

地下储气库关键技术进展与能源转型中的战略作用

史留江^{1,*}, 范明明², 徐大宝²

¹中化能源物流有限公司, 北京, 中国

²中国石油天然气管道工程有限公司, 河北廊坊, 中国

*通讯作者

【摘要】本文综述了地下储气库关键技术的发展现状及其在能源转型中的战略作用。随着全球能源结构向低碳化转型, 地下储气库作为天然气供应链的重要环节, 在保障能源安全、调节供需平衡、促进可再生能源消纳等方面发挥着关键作用。文章详细分析了地下储气库选址与设计、注采工艺、监测与管理等关键技术的进展, 探讨了地下储气库在能源转型中的多重角色, 包括天然气供应安全保障、可再生能源消纳支持、碳捕集与封存应用等。最后, 文章展望了地下储气库技术的未来发展趋势, 强调了其在推动能源结构优化和实现碳中和目标中的重要作用。

【关键词】地下储气库; 能源转型; 天然气储存; 可再生能源; 碳捕集与封存

1.引言

随着全球气候变化问题日益严峻, 能源结构向低碳化转型已成为国际社会的共识^[1-3]。2023 年全球能源消费结构如图 1 所示, 在这一背景下, 天然气作为相对清洁的化石燃料, 在能源转型过程中扮演着重要角色^[4]。地下储气库作为天然气供应链的关键环节, 不仅能够有效调节天然气供需平衡, 还在促进可再生能源消纳、支持碳捕集与封存等方面发挥着重要作用^[5-7]。面对复杂的地缘政治局势和极端气候等多重因素的影响, 出于国家能源安全的迫切需求, 应对可能出现的能源危机, 天然气储备设施建设被提升到了战略层面^[8]。

全球能源转型加速推动化石能源向可再生能源过渡, 但风电、光伏的间歇性特征导致能源系统亟需大规模储能设施调节供需平衡。天然气作为低碳过渡能源, 通过地下储气库实现跨季节储存与快速调峰, 已成为保障能源安全的关键基础设施。截至 2024 年, 全球建成储气库 783 座, 工作气量达 4290 亿立方米, 占天然气消费量 11%^[9]。含枯竭气田/油藏储气库占 63%, 盐穴 31%, 含水层 6%), 2010-2022 年复合增长率 2.1%。中国储气库工作气量仅占消费量 5.2%, 远低于国际平均水平^[10], 技术突破与战略布局需求迫切。

全球 136 个国家碳中和承诺推动能源系统向"高比例可再生能源+氢能"架构转型, 其间歇性特征催生大规模储能需求。主要国家

的储气库工作气量对比如表 1 所示。地下储气库凭借其超大容量 (单库可达 300 亿 m³)、长周期存储和经济性优势 (单位成本 0.3\$/MMBtu), 成为平衡能源供需时空错配的核心基础设施。2022 年欧盟通过《储气库强制填充法案》要求成员国库存率达 80%以上, 印证其战略地位提升。



图 1.2023 年全球能源消费结构

表 1.主要国家储气库工作气量对比 (2023 年, 数据来源: EIA)

国家	工作气量 (亿 m ³)	占消费比例
美国	1480	15%
欧盟	1100	18%
俄罗斯	720	20%
中国	220	5.2%

近年来, 随着能源转型的深入推进, 地下储气库技术也取得了显著进展。从选址设计^[11]到注采工艺^[12-13], 从监测系统到安全管理, 各项关键技术不断突破创新, 为地下储气库的高效、安全运营提供了有力支撑。本文旨在全面回顾地下储气库技术的发展现状, 分析其关键技术, 并探讨未来发展趋势

势。通过梳理地下储气库的基本概念、主要类型、关键技术以及国内外发展现状, 本文将为相关领域的研究人员和工程实践者提供有价值的参考, 同时为地下储气库技术的未来发展提供思路 and 方向。

2. 地下储气库概述及发展现状

2.1 概述

地下储气库是指利用地下地质构造或人工洞穴储存天然气的设施。其主要功能包括调节供需平衡、战略储备、应急调峰和优化输气管网运行等。根据地质条件和储存介质的不同, 地下储气库可分为三种主要类型: 枯竭油气藏型、含水层型和盐穴型^[14-15]。

枯竭油气藏型储气库是利用已经开采完毕或接近枯竭的油气藏改建而成。这类储气库具有密封性好、储气量大、开发成本相对较低等优点, 是目前应用最广泛的储气库类型。含水层型储气库则是利用地下含水层的孔隙空间储存天然气, 通常需要注入气体将水驱替出来。这种类型的储气库适用于缺乏枯竭油气藏的地区, 但开发难度和成本较高。盐穴型储气库是通过溶解地下盐层形成洞穴来储存天然气, 具有注采灵活、循环效率高的特点, 但单库容量相对较小。

2.2 国外储气库

自 1916 年美国在纽约布法罗附近利用 ZOAR 枯竭气藏建成首座储气库, 距今已有 100 余年历史。美国现存储气库总数约 428 座, 占全球 33%。总工作气量超过 4 万亿立方英尺 (约 1130 亿立方米)。盐穴储气库: 198 座 (46%), 主要位于德州、密西西比盆地, 单库容量 1.5-5 亿 m^3 。枯竭油气藏: 205 座 (48%), 集中在阿巴拉契亚盆地, 含水层: 25 座 (6%), 中西部为主, 工作气量占全球 25%。2023 年新增盐穴储气能力 50 亿立方米, 页岩气产区配套储气设施投资增长 12%。其中德州 Spindletop 盐穴库实现 AI 动态优化注采 (循环效率提升 40%), 路易斯安那州 Henry Hub 储气库群与期货市场联动定价。加拿大拥有约 50 个地下储气库, 总工作气量超过 400 亿立方米。主要包括 Iona 储气库 (26 亿 m^3 工作气量, 北美最大含水层储气库)、Dawn Hub 储气枢纽 (连接 12 座盐穴库, 服务美加输气网)。德国总量为 47 座 (2024 年), 储气容量 231 亿 m^3 , 主要类型分布: 盐穴库占比 72% (如 Jemgum 气库深达 2,500 米)、枯竭气田库 26% (Aachen 气田改造)。欧盟建成 134 座储气

库, 工作气量达 $1\,100 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[16], 约占欧洲天然气年消费量的 20%。其中盐穴储气库占比相对较高^[17], 占总工作气量的 15%。

欧盟 REPowerEU 计划投资 120 亿欧元扩建储气库, 重点项目: 德国 Rehden 盐穴储气库二期 (2024 年投运, 容量+8 亿立方米) 罗马尼亚 Transgaz 黑海盐层储气库 (2025 年试点注气), 乌克兰西部储气库成为欧盟备用枢纽, 2025 年运营数量达 48 座。

美国能源部《储气基础设施法案》推动: 墨西哥湾盐穴储气带新增 12 座 (路易斯安那州占 70%), 页岩气产区 (Marcellus, Haynesville) 配套小型储气库 23 座。加拿大艾伯塔省含水层储气库突破 50 座, 服务 LNG 出口调峰。

从国外百年建库实践来看, 储气库主要集中在欧美发达国家, 工作气量占天然气年消费量的 15%~20%, 高于世界平均水平 (10.4%)。形成了中浅层中高渗气藏、衰竭式和气驱开发油藏、浅层高渗构造完整圈闭水层以及厚层高品位盐穴建库技术。

2.3 中国储气库

中国自 20 世纪 90 年代开始在环渤海湾地区开展储气库选址探索, 在借鉴美国等国外经验的基础上, 设计建成了国内首个枯竭气藏型储气库-大港板桥储气库, 其特点是依赖单一地质类型, 调峰能力有限。2000 年-2020 年中国储气库建设进入到快速发展期, 尤其是盐穴储气库技术突破 (如金坛储气库), 形成“东北、华北、西北”三大储气库群布局。从 2021 年开始, 开始进入高质量发展期, 智能化监测、多气种混储 (如氢能掺储试验) 等多项创新技术升级。至 2023 年底, 累计建成储气库 30 座, 工作气量达到 $230 \times 10^8 \text{ m}^3$, 约占天然气年消费量的 5.8%, 日调峰能力超过 $2.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。5 年的高速发展使我国储气库储气能力实现了从 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$ 到 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的翻番增长, 成效显著。

3. 地下储气库关键技术

地下储气库的建设与运营涉及多项关键技术, 其中最为重要的是地质评价与选址技术、建库工程优化技术、注采工艺技术以及监测与安全控制技术。选址与地质评价是地下储气库建设的基础, 需要综合考虑地质构造、储层特性、密封条件等因素, 通过地质勘探、数值模拟等手段进行详细评估, 以确保储气库的安全性、可靠性和经济性。

3.1 地质评价与选址技术

地下储气库的地质评价已形成“三维建模—多场耦合—风险预测”技术体系。通过高精度地震勘探与测井数据融合,实现储层孔隙度、渗透率的三维动态建模,精度提升至米级。多场耦合分析技术突破传统单一渗流场限制,整合地质力学—热力学—化学场耦合模型,可预测储层在30年运行周期内的形变规律(如北美 Aliso Canyon 储气库通过耦合模拟将盖层完整性评估可靠性提升40%)。张建国等^[18]为解决低渗透强非均质岩性气藏侧向封闭不明确、单井产能低等带来的储气库选址评价难、方案优化设计难等诸多问题,开展了岩溶型碳酸盐岩气藏和辫状河三角洲砂岩气藏侧向封闭性评价、碳酸盐岩储层裂缝表征与三维地质建模、大面积强非均质气藏局部甜点建库模式优化等研究,并形成了低渗透岩性气藏型储气库地质评价关键技术。

数字孪生技术推动选址决策智能化,中石油研发的“储气库数字脑”系统集成12类地质参数和8种风险因子,实现选址方案自动优化。在盐穴选址中,德国 Epe 储气库利用机器学习分析盐岩纯度与蠕变特性,建库周期缩短18个月。针对枯竭气藏改建,俄罗斯开发储层压力-温度双控模型,使库容利用率突破85%。未来发展方向聚焦于纳米CT扫描技术应用及人工智能驱动的动态地质模型构建。

3.2 建库工程优化技术

储层改造技术实现三大突破:①水力压裂转向技术使低渗储层导流能力提升3-5倍;②CO₂泡沫酸化技术降低储层伤害率至12%以下;③暂堵剂智能匹配系统在华北储气库应用中增产效果达30%。井网设计引入“鱼骨状”立体井网结构,配合数值模拟优化,注采速度提升25%(如某地区H储气库单井日注气量达80万方)。

盐穴储气库快速建库技术取得革命性进展:双井油垫法建库周期压缩至18-24个月(传统方法需5-7年),江苏金坛储气库通过超声波溶腔监测技术使腔体形态控制精度达97%。全生命周期优化方面,中石化开发储气库数字孪生平台,集成地质力学模拟、井完整性管理等6大模块,实现动态注采策略优化。典型案例显示,该技术使库容利用率提高15%,运营成本降低20%。

3.3 注采动态控制技术

注采动态控制技术直接影响储气库的运营效率和经济性。主要包括注气压缩、采气处理、井筒完整性管理等^[19-20]。先进的注采工艺可以提高储气库的调峰能力,延长使用寿命,降低运营成本。监测与安全控制技术是保障储气库安全运行的关键,包括压力监测、微地震监测、气体泄漏检测等。通过建立完善的监测系统和应急预案,可以有效预防和控制潜在风险,确保储气库的安全稳定运行。

多相渗流理论突破体现为:建立考虑应力敏感效应的非达西渗流方程,预测精度较传统模型提升40%;裂缝型储层动态描述技术实现气水前缘追踪误差<5%。智能调控系统集成实时监测数据与机器学习算法,中石油在华北储气库部署的智能控制系统使注采转换时间缩短至4小时,能耗降低18%。

储采协同优化方面,构建考虑季节调峰、应急供气等多目标优化模型,结合LNG接收站与管网进行联合调度。德国 Rehden 储气库通过“气电联动”模式,在2021年能源危机中实现单日应急供气量3000万方。数字孪生技术实现注采过程实时仿真,预测周期从周级缩短至小时级。

3.4 安全监测与预警技术

分布式光纤传感技术实现温度应变连续监测,定位精度达0.5米。微震监测系统在盐穴储气库中可识别0.1级微震事件,预警准确率超90%。人工智能预警系统采用深度置信网络,对泄漏风险预测时效提前72小时。完整性管理技术形成“监测-评估-修复”技术链,包含22项关键指标监测体系。英国 Rough 储气库应用此技术使事故率下降60%,检测成本降低35%。

4. 能源转型中的战略作用

在能源转型过程中,地下储气库发挥着多重战略作用。首先,作为天然气供应链的重要环节,地下储气库有效保障了天然气供应安全。它能够调节季节性用气波动,应对突发事件导致的供应中断,确保能源系统的稳定运行。其次,地下储气库在支持可再生能源消纳方面发挥着关键作用。通过储存过剩的可再生能源制氢或合成天然气,地下储气库能够平抑可再生能源发电的波动性,提高电网的稳定性和可靠性。

此外,地下储气库在碳捕集与封存(CCS)领域也展现出巨大潜力。枯竭油气藏和咸水层储气库可作为理想的二氧化碳封存

场所，为实现碳中和目标提供重要技术支持。地下储气库还能够储存氢气等新型清洁能源，为未来能源结构的多元化转型奠定基础。

4.1 电力系统灵活性调节

储气库与燃气电站形成“双蓄能”系统，德国实现 1500MW 级风光波动 30 分钟内平衡。区域灵活性资源优化模型整合储气库、抽蓄电站和需求响应，美国 PJM 电网应用后调节成本降低 25%。“储气库-氢能”混合储能模式在荷兰试点，系统响应速度达分钟级。未来需突破气电耦合调度算法，实现跨区域灵活性资源协同。

快速调峰能力：储气库支持燃气机组 5 分钟内从满负荷降至 30%，弥补风光发电的分钟级波动（欧盟电网实测弃风率下降 4.7%）。

绿电转化枢纽：Power-to-Gas 技术将弃风电量转化为氢能储存，丹麦 HyStock 项目实现 60% 电能-燃气转化效率。

4.2 可再生能源消纳枢纽

储气库作为跨季节储能载体，可消纳夏季过剩风电（如英国将 30% 风电转化为储气）。氢能耦合方面，奥地利 Underground Sun Conversion 项目实现风电制氢地下储存，能量转换效率达 68%。技术瓶颈在于氢脆防控，当前掺氢比例限制在 20% 以下。需发展氢敏传感器和新型合金套管材料。

多能互补系统：储气库与 LNG 接收站、氢储罐联动调度，提升区域可再生能源消纳率 12%-15%（唐山港试点数据）。

跨区域调峰网络：中俄东线储气库群实现 3000km 范围内峰谷差平衡，降低管网压力波动 40%。

4.3 碳中和关键路径

储气库助力碳中和体现于：①年减少 CO₂ 排放 2.8 亿吨（全球数据）；②与 CCUS 耦合形成闭环，挪威 Sleipner 项目年封存 CO₂ 百万吨级；③碳交易机制下，欧盟储气库运营商可获得 8 欧元/MWh 的容量补贴。需构建储气库碳足迹全生命周期评价体系。

5. 挑战与未来方向

我国的天然气储气库建设起步较晚，发展历程较短，受统筹规划欠缺、行业标准模糊及储备能力不足问题的限制^[21]，储气库建设的前进步伐十分缓慢，仍有需要关键的技术需要突破。

5.1 地质约束与技术瓶颈

复杂构造区选址成功率不足 40%，需发展亚地震级断层识别技术。盐穴老腔改建面临腔体稳定性难题，法国开发形状记忆合金支撑技术初见成效。注采速率提升受限于储层伤害机理，纳米流体技术或成突破口。

5.2 低碳化与智能化转型

地热协同开发模式在德国实现储气库余热发电 1.2MW。数字孪生体需突破多尺度建模技术，实现分子级渗流模拟。区块链技术应用用于储气交易，试点项目交易效率提升 50%。

5.3 政策与市场机制

欧盟推出储气库容量证券化产品，流动性提升 30%。我国需完善季节性价差机制，建议建立储气容量期货市场。跨国储气库联盟面临运营规则差异，需建立 ISO 国际标准体系。展望未来，地下储气库技术将朝着智能化、多元化和综合化方向发展^[22-23]。智能化管理技术，如大数据分析、人工智能预测等，将提高储气库的运营效率和决策水平。新型储气库的开发，如废弃矿井改造、水合物储气等，将拓展储气库的应用范围。此外，地下储气库与可再生能源、氢能等领域的结合，将推动多能互补系统的形成，为能源转型提供新的解决方案。

人工智能和大数据技术的应用将进一步提高储气库的运营效率和安全性。数字化双胞胎技术的引入，可实现储气库全生命周期的智能化管理。在多功能化方面，地下储气库将不仅限于储存天然气，还将拓展至氢气储存、压缩空气储能等领域，成为综合能源系统的重要组成部分。

技术创新将继续推动地下储气库的发展。新型材料和新工艺的应用将提高储气库的注采效率和储存容量。同时，针对不同类型储气库的特有技术挑战，如盐穴储气库的稳定性控制、含水层储气库的气水界面管理等，也将成为未来研究的重点方向。

6. 结论

地下储气库作为天然气供应链的重要环节，在保障能源安全、调节供需平衡方面发挥着不可替代的作用。随着技术的不断进步，地下储气库在选址评价、注采工艺、监测控制等方面取得了显著进展，为天然气的安全高效储存提供了有力支撑。未来，智能化管理、新型储气库开发和多能互补将成为地下储气库技术发展的重要方向。

然而，地下储气库技术的发展仍面临诸

多挑战,如复杂地质条件下的安全评估、高循环应力下的储层稳定性、大规模氢能储存等。这些挑战也为相关领域的研究和创新提供了机遇。通过持续的技术创新和跨学科合作,地下储气库技术将在未来能源体系中发挥更加重要的作用,为实现能源安全、高效、可持续发展做出贡献。

地下储气库作为能源系统中的关键基础设施,在能源转型过程中发挥着不可替代的战略作用。随着关键技术的不断进步,地下储气库将在保障能源安全、支持可再生能源发展、推动碳减排等方面做出更大贡献。未来,地下储气库技术的智能化、数字化和多功能化发展,将进一步增强其在能源转型中的战略价值,为实现可持续能源未来提供有力支撑。

参考文献

- [1]柴麒麟,刘伯翰,马玉洁,等.能源转型与技术创新的全球盘点:进展与评估[J].气候变化研究进展,2024,20(6):747-756.
- [2]吴珉颖,孙文字,祝婧祎.中国天然气市场2020年回顾与展望[J].国际石油经济,2021,29(06):78-86.
- [3]NEWELL R, RAIMI D, ALDANA G. Global Energy Outlook 2019: The Next Generation of Energy [J]. Resources for the Future, 2019: 8-19.
- [4]郑得文,张刚雄,魏欢,等.中国天然气调峰保供的策略与建议[J].天然气工业,2018,38(4):153-160.
- [5]完颜祺琪,李国欣,朱华银,等.中国天然气地下储气库重大理论、关键技术进展与展望[J].天然气工业,2025,45(01):153-163.
- [6]丁国生,李春,王皆明,等.中国地下储气库现状及技术发展方向[J].天然气工业,2015,35(11):107-112.
- [7]李建君.中国地下储气库发展现状及展望[J].油气储运,2022,41(07):780-786.
- [8]国家发展改革委,国家能源局.关于印发《“十四五”现代能源体系规划》的通知:发改能源(2022)210号[EB/OL].(2022-01-29)[2024-10-20].
- [9]国家能源局.中国天然气发展报告(2024)[EB/OL].(2024-07-23).
- [10]张士杰,刘国良,廖伟,等.大型边底水气藏型储气库多周期运行存在问题及技术对策——以呼图壁储气库为例[J].中外能源,2020,25(02):50-57.
- [11]曾大乾,胡宗全,糜利栋,等.不同类型地下储气库库址评价标准体系及筛选平台[J].天然气工业,2022,42(S1):117-124.
- [12]王皆明,李春,孙军昌,等.气藏型储气库井注采动态不稳定流分析方法[J].石油勘探与开发,2022,49(01):156-165.
- [13]范宇,高新平,宁飞,等.基于多周期注采的气藏型地下储气库储层渗流规律[J].天然气工业,2023,43(10):103-111.
- [14]BAKHTIARI M, SHAD S, ZIVAR D, et al. Coupled hydro-mechanical analysis of underground gas storage at Sarajeh field, Qom formation, Iran[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 92: 103996.
- [15]贾善坡,郑得文,金凤鸣,等.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),2016,47(03):857-867.
- [16]IGU. Storage committee-underground gas storage database [DB/OL].
- [17]潘楠.美欧俄乌地下储气库现状及前景[J].国际石油经济,2016,24(7):80-92.
- [18]张建国,夏勇,赵晨阳,等.鄂尔多斯盆地低渗透岩性气藏型地下储气库地质评价关键技术[J].天然气工业,2023,43(10):55-63.
- [19]唐立根,王皆明,丁国生,等.基于开发资料预测气藏改建储气库后井底流入动态[J].石油勘探与开发,2016,43(1):127-130.
- [20]郑得文,王皆明,丁国生,等.气藏型储气库注采运行优化技术[M].北京:石油工业出版社,2018.
- [21]马新华,郑得文,申瑞臣,等.中国复杂地质条件气藏型储气库建库关键技术与实践[J].石油勘探与开发,2018,45(3):489-499.
- [22]糜利栋,曾大乾,刘华,等.天然气地下储气库智能化建设关键技术及其发展趋势[J].石油与天然气地质,2024,45(2):581-592.
- [23]常海滨,多堂坤,赵昕铭,等.地下储气库数字孪生框架设计[J].钻采工艺,2025,48(1):173-179.