

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2018.01.05

水幕系统对地下水封洞库藏品安全的影响分析

杨 荣, 胡 成, 陈 刚, 黎照洪

(中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为了解水幕系统对地下水封洞库的储藏安全的作用, 验证水幕系统设置的必要性, 基于多相流理论, 依托烟台某地下水封洞库工程, 以其丙烷子洞库为例, 分别设计无水平水幕系统、设置单一水平水幕系统和设置水平与垂直双水幕系统三种工况形式, 选用 TOUGH2 软件中 TMVOC 模块, 进行藏品水-油-气三相流运移模拟。模拟结果显示: 丙烷在储藏过程中会逐步形成围绕在洞室周边的污染晕, 且污染晕的水平延伸较为显著。相邻洞室间污染晕随着时间的推移相互贯通。在无水平水幕系统的工况下, 藏品在储藏 9 个月内, 污染晕水平迁移距离便达到风险阈值, 其余工况下, 污染晕在藏品储藏 100 年后仍未达到风险阈值, 并圈闭在一定范围内。在垂直水幕的作用下, 污染晕的水平迁移受到明显抑制。因此, 仅依赖天然地下水补给, 藏品极易发生泄露, 带来安全隐患, 为保证地下水封洞库的储藏安全, 设置水幕系统是必要且有效的。

关键词: 水幕系统; TOUGH2; 地下水封洞库; 多相流模拟

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2018)01-0030-08

An analysis of the impact of the water curtain system on the safety of an underground water-sealed cavern

YANG Rong, HU Cheng, CHEN Gang, LI Zhaozhong

(School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: In order to understand the role of the water curtain system in the storage security of underground cavern, and verify the necessity of setting up the water curtain system, on the basis of an underground water-sealed cavern in Yantai, several simulating conditions are designed, including a no-water curtain system, a single horizontal water curtain system and a horizontal and vertical water curtain system, using the TMVOC module of TOUGH2 software to simulate the three-phase flow of gas, oil and water with multiphase flow theory. The results of numerical simulations indicate that the pollution halos will form round the caverns, in which the horizontal extension is more obvious. As time goes on, the pollution halos between the adjacent caverns pass through each other. Without the water curtain system, the horizontal migration extension of the pollution halos reaches the risk threshold in 9 months. While under the other simulating conditions, the pollution halos have not reached the risk threshold after 100 years of storage, all of which are trapped in a certain range. Besides, the vertical curtain system can markedly inhibit the horizontal migration of the pollution halos. In conclusion, we note that the propane in the cavern leaks easily depending only on the natural groundwater recharge. It is necessary and effective to set the water curtain system to constrain migration of pollution halos and ensure the storage safety of the underground water-sealed cavern.

收稿日期: 2017-06-10; 修订日期: 2017-08-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401539)

第一作者: 杨荣(1993-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水文地质、工程地质。E-mail: 1014221453@qq.com

通讯作者: 胡成(1976-), 男, 博士, 副教授, 主要从事 3s 技术及水文地质、工程地质的教学及研究工作。

E-mail: hu_cheng@cug.edu.cn

Keywords: water curtain system; TOUGH2; underground water-sealed cavern; multiphase flow simulation

近年我国石油对外依存度逐渐上升,为稳定油气产品供给,国家进一步筹建石油储备基地,而地下水封洞库则以其安全、高效、污染少等多重优越性成为国家石油储备基地以及商业石油储备的重要地质工程设施^[1]。目前,地下水封洞库的修建及分析技术正逐步完善,但相关研究较少关注工程本身的安全问题。储藏安全性是藏品特性、洞室工程设计和地质介质条件的统一。对于洞库本身的工程设计,基于工程经验配备的水幕系统在洞库储运安全方面扮演着重要的角色,但其实际效果仍需进行工程检验,藏品的泄露运移分析则是检验储藏效果的有效方法。

已开展的地下洞库藏品泄漏风险及运移评价工作多从整体气密性角度着手。我国地下洞库以结晶岩水封洞库为主,且已建成的洞库不多,故可参考的工程实例极少,目前仅有黄岛国家储备石油洞库进行过类似评价^[2]。国外方面,Okazaki介绍了日本仓敷市LPG储备库气密性试验的开展情况^[3],Kim等则分析了气密性试验开展时的热量耗散问题^[4]。上述成果主要针对洞库运营阶段之前的气密性试验阶段。Åberg提出“气体不泄漏准则”(No-Gas-Leakage Criterion)—垂直水力梯度准则,被广泛应用^[5]。Goodall等利用Hele Shaw物理模型验证了Åberg提出的垂直水力梯度准则,介绍了无衬砌密封洞库气体逸出的临界压力为地下水流态、裂隙毛细作用与裂隙形态的函数^[6]。韩国学者Lee等提出复合模型,通过迭代修正核心研究区的进出水量定性分析了水幕孔的密封效果^[7]。

泄露影响因素方面,刘汉乐团队通过系列室内试验,得到包气带中LNAPL(轻非水相液体)含量差值的分布特征,分析了介质粒径、接触面性状、结构裂隙、毛细水分等因素对LNAPL在包气带中迁移和分布的影响,并探究了透镜体的存在、地下水位波动等因素对LNAPL运移的影响等^[8-9]。Li等设计了室内物理模型,模拟了水幕系统的密封作用,计算了相关的进气压力并模拟探讨了LNAPL气体泄漏量与水幕压力的关系^[10]。时洪斌通过室内平行板模型试验,定性分析了储油过程地下水位的变化及裂隙介质对石油泄漏的影响,并探究了气态油品泄漏的微观机理^[2]。实际运移模拟方面,付登伟借用TOUGH2的EOS8模块建立石油的水-油-气三相流二维剖面模型,研究了在张性断层中石油的运移规律及分布特征^[11]。Yamamoto H等利用TOUGH2的TMVOC模块,建立了一维模型,按

照压力梯度准则,讨论了日本某LPG洞库的安全性,并通过剖面三相二维流模型,讨论了LPG洞库泄漏的潜在原因,考虑了不充水断层的存在、随机渗透性以及地下水动态变化等因素对洞库泄漏的影响,但其简化了洞室介质条件,将整个研究区视为均一的多孔介质进行处理^[12]。

前人分析LNAPL运移特征及其影响因素时,受研究工具所限,一般建立简单的室内试验模型或理想化的数值模型,极大地简化了工程参数、场地地质参数以及藏品物性特点。受尺度效应影响,室内试验在反映工程场地尺度时存在一定失真。

目前,关于LNAPL地下运移的文献非常罕见。随着研究工具的改善,开展以多相流模拟为基础的地下水封洞库藏品运移模拟研究已变得相对方便高效,对解决实际工程问题具有重要意义。另外对于地下水封洞库工程是否有必要设置水幕系统,一直以来存在较大争议。以烟台某地下水封洞库工程丙烷子洞库为例,选用TOUGH2软件图形化界面程序PetraSim中的TMVOC模块,分别设计无水平水幕系统、设置单一水平水幕系统和设置水平与垂直双水幕系统等三种工况形式,进行藏品水-油-气三相运移模拟,借以评估水幕系统对地下水封洞库藏品储藏安全性的影响,验证水幕系统设置的重要性。

1 工程概况

研究的地下水封洞库位于山东烟台,是某公司的商业储备库。主体由丙烷(北侧)、丁烷(西南侧)、LPG(液化石油气,东南侧)三个储存区组成。主要工程包括9个主洞室和10条水幕巷道,附加工程包括6条交通巷道和4个竖井(图1)。丙烷洞库相关设计参数见表1,表2。

研究区为温带季风气候,年平均气温为12.8℃。库区北部属于丘陵与冲洪积平原过渡地带,1~2 km远处为黄海海域。库区所在地经场地平整后,平均高程约30 m,高差约8 m,地面高程变化不大,因此模拟分析时可视为一个平面。

研究区的地层岩性有第四系覆盖层和基岩、岩脉三类。第四系覆盖层包括人工填土层(Q^m)、冲洪积层(Q^{al+pl})、残坡积层(Q^{el+dl});基岩为燕山早期中粗粒黑云母二长花岗岩($\gamma_s^{2(1)}$);岩脉包括燕山期花岗斑岩脉、煌斑岩脉、闪长玢岩脉等,均与周围岩体接触良好。

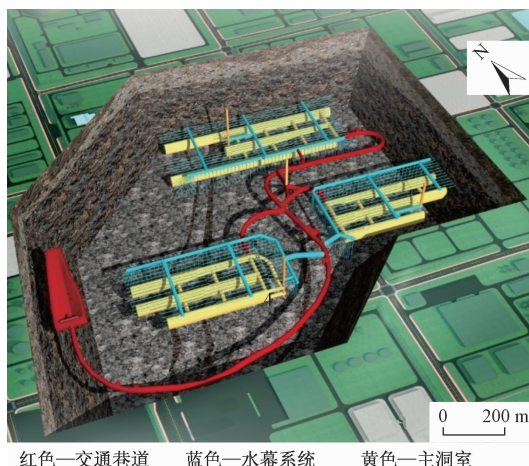


图 1 工程效果

Fig. 1 Design sketch of the engineering

工程场址范围内地质构造发育程度较低。

表 1 丙烷洞室几何参数

Table 1 Geometric parameters of the propane caverns

库区	洞室长度/m	交通巷道条数	洞室几何属性			净间距/m	洞顶板标高/m	洞底板标高/m	洞室离水幕距离/m
			洞跨/m	洞高/m	截面积/m ²				
丙烷	北 480 中 303 南 470	4	22	26	474.7	44	-120	-146	20

表 2 水幕巷道几何参数

Table 2 Geometric parameters of water curtain system

库区	巷道总长度/m	巷道条数	水幕巷道几何属性			水平水幕孔个数	垂直水幕孔个数	水平水幕孔标高/m	孔径/mm
			洞跨/m	洞高/m	截面积/m ²				
丙烷	982	3	7	6	36.7	97	57	-100	100

2 不同工况下藏品运移特征

2.1 模型构建

数值建模工作借助 TOUGH2 软件,选用 TMVOC 模块,构建非饱和非均质水-油-气三相剖面二维流模型。

(1) 边界条件

研究区为近海平原地带,勘察工作范围内不存在明显的水力边界,将其视为无限延伸边界,选取一定的侧向范围作为定温定压力边界(fixed-state cells)。模型的上边界为定温定压力边界。由于丙烷密度小于水,若发生泄漏几乎不影响储藏深度以下地下水体,故对模型下部进行适度扩展即可。通过对底层岩体参数进行特殊设定,可间接设定为定温定压力边界。

(2) 模型概化

对实际工程参数进行一定的概化,模型中单个栅格的尺寸为 5 m × 5 m。模型范围上,对丙烷库区下部扩展 75 m,左右两侧扩展 145 m。库区参数概化情况

地下水类型相对单一,主要包括:松散岩类孔隙水,浅层网状裂隙水和深层脉状裂隙水三种。松散岩类孔隙水主要赋存介质为第四系松散覆盖层,含水层厚 2 ~ 20 m。浅层网状裂隙水的主要赋存介质为燕山早期中粗粒黑云母二长花岗岩,主要赋存在强风化带及中风化带浅部,与上部松散岩类孔隙水联系密切。深层脉状裂隙水主要赋存介质为中风化带深部及以下岩体,是洞库主体工程所在区域的含水类型。研究区地下水主要接受大气降水垂直入渗补给和山区地下水侧向补给,由东西两侧山区地势较高处向中部径流,向黄海方向排泄,黄海为本区域的最低排泄面。根据岩土工程勘察报告,研究区地下水埋深较浅,普遍小于 5 m,最大为 8.22 m,浅层地下水动态变化受降水影响明显,水位年变幅 3 ~ 5 m。

见表 3。丙烷洞库包含 3 个储藏主洞室,由于洞室间间距一致,丙烷扩散情况呈对称分布,故仅需对其中一半进行研究,最终得到尺寸为 220 m × 220 m 的 XZ 方向剖面(X 方向为地理方位的南向)。丙烷洞库概化剖面见图 2。

表 3 库区参数概化情况表

Table 3 Parameter generalization of structures in the propane cavern

内容	模型取值及备注	工程实际值
水幕层	5 m × 5 m, 矩形	约 6 m × 7 m, 拱状
主洞室	20 m × 25 m, 矩形	约 22 m × 26 m, 拱状
洞室间距	45 m	44 m

2.2 参数设定

岩体参数主要有渗透率及孔隙度。由场地多种水文地质试验结果整理得到各层主渗透率。由于水幕系统及洞室开挖后形成空腔,根据现场渗水量测量结果确定空腔渗透率。因洞室开挖造成围岩松动,按工程

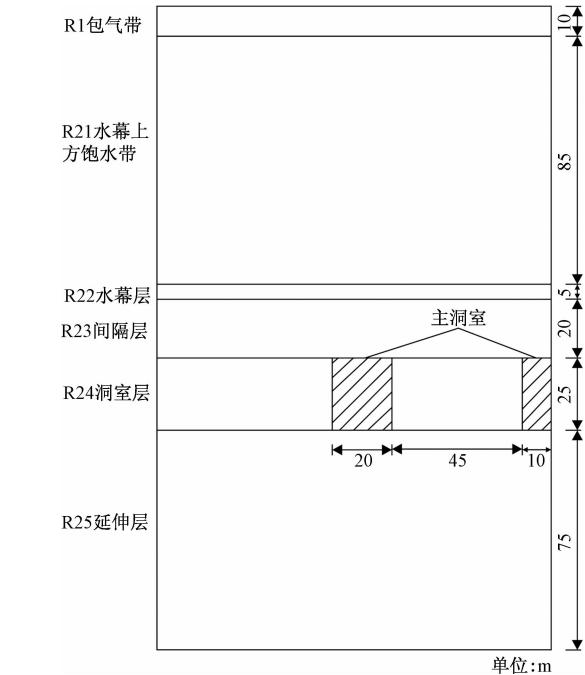


图 2 丙烷洞库概化剖面
Fig.2 Propane cavern section for
parameter generalization

经验,围岩的渗透率比非松动围岩大一个数量级,影响范围取洞室外围的一个单元格。研究区表层区域 R1 与次层区域 R21 仅通过地下水面划分,岩体渗透率取相同值。研究区岩体渗透率见表 4,孔隙度见表 5。岩体饱和导热系数(饱和热导率)取值为 3.0 W/(m·K),比热容为 800 J/(kg·K)。

表 6 热动力参数

Table 6 Thermodynamic parameters			
参数名称	参数值	参数名称	参数值
临界温度 TCRIT/K	369.8	参考密度 RHOREF/(kg·m ⁻³)	589
临界压力 PCRT/bar	42.5	参考温度 TDENRF/K	233.15
临界压缩系数 ZCRIT	0.281	参考温度下二元 VOC 扩散系数 DIFVO/(m ² ·s ⁻¹)	默认值
Pitzer 偏心因子 OMEGA	0.153	气体扩散的参考温度 TDIFRF/K	默认值
偶极矩 DIPOLM/debyes	0.084	化学溶解指数 TEXPO	默认值
标准沸点 TBOTL/K	231.02	液体 NAPL 粘度常数 A VOLA	-7.764
蒸汽压力常数 A(VPA)	-6.763 68	液体 NAPL 粘度常数 B VOLB	721.9
蒸汽压力常数 B(VPB)	1.554 81	液体 NAPL 粘度常数 C VOLC	2.38 × 10 ⁻²
蒸汽压力常数 C(VPC)	-1.587 2	液体 NAPL 粘度常数 D VOLD	-4.67 × 10 ⁻⁵
蒸汽压力常数 D(VPD)	-2.024	临界体积 VOLCRT/(cm ³ ·mol ⁻¹)	200
分子量 AMO	44.097	化学物质在水的溶解度常数 A	6.70 × 10 ⁻⁵
理想气体热容常数 A CPA	3.847	化学物质在水中的溶解度常数 B、C、D	0
理想气体热容常数 B CPB	5.13 × 10 ⁻³	化学有机碳组分系数 OCK/(m ³ ·kg ⁻¹)	0
理想气体热容常数 C CPC	6.01 × 10 ⁻⁵	土壤有机碳默认系数 FOX	0
理想气体热容常数 D CPD	-7.89 × 10 ⁻⁸	VOC 生物降解常数 ALAM/s	0

2.3 初始状态模型的建立

首行单元属性按照地表条件设置:工业区地表大部分经过水泥硬化,可忽略降雨入渗影响,将地表设置

表 4 岩体渗透率 Table 4 Rock permeability		
库区	区域	渗透率/(× 10 ⁻¹⁵ m ²)
丙烷	R1/R21	36.8
	R22	1.40
	R23	98.5
	R24	3.75
	R25	7.85
	松动区 SONG	37.5
	开挖空腔 KONG	1 000 000

表 5 岩体孔隙度 Table 5 Rock porosity			
参数名称	参数值	参数介绍	选用依据及备注
孔隙度	0.03	岩体	岩土工程勘察报告(详勘)
	0.05	松动围岩	同类文献选用值
	0.99	洞室及水幕巷道等挖空区域	TOUGH2 习惯值

热动力参数共 32 个,参数可通过分子物理理论计算或实验室测定。Reid 等介绍了多个参数的多种不同计算方法^[13],Vargaftik 介绍了部分参数随温度或压力的具体变化情况^[14]。热动力领域权威机构美国德克萨斯州 A&M 大学热动力研究中心(Thermodynamics Research Center at Texas A&M University,简称 TRC)通过建立参数数据库收录了大量参数的实验值或计算值。在选用热动力参数时主要依据上述途径。热动力参数见表 6。

成温度为 12.8 ℃,1 个标准大气压的常温常压边界。
地下水埋深按最大不利原则,取最大值 10 m。按相的存在差异,以地下水面为界划分成区域 R1 和

R21。R1 包含水相和气相,水相饱和度取 0.15,温度函数为 $T = 12.8 - 0.03Z$,压力为 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$; R21 仅包含水相,温度函数为 $T = 12.8 - 0.03Z$,压力函数为 $P = 1.013 \times 10^5 - 9800Z$ 。地下边界(末行单元)通过增设一层比热容大,孔隙度小,渗透率低的岩层确定(经验值分别为 $1 \times 10^{30} \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 0.01, $1 \times 10^{-18} \text{ m}^2$)。对各层的岩体参数进行赋值,进行初始平衡计算。由计算结果可知,洞室所在位置岩体温度均值为 17.0°C 。

初始平衡计算结束后,修改洞室单元格岩体参数及相条件:洞室单元格岩体改为 KONG、相条件改为含水率为 15% 的气相,温度为 17.0°C ,压力为 1 个标准大气压;松动区围岩单元格岩体改为 SONG。进行洞室开挖 90 天后的初始平衡计算。

2.4 污染晕运移风险阈值分析

受地下水压力影响,若污染晕被控制在地下一定范围内,则认为藏品的地下水封存是安全有效的。对于丙烷洞库,结合工程参数设计,以污染晕水平向扩散 55 m 作为风险阈值,垂向上,以污染晕到达地下水水面处作为风险阈值。

2.5 不同工况下藏品泄露运移特征

由于溶解于水中的丙烷含量极少,且随着生产、分离工艺的改善,油气产品中水的含量非常低,可忽略,故将洞室设定为固定气-油两相边界(气态为气态丙烷和空气的混合物),气相和油相的比例为 1:9。因油品自重产生的压力远远小于同温度下的饱和蒸汽压,研究区丙烷储存形式为常温储存,且正常情况下不会满负荷储存,故选用温度为 20°C 、对应饱和蒸汽压为 0.8 MPa 的丙烷参数进行模拟。各模拟情景说明如表 7,模型概化后水幕与主洞室的相对位置见图 3。

(1) 有/无水平水幕

加载洞室开挖 90 天后初始平衡模型,对不同工况下相应岩体及热动力参数赋值。模拟丙烷洞库中藏品

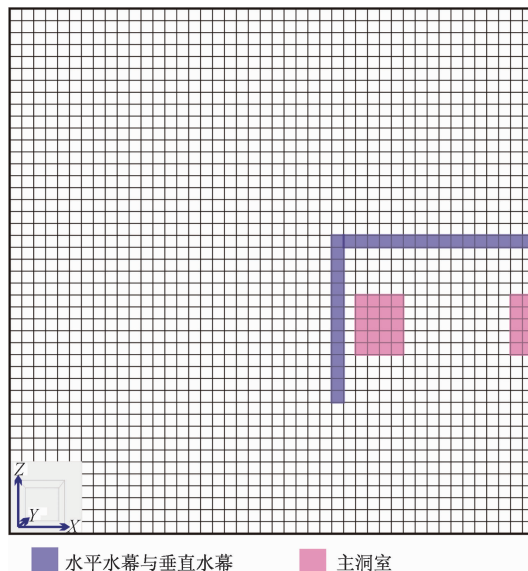


图 3 水幕与主洞室的相对位置

Fig. 3 Relative position between the water curtain and cavern in the model

注:图 4 ~ 图 7 坐标系同本图

的运移特征,得到 0.8 MPa、 20°C 下无水平水幕工况下的模拟结果如图 4 所示,有水平水幕工况下的模拟结果如图 5 所示。

可以发现:丙烷污染晕主要沿水平方向运移,没有水幕作用下,污染晕水平运移速度较快,1 个月后洞室间污染晕便可相互贯通,9 个月后污染晕与洞室间的水平距离达 55 m,到达风险阈值,随着运移时间的推移,污染晕持续扩散,XVOCW 值(挥发性有机化合物在水相中的质量分数值)不断增加,并在运移后期有向洞室上方扩展的趋势,对工程安全造成威胁。加载水平水幕系统后,污染晕在水平方向及垂向向上方向的扩散受到明显抑制,XVOCW 值减小,但在垂向向下方向上,范围扩展了 10 ~ 20 m。10 年后污染晕的范围变化微小,趋于稳定,水平最远扩散距离为 50 m,未达到阈值。50 年后污染晕达到稳定状态。

表 7 模拟情景说明

Table 7 Simulation scenarios

工况	模拟结果	水幕参数设置	水幕位置
1 无水幕	图 4	/	/
2 加载水平水幕	图 5	温度: 20°C 压力: 对应深度天然压力和附加压力 (水平水幕为 0.8 MPa, 垂直水幕为 0.5 MPa) 之和	洞室上方 20 ~ 25 m, 水平向左外延 10 m, 共长 85 m, 位于水幕层
3 加载水平水幕和垂直水幕	A) “非穿透”水幕 图 6 B) “穿透”水幕 图 7	岩体参数: 热导率为 0, 其他同 KONG	洞室左侧 5 ~ 10 m, 上接水平水幕, 下至洞室下方 20 m 处, 共长 65 m

(2) 加载垂直水幕系统

为限制污染晕的水平运移,防止不同藏品洞室之

间的污染物彼此贯通,工程上常设置垂直水幕钻孔。

垂直水幕钻孔既可为地下含水层补水,又可提供

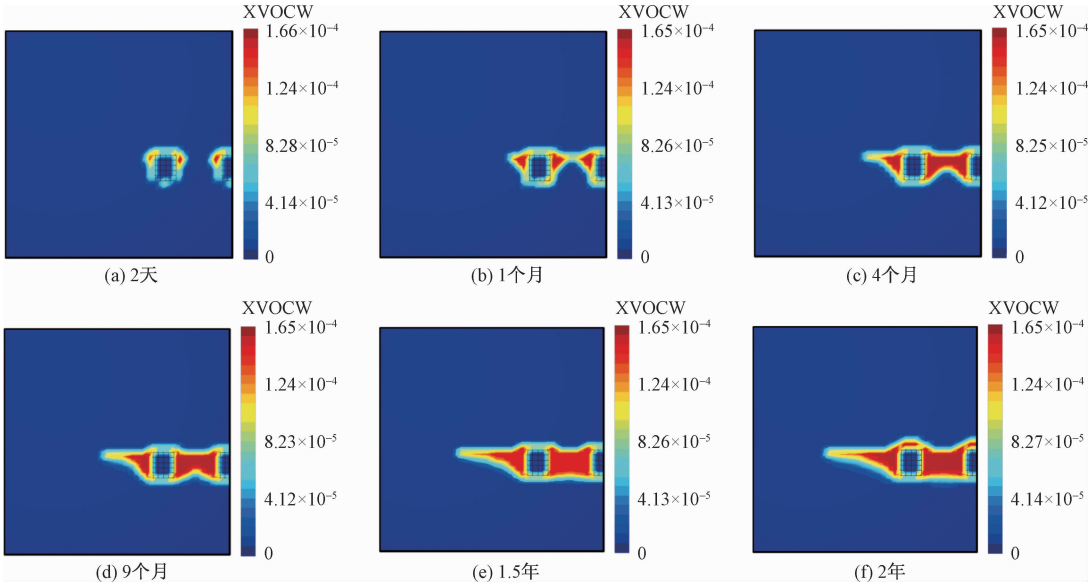


图 4 无水幕作用下丙烷在水相中的质量分数 (XVOCW)
Fig. 4 XVOCW without a water curtain

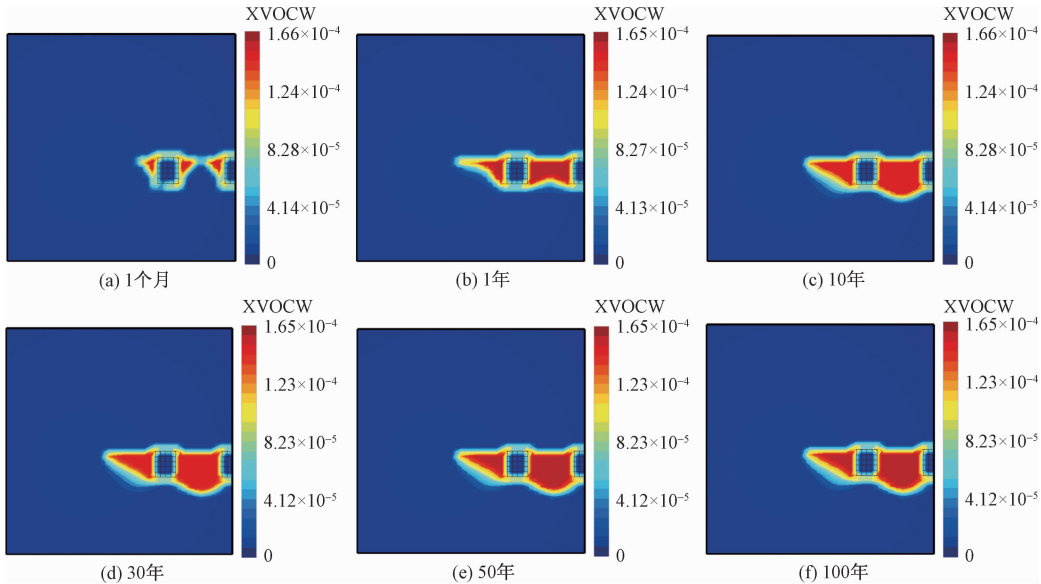


图 5 有水平水幕作用下丙烷在水相中的质量分数 (XVOCW)
Fig. 5 XVOCW with a horizontal water curtain

附加水压力。丙烷垂直水幕钻孔的附加压力为 0.5 MPa(其他参数设置同水平水幕),模拟软件上应设定为 fixed-state 类型单元格,但 fixed-state 类型设置不仅会锁定单元格的温度压力,还会锁定单元格的浓度,使得污染物只能绕开不能穿过。而在实际情况中,污染物可以通过溶解及扩散等方式“穿透”水幕钻孔,从而改变钻孔及钻孔另一侧污染物浓度。

为合理分析垂直水幕的实际作用,同时采用两种方案进行研究。

方案一:设置成“非穿透”水幕,即设置附加压力、

温度及 LNAPL 浓度作为初始条件,并设置为 fixed-state 类型单元格。

方案二:设置成“穿透型”水幕,即设置附加压力、温度及 LNAPL 浓度作为初始条件,但不锁定以上值(单元格类型设置成 Enabled)。

两种方案中,均设置水平水幕,从而使模拟工况与工程实际相匹配。两种方案结果如图 6、图 7 所示。两种方案得到近乎相似的结果。对比图 4、图 5 与图 6、图 7,垂直水幕能有效抑制污染晕的水平运移扩散。同时设置垂直水幕和水平水幕的情况下,洞室左侧及

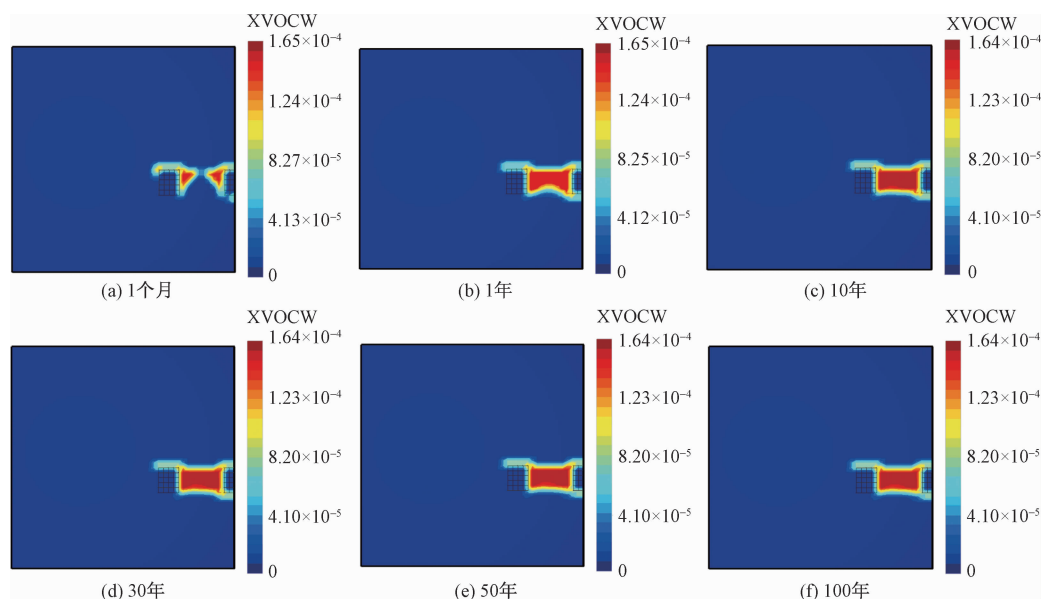


图 6 方案一模拟结果

Fig. 6 Simulation results of scheme 1

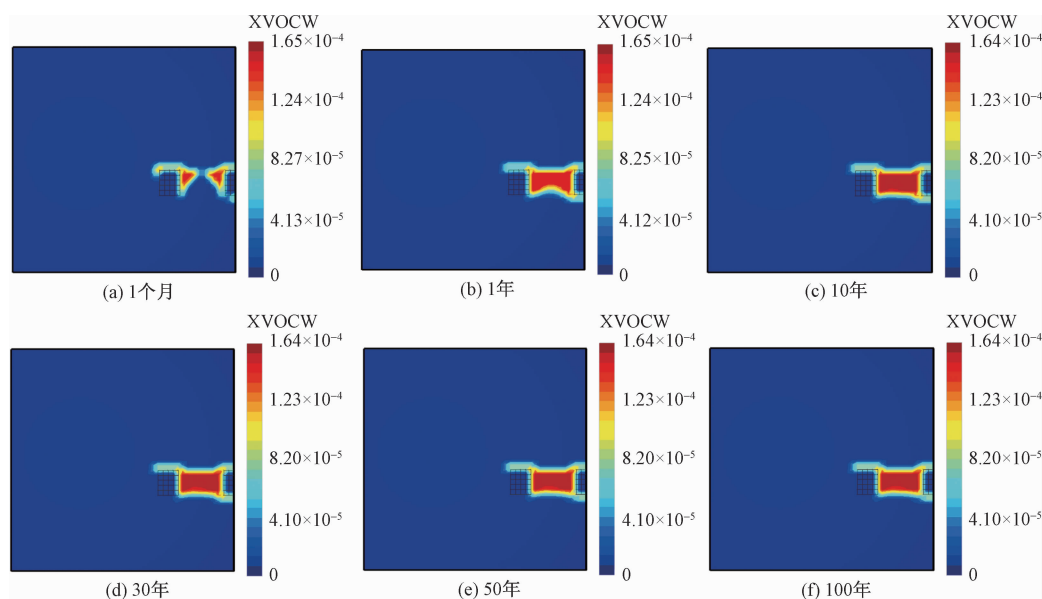


图 7 方案二模拟结果

Fig. 7 Simulation results of scheme2

洞室下方的污染晕消失(相较于只有水平水幕工况),污染晕主要分布于两个洞室之间。污染晕随时间迁移逐步扩大后相互贯通,贯通发生后 XVOCW 值有所下降。10 年后污染晕的范围变化微小,趋于稳定,50 年~100 年间污染晕达到稳定状态。可以看出,同时设置水平水幕和垂直水幕的情况能够满足安全储藏要求。

3 结论及建议

(1) 丙烷在储藏过程中会逐步形成围绕在洞室周

边的污染晕,且污染晕的水平延伸较为显著。相邻洞室间的污染晕随着时间推移相互贯通。在无水幕系统的工况下,藏品在储藏 9 个月内,污染晕水平迁移距离便可达到风险阈值,其余工况下,污染晕在藏品储藏 100 年后仍未达到风险阈值,并圈闭在一定范围内。因此,仅依赖天然地下水补给,藏品极易发生泄露迁移,带来安全隐患,为保证地下水封洞库藏品储藏安全,设置水幕系统是必要且有效的。

(2) 在垂直水幕的作用下,藏品的水平迁移明显

受到抑制,故垂直水幕能有效避免不同库区污染晕扩散连通的情况。

通过以上研究虽然得到了一些有意义的成果,但仍可从以下两方面做进一步研究,进而完善结论,提升多相流理论及其模拟工作在工程实际应用上的价值:

(1)由于研究区位于平原地带,地下水径流缓慢,故论文讨论时忽略了地下水的天然径流。后续研究中可补充测定地下水流向,分析在考虑了地下水流动影响下的 LNAPL 污染晕的扩散变化。

(2)实际工程中裂隙含水岩体的渗透性具有高度各向异性,本次在构建模型时虽对岩体进行了渗透性垂向分层,但由于勘察精度的限制,未考虑各向异性的影响,因此,在后续研究中,在获取更为详细资料的情况下,可通过构建三维模型对裂隙岩体渗透性进行精细刻画,进而得到更加符合工程实际的模拟结果。

参考文献:

- [1] 刘琦,卢耀如,张凤娥. 地下水封储油库址的水文地质工程地质问题[J]. 水文地质工程地质, 2008,35(4):1-5. [LIU Q, LU Y R, ZHANG F E. Hydrogeological and engineering geological problems of the site of underground oil storage caverns with water curtain [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008,35(4):1-5. (in Chinese)]
- [2] 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 H B. 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. (in Chinese)]
- [3] Okazaki Y, Maejima T, Okubo S, *et al.* Development of gas-tightness evaluation system for Kurashiki national LPG stockpiling base[J]. Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses, 2014:493-498.
- [4] Kim H, Rutqvist J, Ryu D, *et al.* Exploring the Concept of Compressed Air Energy Storage (CAES) in lined rock caverns at shallow depth: a modeling study of air tightness and energy balance [J]. Applied Energy, 2012,92(2):653-667.
- [5] Åberg B. Prevention of gas leakage from unlined reservoir in rock [J]. Storage in Excavated Rock Caverns, 1978(2):399-413.
- [6] Goodall D C, Åberg B, Brekke T L. Fundamentals of gas containment in unlined rock cavern [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1988, 21(4): 235-258.
- [7] Lee, Sangpil. A study on the quantitative analysis for the gas tightness of LPG underground storage facilities [J]. Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, 2005,42(4):345-353.
- [8] 刘汉乐,周启友,徐速. 非饱和带中非均质条件下 LNAPL 运移与分布特性实验研究[J]. 水文地质工程地质, 2006,33(5):52-56. [LIU H L, ZHOU Q Y, XU S. An experimental investigation of LNAPL migration and redistribution in unsaturated heterogeneous porous media [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33(5): 52-56. (in Chinese)]
- [9] 刘汉乐,张晨富,刘宝臣,等. 轻非水相液体在不同粒径多孔介质中的运移与分布特性[J]. 水文地质工程地质, 2014,41(2):105-110. [LIU H L, ZHANG C F, LIU B C, *et al.* Experimental investigation of migration and distribution characteristics of LNAPL contaminants in porous media of different particle sizes [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(2): 105-110. (in Chinese)]
- [10] LI Z K, WANG K Z, WANG A M, *et al.* Experimental study of water curtain performance for gas storage in an underground cavern [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2009, 1(1):89-96.
- [11] 付登伟. 基于 TOUGH2 的石油运移数值模拟研究 [D]. 南京:南京大学, 2013. [FU D W. Numerical modeling of oil migration using the TOUGH2 [D]. Nanjing: Nanjing University, 2013. (in Chinese)]
- [12] Yamamoto H, Pruess K. Numerical simulations of leakage from underground LPG storage caverns [D]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, 2004.
- [13] Reid R C, Sherwood T K, Street R E. The properties of gases and liquids [M]. New York: McGraw-Hill, 2004.
- [14] Vargaftik N B. Tables on the thermophysical properties of liquids and gases [M]. New York: Hemisphere Pub, 1975.

责任编辑:张若琳