

我国水封石洞油库研究现状及思考

秦之勇, 高锡敏

(中国石化管道储运有限公司, 江苏 徐州 221008)

摘要:地下水封石洞油库是最好的储油形式, 建设需求迫切。受限于国外技术封锁, 国内多个大型洞库都是在缺乏必要的技术标准和建设标准的情况下直接进入工程实践, 因此也带来了诸多挑战。通过对水封石洞油库相关文献的梳理, 深化了对我国水封洞库选址、围岩稳定、围岩渗透性、水幕系统设计及应用、渗控等关键技术的理论和实践认识。当前洞库勘探、设计、施工仍主要基于连续介质理论和方法, 对岩体中裂隙控制作用的认识和研究还不够充分, 是导致目前洞库工程实施困难的首要原因。结合当前工程实践中面临的问题, 提出水封洞库后续工作中应继续加强基础研究工作力度、加强总结和标准编制工作力度、进一步放开行业准入资格等建议。

关键词:水封石洞油库; 选址; 围岩稳定; 渗透性; 水幕; 渗控

中图分类号:TE822 **文献标志码:**A

文章编号:1001-5485(2019)05-0141-08

Research Status and Thinking about Underground Oil Storage in Rock Caverns in China

QIN Zhi-yong, GAO Xi-min

(SINOPEC Pipeline Storage & Transportation Co., Ltd., Xuzhou 221008, China)

Abstract: Considered as the best way to store oil, underground oil storage in rock caverns is in urgent need for the national petroleum reserve. Subject to the technical blockade of foreign countries, many large caverns in China are directly undergoing engineering practice with no technical standards or construction standards, posing a great deal of challenges. By sorting out literatures on water-sealed oil storage caverns, we discuss in this paper our theoretical and practical understandings of such key technologies as site selection of water-sealed oil storage caverns, stability of surrounding rock, permeability of surrounding rock, design and application of water curtain system, and seepage control. Current survey, design, and construction are mainly based on the continuum theory and methods, and understanding on rock fissure control is insufficient, resulting in the difficulties of constructing water-sealed caverns. In light of problems in current engineering practice, we suggest that fundamental research should be intensified, summaries and standard compiling should be strengthened, and admittance qualification of the industry should be furthered opened.

Key words: underground oil storage in rock caverns; site selection; surrounding rock stability; seepage properties; water curtain system; seepage control

1 研究背景

水封石洞油库技术 1938 年始于瑞典, 至今已有

80 余年的研究和发展历史。国内水封石洞油库的建设始于 1977 年建成的黄岛 15 万 m³ 水封石洞原油库^[1]。国内水封石洞油库技术的发展滞后于国际水平。山东黄岛、辽宁锦州、广东惠州、广东湛江

等多个 300 万 m^3 或 500 万 m^3 国家战略油库的建设,都是在缺乏必要的技术标准和建设标准的情况下,直接进入了工程实践阶段。在诸多基础应用理论和工程实用经验上都还很薄弱,而且受限于国外技术的封锁。

另一方面,我国石油能源对外依存度高。预计到 2020 年,我国石油需求总量将超过 7 亿 t,届时预计将有 70% 的石油必须依靠进口。按照国际能源组织建议,石油输入国应保有 90 d 石油进口量储备,按此计算 2020 年中国应保有约 1.2 亿 t 以上石油储备量,至少需建设 1.5 亿 m^3 储备库^[2]。

水封石洞油库是目前公认最好的油品存储形式,在安全性、经济性和环保性等方面都有突出优势。鉴于当前复杂的国际形势和迫切的战略需求,提升大规模水封石洞油库建设水平、加快大规模水封石洞油库建设步伐势在必行^[3]。

本文旨在通过对我国水封石洞油库研究现状的分析,梳理现有的理论和工程实践认识,在此基础上结合现阶段工程实践中面临的问题,讨论下阶段工作重点,以期对下阶段工作有借鉴作用。

2 洞库选址研究

水封石洞油库对选址要求很高。好的场址可以有效保障洞库后续功能的正常发挥,选址如不合适,不仅将极大地增加工程建设成本,甚至可能导致工程失败。Bérest^[4]早在 20 世纪 90 年代初就对世界范围内地下油气库存储中一些事故案例进行了分析,对潜在灾害的类型及可能造成的损失进行了总结,强调了选址工作的重要性。

国内,杨森等^[5]在 2004 年对黄岛 300 万 m^3 战略储油库的选址及建设方案进行了论证。2008 年,王梦恕等^[3]、刘琦等^[6]、彭振华等^[7]分别对水封洞库的选址要求进行了分析,相关成果纳入《地下水封石洞油库设计规范》(GB 50455—2008)^[8]。《地下水封石洞油库设计规范》(GB 50455—2008)从土地规划、储运条件、地质及水文条件、构造及环保条件、安全距离要求 5 个方面对洞库选址进行了规定,其中,地质及水文条件被工程建设人员所重点关注。

随着工程实践的深入,对洞库选址的要求也在发生变化。韩雪峰^[9]、张奇华^[10]先后对《地下水封石洞油库设计规范》(GB 50455—2008)中“围岩渗透系数应 $<10\sim5\text{ m/d}$ ”的要求提出了质疑,即将发行的修订版规范中也放宽了对渗水量的要求,单日允许涌水量由之前库容量的 0.01% 放宽到了

0.02%^[11]。陈祥等^[12]提出了水封石洞油库场址评价的十因素指标体系,李小彤等^[13]从地质适宜、稳定适宜、水封适宜 3 大方面对我国首批 4 座大规模地下水封油库的场址适宜性进行了分析。

洞库的选址一方面需要明确对场址的各项指标要求,另一方面还需要通过详细的勘察论证以确定待选址是否符合要求。水封洞库行业在 2008 年发布了专门的勘察规范《地下水封洞库岩土工程勘察规范》(SY/T 0610—2008)^[14],但规范发布时,国内还没有 100 万 m^3 以上洞库的建设经验。库容越小,占地面积越小,对选址的要求也越低。换言之,库容量越大,洞库遭遇大规模渗水裂隙和其他不良地质体的可能性也越大,带来的勘测难度也会越大。依托小规模洞库建设经验总结出的规范,在面临大洞库建设时会面临新的挑战。

针对大规模洞库选址,现有工程经验还不充分,规程规范也还有待完善,这也要求我们在开展洞库选址工作时需要谨小慎微,强调系统性和精细度。通过系统性的精细勘察,查明待选场址区地质、水文条件,尤其是基岩埋深、岩体风化程度、岩体中结构面的发育特征等关键指标。前期的系统性精细勘察能够在后期的设计、施工中起到事半功倍的效果。

在洞库选址方面,印度 Millen 等^[15]介绍的 Visakhapatnam 洞库勘测过程及成果分析方法,Markita 等^[16]结合日本 Kuji、Kikuma、Kushikino 3 座洞库的设计及建设开展的围岩质量动态判别及洞室围岩渗透特性动态探测及控制方法,可以为我国洞库选址、勘测提供很好的借鉴。

3 洞库围岩稳定性研究

水封洞库工程属地下洞室工程,按照以往工程经验,对地下洞室围岩稳定性起控制作用的主要是围岩自身性状、地应力条件和地下水条件。水封洞库划定以 I 级、II 级为主体的岩体为适宜建库岩体,洞库岩体质量一般优良。洞库选址要求避开高烈度地震区,洞库所在位置构造应力通常不大,洞库埋深一般在百余米左右,上覆岩体自重应力也有限,所以水封洞库围岩很少出现高应力破坏现象^[17]。水封洞库对地下水环境条件有要求,需要布置在稳定地下水位以下,但是一般距稳定地下水位也只有几十米高差,而且洞库要求围岩具有低渗透性,水封洞库围岩也很少发生由于高水压所导致的围岩整体破坏。总体而言,目前已建和在建水封洞库围岩稳定性通常较好,大部分洞室都具备裸洞开挖成型的

条件。

正因为水封洞库围岩的整体稳定性普遍较好,目前该领域研究工作相对有限。胡谋鹏等^[18-19]基于 GSI 分级开展岩体宏观参数估算,然后采用 FLAC^{3D} 分析了辽宁某地下水封洞库围岩稳定性,对洞库间距进行了论证。王金国^[20]也采用 FLAC^{3D} 分析了某地下水封洞库围岩的稳定性。季惠彬等^[21]依托黄岛 300 万 m³ 水封洞库项目,在 Q 分级方法基础上建立针对水封洞库围岩的 UWCQ 分级体系。水封洞库围岩极少出现整体稳定问题,以局部块体失稳为主要破坏形式。张文辉等^[22]针对黄岛洞库围岩开展了潜在失稳块体辨识及块体稳定性分析。邹灿等^[23]对烟台万华地下水封液化气储库施工期爆破振动进行了监测与分析。

水封洞库建造在稳定地下水位以下,对洞库围岩稳定性的分析离不开水-力耦合研究。李术才等^[24]基于离散介质流固耦合理论,采用 UDEC 分析了黄岛洞库工程的水封性和稳定性。王者超等^[25]也依托黄岛水封洞库工程,研究了围岩力学参数、水力学参数取值,对洞库施工全过程进行了应力-渗流耦合分析。于崇等^[26]针对大连某石油储备工程,通过连续介质数值模拟反演初始地应力场,基于水力学试验和结构面统计采用 3DEC 方法研究岩体渗透张量,然后对洞室群围岩稳定性及渗流场进行了分析。Qiao 等^[27]结合施工期实际监测资料分析了水封洞库洞室围岩的稳定性。

现有文献表明,目前已建和在建洞库工程还没有明显遭遇不可处理的洞室围岩稳定问题,已建和在建洞库施工期围岩稳定性普遍较好。但是,目前洞库都是按 50 a 的使用寿命设计的,而且普遍具有复杂洞群、大跨度、高边墙、裸洞不衬砌、多相介质长期耦合作用、多因素长期扰动、不具备维修条件等显著特点。洞库围岩虽然短期稳定性较好,但是在长效作用下,洞库围岩的稳定性会逐渐弱化。针对水封洞库围岩的长期稳定性问题目前鲜有深入系统的研究。王芝银等^[28]针对某大型地下储油洞,采用 FLAC^{3D} 数值分析方法对洞库开挖方式进行了对比研究,采用黏弹性稳定性分析方法研究了洞库围岩的长期稳定性。李鹏等^[29]对美国大型地下水封洞库长期稳定性相关试验规范做了概述。徐卫亚等^[30]通过室内试验研究了岩石及结构面的流变力学特征,然后以数值模拟为主要手段分析了洞库围岩的长期安全性。

目前针对洞库围岩长期稳定性的研究主要侧重于理论研究,研究成果还未能在工程实践中得到检

验和验证,对实际工程的指导意义有限。鉴于水封洞库围岩长期安全的重要性,建议通过实际工程典型断面全生命周期监测研究洞库围岩长效稳定特征及长效失稳机制。同时,从洞库围岩长效安全角度考虑,应关注洞室开挖施工质量、支护工程质量,如重点关注爆破扰动影响、喷层质量及喷层与围岩粘结强度、锚杆施工质量及灌浆密实度等,为洞库围岩长效稳定提供先决条件。

4 洞库围岩渗透性研究

为了保证水封性,洞库需要建造在稳定地下水位线以下,对渗流问题的研究不可避免。渗流问题是水封洞库设计、建造和运营中需要重点考虑的关键问题。

杨明举等^[31-32]、张振刚等^[33]、谭忠盛等^[34]、刘贯群等^[35]先后对我国汕头修建的第一座 20 万 m³ 地下水封 LPG 洞库采用连续介质数值模拟方法进行了渗流场分析。巫润建等^[36]对锦州洞库工程渗流场进行了连续介质数值模拟分析。刘贯群等^[35]、巫润建等^[36]还重点讨论了水幕系统对渗流场的影响。赵乐之等^[37]、蒋中明等^[38]、张彬等^[39]依托黄岛水封洞库工程,采用 FLAC^{3D}、COMSOL Multiphysics 等软件,对洞库围岩开展了饱和/非饱和/非恒定流固耦合分析。蒋中明等^[40]还对惠州地下水封油库开展了三维非恒定渗流场研究。刘画眉等^[41]利用 Visual MODFLOW 软件分析了惠州洞库建设对周边大范围地下水位的影响。

渗流场研究的目标,一方面是了解地下水位变化,另一方面是了解库内涌水量。许建聪等^[42]采用 FLAC^{3D} 计算了锦州洞库渗流量,并与法国专家经验法、大岛洋志经验方法、《铁路工程水文地质勘测规范》(TB 10049—96)等方法的计算结果进行了比较。何国富^[43]采用常规水文地质比拟法、经验解析法、FLAC^{3D} 数值模拟方法对湛江水封洞库工程涌水量进行了估测。路文龙等^[44]探讨了单条裂隙破碎带对地下水封洞库涌水量的影响。刘晓亮等^[45]介绍了黄岛洞库工程运营期渗水量的长期监测结果。

要想获得准确合理的渗流场研究结果,首先需要获得准确合理的岩体渗透特性参数。当前主要通过 2 个途径获取水封洞库围岩渗透性参数:其一是依据现场水力学试验获取岩体渗透性参数;其二是通过对岩体中结构面的统计分析获得岩体各向异性渗透性指标。犹香智等^[46]依托黄岛洞库工程水力学试验研究了围岩的渗透性参数,然后采用 FE-

FLOW 对比研究了无水幕和有水幕条件下的三维渗流场特征。周斌等^[47]研究了依据提水试验获取含水层渗透系数的方法,并应用于黄岛洞库工程。李印等^[48]介绍了法国 GEOSTOCK 公司提出的水幕孔单孔注水-消散试验方法及其应用情况。袁东等^[49]研究了基于压水试验的均质含水层渗透系数计算方法。张奇华等^[50]依托黄岛工程对水幕孔注水试验及岩体等效渗透参数获取方法进行了研究。《地下水封石洞油库水文地质试验规程》(SH/T 3195—2017)^[51]对洞库水力学试验方法、成果整理方法有比较全面的规定。在依据结构面统计特征获取岩体渗透性参数方面,马峰等^[52-53]先后开展了黄岛洞库工程深部岩体二维、三维裂隙网络模拟,基于网络模拟结果分析了岩体的渗透张量。平洋等^[54]也以黄岛洞库工程为背景,采用 3DEC 软件研究了不同尺度岩体的渗透张量特征,依据水力学试验结果对渗透张量进行校核,在此基础上开展了考虑裂隙岩体渗透各向异性的三维渗流场分析。Yu 等^[55]基于裂隙网络特征及水力学试验结果分析渗透张量,采用连续介质数值模拟方法分析渗流场特征。

虽然目前针对水封洞库工程渗透特性开展了大量研究工作,相关规范也即将发布,但是在工程实践中,仍然存在大量棘手问题。如在地下洞库施工过程中,经常会遭遇意料之外的透水裂隙,因为个别裂隙的突然透水可能导致整个洞库渗水量急剧增加。而且,针对这些透水裂隙,在工程处理时现有措施往往很难达到理想效果,经常会面临这里堵住了、那里又开始漏水的被动局面。封堵措施有效性低、渗水量控制不到位,还可能导致施工期地下水位降幅超标等不利情况。

之所以仍然面临这些棘手问题,很大程度上是因为水封洞库围岩的裂隙渗水特征。因为洞库岩体质量总体较好,洞室开挖期间全断面大量渗水的情况通常不易出现,主要是导水裂隙渗水。但是,对于一个几百万 m^3 储量的洞库,洞库平面范围可能会达到 1 km^2 ,在如此大范围内,要想将主要渗水裂隙都事先查明,现有的勘测和检测手段还不具备这样的能力。而且,目前对岩体渗流的分析,主要手段还是基于等效连续介质思路,基于裂隙渗流的分析理论和软件都还不甚成熟。这就导致了分析模型的建立、分析参数的选取、分析方法的采用,与洞库岩体渗流的实际情况之间必然存在差异,现有的技术、方法、理论还不能满足实际工程的需要。

现有认识已经表明,为了更好地实施水封洞库项目后续工作,对洞库围岩中渗水裂隙的深入研究

必不可少。目前研究岩体中透水裂隙分布特征的手段主要有工程地质分析法、现场结构面实测编录法、物探检测方法、水力学试验反分析方法等。李仲奎等^[56]指出,水幕洞和水幕孔的施工一般早于储油主洞室,对水幕洞、水幕孔以及施工辅助巷道所揭露结构面的精细编录和研究,配合水幕孔水力学试验资料分析,可以为预测主洞岩体结构提供非常宝贵的资料。

另外,由于水封洞库的建设周期一般较长,参建单位也很多,各个单位所掌握的信息通常都很片面。鉴于此,可以考虑利用现在比较成熟的 BIM 技术,全过程集成洞库勘测阶段、施工阶段各方面信息,实时、直观地展示洞库围岩结构相关信息,然后以此为基础,开展渗流场分析、研究、咨询和决策。

5 水幕系统设计及应用研究

水幕系统的设计与测试技术是水封洞库的核心技术,国外研究较早并取得了成熟的设计经验,但均以专有技术形式进行保护。从已有文献看,国外对水幕系统设计原则及水幕系统连通性现场试验与判断方法等方面研究成果报道不多。Chung 等^[57]针对地下水位的复杂性,提出了依据降雨监测数据预测钻孔水位的 WMLR 方法,并在实际工程中进行了应用验证。Kurose 等^[58]提出了基于现场监测信息的动态设计及动态施工方法,用于指导日本最大规模水封 LPG 洞库施工。为了攻克该领域技术难题,国内学者和工程技术人员开展了大量针对性理论和试验研究,特别是结合我国第一座大型水封石洞油库工程——300 万 m^3 黄岛洞库工程实践,进行了比较全面的总结,提升了对水幕系统的理论和实践认识,发展了相关的水力学试验技术,但是也依然存在一些争议。

张秀山^[59]介绍了我国 1977 年建成的第一座水封洞库工程——黄岛 15 万 m^3 水封洞库设计期间针对水封原理及效果所做的模拟试验以及在此基础上提出的渗控方案。高翔等^[60]介绍了不衬砌地下贮气洞室的发展状况,并对人工水幕的发展、原理、设计、施工及运行效果做了较全面的分析。李仲奎等^[56,61]也介绍了不衬砌地下洞室水封准则的研究历程,对水封关键指标进行讨论,开展了专项试验,并对“施工时地下水条件散失可能会导致整个工程失败”等论述提出了质疑。

围绕 300 万 m^3 黄岛水封洞库国家示范性工程,张奇华^[10]、时洪斌等^[62]、李树忱等^[63]、王者超

等^[64-65]、刘静华等^[66]、赵少龙等^[67]都开展了深入研究,在水封原理、人工水幕设计、渗流量分析、水幕系统连通性评价、水封效果检验方法等方面形成了深入系统的认识。杨凯等^[68]对黄岛洞库水幕系统施工关键技术进行了总结。何国富等^[11]以湛江洞库工程为背景,介绍了水幕系统有效性试验的内容和成果,分析了湛江洞库预测渗水量与实际情况不一致的原因。Dai等^[69]采用二维数值模拟分析了洞库中油-水的相互作用,重点对比了库内储油与不储油时,地下水渗流场及渗漏量的差异。Li等^[70]采用子结构建模方法,对洞库及水幕巷道、水幕孔等进行三维精细模拟,模拟结果直观地反映了水、油、气的三相耦合作用,同时还分析了水幕系统的有效性及其影响因素。

通过现有研究可知,目前在洞库水封原理方面已基本达成共识,普遍倾向于接受采用垂直水力梯度 >1 的准则进行水封系统有效性判别。验证水封系统有效性的水力学试验方法、试验过程及试验成果整理方法已基本建立,《地下水封石洞油库水文地质试验规程》(SH/T 3195—2017)已经发布。但是,和洞库围岩渗透性研究类似,洞库围岩的裂隙渗流本质与等效连续介质分析方法之间的矛盾制约了水封系统设计方法及工程实践的发展,导致目前对水封系统设计方法及试验验证方法的研究不论在理论上还是实践上都还有待完善。另外,主洞室开挖期间,是不是都需要提前实施人工水幕,目前在业界也还存在不同意见。Lin等^[71]针对锦州洞库,采用三维裂隙渗流分析方法研究了不同条件水幕系统对洞库水封性的影响,指出由于裂隙渗流特点,洞库区容易出现局部水封失效的情况,在此基础上提出了水幕系统优化设计方法以及水幕系统连通性检验及评价建议方法。石磊等^[72]针对惠州洞库,采用自相关和互相关分析方法,研究了水幕系统的作用效率及其影响因素,提出了在丰水区人工水幕系统可以酌情优化的建议。

总体来说,经过300万 m^3 黄岛洞库工程的建设 and 成果总结,目前对水封的理论和实践认识已得到了极大提升,也已逐渐形成了系统的理论、方法和技术。但是,由于黄岛洞库工程2015年才投入使用,相当部分成果的总结也是最近一两年才完成,很多认识还没来得及写入规范、形成规范,普及程度也有限,导致黄岛工程的经验在同时期开展的其他洞库工程中没有得到充分发挥。目前已经完建或在建的部分洞库工程在水封系统实施及论证等方面仍然存在前期论证不足、过程控制不够、需要事后返工的现象。

6 渗控措施研究

水封洞库围岩必须保证低渗透性。运营期过大的涌水量不仅会造成运营成本增加,还会带来显著的环境问题。但是,洞库规模越大,洞库遭遇大规模透水裂隙及其他不良地质体的可能性也越大。单纯依靠洞库围岩自身的性能往往很难保证运营期洞库围岩的低渗透性要求。渗控是每个大型水封洞库工程都需要采取的必要工程措施。

张秀山^[59]在20世纪70年代就在对岩体裂隙及裂隙水研究的基础上,制定优于国外同类工程的岩体裂隙处理原则及渗控方案。梁建毅等^[73]提出了考虑岩体透水性的水文地质分类方法,用于指导黄岛洞库围岩注浆,并采用地质雷达和压水试验综合方法对注浆效果进行检验。王瑞凯等^[74]介绍了超细水泥灌浆在黄岛洞库工程中的应用情况。魏雪斐等^[75]针对黄岛洞库工程构建了数字化灌浆平台,改进了灌浆工艺。

通过文献检索可以看出,目前专门针对水封洞库渗控研究的文献很有限。《地下水封石洞油库设计规范》(GB 50455—2008)中针对洞库防水也仅有2条非常概括的规定,对实际工程的指导作用也有限。

现有文献资料有限并不能说明在水封洞库工程实践中渗控问题不重要、不突出,实际情况是渗控才是水封洞库工程实践中最棘手的难题。洞库围岩渗控问题的复杂程度要大于渗漏问题的复杂程度,特别对于水封洞库工程,在研究渗控方案时还需要考虑灌浆材料与油品可能的相互作用等特殊问题,更加大了水封洞库渗控研究的难度。

结合目前工程实践的需求,有必要编制专门的水封洞库渗控规范,明确洞库不同类型渗水问题应采用的控制手段,明确灌浆材料、灌浆工艺、灌浆孔布置、灌浆效果检验方法及标准等实际工程所迫切关心的重难点问题。

7 结论及建议

对国内水封洞库相关文献进行了比较细致的梳理,从中可以看出国内工程和科研人员在在水封洞库领域的认识现状和研究历程,对后续工作有一定的借鉴意义。

(1)在水封洞库技术研究层面,目前仍不成熟,主要体现在大型洞库选址工作不够精细、对洞库围岩长期稳定性研究不足、对围岩渗透特性的研究未能充分体现裂隙岩体渗流本质、水幕系统的设计方

法和检验方法不够完善、渗控措施缺乏系统研究和指导性规范等方面。后期还需要加大在上述方面的基础研究力度。

(2) 300 万 m^3 黄岛水封洞库工程作为国家示范工程,在论证和建设过程中取得了非常丰硕的成果,积累了宝贵的经验。但是由于黄岛工程建成投运时间不长,很多认识及成果还未来得及形成规范,对同期和目前正在开展的其他洞库工程的借鉴和指导作用体现得还不够充分,还需要依托黄岛示范工程加强成果总结、规范编制及宣贯推广工作。

(3) 目前水封洞库从业单位、从业人员相对集中,现有有经验的单位和人员可能不足以承担即将到来的大规模地下水封洞库的论证及建设,有必要放宽行业准入资格,充分发挥各单位优势和特点,共同做好后续大量的水封洞库工程建设工作。

(4) 目前的水封洞库建设存在过急隐患,相当部分项目都是在缺乏必要的技术标准和建设标准的情况下,直接进入了工程实践阶段。虽然水封洞库建设具有战略紧迫性,但还是应该充分做好必要的论证工作。Kiyoyama 等^[76]对 20 世纪 90 年代以前日本水封洞库的发展情况进行了介绍,日本当时发展水封洞库技术的迫切要求和我国当前形势非常接近,日本当时针对水封洞库的系统性研究方法与研究思路能够为我们提供非常重要的借鉴。

参考文献:

- [1] 洪开荣.地下水封能源洞库修建技术的发展与应用[J].隧道建设,2014,34(3):188-197.
- [2] 王者超,李术才,薛翊国,等.地下石油洞库水幕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.
- [3] 王梦恕,杨会军.地下水封岩洞油库设计、施工的基本原则[J].中国工程科学,2008,10(4):11-16.
- [4] BÉREST P. Accidents in Underground Oil and Gas Storages: Case Histories and Prevention[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1990, 5(4): 327-335.
- [5] 杨森,于连兴,杜胜伟.地下洞库作为国家原油储备库的可行性分析[J].油气储运,2004,23(7):22-24.
- [6] 刘琦,卢耀如,张凤娥.地下水封储油库库址的水文地质工程地质问题[J].水文地质工程地质,2008,(4):1-5.
- [7] 彭振华,李俊彦,孙承志,等.地下水封洞库的库址选择研究[J].油气储运,2008,27(1):60-62.
- [8] GB 50455—2008,地下水封石洞油库设计规范[S].北京:中国计划出版社,2009.
- [9] 韩雪峰.地下水封石洞库围岩渗透系数探讨[J].科技信息,2012,(22):369-370.
- [10] 张奇华.关于黄岛国家石油储备库水封效果评价和控制的几点认识[J].长江科学院院报,2014,31(8):112-116.
- [11] 何国富,范凌峰,黄俊凯.水幕系统有效性试验与地下水封洞库渗水预测[J].化工与医药工程,2018,39(1):2-11.
- [12] 陈祥,许兆义,张杰坤.大型地下水封石油洞库场址评价标准及评价方法[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(1):177-183.
- [13] 李小彤,王者超,刘泉声,等.地下水封油库地质条件适宜性标准与应用研究[J].地质论评,2017,63(增刊):355-356.
- [14] SY/T0610—2008,地下水封洞库岩土工程勘察规范[S].北京:石油工业出版社,2008.
- [15] MILLEN B, SIGL O, HÖFER-ÖLLINGER G. Rock Mass Behaviour of Weathered, Jointed and Faulted Khondalite—Examples from the Underground Crude Oil Storage Caverns in Visakhapatnam, India[J]. Geomechanics and Tunnelling, 2014, 7(3): 255-271.
- [16] MAKITA T, MIYANAGA Y, IGUCHI K, et al. Underground Oil Storage Facilities in Japan[J]. Engineering Geology, 1993, 35(3/4): 191-198.
- [17] 王章琼,晏鄂川,鲁功达,等.我国大陆地下水封洞库库址区地应力场分布规律统计分析[J].岩土力学,2014,35(增1):251-256.
- [18] 胡谋鹏,梁久正,许杰.地下水封储油库围岩稳定性数值分析[J].油气储运,2013,32(4):370-375.
- [19] 胡谋鹏,陈雪见,梁久正,等.地下水封储油库围岩间距的 FLAC3D 数值分析[J].油气储运,2015,34(9):1005-1009.
- [20] 王金国.地下水封石洞油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.
- [21] 季惠彬,晏鄂川,宋琨,等.地下水封洞库岩体质量分级体系研究[J].长江科学院院报,2012,29(7):62-66.
- [22] 张文辉,赵晓,周永力,等.大型地下水封石洞油库水封系统关键技术研究及其应用[R].北京:中国岩石力学与工程学会,2014.
- [23] 邹灿,吴立,左清军.地下水封石洞储库爆破振动监测与分析[J].爆破,2014,31(1):84-88.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 于崇,李海波,周庆生.大连地下石油储备库洞室群围岩稳定性及渗流场分析[J].岩石力学与工程学报,2012,31(增1):2704-2710.
- [27] QIAO Li-ping, LI Shu-cai, WANG Zhe-chao, et al.

- Geotechnical Monitoring on the Stability of a Pilot Underground Crude-oil Storage Facility During the Construction Phase in China[J]. *Measurement*, 2016, 82: 421-431.
- [28] 王芝银,李云鹏,郭书太,等.大型地下储油洞粘弹性稳定性分析[J].*岩土力学*,2005,26(11):1705-1710.
- [29] 李 鹏,栗金东,赵 晓,等.美国大型地下水封石油气库长期稳定性试验规范概述[J].*长江科学院院报*,2014,31(8):127-131,136.
- [30] 徐卫亚,张 超,王如宾,等.大型地下水封洞库围岩流变力学与长期安全性分析[M].北京:科学出版社,2016.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 张振刚,谭忠盛,万美林,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.
- [34] 谭忠盛,万美林,张振刚.地下水封式液化石油气储藏洞库修建技术[J].*土木工程学报*,2006,39(6):88-95.
- [35] 刘贯群,韩 曼,宋 涛,等.地下水封石油洞库渗流场的数值分析[J].*中国海洋大学学报(自然科学版)*,2007,37(5):819-824.
- [36] 巫润建,李国敏,董艳辉,等.锦州某地下水封洞库工程渗流场数值分析[J].*长江科学院院报*,2009,26(10):87-91.
- [37] 赵乐之,刘保国,赵 峰.考虑流固耦合的地下储油洞库稳定性研究[J].*地下空间与工程学报*,2011,7(1):155-162.
- [38] 蒋中明,冯树荣,曾 铃,等.水封油库地下水位动态变化特性数值研究[J].*岩土工程学报*,2011,33(11):1780-1785.
- [39] 张 彬,李卫明,封 帆,等.基于 COMSOL 的地下水封油库围岩流固耦合特征模拟研究[J].*工程地质学报*,2012,20(5):789-795.
- [40] 蒋中明,冯树荣,赵海斌,等.惠州地下水封油库三维非恒定渗流场研究[J].*地下空间与工程学报*,2012,8(2):334-338,344.
- [41] 刘画眉,蔡素芳,郑国栋.某地下水封洞库工程对区域地下水位的影响分析[J].*广东水利水电*,2011,(10):25-29,38.
- [42] 许建聪,郭书太.地下水封油库围岩地下水渗流量计算[J].*岩土力学*,2010,31(4):1295-1302.
- [43] 何国富.湛江某地下水封洞库涌水量估算与分析[J].*西部探矿工程*,2011,(11):19-24,33.
- [44] 路文龙,周志芳,黄 勇.单条裂隙破碎带对地下水封洞库涌水量的影响[J].*人民黄河*,2014,36(2):112-114.
- [45] 刘晓亮,邹 静.某大型地下水封石洞油库运营期水文资料分析[J].*石油化工设计*,2017,34(3):33-37.
- [46] 犹香智,陈 刚,胡 成.黄岛地下储油库渗流场模拟[J].*地下水*,2010,32(2):140-142.
- [47] 周 斌,陈 刚.提水试验在含水层渗透系数求取中的应用——以黄岛地下水封石油洞库为例[J].*地下水*,2010,32(2):18-19.
- [48] 李 印,梁久正,陈雪见,等.新型压水试验在某地下石油储备库中的运用[J].*工程勘察*,2014,(2):40-43.
- [49] 袁 东,张奇华.基于压水试验的均质含水层渗透系数计算方法[J].*长江科学院院报*,2014,31(8):77-81.
- [50] 张奇华,李玉婕,袁 东,等.地下水封洞库水幕孔注水试验及岩体等效渗透参数分析[J].*岩土力学*,2015,36(9):2648-2658.
- [51] SH/T 3195—2017,地下水封石洞油库水文地质试验规程[S].北京:中国石化出版社,2017.
- [52] 马 峰,曾武林,陈 刚,等.地下水封石油洞库深部岩体二维裂隙网络模拟[J].*地质科技情报*,2011,30(4):104-107.
- [53] 马 峰,白凤怀,陈 刚,等.黄岛地下水封洞库库区三维裂隙网络模拟[J].*岩石力学与工程学报*,2011,30(增2):3421-3427.
- [54] 平 洋,李树忱,马腾飞,等.地下水封石油储备库初始渗流场数值反演分析[J].*地下空间与工程学报*,2015,11(6):1498-1505,1587.
- [55] YU C, DENG S C, LI H B, *et al.* The Anisotropic Seepage Analysis of Water-sealed Underground Oilstorage Caverns[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, 38: 26-37.
- [56] LI Zhong-kui, LU Bao-qi, ZOU Jing, *et al.* Design and Operation Problems Related to Water Curtain System for Underground Water-sealed Oil Storage Caverns[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, 8(5): 689-696.
- [57] CHUNG I M, KIM T, LEE K K, *et al.* Efficient Method for Estimating Groundwater Head in the Vicinity of the Underground Gas Storage Caverns in Fractured Media[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2009, 14(3): 261-270.
- [58] KUROSE H, IKEYA S, CHANG S S, *et al.* Construction of Namikata Underground LPG storage cavern in Japan[J]. *International Journal of the JCRM*, 2014, 10(2): 15-24.
- [59] 张秀山.地下油库岩体裂隙处理及水位动态预测[J].*油气储运*,1995,14(4):24-27,34.
- [60] 高 翔,谷兆祺.人工水幕在不衬砌地下贮气洞室工程中的应用[J].*岩石力学与工程学报*,1997,16(2):178-187.
- [61] 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.
- [62] 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.

- [63] 李树忱, 平 洋, 冯丙阳. 地下储油库水幕系统连通性评价[J]. 中国科技论文, 2013, 8(5): 402-407.
- [64] 王者超, 张振杰, 李术才, 等. 基于离散裂隙网络法的地下石油洞库洞室间水封性评价[J]. 山东大学学报(工学版), 2016, 42(2): 94-100, 115.
- [65] 王者超, 李术才, 乔丽苹, 等. 地下石油洞库水封性评价方法体系及应用[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(11): 2033-2042.
- [66] 刘静华, 黄圣楠, 陈 刚, 等. 关于地下水封洞库水幕系统试验的讨论[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(5): 105-110.
- [67] 赵少龙, 张乐文, 许振浩, 等. 平行裂隙条件下水幕孔间距与压力对地下储油洞库水封性影响分析[J]. 隧道建设, 2016, 36(12): 1478-1486.
- [68] 杨 凯, 赵 晓, 张文辉, 等. 大型地下石洞油气库人工水幕技术[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(9): 89-92, 100.
- [69] DAI Yun-feng, ZHOU Zhi-fang. Steady Seepage Simulation of Underground Oil Storage Caverns Based on Signorini Type Variational Inequality Formulation[J]. Geosciences Journal, 2015, 19(2): 341-355.
- [70] LI Yi, CHEN Yi-feng, ZHANG Gui-jing, et al. A Numerical Procedure for Modeling the Seepage Field of Water-sealed Underground Oil and Gas Storage Caverns[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 66: 56-63.
- [71] LIN Fang, REN Feng, LUAN He-bing, et al. Effectiveness Analysis of Water-sealing for Underground LPG Storage[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 51: 270-290.
- [72] SHI Lei, ZHANG Bin, WANG Lei, et al. Functional Efficiency Assessment of the Water Curtain System in an Underground Water-sealed Oil Storage Cavern Based on Time-series Monitoring Data[J]. Engineering Geology, 2018, 239: 79-95.
- [73] 梁建毅, 李术才, 薛翊国, 等. 地下储油库岩体水文地质分类及工程应用研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2012, 42(6): 86-92, 106.
- [74] 王瑞凯, 张 倩. 黄岛地下水封洞库注浆堵水方案及应用研究[J]. 城市建设理论研究, 2014, (14): 131-138.
- [75] 魏雪斐, 刘晓丽, 段云岭, 等. 大型地下水封储库围岩快速补强灌浆体系[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(1): 200-211.
- [76] KIYOYAMA S. The Present State of Underground Crude Oil Storage Technology in Japan[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1990, 5(4): 343-349.

(编辑: 罗 娟)

长江科学院主编的团体标准《悬索桥隧道锚现场模型试验规程》 编制大纲通过评审

2019 年 3 月 27—28 日, 中国岩石力学与工程学会在重庆组织召开团体标准《悬索桥隧道锚现场模型试验规程》编制大纲评审会议, 评审专家组由三峡大学党委书记李建林教授、中国岩石力学与工程学会副理事长郭熙灵教授级高级工程师、中国岩石力学与工程学会副秘书长黄理兴教授、武汉大学曾亚武教授、重庆交通大学向中富教授、林同棻国际工程咨询(中国)公司刘安双教授级高级工程师、重庆市交通规划勘察设计院郑升宝教授级高级工程师 7 人组成, 由中国岩石力学与工程学会副秘书长黄理兴研究员主持。

中国岩石力学与工程学会团体标准《悬索桥隧道锚现场模型试验规程》由长江水利委员会长江科学院主持编制, 长江勘测规划设计研究院、中交第二公路勘察设计院有限公司、中交第二航务工程勘察设计院有限公司参编。评审会由长江水利委员会长江科学院承办, 参编单位长江勘测规划设计研究院、中交第二公路勘察设计院有限公司、中交第二航务工程勘察设计院有限公司均派代表参加会议。

3 月 28 日上午, 评审专家及参会代表一行赴重庆江津油溪镇现场考察了油溪长江大桥隧道锚模型试验。当天下午, 在长江科学院重庆分院会议室召开了大纲评审会, 评审专家认真听取了周火明教授级高级工程师所作的《编制工作大纲》汇报, 经过质询和讨论, 一致认为编制工作大纲所提出的编写该标准的必要性、指导思想和编制原则、编制单位及分工、进度计划及标准目录基本合适, 同意《编制工作大纲》通过评审, 并提出了具体修改意见。该团体标准的负责人周火明教授级高级工程师代表编制组表示, 将根据专家评审意见和标准编制计划, 加强质量和进度控制, 按期保质完成标准制定工作。

(摘自: 长江水利科技网)