

DOI: 10.11779/CJGE201509021

# 地下水封石油洞库施工期监控量测与稳定性分析

田昊<sup>1</sup>, 李术才<sup>1</sup>, 王者超<sup>\*1, 2</sup>, 薛翊国<sup>1</sup>, 周毅<sup>1</sup>, 姜彦彦<sup>1</sup>, 赵建纲<sup>1</sup>, 王轮祥<sup>1</sup>, 吕晓庆<sup>1</sup>

(1. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061, 2. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 现场监控量测是确保大型地下工程建造和运营安全的重要手段。地下水封石油洞库在中国刚刚起步, 不但缺少监测方案设计原则、实施方法等方面的规定标准, 还缺少对相关监测数据分析方面的研究。以国内首个正在实施的大型地下水封石油洞库建设项目为依托, 首先介绍了适用于大型地下水封石油洞库的监测原则与实施方法, 该原则和方法充分考虑工程特征、地质情况和经济适用性; 其次介绍了洞库监测结果: 洞室大部分监测断面的洞周围岩收敛变形、拱顶沉降、内部位移和围岩松动圈分别处于4~8 mm、3~6 mm、4~8 mm 和0.9~1.8 m区间范围内, 锚杆应力和接触应力值大部分控制在50 MPa 和0.5 MPa以内; 而后分析了监测数据: ①黄岛地下水封石油洞库围岩变形和支护受力较小、岩体稳定性良好、设计支护方案合理; ②综合全面的监控量测结果可准确地反映地下水封石油洞库稳定性特征; ③监测数据显示地下水封石油洞库稳定性表现出显著的时空演化特征。该研究可为中国地下水封石油洞库监测技术和稳定性评价研究提供重要依据。

**关键词:** 地下水封石油洞库; 监控量测; 围岩稳定性; 围岩变形

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)09-1710-11

作者简介: 田昊(1986-), 男, 山东泰安人, 博士研究生, 主要从事岩土工程的学习和研究工作。E-mail: wanz@sdu.edu.cn。

## Field monitoring and stability analysis of underground crude oil storage caverns in construction phase

TIAN Hao<sup>1</sup>, LI Shu-cai<sup>1</sup>, WANG Zhe-chao<sup>1,2</sup>, XUE Yi-guo<sup>1</sup>, ZHOU Yi<sup>1</sup>, JIANG Yan-yan<sup>1</sup>, ZHAO Jian-gang<sup>1</sup>, WANG Lun-xiang<sup>1</sup>, LÜ Xiao-qing<sup>1</sup>

(1. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. State Key Laboratory for

Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Field monitoring is one of the important methods to ensure construction and operation safety of large underground facilities. The construction of underground crude oil storage caverns just commences in China. There are no standards of field monitoring and examples for data analysis. Based on the experience on the first crude oil storage caverns in China, the monitoring principles and implementation method of underground crude oil storage caverns are introduced by fully considering engineering features, geological conditions and economic applicability. The monitoring results show that surrounding rock convergence, crown settlement, internal displacement and surrounding rock loose circle of most monitoring sections are in the ranges of 4~8 mm, 3~6 mm, 4~8 mm, 0.9~1.8 m, respectively, and the anchor bar stress and contact stress are less than 50 MPa and 0.5 MPa, respectively. It is concluded that: (1) The deformation and support stress of the rock mass are low. Its stability is good and the design of support scheme is reasonable. (2) The monitoring results from a comprehensive scheme can reflect the overall stability of the underground crude oil storage cavern. (3) The stability has the characteristics of spatial and time evolution.

**Key words:** underground crude oil storage cavern; field monitoring; stability of surrounding rock; rock mass deformation

## 0 引言

石油是现代工业的“血液”, 是国家生存和发展的重要战略资源, 对保障国家经济和社会发展及国防安全有着不可估量的作用。世界上许多国家已经相继建设了大量的地下储油洞库<sup>[1-2]</sup>, 这是一种安全、环保、

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(2013CB036002);  
国家自然科学青年基金项目(51309145, 41202205); 深部岩土力学与  
地下工程国家重点实验室开放基金项目(SKLGDUEK1408); 山东大  
学自主创新基金项目(2012TS058)

收稿日期: 2014-08-05

\*通讯作者

综合经济效益高的储油方式, 中国在广泛分布着优质花岗岩的沿海区域也建设了大型地下水封石油洞库。

地下水封石油洞库稳定性近些年来已得到一定程度研究, Lee 等以韩国的不衬砌地下石油储库为例详细分析了地下水封储库设计和建设过程中的各种问题, 主要分析了洞室掌子面推进和爆破对围岩应力和变形状态的动态影响<sup>[4-5]</sup>; Sturk 等以 Harare 的非衬砌地下储油洞库为例总结了洞库设计建造过程中遇到的问题, 重点集中在水文地质和围岩稳定性方面<sup>[6]</sup>; Gnirk 等探讨了硬岩中压缩气体能量储存的大型地下洞室的稳定性, 建立了洞室稳定性评价的数值模拟模型<sup>[7]</sup>; 陈祥开展了黄岛地下水封石油洞库岩体质量评价及围岩稳定性分析<sup>[9]</sup>; 时洪斌系统研究了黄岛地下水封洞库水封条件和围岩稳定性<sup>[10]</sup>; 围绕地下水封洞库工程建设中的关键科学问题, 杨明举等结合汕头地下水封储气洞库工程, 阐述了地下水封洞库储存石油液化气原理, 并分析了汕头储气洞库的稳定性和涌水量<sup>[11-12]</sup>; 李术才等基于离散介质流固耦合理论, 开展地下石油洞库水封性和稳定性评价<sup>[13]</sup>; 王者超等对大型地下水封石油洞库围岩完整性、变形和稳定性进行了分析<sup>[14]</sup>。

现场监控量测是稳定性研究的一个重要方面, 在水电站地下厂房方面, 已有相关规范, 许多学者已经结合具体工程做了许多监控量测工作, 例如李仲奎等从高地应力特点、岩体流变特性、变形特性等角度, 对锦屏一级水电站地下厂房洞室群出现的具体工程问题进行分析<sup>[15]</sup>; 冯夏庭等提出了大型地下洞室群的稳定性分析、开挖和支护的智能动态设计方法, 并很好地运用在锦屏二级水电站地下厂房设计与施工全过程中<sup>[16]</sup>; 吴世勇等对高地下水位条件深埋引水隧洞开挖及支护过程中的围岩变形规律与特征等方面做了研究, 得出了一些具有普遍意义的结论<sup>[17]</sup>。但地下水封石油洞库还未有成熟的规范和建成的工程案例, 因此对地下水封石油洞库现场监测技术的研究及在监测工作基础上的稳定性评价研究, 具有重要意义。

本文以国内首个正在实施的大型地下水封石油洞库建设项目为依托, 首先介绍了适用于大型地下水封石油洞库的监测原则与实施方法, 该原则和方法充分考虑了工程特征、地质情况和经济适用性; 其次介绍并分析了洞库的监测结果, 分析结果表明洞室的洞周围岩收敛变形、拱顶沉降、内部位移、围岩松动圈、锚杆应力和接触应力监测值可准确地反映地下水封石油洞库稳定性特征, 该研究可为中国地下水封石油洞库监测技术和稳定性评价研究提供重要依据。

## 1 工程概况

该地下水封洞库工程是目前国内首个大型地下水封石油洞库项目。图 1 为地下水封石油洞库工程结构图, 主要由施工巷道、水幕巷道和主洞室 3 个部分组成。主洞室储存石油, 按北偏西方向平行设置有 9 个, 按顺序每 3 个主洞室之间通过 3, 4 条支洞相连组成一个罐体, 共形成 A、B、C 三个洞罐。其它关于该地下水封洞库的基本信息和工程地质概况见文献[13, 14]。

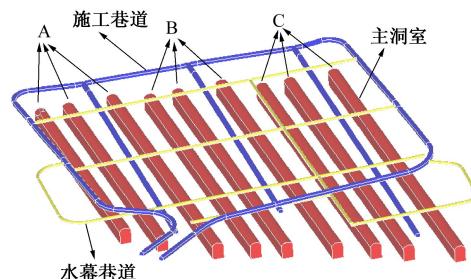


图 1 地下水封石油洞库工程结构图

Fig. 1 Structural diagram of underground crude oil storage cavern

## 2 监测方案

### 2.1 监控量测项目确定原则

本项目是国内首个大型地下水封石油洞库工程, 项目建设前国内缺少监测方案设计原则、实施方法等方面的规范标准。在具体的工程实践经验基础上, 充分考虑洞库施工和运营期整体稳定性要求, 提出以下 5 条原则:

(1) 满足工程设计对洞库稳定性评价的要求, 选择控制洞库整体稳定性的关键项目。

(2) 监测项目应能全面反映围岩变形和支护受力情况。

(3) 选择一项多用、数据可靠和经济合理的监测项目。

(4) 监测项目应该首先突出安全监测。由于与其他行业地下洞室相比, 地下水封石油洞库具有不衬砌、洞室密度大等特点, 所以在满足对洞室群稳定性监测要求的同时, 还要满足对完整性监测的较高要求。

(5) 监测项目能全面的反映洞库运营期稳定性状况, 为洞库运营期稳定性评价提供依据。

### 2.2 监测断面及测线测点布置

为了全面监测洞库的稳定性, 共布置横穿 9 个主洞室的 3 条测线, 如图 2 所示, 共形成 27 个监测断面。在每个监测断面, 根据上述布置原则和实际情况, 有选择地布置洞周围岩收敛变形、拱顶沉降、内部位移、

围岩松动圈、锚杆应力和围岩与喷混间接触应力等监测项目。

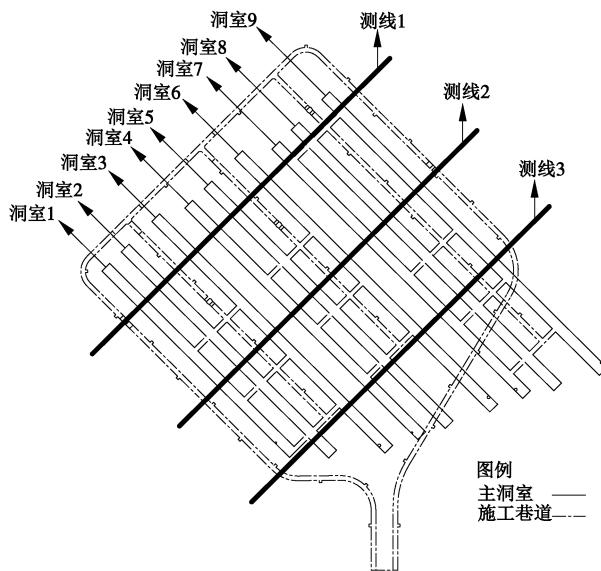


图 2 洞室与测线布置平面图

Fig. 2 Plan of caverns and layout of measuring lines

图 3 是洞周围岩收敛变形和拱顶沉降测点测线布置图, ①~⑦表示洞室上层洞周围岩收敛变形测线, ⑧和⑨分别为中、下层洞周围岩收敛变形测线, A 为拱顶沉降监测点。

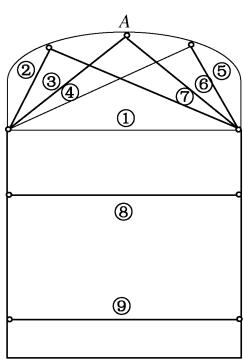


图 3 洞周围岩收敛变形和拱顶沉降测点测线布置图

Fig. 3 Layout of measuring lines for surrounding rock convergence and crown settlement

图 4,5 分别是锚杆应力计和多点位移计测点布置图, ①~⑦表示监测仪器在洞室中安装位置, 每个监测断面最多可布置 7 支锚杆应力计和 7 套多点位移计, 根据地质情况和施工特点, 每个监测断面测点数量有所不同。表 1 为每个多点位移计监测断面测点布置情况。图 6 为围岩松动圈测点布置图, 每个断面布置 5 个测点。图 7 为接触应力测点布置图, 每个断面布置 4 个测点。

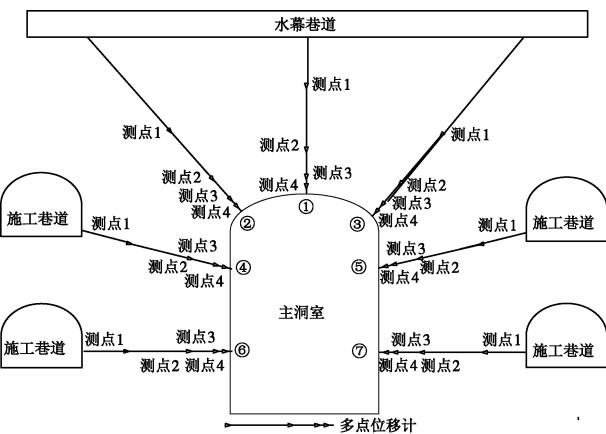


图 4 多点位移计布置图

Fig. 4 Layout of multi-displacement-monitoring instruments

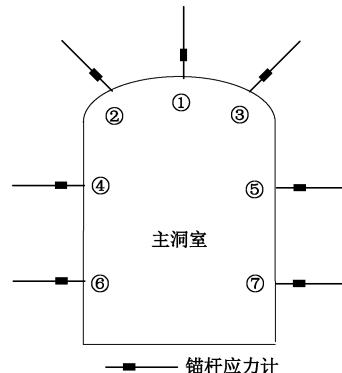


图 5 锚杆应力计布置图

Fig. 5 Layout of anchor bar stress gauges

表 1 各监测断面上多点位移计位置统计表

Table 1 Statistical table of locations of multi-displacement-monitoring instruments

| 洞室 | 测线   |      |     |
|----|------|------|-----|
|    | 1    | 2    | 3   |
| 1  | ①②③  | ①②③  | 无   |
| 2  | ①③   | ①③⑦  | ①   |
| 3  | ①②   | ①②⑥  | ①②③ |
| 4  | ①②③  | ①②③  | ①②③ |
| 5  | ①③   | ①③⑦  | ①   |
| 6  | ①②   | ①②⑥  | ①   |
| 7  | ①    | ①②③  | ①②③ |
| 8  | ①⑤   | ①⑤   | ①⑦  |
| 9  | ①②③④ | ①②③④ | ①③⑥ |

### 2.3 监测方法

洞周围岩收敛变形采用数字钢尺收敛计监测, 最小读数为 0.01 mm; 拱顶沉降采用莱卡全站仪进行监测, 全站仪标称精度为  $\pm 1$  mm; 围岩内部位移采用进口振弦式多点位移计进行监测, 仪器标称精度为  $\pm 0.1\% F.S.$ ; 松动圈测试采用 UCE2000 超声波多功能探测仪; 锚杆

表 2 监测方法统计表

Table 2 Statistical table of monitoring methods

| 序号 | 监测类型          | 监测项目          | 监测目的               | 监测仪器              | 量测频率                 |                        |                     |                    |
|----|---------------|---------------|--------------------|-------------------|----------------------|------------------------|---------------------|--------------------|
|    |               |               |                    |                   | 断面开挖<br>1~<br>15 d 内 | 断面开挖<br>16 d~<br>1 个月内 | 断面开挖<br>1~<br>3 个月内 | 断面开挖<br>3 个月以<br>后 |
| 1  | 围岩变形          | 洞周围岩收敛变形及拱顶沉降 | 判断围岩稳定性            | 数字钢尺收敛计及莱卡全站仪     | 1 次/d                | 1 次/2 d                | 1 次/周               | 1 次/周              |
|    |               | 围岩内部位移        | 确定围岩内部变形范围         | GK4450 振弦式多点位移计   | 1 次/d                | 1 次/2 d                | 1 次/周               | 1 次/周              |
|    |               | 围岩松动圈         | 测定围岩松动圈范围          | UCE2000 超声波多功能探测仪 |                      |                        | 无                   |                    |
| 2  | 洞室围岩与支护相互作用情况 | 锚杆应力          | 监测锚杆受力状况, 检验锚杆设计参数 | MG-25A 振弦式锚杆应力计   | 1 次/d                | 1 次/2 d                | 1 次/周               | 1 次/周              |
|    |               | 接触应力          | 监测喷射混凝土与围岩之间的接触力   | TJ-22 差阻式接触应力计    | 1 次/d                | 1 次/2 d                | 1 次/周               | 1 次/周              |

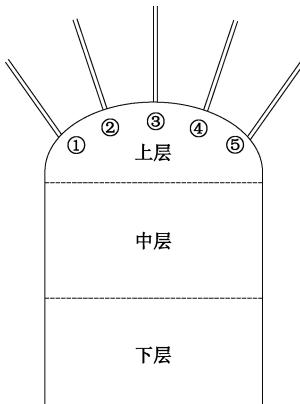


图 6 围岩松动圈测点布置图

Fig. 6 Layout of measuring points in loose zone

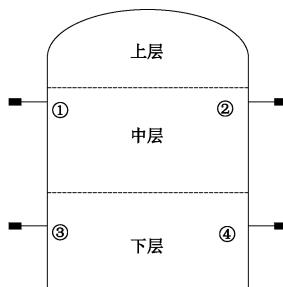


图 7 接触应力计布置图

Fig. 7 Layout of contact stress gauges

应力采用振弦式锚杆应力计监测, 量程为 100 MPa (压) ~300 MPa (拉); 接触应力采用差阻式接触应力计, 量程为 0~5 MPa。表 2 为监测项目汇总表。

### 3 监测结果与分析

#### 3.1 洞周围岩收敛变形及拱顶沉降

地下洞室开挖后, 洞周围岩收敛变形和拱顶沉降是反映围岩变形和支护受力情况最直接的物理量。为

了研究洞周围岩收敛变形、拱顶沉降与围岩等级的关系, 对不同断面的监测值进行了统计。主洞室洞周围岩收敛变形监测断面共 23 个, 以测线①为例, 图 8 统计了典型监测断面的分布情况, 发现监测值大多在 4~8 mm 区间内; 图 9 中拱顶沉降值多分布于 3~6 mm 区间。

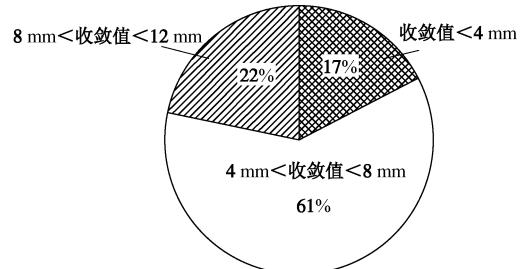


图 8 洞周围岩收敛变形监测值分布图

Fig. 8 Distribution of surrounding rock convergences

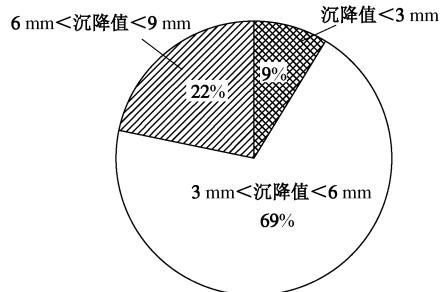


图 9 拱顶沉降监测值分布图

Fig. 9 Distribution of crown settlements

表 3 中, I 、 II 、 III 级围岩中的收敛值大部分介于 4~8 mm 区间内, 大于 8 mm 的收敛值多分布于 IV 级围岩中; 表 4 中, I 、 II 、 III 级围岩中的, 沉降值大部分介于 3~6 mm 之间, IV 级围岩中沉降值平均分布于 6~9 mm 和 8~12 mm 区间中。数据表明主洞室

围岩变形较小, 支护受力良好; 随着围岩质量逐渐变差, 围岩收敛值和拱顶沉降值逐渐变大。

表 3 洞周围岩收敛变形监测断面分布表

Table 3 Proportion of rock convergences

| 围岩等级   | <4 mm | 4~8 mm | 8~12 mm |
|--------|-------|--------|---------|
| I 、 II | 2     | 5      | 0       |
| III    | 2     | 8      | 2       |
| IV     | 0     | 1      | 3       |
| 总计     | 4     | 14     | 5       |

表 4 拱顶沉降监测断面分布表

Table 4 Proportion of crown settlements

| 围岩等级   | <3 mm | 3~6 mm | 6~9 mm |
|--------|-------|--------|--------|
| I 、 II | 1     | 8      | 0      |
| III    | 1     | 7      | 4      |
| IV     | 0     | 1      | 1      |
| 总计     | 2     | 16     | 5      |

为了进一步分析洞库的围岩变形情况, 将拱顶沉降的监测值和理论计算值进行了对比研究。引用朱维申等<sup>[20]</sup>、Li 等<sup>[21]</sup>计算地下洞室拱顶沉降的公式, 公式考虑岩石类型、覆盖层厚度和地应力条件等因素, 表达式为

$$u = h \left[ a \left( \frac{1000 \lambda \gamma H}{E} \right)^2 + b \left( \frac{1000 \lambda \gamma H}{E} \right) + C \right] \times 10^{-3}, \quad (1)$$

式中,  $u$  表示洞室内拱顶沉降位移值,  $h$  表示洞室的高度,  $\lambda$  为初始地应力侧压力系数,  $\gamma$  为围岩的重度 ( $\text{N}/\text{m}^3$ ),  $H=H_0+h$ ,  $H$  表示主洞室底板上覆岩层厚度,  $H_0$  表示主洞室顶板上覆岩层厚度,  $E$  为变形模量 ( $\text{Pa}$ ),  $a$ ,  $b$ ,  $c$  是拟合常数。在本工程中,  $h$  为 30 m,  $\lambda$  为 2.5,  $\gamma$  为  $27 \text{ kN}/\text{m}^3$ ,  $H$  区间为  $120 \sim 270 \text{ m}$ ,  $E$  为  $21 \text{ GPa}$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  值取决于上覆岩层厚度, 取值上覆岩层厚度为  $270 \text{ m}$ ,  $a$ ,  $b$  和  $c$  的取值依次为  $0.394$ ,  $-0.094$  和  $0.301$ , 将以上参数值代入式 (1) 中可得到拱顶沉降的预测值为  $15.5 \text{ mm}$ 。预测值高于监测值, 预测值是洞室的全部变形, 监测值是在洞室开挖后发生的变形。数据显示: 洞室全部位移是洞室开挖后监测位移的 1.6 倍左右, 与乔丽萍等关于地下工程开挖面空间效应特征的研究结果相一致<sup>[22]</sup>。

### 3.2 内部位移

为了深入了解和掌握内部围岩的变化状况, 进而结合洞周围岩收敛变形和拱顶沉降的监测结果, 分析围岩的稳定性, 需对围岩内部位移进行监测。

以多点位移计测点①的监测值为例进行统计。图 10 中 63% 的内部位移值小于  $1 \text{ mm}$ 。由表 5 可得, 在 I 、 II 、 III 级围岩中, 位移值大部分小于  $3 \text{ mm}$ , 在

IV 级围岩中, 位移值均大于  $3 \text{ mm}$ 。随着围岩等级的增加, 围岩的内部位移值变大, 说明围岩的内部位移和围岩质量之间有着密切的关系。

表 5 多点位移计监测断面分布表

Table 5 Proportion of multi-point displacement meter monitoring sections

| 围岩等级   | <1 mm | 1~3 mm | 3~5 mm | >5 mm |
|--------|-------|--------|--------|-------|
| I 、 II | 18    | 6      | 1      | 4     |
| III    | 22    | 7      | 2      | 2     |
| IV     | 0     | 0      | 1      | 1     |
| 总计     | 40    | 13     | 4      | 7     |

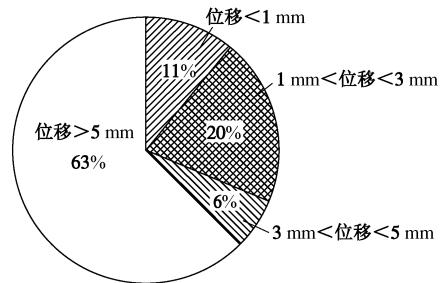


图 10 多点位移计监测值分布图

Fig. 10 Distribution of monitoring value of multi-point displacement meter

洞室开挖会影响围岩的稳定性, 距离开挖面越近的围岩, 内部位移越大 (图 11)。

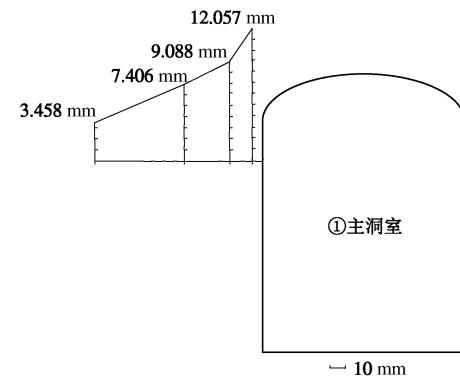


图 11 主洞室③0+293.9 监测断面多点位移监测值示意图

Fig. 11 Sketch map of monitoring values of 0+293.9 monitoring section of main cavern ③ by multi-point displacement meter

围岩内部位移会随时间而变化。图 12 为主洞室① 0+293.9 断面监测值变化曲线, 图中数据显示, 监测值在洞室开挖初期增长较大, 随后 3 个测点的监测值稳定在  $3 \text{ mm}$  左右, 1 个测点稳定在  $5 \text{ mm}$  左右。

洞室分步开挖会影响围岩的稳定性。如图 13 所示, 位于中层多点位移计的监测值在开挖主洞室上、中、下 3 层时, 围岩内部位移突然增大, 反映了分布开挖对围岩稳定性影响。

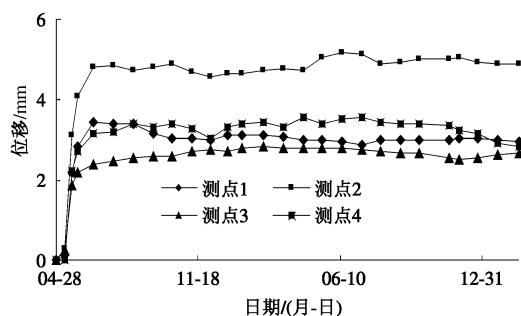


图 12 主洞室①0+293.9 监测断面多点位移变化曲线图

Fig. 12 Curves of data of 0+293.9 monitoring section of main cavern ① by multi-point displacement meter

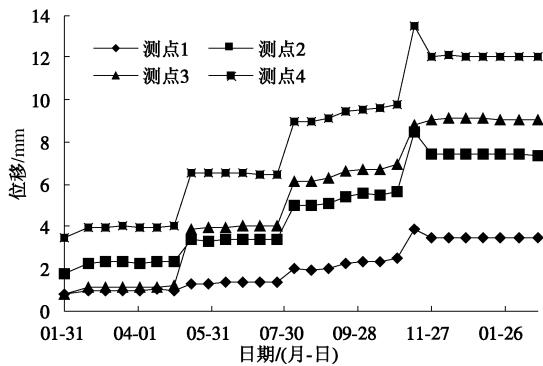


图 13 主洞室③0+293.9 监测断面多点位移变化曲线图

Fig. 13 Curves of data of 0+293.9 monitoring section of main cavern ③ by multi-point displacement meter

### 3.3 围岩松动圈

洞室在成洞前, 岩体内部有初始地应力, 随着洞室的开挖, 由于爆破震动和应力调整, 在洞室周围将形成围岩结构松动圈和应力松动圈, 采用超声波探测仪监测松动圈的范围, 可以判断围岩的稳定性, 为围岩加固提供数据支持。图 14 为松动圈测试时的钻孔和数据采集现场图片。



图 14 现场钻孔和数据采集现场图片

Fig. 14 Photo of drilling data collection in site

超声波测试时, 波速越大, 围岩稳定性越强, 受爆破影响的范围越小; 波速稳定越快, 围岩松动范围越小。以主洞室①0+100 断面 1 号孔为例进行分析,

从图 15 中可以看出, 在孔口段波速较小, 最低波速 1.75 km/s, 表明孔口处由于爆破的影响, 围岩有破碎区域; 随深度增加, 声波波速逐渐增大, 表明爆破造成的影响逐渐变小, 在深度约为 1.4 m 处的声波速达到极大值, 约 5.42 km/s, 分析认为, 此位置以后的围岩受扰动的影响减小。图 16 为主洞室②0+190 断面波速图, 平均波速为 4.03 km/s, 波速的稳定性较差, 判断围岩松动范围大于主洞室①0+100 断面。

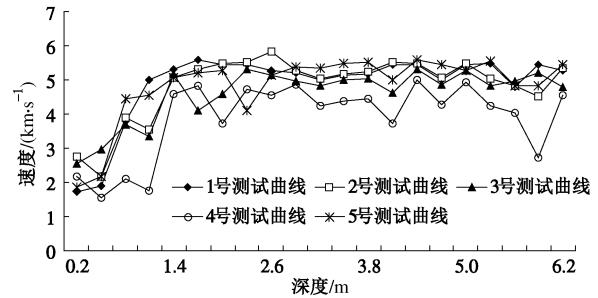


图 15 ①号主洞室 0+100 断面波速图

Fig. 15 Diagram of wave velocity of 0+100 monitoring section of main cavern ①

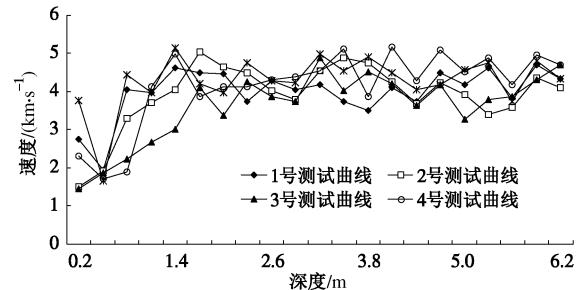


图 16 ②号主洞室 0+190 断面波速图

Fig. 16 Diagram of wave velocity of 0+190 monitoring section of main cavern ②

两断面的松动圈范围如图 17, 18 所示, 主洞室①0+100 断面和主洞室②0+190 断面的围岩松动范围分别为 1.20~1.60 m 和 1.30~1.65 m 左右。

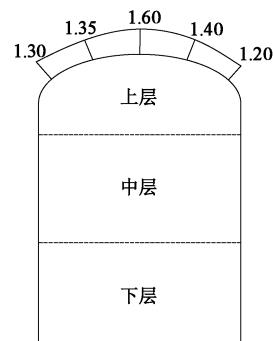


图 17 主洞室①0+100 断面松动圈范围图示

Fig. 17 Graphical representation of loose circle range of 0+100 monitoring section of main cavern ①

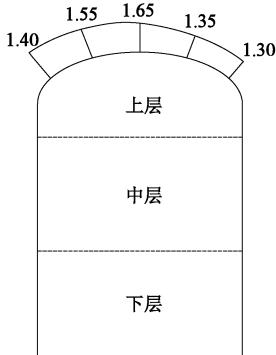


图 18 主洞室②0+190 断面松动圈范围图示

Fig. 18 Graphical representation of loose circle range of 0+190 monitoring section of main cavern ②

为了多角度研究围岩的松动范围, 引入围岩松动圈的理论计算公式<sup>[23]</sup>:

$$R_p = r_0 \left\{ \frac{C_0 \left[ P_0 + \frac{\sigma_c}{K_1} + \frac{K_2 n p'}{K_1 K_3} \right] - \frac{2n P' + (1+\xi)(\sigma_c - \sigma_c^*)}{K_1 K_3}}{P_i + \frac{\sigma_c^*}{K_1}} \right\}^{\frac{1}{k_1}} \quad (2)$$

式中  $r_0$  为隧道开挖半径 (m);  $P_0$  为静水应力场中的原位应力 (MPa);  $P_i$  为单位面积上的支护阻力 (通常取为 0 MPa);  $\sigma_c$  为岩体的极限单向抗压强度 (MPa);  $\sigma_c^*$  为岩体的残余单向抗压强度 (MPa);  $\xi$  为与岩石碎胀性有关的参数, 根据塑性增量理论:

$$\xi = \frac{1 + \sin \varphi'}{1 - \sin \varphi'} \quad , \quad (3)$$

其中,  $\varphi' = (0.7 \sim 0.9) \varphi$ ,  $\varphi$  为岩石的内摩擦角, 而

$$\begin{aligned} K_1 &= K_p - 1, \\ K_2 &= K_p + 1, \\ K_3 &= K_p + \xi, \end{aligned} \quad (4)$$

$$K_p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad , \quad (5)$$

$n$  为岩石的应变软化系数,  $n = M_0/E$ , 其中  $E$  为岩石的弹性模量,  $M_0 = \tan \alpha$  为应变阻尼模量。其中  $\nu$  为泊松比。

$$C_0 = \frac{2}{K_2} \left[ \frac{2n P'}{2n P' + (1+\xi)(\sigma_c - \sigma_c^*)} \right]^{\frac{K_1}{1+\xi}} \quad , \quad (6)$$

$$P' = \frac{1+\nu}{2} [2P_0 \sin \varphi + (1-\sin \varphi)\sigma_c] \quad , \quad (7)$$

松动圈的厚度为

$$L_p = R_p - r_0 \quad . \quad (8)$$

试验测得主洞室②0+190 断面围岩的力学参数如下:  $r_0$  为 20 m,  $P_0$  为 90 MPa,  $P_i$  为 0 MPa,  $\sigma_c$  为 90.74 MPa,  $\sigma_c^*$  为 88.35 MPa,  $\varphi$  为 71.14°,  $n$  为 0.89,  $\nu$  为

0.19,  $E$  为 52.7 GPa, 将以上参数代入式 (2) ~ (8) 计算可得松动圈厚度为 1.63 m。结果显示理论计算值和测量值基本一致, 说明围岩松动圈测试方案合理, 监测值较准确地反映了洞室围岩的松动范围。

### 3.4 锚杆应力

为了监测锚杆加固效果和荷载的形成与变化, 了解锚杆与周边围岩之间的相互作用及锚杆的作用状态, 采用锚杆应力计监测锚杆受力情况。

表 6 锚杆应力计监测断面分布表

Table 6 Proportion of anchor bar stress gauges of monitoring sections

| 围岩等级 | <50 MPa | 50~80 MPa | 80~100 MPa | >100 MPa |
|------|---------|-----------|------------|----------|
|      | MPa     | MPa       | MPa        | MPa      |
| I、II | 7       | 0         | 0          | 0        |
| III  | 11      | 5         | 0          | 0        |
| IV   | 3       | 0         | 1          | 2        |
| 总计   | 21      | 5         | 1          | 2        |

表 6 列出了锚杆应力的分布情况, I、II、III 级围岩中的锚杆应力值大部分小于 50 MPa; IV 级围岩中, 50% 的锚杆应力值大于 80 MPa。图 19 表明监测断面中, 锚杆应力值大部分小于 50 MPa, 共有 21 支, 占总数的 72%。以上数据表明: 随着围岩级别的增加, 锚杆的应力值也随之增加, 围岩的质量会影响锚杆的受力。

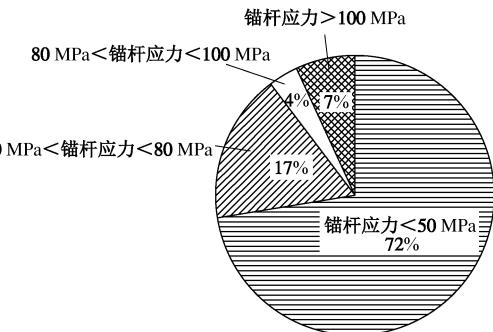


图 19 锚杆应力监测值分布图

Fig. 19 Distribution of anchor bar stresses

由于地下石油洞库的洞室跨度大, 所以左右两侧洞壁之间距离较大, 两侧围岩岩性可能会不一致。图 20 是主洞室①0+292.4 断面的监测数据, 监测洞室中、下层锚杆受力时, 右侧的监测值大于左侧。地质勘查报告中, 主洞室①0+292.4 断面中、下层的右侧边墙部位贯穿有一条宽约 0.5 m 的岩脉, 岩石强度较低, 内部节理发育, 节理面蚀化严重, 有白色高岭土填充, 岩体破碎; 左侧边墙围岩级别为 III1, 只有一条无填充、结合良好的节理。整体上, 左侧边墙围岩质量较好, 锚杆受力较小, 相反, 右侧的围岩差, 锚杆受力大。

洞室高度为 30 m, 坚直方向不同的围岩状况, 同样会引起锚杆应力值的变化。图 21 是主洞室②0+468.9 监测断面锚杆应力图, 上层锚杆应力高于中、下层。地勘报告显示: 上层的围岩整体破碎, 贯穿 3 条较大的破碎带, 破碎带之间节理发育, 部分破碎带内有 0.04~0.07 m 的白色高岭土填充物; 中下层节理也较发育, 但结合良好, 总体上围岩质量较好, 锚杆受力小。

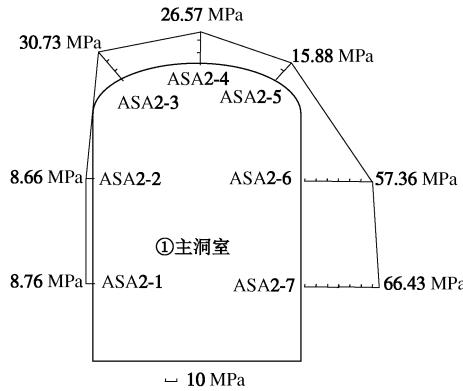


图 20 主洞室①0+292.4 监测断面锚杆应力监测值示意图

Fig. 20 Sketch map of anchor bar stress monitoring values of 0+292.4 monitoring section of main cavern ①

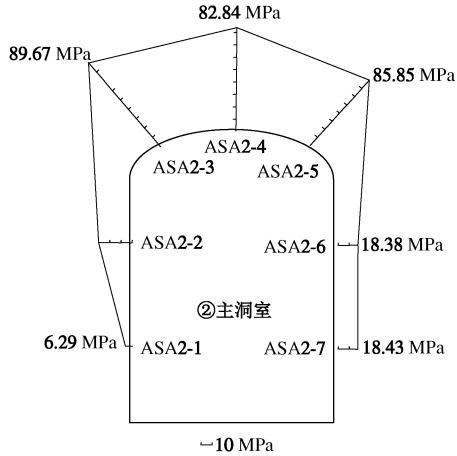


图 21 主洞室②0+468.9 监测断面锚杆应力监测值示意图

Fig. 21 Sketch map of anchor bar stress monitoring values of 0+468.9 monitoring section of main cavern ②

### 3.5 接触应力

监测洞库初期支护喷射混凝土与围岩的径向接触应力, 可用于判断初喷混凝土支护效果及洞库稳定性<sup>[16]</sup>。

图 22 是主洞室③0+570 断面接触应力的典型数据曲线, 监测值在 0.1 MPa 左右。

由于同一条洞室会穿越不同的地质结构<sup>[23-24]</sup>, 同一断面不同位置的岩石性质也会不同, 围岩状况的变化会引起初期支护混凝土喷层内力的明显改变。图 23

中的 TJc7-3 接触应力计监测峰值为 0.421 MPa, 是断面其他测点监测值的 4 倍多, 对比地勘资料发现在 TJa7-3 接触应力计位置的围岩有夹泥, 夹泥层周围有松散破碎带, 破碎带内岩石的挤压产生变形, 造成接触应力增大。

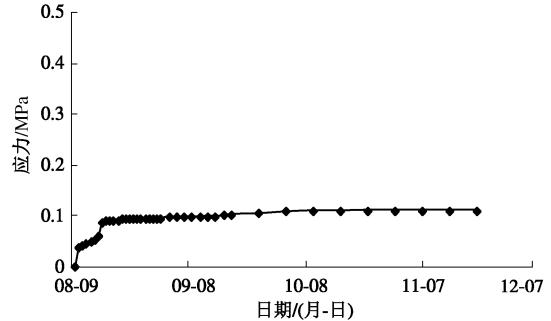


图 22 主洞室③0+570 断面接触应力数据曲线

Fig. 22 Curve of data of contact stress of 0+570 section of main cavern ③

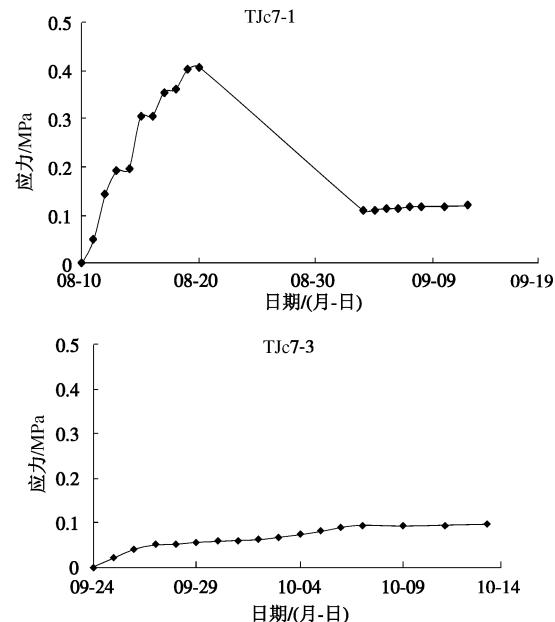


图 23 主洞室⑦0+480 断面接触应力数据曲线

Fig. 23 Curve of data of contact stress of 0+480 section of main cavern ⑦

图 24 为距离 TJc7-3 接触应力计最近的多点位移计 (主洞室⑦0+480 断面) 的数据曲线, 埋设位置见图 23 的位置⑥。由图可看到, 多点位移计的监测值在 8 月变化较大, 后期逐渐降低直至恢复平稳, 与接触应力的变化一致, 说明接触应力可以准确反映洞室的围岩稳定性。

## 4 典型监测断面数据分析

地下水封石油洞库中锚杆应力值最大的断面是主洞室⑧0+425.9 断面, 锚杆应力值为 195.84 MPa,

围岩等级为Ⅳ级。由图 25 所示, 洞室左边墙中、上层锚杆应力值较大, 说明此处围岩变形较大。图 26 是主洞室⑧0+425.9 掌子面现场图, 对比勘察报告可知, 此处有断层带穿过, 断层区周围有较大破碎带, 节理面蚀化严重, 有白色高岭土充填, 结合差, 导致作用于锚杆上的应力较大。

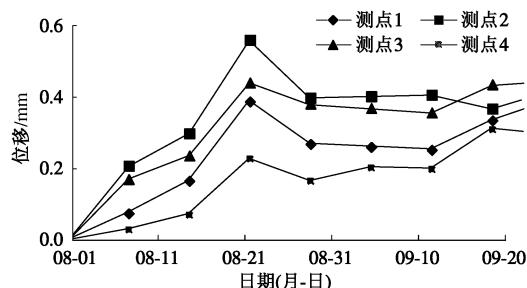


图 24 主洞室⑦0+480 断面 M4C3-3 多点位移数据曲线  
Fig. 24 Curves of data of M4C3-3 of 0+480 section of main cavern ⑦

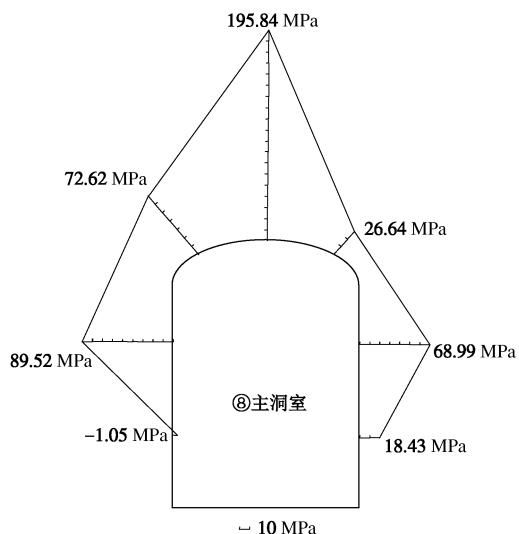


图 25 主洞室⑧0+425.9 监测断面锚杆应力监测值示意图  
Fig. 25 Sketch map of anchor bar stress monitoring values of 0+425.9 monitoring section of main cavern ⑧

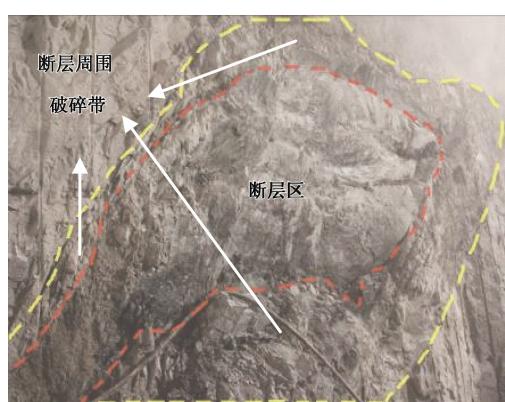


图 26 主洞室⑧0+425.9 掌子面现场图  
Fig. 26 Photo of 0+425.9 tunnel face of main cavern ⑧

图 27 是主洞室②0+293.9 断面右侧边墙图, 节理裂隙发育, 节理切割造成岩体较为破碎, 破碎区域大, 结合差。此断面的内部位移是洞库中最大的, 位移值为 15.068 mm, 由图 28 可以看出主洞室中层右侧围岩位移值大, 说明此处围岩变形大, 稳定性差。另外, 多点位移计 4 个测点的中, 靠近洞室的 3 个监测值较大, 距离洞室最远的测点最小, 与其他 3 个测点的测量值相差较大, 由此可知, 洞室开挖的影响范围基本在以距离洞室最近的测点为圆心、直径 5 m 以内范围。



图 27 主洞室②0+293.9 断面右侧边墙现场图  
Fig. 27 Photo of right side of wall of 0+293.9 monitoring section tunnel face of main cavern ②

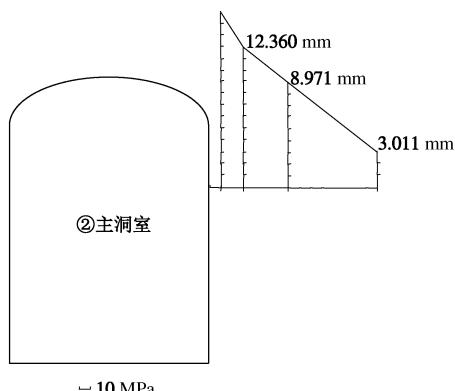


图 28 主洞室②0+293.9 监测断面多点位移监测值示意图  
Fig. 28 Sketch map of monitoring values 0+293.9 monitoring section of main cavern ② by multi-point displacement meter

## 5 结论与建议

本文以国内首个正在实施的大型地下水封石油洞库建设项目为依托, 提出了适用于大型地下水封石油洞库的监测原则与实施方法, 介绍并分析了洞库的监测结果。本文主要研究内容总结如下:

(1) 结合地下水封洞库的工程特征、地质情况和经济适用性, 提出适合于地下水封石油洞库工程的监测方案设计原则和实施方法, 用以确保工程建造和运营安全。

(2) 地下水封石油洞库监测数据显示: 洞室大

部分监测断面的洞周围岩收敛变形、拱顶沉降、内部位移和围岩松动圈分别处于4~8 mm、3~6 mm、4~8 mm 和 0.9~1.8 m 区间范围内, 锚杆应力和接触应力值大部分控制在 50 MPa 和 0.5 MPa 以内。

(3) 监测数据分析结果总体表明: ①该地下水封石油洞库围岩变形和支护受力较小、岩体稳定性良好、设计支护方案合理; ②综合全面的监控量测结果可准确地反映地下水封石油洞库稳定性特征; ③监测数据显示地下水封石油洞库稳定性表现出显著的时空演化特征。

该地下水封石油洞库的监控量测方案整体上是合理的, 监测数据能够准确反映洞库岩体稳定状态和支护受力情况, 因此, 该监测方案可以后类似工程建设提供重要的借鉴; 另外, 从该洞库建设经验看, 洞库稳定性问题主要以局部塌方、掉块和片帮等形式出现, 因此提出相应监测方法并进行预测预警是一个亟待解决的问题。

**致谢:** 本文研究过程中, 得到了黄岛国家石油储备地下水封洞库工程建设项目部、海工英派尔工程有限公司黄岛项目部、中国水电顾问集团中南勘测设计研究院有限公司黄岛项目部、中国安能建设总公司黄岛项目部、北京东方新星石化工程股份有限公司黄岛工程项目部以及清华大学黄岛油库项目部的大力支持与帮助, 在此一并表示感谢。

## 参考文献:

- [1] MOBERG S H. Storage of heavy fuel oil in rock caverns during three decades[C]//International Symposium on Storage in Excavated Rock Caverns. Stockholm, 1977: 117–123.
- [2] KIYOKAWA S. The present state of underground crude oil storage technology in Japan[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1990, 5(4): 343–349.
- [3] NILSEN O. Storage of gases in rock caverns[M]. Rotterdam, Netherlands: A. A. Balkem, 1989.
- [4] LEE Y N, YUN S P, KIM D Y, et al. Design and construction aspects of unlined oil storage caverns in rock[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1996, 11(1): 33–37.
- [5] LEE Y N, SUH Y H, KIM D Y, et al. Stress and deformation behavior of oil storage caverns during excavation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences ISRM International Symposium 36th U.S. Rock Mechanics Symposium, 1997, 34(3/4): 301–305.
- [6] STURK R, STILLE H. Design and excavation of rock caverns for fuel storage—a case study from Zimbabwe[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1995, 10(2): 193–201.
- [7] GNIRK P F, FOSSUM A F. On the formulation of stability and design criteria for compressed air energy storage in hard rock caverns[C]// 14th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Boston, 1979: 23–44.
- [8] 李仲奎, 刘辉, 曾利, 等. 不衬砌地下洞室在能源储存中的作用与问题[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(3): 350–357. (LI Zhong-kui, LIU Hui, ZENG Li, et al. Effect of unlined underground caverns in energy storage and some related problems[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(3): 350–357. (in Chinese))
- [9] 陈祥. 黄岛地下水封石油洞库岩体质量评价及围岩稳定性分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2007. (CHEN Xiang. Evaluation on quality and analysis on stability of adjacent rock mass of the water-sealed underground oil tank in Huangdao[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2007. (in Chinese))
- [10] 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 Hong-bin. Analysis and evaluation of water seal condition and surrounding rock stability of Huangdao water sealed underground petroleum storage caverns in rock[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010. (in Chinese))
- [11] 杨明举, 关宝树. 地下水封储气洞库原理及数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 301–305. (YANG Ming-ju, GUAN Bao-shu. Theoretical and numerical simulation study of underground gas-storage caverns with water curtain[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(3): 301–305. (in Chinese))
- [12] 杨明举, 关宝树. 地下水封裸洞储存LPG耦合问题的变分原理及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 515–520. (YANG Ming-ju, GUAN Bao-shu. Coupling model of underground gas-storage caverns and its application in engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4): 515–520. (in Chinese))
- [13] 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. (LI Shu-cai, PING Yang, WANG Zhe-chao, et al. Assessment of storage caverns based on fluid-solid coupling theory for discrete medium[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(11): 2161–2170. (in Chinese))
- [14] 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(自然科学)

- 学版), 2011, **41**(3): 112 – 117. (WANG Zhe-chao, LI Shu-cai, XUE Yi-guo, et al. Integrity, deformation and stability of a rock mass around underground crude oil storage caverns in containment of groundwater[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2011, **41**(3): 112 – 117. (in Chinese))
- [15] 李仲奎, 周 钟, 汤雪峰, 等. 锦屏一级水电站地下厂房洞室群稳定性分析与思考[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(11): 2167 – 2175. (LI Zhong-kui, ZHOU Zhong, TANG Xue-feng, et al. Stability analysis and considerations of underground powerhouse caverns group of Jinping I hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(11): 2167 – 2175. (in Chinese))
- [16] 冯夏庭, 江 权, 向天兵, 等. 大型洞室群智能动态设计方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(3): 433 – 448. (FENG Xia-ting, JIANG Quan, XIANG Tian-bing, et al. Intelligent and dynamic design methodology of large cavern group and its practice[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(3): 433 – 448. (in Chinese))
- [17] 吴世勇, 任旭华, 陈祥荣, 等. 锦屏二级水电站引水隧洞围岩稳定分析及支护设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(20): 3777 – 3782. (WU Shi-yong, REN Xu-hua, CHEN Xiang-rong, et al. Stability analysis and supporting design of surrounding rocks of diversion tunnel for Jinping hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(20): 3777 – 3782. (in Chinese))
- [18] 王者超, 李术才, 吕晓庆, 等. 地下水封石油洞库施工期围岩完整性参数敏感性分析[J]. 岩土力学, 2011, **32**(增刊 2): 488 – 495. (WANG Zhe-chao, LI Shu-cai, LÜ Xiao-qing, et al. Integrity, deformation and stability of a rock mass around underground crude oil storage caverns in containment of groundwater[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(S2): 488 – 495. (in Chinese))
- [19] 王者超, 李术才, 薛翊国, 等. 大型地下水封石油洞库施工过程力学特性研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(1): 275 – 282. (WANG Zhe-chao, LI Shu-cai, XUE Yi-guo, et al. Mechanical properties of surrounding rocks of large water sealed underground oil storage caverns during construction process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(1): 275 – 282. (in Chinese))
- [20] ZHU W S, SUI B, LI X J, et al. A methodology for studying the high wall displacement of large scale underground cavern complexes and it's applications[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, **23**(6): 651 – 664.
- [21] LI S, WANG Z, PING Y, et al. Discrete element analysis of hydro-mechanical behavior of a pilot underground crude oil storage facility in granite in China[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, **40**(1): 75 – 84.
- [22] 乔丽萍, 刘 杰, 李术才, 等. 地下工程开挖面空间效应特征研究及应用[J]. 岩土力学, 2014, **35**(增刊 2): 481 – 487. (QIAO Li-ping, LIU Jie, LI Shu-cai, et al. Study of spatial effect of excavation face for underground facility and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(S2): 481 – 487. (in Chinese))
- [23] 文竟舟, 张永兴, 王 成. 基于接触应力反分析的隧道初期支护结构内力研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(8): 2467 – 2472. (WEN Jing-zhou, ZHANG Yong-xing, WANG Cheng. Back analysis of internal force of initial support in tunnel based on touch stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(8): 2467 – 2472. (in Chinese))
- [24] 王者超, 李术才, 梁建毅, 等. 地下水封石油洞库渗水量预测与统计[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(8): 1490 – 1497. (WANG Zhe-chao, LI Shu-cai, LIANG Jian-yi, et al. Prediction and measurement of groundwater flow rate of underground crude oil storage caverns[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(8): 1490 – 1497. (in Chinese))