

DOI: 10.11779/CJGE20230353

# 地下水封石油洞库竖直水幕设计参数及其影响分析

乔丽苹<sup>1</sup>, 王菲<sup>1</sup>, 王者超<sup>2\*</sup>, 李成<sup>2</sup>

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110004)

**摘要:** 滨海地区地下水封石油洞库工程中, 需要增设竖直水幕系统, 以满足其水封性和控制海水入侵。为研究竖直水幕系统的设计方法与参数, 以滨海地区某地下水封石油洞库为例, 通过有限元数值模拟方法获得了竖直水幕孔距主洞室距离  $d$ 、竖直水幕孔间距  $b$ 、竖直水幕孔长度  $l$  和竖直水幕孔注水压力  $p_i$  4 个参数对洞库周围地下水渗流场、水封性、涌水量以及海水分布范围的影响规律, 并与现有结果进行了对比验证。研究表明: 竖直水幕孔距主洞室距离主要影响竖直水幕孔的埋深范围, 长度的影响范围取决于超出主洞室的变化位置, 间距和注水压力影响整个深度范围; 4 个参数对水封性和抑制海水入侵的影响程度顺序分别为:  $b < l < d < p_i$ ,  $d < b < l < p_i$ ; 研究中共 7 个工况存在海水入侵洞室的风险, 需进一步增强淡水补给。研究结论可为滨海地区地下水封石油洞库的竖直水幕设计参数提供一定理论依据。

**关键词:** 地下水封石油洞库; 竖直水幕; 设计参数; 水封性; 涌水量

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)07-1525-09

**作者简介:** 乔丽苹(1982—), 女, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程的教学与研究工作。E-mail: qiaoliping@mail.neu.edu.cn。

## Design parameters for vertical water curtains and their effect on underground water-sealed oil storage caverns

QIAO Liping<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>1</sup>, WANG Zhechao<sup>2</sup>, LI Cheng<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Safe Mining in Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** The additional vertical water curtain system is required in the underground water-sealed oil storage cavern project in coastal areas to meet its water-sealed properties and control seawater intrusion. In order to study the design method and parameters for the vertical water curtain system, the influence laws of four parameters of hole distance from the storage cavern ( $d$ ), hole spacing ( $b$ ), hole length ( $l$ ) and hole injection pressure ( $p_i$ ) of the vertical water curtain on the groundwater seepage field, water-sealed properties, water inflow and seawater distribution range around the cavern are obtained by using the finite element numerical simulation method and compared with the existing results for verification based on an underground water-sealed oil storage cavern in the coastal area. The research shows that the hole distance of the vertical water curtain from the storage cavern mainly has an impact on its burial depth range. The range of influences of the length depends on the location of the change beyond the storage cavern, and the spacing and injection pressure affect the entire depth range. The degree of influences of the four parameters on the water-sealed properties and prevention of seawater intrusion are as follows:  $b < l < d < p_i$  and  $d < b < l < p_i$ , respectively. A total of seven cases in the study are at risk of seawater intrusion into the cavern, and further enhancement of freshwater recharge is required. The research results can provide a theoretical basis for the design parameters of the vertical water curtains of the groundwater-sealed oil cave reservoirs in coastal areas.

**Key words:** underground water-sealed oil storage cavern; vertical water curtain; design parameter; water-sealed property; water inflow

## 0 引言

地下水封石油洞库因可靠性好、成本低、无污染等特性, 已成为国家战略石油储备的一个主要手段<sup>[1]</sup>。地下水封石油洞库的储油原理是利用水幕系统使洞室周围岩体裂隙均充满水, 形成地下水压, 从而保证洞

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(42177157); 辽宁省应用基础研究计划项目(2023JH2/101300153, 2022JH2/101300127); 沈阳中青年科技创新人才支持计划项目(RC210405); 沈阳市科学技术计划项目(22-322-3-17, 23-407-3-25)

**收稿日期:** 2023-04-23

**\*通信作者** (E-mail: wangzhechao@mail.neu.edu.cn)

室的水封有效性<sup>[2]</sup>。除了满足水封性外,科学设置水幕系统还可以有效减弱滨海地区地下水封石油洞库面临的海水入侵和相邻洞室间串油问题<sup>[3-4]</sup>。

水幕系统的设计包括水幕孔布置方式与设计参数。地下水封石油洞库水幕孔布置方式有倾斜、水平和水平与竖直结合 3 种<sup>[5]</sup>,设计参数主要包括间距、长度、注水压力和倾角。通常情况下,仅布置水平水幕孔或倾斜水幕孔即可满足洞库水封需求,有效确保水封性<sup>[6-7]</sup>。Dai 等<sup>[8]</sup>以黄岛地下水封石油洞库为背景,基于 Signorini 型变分不等式公式,分析了洞库的渗流特征和涌水量,并对水平水幕系统的设计参数,包括宽度、水压、水幕孔间距和高程进行了评价。Ravandi 等<sup>[9]</sup>采用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟和 2<sup>k</sup> 阶乘试验设计,研究了在不同条件下有效参数(岩体等效渗透率、有效孔隙度、水幕孔间距、水幕孔压力、水幕孔高程、洞顶以上地下水位、储油前水幕运行时间)对人工水平水幕性能的影响。Lin 等<sup>[10]</sup>针对锦州 LPG 地下储库,分析了不同水幕布置工况及水幕孔参数对施工和运行期的洞室水封性影响。马秀媛等<sup>[11]</sup>依托中国首个大型地下水封石油洞库工程,研究了水幕孔间距及节理裂隙宽度对水封性的影响。Xu 等<sup>[12]</sup>研究了不同水幕孔参数对地下水封石油洞库的地下水渗流场和洞室涌水量的影响,结果表明,水幕压力、水幕孔长度和倾角与涌水量呈正相关,而水幕孔间距与涌水量呈负相关。

已有研究所依托的工程多采用水平或倾斜的布孔方式,为两种布孔方式下的地下水封石油洞库水幕系统的设计提供了重要理论依据。然而,若岩体中优势结构面倾角中等<sup>[5]</sup>,需考虑水平与竖直水幕孔相结合的复合式布孔方案,以满足水封条件和防止海水进入洞室影响地下水封石油洞库的使用寿命。乔丽苹等<sup>[13]</sup>采用有限元数值模拟方法,针对某地下水封石油洞库开展了海水入侵评价与控制方法研究,但仅考虑了水平水幕、水平和竖直双水幕两种典型布置方式,未对水幕系统设计参数展开研究。因此,对于采用复合布孔方式,考虑竖直水幕孔及其设计参数对地下水封石油洞库的地下水渗流场及水封性的影响,需要进一步加强。本研究以滨海地区某地下水封石油洞库为背景,分析了复合布孔方式下不同竖直水幕孔参数对地下水封石油洞库渗流场的影响,模拟中设置了海边边界条件,通过地下水的流线分布情况分析不同竖直水幕孔参数对控制海水流入地下水封石油洞库的影响,为滨海地区地下水封石油洞库建设提供理论参考。

## 1 工程背景

### 1.1 工程概况

滨海地区某地下水封洞库共 5 条相互独立的储油洞室,洞顶标高为-62 m,底标高-92 m,总长度为 2704 m。洞室为宽 22 m、高 30 m 的直墙三心圆拱结构。水幕巷道的底面标高确定为-37 m,顶面标高为-30 m。施工巷道横断面形式采用直墙圆拱结构,宽度为 10 m,高度为 10 m,施工巷道沿着库区南侧及西侧周边布置。

### 1.2 地质条件

据工程地质测绘和调查、工程物探以及钻探成果,库区东部地层主要为燕山晚期岩浆侵入的二长花岗岩,库区中部地层主要为燕山晚期岩浆侵入的辉长岩,库区西部地层主要为前泥盆系片麻状花岗岩。地下水封石油洞库主要分布在花岗岩体中,密度为 2600 kg/m<sup>3</sup>,孔隙度为 1.5%,见表 1。

表 1 计算参数

Table 1 Calculation parameters

花岗岩 密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	花岗岩 孔隙 率/%	海水 密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	淡水密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	石油密 度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	渗透系数/ (10 <sup>-3</sup> m·d <sup>-1</sup> )
2600	1.5	1025	1000	850	6.48

根据库区地质测绘、物探、钻探以及水文试验成果,将库区可用岩体分为 2 个区域,库区渗透性根据其分布特征也按照分区进行统计分析。库区范围内一区渗透系数主要集中在 1.00×10<sup>-7</sup>~5.00×10<sup>-7</sup> m/s;二区渗透系数主要集中在 3.00×10<sup>-8</sup>~2.00×10<sup>-7</sup> m/s。抽水试验与压水试验得到的渗透性特征一致。根据现场渗透系数统计,表 1 中库区取渗透系数取值为 7.5×10<sup>-8</sup> m/s,即 6.48×10<sup>-3</sup> m/d。

## 2 模型建立及参数确定

### 2.1 控制方程

本研究采用多物理场耦合软件 COMSOL Multiphysics,研究稳态条件下,不同竖直水幕布孔方式对洞库渗流场的影响。研究区域的岩体视为等效连续介质,洞库周围地下水的流动流服从 Darcy 定律,流体流动满足 COMSOL Multiphysics 中的控制方程:

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

式中:  $\rho$  为流体的密度(kg/m<sup>3</sup>);  $p$  为渗流的压力(Pa);  $k$  为渗透率(m<sup>2</sup>);  $\mu$  为动力黏度系数(Pa·s);  $Q_m$  为流体质量源(kg/(m<sup>3</sup>·s));  $g$  为重力加速度(m/s<sup>2</sup>)。

### 2.2 几何模型

图 1 为地下水封石油洞库的几何模型,研究选取滨海地区某地下水封石油洞库的 2 个相邻洞室进行分析,分析中不考虑裂隙和断层的影响。模型长为 800 m,宽为 600 m,高为 200 m,两洞室由南至北分别编

号为#1和#2。模型顶部边界距洞顶 62 m, 底部边界距洞底 108 m, 模型南北两侧边界至两洞室外侧距离均为 262.6 m, 东西两侧边界至两洞室外侧距离均为 250 m。两洞室尺寸相同, 长度为 300 m, 宽度为 22 m, 高度为 30 m, 间距为 30.8 m。

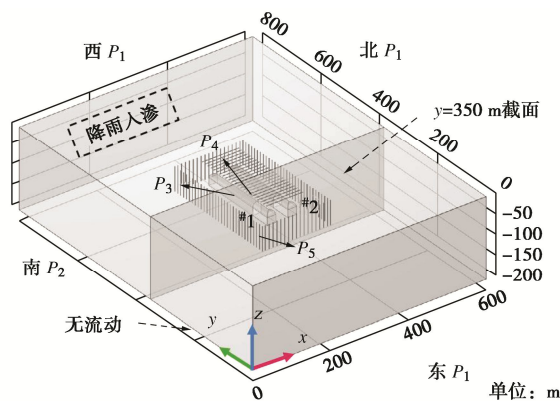


图 1 地下水封石油洞库几何模型

Fig. 1 Geometric model for an underground water-sealed oil storage cavern

研究中水平水幕孔的设计参数固定, 水平水幕孔沿垂直于主洞室轴线方向布置在主洞室正上方 25 m 处, 四周均超出主洞室 10 m, 孔径取为 0.1 m, 间距设置为 10 m。在水平水幕孔设计参数固定的条件下, 竖直水幕孔围绕主洞室四周布置, 研究中考虑不同竖直水幕孔距主洞室距离、间距、长度和注水压力组合。

2.3 边界条件及参数选取

模型边界条件设置见图 1。根据依托工程的实际情况, 模型的东面、西面、北面三面环海, 在渗流场中模型的压力边界条件设置为  $P_1 = -\rho_s g z$ ,  $\rho_s$  为海水密度; 模型的南面为内陆, 压力值为  $P_2 = -\rho_0 g z$ ,  $\rho_0$  为淡水密度; 模型顶部设置为降雨补给边界, 降雨入渗系数取为  $1 \times 10^{-9}$  m/s; 模型底部设置为无流动边界。本研究为地下水封石油洞库的运行期, 主洞室顶部为饱和石油蒸汽 (埋深范围为 62~73 m), 压力设置为 0.1 MPa。液态油品位于饱和蒸气之下 (埋深范围为 73~92 m), 即主洞室两侧及底部, 压力设置为  $P_3 = 0.1 - \rho_p g (-73 - z)$ ,  $\rho_p$  为石油密度。水平水幕孔压力设置为  $P_4 = 0.4$  MPa, 竖直水幕孔压力设置为  $P_5 = -\rho_p g z + p_i$ ,  $p_i$  为竖直水幕孔注水压力。

2.4 工况设置

为研究不同竖直水幕孔参数对洞库周围渗流场的影响, 首先选定满足水封性及海水在洞库周围分布条件的 4 个竖直水幕孔参数值作为典型工况: 竖直水幕孔距主洞室距离为 50 m, 间距为 10 m, 长度为 60 m (竖直水幕孔上方超出主洞室拱顶 10 m, 下方超出主

洞室底板 20 m), 注水压力为 0.3 MPa。竖直水幕孔布置在洞室四周最外围的水幕巷道中, 孔径固定为 0.1 m。竖直水幕孔 4 个参数分别对应 4 个工况组 (距主洞室距离 I, 间距 II, 长度 III, 注水压力 IV), 每组考虑 5 个不同参数值, 共 20 个工况, 如表 2 所示。

表 2 工况设置

Table 2 Setting of working conditions					
工况组	距主洞室 距离/m	间距/m	长度/m	注水压力/ MPa	
I	1	30	10	60	0.3
	2	40	10	60	0.3
	3	50（典型）	10（典型）	60（典型）	0.3（典型）
	4	60	10	60	0.3
	5	70	10	60	0.3
II	1	50	5	60	0.3
	2	50	7.5	60	0.3
	3	50	10	60	0.3
	4	50	12.5	60	0.3
	5	50	15	60	0.3
III	1	50	10	50（上超 10， 下超 10）	0.3
	2	50	10	60（上超 10， 下超 20）	0.3
	3	50	10	70（上超 20， 下超 20）	0.3
	4	50	10	80（上超 20， 下超 30）	0.3
	5	50	10	90（上超 30， 下超 30）	0.3
IV	1	50	10	60	0.1
	2	50	10	60	0.2
	3	50	10	60	0.3
	4	50	10	60	0.4
	5	50	10	60	0.5

3 结果与分析

3.1 不同竖直水幕孔参数对渗流场的影响

图 2 为垂直于洞室轴线方向  $y=350$  m 截面 (如图 1 所示截面位置) 上的速度矢量图, 选取该截面位置研究洞库周围渗流场的变化情况。在距离#2 主洞室外侧 150 m 位置 ( $x=487.4$  m) 设置测线 1-1', 用于观测在不同竖直水幕孔参数组合条件下洞库周围地下水渗流速度的大小沿深度的变化情况。

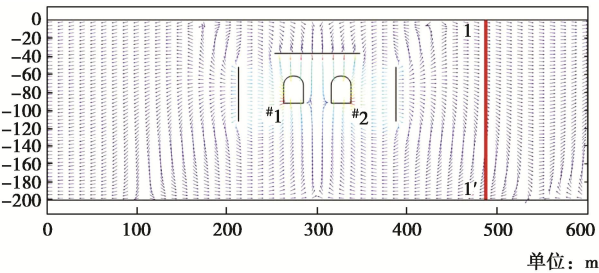
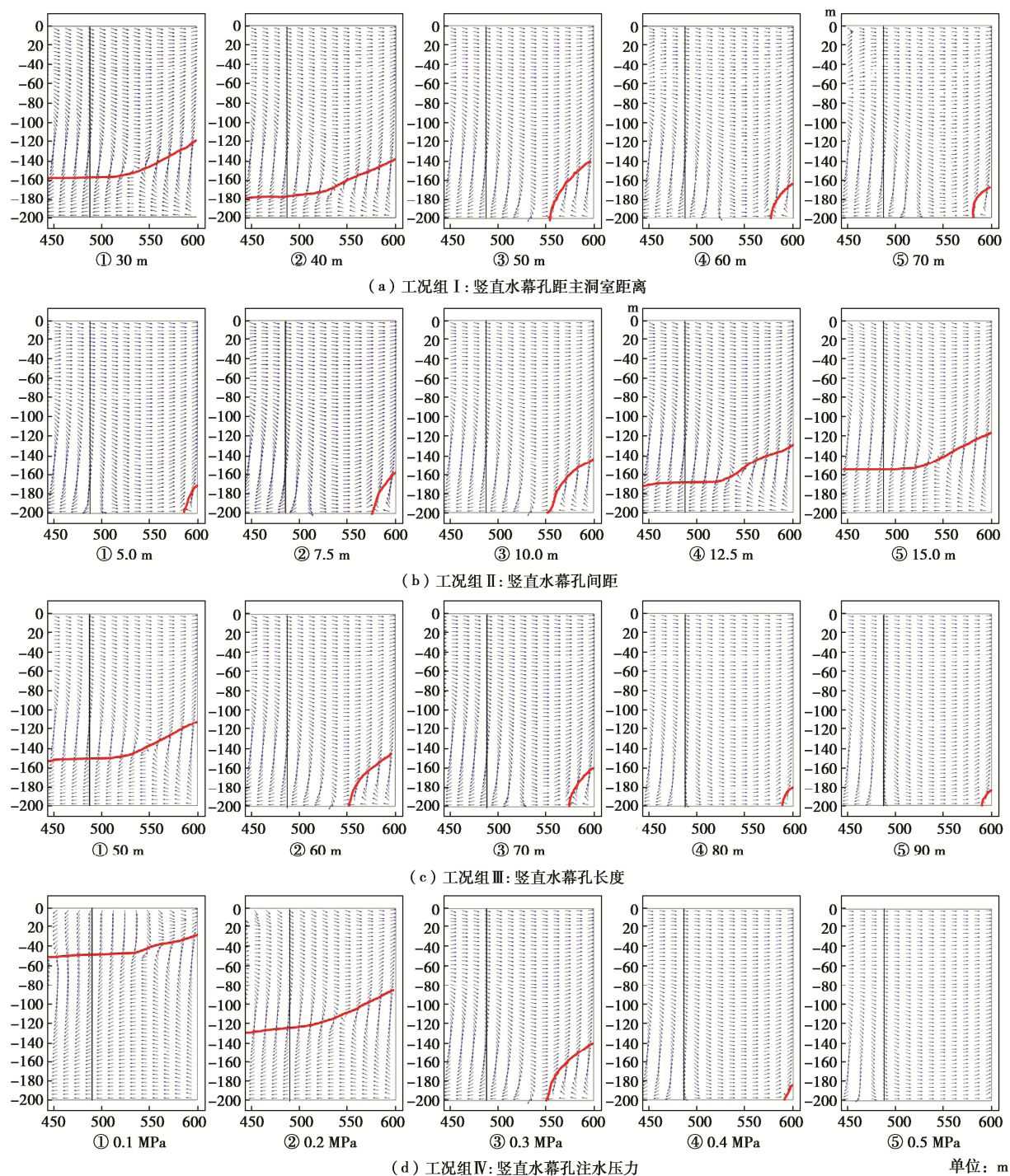


图 2 典型工况的速度矢量图

Fig. 2 Velocity vectors of typical working conditions



图 3 各工况组的速度矢量图 ( $x=450\sim600$  m)Fig. 3 Velocity vectors for each working case group ( $x=450\sim600$  m)

如图 3 所示 (红线划定海边边界流入研究区域的海水流线范围。), 选取各参数下  $x=450\sim600$  m 区间的速度矢量图, 以分析洞库周围的地下水渗流方向。在该区间内根据地下水渗流场中海水流线是否到达  $x=450$  m 截断处的流线分布情况, 即可判断是否有海水流线流入洞室。

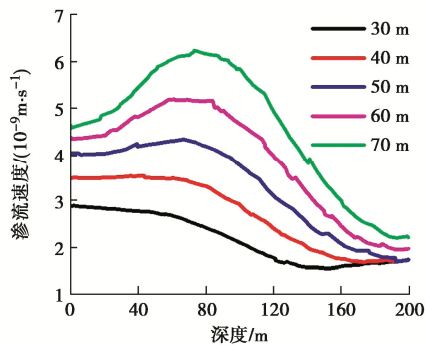
图 3 中由红线划定海边边界处海水流线流入研究区域的范围, 可以明显看出不同竖直水幕孔参数提供的淡水地下水补给对海水入侵的抑制程度。图 4 为不

同竖直水幕孔参数组合条件下, 测线 1-1' 处深度范围的渗流速度大小变化情况, 从图 4 中可以获得不同竖直水幕孔参数对渗流速度的影响结果。

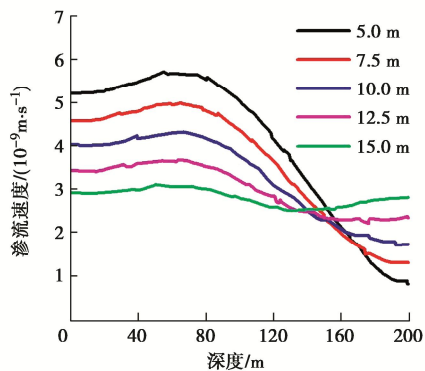
#### (1) 竖直水幕孔距主洞室距离的影响分析

由图 3 (a) 中工况组 I 的速度矢量图可以看出, 竖直水幕孔距主洞室距离为 30, 40 m 时, 均有来自海边边界的海水流线到达  $x=450$  m 位置, 主洞室存在海水入侵的风险。此外, 距主洞室距离为 30 m 时, 由红线划定的海水流线范围更大, 海水入侵主洞室的

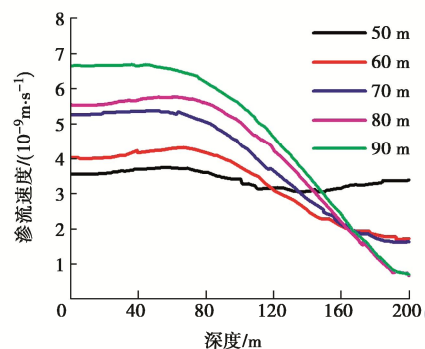
风险更大, 水幕系统对淡水地下水的补给作用需要增强。竖直水幕孔距主洞室距离为 50, 60, 70 m 时, 海水流线均未到达  $x=450$  m 位置, 水幕系统提供的淡水补给充足, 主洞室不会产生海水入侵问题。可以看出, 竖直水幕孔距主洞室距离越远越靠近海边界, 对海水入侵的抑制作用越强。



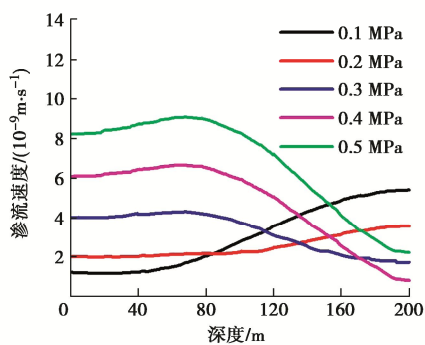
(a) 距主洞室距离-I



(b) 间距-II



(c) 长度-III



(d) 注水压力-IV

图4 各工况组渗流速度与深度的关系曲线图

Fig. 4 Curves of seepage velocity versus depth for each case group

图4(a)为测线1-1'处工况组I的渗流速度大小与深度的关系曲线图。可以看出, 竖直水幕孔距主洞室距离越远, 越靠近测线1-1', 其渗流速度越大。竖直水幕孔距主洞室距离增加时, 水幕孔数量会随之增加, 但增加数量不多, 对地下水的补给程度影响较小。距主洞室距离增加时, 测线1-1'上渗流速度增大, 但仅在竖直水幕孔埋深范围(竖直水幕孔埋深为52~112 m)大幅增长, 主要影响水幕孔埋深范围的渗流场, 对其余位置影响较小。

#### (2) 竖直水幕孔间距的影响分析

由图3(b)中工况组II的速度矢量图可以看出, 竖直水幕孔间距为12.5, 15 m时, 均有来自海边界的海水流线到达 $x=450$  m位置, 主洞室存在海水入侵的风险。间距为15 m时, 流入主洞室的海水流线更多, 海水入侵风险更大, 水幕系统对淡水地下水的补给作用需要增强。竖直水幕孔间距为5, 7.5, 10 m时, 海水流线均未到达 $x=450$  m位置, 水幕系统提供的淡水补给充足, 主洞室不会产生海水入侵问题。可以看出, 竖直水幕孔间距越小, 水幕孔布置的数量越多, 对海水入侵的抑制效果越好。

图4(b)为测线1-1'处工况组II的渗流速度大小与深度的关系曲线图。可以看出, 竖直水幕孔间距越小, 测线1-1'上的渗流速度越大。由于竖直水幕孔间距减小, 水幕孔的数量大幅增加, 淡水补给随之增加。间距的改变对测线1-1'上全部深度范围的渗流场产生影响, 渗流速度的大小近似均匀的变化。

#### (3) 竖直水幕孔长度的影响分析

由图3(c)中工况组III的速度矢量图可以看出, 竖直水幕孔长度为50 m时, 有来自海边界的海水流线到达 $x=450$  m位置, 主洞室存在海水入侵的风险, 水幕系统对淡水地下水的补给作用需要增强。竖直水幕孔长度为60, 70, 80, 90 m时, 海水流线均未到达 $x=450$  m位置, 水幕系统对淡水地下水提供的补给, 可以防止海边界的海水流线流入主洞室。可以看出, 竖直水幕孔长度越长, 对海水入侵的抑制作用越强。

图4(c)为测线1-1'处工况组III的渗流速度大小与深度的关系曲线图。可以看出, 竖直水幕孔长度越长, 测线1-1'上的渗流速度越大。竖直水幕孔长度增加, 淡水补给随之增加, 且竖直水幕孔超出主洞室拱顶长度增加的主要影响深度约为0~120 m, 竖直水幕孔超出主洞室底板长度增加的主要影响深度约为120~200 m。竖直水幕孔超出主洞室拱顶或底板的长度改变, 相应位置深度影响范围的渗流速度随之发生较为明显的改变, 其余位置渗流速度变化较小。

#### (4) 竖直水幕孔注水压力的影响分析



由图 3 (d) 中工况组 IV 的速度矢量图可以看出, 竖直水幕孔注水压力为 0.1, 0.2 MPa 时, 均有来自海边边界的海水流线到达  $x=450$  m 位置, 主洞室存在海水入侵的风险。注水压力为 0.1 MPa 时, 由红线划定的海水流线范围更大, 海水入侵主洞室的风险更大, 水幕系统对淡水地下水的补给作用需要增强。竖直水幕孔注水压力为 0.3, 0.4, 0.5 MPa 时, 海水流线均未到达  $x=450$  m 位置, 水幕系统提供的淡水补给充足, 主洞室不会产生海水入侵问题。可以看出, 竖直水幕孔注水压力越大, 对海水入侵的抑制作用越强。

图 4 (d) 为测线 1-1' 处工况组 IV 的渗流速度大小与深度的关系曲线图。可以看出, 竖直水幕孔注水压力越大, 测线 1-1' 上的渗流速度越大。竖直水幕孔注水压力增加时, 提供的淡水补给会大幅增加, 测线 1-1' 上渗流速度的大小在整个深度范围内近似均匀的增加。

#### (5) 竖直水幕孔参数对渗流场的影响分析

由图 3 中各工况组的速度矢量图和图 4 中不同工况组下渗流速度与深度的关系曲线图可以看出, 不同竖直水幕孔参数对洞库周围地下水渗流方向和渗流速度大小的影响程度有明显差异。图 3 中竖直水幕孔距主洞室距离为 50, 60, 70 m, 竖直水幕孔间距为 5, 7.5, 10 m, 竖直水幕孔长度为 60, 70, 80, 90 m, 竖直水幕孔注水压力为 0.3 MPa, 以上 11 个工况海水流线在模型底部被阻断, 尽管在测线 1-1' 上渗流速度也存在不同方向, 但由于流线全部来自水幕系统, 图 4 中对应的曲线整体趋势未发生改变。

为提出满足水封性及淡水补给要求的竖直水幕孔设计参数选取方案, 研究了 4 个参数对渗流速度大小的影响程度。选择测线 1-1' 上洞库埋深范围内, 深度为 80 m 位置作为监测点 1, 研究 4 个参数对洞库埋深范围渗流速度大小的影响程度, 可为水封性评价提供参考。由于海水密度大于淡水密度, 海水主要从底部入侵含水层, 选择测线 1-1' 上深度为 190 m 位置作为监测点#2, 研究 4 个参数对模型底部渗流速度大小的影响程度, 可为控制海水入侵提供参考。规定监测点 1 的渗流速度方向指向海边边界为正, 指向洞室为负, 监测点 2 规定相反。

图 5 为测线 1-1' 上两监测点处渗流速度的大小及标准差值情况。监测点 1 处 4 个参数对应的标准差值分别约为 1.47, 1.00, 1.04, 4.20, 各参数标准差值间的关系, 即 4 个参数对该位置渗流速度大小的影响程度顺序为  $b < l < d < p_i$ 。监测点#2 处 4 个参数对应的标准差值分别约为 0.2, 0.77, 1.85, 3.29, 4 个参数对该位置渗流速度大小的影响程度顺序为  $d < b < l < p_i$ 。4

个参数对两监测点渗流速度大小的影响程度顺序不同, 主要原因在于竖直水幕孔距主洞室距离这一参数主要对竖直水幕孔埋深范围的渗流场有影响。

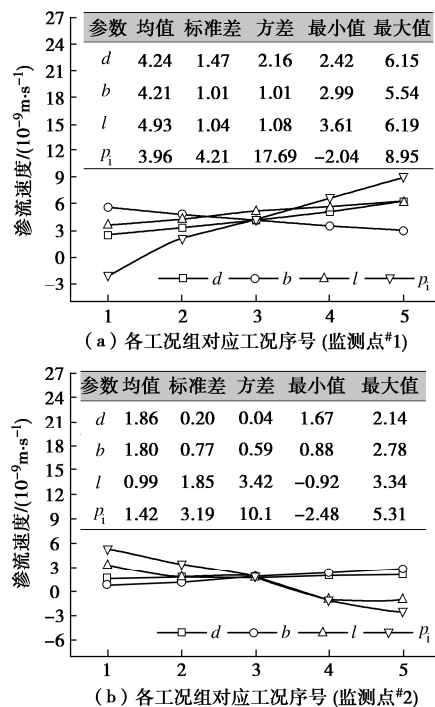


图 5 测线 1-1' 上监测点渗流速度

Fig. 5 Seepage velocities of monitoring point on measuring line 1-1'

### 3.2 不同竖直水幕孔参数对水封性与涌水量的影响

#### (1) 不同竖直水幕孔参数对水封性的影响

为了对不同竖直水幕孔参数条件下的洞室水封压力变化情况进行分析, 截取距离主洞室顶部 30 m 位置的水平截面, 在截面内布置沿洞室轴向和垂向的压力测线 (图 6 所示测线 A-A' 和 B-B'), 对两测线上的压力变化情况进行分析<sup>[15]</sup>。

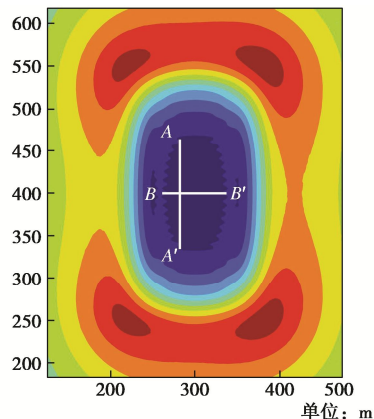


图 6 洞顶 30 m 水平截面上水封压力云图

Fig. 6 Water-sealed pressure clouds on 30 m-horizontal section at top of cavern

图 7 (a) ~ (d) 为各工况组沿洞室轴向的水封压力曲线, 图 7 (e) ~ (h) 为各工况组沿洞室垂向

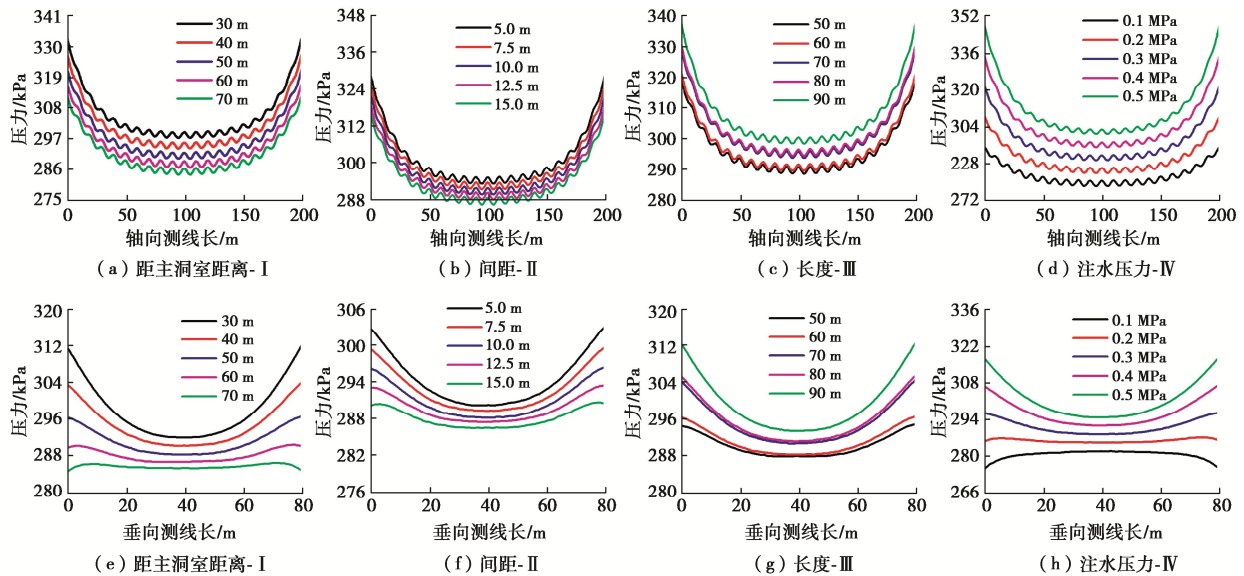


图7 各工况组洞顶30 m处的水封压力分布图

Fig. 7 Distribution of water-sealed pressure at 30 m from top of cavern for each case group

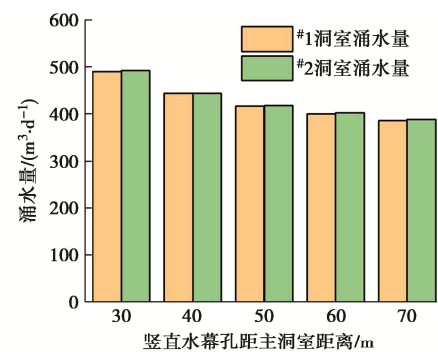
的水封压力曲线。通过分析测线  $A-A'$  和  $B-B'$  上的压力分布情况可知, 各工况组洞室周围的水封压力在 270~350 kPa 范围内, 均可满足水封性要求。竖直水幕孔距主洞室距离和间距与水封压力呈负相关, 长度和注水压力与水封压力呈正相关, 由于水封性评价本质上与对渗流场的研究相同, 且由图 7 可以看出, 4 个参数对水封性的影响作用与其对监测点 1 处的相同。经对比验证, 以上关于 4 个参数对水封性的影响作用分析与李玉涛等<sup>[15]</sup> ( $b < d < p_i$ ) 和 Xu 等<sup>[12]</sup> ( $a < b < l < p_i$ ,  $a$  为水幕孔倾角) 的研究结论一致。此外, 图 7 中由于轴向测线  $A-A'$  垂直于水平水幕孔布置, 轴向水封压力曲线在水平水幕孔处有明显的波动, 垂向测线  $B$  平行于水平水幕孔未出现波动。由于轴向与垂向测线的起点和终点位置均为竖直水幕孔布置处, 两处水封压力明显高于其余位置。

#### (2) 不同竖直水幕孔参数对涌水量的影响

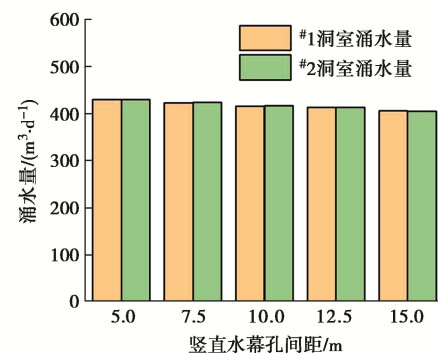
图 8 为 4 个参数的涌水量直方图。洞室涌水量的研究基于对水封性的研究, 4 个参数对涌水量的影响程度顺序与水封性一致。工况组 I 与涌水量呈负相关, 30~70 m 总涌水量减少约 207.27 m<sup>3</sup>/d; 工况组 II 与涌水量呈负相关, 5~15 m 总涌水量减少约 48.30 m<sup>3</sup>/d; 工况组 III 与涌水量呈正相关, 50~90 m 总涌水量增加约 48.89 m<sup>3</sup>/d; 工况组 IV 与涌水量呈正相关, 0.1~0.5 MPa 总涌水量增加约 156.10 m<sup>3</sup>/d。

竖直水幕孔距主洞室距离和注水压力对涌水量的影响程度较竖直水幕孔间距和长度更高。距主洞室距离 30~50 m 涌水量变化较大, 60~70 m 两工况距主洞室距离相对较远, 对涌水量的影响程度降低。由于注水压力对研究深度范围内渗流速度大小的影响近似

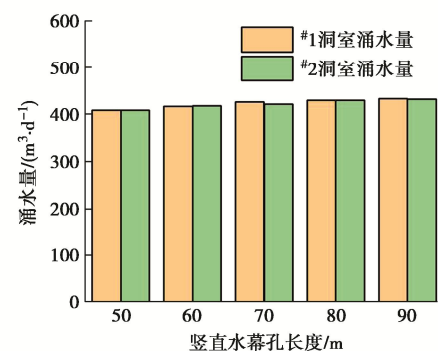
均匀, 涌水量也近似均匀变化。



(a) I



(b) II



(c) III

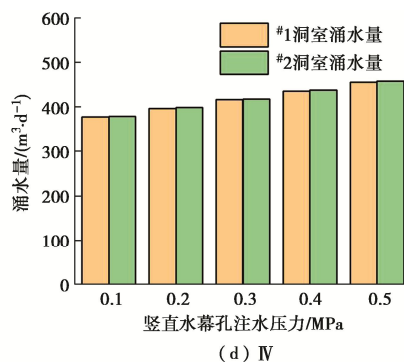


图 8 各工况组的洞室涌水量直方图

Fig. 8 Histogram of cave water inflow for each case group

## 4 讨 论

结合图 7, 8 可以看出, 水封压力与涌水量之间呈正相关。洞库的水封压力在满足储油条件的同时也不宜过大, 否则会导致洞室涌水量过大而增加洞库的运营成本。根据地下水封石油洞库的储油原理, 水封洞库必须长期处于地下水位以下一定深度, 洞室拱顶上距设计稳定地下水位垂直距离不应小于计算值<sup>[16]</sup>:

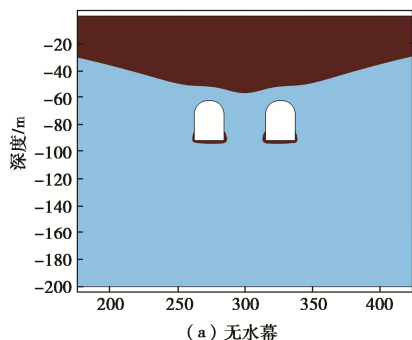
$$H_w = 100P + 20 \quad (2)$$

式中:  $H_w$  为地下水位线至主洞室拱顶的垂直距离

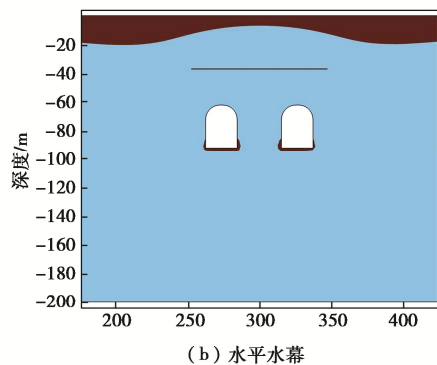
(m);  $P$  为主洞室内的气体压力 (MPa)。根据该模型中主洞室饱和蒸气压力为 0.1 MPa 可知, 地下水位线距主洞室拱顶的最小垂直距离  $H_w=30$  m。

由洞库运行期垂直主洞室轴线方向地下水位图 (图 9 (a) ~ (c)) 可以看出, 运行期洞库无水幕条件下, 地下水位线超出主洞室拱顶少于 30 m, 不满足水封要求; 运行期洞库仅设置水平水幕条件下, 地下水位距主洞室拱顶的垂直距离已达到 30 m, 即可以满足水封要求; 运行期设置水平水幕后加设竖直水幕, 地下水位进一步升高。

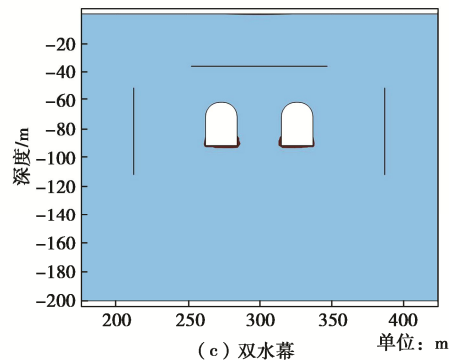
地下水位升高可以提高水封性能, 同时, 淡水向海水的对流作用增强, 海水向淡水的水动力弥散作用减弱, 可以有效地控制滨海地区的海水入侵<sup>[13]</sup>。然而, 洞室涌水量会随地下水位升高而增加, 导致运营期成本增加。因此, 在滨海地区增设竖直水幕阻止海水入侵时, 宜首先考虑调整距主洞室距离、间距 2 个参数, 其次考虑长度和注水压力 2 个参数, 以减少水封压力过大导致洞室涌水量超出限制的风险。



(a) 无水幕



(b) 水平水幕



(c) 双水幕

单位: m

图 9 垂直主洞室轴线方向地下水位图

Fig. 9 Groundwater levels in direction perpendicular to axis of main cavern

## 5 结 论

本文通过建立滨海地区某地下水封石油洞库地下水渗流场的数值模型, 分析了洞库运行期不同竖直水幕孔参数对洞库周围地下水的渗流方向、渗流速度大小、水封性、涌水量的影响规律, 得出以下 3 点结论。

(1) 竖直水幕孔 4 个参数对渗流场的影响范围分别为: 竖直水幕孔距主洞室距离主要影响竖直水幕孔的埋深范围, 竖直水幕孔长度影响范围取决于超出主洞室顶部或底部的位置, 竖直水幕孔间距和注水压力对整个研究深度都有影响。

(2) 工况组 I 下的 30, 40 m, 工况组 II 下的 12.5, 15 m, 工况组 III 下的 50 m, 工况组 IV 下的 0.1, 0.2 MPa, 7 个工况均有海水流线到达  $x=450$  m 位置, 存在海水流入洞室的风险, 滨海地区竖直水幕孔参数设计需要注意对海水入侵的控制。

(3) 竖直水幕孔 4 个参数对运行期洞库周围的地下水渗流方向和渗流速度大小均有一定程度影响, 经对比验证, 针对水封性的影响程度的顺序为: 间距  $b <$  长度  $l <$  距主洞室距离  $d <$  注水压力  $p_i$ , 针对抑制海水入侵的影响程度顺序为距主洞室距离  $d <$  间距  $b <$  长度  $l <$  注水压力  $p_i$ 。竖直水幕孔距主洞室距离和注水压力对涌水量的影响程度较竖直水幕孔间距和长度更高。



## 参考文献:

- [1] 王者超, 李术才, 乔丽苹, 等. 大型地下石油洞库自然水封性应力-渗流耦合分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(8): 1535-1543. (WANG Zhechao, LI Shucai, QIAO Liping, et al. Assessment of natural containment properties of an underground crude oil storage cavern using fluid flow-stress coupling method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(8): 1535-1543. (in Chinese))
- [2] 李术才, 王者超. 地下油库水封性评价方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016. (LI Shucai, WANG Zhechao. Evaluation Method and Application of Water Tightness of Underground Oil Depot[M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese))
- [3] 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))
- [4] LIM J W, LEE E, MOON H S, et al. Integrated investigation of seawater intrusion around oil storage caverns in a coastal fractured aquifer using hydrogeochemical and isotopic data[J]. Journal of Hydrology, 2013, **486**: 202-210.
- [5] 王者超, 李术才, 薛翊国, 等. 地下石油洞库水幕设计原则与连通性判断方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(2): 276-286. (WANG Zhechao, LI Shucai, XUE Yiguo, et al. Design principles and inter-connectivity determination method of groundwater curtaining system for underground crude oil storage Caverns[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(2): 276-286. (in Chinese))
- [6] 李术才, 张立, 马秀媛, 等. 大型地下水封石油洞库渗流场时空演化特征研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(7): 1979-1986. (LI Shucai, ZHANG Li, MA Xiuyuan, et al. Space-time evolution behaviour of seepage field around a large underground petroleum storage caverns with groundwater curtaining[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(7): 1979-1986. (in Chinese))
- [7] 时洪斌, 刘保国. 水封式地下储油洞库人工水幕设计及渗流量分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(1): 130-137. (SHI Hongbin, LIU Baoguo. Design and seepage discharge analysis of artificial water curtains for water sealed underground petroleum storage caverns in rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(1): 130-137. (in Chinese))
- [8] DAI Y F, ZHOU Z F. Steady seepage simulation of underground oil storage caverns based on Signorini type variational inequality formulation[J]. Geosciences Journal, 2015, **19**(2): 341-355.
- [9] GHOTBI RAVANDI E, RAHMANNEJAD R, KARIMI-NASAB S, et al. Sensitivity analysis of effective parameters on water curtain performance for crude oil storage in Iranian URC using the 2 k factorial design and numerical modeling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, **58**: 247-256.
- [10] LIN F, REN F, LUAN H B, et al. Effectiveness analysis of water-sealing for underground LPG storage[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, **51**: 270-290.
- [11] 马秀媛, 张立, 苏强, 等. 大型地下水封石油洞库水幕系统优化设计研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(3): 776-782, 882. (MA Xiuyuan, ZHANG Li, SU Qiang, et al. Optimum design research on water curtain system in large underground water-sealed oil storage cavern[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(3): 776-782, 882. (in Chinese))
- [12] XU Z H, GAO B, LI S C, et al. A groundwater seal evaluation method based on water inflow for underground oil storage caverns[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2018, **82**: 265-277.
- [13] 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))
- [14] QIAO L P, LI C, WANG Z C, et al. Seawater intrusion into an underground water-sealed oil storage cavern: effects of water curtain system, hydraulic conductivity and dispersivity[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2022, **126**: 104542.
- [15] 李玉涛, 张彬, 石磊, 等. 海岛环境下地下水封油库竖直水幕系统水封可靠性研究[J]. 工程地质学报, 2019, **27**(2): 267-276. (LI Yutao, ZHANG Bin, SHI Lei, et al. Water-sealed reliability of vertical water curtain system in underground oil storage cavern in island environment[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, **27**(2): 267-276. (in Chinese))
- [16] 地下水封石油洞库设计标准: GB/T 50455—2020[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020. (Standard for Design of Underground Oil Storage in Rock Caverns: GB/T 50455—2020[S]. Beijing: China Planning Press, 2008. (in Chinese))