

某地下水封洞库工艺竖井密封塞及竖井与主洞室交叉口稳定性模拟分析

毕鑫涛

(中石化石油工程设计有限公司, 山东 东营 257026)

摘 要 水封洞库工艺竖井作为连接地表与地下空间的垂直通道, 在施工期可作为主洞室的通风口, 促进空气流通, 改善地下工作环境, 在运营期则是进出油与水处理的通道, 因此工艺竖井的稳定性至关重要。本研究以某水封石油洞库开挖情况为依托, 采用数值模拟分析方法, 分析了开挖期间工艺竖井密封塞、工艺竖井与主洞室交叉部位的应力应变等力学行为。结果表明: 工艺竖井密封塞位置、工艺竖井和主洞室交叉部位均出现了不同程度的应力集中, 但均小于岩石的抗压强度和系统锚杆的抗拉强度, 工艺竖井在开挖期间整体呈稳定状态。

关键词 水封洞库; 工艺竖井; 主洞室; 稳定性; 数值模拟

中图分类号: TE822

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.08.019

0 引言

在当今世界能源格局中, 石油作为战略性的基础能源, 其安全、高效、长期的储存对于国家能源安全、经济稳定以及应对突发事件具有至关重要的意义。随着全球能源需求的不断增长和能源结构的持续优化, 寻找并开发安全可靠的储油方式成为各国政府和能源企业共同关注的焦点。水封洞库储油技术作为一种集安全性、经济性、环保性于一体的先进储油方式, 正逐渐展现出其独特的优势和必要性。更为重要的是, 水封洞库储油在保障国家能源安全方面发挥着不可替代的作用。在面对国际能源市场波动、地缘政治紧张或自然灾害等突发事件时, 充足且安全的石油储备是国家经济稳定运行和社会秩序安定的坚实后盾。水封洞库因其隐蔽性、安全性和长期稳定性, 成为国家战略石油储备的理想选择。深入研究和发​​展水封洞库储油技术, 对于提升我国能源储备能力、保障国家能源安全、促进能源产业高质量发展具有十分重要的意义^[1-2]。

针对某地下水封洞库工艺竖井开挖期间围岩受力分析, 使用 MIDAS GTS NX 软件对工艺竖井和主洞室相对位置进行建模, 通过数值模拟方法分析工艺竖井开挖密封塞和工艺竖井与主洞室交叉位置的受力变化情况, 为洞室的支护提供相关依据。

1 场地概况

洞库所在场区属低山丘陵地貌, 地层为从上到下主要为第四系沉积物、燕山期早白垩世花岗岩, 局部存在石英脉和煌斑岩脉。第四系沉积物主要以冲洪积

物和残坡积物为主, 部分区域可见第四系冲积物、第四系湖积物; 库燕山期早白垩世花岗岩根据粒度大小、成分含量差异可细分为中细粒二长花岗岩和中细粒正长花岗岩, 局部可见少量细粒正长花岗岩、细粒花岗岩分布, 以中细粒二长花岗岩为主, 除此之外, 还有因热液侵入和动力变质作用产生的蚀变现象; 岩脉零星分布在燕山早期二长花岗岩岩体内, 脉岩产出受岩体内构造、裂隙控制明显, 均呈较规则脉状产出, 其延展方向与构造基本一致。

工艺竖井所在原地貌为林地、荒地。原地层主要为残积砂质粉质黏土、粉质黏土、全~强风化花岗岩、中风化花岗岩、微~未风化花岗岩。工艺竖井施工前已将山体表面覆盖层及部分全~强风化花岗岩挖除。目前该洞库某工艺竖井 0~15 m 为全强~中风化花岗岩, 15 m 以下为微~未风化花岗岩。

工艺竖井断面形状为圆形, 直径为 5 m, 主洞室断面形状均为直墙圆拱形, 主洞室分多层开挖, 第一层高 9 m, 跨度为 20 m, 主洞室上层先于工艺竖井开挖完成, 并采取了系统锚杆支护。工艺竖井和主洞室的相对平面和断面位置如图 1、图 2 所示。

2 工艺竖井与主洞室交叉位置稳定性分析

2.1 模型建立

采用 MIDAS GTS NX 软件建立三维有限元数值计算模型。工艺竖井直径为 5 m, 开挖深度约 120 m。为模拟工艺竖井开挖过程中侧壁的变形情况, 考虑边界条件, 计算模型三维空间范围向外适当拓展。围岩定义

材料为弹塑性,采用摩尔—库伦屈服准则,系统锚杆定义材料为弹性^[3]。

为保证数值模拟的结果尽可能准确和提高计算速度,在工艺竖井密封塞及工艺竖井和主洞室交叉口处的网格划分适当加密,模拟过程中仅考虑自重应力场,忽略库区构造应力场的影响。

工艺竖井埋深 0~15 m 为 IV~V 级围岩,15 m 以下为 III₂ 级围岩,采用系统锚杆支护,IV~V 级围岩系统锚杆支护间距为 1.2 m,长度为 4 m;III₂ 级围岩系统锚杆支护间距为 1.5 m,长度为 3.5 m,均呈梅花形布置。工艺竖井喷混 C30 混凝土,IV~V 级围岩喷混厚度为 0.3 m,III₂ 级围岩喷混厚度为 0.1 m。因主要考虑工艺竖井开挖过程中密封塞处和工艺竖井与主洞室交叉处稳定性情况,井口段其他加强支护方式模拟过程中暂不考虑。工艺竖井 III₂ 级围岩支护示意图见图 3。

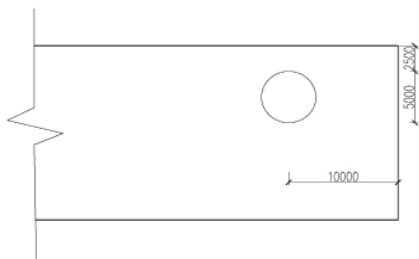


图 1 工艺竖井和主洞室平面位置图

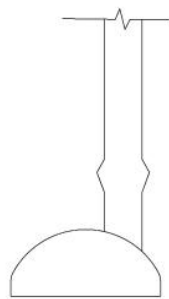


图 2 工艺竖井和主洞室断面位置图

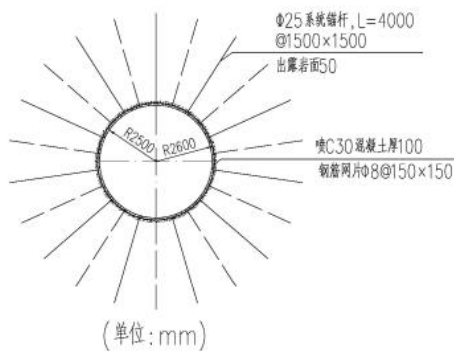


图 3 工艺竖井 III₂ 级围岩支护示意图

主洞室围岩等级为 III₂ 级,采用系统锚杆支护,系统支护锚杆间距为 1.5 m,长度为 6 m,呈梅花形布置,围岩喷混厚度为 0.1 m。数值模拟中围岩物理力学参数情况详见表 1。

表 1 围岩物理力学参数指标

岩体分级	弹性模量 E ($\times 10^4$ MPa)	泊松比 μ	重度 γ (kN/m^3)	粘聚力 c (MPa)	内摩擦角 φ ($^\circ$)
IV~V	2.80	0.35	22.0	0.12	22
III ₂	4.12	0.26	24.5	0.7	39

工艺竖井开挖过程中主洞室一层已开挖并支护完毕。根据实际开挖情况,工艺竖井每次开挖 4 m,采取“边开挖边支护”的方式,即每次开挖 4 m,完成喷混支护后再进行下一循环开挖。在模拟过程中,对上一步开挖产生的位移进行清零,再次对其位移进行模拟计算^[4]。通过数值模拟分析工艺竖井开挖过程中密封塞处和工艺竖井与主洞室交叉处位移及受力情况。

2.2 密封塞处开挖模拟分析

随着工艺竖井的不断开挖,上方卸荷的岩体重力越大,工艺竖井在每循环的开挖过程中岩体位移值不断增大。当开挖至工艺竖井密封塞时竖直方向位移云图如图 4 所示,最大主应力云图如图 5 所示。由模拟结果可知,此时密封塞处最大竖向位移出现在密封塞嵌槽中部,最大位移值为约 66.6 mm。密封塞处最大拉

应力位于嵌槽下部,最大值为 9.2 MPa,最大压应力位于嵌槽中下部,最大压应力为 7.2 MPa。

2.3 工艺竖井与主洞室交叉口开挖模拟分析

由工艺竖井与主洞室交叉口竖直位移云图模拟结果(见图 6)可知,因主洞室上方工艺竖井开挖卸荷,交叉口位置的围岩向上隆起变形^[5-7],在沿主洞室轴线方向两者交叉部位的位移值最大,最大竖向隆起位移值为 65.5 mm。

由工艺竖井和主洞室交叉口的围岩最大主应力分布云图(见图 7)可知,拉应力集中在主洞室顶部以及垂直主洞室轴向方向的两者交叉口位置,最大拉应力约为 13.4 MPa;压应力集中在主洞室拱腰以及平行主洞室轴向方向的两者交叉口位置,最大压应力约为 30.7 MPa。拉应力小于锚杆的抗拔力,压应力小于岩

体的抗压强度, 开挖后工艺竖井和主洞室交叉口位置处于稳定状^[8-9]。

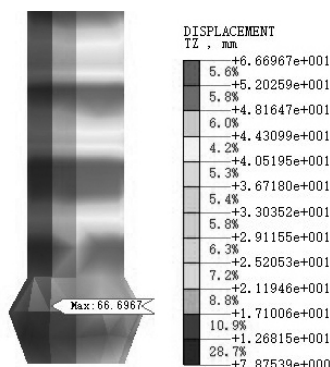


图 4 工艺竖井开挖至密封塞时竖直方向最大位移云图

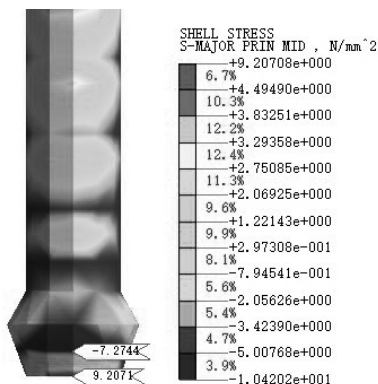


图 5 工艺竖井开挖至密封塞时最大主应力云图

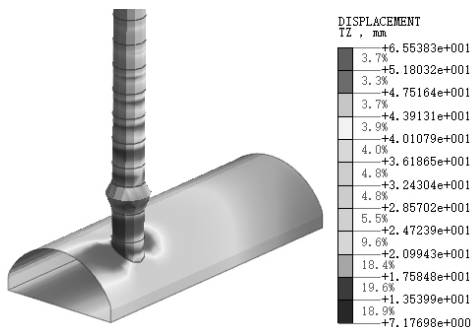


图 6 工艺竖井与主洞室交叉口竖直位移云图

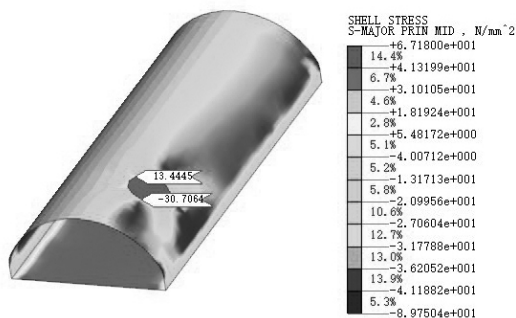


图 7 工艺竖井与主洞室交叉口最大主应力云图

3 结论

1. 由数值模拟分析结果可知, 工艺竖井开挖后密封塞附近存在应力集中现象, 最大竖向位移出现在密封塞嵌槽中下部, 最大拉应力位于密封塞嵌槽中部, 最大压应力位于密封塞嵌槽下部。

2. 工艺竖井与主洞室相交处存在局部应力集中现象, 最大位移发生在沿主洞室轴线方向的两者交叉口部位, 拉应力集中在主洞室顶部以及垂直主洞室轴向方向的两者交叉口位置, 压应力集中在主洞室拱腰以及平行主洞室轴向方向的两者交叉口位置。

3. 工艺竖井密封塞、工艺竖井与主洞室交叉口位置产生的拉应力和压应力均较小, 对主洞室稳定性影响较小。由于工艺竖井运营期存在进出油管道、出水管道及其他设备, 需承担较大应力, 因此对工艺竖井密封塞位置、工艺竖井和主洞室交叉口位置应密切关注围岩应力应变变化情况, 对于局部围岩较差及出水位置要及时加强支护及注浆处理, 保证后期围岩稳定。

参考文献:

- [1] 乔丽苹, 卢卫莉, 闵忠顺, 等. 地下水封洞库围岩块体稳定性与支护可靠性分析[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2023, 44(04): 544-550.
- [2] 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(06): 2252-2276.
- [3] 史作琛. 天池坪隧道变形控制基准研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2011.
- [4] 同[3].
- [5] 杜红亮, 常小兵, 傅鹤林, 等. 深大竖井开挖稳定性数值模拟分析[J]. 科技通报, 2024, 40(09): 93-98.
- [6] 马兆伟. 深大竖井施工围岩稳定性分析[J]. 四川建筑, 2022, 42(01): 146-147.
- [7] 向小祥. 基于花岗岩蠕变特性的地下水封储油洞库围岩稳定性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
- [8] 李洋洋, 赵兴东, 代碧波, 等. 思山岭铁矿 1500m 副井基岩段井筒围岩稳定性分析与控制研究[J]. 金属矿山, 2022(11): 64-70.
- [9] 张磊, 胡谋鹏. 地下水封洞库竖井与洞室交叉处的稳定性[J]. 油气储运, 2020, 39(06): 656-661.