

10-20-2021

Trends Observation: Strategy and Development of International Salt Cavern Energy Storage Research

Recommended Citation

(2021) "Trends Observation: Strategy and Development of International Salt Cavern Energy Storage Research," *Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version)*: Vol. Article 17.

DOI: <https://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.20210828001>

Available at: <https://bulletinofcas.researchcommons.org/journal/vol36/iss10/17>

This Information & Observation is brought to you for free and open access by Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version). It has been accepted for inclusion in Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version) by an authorized editor of Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version). For more information, please contact lcyang@cashq.ac.cn, yjwen@cashq.ac.cn.

Trends Observation: Strategy and Development of International Salt Cavern Energy Storage Research

10-20-2021

Trends Observation: Strategy and Development of International Salt Cavern Energy Storage Research

Recommended Citation

(2021) "Trends Observation: Strategy and Development of International Salt Cavern Energy Storage Research," *Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version)*: Vol. 36 : Iss. 10 , Article 17.

DOI: <https://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.20210828001>

Available at: <https://bulletinofcas.researchcommons.org/journal/vol36/iss10/17>

This Information & Observation is brought to you for free and open access by Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version). It has been accepted for inclusion in Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version) by an authorized editor of Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version). For more information, please contact lcyang@cashq.ac.cn, yjwen@cashq.ac.cn.



Trends Observation: Strategy and Development of International Salt Cavern Energy Storage Research

趋势观察：

国际盐穴储能战略与 科技发展态势分析*

随着我国碳达峰、碳中和目标的提出，新能源将成为未来电力供应的重要组成部分。储能技术是解决可再生能源大规模接入、提高常规电力系统和区域能源系统效率、安全性和经济性的迫切需要，因此被称为能源革命的支撑技术和战略性新兴产业，并得到世界各国广泛关注。地下储能常利用枯竭油气藏、含水层、盐穴等进行储能库建设，作为一种大规模能源存储技术具有广阔应用前景，是支撑我国大规模发展新能源、保障能源安全的关键技术。盐穴储能作为地下储能的重要形式之一，可以充分利用地下闲置空间，实现多种形式能量的大规模高效存储，具有储存容量大、储存压力高、清洁环保、安全可靠、经济性好等优点，对于优化能源结构、促进清洁能源生产、保障国家能源安全意义重大，是实现国家可持续发展和绿色发展战略的重要选择之一。

1 国际盐穴储能领域发展现状

盐穴即盐矿开采后留下的矿洞；建设盐穴储库进行压缩空气、天然气、石油和氢气等能源存储，是世界上许多国家普遍采用的方法。

(1) 压缩空气。全球盐穴压缩空气储能电站研究已有 40 多年历史。目前，全球已有 2 座大规模盐穴压缩空气储能电站投入商业运行。1978 年，德国率先建成世界上第 1 座商业性盐穴压缩空气储能电站——亨托夫（Huntorf）电站；该电站输出功率为 321 MW，运行效率为 29%。美国于 1991 年建成了世界上第 2 座商业性的压缩空气储能电站——麦金托什（McIntosh）电站；该电站输出功率为 110 MW，运行效率为 54%。近年来，美国、加拿大等国都部署了盐穴压缩空气储能项目。美国贝瑟尔能源中心（APEX Bethel）开发的压缩空气储能设施项目计划于 2022 年投运。2019 年，加拿大自然资源部和可持续发展技术基金会提供资金支持的 Goderich 压缩空气储能电站投产。我国盐穴压缩空气储能相关研究开发起步较晚，2021 年 9 月，中国山东肥城盐穴先进压缩空气储能电站正式并网发电，同时中盐金坛盐穴压缩空气储能国家示范项目也并网试验成功，我国盐穴压缩空气储能领域的研发和应用取得重大进展。

(2) 天然气。自 1959 年苏联建成世界上第 1 座

* 本文由中国科学院武汉文献情报中心学科情报团队、中国科学院武汉岩土力学研究所油气地下储备与开发研究中心团队共同撰稿，执笔人包括：李娜娜，赵晏强，王同涛，杨春和

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20210828001

资助项目：中国工程院战略研究与咨询项目（2021-XY-23），中国科学院战略性先导科技专项（B类）培育项目（XDPB21）

修改稿收到日期：2021年10月9日

盐穴储气库以来，全球盐穴储气库建设和运营已有 60 年的发展历程。截至 2020 年初，全世界共有 100 余座盐穴储气库投入运行，主要分布在北美洲（47 座）和欧洲（60 座），以美国和德国居多。我国盐穴储气库研究始于 1999 年，与国外相比，我国在地下储气库建设方面仍存在较大差距。2018 年，我国首个盐穴储气库——港华金坛储气库投产。2021 年，亚洲最大的盐穴储气库在湖北潜江开建。依据国家总体部署，我国未来将形成东北储库群、华北储库群、长江中下游储库群和珠江三角洲储库群四大区域性联网协调的储气库群。

（3）石油。盐穴储油是目前大规模石油储备中成本最低、最安全的储油方式。20 世纪 60 年代起，苏联开始重点关注地下盐穴油库建设。20 世纪 70 年代石油危机爆发后，至今已有近 36 个国家实施了盐穴地下石油储备库建设。据统计，美国 90%、德国 50%、法国 30% 的石油储备储存于盐岩库群中。仅美国墨西哥湾沿岸就有 60 座盐穴储油库用于战略石油储备。2020 年，我国原油对外依存度高达 73%，能源安全形势严峻。我国石油储备规模与国际能源署建议的 90 天安全战略储备量差距较大，现有储油库不能满足需求。随着国家战略石油储备计划的推进，地下盐穴储油库在石油储备体系的占比将不断增大——我国盐穴储油库将迎来重要发展机遇。

（4）氢气。地下储氢是英国和美国（石油）化学工业多年来的先进技术。英国提赛德地区和美国得克萨斯州都建有纯氢气地下盐穴储库（95% 氢气及 3%—4% 二氧化碳），这些地下储氢经验已经证明氢气可以进行长期安全存储。过去 10 年，地下储氢受到了广泛关注。以美国为代表的世界发达国家地下储氢技术迅速发展。目前，英国、德国、加拿大、波兰、土耳其和丹麦等都制定了盐穴储氢计划。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。

2 主要国家/地区盐穴储能战略计划及特点

（1）美国：重视盐穴储能在储油、储氢、储氦等方面的全方位应用，以保持其战略能源储备与国际领先地位。
① 储油。1973 年，中东国家实施石油禁运导致全球油价飙升后，美国政界人士首次提出了石油储备的想法。美国国会在 1975 年通过了《能源政策与保护法案》，确立了战略石油储备。1977 年，美国能源部（DOE）制定战略石油储备计划，先后建成了 5 个盐穴战略石油储备基地。
② 储氦。1962 年 12 月起，美国禁止氦出口，并将过剩的氦储存于国家地下氦储库。美国物理学会和材料研究学会建议美国应该保持氦的非国防储备。
③ 储氢。过去 30 年里，美国能源部化石能源办公室一直致力于开发和推进氢能源技术，大型储罐和地质储氢是其研发项目的重要组成部分。2020 年，美国能源部先后发布《氢能计划发展规划》和《储能挑战路线图》，其中氢储能作为重要的储能技术被提及；美国能源部提出了未来 10 年及更长时期氢能研究、开发和示范的总体战略框架，地质储氢的识别、评估和论证被列为关键技术领域研发及示范重点。2019 年，位于美国犹他州的“先进清洁能源储存”（Advanced Clean Energy Storage）项目启动；该项目计划到 2025 年在该州德尔塔镇附近建立一个大型绿色储氢中心，并将电解氢储存在 100 个巨大的地下盐穴中，以平衡季节性的能源需求。

（2）欧盟：积极部署盐穴储氢项目计划，集中于工业规模盐穴储氢研究。欧盟委员会预测，到 2050 年，氢在欧洲能源结构中的比重将由 2019 年的不到 2% 上升到 13%—14%。2012—2014 年，德国、法国和英国等 7 个国家的 12 家单位发起了大型地下储氢项目“地下氢”（HyUnder），并首次在德国、英国、法国、荷兰、罗马尼亚和西班牙等范围内评估了地下盐穴长期大规模储氢的潜力。2021 年，首个由欧盟支持的盐穴工业规模绿色储氢项目 HyPSTER 启动，

项目首先进行地下盐穴和地表工程研究，然后将进入现场试验阶段，旨在测试盐穴中绿色氢的生产、储存及该方法在欧洲其他地点的可复制性。2020年1月，欧盟“燃料电池与氢能联合行动计划”（FCH-JU）发布招标公告，拟投入9300万欧元支持氢能和燃料电池领域24个技术主题的研究，其中与盐穴储氢相关的主题包括：小型盐穴中可再生氢气存储的循环测试，盐穴进行氢气循环存储的可行性和中试规模示范。

（3）德国：重视盐穴储氢发展，将氢视为能源转型成功的关键。德国高度重视“绿色氢能源”，将氢能视为德国能源转型成功的关键。2020年，德国发布总投资90亿欧元的《国家氢能战略》，推出38项具体措施，涵盖氢的生产制造和应用等多个方面，研究将涉及地下储氢的可行性。德国联邦政府的“储能资助倡议”将地质储能列为具有战略性意义的资助领域，计划于2023年建设3500吨氢气的盐穴储存示范项目。2019年，“德国东部氢能存储和解决方案”（Hydrogen Power Storage & Solutions East Germany）项目包含为期2年的“洞穴储氢研究”（H₂ Research Cavern）项目，其主要任务是开发盐穴储氢研究平台。作为该研究项目的一部分，德国中部的地下氢储存试点项目于2019年5月1日启动。该设施将成为欧洲大陆上第一个盐穴储氢设施，也是世界上首个存储可再生绿色氢的地下设施。2020年，德国联邦交通和数字基础设施部（BMVI）投资近600万欧元资助“机动性氢气洞穴”（HyCAVmobil）项目。其中，德国航空航天中心（DLR）负责研究和评估如何将氢储存在盐穴中，并计划在实验室规模的测试成功之后，在德国奥尔登堡能源公司（EWE）经营的一个盐穴中进行测试。

（4）英国：将地下储氢作为实现净零排放的关键技术之一，并开展相关试验研究。2017年，英国发布《现代工业战略》（*Building our Industrial Strategy-Green Paper*），将储能确定为英国成为全球领导者的

八项技术之一。2020年11月，英国政府推出一项新计划“绿色工业革命十点计划”，希望于2030年实现5GW的低碳氢产能，并制定了“英国氢能网络计划”（Britain's Hydrogen Network Plan），这将有效推动英国地下储氢的发展。2021年8月，英国发布首个国家氢能战略，盐穴储氢作为氢气储运方案被提及。英国地质调查局（BGS）强调了地质学在支持英国长期能源转型中的重要性，指出地下储氢是英国实现净零排放的4项技术之一。为了支持更多地使用地下储能技术，英国地质调查局正在进行试验，旨在研究盐穴的可循环使用性和安全性。

3 国际盐穴储能领域的重要研究方向态势与热点

（1）盐穴储氢蓬勃发展。氢能将是实现全球能源结构清洁、低碳发展的关键路径之一，目前这一全球共识正逐渐形成。欧洲氢能组织（Hydrogen Europe）发布的《为实现欧洲绿色协议的2×40GW绿氢行动计划》（Green Hydrogen for a European Green Deal A 2×40GW Initiative）指出，到2030年，氢在欧洲的使用量将比2015年增加1倍多，达到665TW·h。全球著名能源咨询公司伍德麦肯兹（Wood Mackenzie）研究表明，由太阳能电解生产的绿色氢，到2030年将在澳大利亚、德国和日本达到成本平价，而盐穴储氢将为绿色氢生产提供储备设施。已有研究表明，盐穴储氢成本至少比电池储氢成本低100倍。美国能源部可再生能源实验室与艾塞尔能源公司在科罗拉多州的风能-氢能示范项目论证了压缩氢气储能的可行性，预计可能成为储能技术中的重要方式之一。欧洲具有在层状盐岩和盐丘中储存84.8PW·h氢气的技术潜力。我国尚无盐穴储氢实践，且面临储层和盖层地质完整性、氢气地下化学反应、井筒完整性、采出纯度和材料耐久性等问题制约，因此有必要开展防氢渗透氢脆材料系列、储氢库地面配套设备、氢气除杂技术和地下微生

物化学反应评估等方面的研究。

(2) 压缩空气储能进入重要发展机遇期。以风能、太阳能为代表的可再生能源是能源低碳转型的重要方向，据国际能源署（IEA）预测，2030年全球可再生能源发电量占全球总发电量的比例将达到33%。2020年，我国弃风电量约 1.66×10^{10} kW·h，弃光电量 52.6×10^8 kW·h。构建以新能源为主题的新型电力系统是保障我国电力安全、能源安全的核心，也是实现碳达峰、碳中和目标的关键。在我国风能、太阳能等可再生能源与消费中心地区严重逆向分布的背景下，压缩空气储能是提高未来能源系统可控性和灵活性的关键技术。我国已将压缩空气储能纳入国家“十四五”规划，这为盐穴压缩空气储能的研究提供了有力支撑。鉴于我国盐矿的特殊地质条件，压缩空气储能对于盐穴腔体筛选的相关标准及腔体改造完成后的井筒稳定性提出了更高要求，因此急需解决盐穴筛选与评价、储能盐穴井筒工程技术、运行状态的储库完整性监测等问题。

(3) 盐穴储气处于黄金发展期。随着全球能源结构转型，未来10—20年，全球地下储气库数量和规模将会随能源需求量增长而扩大。据国际天然气联盟（IGU）预测，到2030年全球地下储气库调峰需求量将达到 5.03×10^{11} m³，这需要在现有地下储库基础上新建地下储库183座，预计需要新增工作气量 1.406×10^{11} m³才能满足今后的调峰需求。随着“西气东输”、中俄东线天然气管道、“川气东送”和中缅油气管道的运行与启动，为了提高管道利用率，解决现有储运基础设施工程建设能力/速度与国家需求不匹配问题，地下储气库的建设呈现出高需求态势，未来10年将是我国储气库建设的高峰期。虽然我国已经具备在超薄多夹层盐穴中建设储气库的技术能力，但盐穴储气库建设仍面临造腔效率低、复杂老腔改造难度大、缺乏适宜建设储气库的盐矿资源等问题，而盐穴腔体精确测量技术、腔体体积控制技术、环保节能造腔技术、复杂地

质条件下的造腔技术研究是储气库建设的重点与难点问题。

(4) 盐穴电池储能系统发展前景广阔。利用盐穴开展液流电池储能，可以大幅提高装机容量，且占地面积小、成本低，具有广阔的商业应用前景。德国率先开展了盐穴储能电池系统的研究工作，德国能源公司Ewe Gasspeicher GmbH与耶拿市弗里德里希·席勒·耶纳大学计划在Jemgum天然气储存设施所在地建造一套全球最大的氧化还原液流电池“盐卤发电”（brine4power）项目。该电池系统首次利用地下盐穴来储存电解液，预计将在2023年底投入运营，电池容量可达700 MW·h，可为7.5万个家庭提供1天所需电力。目前，中国盐穴电池储能技术研究尚属空白。盐穴电池工作需要频繁的注采频率，注采频率对盐穴稳定运行的影响规律需要进一步研究。

4 对策与建议

《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》指出，研究与开发新型大规模储能技术对于中国未来能源结构转型及能源互联网、智能电网建设具有重要意义。我国盐穴储能利用方面的研究起步较晚，与欧美等国相比，盐穴地下储库的建设数量和技术水平仍有较大差距。目前，我国被利用的盐穴数量不多，同时利用盐穴进行能源存储已经成为国内研究热点。针对我国盐穴储能发展存在的问题，提出以下4点建议。

(1) 选择适合我国国情的盐穴储能发展道路。以美国、德国为代表的发达国家在盐穴储库建设运营和综合利用方面经验丰富。我国盐穴储能的发展应依据岩盐赋存特点，合理借鉴国外案例与经验，选择适合我国国情的盐穴储能发展道路。

(2) 深化盐穴储能产业规划、政策与资金支持。加强国家层面的盐穴储能顶层设计，科学规划盐穴储能上下游产业链发展，完善储能产业规划和科技创新

政策体系，设立盐穴储能专项资金，加大企业、科研创新提供资金支持力度。

(3) 积极开展关键技术攻关，形成建设和运行技术体系。技术研发升级对盐穴储能发展至关重要，国内相关部门应联合攻关；针对我国盐穴储能面临的问题，推动盐穴储能关键技术研发和产学研深度融合，强化产业自主创新力度。充分利用已有中盐金坛盐穴压缩空气储能项目，突破关键核心技术，实现自主知

识产权。

(4) 打造产业集群，促进盐业与盐穴储能产业的有机协同发展。合理规划设计，开展以盐穴造腔为目的的采卤，促进盐业转型发展；积极探明已有盐穴资源情况、探索盐穴利用途径、深入研究盐穴储能运行管理问题，探索完善储能运行商业模式，优化产业发展路径，提高盐穴综合利用水平。

■责任编辑：文彦杰