

地下水封储油库库址的水文地质工程地质问题

刘琦¹, 卢耀如^{1,2}, 张凤娥²

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061)

摘要: 将石油储存于地下水封洞库是建设大型石油储备基地的重要发展方向。由于建设地下水封储油洞库的地质条件、设计和施工的复杂性, 为满足建设的安全性和经济性, 需要综合考虑水文地质、工程地质、环境地质问题。文章考虑了建设地下水封油库的原则和外部依托条件, 特别针对库址选择时应注意的水文地质、工程地质问题, 提出了相应的认识。

关键词: 地下水封储油库; 水文地质; 工程地质; 环境地质

中图分类号: P641; P642; TE972⁺. 2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2008)04-0001-05

我国的石油资源不足, 原油产量不能满足经济发展的需求。对进口石油依赖度不断增大, 2007年已超过 $1.59 \times 10^8 \text{t}$, 国际石油市场价格波动对我国经济的影响越来越大。根据国际能源组织机构(IEA)规定, 各成员国的应急石油储备量应相当于上年90天的消费量, 以此为据, 2015年我国应保有 $5000 \times 10^4 \text{t}$ 以上的石油储备量, 需建设约七千多万立方米的储备油库。然而, 我国一期在建的4个石油储备基地的地表及地下储油库至2008年全部竣工后, 储油能力仍然不能满足需求, 还需要修建更多的战略石油储备基地。

由于地下储油库具有安全性能高, 不占或少占耕地, 投资省、损耗少, 运营管理费用低, 使用寿命长, 污染小, 装卸速度快等优点^[1] 越来越多地被广泛应用。早在20世纪30年代末, 瑞典就将石油产品储存在地下混凝土的储油罐内, 用地下水来密封。20世纪60~70年代, 地下油库建设进入发展时期, 每年建设几百万立方米地下油库, 储存原油、石油产品、LPG及重质燃料油。我国20世纪70年代在山东青岛和浙江象山自行设计和建造了小型的地下水封岩洞油库, 分别储存了原油和柴油, 其附近还建有地表储油罐(库)。后来青岛地表储油罐发生火灾, 造成重大损失, 而附近的地下油库却安然无恙, 进一步证实了地下油库的安全性。近年来, 国外公司先后在汕头和宁波建造了2个地下LPG水封洞库, 积累了一些经验。

本文根据大型战略石油储备基地的选择原则, 以及地下水封油库的工程特点和发展要求, 探讨其选址

和设计过程中应注意的水文地质工程地质问题。

1 地下水封洞库储油原理

地下水封洞库处于稳定的地下水位线以下一定的深度(5m为宜), 通过人工在地下岩石中开挖出一定容积的洞室, 利用稳定地下水的水封作用密封储存在洞室内的石油。洞室开挖前, 地下水通过节理裂隙等渗透到岩层的深部并完全充满岩层空隙。如图1所示, 当储油洞库开挖形成后, 周围岩石中的裂隙水就向被挖空的洞室流动, 并充满洞室。在洞室中注入油品后, 油品周围会存在一定的压力差, 因而在任一油面上, 水压力都大于油压力, 使油品不能从裂隙中漏走。同时利用油比水轻, 以及油水不能混合的性质, 流入洞内的水则沿洞壁汇集到洞底部形成水垫层, 可由水泵抽出^[1~5]。

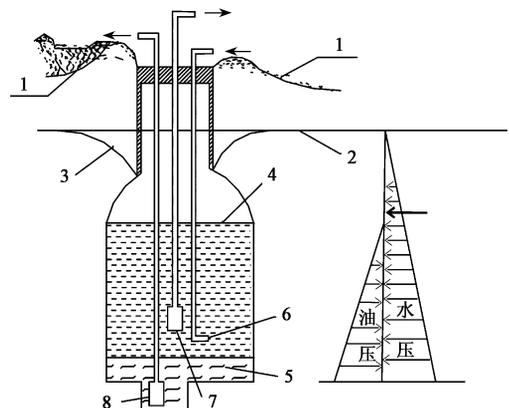


图1 地下水封储油洞库原理示意图

Fig.1 Principle of underground oil storage caverns with water curtain

- 1—裂隙状岩体; 2—地下水位; 3—地下水降落漏斗;
4—库存所贮油品; 5—水垫层; 6—油品注入管;
7—抽取油品的潜液泵; 8—抽取地下水的潜液泵

收稿日期: 2007-11-12; 修订日期: 2008-02-25

作者简介: 刘琦(1980-), 女, 博士研究生, 主要从事水文地质工程地质研究。

E-mail: liuqi472@163.com

地下水封油库的水封形式有3种:(1)自然水封;(2)人工水封;(3)上述两种方法的结合。水封系统受到岩层的水理特性或有无相邻洞室及地下水含水量等的影响。地下水封储油洞库直径规模一般比地下发电站小,而比通常的公路交通隧道断面要大,地下洞室不衬砌或仅做少量结构处理。所以,地下水封储油库对库址区的水文地质和工程地质条件要求较高^[3-7]。

2 地下水封油库选址基本原则

地下水封油库选址首先必须要满足两个基本的地质条件:一是岩体的完整性,即应选出无深性断层和断裂、裂隙不甚发育的结晶岩体,以保证有足够的可用岩体范围;二是密封,即满足必要的水封条件。

其次,还要结合我国国情,因地制宜,根据我国规划建设地下水封油库的需求和特点,考虑以下外部依托条件(图2):

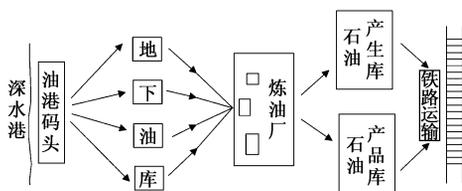


图2 地下水封油库六要素关系图

Fig. 2 Six factors related to underground water-sealed oil storage caverns

(1) 根据拟建储油库的建库地带及周围可供应地区对今后石油的战略储备量需求,确定适宜的地理位置和储油库的规模。

(2) 优良的海港和相应规模的码头设备。储备油品品种主要是进口原油,库址选择应考虑现有良好海港,可接纳大吨位($20 \times 10^4 \sim 30 \times 10^4 \text{t}$)的油轮,并有良好的原油码头设备。

(3) 靠近国家大型进口原油加工基地。

(4) 建库费用经济合理。起步阶段在沿海地区选择若干地点建设储备基地;中远期规划除沿海外,应结合俄罗斯原油和哈萨克斯坦原油的进口情况,在东北和西北内陆地区管道运输枢纽站附近选择地点。

(5) 储油库的安全性。建库地带要有一个庞大的腹地,能够建立起完善的配套设施,以保障地下水封储油洞库的建设和运行使用期间的安全性。

(6) 有良好的输油交通条件^[7-8]。

3 库址选择中应注意的问题

3.1 区域稳定性

对于地下水封储油库这类大型工程,需要慎重考虑库址稳定性问题,包括断裂活动、地震及地应力问题,如若不慎就会造成严重的后果,遭受重大的损失。因此,在选址阶段应注意:

(1) 需查明现今构造活动及地应力场,在工程现场测量地应力的方位、大小和状态,包括各应力分量之间的关系及活动特性^[9]。应选择地应力变化不大或地应力值低的地段。

(2) 确定该地区的地震基本烈度及地震小区(划分)特征,尽可能地避开地震烈度IX度及以上地区^[10],特别要注意低频率高强度地震对洞库周边的影响。建库前要掌握自然地震情况,建库储油后必须考虑可能诱发的地震情况,还要进行相应的钻探、取样,进行岩、土、水的特性分析,也需进行地球物理勘探工作,包括浅层地震勘测等。

3.2 岩体的完整性

修建地下水封洞库的必要条件之一就是要在岩石地层中开凿,必然需要对拟选库区围岩进行评价。

(1) 岩体完整性评价。从岩性上要求库址区岩石质地坚硬,矿物粒度较均匀,抗风化能力强,应尽量选择轻微风化的结晶岩体,注意不同地段的岩石风化带对比,以花岗岩为例,其风化带分带特性概括如图3;从构造上要求库区内断裂、褶皱不发育,节理不甚发育,尽量选择压扭性断裂(弱透水),裂隙宽度不得大于0.5mm,渗透系数一般在 $10^{-8} \sim 10^{-9} \text{cm/s}$ 之间,即基本不透水,对于某些裂隙多但裂隙闭合的岩体也可以考虑^[5,10]。透水量小不仅有利于岩体稳定和施工,而且可以降低运营期间的排水费用和水处理费用^[11]。

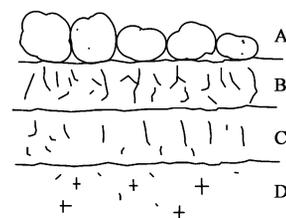


图3 花岗岩风化带分带示意图

Fig. 3 Weathering zones of the granite

A—剧风化带,有球状风化岩体;B—强风化带,有较多切割的风化裂隙;C—弱风化带,有少量风化小裂隙;D—微风化带,岩石完整,小裂隙上有风化痕迹

(2) 岩体质量评价。从岩体力学强度和岩体完整程度两个因素来考虑,岩石的抗压抗剪强度要高。根据国内外已建或在建的53座水封洞库统计分析^[10-11]发现,地下水封岩洞储油库预选场址大多数都是在花

花岗岩、片麻岩等 到 类岩体中(表 1)。

表 1 一些国家和地区地下水封储油洞库选择的围岩类型

Table 1 Surrounding rock types of underground water-sealed oil storage caverns selected in some countries and areas

地区	储存油品	岩石类型	库容 ($\times 10^4 \text{m}^3$)
新加坡 Bukit Timah	原油	花岗岩	400
日本岩手县久慈	原油	花岗岩	175
中国象山	成品油	花岗岩	14
中国锦州	LPG	花岗岩	22
中国青岛	原油	白岗岩	15
非洲津巴布韦	原油	黑花岗岩	36
韩国 GEOJE	原油	花岗闪长岩	429.3
韩国 PYONG TAEK	LPG	花岗片麻岩	27.7
沙特阿拉伯利雅得	原油	花岗片麻岩	200
挪威斯达尔		片麻岩	80
挪威蒙斯坦德		片麻岩	130
法国 Lavera	LPG	石灰岩	
韩国 YEOSU	原油	凝灰岩	620.1

有人曾设想在我国广泛分布的碳酸盐岩地区,利用天然岩溶洞穴进行地下油库建设。在我国及法国、希腊已有在碳酸盐岩地区(石灰岩、白云岩)修建非水封式地下油库的实例^[6]。由于地下水封油库涉及到水封条件,而天然岩溶洞穴具有纵横交错的复杂网络,且岩溶水流具有多变性,洞穴暗河的流量和水位季节性变化大,目前尚无在岩溶地区修建地下水封储油库的实例。但是,在自然界的古岩溶洞穴系统中,就有天然油气的储存并具有三个动态的特性^[12-13]。

岩溶含水层存在孔隙、裂隙和洞穴通道三种介质空间,也存在这三种水流(图 4)。K. Torbartov 利用流量衰减指数方程,计算了 Trebisnjica 流域内岩体的有效孔隙度。Milanovic 提出了多元衰减方程^[12],即:

$$Q_t = Q_{01} \cdot e^{-a_1 t} + Q_{02} \cdot e^{-a_2 t} + \dots + Q_{0n} \cdot e^{-a_n t}$$

式中: Q_t —— t 时段流量;

a_1, a_2, \dots, a_n —— 每个亚动态的衰减系数;

$Q_{01}, Q_{02}, \dots, Q_{0n}$ —— 相应时每个亚动态的流量。

通常岩溶水处在三种介质中,所以出现三个亚动态是较常见的,但也有单一动态,即以溶蚀裂隙为主,没有大洞穴岩溶水活动,在这种条件下可以研究修建地下水封油库。我国一些地带单一动态的岩溶泉水的衰减系数值 a 为 0.0109 ~ 0.00151。而在我国四川,古岩溶通道已成为储存油气场所,经揭露开发后,也发现

有三个动态的特征,现将其衰减系数对比于表 2。

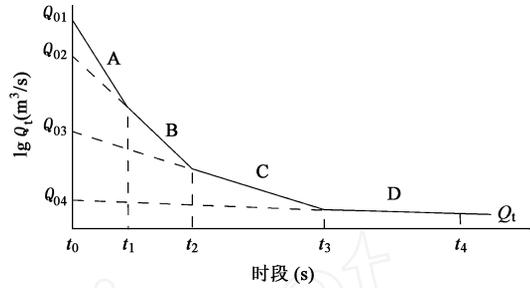


图 4 岩溶泉水衰减三个亚动态叠加曲线^[12]

Fig. 4 Curve of three sub-dynamic superposition of the attenuation of a karst spring^[12]

A、B、C、D—每个亚动态的阶段

表 2 流态物质三个亚动态衰减系数对比表^[12]

Table 2 Comparison of three sub-dynamic modulus of the flow state of matter^[12]

动态	中国		迪纳拉山区岩溶泉
	岩溶泉	油气	
第一亚动态 a_1	0.38 ~ 0.523	- 5.913	0.016
第二亚动态 a_2	0.01 ~ 0.039	0.00558	0.013
第三亚动态 a_3	0.002 ~ 0.0567	0.00048	0.0011

因此,具有三种渗水介质空间的岩溶化碳酸盐岩地层中,在已有的大的岩溶通道,而且仍有大变幅的岩溶水流活跃的地段,如不采取更多处理手段,不宜进行地下水封油库的建设。对于不大的溶蚀裂隙地段,或有统一的地下水面下的岩溶通道,选择适宜地带,经详细研究后,也是有可能采用的。为取得稳定的地下水位,应当和修建地下水库相结合。在硬石膏地区由于遇水膨胀,可以使地下油库得到更好的封闭,但如何避免硬石膏水化后膨胀成石膏,并加剧产生溶蚀现象,也是涉及水封油库安全性必须考虑的问题。岩盐地区修建水封油库,也存在着岩盐的溶解作用问题。

目前,在花岗岩地区修建地下油库,是一个较好的选择,而且我国的东北、山东、福建、广东、海南等地区,广泛分布花岗岩,非常适合于建设地下水封洞库^[11]。

(3) 围岩稳定性评价。围岩稳定性核算至关重要,它决定了洞室宽度、高度、长度以及洞室间距的确定。准确的核算不仅可以保证洞库的安全,还可以节约建造成本^[4]。

3.3 水封条件的保证性

地下水封储油库最大特征就是利用地下洞室周围形成的地下水压大于油压,使油品不能从裂隙中漏走。

水封系统受到地下水含水量的影响,一旦地下水位不稳定或深度不足,地下水压都会发生变化,容易引起油品泄漏。因此,准确确定最低地下水位,合理设置洞室埋深,对保证洞库稳定、密封性以及降低施工造价等都有重要的意义。

最低地下水位通常根据被利用岩体中地下水的最低天然排水基准面来确定,同时要保证最低天然排水基准面不受人为因素影响而有所降低^[14]。为此,库址多选择在距最低排水基准面较近的地段,以减少洞室埋深和降低人为因素干扰,如江河湖海之滨(图5)。

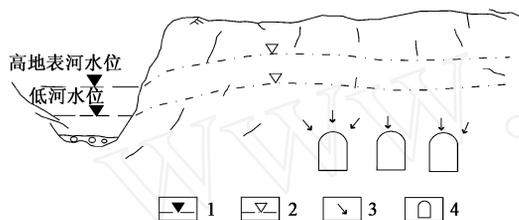


图5 地表河傍丘陵地下水封油库剖面示意图

Fig.5 Schematic profile showing underground water-sealed oil storage caverns in a hilly land near a river

1—高(低)地表河水位;2—高(低)地下水位;
3—水封压力;4—地下储油库

3.4 水资源的保证性

(1) 保证充足的供水水源

在选址过程中应对水文地质断面进行连续监测,包括水位、地下水压力、水化学等监测^[15],注意最高洪水位;查明是否存在海水入侵地下水和河水情况(特别在沿海地区)。同时,要注意对水质、水气成分、惰性气体的观测,避免造岩矿物或水体中含有的硫、铜、铅等对油品和设备仪表的腐蚀,要保证有充足的供水水源,要求水源地和地下油库间水力联系不密切,不要因供水而造成水封油库上部的地下水位急剧下降。

(2) 做好防渗处理

在洞库建设过程中要对渗水量大的裂隙进行处理,如进行注浆处理和表层喷射混凝土措施等^[4,10],考虑到一些不可测因素以及国外地下储库防渗漏经验,在自然渗流下具有阻水作用的水幕满足要求时,增设人工水幕能减少渗流,提供稳定的地下水位,增大水力梯度,更好的保障储油库的安全,同时也能增加洞室的储油量^[3,16]。

4 洞库设计时应注意的地质因素

地下油库的建设应与当地自然条件相和谐,特别是与地质条件相和谐。因此,要依据地质资料和油品

储存的工艺要求,并结合施工方法进行洞库的土建设计。其中洞库的容量和数量、布置形式、埋深、横断面几何形状和尺寸等设计都直接受到地质因素的制约。所以,地质条件应是设计地下水封油库的基础^[4,7]。

4.1 洞库的容量

一般地下油库建设投资要比地上油库大,但当油库规模大到一定程度后,地下油库就会比地上油库投入小。因此,需结合库区的地质条件,根据储备基地主要供给对象的进口原油加工量和周边其他潜在用户来计算原油储备量,从而确定地下储备库的建设规模。

工程建设中,可以考虑先通过建造小规模地下储油库(达到经济可行性的下限)来检验当地的地质情况,根据产生的效应,然后再增加(必要时)地下储库的规模,最终实现地下油库的可持续发展与安全运行。

4.2 洞库的平面布置

根据可用岩体的分布状况确定洞库的方向和深度,洞库的中心轴线要垂直于节理的主要构造方向,并将竖井设置在靠近地面操作区一侧;根据地质条件布置洞库的不同洞室间位置、走向、间距。地应力对洞室群轴线方向及洞室断面形状和尺寸选择起制约作用。

4.3 洞库埋深

洞库的埋设深度由以下因素确定:油品的性质,洞内的最大压力,建库地区的水文地质工程地质条件以及防护与安全要求等。根据这些因素确定合理的埋深,太深的话对原油储层不利。洞库拱顶以设置在略低于含水层厚度之半处最经济合理^[5]。

4.4 洞库横断面几何形状及尺寸

洞库的几何形状对应力分布有直接影响,它是围岩稳定的重要因素之一,特别对于采用喷锚结构处理的洞库更为重要。根据库区对比及地质资料进行围岩稳定性分析,从而确定洞库的数量和形状、截面尺寸(包括跨度、高度、长度)。一般而言,在坚硬完整的花岗岩、片麻岩等岩体中,洞室一般宽20m、高30m,洞间距50m;而在完整的砂岩等岩体中跨度及高度较小,而洞间距较大^[21]。

5 结语

对于这种人工开凿的具有特殊结构、特殊用途、处于复杂环境中的大断面岩洞,在选址及建设过程中既要考虑近期建设合理性,又要预留远期发展的可开拓性。选址时要考虑库区的区域稳定性,保证无大的活动断裂且易于处理,围岩完整性好、节理裂隙不发育,岩体渗透性弱,要有稳定的最低地下水位,以及避开强

烈的天然及人为诱发地质灾害区,如水库诱发地震带、滑坡、泥石流和岩溶塌陷等地区。

值得注意的是,地下水封储油库设计的首要原则是要考虑地质控制因素。当然,由于地质条件是复杂的,在工程施工中会遇到一些不良地质现象,还需要适时地进行观察,以便对洞库和岩体进行适当处理,确保工程的施工安全和今后的运行安全。

参考文献:

- [1] 杨森. 地下洞库作为国家原油战略储备库的可行性分析[J]. 中国勘察设计, 2005(11): 55 - 58.
- [2] 夏喜林. 关于建造 LPG 地下水封岩洞储库的几个问题[J]. 油气储运, 1997, 16(7): 28 - 31.
- [3] 杨明举, 关宝树, 钟新樵. 水封式地下储气洞库的应用及研究[J]. 地下空间, 2000, 9(3): 171 - 175.
- [4] Syver Froise. Hydrocarbon storage in unlined rock caverns: Norway's use and experience [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1987, 2(3): 265 - 268.
- [5] 徐绍利, 张杰坤. 结晶岩体的水跃现象及其在地下水封石洞油库中的作用[J]. 水文地质工程地质论丛, 1986(2): 65 - 78.
- [6] Semprich S, Crotogino F, Schneider HJ. Storage in lined hard-rock caverns: results of a pilot study[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1990, 5(4): 309 - 313.
- [7] GBenardos A, Kaliampakos D C. Hydrocarbon storage in unlined rock caverns in Greek limestone [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(2): 175 - 182.
- [8] 齐建华. 建立石油储备的必要性、紧迫性及选址大亚湾的可行性[J]. 国际石油经济, 2001(12): 33 - 37.
- [9] 李玉峰. 地应力及其在地下工程中的应用[J]. 企业技术开发, 2004, 23(7): 16 - 18.
- [10] 袁广祥, 尚彦军, 史永跃, 等. 与地下石油储备库有关工程地质问题研究现状和对策[J]. 工程地质学报, 2006, 14(6): 792 - 799.
- [11] Lee C I, Song J J. Rock engineering in underground energy storage in Korea [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18(4): 467 - 483.
- [12] 卢耀如. 岩溶水文地质环境演化与工程效应研究[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [13] 陈清华, 刘池阳, 王书香, 等. 碳酸盐岩缝洞系统研究现状与展望[J]. 石油与天然气地质, 2002, 6(2): 196 - 202.
- [14] 张杰坤. 地下岩洞油库与水文地质[J]. 油气储运, 1984, 3(5): 10 - 15.
- [15] 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): 165 - 184.
- [16] Lindblom U E. Design criteria for the Brooklyn Union gas storage caverns at JFK airport, New York [J]. Int J Rock Mech & Min Sci, 1997, 34 (3 - 4): 179 - 194.

Hydrogeological and engineering geological problems of the site of underground oil storage caverns with water curtain

LIU Qi¹, LU Yao-ru^{1,2}, ZHANG Feng-e²

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: Construction of underground oil storage in artificial caverns under water curtain is an important way for the development of huge oil storage bases. For the sake of safety and economy in building underground oil storage caverns, it is needed to investigate the hydrogeological, engineering geological and environmental geological stability in the local region. Consideration of the geological conditions related to these three aspects is important in the selection of the sites for the storage base. Some basic geological problems are discussed in this paper.

Key words: underground oil storage caverns with water curtain; hydrogeology; engineering geology; environmental geology

责任编辑:汪美华