

DOI: 10.11779/CJGE201506012

地下水封石油洞库施工期安全风险评估研究

王者超¹, 陆宝麒², 李术才¹, 邱道宏¹, 乔丽萍¹, 于峰², 毕丽平¹

(1. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061; 2. 黄岛国家石油储备基地有限责任公司, 山东 青岛 266426)

摘要: 地下水封石油洞库建设具有投资大、无成熟设计施工规范、不确定因素多等特点, 建设过程中存在着一定安全风险, 开展地下水封石油洞库施工期安全风险评估研究具有重要意义。针对地下水封石油洞库施工期安全风险, 从洞库稳定性与水封性两个方面, 开展了洞库施工期安全风险评估研究, 结合中国首座大型地下水封石油洞库工程对研究结论进行了验证。研究中, 开展了地下水封石油洞库风险因子识别, 进行了风险因子重要性和引发功能失效概率调查; 采用模糊数学方法获得了风险因子模糊权重集和模糊评价集, 得到了风险因子影响程度排序; 总结了某地下水封石油洞库建设中典型稳定性和水封性风险事故, 分析了事故发生原因, 并与上文所得风险因子影响程度进行了对比验证。研究结果不但为提高地下水封石油洞库风险管理水平提供支撑, 而且还可丰富地下工程安全风险评估研究内容。

关键词: 岩石工程; 地下水封石油洞库; 施工期; 风险评估; 稳定性; 水封性; 风险因子; 模糊分析

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)06-1057-11

作者简介: 王者超(1980-), 男, 山东高唐人, 博士, 副教授, 主要从事岩土力学与工程教学与科研工作。E-mail: qiaolp@sdu.edu.cn。

Risk assessment for an underground crude oil storage facility with water-curtingaining system during construction phase

WANG Zhe-chao¹, LU Bao-qi², LI Shu-cai¹, QIU Dao-hong¹, QIAO Li-ping¹, YU Feng², BI Li-ping¹

(1. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Huangdao Oil Reserve Base

Company Limited, Qingdao 266426, China)

Abstract: The construction of underground oil storage facility with water-curtingaining is characterized by large investment, lack of mature design and construction specifications and many uncertain factors, which will induce risks for the construction. It is very important to assess the risks involved in the construction of such facilities. In this study, the risk assessment is performed for both the stability and containment properties for the facilities, which are the critical concerns. The assessment results are compared with the practical experience in the first large underground oil storage facility in China. The risk sources for the stability and containment properties are identified. A survey on the significance and probability of risk resources is performed. Using the fuzzy mathematical theory, the fuzzy weight set of each risk source and fuzzy evaluation set are obtained, and the rating of the influence of each risk source is determined. The typical accidents of instability and loss of containment property during construction of Huangdao underground oil storage facility are introduced. The causes of the accidents are analyzed and compared with the risk sources rating results. The research can be helpful for the risk management and mitigation for such facilities and for enriching the assessment methods and scope of underground engineering risk assessment.

Key words: rock engineering; underground crude oil storage cavern; construction phase; risk assessment; stability; containment property; risk source; fuzzy analysis

0 引言

中国国家安全、经济发展和社会稳定离不开稳定的能源供应。建立国家石油储备是实现能源稳定安全供应的有效手段。由于具有安全性能高、成本低、环保等优点, 地下水封石油储库已成为中国战略石油储备的一种重要方式。

根据世界各国地下工程的建设经验, 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^[1]。地下水封石洞油库是利用岩体密封性进行石油储备的一种方式。地下水封石油洞库是通过人工在地

基金项目: 国家自然科学青年基金项目(51309145, 41202205); 教育部博士点基金(20120131120038); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金(BS2013NJ018); 山东大学自主创新基金项目(2012TS058)

收稿日期: 2014-06-20

下岩体中开挖形成的，其功能的实现建立在以下两个条件：①密封性，保证储存介质不泄露；②稳定性，保证储存空间安全。作为中国石油战略储备的一种新方式，由于地下水封石油洞库具有规模大、开挖面多、交叉作业频繁、地下水位控制要求严格等特点^[2-5]，且其功能的实现不但取决于地下结构的稳定性，更取决于洞库水封性，因此开展地下水封石油洞库施工期风险评估研究具有重要的理论意义与应用价值。

在地下工程风险评估方面，Einstein^[6]分析了岩石工程中的风险来源。范益群等^[7]以可靠度理论为基础，提出了地下结构的抗风险设计概念。黄宏伟等^[8]开展了在地铁建设和运营阶段的风险管理研究，给出了地铁不同阶段中的风险因素、分析和控制的整体思路。杨林德等^[9]用可靠度理论对隧道管片构件耐久性失效风险进行了研究。You 等^[10]对地下洞室的风险可靠度进行了分析研究。为规范地铁及地下工程建设风险管理，中国土木工程学会和同济大学制定了地铁及地下工程建设风险管理指南。钱七虎等^[11]全面论述了地下工程安全风险管理的现状和存在的问题，并针对中国安全管理中存在的问题提出了建议。胡元鑫等^[12]提出施工阶段的残余风险可利用监控量测进行管理和控制。李媛等^[13]建立了盐岩地下油气储库运营期库群破坏、油气渗漏、地表沉降的故障树模型，获得了影响盐岩油气储库运营安全的主要风险因子。Brown^[14]总结了岩石地下工程风险评估和管理方法，并提出了地下工程风险评估发展方向。姜彦彦^[15]在现场监测基础上开展了地下水封石油洞库施工期风险评价与控制研究。陆宝麒等^[16]介绍了中国首个大型地下水封石油洞库风险管理经验。上述研究发展了地下工程风险评价理论和方法，全方位提升了地下工程安全风险管理研究和管理水平。

具体到地下工程风险管理，已有研究多针对由于不确定因素引起的隧道等地下工程稳定性风险，而针对大型地下洞室群施工期安全风险研究并不多见。地下水封油库具有的大规模、立体开挖、交叉作业和水位调控等特征，使得地下水封石油洞库风险评估具有独特性。本研究中，笔者针对地下水封石油洞库施工期安全风险，从洞库稳定性与水封性两个方面，开展了洞库施工期安全风险评估研究，并结合中国首座大型地下水封石油洞库工程对研究结论进行了验证。研究中，开展了地下水封石油洞库风险因子识别，进行了风险因子重要性和发生概率调查；采用模糊数学方法，获得了各风险因子模糊权重集和模糊评价集，得到了各风险因子影响程度排序；介绍了某地下水封石

油洞库建设中典型稳定性和水封性风险事故，分析事故发生的原因，对上文所得风险因子影响程度进行验证。研究结果可为提高地下水封石油洞库风险管理水平和降低工程建设风险提供有益支撑，并可进一步完善地下工程安全风险评估方法、丰富地下工程安全风险管理内容。

1 风险因子辨识

工程风险是指工程项目在规划、设计、施工及运营期等各个阶段可能遇到的不安全因素。风险的概念包括两个重要组成部分，即风险事件发生的可能性及事件潜在的风险损失。通常风险函数可定义如下^[7]：

$$R = f(p, c) \quad , \quad (1)$$

式中， R 为风险值， f 为该风险事件可能出现各类风险事故的概率， c 为该风险事件出现各类风险事故的后果指数。具体到地下水封石油洞库，在洞室正常施工过程中，如果某种因素的存在足以导致承险体系统发生各类直接或间接损失的可能性，那么就称存在风险，而风险所引发的致使岩体整体或局部失稳、水封性能失效的后果就称为风险事故。

地下水封洞库工程施工期间，洞库稳定性和水封性都存在大量不确定因素。由于这些因素的存在，使得工程可能发生各类风险事故。一旦发生事故，就可能对整个工程安全、进度、质量和周围环境等造成重大影响。风险辨识是工程风险管理的重要内容，是工程风险管理系统的基础。结合地下工程建设实际情况，一般按照工程进度划分为 5 个阶段，包括：规划阶段、工程可行性研究阶段、设计阶段、招投标阶段和施工阶段^[7]。本研究主要针对施工阶段洞库稳定性和水封性风险管理相关内容，对风险因子进行辨识。

从技术角度，施工期安全风险主要来源于设计、施工、勘察等技术环节。在系统分析施工期安全风险类型、发生原因和系统筛选基础上，综合国内外学者的理论研究和意见咨询，根据工程建设实际情况，辨识出地下水封石油洞库施工期安全主要风险因子。表 1、2 分别给出了洞库稳定性和水封性风险因子。

表 1 洞库施工期稳定性风险因子详情表

Table 1 Risk sources for stability of caverns during construction

风险来源	主要风险因子
结构	洞室形状、洞室埋深、洞室尺寸、洞室轴线方向、岩柱厚度等
施工	开挖方式、爆破方案、锚杆布设方式、喷混凝土厚度、支护时机等
地质	地应力、岩性、结构面密度、优势结构面产状、岩块强度、断层破碎带等

表2 洞库施工期水封性风险因子详情表

Table 1 Risk sources for containment property of caverns during construction

风险来源	主要风险因子
结构	库址区降水量、洞室埋深、水幕巷道布置、水幕孔布置、水幕注水压力等
	爆破方案、锚杆布设方式、喷混厚度、注浆效果等
施工	
地质	水位、结构面密度、优势结构面产状、结构面张开度、断层破碎带等

2 风险因子重要性与发生概率

确定风险因子的重要性与发生概率是风险分析与评价工作中的重要内容之一。对地下工程施工期安全风险评价而言, 由于地质条件的不确定性, 引起了设计与施工技术方案的不确定性, 因此施工期通常仍然存在风险。由于地下水封石油洞库建设在中国刚刚起步, 目前相关风险理论研究还不充分。为了评价风险因子的重要性与发生概率, 本文开展了专家调查并进行分析。在调查中, 根据上节已识别的风险因子, 根据稳定性和水封性风险评价特征, 设计了风险因子调查表, 邀请了从事地下水封石油洞库勘察、设计、施工、科研的相关人员, 根据各自专业知识和经验, 对各个风险因子的重要性及发生概率做出模糊判断。调

查表中, 将各个风险因子重要性分成了“非常重要、重要、一般和不重要”4个重要性级别, 将各个风险因子引发洞室失稳和水封失效的概率分成了“极高、高、一般和不高”4个级别。

经搜集整理, 筛选出有效调查答卷27份, 其中, 勘察技术人员7份、设计技术人员4份、施工技术人员10份、科研人员6份。表3为稳定性风险因子重要性和引发洞室失稳概率统计表, 表4为水封性风险因子重要性和引发水封失效概率统计表。图1为各个稳定性风险因子重要性统计图, 图2为各个稳定性风险因子引发洞室失稳概率情况统计表。图3为各个水封性风险因子重要性统计图, 图4为各个水封性风险因子引发水封失效概率情况统计表。

从表3、4和图1~4中看, 对于稳定性而言, 洞室形状、洞室尺寸、爆破方案和支护时机等结构施工因素风险因子, 优势结构面产状和断层破碎带等地质因素风险因子重要性较高; 而洞室尺寸、支护时机等设计施工因素风险因子, 断层破碎带等地质因素风险因子引发洞室失稳的概率较高。对于水封性来讲, 水幕巷道布置和水幕孔布置等结构施工因素风险因子, 结构面密度和断层破碎带等地质因素风险因子重要性较高; 而水幕巷道布置、水幕孔布置和注浆效果等结构施工因素风险因子, 断层破碎带和结构面密度等地质因素风险因子引发水封失效的概率较高。

表3 稳定性风险因子重要性和引发洞室失稳概率统计表

Table 3 Statistics of significance and probability of risk sources for stability

稳定性风险因子	重要性				引发洞室失稳概率			
	非常重 要(B_1^Z)	重 要(B_2^Z)	一 般 (B_3^Z)	不重 要 (B_4^Z)	极 高 (B_1^G)	高 (B_2^G)	一 般 (B_3^G)	不 高 (B_4^G)
结 构 因 素	洞室形状(U_1^w)	9	14	4	0	5	16	5
	洞室埋深(U_2^w)	5	15	7	0	3	16	7
	洞室尺寸(U_3^w)	9	13	5	0	7	13	6
	洞室轴线方向(U_4^w)	5	14	8	0	3	16	7
	岩柱厚度(U_5^w)	6	11	10	0	5	12	8
施 工 因 素	开挖方式(U_6^w)	3	16	8	0	3	12	11
	爆破方案(U_7^w)	8	15	4	0	5	16	5
	锚杆布设方式(U_8^w)	6	16	5	0	5	16	4
	喷混厚度(U_9^w)	3	11	9	4	2	7	11
	支护时机(U_{10}^w)	8	12	7	0	8	9	7
地 质 因 素	地应力(U_{11}^w)	4	20	3	0	4	17	6
	岩性(U_{12}^w)	8	16	2	1	7	14	3
	结构面密度(U_{13}^w)	8	14	5	0	8	10	9
	优势结构面产状(U_{14}^w)	10	13	4	0	9	10	8
	岩块强度(U_{15}^w)	8	15	4	0	9	10	7
	断层破碎带(U_{16}^w)	17	8	2	0	18	6	3

表 4 水封性风险因子重要性和引发水封失效概率统计表

Table 4 Statistics of significance and probability of risk sources for containment property

水封性风险因子	重要性				引发水封失效概率			
	非常重 要(B_1^S)	重 要(B_2^S)	一 般 (B_3^S)	不重 要 (B_4^S)	极高 (B_1^G)	高 (B_2^G)	一 般 (B_3^G)	不高 (B_4^G)
结构因素	库址区降水量(U_1^S)	6	10	11	0	3	11	9
	主洞室埋深(U_2^S)	6	16	5	0	3	13	9
	水幕巷道布置(U_3^S)	12	11	2	2	9	13	3
	水幕孔布置(U_4^S)	11	9	6	1	8	15	4
	水幕注水压力(U_5^S)	5	20	1	1	3	21	0
施工因素	锚杆布设方式(U_6^S)	2	7	11	7	1	4	13
	爆破方案(U_7^S)	5	6	11	5	4	2	13
	注浆效果(U_8^S)	7	15	4	1	7	12	5
	喷混厚度(U_9^S)	0	6	18	3	0	3	18
地质因素	水位(U_{10}^S)	6	17	4	0	3	19	5
	结构面密度(U_{11}^S)	9	9	9	0	7	11	7
	结构面张开度(U_{12}^S)	7	13	7	0	5	13	8
	优势结构面产状(U_{13}^S)	3	11	13	0	2	14	9
	断层破碎带(U_{14}^S)	12	11	4	0	10	13	2

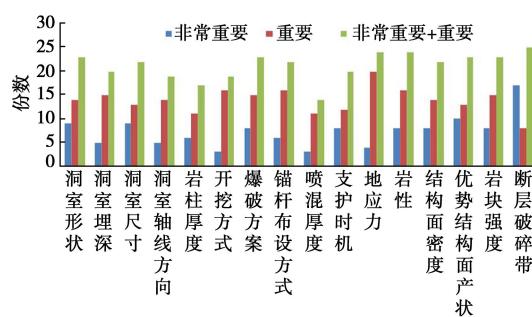


图 1 稳定性风险因子重要性统计图

Fig. 1 Statistics of significance of risk sources for stability

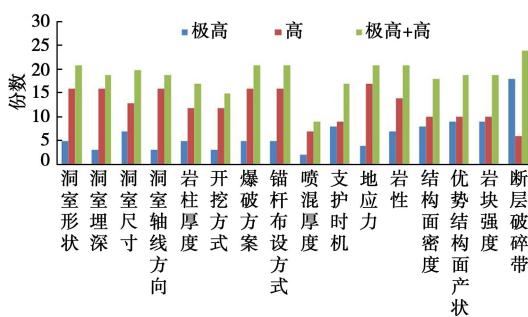


图 2 稳定性风险因子引发洞室失稳概率调查汇总图

Fig. 2 Statistics of probability of risk sources for stability

对比不同因素风险因子在稳定性和水封性风险控制中影响作用, 可以发现以下特点: ①结构因素和地质因素在两种风险控制中均具有较大影响, 且引发功能失效概率较高; ②施工因素对稳定性影响高于对水封性影响; ③同一风险因子在稳定性和水封性影响不

同, 优势结构面产状对稳定性影响大于对水封性影响。

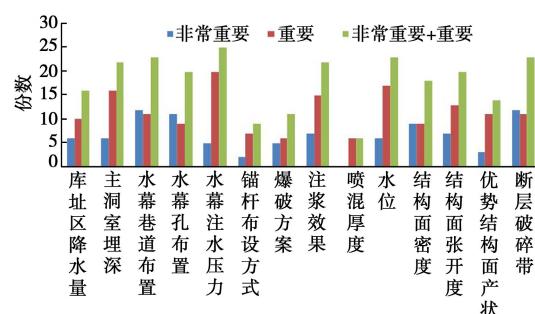


图 3 水封性风险因子重要性统计图

Fig. 3 Statistics of significance of risk sources for containment property

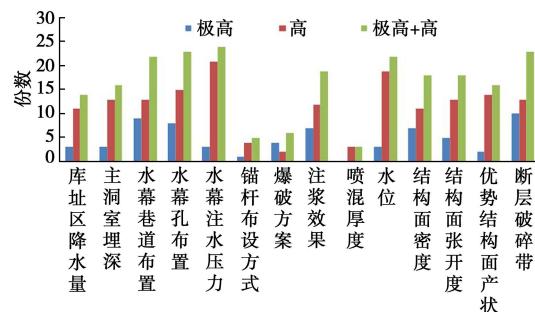


图 4 水封性风险因子引发洞室水封失效概率调查汇总图

Fig. 4 Statistics of probability of risk sources for containment property

3 风险因子影响程度模糊综合识别

第 2 节通过问卷调查, 初步获得了各个风险因子

的重要性和引发功能失效的概率。本节将采用模糊分析方法^[17], 获得各个因素对洞库施工期稳定性和水封性的影响程度。

3.1 风险因子集和评价等级集

风险因子集是由风险评价致险因子所构成的集合。根据本研究范围, 可分为稳定性风险因子集和水封性风险因子集。根据表3和表4, 可得到两种风险因子集: 稳定性风险因子集 $\mathbf{U}^W = [U_1^W, U_2^W, \dots, U_{16}^W]$, 和水封性风险因子集 $\mathbf{U}^S = [U_1^S, U_2^S, \dots, U_{14}^S]$ 。而评价等级集由专家评价结果组成, 根据本研究内容, 可分为重要性评价集: $\mathbf{B}^Z = [B_1^Z, B_2^Z, B_3^Z, B_4^Z]$, 和引发功能失效概率评价集: $\mathbf{B}^G = [B_1^G, B_2^G, B_3^G, B_4^G]$ 。

3.2 风险因子权重集

风险因子权重集即风险因子的权重向量矩阵, 用以量化表达各个风险因子的重要程度或引发功能失效概率。目前, 权重确定方法有层次分析法和打分法。本文根据表3和表4专家调查统计数据, 采用层次分析法中的0-1方法, 通过比较两个因子的相同重要程度或引发功能失效概率评价语数量, 进行各个风险因子的权重赋值。

表5为稳定性风险因子重要性权重分数计算矩阵。表中, 任意两个风险因子, 如果前一个因子比后一个因子在“非常重要”一栏评价数量多, 则为1, 反之为0。如果相同, 则继续比较“重要”一栏的评

价数量, 以此类推, 最后累积求和获得权重分数, 权重分数加上一个自身权重分数1即可得权重分数。根据上述方法计算, 可得稳定性风险因子引发失稳概率权重分数和水封性各个风险因子重要性和引发功能失效概率权重分数。将各个风险因子权重分数除以所有风险因子权重值之和即为权重值, 由权重值组成的集合称为权重集。

表6为稳定性因子重要性权重集 (A^{WZ}) 和引发洞室失稳概率权重集 (A^{WG})。表7为水封性因子重要性权重集 (A^{SZ}) 和引发水封失效概率权重集 (A^{SG})。在稳定性风险因子中, 断层破碎带、优势结构面产状和洞室形状在重要性评价中位于前3位, 而断层破碎带、优势结构面产状和岩块强度在引发洞室失稳概率评价中位于前3位。在水封性风险因子中, 断层破碎带、水幕巷道布置和水幕孔布置在重要性评价中位于前3位, 而断层破碎带、注浆效果和结构面密度在引发水封失效概率评价中位于前3位。水幕系统设计在重要性评价中排序较前, 而在引发水封失效概率评价中排序较后, 其原因可能在于水幕系统设计常常采用较大的安全度, 其可靠性通常可以得到保障。

3.3 风险因子模糊评价矩阵

风险因子模糊评价矩阵也称为隶属关系矩阵, 表示从风险因子集到评价等级集的一个模糊映射:

$$\mathbf{R} = \{r_{ij}\} \quad (i=1 \sim n; j=1 \sim m) \quad , \quad (2)$$

表5 稳定性风险因子重要性权重值计算矩阵

Table 5 Matrix for calculation of weights of significance of risk sources for stability

	U_1^W	U_2^W	U_3^W	U_4^W	U_5^W	U_6^W	U_7^W	U_8^W	U_9^W	U_{10}^W	U_{11}^W	U_{12}^W	U_{13}^W	U_{14}^W	U_{15}^W	U_{16}^W	得分	权重 分数	
U_1^W	*	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	13	14
U_2^W	0	*	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	4	5
U_3^W	0	1	*	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	12	13
U_4^W	0	0	0	*	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	3	4
U_5^W	0	1	0	1	*	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	5	6
U_6^W	0	0	0	0	0	*	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2
U_7^W	0	1	0	1	1	1	*	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	10	11
U_8^W	0	1	0	1	1	1	0	*	1	0	1	0	0	0	0	0	0	6	7
U_9^W	0	0	0	0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
U_{10}^W	0	1	0	1	1	1	0	1	1	*	1	0	0	0	0	0	0	7	8
U_{11}^W	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	*	0	0	0	0	0	0	2	3
U_{12}^W	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	*	1	0	1	0	1	0	11	12
U_{13}^W	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	*	0	0	0	0	0	8	9
U_{14}^W	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	*	1	0	14	15	
U_{15}^W	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	*	0	9	10	
U_{16}^W	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	*	15	16		

注: *表示各因子在与自身对比时不赋值。

式中, n 为风险因子个数, m 为评价等级个数, r_{ij} 为隶属度, 即第 i 个风险因子隶属于第 j 个评价等级的程度, 由调查表中各评语数量占总调查人数的百分数确定。据此, 可以计算稳定性和水封性风险因子重要性和引发洞室失稳概率隶属关系矩阵, 即, R^{WZ} , R^{WG} , R^{SZ} 和 R^{SG} , 其值采用矩阵表达:

$$R^{WZ} = \begin{bmatrix} 0.333 & 0.519 & 0.148 & 0.000 \\ 0.185 & 0.556 & 0.259 & 0.000 \\ 0.333 & 0.481 & 0.185 & 0.000 \\ 0.185 & 0.519 & 0.296 & 0.000 \\ 0.222 & 0.407 & 0.370 & 0.000 \\ 0.111 & 0.593 & 0.296 & 0.000 \\ 0.296 & 0.556 & 0.148 & 0.000 \\ 0.222 & 0.593 & 0.185 & 0.000 \\ 0.111 & 0.407 & 0.333 & 0.148 \\ 0.296 & 0.444 & 0.259 & 0.000 \\ 0.148 & 0.741 & 0.111 & 0.000 \\ 0.296 & 0.593 & 0.074 & 0.037 \\ 0.296 & 0.519 & 0.185 & 0.000 \\ 0.370 & 0.481 & 0.148 & 0.000 \\ 0.296 & 0.556 & 0.148 & 0.000 \\ 0.630 & 0.296 & 0.074 & 0.000 \end{bmatrix},$$

$$R^{WG} = \begin{bmatrix} 0.185 & 0.593 & 0.185 & 0.037 \\ 0.111 & 0.593 & 0.259 & 0.037 \\ 0.259 & 0.481 & 0.222 & 0.037 \\ 0.111 & 0.593 & 0.259 & 0.037 \\ 0.185 & 0.444 & 0.296 & 0.074 \\ 0.111 & 0.444 & 0.407 & 0.037 \\ 0.185 & 0.593 & 0.185 & 0.037 \\ 0.185 & 0.593 & 0.148 & 0.074 \\ 0.074 & 0.259 & 0.407 & 0.259 \\ 0.296 & 0.333 & 0.259 & 0.111 \\ 0.148 & 0.630 & 0.222 & 0.000 \\ 0.259 & 0.519 & 0.111 & 0.111 \\ 0.296 & 0.370 & 0.333 & 0.000 \\ 0.333 & 0.370 & 0.296 & 0.000 \\ 0.333 & 0.370 & 0.259 & 0.037 \\ 0.667 & 0.222 & 0.111 & 0.000 \end{bmatrix},$$

$$R^{SZ} = \begin{bmatrix} 0.222 & 0.370 & 0.407 & 0.000 \\ 0.222 & 0.593 & 0.185 & 0.000 \\ 0.444 & 0.407 & 0.074 & 0.074 \\ 0.407 & 0.333 & 0.222 & 0.037 \\ 0.185 & 0.741 & 0.037 & 0.037 \\ 0.074 & 0.259 & 0.407 & 0.259 \\ 0.185 & 0.222 & 0.407 & 0.185 \\ 0.259 & 0.556 & 0.148 & 0.037 \\ 0.000 & 0.222 & 0.667 & 0.111 \\ 0.222 & 0.630 & 0.148 & 0.000 \\ 0.333 & 0.333 & 0.333 & 0.000 \\ 0.259 & 0.481 & 0.259 & 0.000 \\ 0.111 & 0.407 & 0.481 & 0.000 \\ 0.444 & 0.407 & 0.148 & 0.000 \end{bmatrix},$$

$$R^{SG} = \begin{bmatrix} 0.111 & 0.407 & 0.333 & 0.148 \\ 0.111 & 0.481 & 0.333 & 0.074 \\ 0.333 & 0.481 & 0.111 & 0.074 \\ 0.296 & 0.556 & 0.148 & 0.000 \\ 0.111 & 0.778 & 0.111 & 0.000 \\ 0.037 & 0.148 & 0.481 & 0.333 \\ 0.148 & 0.074 & 0.481 & 0.296 \\ 0.259 & 0.444 & 0.185 & 0.111 \\ 0.000 & 0.111 & 0.667 & 0.222 \\ 0.111 & 0.704 & 0.185 & 0.000 \\ 0.259 & 0.407 & 0.259 & 0.074 \\ 0.185 & 0.481 & 0.296 & 0.037 \\ 0.074 & 0.519 & 0.333 & 0.074 \\ 0.370 & 0.481 & 0.074 & 0.074 \end{bmatrix}.$$

表 6 稳定性风险因子重要性和引发失稳概率权重集

Table 6 Weights of significance and probability of risk sources for stability

风险因子	重要性 A^{WZ}	失稳概率 A^{WG}
洞室形状	0.103	0.058
洞室埋深	0.037	0.022
洞室尺寸	0.096	0.073
洞室轴线方向	0.029	0.029
岩柱厚度	0.044	0.044
开挖方式	0.015	0.022
爆破方案	0.081	0.066
锚杆布设方式	0.051	0.044
喷混厚度	0.007	0.015
支护时机	0.059	0.088
地应力	0.022	0.036
岩性	0.088	0.080
结构面密度	0.066	0.095
优势结构面产状	0.110	0.109
岩块强度	0.074	0.102
断层破碎带	0.118	0.117

表 7 水封性风险因子重要性和引发水封失效概率权重集

Table 7 Weights of significance and probability of risk sources for containment property

风险因子	重要性 A^{SZ}	失效概率 A^{SG}
库址区降水量	0.057	0.048
主洞室埋深	0.067	0.048
水幕巷道布置	0.124	0.038
水幕孔布置	0.114	0.048
水幕注水压力	0.048	0.086
锚杆布设方式	0.019	0.038
爆破方案	0.067	0.094
注浆效果	0.095	0.048
喷混厚度	0.010	0.086
水位	0.067	0.076
结构面密度	0.095	0.095
结构面张开度	0.076	0.045
优势结构面产状	0.038	0.048
断层破碎带	0.124	0.105

3.4 评价等级模糊评价集

评价等级的模糊评价集表示专家评价结果隶属于

评语集的隶属度, 采用下式求解:

$$\mathbf{E} = \mathbf{A}^T \mathbf{R} \quad (3)$$

式中, \mathbf{E} 为评价等级模糊评价矩阵, \mathbf{A} 为风险因子权重集, \mathbf{R} 为风险因子模糊矩阵。本研究中, 稳定性和水封性评价等级的模糊评价结果集分别为

$$\mathbf{E}^{WZ} = (\mathbf{A}^{WZ})^T \mathbf{R}^{WZ} = [0.329, 0.498, 0.168, 0.004],$$

$$\mathbf{E}^{WG} = (\mathbf{A}^{WG})^T \mathbf{R}^{WG} = [0.296, 0.431, 0.230, 0.043],$$

$$\mathbf{E}^{SZ} = (\mathbf{A}^{SZ})^T \mathbf{R}^{SZ} = [0.302, 0.436, 0.225, 0.037],$$

$$\mathbf{E}^{SG} = (\mathbf{A}^{SG})^T \mathbf{R}^{SG} = [0.181, 0.431, 0.281, 0.107]。$$

3.5 风险因子影响模糊综合评价集

风险因子影响模糊评价集表示风险因子的影响程度, 采用下式求解:

$$\mathbf{C} = \mathbf{ER} \quad (4)$$

本研究中, 稳定性和水封性评价等级的模糊评价结果集分别为

$$\mathbf{C}^{WZ} = \mathbf{E}^{WZ} \mathbf{R}^{WZ} = [0.393, 0.381, 0.381, 0.369, 0.338, 0.382, 0.399, 0.399, 0.296, 0.363, 0.436, 0.405, 0.387, 0.387, 0.399, 0.367],$$

$$\mathbf{C}^{WG} = \mathbf{E}^{WG} \mathbf{R}^{WG} = [0.355, 0.350, 0.337, 0.350, 0.318, 0.320, 0.355, 0.348, 0.239, 0.296, 0.366, 0.331, 0.324, 0.327, 0.320, 0.319]$$

$$\mathbf{C}^{SZ} = \mathbf{E}^{SZ} \mathbf{R}^{SZ} = [0.320, 0.367, 0.331, 0.320, 0.388, 0.237, 0.251, 0.355, 0.251, 0.375, 0.321, 0.346, 0.320, 0.345,$$

$$\mathbf{C}^{SG} = \mathbf{E}^{SG} \mathbf{R}^{SG} = [0.305, 0.329, 0.307, 0.335, 0.387, 0.241, 0.226, 0.303, 0.259, 0.376, 0.303, 0.328, 0.339, 0.303]。$$

为便于分级, 引入下式对上述评价集进行处理^[18]:

$$D = \frac{C_i - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}}, \quad (5)$$

式中, $C_{\max} = \max\{C_1, C_2, \dots, C_l\}$, $C_{\min} = \min\{C_1, C_2, \dots, C_l\}$, l 为元素个数。

对稳定性和水封性风险因子分别计算重要性和引发功能失效概率模糊评级集, 如表 8, 9 所示。根据式

(1) 定义, 将稳定性风险因子重要性与引发概率失效概率评价值相乘得各风险因子对稳定性影响权重集。

同样将水封性风险因子重要性与引发水封失效概率评级值相乘得各风险因子对水封性影响权重集。

3.6 风险因子影响程度分级

将各个风险因子按影响程度进行分级, 将由模糊综合评价所得结果进行处理, 按<25%, 25%~49%, 49%~64%, >64% 的区间进行等级划分如表 10, 11 所示。由表 10, 11 得: 在稳定性风险因子中, 地应力和爆破方案影响特别大, 主洞室形状、主洞室埋深、锚杆布设方式、岩性影响次之; 而在水封性风险因子

中, 水幕注水压力和初始水位影响特别大, 主洞室埋深、注浆效果和结构面张开度影响次之。

表 8 稳定性风险因子影响权重集

Table 8 Weights of influence of risk sources for stability

参数	D^{WZ}	D^{WG}	E^W
洞室形状	0.69	0.91	0.63
洞室埋深	0.61	0.87	0.53
洞室尺寸	0.60	0.77	0.46
洞室轴线方向	0.52	0.87	0.45
岩柱厚度	0.30	0.62	0.19
开挖方式	0.61	0.64	0.39
爆破方案	0.73	0.91	0.67
锚杆布设方式	0.74	0.85	0.63
喷混厚度	0	0	0
支护时机	0.47	0.45	0.21
地应力	1.00	1.00	1.00
岩性	0.78	0.72	0.56
结构面密度	0.65	0.67	0.43
优势结构面产状	0.65	0.69	0.44
岩块强度	0.73	0.63	0.47
断层破碎带	0.51	0.63	0.32

表 9 水封性风险因子影响权重集

Table 9 Weights of influence of risk sources for containment

参数	D^{SZ}	D^{SG}	E^S
库址区降水量	0.55	0.49	0.27
主洞室埋深	0.86	0.64	0.55
水幕巷道布置	0.62	0.51	0.31
水幕孔布置	0.55	0.68	0.37
水幕注水压力	1.00	1.00	1.00
锚杆布设方式	0	0.10	0
爆破方案	0.10	0	0
注浆效果	0.78	0.68	0.53
喷混厚度	0.10	0.21	0.02
水位	0.91	0.93	0.85
结构面密度	0.56	0.48	0.27
结构面张开度	0.72	0.74	0.53
优势结构面产状	0.55	0.70	0.38
断层破碎带	0.71	0.48	0.34

表 10 稳定性风险因子影响排序

Table 10 Rating of risk sources of stability

特别大	大	一般	不大
		洞室尺寸	洞室
		主洞室形状	轴线方向
地应力	主洞室埋深	开挖方式	岩柱厚度
爆破方案	锚杆布设方	结构面密	喷混厚度
		度	支护时机
		优势结构面	
		产状	
		断层破碎	
		带	
		岩块强度	

表 11 水封性风险因子影响排序

Table 11 Rating of risk sources of containment property

特别大	大	一般	不大
水幕注水	主洞室埋深	库址区降水量	锚杆布设
压力水位	注浆效果	幕巷道布置水幕	方式爆破
	结构面张开度	孔布置结构面密	方案喷混
		度优势结构面产	厚度
		状断层破碎带	

4 应用验证

4.1 工程概况

某地下水封洞库工程是国内首个大型地下水封石油洞库建设项目。工程库址区属低山丘陵地貌，地面平均标高为 220 m，最高点标高为 350.9 m。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，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。

地下工程主要包括 2 条施工巷道，9 个主洞室和 5 条水幕巷道，如图 5 所示。地下储库由 9 个洞室组成。2 条施工巷道入口位于洞库南侧，设计标高均为 70 m，分别沿洞库东西两侧向北延展，至洞库北端交汇，并沿主洞室方向 3 个交叉向南延伸至洞库南部，施工巷道洞跨为 9 m，洞高为 8 m。9 个主洞室按南北偏西平行设置，洞室设计底板面标高为 -50 m，设计洞跨 20 m，洞高 30 m，截面形状为直墙圆拱形。为了保证洞库密封性，在主洞室拱顶以上 25 m 处设置 5 条水幕巷道，水幕巷道轴线垂直于主洞室方向布置，设计洞跨为 5 m，洞高为 4.5 m。水幕孔为水平方向布置，覆盖整个洞库范围。

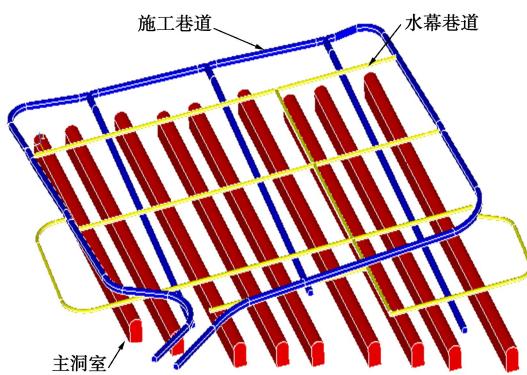


图 5 工程地下结构布置图

Fig. 5 Layout of underground structures

地下工程采用钻爆法施工。主洞室分上层、中层、下层和底板保护层 4 层开挖。上层开挖先采用中导洞开挖爆破先行，再进行两侧的扩挖，在中下层则主要

采用深孔台阶爆破开挖，底板保护层则采用光面爆破。主洞室支护主要采用锚杆和喷射混凝土，地质条件较差和交叉口等重点部位采用钢格栅支护。施工过程对重点部位进行超前注浆，并对开挖揭露渗水部位进行后注浆处理，以保证洞库水封性。

本部分将介绍该地下水封石油洞库建设中典型稳定性和水封性风险事故，分析事故发生的原因，对上文所得风险因子影响程度进行验证。

4.2 稳定性风险

由于前期地质勘察工作细致，且在施工过程中采取了超前预报和监控量测等技术手段，该地下水封石油洞库施工过程未出现大规模岩体失稳事故，仅在主洞室③、⑤、⑧出现 3 次局部岩体失稳。

现场监控量测结果显示：

(1) 洞室围岩收敛值最大值为 12 mm，拱顶沉降最大值为 12 mm，大多数断面收敛在 4~8 mm 之间，拱顶沉降一般在 3~6 mm 之间。

(2) 锚杆最大内力值为 196 MPa，但多数部位锚杆内力值小于 50 MPa。

(3) 采用超声波测速方法测得主洞室开挖扰动范围在 0.8~1.3 m 之间。

表 12 详细列出了 3 次岩体失稳位置、情况描述和原因分析。从表 12 原因分析看，影响洞室稳定性的主要因素包括：应力状况、爆破方案、锚杆布设方式、岩体性质变化等，这与表 10 结果基本是一致的。在该工程中，由于埋设和洞室形状变化不大，因此未显示出其影响。图 6~8 为 3 次局部失稳后现场情况。

4.3 水封性风险

根据水封原理，地下水封石油洞库的水封性主要通过控制水位实现。根据水封性要求，该地下水封石油洞库地下水位需控制在 +20 m 高程以上。

为了监测水位情况，共布置水位监测孔 20 个，其中，详细勘察阶段布置水位监测孔 13 个，施工期加密布置水位监测孔 7 个。施工过程中对 20 个水位孔进行了长期监测，监测数据显示：

(1) 受工程开挖影响孔内水位随时间呈下降趋势，水位下降值在 5~130 m 不等，其中大多数水位孔下降不超过 50 m，能够满足洞库水封要求；

(2) 受地形影响，初始水位高的水位孔孔内水位下降较大；

(3) 由于存在导水结构面与洞室连接，少数水位孔水位下降明显，存在水封失效风险。

表 13 为典型水位下降明显监测孔案例分析表。表中描述水位下降情况，并分析了下降原因。经分析发

表 12 某地下水封石油洞库岩体失稳事故详情表

Table 12 List of stability accidents

序号	位置	失稳情况描述	原因分析
1	主洞室③0+474~0+482 桩号 上层拱顶处	掘进爆破后拱顶处发生岩体失稳, 最大深度约 4 m, 塌方量约为 60 m ³	①洞顶软弱结构面和临空面形成不稳定块体; ②爆破扰动; ③超前支护强度低
2	主洞室⑤0+456~0+475 桩号 中层左侧边墙	工程最大一次塌方, 塌方区深约 7 m、宽约 6 m, 塌方量约为 800 m ³	①高陡边墙, 应力集中; ②锚杆长度不足; ③岩体内出现高岭土夹层
3	主洞室⑧0+430~0+470 桩号 底层右侧边墙	整块岩板沿结构面滑动, 块体宽约 40 m, 高 10 m, 厚度 0.5 至 2 m 不等	①边墙结构面与临空面形成不稳定块体; ②锚杆密度低;

表 13 某地下水封石油洞库水封失效事故详情表

Table 12 List of containment accidents

序号	孔号	水位下降情况描述	原因分析
1	XZ02	该水位孔 3 个月内水位下降 60 m, 最低水位为 +5 高程, 中间对洞内一处渗水点进行注浆处理, 但仍未阻止水位继续下降, 后通过示踪试验, 揭露另一处主要渗水点 (如图 9 所示), 经后注浆处理, 并结合水幕系统补水使得水位回升 60 m, 恢复至下降前水位。	①存在导水结构面与地下开挖空间连接; ②结构面开度大; ③第一次注浆未涵盖主要导水结构面④水幕注水压力不足
2	Zk003	水位孔水位随施工巷道、水幕孔及主洞室施工而变化, 显示出明显的施工过程影响。采用示踪试验, 揭露渗水部位位于主洞室①底板, 采用后注浆和增补水幕孔两种手段, 水位恢复至 +20 m 高程。	①存在导水结构面与开挖空间相连; ②结构面开度大; ③水幕系统补给量小于洞室渗水量



图 6 主洞室③岩体失稳现场情况图

Fig. 6 Rock mass collapse in cavern No. 3

请参考文献[20]。



图 8 主洞室⑧岩体失稳现场情况图

Fig. 8 Rock mass collapse in cavern No. 8



图 7 主洞室⑤岩体失稳现场情况图

Fig. 7 Rock mass collapse in cavern No. 5

现, 影响洞库水封性的因素主要包括: 水位、水幕注水压力、注浆效果和结构面张开度等, 这也与表 10 结果是一致的。但由于洞室埋设变化不大, 因此, 主洞室埋深对水封性影响不大。关于该洞库渗水量情况



图 9 水位孔 XZ02 示踪试验后示踪剂分布图

Fig. 9 Tracer distribution for borehole XZ02

5 结 论

地下水封石油洞库具有投资大, 无成熟设计施

工规范, 不确定因素多等特点, 其建设存在着一定的安全风险, 因此, 开展地下水封石油洞库施工期安全风险评估研究具有重要意义。本文主要研究工作如下:

(1) 在系统分析水封洞库施工期风险类型、发生原因和系统筛选基础上, 综合国内外学者的理论研究和意见咨询, 根据工程建设实际情况, 从设计、施工和地质因素方面辨识出地下水封石油洞库施工期影响稳定性的主要风险因子 16 个、影响水封性的主要风险因子 14 个。

(2) 根据稳定性和水封性风险评估特征, 设计了风险因子调查表, 邀请了从事地下水封石油洞库勘察、设计、施工、科研的相关人员, 根据各自专业知识和经验, 对各个风险因子的重要性及发生概率做出模糊判断。

(3) 采用模糊数学方法, 获得了各风险因子模糊权重集和模糊评价集, 得到了各风险因子影响程度排序。经分析: 在稳定性风险因子中, 地应力和爆破方案影响特别大, 主洞室形状、主洞室埋深、锚杆布设方式、岩性影响次之; 而在水封性风险因子中, 水幕注水压力和初始水位影响特别大, 主洞室埋深、注浆效果和结构面张开度影响次之。

(4) 总结了某地下水封石油洞库施工中典型稳定性和水封性风险事故, 分析事故发生的原因, 分析表明本研究风险因子识别结果与风险事故发生原因较为一致。

一方面, 地下水封石油洞库不但具有一般洞室群特征, 还具有其独自特征, 其风险评价与管理具有重要的理论价值; 另一方面, 作为我国石油战略储备的一种新方式, 地下水封石油洞库在我国具有广阔的应用前景。因此, 如何评价和控制地下水封石油洞库建设和运营风险具有重要的理论和应用价值。本研究仅就施工期安全风险评估做了探讨, 且限于目前地下水封油库工程较少, 调查样本数量有限, 难免存在偏颇甚至错误之处, 请专家读者不吝赐教。

参考文献:

- [1] 钱七虎, 戎晓力. 中国地下工程安全风险管理的现状、问题及建议[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 649 - 655.
(QIAN Qi-hu, RONG Xiao-li. State, issues and relevant recommendations for security risk management of China's underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 649 - 655. (in Chinese))
- [2] 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, LU Xiao-qiao, et al. Parameter sensitivity of rock mass integrity for a pilot underground crude oil storage caverns during construction phase. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 488 - 495. (in Chinese))
- [3] 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(21): 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(21): 275 - 282. (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] 王者超, 李术才, 乔丽萍, 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 properties of an underground crude oil storage cavern using fluid flow-stress coupling method[J]. Chinese of Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(8): 1535 - 1543. (in Chinese))
- [6] EINSTEIN H H. Risk and risk analysis in rock engineering[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1996: 141 - 15.
- [7] 范益群, 钟万勰, 刘建航. 时空效应理论与软土基坑现代设计概念[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(增刊 1): 49 - 53. (FAN Yi-qun, ZHONG Wan-xie, LIU Jian-hang. Theory of time-space effect and modern design concepts in soft soil pit engineering[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2000, 40(S1): 49 - 53. (in Chinese))
- [8] 黄宏伟, 陈桂香. 风险管理在降低地铁造价中的作用[J]. 现代隧道技术, 2003, 40(5): 1 - 6. (HUANG Hong-wei, CHEN Gui-xiang. Role of risk management in the cost reduction of metro construction[J]. Modern Tunnelling Technology, 2003, 40(5): 1 - 6. (in Chinese))
- [9] 杨林德, 黄慷. 水底隧道管片构件耐久性失效风险研究[J]. 地下空间, 2004, 24(1): 1 - 4. (YANG Lin-de, HUANG

- Kang. A study on risk of durability failure of the segments for underwater tunnel[J]. *Underground Space*, 2004, **24**(1): 1 - 4. (in Chinese))
- [10] YOU K, PARK Y, LEE J S. Risk analysis for determination of a tunnel support pattern[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2005, **20**(5): 479 - 486.
- [11] 中国土木工程学会, 同济大学. 地铁及地下工程建设风险管理指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. (Chinese Society of Civil Engineering, Tongji University. Guideline of risk management for construction of subway and underground works[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007. (in Chinese))
- [12] 胡元鑫, 刘新荣, 李晓红, 等. 基于监控量测的山岭隧道工程风险管理分析[J]. *岩土工程学报*, 2010, **32**(7): 1135 - 1141. (HU Yuan-xin, LIU Xin-rong, LI Xiao-hong. Engineering risk management of mountain tunnels based on observation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **32**(7): 1135 - 1141. (in Chinese))
- [13] 李媛. 盐岩地下油气储库风险分析与评估研究[D]. 济南: 山东大学, 2011. (LI Yuan. Study on risk analysis and evaluation for the salt cavern storage[D]. Jinan: Shandong University, 2011. (in Chinese))
- [14] BROWN E T. Risk assessment and management in underground rock engineering: an overview[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2012, **4**(3): 193 - 204.
- [15] 姜彦彦. 地下水封石油洞库施工期风险分析与评价研究[D]. 济南: 山东大学, 2013. (JIANG Yan-yan. Research of risk analysis and assessment during construction of underground petroleum storage caverns[D]. Jinan: Shandong University, 2013. (in Chinese))
- [16] 陆宝麒, 梁建毅, 张文辉, 等. 首座大型地下水封石油洞库工程建设管理集成创新模式[J]. *长江科学院院报*, 2014, **31**(1): 98 - 102. (LU Bao-qi, LIANG Jianyi, ZHANG Wen-hui, et al. Integrated Innovations for construction management of China's first large underground water-sealed oil storage cavern[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2014, **31**(1): 98 - 102. (in Chinese))
- [17] 张跃. 模糊数学方法及其应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992. (ZHANG Yue. Fuzzy mathematical methods and applications[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1992. (in Chinese))
- [18] 吴贤国, 王峰. $R=P \times C$ 法评价水下盾构隧道施工风险[J]. *华中科技大学报*. 2005, **22**(4): 44 - 46. (WU Guo-xian, WANG Feng. Gradation Evaluation of underwater shield tunnel construction risks using $R=P \times C$ method[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology-Urban Science*, 2005, **22**(4): 44 - 46. (in Chinese))
- [19] 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 Jianyi, 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))