

采矿与岩层控制工程学报

JOURNAL OF MINING AND STRATA CONTROL ENGINEERING



煤层顶板“人造解放层”采动响应规律相似模拟研究

潘俊锋 邬建宏 贺海鸿 高家明 马小辉 杜涛涛 吕大钊

Similarity simulation study on the mining response law of artificial stress relief layer in coal seam roof

PAN Junfeng, WU Jianhong, HE Haihong, GAO Jiaming, MA Xiaohui, DU Taotao, LYU Dazhao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.2024-1411>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

采动增量静载荷加载下煤层卸压钻孔响应规律及其极限性

Response law and limit of pressure relief drilling borehole in coal seams under incremental static loading

采矿与岩层控制工程学报. 2025, 7(1): 013033-1-013033-15 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.2024-1232>

工作面坚硬顶板水力压裂对采动应力影响的数值模拟研究

Influence of hydraulic fracturing of strong roof on mining-induced stress-insight from numerical simulation

采矿与岩层控制工程学报. 2021, 3(2): 023032-023032 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20210329.001>

分布式光纤监测的采动断层活化特征实验研究

Experimental study on mining fault activation characteristics by a distributed optical fiber system

采矿与岩层控制工程学报. 2020, 2(1): 013018-013018 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.2020.01.010>

采场覆岩变形分布式光纤监测岩体-光纤耦合性分析

Theoretical analysis of the mechanical coupling between rock and optical fiber for distributed sensing of overlying strata deformation

采矿与岩层控制工程学报. 2020, 2(3): 033038-033038 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20191104.001>

近距离煤层群半煤岩上保护层开采卸压增透效应研究

Study on pressure relief and permeability enhancement effect of upper protective layer mining of semi-coal rock in close distance coal seam group

采矿与岩层控制工程学报. 2022, 4(2): 023524-023524 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20211111.001>

采动覆岩全场变形演化过程分布式光纤监测研究

Evolution of mining-induced overburden deformation using distributed optical fiber

采矿与岩层控制工程学报. 2022, 4(1): 013014-013014 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20211014.002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

潘俊锋, 邬建宏, 贺海鸿, 等. 煤层顶板“人造解放层”采动响应规律相似模拟研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2025, 7(2): 023023.

PAN Junfeng, WU Jianhong, HE Haihong, et al. Similarity simulation study on the mining response law of artificial stress relief layer in coal seam roof[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2025, 7(2): 023023.

煤层顶板“人造解放层”采动响应规律相似模拟研究

潘俊锋^{1,2}, 邬建宏^{1,2}, 贺海鸿³, 高家明^{1,2}, 马小辉³, 杜涛涛^{1,2}, 吕大钊³

(1. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013; 2. 煤矿灾害防控全国重点实验室 冲击地压室, 北京 100013; 3. 陕西彬长矿业集团有限公司, 陕西咸阳 712000)

摘要: 通过地面“L”型井压裂厚硬顶板, 在煤层上方形成“人造解放层”, 可以显著降低冲击地压风险性。针对工程现场因手段受限而难以揭示“人造解放层”形成后覆岩在工作面回采过程中结构与载荷的变化特征, 基于 OFDR 分布式光纤、压力盒以及三维光学数字散斑监测等技术, 开展厚硬顶板区域预裂形成“人造解放层”后覆岩结构与载荷采动响应规律相似模拟研究。结果表明, 压裂使厚硬岩层的整体性及其强度得到有效弱化, 工作面推进过程中覆岩能够及时、有序垮落, 悬臂面积和悬臂长度减小, 由未压裂条件下的长悬臂梁“F”形结构转变为压裂后的短悬臂梁“F”形结构; 压裂后岩层破断不再满足于极限破断步距公式, 而是受压裂裂缝影响控制, 压裂层及附近上下关键层都将提前破断; 压裂裂缝受采动应力作用再次发育, 顶板局部覆岩出现裂缝超前缓慢发育现象, 覆岩破断块体沿压裂裂缝切落, 致使来压步距减小, 压裂后来压步距降低了 17%; 同时, 压裂后未出现因中高位关键层和基本顶同时破断, 导致顶板覆岩出现大面积垮落的现象; 工作面推进过程中, 顶板压裂形成的“人造解放层”起到隔层作用, 阻断了上层与下层的载荷硬传递, 同时, 压裂层内部裂隙发育, 在由三向承载向两向承载转换过程中, 结构不断劣化, 丧失了大面积悬臂能力, 从而降低了工作面超前覆岩变形和煤体应力集中度。

关键词: 厚硬顶板; 区域卸压; 人造解放层; 采动响应; 光纤监测; 岩层活动

中图分类号: TD324

文献标志码: A

文章编号: 2096-7187(2025)02-3023-17

Similarity simulation study on the mining response law of artificial stress relief layer in coal seam roof

PAN Junfeng^{1,2}, WU Jianhong^{1,2}, HE Haihong³, GAO Jiaming^{1,2}, MA Xiaohui³, DU Taotao^{1,2}, LYU Dazhao³

(1. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 2. Rock Burst Sub Laboratory, State Key Laboratory for Coal Mine Disaster Prevention and Control, Beijing 100013, China; 3. Shaanxi Binchang Mining Group Co., Ltd., Xianyang 712000, China)

Abstract: The "L"-shaped fracturing well on the ground breaks the thick and hard roof, forming an artificial stress relief layer above the coal seam, which can significantly reduce the risk of rockburst. Constraining at the engineering site, it is difficult to reveal the structural and load changes of the overlying rock during the mining after the formation of the artificial stress relief layer. Using OFDR distributed optical fiber, pressure box, and

收稿日期: 2024-11-15

修回日期: 2024-12-19

责任编辑: 施红霞

DOI: 10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.2024-1411

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2022YFC3004604); 国家自然科学基金面上资助项目 (52174186); 国家高层次人才计划资助项目 (020403050009)

作者简介: 潘俊锋 (1979—), 男, 陕西旬邑人, 研究员, 博士生导师。E-mail: panjunfeng@yeah.net

three-dimensional optical digital speckle monitoring, prefracturing of the thick and hard roof area is carried out to investigate the structure and load response law of the overlying rock after the formation of the artificial stress relief layer. The results show that fracturing effectively weakens the integrity and strength of thick and hard rock layers. During the process of advancing the working face, the overlying rock can collapse in a timely and orderly manner, and the cantilever area and length are reduced. The "F"-shaped structure of the long cantilever beam under non-fracturing conditions is transformed into the "F"-shaped structure of the short cantilever beam after fracturing. After fracturing, the fracture of rock layers no longer follows the formula of ultimate fracture step distance, but is controlled by the fracturing cracks. The fractured layer and nearby key layers should be fractured in advance. The fracturing cracks develop again under the action of mining stress, and a phenomenon of slow and advanced development of cracks in the local overlying roof rock is observed. The fractured blocks of overlying rock fall along fractures, resulting in a decrease by 17% in the step distance of mining-induced pressure. At the same time, no large-scale collapse of the overlying rock occur due to the simultaneous rupture of the key layer and the basic roof in the middle and high positions after fracturing. During the process of working face advance, the artificial stress relief layer formed by the top plate fracturing acts as a barrier, blocking the hard transmission of loads between the upper and lower layers. At the same time, cracks develop inside the fracturing layer. During the transition from triaxial to biaxial loading, the structure deteriorates continuously, thereby reducing the deformation of the overlying rock and the stress concentration of coal seam in advance.

Key words: thick and hard top plate; regional pressure relief; artificial stress relief layer; mining response; fiber optic monitoring; rock activity

煤层往往赋存于沉积岩层的夹缝中, 煤炭采出过程就是覆岩活动过程, 覆岩活动规律的掌握与控制关系着安全生产的方方面面^[1-2], 因而是研究的热点。对于采场覆岩破断特征的研究, 茅献彪等^[3]研究得出关键层的破断是由其载荷与支承压力特征所决定的, 与覆岩的分层力学特性和几何特性密切相关; 刘传孝^[4]从三维离散单元法及非线性动力学方法两个角度研究得出, 坚硬顶板的初次垮落具有冲击性, 应力水平较高, 而周期垮落阶段应力水平较初次垮落阶段降低; 蒋金泉等^[5]研究得出高位硬厚岩层在边界基础支承下, 走向和倾向的最大弯矩和起始破断位置在采空区中部, 具有边界基础变形效应; 冯强等^[6]建立了采场顶板力学分析模型, 得出支承压力最大值处可能是岩梁破断的关键位置; 潘岳等^[7]的研究结果表明厚硬岩层距离工作面越近, 岩梁的变形量和弯矩越大, 聚集的弹性能越多, 破断后所释放的能量也越多; 鞠金峰等^[8]提出了 3 种“悬臂梁”结构的破断运动形式: “悬臂梁”直接垮落式、“悬臂梁”双向回转垮落式、“悬臂梁-砌体梁”交替式; 于雷等^[9]将顶板破断运动分为了 5 种基本形式, 研究表明组合悬臂梁结构单独断裂回

转引起小周期来压, 铰接岩梁结构回转引起组合悬臂梁结构同时断裂回转引起大周期来压; 郭文兵等^[10]分析了覆岩破断传递过程, 随着工作面向前推进, 采空区上覆岩层依次经历悬空完整、悬空断裂、悬空垮落、悬伸稳定及断裂等过程; 荣海等^[11]研究了覆岩结构失稳运动规律, 认为低、中位坚硬岩层初次失稳和周期失稳, 是工作面发生冲击的主要影响因素。

在覆岩进行区域预裂人工干预研究方面, 罗文等^[12]针对神东矿区布尔台矿强矿压显现问题, 在工作面中部上覆基本顶实施水力压裂, 破坏基本顶的完整性, 使采空区顶板能够及时垮落; 夏永学等^[13]通过对距离煤层顶板上方致灾性坚硬岩层进行大范围水力压裂, 大幅度减弱了目标岩层的整体强度; 黄澎涛^[14]通过井上下远程区域水力压裂工业试验, 发现压裂后的煤体应力降低 10 MPa 以上; 贺斌等^[15]采用井下长钻孔压裂解决了大柳塔 52502 工作面坚硬顶板难以及时垮落等问题; 谢华东等^[16]研究表明水力压裂破坏了关键砂岩层的完整性, 加速了岩层的破裂, 微震事件大幅增加, 震级显著降低; 王泽阳等^[17]通过工程实践表明, 经过定向长钻孔分

段水力压裂后, 微震事件超前工作面距离和侧向发育距离减小, 微震事件总能量和频次均下降。于斌^[18]、高瑞^[19]等研究表明压裂可改变远场高位结构的形成和失稳条件, 降低其破断失稳的矿压作用强度; 潘超^[20]研究得出压裂弱化了高位坚硬顶板整体性和强度, 促使顶板及时垮落, 垮落后碎胀矸石的支撑作用是造成工作面顶板压力减小的直接原因。

综上所述, 研究人员已从过去被动地研究岩层活动规律向人工主动干预转变, 但仍然处于宏观效应分析, 缺乏揭示宏观效应背后人工干预前后覆岩结构与载荷采动响应规律。笔者以彬长矿区孟村煤矿首次探索地面“L”型井压裂干预厚硬顶板^[21], 在煤层上方形成“人造解放层”^[22], 以降低冲击地压风险性, 但是受工程现场研究手段限制, 难以揭示“人造解放层”形成后覆岩在工作面回采过程中结构与载荷变化特征为背景, 基于 OFDR 分布式光纤、压力盒以及三维光学数字散斑监测等技术, 在实验室开展了厚硬顶板未压裂和压裂相似模拟对比试验研究, 研究结果可为厚硬顶板区域预裂“人造解放层”调控覆岩结构与载荷方法的推广提供理论参考。

1 工程背景及物理相似模型建立

彬长矿区孟村煤矿开采 4 号煤层, 煤层平均厚度为 20 m, 平均埋藏深度为 750 m, 平均倾角为 4°。经鉴定与评价煤层具有强冲击倾向性、强冲危险性。开采方式为走向长壁综放开采, 机采高度 3.5 m, 放煤高度约 14 m, 采用全部垮落法管理顶板。矿井首采 401101 工作面在开采过程中多次发生冲击地压, 第 2 个工作面 401102 综放工作面切眼贯通后, 回采前采用了地面“L”型水平井区域压裂煤层上覆厚硬顶板, 为下伏回采煤层形成“人造解放层”低应力环境, 以大范围预防冲击地压。为了揭示厚硬顶板区域压裂前后覆岩结构与载荷采动效应, 开展了基于光纤监测等方法的实验室相似模拟研究。

1.1 相似模型设计

试验以孟村煤矿 401102 工作面为研究对象, 选用尺寸为 3.0 m×0.3 m×2.0 m 的平面模型试验台。根据相似理论, 确定几何相似常数为 250、容重相似常数为 1.26、应力相似常数为 390、时间相似常数为 15.81。现场每工作班实际为 8 h, 每天 2 班采

煤 1 班检修, 即采煤工作时间为 16 h/d, 检修工作时间为 8 h/d, 每天进尺约 4 m。基于此, 综合考虑其他因素及实验室具体条件, 设计模型开采工作面完成采煤作业为 1 次/h, 每次开挖 5 cm, 按此速度推进至模型开挖边界。

模型顶部施加等效应力, 本次试验载荷相似系数与应力相似系数相同, 上覆未铺设岩层的厚度为 355.73 m, 因模型尺寸有限, 相似模型中上覆岩层未进行铺装的部分, 需通过加载来补偿。试验采用铁块加载的方式, 模型顶部需铺设的铁块质量为约 2 094 kg, 单块铁块质量为 5 kg, 模型顶部需铺设 419 块铁块。模型基本参数见表 1。

表 1 物理相似模型基本参数

Table 1 Basic parameters of physical similarity model

项目	参数	项目	参数
模型长度/m	3.0	开挖距离/m	2.4
模型高度/m	1.7	开挖步数/步	48
模型边界/m	0.3	煤层开挖高度/cm	7
开挖时间间隔/min	60	单次开挖距离/cm	5
补偿载荷/MPa	0.022 803	加载铁块数量/块	419

试验以工作面岩层柱状图和岩层物理力学参数为基础, 采用二维试验台, 用细砂、石灰、石膏、云母粉等材料搭建平面模型。根据模型岩层结构及岩层物理力学参数, 制定相似材料配比, 见表 2。综合采用理论分析、微震监测并结合岩层可压裂性, 确定亚关键层 3 为压裂层。试验主要考虑岩体致裂裂缝扩展形态的相似性, 不考虑岩体的水化反应, 尝试采用静态破碎剂对目标压裂层位岩层进行膨胀致裂, 相似模拟地面水平井分段压裂对岩体的弱化效果。

1.2 数据监测与模型开挖

采用 OFDR 分布式光纤监测系统、压力盒应力监测系统和三维光学数字散斑监测系统 3 种手段, 对相似模型表面和内部位移、应变、应力进行实时监测, 相似模型监测系统设计及实物图, 如图 1 所示。

(1) 分布式光纤布设及监测

传感光纤采用预埋方式, 沿模型从开切眼至终采线均匀垂直布设 4 根, 分别为 V1、V2、V3、V4; 沿模型水平布设 4 根, 分别为 H1、H2、H3、H4。垂直光纤应变曲线变化代表垮落带和裂隙带高度发育过程; 水平光纤应变曲线表征岩层破断动态变化。

表 2 模型相似材料配比
Table 2 Model similar material proportioning table

层号	岩性	岩层厚度/m	配比号	关键层位置	层号	岩性	岩层厚度/m	配比号	关键层位置
12	粗粒砂岩	7.98	1437		13	泥岩	17.41	1555	
11	粉砂岩	11.17	1555		14	粗粒砂岩	9.55	1473	
10	粗粒砂岩	22.50	1337	亚关键层 3(KS3)	15	泥岩	13.26	1555	
9	泥岩	3.42	1555		16	细粒砂岩	4.23	1446	
8	细粒砂岩	2.47	1446		17	粗砾岩	21.10	1273	亚关键层 4(KS4)
7	泥岩	11.00	1555		18	细粒砂岩	6.25	1446	
6	粗粒砂岩	6.88	1473	亚关键层 2(KS2)	19	中粒砂岩	9.72	1446	
5	泥岩	2.32	1555		20	粗砾岩	2.36	1273	
4	中粒砂岩	4.53	1437		21	粉砂岩	13.08	1555	
3	泥岩	7.21	1555		22	粗粒砂岩	14.54	1473	
2	粗粒砂岩	10.08	1437	亚关键层 1(KS1)	23	中粒砂岩	22.97	1446	亚关键层 5(KS5)
1	砂质泥岩	10.07	1555		24	粗粒砂岩	57.75	1473	
0	煤层	25.32	1555		25	粗砾岩	4.60	1273	
1	铝质泥岩	10.00	1555		26	粗粒砂岩	65.24	1473	主关键层

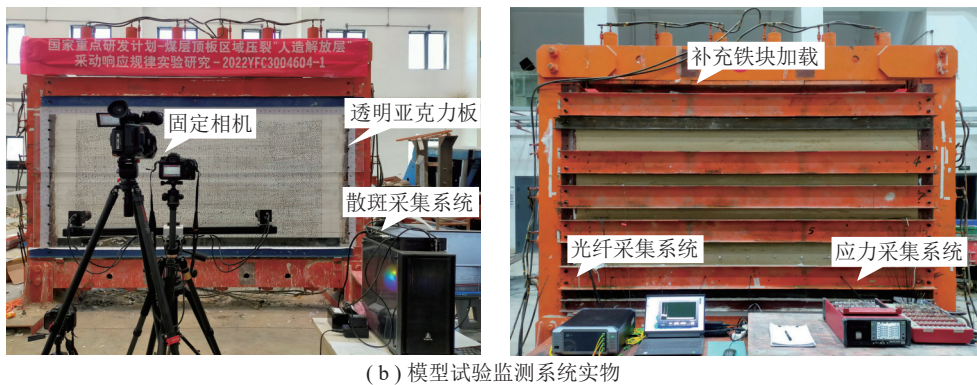
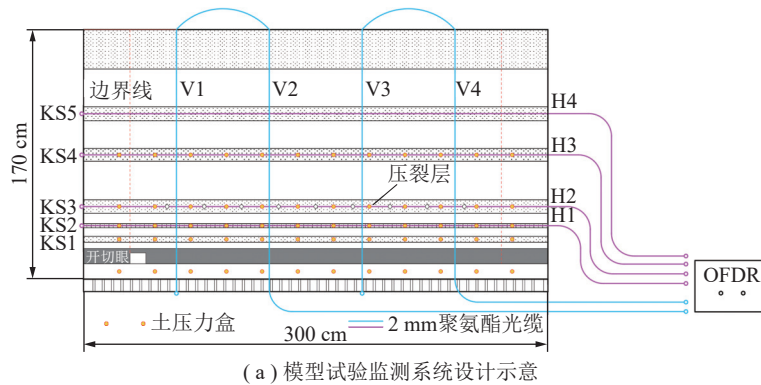


图 1 模型试验监测系统

Fig. 1 Model experiment monitoring system

铺设位置如图 1 所示。试验选用 OSI 型四通道 OFDR 分布式光纤传感仪。

(2) 压力盒布设及监测

在模型关键层的内部埋入压力盒, 对岩层内部的应力情况进行实时监测。在模型垂直方向分

5 组, 每组 12 个共 60 个土压力盒传感器 (图 1), 采用预埋式垂直布设于煤层顶底板岩层中, 编号为 T-1~T-12。试验选用 TDS 静态应变采集仪, 采样方式为实时间隔自动采集, 每间隔 2 min 采集 1 次。

(3) 三维数字散斑监测

采用数字散斑测量系统对模型表面的应变场和位移场进行监测。选用 XTDIC 三维全场位移、应变测量系统, 该系统由 2 个高速摄像机、控制机箱、计算机及 XTDIC 系统软件等组成, 采样方式为实时间隔自动采集, 每间隔 2 min 采集 1 次。

(4) 模型开挖

模拟煤层走向长度为 300 cm, 模型两侧各留 30 cm 边界煤柱, 煤层开采的推进长度为 240 cm, 开采速度为 5 cm/次, 每次间隔 1 h, 共计开采 48 次, 历时 2 d 结束。

2 岩层压裂前后覆岩结构与载荷采动响应规律相似模拟

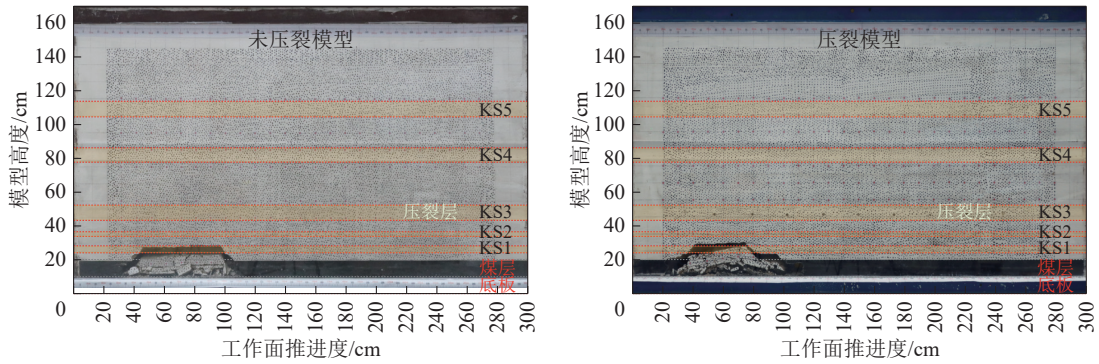
基于上述模型, 为了考察煤层覆岩形成“人造

解放层”后, 覆岩在工作面开采过程中结构与载荷采动响应特征, 分别开展岩层压裂前后覆岩结构采动演化规律、覆岩采动变形破坏规律、采场应力与覆岩位移演化规律等研究。

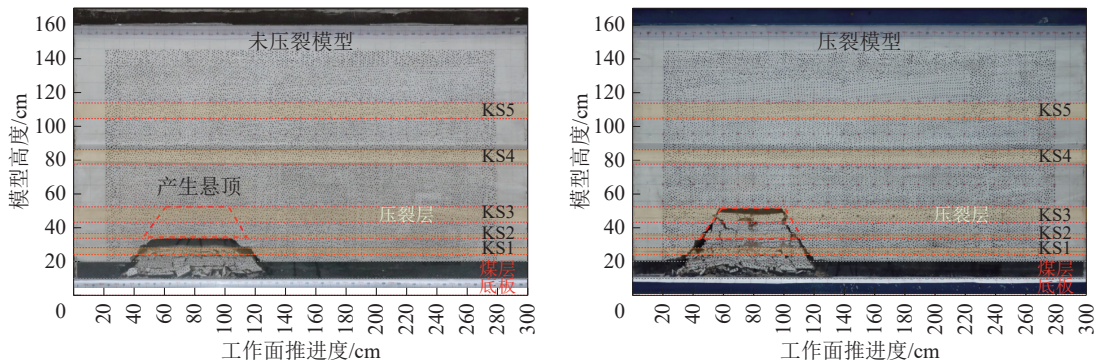
2.1 岩层压裂前后覆岩结构采动演化规律

2.1.1 覆岩结构演化规律

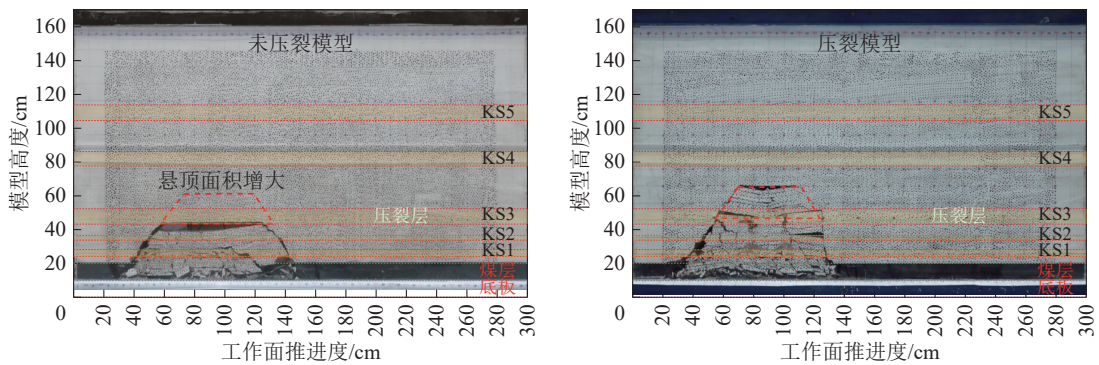
按照设计推进度和推进时间对工作面进行开采, 得到工作面开采过程中不同阶段的覆岩结构形态特征, 对比分析区域压裂对覆岩结构的调控作用。如图 2(a) 所示, 工作面推进至 110 cm 时, 未压裂模型和压裂模型的基本顶都发生了初次破断, 初次破断步距达 80 cm, 但覆岩的垮落高度都未达到压裂层位, 并且由于压裂造成卸压作用, 压裂模型顶板垮落不够充分。



(a) 推进至110 cm时覆岩结构形态



(b) 推进至130 cm时覆岩结构形态



(c) 推进至155 cm时覆岩结构形态

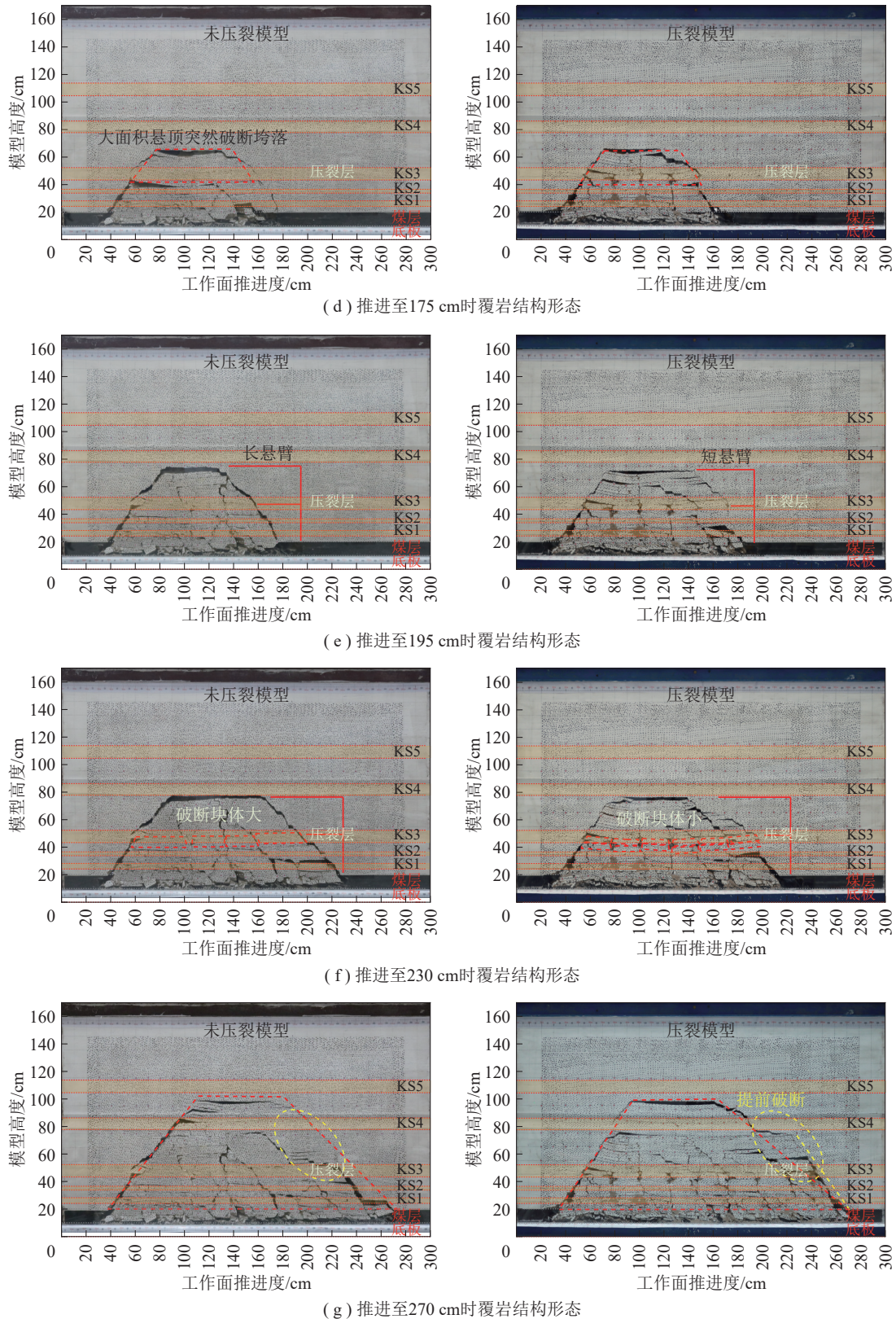


图2 不同推采阶段覆岩结构形态

Fig. 2 Overburden structure morphology at different mining stages

如图2(b)所示,工作面推进至130 cm时,未压裂模型处于持续悬顶状态;压裂模型由于压裂有效弱化了亚关键层3的整体性及其强度,压裂层位出

现垮断,同时,覆岩垮落高度增加。

如图2(c)所示,工作面推进至155 cm时,未压裂模型中亚关键层2发生初次破断,覆岩垮落高度发

育至亚关键层 3 的底部位置; 压裂模型由于亚关键层 3 提前破断垮落, 所承载的覆岩也随之发生垮落。

如图 2(d) 所示, 在工作面推进至 175 cm 时, 未压裂模型大面积悬顶突然破断垮落, 破断块体较大, 对工作面造成剧烈影响; 而压裂模型未出现此现象, 在采动影响下压裂裂缝持续发育, 覆岩破断块体较小。

如图 2(e) 所示, 工作面推进至 195 cm 时, 未压裂模型覆岩破坏高度发育至亚关键层 4 底部, 煤层顶板上方形成长臂“F”形结构; 压裂模型也同样发育至亚关键层 4 底部, 由于压裂裂缝再次发育, 覆岩提前破断垮落, 煤层顶板上方悬臂面积和悬臂长度相对较小, 形成短臂“F”形结构。

如图 2(f) 所示, 工作面推进至 230 cm 时, 未压裂模型和压裂模型覆岩破坏发育高度相同。对覆岩破断块体进行对比分析, 未压裂模型破断块体整体较大, 破断垮落时易形成强烈矿压显现, 释放能量较高; 而压裂模型破断块体相对较小, 破断垮落时矿压显现缓和, 压裂后破断块体由大块变小块。

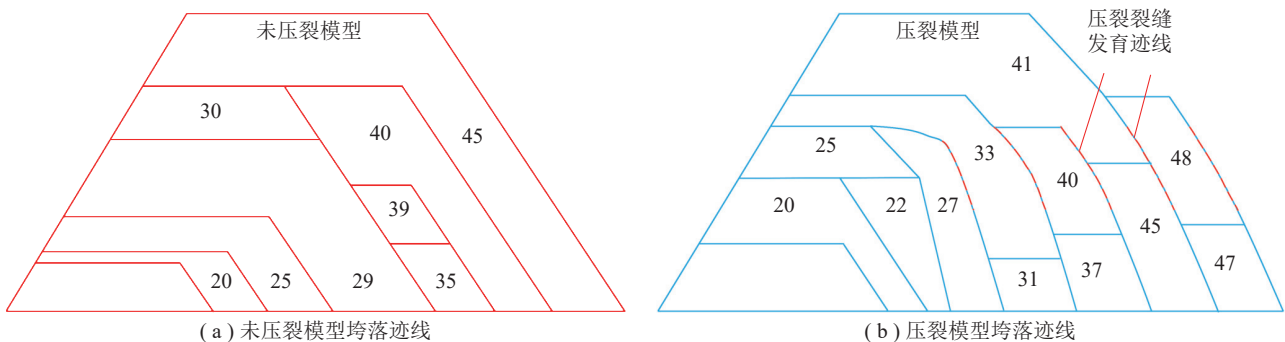


图 3 覆岩垮落迹线

Fig. 3 Footprint of overlying rock collapse

由图 3(a) 可知, 未压裂模型中, 随着工作面开挖, 基本顶垮落后, 顶板覆岩按照“ $\frac{C}{A/B}$ ”型^[23]垮落规律, 从下向上依次逐步垮落。模型开挖第 25、29、40 和 45 次时, 中高位关键层和基本顶同时破断, 导致顶板覆岩发生大面积垮落, 可能造成工作面大周期来压; 其余开挖次数为基本顶周期破断或上覆关键层周期破断, 可能造成小周期来压。经统计未压裂模型平均周期来压步距为 23 cm。

压裂模型的覆岩垮落规律与未压裂模型存在着明显差异, 覆岩垮落迹线如图 3(b) 所示。压裂裂缝在采动应力作用下, 沿着原裂缝尖端再次发育扩

展, 致使覆岩破断块体沿压裂裂缝切落; 压裂模型中未出现中高位关键层和基本顶同时破断, 导致覆岩大面积垮落的现象。经统计压裂模型平均周期来压步距为 19 cm, 与未压裂模型相比, 周期来压步距降低了 17%。

(2) 顶板局部裂缝超前缓慢发育

基于数字散斑监测应变云图 (图 4), 对顶板局部裂缝超前发育现象进行分析。工作面推进至 150 cm 时, 岩层裂缝再次起裂, 岩层最大应变值为 1.572×10^{-2} ; 在接续开挖 5 cm 后, 裂缝持续扩展, 应变增大为 1.754×10^{-2} ; 推进至 160 cm 时, 裂缝出现

贯通, 应变增大为 2.815×10^{-2} ; 在推进至 200 cm 时,

岩层出现破坏垮落, 最大应变值为 3.494×10^{-2} 。

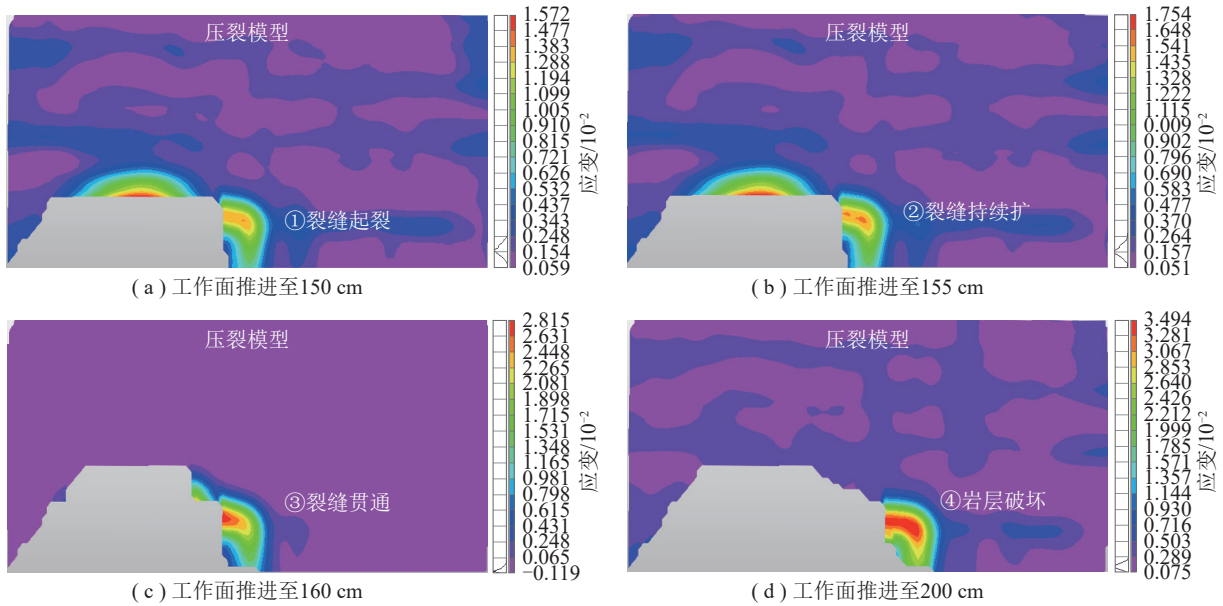


图 4 压裂模型裂缝超前发育

Fig. 4 Advanced development of fractures in fracturing model

经分析压裂在岩体内部产生损伤裂缝, 损伤裂缝相当于岩体中的弱面, 在受到采动应力加载作用时, 压裂裂缝面相对于其他完整岩体会优先发生起裂, 并在载荷作用下裂缝持续扩展逐渐贯通, 最终出现破坏, 表现为裂缝超前缓慢发育。

(3) 岩体破碎程度分析

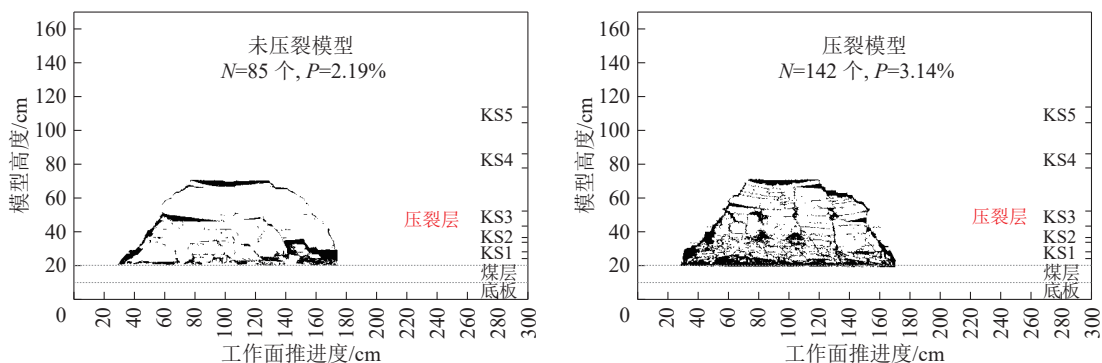
为进一步分析区域压裂对于覆岩破断块体和岩体破碎程度的影响, 对不同推进度下的未压裂和压裂模型的表面裂缝发育情况进行统计分析。采用 Image J 图像处理软件, 对未压裂和压裂模型的覆岩结构实物图进行二值化处理 (图 5、6), 随后进一步统计模型表面的裂缝总数 N 、裂缝表面积与模型表面积 (模型表面积为 $3.0 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$) 的比值 P 。

由图 5 和图 6 可知, 随着工作面的不断推进, 覆

岩裂缝发育并逐步垮落, 模型表面裂缝总数和裂缝表面积占比不断增大。从工作面推进至 130 cm 开始, 压裂模型的表面裂缝总数和裂缝占比始终大于未压裂模型, 而且增长速度也较快; 当工作面推进至 270 cm 结束时, 未压裂模型和压裂模型表面裂缝总数 N 别为 285 和 318, 未压裂模型和压裂模型裂缝表面积占比 P 分别为 5.35% 和 7.59%, 充分说明了压裂后模型表面裂缝发育, 使得岩体破断块体小, 岩体破碎程度高, 降低了覆岩破断带来的冲击风险。

2.2 岩层压裂前后覆岩采动变形破坏规律

模型铺设时在监测位置预埋入分布式光纤, 待模型压裂干燥固结后, 光纤与围岩耦合为一体, 光纤随围岩变形产生轴向压缩和拉伸, 从而感知围岩内部应变情况。当围岩压缩变形时, 光纤会产生一



(a) 工作面推进至 175 cm

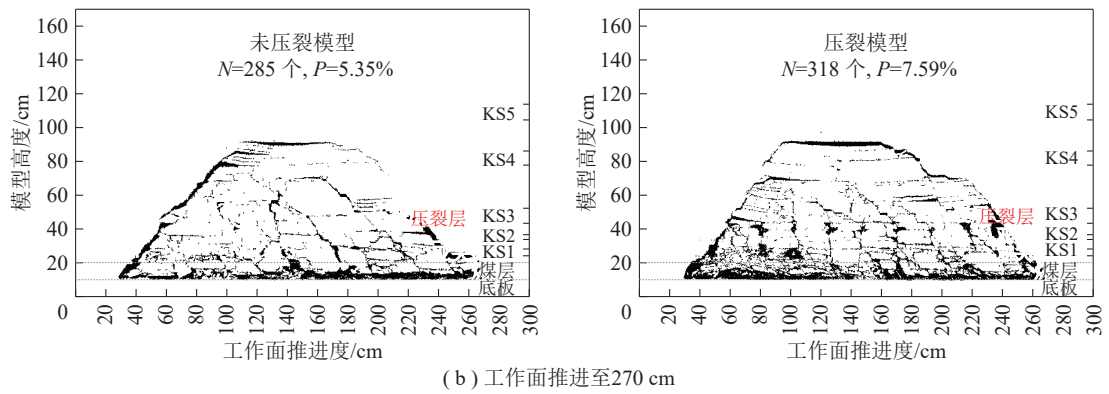


图 5 不同推进度下的裂缝网格特征

Fig. 5 Fracture grid characteristics under different advancement degrees

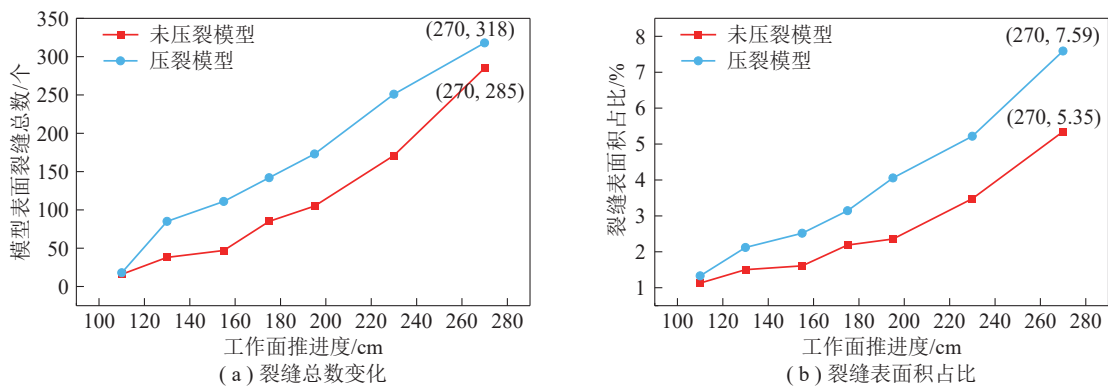


图 6 不同推进度下的裂缝总数和表面积变化

Fig. 6 Changes in total number of fractures and surface area under different advancement degrees

个“相对压缩量”，光纤应变值为负，表征为压应变；当围岩拉伸变形时，光纤应变值为正，表征为拉应变^[24]。

2.2.1 厚硬岩层变形规律

(1) 亚关键层 2 变形分析

随着工作面的推进，顶板悬空宽度逐渐增大，从光纤表征来看，顶板表现为下沉移动趋势，持续弯曲聚集弹性能。图 7 为未压裂模型工作面推进

至 120 cm 时亚关键层 2 光纤的变形表征，工作面顶部覆岩呈现拉应力聚集特征，在工作面前方 4 cm 的位置应变峰值为 7.6×10^{-5} ，超前影响距离为 45 cm；图 8 为压裂模型推进至 120 cm 时亚关键层 2 光纤变形表征，在工作面前方 13 cm 的位置应变峰值为 4.89×10^{-4} ，超前影响距离为 70 cm。

通过光纤数据表征对比分析，压裂模型中的亚关键层 2 比未压裂模型更早出现破断和裂隙发育

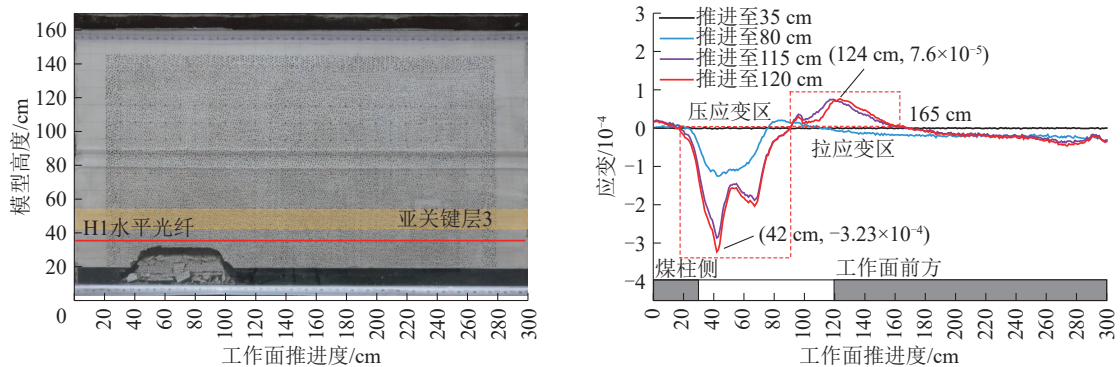


图 7 未压裂模型推进至 120 cm 时 H1 水平光纤应变曲线

Fig. 7 H1 horizontal fiber optic strain curves when the unfractured model advances to 120 cm

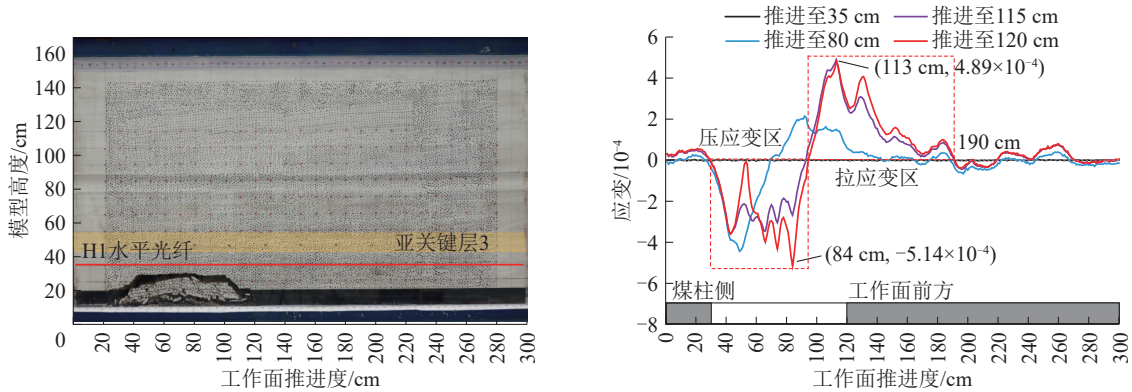


图8 压裂模型推进至120 cm时H1水平光纤应变曲线

Fig. 8 H1 horizontal fiber optic strain curves when the fracturing model advances to 120 cm

的特征, 如压裂模型推进至115 cm时, 光纤应变曲线就呈现出多个应变凸峰, 表征为岩梁内部弯曲应力已超过其强度极限, 岩体内部萌生裂隙并持续发育扩展, 直到裂隙贯穿岩层, 将会发生破断; 同时由于压裂层(亚关键层3)下方的整体岩层下移趋势更大, 使得岩体受拉应力影响范围大。

(2) 亚关键层3变形分析

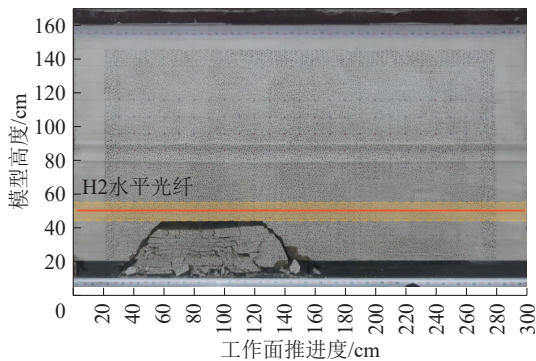


图9 未压裂模型推进至165 cm时H2水平光纤应变曲线

Fig. 9 H2 horizontal fiber optic strain curves when the unfractured model advances to 165 cm

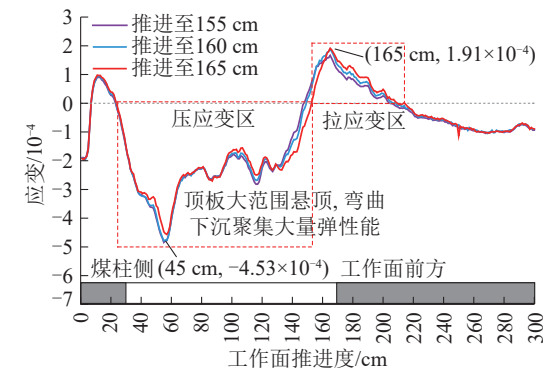
综合上述分析, 压裂有效弱化了厚硬岩层的整体性和强度, 且内部含有众多裂隙, 在工作面推采后能够及时随采随垮, 避免大面积悬顶聚集大量弹性性能。

2.2.2 工作面超前变形规律

(1) 覆岩破坏高度触及压裂层前

未压裂模型和压裂模型推进至115 cm时V2垂直光纤应变曲线如图11和12所示。由图11和图12可知, 垂直光纤整体上呈现负台阶特征, 光纤应变值为负, 表明在工作面靠近光纤过程中, 光纤受工作面超前支承压力作用, 煤岩体处于受压缩状

图9为未压裂模型推进至165 cm时光纤表征, 此时由于亚关键层3整体性好, 强度和厚度大, 处于大面积悬顶状态, 顶板弯曲下沉聚集大量弹性性能; 而压裂模型由于经压裂后岩层整体性和强度得到有效弱化, 丧失了聚集弹性性能的能力, 覆岩顶板随工作面推采及时垮落, 图10为压裂模型光纤表征的岩层内部裂缝形态。



态, 且随着工作面的不断靠近, 光纤应变峰值持续增大。

对比推采至115 cm时, 未压裂和压裂模型V2垂直光纤的超前变形规律。未压裂模型(图11)的0~70 cm范围为压应变区, 光纤应变峰值为 -9.76×10^{-4} 。压裂模型(图12)的0~38 cm范围为压应变区, 应变峰值为 -8.10×10^{-4} ; 38~53 cm为拉应变区, 应变峰值为 7.43×10^{-4} , 此处拉应变源于在压裂期间产生的水平裂隙, 在采动影响作用下呈现持续发育扩展的趋势。

当工作面推进至115 cm, 距离V2垂直光纤

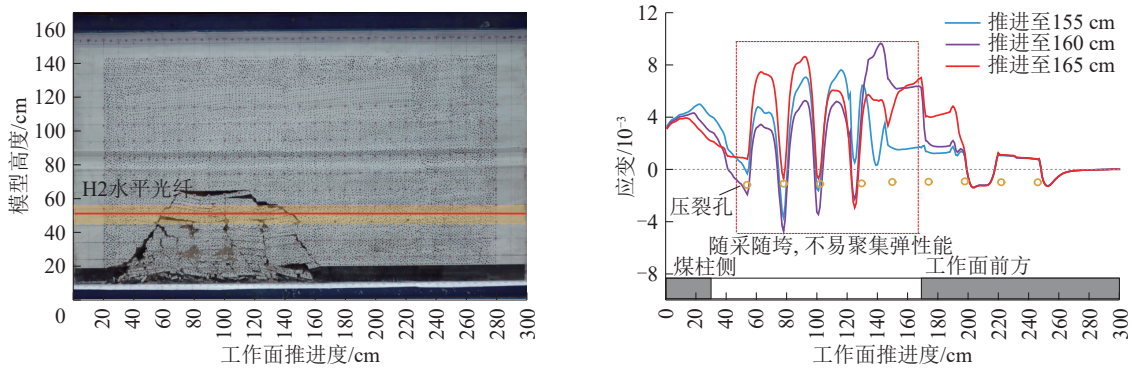


图 10 压裂模型推进至 165 cm 时 H2 水平光纤应变曲线

Fig. 10 H2 horizontal optical fiber strain curves when fracturing model advances to 165 cm

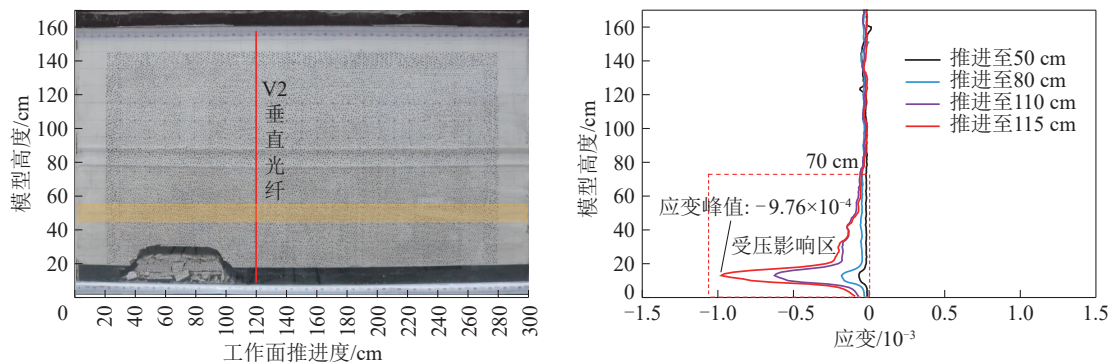


图 11 未压裂模型推进至 115 cm 时 V2 垂直光纤应变曲线

Fig. 11 V2 vertical optical fiber strain curves when the unfractured model advances to 115 cm

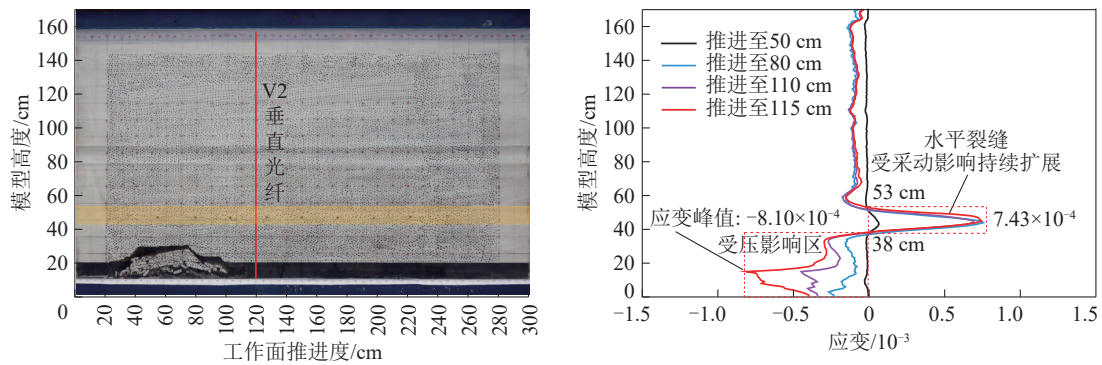


图 12 压裂模型推进至 115 cm 时 V2 垂直光纤应变曲线

Fig. 12 V2 vertical fibr optic strain curves when fracturing model advances to 115 cm

5 cm, 此时光纤处于超前支承压力影响范围内的弹性区, 可采用胡克定律对超前支承压力进行估算^[24], 煤体弹性模量为 6.84 GPa, 计算得到未压裂模型的煤壁应力峰值为 6.68 MPa, 而压裂模型的应力峰值为 5.54 MPa, 这充分说明压裂厚硬岩层后使得煤壁应力峰值得到降低, 可以起到较好的卸压作用。

从支承压力影响高度分析, 未压裂模型支承压力影响高度为 70 cm, 达到了亚关键层 3(压裂层) 上方 18 cm 的位置; 而压裂模型支承压力影响高度为

38 cm, 达到了亚关键层 3 的底部位置。说明由于压裂作用, 在亚关键层 3 内部产生水平裂缝和垂直裂缝, 使得厚硬岩层的强度及其整体性得到有效弱化, 在一定时间段内阻止了采动影响的向上传递, 此时间段指的是采动覆岩破坏高度触及压裂层之前。

(2) 覆岩破坏高度触及压裂层后

推采至 170 cm 时, 压裂和未压裂模型 V3 垂直光纤的超前变形规律如图 13 和 14 所示。由图 13 可知, 未压裂模型的 0~20 cm 范围为压应变区, 此

部分为煤体区域, 光纤应变峰值为 -4.586×10^{-3} ; 20~67 cm 为拉应变区, 此部分为悬臂梁固支端部;

67~143 cm 为压应变区, 此部分顶板弯曲下沉区域, 岩体受力压缩。

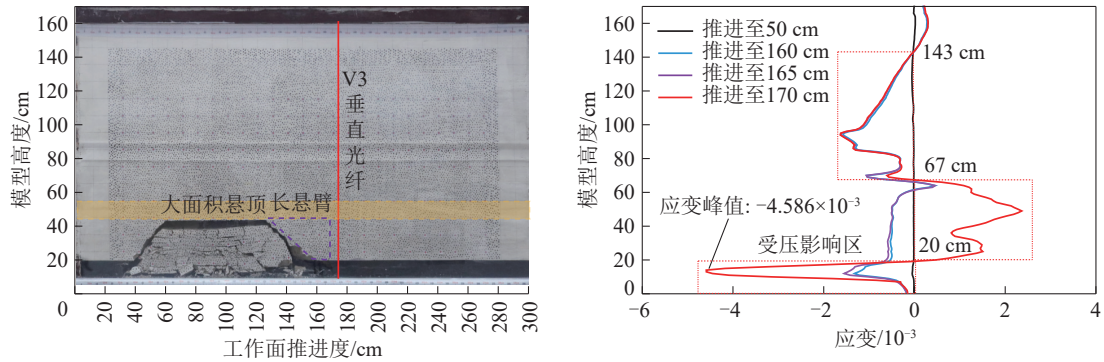


图 13 未压裂模型推进至 170 cm 时 V3 垂直光纤应变曲线

Fig. 13 V3 vertical optical fiber strain curve when the unfractured model advanced to 170 cm

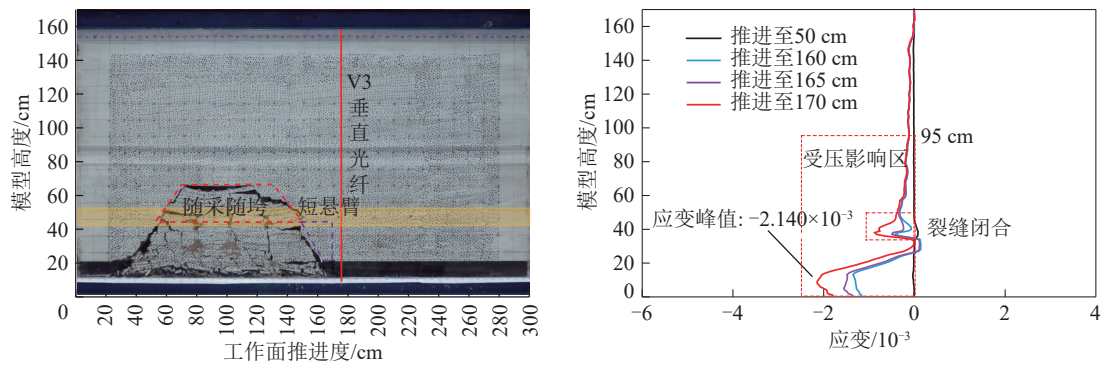


图 14 压裂模型推进至 170 cm 时 V3 垂直光纤应变曲线

Fig. 14 V3 vertical optical fiber strain curve when fracturing model advances to 170 cm

由图 14 可知, 压裂模型的 0~95 cm 范围为压应变区, 应变峰值为 -2.140×10^{-3} ; 34~48 cm 也为压应变区, 且出现压应变峰值, 这是因为在超前支承压力作用下, 压裂裂缝出现闭合趋势。当工作面推进至 170 cm, 距离 V3 垂直光纤 5 cm 时, 光纤处于超前支承压力影响范围内的弹性区, 估算得到未压裂模型的煤壁应力峰值为 31.36 MPa, 而压裂模型的应力峰值为 14.63 MPa。对比未压裂模型和压裂模型可知, 未压裂模型煤壁应力峰值较大的原因有两个方面: ①未压裂模型形成长悬臂梁, 对工作面前方形成较大附加应力; ②未压裂模型形成大面积悬顶, 形成载荷传递路径, 随着工作面推采向其前方传递覆岩载荷, 造成煤壁出现较高支承压力。

综合上述对垂直光纤 V2 和 V3 监测数据的分析可以得出: 压裂厚硬岩层, 能够实现煤层顶板覆岩随采随垮, 避免形成大面积悬顶, 切断了载荷传递路径; 压裂后由长悬臂梁转换为短悬臂梁, 减小

工作面煤体的附加应力; 压裂使得厚硬岩层的强度及其整体性得到有效弱化, 切断了压裂下层和压裂上层覆岩的连续性, 在工作面推采的一定时间内, 阻止了采动影响向上传递。

2.3 岩层压裂前后采场应力与覆岩位移演化规律

2.3.1 超前支承压力演化规律

不同开采阶段支承压力演化曲线如 15 所示。由图 15 可知, 在相似模型煤柱区域和工作面前方产生应力集中, 超前支承压力随工作面的推进发生动态迁移和变化。由图 15(a) 可知, 工作面推进 130 cm 时, 未压裂模型仍处于持续悬顶状态, 而压裂模型的厚硬岩层将提前破断, 不再作为载荷传递路径, 使得煤柱侧和工作面前方应力集中程度降低, 未压裂模型和压裂模型工作面应力峰值分别为 22.18、21.60 MPa。工作面推进至 170 cm 时, 受厚硬岩层悬顶影响, 支承压力分布如图 15(b) 所示, 此与工作面垂直光纤监测结果趋势一致 (图 11、12)。

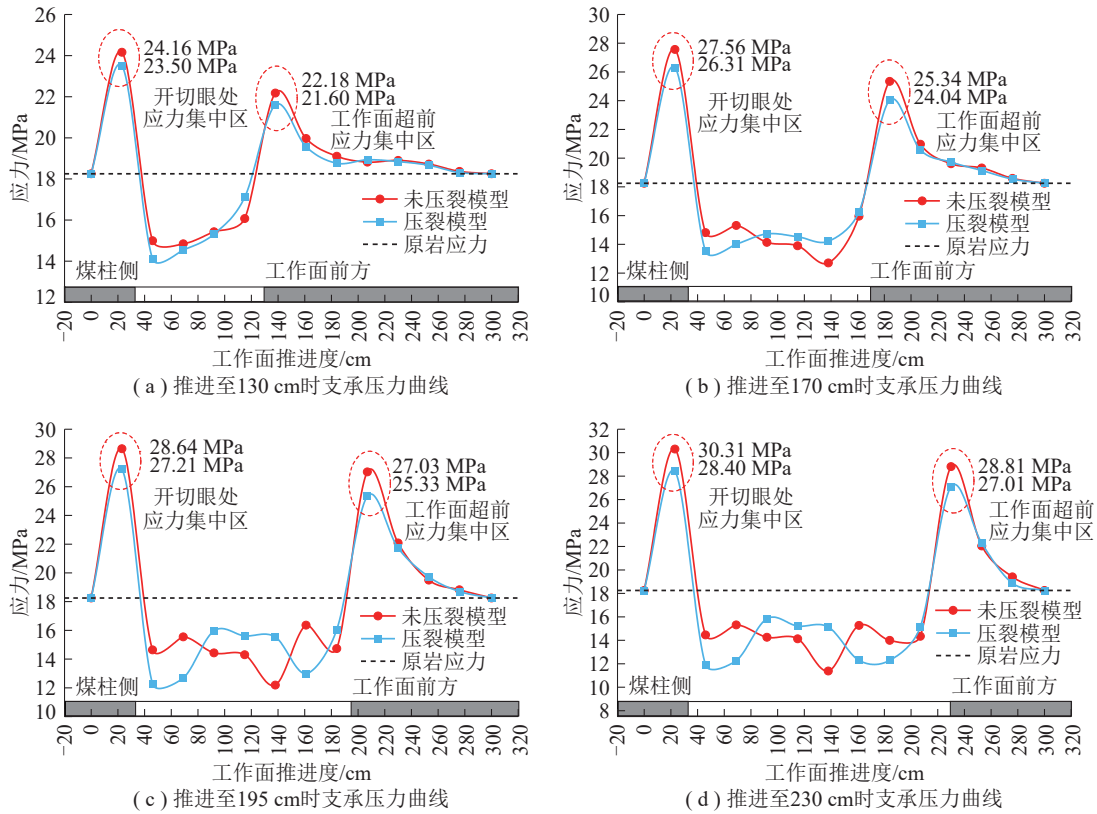


图 15 不同开采阶段支承压力演化

Fig. 15 Evolution of support pressure in different mining stages

由图 15(c) 可知, 工作面推进至 195 cm 时, 未压裂模型煤层顶板形成长臂“F”形结构; 而压裂模型由于覆岩提前破断垮落, 形成短臂“F”形结构, 减小了对工作面的附加应力。未压裂模型和压裂模型工作面应力峰值分别为 27.03、25.33 MPa, 应力集中系数分别为 1.48、1.39。工作面推进至 230 cm 时, 支承压力分布特征受长悬臂附加应力的影响, 支承压力分布如图 15(d) 所示。

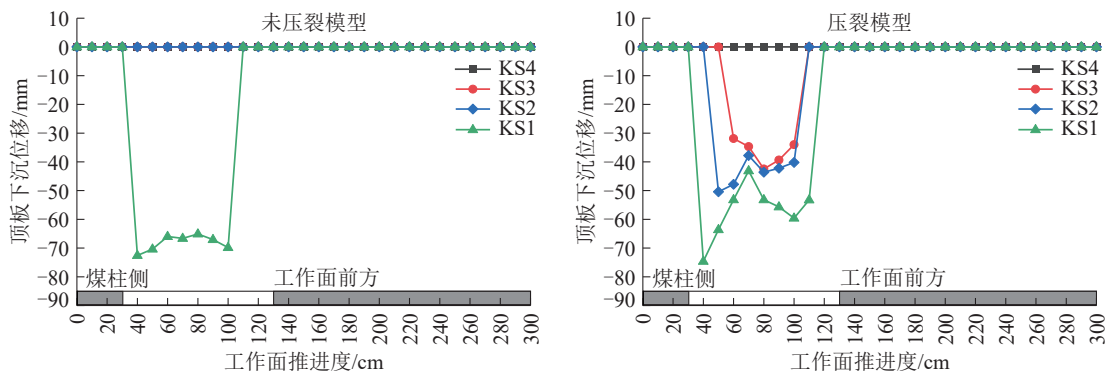
2.3.2 覆岩下沉位移演化规律

厚硬关键层初次破断时, 覆岩顶板下沉位移演

化规律如图 16 所示。工作面推进至 130 cm 时 (图 16(a)), 压裂模型中亚关键层 2 和亚关键层 3 发生破断垮落, 亚关键层 3 顶板最大下沉位移达 -40 mm, 由于破断块体破碎, 对工作面影响不大; 而未压裂模型未破断岩层处于完整悬顶状态。

工作面推进至 155 cm 时 (图 16(b)), 未压裂模型中亚关键层 2 初次破断, 顶板最大下沉位移达 -61 mm, 虽然下沉位移大, 但此关键层相对于其他岩层厚度较小, 破断对工作面影响不大。

工作面推进至 175 cm 时 (图 16(c)), 未压裂模



(a) 推进至130 cm时顶板下沉位移

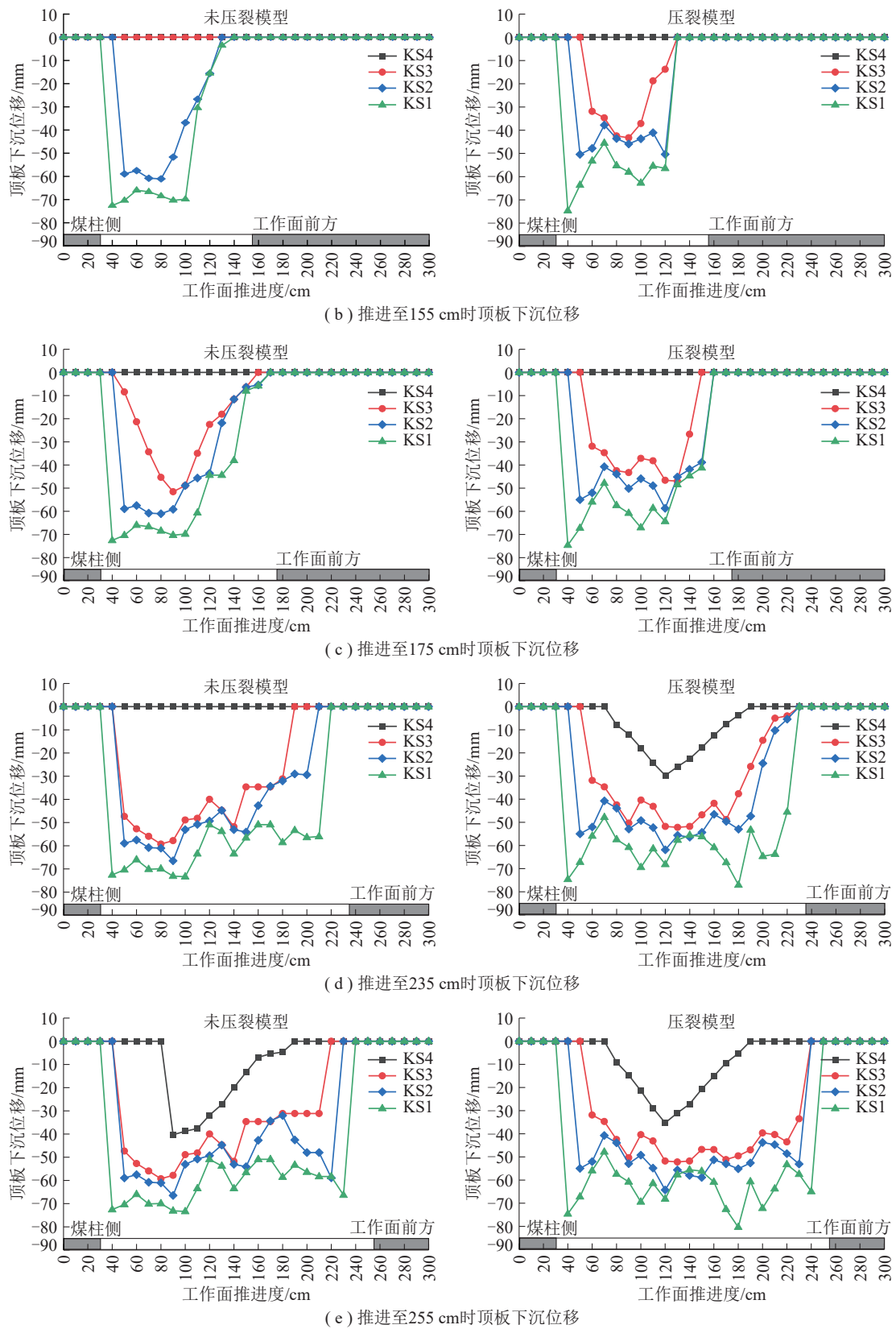


图 16 厚硬关键层初次破断时下沉位移

Fig. 16 Subsidence displacement during the initial breakage of the thick and hard key layer

型中亚关键层 3 发生初次破断, 顶板最大下沉位移达-52 mm; 而此时压裂模型中亚关键层 3 最大下沉

位移为-45 mm, 与工作面推进至 130 cm, 压裂模型中亚关键层 3 初次破断时相比, 顶板下沉位移量较大,

说明大面积悬顶突然破断, 较大的顶板下沉, 极有可能形成暴风现象, 对工作面影响较大。

由于压裂层 (亚关键层 3) 因压裂失去承载作用, 在工作面推进至 235 cm 时 (图 16(d)), 压裂模型的亚关键层 4 初次破断, 顶板最大下沉位移达 -30 mm。

工作面在推进至 255 cm 时 (图 16(e)), 未压裂模型中的亚关键层 4 发生初次破断, 顶板最大下沉位移达 -40 mm。

综合上述分析可以发现, 压裂模型中的亚关键层 2~亚关键层 4 都相对于未压裂模型提前破断垮落, 且由于顶板提前破断垮落, 厚硬关键层在初次破断垮落时, 顶板下沉位移也小于未压裂模型, 覆岩破断垮落时对于工作面的冲击影响小。

3 工程验证分析

为了验证上述结果, 以孟村矿 401102 工作面为工程背景, 进行了地面区域压裂工程实施前后对比分析。图 17 为现场不同顶板压裂程度时微震监测结果^[25]。由图 17 可知, 未压裂区微震事件日总能量为 157.37 kJ, 分别为压裂不充分区域和压裂充分区域的 1.54 倍和 3.52 倍; 能量 1×10^3 J 以上事件数为 46, 分别为前两个区域的 1.7 倍和 11.5 倍, 微震事件整体呈现“高频次、高能量”的响应特征。上述数据充分说明, 压裂后开采期间高能量事件的能级和频次显著降低, 表明悬顶结构得到了有效改造, 避免了高能量事件的发生。

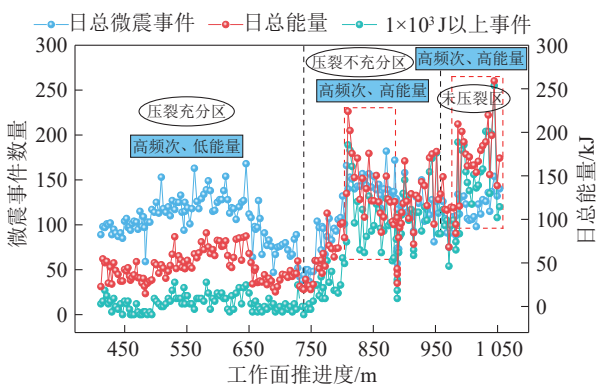


图 17 压裂前后微震事件日总能量与总频次^[25]

Fig. 17 Total daily energy and total frequency of microseismic events before and after fracturing^[25]

综放工作面开采经历压裂充分区、压裂不充分区和未压裂区时支架末阻力分布规律如图 18 所

示^[25]。压裂充分区、压裂不充分区和未压裂区支架平均末阻力值分别为 10 360、10 559、11 969 kN; 最大末阻力分别为 13 720、13 736、14 267 kN。压裂充分区和压裂不充分区与未压裂区相比较, 支架平均末阻力值分别降低了 13.44% 和 11.78%, 表明区域压裂后, 工作面避免了出现高末阻力及末阻力集中分布的现象, 覆岩载荷得到明显调控。

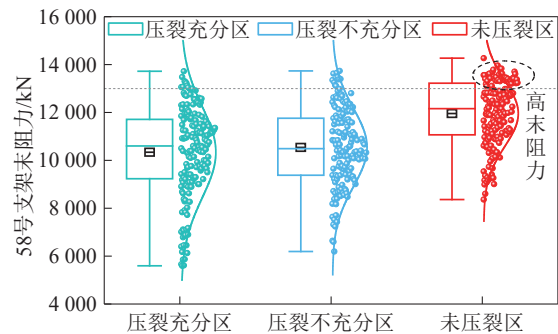


图 18 不同开采区域支架末阻力分布^[25]

Fig. 18 Distribution of support end resistance in different mining areas^[25]

工作面开采过程中, 无论是反映覆岩结构的微震监测数据, 还是反映覆岩载荷的支架工作阻力监测数据, 均表明工作面覆岩结构与载荷向降低动力灾害风险的方向得到了有效改善, 宏观印证了相似模拟试验结果, 目前该工作面已安全开采结束。

4 结论

(1) 相似模拟试验揭示: 压裂使厚硬岩层的整体性及强度均得到有效弱化, 工作面推进过程中覆岩能够及时有序垮落, 悬臂面积和悬臂长度均减小, 由未压裂条件下的长悬臂梁“F”形结构转变为压裂后的短悬臂梁“F”形结构。

(2) 压裂后岩层破断不再满足于极限破断步距公式, 而是受压裂裂缝的影响控制, 压裂层及附近上、下关键层都将提前破断。

(3) 压裂裂缝受采动应力作用再次发育, 顶板局部覆岩出现裂缝超前缓慢发育现象, 覆岩破断块体沿压裂裂缝切落, 致使来压步距减小, 压裂后来压步距降低了 17%; 同时, 压裂后未出现因中、高位关键层和基本顶同时破断, 导致顶板覆岩出现大面积垮落的现象。

(4) 工作面推进过程中, 顶板压裂层起到隔层作用, 阻断了上层与下层的载荷硬传递。同时, 压裂

层内部裂隙发育, 在由三向承载向两向承载转换过程中, 结构不断劣化, 丧失了大面积悬臂的能力, 从而降低了工作面超前覆岩变形和煤体应力集中度。

参考文献 (References):

- [1] 康红普, 徐刚, 王彪谋, 等. 我国煤炭开采与岩层控制技术发展 40a 及展望[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2019, 1(1): 013501.
KANG Hongpu, XU Gang, WANG Biaomou, et al. Forty years development and prospects of underground coal mining and strata control technologies in China[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019, 1(1): 013501.
- [2] 宋振骥, 文志杰, 蒋宇静, 等. 采动力学与岩层控制关键理论及工程应用[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 16–35.
SONG Zhenqi, WEN Zhijie, JIANG Yujing, et al. Theory and application of mining mechanics and strata control[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 16–35.
- [3] 茅献彪, 缪协兴, 钱鸣高. 采动覆岩中关键层的破断规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 1998(1): 41–44.
MAO Xianbiao, MIAO Xiexing, QIAN Minggao. Study on broken laws of key strata in mining overlying strata[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1998(1): 41–44.
- [4] 刘传孝. 坚硬顶板运动特征的数值模拟及非线性动力学分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 759–762.
LIU Chuanxiao. Numerical simulation of moving features of hard roof with three-dimensional discrete element method and nonlinear dynamic analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(5): 759–762.
- [5] 蒋金泉, 王普, 武泉林, 等. 高位硬厚岩层弹性基础边界下破断规律的演化特征[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(3): 490–499.
JIANG Jinquan, WANG Pu, WU Quanlin, et al. Evolutionary characteristics of fracture laws of high-position hard thick strata with elastic foundation boundary[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(3): 490–499.
- [6] 冯强, 刘炜炜, 伏圣岗, 等. 基于弹性地基梁采场坚硬顶板变形与内力的解析计算[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(2): 342–347.
FENG Qiang, LIU Weiwei, FU Shenggang, et al. Analytical solution for deformation and internal force of hard roof in stope based on elastic foundation beam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(2): 342–347.
- [7] 潘岳, 王志强, 李爱武. 初次断裂期间超前工作面坚硬顶板挠度、弯矩和能量变化的解析解[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 32–41.
PAN Yue, WANG Zhiqiang, LI Aiwu. Analytic solutions of deflection, bending moment and energy change of tight roof of advanced working surface during initial fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 32–41.
- [8] 鞠金峰, 许家林, 王庆雄. 大采高采场关键层“悬臂梁”结构运动型式及对矿压的影响[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 2115–2120.
JU Jinfeng, XU Jialin, WANG Qingxiong. Cantilever structure moving type of key strata and its influence on ground pressure in large mining height workface[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 2115–2120.
- [9] 于雷, 闫少宏. 特厚煤层综放开采顶板运动形式及矿压规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(8): 40–44, 59.
YU Lei, YAN Shaohong. Study on roof movement form and mine strata pressure law of fully-mechanized top coal caving mining in ultra thick seam[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(8): 40–44, 59.
- [10] 郭文兵, 白二虎, 赵高博. 高强度开采覆岩地表破坏及防控技术现状与进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(2): 509–523.
GUO Wenbing, BAI Erhu, ZHAO Gaobo. Current status and progress on overburden and surface damage and prevention technology of high-intensity mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(2): 509–523.
- [11] 荣海, 于世棋, 王雅迪, 等. 坚硬覆岩的结构失稳运动规律及其对冲击地压的影响[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(6): 063026.
RONG Hai, YU Shiqi, WANG Yadi, et al. Analysis of structural instability movement of hard overburden and its influence mechanism on rockburst[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(6): 063026.
- [12] 罗文, 杨俊彩, 高振宇. 强矿压矿井定向长孔分段压裂技术研究及应用[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(11): 43–49.
LUO Wen, YANG Juncai, GAO Zhenyu. Research and application of directional long-borehole staged hydraulic fracturing technology for strong rock pressure in mine[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(11): 43–49.
- [13] 夏永学, 潘俊锋, 谢非, 等. 井下超长水平孔分段压裂防冲机理及效果[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S1): 130–139.
XIA Yongxue, PAN Junfeng, XIE Fei, et al. Mechanism and effect of the rock burst prevention using overlength horizontal hole staged fracturing technology[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S1): 130–139.
- [14] 黄澎涛. 冲击地压关键层远程区域水力压裂防治技术[A]. 第二十一届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集[C]. 中煤地质集团有限公司, 2021: 199–206.
HUANG Pengtao. Control technology for critical rock burst formations by distant and large scale hydraulic fracturing[A]. Proceedings of the 21st Annual Academic Ex-

- change Conference on National Exploration Engineering (Geotechnical Drilling and Tunneling Engineering)[C]. China Coal Geology Group Co., Ltd., 2021: 199–206.
- [15] 贺斌, 雷鹏翔, 弓仲标. 水力压裂技术在大柳塔煤矿 52502 工作面的应用[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(S2): 78–84.
- HE Bin, LEI Pengxiang, GONG Zhongbiao. Application of hydraulic fracturing technology in No. 52502 working face of Daliuta Coal Mine[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(S2): 78–84.
- [16] 谢华东, 张静非, 王富刚, 等. 煤层巨厚砂岩顶板定向长钻孔水力压裂矿震防治技术研究[J]. 中国矿业, 2021, 30(12): 106–111.
- XIE Huadong, ZHANG Jingfei, WANG Fugang, et al. Study on mine earthquake prevention technology of directional long drilling hydraulic fracturing in super thick sandstone roof of coal seam[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(12): 106–111.
- [17] 王泽阳, 郑凯歌, 王豪杰, 等. 定向长钻孔分段水力压裂技术在冲击地压防治中的应用[J]. 中国煤炭, 2022, 48(7): 68–78.
- WANG Zeyang, ZHENG Kaige, WANG Haojie, et al. Application of directional long borehole sectional hydraulic fracturing technology in the prevention and control of rock burst[J]. China Coal, 2022, 48(7): 68–78.
- [18] 于斌, 高瑞, 夏彬伟, 等. 大空间坚硬顶板地面压裂技术与应用[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 800–811.
- YU Bin, GAO Rui, XIA Binwei, et al. Ground fracturing technology and application of hard roof in large space[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 800–811.
- [19] 高瑞. 远场坚硬岩层破断失稳的矿压作用机理及地面压裂控制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- GAO Rui. The mechanism of ground pressure induced by the breakage of far-field hard strata and the control technology of ground fracturing[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [20] 潘超. 高位坚硬顶板失稳诱发强矿压机理与控制[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- PAN Chao. Mechanism and control of strong ground pressure induced by instability of high-position hard roof[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [21] 潘俊锋, 陆闯, 马小辉, 等. 井上下煤层顶板区域压裂防治冲击地压系统及应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 106–115.
- PAN Junfeng, LU Chuang, MA Xiaohui, et al. System and application of regional fracking of coal seam roof on and under the ground to prevent rockburst[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 106–115.
- [22] 潘俊锋, 康红普, 闫耀东, 等. 顶板“人造解放层”防治冲击地压方法、机理及应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 636–648.
- PAN Junfeng, KANG Hongpu, YAN Yaodong, et al. The method, mechanism and application of preventing rock burst by artificial liberation layer of roof[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 636–648.
- [23] 龚涛, 张继, 夏彬伟. 地面压裂坚硬顶板对矿山压力显现影响的实验研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(36): 15427–15439.
- GONG Tao, ZHANG Ji, XIA Binwei. Experimental study on the influence of surface fracturing hard roof on strata behaviours[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(36): 15427–15439.
- [24] 柴敬, 杜文刚, 袁强, 等. 物理模型试验光纤传感技术测试方法分析[J]. 西安科技大学学报, 2018, 38(5): 728–736.
- CHAI Jing, DU Wengang, YUAN Qiang, et al. Analysis of test method for physical model test based on optical fiber sensing technology detection[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018, 38(5): 728–736.
- [25] 郭建宏, 潘俊锋, 冯美华, 等. 顶板不同区域压裂程度覆岩采动响应特征研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(11): 4351–4364.
- WU Jianhong, PAN Junfeng, FENG Meihua, et al. Response characteristics of mining-induced overburden strata under different degrees of regional fracturing on the roof[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(11): 4351–4364.