文章编号：1004-4051(2024)05-0152-12 DOI：10.12075/j.issn.1004-4051.20230957

近距离多煤层下行重复采动覆岩变形与裂隙演化特征研究

张金贵[1]，姬中奎[2]，呼少平[3]，王 海[2]，胡 俭[3]，韩 强[2]，杨 帆[3]
（1. 中国矿业大学(北京)能源与矿业学院，北京 100083；
2. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司，陕西 西安 710077；
3. 陕煤集团神木张家峁矿业有限公司，陕西 神木 719300）

摘 要：随着地壳浅部易采煤炭资源的逐渐枯竭，复杂地质条件下的多煤层开采将成为新常态。由于多煤层开采对上覆岩体造成极大的重复扰动，导致覆岩的垮落、移动与裂隙演化规律相较于单一煤层开采更加复杂。为了研究多煤层下行重复采动条件下覆岩变形与裂隙演化特征，本文以陕北神府矿区张家峁煤矿 4^{-2} 煤层、4^{-3} 煤层、4^{-4} 煤层、5^{-2} 煤层开采为研究对象，进行了几何相似比 1∶100 的相似模型试验和 UDEC 数值模拟研究。张家峁煤矿四层煤层下行重复采动物理相似模拟和数值模拟分析结果表明，周期来压步距随下行开采呈逐渐减小的规律，冒落带高度与煤层厚度正相关，4^{-2} 煤层开采后导水裂隙带贯穿至地表，4^{-3} 煤层、4^{-4} 煤层、5^{-2} 煤层开采结束后，导水裂隙带均贯穿层间覆岩。顶板围岩在反复拉伸、挤压作用下，破碎程度逐渐增大，且多为未闭合裂隙。研究结果可以为多煤层开采条件下的顶板管理和开采设计提供理论层面的参考和指导。

关键词：多煤层；重复采动；关键层；导水裂隙带；相似模型
中图分类号：TD325 **文献标识码：**A

Investigation on the deformation and crack evolution of overburden rock in downward repetitive mining of multi-coal seams with near distance

ZHANG Jingui[1]，JI Zhongkui[2]，HU Shaoping[3]，WANG Hai[2]，HU Jian[3]，HAN Qiang[2]，YANG Fan[3]
（1. *School of Energy and Mining Engineering*，*China University of Mining and Technology-Beijing*，*Beijing* 100083，*China*；
2. *Xi'an Research Institute Co.*，*Ltd.*，*China Coal Technology and Engineering Group Corp.*，*Xi'an* 710077，*China*；
3. *Shenmu Zhangjiamao Mining Co.*，*Ltd.*，*Shaanxi Coal Group*，*Shenmu* 719300，*China*）

Abstract：With the gradual depletion of easily exploitable coal resources in the shallow crust, multi-

收稿日期：2023-12-29 **责任编辑：**聂虹
基金项目：陕西省自然科学基金重点研发计划项目资助(编号：2022SF-046)；中煤科工西安研究院(集团)有限公司科技创新基金项目资助(编号：2022XAYJS06, 2023XAYJS02)
第一作者简介：张金贵(1987—)，男，陕西神木人，博士研究生，采矿高级工程师，从事煤矿安全监督、安全技术管理工作，E-mail：jingui88@126.com。
通讯作者简介：王海(1987—)，男，江苏睢宁人，博士研究生，副研究员，从事矿井水害防治及矿区水资源保护技术研究及推广应用工作，E-mail：wanghai3777@163.com。
引用格式：张金贵，姬中奎，呼少平，等. 近距离多煤层下行重复采动覆岩变形与裂隙演化特征研究[J]. 中国矿业，2024，33(5)：152-163.
ZHANG Jingui, JI Zhongkui, HU Shaoping, et al. Investigation on the deformation and crack evolution of overburden rock in downward repetitive mining of multi-coal seams with near distance[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(5)：152-163.

coal seams mining under complex geological conditions will become the new normal. As multi-coal seams mining will cause great repetitive disturbance to the overlying rock mass, resulting in a more complex collapse, movement and crack evolution law of the overburden rock compared to single-coal seam mining. In order to study the collapse, deformation and crack evolution law of overburden rock under the condition of downward repetitive mining of multi-coal seams, this paper takes the four coal seams mining of 4^{-2}, 4^{-3}, 4^{-4} and 5^{-2} in Zhangjiamao Coal Mine, Shenfu Mining District, North Shaanxi Province, as the research subject, and carries out a similar modeling experimental study and a UDEC numerical simulation model with a geometrical similarity ratio of 1∶100 . The results of physical similarity simulation and numerical simulation analysis of downward repetitive mining in the fourth coal seam of Zhangjiamao Coal Mine show that the cyclic pressure step distance gradually decreases with downward mining, and the height of the caving zone is positively correlated with the thickness of the coal seam. After the mining of the 4^{-2} coal seam, the water conducting crack zone runs through the surface. After the mining of the 4^{-3}, 4^{-4}, and 5^{-2} coal seams is completed, the water conducting crack zone runs through the interlayer overburden rock, and the fragmentation of the roof surrounding rock gradually increases under repetitive stretching and compression, and most of them are unclosed cracks. The findings of investigation can provide a theoretical level of reference and guidance for roof management and mining design under multi-coal seam mining conditions.

Keywords：multi-coal seam；repetitive mining；key stratum；water conducting crack zone；scale model test

0　引　言

煤炭是我国的主体能源，为国民经济平稳较快发展提供了有力的能源保障。全国煤炭产量由 1978 年的 6.2 亿 t，增加到 2021 年的 40.7 亿 t，累计产量达 865.8 亿 t[1-3]，煤炭产量和增速演化过程如图 1 所示。煤炭资源的安全、高效开采保障了我国能源安全和经济高质量发展[4-5]。多煤层开采可以提高煤炭开采的效率和产量，降低开采成本。然而，多煤层重复开采可能会加剧地表下沉和塌陷，进而影响矿井安全和周边环境。

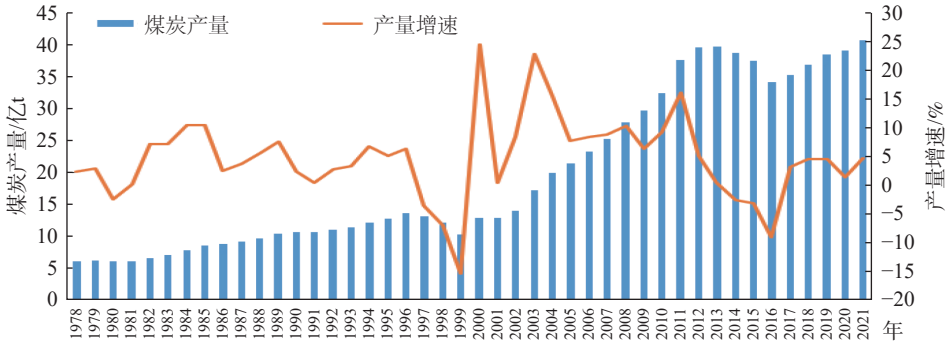


图 1　1978—2021 年我国煤炭产量和增速演化过程

Fig. 1　Evolution process of coal production and growth rate from 1978 to 2021 in China

近年来，众多学者通过各种方法研究了多煤层开采条件下覆岩裂隙发育、应力演化及地表沉陷规律。例如，杨滨滨等[6]采用相似材料模型试验，对近距离煤层在上行和下行重复采动下，覆岩裂隙的时空演化特征进行了研究，并提出了可以采用裂隙分形维数、裂隙熵和裂隙率来反映覆岩裂隙的状态；ZHANG 等[7]基于现场实测、物理与数值模拟相结合方法，对地表大型水体下的近距离煤层开采问题进行了深入研究，揭示了多煤层夹矸厚度和特性对覆岩垮落带及导水裂隙带发育高度的影响规律，提出了近距离煤层相互作用和叠加效应可以被忽略的临界阈值；陈金宇等[8]通过理论分析和数值模拟的手段，分析了多煤层开采煤矸互层顶板动压巷道围岩稳定性问题，提出了上层煤与下层煤工作面的水平错距是影响多煤层开采中下层煤巷道围岩稳定性的关键因素；阎跃观等[9]以木城涧煤矿大台井急倾斜多煤层开采为研究对象，通过相似模型试验，揭示了地表移动变形规律和围岩垮落、破坏机理，得出了不同区域移动变形的程度及主要特点，并与实测数据进行了对比分析；黄庆享等[10]以矿压实测数据为基础，分析

了浅埋煤层群开采下煤层过采空区和煤柱时的矿压显现规律，以及不同工作面宽度和不同采高条件下的矿压变化规律。对于多煤层重复开采扰动下的研究还有很多，但是这些研究的多煤层还是以两层煤层为主，少数的研究涉及三层煤层，对于四层煤层及以上的研究很少涉及[11-15]。

因此，本文以陕北神府矿区张家峁煤矿为工程地质背景，在系统分析其工程与水文地质条件的基础上，设计了四层煤层下行开采的相似试验模型以及数值计算模型，分析了覆岩重复扰动下的垮落、移动以及裂隙演化特征，研究结果可以为多煤层开采条件下的顶板管理和开采设计提供理论层面的参考。

1 地质概况

1.1 地形地貌

张家峁煤矿位于陕北黄土高原与毛乌素沙漠的接壤地带，地形南高东低，按地貌类型可分为风沙滩区、河谷区和黄土丘陵沟壑区，如图 2 所示。张家峁煤矿可采 7 层煤层，可采储量约 5.43 亿 t，设计生产能力 600 万 t/a，采用全部垮落法管理顶板，是神府矿区的主力矿井之一。

（a）风沙滩区　（b）河谷区　（c）黄土丘陵沟壑区

图 2　研究区地形地貌特征

Fig. 2　Topographic and geomorphologic features of the study area

1.2 地质与水文地质特征

张家峁煤矿地表被第四系风积砂和黄土覆盖，基岩地层依次为三叠系上统永坪组（T_3y）、侏罗系下统富县组（J_1f）、侏罗系中统延安组（J_2y）和直罗组（J_2z）、新近系上新统保德组（N_2b）、第四系中更新统离石组（Q_2l）、上更新统萨拉乌素组（Q_3s）。矿区范围内未发育大型断层，总体上为向西缓倾的单斜构造，地层倾角 1°～2°。依据矿区范围内地下水的补径排条件及富水性差异，划分为风沙滩地水文地质单元和黄土梁峁丘陵水文地质单元，含水层主要有松散层孔隙含水层、基岩裂隙含水层、烧变岩含水层 3 类。

1.3 煤层赋存特征

根据常家沟水库周围钻孔地质资料，水库西侧有 4^{-2} 煤层、4^{-3} 煤层、4^{-4} 煤层、5^{-2} 煤层四层优质煤层可采。4^{-2} 煤层、4^{-3} 煤层、4^{-4} 煤层、5^{-2} 煤层的平均厚度分别为 3.61 m、1.05 m、0.90 m、6.09 m，煤层结构简单～复杂，赋存范围内全部可采。四层煤层与常家沟水库之间的位置关系及开采模式如图 3 所示，各煤层保护煤柱的留设方式见文献 [16]，在此不再赘述。

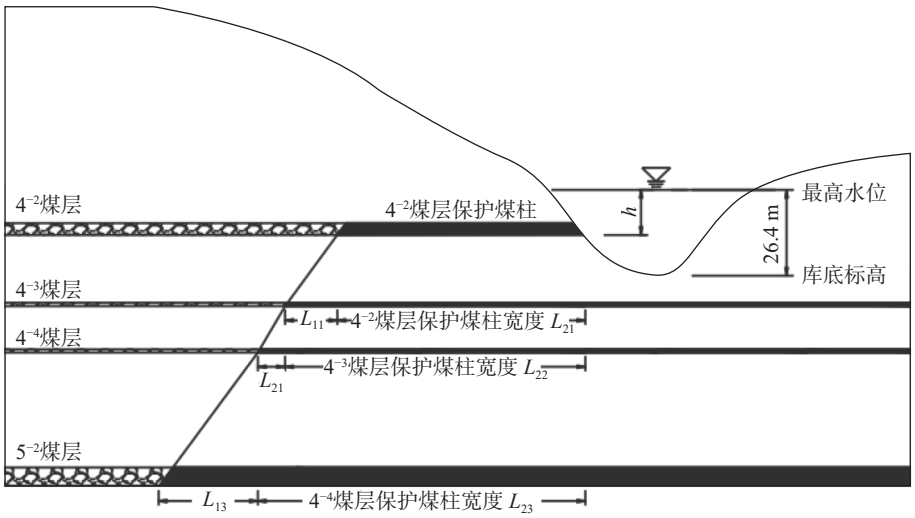


图 3　四层煤层与水库的位置关系及开采模式

Fig. 3　Positional relationship between the four coal seams and the reservoir and mining method

2　研究方法

2.1　相似试验模型

试验主要针对常家沟水库西侧 4^{-2} 煤层、4^{-3} 煤层、4^{-4} 煤层、5^{-2} 煤层开采进行模拟研究，其覆岩构成及基本物理力学参数见表 1。试验采用平面应变模型架，模型架长 5.0 m，宽 0.2 m，设计模型几何相似比为 1∶100，容重相似比为 1∶1.5，应力相似比为 1∶150。模拟试验相似材料配比方案见表 1，其中，配比号为河沙、石膏、大白粉和粉煤灰的配合比例。

表 1　四层煤层覆岩构成与力学性质

Table 1　Composition of overburden rock and mechanical properties of four coal seams

序号	岩性	层厚/m	埋深/m	密度/(kg/m³)	抗压强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比	配比号	关键层位置
1	砂土	5.0	5.0	1.92	—	—	—	95∶2∶3∶0	—
2	红土	20.0	25.0	2.28	—	—	—	95∶2∶3∶0	—
3	泥岩	2.5	27.5	2.35	35.4	3 500	0.22	9∶3∶7∶0	—
4	细粒砂岩	4.5	32.0	2.67	50.4	4 300	0.24	7∶4∶6∶0	—
5	泥岩	5.5	37.5	2.35	35.4	3 675	0.22	9∶3∶7∶0	—
6	细粒砂岩	27.3	64.8	2.69	79.7	6 537	0.20	7∶4∶6∶0	主关键层
7	粉砂岩	1.8	66.6	2.70	71.9	5 439	0.19	8∶2∶8∶0	—
8	4^{-2} 煤层	3.5	70.1	1.42	33.0	1 175	0.29	20∶20∶1∶5	—
9	泥岩	2.4	72.5	2.38	38.4	3 875	0.22	9∶3∶7∶0	—
10	细粒砂岩	18.5	91.0	2.69	79.7	4 299	0.20	7∶4∶6∶0	亚关键层 3
11	4^{-3} 煤层	1.0	92.0	1.45	33.5	1 175	0.29	20∶20∶1∶5	—
12	泥岩	2.3	94.3	2.42	38.8	3 985	0.22	9∶3∶7∶0	—
13	粉砂岩	6.6	100.9	2.70	71.9	5 439	0.19	8∶2∶8∶0	亚关键层 2
14	细粒砂岩	2.9	103.8	2.71	100.6	10 773	0.16	7∶4∶6∶0	—
15	粉砂岩	1.7	105.5	2.72	69.8	5 226	0.19	8∶2∶8∶0	—
16	4^{-4} 煤层	1.0	106.5	1.68	35.1	1 344	0.28	20∶20∶1∶5	—
17	泥岩	4.3	110.8	2.42	38.8	3 985	0.22	9∶3∶7∶0	—
18	粉砂岩	10.9	121.7	2.71	79.5	5 596	0.19	8∶2∶8∶0	亚关键层 1
19	细粒砂岩	20.2	141.9	2.70	85.6	9 414	0.16	7∶4∶6∶0	—
20	5^{-2} 煤层	6.0	147.9	1.42	33.0	1 175	0.29	20∶20∶1∶5	—

在模型上表面共设置了 10 个百分表，用以监测开采过程中地表沉降量。在模型表面设置 8 条位移监测线，分别位于 4^{-2} 煤层上方 52 cm 处（测线 A，松散层）、4^{-2} 煤层上方 29 cm 处（测线 B，4^{-2} 煤层基本顶上方）、4^{-2} 煤层上方 13 cm 处（测线 C，4^{-2} 煤层基本顶）、4^{-3} 煤层上方 12 cm 处（测线 D，4^{-3} 煤层直接顶）、4^{-4} 煤层上方 9 cm 处（测线 E，4^{-4} 煤层基本顶）、5^{-2} 煤层上方 31 cm 处（测线 F，5^{-2} 煤层基本顶上方）、5^{-2} 煤层上方 25 cm 处（测线 G，5^{-2} 煤层基本顶下方）、5^{-2} 煤层上方 10 cm 处（测线 H，5^{-2} 煤层直接顶）。每条监测线上布置了 24 个位移监测点，监测点间距为 20 cm，依次编号 A1～A24、B1～B24、……、H1～H24。模型采用下行开采，依次开采 4^{-2} 煤层、4^{-3} 煤层、4^{-4} 煤层、5^{-2} 煤层。每层均从左向右开挖，开挖步距为 2.0 cm，待上煤层开采覆岩稳定之后，再开始开采下一煤层。考虑到模型边界效应的影响，模型左右两侧至少设置 50 cm 的边界煤柱，模型全景和监测线布置如图 4 所示。

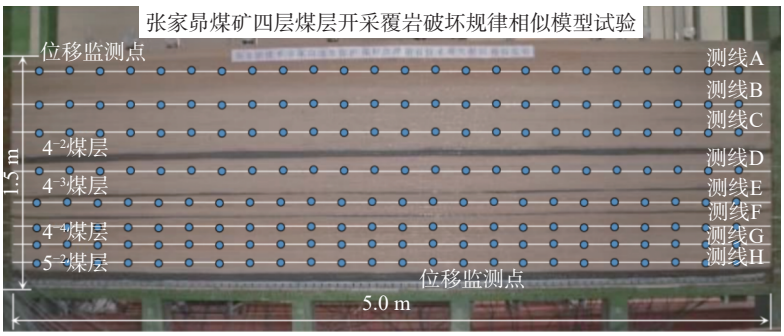


图 4　模型全景与位移监测线布置

Fig. 4　Panoramic view of model with the layout of displacement monitoring line

2.2 数值计算模型

采用 UDEC 中的理想弹塑性模型，以 Mohr-Coulomb 强度准则作为其屈服准则。根据表 1 中的工作面覆岩力学参数，建立长 500 m、高 167.9 m 的走向模型，如图 5 所示。模型采用下行开采，从上到下依次开采 4^{-2} 煤层、4^{-3} 煤层、4^{-4} 煤层、5^{-2} 煤层，每次开挖步距为 2.5 m。考虑到模型边界效应对计算的影响，模型左右两侧设置 100 m 的边界煤柱。

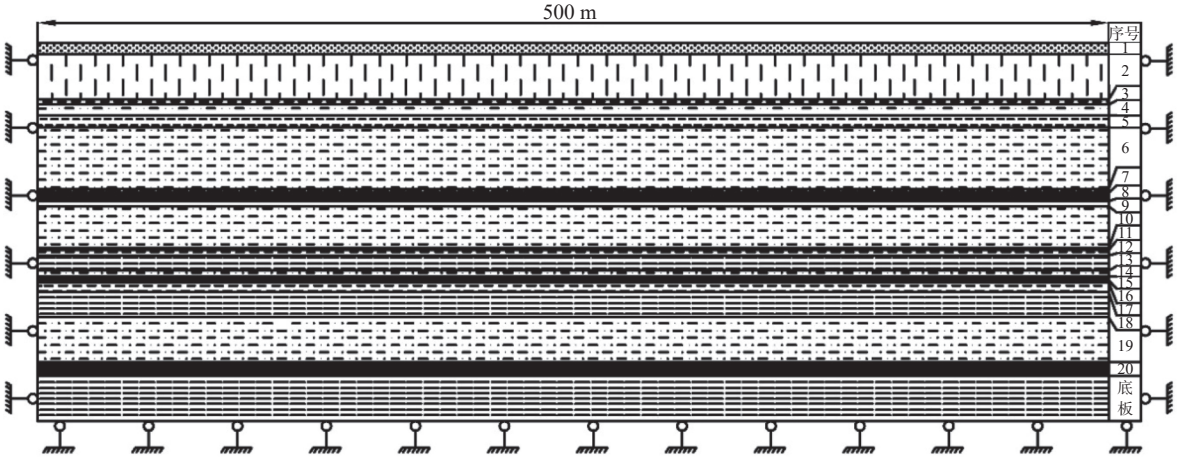


图 5 四层煤层开采 UDEC 数值模拟走向模型力学模型

Fig. 5 UDEC numerical simulation mechanical model for the mining of four coal seams

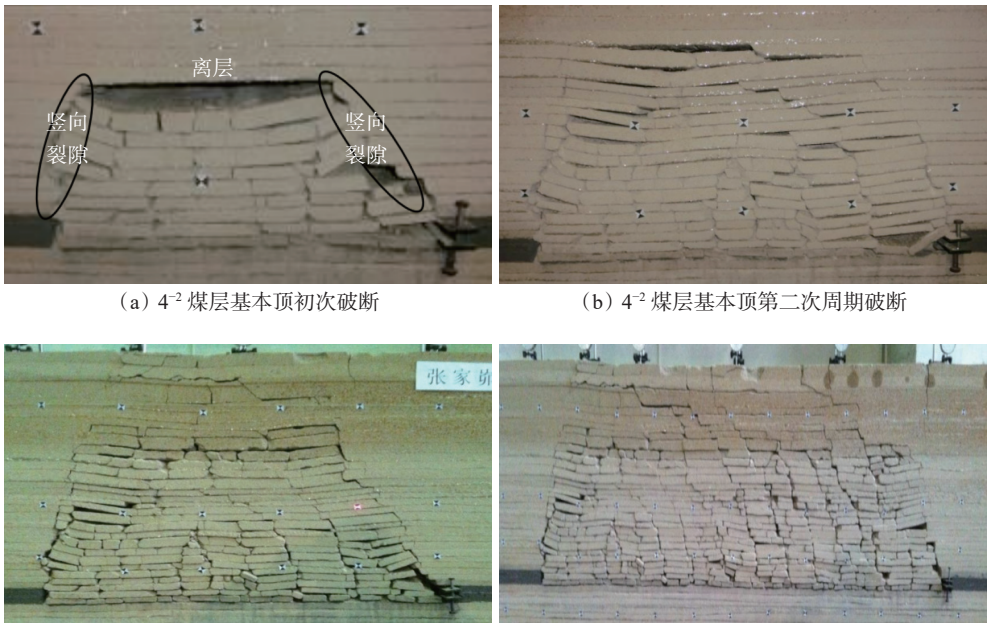
3 相似试验模型结果分析

在各煤层工作面开挖试验过程中，每开挖一次推进 2 cm，采高分别为 3.5 cm、1.0 cm、1.0 cm 和 6.0 cm，按照相似比例，每次推进 2 m，采高分别为 3.5 m、1.0 m、1.0 m 和 6.0 m。为了更真实地反映各煤层实际开采情况，在试验现象与结果描述过程中均采用相似比例换算到实际数据进行表达。

3.1 4^{-2} 煤层开采过程分析

4^{-2} 煤层埋深为 66.6 m，采高为 3.5 m，基岩厚度为 41.6 m，上覆松散层厚度为 25 m，基载比为 1.67。4^{-2} 煤层工作面切眼宽度为 8 m，工作面推进至 20 m 时，顶板出现离层，离层高度约为 1.8 m，继续推进至 24 m 时，直接顶垮落，垮落高度为 1.8 m。工作面推进至 56 m 时，顶板离层发育明显，紧接着基本顶发生初次垮落破断，垮落高度为 10 m，初次来压步距为 56 m。直接顶和基本顶下位岩层破断的岩块块度较小，且杂乱无章，基本顶上位岩块破断形成铰接结构，切眼侧岩层破断角明显大于工作面开采侧。顶板两端形成明显的向上发育的裂隙，裂隙发育高度约为 22 m，并在基本顶上方出现明显的离层，离层发育高度最大约为 25 m，到达 4^{-2} 煤层基本顶顶部，如图 6(a)所示。工作面继续推进至 84 m 时，顶板破断高度达到 35 m，顶板破断后形成的岩块相互铰接，下部破断岩块被压实，破断顶板上方出现明显的离层，如图 6(b)所示。继续推进至 100 m 时，顶板破断直接波及到地表，地表及松散层拉伸破坏严重，出现竖向、横向等多条裂缝，如图 6(c)所示。4^{-2} 煤层工作面一共推进了 220 m，基本顶共发生了 11 次周期破断，周期来压步距分别为 12 m、16 m、16 m、14 m、16 m、16 m、14 m、14 m、16 m、14 m、16 m，平均周期来压步距为 14.9 m。切眼侧的岩层断裂角约为 81°，停采线侧的岩层断裂角约为 66°，如图 6(d)所示。从来压现象和覆岩移动特征分析，4^{-2} 煤层开采过程中，初次来压期间顶板未出现全厚切落的现象，开采空间两端的裂隙并未贯穿松散含水层，地表无明显变化。经历三个周期后，上覆岩层会出现整体性的下沉，松散层及地表破坏较大，上行裂隙和下行裂隙相互沟通，形成导水通道。

图 7(a)为工作面推进 56 m(初次来压)后测线 A、测线 B、测线 C 下沉曲线。4^{-2} 煤层初次来压期间，测线 C 所在的岩层均已垮落，最大下沉值为 2.5 m，测线 B、测线 A 所受的影响不大。图 7(b)为工作面推进至 84 m(第二次周期来压)时测线 A、测线 B、测线 C 下沉曲线。工作面推进至 84 m 时，岩层垮落高度继续增加，测线 C 已垮落的岩层在上覆岩层的压实作用下，最大下沉值达到 2.8 m；测线 B 所在的岩层也出现下沉，最大下沉值为 2.2 m；测线 A 基本无变化。图 7(c)为工作面推进至 100 m(第三次周期来压)时测线 A、测线 B、测线 C 下沉曲线。工作面推进至 100 m 时，顶板破断波及到松散层，测线 A 最大下沉值为 1.9 m。图 7(d)为工作面开采结束后测线 A、测线 B、测线 C 下沉曲线。4^{-2} 煤层开采结束后，测线 A

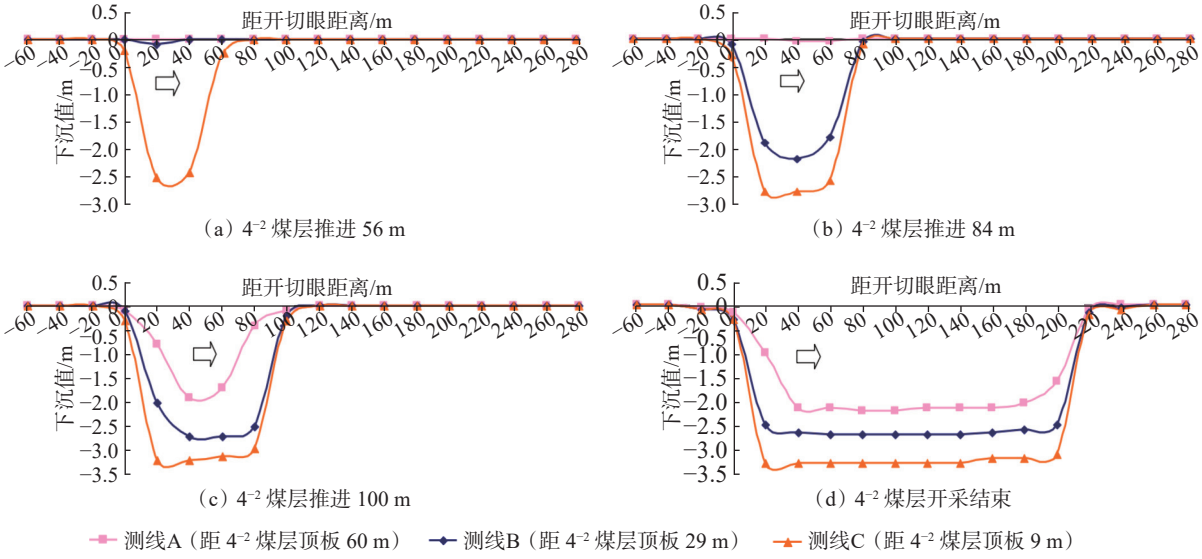


（a）4^{-2} 煤层基本顶初次破断　（b）4^{-2} 煤层基本顶第二次周期破断

（c）4^{-2} 煤层基本顶第三次周期破断　（d）4^{-2} 煤层开采结束后覆岩稳定形态

图 6　4^{-2} 煤层开采过程覆岩运动分析

Fig. 6　Analysis of overburden rock movement in the mining process of 4^{-2} coal seam



（a）4^{-2} 煤层推进 56 m　（b）4^{-2} 煤层推进 84 m

（c）4^{-2} 煤层推进 100 m　（d）4^{-2} 煤层开采结束

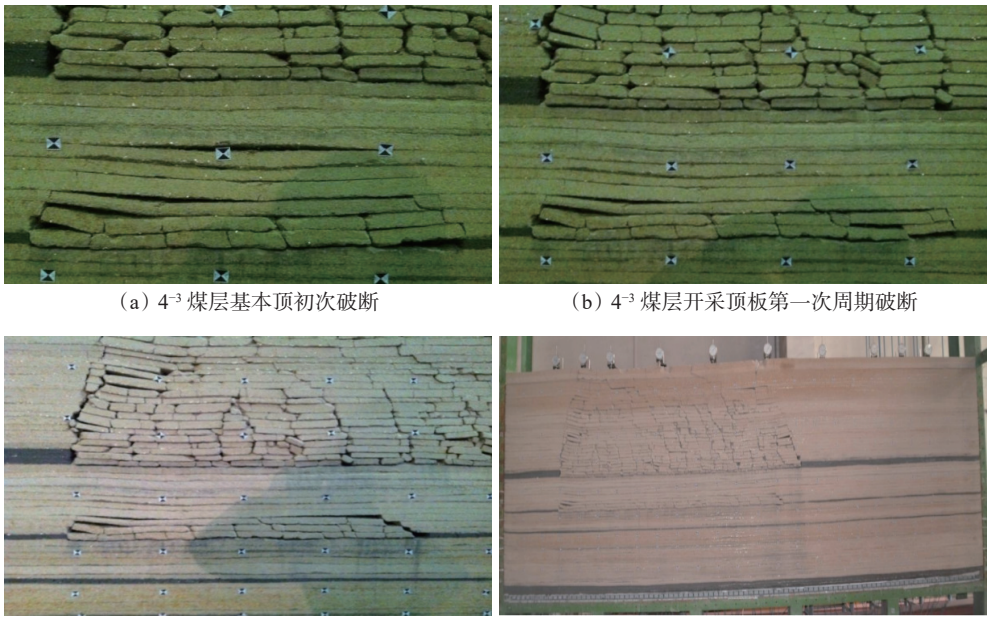
图 7　4^{-2} 煤层开采过程下沉曲线

Fig. 7　Subsidence curves in the mining process of 4^{-2} coal seam

最大下沉值为 2.2 m，测线 B 最大下沉值为 2.7 m，测线 C 最大下沉值为 3.3 m。

3.2　4^{-3} 煤层开采过程分析

4^{-3} 煤层埋深为 91 m，位于 4^{-2} 煤层底板下方 20.9 m，采高为 1.0 m。4^{-3} 煤层工作面顶板为层厚 18.5 m 的细粒砂岩，工作面推进至 24 m 时，下位顶板出现离层，离层高度约为 2 m；工作面继续推进至 50 m 时，顶板发生大范围破断下沉，顶板离层高度达到 12 m，因此，认为工作面发生初次来压，如图 8(a)所示。由于 4^{-3} 煤层的顶板是层厚 18.5 m 的细粒砂岩，且 4^{-3} 煤层采高较小，因为 4^{-3} 煤层初次来压期间，冒落带范围内的顶板破断块度较大，采空区容易被充满压实，上位顶板破断后顶板回转空间较小，破断顶板铰接并不明显，对 4^{-2} 煤层上覆已压实稳定的岩层无明显影响。工作面继续推进至 66 m 时，顶板发生第一次周期破断，切眼侧顶板破坏程度明显大于开采侧，切眼侧竖向裂隙高度达到 19.2 m，如图 8(b)所示。工作面继续推进到 82 m 时，顶板发生第二次周期破断，顶板破断范围进一步扩大，切眼侧的竖向裂隙已贯穿层间覆岩，如图 8(c)所示。4^{-3} 煤层工作面共推进了 210 m，发生了 12 次周期来压，来压步距分别为 16 m、16 m、10 m、12 m、12 m、16 m、14 m、



(a) 4^{-3} 煤层基本顶初次破断　(b) 4^{-3} 煤层开采顶板第一次周期破断

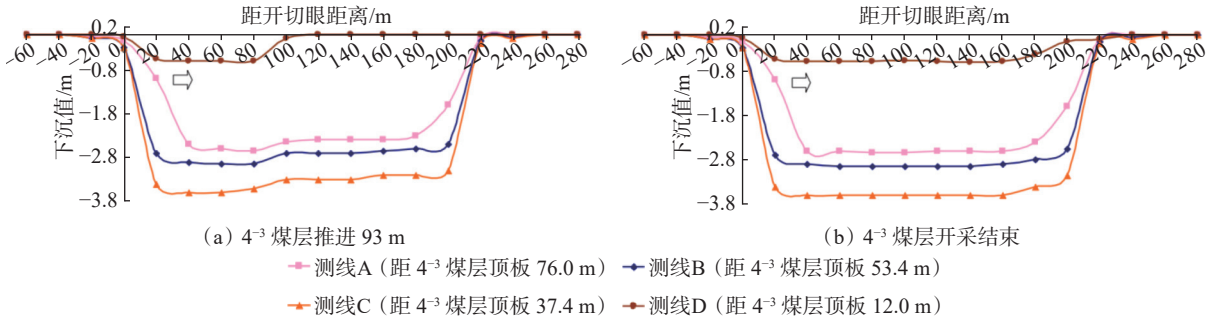
(c) 4^{-3} 煤层开采顶板第二次周期破断　(d) 4^{-3} 煤层开采结束后覆岩稳定形态

图 8　4^{-3} 煤层开采过程覆岩运动分析

Fig. 8　Analysis of overburden rock movement in the mining process of 4^{-3} coal seam

14 m、14 m、12 m、12 m、12 m，平均周期来压步距为 13.3 m。覆岩稳定后状况如图 8(d)所示，4^{-3} 煤层开采覆岩稳定后，冒落带高度约为 2.5 m，裂隙带高度约为 9.5 m，切眼侧岩层破断角约为 60°，工作面侧岩层破断角约为 43°。4^{-2} 煤层上方已稳定的覆岩基本上位于 4^{-3} 煤层开采弯曲下沉带中，在 4^{-3} 煤层开采过程中，4^{-2} 煤层切眼一侧的裂隙受覆岩整体下沉的影响，宽度有所增加。

图 9(a)为 4^{-3} 煤层工作面推进至 93 m(第三次周期来压)时测线 A、测线 B、测线 C、测线 D 下沉曲线。4^{-3} 煤层顶板为层厚 18.5 m 的细粒砂岩，顶板破断排列整齐，覆岩整体下沉值较大，测线 D 位于 4^{-3} 煤层开采裂隙带内，最大下沉值为 0.6 m。上覆稳定岩层在 4^{-3} 煤层的开采影响下，整体性下沉，测线 A、测线 C、测线 D 的累计下沉最大值分别为 2.65 m、2.95 m 和 3.60 m。图 9(b)为 4^{-3} 煤层开采结束后测线 A、测线 B、测线 C、测线 D 下沉曲线。测线 D 最大下沉值为 0.61 m。上覆岩层中测线 A、测线 B、测线 C 的累计下沉最大值分别为 2.65 m、2.95 m 和 3.60 m，与 4^{-3} 煤层推进 93 m 时的数值相一致，这是由于测线 A、测线 B、测线 C 所在的岩层均已被破坏，下伏岩层一旦移动，上覆岩层就会随之移动。



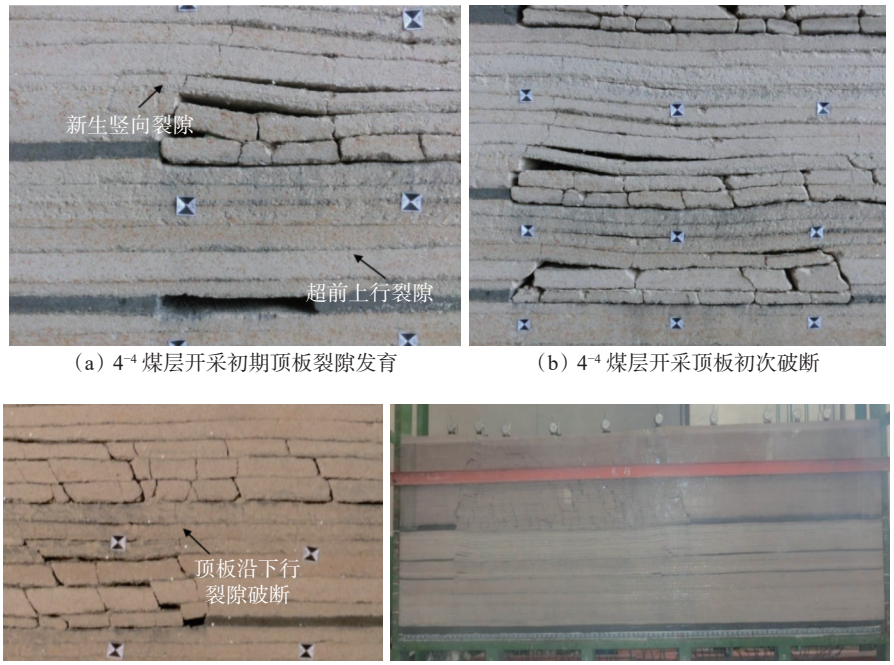
(a) 4^{-3} 煤层推进 93 m　(b) 4^{-3} 煤层开采结束

图 9　4^{-3} 煤层开采过程下沉曲线

Fig. 9　Subsidence curves in the mining process of 4^{-3} coal seam

3.3　4^{-4} 煤层开采过程分析

4^{-4} 煤层埋深为 105.5 m，位于 4^{-3} 煤层底板下方 13.5 m，采高为 1.0 m。4^{-4} 煤层工作面推进至 14 m 时，煤壁前方 3 m 处出现长度约为 8.5 m 的上行裂隙，裂隙发育角度为 80°，此时，4^{-3} 煤层切眼侧出现新的竖向裂隙，发育高度约为 8.5 m，如图 10(a)所示。工作面继续推进至 18 m，即竖向裂隙附近时，直接顶发生初次垮落，随着工作面继续推进，直接顶周期性垮落。推进至 48 m 时，基本顶发生初次破断。顶板破断产生的竖向裂隙贯穿层间覆岩，上覆已稳定的岩层出



（a）4^{-4} 煤层开采初期顶板裂隙发育　（b）4^{-4} 煤层开采顶板初次破断

（c）4^{-4} 煤层开采顶板周期破断　（d）4^{-4} 煤层开采结束后覆岩稳定形态

图 10　4^{-4} 煤层开采过程覆岩运动分析

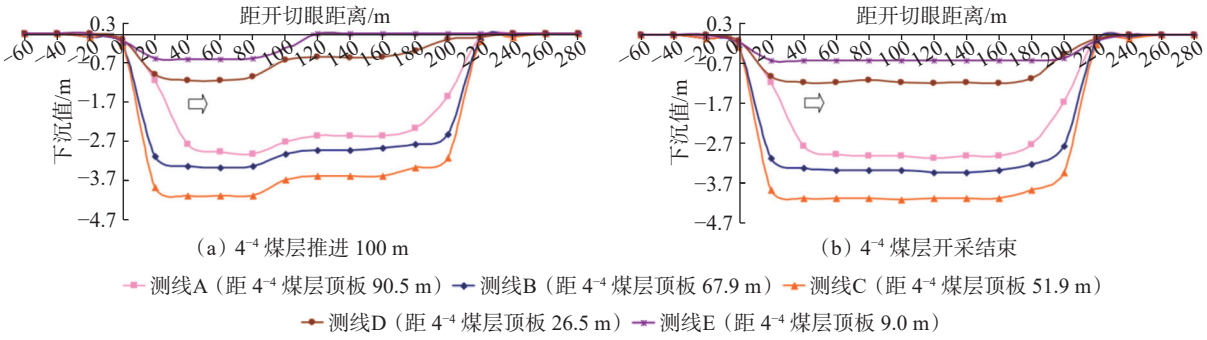
Fig. 10　Analysis of overburden rock movement in the mining process of 4^{-4} coal seam

现下沉，但并不明显，4^{-3} 煤层切眼侧已稳定的竖向裂隙宽度略微增加，如图 10(b)所示。随着工作面继续推进，基本顶进入周期性破断阶段。工作面每推进 10 m 左右时，煤壁正上方出现自层间覆岩顶界面向下发育的裂隙，紧接着顶板沿裂隙发生整体性破断下沉，即顶板周期性破断，如图 10(c)所示。4^{-4} 煤层共推进了 210 m，共发生了 14 次周期来压，周期来压步距分别为 12 m、10 m、10 m、12 m、12 m、10 m、12 m、14 m、12 m、10 m、12 m、12 m、12 m、12 m，平均周期来压步距为 11.6 m。相对于 4^{-3} 煤层开采，4^{-4} 煤层顶板的周期破断步距减小，即 4^{-4} 煤层工作面顶板周期性破断较 4^{-3} 煤层顶板周期破断表现得更为迅速，层间覆岩出现的裂隙破坏对 4^{-4} 煤层顶板活动影响更为明显。分析原因可知，一是相对于 4^{-3} 煤层而言，4^{-4} 煤层开采时上覆载荷层重量已增加；二是 4^{-4} 煤层上方无厚坚硬顶板，因此，4^{-4} 煤层开采时对上覆载荷的抵抗能力更差，工作面极易出现压架现象。

图 11(a)为 4^{-4} 煤层推进至 100 m 时测线 A、测线 B、测线 C、测线 D、测线 E 下沉曲线。测线 E 位于 4^{-4} 煤层开采后裂隙带范围内，推进 100 m 后最大下沉值为 0.65 m。图 11(b)为 4^{-4} 煤层开采结束后测线 A、测线 B、测线 C、测线 D、测线 E 下沉曲线。4^{-4} 煤层开采结束后，上覆岩层中测线 A、测线 B、测线 C、测线 D 的累计下沉最大值分别为 3.10 m、3.45 m、4.15 m 和 1.21 m。

3.4　5^{-2} 煤层开采过程分析

5^{-2} 煤层埋深为 141.9 m，位于 4^{-4} 煤层底板下方 35.4 m，采高为 6.0 m。5^{-2} 煤层工作面切眼宽度为 8.0 m，顶板为层厚 20.2 m 的细粒砂岩，工作面推进至 25 m 时，顶板出现明显离层，离层高度约为 2.5 m。

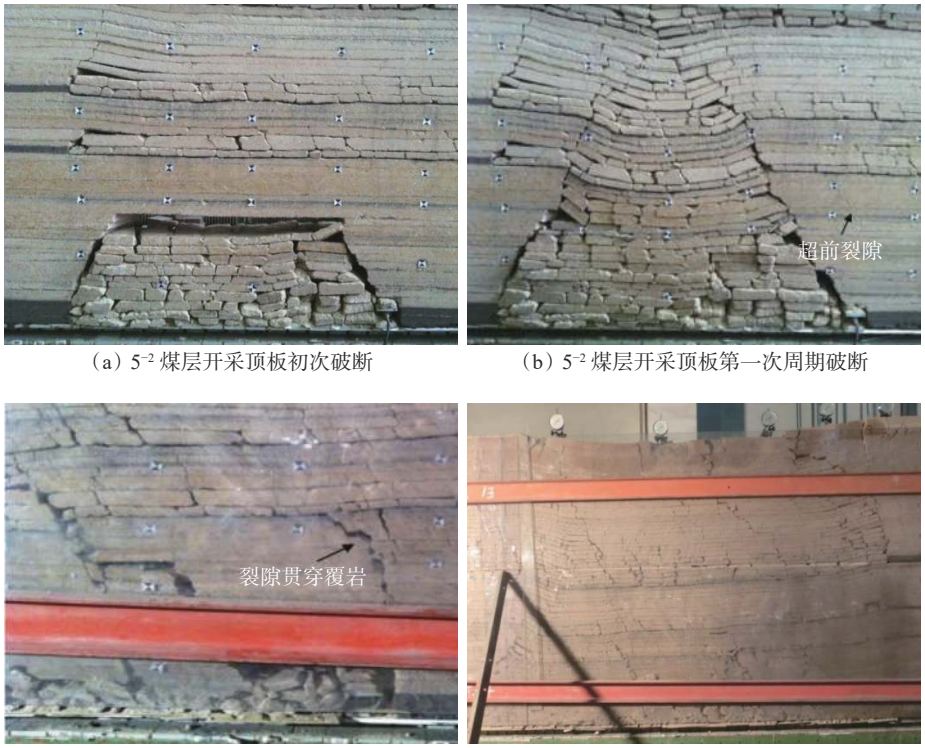


（a）4^{-4} 煤层推进 100 m　（b）4^{-4} 煤层开采结束

图 11　4^{-4} 煤层开采过程下沉曲线

Fig. 11　Subsidence curves in the mining process of 4^{-4} coal seam

随着工作面继续推进，顶板下位分层随采随冒，垮落范围越来越大，工作面推进至 76 m 时，顶板发生大范围垮落，垮落高度达到 23.5 m，垮落覆岩上方出现大范围离层，离层量约为 4.5 m，判定工作面发生初次来压，如图 12(a)所示。从顶板岩层岩性和厚度来考虑，可以认为直接顶为下位关键层，基本顶为上位关键层。5^{-2} 煤层初次来压期间，冒落带高度为 23.5 m，下位关键层全部处于垮落带范围内，上位关键层部分处于垮落带范围内，其余部分仍具有较好的承载能力，能暂时保持稳定，此时，5^{-2} 煤层开采对上覆岩层无明显影响。工作面继续推进至 90 m 时，上位关键层发生完全破断，工作面顶板发生第一次周期破断，自上位关键层至地表的岩层均出现明显的整体性下沉，由于采高较大，回转空间大，上位关键层破断块体被压实，没有形成“砌体梁”式的铰接结构，而形成“悬臂梁”式的暂时稳定结构，如图 12(b)所示。开采空间两端和破断岩块间的竖向裂隙贯穿 4^{-2} 煤层和 5^{-2} 煤层间的覆岩，与上覆岩层中未闭合的裂隙沟通，形成导水通道；4^{-2} 煤层、4^{-3} 煤层、4^{-4} 煤层覆岩中原已压实闭合的裂隙再次发育，三层煤层切眼侧的竖向裂隙宽度均明显增加。同时观察到，5^{-2} 煤层工作面煤壁前方 10 m 处出现一条自层间基岩顶界面发育的下行裂隙，裂隙与顶板破断线平行。工作面继续推进过程中，此裂隙向下延伸，其宽度和长度均发育很快，工作面推进过程中，支架受力增大，移架也异常困难；待工作面推进到或接近该裂缝时，该裂缝已贯穿整个层间覆岩，层间覆岩整体性下沉，如图 12(c)所示。



(a) 5^{-2} 煤层开采顶板初次破断　(b) 5^{-2} 煤层开采顶板第一次周期破断

(c) 5^{-2} 煤层开采顶板第二次周期破断　(d) 5^{-2} 煤层开采结束后覆岩稳定形态

图 12　5^{-2} 煤层开采过程覆岩运动分析

Fig. 12　Analysis of overburden rock movement in the mining process of 5^{-2} coal seam

此后，工作面推进过程中，周期性出现类似的顶板破断现象，与 4^{-3} 煤层、4^{-4} 煤层顶板周期性破断相比，5^{-2} 煤层开采时顶板破断特点：5^{-2} 煤层顶板破断是由超前下行裂缝起主导作用导致的，且由于采高较大，回转空间较大，前一周期顶板破断的断裂线和此周期裂隙之间这部分的层间覆岩在上覆载荷层的作用下，有逆向回转的趋势。工作面继续推进过程中，顶板又先后经历了 7 次周期破断，周期来压步距为 10 m、10 m、12 m、10 m、10 m、10 m、8 m，平均周期来压步距为 11.8 m。5^{-2} 煤层工作面共推进了 170 m，开采后上覆岩层稳定后状况如图 12(d)所示。5^{-2} 煤层冒落带高度约 23.5 m，开采覆岩稳定后，采空区中下部裂隙基本上压实闭合，中上部的岩层受多次拉伸或压缩破坏，岩块块度较小，裂隙不易闭合。

图 13(a)为 5^{-2} 煤层推进至 91 m(第一次周期来压)时，测线 A、测线 F、测线 G、测线 H 下沉曲线。5^{-2} 煤层推进至 91 m 时，顶板破断波及到地表，此时测线 A 累计最大下沉值为 6.3 m，测线 F 最大下沉值

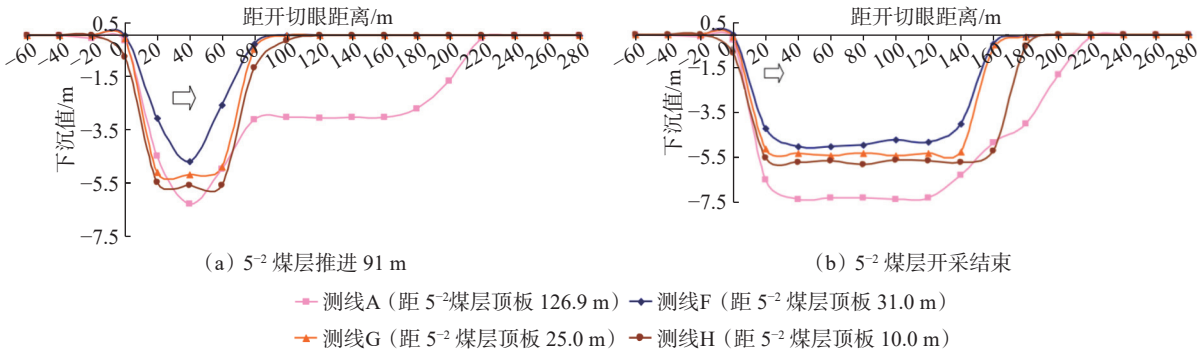


图 13　5^{-2} 煤层开采过程下沉曲线

Fig. 13　Subsidence curves in the mining process of 5^{-2} coal seam

为 5.0 m，测线 G 最大下沉值为 5.3 m，测线 H 最大下沉值为 5.7 m。图 13(b)为 5^{-2} 煤层开采结束后测线 A、测线 F、测线 G、测线 H 下沉曲线。5^{-2} 煤层开采过程中，对测线 A 影响较大，测线 A 累计最大下沉值达到 7.35 m。

4　数值计算模型结果分析

4^{-2} 煤层工作面一共推进了 300 m，平均周期来压步距为 13.8 m，开采结束后覆岩及裂隙分布状况如图 14 所示。4^{-2} 煤层开采覆岩稳定后，其结构只有冒落带和裂隙带，冒落带高度约为 13 m，地表出现了明显的下沉。采空区中上部的裂隙均已压实闭合，但两端破断的顶板由于铰接结构的存在，未被完全压实，且切眼侧裂隙分布范围大于工作面一侧。结合 4^{-2} 煤层开采过程分析结果可知，切眼侧未压实闭合的裂隙主要是在初次来压和前两到三个周期来压期间形成的，这也验证了浅埋煤层开采初次来压和前两到三个周期来压阶段来压显现剧烈，影响范围大，采后裂隙不易闭合。

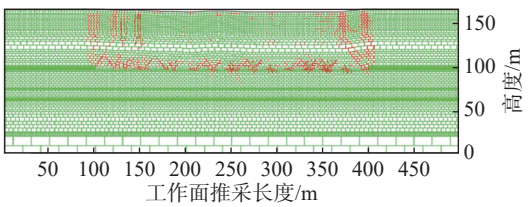


图 14　4^{-2} 煤层开采结束后裂隙分布

Fig. 14　Cracks distribution after the mining of 4^{-2} coal seam

4^{-3} 煤层工作面一共推进了 300 m，平均周期来压步距为 12.9 m，开采结束后覆岩及裂隙分布状况如图 15 所示。4^{-3} 煤层开采后冒落带高度约为 3.5 m，受上煤层开采边界煤柱集中应力的影响，4^{-3} 煤层开采两端的竖向裂隙均贯穿层间覆岩，但正常回采区域裂隙带高度约为 11 m。4^{-3} 煤层覆岩稳定后，采空区层间覆岩的裂隙均已压实闭合，由于采高较小，两端

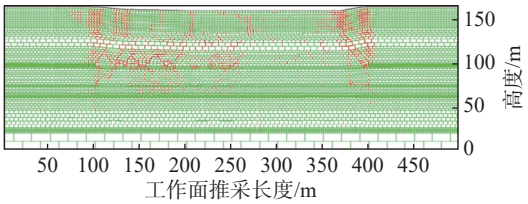


图 15　4^{-3} 煤层开采结束后裂隙分布

Fig. 15　Cracks distribution after the mining of 4^{-3} coal seam

破断的顶板铰接并不明显，因此，裂隙虽未被完全压实，但分布范围较小。4^{-2} 煤层中上部原已压实稳定的覆岩内出现了许多裂隙，且在 4^{-3} 煤层开采结束后仍未压实闭合，这说明在重复扰动情况下，覆岩受二次拉伸破坏后，块体破碎程度增加，裂隙不易闭合。此外，由裂隙分布特征可知，4^{-3} 煤层开采后底板破坏深度超过了 4^{-3} 煤层和 4^{-4} 煤层层间距，且边界煤柱附近破坏深度最大。

4^{-4} 煤层工作面一共推进了 300 m，平均周期来压步距为 12.5 m，开采结束后覆岩及裂隙分布状况如图 16 所示。4^{-4} 煤层开采后冒落带高度约为 4.5 m，裂隙发育高度已贯穿层间覆岩。重复采动后开采空间切眼侧采动影响范围约为 32 m，工作面侧采动影响范围约为 12.5 m。

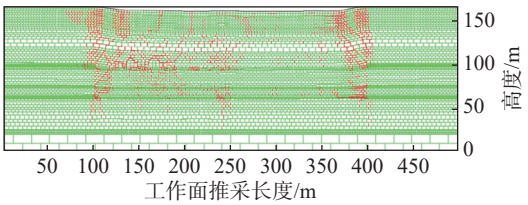


图 16　4^{-4} 煤层开采结束后裂隙分布

Fig. 16　Cracks distribution after the mining of 4^{-4} coal seam

5^{-2} 煤层工作面一共推进了 300 m，平均周期来压步距为 10.8 m，开采结束后覆岩及裂隙分布状况如图 17 所示。5^{-2} 煤层工作面推进过程中，覆岩下部顶

板随采随垮，上部顶板呈周期步距破断，未形成铰接结构。5^{-2} 煤层开采后冒落带高度约为 26.5 m，裂隙发育已贯穿层间覆岩。重复采动后开采空间切眼侧采动影响范围约为 47 m，工作面侧采动影响范围也约为 47 m。同时，5^{-2} 煤层开采结束后，切眼侧初次来压和前三个周期来压范围内裂隙未被压实闭合，停采线侧两个周期来压范围内的裂隙也未被压实闭合，未闭合裂隙的范围远远大于单一浅埋煤层开采结束后的分布范围。这说明多煤层重复开采，围岩受到反复拉伸、挤压破坏，破碎程度增大，尤其是两侧显现得更为明显。

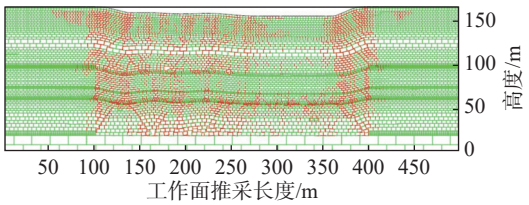


图 17 5^{-2} 煤层开采结束后裂隙分布

Fig. 17 Cracks distribution after the mining of 5^{-2} coal seam

5 结 论

通过分析张家峁煤矿工程与水文地质条件以及煤层赋存特征，构建了四层煤层下行开采的相似试验模型以及数值计算模型，分析了覆岩重复扰动下的垮落、移动以及裂隙演化规律，得到的主要结论如下所述。

1)四层煤层下行开采的周期来压步距依次为 13.8～14.9 m、12.9～13.3 m、11.6～12.5 m、10.8～11.8 m，呈逐渐减小的规律；冒落带高度依次为 12.0～13.0 m、2.5～3.5 m、3.5～4.5 m、23.5～26.5 m，与煤层厚度呈正相关。

2)随着工作面的持续推进，地表下沉的范围逐渐增大，4^{-2} 煤层开采结束后导水裂隙带发育贯穿至地表，4^{-3} 煤层、4^{-4} 煤层、5^{-2} 煤层开采结束后，导水裂隙带发育均贯穿层间覆岩。

3)多煤层重复开采条件下，顶板覆岩受到反复拉伸、挤压破坏，围岩的破碎程度逐渐增大，尤其是两侧显现得更为明显，未闭合裂隙的范围远远大于单一浅埋煤层开采结束后的分布范围。

参考文献(References)：

[1] 武强，涂坤，曾一凡．“双碳”目标愿景下我国能源战略形势若干问题思考[J]．科学通报，2023，68(15)：1884-1898.
WU Qiang, TU Kun, ZENG Yifan. Research on China's energy strategic situation under the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(15): 1884-1898.

[2] 王双明，耿济世，李鹏飞，等．煤炭绿色开发地质保障体系的构建[J]．煤田地质与勘探，2023，51(1)：33-43.
WANG Shuangming, GENG Jishi, LI Pengfei, et al. Construction of geological guarantee system for green coal mining[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 33-43.

[3] 王国法，任世华，庞义辉，等．煤炭工业“十三五”发展成效与“双碳”目标实施路径[J]．煤炭科学技术，2021，49(9)：1-8.
WANG Guofa, REN Shihua, PANG Yihui, et al. Development achievements of China's coal industry during the 13th Five-Year Plan period and implementation path of “dual carbon” target[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 1-8.

[4] 李霞，崔涛．我国煤炭资源可持续发展的保障分析[J]．中国煤炭，2019，45(1)：33-37.
LI Xia, CUI Tao. Supportability analysis of sustainable development for coal resources in China[J]. China Coal, 2019, 45(1): 33-37.

[5] 刘峰，郭林峰，赵路正．双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径[J]．煤炭学报，2022，47(1)：1-15.
LIU Feng, GUO Linfeng, ZHAO Luzheng. Research on coal safety range and green low-carbon technology path under the dual-carbon background[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 1-15.

[6] 杨滨滨，袁世冲，郑德志，等．近距离煤层重复采动覆岩裂隙时空演化特征研究[J]．采矿与安全工程学报，2022，39(2)：255-263.
YANG Binbin, YUAN Shichong, ZHENG Dezhi, et al. Spatial and temporal characteristics of overburden fractures due to repeated mining in close distance coal seams[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(2): 255-263.

[7] ZHANG D Y, SUI W H, LIU J W. Overburden failure associated with mining coal seams in close proximity in ascending and descending sequences under a large water body[J]. Mine Water and the Environment, 2018, 37(2): 322-335.

[8] 陈金宇，刘华枢，孙卓越，等．多煤层开采煤矸互层顶板动压巷道围岩稳定性研究与控制[J]．煤炭技术，2023，42(6)：62-66.
CHEN Jinyu, LIU Huashu, SUN Zhuoyue, et al. Study and control of surrounding rock stability of dynamic pressure roadway with coal gangue interbed roof in multi-coal seam mining[J]. Coal Technology, 2023, 42(6): 62-66.

[9] 阎跃观，戴华阳，王忠武，等．急倾斜多煤层开采地表沉陷分区与围岩破坏机理：以木城涧煤矿大台井为例[J]．中国矿业大学学报，2013，42(4)：547-553.
YAN Yueguan, DAI Huayang, WANG Zhongwu, et al. Ground subsidence zone and surrounding rock failure mechanism due to steep multiple coal seam mining: a case study at Muchengjian Datai Mine[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(4): 547-553.

[10] 黄庆享，贺雁鹏，周海丰．榆家梁煤矿多煤层开采矿压显现规律研究[J]．西安科技大学学报，2017，37(1)：21-25.
HUANG Qingxiang, HE Yanpeng, ZHOU Haifeng. Roof pressure of multiple coal seams mining in Yujialiang Mine[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2017, 37(1): 21-25.

[11] 张志祥，张永波，赵志怀，等．多煤层开采覆岩移动及地表变形

规律的相似模拟实验研究[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(4): 130-134.
ZHANG Zhixiang, ZHANG Yongbo, ZHAO Zhihuai, et al. Similar simulation of overlying rock movement and surface deformation behavior with multi-coal seam mining[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(4): 130-134.

[12] 袁世冲, 张改玲, 郑国胜, 等. 斜井穿越风积砂层水砂突涌注浆治理研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(4): 1104-1110.
YUAN Shichong, ZHANG Gailing, ZHENG Guosheng, et al. Grouting treatment of water and sand inrush into an inclined shaft in aeolian sand layer[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(4): 1104-1110.

[13] 夏筱红, 隋旺华, 杨伟峰. 多煤层开采覆岩破断过程的模型试验与数值模拟[J]. 工程地质学报, 2008, 16(4): 528-532.
XIA Xiaohong, SUI Wanghua, YANG Weifeng. Model test and numerical simulation of overburden failure process in multi-coal seam mining[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(4): 528-532.

[14] 白阳, 齐跃明, 项敏, 等. 南梁煤矿多煤层开采地下水系统演化规律[J]. 地质科技通报, 2022, 41(1): 183-192.
BAI Yang, QI Yueming, XIANG Min, et al. Evolution law of groundwater system with multiple seams mining in Nanliang Coal Mine[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(1): 183-192.

[15] 刘小平, 田延哲, 曹晓毅, 等. 多煤层开采条件下高陡山体变形控制[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(11): 180-190.
LIU Xiaoping, TIAN Yanzhe, CAO Xiaoyi, et al. Deformation control of high and steep mountain under condition of multi-coal mining[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(11): 180-190.

[16] 黄克军, 陈通, 曹新奇, 等. 浅埋煤层群水库周边开采保护煤柱留设研究[J]. 煤炭技术, 2014, 33(11): 149-151.
HUANG Kejun, CHEN Tong, CAO Xinqi, et al. Research of protection coal pillars in shallow buried coal seams around reservoir[J]. Coal Technology, 2014, 33(11): 149-151.