

盐穴在地下能源存储领域的应用及发展

冉莉娜^{1,2}, 王志德^{1,2}, 韩冰洁^{1,2}

1. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007
2. 中国石油集团公司油气地下储库工程重点实验室, 河北廊坊 065007

摘要 盐岩具有较低的渗透性、良好的蠕变特性及损伤恢复功能。盐穴是能源地下存储的良好介质,广泛应用于天然气、原油、液态碳氢化合物等的存储;也可以进行压缩空气蓄能和氢气存储蓄能,存储转化可再生能源;同时可应用于工业废料、有害废料的处置及二氧化碳封存等。综述了盐穴在地下能源领域的应用情况及基本原理,展望了盐穴的技术发展趋势。阐述了我国盐穴能源存储起步较晚、资源有限、技术难点多、发展与挑战并存的现状。

关键词 盐穴;地下存储;能源存储

中图分类号 TE822

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.35.014

Utilization and Development of Salt Caverns in the Field of Energy Underground Storage

RAN Lina^{1,2}, WU Zhide^{1,2}, HAN Bingjie^{1,2}

1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development—Langfang, Langfang 065007, Hebei Province, China
2. Key Laboratory of Oil and Gas Underground Storage, China National Petroleum Corporation, Langfang 065007, Hebei Province, China

Abstract With the low permeability, good creep and damage recovery of rock salt, salt cavern is a good medium of underground energy storage, and thus is used for gas, crude oil and liquid hydrocarbon storage. Salt cavern can also be used for compressed air energy storage and hydrogen storage, and storing and transforming surplus energy form renewable energy sources. At the same time, salt caverns are also widely used in the industrial waste, hazardous waste disposal, carbon dioxide sequestration and so on. This paper reviews the application of underground salt cavern in the field of energy underground storage and the basic principle, the technical development trend of salt caverns, and expounds the development status of China's energy storage in salt caverns.

Keywords salt cavern; underground storage; energy storage

0 引言

全球范围内盐矿资源的储存非常丰富,人类开采盐矿已有上千年的历史。采用水溶开采的方式在地下盐层中建造的人工洞穴称为盐穴。由于盐岩具有极低的渗透性,较好的蠕变及损伤恢复特性,作为能源地下储存库具有较高的安全性,被称为“高度战略安全的储备库”^[1]。从20世纪中期开始,盐穴广泛应用于地下能源的存储。20世纪40年代,加拿大首先尝试利用盐矿溶腔存储油气^[2];20世纪50年代,北美和欧洲等一些国家开始利用盐穴存储液化石油气(LPG)和其他轻质烃类^[3];20世纪60年代后,随着天然气的利用发展,盐穴储

气库也快速发展,目前已成为盐穴能源存储的主要形式^[4]。德国、美国等国家利用盐穴进行压缩空气蓄能,氢气存储蓄能,用于解决可再生能源发电平衡问题^[5];同时,盐穴也应用于工业废料、有害物质的处置^[3];近年来,在利用盐穴进行二氧化碳封存等方面也开展了广泛的研究^[6]。

1 盐穴的应用

1.1 天然气储库

在盐穴中注入天然气,利用压差进行天然气注入采出,即形成盐穴储气库。盐穴储气库主要与天然气管网配套,

收稿日期:2013-06-24;修回日期:2013-08-28

基金项目:中国石油天然气集团公司科学研究与技术开发项目(2012B-3310)

作者简介:冉莉娜,工程师,研究方向为盐穴油气储库设计,电子信箱:ranln@petrochina.com.cn

进行季节调峰、应急调峰,同时可以满足贸易需求。相对于油气藏型、含水层型等地下储气库,盐穴储气库具有高注采速率、短期吞度量、垫底气少等特点^[17,8]。从世界范围来看,盐穴储气库的垫底气量占总库容量的平均比例约为 30%(体积分数),油气藏型储气库垫底气量的比例约为 50%,含水层型储气库垫底气量的比例约为 60%,相对于这两种常用储气库,盐穴储气库的垫底气量占总库容量的平均比例最低。孔隙型储气库平均每年运行 1~2 次,但是盐穴储气库每年可运行多个周期。如美国密西西比州的 Petal 储气库,纽约州的 Seneca Lake 储气库等平均每月进行一次注采;美国德克萨斯的 North Dayton 储气库每年注采 15 次;德国的 Stassfurt 储气库每年注采周期更是达到了 200 次左右^[9]。世界上在运营的盐穴储气库建库埋深大多在 200~1800m 之间,最浅的盐穴储气库是 1993 年美国于堪萨斯州建成的 Yaggy 储气库,埋深为 193m^[9]。

世界上第一座盐穴储气库于 1959 年在苏联建成^[2],随后美国、加拿大、亚美尼亚等国相继建成盐穴储气库。目前世界上共有 70 多座盐穴储气库在运营,总工作气量 222 亿 m³,约占世界地下储气库总工作气量的 6%^[1]。美国拥有 31 座在运营的盐穴储气库,总工作气量 17.8 亿 m³;德国有 22 座,总工作气量 27.4 亿 m³;加拿大有 9 座,总工作气量 2.16 亿 m³;英国和法国各 3 座,工作气量分别为 1.77 亿 m³ 和 2.5 亿 m³;波兰、葡萄牙、丹麦、亚美尼亚各 1 座;中国第一座盐穴储气库金坛储气库于 2004 年开始建设,目前的工作气量为 0.8 亿 m³ 左右,预计 2020 年将达到工作气量 17 亿 m³ 规模^[1]。

近年来,由于盐穴储气库只有高注采速率、短期吞度量、大垫底气少等特点,在平衡长输管网和应急采气方面发挥的作用越来越大。世界天然气大会资料显示,盐穴储气库工作气量及其占全球地下储气库总工作气量的比例呈逐年增长趋势(表 1)^[1,7,8]。

表 1 盐穴储气库工作气量及占世界地下储气库总工作气量比例

Table 1 Working gas volume and ratio of salt cavern gas storage in the world

年份	盐穴储气库/亿 m ³	占世界地下储气库/%
2006	130	3.9
2009	170	5.0
2012	222	6.0

1.2 液态碳氢化合物存储库

出于战略储备、贸易等需求,盐穴也应用于液态碳氢化合物的存储,如原油、石油产品、柴油、燃油、瓦斯油、煤油、重质燃油、液化石油气(乙烷、丙烷、丁烷、乙烯、丙烯)、二氯乙烷(DEC)等^[9]。

与储气库不同,盐穴型储油库压力波动小、套管尺寸大、注采流量大。储油库通常设计 2~3 口大尺寸注采井。采用饱和卤水置换,实现存储物质的注采;即采油时,注入饱和卤水

至盐穴中,置换出所存储的液态物质;反之,注入存储的液态物质,将卤水替换出,如图 1 所示^[4]。

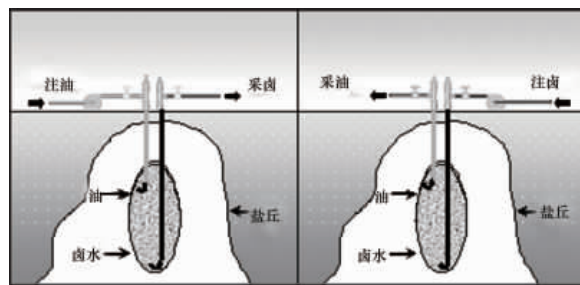


图 1 盐穴储油库卤水置换原理

Fig. 1 Brine displacement principle of salt cavern oil storage

盐穴型储油库在全世界范围内已经得到了良好的应用。尤其是在 20 世纪 70 年代初,石油危机爆发后,世界各国开始注重发展石油战略储备。美国在 1975 年颁布了《能源政策与储备法》,并在此后 10 多年时间里,利用得克萨斯和路易斯安那州墨西哥湾沿岸的地下盐穴,建设了 5 大战略石油储备基地,总储存能力为 7.2 亿桶,约合 1.03 亿 t^[10]。德国在 1971 年到 1978 年间,在威廉港的 Etzel 盐丘中建立了总存储量为 1300 万 m³ 的石油战略储备库^[11]。法国在马赛以北的马诺斯克建立了 430 万 t 储量的盐穴储油库。俄罗斯、加拿大、墨西哥、摩洛哥等国家都建有盐穴原油储库。加拿大在阿尔伯塔省萨斯喀彻温堡建立了盐穴乙烷储库^[4]。

相对于地面存储石油等碳氢化合物的方式,盐穴地下储库具有占地面积小,不破坏地表环境,存储量大,价格低廉等优点,同时战略安全性较高。

1.3 压缩空气蓄能盐穴库

盐穴还可以用于压缩空气蓄能发电。压缩空气蓄能发电,是一种高效率的电能存储技术。太阳能、风能等可再生能源发电受自然因素影响,产能不稳定,当电网低负荷时会产生多余电能,多余的电能不能存储,造成电能浪费。因此,利用多余电能将空气压缩储存在地下洞室(盐穴、岩洞等)中,待需要时再放出,压缩空气经加热后通过燃气轮机发电机组发电,以供电力尖峰负荷的需要(图 2)^[4]。这一技术既实现了电能的存储,还可以进行电价差价套利。

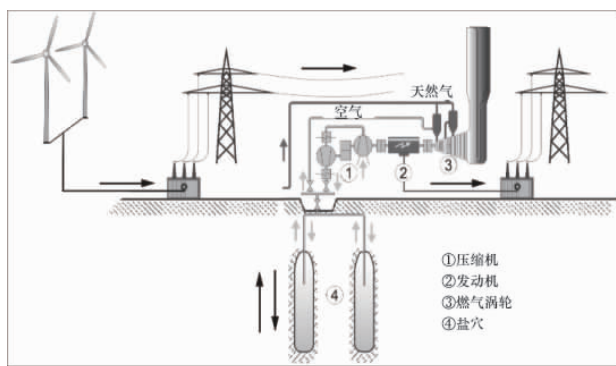
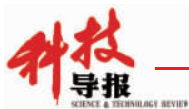


图 2 盐穴压缩空气蓄能原理示意

Fig. 2 Principle of salt cavern compressed air energy storage



盐穴具有安全性高、灵活经济、快速响应(5~10min)等特点,非常适合作为压缩空气蓄能的储库。德国于1978年^[9]首次在Huntorf建立了29万kW的盐穴空气压缩蓄能电站,至今稳定运行30余年,该电站由两个单腔有效体积15万m³的盐穴组成,运行压力在5~7MPa之间,电能的转化效率42%左右。美国于1991年^[5]在阿拉巴马州的McIntosh建立了世界上第2个商用盐穴空气压缩蓄能电站^[5],功率为11万kW,其电能转化效率为54%左右。利用盐穴进行压缩空气蓄能可以以较高的效率实现电能的存储转换,所以这一技术已经在多个国家推广^[13]。

利用盐穴进行空气蓄能也有相应的缺点,由于盐穴压缩蓄能储库注采流量大、压力变化频繁,对盐穴的稳定性、收敛率、温度、湿度变化均会产生较大影响,同时由于注采管柱与空气接触,可能会引起套管、管柱等的腐蚀,所以压缩蓄能盐穴储库往往采用大尺寸的玻璃纤维或不锈钢材料的套管。

1.4 氢气存储蓄能

盐穴储气库存储氢气蓄能,与压缩空气蓄能相近,也是一种电能转化存储技术。将风能、太阳能、水利发电等产生的过剩电力,用于水的电解,将水电解产生的氢气存储在盐穴中。氢气可用于化工制造、燃料,也可在电力需求高峰时期用于发电^[7]。

英国建立了Teesside盐穴氢气储库,由3个单腔体积为7万m³的盐腔组成。美国在德克萨斯州墨西哥湾沿岸,建立了Clemens Dome、Moss Bluff、Mont Belvieu 3座盐穴氢气储库。利用盐穴存储氢气蓄能,与利用地下含水层、枯竭气藏存储氢气蓄能相比,其费用最低^[11,12]。

1.5 工业废料处置

基于盐岩的低渗透性,盐穴也用来存储工业废料(如卤水制盐残渣、燃料灰渣、化学废料等)、油田生产废料(如钻屑、出砂、污染土及罐底残渣等)、采矿废渣、有害物质甚至核废料等。利用盐穴存储工业废料要保证其与盐岩不发生化学反应,确保长期的密封性^[3]。

利用盐穴处置工业废料最初始于盐业公司。1959年,英国曼彻斯特市南约32km的Holford盐田首次利用废弃的盐穴处置生产苏打所产生的碱性废物以及制盐残渣。美国已将盐穴用于储存油田废物,得克萨斯州已经批准了6个盐穴用于处理油田无害废物(Non-hazardous oilfield wastes)、1个盐穴用于处理天然放射性物质(Naturally occurring radioactive material)^[4]。相对于其他诸如填埋、蒸发及热处理等油田无害废物处理方法,盐穴处置在价格上是最低的,而且具有不污染地表地下水,利于环境保护等优点^[13,14]。

世界上部分国家针对盐穴存储有害物质以及核废料等进行了研究和实践。美国在新墨西哥州WIPP核废料掩埋场,利用采盐的老腔进行了核废物的处置^[5]。出于安全环保的考虑,利用盐穴进行有害物质的封存,需要对盐穴的渗透性、完整性等进行充分详细的论证,避免有害物质的泄露。

1.6 CO₂封存

全球气候变暖问题,引发了人们对CO₂排放的关注。将CO₂注入地下深部不可渗漏岩体洞穴中,进行地质处置,是实现减排的重要措施之一^[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 $T_c=304.1\text{K}$,压力大于临界压力 $p_c=7.38\text{MPa}$ ^[6,17])的CO₂通过压缩机压缩,以近似流体的状态注入地下构造中。目前可用于封存的地质构造包括:枯竭油气藏、深部咸水层、无法开采的深部矿层、盐穴、玄武岩、油页岩层。与其他CO₂封存方法相比,利用盐穴进行CO₂封存价格最高,但具有相对集中、注入采出不受地质条件影响、密封性高、随时可以对存储的CO₂进行评价等优势。在缺乏其他CO₂封存地质构造的地区,采用盐穴进行CO₂封存也是一种可行的途径^[7]。加拿大地质研究院以阿尔伯塔的Lotsberg层状盐岩层为研究对象,分析了该处层状盐岩的基本力学特性、实施CO₂封存的地质条件、可行性以及需要重点关注的基础研究,结果表明,利用盐穴进行CO₂封存技术是可行的^[11,17]。

2 盐穴的技术发展

随着盐穴储库的广泛应用,盐穴地下储库技术在以下多个领域取得了进展^[1,18-20]:

(1) 盐穴储库的库址选择。随着建库需求增加和盐岩资源减少,使得盐穴项目逐渐由大型均质盐丘向薄夹层、非均质或超深的层状盐岩拓展,新技术不断发展。英国Gateway储气库采用特殊平台发展了海上造腔技术;英国Potland储气库采用卤水置换技术,在2400m超深盐层中建库,压力超过40MPa;中国也在湖北云应、河南平顶山、湖北潜江等多夹层、低品位盐层中开展了大量建库技术研究和实践,其中平顶山及潜江均在地下2000m左右的超深层状盐层中建库。

(2) 盐穴储库钻井及造腔技术。随着盐穴项目的环境保护程度逐渐提高,为减少对地表的影响,盐穴储气库采用从式井设计,钻探S型大尺寸斜井,如德国Ettel储气库,英国Preesal储气库(井斜达75°、井径508mm(20英寸));为了增加造腔的速度,国外普遍采用了大井眼钻井,采用273mm+177.8mm($10\frac{3}{4}$ 英寸+7英寸)的管柱组合进行造腔来增加造腔排量,提高造腔速度;在增加造腔速度方面,目前欧洲采用了双井造腔技术,加大造腔流速,缩短建库周期,如德国Ettel储气库造腔流速达到了350m³/h;目前国内造腔普遍采用177.8mm+114.3mm(7英寸+4 $\frac{1}{2}$ 英寸)管柱组合,针对大井眼钻井及双井造腔技术还在相应的探索阶段。

(3) 盐穴储库增大库容方面的技术发展。建造大尺寸、大体积盐穴是目前储气库建设的发展趋势,英国Preesal盐穴储库单腔体积达70~80万m³,Nuttnoor储库单腔体积超过了100万m³;在建造大体积盐穴的同时,大力开展盐岩的力学特性研究,充分利用盐岩的蠕变特性及损伤修复特性,增加储气库运行压力区间和日注采压力梯度,增大库容和注采流量。

(4) 其他应用。受 2008 年经济危机影响,盐穴项目采取多种措施缩短开发周期、降低成本,利用现有盐穴开发新项目。如德国的 Etzel 储油库改建储气库,英国 Hose House 储气库进行再扩容,中国金坛盐穴储气库利用采盐废弃老腔成功改建储气库;为节约淡水资源,利用海水进行溶腔;充分利用建库采盐的资源,开发研究反渗透发电技术,开展陆地海洋渔业、海洋疗法等。

3 中国盐穴的利用现状及展望

中国盐矿资源丰富,但利用盐穴进行能源存储的历史仅十几年。中国石油天然气集团公司从 1999 年开始对国内盐矿进行调查,初步评价各盐矿建设地下储气库的地质条件。2004 年,配套西气东输一线的中国第一座盐穴储气库——金坛储气库开始建设,建库盐层为下第三系阜宁组四段,盐矿 NaCl 平均含量 74.9%~90.8%,埋深 800~1200m 左右。该储气库设计有效工作气量 17.14 亿 m³,单腔有效体积 25 万 m³,最大直径 80m,盐腔高度 135m。于 2007 年完成 5 口老腔改造并投入运行,形成库容量 1.1 亿 m³。目前已完成新钻井 30 余口,造腔量累计近 500 万 m³,形成库容 2.3 亿 m³,工作气量 1.2 亿 m³,预计 2020 年完成工程整体建设。金坛储气库运行 6 年来,在天然气调峰、应急方面发挥了重要作用。随着天然气市场的不断发展,我国盐穴储气库发展迅速,配套西气东输二线等天然气长输管网的云应、平顶山、淮安等盐穴储气库已经完成前期勘探、资料井钻探工作,正开展设计研究与先导性试验。定远、楚州、衡阳等盐矿正开展建库可行性研究工作^[20-22]。此外,在安宁、金坛等盐矿,开展了利用盐穴进行原油存储的相关研究^[23-25]。

与欧美等国家相比,中国盐岩层地质条件较差,盐层单层厚度薄、品位低且水不溶物含量高,导致盐穴建库技术难点多,中国目前盐穴建库工艺还不完善,并未形成合理、高效的建库体系。未来中国盐穴能源储库的发展机遇与挑战并存^[26]。

参考文献 (References)

- [1] Report of working committee 2: Underground gas storage [R]/25th World Gas Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, June 4-8, 2012.
- [2] 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.
Zheng Yali, Zhao Yanjie. Oil & Gas Storage and Transportation, 2010, 29(9): 652-655.
- [3] Thoms R L, Gehle R M. A brief history of salt cavern use[C]. The 8th World Salt Symposium, Hague, Netherlands, May 7-11, 2000.
- [4] Brockmann B, Donadei S, Crocigno F. Energy storage in salt caverns-renewable energies in the spotlight [C]. Sino German Conference, Beijing, China, July 7, 2010.
- [5] 杨花. 压气蓄能过程中地下盐岩储气库稳定性研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩石力学研究所, 2009.
Yang Hua. Underground gas storage in salt rock in the process of compressed air energy storage [D]. Wuhan: Institute of Rock & Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [6] 谢凌志, 周宏伟, 谢和平. 盐岩 CO₂ 处置相关研究进展[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3324-3329.
Xie Lingzhi, Zhou Hongwei, Xie Heping. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3324-3329.
- [7] Report of working committee 2: Underground gas storage [R]/24th World Gas Conference, Buenos Aires, Argentina, October 5-9, 2009.
- [8] Report of working committee 2: Underground gas storage [R]/23th World Gas Conference, Amsterdam, Netherlands: International Gas Union, June 5-9, 2006.
- [9] UGS World Data Bank [EB/CD]/25th World Gas Conference, Kuala Lumpur, Malaysia: International Gas Union, June 4-8, 2012.
- [10] 潘家华. 中国的能源问题和国家石油储备[J]. 油气储运, 2004, 23(12): 1-4.
Pan Jiahua. Oil & Gas Storage and Transportation, 2004, 23(12): 1-4.
- [11] Schaber C, Mazza P, Hammerschlag R. Utility-scale storage of renewable energy[J]. The Electricity Journal, 2004, 17(6): 21-29.
- [12] Padró C E G, Putsche V. Survey of the economics of hydrogen technologies[M]. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 1999.
- [13] 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, Albuquerque, USA, October 7-10, 2001.
- [14] Thoms R, Gehle R. Analysis of a solidified waste disposal cavern in Gulf Coast salt dome [C]. SMRI Fall Meeting, Hannover, Germany, September 25-October 1, 1994.
- [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.
Ding Guosheng, Xie Ping. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(6): 1068-1071.
- [16] Dusseault M B, Bachu S, Davidson B C. Carbon dioxide sequestration potential in salt solution caverns in Alberta, Canada [C]. SMRI Fall Meeting, September 7-11, 2001.
- [17] 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. Advances in Earth Science, 2007, 22(7): 698-707.
- [18] Axel G. Natural gas storage in salt caverns-present status, developments and future trends in Europe [C]. SMRI Spring Meeting, Basel, Switzerland, April 29-May 2, 2007.
- [19] 霍瑶, 黄伟岗, 温晓红. 北美天然气储气库建设的经验与启示[J]. 天然气工业, 2010, 30(11): 83-86.
Huo Yao, Huang Weigang, Wen Xiaohong. Natural Gas Industry, 2010, 30(11): 83-86.
- [20] 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.
Ding Guosheng, Xie Ping. Natural Gas Industry, 2006, 26(6): 111-113.
- [21] 丁国生. 金坛盐穴地下储气库建库关键技术综述[J]. 天然气工业, 2007, 27(3): 111-113.
Ding Guosheng. Natural Gas Industry, 2007, 27(3): 111-113.
- [22] 李建中. 利用盐岩建设盐穴地下储气库[J]. 天然气工业, 2004, 24(9): 19-121.
Li Jianzhong. Natural Gas Industry, 2004, 24(9): 19-121.
- [23] 李文阳, 丁国生, 张昱文. 我国石油资源地下储备的可行性[J]. 石油化工技术经济, 2002, 17(1): 14-18.
Li Wenyang, Ding Guosheng, Zhang Yuwen. Techno-Economics in Petrochemicals, 2002, 17(1): 14-18.
- [24] 谭羽非, 宋传亮. 利用盐穴储备战略石油的技术要点分析[J]. 油气储运, 2008, 27(8): 1-4.
Tan Yufei, Song Chuanliang. Oil & Gas Storage and Transportation, 2008, 27(8): 1-4.
- [25] 赵德贵. 天然气地下储气库及其在美国的应用[J]. 能源安全, 2006, 11(6): 29-31.
Zhao Degui. Energy Security, 2006, 11(6): 29-31.
- [26] 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.
Ding Guosheng. Natural Gas Industry, 2011, 31(12): 90-93.