHAO Pengxiang, et al. Gas adsorption characteristics of similar materials with solid and gas couple of coal and gas[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(3): 634-642.
- [31] 刘奇, 笪雨欣, 曹广勇, 等. 裂隙发育过程对采动裂隙抛带压实区的影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(5): 25-35.
- LIU Qi, DA Yuxin, CAO Guangyong, et al. Study on the influence of fracture development process on the compaction area of overlying strata in working face[J]. Coal science and Technology, 2024, 52(5): 25-35.
- [32] 侯恩科, 陈育, 车晓阳, 等. 浅埋煤层过沟开采覆岩破坏特征及裂隙演化规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(10): 185-192.
- HOU Enke, CHEN Yu, CHE Xiaoyang, et al. Study on overburden failure characteristics and fracture evolution law of shallow buried coal seam through trench mining[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(10): 185-192.
- [33] 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. Research on through degree of overlying strata fracture fissure induced by mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(1): 45-49.
- [34] 赵鹏翔, 张文进, 李树刚, 等. 高瓦斯厚煤层综采工作面推进速度影响下的瓦斯运-储区交叉融合机理[J]. 煤炭学报, 2023, 48(9): 3405-3419.
- ZHAO Pengxiang, ZHANG Wenjin, LI Shugang, et al. Mechanism of cross-fusion in gas transportation-storage area in fully mechanized mining face of high gas thick coal seam under different advancing speeds[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(9): 3405-3419.
- [35] 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. Spatial and temporal characteristics of overburden fractures due to repeated mining in close distance coal seams[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(2): 255-263.