

扩建地下水封洞库水封性评价与水幕系统优化

彭振华¹,王者超²,李佳佳²,乔丽革³,赵秦尼³,李涵硕²

(1.中海油石化工程有限公司,山东 青岛 266101; 2.深部金属矿山安全开采教育部重点实验室(东北大学),辽宁 沈阳 110004; 3.东北大学资源与土木工程学院,辽宁 沈阳 110819)

摘要:扩建地下水封油库可能对已建相邻洞库产生相互影响。针对国内首个大型地下水封洞库扩建工程,开展地下水封洞库水封效率评价与扩建-已建工程水封性相互影响分析,依据地下水位、水封效率对该扩建工程水幕系统进行优化。研究结果表明:扩建洞库工程的开挖破坏了地下初始稳定渗流场,会导致已建洞库水位小幅下降,涌水量上升,但已建洞库水封性仍满足要求,研究结果说明扩建工程施工对已建工程运行的水封性影响有限;相比于独立选址建库,在已建洞库旁进行扩建,扩建洞库地下水位和涌水量均发生下降,但降幅不多,满足水封要求。综上所述,在已建工程旁进行扩建是可行的;在满足地下水位的条件下,可适当降低水幕孔压力、增大水幕孔间距来进行扩建地下水封洞库的水幕系统优化。

关键词:扩建地下水封洞库;水封性;水封效率;水幕系统优化

中图分类号:TE822

文献标志码:A

引用格式:彭振华,王者超,李佳佳,等. 扩建地下水封洞库水封性评价与水幕系统优化[J]. 山东大学学报(工学版),2025,55(2):125-133.

PENG Zhenhua, WANG Zhechao, LI Jijia, et al. Evaluation of containment properties and optimization design of water curtain system for an extended underground oil storage cavern[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(2):125-133.

Evaluation of containment properties and optimization design of water curtain system for an extended underground oil storage cavern

PENG Zhenhua¹, WANG Zhechao², LI Jijia², QIAO Liping³, ZHAO Qinni³, LI Hanshuo²

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

Abstract: The expansion of underground water-sealed oil depot may have mutual influenced on the built adjacent caves. In view of the first large-scale groundwater sealing reservoir expansion project in China, this research carried out the analysis of the water-sealed efficiency of the expansion and the analysis of the mutual influence between the expansion project and the water sealing performance of the existing project. The water curtain system of the expansion project was optimized according to the groundwater level and water sealing efficiency. The results showed that the excavation of the expansion cave project had disrupted the initial stable seepage field underground, leading to a slight decrease in the water level of the existing cavern and an increase in water inflow, but the water-sealed of the built cavern still meeting the requirements. The research results indicated that the construction of expansion projects had limited impact on the water tightness of existing projects; Compared to building a separate site for the construction of a reservoir, expanding next to an existing cavern resulted in a decrease in groundwater level and water inflow, but the decrease was not significant and met the water seal requirements. In conclusion, it was feasible to expand next to existing projects. In accordance with the requirements of the groundwater level, the optimization of the water curtain system for expanding the underground water sealed cavern could be carried out by appropriately reducing the pressure of the water curtain holes and increasing the spacing between the water curtain holes.

Keywords: extended underground water-sealed cavern; containment property; containment efficiency; water curtain system optimization

0 引言

我国石油资源有限,国内石油消费不断增加,石油进口量逐年增大,根据中国石油经济技术研究院的数据显示,我国在2009年突破国际公认的石油对外依存度50%警戒线,更是在2018年始高达70%以上。地下水封油库具有占地面积小、存储容量大、安全性能高、使用寿命长、运行成本低等优点,因此被广泛地运用于国家石油战略储备中^[1-6],为了扩大储油能力,目前正在开展在一个正在运行的地下水封洞库附近建造一个新的地下水封洞库^[7]。

地下水封洞库主要关注围岩稳定性^[8-13]和水封安全性,由于地下水封洞库大多建设在坚硬的花岗岩中,围岩稳定性基本可以满足要求。地下水封洞库工程区别于其他工程最大的特点在于水封,其中水封来源有自然地下水补给还有人工水幕补给。国内外许多学者针对地下水封洞库的水封性进行了大量的研究。对水封性的研究主要分为理论分析法、数值模拟法、现场试验法^[14]。在理论方面,文献^[15]最早对水幕压力和洞库存储压力的关系进行了研究,提出了当垂直水力梯度大于1,就可以保证储洞的密封性,国内外许多学者^[16-20]对此标准进行了修订。文献^[21]分析地下水与水封安全性、洞库涌水量的关系,提出了协同考虑水封安全性和洞库涌水量的水封效率理念。但目前的主流方法是利用数值模拟软件进行水封性评价。文献^[22-24]利用离散单元法开展了黄岛地下水封洞库水封性研究。文献^[25]以韩国平泽储气库为研究背景,提出设计竖直水幕与水平水幕相结合的水幕系统能保证洞室的水封性。文献^[26]采用有限差分法研究了地下水封洞库的涌水量。现场试验主要包括全面水力试验、气密试验、现场水文监测等^[27-31]。上述研究都是针对单一地下水封洞库水封性评价分析,但随着储油洞室群的数量和规模不断的增加,部分油库开展了扩建工程,已建和扩建库区概念图如图1所示。扩建洞库开挖后,扩建工程将破坏已建工程的地下初始稳定渗流场,以及扩建工程在水平水幕的人工补给下进行施工,人工补给与地下水天然补给协同作用达到新的平衡,致使已建洞库地下水位和洞室涌水量发生变化,相比于独立选址建库,在已建工程旁进行扩建,扩建工程受到已建工程水封系统的影响,扩建工程洞室涌水量和地

下水位也会发生相应变化,因此扩建的地下水封油库可能与已建相邻洞库的水封性产生相互影响,但目前很少有进行扩建-已建洞库之间相互影响的水封性评价的研究。

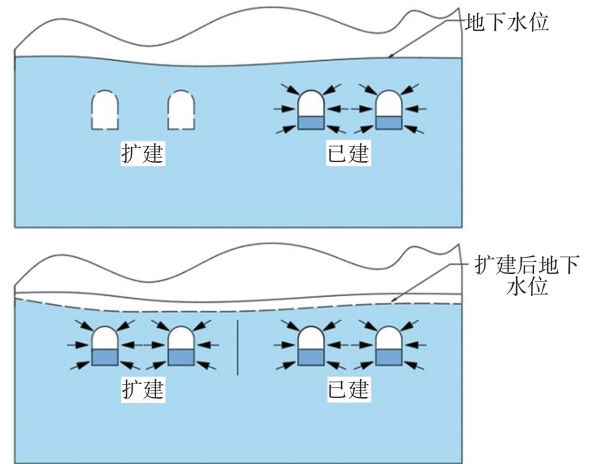


图1 已建和扩建库区概念图

Fig.1 Conceptual diagram of the reservoir area that has been built and expand

扩建洞库水封性评价不仅需要考虑扩建地下水封洞库的水封性,还可能对已建相邻洞库的渗流场产生一定程度的影响,可能导致已建油库发生油气外泄等安全事故。目前已有的研究大多针对扩建洞库对已建洞库储油安全性的影响,文献^[32-35]以国内首个扩建地下水封洞库为例,利用数值模拟软件对扩建洞库的可靠性、布局方式和水封安全性进行了研究。洞库洞罐之间的水封性评价对于扩建-已建洞库之间的影响也有借鉴意义。文献^[36]以黄岛地下水封洞库为研究对象,提出洞室间距应大于40 m才能满足洞室间的水封性。对扩建地下水封洞库进行水封性评价,能够确保大型地下水封洞库扩建工程水封安全性的同时揭示已-扩建洞库水封性方面的相互影响规律。

目前对于扩建地下水封洞库的研究并没有已-扩建洞库水封性影响的相互规律,很少有基于水封效率为指标进行水幕系统优化。本研究以国内首个扩建地下水封洞库为背景,通过构建、校核三维渗流分析模型,对库区水封性进行评价。对扩建地下水封洞库渗流分析模型中已建工程与扩建工程涌水量、地下水位、水封效率等数据进行提取,并分别与仅开挖已建工程、仅开挖扩建工程相应数据进行对比分析,揭示扩建与已建地下水封洞库水封性相互影响规律,并且依据地下水位、水封效率进行了水幕系统优化设计。本研究可对类似扩建地下水封洞库建设提供参考。

1 工程背景

1.1 工程概况

南方某大型地下水封洞库在分期建设过程中,已建洞库的规模为 $500 \times 10^4 \text{ m}^3$,由9条平行排布的洞室组成,洞室长度为930 m,轴线按 $NE70^\circ$ 方向平行设置,洞室断面为直边墙圆拱洞,洞室跨度为20 m,洞室高度为30 m,洞室底板高程-60 m,顶板高程-30 m,在已建地下储油洞库上方25 m位置处设置水平水幕。通过对库址区工程地质及水文地质资料的分析可知,库址区地质条件优越,适宜对已建地下洞库进行扩建,扩建工程位于已建洞库北侧,扩建洞库规模为 $300 \times 10^4 \text{ m}^3$,主洞室长度为920 m,轴线按 $NE70^\circ$ 方向平行设置,共7条主洞室。单个洞室的断面尺寸与已建洞库一致。在扩建洞库开挖前,在洞库上方25 m位置处设置水平水幕。在已建洞库和扩建洞库之间,近扩建洞库处添加竖直水幕,孔直径0.1 m,顶部标高-5 m,底部标高-75 m,间距10 m,库区布置图如图2所示。

1.2 工程水文地质条件

库址区的岩性主要为第四系全新统万顷沙组(Q_w)的砂质黏性土和燕山期晚侏罗系(J)的侵入

花岗岩,侵入岩按生成的先后顺序分为石碑岭单元(J_3S)和观音庙单元(J_3G)。根据钻探揭露情况,从地表向下按岩石风化程度共划分3个风化带,依次为覆盖层和强风化岩带、中风化岩带和微风化岩带,库区地下水类型可分为松散岩类孔隙水和基岩裂隙水两大类。库区工程水文地质图如图3所示。已建与扩建地下储油洞库的主洞室主要处于微风化的花岗岩体中。通过对库区部分勘察钻孔进行压水试验、提水试验和注水消散试验,计算得到库区岩体的渗透系数,并进行了相对频率分布统计如图4所示,岩体渗透系数基本为 $10^{-3} \sim 10^{-5} \text{ m/d}$ 。

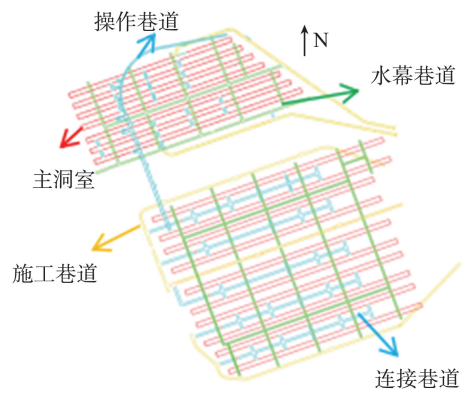


图2 库区平面布置图
Fig.2 Layout of the reservoir area

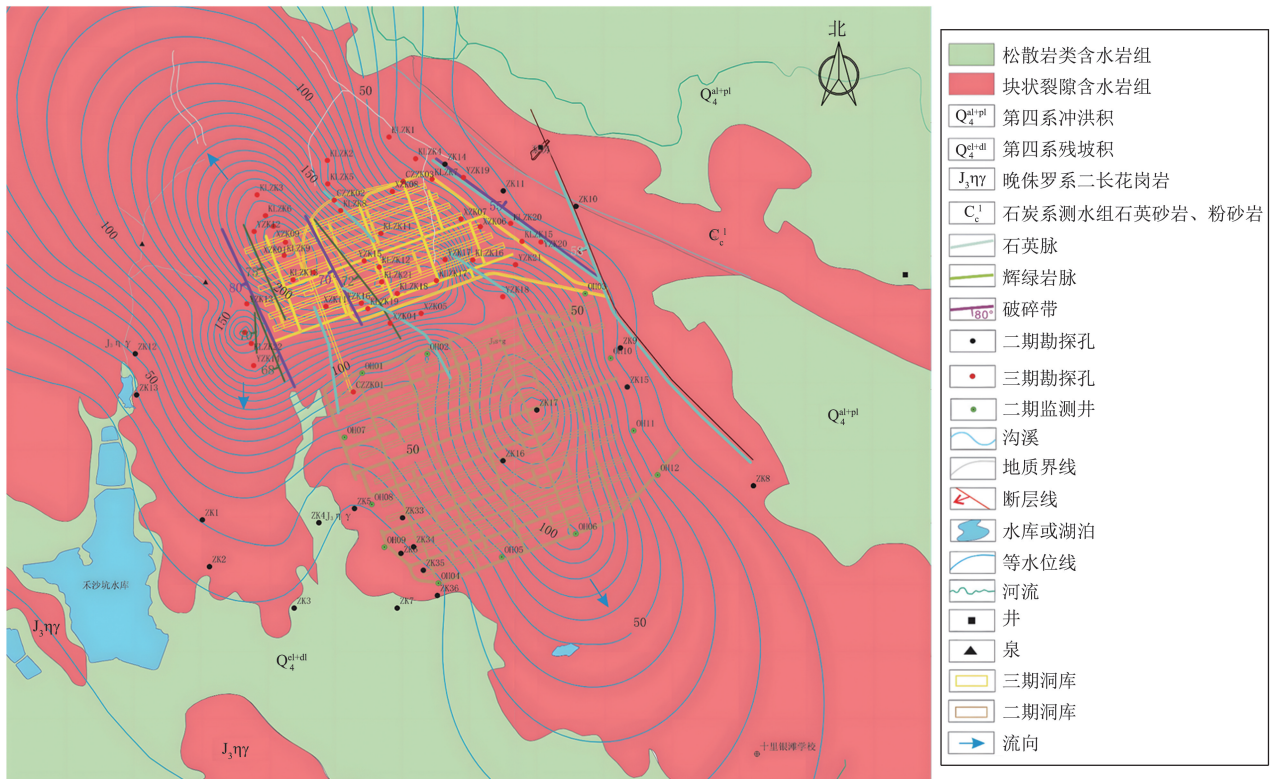


图3 工程水文地质图
Fig.3 Hydrogeological map of the storage zone

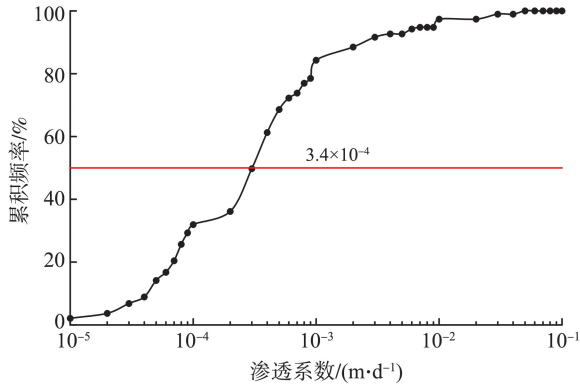


图4 渗透系数累积频率统计

Fig.4 Summary frequency statistics of permeability coefficient

2 模型建立及模型验证

2.1 模型建立

本研究以南方某大型地下水封洞库分期建设工程为依托,采用有限元软件 COMSOL Multiphysics 达西定律模块建立三维数值模型,如图5所示。结合相关工程经验,并充分考虑远场边界,模型长4 800 m,宽4 000 m,最高点标高274 m,底部标高-400 m。模型中 x 轴为地理正东方向, y 轴为地理正北方向, z 轴垂直向上。已建洞库由9个互相平行但间距不同的主洞室组成,扩建洞库由7个互相平行的主洞室组成,已建洞库的9号主洞室与扩建洞库的1号主洞室相邻,两期洞库间距为300 m,两期洞库上方一定高度处均设置有水平水幕系统,并在两期洞库之间设置竖直水幕。

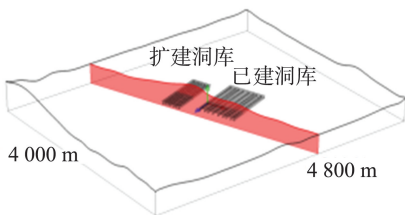


图5 三维渗流分析模型

Fig.5 Three-dimensional numerical model

储油洞室断面为20 m×30 m的直墙圆拱形,洞室间距不等,轴线按NE70°方向平行设置,已建工程与扩建工程洞室长度分别为930、920 m,底板标高-60 m,顶板标高为-30 m。水平水幕孔位于储油洞室上方25 m处,孔径0.1 m,间距10 m,四周超出主洞室10 m,竖直水幕孔顶部位于储油洞室上方25 m处,孔径0.1 m,间距10 m,长度70 m。

2.2 控制方程

本研究采用大型有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics,研究稳态条件下,已建工程和扩建工

程渗流场相互影响分析,研究区域的岩体视为等效连续介质,洞室周围的地下水流动服从达西定律,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: ρ 为流体密度,kg/m³; p 为渗流压力,Pa; k 为渗透率,m²; μ 为动力黏度系数,Pa·s; Q_m 为流体质量源,kg/(m³·s); g 为重力加速度,m/s²。

2.3 边界条件及参数选取

采用均匀介质模型,基于达西定律进行渗流稳态模拟,库区模拟了已建洞库和扩建洞库以及水平水幕和竖直水幕。几何模型及洞室位置如图5所示。模型长4 800 m,宽4 000 m,模型尺寸满足最小代表尺寸 REV,模型充分考虑了远场边界条件。使用已建工程校核后的模型进行模拟。数值模拟中的边界条件设置如下:四周为压力边界条件,设为静水压力边界, $P_1 = -\rho_w g z$, ρ_w 为水密度;考虑重力的存在。模型顶部设置为降雨补给边界,考虑到地表径流,实际入渗水量小于降雨量,根据库区所在地的年平均降雨量进行降雨入渗折减,取降水量年平均值为1 800 mm。考虑到当地的蒸发量,计算过程中存在一个降雨入渗系数,该系数的范围可从0.03变动至0.3^[37],查阅资料取降雨入渗补给系数0.1,综合考虑降雨入渗系数取 1×10^{-9} m/s;模型底部设置为无流动边界。已建工程主洞室压力为梯度变化,压力设置为 $P_2 = 0.1 - \rho_p g (-30 - z)$, ρ_p 为油品密度,扩建工程主洞室压力为0 MPa,水平水幕孔间距设置为10 m、压力设置为0.3 MPa,竖直水幕孔压力设置为 $P_3 = 0.3 - \rho_w g (-5 - z)$ 。

根据勘查报告,在竖直方向上,考虑渗透系数现场地质剖面图不同风化区的分层,对各地层单独赋予渗透系数,覆盖层和强风化层渗透系数取值为 3.689×10^{-2} m/d,中风化层渗透系数取值 1.862×10^{-2} m/d,微风化层取值 3.432×10^{-4} m/d。

2.4 模型验证

在已建洞库开挖过程中,统计地下储油洞库的总涌水量如图6所示。根据图6统计数据可知,运行期的主洞室涌水量约为1 560.00 ~ 2 042.00 m³/d,模拟已建工程涌水量为1 941.36 m³/d,模拟库区总涌水量与监测数据较一致,模拟中各水位监测孔水位均值为20.7 m,现场监测地下水位21.1 m,模拟地下水位与监测地下水位误差为2.05%,模拟与实测地下水位较一致。因此,使用该模型来研究扩建工程与已建工程水封性相互影响是合理的。

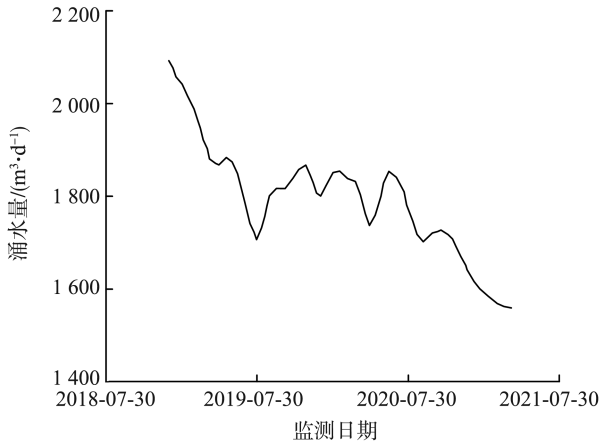


图 6 库区监测涌水量
Fig.6 Water inflow monitoring data

3 结果分析

3.1 水封性评价

(1) 地下水位

对扩建地下水封洞库三维渗流数值分析模型

进行水封性评价模拟,提取库区最低地下水位,如图 7 所示。由图 7 可知,洞室上方地下水位线高程为 20 m,在洞室顶部上方 50 m 左右。并且扩建洞室上方模拟水位均值 19.3 m,已建洞室上方模拟水位 19.3 m。洞库能够保证水封条件最显著的指标就是地下水位,当洞库投入运行后,需要保证洞顶水位在洞室顶板以上 30 m 及以上,才能保证洞库的水封条件。因此,目前水位条件满足洞库水封要求。

对主洞室的横剖面流场进行分析,选取主洞室高程中线-45 m 水平,主洞室附近速度矢量分布如图 8 所示。根据图 8 可以看出,地下水主要流向洞室和模型边界。

(2) 涌水量

已建一期工程洞室编号由南向北依次为 1#1~1#9,扩建二期工程洞室编号由南向北依次为 2#1~2#7,提取各洞室及洞库总的涌水量,各洞室涌水量如图 9 所示,已建工程总涌水量为 2 288.3 m³/d,扩建工程总涌水量为 2 200.0 m³/d。

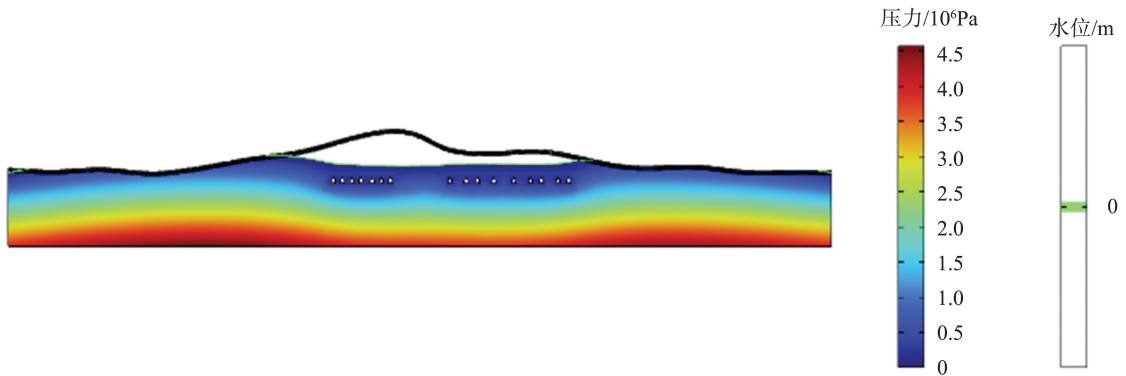


图 7 库区地下水位图
Fig.7 Water level distribution

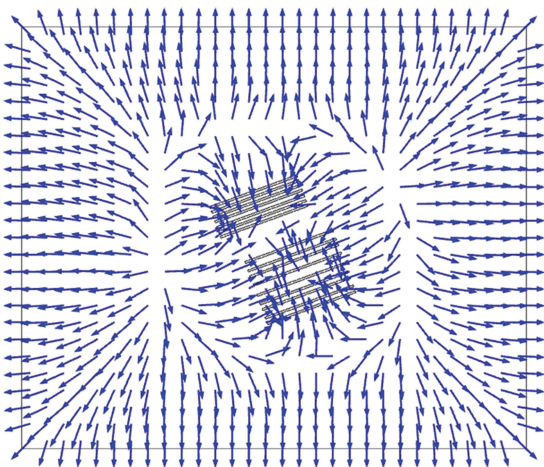


图 8 库区洞室横断面高程-45 m 速度矢量图
Fig.8 Cross section velocity vector plot of -45 m

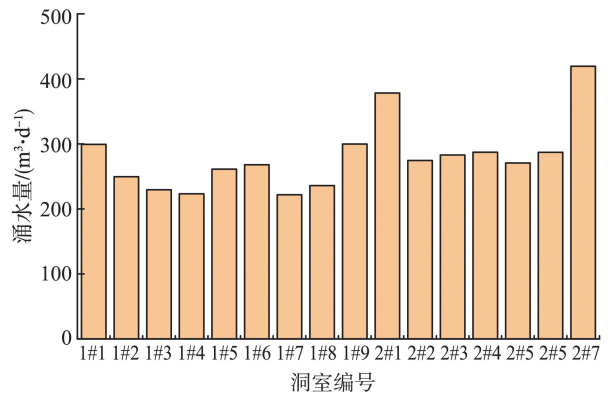


图 9 库区洞室涌水量直方图
Fig.9 Water seepage volume of caverns

3.2 水封效率评价

为推动水封性设计由安全为主,向安全与效率兼顾的提升,根据分析地下水与水封安全性、洞库涌水

量的关系,文献[21]提出了协同考虑水封安全性和洞库涌水量的水封设计理念,即洞库单位长度涌水量所能提供的水封安全度,建立水封效率量化指标

$$I_e = \frac{AL}{QT}, \quad (2)$$

式中: Q 为洞库涌水量, m^3/d ; T 为特征时间, d ; L 为主洞室的长度, m ; A 为水封安全余量的面积, m^2 ($A>0$,则水封安全)。

下面开始计算水封效率,水封安全余量 A 通过洞顶至水幕孔高程中水头分布获得,其中水头分布包括位置水头和压力水头。分别计算两期洞室安全余量结合涌水量得到扩建二期 2#1~2#7 洞室水封效率范围为 1 507.85~2 337.43;已建一期 1#1~1#9 洞室水封效率范围为 2 133.11~2 882.25。

根据文献[38]的规定,基础设计时地下水封洞库水封效率不宜低于 6 000,由于本研究模拟未考虑注浆降渗,因此现行模拟涌水量相对于注浆后会偏高,所以计算水封效率会偏低,并且由于扩建工程模拟工况为施工期,扩建洞室压力为 0,已建工程处于运行期,所以扩建洞室水封效率相较于已建洞室较高。

4 扩建和已建洞库相互影响分析

4.1 扩建工程施工对已建工程运营水封性影响

通过对比 2.4 节校核模型,即仅开挖已建工程模型,下面探究扩建工程对已建工程的水封性影响。分别模拟提取已建工程初始与目前状态下洞室涌水量、地下水位,并计算洞室水封效率。涌水量对比如图 10 所示。由图 10 可以看出,由于在库区 300 m 外进行扩建工程施工,一期各洞室涌水量均呈现不同程度的增长,涌水量增长变化率为 10.47%~22.28%。

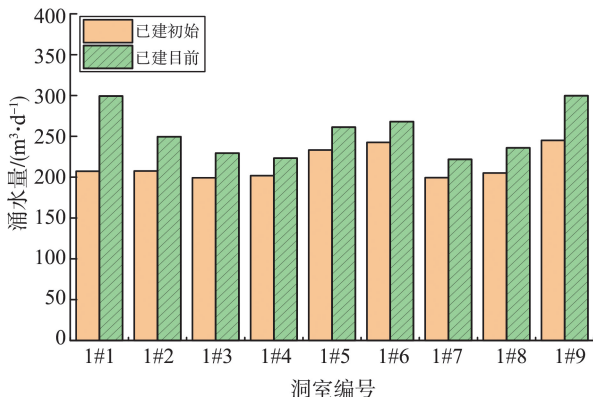


图 10 已建工程涌水量变化

Fig.10 Comparison of water seepage volume

已建一期洞室上方初始地下水位为 20.7 m,目前为 19.3 m,由于扩建工程的建设,地下水位会有小幅下降,仍满足水封要求。

分别计算对比了洞室水封效率,如图 11 所示。初始已建一期水封效率,范围为 2 608.45~3 208.40,扩建工程施工后水封效率变化为 2 133.11~2 882.25,变化率为 9.47%~30.77%,扩建工程的开挖破坏了地下初始稳定渗流场,以及扩建工程在水平水幕的人工补给下进行施工,人工补给与地下水天然补给协同作用达到新的平衡,致使一期洞室涌水量增加、水封效率降低。

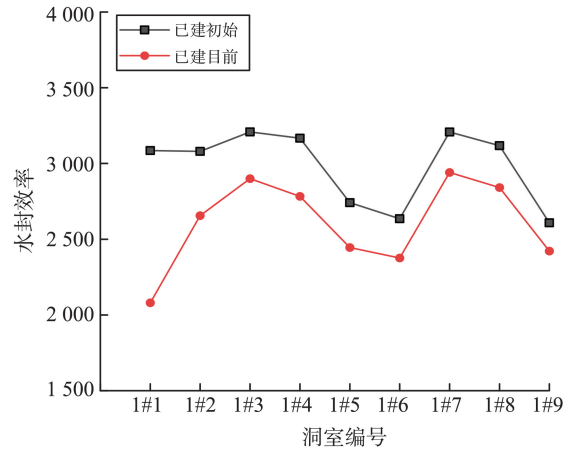


图 11 已建工程水封效率变化

Fig.11 Comparison of water seal efficiency

4.2 已建工程运营对扩建工程施工水封性影响

模拟仅开挖扩建工程库区渗流场,与扩建-已建库区渗流场进行对比分析,研究已建工程对扩建工程水封性影响。涌水量对比如图 12 所示,相比于独立选址建库,在已建工程旁进行扩建,扩建二期工程各洞室涌水量均呈现不同程度的降低,涌水量变化率为 3.38%~21.51%。

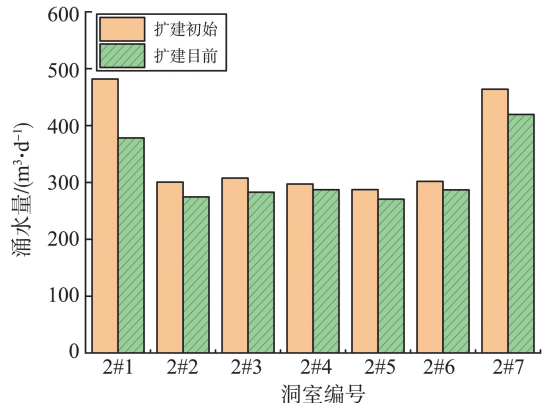


图 12 扩建工程涌水量变化

Fig.12 Comparison of water seepage volume

仅扩建模型中洞室上方最低地下水位为 19.1 m,目前状态下为 18.5 m,由于已建工程的存在,而非初始未开挖渗流场,地下水位会有小幅下

降,仍满足水封要求。

分别计算对比了洞室水封效率,如图 13 所示。初始二期工程水封效率范围为 1 312.38~2 200.10,当二期工程选址建设在运行一期工程旁边后水封效率变化为 1 507.85~2 337.43,变化率为3.50%~27.41%。洞室涌水量及水封效率变化的原因在于初始由 2#1 侧涌入扩建二期的地下水,现处于两期工程 2#1 和 1#9 洞室区域范围,地下水分别涌向两期洞室,因此 2#1 洞室降幅较大,相应地,整个扩建二期工程水封效率也较初始状态有不同程度的提升。

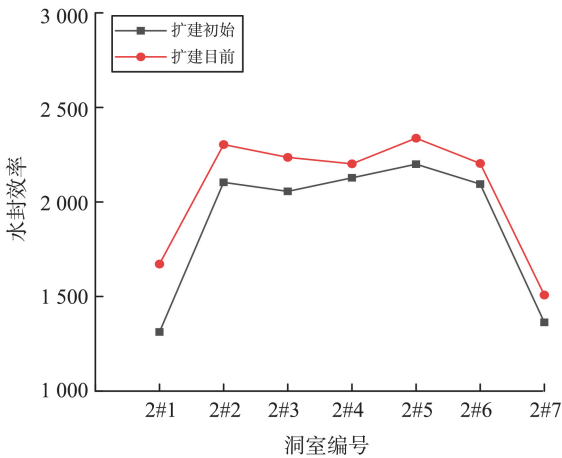


图 13 扩建工程水封效率变化

Fig.13 Comparison of water seal efficiency

5 扩建洞库水幕系统优化分析

5.1 工况设置

本章 4.2 节模拟时扩建工程水幕压力设置为 0.3 MPa,水幕孔间距设置为 10 m,记作典型工况 B1。分别研究水幕压力、水幕孔间距等因素的影响,工况 B1、B2、B3 研究水幕孔压力的影响,保持水幕孔间距 10 m 不变,水幕压力依次设置为 0.3、0.2、0.4 MPa,工况 B1、B4、B5 研究水幕孔间距的影响,保持水幕孔压力 0.3 MPa 不变,水幕孔间距依次设置为 10、5、20 m。扩建洞库水幕系统优化设置工况如表 1 所示。

表 1 扩建洞库水幕系统优化设置工况

Table 1 Simulate conditions setting

工况设置	扩建水幕孔压力/MPa	扩建水幕孔间距/m
典型工况	B1	0.3
	B2	0.2
	B3	0.4
对比工况	B4	0.3
	B5	0.3
		20

5.2 水幕系统优化

分别提取不同水幕孔压力、水幕孔间距及典型工况的地下水位、水封效率数据,如图 14 所示,随着水幕孔压力增加,地下水位由 17.6 m 上升至 26.8 m (0.2~0.4 MPa 研究范围内均满足要求)、水封效率由 2 202 降低至 1 800;随着水幕孔间距增加,地下水位由 18.8 m 降低至 16.5 m,但降幅不大(5~20 m 研究范围内均满足要求)、水封效率由 2 004 上升至 2 153。

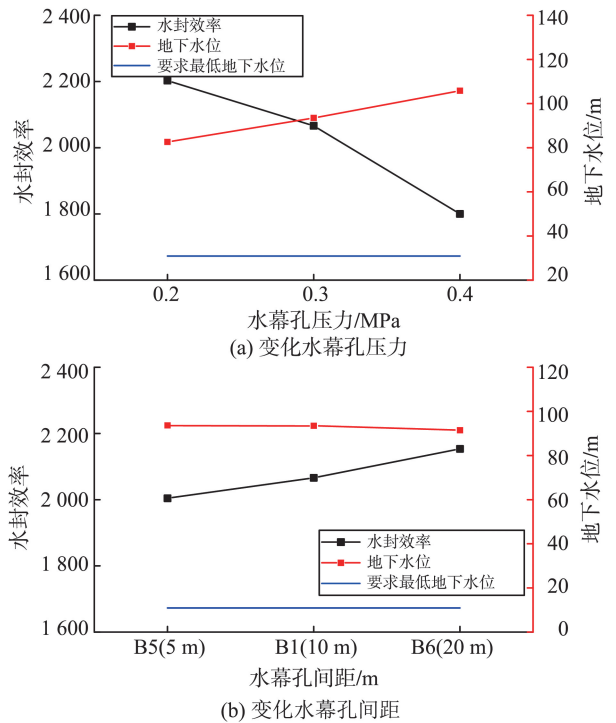


图 14 不同水幕参数下地下水位、水封效率变化图

Fig.14 Variation diagram of water level and containment efficiency

因此,在保证水封前提下,为更经济地运行地下水封洞库,结合水封效率指标,在设计阶段可适当降低水幕孔压力、增大水幕孔间距,具体数值要依据现场试验及监测结果动态调整,在该工程中,水幕孔压力建议为 0.2~0.4 MPa,水幕孔间距建议为 5~20 m。

6 结论

本研究以南方某大型地下水封洞库扩建项目为背景,采用有限元软件 COMSOL Multiphysics 建立地下水封洞库三维渗流计算模型,进行了库区渗流场模拟,分析扩建与已建地下水封洞库水封性相互影响。主要结论如下。

(1) 扩建工程施工会对已建工程运营渗流场产生一定程度影响,相比于独立选址建库,扩建工程会破坏已建工程的稳定渗流场,导致已建工程上方

地下水位下降,涌水量增加,水封效率降低,但不会使已建工程水封失效。已建工程在人工补给与地下水天然补给协同作用达到新的平衡,导致已建工程洞室上方水位下降1 m左右,但仍然满足水封要求,洞室涌水量增大10.47%~22.28%,计算水封效率降低9.47%~30.77%。

(2)已建工程运营会对扩建工程施工产生一定程度的影响,但是影响程度有限,两期工程仍满足水封要求,依托本项目数值模拟结果而言,相比于独立选址建库,在已建工程旁进行扩建,扩建工程涌水量降低,水封效率提高。地下水分别涌入两期工程洞室,二期工程洞室涌水量降低3.38%~21.51%,计算水封效率提高3.50%~27.41%。

(3)变化水幕孔注水压力相比于变化水幕孔间距影响程度更高,扩建工程水封效率与水幕孔压力呈现负相关,与水幕孔间距呈现正相关。因此在满足地下水水位的要求下,可适当降低水幕孔压力、增大水幕孔间距,在该工程中,水幕孔压力调整范围建议为0.2~0.4 MPa,水幕孔间距调整范围建议为5~20 m。

参考文献:

- [1] 曾茹, 李荔霞. 国内石油储运业现状及安全建议[J]. 安全、健康和环境, 2011, 11(1): 8-10.
ZENG Ru, LI Lixia. The situation and safety suggestions on domestic oil storage and transportation industry [J]. Safety Health & Environment, 2011, 11(1): 8-10.
- [2] HIROKI K, SADAU I, CHUAN S C H, et al. Construction of Namikata underground LPG storage cavern in Japan [J]. International Journal of the JCRM, 2014, 10(2): 15-24.
- [3] STURK R, STILLE H. Design and excavation of rock caverns for fuel storage; a case study from Zimbabwe [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1995, 10(2): 193-201.
- [4] HEPBASLI A. Liquefied petroleum gas in Turkey's energy sources [J]. Energy Sources, 2003, 25(5): 373-382.
- [5] NILSEN B. Norwegian oil and gas storage in rock caverns-technology based on experience from hydropower development [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2021, 13(2): 479-486.
- [6] MAKITA T, MIYANAGA Y, IGUCHI K, et al. Underground oil storage facilities in Japan [J]. Engineering Geology, 1993, 35(3/4): 191-198.
- [7] 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. Study on the layout mode of expanding sealing oil depot under the action of vertical water curtain [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(8): 1308-1318.
- [8] 彭振华, 王者超, 洪成华, 等. 围岩参数不确定性对地下水封洞库稳定性的影响[J]. 山东大学学报(工学版), 2024, 54(2): 126-135.
PENG Zhenhua, WANG Zhechao, HONG Chenghua, et al. Influence of uncertainty of surrounding rock parameters on stability of underground water-sealed cavern [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(2): 126-135.
- [9] 王者超, 李术才, 薛翊国, 等. 大型地下水封石油洞库围岩完整性、变形和稳定性分析[J]. 山东大学学报(工学版), 2011, 41(3): 112-117.
WANG Zhechao, LI Shucui, XUE Yiguo, et al. Analysis of integrity, deformation and stability of surrounding rocks of large groundwater sealed oil tunnel reservoir [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2011, 41(3): 112-117.
- [10] 梁建毅, 李术才, 薛翊国, 等. 地下储油库岩体水文地质分类及工程应用研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2012, 42(6): 86-92.
LIANG Jianyi, LI Shucui, XUE Yiguo, et al. Study on hydrogeological classification and engineering application of rock mass in underground oil storage depot [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2012, 42(6): 86-92.
- [11] ZHAO X D, DENG L, ZHANG S J. Stability analysis of underground water-sealed oil storage caverns in China: a case study [J]. Energy Exploration & Exploitation, 2020, 38(6): 2252-2276.
- [12] HASSANPOUR J, FIROUZEI Y, HAJIPOUR G. A regional-scale engineering geological study for selecting suitable rock masses for constructing unlined oil storage caverns in Southern Zagros, Iran [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(1): 267-280.
- [13] 付长波, 洪成华, 王者超, 等. 水封洞库施工过程稳定性评价及断层影响分析[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2024, 6(1): 45-53.
FU Changbo, HONG Chenghua, WANG Zhechao, et al. Stability evaluation and faults influence analysis of water-sealed caverns during construction [J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2024, 6(1): 45-53.
- [14] LI Y T, ZHANG B, WANG L, et al. Key issues in

- water sealing performance of underground oil storage caverns: advances and perspectives[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15(10): 2787-2802.
- [15] ÅBERG B. Prevention of gas leakage from unlined reservoirs in rock [M]//*Storage in Excavated Rock Caverns: Rockstore 77*. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier, 1978: 399-413.
- [16] GOODALL D C, ÅBERG B, BREKKE T L. Fundamentals of gas containment in unlined rock caverns [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1988, 21(4): 235-258.
- [17] ZHANG Q H, LIU Q B, HE G F. Reexamining the necessity of adding water curtain borehole with improved understanding of water sealing criterion [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(10): 4623-4638.
- [18] SUH J, CHUNG H, KIM C. Study of the condition of preventing gas leakage from unlined rock cavern [C]//*Proceedings International Symposium on Large Rock Caverns*. Helsinki, Finland: [s.n.], 1986: 725-736.
- [19] LIANG J, LINDBLOM U. Analysis of gas storage capacity in unlined rock caverns [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1994, 27(3): 115-134.
- [20] LI Y T, ZHANG B, WANG L, et al. Key issues in water sealing performance of underground oil storage caverns: advances and perspectives[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15(10): 2787-2802.
- [21] 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.
- [22] 李术才, 平洋, 王者超, 等. 基于离散介质流固耦合理论的地下石油洞库水封性和稳定性评价[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(11): 2161-2170.
- LI Shucai, PING Yang, WANG Zhechao, et al. Water sealing and stability evaluation of underground oil cavern based on fluid-solid coupling theory of discrete medium [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(11): 2161-2170.
- [23] 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 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.
- [24] 平洋, 王者超, 李术才, 等. 裂隙随机分布条件下地下石油洞库水封性评价[J]. *岩土力学*, 2014, 35(3): 811-819.
- PING Yang, WANG Zhechao, LI Shucai, et al. Water seal effect evaluation of underground crude oil storage caverns around rock mass with random joints [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(3): 811-819.
- [25] PARK J J, JEON S. Design of Pyongtaek LPG storage terminal underneath the Lake Namyang [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2005, 9(2): 81-89.
- [26] 许建聪, 郭书太. 地下水封洞库围岩地下水渗流量计算[J]. *岩土力学*, 2010, 31(4): 1295-1302.
- XU Jiancong, GUO Shutai. Calculation of groundwater seepage flow rate in surrounding rock of groundwater sealed cavern [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(4): 1295-1302.
- [27] KIM T, LEE K K, KO K S, et al. Groundwater flow system inferred from hydraulic stresses and heads at an underground LPG storage cavern site [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 236(3/4): 165-184.
- [28] WANG Z C, LI S C, QIAO L P. Design and test aspects of a water curtain system for underground oil storage caverns in China [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 48: 20-34.
- [29] 彭振华, 乔丽苹, 黄安达, 等. 基于地下水化学特征的水封油库水幕系统有效性评价[J]. *水文地质工程地质*, 2024, 51(3): 34-42.
- PENG Zhenhua, QIAO Liping, HUANG Anda, et al. Evaluation of the effectiveness of water curtain system in water seal oil depot based on the chemical characteristics of groundwater [J]. *Hydrogeology and Engineering geology*, 2024, 51(3): 34-42.
- [30] 石磊. 降雨充沛区地下洞库人工水封作用特征及适度性研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2022.
- SHI Lei. Study on the characteristics and moderation of artificial water sealing of underground caves in areas with abundant rainfall [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2022.
- [31] 张宜虎, 刘倩, 高锡敏, 等. 水封洞库地下水位监测资料分析与利用[J]. *隧道与地下工程灾害防治*, 2024, 6(1): 24-35.
- ZHANG Yihu, LIU Qian, GAO Ximin, et al. Analysis and utilization of groundwater level monitoring data in water seal tunnel reservoir [J]. *Tunnel and Underground engineering disaster prevention*, 2024, 6(1): 24-35.