

巨厚白垩系含水层采动渗透性演化及高位离层积水模型

乔伟^{1,2,3}, 孟祥胜¹, 杨眷⁴, 李连刚⁵, 梁启敬⁴, 刘梦楠¹, 陶志和¹, 韩昌民¹, 孔维滕⁶

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 2. 矿区地质与灾害超前探测与预警应急管理部重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 矿区深部零碳负碳技术教育部工程研究中心, 江苏 徐州 221116; 4. 陕西金源招贤矿业有限公司, 陕西 宝鸡 721000; 5. 安徽省皖北煤电集团有限责任公司, 安徽 淮北 235000; 6. 山东能源集团南美有限公司, 山东 青岛 266000)

摘 要: 离层水作为一种采动突涌水水源, 其突水具有瞬时量大、周期性和突水征兆不明显等特点, 危害极大, 防控难度极高。以黄陇煤田永陇矿区招贤煤矿为研究区, 针对白垩系含水层开展了长期群孔抽水试验, 采用基于同步连续线性估计算法 (SimSLE) 的水力层析反演技术, 分析了工作面采动过程中含水层渗透性演化规律, 最后通过地下水动力学和数值模拟的方法, 建立了考虑真空负压作用的采动覆岩渗透性演化-离层积水模型。结果表明: ① 采动覆岩巨厚白垩系含水层的渗透性整体呈现先增大后减小的趋势, 采空区范围内白垩系含水层渗透系数为 0.115~1.96 m/d, 渗透性增长了 23~392 倍, 采动影响范围内白垩系含水层渗透系数为 0.005~0.333 m/d, 渗透性增长了 1~67 倍, 在平面上, 随着工作面的持续推进, 工作面前方的渗透性是依次序逐步演化增大的; ② 以半无限含水层汇点概化模型为基础, 推导了真空负压状态下的离层积水理论模型, 通过 COMSOL 数值软件建立了经典稳态问题中的“圆岛模型”, 数值计算结果与理论模型偏差较小, 说明通过 COMSOL 数值软件建立的离层积水模型是合理的; ③ 区块渗透性逐一发生演化时, 离层积水速率仅有小幅度的提升, 直至所有区块渗透性均发生演化后, 离层空间的积水速率从 14.09 m³/h 提升到了 98.95 m³/h, 提升幅度达 84.86 m³/h, 同时绝对真空状态下相较于标准大气压进水速率高 2.5 m³/h。论文提出的含水层采动渗透性演化-离层积水模型可以为高位离层积水速率的预测和演化提供研究思路。

关键词: 离层水害; 水力层析; 渗透性演化; 地下水动力学; 离层积水模型

中图分类号: TD745 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)02-1041-14

Permeability evolution of the thick Cretaceous aquifer and the high-level bed separation water accumulation model during coal mining

QIAO Wei^{1,2,3}, MENG Xiangsheng¹, YANG Juan⁴, LI Liangang⁵, LIANG Qijing⁴, LIU Mengnan¹, TAO Zhihe¹, HAN Changmin¹, KONG Weiteng⁶

(1. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Key Laboratory of Advanced Detection and Early Warning for Geology and Hazards in Mining Areas of the Ministry of Emergency Management, Xuzhou 221116, China; 3. Zero Carbon Negative Carbon in Deep Mining Area Engineering Research Center of Ministry of Education, Xuzhou 221116, China; 4. Shaanxi Jinyuan Zhaoxian Mining Co., Ltd., Baoji 721000, China; 5. Anhui Wanbei Coal Power Group Co., Ltd., Huaibei 235000, China; 6. Shandong Energy Group South America Co., Ltd.,

收稿日期: 2024-12-04 策划编辑: 韩晋平 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.XH24.1513

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42472334); 江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目 (KYCX23_2762); 中国矿业大学研究生创新计划项目资助项目 (2023WLKXJ005)

作者简介: 乔伟 (1984—), 男, 山东蒙阴人, 教授, 博士生导师。E-mail: qiaowei@cumt.edu.cn

通讯作者: 孟祥胜 (1999—), 男, 河北衡水人, 博士研究生。E-mail: mengxiangsheng@cumt.edu.cn

引用格式: 乔伟, 孟祥胜, 杨眷, 等. 巨厚白垩系含水层采动渗透性演化及高位离层积水模型[J]. 煤炭学报, 2025, 50(2): 1041-1054.

QIAO Wei, MENG Xiangsheng, YANG Juan, et al. Permeability evolution of the thick Cretaceous aquifer and the high-level bed separation water accumulation model during coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(2): 1041-1054.



移动阅读

Qingdao 266000, China)

Abstract: Bed separation water, as a source of sudden water inrush induced by mining, is characterized by large instantaneous discharge, periodic occurrence, and subtle warning signs, making it highly hazardous and extremely challenging to prevent and control. Taking the Zhaoxian Coal Mine in the Yonglong Mining Area of the Huanglong Coalfield as the study area, a long-term multi-well pumping test was conducted on the Cretaceous aquifer. Hydraulic tomography inversion technology, based on the Simultaneous Sequential Linear Estimation (SimSLE) algorithm, was used to analyze the permeability evolution of the aquifer during mining. Finally, a mining-induced permeability evolution and bed separation water accumulation model, incorporating vacuum negative pressure effects, was established through groundwater dynamics and numerical simulation methods. The results indicate that: ①The permeability of the Cretaceous aquifer in the overlying strata exhibits a trend of initially increasing and then decreasing as mining progresses. Within the goaf, the permeability coefficient of the Cretaceous aquifer ranges from 0.115 to 1.96 m/d, indicating a permeability increase of 23 to 392 times. In the mining influence area, the permeability coefficient of the Cretaceous aquifer ranges from 0.005 to 0.333 m/d, showing a permeability increase of 1 to 67 times. In the horizontal plane, as the working face advances, the permeability in the front of the working face undergoes a sequential and progressive increase. ②Based on the conceptual model of the convergence point in a semi-infinite aquifer, a theoretical model of bed separation water accumulation under vacuum negative pressure was derived. A "circular island model" for classic steady-state conditions was developed using COMSOL numerical simulation software. The numerical results showed minimal deviation from the theoretical model, indicating that the bed separation water accumulation model established using COMSOL is reasonable and reliable. ③When the permeability of individual blocks evolves sequentially, the bed separation water accumulation rate increases only slightly. However, once all blocks evolve, the accumulation rate rises significantly from 14.09 m³/h to 98.95 m³/h, an increase of 84.86 m³/h. Additionally, the water inflow rate under absolute vacuum is 2.5 m³/h higher than under standard atmospheric pressure. The proposed aquifer permeability evolution-bed separation water accumulation model provides a research framework for predicting and analyzing the accumulation rate and evolution of high-level bed separation water.

Key words: bed separation water hazard; hydraulic tomography; permeability evolution; groundwater dynamics; bed separation water accumulation model

我国具有“富煤、贫油、少气”的能源赋存结构,煤炭是我国的主要能源,据预测到 2030 年煤炭仍占一次能源消费总量的 50% 左右,其在一次能源生产和消费中的主导地位在短期内不会变化^[1-4]。目前我国东部地区煤炭资源逐渐枯竭,煤炭生产战略向西部转移势在必行,其中主要开采的侏罗纪煤田资源储量丰富,地质条件复杂,如何将煤炭从地下安全采出是一项严峻的挑战^[5-6]。其中,矿井突涌水是制约煤炭安全采出的主要因素之一,酿成的水灾事故给国家和企业造成巨大经济损失,甚至是人员伤亡事故^[7-8]。

随着西部煤矿开采规模的进一步扩大,顶板离层突水问题日益突出。离层水作为一种采动突涌水水源,其突水具有瞬时量大、周期性和突水征兆不明显等特点,危害极大,防控难度极高,例如:黄陇煤田彬长矿区大佛寺煤矿 40110 工作面发生涌水量 200 m³/h 以上的突涌水达 10 次;永陇矿区崔木煤矿 21301 工作面回采期间发生 12 次压架突水事故,最大涌水量可达 1 100 m³/h^[9-10]。

针对离层水害的致灾机理和防控,国内外学者已

经作出了大量的研究,积累了丰富的成果和方法。笔者等^[11]从“水源”、“动力源”、“物源”和“涌水特征”4 个方面,提出了“离层静水压涌突水”、“离层动力突水”和“携泥砂型离层突水”3 个离层水害类型。舒宗运^[12]等利用尖点突变模型解释离层关键层破断的能量跃迁方式,提出“压裂”和“劈裂”2 种离层突水模式。李小琴^[13]在对海孜矿 745 工作面突水事故归纳总结得出覆岩离层水形成的 4 个基本条件,即离层周边存在补给水源、可积水离层-离层的发育位置应位于导水裂隙带之上、离层空间持续时间足够长、离层周围岩体的渗透能力较强。FAN^[14]等考虑采高、采距、采深、垮落角和岩层膨胀系数等因素,提出了一种新的离层识别方法,并根据离层“有支撑”和“无支撑”的状态,建立了 2 种类型的离层致灾力学模型。HE^[15]等将覆岩变形破碎区简化为三角形覆岩变形区,提出了逐级对比合并法来分析覆岩的组合与分离,并将 2 者相结合得到了可用于识别离层发育位置和分析覆岩破坏的三角计算模型。吕玉广^[16]认为疏干开采可改变含水层富水性条件,预置导流管可破坏离层空间

的封闭性,从而改变离层汇水的空间条件和水压条件,为离层水害治理提供了一种思路。

上述研究促进了离层水害致灾机理和防控方面的发展,然而,离层突水是地质、水文地质及开采条件相互作用的结果,难以通过物探或钻探的方式对工作面采前离层水进行直接探查,因此研究离层积水模型及其演化过程对离层水形成机制及水害防控具有重要意义。

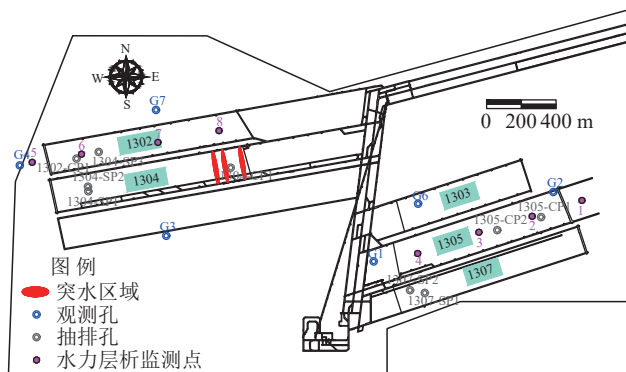
目前已有部分学者针对离层积水模型及演化开展了相关研究,许进鹏等^[17]建立了离层积水的水文地质模型及水量预测方法并进行了计算,研究了积水量与离层空间特别是与离层高度之间的关系,分析了积水量和离层高度对突水的预测预报作用;陈维池^[18]建立了采动覆岩离层发育弹性薄板力学模型,提出了垂向扩张和水平扩展发育阶段离层体积计算公式,判断了主积水离层位置并计算了离层闭合白垩系破断距,成果在崔木煤矿得到了验证。以上研究成果丰富了离层积水模型及其演化方面的内容,但是地下开采活动可以使岩层渗透性增大为原岩渗透性的几10倍甚至更大^[19-20],且离层形成瞬间具有“真空负压”的特点^[21],因此渗透性演化与离层真空负压对离层积水演化的影响不能忽视。

鉴于此,笔者以黄陇煤田永陇矿区招贤煤矿为研究区,采用现场群孔抽水试验和水力层析反演方法,分析了工作面采动过程中巨厚白垩系含水层渗透性

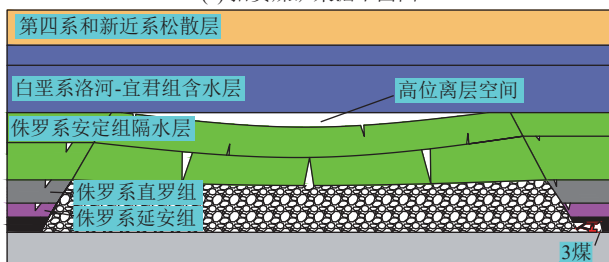
演化规律。通过地下水动力学相关理论,提出了考虑真空负压的离层积水理论模型;通过 COMSOL 数值软件,建立了考虑真空负压的采动覆岩渗透性演化-离层积水模型,分析了工作面回采过程中离层积水的演化过程。论文提出的含水层采动渗透性演化-离层积水模型可以为高位离层积水速率的预测和演化提供研究思路。

1 研究区概况

招贤煤矿位于陕西省宝鸡市麟游县西北部,属黄陇煤田永陇矿区。矿井主采煤层为侏罗系中统延安组3煤层,平均煤厚13 m,目前一采区已回采完毕,矿井生产期间仅1304工作面发生了3次离层突水事件(图1a)。研究区地层由老至新依次有:三叠系中统铜川组(T_2t),侏罗系下统富县组(J_1f)、中统延安组(J_2y)、直罗组(J_2z)、安定组(J_2a),白垩系下统宜君组(K_1y)、洛河组(K_1l),新近系(N)及第四系中-上更新统(Q_{2+3})、全新统(Q_4),如图1b所示。其中,洛河组厚度约58 m,钻孔单位涌水量为0.000 31~0.003 87 L/(s·m);宜君组厚度约172 m,钻孔单位涌水量为0.003 2~0.08 L/(s·m);安定组平均厚度约167 m,钻孔单位涌水量为0.000 18~0.009 5 L/(s·m);直罗组平均厚度约43 m,钻孔单位涌水量为0.000 21~0.009 893 L/(s·m);延安组平均厚度约57 m,钻孔单位涌水量为0.000 33~0.004 1 L/(s·m)。



(a) 招贤煤矿采掘平面图



(c) “突水离层带”示意图

地层单位	层厚/m 极值 平均值	柱状 1:500	地层特征
新生界	全新统 Q ₄ 5.152 63		河流一级阶地、河漫滩冲积层及沟谷坡积层堆积物。浅棕色亚粘土及淡黄色砂质粘土,中下部夹有较密集的棕红色古土壤层。浅棕红色亚粘土、粉砂质粘土。含钙质结核及石英小砾石、夹多层钙质结核层,底部有厚度不稳定的底砾岩沉积。
中生界	白垩系 洛河组(K_1l) 0.102 58		紫红色、棕红色巨厚层状细~粗粒长石砂岩,中夹1~2层中厚层状紫杂色粗砂岩及薄层棕色砂质泥岩,砂岩成分主要为石英、长石,次棱角~次圆状,分选好,钙质、泥质胶结,疏松,为河流相沉积。
	宜君组(K_1y) 106.262 171.81		杂色巨厚层状粗砂岩,夹粗砂岩透镜体。砾石成分主要为花岗岩、变质岩块,次为石英岩块,砾径一般5~15 cm,最大25 cm以上,分选差,次圆状,砂泥质充填,钙质、硅质基底或孔隙胶结,致密坚硬,厚度较为稳定,与下伏安定组平整合接触。
	安定组(J_2a) 121.301 167		棕红色、紫红色砂质泥岩,夹薄层紫灰色、灰绿色中~粗粒砂岩,底部为厚层含砾粗砂岩。砂岩成熟度低,以岩屑长石杂砂岩为主,次为长石英杂砂岩,次棱角状,分选差,钙泥质胶结,结构疏松,层理不清。泥岩含砂量高,沿裂隙分布有网纹钙膜。
	直罗组(J_2z) 10.79 43		下段为泥质中~粗粒砂岩夹砂质泥岩、粉细砂岩,颜色以灰绿色为主,底部为一层灰白色含砾中粗粒砂岩或细砾岩,特征显著,比较稳定。上段为砂质泥岩、泥质粉砂岩夹细~中粒砂岩,常见杂色泥岩夹层,偶见泥质灰岩薄层,顶部较细,颜色较深。
侏罗系	中统 延安组(J_2y) 13.120 57		灰~深灰色泥岩、砂质泥岩、粉细砂岩与灰白色中粗粒砂岩互层,中央炭质泥岩及煤层

(b) 招贤煤矿地层综合柱状图

图1 招贤煤矿地质概况及“突水离层带”模型

Fig.1 Geological overview of Zhaoxian coal mine and the "Inrush separation zone" model

根据以往研究表明^[22-23]：离层水的形成与演化发生在采动覆岩“突水离层带”中。研究区“突水离层带”的上位岩层为白垩系洛河-宜君组含水层，下位隔水层为侏罗系安定组厚层泥岩隔水层。当工作面开采跨距达到一定长度时，离层空间迅速拉开，该时刻离层空间处于真空状态，之后上覆含水层补给离层空间，使离层空间开始充水（图 1c）。

2 基于水力层析反演的含水层采动渗透性演化规律

水力层析反演是基于传统抽水或者注水试验的改进方法，运用含水层水位响应数据，识别含水层水文地质参数的空间分布特征。本节以招贤煤矿群孔抽水试验数据为基础，采用基于同步连续线性估计算

法 (SimSLE) 的水力层析反演技术^[24-26]，分析了煤层采动白垩系含水层渗透性演化规律。

2.1 群孔抽水试验

本次群孔抽水试验历经 30 d，抽水目标层位为白垩系洛河-宜君组含水层，共包含试验前白垩系含水层流场观测和正式抽水试验阶段。抽水试验阶段含有 2 个子阶段，子阶段 1：同时开启大巷西翼的 1304-SP1 孔、1304-SP3 孔及 1302-CP1 孔，3 个孔同时抽水，抽水速率分别为 63、15、22 m³/h，周边观测孔同步观测水位；子阶段 2：在以上 3 个抽水孔不停抽的情况下开启大巷东翼的 1307-SP2 孔，抽水速率为 75 m³/h，周边观测孔同步观测水位。各抽水孔及观测孔位置如图 1a 所示，群孔抽水试验结果见表 1，表中 T 为导水系数； S 为贮水系数； K 为渗透系数^[27-28]。

表 1 群孔抽水试验水文地质参数情况

Table 1 Hydrogeological parameters of the multi-well pumping test

钻孔	$T/(\text{m}^2/\text{h})$	S	$K/(\text{m}/\text{d})$
1304-SP1	2.019 965 433	0.166 587 767	0.241 184
1302-CP1	0.212 879 167	0.257 783 867	0.024 099 533
1304-SP3	0.121 54 006	0.014 71 774	0.015 3 524
G7	0.992 9 656	8.43E-05	0.170 2 227
G4	0.819 5 682	1.09E-05	0.104 0 997
G3	4.896 5 774	0.309 9 266	0.519 9
1304-X4	48.985 17	0.012 209	6.531 3 559
1307-SP1	0.898 0 512	0.002 4 267	0.103 1 255
1305-CP2	0.942 3 617	0.000 4 046	0.114 2 257
1305-CP4	1.015 0 739	0.003 9 149	0.120 6 028
G6	11.763 931	0.025 8 408	1.478 1 903
G2	21.267 712	0.011 1 591	2.750 8 762

2.2 水力层析反演数值模拟

2.2.1 水力层析反演原理

(1) 地下水流控制方程

地下水流控制方程用于模拟地下水流场变化，是进行水文地质参数反演的基础，地下水流控制方程为

$$\nabla \cdot [T(x)\nabla H] + Q(x_p, t) = S_s(x) \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

$$\begin{cases} H|_{\Gamma_1} = H_1 \\ [K(x)\nabla H] \cdot \mathbf{n}|_{\Gamma_2} = q \\ H|_{\Gamma_3} = H_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中， H 为水头，m； x 为二维空间坐标，m； $Q(x_p, t)$ 为 x_p 处 t 时刻的放水孔流量，m/s； $T(x)$ 为导水系数，m²/s； $K(x)$ 为渗透系数，m/s； $S(x)$ 为储水系数； H_1 为第 1 类

边界条件处的恒定水头，m； q 为第 2 类边界条件处的恒定水头，m/s； H_0 为含水层初始水头，m。

(2) 同步连续线性估计算法

同时连续线性估计算法 SimSLE 为一种基于地质统计学的参数估计方法，将导水系数和储水系数的自然对数及观测孔水头处理成空间随机变量：

$$\begin{cases} \ln T = f = \bar{f} + f' \\ \ln S = s = \bar{s} + s' \\ H = \bar{h} + h' \end{cases} \quad (3)$$

式中： \bar{f} 、 \bar{s} 、 \bar{h} 为均值； f' 、 s' 、 h' 为扰动值。

SimSLE 从带有权重的线性估计开始，利用实测的含水层水文地质参数和水头数据计算得到参数的初始估计值，其中权重是根据实测水文地质参数和水

头数据的统计属性(水头、均值、相关长度以及参数之间的互协方差和自协方差),采用协同克里格(cokriging)计算得到的,在估计过程中,参数的自协方差不断更新。下面将以导水系数 T 为例,初始估计结果为

$$\hat{f}^{(1)}(x_0) = \sum_{i=1}^{N_f} \lambda_{0i} f^*(x_i) + \sum_{k=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_h(k)} \sum_{l=1}^{N_l(k,j)} \mu_{0kl} \cdot [H^*(k, x_j, t_l) - H_e(k, x_j, t_l)] \quad (4)$$

式中: $\hat{f}^{(1)}(x_0)$ 为 x_0 处的导水系数扰动值的估计值; H^* 为实际水头测量值; H_e 为通过地下水流控制方程求得的水头模拟值; N_f 为参数测量点的总数; N_p 为放水试验的总次数; $N_h(k)$ 为第 k 次放水试验中水头测量点的总数; $N_l(k,j)$ 为第 k 次放水试验中第 j 个水头测量点随时间变化的水头测量数据的总数; λ_{0i} 为协同克里格权重,即第 i 个参数测量点的参数 f^* 对 x_0 处的参数估计值的权重; μ_{0kl} 为实际水头测量值 $H^*(k, x_j, t_l)$ 对参数估计值的权重。

以上导水系数 T 的初始估计结果通过变换代入地下水流控制方程(式(1))进行下一步迭代计算,又因为水头和含水层参数直接为非线性关系,而协同克里格方法为线性估计算法,故需要经历多次迭代直至满足非线性关系,将每一次参数估计值代入地下水流控制方程计算不同时刻的水头模拟值,并计算模拟值

与实测值的误差,若误差没有达到指定精度,就会重复迭代进行计算,其中迭代计算公式为

$$\hat{f}^{(r+1)}(x_0) = \hat{f}^{(r)}(x_0) + \sum_{k=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_h(k)} \sum_{l=1}^{N_l(k,j)} \omega_{0kl}^{(r)} [H^*(k, x_j, t_l) - H^{(r)}(k, x_j, t_l)] \quad (5)$$

式中: $\omega_{0kl}^{(r)}$ 为第 r 次迭代时,第 k 次抽水试验中第 j 个观测点 x_j 在 t_l 时刻实际水头测量值和模拟值的差值对 x_0 处的参数估计值的权重。

与传统抽水试验求得的水文地质参数相比,水力层析方法操作简单,适用性广,获取的参数详细具体,可准确刻画含水层的非均质性,为煤层采动白垩系含水层渗透性演化提供了一种新方法,其中的SimSLE算法由亚利桑那大学Yeh教授课题组开发的软件VSAFT2实现,下载链接为<http://tian.hwr.arizona.edu/downloads>。

2.2.2 水力层析反演数值模型

根据各个工作面回采情况、群孔抽水试验时间以及各个抽排孔开抽和停抽时间的综合考虑,将本次反演的过程分为7个阶段,其中重点考虑了工作面回采开始与结束的关键节点以及不同抽排孔的开抽与停抽的时间节点,如图2所示,各阶段对应工作面回采位置见表2。

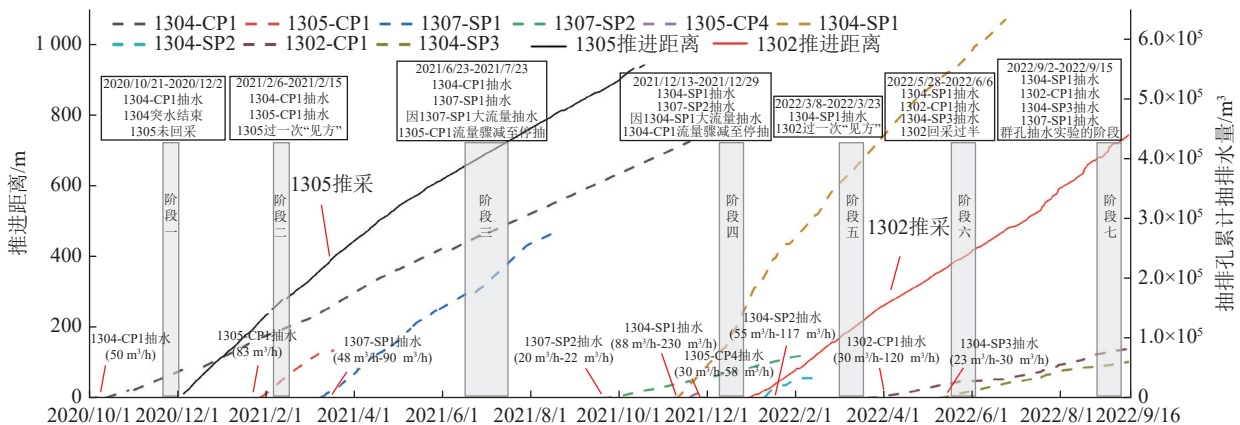


图2 白垩系含水层水力层析阶段划分示意图

Fig.2 Schematic of hydraulic tomography inversion stage division in the Cretaceous aquifer

本次概化数值模型为 $4\,300\text{ m} \times 2\,100\text{ m}$ 的二维非均质饱和含水层,在模型求解域内进行单元网格划分,网格为正方形,将含水层模型划分为 43×21 个单元格,每个单元格为 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$,共903个计算单元以及968个节点,如图3所示。为了分析工作面回采过程中含水层渗透性演化规律,在模型中布置了8个测点,测点位置为:1305工作面开切眼至停采线方向均匀布置4个测点,测点名称为:测点1、测点2、测点3和测点4;1302工作面开切眼至停采线方向均匀布置4个

测点,测点名称为:测点5、测点6、测点7和测点8,如图3所示,初始渗透系数设置为 0.005 m/d 。

2.3 水力层析反演结果和分析

水力层析反演结果如图4所示,研究区采动区域内含水层的渗透系数显著高于周边天然区域。根据表3,渗透系数平面上的分布特征表现为:采空区范围内含水层渗透系数为 $0.115 \sim 1.96\text{ m/d}$,相较于天然状态下含水层的渗透系数,采动后的渗透系数增长了23~392倍;采动影响的范围为沿着采空区向外扩展

表 2 各阶段对应工作面回采位置情况

Table 2 Location of working faces corresponding to each hydraulic tomography inversion stage

阶段	工作面回采位置
阶段一	1305工作面回采前
阶段二	1305工作面过“一次见方”位置
阶段三	1305工作面推进至670~740 m
阶段四	1305工作面回采结束以及1302工作面回采前
阶段五	1302工作面过“一次见方”位置
阶段六	1302工作面推进至400~425 m
阶段七	1302工作面推进至650~680 m

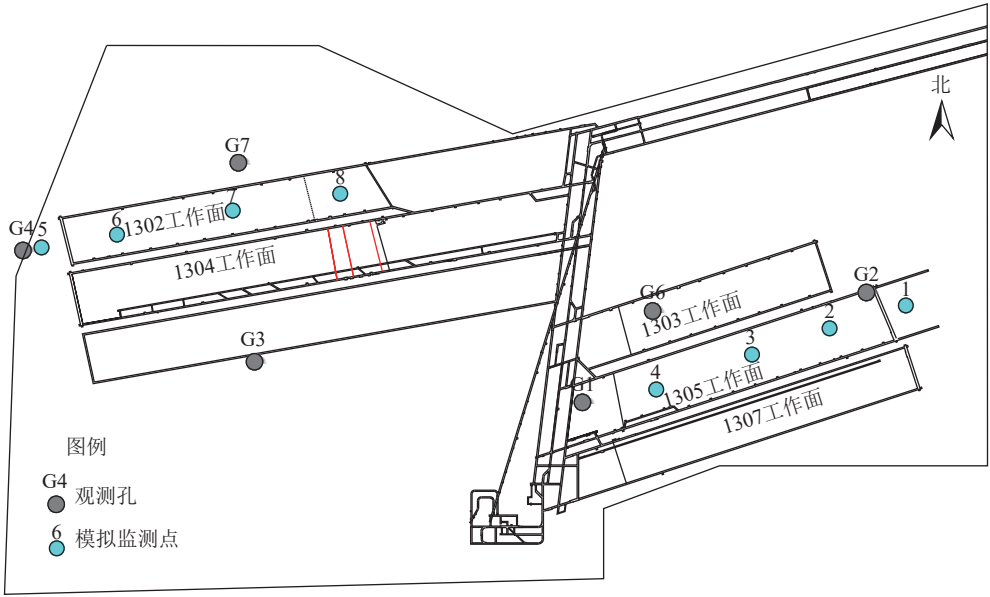


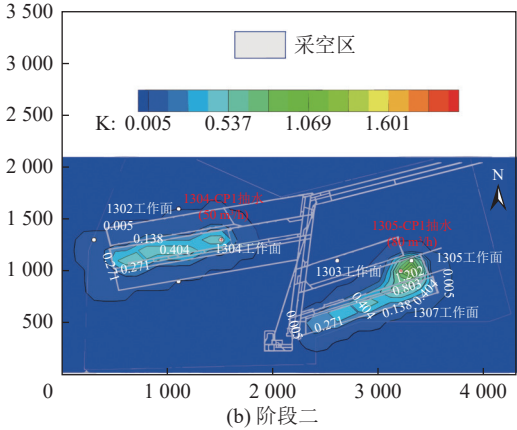
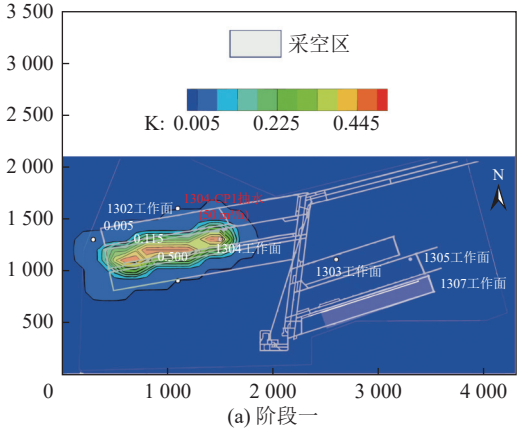
图 3 水力层析反演模型

Fig.3 The inversion model of hydraulic tomography

的区域,采动影响范围内含水层渗透系数为 0.005~0.333 m/d,增长了 1~67 倍;天然区域因远离工作面,未受工作面采动影响,以天然状态下的渗透系数均匀分布。

为了进一步分析白垩系含水层采动渗透性演化规律,分阶段提取各测点渗透系数和渗透系数比值

(当前阶段渗透系数与初始渗透系数的比值),如图 5、图 6 所示。由图 5 可知,测点 1 的渗透系数和渗透系数比值在阶段 2~阶段 3 达到峰值。由图 6 可知,测点 5 的渗透系数和渗透系数比值在阶段 4~阶段 5 达到了峰值。因为 1305 工作面的测点 2、3、4 以及 1302 工作面的测点 6、7、8 均沿着工作面走向依次布



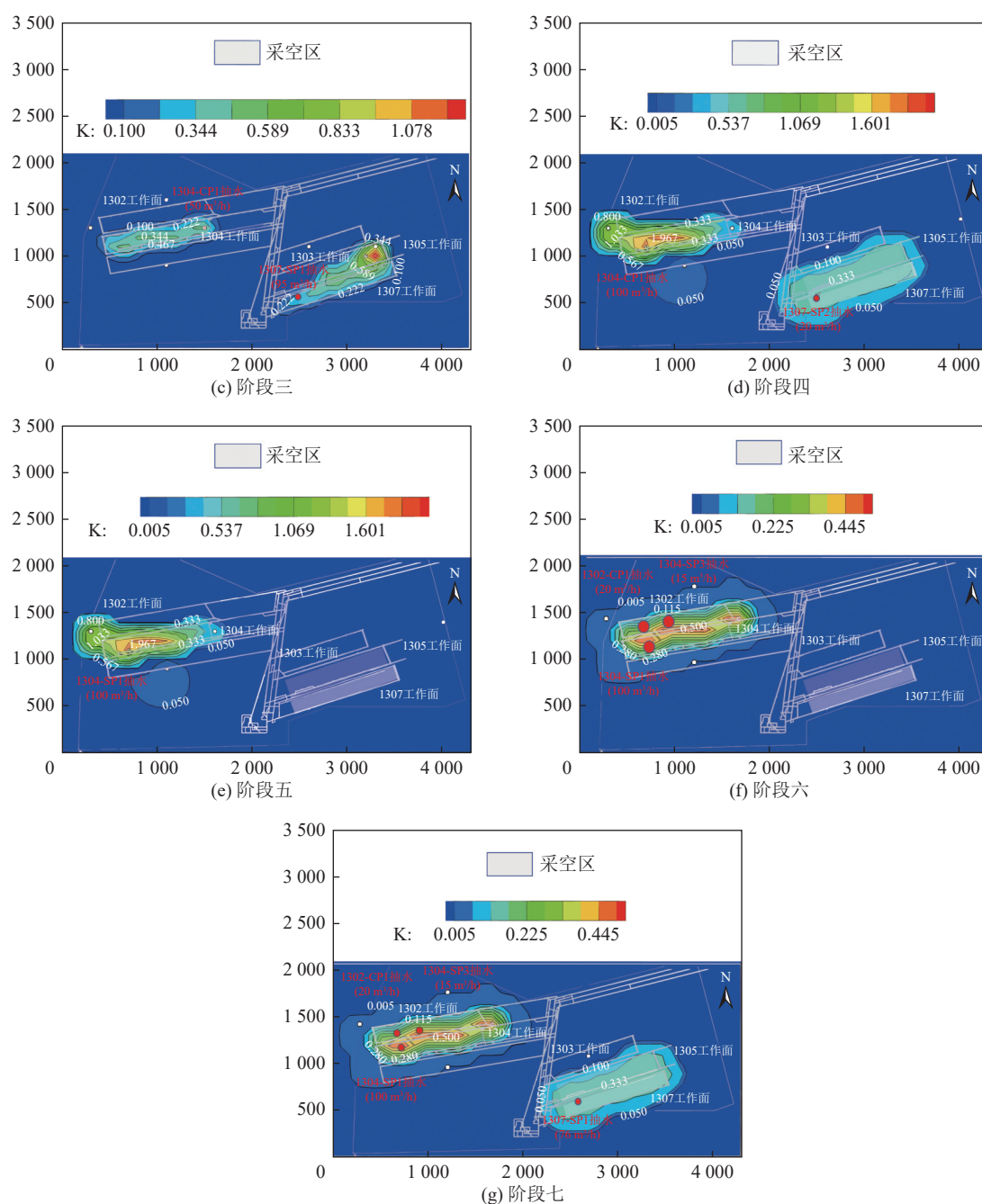


图4 白垩系含水层水力层析分阶段反演结果

Fig.4 Results of hydraulic tomography inversion in the Cretaceous aquifer

置的,故整体来看,2个工作面后续3个测点渗透系数达到峰值的时间或者快速上升时间是按位置先后依次出现的。可见随着工作面的持续回采,工作面前方的渗透性是逐步增大的。这是由于随着工作面的回采,工作面前方岩体应力重新分布,顶板覆岩产生变形、位移、破断,形成裂隙,从而导致工作面前方含水层的渗透性依次增大^[29-30]。

3 考虑真空负压的离层积水模型

在离层水害孕育阶段,白垩系含水层在离层真空

负压抽吸作用下,其水源迅速向离层空腔汇集,逐步形成离层水体,离层水体是导致离层突水的根本原因,因此研究真空负压作用下的离层积水模型对离层水害的形成机制及防控具有重要意义,并且为后文采动覆岩渗透性演化-离层积水模型的建立提供基础。本节将通过地下水动力学和数值模拟方法对真空负压作用下的离层积水模型进行介绍。

3.1 基于地下水动力学的离层积水理论模型

考虑到白垩系洛河-宜君组含水层厚度较大,可将其顶板对井流的影响忽略不计。白垩系洛河-宜君

表 3 各个阶段白垩系含水层渗透性反演结果统计

Table 3 Statistical results of permeability inversion in the Cretaceous aquifer for each stage

阶段	时间	区域范围	初始渗透系数 $K_0/(m/d)$	当前渗透系数 $K/(m/d)$	渗透系数比值 K/K_0
一	2020-11-21—2020-12-02	1304采空区内		0.280~0.500	56~100
		采动影响范围内		0.005~0.280	1~56
		1307采空区内		0.271~0.671	54~134
二	2021-02-06—2021-02-15	1305开切眼至284.8 m采空区内		0.404~1.96	81~392
		采动影响范围内		0.005~0.271	1~54
		1304采空区内		0.222~0.467	44~93
三	2021-06-23—2021-07-23	1307采空区内		0.222~0.589	44~118
		1305开切眼至741.4 m采空区内		0.222~1.26	44~252
		采动影响范围内		0.005~0.222	1~44
四	2021-12-13—2021-12-29	1304采空区内	0.005	0.567~1.96	113~392
		1307、1305采空区内		0.22~0.59	44~118
		采动影响范围内		0.005~0.333	1~67
五	2022-03-08—2022-03-23	1304采空区内		0.567~1.96	113~392
		采动影响范围内		0.005~0.333	1~67
六	2022-05-28—2022-06-06	1304采空区内		0.115~0.5	23~100
		采动影响范围内		0.005~0.115	1~23
		1304、1302采空区内		0.280~0.500	56~100
七	2022-09-02—2022-09-15	1307、1305采空区内		0.280~0.330	56~67
		采动影响范围内		0.005~0.280	1~56

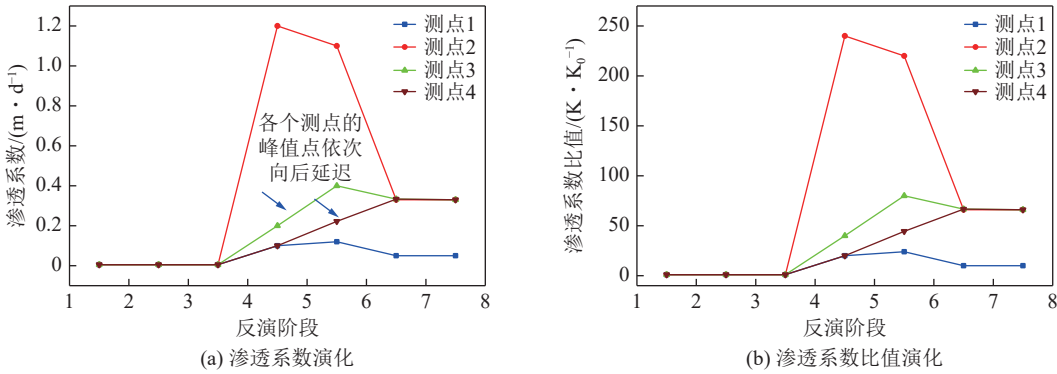


图 5 1305 工作面测点 1~4 渗透系数演化

Fig.5 Evolution of permeability coefficients at measurement points 1~4 in the working face 1305

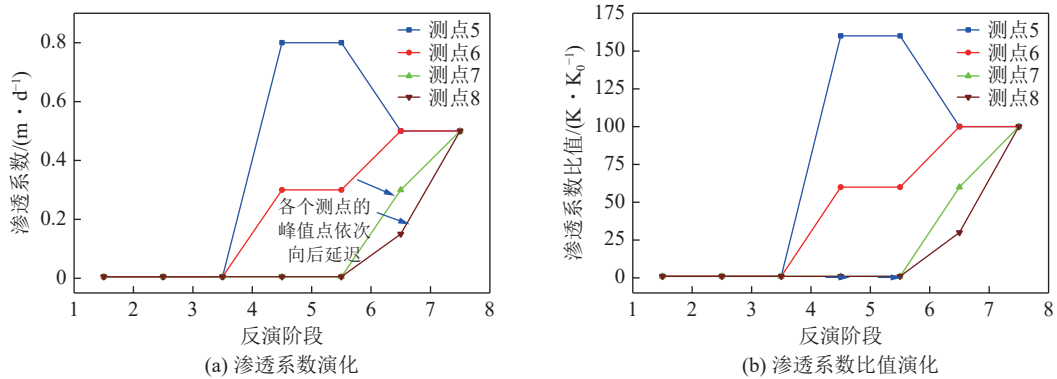


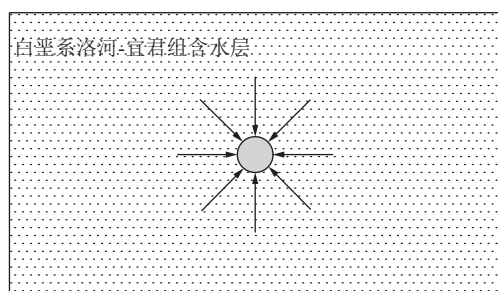
图 6 1302 工作面测点 5~8 渗透系数演化

Fig.6 Evolution of permeability coefficients at measurement points 5~8 in the working face 1302

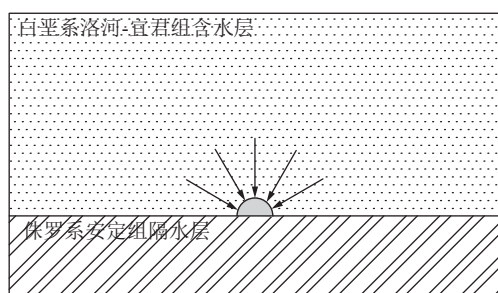
组含水层在侧向上是无限分布的,为半无限含水层(图1c)。离层空间与巨厚白垩系洛河-宜君组含水层比较,可以近似为直径无限小的球形汇点,渗流沿半径方向流入球形汇点,则流线为径向直线,等水头面为半个同心球面,这种不完整井流可以当作空间汇点来求解,故离层积水过程可概化为半无限含水层空间汇点模型(图7)。假设与空间汇点(离层空间)距离为 ρ 的任意点 A 的降深为 s ,半球形过水断面面积 A 为 $2\pi\rho^2$ 。根据Darcy定律,采用符合Dupuit假设的无导、隔水边界模型计算^[31],则流向离层汇点的流量 Q 为

$$Q = vA = KJA = -K \frac{ds}{d\rho} \cdot 2\pi\rho^2 \quad (6)$$

式中, Q 为流入离层汇点的流量, m^3/d ; v 为渗流速度, m/d ; A 为半球形过水断面面积, m^2 ; K 为渗透系数, m/d ; J 为水力坡度; s 为含水层水位降深, m ; ρ 为距离空间汇点的距离, m 。



(a) 无限边界空间汇点模型



(b) 半无限边界空间汇点模型

图7 离层积水模型

Fig.7 Model of bed separation water accumulation

分离变量后,在 ρ 和影响半径 R 的区间内积分式(6),可得:

$$s = \frac{Q}{2\pi K} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{R} \right) \quad (7)$$

通常, $R \gg \rho$, $1/R$ 很小,可忽略不计,所以可得:

$$s = \frac{Q}{2\pi K \rho} \quad (8)$$

所以,流向离层汇点的流量 Q 为

$$Q = 2\pi K \rho s \quad (9)$$

由于离层空间是由原本闭合的封闭空间瞬间拉开形成的,上覆含水层中的水不能立刻充满离层空间,故该时刻离层空间属于真空状态。可以将该过程近似理解为:离层空间瞬间拉开,在其内部施加了一个负压,增加了离层空间与上覆含水层的水头差。为进一步探讨真空作用对地下水渗流的影响,依据伯努利方程,假设在点 A 处真空度为 P_k ,得到该位置处真空状态下的水头为

$$H = z + \frac{P_k}{\gamma_w} \quad (10)$$

式中: H 为该位置处测压管水头, m ; z 为该位置的位置水头; P_k 为真空度, kPa 。

根据式(10),当离层形成瞬间,其空间内部处于真空状态, P_k 值增大,含水层底部水头 H 增加,从而导致含水层渗流速度增加。这一过程可以转换为含水层水头值不变,降低空间汇点的水头值,从而达到增加渗流速度的目的。在空间汇点中,不同真空度 P_k 对应的水头下降量 Δh 不同,则负压作用下的稳定承压空间汇点井流公式为

$$Q_{\text{真空}} = 2\pi K \rho (s + \Delta h) \quad (11)$$

式中: $Q_{\text{真空}}$ 为真空状态下流入离层汇点的流量, m^3/d ; Δh 为真空作用下水头下降量, m 。

3.2 真空负压作用下的稳定承压空间汇点数值模拟

为了进一步研究离层积水过程中的井流特征,基于上节半球形空间汇点的离层积水理论模型,利用COMSOL构建了经典稳态问题中的“圆岛模型”,如图8所示,模型参数见表4。为了消除边界条件对数值计算结果的影响,将“圆岛模型”的半径设置为250 m,含水层厚度(模型的高度)设置为50 m,位于模型顶部的半球形汇点半径为0.1 m(模拟井底进水)。在空间汇点附近进行网格加密,模型共包含2 550 985个单元。将模型的四周设置为定水头边界 $H_0=200$ m,初始模型内孔隙充满水,模型的初始水头 $H=200$ m。

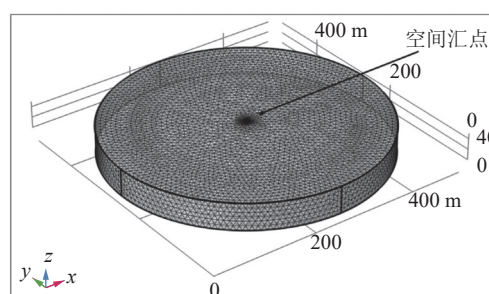


图8 三维半球形空间汇点模型

Fig.8 3D hemispherical model of convergence point

表 4 数值模型参数
Table 4 Parameters of numerical model

物理量	数值
球形空间汇点的半径 r_w/m	0.1
含水层厚度 D/m	50
初始水头 H/m	100
流体粘滞系数 $\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	1×10^{-3}
流体密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	1×10^3

承压含水层在抽水时,空间汇点内的真空度不会随时间发生变化,真空状态可以通过降低井内水头方法来实现。一个标准大气压相当于 10.33 m 水柱,若空间汇点内处于绝对真空状态时,则相当于空间汇点的水头下降了 10.33 m,以下将通过 COMSOL 数值模型研究不同真空度下稳定承压含水层空间汇点井流特征。

不同真空负压作用下的稳定承压空间汇点模拟结果如图 9 所示,由图 9a 中发现,当半球形空间汇点的半径较小($r=0.1$)时,不同的真空状态下的水位降深曲线基本重合,真空负压的作用并不明显。由图 9b

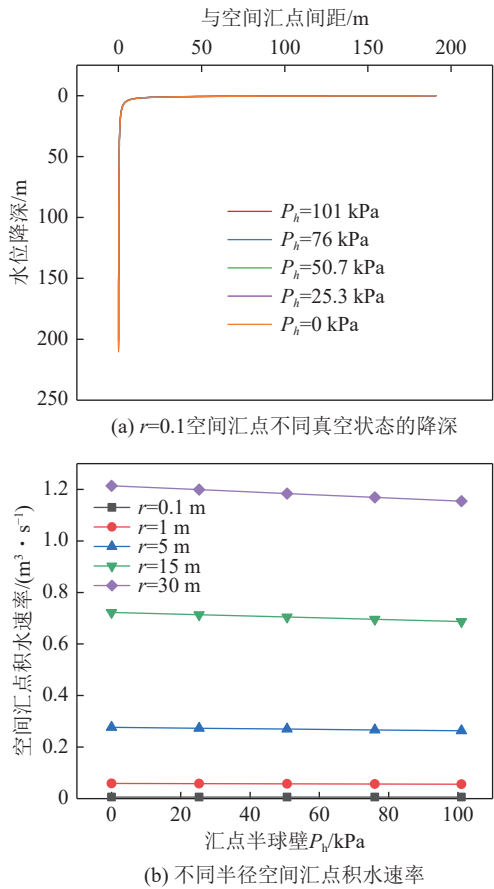


图 9 不同负压作用下的稳定承压空间汇点模拟结果
Fig.9 Simulation results of the convergence point under different negative pressure effects

中发现,随着空间汇点的半径增大,汇点的积水速率逐渐增大,且每条线斜率的绝对值也在逐渐增大,表明随着半径的增大,真空负压作用的影响也在提升。以此类推:离层的发育过程也是离层空间扩容的过程,离层空间的体积是不断增大的,则离层空间的真空负压作用的影响也在逐步提升,从而加快了离层的充水速率。

此外,笔者通过式 (10) 计算了不同半径空间汇点在不同负压作用下的积水速率,通过数值解和解析解对比,如图 10 所示,2 者计算偏差较小,说明数值模拟结果及以上分析可靠,可以进一步采用半球形空间汇点三维数值计算模型研究含水层渗透性演化对离层积水速率的影响。

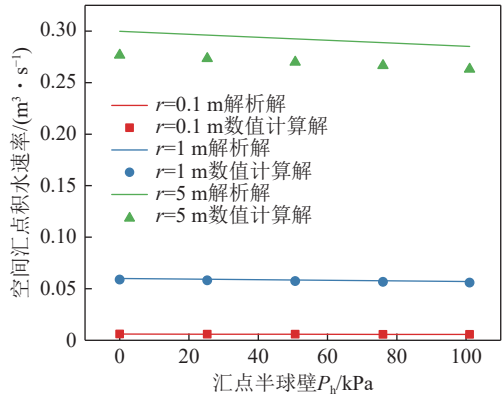
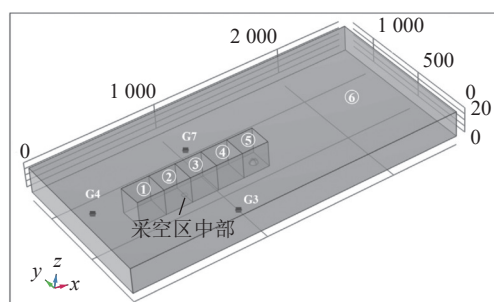


图 10 不同半径空间汇点积水速率数值解与解析解对比
Fig.10 Comparison between numerical and analytical solutions of water accumulation rates at different radii convergence points

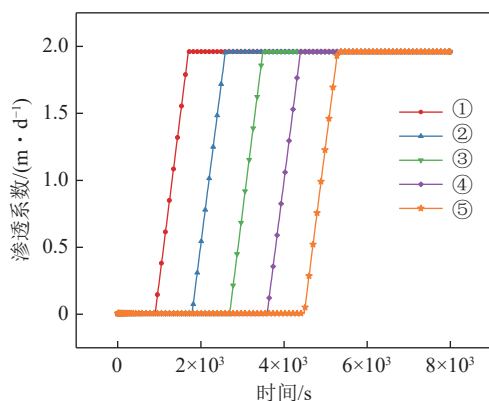
4 巨厚白垩系含水层渗透性演化-离层积水模型

根据前文研究结果,煤层采动过程中白垩系含水层渗透性并非一成不变的,而渗透性的改变势必会造成离层积水速率的变化,因此本节通过 COMSOL 数值软件建立了巨厚白垩系含水层渗透性演化-离层积水模型,探讨了工作面渗透性演化对离层积水速率的影响。

随着工作面的回采,渗透系数从原始天然状态下的 0.005 m/d 可逐渐演化到最大的 1.96 m/d,如图 5 和图 6 所示,而渗透性的演化会影响着离层积水过程,因此本模型以招贤煤矿 1304 工作面为例,将考虑采动离层发育过程中白垩系含水层的渗透性响应规律,建立采动覆岩渗透性演化-离层积水模型,如图 11 所示。图 11a 中模型的分区①~⑤是 1304 工作面采动范围上部的白垩系含水层,分区⑥为天然区域的含水层。通过函数功能定义渗透系数的分段函数,将采空



(a) 渗透性演化-离层积水耦合示意



(b) 渗透系数演化设计

图 11 渗透性演化-离层积水模型及渗透系数演化设计

Fig.11 Schematic diagram of the mining-induced permeability evolution-bed separation water accumulation model and design of permeability coefficient evolution

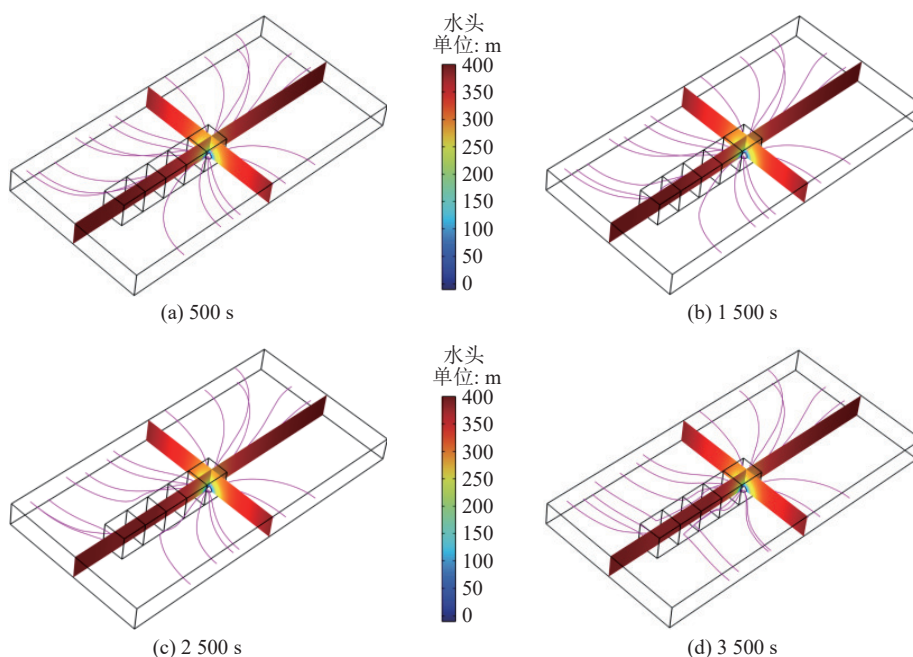
区范围含水层的渗透系数演化规律耦合到 COMSOL 数值模型中, 让采动范围含水层的各个分区 ①~⑤ 的渗透系数 K 随时间发生变化, 如图 11b 所示, 根据不同的采动位置让不同分区 ①~⑤ 渗透性发生演化的时间点不同, 整体随着采动逐步、依次序的发生演化, 为了简化问题, 将相邻含水层区块渗透系数

演化的时间间隔取 1 000 s, 最终均达到最大渗透系数 1.96 m/d。

模型中含水层厚度根据实际厚度均值设置为 200 m, 模型的四周设置为定水头边界 $H_0=400$ m, 初始模型内孔隙充满水, 初始水头 $H=400$ m, 根据工作面累计突水水量的最大值, 将离层空间的半径设置为 26.81 m, 分别求解了离层汇点在标准大气压和绝对真空 2 种情况下的含水层渗流特征。

以离层空间绝对真空状态时的模拟结果为例, 如图 12 所示, 对比不同时刻流线图发现: 随着采动覆岩渗透性逐步演化, 地下水的流线逐步向采动范围聚拢, 渗透性发生演化的白垩系含水层内流线更加密集。同时对比水头云图发现, 离层空间的真空负压作用在采动范围内传播的更远, 沿采动方向的含水层受到离层的抽吸更剧烈, 尤其是模拟时刻从 4 500~5 500 s 的过程中, 经历离层空间所在位置的含水层区块渗透性发生演化 (5 000 s) 后, 离层的真空负压作用瞬间传导到整个采空区范围, 且在非采动区域也有一定的影响, 此时的流线也变得更加规则。

为了进一步观察渗透性演化-离层积水过程的水位变化情况, 在模型中设置了 4 个探针, 探针位置分别位于 G3 孔、G4 孔、G7 孔以及 1304 工作面采空区中部。如图 13 所示, 经过每一次含水层区块渗透性演化后, 模型均会达到新的稳定状态, 而随着渗透性演化的范围逐步靠近离层位置, 各个观测孔的稳定水位逐步降低, 直至离层位置处的含水层区块渗透性发生了演化, 各个观测孔才达到最低的稳定水位。从最终的稳定水位来看, 采空区中部的稳定水位最低, 其



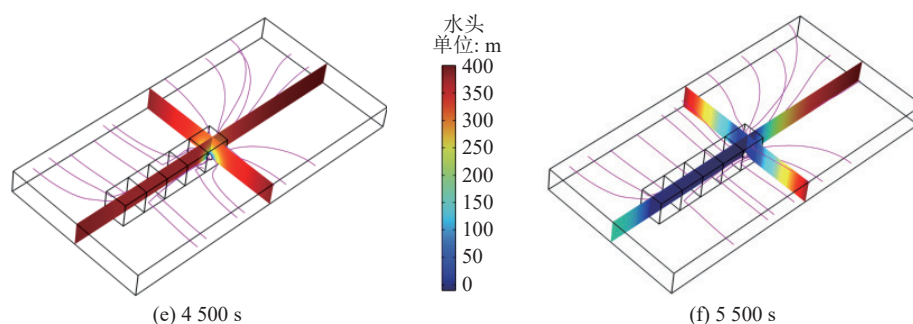


图 12 渗透性演化-离层积水模型在不同时刻水头等值线及流线图

Fig.12 Contour lines of hydraulic head and streamlines at different times for the permeability evolution-bed separation water accumulation model

次为 G4 孔水位, G4 孔水位的总降幅大于 G3 孔和 G7 孔。在分析现场实际水位前, 需要补充说明的是由于现场水位资料久远, 存在水位丢失的现象, 因此本次建模中的水位数据未采用工作面回采前的实际水位值, 模型仅将含水层概化为承压含水层, 因此模型和现场水位降幅值具有差异性, 但是模型水位变化趋势与现场规律具有一致性, 如图 14 所示, G4 孔水位降幅均高于 G3 孔; G7 孔仅在第 2 次突水前后进行了水位监测, 其降幅比 G4 孔降幅低。

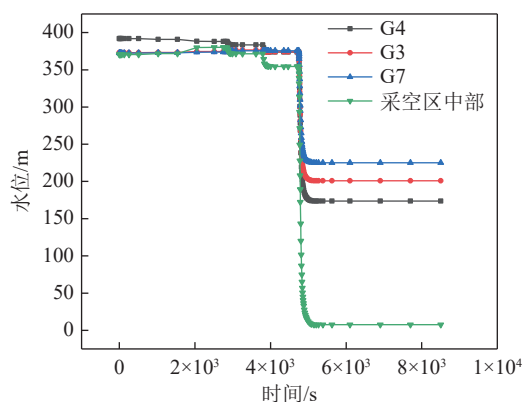


图 13 渗透性演化-离层积水模型虚拟观测孔水位曲线图

Fig.13 Water level curve of virtual observation well in the permeability evolution-bed separation water accumulation model

此外, 对模型中离层半球面上的质量通量进行积分, 获得了每一个时刻通过该半球面上的质量通量 (kg/s), 通过水的密度将其转化为离层积水速率 (m^3/h), 从而得到了离层积水速率动态曲线, 如图 15 所示。由于天然状态下白垩系洛河-宜君组含水层渗透性差, 在离层空间所在区块渗透性未发生演化前, 离层积水速率均较小, 前面区块渗透性逐一发生演化时, 离层积水速率仅有小幅度的提升, 直至所有区块渗透性均发生演化后, 离层空间的积水速率得到显著提升, 从 $14.09 \text{ m}^3/\text{h}$ 提升到了 $98.95 \text{ m}^3/\text{h}$, 提升幅度达 $84.86 \text{ m}^3/\text{h}$, 同时绝对真空状态下相较于标准大气压进水速率高

$2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

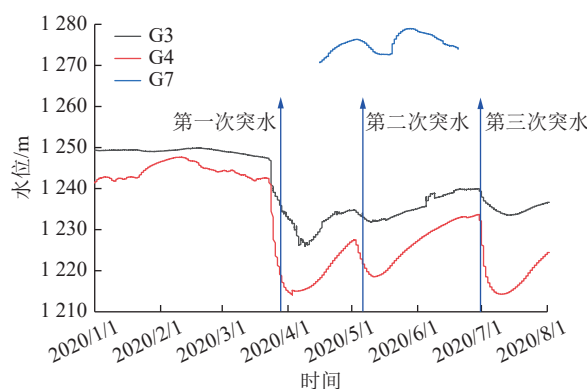


图 14 1304 工作面突水前后长观孔水位变化曲线

Fig.14 Water level variation curve of long observation well before and after inrush in the working face 1304

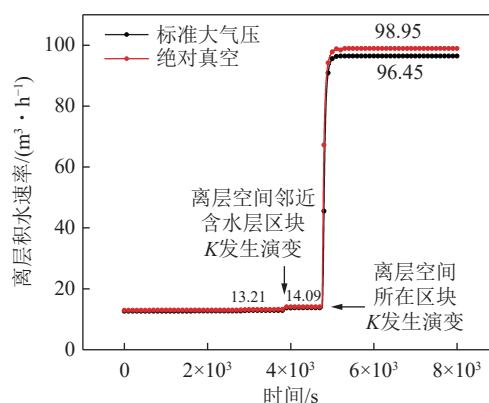


图 15 离层积水速率动态曲线图

Fig.15 Dynamic curve of bed separation water accumulation rate

5 结 论

(1) 以现场白垩系含水层群孔抽水试验为基础, 基于同步连续线性估计算法 (SimSLE), 采用水力层析技术对巨厚白垩系含水层进行分阶段反演成像, 获得不同回采阶段渗透系数的空间分布规律。采动覆岩含水层的渗透性整体呈现先增大后减小的趋势, 采空区

范围内白垩系含水层渗透系数为 0.115~1.96 m/d, 渗透性增长 23~392 倍, 采动影响范围内白垩系含水层渗透系数为 0.005~0.333 m/d, 渗透性增长 1~67 倍。在平面上, 随着工作面的持续推进, 工作面前方渗透性是依次序逐步演化增大的。

(2) 采用地下水动力学中半无限含水层的空间汇点理论, 考虑离层真空负压作用, 推导了稳态下的离层积水理论公式, 通过 COMSOL 数值软件得到了井底进水承压不完整井的井流特征。通过数值解和解析解对比, 2 者计算偏差较小, 说明可以采用半球形空间汇点三维数值计算模型研究含水层渗透性演化对离层积水速率的影响。

(3) 通过定义渗透系数分段函数, 建立了采动覆岩渗透性演化-离层积水模型, 结果表明, 随着采动覆岩渗透性演化范围的延伸扩张, 地下水的流线逐步向采动范围聚拢, 采动范围的流线更加密集, 离层空间的真空负压作用在采动范围内传播的更远, 沿着采动方向上的观测孔 G4 水位下降幅度更大, 该范围内含水层受到离层的抽吸更剧烈。

参考文献(References):

- 钱鸣高, 许家林, 王家臣. 再论煤炭的科学开采[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 1-13.
QIAN Minggao, XU Jialin, WANG Jiachen. Further on the sustainable mining of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 1-13.
- 谢和平, 吴立新, 郑德志. 2025 年中国能源消费及煤炭需求预测[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 1949-1960.
XIE Heping, WU Lixin, ZHENG Dezhi. Prediction on the energy consumption and coal demand of China in 2025[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 1949-1960.
- 谢和平, 任世华, 谢亚辰, 等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2197-2211.
XIE Heping, REN Shihua, XIE Yachen, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2197-2211.
- 袁亮, 王恩元, 马衍坤, 等. 我国煤岩动力灾害研究进展及面临的科技难题[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1825-1845.
YUAN Liang, WANG Enyuan, MA Yankun, et al. Research progress of coal and rock dynamic disasters and scientific and technological problems in China[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1825-1845.
- 董书宁, 姬亚东, 王皓, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗纪煤田典型顶板水害防控技术与应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2367-2375.
DONG Shuning, JI Yadong, WANG Hao, et al. Prevention and control technology and application of roof water disaster in Jurassic coal field of Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2367-2375.
- 董书宁, 樊敏, 郭小铭, 等. 陕西省煤矿典型水灾隐患特征及治理技术[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 902-916.
DONG Shuning, FAN Min, GUO Xiaoming, et al. Characteristics and prevention and control techniques of typical water hazards in coal mines in Shaanxi Province[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 902-916.
- 曾一凡, 武强, 赵苏启, 等. 我国煤矿水害事故特征、成因与防治对策[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 1-14.
ZENG Yifan, WU Qiang, ZHAO Suqi, et al. Characteristics, causes, and prevention measures of coal mine water hazard accidents in China[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 1-14.
- 曾一凡, 朱慧聪, 武强, 等. 我国不同类别煤层顶板水害致灾机理与防控路径[J]. 煤炭学报, 2024, 49(3): 1539-1555.
ZENG Yifan, ZHU Huicong, WU Qiang, et al. Disaster-causing mechanism and prevention and control path of different types of coal seam roof water disasters in China[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(3): 1539-1555.
- 乔伟, 赵世隆, 李连刚, 等. 采动覆岩高位离层演化特征及涌(突)水前兆信息研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(2): 194-205.
QIAO Wei, ZHAO Shilong, LI Liangang, et al. Study on evolution features of high level overburden separation layer and precursor information of water inrush during coal mining[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 194-205.
- 乔伟, 刘梦楠, 孟祥胜, 等. 煤矿采动覆岩离层水害致灾因素勘查与预测评价[J]. 煤炭学报, 2024, 49(4): 2031-2044.
QIAO Wei, LIU Mengnan, MENG Xiangsheng, et al. Exploration and prediction evaluation on causative factors of water inrush from separation layers of mining overburden in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(4): 2031-2044.
- 乔伟, 王志文, 李文平, 等. 煤矿顶板离层水害形成机制、致灾机理及防治技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 507-522.
QIAO Wei, WANG Zhiwen, LI Wenping, et al. Formation mechanism, disaster-causing mechanism and prevention technology of roof bed separation water disaster in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 507-522.
- 舒宗运, 何标庆, 黎灵. 关键层突变破断的冲击能诱发离层水灾机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(5): 149-156.
SHU Zongyun, HE Biaoqing, LI Ling. Study on mechanism of separation strata water-inrush induced by impact energy of key strata abrupt breaking[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(5): 149-156.
- 李小琴. 坚硬覆岩下重复采动离层水涌突机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
LI Xiaoqin. Study on the inrush mechanism of the water in bed separation due to repeated coal mining under hard rock[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2011.
- FAN K F, HE J H, LI W P, et al. Dynamic evolution and identification of bed separation in overburden during coal mining[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55(7): 4015-4030.
- HE J H, LI W P, FAN K F, et al. A method for predicting the water-flowing fractured zone height based on an improved key stratum theory[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 33(1): 61-71.
- 吕玉广, 肖庆华, 程久龙. 弱富水软岩水-沙混合型突水机制与防

- 治技术: 以上海庙矿区为例[J]. 煤炭学报, 2019, 44(10): 3154–3163.
- LÜ Yuguang, XIAO Qinghua, CHENG Jiulong. Mechanism and prevention of water-sand inrush in soft rock with weakly abundant water: A case study in Shanghai temple mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(10): 3154–3163.
- [17] 许进鹏, 周宇, 浦早红, 等. 离层积水量估算方法及离层突水预测: 以陕西招贤煤矿 1304 工作面突水为例[J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 3083–3090.
- XU Jinpeng, ZHOU Yu, PU Zaohong, et al. Calculation method of separated water accumulation in the process of separated water inrush and its forecast: Taking the water inrush at 1304 working face of Zhaoxian Coal Mine in Shaanxi Province as an example[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 3083–3090.
- [18] 陈维池. 煤层开采上覆巨厚白垩系离层动态发育及含水层响应机制[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- CHEN Weichi. Bed separation dynamic development and response mechanism of extra-thick cretaceous aquifer induced by coal mining[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [19] TAMMETTA P. Estimation of the change in hydraulic conductivity above mined longwall panels[J]. *Ground Water*, 2015, 53(1): 122–129.
- [20] 徐智敏, 陈天赐, 陈歌, 等. 煤层采动顶板水文地质参数演化与矿井涌水量动态计算方法[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 833–845.
- XU Zhimin, CHEN Tianci, CHEN Ge, et al. Hydrogeological parameter evolution of coal seam roof and dynamic calculation method of mine water inflow[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 833–845.
- [21] 乔伟, 李文平, 李小琴. 采场顶板离层水“静水压涌突水”机理及防治[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(1): 96–104.
- QIAO Wei, LI Wenping, LI Xiaojin. Mechanism of “hydrostatic water-inrush” and countermeasures for water inrush in roof bed separation of a mining face[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2011, 28(1): 96–104.
- [22] 乔伟, 黄阳, 袁中帮, 等. 巨厚煤层综放开采顶板离层水形成机制及防治方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(10): 2076–2084.
- QIAO Wei, HUANG Yang, YUAN Zhongbang, et al. Formation and prevention of water inrush from roof bed separation with full-mechanized caving mining of ultra thick coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(10): 2076–2084.
- [23] 乔伟, 刘梦楠, 李连刚, 等. 采动覆岩“突水离层带”岩体结构演化致灾机理及突水预报方法[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 818–832.
- QIAO Wei, LIU Mengnan, LI Liangang, et al. Disaster mechanism induced by structure evolution of “water-inrushing separation zone” of mining rock mass and prediction method of water inrush from separation layer[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 818–832.
- [24] 蒋立群, 孙蓉琳, 王文梅, 等. 水力层析法与克立金法估算非均质含水层渗透系数场比较[J]. 地球科学, 2017, 42(2): 307–314.
- JIANG Liquan, SUN Ronglin, WANG Wenmei, et al. Comparison of hydraulic tomography and Kriging for estimating hydraulic conductivity of a heterogeneous aquifer[J]. Earth Science, 2017, 42(2): 307–314.
- [25] 赵瑞珏, 毛德强, 刘再斌, 等. 基于水力层析法的某煤矿承压含水层叠加放水试验分析[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 1–9.
- ZHAO Ruijue, MAO Deqiang, LIU Zaibin, et al. An analysis of sequential water releasing tests of the confined aquifers in a coal mine based on hydraulic tomography[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(1): 1–9.
- [26] 王欣桐. 复杂岩溶管道介质示踪—水力层析反演方法及工程应用[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- WANG Xintong. Tracer-hydraulic tomography inversion method and application for complex karst conduit medium imaging[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [27] 赵世隆. 侏罗系覆岩离层裂隙演化特征及突水前兆信息研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- ZHAO Shilong. Study on the characteristics of fracture evolution in jurassic overburden separation and precursor information of separated water inrush[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [28] 张磊. 采动覆岩巨厚含水层渗透特性时空演化规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- ZHANG Lei. Temporal and spatial evolution of overburden ultra thick aquifer permeability during coal seam extraction[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [29] 张世忠, 范钢伟, 张东升, 等. 应力-损伤-渗流耦合下采动弱胶结覆岩渗透性演化规律[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(6): 1230–1240.
- ZHANG Shizhong, FAN Gangwei, ZHANG Dongsheng, et al. Mining-induced permeability evolution in weakly cemented strata under stress-damage-seepage coupling[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(6): 1230–1240.
- [30] 余伊河. 采场边界覆岩损伤破坏特征及渗透性演化规律[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- YU Yihe. Deformation characteristics and permeability evolution-laws of strata on stope boundary[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [31] 陈崇希, 林敏, 成建梅. 地下水动力学[M]. 5 版. 北京: 地质出版社, 2011.