

引文: 阳小平. 中国地下储气库建设需求与关键技术发展方向[J]. 油气储运, 2023, 42(10): 1100-1106.

YANG Xiaoping. Construction demand and key technology development direction of underground gas storage in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(10): 1100-1106.

中国地下储气库建设需求与关键技术发展方向

阳小平

国家石油天然气管网集团有限公司

摘要: 能源低碳化与清洁化是中国能源发展过程中应对国内外挑战的迫切需求,作为低碳清洁能源的天然气在国家能源体系中的重要性日益凸显,而储气基础设施建设滞后、储备能力不足等问题成为制约中国天然气安全稳定供应和行业健康发展的短板。中国地下储气库建库条件差,多复杂断块,埋藏深,储层物性较差,非均质性强。复杂的地质条件一方面使得储库的建库难度大大提高,另一方面对其安全性形成重大隐患,对建库理论、技术及工程应用提出了更大挑战。结合中国储气需求和地质条件现状,回顾了地下储气库建设需求和地下储气技术发展现状,总结了气藏型储气库建设与运行技术、单井盐腔建设与运营稳定性评价技术、含水层建库技术等3方面的地下储气库关键技术上国内外存在的差距,最后指出需集中力量开展储气库建设关键技术科研攻关,快速发展地下储气库建设、运行、安全预警技术,以满足中国地下储气库建设的长期发展需求,保障中国天然气应急调峰与供气安全。(图2,参31)

关键词: 地下储气库; 气藏储库; 造腔方法; 稳定性评价; 储气关键技术

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2023)10-1100-07

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.10.003

Construction demand and key technology development direction of underground gas storage in China

YANG Xiaoping

China Oil & Gas Pipeline Network Corporation

Abstract: Low-carbon and clean energy is an urgent need for China to cope with the challenges at home and abroad in the process of energy development. Thus, natural gas as a low-carbon and clean energy is becoming more important in the national energy system. However, the problems of lagging gas storage infrastructure and insufficient reserve capacity have become the shortcomings that restrict the safe and stable supply of natural gas and the healthy development of the industry in China. The construction conditions of underground gas storage in China are poor, with many complex fault blocks, deep burial, poor reservoir physical properties and strong non-homogeneity. The complex geological conditions not only greatly improve the construction difficulty of underground gas storage in China, but also form a safety hazard for the gas storage, which poses a greater challenge to the theory, technology and engineering application of gas storage construction in China. Herein, the construction demand and the current technical status of underground gas storage in China were reviewed based on the current situation of gas storage demand and the geological conditions. Meanwhile, the gap between the domestic and foreign key technologies of underground gas storage was summarized from the following three aspects: the construction and operation technology of gas reservoir type gas storage, the stability evaluation technology of single well salt cavern construction and operation, and the construction technology of aquifer type gas storage. Finally, it was pointed out that it was necessary to focus on the scientific research on key technologies of gas storage construction, rapidly develop the underground gas storage construction, operation and safety early warning technology, so as to meet the long-term development needs of underground gas storage construction, and ensure the emergency peak regulation and gas supply safety of natural gas in China. (2 Figures, 31 References)

Key words: underground gas storage, gas reservoir type gas storage, solution mining method, stability evaluation, key technology of gas storage

地下储气库是指将天然气注入地下枯竭油气藏、含水层或洞穴等地下空间形成的储气场所。在天然气产业链中,地下储气库是“产、运、储、销、用”的五大关键环节之一,是实现天然气季节性调峰和大规模储备的重要基础设施^[1-2]。按照天然气储备场所和方式的不同,天然气存储可分为地面罐装存储和地下储气库存储。地面罐装存储包括地面储气罐储气、高压管束储气、管道储气及LNG储气等;地下储气库按地质构造可分为枯竭油气藏储气库、含水层地下储气库、盐岩储气库及地下矿坑储气库等。地下储气库储存天然气具有储量大、经济性好、安全性高、占地面积小以及受气候影响小等优点。根据对世界范围内地下储气库的工作气量与日采气能力统计^[2],地下储气库主要为气藏型,其工作气量约占总储气量的75%;其次是地下含水层储气库,其工作气量约占总储气量的12%;最后是盐岩储气库与油藏型储气库,其工作气量各占总储气量的7%、6%。日采气数据表明,拥有75%工作气量的气藏型储气库其日采气能力仅占总日采气能力的59%;盐岩型储气库日采气量占比却高达23%。可见,气藏型储气库虽然储气量大,但采气能力相对较弱;盐岩储气库吞吐量巨大,在调峰供气 and 灵活存储方面拥有巨大优势^[3]。

中国储气库建库地质条件复杂,建库难度大,多年的建设和运行经验表明,其理论与技术水平相比国外仍存在差距,大大制约了储气库业务的快速和可持续发展。主要表现在4个方面:①对储层微观注采渗流机理研究的不足,导致部分储气库达容时间长、效率低;②对圈闭动态密封性研究的不足,导致储气库运行压力趋于保守,不能进一步提升储层动用率;③对注采井管柱检测、井筒环空压力控制研究的不足,导致井筒完整性失效风险高;④对地面大型压缩机等关键设备研究的不足,导致设备完全依赖进口,备货时间长,维保费用高,建库周期延长,成本增加^[3]。此外,地下储气库强注强采作业模式使得储气库的建设安全标准进一步提高,因此需快速发展地下储气库建设、运行、安全预警技术,以满足中国地下储气库建设的长期发展需求^[4]。

1 中国储气库产业现状及发展意义

1.1 地下大规模储气需求

由于天然气的季节性需求差异,充足的储备是保

证稳定供应的关键。但夏季与冬季的天然气价格差、调峰气价及高峰时的议价气是促使欧美储气库高度发展的主要驱动力^[5]。在中国天然气“产、运、储、销、用”体系中,“储”是最薄弱的环节。截至2022年底,中国累计建成储气库24座(图1),形成工作气量约为 $190 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中衰竭油气藏型储气库20座、盐穴储气库4座。储气库工作气量约占天然气消费量(2022年)的5%,距离保安调峰所需的15%仍具有较大差距^[6-7]。根据中国天然气消费前景预测,还需建设约 $600 \times 10^8 \text{ m}^3$ 战略储备存储空间。中国对储气空间需求巨大,加快储气库建设是天然气行业发展必须优先解决的难题。

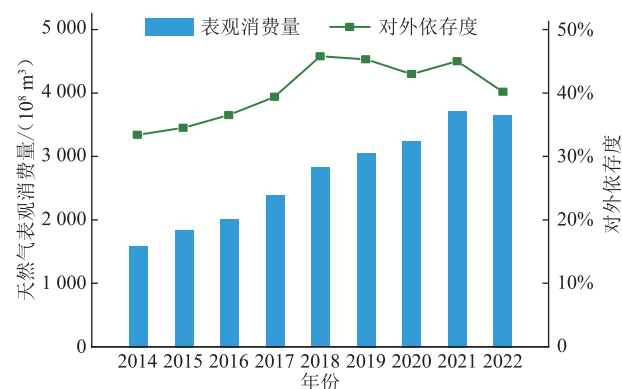


图1 2014—2019年中国天然气表观消费量与对外依存度变化趋势图

Fig. 1 Trend of apparent consumption and external dependence of natural gas in China from 2014 to 2019

储气库独立运营,向市场提供服务,必须建立单独的定价机制。可以说,储气业务独立运营,成为一个盈利主体,使得储气环节单独定价成为必然^[8]。2019年,在国家发改委、能源局的指导下,上海石油天然气交易中心与港华深度合作,开展了港华金坛储气库调峰气交易研究并具体组织了线上交易工作,具体设计了“大管网”与“小管网”模式。其中,港华金坛储气库调峰气上线交易为天然气“产、供、储、销、用”体系开拓了一个新思路,可为中国储气库经营提供有效借鉴。

中国天然气产业迅速发展,天然气消费持续增长,在国家能源体系中的重要性不断提高^[9-14]。2014—2022年,中国天然气对外依存度从32.2%升至40.5%,表观需求量从 $1830 \times 10^8 \text{ m}^3$ 骤升至 $3663 \times 10^8 \text{ m}^3$ (增幅100.16%)^[2],中国天然气进口量高速增长,对外依存度持续上升(图1),预计到2030年,对外依存度将攀升至55%^[15]。目前,中国应急储气缺口巨大,储气库建设滞后,长期储备能力短缺,严重威胁了国家能源

安全^[16]。因此,加快储气库建设、挖掘地下储气库经济潜力,对上游生产、管道运行、冬季调峰保供具有积极作用,也是在中国天然气对外依存度如此之高的背景下保障国家能源安全的重要手段。

2018年2月,习近平总书记作出加强天然气产供储销体系建设的重要指示。国家相关部委密集出台文件,要求全力以赴做好天然气产供储销体系建设,弥补储气能力不足的短板。根据国家发改委发布运行快报,2022年,天然气在中国一次能源消费结构中占比约9.4%。国家清洁能源发展战略的推动,将使得未来天然气消费仍保持较快增长态势。因此,尽快形成与中国天然气消费需求相适应的储气能力是保障天然气稳定供应的迫切、必然要求。

1.2 中国储气库行业发展现状

20年来,中国储气库业务发展主要分3个阶段:①1999—2010年,以9座储气库发展为代表的起步探索期,基于枯竭气藏依次建造了大港储气库、大庆油田储气库、板中北储气库等^[9]。2007年投入运营的金坛储气库是中国建成的首座地下盐岩储气库,标志着中国开启天然气盐穴储气元年。②2010—2014年的快速发展阶段,陆续建成呼图壁、相国寺等6座大型地下储气库^[10]。③2015年至今的稳定发展期。截至2022年,全国地下储气库数量已增至24座,全国地下储气库累计库容达到 $473.73 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[11-14]。

当前,中国储气库技术与标准体系框架已初步建立^[12],但针对复杂地质条件的关键技术储备仍较为薄弱^[14],从业技术人员专业缺失,技术水平和技术人员体系尚不能满足目前业务快速发展的需要。

(1)在专业技术方面,因储气库具有多周期运行、短期内高速注采等特性,常规油气藏开发专业远不能满足业务需求;在地质圈闭动静密封性评价、微观注采渗流机理、储气库地质动态跟踪及优化运行、井筒腐蚀、地应力评价方面缺少完整的指导技术体系。

(2)在人才体系方面,目前从事储气库的专业研究机构数量少,地质气藏专业主要依托勘探开发研究院,钻完井专业主要依托工程技术研究院,技术人才不足。油田所属的各储气库虽已成立相应的管理部门,但专业技术人员比例不高,大部分在20%以下;除勘探院和工程院储气库所外,各油田储气库大部分也没有专属的研究力量,其科研工作主要通过临时抽调各专业人员完成,人员流动性强,业务能力参差不齐。

2 地下储气库关键技术

2.1 气藏型储气库建设与运行技术

国外气藏型储气库建设与运行技术成熟配套,在动态密封理论、库容动用、气井配产等方面具有丰富的理论基础和现场经验^[17-18],主要体现在以下方面:①在动态密封理论方面,建立了复杂储气库动态密封理论,形成以四维地质力学建模为核心的提压运行技术,运行期间采用全方位“三位一体”监测保障储气库安全运行;②在储气空间动用模拟评价方面,形成了强注强采条件下注采能力优化设计技术,建立了储气库注采物理模拟评价技术,已构建相对成熟的渗流模拟与分析方法;③在库容动用评价方面,形成了气藏型储气库库容动用评价技术,建立了适用于储气库稳定注采运行阶段的库存评价模型^[14],目前已构建相对成熟完善的储气库库容评估与管理的方法与模型,实现了储气库库容的自动化评估。储气库运行优化关键技术主要包括复杂储气库动态密封理论、裂缝-孔隙底水储层高速流空间动用机理、储气库库容动用评价技术以及储气库注采能力优化设计技术^[14,19]。

2.2 单井盐腔建设与运营稳定性评价技术

目前,国外在巨厚盐层单井盐腔建设与运营稳定性评价方面已形成丰富的经验认识和成熟的技术方法。国外现已广泛采用丛式井建库技术,如德国 Etzel 储气库北区采用丛式井技术建站,共布置11个丛式井组,单个站场布置3~7口井^[20],并采用大尺寸井身结构及大尺寸造腔管柱,可大幅提高排卤流量、缩短造腔周期、降低管柱摩阻和能耗。在造腔技术方面,盐腔体积不断扩大、分段造腔方式多样化、造腔数值模拟软件日趋完善。在稳定性评价方面,构建了多种盐岩蠕变损伤、剪胀模型,可用于评价盐穴储气库注采运行过程中腔体围岩出现损伤变形引起的安全稳定风险^[21]。

2.3 含水层建库技术

水层建库一般需经历区域勘探、圈闭预探、圈闭详探试注、工业性过渡循环注采、大规模商业化调峰运行等阶段,专业跨度大、技术难点多,建库周期至少10年以上。国外针对浅层高渗构造完整水层,形成了水层圈闭勘探评价、增压注气滚动扩容以及全生命周期运行优化与监测等配套技术,尤其重视水层建库勘探与评价工作,确保地质体的完整性(图2)。但中国水层储气库起步较晚,2010年开始在东部地区开展水层筛

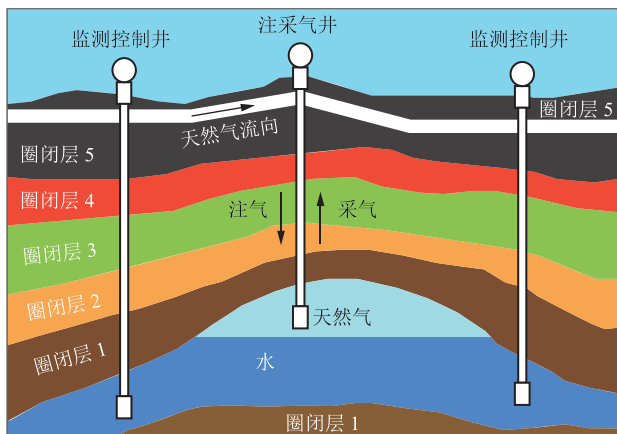


图2 浅层水层建库技术流程示意图
Fig. 2 Process flow of construction technology for shallow aquifer type gas storage

选评价,初步建立了含水层建库储层质量评价技术流程,提出了圈闭预探和地质勘查详勘的两阶段评价方法,形成了含水层建库前期可行性评价的一整套研究方法及技术流程,水层建库研究尚处于探索阶段^[22]。

3 中国地下储气技术发展方向

较之国外,中国储气库技术仍存在一定差距,需集中有效的科研力量开展关键技术攻关。

3.1 以动态监测为核心的地层风险预警技术

盐岩储气库在能源存储方面具有诸多优势,但地质赋存情况复杂、建库实践不足、理论体系不完备等因素,致使储库密闭性和稳定性都遭遇巨大挑战。储气库安全事故的发生主要集中在油气渗漏、地表沉陷及腔体失效方面。当前,地下储气库的腔体稳定性评估方法主要以地表沉降监测和力学稳定性评价为主,难以实现储气库安全的实时监测^[23]。在对盐穴储气库运行压力优化过程中,需对盐穴稳定性进行实时监测,采用现场数据对优化后的运行压力区间进行评价。此外,由于建库工程的隐蔽性和复杂性,导致储库泄漏原因和渗漏模式各异,目前世界范围内仍未形成完备的密闭性评价体系。同时,中国湖相沉积的层状盐岩相比欧美地区的巨厚盐丘,具有层多、盐层薄、埋深大、品位低等诸多不利因素,导致层状盐岩储库密闭性评价更加复杂,渗漏模式也更加多样。因此,力学数值模拟技术对于中国层状盐岩储库密闭性评价有很大局限性,密闭性评价标准也未形成规范。地下储气库的稳定性和密闭性是安全平稳运行的关键,因此,成熟的储气库安全性研究,不仅包括力学数值模拟,而且要建立

完善的现场实时监测系统,将实测数据与力学分析相结合是未来储气库的研究方向。

3.2 注采井完整性检测与风险评估技术

储气库注采井作为天然气注采的通道,在运行过程中可能受套管腐蚀、设备密封失效、固井质量差、误操作、第三方损坏及地震等多种因素的影响,造成盐穴储气库中井筒失效及环空带压等事故^[24-25]。截至2022年,在全世界的储气库泄漏事故中,有12起及以上与井筒失效相关。在多数情况下,储存的高压气体不会直接在地面泄漏,高压气体首先由井筒泄漏并在地下积聚,然后通过浅层运移并在地表逸出。在发生气体泄漏事故时,由于泄漏源头在地面以下几百米甚至几千米,事故溯源难以完成。

对于井筒泄漏难以溯源的工程难题,首先应结合理论与试验分析建立各种潜在的井筒泄漏模式,并基于地质条件和现场工况形成井筒泄漏预测数学工具和注采井泄漏概率计算模型;此外,还需建立井筒泄漏监测系统,结合微地震、光纤监测及微泄漏监测装置,形成完整且实时的井筒泄漏风险监测体系,以降低未知地质条件与极端工况带来的井筒密封性失效风险。

3.3 储气库全生命周期的安全风险管控技术

为保证储气库在建设 and 运行过程中的安全性,需建立完善的监测系统。常规的稳定性气密性评价通常依靠数值模型进行力学分析,该方法一般用于运行参数的前期优化,所依据的数据具有滞后性,最终所得结果也具有不确定性。微地震事件定位对于正确分析局部破裂活动、了解事件位置分布、降低腔体破裂风险至关重要。如果在储气库运行参数现场调试中成功应用该技术,能够更安全地探究储气库运行压力上下限,有助于优化工作气量。对于层状盐岩储库盖层和夹层的密封特性、渗漏通道、泄漏机理研究至今仍停留在事故的现象分析阶段。今后应增加相关腔体、井筒密封性监测和保障措施研究,以降低高压带来的密封性失效风险。

3.4 储气库数字化技术

在储气库的数字化方面,应努力构建以三维地质模型为中心的储气库研究一体化平台,开展体积平衡方程解法和非结构化网格技术、智能网格粗化技术、地面-地下一体化数值模拟技术、多油藏一体化模拟技术攻关,形成储气库油气藏圈闭三维精细地质研究及建模技术,实现一体化平台地质力学建模与动态密封性评价^[26]。针对储气库多周期高速注采机理的复杂性

和特殊性,需开展储气库注采优化技术科研攻关,建成数字化储气库运营优化管理系统,构建库群协同调峰预测模型^[27-31]。

4 结论

(1)经过多年发展,中国储气库技术和标准体系框架已初步建立,在气藏型储气库运行优化技术、厚盐层单井造腔技术等方面取得积极进展并完成了现场工程应用。但整体而言,中国的大规模储气能力仍不足,储气基础建设依然滞后,地下储气技术体系和人才结构不够完善,制约了中国天然气安全稳定供应。

(2)中国地下储气关键技术尚未突破。相比欧美国家,中国储气库建设起步较晚,同时中国建库条件也更加复杂,目前尚未建立一套针对中国地质条件的地下储气库建设、运行评估理论体系,尤其是在气藏型储气库运行评估、薄盐层造腔技术及浅层水层建库技术方面亟待突破。

(3)为加快中国地下储气库建设,应集中力量从以下方面进行科研攻关:攻克以动态监测为核心的地层风险预警技术、建立注采井完整性检测与风险评估体系、完善储气库全生命周期安全风险管控体系、创建数字化储气库平台和强化生产指挥平台,形成适用于中国特色地质条件的储气库建设指导体系,从而保障中国天然气应急调峰、供气安全及战略安全储备。

参考文献:

- [1] 丁国生. 中国地下储气库的需求与挑战[J]. 天然气工业, 2011, 31(12): 90-93. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2011.12.016.
DING G S. Demand and challenges for underground gas storages in China[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12): 90-93.
- [2] 杨春和, 王同涛. 深地储能研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(9): 1729-1759. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2022.0829.
YANG C H, WANG T T. Advance in deep underground energy storage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(9): 1729-1759.
- [3] 李建君. 中国地下储气库发展现状及展望[J]. 油气储运, 2022, 41(7): 780-786. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.07.004.
LI J J. Development status and prospect of underground gas storage in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(7): 780-786.
- [4] 杨海军. 中国盐穴储气库建设关键技术及挑战[J]. 油气储运, 2017, 36(7): 747-753. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2017.07.001.
YANG H J. Construction key technologies and challenges of salt-cavern gas storage in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(7): 747-753.
- [5] 张刚雄, 李彬, 郑得文, 丁国生, 魏欢, 钱品淑, 等. 中国地下储气库业务面临的挑战及对策建议[J]. 天然气工业, 2017, 37(1): 153-159. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2017.01.020.
ZHANG G X, LI B, ZHENG D W, DING G S, WEI H, QIAN P S, et al. Challenges to and proposals for underground gas storage (UGS) business in China[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(1): 153-159.
- [6] 洪波, 丛威, 付定华, 宋镇. 欧美储气库的运营管理及定价对我国的借鉴[J]. 国际石油经济, 2014, 22(4): 23-29, 109. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7298.2014.04.004.
HONG B, CONG W, FU D H, SONG Z. Lessons for China from U.S. and European natural gas storage management and pricing practices[J]. International Petroleum Economics, 2014, 22(4): 23-29, 109.
- [7] 苏欣, 张琳, 李岳. 国内外地下储气库现状及发展趋势[J]. 天然气与石油, 2007, 25(4): 1-4, 7. DOI: 10.3969/j.issn.1006-5539.2007.04.001.
SU X, ZHANG L, LI Y. Status and development trend of foreign underground gas storages[J]. Natural Gas and Oil, 2007, 25(4): 1-4, 7.
- [8] 高思萱, 杨艳萍. 国内外储气库经营管理现状研究与展望[J]. 化工管理, 2023(4): 8-11. DOI: 10.19900/j.cnki.ISSN1008-4800.2023.04.003.
GAO S X, YANG Y P. Research and prospect on the current situation of gas storage management at home and abroad[J]. Chemical Enterprise Management, 2023(4): 8-11.
- [9] 郑得文, 胥洪成, 王皆明, 孙军昌, 赵凯, 李春, 等. 气藏型储气库建库评价关键技术[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(5): 794-801. DOI: 10.11698/PED.2017.05.15.
ZHENG D W, XU H C, WANG J M, SUN J C, ZHAO K, LI C, et al. Key evaluation techniques in the process of gas reservoir being converted into underground gas storage[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(5): 794-801.
- [10] 丁国生, 李春, 王皆明, 胥红成, 郑雅丽, 完颜祺琪, 等. 中国地下储气库现状及技术发展方向[J]. 天然气工业, 2015, 35(11): 107-112. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2015.11.017.
DING G S, LI C, WANG J M, XU H C, ZHENG Y L,

- WANYAN Q Q, et al. The status quo and technical development direction of underground gas storages in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(11): 107-112.
- [11] 杨春和, 贺涛, 王同涛. 层状盐岩地层油气储库建造技术研发进展[J]. *油气储运*, 2022, 41(6): 614-624. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.06.003.
- YANG C H, HE T, WANG T T. Research and development progress of oil and gas storage construction technology in bedded salt rock formation[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2022, 41(6): 614-624.
- [12] 孙军治, 陈加松, 井岗, 杨普国, 王一单, 孟君. 国内盐穴储气库建库关键技术研究进展[J]. *盐科学与化工*, 2022, 51(10): 1-7. DOI: 10.3969/j.issn.2096-3408.2022.10.001.
- SUN J Z, CHEN J S, JING G, YANG P G, WANG Y D, MENG J. Research progress on key technologies of salt cavern gas storage construction in China[J]. *Journal of Salt and Chemical Industry*, 2022, 51(10): 1-7.
- [13] 袁光杰, 夏焱, 金根泰, 班凡生. 国内外地下储库现状及工程技术发展趋势[J]. *石油钻探技术*, 2017, 45(4): 8-14. DOI: 10.11911/syztjs.201704002.
- YUAN G J, XIA Y, JIN G T, BAN F S. Present state of underground storage and development trends in engineering technologies at home and abroad[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(4): 8-14.
- [14] 唐康, 廖新维, 闵忠顺, 李滨, 高旺来, 董鹏. 复杂类型储气库多周期注采相渗变化规律[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2023, 38(3): 81-87. DOI: 10.3969/j.issn.1673-064X.2023.03.011.
- TANG K, LIAO X W, MIN Z S, LI B, GAO W L, DONG P. Variation of relative permeability during multi-cycle injection-production of complex reservoir gas storage[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2023, 38(3): 81-87.
- [15] 何奇, 冯永存, 邓金根, 李海涛, 完颜祺琪, 李康, 等. 国内盐穴储气库空间利用技术及展望[J]. *石油钻采工艺*, 2022, 44(6): 711-718. DOI: 10.13639/j.odpt.2022.06.008.
- HE Q, FENG Y C, DENG J G, LI H T, WANYAN Q Q, LI K, et al. Review and outlook of space utilization technology for salt-cavern gas storage in China[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2022, 44(6): 711-718.
- [16] 丁国生, 谢萍. 中国地下储气库现状与发展展望[J]. *天然气工业*, 2006, 26(6): 111-113. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0976.2006.06.036.
- DING G S, XIE P. Current situation and prospect of Chinese underground natural gas storage[J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(6): 111-113.
- [17] 郑雅丽, 孙军昌, 邱小松, 赖欣, 刘建东, 郭泽萍, 等. 油气藏型储气库地质体完整性内涵与评价技术[J]. *天然气工业*, 2020, 40(5): 94-103. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2020.05.012.
- ZHENG Y L, SUN J C, QIU X S, LAI X, LIU J D, GUO Z P, et al. Connotation and evaluation technique of geological integrity of UGSs in oil-gas fields[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(5): 94-103.
- [18] 马新华, 郑得文, 申瑞臣, 王春燕, 罗金恒, 孙军昌. 中国复杂地质条件气藏型储气库建库关键技术与实践[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(3): 489-499. DOI: 10.11698/PED.2018.03.14.
- MA X H, ZHENG D W, SHEN R C, WANG C Y, LUO J H, SUN J C. Key technologies and practice for gas field storage facility construction of complex geological conditions in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(3): 489-499.
- [19] 巴金红, 任凭, 金作良, 王建夫, 齐磊. 山东菏泽盐穴储气库注采气规模设计方法[J]. *油气田地面工程*, 2023, 42(6): 32-39. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6896.2023.06.006.
- BA J H, REN P, JIN Z L, WANG J F, QI L. Scale design method of gas injection and production for Heze salt-cavern gas storage in Shandong province[J]. *Oil-Gas Field Surface Engineering*, 2023, 42(6): 32-39.
- [20] 郑雅丽, 赵艳杰. 盐穴储气库国内外发展概况[J]. *油气储运*, 2010, 29(9): 652-655, 663. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2010.09.003.
- ZHENG Y L, ZHAO Y J. General situation of salt cavern gas storage worldwide[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2010, 29(9): 652-655, 663.
- [21] 完颜祺琪, 丁国生, 赵岩, 李康, 邓金根, 郑雅丽. 盐穴型地下储气库建库评价关键技术及其应用[J]. *天然气工业*, 2018, 38(5): 111-117. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2018.05.013.
- WANYAN Q Q, DING G S, ZHAO Y, LI K, DENG J G, ZHENG Y L. Key technologies for salt-cavern underground gas storage construction and evaluation and their application[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(5): 111-117.
- [22] 王玉芳. 中国含水层储气库建设的发展前景[J]. *石油知识*, 2023(3): 38-39.
- WANG Y F. The development prospects of aquifer gas

- storage construction in China[J]. *Petroleum Knowledge*, 2023(3): 38-39.
- [23] 李猛, 郑得文, 邱小松, 刘满仓. 储气库不同类型砂岩储层压敏特征及其影响因素[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(2): 385-392. DOI: 10.11781/sysydz202302385.
- LI M, ZHENG D W, QIU X S, LIU M C. Stress sensitivity characteristics and influencing factors of different types of sandstone reservoirs in gas storage[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2023, 45(2): 385-392.
- [24] 魏东吼, 董绍华, 梁伟. 地下储气库完整性管理体系及相关技术应用研究[J]. *油气储运*, 2015, 34(2): 115-121. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2015.02.001.
- WEI D H, DONG S H, LIANG W. Applied research of integrity management system and related technologies of underground gas storage[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2015, 34(2): 115-121.
- [25] 刘洁莹, 毕智高. 盐穴型储气库风险评价的应用研究[J]. *价值工程*, 2022, 41(31): 117-119. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4311.2022.31.036.
- LIU J Y, BI Z G. Application research on risk assessment of salt cavern gas storage[J]. *Value Engineering*, 2022, 41(31): 117-119.
- [26] 文韵豪, 王秋晨, 巴玺立, 李庆, 班兴安, 李昱江. 国内外智能化储气库现状及展望[J]. *油气与新能源*, 2022, 34(6): 60-64. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0021.2022.06.008.
- WEN Y H, WANG Q C, BA X L, LI Q, BAN X A, LI Y J. Insights and forecast on domestic and international intelligent gas storage[J]. *Petroleum and New Energy*, 2022, 34(6): 60-64.
- [27] 刘继宝, 秦紫函. 科技创新助推储气库产业高质量发展[N]. *中国石化报*, 2023-05-22(5).
- LIU J B, QIN Z H. Technological innovation boosts the high-quality development of the gas storage industry[N]. *China Petrochemical News*, 2023-05-22(5).
- [28] 朱喜平, 张平, 王多才, 李含成, 付亚平, 任众鑫, 等. 基于价值链分析的智慧储气库顶层设计[J]. *油气储运*, 2023, 42(4): 361-374. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.04.001.
- ZHU X P, ZHANG P, WANG D C, LI H C, FU Y P, REN Z X, et al. Top-level design of intelligent underground gas storage based on value chain analysis[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2023, 42(4): 361-374.
- [29] 郑雅丽, 邱小松, 赖欣, 赵艳杰, 孙军昌, 皇甫晓红. 盐穴储气库地质体完整性管理体系[J]. *油气储运*, 2022, 41(9): 1021-1028. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.09.004.
- ZHENG Y L, QIU X S, LAI X, ZHAO Y J, SUN J C, HUANGPU X H. Geological body integrity management system for salt cavern gas storage[J]. *Oil and Gas Storage and Transportation*, 2022, 41(9): 1021-1028.
- [30] 王丹玲, 单保东, 王文权, 苗胜东, 邢红艳. 盐穴地下储气库腔体稳定性监测体系的建立[J]. *天然气工业*, 2022, 42(增刊1): 139-145. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2022.S1.022.
- WANG D L, SHAN B D, WANG W Q, MIAO S D, XING H Y. Establishment of a cavity stability monitoring system for salt cavern underground gas storage[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(S1): 139-145.
- [31] 王建夫, 张志胜, 安国印, 王文权, 巴金红, 尹浩, 等. 气体示踪技术在盐穴地下储气库微泄漏监测中的应用[J]. *天然气工业*, 2021, 41(12): 156-164. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2021.12.017.
- WANG J F, ZHANG Z S, AN G Y, WANG W Q, BA J H, YIN H, et al. Application of gas tracer technology in microleakage monitoring of underground salt cavern gas storage[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(12): 156-164.
- (收稿日期: 2023-07-12; 修回日期: 2023-07-27; 编辑: 刘朝阳)
-
- 基金项目:** 国家自然科学基金资助项目“层状盐岩地层中盐穴储气库悬挑型腔壁失稳致灾机理研究”, 42072307; 湖北省杰出青年基金资助项目“深部地下大型盐穴储氢基础理论研究”, 2021CFA095。
- 作者简介:** 阳小平, 男, 1977年生, 高级工程师, 2003年硕士毕业于中国石油大学(北京)油气田开发专业, 现主要从事地下储气库的建设和运行管理工作。地址: 北京市朝阳区大屯路9号中石油北京天然气管道有限公司, 100020。电话: 010-84884239。Email: oyxp1977@163.com



开放科学(资源服务)标识码(OSID):