

doi: 10.12029/gc20240124002

王浩, 徐俊辉, 陆佳敏, 张高, 罗森, 赵云松, 王卫东, 徐孜俊, 戴秋霞, 陈留平, 王同涛. 2025. 大规模地质储氢工程现状及应用展望[J]. 中国地质, 52(1): 180–204.

Wang Hao, Xu Junhui, Lu Jiamin, Zhang Gao, Luo Miao, Zhao Yunsong, Wang Weidong, Xu Zijun, Dai Qiuxia, Chen Liuping, Wang Tongtao. 2025. Current situation and application prospect of large-scale geological hydrogen storage engineering[J]. *Geology in China*, 52(1): 180–204 (in Chinese with English abstract).

大规模地质储氢工程现状及应用展望

王浩^{1,2}, 徐俊辉^{1,2}, 陆佳敏^{1,2}, 张高^{2,3}, 罗森^{2,3}, 赵云松^{2,3}, 王卫东^{1,2}, 徐孜俊^{2,3},
戴秋霞^{1,2}, 陈留平^{1,2}, 王同涛⁴

(1. 中盐金坛盐化有限责任公司, 江苏 常州 213000; 2. 江苏省井矿盐综合利用工程技术研究中心, 江苏 常州 213000; 3. 中盐盐穴综合利用股份有限公司, 江苏 常州 213000; 4. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要:【研究目的】地质储氢具有规模大、周期长、可跨季节储能等突出优势, 是未来氢能大规模储备的重要发展方向。【研究方法】本文通过系统搜集和整理地质储氢领域的研究成果, 以及基于文献调研对地质储氢工程现状进行了论述。同时, 充分借鉴盐穴天然气储气库工程建设的经验, 分析了中国盐穴储氢库建设中的挑战, 并提出解决思路。结合江苏省金坛区盐盆资源条件和盐穴综合利用经验, 探索在该地建设盐穴储氢库的技术路线的可能性。【研究结果】(1)地质储氢库根据地质构造分为盐穴、枯竭油气藏、含水层以及废弃矿洞, 其中, 盐穴储氢库已投产运行和中试示范的项目数量最多, 且已实现纯度 95% 的氢气储存, 是大规模地质储氢的优先发展方向。(2)盐穴储氢库的建设周期可划分为选址、钻井、造腔、注采完井、注气排卤、不压井作业、运行以及监测等 8 个阶段, 可参考盐穴天然气储气库的建设经验, 但仍存在政策、材料以及施工工艺等方面的问题。(3)在江苏金坛地区, 盐穴储氢技术路线可以与该地的盐穴压缩空气储能和盐穴储天然气技术相结合, 形成一套综合技术方案, 包括可再生能源发电技术、高压空气压缩技术、电解水制氢技术以及天然气管道掺氢技术等不同领域技术。【结论】近年来, 国外地质储氢库的选址调研与试验论证工作正在加速进行, 出现了多个处于中试阶段的地质储氢项目。综合考虑安全性、经济性以及技术难度等多个方面, 盐穴储氢被认为是中国大规模地质储氢的优先发展方向。建成盐穴储氢验证平台, 推进示范工程建设, 将有助于形成具有自主知识产权的盐穴储氢技术体系。

关键词: 新型储能技术; 地质储氢; 盐穴储气库; 盐穴储氢库; 能源勘查工程

创 新 点: (1)从工程角度系统介绍了盐穴天然气储气库主要的建设阶段, 提出在国内建设盐穴储氢库可能面临的问题及相应的解决办法建议; (2)结合江苏省金坛区的盐盆资源条件和盐穴综合利用经验, 对金坛盐矿进行了建盐穴储氢库条件评价, 探索了在该地区建设盐穴储氢库的技术路线的可能性。

中图分类号: TK91 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)01-0180-25

Current situation and application prospect of large-scale geological hydrogen storage engineering

收稿日期: 2024-01-24; 改回日期: 2024-06-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB4005500), 湖北省杰出青年基金(2021CFA095)及中国盐业股份有限公司重点科技发展计划项目(ZK-2205, ZK-2301)联合资助。

作者简介: 王浩, 男, 1996 年生, 硕士, 从事盐穴储能技术研究; E-mail: haowang@chinasalt-jt.com。

通信作者: 徐俊辉, 男, 1988 年生, 高级工程师, 从事盐穴储能技术研究; E-mail: jhxu@chinasalt-jt.com。

陈留平, 男, 1967 年生, 正高级工程师, 从事制盐及盐穴储能技术研究; E-mail: jsb@chinasalt-jt.com。

WANG Hao^{1,2}, XU Junhui^{1,2}, LU Jiamin^{1,2}, ZHANG Gao^{2,3}, LUO Miao^{2,3}, ZHAO Yunsong^{2,3},
WANG Weidong^{1,2}, XU Zijun^{2,3}, DAI Qiuxia^{1,2}, CHEN Liuping^{1,2}, WANG Tongtao⁴

(1. China Salt Jintan Salt Chemical Co., Ltd., Changzhou 213000, Jiangsu, China; 2. Jiangsu Engineering Research Centre for Comprehensive Utilization of Well and Rock Salt, Changzhou 213000, Jiangsu, China; 3. CNSIG Salt cavern Comprehensive Utilization Co., Ltd., Changzhou 213000, Jiangsu, China; 4. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, Hubei, China)

Abstract: This paper is the result of energy exploration engineering.

[Objective] Geological hydrogen storage has the outstanding advantages of large scale, long period and cross-season energy storage, which is an important development direction of large-scale hydrogen energy storage in the future. **[Methods]** This review systematically collects and collates the research results in the field of geological hydrogen storage, and discusses the current situation of geological hydrogen storage engineering based on literature investigation. At the same time, the review makes full reference to the experience of salt cavern gas storage engineering construction, analyzes the challenges in the construction of salt cavern hydrogen storage in China, and puts forward solutions. Based on the salt basin resource condition and the comprehensive utilization experience of salt cavern in Jintan District of Jiangsu Province, the possibility of constructing the technical route of salt cavern hydrogen storage is explored. **[Results]** (1) Geological hydrogen storage facilities are classified according to geological structures into salt caverns, depleted oil and gas reservoirs, aquifers, and abandoned mines. Among these, salt cavern storage facilities have the highest number of operational and research projects. They achieve hydrogen storage with purity exceeding 95%, making them the primary direction for large-scale geological hydrogen storage development. (2) The construction cycle of salt cavern hydrogen storage can be divided into eight stages, including site selection, drilling, solution mining, injection and production completion, gas first fill, snubbing, operation and monitoring, which can refer to the construction experience of salt cavern natural gas storage, but there are still problems in policy, materials and construction technology. (3) In Jintan area of Jiangsu Province, the salt cavern hydrogen storage technology route can be combined with the salt cavern compressed air energy storage and salt cavern natural gas storage technology to form a set of comprehensive technical solutions, including renewable energy power generation technology, high-pressure air compression technology, electrolytic water hydrogen production technology and natural gas pipeline hydrogen mixing technology. **[Conclusions]** In recent years, the site selection, investigation, and experimental verification of geological hydrogen storage facilities abroad have been accelerating, with several geological hydrogen storage projects in the pilot stage. Considering factors such as safety, economy, and technical difficulty, salt cavern storage is considered the primary direction for large-scale geological hydrogen storage in our country. Establishing a salt cavern hydrogen storage verification platform and advancing demonstration project construction will help to form a salt cavern hydrogen storage technology system with independent intellectual property rights.

Key words: new energy storage technologies; geological hydrogen storage; salt cavern gas storage; salt cavern hydrogen storage; energy exploration engineering

Highlights: (1) From an engineering perspective, the main construction stages of salt cavern natural gas storage facilities are systematically introduced. Additionally, potential problems that may arise in constructing salt cavern hydrogen storage facilities domestically are identified, along with corresponding suggested solutions; (2) Based on the salt basin resources and comprehensive utilization experience in Jintan District, Jiangsu Province, an assessment of the conditions for constructing a salt cavern hydrogen storage facility in the Jintan salt mine is conducted. The feasibility of establishing a technical route for constructing a salt cavern hydrogen storage facility in this region is explored.

About the first author: WANG Hao, male, born in 1996, master, engaged in salt cavern energy storage technology research; E-mail: haowang@chinasalt-jt.com.

About the corresponding author: XU Junhui, male, born in 1988, senior engineer, engaged in research on salt cavern energy storage technology; E-mail: jhxu@chinasalt-jt.com. CHEN Liuping, male, born in 1967, professor level senior engineer, engaged in salt production and salt cavern energy storage technology research; E-mail: jsb@chinasalt-jt.com.

Fund support: Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2023YFB4005500), Hubei Province Outstanding Youth Fund (No.2021CFA095), Key Science and Technology Development Project of China National Salt Industry Co., LTD. (No.ZK-2205, No.ZK-2301).

1 引 言

作为人类生存和发展的重要基石,能源是推动经济社会快速发展的重要动力。随着世界人口快速增长和科技、工业迅猛发展,对能源的需求不断增加(Dawood et al., 2020)。中国已经成为全球最大的一次能源消费国,根据《2023 世界能源统计年鉴》的数据显示(Davenport and Wayth, 2023),2022 年全球一次能源消费总量为 604.04 EJ,其中中国占比达到 26.51%,为 160.18 EJ。2022 年,中国煤炭、天然气以及石油消费量分别达到 88.56 EJ、13.69 EJ 和 28.63 EJ,化石能源消费占中国一次能源消费量的 81.7%,这表明化石能源在中国的能源消费中仍占据主导地位。然而,传统的化石能源资源并非取之不竭,过度使用不仅会导致资源枯竭(Zhang et al., 2022),还会引发环境污染问题,严重影响人类的可持续发展(Zou et al., 2022)。2020 年 9 月 22 日,中国正式承诺将在 2030 年前实现“碳达峰”,2060 年前实现“碳中和”,为了实现这一双碳目标,有必要减少化石能源的使用,并将能源结构从以化石能源为主向以可再生能源为主转变(马冰等, 2021)。

在过去十年中,全球可再生能源技术变革的步幅显著加快,越来越多的可再生能源项目已经完成建设并投入发电使用(Guney, 2019)。中国幅员辽阔,资源丰富,太阳能、风能、地热能等可再生能源具有大规模开发利用的物质基础(Harlan, 2022)。截至 2023 年底,全国可再生能源发电总装机容量突破 14.5 亿 kWh,占全国发电总装机容量的 51.9%,历史性超过火电装机(郭娟等, 2024)。然而,以风电和光伏发电为代表的可再生能源,受天气条件、地理位置等因素影响,其发电过程具有间歇性和波动性特点,难以维持稳定的电力输出,电网频率波动较大、供需不匹配等问题时有发生,进而导致了弃风、弃水、弃光等现象的存在(Hong and Moller, 2012; Fang et al., 2018; Yang et al., 2021)。这些问题的存在,使得新能源利用率相对较低,对

新能源的可持续发展产生了一定制约。为了解决可再生能源发电与用电不匹配的问题,打破发电不能存储的困境,需要采用储能技术,利用储能设施装置或物理介质将能量储存起来,以实现电力的稳定输出和平衡供需(Rahman et al., 2020)。

电能可以转换为化学能、势能等形态存储,按照能量的储存方式,储能可分为物理储能、化学储能以及电磁储能三类(Amir et al., 2023),按照能量的应用范围,储能可分为狭义储能和广义储能。狭义储能用于提供大规模电能,包括压缩空气储能、抽水蓄能等,在“电能—其他形式能量—电能”2 次能量转化的过程中会增加能量损耗。广义储能指利用电力系统富余的电能,将其转化为其他能源,在“电能—其他形式能量”能量转化后,终端应用环节可以直接使用能量而非必须转换回电能上网的储能方式,包括氢储能、热储能等。氢作为一种热值高、清洁无污染的安全能源,近年来随着上游制氢技术的成熟和成本的降低(Olabi et al., 2021; Ishaq et al., 2022),下游氢能利用呈现日益广泛的趋势,引起了人们的广泛关注。氢能储存作为一种新型储能方式,在能量维度、时间维度和空间维度上相较于其他储能方式具有显著的优势,使得氢能储存在新型电力系统建设中能够发挥重要的作用(Andersson and Gronkvist, 2019; Osman et al., 2021)。此外,中国已成为全球最大氢气生产国,2022 年,中国氢气产能约 4000 万 t/年,产量约 3300 万 t/年(陆娅楠, 2022),氢气产能和产量的差距反映了储存氢气的的能力对氢气生产存在一定的影响。

目前,主要的储氢方式可分为物理储氢、化学储氢与其他方式。物理储氢包括高压气态储氢和低温液态储氢;化学储氢则涵盖固态储氢、有机液态储氢以及液氨储氢。然而,受各种因素的影响,以上方法难以满足氢能在大规模、长周期储能方面的需求,解决这一难题的有效途径是地质储氢(王朋飞等, 2021)。将氢气作为能源载体存储在自然界中的地下地质构造中,在需要时可采出直接使用,

也可转化为电能。地质储氢由于其储能规模大、储存周期长、储能成本较低、安全性高及寿命长等特点在国际上受到广泛关注 (Miocic et al., 2023), 美国、英国以及德国都已建成并运行了地下储氢项目, 其中盐穴储存 95% 纯度氢气的技术已经成功应用。近几年来, 荷兰、法国、丹麦等其他国家也相继开工了一些地质储氢的中试项目 (Caglayan et al., 2020; Dash et al., 2023)。

从国外地质储氢库的建设实践来看, 主流的地质储氢库—盐穴储氢库的建设技术源自于盐穴天然气储气库。目前, 中国尚未在地质储氢领域进行工程应用, 但在储存天然气和压缩空气方面, 积累了丰富的工程经验。中国拥有大量的枯竭油气藏、采卤老腔盐穴等地质空间资源, 使得地质储氢的发展具有巨大的潜力。本文总结了国内外地质储氢库工程的现状, 介绍了已投运和处于中试阶段的国内外地质储氢库, 并对比分析了不同类型地质储氢库的优缺点。针对中国盐穴储氢库工程的建设, 结合国外盐穴储氢库和国内盐穴天然气储气库的建设经验, 讨论了建设中的关键技术问题和应对策略。最后, 结合江苏省金坛盐盆特点和盐穴储能项目现状, 对在金坛建设盐穴储氢库进行了展望, 旨在加快中国盐穴储氢项目的快速发展, 进一步提升中国盐穴综合利用水平。

2 地质储氢概述

随着能源结构转型和科技快速发展, 地下空间储能已由传统的储天然气 (丁国生和谢萍, 2006)、储油 (施锡林等, 2023), 发展到二氧化碳封存 (李光等, 2016)、压缩空气储能 (郭朝斌等, 2021)、储氢 (陆佳敏等, 2022)。

2.1 氢气的特征

氢气是相对分子质量最小的气体, 在所有燃料中, 氢气的质量能量密度最高, 同等质量的氢气所容纳的能量是甲烷的 2.5 倍。然而, 其体积能量密

度较低, 仅为甲烷的三分之一, 这意味着需要更大的储气空间来容纳相同能量的氢气, 以降低单位体积库容的储气成本。氢气的密度约为甲烷的八分之一, 在质量相同情况下氢气需要更大的储存空间或压力。氢气的比重远小于甲烷, 仅为 0.0695, 一旦泄露至空气中后, 它会迅速向上扩散。氢气的分子量比甲烷低, 能密封住甲烷的盖层和夹层, 对氢气来说存在泄露的风险。较低的黏度也意味着氢气具有较好的流动性, 在采气过程中, 相比甲烷, 氢气的损失更小。此外, 氢气在水中的溶解度小于甲烷, 意味着在注氢排卤过程中氢气的损失更少。最后, 氢气爆炸极限的体积分数在 4%~75%, 相比甲烷的 5%~15%, 其爆炸极限体积分数的范围很宽 (表 1)。

2.2 地质储氢技术原理

氢的制取来源包括化石燃料制氢、工业副产氢以及电解水制氢等, 根据原料来源可划分为灰氢、蓝氢和绿氢。尽管化石燃料制氢技术成熟, 成本最低, 但其碳排放量较高, 且随着原料价格波动, 其成本优势会逐渐减弱, 再加上化石燃料不可再生性与减排压力, 其扩展空间有限; 工业副产氢受到主产品制备规模的制约, 难以实现稳定的大规模供应, 仅适用于补充性气源与短期过渡。电解水制氢具有零碳排放优势, 但目前成本是制约其大规模应用的主要因素, 包括清洁电力端电价与关键设备的投资。随着清洁电力端电价与设备价格的下降, 与可再生能源发电耦合的电解水制氢将逐步成为主流的制氢路径, 实现环境与经济效益的双赢。

地质储氢是通过利用地下地质构造实现氢能大规模储存的技术。狭义的氢储能基于“电-氢-电”转换过程, 在电力需求较低时, 利用风电、光电及其他清洁能源电能进行电解水制氢, 将制得的氢气通过压缩机升压, 注入地下构造中, 以实现氢能的储存。储存的氢气可以在电力需求高峰时通过燃料电池或内燃机进行发电, 并向电网供应电力; 广义的氢储能强调“电-氢”单向转换, 储存的氢气

表 1 氢气和甲烷的物理性质 (数据来源 Muhammed et al., 2022; Ugarte and Salehi, 2022)

Table 1 Physical properties of hydrogen and methane (Data from Muhammed et al., 2022; Ugarte and Salehi, 2022)

气体	相对分子质量	密度/ (kg/m ³)	比重	黏度/ (Pa·s)	水中溶解度/ (g/L)	标准沸点/ (°C)	热值/ (kJ/g)	水中扩散速率/ (m ² /s)	爆炸浓度范围
氢气	2.016	0.089	0.068	0.89×10 ⁻⁵	16×10 ⁻⁴	-253	120~142	5.13×10 ⁻⁹	4%~75%
甲烷	16.043	0.657	0.509	1.1×10 ⁻⁵	22.7×10 ⁻³	-165	50~55.5	1.85×10 ⁻⁹	5%~15%

直接通过管道输送到下游使用(Tarkowski, 2019)。在电解水制氢过程中,副产品高纯度氧气也可以得到有效利用,从而降低整体成本(图1)。与其他储能方式相比,在新能源消纳方面,地质储氢具有明显的优势,是少有的容量规模能够达到储存百吉瓦时的储能方式,且可以适应季节性的储能(Liebscher et al., 2016)。

2.3 地质储氢的应用场景

2.3.1 电源侧

地质储氢技术可以与风电、光伏等可再生能源发电技术相耦合,构建风储或光储一体化系统。将过剩的能量转化为氢气储存起来,转化为稳定可控的能源输出,从而提升可再生能源发电规模化消纳的能力;平滑风电和光伏发电的波动性,使得输出的电能质量更高,更加稳定,从而提高其可控性;优化风电和光伏场群的出线容量,减少对电网出线容量的需求,从而降低电网建设投资,提高输电线路的利用率,降低输电损耗。

2.3.2 电网侧

地质储氢系统与氢能发电系统配套,可接入输电网或者配电网,接受电力调度机构的统一调度,确保电网的安全稳定运行。其主要功能包括提供调峰辅助容量和调节容量缺口,以应对电力供需之间的差异。在用电低谷时储存多余电力,而在用电高峰时则释放储存的氢气以产生电力。此外,当电力系统遭受突发事件或故障时,地质储氢系统可以迅速释放储存的氢气,为关键设施提供紧急电力供应,确保电网的稳定运行。

2.3.3 负荷侧

地质储氢系统具备多能联供的特性,可实现氢能、压缩产生的热能以及氢能发电联合供应。可广泛应用于城市社区、工业园区等多样化能源需求场

景,显著提升能源利用效率。

2.4 地质储氢库类型

根据地质结构的不同,可将地质储库分为人工空间型和天然多孔介质储层型两种(Oldenburg and Pan, 2013),盐穴和废弃矿洞属于人工空间型,含水层和枯竭油气藏属于孔隙-裂缝天然多孔介质型。

2.4.1 盐穴

盐穴是指利用地下盐层或盐丘,采用人工方式在盐层或盐丘中通过水溶形成洞穴储存空间。盐岩是一种分布广泛的沉积岩,中国的盐层多为湖相沉积,在江苏金坛、山东肥城、湖北应城、河南平顶山、陕西榆林等地均发现大型盐矿。由于与其他岩石相比,盐岩具有极低的孔隙度($<0.5\%$)和渗透率($<10^{-6}$ mD),确保了储库的密闭性。其蠕变性能较好,能够适应注采气导致的周期性内压变化(Liu et al., 2023)。同时,盐岩表现出损伤自恢复性,加上盐穴开采方式简单、空间利用率高、注采能力强,在国际上被广泛认可为最佳能源储存介质。

2.4.2 枯竭油气藏

枯竭油气藏指那些已经开采、废弃或达到一定程度退役的油田或气田。这类油气藏包括已枯竭的干气藏、凝析气藏、带气顶的油藏或带油顶的气藏(宋刚祥等, 2020)。中国油气藏主要分布在松辽盆地、渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地和准噶尔盆地等地,由于在先前开发阶段已经储存了大量油气,证明这些油气藏具有良好的圈闭构造。同时,通过油气勘探和开采的过程,建设了一些油气开采基础设施,积累了大量丰富的地质资料,包括油气藏面积、储层厚度、原始地层压力和温度、储层孔隙度、渗透率等,使得无需额外进行地质勘探和新设施建设,从而节约了投资(朱礼萍, 2022)。因此,枯竭油气藏成为目前应用最为广泛的一种地下空间。

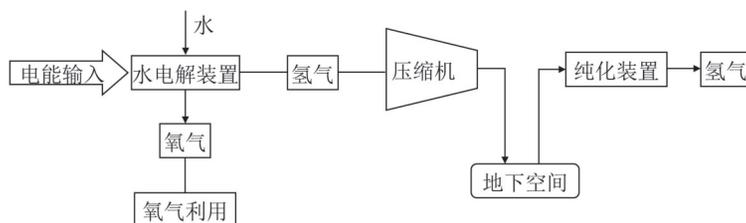


图1 与电力系统耦合的地下空间储氢

Fig.1 Hydrogen storage in underground space coupled with power system

2.4.3 含水层

含水层是一种多孔且具有一定渗透性的岩层, 其孔隙空间被淡水或盐水填充, 而其上方由不透水的盖层和断层组成, 形成一个防止气体渗漏的构造密封层(贾善坡等, 2016)。将气体注入充满水的含水层时, 由于压力升高, 导致水向下或者侧向渗透, 以创造出储存空间。地下含水层具有巨大的容量、相对稳定的温度和较高的安全性, 但存在地质条件限制、需要大量的垫气、建设周期较长等问题。

2.4.4 废弃矿洞

废弃矿洞储气库通常是指用废弃的符合储气条件的矿洞进行储气, 这种储气库的工作效率高, 因为可以充分利用已有的地下空间, 并且可以完全回收垫气。然而, 由于符合储气条件的废弃矿洞数量有限, 改造时通常需要加装多层内衬以增强密封性, 增加了成本和工程难度。其次, 人工开凿也受到地质条件的限制, 因此这类储气库目前并不十分常见(黄宽等, 2023)。

2.5 不同类型地质储库分析

盐穴储存纯氢的可行性已经在实践中得到证明。枯竭油气藏和含水层曾用于储存掺有氢气的混合气体, 但纯度较低, 废弃矿洞主要用于储存天然气, 对这三类地下空间进行纯氢储存的可行性仍需进一步研究与测试。Hematpur et al.(2023)对比了不同类型储库的优缺点(表 2), 盐穴和废弃矿洞具有较高的注采频率承受能力, 且注采效率高, 速度快, 垫气量要求低, 因此适用于日常调峰使用。以金坛盐穴压缩空气储能电站为例, 截至

2023 年 7 月底, 已完成注气储能 146 次, 采气释能 156 次, 实现了电网调度的高度灵活运行(刘笑驰等, 2023)。相比之下, 枯竭油气藏和含水层的注采效率较低, 速度慢, 垫气量大, 且有部分无法回收, 更适合采用“夏注冬采”的运营模式。虽然单个盐穴储气库的物理容积和储气能力较为有限, 不及枯竭油气藏和含水层, 但由多个盐穴所组成的储气库群的储气能力相当可观, 能够满足氢能的大规模储存。

Lord et al.(2014)对不同类型地下储氢库的经济性进行了分析。盐穴、枯竭油气藏、含水层以及废弃矿洞储存氢气的平均成本(单位: 美元/kg)分别为 1.61、1.23、1.29 和 2.77。废弃矿洞的储氢成本最高, 主要因其确保密封性所用的混凝土衬砌、钢衬材料以及施工安装费用较为昂贵。盐穴不同于枯竭油气藏和含水层, 不能利用已有的地质构造, 需要进行水溶造腔以新建地下空间。此外, 根据国外地质储氢的经验, 地质储氢库中可能含有大量微生物, 与氢气发生各种反应, 生成 H_2S 和 CH_4 等气体, 从而降低氢气的储存量并影响氢气的纯度(Loto, 2017; Dutta et al., 2018), 而盐穴储层围岩高盐的环境有助于抑制一些微生物的存在, 减少对氢的消耗和纯度影响(Dopffel et al., 2021)。

随着新能源在发电侧占比不断提升, 储能需求逐渐增长。综合来看, 盐穴由于国内盐矿分布广泛、规模大、地质构造和水文条件简单、密封性能出色, 以及在国际上已有纯氢储存的成功案例, 有望成为未来与电能耦合实现大规模地下氢气储存

表 2 四种类型地下储氢库特点

Table 2 Four types of underground hydrogen storage

储存类型	盐穴	枯竭油气藏	含水层	废弃矿洞
状态	4座正在运行的储氢成功案例, 盐穴地下储氢的可行性已被实践证明	氢气与甲烷的混合气储存以被实践证明可行, 纯氢储存尚在研究	氢气与甲烷的混合气储存以被实践证明可行, 纯氢储存尚在研究	存在天然气储存案例, 纯氢储存尚在研究
运行模式	战略储备和日、周、季节调峰	战略储备和季节调峰	战略储备和季节调峰	战略储备和日、周、季节调峰
注采周期	>10 次/年	1~2 次/年	1~2 次/年	>10 次/年
垫气量	30%	40%~50%	50%~80%	≤30%
运行压力	3.5~20 MPa	1.5~30 MPa	3~30 MPa	2~20 MPa
建设成本	低	低	低	高
运营成本	中等	低	低	中等
主要支出	钻井, 腔体建设, 卤水处理	钻井, 垫气	地质勘察, 钻井, 垫气	洞室开挖, 衬砌加固, 密封性监测
技术难点	注采参数(注采速率、频率)优化	残余油气和微生物的影响	储层围岩和盖层致密性需确定、微生物的影响	氢气与衬砌材料的反应机理

的首选类型。

3 国内外地质储氢项目概况

3.1 国外地质储氢项目

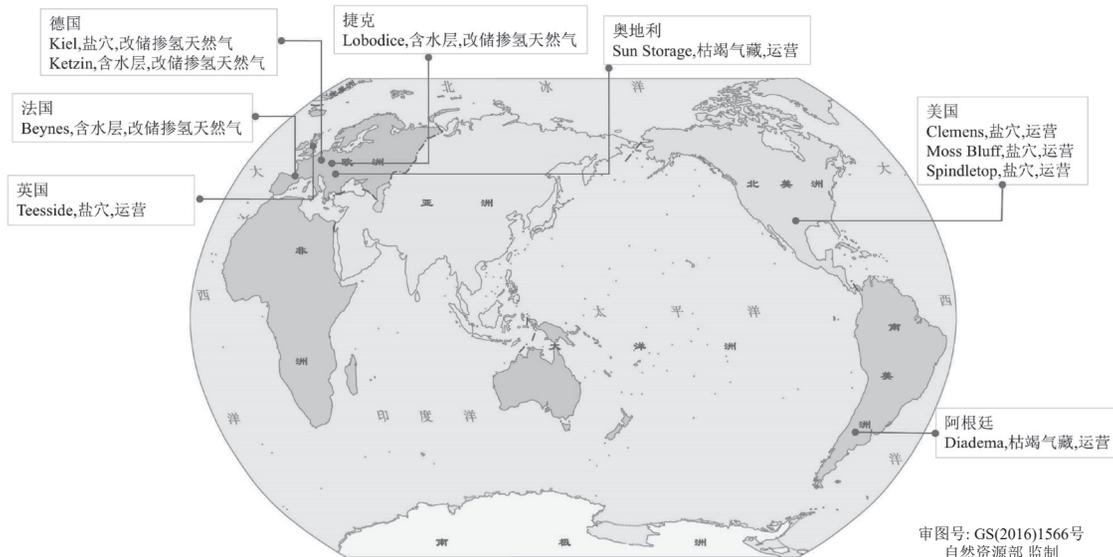
欧洲是全球地质储氢工程项目最为丰富的地区之一。在 20 世纪 60 至 70 年代,多个欧洲国家开始大规模生产城镇燃气(含有 CO_2 、 CO 、 H_2 、 CH_4 等多种气体的混合气),其含氢量可高达 50%。为了有效利用这些含氢量庞大的城镇燃气,以应对季节性需求变化、确保供应稳定性和灵活性,需要进行大规模的储存。1956 年,法国天然气公司(Gas de France)在位于巴黎西侧 Beynes 小镇附近的一个含水层储层中,首次进行了含有 50%~60% 纯度氢气的城镇燃气的地质储存(Zivar et al., 2021)。随后,德国于 1971 年首次成功利用盐穴储存了 50%~60% 纯度的氢气,而英国 Sabic Petroleum 公司则在 1972 年在盐穴中实现了 95% 纯度氢气的储存。目前,国际上已有 10 个已投产的地质储氢工程项目(图 2)。其中,美国德克萨斯州的 Clemens、Moss Bluff 以及 Spindletop 盐穴储氢库和英国 Tesside 盐穴储氢库,从运行初期就一直储存着 95% 纯度的氢气,并且至今仍正常运行。阿根廷 Diadema 和奥地利 Sun Storage 枯竭气藏储气库采取了天然气掺氢技术,通过将一定体积比例的氢气掺入天然气中形成掺氢天然气,然后将其注入枯竭

气藏进行储存。随着城镇燃气逐渐被天然气所取代,德国 Kiel 盐穴储气库、Ketzin 含水层储气库、法国 Beynes 含水层储气库以及捷克 Lobodice 含水层储气库这些混合气储气库也相继经过改造,成为了掺氢天然气储气库(Sambo et al., 2022; Navaid et al., 2023)。

在过去,燃气轮机发电、采暖、工业加热等氢气下游应用对氢气纯度要求不高,地质储存纯氢的工程案例相对较少。然而,随着氢燃料电池产业的迅速发展,对氢气纯度的要求日益提高,高纯氢的制备和储存成为关注的焦点。随着新能源装机规模不断增长,发电成本逐渐降低,以及电解水制氢技术越来越成熟,氢气纯度可达 99.999%(Ursua et al., 2012)。利用新能源进行电解水制氢逐步成为降低绿氢制备成本的有效途径。为了满足新能源发电系统的需求和推动绿氢规模化应用,许多国家纷纷开展了新能源和地质纯氢储能耦合的中试项目(Hematpur et al., 2023),其中包括荷兰 Hystock 项目、德国 HyCAV mobil 项目、法国 Hypster 项目以及瑞典 Hybrit 项目等(表 3)。

3.2 国内地质储氢项目

中国已应用地下空间于天然气、石油、二氧化碳封存以及压缩空气储能等领域。一些代表性的地质构造空间利用工程项目已经建成,包括呼图壁储气库、大庆储气库、金坛盐穴储气库、黄岛国家



审图号: GS(2016)1566号
自然资源部 监制

图 2 国外地质储氢库分布
Fig.2 Distribution of geological hydrogen storage in the world

表 3 国外地质储氢库项目案例

Table 3 Geological hydrogen storage project in the world

地点	项目名称	纯度/%	状态	投运年份	储存类型	物理容积/m ³	深度/m	运行压力/MPa
阿根廷	Diadema	10	运行中	2015年	枯竭油气藏		600~800	1
奥地利	Underground Sun	10	运行中	2017年	枯竭油气藏	60×10 ⁸	1200	7.8
捷克	Lobodice	50	储天然气	1965年	含水层	1×10 ⁸	400~500	9
	Haje		早期开发		含水层	1×10 ⁸		
丹麦	Green Hydrogen Hub		早期开发		盐穴	66 000		
欧盟地区	HyStories	100	早期开发		枯竭油气藏 含水层			
	HyUnder		早期开发		盐穴	4 000 000		
法国	HyPster		早期开发		盐穴	480 000		
	TEREGA		早期开发		盐穴	3 300 000		
	Beynes	60	储天然气	1956年	含水层	3.3×10 ⁸	430	1.1
德国	HyCAVmobil		早期开发		盐穴	500 000		
	HYPOS		早期开发		盐穴			
	InSpEE		早期开发		盐穴			
	HyINTEGRER		早期开发		枯竭油气藏			
	Kiel	60	储天然气	1971年	盐穴	32 000	1335	8~10
	Ketzin	62	储天然气	1964年	含水层	1.3×10 ⁸	200~250	
	H ₂ STORE		早期开发		枯竭油气藏			
爱尔兰	Green Hydrogen @ Kinsale		早期开发		枯竭油气藏	990 000		
荷兰	Hystock		早期开发		盐穴	60 000		
	LSES		早期开发		盐穴 枯竭油气藏	0.14×10 ⁸ 0.75×10 ⁸		
瑞典	Hybrit	100	早期开发		废弃矿洞	100	30	
英国	Aldbrough		早期开发		盐穴	3.3×10 ⁸		
	HyStorPor		早期开发					
	Teesside	95	运行中	1972年	盐穴(层状盐岩)	225 900	350	4.5
美国	Clemens Dome	95	运行中	1986年	盐穴(盐丘)	580 000	1000	7~13.5
	Moss Bluss	95	运行中	2007年	盐穴(盐丘)	566 000	1200	5.5~15.2
	Spindletop	95	运行中	2014年	盐穴(盐丘)	906 000	1340	6.8~20.2

注: 表中空缺表示相关数据未见报道。

石油储备基地以及江苏金坛盐穴压缩空气储能电站等(Wang et al., 2021)。与这些领域相比, 中国在地质储氢方面的研究相对较晚, 尚未有地质储氢工程投入运行。

目前, 中国地下储氢的应用主要集中在加氢站所需的储氢井上。2021年, 中国石化在重庆建成了国内首座采用储氢井技术的加氢站。储氢井指埋深约为 150 m 的地下氢气储存井, 采用专用材料制作, 具有安全系数高和占地面积小的特点(段志祥等, 2023)。然而, 由于储氢井的初始投资和后期维护费用较高, 且与地质构造储氢相比, 其储存容量较小, 因此并不适合大规模储氢应用。

自 2023 年起, 中国陆续出现一些地质储氢工程项目的新闻报道。中国五矿集团、中国平煤神马集团等煤矿以及盐业公司纷纷启动地质储氢工程项目(表 4)。2023 年 3 月, 湖北省大冶市启动了绿电绿氢制储用一体化氢能矿场综合建设项目, 该项

目计划利用大冶市现有的废弃矿洞, 选择地质稳定、岩体构造裂隙可控的矿洞进行人工改造, 以实现氢气储存。项目中的岩穴储氢洞室内共有 7 个采场, 几何体积不小于 5000 m³, 储氢压力为 5 MPa。同时, 湖北大冶深地储氢科研中试基地项目也于 2024 年 1 月正式开工, 该项目研究领域包括岩洞储氢基础理论、关键临氢材料、建造工艺等内容。2024 年 9 月, 湖北大冶深地岩洞储氢项目方案通过评审, 同年 12 月, 中试基地项目岩洞氢储能系统正式开工建设。

此外, 2023 年 4 月, 陕西榆林佳县与清华大学土木水利学院、陕西氢能产业发展有限公司、陕西华盐绿能能源有限公司签订了战略合作框架协议, 拟开发盐穴储氢项目。该项目计划制氢产能为 160 万 m³/年, 建设 9600 Nm³/h 的碱性电解水制氢设备, 设置 8 套 1200 Nm³/h 的电解槽, 利用榆林岩盐资源核心区佳县王家砭的两口盐井, 在地下 2500 m

表4 国内地质储氢库项目案例

Table 4 Geological hydrogen storage projects in China

项目名称	物理容积/m ³	运行压力/MPa	储存类型	参与单位	当前状态
湖北大冶岩洞储氢	>5000	5	废弃矿洞	中冶武勘工程技术有限公司、中国科学院武汉岩土力学研究所	开工建设
陕西榆林盐穴储氢	50000		盐穴	陕西氢能产业发展有限公司、陕西华盐绿能源有限公司、清华大学土木水利学院	准备阶段
平煤神马盐穴储氢	>30000		盐穴	中国平煤神马集团联合盐化公司、中国科学院武汉岩土力学研究所	开工建设
中盐集团盐穴储氢			盐穴	清华大学、中盐集团、中国地质大学(北京)、中国科学院理化技术研究所、天津大学、中国矿业大学、国家电投科学技术研究院、首钢集团、中国特种设备检测研究院、中国石油工程技术研究院	准备阶段

注：表中空缺表示相关数据未见报道。

深处建造一个物理容积达 50000 m³ 的盐穴,用于储存上游制取的氢气。2024年9月,由清华大学牵头,联合中盐集团、中国地质大学(北京)、中国科学院理化技术研究所、天津大学、中国矿业大学、国家电投科学技术研究院、首钢集团、中国特种设备检测研究院、中国石油工程技术研究院等单位共同承担的国家重点研发计划“基于地质条件的大规模储氢关键技术及试验验证”项目启动会暨实施方案论证会在北京顺利召开。同年11月,中国平煤神马集团深地盐穴大规模储氢项目在河南平顶山叶县开工,项目预计2025年4月完成储氢盐穴的腔体造腔和地面管线建设,2025年6月完成氢气注气排卤,9月完成盐穴储氢中试。

3.3 代表性地质储氢项目概况

3.3.1 英国 Teesside 盐穴储氢库

英国 Teesside 盐穴储氢库始于 1972 年,由英国帝国化学工业公司(ICI)运营。该储氢库在层状盐岩层中建库,盐岩层厚度约 40 m。由 3 个盐穴组成,埋深约 350 m,物理容积分别为 7200 m³、74900 m³ 和 77800 m³(图 3)。该盐穴储氢库的工作气量约为 890 万 Nm³,其中储存着 95% 纯度氢气,同时还含有 3%~4% 的 CO₂,采出的氢气主要用于附近的化工厂生产甲醇和合成氨(Liebscher et al., 2016)。该盐穴储氢库在注采运行时不使用垫气,而是采用“保压法”的工艺,通过“注氢排卤”和“注卤采氢”的方式,维持盐穴内部的压力恒定在 4.5 MPa。

3.3.2 美国 Spindletop 盐穴储氢库

美国 Spindletop 盐穴储氢库于 2017 年建成,是目前全球最大的储氢库,由美国液化空气公司(Air Liquide)运营。该盐穴腔顶深度为 1204 m,平均直

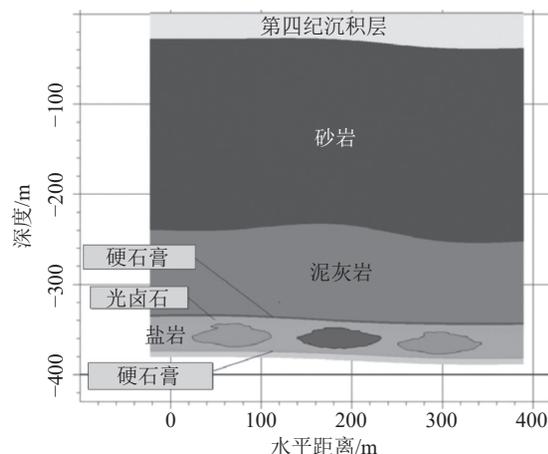


图3 英国 Teesside 盐穴储氢库地层剖面图

Fig.3 Cross-section of the Teesside salt cavern hydrogen storage reservoir in the United Kingdom

径约 70 m,物理容积高达 90.6 万 m³(图 4)。该储氢库的最大工作压力达到 20.2 MPa,氢气容量为 274 GWh,可储存 8230 t 氢气,足以为当地氢气管网提供 30 天的气量(Chemical Weekly Group, 2017)。

3.3.3 荷兰 Hystock 盐穴储氢库

2021 年至 2022 年间,荷兰天然气网络运营公司(Gasunie)子公司(Hystock)启动了一项地下储氢示范项目,利用位于荷兰 Zuidwending 储气库的一口裸眼井(A8 井)进行了氢气地下储存测试(图 5)。该测试评估了氢气对注采管柱、井下工具、固井水泥以及围岩的影响,同时探索了储氢与储天然气在工艺上和设备上的差异。Gasunie 宣称这个示范项目成功证明了在盐穴中储存氢气是安全可行的,并为此开发了更大规模的储氢平台。在 2023 年,完成了一口储氢井(A5 井)的造腔工作,并将在 2024 年规划未来两口储氢井(A9、A10)的位置(图 6)。计划在 2025 年和 2026 年完成地面制氢和 A5 井所

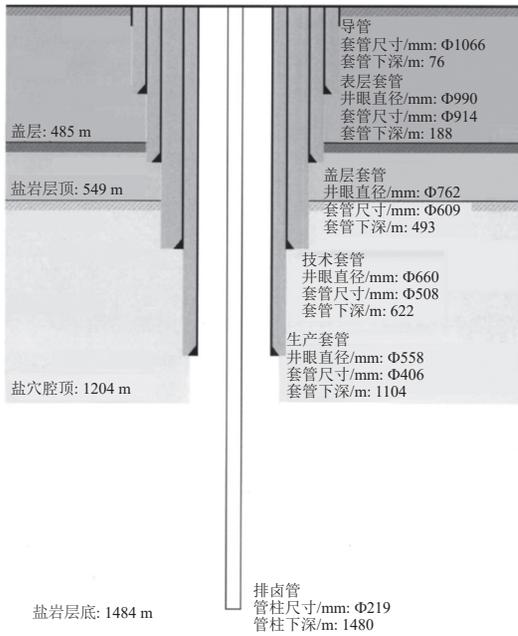


图 4 美国 Spindletop 盐穴储氢库井身结构
Fig.4 Well structure of Spindletop salt cavern hydrogen storage in the united states

需的基础设施建设,并开始对其他规划的储氢井进行钻井和造腔工作。预计在 2027 年对 A5 井进行注氢排卤,随后在 2028 年正式投入使用 A5 井,并接入国家氢气管网,其储存容量预计达到 200 GWh (相当于 6000 t H₂)。

3.3.4 瑞典 Hybrit 矿洞储氢

Hybrit 项目由瑞典钢铁公司(SSAB)、瑞典国

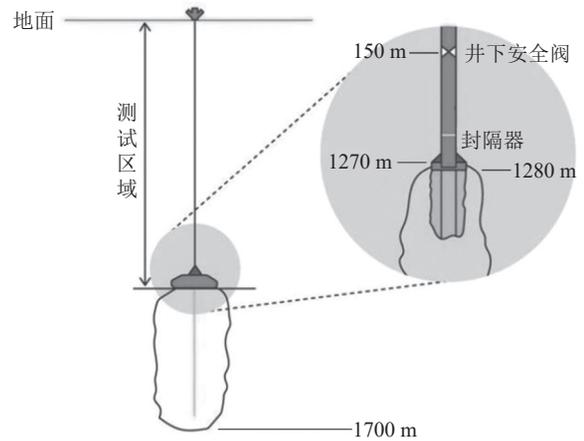


图 5 A8 井储氢测试示意图
Fig.5 Diagram of hydrogen storage test in well A8

有矿业公司(LKAB)和瑞典国有能源公司(Vattenfall)共同发起,其主要目的是开发一种利用绿氢从矿石中提取铁的技术,以替代取代传统高炉中使用的焦炭,同时构建从矿山到成品钢的非石化能源价值链。氢气被储存在一个地下的衬砌岩洞中,该洞室的物理容积为 100 m³(图 7)。目前,已使用水作为介质进行了对洞室稳定性、密封性以及承压能力的测试,正在进行循环储释氢气的测试阶段,预计于 2025 年投产使用(Pei et al., 2020)

4 盐穴储氢库建设关键技术及难点

为了全面考虑盐穴储氢库工程建设中可能面临的各类技术问题,必须综合考虑到整个建设周



图 6 Zuidwending 储气库中储氢井规划
Fig.6 Planning of hydrogen storage wells in Zuidwending gas storage



图 7 Hybrit 项目储氢衬砌岩洞
Fig.7 Hydrogen storage lining cavern of Hybrit project

期。参考盐穴天然气储气库的建设周期,将盐穴储氢库的建设划分为选址、钻井、造腔、注采完井、注气排卤、不压井作业、运行以及监测等 8 个阶段。针对每个阶段,对盐穴天然气储气库建设的主要操作进行了简要概述,同时结合氢气的独特属性,分析在建设盐穴储氢库时可能遇到的技术问题,并探讨国内外应对这些问题的相应措施。

4.1 选址

建设盐穴储氢库是一个复杂而系统性的工程,其中科学的盐穴储氢库库址评价及筛选工作是储氢库建设和运行安全、高效、经济的基础和前提。结合盐穴天然气储气库选址评价方法(Deveci, 2018),探究盐穴储氢库的选址原则和影响因素。

4.1.1 盐穴储氢库选址原则

(1)安全性原则。与地面储存氢气相比,利用地下盐穴储存氢气是一种相对安全的能源储存方式,然而并非绝对安全。以盐穴天然气储气库为例,从 20 世纪 50 年代起,国外的盐穴天然气储气库在造腔、运营和废弃阶段都曾发生过地表沉陷、腔体垮塌以及气体泄露引起的火灾或爆炸等事故,不仅导致巨大的资金浪费,也给附近居民生命财产和生态环境造成了严重损失。与盐穴天然气储气夏注冬采的运营模式不同,盐穴储氢库根据电网需求频繁注采氢气,这对其腔体的稳定性和密封性构成了更大的考验。因此,保障安全性是盐穴储氢库的首要原则(井文君等, 2012)。

(2)经济性原则。与盐穴天然气储气库和压缩空气储能电站一样,盐穴储氢库是一项投资巨大、回收周期较长的项目。不同盐矿区域的地质水文特征和地表条件均会影响钻井、造腔以及井场建设

等方面的费用。此外,不同地区的前期投资、用电成本、用氢需求预测及售氢收益等因素也会对长期经济效益产生影响。

(3)就近性原则。根据目前中国输氢管线的分布,盐穴储氢库的库址应选在距离制氢工厂、输氢管道或目标城市较近的盐矿区,以便于氢气的制备、储存、运输和使用,从而避免因二次运输而增加成本。对于掺氢管道而言,盐穴储氢库的选择可以考虑在靠近天然气长输管道的前中端位置,以实现在现有天然气管道中掺入一定比例的氢气,充分利用现有天然气管道进行输送。此外,作为清洁能源储备的配套设施,其库址的选择应靠近风光水电等资源丰富的地区。

(4)社会性原则。盐穴储氢库不仅是国家重要能源储备的关键设施,同时也跟企业和居民的生活密切相关。在选址时,除了需要考虑当地的社会接受度外,还要综合考虑当地的氢能政策,并与当地的氢能产业体系相协调,以促进当地氢能产业发展。

4.1.2 盐穴储氢库选址影响因素

基于盐穴储氢库选址的基本原则,结合中国盐矿层状盐岩分布的特点以及国内盐穴天然气储气库选址的经验等(郑雅丽等, 2019; 施金伶, 2020),建议中国盐穴储氢库选址时,应综合考虑地质、地表、经济、环境以及社会等五方面的影响因素:

(1)地质因素

构造:地质构造应简单,避免存在大型断层或断裂带,并确保历史地震活动相对较弱,以减少地质灾害对盐穴储氢库安全性的影响。

地下水:在盖层、顶底板以及储层范围内,应排出存在含水层的可能,以防止流体-岩石相互作用引发地面沉降等问题。

盐层平面分布:建议选择盐层的平面分布大于 50 km² 的地点,以提供更多的选址可能性,方便后期扩容,提升储氢库群的储气能力。

盐顶埋深:建议埋藏深度介于 800~1500 m 范围内,既能提供适当的储气压力,又能降低钻井和材料成本。

盐层厚度:建议盐层厚度大于 120 m,夹层层数少且厚度薄,单层纯盐岩层厚度大、分布稳定,与盐层厚度占比大于 80%。

品位及不溶物含量:建议盐矿平均品位大于

80%, 盐层不溶物含量小于 10%。

盖层: 盖层孔隙度应小于 10%, 渗透率应小于 10^{-3} mD, 厚度应大于 30 m 且分布稳定。

(2) 地面因素

水源与卤水: 在建设腔体过程中, 一口盐穴所需清水和排出的卤水体积大约是盐穴体积的 8 倍, 稳定的水源和适当的距离是确保建造进度和成本控制的关键。此外, 还需要考虑有长期稳定的渠道来处理造腔过程中产生的大量卤水, 使用电解水制取氢气时也需要充足的水资源。

交通条件: 在盐穴储氢库的建设过程中, 需考虑大量设备及材料的运输, 以及建成后的维护工作。选择交通便利的地点可以有效降低运输成本, 提高工作效率。

氢能来源: 在选址时应考虑风电场、光伏电站等可再生能源电厂, 它们能够提供大量电能。此外, 如果靠近炼油厂、化工厂等地方, 也可以作为获取氢能的一种途径。

氢能消纳: 鉴于氢能的长途运输成本和不确定性, 最理想的选择是实现氢能就地消纳, 以最大程度地减少长距离运输带来的各种不便和风险。

与居民区距离: 综合考虑建设过程中潜在的危險和氢气易燃易爆的特点, 盐穴储氢库尽量远离居民区, 以降低可能带来的人身伤害风险。

(3) 经济因素

基础设施: 所在地的电网、燃气管网、加氢站、燃料电池工厂等基础设施的数量是能否有效制氢和消纳氢能的重要因素, 直接关系到盐穴纯氢库的运作模式和整体效益。

运维成本: 设备维修与养护、易耗品的补充、定期监测及人工成本等费用都会对长远经济效益产生影响。

(4) 环境因素

土地占用: 盐穴储氢库的建设必然需要占有一定的土地, 这将不可避免地影响周围的生态环境, 如农田、湖泊、树林等, 选址时要重点评估这种影响的程度。

噪音污染: 盐穴储氢库的噪声主要源于建设阶段的施工、设备运输, 以及后期运营中压缩机工作、管道中气流的声音。这种噪音不仅会影响居民对建设的接受度, 同时还可能导致一些额外的成本支出。

(5) 社会因素

氢能需求: 氢能需求反映了当地对氢能的需求水平, 售氢收益在项目总收益中占有较大比例, 对项目的盈利能力有着重要的影响。

人口密度: 人口密度反映了当地的人口数量, 作为主要用电消耗者, 高人口密度通常意味着更大的用电需求, 确保了项目一定的经济效益。此外, 高人口密度也会对未来储氢库扩容产生积极影响, 因为它意味着潜在的未来氢能需求可能会增加。

社会接受度: 人们对新能源常常存在担忧, 其对氢能的认知和接受度直接影响着盐穴储氢库的建设进程和相关不确定性支出。

4.2 钻井

钻井工程是在盐穴储氢库选址完成后进入施工阶段的重要环节, 其目的是通过钻探达到目标盐层, 安装可以进行注水排卤造腔的井身结构。

4.2.1 钻井作业

中国盐穴天然气储气库钻井施工与国外的操作有许多相似之处。在国外的钻井施工中, 首先下入导管以封隔地表, 防止井口坍塌, 并形成钻井液循环通道。导管的下深一般在 20~50 m, 具体的深度根据实际情况而定。接下来进行一开钻井, 下放表层套管并通过内插法固井, 表层套管的作用是封隔上部不稳定的松软、易塌易漏地层和含水层, 以避免钻井液污染饮用水含水层, 同时防止井筒内流体流失。随后进行二开钻井, 下放技术套管, 技术套管的作用是封隔难以控制的复杂地层和严重漏失层。根据地层情况, 可能进行三开继续下入技术套管。接着进行四开, 下放生产套管并固井, 最后下放排卤管, 并通过井口的采卤树进行悬挂控制(图 8)。每次固井后需要进行测井以评估固井质量, 合格后方可继续钻井。下放排卤管前, 通常使用氮气对井筒进行气密封检测, 确保井筒的密封性合格, 避免在后续的造腔过程中出现卤水泄露的情况。

4.2.2 井身结构

美国盐穴储氢库不仅井身结构开次较多, 井眼直接和套管尺寸也较大。例如, 在 Spindletop 储氢井位置, 使用 42" 导管下固至 76 m, 36" 表层套管下固至 188 m, 24" 的盖层套管下固至 493 m (盖层顶部以下), 20" 的技术套管下固至 622 m (盐层顶部), 然

后在 1104 m 深度固井 16" 的生产套管, 最后下入悬挂的 8 5/8" 排卤管至 1480 m (盐层底部)。中国盐穴天然气储气库钻井完井井身结构主要有“三管”和“两管”两种组合(图 9)。“三管法”的生产套管下至盐层顶部且存在中间管, 而“两管法”的生产套管下至盐层底部。

4.2.3 固井水泥

固井水泥在钻井工程中扮演着至关重要的角

色, 其功能在于将套管与周围岩层牢固地胶结在一起, 形成密封环境。盐穴天然气储气库主要采用 API 标准的 G 级或 H 级高抗硫水泥。根据不同的井况, 适量加入早强剂、增强剂以及阻隔剂等辅助材料, 以确保固井水泥的性能达到最佳状态。在已发表的文献中, 尚无研究表明盐穴天然气储气库所使用的固井水泥具有密封氢气的能力。在标准温度和压力下, 氢气的黏度小于甲烷, 但其扩散系数

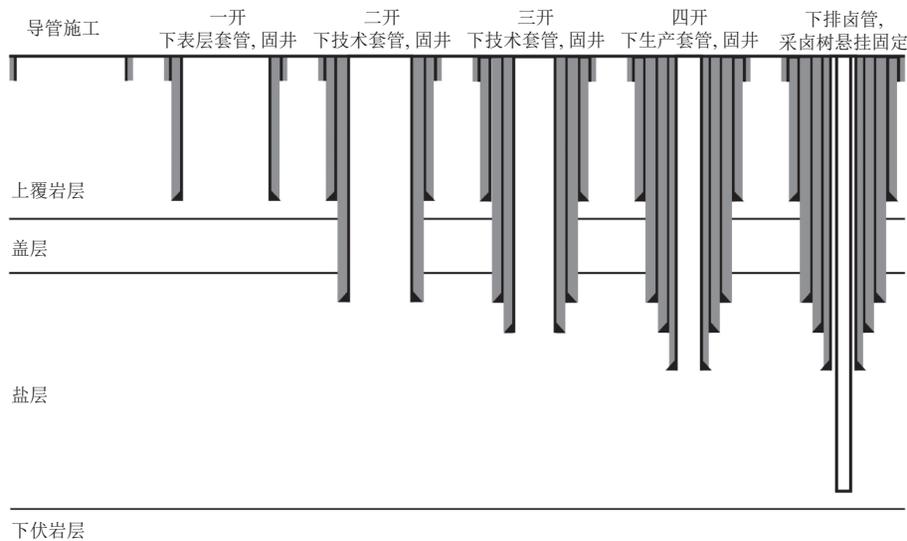


图 8 钻井管柱下放顺序图
Fig.8 Sequence diagram of drilling string running

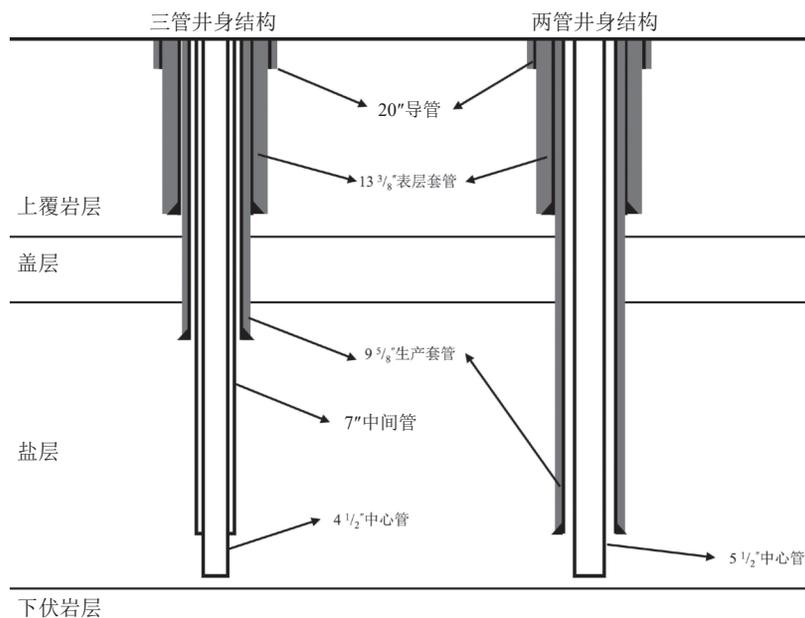


图 9 国内盐穴天然气储气库钻井完井井身结构
Fig.9 Drilling completion well structure of salt cavern natural gas storage in China

却约为甲烷的 4 倍, 这对管柱—固井水泥环—地层系统的密封完整性提出了更为严格的要求。与固井水泥相关的氢气漏失通道主要包括水泥环与套管胶结失效、水泥环本身性能不足产生微裂缝以及水泥环与地层之间胶结失效(图 10)。

固井水泥对盐穴储氢库的影响主要有两方面: 一方面, 固井水泥本身的渗透率和孔隙度难以达到储氢的要求; 另一方面, 固井水泥在储氢库环境中受环境影响, 发生化学降解和腐蚀等现象, 导致其强度降低, 密封性能变差(Navaid et al., 2023)。水泥的水化产物会与 CO_2 发生化学反应, 生成碳酸钙(Strazisar et al., 2009)。虽然碳酸钙可以提高水泥的强度, 但其沉淀会降低水泥的孔隙度和渗透率。此外, 盐穴中微生物反应产生的 H_2S 也会对水泥环产生影响, H_2S 在一定条件下会与水化产物生成二次钙矾石, 导致水泥结构内部发生膨胀, 从而产生内应力并引发裂缝(Kutchko et al., 2011)。

国外研究表明, 采用黏合剂中 SiO_2 含量较低的细水泥可以有效降低渗透率, 减小气体渗漏的风险(Reitenbach et al., 2015); 胶乳, 即乳化聚合物, 通常是由极小的球状聚合物颗粒的悬浮乳液, 其粒度大小在 200~500 nm。加入胶乳后的水泥浆在抗折、抗拉强度、防裂性以及界面黏结强度等方面都得到了显著改善。同时, 通过堵塞水泥间的孔隙, 有效

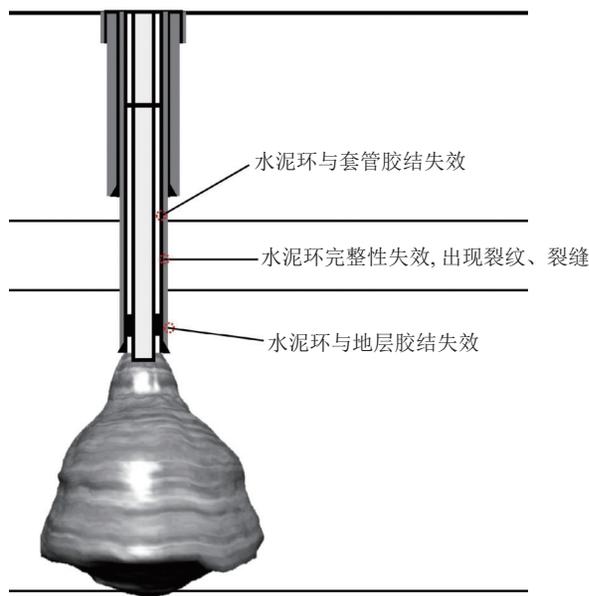


图 10 固井水泥对密封性的影响
Fig.10 Effect of cementing cement on sealing

降低水泥的渗透率, 限制了气体的侵入(Shahvali et al., 2014); 掺入树脂后形成的树脂水泥浆具有更强的黏结力和抗渗透性能, 且能够减缓收缩与膨胀反应(Gajda and Lutynski, 2021)。

4.3 造腔

造腔是指通过注入淡水进行循环, 将卤水排出并经处理, 最终形成符合要求的腔体空间。与以往盐企采卤制盐的目标不同, 盐穴储气库建设的采卤目的在于高效利用地下盐层来建造储库空间。因此, 需要考虑多个因素, 包括建腔周期、腔体有效体积、腔体结构形态以及排卤浓度等。

4.3.1 造腔方式

目前, 盐穴储气库的造腔工艺主要有 4 种, 分别是单井对流法、小间距双直井自然溶通法、水平定向对接连通法以及水平多步回退法(图 11)。

单井对流法是一种国内外广泛采用的地下盐穴储气库造腔方法(图 11a)。单井对流法包含两种对流方式, 其中一种被称为正循环造腔, 淡水从造腔内管中注入, 而卤水从造腔内管和外管所形成的环空中流出。另一种是反循环造腔, 与正循环相反, 淡水从环空中注入, 而卤水从造腔内管中流出(Jiang et al., 2016)。正循环多用于造腔的前期, 在底部形成一个槽, 以便不溶物的沉积。随着注入淡水和盐岩的溶蚀过程不断进行, 溶腔体积逐渐扩大, 进入造腔的主要阶段—建腔期。建腔期占据了整个造腔过程的 80% 以上的时间, 这一阶段主要采用反循环造腔。通过逐步提升造腔内管和外管的位置, 以提高盐穴的高度, 其中对于“双管”井身结构, 通常采用生产套管割管的方式提升位置。造腔的后期阶段称为收顶期, 其目标是形成一个拱形顶部, 以确保储气库的空间和结构符合预期要求。

小间距双直井自然溶通法主要通过相邻较近的两口直井进行造腔(图 11b)。前期采用单井对流法独立进行造腔。随着时间的推移, 两口盐腔的半径不断扩大, 最终在某一深度位置处发生贯通, 形成一口盐腔。两个盐腔连通后, 可以继续使用单井水溶法对盐腔进行建造, 也可以取出造腔内管, 采用一口井注淡水, 一口井采卤的模式进行操作。这种造腔方法已成功应用于荷兰 Zuidwending 盐穴储气库(Wan et al., 2019)。

水平定向对接连通井是一种独特的盐穴储气

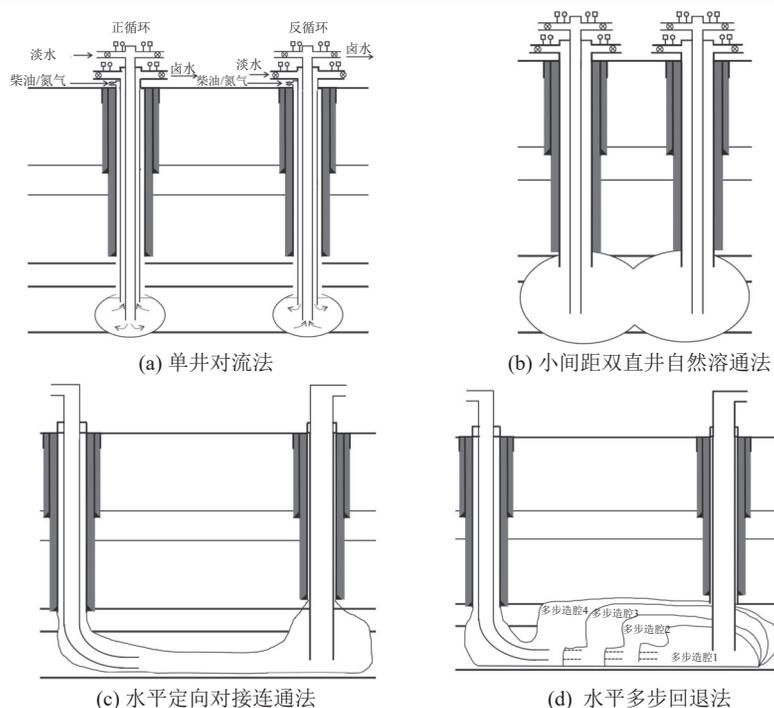


图 11 盐穴储气库不同造腔工艺

Fig.11 Different cavity forming processes of salt cavern gas storage

库造腔方法(图 11c)。该方法由一组直井和斜井组成,首先钻取一口直井,然后在其附近钻取一口斜井,通过定向钻探与水平井技术,使得斜井能够在目标盐层中定向对接并连通至直井。通过这种方式,可以实现两井之间的连通采卤。斜井内的造腔管深入水平段内部较短的距离,在造腔过程中主要采用交替注水和排卤的方式。水平定向对接连通井适用于盐层厚度较薄、品位较低的盐矿。由于两井间存在较长的水平段,延长了淡水的溶蚀时间,卤水浓度和造腔效率会得到提高(Sun et al., 2017; Zhang et al., 2019)。然而,这种技术也存在一定的风险,如斜井末段和水平段容易出现砂堵等问题。

水平多步回退法与水平定向对接连通法相似,同样由一口直井和斜井组成(图 11d)。两者的主要区别在于水平多步回退法中,斜井内的造腔管会深入整个水平井段,并靠近直井的末段。在造腔过程中,主要采用斜井注水和直井采卤的方式进行,通过多次调整斜井中的造腔管的位置,改变水平井段中淡水流出口与直井的距离,从而分阶段溶蚀盐层,使得溶腔向水平方向扩展。采用水平多步回退法建造的腔体形态规则,结构稳定性高,能够充分利用薄盐层进行储库建设(Bely et al., 1997)。然

而,这种造腔方法存在一些缺点,如声纳测腔困难、修井成本高以及残留卤水多等。

4.3.2 卤水腔测腔

在盐腔的形成过程中,对其发展进行准确的预测和控制至关重要。在日常生产管理中,通过监测每口井的流量和卤水浓度,可以计算出已开采的盐岩体积,进而推算出腔体体积。为了获取盐腔的准确形态和结构参数,通常需要进行声纳测腔(郭朝斌等, 2019)。通过将具备发射和接收声波功能的声纳装置放入井中,当声波在卤水中传播并遇到腔壁围岩时,会引发反射。通过记录声波信号从发射到接收所花费的时间,再根据声波在该介质中的传播速度,可以推算出声纳装置与腔壁的距离,从而得到盐穴在某一深度和方向上的半径。通过按一定角度间隔转动声纳测量装置,可以测得该深度处多方向上的半径,从而描绘出该深度处的平面形态及相关参数。通过不断地将装置上提,就能够获取整个盐腔的形态及参数(Wanyan et al., 2018)。

4.4 注采完井

一旦腔体形态结构达到设计要求,便可以停止造腔工作,进入下一步的注采完井阶段。这个过程包括取出井筒中的中心管,下放注采管柱和排卤管

柱,并配置井下工具,如封隔器和安全阀。同时,井口采卤树会被改造成采气树,以确保该井具备注采气的条件。

4.4.1 气密性测试

腔体和井筒的气密封性能不仅直接关系到盐穴是否能够储存气体,而且涉及到周围居民的生命和财产安全。因此,在腔体建成后,进行气密性测试以评估井筒和腔体的气密封性能是必需的。我国在借鉴国外盐穴腔体及井筒气密封检测技术的基础上(Berest et al., 2006; Von et al., 2022),提出了一种新方法,该方法利用气液界面深度变化与气体泄漏率随时间的变化趋势来综合评价盐穴腔体及井筒气密封性。

将能够检测气液界面深度的测井仪放入测试管中,通过向生产套管与测试管之间的环空中注入测试气体,使气液界面稳定在生产套管鞋以下的位置,同时确保生产套管鞋处的气体压力达到一定值(图 12)。通过记录测试期间内井口卤水压力、井口环空气体压力以及气液界面深度,计算出气体泄漏率随时间的变化趋势,结合气液界面深度随时间的变化趋势,评价盐穴腔体及井筒的气密封性。

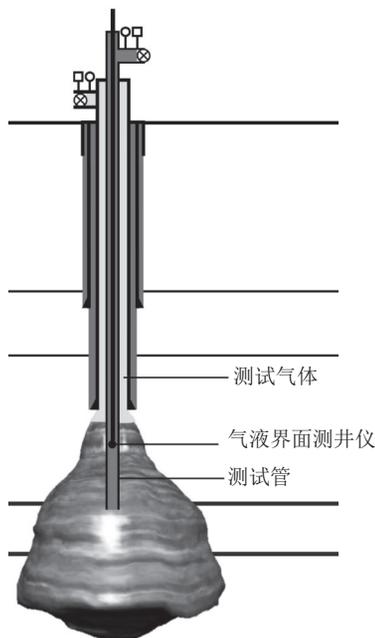


图 12 气密封测试
Fig.12 Tightness Testing

对于后期储存天然气的盐穴,通常采用氮气作为气密封性检测介质。然而,对于盐穴储氢库来

说,由于氢气分子的直径远小于氮气和甲烷分子,使用氮气作为测试介质并不适用于验证盐穴储氢库的气密封性。鉴于技术和安全等因素,并且缺乏地下高压储存氢气的经验,直接使用氢气作为测试介质进行气密封测试并不现实。国外盐穴储氢库,通常采用组合完整性测试(COMIT)进行气密性测试,以最大限度地减少氢气大量泄漏的风险。在测试过程中,首先使用氮气作为测试介质进行气密封性测试,评价合格后,再用氢气作为测试介质去验证盐穴的气密封性是否达到储存氢气的要求。Berest et al.(2021)建议对于气密封测试中氢气的最大允许泄漏率为 50 kg/d,而在荷兰 Hystock 盐穴储氢库项目中 A8 储氢井氢氮组合气密封测试使用的评价标准为 50 L/d(Horvath et al., 2022)。

4.4.2 注采管及井下工具

气密封测试合格后,下入装有井下工具的注采管。井下工具主要由井下安全阀和封隔器等部分组成(图 13)。

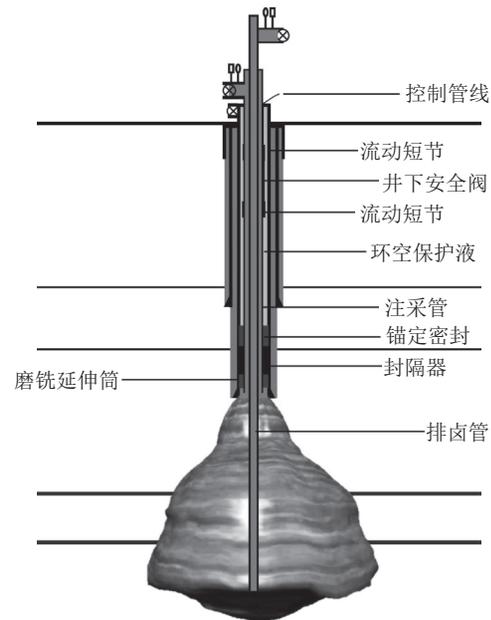


图 13 注采完井井身结构
Fig.13 Well structure of injection production completion

(1)注采管材质。在盐穴储氢库中,注采管的质量状况直接关系到整个储氢库的平稳注采运行和密封性能。在盐穴储氢库设计几十年的运营期中,注采管直接与高压氢气接触,承受着频繁注采氢气引起的交变应力,因此容易造成损伤和失效

(Szummer et al., 1999)。在高压环境下,氢气分子会在管柱表面吸附并裂解成氢原子,继续向内扩散,局部氢浓度达到饱和后聚合成氢分子,造成应力集中,引起金属塑性下降、诱发裂纹或断裂(Kanezaki et al., 2008; Murakami and Matsuoka, 2010)。此外,在高温高压下,氢会与钢材中的夹杂物或合金添加物发生化学反应,引发氢腐蚀。因此,在为盐穴储氢库选择套管材料时,需要考虑到氢脆和腐蚀等对管柱的影响,选择一种能够耐氢脆和防腐蚀的材料。通常情况下,注采管由含碳的低合金高强度钢制成,但是在高压环境下,氢气会与碳结合,导致管柱强度下降并最终失效(Marchi and Somerday, 2014)。此外,S、Mn、P等元素也会增加管材的氢脆敏感性(Hayden and Stalheim, 2009)。钢材的屈服强度越高,对于氢脆的敏感性越高,因此相对于高强度钢,低中碳钢来说更具耐氢脆性(Moody et al., 1990)。因此,为了降低氢损伤失效的风险,需要在确保力学强度满足的情况下,合理控制合金元素的含量,降低钢的强度级别。

(2)井下工具材质。井下安全阀的主要功能在于发生井喷、井口失效或地面阀门发生故障等特殊情况下迅速关闭,以防止气体泄漏。封隔器的主要功能是封隔生产套管和注采管间的环空,阻止气体进入。在荷兰和法国的盐穴储氢中试项目中,其材质选用了细晶高强度低合金钢与奥氏体铬镍不锈钢。井下工具上还会用到一些合成橡胶材料作为弹性体密封元件,以实现弹性密封。在高压环境下,氢气可能渗透到弹性体密封元件内部,导致橡胶材料过饱和。一旦超过材料的拉伸屈服强度,橡胶材料就会出现内部气泡并开裂,即使在快速减压后,裂缝也难以恢复(Reitenbach et al., 2015)。H₂S、CO₂以及CH₄等气体的存在会通过和橡胶材料发生化学反应或者渗透的方式,降低其强度、伸长率以及硬度等性能,从而减少弹性密封元件的使用寿命(Salehi et al., 2019; Patel et al., 2019)。常用弹性体密封材料包括三元乙丙橡胶、硅橡胶、氢化丁腈橡胶(罗森, 2021),其中,氢化丁腈橡胶的耐H₂S和CO₂腐蚀性能出色,可在高压条件下工作,加上氢气对其劣化和渗透的程度相对较低,被认为是用于储氢的最佳弹性密封元件材料(Ugarte and Salehi, 2022)。此外,如果不能减少橡胶材料的使用,在确保密封

性的情况下,减小弹性体密封元件的厚度也是一种办法。这样可以减少弹性体密封元件内部的氢气滞留,从而降低在快速减压情况下开裂的风险。

(3)注采管连接方式。在中国盐穴天然气储气库中,注采管柱间的连接方式主要包括焊接和螺纹连接两种。与螺纹连接相比,焊接具有更优越的连接强度、致密性以及抗变形能力,但施工工艺相对复杂,容易产生缺陷,且焊缝处是应力集中的关键区域。国外已投产的盐穴储氢库工程中,通常选择焊接以确保气密性。在进行焊接注采管接头时,焊缝周围的碳浓度、硬度以及残余应力的升高会导致焊缝容易发生氢致失效。因此国外在对盐穴储氢库注采管接头进行焊接时,采取了焊前预热和焊后热处理的措施。预热可以减缓焊后冷却速度、降低焊接应力,从而避免裂纹的产生;而焊后热处理则可以消除焊接应力,改善焊缝组织和整体性能。这种焊接过程需要较长的时间,通常一个焊缝需要8~12 h,而中国盐穴天然气储气库注采管焊缝通常只需1~2 h。此外,在荷兰Hystock盐穴储氢项目中,注采管使用了瓦卢瑞克(Vallourec)的钢管和螺纹,通过使用“VAM® 21”型号特殊扣实现了注采管间的连接(Horvath et al., 2022)。

(4)井下工具安装方式。井下安全阀可根据回收方式分为两种类型:钢丝回收式和油管回收式(图14)。钢丝回收式的井下安全阀通常安装在坐落短节中,通过钢丝或电缆工具进行下入和回收,而油管回收式的井下安全阀则直接安装在注采管上(Liu et al., 2018)。在盐穴天然气储气库中,大多数采用通过地面控制的油管回收式井下安全阀。与钢丝回收式相比,油管回收式的井下安全阀的优点是外径更大,能够通过更大的注采气流量,缺点在于维修时需要将整根管柱提出,导致修井成本较高。目前钢丝回收式井下安全阀仍存在一些弹性密封元件,而部分油管回收式设计已不再包含弹性密封元件。此外,由于工作机理(使用橡胶胶筒)的限制,目前盐穴天然气储气库中使用的封隔器不可避免地仍存在一些弹性密封元件。

4.5 注气排卤

尽管注采完井工程已经安装了储气运营时所用到的采气树以及注采管,满足了注采气的结构条件,但盐腔内仍充满卤水。因此,需要下入排卤管,

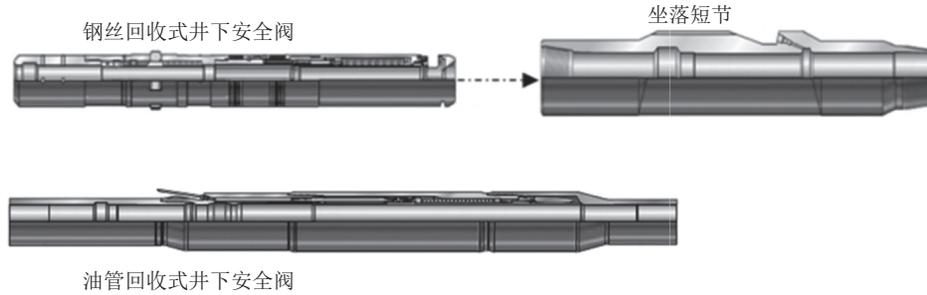


图 14 钢丝和油管式井下安全阀(据 Buzogany and Bernhardt, 2023)

Fig.14 Wireline and tubing retrievable surface controlled subsurface safety valve (after Buzogany and Bernhardt, 2023)

并安装排卤管线和注气管线,以便使高压天然气通过注采套管与排卤管的环空注入盐腔,卤水在气体压力的作用下通过排卤管流出。

为了最大限度地排出卤水,防止残留水与储存的气体发生反应,排卤管的末段应靠近盐腔底部。在注气排卤过程中,需要持续测量和记录工作,包括注气压力和温度、井口卤水压力、累计注气量以及排卤量。结合声纳测腔结果,判断当前气水界面深度。当计算的气液界面接近排卤管末端时,通过下入气液界面测井仪来确定准确的深度。随着气液界面逐渐接近排卤管鞋,需要逐渐降低注气速率以实现缓慢排卤。当观察到排卤管口有连续气泡带出,且检测到排出卤水中天然气含量达到一定范围时,表明气液界面已到达过渡区,此时注气排卤工作结束。

在注气排卤后期,排出的卤水会含有一定量的溶解气体,由于氢气分子体积较小,存在透过排卤管间缝隙随卤水排出和进入环空的可能,因此需要定期检测排出卤水中的氢气含量和环空压力。为了增强操作的安全性,建议在进行盐穴储氢库注氢排卤时,在排卤井口后安装一个鼓泡脱气装置,以去除卤水中的氢气。

4.6 不压井作业

在注采完井阶段,为了将盐腔内的卤水排出,通常会下放一根排卤管。在注气排卤的过程中,必须确保安装在生产套管上的井下安全阀保持开启状态,使气体得以通过环空注入到盐腔内。完成注气排卤作业后,需要将排卤管起出,否则将无法实现通过井下安全阀来隔绝储存的气体(Li and Li, 2008)。此时,盐腔内部已充满了高压气体,需利用不压井起管柱技术来起出排卤管(图 15)。



图 15 不压井作业现场

Fig.15 Snubbing site

不压井作业装置包含了多个阀板、防喷器、卡瓦、法兰以及四通等部件,尽管不压井作业施工时间相对较短,但这些部件在操作过程中仍会与高压氢气发生接触。因此,为了确保盐穴储氢库在进行不压井作业期间的安全性,一方面这些部件本身必须具备耐氢性,另一方面需要增加额外的密封部件以提高整个装置的密封性,并且避免使用弹性密封。在实施作业之前,建议先利用氢气对不压井作业装置进行气密封性检测,只有检测合格后才能进行不压井作业。同时,考虑在不压井作业之前往井内注入一些氮气,以减少作业时装置与氢气直接接触的可能性。

4.7 运行

盐穴储气库的运行压力一般在一个区间内呈周期性变化,在注气阶段,内压逐渐达到上限运行

压力 P_{\max} , 在采气阶段, 内压则逐渐降至下限运行压力 P_{\min} 。一个循环周期内有注气、高压保压、采气和低压保压四个阶段, 对于盐穴天然气储气库来说, 一般一年即为一个循环周期。储气库的上限运行压力越高, 储存的气量就越大, 但若上限运行压力过大, 可能导致盐岩渗透率急剧增加, 进而引发围岩气体穿透渗漏 (Wang et al., 2015); 下限运行压力越小, 所需的垫气量也就越少, 工作气量也就越多, 然而最小压力过小可能会使围岩发生剪胀破坏, 导致腔体体积收缩过快, 严重时会导致起腔体坍塌 (Berest and Brouard, 2006)。因此, 在注采气过程中, 要合理地控制运行压力区间。根据金坛盐穴天然气储气库的经验, 上限运行压力不应超过生产套管鞋所处地层最小主应力和地层破裂压力中较小值的 80%, 下限压力宜按 0.006 MPa/m 考虑 (丁国生和张昱文, 2010)。

在设计盐穴储氢库的运行压力范围时, 可以参考盐穴天然气储气库的经验进行一系列的研究和测试。首先, 进行地应力测试以了解建腔目的层位的地应力状况, 获取最小主应力和地层破裂压力 (赵昱超等, 2022)。其次, 通过钻取岩心并对其进行力学和渗透实验, 获取力学和渗透参数。通过数值模拟的方法, 分析不同运行压力、注采周期以及注采速率对于稳定性和密封性的影响, 以确定最佳的注采运行参数。此外, 可以在注采完井阶段气密封测试判断井筒及腔体密封性能时, 通过提升测试压力的方式获得盐腔实际的储气能力。

4.8 监测

盐穴天然气储气库运行后的监测内容主要包括地层完整性监测、注采运行监测、井筒气体泄露监测、储气库区域沉降监测 (顾春生等, 2023) 以及腔体变形监测等 (表 5)。对于盐穴储氢库而言, 一方面, 考虑到氢气具有小分子逃逸性和易燃易爆性, 必须加强对氢气泄露的监测。在地面和地下布设氢气传感器实时监测, 以确保盐穴储氢库整体的

完整性, 并及早发现气体泄露的迹象; 另一方面, 由于氢气可能导致管柱腐蚀、变形等问题, 需要加强对套管的监测。可通过多臂井径成像测井、电磁测井、井下电视成像测井等手段进行监测, 从而调整生产操作参数, 延长套管的使用寿命, 预防事故的发生。

4.9 小结

对于盐穴储氢库的各个建设阶段, 总结了一些可能存在的风险或问题, 并提出了相应的对策 (表 6)。

长期以来, 中国将氢气列为危化品范畴, 化工园区制氢在一定程度上限制了盐穴储氢产业的发展。例如, 如果盐矿旁边没有化工园区, 想利用盐穴储氢, 就不得不在就近的化工园区建设制氢站, 而盐矿和化工园区之间有可能相隔几十千米, 增加额外的投资成本。近年来, 全国各地纷纷研究可再生能源制氢的危化品许可政策, 吉林、内蒙古等地表示允许在化工园区外建设可再生能源制氢项目, 绿氢生产也不需要取得危险化学品安全生产许可, 这大大促进了氢能产业的迅速发展。储氢环节作为“制”和“用”之间的桥梁, 对于氢能朝着大规模发展的方向具有重要影响。研发满足高压临氢复杂环境下的金属、非金属和新型阻氢渗透防腐材料, 开发材料连接和密封技术对提高盐穴储氢库安全性至关重要。对于如何提升盐穴储氢库的注采能力和储气能力, 可采用大尺寸管径组合的管柱以提升注采流量, 以及考虑采用小间距双直井自然溶通法进行造腔, 一个盐腔设置两口井和注采管, 不仅能够同时注气或采气, 也可以在特殊情况下实现边注边采。此外, 还存在一些尚待深入研究的问题。例如, 盐穴天然气储气库结构设计技术在储氢应用中的适用性尚不明确, 盐穴储氢库对周边地质的影响以及运行调控缺乏系统性的研究。这些问题亟需在未来的研究中得到深入解决, 以确保盐穴储氢库能够安全可靠地运行。

表 5 盐穴储气库监测技术

Table 5 Monitoring technology of salt cavern gas storage

监测目的	地层完整性监测		注采运行监测	井筒泄露监测	储气库区域沉降监测	腔体变形监测
监测内容	微地震事件	库区内气体泄露	单井注采运行参数 (温度、压力、流量等)	井筒、腔体内温度和压力梯度	地面沉降值、沉降速率	腔体形态、结构参数
监测手段	微地震监测	气体示踪剂	井口数据录取	光纤测井	地面沉降观测、测量	声纳测气腔

表 6 盐穴储氢库建设过程中各阶段潜在风险

Table 6 Potential risks in the construction process of salt cavern hydrogen storage

阶段	可能存在的风险/问题	应对措施
选址	受政策影响,制氢必须放在化工园区,距离盐矿较远	等待当地氢能产业政策松绑,允许非化工园区绿氢生产;购买氢气先进行储存,验证盐穴储氢可行性
钻井	固井水泥性能不足,氢气逃逸 盐穴储氢库对注采能力要求高,而大尺寸管柱组合(生产套管 $13\frac{3}{8}$ ")施工方案未成熟	考虑胶乳、树脂等新型固井水泥的研发 借鉴金坛压缩空气储能电站所用管柱组合的经验,攻克大尺寸管径组合方案或设置两个井口和注采管
造腔	清水(微生物)、垫层(柴油、氮气)的使用影响储气时氢气纯度 腔体体积小,储气容量低,建库速度慢 传统气密封测试不一定适用盐穴储氢库	对清水定期进行水质检测,必要时进行水质处理;使用无垫层造腔方法 考虑采用小间距双直井自然溶通法造腔
注采完井	注采管、井下工具不足以密封住氢气	采用国外已有的组合气密封测试方法,确定最大允许泄漏率 研发新型阻氢渗透防腐材料,使用金属密封,避免使用弹性密封,减小弹性密封元件厚度
注气排卤	氢气进入排卤管随卤水排出、透过注采管造成环空带压	定期检测排出卤水中氢气含量以及环空压力,安装脱气装置 增加额外的密封部件,减少弹性密封部件的使用,在作业前先用氢气对其进行气密封性检测以及考虑注入一些氮气暂时顶替井筒上面的氢气
不压井作业	不压井作业装置本身或受氢气影响造成密封性能不足,氢气逃逸	钻井时采用大尺寸管径组合,提升注采流量;造腔时采用小间距双直井自然溶通法,实现两个井口同时注采气
运行	注采效率低	对于测量盐穴氢气腔的声呐装置进行适当改造,确定在氢气中的声速等关键参数
监测	已有声呐装置对于盐穴氢气腔的适用性未知	

5 金坛盐穴储氢库建设适宜性评价

5.1 优越的地质条件

2021年,国家管网集团西气东输公司与中国科学院武汉岩土力学研究所展开了合作,旨在研究全国盐穴储气库新库址的选择。通过对全国范围内22个盐矿的地质条件、区域采卤条件等进行全面调查,其中金坛盐矿由于适中的埋深、良好的盐层厚度、高品位、夹层稀薄以及制盐能力强等特点,被认为具有极佳的建库条件(李龙和李建军,2023)。

金坛盐矿是中国东部地区综合指标最佳的大型盐矿,具备建设盐穴储氢库的优越地质条件,这些条件主要体现在以下几个方面:

5.1.1 盐矿资源

金坛盐盆覆盖面积达 60.55 km^2 ,矿储量高达163亿t,矿体品位高,平均氯化钠含量高达85%,最高层品位甚至可达95%。盐矿区域的沉积特征属于浅湖相沉积,盐岩层总厚度可达200m以上。盐层厚度大于180m的区域面积约 12 km^2 ,盐层厚度大于160m的区域面积可达 17 km^2 。这些厚、广且优质的盐岩资源为盐穴储氢库工程示范项目建设及后期推广提供了充足的基础。

5.1.2 埋深和可溶物含量

盐层的埋深范围一般在850~1200m,这种适中的埋深既有助于降低建库的投资,又提高了储库的

安全性。可溶物含量约为90%,部分不溶物物质的颗粒小于5mm,可随卤水带回地面。盐岩层间虽分布有厚度不等的夹层,但单层厚度小,一般在0.28~2m,有效保障盐穴储氢库的成腔率,降低建设风险。

5.1.3 地下水条件

在金坛盐盆区域附近,地表淡水充足,而地下含水层与含盐层系没有水力联系,避免对盐岩层造成不良影响。

5.1.4 安全的地质环境

根据现有勘探资料,该地区的地质活动基本处于静止状态,没有活动断层,历史上发生的地震活动少且震级小。这样的地质环境为盐穴储氢库的长久运行提供了安全稳定的保障。

5.2 便利的交通条件

金坛盐矿区位于江苏省常州市金坛区的茅麓镇附近。金坛地处宁沪杭三角地带中心,周围50km内有多条交通要道,包括京沪铁路、沪宁高速公路、常州港、镇江港、常州机场以及沪宁沿江高铁。

5.3 丰富的工程经验

中盐金坛盐化有限责任公司配合“西气东输”工程利用地下溶盐穴建立储气库(管国兴和李留荣,2003),于2007年成功在金坛盐盆建立了亚洲首座盐穴储气库—西气东输金坛储气库,实现了地下天然气的储存。之后,于2016年建成中石化盐穴储气库,2018年建成港华燃气金坛储气库。2022年,

金坛盐穴压缩空气储能国家试验示范项目正式投产,标志着金坛盐盆盐穴综合利用领域再次取得了重大突破。

截至 2023 年 5 月,金坛盐盆已完成钻井 116 口,其中 56 口井已投入使用,用于储存天然气,另有 1 口井专用于压缩空气储能。在过去的十几年中,金坛盐盆在盐穴储库的建设过程中积极采用了多项技术,取得了一系列重要的技术成果。在老腔利用方面,采用老井分段锻铣注水泥封堵技术,缩减老井处理成本和工期,充分利用了已有盐穴资源。在造腔方面,多夹层盐岩溶腔建库技术成功解决了复杂地层条件下盐穴储气的问题。同时,氮气和天然气阻溶造腔技术的应用使得盐穴形态更能可控。双管无垫层造腔技术则显著提高了造腔效率。丛式定向井等技术的应用,能够利用不良地形之下的盐矿资源,增大布井总数,提高地下盐矿资源利用率。在数字化应用方面,开发了造腔模拟软件、盐穴储气库数字化协同平台等工具,使得储气库的运营更加智能化和高效化。

5.4 广阔的发展前景

2024 年 1—11 月,江苏省发电量 6126.74 亿 kWh,其中风电发电量 518.65 亿 kWh,同比增长 7.98%,光伏发电量 539.44 亿 kWh,同比增长 61.79%。截至到 2024 年 11 月底,江苏省装机容量 19956.59 万 kW,全省风电和光伏装机容量 8183 万 kW,其中风电装机 2318.21 万 kW,光伏装机 5864.79 万 kW。(江苏省电力行业协会,2024)。这一年江苏省还印发了《江苏省海上光伏开发建设实施方案(2025—2030 年)》、《关于高质量做好全省分布式光伏并网消纳的通知》以及《江苏省氢能产业发展中长期规划(2024—2035 年)》等能源行业重要政策,为江苏省能源行业高质量发展进一步指明了方向。

江苏常州在全国率先提出“新能源之都”的建设目标,并创建了常州“氢湾”,旨在打造氢能产业核心零部件及检验检测设备的研发中心和生产基地,重点吸引制氢、燃料电池、氢储能等相关核心零部件制造企业,目前已有多个项目成功签约入驻,如加拿大西港氢能阀门研发制造、中海电力氢能核心部件、锐格氢能测试装备、创氢氢能设备与检测等。

随着江苏省可再生能源规模持续扩大和氢能

产业的优势的凸显,为提高可再生能源利用效率并完善氢能产业链中“储”环节,需配置大规模的储能系统,以对日益增大的可再生能源进行调峰储能。在江苏金坛这一具有丰富可再生能源资源和盐穴储能地质条件的地区,将可再生能源发电与盐穴储氢相结合是推进低碳绿色发展的理想途径之一。

借鉴金坛盐盆多年来在储存天然气和压缩空气储能发电上的经验,可以采用一条包括可再生能源发电技术、高压空气压缩技术、电解水制氢技术、盐穴储氢技术以及天然气管道掺氢技术相结合的综合技术方案。该方案能够通过利用电解槽配合空气压缩机灵活地吸纳电网低谷或可再生能源电力,同时为电力系统提供低成本的平衡服务。过剩的可再生能源发电可以用来将空气压缩至高压状态,同时将水分解成氢气和氧气,实现电能向势能和化学能的转化。高压空气储存在盐穴中,等待用电高峰时再释放发电;生产的氢气也储存在盐穴中,不仅可以用于发电,还可以通过纯氢或者天然气掺氢管道用于下游的应用(图 16)。

6 结 论

(1)氢能是来源清洁且低碳的能源,积极推动氢能产业的发展是实现双碳目标和应对能源转型的重要举措。利用地下地质构造储存氢气是实现氢能大容量长期储存的有效途径,也是未来氢能大规模储备的重要发展方向。目前,地质储氢库主要有四类:盐穴、枯竭油气藏、含水层以及废弃矿洞,在这些类型中,盐穴储氢以其规模大、密封性强、储氢纯度高以及已有投产工程案例等特点,成为地质储氢的优先发展方向。

(2)虽然国外在地质储氢库方面已建立了一些投产工程和验证平台,但近年来中国也在加快验证平台的建设工作,并涌现了一些项目,如陕西榆林盐穴储氢和湖北大冶矿洞储氢项目。

(3)盐穴储氢库的建设周期可以参考盐穴天然气储气库的经验,分为选址、钻井、造腔、注采完井、注气排卤、不压井作业、运行以及监测等 8 个阶段。尽管在各个阶段的建设中可以借鉴盐穴天然气储气库的经验,但仍存在政策、材料、施工工艺以及安全运行调控等方面的问题。

(4)中国盐矿资源相当丰富,在多个省(区)都有

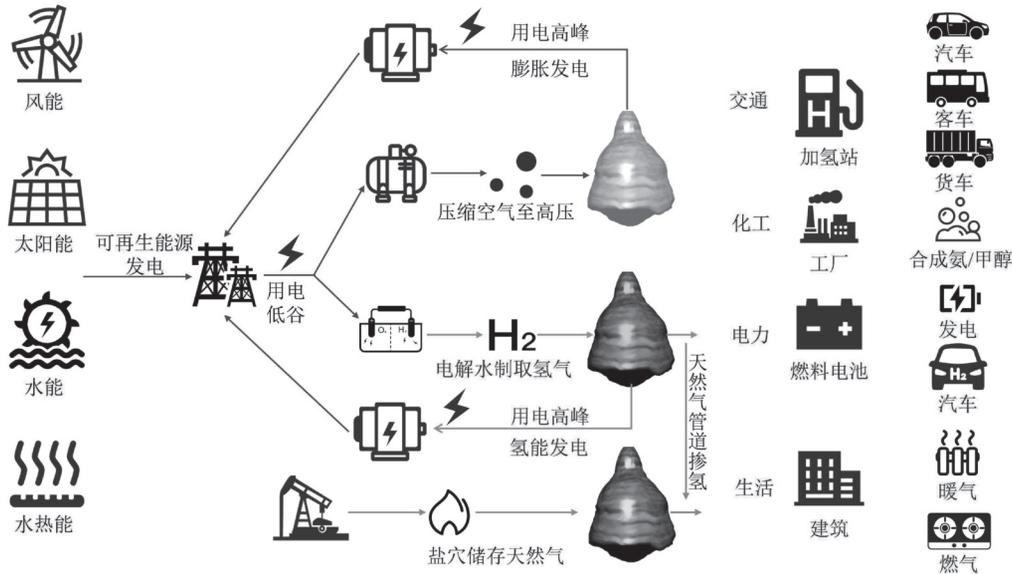


图 16 氢能联合发展技术路线图

Fig.16 Technology road map of hydrogen energy joint development

产出, 因此开展盐矿地质调查工作、加速盐穴储氢能力的调查以及建设盐穴储氢库十分必要。金坛盐矿地质条件优越、交通便利、工程经验丰富, 具备建设优秀的盐穴储氢库的条件。可以在该地结合水电解制氢、压缩空气储能、盐穴储氢以及天然气管道掺氢等技术, 构建一个“制、储、运、用”一体化供应链生态, 实现我国盐穴储氢技术与应用的零突破, 填补我国在盐穴储氢技术领域的空白。

References

- Amir M, Deshmukh R G, Khalid H M, Said Z, Raza A, Muyeen S M, Nizami A S, Elavarasan R M, Saidur R, Sopian K. 2023. Energy storage technologies: An integrated survey of developments, global economical/envirnmental effects, optimal scheduling model, and sustainable adaption policies[J]. *Journal of Energy Storage*, 72.
- Andersson J, Gronkvist S. 2019. Large-scale storage of hydrogen[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(23): 11901-11919.
- Bely N I, Smirnov V I, Parfenov V I, Marchand R L, Laguerie P D, Yoy T. 1997. Experience of cooperation between russia and geostock (france) in the project for underground storage of natural gas in salt caverns at volgograd [C]// 20th World Gas Conference.
- Berest P, Brouard B. 2006. Safety of salt caverns used for underground storage blow out, Mechanical Instability, Seepage, Cavern Abandonment[J]. *Oil & Gas Science and Technology*, 58(3): 361-384.
- Berest P, Brouard B, Durup J G. 2006. Tightness tests in salt-cavern wells[J]. *Oil & Gas Science and Technology*, 56(5): 451-469.
- Berest P, Brouard B, Hevin G, Reveillere A. 2021. Tightness of salt caverns used for hydrogen storage [C]//SMRI Collection(ed./eds.). SMRI Spring 2021 Virtual Technical Conference. USA: Solution Mining Research Instituteusa, 2021: 1-20.
- Buzogany R, Bernhardt H. 2023. Hydrogen storage in salt caverns current status and potential future research topics [C]//Fifth EAGE Global Energy Transition Conference & Exhibition, European Association of Geoscientists & Engineers, (1): 1-4.
- Caglayan D G, Weber N, Heinrichs H U, Linben J, Robinius M, Kukla P A, Stolten D. 2020. Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(11): 6793-6805.
- Chemical Weekly Group. 2017. Air Liquide commissions world's largest hydrogen storage facility in US[J]. *Chemical Weekly*, 62(24): 184-184.
- Dash S K, Chakraborty S, Elangovan D. 2023. A brief review of hydrogen production methods and their challenges[J]. *Energies*, 16(3): 1141.
- Davenport J, Wayth N. 2023. Statistical Review of World Energy [R]. Britain: Energy Institute.
- Dawood F, Anda M, Shafiullah G M. 2020. Hydrogen production for energy: An overview[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(7): 3847-3869.
- Deveci M. 2018. Site selection for hydrogen underground storage using interval type-2 hesitant fuzzy sets[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(19): 9353-9368.
- Dopffel N, Jansen S, Gerritse J. 2021. Microbial side effects of underground hydrogen storage-Knowledge gaps, risks and opportunities for successful implementation[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(12): 8594-8606.
- Ding Guosheng, Xie Ping. 2006. Current situation and prospect of Chinese underground gas storage[J]. *Natural Gas Industry*, 26(6): 111-113(in Chinese with English abstract).
- Ding Guosheng, Zhang Yuwen. 2010. Salt Cavern Underground Gas Storage[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 62-63 (in Chinese).

- Duan Zhixiang, Shi Kun, Hu Hangjian, Zhang Yansheng, Feng Yiyong. 2003. Review on the development of inspection technology for underground gas (hydrogen) storage wells in China[J]. *China Special Equipment Safety*, 39(6): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Dutta A, Gupta D S, Gupta A, Sarkar J, Roy S, Mukherjee A, Sar P. 2018. Exploration of deep terrestrial subsurface microbiome in Late Cretaceous Deccan traps and underlying Archean basement, India[J]. *Scientific Reports*, 8(1): 17459.
- Fang D, Zhao C, Yu Q. 2018. Government regulation of renewable energy generation and transmission in China's electricity market[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93: 775–793.
- Gajda D, Lutynski M. 2021. Hydrogen permeability of epoxy composites as liners in lined rock caverns—Experimental study[J]. *Applied Sciences*, 11(9): 3885.
- Gu Chunsheng, Yang Lei, Min Wang, Zhang Qiqi, Lu Yi, Su Dong. 2023. Monitoring and analyzing the development trend of land subsidence in Changzhou City, Jiangsu Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 34(2): 82–91 (in Chinese with English abstract).
- Guan Guoxing, Li Liurong. 2003. Jintan City cooperated with "West–East Gas Transmission" to establish gas storage by using underground salt caverns[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2: 24 (in Chinese).
- Guney T. 2019. Renewable energy, non–renewable energy and sustainable development[J]. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 26(5): 389–397.
- Guo Chaobin, Li Cai, Yang Lichao, Liu Kai, Ruan Yuejun, He Yang. 2021. Research review and engineering case analysis of geological compressed air energy storage[J]. *Geological Survey of China*, 8(4): 109–119 (in Chinese with English abstract).
- Guo Chaobin, Wang Zhihui, Liu Kai, Li Cai. 2019. The application and research progress of special underground space[J]. *Geology in China*, 46(3): 482–492. (in Chinese with English abstract)
- Guo Juan, Cui Rongguo, Zhou Qizhong, Hu Rongbo. 2024. Outlook and overview of mineral resources situation of China in 2023[J]. *China Mining Magazine*, 33(1): 12–19. (in Chinese with English abstract)
- Harlan T. 2022. Low–carbon Frontier: Renewable energy and the new resource boom in western China[J]. *The China Quarterly*, 255: 591–610.
- Hayden L E, Stalheim D. 2009. ASME b31.12 hydrogen piping and pipeline code design rules and their Interaction with pipeline materials concerns, issues and research [C]//ASME Pressure Vessels and Piping Conference, 43642: 355–361.
- Hematpur H, Abdollahi R, Rostami S, Haghghi M, Blunt M J. 2023. Review of underground hydrogen storage: Concepts and challenges[J]. *Advances in Geo–Energy Research*, 7(2): 111–131.
- Hong L, Moller B. 2012. Feasibility study of China's offshore wind target by 2020[J]. *Energy*, 48(1): 268–277.
- Horvath P R B. 2022. Hydrogen storage in the netherlands—latest findings from demonstration project hyStock for underground storage of hydrogen in salt caverns [C]// SMRI Fall 2022 Technical Conference. Chester; Solution Mining Research Institute.
- Huang Kuan, Zhang Wanyi, Wang Fengxiang, Luan Zhuoran, Hu Yalu, Chen Ji, Fang Yuan, Song Zefeng, Wang Jian. 2024. Development status of underground space energy storage at home and abroad and geological survey suggestions[J]. *Geology in China*, 51(1): 105–117. (in Chinese with English abstract)
- Ishaq H, Dincer I, Crawford C. 2022. A review on hydrogen production and utilization: Challenges and opportunities[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(62): 26238–26264.
- Jia Shanpo, Zheng Dewen, Jin Fengming, Zhang Hui, Meng Qingchun, Lin Jianpin, Wei Qiang. 2016. Evaluation system of selected target sites for aquifer underground gas storage[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 47(3): 857–867 (in Chinese with English abstract).
- Jiang D Y, Yi L, Chen J, Ren S, Li Y P. 2016. Comparison of cavern formation in massive salt blocks with single–well and two–well systems[J]. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 39(8): 954–961.
- Jiangsu Electric Power Industry Association. 2024. Electric power production and operation data of Jiangsu Province from January to November 2024[EB/OL]. <http://www.jsepa.com/report.shtml?cid=10932> (in Chinese).
- Jing Wenjun, Yang Chunhe, Li Yingping, Yang Changlai. 2012. Research on site selection evaluation method of salt cavern gas storage with analytic hierarchy process[J]. *Rock & Soil Mechanics*, 33(9): 2683–2690 (in Chinese with English abstract).
- Kanezaki T, Narazaki C, Mine Y, Matsuoka S, Murakami Y. 2008. Effects of hydrogen on fatigue crack growth behavior of austenitic stainless steels[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(10): 2604–2619.
- Kutchko B G, Strazisar B R, Hawthorne S B, Lopano C, Miller D, Hakala J A, Guthrie G. 2011. H₂S–CO₂ reaction with hydrated Class H well cement: Acid–gas injection and CO₂ Co–sequestration[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5(4): 880–888.
- Li Guang, Liu Jianjun, Liu Qiang, Ji Youjun. 2016. Review on geological storage of carbon dioxide[J]. *Journal of Hunan Ecological Science*, 3(4): 41–48 (in Chinese with English abstract).
- Li Long, Li Jianjun. 2023. Safety Monitoring Technology of Salt Cavern Gas Storage[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 4–5 (in Chinese).
- Li X, Li J L. 2008. Application of no–killing operations in Jintan cavern underground gas storage[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 30(6): 100–103.
- Liebscher A, Wackerl J, Streibel M. 2016. Geologic Storage of Hydrogen–Fundamentals, Processing, and Projects [M]. Weinheim: Wiley–VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, 629–658.
- Liu W, Li Q, Yang C H, Shi X L, Wan J F, Jurado M J, Li Y P, Jiang D Y, Chen J, Qiao W B, Zhang X, Fan J Y, Peng T J, He Y X. 2023. The role of underground salt caverns for large–scale energy storage: A review and prospects[J]. *Energy Storage Materials*, 63: 103045.
- Liu W, Yang S, Mai Y, Wang J M, Jiang S K. 2018. Reflection on domestic and foreign research status of subsurface safety valves and their domestication[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 40(3): 164–174.
- Liu Xiaochi, Mei Shengwei, Dung Ruoichen, Zhong Shengyuan, Zhang Xianfeng, Xie Ningning, Chang Yong, Zhang Tong. 2023. Current situation, development trend and application prospect of

- compressed air energy storage engineering projects[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 43(10): 38–47 (in Chinese with English abstract).
- Lord A S, Kobos P H, Borna D J. 2014. Geologic storage of hydrogen: Scaling up to meet city transportation demands[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(28): 15570–15582.
- Loto C A. 2017. Microbiological corrosion: Mechanism, control and impact—a review[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(9/12): 4241–4252.
- Lu Jiamin, Xu Junhui, Wang Weidong, Wang Hao, Xu Zijun, Chen Liuping. 2022. Development of large-scale underground hydrogen storage technology[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 11(11): 3699–3707 (in Chinese with English abstract).
- Lu Yanan. 2022. Promote the healthy, orderly and sustainable development of the hydrogen energy industry[N]. *People's Daily*, 2022–03–24(11) (in Chinese).
- Luo Miao. 2021. Study on Material Selection of Casing Strings for Injection and Production Wells in Hydrogen Underground Energy Storage[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 1–56 (in Chinese with English abstract).
- Ma Bing, Jia Lingxiao, Yu Yang, Wang Huan, Chen Jing, Zhong Shuai, Zhu Jichang. 2021. Geoscience and carbon neutralization: Current status and development direction[J]. *Geology in China*, 48(2): 347–358 (in Chinese with English abstract).
- Marchi C S, Somerday B P. 2014. Technical reference for hydrogen compatibility of materials [R]. United States: Sandia National Laboratories.
- Miocic J, Heinemann N, Edlmann K, Scafidi J, Molaei F, Alcalde J. 2023. Underground hydrogen storage: A review [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 528(1): 73–86.
- Moody N R, Robinson S L, Garrison J W M. 1990. Hydrogen effects on the properties and fracture modes of iron-based alloys[J]. *Res mechanics*, 30(2): 143–206.
- Muhammed N S, Haq B, Shehri D A, Ahmed A A, Rahman M M, Zaman E. 2022. A review on underground hydrogen storage: Insight into geological sites, influencing factors and future outlook[J]. *Energy Reports*, 8: 461–499.
- Murakami Y, Matsuoka S. 2010. Effect of hydrogen on fatigue crack growth of metals[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 77(11): 1926–1940.
- Navaid H B, Emadi H, Watson M. 2023. A comprehensive literature review on the challenges associated with underground hydrogen storage[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(28): 10603–10635.
- Olabi A G, Bahri A S, Abdelghafar A A, Baroutaji A, Sayed E T, Alami A H, Rezk H, Abdelkareem M A. 2021. Large-scale hydrogen production and storage technologies: Current status and future directions[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(45): 23498–23528.
- Oldenburg C M, Pan L. 2013. Porous Media Compressed-Air Energy Storage (PM-CAES): Theory and simulation of the coupled wellbore-reservoir system[J]. *Transport in Porous Media*, 97(2): 201–221.
- Osman A I, Mehta N, Elgarahy A M, Hefny M, Hinai A A, Muhtaseb A A, Rooney D W. 2021. Hydrogen production, storage, utilization and environmental impacts: A review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 20(1): 153–188.
- Patel H, Salehi S, Ahmed R, Teodoriu C. 2019. Review of elastomer seal assemblies in oil & gas wells: Performance evaluation, failure mechanisms, and gaps in industry standards[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 179: 1046–1062.
- Pei M, Petajaniemi M, Regnell A, Wijk O. 2020. Toward a fossil free future with Hybrit: Development of iron and steelmaking technology in Sweden and Finland[J]. *Metals*, 10(7): 972.
- Rahman M, Oni A, Kumar A. 2020. Assessment of energy storage technologies: A review[J]. *Energy Conversion and Management*, 223: 113295.
- Reitenbach V, Ganzer L, Hagemann B. 2015. Influence of added hydrogen on underground gas storage: A review of key issues[J]. *Environmental Earth Sciences*, 73(11): 6927–6937.
- Salehi S, Ezeakacha C P, Kwatia G. 2019. Performance verification of elastomer materials in corrosive gas and liquid conditions[J]. *Polymer Testing*, 75: 48–63.
- Sambo C, Dudun A, Samuel S A. 2022. A review on worldwide underground hydrogen storage operating and potential fields[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(54): 22840–22880.
- Shahvali A, Azin R, Zamani A. 2014. Cement design for underground gas storage well completion[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 18: 149–154.
- Shi Jinling. 2020. Evaluation of site selection conditions for salt cavern underground salt cavity gas storage[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 40(18): 5–6 (in Chinese).
- Shi Xilin, Wei Xinxing, Yang Chunhe, Ma Hongling, Li Yiping. 2023. Problems and countermeasures for construction of China's salt cavern type strategic oil storage[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 38(1): 99–111 (in Chinese with English abstract).
- Song Gangxiang, Lu Yan, Ding Fang, Ju Hao, Xu Bo, Zhang Xinan. 2020. Study on dynamic diagnosis and equilibrium production technology for the gas condensate reservoir with bottom oil[J]. *Natural Gas Geoscience*, 31(6): 890–894 (in Chinese with English abstract).
- Strazisar B, Kutcho B, Huerta N. 2009. Chemical reactions of wellbore cement under CO₂ storage conditions: Effects of cement additives[J]. *Energy Procedia*, 1(1): 3603–3607.
- Sun X, Yang P, Zhang Z. 2017. A study of earthquakes induced by water injection in the Changning salt mine area, SW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 136: 102–109.
- Szumner A, Jezierska E, Lublinska K. 1999. Hydrogen surface effects in ferritic stainless steels[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 293(51): 356–360.
- Tarkowski R. 2019. Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105: 86–94.
- Ugarte E R, Salehi S. 2022. A review on well integrity issues for underground hydrogen storage[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 144(4): 1–5.
- Ursua A, Gandia L M, Sanchis P. 2012. Hydrogen production from water electrolysis: Current status and future trends[J]. *Proceedings of the IEEE*, 100(2): 410–426.
- Von T H, Reitze A, Crotofino F. 2022. New procedure for tightness tests (MIT) of salt cavern storage wells: Continuous high accuracy

- determination of relevant parameters, without the need to use radioactive tools [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 313(1): 129–137.
- Wan J, Peng T J, Shen R. 2019. Numerical model and program development of TWH salt cavern construction for UGS[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 179: 930–940.
- Wang Pengfei, Jiang Chongxin, Ma Bing. 2021. Hydrogen energy development strategy and its important significance at home and abroad[J]. *Geological Survey of China*, 8(4): 33–39 (in Chinese with English abstract).
- Wang T T, Ma H L, Yang C H, Shi X L, Daemen J J K. 2015. Gas seepage around bedded salt cavern gas storage[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 26: 61–71.
- Wang Y, Guo C H, Zhuang S R, Chen X J, Jia L Q, Chen Z Y. 2021. Major contribution to carbon neutrality by China's geosciences and geological technologies[J]. *China Geology*, 4(2): 329–352.
- Wanyan Q Q, Ding G, Zhao Y, Li K, Deng J G, Zheng Y L. 2018. Key technologies for salt-cavern underground gas storage construction and evaluation and their application[J]. *Natural Gas Industry B*, 5(6): 623–630.
- Yang Y, Ma C, Pang X L. 2021. Optimal power reallocation of large-scale grid-connected photovoltaic power station integrated with hydrogen production[J]. *Journal of Cleaner Production*, 298(10): 126830.
- Zhang Z X, Jiang D, Liu W, Chen J, Li E B. 2019. Study on the mechanism of roof collapse and leakage of horizontal cavern in thinly bedded salt rocks[J]. *Environmental Earth Sciences*, 78(10): 292.
- Zhang Z X, Liu W, Guo Q, Duan X Y. 2022. Tightness evaluation and countermeasures for hydrogen storage salt cavern contains various lithological interlayers[J]. *Journal of Energy Storage*, 50: 104454.
- Zhao Yuchao, Luo Yu, Li Longxin, Zhou Yuan, Li Limin, Wang Xia. 2022. In-situ stress simulation and integrity evaluation of underground gas storage: A case study of the Xiangguosi underground gas storage, Sichuan, SW China[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(4): 523–536 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yali, Wanyan Qiqi, Qiu Xiaosong, Kou Yanxia, Ran Lina, Lai Xin, Wu Shuang. 2019. New technologies for site selection and evaluation of salt-cavern underground gas storages[J]. *Natural Gas Industry*, 39(6): 123–130 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Liping. 2022. An overview of monitoring technology for underground natural gas storage[J]. *Petroleum Tubular Goods & Instruments*, 8(4): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Zivar D, Kumar S, Foroozesh J. 2021. Underground hydrogen storage: A comprehensive review[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(45): 23436–23462.
- Zou C, Ma F, Pan S Q. 2022. Earth energy evolution, human development and carbon neutral strategy[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 49(2): 468–488.
- 丁国生, 张昱文. 2010. 盐穴地下储气库[M]. 北京: 石油工业出版社, 62–63.
- 段志祥, 石坤, 胡杭健, 张烟生, 冯异勇. 2023. 我国地下储气(氢)井检测技术进展综述[J]. *中国特种设备安全*, 39(6): 1–7.
- 顾春生, 杨磊, 闵望, 张其琪, 卢毅, 苏东. 2023. 江苏常州地面沉降监测与发展趋势分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 34(2): 82–91.
- 管国兴, 李留荣. 2003. 金坛市配合“西气东输”利用地下溶盐穴建立储气库[J]. *矿产保护与利用*, (2): 24.
- 郭朝斌, 李采, 杨利超, 刘凯, 阮岳军, 何阳. 2021. 压缩空气地质储能研究现状及工程案例分析[J]. *中国地质调查*, 8(4): 109–119.
- 郭朝斌, 王志辉, 刘凯, 李采. 2019. 特殊地下空间应用与研究现状[J]. *中国地质*, 46(3): 482–492.
- 郭娟, 崔荣国, 周起忠, 胡容波. 2024. 2023 年中国矿产资源形势回顾与展望[J]. *中国矿业*, 33(1): 12–19.
- 黄宽, 张万益, 王丰翔, 栾卓然, 胡雅璐, 陈骥, 方圆, 宋泽峰, 王健. 2023. 地下空间储能国内外发展现状及调查建议[J]. *中国地质*, 51(1): 105–117.
- 贾善坡, 郑得文, 金凤鸣, 张辉, 孟庆春, 林建品, 魏强. 2016. 含水层构造改建地下储气库评价体系[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 47(3): 857–867.
- 江苏省电力行业协会. 2024. 2024 年 1—11 月江苏省电力生产经营数据 [EB/OL]. <http://www.jsepa.com/report.shtml?cid=10932>.
- 井文君, 杨春和, 李银平, 杨长来. 2012. 基于层次分析法的盐穴储气库选址评价方法研究[J]. *岩土力学*, 33(9): 2683–2690.
- 李光, 刘建军, 刘强, 纪佑军. 2016. 二氧化碳地质封存研究进展综述 [J]. *湖南生态科学学报*, 3(4): 41–48.
- 李龙, 李建军. 2023. 盐穴储气库安全监测技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 4–5.
- 刘笑驰, 梅生伟, 丁若晨, 钟声远, 张险峰, 谢宁宁, 常勇, 张通. 2023. 压缩空气储能工程现状, 发展趋势及应用展望[J]. *电力自动化设备*, 43(10): 38–47.
- 陆佳敏, 徐俊辉, 王卫东, 王浩, 徐孜俊, 陈留平. 2022. 大规模地下储氢技术研究展望[J]. *储能科学与技术*, 11(11): 3699–3707.
- 陆娅楠. 2022. 推进氢能产业健康有序可持续发展[N]. *人民日报*, 2022-03-24(011).
- 罗森. 2021. 氢气地下储能库注采井套管选材研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 1–56.
- 马冰, 贾凌霄, 于洋, 王欢, 陈静, 钟帅, 朱吉昌. 2021. 地球科学与碳中和: 现状与发展方向[J]. *中国地质*, 48(2): 347–358.
- 施金伶. 2020. 盐穴地下盐腔储气库选址条件评价[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 40(18): 5–6.
- 施锡林, 尉欣星, 杨春和, 马洪岭, 李银平. 2023. 中国盐穴型战略石油储备库建设的问题及对策[J]. *中国科学院院刊*, 38(1): 99–111.
- 宋刚祥, 陆嫣, 丁芳, 鞠颖, 徐博, 张锡楠. 2020. 带底油凝析气藏动态诊断及均衡开采技术[J]. *天然气地球科学*, 31(6): 890–894.
- 王朋飞, 姜重昕, 马冰. 2021. 国内外氢能发展战略及其重要意义[J]. *中国地质调查*, 8(4): 33–39.
- 赵昱超, 罗瑜, 李隆新, 周源, 李力民, 王霞. 2022. 地下储气库地应力模拟研究与地质完整性评估——以相国寺为例[J]. *地质力学学报*, 28(4): 523–536.
- 郑雅丽, 完颜祺琪, 邱小松, 垢艳侠, 冉莉娜, 赖欣, 吴双. 2019. 盐穴地下储气库选址与评价新技术[J]. *天然气工业*, 39(6): 123–130.
- 朱礼萍. 2022. 国内外地下储气库监测技术概述[J]. *石油管材与仪器*, 8(4): 1–7.

附中文参考文献

- 丁国生, 谢萍. 2006. 中国地下储气库现状与发展展望[J]. *天然气工业*, 26(6): 111–113.