https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.137

深部地热储能:机遇、挑战与发展展望

王焰新[1,2*],杨福见[1,2],胡 帆[1,2],张晓博[1,2],薛旭耀[3],
郭清海[1,2],刘 珩[1,2],胡大伟[1,2,3]

1. 中国地质大学(武汉)深层地热富集机理与高效开发全国重点实验室,新能源学院,湖北武汉 430074
2. 中国地质大学(武汉)内蒙古研究院,内蒙古鄂尔多斯 017010
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所,湖北武汉 430071

摘 要: 在能源低碳转型的宏观背景下,风电、光伏等新能源固有的随机性与波动性,导致其并网难度大、利用效率低,已成为制约能源结构优化升级的关键瓶颈.储能技术作为实现跨时段能量调节的核心手段,为破解这一难题提供了重要技术支撑.深部地热储能作为一种新兴的长时大规模储能技术,凭借规模化潜力大、经济性优、应用场景广及系统韧性强等显著优势,逐渐成为新能源领域的研究热点和前沿方向.系统阐述了深部地热储能的技术背景与核心优势,深入分析了深部地热系统的分类特征、储能地质结构、储能能力及储能效率的关键影响因素;详细综述了含水层储能、岩土储能、压缩空气储能及二氧化碳羽流储能等主流技术路径的原理、工程应用现状与关键技术进展;全面剖析了当前深部地热储能在储址勘测、储能效率调控及环境安全风险防控等方面面临的核心问题;最后从多能互补能源体系构建、技术创新与产业化体系完善两个维度提出了未来发展建议,旨在为深部地热储能技术的规模化应用与可持续发展提供理论参考与技术支撑,助力我国"双碳"目标与能源安全战略的实现.

关键词: 二氧化碳;深部地热储能;地热;储能特征;技术现状;技术瓶颈;发展展望.

中图分类号: P69 **文章编号:** 1000-2383(2026)05-1599-20 **收稿日期:** 2026-02-15

Deep Geothermal Energy Storage: Opportunities, Challenges, and Development Prospects

Wang Yanxin[1,2*], Yang Fujian[1,2], Hu Fan[1,2], Zhang Xiaobo[1,2], Xue Xuyao[3], Guo Qinghai[1,2], Liu Heng[1,2], Hu Dawei[1,2,3]

1. *National Key Laboratory of Deep Geothermal Enrichment Mechanism and Efficient Development, School of Sustainable Energy, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan* 430074, *China*
2. *Inner Mongolia Institute of Technology, China University of Geosciences (Wuhan), Ordos* 017010, *China*
3. *Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan* 430071, *China*

Abstract: Against the background of low-carbon energy transition, the inherent intermittency and volatility of wind and photovoltaic power pose significant challenges to grid integration and utilization efficiency, which has become a key bottleneck constraining the optimization and upgrading of the energy structure. Energy storage technology, as a core means of achieving

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项(Nos.2025ZD1010202,2024ZD1003602,2024ZD1003503,2025ZD1010208);国家自然科学基金项目(No.52309147);湖北省技术创新计划项目(No.2025BEB014).

作者简介: 王焰新(1963—),男,教授,中国科学院院士,博士生导师,主要从事环境水文地质研究工作. E-mail: yx. wang@cug. edu. cn
* **通讯作者:** 王焰新,E-mail: yx. wang@cug. edu. cn

引用格式: 王焰新,杨福见,胡帆,张晓博,薛旭耀,郭清海,刘珩,胡大伟,2026.深部地热储能:机遇、挑战与发展展望.地球科学,51(5):1599-1618.

Citation: Wang Yanxin, Yang Fujian, Hu Fan, Zhang Xiaobo, Xue Xuyao, Guo Qinghai, Liu Heng, Hu Dawei, 2026. Deep Geothermal Energy Storage: Opportunities, Challenges, and Development Prospects. *Earth Science*, 51(5): 1599-1618.

inter-temporal energy regulation, provides crucial technical support to address this challenge. As an emerging long-duration, large-scale energy storage technology, deep geothermal energy storage has gradually become a research focus and a frontier direction in the field of renewable energy, owing to its prominent advantages such as substantial scalability, high economical efficiency, wide application scenarios, and strong system resilience. In this paper it systematically elaborates on the technological background and core strengths of deep geothermal energy storage, and conducts an in-depth analysis of the classification characteristics of deep geothermal systems, the geological structures for energy storage, as well as the key factors influencing storage capacity and efficiency. It presents a detailed review of mainstream technical pathways, including hydrothermal reservoir heat storage, geotechnical energy storage, compressed air energy storage, and CO_2 plume geothermal systems, covering their working principles, current status of engineering applications, and key technological advances. The paper comprehensively examines the critical issues currently faced by deep geothermal energy storage in areas such as site exploration, efficiency regulation, and environmental safety risk prevention. Finally, future development recommendations are proposed from two dimensions: the construction of a multi-energy complementary energy system, and the enhancement of technological innovation and industrial development systems. The aim is to provide theoretical reference and technical support for the large-scale application and sustainable development of deep geothermal energy storage technology, thereby contributing to the achievement of China's "dual-carbon" goals and energy security strategy.

Key words: carbon dioxide; deep geothermal energy storage; geothermal energy; storage characteristics; current state of technology; technical bottleneck; development outlook.

0 储能技术发展背景

能源低碳转型是全球可持续发展的核心议题，我国正积极推进能源结构向非化石能源主导方向转变，这既是实现"双碳"目标的迫切需求，也是保障能源安全、培育新质生产力的战略选择(陈珲等，2024; Huang *et al.*, 2024; 王贵玲等, 2024). 近年来，我国风电、光伏等新能源装机规模持续快速增长，但此类能源固有的随机性、波动性特征导致其并网难度大、利用率偏低，成为能源转型进程中的关键瓶颈. 在西北、东北、华北部分地区，弃风、弃光率曾一度超过50%，2017年浪费的能量相当于三峡水库全年发电量. 储能技术通过实现跨时段能量调节，能够从根本上提升电力系统灵活性与新能源消纳能力，是破解新能源并网困境的核心支撑技术.

作为能源革命的核心基础设施，储能的战略价值已得到政策与市场的双重认可，我国新型储能正加速进入规模化、市场化发展阶段. 2024年，我国新型储能新增投运规模达43.7 GW/109.8 GWh，增速超100%，累计装机容量达137.9 GW，2025年新型储能新增装机预计平均45 GW左右(https://cn.solarbe.com/news/20250115/92497.html). 储能技术不仅能保障新型电力系统的稳定运行，还能有效衔接能源生产与消费的时空错配，为非化石能源的大规模替代奠定坚实基础，是实现能源永续利用与"双碳"目标的关键抓手.

目前，已实现实际应用的储能技术主要分为机械类、电化学类及其他储能技术三大类(黄永辉等，2020; 杨春和和王同涛，2022; 芮振华等，2024). 各类储能技术的原理、应用现状、适用场景及优缺点存在显著差异(表1). 其中，抽水蓄能技术成熟、寿命长，是传统储能的主力技术，但依赖特定地质条件、建设周期长; 锂离子电池储能能量密度高、响应快，在新型储能中占比超90%，但存在安全性问题与原材料供应风险; 液流电池、钠离子电池等新兴电化学储能技术在安全性、资源可用性等方面具有优势，但仍面临能量密度低或产业链不成熟等问题; 氢储能适合长周期跨季节储能，但能量转换效率低、储运成本高. 现有储能技术在长时大规模储能场景下的局限性，为深部地热储能技术的发展提供了广阔空间.

1 深部地热储能概念及优势

深部地热储能是一种利用深部地热储层(深度>500 m)储存热能的新兴技术(黄永辉等，2020)，以高温流体为储能载体，选取隔热性能优良的地下空间进行能量存储，必要时通过井筒将热能提取至地面加以利用(图1). 相较于传统储能技术，深部地热储能具有以下四大核心优势(黄永辉等，2020; 芮振华等，2024):

(1)规模化潜力大: 深部地热资源温度高、储热容量大，能够长期储存大量热能并提供稳定热源，适配大规模储能与供能需求. 该技术可有效整合

表 1　已有实际应用的各类储能技术原理、现状及优缺点对比

Table 1　Comparison of working principles, current status, and advantages and disadvantages of various energy storage technologies with practical applications

储能类型	原理	现状	优点	缺点
抽水蓄能	利用电力低谷时段将水抽至高位水库,高峰时段释放水流发电,实现能量存储与释放.	全球抽水蓄能电站装机容量约1.85亿kW,截至2025年底,我国抽水蓄能装机规模超过6 600万kW,连续10年位居世界首位.	技术最成熟、寿命长(50～100年)、效率稳定(75%～85%)、适合大规模调峰.	严格依赖地形(高差)、生态环境影响大、建设周期长达6～10年、投资门槛高.
压缩空气储能	压缩空气储存于地下洞穴,释能时加热膨胀驱动发电机发电.	截至2025年底,我国压缩空气储能累计装机规模约为163万kW.2025年1月,世界首座300 MW级压缩空气储能电站在湖北应城全容量并网,创单机功率、储能规模和转换效率三项世界纪录.	适合大规模(单机100～300 MW)、寿命长(30～50年)、安全性高、清洁.	依赖地质条件、效率虽提升但仍低于抽蓄(约50%)、建设周期长.
飞轮储能	电能驱动飞轮高速旋转,以动能形式储存能量,需能时通过发电机释放.	2025年山西浮山推进120 MW飞轮储能项目(含20 MW飞轮+100 MW锂电池),主要参与电网频率调节.	响应速度极快(毫秒级)、功率密度高、效率高(85%～95%)、无衰减循环.	能量密度低(储能时长通常仅数秒至15分钟)、自放电率高(每小时约1%～3%)、造价高.
锂离子电池	锂离子在正负极间迁移实现充放电,以磷酸铁锂(LFP)为主流路线.	截至2025年9月底,我国锂离子电池储能装机超过9 800万kW,占新型储能的96.1%.	能量密度高、响应快、产业链成熟、成本持续快速下降.	安全性(热失控)问题仍存在;日历寿命(10～15年)短于抽蓄/压缩空气;锂资源地缘风险.
液流电池	电解液在电堆中循环发生氧化还原反应,以全钒液流电池(VRB)为主.	截止2025年上半年,全球液流电池累计装机约6 GWh,仅占电化学储能总量的约2%.截至2025年9月底,我国液流电池储能装机达到115万kW,较"十三五"末增长约30倍.	安全性高、循环寿命极长(>20年/20 000次)、容量与功率解耦(易扩展)、无衰减.	能量密度低(20～50 Wh/L)、初始投资仍较高(约锂电4倍)、钒电解液成本波动大.
钠离子电池	钠离子在电极间迁移,结构与锂离子电池类似.	2025年11月全球首个吉瓦时级钠电项目在中国达州投运,中国的钠电储能累计装机已突破1.8 GW,全球占比超过95%.	钠资源丰富且分布广泛、低温性能好(-20 ℃容量保持率>80%)、与锂电产线兼容.	能量密度(100～160 Wh/kg)低于锂电、循环寿命(1 000～2 000次)仍需提升.
氢储能	电解水制氢储存,通过燃料电池或燃烧发电.	截止2025年底,全球氢储能装机容量已突破15 GW.而我国2025年可再生能源制氢产能超25万吨/年,实现翻番式增长.	可实现跨季节长时储能、能量密度极高(33.3 kWh/kg H_2)、可与工业/交通耦合.	全流程效率低(30%～40%)、储运成本高(高压/液化)、基础设施尚不成熟.
超级电容器	利用双电层储存电荷,充放电速度快.	截至2025年7月,全球超级电容储能累计装机已突破1 GW,但在我国新型储能总装机中的占比极小(推算<0.5%).	循环寿命极长(>50万次)、功率密度极高(10～15 kW/kg)、响应纳秒级.	能量密度低(5～10 Wh/kg)、成本远高于电池.

工业余热、弃风弃光等低边际成本能源,储热功率可达5～30 MW,规模远超传统电化学储能.

(2)经济性优:通过"取热不取水"的同层回灌技术可实现零碳排放,长时大规模高温地热储能能够跨时段调节能源供需,降低峰谷电价差带来的成本压力.规模化应用后,其运行成本仅为传统储能的1/3～1/2,经济效益显著.项目不仅可通过售电、供热获得直接收益,还能借助碳交易、绿证交易获取额外收入,尽管初始投资较高,但运行周期长、维护成本低,可实现长期稳定收益.

(3)应用场景广:深部地热储能能有效推动可再生能源整合,既可将太阳能、风能等间歇性能源的富余能量转化为热能储存,也可集中储存城市与工业废热、余热,在能源需求高峰时释放,从而优化能源系统运行效率.

(4)系统韧性强:深部地热资源分布广泛,可显著提升本地能源自给率,在寒潮或

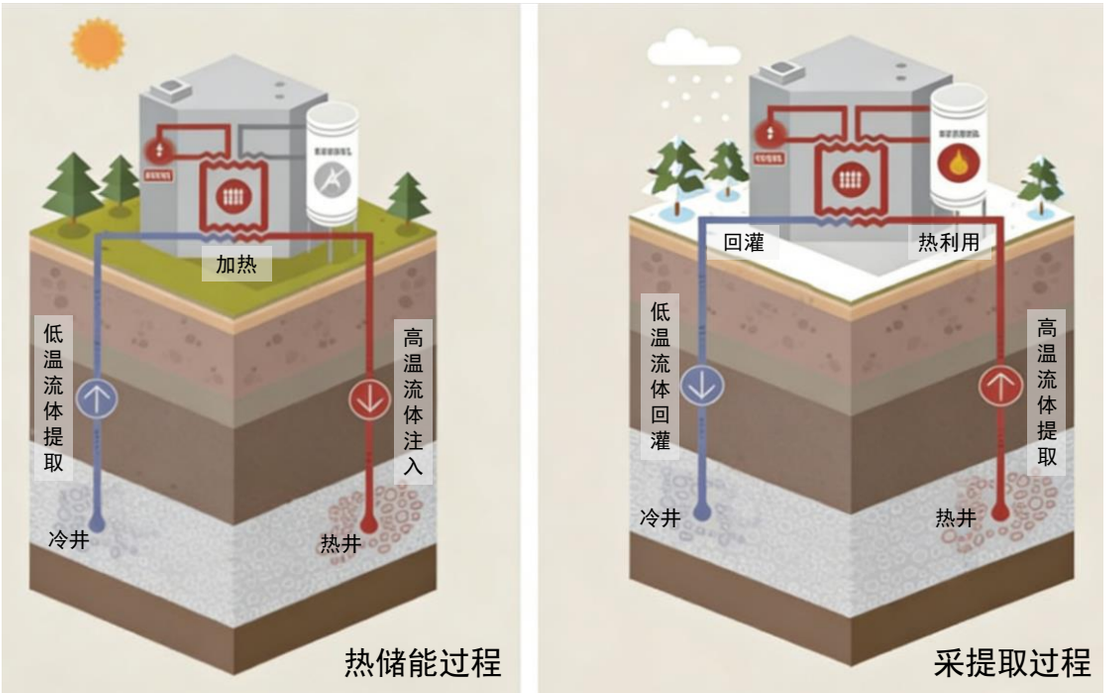


图 1　深部地热储能示意(黄永辉等,2020)

Fig.1　Schematic diagrams of deep geothermal heat storage (Huang *et al.*, 2020)

能源短缺等极端情况下可作为可靠备用能源,保障民生与关键设施的稳定运行.

综上,深部地热储能技术具备诸多独特优势,大力发展该技术将有效促进长时大规模储能行业发展,为我国能源转型与碳中和目标实现提供重要支撑.

2　深部地热系统及储能特征

2.1　深部地热系统的定义和分类

深部地热系统是指赋存于地下深处、温度普遍较高的地热资源及其赋存环境的总称.其热能主要来源于深部岩浆活动、深部岩石形变与摩擦作用、地球内部放射性元素衰变、地幔热对流等地质过程,具有储量大、温度梯度高、分布范围广的显著特征.

根据热源类型、储层形态及开发技术差异,深部地热系统可分为水热型和干热岩型,另有学者提出浆热型概念(李德威和王焰新,2015),指赋存于岩浆中的地热能,但在当前技术条件下暂不具备开发可行性.水热型地热系统以高温流体(液态水、蒸汽或超临界流体)作为热能载体,通过裂隙、溶隙或孔隙等多孔介质实现物质和能量输运,此类系统通常发育于沉积盆地或构造活动带,国内典型案例如雄安新区深部地热田,其热储层以元古界碳酸盐岩为主,受基底断裂控制的热流体沿凸起构造富集,形成温度达70～120 ℃的可开发资源.干热岩型地热系统则赋存于天然裂隙不发育、不含水或含水少的岩层,需经储层刺激或借助特定换热设备及技术进行利用,国内典型案例如青海共和盆地干热岩系统,其花岗岩基底在新生代构造运动影响下形成高温热储,可开发资源量巨大.在适宜的地质环境中,水热型与干热型地热系统可以并存,如中国地质大学(武汉)与山西省地勘局合作在山西大同天镇地区发现的我国东部2 000 m以浅首个高温地热系统,被命名为“双热型”高温地热系统(图2).

此外,深部地热系统的分类依据具有多维性.根据热源机制,可分为岩浆热源型和非岩浆热源型:岩浆热源型地热系统接受岩浆囊传导热,且受岩浆流体直接影响,热储温度异常高(郭清海,2022),典型案例如云南腾冲热海地热系统,此类系统因其热源强度大、稳定性好,具备远超其他类型地热系统的科学研究和开发利用价值;非岩浆热源型地热系统则在全球范围内普遍发育,国内多数地热系统属于此类.根据传热导热方式,可分为传导型与对流型:传导型地热系统依赖岩石热传导实现热能传递,如松辽盆地北部地热田受软流圈隆起影响形成稳定的传导热流;对流型地热系统则以地下水循环为主要导热方式,地热异常区往往出现在地

下水升流区,如西藏羊八井地热田的热能运移即与念青唐古拉山前地下水入渗及其后期升流密切相关.根据储层特征,可分为层状热储与带状热储:层状热储多见于沉积盆地或隐伏的碳酸盐岩储层,如华北地区新近系砂岩热储和元古代、古生代碳酸盐岩热储;带状热储则发育于岩浆岩或变质岩构造破碎带,如山西大同盆地和忻州盆地地热田.

由此可见,我国深部地热资源丰富,具有储量大、分布广等特点,可为深部地热储能提供良好的条件,储能潜力巨大,这种规模优势使深部地热在能源转型中具备战略价值,特别是在基荷电力供应和工业过程供热领域具有不可替代性.

2.2　深部地热系统的储能特征

2.2.1　储能地质结构特征　深部地热系统的储能地质结构特征,是指地下深处能够有效储存地热流体(能量载体)并允许其被经济开采的地质单元所具备的构造、岩性与物性组合.一个完整且高效的地热储能结构并非单一岩层,而是由热源、储层以及盖层三大要素在三维空间上构成的有机整体,其核心功能是实现热能的高效聚集、保存与提取(Moeck, 2014;图 3).

热源是驱动整个深部地热储能系统的关键要素,不仅提供了能量的根本来源,更决定了储能结构的温度水平、规模上限与可持续性.热源并非孤立存在,它与储能地质结构(特别是储热岩体和盖层)存在特定的空间配置模式.例如,高生热率的花岗岩基底或年轻岩体呈穹窿状上隆,其顶部直接与上覆储层接触,热源距离储层近,热传导路径短;在沉积盆地中,具有一定厚度的、富含放射性元素的泥岩层或花岗质基底本身,可作为区域性的层状热源,为其上部的砂岩或碳酸盐岩储层供热.热源为储层提供持续的热量供给,

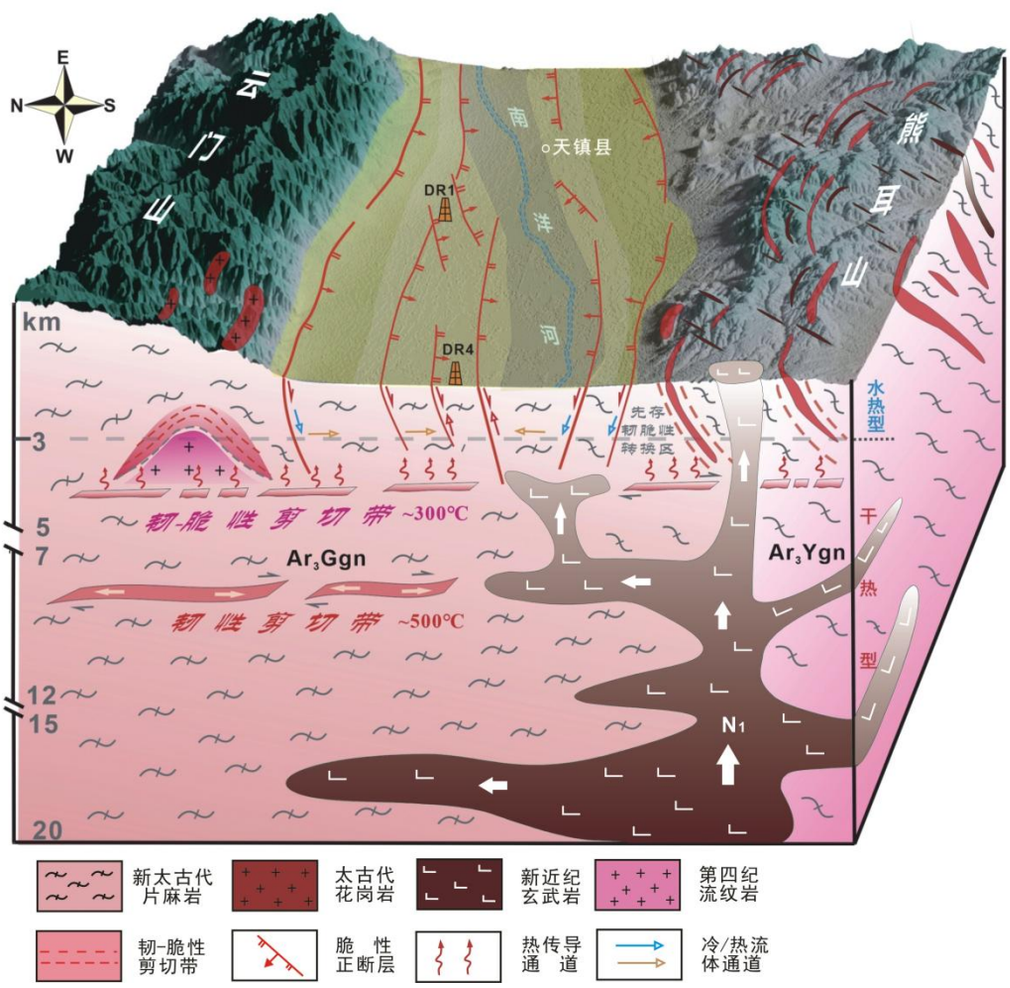
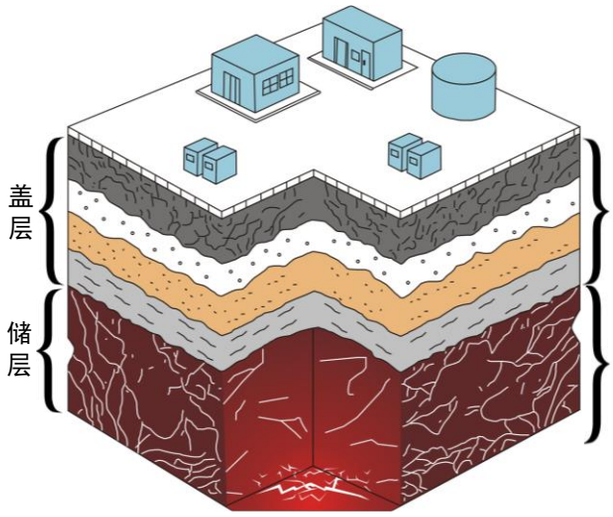


图 2　山西大同天镇"双热型"高温地热系统概念模型

Fig.2　Conceptual model of the "dual-heat-source" high-temperature geothermal system in Tianzhen, Datong City, Shanxi Province



储能能力影响因素	储能效率影响因素
完整性	低热导率
空间分布	适中的渗透性
有效厚度	岩石热恢复速率
孔隙类型	储层初始温度
体积热容	对流换热系数

图 3　地热储能地质结构简图及储能能力、效率影响因素

Fig.3　Simplified geological structure diagram for geothermal heat storage and factors affecting its storage capacity and efficiency

起到维持热储温度、降低热量损失的重要作用.

储能结构的核心是储层,根据岩性和储集空间类型,可分为两类:一是孔隙-裂隙型储层,常见于沉积盆地,如高孔隙度、高渗透率的砂岩、砂砾岩或岩溶、裂缝发育的碳酸盐岩(如白云岩),这类储层具备良好的原生储渗能力,流体存储于颗粒间孔隙和天然裂缝中;二是裂隙型储层,主要见于以花岗岩、片麻岩等为主的结晶岩基底中,构成"干热岩"或增强型地热系统(EGS),其原生孔隙度和渗透率极低,热能的储存依赖于岩石本身的高温,而流体的运移和热交换则完全依赖于后期构造运动或人工水力压裂所形成的密集裂缝网络(Lu, 2018).

盖层是维持储能结构高温高压状态不可或缺的封隔体,理想的盖层岩性通常为致密、低渗透的厚层泥岩、页岩、膏盐岩或致密灰岩.其关键特征在于极低的流体渗透性,能够有效阻止储层内高温热流体的垂向逸散,同时防止上部低温水的混入与降温.此外,盖层还需具备区域上的连续性和稳定性,未被大规模断裂彻底切割破坏,从而形成区域性的压力与温度封隔.盖层的质量直接决定了地热田的热异常幅度和流体的保存条件,对储能效率具有重要影响.

2.2.2　储能能力　深部地热储能能力受多重地质与物理因素协同控制,它决定了特定地下空间所能容纳并可供利用的热能总量与品质(Moeck, 2014;图 3).地质因素是储能能力的物质基础与空间框架.储层方面,其有效厚度与空间展布范围直接决定了储层体积,而储集空间类型(孔隙型或裂缝型)及其物性参数则控制了能量的储存与流动效率.高孔隙度提供了巨大的流体储存空间,而高渗透率,尤其是天然裂缝网络的连通性与导流能力,决定了热能载体(热流体)能否被高效地注热和采热.若储层非均质性强,存在低渗隔夹层或裂缝网络不连通,将形成"热孤岛",极大降低有效储热体积和储热能力.盖层方面,其完整性是维持热储压力与温度的关键.一套区域连续、厚度稳定、岩性致密(如膏盐岩、厚层泥岩)的盖层,能够有效封隔热流体向上逸散并阻止浅部冷水下渗,其低热导率特性更起到了"地质保温层"的作用.盖层的任何破裂或缺失,都将导致热能的持续泄露和系统压力的衰减,使储能能力大打折扣.

储层属性是地热储能能力的物质载体和容量基础.从物理属性来看,储层岩石体积热容决定了能量的储存密度.体积热容由岩石的密度和比热容共同决定,它直观表示使单位体积岩石温度升高 1 ℃所需的热量(Clauser and Huenges, 1995).密度高、比热容大的岩石,如基性玄武岩、致密碳酸盐岩,具有更高的体积热容,意味着在相同体积和温升条件下,它们能储存更多的热能.相比之下,多孔但骨架疏松的砂岩,其有效体积热容可能因孔隙中流体的高比热而得到显著补偿.而储层的几何空间属性则决定了能量的储存规模,这些属性包括了储层的有效厚度、分布面积、有效体积以及结构形态.其中,有效厚度指在垂向上具备良好储热特性(如一定的孔隙/裂隙发育度、有利岩性)的储层净厚度,分布面积是指储层在横向上的连续展布范围,有效体积则是由有效厚度与分

布面积共同构成的三维空间体积，这是决定总储能潜力最具决定性的宏观参数．一个体积巨大的储层，即使其岩石热容中等，其总储热量也可能非常可观．在形态结构方面，背斜、穹窿、地垒等正向构造形态，往往有利于形成厚大且顶部被覆盖的储层空间，不仅体积大，还具备良好的圈闭形态．

2.2.3　储能效率　深部地热系统的储能效率，其核心在于评估特定地质单元在时间尺度上储存热能、维持高温、延缓热散失的能力．这种“静态”储能效率决定了储层热量的耗散速率与稳定性．

盖层的完整性是高效储能的先决条件，其低渗透性（岩性封闭）和低热导率（热力学封闭）可实现盖层的双重封闭，前者是阻止流体对流造成的热质散失，后者则抑制通过岩石骨架传导的热损失（Ingebritsen and Appold，2012）．而封闭性差的盖层（如被断层切割、厚度不均或岩性疏松）会形成热泄漏通道，导致储存的热能以热水或蒸汽形式向上逸散，或以传导方式快速耗散，使储层温度无法长期保持，储能效率急剧下降．

一个水文地质条件相对封闭、地下水流动微弱的储层是理想的选择．适中的渗透率有利于注入流体的扩散和热量的均匀分布，促进储层内部通过对流实现快速热平衡，提升储热体的均一性．过高的渗透率，尤其在缺少良好水力边界的储层中，会增强储层内部或与外部的对流散热．地下水可能在自然水动力驱动下将储存的热能带离目标储层，造成“热流短路”，显著降低储能效率（Doughty，2007）．

岩石热恢复速率取决于围岩和储层岩石的热扩散率．高热扩散率的岩石能使热量从周围更快地回流至被冷却的储层区域，缩短热恢复所需时间，从而支持更短周期、更高频次的储能循环而不导致系统性能的显著衰减．短周期储能在热提取后，围岩还未来得及通过热传导对储层进行充分的热补给（即热恢复），可能导致后续循环的储层温度逐次降低．

温度参数与岩石热物性是储能密度的决定因素．储层初始温度直接决定了储能的品位，初始温度越高，所储存热能的可利用功越大，储能的质量和潜在价值越高（Rutqvist，2012）．在储热型系统中，注入流体与储层岩石的温差是热交换的驱动力，过低的注入温度可能引起更大的热应力，影响储层稳定性．高导热系数利于储层内部及储层与围岩之间的热传导．在储热阶段，它有助于将注入点周边的热量快速扩散至更广的体积，提高储热空间的利用率；在闲置或恢复阶段，它有助于从周围岩体补充热量．

对流换热系数决定了固-液界面的交换效率．高效的对流换热意味着注入的流体能迅速与岩石达到热平衡，从而在注入阶段将热量充分地传递给岩石储存，或在提取阶段从岩石中充分地提取热量．这提升了单次循环的储/放热功率和完整性，减少了因热交换不充分造成的“死区”，是提高储能过程效率的关键微观参数．

3　深部地热储能技术现状

目前已有的深部地热储能可细分为含水层储能、岩土储能、压缩空气储能、二氧化碳羽流储能等．本章介绍其技术原理，以及在选址、运行优化及环境安全等关键技术方面的进展．

3.1　含水层储能

3.1.1　技术原理　含水层储能系统通过夏季利用太阳能电池板等设备加热载体，并将加热后的载体回灌至含水层中储存热能，冬季开采以满足取暖等需求，原理图如图 4 所示，典型的含水层储能系统工程如表 2．早期含水层储热集中在中浅部，1978 年，奥本大学将 58 010 m^3平均温度 55 ℃的热水注入地下含水层开展储热实验．1982 年，美国明尼苏达大学圣保罗分校在地下 180 m 的含水层注入 115 ℃热水进行含水层储热实验．1999 年，柏林 Reichstag 工程将 70 ℃热水注入地下 300 m 左右的含水层．随着需求和技术的发展，含水层储热逐渐向深部发展，2004 年，Neubrandenburg 工程将 90 ℃热水注入到地下 1 000 m 左右的含水层中．2016 年，德国宝马公司和慕尼黑工业大学设计了一套深层含水层储能系统示范工程，将 130 ℃的热水储存在地下 500～700 m 的含水层中．汉堡市政府在 2017 年提出计划利用垃圾焚烧场和污水处理厂的余热，将 80～90 ℃的热水储存在地下 400～500 m 的含水层中（黄永辉等，2020）．国内典型的含水层储能项目为中国科学院广州能源研究所地热能研究室龚宇烈团队联合中科院地质与地球物理研究所庞忠和团队在雄安新区容城领秀城地热站完成含水层储/供能系统现场试验（https://www.cas.cn/syky/202303/t20230315_4880163.shtml），该工程利用中深层地热含水层长时储能实现了 100% 可再生能源建筑供暖，为高效就地消纳风光等可再生能源提供了重要技术途径．

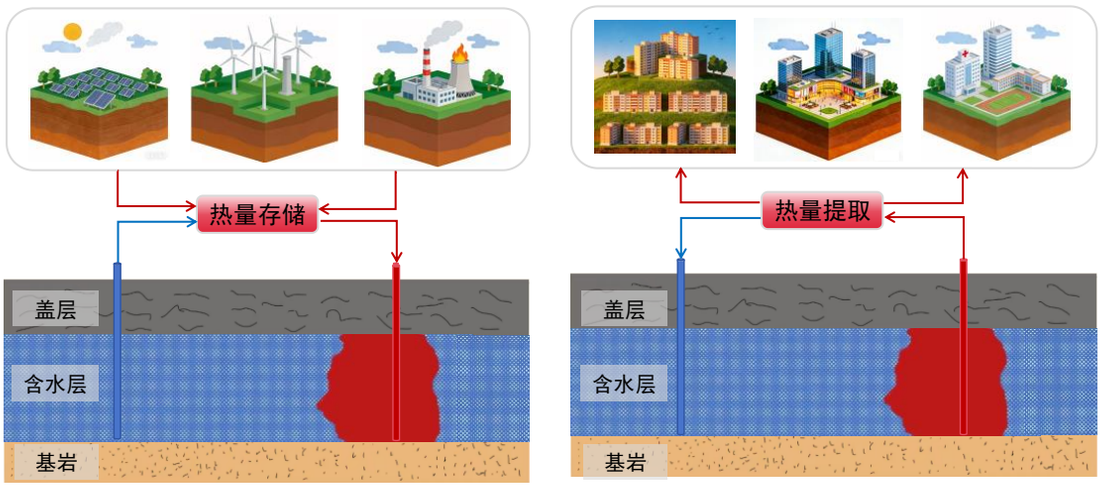


图 4　含水层储能系统示意(黄永辉等,2023;Geerts *et al.*, 2025)

Fig.4　Schematic diagrams of an aquifer thermal energy storage (ATES) system (from Huang *et al.*, 2023;Geerts *et al.*, 2025)

表 2　美国和德国含水层储能系统工程案例

Table 2　Engineering cases of aquifer thermal energy storage (ATES) systems in the United States and Germany

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	University of Minnesota, St. Paul, USA	实验/已关闭	未知	115	180～240
1999	Reichstag Berlin, Germany	示范工程/正在运行	热电联供	70	300
2004	Neubrandenburg. Germany	正在运行	热电联供	75～80	1 250
2016	BMW. TUMunich. Germany	未知	垃圾处理余热	130	500～700
2017	Hamburg. Germany	正在运行	垃圾处理余热	80～90	400～500

3.1.2　关键技术进展　含水层储能选址需重点考察目标区域的水文地质特征,包括地层构造、含水层分布及水质参数.为实现高效储能,需综合评估储层深度(建议>20 m)、温度场分布、岩性组成等关键指标.其中透水系数(渗透率×储层厚度)尤为关键,理想储层应满足渗透率250～500 mD、孔隙率≥20%的技术要求,以确保热回收率达标(黄永辉等,2020).

含水层储能的运行优化需围绕热损失抑制、热交换效率提升及系统稳定性保障三大核心目标展开,通过多维度参数协同调控实现高效储能.在井群布局层面,需基于储层渗透性与厚度特征优化井间距及空间分布(Jeon *et al.*, 2015),避免注采井间热干扰,尤其针对高渗透含水层,可采用交错布井模式减少热突破风险;针对自由对流引发的垂向浮力流热损失(Drijver *et al.*, 2012; Winterleitner *et al.*, 2018),可通过提升注入水盐度以补偿密度差,或选择初始温度较高的深层储层(埋深>500 m)缩小温差梯度(van Lopik *et al.*, 2016),显著降低热损耗.

运行参数调控方面,注入温度是控制热储容量与热损失的重要因素.研究指出,较高注入温度虽可提高储热密度,但同时会增强密度驱动对流及热传导损失,从而影响系统长期效率(Huang *et al.*, 2023;Tas *et al.*, 2025).此外,注入速率对热传输过程具有双重作用:一方面,提高注入流量可强化强制对流、扩大热影响范围;另一方面,过高流速会加速热前锋推进,导致热突破提前发生(Li *et al.*, 2024a).针对传统恒定运行模式的局限,最新研究提出动态注采策略,通过分阶段调控注入速率与生产速率以提升系统性能.例如,在德国Burgwedel高温ATES工程中,后期提高注入流量及初期提高采出速率可有效提升热回收率及峰值供能能力(Zhou *et al.*, 2026).同时,多目标优化研究表明,联合优化注入温度与流量参数可显著提高储热效率并降低热损失(Wang and Zhang, 2025).在储层选择方面,含水层厚度、渗透率及非均质性是影响系统性能的关键因素.研究表明,厚层、高渗透储层更有利于形成稳

定热储区，而非均质结构会导致热量运移，降低热回收效率（Tzoufka *et al.*, 2024；Tas *et al.*, 2025）. 此外，盖层对热损失具有重要控制作用，其热导率及厚度直接影响垂向热耗散；同时需动态匹配注入温度与储层初始地温场，结合峰谷电价差制定阶梯式注采策略——低谷时段以较高流量（30～50 m^3/h）注入高温流体（温差控制在 20～30 ℃），高峰时段以稳定流量提取热能，同时通过同层回灌技术维持储层压力平衡，减少地层变形导致的渗透率衰减. 长期运行中，需建立储层温度-压力-化学场动态监测系统，实时修正注采参数，避免高温引发的岩体热胀冷缩对井筒结构的破坏，兼顾系统能效与地质安全性.

含水层储能系统在运行期间，会持续向地下岩层注入和提取热量，引起储层温度场的变化. 这种温度波动可能改变岩层的热力学特性，影响地下水化学平衡，进而破坏原有的水文地质环境. 储层的深度、厚度和渗透率等关键参数若设计不当，可能导致热储层稳定性下降. 在长期运行后，高温热储可能引发岩体热胀冷缩，造成地层裂隙扩展或闭合，损害井筒结构和井下设备，威胁系统安全运行. 更严重的是，地层结构的破坏可能导致高温流体泄漏，不仅降低系统效率，还可能引发地热污染等环境问题.

3.2　岩土储能

3.2.1　技术原理　岩土储能通过多余的能量加热水并储存在地下钻孔系统中，在供暖期将热水提取出来用于供暖，原理图如图 5 所示. 瑞典 Emmaboda 利用高温烘烤箱和铸造厂通风空气中的热能把水加热到 60 ℃，储存在 140 个深度 150 m 的钻孔系统（Nilsson and Rohdin, 2019）. 瑞典 Anneberg 利用 2 400 m^2 的集热器将水加热到 30～45 ℃，储存在 99 个深度 65 m 的钻孔系统中（Lundh and Dalenbäck, 2008）. 2007 年，加拿大阿尔伯塔省 DLSC 的 144 个深 35 m 的岩土储能系统，连续运行 5 年后储能效率达 97%，成为全球首个储能效率超过 90% 的岩土储能项目（Sibbitt *et al.*, 2012；Rad and Fung, 2016）. 2016 年，清华大学主导的内蒙古赤峰岩土储能项目投运，储热体积 500 000 m^3，共布置 468 个 80 m 深埋管，埋管间距为 4 m，集热器面积为 1 002 m^2，每年可为城市集中供热网提供 50 万 GJ 的热量（Guo *et al.*, 2017, 2020；Xu *et al.*, 2018）. 2021 年在中科院战略性先导科技专项和中科院 STS 计划的支持下，中国科学院广州能源研究所地热能研究室龚宇烈团队依托青岛即墨鼎泰丰中深层地热供暖站，开展了基于消纳太阳能的中深层同轴套管岩土储能技术的研究，研究表明中深层同轴套管换热系统的传热和流动性能直接影响取热系统的供热效率，随着供暖周期增加存在热衰减的风险.

然而，上述应用案例均为中浅部岩土储能系统. 浅部岩土储能系统由于土壤和岩石的保温效果不佳，导致能源回收率偏低，而深部地热场可减少储

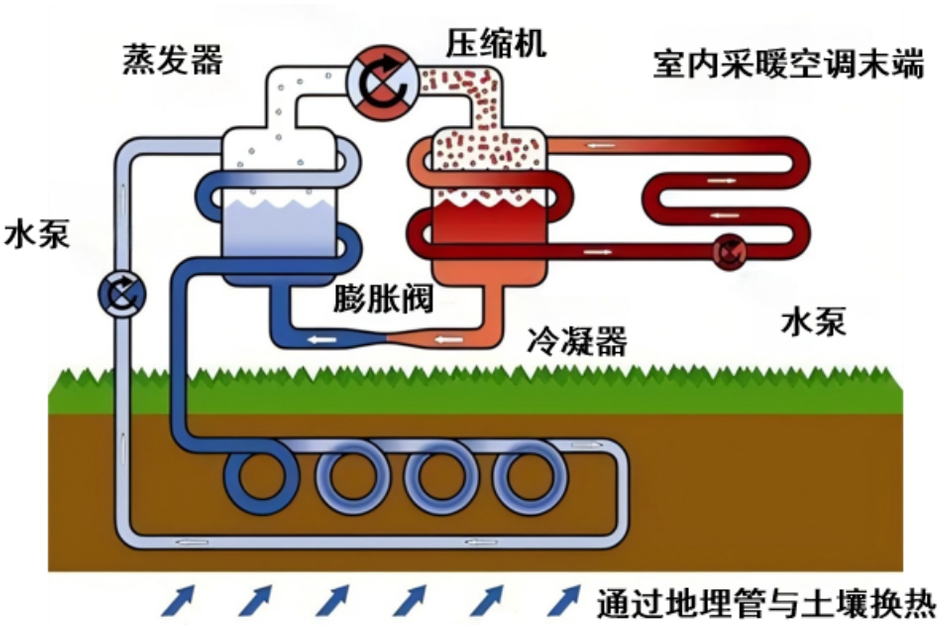


图 5　岩土储能系统示意（https://wenku.baidu.com）

Fig.5　Schematic diagram of a borehole thermal energy storage (BTES) system（https://wenku.baidu.com）

存能量的损失，大幅提高能源回收率．目前国内外尚未有深部岩土储能项目，但已有不少学者对此展开研究．Zhao *et al*.(2021)提出了一种高效算法，钻孔内部传热方程采用有限差分法求解，周围土壤和岩体的传热方程采用解析模型求解，该算法可实现地下2 000～3 000 m初始地温梯度管理，并处理随时间和深度变化的温度分布．Qin *et al*.(2022)提出了一个扩展的有限线源模型来研究深井换热器在充放电阶段的热性能，并对储热效率进行了评估，发现：在整个放热过程中，热性能最大提升倍数可达11.27倍，基于平均换热率评估的储热效率为2.86.Deng *et al*.(2023)通过仿真分析了深部钻孔连续运行和间歇运行两种运行模式下的储热特性，连续运行下的出口平均温度为30.1 ℃，间歇运行模式下的平均出口温度为33.5 ℃，表明间歇性运行时的平均热提取率高于连续运行时的平均热提取率．

3.2.2 关键技术进展 岩土储能系统选址需全面搜集项目所在地的地质勘查数据，重点掌握区域地层结构、岩土热物性参数(如导热系数、比热容、密度)、地下水渗流特征(流速、流向、水力梯度).Brown *et al*.(2023)通过OGS软件对地下水流动对岩土储能的影响进行研究，结果表明：存在地下水流动时，岩土储能的效率会降低13%．Wołoszyn and Gołaś(2014)采用一维多自由度有限元模型对钻孔换热器进行了数值模拟，并研究了岩体导热系数、比热、密度和灌浆材料导热系数四个参数对蓄热效率的影响，初步证实：岩体的导热系数对地下蓄热效率影响最大，且导热系数与储热效率呈现正相关．白天(2010)对严寒地区岩土储能的特性进行了分析，结果表明：寒冷地区岩土储能的孔间距应大于6 m.

岩土储能效率的主要影响因素包括埋管类型、埋管倾角、运行模式、储热/采热方式．李伟等(2009)对跨季节地埋管的蓄热能力和热作用半径进行了研究，分别对单管和管群的跨季节地埋管进行了数值模拟．模拟结果显示，在一个运行周期内，管群的日蓄热量优于单管，说明地埋管群有利于能量的长期储存．Wołoszyn(2018)利用ANSYS软件对地埋管储热长期运行进行全局敏感性分析，研究表明，地埋管在地下布置时的倾角对地埋管储热效率有重要影响，竖直布置地埋管的储热效率最佳．闫俐君和张旭(2015)基于热作用半径理论，对地埋管单管的储热特性进行了模拟研究，结果表明间歇运行时土壤的储热能力高于非间歇运行，且平均储热密度随进口水温的增加而呈线性增加．Wołoszyn(2020)利用全局敏感分析研究了各种参数对岩土储能长期运行效率的影响，结果表明：储能时选择较高的进口流体温度，释能时选择较低的进口流体温度可使岩土储能效率达到最高．Zhang *et al*.(2023)通过研究发现，在非供暖期持续供热可以有效缓解井筒因长时间取热造成的供热系统效率衰减的问题．

岩土储能系统在运行过程中，会向周围土壤释放或吸收热量，导致土壤温度发生变化．这种温度变化可能影响土壤中有机物的分解和养分循环，改变土壤的物理和化学性质，进而影响周边植物的生长和发育．钻孔的深度、直径和间距等设计参数如果不合理，可能导致钻孔结构不稳定．在长期运行过程中，钻孔周围的土壤可能发生坍塌或变形，损坏钻孔内的管道和设备，影响系统的正常运行．此外，钻孔结构的不稳定还可能导致传热流体泄漏，引发安全事故．

3.3 压缩空气储能

3.3.1 技术原理 传统压缩空气储能以压缩空气为储能介质，压缩机消耗能源压缩空气并储存在储气库中，发电时释放高压空气驱动电机放电．但在释放能量过程中，气体压力下降导致温度降低，使得能源利用率偏低．目前国际上典型的深部压缩空气储能项目有德国的Huntorf电站(地下约600 m深处盐穴)和美国Alabama电站(地下约450 m深处盐穴)，前者的能源利用率为42%，后者的能源利用率为54%(郭朝斌等，2019)．国内典型的深部压缩空气储能项目为中国能建主体投资建设的湖北应城300兆瓦压气储能示范工程——“能储一号”(地下600 m废弃盐穴)(https://paper.people.com.cn/zgnyb/pc/content/202501/13/content_0052549.html)，该工程利用储热罐在压缩空气时储存热量，释放空气时使用，使能源利用率达到70%，但储热罐的造价较高且占地面积大．

若使用深部地热储层作为压缩空气的储气罐，地热会对压缩空气进行加热，且在释放能量过程中地热还会对高压空气进行保温，可大幅提高能源利用率，原理图如图6所示．目前国际上尚未有具体项目进行实验，但已有不少学者对此展开研究．Liu *et al*.(2023)提出一种干热岩-压缩空气储能系统，在用电低谷时，将电能以压缩空气势能的形式储存在干热岩裂隙中，结果表明生产温度会随着质量流量的增加而升高，且往返效率远高于传统压缩空气储能．Li *et al*.(2020)提出一种利

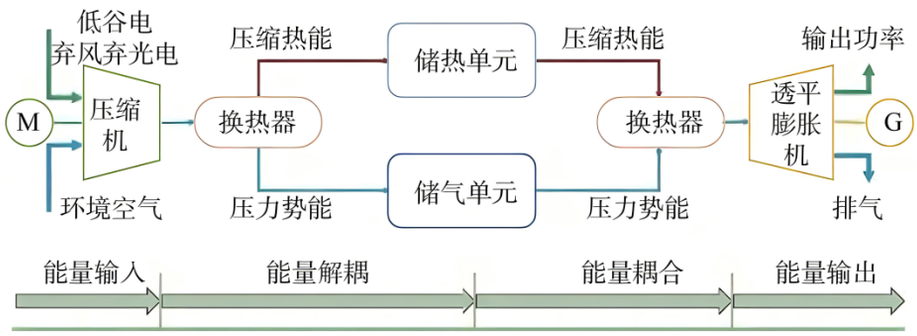


图 6　压缩空气储能系统示意（袁照威和杨易凡，2024）

Fig.6　Schematic diagram of a compressed air energy storage (CAES) system (from Yuan and Yang, 2024)

用U形井筒结构的含水层压缩空气储能与地热能耦合系统，研究了空气注入温度和地热温度分布对储能的影响，发现较低的空气温度有利于获取地热能，较高的地热温度有利于提高能源生产率.

3.3.2　关键技术　以深部地热储层为储罐的压缩空气储能系统选址需全面收集场址的地质勘探资料，着重考察储层构造特征、岩体力学参数（如孔隙度、渗透率、压缩模量）以及流体运移特性（气体扩散系数、盖层密封性）等关键指标. Stottlemyre（1978）和 Allen *et al.*（1983）分别在1978年和1983年提出了含水层压缩空气储能选址时储层孔隙度应大于10%，2008年 Succar and Williams（2008）提出13%为场地储层的最小孔隙度.因此，综合研究结果：选址时含水层孔隙度最好宜大于13%（董家伟和李毅，2021）.

目前以深部地热储层为储罐的压缩空气储能系统运行参数的相关研究较少，但其运行性能的核心在于各类参数的协同匹配.其中在储能阶段系统运行的关键参数包括压缩压力、压缩温度及空气存储速率，需通过调节这些参数平衡压缩效率与热回收量之间的关系；释能阶段的关键参数包括膨胀机入口温度、压力等，通过系统精准调控运行参数，使预热后高压空气温度满足膨胀机运行要求，实现能量高效转化.

在以深部地热储层为储罐的压缩空气储能和释能过程中，储层内的压力会发生变化.如果压力控制不当，可能导致储层压力失衡，引发储层破裂、塌陷等地质灾害.此外，压力失衡还可能影响周边的地质构造，诱发地震等自然灾害.

3.4　二氧化碳羽流储能

3.4.1　技术原理　二氧化碳羽流储能在用电低谷期将空气中现存或工业排放的二氧化碳收集起来作为气源，注入到地下渗透性较好的深层地热储层中（埋深2 000～3 000 m），注入过程中二氧化碳对储层中的流体进行驱动，并在储层中得到加热，用电高峰期将被加热的部分二氧化碳运送至地表进行发电，原理图如图7所示.当前国内外尚无二氧化碳羽流储能应用实例，该技术仍处于探索阶段，仅对二氧化碳作为储能介质的可能性进行了分析. Zhou *et al.*（2024）对比了二氧化碳和水作为含水层储热工作流体的储热性能，发现水的储热量虽然高于二氧化碳，但二氧化碳热损失更少、热回收率更高.付雷等（2022）以中国东北部的松辽盆地为例，建立了一个储层厚度100 m、温度100 ℃、位于地下2 000 m的模型，分析了注入压力、井间距与回注温度对热提取率的影响，发现热提取率与回注压力呈现正相关性，与回注温度呈现负相关性，井间距对热提取效率影响不显著.Li *et al.*（2024b）提出了一个地热能和二氧化碳羽流相联合的系统，发现当地温梯度大于0.05 ℃/m时，生产温度和高压储层压力会增加，且在模拟的六个地温梯度下，从井口回收的能量甚至大于注入的能量.Tang *et al.*（2024）利用德国Huntorf储电站的运行数据，以0.025 ℃/m的地温梯度建立模型，发现存在一个最佳的含水层渗透范围，可确保大规模注入和开采，同时保持高储能效率.

3.4.2　关键技术　二氧化碳羽流储能需全面搜集项目所在地的地质-热工耦合数据，重点掌握区域构造格局、储层物性参数（渗透率、孔隙度、裂隙发育程度）、地温梯度、盖层力学性质（厚度、破裂压力、渗透率）等关键信息.魏铭聪等（2015）运用TOUGH2/ECO2H软件建立平面二维羽流地热模型，对地下载热流体进行数值模拟，定量分析了注采井距和储层渗透率对采热速率的影响规律，结果表明，二氧化碳羽流系统的热效率与井间距和储层渗透率呈正相关.二氧化碳羽流储能时，大量

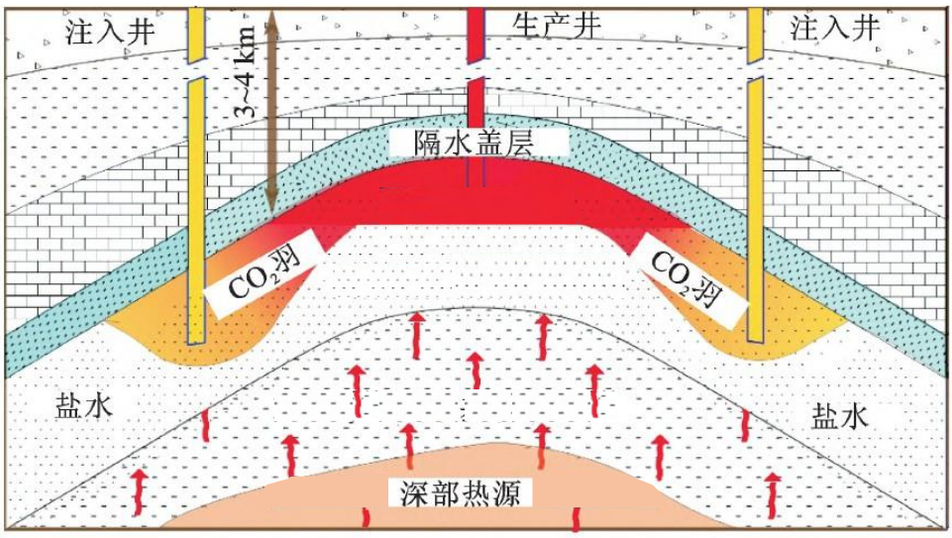


图7 二氧化碳羽流储能示意(周倩等,2023)

Fig.7 Schematic diagram of CO_2 plume energy storage (from Zhou *et al.*, 2023)

注入二氧化碳可能导致储层压力升高,破坏盖层稳定性,选址时应优选地质力学性能好、岩石破碎压力高的盖层,以降低高压注入对地层的影响.

二氧化碳羽流储能的运行优化需通过注入参数精准调控、储层-流体耦合匹配及多目标协同策略,实现地热高效提取与CO_2安全封存的双赢.在注入参数设计上,需优先保障CO_2处于超临界状态(压力≥7.38 MPa、温度≥31.1℃),利用其低黏度(0.02~0.1 mPa·s)、高导热系数(0.05~0.1 W/(m·K))的特性强化热交换效率,同时基于储层渗透率分布优化注入流量(建议20~50 m^3/h)与压力(略高于储层静水压力0.5~1.0 MPa),避免高流量引发的羽流过早热突破或低压力导致的CO_2泄漏风险(Adams *et al.*, 2015).储层适配性调控方面,针对高渗透性砂岩热储,采用"多点分散注入+单井集中采出"的羽流控制模式,通过数值模拟预判羽流扩散范围,减少井间热干扰(付雷等,2022).运行策略上,采用"储热-采热"周期性调度(如冬季供暖期连续采热、夏季非供暖期集中储热),利用非采热阶段的CO_2滞留强化与储层的热交换,使单位质量CO_2的地热提取量提升;长期运行中,需建立储层温度-压力-组分动态监测系统,实时修正注采参数,避免CO_2与岩石矿物反应(如长石溶解、方解石沉淀)导致的渗透率衰减(Ma *et al.*, 2019),兼顾系统能效与地质封存稳定性.

二氧化碳羽流储能在安全方面面临诸多挑战,这与系统运行特性和地质条件密切相关.在注入二氧化碳过程中,由于注入量较大且持续时间长,若储层密封性不佳,二氧化碳可能发生泄漏.二氧化碳泄漏不仅会导致储能效率降低,无法实现预期的能量存储和利用目标,还可能对周边环境和生态系统造成严重威胁.一旦二氧化碳泄漏至大气中,会增加温室气体排放,加剧全球气候变暖;若泄漏到土壤或水体中,会改变土壤和水体的酸碱度,影响土壤微生物活性和水生生物的生存环境,破坏生态平衡.

4 深部地热储能面临的挑战

尽管学界与业界已围绕深部地热储能的储热选址、运行优化和环境安全等方面开展了大量研究,在储热效率提升等方面取得阶段性突破,但从技术规模化应用视角来看,该技术仍面临多维度瓶颈制约,具体体现在以下核心领域:

其一,储址精准甄选与勘测难度高.储层的岩性、孔隙率、渗透率、有效厚度及稳定性等参数直接决定储能容量与长期运行效果,是储址选择的核心依据.然而,深部地层普遍呈现高温、高压、地质结构复杂等特征,现有地球物理勘探、钻井取芯分析等技术手段对深部储层参数的探测精度有限,难以全面刻画储层空间分布规律与动态演化特征,易导致储址甄选出现偏差,直接影响储能系统的设计效率与运行稳定性.

其二,储能效率提升受限且调控难度大.深部

地热储能过程中，热量损失是制约储能效率的关键因素——储热介质的热量不仅会通过岩石传导向周围低温地层扩散，在储层渗透率较高的区域，热流体与周边岩体的对流换热会进一步加剧热量流失，显著降低能量存储效率．更为关键的是，注水井的注水速率直接关联储层裂缝扩展形态与诱发地震风险，当前主流的注水控制技术与压裂工艺难以实现注水速率的精准动态调控，也无法精准控制裂缝的延伸方向、长度及开度，既难以充分激活储层的有效储热空间、发挥储热潜力，又进一步增加了运行过程中的安全不确定性．

其三，环境安全风险防控压力大且技术不成熟．一方面，深部储层天然渗透率较低，为满足储能需求需通过注水压裂进行储层改造，而该过程易扰动周边地质体应力平衡，诱发不同震级的地震事件．目前针对压裂诱发地震的预测模型精度不足，对地震震级、发生时间及影响范围的预判能力有限，且缺乏有效的主动防控与应急处置技术．另一方面，储能系统长期运行于高温、高压及含腐蚀性介质的环境中，井筒管材易发生腐蚀、磨损甚至破裂，储热介质可能出现泄漏，不仅会损坏设备、影响系统寿命，还可能污染地下水资源，但当前针对高温高压环境下的防腐、防泄漏技术仍存在适配性不足、耐久性差等问题，难以实现长期稳定的安全防控．

5　深部地热储能发展展望

在全球能源结构变革与气候治理深化的背景下，深部地热储能作为高效、清洁、可再生的能源利用方式，迎来重要发展机遇．其深度契合“双碳”战略，凭借低碳基荷属性与多能协同潜力，成为实现“双碳”目标的关键技术支撑．政策层面，《“十四五”可再生能源发展规划》等多项文件将地热能规模化开发列为重点，推动大容量储能技术示范与高温含水层储能攻关；技术层面，深部地热储能节能性与经济性显著，可整合风光等可再生能源，构建多能耦合网络，提升系统灵活性与效率，为新型能源体系提供保障（黄永辉等，2023；芮振华等，2024）．

5.1　构建以地热储能为核心的多能互补能源体系

5.1.1　“电转热”模式下的深部地热储能与多能互补　推动深部地热储能与风能、太阳能及其他储能技术融合，形成多能互补体系．如采用“电转热”模式，利用过剩风光电加热换热介质并注入深部地热储层，实现产能储能双重效益（侯正猛等，2024）．卡诺电池（Carnot Battery）是一种典型的“电转热”模式大规模储能技术，其核心思想是通过电能与热能的相互转换实现能量存储与释放．系统通常包括充电（储能）和放电（释能）两个阶段：充电时，利用过剩电力驱动热泵或电热装置，将低温热源（如环境介质）的热能提升至高温储热介质（如熔盐、岩石或高温流体）中储存；放电时，储存的高温热能通过热机（如蒸汽轮机、有机朗肯循环等）重新转化为电能，完成“电能→热能→电能”的循环．卡诺电池的优势在于可适配多种储热材料（工作温度范围广，通常为150～1 000 ℃以上），且通过高温差设计（提升卡诺效率）和低成本储热介质（如固体颗粒、熔盐）实现长时（小时至季节性）储能，适用于可再生能源并网和工业废热回收等领域．其效率受热机循环效率限制（理论上限为卡诺效率，实际约40%～70%），但规模可扩展至百兆瓦级，经济性显著优于纯电化学储能系统．

基于该原理，2019年在德国汉堡由西门子歌美飒可再生能源公司主导建立了一个储能容量大于100 MWh的电-地热储能（Electric Thermal Energy Storage，ETES）中试项目．该项目聚焦电-热转换与岩石床储热技术融合，旨在解决风电、光伏等波动性可再生能源的消纳与时空匹配问题，其设计、运行数据及性能验证为长时储能技术规模化应用提供了关键支撑，核心成果可从技术设计、运行性能、效率与稳定性及应用前景四方面总结．项目采用创新性固体介质储热架构，以天然火山岩为低成本储热材料，构建了完整的电热转换-储热-热电转换系统，通过精细化的温度监控与流量调节机制实现了运行的灵活性与稳定性．实践验证表明，该技术具有优异的长时储能特性，单次放电可持续数十小时，热场分布均匀且经多次循环无明显性能衰减，充分展现了工程尺度的可靠性．虽然受限于小规模蒸汽系统，整体能量转换效率仍有提升空间，但仿真分析证实通过集成超临界CO_2循环等先进热力系统可显著优化性能．从战略定位看，该技术路线兼具储热介质成本低、无资源约束、安全性高等优势，特别适合“可再生能源＋工业用热”应用场景，长期可拓展至电网级长时储能领域，为构建新型电力系统和推动能源转型提供了具有显著经济性和可扩展性的技术路径．

作为全球首个兆瓦级ETES示范工程，德国

汉堡的电-地热储能中试项目验证了“电转热”模式大规模储能技术的可行性，填补了低成本长时储能技术空白，提供了详实的兆瓦级运行数据，为规模化设计提供参考.尽管该项目于2022年因市场与企业战略调整被拆除，但其技术成果为行业研发（如西门子能源、美国储热企业）提供了重要借鉴，奠定了多联产储能系统的发展基础.

5.1.2　“电转热+热转热”模式下的深部地热储能与多能互补　常规聚光太阳能发电储能存在不稳定性、熔盐储能容量小（<24 h）、占地面积大等问题.而深部地热储能具有储热容量大、储热效率高、携热介质充足、造价低等优势，与太阳能、风能组成多能互补新能源体系，可解决地上太阳辐照强度不均衡和地下中低温地热能源开发不足的瓶颈.

基于此，王焰新教授团队提出“地大方案”——地下超长时高温储能系统（图8），该系统由聚能、运能、储能、用能四大功能部分组成，技术成熟度较高.地下超长时高温储能系统将收集的聚光太阳能的热能或风电和光伏的电能转化为以流体承载的热能，注入地下并与地下地热能源结合，形成规模性高温地热储能系统（地热电池），可实时开采用于发电和梯级利用.被加热的水通过注入井注入地下储层，使储层温度提高，从而实现对原本不经济的地热储层的利用，并可根据电力需求抽采储层中的热水用于发电和供暖梯级利用.在该循环过程中，发电尾水重新注入冷水井以维持地层压力恒定，替代了地上蓄热站的建造，降低了投入成本，是一种极具潜力的创新方案.

针对提出的地下超长时高温储能系统进行系统性数值仿真：聚光吸热采用SG-塔式设计软件，运用光线追迹法，建立聚光吸热循环系统仿真模型；地层储热采用多物理耦合软件COMSOL Multiphysics，运行网格加密法，建立储层热-流-固耦合双井注采模型；地热电池发电采用瞬态性能仿真软件TRNSYS，运用两级闪蒸朗肯循环工艺，建立地热发电系统模型.采用日循环注采制度，即储6 h、停12 h、采6 h.运行第1天地热储热效率最低，随着运行天数的增加，储热效率逐渐升高，稳定运行30天后，地热储热效率保持在0.913～0.936范围，平均储热效率达0.925，与现有系统相当或更优（王焰新等，2026）.

5.1.3　深地储能与CO_2地质封存协同技术　在全球碳中和战略背景下，深部地热储能与CO_2地质封存技术的深度融合，代表了能源-环境-资源协同发展的创新方向.这一跨领域技术融合不仅能够实现能源的高效存储与利用，更能为碳减排提供规模化解决方案，形成“储热-固碳-增效”三位一体的综合技术体系.通过将低温CO_2注入深部地热储层，吸收地热能升温后再将其引导至目标储层进

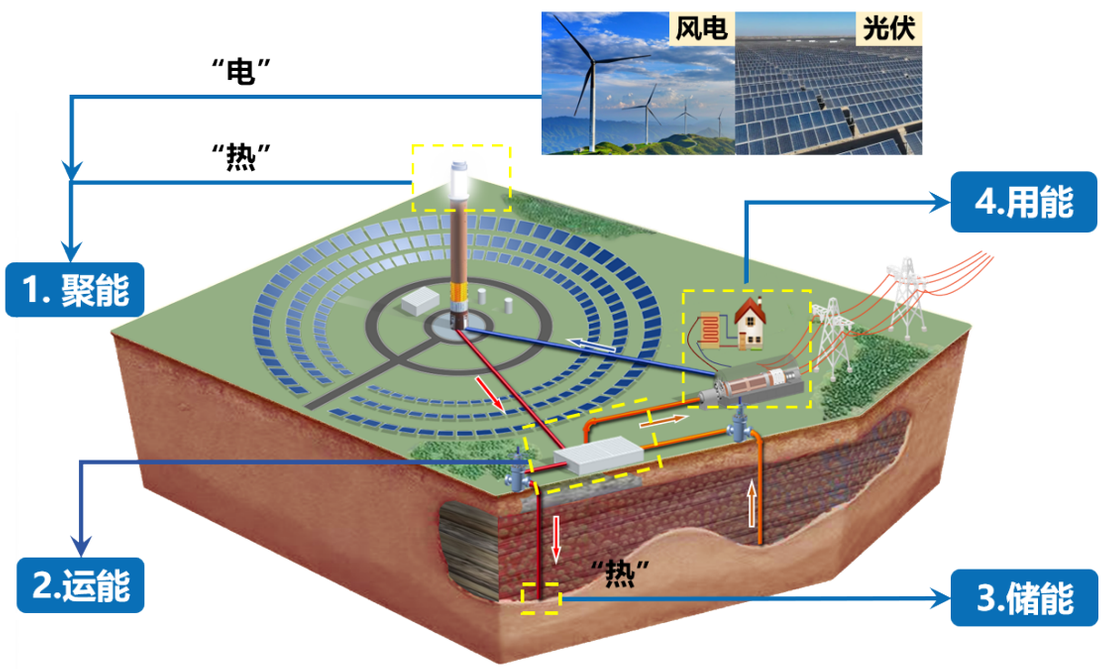


图8　“地大方案”——地下超长时高温储能系统概念

Fig.8　Conceptual diagram of the “CUG Solution”: An underground ultra-long-duration high-temperature energy storage system

行驱油作业，同时实现热能存储与CO_2地质封存．这一技术路径不仅能够显著提升原油采收率，还能确保CO_2的稳定埋存．在此过程中，深部地热储能系统既为驱油工艺提供了稳定的高温热源，又通过热能存储实现了部分CO_2的有效封存，有效降低了碳排放强度（杨子江等，2024）．

基于上述5.1.2“热转热”模式下的深部地热储存，构建地热/太阳能/储热/CO_2封存/供暖联合系统．该系统深度融合聚光太阳能地下超长时高温储能理念与二氧化碳羽流地热技术，以超临界CO_2作为储热媒介，充分利用其低黏度和高导热的物理特性，显著提升热交换效率．系统采用“热转热”模式：非采暖季，聚光太阳能系统收集的热能直接加热CO_2，注入深部地热储层进行长期储存；采暖季，加热后的CO_2通过生产井升至地表，经换热器释放热量用于区域供暖，冷却后的CO_2部分回注循环，部分转移至邻近咸水层进行永久封存．这一设计实现了三重协同效应：首先，CO_2在储层中吸收地热能的同时实现了地质封存，形成“储热-固碳”一体化过程；其次，深部地热储层作为永久地下储热设施（热惯性时间可达数月），可有效平抑太阳能间歇性与季节性波动，系统储热效率稳定在0.909～0.936；最后，通过“热转热”模式直接将太阳能转化为地热能，实现了可再生能源的高效捕获与跨季节存储．这种将能源存储、碳封存与民生需求有机结合的技术路径，代表了深部地热资源高值化利用的创新方向，为实现“双碳”目标提供了具有工程可行性的技术方案（卜宪标，2025）．

5.2　构建深部地热储能技术创新与产业化体系

在未来清洁型供暖需求日益增长、可再生能源占比持续提升的背景下，深部地热储能技术展现出巨大的应用潜力．然而，现有研究指出，该技术在实际应用中仍面临诸多瓶颈：深部地质勘测精度不足导致选址存在不确定性；复杂地质环境下的热损失与流体控制难题制约储能效率；高压注水可能诱发的微震风险及设备腐蚀问题威胁系统安全．同时，基础理论体系尚未完善，技术瓶颈亟待突破．因此，需构建覆盖理论创新、技术研发、工程应用、安全管控到产业推广的全链条技术体系，为深部地热储能高质量发展提供系统支撑（黄永辉等，2020）．

5.2.1　深化基础理论研究　深部地热储能涉及热-流-力-化-生多物理场复杂耦合过程，亟需构建系统化理论体系．重点突破热锋面在复杂地质介质中的演化规律、热干扰抑制机制及热回收效率提升等核心科学问题，建立热能存储与释放全过程理论模型．基于我国多样化的地质条件，需研究不同岩性、地层结构及含水层特征对储热性能的影响机制，形成差异化理论框架．同时，应加强深部地热与风能、太阳能等可再生能源协同的理论研究，探索“电-热”转换效率优化路径，并融合地质储氢、压缩空气储能等领域的研究成果，将小分子物质渗流理论、地质体密封性演化规律等前沿理论融入深部地热储能研究体系，全面提升理论研究水平．

5.2.2　突破核心技术瓶颈　聚焦热损失控制与系统效率提升，系统研究不同渗透率储层的热传导与对流机制，针对高渗透地层开发储层密封性改造等热损失抑制技术．攻克储热-释热循环中的能量梯级利用、热力系统匹配及多能互补集成关键技术，建立系统性能评价与优化方法体系．重点解决注水控制精度不足、储层热潜力挖掘不充分等工程难题，通过系统集成与协同优化，显著提升热能保持率与综合效率（卜宪标和张冬冬，2020）．

5.2.3　构建科学选址与工程化体系　构建融合地质构造、水文条件、热物理特性、环境影响及经济性等多维度参数的资源评价体系，依据科学的资源分级标准及精细的工程勘测进行储层选址．针对深部地层岩性、孔隙度、渗透率等关键参数获取困难及勘探精度不足等问题，借鉴盐穴及油气藏储气库成熟经验，研发适应不同地质条件的钻完井、储层改造及密封保障技术．建立全生命周期成本效益模型，综合评估初始投资、运维成本与环境影响，探索“源-网-荷-储”一体化开发模式，加速构建工程化技术体系．

5.2.4　健全安全监测与风险管控体系　深入开展热力循环对地质体稳定性的影响研究，掌握多次注采循环下岩体力学性能演化规律，建立安全评价与风险预警模型（王一鸣等，2025）．重点发展原位监测技术，构建“空-天-地-井”一体化监测网络，实现系统全生命周期实时监控与智能诊断．融合大数据与人工智能技术，提升风险预测预警能力．完善覆盖规划、设计、建设、运行、维护全链条的技术标准与安全规范，强化极端工况防护能力，筑牢安全发展根基．

5.2.5　推动区域示范与产业协同发展　立足资源禀赋实施区域差异化开发，在西部高温地热富集区，重点发展地热发电与大规模储能协同项目；

在东部负荷中心,推进地热供暖与跨季节储能系统建设.创新利用废弃矿井资源,探索“矿-储-能”绿色转型模式.通过百兆瓦级示范工程建设,验证技术经济可行性,降低单位能源成本,提升系统效率,构建“理论-技术-工程-安全-产业”五位一体的深部地热储能发展新格局,为国家能源安全与双碳目标实现提供关键支撑.

6 结论

储能是破解新能源并网难题、保障新型电力系统稳定运行、实现“双碳”目标的核心支撑,其规模化发展对能源转型至关重要.在各类储能技术中,深部地热储能凭借显著优势脱颖而出,具备规模化潜力大、经济性优、应用场景广及系统韧性强的特点,可整合弃风弃光、工业余热等低边际成本能源,运行成本仅为传统储能的1/3~1/2,是长时大规模储能的优选方向.

深部地热系统以水热型、干热岩型为主要类型,兼具储量大、温度梯度高、分布广的特征,其储能能力由热源特性、储层地质结构及盖层特性共同决定,热源具有多源性,热能传输机制呈传导型与对流型分异,地质构造则贯穿热能形成、运移及储集全过程,为储能提供了坚实的天然地质基础.

当前深部地热储能已形成含水层储能、岩土储能、压缩空气储能及二氧化碳羽流储能等技术路径,其中水热型与中浅部岩土储能已有成熟示范工程,后两者仍处于理论研究与仿真阶段.但整体而言,技术规模化应用仍面临储址勘测难度高、储能效率调控受限、环境安全风险防控技术不成熟等核心挑战.

未来深部地热储能需向多能互补与技术产业化方向发展:一方面构建“电转热”“热转热”模式下的地热-风光互补体系及储热-固碳一体化系统,挖掘“地大方案”等创新技术潜力;另一方面需深化多物理场耦合理论研究,突破热损失控制、精准注水等核心技术,构建科学选址、安全监测及产业协同体系,通过区域差异化示范工程推动技术落地,助力能源安全与碳中和目标实现.

References

Adams, B. M., Kuehn, T. H., Bielicki, J. M., et al., 2015. A Comparison of Electric Power Output of CO_2 Plume Geothermal (CPG) and Brine Geothermal Systems for Varying Reservoir Conditions. *Applied Energy*, 140: 365−377. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.043

Allen, R.D., Doherty, T.J., Erikson, R.L., et al., 1983. Factors Affecting Storage of Compressed Air in Porous-Rock Reservoirs. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information, United States. https://doi.org/10.2172/6270908

Bai, T., 2010. Research on Operation Characteristic of Ground Heat Exchanger for Ground Coupled Heat Pump System in Cold Climate (Dissertation). Harbin Institute of Technology, Harbin (in Chinese with English abstract).

Brown, C. S., Doran, H., Kolo, I., et al., 2023. Investigating the Influence of Groundwater Flow and Charge Cycle Duration on Deep Borehole Heat Exchangers for Heat Extraction and Borehole Thermal Energy Storage. *Energies*, 16(6): 2677. https://doi.org/10.3390/en16062677

Bu, X.B., 2025. Medium-Deep Geothermal Energy Storage Synergistic CO_2 Sequestration. Proceedings of the 7th Geothermal Youth Forum, Shanghai (in Chinese).

Bu, X. B., Zhang, D. D., 2020. Performance Analysis, Countermeasures and Suggestions of Integrated Heating System Combined Medium-Deep Borehole Heat Exchanger with Heat Pump. *Science & Technology for Development*, 16(S1): 338−345 (in Chinese with English abstract).

Chen, H., Cui, Y. H., Wang, H. M., et al., 2024. Advances in Mines Ecological Restoration and Carbon Sequestration Potential. *Earth Science*, 49(12): 4594−4607 (in Chinese with English abstract). https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.081

Clauser, C., Huenges, E., 1995. Thermal Conductivity of Rocks and Minerals. Rock Physics & Phase Relations. American Geophysical Union, Washington, D. C., 105−126. https://doi.org/10.1029/rf003p0105

Deng, J. W., Peng, C. W., Su, Y. Y., et al., 2023. Research on the Heat Storage Characteristic of Deep Borehole Heat Exchangers under Intermittent Operation Mode: Simulation Analysis and Comparative Study. *Energy*, 282: 128938. https://doi. org/10.1016/j. energy.2023.128938

Dong, J. W., Li, Y., 2021. Study of the Site Evaluation of Compressed Air Energy Storage in Aquifers. *Safety and Environmental Engineering*, 28(3): 228−239 (in Chinese with English abstract).

Doughty, C., 2007. Modeling Geologic Storage of Carbon Dioxide: Comparison of Non-Hysteretic and Hysteretic

Characteristic Curves. *Energy Conversion and Management*, 48(6): 1768—1781. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.01.022

Drijver, B., Van Aarssen, M., Zwart, B.D., 2012. High-Temperature Aquifer Thermal Energy Storage (HT-ATES): Sustainable and Multi-Usable. The 12th International Conference on Energy Storage, Lleida, Spain.

Fu, L., Ma, X., Diao, Y. J., et al., 2022. Economic Analysis of Carbon Storage in CO_2 Plume Geothermal System. *Geology in China*, 49(5): 1374—1384. (in Chinese with English abstract).

Geerts, D., Daniilidis, A., Kramer, G. J., et al., 2025. Analytically Estimating the Efficiency of High Temperature Aquifer Thermal Energy Storage. *Geothermal Energy*, 13: 17. https://doi.org/10.1186/s40517-025-00343-8

Guo, C. B., Wang, Z. H., Liu, K., et al., 2019. The Application and Research Progress of Special Underground Space. *Geology in China*, 46(3): 482—492 (in Chinese with English abstract).

Guo, F., Yang, X. D., Xu, L. Y., et al., 2017. A Central Solar-Industrial Waste Heat Heating System with Large Scale Borehole Thermal Storage. *Procedia Engineering*, 205: 1584—1591. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.274

Guo, F., Zhu, X. Y., Zhang, J. Y., et al., 2020. Large-Scale Living Laboratory of Seasonal Borehole Thermal Energy Storage System for Urban District Heating. *Applied Energy*, 264: 114763. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114763

Guo, Q. H., 2022. Definition of Magma-Impacted Geothermal System. *Acta Geologica Sinica*, 96(1): 208—214 (in Chinese with English abstract).

Hou, Z. M., Wu, X. N., Luo, J. S., et al., 2024. Major Challenges of Deep Geothermal Systems and an Innovative Development Mode of REGS Integrated with Energy Storage. *Coal Geology & Exploration*, 52(1): 1—13 (in Chinese with English abstract).

Huang, G. S., Liu, L., Mu, M. G., et al., 2023. Prediction of Dynamic Temperature and Thermal Front in a Multi-Aquifer Thermal Energy Storage System with Reinjection. *Energies*, 16(21): 7358. https://doi.org/10.3390/en16217358

Huang, L. C., Hou, Z. M., Fang, Y. L., et al., 2024. The Development, Frontier and Prospect of Large-Scale Underground Energy Storage: A Bibliometric Review. *Journal of Energy Storage*, 103: 114293. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114293

Huang, Y. H., Pang, Z. H., Cheng, Y. Z., et al., 2020. The Development and Outlook of the Deep Aquifer Thermal Energy Storage (Deep-ATES). *Earth Science Frontiers*, 27(1): 17—24 (in Chinese with English abstract).

Huang, Y. H., Yang, J. S., Zhu, C. Q., et al., 2023. Numerical Modeling of the High-Temperature Thermal Energy Storage System in Deep Aquifers. *Acta Geoscientica Sinica*, 44(1): 239—247 (in Chinese with English abstract).

Ingebritsen, S. E., Appold, M. S., 2012. The Physical Hydrogeology of Ore Deposits. *Economic Geology*, 107(4): 559—584. https://doi.org/10.2113/econgeo.107.4.559

Jeon, J. S., Lee, S. R., Pasquinelli, L., et al., 2015. Sensitivity Analysis of Recovery Efficiency in High-Temperature Aquifer Thermal Energy Storage with Single Well. *Energy*, 90: 1349—1359. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.079

Li, D. W., Wang, Y. X., 2015. Major Issues of Research and Development of Hot Dry Rock Geothermal Energy. *Earth Science*, 40(11): 1858—1869 (in Chinese with English abstract).

Li, S., Wang, G. S., Zhou, M. M., et al., 2024a. Thermal Performance of an Aquifer Thermal Energy Storage System: Insights from Novel Multilateral Wells. *Energy*, 294: 130915. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130915

Li, Y., Cui, J., Yu, H., et al., 2024b. The Impacts of Geothermal Gradients on Compressed Carbon Dioxide Energy Storage in Aquifers. *Renewable Energy*, 231: 120954. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120954

Li, W., Li, X. G., Zhao, J., et al., 2009. Study on Heat Storage Characteristics of Soil and Simulation. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 30(11): 1491—1495 (in Chinese with English abstract).

Li, Y., Liu, Y. N., Hu, B., et al., 2020. Numerical Investigation of a Novel Approach to Coupling Compressed Air Energy Storage in Aquifers with Geothermal Energy. *Applied Energy*, 279: 115781. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115781

Liu, X. L., Zhong, L. S., Wang, J. S., 2023. The Investigation on a Hot Dry Rock Compressed Air Energy Storage System. *Energy Conversion and Management*, 291: 117274. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117274

Lu, S. M., 2018. A Global Review of Enhanced Geothermal System (EGS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81: 2902—2921. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.097

Lundh, M., Dalenbäck, J. O., 2008. Swedish Solar Heated Residential Area with Seasonal Storage in Rock: Initial Evaluation. *Renewable Energy*, 33(4): 703—711. https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.03.024

Ma, X., Yang, G. D., Li, X. F., et al., 2019. Geochemical Modeling of Changes in Caprock Permeability Caused by CO_2-Brine-Rock Interactions under the Diffusion Mechanism. *Oil & Gas Science and Technology-Revue D'IFP Energies Nouvelles*, 74: 83. https://doi.org/10.2516/ogst/2019055

Moeck, I. S., 2014. Catalog of Geothermal Play Types Based on Geologic Controls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37: 867—882. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.032

Nilsson, E., Rohdin, P., 2019. Performance Evaluation of an Industrial Borehole Thermal Energy Storage (BTES) Project—Experiences from the First Seven Years of Operation. *Renewable Energy*, 143: 1022—1034. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.020

Qin, X. X., Zhao, Y. Z., Dai, C. J., et al., 2022. Thermal Performance Analysis on the Seasonal Heat Storage by Deep Borehole Heat Exchanger with the Extended Finite Line Source Model. *Energies*, 15(22): 8366. https://doi.org/10.3390/en15228366

Rad, F. M., Fung, A. S., 2016. Solar Community Heating and Cooling System with Borehole Thermal Energy Storage—Review of Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60: 1550—1561. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.025

Rui, Z. H., Liu, Y. L., Zhang, Z., et al., 2024. Research Progress and Prospect of Geothermal Energy Storage Technology. *Petroleum Science Bulletin*, 9(2): 260—281 (in Chinese with English abstract).

Rutqvist, J., 2012. The Geomechanics of CO_2 Storage in Deep Sedimentary Formations. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(3): 525—551. https://doi.org/10.1007/s10706-011-9491-0

Sibbitt, B., McClenahan, D., Djebbar, R., et al., 2012. The Performance of a High Solar Fraction Seasonal Storage District Heating System—Five Years of Operation. *Energy Procedia*, 30: 856—865. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.097

Stottlemyre, J. A., 1978. Preliminary Stability Criteria for Compressed Air Energy Storage in Porous Media Reservoirs. Pacific Northwest Laboratory, Department of Energy, United States. https://doi.org/10.2172/6648903

Succar, S., Williams, R.H., 2008. Compressed Air Energy Storage: Theory, Resources, and Applications for Wind Power. Princeton Environmental Institute, Carbon Mitigation Initiative, Princeton University, Princeton.

Tang, D., Li, Y., Liu, Y. J., et al., 2024. Factors Affecting Compressed Carbon Dioxide Energy Storage System in Deep Aquifers. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83(10): 407. https://doi.org/10.1007/s10064-024-03887-4

Tas, L., Hartog, N., Bloemendal, M., et al., 2025. Efficiency and Heat Transport Processes of Low-Temperature Aquifer Thermal Energy Storage Systems: New Insights from Global Sensitivity Analyses. *Geothermal Energy*, 13: 2. https://doi.org/10.1186/s40517-024-00326-1

Tzoufka, K., Blöcher, G., Cacace, M., et al., 2024. Physics-Based Numerical Evaluation of High-Temperature Aquifer Thermal Energy Storage (HT-ATES) in the Upper Jurassic Reservoir of the German Molasse Basin. *Advances in Geosciences*, 65: 103—111. https://doi.org/10.5194/adgeo-65-103-2024

van Lopik, J. H., Hartog, N., Zaadnoordijk, W. J., 2016. The Use of Salinity Contrast for Density Difference Compensation to Improve the Thermal Recovery Efficiency in High-Temperature Aquifer Thermal Energy Storage Systems. *Hydrogeology Journal*, 24(5): 1255—1271. https://doi.org/10.1007/s10040-016-1366-2

Wang, G. L., Yue, G. F., Lin, W. J., et al., 2024. Deep Carbonate Geohermal Reservoir Production Enhancement Technology in North China Plain. *Earth Science*, 49(4): 1470—1486 (in Chinese with English abstract). https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.449

Wang, Y., Zhang, F. S., 2025. Operation Optimization for Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) Systems Based on a Surrogate Model-Assisted Method. *Applied Thermal Engineering*, 268: 125907. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125907

Wang, Y. X., Jiang, S., Hu, F., et al., 2026. Orthogonal Experimental Optimization and Economic Evaluation of a Coupled Multi-Parameter Simulation for a Concentrating Solar-Geothermal Energy Storage System. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 45(3): 1—15 (in Chinese with English abstract).

Wang, Y. M., Chen, W., Bu, X. B., 2025. Quantitative Analysis of Influential Factors of Formation Heat Losses in High-Temperature Aquifer Thermal Energy Storage System. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 44(10): 5717—5729 (in Chinese with English abstract).

Wei, M. C., Yang, B., Xu, T. F., et al., 2015. Effects of Well Spacing and Reservior Permeability on Heat Ex-

traction in CO_2 Plume Geothermal System: A Case Study of Songliao Basin. *Geological Science and Technology Information*, 34(2): 188－193 (in Chinese with English abstract).

Winterleitner, G., Schütz, F., Wenzlaff, C., et al., 2018. The Impact of Reservoir Heterogeneities on High-Temperature Aquifer Thermal Energy Storage Systems. a Case Study from Northern Oman. *Geothermics*, 74: 150－162. https://doi. org/10.1016/j. geothermics.2018.02.005

Wołoszyn, J., 2018. Global Sensitivity Analysis of Borehole Thermal Energy Storage Efficiency on the Heat Exchanger Arrangement. *Energy Conversion and Management*, 166: 106－119. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.009

Wołoszyn, J., 2020. Global Sensitivity Analysis of Borehole Thermal Energy Storage Efficiency for Seventeen Material, Design and Operating Parameters. *Renewable Energy*, 157: 545－559. https://doi. org/10.1016/j. renene.2020.05.047

Wołoszyn, J., Gołaś, A., 2014. Sensitivity Analysis of Efficiency Thermal Energy Storage on Selected Rock Mass and Grout Parameters Using Design of Experiment Method. *Energy Conversion and Management*, 87: 1297－1304. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.059

Xu, L. Y., Torrens, J. I., Guo, F., et al., 2018. Application of Large Underground Seasonal Thermal Energy Storage in District Heating System: A Model-Based Energy Performance Assessment of a Pilot System in Chifeng, China. *Applied Thermal Engineering*, 137: 319－328. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.03.047

Yan, L. J., Zhang, X., 2015. Research on Heat Storage Characteristics of Ground Heat Exchanger Based on Thermal Influencing Radius. *Chinese Journal of Refrigeration Technology*, 35(1): 1－5, 10 (in Chinese with English abstract).

Yang, C. H., Wang, T. T., 2022. Advance in Deep Underground Energy Storage. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 41(9): 1729－1759 (in Chinese with English abstract).

Yang, Z. J., Shi, Y., Peng, J. L., et al., 2024. Advances in Theory and Technology of Heat Extraction and Energy Storage Utilization in CO_2 Geological Storage Processes. *Journal of Chengdu University of Technology* (*Science & Technology Edition*), 51(6): 913－926 (in Chinese with English abstract).

Yuan, Z. W., Yang, Y. F., 2024. Research Status and Development Trend of Compressed Air Energy Storage Technology. *Southern Energy Construction*, 11(2): 146－153 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Y. Y., Ye, C. T., Kong, Y. L., et al., 2023. Thermal Attenuation and Heat Supplementary Analysis of Medium-Deep Coaxial Borehole System-Based on a Practical Project. *Energy*, 270: 126805. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126805

Zhao, Y. Z., Pang, Z. H., Huang, Y. H., et al., 2021. Correction to: An Efficient Hybrid Model for Thermal Analysis of Deep Borehole Heat Exchangers. *Geothermal Energy*, 9: 7. https://doi. org/10.1186/s40517-021-00191-2

Zhou, D. J., Li, K., Gao, H. H., et al., 2024. CO_2 High-Temperature Aquifer Thermal Energy Storage (CO_2 HT-ATES) Feasible Study: Combing the Heating Storage and CCUS. *Gas Science and Engineering*, 122: 205224. https://doi.org/10.1016/j.jgsce.2024.205224

Zhou, D. J., Li, K., Gao, H. H., et al., 2026. Injection Strategy Analysis of High-Temperature Aquifer Thermal Energy Storage System, an Insight from the Study Case in Burgwedel, Germany. *Renewable Energy*, 256: 124722. https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.124722

Zhou, Q., Wang, F. Q., Zou, L. F., et al., 2023. Research Progress on Geothermal Exploitation of CO_2 Plume Geothermal Systems. *Resources Environment & Engineering*, 37(5): 530－536 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

白天, 2010. 严寒地区土壤源热泵系统地埋管运行特性研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学.

卜宪标, 2025. 中深层水热型地热储能协同CO_2封存. 上海: 第七届地热青年论坛.

卜宪标, 张冬冬, 2020. 中深层井下换热器联合热泵供暖系统性能提高技术途径分析. 科技促进发展, 16(S1): 338－345.

陈珲, 崔一涵, 汪海明, 等, 2024. 矿山生态修复及其固碳潜力研究进展. 地球科学, 49(12): 4594－4607.

董家伟, 李毅, 2021. 含水层压缩空气储能选址评价方法研究. 安全与环境工程, 28(3): 228－239.

付雷, 马鑫, 刁玉杰, 等, 2022. 二氧化碳羽流地热系统的碳封存经济分析. 中国地质, 49(5): 1374－1384.

郭朝斌, 王志辉, 刘凯, 等, 2019. 特殊地下空间应用与研究现状. 中国地质, 46(3): 482－492.

郭清海, 2022. 岩浆热源型地热系统释义. 地质学报, 96(1): 208－214.

侯正猛, 吴旭宁, 罗佳顺, 等, 2024. 深部地热能系统主要挑

战与耦合储能的增强型创新开发模式. 煤田地质与勘探, 52(1): 1－13.
黄永辉, 庞忠和, 程远志, 等, 2020. 深层含水层地下储热技术的发展现状与展望. 地学前缘, 27(1): 17－24.
黄永辉, 杨俊生, 朱传庆, 等, 2023. 深部含水层储热系统的数值模拟研究. 地球学报, 44(1): 239－247.
李德威, 王焰新, 2015. 干热岩地热能研究与开发的若干重大问题. 地球科学, 40(11): 1858－1869.
李伟, 李新国, 赵军, 等, 2009. 土壤蓄热特性与模拟研究. 太阳能学报, 30(11): 1491－1495.
芮振华, 刘月亮, 张政, 等, 2024. 地热储能技术研究进展及未来展望. 石油科学通报, 9(2): 260－281.
王贵玲, 岳高凡, 蔺文静, 等, 2024. 华北平原典型深部碳酸盐岩热储增产改造技术. 地球科学, 49(4): 1470－1486.
王焰新, 蒋恕, 胡帆, 等, 2026. 聚光太阳能－地热储能系统多参数耦合仿真的正交试验优化与经济性评估. 地质科技通报, 45(3):1－15.
王一鸣, 陈伟, 卜宪标, 2025. 高温含水层储热系统地层热损失影响因素量化分析. 化工进展, 44(10): 5717－5729.
魏铭聪, 杨冰, 许天福, 等, 2015. 二氧化碳羽流地热系统中井间距和储层渗透率对热提取率的影响: 以松辽盆地为例. 地质科技情报, 34(2): 188－193.
闫俐君, 张旭, 2015. 基于热作用半径的地埋管换热器储热特性研究. 制冷技术, 35(1): 1－5, 10.
杨春和, 王同涛, 2022. 深地储能研究进展. 岩石力学与工程学报, 41(9): 1729－1759.
杨子江, 石宇, 彭俊岚, 等, 2024. CO_2地质封存过程的取热-储能利用理论与技术进展. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(6): 913－926.
袁照威, 杨易凡, 2024. 压缩空气储能技术研究现状及发展趋势. 南方能源建设, 11(2): 146－153.
周倩, 王富强, 邹立帆, 等, 2023. CO_2羽流地热系统开采特性研究进展及展望. 资源环境与工程, 37(5): 530－536.