doi: 10.19388/j.zgdzdc.2021.04.12

引用格式:郭朝斌,李采,杨利超,等. 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,2021,8(4):109-119. (Guo C B,Li C,Yang L C, et al. Research review and engineering case analysis of geological compressed air energy storage[J]. Geological Survey of China,2021,8(4):109-119.)

压缩空气地质储能研究现状及工程案例分析

郭朝斌¹,李采¹,杨利超¹,刘凯¹,阮岳军²,何阳² (1.中国地质科学院,北京 100037; 2.湖南省地质调查院,湖南长沙 410029)

摘要: 压缩空气地质储能可为大规模部署风能、太阳能等间歇性清洁能源提供灵活、高效的储能方案,从而促进 能源结构转型,加快碳达峰、碳中和战略目标的实现。在介绍压缩空气地质储能概念与分类的基础上,从理论分 析、技术方法、经济成本等方面总结了该领域的研究现状与发展趋势,详细叙述了利用盐腔、含水层、枯竭油气田 作为储气库的典型储能工程案例及关键参数与经验,分析了压缩空气地质储能在我国的应用前景和不同储气库 的特性及其关键影响因素,指出不同类型储气库地质储能的适宜条件,为促进清洁能源可持续开发利用提供科学 参考。

关键词:地质储气库;压缩空气储能;清洁可再生能源;含水层
中图分类号: P642; X14; P618.130.2
文献标志码: A
文章编号: 2095 - 8706(2021)04 - 0109 - 11

0 引言

"减碳"与"增汇"是我国 2030 年前实现碳达 峰、2060 年前实现碳中和的根本措施。调整能源 结构、降低煤炭及石油消耗是从源头上减少 CO₂ 排放的根本途径。大力发展风能、太阳能等清洁 可再生能源是调整能源结构、解决能源供应矛盾 和应对气候变化的重要措施。但由于大部分清洁 可再生能源具有分布分散、间歇性、可控性差等特 点,另外电网本身只能传输电能,不能储存电能, 因此清洁可再生能源与电网在时间、空间和强度 上并不匹配,特别是在用电低谷期,大量清洁可再 生能源难以得到有效利用而只能被舍弃。例如, 2020 年全国因电网消纳不足而放弃风能发电电 量(弃风电量)约 166 亿 kW·h,全国弃光电量 52.6 亿 kW·h,特别是在西北地区弃风率仍保持 较高比例^[1]。因此,储能技术是影响未来能源格 局的关键技术之一,对提高能源效率,促进新能源 相关产业发展,推动能源战略转型以及加快碳达 峰、碳中和战略目标的实现具有重大意义。本文 对压缩空气地质储能的概念、分类、发展历史、研 究现状以及发展趋势进行了总结,分析了以盐腔、 含水层、枯竭油气田为储气库的代表性工程案例 的关键参数及经验,以期为后续开展压缩空气地 质储能工程设计提供科学参考。

1 地质储能概念及发展历史

目前,常见储能技术根据能量储存形式可划 分为利用机械能相互转化的物理储能、利用化学 可逆反应的化学储能和利用电磁能转化的电磁 储能3大类^[2]。各种储能方式在其主要的领域 范围内快速发展,其储能规模及优缺点总结如表 1 所示。

收稿日期: 2021-06-18;修订日期: 2021-07-29。

基金项目:国家自然科学基金"注气温度对含水层压缩空气储能效率的影响研究(编号:42002255)"、中国地质调查局"环武功山地区地 热(干热岩)资源调查评价、典型地区地下空间资源调查评价(编号:DD20201165,DD202314)"和湖南省地质调查院"湖南省 深部地质空间利用可行性研究——湘衡盐矿盐腔能源储存与废物处置适宜性评价(编号:HNGSTP202101)"项目联合资助。 第一作者简介:郭朝斌(1989—),男,副研究员,主要从事地质能源清洁利用方面的研究。Email: guochaobin@ cags. ac. cn。 通信作者简介:李采(1979—),女,高级工程师,主要从事二氧化碳地质封存与利用方面的研究。Email: licai@ cags. ac. cn。

表1 各类储能技术特点

Tab.1 Characteristics of different energy storage technologies

	储能类型	储能规模	优缺点
the stat	抽水储能	200 ~2 000 MW	规模大、技术成熟、响 应慢、需要地理资源
初理 储能	压缩气体储能	10~300 MW	规模大、技术成熟、响 应快、需要地理资源
	飞轮储能	$5 \text{ kW} \sim 10 \text{ MW}$	比功率大、成本高
	铅酸电池	1 kW~50 MW	技术成熟、成本低、寿 命短、存在环保问题
化学 储能	液流电池	5 kW ~100 MW	寿命长、效率高、比能 量稍低
	锂电池	1 kW ~1 MW	比能量高、安全问题 有待改进
电磁 储能	超导储能	10 kW ~ 50 MW	响应快、比功率高、成 本高、维护困难
	超级电容	10 kW ~1 MW	响应快、比功率高、成 本高

1.1 压缩空气地质储能概念及分类

压缩空气地质储能(Geological Compressed Air Energy Storage, GCAES)是指以压缩空气作为储能 介质,通过燃气轮机的压缩机和涡轮机,在用电低 谷时利用多余的电能将空气压缩并储存于地质储 气库中,在用电高峰时再将储气库中的高压气体释 放经涡轮机发电^[3](图1)。



注:图中箭头表示能量流向。

图 1 压缩空气地质储能系统示意图^[3] Fig. 1 Schematic diagram of GCAES system^[3]

虽然目前抽水储能是最常用的物理储能方式, 但相比之下,GCAES 具有建设成本低、设备占地面 积小、污染小以及能量效率高等特点。GCAES 在 装机容量上可达到几百兆瓦,规模仅次于抽水储能 (表1),便于大规模商业化的应用和推广。GCAES 的能源转化效率较高,一般在75%左右,如果采用一 些先进的技术(如超导热管技术、同时蓄热等),其效 率能进一步提升到80%以上^[4]。另外,其商业应用 已超过40 a,积累了成熟的技术经验,这些优势使 GCAES 有望成为一种重要的储能手段。 储气库是 GCAES 系统重要的组成部分,根据 储气库地质条件可分为以下3类:

(1)岩石洞穴(如盐腔、坚硬岩洞)储气库。此类 系统利用地下岩石洞穴或人工开挖的洞穴作为储气 库,规模较大,德国 Huntorf 压缩空气电站(290 MW) 和美国 McIntosh 压缩空气电站(110 MW)均属于此 类储能系统^[5]。

(2)含水层储气库。将广泛分布的地下含水层 作为储气库进行储能可减少储能系统对地质条件 的限制。其储能规模与岩石洞穴储能类型相近,目 前处于工程试验与示范阶段。地下含水层作为 CO₂地质封存(一般为地下 800 m 以下含水层)和 天然气地下储存的容器已得到成功应用,证实了气 体可以在含水层储气库中得到有效储存。另外,含 水层分布比盐腔广泛,可降低 GCAES 对盐腔地理 位置的依赖,而且成本较盐腔也更具优势。

(3)枯竭油气田储气库。在油气藏开采过程中 已获取较多的地质条件信息,如具有良好的圈闭 性、丰富的钻孔信息与地层岩性参数且能够节省选 址建设成本等,因此,在枯竭的油气田中开展地质 储能较为可行。

1.2 压缩空气地质储能发展历史及趋势

GCAES 技术经历了快速发展、缓慢发展、再快 速发展3个阶段,与能源结构的改变密不可分。压 缩空气储能的概念始于20世纪40年代,同期在美 国出现相关专利。但是,由于当时电网峰谷特征不 明显.压缩空气储能技术没有得到重视和应用。到 20世纪60年代,随着核电和燃煤电厂的快速发展, 电网峰谷特征日益明显,有关在用电低谷期将廉价 电能储存、在用电高峰期释能发电的研究迅速发 展。GCAES 开始逐渐得到重视,相关研究也随之 开始。1969年,德国计划在盐腔中建设压缩空气储 能系统以满足大规模储能需求,于1978年建成 Huntorf 电站宣布成功商用。随着 Huntorf 电站的成 功商用,GCAES的研究进入第一个快速发展阶段。 随后,美国能源部开展了一系列的可行性研究及小 型示范项目,研究内容主要是储气库的选择及第二 代 GCAES 系统的研究。1991 年,美国在阿拉巴马 州建立了其第一个110 MW 级 GCAES 电站。

1.3 我国 GCAES 的需求与潜力分析

近些年,随着清洁能源的广泛使用,大规模储 能技术进入快速发展阶段。近十年来,全球可再生 能源发电装机容量大幅增加,在 2020 年新增发电 容量中,82%为可再生能源(图2)。与此同时,中 国经济经历了持续快速增长,已经成为世界第一大 能源消费国。2020年,中国水电、风电装机容量以 及可再生能源发电总装机容量均位居世界前列。 在此期间,间歇性清洁能源的迅速发展导致电网负 荷不均衡,一方面发电企业的收益受到影响,另一 方面会浪费大量的能源,不利于可再生能源的投 资,阻碍了新能源技术的推广和发展。但 GCAES 系统与可再生能源相结合,可将间歇性可再生能源 拼接起来,形成稳定的电力供应,促进新能源的发展^[7]。据测算,2020—2025年储能市场累计投资空 间为1.6万亿元,2030年市场投资可达1.3万亿 元,2060年市场投资可达5万亿元,累计规模达 122万亿元,压缩气体储能作为未来极有竞争力的 长时大规模储能技术,预计在储能整体市场中会占 据不少于30%的份额^[8]。





2 GCAES 研究现状

2.1 理论分析研究现状

近年来,国内外对于 GCAES 的相关研究主要 集中在储气库的选择、新型 GCAES 系统的优化以 及储能效率、经济性分析等方面^[9]。

有关盐腔储气库 GCAES 系统方面发表的文章 大多以盐腔力学稳定性和安全评价为主^[10-14]。耦 合热学、水文地质学和力学模型分析表明压力和温 度的巨大波动会导致 GCAES 系统在循环过程中不 稳定^[15]。热动力学和力学耦合模型及与历史数据 的拟合分析可用于判别 GCAES 系统的泄漏风险, 有助于确定泄露位置,辅助后续系统监测井的设 计^[16]。在此基础上,多种确定盐腔泄露位置的方 法也被提出^[17]。

针对含水层储气库 GCAES 的研究以基本物理

过程、存储机制和数值模拟分析为主[11,18-19]。胡 贤贤等^[20]对当前国内外含水层 GCAES 相关技术 进行了全面总结,包括项目、技术概况以及经济成 本的分析等; Kushnir 等^[21]基于达西定律及部分假 设前提建立了在含水层中进行 GCAES 的数学模 型,并通过解析解求解,对地层参数、钻孔完井程度 等进行了敏感性计算,分析了这些参数对压力波动 的影响;美国劳伦斯伯克利国家实验室的 Oldenburg 等^[19]提出了一种利用 CO,作为储能缓冲气体 的方法,当CO,从气相过渡到超临界相时,它比空 气具备更大的压缩性能; Guo 等^[22]通过数值模拟 方法对 GCAES 系统的可行性及日循环和周循环进 行了分析; Guo 等^[22-23]针对 CAESA 系统初始气囊 形成中地层渗透率的影响进行了分析,结果表明存 在最佳渗透率范围,渗透率过大或过小均会对系统 造成较大影响。GCAES 系统仍有大量的基础问题 需要进一步研究和探讨。

目前,GCAES 系统和新能源系统相结合的方 式成为新的研究热点。GCAES 与风能结合的技术 可将风力发电在电网中的比重提高至八成^[24]。除 了与风能、太阳能耦合, GCAES 还可以与生物质能 耦合,将生物质气化后应用于 GCAES 系统可降低 温室气体的排放及对天然气的依赖程度。佛罗伦 萨大学 Fiaschi 等^[25]提出了耦合压缩空气储能系 统和其他储能方式的海上可再生能源平台,海上 的风能、太阳能、波浪能分别利用风力发电机、太 阳能电池板和波浪能回收装置将能量转化成压缩 空气能量进行储存,使用水下压缩空气储能装置 进行压缩空气的水下定压存储,可为海岛地区提 供足够的能源^[26]。目前限制我国 GCAES 技术推 广的主要因素是缺少大容量的储气装置,如果考 虑采用孔隙含水层作为储气库,地质条件的限制 将大大降低。

在 GCAES 储气库选址方面,需要考虑储气库 位置、储层性质(孔隙度、渗透率等)、经济成本、社 会环境影响等因素。Allen 等^[27]对影响多孔介质储 气库的因素进行了详细总结并给出了参考值。董 家伟等^[28]通过层次分析法针对储层性质、地质安 全和经济效益3大类评价因素12个评价指标,建 立了含水层压缩空气储能选址评价体系框架,并在 河北省某区块开展了实际应用。

随着计算机模拟技术的快速发展,利用数值模 拟方法,可计算各种过程的耦合来研究 GCAES 系 统的相关问题^[29-30]。TOUGH2 是由美国劳伦斯伯 克利国家实验室开发的模拟软件,最初用于地下水 渗流和热运移模拟,随着新功能的扩展,现在可用 于地热、核废料、天然气水合物、地下水环境化学、 二氧化碳地质封存、GCAES 等方面的研究^[31]。 T2Well 是在 TOUGH2 原有功能基础上研发的耦合 含水层和钻孔流动的数值模拟软件^[32]。TOUGH – FLAC 是在 TOUGH2 对流场模拟的基础上增加了 力学方面耦合的软件^[13]。Rutqvist 等^[12]利用 TOUGH – FLAC 模拟器,对 GCAES 系统的热动力学 和力学方面进行了相关研究。

在 GCAES 系统数值模拟相关研究中,ECLIPSE 模拟器的应用也较为广泛。ECLIPSE 是在石油、页 岩气和天然气等地下流体工程领域应用广泛的数 值软件^[33],功能强大,界面友好,但由于是商业软 件,其关键原理部分的程序相对封闭,对于学术研 究具有一定的局限性。不过部分学者采用开放式 源代码程序进行了相关研究,如 Wang 等^[34]利用 E-CLIPSE 进行了 GCAES 系统中不同布井方式对储 能规模方面影响的研究。

2.2 经济性研究现状

系统的可行性不仅要求技术上具有可行性, 在经济成本方面也应具有可行性。在经济成本方 面,各类储能方式的成本如表2所示。由表2可 知,GCAES系统较抽水储能和硫钠电池更具成本 优势。

表 2 各类储能技术成本比较^[20,35] Tab. 2 Cost comparison of various energy storage technologies^[20,35]

储能技术, 功率	容量成本/ (美元·kW ⁻¹)	能量成本/ (美元·kW ⁻¹)	储能时 间/h	· 总成本/ (美元·kW ⁻¹)
GCAES,300 MW	580	1.75	40	650
PHS,1 000 MW	600	37.5	10	975
硫钠电池,10 MW	1 720 ~1 860	$180 \sim 210$	6~9	3 100 ~ 3 400

对于含水层 GCAES 系统,其成本如表 3 所示。 3 个不同地区的试验表明,含水层 GCAES 开发成本 为 2 ~ 7 美元/(kW · h),盐腔 GCAES 系统开发成 本为 6 ~ 10 美元/(kW · h)。对比可知,含水层 GCAES 系统比盐腔 GCAES 系统更具经济成本优 势。在增加储能规模成本方面,含水层 GCAES 系统 也具有较大优势。以盐腔为代表的常规 GCAES 系 统,储能容量增大时所需成本约为 2 美元/(kW · h), 而对于含水层 GCAES 系统,其储能容量增加时所需 成本仅为 0.11 美元/(kW · h)^[36]。

表 3 含水层 GCAES 系统开发成本^[36]

 Tab. 3
 Development cost of aquifer GCAES system^[36]

地区	奥奈达	罗克兰县	布法罗
深度/m	910	460	610
每口钻井成本/万美元	77.5	48.0	52.0
每口井的外围结构成本/万美元	10	10	10
集输系统成本/万美元	260	260	260
井的数量/口	18~38	$80 \sim 107$	$40\sim71$
每度电总成本/美元	2.0 ~ 2.2	5.6~7.0	2.7~3.4

在经济性分析方面,谭靖等^[37]针对某一风电 场的实际情况分别从节能、电站建设以及环保效益 方面分析了 GCAES 系统的综合效益。张新敬^[38] 对不同的 GCAES 系统进行了分析,发现压缩空气 储能系统及其与风能的耦合系统虽然初期建设成 本较高,但是在运行过程中相较于传统的 GCAES 系统,减少了温室气体的排放,更加环保。

3.1 以盐腔为储气库

3.1.1 德国 Huntorf 工程

1969年,德国计划在北部盐穴地层中建立 GCAES系统以满足大规模储能的需求。该区域 已有大量利用盐腔储存天然气的工程,为 GCAES 电站的建立积累了大量的地质资料与操作经验。 德国于 1975 年开始在 Huntorf 建造 GCAES 电站, 于 1978 年宣布成功商用^[39]。Huntorf 电站以两个 盐洞为储气库进行储能,如图 3 所示。其技术参 数如表 4 所示。Huntorf 电站整体运行效率为 42%^[41-42],平均启动可用率和可靠率分别为 90%和 99%^[36]。



图 3 德国 Huntorf 电站地面设备(左)及地下盐腔示意图(右)^[39]

Fig. 3 Surface instruments (left) and underground salt caverns (right) of Huntorf project in German^[39]

表 4 德国 Huntorf 电站技术参数^[40]

Tab. 4 Technical parameters of

Huntorf project in German^[40]

参数	单位
透平功率/MW	290
压缩机功率/MW	60
透平空气流速/ $(kg \cdot s^{-1})$	417
压缩机空气流速/($kg \cdot s^{-1}$)	108
流速比	1/4
盐洞数量/个	2
盐洞体积/m ³	$1.4 \times 10^5 + 1.7 \times 10^5 =$ 3.1×10^5
盐洞顶部埋深/m	650
盐洞底部埋深/m	800
盐洞中空气最小操作压力/MPa	4.3
盐洞中空气最大操作压力/MPa	7.0
盐洞中空气最大压力降速/(MPa·h ⁻¹)	1.5

3.1.2 美国 McIntosh 工程

在 Huntorf 电站成功运行 13 a 后,1991 年美国 在 Alabama 州建立了以盐洞为储气库的 GCAES 电 站,具体技术参数如表 5 所示。由于增加了压缩热 回收利用装置, McIntosh 电站的整体运行效率得到 了提高,为 54%^[41],压缩过程和膨胀过程平均启动 可靠率分别为 91.2% 和 92.1%,运行可用率分别 为 96.8% 和 99.5%^[36,44]。

表 5 美国 McIntosh 电站技术参数^[36,41,43]

Tab. 5 Technical parameters of

McIntosh project in the USA^[36,41,43]

参数	数值
透平功率/MW	110
透平空气流速/($kg\cdot s^{-1}$)	154
压缩机空气流速/(kg·s ⁻¹)	96
盐洞数量/个	1
盐洞体积/m ³	5.6×10^{5}
盐洞顶部埋深/m	459
盐洞底部埋深/m	807
盐洞中空气最小操作压力/MPa	4.5
盐洞中空气最大操作压力/MPa	7.04

McIntosh 压缩空气储能电站如图 4 所示。





Fig. 4 Schematic diagram of GCAES system of McIntosh project in the USA^[44]

3.1.3 盐腔储气库优缺点分析

盐腔由于其力学性质稳定、渗透率低、高压下具 有塑性等特点,具有较好的密闭性,在储存天然气、 石油等方面已经得到成熟的应用,具有技术成熟、储 气容量大、费用低等优点,是开展 GCAES 的良好储 气库。我国盐腔资源丰富,现有盐腔资源容量约 1.3×10⁸m³,其中部分盐腔资源容量如表6所示。但

表 0 我国东部监腔贷源谷重``	
------------------	--

Fab.6	Resource	capacity	of	salt	caverns	in	the	east	of	China [[]	45]	
-------	----------	----------	----	------	---------	----	-----	------	----	---------------------------	------	--

盐腔名称	所在省份	容量/(10 ⁶ m ³)
金坛	江苏	14.3
淮安	江苏	10
平顶山	河南	4
应城	湖北	8
樟树	江西	10
潜江	湖北	4

是由于盐腔发育分布与储能需求的匹配度较低,只能在特定区域开展,限制了盐腔类 GCAES 的快速推 广和发展。另外,由于赋存地质条件的不同,存在部 分盐岩杂质较多以及开采后盐腔形态不一等问题, 因此在作为储气库进行储能前,需要进行盐腔形态 精准测量、气密性测试等研究。

3.2 以含水层为储气库

3.2.1 美国 Pittsfield 场地试验

1981年,美国太平洋西北国家实验室在伊利诺 伊州的 Pittsfield 启动了含水层 GCAES 试验,分析 和评估了在多孔介质中进行 GCAES 的可行性。如 图5所示,注入目标地层 St. Peter 砂岩埋深约 200 m, 盖层渗透率较低且具有圈闭特征。从 1982 年开 始,经过6个月的空气注入(体积约 2.1×10⁶ m³) 形成初始气囊,随后开始注采循环试验。



Fig. 5 The anticline structure, zoom – in of the anticline center and lithology column in Pittsfield site^[3]

Pittsfield 试验结果证明了含水层可以作为储 气库进行 GCAES。同时也发现了一些需要进一步 研究的内容,例如注入空气中的氧气与地层矿物 (黄铁矿)发生反应,产生消耗,该消耗量需通过与 St. Peter 砂岩中矿物的反应定量计算并进一步 解释。

3.2.2 美国爱荷华州 GCAES 项目

美国爱荷华州 GCAES 项目(Iowa Stored Energy Park,以下简称 ISEP - GCAES 电站)是一个具有创 新性的能源储存项目,计划储能规模为270 MW,前 期投资约为4亿美元,原计划于2015年开始为爱 荷华州得梅因市提供储能服务。该项目于2006年 启动,在开展8年的规划调查后,由于经济性原因, 于2011年7月暂停实施。项目的主要参与方 Hydrodynamics 公司和桑迪亚国家实验室联合开展了 含水层 GCAES 可行性地质调查项目^[46],储层为 Dallas Center Mt. Simon 含水层,储能规模为135 MW~ 270 MW。该地质调查与测试项目的目标是:①确 定 Dallas Center 构造中 Mt. Simon 地层的深度及形 状等; ②确定 Mt. Simon 地层的岩石属性(孔隙度、 渗透率、组成即岩石力学性质等):③确定在技术 上该构造是否可以作为储气库进行 GCAES 电站的 建设运行。在此之前,该地区的地质资料来源于20 世纪70年代的地震波反射研究和 Dallas Center 构 造附近3个废弃井的测井数据,有关 Dallas Center 构造的直接地质数据几乎没有^[47]。先前根据 Redfield 构造的地质数据进行了相关数值模拟,如果 Dallas Center 地质数据与其相似则可以满足项目储 能规模要求(2个135 MW电站)。

根据场地调查结果,场地砂岩背斜结构中可用 空间体积过小,非均质性较高且渗透率相对较低, 使得该场地不满足设定的储能规模要求^[47]。ISEP – GCAES 电站原计划储能规模为 270 MW, Moridis 等^[48]利用数值模拟方法根据场地数据建立模型, 模拟结果表明当前场地可提供约 65 MW 级别的储 能规模,而经济分析表明 65 MW 储能规模在当前 经济条件下处于亏损状态,建议在进行更多注气试 验前暂停项目。

3.2.3 含水层储气库优缺点

含水层分布广泛,在与储能需求的匹配度上 较盐腔更具优势。美国普林斯顿大学的研究报告 指出,采用含水层作为 GCAES 系统的储气库,在 成本上能够进一步降低,有利于压缩空气储能技 术的应用与发展^[36]。与盐腔储气库不同,含水层 作为多孔介质,在空气注入过程中涉及注入速率、 压力分布、空气气相饱和度分布等诸多多相流方 面的问题,需要更加详细的地质参数进行储能规 模和安全性评估。

3.3 以枯竭油气田为储气库

3.3.1 300 MW 枯竭天然气田 GCAES 探索

美国太平洋天然气电力公司在 2009 年提出利 用枯竭气田开展 300 MW - 10 h 规模的 GCAES 系 统技术和经济可行性研究。其可分为许可评估(选 址调查、环境影响评价和公开招标)、运维(建设、调 试和运行)和监测分析(数据收集分析、技术转让 等)3 个阶段。

第一阶段的可行性许可评估研究包括地质储 气库的预选区筛选、选址、注气试验等过程,是后续 阶段研究的基础,最为关键。项目早期规划中利用 加利福尼亚州 Buttonwillow 地区的枯竭气田作为储 气库。经过调查和分析,抽气阶段该地层可供最大 压力约5.5 MPa,无法满足地面设备满负荷工作所 需的 6.5 MPa 压力的要求。另外,该区域在 1930— 1940年期间施工85口钻孔,其中一部分废弃的钻 孔只进行了简单的处理,现阶段开展钻孔修补的成 本也较高,如果开展压缩空气储能工程存在较高的 泄漏风险。基于压力需求和泄漏风险的原因,最终 放弃了该地区。项目团队在提出储层应具有圈闭 特性以及可以匹配地面发电设备的技术和操作要 求两个原则的基础上,总结形成了 GCAES 储气库 适宜性评价方法,筛选出 King Island 和 East Islands 2个预选场址。在2个预选场址同步开展岩心分 析等地质测试,获取了详细储层参数,在进行潜力 评价和风险评估的同时,考虑技术、环境和经济因 素(法律、商业、技术等方面的问题),最终确定在 King Island 开展空气注入试验。此外,还针对地 面设备和地质储气库开展了环境影响评价,结果 显示该项目环境影响较小,符合加利福尼亚州能 源委员会和美国环境保护局的建造和运行许可 要求。

该项目展示了使用枯竭气田开展 300 MW - 10 h 压缩空气地质储能的技术可行性,为后续工程设计 提供了参考。

首先,地质储气库可以满足设施运行所需的流 速和压力,但必须进行正确的系统管理和操作约 束,特别是严格限制抽出空气中的甲烷比例,防止 影响安全性或燃烧稳定性。在开始注气试验之前, King Island 地质储气库中的残余气体中甲烷占 92%。为了使该部分甲烷与注入的空气混合最小 化,在储气库中需形成较大的初始气囊。同时,在 循环周期中,需要通过平衡注入和抽出的循环来保 持气囊的大小。King Island 项目假设每个工作日 进行注入/抽出循环,周末进行连续注入。如果连 续抽出气体,停止注入2~3 d 后,某些钻孔抽出的 空气中甲烷的浓度超出限制。在开始的几年中,储 层中甲烷体积较多时,建议限制储层连续抽气的持 续时间。

其次,需要注意空气中的耗氧问题。在空气注 入测试过程中发现注入的空气会以较快的速率与储 层中的一些矿物质发生反应,测试结束时氧气浓度 从注入时的21.6%降至约2%,无法满足 GCAES 发 电设施系统所需的氧气含量。该问题可以通过前期 多次大量注入空气以消耗可氧化的矿物质来解决。

另外,在初始气囊形成阶段,在空气注入的同时需要额外的钻孔来抽取原始地层水,以满足合理施工时间且不超出钻孔允许压力。通过抽水钻孔,初始气囊形成时间大约为18个月,大幅缩减了无抽水钻孔所需的10 a时间。King Island项目设计了29个空气注采钻孔、4个抽水钻孔和2个水处理钻孔(重新注入水到远离初始气囊的含水层中)。 3.3.2 枯竭油气田储气库优缺点分析

枯竭油气田具有丰富的地质资料和齐全的钻 孔设施,是开展压缩空气地质储能的理想储气库。 国外具备以枯竭油气田作为储气库进行地质储能 的经验,中国与国外地下枯竭油气藏储气库建设技 术还存在一定差距,相关方面的建设经验也不 多^[49-50]。

4 结论与建议

通过分析压缩空气地质储能的分类、研究现状 以及不同储气库工程案例,指出地质储能不同类型 储气库的优缺点及其关键影响因素,具体结论及建 议如下:

(1)储气库的地质条件是影响地质储能系统的 关键因素。不同的地质参数,如渗透率、孔隙度的 非均质分布对压力、能量流速等系统关键参数都会 产生影响。在实际工程中,应根据盐腔、含水层、枯 竭油气田等地质储能空间的不同特性以及当地能 源结构类型,因地制宜地开展压缩空气地质储能的 研究与应用。

(2)我国盐腔资源丰富且利用率较低,具有较大的开发利用空间。但盐腔资源的分布与储能需求区域的匹配较差,盐岩资源赋存条件和开采过程也存在差异,在开展地质储能前需进行严格的腔体测量和气密性分析。

(3)含水层分布广泛,是最具潜力的地质储能 储气库。但由于含水层及枯竭油气田的多孔介质 属性,空气的运移规律较为复杂,在实际工程设计 及运行过程中需要尽量获取准确详细实际的地质 数据,降低地质条件的不确定性。另外,多孔介质 中初始气囊形成时,特别是在饱水含水层中,空气 驱替原始地层水需要较长的时间和合理的注气方 式,在系统设计时需要考虑时间成本。

参考文献(References):

- [1] 国家能源局. 国新办举行中国可再生能源发展有关情况发布 会[EB/OL]. (2021-03-30)[2021-06-21]. http://www. nea. gov. cn/2021-03/30/c_139846095. htm.
 National Energy Administration. China's Renewable Energy Development Situation Briefing[EB/OL]. (2021-03-30)[2021-06-21]. http://www. nea. gov. cn/2021-03/30/c_139846095. htm.
- [2] 张静,李岱昕. 物理储能技术的市场现状及发展前景[J]. 储能科学与技术,2015,4(2):153-157.
 Zhang J, Li D X. Current application situation and development prospect of physical energy storage technologies[J]. Energy Storage Sci Technol,2015,4(2):153-157.
- [3] Guo C B, Li C, Zhang K N, et al. The promise and challenges of utility – scale compressed air energy storage in aquifers[J]. Appl Energy, 2021, 286:116513.
- [4] 郭新生,傅秦生,赵知辛,等. 电热冷联产的新压缩空气蓄能系统[J]. 热能动力工程,2005,20(2):170-173.
 Guo X S,Fu Q S,Zhao Z X, et al. A new type of compressed air energy storage system for the cogeneration of electricity, heat and cooling energy[J]. J Eng Therm Energy Power,2005,20(2):170-173.
- [5] 郭朝斌,王志辉,刘凯,等. 特殊地下空间应用与研究现状[J]. 中国地质,2019,46(3):482-492.
 Guo C B, Wang Z H, Liu K, et al. The application and research progress of special underground space[J]. Geol China,2019,46 (3):482-492.
- [6] International Renewable Energy Agency. Renewable Capacity Highlights [R]. Abu Dhabi; International Renewable Energy Agency, 2021.

- [7] 张新敬,陈海生,刘金超,等. 压缩空气储能技术研究进展[J].储能科学与技术,2012,1(1):26-40.
 Zhang X J,Chen H S,Liu J C, et al. Research progress in compressed air energy storage system: A review[J]. Energy Stor Sci
- [8] 小于.[储能]万亿级储能市场跳出"大黑马"……[EB/OL].
 (2021-05-26)[2021-07-05]. https://www.sohu.com/a/
 468582567_651733.

Technol, 2012, 1(1):26-40.

Xiao Y. Trillion – level Energy Storage Market Came Out As a Dark Horse…[EB/OL]. (2021-05-26)[2021-07-05]. https://www.sohu.com/a/468582567_651733.

[9] 郭朝斌,张可倪,李采. 压缩空气含水层储能系统设计及可行 性分析[J]. 同济大学学报:自然科学版,2016,44(7):1107 -1112.

Guo C B,Zhang K N,Li C. Subsurface system design and feasibility analysis of compressed air energy storage in aquifers [J]. J Tongji Univ:Nat Sci,2016,44(7):1107-1112.

- [10] Raju M, Khaitan S K. Modeling and simulation of compressed air storage in caverns: A case study of the Huntorf plant [J]. Appl Energy, 2012, 89(1):474-481.
- [11] Kushnir R, Ullmann A, Dayan A. Thermodynamic and hydrodynamic response of compressed air energy storage reservoirs: a review[J]. Rev Chem Eng, 2012, 28 (2/3):123 - 148.
- [12] Rutqvist J, Kim H M, Ryu D W, et al. Modeling of coupled thermodynamic and geomechanical performance of underground compressed air energy storage in lined rock caverns [J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2012, 52:71-81.
- [13] Kim H M, Rutqvist J, Ryu D W, et al. Exploring the concept of compressed air energy storage (CAES) in lined rock caverns at shallow depth: a modeling study of air tightness and energy balance[J]. Appl Energy, 2012, 92:653-667.
- [14] Liu G L, Lu Y W, Xu J L, et al. Optimization of compressed air energy storage system parameters [J]. Adv Mater Res, 2013, 634/ 638:787-791.
- [15] Zhuang X Y, Huang R Q, Liang C, et al. A coupled thermo hydro – mechanical model of jointed hard rock for compressed air energy storage[J]. Math Probl Eng, 2014, 2014:179169.
- [16] Kim H M, Rutqvist J, Kim H, et al. Failure monitoring and leakage detection for underground storage of compressed air energy in lined rock caverns[J]. Rock Mech Rock Eng, 2016, 49(2):573 – 584.
- [17] Murvay P S, Silea I. A survey on gas leak detection and localization techniques [J]. J Loss Prev Process Ind, 2012, 25(6):966 – 973.
- [18] Oldenburg C M, Pan L. Porous Media Compressed Air Energy Storage (PM – CAES): Theory and simulation of the coupled wellbore – reservoir system [J]. Transp Porous Med, 2013, 97 (2):201 – 221.
- $\left[\,19\,\right]\,$ Oldenburg C M, Pan L. Utilization of CO_2 as cushion gas for por-

ous media compressed air energy storage [J]. Greenh Gases: Sci Technol,2013,3(2):124-135.

- [20] 胡贤贤,张可霓,郭朝斌. 压缩空气地下咸水含水层储能技术[J]. 新能源进展,2014,2(5):390-396.
 Hu X X, Zhang K N, Guo C B. Compressed air energy storage using saline aquifer as storage reservior[J]. Adv New Renew Energy, 2014,2(5):390-396.
- [21] Kushnir R, Ullmann A, Dayan A. Compressed air flow within aquifer reservoirs of CAES plants [J]. Transp Porous Med, 2010, 81 (2):219-240.
- [22] Guo C B, Zhang K N, Li C, et al. Modelling studies for influence factors of gas bubble in compressed air energy storage in aquifers[J]. Energy, 2016, 107:48 – 59.
- [23] Guo C, Zhang K, Li C. Influence of Permeability on the Initial Gas Bubble Evolution in Compressed Air Energy Storage in Aquifers[C]//Proceedings of the TOUGH Symposium 2015. Berkeley, 2015.
- [24] Lerch E. Energy Storage to Balance Wind Power Fluctuations [C]//Proceedings of the Third IASTED Asian Conference on Power and Energy Systems. Phuket, 2007:134 – 139.
- [25] Fiaschi D, Manfrida G, Secchi R, et al. A versatile system for offshore energy conversion including diversified storage[J]. Energy, 2012,48(1):566-576.
- [26] 王志文,熊伟,王海涛,等.水下压缩空气储能研究进展[J]. 储能科学与技术,2015,4(6):585-598.
 Wang Z W, Xiong W, Wang H T, et al. A review on underwater compressed air energy storage[J]. Energy Storage Sci Technol, 2015,4(6):585-598.
- [27] Allen R D, Doherty T J, Erikson R L, et al. Factors Affecting Storage of Compressed Air in Porous – Rock Reservoirs [R]. Richland; Pacific Northwest Lab, 1983.
- [28] 董家伟,李毅. 含水层压缩空气储能选址评价方法研究[J]. 安全与环境工程,2021,28(3):228-239.
 Dong J W, Li Y. Study of the site evaluation of compressed air energy storage in aquifers[J]. Safety Environ Eng, 2021,28(3): 228-239.
- [29] Metz B. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage: Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [30] 张炜,吕鹏. 二氧化碳地质封存中"对流混合"过程的研究进展[J]. 水文地质工程地质,2013,40(2):101-107.
 Zhang W,Lv P. Density driven convection in carbon dioxide geological storage: a review[J]. Hydrogeol Eng Geol,2013,40(2): 101-107.
- [31] Pruess K, Oldenburg C M, Moridis G J. TOUGH2 User's Guide Version 2[R]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 1999.
- [32] Pan L H, Oldenburg C M. T2Well: An integrated wellbore re-

servoir simulator[J]. Comput Geosci, 2014, 65:46-55.

- [33] Kempka T, Norden B, Tillner E, et al. Comparison of Long Term Numerical Simulations at the Ketzin Pilot Site Using the Schlumberger ECLIPSE and LBNL TOUGH2 Simulators [C]//Proceedings of the EGU General Assembly Conference 2012. Vienna, 2012.
- [34] Wang B, Pfeiffer W T, Li D, et al. A Feasibility Study on Operating Large Scale Compressed Air Energy Storage in Porous Formations[C]//Proceedings of the AGU Fall Meeting 2015. San Fransisco: American Geophysical Union, 2015.
- [35] Gyuk I P. EPRI DOE handbook of energy storage for transmission & distribution applications [R]. Washington: U. S. Department of Energy, 2003.
- [36] Succar S, Williams R H. Compressed Air Energy Storage: Theory, Resources, and Applications for Wind Power[R]. PEI,2008.
- [37] 谭靖,李国杰,唐志伟.基于压缩空气储能的风电场功率调节 及效益分析[J].电力系统自动化,2011,35(8):33-37.
 Tan J,Li G J,Tang Z W. Design and economic analysis of compressed air energy storage based wind farm power regulation system[J]. Autom Electr Power Syst,2011,35(8):33-37.
- [38] 张新敬. 压缩空气储能系统若干问题的研究[D]. 北京:中国 科学院研究生院(工程热物理研究所),2011.
 Zhang X J. Investigation on Compressed Air Energy Storage[D].
 Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Engineering Thermophysics),2011.
- [39] Crotogino F, Quast P. Compressed air Storage Caverns at Huntorf[M]//Bergman M. Subsurface Space. Amsterdam: Elsevier, 1981:593 – 600.
- [40] Crotogino F, Mohmeyer K U, Scharf R. Huntorf CAES: More than 20 Years of Successful Operation [C]//Proceedings of the Spring 2001 Meeting. Orlando, 2001.
- [41] Budt M, Wolf D, Span R, et al. A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments[J]. Appl Energy, 2016, 170:250 - 268.
- [42] Crotogino F. Compressed Air Storage [C]//Proceedings of the Internationale Konferenz "Energieautonomie Durch Speicherung Erneuerbarer Energien". 2006.
- [43] Arsie I, Marano V, Moran M, et al. Optimal Management of a

Wind/CAES Power Plant by means of Neural Network Wind Speed Forecast[C]//Proceedings of the European Wind Energy Conference and Exhibition. Milan: The European Wind Energy Association (EWEA),2007.

- [44] Davis L, Schainker R. Compressed Air Energy Storage (CAES): Alabama Electric Cooperative Mcintosh Plantñoverview and Operational History[C]//Proceedings of the Electricity Storage Association Meeting; Energy Storage in Action. 2006.
- [45] 梅生伟,公茂琼,秦国良,等. 基于盐穴储气的先进绝热压缩 空气储能技术及应用前景[J]. 电网技术,2017,41(10):3392 -3399.
 Mei S W, Gong M Q, Qin G L, et al. Advanced adiabatic compressed air energy storage system with salt cavern air storage and its application prospects[J]. Power Syst Technol,2017,41(10):
- [46] Simon Structure CAES System Performance Analysis [R]. Iowa: The Hydrodynamics Group, 2011.

3392 - 3399.

- [47] Heath J E, Bauer S J, Broome S T, et al. Petrologic and Petrophysical Evaluation of the Dallas Center Structure, Iowa, for Compressed Air Energy Storage in the Mount Simon Sandstone [R]. Albuquerque; Sandia National Lab, 2013.
- [48] Moridis G J, King M, Jansen J. Iowa Stored Energy Park Compressed – air Energy Storage Project: Compressed – air Energy Storage Candidate site Selection Evaluation in Iowa: Dallas Center Feasibility Analysis [EB/OL]. (2007 – 01). https://www. researchgate. net/publication/303286546_Iowa_stored_energy_park_ compressed – air_energy_storage_project_compressed – air_energy_ storage_candidate_site_selection_evaluation_in_Iowa_Dallas_ Center_feasibility_analysis.
- [49] 张益炬. 枯竭油气藏型地下储气库方案优选及安全性评价方 法研究[D]. 成都:西南石油大学,2014. Zhang Y J. Research on Optimal Selection and Safety Evaluation Method of Depleted Oil and Gas Reservoir Underground Gas Storage[D]. Chengdu:Southwest Petroleum University,2014.
- [50] Matos C R, Carneiro J F, Silva P P. Overview of large scale underground energy storage technologies for integration of renewable energies and criteria for reservoir identification [J]. J Energy Stor, 2019,21:241 – 258.

Research review and engineering case analysis of geological compressed air energy storage

GUO Chaobin¹, LI Cai¹, YANG Lichao¹, LIU Kai¹, RUAN Yuejun², HE Yang²

 Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Geological Bureau of Hunan Province, Hunan Changsha 410029, China)

Abstract: Geological Compressed Air Energy Storage (GCAES) can provide a flexible and efficient energy stor-

age scheme for the large – scale deployment of intermittent clean energy, such as wind energy and solar energy, which could promote the rapid transformation of energy structure and accelerate the realization of carbon emission peak and carbon neutrality strategy. Based on the introduction of the concept and classification of GCAES, the authors have summarized the research status and development trend of GCAES from aspects of theoretical analysis, technical methods and economic cost, and described the key parameters and experience of typical engineering cases of GCAES, including salt caverns, aquifers and exhausted oil and gas fields, in order to analyze the application prospect of GCAES. With the increasing proportion of clean and renewable energy in the power grid, the authors have also explored the characteristics and influence factors of different storage tanks, and put forward their suitable conditions, which could provide some scientific reference for the sustainable development and utilization of clean energy.

Keywords: geological storage reservoir; compressed air energy storage; renewable clean energy; aquifers (责任编辑: 刘丹)