

DOI: 10.13745/j.esf.2020.1.3

深层含水层地下储热技术的发展现状与展望

黄永辉^{1,2,3}, 庞忠和^{1,2,4,*}, 程远志^{1,2,4}, 孔彦龙^{1,2,4}, 汪集旻^{1,2,4}

1. 中国科学院 地质与地球物理研究所; 中国科学院页岩气与地质工程重点实验室, 北京 100029
2. 中国科学院 地球科学研究院, 北京 100029
3. Department of Environmental Informatics, Helmholtz Centre for Environmental Research-UFZ, Leipzig 04318, Germany
4. 中国科学院大学, 北京 100049

HUANG Yonghui^{1,2,3}, PANG Zhonghe^{1,2,4,*}, CHENG Yuanzhi^{1,2,4}, KONG Yanlong^{1,2,4}, WANG Jiyang^{1,2,4}

1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences; Key Laboratory of Shale Gas and Geoengineering, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China
2. Institutions of Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
3. Department of Environmental Informatics, Helmholtz Centre for Environmental Research-UFZ, Leipzig 04318, Germany
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

HUANG Yonghui, PANG Zhonghe, CHENG Yuanzhi, et al. The development and outlook of the deep aquifer thermal energy storage (deep-ATES). *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(1): 017-024

Abstract: The deep aquifer thermal energy storage (deep-ATES) is a technology that uses deep aquifer (> 500 m) as the thermal storage medium. Storage and recovery of thermal energy are achieved by extracting and injecting groundwater from deep aquifers through groundwater wells. Using geothermal energy as basic carrier, deep-ATES achieves balancing among multiple energy resources, and guarantees a steady supply of energy. Deep-ATES is an effective and critical technology for matching up heat supply and demand over time and space. In this paper, we presented a comprehensive review of the worldwide development of deep-ATES projects and summarized its thermal performance indicators. Thereby, we investigated the key processes and dominant hydrogeological and operational parameters controlling the thermal recovery efficiency of a deep-ATES system. We further discussed the technological bottlenecks in deep-ATES on the basis of previous researches. The last but not least, we evaluated and predicted the economic and market potentials of the deep-ATES system.

Keywords: hot temperature aquifer thermal energy storage; thermal recovery efficiency; geothermal energy; hydrogeology; economical-potential

摘要: 深层含水层储热是一种利用深度>500 m的深层含水层作为储热介质的储热技术,储热对象通常为50~150℃的热水。它通过地下水井从深层含水层中抽取和灌入地下水,实现热能储存和回收。深层含水层储热技术是弥补能源供需时空分布的不平衡,综合利用多种可再生能源,实现节能减排的有效途径,是国内外研究的前沿和热点。文中首先阐述了深层含水层储热系统在世界范围内的历史发展,归纳储热系统的热工性能,在总结前人研究工作的基础上分析影响其热回收效率的关键参数,并对各个参数对热回收效率的敏感性做了综述。在此基础上,本文还讨论了限制深层含水层储热系统发展的技术瓶颈,并针对系统的经济效益和市场潜力做了预测和展望。

关键词: 深层含水层储热系统;热回收效率;地热;水文地质;经济效益

中图分类号: P314;P641.25 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2321(2020)01-0017-08

收稿日期:2019-03-31;修回日期:2019-05-11

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项资助项目(XDA21050500)

作者简介:黄永辉(1989—),男,博士,主要从事热储工程数值模拟研究。E-mail: yh.huang@mail.iggcas.ac.cn

*通信作者简介:庞忠和(1961—),男,研究员,博士生导师,主要从事地热地质学研究。E-mail: z.pang@mail.iggcas.ac.cn

0 引言

含水层储热是一种利用地下含水层作为介质,将热能以热水的形式存储于地下含水层中的储能系统。它通过地下水井从含水层中抽取和灌入地下水,实现热能储存和回收。含水层储能可以弥补能源供需在时间/空间上分布的不平衡,能够综合利用多种可再生能源形式,减少对矿物燃料的依赖,为节能减排和环境保护提供了一个很好的解决途径。根据含水层所处深度,可将含水层储能系统分为如下几类:(1)浅层含水层储能,含水层深度在 500 m 以浅,存储热水温度一般低于 50 °C;(2)深层含水层储能,含水层深度通常在 500 m 以深,存储热水温度一般为 50~150 °C。

国际上对浅层含水层储热系统的研究始于 20 世纪中叶。德国于 2000 年在柏林地区建立了第一个全商业化运作的基于浅层地下含水层的跨季节储热系统^[1]。随后荷兰对浅层低温含水层储热进行了广泛的研究,并在成井技术和回灌技术等方面取得了突破,之后该技术在荷兰得到了广泛推广和应用^[2]。我国在利用浅层地下含水层进行储热方面的实践开展得较早^[3],如 20 世纪 60 年代,上海为了控制工业上过度抽取地下水所引起的地面沉降,进行了地下水的人工补给,同时开展了“冬灌夏用”和“夏灌冬用”的地下含水层储热技术^[4-5]。截至 2017 年,全世界范围内已建成 2 800 多组浅层含水层储热系统,其中 85% 在荷兰^[2],我国有 6 处已建成并投入使用^[6]。

基于浅层含水层的储热方式具有成本低的优势,但因其工作温度较低、规模较小,储热能力有限,且有污染地下饮用水的潜在风险。近年来,世界范围内开始尝试替代方法,即基于深层含水层的高温储热系统模式(此处“高温”针对储能系统,相较于浅层含水层储能温度而言,该名称与国际惯例一致^[7],有别于地热资源中的“高温”)。深层含水层储热系统是一种利用深度 > 500 m 的深层含水层作为储热介质的储热技术^[8-9],储热对象通常为 50~150 °C 的热水,其概念模式如图 1 所示。

深层含水层的储热系统相较于传统的浅层含水层储能系统,具有以下明显的优势^[9]:(1)可储热量更高,储热密度更大,深层储热系统通常存储的热水可达 50~150 °C,而浅层含水层仅适于存储 20~50 °C 的热水^[7-8];(2)系统储热效率更高,中深层含水层通

常储层温度较高,而且储层的渗透率相对较低,使得热量散失相较于浅层含水层要小得多;(3)对周边环境和地下水水质的影响程度较小^[10]。Fleuchausa 等^[6]比较了目前常见的水箱蓄热、浅层含水层储热和深层含水层储热几种地下储热方式的特点,如表 1 所示。

相较于水箱蓄热,含水层储热(浅层与深层)具有蓄热体积大、可储热量高、成本低等显著特点,但对地质条件的要求也更为苛刻:首先需要有合适的含水层,其次需要满足特定要求的水文地质条件,例如较低的地下水流速,较低的储层渗透率以及合适的含水层厚度等,最后还需要有合适的地球化学环境以防止结垢和腐蚀等情况;而深层含水层储能因含水层所处深度更深,对地质条件的要求更为复杂。同时,水箱蓄热和浅层含水层储热都有污染地下饮用水的风险,而深层含水层储热则对环境的影响较小。

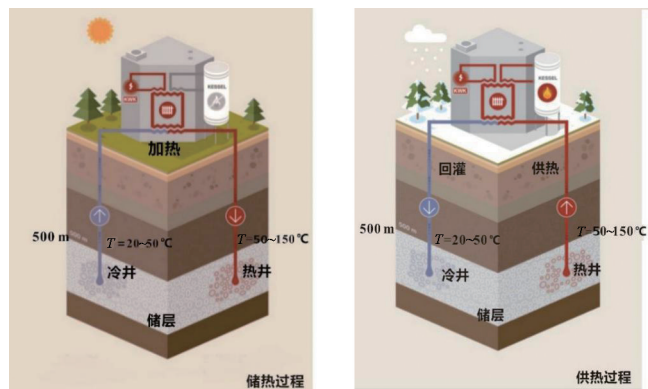


图 1 深层含水层储热系统储/供能流程示意图;以地下水为水源的情形

Fig. 1 Schematic diagram of energy storage/supply in deep aquifer energy storage system

表 1 综合比较三组跨季节地下储能方式的主要特点
(修改自文献^[6])

Table 1 Comparison of three seasonal underground thermal energy storage (UTES) scheme. Modified from ^[6].

特点	水箱蓄热	浅层含水层储热	深层含水层储热
储热媒介	水	地下水/岩石	地下水/岩石
地质要求	+	++	+++
储热体积	+	+++	+++
可储热量	+	++	+++
空间需求	+++	+	+
投资	+++	+	+
环境影响	++	++	+

注:+++ 高; ++ 中; + 低。

1 发展历史

(1)1976—1988年。6座实验性质的深层含水层系统先后在不同的国家开始建立,其中部分工程属于国际能源机构的ECES研究框架下^[6]。工程的目的是在实验成功之后用于供暖工程,但因为严重的技术问题,目的没有实现。这些技术问题主要包括:①热损失/损耗较大,储热效率低;②粉末颗粒、气泡、矿物沉淀造成井下淤塞;③组件腐蚀。

(2)1988—2000年。为了解决深层含水层系统中存在的上述技术问题,科学家开展了大量的研究工作^[8-9,11]。这些研究指明了上述技术问题的解决途径,也证实深层含水层系统具实际可行性,但也明确了深层含水层系统面临的技术难题远远大于浅层低温含水层储能系统。

(3)2000—2010年。德国在深层含水层储能系统开展了大量研究和工程实践,并先后于2000年和2004年在柏林建立了2座含水层储能系统:Reichstag工程和Neubrandenburg工程。前者注入70℃热水,含水储层在地下300m左右;后者注入水的温度在90℃,含水层在地下1000m左右^[11]。

这2座储能系统成功运行至今,也是目前世界上唯一在运行的深层含水层储能系统工程。

(4)2010—现今。随着世界范围内对能源需求的日益增长,人们开始探索温度更高的深层含水层系统。德国宝马公司和慕尼黑工业大学于2016年设计了一套深层含水层储能系统示范工程,储层温度可达130℃,注入流量在280m³/h。含水层选在地下500m深的石灰岩^[12]。汉堡市政府计划利用垃圾焚烧场和污水处理厂的余热,将其存于地下400~500m深的砂岩含水层中,以实现为8000户住户提供长期供暖^[13]。瑞士计划在首都伯尔尼地区利用发电站的余热将水烧热至120℃,存储在地下400~500m的深砂岩含水层,以实现在冬季为该市旧城区供暖。美国与瑞士研究了利用CO₂替代传统的水作为储能媒介,将地热储能和CO₂地质封存结合起来,在实现高效储能的同时进行CO₂的存储^[14]。该项目已证明以CO₂为介质相较于传统以水为主的含水层储能系统在储能效率上有明显提升。

表2总结了国际上深层含水层储能系统工程相关案例。目前我国在含水层储能技术上的研究与实践多局限于浅层,针对中深层热储的深层储热系统的理论研究和工程实践还是空白。

表2 国际上深层含水层储能系统工程案例表^[9]
Table 2 Overview of deep aquifer energy storage project^[9]

年份	地点/工程名称	当前状态	热源	注入温度/℃	深度/m
1976	Auburn University, Mobile/AL, USA	实验/已关闭	电厂余热	55	40~61
1982	SPEOS, Lausanne-Dorigny, Switzerland	已关闭	废水处理厂余热	69	未知
1982	Hørsholm, Denmark	示范工程/已关闭	垃圾处理厂余热	100	10
1982	University of Minnesota, St. Paul, USA	实验/已关闭	未知	115 (150)	180~240
1987	Plaisir, Thiverval-Grignon, France	实验/已关闭	未知	180	500
1991	De Uithof, Universiteit Utrecht, Netherlands	示范工程/已关闭	热电联供	90	4~45
1998	Hooge Burch, Zwammerdam near Gouda, Netherlands	示范工程/已关闭	热电联供	90	未知
1999	Reichstag, Berlin, Germany	示范工程/正在运行	热电联供	70	300
2004	Neubrandenburg, Germany	运行中	热电联供	75~80	1 250
2015	Duiven, Netherlands	可行性研究	垃圾处理厂余热	140	未知
2016	BMW, TU Munich, Germany	示范工程/运行中	未知	130	500~700
2017	Hamburg, Germany	运行中	垃圾处理厂余热	80~90	400~500
2017	Bern, Switzerland	计划	垃圾处理厂余热	90~100	500

2 深层含水层储能系统的热工性能

地下含水层是深层含水层储能系统的核心,其水文地质条件决定了整个系统热工性能。因此,国际上关于深层含水层储能技术的研究大多聚焦在地下部分,针对地下部分热工性能也提出了相关的评价指标。这些指标与普通浅层含水层储能系统的评

价指标类似,包括热干扰强度、热回收效率等。热干扰是指一口井周围地下水温度受另一口井地下水温度的影响而发生变化的现象。热回收效率是从含水层中开采出来的热量与注入含水层中的热量的比值。Schout 等^[10]提出深层含水层储能系统中热回收效率同瑞利数之间的关系,并指明了瑞利数作为热工性能指标的可行性。表 3 描述了深层含水层储能系统的热工性能指标的定义和数学表达式。

表 3 深层含水层储能系统的热工性能指标

Table 3 The thermal performance indicators for high-temperature aquifer thermal storage system

指标	定义	方程式
热干扰强度	一口井附近区域的水温受另一口井的水温影响的变化程度	热突破时间 ^[15-16] : $t_b = \frac{\pi H d^2 \rho_{aq} c_{aq}}{3 Q \rho_w c_w}$
热回收效率	从含水层中开采出来的热量与注入含水层中的热量的比值	热回收效率 ^[15] : $\eta = \frac{E_{\text{extract}}}{E_{\text{inject}}}$
瑞利数 (Rayleigh number)	含水层中自然对流和扩散热量、质量传递之比	瑞利数 ^[10] : $Ra = \frac{\alpha \rho g H \cdot C_a \cdot k_a^v \cdot \Delta T}{\mu \lambda_a}$

注: H 为储层厚度; d 为井半径; ρ 为流体密度; c 为比热容; Q 为注入流量; E_{extract} 为从含水层中开采出来的热量; E_{inject} 为注入含水层中的热量; α 为热膨胀系数; μ 为黏滞系数; g 为重力加速度; λ_a 为热传导系数; ΔT 为注入水和原层水的温度差; C_a 为单位体积热容; k_a^v 为储层垂向渗透系数。

Drijver 等^[8]、Schout 等^[10]和 van Lopik 等^[17]分别对深层含水层储能系统在不同情形下的热回收效率做了分析和阐述,本文将相关数据整理如表 4 所示。

由表 4 可知,深层含水层储热系统具有较高的热回收效率,即系统的储热效率较高。

表 4 综合比较不同储热模式的热回收效率

Table 4 Comprehensive comparison of thermal recovery efficiencies of different thermal storage systems

储热模式	热回收率	参考文献
深层含水层储热系统	60%~80%	[8, 10, 17]
浅层含水层储热系统	45%~85%	[8, 18]
埋管储热系统	40%~70%	[19-20]
水箱蓄热	80%~90%	[20]

3 主要关键技术

3.1 热储场地选择技术

由于地质条件的不确定性,在项目的初期或概念性设计阶段,首先要进行可行性分析和风险评价。对于深层含水层储能项目,需要搜集项目所在地的人文

地质调查数据,了解当地的地质构造、含水层分布情况、水质等方面的信息。为了在地下 500 m 以深的深度范围内确定适于深层热水储存的含水层,需要对地层深度、温度以及储层岩性等相关信息进行充分调研。为了实现深层含水层储能系统的经济运行,即达到高回收效率(提取与储存的热能的比率),必须根据储层的地质条件、水力特性以及注入水与原水的温度差异等因素综合考量。其中特别重要的参数之一是透水系数,它是渗透率(储层的水力传导率)和储层厚度的乘积。通常,合适的储层厚度最小为 20 m,最小渗透率为 250~500 mD,有效孔隙率至少为 20%。这些水文地质条件是保证深层含水层储能系统高效运行的重要约束和限制条件。

3.2 井储优化技术

针对深层含水层储能系统的井储优化,需要尽可能确保高的热回收效率,因此对储能过程中含水层流体流动和温度变化的模拟计算是重要研究内容之一,其主要集中在参数的敏感性分析上。许多模型具备模拟深层含水层储能系统中的流体流动和传热过程的功能,表 5 总结了目前可模拟含水层中的流体流动和传热的主流模拟软件及其特点。

表 5 模拟含水层中的流体流动和传热的主流模拟软件及其特点

Table 5 Numerical simulation softwares and their characteristics for modeling groundwater flow and heat transport in aquifer

模型	数值离散方法	特征与应用条件
AQUA3D ^[21]	有限元	3-D; 模拟地下水流动、质量传输与热传导过程
DuMu ^x ^[22]	有限体积	3-D; 开源模拟多孔介质与裂隙介质中的非等温多相流传输
FEFLOW ^[23]	有限元	3-D; 多组分多相流的质量传输、热传导
FEHM ^[24]	控制体积有限元	3-D; 多组分多相流的质量传输、热传导以及化学反应耦合过程
HST2D/3D ^[25]	有限差分	模拟饱和流体在多孔介质中的流动, 可模拟地下水流随温度/压力的变化
TOUGH2 ^[26]	积分式有限差分	3-D; 模拟非饱和/饱和流体在多孔介质与裂隙介质中的流动和传输过程
MT3DMS ^[27]	有限差分	3-D; 通常与 MODFLOW 进行耦合, 可用于模拟地下水流动、质量传输与热传导过程
OpenGeoSys ^[28]	有限元	3-D; 多孔介质与裂隙介质中的水力-传热-力学-化学 (THMC) 多物理场模拟

影响深层含水层储能系统的储能效率的关键参数, 包括水文地质参数、设计和运行参数以及背景参数。在群井储能与开采的模式下, 为了避免产生严重的热干扰并维持较高的热回收效率, 适当的井距和井群布置方式也非常重要。

Jeon 等^[2]利用数学模型分析了两组丹麦深层含水层储能系统的备选场地, 并开展参数敏感性分析的工作。他总结了影响深层含水层储能系统热回收效率的主要因素, 包括: 总的注入流量, 注入水温度, 含水层的渗透系数, 含水层的比热, 隔水层、盖层的比热, 含水层的厚度, 含水层和隔水层、盖层的热导率等, 但同时他也指出影响储能系统的关键参数随场地不同而发生改变, 需要根据实际场地的条件而具体分析。Wenzlaff 等^[19]分析了深层含水层储能系统单井式群井系统, 并分析井间距和布井方式对储能效率的影响。

Drijver 等^[8]指出相较于浅层含水层储能, 在 HT-ATES 项目中导致热量损失的最重要的过程是密度驱动流动(也称为自由对流的浮力流)。浮力流是由注入的水和周围的地下水之间的密度差异引起的, 注入的热热水因温度较高而相较储层原水密度更低。Winterleitner 等^[29]通过研究与分析 Oman 的一座深层含水层储能系统, 也证实垂向的浮力流是导致储能系统热量损失的主要原因, 并进一步指出储层的非均质性会增加热量的损失。各国学者也提出了不同方法以补偿浮力流带来的热损失, 包括选择较深的储层使得储层具有较高的初始温度从而缩小温度差, 增加注入热水的盐度以弥补注入水和储层原水间的密度差^[17]。

4 技术瓶颈问题

4.1 腐蚀和结垢问题

腐蚀和结垢过程是影响深层含水层储能效率的重要因素。在深层含水层的高温、高压条件下, 矿物的溶解和沉淀也是限制深层含水层储能技术大范围推广的主要原因与瓶颈。这些化学反应产物经常可在井内、井周围以及地上设施中观察到。中深层含水层通常会遇到高盐度咸水, 所以在选择材料时需要考虑这一点以防止系统组件的腐蚀。压力和温度的变化导致不同矿物的溶解和沉淀, 主要包括碳酸钙(方解石和文石)和铁矿物等。例如, 方解石结垢通常发生在开采井和热交换器表面, 原因是其在高温下溶解度较低。为了防止其与大气进行气体交换, 通常用氮气保持井中压力, 而氧气的进入通常会引发氧化反应导致铁矿物沉淀并降低井的注入能力和生产效率。

微生物作用对深层含水层储能系统的影响尤为重要。微生物不仅会影响含水层中碳酸钙和铁矿物沉淀的产生, 而且它们对硫的氧化-还原循环的影响更为明显^[9]。硫酸盐还原菌以及硫氧化菌(SRB 和 SOB)也可能降低注入井的注入能力和开采井的生产率, 并可能进一步导致微生物腐蚀(MIC)。MIC 包括几个过程: 在 pH 较低环境下, 钢的非生物腐蚀所产生的氢气可与 SRB 发生反应从而促进腐蚀。此外, 硫化物可能与三价铁反应生成硫, 这对于不锈钢也具有极强的腐蚀性。通常情况下, 虽然 SRB 可以在没有氧气的情况下存活, 但和其他细菌一样, 它

们的生长和存活需要有机物质。传统研究认为 SRB 很难在中深含水层中存活, 是因为中深含水层水体中的有机物质和营养物质含量较低。但近年来研究发现, SRB 细菌也可以在深层含水层储能系统中大量生长, 主要原因是随着温度的升高, 尤其在高温作用下, 矿物的溶解过程加剧, 或多或少会有一些有机质从沉积物中释放出来。虽然这一过程较为缓慢, 但是考虑到通常深层含水层储能系统使用寿命达 20~30 a 以上, 这期间 SRB 等细菌的微生物作用将不容忽视。

这些化学反应和微生物过程, 也通常是限制深层含水层储能系统的最高注入温度的主要因素。针对深层含水层储能所造成的化学和生物影响的处理方法, 归纳起来有两种: (1) 将重点放在影响产生后的补救措施上, 如对井进行定期回扬、抽水井和注水井轮流对倒以及洗井等方式; (2) 从化学和微生物过程的机理出发, 以预防为主, 一套行之有效的污水处理技术是预防深层含水层储能系统中化学和生物影响的有效途径。

4.2 水处理技术

Drijver 等^[8]综述了离子交换和添加 HCl 这两组水处理方法以防止这些化学和生物过程对深层含水层储能系统影响。前一种方法在实际应用中存在明显的问题: (1) 水处理的强度需根据定期的水化学分析进行实时的调整; (2) 需要添加大量的 NaCl 以保证水处理的效果, 这为系统带来了潜在风险; (3) 系统运行一段时间后在热井周围还是出现了严重的结垢现象。而第二种方法在荷兰 Zwammerdam 深层含水层储能示范工程中得到应用并取得了较好的效果, 在系统运行了 5 a 后, 井内并未有结垢现象产生。但该方法存在的最大问题是大量的 HCl 加入系统中, 给系统的操作和运行带来了风险。

2017 年, Ueckert 和 Baumann^[12]在慕尼黑深层含水层储能系统工程中尝试添加 CO₂ 以防止碳酸盐沉淀, 相较于 HCl, CO₂ 的酸化作用更为温和, 减轻了操作风险, 并取得良好的效果。

尽管多年来, 研究人员关于水处理方法做了系统的研究并提出了一系列方法, 但目前深层含水层储能系统中的水处理方法的有效性仍旧不确定, 尤其在系统长期运行过程中是否能保持较好的处理效果目前仍然存疑。水处理技术仍然是深层含水层储能技术突破瓶颈、实现大范围推广的关键技术。

5 经济效益分析

良好的经济效益和环境友好型技术是深层含水层储能系统的主要特点与优势。国内外学者针对其经济性和市场潜力做了大量实例研究与分析。

根据 Kilkiş 等^[30]的研究, 在瑞典皇家理工学院校区新设计的能源供应场景中, 使用大规模深层含水层储能系统和大含水层储能系统与太阳能集热器耦合模式, 与现有能源供应系统相比, 节能量分别达到 12 和 16 GW·h, 而 CO₂ 减排量分别达到 2 663 和 2 654 t。Réveillère 等^[31]的模拟研究表明, 将 HT-ATES 与巴黎盆地的区域供暖网络相结合, 可将网络中的地热所占份额从 50% 提高到 70%。Werner^[32]通过对荷兰 Duiven 深层含水层储能系统的评估和研究表明, 相较于传统的燃气锅炉供暖方式, 使用深层含水层储能将节约 83% 的化石燃料, 而 CO₂ 减排量达到了 31 000 t。

Drijver 等^[8]对荷兰 Vierpoders 市深层含水层储能系统备选场地进行了经济效益分析。表 6 显示了从大型深层含水层储能系统中提取每 GJ 热能的成本价格, 能源价格基于 20 a 的折旧期。

表 6 大型深层含水层储能系统中提取每 GJ 热能的成本价格^[8]

Table 6 Cost price per GJ of thermal energy for the large high-temperature aquifer thermal storage system^[8]

大型深度含水层储能系统中 注入热水的温度/°C	成本价格/ (欧元·GJ ⁻¹)
75	3.5
93	1.9

Wesselink 等^[33]以荷兰 Groningen 市为例预测了深层含水层储能系统在当地的市场潜力。他们指出, 在当前政策下, 深层含水层储能系统的平准化能源成本 (LCOE: levelized cost of energy) 为 2.76~3.54 欧元/GJ:

$$LCOE = \frac{EQ - \sum_{y=1}^n \left[\frac{I_y - C_y - L_y - T_y}{(1+r)^y} \right]}{\sum_{y=1}^n \left[\frac{1}{(1+r)^y} P_y \right]}$$

式中: EQ 为股权投资; I_y 为第 y 年的总收入; C_y 为第 y 年的总成本; L_y 为贷款费用; T_y 为税费; r 为股本回报率; P_y 为开采出来的总热量; y 为第 y 年。

该结果与 Drijver 等^[8]的分析较为一致; 同时他

他们还针对影响其市场潜力和经济效益的关键参数进行敏感性分析,指出储能系统的运行生命周期和能源需求为主要影响因素。他们还进一步对比了荷兰天然气平准化能源成本在 6.51~16.51 欧元/GJ。这意味着,相较于天然气,大型深层含水层储能系统工程成本更低,具有更好的经济效益和广阔的市场前景。

6 结论与展望

本文针对深层含水层储热技术的发展历史、关键技术、经济效益及市场潜力等问题做了简要的综述。当前的研究集中在分析影响深层含水层储热系统地下部分性能以及热回收效率的关键因素,并总结了限制该技术发展与推广的瓶颈问题,同时,针对该储热技术的经济效益及市场潜力做了初步的评估和预测。

总体来说,深层含水层储热技术具有储热容量大、储热效率高、造价低等优势,是一种较为理想的大规模跨季节储能方式。它既能结合其他多种能源形式实现多能互补,也可作为区域地热资源的必要补充和增强。在未来清洁型供暖需求日益增长、可再生能源占比越来越大的大背景下,深层含水层储热系统作为一种有着良好发展基础和前景的储热技术将发挥更大的作用。

但与此同时,深层含水层储热系统目前还是一项新兴的技术,国际上针对该技术的工程实践多为试验性质或示范工程,国内在深层含水层储热系统的应用方面还是空白。针对该技术的相关理论研究仍不成熟,技术在发展过程中还存在一些瓶颈问题需要攻克与突破,因此对该技术还需要投入更多更深入的研究。

参考文献

- [1] SCHMIDT T. The central solar heating plant with aquifer thermal energy store in Rostock: results after four years of operation[C]//Proceedings of Eurosun. Freiburg, Germany: International Solar Energy Society, 2004: 20-23.
- [2] JEON J, LEE S, PASQUINELLI L, et al. Sensitivity analysis of recovery efficiency in high-temperature aquifer thermal energy storage with single well[J]. Energy, 2015, 90: 1349-1359.
- [3] 刘雪玲, 朱家玲, 刘立伟. 热泵耦合含水层储能技术应用研究[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36: 132-135.
- [4] 赵新颖, 万曼影, 马捷. 地下含水层储能及其对环境影响的评估[J]. 能源研究与利用, 2004, 1: 51-54.
- [5] 马捷, 王明育, 戴斌. 地下含水层的储能和过程特性的分析[J]. 华北电力大学学报, 2004, 31: 57-60.
- [6] FLEUCHAUS P, GODSCHALK B, STOBER I, et al. Worldwide application of aquifer thermal energy storage: a review [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2018, 94: 861-876.
- [7] WESSELINK M, LIU W, KOORNNEEF J, et al. Conceptual market potential framework of high temperature aquifer thermal energy storage: a case study in the Netherlands [J]. Energy, 2018, 147: 477-489.
- [8] DRIJVER B, VAN AARSEN M, ZWART B D. High-temperature aquifer thermal energy storage (HT-ATES): sustainable and multi-usable[C]//Proceedings of the 12th international conference on energy storage. Lleida, Spain: International Energy Agency, 2012.
- [9] HOLSTENKAMP L, NEIDIG P, STEFFAHN J, et al. Interdisciplinary review of medium-deep aquifer thermal energy in north Germany [J]. Energy Procedia, 2017, 142: 327-336.
- [10] SCHOUT G, DRIJVER B, GUTIERREZ-NERI M, et al. Analysis of recovery efficiency in high-temperature aquifer thermal energy storage: a Rayleigh-based method [J]. Hydrogeology Journal, 2014, 22: 281-291.
- [11] KABUS F, WOLFGRAMM M, SEIBT A, et al. Aquifer thermal energy storage in Neubrandenburg: monitoring throughout three years of regular operation[C]//Proceedings of the EFFS-TOCK conference. Stockholm, Sweden: Swedish Society of HVAC Engineers, 2009: 1-8.
- [12] UECKERT M, BAUMANN T. Hydrochemical aspects of high-temperature aquifer storage in carbonaceous aquifers: evaluation of a field study[J]. Geothermal Energy, 2019, 7 (1): 4.
- [13] GAO L, ZHAO J, AN Q, et al. A review on system performance studies of aquifer thermal energy storage[J]. Energy Procedia, 2017, 142: 3537-3545.
- [14] RANDOLPH J B, SAAR M. Combining geothermal energy capture with geologic carbon dioxide sequestration[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38:10.
- [15] GAO L, ZHAO J, AN Q, et al. Thermal performance of medium-to-high-temperature aquifer thermal energy storage systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 146: 898-909.
- [16] ZHOU X, GAO Q, CHEN X, et al. Developmental status and challenges of GWHP and ATEs in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 42: 973-985
- [17] VAN LOPIK J H, HARTOG N, ZAADNOORDIJK W J.

- The use of salinity contrast for density difference compensation to improve the thermal recovery efficiency in high-temperature aquifer thermal energy storage systems[J]. *Hydrogeology Journal*, 2016, 24: 1255-1271.
- [18] BAKR M, VAN OOSTROM N, SOMMER W. Efficiency of and interference among multiple aquifer thermal energy storage systems: a Dutch case study[J]. *Renewable Energy*, 2013, 60: 53-62.
- [19] WENZLAFF C, WINTERLEITNER G, SCHÜTZ F. Controlling parameters of a mono-well high-temperature aquifer thermal energy storage in porous media, northern Oman [J]. *Petroleum Geoscience*, 2019: 2018-104.
- [20] LANAHAN M, TABARES-VELASCO P. Seasonal thermal-energy storage: a critical review on BTES systems, modeling, and system design for higher system efficiency [J]. *Energy*, 2017, 10(6): 743.
- [21] TRAN M, ZUBA M, LE S, et al. Aqua-3D: an underwater network animator[J]. *Oceans IEEE*, 2012: 1-5.
- [22] FLEMISCH B, DARCIS M, ERBERSEDER K, et al. DUMux: DUNE for multi-{phase, component, scale, physics, ...} flow and transport in porous media[J]. *Advances in Water Resources*, 2011, 34: 1102-1112.
- [23] DIERSCH H J G, BAUER D, HEIDEMANN W, et al. Finite element modeling of borehole heat exchanger systems [J]. *Computational Geosciences*, 2011, 37: 1122-1135.
- [24] ZYVOLOSKI G, FEHM: a control volume finite element code for simulating subsurface multi-phase multi-fluid heat and mass transfer[R]. Los Alamos Unclassif; 2007: Rep. LA-UR-07-3359.
- [25] KIPP K L Jr. Guide to the revised heat and solute transport simulator: HST3D Version 2[R]//Water-resources investigations report. Virginia: United States Geological Survey, 1997, 97: 4157.
- [26] PRUESS K, OLDENBURG C, MORIDIS G. TOUGH2 user's guide[R]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2012: Rep. LBNL-43134.
- [27] ZHENG C M. MT3D: a modular three-dimensional transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems [R]. Tuscaloosa: University of Alabama, 1992.
- [28] KOLDITZ O, GÖRKE U J, SHAO H, et al. Thermo-hydro-mechanical-chemical processes in fractured porous media: modelling and benchmarking[M]. Cham: Springer International Publishing, 2015.
- [29] WINTERLEITNER G, SCHÜTZ F, WENZLAFF C, et al. The impact of reservoir heterogeneities on high-temperature aquifer thermal energy storage systems: a case study from northern Oman[J]. *Geothermics*, 2018, 74: 150-162.
- [30] KILKIŞ Ş, WANG C, BJÖRK F, et al. Cleaner energy scenarios for building clusters in campus areas based on the rational exergy management model[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 155: 72-82.
- [31] RÉVEILLÈRE A, HAMM V, LESUEUR H, et al. Geothermal contribution to the energy mix of a heating network when using aquifer thermal energy storage: modeling and application to the Paris basin[J]. *Geothermics*, 2013, 47: 69-79.
- [32] WERNER J. Environmental footprint of high temperature aquifer thermal energy storage[D]. Utrecht, Netherlands: University Utrecht, 2016.
- [33] WESSELINK M, LIU W, KOORNNEEF J, et al. Conceptual market potential framework of high temperature aquifer thermal energy storage: a case study in the Netherlands [J]. *Energy*, 2018, 147: 477-489.