覆岩采动裂隙空间形态反演方法及在瓦斯抽采中的应用

胡国忠^{1,2},李 康¹,许家林^{1,2},贾丽明¹,王晓振¹,秦 伟²,谢建林¹

(1.中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州 221116;2.中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,江苏 徐州 221116)

要:如何实现工作面采空区瓦斯的高效抽采一直是煤矿安全领域亟待解决的重要难题。覆岩 摘 采动裂隙作为采空区瓦斯储运的主要空间,其演化过程与覆岩运动密切相关。通过掌握采动覆岩 运动演化特征,反演出覆岩采动裂隙空间形态,从而提出精准的瓦斯抽采技术方案,是解决上述难 题的根本途径。为此,结合山西某矿深部高强度开采条件,采用地面钻孔全柱状原位监测方法,研 究了工作面开采过程中覆岩运动的演化过程,揭示了覆岩关键层运动的分段特征;在此基础上,反 演得到了覆岩采动裂隙空间形态发育特征,即采动覆岩瓦斯卸压运移"三带"、"0"形圈裂隙区、覆 岩移动"横三区"的具体范围,提出了包括钻孔布置层位、伸入工作面水平距离和抽采最优时段的 顶板定向长钻孔抽采瓦斯技术方案。试验结果表明,深部开采条件下覆岩运动经历了煤壁支撑影 响阶段、低位岩层破断运动阶段、破断覆岩快速回转阶段、上部覆岩向下重新压实阶段、采动影响衰 减的整体运动平稳阶段等变化过程,其中,在低位岩层破断运动阶段和破断覆岩快速回转阶段内, 覆岩的离层空间与破断裂隙快速发育并相互贯通而形成导气裂隙带,为采空区瓦斯的聚集与运移 提供了空间,是抽采采空区瓦斯的有利时机;基于采动裂隙空间形态反演的顶板定向长钻孔抽采瓦 斯技术,使工作面采空区瓦斯抽采率平均提高了57.5%,有效保障了工作面的安全开采。 关键词:采动裂隙;空间形态;覆岩运动监测;精准抽采;煤与瓦斯共采;关键层 中图分类号:TD712 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2023)02-0750-13

Spatial morphology inversion method of mining-induced fractures of overburden and its application in gas drainage

HU Guozhong^{1,2}, LI Kang¹, XU Jialin^{1,2}, JIA Liming¹, WANG Xiaozhen¹, QIN Wei², XIE Jianlin¹

(1.School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resource and Mine Safety, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: During the mining process of working face, how to realize the efficient gas drainage in goaf has been an important problem to be solved in the field of coal mine safety. The overburden mining-induced fractures are the main space for gas storage and transportation in the goaf of working face, and their evolution process is closely related to the movement of overburden key strata. The fundamental way to solve the problem of efficient gas drainage in the goaf of working face is by understanding the movement characteristics of mining overburden, the reversing spatial morphology of overburden mining-induced fractures, thus proposing accurate gas drainage technology. In the deep mining conditions of a coal mine in Shanxi, using the surface borehole full-columnar in-situ monitoring meth-

收稿日期:2022-11-15 修回日期:2023-02-20 责任编辑:王晓珍 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.S022.1669 基金项目:国家自然科学基金联合重点资助项目(U22A20169);江苏省"六大人才高峰"高层次人才资助项目 (JNHB-094)

引用格式: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.



移动阅读

作者简介:胡国忠(1981—),男,湖南衡阳人,教授,博士生导师,博士。E-mail:gzhu@cumt.edu.cn

通讯作者:李 康(1995—),男,安徽宿州人,博士研究生。E-mail:kangli@cumt.edu.cn

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.

od, the evolution process of overburden movement during the mining process of the working face is studied to reveal the movement characteristics of the key strata. On this basis, the spatial morphology development characteristics of overburden mining-induced fracture is obtained by inversion, and the specific ranges of "three zones" of overlying gas release and migration, "O" shaped fissure zone, and the "horizontal three zones" of overburden movement are determined. A precise extraction technology is proposed for directional long borehole in roof on the test working face, including the borehole layout level, the horizontal distance extending into the working face, and the optimal time for drainage. The test results show that the overburden movement under deep mining conditions will go through five processes of change, including the influence stage of coal wall support, the stage of breaking movement of low-level rock layer, the rapid rotation stage of broken overlying rock, the downward compaction stage of high-level overlying rock, and the stable stage of overall overburden movement. Among them, in the stage of breaking movement of lowlevel rock layer and the rapid rotation stage of broken overlying rock, the overburden mining-induced fracture space develops rapidly and the separation space in the overburden and breaking fracture penetrate each other and form a gas-conducting fracture zone, which provides space for the gas gathering and transportation in the mining area, and it is a favorable time to extract the goaf gas. The precise extraction technology of directional long borehole in roof based on the spatial morphology inversion of overburden mining-induced fractures makes the gas drainage ratio be improved by an average of 57.5%, effectively ensuring the safe mining of the working face.

Key words: mining-induced fractures; spatial morphology; strata movement monitoring; precise gas drainage; co-extraction of coal and gas; key strata

近年来,随着浅部煤炭资源的枯竭,我国大量高 瓦斯煤矿的开采深度正以每年 10~25 m 的速度向下 延伸,并逐渐进入深部(埋深达 700~1 000 m^[1])。深 部煤层具有高地应力、高瓦斯压力、高地温、低渗透性 的"三高一低"特征[2],在深部工作面高强度(煤层 厚、面宽大、推进速度快)开采过程中,工作面瓦斯涌 出量相对浅部急剧上升,增加了工作面瓦斯超限的风 险,严重威胁生产安全。为此,国内外学者提出了高 抽巷、定向长钻孔和高位钻孔等瓦斯治理措施[3-6]. 但因其抽采孔(巷)布置参数设计多凭理论经验公 式,缺乏科学的设计方法,使得瓦斯抽采效果不佳。 因此,如何合理地确定瓦斯抽采孔(巷)布置参数,以 高效抽采采空区瓦斯、降低工作面上隅角瓦斯体积分 数是当前深部高强度开采工作面瓦斯治理亟待解决 的难题。煤层采动引起的岩层移动是导致煤岩层中 瓦斯卸压、解吸和运移的主要原因[3-4]。在煤层开采 过程中,覆岩移动不仅引起煤岩层应力场的变化,导 致瓦斯卸压和解吸^[5]:还造成贯通导气裂隙的产生 和延展,为卸压瓦斯提供了大量运移通道与储集空 间[6-7]。由此可见,掌握采动覆岩内部运动规律及采 动裂隙空间形态发育特征,是合理确定采空区瓦斯抽 采孔(巷)布置参数的基础和前提。

针对上述问题,钱鸣高等^[8]从应力演化与裂隙 发育的角度将采动覆岩划分为"横三区"、"竖三带"。 袁亮等^[9]提出了采动覆岩"高位环形裂隙体"理论, 并将其应用于卸压瓦斯抽采范围的确定。李树刚、林

海飞等[10-11] 建立了采动裂隙" 椭抛带" 动态演化数学 模型及其卸压瓦斯渗流-升浮-扩散的控制模型,并 提出对应的煤与甲烷共采技术。刘泽功等[12]提出抽 采钻孔或抽采巷道应布置在顶板裂隙充分发育区的 原则。卢平等[13]揭示了煤层群首采关键卸压层开采 后采动影响区内顶、底板岩层裂隙的动态演化规律和 卸压瓦斯运移规律。再者,部分学者还定义了"梯形 椎体"^[14]、"帽"状^[15]、"回形圈"^[16]等采动裂隙形态, 揭示不同开采条件因素对覆岩采动裂隙发育的影响 规律[17-19],并提出采动裂隙发育高度的理论预测模 型^[20-21]。笔者研究团队^[7,22-28]将采空区四周沿层面 横向连通的覆岩离层发育区定义为采动裂隙"0"形 圈,提出了将采动覆岩划分为导气裂隙带、卸压解吸 带和不易解吸带的瓦斯卸压运移"三带",建立了基 于关键层运动的邻近层卸压瓦斯抽采巷(孔)布置优 化方法,形成了基于岩层移动的"煤与煤层气共采" 理论,成功指导了卸压瓦斯抽采工程实践。综上所 述,上述采动裂隙发育方面的研究成果在指导采空区 瓦斯抽采孔(巷)布置方面发挥了积极作用,但其大 多基于实验室研究结果而得出,较少涉及利用覆岩运 动原位监测方法来反演采动裂隙空间形态的新思路。

相对于地表移动,采动覆岩内部运动特征及规律 极其复杂,是行业内未解的"黑箱"难题,其研究手段和 实施途径相对匮乏。为此,笔者以山西某高瓦斯矿井 深部开采工作面为试验点,通过开展采动覆岩内部运 动地面钻孔全柱状原位监测,反演得出覆岩关键层运动 演化规律及其采动裂隙空间形态发育特征,确定了采动 覆岩瓦斯卸压运移"三带"、"O"形圈裂隙区、覆岩移动 "横三区"的具体范围。在此基础上,提出了顶板定向长 钻孔精准抽采采空区瓦斯技术方案。研究成果形成了 一套基于覆岩运动原位监测的采动裂隙空间形态反演 方法,有效指导了工作面采空区瓦斯的高效抽采。

采动覆岩内部运动地面钻孔全柱状原位监 测试验

1.1 工作面概况

试验工作面位于山西某高瓦斯矿井 3 号煤层,采 高 4.5 m(厚煤层)、采宽 260 m(大采长)、推进速度 6~7 m/d(推速快),属于典型的高强度开采条件。工 作面采用后退式一次采全高、全部垮落法的开采方式 以及"两进一回"巷道布置方式。工作面煤层原始瓦 斯含量 7.08 m³/t,相邻工作面最大瓦斯涌出量 65.22 m³/min。在此条件下,试验工作面仅靠通风排 放难以解决上隅角瓦斯超限问题。为此,该矿曾在相 邻工作面试验了"高位钻孔(初采期)+大直径定向长 钻孔(正常回采期)"抽采的瓦斯治理方式。

1.2 原位监测原理与方法

本文的采动覆岩运动原位监测试验采用了笔者 研究团队自主研发的地面钻孔岩移监测成套技术及 装备,其监测原理是:在地面钻孔内部不同特定层位 的岩层测点上锚固位移传感器,利用位移传感器与所 锚固岩层的同步运动,将岩层运动信息通过传输线实 时反馈至孔口的位移监测装置上,从而获取测点所在 岩层与孔口地表的相对移动变化信息;而后,根据地 面钻孔孔口的地表移动数据,可得到不同层位岩层的 绝对移动信息,如图1所示。



图1 岩层运动监测原理示意

Fig.1 Monitoring principle of rock movement

该套岩移监测技术装备是由地面钻孔内部岩移 监测传感器、地表移动 GNSS-RTK 监测传感器、太阳 能供电系统和地面钻孔岩移(内部岩移和地表移动) 监测数据云平台组成,岩层内部移动监测数据采集系 统最大量程5m、分辨率0.01mm,地表移动监测频率 达1次/h、孔口高程监测误差±5mm。岩移监测的具 体过程为:①地面钻孔设计。结合监测目的与工作 面条件,设计地面岩移监测钻孔布置位置;②地面钻 孔施工与覆岩探测。施工地面钻孔、取心,并进行物 理力学测试,结合钻孔测井结果编录地层柱状;③钻 孔孔内测点设计。判别工作面覆岩关键层位置,确定 岩移监测钻孔孔内测点的布置层位;④监测装备安 装与运行。安装位移传感器至孔内测点,钻孔封孔并 锚固测点;而后安装地表移动监测传感器、布设监测 数据的采集装置,实时自动监测工作面开采过程中覆 岩内部运动与地表移动的变化信息。

1.3 监测方案与实施

根据试验工作面埋深、开采尺寸、地面地形及周 边工作面已采情况,同时考虑不同层位岩层产生初次 破断的时间以及工作面边界位置岩层破断角度(通 常在 50°~55°),在工作面上方地表布置覆岩运动监 测钻孔,大致位于工作面中部,如图 2 所示。



Fig.2 Location plan of borehole

同时,考虑到关键层在岩层运动中的控制作用, 将测点大部分设置在关键层及其附近,以便监测数据 能够反映出覆岩关键层的运移规律。因此,准确探测 工作面覆岩岩性、获取工作面覆岩的力学参数,是判 别覆岩关键层位置的基础。在地面钻孔施工过程中,笔 者开展了钻孔取心与岩心物理力学测试,获得了各岩层 物理力学参数(表1)和监测钻孔的地层柱状(表2)。

表1 各类岩层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock

岩性	容重/	弹性模	单轴抗压	抗拉强	泊払い		
	$(kN\boldsymbol{\cdot}m^{-3})$	量/GPa	强度/MPa	度/MPa	111212		
砂质泥岩	25.8~26.5	4.2~7.9	19.5~61.0	2.9~7.3	0.23~0.27		
泥岩	$25.7 \sim 27.6$	2.9~6.3	10.5~46.8	1.9~4.9	0.25~0.31		
粉砂岩	$25.8 \sim 26.8$	6.8~13.2	51.0~117.6	4.8~9.9	0.13~0.18		
细砂岩	$25.7 \sim 27.2$	5.4~11.1	$32.6 \sim 103.8$	4.3~13.4	0.14~0.19		
中砂岩	24.6~25.8	6.1~9.2	39.4~88.9	3.7~7.8	0.18~0.24		

注:数据格式最小值~最大值。

表 2 关键层判别结果 Table 2 Discriminant results of key layers

层号	厚度/	埋深/	岩层	关键层	E E	厚度/	埋深/	岩层	关键层		厚度/	埋深/	岩层	关键层
	m	m	岩性	位置	広 万	m	m	岩性	位置	层兮	m	m	岩性	位置
121	4.50	4.50	松散层		80	3.05	273.70	细砂岩		39	14.75	550.90	砂质泥岩	亚关键层
120	4.10	8.60	砂质泥岩		79	9.55	283.25	砂质泥岩		38	3.15	554.05	粉砂岩	
119	4.30	12.90	细砂岩		78	1.35	284.60	粉砂岩		37	5.10	559.15	砂质泥岩	
118	4.70	17.60	砂质泥岩		77	11.15	295.75	砂质泥岩		36	4.95	564.10	中砂岩	
117	2.40	20.00	粉砂岩		76	7.60	303.35	细砂岩		35	10.70	574.80	砂质泥岩	
116	8.05	28.05	砂质泥岩		75	4.65	308.00	中砂岩		34	5.00	579.80	粉砂岩	亚关键层
115	5.90	33.95	粉砂岩		74	7.25	315.25	砂质泥岩		33	5.75	585.55	中砂岩	
114	7.35	41.30	砂质泥岩		73	2.30	317.55	粉砂岩		32	5.80	591.35	砂质泥岩	亚关键层
113	6.75	48.05	细砂岩	主关键层	72	5.45	323.00	砂质泥岩		31	4.55	595.90	中砂岩	
112	3.60	51.65	砂质泥岩		71	1.55	324.55	中砂岩		30	1.60	597.50	砂质泥岩	
111	3.80	55.45	细砂岩		70	7.65	332.20	砂质泥岩		29	5.90	603.40	中砂岩	亚关键层
110	3.75	59.20	中砂岩		69	6.40	338.60	粉砂岩		28	5.35	608.75	细砂岩	
109	3.65	62.85	泥岩		68	19.25	357.85	砂质泥岩		27	2.05	610.80	砂质泥岩	
108	4.45	67.30	砂质泥岩		67	9.45	367.30	中砂岩		26	1.40	612.20	细砂岩	
107	3.80	71.10	中砂岩		66	7.65	374.95	砂质泥岩	亚关键层	25	6.10	618.30	砂质泥岩	
106	7.90	79.00	砂质泥岩		65	2.70	377.65	细砂岩		24	5.90	624.20	粉砂岩	
105	11.70	90.70	粉砂岩		64	7.20	384.85	中砂岩		23	5.35	629.55	细砂岩	
104	4.80	95.50	细砂岩		63	6.45	391.30	砂质泥岩		22	6.25	635.80	砂质泥岩	
103	1.30	96.80	砂质泥岩		62	6.55	397.85	中砂岩	亚关键层	21	4.60	640.40	粉砂岩	
102	7.55	104.35	细砂岩		61	2.15	400.00	砂质泥岩		20	6.95	647.35	砂质泥岩	
101	12.75	117.10	砂质泥岩		60	3.95	403.95	中砂岩		19	5.55	652.90	细砂岩	亚关键层
100	2.15	119.25	细砂岩		59	4.05	408.00	砂质泥岩		18	2.70	655.60	中砂岩	
99	8.40	127.65	砂质泥岩		58	1.60	409.60	粉砂岩		17	3.40	659.00	砂质泥岩	
98	2.50	130.15	细砂岩		57	5.70	415.30	砂质泥岩		16	2.00	661.00	细砂岩	
97	8.30	138.45	砂质泥岩		56	1.45	416.75	粉砂岩		15	0.35	661.35	煤层	
96	4.05	142.50	粉砂岩		55	6.90	423.65	砂质泥岩		14	2.15	663.50	砂质泥岩	
95	16.15	158.65	砂质泥岩		54	3.10	426.75	中砂岩		13	2.25	665.75	粉砂岩	
94	2.10	160.75	细砂岩		53	4.40	431.15	砂质泥岩		12	2.00	667.75	细砂岩	
93	16.85	177.60	砂质泥岩	亚关键	52	8.30	439.45	粉砂岩		11	2.65	670.40	粉砂岩	
92	1.50	179.10	粉砂岩		51	9.25	448.70	砂质泥岩	亚关键层	10	2.65	673.05	砂质泥岩	
91	9.60	188.70	砂质泥岩		50	6.40	455.10	粉砂岩		9	0.35	673.40	煤层	
90	2.15	190.85	粉砂岩		49	10.85	465.95	细砂岩		8	1.40	674.80	砂质泥岩	
89	17.80	208.65	砂质泥岩	亚关键	48	10.20	476.15	砂质泥岩		7	0.35	675.15	煤层	
88	2.05	210.70	粉砂岩		47	10.35	486.50	细砂岩		6	1.85	677.00	细砂岩	
87	6.70	217.40	砂质泥岩		46	8.90	495.40	粉砂岩		5	2.35	679.35	砂质泥岩	
86	1.45	218.85	粉砂岩		45	5.30	500.70	砂质泥岩		4	3.40	682.75	细砂岩	
85	11.55	230.40	砂质泥岩	亚关键层	44	2.20	502.90	粉砂岩		3	0.25	683.00	炭质泥岩	
84	8.75	239.15	粉砂岩		43	9.35	512.25	砂质泥岩		2	5.50	688.50	砂质泥岩	
83	14.35	253.50	砂质泥岩		42	6.85	519.10	粉砂岩		1	8.00	696.50	泥岩	亚关键层
82	5.40	258.90	细砂岩		41	7.40	526.50	砂质泥岩		0	4.50	701.00	煤层	
81	11.75	270.65	砂质泥岩		40	9.65	536.15	粉砂岩						

根据关键层的定义和变形特征,其控制的上覆软 岩层会随着关键层同步协调运动,其下部岩层的运动 体现为不同步的非协调性变形,由于关键层的控制作 用,不需要其下方岩层承担它所承受的任何载荷。因 此,通过判别覆岩中各岩层是否满足 q₁(x) |_m 这一强度和刚度条件可确定上覆岩层中的 关键层^[29],其中 q₁(x) |_m 为第 m 层岩层对第 1 层的

作用载荷,可表示^[29]为

$$q_{1}(x) \Big|_{m} = E_{1}h_{1}^{3}\sum_{i=1}^{m}h_{i}\gamma_{i}/\Big(\sum_{i=1}^{m}E_{i}h_{i}^{3}\Big)$$
(1)

其中, h_i 为第 i 岩层的厚度,m; γ_i 为第 i 岩层的容 重, kN/m^3 ; E_i 为第 i 岩层的弹性模量,GPa。因此,通 过计算判别,得到试验工作面覆岩关键层位置的判别 结果见表 2。 根据试验工作面的覆岩关键层判别结果,在地面 钻孔内共设置了8个测点,测点布置层位如图3所 示。钻孔施工与装备安装情况如图4所示。



图 3 孔内监测点在岩层内的位置

Fig.3 Positions of monitoring points in rock strata



(a) 空气钻井





(b)钻孔取心

(c)测站安装



2 采动覆岩运动演化规律

采动覆岩运动监测工作从工作面正式开采开始, 持续约7个月,各测点的相对位移、覆岩运动状态和 运动速度变化如图5、6所示,其中1号测点的位移最 大,为-373.52 mm。通过对比不同测点的监测数据, 可以发现覆岩内部测点的运动呈现明显的"分段" 特征。

(1)A:煤壁支撑影响阶段(图 5(b))。在工作面 靠近并推过钻孔 17 m 的范围内,受煤壁支撑的影响, 仅有最下部的测点由于卸荷膨胀累积效应出现缓慢 下沉的趋势,移动量很小,该层位岩层还未产生破断。 同时,其余测点没有运动。

(2)B:低位岩层破断运动阶段(图5(c))。在工 作面推过钻孔17~150m,从1、2、3号测点的运动轨 迹可以看出,低位岩层开始破断运动,下沉速度明显 增加(图7),高位岩层受下部岩层破断的影响开始缓 慢运动,但是下沉速度要远小于下部岩层,体现了岩 层运动由下往上逐渐传递的时空演化特征。采动裂 隙也在此阶段开始产生。

(3)C:覆岩破断回转快速运动阶段(图5(d))。 在工作面推过钻孔150~250m的过程中,下部覆岩 进入破断回转阶段,上部岩层开始破断运动,测点的 位移急剧增加,岩移曲线速率的峰值也在这一时期出 现。由于岩层破断后的回转运动是处于先正向回转、 后待下一个块体发生断裂后又发生反向回转的"双 向"过程,处于下位的关键层破断回转时机相对较 早,当下位测点对应关键层破断以体已处于"双向" 回转时,而上位岩层仍处于单方向的破断回转状态。 所以在此阶段内各层位的运动速度不尽相同,下部岩 层的移动速度要快于上覆岩层,层位越往上测点运动 速度越慢,体现出关键层对上覆岩层的控制作用。而 采动覆岩的离层裂隙因岩层间的不同步运动,将在这 一阶段快速发育。

(4)D:上部覆岩向下重新压实阶段(图5(e))。 在工作面推过钻孔250~500m的过程中,低位岩层 破断回转阶段已经结束,受到已垮落矸石的支撑,下 降趋势逐渐变缓。而上部岩层因没有足够的空间供 其破断回转,其运动形式主要表现为破断块体的相互 挤压甚至滑移,所以测点运动速度逐渐变缓。但由于 覆岩的卸荷膨胀且尚属于非充分采动状态,该阶段测 点的位移明显增加,逐步向下压实离层裂隙空间。此 时测点移动速度的特点是邻近岩层的移动速度要缓 于其上覆岩层。

(5)E:采动影响衰减的整体运动平稳阶段(图5(f))。



钻孔内测点随工作面推进的相对位移与覆岩运动示意



图 5





Fig.6 Change of movement velocity of measuring points in borehole with the advance of working face

当工作面推过钻孔 500 m 之后,采动影响衰减,孔内 测点的相对位移均达到最大值,且位移大小基本保持 不变,岩移曲线趋于平稳,标志着上覆岩层开始进入 整体运动阶段,与地表同步沉降。

3 基于覆岩运动原位监测的采动裂隙空间形态反演方法

3.1 覆岩关键层位置理论判别结果的验证

文中第2节的研究结果表明,采动覆岩内部运动 是由下向上逐步传递的,其动态发育过程受控于覆岩 关键层的破断运动。而覆岩中的裂隙演化,同样受到 了关键层破断运动的控制。由此可见,准确掌握覆岩 中关键层的位置和破断特征,是精准反演覆岩采动裂 隙空间形态的基础。

由图 7 各测点运动趋势可以看出,当工作面推过 钻孔一段距离(17 m),位于最深部的 1 号测点并未

及时发生下沉,这说明在1号测点下部存在关键层控 制着上覆岩层的运动。而后,覆岩进入低位岩层破断 运动阶段,1、2、3号测点依次发生相对下沉,根据不 同关键层控制的上覆岩层具有非协调性变形特征,可 以判断这3个测点分属不同的关键层所控制,且关键 层从下向上逐渐破断,符合关键层的破断特征,由此 可判定控制1、2、3号测点运动的亚关键层1、亚关键 层2和亚关键层6的判别结果是可靠的。而后,覆岩 进入破断回转快速运动阶段,下部岩层发生破断回 转,上部岩层开始破断运动。4 号测点的运动速度 显著加快,原因是控制其运动的下部关键层发生断 裂,即4号测点下部的亚关键层8控制其运动。随 着工作面的继续推进,5、6号测点基本保持同步运 动,根据只有同一关键层控制的上覆岩层才会出现 同步协调运动,则这2个测点均被亚关键层10所 控制。







其次,由覆岩破断角圈出的试验工作面采空区边 界范围(图7)可知,6号测点以上的7、8号测点位于 采空区边界以外的煤柱应力集中区,该范围内的岩层 会因应力集中而出现较大的压缩变形,且测点与其上 覆关键层之间的软岩层越厚、对应测点反映出的岩层 压缩变形量相对越大(如8号测点大于7号测点下沉 量);与此同时,下部的6、5、4号测点处于工作面采 空区,该范围内岩层会因采动卸压而产生膨胀变 形^[18],抑制下部6、5、4号测点的下沉,从而导致了7、 8号测点的下沉量大于下部测点。值得说明的是,虽 然监测钻孔上部的7、8号测点的下沉量要大于下部 测点,但7、8号测点的运动过程呈现显著的非协调 性,这表明7、8号测点分属不同的关键层所控制。由 此可见,各测点的运动和关键层的破断运动特征是相 对应的,验证了该工作面覆岩关键层的理论判别结 果,从而为覆岩采动裂隙空间形态的反演提供了 依据。

3.2 采动覆岩瓦斯卸压运移"三带"特征

对于采动卸压瓦斯抽采来讲,能够准确掌握采动 上覆岩层卸压范围与瓦斯运移特征,是优化瓦斯抽采 方案和实现卸压瓦斯高效抽采的前提与基础。为此, 笔者结合采动覆岩瓦斯卸压运移"三带"的划分方 法^[24,28],反演出试验工作面覆岩采动裂隙空间形态, 从而得出采场上覆岩层的"导气裂隙带"、"卸压解吸 带"和"不易解吸带"的具体范围。试验工作面瓦斯 卸压运移分带模型如图 8 所示。

3.2.1 导气裂隙带范围

由前文分析可知,在低位岩层破断运动阶段和破



Fig.8 "Three zones" of the overlying gas release and migration of working face

断覆岩快速回转阶段内,覆岩采动裂隙快速发育,且 覆岩内的离层空间与破断裂隙相互贯通而形成导气 裂隙带,为采空区卸压瓦斯的聚集与运移提供了裂隙 空间,同时这一时段也是抽采卸压瓦斯的有利时机。 将瓦斯抽采钻孔(巷)布置在导气裂隙带中上部范 围,即垮落带以上、导气裂隙带最大发育高度以内的 空间范围,可以高效抽采采空区瓦斯,解决工作面瓦 斯超限难题。

由本文 3.1 节可得试验工作面覆岩关键层的判 别结果是可靠的,导气裂隙带范围的确定可以按照基 于关键层位置的覆岩导气裂隙带发育高度预计方 法^[28,30],如图 9 所示。由于试验工作面覆岩主关键 层位置距开采煤层高度远大于(7~10)倍采高 *M*,所 以工作面导气裂隙带发育至距离煤层顶板(7~10)倍 采高以外最近的亚关键层 3 的底部,其高度等于该层







关键层距煤层顶板的高度,为93.1 m。

3.2.2 卸压解吸带范围

从试验工作面钻孔内各测点相对地表的下沉 量(图5)可以看出,埋深305m处的6号测点相对地 表的下沉量最小,下沉量为88.36 mm。由岩移孔内 6、7和8号测点的相对地表下沉量和运动速度(图) 10)可知,与7、8号测点相比,6号测点的运动最早出 现衰减,且下沉速度最大值仅为3.57 mm/d,远小于 7、8 号测点的下沉速度峰值,速度变化相对平缓;同 时,当工作面推过一定距离,上部的8、7号测点的下 沉量大于下部6号测点,而下部的1~5号测点下沉 量依次增大,这说明上部的7、8号测点逐渐靠近6号 测点,而下部1~5号测点不断远离6号测点,即6号 测点以上岩层处于相对压缩状态,6号测点以下的煤 岩层处于卸荷膨胀状态。由此可见,试验工作面岩移 钻孔处的卸荷高度已经达到6号测点所在岩层。考 虑到关键层对覆岩的控制作用,该钻孔处的卸压高度 应达到埋深为 230.4 m 的第 11 层亚关键层底部,距 离 3 号煤层顶板 466.1 m。



Fig.10 Amount of sinking and movement velocity of measuring points 6,7 and 8 in borehole

通过对孔内测点的运动分析,采动覆岩卸荷膨胀 对岩层运动规律有着显著影响。根据采动覆岩卸荷 膨胀累积效应力学模型可知^[18,31],覆岩卸荷膨胀累 积总量如下:

$$f = \sum_{k=1}^{n} \left[-\frac{E_{l_{k}} (K_{l_{k}} - 1)^{2}}{K_{l_{k}} \gamma_{l_{k}}} \ln \left| \frac{K_{l_{k}} R_{k} + E_{l_{k}} (K_{l_{k}} - 1)}{K_{l_{k}} \gamma_{l_{k}} l_{k} + K_{l_{k}} R_{k} + E_{l_{k}} (K_{l_{k}} - 1)} \right| \right] + \sum_{j=1}^{m} \frac{W_{j} - R_{j}}{\gamma_{l_{j}}} \ln \left| \frac{E_{j} - (1 - 2\mu_{l_{j}}^{2})W_{j}}{E_{j} - (1 - 2\mu_{l_{j}}^{2})W_{j-1}} \right|$$
(2)

其中, *E*_{*l_k*}为塑性膨胀区第 *k* 层岩层的初始切线模量, Pa; *K*_{*l_k*}为塑性膨胀区第 *k* 层岩层的初始碎胀系数,砂 质泥岩为 1.3, 泥岩、粉砂岩、细砂岩、中砂岩均为 1.2; *R_k* 为从塑性膨胀区第 *k* 层煤岩上界面到采动覆岩卸荷 高度 y'范围内的煤岩载荷, Pa; γ_{l_k} 为塑性膨胀区第 k 层岩层的容重, N/m³; l_k 为塑性膨胀区第 k 层岩层的厚 度, m; W_j 为弹性膨胀区第 j 层煤岩上界面到地表的全 部载荷, Pa; R_j 为从第 j 层煤岩上界面到 y'范围内的煤 岩载荷; E_j 为弹性膨胀区第 j 层岩层的初始切线模量, Pa; γ_{L_j} 为弹性膨胀区第 j 层岩层的容重, N/m³; μ_{L_j} 为 弹性膨胀区第 j 层岩层的泊松比。其余参数的取值范 围见表 1。

根据式(2)的计算结果,当卸荷高度达到466.1 m 时,计算得到卸荷膨胀总量为2.62 m,而煤层实际开采 厚度为4.5 m,由此计算出亚关键层11的下沉量为 1.88 m,地表 GPS 沉陷监测结果显示实际地表下沉量 为1.978 m,由于亚关键层11上部覆岩处于相对压缩 状态,所以地表下沉量稍大于亚关键层11的下沉量, 实测地表下沉与理论计算结果相近。另外,根据式(2) 模型的计算结果,1号测点与6号测点之间的相对膨 胀量为0.282 m,而实际相对下沉量为0.29 m,两者大 致相等。岩移实测数据验证了采动覆岩卸荷膨胀累积 效应力学模型的可靠性。因此,可以用采动覆岩卸荷 膨胀累积效应力学模型来计算卸压解吸带的高度,为 卸压解吸带高度的确定提供了新思路。

综上所述,最终确定卸压解吸带范围为埋深 230.4~603.4 m,即距离煤层顶板上方93.1~466.1 m。 煤层顶板上方466.1 m到地表的范围为不易解吸带。 虽然,卸压解吸带高度最高可发育至主关键层底部, 但不能一概而论,尤其是对于煤层采深比较大的情况,该试验就是一个例证。

3.3 导气裂隙带内"O"形圈裂隙区发育宽度

试验工作面岩移钻孔导气裂隙带内测点1和测 点2下沉速度曲线如图11所示。





从图 11 可以看出,在工作面推过钻孔后,距离煤 层顶板 16 m 的测点 1 滞后工作面 17 m 开始下沉,变 化速度相对明显,而采动影响还未传递至导气裂隙带 内的测点 2,离层开始产生。随着工作面继续推进, 测点运动速度加快,离层裂隙逐渐增大。当工作面推 过钻孔 67.8 m时,2 号测点运动速度快速提升,说明 其所在的岩层破断,之后由于 2 号测点下沉速度较 大,离层裂隙逐渐闭合。根据 2 个测点开始运动时相 对于工作面的滞后距离,可以说明工作面后方上覆岩 层非同步下沉的范围大约为 50.8 m,即采空区后方 "O"形圈裂隙区宽度为 50.8 m。

3.4 采动覆岩运动离层区的发育范围

根据覆岩移动的"横三区"理论^[32],采动后的上 覆岩层在工作面推进方向上可以划分为煤壁支撑影 响区、离层区和重新压实区。其中,离层区是采动过 程中顶板裂隙空间最为发育的区域,同时也可以反映 出顶板破断运动的时空关系,该区域范围的确定对于 工作面采空区瓦斯抽采方案的设计具有重要指导 意义。

结合岩移监测结果,采动覆岩离层区发育范围可 以根据测点间的运动差值来反映,如图 12 所示。其 变化过程大致可以划分为 3 个阶段,各阶段的覆岩运 动特征概括如下,第 1 阶段:工作面刚推过钻孔,测点 间没有相对运动,还未产生离层;第 2 阶段:测点间开 始发生相对运动且差值逐渐增大,离层快速发育;第 3 阶段:在离层达到最大值之后,位于卸压解吸带内 测点(3~7号)间的离层量基本保持稳定,而位于导 气裂隙带内的测点间(1、2号)离层量因受到上覆岩 层的压实逐渐变小,离层裂隙逐渐闭合并趋于稳定。 离层区发育过程如下。







首先,在工作面推过钻孔 67.8 m 时,2 号测 点(煤层顶板上方约 91 m)下沉速度明显增加,该层 位关键层发生断裂下沉,通过计算可以得到导气裂隙 带内岩层破断角度为 53°。

1 号测点在工作面推过钻孔 17 m 时下沉速度 明显提升,其所在岩层发生破断。在工作面过钻孔 67.8 m时,2 号测点所在岩层发生破断,之后进入缓 慢推进阶段,运动速度也降低,但2个测点间运动 速度差值在增加,岩层内部有离层裂隙产生,也进 一步体现了缓慢推进有利于离层裂隙发育。当工 作面推过钻孔 171.2 m 时,测点位移差值达到最大, 而后离层裂隙逐渐闭合,工作面后方开始进入压实 区。所以2号测点所在层位离层区走向长度为 103.4 m_o

根据岩层破断及测点运动差值和速度的变化情 况,对工作面卸压解吸带以下岩层沿工作面走向上的 分区情况进行分析,并对岩移边界线进行拟合处理, 反演得到采动覆岩煤壁支撑影响区、离层区和重新压 实区的具体范围,如图13所示。



图 13 采动覆岩走向方向"横三区"分布反演 Fig.13 Inversion of the "transverse three zone" distribution in



综上所述,离层区是采空区瓦斯主要聚集的场 所,也是抽采瓦斯的最佳区域,瓦斯抽采孔(巷)应布 置在离层裂隙区内。所以,采动覆岩离层区的确定对 于采空区瓦斯的抽采具有重要的意义。

4 基于采动裂隙反演的采空区瓦斯精准抽采 试验

由试验工作面监测钻孔的地层柱状编录结果和 邻近工作面的开采情况可知,工作面的采空区瓦斯主 要来源于本煤层(3号煤层)的采动涌出瓦斯。在工 作面回采过程中,采空区漏风风流携带的高体积分数 瓦斯会向工作面上隅角运移并造成瓦斯积聚。由于 试验工作面(厚煤层、大采长、推速快)属于典型的高 强度开采条件,由此造成工作面的瞬间瓦斯涌出量 大,仅靠通风排放易导致上隅角瓦斯超限。

因此,为有效调控试验工作面采空区瓦斯流场, 阻止瓦斯向工作面上隅角积聚,笔者根据上述基于覆 岩运动原位监测的采动裂隙空间形态反演方法,得到 了试验工作面覆岩采动裂隙空间形态的具体范 围(图14),提出了如下顶板定向长钻孔抽采采空区 瓦斯技术方案。

4.1 顶板定向长钻孔布置层位选择

根据岩移监测数据可知,位于钻孔最深部的1号 测点没有发生明显的突变下沉,说明其尚未进入垮落 带,即垮落带高度最大发育至1号测点位置(距煤层 顶板 16 m)。结合试验矿井的实测结果和本文的采 动裂隙反演结果可知,试验工作面的垮落带高度为 16 m、导气裂隙带高度为 93.1 m, 理论上距煤层顶板 16.0~93.1 m 均可布置定向长钻孔。

<u>主关键层</u>	不易解吸带
亚关键层1	(235 m)
离层裂隙	卸压解吸带
	(373 m)
○ 日本の内容 ○ 日本の内容 ○ 日本の内容 ○ 日本の内容 ○ 小子の内容 ○ 小子の方(○) ○ 小子のう(○) ○ 小子のう(○)<	导气裂隙带 (93.1 m)

图 14 试验工作面覆岩采动裂隙空间形态

Fig.14 Spatial morphology of mining-induced fractures on working face

然而,若定向长钻孔布置层位偏上,则钻孔对采 空区瓦斯流场的调控效果有限,进而影响钻孔的瓦斯

抽采效果;若定向长钻孔布置层位靠下,则抽采钻孔 会更早受到采动影响而出现抽采孔变形破坏。由试

报

验工作面其他钻孔柱状和覆岩采动裂隙反演结果可 知,在距离煤层顶板 41.2~43.6 m 位置赋存一层亚关 键层 2,若定向长钻孔全部布置在该关键层以上范 围,则在其破断之前,钻孔因未与亚关键层 2 下伏岩 层的竖向破断裂隙贯通而难以抽采采空区瓦斯,此时 定向长钻孔不能发挥作用,不仅造成钻孔抽采效果不 佳,且易导致上隅角瓦斯体积分数超限;而且,由于亚 关键层 2 的控制作用,其下伏岩层会产生大量的贯通 裂隙,为采空区瓦斯运移提供了良好的通道。因此, 综合考虑顶板定向长钻孔的变形破坏情况及其对采 空区瓦斯的调控效果,试验工作面的定向长钻孔布置 在垮落带以上、亚关键层 2 及其上下的范围较为合 适,即距煤层 32~50 m 的顶板范围,如图 15 所示。







4.2 顶板定向长钻孔伸入工作面水平距离

工作面采动裂隙"O"形圈是布置定向长钻孔的 最佳区域。由前文 3.3 节得到试验工作面采动裂隙 "O"形圈宽度为 50.8 m,在导气裂隙带内岩层破断角 53°的条件下,定向长钻孔伸入工作面水平距离可定 为 20、30、40、50、60 m,如图 16 所示。

4.3 顶板定向长钻孔瓦斯抽采最优时段

在工作面横向离层区内,覆岩的离层裂隙发育且 与穿层破断裂隙互为贯通,是顶板定向长钻孔抽采瓦 斯的最优时段。当顶板定向长钻孔进入该区域时,瓦 斯抽采效果较好。根据 3.4 节的分析,可得到试验工 作面横向离层裂隙区发育的范围,如图 17 所示。











4.4 顶板定向长钻孔瓦斯抽采试验

在试验工作面正常回采期,按照定向长钻孔的上 述具体布置参数,在试验工作面运输巷的联络巷内布 置了钻场,每组共施工5个钻孔,孔径为178 mm。同 时,为了最大程度地抽采采空区瓦斯,对设计的定向 长钻孔各施工了1个分支孔(孔径98 mm),分支孔 位于定向长钻孔布置层位的下方,两者的层位垂距 9 m、水平错距2 m。根据现场实测结果,试验工作面 的顶板定向长钻孔瓦斯抽采量和上隅角瓦斯体积分 数的变化情况如图 18 所示。

由图 18 可知,在试验工作面正常回采期,顶板定向长钻孔的抽采量呈周期性的波动状态,平均瓦斯抽 采量为 26.2 m³/min,工作面采空区瓦斯抽采率达 58.1%,而相邻工作面同样条件下的钻孔平均瓦斯抽 采量为 19.24 m³/min、采空区瓦斯抽采率为 28.4%~ 45.4%;同时,工作面上隅角瓦斯体积分数也随工作 面推进出现周期性的升-降变化,最大仅为 0.66%,未 出现瓦斯超限现象。



图 18 定向钻孔瓦斯抽采量与上隅角瓦斯体积分数变化 Fig.18 Variation of gas drainage by directional borehole and gas concentration on the upper corner

5 结 论

(1)采用覆岩运动地面钻孔全柱状原位监测方法,揭示了深部开采条件下覆岩运动的分段特征,即 覆岩运动将经历煤壁支撑影响阶段、低位岩层破断运动阶段、破断覆岩快速回转阶段、上部覆岩向下重新 压实阶段和采动影响衰减的整体运动平稳阶段。

(2)建立了基于覆岩运动原位监测的采动裂隙 空间形态反演方法,确定了试验工作面采动覆岩导气 裂隙带高度为93.1 m、卸压解吸带范围为距煤层顶板 93.1~466.1 m、"O"形圈裂隙区宽度为 50.8 m。

(3)根据采动覆岩运动的5阶段变化规律,确定 了采动覆岩移动"横三区"的具体发育范围,揭示了 低位岩层破断运动阶段和破断覆岩快速回转阶段是 抽采工作面采空区瓦斯的有利时机。

(4)提出了包括钻孔布置层位、伸入工作面水平 距离和抽采最优时段的顶板定向长钻孔精准抽采瓦 斯技术方案,并取得了较好的应用效果。在定向长钻 孔抽采条件下,试验工作面上隅角瓦斯体积分数最大 为0.66%,采空区瓦斯抽采率平均提高了57.5%,实 现了工作面的安全开采。

参考文献(References):

 [1] 袁亮. 我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J]. 煤炭学报,2016, 41(1):1-6.

YUAN Liang. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1):1-6.

- [2] 谢和平,高峰,鞠杨. 深部岩体力学研究与探索[J]. 岩石力学与 工程学报,2015,34(11):2161-2178.
 XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(11):2161-2178.
- [3] 许家林. 煤矿绿色开采 20 年研究及进展[J]. 煤炭科学技术,

2020,48(9):1-15.

XU Jialin. Research and progress of coal mine green mining in 20 years[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9):1-15.

[4] 程远平, 俞启香. 煤层群煤与瓦斯安全高效共采体系及应用[J]. 中国矿业大学学报,2003,32(5):471-475.

CHENG Yuanping, YU Qixiang. Application of safe and highefficient exploitation system of coal and gas in coal seams [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(5): 471-475.

- [5] 胡国忠,王宏图,李晓红,等. 急倾斜俯伪斜上保护层开采的卸压瓦斯抽采优化设计[J]. 煤炭学报,2009,34(1):9-14.
 HU Guozhong, WANG Hongtu, LI Xiaohong, et al. Optimization design on extracting pressure-relief gas of steep-inclined up-protective layer with pitching oblique mining [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(1):9-14.
- [6] 薛俊华. 近距离高瓦斯煤层群大采高首采层煤与瓦斯共采[J]. 煤炭学报,2012,37(10):1682-1687.
 XUE Junhua. Integrated coal and gas extraction in mining the first seam with a high cutting height in multiple gassy seams of short intervals[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(10):1682-1687.
- [7] 钱鸣高,许家林. 覆岩采动裂隙分布的"O"形圈特征研究[J]. 煤炭学报,1998,23(5):466-469.
 QIAN Minggao, XU Jialin. Study on the "O-shape" circle distribution characteristics of mining-induced fractures in the overlaying strata[J]. Journal of China Coal Society, 1998,23(5):466-469.
- [8] 钱鸣高,刘听成. 矿山压力及其控制[M]. 北京:煤炭工业出版 社,1991.
- [9] 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.
 YU 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.
- [10] 李树刚,林海飞,赵鹏翔,等. 采动裂隙椭抛带动态演化及煤与 甲烷共采[J].煤炭学报,2014,39(8):1455-1462.
 LI Shugang,LIN Haifei,ZHAO Pengxiang, et al. Dynamic evolution of mining fissure elliptic paraboloid zone and extraction coal and gas [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1455-1462.
- [11] 林海飞,杨二豪,夏保庆,等. 高瓦斯综采工作面定向钻孔代替 尾巷抽采瓦斯技术[J]. 煤炭科学技术,2020,48(1):136-143.
 LIN Haifei, YANG Erhao, XIA Baoqing, et al. Directional drilling replacing tailgate gas drainage technology in gassy fullymecha-nized coal mining face[J]. Coal Science and Technology, 2020,48(1):136-143.
- [12] 刘泽功,戴广龙,卢平,等.顶板巷道抽放瓦斯试验与效果分析
 [J].煤矿安全,2001,32(12):13-15.
 LIU Zegong, DAI Guanglong, LU Ping, et al. Test and effect analysis of gas extraction in roof roadway[J]. Safety in Coal Mines, 2001,32(12):13-15.
- [13] 卢平,袁亮,程桦,等. 低透气性煤层群高瓦斯采煤工作面强化 抽采卸压瓦斯机理及试验[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4):

580-585.

LU Ping, YUAN Liang, CHENG Hua, et al. Theory and experimental studies of enhanced gas drainage in the high-gas face of low permeability coal multi-seams[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4):580–585.

[14] 杨科,谢广祥.采动裂隙分布及其演化特征的采厚效应[J].煤炭学报,2008,33(10):1092-1096.

YANG Ke, XIE Guangxiang. Caving thickness effects on distribution and evolution characteristics of mining induced fracture [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(10):1092-1096.

[15] 张通,袁亮,赵毅鑫,等. 薄基岩厚松散层深部采场裂隙带几何 特征及矿压分布的工作面效应[J]. 煤炭学报,2015,40(10): 40-48.

ZHANG Tong, YUAN Liang, ZHAO Yixin, et al. Distribution lawof working face pressure under the fracture zone distribution c-haracteristic of deep mining [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10):2260-2268.

- [16] 赵保太,林柏泉."三软"不稳定低透气性煤层开采瓦斯涌出及 防治技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2007.
- [17] 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 of dynamic evolution rules and distribution pattern of mining-induced fractures of thick coal seam[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2013,42(6):935-940.
- [18] 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.
- [19] 李树清,何学秋,李绍泉,等.煤层群双重卸压开采覆岩移动及
 裂隙动态演化的实验研究[J].煤炭学报,2013,38(12):
 2146-2152.

LI Shuqing, HE Xueqiu, LI Shaoquan, et al. Experimental research on strata movement and fracture dynamic evolution of double pressure-relief mining in coal seams group [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(12):2146–2152.

- [20] MAJDI A, HASSANI P P, YOUSEF Nasiri M. Prediction of the height of destressed zone above the mined panel roof in longwall coal mining [J]. International Journal of Coal Geology, 2012,62:62-72.
- [21] MOHAMMAD Rezaei, MOHAMMAD Farouq Hossaini, ABBAS Majdi. A time-independent energy model to determine the height of de-stressed zone above the mined panel in longwall coal mining [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 47: 81-92.
- [22] 许家林,钱鸣高,金宏伟.基于岩层移动的"煤与煤层气共采"

技术研究[J]. 煤炭学报,2004,29(2):129-132.

XU Jialin, QIAN Minggao, JIN hongwei. Study on "coal and coalbed methane simultaneous extraction" technique on the basis of strata movement[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(2): 129–132.

- [23] 许家林.煤矿绿色开采[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2011.
- [24] QU Qingdong, XU Jialin, WU Renlun, et al. Three-zone characterization of coupled strata and gas behavior in multi-seam mining[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015,78:91–98.
- [25] 许家林. 岩层采动裂隙演化规律与应用[M]. 徐州:中国矿业 大学出版社,2016.
- [26] 胡国忠,许家林,黄军碗,等. 高瓦斯综放工作面的均衡开采技术研究[J]. 煤炭学报,2010,35(5):711-716.
 HU Guozhong,XU Jialin,HUANG Junwan, et al. Study on the technique of equilibrium mining for high gassy fully mechanized top-coal caving face [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(5):711-716.
- [27] HU Guozhong, XU Jialin, REN Ting, et al. Adjacent seam pressure-relief gas drainage technique based on ground movement for initial mining phase of longwall face [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 77:237-245.
- [28] 胡国忠,许家林,秦伟,等. 基于关键层运动的邻近层卸压瓦斯 抽采优化设计方法[J]. 煤炭科学技术,2021,49(5):52-59.
 HU Guozhong, XU Jialin, QIN Wei, et al. Optimization designing method of pressure-relief gas drainage in adjacent layers based on key strata movement[J]. Coal Science and Technology,2021, 49(5):52-59.
- [29] 钱鸣高,缪协兴,许家林,等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐 州:中国矿业大学出版社,2003.
- [30] 许家林,朱卫兵,王晓振. 基于关键层位置的导水裂隙带高度预计方法[J]. 煤炭学报,2012,37(5):762-769.
 XU Jialin, ZHU Weibing, WANG Xiaozhen. New method to predict the height of fractured water-conducting zone by location of key strata[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 762-769.
- [31] 许家林,秦伟,陈晓军,等. 采动覆岩卸荷膨胀累积效应的影响
 因素[J].煤炭学报,2022,47(1):115-127.
 XU Jialin, QIN Wei, CHEN Xiaojun, et al. Influencing factors of accumulative effect of overburden strata expansion induced by stress relief[J]. Journal of China Coal Society,2022,47(1):115-127.
- [32] 钱鸣高,李鸿昌. 采场上覆岩层活动规律及其对矿山压力的影响[J]. 煤炭学报,1982,7(2):1-12.
 QIAN Minggao,LI Hongchang. The movement of overlying strata in longwall mining and its effect on ground pressure [J]. Journal of China Coal Society,1982,7(2):1-12.