

国内外地下储库现状及工程技术发展趋势

袁光杰, 夏焱, 金根泰, 班凡生

(中国石油集团钻井工程技术研究院, 北京 102206)

摘要:近年来国内地下储库尤其是储气库建设取得了长足的进步,在天然气调峰安全保供中发挥了重要作用,如何利用地下储存空间提高能源利用效率和节能减排成为国内近年来一个持续攻关的热点。在介绍国内外地下储气库、盐穴储油库、压缩空气/氢气储能库、地下CO₂储库和废料储库等建设及工程技术发展现状的基础上,详细阐述了地下储库工程技术的现状和存在的问题,分析了推动地下储库工程技术发展的因素,并对地下储库工程技术的发展趋势进行了展望和分析,最后给出了国内地下储库工程技术发展的认识与建议,以期对国内地下储库工程技术的发展提供借鉴和参考。

关键词:地下储库;储气库;储油库;储能库;工程技术;发展趋势

中图分类号:TE972. + 3 文献标志码:A 文章编号:1001-0890(2017)04-0008-07

Present State of Underground Storage and Development Trends in Engineering Technologies at Home and Abroad

YUAN Guangjie, XIA Yan, JIN Gentai, BAN Fansheng

(CNPC Drilling Research Institute, Beijing, 102206, China)

Abstract: In recent years, great progress has been made in the construction of underground storage, especially gas storage, which has played an important part in peak modulation and safe supply of natural gas. How to utilize the underground storage to enhance energy efficiency, preserve energy and minimize e-missions has been a hot topic of continuous research in China. On the basis of introducing the construction and engineering technologies that related to underground gas storage, salt cave oil storage, compressed air/hydrogen storage, underground CO₂ storage, waste storage, and more around the world, the technical state and existing problems of underground storage projects have been elaborated, and analyzed the factors that promote technical development of underground storage, and the development trend of underground storage engineering technology. Finally, some cognition and suggestions for the development of underground storage technology in China are given, to provide the necessary references for the development of domestic underground storage engineering and technology.

Key words: underground storage; gas storage; oil storage; energy storage; engineering technology; development trend

目前,我国成为全球石油净进口量最大的国家和第二大石油消费国,对外依存度超过了65%^[1];2016年国内天然气消费量 $2058 \times 10^8 \text{ m}^3$,天然气进口量 $721 \times 10^8 \text{ m}^3$,对外依存度超过了35%^[2],而且我国的油气储备仅能维持1个月左右,远低于3个月的国际安全标准,因此,我国需进一步加强油气的地下储存,以保证油气供应安全。目前,我国地下储库建设总体处于起步发展阶段,虽然建成了

多座储气库并在国内天然气调峰安全保供中发挥了重要作用,但与欧美等国家相比,我国地下储库

收稿日期:2016-06-30;改回日期:2017-06-25。

作者简介:袁光杰(1974—),男,河北邢台人,2004年获上海交通大学机械制造及其自动化专业博士学位,教授级高级工程师,主要从事地下储库建库工程、煤层气钻完井技术等方面的科研工作。E-mail:ygjdr@cnpc.com.cn。

基金项目:中国石油天然气集团公司重大科技专项“储气库优快钻完井技术与装备研究”(编号:2015E-4003)资助。

建设数量与技术水平仍有较大的差距,且面临着地质构造环境复杂、优质建库资源距离能源消费区较远、优快建库工程技术与装备不配套、地下储库运营模式尚不完善和相关配套政策缺乏等一系列挑战。因此,研发地下储库优快建库配套技术与装备以保障国家能源供给安全,充分利用地下储存空间并提高能源利用效率和节能减排,成为国内近年来一个持续攻关的热点。笔者在介绍国内外各类地下储库发展现状的基础上,详细阐述了地下储库工程技术的现状和存在的问题,并对地下储库工程技术的发展趋势进行了展望和分析,以期对国内地下储库工程技术的发展提供一定的借鉴和参考。

1 国内外地下储库现状

1.1 国外地下储库现状

根据储存介质和功能的不同,地下储库主要分为地下储气库、盐穴储油库、压缩空气/氢气储能库、地下 CO₂ 储库和废渣/废料储库等。

地下储气库是天然气“产、运、储、销、用”业务链五大环节之一,是天然气产业的重要组成部分,主要有枯竭油气藏型、含水层型、盐穴型和废弃矿坑型 4 种类型^[3-6],在天然气调峰、战略储备等方面发挥着重要作用。截至 2014 年底,世界上运行和在建的储气库约 715 座,总工作气量 $3\ 930 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全球天然气消费量的 11%,预测 2030 年工作气量将达 $4\ 500 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。美国、俄罗斯、乌克兰、德国、意大利、加拿大和法国是传统的储气库大国,占全球地下储气库工作气量的 85%^[3-4]。据美国能源信息署(EIA)公布的数据,2014 年美国拥有地下储气库 418 座,总库容量为 $2\ 613 \times 10^8 \text{ m}^3$,工作气量为 $1\ 354 \times 10^8 \text{ m}^3$,相当于美国当年天然气消费总量($7\ 555 \times 10^8 \text{ m}^3$)的 17.9%。其中,枯竭油气藏型储气库总库容量约为 $2\ 005 \times 10^8 \text{ m}^3$,工作气量为 $1\ 088 \times 10^8 \text{ m}^3$;含水层型储气库总库容量约为 $409 \times 10^8 \text{ m}^3$,工作气量为 $128 \times 10^8 \text{ m}^3$;盐穴型储气库总库容量约为 $199 \times 10^8 \text{ m}^3$,工作气量为 $138 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[7]。

盐穴储油库已经成为很多国家实施战略石油储备的重要方式,主要是为了弥补地面储油库在建造成本、安全性及库容量等方面的不足。目前,采用盐穴储油的国家主要集中在北美和欧洲,美国利用得

克萨斯州和路易斯安那州墨西哥湾沿岸的地下盐穴,建设了 5 个战略石油储备基地,总储存能力为 $1.03 \times 10^8 \text{ t}$;德国、法国、俄罗斯、加拿大、墨西哥和摩洛哥等国家都建有盐穴储油库^[8]。近年来,美国在得克萨斯州建了 250 个盐穴储库,用来储存 NGL/LPG。

地下 CO₂ 储库可以将相关燃烧源(如大型发电厂)产生的 CO₂ 长期封存在深部盐水层、枯竭油气藏或不可采煤层等地点,从而阻止或显著减少温室气体排放量,以减轻对地球气候的影响^[9]。CO₂ 地质封存主要是将处于超临界状态(温度大于临界温度 304.1 K,压力大于临界压力 7.38 MPa^[10-11])的 CO₂ 采用压缩机压缩后以近似流体的状态注入地下构造中,可用于封存 CO₂ 的地质构造包括枯竭油气藏、盐水层、不可开采的煤层和水合物地层等^[9,12],通常距离地面至少 1 km。目前,国外至少有 74 个大型地下 CO₂ 储库正在运营或在建中,每年大约能减少 $3\ 300 \times 10^4 \text{ t}$ CO₂ 的排放。

地下压缩空气/氢气储库的储存点一般选择密封性好的地下洞穴、盐丘和枯竭油气藏,主要用于解决可再生能源发电平衡和能源储存的问题。该项技术的基本原理(如图 1 所示)是利用压缩机,将大自然中的空气或电解水产生的氢气压缩成高密度和高压的有效气压资源,并储存稳压,需要使用时再通过放气阀门和输气管道向气轮机排放,从而带动气轮机叶轮运转并拖动发电机转子运转而发电,其能源转换效率理论最高可达到 75%,但实际一般只能达到 40%~50%^[13-14]。该项技术通常用于调节电网的峰谷差,即晚上用电低谷时,可以把压缩空气或氢气注入地下,白天再利用地下高压气体来推动发电机发电,也可充分利用风力和太阳能发电的间歇性,从而达到节约能源的目的。德国于 1978 年在 Huntorf 建立了首个盐穴空气压缩蓄能电站,至今已稳定运行近 40 年,其由 2 个单腔有效体积 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的盐穴组成,运行压力 5~7 MPa,发电能力 $29 \times 10^4 \text{ kW}$,能源转换效率在 42% 左右^[13]。20 世纪 80 年代以来,康菲石油公司在得克萨斯州的一个溶采的盐穴中储存氢气,这个盐穴顶部距离地面约 850 m,是一个圆柱体,直径为 49 m,高度为 300 m,可储存氢气 $0.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[8,14]。

废渣/废料储库是利用地下的溶洞来储存无害油田废物(NOW)或处置天然放射性物质(NORM)^[15-16]。相对于填埋、蒸发及热处理等油田无害废物处理方法,盐穴封存具有成本最低、不污染地表地下水和有利于环境保护等优点^[17]。目前,

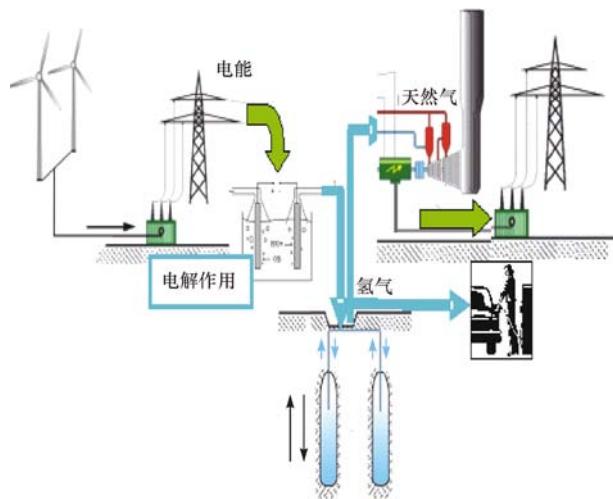


图 1 地下氢气储能工艺基本原理

Fig. 1 Basic principle of underground hydrogen energy storage

美国、加拿大、德国和荷兰等国家已授权在盐穴中储存无害油田废物。1998 年,美国能源部委托 Argonne National Laboratory 研究油田废料盐穴储存技术,认为该处理方式在法律、技术和经济层面均是一种有效的废物处理方式,具有较好的应用前景。目前,美国已在 6 个废弃溶洞进行了废渣/废料储库建设,其中 4 个已经开始运转^[18]。这 4 个废渣/废料储库采用 3 种方式将废渣/废料输送到盐穴中:2 个储库是通过油管注入废渣/废料,通过环空排出卤水;1 个储库则是通过环空注入废渣/废料,通过油管排出卤水;1 个储库是采用一口井注入废渣/废料,另一口井排出卤水。

1.2 国内地下储库现状

国内地下储库设施建设总体处于起步发展阶段,目前主要有枯竭气藏型储气库、盐穴储气库和地下 CO₂ 储库,其他类型地下储库尚在研究和论证阶段,尚未进行建设。

我国地下储气库建设经过多年研究与实践,目前已进入快速发展阶段,已投产的地下储气库群设计工作气量达到 $186.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ (如表 1 所示),形成调峰能力 $45.25 \times 10^8 \text{ m}^3$,在国内天然气调峰安全保供中发挥了重要作用^[19]。据中国石油规划总院预测,到 2020 年中国天然气调峰需求约占年消费量的 11% 左右^[20],而储气库作为最主要的调峰方式,储气调峰规模至少应达到 10% 以上,才能基本满足调峰及保供需求,为此目前国内正在待建和开展前期评价的储气库达到了 26 座。

表 1 中国已建地下储气库的库容及工作气量

Table 1 Capacities and volumes of working gas of existing underground gas storage in China

储气库	库容量/ 10^8 m^3	工作气量/ 10^8 m^3
文 96	5.90	2.96
板桥库群	69.60	30.30
京 58 库群	15.40	7.50
刘庄	4.60	2.50
金坛气库(中石油)	26.40	17.10
金坛气库(中石化)	11.80	7.20
金坛气库(金坛盐化)	4.26	2.34
双 6	41.30	16.00
苏桥	67.40	23.30
板南	10.10	4.30
呼图壁	117.00	45.10
相国寺	42.60	22.80
陕 224	10.40	5.00
合计	426.76	186.40

我国地下 CO₂ 储库研究目前处于起步阶段,一些研究机构和大型企业正在开展二氧化碳捕集与储存(CCS)研究和示范项目(见表 2)^[9-10]。

表 2 中国 CCS 示范项目统计结果

Table 2 Statistical results of China CCS demonstration project

项目名称	投资单位	类型	运行年份	封存能力/ $(10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$
吉林油田 CO ₂ 驱注采项目	中国石油	封存	2008	10.9~14.6
神华集团 CCS 示范工程	神华集团	封存	2010	10.0
大庆油田先导试验	中国石油	驱油	1990	
辽河油田先导试验	中国石油	驱油	2001	
重庆合川双槐树电厂 CCS 示范工程	中电投	捕捉	2010	1.0
华能北京热电厂 CCS 示范工程	中国华能集团公司	捕捉	2009	0.3
华能石洞口第二电厂 CCS 示范工程	中国华能集团公司	捕捉	2009	12.0

截至 2015 年中期,我国共建成 8 个国家石油储备基地,其中地面库 7 个,分别为舟山、镇海、大连、黄岛、独山子、兰州和天津国家石油储备基地,库容量分别为 500×10^4 , 520×10^4 , 300×10^4 , 320×10^4 , 300×10^4 , 300×10^4 和 $320 \times 10^4 \text{ m}^3$;地下库 1 个,为黄岛国家石油储备洞库,库容量为 $300 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。8 个国家石油储备库及部分社会库可储备原油 $2.610 \times 10^4 \text{ t}$ ^[21]。2009 年,国内开始论证建设盐穴

储油库,但是目前尚无开建的盐穴储油库,国家能源储备中心正在推进金坛和淮安盐穴储油库的建设,前期工作已经启动,预计金坛盐矿可将已有的 33 个盐穴改造成库容量 $500 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的原油储备库,淮安盐矿可将已有的 40 个盐穴改造成库容量 $1500 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的原油储备库。

在废渣/废料地下储库方面,国内一些学者在积极探讨和研究利用盐穴储存核废料的相关技术,少数企业已经在一些领域应用地下灌注技术储存污水和废渣,但至今还没有相应的法律法规来规范废渣/废料等有害物质的地下储存。出于安全和环保的考虑,利用盐穴进行有害物质封存时,需要对盐穴的密封性、稳定性和整体完整性等进行充分详细的论证,以避免有害物质的泄露。

2 地下储库工程技术现状

1915 年,国外就开始进行地下储库工程技术的研究和实践,经过百年的发展,在地下储气库、盐穴储油库和盐穴储能库等方面形成了系列特色工程技术装备。国内在地下储库工程技术方面的研究起步较晚,经过近 20 年的研究与实践,初步形成了枯竭气藏型和盐穴储气库建库工程技术,并在盐穴储油库、 CO_2 地下储库和储能库等方面进行了初步的探索。枯竭气藏型储气库建库的主要工作对象是老井的枯竭气层,为满足大排量注采、长期运行、高井筒气密性等需求,枯竭气藏型储气库建库工程技术主要包括井型及井身结构设计、储层保护、井筒密封性保障、监测评价、地面注采设备研制与优选和钻完井设计与施工等。盐穴储库的工作对象为地下岩盐地层,主要工程技术包括岩盐层钻井与固井技术、岩盐造腔及腔体形态控制、注气排卤及注采气完井、地面造腔和注采设备研制与优选等。

2.1 枯竭气藏型储气库建库工程技术

国外枯竭气藏型储气库埋深一般小于 2 000.00 m,储气库物性条件普遍较好,孔隙度大于 15%,渗透率大于 100 mD。储气库井多为直井和定向井,近年来,美国、土耳其、法国等在储气库建库时开始推广应用丛式井、水平井和多分支井;储气库井多选用 $\phi 177.8$ 和 $\phi 244.5 \text{ mm}$ 油管,实现了储气库大吞大吐的功能,部分井注采能力达 $(800 \sim 1000) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,油管及生产套管均采用气密封螺纹连接,生产套管采用弹性水泥浆固井;储气库井在钻井施工时采用

储层专打、欠平衡钻井、不压井作业、先注气后钻井等储层保护技术,灵活应用预充填防砂筛管、悬挂尾管等砂岩储气库先期防砂完井技术,并采用大直径管柱,环空通常加注氮气和环空保护液;在储气库监测方面,形成了针对储层、盖层、地层水、边界、断层等不同对象的监测井井身结构设计技术及运行期间井筒压力和气体泄漏监测和评价技术等。国外充分考虑了储气库的大吞大吐、注采循环、气量波动大、运行压力高、使用寿命长等特点,地面注采流程采用了井场-集注站-双向输送管道的模式。该模式具有注采合一、双向计量、自控水平高、管理人员少的特点,且井场无放空立管,集注站分区延时泄放,可有效减少放空量。储气库可通过多个注采循环,实现逐步达容、地面分期建设的目的,且注采装置设计弹性大,可对采出气进行控油脱水。

国内枯竭气藏型储气库具有埋藏深、注采压力高、采出物组分复杂、储层物性差、压力系数低、老井多且井况复杂等特点。在借鉴国外先进建库经验的基础上,国内初步形成了适合砂岩和碳酸岩的储气库建库井型优选与井身结构设计、防塌与储层保护钻井液、低压易漏长封固段固井、弹性水泥浆、筛管和射孔完井设计、复杂老井封堵处理、地面注采设备选型与配套等工程技术,并在深岩层建库方面积累了一定的经验^[22-25]。目前,国内枯竭气藏型储气库建库面临的主要技术难题包括:储气库井以直井、丛式定向井为主,大井眼水平井尚面临钻井风险高、成本高的挑战;要求注采井寿命长,井身结构复杂,钻井过程中频繁发生井壁坍塌、卡钻及严重漏失等井下故障;监测井井身结构设计针对性不强,且成本较高;高性能韧性水泥浆体系、低压易漏长封固段固井技术仍需完善和优化;部分已封堵老井出现井口带压现象,在已有老井评价、改造利用和封堵方面仍缺乏技术及标准规范;储气库井筒完整性检测、评价和处理技术与装备不成熟,仍主要依赖进口;地面工程面临着注气压缩机配件国产化和稳定运行、靶式流量计计量不准、离心压缩机选型配置和数字化储气库建设等一系列技术难题。

2.2 盐穴储气库建库工程技术

国外盐穴型储气库的目的层一般为盐丘,盐丘厚度达 500.00 ~ 1 000.00 m,岩盐埋深一般不超过 1 500.00 m,岩盐品位好,不溶物含量低、夹层少。盐穴型储气库井井眼直径普遍较大,多选用 $\phi 339.7 \text{ mm}$ 生产套管,并采用 $\phi 244.5 \text{ mm}$ 油管生产,单井吞吐

能力强。盐穴储气库建库时间较短,一般为 2~3 年,腔体体积大,多为 $(40\sim80)\times10^4\text{ m}^3$ 。为了加快盐穴储气库建库速度,国外应用了双井盐穴建库技术和薄盐层巷道式建库技术。受资源限制,欧洲一些国家在深层岩盐(埋深 2 000.00 m 以深)建库、定向井和丛式井盐穴建库方面取得了明显进展。另外,德国在浅层盐穴建库中推广应用了套管焊接技术,有效提高了注采井筒的完整性。同时,国外也在加强相关储气库标准的修订和完善,加拿大更新完善了 CSA Z341 储气库标准,API 协会修订完善了 API RP 1114 和 API RP 1115 两个盐穴储气库标准。

国内盐穴储气库地质条件苛刻,全部为层状盐层,且夹层多、品位低,平顶山和淮安的盐层埋深超过 2 000.00 m。经过 10 余年的发展,目前,国内盐穴储气库直井普遍采用 $\phi339.7\text{ mm}$ 技术套管 $\times \phi244.5\text{ mm}$ 生产套管 $\times \phi177.8\text{ mm}$ 注采气油管的井身结构,并形成了 JSS 低温抗盐水泥浆、已有溶腔改造利用技术、盐穴井筒及腔体密封性检测技术、盐穴造腔及腔体形态控制技术和注气排卤及注采气完井等建库工程配套技术^[26-27]。但是,国内盐穴储气库建库工程技术仍存在一些难题:井型单一,以直井为主,定向井和双井尚未实施,岩盐资源利用率低;盐矿老腔在改建中存在井眼直径大、井况复杂和井筒密封性要求高等技术挑战;盐穴造腔中井下复杂情况多,腔体形态难以控制,且造腔周期长;生产管柱每年调整 2~3 次,修井工作量大,且采用油垫,导致生产成本高;溶腔实际的形态和体积与设计形态和体积的符合率低,单井溶腔时间达 5~7 年,单腔耗电约 $1\,000\times10^4\text{ kW}\cdot\text{h}$;注气排卤过程中排卤管易堵塞,排卤时间长,腔底不溶物残留多;储气库井井筒完整性检测、评价和处理缺少相应的工具和标准。

2.3 其他地下储库建库工程技术

国外在地下 CO_2 储库、盐穴储油库、地下压缩空气/氢气储库和地下废渣/废料储库方面均进行了不同程度的研究和实践,并初步形成了相应的建库工程技术。在 CO_2 储库建库方面,国外相关建库工程技术均具有一定的试验性,仅有 CO_2 提高原油采收率和在盐水层中储存的技术相对成熟,在注气管柱选材和防腐以及井筒长期密封完整性方面尚需进行进一步研究。在盐穴储油库方面,国外建库工程技术相对比较成熟,形成了盐穴储油库腔体设计技术、单井或双井建腔技术和注采运行技术等技术。在地下压缩空气/氢气储库和废渣/废料储库方面,

目前国外主要处于试验应用阶段,初步具备了工程试验条件,但相关建库工程技术的报道较少。

国内在地下 CO_2 储库、盐穴储油库和地下储能库方面正在开展可行性研究和部分试验,而在废渣/废料储库方面,相关的研究报道很少。目前国内需要解决已有溶腔改建储油库的溶腔筛选方法和标准、盐穴储油库注采运行与腔体稳定性、盐穴储油库双井建腔和注采技术、储能库高频次交变应力和腐蚀环境下井筒管柱选材及强度优化设计、大井眼低温井固井工艺及韧性水泥浆开发、储能库腔体稳定性分析等一系列技术难题。

3 地下储库工程技术发展趋势

3.1 影响地下储库工程技术发展的因素

地下储库的功能涉及战略储备、安全供气、城市季节调峰、天然气供应优化配置、环境治理、可再生能源储存和废物处理等方面,推动地下储库和工程技术发展的因素主要有:1)天然气需求的快速增长和天然气管网的致密化;2)大型发电厂、能源公司和 LNG 供应链的发展,使天然气的用途得到扩展;3)国际天然气贸易量迅速增加,天然气市场自由化和分拆活动加剧(传输、存储和配送);4)石油地缘政治问题突出,国家石油战略储备越来越重要;5)可再生能源(风能,太阳能)正在快速发展,并需求一些新的存储形式;6)随着气候变暖和环境污染问题越来越严重,减少工业 CO_2 排放量和储存大量工业废料越来越受到重视。

3.2 地下储库工程技术发展趋势

随着全球地下储库建设的需求越来越大,地下储库的功能不断丰富,面临的挑战也不断变化,地下储库工程在以下几个方面发生重要变化^[20]:1)地下储库设施的使用和操作由以技术功能驱动为主改变为以经济驱动为主,将使储库经营者的资产价值和销售利润最大化;2)需要准确实时地进行地下储库设施性能的预测和优化;3)地下储库设施和经营需要有更高的灵活性和可靠性;4)在复杂的地质条件下经济高效地完成储库建设;5)储库设施要严格符合环保要求和安全标准。

为了更好地满足地下储库在性能、灵活性、安全性、环境影响、社会影响和经济效益方面的需求,地下储库工程技术的发展趋势主要有:

1) 现有地下储气库设施性能属性的改进,包括优化储气库运营模式,突破瓶颈技术,加快储气库达产速度,拓展储气库供应能力和容量,延长其使用寿命等。例如,发展精确的应力测试评价技术,最大限度地提高储气库的性能(工作压力、容量、注入/退出)、灵活性、吞吐量、每年循环的次数及安全性,开发储气库建库注采运行优化系统等,进一步优化成本(建库成本和运营成本)和开发时间表,使运营效率最大化。

2) 破解库址资源少、建库条件难度大和资源利用率低等难题,寻找和开发适应市场需求的存储构造。例如,在更深、更复杂的地质构造中选址,考虑建造海上地下储气库,在薄盐层中采用水平井或丛式定向井建盐穴储气库,储气库区已有复杂老井的改造利用和封堵等,以及降低3 000.00 m以深枯竭气藏建库工程成本等。

3) 制定地下储气库建库、运行和监控标准体系,研究不满足要求的地下储气库退役措施和方法,并研究新的技术、材料和工具来解决储气库的特定需求。例如,焊接套管技术、提高盐溶速度的化学添加剂、防止注采过程中腔内卤水蒸发的新材料、井筒泄漏检测和定位工具等。

4) 针对国内尚未开展盐穴储油库建设的基本情况,需要积极发展盐穴储油库建库和运行的工程和经济风险分析与评价技术、盐穴储油库选址和评价技术、已有溶腔改建储油库井筒及溶腔筛选方法和标准、已有溶腔改建储油库和双井建储油库工程技术、盐穴储油库注采运行技术等。

5) 发展压缩空气/氢气储能库建库配套技术,研究高频交变应力和腐蚀对井筒完整性的影响,提高长期低压工况下盐腔的稳定性和延长其使用寿命;优化地面设施和运营模式,提高压缩空气/氢气储能库的能量转换效率和运营效益。

6) 积极发展CO₂储库和废渣/废料储库库址评价与储层响应监测技术、储库泄露和安全性风险分析和控制技术、超大井眼钻井技术和固井技术、井筒完整性监测和评价技术等,同时需要环境和安全部门制定相应的法律和法规。

4 结论与建议

1) 为满足经济快速发展的需求,地下空间资源的综合利用成为一项热门技术,以美国、法国和德国为代表的发达国家在地下储库建设与综合利用方面

起步较早,拥有较为成熟的建库和运营经验,值得学习和借鉴。

2) 国内各类地下储库建设尚处于起步阶段,但是面对天然气和清洁能源需求急剧增大、国际油价持续低迷的现状,地下储气库、盐穴储油库和地下储能库面临前所未有的发展机遇,国内相关部门应联合行动,尽早启动相关工程建设。

3) 国际油价将在低位持续徘徊,国内应抓住低油价的机遇,尽早启动盐穴战略石油储备库的建设,尤其是对江苏金坛、淮安地区已有盐穴进行改造利用,以加快地下储油库建设,提高建库综合效益。

4) 国内地下储库建设面临复杂建库技术、高效经济运行、安全和环保等多方面的挑战,需要积极研发低成本高效建库工程技术、储库完整性检测评价等新技术,探索运营模式,建立配套技术和运行规范,使地下储库设施经济高效地运行。

参 考 文 献

References

- [1] 刘朝全,姜学峰. 2016年国内外油气行业发展报告[M]. 北京: 石油工业出版社, 2017.
LIU Chaoquan, JIANG Xuefeng. Report on the oil and gas development in 2016 [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2017.
- [2] 2016年天然气运行简况[EB/OL]. (2017-01-23) [2017-05-20]. http://yxj.ndrc.gov.cn/mtzhgl/201701/t20170123_836224.html.
Operation profile of the natural gas in 2016[EB/OL]. (2017-01-23) [2017-05-20]. http://yxj.ndrc.gov.cn/mtzhgl/201701/t20170123_836224.html.
- [3] Report of working committee 2: underground gas storage [C]// The 25th World Gas Conference, June 4-8, 2012, Kuala Lumpur, Malaysia.
- [4] Report of working committee 2: underground gas storage [C]// The 24th World Gas Conference, October 5-9, 2009, Buenos Aires, Argentina.
- [5] Report of working committee 2: underground gas storage [C]// The 23th World Gas Conference, June 5-9, 2006, Amsterdam, Netherlands.
- [6] GRAPPE J. UGS technology improvements: some answers of the UGS industry to the evolution of gas markets[C]// International Gas Union Research Conference, October 8, 2008, Paris, France.
- [7] Natural Gas Annual 2014[EB/OL]. [2017-05-20]. <http://www.eia.gov/naturalgas/annual/pdf/nga14.pdf>.
- [8] 冉莉娜,武志德,韩冰洁. 盐穴在地下能源存储领域的应用及发展[J]. 科技导报, 2013, 31(35): 76-79.
RAN Lina, WU Zhid, HAN Bingjie. Utilization and development of salt caverns in the field of energy underground storage

- [J]. *Science & Technology Review*, 2013, 31(35): 6-79.
- [9] 刘子剑, 张楠, 张凤君. CO₂ 地质封存技术及其同位素在咸水层的化学行为研究进展[J]. *科技导报*, 2015, 33(11): 108-113.
LIU Zijian, ZHANG Nan, ZHANG Fengjun. A review on CO₂ geological storage technologies and chemical behaviors of isotope in salty water layer[J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(11): 108-113.
- [10] 于德龙, 吴明, 赵玲, 等. 碳捕捉与封存技术研究[J]. *当代化工*, 2014, 43(4): 544-546, 579.
YU Delong, WU Ming, ZHAO Ling, et al. Research on carbon dioxide capture and storage technology [J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2014, 43(4): 544-546, 579.
- [11] 徐志刚, 陈代钊, 曾荣树. CO₂ 的地质埋存与资源化利用进展[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(7): 698-707.
XU Zhigang, CHEN Daizhao, ZENG Rongshu. Geological storage of CO₂ and commercial utilization [J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(7): 698-707.
- [12] 任韶然, 李德祥, 张亮, 等. 地质封存过程中 CO₂ 泄漏途径及风险分析[J]. *石油学报*, 2014, 35(3): 591-601.
REN Shaoran, LI Dexiang, ZHANG Liang, et al. Leakage pathways and risk analysis of carbon dioxide in geological storage[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(3): 591-601.
- [13] CROTOGINO F, DONADEI S, BUNGER U, et al. Large-scale hydrogen underground storage for securing future energy supplies[C]//The 18th World Hydrogen Energy Conference, May 16-21, 2010, Essen, Germany.
- [14] FORSBERG C W. Future hydrogen markets for large-scale hydrogen production systems[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(4): 431-439.
- [15] 丁国生, 谢萍. 地下盐穴处理核废料的方法[J]. *地下空间与工程学报*, 2006, 2(6): 1068-1071, 1080.
DING Guosheng, XIE Ping. Using salt cavern storages to dispose nuclear garbage [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2006, 2(6): 1068-1071, 1080.
- [16] THOMS R L, GEHLE R M. A brief history of salt cavern use [C]//The 8th World Salt Symposium, May 7-11, 2000, Hague, Netherlands.
- [17] BRASSOW C L. Use of solution-mined salt caverns for the disposal of non-hazardous oil and gas(NOW) waste[C]//The 8th International Petroleum Environmental Conference, October 7-10, 2001, Albuquerque, USA.
- [18] BROCKMANN B, DONADEI S, CROTOGINO F. Energy storage in salt caverns: renewable energies in the spotlight [M]//Jeoung Seok Yoon. *Underground storage of CO₂ and energy*. Boca Raton: CRC Press, 2010: 271-277.
- [19] 丁国生, 李春, 王皆明, 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.
DING Guosheng, LI Chun, WANG Jieming, et al. The status quo and technical development direction of underground gas storages in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35 (11): 107-112.
- [20] 魏欢, 田静, 李建中, 等. 中国天然气地下储气库现状及发展趋势[J]. *国际石油经济*, 2015, 35 (6): 57-62.
WEI Huan, TIAN Jing, LI Jianzhong, et al. China's current situation and development trend of underground gas storage [J]. *International Petroleum Economics*, 2015, 35 (6): 57-62.
- [21] 中商情报网. 中国建成八个国家石油储备基地总储备库容为 2860 万立方米[EB/OL]. [2016-06-12]. <http://www.askci.com/news/chanye/2015/12/14/1447970ka.shtml>.
China Competition Information. China has built eight national oil reserve bases with the capacity of 28.6 million m³. [EB/OL]. [2016-06-12]. <http://www.askci.com/news/chanye/2015/12/14/1447970ka.shtml>.
- [22] 范伟华, 符自明, 曹权, 等. 相国寺储气库低压易漏失井固井技术[J]. *断块油气田*, 2014, 21(5): 675-677.
FAN Weihua, FU Ziming, CAO Qua, et al. Cementing technology of low pressure and easy leaking well in Xiangguosi underground gas storage[J]. *Fault Block Oil & Gas Field*, 2014, 21(5): 675-677.
- [23] 侯树刚, 胡建均, 李勇军, 等. 低压低渗枯竭型砂岩储气库钻井工程方案设计[J]. *石油钻采工艺*, 2013, 35(5): 36-39.
HOU Shugang, HU Jianjun, LI Yongjun, et al. Drilling engineering design of low pressure & low permeability depleted sandstone gas storage [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2013, 35(5): 36-39.
- [24] 范伟华, 冯彬, 刘世彬, 等. 相国寺储气库固井井筒密封完整性技术[J]. *断块油气田*, 2014, 21(1): 104-106.
FAN Weihua, FENG Bin, LIU Shibin, et al. Wellbore seal integrity cementing technology of underground gas storage in Xiangguosi[J]. *Fault Block Oil & Gas Field*, 2014, 21(1): 104-106.
- [25] 曹洪昌, 王野, 田惠, 等. 苏桥储气库群老井封堵浆及封堵工艺研究与应用[J]. *钻井液与完井液*, 2014, 31(2): 55-58.
CAO Hongchang, WANG Ye, TIAN Hui, et al. Plugging of old wells for building UGS in Suqiao [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2014, 31(2): 55-58.
- [26] 尹学源, 张子桥. 金坛盐穴地下储气库固井技术[J]. *石油钻探技术*, 2006, 34(2): 45-47.
YIN Xueyuan, ZHANG Ziqiao. Cementing techniques for wells with salt caverns used for gas storage in Jintan[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2006, 34(2): 45-47.
- [27] 刘鑫, 赵楠, 杨宪民, 等. 强吸水暂堵完井液在呼图壁储气库完井中的应用[J]. *石油钻探技术*, 2013, 41(6): 72-77.
LIU Xin, ZHAO Nan, YANG Xianmin, et al. Application of strong water absorption temporary plugging technique in well completion of Htubi Gas Storage[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2013, 41(6): 72-77.