

DOI: 10.11779/CJGE201611013

# 地下石油洞库水封性评价方法体系及应用

王者超<sup>1,2</sup>, 李术才<sup>1</sup>, 乔丽苹<sup>\*</sup>, 毕丽平<sup>1</sup>, 张振杰<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. 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 220116)

**摘 要:** 水封性评价是地下水封石油洞库建设的关键科学问题。围绕地下石油洞库水封性评价, 提出了地下水封石油洞库水封性评价的水文地质概念模型, 总结了水封性评价中地下水、岩体性质与地质环境和洞库工程特征 3 个方面基础数据, 分析了三者之间关系; 分析了经验法、数值分析法和试验法三大类评价方法的特点和对应的适用范围, 提出了评价方法“三适应”选用原则: 评价方法与建设阶段、评价目标和参数要求相适应, 提出了水封性评价流程, 分析了不同评价阶段所应采用评价方法和重点的评价内容; 以具体工程为背景, 介绍了评价方法体系的应用情况, 并着重介绍了经验法、裂隙网络法和现场试验法在水封性评价中的使用情况。研究成果对提高地下水封石油洞库水封性评价水平具有重要参考价值。

**关键词:** 岩石工程; 地下石油洞库; 水封性评价; 经验法; 数值分析; 现场试验

**中图分类号:** TU45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2016)11-2033-10

**作者简介:** 王者超(1980-), 男, 山东高唐人, 博士, 副教授, 主要从事岩体渗流特性与岩土材料流变性质的研究工作。E-mail: wanz@sdu.edu.cn。

## Assessment methods for containment properties of underground crude oil storage caverns and their applications

WANG Zhe-chao<sup>1,2</sup>, LI Shu-cai<sup>1</sup>, QIAO Li-ping<sup>1</sup>, BI Li-ping<sup>1</sup>, ZHANG Zhen-jie<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, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** One of the important scientific issues for the construction of underground storage caverns is the assessment of containment properties of the caverns. It is aimed to develop a system of methods for the assessment of containment properties of the caverns. A conceptual hydrogeological model for the assessment is proposed. The required information on groundwater, rock mass properties and geological conditions and the engineering characteristics of caverns are summarized. The relationship among the three aspects is analyzed. The catalogues, application fields and characteristics of empirical, numerical and experimental methods are analyzed. The principles for the selection of methods are proposed for the assessment. That is, a favorable method is suitable to the construction stage, assessment object and parameter requirements. A procedure of containment property assessment is proposed. The methods and contents for different stages of the assessment are recommended. A case study is performed to show the applicability of the system. The empirical method, discrete fracture network modeling and experimental methods are used to assess the containment properties of the project. This study may provide an important reference for the construction of underground storage caverns with groundwater curtaining system, and a critical benchmark for the study on seepage behaviors of jointed rock mass.

**Key words:** rock engineering; underground oil storage cavern; assessment of containment property; empirical method; numerical simulation; field test

## 0 引 言

石油是国家的经济命脉, 持续稳定的石油供给是经济与社会可持续发展的重要保障条件。国内石油资源不足, 供需矛盾突出, 进口石油依存度不断增大。国家能源局统计数据表明, 从 1993 年起, 中国已经成为石油和石油产品净进口国。2012 年中国石油总消

耗量为  $4.9 \times 10^8$  t, 其中进口量为  $2.7 \times 10^8$  t, 进口依存度为 55%<sup>[1]</sup>。根据中国石油需求增长幅度, 预计到

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579141, 5151101078, 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(SKLGDEK1408)

收稿日期: 2015-05-28

\*通讯作者(E-mail: qiaolp@sdu.edu.cn)

2020年中国石油需求总量将超过  $7 \times 10^8 \text{ t}$ , 其中 2/3 需要依靠进口。与此对比, 中国国内只有不足 40 d 的储备量, 而根据国际能源组织的建议, 石油输入国应保有 90 d 石油进口量的储备, 按此计算 2020 年中国应保有  $1.16 \times 10^8 \text{ t}$  以上的石油储备量, 至少需建设  $1.45 \times 10^8 \text{ m}^3$  储备库。

地下石油储库最早出现于瑞典, 在西班牙内战期间, 瑞典政府为了安全储备军用和民用燃油, 对石油储备方式提出了新的要求, 储存方式从地上转移到地下的洞库中。作为地下储库的一种, 地下水封石油洞库具有地域适应性强、库存规模大、易扩建等优点<sup>[2]</sup>。2003年起, 国家发改委和国家能源局组织有关单位从环保、安全、节约土地资源、降低工程造价等方面, 开展了国内地下岩穴储油库以及花岗岩地下水封储油库的选址、建设方案研究等前期工作。研究表明, 在中国东南沿海可以找到不少适合建设大规模地下储油库的地质构造地点, 上述地点均靠近已建成或规划建设的大吨位进口原油码头及大型石化基地<sup>[5]</sup>。目前, 山东黄岛、辽宁锦州、广东惠州和湛江 4 个国家战略石油储备地下水封石油洞库已相继开工建设。根据中国规划的储备规模, 大约还需修建近 20 座国家石油储备地下水封石油洞库。若将国有大型石油企业和民营企业的商业储备计算在内, 预计未来几十年内将有近百座地下水封石油洞库建成, 由此可以预见中国即将进入大规模修建地下水封石油洞库阶段。

地下水封石油洞库技术是在地下水位以下岩体中由人工挖掘形成的一定容积洞室中储存各种石油产品的技术。地下水封石油洞库的密封性是通过地下水、岩体和水封系统协同工作得以保证。水封性评价是地下水封石油洞库建设的关键科学问题。围绕此问题, 杨明举等<sup>[3-4]</sup>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。李仲奎等<sup>[5]</sup>讨论和分析了不衬砌地下洞室在能源储存中的密封措施及关键指标等问题。许建聪等<sup>[6]</sup>采用有限差分法研究了地下水封储油洞库涌水量。时洪斌等<sup>[7]</sup>依托黄岛地下水封石油洞库, 开展了人工水幕水封效果评价, 并估算了储油洞室渗流量。宋琨等<sup>[8]</sup>采用正交设计方法, 以围岩变形和塑性区面积为对象, 进行了地下水封石油洞库库群优化设计。蒋中明等<sup>[9]</sup>采用 Geoslope 分析了黄岛油库库区地下水位分布特点及变化过程。张振刚等<sup>[10]</sup>开展了汕头丙烷储库三维渗流场分析, 研究了水幕作用及其对储洞周围渗流场的影响; 李术才等<sup>[11]</sup>开展了基于离散介质流固耦合理论的地下水封石油洞库水封性和稳定性评价。

地下水封石油洞库建设是一项复杂的系统工程,

在我国尚属全新的领域, 许多重要的理论方法处于空白状态。笔者所在团队参加了国内第一个大型地下水封石油洞库的建设工作, 在洞库建设过程中, 通过文献查阅、理论分析、数值计算和工程实践检验等方法, 提出了地下水封石油洞库水封性评价方法体系, 并在工程建设中得以应用。本文中, 提出了地下水封石油洞库水封性评价的水文地质概念模型; 总结了经验法、数值分析法和试验法三大类评价方法的特点和适用范围; 提出了评价方法“三适应”选择原则: 评价方法与建设阶段、评价目标和参数要求相适应; 提出了评价流程分析了不同评价阶段所应采用评价方法和重点的评价内容; 以具体工程为背景, 介绍了评价方法体系的应用情况, 并着重介绍了经验法、裂隙网络法和现场试验法在水封性评价中的使用情况。研究成果对提高地下水封石油洞库水封性评价水平具有重要参考价值。

## 1 水封性评价水文地质概念模型

地下水封石油洞库水封性依赖于库区地质环境与洞库工程特征。洞库水封性评价必须依据库区地下渗流场、岩体性质与工程参数等基础数据信息。根据地下水封石油洞库特征, 地下水、岩体性质及赋存环境和工程特征参数均会对洞库水封性产生重要影响。对上述数据信息掌握的准确程度会影响对洞库水封性评价的合理性。图 1 为地下水封石油洞库水封性评价水文地质概念模型。

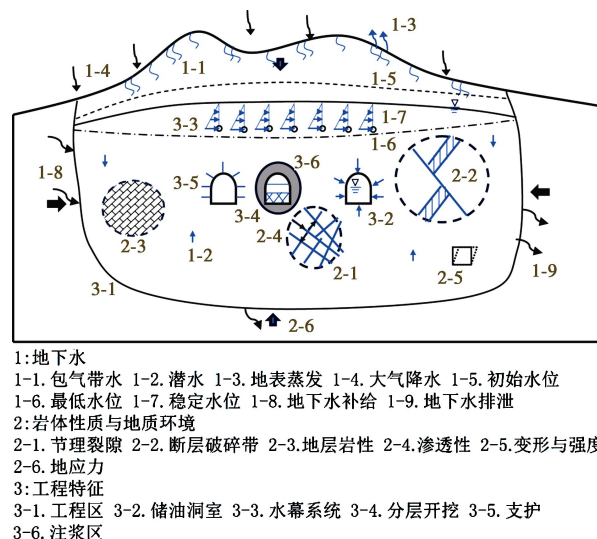


图 1 地下水封石油洞库水封性评价水文地质概念模型

Fig. 1 Conceptual hydrogeological model for assessment of containment properties for underground crude oil storage caverns

地下水是地下水封石油洞库水封性评价的重要因素, 对工程库区地层中地下水流场信息的掌握是进行水封性评价的前提条件。洞库水封性评价需要掌握以下信息: 地下水赋存条件及分布规律、地下水位及动态变化特征和地下水的补给、径流及排泄条件。

岩体地层是实现地下储油的具体载体, 对地层岩体性质与赋存环境信息的掌握是评价洞库水封性能的重要条件。岩体构造、地层岩性、岩体渗透与变形强度特性决定了地层洞室开挖后的响应特征, 而地应力反映了工程岩体所受的应力环境, 这些因素综合决定了工程库区岩体在开挖、施加水幕等外界扰动条件下的响应特征, 对于评价洞库的水封性具有重要的作用。

工程特征参数反映了地下水封石油洞库建设中人的影响。包括工程展布、几何尺寸、水幕系统方案等设计因素和施工组织、开挖与支护系统、注浆效果等施工因素组成的工程因素对地下水封石油洞库水封性同样具有重要影响。

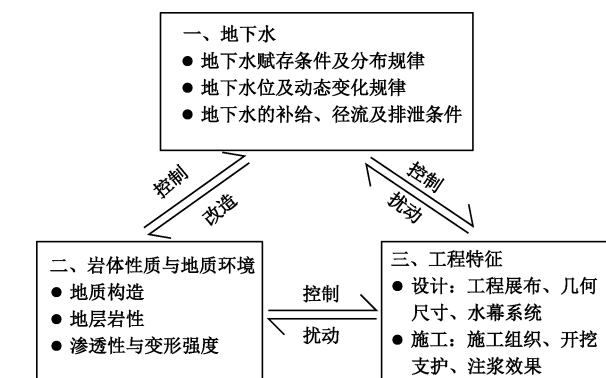


图 2 水封性评价中地下水、岩体性质与地质环境和工程特征之间关系

Fig. 2 Relationship among groundwater, rock mass properties and geological conditions and engineering characteristics for assessment of containment properties

3 种因素相互影响相互制约, 地下水受岩体性质与赋存环境影响, 地下水和岩体性质与赋存环境控制着工程特征因素, 而工程特征因素可以影响地下水和岩体赋存环境。举例来说, 良好的地下水和地层条件允许建设更大容积的洞库、降低工程造价, 而通过设计和施工等手段, 可以改善库区地下水条件和洞库赋存环境。3 种因素之间关系见图 2。

## 2 水封性评价方法体系

### 2.1 水封性评价方法

根据上文水文地质模型, 根据文献调研情况, 目前水封性评价方法可分为 3 大类: 经验法、数值分析法和试验法。表 1 为水封性评价方法列表, 表中还总结了各种方法的适用范围及其特点。

### 2.2 评价方法选择原则

图 3 为地下水封石油洞库水封性评价程序。评价方法选择应遵循与建设阶段、评价目的和参数要求相适应的三适用原则。不同建设阶段, 水封性评价内容不同, 已获得的地质模型参数精确程度不同; 不同评价目的, 水封性评价抽象物理模型不同; 而不同评价方法所需参数要求也不同。水封性评价方法的选用应满足不同建设阶段、不同评价目的和不同参数要求的需求。

### 2.3 评价程序

地下水封石油洞库水封性评价应根据工程建设进度开展, 可分为 5 个阶段。

表 1 水封性评价方法: 类别、适用范围及特点

Table 1 Methods for containment property assessment: catalogues, application fields and characteristics				
类别	方法	适用范围		特点
经验法	地质分析法	初步判断库址区地下水补给、径流和排泄条件, 对洞库稳定地下水位和渗水量进行预测, 对水文地质条件进行宏观评价		主要根据地质条件、工程区降水和地下水情况以及已有类似工程数据进行粗略分析与评价
	工程类比法			
数值法	水动力学法	判断库址区地下水补给、径流和排泄条件, 分析评价较大规模地质构造对洞库水封性影响		主要结合详细勘察阶段地质资料, 建立与工程实际相吻合的水文地质模型, 采用水文地质模型进行分析与评价
	有限单元法	预测洞库整体地下水位变化特征和洞库渗水量大致规模, 分析中等规模地质构造和施工过程等因素对洞库水封性影响		根据详细勘察和施工勘察资料, 结合工程开挖和施工工艺, 采用等效连续介质理论方法进行分析与评价, 可采用有无流固耦合效应两种方法分析。
	离散单元法	预测洞库地下水位变化特征和渗水量规模与分布特征, 分析结构面性质对水封性影响特征, 分析与评价水幕系统效率, 分析局部地下水位变化特征。		根据详细勘察和施工勘察资料, 结合室内结构面性质试验和现场渗透试验, 采用离散介质流固耦合理论进行分析与评价
	裂隙网络法	评价洞库地下水水封条件, 分析不同边界条件下洞库水封条件变化规律		根据施工勘察资料获得结构面几何特征, 根据渗透规律, 获得裂隙网络中水头分布规律, 判断地下水流动规律
试验法	现场监测法	获得洞库地下水位变化特征与洞库渗水量规模和分布规律, 获得水封变化特征与地质条件、施工过程关系。		主要采用观测地下水位、地下水渗透压力、量测洞库渗水量和示踪试验等方法
	水幕试验法	获得水幕系统连通性特征, 提出水幕系统优化方案, 获得洞库地下水位和渗水量规模及分布特征		通过开展水幕注水-回落试验、有效性试验和全面水力试验等方法。
	气密试验法	全面准确获得洞库工作状态条件下洞库密封条件, 获得洞库地下水位和洞库渗水量是否满足设计要求		通过开展洞库整体气密性试验, 分析试验过程中气体压力变化规律, 获得洞库气密性评价

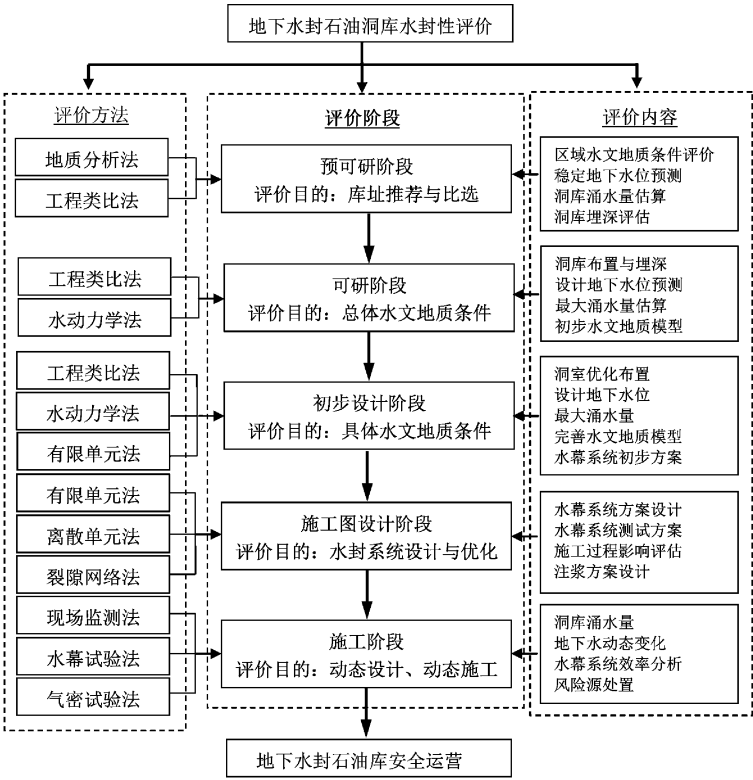


图 3 地下水封石油洞库水封性评价程序

Fig. 3 Procedure for assessment of containment properties

(1) 预可研阶段：该阶段评价目的为库址推荐与比选。评价内容主要为区域水文地质条件评价、稳定地下水位预测、洞库涌水量估算和洞库埋深评估，评价方法主要选用地质分析法和工程类比法。

(2) 可研阶段：该阶段评价目的为库区总体水文地质条件。评价内容主要为洞库布置与埋深、设计地下水位预测、最大涌水量估算和初步水文地质模型，而评价方法主要选用工程类比法和水动力学法。

(3) 初步设计阶段：该阶段评价目的为库区具体水文地质条件。评价内容主要为洞室优化布置、设计地下水位、最大涌水量、完善水文地质模型和水幕系统初步方案，评价方法主要选用工程类比法、水动力学法和有限单元法。

(4) 施工图设计阶段：该阶段评价目的为水封系统设计与优化。评价内容主要为水幕系统方案设计、水幕系统测试方案、施工过程影响评估和注浆方案设计，评价方法主要选用有限单元法、离散单元法和裂隙网络法。

(5) 施工阶段：该阶段评价目的为动态设计、动态施工。评价内容主要有：洞库涌水量、地下水动态变化、水幕系统效率分析和风险源处置；而评价方法主要选用现场监测法、水幕试验法和气密试验法。

同时，根据地下工程建设经验，建立风险管理制度、对风险因素进行风险评估与控制是十分必要的。

水封性评价可结合不同阶段开展<sup>[12]</sup>。

3 工程应用

3.1 工程背景

该大型不衬砌石油储备库地下水封洞库工程是目前国内首个正在实施的大型地下原油储备库建设项目。工程库址区属低山丘陵地貌。洞库山体近东西走向，山脊标高 280~350 m，地形坡度一般为 35°~55°。地面平均标高为 220 m，最高点标高为 350.9 m。储库洞室区呈北偏西方向展布，东西宽 600 m，南北长约 838 m。工程包括地下工程和地上辅助设施两部分，设计库容  $300 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，洞库设计使用年限为 50 a。地下储库由 9 个洞室组成。9 个洞室按南北偏西平行设置，每 3 个主洞室之间通过四条支洞相连组成一个罐体，共分为 3 个洞罐组。洞室设计底板面标高为 -50 m，长度为 500~600 m 不等，设计洞跨 20 m，洞高 30 m，截面形状为直墙圆拱形。洞室壁与相邻施工巷道壁之间设计间距为 25 m，两个洞室之间设计间距为 30 m。

工程库址区主要发育北东走向及近东西向两条断裂带，褶皱构造不发育。断裂仅对库址区选址有影响，对洞库工程建设影响不大。库址区内探明的次级断裂及节理将在洞室开挖前做注浆加固处理，对地下水流动和洞库稳定性影响有限。根据地质勘察报告，库址

区内的地层主要为晚元古界花岗片麻岩, 浅肉红色—浅青灰色, 主要矿物为钾长石、斜长石、石英、角闪石黑云母, 细粒花岗片麻结构, 块状构造, 岩体较破碎—较完整, 占洞库岩体 80%以上, 属坚硬岩。

根据水文地质情况调查, 库区地下水以孔隙潜水和裂隙潜水形式赋存。孔隙潜水赋存于表层第四系松散地层中, 而裂隙潜水可分为浅层的网状裂隙水和深层的脉状裂隙水。孔隙潜水与浅层网状裂隙水接受大气补给, 但由于地势较陡, 降水入渗补给地下水量相当少 (入渗系数仅为 0.073)。深层脉状裂隙水主要赋存于断层破碎带内, 总体水量较少。库区地下水以山脊作为分水岭, 向南北两侧流动。因地下水水力梯度较大, 地下水径流较通畅。因此, 由于缺少稳定的地下水补给来源, 洞库建成后地下水自然补给量十分有限。为确定岩体渗透系数, 详细勘察阶段取用了提水及恢复试验、注水消散试验和压水试验进行测试。试验结果表明, 该区岩体渗透系数在  $5 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-4}$  m/d 之间。多数区域岩体渗透系数在  $1 \times 10^{-4}$  m/d 左右。

在该洞库工程水封性评价中, 采用了上述水封性评价方法体系。各种方法的评价内容及参考文献见表 2。

3.2 经验法

(1) 稳定地下水位

洞库水封条件是确保储存介质不外渗的条件, 一般要求洞库的地下水头压力要大于洞库内压。因此, 这就要求水封洞库必须长期处于地下水位以下一定深度。如何确定多年最低地下水位就显得尤为重要, 并且多数情况下, 取得多年最低水位资料十分困难。因此, 通常把区域地下水排泄基准面作为多年最低地下

水位, 即, 沿海一带可采用最低潮位或平均潮位作为地下水排泄基准面。

水封洞库设计水位是为设计洞库埋深而提供的区域性分布的理论最低地下水位, 它永远低于实测的天然最低地下水位。取区域性地下水排泄基准面作为设计地下水位, 而且所取区域性排泄基准面必须不受天然或人为因素影响而发生变化, 具有长期稳定条件。依据上述原则, 从储油洞室拱顶算起, 洞室距设计稳定地下水位垂直距离按下式计算, 且不小于 20 m<sup>[19]</sup>。

$$H_w = 100p + 15 \quad , \quad (1)$$

式中,  $H_w$  为设计稳定地下水位至洞室拱顶的垂直距离 (m),  $p$  为洞室内的气相设计压力 (MPa)。根据上式, 该地下水封石油洞库气相设计压力为 0.1 MPa, 取稳定地下水位为海平面高程, 则洞室拱顶高程不高于 -25 m 高程。

(2) 涌水量估算

在水封性评价中, 洞库渗水量规模与空间分布特征是一个至关重要方面。只有掌握了洞库的渗水量规模和空间分布特征, 才能有效地开展水封系统设计和制定防渗控渗措施。经验公式法是进行地下工程渗 (涌) 水量初步预测的有效途径, 表 3 列出了涌水量估算常用经验公式。图 4 为经验公式适用条件示意图。表 3 中公式物理量意义如下:  $q$  为洞室涌水量 (m<sup>3</sup>/d);  $k$  为地层渗透系数 (m/d);  $H_w$  为地下水位高程 (m);  $H_{w0}$  为初始地下水位高程 (m);  $H_b$  为地表高程 (m);  $H_d$  为地表与地下水位高程差 (m);  $h_a$  为洞室边界水头高程 (m);  $r$  为洞室半径 (m);  $s$  为地下水位下降量 (m)。

表 2 依托工程水封性评价方法体系<sup>[11-18]</sup>

Table 2 System of assessment methods used in project<sup>[11-18]</sup>

类别	方法	评价内容	参考文献
经验法	地质分析法	初步判断库址区地下水补给、径流和排泄条件, 对洞库稳定地下	本文 3.2 节
	工程类比法	水位和渗水量进行预测, 对水文地质条件进行宏观评价	
数值法	水动力学法	验证库址区水文地质模型, 分析渗流场时空演化特征	文献[3]
	有限单元法	分析有无水幕系统条件下洞库水封条件, 分析不同施工过程对洞库水封性影响	文献[14], [15]
	离散单元法	分析结构面几何和物理性质对水封性影响特征, 分析水幕压力对水封性影响	文献[11], [18]
	裂隙网络法	分析洞库之间水封性	本文 3.3 节
试验法	现场监测法	获得洞库地下水位变化特征与洞库渗水量规模和分布规律, 获得水封性条件变化特征与地质条件、施工过程关系。	文献[16] 本文 3.4 (1) 节
	水幕试验法	分析水幕系统连通性特征, 提出水幕系统优化方案	文献[17]
	气密试验法	全面准确获得洞库工作状态条件下洞库密封条件, 获得洞库地下水位和洞库渗水量是否满足设计要求	本文 3.4 (2) 节

表 3 涌水量估算公式列表<sup>[20-24]</sup>  
Table 3 List of equations for groundwater inflow estimation<sup>[20-24]</sup>

编号	参考文献	表达式	洞室边界条件	示意图
1	文献[20]	$q = \frac{2\pi k H_w}{\ln(2H_w/r)}$	零压力	图 4 (a)
2	文献[21]	$q = 2\pi k \frac{\lambda^2 - 1}{\lambda^2 + 1} \frac{H_w}{\ln \lambda}, \quad \lambda = \frac{H_w}{r} - \sqrt{\left(\frac{H_w}{r}\right)^2 - 1}$	零压力	图 4 (a)
3	文献[22]	$q = \frac{2\pi k (H_w - h_a)}{\ln \frac{H_b + \sqrt{H_b^2 - r^2}}{r}}$	常水头	图 4 (b)
4	文献[23]	$q_1 = \frac{2\pi k (A + H_d)}{\ln \frac{H_b + \sqrt{H_b^2 - r^2}}{r}} \left( A = H_b \frac{1 - \lambda^2}{1 + \lambda^2} \right)$ $q_2 = \frac{2\pi k (-h_a + H_d)}{\ln \frac{H_w + \sqrt{H_w^2 - r^2}}{r}}$	零压力 常水头	图 4 (c) 图 4 (d)
5	文献[24]	$q_1 = \frac{2\pi k (H_{w0} - s)}{\ln(2H_w/r)}$	零压力	图 4 (e)

上述经验公式中假设：①地层是均匀和各向同性的，渗透系数为  $k$ ；②洞室是圆形的，半径为  $r$ ；③地下水流动是稳态的。

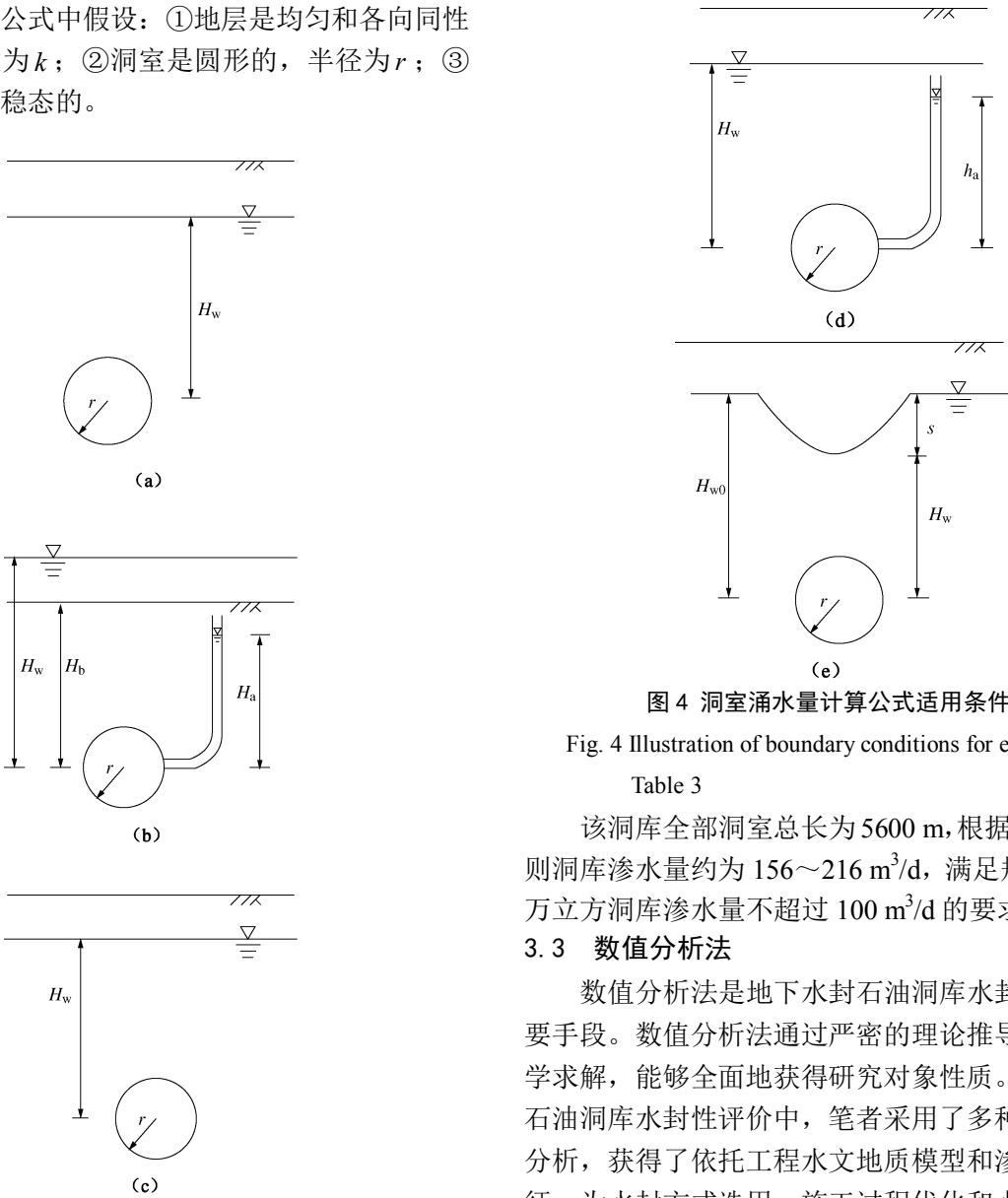


图 4 洞室涌水量计算公式适用条件示意图

Fig. 4 Illustration of boundary conditions for equations in

Table 3

该洞库全部洞室总长为 5600 m, 根据表 4 中数据, 则洞库渗水量约为 156~216 m<sup>3</sup>/d, 满足规范中每 100 万立方洞库渗水量不超过 100 m<sup>3</sup>/d 的要求。

3.3 数值分析法

数值分析法是地下水封石油洞库水封性评价的重要手段。数值分析法通过严密的理论推导、精确的数学求解, 能够全面地获得研究对象性质。在地下水封石油洞库水封性评价中, 笔者采用了多种方法进行了分析, 获得了依托工程水文地质模型和渗流场演化特征, 为水封方式选用、施工过程优化和水幕压力调整



等问题提供了理论依据。

表 4 依托工程渗水量估算

Table 4 Estimated groundwater inflow rates using equations in Table 3					
公式	Harr, 1962	El Tani, 2003	Kolymbas & Wagner, 2007	Park et al., 2008	Moon & Fernandez, 2010
涌水量	0.0387	0.0386	0.0371	0.0346	0.0279

裂隙网络法是计算裂隙岩体渗透性常用的方法在之一。在该方法中，岩体中流体流动主要发生在裂隙网络中，一般假设网络中每条裂隙内的流体流动满足立方定律，根据网络节点处质量守恒定律和边界条件，进而求解整个裂隙网络中流体流速和节点水头。裂隙网络法在模拟裂隙渗流方面具有概念明确、参数少、结果直观等方面优点。本节将介绍采用裂隙网络法分析相邻洞室之间的渗流特征，为洞库水平方向水封性评价提供依据。

在裂隙网络法中，单裂隙中流体流动的立方定律可表示为

$$q = \frac{\gamma b^3 \Delta h}{12 \mu L} \quad (2)$$

式中  $q$  为裂隙流量 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )； $\gamma$  为流体重度 ( $\text{Pa}/\text{m}$ )； $b$  为裂隙隙宽 ( $\text{m}$ )； $\mu$  为流体动力黏度系数 ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )， $\Delta h$  为裂隙两端水头差 ( $\text{m}$ )； $L$  为裂隙长度 ( $\text{m}$ )。

而节点处质量守恒定律可表示为

$$\left(\sum_{j=1}^m q_j\right) + Q_i = 0 \quad (i=1,2,\cdots,n) \quad (3)$$

式中  $m$  为与节点  $i$  相连的裂隙数目， $q_j$  为与节点  $i$  相连的第  $j$  个裂隙单元的流量 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )； $n$  为裂隙网络中节点数； $Q_i$  为节点  $i$  处的源或汇量。将裂隙网络所有节点质量守恒方程联立，并将式 (2) 代入式 (3)，结合边界条件，即可获得求解线性方程组。

图 5 为地下水封洞库水平向水封性计算示意图。洞室 1 和 2 为洞库中多个洞室中相邻的两个，洞室宽度为 20 m，高度为 30 m，洞室间距为 30 m。水幕系统处于洞室上方 25 m 处，其压力水头为 30 m，计算模型下边界取距离底板 95 m 处，其压力水头为 150 m。为简便计算，根据对称性，洞室中轴线为对称轴，为零流量边界。洞壁上压力与储油液面成正比。本文选取两个典型工况计算，两种工况下洞室 2 液面高度均为 0，工况 1 中洞室 1 液面为 10 m，而工况 2 中洞室 1 液面为 20 m。裂隙网络中裂隙分布特征根据地质调查结果设定。

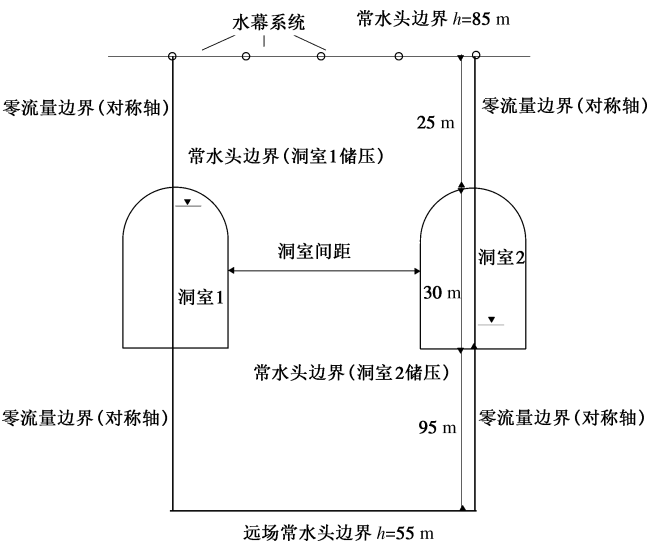


图 5 地下水封洞库水平向水封性计算示意图

Fig. 5 Illustration of problem for assessment of containment properties in horizontal direction

图 6 为采用裂隙网络法计算结果。图 6 (a) 为液位差为 10 m 时裂隙网络中流体流动方向示意图，从图中看，洞室 1 和洞室 2 洞壁节点处流体流动方向均指向洞内，即地下水流入洞室，因此两个洞室水封性均得到了保证。图 6 (b) 为液位差为 20 m 时裂隙网络中流体流动方向示意图，图中显示，由于洞室 1 和洞室 2 液位差较大，洞室 1 底板处节点流动方向指向洞外，且沿裂隙通过洞室间岩柱，流入了洞室 2，出现了 3 个泄露路径，在此条件下两个洞室间密封性将失效。

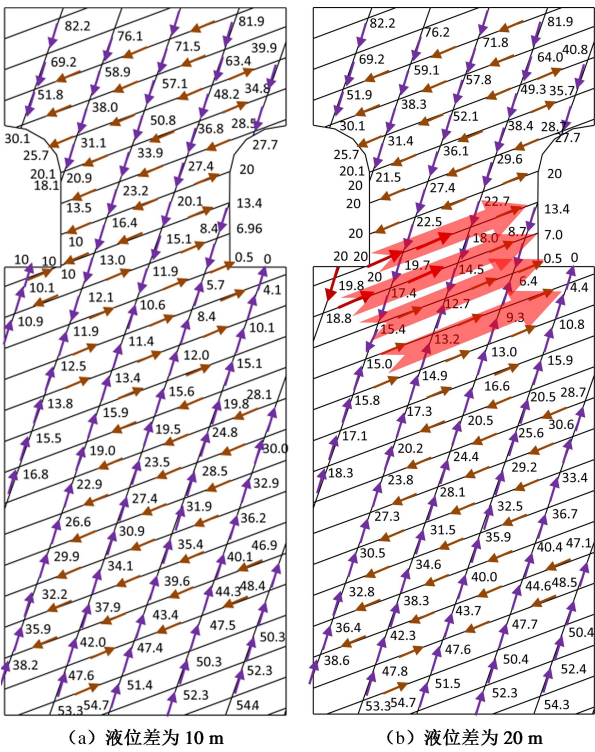


图 6 相邻洞室液位差为 10 m 和 20 m 时岩柱中流动矢量方向

Fig. 6 Fluid flow vectors in rock mass with differential heights of 10 and 20 m in neighboring caverns

3.4 现场试验法

现场试验是水封性评价的重要方法，本节着重介绍现场监测法和气密试验法，其他方法参考表 2 中所列文献。

(1) 现场监测法

现场监测法是通过监测施工运营过程中地下水水位、水幕系统供水量和岩体中渗透压力等量的变化特征，获得洞库水封条件变化规律，从而评价洞库水封性的一种方法。现场监测真实反映了洞库水封特征，能及时发出风险警告，通过动态设计动态施工，降低水封失效概率，具有不可替代的作用。本节将以依托工程钻孔水位变化为例，说明现场监测法在水封性评价中的应用。

图 7 为钻孔 ZK003 水位变化历程曲线。该钻孔与洞库洞室、巷道、水幕水力联系紧密，在施工过程中钻孔水位多次下降，反映了施工对洞库水封性的影响。图 8 为钻孔平面位置示意图。与该钻孔可能存在水力联系的分别为#2 施工巷道、#9 主洞室、#1 水幕巷道和 C2 区水幕孔。根据水位变化曲线特征，可分为 4 个阶段：①第 1 阶段（2010 年 3 月—2012 年 5 月）：由于#2 施工巷道施工，形成了临空面，该阶段水位高程从近 100 m 下降至 60 m；②第 2 阶段（2012 年 5 月—2012 年 7 月）：由于 C2 区水幕孔造孔，在水幕高程附近岩体渗透性大幅提高，引起了钻孔水位从 60 m 下降至 28 m。期间由于水幕孔注水，水位时有波动；③第 3 阶段（2012 年 9 月—2013 年 8 月）：自 2012 年 9 月起，C2 区水幕造孔完毕，水幕系统稳定供水，而此时#9 主洞室上层处于开挖状态，水幕系统供水与#9 主洞室上层渗水处于平衡状态；④第 4 阶段（2013 年 9 月—2013 年 11 月）：在此期间，钻孔增加了套管保护，使得钻孔与水幕系统失去水力联系，而同时洞室下层开挖揭露底板存在渗水现象，使得水位从 20 m 降低到-45 m。严重威胁着洞库水封性。

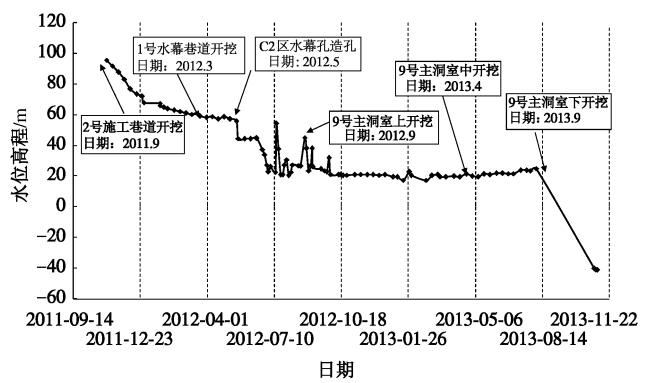


图 7 钻孔 ZK003 水位变化历程曲线

Fig. 7 Variation of groundwater table with time at borehole ZK003

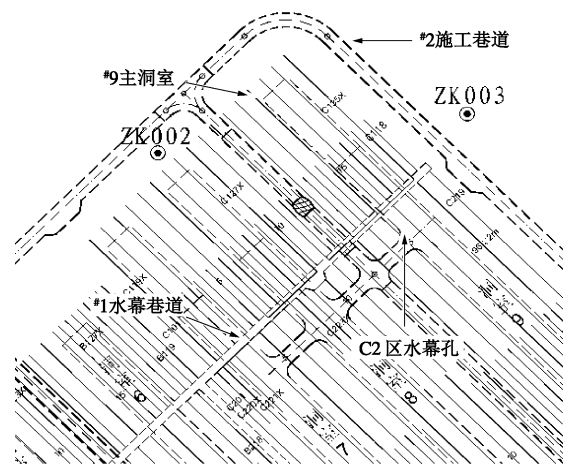


图 8 地下结构空间关系平面示意图

Fig. 8 Illustration of underground structures around borehole ZK003

此后，通过示踪试验，获得了洞内渗透情况，开展了注浆和钻孔修复等措施，使得钻孔水位上升至 30 m 高程。

(2) 气密试验法

气密性试验是地下水封石油洞库施工验收的重要组成部分。气密性试验通过观测注入洞室内的压缩气体压力和温度变化情况，计算获得洞库是否满足水封条件。气密性试验前，需要对洞库整体情况进行检查，确保竖井、电缆井等已密封，且水幕系统已按设计要求施加压力。试验过程中，气体体积、压力和温度相互影响，且洞库体积较大，因此需要较长时间的试验时间。试验过程中，需要对测得的物理量进行修正与分析。

图 9 为某洞罐温度 - 时间关系，试验一般分为 3 个阶段：①压缩阶段：在此阶段，压缩空气不断注入洞罐。由于压缩气体的注入，气体不断被压缩，洞罐内气体压力不断上升，而气体温度下降。②稳压阶段：在此阶段，洞罐内气体压力已达到设计要求，但由于温度逐渐下降，需要不断补充压缩空气以维持气体压力。③试验阶段：经过稳压阶段，其他压力和温度相对稳定，可以进入洞罐气密性试验阶段。在此阶段，通过传感器不间断测量，获得洞罐内气体压力和温度值。

图 10 为试验阶段洞罐内气体压力与时间关系曲线。图 10 中还给出了满足气密性试验要求的允许气体压力变化值范围。允许气体压力变化值通过试验过程中压力、温度和体积测量的不确定性估计。由于洞罐内气体温度变化、气体溶解等因素，需要采用对实测压力进行修正。图 10 中显示，在气密性试验过程中，所测得气体压力变化值在允许变化值范围内，因此洞库的气密性可以得到保障。



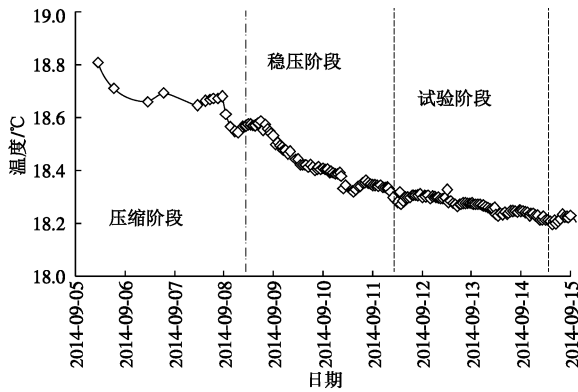


图 9 某洞罐气密性试验中温度 - 时间关系

Fig. 9 Variation of temperature with time in caverns

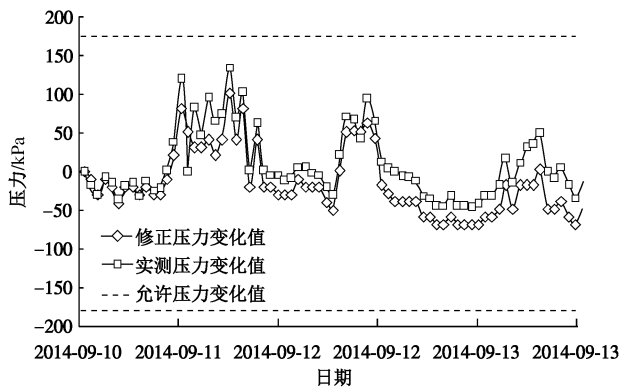


图 10 试验阶段洞罐内气体压力 - 时间关系曲线

Fig. 10 Pressure change-time relationship in caverns

## 4 结 论

地下水封石油洞库具有地域适应性强、库存规模大、易扩建等优点, 水封性评价是地下水封石油洞库建设的关键科学问题。

(1) 提出了地下水封石油洞库水封性评价的水文地质概念模型, 总结了水封性评价中地下水、岩体性质与地质环境和洞库工程特征 3 个方面需掌握数据基础, 分析了三者之间关系。

(2) 总结了经验法、数值分析法和试验法 3 大类评价方法的特点和适用范围, 提出了评价方法“三适应”选择原则: 评价方法与建设阶段、评价目标和参数要求相适应, 提出了评价流程, 分析了不同评价阶段所应采用评价方法和重点的评价内容。

(3) 以具体工程为背景, 介绍了评价方法体系的应用情况, 并着重介绍了经验法、裂隙网络法和现场试验法在依托工程水封性评价中的使用情况。

### 参考文献:

[1] 田春荣. 2012 年中国石油和天然气进出口状况[J]. 国际石油经济, 2013, **21**(3): 44 - 55. (TIAN Chun-rong. Analysis of oil and gas import and export situations of China in 2012[J].

International Petroleum, 2013, **21**(3): 44 - 55. (in Chinese))

[2] 王梦恕, 杨 森. 地下水封岩洞油库是储存油品的最好型式[C]// 中国土木工程学会第十届隧道及地下工程分会第十三届年会. 北京, 2004. (WANG Meng-shu, YANG Sen. Underground rock caverns with water curtain is the best option for oil storage[C]// Proceedings of 13rd Annual Conference of Tunneling and Underground Engineering Branch of China Civil Engineering Society. Beijing, 2014. (in Chinese))

[3] 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))

[4] 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))

[5] 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))

[6] 许建聪, 郭书太. 地下水封洞库围岩地下水渗流量计算[J]. 岩土力学, 2010, **31**(4): 1295 - 1302. (XU Jian-cong, GUO Shu-tai. Seepage discharge calculation of surrounding rock groundwater in rock caverns sealed oil storage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(4): 1295 - 1302. (in Chinese))

[7] 时洪斌, 刘保国. 水封式地下储油洞库人工水幕设计及渗流量分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(1): 130 - 137. (SHI Hong-bin, LIU Bao-guo. Design and seepage discharge analysis of artificial water curtain for water sealed underground petroleum storage caverns in rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(1): 130 - 137. (in Chinese))

[8] 宋 琨, 晏鄂川, 杨 举, 等. 基于正交设计的地下水封洞库群优化[J]. 岩土力学, 2011, **32**(11): 3503 - 3507. (SONG Kun, YAN E-chuan, YANG Ju. et al. Based on orthogonal design to optimize water sealed underground oil storage caverns[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(11): 3503 - 3507. (in Chinese))

[9] 蒋中明, 冯树荣, 曹 铃, 等. 水封油库地下水动态变化

- 特性数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(11): 1780 - 1785. (JIANG Zhong-ming, FENG Shu-rong, ZENG Ling et al. Numerical study on variation features of water table in area of underground rock cavern for oil storage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(11): 1780 - 1785. (in Chinese))
- [10] 张振刚, 谭忠盛, 万姜林, 等. 水封式 LPG 地下储库渗流场三维分析[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(3): 331 - 335. (ZHANG Zhen-gang, TAN Zhong-sheng, WAN Jiang-lin, et al. Three-dimensional seepage analysis of underground LPG storage with water curtain[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(3): 331 - 335. (in Chinese))
- [11] 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): 1 - 11. (LI Shu-cai, PING Yang, WANG Zhe-chao, et al. Assessments of containment and stability of underground crude oil storage caverns by discrete element method of fluid-solid coupling theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(11): 1 - 11. (in Chinese))
- [12] 王者超, 陆宝麒, 李术才, 等. 地下水封石油洞库施工期安全风险评估研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(6): 1057 - 1067. (WANG Zhe-chao, LU Bao-qi, LI Shu-cai, et al. Risk assessment for an underground crude oil storage facility with water-curtaining system during construction phase[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(6): 1057 - 1067. (in Chinese))
- [13] 李术才, 张 立, 马秀媛, 等. 大型地下水封石油洞库渗流场时空演化特征研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(7): 1979 - 1986. (LI Shu-cai, ZHANG Li, MA Xiu-yuan, et al. Space-time evolution behavior of seepage field around a large underground petroleum storage caverns with groundwater curtaining[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **43**(7): 1979 - 1986. (in Chinese))
- [14] 王者超, 李术才, 乔丽苹, 等. 大型地下石油洞库自然水封性应力-渗流耦合分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(8): 1535 - 1543. (WANG Zhe-chao, LI Shu-cai, QIAO Li-ping, et al. Assessment of natural containment property of an underground crude oil storage caverns using fluid flow-stress coupling method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(8): 1535 - 1543. (in Chinese))
- [15] 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))
- [16] 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))
- [17] 王者超, 李术才, 薛翊国, 等. 地下水封石油洞库水幕系统设计原则与连通性判断方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(2): 276 - 286. (WANG Zhe-chao, LI Shu-cai, XUE Yi-guo, et al. Design principles and inter-connectivity determination method of groundwater curtaining system for underground crude oil storage caverns[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(2): 276 - 286. (in Chinese))
- [18] 平 洋, 王者超, 李术才, 等. 裂隙随机分布条件下地下石油洞库水封性评价[J]. 岩土力学, 2014, **35**(3): 811 - 819. (PING Yang, WANG Zhe-chao, LI Shu-cai, et al. Water seal effect evaluation of underground crude oil storage caverns around rock mass with random joints[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(3): 811 - 819. (in Chinese))
- [19] SY/T 0610—2008 地下水封洞库岩土工程勘察规范[S]. 2008. (SY/T 0610—2008 Standard for underground water enclose cavern investigation of geotechnical engineering[S]. 2008. (in Chinese))
- [20] HARR M E. Ground water and seepage[M]. New York: McGraw Hill, 1962: 249 - 264.
- [21] TANI El M. Circular tunnel in a semi-infinite aquifer[J]. Tunnelling Underground Space Technol, 2003, **18**: 49 - 55.
- [22] KOLYMBAS D, WAGNER P. Groundwater ingress to tunnels—The exact analytical solution[J]. Tunnelling Underground Space Technol, 2007, **22**: 23 - 27.
- [23] PARK K, OWATSIRIWONG A, LEE J. Analytical solution for steady-state groundwater inflow into a drained circular tunnel in a semi-infinite aquifer: A revisit[J]. Tunnelling Underground Space Technol, 2008, **23**: 206 - 209.
- [24] MOON J, FERNANDEZ G. Effect of excavation-induced groundwater level drawdown on tunnel inflow in a jointed rock mass[J]. Eng Geol, 2010, **110**: 33 - 42.