

# 基于稳定性模拟分析的地下水封洞库储油洞室断面优选方法研究

杨 征

国家管网集团工程技术创新有限公司, 天津

收稿日期: 2023年1月29日; 录用日期: 2023年3月6日; 发布日期: 2023年3月16日

## 摘 要

洞室断面尺寸对地下水封石油洞库的变形和稳定性具有至关重要的影响。以我国某个在建的大型非衬砌地下水封石油洞库项目为例, 运用Hoek-Brown强度理论, 采用有限元软件模拟不同断面尺寸储油洞室围岩的应力分布状态及稳定性。研究表明: 储油洞室开挖后, 应力场会重新分布, 洞室边墙底部应力较大, 产生应力集中现象, 而洞室边墙处应力较小。围岩应力作用下洞室开挖应力型破坏主要受最小主应力影响。在地应力作用下洞室变形主要集中在直边墙中部区域, 对于断面 $22 \times 30$  m (长  $\times$  宽)工况, 最大水平位移为18.8 mm, 相应的收敛应变率为0.16%, 岩体不具有变形破坏风险, 并确定为最优断面。

## 关键词

地下石油洞库, 断面尺寸, 稳定性, 应力分布

# Research on the Optimization Method of Oil Storage Cavern Section of Underground Water Sealed Cavern Based on Stability Simulation Analysis

Zheng Yang

Pipe China Engineering Technology Innovation Co. Ltd., Tianjin

Received: Jan. 29<sup>th</sup>, 2023; accepted: Mar. 6<sup>th</sup>, 2023; published: Mar. 16<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

The section size of the cavern has a vital influence on the deformation and stability of the under-

文章引用: 杨征. 基于稳定性模拟分析的地下水封洞库储油洞室断面优选方法研究[J]. 石油天然气学报, 2023, 45(1): 75-84. DOI: 10.12677/jogt.2023.451010

ground water-sealed oil cavern. Taking a large unlined underground sealed oil cavern project under construction in China as an example, using Hoek-Brown strength theory, the stress distribution and stability of surrounding rock of oil caverns with different section sizes are simulated by finite element software. The research shows that after the excavation of the oil storage cavern, the stress field will be redistributed, the stress at the bottom of the cavern side wall is larger, resulting in stress concentration, while the stress at the cavern side wall is smaller. Under the action of surrounding rock stress, the stress type failure of cavern excavation is mainly affected by the minimum principal stress. Under the effect of ground stress, the deformation of the cavern is mainly concentrated in the middle area of the straight side wall. For section  $22 \times 30$  m (length  $\times$  width) condition, the maximum horizontal displacement is 18.8 mm, and the corresponding convergence strain rate is 0.16%. The rock mass has no risk of deformation and failure, and is determined as the optimal section.

## Keywords

Underground Crude Oil Storage Caverns, Section Size, Stability, Stress Distribution

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

目前国内外石油储备库主要分为地上油库和地下油库两大类,地下水封石油洞库具有安全性高、占地面积小、节省投资等优点,逐渐在我国得到推广建设[1]。油库洞室群的稳定性分析评价是影响储库设计的重要因素,决定了储库的施工期安全和洞库建成后的运行状况,同时也为洞室群的优化设计提供了依据[2]。储油洞室的几何形状和断面尺寸对应力分布有直接影响,是围岩稳定性的重要因素之一,需根据使用要求、岩体强度、地质构造、围岩受力状态、地应力等条件综合决定[3]。围绕地下水封洞库工程建设中的关键问题,张成斌等研究了储油洞室在实际施工开挖工况下的稳定性[4]。王者超等运用弹塑性理论,研究了花岗岩地层大型不衬砌地下水封石油洞库围岩的完整性以及变形和稳定性[5]。胡谋鹏等采用 Hoek-Brown 强度指标,对某地下水封洞库围岩稳定性进行数值分析研究[6]。李术才等开展了基于离散介质流固耦合理论的地下洞库稳定性评价[7]。王成虎等针对我国渤海湾某地下水封油库进行了场址地应力场及工程稳定性分析研究[8]。以上研究有力地推动了我国地下水封石油洞库围岩稳定性分析和理论水平。

为进一步探究地下岩洞断面尺寸对洞室稳定性的影响,本文以东南沿海某地下水封石油洞库储油洞室工程为例,采用大型岩土工程分析软件 ABAQUS 对其施工开挖过程进行数值模拟,从围岩应力和位移变形两方面分析了不同断面尺寸工况下洞室的稳定性,对围岩的初始应力场情况、影响围岩稳定的主要因素、围岩变形量等进行全面的讨论,并在此基础上确定储油洞室最优断面尺寸。

## 2. 工程实例

某地下水封洞库设计库容为  $350 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 共设有 11 条储油洞室, 每条洞室长度约 500 m, 利用混凝土密封塞将储油洞室分隔成为 4 组储油洞罐, 每组储油洞罐的洞室之间通过连接巷道互相连通, 储油洞室的轴线方向为  $N45^\circ W$ 。

库区附近岩性主要为燕山晚期侵入的二长花岗岩以及辉长岩、前泥盆系片麻状花岗岩。三种岩性均

岩质坚硬，岩体完整，除局部破碎薄层、节理密集带外，微风化层岩体质量基本属于 I~II 级。场区岩体工程地质分类为基本稳定~稳定。

地下储油洞室的几何形状，对应力分布有直接影响，是围岩稳定性的重要因素之一。储油洞室的断面形状与大小需根据使用要求、岩体强度、地质构造情况、围岩受力状态、地应力情况等条件综合决定。

### 3. 地应力确定

根据本工程勘察成果资料，岩体的主应力随深度增大而增加，在测试深度范围内，三向主应力之间的大小关系为： $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ，表明该地区在地壳浅部水平应力占主导地位，水平构造活动较为强烈。工程区应力场主要受构造应力作用，与大的区域构造应力场基本一致。

根据勘察报告洞库主应力统计表，可知储油洞室深度范围内的最大水平应力为 9.28~13.86 MPa，最小水平主应力为 5.56~8.43 MPa，垂直主应力为 4.37~5.58 MPa。可见，最大水平应力与竖直主应力的比值为 1.67~2.48，平均值为 2.08；最小水平主应力与竖直主应力的比值为 1.27~1.51，平均值为 1.39。综上所述，稳定性评价最终采用的初始应力场分布，且满足如下关系[4]：

$$\sigma_3 = \gamma h \quad (1)$$

$$\sigma_2 = 1.39\sigma_3 \quad (2)$$

$$\sigma_1 = 2.08\sigma_3 \quad (3)$$

式中： $\gamma$  为岩体的重度， $\text{kN/m}^3$ ； $h$  为围岩深度， $\text{m}$ 。

竖直主应力方向与重力方向一致，最大主应力方向与储油洞室间夹角为  $\theta$ 。由于现场实测地应力结果与储油洞室有一定的夹角，因此，需要对实测地应力进行坐标转换，才能输入到数值模拟软件边界条件进行结构分析计算。

$\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  分别为最大和中间主应力，现实中这两个应力分量与水平面平行， $y$  沿洞库轴向方向， $\theta$  为洞库轴向与最大主应力在水平面内的夹角。应力换算依据如下算式[6]：

$$S_{xx} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\theta \quad (4)$$

$$S_{yy} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\theta \quad (5)$$

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\theta \quad (6)$$

式中： $S_{xx}$ 、 $S_{yy}$ 、 $\tau_{xy}$  分别为坐标系中的  $x$  方向的主应力、 $y$  方向的主应力和剪应力； $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  为最大主应力、中间主应力，单位为 MPa。

### 4. 计算参数确定

Hoek-Brown (以下简称 H-B) 强度准则及其相应的岩体力学参数取值方法目前在国际范围内尤其是欧美国得到普遍采用。在我国岩体工程界，早期分析方法呈现以 Mohr-Coulomb (以下简称 M-C) 强度准则占据绝对地位的基本格局，随工程建设条件复杂化特别是深埋地下工程对岩体力学复杂特性的进一步揭示，人们逐渐认识到 M-C 强度准则无法合理描述地质条件对岩体力学性质的影响，从而难以解释岩体现场表现的变形或破坏现象，M-C 强度准则占据主导应用地位的格局也呈现出逐渐被打破的趋势[9]。

考虑到 H-B 强度准则能够更为合理地反映岩体的固有特点及其非线性破坏特征，本次分析应用该准则帮助确定岩体力学参数，同时还采用了基于该准则的本构模型进行岩体开挖力学响应特性的描述。利用 H-B 强度准则确定岩体 M-C 强度准则参数计算如下[10]：

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2} \quad (7)$$

式中,  $\sigma_1$  为破坏时的最大主应力;  $\sigma_3$  为作用在岩石试样上的最小主应力;  $\sigma_c$  为岩块的单轴抗压强度;  $m$ 、 $s$  为常数(与岩性及结构面有关)。

数值模拟时采用基于 H-B 强度准则计算的 M-C 本构模型。根据地勘报告, 表 1 给出了岩体数值分析采用的物理力学参数。

**Table 1.** HOEK-BROWN criterion parameter value ( $m_i = 25$ )

**表 1.** HOEK-BROWN 准则参数取值( $m_i = 25$ )

弹性模量 $E_i/\text{GPa}$	单轴抗压强度 $\sigma_c/\text{MPa}$	密度 $\rho$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$m$	$s$	内聚力 $c$	内摩擦角 $\varphi$	泊松比 $\mu$
40	84	2730	1.7	0.004	5.5	45	0.27

## 5. 洞型模拟分析

### 5.1. 模型建立和工况设置

基于上述断面形式确定原则, 采用工程类比法以及设计储量初步选择储油洞库的断面大小。部分国内外已建或在建的水封洞库储油洞室的断面形式如表 2 所示。

**Table 2.** Statistical table of section forms of oil storage caverns of some water sealed caverns built or under construction at home and abroad

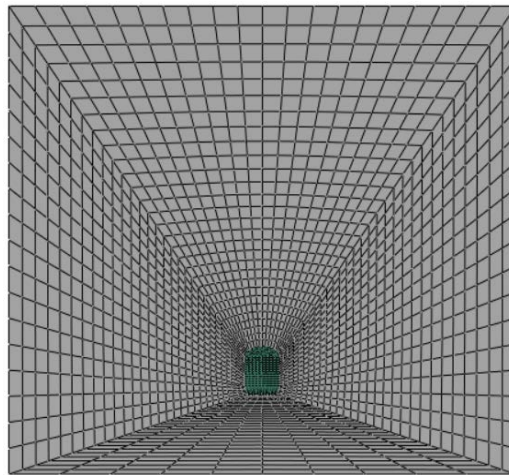
**表 2.** 部分国内外已建或在建水封洞库储油洞室断面形式统计表

地区	储存油品	岩石类型	库容( $10^4 \text{ m}^3$ )	跨度 $\times$ 高度(m)	力学参数(MPa)
烟台	LPG	花岗岩	120	22 $\times$ 26 (马蹄形)	单轴饱和抗压强度 UCS = 70 - 140
黄岛	原油	花岗岩	300	20 $\times$ 30 (直墙圆拱)	最大主应力 $S_{\max} = 15.7$ 单轴饱和抗压强度 UCS = 91
惠州	原油	花岗岩	500	20 $\times$ 30 (直墙三心拱)	最大主应力 $S_{\max} = 10$ 单轴饱和抗压强度 UCS = 75.1
湛江	原油	花岗岩	500	20 $\times$ 30 (直墙三心拱)	最大主应力 $S_{\max} = 10$ 单轴饱和抗压强度 UCS = 97.47
日本	/	花岗岩	136	20.5 $\times$ 30	/
挪威	/	变质斜长石	/	22 $\times$ 30	/

参考已建地下水封洞库的断面尺寸和洞库的围岩质量水平, 本工程选用直墙三心拱形断面形式。

根据储油洞室断面建立平面应变模型, 分析在垂直主应力和最小水平主应力条件下储油洞室断面稳定性, 数值模型如图 1 所示, 模型边界条件为竖向施加地应力, 水平向施加最小水平应力, 利用 ABAQUS 有限元软件模拟生成洞室围岩的初始应力分布状态, 通过生死单元法实现储油洞室开挖。

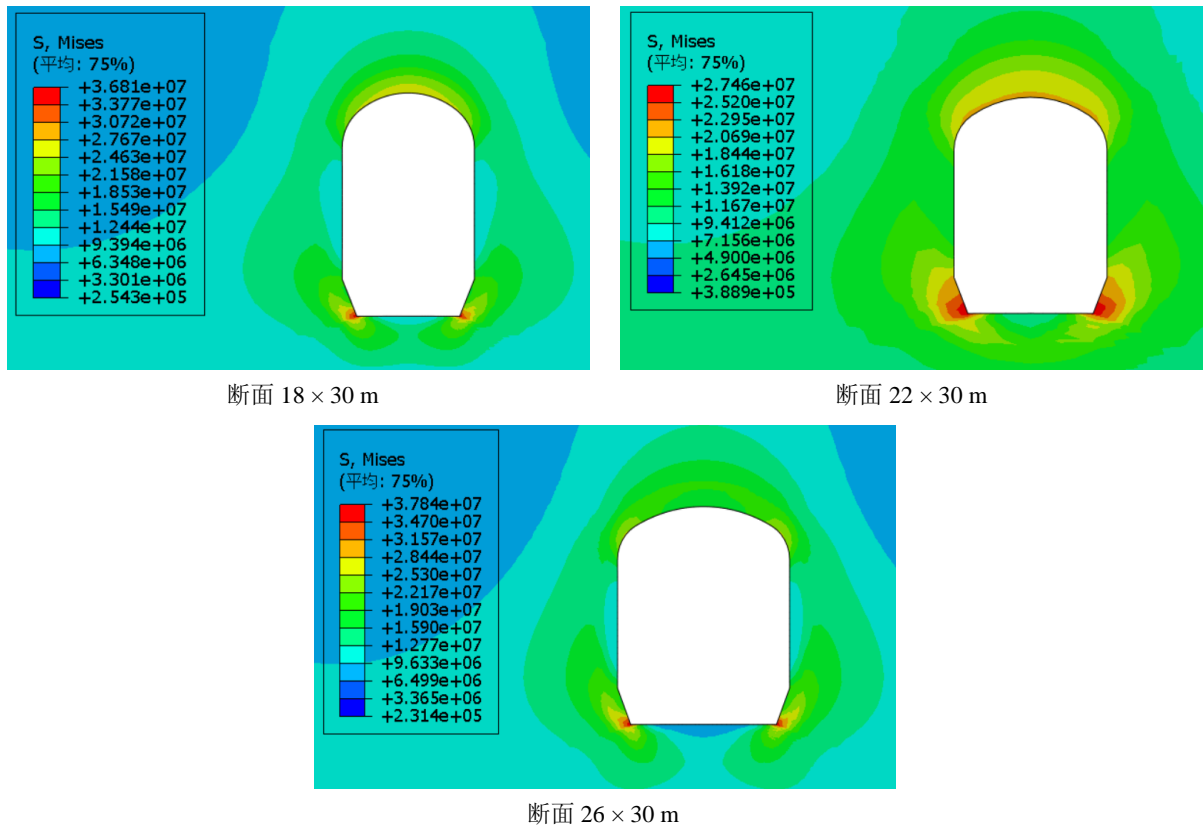
为了确定合理的储油洞室跨度, 设置了三个不同的布置方案, 模拟工况分别为工况一 18  $\times$  30 m (跨度  $\times$  高度, 下同)、工况二 22  $\times$  30 m、工况三 26  $\times$  30 m, 分析时考虑倒角的安全余量, 研究洞室跨度对围岩稳定性的影响。



**Figure 1.** Schematic diagram of plane strain model of oil storage cavern  
**图 1.** 储油洞室平面应变模型示意图

### 5.2. 模拟结果

在岩体应力作用下，对地下洞室一次性开挖模拟，得到储油洞室围岩的应力场分布和位移场分布，如图 2 所示。



**Figure 2.** Total stress field under different working conditions  
**图 2.** 不同工况下的总应力场



从图 2 可以看出, 储油洞室开挖后, 应力场会重新分布, 一般洞室边墙底部应力较大, 产生应力集中现象, 而洞室边墙处应力较小。

根据图 3~5 储油洞室断面最大主应力和最小主应力场分布情况, 最大主应力值普遍小于最小主应力值, 因此在围岩应力作用下洞室开挖应力型破坏主要受最小主应力影响, 从储油洞室断面选取 4 个监测点, 如图 6 所示, 分析不同工况时最小主应力对洞室稳定性的影响。

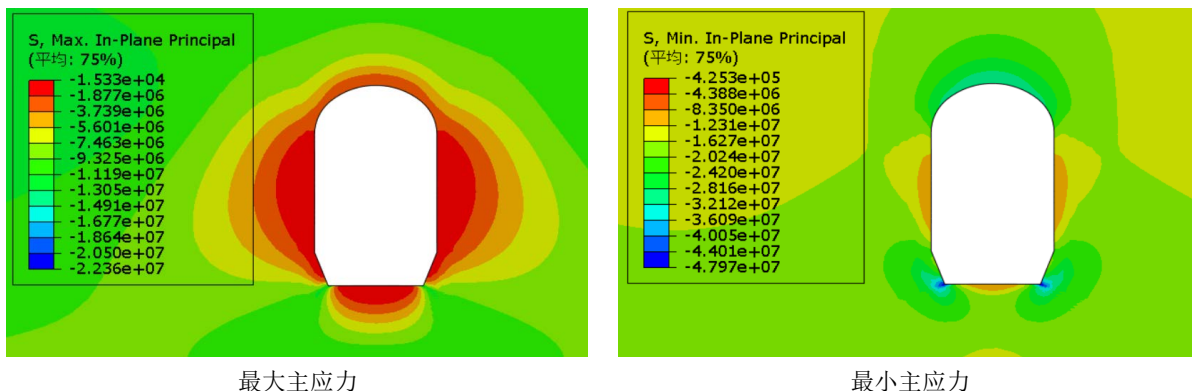


Figure 3. Section 18 × 30 m stress field

图 3. 断面 18 × 30 m 应力场

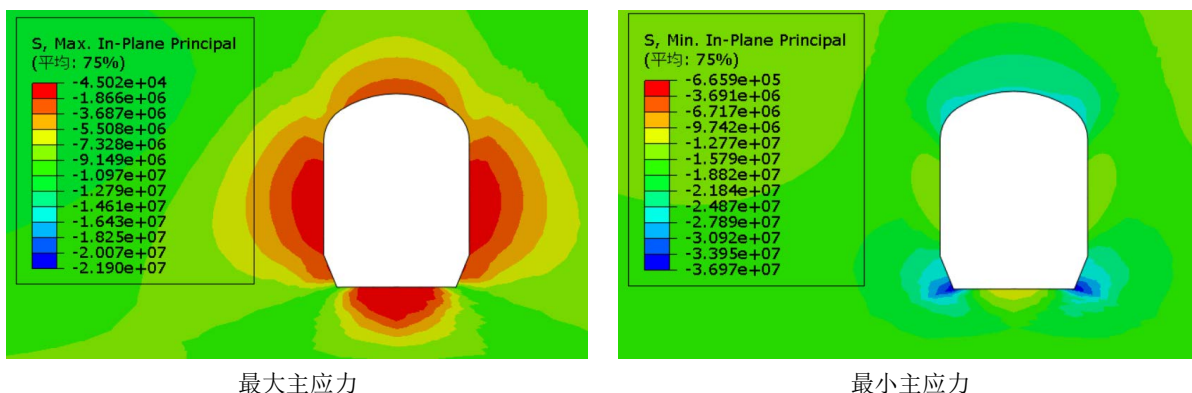


Figure 4. Section 22 × 30 m stress field

图 4. 断面 22 × 30 m 应力场

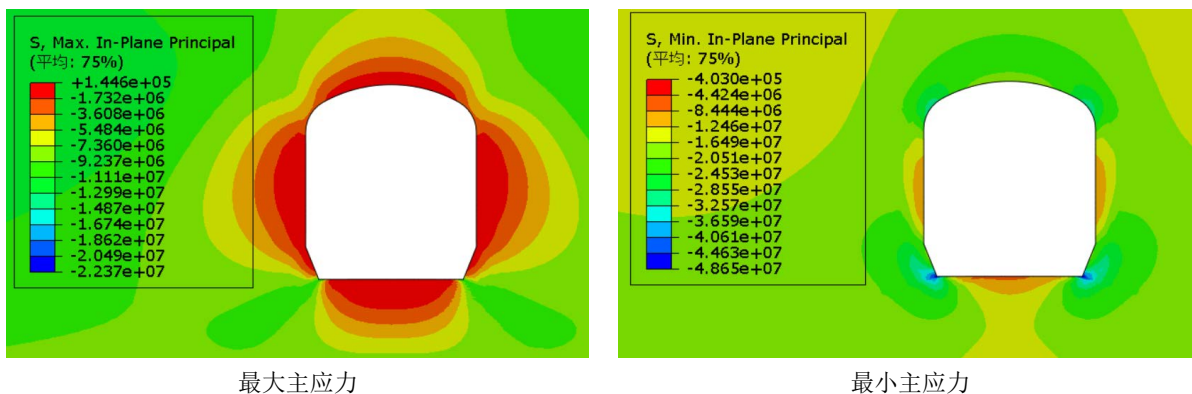
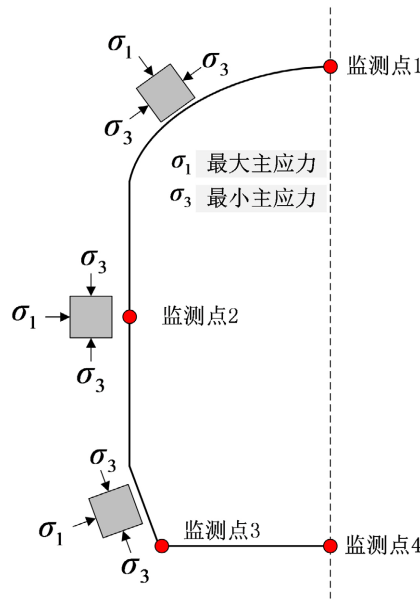


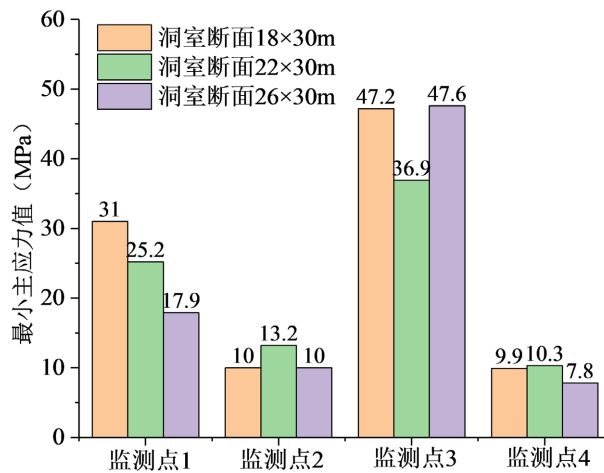
Figure 5. Section 26 × 30 m stress field

图 5. 断面 26 × 30 m 应力场



**Figure 6.** Monitoring points of oil storage cavern section  
**图 6.** 储油洞室断面监测点

由图 7 可知，洞室最小应力极值主要分布在直墙倒角处，该处产生应力集中现象。断面  $18 \times 30 \text{ m}$  (工况一)最大应力值为  $47.2 \text{ MPa}$ ，对应的应力强度比约为  $47.9/84 = 0.57$ ；断面  $22 \times 30 \text{ m}$  (工况二)最大应力值为  $36.9 \text{ MPa}$ ，对应的应力强度比约为  $36.9/84 = 0.44$ ；断面  $26 \times 30 \text{ m}$  (工况三)最大应力值为  $48.7 \text{ MPa}$ ，对应的应力强度比约为  $48.7/84 = 0.58$ 。以上三种工况应力强度比均小于发生岩体应力破坏中风险所需的指标水平。从分析结果可知，上述三种工况断面均不会出现应力型破坏风险，但从监测点 3 (边墙底部倒角处)应力水平来看，断面  $22 \times 30 \text{ m}$  围岩稳定性优于其它断面形式。



**Figure 7.** Comparison of minimum principal stress under different working conditions  
**图 7.** 不同工况最小主应力对比

图 8~10 为不同工况条件下的变形云图，在地应力作用下洞室变形主要集中在洞室的直边墙中部区域，由此获得如下结论：采用应力、变形为稳定性评价分析指标；受地质条件、结构形态决定的，在开挖作

用下，洞库拱顶与底板中部是应力集中部位，而高边墙则以应力松弛变形作为开挖响应方式。高边墙中部近临空面处主要以拉压组合受力为主，其中 18 × 30 m 储油洞室断面高边墙中部最大拉应力为 10.0 MPa，22 × 30 m 储油洞室断面高边墙中部最大拉应力为 13.3 MPa，26 × 30 m 储油洞室断面高边墙中部最大拉应力为 10.1 MPa，因此在储油洞室直墙部位开挖施工时需要降低岩石应力卸载速率，防止应力集中现象。

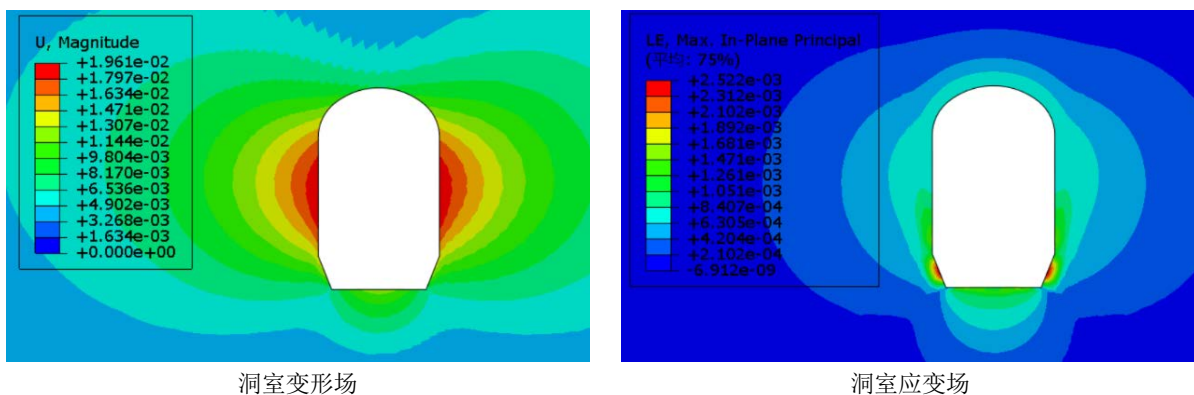


Figure 8. Section 18 × 30 m deformation nephogram  
图 8. 断面 18 × 30 m 变形云图

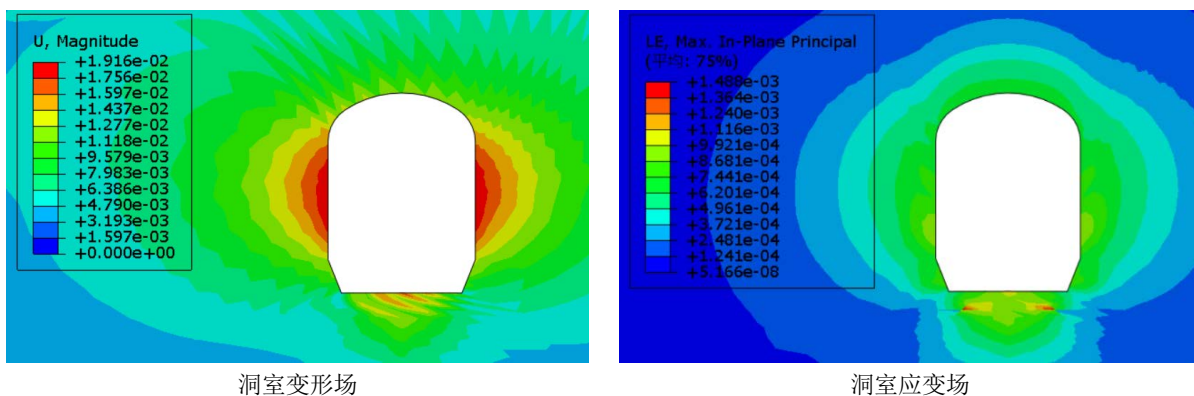


Figure 9. Section 22 × 30 m deformation nephogram  
图 9. 断面 22 × 30 m 变形云图

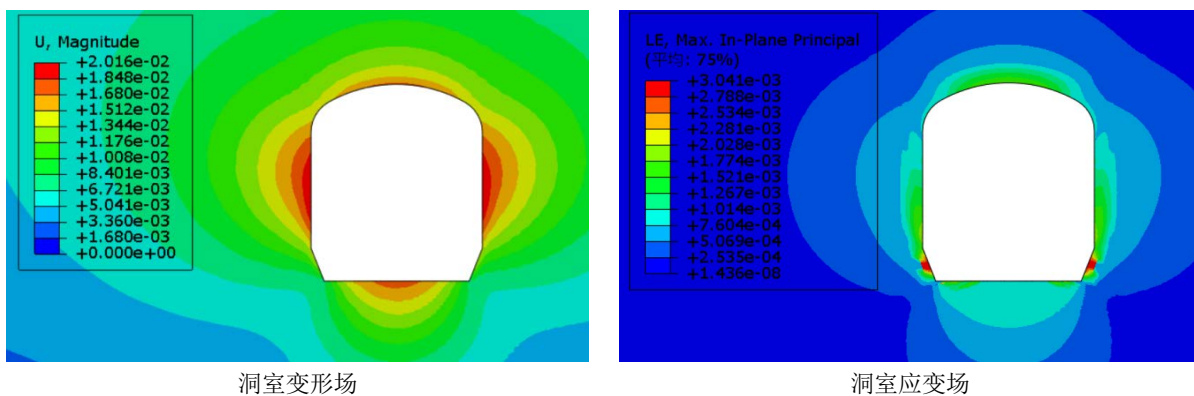


Figure 10. Section 26 × 30 m deformation nephogram  
图 10. 断面 26 × 30 m 变形云图



在储油洞室断面选取三个特征监测点，如图 11 所示，分别位于拱顶、直墙中部和拱底，分别监测不同洞室断面开挖后的变形量。

由图 12 可知，洞室最大位移分布在直墙中部，三种工况最大水平位移分别为 19.5 mm、18.8 mm、20.1 mm，相应的收敛应变率分别为 0.22%、0.16%、0.15%，岩体均不具有变形破坏风险，但当洞室跨度超过 22 m 时，洞室拱顶下沉量增大，洞室直墙段收敛变形也相应增大，同时当跨度为 18 m 时，直墙段的收敛变形量比跨度为 22 m 更大。

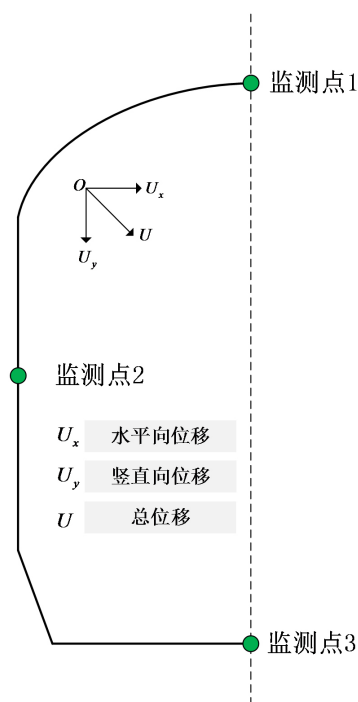


Figure 11. Section displacement monitoring point of oil storage cavern

图 11. 储油洞室断面位移监测点

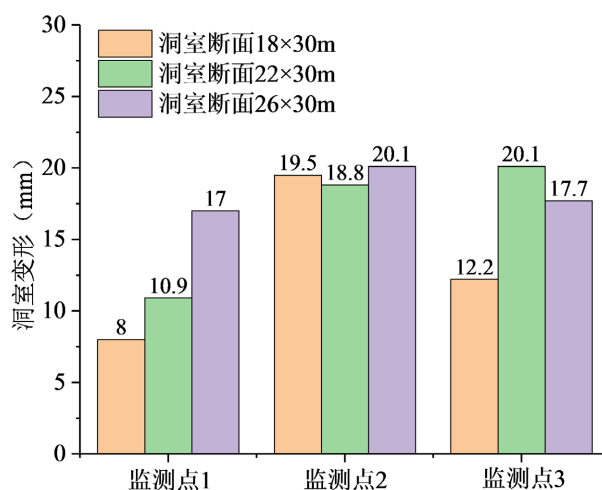


Figure 12. Comparison of minimum principal stress under different working conditions

图 12. 不同工况最小主应力对比

综上所述, 结合三种工况的储油洞室应力场和变形场分析, 在满足围岩强度和变形的判别准则下, 洞室跨度 22 m 时为最优化合理跨度, 即推荐储油洞室断面为 22 × 30 m。

## 6. 结论

本研究以某地下水封石油洞库工程为例, 采用数值模拟方法, 从围岩应力和变形两个方面分析了不同断面工况下储油洞室的稳定性, 对围岩的初始应力场情况、围岩变形量等进行全面地讨论, 得到如下结论:

1) 地下水封洞库储油洞室开挖后, 应力场会重新分布, 一般洞室边墙底部应力较大, 会产生应力集中现象, 而洞室边墙处应力较小。

2) 根据储油洞室断面应力场分布情况, 最大主应力值普遍小于最小主应力值, 因此在围岩应力作用下洞室开挖应力型破坏主要受最小主应力影响。洞室最小应力极值主要分布在直墙倒角处, 该处产生应力集中现象。

3) 在地应力作用下储油洞室变形主要集中在直边墙中部区域, 在开挖作用下, 洞库拱顶与底板中部为应力集中部位, 而高边墙则以应力松弛变形作为开挖响应方式。高边墙中部近临空面处主要以拉压组合受力, 因此在储油洞室直墙部位开挖施工时需要降低岩石应力卸载速率, 防止应力集中现象。

4) 采用数值模拟手段, 从围岩应力和变形两方面分析了不同断面尺寸工况下洞室的稳定性, 在满足储油洞室罐容和洞室布置的情况下, 实现储油洞室断面最优化设计。

## 参考文献

- [1] 王梦恕, 杨会军. 地下水封岩洞油库设计、施工的基本原则[J]. 中国工程科学, 2008, 10(4): 11-16.
- [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]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [3] 李立青. 地下水封油库水封机制试验研究及理论分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- [4] 张成斌, 张亚琴, 胡谋鹏, 等. 大断面地下水封石油洞库储油洞室稳定性模拟[J]. 油气储运, 2019, 38(7): 827-833.
- [5] 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): 112-125.
- [6] 胡谋鹏, 梁久正, 许杰. 地下水封储油库围岩稳定性数值分析[J]. 油气储运, 2013, 32(4): 370-375.
- [7] 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.
- [8] 王成虎, 郭啟良, 侯硯和, 等. 地下水封油库场址地应力场及工程稳定性分析研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 698-705.
- [9] 崔少东, 郭书太, 高剑锋. 基于 GSI 和 Q 系统岩体力学参数确定方法及应用[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(6): 43-47.
- [10] Martin, C.D., Kaiser, P.K and McCreath, D.R. (1999) Hoek-Brown Parameters for Predicting the Depth of Brittle Failure around Tunnels. *The Canadian Geotechnical Journal*, 3, 136-151. <https://doi.org/10.1139/t98-072>