

DOI: 10.11779/CJGE20221211

水封石油洞库污染物运移规律研究

蒋中明^{1,2}, 钟兵¹, 万发¹

(1. 长沙理工大学水利与环境工程学院, 湖南长沙 410114; 2. 长沙理工大学洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南长沙 410114)

摘要: 水封石油洞库储油可能造成地下水污染。明晰石油污染物在裂隙岩体中的运移规律是库区地下水污染防控的前提。为揭示石油污染物在洞周围岩地下水中的运移规律, 基于裂隙-孔隙双重介质模型, 采用数值模拟方法研究了石油中的特征污染物——苯的运移扩散过程, 并分析了裂隙倾角、裂隙开度、基质渗透率和纵向弥散度对苯运移规律的影响。研究表明: 储库正常运行 50 a 后, 苯的迁移被限制在较小的范围内, 不会到达水幕系统, 也不会进入到地面表层下的水体中。在长期运行条件下, 相邻洞周围岩中的污染晕可相互连通, 并将引起相邻洞罐中油品污染物之间的交叉污染。苯的竖向污染距离对纵向弥散度和裂隙倾角大小敏感性强, 而对裂隙开度和基质渗透率的敏感性较弱。洞室间岩柱中轴线上苯的最大浓度对裂隙倾角最为敏感, 且随裂隙倾角和基质渗透率的增大而减小, 随纵向弥散度和裂隙开度的增加而增大。

关键词: 水封石油洞库; 裂隙岩体; 污染物运移; 双重介质模型

中图分类号: TU43; X523

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)12-2529-08

作者简介: 蒋中明(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程等方面的教学和科研工作。E-mail: zzmjiang@163.com。

Migration laws of pollutants in surrounding rock of underground oil storage caverns

JIANG Zhongming^{1,2}, ZHONG Bing¹, WAN Fa¹

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The groundwater near a cavern may be polluted during the operation period of oil storage. Understanding the migration laws of oil pollutants in fractured rock mass is the base of groundwater pollution prevention and control in reservoir areas. For the sake of revealing the migration laws of oil pollutants in surrounding rock of the caverns, the migration and diffusion processes of benzene are studied by using the numerical simulation method based on the fracture-pore dual-medium model. The effects of fracture inclination angle, fracture aperture, matrix permeability and longitudinal dispersivity on the migration of benzene are also analyzed. The research results show that the migration of benzene is limited in a small range after 50 years of oil storage in the caverns, and it does not go up to the water curtain system, nor access the water body near ground surface. Under the long-term operation of the caverns, the pollution halos of the adjacent caverns can connect with each other, which will lead to cross-contamination of oil pollutants in the adjacent caverns. The vertical pollution distance of benzene is sensitive to the longitudinal dispersivity and fracture inclination angle, but weakly sensitive to the fracture aperture and matrix permeability. The maximum concentration of benzene on the central axis of rock pillars between caverns is most sensitive to the fracture inclination angle, and it decreases with the increase of the fracture inclination angle and matrix permeability, but increases with the increase of the longitudinal dispersivity and fracture aperture.

Key words: underground oil storage cavern; fractured rock mass; pollutant migration; dual-medium model

0 引言

石油类污染物是地下水污染的主要污染源之一, 对地下水的污染影响可持续上百年, 严重威胁人类生存环境。地下水中石油类污染物的迁移转化问题已逐渐成为人们研究的热点。地下水封石油洞库是一种利

用裂隙中的地下水对原油进行封存的储油技术, 具有良好的安全性和隐蔽性, 近年来在中国得到快速发展,

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178381); 国家自然科学基金项目(51778070)

收稿日期: 2022-10-08

逐渐成为中国石油战略储备的主流方式。在地下水封石油洞库中,原油与地下水直接接触,原油中的有机物、有害离子等污染物容易进入到地下水中,在渗流场和浓度场的作用下产生迁移,污染库区地下水。《环境影响评价技术导则地下水环境》(HJ 610—2016)^[1]要求对地下水封石油洞库建设项目进行1级地下水环境影响评价,分析预测储库建设对库区地下水环境的影响。

许多学者对地下水封石油洞库溶质运移展开了研究。张彬等^[2]和乔丽莘等^[3]基于污染物扩散理论,模拟了地下油库建造及运营期的海水入侵现象。黄安达^[4]以黄岛地下水封石油洞库为背景,通过理论分析、室内试验和数值模拟等方法,对反应性溶质在花岗岩裂隙中的运移规律进行了研究。韩曼^[5]建立了地下油库溶质运移数值模型,预报了黄岛水封石油洞库运营50a库区的石油类和IDMn浓度分布情况。上述研究多采用等效连续介质模型进行分析。然而,在各种地质作用下,岩体中通常发育有大量裂隙。蒋中明等^[6]、王者超等^[7]、温毓繁等^[8]对水封石油洞库渗流场的研究均表明,裂隙对水封油库地下渗流场具有重要影响。渗流场的变化会导致污染物在裂隙岩体中的运移扩散发生变化。因此,有必要考虑裂隙对水封石油洞库污染物运移特性的影响。

目前,裂隙岩体污染物运移模型主要有等效连续介质模型^[9-10]、离散裂隙网络模型^[11-12]和双重介质模型^[13-14]3种类型。等效连续介质模型将裂隙岩体等效成连续介质,忽略了岩体的各向异性,无法得到岩体中真实的渗流场和溶质浓度场。离散裂隙网络模型只考虑裂隙系统中的流体流动和污染物迁移,忽略了基质岩块中的流体流动和溶质运移。而双重介质模型将裂隙岩体分为裂隙系统和基质岩块系统,既考虑污染物在裂隙系统中的迁移,也考虑污染物在岩块中的迁移,能够较为准确地刻画出污染物的运移特征。

本研究以某地下水封石油洞库工程的地质条件为例,基于裂隙-孔隙双重介质模型,采用实体单元模拟岩块、无厚度单元模拟大规模裂隙,开展了复杂地质条件下地下水封油库石油类污染物运移数值模拟计算,分析了油库运行后特征污染物苯在裂隙岩体中的运移扩散过程。以此为基础,采用局部分析法中的因子变换法,研究了水封油库石油污染物迁移模型中污染晕的变化对裂隙倾角、裂隙开度、基质渗透率、纵向弥散度的响应。

1 数值模拟理论及方法

裂隙-孔隙双重介质模型将裂隙岩体看作是裂隙

系统和孔隙系统共同构成的统一体。裂隙的导水性强,是流体流动和污染物运移的主要通道。孔隙岩块导水性弱,是流体和污染物储存的主要场所。对裂隙介质和孔隙岩块分别建立流体流动和物质运移数学模型,将裂隙-孔隙岩块接触边界视为内部边界,联系两个数学模型,使之成为一整体。

假设地下水在裂隙岩体中的流动满足达西定律,流体和固体不可压缩,那么基质岩块中地下水流动控制方程为

$$\nabla \cdot \rho \left[-\frac{\kappa_m}{\mu} (\nabla p + \rho g) \right] = Q_m \quad (1)$$

式中: p 为孔隙水压力(Pa); μ 为水的动力黏度(Pa·s); κ_m 为岩块渗透率(m^2); ρ 为水的密度(kg/m^3); g 为重力加速度(m/s^2); Q_m 为质量源项($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。

裂隙中地下水流动控制方程为

$$\nabla_t \cdot \rho \left(-\frac{\kappa_f d_f}{\mu} (\nabla p + \rho g) \right) = d_f Q_f \quad (2)$$

式中: ∇_t 为裂隙切平面的梯度算子; κ_f 为裂隙的渗透率(m^2); d_f 为裂隙开度(m); Q_f 为质量源项($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。

地下水在裂隙中的流动满足立方定律。裂隙的渗透率可表示为^[13]

$$\kappa_f = \xi d_f^2 / 12 \quad (3)$$

式中: ξ 为粗糙度修正系数。

石油污染物在裂隙岩体中的运移主要受对流弥散作用控制。污染物在裂隙岩体中运移的数学模型参考单裂隙系统污染物运移模型^[15],其中,基质岩块中污染物运移的控制方程为

$$R_m \frac{\partial(\theta_m c)}{\partial t} + \nabla \cdot (-\theta_m D_{ij} \nabla c) + u \cdot \nabla c = 0 \quad (4)$$

式中: c 为污染物浓度(mol/m^3); u 为地下水的达西流速(m/s); θ_m 为基质岩块的孔隙率; R_m 为基质岩块的迟滞系数,

$$R_m = 1 + \frac{\rho_m}{\theta_m} K_m \quad (5)$$

式中: ρ_m 为基质岩块的密度(kg/m^3); K_m 为污染物在基质岩块中的线性平衡分配系数(m^3/kg)。

D_{ij} 为基质岩块水动力弥散系数(m^2/s),

$$\theta_m D_{ij} = \tau D^* \delta_{ij} + \alpha_T |u| \delta_{ij} + (\alpha_T - \alpha_L) \frac{u_i u_j}{|u|} \quad (6)$$

式中: τ 为曲度; D^* 为分子扩散系数(m^2/s); α_T 为横向弥散度(m); α_L 为纵向弥散度(m); δ_{ij} 为Kronecher符号。

裂隙中污染物运移的控制方程为

$$R_f \frac{\partial c}{\partial t} + \nabla_t \cdot (-D_f \nabla c) + u \cdot \nabla_t c = 0 \quad (7)$$

式中: R_f 为裂隙的迟滞系数,

$$R_f = 1 + \frac{2K_f}{d_f} \quad (8)$$

式中: K_f 为污染质在裂隙中的线性平衡分配系数 (m^3/kg)。

D_f 为裂隙的水动力弥散系数 (m^2/s),

$$D_f = D^* + \alpha_L |u| \quad (9)$$

式 (9) 中第一项为分子扩散系数, 第二项为机械弥散系数, 其余符号意义同前。

采用 COMSOL Multiphysics 仿真软件的“多孔介质中的稀物质传递”模块进行模拟。该模块提供了一个“裂隙”边界条件, 可以模拟污染物在裂隙中的运移扩散, 其控制方程为

$$R_f \frac{\partial c}{\partial t} + \nabla_i \cdot (-D^* \nabla c) + u \cdot \nabla_i c = 0 \quad (10)$$

对于一般的污染物扩散问题而言, 裂隙中的水流流向与污染物的扩散方向是相同的, 污染物的运移主要受对流作用控制, 机械弥散作用和分子扩散作用可以忽略^[16]。但对地下水封石油洞库来说, 水流整体流向洞室内部, 与污染物的扩散方向是相反的, 机械弥散作用和分子扩散作用对污染物扩散具有重要影响, 不能忽略。因此, 式 (7) 在式 (10) 的基础上, 增加了机械弥散项。在 COMSOL 编程计算时, 对原溶质运移分析模块进行了二次开发, 以便考虑机械弥散的影响。

2 污染物运移规律分析

2.1 工程背景

某地下水封油库的设计库容为 $300 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。地下工程主要包括 9 个主洞室、6 条竖井及 5 条水幕巷道。主洞室设计底板标高为 -50 m , 截面形状为直墙圆拱形, 洞宽 20 m , 洞高 30 m , 两相邻主洞室之间设计净间距为 30 m 。水幕巷道内设置水幕注水孔, 孔间距 10 m , 高程 10 m , 孔长覆盖洞室壁以外 10 m 。

库址区内的地层主要为晚元古界花岗片麻岩。根据现场节理、裂隙统计结果, 库区内节理、裂隙的倾角多为 $20^\circ \sim 40^\circ$, $55^\circ \sim 80^\circ$ 。现场渗透试验结果表明^[17], 该区岩体渗透系数为 $5.0 \times 10^{-5} \sim 5.0 \times 10^{-4} \text{ m/d}$, 多数区域岩体渗透系数在 $1.0 \times 10^{-4} \text{ m/d}$ 左右。

2.2 数值模型

为评价油库储油对地下水污染的风险及污染物的迁移扩散规律, 本次研究仅针对其中 1 组洞室储油后的污染物迁移状况进行计算分析。

几何模型: 选取其中 1 组洞室, 采用 COMSOL Multiphysics 有限元软件进行数值模拟。建立的数值模

型见图 1, 模型长 670 m , 高 260 m , 由 2 个储油洞室、水幕系统以及裂隙等组成。左右洞室间距为 30 m , 模型左右边界至两洞壁外侧距离均为 300 m , 底部边界至洞底距离为 170 m , 顶部边界模拟至平均地下水位。根据地质勘查资料, 研究范围内岩体中发育有两组裂隙。第一组裂隙倾角为 40° , 第二组裂隙倾角为 140° 。两组裂隙的裂隙间距均为 10 m , 隙宽设为 0.1 mm 。数值模型单元 654936 个, 节点 330896 个, 单元最小尺寸 0.025 m 。

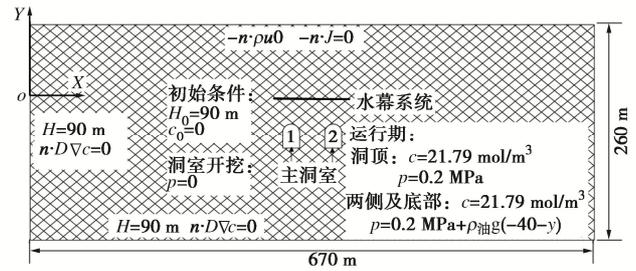


图 1 模型设置与初始条件、边界条件

Fig. 1 Model setting, initial and boundary conditions

边界及初始条件: 模型左右铅直边界及底部边界设为固定水头边界, 顶部设为无流动边界, 水幕系统设为定压力边界, 洞室储油后洞壁设为定压力边界。原油的主要成分为烷烃、环烷烃、芳香烃, 其中, 芳香烃中的苯具有较高的溶解度, 且具有很高的毒性。因此, 选择苯作为特征污染物。油库未储油前, 地下水中石油类物质含量为零, 苯的初始浓度设为 0 mol/m^3 。洞室储油后洞壁设为定浓度边界, 模型左右铅直边界及底部边界设为流出边界, 顶部设为无通量边界。

参数选取: 库区的岩体主要为晚元古界花岗片麻岩。根据现场实验结果, 基质岩块渗透系数取 $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 。本文忽略了固体介质对污染物的吸附作用, R_m , R_f 的取值均为 1。曲度 τ 取 0.1。苯的分子扩散系数根据 Wilke-Chang 公式^[18]计算得到, 为 $9.12 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。石云峰等^[19]通过室内试验测得 Na, Cu, U 在花岗岩裂隙中的纵向弥散度均为 0.1 m 左右。而大量研究表明, 弥散度试验受观测尺度的影响较大。一般来说, 野外试验的结果是室内试验的十几倍甚至几十倍。而目前国内的野外弥散试验很少。Gelhar 等^[20]收集的世界范围内 59 个大区域的弥散资料, 是目前进行污染物迁移模拟时确定纵向弥散度被广泛引用的参考资料。根据这 59 个大区域的弥散资料, 同时参考 Tracy^[21]给出的裂隙花岗岩弥散度的经验值, 最终确定裂隙和基质岩块的纵向弥散度为 1.5 m , 横向弥散度为 0.01 m 。

计算过程: ①初始渗流场模拟; ②主洞室开挖模拟。计算洞室开挖 3 a 后的渗流场; ③储库运行模拟。

计算储库运行 50 a 后渗流场和苯浓度场的变化情况。

2.3 结果分析

(1) 渗流场分布特征

图 2, 3 分别为油库运行 1 a 时的总水头分布图和裂隙内地下水流动矢量方向分布图。可以看出, 洞室开挖后, 洞顶上方的水位出现了下降, 但由于水幕系统的补水作用, 洞室上方的水位下降幅度较小, 保证了洞室具有良好的水封性能。开挖期主洞室 1 的渗水量为 $0.39 \text{ L}^3/\text{min}$ 。洞室含 2 组节理裂隙处的渗水量实测值为 $0.23 \text{ L}^3/\text{min}$ ^[22]。两者相差较小, 说明本文渗流场结果是合理的。由于洞室内的压力小于周围岩体中的水压力, 洞周岩体中的地下水通过节理裂隙不断渗入到洞罐中。洞室间出现了两条裂隙水流连通的裂隙, 如图 3 中红色箭头标注的裂隙所示。这表明, 流入某一洞罐中的渗水有可能是来自于另一洞室上方的裂隙水。这是因为洞室间的岩柱较为狭窄, 地下水沿裂隙形成的优势流是地下水迁移的主要通道所导致。图 4 为裂隙内的水流速度分布图。从图中可以看出, 靠近洞室底部和顶部的裂隙中的水流流速较大, 而洞室间裂隙中的水流流速较小。裂隙中水流流速最大为 0.02 m/s 。

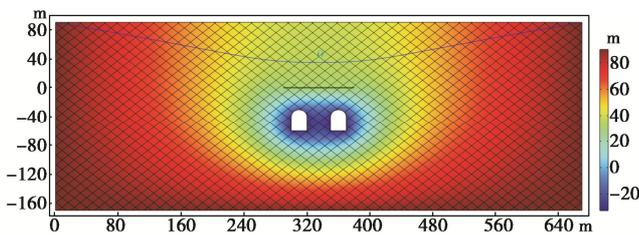


图 2 油库运行 1 a 时总水头分布图

Fig. 2 Total head distribution after one year of oil storage

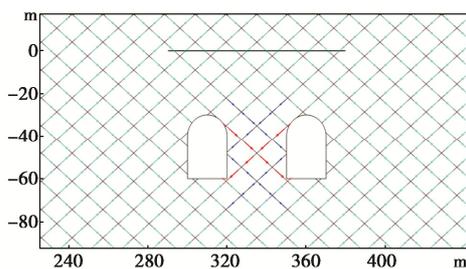


图 3 油库运行 1 a 时裂隙水流动矢量图

Fig. 3 Flow vector direction of fracture water after one year of oil storage

根据水流方向和位置, 洞室附近的裂隙可分为 3 类。以第二组裂隙为例, 第一类如红色箭头标注的裂隙所示, 水流从主洞室 1 的顶部流向主洞室 2 的底部, 污染物可直接沿着裂隙扩散到主洞室 2 中。第二类如蓝色箭头标注的裂隙所示, 裂隙距主洞室 1 较近, 水流流向指向主洞室 2。在水动力弥散作用下, 主洞室 1 中的污染物可能进入到第二类裂隙中, 沿裂隙向主洞

室 2 扩散。第三类裂隙如青色箭头标注的裂隙所示, 裂隙中的水流指向主洞室 1, 水流方向与污染物的扩散方向是相反的。

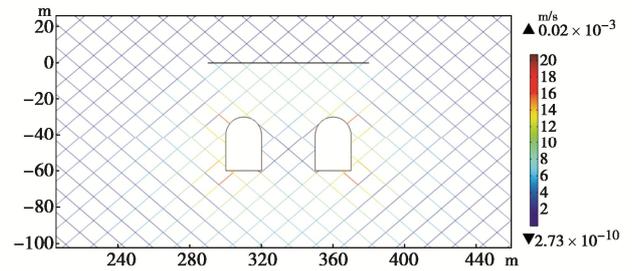


图 4 油库运行 1 a 时裂隙水流速图

Fig. 4 Seepage velocity of fracture water after one year of oil storage

(2) 苯浓度场分析

研究区地下水中苯污染晕的时空演化见图 5。根据中国《地下水质量标准》(GBT14848—2017) 的规定, 地下水中苯污染晕的下限浓度按 V 类标准限值设定, 为 0.00154 mol/m^3 。从图 5 中可以看出, 油库储油后, 苯沿着裂隙迅速向洞室四周扩散。储库运行 0.1 a 后, 裂隙中苯的污染距离便达到了 12 m, 而后苯主要从裂隙向附近的基质岩石中扩散, 污染晕逐渐覆盖裂隙与洞室间的所有区域。储库运行 50 a 后, 苯的最大水平污染距离为 14.3 m, 最大竖向污染距离为 12.7 m。

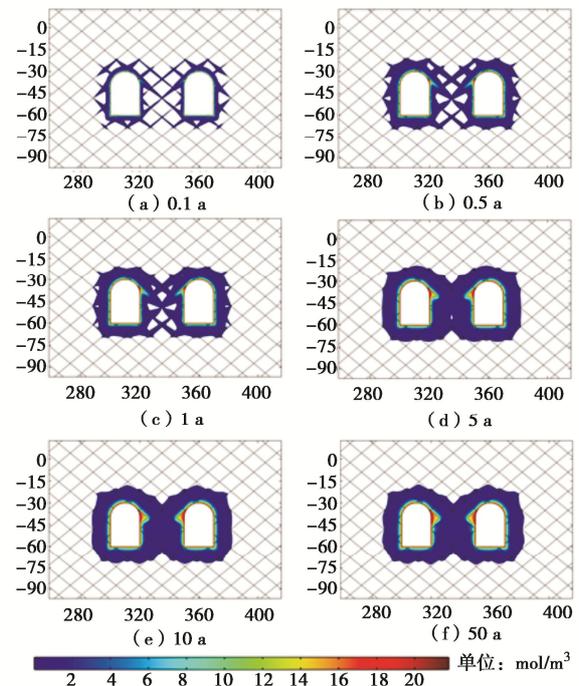


图 5 运行期苯浓度随时间变化图

Fig. 5 Variation of benzene concentration with time during operation

储库储油后, 苯沿着渗漏裂隙和第二类裂隙向相邻洞室扩散。洞室间的污染晕在储库运行 0.1 a 时便相互贯通。渗漏裂隙中苯的浓度远远高于第二类裂隙

中苯的浓度, 是苯向相邻洞室扩散的主要通道。

3 苯扩散影响因素分析

污染物在裂隙岩体的运移主要受裂隙几何特征、基质渗透率以及溶质运移参数影响。裂隙特征主要包括裂隙的倾角、开度和间距。本文主要考虑裂隙倾角、裂隙开度、基质渗透率和弥散度对地下水封油库污染物运移的影响。在地下水整体流向洞室的情况下, 苯在水平方向上的扩散会限制在较小的范围内, 而竖直方向上, 如果苯扩散到了水幕系统处, 会污染水幕系统及上方地表岩体。此外, 洞室间污染晕的相互贯通可能引起污染物之间的交叉污染。因此, 选择两个洞室间岩柱中轴线上苯的最大浓度和竖向污染距离作为观测指标。

采用局部分析法中的因子变换法, 分别改变 4 个影响因素的取值, 分析各因素变化对观测指标的影响情况。以本工程的地质条件为基础, 参考湛江地下石油洞库^[6]、Yeosu peninsula 地下石油洞库^[23]、惠州地下石油洞库^[24]的地质条件, 确定各因素的取值如表 1 所示。

表 1 计算参数取值表

Table 1 Parameter values for calculation

影响因素	因素取值
裂隙倾角/(°)	第一组 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80
	第二组 170, 160, 150, 140, 130, 120, 110, 100
裂隙开度/mm	0.05, 0.075, 0.1, 0.125, 0.15
基质渗透率/m ²	1×10 ⁻¹⁷ , 5×10 ⁻¹⁷ , 1×10 ⁻¹⁶ , 5×10 ⁻¹⁶ , 1×10 ⁻¹⁵
纵向弥散度/m	0.5, 1, 1.5, 2, 2.5

3.1 裂隙倾角对苯运移的影响

裂隙倾角对竖向污染距离和岩柱中轴线上苯的最大浓度的影响如图 6 所示。随着裂隙倾角增大, 竖向污染距离增大, 其值由 10° 时的 9.4 m 增加到了 80° 时的 15.2 m。图 7 是根据单裂隙中污染物运移的解析解^[25]得到的结果, 计算时长为 50 a。从图中可以看出, 裂隙中的水流流速达到 10⁻⁸ m/s 后, 流速增大, 苯的污染距离基本保持不变。由此可知, 在本算例条件下, 污染物运移距离主要受污染物的扩散能力控制。尽管本研究方案中改变裂隙倾角后, 洞室顶部裂隙中的水流流速会发生变化, 但始终大于 10⁻⁸ m/s, 因此洞室顶部裂隙中苯的污染距离基本不变。在洞室顶部裂隙中苯的污染距离保持不变的情况下, 随着裂隙倾角增大, 洞室顶部裂隙中苯的污染距离在竖直方向上的分量增大, 使得苯的竖向污染距离总体上呈增大趋势。图 6 中裂隙倾角为 20° 时, 苯的竖向污染距离小于裂隙倾角为 10° 时的竖向污染距离。其原因是本算例倾角从 10° 变为 20° 时, 裂隙穿过洞室顶部的位置向下

移动了一小段距离。这个下降距离大于裂隙中苯的污染距离在竖直方向上的分量增加量, 从而使得裂隙倾角为 20° 时苯的竖向污染距离减小。

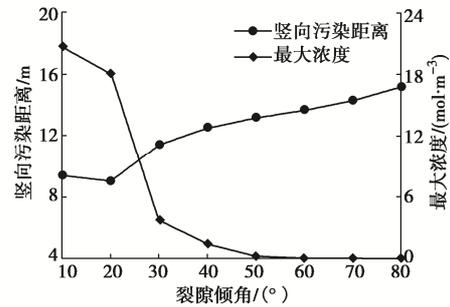


图 6 裂隙倾角对苯运移的影响

Fig. 6 Effects of fracture inclination angle on migration of benzene

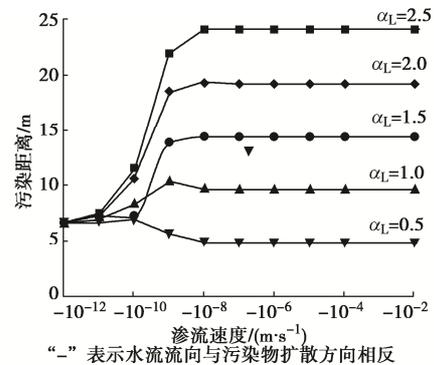


图 7 单裂隙中渗流速度对苯污染距离的影响

Fig. 7 Effects of seepage velocity in a single fracture on pollution distance of benzene

随着裂隙倾角增大, 洞室间岩柱中轴线上苯的最大浓度不断减小。倾角为 10° 时, 中轴线上最大浓度为 20.71 mol/m³; 倾角为 70° 时, 最大浓度为 0.0005 mol/m³, 洞室间的污染晕不再贯通。这主要是由于随着裂隙倾角增大, 洞室间岩柱的优势渗流路径方向更接近于竖直方向^[7], 岩柱中的水流方向更接近于竖直方向, 减弱了苯在水平方向上的运移扩散。

3.2 裂隙开度对苯运移的影响

裂隙开度对竖向污染距离和岩柱中轴线上苯的最大浓度的影响如图 8 所示。随着裂隙开度增大, 竖向污染距离基本保持不变。而洞室间岩柱中轴线上苯的最大浓度随着裂隙开度的增大而增大, 从 0.45 mol/m³ 增加到 1.58 mol/m³。对于洞室顶部的裂隙, 随着裂隙开度增加, 裂隙水流流速增加。但由图 7 可知, 渗流速度达到 10⁻⁸ m/s 后, 随着流速增大, 苯在裂隙中的污染距离基本保持不变, 因此苯的竖向污染距离基本保持不变。而对于洞室间的裂隙, 水流方向与苯的迁移方向相同。随着裂隙开度增加, 裂隙水流流速增大, 水动力弥散作用和对流作用均增强, 使得洞室间岩柱中轴线上苯的最大浓度增加。

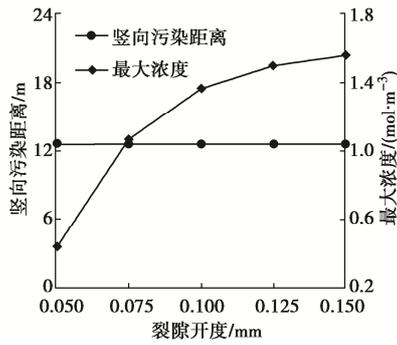


图8 裂隙开度对苯运移的影响

Fig. 8 Effects of fracture aperture on migration of benzene

3.3 基质渗透率对苯运移的影响

基质渗透率对竖向污染距离和岩柱中轴线上苯的最大浓度的影响如图9所示。随着基质渗透率的增加，苯的竖向污染距离基本保持不变。这是由于竖向污染距离主要由苯在裂隙中的迁移决定，基质渗透率对竖向污染距离的影响很小。随着基质渗透率增大，岩柱中轴线上苯的最大浓度不断减小，从1.64 mol/m³减小到0.34 mol/m³。这是由于基质渗透率增大，水幕系统和研究区域四周岩体对洞室间岩体的补水作用增强，岩柱内部的水头增大，降低了渗漏裂隙的渗流量。

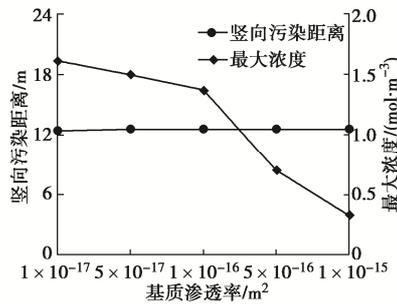


图9 基质渗透率对苯运移的影响

Fig. 9 Effects of matrix permeability on migration of benzene

3.4 纵向弥散度对污染物运移的影响

基质渗透率对竖向污染距离和中轴线最大浓度的影响如图10所示。

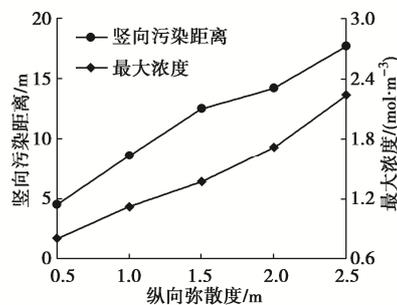


图10 纵向弥散度对苯运移的影响

Fig. 10 Effects of longitudinal dispersivity on migration of benzene

随着纵向弥散度的增加，苯的竖向污染距离增大，由4.5 m增大到了17.8 m。由图8可知，水流流向与

污染物运移方向相反时，随着纵向弥散度增加，水动力弥散作用增强，苯的污染距离增大，因此竖向方向上苯的污染距离随着弥散度的增大而增大。对于洞室间的裂隙，随着弥散度增加，水动力弥散作用增强，洞室间岩柱中轴线上苯的最大浓度随着弥散度的增大而增大。

4 讨论

4.1 苯的运移特征

根据水封油库的储油原理，库区地下水整体朝洞室内部流动，对洞室内石油污染物的扩散起阻碍作用，因此苯污染晕被限制在较小的范围内，这与韩曼^[5]的结论是一致的。与韩曼的结果^[5]相比，本文得到的污染物的污染范围明显更大，这主要是由于本文采用的纵向弥散度值大于韩曼采用的纵向弥散度值。受裂隙影响，岩体的渗透性呈现显著的各向异性，苯沿不同方向的扩散是不均匀的。在一定的条件下，两洞室之间岩柱中会出现渗漏裂隙^[7]，苯可沿着渗漏裂隙向相邻洞室扩散。由此可见，裂隙对水封油库污染物的扩散特征有较大的影响。

4.2 各因素对水封油库苯运移的影响

污染物在裂隙岩体中的运移是一个复杂的过程。通常认为，裂隙是污染物运移的主要通道，污染物在裂隙中的运移主要受对流作用控制，裂隙开度对污染物在裂隙中扩散范围具有重要影响^[13]。但本研究结果表明裂隙开度对苯的竖向污染距离影响很小。这是因为水封油库库区地下水的流动方向与污染物的扩散方向整体上是相反的，污染物沿裂隙的扩散范围主要取决于水动力弥散作用和对流作用的相对强弱。

为进一步分析裂隙倾角、裂隙开度、基质渗透率和纵向弥散度对水封石油洞库污染物运移的影响程度，引入参数相对敏感性分析方法^[26]，计算各参数的相对敏感性参数。这种计算方法考虑了模型因变量与各影响因素之间的非线性关系，同时使参数的扰动值最小，敏感性分析结果更加准确。参数相对敏感度计算结果如表2所示。

表2 苯运移敏感性分析表

Table 2 Sensitivity analysis for migration of benzene

参数相对敏感度 S	裂隙倾角	裂隙开度	基质渗透率	纵向弥散度
竖向污染距离	0.29	0.0044	0.0042	0.80
最大浓度	7.08	0.9100	0.4300	0.72

从表2可以看出，竖向污染距离对纵向弥散度最为敏感，其相对敏感度约为裂隙倾角的2.8倍。裂隙开度和基质渗透率对竖向污染距离的影响可忽略不

计。洞室间岩柱中轴线上苯的最大浓度对裂隙倾角最为敏感, 其次为裂隙开度、纵向弥散度和基质渗透率。裂隙倾角的相对敏感度约为裂隙开度的 7.9 倍。

5 结 论

以某地下水封油库地质条件为例, 基于裂隙-孔隙双重连续介质模型, 建立了水封油库污染物运移模型, 研究了地下水封油库运行后特征污染物苯的运移规律, 并分析了裂隙倾角、裂隙开度、基质渗透率和纵向弥散度对苯运移的影响, 得出 3 点结论。

(1) 在地下水整体流向洞室内的情况下, 苯的水平最大污染距离为 14.3 m, 竖直最大污染距离为 12.7 m, 污染晕被限制在较小的范围内, 不会污染水幕系统及上方地表水体。受洞室之间渗漏裂隙的影响, 洞室间污染晕相互贯通, 可能造成不同洞罐油品污染物之间的交叉污染。

(2) 苯的竖向污染距离对纵向弥散度的敏感性最高, 其次为裂隙倾角。随着裂隙开度和基质渗透率增大, 苯的竖向污染距离基本保持不变; 随着裂隙倾角和纵向弥散度增大, 苯的竖向污染距离增大, 水幕系统及上方地表岩体有被污染的风险。

(3) 洞室间岩柱中轴线上苯的最大浓度对裂隙倾角的敏感性最高, 其次为裂隙开度。随着裂隙开度和纵向弥散度增加, 洞室间岩柱中轴线上苯的最大浓度增大; 随着裂隙倾角和基质渗透率增大, 洞室间岩柱中轴线上苯的最大浓度减小。

参考文献:

- [1] 环境影响评价技术导则 地下水环境: HJ 610—2016[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016. (Technical Guidelines for Environmental Impact Assessment—Groundwater Environment: HJ 610—2016[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2016. (in Chinese))
- [2] 张 彬, 李玉涛, 石 磊, 等. 海岛环境下地下水封油库海水入侵数值模拟研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(5): 1366-1374. (ZHANG Bin, LI Yutao, SHI Lei, et al. Numerical simulation of seawater intrusion in underground oil storage cavern in island environment[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(5): 1366-1374. (in Chinese))
- [3] 乔丽苹, 王小倩, 王者超, 等. 某地下水封石油洞库海水入侵评价与控制方法研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(7): 1338-1344. (QIAO Liping, WANG Xiaoqian, WANG Zhechao, et al. Evaluation and control method of seawater intrusion in an underground water-sealing oil storage cavern[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(7): 1338-1344. (in Chinese))
- [4] 黄安达. 花岗岩裂隙反应性溶质运移规律研究[D]. 济南: 山东大学, 2018. (HUANG Anda. Reactive Solute Transport in Single Granitic Fractures[D]. Jinan: Shandong University, 2018. (in Chinese))
- [5] 韩 曼. 地下水封石油洞库渗流场及溶质运移模拟研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007. (HAN Man. Research on Seepage and Solute Transport Simulation of Underground Petroleum Storage Caverns[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007. (in Chinese))
- [6] 蒋中明, 肖喆臻, 唐 栋, 等. 基于裂隙渗流效应的水封油库涌水量预测分析[J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 1041-1047, 1082. (JIANG Zhongming, XIAO Zhezhen, TANG Dong, et al. Prediction of water inflow in water-sealed oil storage Caverns based on fracture seepage effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(4): 1041-1047, 1082. (in Chinese))
- [7] 王者超, 张振杰, 李术才, 等. 基于离散裂隙网络法的地下石油洞库洞室间水封性评价[J]. 山东大学学报(工学版), 2016, 46(2): 94-100, 115. (WANG Zhechao, ZHANG Zhenjie, LI Shucai, et al. Assessment of inter-cavern containment property for underground oil storage caverns using discrete fracture networks[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2016, 46(2): 94-100, 115. (in Chinese))
- [8] 温毓繁, 任旭华, 张海波, 等. 裂隙倾角对石油洞库水封效果的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(5): 69-72. (WEN Yufan, REN Xuhua, ZHANG Haibo, et al. Impact of fissure inclination angle on water seal effect of petroleum storage cavern[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25(5): 69-72. (in Chinese))
- [9] 王笑雨, 张可霓, 李 毅. 裂隙岩体渗流及污染物迁移模型的数值模拟研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2015, 51(5): 527-532. (WANG Xiaoyu, ZHANG Keni, LI Yi. Modeling fluid flow and tracer transport in fractured rock by the effective continuum method[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2015, 51(5): 527-532. (in Chinese))
- [10] 李 明, 张刘俊, 冯 涛, 等. 污染场地地下水中砷的运移模拟研究[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(2): 141-150. (LI Ming, ZHANG Liujun, FENG Tao, et al. Simulation study on arsenic transport in groundwater of contaminated sites[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(2): 141-150. (in Chinese))
- [11] 姚 池, 姜清辉, 位 伟, 等. 复杂裂隙岩体水-力耦合模

- 型及溶质运移模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(8): 1656-1665. (YAO Chi, JIANG Qinghui, WEI Wei, et al. Numerical simulation of hydro-mechanical coupling and solute transport in complex fractured rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(8): 1656-1665. (in Chinese))
- [12] 魏亚强, 董艳辉, 周鹏鹏, 等. 基于离散裂隙网络模型的核素粒子迁移数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, **44**(1): 123-130, 136. (WEI Yaqiang, DONG Yanhui, ZHOU Pengpeng, et al. Numerical simulation of radionuclide particle tracking based on discrete fracture network[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, **44**(1): 123-130, 136. (in Chinese))
- [13] 李馨馨, 徐 轶. 裂隙岩体渗流溶质运移耦合离散裂隙模型数值计算方法[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(6): 1164-1171. (LI Xinxin, XU Yi. Hydraulic and solute transport coupling model for fractured rock mass with discrete fracture network using computational method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(6): 1164-1171. (in Chinese))
- [14] 张 弛, 陈 干, 吴剑锋, 等. 基于多点地质统计的二维裂隙网络溶质运移模拟[J]. 南京大学学报(自然科学), 2016, **52**(3): 456-463. (ZHANG Chi, CHEN Gan, WU Jianfeng, et al. Two-dimensional simulation of solute transport in fractured media based on multiple-point geostatistics[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2016, **52**(3): 456-463. (in Chinese))
- [15] 薛 强, 梁 冰, 刘建军. 裂隙岩体中污染物运移过程的数值模拟[J]. 岩土力学, 2003, **24**(增刊 2): 35-38. (XUE Qiang, LIANG Bing, LIU Jianjun. Numerical simulation of contaminant transport in jointed rockmass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(S2): 35-38. (in Chinese))
- [16] ZHU Y H, ZHAN H B, JIN M G. Analytical solutions of solute transport in a fracture-matrix system with different reaction rates for fracture and matrix[J]. Journal of Hydrology, 2016, **539**: 447-456.
- [17] 王者超, 李术才, 薛翊国, 等. 注取油循环荷载作用下地下水封油库运营性能评价[J]. 工程力学, 2013, **30**(12): 167-175, 212. (WANG Zhechao, LI Shucai, XUE Yiguo, et al. Assessment of performance of an underground crude oil storage Caverns subjected to cyclic loading due to storage and extraction of crude oil in operation phase[J]. Engineering Mechanics, 2013, **30**(12): 167-175, 212. (in Chinese))
- [18] MIYABE K, ISOGAI R. Estimation of molecular diffusivity in liquid phase systems by the Wilke-Chang equation[J]. Journal of Chromatography A, 2011, **1218**(38): 6639-6645.
- [19] 石云峰, 李 寻, 裴妙荣. 花岗岩单一裂隙中 Na、Cu、U 的迁移试验[J]. 核化学与放射化学, 2016, **38**(2): 123-128. (SHI Yunfeng, LI Xun, PEI Miaorong. Na, Cu, U transport in granite rock[J]. Journal of Nuclear and Radiochemistry, 2016, **38**(2): 123-128. (in Chinese))
- [20] GELHAR L W, WELTY C, REHFELDT K R. A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers[J]. Water Resources Research, 1992, **28**(7): 1955-1974.
- [21] TRACY J C. A practical guide to groundwater and solute transport modeling[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1996, **77**(44): 434.
- [22] 王者超, 李术才, 梁建毅, 等. 地下水封石油洞库渗水量预测与统计[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(8): 1490-1497. (WANG Zhechao, LI Shucai, LIANG Jianyi, et al. Prediction and measurement of groundwater flow rate of underground crude oil storage Caverns[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(8): 1490-1497. (in Chinese))
- [23] YANG H S, KANG J G, KIM K S, et al. Groundwater flow characterization in the vicinity of the underground Caverns in fractured rock masses by numerical modeling[J]. Geosciences Journal, 2004, **8**(4): 401-413.
- [24] 李卫明. 岩体裂隙对地下水封油库水封性能影响研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015. (LI Weiming. Study of Seal Properties in Underground Oil Storage Cavern Influenced by Rock Cracks[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015. (in Chinese))
- [25] GRISAK G E, PICKENS J F. Solute transport through fractured media: 1. The effect of matrix diffusion[J]. Water Resources Research, 1980, **16**(4): 719-730.
- [26] 席 庆, 李兆富, 罗 川. 基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 1773-1780. (XI Qing, LI Zhaofu, LUO Chuan. Sensitivity analysis of AnnAGNPS model's hydrology and water quality parameters based on the perturbation analysis method[J]. Environmental Science, 2014, **35**(5): 1773-1780. (in Chinese))