

文章编号:1672-3961(2025)02-0134-09

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2024.033

# 海岛地下水封石油洞库海水入侵防控

王敬奎<sup>1</sup>, 乔丽苹<sup>2</sup>, 王菲<sup>2</sup>, 王者超<sup>3</sup>, 李巍<sup>3</sup>

(1.中海油石化工程有限公司, 山东 青岛 266101; 2.东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 3.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:**为防止海岛大规模地下开挖引发海水入侵,以某海岛地下水封石油洞库工程为背景展开研究。利用有限元数值模拟方法,获得了施工期洞室开挖无水幕和运营50 a后不同水平水幕设计参数工况下,地下水封石油洞库的渗流场和海水入侵控制效果。研究表明:洞室开挖无水幕不满足水封要求,需增设水幕系统;洞室储油后地下水位比洞室空置上升,涌水量和海水入侵程度降低;增设水平水幕系统后,洞室涌水量大幅度提高;运营期仅设置水平水幕不能完全阻止海水入侵,只能将其控制在一定范围;水封效果、涌水量及海水入侵控制效果与水幕孔长度和注水压力呈正相关,且注水压力的影响程度更高。

**关键词:**海岛环境;海水入侵;地下水封石油洞库;水幕系统;水封性

中图分类号:TU432

文献标志码:A

引用格式:王敬奎,乔丽苹,王菲,等.海岛地下水封石油洞库海水入侵防控[J].山东大学学报(工学版),2025,55(2):134-142.

WANG Jingkui, QIAO Liping, WANG Fei, et al. The prevention and control of seawater intrusion into underground water-sealed oil storage cavern on an island [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(2):134-142.

## The prevention and control of seawater intrusion into underground water-sealed oil storage cavern on an island

WANG Jingkui<sup>1</sup>, QIAO Liping<sup>2</sup>, WANG Fei<sup>2</sup>, WANG Zhechao<sup>3</sup>, LI Wei<sup>3</sup>

(1. CNOOC Petrochemical Engineering Company Limited, Qingdao 266101, Shandong, China; 2. College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China; 3. Key Laboratory of Ministry of Education for Safe Mining in Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110004, Liaoning, China)

**Abstract:** In order to prevent seawater intrusion caused by large-scale underground excavation on the island, which affected the construction and operation safety of the underground water-sealed oil storage cavern, a research on the prevention and control of seawater intrusion had been carried out on the basis of the underground water-sealed oil storage cavern project on a certain island. Through the finite element numerical simulation method, the seepage field and seawater intrusion control effect of underground water-sealed oil storage cavern under the working conditions of different horizontal water curtain design parameters during the construction period of cavern excavation without water curtain and after 50 years of operation period were obtained. The study showed that: cavern excavation without water curtain does not meet the water-sealed property, additional water curtain system was required; the groundwater level was elevated after oil storage in the cavern compared to the cavern vacancy, and the water inflow and seawater intrusion were reduced; the installation of horizontal water curtains only during the operation period could not completely prevent the entry of seawater, but could only control it to a certain extent; the effectiveness of water-sealed property, water inflow and seawater intrusion control was positively correlated with the length of water curtain holes and water injection pressure, and the water injection pressure had a higher degree of influence.

**Keywords:** island environment; seawater intrusion; underground water-sealed oil storage cavern; water curtain system; water-sealed property

收稿日期:2024-02-06

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(51779045);辽宁省“兴辽英才计划”资助项目(XLYC1807029)

第一作者简介:王敬奎(1972—),男,山东单县人,研究员,主要研究方向为地下水封洞库设计。E-mail:wangjinkui2023@163.com

## 0 引言

石油战略储备对于保障国民经济的持续稳定发展、应对突发事件并保证持续稳定的石油供给具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。目前,建造地下水封石油洞库是国内外石油战略储备的一种重要方式<sup>[3]</sup>。滨海地区广泛分布着优质稳定的岩性区域,且距离石油码头或炼油厂位置较近,为建造大型地下水封石油洞库提供了极为有利的条件<sup>[4]</sup>。

天然条件下,滨海含水层的咸、淡水之间维持着动态平衡。滨海地区地下水的过度开采或大规模地下开挖等人类活动,导致了区域性地下水位下降,使咸淡水界面向内陆移动,形成咸水对淡水层的补给,使淡水层咸化,即为海水入侵<sup>[5-6]</sup>。海岛周围环绕海水,建造地下水封石油洞库时,施工及运营期间洞室存在海水入侵风险<sup>[7]</sup>。海水中含有浓度较高的  $\text{Cl}^-$  等,会腐蚀洞库的结构设施,对洞库的长期稳定性构成威胁<sup>[8]</sup>。

国内外许多学者针对地下水封石油洞库的海水入侵防控展开了研究。文献[9]采用现场监测和数值模拟的方法,对韩国 Yeosu 地下储油洞库的海水入侵程度进行了评价,研究认为,沿海岸线设置屏障井可以有效阻止海水入侵洞室;文献[10]以多物理场耦合理论为基础,采用有限元方法分析了潮汐波动和水幕系统对我国某海岛储油洞海水入侵时空变化的影响,结果表明,在海岛环境下地下水封石油洞库的运行有诱发海水入侵的风险;文献[11-12]研究表明仅设置水平水幕不能阻止海水入侵,必须设置竖直水幕才能有效阻止海水入侵洞室。

水幕系统的设计内容包括水幕孔的布置方式和设计参数,地下水封石油洞库水幕孔布置方式有水平、水平与竖直结合和倾斜3种,设计参数主要包括间距、长度、注水压力和倾角<sup>[13]</sup>。文献[14]以青岛地下水封石油洞库为依托,研究了洞库的渗流特征和涌水量,并对水平水幕系统的宽度、水压、间距和高程进行了评价;文献[15]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期和运行期的洞室水封性影响;文献[16]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。

以上研究针对地下水封洞库海水入侵问题展

开了研究,可以通过设置水幕系统对海水入侵进行控制,并且现有研究表明必须设置竖直水幕才能完全阻止海水入侵洞室<sup>[7,10-12]</sup>。然而,本研究依托的地下水封石油洞库工程位于海岛南侧近临海岸线,且洞室与海岸线之间存在回填土,不宜设置竖直水幕系统,因此需调整水平水幕设计参数将海水入侵控制在一定范围。

根据某海岛地下水封石油洞库岩土工程勘察报告获得的钻孔、物探、施工勘探等数据,建立了三维水文地质模型,依据现场压水试验、水幕系统试验、涌水量监测等数据信息分析确定水文地质模型准确物理参数。通过校核模型得到初始条件、边界条件、渗透性描述等准确物理参数,采用COMSOL有限元软件中的渗流场与溶质运移场耦合形式,对地下水封石油洞库不同水平水幕设计参数下施工期和运营期的水封性、涌水量、海水入侵控制效果进行模拟预测。预测结果可以为海岛建造地下水封石油洞库设计水幕系统、阻止海水入侵提供一定参考。

## 1 工程背景

### 1.1 工程概况

拟建地下水封洞库项目建设规模为  $309 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,库区工程布置如图1所示。主洞室按  $\text{N}55^\circ\text{W}$  向平行设置,分为3组洞罐,分别由6条、2条、4条储油洞室组成,共布置12条储油洞室。储油洞室断面尺寸为宽20 m、高30 m,洞室顶板标高为-60 m,底板标高为-90 m。施工巷道布置2条,尺寸为宽9 m、高8 m;设置3层连接巷道,尺寸为宽9 m、高8 m;设置进出油竖井2个,直径为6 m;水幕系统包括水幕巷道3条、水幕连接巷道1条、环形水幕巷道1条,尺寸均为宽7 m、高6 m,水幕巷道顶板标高-29 m,水幕巷道底板标高-35 m。

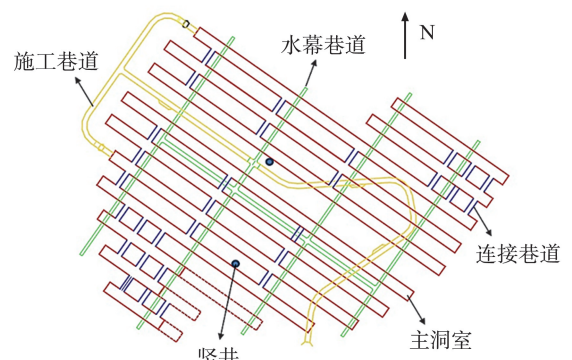


图1 库区平面布置图

Fig.1 Layout of the reservoir area

## 1.2 工程地质

根据地质时代、成因、岩性及工程性质的不同,库址区内的地层岩性由新至老可分为2大类:(1)第四系,(2)侏罗系上统。地质测绘结果表明场区内主要存在辉绿岩脉,其一般呈透镜状发育,岩体质量整体一般~较差,岩体质量等级为IV级,宽度为

0.1~4.5 m。根据勘察结果可知,对洞库工程建设影响较大的是分布在工程建设场地内的断层和破碎带(如图2所示)。场区范围内共揭露的断层有NE向断层 $F_1$ 、 $F_3$ ,NW向断层 $F_2$ 、 $F_4$ ,EW向断层 $f_5$ 、 $f_6$ ,发育1条NW向破碎带 $P_1$ , $P_1$ 产状 $N15^\circ W$ , $SW \angle 85^\circ$ ,宽约1 m。

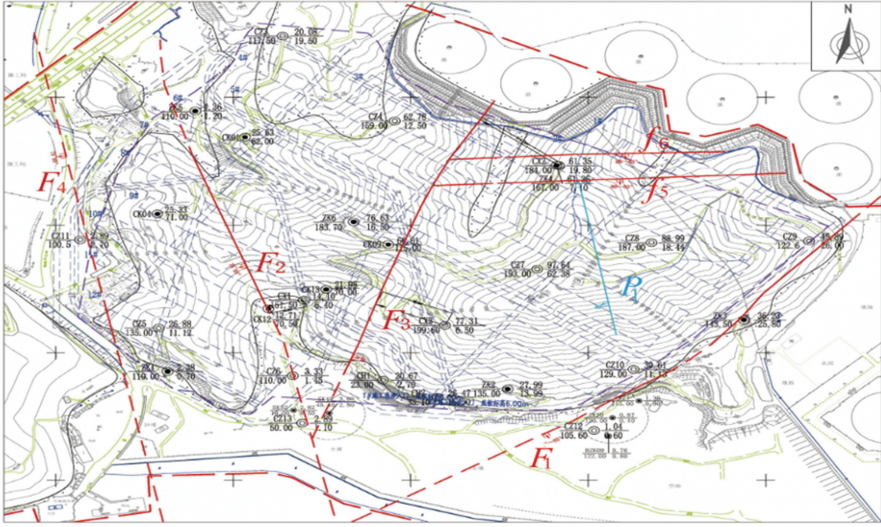


图2 洞库区断层分布图

Fig.2 Distribution of faults in the reservoir area

## 1.3 水文地质

根据地质调查和勘探成果,结合前期可研勘察的有关结论,本场区地下水的赋存介质主要为中生界上侏罗系九里坪组流纹斑岩及第四系松散覆盖层。地下水主要以松散岩类孔隙水和基岩裂隙水等形态存在。

场区内地下水的补给,径流与排泄条件较为简单,动态变化主要受气候影响,同时与地形地貌、岩体构造等因素有关。各钻孔水位统计结果表明工程区钻孔地下水位高程变化为0.78~70.09 m,地下水位基本受地形控制,水位变化与地形起伏基本一致。

在场区内共计完成124段水文地质试验、3个钻孔的抽水试验、15个钻孔的压水试验。其中极微透水有83段,占比66.9%;微透水30段,占比26.6%;弱透水6段(渗透系数 $< 10^{-2}$  m/s),占比4.8%;中等透水仅1段。根据钻孔内压水试验成果,微风化流纹斑岩渗透系数为 $3.72 \times 10^{-8} \sim 2.42 \times 10^{-7}$  m/s,属于微~弱透水。

## 2 模型建立及参数确定

### 2.1 控制方程

海岛环境下水封油库海水入侵的对流-弥散方

程包括地下水流运动方程和溶质运移方程。数值模拟中通常采用多物理场耦合方法对两个方程进行耦合,基于达西定律和质量守恒定律推导出的地下水流运动控制方程为<sup>[17]</sup>

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

式中: $\mu$ 为动力黏度系数,Pa·s; $\rho$ 为流体密度,kg/m<sup>3</sup>; $p$ 为渗流的压力,Pa; $K$ 为渗透系数, $K = k\rho g/\mu$ ,其中 $k$ 为渗透率,m/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>。

COMSOL中稀释物质传递界面中,溶质质量在多孔介质中通过地下水流动(流)、分子扩散和机械弥散进行运输。地下水中溶质质量的运移可以用以下对流-弥散方程,表达式为<sup>[18]</sup>

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot C v - \nabla \cdot (D \nabla C) = 0, \quad (2)$$

式中: $C$ 为溶质质量浓度,kg/m<sup>3</sup>; $v$ 为流速,m/s; $D$ 为水动力弥散系数,m<sup>2</sup>/s。

### 2.2 边界条件

采用均匀介质模型,基于达西定律进行渗流稳态模拟和稀物质传递瞬态模拟,库区模拟了主要断层 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 和 $F_4$ ,几何模型及洞室位置如图3所示。

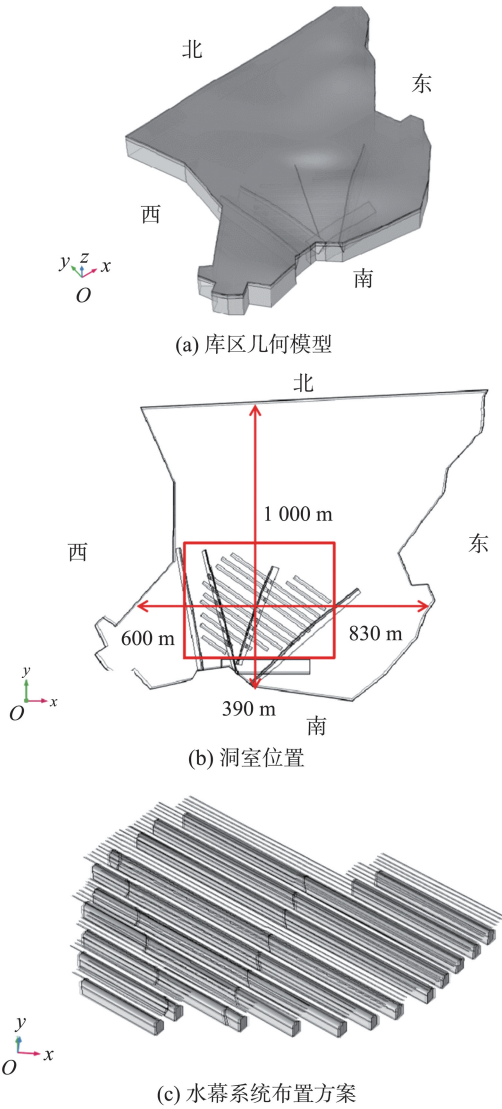


图 3 库区几何模型、位置及水幕布置示意图  
Fig.3 Schematic of the geometric model, location and water curtain arrangement of the reservoir area

模型初始条件:将未开挖洞室运行到稳定状态得到的压强和浓度模拟结果,作为施工期和运营期模拟研究结果的初始条件。数值模拟中的边界条件设置为模型西侧、南侧、东侧三面均为海水边界,同样设为静水压力边界,边界静水压力计算公式为

$$P_1 = -\rho_s g z, \quad (3)$$

表 1 计算参数取值表

Table 1 Calculated parameter values

渗透系数/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )					扩散系数/( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )		密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )		浓度/( $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$ )	
$K_1$	$K_2$ (全强风化层)	$K_3$ (中风化层)	$K_4$ (微风化层)	$K_5$ (断层、高渗区)	$D_1$ (库区岩体)	$D_2$ (断层、高渗区)	$\rho_w$	$\rho_s$	$c_0$	$c_s$
$1.16 \times 10^{-6}$	$9.29 \times 10^{-7}$	$1.39 \times 10^{-7}$	$4.13 \times 10^{-8}$	$1.39 \times 10^{-7}$	$1.5 \times 10^{-10}$	$1.5 \times 10^{-8}$	1 000	1 025	3	430

以某海岛地下水封石油洞库为研究背景,在有限元软件 COMSOL 中,通过多物理场耦合实现地下水渗流场和溶质运移场的耦合作用,地下水渗流

式中: $\rho_s$  为海水密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ ,  $z$  为  $z$  方向的深度,  $\text{m}$ 。

北侧为内陆边界,考虑重力的存在,设为静水压力边界条件,压力值计算公式为

$$P_2 = -\rho_0 g z, \quad (4)$$

式中, $\rho_0$  为淡水密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

查阅相关文献,潮汐水位拟合曲线相差较小,计算中引用文献[12]中海水的潮汐作用。模型顶部设置为降雨补给边界,降雨入渗系数取  $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ ;模型底部设置为无流动边界。

地下水封石油洞库洞室空置压力设置为 0,洞室储油后,主洞室顶部为饱和石油蒸汽(埋深 62~73 m),压力设置为 0.2 MPa。液态油品位于饱和蒸气之下(埋深 73~92 m),即主洞室两侧及底部,压力设置为

$$P_3 = 0.2 - \rho_p g (-70 - z), \quad (5)$$

式中: $\rho_p$  为石油密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^3$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ ,  $z$  为  $z$  方向的深度,  $\text{m}$ 。

水平水幕压力设置为

$$P_4 = p_i \quad (6)$$

式中, $p_i$  为水平水幕孔注水压力, MPa。

溶质运移中海水边界根据地下水监测,设置该地区的海水和地下水溶质浓度分别为 430、3  $\text{mol}/\text{m}^3$ 。

### 2.3 参数选取及工况设置

岩土体的渗透系数结合钻孔压水试验取值,岩体风化带按钻孔揭露情况取大值平均值,断层渗透系数取压水试验全部试验段最大渗透系数。模型根据地层分为四层,覆盖层厚度约为 5 m,全强风化层厚度约为 10 m,中风化层厚度约为 30 m,微风化层厚为中风化层底到模型底部。

扩散系数与岩石(土壤)的孔隙度相关性很强,岩石的扩散系数变化范围很大,为  $10 \times 10^{-14} \sim 10 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 。同时与岩石的透水性、温度、构造等有关。查阅相关资料及经验,扩散系数取  $10 \times 10^{-10}$ ,具体计算参数如表 1 所示。

场满足稳态条件下的达西定律,溶质运移场主要是考虑到溶质的对流-弥散作用,即满足公式(1)(2)。通过数值模拟获得了施工期洞室开挖无水幕、运营

50 a后不同水平水幕孔设计参数工况下的洞室水封性、涌水量和海水入侵控制效果,并在施工期对照分析了洞室储油对周围渗流场及海水入侵的影响。

模拟中水平水幕孔距主洞室拱顶的距离固定为34 m,1#~11#水平水幕孔间距固定为10 m,具体计算工况如表2所示。

表2 工况设置  
Table 2 Case settings

模拟阶段	工况设置	研究内容
施工期	开挖无水幕洞室空置	施工期无水幕洞室的水封性、涌水量、海水入侵范围
	洞室储油对照	
运营期 50 a	水幕孔超出主洞室四周为10 m,注水压力0.3、0.4 MPa	不同水平水幕设计参数下洞室的水封性、涌水量、海水入侵范围
	水幕孔超出主洞室四周为20 m,注水压力0.3、0.4 MPa	
	1#~11#主洞室水幕孔超出主洞室四周为20 m,12#主洞室水幕孔超四周30 m,间距5 m,注水压力0.5、0.6 MPa	

## 2.4 海水入侵控制标准

Cl<sup>-</sup>浓度对应的腐蚀等级临界值如表3所示。库区海水入侵评价标准依据文献[19]中针对地下水对钢筋混凝土中钢筋及钢结构的腐蚀性标准。由于Cl<sup>-</sup>的相对原子质量为35.5,根据COMSOL中的计算需要将规范中的单位mg/L除以其相对原子质量35.5转换为mol/m<sup>3</sup>。

表3 钢筋腐蚀等级转换表

Table 3 Conversion table for corrosion class of rebar

腐蚀等级	Cl <sup>-</sup> 浓度/(mol·m <sup>-3</sup> )
微腐蚀	<3.0
弱腐蚀	3.0~14.3
中腐蚀	>14.3~143.0
强腐蚀	>143.0

## 3 结果分析

### 3.1 水封性

地下水封洞库必须长期处于稳定地下水位以下一定深度,保证洞室的水封性,在此基础上对涌水量及海水入侵展开研究。地下水位线距主洞室拱顶的垂直距离应满足<sup>[20]</sup>

$$H_w = 100P + 20, \quad (7)$$

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。

该模型中施工期洞室空置时,主洞室饱和蒸气压力为0,地下水位线距主洞室拱顶的最小垂直距离 $H_w = 20$  m;施工期及运营期洞室储油时,主洞室顶部为饱和石油蒸汽,压力设置为0.2 MPa,地下水位线距主洞室拱顶的最小垂直距离 $H_w = 40$  m。

#### (1) 施工期

施工期无水幕洞室空置、储油的地下水位如图4所示,其中纵坐标 $z$ 表示 $z$ 方向的高度, $x$ 为 $x$ 方向的长度。由图4可以看出,洞室开挖后库区位置地

下水位大幅降低,洞室空置的地下水位线与洞室相交,无法满足水封性要求。洞室储油后,洞室内存在一定的压力,减缓了地下水流向洞室,库区周围地下水位相比洞室空置时上升,地下水位线距主洞室拱顶的最小垂直距离约为12 m,无法满足水封性要求。施工期开挖无水幕洞室空置的地下水位线不满足规范要求,库区无法满足水封性要求,洞室储油后可以在一定程度上提升地下水位,但水封性仍然无法得到满足,需设置水幕系统。

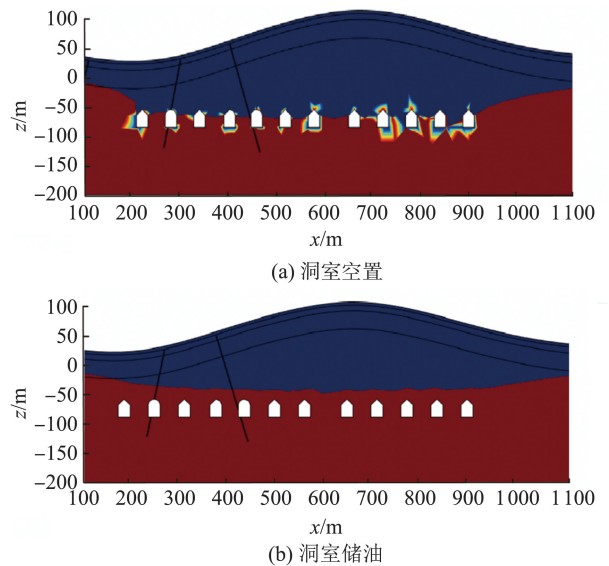


图4 施工期开挖无水幕洞室空置、储油地下水位  
Fig.4 Vacant and full groundwater levels in excavated waterless curtain cavities during construction period

#### (2) 运营期 50 a

运营期设置水平水幕系统后的地下水位如图5所示,水平水幕系统方案的设计参数为水幕孔超出主洞室四周10 m,注水压力为0.3 MPa。由图5可以看出,该工况下的地下水位线距主洞室拱顶的最小垂直距离大于35 m,可以满足水封性要求。运营期共模拟了6个工况,其中水幕孔超出主洞室四周10 m,注水压力0.3 MPa工况提供的淡水补给最少<sup>[14]</sup>,地下水位

提升最小,在该工况库区已经满足水封性要求,因此  
剩余5个工况的水封性也满足要求。

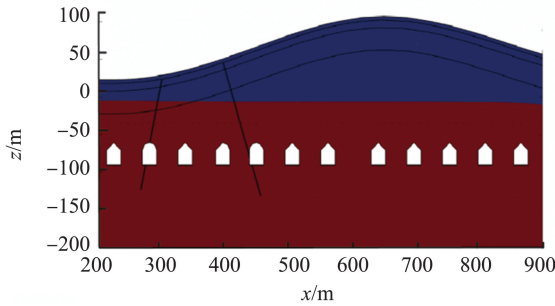


图5 水幕孔超洞室10 m,注水压力0.3 MPa 地下水位  
Fig.5 Groundwater level of water curtain holes exceeding the cavern by 10 m and water injection pressure of 0.3 MPa during operation period

### 3.2 涌水量

#### (1) 施工期

施工期开挖无水幕洞室空置、储油涌水量如图6所示,洞室空置、储油的总涌水量分别为362.22、290.47 m<sup>3</sup>/d,两工况下12#主洞室涌水量最大,2#主洞室涌水量最小。1#和12#洞室容积较小,但涌水量相对较大,这是由于两洞室位于库区边缘位置。2#和11#洞室容积较小,涌水量小于其余各洞室,3#~10#洞室容积较大,且洞室位置断层分布较多,涌水量较高。洞室储油较空置时涌水量有所降低,这是由于洞室储油后油压力使得流向洞室的地下水

减少,因而涌水量降低。

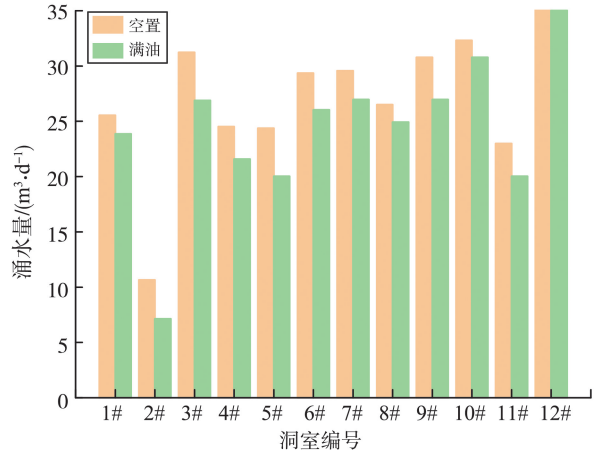


图6 施工期洞室空置、储油的涌水量  
Fig.6 Water inflow from cavern vacancy and oil storage during construction period

#### (2) 运营期50 a

运营期50 a后水平水幕系统工况下洞室涌水量如图7所示。由图7可以看出,设置水平水幕系统后,由于3#~10#洞室容积较大,库区涌水量呈中间大、两端小的情况。1#、12#洞室由于位于库区边缘,涌水量依旧较2#、11#洞室更大。设置水平水幕系统后,库区涌水量较施工期洞室储油工况增长了284.00~715.34 m<sup>3</sup>/d,水平水幕系统的设置可以大幅度提高洞室涌水量。

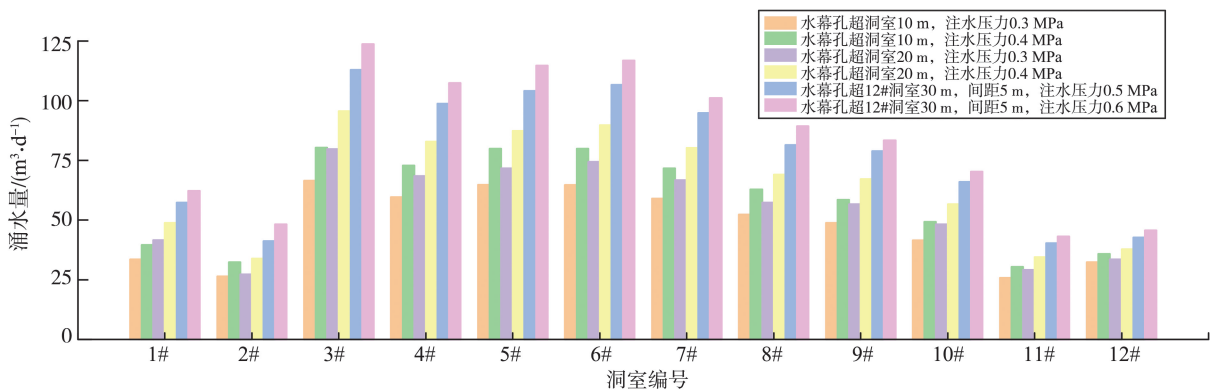


图7 运营期50 a后各工况的涌水量  
Fig.7 Water inflow for each case after 50 years of operation period

水平水幕孔超洞室四周10 m,注水压力0.3、0.4 MPa,总涌水量分别为574.47、693.08 m<sup>3</sup>/d;水平水幕孔超洞室四周20 m,注水压力0.3、0.4 MPa,总涌水量分别为653.70、782.85 m<sup>3</sup>/d。水幕孔长度增加10 m,总涌水量增加79.23、89.77 m<sup>3</sup>/d,水幕孔注水压力增加0.1 MPa,总涌水量增加117.61、129.15 m<sup>3</sup>/d,水幕孔注水压力对涌水量的影响高于水幕孔长度,涌水量过高会增加运营成本,需根据实际工程适当调整水幕系统设计参数。

### 3.3 海水入侵控制效果

#### (1) 施工期

运营期库区Cl<sup>-</sup>浓度如图8所示,库区东、南、西三面环海,西侧和南侧洞室距海岸边界较近,且南侧存在断层F<sub>2</sub>及回填区。由图8(a)可以看出,靠近南侧海岸线的10#~12#洞室受海水入侵最严重,靠近西侧海岸线的6#、7#洞室也存在程度相对较低的海水入侵,以上洞室均处于中度腐蚀以上。对比图8(a)、(b)可知,洞室储油后,由于油压力的

存在,流入洞室的地下水减少,海水入侵程度有所降低,但10#~12#洞室的海水入侵问题依旧严重。

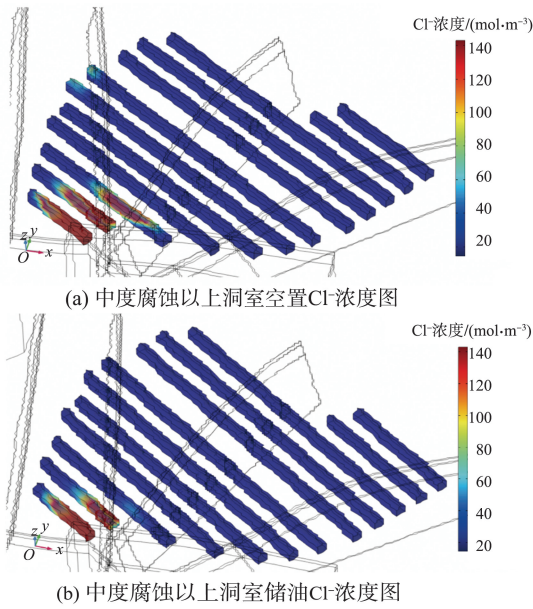


图8 运营期库区Cl<sup>-</sup>浓度图

Fig.8 Cl<sup>-</sup> concentration in the reservoir area during the operation period

(2)运营期

设置水平水幕后库区的Cl<sup>-</sup>浓度如图9所示。由图9可以看出,设置水平水幕系统后,各工况洞室运营50 a后仅12#洞室西南存在海水入侵。12#洞室靠近南侧海岸边界且存在回填区,受海水入侵影响最严重。水平水幕孔长度超出洞室四周10 m,注水压力0.3 MPa,12#洞室海水入侵程度最大,水幕孔超12#洞室30 m,注水压力0.6 MPa,12#洞室海水入侵程度最小。各工况下Cl<sup>-</sup>浓度处于中度腐蚀以上,部分位置Cl<sup>-</sup>浓度在143 mol/m<sup>3</sup>上下。对比图9(a)~(f)可知,水幕孔长度越大、注水压力越大,洞室海水入侵程度越低,注水压力对海水入侵的控制效果较水幕孔长度更好,长度改变时海水入侵效果变化不明显,注水压力改变时海水入侵情况有明显变化。库区仅设置水平水幕系统,运营期50 a后不能满足完全阻止海水入侵洞室的要求,仅能将海水入侵程度控制在一定范围。

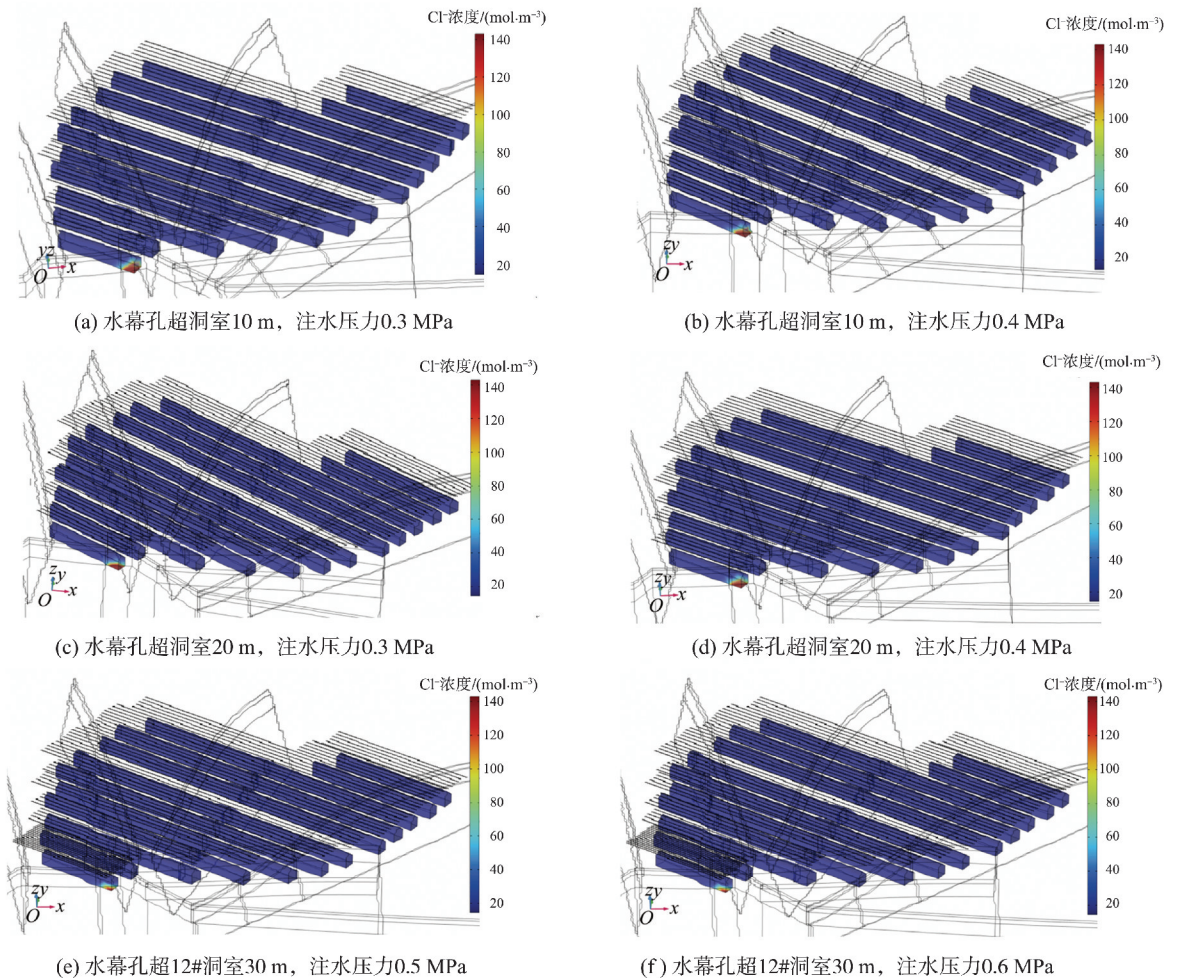


图9 设置水平水幕库区Cl<sup>-</sup>浓度图

Fig.9 Plot of Cl<sup>-</sup> concentration in the reservoir area with horizontal water curtain set up

## 4 结论

以某海岛地下水封油库工程为依托,模拟了洞库施工期开挖无水幕洞室空置、储油和不同水平水幕设计参数工况下运营期 50 a 后的水封性、涌水量以及海水入侵情况。通过对比施工期洞室空置、储油及不同水平水幕设计参数工况对渗流场、抑制海水入侵的影响规律分析,得出以下结论。

(1)施工期洞室开挖无水幕洞室空置、储油两工况下的地下水位线距主洞室拱顶距离均不满足水封要求,增设水平水幕后 6 个工况的水封性均满足要求。施工期开挖无水幕洞室储油后,油压力使得流入洞室的地下水减少,地下水位相比于洞室空置时有所上升,洞室涌水量减少,海水入侵程度降低。

(2)增设水平水幕系统后,总涌水量较施工期无水幕工况增长了约 284.00~715.34 m<sup>3</sup>/d,水平水幕系统的设置可以大幅度提高洞室涌水量。

(3)由于库区西南侧临近海岸线,且南侧存在回填区,运营期仅设置水平水幕系统不能完全阻止海水入侵 12#洞室。12#洞室处水幕孔加长、加密,注水压力设置 0.6 MPa 时,运营期 50 a 后 12#洞室西南底角区域处于中度腐蚀标准,周围 Cl<sup>-</sup> 浓度接近 14.3 mol/m<sup>3</sup>,海水入侵控制效果最好。

(4)水封效果、涌水量及海水入侵控制效果与水幕孔长度和注水压力呈正相关,水幕孔注水压力相比于水幕孔长度对以上 3 个参数的影响程度更高,与文献[13]、文献[16]对比验证后结论相符。水幕系统设计时需合理选取各个参数值,满足水封性、海水入侵控制效果的同时,涌水量不超出规范要求。

### 参考文献:

[1] LIU H, QIAO L P, WANG S H, et al. Quantifying the containment efficiency of underground water-sealed oil storage caverns: method and case study[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 110:103797.

[2] 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.

WANG Zhechao, ZHANG Zhenjie, LI Shucui, 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.

[3] 时洪斌.黄岛地下水封洞库水封条件和围岩稳定性分析与评价[D].北京:北京交通大学,2010.

SHI Hongbin. Analysis and evaluation of water seal condition and surrounding rock stability for Huangdao water sealed underground petroleum storage caverns in rock[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.

[4] 马耀川,潘真.地下水封石油洞库埋深优化方法[J].*油气储运*, 2013, 32(5): 521-525.

MA Yaochuan, PAN Zhen. Method to optimize the buried depth of underground water-sealing oil storage in rock caverns[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2013, 32(5): 521-525.

[5] WERNER A D, BAKKER M, POST V E A, et al. Seawater intrusion processes, investigation and management: recent advances and future challenges[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 51:3-26.

[6] 秦之勇,高锡敏.我国水封石洞油库研究现状及思考[J].*长江科学院院报*, 2019, 36(5):145-152.

QIN Zhiyong, GAO Ximin. Research status and thinking about underground oil storage in rock caverns in China [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36(5):145-152.

[7] 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.

[8] 曹权,杨爱武,李清明,等.海水入侵对地铁地下结构侵蚀性的统计分析[J].*工程地质学报*, 2016, 24(3): 345-351.

CAO Quan, YANG Aiwu, LI Qingming, et al. Statistic analysis of groundwater corrosion to subway tunnel structure under seawater intrusion [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(3): 345-351.

[9] LEE E, LIM J W, MOON H S, et al. Assessment of seawater intrusion into underground oil storage cavern and prediction of its sustainability[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(3): 1179-1190.

[10] LI Y T, ZHANG B, SHI L, et al. Dynamic variation characteristics of seawater intrusion in underground water-sealed oil storage cavern under island tidal environment[J]. *Water*, 2019, 11(1): 130.

[11] 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.
- [12] 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, 2022, 126: 104542.
- [13] 乔丽苹, 王菲, 王者超, 等. 地下水封石油洞库垂直水幕设计参数及其影响分析 [J]. 岩土工程学报, 2024, 46(7): 1525-1533.
- QIAO Liping, WANG Fei, WANG Zhechao, et al. Analysis of vertical water curtain design parameters and its effect on underground water-sealed oil storage cavern [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(7): 1525-1533.
- [14] 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.
- [15] LIN F, REN F, LUAN H, et al. Effectiveness analysis of water-sealing for underground LPG storage [J]. Tunnelling Underground Space Technology, 2016, 51(1): 270-290.
- [16] 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, 2018, 82: 265-277.
- [17] HUYAKORN P S, ANDERSEN P F, MERCER J W, et al. Saltwater intrusion in aquifers: development and testing of a three-dimensional finite element model [J]. Water Resources Research, 1987, 23(2): 293-312.
- [18] CROUCHER A E, O' SULLIVAN M J. The Henry problem for saltwater intrusion [J]. Water Resources Research, 1995, 31(7): 1809-1814.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 岩土工程勘察规范(2009年版); GB 50021—2021 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 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, 2009.
- (编辑: 郭少华)
- (上接第133页)
- [32] 张彬, 石磊, 杨森, 等. 新建地下水封油库对附近运行油库水封可靠性影响研究 [J]. 工程地质学报, 2016, 24(5): 815-822.
- ZHANG Bin, SHI Lei, YANG Sen, et al. Minimum separation distance between existing and newly constructing underground water-sealed oil storages [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(5): 815-822.
- [33] ZHANG B, SHI L, YU X, et al. Assessing the water-sealed safety of an operating underground crude oil storage adjacent to a new similar cavern—a case study in China [J]. Engineering Geology, 2019, 249: 257-272.
- [34] 李玉涛, 张彬, 石磊, 等. 垂直水幕作用下扩建地下水封油库布局方式研究 [J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(8): 1308-1318.
- LI Yutao, ZHANG Bin, SHI Lei, et al. Research on the layout mode of expanding underground water seal oil depot under the action of vertical water curtain [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(8): 1308-1318.
- [35] SHI L, ZHANG B, WANG L, et al. Functional efficiency assessment of the water curtain system in an underground water-sealed oil storage cavern based on time-series monitoring data [J]. Engineering Geology, 2018, 239: 79-95.
- [36] QIAO L P, LI W, WANG Z C, et al. Assessment of inter-cavern containment property of underground water-sealed oil storage caverns combining discrete fracture [J]. Environmental Earth Sciences, 2022, 81(18): 442.
- [37] 王业冬. 地下水封洞库岩体渗透参数取值方法与水封性评价 [D]. 沈阳: 东北大学, 2022.
- WANG Yedong. Study on permeability-parameters determination of rock mass and application of underground water-sealed storage [D]. Shenyang: Northeastern University, 2022.
- [38] 中国岩石力学与工程学会. 地下水封洞库岩土工程设计指南; T/CSRME 028—2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- (编辑: 宋艳)