

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.11.006

地下储能技术研究现状及发展

Review and prospect of underground thermal energy storage technology

张媛媛¹, 叶灿滔¹, 龚宇烈^{1*}, 马玖辰², 黄永辉³, 赵军⁴, 庞忠和³

ZHANG Yuanyuan¹, YE Cantao¹, GONG Yulie^{1*}, MA Jiuchen², HUANG Yonghui³,
ZHAO Jun⁴, PANG Zhonghe³

(1. 中国科学院广州能源研究所, 中国科学院可再生能源重点实验室, 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用
重点实验室, 广州 510640; 2. 天津城建大学 能源与安全工程学院, 天津 300384; 3. 中国科学院地质与
地球物理研究所, 北京 100029; 4. 天津大学 机械工程学院, 天津 300350)

(1. CAS Guangzhou Institute of Energy Conversion, CAS Key Laboratory of Renewable Energy, Guangdong Provincial Key
Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China; 2. School of Energy and
Safety Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 3. Institute of Geology and Geophysics, CAS,
Beijing 100029, China; 4. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

摘要:为了减缓全球变暖, 实现碳达峰、碳中和目标及新能源的高效利用, 需以新能源为主体的新型电力系统和储能行业相互协调发展。新型电力系统与地下储能相结合作为关键技术之一, 其跨季节地下储能, 尤其是地下水层储能 (ATES), 从理论研究转为工程应用成为亟待攻克的难点。综述了地下储能方式及其原理, 分析了地下 ATES 系统在数值模拟试验等方面的研究进展, 深刻剖析了在实际工程应用中关键技术和瓶颈问题, 进一步对比了地下 ATES 系统热工性能和经济环保效益评价标准, 展望了新型电力系统与地下 ATES 相结合的未来, 为后续的应用研究提供参考。

关键词:地下储能; 含水层储能; 跨季节; 性能评价; 可再生能源; 碳中和; 供热

中图分类号:TK 52 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2021)11-0049-09

Abstract: In order to mitigate global warming, achieve "emission peaking and carbon neutrality" and utilize new energy resources efficiently, the power system taking new energy as the main part and power storage industry have to develop in coordination. As one of the key technologies for the joint development, the seasonal underground thermal energy storage, especially Aquifer Thermal Energy Storage (ATES), is difficult to be transformed from theory to engineering cases. Summarizing the methods and principles of underground thermal energy storage, the theoretical research progress of ATES system in numerical simulation and testing are analyzed. Then, the key technologies and bottlenecks in practical engineering cases are deeply analyzed. The evaluation standards for thermal performance, economic and environmental benefit of ATES systems are compared. On this basis, the prospect of the new power system coupled with ATES technology is made, which can provide reference for the following researches.

Keywords: underground thermal energy storage; Aquifer Thermal Energy Storage; seasonal; performance evaluation; renewable energy; carbon neutrality; heat supply

0 引言

全球变暖引发了从基于化石燃料的能源系统向可持续能源系统的全球性转变, 为可再生能源带来了新的机遇和挑战^[1-2]。为了实现二氧化碳排放

于 2030 年前达到峰值, 2060 年前实现碳中和这一目标, 需要增加可再生能源在供暖和制冷领域的比例, 并解决热能需求和季节性供应之间不匹配的问题^[3]。热能储存 (TES) 因其可以有效解决这种季节性不匹配问题而引起越来越多的关注^[4]。我国储能产业战略布局始于 2005 年发布的《可再生能源发展指导目录》, 在 2011 年储能被写入“十二五”规划纲要, 并在 2017 年发布首个指导性政策《关于促进储能产业与技术发展的指导意见》, 指出未来 10 年内

收稿日期: 2021-08-16; 修回日期: 2021-09-09

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) 课题 (XDA21050500); 中国科学院科技服务网络计划 (STS 计划) 项目 (KFJ-STY-QYZD-2021-02-006); 天津市重点研发计划项目 (20YFYSGX00020)

分 2 个阶段推进相关工作:第 1 阶段实现储能由研发示范向商业化初期过渡;第 2 阶段实现商业化初期向规模化发展转变。

在储能产业规模化发展的关键时期,地下储能因其高储存效率和高储存容量^[5-6]等优点,是长期热能存储的首选。

地下储能分为含水层储能(ATES)和钻孔式储能(BTES)。其中地下 ATES 的存储容量最高,成本较低,当冷热平衡系统所需冷量和热量均为 1 000 MW·h 时,假定发电效率为 35%,且由矿物燃料发电,ATES 系统与常规储能系统相比可节能 4 700 GJ^[7],因此最适合大规模应用。地下 ATES 应用起源于我国 1965 年上海地下水人工回灌工程,利用“冬灌夏用”为主、“夏灌冬用”为辅的季节性储能为纺织厂调温和调湿^[3,8]。随后的几年里,地下 ATES 系统的应用数量逐渐增加。然而由于含水层流体污染、井配置不当、管道腐蚀堵塞等问题,导致 ATES 系统不可持续利用而停止运行。

从 20 世纪 80 年代开始,荷兰和瑞典经过工程可行性论证,并分析了水文地质和热力学参数对存储效率的影响进而对系统进行优化,使得地下 ATES 技术得到了工程应用^[9-10]。地下 ATES 根据地下深度不同,分为浅层(<500 m)和中深层(≥500 m)含水层。目前的应用主要集中于浅层 ATES,全球有 2 800 多个该系统在运行,以荷兰的应用最为广泛^[3,11]。

2018 年中国科学院开展战略性先导科技专项(A 类)课题“基于消纳风电的储能式地热供暖关键技术研究及示范”,分析了复杂地质与水力条件下储能式地热系统的关键物理/化学过程机理,明确了影响储能式地热供暖系统性能的关键因素;研究基于不同灌注水体和精细灌注工艺的灌注技术方案,开发了适用于中深层储能式地热系统的储层改造技术,提高增产效率,突破砂岩低回灌的技术瓶颈,建立储能式地热系统的综合评价体系;研究基于“源网荷储”协同优化的新一代电热耦合技术,突破将不稳定的风电转换为稳定的地热输出的关键技术;打造基于 100% 可再生能源的储/供能“地热+”多能互补供暖系统,为实现中国北方清洁供暖提供有力技术保障。

本文主要综述了地下储能方式及其原理,分析了地下 ATES 系统的理论、试验研究、应用情况及其关键技术和瓶颈问题,对比了地下 ATES 系统热工性能和经济环保效益评价标准,并在此基础上展望了地下 ATES 的未来,为后续的应用研究提供参考。

1 地下储能方式及其工作原理

1.1 ATES

地下岩层中有透水层和隔水层之分,透水层中充满可自由流动的重力水,称为含水层。ATES 将地下水作为外部热/冷源和含水层之间的传热介质。地下水具有恒定的温度,与当地的年平均温度有关。在冬季,低品位的冷量储存在含水层的冷侧,同时将热量从暖侧抽走,夏季则相反,进而通过热交换器将热量或冷量从地下水回路传递给用户。工作原理如图 1 所示。

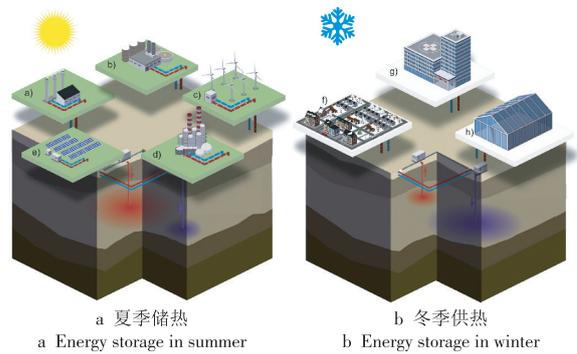


图 1 ATES 工作原理示意^[12]

Fig. 1 ATES working principle^[12]

根据距离地表深度不同,处于近地表含水层为潜水含水层,处于地下深处含水层为承压含水层。承压含水层的水温几乎不受外界因素的影响,是一个恒温带。只有处于一定深度的承压含水层才能被用于储能,因此承压含水层又分为浅层承压含水层和深层承压含水层。含水层特点和区别见表 1^[13-14]。有研究发现,ATES 系统能效高于地下水源热泵,供冷性能系数(COP)比地下水源热泵提高了 2.00~4.00 倍,供热 COP 提高了 1.25 倍左右^[15]。可以看出,深层承压含水层具有更高的储热温度和较低的成本,未来发展潜力较大。根据储能方式不同,ATES 有单井、对井和多井 3 种储能系统,各自的储能特点见表 2^[16]。当井相对位置适中时,对井内冷、热流体可在同层或异层含水层中被隔开,从而减少自然对流引起的热损失,也节省了成本,是近年来研究的热点。

表 1 潜水含水层和承压含水层特点及区别

Tab. 1 Characteristics and differences between unconfined aquifer and confined aquifer

含水层	分类	受地表影响	储存水温/℃	投资成本	污染程度
潜水含水层	—	大	<25	高	大
承压含水层	浅层	较小	25~50	低	较小
	深层	小	50~150	低	小

表 2 不同储能方式的特点

Tab. 2 Characteristics of different thermal energy storage methods

储能方式	井数	冷热流体位置	管路数量	成本
单井	1	同层/异层	少	低
对井	2	同层/异层	较少	较低
多井	>2	同层/异层	多	高

1.2 钻孔式储能

当没有合适的含水层时, BTES 不受地质条件限制, 可以作为使用岩层进行能量储存的替代系统。在 BTES 系统中, 钻孔在地下充当换热器。地理管有单 U 管、双 U 管和套管。最常见的是由聚乙烯塑料 (PE) 管制成的单个 U 型管。通过钻孔使流体在封闭回路中循环, 从而为地下输送或提取热量或冷量。流体通常添加防冻剂, 以保持系统在冰点以下运行^[16]。与 ATES 系统一样, 室内与钻孔的冷热交换是通过系统中的热交换器完成的。BTES 地理管换热器井群耦合的储能系统示意如图 2 所示^[17]。由于岩层的储热能力低于水, 因此一定量的热量需要更大的储热容积。

1.3 跨季节地下储能系统特点

跨季节地下储能系统能有效解决可再生能源供热系统在时间、空间、强度等方面的间歇性和不稳定性, 可将夏季低品位热量转移到冬季, 冬季低品位冷量转移到夏季, 提高可再生能源利用效率。研究显示, 短期储能系统能量利用率只有 10%~20%, 而跨季节地下储能系统可达 50%~100%^[18-19]。ATES 和 BTES 优缺点对比见表 3。

随着跨季节地下储能技术研究的不断完善, 综合利用多种跨季节储能系统提高储能效率成为近年来的发展趋势。文献[20]阐述了 4 种跨季节地下储热系统(热水储热、砾石-水储热、钻孔式储热和含水层储热)及其工作原理, 如图 3 所示。分析了全球跨季节储能的最新技术, 并预测了该技术的发展趋势, 结果证明跨季节地下储能系统具有显著的经济、社会和环境效益。

2 地下含水层储能理论研究

2.1 数值模拟研究

国内外针对 ATES 系统换热的数值模拟进行了广泛而深入的研究, 具体见表 4。

针对 ATES 温度场数值模拟研究的模型多样性, 计算方法也有所不同。从这些研究中可以归纳出以下几点。

- (1) ATES 换热模型采用局部热平衡模型, 忽略

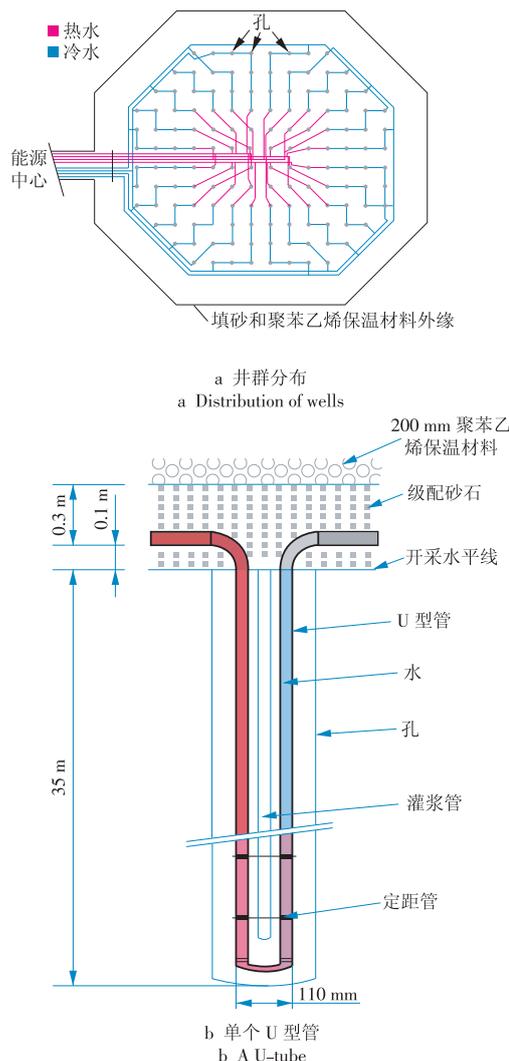


图 2 BTES 地理管换热器井群耦合的储能系统示意
Fig. 2 Energy storage system coupled with well clusters of BTES heat exchangers

表 3 ATES 和 BTES 优缺点对比

Tab. 3 Advantages and disadvantages of ATES and BTES

系统	优点	缺点
ATES	(1) 换热介质为水, 使得换热均匀; (2) 夏季不启动热泵, 节省成本	(1) 对水文地质条件要求高; (2) 地下水流速要低
BTES	(1) 受地质条件的限制; (2) 可当做地基的一部分, 节省成本	(1) 储冷/热温度范围小; (2) 受地表条件影响较大

水-岩热交换, 换热方式多采用导热、自然对流、热弥散等。

- (2) 对于深层 ATES 需考虑温度梯度的影响。
- (3) 通常将隔水层物性参数看作常数。
- (4) 含水层的结构性质大多数假设为各向均值、同性, 一定程度上降低了模型精确度。

2.2 试验研究

国际上对于地下含水层试验研究可以追溯到 1973 年美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的高温地下岩体资源开采试验, 使用水压致裂法向地下 3 000~

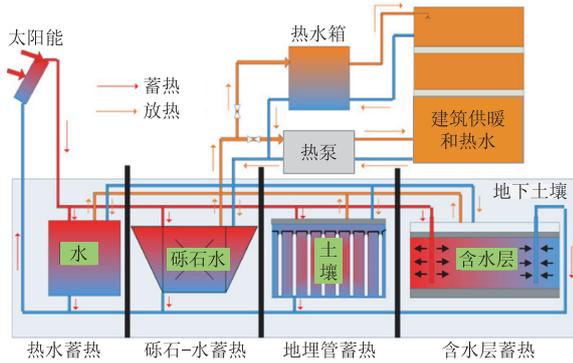


图 3 4种跨季节地下储能系统及其工作原理

Fig. 3 Working principles of four seasonal underground thermal energy storage systems

5 000 m 基岩中注水, 获得了 200~325 °C 的超高温热水^[31]。

随后的几十年里, 国内外开始对 ATEs 系统开展大量相关试验研究, 表 5 列举了国内外比较典型的 ATEs 系统试验研究。

ATEs 试验研究不断完善, 既在实际应用的基础上解决问题又探索在各种因素下可能出现的问题, 根据现有研究可以得到以下几点结论。

- (1) 保证试验中含水层良好的渗透性, 较大的含水层厚度可以储存更多能量。
- (2) 含水层上下的隔水层渗透性要足够低且具有较好的保温性以减少能量损失。
- (3) 大部分研究集中于室内含水层砂箱试验系统, 逐渐从单井试验扩大到井群。

(4) 承压 ATEs 与太阳能、风能等其他可再生能源形成的多能互补耦合试验研究较少。

3 地下 ATEs 关键技术及应用

3.1 储能式综合能源技术应用

目前全球 ATEs 共有超过 2.5 TW·h 的能量用于供暖和制冷。然而, 其中 99% 地下储能系统的含水层温度低于 25 °C, 即近地表 ATEs 系统^[3]。根据不同 TES 禀赋, 应用于多种冷、热、电综合能源供应场景的情况见表 6^[3,43-53]。由表 6 可知, 与其他地下储能相比, 深层承压 ATEs 的工程应用很少, 多为试验示范项目研究, 该技术理论研究仍存在不足, 需要进一步深入研究并攻克其瓶颈问题^[54]。

3.2 关键技术及瓶颈

通过上述文献调研发现, 我国地下 ATEs 作为一种新的可再生能源开发技术, 和国外先进水平相比仍存在差距, 需要将理论研究和实践相结合。

目前地下储能关键技术及瓶颈主要有以下几方面。

- (1) 提高 ATEs 热利用效率: 通过 ATEs 强化技术如压裂、选址等。
- (2) 地热+多能耦合技术: 由于浅层含水层受地面影响较大, 如何更好地解决浅层冷热平衡问题仍需研究; 中深层含水层热量利用为递减趋势, 如何对中深层含水层跨季节补热等问题, 将成为“地热+”多能耦合技术研究的重点。

表 4 国内外 ATEs 系统数值模拟研究

Tab. 4 Numerical simulation studies on ATEs systems at home and abroad

模型	井数	计算方法	改变条件	结构性质	参考文献
三维	2	有限元	钻孔深度/抽注水量等	各向均值	[21]
三维	2	有限元和有限体积	井对间距/入口温度	各向均值	[22]
三维	2	有限差分	孔隙率/含水层厚度等	各向均值	[23]
二维轴对称	1	有限元	注水量/渗透系数等	各向异性	[24]
对流-热弥散	2	特征线法	多孔介质粒径	各向均值	[25]
湍流	2	有限体积	含水层厚度/流量等	各向均值	[26-29]
群井渗流	>2	有限体积	井数量/井对间距/流量	各向均值	[30]

表 5 国内外 ATEs 系统试验研究

Tab. 5 Test researches on ATEs systems at home and abroad

试验系统	含水层厚度/m	井数/个	周期	注水量	注水/采水温度/°C	参考文献
深部承压含水层	—	1	51.0 d	45.210 0 m ³ /h	55.00/33.00	[32-33]
第二承压含水层	19.0~26.0	>2	≥46.0 d	—	28.78/12.68	[34-35]
含水层砂箱	1.0	2	23.0 min	0.136 0 m ³ /h	45.00/—	[36]
承压含水层(室内)	0.8	2	120.0 min	0.097 7 m ³ /h	—	[37]
含水层自然横流抽灌井群	0.4	5	—	≥0.240 0 m ³ /h	12.00/7.00	[38-39]
承压含水层	67.0	>2	150.0 d	0.103 0 m ³ /min	—	[40]
含水层砂箱	0.2	≥2	9.6 h	1.200 0 m ³ /s	14.50/—	[41-42]

表 6 储能式综合能源技术应用实例

Tab. 6 Applications of comprehensive energy system integrated energy storage

国家	年份	储能目的	井数/ 个	井深/ m	容量/ MW	冷/热水 温度/°C	供应 场合
挪威	1998	供暖+空调	18	45	7.0	—	医院
德国	1999	供暖+空调	12	300	—	—/19.0	会议 大厦
比利时	2000	供暖+空调	2	65	1.2	8.0/18.0	医院
加拿大	2002	供暖+空调	2	—	1.8	10.0/60.0	温室
德国	2005	供暖	2	1 250	3.3	—/55.0	区域 供暖
中国	2010	供暖+空调	3	—	—	—/26.3	青少 年宫
日本	2011	供暖+空调	5	50	—	—	大学
英国	2013	供暖+空调	8	70	2.9	—	住宅
荷兰	2015	供暖+空调	7	—	20.0	—	区域 供暖
中国	2016	供暖+空调	2	—	—	10.0/43.0	工厂

(3) 地热能多元化高效利用技术: 目前地热多用于供暖和空调, 而在中低温发电、制冷、能量梯级利用等方面应用较少, 需要进一步提高地热多元化利用技术。

(4) 回灌技术: 目前仍然存在由于井堵塞导致地下水不能有效回灌, 能效降低, 严重时引起地面沉降的问题, 亟须在保证足量水源和良好水质条件下完善回灌技术。

(5) 其他防护措施: 提升井下防腐、防垢和除垢技术避免管道堵塞。

4 地下 ATES 性能评价

4.1 热工性能评价

热工性能主要有以下 3 种分析方法。

4.1.1 瑞利数(Rayleigh Number)分析法^[54]

瑞利数是一种无量纲数, 根据临界值衡量热量传递形式是热传导为主还是对流传热为主, 方程式为

$$Ra = \frac{\alpha \rho g h c_{aq} k_{aq} \Delta T}{\mu \lambda_{aq}}, \quad (1)$$

式中: α , ρ , g , h , c_{aq} , k_{aq} , ΔT , μ 和 λ_{aq} 分别为水的热膨胀系数、密度、重力加速度、含水层厚度、含水层体积热容、含水层渗透系数、注入水和环境的温差、水动力学黏度和含水层导热系数。

文献[55-56]研究发现, 当 Ra 的临界值 $Ra_c \geq 4\pi^2$ 时, 如果 $Ra < Ra_c$, 换热主要通过热传导, 反之则通过自然对流; 随着 Ra 增加, 热回收效率受自然对流影响增大。

4.1.2 热干扰分析法^[57]

通常将含水层中的储水量近似为圆柱体, 高度等于含水层厚度, 其热干扰半径则随着注入含水层的水量增加而增大。假设地下水和含水层沉积物之间存在瞬时热平衡, 则热干扰半径为

$$R_{th} = \sqrt{\frac{nc_w}{c_{aq}}} R_h, \quad (2)$$

式中: c_w 为水的体积热容; R_h 为水力半径; n 为孔隙率。从式(2)可知, 当 c_w , c_{aq} 和 n 为定值时, 热干扰半径与水力半径呈线性关系, 这是由于热传递发生在所有方向, 而水仅从井中径向流动造成。

4.1.3 热回收效率分析法^[58]

热回收效率 η_{th} 是指从含水层中提取的能量与注入的能量的比值, 所使用的参考温度为含水层未受干扰时的温度, 方程为

$$\eta_{th} = \frac{\int_{t_{ext\ start}}^{t_{ext\ end}} c_w q_{V\ ext} (T_{ext} - T_0)_{ext} dt}{\int_{t_{inj\ start}}^{t_{inj\ end}} c_w q_{V\ inj} (T_{inj} - T_0)_{inj} dt}, \quad (3)$$

式中: $q_{V\ ext}$ 和 $q_{V\ inj}$ 分别为提取和注入的水的体积流量; T_0 为含水层的初始温度; T_{ext} 和 T_{inj} 分别为提取和注入的水温度; $t_{ext\ start}$ 和 $t_{ext\ end}$ 分别为提取水的开始和结束时间; $t_{inj\ start}$ 和 $t_{inj\ end}$ 分别为注入水的开始和结束时间。

热回收效率和热干扰半径与地下水流速之间的关系如图 4 所示。当 TES 半径和流速比值较小 ($R_{th}/u < 2$) 时, 热损失较大, 热回收效率低; 当 TES 半径和流速比值较大 ($R_{th}/u > 4$) 时, 热传导占主导, 热回收效率基本稳定; 当 TES 半径和流速比值满足 $2 < R_{th}/u < 4$ 时, 热损失和热传导两者相互作用。

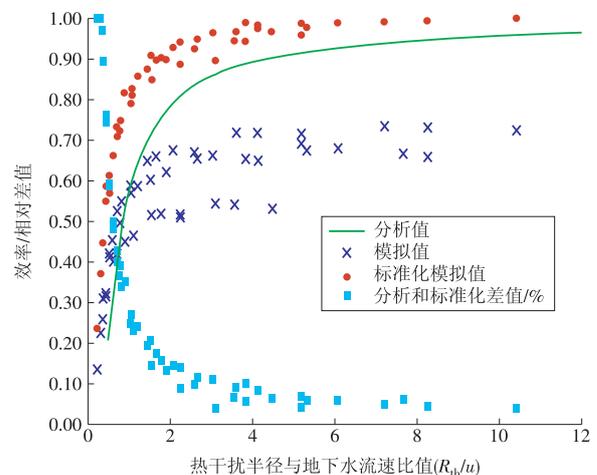


图 4 热回收效率和热干扰半径与地下水流速之间的关系^[59]

Fig. 4 Relationship between heat recovery efficiency and heat disturbance radius or groundwater velocity^[59]

4.2 经济环保效益评价

在对 ATES 系统进行经济性评价时,以获取高热量为目标,热回收效率和热量为首要因素,投资成本、维修费用等为次要因素^[60]。在环保效益方面,将二氧化碳排放作为最低评估标准。具体评价指标和费用计算见表 7。

表 7 ATES 经济环保效益费用计算

Tab. 7 Economic costs and environmental protection benefits of the ATES system

项目	经济性评价		环保效益评价 (P_{en})
	投资成本(P_{in})	用电成本(P_{elec})	
计算公式	P_{in} =井造价+管道费用+维修费	P_{elec} =(水泵耗电+热泵耗电)×单价	$P_{en}=P_{elec} \times \eta$ (气体排放因子)
总费用	$P_{total}=P_{in}+P_{elec}+P_{en}$		

然而,在实际工程中需要同时考虑热工性能和经济环保效益。文献[61]提出了一种根据指标权重不同,基于理想点多指标决策原理的逼近理想点(TOPSIS)法,计算公式为

$$C_i = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^n w_j (x_{ij} - x_j^-)^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n w_j (x_{ij} - x_j^+)^2} + \sqrt{\sum_{j=1}^n w_j (x_{ij} - x_j^-)^2}}, \quad (4)$$

式中: C_i 为第*i*个方案最接近最优解的程度; n 为评价指标数量; x_{ij} 为标准化后的评价指标; x_j^+ 为极大值; x_j^- 为极小值; w_j 为权重。

文献[29]利用该综合效益评价方法对 ATES 系统进行评价,分别获得了以能量获取和环境效益为标准时的最佳设计方案,并假定当获取热量 3.5 MJ 时,ATES 系统用电量比传统空调减少了 50%,二氧化碳排放减少 50%,总费用节省原系统的 1/3。由此可见,ATES 系统具有很好的经济和环保效益。

5 结论和展望

本文通过分析地下 ATES 系统的理论和工程研究进展,以及在实际工程应用中的关键技术和瓶颈,根据地下 ATES 系统热工性能和经济环保效益评价标准,发现地下 ATES 的理论和工程研究逐渐由浅层向深层发展,挖掘深层含水层更多的应用潜力,如发电、制冷等。主要结论如下。

(1) 地下 ATES 具有技术优势,环保效益较为显著,逐渐从浅层向深层研究发展。

(2) 在理论研究方面,仍需完善数值模型,如考虑地面环境、复杂的含水层结构等因素;改进试验方法,如与太阳能、风能等其他可再生能源形成多

能互补耦合。

(3) 由于投资成本高,经济效益不突出,需要突破和攻克技术瓶颈以增加实际工程数量。

(4) 未来研究将集中在地下高温含水层 TES 强化方面,如提高中深层含水层回灌技术、对中深层含水层进行跨季节补热的多能耦合储能,以及用于中低温发电、能量梯级利用等多元化高效利用。

为实现碳达峰、碳中和目标,电能作为重要的低碳行动载体,而新型电力系统主要使用的是新能源,是实现“双碳”目标的关键。通过构建新型电力系统,与利用可再生能源的地下 ATES 技术相结合,可以真正实现节能减排,同时是电储能与其他储能方式相结合的关键技术之一,这将成为未来储能产业的研究热点和发展趋势。

参考文献:

- [1] GALLO A B, SIMOES-MOREIRA J R, COSTA H K M, et al. Energy storage in the energy transition context: A technology review [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 65: 800-822.
- [2] 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.
- [3] PAUL F, BA S G, INGRID S, et al. Worldwide application of aquifer thermal energy storage—A review [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2018, 94: 861-876.
- [4] DINCER I. Thermal energy storage systems as a key technology in energy conservation [J]. *International Journal of Energy Research*, 2002, 26(7): 567-588.
- [5] LI G. Sensible heat thermal storage energy and exergy performance evaluations [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 53: 897-923.
- [6] CALISKAN H, DINCER I, HEPBASLI A. Thermodynamic analyses and assessments of various thermal energy storage systems for buildings [J]. *Energy Conversion and Management*, 2012, 62: 109-122.
- [7] 王锦程, 万曼影, 马捷. 地下含水层储能技术的应用条件及其关键科学问题 [J]. *能源研究与信息*, 2003, 19(4): 229-235.
WANG Jincheng, WAN Manying, MA Jie. Conditions for the application of aquifer energy storage and related crucial problems [J]. *Energy Research and Information*, 2003, 19(4): 229-235.
- [8] 刘毅. 上海市地面沉降防治措施及其效果 [J]. *火山地质与矿产*, 2000, 21(2): 107-111.
LIU Yi. Preventive measures for Shanghai land subsidence and their effects (China) [J]. *Volcanology & Mineral*

- Resources, 2000, 21(2):107-111.
- [9] ANDERSSON O, SELBERG B. Swedish ATEs applications: Experiences after ten years of development [C]//27th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1992.
- [10] WILLEMSSEN A, BAKEMA G, SNIJDERS A L. Status of cold storage in aquifers in the Netherlands in 1994 [C]// Proceedings of International Symposium on Aquifer Thermal Energy Storage. Tuscaloosa, Alabama, US, 1995: 41-61.
- [11] 倪龙, 荣莉, 马最良. 含水层储能的研究历史及未来[J]. 建筑热能通风空调, 2007, 26(1):18-24.
NI Long, RONG Li, MA Zuiliang. The history and future of aquifer thermal energy storage [J]. Building Energy & Environment, 2007, 26(1):18-24.
- [12] FLEUCHAUS P, SCHÜPPLER S, BLOEMENDAL M, et al. Risk analysis of High - Temperature Aquifer Thermal Energy Storage (HT-ATES) [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 133. DOI: /10.1016/j.rser.2020.110153.
- [13] 黄永辉, 庞忠和, 程远志, 等. 深层含水层地下储热技术的发展现状与展望[J]. 地学前缘, 2020, 27(1):21-28.
HUANG Yonghui, PANG Zhonghe, CHENG Yuanzhi, et al. The development and outlook of the deep aquifer thermal energy storage (deep-ATES) [J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1):21-28.
- [14] DRIJVER B, AARSSSEN M V, ZWART B D. High - Temperature Aquifer Thermal Energy Storage (HT-ATES) sustainable and multi - usable [C]//Innstock 2012, The 12th International Conference on Energy Storage. Lleida, Spain, 2012.
- [15] 邬小波, 孟超. 地下含水层储能技术探讨[J]. 暖通空调, 2021, 51(6):93-96.
WU Xiaobo, MENG Chao. Discussion on aquifer thermal storage technology [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2021, 51(6):93-96.
- [16] 龙翔, 万曼影, 马捷. 含水层储能技术的应用及储能条件的分析[J]. 能源工程, 2005(1):42-44.
LONG Xiang, WAN Manying, MA Jie. The application of ATEs and its condition for energy storage [J]. Energy Engineering, 2005(1):42-44.
- [17] PINEL P, CRUICKSHANK C A, BEAUSOLEIL-MORRISON I, et al. A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(7):3341-3359.
- [18] XU J, WANG R Z, LI Y. A review of available technologies for seasonal thermal energy storage [J]. Solar Energy, 2014, 103:610-638.
- [19] HENNESSY J, LI H, WALLIN F, et al. Flexibility in thermal grids: A review of short - term storage in district heating distribution networks [J]. Energy Procedia, 2019, 158:2430-2434.
- [20] ZHOU X Z, XU Y J, ZHANG X J, et al. Large scale underground seasonal thermal energy storage in China [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 33. DOI: 10.1016/j.est.2020.102026.
- [21] KIM J, LEE Y, YOON W S, et al. Numerical modeling of aquifer thermal energy storage system [J]. Energy, 2010, 35(12):4955-4965.
- [22] YAPPAROVA A, MATTHAEI S, DRIESNER T. Realistic simulation of an aquifer thermal energy storage: Effects of injection temperature, well placement and groundwater flow [J]. Energy, 2014, 76:1011-1018.
- [23] GHAEBI H, BAHADORI M N, SAIDI M H. Performance analysis and parametric study of thermal energy storage in an aquifer coupled with a heat pump and solar collectors, for a residential complex in Tehran, Iran [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 62(1):156-170.
- [24] JEON J S, LEE S R, PASQUINELLI L, et al. Sensitivity analysis of recovery efficiency in high-temperature aquifer thermal energy storage with single well [J]. Energy, 2015, 90(3):1349-1359.
- [25] 龙翔, 万曼影, 马捷. 地下水含水层储能的数学模型及其流动条件的研究[J]. 能源研究与利用, 2005(1):14-18.
LONG Xiang, WAN Manying, MA Jie. Study on the mathematical model of aquifer thermal energy storage and its flow conditions [J]. Energy Research & Utilization, 2005(1):14-18.
- [26] 袁建伟, 王瑞祥, 袁东立. 井对间距对含水层采能区抽水温度的影响[J]. 建筑科学, 2009, 25(2):92-96.
YUAN Jianwei, WANG Ruixiang, YUAN Dongli. Effects of well pair distance on pumping temperature of storage exploiting in the aquifer of water - source heat pump [J]. Building Science, 2009, 25(2):92-96.
- [27] 南新磊. 地下含水层储能系统的数值模拟与实验研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2012.
- [28] VISSER P, KOOI H, STUYFZAND P J. The thermal impact of Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) systems: A case study in the Netherlands, combining monitoring and modeling [J]. Hydrogeology Journal, 2015, 23(3):507-532.
- [29] 燕旭辉. 基于 Fluent 的含水层储能系统温度场模拟分析及优化设计 [D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [30] 贾欣. 海水源热泵多井取水系统渗流换热特性研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [31] 万志军, 赵阳升, 康建荣, 等. 高温岩体地热开发的国际动态及其在中国的开发前景 [C]//第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2004: 304-309.
- [32] MOLZ F J, WARMAN J C, JONES T E. Aquifer storage of

- heated water: Part I—A field experiment [J]. *Groundwater*, 1978, 16(4): 234–241.
- [33] MOLZ F J, PARR A D, ANDERSEN P F, et al. Thermal energy storage in a confined aquifer: Experimental results [J]. *Water Resources Research*, 1979, 15(6): 1509–1514.
- [34] 薛禹群, 谢春红, 李勤奋. 含水层贮热能研究——上海贮能试验数值模拟 [J]. *地质学报*, 1989(1): 75–87.
XUE Yuqun, XIE Chunhong, LI Qinfen. Research on aquifer thermal energy storage—Numerical simulation of Shanghai energy storage test [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1989(1): 75–87.
- [35] XUE Y, XIE C, LI Q. Aquifer thermal energy storage: A numerical simulation of field experiments in China [J]. *Water Resources Research*, 1990, 26(10): 2365–2375.
- [36] 张建栋, 马捷, 戴斌. 地下含水层储能的实验分析与模拟 [J]. *能源技术*, 2005(6): 231–235.
ZHANG Jiandong, MA Jie, DAI Bin. Experiment and simulation on the processes of aquifer's thermal energy storage [J]. *Energy Technology*, 2005(6): 231–235.
- [37] 何朋朋. 含水层水热运移试验研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2011.
- [38] 周学志, 高青. 抽/灌井场热贯通与含水层自然流动关联性实验研究 [J]. *建筑科学*, 2012(S2): 189–194.
ZHOU Xuezhi, GAO Qing. Experiment on the relevance of thermal breakthrough between pumping and injecting well groups with aquifer advection [J]. *Building Science*, 2012(S2): 189–194.
- [39] 周学志. 抽灌井群地下水运移能量传输及其传热研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [40] SMITH D C, ELMORE A C. The observed effects of changes in groundwater flow on a borehole heat exchanger of a large scale ground coupled heat pump system [J]. *Geothermics*, 2018, 74: 240–246.
- [41] 马玖辰, 邵刚, 王宇, 等. 抽-灌井分布模式对埋管换热器井群传热特性的影响 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2019, 27(5): 217–230.
MA Jiuchen, SHAO Gang, WANG Yu, et al. Influence of the distribution of pumping and injection wells on heat transfer characteristic of borehole heat exchangers [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2019, 27(5): 217–230.
- [42] 马玖辰, 王文君, 王宇, 等. 含水层热-渗运移机理的地源热泵实验系统研发 [J]. *实验室研究与探索*, 2020, 39(11): 88–93, 151.
MA Jiuchen, WANG Wenjun, WANG Yu, et al. Research and development of ground source heat pump experimental system based on the mechanism of aquifer groundwater seepage and heat transferring [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2020, 39(11): 88–93, 151.
- [43] BIRHANU Z K, KITTED N O, KROGSTAD H E, et al. Temperature boundary conditions for ATEs systems [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2015, 1648(1). DOI: 10.1063/1.4912349.
- [44] KALAISELVAM S, PARAMESHWARAN R. Seasonal thermal energy storage [M]. Netherlands: Elsevier Incorporated, 2014: 145–162.
- [45] VANHOUDT D, DESMEDT J, BAEL J V, et al. An aquifer thermal storage system in a Belgian hospital: Long-term experimental evaluation of energy and cost savings [J]. *Energy & Buildings*, 2011, 43(12): 3657–3665.
- [46] KABUS F, RICHLAK U, BEUSTER H. Saisonale speicherung von überschusswärme auseinem heizkraftwerk in einem aquifer in neubrandenburg [C]//Statusseminar Thermische Energiespeicherung. Freiburg, Germany, 2006.
- [47] KABUS F, RICHLAK U, WOLFGGRAMM M, et al. Aquiferspeicher neubrandenburg - betriebserfahrung über drei speicherzyklen [C]//DerGeothermiekongress, Karlsruhe, Germany, 2008.
- [48] WONG B, SNIJDERS A, MCCLUNG L. Recent inter-seasonal underground thermal energy storage applications in Canada [C]//2006 IEEE EIC Climate Change Conference. Ottawa, Canada, 2006.
- [49] 董晓敏, 柴雅彬, 顾新洲. 地下储能系统在天津市河西区青少年宫项目中的应用 [J]. *海河水利*, 2013(2): 58–59.
DONG Xiaomin, CHAI Yabin, GU Xinzhou. Application of underground energy storage system in the youth palace project in Hexi district, Tianjin [J]. *Haihe Water Resources*, 2013(2): 58–59.
- [50] 中曾康壽, 崔林日, 坂井正頌, 等. 帯水層蓄熱空調システムの普及に向けた研究開発低GWP冷媒ターボ冷凍機を用いた経済性・環境性評価 [C]//日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, 2018: 815–818.
- [51] PAKSOY H O, ANDERSSON O, ABACI S. Heating and cooling of a hospital using solar energy coupled with seasonal thermal energy storage in an aquifer [J]. *Renewable Energy*, 2000, 19(1/2): 117–122.
- [52] KUNKEL C, AGEMAR T, STOBBER I. Geothermisches nutzungspotenzial der buntsandstein- und keuperaquifere im nordosten bayerns mit fokus auf tiefe aquiferspeicher [J]. *Grundwasser*, 2019, 24(4): 251–267.
- [53] HOLSTENKAMP L, MEISEL M, NEIDIG P, et al. Interdisciplinary review of medium-deep aquifer thermal energy storage in north germany [J]. *Energy Procedia*, 2017, 135: 327–336.
- [54] FLEUCHAUS P, SCHUEPPLER S, GODSCHALK B, et al. Performance analysis of aquifer thermal energy storage (ATES) [J]. *Renewable Energy*, 2020, 146(2): 1536–1548.
- [55] 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.
- [56] LAPWOOD E. Convection of a fluid in a porous medium [J]. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1948, 44(4): 508-521.
- [57] BUIK N, GUTIERREZ-NERI M, DRIJVER B. Analysis of recovery efficiency in a high - temperature energy storage system [C]//NCB, 2011.
- [58] BLOEMENDAL M, HARTOG N. After the boom; Evaluation of dutch ATEs—System for energy efficiency [C]//European Geothermal Congress, 2016.
- [59] ABUASBEH M, ACUÑA J, LAZZAROTTO A, et al. Long term performance monitoring and KPIs' evaluation of Aquifer Thermal Energy Storage system in Esker formation: Case study in Stockholm [J]. Geothermics, 2021, 96(1). DOI: 10.1016/j.geothermics.2021.102166.
- [60] 孙方田, 郝宝如, 陈旭, 等. 基于喷射式换热的水热型地热集中供热系统效益分析 [J]. 华电技术, 2020, 42(11): 39-43.
SUN Fangtian, HAO Baoru, CHEN Xu, et al. Benefit analysis of hydrothermal geothermal central heating systems based on ejector heat exchangers [J]. Huadian Technology, 2020, 42(11): 39-43.
- [61] 夏勇其, 吴祈宗. 一种混合型多属性决策问题的 TOPSIS 方法 [J]. 系统工程学报, 2004(6): 630-634.
XIA Yongqi, WU Qizong. A technique of order preference by similarity to ideal solution for hybrid multiple attribute decision making problems [J]. Journal of System Engineering, 2004(6): 630-634.

(本文责编:张帆)

作者简介:

张媛媛(1993—),女,河南商丘人,特别研究助理,博士,从事地下含水层储能研究、多孔介质中流动与传热特性等方面的研究(E-mail: zhangyy@ms.giec.ac.cn)。

叶灿滔(1980—),男,广东佛山人,高级工程师,硕士,从事近零碳综合能源运筹、地热多能耦合技术等方面的研究(E-mail: yect@ms.giec.ac.cn)。

龚宇烈*(1978—),男,江西进贤人,研究员,博士生导师,博士,从事地热能利用技术、热泵制冷技术、建筑节能技术等方面的研究(E-mail: gongyl@ms.giec.ac.cn)。

马玖辰(1980—),男,天津人,副教授,博士,从事浅层、中深层地热开发研究、暖通空调新技术等方面的研究(E-mail: thermaltju@163.com)。

黄永辉(1989—),男,江西吉安人,博士,博士后,从事热储工程数值模拟等方面的研究(E-mail: yh.huang@mail.iggcas.ac.cn)。

赵军(1964—),男,天津人,教授,博士生导师,博士,从事中低温热能高效利用、智慧型综合能源以及近零碳技术中的新理论与新方法等方面的研究(E-mail: zhaojun@tju.edu.cn)。

庞忠和(1961—),男,江苏盱眙人,研究员,博士生导师,博士,从事地热地质学等方面的研究(E-mail: z.pang@mail.iggcas.ac.cn)。