

深埋薄基岩覆岩水渗流规律

胡皓宇

(煤炭科学研究总院 开采研究分院,北京 100013)

摘 要:为合理利用深埋覆岩水资源,采用相似模拟、数值模拟等方法,研究深埋薄基岩厚冲积层开采过程中覆岩水运移规律。研究表明:覆岩完整性和连通性的变化会导致覆岩水渗流通道发生变化。煤层开挖过程中,薄基岩塑性区呈梯形分布,垂向裂隙分布多且分散,是第1含水层水快速下渗的主要通道。冲积层形成拱形离层裂隙区,连通性好且范围广,是第2含水层水下渗的主要路径。随着开采距离的增大,塑性区和离层裂隙区向上发育扩展,影响覆岩水运移,导致覆岩水压力快速下降,流速和流量增加。靠近工作面一侧的裂隙通道形成后,该区域渗流速度较快,渗透量大,易发生突水。研究结论为明确覆岩水在复杂岩层中的传播规律提供参考。

关键词:深埋薄基岩;厚冲积层;覆岩水;渗透通道;运移路径;离层裂隙区

中图分类号:TD742

文献标志码:A

文章编号:1008-0562(2025)04-0403-08

Overburden water seepage law of deep buried thin bedrock

HU Haoyu

(Coal Mining Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to make rational use of overburden water resources in deep buried, the law of overburden water movement during the mining of thick alluvium with deep buried thin bedrock was studied by means of similar simulation and numerical simulation. The results show that the change of overburden rock integrity and connectivity leads to the change of overburden water seepage channel; in the process of coal seam excavation, the plastic zone of thin bedrock is trapezoidal distribution, and the vertical fracture distribution is more and dispersed, which is the main channel for the rapid infiltration of the first aquifer water. The alluvial layer forms an arched separation fracture zone with good connectivity and wide, which is the main path of the second aquifer water infiltration. With the increase of mining distance, the development and expansion of plastic zone and bed separation fracture zone jointly affect the movement of overburden water, resulting in a rapid decrease of overburden water pressure and an increase of flow velocity and flow rate. After the formation of the fracture channel near the side of the working face, the seepage velocity is fast, and volume is large, which was prone to water inrush. The research conclusions provide a reference for studying the propagation law of overburden water in complex rock.

Keywords: buried deep thin bedrock; thick alluvial layer; overburden water; seepage path; migration path; bed separation fracture zone

0 引言

中国中东部等老矿区煤炭资源日渐枯竭,煤炭开采正向深部发展,平均采深呈逐步增长趋势。受深部水文地质环境影响,水害事故频发,是世界上煤矿水害最为严重的国家之一^[1-2]。深埋薄基

岩覆岩水渗流是工作面开采需考虑的重要因素。深埋薄基岩厚冲积层岩体性质发生改变,且地应力大,承压水层水压大^[3]。与浅埋煤层相比,覆岩的破断特征及“两带”的发育高度均发生较大变化^[4-6]。煤矿开采后覆岩形成的裂隙场是主要的突水通道^[7],采动裂隙场驱动围岩破坏,形成不同形

收稿日期:2024-10-14 修回日期:2024-12-11 接受日期:2025-12-25 责任编辑:黄琦

基金项目:国家自然科学基金项目(51934008)

作者简介:胡皓宇(1999-),男,山西阳泉人,博士研究生,主要从事矿山压力与岩层控制方面的研究。E-mail:397417977@qq.com

态的关键岩块,影响覆岩运动轨迹。覆岩破断运移会导致采场周围水资源所受压力发生变化,成为补充动力源。煤矿工作面开采后,远近场围岩系统变化是矿压控制的研究热点^[8-9]。

目前主要通过数值模拟、现场试验及经验公式推导等方法来研究地下水的渗透通道。王家臣教授课题组^[3-6,10-12]针对赵固二矿深埋薄基岩厚冲积层地质条件下的覆岩破断规律开展了系统研究,发现薄基岩形成的结构脆弱,易失稳,动载明显,厚冲积层胶结程度差,以随动载荷形式作用在基岩上,基岩破断后以散体形式大范围移动。李海祥等^[13]通过相似模型试验研究覆岩裂隙发育规律及地下水的渗流特征,结合 MODFLOW 软件验证渗流规律。高保彬等^[14]修正了传统经验公式,并对上覆岩层导水裂隙带发育高度进行了定量探测和定性分析。黄庆亨等^[15]、屈少波^[16]、王双明等^[17]通过实测地裂缝及物理相似模拟,揭示裂隙的发育规律,并推导出下行裂隙带的发育深度公式及上行裂隙带的发育高度公式。范立民等^[18-21]对煤层与含(隔)水层的空间关系、煤层覆岩结构类型、导水裂隙带的发育规律、隔水层的稳定性演化规律及煤层开采方法进行了系统总结。张玉军等^[22]总结了国内厚及特厚煤层综放和大采高综采条件下导水裂缝带高度的实测数据,分析不同矿井导水裂缝带的高度分布特征及主要影响因素,发现采高、基岩厚度及埋深的改变对裂隙发育高度影响较大。弓昊等^[23]研究了厚冲积层影响下覆岩裂隙发育高度、扩展轨迹及垮落拱形态演化特征,发现厚冲

积层中的水会与基岩上部潜水含水层中的水相互渗透,形成集中危险区。

上述研究多聚焦于覆岩的裂隙通道形成过程以及分区影响程度,对于大尺度煤层开挖条件下裂隙发育对覆岩水流动影响的研究较少。本文以河南省能源集团赵固二矿 14030 工作面为研究背景,采用 COMSOL 数值模拟软件,对煤层开挖过程中覆岩水的压力、速度变化及运移路径开展研究,并采用粒子追踪法模拟覆岩水的运移路径,揭示覆岩水在复杂岩层中的传播规律。

1 工程背景

赵固二矿 14030 工作面主采二₁煤层厚 3.9~6.5 m,工作面上覆薄基岩厚 25~50 m,裂隙发育程度较低。基岩上方冲积层厚 550~600 m,有 2 层充水含水层。其中,第 1 含水层是位于基岩层与风化冲积层交界处的新近系砂、砾石含水层,最大单位涌水量为 0.582 8 L/(s·m),是矿井的主要充水含水层;第 2 含水层位于二₁煤层上方 88.5~102.4 m 处的第四系砾石、细至中砂含水层。

赵固二矿 14030 工作面工程地质示意图 1。工作面推进 500 m 后,工作面上方电阻率发生变化。工作面前方 100 m 处,低电阻区迅速下降至基岩层位,逐渐接近煤层附近。推进距离超过 100 m 后,电阻率变化幅度较小,表明工作面开采会引起矿山压力,当压力波及含水区域时,覆岩水会发生局部运移。

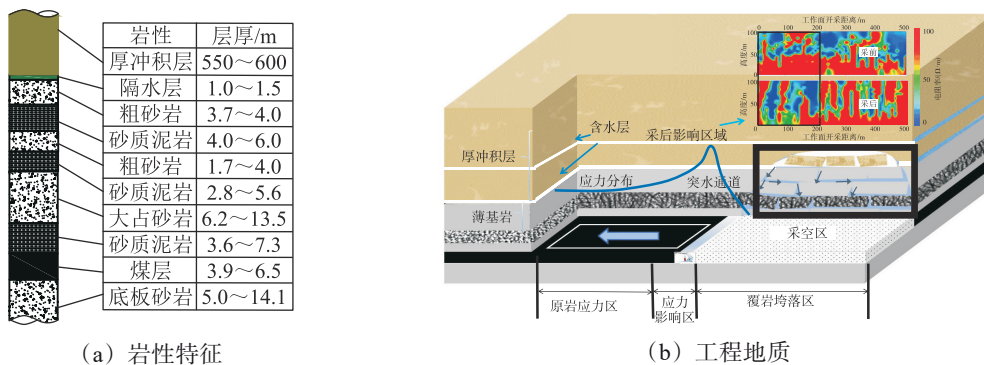


图1 赵固二矿 14030 工作面的工程地质示意

Fig.1 engineering geological indication of 14030 working face in ZhaoGu No.2 coal mine

2 深埋薄基岩覆岩垮落规律

2.1 相似模拟实验方案

借助中国矿业大学(北京)矿山压力与岩层控制实验室二维模拟实验平台开展模拟实验。平台尺寸为 2.2 m (长)×1.5 m (宽)×1.6 m (高)。

模型几何相似比为 1:200,实际铺设高度为 1.16 m,覆岩铺设高度为 1.1 m。由于实验台尺寸有限,在实验台上方使用槽钢加压,模拟未铺设覆岩重力载荷。在开挖模型中预设含水层,每次开挖结束后,根据裂隙发育高度,判断是否通过含水层。若裂隙发育超过含水层高度,在裂隙点处进行针

孔注水，观察水流运动。相似模拟材料配比及用量^[3]见表 1，模型实验台见图 2。

表 1 相似模拟材料配比及用量

Tab.1 ratio and dosage of similar simulated materials

岩层号	岩性	岩层实际厚度/m	模拟铺设厚度/cm	每层材料用量/kg				
				河砂	石灰	石膏	锯末	水
13	松散层	160.0	80.00	10.81	0.22	0.22	1.08	1.45
12	砾石	6.0	3.00	16.35	1.09	0.73		1.27
11	泥岩	12.0	6.00	10.76	0.67	0.67		0.85
10	砂质泥岩	4.0	2.00	10.76	0.81	0.54		0.85
9	粗砂岩	10.0	5.00	13.24	0.95	0.95		1.06
8	泥岩	4.0	2.00	10.76	0.67	0.67		0.85
7	砂质泥岩	2.0	1.00	5.38	0.40	0.27		0.42
6	泥岩	4.0	2.00	10.76	0.67	0.67		0.85
5	大占砂岩	8.0	4.00	10.60	0.76	0.76		0.85
4	砂质泥岩	5.0	2.50	13.45	1.01	0.67		1.06
3	泥岩	5.0	2.50	13.45	0.84	0.84		1.06
2	煤	6.5	3.25	17.71	0.98	0.98		1.38
1	砂岩	5.5	2.75	14.27	1.19	1.19		1.17

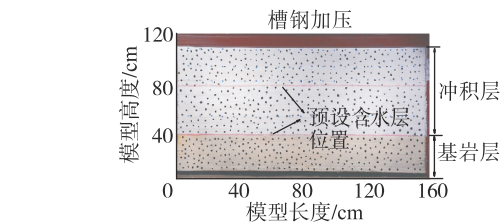


图 2 模型实验台

Fig.2 model test bench

2.2 覆岩垮落形态及水流路径分析

为减少边界对模拟结果的影响，在相似模拟实验中，左右两侧各保留长 25 cm 的保护煤柱，限制边界变形。在距左边界 25 cm 处设置开切眼，每次开采步距为 5 cm，由左向右推进。不同开采深度下覆岩垮落形态见图 3。

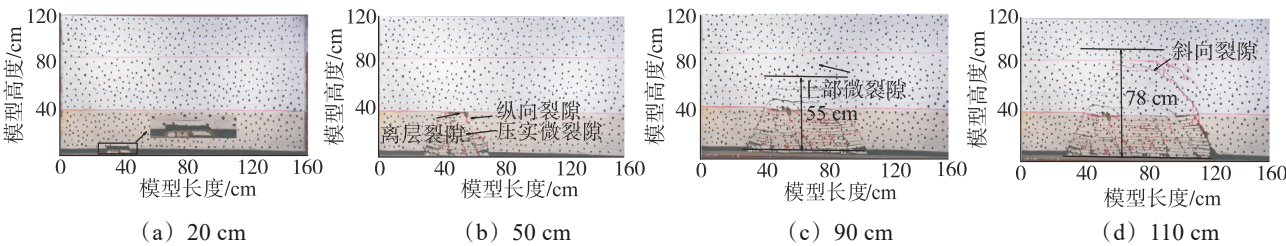


图 3 不同开采深度下覆岩垮落形态

Fig.3 caving form of overburden rock under different mining depths

由图 3 (a) 可知，煤层开采 20 cm 时，首次出现垮落现象，直接顶部分开始破碎下沉。由图 3 (b) 可知，煤层开采 50 cm 时，发生第 4 次垮落，薄基岩全部垮落，以全厚切落模式发生大范围破坏。模型整体呈梯形破坏形态，内部出现多个小梯形断裂体，且断裂体之间存在裂隙。基岩垮落过程中所产生的裂隙，按照方向、大小可分为垂向裂隙、压实微裂隙和离层裂隙。工作面开切眼一侧和停采线一侧各有 1 条偏向采空区内侧的垂向裂隙发育，垂向裂隙将顶部第 1 含水层和下方采空区贯通，覆岩水主要沿垂向裂隙流动。由于垮落岩块的膨胀压实作用，微裂隙失去导水能力，以储水为主。由图 3 (c) 可知，煤层开采 90 cm 时，

覆岩裂隙扩展至冲积层，受冲积层硬土土体特性的影响，出现拱形垮落带，拱上方形成新生微裂隙。这是由于开采过程中，冒落区上方覆岩在应力变化的影响下，会形成更大的塑性破坏区域，形成新微裂隙。由图 3 (d) 可知，煤层开采 110 cm 时，冒落拱继续向上发育，最大垮落高度为 78 cm，同时，裂隙贯通第 2 含水层。由于冲积层强度较小，与基岩层相比，冲积层多为斜向裂隙，裂隙发育方向的改变使液体动力黏度及覆岩的溶水性均发生较大变化。由相似模拟实验结果可知，深埋薄基岩厚冲积层的覆岩垮落形态与浅埋煤层形成的“上三带”形态有显著差别。覆岩裂隙模式

与水流动的关系见图 4。

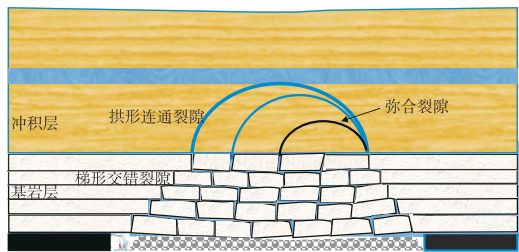


图 4 覆岩裂隙模式与水流动的关系

Fig.4 relation between fracture pattern and water flow in overburden rock

由图 4 可知,薄基岩梯形破断及冲积层内拱形垮落,导致覆岩水运移路径发生改变。基岩破断后呈碎块状排列,裂隙呈多方向、多角度交错,对水的渗流起到阻隔作用。冲积层内水流动速度较快,且土颗粒松散,易形成连通裂隙结构,在覆岩水流动作用下逐渐延展,与其他裂隙相连,形成较完整的渗流通道。

3 深埋覆岩水渗流规律

3.1 数值模型的建立

目前,相似模拟实验尚无法有效模拟水流动

动情况,因此采用 COMSOL 数值模拟软件进行深埋覆岩水渗流规律研究。基于赵固二矿 14030 工作面的地质条件,建立二维数值模型。

为消除边界对模型开挖的影响,设置数值模型长为 800 m,高为 300 m。力学边界条件如下:在模型底部施加固定约束,限制水平、垂直方向位移;两侧施加辊支承约束,控制法向位移;顶部施加 13.5 MPa 应力,模拟上边界至地表的覆岩载荷;按容重 27 kN/m³施加体载荷,模拟覆岩的重力载荷。流体边界条件如下:在煤层上方布置 2 层含水层,水压力为 2 MPa,采空区上方水压力为 0。参考文献[23]设置岩层物理力学参数,见表 2。通过固体力学场计算煤层开采形成的塑性区和裂隙区范围,并对不同区域赋予渗透率、孔隙度等参数,计算渗流场。采用软件内置的摩尔库伦准则计算煤岩塑性区范围,冒落拱边界线方程^[3]为

$$\frac{x^2}{l_i^2} + \frac{f^2 y^2}{l_i^2} = 1, \tag{1}$$

式中: l_i 为冒落拱的第 i 次跨距, m; f 为普氏系数,取 0.8; x 为煤层开挖距离, m; y 为冒落拱最大高度, m。

将式(1)嵌入软件,可得到煤层采动过程中冒落拱边界。

表 2 岩石物理力学参数

Tab.2 rock physical and mechanical parameters

岩性	厚/m	密度/(kg·m ⁻³)	杨氏模量/GPa	泊松比	岩性	厚/m	密度/(kg·m ⁻³)	杨氏模量/GPa	泊松比
冲积层	232.0	2 500	10.0	0.19	大占砂岩	8.0	2 530	24.8	0.18
砾石	6.0	2 500	26.0	0.18	砂质泥岩	5.0	2 410	13.9	0.19
泥岩	12.0	2 520	14.3	0.18	泥岩	5.5	2 520	14.3	0.18
砂质泥岩	4.0	2 410	13.9	0.19	二 ₁ 煤	6.5	1 350	2.1	0.19
大占砂岩	10.0	2 530	24.8	0.18	泥岩	50.0	2 520	14.3	0.18
泥岩	11.0	2 520	14.3	0.18	砂质泥岩	50.0	2 410	13.9	0.19

3.2 工作面压力变化

在工作面回风巷布置钻孔应力计,测得钻孔超前压力变化曲线,见图 5。由图 5 可知,钻孔超前压力呈先增大后减小的波动变化状态,超前压力峰值距离工作面 7~8 m,超前压力的影响范围约为工作面前方 150 m 内。

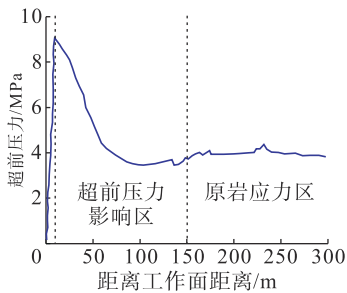


图 5 钻孔超前压力变化

Fig.5 borehole advance pressure change

不同开采深度下工作面应力变化曲线见图 6。由图 6 可知,随着开采深度的增加,应力峰值及应力影响范围逐渐增大。煤层开采至 200 m 时,数值模拟得到的峰值压力和原岩应力分别约为 10 MPa 和 5 MPa,应力集中系数为 2,超前压力与实测应力集中系数相差较小。

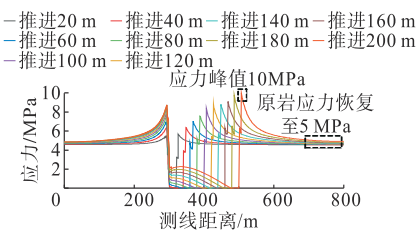


图 6 不同开采深度下工作面应力变化

Fig.6 stress change of working face under different mining depth

对比图 5 实测数据与图 6 数值模拟结果可知, 支承压压力分布特征非常相似, 表明数值模拟的参数计算结果精度较高, 验证了计算模型的可靠性。

3.3 渗流场及水流速度变化

覆岩裂隙-渗流场示意图 7。分析可知, 深埋薄基岩煤层开采过程中, 水流裂隙通道的形成与塑性区发育程度及冒落拱形态演化特征有关。

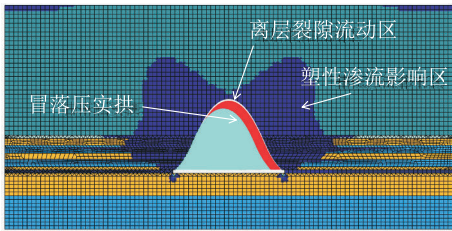


图 7 覆岩裂隙-渗流场示意

Fig.7 schematic of coupling field between fracture and seepage in overburden rock

采用等效多孔介质法^[13]得到覆岩裂隙稳定渗流场为

$$\begin{cases} \nabla \cdot (K_i \nabla P) = Q & 0 \leq x \leq L, 0 \leq y \leq H \\ \nabla \cdot P = 0 & x = 0 \text{ 或 } x = L \end{cases}, \quad (2)$$

式中: K_i ($i=1,2,3,4,5$) 为模型不同区域的渗透系

数, $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$; P 为压力, MPa ; Q 为渗流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; L 和 H 分别为数值模型 x 轴方向长度和 y 轴方向高度, m ; ∇ 为哈密顿算子。

岩层孔隙度取 0.1, 考虑到需将模型进行多孔介质等效处理, 因此, 对塑性区岩体及离层裂隙区赋予较大的渗透系数和孔隙度, 岩层渗透性为均质各向同性。流体力学参数见表 3。

表 3 流体力学参数

Tab.3 hydrodynamic parameters

类型	岩性	孔隙度	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)
原岩应力区	泥岩	0.10	1 000	8.640×10^{-5}
	砂岩	0.15	1 000	0.864
	冲积层	0.20	1 000	8.640
塑性区		0.30	1 000	43.200
离层裂隙区		0.30	1 000	192.000

赵固二矿 14030 工作面一个循环推进度为 80 cm, 平均一天可推进 5 m, 则开采 20 m 需 96 h。采动过程中, 含水层水压梯度的重分布会导致地下水流动速度发生变化。采动 96 h 后, 不同开采深度下水流速度变化见图 8。

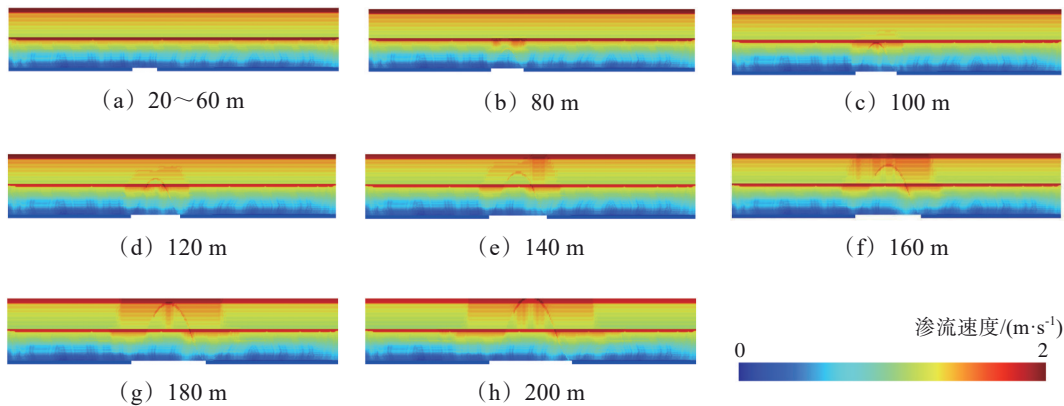


图 8 不同开采深度下水流速度变化

Fig.8 change of water flow velocity under different mining depth

由图 8 (a) 可知, 煤层开采至 20~60 m 时, 采动初期水流动速度较慢, 对工作面开采无影响。由图 8 (b) 可知, 煤层开采至 80 m 时, 塑性区的发育已影响到第 1 含水层。含水层中的覆岩水流动速度和方向开始发生变化, 出现局部扰动现象。由图 8 (c) 可知, 煤层开采至 100 m 时, 冒落拱的发育深度已高达 61 m, 并将工作面与含水层贯通, 裂隙通道内水流速度急剧增加。由图 8 (d) ~图 8 (f)

可知, 煤层开采至 120~160 m 时, 冒落拱裂隙区开始与第 1 含水层连通, 地下水流动速度和方向进一步发生变化。由图 8 (g) 可知, 煤层开采至 180 m 时, 塑性区发育影响范围波及第 2 含水层, 地下水流动速度加快, 且方向逐渐分散。由图 8 (h) 可知, 煤层开采至 200 m 时, 冒落拱裂隙区连通第 1 含水层和第 2 含水层, 两水层的水量叠加, 覆岩水流动速度进一步加快。

不同开采深度下工作面上方的水流速度见图9。不同开采深度下工作面的渗流量见图10。由图9、图10可知,煤层开采至20~80 m时,由于开采深度较浅,岩土受到的破坏较小,裂隙和孔隙通道相对封闭,阻碍地下水流动,上部基岩的渗流速度较慢,两含水层中地下水的流动速度基本为0。煤层开采深度达到100 m时,基岩发生破坏,地下水流动速度加快,且距离工作面越近,岩石破坏程度越大,渗透率越高,地下水的流动速度越快,

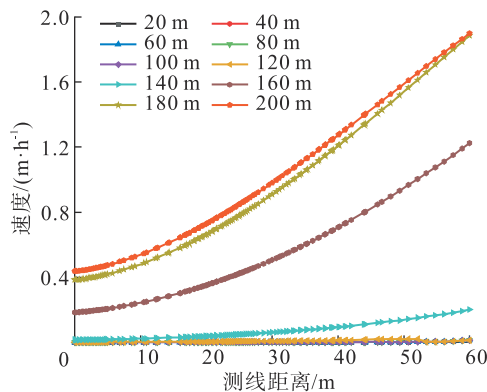


图9 不同开采深度下工作面上方的水流速度

Fig.9 water flow velocity above the working face under different mining depths

渗透量第1次显著增大。随着煤层继续开采,下层含水层的水流速度基本趋于稳定。煤层开采至160 m时,塑性区开始影响第2含水层,与煤层开采至140 m时相比,水流速度差别较大。随着煤层继续开采,第2含水层与工作面形成1个塑性渗流区与裂隙流动区相耦合的渗流通道。由于拱形裂隙通道的存在,地下水在通道内的流动速度迅速增加,渗流量达到峰值,所对应测线处的位置,即为裂隙区流动点位置。

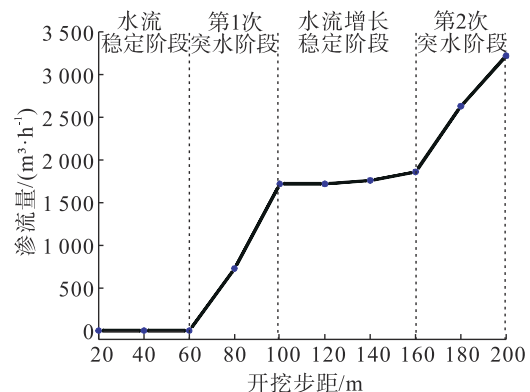


图10 不同开挖深度下工作面的渗流量

Fig.10 seepage flow of working face under different excavation depths

4 深埋覆岩水运移模拟

为进一步研究煤矿开采后覆岩水的运移规律,获取粒子运移轨迹,采用COMSOL软件求解稳定流场,在含水层中均匀布设粒子并进行反向示踪计算,通过Matlab 二值化处理后得到裂隙网格,见图11。

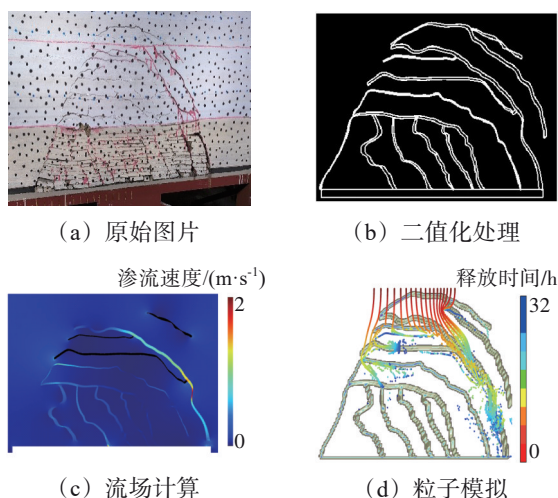


图11 裂隙网格的建立

Fig.11 crack grid establishment

水流运移路径见图12。不同时刻释放出来的粒子用不同颜色表示,其中,最早释放出来的是蓝色粒子,后释放出来的是黄色和红色粒子。由图12可知,上覆含水层中的地下水主要通过上方覆岩裂隙网络渗流到采空区。采空区两侧渗流量较小,这是由于采空区周边的完整岩体可有效阻止上覆含水层中大量地下水的横向流动以及向采空区渗透。覆岩左右两侧垂向裂隙渗透速度较快,易将地下水从上覆含水层引导到采空区,形成相对较大的渗流量。离层裂隙中存在地下水横向运移现象,渗流量虽小于垂向裂隙区域,但仍大于未扰动基岩处的渗流量。释放32 h时,第1次释放的粒子已通过最上层的拱形裂隙进入工作面,在渗流区与基岩交界处,裂隙区被水分填充,形成储水区域。由于前几次开采形成的冒落拱和离层裂隙会影响粒子的横向流动,粒子的运移速度较慢,大量粒子集中存在于该区域。

在工作面一侧布置测线,得到渗流速度分布情况,见图13。由图13可知,在覆岩裂隙中,覆岩水经采空区顶板渗流进入采空区。采空区不同位置处涌水量及渗流强度差异较大。受拱形裂隙

的影响,不同位置处渗流强度变化较大,当离层裂隙与工作面连通时,大量的覆岩水经该通道渗入采空区,渗透量较大。若顶板完全压实,则其渗透量较小。图中出现3个高速渗流区域,对应的

测线距离分别为88~110 m、137~138 m和195~196 m。靠近工作面一侧,水流速度最大,表明工作面一侧形成的裂隙通道处覆岩水渗流最快,且渗透量较大,最易发生突水。

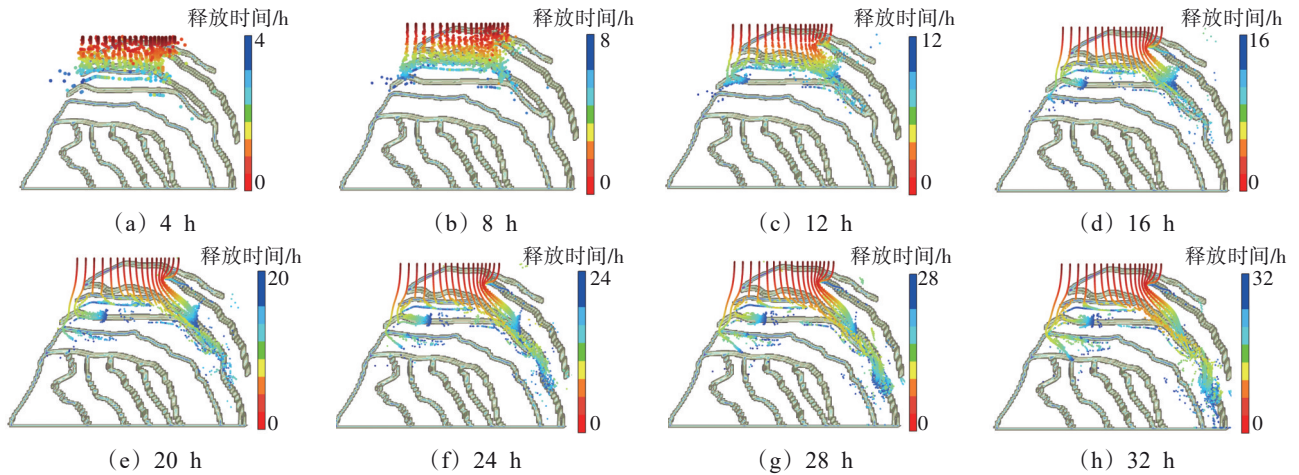


图12 水流运移路径

Fig.12 migration path of water flow

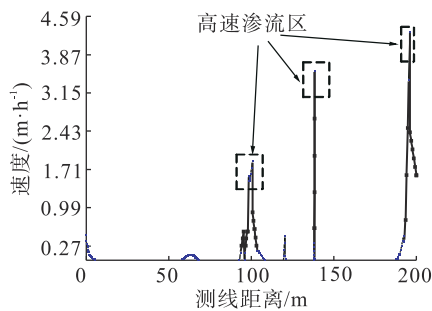


图13 工作面渗流速度

Fig.13 working face water seepage velocity

5 结论

(1) 深埋薄基岩覆岩裂隙-渗流场中,基岩“切落”垂向裂隙是第1含水层地下水快速下渗通道,冒落拱“斜向”裂隙是第2含水层地下水快速下渗的主要通道。离层裂隙通过微裂隙相互连接,水流可相互补充,储水能力较强。

(2) 煤层开采至120 m时,第1含水层与采空区彻底导通,含水层与采空区之间形成完整的渗透通道,第1含水层在短时间内形成稳定压力区。煤层开采至200 m时,第2含水层与工作面形成塑性渗流区与裂隙流动区相耦合的渗流通道。由于存在拱形裂隙通道,地下水流动速度迅速增大,渗流量达到峰值。

(3) 粒子模拟法可实现对地下水运移特征及路径的模拟。工作面一侧裂隙通道形成后,该区域渗流速度较快,渗透量大,易发生突水。采空

区中部虽然也存在水流增大的现象,但对煤层开采无影响。

参考文献(References):

- [1] 武强,郭小铭,边凯,等.开展水害致灾因素普查防范煤矿水害事故发生[J].中国煤炭,2023,49(1):3-15.
WU Qiang, GUO Xiaoming, BIAN Kai, et al. Carrying out general survey of the water disaster-causing factors to prevent the occurrence of coal mine water disasters[J]. China Coal, 2023, 49(1): 3-15.
- [2] 武强.我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展望[J].煤炭学报,2014,39(5):795-805.
WU Qiang. Progress, problems and prospects of prevention and control technology of mine water and reutilization in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 795-805.
- [3] 王家臣,王兆会,唐岳松,等.深埋弱胶结薄基岩厚煤层开采顶板动载冲击效应产生机制试验研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(12):2377-2391.
WANG Jiachen, WANG Zhaohui, TANG Yuesong, et al. Experimental study on mining-induced dynamic impact effect of main roofs in deeply buried thick coal seams with weakly consolidated thin bed rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(12): 2377-2391.
- [4] 王家臣,杨胜利,杨宝贵,等.深井超长工作面基本顶分区破断模型与支架阻力分布特征[J].煤炭学报,2019,44(1):54-63.
WANG Jiachen, YANG Shengli, YANG Baogui, et al. Roof sub-regional fracturing and support resistance distribution in deep longwall face with ultra-large length[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 54-63.

- [5] 杨胜利,吴山西,王兆会,等.深埋厚冲积层薄基岩煤层开采地表沉降特征与预测方法[J].煤炭学报,2023,48(2):523-537.
YANG Shengli, WU Shanxi, WANG Zhaohui, et al. Surface subsidence and its prediction method of mining deep-buried seam with thick alluvial layer and thin bedrock[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 523-537.
- [6] 李猛,王兆会,何吉清,等.深埋薄基岩大采高工作面支架阻力分布与急增阻效应分析[J].采矿与安全工程学报,2023,40(5):1111-1121.
LI Meng, WANG Zhaohui, HE Jiqing, et al. Analysis of support resistance distribution and rapid increase resistance effect in deep buried thin bedrock panel with large mining height[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(5): 1111-1121.
- [7] 张玉军,张志巍.煤层采动覆岩破坏规律与控制技术研究进展[J].煤炭科学技术,2020,48(11):85-97.
ZHANG Yujun, ZHANG Zhiwei. Research progress of mining overlying stratas failure law and control technology[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(11): 85-97.
- [8] 杨胜利,王家臣,李明.煤矿采场围岩智能控制技术路径与设想[J].矿业科学学报,2022,7(4):403-416.
YANG Shengli, WANG Jiachen, LI Ming. Technology path and assumptions of intelligent surrounding rock control at longwall working face[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2022, 7(4): 403-416.
- [9] 于斌,高瑞,孟祥斌,等.大空间远近场结构失稳矿压作用与控制技术[J].岩石力学与工程学报,2018,37(5):1134-1145.
YU Bin, GAO Rui, MENG Xiangbin, et al. Near-far strata structure instability and associate strata behaviors in large space and corresponding control technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1134-1145.
- [10] 王兆会,唐岳松,李猛,等.深埋薄基岩采场覆岩冒落拱与拱脚高耸岩梁复合承载结构形成机理与应用[J].煤炭学报,2023,48(2):563-575.
WANG Zhaohui, TANG Yuesong, LI Meng, et al. Development and application of overburden structure composed of caving arch and towering roof beam in deep longwall panel with thin bedrock[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 563-575.
- [11] WANG Z H, WU S X, LI J L, et al. Surface subsidence and its reclamation of a coal mine locating at the high groundwater table, China[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2023, 20(12): 13635-13654.
- [12] LI T, TANG Y S, LI L H, et al. Study of the catastrophic process of water-sand inrush in a deep buried stope with thin bedrock[J]. Water, 2023, 15(15): 2847.
- [13] 李海祥,曹志国,吴宝杨,等.煤矿覆岩裂隙地下水渗流特征的试验研究[J].煤炭科学技术,2023,51(6):168-176.
LI Haixiang, CAO Zhiguo, WU Baoyang, et al. Experimental study on characteristics of groundwater fracture in coal mine overlying rock[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(6): 168-176.
- [14] 高保彬,刘云鹏,潘家宇,等.水体下采煤中导水裂隙带高度的探测与分析[J].岩石力学与工程学报,2014,33(增刊1):3384-3390.
GAO Baobin, LIU Yunpeng, PAN Jiayu, et al. Detection and analysis of height of water flowing fractured zone in underwater mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (Suppl.1): 3384-3390.
- [15] 黄庆享,蔚保宁,张文忠.浅埋煤层黏土隔水层下行裂隙弥合研究[J].采矿与安全工程学报,2010,27(1):35-39.
HUANG Qingxiang, WEI Baoning, ZHANG Wenzhong. Study of downward crack closing of clay aquiclude in shallowly buried coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(1): 35-39.
- [16] 屈少波.双关键层综放面厚硬覆岩垮落及导水裂隙带演化分析[J].西安科技大学学报,2024,44(5):880-891.
QU Shaobo. Evolution analysis of thick and hard overburden strata and water-conducting fracture zone in double key layer fully mechanized caving face[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2024, 44(5): 880-891.
- [17] 王双明,黄庆享,范立民,等.生态脆弱矿区(隔)水层特征及保水开采分区研究[J].煤炭学报,2010,35(1):7-14.
WANG Shuangming, HUANG Qingxiang, FAN Limin, et al. Study on overburden aquiclude and water protection mining regionization in the ecological fragile mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 7-14.
- [18] 范立民.保水采煤面临的科学问题[J].煤炭学报,2019,44(3):667-674.
FAN Limin. Some scientific issues in water-preserved coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 667-674.
- [19] 范立民,马雄德,冀瑞君.西部生态脆弱矿区保水采煤研究与实践进展[J].煤炭学报,2015,40(8):1711-1717.
FAN Limin, MA Xiongde, JI Ruijun. Progress in engineering practice of water-preserved coal mining in western eco-environment frangible area[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1711-1717.
- [20] FAN L M, MA L Q, YU Y H, et al. Water-conserving mining influencing factors identification and weight determination in northwest China[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2019, 6(1): 95-101.
- [21] 范立民,马雄德,蒋泽泉,等.保水采煤研究30年回顾与展望[J].煤炭科学技术,2019,47(7):1-30.
FAN Limin, MA Xiongde, JIANG Zequan, et al. Review and thirty years prospect of research on water-preserved coal mining[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(7): 1-30.
- [22] 张玉军,申晨辉,张志巍,等.我国厚及特厚煤层高强度开采导水裂缝带发育高度区域分布规律[J].煤炭科学技术,2022,50(5):38-48.
ZHANG Yujun, SHEN Chenhui, ZHANG Zhiwei, et al. Regional distribution law of water-conducting fractured zone height in high-strength mining of thick and extra-thick coal seams in China[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(5): 38-48.
- [23] 弓昊,李铮,胡皓宇.基于赵固二矿煤岩损伤程度范围确定及渗透率演化规律研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2023,5(1):41-54.
GONG Hao, LI Zheng, HU Haoyu. Determination of the damage degree of coal rocks and study on the evolution law of permeability based on Zhaogu No. 2 Coal Mine[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2023, 5(1): 41-54.