

The technical innovation and highlight of groundwater sealing cavern design

Linheng Dong¹ Bin Wang² Guang Yang³ Lei Si⁴

1. Petrochina Pipeline Materials and Equipment Co., Ltd, Langfang, Hebei, 065000, China
2. Hebei North China Petroleum Engineering Construction Co., Ltd, Langfang, Hebei, 065000, China
3. Fourth Branch of China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd, Langfang, Hebei, 065000, China
4. First Branch of China Petroleum Pipeline Bureau Engineering Co., Ltd, Langfang, Hebei, 065000, China

Abstract

This paper summarizes nine technological innovations and highlights in China's first batch of large-scale underground petroleum reserve reservoirs. These include breakthroughs in geotechnical engineering survey techniques, overcoming challenges in water-sealing technology design, advancements in cavern stability analysis, the Q system rock classification method with corresponding Q support design, application of dynamic design technology, solutions to design challenges in large-volume concrete sealing plugs, and the proposal and implementation of full-cycle monitoring technology integrating geotechnical monitoring with hydrogeological studies.

Keywords

groundwater; cave storage; survey and design; technological innovation

地下水封洞库勘察设计的技术创新与亮点

董林恒¹ 王斌² 杨光³ 司磊⁴

1. 中油管道物资装备有限公司, 中国·河北 廊坊 065000
2. 河北华北石油工程建设有限公司, 中国·河北 任丘 062550
3. 中国石油管道局工程有限公司第四分公司, 中国·河北 廊坊 065000
4. 中国石油管道局工程有限公司第一分公司, 中国·河北 廊坊 065000

摘 要

结合我国第一批投入建设的大规模地下石油储备库,总结了岩土工程勘察技术中的突破,设计中水封技术难关的攻克,洞室稳定性分析技术的亮点,Q系统岩体分类方法及对应的Q支护设计,动态设计技术的运用,大体积混凝土密封塞设计技术难关的攻克,岩土监测和水文地质相结合的全周期监测技术的提出和应用等9项技术创新与亮点。

关键词

地下水; 封洞库; 勘察设计; 技术创新

1 引言

地下水封岩洞储油是指在低于地下水位的岩体中由人工挖掘形成的一定形状和容积的洞室,利用地下水压力,形成地下水封,在岩洞内储存原油。目前北欧、韩国等国家的石油战略储备都采用了这种地下储存方式。地下水封岩洞储油主要具有安全、经济、环保效果好等可观优越性。

石油储备是保障国家能源安全的重要措施,其中,地下储备库已成为储备的主要方式。地下储备库是一种安全和节约的储备方式,随着进口依存度的不断增大,需重视和

加大地下储备技术的研发,随着我国第一批大规模地下石油储备库正式进入建设阶段,进一步总结地下水封洞库的在勘察与设计过程的技术创新与亮点变得十分必要(Xue et al. 2015)。

2 地下水封洞库储油的基本原理

地下水封储油库是通过人工在地下岩石中开挖形成的。其密封是通过地下水往洞内渗透实现的,地下洞库必须建在稳定的地下水位线以下,洞的埋深与所储存的介质压力有关,以保证洞库周围的地下水压力大于洞内储存介质的压力;为保证强度地下水封储气洞库一般修建在岩性较好的岩体中。

洞室开挖前,地下水通过节理裂隙渗透到岩层的深部并完全充满岩层空隙,洞室开挖形成后,周围岩石中的裂隙

【作者简介】董林恒(1986-)男,中国山东泰安人,本科,工程师,从事项目采办管理研究。

水就向被挖空的洞室流动,并充满洞室。在洞室中注入石油后,洞室周围会存在一定油、水压力差,因而在任一相同水准面上,地下静水压力都大于洞内油压,这样,洞内石油就储存在这个封闭的压力场中。在水压力的作用下,岩体中的裂隙水不断地流入洞室中,而石油却不能从裂隙中泄漏。流入洞内的水沿洞壁汇集到洞底部形成水垫层,由于油比水轻、油水不相混,石油始终漂浮在洞室底部的水垫层上。通过油水介面检测仪监视其液位,待达到一定高度时,用装在洞内的潜液泵将水排出洞外。

3 地下水封洞库勘察设计的技术创新与亮点

由于地下水封洞库的特殊性,其在设计方面,从预可研、可研、初步设计到施工图,都与普通地上储罐存在较大不同,需掌握全面掌握勘察选址、大断面洞室群稳定性分析设计、水封设计、操作竖井工艺、仪表自动化设计、竖井金属构筑物防腐设计、施工期和运行期监测等地下水封岩洞储油项目关键设计技术,攻克了大断面洞室稳定性分析和支护,水封效果评价和竖井工艺安装等设计难题。我国已经建设的第一批地下水封洞库,已成功开创了行业设计先河,填补我国地下水封洞库设计技术的空白。

3.1 地下水封洞库岩土工程勘察技术中的突破

地下水封洞库设计已采取区域资料收集分析、工程地质测绘、工程物探、工程地质钻探、综合水文地质试验、地应力测试、波速测井、孔内超声波成像、地温测试、室内分析实验、开挖素描、超前地质预报分析等十多种手段,将地表测绘数据、钻孔数据、地层岩性、风化程度、RQD、节理裂隙数据、岩脉数据、岩体渗透系数等数据进行集中综合分析,为设计和施工提供了高精度、高质量、完整详实的工程地质资料和水文地质资料(Li et al. 2023)。

3.1.1 三维地质综合分析技术的应用

该技术实现了钻探测试等数据的输入和处理、三维地质模型的展示、不连续面以及软弱带等地质条件分析研究,为高效的展现工程地质三维信息及其可视化综合分析开拓了一条有效的途径,为地下水封洞库项目论证及设计提供可靠的依据。

3.1.2 综合水文地质试验技术的提出和应用

综合水文地质试验技术包函了综合压水试验、压水干扰试验、抽水干扰试验等一系列针对水封洞库的系统性水文试验及分析方法。该方法可适用于各种渗透性不同的地层,可取得不同深度、不同性质地层的渗透性指标,可反映渗透系数的各向异性分布规律、围岩的总体导水性、含水层特性。为水幕系统设计、渗水评估、水文监控系统设计提供可靠的设计依据。该技术填补了国内现有规范的空白。

3.1.3 孔内超声波成像测试技术的使用

位于我国北方的一处地下水封洞库,由于地表残积土覆盖较厚,基岩露头很少,地表工程地质测绘获取的结构面信息非常有限。针对这个难点,该工程勘察采用了孔内超声波成像系统在钻孔内进行结构面量测,原位获取地下岩体结

构面发育、产状、及组合关系的方法。为地下水封洞库设计,特别是注浆与支护设计提供了传统手段难以完成的丰富的工程地质资料,表现出了新技术的优越性,经济效益明显。

3.2 地下洞库设计中水封技术难关的攻克

3.2.1 大型地下水封洞库水幕系统设计技术

为确保良好的地下水渗流压力,大型地下水封洞库均设置了水幕系统,做为洞库密封性的保障。通过综合分析库区的工程地质、水文地质测绘和钻探资料,建立洞库的渗流场模型,运用数值模拟软件对地下水渗流场进行模拟,分析研究不同阶段、不同运营压力等不同工况下储油洞室周边地下水渗流情况,综合确定水幕系统的最佳设计方案,包括水幕巷道设计、水幕孔设计、水幕供水设计等。

3.2.2 水幕系统有效性现场试验验证优化技术

应用裂隙水的连通性试验来优化调整水幕系统设计,通过开展水幕孔之间连通性试验来验证已有水幕系统的水力连通性,检测可能存在的不良水文地质区域,优化调整未开挖前的水幕系统布置方案,在保证水封效果的前提下,提升水幕系统的利用效率。该技术解决了常规干扰试验不适用于水幕系统中裂隙水评价的问题,攻克了水封洞库地下岩体的不连续性、裂隙水的不可知性等固有属性造成水封效率难以评价的难题,形成了一套水幕系统连通性测试与评价技术(Zhang et al. 2020)。

3.3 超大断面地下洞室稳定性分析技术的亮点

通过对岩体、节理力学参数取值进行研究,形成了基于 Hoek-Brown 广义破坏准则的岩体和基于 Barton-Bandis 破坏准则的节理力学参数取值方法;采用 Plaxis 软件考虑地下洞室合理洞型、埋深、间距的整体稳定性评价;采用 Flac3D 软件进行储油洞室和连接巷道交叉部位的局部三维稳定性分析;基于初步勘察获得的岩体节理、断层、岩脉等不连续结构面的信息,采用离散单元法进行地下洞室围岩稳定性分析,判断由结构面切割形成的块体失稳部位和破裂深度,为支护设计提供参考;采用蒙特卡洛法对围岩稳定性作以概率和数理统计理论为基础的地下工程结构可靠度分析,解决了勘察信息不确定性带来的工程风险。

通过施工阶段地下洞室开挖所取得的详实、准确工程地质信息,采用反分析方法,进一步修正初设阶段的数值模型,使其更准确的预测围岩开挖响应,为后续地下洞室施工提供指导。针对开挖施工中遇到的特定不良断层、岩脉,建立特定位置处的 UDEC 离散元分析模型,以评估该部位的支护强度。

形成模型建立、参数选取、结果分析到确定支护设计方案等的一整套设计方法。

3.4 Q 系统岩体分类方法及对应的 Q 支护设计

采用 Q 系统岩体分类方法,通过施工阶段地质素描,建立了 Q 系统与 RMR 之间的关系,获得了不同围岩等级下自稳时间,科学确定不同围岩等级的支护时机,确保工程建设安全奠定坚实基础(Zhao et al. 2020)。

3.5 大体积混凝土密封塞设计技术难关的攻克

通过有限元数值模拟,确定了密封塞形状、厚度、配筋等关键设计参数,确保密封塞整体稳定性和接触面围岩稳定性;通过室内试块温度试验和设置冷却水循环系统,解决了大体积混凝土水化热产生的温度裂缝问题;采用有限元数值分析确定了密封塞的渗流路径,通过试验研究确定了密封塞界面注浆材料选择、注浆口布置、注浆压力确定等注浆关键技术。

3.6 岩土监测和水文地质相结合的全周期监测技术的提出和应用

在洞库建设前、建设过程中和运行期分别制定详细的监测项目、设备和频率要求。洞库建设前,设计地表水文监测网,动态监测库区的地下水位。洞库建设过程中,设计水幕巷道、主洞室内涌水量分开计量方案,用于协助控制运营期水幕系统水封效率和主洞室内的涌水量;设计地下压力计监测围岩裂隙水压力;设计多点位移计,监测库区围岩收敛情况。洞库运营期,各监测系统集成到站控室,实现对储油洞库全方位的健康监测和自动化控制,为运营期决策、判断储库运行状态、调整运行参数等提供基础信息。最终形成一套水封洞库监测系统设计技术(Xue et al. 2021)。

3.7 地下水封工艺设计技术的亮点

3.7.1 库区地面工程及地下工程整体应力分析

分析过程将进出站管道、库区管网、地面相关工艺设备区、进出油竖井套管作为一个整体进行应力分析,考虑各种工况、地面气象条件以及地下环境参数,论证各工艺设施的安装可靠性及后期运行的稳定性。

3.7.2 泵坑流场模拟分析辅助设计

泵坑用于设置潜油泵、潜水泵以及相关监测仪表。如何确定泵坑内各种设备的安装位置以及确定油水液位是地下水封洞库项目设计的难点以及核心技术。采用ANSYS流场模拟分析手段进行辅助设计,可以为相关设计参数的确定及优化提供指导。

3.7.3 优化工艺过程控制及联锁方案

从本质安全的设计角度出发,科学确定温度、压力、流量、液位控制方案,合理设置全场的参数设定值、报警值以及连锁值,采用DCS、SIS等系统对所有设备进行状态监控及安全连锁,保证整个工艺装置操作方便、控制平稳、安全可靠。对于突发性工况,如突然断电、压力失控、液位超限、管线破裂等,专门设紧急移动供电设备、关键区域设置快速切断阀,以及实现全场控制系统连锁动作等措施来保障安全生产运行。

3.8 洞库运行期的长期安全性监测技术

由于地下水封洞库是在地壳浅薄处的基岩内挖掘出的洞库。围岩自身的裂隙、岩脉以及建设洞库时的人工爆破会对建设期和运行期间的洞库围岩稳定性产生破坏性影响。此外,自然地震、原油存储、抽采过程以及水封环境的压力变化都会造成洞库围岩应力场的变化,从而产生破坏。长期围

岩微小的形变的累积可能产生不可预测的后果。

微震技术能够提供给洞库管理者关于洞库围岩稳定性的安全信息,特别是在长期运营期间。这些信息对判断地震类型和对洞库的破坏程度有着重要的参考价值。管理者通过这些信息,能够做出洞库整体安全性的及时、准确评估。如果围岩严重变形可能产生油品泄露,必须及时采取安全措施,降低对地面生产、生活人员以及环境的危害性。

通过技术攻关,建模计算,确定此类工程围岩破坏性震动的频段范围,并研究此类型工程微震检测与矿山震动检测的区别,确定非接触式的微震系统是能捕捉可能产生破坏围岩的唯一技术手段,并把定位误差限制在12米之内。微震技术首次在国内超大型地下水封原油储备库中使用,解决了地下洞室一旦被封就50年对其安全性全无了解的问题。

4 结语

大型地下水封储油洞库目前国内还属于一种没有普遍使用的新型能源储备方式,在勘察和设计中也还存在着出多难点。但是地下储备库具有地上储备库所无法代替的安全性和实用性,必将成为今后国家能源战略储备的重要方式。

因此,如何不断摸索地下水封洞库在设计中的技术特点,总结其勘察和设计中的技术创新和亮点,完善地下水封洞库的安全性和稳定性,更好的提高其使用效率和经济效益,就显得更加重要。

参考文献

- [1] Li, Y.T., Zhang, B., Wang, L., Xue, Y.G., Wang, H.X., Shi, L., Peng, Z.H., and Li, J.Y. 2023. Key issues in water sealing performance of underground oil storage caverns: Advances and perspectives. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 15(10): 2787-2802.
- [2] Xue, Y.G., Tao, Y.F., Qiu, D.H., Su, M.X., Li, Z.Q., and Zhang, X.L. 2021. Analysis of an Underground Water-Sealed Oil Storage Cavern: a Method of Surrounding Rock Classification Considering Hydrological Conditions. *POLISH JOURNAL OF ENVIRONMENTAL STUDIES*. 30(3): 2369-2379.
- [3] Xue, Y.G., Li, S.C., Qiu, D.H., Wang, Z.C., Li, Z.Q., Tian, H., Su, M.X., Yang, W.M., Lin, C.J., and Zhu, J.Y. 2015. A new evaluation method for site selection of large underground water-sealed petroleum storage depots. *SCIENCE CHINA-TECHNOLOGICAL SCIENCES*. 58(6): 967-978.
- [4] Zhang, Q.H., Liu, Q.B., and He, G.F. 2020. Reexamining the Necessity of Adding Water Curtain Borehole with Improved Understanding of Water Sealing Criterion. *ROCK MECHANICS AND ROCK ENGINEERING*. 53(10): 4623-4638.
- [5] Zhao, X.D., Lei, D., and Zhang, S.J. 2020. Stability analysis of underground water-sealed oil storage caverns in China: A case study. *ENERGY EXPLORATION & EXPLOITATION*. 38(6): 2252-2276.