



倾斜煤层群覆岩“三场”非对称特征及靶向抽采机制

冉启灿 梁运培 邹全乐 张碧川

引用本文:

冉启灿, 梁运培, 邹全乐, 等. 倾斜煤层群覆岩“三场”非对称特征及靶向抽采机制[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 177–192.

RAN Qican, LIANG Yunpei, ZOU Quanle. Asymmetric characteristics of “three-field” in overburden of inclined coal seam groups and target extraction mechanism[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 177–192.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0068>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

倾斜碎软煤层群煤层气协调开发关键技术

Key technologies for coordinated development of coalbed methane in inclined soft coal seam groups: a case study of Aiweigou Mining Area

煤炭科学技术. 2024, 52(1): 211–220 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0005>

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>

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

“Three zones” microseismic monitoring and analysis of gas drainage effect of overlying strata in gob of high dip high gas seam

煤炭科学技术. 2022, 50(1): 177–185 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/0c16bebc-bacd-41d6-873f-420e04616cb5>

深部煤层非充分采动下覆岩裂隙场可视化探测研究

Study on visual exploration of fissure field of overlying strata in deep coal seam under subcritical extraction

煤炭科学技术. 2020, 48(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c499572d-a6e9-4ad2-b404-73729ad60719>

倾斜厚煤层仰斜综采工作面覆岩瓦斯缓渗区分域方法及分形特征研究

Division method and fractal characteristics of overburden gas slow permeability zone in up-dip fully mechanized face of inclined thick coal seam

煤炭科学技术. 2023, 51(S2): 71–83 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1444>

急倾斜煤层瓦斯钻孔有效抽采范围的精准确定

Accurate determination of effective gas extraction range of gas drilling holes in steeply inclined coal seams

煤炭科学技术. 2021, 49(5): 91–99 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/64da211b-2b8c-48a4-9238-0c88bc78c3cf>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

冉启灿, 梁运培, 邹全乐, 等. 倾斜煤层群覆岩“三场”非对称特征及靶向抽采机制[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 177-192.

RAN Qican, LIANG Yunpei, ZOU Quanle, *et al.* Asymmetric characteristics of “three-field” in overburden of inclined coal seam groups and target extraction mechanism[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 177-192.

倾斜煤层群覆岩“三场”非对称特征及靶向抽采机制

冉启灿^{1,2}, 梁运培^{1,2}, 邹全乐^{1,2}, 张碧川³

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆大学 资源与安全学院, 重庆 400044; 3. 太原理工大学 原位改性教育部重点试验室, 山西 太原 030024)

摘要: 倾斜煤层群“三场”(应力场、位移场和裂隙场)演化规律较为复杂, 对卸压瓦斯运移和储集具有重要意义。为了探究倾斜煤层群“三场”演化规律, 研究以新疆 1930 煤矿为对象, 开展了倾斜煤层群多重采动相似模拟实验。分析了上覆岩层垮落形态, 获得了覆岩应力演化特征, 分析了覆岩位移分布和移动方向特征, 阐明了采动裂隙分布特征。进而探究了三场演化规律对瓦斯运移的影响, 并开展了定向钻孔瓦斯抽采现场试验进行验证。研究表明: 倾斜煤层群多重采动下, 采动裂隙矩形梯台呈现明显的非对称特征。低位侧覆岩应力变化较大, 随开采次数增加, 卸压效应更为明显, 而高位侧覆岩应力变化较小; 结合重力-倾角效应, 高位侧覆岩更易破坏, 垮落次序优先, 呈非对称特征。覆岩位移分布呈非对称特征, 高位侧位移显著且移动方向变化较大。高位侧裂隙区网格内采动裂隙频数明显高于低位侧; 高位侧裂隙区破断裂隙分布更多, 且开度较大; 采动裂隙呈“高位扩展-低位压缩”的非对称特征。多重采动使得“三场”非对称特征更为显著。此外, 覆岩贯通度存在“慢速减小-快速减小”的现象。基于“三场”演化特征和瓦斯运移的关系, 揭示了瓦斯抽采靶向优选机制。结合试验结果, 构建了基于“三场”演化规律的裂隙带瓦斯抽采靶点区判定流程。现场瓦斯抽采效果良好, 保证了工作面安全高效回采。研究结果为倾斜煤层群卸压瓦斯精准抽采提供了理论参考, 旨在提高倾斜煤层群瓦斯抽采量, 防止上隅角瓦斯超限, 实现倾斜煤层群安全高效开采。

关键词: 倾斜煤层群; 覆岩移动; 采动裂隙; 非对称特征; 瓦斯抽采

中图分类号: TD713

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)04-0177-16

Asymmetric characteristics of “three-field” in overburden of inclined coal seam groups and target extraction mechanism

RAN Qican^{1,2}, LIANG Yunpei^{1,2}, ZOU Quanle^{1,2}, ZHANG Bichuan³

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. School of Resources and Safety Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Key Laboratory of In-Situ Property-Improving Mining of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The three-field (stress, displacement and fracture field) evolution laws of the inclined coal seam group are complex, which are important for the transport and storage of pressure-relief gas. In order to investigate the three-field evolution law of inclined coal seam group, the study carried out a similar simulation experiment of multiple mining in inclined coal seam group with the 1930 coal mine in Xinjiang as an object. The collapse pattern of the overlying strata was analyzed, the stress evolution characteristics of overlying strata was obtained, the overlying strata displacement distribution and movement direction characteristics were analyzed, and the characteristics of mining-induced fracture distribution were elucidated. The influence of the three-field evolution law on gas migration was further investig-

收稿日期: 2023-12-30

责任编辑: 宫在芹

DOI: 10.12438/cst.2024-0068

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52174166); 国家重点研发计划资助项目 (2022YFC3004704); 重庆市研究生科研创新资助项目 (CYB23031)

作者简介: 冉启灿(1996—), 男, 重庆忠县人, 博士研究生。E-mail: ranqican@126.com

通讯作者: 梁运培(1971—), 男, 山东临沂人, 教授, 博士生导师。E-mail: liangyunpei@cqu.edu.cn

ated, and a directional borehole gas extraction field test was carried out for verification. The study results shown that, the rectangular ladder platform of mining-induced fracture shown obvious asymmetric characteristics under multiple mining of inclined coal seam group. The overlying strata stress of the lower side was more variable, and the pressure-relief effect was more obvious with increasing mining frequency, while the overlying strata stress of the higher side was less variable. Combined with the gravity-dip effect, the overlying strata of the higher side was more prone to be damaged, and the collapse order was preferred with asymmetric characteristics. The displacement distribution of overlying strata was asymmetric, with significant displacement on the high side and large changes in the movement direction. The frequency of mining-induced fractures in the high side fractured area was significantly higher than that in the low side. The high side fracture area had more fracture distribution and fracture aperture was bigger. The mining-induced fractures shown the asymmetric characteristics of “high expansion-low compression”. The multiple mining made the asymmetric characteristics of three-field more significant. In addition, there was a “slow decreasing-fast decreasing” in the overlying strata penetration. Based on the relationship between three-field evolution characteristics and gas migration, the mechanism of preferential gas extraction targeting was revealed. Combined with the experimental results, the process of determining the target area for gas extraction in the fractured zone based on the three-field evolution law was constructed. The gas extraction effect in the field was great, which ensured the safe and efficient recovery of the working face. The results of this study provide a theoretical reference for the accurate extraction of pressure-relief gas in the inclined coal seam group, aiming to improve the gas extraction from the inclined coal seam group, prevent gas overlimit in the upper corner, and achieve safe and efficient mining of the inclined coal seam group.

Key words: inclined coal seam groups; overburden movement; mining-induced fractures; asymmetric characteristics; gas extraction

0 引言

随着煤炭开采强度和深度的不断增加^[1],煤与瓦斯灾害日益严重,制约着矿井安全高效生产^[2-3]。近年来,随着各大矿井近水平煤层群易采煤炭资源趋于枯竭,亟需开采赋存条件复杂的倾斜煤层群^[4]。其中,中国新疆维吾尔自治区的倾斜煤层较多^[5-6]。采动覆岩原岩应力发生改变,覆岩出现垮落、破断和弯曲下沉等现象^[7-8];然而,煤层群开采相较单一煤层开采,覆岩应力、岩层移动、裂隙扩展规律有所不同^[9];且倾斜煤层与近水平煤层区别较大,“三场”(应力场、位移场和裂隙场)演化特征不尽相同。而瓦斯运移富集与“三场”演化规律密切相关,进而影响抽采钻孔位置的精准布置,这对于瓦斯资源利用与煤矿安全生产具有重大意义^[10]。此外,在倾斜煤层生产实践过程中,一般将近水平煤层研究成果作为参考,然而,实际生产实践过程中,两者还是存在较多区别。因此,有必要研究倾斜煤层群“三场”演化规律及其对瓦斯运移的影响。

目前,国内外学者对倾斜煤层三场演化规律已有较多研究^[11]。罗生虎等^[12]研究了大倾角煤层群重复采动下间隔岩层的复杂应力扰动过程,且变形破坏呈非对称特征;来兴平等^[13]开展了覆岩联动致灾物理相似模拟试验,获得了急倾斜煤层覆岩应力“拱-梁”结构特征;此外,LIU等^[14]采用正交试验,阐明了倾斜煤层中各因素对采动应力的影响。针对倾斜煤层覆岩移动特征,高喜才等^[15]研究了变角度工作面覆岩移动特征受倾角的控制作用;解盘石等^[16]基于

相似模拟试验阐明了大倾角伪俯斜采场顶板应力分布与位移具有非对称性,呈“O-X”破断特征,且有强时效性。ZHAO等^[17]以倾角为变量,分析了煤层倾角与采动裂隙分布的关系,进而阐明其对瓦斯运移的影响。综上所述,现有研究大多集中在倾斜煤层单场演化规律,较少考虑“三场”演化规律与瓦斯运移的关系;且目前针对倾斜煤层群“三场”演化及瓦斯运移规律方面的研究仍有待深入,亟需找准钻孔布置位置以实现卸压瓦斯精准抽采。

采动卸压使得瓦斯大量解吸,岩层移动使得覆岩渗透率增加,采动裂隙也为卸压瓦斯储运提供了有利通道。因此,裂隙带是卸压瓦斯抽采的重要区域。针对倾斜煤层群三场演化规律的研究,能够帮助实现卸压瓦斯精准抽采。新疆1930煤矿是典型的倾斜煤层群,在这种地质特征下,“三场”演化规律更为复杂,瓦斯运移富集优势区难以确定。因此,研究以1930煤矿为研究对象,开展了倾斜煤层群多重采动相似模拟试验。获得了上覆岩层垮落特征与应力演化特征,阐明了覆岩位移分布和覆岩移动方向特征,分析了裂隙频数、裂隙角度、裂隙开度分布情况,获得了覆岩贯通度演化特征。进而根据“三场”演化规律,揭示了裂隙带瓦斯抽采靶向优选机制;构建了基于“三场”演化规律的裂隙带瓦斯抽采靶点区判定流程,并开展了定向钻孔瓦斯抽采现场试验进行验证。研究结果为倾斜煤层群卸压瓦斯精准抽采提供了参考,旨在提高倾斜煤层群瓦斯抽采量,防治上隅角瓦斯超限,实现煤矿安全高效开采。

1 试验设备与方法

1.1 工程与试验设备

新疆焦煤集团有限责任公司 1930 煤矿位于新疆艾维尔沟矿区的中西部,距乌鲁木齐市 130 km。图 1 为 1930 煤矿地质柱状图。地层厚度 455.67 ~ 504.89 m,平均厚度 480.28 m。煤层倾角在 18° ~ 38°,平均倾角 30°,属于倾斜煤层。采用煤层群联合开采方式,根据各煤层间距及赋存特征,设计将 1 号、2 号、3 号煤层划分为一个煤组联合开采;4 号、5 号、6 号煤层划分为一个煤组联合开采。目前开采 4 号、5 号、6 号煤层,采煤方法采用综合机械放顶煤进行开采,一次采全高。本次相似模拟试验以 1930 煤矿 24312 工作面为原型,工作面走向长 553 m,倾向长度 173 m。

采用重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室自主研发的卸压开采相似模拟实验系统(图 2),开展倾斜煤层群开采相似模拟试验。该系统主要包括控制模块、材料填充室、倾角调控模块、相似模拟架、高清摄像机、压力监测模块、加载模块和其它附属模块^[18]。该实验系统最大可模拟地层倾斜角度为 70°,最大可施加应力为 0.4 MPa。该实验系统可模拟的尺寸为:长 1 316 mm,宽 50 mm,高 1 262 mm。压力监测模块包含静态电阻应变仪和应变式微型土压力盒传感器,可用于监测覆岩应力演化;微型土压力盒传感器技术指标如下:量程 0 ~ 1 000 kPa,直径 12 mm,厚度 10 mm,准确度误差 ≤ 5 kPa,计算结果采用公式 $P = \mu_\epsilon K$ (P 为压力盒压力值; μ_ϵ 为压力盒应变值, K 为压力盒率定系数)。Trimble FX 三维激光扫描仪能够提供扫描物体表面三维点云数据,可用

界	系	统	组	岩性	柱状	厚度/m
中生界	侏罗系	下侏罗统	八道湾组	粉砂岩	[Symbol]	1.80
				中砂岩	[Symbol]	3.20
				1-1 号煤层	[Symbol]	1.80
				粉砂岩	[Symbol]	1.70
				1-2 号煤层	[Symbol]	1.40
				粉砂岩	[Symbol]	2.00
				粗砂岩	[Symbol]	7.00
				2-1 号煤层	[Symbol]	4.00
				粉砂岩	[Symbol]	3.30
				2-2 号煤层	[Symbol]	3.40
				粉砂岩	[Symbol]	2.50
				中砂岩	[Symbol]	19.60
				粗砂岩	[Symbol]	2.50
				3 号煤层	[Symbol]	1.56
				中砂岩	[Symbol]	3.65
				粗砂岩	[Symbol]	11.70
				砾岩	[Symbol]	1.50
				4 号煤层	[Symbol]	2.81
				泥岩	[Symbol]	2.50
				中砂岩	[Symbol]	4.60
				粗砂岩	[Symbol]	4.10
				中砂岩	[Symbol]	8.60
				粗砂岩	[Symbol]	6.30
				中砂岩	[Symbol]	1.80
				5 号煤层	[Symbol]	5.23
				粉砂岩	[Symbol]	2.50
				中砂岩	[Symbol]	7.00
				砾岩	[Symbol]	3.20
				粗砂岩	[Symbol]	9.10
				6 号煤层	[Symbol]	3.60
				粉砂岩	[Symbol]	4.10
				粗砂岩	[Symbol]	3.90
粗砂岩	[Symbol]	3.60				
砾岩	[Symbol]	4.20				
砂砾岩	[Symbol]	16.20				
7 号煤层	[Symbol]	2.30				

图 1 1930 煤矿地质柱状图

Fig.1 Geologic column map of 1930 Coal Mine

于监测覆岩位移变化;其主要设备参数如下:激光波长 685 nm 红光,激光功率 5 mW,测试技术为相位激光,最大测程 140 m,测量精度 < 0.6 mm。

1.2 相似模型搭建与实验方法

在进行相似模拟实验前,需要以工程实际为参

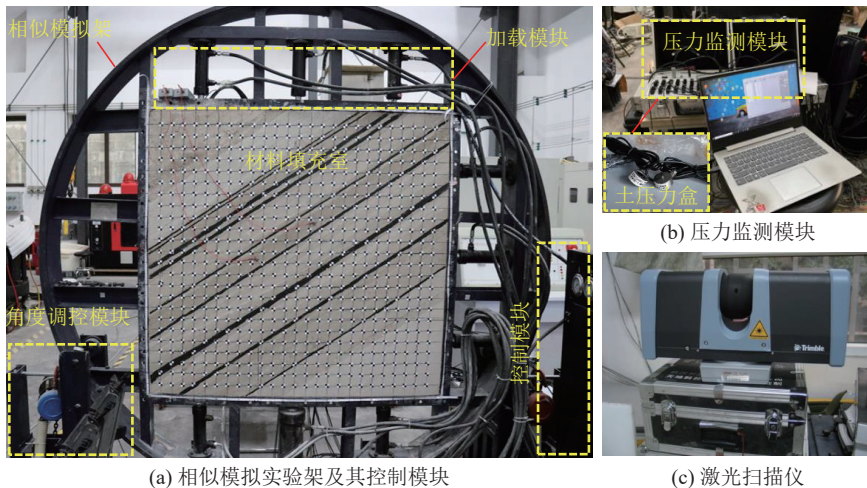


图 2 卸压开采相似模拟实验系统

Fig.2 Pressure relief mining similar simulation experiment system

照,根据相似理论搭建相似模拟模型,要求模型在应力应变、几何形状等同类物理量需按一定比例相似。本研究主要探究煤层群开采对上覆岩层变形破坏的影响;因此,所需考虑的主要参数有:几何尺寸、容重、弹性模量、应力等。根据相似理论,确定相似模型几何相似比为1:200;容重相似比为1:1.5;应力相似比为1:300^[18]。模拟材料以河砂做骨料,以碳酸钙和石膏做胶结料,用云母粉作为分层辅料,模型考虑覆岩自重。物理相似模型各煤岩层通过改变河砂、碳酸钙和石膏的配比得到,具体的配比方案由各煤岩层的强度和模型相似比决定。结合课题组前期对于相似配比确定及相似模拟实验的研究成果^[18],模型各煤岩层材料配比情况见表1。需要注意的是,配比为质量比;其中,6:3:7表示河砂与胶结料的质量比为6:1,胶结料中碳酸钙与石膏的质量为3:7。

铺设完成的相似模型及监测点布置如图3所示。为了获得覆岩应力演化规律,在2-2号煤层底板的粉砂岩层位(序号12)布置了9个应力监测点,应力监测点编号从左至右依次为2-1~2-9。为了监测覆岩位移变化情况,在相似模型表面布置位移监测点。一共布置了24层位移监测点,每层布置25个监测点,合计600个位移监测点,相邻监测点的间距为50 mm×50 mm。相似模型煤层开采顺序为4号煤层→5号煤层→6号煤层;其中,煤层开采尺寸为900 mm。第1次开采4号煤层记为M1,第2次开采5号煤层记为M2,第3次开采6号煤层记为M3。每层煤层开采后,采用高清摄像机进行拍照记录,以便探究采动裂隙演化规律。

2 结果与分析

2.1 上覆岩层垮落形态

随着工作面推进,上覆岩层会形成垮落带、裂隙带和弯曲下沉带。同时,在采空区中部形成了压实区,在两侧形成了裂隙区,两者共同构成了采动裂隙矩形梯台。采动裂隙矩形梯台能够初步判定采动影响范围,是后续分析的基础。

图4展示了倾斜煤层群多重采动下上覆岩层垮落形态。如图4a所示,单次采动后,采空区中部上覆岩层不断垮落,离层裂隙基本被压实形成压实区,同时在两侧形成一定张开度的裂隙区;采动裂隙矩形梯台呈现明显的非对称特征。如图4b、图4c所示,随着开采次数增加,采动裂隙矩形梯台向四周扩展,裂隙区与压实区面积均增大。此外,第1次开采、第2次开采、第3次开采的左侧裂隙区的断裂角分

表1 相似材料比例和铺设顺序

Table 1 Similarity material ratio and laying sequence

序号	岩性	模型厚度/cm	相似材料配比	相似材料质量/kg
1	覆岩	42.32	3:4:6	31.64
2	粉砂岩	0.90	4:3:7	1.36
3	中砂岩	1.60	4:3:7	2.49
4	1-1号煤层	0.90	8:7:3	1.44
5	粉砂岩	0.85	5:3:7	1.39
6	1-2号煤层	0.70	8:7:3	1.16
7	粉砂岩	1.00	5:3:7	1.69
8	粗砂岩	3.50	6:3:7	6.19
9	2-1号煤层	2.00	8:7:3	3.73
10	粉砂岩	1.65	5:3:7	3.18
11	2-2号煤层	1.70	8:7:3	3.38
12	粉砂岩	1.25	5:3:7	2.55
13	中砂岩	9.80	6:7:3	21.81
14	粗砂岩	1.25	7:3:7	2.91
15	3号煤层	0.78	8:7:3	1.81
16	中砂岩	1.83	5:5:5	4.24
17	粗砂岩	5.85	6:3:7	13.60
18	砾岩	0.75	7:7:3	1.74
19	4号煤层	1.40	8:7:3	3.27
20	泥岩	1.25	6:3:7	2.91
21	中砂岩	2.30	6:7:3	5.35
22	粗砂岩	2.05	4.5:3:7	4.77
23	中砂岩	4.30	5:5:5	10.00
24	粗砂岩	3.15	4.5:3:7	7.32
25	中砂岩	0.90	7:3:7	2.09
26	5号煤层	2.62	8:7:3	6.08
27	粉砂岩	1.25	6:3:7	2.91
28	中砂岩	3.50	6:7:3	8.14
29	砾岩	1.60	7:7:3	3.72
30	粗砂岩	4.55	4.5:3:7	10.58
31	6号煤层	1.80	8:7:3	4.18
32	粉砂岩	2.05	5:3:7	4.69
33	粗砂岩	1.95	6:3:7	4.33
34	粗砂岩	1.80	6:3:7	3.87
35	砾岩	2.10	7:7:3	4.37
36	砂砾岩	8.10	7:3:7	15.41
37	7号煤层	1.15	8:7:3	2.00
38	覆岩	48.65	3:4:6	41.81

别为52.3°,52.8°,57.8°;右侧裂隙区的断裂角分别为55.2°,63.5°,70.3°。两侧断裂角的差异性体现了采动裂隙矩形梯台的非对称特征。

2.2 覆岩应力演化特征

倾斜煤层群多重采动下覆岩应力演化特征如图5所示。其中,由于压力盒故障,编号为2-1、2-5和2-6的3个应力监测点数据无法使用。如图5a所示,采动作用下,覆岩受到循环加卸载形式的荷载作用,并随之发生变化。在开采阶段,应力变化显著;在停采期,大部分监测点应力数值没有显著的变化。图5b展示了煤层开采后稳定时刻不同位置覆岩应力演化规律。在2-2监测点位置,随着煤层开采次数增加,应力随之增加,但第3次开采导致的增压效果较低。在其余位置(2-4、2-8等),应力大多随着开采

次数增加而卸压;此外,还可发现低位侧覆岩应力变化较大,而高位侧覆岩应力变化较小;随开采次数增加,左侧低位侧卸压效应更为明显。这表明覆岩层位与开采煤层越近^[19],受多重采动叠加的影响就越大。因此,结合原岩应力及压力盒得出的应力变化,可以发现在高位侧与低位侧两端头区域应力集中。同时,由于重力-倾角效应^[20]显著,高位侧覆岩更易破坏,垮落次序优先,呈非对称特征^[21]。

根据相似模拟实验结果,分析倾斜煤层直接顶受力情况,力学模型如图6所示。

沿工作面倾斜方向上,直接顶垮落前可看成为两端固支的岩梁,该岩梁所受最大弯矩和最大拉应力^[4]如式(1)所示:

$$\begin{cases} M_{\max} = -\frac{1}{12}q\cos\alpha L^2 \\ \sigma_{\max} = \frac{qL^2\cos\alpha}{2(\sum h_i)^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: M_{\max} 为岩梁的最大弯矩; q 为上覆岩层及本岩层自重所产生的载荷; L 为岩梁长度; α 为煤层倾角; σ_{\max} 为弯矩所产生的最大拉应力; $\sum h_i$ 为直接顶各岩层厚度之和; i 为直接顶上方岩层序号。

当直接顶所受到的最大拉应力达到该岩梁的抗拉强度极限时,两端发生拉破坏,由此可知直接顶沿煤层倾斜方向上破断的极限岩梁跨距^[4]。

$$L_{\max} = \sum h_i \sqrt{\frac{2R_t}{q\cos\alpha}} \quad (2)$$

式中: L_{\max} 为直接顶岩梁破断的极限岩梁跨距; R_t 为直接顶岩梁极限抗拉强度。

在工作面上下端头处,岩梁所受上覆岩层载荷不同,导致上下端头处直接顶岩梁极限破断跨距以及垮落次序不同,即上端头岩梁破断跨距较大,并且

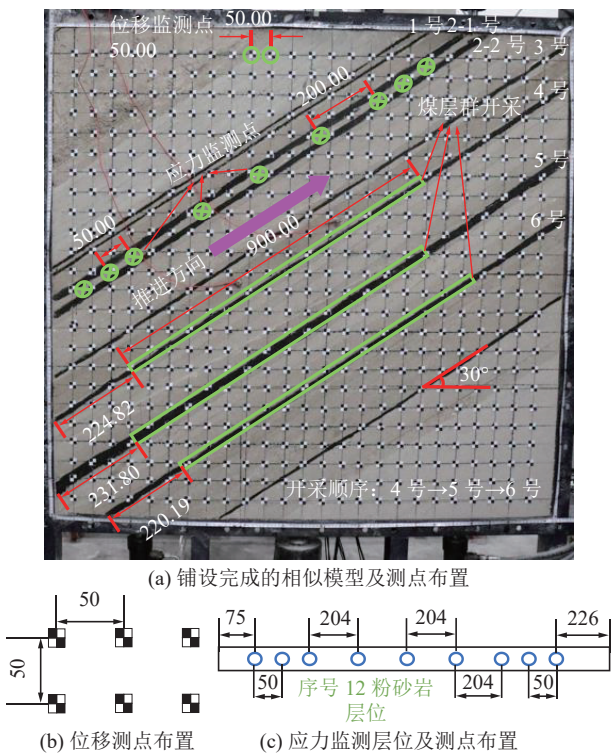


图3 相似模型及监测点布置

Fig.3 Similar models and monitoring point placement

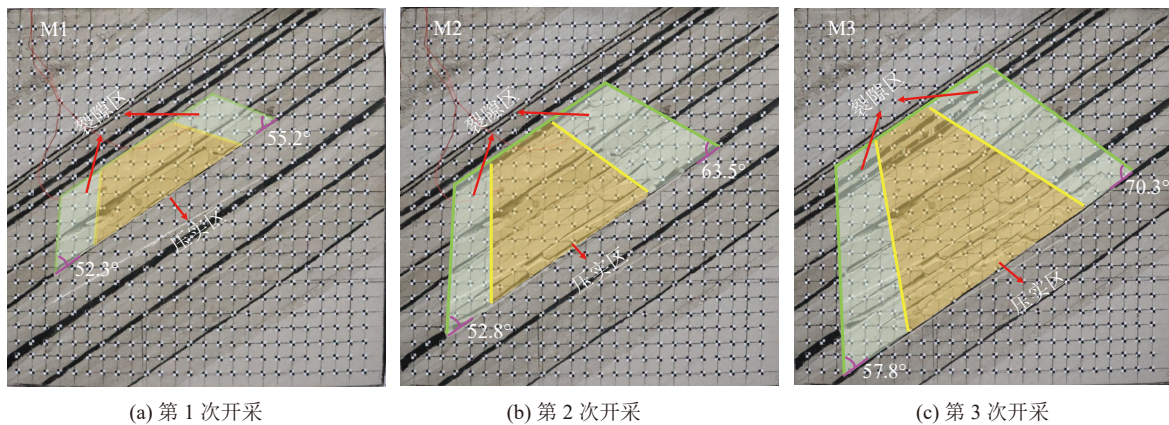


图4 倾斜煤层群多重采动下覆岩垮落形态

Fig.4 Overlying strata collapse patterns under multiple mining in inclined coal seam groups

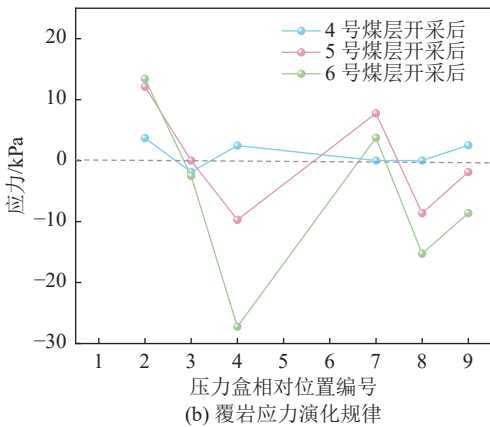
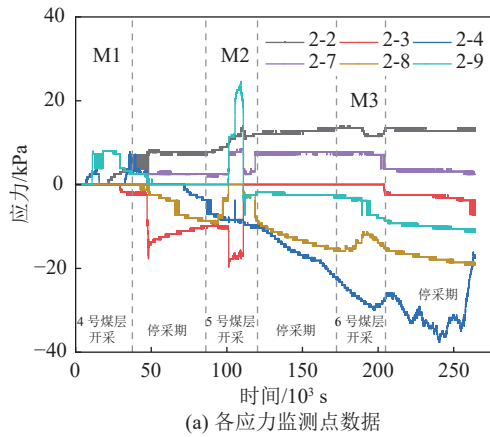


图5 倾斜煤层群多重采动下覆岩应力演化特征

Fig.5 Stress evolution characteristics of overburden rocks under multiple mining in inclined coal seam groups

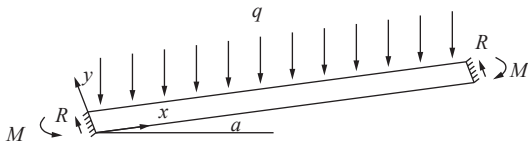
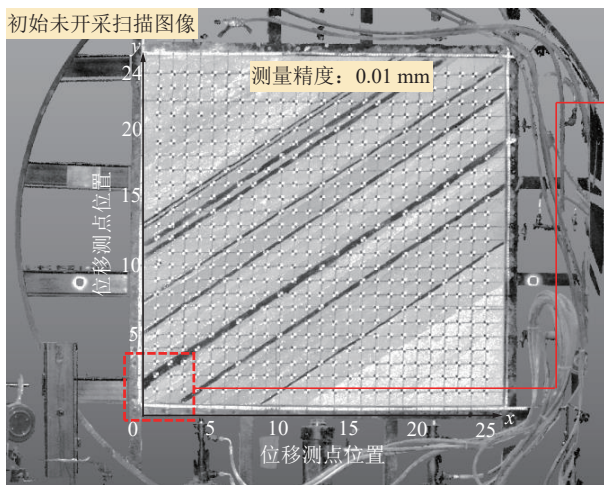
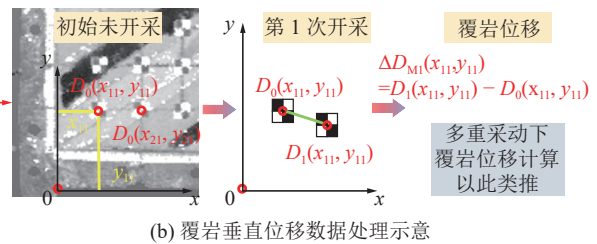


图6 倾斜煤层直接顶岩梁模型^[4]

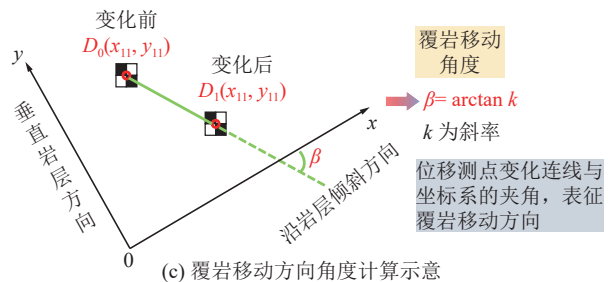
Fig.6 Model of directly roof in inclined coal seam^[4]



(a) Trimble 软件处理相似模型三维扫描数据



(b) 覆岩垂直位移数据处理示意



(c) 覆岩移动方向角度计算示意

图7 覆岩移动数据观测与处理方法

Fig.7 Overburden movement data observation and processing method

垮落次序优先于下端头。根据相似模拟与受力分析结果可知,受煤层开采后矿山压力分布具有不对称性的影响,倾斜煤层基本顶倾向不同位置垮落破断距离以及垮落次序的不同,导致了倾斜煤层采空区上覆岩层的位移和裂隙分布同样呈非对称特征。开采次数增加,应力非对称特征将更为明显。

覆岩不同位置或增压或卸压,改变了覆岩物理力学性质,进而影响覆岩移动和采动裂隙特征,最终影响卸压瓦斯运移富集^[21]。

2.3 覆岩位移分布特征

2.3.1 覆岩移动数据观测与处理

如图7a所示,为了保证相似模拟实验中覆岩位移数据的准确性,采用位移监测仪器配套软件 Trimble 进行位移数据处理,测量精度为 0.01 mm。如图7b所示,建立直角坐标系,对实验图像进行位移数据处理;其中,为了直观展示覆岩移动特征,定义垂直位移则是位移监测点在 y 方向上的移动距离^[22]。如图7c所示,为了获得采动后覆岩变形破坏的方向特征^[23],以垂直岩层方向和沿岩层倾斜方向构建坐标系,定义开采前、后的位移监测点形成的直线与坐标系所成角度(β)为覆岩移动方向角度,范围 -180°~ 0°。其可通过获得直线与坐标系的斜率,再通过反三角函数计算获得覆岩移动角度。

2.3.2 覆岩位移分布

图8展示了倾斜煤层群多重采动下覆岩垂直位移分布演化特征。M1条件下,采动影响范围较小,M2和M3条件下,采动影响范围逐步增大。且M1、M2和M3条件下,垂直位移变化大多分别集中在 -6.00、-10.00、-16.00 mm 左右,最大垂直位移分别

为-14.21、-21.83、-31.65 mm。倾斜煤层群多重采动下覆岩最大垂直位移同样存在于裂隙区两侧，且高位侧更显著，非对称特征明显。相比于M1条件，M2条件下垂直位移显著区域出现小幅扩展现象，但M3条件下覆岩高位侧垂直位移显著区域大幅增加。这表明了重复采动(M2)对覆岩位移影响较小，而多

重采动(M3)对覆岩影响较大。由于多重采动的影响，裂隙区高位侧垂直位移显著区域不断扩展，尤其是4号煤层上部区域。此外，从M2到M3，裂隙区低位侧位移显著区域看似缩减了，实则还是略微扩展了；因为相较于高位侧，低位侧垂直位移相对较小，显得区域减少了。

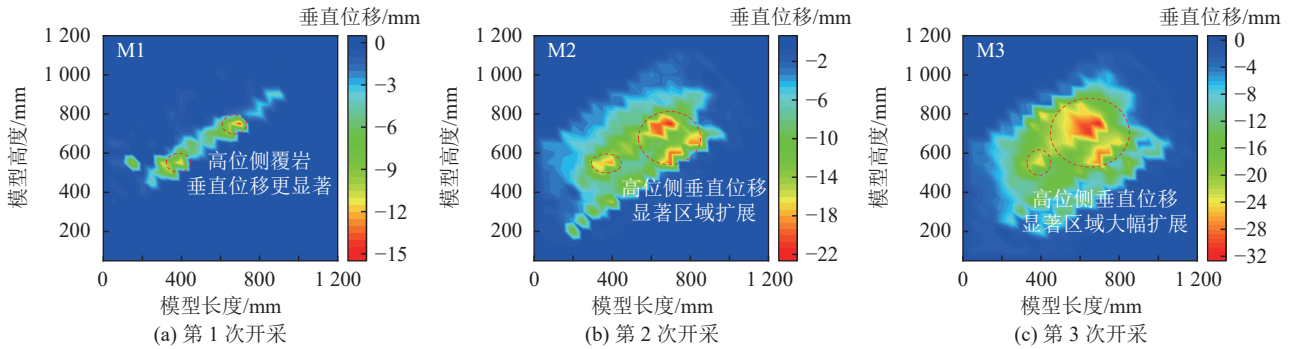


图8 倾斜煤层群多重采动下覆岩垂直位移分布特征

Fig.8 Characteristics of overburden displacement distribution under multiple mining in inclined coal seam groups

随开采层数增加，采动扰动范围扩大；多重采动下，除开采煤层顶板的位移急剧增大外，也诱发了上部煤层顶板的大范围移动，特别是4号煤层顶板。多重采动使得上覆岩层层间滑动、错动，致使采动扰动范围增大，顶板岩层运动更为剧烈。

2.3.3 覆岩移动方向特征

为了准确描述倾斜煤层群多重采动下覆岩移动方向特征，分析了采动扰动导致的每个位移监测点运动方向的变化。倾斜煤层群多重采动下覆岩移动方向特征，如图9所示。

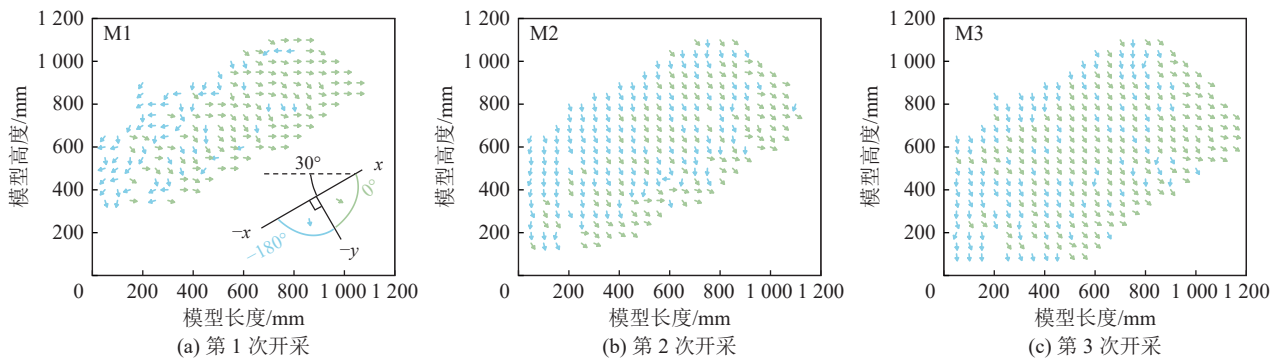


图9 倾斜煤层群多重采动下覆岩移动方向变化

Fig.9 Change of overburden movement direction under multiple mining in inclined coal seam groups

如图9a所示，倾斜煤层开采后，覆岩移动方向呈现明显的分区特征。低位侧覆岩位移方向较杂乱，但主体方向仍为沿煤层倾斜向下，移动方向角度主要在 $-180^\circ \sim -90^\circ$ 范围变化。高位侧覆岩位移方向主要以垂直煤层方向运动为主，移动方向角度主要在 -30° 左右。如图9b所示，第2次开采后，覆岩移动方向分区特征更为明显。低位侧覆岩移动方向角度主要在 $-120^\circ \sim -90^\circ$ 范围变化，而高位侧覆岩移动方向角度主要在 $-90^\circ \sim -60^\circ$ 范围变化。如图9c所示，第3次开采后，移动方向分区特征更为显著，低位侧

移动方向主要以沿煤层方向倾斜向下的运动为主。高位侧移动方向角度主要在 -60° 左右；主要以垂直煤层方向运动为主。倾斜煤层开采，直接顶破断、下滑，在倾斜下部区域充填；这导致了裂隙区低位侧覆岩位移相对较小，移动方向变化较小，而高位侧覆岩位移相对较大，移动方向变化较大。多重采动加剧了这种非对称分区特征。

结合采动影响下岩层移动预测模型，探究位移场对瓦斯运移的影响。地层中任意一点的下沉及水平移动量^[24]，如式(3)所示：

$$\begin{cases} S(x,i) = \frac{a_i}{R_i} \int_{d_{i-1}-x}^{W-d_{2i}-x} S(x',z_{i-1}) e^{-\pi \left(\frac{x'}{R_i}\right)^2} dx' \\ U(x,i) = -2\pi \frac{a_i n}{R_i h} \int_{d_{i-1}-x}^{W-d_{2i}-x} S(x',z_{i-1}) x' e^{-\pi \left(\frac{x'}{R_i}\right)^2} dx' \end{cases} \quad (3)$$

式中： x 为水平方向距离； x' 为地表预计点与地下开采单元点之间的水平距离， $S(x',z_{i-1})$ 为 x' 处，上层（第 $i-1$ 层）下沉量； a_i 为第 i 层岩体的下沉系数； R_i 为第 i 层岩体受到采动影响的影响半径值； h 为工作面埋深； W 为工作面长度； d_i 为第 i 层岩层的拐点偏移距，记左右两侧的岩层 i 的拐点偏移距为 d_{i1} 和 d_{i2} ； n 为第 n 层岩层，煤层上方至地表总共 n 层岩层。

采动作用下岩层各点的垂直位移和水平位移不同，点与点之间存在相对的移动，覆岩变形发生。二维情况下，采动覆岩的面应变 $\varepsilon_t(x,z)$ 可以认为是二维面应变，计算公式^[24]如式(4)、(5)所示。

$$\begin{cases} \varepsilon_x(x,z) = \frac{dU(x,z)}{dx} \\ \varepsilon_z(x,z) = -\frac{dS(x,z)}{dz} \end{cases} \quad (4)$$

$$\varepsilon_t(x,z) = \varepsilon_x(x,z) + \varepsilon_z(x,z) + \varepsilon_x(x,z)\varepsilon_z(x,z) \quad (5)$$

忽略煤岩体的微弱本体变形，可得采动覆岩的孔隙率，计算公式如式(6)所示：

$$\begin{cases} \varphi_0 = \frac{V_{p0}}{V_{b0}} \\ \varphi = 1 - \frac{(1-\varphi_0)}{1+\varepsilon_t} = \frac{\varphi_0 + \varepsilon_t}{1+\varepsilon_t} \end{cases} \quad (6)$$

式中： φ_0 为原始孔隙率； φ 为采动作用下覆岩孔隙率； V_{b0} 为多孔介质外观体积； V_{p0} 为多孔介质孔隙体积。

结合 Kozeny-Carman 方程，得到渗透率与面应变的关系。对特定结构的煤岩体而言，在其应力应变的过程中，介质颗粒的总表面积近似认为不变。采动后覆岩新渗透率和原始渗透率之比^[24]如式(7)

所示。

$$\begin{cases} K_0 = \frac{\varphi_0^3}{K_c \sum s_0^2} \\ \frac{K}{K_0} = \left(\frac{1 + \varepsilon_t}{1 + \varepsilon_t} \right)^3 \end{cases} \quad (7)$$

式中： K 为采动作用下覆岩渗透率； K_0 为覆岩原始渗透率； K_c 为常数； $\sum s_0$ 为单位体积的多孔介质中孔隙表面积。

岩层移动的位移数据变化导致面应变改变，进而影响孔隙率变化；而渗透率则会随孔隙率而变化，影响上覆岩层瓦斯流动特征。倾斜煤层群开采下岩层移动呈非对称特征，位移显著的区域导致了岩层的渗透率增加，进而影响瓦斯流动。

采动裂隙为瓦斯的运移和富集提供了潜在通道；然而，煤岩体渗透率是反映煤岩体内瓦斯渗透运移难易程度的重要因素。因此，通过位移分布反映渗透率变化，进而结合下文对采动裂隙分布的研究，两者结合可以更准确地判断出瓦斯的主要运移通道和富集区间。

2.4 采动裂隙参数量化分析

2.4.1 采动裂隙参数统计

为了研究采动裂隙矩形梯台区域内的瓦斯运移与富集，选择开采完成的图像作为研究对象，分析采动裂隙分布特征。采用图像划分网格的方法，以所得的原始图像为基础，对图像中采动裂隙进行统计分析处理。在保证每张图像研究区域与网格对应一致的前提下，划分的网格单元长度和宽度分别为15 cm和10 cm(图10)。图10中的A、B和C分别指第1次开采(M1)、第2次开采(M2)和第3次开采(M3)。在统计裂隙参数时，在每个网格单元中记录采动裂隙的频数、角度和开度。低位侧裂隙区主要

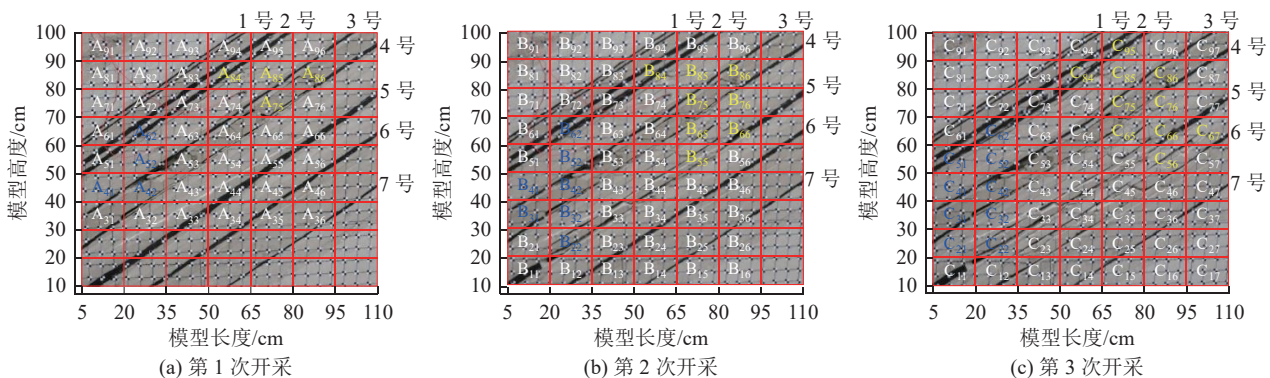


图10 基于图像划分网格法的采动裂隙参数统计^[25]

Fig.10 Statistics of mining-induced fracture parameters based on image division grid method^[25]

分布于图9中蓝色标记的网格，高位侧裂隙区主要分布于黄色标记的网格。

此外，为了更好地获得采动裂隙角度分布特征，将可见的采动裂隙简化为理想椭圆形，裂隙中轴线与坐标原点的夹角记为该条裂隙的角度，如图11a所示。坐标轴的x轴平行于网格线，裂隙角度范围

为0°~180°。如图11b所示，采用玫瑰图展示裂隙角度分布情况。玫瑰图中角度30°的区间表示裂隙角度范围为25°~35°，横坐标表示角度区间的裂隙频数；其中，裂隙数量大于5，将直接以数字形式展示。在30°区间的裂隙主要为离层裂隙，在100°~170°区间的裂隙主要为破断裂隙。

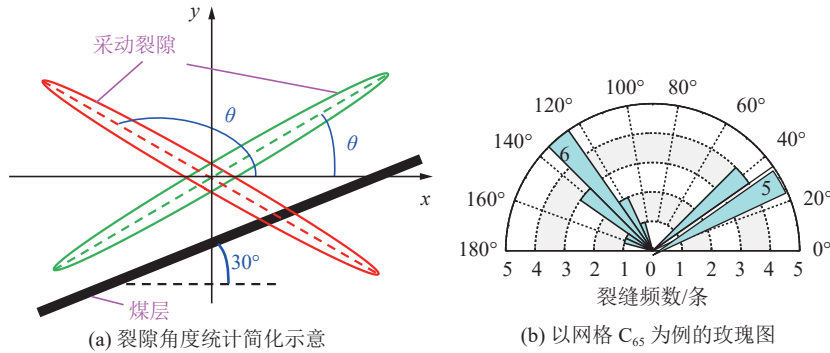


图11 采动裂隙角度统计方法^[26]

Fig.11 Mining-induced fracture angle statistics method^[26]

2.4.2 裂隙频数分布特征

裂隙频数反映的是裂隙密度特征，同时也反映瓦斯流动通道的数目。图12展示了倾斜煤层群多重采动下裂隙频数分布特征。“--”表示该网格不存在采动裂隙。由图11可知，随着开采次数增加，裂隙频数随之增多，更多的网格内包含采动裂隙；三次开采下低位侧裂隙频数分别为11、33、68条，高位侧裂隙频数分别为18、84、114条。不难发现，裂隙区高位侧裂隙频数增幅变大。此外，裂隙区采动裂隙发育程度高，且裂隙区高位侧采动裂隙频数分布更多，呈现非对称特征；这种现象随着开采次数增加而逐渐加剧。同时，这也符合采动裂隙矩形梯台的非

对称特征。采动作用下，煤层上部关键层破断，结合重力-倾角效应^[23]，导致了采动裂隙频数分布的非对称特征；且随着开采次数增加，重力-倾角效应加剧，非对称特征更为明显。M1、M2、M3条件下采动裂隙总频数分别为73、203、407条。第2次采动下裂隙频数相较第1次采动增加了130条，而第3次采动相较第2次采动而言裂隙频数增加了204条。可以发现，第2次采动下，采动裂隙频数小幅增；第3次采动下，裂隙频数大幅增加。这表明了第1次开采下的覆岩裂隙对第2次开采下的裂隙发育起到了缓冲效应^[27]，而第3次开采则打破了缓冲效应，导致裂隙发育程度大增。

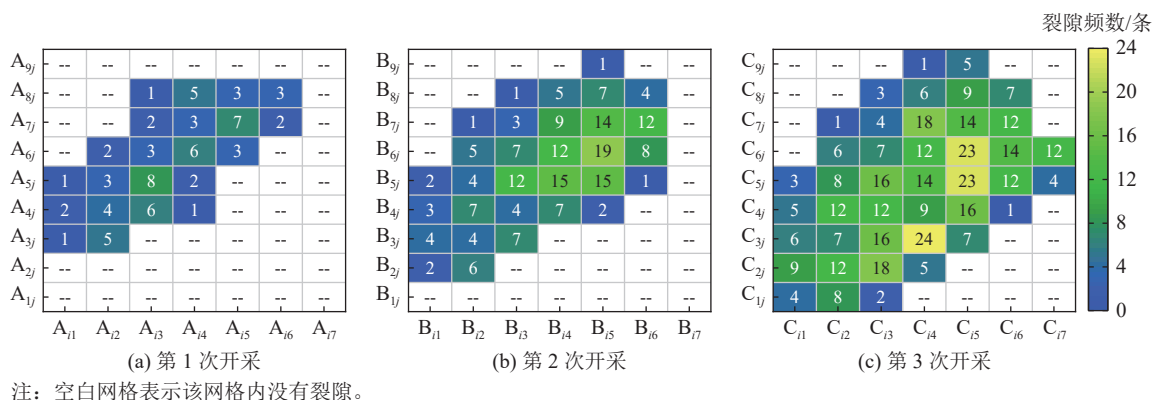


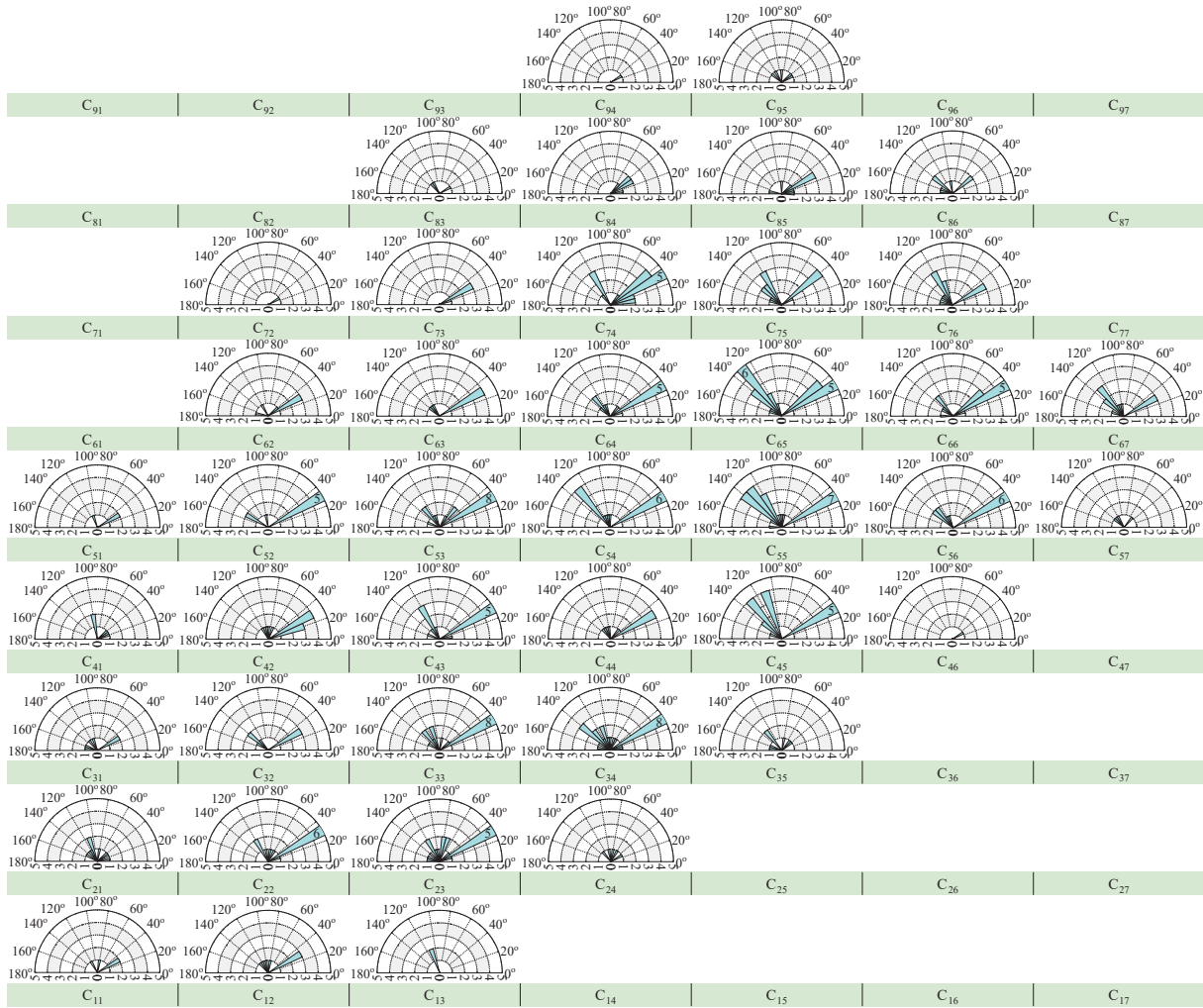
图12 倾斜煤层群多重采动下裂隙频数分布特征

Fig.12 Characteristics of mining-induced fracture frequency distribution under multiple mining in inclined coal seam groups

2.4.3 裂隙角度占比特征

采动裂隙角度能够反映瓦斯流动通道的方向性。

由于文章篇幅原因，本研究仅展示第3次开采下采动裂隙角度分布特征(图13)。由图13可知，裂隙角



注：空白网格表示该网格内没有采动裂隙；横坐标为裂缝频数，条。

图 13 第 3 次开采下采动裂隙角度区间分布特征

Fig.13 Characteristics of interval distribution of mining-induced fracture angle under the third mining

度范围区间主要包括 30°~40°和 90°~140°。这说明了采动裂隙主要由离层裂隙和破断裂隙组成。离层裂隙主要分布在压实区，而破断裂隙主要分布在裂隙区，尤其是高位侧。这主要是因为煤层倾角大，高位侧裂隙区垂直应力较小，在采动卸压作用下易形成倾向堆砌结构和空洞^[25]，覆岩垮落破断严重，形成的破断裂隙更多。图 14 展示了采动裂隙角度区间的占比分布。随着开采次数的增加，30°区间的离层裂隙占比逐渐下降(75%→40%→34%)，100°~170°角度区间的破断裂隙和其余角度区间裂隙的占比逐渐上升(13%→43%→45%)。这说明，多重采动后，采动影响范围明显增加，原先已破断的岩层再次发生下沉和破断，原先未受到采动扰动的岩层也将发生下沉、破断，从而导致破断裂隙占比不断扩大。随着开采次数增加，采动裂隙不断发育，为瓦斯的流动和富集提供了通道。

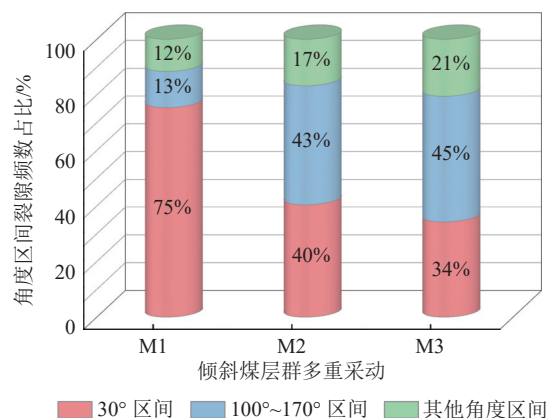


图 14 裂隙角度占比分布

Fig.14 Distribution of fracture angle percentage

2.4.4 裂隙开度分布及贯通度特征

裂隙开度是反映裂隙形态的重要参数之一，它能影响瓦斯的流动速度。图 15 展示了倾斜煤层群采动裂隙开度的分布特征。将 0~2 mm、2~5 mm

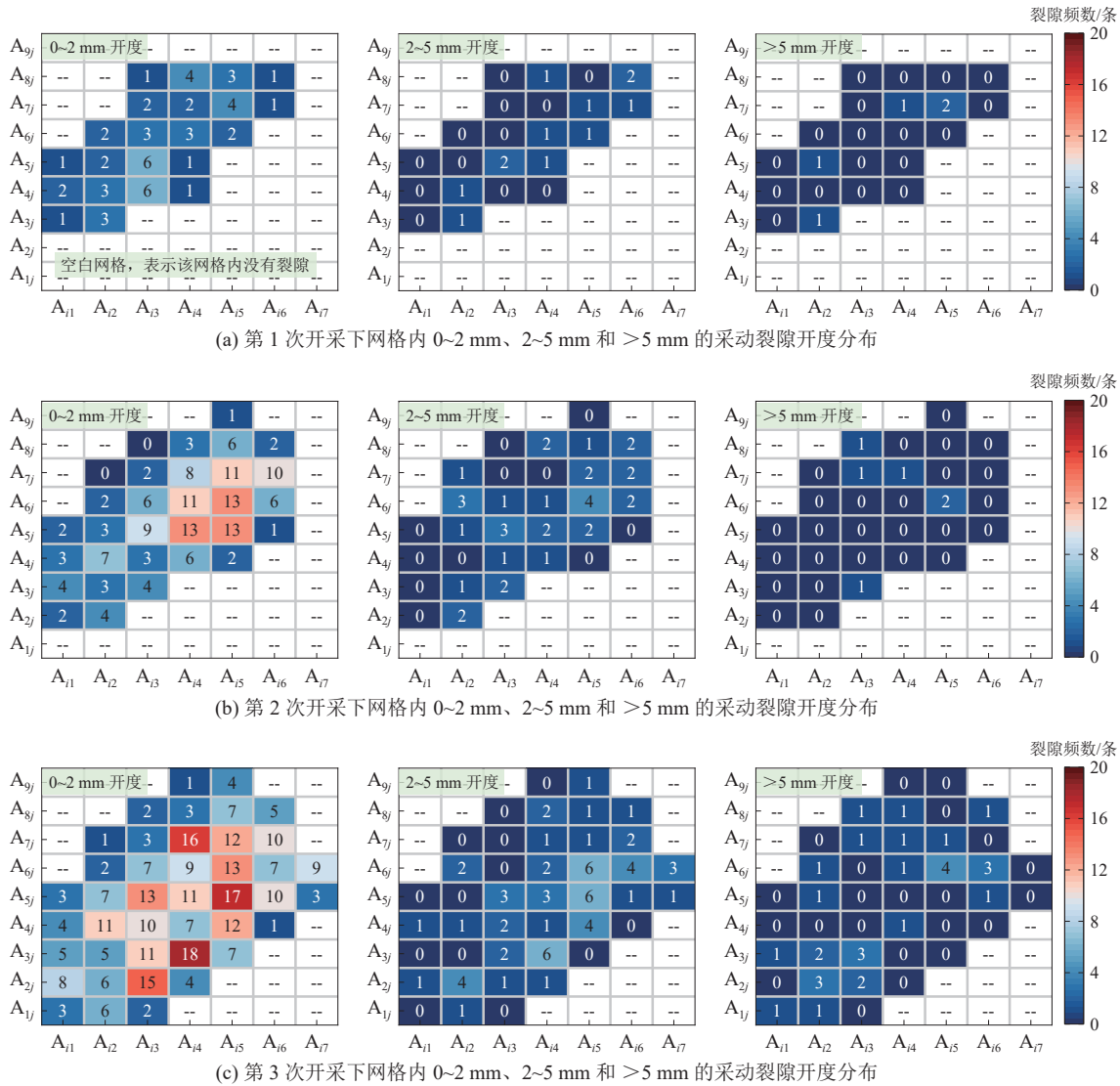


图 15 倾斜煤层群采动裂隙开度的分布特征

Fig.15 Distribution characteristics of mining-induced fracture aperture in inclined coal seam groups

和>5 mm 开度的裂隙分别定义为小裂隙、中裂隙和大裂隙。“0”表示该网格不存在某个开度范围的裂隙。

由图 15a 可知，第 1 次开采下，小裂隙数量较多（54 条），占总裂隙数量的 76.06%；而中、大裂隙数量较少（分别为 12 条、5 条），分别占总裂隙数量的 16.90%、7.04%，且主要分布在裂隙区两侧。如图 15b 所示，第 2 次开采下，采动裂隙逐渐发育，小裂隙大幅增加，数量达到 160 条，占比为 79.21%，且主要分布在压实区；中、大裂隙少量增加，主要分布在裂隙区两侧，高位侧显著。如图 15c 所示，第 3 次开采下，压实区小裂隙数量达到最大 310 条，裂隙区中、大裂隙也出现了小幅增加，数量分别为 65 条、31 条，占比分别为 16.01%、7.64%。中、大裂隙数量呈现高位侧多—低位侧少的非对称特征。在裂隙区

高位侧，应力恢复对裂隙的闭合作用较小，裂隙开度较大；而压实区与裂隙区低位侧，在采动应力恢复作用下裂隙被重新压实，采动裂隙开度较小；这表明了倾斜煤层群多重采动下，裂隙开度呈现“低位压缩—高位扩展”的非对称特征。此外，小裂隙约占全部裂隙的 80%，然而，随着开采次数增加，中、大裂隙占比略微增长，裂隙区高位侧更为显著。由于流速对裂隙开度十分敏感。因此，可以初步确定，瓦斯流动主要区域在采动裂隙矩形梯台的裂隙区高位侧。

此外，上覆岩层的断裂特征，对瓦斯运移同样有着重大影响。上覆岩层受岩性、埋深及关键层的影响，产生的破断裂隙是有所差异的。而破断裂隙对瓦斯向上运移起着影响作用。因此，为了定量描述瓦斯在上覆岩层中向上运移的强弱程度，采用贯通度表征^[28]，如式(8)所示：

$$T_i = \frac{a_i}{h_i} \quad (8)$$

式中: T_i 为第 i 层覆岩贯通度; a_i 为第 i 层覆岩厚度; h_i 为第 i 层破断裂隙长度。

图16展示了不同开采次数下贯通度的变化曲线。由图16可知,4号煤层顶板区域(I),5号煤层顶板区域(II),6号煤层顶板区域(III),均存在贯通度“慢速减小—快速减小”的现象。这是因为当覆岩与煤层顶板间隔距离较小时,覆岩垮落破坏程度较大,破断裂隙贯穿整个岩层,贯通度大。随着间距的增大,上覆岩层向下垮落的空间急剧减小,岩层垮落破碎程度减小。此时,岩层之间形成了较大的离层裂隙,而破断裂隙在覆岩厚度方向上的长度减小,这导致了贯通度快速减小。这种现象在关键层垮落后更为显著。此外,随着开采次数的增加,贯通度越大。同时,不难发现,贯通度在垮落带最大,在裂隙带次之,在弯曲下沉带最小。这意味着卸压瓦斯在垮落带、裂隙带向上运移,在弯曲下沉带难以向上运移。

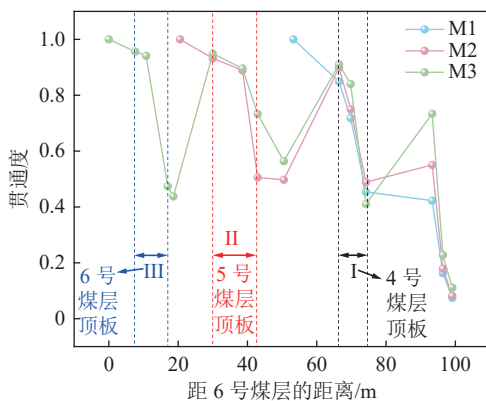


图16 贯通度演变曲线

Fig.16 Through degree evolution curve

3 讨论

3.1 裂隙带瓦斯抽采靶向优选机制

在煤层开采过程中,采动应力发生改变,覆岩垮落、移动并产生大量裂隙,应力场、位移场和裂隙场“三场”演化规律复杂,且存在相互关系。解盘石等^[19]研究了采动应力、位移和覆岩断裂存在复杂的映射关系。采动作用下,覆岩三场演化规律与许多方面相关,黄庆亨等^[29]探究了基于浅埋近距离煤层群“三场”演化规律的减损开采、合理煤柱错距、煤柱群结构控制效应等方面的研究。然而,目前较少考虑“三场”演化规律与瓦斯运移的关系,且目前仍存在采动卸压抽采钻孔终孔定位依据单一,造成采动卸压瓦斯精准抽采困难的难题。因此,本研究在前

人基础上,探究了应力、位移和裂隙“三场”与瓦斯运移的联系,揭示了瓦斯抽采靶向优选机制,如图17所示。

如图17所示,应力场对应卸压区:采动作用下覆岩应力发生变化,进而导致卸压瓦斯从吸附态变为游离态并不断解吸,应力卸压是卸压瓦斯产生的重要因素;位移场对应增渗区:采动影响上下覆岩层垮落、变形,从而导致覆岩孔隙率^[23]、渗透率^[24]的变化;裂隙场对应储运区:采动影响下,覆岩裂隙发育,为卸压瓦斯提供了运移通道和储集区间。其中,“场”到“区”的转变,视为一种映射;将现场实际看作空间坐标的组合,视为初始映射;最终裂隙带瓦斯抽采钻孔终孔位置的定位坐标为中心聚类靶点区,将坐标集合与现场实际对应,视为终点映射。如图17所示,先进行应力场的应力靶点区筛选,再进行位移场的位移靶点区筛选,再进行裂隙场的裂隙靶点区筛选,逐级进行;在应力靶点区基础上筛选满足下一阶段的位移靶点区,进而继续筛选满足下一阶段的裂隙靶点区;然后,进行中心聚类,最终得到合适的抽采靶点。

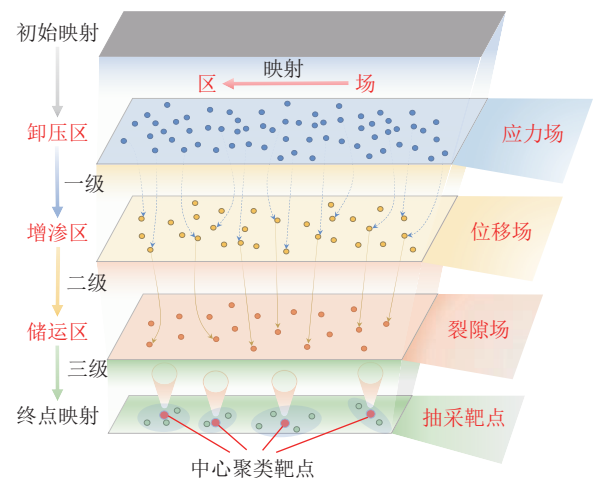


图17 裂隙带瓦斯抽采靶向优选机制

Fig.17 Gas extraction targeted preferential mechanism

3.2 裂隙带瓦斯抽采靶点区判定方法

瓦斯抽采靶点的精准确定,是瓦斯高效抽采、煤炭安全生产的前提。目前在瓦斯精准抽采方面已有相关研究。郭明杰等^[30]对覆岩裂隙分布进行了区域划分,确定了结构裂隙区的瓦斯抽采最佳区域,并推导了结构裂隙区空间位置边界的理论计算公式。ZHAO等^[31]根据“三带”高度、贯通度等关键参数,构建了瓦斯运移通道几何位置的判断标准。应力、位移和裂隙三场演化特征对瓦斯运移富集有较大影响。然而,目前鲜有以“三场”演化规律为基础的瓦

斯抽采靶点区确定流程。因此,研究在前人基础上^[32-33],结合相似模拟实验结果,提出了基于“三场”演化规律的裂隙带瓦斯抽采靶点区判定方法,如图18所示。

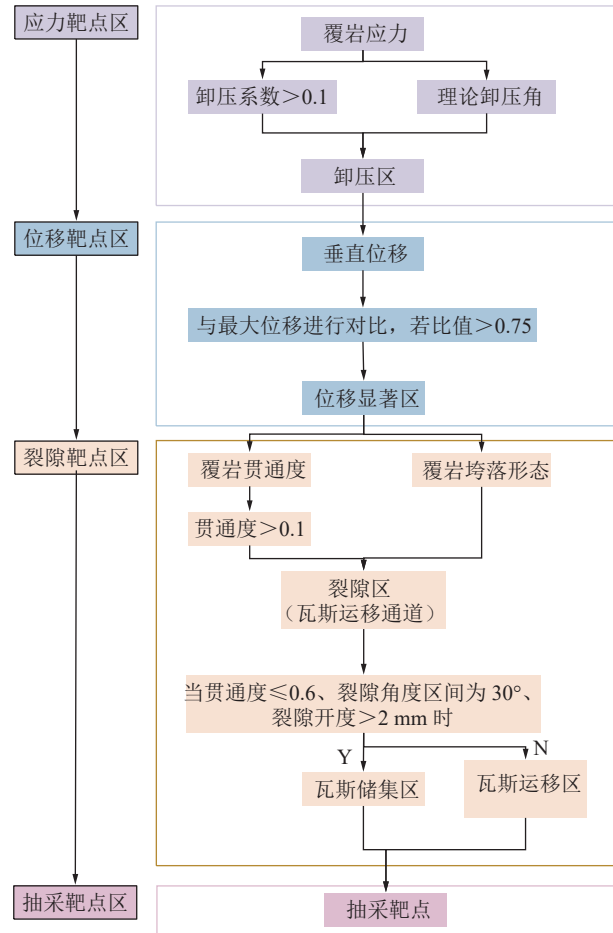


图18 裂隙带瓦斯抽采靶点区判定方法

Fig. 18 Fractured zone gas extraction target determination process

基于前述结果及分析,对裂隙带瓦斯抽采靶点区进行判定,流程如图18所示。第1步,确定应力靶点区。将相似模拟应力场结果与原岩应力进行对比,主要是通过卸压系数^[34]和《防治煤与瓦斯突出细则》中卸压角的划定,识别上覆岩层卸压范围;根据煤层倾角得到的理论卸压角及 $r > 0.1$ 的区域,划定为卸压区;其中,卸压系数 r 采用公式 $r = 1 - (\sigma_z / \sigma_{z0})$ 计算, σ_z 为采动应力, σ_{z0} 为原岩应力。第2步,确定位移靶点区。将相似模拟煤层开采后垂直位移变化结果与最大位移进行对比,将比值 > 0.75 的区域识别为位移相对显著的区域。第3步,确定裂隙靶点区。根据覆岩贯通度^[31]和覆岩垮落形态,区分裂隙区(贯通度 > 0.1)和压实区;进而再结合贯通度、裂隙角度和裂隙开度等具体裂隙参数,识别瓦斯运移区

和瓦斯储集区;当满足贯通度 ≤ 0.6 、裂隙角度区间为 30° 、裂隙开度 > 2 mm的条件时,该区域判定为瓦斯储集区,反之则为瓦斯运移区。第4步,筛选同时满足应力靶点区、位移靶点区、裂隙靶点区的范围,得到裂隙带瓦斯抽采靶点区,进而精确定抽采靶点。

根据上述裂隙带瓦斯抽采靶点区判定方法,以相似模拟第1次开采结果为例:第1步,识别应力靶点区;根据应力结果得到的卸压系数与《防治煤与瓦斯突出细则》,综合判定左侧卸压角 61.5° 、右侧卸压角 87.8° 。第2步,通过将位移结果与最大垂直位移 -14.21 mm进行比较,可以得到位移显著区的位置在裂隙区两侧,其中高位侧范围更大,为(600 mm, 700 mm)和(750 mm, 800 mm)围成的矩形位移网格区域。第3步,在划分的裂隙区和压实区的基础上,通过裂隙参数数据,进一步得到裂隙靶点区位于裂隙网格 A_{42} 、 A_{52} 、 A_{85} 、 A_{86} 、 A_{75} 。第4步,筛选裂隙带瓦斯抽采靶点区,为与煤层垂直距离15~24 m、与右侧煤壁水平距离5~12 m的区域,抽采靶点位于该区域内。

4 现场验证

为了验证裂隙带瓦斯抽采靶向优选机制的可靠性,在新疆1930煤矿4号煤层24312工作面施工高位定向钻孔开展瓦斯抽采现场试验。24312工作面走向长度平均为553 m,倾向长度平均为193 m。4号煤层平均厚度2.8 m,24312工作面最大瓦斯含量为 6.1527 m³/t。在考虑钻孔布置基本原则的基础上,结合地形条件及采掘部署情况,依据瓦斯抽采靶点区判定流程和砌体梁理论,确定钻孔布置坐标。首先,确定钻孔数量,采用式(8)进行确定。24312工作面 Q_j 为 10.5 m³/min, Q_f 为 1500 m³/min,生产期间风流中平均瓦斯浓度取0.6%,高位钻孔的负压较低,一般为5 kPa左右, c_n 按照钻场单孔平均浓度为2.5%取值,抽采量为 16 m³/min,经计算 $N = 3.75$,取值为4;故应保证现场抽采钻孔数不低于4个。其次,根据相似模拟第1次开采试验结果,确定顶板垮落角,为 55.2° 。然后,以覆岩垮落角所在位置为基本轴线,选定特定采高倍数附近覆岩,避开较为软弱的岩层,避免塌孔。最后,减去砌体梁理论^[35]确定的覆岩断裂块体长度,确定钻孔在水平方向与巷道的内错距离,计算公式如式(9)所示:

$$N = \frac{Q}{Q_{kc}} = \frac{Q_j - Q_f}{Q_k c_n} \quad (9)$$

式中: Q 为保证采场瓦斯超限需抽采的瓦斯总量; Q_j 为工作面绝对瓦斯涌出量; Q_f 为工作面风排瓦斯量;

Q_{kc} 为单个钻孔抽采瓦斯纯量; c_n 为单孔平均瓦斯浓度。

$$l_{block} = h_{roof} \sqrt{\frac{\sigma_t}{q_{load}}} \quad (10)$$

式中: l_{block} 为断裂岩块长度; h_{roof} 为砌体梁结构到煤层顶板的距离; σ_t 为岩块抗拉强度; q_{load} 为岩块承受载荷。最终, 4个定向钻孔设计参数见表2, 如图19所示。

表2 定向钻孔设计参数

Table 2 Directional borehole design parameters

孔号	开孔倾角/(°)	开孔方位角/(°)	目标方位角/(°)	帮距/m	终孔层位/m	采高倍数
1	13	185	180	7.2	15.4	7倍左右
2	13	190	180	8.2	17.6	8倍左右
3	15	195	180	9.4	19.8	9倍左右
4	15	200	180	10.3	22.0	10倍左右

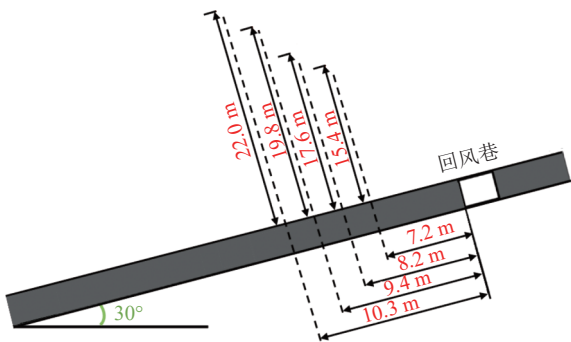


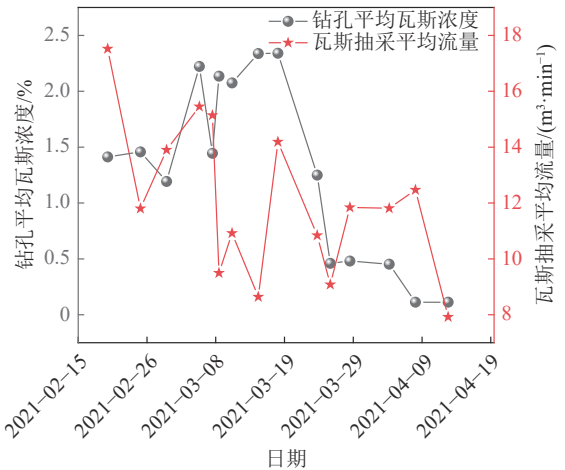
图19 瓦斯抽采钻孔布置示意

Fig.19 Schematic layout of gas extraction borehole

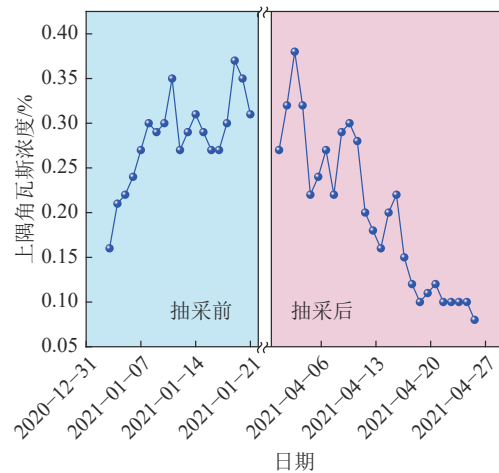
图20a展示了定向钻孔瓦斯抽采效果。可以发现, 随着抽采的持续进行, 钻孔平均瓦斯浓度显著下降, 但流量并未显著减少; 取得了较好的抽采效果。这说明富集的卸压瓦斯得到了精准有效的抽采; 同时, 也证明了瓦斯抽采靶向优选机制的正确性。由图20b可知, 工作面的上隅角瓦斯浓度明显降低, 在回采初期上隅角瓦斯浓度约为0.4%, 采用该方法后, 上隅角瓦斯浓度降低至0.1%左右。抽采效果表明, 设计的抽采方案能够较好的保证回采期间煤矿的安全生产。

5 结论

1) 阐明了倾斜煤层群多重采动下应力与位移分布非对称特征。倾斜煤层群多重采动下, 采动裂隙矩形梯台呈现明显的非对称特征。低位侧覆岩应力变化较大, 随开采次数增加, 卸压效应更为明显; 而高位侧覆岩应力变化较小, 这导致了在高位



(a) 定向钻孔瓦斯抽采效果



(b) 抽采前后上隅角瓦斯浓度变化

图20 现场瓦斯抽采效果

Fig.20 Effects of gas extraction in the field

侧与低位侧两端头区域应力集中。结合重力-倾角效应, 高位侧覆岩更易破坏, 垮落次序优先, 呈非对称特征。随开采层数增加, 采动扰动范围扩大; 覆岩位移分布呈非对称特征, 高位侧位移显著; 此外, 倾斜煤层群覆岩移动方向呈现明显的非对称分区特征, 裂隙区低位侧覆岩移动方向变化较小, 而高位侧覆岩移动方向变化较大; 低位侧主要以沿煤层方向倾斜向下的运动为主, 高位侧主要以垂直煤层方向运动为主。

2) 揭示了倾斜煤层群多重采动下裂隙“高位扩展-低位压缩”的非对称特征。高位侧裂隙区网格采动裂隙频数明显高于另一侧; 离层裂隙主要集中在压实区, 破断裂隙主要集中在裂隙区, 高位侧裂隙区更明显。开度较大的裂隙分布于高位侧裂隙区。随开采次数增加, 采动裂隙的非对称特征更为显著。此外, 倾斜煤层群多重采动下, 贯通度存在“慢速减小-快速减小”的现象。

3)揭示了裂隙带瓦斯抽采靶向优选机制。探究了应力、位移和裂隙三场与瓦斯运移的联系,揭示了瓦斯靶向抽采机制。结合相似模拟实验结果,构建了基于三场演化规律的裂隙带瓦斯抽采靶点区判定流程,并结合理论分析确定了现场钻孔布置位置;进而开展了定向钻孔瓦斯抽采现场试验。瓦斯抽采效果良好,有效保证了工作面安全高效生产。

参考文献(References):

- [1] 邹全乐,王鑫,李左媛,等. 木质素磺酸钙对固井水泥石变形破坏特性的影响及其改性机制[J]. 煤炭学报, 2023, 48(4): 1606-1621.
ZOU Quanle, WANG Xin, LI Zuoyuan, *et al.* Effect of calcium lignosulfonate on the deformation and failure characteristics of cementing stone and its modification mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1606-1621.
- [2] 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.
- [3] 赵佳佳,田世祥,李鹏,等. SiO₂-H₂O 纳米流体强化煤尘润湿性的微观机理研究[J]. 化工学报, 2023, 74(9): 3931-3945.
ZHAO Jiajia, TIAN Shixiang, LI Peng, *et al.* Microscopic mechanism of SiO₂-H₂O nanofluids to enhance the wettability of coal dust[J]. CIESC Journal, 2023, 74(9): 3931-3945.
- [4] 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与实践[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.
- [5] 孙东玲,梁运培,黄旭超,等. 新疆大倾角多煤组煤矿区煤层气开发利用进展与前景[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S1): 162-172.
SUN Dongling, LIANG Yunpei, HUANG Xuchao, *et al.* Progress and prospects of coalbed methane development and utilization in coal mining areas with large dip angle and multiple coal groups in Xinjiang[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S1): 162-172.
- [6] 梁运培,朱拴成,陈亮,等. 倾斜碎软煤层群煤层气协调开发关键技术:以艾维尔沟矿区为例[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 211-220.
LIANG Yunpei, ZHU Shuancheng, CHEN Liang, *et al.* Key technologies for coordinated development of coalbed methane in inclined soft coal seam groups: a case study of Aiweigou Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 211-220.
- [7] 伍永平,闫壮壮,罗生虎,等. 煤岩组合体应力传递与强度特征倾角效应[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 105-116.
WU Yongping, YAN Zhuangzhuang, LUO Shenghu, *et al.* Dip effect of stress transfer and structural instability mechanism of coal-rock combination[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 105-116.
- [8] 叶春烽,谢和平,李存宝. 直接剪切下页岩的各向异性破坏特征和强度预测模型[J]. 工程科学与技术, 2024, 56(2): 257-267.
YE Chunfeng, XIE Heping, LI Cunbao. Anisotropic failure characteristics and strength prediction model of shale under direct shear[J]. Advanced Engineering Sciences, 2024, 56(2): 257-267.
- [9] LI Yang, REN Yuqi, PENG Syd S, *et al.* Measurement of overburden failure zones in close-multiple coal seams mining[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2021, 31(1): 43-50.
- [10] 丁洋,朱冰,李树刚,等. 高突矿井采空区卸压瓦斯精准辨识及高效抽采[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3565-3577.
DING Yang, ZHU Bing, LI Shugang, *et al.* Accurate identification and efficient drainage of relieved methane in goaf of high outburst mine[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(11): 3565-3577.
- [11] 解盘石,张颖异,张艳丽,等. 大倾角大采高煤矸互层顶板失稳规律及对支架的影响[J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 344-356.
XIE Panshi, ZHANG Yingyi, ZHANG Yanli, *et al.* Study on the instability law of the coal-rock interbedded roof and its influence on supports in large mining height stope with steeply dipping coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 344-356.
- [12] 罗生虎,王同,伍永平,等. 大倾角煤层群长壁开采承载拱与间隔岩层采动应力演化特征[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 551-562.
LUO Shenghu, WANG Tong, WU Yongping, *et al.* Evolution characteristics of mining stress of bearing arch and interval strata in longwall mining of steeply dipping coal seam groups[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 551-562.
- [13] 来兴平,代晶晶,李超. 急倾斜煤层开采覆岩联动致灾特征分析[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 122-130.
LAI Xingping, DAI Jingjing, LI Chao. Analysis on hazard characteristics of overburden structure in steeply inclined coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 122-130.
- [14] LIU Weitao, MU Dianrui, XIE Xiangxiang, *et al.* Sensitivity analysis of the main factors controlling floor failure depth and a risk evaluation of floor water inrush for an inclined coal seam[J]. Mine Water and the Environment, 2018, 37(3): 636-648.
- [15] 高喜才,伍永平,曹沛沛,等. 大倾角煤层变角度综放工作面开采覆岩运移规律[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(3): 381-386.
GAO Xicai, WU Yongping, CAO Peipei, *et al.* Overlying strata movement property of fully mechanized caving angle-varied workface in steep dipping seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(3): 381-386.
- [16] 解盘石,田双奇,段建杰. 大倾角伪俯斜采场顶板运移规律实验研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(10): 2974-2982.
XIE Panshi, TIAN Shuangqi, DUAN Jianjie. Experimental study on the movement law of roof in pitching oblique mining area of steeply dipping seam[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(10): 2974-2982.
- [17] ZHAO Pengxiang, ZHUO Risheng, LI Shugang, *et al.* Research on the effect of coal seam inclination on gas migration channels at fully mechanized coal mining face[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12(18): 597.

- [18] 王智民, 梁运培, 邹全乐, 等. 多重采动下大倾角上覆煤岩移动及地面井变形规律[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(4): 47-55.
WANG Zhimin, LIANG Yunpei, ZOU Quanle, *et al.* Movement of overlying rock and deformation law of surface well under multiple mining with large dip angle[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(4): 47-55.
- [19] 解盘石, 黄宝发, 伍永平, 等. 大倾角大采高采场覆岩应力路径时空效应[J/OL]. 煤炭学报: 1-14[2023-12-20]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2022.1859>.
XIE Panshi, HUANG Baofa, WU Yongping, Time-space effect of overburden stress path in steeply dipping and large mining height stope[J/OL]. Journal of China Coal Society, 1-14[2023-12-20]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2022.1859>.
- [20] 伍永平, 解盘石, 俞东风, 等. 大倾角层状采动煤岩体重力-倾角效应与岩层控制[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 100-113.
WU Yongping, XIE Panshi, YUN Dongfeng, *et al.* Gravity-dip effect and strata control in mining of the steeply dipping coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 100-113.
- [21] 李树刚, 刘李东, 赵鹏翔, 等. 综采工作面覆岩压实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.
- [22] 来兴平, 张旭东, 单鹏飞, 等. 厚松散层下三软煤层开采覆岩导水裂隙发育规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(9): 1739-1750.
LAI Xingping, ZHANG Xudong, SHAN Pengfei, *et al.* Study on development law of water-conducting fractures in overlying strata of three soft coal seam mining under thick loose layers[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(9): 1739-1750.
- [23] 解盘石, 张颖异, LUO Yi, 等. 基于开采损害预计的大倾角多区段采场顶板顶移规律实验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(6): 1188-1195.
XIE Panshi, ZHANG Yingyi, LUO Yi, *et al.* Roof deformation of multi-section mining with steeply dipping coal seam based on mining damage prediction[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(6): 1188-1195.
- [24] 陆卫东, 程健维. 基于岩层移动计算的工作面覆岩体渗透率变化研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(1): 118-124.
LU Weidong, CHENG Jianwei. Study on the permeability change of overlying strata based on strata movement calculations[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(1): 118-124.
- [25] RAN Qican, LIANG Yunpei, ZOU Quanle, *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.
- [26] ZHANG Bichuan, SUN Haitao, LIANG Yunpei, *et al.* Characterization and quantification of mining-induced fractures in overlying strata: implications for coalbed methane drainage[J]. *Natural Resources Research*, 2020, 29(4): 2467-2480.
- [27] 刘应科. 远距离下保护层开采卸压特性及钻井抽采消突研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(6): 1067-1068.
LIU Yingke. Study on the depressurization effect produced by exploitation of lower distant protective coal seam and elimination of outburst hazard of the protected seams by applying gas drainage with surface boreholes[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(6): 1067-1068.
- [28] ZHAO Pengxiang, ZHUO Risheng, LI Shugang, *et al.* Analysis of advancing speed effect in gas safety extraction channels and pressure-relief gas extraction[J]. *Fuel*, 2020, 265: 116825.
- [29] 黄庆享, 曹健. 浅埋近距煤层开采三场演化规律及煤柱群结构控制效应[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S1): 1-9.
HUANG Qingxiang, CAO Jian. Research on three-field evolution and control effect of pillars structural in shallow buried closely spaced multi-seams mining[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S1): 1-9.
- [30] 郭明杰, 郭文兵, 袁瑞甫, 等. 基于采动裂隙区域分布特征的定向钻孔空间位置研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(4): 817-826.
GUO Mingjie, GUO Wenbing, YUAN Ruifu, *et al.* Spatial location determination of directional bore holes based on regional distribution characteristics of mining-induced overburden fractures[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(4): 817-826.
- [31] ZHAO Pengxiang, WANG Jianan, LI Shugang, *et al.* Effects of recovery ratio on the fracture evolution of the overburden pressure-relief gas migration channel for a fully mechanized working face[J]. *Natural Resources Research*, 2022, 31(2): 1011-1026.
- [32] 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.* Study on the mechanism of cross-fusion in gas transportation-storage area in fully mechanized mining face of high gas thick coal seam under different advancing speed[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(9): 3405-3419.
- [33] 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.
- [34] 袁亮, 郭华, 沈宝堂, 等. 低透气性煤层群煤与瓦斯共采中的高位环形裂隙体[J]. 煤炭学报, 2011, 36(3): 357-365.
YUAN Liang, GUO Hua, SHEN Baotang, *et al.* Circular overlying zone at longwall panel for efficient methane capture of multiple coal seams with low permeability[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 357-365.
- [35] 王家臣, 许家林, 杨胜利, 等. 煤矿采场岩层运动与控制研究进展-纪念钱鸣高院士“砌体梁”理论40年[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 80-94.
WANG Jiachen, XU Jialin, YANG Shengli, *et al.* Development of strata movement and its control in underground mining: In memory of 40 years of Voussoir Beam Theory proposed by Academician Minggao Qian[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 80-94.