切顶留巷采动覆岩力学特征时空演化规律

双海清[1,2],韩　涛[1],周　斌[1,2],李树刚[1,2],林海飞[1,2],程　亮[1,2],崔名威[1],张培震[1]
(1. 西安科技大学 安全科学与工程学院,陕西 西安　710054;2. 西安科技大学 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室,陕西 西安　710054)

摘要: 切顶留巷开采与留煤柱开采造成的顶板结构断裂特征存在显著差异,为了探究切顶留巷开采模式下覆岩结构的力学响应机制,本研究以陕西某矿试验工作面为研究对象,通过物理相似模拟试验,研究了不同区域覆岩裂隙的动态发育过程. 结果表明:非切顶侧煤柱应力整体呈线性上升趋势,切顶侧煤柱应力在回采前期缓慢增加,回采后期增长速率加快;切顶工艺虽阻断顶板短悬臂力传递,覆岩载荷仍可通过煤体-预裂面复合结构向深部传递. 非切顶侧顶板岩层通过自承形成砌体梁结构后,低层位垂直位移与应变趋于稳定,水平位移经历了"快增—缓增—快增"的时序性变化规律. 回采结束时,切顶侧最大应变比非切顶侧小 28.4%,高层位切顶侧与非切顶侧垂直位移与应变受关键层影响较大,水平位移并未受关键层影响;切顶侧裂隙比非切顶侧少 12.1%,且裂隙角度主要分布在 0°～65°区间. 现场微震监测结果进一步验证了切顶侧"碎胀矸石压实＋残余顶板微破裂"的破断模式. 研究结果明确了切顶留巷条件下的顶板结构演化特征及裂隙演化规律.

关键词: 切顶留巷;采动覆岩;力学特征;时空演化;微震监测
中图分类号: TD 313　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000-1964(2026)01-0088-16

Spatiotemporal evolution of mechanical characteristics in mining-induced overlying strata with gob-side entry retaining by roof cutting

SHUANG Haiqing[1,2], HAN Tao[1], ZHOU Bin[1,2], LI Shugang[1,2], LIN Haifei[1,2], CHENG Liang[1,2], CUI Mingwei[1], ZHANG Peizhen[1]
(1. College of Safey Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention, Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Based on the significant differences in roof structure fracture characteristics between gob-side entry retaining by roof cutting and coal-pillar mining, the mechanical response mechanism of the overburden under gob-side entry retaining by roof cutting was investigated. A physical similarity model of a coal mining panel in Shaanxi was constructed to track the dynamic development of fractures in different zones. The results show that the stress in the non-cutting coal pillar increases

收稿日期: 2025－06－18　　**修回日期:** 2025－09－12　　**DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20250224
基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3009001);国家自然科学基金项目(52574272);中国博士后科学基金面上项目(2022MD723830)
第一作者: 双海清(1988—),男,陕西省靖边县人,教授,项目博导.
通信作者: 周　斌(1991—),男,陕西省延安市人,副教授,硕士生导师. E-mail: zhou_bin@xust.edu.cn
引用格式: 双海清,韩　涛,周　斌,等.切顶留巷采动覆岩力学特征时空演化规律[J].中国矿业大学学报,2026,55(1):88-103.
SHUANG Haiqing, HAN Tao, ZHOU Bin, et al. Spatiotemporal evolution of mechanical characteristics in mining-induced overlying strata with gob-side entry retaining by roof cutting[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(1): 88-103.

linearly, while the stress in the cutting-side coal pillar rises slowly in the early stage of mining and then accelerates. Although the roof cutting technique interrupts the short cantilever load path, the overburden load continues to be transferred to the deeper strata through a composite coal-pre-fractured plane structure. After the formation of a self-supporting masonry beam in the non-cutting roof, the vertical displacement and strain in the lower strata stabilize, while the horizontal displacement follows a "rapid—slow—rapid" sequence. The results also show that, at the end of mining, the maximum strain on the cutting side is 28.4% lower than that on the non-cutting side. The vertical displacement and strain in the upper strata are controlled by the key stratum, while the horizontal displacement is not affected. The cutting side develops 12.1% fewer fractures, which are mainly oriented within the range of 0°—65°. Field microseismic data further validate the failure mode of "compacted bulking gangue + residual roof micro-fracturing" on the cutting side. These results provide an important reference for clarifying the evolution of roof structure and fracture propagation under gob-side entry retaining by roof cutting conditions.

Key words: gob-side entry retaining by roof cutting; mining overburden; mechanical characteristic; space-time evolution; microseismic monitoring

在我国能源结构中,煤炭长期占据主导地位,保障煤炭高效、安全开采对国家能源安全意义重大[1]. 切顶留巷无煤柱开采作为一项安全高效的采矿工艺,不仅能提高煤炭资源回收率,还可降低采动影响,缓解矿山压力显现. 由于切顶留巷开采切断巷道顶板与采空区顶板之间的物理联系,切缝两侧之间的约束被削弱,与常规开采顶板结构不同[2-4],由此导致采动裂隙切顶侧与非切顶侧存在明显区别. 因此,需要进一步分析切顶留巷回采过程中顶板结构演变特征,明确不同顶板结构类型下岩层破断形态,揭示切顶留巷覆岩裂隙演化机制.

目前,国内外学者对切顶留巷开采覆岩裂隙演化特征已开展了较多研究工作. 文献[5-6]发现通过顶板预裂技术,将沿空留巷基本顶断裂位置转移至采空区侧,顶板在侧向形成了切顶短臂梁结构,减小了侧向悬臂长度,切落后碎胀的矸石较好地支撑了上位岩层. 文献[7]通过分析沿空留巷采空侧支护体侧向受力失稳情况,提出了沿空留巷支护体采空侧充填堆积体概念,建立了沿空留巷采空侧支护堆积体稳定性模型. 文献[8]指出无煤柱切顶沿空留巷受采动影响,顶板下沉表现为"非对称、持续时间长"的基本特点. 文献[9]系统研究了巷旁切顶对采场下位岩层垮落特征的影响机制,指出110工法下的下位顶板垮落线由切顶侧向工作面充分移动. 文献[10]通过建立停采工作面覆岩结构力学模型,揭示了悬板作用下的覆岩应力传递机制. 文献[11]基于砌体梁的滑落和回转变形稳定性理论构建了不同切顶高度下煤柱顶板力学模型,得到了不同切顶高度条件下的煤柱承载应力分布方程. 文献[12]发现切顶后垮落岩石可较好地充填采空区,有效限制了深部层位顶板的运动,减弱了留巷顶板悬顶结构产生的区域应力增高. 文献[13-14]揭示了工作面开采扰动下沿空留巷围岩的非对称变形破坏机制. 文献[15-16]模拟了切顶留巷下不同阶段采空区上方覆岩在开采过程中的变形、破裂及裂隙演化规律. 文献[17]基于围岩塑性区力学模型,揭示了沿空巷道倾斜煤层的不均匀变形破坏机理. 文献[18]通过分析自成巷道顶板结构的演化过程与变形特征,建立了切顶短臂梁顶板破断力学模型. 文献[19]采用物理相似模拟与数值模拟相结合的手段得出切顶侧裂隙带高度约为未切顶侧的0.87倍. 文献[20-21]根据相似模拟试验得出低位覆岩受切顶影响易发生破断垮落,高位覆岩区域未切顶侧覆岩裂隙较为发育. 文献[22]通过物理相似模拟试验得出对顶板预裂切缝,可有效缓解巷道围岩压力,控制围岩变形. 文献[23]通过超深孔切顶提高采空区顶板的冒落高度,进而降低了岩层运动对围岩的挤压和扰动. 文献[24]将特制的"切-支-护"一体化装置作为模拟切顶成巷关键装备的二维模型试验系统,得出不同区域的底板应力及表面位移分布规律.

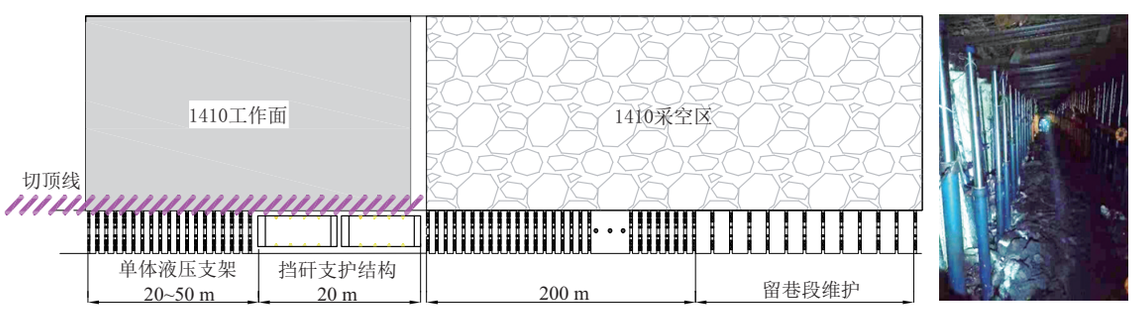
综上,尽管众多学者相继研究了切顶留巷开采覆岩演化规律,但鲜有针对切顶留巷采动下采场全生命周期内覆岩在时间和空间下的动态演化

特征相关报道. 基于此,笔者通过物理相似模拟试验,研究了采动覆岩力学特征动态发育过程,获得了煤层底板应力演化特征,阐明了上覆岩层垮落位移时空演化规律,定量表征了采动过程中裂隙分布特征及演化规律. 最后根据现场微震监测事件分布验证了覆岩破断的空间分布特征. 本文研究成果可为明确切顶留巷下顶板结构演化特征及裂隙演化规律提供重要参考.

1 试验方案

1.1 工程背景

本研究以陕西某矿试验工作面主采4#煤层为研究对象,试验工作面平均走向长度为2 700 m,采面宽度为120 m,采用切顶留巷无煤柱开采方式,其煤厚为0.65~1.40 m,平均煤厚为1.2 m,倾角为0°~5°,为近水平煤层,煤层平均埋深为555 m,煤层瓦斯含量为0.42~3.18 m^3/t. 采用水力压裂技术切断巷道与采空区顶板联系,具体的工艺流程为:第一步,在原巷道支护的基础上,在工作面前方20~50 m处紧贴煤壁架设多排高强度的单体液压支架;第二步,在紧贴巷道主帮处施工孔径为56 mm、间距为10 m、倾角为80°、垂高为7 m的钻孔,实施水力压裂,实现切顶;第三步,超前工作面20 m,在提前架设的单体支架侧安装挡矸支护结构,阻挡回采垮落的矸石;第四步,在工作面后方动压区及留巷稳定区,发现巷道顶板下沉明显、单体支架压力异常、挡矸结构变形或矸石墙鼓出等情况时,在巷旁支护带内侧架设新的单体液压支架. 具体切顶留巷工艺及各阶段空间布局如图1所示.



(a) 切顶线平面布置 (b) 切顶效果

图1 切顶线平面布置及切顶效果

Fig. 1 Spatial layout of roof-cutting line and its cutting efficacy

1.2 试验方法

根据原岩强度与相似材料强度之间的关系(见表1),确定本试验相似比,几何相似比为1∶100,时间相似比为1∶10,容重相似比为1∶1.5,应力相似比为1∶150,强度相似比为1∶150,计算方法见式(1)~(5)[25].

$$a_l=\frac{l_p}{l_m}, \tag{1}$$

$$a_t=\sqrt{a_l}, \tag{2}$$

$$a_r=\frac{\gamma_p}{\gamma_m}, \tag{3}$$

$$a_\sigma=a_r a_l, \tag{4}$$

$$\frac{a_f}{a_\sigma}=1, \tag{5}$$

式中:a_l为几何相似比;l_p为矿井煤层尺寸,m;l_m为试验模拟煤层尺寸,m;a_t为时间相似比;a_r为容重相似比;γ_p为覆盖层物质的密度,kg/m^3;γ_m为试验模拟覆盖层物质的密度,kg/m^3;a_σ为应力相似比;a_f为强度相似比.

相似模拟模型及监测方法如图2所示,根据试验工作面地质条件和相似理论,设计模拟试验岩层高度为125.4 m,其中煤层厚度为1.5 m. 模型的铺设参数和材料配比见表2.

表1 煤岩层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of coal strata

岩性	容重/(kN·m^{-3})	弹性模量/MPa	抗压强度/MPa	泊松比
泥岩	21.7	11.7	20.1	0.22
沙质泥岩	25.8	10.4	27.6	0.27
中粒砂岩	27.8	21.5	55.7	0.17
细粒砂岩	22.7	19.8	59.5	0.11
粉砂岩	27.1	17.5	51.3	0.25
煤	9.5	9.9	12.4	0.25

模型上部未模拟岩层通过施加恒定载荷补偿,补偿载荷为10.7 MPa. 经计算,实际需要加载的垂直应力约为28 kN. 除顶部边界外,模型其余边界固定,为减小边界效应影响,在模型两侧预留长度为35 m的煤柱. 模型两侧巷道规格为

4.0 m×1.5 m(宽×高)，回风巷采用折叠切缝板进行“切顶”，其中切顶高度为 7 m、切顶角度为 80°. 按照 4#煤层主采工作面实际开采的相似比进行回采. 工作面实际开采一个倾向面历时约 3～4 h，按照时间相似比 1∶10，在 18～24 min 内回采完成. 模型开挖顺序为：1410 工作面两侧开挖 2 条巷道、回风巷切顶及 1410 工作面开挖(分 48 步开挖，以 2，3 m 交替进行). 工作面开挖过程中，在模型底板铺设 30 个应力传感器来监测应力变化，监测范围为非切顶侧煤柱 0～35 m(1～7 号传感器)、回采区域 40～160 m(9～22 号传感器)、切顶侧煤柱 165～200 m(24～30 号传感器). 在模型表面，采用 XTDIC 全场位移测量仪实时监测位移变化情况. 选取距煤层顶板 8.0，15.5，29.0 m 共 3 条测线，分别在靠近非切顶侧 35～50 m(监测点 1～10)、采空区中部 90～110 m(监测点 11～20)、切顶侧 150～165 m(监测点 21～30)处，对比不同区域及层位的覆岩在采动影响下的空间变形规律与结构响应差异.

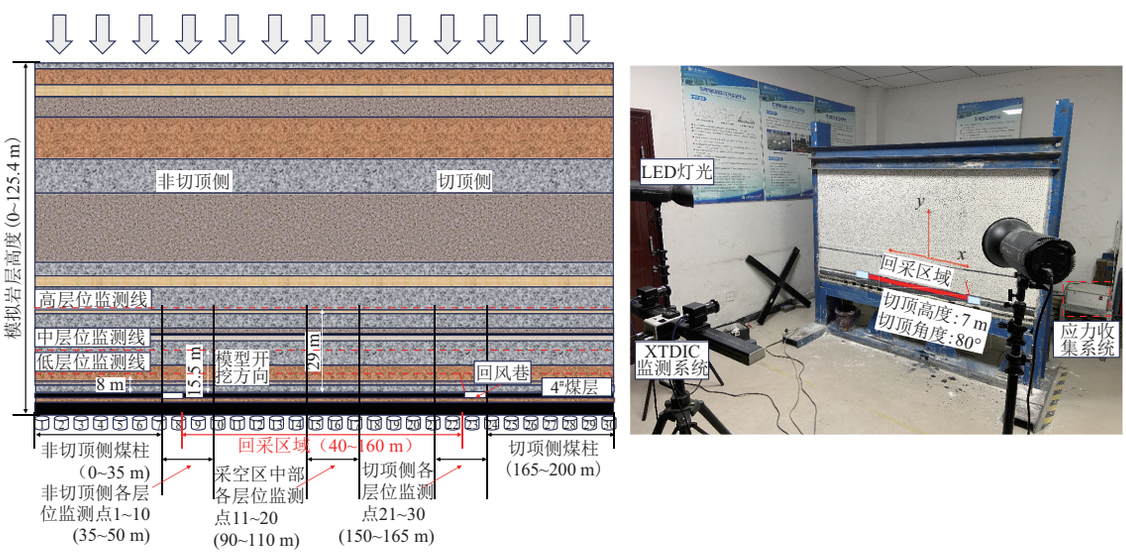


图 2　相似模拟模型及监测方法

Fig. 2　Similar simulation models and monitoring methods

表 2　工作面岩层分布及其配比

Table 2　Distribution of rock layers in the working face and their proportions

序号	岩性	模型厚度/m	累计厚度/m	配比号	m(沙子)/kg	m(石膏)/kg	m(大白粉)/kg	备注
1	砂质泥岩	1.0	1.0	846	5.70	0.28	0.43	
2	5#煤	4.4	5.4	928	5.77	0.13	0.51	
3	砂质泥岩	1.5	6.9	846	5.70	0.28	0.43	
4	4#煤	1.5	8.4	928	5.77	0.13	0.51	
5	粉砂岩	2.5	10.9	728	5.61	0.16	0.64	
6	中粒砂岩	1.5	12.4	737	5.61	0.24	0.56	
7	砂质泥岩	5.5	17.9	846	5.70	0.28	0.43	
8	粉砂岩	8.5	26.4	728	5.61	0.16	0.64	亚关键层Ⅰ
9	泥岩	2.0	28.4	837	5.70	0.21	0.50	
10	3#煤	0.5	28.9	928	5.77	0.13	0.51	
11	中粒砂岩	2.0	30.9	737	5.61	0.24	0.56	
12	粉砂岩	5.0	35.9	728	5.61	0.16	0.64	亚关键层Ⅱ
13	细粒砂岩	1.5	37.4	746	5.61	0.32	0.48	
14	粉砂岩	8.0	45.4	728	5.61	0.16	0.64	主关键层
15	细粒砂岩	4.0	49.4	746	5.61	0.32	0.48	
16	粉砂岩	5.0	54.4	728	5.61	0.16	0.64	
17	中粒砂岩	24.0	78.4	737	5.61	0.24	0.56	
18	粉砂岩	12.0	90.4	728	5.61	0.16	0.64	
19	砂质泥岩	14.5	104.9	846	5.70	0.28	0.43	
20	中粒砂岩	7.0	111.9	737	5.61	0.24	0.56	
21	细粒砂岩	4.0	115.9	746	5.61	0.32	0.48	
22	砂质泥岩	5.5	121.4	846	5.70	0.28	0.43	
23	粉砂岩	4.0	125.4	728	5.61	0.16	0.64	

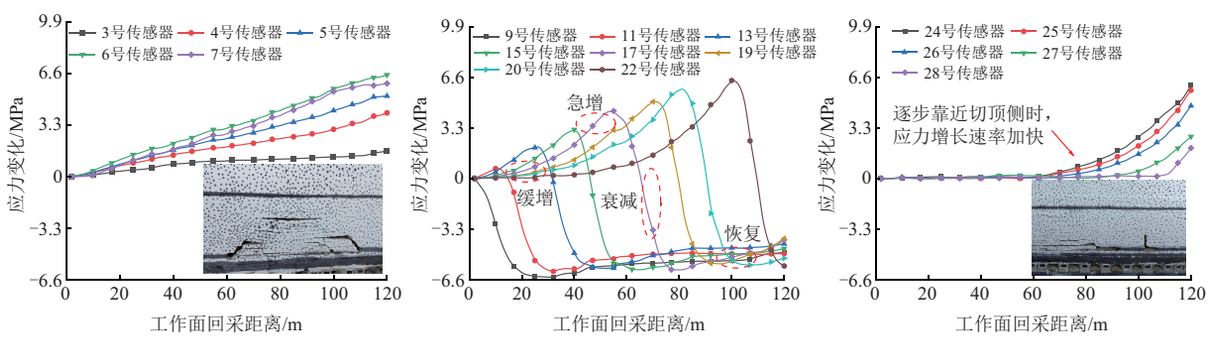
2 试验结果

2.1 采动应力分布特征

煤层采出后，覆岩应力重新分布，揭示采动应力演化规律及覆岩破断力学机制是明确裂隙演化特征的基础. 顶板覆岩断裂形成悬臂梁结构，垮落岩体自重应力通过煤壁前方支承压力区向底板传递，形成“顶板破断—煤壁承载—底板受载”的链式传递路径.

2.1.1 采动应力时程演化

通过对非切顶侧煤柱、回采区域及切顶侧煤柱应力变化进行监测，得到整个模型回采过程中的底板应力演化规律，如图 3 所示. 由图 3 可知，工作面回采过程中，非切顶侧煤柱、回采区域及切顶侧煤柱应力变换呈 3 种不同的应力时序演化规律. 非切顶侧煤柱的应力整体呈线性上升趋势，如非切顶侧的 6 号传感器至回采结束时应力线性增长至 6.56 MPa，平均增速为 54.7 kPa/m，这种线性增加型应力变化过程对应着顶板持续变形未破断阶段的静载传递[26]. 回采区域的应力先上升后下降，具有“缓增—快增—衰减—恢复”的时序变化规律. 如 17 号传感器在工作面回采至 25 m 时，应力达 769 kPa，增速仅为 65.3 kPa/m；回采至 55 m 时，应力达到峰值 4.43 MPa，增速为 207 kPa/m；在回采至 77 m 时应力降到 −5.97 MPa，平均降速为 472 kPa/m；回采至 85 m 时，应力恢复到 −5.74 MPa，平均恢复速率为 39.1 kPa/m. “缓增—快增—衰减—恢复”型应力时序变化特征反映了顶板周期来压（断裂、回转、压实）全过程的动载冲击叠加采空区压实效应.



(a) 非切顶侧煤柱 (b) 回采区域 (c) 切顶侧煤柱

图 3 模型底板布置各通道传感器应力变化

Fig. 3 Stress variation of each channel sensor in the model bottom plate arrangement

相较而言，切顶侧煤柱应力在回采前期缓慢增加，回采后期应力增长速率加快，如 24 号传感器回采至 70 m 时应力仅为 441 kPa，增速为 43.1 kPa/m，回采至 120 m 时应力迅速达到 6.13 MPa，增长速率为 308 kPa/m. 实施切顶后，顶板仍存在残余承载力，采动过程中覆岩载荷通过切顶处缓慢传递至底板，形成渐进式应力积累；当回采至切顶处时，顶板达到临界失稳条件，整体切落造成载荷突然释放，引发底板应力骤增；同时，因切顶抑制了顶板回转压实过程，难以形成稳定承载结构，导致应力无法像采空区通过岩体碎胀充分消散.

2.1.2 采动应力空间演化

不同回采距离下工作面应力空间演化规律如图 4 所示. 由图 4 可知，工作面未回采时无明显应力波动. 在回采时两侧会出现应力峰值，工作面回采至 82，100，120 m 时，非切顶侧应力峰值分别为 4.76，5.94，7.10 MPa，应力峰值出现在模型宽度为 28 m 处且不随工作面回采移动. 非切顶侧应力峰值随工作面回采呈阶梯式增长，符合“顶板悬臂梁-煤壁塑性区”作用下的静态增压模式.

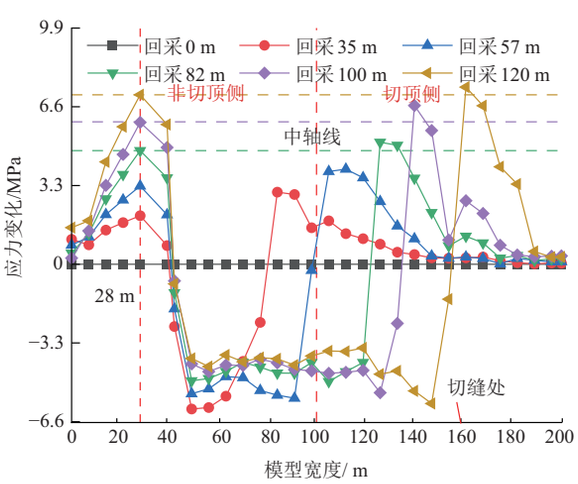


图 4 工作面回采过程中应力空间演化

Fig. 4 Spatial evolution of stresses during workface recovery

切顶侧应力峰值在工作面回采至82，100，120 m时分别为5.11，6.65，7.42 MPa，应力峰值分别出现在距工作面126，140，161 m处．应力峰值位置随工作面回采向深部移动，表明切顶工艺虽阻断顶板短悬臂传递，但随采空区扩大，顶板关键层破断引发远场覆岩“梁-拱”结构改变，导致超前支承压力带向煤体深部转移．切顶侧应力峰值由5.11 MPa增至7.42 MPa，增幅达45%，说明顶板预裂后形成的短悬臂结构仍存在残余承载能力，随悬露长度增加，覆岩载荷通过煤体-预裂面复合结构向深部传递，诱发二次应力集中．相较于非切顶侧峰值固定于28 m处，切顶侧峰值位置外移说明当前预裂参数并不能够完全切断顶板应力传递路径．

切缝处的应力值分别为0.77，1.02，−1.46 MPa．对比发现，切顶侧应力值远低于非切顶侧，证明切顶侧成功阻断了部分顶板应力传递路径，使采动应力向煤壁深部转移，降低切顶侧应力集中程度达80%以上．同时，切顶侧出现负应力表明顶板破断后产生拉应力区，揭示了岩层回转触发的底板卸压效应．

2.1.3　采动应力时空演化

不同时空工作面应力演化规律如图5所示．由图5可知，非切顶侧随工作面回采，应力持续升高，呈典型超前支承压力特征，表明顶板悬臂结构未受干预，应力通过煤壁向底板传递，峰值位置固定于近场区域．切顶侧在回采初期应力几乎无变化，在回采至120 m时应力快速增至7.17 MPa，说明切顶后应力传递路径被阻断，覆岩载荷向切顶侧深部转移，形成“应力屏障效应”，迫使应力集中区外移至160 m外．应力集中区随回采向深部动态迁移，表明切顶工艺改变了覆岩破断模式，由“悬臂梁”转为“短梁-铰接”结构，动态调控了应力释放路径．

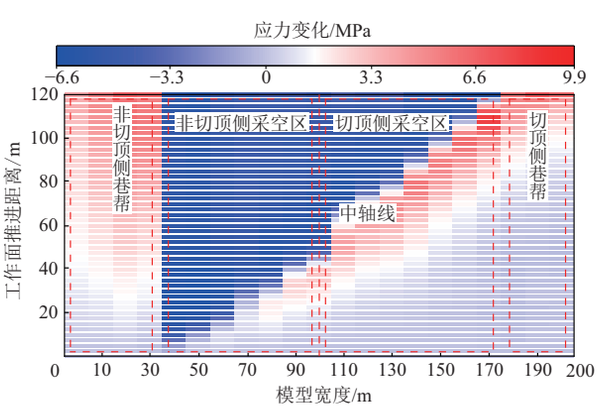


图5　工作面回采过程中应力时空演化云图

Fig. 5　Cloud map of spatio-temporal evolution of stresses during workface recovery process

2.2　采动位移-应变分布特征

应力的变化直接对覆岩的移动产生影响，导致覆岩移动的范围及方向发生改变．位移分布又决定应变状态，因此需分析各区域在不同层位的位移、应变差异，并在低层位各区域选取一个典型测点开展同一层位、不同区域的位移应变对比研究．

2.2.1　采动位移－应变时程演化

图6展示了不同层位监测点的垂直位移随工作面回采距离的变化特征．低层位非切顶侧顶板岩层通过自承形成砌体梁结构，砌体梁的“梁-拱”效应将载荷向巷道两侧转移，覆岩应力释放完成后，垂直位移趋于稳定．如监测点10在回采至35 m时的垂直位移达到0.285 m后趋于稳定．采空区顶板初次破断后，岩块回转导致覆岩整体下沉．后期随着采空区矸石碎胀压实，形成“载荷缓冲层”，抑制进一步下沉，最终下沉速率反映了顶板破断后岩体碎胀与压实过程的综合平衡．如监测点15在回采至82 m时垂直位移为0.526 m，下降速率为89.5%；在回采至110 m时垂直位移为1.094 m，下降速率为5.6%．切顶侧破坏了顶板的连续性，导致回采至切顶侧引发位移快速下沉．如监测点25在回采至120 m时垂直位移为0.502 m，下降速率为46.3%．

中层位采空区顶板位移演化相较于低层位有18 m的滞后效应，非切顶侧与切顶侧垂直位移的动态演化在回采终态呈现分异性，如测点10与25在回采至120 m时垂直位移分别为0.036，0.026 m，切顶侧垂直位移比非切顶侧小38.5%，原因在于切顶侧低层位矸石碎胀性能良好，提供额外支撑．

高层位上方关键层通过大范围岩梁结构将载荷传递至煤柱，削弱了局部开采方式的差异影响．非切顶侧与切顶侧覆岩回采结束时测点10与25垂直位移分别为0.019，0.020 m，差异较小．

以非切顶侧水平位移向右为正方向（详见图2所示坐标），图7展示了不同层位监测点的水平位移随工作面回采距离的变化特征．低层位非切顶侧水平位移经历了“快增—缓增—快增”的时序性变化规律．以监测点10为例，在回采至35 m时水平位移为0.087 m，上升速率为2.5%，覆岩载荷通过“梁效应”传递至巷道两帮，水平挤压应力集中，导致煤体受剪切作用向采空区滑移；在回采至55 m时水平位移为0.095 m，上升速率为0.3%，此阶段顶板已形成砌体梁结构，岩块铰接后分担

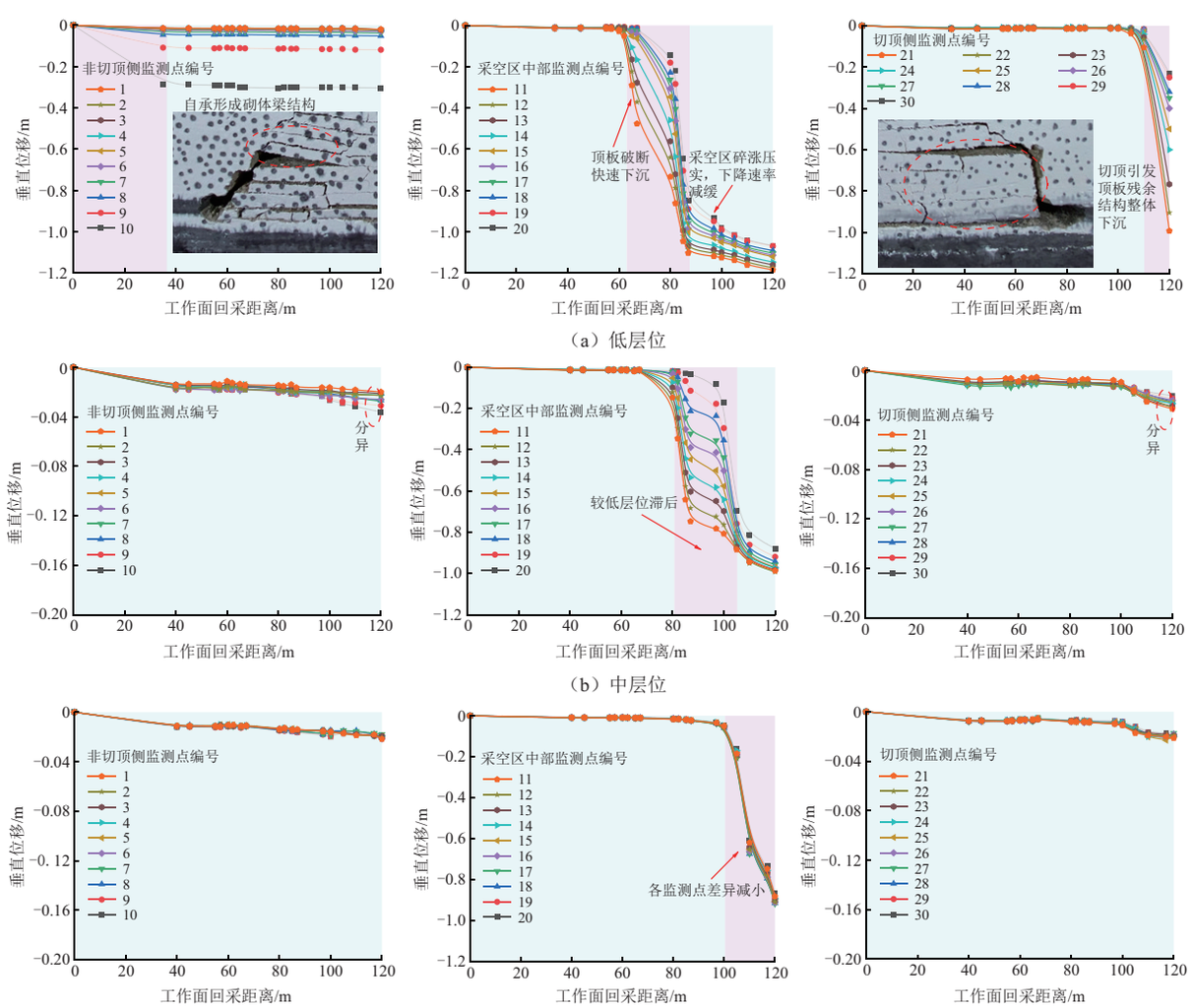
水平应力，挤压应力向深部转移，位移增速减缓，反映顶板自稳阶段的应力调整；在回采至 120 m 时水平位移为 0.190 m，上升速率为 6.7%，随采空区扩大，砌体梁悬露长度超过临界值，发生失稳回转，顶板破断释放水平挤压应力，岩体二次滑移．采空区覆岩垮落后较为破碎，水平位移紊乱，无明显规律．

切顶侧经历了与非切顶侧相反的下降过程，监测点 22 在回采至 35 m 时水平位移为 0.096 m，下降速率为 2.7%，切顶侧削弱顶板连续性，水平应力沿切顶侧集中释放，煤体向采空区滑移．在回采至 55 m 时水平位移为 0.090 m，下降速率为 1.7%，此阶段切顶侧扩展至稳定状态，顶板残余结构暂时自稳，水平应力释放速率降低．在回采至 120 m 时水平位移为 0.244 m，下降速率为 6%．顶板整体切落后，采空区边界失去顶板残余结构的水平约束，侧向膨胀应力增强，推动煤体进一步向采空区移动．

在中层位，切顶侧与非切顶侧水平位移受层位影响衰减较小．采空区监测点随着岩层垮落、压实，中部区域因重力作用向采空区中心收缩，随着回采岩层垮落，其水平位移逐渐趋于 0．

在高层位，采空区水平位移收缩幅度减小．切顶侧与非切顶侧水平位移并未受关键层影响衰减．

图 8 展示了工作面回采不同距离下各层位监测点应变的变化特征．低层位非切顶侧覆岩顶板在前期处于弹性变形阶段，此阶段对应顶板弹性储能过程，为后续破断提供能量基础．覆岩连续梁结构承担采动载荷，应变随回采距离线性累积．回采至 35 m 时，顶板形成砌体梁稳定结构，载荷通过铰接岩块传递至煤柱．应变增速趋于零，反映岩体进入塑性平衡阶段．此阶段表明顶板自稳结构形成，破断风险降低．



（a）低层位

（b）中层位

（c）高层位

图 6　覆岩垂直位移演化特征

Fig. 6　Characterization of vertical displacement evolution of overburden rocks

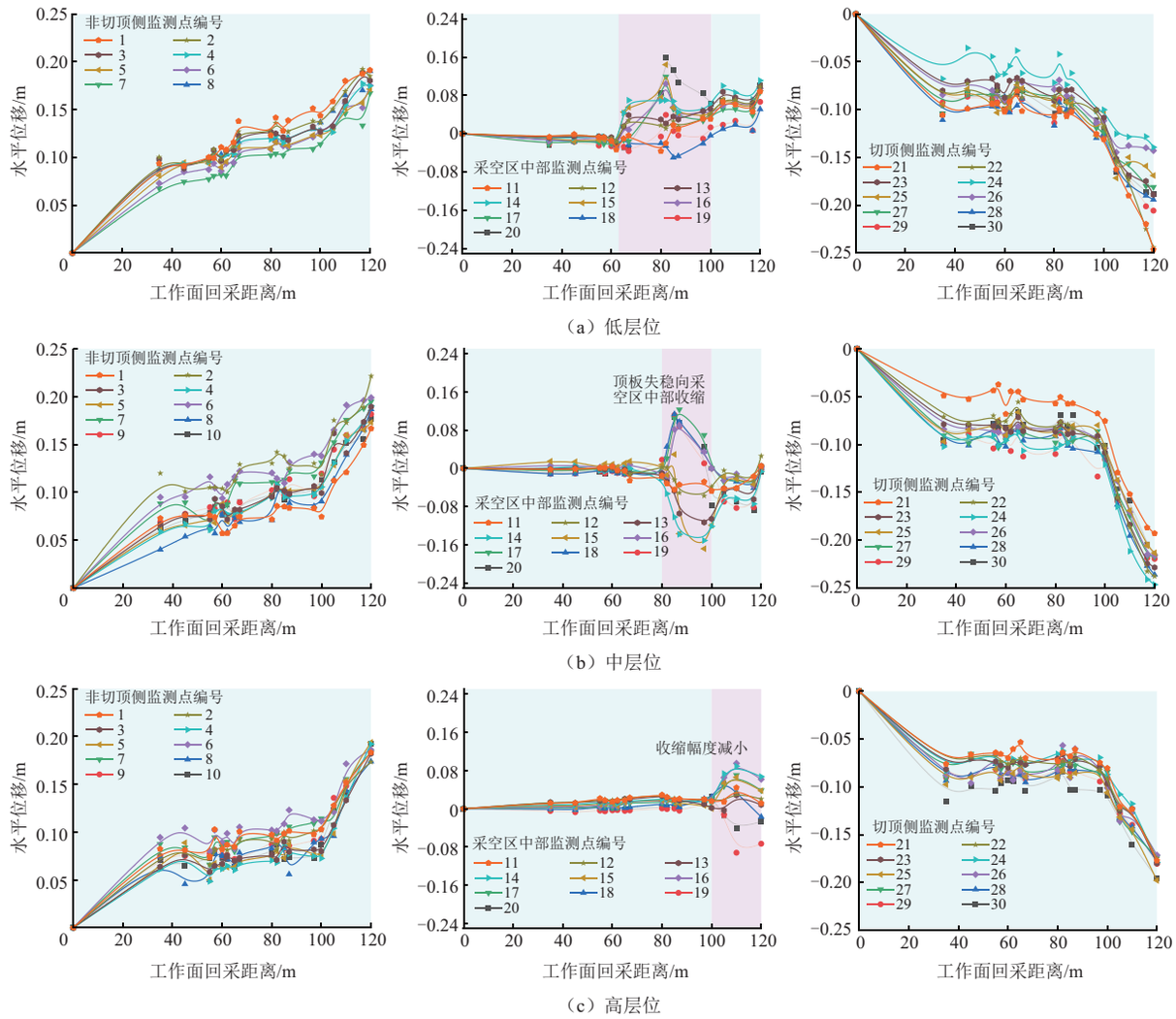


图 7　覆岩水平位移演化特征

Fig. 7　Characterization of horizontal displacement evolution of overburden

采空区应变经历了“缓增—急增—急降—缓降”的变化过程，应变“急增—急降”对应顶板“断裂—回转—压实”的动态循环. 以监测点 15 为例，在回采至 35 m 时应变为 4.8×10^{-4}，增速几乎为 0，顶板未破断，采空区中部覆岩处于双向受压（垂直载荷＋水平挤压力）状态，应变以压缩为主；在回采至 67 m 时应变为 4.5×10^{-2}，增速为 8.5×10^{-3} m^{-1}，顶板初次破断，岩块回转导致覆岩拉-剪复合应变，裂隙快速扩展释放应变能；在回采至 87 m 时应变为 2.8×10^{-2}，降速为 5.9×10^{-3} m^{-1}，破断岩块进入回转压实阶段，碎胀矸石填充采空区，卸载覆岩拉应力；回采至 100 m 时应变为 2.3×10^{-2}，降速为 5.0×10^{-4} m^{-1}，此时采空区压实趋于稳定.

切顶侧覆岩应变在前期并未变化，后期快速升高. 如监测点 24 在回采至 35 m 时应变为 1.1×10^{-3}，回采至 120 m 时应变为 1.1×10^{-1}，增速为 7.3×10^{-3} m^{-1}. 顶板残余结构整体切落，引发动载冲击，叠加采空区矸石侧向膨胀，导致低层位覆岩受拉-剪复合作用，应变能急剧释放. 切顶侧应变“前期停滞-后期突增”反映顶板破断模式由渐进式能量释放到储能-突发式能量释放根本性改变.

中层位采空区作为应力传导的“缓冲带”，需持续吸收上层和下层的应力传递，导致应变随时间逐渐累积，较低层位演化幅度更大. 非切顶侧覆岩顶板连续性保持较好，岩层需承担少部分悬臂梁弯曲应力，导致应变小幅度累积，切顶侧碎胀矸石向上传递部分载荷，减轻中层位直接承载压力，故切顶侧最大应变较非切顶侧小 14.5%.

高层位因关键层的大跨度梁式承载效应，切顶侧与非切顶侧应变差异显著弱化；而采空区中部覆岩经历“应力加载—破断—压实”全周期应变演化，应变响应相位较低层位滞后约 40 m 回采周期.

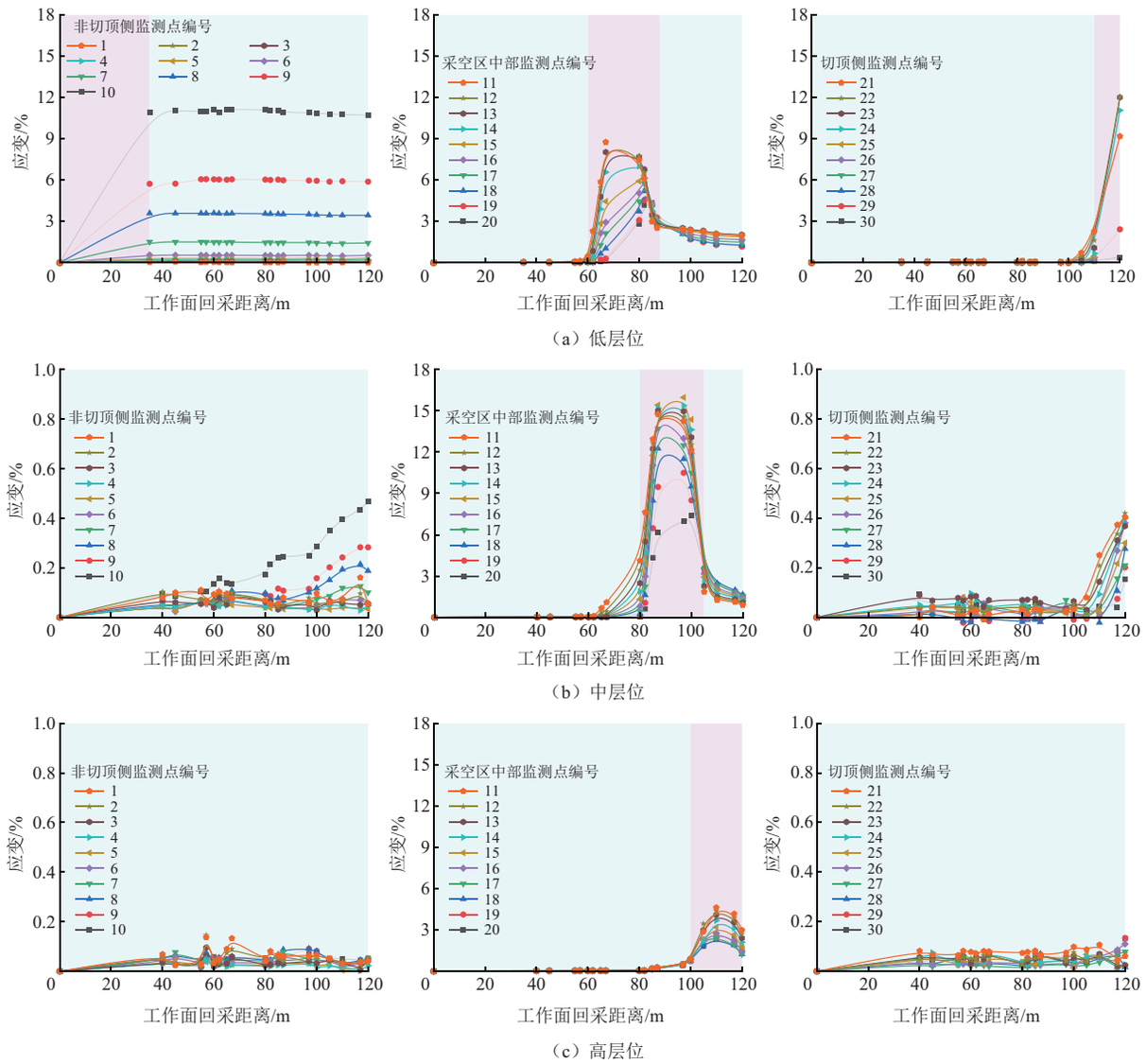


图 8 覆岩应变演化特征

Fig. 8 Characterization of the strain evolution of the overburden

2.2.2 采动位移—应变空间演化

不同回采距离下工作面水平、垂直位移变化趋势曲线如图 9 所示. 由图 9a 可知，低层位垂直位移呈马鞍形演化，工作面回采至 82，100，120 m 时，非切顶侧最大垂直位移分别为 1.371，1.373，1.378 m，回采结束时切顶侧最大垂直位移为 1.165 m，切顶侧碎胀矸石快速充填采空区，提供了部分支撑，抑制顶板下沉，导致切顶侧最大垂直位移比非切顶侧小 15.4%. 在中层位，当工作面回采至 35 m 时，顶板周期性破断导致覆岩“梁-拱”结构失稳，破断位置形成应力集中区，引发局部下沉加剧，形成一个“V”形，最大垂直位移为 0.17 m. 工作面回采至 82，100，120 m 时，“V”形的深度分别达 0.820，0.921，1.092 m，位置分别在模型宽度 64，67，80 m 处. “V”形的迁移和其深度的增加反映出顶板破断线向采空区方向移动，破断事件空间扩展及破断规模逐次扩大，覆岩自承能力逐步丧失，下沉累积效应显著. 在高层位，回采至 120 m 时，“V”形最大深度为 0.917 m，位置在模型宽度 92 m 处. 高层位存在厚硬关键层，通过大范围梁式承载分散载荷，其破断滞后于中低层位，导致“V”形位置更远、深度更小.

由图 9b 可知，在低层位，工作面回采至 82，100，120 m 时，水平位移在工作面 40 m 处的最大幅度分别为 0.048，0.059，0.069 m，波动范围分别为工作面宽度 0～127，0～170，0～200 m. 波动范围呈应力拱[28]动态演化，扰动范围随着工作面回采扩展，直至跨越整个工作面宽度. 中层位水平位移峰值消失，整体分布规律较为对称. 高层位由于关键层的存在，水平位移逐渐呈线性演化.

图 10 展示了在不同回采距离下，应变随工作面回采的空间演化规律．由图 10 可知，低层位工作面回采至 82，100，120 m 时，非切顶侧应变峰值分别为 1.65×10^{-1}，1.63×10^{-1}，1.57×10^{-1}，随回采距离增加，砌体梁逐渐稳固压实，导致应变出现小幅度减小．应变峰值固定出现在模型宽度 38 m 处．应力及应变空间位置关联，反映载荷通过煤壁塑性区传递的模式，砌体梁的“梁-拱”效应锁定载荷传递路径，应变峰值不随回采距离迁移．低层位工作面回采至 82，100，120 m 时，切顶侧应变峰值分别为 6.79×10^{-2}，7.50×10^{-2}，1.13×10^{-1}，在回采结束时，覆岩中的亚关键层Ⅰ发生破断能量释放，但由于碎涨矸石的支撑作用，切顶侧应变比非切顶侧小 28.4%；应变峰值分别出现在模型宽度 86，116，147 m 处，切顶侧应变峰值迁移表明覆岩结构演化直接影响应变分布．

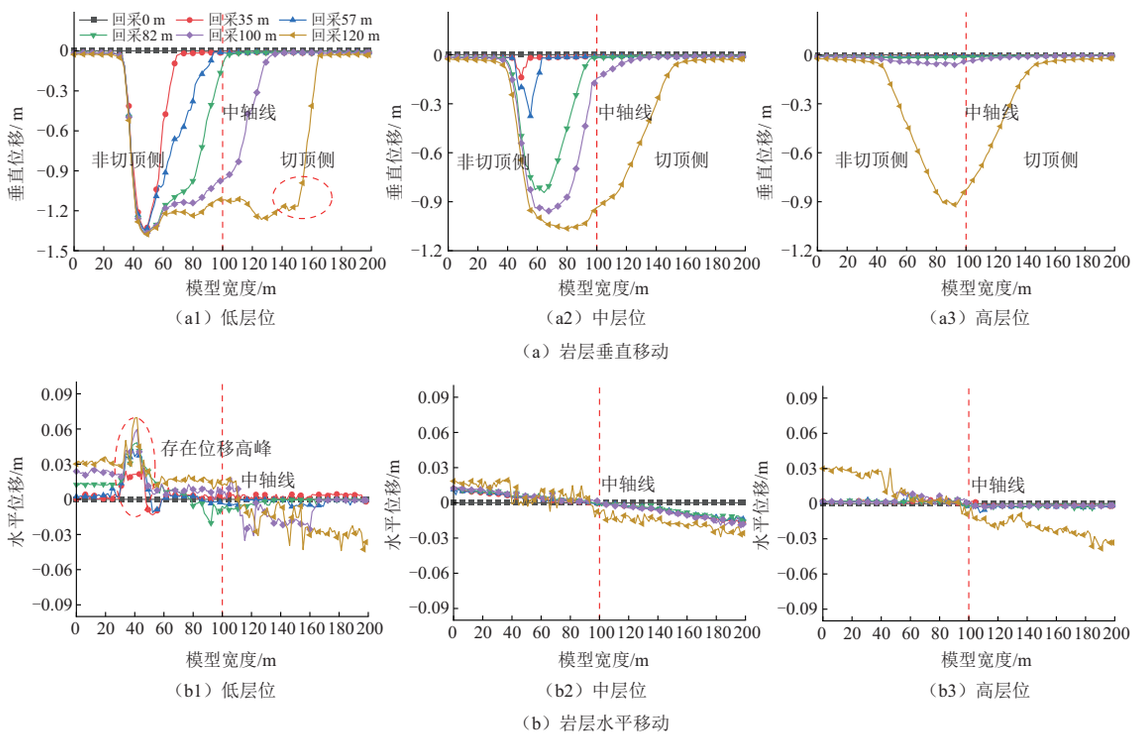


图 9　工作面回采过程中位移空间演化

Fig. 9　Spatial evolution of displacements during workface recovery

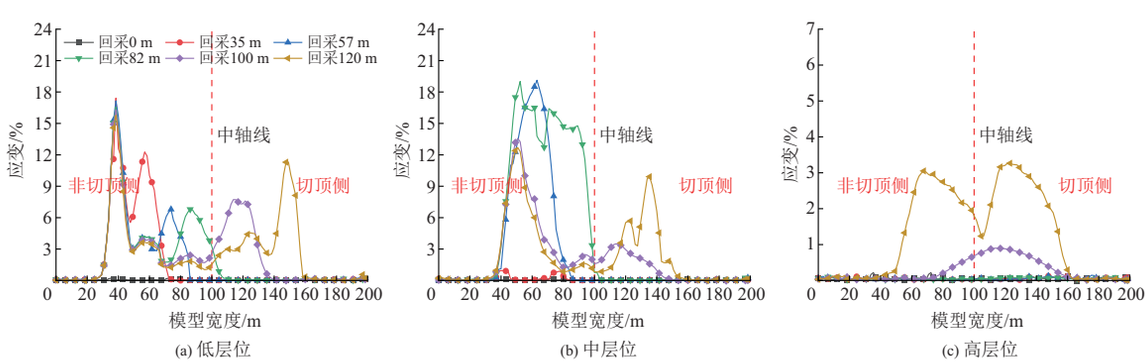


图 10　工作面回采过程中应变空间演化

Fig. 10　Spatial evolution of strain during workface recovery

中层位应变呈单峰向双峰分离扩展的演化过程，如回采至 57 m 时，模型出现 1 个应变峰值；而回采至 120 m 时，分裂演化为 2 个应变峰值，2 个应变峰值分别为 1.3×10^{-1}，9.9×10^{-2}，其中切顶侧应变峰值比非切顶侧小 21.9%，表明切顶侧的砌体铰接梁由于下方碎涨岩石支撑更为稳固[30]．

高层位随着工作面回采应变变化较小，回采结束时应变变化曲线呈“M”形，非切顶侧与切顶侧应变峰值分别为 3.05×10^{-2}，3.26×10^{-2}．两侧应变差异较小．

2.2.3　采动位移-应变时空演化

不同时空覆岩整体位移-应变演化规律如图

11所示. 随着工作面回采工作推进,高位移区域不断向采空区方向扩展,在非切顶侧,当工作面回采至35 m时,顶板出现小面积下沉,形成砌体梁结构,相互铰接的“砌体梁”结构形成承载覆岩结构的边界;最大位移集中在1.2～1.4 m,最大主应变值集中在1.4×10^{-1}～1.9×10^{-1};随着工作面回采距离增加,最大位移及主应变略微减小. 而在切顶侧,原本该形成的砌体梁结构转变为短臂梁结构,岩块铰接失效,顶板突然切落释放能量,引发覆岩连锁垮落. 回采结束时最大位移集中在1.2～1.3 m处,最大主应变值集中在1.2×10^{-1}～1.5×10^{-1};此时整体覆岩受到强烈采动的影响形成大面积高位移、应变区域. 高位移区对应宏观形变,通过整体下沉释放能量;而高应变区体现弹性应变能集中,反映局部岩体储能-耗能平衡过程.

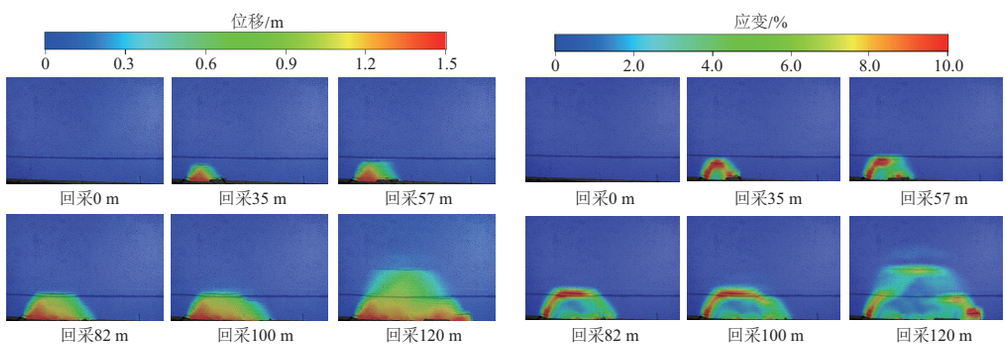


图11 工作面回采过程中覆岩位移-应变场时空演化规律

Fig. 11 Temporal and spatial evolution law of displacement-strain field of overburden rock in the process of mining back to the working face

2.3 采动裂隙演化特征

裂隙是覆岩损伤累积的直观表征,其演化过程直接反映覆岩从连续介质向非连续结构的转化规律. 通过追踪裂隙演化特征可量化能量释放与应力-位移重分配的动态平衡. 同时裂隙网络是瓦斯运移主通道,其空间分布直接决定钻孔布置.

2.3.1 采动裂隙时空演化

图12为回采不同阶段的裂隙演化规律. 在工作面回采至35 m时,砌体梁结构形成. 由于初始开采导致顶板悬露,形成弹性弯曲,超过岩层抗拉强度,产生张拉裂隙,裂隙开始大量出现.

工作面回采至57 m时,部分裂隙闭合,此时顶板再次发生破断,铰接岩块间摩擦锁固,促使裂隙向应力释放区扩展. 工作面回采至100 m时,上方围岩压力增大,周围岩石进一步变形、移动,使最大空洞闭合;同时,由于下部回采扰动,应力向更上方传递,导致裂隙向上扩展发育. 回采至120 m时,在切顶侧形成了“短梁-铰接”结构. 由于裂隙在前期反复开闭,加剧了岩体破碎. 后期关键层破断引发贯穿性破坏,裂隙发育达到更复杂的程度.

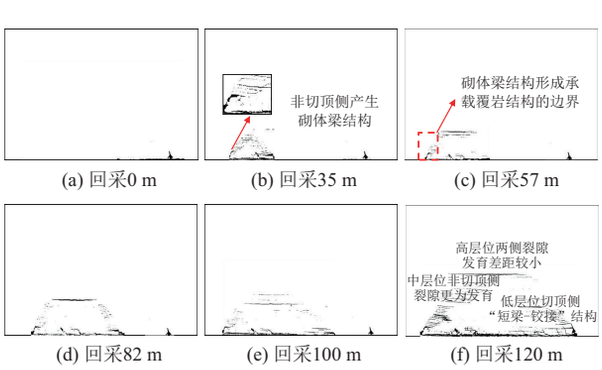


图12 工作面回采过程中裂隙演化规律

Fig. 12 Fissure evolution law in the process of mining back to the working face

对工作面回采过程中裂隙数量、发育高度及最大空洞高度进行统计,结果如图13所示.

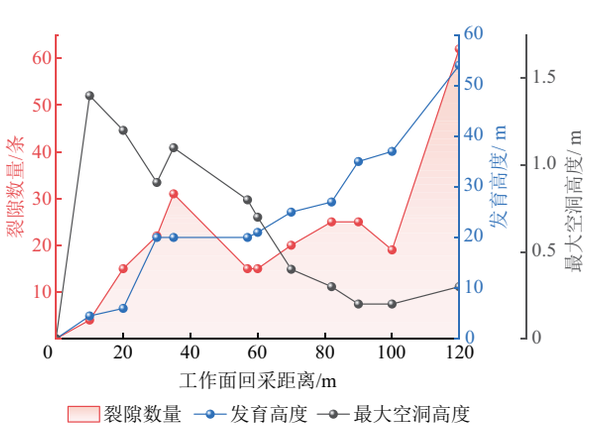


图13 工作面回采过程中裂隙数量、裂隙发育高度及最大空洞高度

Fig. 13 Number of fissures, height of fissure development and maximum void height during workface recovery

由图 13 可知，在工作面回采初期垮落矸石未能有效充填采空区，导致空洞高度快速增加．最大空洞高度急剧上升至 1.2 m，裂隙总数增加至 15 条，裂隙发育高度上升至 6 m．中期裂隙数量有波动，但整体维持在一定水平；裂隙发育高度为 21 m，处于稳定阶段．采空区矸石逐渐压实，挤压裂隙空间，部分空洞被碎胀岩屑填充，最大空洞高度开始缓慢下降至 0.7 m．覆岩形成稳定应力拱，载荷向两侧煤柱转移，周期来压导致部分裂隙受挤压闭合，抵消新裂隙生成，维持裂隙数量在 22 条动态平衡．回采后期，裂隙数量及发育高度同步上升，关键层破断后，裂隙向高层位延伸，矸石充分压实且分布均匀，支撑效果增强，限制空洞扩大．如回采至 120 m 时裂隙数量达到 62 条，发育高度至 54 m，最大空洞高度达 0.3 m．

对不同开采阶段覆岩区域的采动裂隙角度、数量进行统计分析，结果如图 14 所示，玫瑰花图中花瓣的方向代表裂隙的主要走向．

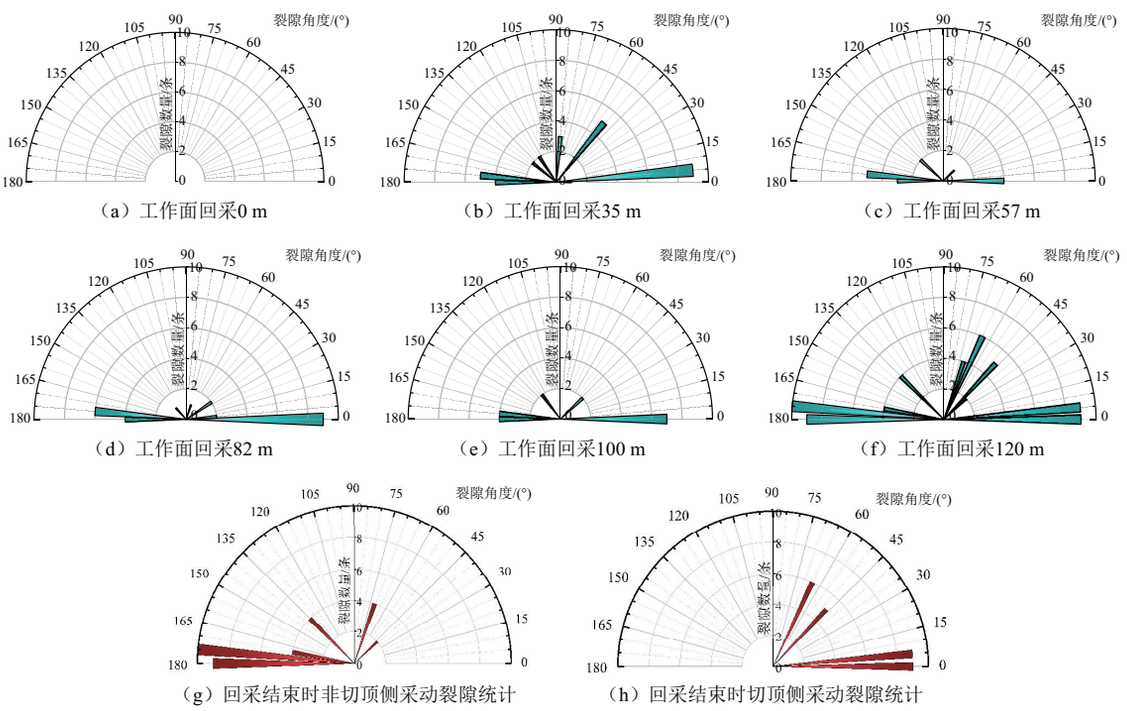


图 14　工作面回采过程中覆岩采动裂隙角度区间分布

Fig. 14　Interval distribution of overburden rock mining fissure angle during the workface mining process

由图 14 可知，由于回采引起的应力-位移场调整，导致岩体在不同方向上的破裂趋势发生改变．工作面回采至 35 m 时采空区上方岩层因弯曲下沉产生拉应力区，形成平行于层面的层间离层裂隙．此类裂隙集中在直接顶或关键层下部，51°～85°合计有 8 条裂隙，由应力旋转或压缩剪切破坏而产生，反映采动引起的非均匀应力场．在回采至 57～100 m 时，51°～85°裂隙数量较少，仅在 1 条上下波动，此时采动应力场进入周期性稳定阶段，非切顶侧形成稳定的“砌体梁结构”，应力集中区转移至煤壁，采空区上方应力梯度降低，导致剪切裂隙生成量减少，表明当前顶板破坏模式由分散性剪切破坏转向集中性宏观断裂．在回采至 120 m 时，裂隙数量增多且分布更加复杂，说明岩体的完整性受到破坏．通过对比回采结束时非切顶侧与切顶侧发现，非切顶侧裂隙为 33 条，裂隙角度分布较广，主要集中在近水平方向（170°～180°）和倾斜方向（43°～135°）；切顶侧裂隙为 29 条，切顶侧裂隙比非切顶侧少 12.1%，裂隙角度在 0°～65°之间．由于切顶主动破坏了顶板的连续性，使原集中于顶板的垂直应力向采空区深部转移（应力拱效应）．切顶侧岩体承受的压应力降低，裂隙发育所需的能量条件减弱，局部应力场改变，从而减少了裂隙角度的多样性，使裂隙角度集中在低-中角度范围，提高了顶板稳定性．

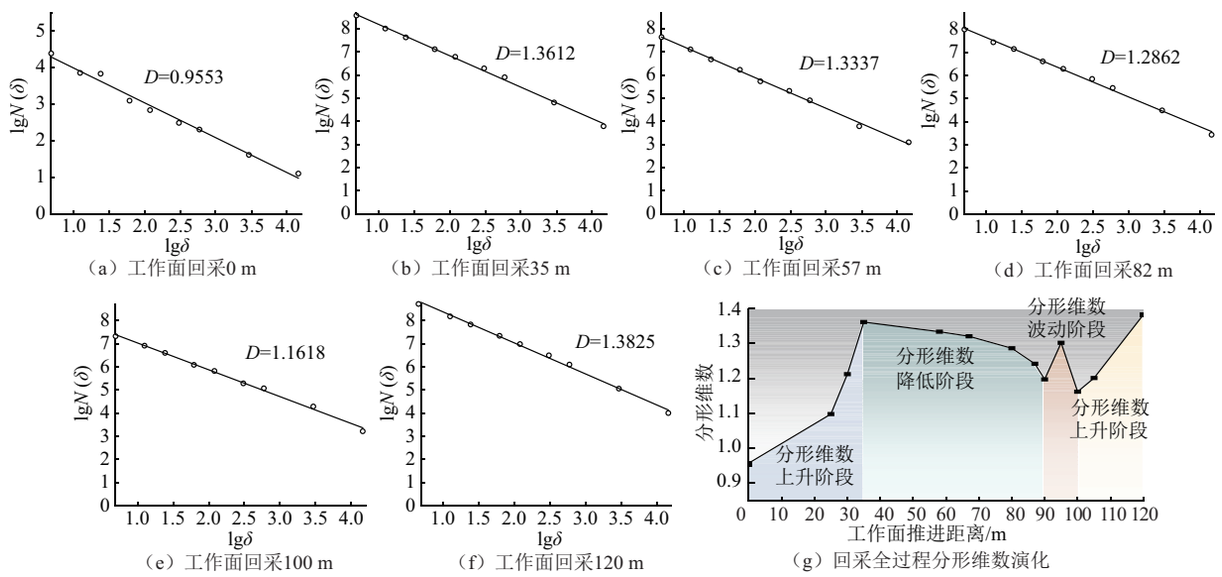
2.3.2　采动裂隙分形维数演化

为了进一步分析采动覆岩裂隙演化过程，基于分形理论对覆岩结构特征进行量化[31]，计算公式如下：

$$D=-\lim\frac{\lg N(\delta)}{\lg\delta}, \tag{6}$$

式中：D为分形维数；$N(\delta)$为覆盖全部裂隙网络的方格数量；δ为覆盖裂隙网络的图形边长.

回采过程中各阶段采动覆岩裂隙演化分形维数变化如图15所示. 分形维数在回采至35 m时分形维数由初始0.955 3增加到1.361 2，增速由0.005 7 m^{-1}增加到0.026 m^{-1}. 因为初始阶段裂隙开始形成，应力集中导致裂隙扩展，分形维数缓增. 当顶板初次破断时，裂隙网络迅速复杂化，导致分形维数急增. 在回采90 m时降低至1.197 0，此时降低速率为0.015 m^{-1}. 由于矸石压实作用，挤压浅部裂隙闭合简化裂隙网络，导致复杂度降低. 随着回采的继续，由于采动覆岩裂隙受岩体结构的影响，覆岩裂隙经历着新裂隙生成、扩张和旧裂隙闭合[32-34]，导致裂隙网络复杂度处于波动的趋势. 随后回采至切顶侧附近，由于切顶工艺破坏了顶板结构，导致新的裂隙稳定生成，分形维数进入二次上升阶段，回采结束时分形维数快速增加至1.382 5.



（a）工作面回采0 m （b）工作面回采35 m （c）工作面回采57 m （d）工作面回采82 m

（e）工作面回采100 m （f）工作面回采120 m （g）回采全过程分形维数演化

图15 工作面回采过程分形维数演化规律

Fig. 15 Fractal dimension evolution law of working face mining process

3 采动裂隙现场微震监测

为了验证物理相似模拟试验中切顶留巷覆岩的破坏规律，在现场工作面布置了微震监测系统，用以测试并对比非切顶侧与切顶侧的裂隙分布差异. 整个测试系统主要包括传感器、井下数字信号采集系统、地面主机处理系统、收发器、电缆线、光缆、接线盒等设备. 微震传感器布置方案如图16所示.

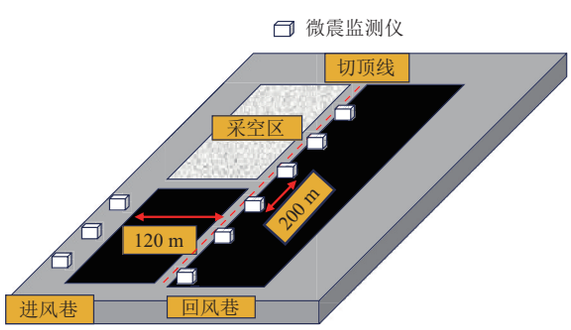


图16 微震监测系统布置

Fig. 16 Microseismic monitoring system layout

微震数据空间分布差异揭示了不同区域的覆岩破断特征. 通过对微震事件的定位分析，可以得到覆岩破裂的坐标、时刻、能量等信息. 经过为期5个月的微震监测，得到了图17所示的覆岩微震能量(E)分布空间图，为了便于分析，将微震事件划分为小能量事件($E\leqslant100$ J)、中等能量事件(100 J$<E\leqslant$1000 J)、大能量事件($E>1000$ J).

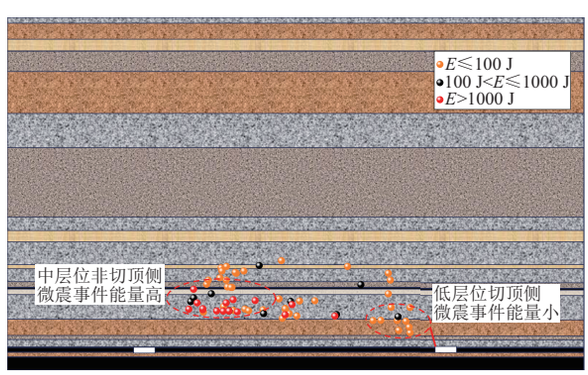


图17 微震事件空间分布

Fig. 17 Spatial distribution of microseismic events

由图 17 可知，在低层位切顶侧发生大量小能量事件，印证了前文切顶处附近应变集中和大量微裂隙生成的试验规律，这种低能量高频事件说明了“短臂-铰接”结构使覆岩能量得以平缓释放，形成大量小规模破裂．中层位非切顶侧多发生大能量事件，印证了前文分析得到的砌体梁铰接点的高应变区域．此外，由前文分析可知，非切顶侧较切顶侧产生了更多的斜向剪切裂隙，且裂隙发育高度更高，因此对应了更多的微震事件及大能量事件，且微震事件总体分布层位更高．综上，现场微震实测结果揭示了切顶侧“碎胀矸石压实、残余顶板微破裂”的破断模式，与前述试验结果一致，进一步验证了试验结果的准确性．

4　结　论

1）非切顶侧煤柱的应力整体呈线性上升趋势，切顶侧煤柱应力在回采前期缓慢增加，回采后期应力增长速率加快；切顶侧应力峰值的迁移表明切顶工艺虽改变了顶板悬臂梁结构，但并不能够完全切断顶板应力传递路径，随采空区扩大，顶板关键层破断引发远场覆岩“梁-拱”结构改变．

2）非切顶侧顶板岩层通过自承形成砌体梁结构后，低层位垂直位移与应变趋于稳定，水平位移经历了“快增—缓增—快增”的时序性变化，回采结束时，切顶侧最大应变比非切顶侧小 28.4%；高层位切顶侧与非切顶侧垂直位移与应变受关键层影响较大，水平位移并未受关键层影响．

3）切顶后，工作面回采结束时切顶侧裂隙角度主要分布在 0°～65°区间，且裂隙数量比非切顶侧少 12.1%．由于切顶使原集中于顶板的垂直应力向采空区深部转移，切顶侧岩体承受的压应力降低，减少了裂隙角度的多样性．

4）现场微震结果揭示了低层位切顶侧“碎胀矸石压实＋残余顶板微破裂”的破断机制．中层位非切顶侧发生了更多的大能量事件，证实了该区域在空间分布上应变集中程度更高．

需要说明的是，本文在探究切顶留巷对覆岩力学特征影响过程中，仅考虑了重力及采动应力对覆岩运动的作用，未能真实反映煤层的三维应力场环境；同时，未考虑巷内支护系统对覆岩承载的影响，所得结论具有一定局限性．

参考文献：

[1] 王双明，申艳军，宋世杰，等．“双碳”目标下煤炭能源地位变化与绿色低碳开发[J]．煤炭学报，2023，48(7)：2599-2612.
WANG Shuangming，SHEN Yanjun，SONG Shijie，et al.Change of coal energy status and green and low-carbon development under the “dual carbon” goal [J]. Journal of China Coal Society，2023，48(7)：2599-2612.

[2] 何满潮．无煤柱自成巷开采理论与 110 工法[J]．采矿与安全工程学报，2023，40(5)：869-881.
HE Manchao.Theory and engineering practice for non-pillars mining with automagical entry formation and 110 mining method [J]. Journal of Mining & Safety Engineering，2023，40(5)：869-881.

[3] 高玉兵，王　琦，杨　军，等．特厚煤层综放开采邻空动压巷道围岩变形机理及卸压控制[J]．煤炭科学技术，2023，51(2)：83-94.
GAO Yubing，WANG Qi，YANG Jun，et al.Mechanism of deformation and pressure relief control of dynamic gob-side entry surroundings in fully-mechanized caving mining for extra-thick coal seam [J].Coal Science and Technology，2023，51(2)：83-94.

[4] 王新丰，陆明远．深部变面长采场顶板破断演化的力学机制分析[J]．煤田地质与勘探，2022，50(10)：1-15.
WANG Xinfeng，LU Mingyuan.Study on mechanical mechanism of roof fracture evolution in deep stope with variable face length [J].Coal Geology & Exploration，2022，50(10)：1-15.

[5] 何满潮，陈上元，郭志飚，等．切顶卸压沿空留巷围岩结构控制及其工程应用[J]．中国矿业大学学报，2017，46(5)：959-969.
HE Manchao，CHEN Shangyuan，GUO Zhibiao，et al.Control of surrounding rock structure for gob-side entry retaining by cutting roof to release pressure and its engineering application [J]. Journal of China University of Mining & Technology，2017，46(5)：959-969.

[6] 何满潮，盖秋凯，高玉兵，等．坚硬顶板无煤柱自成巷碎胀平衡机理与调控研究[J]．中国矿业大学学报，2023，52(5)：831-844.
HE Manchao，GAI Qiukai，GAO Yubing，et al.Research on the mechanism and control of bulking equilibrium of non-pillar mining with automatic entry formation for hard roof [J].Journal of China University of Mining & Technology，2023，52(5)：831-844.

[7] 辛亚军，田孟含，姬红英，等．沿空留巷采空侧支护体-堆积体协同承载机理[J]．中国矿业大学学报，2025，54(3)：595-608.
XIN Yajun，TIAN Menghan，JI Hongying，et al.Collaborative bearing mechanism of support body-accumulation body along gob for gob-side retention gateway [J].Journal of China University of Mining & Technol-

ogy,2025,54(3):595-608.

[8] 赵萌烨,黄庆享,朱 磊,等.无煤柱切顶沿空留巷顶板“短砌体-铰接”结构及支撑阻力研究[J].煤炭学报,2021,46(增1):84-93.
ZHAO Mengye,HUANG Qingxiang,ZHU Lei,et al. Research on roof structure and support resistance of gob-side entry retaining with roof cutting and non-pillar mining [J].Journal of China Coal Society,2021,46(Sup 1):84-93.

[9] 刘斌慧,杨 军,田 锋,等.巷旁切顶对采场下位岩层垮落特征的影响机制[J].岩土力学,2023,44(1):289-302.
LIU Binhui,YANG Jun,TIAN Feng,et al.Influence mechanism of roadside roof cutting on collapse characteristics of lower roof in a stope [J].Rock and Soil Mechanics,2023,44(1):289-302.

[10] 杨敬轩,张 瑞,卢 硕,等.工作面顶板超前预裂应力阻隔护巷机理[J].中国矿业大学学报,2024,53(2):264-276.
YANG Jingxuan,ZHANG Rui,LU Shuo,et al.Insight into the mechanism of roadway protection against high advance stress by roof pre-splitting [J].Journal of China University of Mining & Technology,2024,53(2):264-276.

[11] 张陶香,涂 敏,赵庆冲,等.沿空巷道侧向结构切顶卸压高度研究[J].科学技术与工程,2025,25(12):4938-4946.
ZHANG Taoxiang,TU Min,ZHAO Qingchong,et al.Pressure relief height of roof cutting and relieving along the lateral structure of empty roadway [J].Science Technology and Engineering,2025,25(12):4938-4946.

[12] 贾后省,王 林,彭 博,等.弱黏结复合顶板沿空留巷分级“控顶-卸压”机理与应用[J].中国矿业大学学报,2023,52(6):1191-1202.
JIA Housheng,WANG Lin,PENG Bo,et al.Mechanism and application of classification “roof control-pressure relief” of gob-side entry retained with weakly caking compound roof [J].Journal of China University of Mining & Technology,2023,52(6):1191-1202.

[13] SUN B J,HUA X Z,ZHANG Y,et al.Analysis of roof deformation mechanism and control measures with roof cutting and pressure releasing in gob-side entry retaining [J].Shock and Vibration,2021,2021(1):6677407.

[14] ZHANG Z Z,DENG M,BAI J B,et al.Stability control of gob-side entry retained under the gob with close distance coal seams [J].International Journal of Mining Science and Technology,2021,31(2):321-332.

[15] YANG J,QIAO B W,GAO Y B,et al.Study on the gas migration laws of non-pillar mining with gob-side entry retaining in high gas outburst coal seam[C]//IOP Conference Series:Earth and Environmental Science.Bristol:IOP Publishing,2021,861(5):052058.

[16] 刘红威,赵阳升,REN Tingxiang,等.切顶成巷条件下采空区覆岩破坏与裂隙发育特征[J].中国矿业大学学报,2022,51(1):77-89.
LIU Hongwei,ZHAO Yangsheng,REN Tingxiang,et al.Characteristics of overburden failure and fracture development in gob of mining with gob-side entry formed by cutting roof [J].Journal of China University of Mining & Technology,2022,51(1):77-89.

[17] QIANG X B,LI J,CHEN C S,et al.Nonuniform deformation instability mechanism of gob-side entry retained in inclined coal seam and stability control [J].Applied Sciences,2023,13(15):8727.

[18] 杨 军,闵铁军,王亚军,等.无煤柱自成巷动压承载支护作用机理与设计方法[J].中国矿业大学学报,2023,52(3):457-465.
YANG Jun,MIN Tiejun,WANG Yajun,et al. Mechanism and design method of dynamic pressure support for non-pillar mining with automatically formed roadway [J].Journal of China University of Mining & Technology,2023,52(3):457-465.

[19] 双海清,辛越强,李树刚,等.基于关键层理论的切顶留巷下覆岩裂隙分布特征研究[J].煤炭科学技术,2024,52(5):102-113.
SHUANG Haiqing,XIN Yueqiang,LI Shugang,et al.Characterization of fissure distribution of overburden rock under roof cutting and entry retaining based on key strata theory [J].Coal Science and Technology,2024,52(5):102-113.

[20] 林海飞,刘思博,双海清,等.沿空留巷开采覆岩裂隙演化规律及卸压瓦斯抽采技术[J].采矿与岩层控制工程学报,2024,6(1):52-64.
LIN Haifei,LIU Sibo,SHUANG Haiqing,et al. Overburden rock fracture evolution law and pressure relief gas extraction technology of gob-side entry retaining mining [J].Journal of Mining and Strata Control Engineering,2024,6(1):52-64.

[21] 林海飞,刘思博,李树刚,等.切顶留巷贯通相邻采空区覆岩破断特征研究及应用[J].采矿与岩层控制工程学报,2025,7(3):156-169.
LIN Haifei,LIU Sibo,LI Shugang,et al.Research on the characteristics of overlying rock fracturing in roadway maintained by roof cutting and connecting adja-

cent goaf and its application [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2025, 7(3): 156-169.

[22] 王　炯, 朱道勇, 宫伟力, 等. 切顶卸压自动成巷岩层运动规律物理模拟实验[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(11): 2536-2547.
WANG Jiong, ZHU Daoyong, GONG Weili, et al. Physical simulation experiment on the movement of rock strata upon automatic roadway forming by roof cutting and pressure releasing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(11): 2536-2547.

[23] 郭志飚, 李伟涛, 何满潮, 等. 基于补偿理论的深部软岩动压巷道破坏机理及控制对策[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(5): 931-942.
GUO Zhibiao, LI Weitao, HE Manchao, et al. Failure mechanisms and control strategies in dynamic pressure roadways of deep soft rock based on compensation theory [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(5): 931-942.

[24] 盖秋凯, 高玉兵, 何满潮. 承压水上无煤柱自成巷开采底板破坏特征模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(2): 391-408.
GAI Qiukai, GAO Yubing, HE Manchao. Model experimental study of floor failure characteristics during non-pillar mining with automatically formed roadway above confined water [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(2): 391-408.

[25] ZHAO P X, CHANG Z C, LI S G, et al. Study of the velocity effect on the energy dissipation structure of overlying rock at a fully mechanized mining face [J]. Energy, 2025, 320: 135315.

[26] 李家卓, 彭　瑞, 窦林名, 等. 远场弱动载触发深部高应力煤层大巷冲击地压发生机制及防控机理[J]. 采矿与安全工程学报, 2025, 42(2): 371-381.
LI Jiazhuo, PENG Rui, DOU Linming, et al. Mechanism and technology of preventing and controlling rock burst in roadway in deep high stress disk area in far field weak dynamic load [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2025, 42(2): 371-381.

[27] 祖　坤, 熊二刚, 罗　斌, 等. 基于梁-拱复合受力机制的高强混凝土梁受剪分析模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(11): 78-87.
ZU Kun, XIONG Ergang, LUO Bin, et al. Shear analysis model of high-strength concrete beams based on beam-arch action mechanism [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(11): 78-87.

[28] XIA B W, ZHANG X, YU B, et al. Weakening effects of hydraulic fracture in hard roof under the influence of stress arch [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2018, 28(6): 951-958.

[29] 林韩祥, 冯雪峰, 张强勇, 等. 高位厚硬岩层破断力学机制分析[J]. 岩土力学, 2025, 46(4): 1264-1277.
LIN Hanxiang, FENG Xuefeng, ZHANG Qiangyong, et al. Mechanical mechanism of the fracture of high thick-and-hard overburden strata [J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(4): 1264-1277.

[30] 侯俊领, 赵　能, 李俊斌, 等. 深浅孔联合爆破切顶留巷围岩控制技术及应用[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(12): 70-78.
HOU Junling, ZHAO Neng, LI Junbin, et al. Control technology and application of surrounding rock of deep and shallow hole combined blasting roof-cutting retaining roadway [J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(12): 70-78.

[31] XU C, WANG K, GUO L, et al. Fractal characteristics of mining-induced overburden fracture development during fully mechanized coal mining [J]. Environmental Earth Sciences, 2024, 83(3): 113.

[32] 郭文兵, 刘　玄, 杨伟强, 等. 断层影响下采动覆岩与地表移动特征[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(12): 38-46.
GUO Wenbing, LIU Xuan, YANG Weiqiang, et al. Characteristics of mining overburden and surface movement under influence of faults [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(12): 38-46.

[33] 赵鹏翔, 裴文博, 李树刚, 等. 巨厚煤层下分层开采邻近采空区破断岩体分形继发性演化机理[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(4): 696-709.
ZHAO Pengxiang, PEI Wenbo, LI Shugang, et al. Fractal secondary evolution mechanism of fractured rock mass in adjacent goaf areas under extremely thick coal seam lower slice mining [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(4): 696-709.

[34] 张玉军, 华照来, 宋业杰, 等. 超大采高土-基型覆岩采动导水裂缝发育规律及控水开采策略[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(7): 112-127.
ZHANG Yujun, HUA Zhaolai, SONG Yejie, et al. Developmental pattern of water flowing fractured zones in the soil-bedrock-type overburden and water-controlled mining strategy under a super-large mining height [J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(7): 112-127.

（责任编辑　沈春妮　宋　爽）