

浅埋煤层群开采覆岩垮落及导水裂隙带发育规律研究

尚 慧, 柳思航, 甘智慧, 苏理想, 刘 阳

Development of overlying strata collapse and water-conducting fractured zone in shallow coal seams mining

SHANG Hui, LIU Sihang, GAN Zhihui, SU Lixiang, and LIU Yang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202309025>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

含单裂隙非饱和带中轻非水相流体修复的数值模拟

Numerical simulation of light non-aqueous phase liquids remediation in the unsaturated zone with single fractures

赵科锋, 王锦国, 曹慧群 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 43-55

基于InSAR技术的缓倾煤层开采诱发顺层岩体地表变形模式研究

A study of deformation mode and formation mechanism of abedding landslide induced by mining of gently inclined coal seam based on InSAR technology

姚佳明, 姚鑫, 陈剑, 李凌婧, 任开, 刘星洪 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 135-146

水位波动下包气带透镜体影响LNAPL迁移的数值模拟研究

A numerical simulation study of the effect of the vadose zone with lenses on LNAPL migration under the fluctuating water table

潘明浩, 时健, 左锐, 赵晓, 刘嘉蔚, 薛镇坤, 王金生, 胡立堂 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 154-163

共和盆地干热岩体人工裂隙带结构的控热机理与产能优化

Heat control mechanism and productivity optimization of artificial fracture zone structure of dry hot rock in Gonghe Basin

陈炫沂, 姜振蛟, 徐含英, 冯波 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 191-199

基于GSFLOW的镜湖湿地地表水与地下水耦合数值模拟

Numerical simulation of coupling surface water and groundwater based on GSFLOW for the Jinghu Wetland

郜会彩, 肖玉福, 胡云进, 陈柳安, 周如杰 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 182-191

层状非均质结构包气带入渗过程单相流与两相流数值模拟对比研究

A comparative numerical simulation study of single-phase flow and water-gas two-phase flow infiltration process in the vadose zone with the layered heterogeneous structure

高靖勋, 冯洪川, 祝晓彬, 吴吉春, 吴剑锋, 卫云波, 王水 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 24-32



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202309025

尚慧, 柳思航, 甘智慧, 等. 浅埋煤层群开采覆岩垮落及导水裂隙带发育规律研究 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(2): 125-137.
SHANG Hui, LIU Sihang, GAN Zhihui, et al. Development of overlying strata collapse and water-conducting fractured zone in shallow coal seams mining[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(2): 125-137.

浅埋煤层群开采覆岩垮落及导水裂隙带发育规律研究

尚 慧¹, 柳思航¹, 甘智慧², 苏理想¹, 刘 阳³

(1. 西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国煤炭地质总局广东煤炭地质局
勘查院, 广东 广州 510400; 3. 陕西矿业开发工贸有限公司, 陕西 西安 710054)

摘要: 浅埋煤层群井下开采对上覆岩层有较大影响, 不仅会加剧地表沉陷, 而且可能造成地表和地下水流失, 影响生态环境和发展安全。为进一步掌握浅埋煤层群开采过程中覆岩垮落规律和裂隙分布特征, 以宁夏石嘴山二矿 2[#]、3[#]、5[#]和 6[#]煤层为研究对象, 分别采用相似材料模拟试验、数值模拟和经验公式计算, 分析导水裂隙带发育规律; 同时采用相似材料模拟试验方法, 分析一次采动和多次采动覆岩垮落规律。研究结果表明: (1) 浅埋近距离煤层群开采时, 上层煤周期来压步距大于下层; (2) 单层煤开采时, 上覆岩层垮落以“铰接结构”和“台阶结构”形式出现, 两层及多层煤开采时, “铰接结构”稳定性明显降低, 垮落结构主要以“台阶结构”稳定在采空区上方; (3) 一次采动时形成“梯形”裂隙区, 二次采动时形成“M”形裂隙区, 多次采动时形成两个“等腰梯形”裂隙区; (4) 导水裂隙带发育高度一次采动时呈平稳增长—缓慢变化趋势, 重复采动时, 导水裂隙带发育高度则呈快速增长—平稳增长趋势; (5) 相似材料模拟试验值及数值模拟结果与实测值较为接近, 且均符合煤矿防治水规定。该结果可为类似矿区煤层群高效开采提供参考依据。

关键词: 煤层群; 覆岩垮落; 导水裂隙带; 相似材料模拟; 数值模拟

中图分类号: TD325

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)02-0125-13

Development of overlying strata collapse and water-conducting fractured zone in shallow coal seams mining

SHANG Hui¹, LIU Sihang¹, GAN Zhihui², SU Lixiang¹, LIU Yang³

(1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Exploration Institute, Guangdong Bureau of Coal Geology, China National Administration of Coal Geology, Guangzhou, Guangdong 510400, China; 3. Shaanxi Mining Development Industry and Trade Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Shallow underground mining of coal seams has significant impacts on the overlying rock formations, not only exacerbating surface subsidence but also potentially leading to surface and groundwater loss, thereby affecting the development and safety of the ecological environment. To further understand the collapse law and

收稿日期: 2023-09-09; 修订日期: 2023-12-22

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41702377); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2017JQ4008)

第一作者: 尚慧(1985—), 女, 博士, 讲师, 硕士生导师, 从事岩土体稳定性与地质灾害防治、矿山环境方面研究。

E-mail: shanghui@xust.edu.cn

通讯作者: 柳思航(1999—), 男, 硕士研究生, 从事岩土体稳定性与地质灾害防治方面研究。E-mail: 393177562@qq.com

fracture distribution characteristics of overlying strata during the shallow coal seam mining process, a study was conducted on the 2[#], 3[#], 5[#], and 6[#] coal seams of the Shizuishan No. 2 Mine in Ningxia. Similar material simulation tests, numerical simulations, and empirical formula calculations were employed to analyze the development of water-bearing fracture zones and the collapse characteristic of the overlying strata under single and multiple mining operations. The results indicate that: (1) During the mining of shallow and closely spaced coal seams, the gob-side entry retention time of the upper coal seam is greater than that of the lower coal seam. (2) When mining a single coal seam, the collapse of the overlying strata occurs in the form of “hinged structure” and “step structure”. As to the mining of two or more coal seams, the stability of the “hinged structure” decreases significantly and the collapse structure mainly stabilizes as a “step structure” above the goaf. (3) During the initial mining, a “trapezoidal” fracture zone is formed, while during the secondary mining, an “M-shaped” fracture zone is formed, and during multiple mining operations, two “isosceles trapezoidal” fracture zones are formed. (4) The development height of the water-bearing fracture zone shows a steady increase or slow change during the initial mining. While during repetitive mining, the development height of the water-bearing fracture zone shows a rapid increase to steady growth. (5) The values obtained from the similar material simulation tests and numerical simulations are similar to the measured values, and all of them comply with the regulations for coal mine water control. These results can provide a basis for the efficient mining of coal seam groups in similar mining areas.

Keywords: coal seam group; overburden caving; water-conducting fracture zone; similar material simulation; numerical simulation

浅埋近距离煤层群在我国不仅储量大,而且分布广泛、开采强度高,如陕北柠条塔煤矿、韩家湾煤矿等^[1-2]。在地下煤炭资源开采过程中,上覆岩层会表现出垮落、断裂、离层、移动和变形等现象,从而在覆岩中出现大量的裂隙。若裂隙带高度发育至含水层,不仅造成地下水的大量流失,而且会直接威胁到矿井的生产安全^[3-5]。因此在采动条件下,研究覆岩垮落规律和准确判断导水裂隙带发育高度,对实现煤层群高效开采与可持续发展具有重要指导意义。

近年来,众多学者借助现场实测^[6-7]、数值模拟^[8-10]和相似材料模拟^[11-13]等方法对单一煤层及煤层群开采覆岩垮落规律及导水裂隙带发育高度进行研究,并取得了系列研究成果,一定程度上指导了煤矿生产的工程设计和工程实践。研究表明:单一煤层开采覆岩运移呈非对称性,采高与推进速率和导水裂隙带发育高度呈正比的关系^[14-15]。双层煤开采裂采比和垮采比与煤层间距呈反比关系,且覆岩裂隙和高度随着推进距离的增加而增加,重复采动会加剧上覆采空区围岩失稳及地表沉陷^[16-18]。相关理论研究和开采实践表明,多煤层重复开采造成的重复扰动和叠加破坏对覆岩裂隙演化^[19-20]和移动变形^[21-23]具有独特的变化特征。综上所述,目前对于单一煤层和双层煤开采覆岩移动变形特征和导水裂隙带发育规律研究较为深

入,对于浅埋多煤层(三层及以上)相关研究较为薄弱,尚不能有效地指导煤矿防灾和工作面推进设计方案,因此有必要进行进一步的研究。

宁夏石嘴山二矿井田下存在 2[#]、3[#]、5[#]、6[#]和 7[#]稳定浅埋可采煤层,以此为研究对象,采用相似材料模拟、数值模拟和经验公式计算来研究煤层群开采覆岩垮落特征及导水裂隙带发育高度变化规律,以期为浅埋煤层群开采工作面覆岩破坏和裂隙带发育问题的研究提供新思路。

1 研究区概况

1.1 自然地理与地质环境条件

石嘴山矿区位于宁夏回族自治区石嘴山市惠农区境内,东濒黄河,西靠贺兰山,北接正义关,南界灌渠,区内气候属于大陆性半干旱气候,雨量稀少,蒸发量大;全年多风,春冬尤甚;气候干燥,温度变化剧烈。

石嘴山矿区地势西高东低,在鄂尔多斯地台与阿拉善地块之间,构造以褶皱为主,总体为一向斜构造。地下水类型为坚硬基岩裂隙水,水文地质条件中等,含水层之间存在隔水层,且隔水性能良好,各含水层之间的水利联系较弱。根据研究区矿山精查地质报告,主要出露岩层由老至新为:前震旦系、震旦系、

寒武系、奥陶系、石炭系太原组、二叠系、三叠系、侏罗系、新近系和第四系冲积层、风积层。其中石炭系上统太原组和二叠系下统山西组为主要含煤地层, 含煤地层平均厚度为 185.91 m, 可采煤层总厚度为 28.75 m, 可采含煤系数为 16.2%。

1.2 采矿条件与开采现状

石嘴山矿区主要包括一矿井田和二矿井田(图 1),

均为地下开采, 经过 60 多年的开采, 形成了总面积约 38.57 km² 的采煤沉陷区, 沉陷区内主要形成了 7 处面积较大的塌陷坑, 总面积达 9.69 km², 最大塌陷深度超过 20 m。其中一矿井田周围分布了 1—4 号 4 个塌陷坑, 塌陷面积为 5.01 km²; 二矿井田周围分布了 5—7 号 3 个塌陷坑, 塌陷面积为 4.68 km²。该沉陷区于 2004—2015 年已完成矿山地质环境恢复治理。

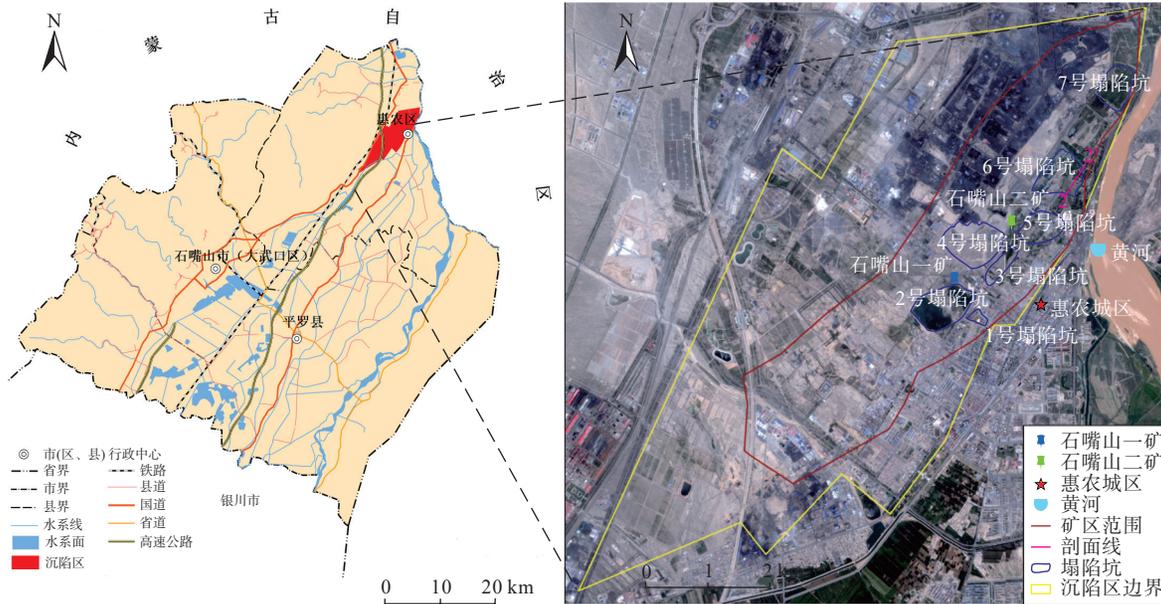


图 1 研究区地理位置图

Fig. 1 Geographical location of the study area

以石嘴山二矿采空区 6 号陷坑下 2—2'剖面为研究对象, 地层剖面线见图 1, 地层剖面图见图 2。2[#]煤平均厚度 4.22 m, 上覆基岩主要为砂岩, 平均厚度 31.45 m; 3[#]煤平均厚度 7.38 m, 上覆基岩主要为砂岩, 平均厚度 3.16 m; 5[#]煤平均厚度 2.07 m, 上覆基岩主要为砂岩、砂质页岩、页岩和灰岩, 平均厚度 93.68 m;

6[#]煤平均厚度 11.36 m, 上覆基岩主要为砂岩和砂质页岩, 平均厚度 4.65 m; 7[#]煤平均厚度 1.55 m, 上覆基岩主要为砂岩, 平均厚度 7.23 m。试验将 2[#]和 3[#]煤划分为上组煤层, 5[#]、6[#]和 7[#]煤划分为下组煤层, 因 7[#]煤层相对较薄, 试验过程中未进行回采。

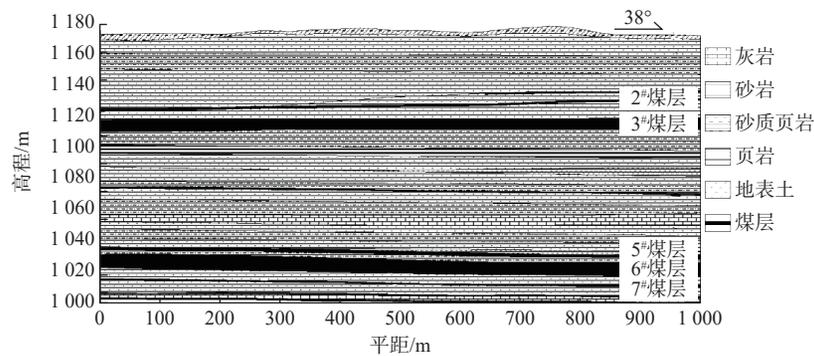


图 2 石嘴山二矿 2—2'地层剖面图

Fig. 2 2-2' stratigraphic profile of Shizuishan No.2 mine

2 相似材料模拟试验设计

2.1 物理模型建立

为研究石嘴山矿区浅埋煤层群开采覆岩垮落及导水裂隙带发育规律,以 2—2'剖面为研究对象,建立物理模型。各煤岩层厚度及物理力学参数见表 1^[24]。根据相似试验定理并结合试验实际情况,选用试验台架为长×高×宽=300 cm×200 cm×20 cm 的钢架结构,模

拟沿走向方向的地层,分别选用细河砂、大白粉和石膏作为骨料、填料和胶结物。通过 3 种材料的不同配比实现模拟强度不同的地层,地层之间的层理面选用细碎白云母片模拟。模型几何相似比为 $C_l=1:100$,容重相似比为 $C_\gamma=1:1.6$,泊松相似比为 $C_\mu=1:1$,时间相似比为 $C_t=1:10$,应力和各种强度相似比为 $C_\sigma=1:160$ 。模型中岩层的材料配比见表 2。

表 1 模型厚度及岩石力学参数

Table 1 Model thickness and rock mechanics parameters

岩性	模型厚度/cm	累计厚度/cm	密度/(kg·m ⁻³)	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	泊松比
砂岩	31.45	31.45	2 400	45 000	6 000	5.65	35.0	45	0.30
2 [#] 煤	4.22	35.67	1 900	2 000	200	1.11	3.0	25	0.35
砂岩	3.16	38.83	2 400	45 000	6 000	5.65	35.0	45	0.30
3 [#] 煤	7.38	46.21	1 900	2 000	200	1.11	3.0	25	0.35
砂质页岩	15.83	62.04	2 100	30 000	4 000	3.64	17.0	30	0.30
页岩	12.78	74.82	2 380	69 700	4 650	3.20	3.1	40	0.40
砂岩	7.23	82.05	2 400	45 000	6 000	5.65	35.0	45	0.30
砂质页岩	4.13	86.18	2 100	30 000	4 000	3.64	17.0	30	0.30
砂岩	4.13	90.31	2 400	45 000	6 000	5.65	35.0	45	0.30
砂质页岩	20.66	110.97	2 100	30 000	4 000	3.64	17.0	30	0.30
灰岩	4.13	115.10	2 700	15 700	2 830	8.42	40.0	40	0.23
砂岩	6.20	121.30	2 400	45 000	6 000	5.65	35.0	45	0.30
砂质页岩	7.23	128.53	2 100	30 000	4 000	3.64	17.0	30	0.30
砂岩	8.26	136.79	2 400	45 000	6 000	5.65	35.0	45	0.30
砂质页岩	3.10	139.89	2 100	30 000	4 000	3.64	17.0	30	0.30
5 [#] 煤	2.07	141.96	1 900	2 000	200	1.11	3.0	25	0.35
砂岩	2.07	144.03	2 400	45 000	6 000	5.65	35.0	45	0.30
砂质页岩	2.58	146.61	2 100	30 000	4 000	3.64	17.0	30	0.30
6 [#] 煤	11.36	157.97	1 900	2 000	200	1.11	3.0	25	0.35
砂岩	7.23	165.20	2 400	45 000	6 000	5.65	35.0	45	0.30
7 [#] 煤	1.55	166.75	1 900	2 000	200	1.11	3.0	25	0.35
砂岩	3.61	170.36	2 400	45 000	6 000	5.65	35.0	45	0.30
灰岩	3.10	173.46	2 700	15 700	2 830	8.42	40.0	40	0.23

表 2 岩层材料配比表

Table 2 Rock layer material ratios

岩层名称	累计厚度/cm	配比号	河砂/kg	石膏/kg	大白粉/kg
砂岩	73.34	728	492.8	42.24	168.98
煤	26.58	928	229.7	15.31	61.24
砂质页岩	53.53	864	411.1	92.5	61.67
页岩	12.78	737	85.88	11.04	25.76
灰岩	7.23	628	41.64	4.16	16.66

2.2 试验监测方案

相似材料试验依据研究区矿山精查地质报告中 2—2'剖面钻孔资料建立物理模型(图 3)。在试验过程中选择从左往右,从上往下的方式依次按顺序开采上组煤和下组煤,模拟单次开采量为 2 cm/次(即实际为

2 m/次),每次开采 0.5 h 后对模型数据进行记录。为观测开采过程中覆岩移动变形规律,模型布设 11 排位移测点,从上往下依次编号为 A、B、C、D、E、F、G、H、J、K,从左至右编号为 1—25 号,靠近模型两端的两个测点中心间距为 20 cm,其余各测点中心间距为 10 cm。借助全站仪对各位移测点进行测量记录,并使用精度 0.01 mm、量程 30 mm 的百分表监测周期来压时地表下沉情况,每间隔 30 cm 布置一个百分表,从左至右依次编号,共布置 9 个测点。

3 煤层群重复采动覆岩垮落规律

3.1 上组煤覆岩垮落规律

在 2[#]煤层回采过程中,当工作面推进至 35 m 时,

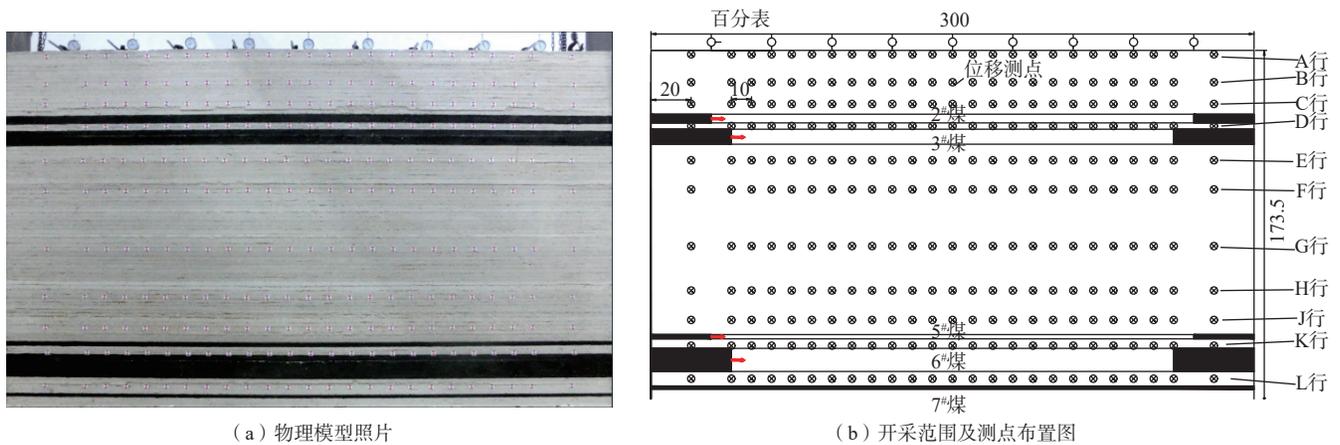


图 3 物理模型开采范围及测点布置图 (单位: cm)

Fig. 3 Model mining scope and measurement point layout (unit: cm)

直接顶岩层率先达到抗拉强度, 顶板出现拉裂破坏并发生初次垮落, 如图 4(a)所示; 当工作面推进至 53 m 时, 在自重和拉应力作用下, 直接顶初次来压, 来压步距 20 m, 如图 4(b)所示。随着工作面的持续推进, 共计 240 m, 上覆岩层垮落向上延伸直至地表, 并在垮落

过程中以“砌体梁”或“悬臂梁”结构形式出现, 共经历了直接顶初次来压和累计九次周期来压, 如图 4(c)、表 3 所示, 周期来压步距 18~24 m, 平均周期来压步距为 21 m。

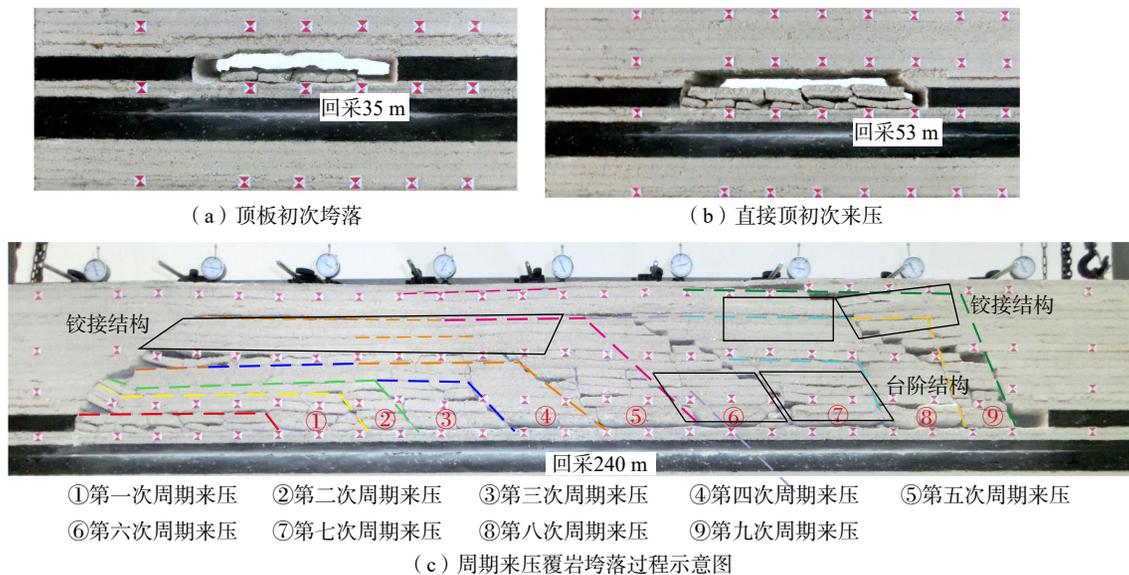


图 4 2#煤层覆岩垮落图

Fig. 4 Caving diagram of overburden of 2# coal seam

表 3 2#煤层回采来压步距

Table 3 Pressure step of 2# coal seam mining

来压次数	推进距离/m	来压步距/m	来压次数	推进距离/m	来压步距/m
初次来压	53	18	5	155	24
1	71	18	6	177	22
2	89	18	7	201	24
3	109	20	8	219	18
4	131	22	9	240	21

在 3#煤层回采过程中, 顶板发生初次来压位置距开切眼 31 m, 如图 5(a)所示。顶板垮落贯穿至 2#煤层采空区, 冒落岩块充填至 3#煤层采空区, 由于开切眼侧的“铰接”结构, 导致岩块未完全垮落, 形成了暂时稳定的“悬臂梁”结构。当工作面推进至 45 m 时, 顶板出现第一次周期来压, 来压步距 14 m。随着工作面的持续推进, 共计 220 m, 顶板呈现出周期来压不明显、“随挖随垮”的顶板垮落形式, 共经历了 20 次周期来

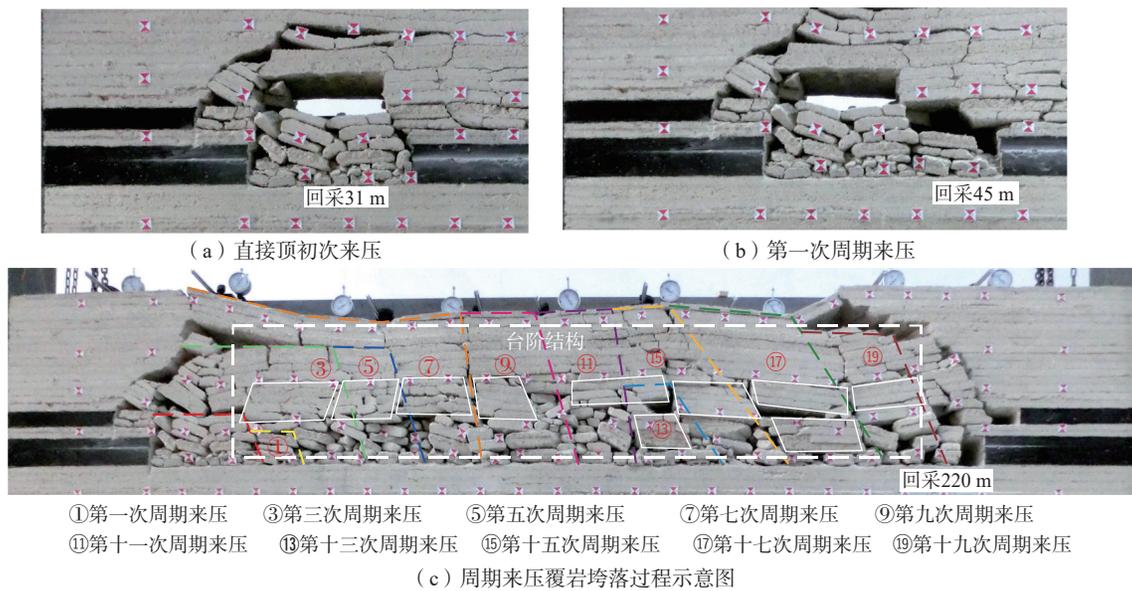


图 5 3#煤层覆岩垮落图

Fig. 5 Caving diagram of overburden of 3# coal seam

压,如图 5(c)、表 4 所示,周期来压步距 6~20 m,平均周期来压步距 9.4 m。

表 4 3#煤层回采来压步距

Table 4 Pressure step of 3# coal seam mining

来压次数	推进距离/m	来压步距/m	来压次数	推进距离/m	来压步距/m
初次来压	31	31	11	131	6
1	45	14	12	143	12
2	53	8	13	151	8
3	61	8	14	163	12
4	67	6	15	169	6
5	74	7	16	189	20
6	87	13	17	195	6
7	93	6	18	203	8
8	109	16	19	210	7
9	115	6	20	217	7
10	125	10			

在上组煤回采中发现覆岩结构具有以下特点:上层煤的初次垮落步距和周期来压均大于下层煤,平均周期来压步距约是下层煤的 2.13 倍;上层煤开采时,上覆岩层垮落结构常以“铰接结构”和“台阶结构”出现,如图 4(c)所示。“铰接结构”可以对上覆地层起到连续承载作用,能够有效抑制覆岩裂隙的发育,且使地表产生均匀沉降,而“台阶结构”间存在一定的垂距,对上覆地层产生非连续承载,促使覆岩裂隙充分演化,出现阶梯式下沉;下层煤开采时,采空区贯通导致上煤层稳定垮落结构再次活化运移,在二次扰动下产生新的“铰接结构”和“台阶结构”,最终多数垮落岩层以“台阶结构”稳定在采空区上方,致使地表出现大

范围的阶梯式下沉。

3.2 下组煤覆岩垮落规律

在 5#煤层回采过程中,顶板初次垮落步距为 32 m,如图 6(a)所示。初次来压步距为 56 m,如图 6(b)所示。顶板共经历了 8 次周期来压,如图 6(c)、表 5 所示。周期来压步距 16~26 m,平均周期来压步距 23 m。相比 2#煤层,5#煤层因采厚较小,上覆岩层周期来压步距与平均周期来压步距明显增大,在垮落过程中少见“砌体梁”或“悬臂梁”结构,垮落岩层多以“台阶结构”稳定在采空区上方。

在 6#煤层回采过程中,顶板初次来压步距为 28 m,如图 7(a)所示,由于 5#煤层采空区垮落岩层间的相互作用力,仅有部分岩层掉落 6#煤层采空区。当工作面推进至 38 m 时,顶板发生第一次周期来压,来压步距 10 m;随着工作面的持续推进,共计 220 m,产生 15 次周期来压,如图 7(c)、表 6 所示。周期来压步距 6~26 m,平均周期来压步距 12.8 m。在推进过程中,复合垮落区破碎严重,垮落范围不断扩大,直至与上组煤采空区贯通。复合垮落区上部岩层多以“铰接-台阶”过渡结构存在,起到承载上覆岩层的作用,因此采空区下部岩层破碎严重,上部岩层完整性较好。

综上所述,浅埋煤层群开采过程中覆岩垮落规律如下:煤层间距较小时,上层煤的周期来压步距均大于下层煤,当上层煤采厚较小时,下层煤周期来压步距有明显增大现象;单层煤回采时,上覆岩层垮落结构以“铰接结构”和“台阶结构”出现,二者相互结合产

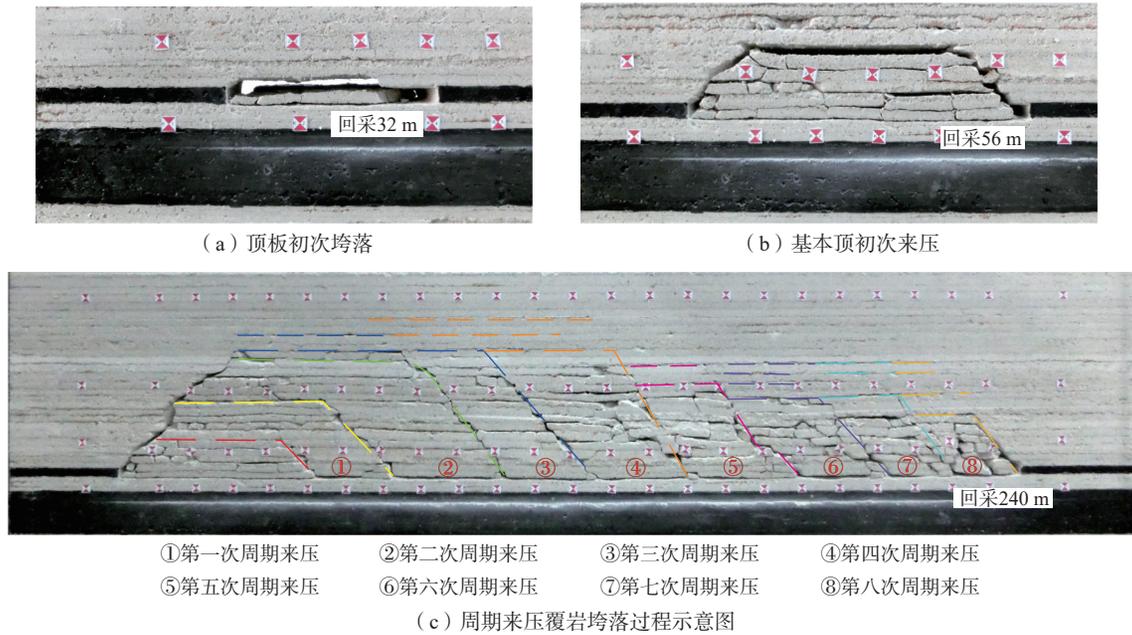


图 6 5#煤层覆岩垮落图

Fig. 6 Caving diagram of overburden of 5# coal seam

表 5 5#煤层回采来压步距

Table 5 Pressure step of 5# coal seam mining

来压次数	推进距离/m	来压步距/m	来压次数	推进距离/m	来压步距/m
初次来压	56	24	5	182	26
1	80	24	6	206	24
2	104	24	7	224	18
3	130	26	8	240	16
4	156	26			

生作用效果能够有效地抑制地表大范围的沉降及裂缝; 两层煤及多层煤回采时, 垮落结构再次活化运移, 受采厚、层间距及多次采动等因素的影响, “铰接结构”稳定性明显降低, 垮落结构主要以“台阶”结构稳定在采空区上方。

4 煤层群开采导水裂隙带发育规律

4.1 上组煤裂隙带演化规律

4.1.1 单层煤回采裂隙演化规律

单层煤采动后裂隙分布范围及发育情况如图 8 所示。由图可以看出: 2#煤层基本顶垮落后, 在采空区上部会自下而上产生离层裂隙和弯曲下沉裂隙。当工作面推进至 155 m 时, 离层裂隙已发育至近地表, 高度约为 27.71 m, 并在距离开切眼约 18 m 处的地表出现了一条贯穿模型的纵向裂隙, 长度约 18 m(图 9)。随着工作面的推进, 上覆岩层弯曲下沉导致下部离层裂隙逐渐压实闭合, 上部岩层在拉应力和自重作用下, 离层裂隙转换为弯曲下沉裂隙。因受边界煤柱的影响,

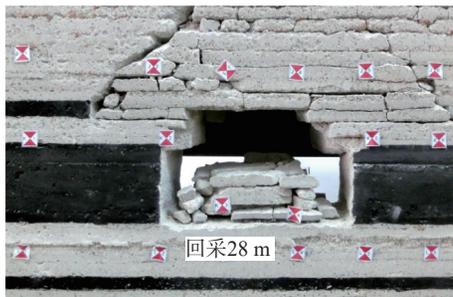
开切眼侧的裂隙闭合程度较低, 且已形成的裂隙不会随着煤层的回采而被压实。当工作面回采结束时, 近地表产生了大量的弯曲下沉裂隙, 裂隙发育高度为 31.45 m, 并以底板为边界, 在开切眼附近, 工作面及采空区上方的裂隙近似构成一个“梯形”裂隙区(图 8)。

4.1.2 两层煤回采裂隙演化规律

双层煤采动后裂隙分布范围及发育情况如图 10 所示。由图可以看出: 重复采动使得 3#煤层周期来压时覆岩进一步垮落、旋转, 从而导致裂隙加剧演化, 主要向采空区两侧边界方向发展。当工作面推进至 93 m 时, 裂隙带向上发育并首次贯穿至地表, 悬臂梁断裂导致地表发生较大沉降, 采空区中部岩层及裂隙被逐渐压实, 形成压实区。由于地表岩层破断形成“砌体梁结构”支撑的影响, 采空区两侧的裂隙明显高于中部, 形成“M”形裂隙区。与单层煤采动相比, 双重扰动下采空区中部覆岩裂隙再次发育并进一步被压实, 边界裂隙进一步扩张。

4.2 下组煤裂隙带演化规律

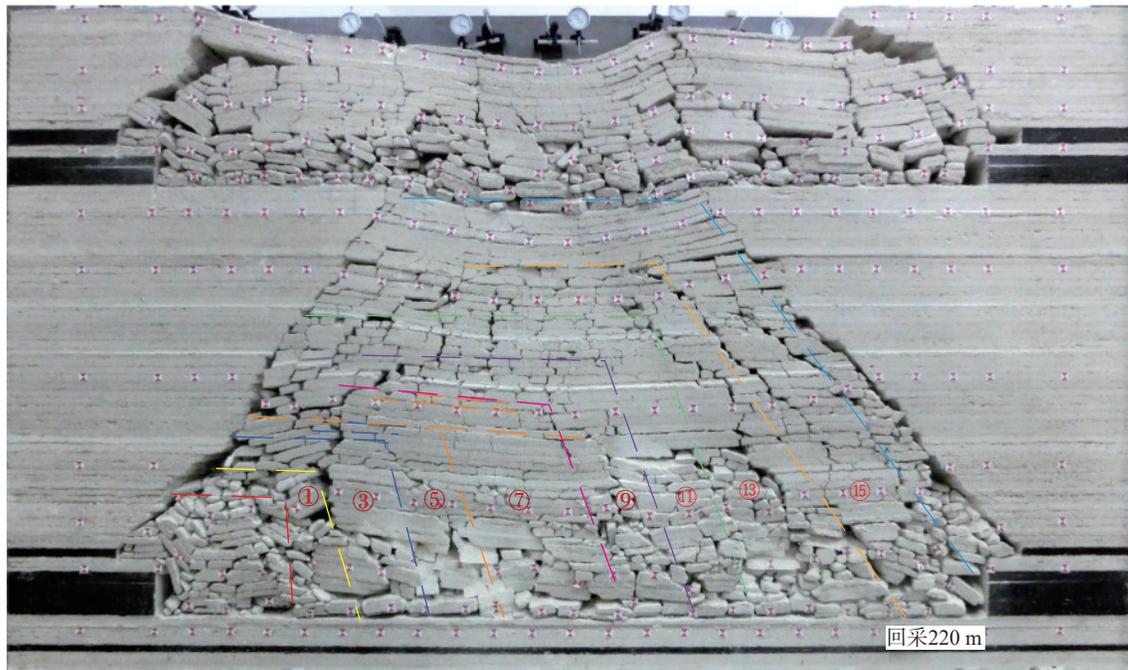
多层煤回采后裂隙分布范围及发育情况如图 11、图 12 所示。由图 11 可知: 5#煤层开采对上组煤及地表影响程度较小, 且采空区上方以离层裂隙为主。随着工作面的推进, 离层裂隙经历了产生、扩张、闭合、再产生、贯通与再闭合 6 个变化阶段。当工作面回采结束时, 边界煤柱两侧上行裂隙呈“阶梯状”分布, 最终覆岩裂隙发育最大高度为 33.42 m。由图 12 可知:



(a) 直接顶初次来压



(b) 第一次周期来压



①第一次周期来压 ③第三次周期来压 ⑤第五次周期来压 ⑦第七次周期来压
 ⑨第九次周期来压 ⑪第十一次周期来压 ⑬第十三次周期来压 ⑮第十五次周期来压
 (c) 周期来压覆岩垮落过程示意图

图 7 6#煤层覆岩垮落图

Fig. 7 Caving diagram of overburden of 6# coal seam

表 6 6#煤层回采来压步距

Table 6 Pressure step of 6# coal seam mining

来压次数	推进距离/m	来压步距/m	来压次数	推进距离/m	来压步距/m
初次来压	28	28	8	132	12
1	38	10	9	148	16
2	56	18	10	159	11
3	74	18	11	168	9
4	86	12	12	174	6
5	98	12	13	200	26
6	112	14	14	210	10
7	120	8	15	220	10

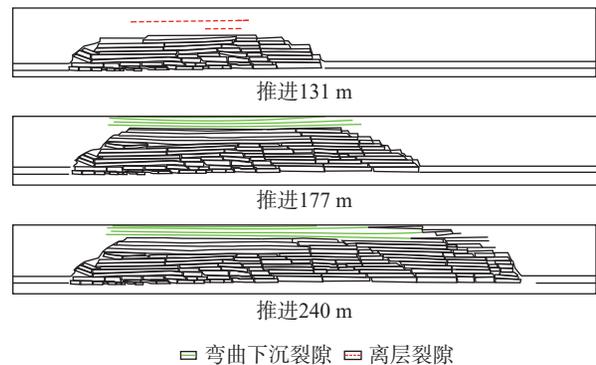


图 8 2#煤层回采裂隙发育图

Fig. 8 Development diagram of mining fractures in 2# coal seam

6#煤层回采中, 裂隙高度进一步上升直至与3#煤层采空区贯通, 上组煤与下组煤采空区形成复合采空区。回采结束时, 裂隙形态近似呈两个“等腰梯形”分布, 地表出现拉张裂缝和大范围的沉降, 地表最大沉降量

达 14.76 m。下组煤回采中裂隙密度及张开度明显大于上组煤, 因此覆岩裂隙密度发育和煤层累计开采厚度呈正相关关系。



(a) 正视图 (b) 俯视图

图 9 2#煤层推进 155 m 时地表裂隙图

Fig. 9 Surface fracture diagram of 2# coal seam at 155 m advance

4.3 导水裂隙带发育高度及对比分析

4.3.1 导水裂隙带发育高度经验公式计算

导水裂隙带发育高度预测是进行观测“三带”设计的依据,主要取决于地层结构、岩石力学性质和开采方法。2#煤、3#煤、5#煤和6#煤顶板岩层均为中等坚硬岩层。针对导水裂隙带发育高度的研究,国内外众多学者提出了相应的计算公式,通过查阅相关文献^[25]主要有:分层开采煤厚裂隙带高度最大值计算公式、综放开采裂隙带高度最大值计算公式和煤层群开采裂隙带高度最大值计算公式。相似材料模拟试验中一次采全高,故使用式(1)、式(2)计算。

综放开采下导水裂隙带发育高度经验公式:

$$H_f = \frac{100M}{0.19M + 7.74} \pm 13.26 \quad (1)$$

式中: H_f ——导水裂隙带高度/m;

M ——煤层开采厚度/m;

\pm ——允许的误差范围。

通过煤层群的相对层间距和回采层的相对位置与厚度来计算开采厚度 $M_{Z_{1-2}}$ 。煤层群开采导水裂隙带发育高度经验公式:

$$M_{Z_{1-2}} = M_2 + M_1 - \frac{h_{1-2}}{y_2} \quad (2)$$

式中: $M_{Z_{1-2}}$ ——综合开采厚度/m;

M_1 ——上层煤厚度/m;

M_2 ——下层煤厚度/m;

h_{1-2} ——上层煤与下层煤之间的法线距离/m;

y_2 ——下层煤的冒高和采高的比值。

根据实际地质条件,上组煤与下组煤层间距较大,在回采过程中彼此扰动程度较小,故可将其分别进行计算分析。2#煤层的累计回采厚度为 4.22 m, 5#煤层的累计回采厚度为 2.07 m, 6#煤层的累计回采厚度为 11.36 m, 5#煤层与 6#煤层之间的法线距离仅有 4.65 m, 属于近距离煤层群开采,按照煤层群开采计算方法将 5#与 6#煤层数据代入式(2)中得到综合开采厚度为 10.06 m。将各煤层数据代入式(1),得到综放开采下 2#煤层导水裂隙带发育高度为 36.14 ~ 62.66 m, 5#煤层导水裂隙带发育高度为 16.41 ~ 39.39 m, 6#煤层开采后联合 5#煤层采动引起的导水裂隙带发育高度

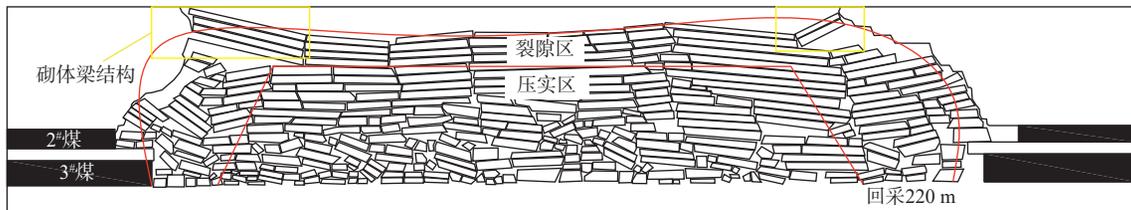


图 10 双重扰动覆岩裂隙分布

Fig. 10 Double disturbance overburden fracture distribution

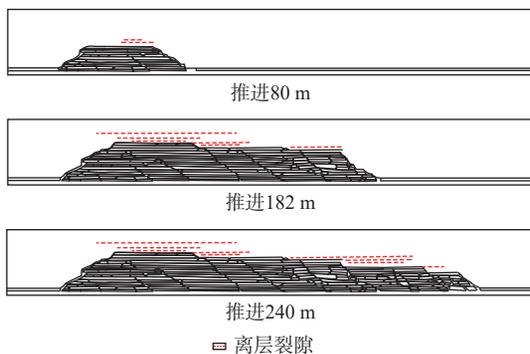


图 11 5#煤层回采时裂隙发育情况

Fig. 11 Fracture development during mining of 5# coal seam

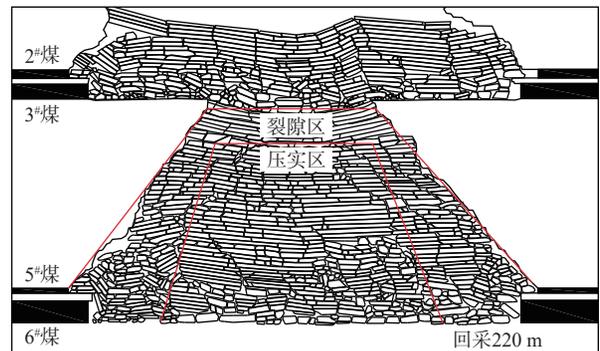


图 12 6#煤层回采覆岩裂隙分布图

Fig. 12 Fracture distribution of overburden in 6# coal seam mining

为 90.97 ~ 117.49 m。

4.3.2 导水裂隙带发育高度相似材料模拟试验

根据相似材料试验结果, 2#煤回采结束后, 裂隙发育高度已贯通至地表, 因此 2#煤和 3#煤导水裂隙带发育高度为 31.45 m。5#煤导水裂隙带发育高度为 33.42 m, 6#煤导水裂隙带发育高度为 93.12 m。依据试验过程绘制 2#煤、5#煤及 6#煤回采过程中导水裂隙带

发育高度与工作面推进距离关系图, 并对 5#煤和 6#煤层回采过程中导水裂隙带发育高度进行多项式非线性曲线拟合, 拟合公式见图 13。得到: 5#煤层推进距离与裂隙带发育高度拟合曲线相关系数为 0.987, 6#煤层推进距离与裂隙带发育高度拟合曲线相关系数为 0.996, 相关系数均较高, 拟合效果较好, 因此拟合曲线均可以用于该矿区导水带发育高度预测。

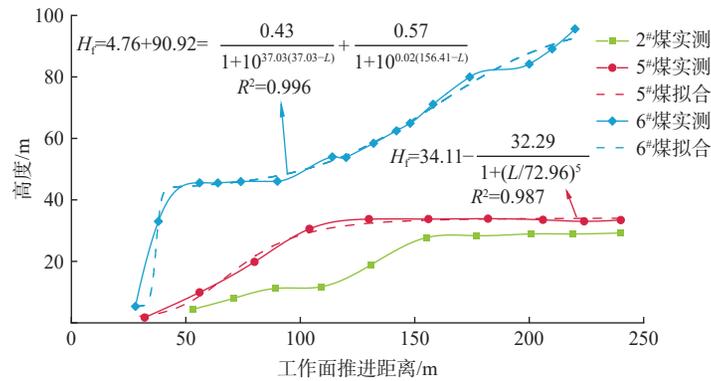


图 13 工作面推进长度与导水裂隙带发育高度曲线

Fig. 13 Advance length of working face and development height of water-conducting fracture zone

注: 图中 H_f 为导水裂隙带高度/m; L 为工作面推进距离/m。

由图 13 可知: 单一煤层开采时, 随着工作面的持续推进, 导水裂隙高度变化规律表现为平稳增长—缓慢变化; 多煤层开采时, 导水裂隙高度变化规律表现为快速增长—平稳增长。快速增长阶段是因为裂隙在通过复合垮落区, 当裂隙到达未垮落岩层后, 裂隙便平稳增长直到贯通至上组煤采空区。

4.3.3 导水裂隙带发育高度数值模拟

为进一步研究煤层开采过程中导水裂隙发育规律, 与经验公式计算结果和相似材料模拟试验结果相互验证, 采用 3DEC(3 dimensional distinct element code) 块体离散元程序模拟煤层工作面推进过程中覆岩运移及破断结构, 观测开采过程中上覆岩体裂隙分布情况。

依据石嘴山矿区实际地质条件建立数值模型(图 14), 根据岩体所处位置划分模型节理, 靠近煤层的岩体节理划分较密, 较远位置的岩体节理划分较疏。矿区初始应力以自重应力为主, 重力加速度为 9.8 m/s^2 , 方向竖直向下; 将模型四周和底面施加位移边界条件, 顶部地表为自由面。岩体力学参数见表 2, 并在模拟过程中根据实践结果进行适当调整。模型块体本构模型选取各向同性连续均匀介质, 摩尔库伦弹塑性模型, 节理本构模型选取剪切滑移模型, 允许块体产生大变形。

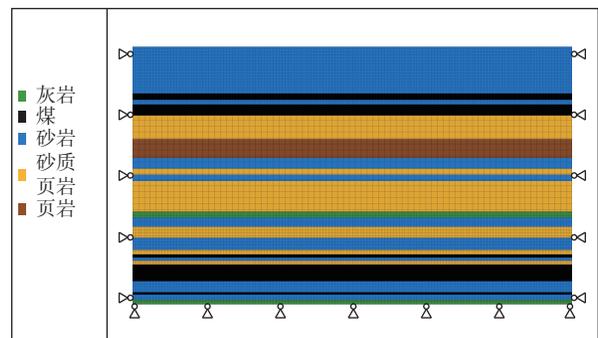


图 14 3DEC 数值模拟模型

Fig. 14 3DEC numerical simulation model

煤层开采后, 2#、5#和 6#煤层采空区上覆岩层裂隙演化分别如图 15—17 所示。由图可得, 煤层开采后会导致上覆岩层发育不同程度的水平裂隙, 且距离煤层越远, 裂隙范围越小, 产生的裂隙数量越少。图 15 和图 16 对比可知: 在工作面推进过程中, 2#煤层采空区上部覆岩裂隙较 5#煤层更为发育, 且裂隙发育高度和范围也较大; 当工作面回采结束时, 2#煤层与 5#煤层上覆岩层导水裂隙发育高度分别为 31.45 m 和 25.20 m, 主要是因为采高不同的影响。对比图 16 和图 17 可以看出: 6#煤层回采时上覆岩层裂隙与 5#煤层采空区直接贯通, 加剧了采空区上覆岩层裂隙的扩展与发育, 随着采动的影响, 裂隙不断经历着“张开—闭合—张

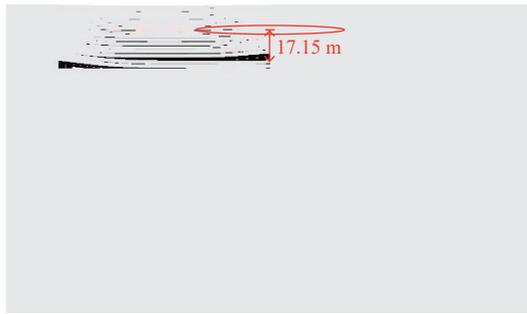


图 15 2#煤层开采覆岩导水裂隙数值模拟图

Fig. 15 Numerical simulation diagram of water-conducting fracture in overburden of 2# coal seam mining

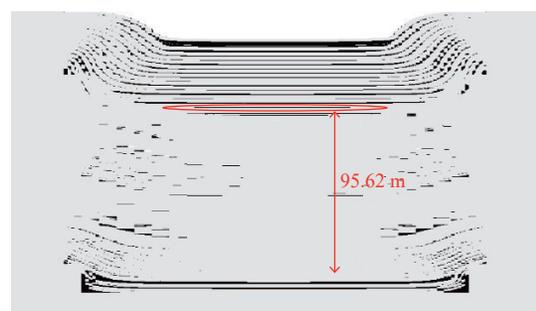
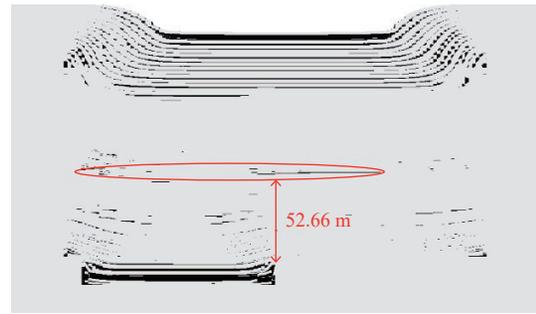


图 17 6#煤层开采覆岩导水裂隙数值模拟图

Fig. 17 Numerical simulation diagram of water-conducting fracture in overburden of 6# coal seam mining

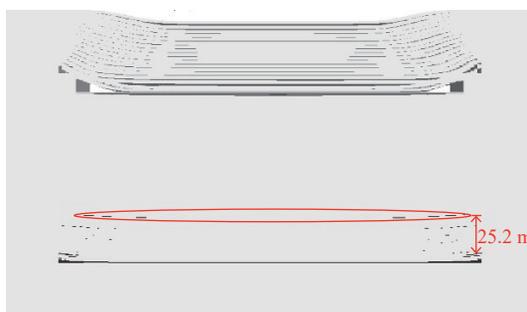
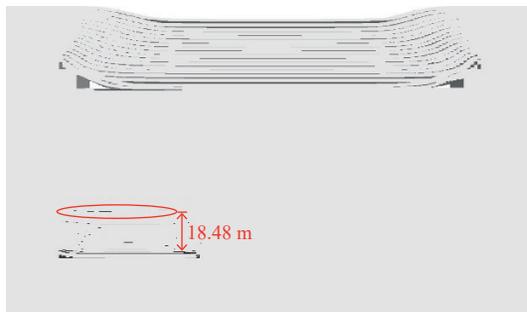


图 16 5#煤层开采覆岩导水裂隙数值模拟图

Fig. 16 Numerical simulation diagram of water-conducting fracture in overburden of 5# coal seam mining

开”的变化过程;当工作面回采结束后,导水裂隙已发育至上组煤层采空区,同时也导致上组煤层采空区覆岩采动裂隙进一步发展,最终6#煤层的导水裂隙发育

高度为95.62 m。由此可见,采高与累计采厚对覆岩裂隙发育起着关键性作用。

4.3.4 导水裂隙带发育高度对比分析

将相似材料模拟试验值、综放开采经验公式计算值、数值模拟试验值与实测数据进行对比分析(表7)。可以看出:2#煤层相似材料模拟试验值与数值模拟试验值均为31.45 m,导水裂隙带发育高度已贯通至地表,与实测数据一致;5#煤层相似材料模拟试验值与数值模拟试验值均在经验公式计算值范围内,且相似材料模拟试验值与实测值更为接近,误差仅为4.5%;6#煤层相似材料模拟试验值和数值模拟确定的导水裂隙带发育高度接近,均在经验公式计算范围内,且与实测数据误差较小。因此综放开采经验公式及相似材料模拟试验得到的拟合公式均可用于研究区导水裂隙带发育高度的预测。

5 结论

(1)浅埋煤层群开采时,上层煤周期来压步距大于下层煤,当上层煤采厚较小时,下层煤周期来压步距有明显增大现象。

(2)单层煤开采时,上覆岩层垮落结构以“铰接结构”和“台阶结构”出现;两层及多层煤回采时,“铰接结构”稳定性明显降低,垮落结构主要以“台阶”结构

表 7 不同方法导水裂隙带发育高度对比表

Table 7 Comparison of development height of water-conducting fracture zone in different methods

取值类型	2#煤导水裂隙带发育高度/m	5#煤导水裂隙带发育高度/m	误差/%	6#煤导水裂隙带发育高度/m	误差/%
实测值	31.45	35.00	0	104.00	0
相似材料模拟试验值	31.45	33.42	4.5	93.12	10.4
数值模拟值	31.45	25.20	28.0	95.62	8.0
经验公式值	36.14 ~ 62.66	16.41 ~ 39.39		90.97 ~ 117.49	

稳定在采空区上方。

(3)单煤层开采裂隙形态呈“梯形分布”，二次采动时呈现“M”形裂隙区；而本次多次采动时得到裂隙区呈现两个“等腰梯形”，且裂隙发育密度与煤层累计开采厚度呈正相关关系。

(4)以往大部分研究主要针对单煤层采动，得到：导水裂隙高度呈平稳增长—缓慢变化趋势；此次多煤层重复采动时，导水裂隙高度呈快速增长—平稳增长趋势。

(5)相似材料模拟试验值及数值模拟结果与实测值较为接近，且均符合煤矿防治水相关规定，试验结果可为类似矿区煤层群高效开采提供参考依据。

参考文献 (References) :

- [1] 杜君武, 黄庆享. 浅埋煤层群不同煤柱错距覆岩结构演化规律及煤柱稳定性分析 [J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(1): 12 - 20. [DU Junwu, HUANG Qingxiang. Overburden structure evolution and coal pillar stability analysis with different offset distance of coal Pillars in shallow multi-seam[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(1): 12 - 20. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 卢少帅, 高超, 霍军鹏, 等. 韩家湾煤矿浅埋近距离煤层群覆岩破坏规律研究 [J]. 煤炭工程, 2022, 54(1): 107 - 111. [LU Shaoshuai, GAO Chao, HUO Junpeng, et al. Failure law of overburden under shallow contiguous coal seams in Hanjiawan Coal Mine[J]. Coal Engineering, 2022, 54(1): 107 - 111. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 刘谋, 王俊杰, 吴广涛, 等. 矿井涌水量预测及其对沙漠植被的影响 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 65 - 75. [LIU Mou, WANG Junjie, WU Guangtao, et al. Prediction of mine water inflow and analyses of its influence on desert vegetation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(3): 65 - 75. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 陈建平, 李金柱, 王雪冬, 等. 改进脆弱性指数法在煤矿底板突水评价中的应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(3): 67 - 74. [CHEN Jianping, LI Jinzhu, WANG Xuedong, et al. Improved vulnerability index method for evaluating water inrush from the floor of coal seam[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(3): 67 - 74. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 田华, 杨嘉懿, 韩强强, 等. 煤炭开采对地下水的预测 [J]. 煤炭技术, 2021, 40(12): 110 - 114. [TIAN Hua, YANG Jiayi, HAN Qiangqiang, et al. Prediction of impact of coal mining on groundwater[J]. Coal Technology, 2021, 40(12): 110 - 114. (in Chinese with English abstract)]
- [6] DU Feng, WANG Wenqiang, LI Zhenhu. Study on the evolution law of fracture field in full-mechanized caving mining of double system and extrathick coal seam[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 8880526.
- [7] PRAKASH A, KUMAR A, VERMA A, et al. Trait of subsidence under high rate of coal extraction by longwall mining: some inferences[J]. Sādhanā, 2021, 46(4): 216.
- [8] 韦华鹏, 罗奇斌, 康卫东, 等. 基于不同开采方式的煤矿涌水量预测及其环境影响分析 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 21 - 31. [WEI Huapeng, LUO Qibin, KANG Weidong, et al. Prediction of coal mine water inflow by different mining methods and environment impact analyses[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 21 - 31. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 甘智慧, 尚慧, 杜荣军, 等. 基于 FLAC3D 和 DEM 数据的缓倾斜煤层开采沉陷分析 [J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(3): 158 - 166. [GAN Zhihui, SHANG Hui, DU Rongjun, et al. Mining subsidence analysis of gently inclined coal seams based on FLAC3D and DEM data[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(3): 158 - 166. (in Chinese with English abstract)]
- [10] JENA S K, LOKHANDE R D, PRADHAN M, et al. Development of a model to estimate strata behavior during bord and pillar extraction in underground coal mining[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12(7): 242.
- [11] ZHANG Dingyang, SUI Wanghua. Orthogonal array analysis of overburden failure due to mining of multiple

- coal seams[J]. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2019, 119(10): 801 – 810.
- [12] ZHOU Yang, YU Xueyi. Study of the evolution of water-conducting fracture zones in overlying rock of a fully mechanized caving face in gently inclined extra-thick coal seams[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(18): 9057.
- [13] 杨科, 刘文杰, 焦彪, 等. 深部厚硬顶板综放开采覆岩运移三维物理模拟试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(1): 85 – 93. [YANG Ke, LIU Wenjie, JIAO Biao, et al. Three-dimensional physical simulation of overburden migration in deep thick hard roof fully-mechanized caving mining[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(1): 85 – 93. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 康国彪, 卞涛, 蒲平武. 大采高工作面覆岩导水裂隙带发育高度及其影响因素研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(增刊 2): 19 – 24. [KANG Guobiao, BIAN Tao, PU Pingwu. Study on development height and influencing factors of overburden water conducting fracture zone in large mining height face[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(S2): 19 – 24. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 张纪星, 师修昌. 浅埋采空区大采高条件下覆岩破坏规律[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(5): 92 – 97. [ZHANG Jixing, SHI Xiuchang. Failure of overburden rock under large mining height in shallow buried goaf area[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(5): 92 – 97. (in Chinese with English abstract)]
- [16] QI Yun, WANG Wei, GE Jiaqi, et al. Development characteristics of the rock fracture field in strata overlying a mined coal seam group[J]. *PLoS One*, 2022, 17(10): e0268955.
- [17] ZHANG Dingyang, SUI Wanghua, LIU Jiawei. 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.
- [18] 来兴平, 张旭东, 单鹏飞, 等. 厚松散层下三软煤层开采覆岩导水裂隙带发育规律[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(9): 1739 – 1750. [LAI Xingping, ZHANG Xudong, SHAN Pengfei, et al. Study on development law of water-conducting fractures in overlying strata of three soft coal seam mining under thick loose layers[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(9): 1739 – 1750. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 李建华, 王帅, 贺艳军, 等. 煤层群叠加开采采空区覆岩裂隙演化规律研究[J]. *煤炭工程*, 2021, 53(12): 92 – 96. [LI Jianhua, WANG Shuai, HE Yanjun, et al. Fissure evolution of gob overlying strata under superimposed mining in coal seams group[J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(12): 92 – 96. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 潘瑞凯, 曹树刚, 李勇, 等. 浅埋近距离双厚煤层开采覆岩裂隙发育规律[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(8): 2261 – 2268. [PAN Ruikai, CAO Shugang, LI Yong, et al. Development of overburden fractures for shallow double thick seams mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(8): 2261 – 2268. (in Chinese with English abstract)]
- [21] SUI Wanghua, HANG Yuan, MA Luxing, et al. Interactions of overburden failure zones due to multiple-seam mining using longwall caving[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2015, 74(3): 1019 – 1035.
- [22] 张杰, 何义峰, 罗南洪, 等. 浅埋煤层群重复采动覆岩运移及裂隙演化规律研究[J]. *煤矿安全*, 2022, 53(3): 58 – 65. [ZHANG Jie, HE Yifeng, LUO Nanhong, et al. Research on overburden movement and fracture evolution of repeated mining in shallow coal seams group[J]. *Safety in Coal Mines*, 2022, 53(3): 58 – 65. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 曹晓毅, 刘小平, 田延哲. 煤层重复采动对水渠稳定性及渗漏性影响评价[J]. *煤田地质与勘探*, 2018, 46(4): 93 – 98. [CAO Xiaoyi, LIU Xiaoping, TIAN Yanzhe. Evaluation on influence of repeated coal mining on the stability and leakage of irrigation canal[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2018, 46(4): 93 – 98. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 尚慧. 宁夏矿山地质环境评价与动态监测分析[D]. 西安: 长安大学, 2013. [SHANG Hui. Assessment and Dynamic Monitoring of Mining Geo-environment in Ningxia[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 皮希宇. 煤层群采动卸压煤与覆岩裂隙演化特征及其对瓦斯抽采的影响[D]. 北京: 北京科技大学, 2021. [PI Xiyu. Evolution Characteristics of Cracks in Coal and Overlying Strata Caused by Mining of Coal Seams and Their Influence on Gas Drainage[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021. (in Chinese with English abstract)]