

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2023.05.002

某地下水封洞库群围岩稳定性分析与评价

贾聿颀, 张溢丰, 黄智国, 涂淼洋

(黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要: 基于我国东南地区某地下水封洞库工程, 构建三维地质模型, 通过自编的程序接口将模型导入3DEC中, 构建出考虑真实断层影响的数值模型, 开展模拟计算, 并分析在Ⅱ、Ⅲ类围岩中无衬砌开挖条件下洞库群的围岩稳定性。结果表明: Ⅱ、Ⅲ类围岩条件下洞库群的围岩变形规律趋于一致, 从变形量分区来看后者约为前者的5倍, 主要变形均集中于洞库群中心区域, 越靠近洞库群中心, 洞库变形就越大, 群洞效应越突出; Ⅱ、Ⅲ类围岩条件下典型洞库监测点的围岩变形特征相似, 均表现为向开挖临空面变形的趋势, 且围岩变形最终收敛, 监测点最大主应力主要位于拱肩和下边角部位, 均未超过对应级别围岩的单轴饱和抗压强度, 处于稳定状态; 区内断层对本工程洞库群开挖时围岩变形影响较小。该分析结果对于考虑区域性断层的地下水封洞库围岩稳定性分析提供参考依据。

关键词: 洞库群; 数值计算; 围岩变形; 群洞效应

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)05-0007-06

Stability Analysis and Evaluation of Surrounding Rock in an Underground Water-sealed Cavern Group

JIA Yujie, ZHANG Yifeng, HUANG Zhiguo, TU Miaoyang

(Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan 450003, China)

Abstract: Based on an underground water-sealed cavern project in southeast China, a 3D geological model is imported into the DEM software 3DEC by self-programming interface, then a 3D numerical model considering the effects of real faults is constructed and the simulation calculation is carried out. The whole surrounding rock stability of the cavern group is analyzed and evaluated under Ⅱ and Ⅲ surrounding rock conditions during the excavation without lining. The results are as follows. The deformation law tends to be the same of the cavern group surrounding rock which is under the type Ⅱ and Ⅲ, the latter is about 5 times of the former, the main deformation is concentrated in the central area of cavern group, where the larger deformation and more prominent affection of the cavern group. The surrounding rock deformation characteristics is similar at the monitor points of type Ⅱ and Ⅲ, showing that the trend of deformation towards the free surface of excavation and the deformation converges eventually. The maximum principal stress at the monitoring points is mainly located at the spinner and lower corner, it is in a stable state which does not exceed the uniaxial saturation compressive strength of surrounding rock. The Faults have little influence on the surrounding rock deformation during the excavation of the caverns. The results provide a reference for the stability analysis of surrounding rock of underground water-sealed reservoir considering regional faults

Keywords: cavern group; numerical calculation; surrounding rock deformation; group hole effect

地下水封洞库是指在稳定地下水位以下一定深度岩体中开挖出的利用水封原理储存油气能源的地下空间系统, 通常由一定数量的单个洞库组成洞库

群以满足储量要求, 是目前国际上石油、液化气等能源的主要储存方式^[1]。相比于传统的地表钢罐能源储存, 地下水封洞库能源储存具有安全、经济、环

保的独特优势^[2]。地下水封洞库的选址和建设必须要满足两个基本的地质条件:完整性和强度较好的岩体、稳定的地下水条件。

基于此,大规模的地下水封洞库群开挖过程中围岩的稳定性问题,成为了制约地下水封洞库工程建设的一个关键技术问题,众多学者在水封洞库群开挖过程中围岩变形、稳定性分析和评价方面已经积累了一定的理论和经验。

Lee 等^[3]、Sturk 等^[4]以非衬砌地下储油洞库为例总结了洞库设计、建造过程中遇到的围岩稳定性方面问题。陈祥^[5]、时洪斌^[6]以黄岛地下水封石油洞库工程为例,通过采用 Solidworks、Hypermesh 和 Flac^{3D}等分析软件对黄岛地下水封石油洞库进行了单洞和洞群的开挖模拟计算,分析评价了实际工序或优化工序下地下洞室围岩的变形情况、稳定性以及洞群开挖时洞室间的相互作用等。杨峰^[7]以惠州地下储油库为研究对象,采用复变函数解析方法对不同等级围岩情况下的单洞稳定性进行了比较分析,并对渗流条件下洞周围岩塑性区的扩展进行了预测。吕晓庆^[8]以我国首个在建的大型无衬砌地下水封石油储备库项目为背景,运用弹塑性理论,在室内岩石三轴试验基础上,研究了花岗岩地层大型无衬砌地下水封石油洞库围岩稳定性参数的敏感性以及变形和稳定性。吴壮志^[9]详细分析和总结了地下水封洞库群开挖过程中影响围岩稳定性的因素,并通过数值建模和分析计算,对洞库群围岩塑性区、应力场、水平和竖向变形量进行了研究总结,极大地优化地下水封洞库的开挖方案、断面形式和空间布置形式。彭振华等^[10]以海岛环境建造地下水封油库为例,基于流固耦合理论,采用有限元数值模拟方法对海岛环境建造地下水封洞库的围岩稳定性和水幕系统对水封可靠性的影响进行分析。曹洋兵^[11]、李健^[12]、王者超等^[13]针对大型地下水封洞库,通过采用理论推导、数值分析、室内试验等方法,在围岩变形破坏特征、稳定性分析以及支护方案等方面进行了深入浅出的研究,并总结出了一定的研究经验和理论。

研究表明数值分析方法^[14-16]可以通过较低的成本完成大量的重复计算,为实际建设工程提供指导意见。然而,目前仍缺少区域性大断层存在时的地下水封洞库群围岩安全性分析研究。

离散单元法是一种显示求解的数值计算方法,是 Cundall 在 1971 年提出的,能够考虑节理、断层的存在,块体被节理或断层等切割后变成不连续体,可

以分析块体间的失稳脱离造成的掉块、崩落等现象,是已被证实用于分析洞库群围岩稳定性问题的有效方法^[17-18]。

3DEC 是一款基于离散单元法作为基本理论以描述离散介质力学行为的计算分析程序,3DEC 有内置的材料行为模型,适用于完整块和不连续块,可以模拟不连续地质或类似材料的响应。对于考虑区域性断层的地下水封洞库围岩的稳定性分析,具有较好的适应性。

本文基于离散单元法软件 3DEC,构建出了包含断层影响带在内的离散地质三维模型,分别计算某地下水封洞库群在Ⅱ类和Ⅲ类围岩级别条件下无衬砌开挖时围岩的变形和应力分布特征,分析评价了地下水封洞库群的围岩稳定性特征,旨在为后续的设计施工和类似工程作理论参考,探索一种广泛适用于地下水封洞库群围岩安全性的研究分析方法。

1 工程概况

拟建于我国东南沿海典型的花岗岩地区的某地下水封洞库工程,属闽粤沿海花岗岩丘陵亚区,区内地势整体西南高北东低,东侧临海,水源丰富。工程区地表基岩裸露,表层风化,岩性主要为晚三叠-侏罗系片麻状混合二长花岗岩(T_3-J),属于典型的花岗岩地区,区内影响洞库群稳定性的构造断裂主要有四条:F1、F2、F3、F4-1,其中 F1 和 F2 近垂直切穿洞库的设置轴线,F3 和 F4-1 位于洞库工程的边缘地带。

工程规划库容超 1 000 万 m^3 ,共布置主洞室 21 条,洞室均按 $NW310^\circ E$ 平行布置洞库,洞库截面均为直墙圆拱形,断面宽 20 m,高 30 m,拱顶高程为 -60 m,底板高程为 -90 m,洞库群平面布置如图 1 所示,图 2 为洞库横截面图。

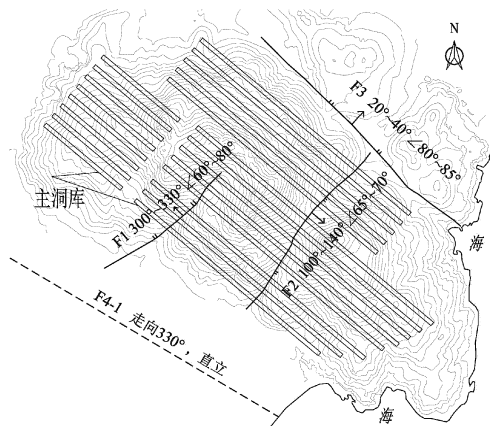


图 1 平面示意图

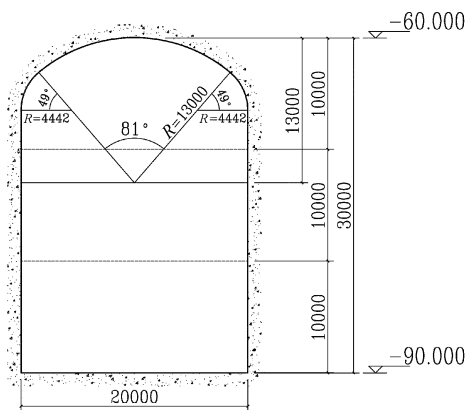


图 2 主洞室横截面图

2 三维整体稳定性分析

2.1 数值模型

由于工程区面积较大,计算深度范围内洞库群围岩以微风化~新鲜状花岗岩为主,节理裂隙不甚发育,因此对模型进行适当简化,暂不考虑模型中节理裂隙,仅考虑断层 F1、F2、F3、F4-1 对洞库群的影响。

采用块体离散单元法的计算程序 3DEC 对某地下水封洞库群的围岩稳定性进行数值模拟分析,首先在 ItasCAD 中将地形数据构建出真实的天然地表,再通过自编程序接口,将地表导入 3DEC 中,以 Y 向为正北方向, X 为正东方向,以断层产状为依据创建结构面,贯穿切割所有块体,最终建立 3DEC 离散模型。模型长 2 712 m,宽 2 458 m,最大高差 383.6 m,底部高程 -100 m,坡顶高程 283.6 m,三维计算模型整体效果如图 3 所示。

为了方便后面分析,将洞室分为 A、B、C 三个区,见图 4 所示,并对每个洞室进行编号, A 区包括 1~8 号洞库, B 区包括 9~13 号洞库, C 区包括 14~21 号洞库。洞库群的中心区域约在 A 区 5~7 号洞库北侧。

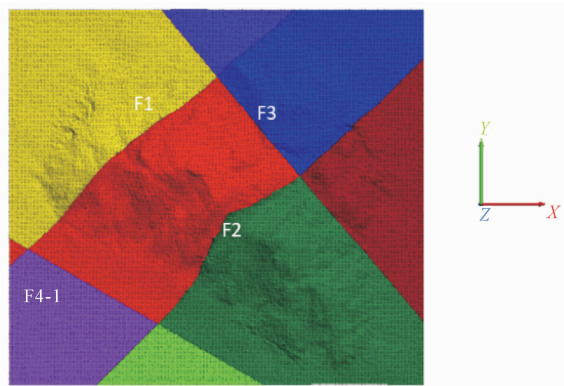


图 3 三维计算模型

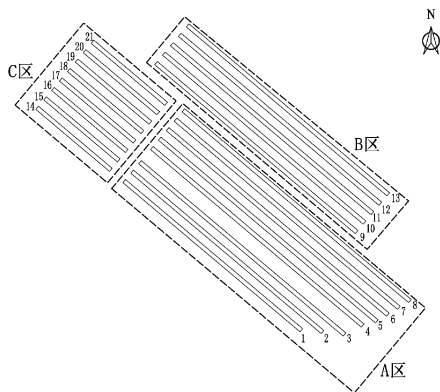


图 4 洞库群平面分布图

2.2 计算条件

按照洞库设计深度,结合勘察资料,对主洞库的围岩类别占比进行了统计, II 类围岩占比约 75%, III 类围岩占比约 19%, IV 类围岩占比约 3%, V 类围岩占比约 3%。洞库多位于微风化~新鲜状的 II~III 类花岗岩体中,洞库群拟采用无衬砌施工开挖。

基于此,分别计算分析了洞库群在 II 类和 III 类 2 种围岩条件下一次性开挖时围岩的稳定性特征,并在埋深最大的 8 号洞库南侧洞口处设置监测截面,布置监测点,记录分析洞库典型截面的变形特征和应力分布。

计算中岩体和结构面均采用摩尔-库伦本构模型,采用的物理力学参数见表 1。

表 1 围岩和结构面物理力学参数表

岩性/结构面	围岩分级	饱和密度 $\rho / (g \cdot cm^{-3})$	单轴饱和抗压强度 σ_c / MPa	抗拉强度 σ_t / MPa	黏聚力 c / MPa	摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	弹性模量 E_0 / GPa	泊松比 μ	侧压力系数
花岗岩	II	2.72	150	12	2.50	52	30	0.22	0.25
	III	2.68	100	6	1.50	48	15	0.25	0.28
断层	V	1.80	<10	—	0.10	28	<1	0.35	1.00

3 计算结果分析

3.1 整体变形分析

(1) II类围岩。图5为地下水封洞库群的整体变形分布情况,图6为-70 m高程处洞库群围岩的平面变形云图,该高程处的变形包含洞库群围岩的最大变形。

按照变形大小,洞库群变形区可以分为4类:i)变形小于20 mm;ii)变形介于20 mm~30 mm;iii)变形介于30 mm~50 mm;iv)变形大于50 mm。

根据变形云图,可以看出这4类变形区的分布特征:i类变形仅出现在洞库群边缘远端部分,ii~iv类变形主要集中在洞库群的中心区域,且越靠近洞库群中心,洞库变形就越大,群洞效应突出。

最大变形区位于A区4~7号洞室北段,最大变形量可达80 mm,因这部分围岩的洞室较为密集,且被A、B区和C区洞室群包围,受群洞开挖而产生的不利影响最大。

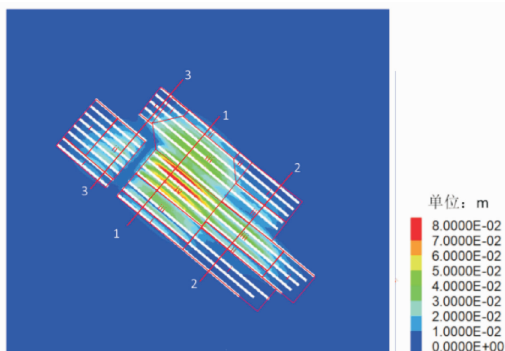


图5 整体平面变形云图

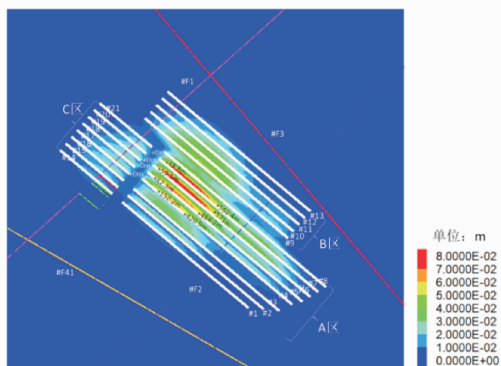


图6 高程-70 m处洞库群围岩变形云图(II类围岩)

为了更清晰的观察最大变形区,从而辨别围岩潜在危险区,将图5中1-1剖面的围岩变形展示于图7中,从左至右,洞库编号依次为1~13。可以看出:6号洞库和7号洞库拱顶和右侧边墙上部为潜

在不稳定区,4号洞库拱顶和右侧边墙局部、5号洞库拱顶和右侧边墙、8号洞的拱顶为潜在次危险区。

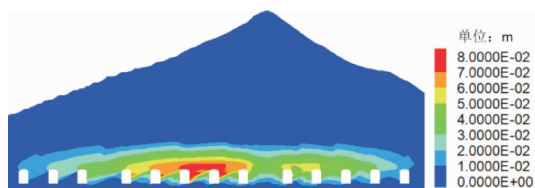


图7 1-1剖面的围岩变形分布(II类围岩)

(2) III类围岩。图8为高程-70 m处洞室群的围岩平面变形云图,该高程处的变形包含洞库群围岩的最大变形。按照变形大小,洞库群变形区依然可分为4类:i)变形小于100 mm;ii)变形介于100 mm~150 mm;iii)变形介于150 mm~250 mm;iv)变形大于250 mm。

这4类变形区的分布特征与II类围岩条件下的分布特征基本一致,较大变形依然主要集中分布在洞库群中心区域,越靠近群洞中心,变形就越大,揭示了群洞效应的影响。

最大变形区依然位于A区4~7号洞室北段,最大变形量可达400 mm,变形量远大于II类围岩条件下的变形量,约为II类围岩的5倍。

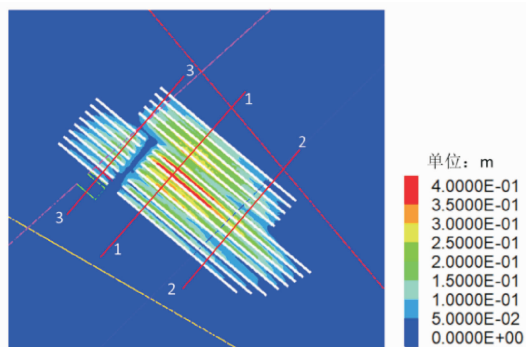


图8 高程-70 m处洞室群围岩变形云图(III类围岩)

图9所示1-1剖面的围岩变形分布特征以及潜在不稳定区与II类围岩条件下基本保持一致,6、7号洞库拱顶和右侧边墙上部为潜在不稳定区,4、5号洞库拱顶和右侧边墙、8号洞的拱顶为潜在次危险区。但围岩变形量增加,开挖主要影响范围内变形量都在100 mm以上,说明围岩III类时,围岩变形增大,开挖的危险性变高。

3.2 监测截面分析

根据计算时监测点的数据,分析8号洞库典型截面的变形特征和应力分布。

(1) 变形特征。图10为II类围岩条件下8号

洞库监测点的变形曲线,围岩变形最终收敛,截面处围岩变形规律表现为顶拱下沉、底板隆起、边墙向两侧临空面变形,其中顶拱的最大下沉约 14.8 mm。图 11 为 III 类围岩条件下 8 号洞库监测点的变形曲线,截面处围岩变形规律表现与 II 类围岩条件下保持一致,但顶拱的最大下沉变为 72.0 mm。

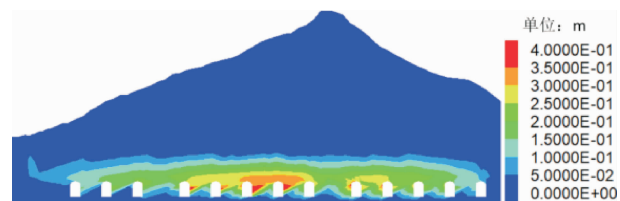


图 9 1-1 剖面的围岩变形分布(III类围岩)

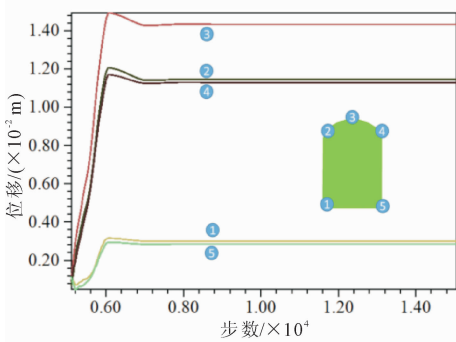


图 10 II 类围岩下各监测点变形曲线

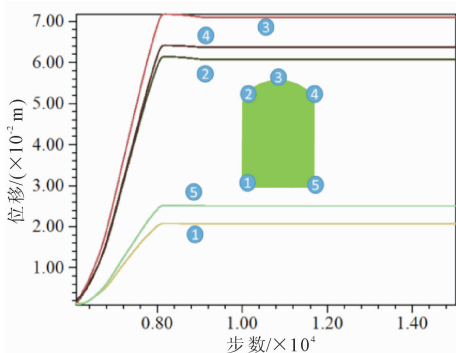


图 11 III 类围岩下各监测点变形曲线

(2) 应力分布。表 2 统计了 II、III 类围岩条件下 8 号洞库监测点最大主应力、中间主应力和最小主应力。

可以看出,II 类围岩条件下,最大应力集中出现在洞库截面左侧拱肩处,量值为 14.10 MPa,未超过 II 类围岩的单轴饱和抗压强度,说明围岩未受破坏,围岩处于稳定状态。III 类围岩条件下,最大应力集中出现在洞库左侧壁下边角处,量值为 12.38 MPa,同样未超过 III 类围岩的单轴饱和抗压强度,说明围岩未受破坏,围岩处于稳定状态。

实际上,根据勘察结果,工程深度范围内岩体主要为 II、III 类花岗岩,III 类围岩的计算结果是偏向保守的。另外,大尺度模型也可能过高估计围岩的变形。

表 2 8 号洞库监测点应力统计表

监测点	最大主应力 /MPa		中间主应力 /MPa		最小主应力 /MPa	
	II	III	II	III	II	III
	1	8.14	12.38	2.86	8.80	2.68
2	14.10	11.58	8.43	8.23	8.41	8.17
3	4.36	6.63	1.37	3.50	0.16	3.38
4	13.45	5.85	8.10	3.59	7.95	2.56
5	8.83	9.23	3.64	5.90	3.38	5.87

值得注意的是,虽然围岩变形可能被高估,但是若考虑岩体中存在的节理,III 类岩体依然可能发生较大变形,具有较高的失稳风险。

3.3 断层对围岩变形影响

根据两类围岩级别条件下计算结果变形云图分析,未见断层对洞库围岩变形有显著的影响,相比于计算模型的尺寸,结构面对洞库群围岩变形的影响可忽略不计。分析认为:区内发育的断层规模较小;计算条件下围岩为 II 类或 III 类花岗岩,自身整体稳定性较好;洞库近垂直穿越断层 F1 和 F2;这些因素都削弱了构造破碎带对洞库围岩变形的影响。可以认为,区内断层对本工程洞库围岩变形影响较小。

4 结 论

通过分析研究我国东南花岗岩地区某地下水封洞库群在两种不同围岩级别条件下无衬砌开挖时,洞库群的围岩变形规律和应力特征,得到以下主要结论:

(1) 通过对整体变形分析,II 类和 III 类围岩两种工况下洞库群的变形规律趋于一致,主要变形均集中于洞库群中心区域,越靠近洞库群中心,洞库变形就越大,群洞效应突出;最大变形区均集中于 A 区 4~7 号洞室北段,变形量后者约为前者的 5 倍;两种工况下 1-1 剖面揭示的围岩变形中,6、7 号洞库的拱顶和右侧拱肩均为潜在不稳定区。

(2) 通过对监测点数据的分析,II 类和 III 类围岩两种工况下 8 号洞库典型截面监测点的变形特征相似,均表现为向开挖临空面变形的趋势,且围岩变形最终收敛。其中两种工况下顶拱的最大下沉量分别为 14.8 mm 和 72.0 mm;监测点最大主应力分别为 14.10 MPa 和 12.38 MPa,主要位于拱肩和下边

角部位,均未超过对应级别围岩的单轴饱和抗压强度,围岩未受破坏,处于稳定状态。

(3) 区内断层对本工程洞库围岩变形影响较小。这是因为区内发育的断层规模较小、围岩条件较好以及洞库近垂直穿越断层 F1 和 F2,这些因素会不同程度的削弱断层对本工程洞库群围岩变形的影响。

(4) 计算采用的是洞室一次开挖完成的方法,并不能完全体现洞室开挖顺序对围岩稳定性的影响,但是较好揭示了群洞效应的存在,建议根据围岩存在的潜在大变形问题,合理设计洞库的施工开挖次序,同时,应考虑对 iv 类变形区的洞库开挖进行重点支护或加强支护。

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] Lindblom U. The development of hydrocarbon storage in hard rock cavern [C]//Proceedings of the International Conference of Storage of Gases in Rock Caverns, Trondheim. 1989:15-30.
- [3] 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, 1997,34(3/4):301-305.
- [4] Sturk R, Stille H. Design and excavation of rock caverns for fuel storage-a case study from Zimbabwe[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1995,10(2): 193-201.
- [5] 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(北京),2007.

- [6] 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.
- [7] 杨 峰. 惠州地下水封储油洞库群围岩稳定性分析与评价[D]. 北京:中国地质大学(北京),2011.
- [8] 吕晓庆. 大型地下水封石油洞库变形监测与围岩稳定性评价[D]. 济南:山东大学,2012.
- [9] 吴壮志. 地下水封储油洞库施工过程中的围岩稳定性分析[D]. 大庆:东北石油大学,2020.
- [10] 彭振华,张 彬,李玉涛,等. 海岛地下水封洞库围岩稳定性及水封可靠性研究[J]. 地下空间与工程学报,2020,16(6):1875-1881.
- [11] 曹洋兵. 大型地下水封储气库围岩变形破坏机制与锚喷支护研究[D]. 武汉:中国地质大学,2014.
- [12] 李 健. 大型地下水封洞库洞室围岩变形特征及支护效果评价[D]. 石家庄:河北地质大学,2018.
- [13] 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):112-117,125.
- [14] 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.
- [15] 王金国. 地下水封石油洞库围岩稳定性三维数值分析[J]. 油气田地面工程,2017,36(8):46-49.
- [16] 胡谋鹏,梁久正. 地下水封石油储备库洞室间距及数值分析[J]. 石油工程建设,2013,39(3):17-19,30, 24.
- [17] 任文明,崔 炜,张 安,等. 离散单元法在地下洞室围岩稳定性分析中的应用研究[J]. 地下空间与工程学报,2013,9(S2):1916-1921,1935.
- [18] 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.

(上接第 6 页)

为国家自然科学基金同行评议专家,中国博士后基金评审专家。为《工程抗震与加固改造》编委,中国工程建设标准化协会抗震专业委员会委员,中国土木工程学会防震减灾工程分会理事。为《建筑结构学报》、《文物保护与考古科学》、《湖南大学学

报》(自然科学版)等多家期刊特约审稿人。代表著作有《故宫建筑细探》、《太和殿》、《故宫古建筑结构分析与保护》等。代表论文有《紫禁城古建筑的传统防震方法》、《紫禁城太和殿的建筑艺术》、《〈周易〉思想对紫禁城古建筑营建的影响》等。