

储能技术经济性分析



大规模地下储氢技术研究展望

陆佳敏, 徐俊辉, 王卫东, 王 浩, 徐孜俊, 陈留平

(中盐金坛盐化有限责任公司, 江苏省井矿盐综合利用工程技术研究中心, 江苏 常州 213000)

摘 要: 随着传统化石能源消耗和环境污染问题日益凸显, 能源行业一直在寻找可再生能源来满足绿色消费需求。氢能是一种来源丰富、绿色低碳、应用广泛的二次能源, 正逐步成为能源转型的重要载体之一。为了落实能源需求变革, 氢能的安全高效存储尤为重要。地下储氢技术由于其储氢规模大、综合成本低而受到了广泛关注。本工作分析了世界地下储氢项目概况和研究进展, 结果表明盐穴储氢密封性好、结构稳定、操作灵活的优点, 是目前大规模地下储氢最有前景的选择。从氢气的特点出发, 综合阐述了在工程实施中氢气的注采对井况和地下环境造成金属腐蚀、橡胶失效、水泥降解、氢气泄漏等问题, 为国内发展盐穴储氢技术研究提供借鉴。进一步结合中盐金坛盐穴综合利用的经验以及江苏地区的地域特点, 探索盐穴储氢的技术路线的可能性。该路线通过将水电解制氢技术、盐穴储氢技术及天然气管道掺氢技术相结合, 解决“制、储、运”的关键问题, 为中国实现“双碳”目标提供思路。盐穴储氢具有能源电力消纳、电网削峰填谷、跨季节存储、平衡氢能供需以及低成本等优势, 这对于可再生能源发电剩余电量的大规模存储、绿色清洁氢能源的使用与发展以及节能减排、发展低碳经济都具有十分重要的意义。

关键词: 氢能; 盐穴储氢; 地下存储; 低碳经济

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0297

中图分类号: TE 822

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2022) 11-3699-09

Development of large-scale underground hydrogen storage technology

LU Jiamin, XU Junhui, WANG Weidong, WANG Hao, XU Zijun, CHEN Liuping

(Jiangsu Engineering Research Centre for Comprehensive Utilization of Well and Rock Salt,
China Salt Jintan Salt Chemical Co., Ltd., Changzhou 213000, Jiangsu, China)

Abstract: The use of fossil fuels as the primary source of energy has caused several negative environmental effects, including global warming and air pollution. Despite having numerous benefits, the storage of hydrogen is a serious issue, as a potential non-carbon-based energy resource, which can replace fossil fuels. It is extensively employed, clean and safe. Underground hydrogen storage (UHS) appears to be a crucial means of a large-scale and long-term energy storage solution. This research analysis underground hydrogen storage projects around the world. The salt cavern has the benefits of good sealing, a stable structure, and easy engineering application when combined with research. This demonstrates that the salt cavern is one of the most promising options for UHS. With a feasible and economical solution for fulfilling the large-scale UHS in the Jintan salt mine being proposed in this study, also introduced are the difficulties associated with underground hydrogen storage.

收稿日期: 2022-06-01; 修改稿日期: 2022-07-12。

基金项目: 2021年度中国盐业股份有限公司科技发展规划项目 (ZK-2103)。

第一作者: 陆佳敏 (1996—), 女, 硕士, 研究方向为盐穴储能技术,
E-mail: jmlu@chinasalt-jt.com; 通讯作者: 徐俊辉, 高级工程师, 研

究方向为盐穴储能技术, E-mail: jhxu@chinasalt-jt.com; 陈留平, 研究员级高级工程师, 研究方向为制盐及盐穴储能技术, E-mail: jsb@chinasalt-jt.com。

Mechanisms that can compromise well integrity and generate leaks include microbial corrosion, hydrogen embrittlement, cement degradation, elastomer failure, caprock sealing failure, and hydrogen leakage. The difference between supply and demand is reduced by storing the energy converted into hydrogen. The key issues of "production, storage, and transportation of hydrogen" could be solved. This is of great significance for the large-scale storage of renewable energy, the use of green hydrogen sources, and the development of a low-carbon economy.

Keywords: hydrogen energy; salt cavern hydrogen storage; underground storage; low-carbon economy

氢气是一种用途广泛、清洁、安全的能量载体, 可以作为动力燃料或工业原料。随着水电解技术的发展, 氢能可以实现大规模、高效的可再生能源消纳。作为能源缓冲载体, 它可以跨行业和跨地区分配能源, 提高了能源系统的韧性^[1]。氢能的应用有利于减少社会对煤石油等不可再生能源的依赖, 推动燃料行业变革转型, 也可以降低交通运输、工业用能、建筑采暖过程中的碳排放。目前, 世界主要发达经济体, 已经把氢能源的利用提到了国家战略的高度来对待, 从国家层面上制定了长期的研发计划。美、欧、日等发达国家和地区都从国家可持续发展和安全战略的高度, 纷纷投入巨资进行氢能相关技术研发, 制定相应的发展战略和计划, 并指导和推进相关领域的发展, 以期在未来氢经济社会占据主动权^[2]。

储氢技术作为氢气“制”和“用”环节之间的重要桥梁, 其重要性不容忽视。高压气态储氢技术、低温液态储氢技术、固态储氢技术及有机液体储氢技术是目前主要的 4 种储氢技术, 其中主流方式还是高压气态储氢^[3-4]。从长远来看氢能要实现其对净零排放的重大贡献潜力, 就必须进行大规模储存。地下储氢技术由于其储氢规模大、综合成本低而受到了广泛关注。以美国为代表的发达国家围绕地下储氢技术正进行技术攻关, 并得到迅速发展。目前, 英国、德国、加拿大、波兰、土耳其、荷兰和丹麦等也都制定了盐穴储氢计划^[5-7]。相比上述国家, 我国地下储氢研究较为滞后, 尚无地下储氢实践。为此, 本工作主要根据国外地下储氢技术的研究和应用现状, 分析氢气地下储存可能面临的技术问题, 为国内发展盐穴储氢技术提供借鉴。进一步结合中盐金坛盐穴综合利用的经验以及江苏地区的地域特点, 探索盐穴储氢技术路线的可

能性, 为中国实现“双碳”目标提供思路。

1 氢气的特点

一般情况下, 氢气的能量密度约为 120 MJ/kg, 它的能量密度是天然气的 2.5~3.0 倍, 是单位质量中能量含量最高的燃料。我国地下储氢研究较为滞后, 尚无地下盐穴储氢实践。但是天然气地下储气库在国内已实现大规模推广, 在建设和运营方面可以为氢气储运提供成熟经验与借鉴。氢气在物理性质上和甲烷大有不同, 见表 1。在 25 °C、101.325 kPa 气压下, 氢气的密度仅为 0.082 kg/m³, 甲烷在室温下密度是氢气的 8 倍, 在质量相同情况下氢气需要更高的储存压力。氢气的黏度同样也比甲烷小, 表现出更高的流动性, 这会导致氢气在地下采出过程中的残留变低, 注采效率与天然气相比会有所提高。在水溶性方面, 氢气在水中的溶解度也比甲烷低, 这意味着氢气在注气排卤过程中会有更少的损失。以典型的地下盐穴存储体系为例, 在水-氢-盐三相系统中, 可通过调节温度、压力、盐水浓度等参数, 进一步降低氢在盐水中的溶解度。但是, 由于氢气的分子量较低, 扩散程度较高, 它很可能通过盖层和夹层向地表或四周泄漏。在标准状态下, 氢气的水中扩散系数是甲烷的 2.77 倍。因此在地下存储过程中, 必须考虑地下空间孔隙度对扩散的影响。综上所述, 在借鉴成熟经验时应考虑到实际工程应用中储存氢气压力、注采工艺、渗透率等因素与储存天然气的差异, 意识到氢气地下存储研究的科学问题和技术挑战。

2 氢气地下存储的研究和应用

目前, 地下储气库主要有 4 种类型。含水层储气库, 通过向盖层下注气驱替岩层中的水而成, 其

表 1 氢气和甲烷的物理性质^[8]

Table 1 Physical properties of hydrogen and methane^[8]

性质	氢气	甲烷
分子质量	2.016	16.043
密度(25 ℃, 101.325 kPa)	0.082 kg/m ³	0.657 kg/m ³
黏度(25 ℃, 101.325 kPa)	0.89×10 ⁻⁵ Pa·s	1.1×10 ⁻⁵ Pa·s
水中溶解度(25 ℃, 101.325 kPa)	7.9×10 ⁻⁴ mol/kg	1.4×10 ⁻³ mol/kg
标准沸点/℃	-253	-165
临界压力	1.3×10 ⁶ Pa	4639.67 kPa
临界温度/℃	-239.95	-82.3
热值/(kJ/g)	120~142	50.2~55.5 kJ/g
水中扩散速率(25 ℃)	5.13×10 ⁻⁹ m ² /s	1.85×10 ⁻⁹ m ² /s

存储容量大，但勘探风险大、垫气不能完全回收。废弃矿坑储气库容量小且易漏气，很少被使用。枯竭的油气藏储气库利用油气田的原有设施及储气量大的优点在地下储气库中占的比例较大，但是地层中空隙体积过大会导致大量气体残留，增加垫气量，同时对地面设施的要求较高。盐穴储气库则因为其调峰能力强，注采气的效率高，对于垫层气量需求低，同时岩盐的密封能力大及盐结构的惰性，可以防止储存的氢气被污染，并且操作灵活，目前被认为是最有前景的地下储氢选择^[9-11]。

1976 年 Walters^[12]验证了利用自然形成的地下结构来储存氢气具有可行性。1979 年 Carden 等^[13]研究了地下储氢的流失率，他们发现每个注采循环周期约有 1% 氢气可能会损失，而在第 1 个循环中，氢气溶解到地层中造成的损耗只有 0.4%。1986 年

Taylor 等^[9]通过评估氢气储存在盐穴、岩石穴的可行性及经济性，研究发现盐穴是最经济的地下储存结构。2018 年 Tarkowski 等^[10]在波兰筛选了 28 个盐穴，为地下储氢选出了最有价值的 7 个盐穴。同年，Heinemann 等^[14]根据存储容量和地质条件，研究了在英国中部的地下储氢的可能性。Lemieux 等^[15]在 2019 年分析了枯竭的油气藏储气库、盐穴储气库、含水层储气库等优势，并把盐穴用于季节性储存加拿大安大略省的氢气。Lankof 等^[16]在 2020 年提供了一系列具有地下储氢潜力的盐穴。Narayanamoorthy 等^[17]参照运营技术、投资成本、社会、经济、风险因素等 5 个标准，提出了地下储氢盐穴选址方法。随着研究的深入，越来越多的目光聚焦在大规模地下盐穴储氢项目上。氢气储气库的垫层气以甲烷为主，但氢气和甲烷两种气体易形成气体混合，采出氢气时会同时采出一定量的甲烷，影响氢气的采出纯度。如表 2 所示，世界上地下存储纯度较高的氢气(氢气纯度≥95%)的设施大多建立在英国和美国，它们大部分选择盐穴作为储氢地点^[18]。比如位于英国 Teesside 的储氢工程证明盐穴是一个完美的储氢场所，但是它的运行压力较低，且 Teesside 的储氢工程深度仅为 356 m，运行压力低会导致盐穴塌陷，所以需要已注入的大部分氢气维持压力，故循环采出的氢气量较小，采出氢气的体积占总体积的 8%。在表 2 中，还有许多氢气与其他气体(例如甲烷)混合的储存项目，这说明利用氢气地下大规模储存并转化成另一种形式能源的研究引起了世界各国的极大关注。

表 2 世界地下储氢项目概况

Table 2 The worldwide underground hydrogen storage operating sites

工程名称(地区)	存储类型	氢气/%	运行条件	深度/m	体积/m ³	状态
Teesside(英国)	盐层	95	45 MPa	365	210000	运行
Clemens(美国)	盐丘	95	7~13.7 MPa	1000	580000	运行
Moss Bluff(美国)	盐丘	—	5.5~15.2 MPa	1200	566000	运行
Spindletop(美国)	盐丘	95	6.8~20.2 MPa	1340	906000	运行
Kiel(德国)	盐穴	60	8~10 MPa		32000	关闭
Ketzin(德国)	蓄水层	62	—	200~250	—	与天然气混合
Beynes(法国)	蓄水层	50	—	430	3.3×10 ⁸	与天然气混合
Lobodice(捷克)	蓄水层	50	9 MPa/34 ℃	430	—	运行
Diadema(阿根廷)	枯竭气藏	10	1 MPa/50 ℃	600	—	—
Underground Sun Storage(澳大利亚)	枯竭气藏	10	7.8 MPa/40 ℃	1000	—	运行

3 地下储氢存在的技术问题

虽然大规模地下储氢拥有广阔的应用前景，但

在实施中也不可避免地存在技术问题和科学挑战。要实现安全高效的存储，在项目实施之前，不仅要考虑存储类型、容量、稳定性和经济效益等因

素, 还需要对电力生产设施和地质储存潜力进行评估和研究^[19]。在项目运行中, 氢气的注采过程还对井况和地下环境造成金属腐蚀、橡胶失效、水泥降解、氢气泄漏等问题, 如图 1 所示。

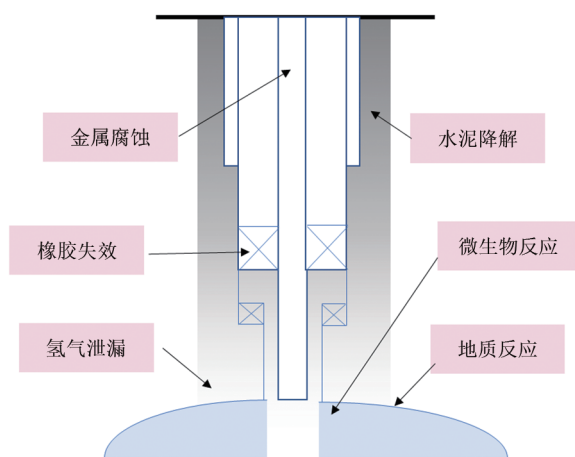


图 1 地下储氢技术问题
Fig. 1 Mechanisms causing well integrity failure in UHS

3.1 氢腐蚀

氢腐蚀严重威胁了完井所用材料的耐久性、储气井的完整性、储层的地质与环境安全。氢气化学性质很活泼, 容易对钢材造成氢气起泡、氢脆、氢裂纹。储存的 H_2 或产生的 H_2S 等分子在材料表面发生分解反应生成氢原子, 氢原子在金属表面形成化学吸附。在这种原子形式中, 氢可以积累在金属表面下的缺陷位置。这种积累会使缺陷附近产生强大的内压, 产生塑性变形^[20]。固井是保证井身完整性的重要组成部分, Reitenbach 等^[21]对完井所用材料的耐久性、腐蚀和与微生物代谢有关的环境风险进行研究。氢气渗透过水泥环也是一个相对潜在的风险点, 因为水泥暴露在极端的负荷条件下由于压力、热膨胀和体积变化导致腐蚀, 机械强度会降低。Kutchko 等^[22]研究了酸性气体 (H_2S - CO_2) 和纯 CO_2 作用下水泥在模拟储层条件下的变化规律, 温度、pH 对水泥的孔隙度和渗透率有很大影响。 CO_2 对水泥的化学降解作用称为碳酸化。对于地下储氢来说, 碳酸化过程将取决于岩石矿物和地层流体中 CO_2 的含量。如果碳酸化作用持续下去, 碳酸钙会转化为重碳酸氢钙 $[Ca(HCO_3)_2]$ ^[23], Teodoriu 等^[24]研究表明这种水溶性的产物导致水泥强度降低。此外, 氢气环境中的微生物也会参与水泥化学反应,

影响水泥材料的性能。

封隔器是完井过程中的密封组件, 其主要功能是隔离套管、油管或环空中的流体。封隔器故障会影响井的完整性, 产生泄漏, 危及环境与安全。封隔器通常由橡胶或聚合物制成的弹性体材料组成。由于在注采过程中会出现快速气体减压 (RGD), 弹性体材料在储氢操作中可能受到损害。Patel 等^[25]发现在高压下, 氢气可以渗透到弹性体材料中。在 RGD 之后, 橡胶材料会因为接触氢气而变得过饱和, 这影响材料的拉伸强度, 并在密封橡胶材料内部产生气泡破裂。故障的严重程度与温度、压力和减压时间成正比。当弹性体材料与钻井液、完井液、旋转液、地层盐水或含有各种溶剂、焦散剂、腐蚀性化学品的生产液接触时, 弹性体的内部结构遭到破坏并可能会发生化学降解。一方面, 盐穴储氢的垫层气以甲烷为主, 存储的氢气和甲烷混合。另一方面, 地下氢气在高压条件下可能发生的主要化学反应为产生甲烷、硫酸盐还原和乙酰化。盐穴本身的岩层杂质或者 CO_2 使氢气被消耗生成甲烷、乙酸盐、硫化氢。因此, 储氢过程中产生的 H_2S 、 CO_2 和 CH_4 也会加速弹性体的化学降解。Salehi 等^[26]发现当弹性体表面接触存在的 H_2S 时, 它的高反应活性使其部分溶解, 导致其强度、极限伸长率和硬度降低。Fernández 等^[27]研究发现随着 H_2S 浓度的增加, 弹性体表面发生脆性断裂。国内外的专家和学者仍在持续对防止氢气渗透材料进行研究, 通过对水泥、完井金属和橡胶材料的改进可以改善井身的完井条件, 为密封储氢提供可靠屏障。

3.2 地质反应

注入氢气会改变地层孔隙、溶解气体和岩石基质之间的化学平衡, 这可能导致氢气的大量损失、气体污染 (例如产生 H_2S)、矿物溶解或沉淀、氢扩散泄漏等问题。Lassin 等^[28]研究表明氢气在存储过程中所产生的压力可以驱替邻近的孔隙水, 影响温度和相对湿度的变化, 孔隙水-岩石-气体系统的化学反应性也产生变化。地下存储环境影响相当复杂, 比如溶解氢不会直接影响孔隙水的 pH, 但反应溶解的硫酸盐间接影响液体的 pH, 从而导致矿物产生溶解/沉淀反应。如果赤铁矿或含铁黏土和云母等矿物与储存的氢气引起氧化还原反应, 岩石基质的强度和力学性能就会受到影响。矿物的溶蚀作用可能会产生气体泄漏的通道, 从而导致氢气的损失。

如果在断层和井口注入低温的液态氢，将直接导致储层的压力和温度变化。由于焦耳-汤姆逊效应，低温液态氢的温度对地层和井筒的稳定性是个巨大的挑战。除此之外，氢气进入地下，超出压力承受范围的部分岩层会发生形变。Rutqvist^[29]研究了深部沉积层，特别是盐水层的储存问题，对储层应力-应变和微震活动、井的完整性、盖层封闭性能等进行探讨。周期性的注氢产生循环应力的波动可能导致储层内部、井筒和断层附近的储层压实，孔隙度降低，也有可能引起盖层弯曲、产生裂缝和孔洞渗漏。盐穴围岩在受到地震剪切力的作用时，由于泥岩夹层和盐岩的物理力学性质不同，在地震作用下两者的变形不协调，在两者接触面处会发生较大的相对位移差，产生裂缝，影响盐穴整体的稳定性和密封性，因此在选择储氢库区块位置时要考虑到地震对于气库的影响，根据《中国地震动参数区划图》，在气库所在区块位置的相应抗震设防烈度基础上，按照高一烈度的要求设计工程。

氢气在地下条件下反应的程度和速率存在很大不确定性，为了预测化学反应对储存周期的影响，在项目开展前期，通过对目标储库处钻取岩芯，进行力学性能和渗透性能的分析，同时利用数值软件模拟氢气在地下盐穴的储存情况也是必要的。

3.3 微生物反应

微生物在地下的生长情况应纳入储层稳定性评价。Gregory 等^[30]研究表明生物和非生物作用产生的氢都可以被微生物消耗。除了地下固有群落，在储存过程中从地表气体或钻井液可能引入外来微生物。微生物与氢循环消耗、生产和腐蚀息息相关。有很多经常出现的微生物被认为是主要的氢消耗者，如产甲烷菌、硫酸盐还原菌、乙酸细菌等。氢气的损失主要因为微生物反应将 H_2 转化为 CH_4 或 H_2S 等气体。在奥地利实施的 Underground Sun Storage 工程中 3% 的氢气被存在的微生物损耗。在法国拜恩斯(Beynes)项目中 H_2 在 7 个月内减少了 17%，但是 CH_4 的量有所增加，说明 H_2 转化成了 CH_4 。虽然 CH_4 的增加有利于提高热量值，但从长远角度上看不利于绿色低碳的理念，同时也会产生一些不可控的因素。另一方面，微生物产生的 H_2S 也会带来氢储存的风险。随着微生物密度的增加，微生物形成的生物膜或矿物沉淀可能导致孔隙堵塞，从而降低氢气的注入能力。

Berta 等^[31]研究表明在实验过程中，硫酸盐还原和乙酸盐生成的过程中，氢气的消耗较快，但是没有产甲烷，而且反应速率与氢气的分压无关，当盐水的浓度增加到 35 g/L 以上，氢气的消耗才停止，说明在高盐环境会抑制某些微生物的生长。高压也对微生物代谢产生影响。这些研究表明通过温度、卤水浓度、压力等参数可以控制微生物的生长。

综上所述，我国地下盐穴储氢应从以下四个方面入手：防氢渗透材料、地面配套设备、检测氢气净化技术和地下监测综合模拟评估。使用含渗透率较低的二氧化硅黏结剂的水泥、含镍的奥氏体不锈钢及氢化丁腈橡胶作为封隔材料，防止气体漏失及套管开裂、腐蚀和脆化，以改善井身条件。在选择储氢库区块位置时综合考虑安全、经济、地理位置等因素，在气库所在区块位置的相应抗震设防烈度基础上，可以按照高一烈度的要求设计工程。在氢气的“制”“储”“运”环节除了政策规范、设施配套齐全，对氢气的提纯工艺和检测标准也需进一步完善。

由于氢气在地下条件下反应的程度和速率存在很大不确定性，为了预测化学反应对储存周期的影响，在项目开展前期，通过对目标储库处钻取岩芯，进行力学性能和渗透性能的分析，同时利用数值软件模拟氢气在地下盐穴的储存情况。一般储氢压力过小时，储存的气体体积小且盐穴可能发生蠕变收缩，压力过大，氢气可能会通过渗透率较大的盖层或夹层渗透发生泄漏。储氢的压力范围应具有合理的安全稳定性和经济效益。

4 盐穴储氢的展望

4.1 江苏省能源结构特点

江苏省位于我国大陆东部沿海中纬度地区，地势平坦，全省陆区面积 10.72 万平方公里，海岸线长达 954 公里，滩涂面积约 50 万公顷，海域面积 3 万余平方公里，面向西太平洋。海上风能资源对于经济发达的江苏而言，无疑是一种极其宝贵的资源。根据江苏省能源局发布的《江苏省“十四五”可再生能源发展专项规划(征求意见稿)》的规划目标，到 2025 年，江苏省风电新增约 1100 万千瓦，其中海上风电新增约 800 万千瓦；光伏发电新增约 900 万千瓦；各类生物质发电新增约 70 万千瓦；抽

水蓄能新增约 135 万千瓦。由于江苏风能具有典型的季风特征，需要季节间的储能来调节。为此，将风能与盐穴储能相结合能较好解决城市能源消耗的问题。太阳能资源及生物质能资源丰富，江苏省全年辐射量约为 4500~5200 MJ/m²，大部分地区的年均日照数在 1400~3000 h。江苏省境内平原、湖泊较多，土壤适宜多种农作物生长、生物质能资源量丰富。由于江苏省临海，具有丰富的水资源，且降雨量相对丰沛，各地多年平均降水量在 800~1100 mm。这便为电解水制氢，进行过盈风能、太阳能等可再生能源的消纳提供了保障。

随着江苏省可再生能源规模的持续扩大，为提高可再生能源的利用效率，消纳可再生能源的弃电，需要配备大规模的储能系统，对规模日益增大的可再生能源进行调峰储能。如前所述，江苏省在我国氢能产业发展中位居前列，且江苏省在金坛、淮安等地拥有丰富的地下盐穴资源，同时考虑到《江苏省“十四五”可再生能源发展专项规划(征求意见稿)》中所提出的“因地制宜”的发展规划，江苏省的可再生能源也具有良好的大规模发展前景，可再生能源发电的资源条件和地下盐穴储氢的地质条件在江苏这个区位因素上重叠，将可再生能源发电与地下盐穴氢储能结合是适宜江苏省低碳发展的理想途径之一。至于选取具体合适的地下储氢场所，还需根据江苏当地政策、地理位置、区域发

展因地制宜。

4.2 江苏省盐穴特点

江苏省拥有丰富的可再生能源资源，成熟的输气管路，并且拥有金坛、徐州师寨以及淮安等多处丰富的盐矿、盐穴资源，见表 3。其中，金坛盐矿覆盖面积达 60.5 km²。盐层厚度大、夹层少、品位高，金坛盐穴深 1000 m 以上，远低于地下含水层，降水对地下储氢盐穴的安全影响可忽略不计，是建设地下盐穴储氢库的良好场所。研究人员^[32]对金坛盐穴的盖层密封性研究，获得并制备了用于实验的泥岩盖层样品，泥岩岩芯是在深度为 760~870 m 的先导井中获得的。862~869 m 之间泥岩盖层的 40 个样品的突破压力(BP)值为 2.94~66.43 MPa，平均值为 28.48 MPa。根据邓氏盖层标准，当 BP>24.3 MPa 时盖层为优良，30 MPa 时盖层为完美。按此标准，该区泥岩盖层处于优良和完美之间。因此，金坛矿泥岩盖层具有良好的密封性。金坛盐矿深部范围 900~1100 m，原位垂向应力为 20.7~25.3 MPa。这个值比阈值压力大得多。因此，泥岩盖层致密性好，渗透率低，约 10⁻¹⁸ m²。用 50 个盖层样品测量孔隙率。孔隙率最高为 10.4%，最低为 1.4%，平均为 4.3%。这样的平均孔隙率也非常低。从微观结构角度对泥岩盖层进行了研究，该泥岩盖层致密，表面是凹陷和波峰。颗粒非常小，呈碎状或不规则形状，颗粒大小为 2~6 mm，粒子分

表 3 江苏各市用电总量、可再生资源^[33]、长输管道及盐矿分布^[34]情况
Table 3 Distribution of total electricity consumption, renewable resources^[33], pipelines and salt mines^[34] in Jiangsu province

江苏地区	用电总量 /GWh	水资源总量 /亿立方米	风能产量 /GWh	长输管道 /条	盐矿名称	盐矿规模
南京市	632.9	41.5	212.2	21	—	
无锡市	759.5	37.3	94.6	20	—	
徐州市	365.0	47.5	290.0	19	丰县师寨盐矿	东西 10.7 km，南北 6 km，其分布范围约 64 km ² ，含储量约 220 亿吨
南通市	477.3	41.0	62893.3	20	—	
苏州市	1523.3	58.1	7651.4	51	—	
连云港市	194.1	40.7	8796.0	8	—	
淮安市	193.8	48.8	1613.1	7	淮安盐矿	保有资源储量 121.40 亿吨，储量丰富、品质优良、矿床厚
盐城市	358.2	76.5	5503.8	13	—	
扬州市	264.7	28.5	452.5	17	—	
镇江市	267.1	17.8	118.5	14	—	
常州市	522.6	32.0	1805.1	26	金坛盐矿	60.5 平方千米内岩盐储量为 162.42 亿吨
泰州市	306.9	25.6	11490.6	18	—	
宿迁市	222.5	41.5	310.3	12	—	
市域输气干线				241		

布非常紧密, 粒子之间几乎没有间隙。随着离盐岩层距离的增大和深度的增加, 颗粒分布更加紧密, 指标基质表现更紧密。这些都表明金坛盐矿在纵向和横向均具有稳定的区域构造和良好的存储性。统计自公元 320 年以来金坛及周边历史上的地震资料, 震级大于 3 级的共 26 次, 最大 6 级, 一般为 3~5 级。发生在金坛地区的共 7 次, 最大震级 3.5 级。从该地区相应抗震设防烈度来看, 该地区相应抗震设防烈度为 6 度, 在工程建设中按 7 度考虑设计。综合考虑地区的地质资料和地震历史, 金坛盐穴在储氢选址时具有极大的优势。

4.3 盐穴储氢技术路线

以氢气作为储能介质, 对于单个储能系统达到 100 GWh 的规模, 盐穴储氢是唯一具有技术潜力的方法。盐穴储氢具有以下特殊优势: ①岩盐具有致密的基质和极低的渗透率($\leq 10^{-20} \text{ m}^2$), 较好的蠕变特性使其能够自动修复裂隙; ②地下盐矿是非含水层, 密封性好, 不会污染地下水, 而且盐穴采用水溶造腔技术, 相比其他储气库造腔成本低; ③盐穴的工程条件比其他水库更合适, 例如盐穴的空间通常为 10 万~50 万 m^3 , 深度范围为 600~2000 m, 非常经济, 适合储存加压氢气; ④总体而言, 与枯竭的油气藏型储层和含水层相比, 利用盐穴来储存氢气费用最低, 例如, 盐穴仅需要总气体量的 1/3 作为缓冲气, 但枯竭的油气藏型储层和含水层需要总气量的 50%~80% 作为缓冲气。而且, 地下盐穴储氢的能量密度可以达到约 300 kWh/m^3 , 几乎等于锂离子电池的能量密度。一个盐穴可以储存数千吨的氢气, 规模较大。因此, 利用盐穴可以在将来实现氢气的大规模长期储存。

据江苏统计年鉴 2021 年数据显示, 江苏省全社会用电总量 6373.7 亿千瓦时, 其中, 苏南地区用电总量达 3705.5 亿千瓦时(具体城市见表 3)。面对巨大能源需求, 截至 2021 年底, 江苏全省可再生能源累计装机 4443 万千瓦, 占全省装机总量的 28.8%。海上风电装机连续多年位居全国第一, 光伏发电装机位居全国第三, 生物质发电装机位居全国第四。根据目前技术水平, 可采用大规模碱性水电解制氢技术、盐穴储氢技术及天然气管道掺氢技术相结合的技术方案。该技术方可利用电解槽灵活地吸纳电网低谷或可再生能源的电力, 同时也能为电力系统提供低成本的平衡服务。如图 2 所示, 电

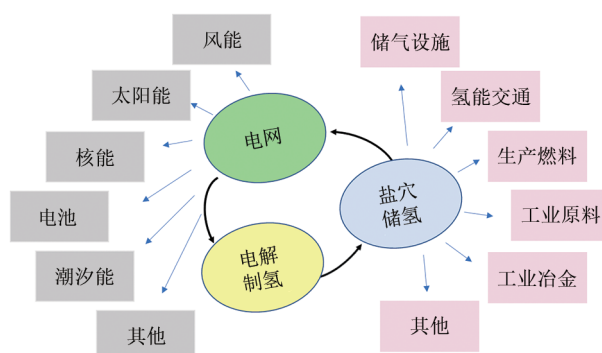


图 2 氢能发展路线

Fig. 2 The technology road mapping of hydrogen energy

网过剩的可再生能源将水分解成氢气和氧气, 也就是将电能转化为化学能。生产的氢气可大规模储存于盐穴中, 也可进一步用于下游的交通、工业或天然气管网注入。据 2021 年 4 季度江苏省天然气行业报告显示, 江苏省天然气长输管道总计 293 条(表 3), 市域输气干线 241 条。而金坛盐盆位于苏南天然气管网中心, “天然气管道掺氢”具有得天独厚的优势, 可顺利解决氢气下游消纳的问题。该方案具有新能源电力消纳、电网削峰填谷、能源大规模、跨季节存储、平衡氢能供需以及低成本等优势。这对于可再生能源发电的剩余电量的大规模存储、绿色清洁氢能源的使用与发展以及节能减排, 发展低碳经济都具有十分重要的意义。

5 结 论

大规模的储氢可以帮助缓解可再生能源发电的主要问题, 如间歇性、季节性和地理限制。满足用氢需求, 推动氢经济实现双碳减排绿色目标。本工作介绍了氢能的发展趋势和相关储氢技术。通过分析比较, 盐穴在大规模地下储氢方向有远大前景。越来越多的国家在全球都大力投资, 而我国在大规模盐穴储氢项目上还较为薄弱。实施过程中存在一些科学问题亟待解决, 如氢腐蚀、微生物反应、地质反应等。为了保障氢能的安全高效存储, 选址应建立科学完善的评估体系, 储存点应具备测量、监视和验证操作系统, 开发技术应借鉴多学科基础和成功经验。以江苏金坛盐穴为例, 结合江苏能源结构背景, 将水电解制氢技术、盐穴储氢技术及天然气管道掺氢技术相结合, 解决“制、储、运”的关键问题, 这对加快氢能产业发展、推动我国能源结

构改革、支撑可再生能源大规模发展、实现交通运输、工业等领域的深度脱碳均能起到重要作用。

参 考 文 献

- [1] BLANCO H, FAAIJ A. A review at the role of storage in energy systems with a focus on power to gas and long-term storage[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 1049-1086.
- [2] SCHULTZ M G, DIEHL T, BRASSEUR G P, et al. Air pollution and climate-forcing impacts of a global hydrogen economy[J]. *Science*, 2003, 302(5645): 624-627.
- [3] KAUR M, PAL K. Review on hydrogen storage materials and methods from an electrochemical viewpoint[J]. *Journal of Energy Storage*, 2019, 23: 234-249.
- [4] ABE J O, POPOOLA A P I, AJENIFUJA E, et al. Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(29): 15072-15086.
- [5] CAGLAYAN D G, WEBER N, HEINRICHS H U, et al. Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(11): 6793-6805.
- [6] TAKACH M, SARAJLIU0107 M, PETERS D, et al. Review of hydrogen production techniques from water using renewable energy sources and its storage in salt caverns[J]. *Energies*, 2022, 15(4): 1-17.
- [7] MICHALSKI J, BÜNGER U, CROTOGINO F, et al. Hydrogen generation by electrolysis and storage in salt caverns: Potentials, economics and systems aspects with regard to the German energy transition[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(19): 13427-13443.
- [8] ZIVAR D, KUMAR S, FOROOZESH J. Underground hydrogen storage: A comprehensive review[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(45): 23436-23462.
- [9] TAYLOR J B, ALDERSON J E A, KALYANAM K M, et al. Technical and economic assessment of methods for the storage of large quantities of hydrogen[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1986, 11(1): 5-22.
- [10] TARKOWSKI R, CZAPOWSKI G. Salt domes in Poland-potential sites for hydrogen storage in caverns[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(46): 21414-21427.
- [11] LINDBLOM U E. A conceptual design for compressed hydrogen storage in mined caverns[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1985, 10(10): 667-675.
- [12] WALTERS A. Technical and environmental aspects of underground hydrogen storage: proceedings of the 1st World Hydrogen Energy Conference, 1976[C]// Florida: March, 1976.
- [13] CARDEN P O, PATERSON L. Physical, chemical and energy aspects of underground hydrogen storage[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1979, 4(6): 559-569.
- [14] HEINEMANN N, BOOTH M G, HASZELDINE R S, et al. Hydrogen storage in porous geological formations-onshore play opportunities in the midland valley (Scotland, UK)[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(45): 20861-20874.
- [15] LEMIEUX A, SHARP K, SHKARUPIN A. Preliminary assessment of underground hydrogen storage sites in Ontario, Canada[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(29): 15193-15204.
- [16] LANKOF L, TARKOWSKI R. Assessment of the potential for underground hydrogen storage in bedded salt formation[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(38): 19479-19492.
- [17] NARAYANAMOORTHY S, RAMYA L, BALEANU D, et al. Application of normal wiggly dual hesitant fuzzy sets to site selection for hydrogen underground storage[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(54): 28874-28892.
- [18] TARKOWSKI R. Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 105: 86-94.
- [19] YUE M L, LAMBERT H, PAHON E, et al. Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 146: 111180.
- [20] CONDON J B, SCHOBERT T. Hydrogen bubbles in metals[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 1993, 207: 1-24.
- [21] REITENBACH V, GANZER L, ALBRECHT D, et al. Influence of added hydrogen on underground gas storage: A review of key issues[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(11): 6927-6937.
- [22] KUTCHKO B G, STRAZISAR B R, HAWTHORNE S B, et al. H₂S-CO₂ reaction with hydrated class H well cement: Acid-gas injection and CO₂ co-sequestration[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, 5(4): 880-888.
- [23] SANTRA A, REDDY B R, LIANG F, et al. Reaction of CO₂ with Portland cement at downhole conditions and the role of pozzolanic supplements[C]//April 20-22, 2009. The Woodlands, Texas. SPE, 2009.
- [24] TEODORIU C, REINICKE K M, FICHTER C, et al. Investigations on casing-cement interaction with application to gas and CO₂ storage wells[C]//June 14-17, 2010. Barcelona, Spain. SPE, 2010.
- [25] PATEL H, SALEHI S, AHMED R, et al. 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*, 2019, 179: 1046-1062.
- [26] SALEHI S, EZEAKACHA C P, KWATIA G, et al. Performance verification of elastomer materials in corrosive gas and liquid conditions[J]. *Polymer Testing*, 2019, 75: 48-63.
- [27] FERNÁNDEZ C, CASTAÑO P. Compatibility behavior of elastomers for PCP applications: Corrosion[C]//March 6-10, 2016. Canada, 2016.
- [28] LASSIN A, DYMITROWSKA M, AZAROUAL M. Hydrogen solubility in pore water of partially saturated argillites: Application to Callovo-Oxfordian clayrock in the context of a nuclear waste

- geological disposal[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2011, 36(17/18): 1721-1728.
- [29] RUTQVIST J. The geomechanics of CO₂ storage in deep sedimentary formations[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2012, 30(3): 525-551.
- [30] GREGORY S P, BARNETT M J, FIELD L P, et al. Subsurface microbial hydrogen cycling: Natural occurrence and implications for industry[J]. *Microorganisms*, 2019, 7(2): 53.
- [31] BERTA M, DETHLEFSEN F, EBERT M, et al. Geochemical effects of millimolar hydrogen concentrations in groundwater: An experimental study in the context of subsurface hydrogen storage[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(8): 4937-4949.
- [32] LIU W, ZHANG Z X, CHEN J, et al. Feasibility evaluation of large-scale underground hydrogen storage in bedded salt rocks of China: A case study in Jiangsu Province[J]. *Energy*, 2020, 198: doi: 10.1016/j.energy.2020.117348.
- [33] WEI X L, DUAN Y W, LIU Y X, et al. Onshore-offshore wind energy resource evaluation based on synergetic use of multiple satellite data and meteorological stations in Jiangsu Province, China[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2019, 13(1): 132-150.
- [34] LIU W, ZHANG X, FAN J Y, et al. Evaluation of potential for salt cavern gas storage and integration of brine extraction: Cavern utilization, Yangtze River Delta region[J]. *Natural Resources Research*, 2020, 29(5): 3275-3290.