



矿业科学学报

JOURNAL OF MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY

西部矿区特大采高工作面覆岩破断运移全周期动态演化特征

任赵鹏, 樊柏强, 程聚豪, 李晓斌, 李全生, 张村, 韩鹏华

The whole-cycle dynamic evolution characteristics of overburden fracture and movement in extremely high mining longwall face in western mining area

引用本文:

任赵鹏, 樊柏强, 程聚豪, 等. 西部矿区特大采高工作面覆岩破断运移全周期动态演化特征[J]. [矿业科学学报](#), 2025, 10(4): 648–660.

REN Zhaopeng, FAN Baiqiang, CHENG Juhao, et al. The whole-cycle dynamic evolution characteristics of overburden fracture and movement in extremely high mining longwall face in western mining area[J]. [Journal of Mining Science and Technology](#), 2025, 10(4): 648–660.

您可能感兴趣的其他文章

1. 复杂地形地貌对下伏煤岩层应力影响规律研究

引用本文: 张大明, 付松, 李刚. 复杂地形地貌对下伏煤岩层应力影响规律研究[J]. [矿业科学学报](#), 2023, 8(4): 548–559.

2. 西南地区节理化薄层软岩隧道大变形力学机理及支护控制方法

引用本文: 陶志刚, 李梦楠, 张博, 等. 西南地区节理化薄层软岩隧道大变形力学机理及支护控制方法[J]. [矿业科学学报](#), 2023, 8(4): 452–463.

3. 煤矿开采损伤数值模拟量化表征与应用

引用本文: 张村, 任赵鹏, 兰世勇, 等. 煤矿开采损伤数值模拟量化表征与应用[J]. [矿业科学学报](#), 2023, 8(3): 398–408.

4. TBM滚刀破岩效果及新型刀具的应用研究

引用本文: 刘颖超, 刘波, 江玉生, 等. TBM滚刀破岩效果及新型刀具的应用研究[J]. [矿业科学学报](#), 2023, 8(3): 357–369.

5. 致密砂岩 I 型断裂行为的温度效应研究

引用本文: 陈立超, 吕帅锋, 张典坤. 致密砂岩 I 型断裂行为的温度效应研究[J]. [矿业科学学报](#), 2022, 7(6): 700–709.

任赵鹏,樊柏强,程聚豪,等. 西部矿区特大采高工作面覆岩破断运移全周期动态演化特征[J]. 矿业科学学报, 2025, 10(4): 648-660. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2025014

REN Zhaopeng, FAN Baiqiang, CHENG Juhao, et al. The whole-cycle dynamic evolution characteristics of overburden fracture and movement in extremely high mining longwall face in western mining area[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2025, 10(4): 648-660. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2025014

西部矿区特大采高工作面覆岩破断运移 全周期动态演化特征

任赵鹏¹, 樊柏强¹, 程聚豪¹, 李晓斌², 李全生^{1,2}, 张村^{1,2}, 韩鹏华¹

1. 中国矿业大学(北京)能源与矿业学院, 北京 100083;

2. 北京低碳清洁能源研究院煤炭开采水资源保护与利用全国重点实验室, 北京 102209

摘要:为探索西部矿区特大采高工作面覆岩的损伤破断结构特征及运动规律,以上湾煤矿8.8 m特大采高工作面为背景,采用现场实测、物理模拟等方法研究中等埋深、厚覆岩地质特征和固有采动损伤条件下覆岩破断垮落过程及其时空演化规律。结果表明:覆岩破坏高度随工作面推进呈现“台阶式”上升的演化过程,揭示特殊地质条件下特大采高工作面覆岩的“三带”破断模式以及主控岩层上方组合厚软岩层缓冲层对采动损伤的抑制作用;基本顶以“切落体”形式垮落于采空区,而主关键层则形成“砌体梁”结构;覆岩以“协同下沉组”形式破断沉降,且不同层位岩层沉降量随埋深减小而减小,地表随厚软岩层的弯曲下沉形成均匀沉降,下沉系数达0.58。

关键词:特大采高;厚覆岩;覆岩破断;采动损伤传导

中图分类号:TD 324

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2025)04-0648-13

The whole-cycle dynamic evolution characteristics of overburden fracture and movement in extremely high mining longwall face in western mining area

REN Zhaopeng¹, FAN Baiqiang¹, CHENG Juhao¹, LI Xiaobin²,
LI Quansheng^{1,2}, ZHANG Cun^{1,2}, HAN Penghua¹

1. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining, National Institute of Low Carbon and Clean Energy, Beijing 102209, China

Abstract: In order to explore the structural characteristics and movement laws of overburden damage and fracture in the extremely high mining longwall face in the western mining area, the 8.8 m extremely high mining longwall face of Shangwan Coal Mine was used as the research background. Based on the field measurement results, physical modeling and other methods, the geological characteristics of medium burial depth, thick bedrock and inherent mining damage conditions of overlying rock damage and its spatiotemporal evolution process were studied. The results show that: the damage height of over-

收稿日期:2024-06-29 修回日期:2024-08-21

基金项目:国家自然科学基金(52104155,51904302,52404109);北京市自然科学基金(8212032);煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室开放基金(WPUKFJJ2019-15)

作者简介:任赵鹏(1996—),男,山西晋中人,博士研究生,主要从事矿山压力与岩层控制方面的研究工作。Tel:18801367433, E-mail:ren18435227714@163.com

通信作者:李晓斌(1993—),男,山西忻州人,工程师,博士,主要从事绿色开采方面的研究工作。Tel:18813042559, E-mail:lxb162197@126.com

lying rock shows a "stepwise" development and evolution process. It reveals the "three-zone" fracture mode of overlying rock in extremely high mining longwall face under special geological conditions and the restraining effect of the combination of thick and soft rock layers above the primary key strata on mining damage. The main roof collapsed in the goaf in the form of a "caved rock block", while the primary key strata formed a "masonry beam" structure. The "non-uniform" characteristics of overlying rock subsidence were formed in the form of "collaborative subsidence groups" when the overlying rock broke and settled. The subsidence of overlying rock showed the non-linear decrease with the decrease of burial depth, and the surface movement was uniform with the bending of thick and soft rock layers, with the subsidence coefficient of 0.58.

Key words: extremely high mining; thick overburden; overburden fracture; mining damage conduction

目前,我国西部矿区已全面进入高强度开采阶段,在提高生产效率的同时造成矿区严重的生态破坏^[1-2]。在采动损伤的影响下,覆岩破坏严重,采动裂隙大多发育至地表,形成大量地表裂缝与大范围地表沉降,导致地下水流失、植被死亡与地面建筑物严重损坏,煤炭安全高效开采与生态保护的矛盾日益凸显^[3-4]。因此,研究煤层开采过程中上覆岩层由下向上逐步破断发展的采动损伤传导过程,是科学解决上述矛盾的重要基础。

覆岩结构在采场内起到“承上启下”的作用,不仅控制上覆岩层的变形与移动,还直接影响采场围岩与支架的受力分布。随着实验室实验(相似模拟)和计算机技术(数值模拟)的发展^[5-6],众多学者基于现场宏观观测结果,从微观角度出发研究覆岩、地表采动损伤演化规律。李全生等^[7-11]针对西部矿区高强度开采下覆岩、地表破坏严重的现象,为揭示工作面开采过程中高强度采动损伤的传导机理,构建了“空天地一体化”现场监测手段,提出“源头减损、采中控制、采后治理”的系统减损方法,为西部矿区生态保护提供科学指导。何祥等^[12-15]利用数值模拟、物理模拟、理论分析等手段阐述了西部矿区覆岩破断特征及导水裂隙带发育规律,并揭示了覆岩-地表协同演化特征。张村等^[16]针对围岩采动损伤的量化表征,基于有限元和离散元模拟方法提出了损伤度的概念,并基于此优化了西部矿区高强度开采参数。鞠金峰等^[17]、尹希文^[18]、黄庆亨等^[19-21]、王云广等^[22]基于现场实测结果分析了覆岩主控岩层控制作用下覆岩逐层下沉机理,并结合物理模拟实验呈现的覆岩整体切落现象与力学机理分析,提出“切落体”结构及覆岩裂隙演化分区。张玉军等^[23]、GAO等^[24]、LÜ等^[25]基于不同地质条件,结合 UDED (Universal Distinct Element Code) 数值模拟和物理实验等手段分析高强度开采工作面覆岩破断特征、采动裂隙演

化阶段和规律,阐述覆岩受采动影响下的破坏模式机理。张村等^[26]、杨俊哲等^[27]针对西部矿区特大采高、厚覆岩特殊地质条件下工作面覆岩采动发育规律,结合 FLac3D 数值模拟软件和现场观测手段,揭示特大采高工作面覆岩破坏呈现“三带”模式,且裂隙带形态随着采动程度的变化从“拱形”(三维“壳形”)转变为“马鞍形”(三维“盆形”)的发育过程。赵毅鑫等^[28]、曹健等^[29]、黄庆亨等^[30]结合物理模拟、数值模拟推演、分形理论分析、现场观测结果验证,阐述西部矿区高强度开采工作面采动裂隙发育演化规律及能量耗散规律,并基于裂隙演化形态对采场覆岩进行裂隙分区,为浅埋超大采高开采地表生态保护提供参考。梅福星等^[31]利用相似模拟和 DIC 技术分析了近距离煤层开采扰动下的覆岩裂隙发育规律,揭示了覆岩位移场、应力场的演化特征。魏江波等^[32]结合理论分析、数值模拟和物理模型试验结果,分析覆岩采动裂隙及地表裂缝的发育规律,揭示覆岩-地表采动裂隙的动态演化过程,为西部矿区浅埋煤层高强度开采覆岩、地表损伤防控提供科学借鉴。

上湾煤矿 12401 工作面是世界首个 8.8 m 特大采高工作面,固有采动损伤已足够大且埋深中等、覆岩比例高,不再适用于西部矿区浅埋、薄覆岩工作面的覆岩破断规律,导致采动损伤传导过程不明晰,缺乏对覆岩逐层破断、垮落直至诱发地表破坏的全周期运移规律的全面认识。因此,结合现场实测结果和物理模拟实验,全周期分析该工作面推进过程中的覆岩破断运移规律,从不同尺度揭示西部矿区特大采高工作面的采动损伤传导特征及采动损伤场的演化机理。

1 工程背景

上湾煤矿位于鄂尔多斯高原东部,地表大部分由风积沙覆盖,可采煤层主要为 1-2 煤层,煤层结

构简单,倾角约 3°。12401 工作面为该煤层首采面,为最大限度提高煤炭资源采出率,设计综采一

次采全高 8.8 m。采用全部垮落法管理顶板,推进长度 5 254.8 m,走向长度 299.2 m,如图 1 所示。

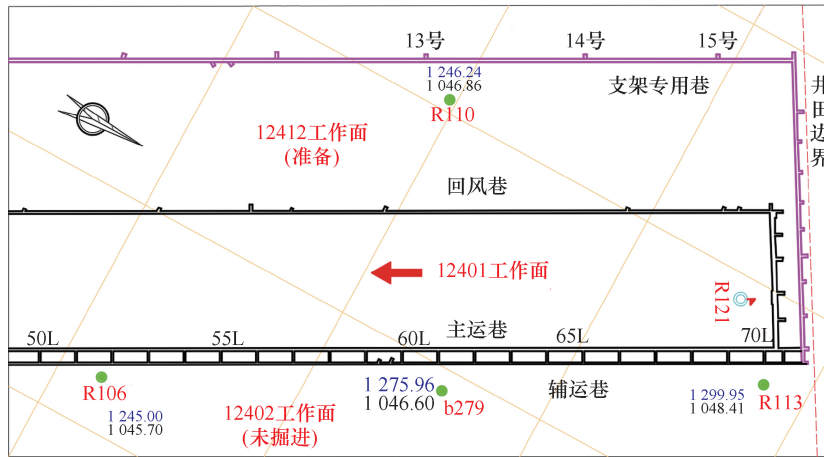


图 1 上湾煤矿 12401 工作面布置

Fig. 1 Layout of the longwall face 12401 in Shangwan Coal Mine

该工作面埋深 120~224 m,松散层厚度为 0~27 m,覆岩比例大,煤层顶板岩层以弱胶结砂岩为主,其次为断口粗糙的砂质泥岩,整体力学强度较弱;工作面伪顶为泥岩,抗压强度 11.3~13.2 MPa,普氏系数约 1.32,坚固性较低,属不坚硬类不稳定型;直接顶为灰白色细砂岩,抗压强度 13.3~15.2 MPa,普氏系数约 1.35,坚固性较强,属坚硬类不稳定型;基本顶为距煤层 20.2 m、厚 14 m 的细砂岩,主关键层为距煤层 68.5 m、厚度 22.7 m 的粗砂岩,抗压强度 14.5~36.6 MPa,普氏系数约 2.32。

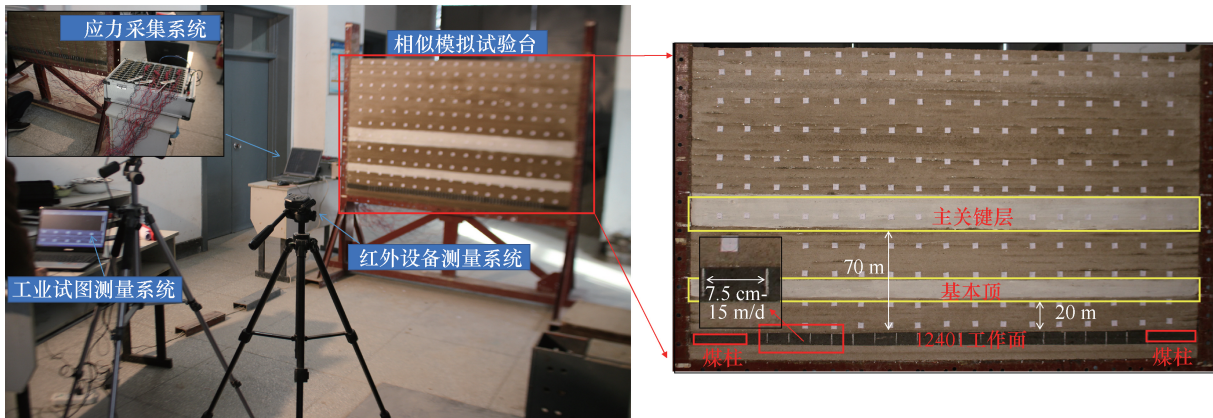
平均埋深 190 m,工作面采高 8.8 m,每天推进 15 m,根据岩层实际赋存情况建立相似模型,复现工作面推进至充分采动过程中主控岩层的初次断裂以及周期性破断过程。模型的相似比为 $C_y = 1 : 200$,容重相似比 $C_\gamma = 1 : 1.5$ (岩层)、 $C_\gamma = 1 : 1$ (煤层),应力相似比 $C_\sigma = C_y \times C_L$,即 $1 : 300$,时间相似比 $C_T = 1 : 10$,相似模型实验平台尺寸为 1 725 mm (长)×200 mm (宽)×1 165 mm (高)。物理模型如图 2 所示,为监测上覆岩层位移情况,在模型中设置位移观测点,行成一组 17 列的位移监测矩阵,监测点共设置 187 个。

2 特大采高工作面覆岩破断规律

2.1 物理模拟实验设计

根据上湾矿 12401 工作面钻孔资料,1-2 煤层

实验材料以沙子为主料,配以石灰、石膏、云母和水,层与层之间的弱面加入一定量云母粉,对于厚度较大(>5 m)的岩层,按照弱面分布进行分层铺设。物理模拟材料配比见表 1。



(a) 相似模型监测系统

(b) 物理相似模型

图 2 物理模型

Fig. 2 Experimental instruments and equipment

表1 物理模拟材料配比
Table 1 Material ratio for physical modeling

层号	厚度/cm	岩性	容重 $\gamma_r / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	抗压强度 σ / MPa	配比号(沙:石灰:石膏)	备注
1	4.5	风积砂	15.8	—	8:8:2	地表
2	0.5	粉砂岩	24.6	34	7:5:5	局部风化
3	11.5	细砂岩	25.0	44	6:5:5	
4	1.5	粗砂岩	24.3	33	8:6:4	厚软交互岩层
5	10.0	砂质泥岩	24.0	16	7:5:5	
6	3.0	中砂岩	23.9	37	7:5:5	
7	1.0	粗砂岩	24.3	33	8:6:4	
8	21.5	砂质泥岩	24.0	30	7:5:5	主关键层
9	2.5	细砂岩	25.0	44	6:5:5	
10	6.0	粗砂岩	24.3	33	8:6:4	
11	11.5	粗砂岩	24.3	33	6:5:5	
12	1.0	中砂岩	23.9	37	7:5:5	基本顶
13	1.5	砂质泥岩	24.0	30	7:5:5	
14	4.5	粗砂岩	24.3	33	8:6:4	
15	11.0	砂质泥岩	24.0	30	7:5:5	
16	7.0	细砂岩	25.0	44	6:5:5	工作面
17	1.5	砂质泥岩	24.0	30	7:5:5	
18	3.5	粉砂岩	24.6	34	6:5:5	
19	1.0	砂质泥岩	24.0	30	7:5:5	
20	4.0	细砂岩	25.0	44	6:5:5	
21	1.0	泥岩	21.2	28	8:6:4	
22	4.5	1-2煤	14.8	25	8:7:3	
23	2.5	砂质泥岩	24.0	30	6:5:5	
24	2.5	砂质泥岩	24.0	30	6:5:5	

工作面的开挖速度为 15 m/d, 由于该矿井采用 4/6 工作制, 根据几何相似比 (1:200) 和时间相似比 (1:10), 即每 1.8 h 开挖 7.5 cm, 每隔 0.6 h 开挖 1 次。

2.2 覆岩损伤破断全周期动态演化特征

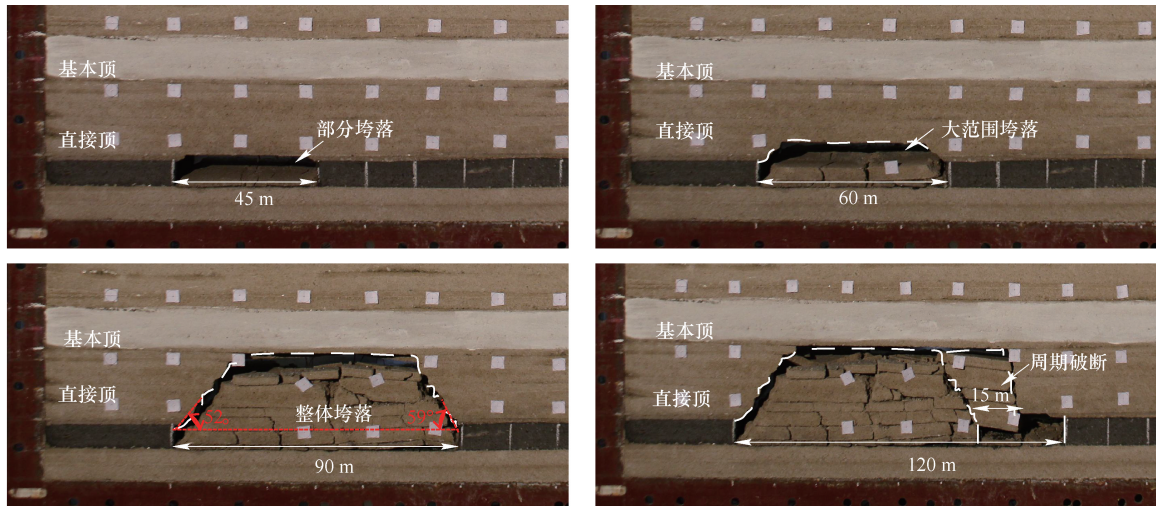
随着工作面的推进, 覆岩损伤破断直至充分采动的全周期动态演化情况如图 3 所示。特大采高工作面推进过程中, 覆岩损伤破断特征由不同层位的控制岩层共同作用划分为 4 个阶段: 直接顶突增阶段 (I)、基本顶抑制与释放阶段 (II)、关键层抑制与释放阶段 (III)、厚软缓冲层抑制阶段 (IV)。

在阶段 I 内, 从开切眼处开始开挖, 直接顶暴露面积不断扩大, 如图 3(a) 所示。工作面推进 45 m 时, 直接顶采动裂隙逐渐扩展, 发生部分垮落; 当推进至 60 m 时, 直接顶突然发生大范围垮落, 垮落高度 5.2 m。在直接顶初次垮落之后, 随着工作面继续推进至 90 m 时, 直接顶完全跨落于采空区, 由于基本顶对部分覆岩区域的控制作用,

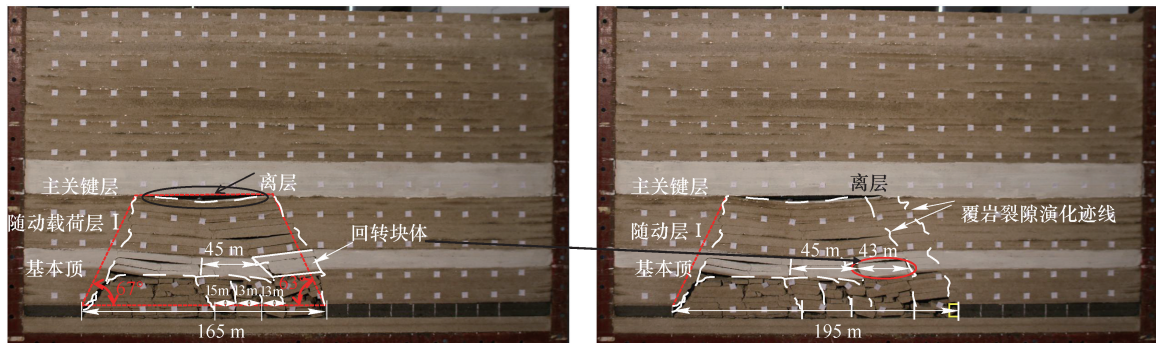
基本顶下方产生明显离层, 岩层破断角在开切眼一侧为 52° , 在工作面一侧为 59° 。

在阶段 II 内, 当推进至 165 m 时基本顶发生初次破断垮落于采空区, 破断块体长度约 45 m, 回转块体长度约 43 m; 其上覆随动载荷层同时垮落, 且与主关键层之间形成明显离层, 如图 3(b) 所示, 岩层破断角在开切眼一侧为 67° , 在工作面一侧为 63° , 工作面一侧的角度小于开切眼一侧的角度, 两者一般相差 $4^\circ \sim 5^\circ$, 具有不对称性; 当工作面推进至 195 m 时, 基本顶回转块体切落于采空区。

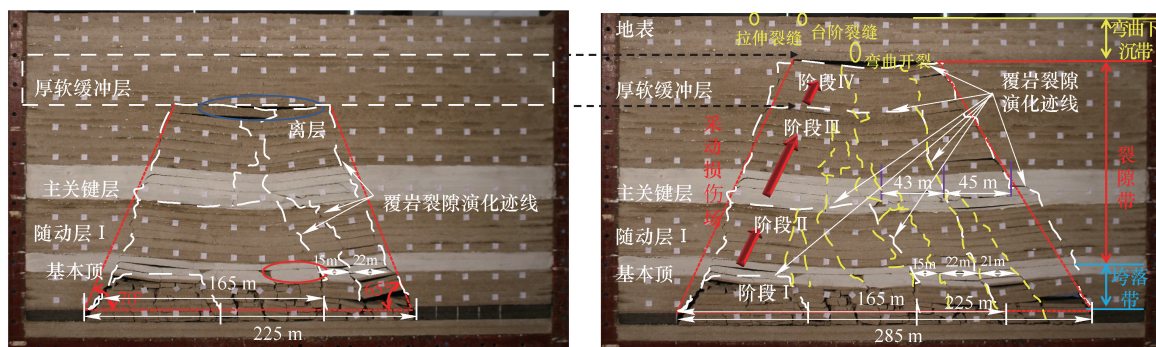
在阶段 III~IV 内, 当工作面推进至 225 m 时, 基本顶发生 2 次周期破断, 破断步距 15~22 m, 同时主关键层发生初次破断, 形成“三铰拱”结构, 并在高位厚软缓冲层下方出现明显离层, 同时高位厚软缓冲层由于受到弯曲拉应力作用, 在下表面产生轻微竖向破断裂隙, 如图 3(c) 所示。当推进至 285 m 时, 基本顶发生第 3 次周期破断, 破断块体长度约 21 m, 同时主关键层进入周期破断阶段, 回转



(a) 阶段 I



(b) 阶段 II



(c) 阶段 III~IV

图3 覆岩损伤破断的全周期动态演化情况

Fig. 3 Whole-cycle evolution of overburden damage and fracture

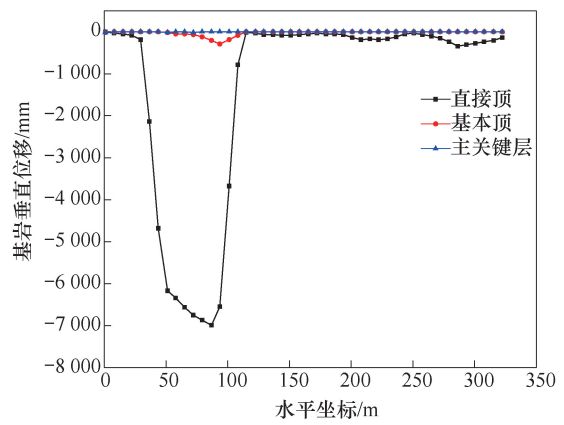
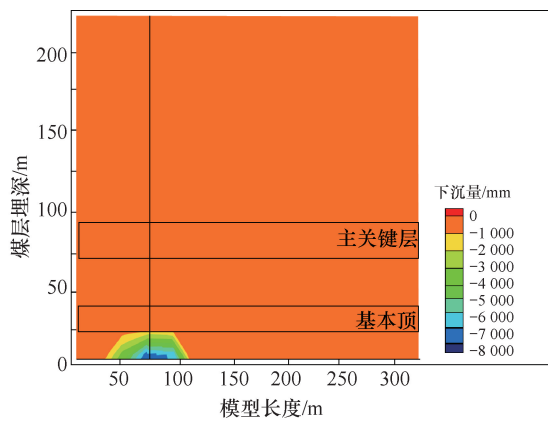
块体靠近煤壁侧伴随轻微滑移,破断块体长度 43 m,高位厚软缓冲层端部上方产生破断裂隙,下方离层闭合,且与弯曲下沉带之间形成明显离层。这说明上位厚软缓冲层对覆岩破断结构起支撑作用。

如图 3(c) 所示,主关键层失稳后覆岩整体并没有发生全部垮落,整体破断模式呈现完整“三带”。由于该工作面埋深 120~224 m,当工作面推进至厚覆岩区域时,覆岩在主关键层上方 17 m 和 68 m 处分别存在一层 43 m 和 20 m 厚的完整砂质泥岩,形成上位厚软岩层缓冲层。当主关键层破断

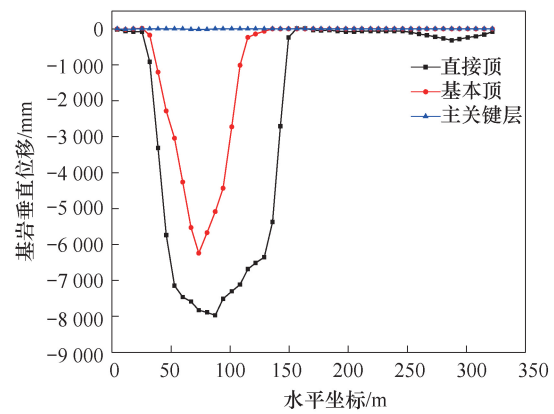
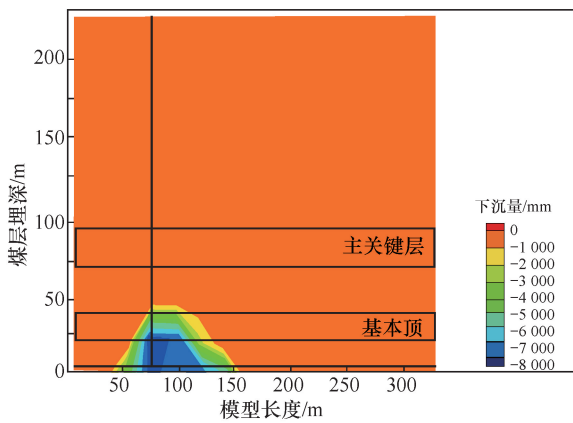
后,采动损伤传导在经过一定消耗后,缓冲层对其有足够的抑制作用,从而造成远场离层的发育与闭合,形成“弯曲下沉带”。这说明在特大采高工作面厚覆岩区域,覆岩整体受到“双关键层+上位厚软岩层缓冲层”的控制作用。

2.3 覆岩损伤破断全周期动态下沉特征

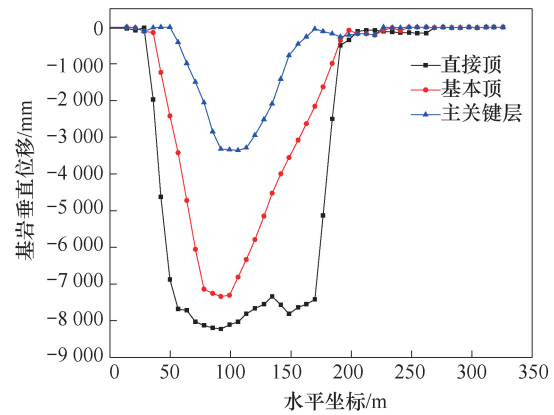
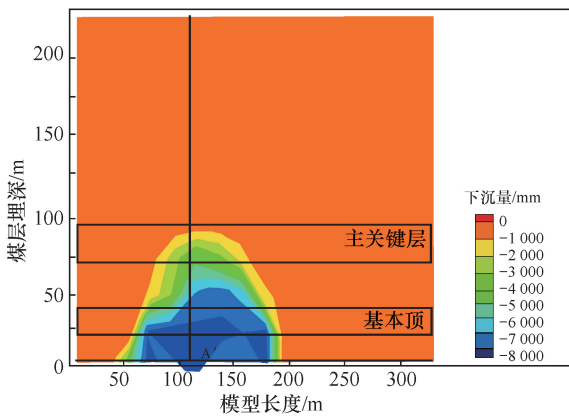
根据覆岩损伤破断的全周期演化情况,覆岩破断运移受到基本顶、主关键层以及上部厚软岩层的共同控制作用,从而呈现非一致性沉降特征。图 4 为覆岩损伤破断全周期下沉曲线。模型开挖前,



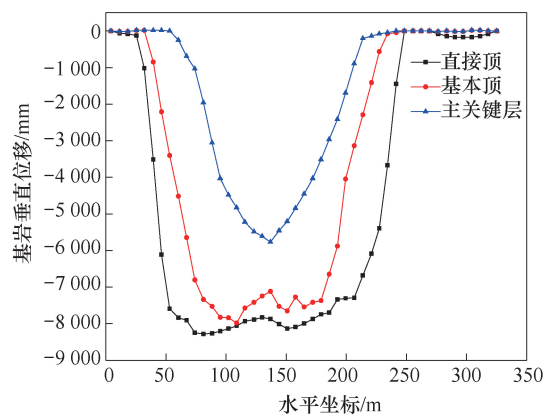
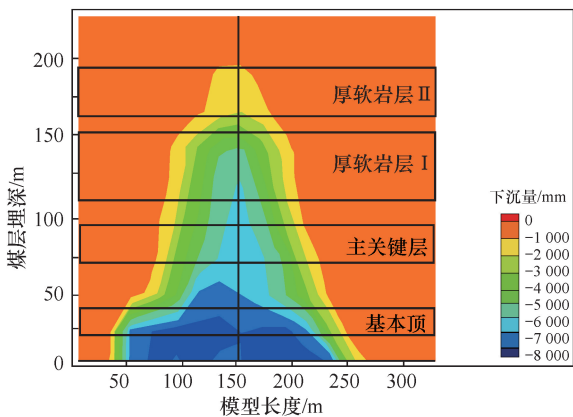
(a) 直接顶完全垮落



(b) 基本顶初次破断



(c) 主关键层初次破断



(d) 主关键层完全破断

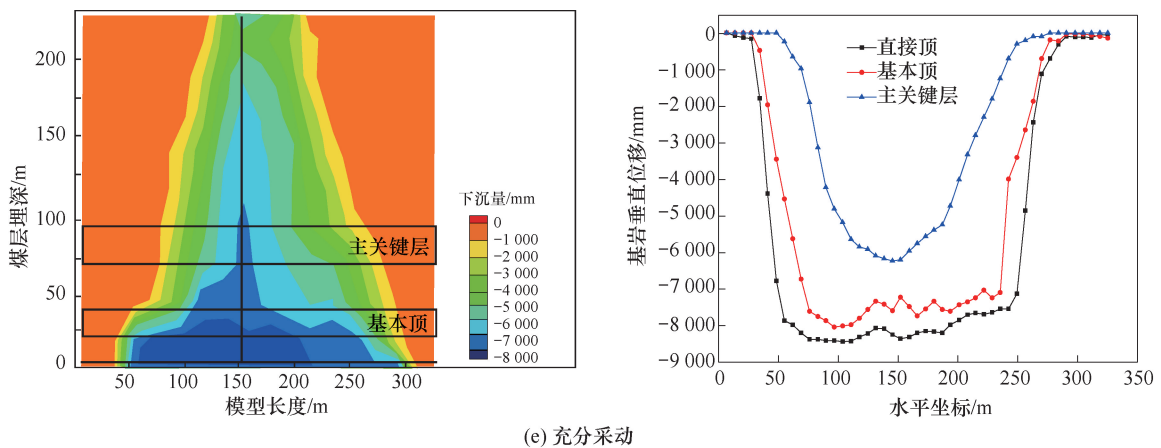


图4 覆岩损伤破断全周期下沉曲线

Fig. 4 Whole-cycle subsidence curve of overburden damage and fracture

各岩层垂直位移量为零,当工作面推进 60 m 时直接顶开始大范围垮落,直至推进 90 m 时完全垮落,如图 4(a) 所示,直接顶下沉范围为 6 100~7 000 mm,此时直接顶与基本顶之间存在大范围离层,基本顶发生挠屈;随着工作面继续推进,如图 4(b)(c) 所示,基本顶开始破断直至完全垮落,最大下沉量由 6 100 mm 增加至 7 200 mm,直接顶、基本顶沉降曲线底部开始趋于平缓。

如图 4(c)(d) 所示,当基本顶完全破断垮落后,主关键层下沉量达 3 200 mm,当主关键层完全破断后,其最大下沉量达到 5 900 mm,基本顶与主关键层之间离层量压缩为 1 300 mm。由于主关键层上方厚软组合岩层对采动损伤的缓冲与消耗作用,采动损伤并未直接波及地表,离层并未完全压实,仍稳定存在。

当工作面达到充分采动时,如图 4(e) 所示,主关键层最大下沉量达到 6 200 mm,下沉系数为 0.69;基本顶最大下沉量约 7 800 mm,下沉系数约 0.87;同时厚软组合层及地表发生同步下沉,地表下沉量在 4 000~5 000 mm,地表下沉系数为 0.44~0.56(平均 0.5)。

覆岩移动高度如图 5 所示。由图 5 可知,覆岩移动高度整体呈现台阶式上升,在距离煤层 112 m 范围内,岩层移动受基本顶(距离煤层 22~36 m)和主关键层(距离煤层 72~95 m)共同控制,覆岩移动在这两范围内扩展相对较为缓慢,呈现“平底”形态,这也说明主控岩层对采动损伤的抑制作用。在距离煤层 112~155 m 范围,存在一层 43 m 厚的砂质泥岩,该范围内岩层移动增长相对较缓,但并不能完全抑制采动损伤的传导,当采动损伤传导至厚软岩层 II 位置时(距煤层 163~183 m)岩层

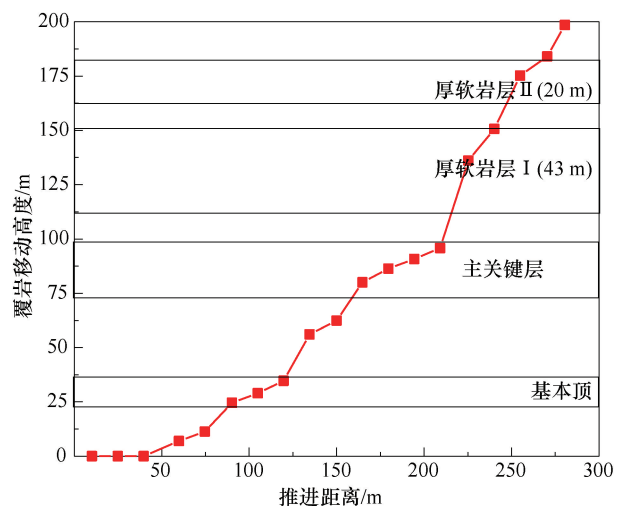


图5 覆岩全周期损伤破断移动高度
Fig. 5 Comparison diagram of the whole-cycle fracture and movement height of overburden rock

移动趋于稳定;此外,结合模型破断特征,该模型的裂隙带发育高度为 127~147 m,裂采比为 14.11~16.33。

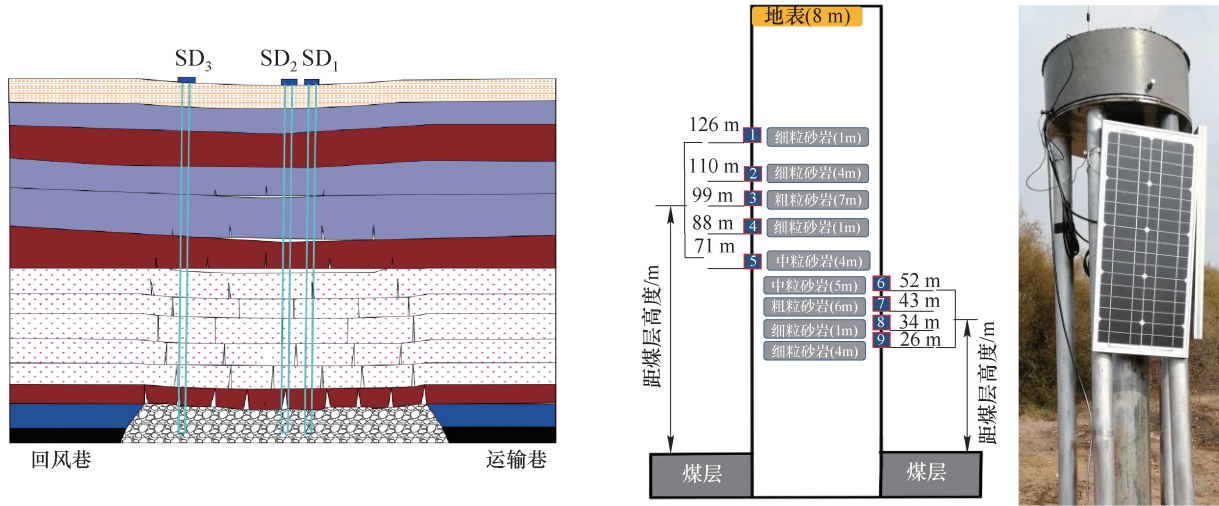
3 覆岩破断沉降实测分析

3.1 观测方案设计

矿山采动覆岩内部岩移原位监测作为揭示岩层运动规律的有效手段,可以实时监测煤矿工作面覆岩变形及运动^[17]。因此,采用地面钻孔原位监测方法研究岩层内部损伤破断沉降规律,如图 1(b) 和图 6 所示。当工作面推进至 1 842 m 时,在超前工作面 8.0 m 处从地表向煤层顶板打钻孔:采前孔 SD₁ 距回风巷 175 m,距主运输巷 125 m,孔深 187.43 m;采后孔 SD₂ 位于工作面中心位置,SD₃ 孔与东侧回风巷相距 31.8 m,孔口分别距煤层顶板 167、172 m,孔深分别为 177.25、182.52 m,孔斜不

大于5°。其次,在采前孔安装分层沉降监测系统,根据关键层位置判别结果,设计岩移测点布置层位^[17],从地面向煤层上方安装1~9号位移计,对

应于关键层或厚硬砂岩位置,各位移计测点位置分别距煤层顶板126、110、99、88、71、52、43、34、26 m,实时监测各层位岩层动态沉降变化情况。



(a) 钻孔布置

(b) 深基点位移计布置

图6 现场观测布置示意

Fig. 6 Layout diagram of on-site observation

3.2 观测结果分析

以工作面推过SD₁孔300 m过程中覆岩移动规律为分析对象,分层沉降监测结果反映特大采

高、厚覆岩工作面采动损伤传导过程中的覆岩动态沉降情况,各测点相对地表沉降变化曲线如图7所示。

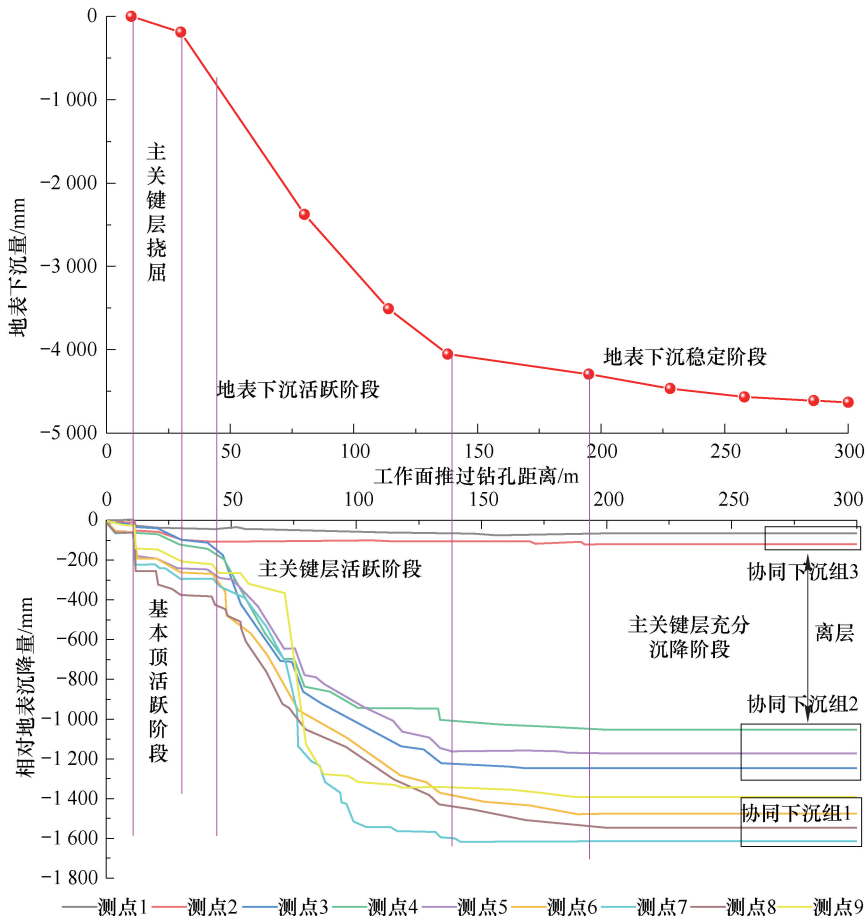


图7 覆岩相对地表沉降演化曲线

Fig. 7 Evolution curve of relative surface subsidence of overburden rock

由图7可知,工作面推过钻孔11 m(工作面推进19 m)后测点5~9所在岩层(距离煤层71 m范围内)突然发生整体台阶式下沉,相对地表下沉量突增到220 mm,由此判断基本顶发生周期切落,其上方随动岩层发生协同沉降,同时主关键层(距离煤层72~95 m)发生挠屈;当工作面推过钻孔43 m(工作面推进51 m)时,孔口下沉量同步突增到850 mm左右,覆岩整体发生同步沉降,说明主关键层(表1中11号岩层)对覆岩整体起导控作用。在工作面继续推进100 m的过程中,测点6~9发生剧烈沉降,最大相对地表沉降达到1 600 mm,而位移计3~5仅沉降1 000 mm。当推过钻孔75~80 m时,测点9(基本顶)突然下降900 mm,而此时测点3~5仅下降约150 mm,说明主关键层沉降趋势相对基本顶较缓,主要以回转变形形成“砌体梁”结构控制岩层移动。

当工作面推过钻孔140 m(工作面推进148 m)时覆岩整体达到充分下沉、趋于稳定,此推进过程为沉降活跃周期,约100 m;此时地表绝对下沉量为4 632 mm,下沉系数0.58。其中,测点1、2相对地表沉降量仅为75~126 mm,而距离煤层99 m范围内覆岩最终相对地表沉降量高达1 064 mm(位移计4)~1 618 mm(位移计7)。将SD₁孔口(地表)的沉降量与各个测点的相对下沉量相结合,最终各岩层的绝对下沉量见表2。整体上,采动覆岩不同埋深处(h)岩层下沉量与地表下沉量的比值(w_i/W_s)随岩层埋藏深度(h/H)的增大而增大,如图8所示。位移计7下沉量最大(6 324 mm),这是由于该层位于垮落带与裂隙带交界处,运动相对较为充分,同时因其岩性较软(砂质泥岩),在沉降剧烈期内受到远场载荷的瞬时加载作用后,同下方垮落块体挤压内嵌,造成沉降量异常。

表2 各岩层最终下沉量

Table 2 Subsidence displacement of each monitoring point

位移计	相对地表沉降量/mm	绝对沉降量/mm	w_i/W_s
地表	—	4 632	1.00
1	75	4 781	1.03
2	126	4 832	1.04
3	1 248	5 954	1.29
4	1 064	5 770	1.25
5	1 171	5 877	1.27
6	1 484	6 190	1.34
7	1 618	6 324	1.37
8	1 567	6 273	1.35
9	1 472	6 178	1.33

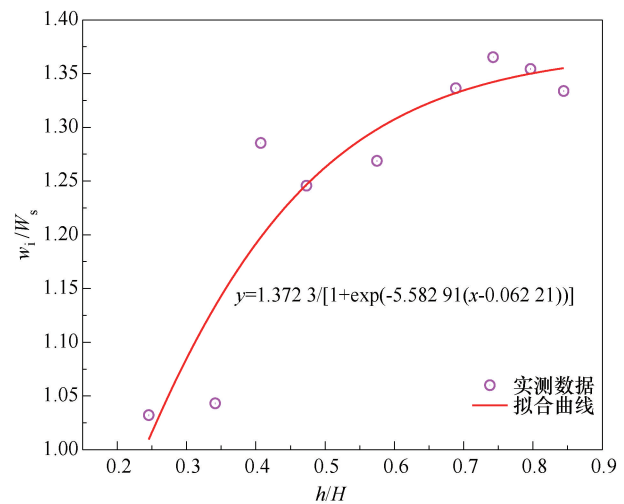


图8 岩层与地表下沉比的实测拟合曲线

Fig. 8 Measured data and fitting curve of the ratio of rock strata to surface subsidence

当覆岩整体失稳后,位移计1、2所在岩层并未随其下方岩层同步下沉,相对地表最大沉降量仅为126 mm,与位移计4之间相差高达938 mm,并且在观测期内稳定保持。因此,结合该工作面地质条件(表1),在距离煤层112~155 m范围内存在43 m的厚软砂质泥岩,说明该岩层对采动损伤具有一定的抑制作用,它的存在并没有造成地表的切落式破坏,进一步减小地表非均匀沉降程度。已有研究^[7]指出,在该工作面上方研究区域地表裂缝以动态拉伸-压缩裂缝为主,并无明显台阶裂缝,进一步验证该岩层的缓冲作用。

为阐述主控岩层在采动损伤传导过程中的沉降特征,考察基本顶与主关键层之间(离层I)、主关键层与厚软岩层之间(离层II)之间的离层量,其随开采空间发育规律如图9所示。

由图9可知,根据离层演化特征,可将覆岩离层发育过程划分为4个阶段:初始发育、剧烈扩展、缓慢扩展和稳定阶段,总体呈现“台阶式”上升。离层发育过程中的演化规律可用^[33]“离层速率”表示。

$$v_h = \frac{h_1 - h_0}{L - L_0}$$

式中, v_h 为离层速率,mm/m; h_1 为推进一定距离时离层高度,m; h_0 为离层初始高度,m; L 为阶段末工作面推进距离,m; L_0 为阶段初期工作面推进距离,m。

当工作面距离钻孔42 m的过程中,仅有离层I发育,发育高度约为100 mm,此阶段为离层初始发育阶段,离层速率仅为2.38 mm/m;随着工作面的推进,覆岩整体破断,离层进入剧烈扩展阶段开

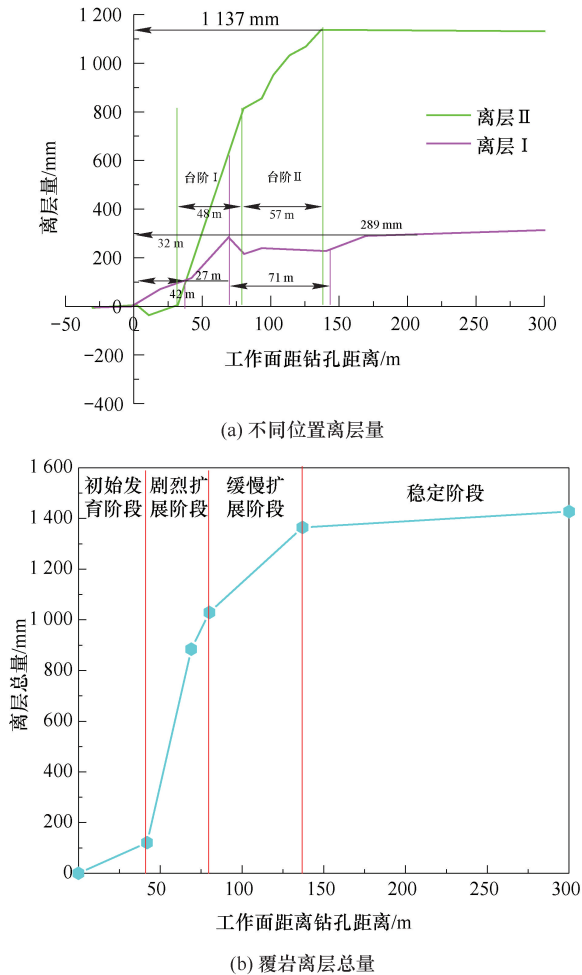


图 9 离层发育演化过程

Fig. 9 Development and evolution process of ionosphere

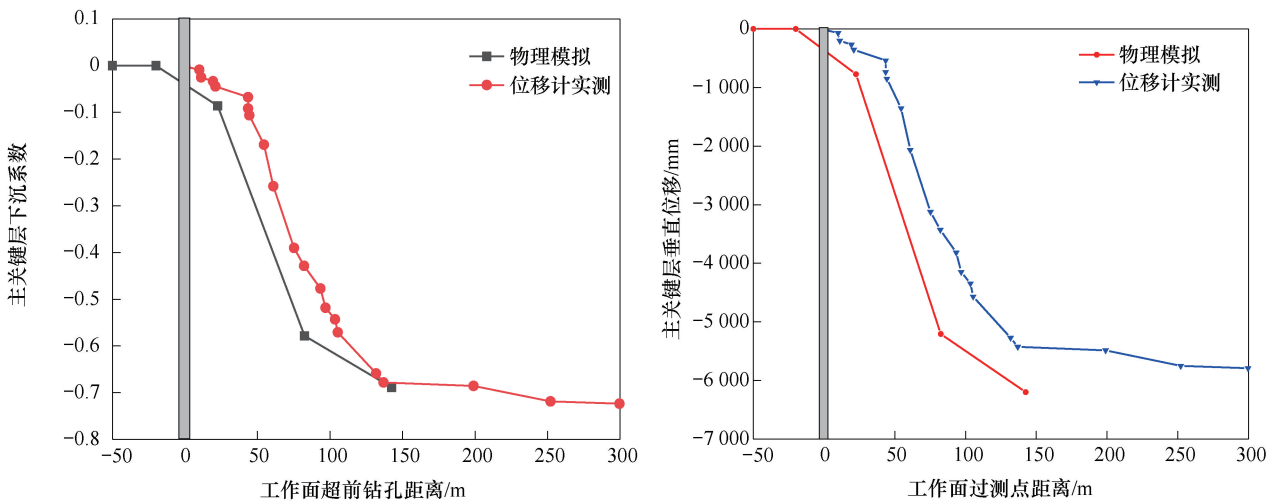


图 10 主关键层沉降与工作面推进的时空演化关系

Fig. 10 The spatiotemporal evolution relationship between the subsidence of the primary key stratum and the advancing of the longwall face

4 结论

针对上湾煤矿 8.8 m 特大采高工作面,利用物理模拟反演覆岩损伤破断全周期演化特征,并结合

始迅速发育;当工作面继续推进 27 m 时,离层 I 发育至 300 mm 而后压实趋于稳定,离层 II 发育至 600 mm,离层总量 900 mm;当工作面继续推进 11 m (距离钻孔 80 m),离层 II 迅速发育至约 800 mm,离层 I 稳定,离层总量 1 029 mm,此阶段离层速率为 24.45 mm/m;随后离层进入缓慢扩展阶段,继续推进 57 m 后,离层 II 增长至 1 137.5 mm,离层总量 1 364.7 mm,此阶段离层速率为 5.89 mm/m。

离层速率的变化反映采动损伤在覆岩中的传导与工作面开采空间的相互关系,离层速率越快,采动损伤传导速度越快,当离层发育充分时,采动损伤停止传导,直至控制岩层破断。

基于主关键层对覆岩沉降活跃范围岩层的控制作用,将其损伤破断失稳过程与物理模拟监测结果进行对照,如图 10 所示。根据下沉系数随推进过程的演化趋势,物理模拟中主关键层损伤破断失稳过程与实测结果相对一致,当工作面推过测点 140~150 m 时,其沉降活动趋于稳定,下沉系数约为 0.69;物理模拟时,由于采空区切落体碎胀系数相对于实际开采较小,无法充分支撑上覆垮落岩层,导致物理模拟下沉量略高于实际观测值。在物理模拟中,其主关键层最大下沉量为 6 197 mm,位移计最大观测值为 5 877 mm,误差仅为 5.4%,也说明物理模拟的准确性与科学性。

地面钻孔深基点分层沉降设备分析验证覆岩沉降特征,结论如下:

(1) 覆岩整体受到“双关键层+厚软岩层”组合的分层控制,且移动高度随工作面推进呈现“台阶

式”上升规律,各层位岩层沉降量随埋深减小呈现非线性减小,且沉降速率逐渐降低,总沉降量最终保持稳定。

(2)特大采高工作面主控岩层的破断方式,基本顶以“切落体”形式垮落于采空区,主关键层则形成“砌体梁”结构,并在组合厚软岩层缓冲层对采动损伤的抑制作用下覆岩整体形成“三带”破坏模式。

(3)覆岩在受采动损伤影响下呈现“协同分组下沉”的三分层沉降模式。根据实测,地表最大下沉量为 4 632 mm,下沉系数 0.58,物理模拟地表下沉量为 4 000~5 000 mm,下沉系数 0.56。

参考文献

- [1] 郭俊廷, 李全生. 浅埋高强度开采地表破坏特征: 以神东矿区为例[J]. 中国矿业, 2018, 27(4): 106-112.
GUO Juntao, LI Quansheng. Surface damage characteristics in shallow-buried coal seam with strong disturbance mining: taking Shendong coal mine district as an example[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(4): 106-112.
- [2] 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.
- [3] 黄庆享. 西部浅埋大煤田安全绿色开采岩层控制进展与展望[J]. 西安科技大学学报, 2021, 41(3): 382.
HUANG Qingxiang. Progress and prospect of strata control in safe and green mining of large shallow coalfield in Western China[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2021, 41(3): 382.
- [4] 李全生, 李晓斌, 许家林, 等. 岩层采动裂隙演化规律与生态治理技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 28-47.
LI Quansheng, LI Xiaobin, XU Jialin, et al. Research advances in mining fractures evolution law of rock strata and ecological treatment technology [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 28-47.
- [5] JU Yang, WANG Yongliang, SU Chuanshang, et al. Numerical analysis of the dynamic evolution of mining-induced stresses and fractures in multilayered rock strata using continuum-based discrete element methods [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 113: 191-210.
- [6] WEI Jiangbo, WANG Shuangming, SONG Shijie, et al. Experiment and numerical simulation of overburden and surface damage law in shallow coal seam mining under the gully[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(5): 207.
- [7] 李全生, 李晓斌, 张凯, 等. 基于“空天地”一体化技术的岩层采动损伤监测与应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 402-413.
LI Quansheng, LI Xiaobin, ZHANG Kai, et al. Rock strata mining damage monitoring and application based on “space-sky-surface” integrated technology[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 402-413.
- [8] 李全生, 郭俊廷, 张凯, 等. 西部煤炭集约化开采损伤传导机理与源头减损关键技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3636-3644.
LI Quansheng, GUO Juntao, ZHANG Kai, et al. Damage conduction mechanism and key technologies of damage reduction in sources for intensive coal mining in Western China [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(11): 3636-3644.
- [9] 李全生, 鞠金峰, 许家林, 等. 神东矿区采动裂隙岩体自修复特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 12-22.
LI Quansheng, JU Jinfeng, XU Jialin, et al. Self-healing law of mining fractured rock mass in Shendong coalfield[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 12-22.
- [10] 李全生, 张村. 基于采动空间守恒的西部矿区高强度开采损伤传导模型及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(1): 1-8.
LI Quansheng, ZHANG Cun. Damage conduction model of high intensity mining in western mining area based on conservation of mining space and its application [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(1): 1-8.
- [11] 李全生, 任赵鹏, 张村, 等. 推进速度影响下的上湾煤矿高强度开采覆岩-地表移动特征[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(3): 437-449.
LI Quansheng, REN Zhaopeng, ZHANG Cun, et al. Characteristics of overburden-surface movement in high-intensity mining in Shangwan coal mine under the influence of advancing speed[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(3): 437-449.
- [12] 何祥, 张村, 赵毅鑫, 等. 基于覆岩损伤本构模型的高强度开采参数确定及减损效果评价[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(3): 439-448.

- HE Xiang, ZHANG Cun, ZHAO Yixin, et al. Parameters determination of high-intensity mining and reduction effect evaluation based on damage constitutive model of overburden rock [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(3): 439-448.
- [13] HE Xiang, ZHAO YiXin, ZHANG Cun, et al. A model to estimate the height of the water-conducting fracture zone for longwall panels in Western China [J]. *Mine Water and the Environment*, 2020, 39(4): 823-838.
- [14] HE Xiang, ZHANG Cun, HAN PengHua. Overburden damage degree-based optimization of high-intensity mining parameters and engineering practices in China's western mining area [J]. *Geofluids*, 2020, 2020: 8889663.
- [15] HE Xiang, ZHAO YiXin, YANG Ke, et al. Development and formation of ground fissures induced by an ultra large mining height longwall panel in Shandong mining area [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(10): 7879-7898.
- [16] 张村, 任赵鹏, 兰世勇, 等. 煤矿开采损伤数值模拟量化表征与应用 [J]. *矿业科学学报*, 2023, 8(3): 398-408.
- ZHANG Cun, REN Zhaopeng, LAN Shiyong, et al. Quantitative characterization of coal mining damage and its application in numerical simulation [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 8(3): 398-408.
- [17] 鞠金峰, 许家林, 刘阳军, 等. 关键层运动监测及岩移5阶段规律: 以红庆河煤矿为例 [J]. *煤炭学报*, 2022, 47(2): 611-622.
- JU Jinfeng, XU Jialin, LIU Yangjun, et al. Key strata movement monitoring during underground coal mining and its 5-stage movement law inversion: a case study in hongqinghe mine [J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 611-622.
- [18] 尹希文. 浅埋超大采高工作面覆岩“切落体”结构模型及应用 [J]. *煤炭学报*, 2019, 44(7): 1961-1970.
- YIN Xiwen. Cutting block structure model of overburden with shallow buried coal seam and ultra-large mining height working face [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(7): 1961-1970.
- [19] 黄庆享, 马龙涛, 董博, 等. 大采高工作面等效直接顶与顶板结构研究 [J]. *西安科技大学学报*, 2015, 35(5): 541-546, 610.
- HUANG Qingxiang, MA Longtao, DONG Bo, et al. Research on equivalent immediate roof and roof structure of large mining height face [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2015, 35(5): 541-546, 610.
- [20] 黄庆享, 周金龙. 浅埋煤层大采高工作面矿压规律及顶板结构研究 [J]. *煤炭学报*, 2016, 41(S2): 279-286.
- HUANG Qingxiang, ZHOU Jinlong. Study on ground pressure law and roof structure of large mining height working face in shallow coal seam [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(S2): 279-286.
- [21] 黄庆享, 周金龙, 马龙涛, 等. 近浅埋煤层大采高工作面双关键层结构分析 [J]. *煤炭学报*, 2017, 42(10): 2504-2510.
- HUANG Qingxiang, ZHOU Jinlong, MA Longtao, et al. Double key strata structure analysis of large mining height longwall face in nearly shallow coal seam [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(10): 2504-2510.
- [22] 王云广, 郭文兵, 白二虎, 等. 高强度开采覆岩运移特征与机理研究 [J]. *煤炭学报*, 2018, 43(S1): 28-35.
- WANG Yunguang, GUO Wenbing, BAI Erhu, et al. Study on characteristics and mechanism of overlying strata migration in high-intensity mining [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(S1): 28-35.
- [23] 张玉军, 李友伟, 肖杰, 等. 厚土层薄覆岩高强度开采覆岩破坏高度与特征 [J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2023, 5(2): 8-16.
- ZHANG Yujun, LI Youwei, XIAO Jie, et al. Failure height and characteristics of overlying strata in high-intensity mining with thick soil and thin bedrock [J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2023, 5(2): 8-16.
- [24] GAO Fuqiang, LI Jianzhong, LOU Jinfu, et al. Understanding the evolution of mining-induced fractures using physical and numerical modeling [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 81(1): 22.
- [25] LÜ Huayong, CHENG Zhanbo, LIU Fei. Study on the mechanism of a new fully mechanical mining method for extremely thick coal seam [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 142: 104788.
- [26] 张村, 任赵鹏, 韩鹏华, 等. 西部矿区厚覆岩特大采高工作面导水裂隙带发育特征 [J]. *矿业科学学报*, 2022, 7(3): 333-343.
- ZHANG Cun, REN Zhaopeng, HAN Penghua, et al. Characteristic of the water-conducting fracture zone development in thick overburden working face with extra-large mining height in western mining area [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 7(3): 333-

- 343.
- [27] 杨俊哲, 胡博文, 王振荣. 8.8m大采高工作面覆岩三带分布特征及分层沉降研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(6): 42-48.
YANG Junzhe, HU Bowen, WANG Zhenrong. Study on distribution characteristics of collapse zone, fissure zone and curved subsidence zone and layered settlement of overburden on 8.8 m super-large mining height coal mining face[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(6): 42-48.
- [28] 赵毅鑫, 令春伟, 刘斌, 等. 浅埋超大采高工作面覆岩裂隙演化及能量耗散规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(1): 9-18, 30.
ZHAO Yixin, LING Chunwei, LIU Bin, et al. Fracture evolution and energy dissipation of overlying strata in shallow-buried underground mining with ultra-high working face[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(1): 9-18, 30.
- [29] 曹健, 黄庆享. 浅埋近距煤层开采覆岩与地表裂缝发育规律及控制[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(4): 213-220.
CAO Jian, HUANG Qingxiang. Regularity and control of overburden and surface fractures in shallow-contiguous seams[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(4): 213-220.
- [30] 黄庆享, 杜君武, 侯恩科, 等. 浅埋煤层群覆岩与地表裂缝发育规律和形成机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(1): 7-15.
HUANG Qingxiang, DU Junwu, HOU Enke, et al. Research on overburden and ground surface cracks distribution and formation mechanism in shallow coal seams group mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(1): 7-15.
- [31] 梅福星, 尚宇琦, 孔德中, 等. 基于DIC技术近距离煤层采动裂隙-位移-应变演化规律相似模拟研究[J]. 矿业科学学报, 2024, 9(4): 519-528.
MEI Fuxing, SHANG Yuqi, KONG Dezhong, et al. DIC-based similar simulation study on the evolution patterns of mining-induced fracture, displacement and strain in close distance coal seam[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024, 9(4): 519-528.
- [32] 魏江波, 王双明, 宋世杰, 等. 浅埋煤层过沟开采覆岩裂隙与地表裂缝演化规律数值模拟[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(10): 67-75.
WEI Jiangbo, WANG Shuangming, SONG Shijie, et al. Numerical simulation on evolution law of overburden fractures and surface cracks in crossing ditch mining of shallow coal seam[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(10): 67-75.
- [33] 翟新献, 赵晓凡, 翟俨伟, 等. 综放开采上覆巨厚砾岩层离层和断裂力学模型及其应用[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(2): 241-254.
ZHAI Xinxian, ZHAO Xiaofan, ZHAI Yanwei, et al. Separation and fracturing mechanical models of overlying hugely-thick conglomerate stratum in fully mechanized caving mining and their application[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(2): 241-254.

(责任编辑:陈骏)