



枯竭油气藏与新能源融合发展技术进展与发展建议

闫娜

Technological Progress and Development Suggestions on Integrated Development of Depleted Oil & Gas Reservoirs and New Energy

YAN Na

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2024058>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

致密/页岩油气储层损害机理与保护技术研究进展及发展建议

Research Progress and Development Recommendations Covering Damage Mechanisms and Protection Technologies for Tight/Shale Oil and Gas Reservoirs

石油钻探技术. 2020, 48(4): 1-10 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020068>

国内外地下储库现状及工程技术发展趋势

Present State of Underground Storage and Development Trends in Engineering Technologies at Home and Abroad

石油钻探技术. 2017, 45(4): 8-14 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201704002>

低渗透油气藏高效开发钻完井技术研究主要进展

Key Achievement of Drilling & Completion Technologies for the Efficient Development of Low Permeability Oil and Gas Reservoirs

石油钻探技术. 2019, 47(1): 1-7 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019027>

我国地下储气库钻井完井技术现状与发展建议

Current Status and Development Suggestions in Drilling and Completion Technology of Underground Gas Storage in China

石油钻探技术. 2020, 48(3): 1-7 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020041>

中国石化石油工程技术新进展与发展建议

New Progress and Development Proposals of Sinopec's Petroleum Engineering Technologies

石油钻探技术. 2021, 49(1): 1-10 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021001>

碳中和约束下油气行业发展形势及应对策略

Development Situation and Countermeasures of the Oil and Gas Industry Facing the Challenge of Carbon Neutrality

石油钻探技术. 2021, 49(5): 1-6 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021070>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀低碳减碳▶

doi:10.11911/syztjs.2024058

引用格式: 闫娜. 枯竭油气藏与新能源融合发展技术进展与发展建议 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(3): 146-152.

YAN Na. Technological progress and development suggestions on integrated development of depleted oil & gas reservoirs and new energy [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(3): 146-152.

枯竭油气藏与新能源融合发展技术进展与发展建议

闫 娜

(中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206)

摘 要: 油气资源与新能源融合发展是新型能源体系建设的重要特征。在分析枯竭油气藏与新能源融合发展主要优势的基础上, 调研了国内外利用枯竭油气藏开发地热能、储能、储氢、采氢、开采锂金属等方面的研究进展。调研发现, 由于技术可移植借鉴的程度不同, 枯竭油气藏与新能源融合的技术发展成熟度有很大差异。其中, 利用枯竭油气藏开发地热能的可行性已经过充分验证, 枯竭油气藏储能处于现场试验阶段, 枯竭油气藏储氢处于前期探索阶段, 少数公司开展了枯竭油气藏开采氢及锂的研究, 可行性还没有得到验证。基于调研结果, 提出了推动枯竭油气藏与新能源融合发展的主要建议: 进行枯竭油气藏现状普查, 建立相关信息共享平台; 开展广泛协同研究, 推动技术迅速突破; 开展示范试点, 形成枯竭油气藏资源化利用标准; 探索枯竭油气藏资源化利用商业模式, 实现低碳发展。

关键词: 枯竭油气藏; 新能源; 融合发展; 储能; 储氢; 技术进展; 发展建议

中图分类号: TE0; X741

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2024)03-0146-07

Technological Progress and Development Suggestions on Integrated Development of Depleted Oil & Gas Reservoirs and New Energy

YAN Na

(Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering Co. Ltd., Beijing, 102206, China)

Abstract: The integrated development of oil & gas resources and new energy is an important feature of building a new energy system. This study analyzes the main advantages of integrating depleted oil & gas reservoirs with new energy sources and reviews research progress in utilizing these reservoirs for geothermal energy, energy storage, hydrogen storage, hydrogen production, and lithium metal mining, both in China and abroad. The research results show that due to the different degrees of technology portability and reference, the technology maturity of integrated development of depleted oil & gas reservoirs and new energy is different. The feasibility of exploiting geothermal resources by utilizing depleted oil & gas reservoirs has been fully verified, the energy storage of depleted oil & gas reservoirs is currently undergoing verification, while hydrogen storage in depleted oil & gas reservoirs is in the early exploratory stage. Researches into extracting hydrogen and lithium from depleted oil & gas reservoirs have been carried out by a few companies, with the feasibility unproven. Based on the survey results, the main suggestions for promoting the integrating depleted oil & gas reservoirs with new energy are put forward: surveying current depleted oil & gas reservoirs to establish the relevant information sharing platform; conducting extensive collaborative research to promote rapid technological breakthroughs; implementing demonstration and pilot projects to form utilization standards for the resources of depleted oil & gas reservoirs; exploring the business modes for resource utilization of depleted oil & gas reservoirs to achieve low-carbon development.

Key words: depleted reservoir; new energy; integrated development; energy storage; hydrogen storage; technological progress; development proposal

收稿日期: 2024-04-28; 改回日期: 2024-05-10。

作者简介: 闫娜 (1976—), 女, 河北保定人, 1998年毕业于河北大学统计专业, 2001年获北京师范大学国际经济专业硕士学位, 2010年获中国石油大学(北京)石油工程管理专业博士学位, 副研究员, 主要从事石油工程技术经济评价及战略规划研究。E-mail: yanna.sripe@sinopec.com。

基金项目: 中国石化科技战略研究项目“面向2035年的油气开发工程前沿技术战略研究”(编号: P20031)资助。

随着油气勘探开发的深入,全球油气田进入开发中后期,油气井废弃或转产逐渐增多,导致枯竭油气藏逐渐增多。国际能源署(IEA)分析了全球 800 个主要油田的生产和储量情况,认为全球现有油田产量以平均 9% 的自然递减率减少^[1],大多数非欧佩克产油国的石油产量要么已过高峰期,要么在未来 20 年内将达到高峰期,我国老油田年产量递减率为 10%~15%^[2]。非常规油气田的产量递减率更高,油气藏衰竭迅速,导致枯竭油气藏、废弃井数量迅速攀升。根据美国环境保护署统计,全美备案的废弃油井数量,相比“页岩气革命”前增加了 12% 以上^[3],废弃井泄露、地面坍塌等引发的安全环保问题已经引起广泛关注。另外,在全球低碳发展的背景下,油公司在油气投资决策中计入碳价格,提高了油气勘探开发的门槛,使更多的油气资源变得不可开发。妥善处理枯竭油气藏相关的资产及安全环保问题、谋取在新型能源体系中的地位,成为油气企业转型的重要考量。为此,国外众多机构对利用枯竭油气藏开发新能源的种路径进行了大量研究试验,并取得一定的效果。2023 年,我国国家能源局发布《加快油气勘探开发与新能源融合发展行动方案(2023—2025)》,提出要大力推动油气勘探开发与新能源融合发展。我国油公司在勘探开发中积极强化新能源开发利用,但多以内部用能清洁替代为目的,对于外部供能多样化、提供更多低碳能源方面缺乏深入研究和规划^[4]。因此,笔者调研总结了枯竭油气藏与新能源融合发展的主要技术进展,提出了推动枯竭油气藏与新能源融合发展的建议,为油气企业科技规划、油气田开发计划、新能源发展规划等提供参考。

1 枯竭油气藏与新能源融合发展的主要优势

太阳能、风能、地热、氢能等新能源在低碳环保方面有着明显的优势,但前期投资成本较高,回报周期较长,限制了其规模发展。另外,太阳能、风能受天气条件影响大,能源生产波动性强,且受到储能高成本、低效率的制约。枯竭油气藏可以为风能、光能、地热、氢能等能源提供低成本的运输通道、存储空间、基础设施和施工经验,通过油气技术移植和拓展,可以降低新能源开发利用的风险和成本,提升其规模化发展的速度。枯竭油气藏与新能源融合发展主要有以下优势:

1) 避免废弃井带来的安全环保问题。废弃井里含有大量的甲烷、苯、硫化氢等物质,易污染空气、地表水和地下水,还有爆炸的风险。国内外发生过多起废弃井引起的安全事故,造成了巨大的经济损失。2021 年,美国启动了为期 10 年的废弃井治理计划,投资 800 亿美元进行废弃井的封堵^[3]。枯竭油气藏的资源化利用可以恢复废弃井的使用和运行,能有效减少废弃井带来的安全环保问题。

2) 节约投资。a. 降低油气井废弃及维护成本。环保要求日益提高,使油气井的废弃成本越来越高。据统计,加拿大陆上油气井的废弃成本为每口井 2 万~16 万加元^[5];尼日利亚陆上油气井的弃井成本每口井约为 100 万美元^[6];荷兰 Schoonebeek 油气田油气井的废弃总成本估计为 2.61 亿美元^[7]。海上油田油气井的废弃成本更加高昂。墨西哥湾地区油井的废弃总成本预期高达 290 亿美元^[8],北海地区油井废弃井成本每年高达 30 亿美元,总费用预计为 400 亿美元。b. 节约新能源基础设施投资。油气田多数占地面积大,距离居民区较远,交通和物流的基础设施完善,利用枯竭油气田开发新能源,可以利用已建成的基础设施,从而节约新能源建设投资,提高新能源开发利用的经济可行性。

3) 促进油气产业转型及新能源快速发展。枯竭油气藏与新能源融合发展,可为油气行业的退出人员提供就业机会,为油气生产提供绿色能源,推动当地能源转型。油气田开发中积累的地质环境、储层条件等基础数据,生产井、注入井的历史数据,油气从业人员的经验,可为新能源开发提供信息支撑,降低新能源发展的风险,从而推动相关技术快速发展。

2 枯竭油气藏与新能源融合的技术进展

由于技术可移植借鉴的程度不同,枯竭油气藏与新能源融合的技术发展成熟度有很大差异:利用枯竭油气藏开采地热资源在全球已有较多成功案例,利用枯竭油气藏储能处于现场验证阶段,利用枯竭油气藏储氢已有少数成功的先导试验,但距离大规模、长周期、纯氢的存储仍有很多基础性问题有待解决,利用枯竭油气藏原位开采氢及锂的技术应用边界条件不清晰,推广应用的可行性还没有得到验证。

2.1 地热开采

地热资源常与油气伴生,地热能可与油气资源的

勘探开发技术有较高程度的重叠,技术可移植的程度很高。利用废弃井的井筒和地面设施来开采地热资源,是油气与新能源融合最常见的方式,主要有联产和废弃油气井转地热井2种方式。

联产是指在油气开采过程中提取油气井产出液中的热量,同时生产碳氢化合物和地热能。老油田油井产出液的含水率最高达99%,其温度为65~150℃,可以转化为热能和/或电能。废弃油气井转为地热井的井筒改造方法主要有开窗侧钻法、改造泵室射孔法和直接射孔法^[9]。中原油田采用改造泵室射孔法,将马古6井改造为地热井,验证了改造方案和配套技术的可行性和可靠性;大港油田应用直接射孔法对滨海新区的废弃油井进行了改造,采用“一采两灌”模式开发地热,获得了达到供暖要求的地热能,供热面积达 $39 \times 10^4 \text{ m}^2$;长庆油田在陕北姬塬油区建成了长停油井地热能开发利用示范工程。2019年,加拿大阿尔伯塔省开始建设“低焓地热能”样板项目(如图1所示),利用2口相距2.5 km、深2 400 m的废弃井,在井底建立通道,将水从1口井注入地下,经水平段高温加热后从另1口井流回地面,达到采出地热能的的目的,这样的设计利用了热虹吸原理,节省了泵水的能量消耗。

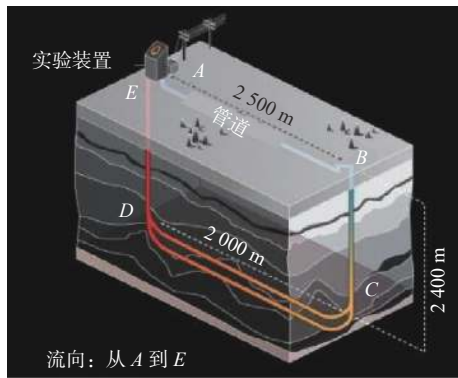


图1 低焓地热能系统

Fig.1 Low-enthalpy geothermal energy system

2000年,斯坦福大学等研究机构提出利用二氧化碳黏度低、热物性好、与天然气储层配伍性高的优点来开发废弃气藏地热能^[10-14]。崔国栋等人^[15]提出了利用二氧化碳开采废弃气藏地热能的操作流程:在提高天然气采收率阶段,提前将部分生产井转为注入井,注入二氧化碳以恢复储层压力;然后注采二氧化碳,进入地热能开发阶段。2020年,加拿大利用二氧化碳羽流系统开采废弃井地热进入测试阶段,用超临界二氧化碳代替水作为工作流体(如图2所示),在地层温度90℃条件下也可以运

行,降低了对地层温度的要求(通常地热发电的地层温度要高于160℃),提高了利用废弃井建设发电厂的经济可行性。

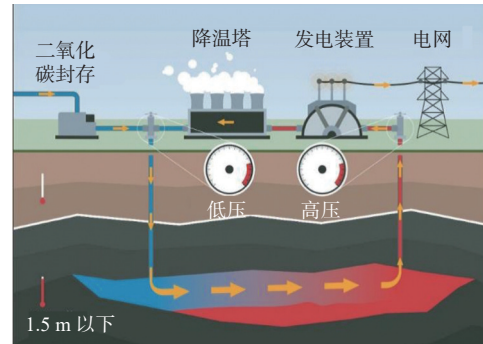


图2 二氧化碳羽流系统开采废弃井地热基本原理

Fig.2 Basic principle of geothermal energy exploitation in abandoned wells by CO₂ plume system

2.2 储能

2.2.1 压缩气体储能

压缩气体储能是用可再生能源发电对气体加压,通过废弃井注入地下储存,压缩气体产生的热能也在地下储存;当需要恢复电能时,气体从井下释放并受热,气体膨胀做功用于发电。

2009年,美国太平洋天然气电力公司从地址评价及选址、储库建设与运维及监测分析等方面,研究了利用枯竭气田进行压缩空气储能技术的经济可行性^[16];考虑储层的圈闭特性、地面发电设备、已钻井的分布密度、废弃井修复成本等因素,形成了储气库适宜性评价方法;利用枯竭油藏进行压缩空气储能,可以满足设施运行所需的流速和压力,但需严格限制空气中的甲烷比例。2020年,美国再生能源实验室提出了压缩气体储能设计方案^[17],考虑了与枯竭油气田基础设施的兼容度,采用天然气作为能量载体储能(如图3所示),模拟结果显示,不同岩层温度的往返效率为40%~70%。但目前该方案处于研究分析阶段,还未进行现场试验。

近年来,国内也进行了压缩气体储能的探索。江都区新型空气储能源网荷储一体化项目,设计利用真武油田废弃油井进行压缩空气储能发电,装机容量120 MW,年发电量 $1.5 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,建设期2年。胜利油田计划与清华大学联手,在垦东区块开展兆瓦级空气储能试验。

2.2.2 泵压水力储能

水力储能是将能量转化为高水位和低水位之间的差值来实现发电,具有储能效率高、环境污染少等优点,但在场地选择、建设成本方面有诸多限

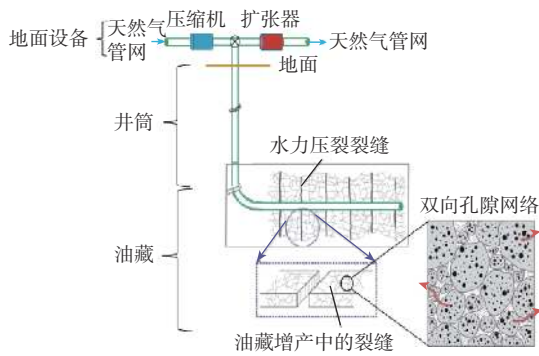


图3 压缩天然气储能技术基本原理

Fig.3 Basic principle of compressed natural gas energy storage technology

制。泵压水力储能是利用废弃井建立一个连接至油气藏的地下封闭水库，当新能源电力产出过剩时，用多产出的电将地面水池中的水加压泵入地下储存起来。当需要用电时打开井口，高压液体回到地面，通过涡轮发电，恢复正常压力的水流回地面水池。通过地面控制，能够在电网负荷高峰期提供短时间、高功率的电力输出。

美国得州 Quidnet 公司发明了模块式的涡流发电机（如图 4 所示），可以使枯竭油气藏储能的往返效率达到 70%~75%，与抽水储能效率相当。目前部署了 6 个试点项目，并得到美国能源部的支持，现已与一家供电公司签订了为期 15 年的承购协议^[18]。

美国 Sage Geosystems 公司推出了“EarthStore”泵压储能技术^[19]，通过油田废弃井向地层注入高压钻井液，推动地下岩石裂缝扩张，再利用多余的可再生能源向井筒注入高压水，以保持裂缝“充气”，然后关闭阀门，将水储存在地层中。当需要使用能源时，打开阀门，地层压力会使水沿着管道流出地面，通过涡轮机进行发电（见图 5）。“EarthStore”系统这种类似于“吸气和呼气”的作用机制，将水

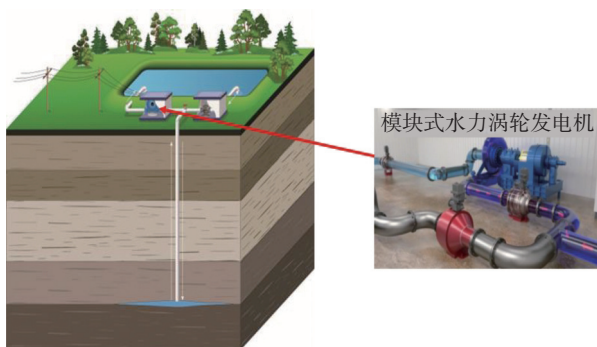


图4 Quidnet公司的泵压水力储能基本原理

Fig.4 Basic principle of hydraulic pump pressure energy storage by Quidnet

与热岩结合在一起，多个邻近的油气井可以组合成多缸热/压力发动机，18~20个这样的装置就可形成一个 50 MW 的可再生能源储存厂。目前，Sage Geosystems 公司得到了国际钻井承包商 Nabors Industries 等投资者的支持。

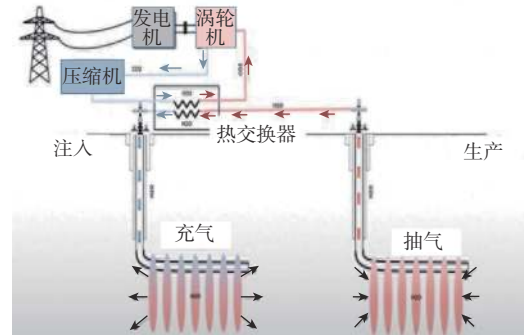


图5 “EarthStore”系统泵压储能原理

Fig.5 Principle of pump pressure energy storage of "EarthStore" system

2.3 枯竭气藏储氢

枯竭气藏储氢具有容积大、地质认识程度高、密封性好和地理分布比较广等优点，与新建储氢设施相比，具有显著的成本优势。欧洲是探索枯竭气藏储氢的先驱，2012年欧盟启动了 HyUnder 项目，主要目的是评估欧洲大规模地下储氢的潜力。2021年欧盟资助了 HyStorIES 项目，探索在地下含水层或枯竭油气藏中储存纯氢的可行性，评估了爱尔兰、意大利等国家枯竭气田储氢的潜力和可行性。

2011—2015年，Hychico公司在阿根廷的 Diadema 地区开展枯竭气藏储氢的先导性试验。首先通过循环注入和采出天然气，使储层压力达到 2.65 MPa（设定为原始压力），同时设立几处监测点，注入少量氢气作为示踪剂，以确定储层的性质和密封性；然后向储层注入氢气，直至储层内含氢量达到 10%，储层压力达到 1.0 MPa；再次注入天然气提高储层压力，检查储层在原始压力下对氢气的密封性，结果证明含氢量 10% 时，对储层密封性无显著影响。2014—2017年，RAG公司在奥地利的 Gampem 气田，将氢气（10%）和天然气（90%）的混合物注入枯竭油气藏，发现 10% 的氢气对储层的密封性、力学性质和设备材料无显著影响，注入氢气的 82% 可以被回收。2023年，RAG公司在该油田启动了枯竭油气藏储氢示范项目。

虽然枯竭气藏储氢可利用天然气储气库的建设经验，但氢气的特殊性使其地下流动行为与流固相互作用更为复杂，利用枯竭油气藏储氢仍在探索阶

段,且面临巨大挑战。据 IEA 的统计,全球 13 个储氢项目中,有 50% 处于概念论证阶段,极少数处于试验和运营阶段。要推动地质储氢发展,亟需开展多尺度多场耦合氢损耗机制、氢气体运移及泄漏监测体系、场地尺度数值模拟等攻关研究^[20-23]。

2.4 其他能源开采

2.4.1 废弃井采氢

目前,利用枯竭油气藏采氢有地下原位燃烧和微生物发酵 2 种方式。

加拿大 Proton 公司利用其在原位燃烧和纳米薄膜过滤方面的技术优势,提出了地下原位燃烧采氢技术^[24],主要流程分为 3 步:1)将废弃井改造为注氧井,将富含氧气的气体注入储层,在储层高温下,氧气与储层内的少量焦炭结合引起燃烧,引发热解反应、水热分解、烃气化和水煤气变换等一系列化学反应,生成含有氧气、二氧化碳、一氧化碳、甲烷、氮气和氢气的混合气体,氢气缓慢上浮汇集在盖层岩石的下部,其他气体则留在储层中;2)在注氧井旁边钻 1 口氢气接收井,井深钻至盖层底部,井眼底部安装过滤装置,将其他气体过滤掉,将氢气分离,并提升到地面;3)氢气存储(见图 6)。2020 年,该公司在加拿大一个废弃油田进行了现场试验,氢气日产量超过 30 t。但由于注入储层的是空气,其中 70% 以上的氮气既不参与合成反应,也达不到超临界状态,而是在地下积存,影响了氢气的持续生产。目前,该公司计划在地面建设氧气站,向地下注入纯氧气,以解决氮气的地下积存问题。

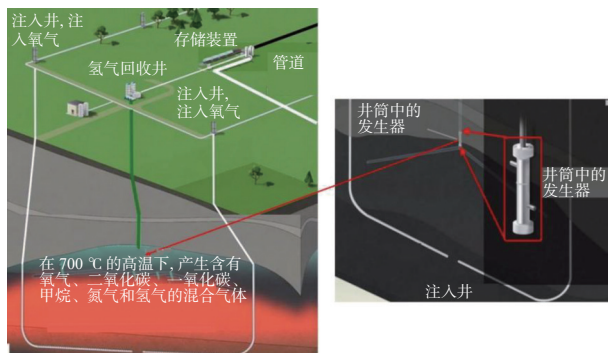


图 6 井下原位燃烧制氢基本原理

Fig.6 Basic principle of hydrogen production by in-situ combustion

美国 Cemvita Factory 公司研发了利用枯竭油气藏的天然微生物采氢技术^[25],并将采出的氢定义为金氢,其生产流程为:将循环水、食用微生物和抑制物质通过废弃井注入储层,通过生物刺激发生专有

反应,产生氢气和二氧化碳,氢气通过井筒采出,二氧化碳封存在地下。2022 年,该技术在美二叠纪盆地枯竭油田进行了现场试验,成功采出了氢气。

2.4.2 废弃井采锂金属

锂金属是新能源领域的关键矿产,主要存在于伟晶岩矿物及盐水中,在自然界中没有单质存在。目前,主要通过矿石提炼和卤水萃取来生产,需要占用大量土地和水资源。由于油气开发产出的盐水中通常含有锂,随着锂需求量的增加,从废弃井中开采锂金属已经引起广泛关注。目前,加拿大、美国等国家已进行了废弃井采锂技术的现场试验,我国仍处于起步阶段。加拿大 Prairie Lithium 公司购买了 3 口废弃井,计划加深钻至富含锂的盐水层,进行锂金属开采。美国 A1 Lithium 公司计划在 Paradox 盆地的废弃油气井进行锂的勘探开发^[26]。2023 年,中国石油西南油气田公司采用气田出水预处理和吸附膜-沉淀法耦合的提锂工艺,在龙王庙组气藏成功产出了首批 Li_2CO_3 成品,锂吸附剂回收率达 85%~95%,实现了国内油气田采出水提锂“零的突破”^[27]。

为了提高锂的提取速度,普林斯顿大学开发了一种可以扭曲成绳索的多孔纤维,研发了绳子捞锂技术^[28]。该多孔纤维内部亲水,表面防水,浸入盐水中时,水会通过毛细作用向上流动,水蒸发后,在纤维表面形成氯化钠和氯化锂晶体,由于钠盐溶解度较低,形成的晶体在绳子下端,而溶解度较高的锂盐晶体则在上部,可轻松分离。该技术将原来几个月甚至几年的蒸发时间缩短至不到一个月。

3 枯竭油气藏与新能源融合发展建议

枯竭油气藏与新能源融合发展已进行了多种路径的探索,但受技术发展阶段、行业壁垒、信息壁垒、行政审批和商业模式等因素的限制,目前仍未形成顺畅的发展态势。为了切实发挥枯竭油气藏与新能源融合发展的潜力,需要在建立枯竭油气藏信息共享平台和废弃油气井资源化利用研发平台、形成油气藏资源化利用标准、创新枯竭油气藏资源化利用商业模式等方面进行攻关研究。

1)进行枯竭油气藏普查,建立相关信息共享平台。开展枯竭油气藏普查工作,详细调研普查枯竭油气藏位置、封存状态、地质条件、资源赋存、区域经济及社会发展水平、市场需求与经济性等基本信息与参数,为综合利用、商业化运营奠定基础,建议建立国家级枯竭油气藏数据库和信息共享平台,并

实行信息动态跟踪管理,为推进枯竭油气藏与新能源融合发展提供全面而详实的数据支撑。

2) 建立废弃油气井资源化利用研发平台,协同推动技术快速突破。废弃油气井资源化利用涉及传统能源和多种新能源种类,有油气公司、油服公司、新技术公司、最终用户、区域管理等多种参与主体,基础理论研究薄弱,且存在地质条件复杂,社会条件多变等困难,建议建立废弃油气井资源化利用研发平台,围绕枯竭油气藏资源化利用的关键核心问题进行联合攻关,如地热开发过程中的压力保持问题,氢气与储层岩石和流体的化学反应、微生物反应、多尺度多场耦合氢损耗机制、氢气运移及泄漏监测体系,枯竭油气藏资源化利用的地质、井筒、地面设施评价及选址方法、应用潜力评价方法、投入产出评价方法等。在科研机构、地方政府、国内外先进科技企业、传统能源企业之间形成技术交流、专利转让、技术试验、利益共享的研发合作机制。

3) 开展示范试点,形成枯竭油气藏资源化利用的标准体系。枯竭油气藏资源禀赋条件各不相同,原有地面基础设施和井筒条件也是千差万别,因此建议通过国家重大专项研发平台,对枯竭油气藏储能的安全性、科学性、技术经济可行性进行评估,选取技术可靠、经济可行、资源综合利用效率高的项目作为示范工程,进而形成枯竭油气藏资源化利用的装备、设计、施工及项目运行的规范和标准体系。在条件许可地区,采用政府与企业共同投资的模式,形成产业示范区,以点带面,推动我国油气能源与新能源融合发展的进程。

4) 探索枯竭油气藏资源化利用的商业模式,推动协同低碳发展。构建枯竭油气藏与新能源融合发展的投资合作机制,明确产权与利益分配机制。关注新兴科技公司,发掘并投资具有潜在颠覆性的工程技术,抢占发展先机。在电网接入、示范项目申报等方面与地方政府及金融机构合作,积极争取专项或区域税收优惠政策,多方协力推动枯竭油气藏资源化利用发展,逐步形成经济和社会效益显著的低碳发展商业模式。

4 结束语

枯竭油气藏的资源化利用是解决废弃油气井带来的安全环保问题的重要途径,其与新能源的融合发展,对于建设国家新型能源体系具有重要意义。目前,国内外在利用枯竭油气藏进行地热开采、储

氢、储能、制氢、开采锂金属等方面,开展了大量卓有成效的研究和探索,但由于技术可移植借鉴的程度不同,技术发展成熟度有很大差异,而且受理念思路、行政审批、运营管理等因素的限制,枯竭油气藏与新能源融合发展中存在技术突破难、运营成本高、组织运营不畅等问题。为此,需要建立国家级枯竭油气藏数据库和信息共享平台及废弃油气井资源化利用研发平台,开展示范工程项目,逐步形成枯竭油气藏资源化利用的规范和标准,油公司、油服公司、新技术公司、地方政府、金融机构等多方合作,推动枯竭油气藏资源化利用快速发展,更好地满足国家能源战略需求。

参 考 文 献

References

- [1] 师琰. 全球现有油田产量正以 9% 的自然递减率下滑 [EB/OL]. (2008-11-15)[2024-01-20]. <https://finance.sina.com.cn/money/future/futuresnyzx/20081115/02105510196.shtml>.
SHI Yan. Global oilfield production is currently declining at a natural rate of 9% [EB/OL]. (2008-11-15)[2024-01-20]. <https://finance.sina.com.cn/money/future/futuresnyzx/20081115/02105510196.shtml>.
- [2] 陆晓如, 董喆. 重回 2 亿吨, 石油人做对了什么 [EB/OL]. (2023-02-21) [2024-01-20]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1758422404177586598&wfr=spider&for=pc>.
LU Xiaoru, DONG Zhe. Returning 200 million tons, what did the oil man do right [EB/OL]. (2023-02-21)[2024-01-20]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1758422404177586598&wfr=spider&for=pc>.
- [3] 贡晓丽, 张超. 北美页岩气革命欠下的环境债, 恐怕要全世界一起还了 [EB/OL]. (2020-07-15) [2024-01-10]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1672298877076288307&wfr=spider&for=pc>.
GONG Xiaoli, ZHANG Chao. The environmental debt owed by the North American shale gas revolution may have to be repaid by the whole world together [EB/OL]. (2020-07-15)[2024-01-10]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1672298877076288307&wfr=spider&for=pc>.
- [4] 吕建中. 保障能源安全需做好传统能源与新能源战略协同 [J]. 世界石油工业, 2022, 29(2): 1-6.
LYU Jianzhong. Necessary to coordinate traditional and new energy strategies to ensure energy security [J]. World Petroleum Industry, 2022, 29(2): 1-6.
- [5] MARSH M. New Brunswick onshore oil and natural gas well abandonment study [EB/OL]. [2024-01-10]. <https://dokumen.tips/documents/new-brunswick-onshore-oil-and-natural-gas-well-abandonment-coiled-tubing-can.html?page=1>.
- [6] KOOFFREHA B E, ANYATANG B F I. Abandonment/decommissioning under nigerian legal regimes: a comparative analysis [EB/OL]. (2020-12-04) [2024-01-10]. <http://ensani.ir/file/download/article/1621232043-10362-2020-12-4.pdf>.
- [7] KANT A. Oilfield abandonment and soil restoration in the Netherlands, experiences for the future [R]. SPE 126956, 2010.

- [8] PRASETYA A E, RAKHMAHWIDIATI R, HUTABARAT R D. Plug and abandonment procedures for onshore wells and the utilization of reserved abandonment and site restoration ASR funds[R]. SPE 193956, 2018.
- [9] BROWN D W. A hot dry rock geothermal energy concept utilizing supercritical CO₂ instead of water[C]//Proceedings, Twenty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, January 24-26, 2000, Stanford University, Palo Alto, California: 1-6.
- [10] PRUESS K. Enhanced geothermal systems (EGS) using CO₂ as working fluid: a novel approach for generating renewable energy with simultaneous sequestration of carbon[J]. *Geothermics*, 2006, 35(4): 351-367.
- [11] ADAMS B M, KUEHN T H, BIELICKI J M, et al. On the importance of the thermosiphon effect in CPG (CO₂ plume geothermal) power systems[J]. *Energy*, 2014, 69: 409-418.
- [12] LIANG Xi, REINER D, LI Jia. Perceptions of opinion leaders towards CCS demonstration projects in China[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(5): 1873-1885.
- [13] 宋先知, 许富强, 宋国锋. 废弃井地热能开发技术现状与发展建议[J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(6): 1-7.
SONG Xianzhi, XU Fuqiang, SONG Guofeng. Technical status and development suggestions in exploiting geothermal energy from abandoned wells[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(6): 1-7.
- [14] 宋先知, 许富强, 姬佳炎, 等. 多层合采油藏废弃井网取热性能评价[J]. *天然气工业*, 2022, 42(4): 54-62.
SONG Xianzhi, XU Fuqiang, JI Jiayan, et al. Evaluation on the heat extraction performance of abandoned well pattern in multi-layer commingled production oil reservoirs[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(4): 54-62.
- [15] 崔国栋, 任韶然, 裴智超, 等. 低渗废弃气藏注超临界 CO₂ 采热发电技术及经济性分析[J]. *石油学报*, 2022, 43(1): 156-166.
CUI Guodong, REN Shaoran, QIU Zhichao, et al. Technical and economic analysis of geothermal development and power generation by injecting supercritical CO₂ in low-permeability depleted gas reservoirs[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(1): 156-166.
- [16] 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 Chaobin, LI Cai, YANG Lichao, et al. Research review and engineering case analysis of geological compressed air energy storage[J]. *Geological Survey of China*, 2021, 8(4): 109-119.
- [17] U. S. Department of Energy. Energy storage grand challenge roadmap[EB/OL]. (2020-12-21)[2024-01-20].<https://www.energy.gov/sites/default/files/2020/12/f81/Energy%20Storage%20Grand%20Challenge%20Roadmap.pdf>.
- [18] Quidnet Energy. Quidnet's breakthrough energy storage technology is enabling the zero-carbon grid[EB/OL]. [2024-01-17].<https://quidnetenergy.com/>.
- [19] Sage Geosystems. What makes Sage Geosystems different? [EB/OL]. [2024-01-17].<https://www.sagegeosystems.com/>.
- [20] 潘松圻, 邹才能, 王杭州, 等. 地下储氢库发展现状及气藏型储氢库高效建库十大技术挑战[J]. *天然气工业*, 2023, 43(11): 164-180.
PAN Songqi, ZOU Caineng, WANG Hangzhou, et al. Development status of underground hydrogen storages and top ten technical challenges to efficient construction of gas reservoir-type underground hydrogen storages[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(11): 164-180.
- [21] 周庆凡, 张俊法. 地下储氢技术研究综述[J]. *油气与新能源*, 2022, 34(4): 1-6.
ZHOU Qingfan, ZHANG Junfa. Review of underground hydrogen storage technology[J]. *Petroleum and New Energy*, 2022, 34(4): 1-6.
- [22] 刘翠伟, 洪伟民, 王多才, 等. 地下储氢技术研究进展[J]. *油气储运*, 2023, 42(8): 841-855.
LIU Cuiwei, HONG Weimin, WANG Duocai, et al. Research progress of underground hydrogen storage technology[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2023, 42(8): 841-855.
- [23] 罗小明, 贾子寒, 张宏阳. 枯竭油气藏地下储氢技术挑战及展望[J]. *油气储运*, 2023, 42(9): 1009-1023.
LUO Xiaoming, JIA Zihan, ZHANG Hongyang. Technical challenges and outlook of underground hydrogen storage in depleted oil and gas reservoirs[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2023, 42(9): 1009-1023.
- [24] Proton Technologies. H₂ recovery[EB/OL]. [2024-01-20].<https://www.proton-technologies.com/markets/h2-recovery/>.
- [25] Cemvita. Cemvita's successful field test demonstrates gold Hydrogen™ production in situ [EB/OL]. (2022-09-27)[2024-01-20].<https://www.cemvita.com/news/cemvitas-successful-field-test-demonstrates-gold-hydrogen-tm-production-in-situ>.
- [26] PARASKOVA T. Abandoned oil wells offer new source of lithium[EB/OL]. (2023-04-22)[2024-02-15].<https://oilprice.com/Metals/Commodities/Abandoned-Oil-Wells-Offer-New-Source-Of-Lithium.html>.
- [27] 赵紫伊, 周雪, 王铁夫, 等. 油气田采出水锂资源回收可行性、技术现状及展望[J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(4): 1434-1443.
ZHAO Ziyi, ZHOU Xue, WANG Tiefu, et al. Feasibility, technical status and prospects of lithium recovery from produced water in oil and gas fields[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(4): 1434-1443.
- [28] CHEN Xi, YANG Meiqi, ZHENG Sunxiang, et al. Spatially separated crystallization for selective lithium extraction from saline water[J]. *Nature Water*, 2023, 1(9): 808-817.

[编辑 陈会年]