

中深部地热能开发关键技术研究现状与展望

许天福, 姜振蛟*, 袁益龙

(吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室, 长春 130021)

摘要:地热能具有清洁稳定、分布广泛、使用灵活的优点,且为无碳基能源,在“双碳”目标下的国家能源结构调整中将发挥重要作用。中深部地热能资源潜力巨大,但因储层埋藏深度大、天然孔渗条件较差,该部分地热资源潜力尚未得到充分释放。本文综述国际中深部地热能开发研究现状,梳理我国相关技术最新研究进展,结合国内外中深部地热开发技术发展趋势,提出中深部地热资源开发的技术攻关方向,以期为我国中深部地热资源开发技术发展提供参考。

关键词:地热能;储层改造;监测;发电;直接利用

1 引言

地热能是一种分布广泛、使用灵活的清洁能源,在国家应对能源短缺、大气污染和气候变化问题中发挥重要作用。现代技术条件下,可开发的地热能类型主要包括浅部地热能、中深部水热型地热能和深部干热岩型地热能。据估计,我国大陆 336 个主要城市浅部地热能每年可采资源量折合标准煤约 7.0 亿吨,可支撑建筑供暖制冷面积超过 300 亿平方米。凭借先进的热泵技术,截至目前,我国地源热泵装机容量已超过 2 万兆瓦,居世界首位。我国中深部地热资源更为丰富:水热型地热资源总量折合标准煤约 1.25 万亿吨,年可采资源量折合标准煤 19 亿吨,主要用于供暖、洗浴,部分高温水热资源用于发电;陆域埋深 3~10km 的干热岩地热资源折合标准煤超过 800 万亿吨,主要用于发电和供暖。

中深部地热能开发的主流工艺采用注采结合模式(图 1),即通过一口或多口开采井抽取热储层中热水,经过地面换热或发电系统提取热量后,将降温后的冷水注入热储层,以维持热储层及周围含水层水力压力,达到取热不取水的目的。该类地热系统性能受控于地热资源属性(可采资源量)、储层属性(水热传递能力)和经济属性(工程成本)。性能优良的地热系统可在较低资金投入条件下,凭借良好储层水热传递能力,长期稳定地获取热储层中的地热能。然而,热储层埋藏深度较大,储层天然孔渗条件普遍较差;且由于地热流体形

成过程中经过长期水岩作用,流体化学组分复杂,工程运行过程中常出现井筒及储层堵塞等问题。构建性能优良的中深层地热资源开发系统仍面临诸多技术挑战。

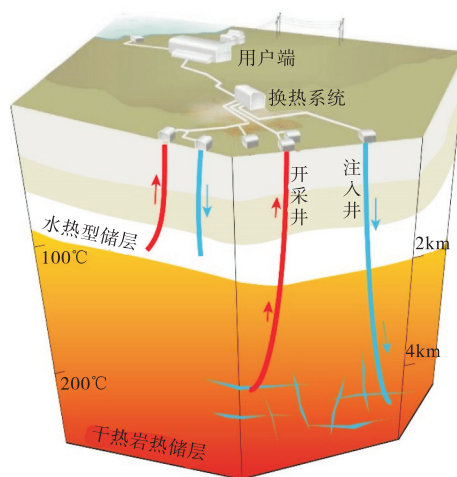


图 1 中深部地热开发利用系统示意图

本文聚焦中深部地热能开发关键技术,阐述其国际研究进展、追踪国内最新研究动态,提出未来发展建议,希望为我国中深部地热能开发利用技术发展提供参考,以期释放巨大的中深部地热资源潜力,服务于“双碳”目标下的国家能源结构调整。

2 中深部地热能开发利用技术国际上的发展

2.1 水热型地热资源开发利用技术

自 1913 年,意大利建成全球首座商业性地热

发电站以来,新西兰、美国、印度尼西亚、日本、菲律宾等国相继开展水热型地热资源评价和开发利用研究。截至 2020 年,全球 29 个国家和地区,水热型地热发电装机总容量超过 15000MW。现对国际水热型地热资源评价、开发和利用主要技术进展综述如下。

2.1.1 地热资源评价技术

传统地热资源评价通过钻探获取热储层温度和含水量等信息,进而计算热储层所蕴藏的热量,作为储层静态地热资源储量的估计。然而,中深层地热系统运行过程中,随着热水的抽出和冷水的注入,开采井所能获取的热量与热储层内部热量恢复能力密切相关,静态地热资源量难以指示地热系统所能开采的资源量。针对该问题,地热资源量评价指标体系不断细化、完善。例如 Thorsteinsson et al.(2008)根据储层孔渗条件和地热温度梯度来划分中深部地热资源类型(图 2),并对地热资源量进行分类评价,其中孔渗条件能够指示储层对流换热能力,温度梯度能够反映储层热传导恢复能力。Kong et al.(2021)统计全球典型地热系统资源状况与热源属性关系,提出了根据热源属性定义地热资源禀赋的指标体系。

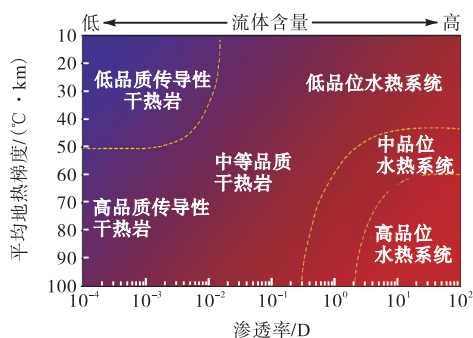


图 2 中深部地热资源分类示意图

新的地热资源评价指标体系对地热资源勘查技术提出更高的要求。一方面,需要发展地球物理勘查技术,快速圈定地热资源禀赋良好的资源潜力区,并测定储层温度和梯度;另一方面,需要完善水文地球化学勘查技术,以明确地热资源成因机制和开采条件下资源可恢复能力,包括热量来源、热量富集方式、以及载热流体补给、径流、排泄过程等。

(1) 地球物理勘查

常用的地热资源地球物理勘查方法技术有重力、磁法、电法和地震。重力和电磁法通过分析地层温度变化所引起的密度及电磁信号异常,圈定高温岩体三维空间范围;地震主要用于识别地层界面及断裂位置,辅助地热成因机理解释。目前,不同类型地球物理勘查的硬件设施较为发达,可以捕捉埋深超过 1500m 的热储层属性异常信号。但单一地球物理信息除了受储层目标属性(例如温度和含水率)影响之外,还存在诸多干扰信息,包括地面噪音、地形、热储层以外其他地层岩性和含水率非均匀性等,导致地球物理数据反演解释过程中存在多解性问题。近年来,随着人工智能和机器学习方法的飞速发展,多元数据融合技术有效提升了热储层属性解释精度。2019 年,美国能源部投入 550 万美元,用于研发基于机器学习算法的地热资源勘查和开发技术,其中超过 60% 的经费用于多元地球物理数据融合的地热资源勘查技术研发。人工智能与多元地球物理勘查技术的结合成为地热资源勘查的趋势性途径。

(2) 水文地球化学勘查

在地热资源水文地球化学勘查方法技术方面,随着先进的同位素测试技术的发展,在新的同位素数据约束下,地热资源成因机制解释更加客观且量化程度更高。例如:Zakharov et al.(2019)在测得流体和岩矿中含量极低的 $\delta^{17}\text{O}$ 基础上,构建 $\delta^{16}\text{O}$ - $\delta^{17}\text{O}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 三元同位素体系,更好地推演了冰岛地区现代地热系统演化过程。Pinti et al.(2020)测试洋中脊地热流体中的 $\delta^{37}\text{Cl}$, $\delta^{81}\text{Br}$ 和 $^3\text{He}/^4\text{He}$,进一步细化了地热流体中挥发组分来源(即热源)的同位素构成依据。Byrne et al.(2021)通过惰性气体同位素体系($^3\text{He}/^4\text{He}$, $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$, ^{20}Ne , ^{36}Ar , ^{84}Kr)测试与分析,准确揭示了冰岛蒸汽型地热系统的储层温度。多组分同位素水文地球化学分析仍是揭示地热系统成因机理、客观评价地热资源可采资源量不可或缺的技术手段。

2.1.2 地热回灌技术

采灌结合是目前国际普遍采用的中深部水热型储层热能获取模式,即通过开采井抽取热水获得热能后,降温后的冷水需回灌进入热储层,以维持储层压力,防止储层压力快速下降导致开采井

涌水量下降和地面沉降等问题。然而,地热尾水回灌过程中,冷水可能过早突破进入开采井导致产热能力下降。此外,由于注入流体温度和储层温度差异,可能生成硅酸盐、碳酸盐和重金属等沉淀,堵塞储层孔渗通道,导致回灌能力下降。针对该问题,已有研究通过调控注入温度,防止易沉淀矿物在回灌过程中达到饱和析出;通过地面冷凝脱盐、混合稀释等方式降低回灌流体矿化度和易沉淀矿物含量;通过加入化学阻滞剂和酸性解堵剂等方式缓解或疏通堵塞。尽管针对回灌堵塞问题目前已开展了大量研究,但由于地热田温度、矿物组分、地热流体组分极为复杂,且深部热储层天然状态下孔渗条件普遍较差,地热尾水回灌过程的堵塞机理不完全清楚。地热流体回灌效率偏低的问题仍是限制中深部水热型(特别是砂岩储层)资源开发的主要瓶颈。

2.1.3 地热发电和综合利用技术

地热发电是地热能商业化利用的主要方式之

一。全球地热发电站多数建立于天然状态下温度高、涌水量大的对流型地热系统。对于高温地热系统(储层温度 $>240^{\circ}\text{C}$),可以采用干蒸汽发电技术(图 3a),将蒸汽从井引出,除去固体杂质后直接传输到发电机组进行发电。该类技术发电效率高,发电量占世界地热发电装机容量的 22%。当储层温度介于 $210\sim 240^{\circ}\text{C}$ 之间,开采井中流体相态表现为气体和液体混合,普遍采用闪蒸发电技术(图 3b),经过水汽分离,将液态水直接回灌至热储层,而气体用于驱动汽轮发电机做功发电,冷凝后的汽体输送至回灌井注入热储层。该类技术热电转化效率可达 25%。当储层温度低于 210°C 或开采井口温度低于 150°C 时,需要采用双工质循环发电系统(图 3c),利用地热流体携带的热量加热低沸点流体(如正丁烷、正戊烷等)产生高压气体,驱动涡轮机进行发电。该类技术热电转化效率低,不足 9%。

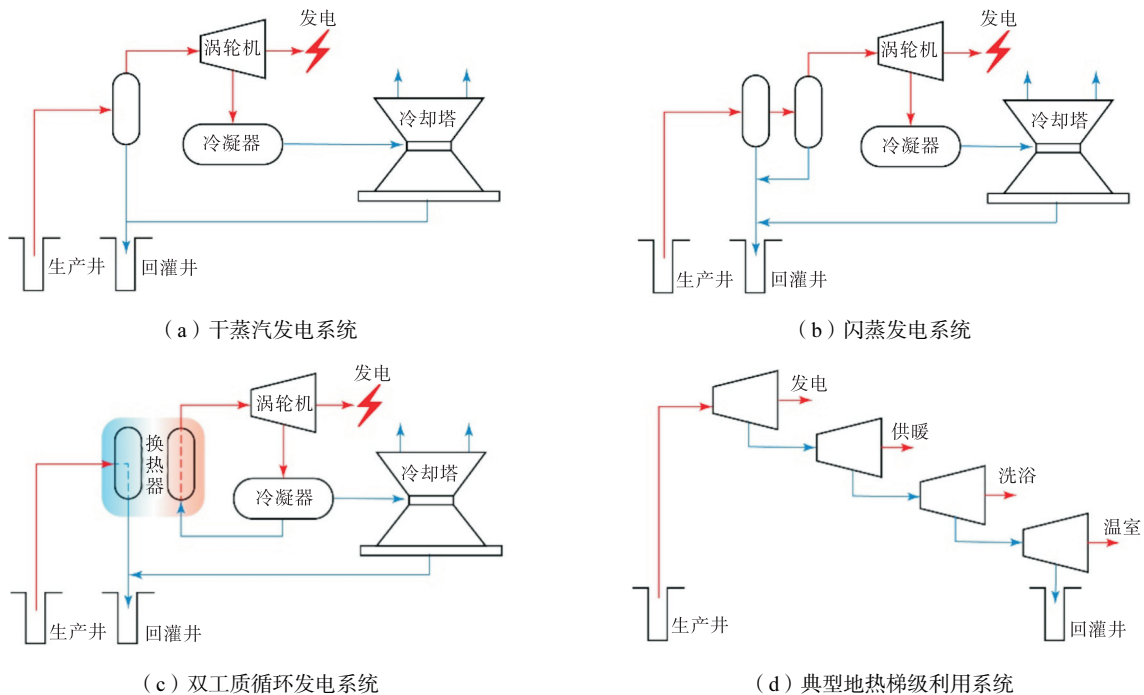


图3 典型地热发电和综合利用系统示意图

世界范围多数地热田的开采井温度都低于 150°C ,如果仅利用地热资源进行发电,经济价值不高且造成地热资源的浪费。该类地热资源可以直接用于建筑供暖,即将开采的中深部热水,加压后直接进入用户采暖端,或者经过中间板式换热

器,加热供暖循环流体,再进入用户端进行供暖。为了进一步提升地热资源利用率,目前研究前沿为地热能综合利用系统,包括地热能-天然气耦合系统、地热能-太阳能耦合系统、地热梯级利用系统等(图 3d),提升地热能商业价值。

2.2 干热岩型地热资源开发利用技术

地热系统的成功运行需要以较高的流量持续从热储层中获得高温流体。目前全球商业运行的中深部地热发电系统中,流体温度在 10 年至 20 年的工程周期内一般维持于 $120 \sim 300^{\circ}\text{C}$;而供暖系统温度维持于 $50 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 。不同类型系统在运行周期内的流量介于 $30 \sim 100\text{kg/s}$ 。高流量和高温的双重约束,要求储层具有较大的换热面积并避免注采井之间出现流体短路。天然状态下能够满足该条件的储层仅有渗透性较强的砂岩型或岩溶型热储层,以及部分断层型热储层。随着储层埋藏深度的增加,温度条件明显提升,但孔渗条件逐渐变差。埋藏于地下 3-10km 温度高于 180°C 的无水或者含有少量流体的低渗透岩体被称为干热岩。20 世纪 70 年代,美国在新墨西哥州的 Fenton Hill 率先通过水力压裂对干热岩进行改造,提高储层渗透能力,并成功实现热能产出,所形成的地热系统被称为增强型地热系统(Enhanced Geothermal System, EGS)。EGS 技术能够拓展可商业开发的地热资源边界,是大幅度提升地热资源在能源结构中占比的关键。在日本、瑞士、法国、澳大利亚等国家相继对干热岩型地热资源开发进行了先导性实验,但受储层改(建)造效果、压裂诱发地震风险、社会需求等因素限制,目前仅有极少数如法国 Soultz EGS 实现了商业化运行。

2.2.1 储层改造技术

目前常用的地热储层改(建)造技术主要借鉴油气领域水力压裂工艺,即通过向热储层高压注入压裂液,刺激地层原生裂隙二次拓展或激发形成新的裂隙。1970 年,美国 Alamos 国家实验室在 Fenton Hill 干热岩储层开展水力压裂储层改(建)造工程示范,经过近 20 年的现场试验,使得该地热系统产热能力提升至 10MW。随后,法国、日本和澳大利亚等发达国家也相继开展了基于水力压裂的 EGS 工程试验。其中,澳大利亚 Cooper 盆地 EGS 场地通过两期储层水力压裂改造,实现了 1MW 的发电目标。经过近半个世纪的探索,目前业内较为认可的热储层水力压裂流程可归纳为:(1)目标压裂段射孔,增加井筒与储层接触面积;(2)隔离压裂目标层位,低压注入滑溜水,使储层天然裂隙饱和;(3)提升注入压力,使储层净压力

超过岩石破裂压力,促使裂隙发育;(4)注入支撑剂,防止裂隙闭合;(5)返排。除了水力压裂,部分 EGS 场地也采用化学刺激和热刺激作为辅助手段提高水力压裂效率。

通过水力压裂等储层改造方式可以改善热储层渗透能力,但受地应力的控制,热储层水力压裂容易沿最大主应力方向形成优势裂隙通道,仅在垂直优势裂隙表面方向形成少量伴生的微小裂隙。优势裂隙通道的形成有利于注采井之间流体循环,但往往导致换热面积降低,使得注入低温流体未能经过充分受热即从开采井采出,造成冷水过早突破(即短路)。随着流量的提升,短路所导致开采井温度骤降问题更为凸显。如何通过优化储层改造工艺,激发形成纵横交错的复杂裂隙网络,仍是目前热储层改造尚未解决的关键问题。

2021 年美国 FORGE(The Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy) EGS 场地尝试采用定向井压裂技术,综合考虑了流体注入方向和地应力方向之间关系,有效提升了压裂空间体积和人工缝网的空间复杂度。该工程的成功标志着高温定向钻井技术的重要突破,也意味着改变井储耦合方式有助于实现热储层大体积压裂。

2.2.2 压裂监测与人工裂隙网络表征技术

若要实现储层人工裂隙发育过程的精细化管控,需要借助于压裂过程监测技术,及时把握储层水力缝网发育状态。目前,已有的 EGS 构建过程中普遍采用微地震监测技术,即通过深井、浅井、地面布设地震监测台站,记录压裂过程中裂隙发育所伴生的地震波信号,据此反演确定震源位置和属性(图 4)。

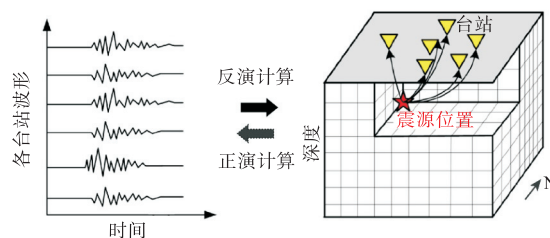


图 4 微地震定位预测流程示意图

在水力裂缝形成与演化过程中通常伴生有成千上万次微地震事件,导致监测获得的地震波表

现出显著的不连续性。此外,裂隙形成所伴生的地震事件能量微弱,地面或浅井监测获取的地震波信号的信噪比较高,且震源位置、发生时间和震源机理均为未知参数,现场监测数据的处理和解释难度较大。随着地震波检波器灵敏度的提升和反演算法的改进,目前微地震事件的定位精度和计算效率已得到显著提升。

除了微地震发生位置 and 时间的解释以外,近年来越来越多的研究关注于震源机制解释,以更好地了解压裂诱发裂隙形成机理、应力变化过程和裂隙发育方位。基于微地震属性的裂隙网络表征技术也取得了长足的进步。Alghalandis et al (2013)提出了几何拟合方法,以裂隙与微地震事件之间距离最小化为目标,随机生成二维乃至三维裂隙网络。随后,结合页岩气储层压裂诱发微地震的震源机制解释结果,McKean et al(2019)提出新的裂隙网络成像技术,但目前该项技术尚未应用于热储层人工裂隙网络结构解释。热储层改造过程中也缺少基于微地震事件时空分布的裂隙网络实时成像技术。

中深部地热能高效获取与利用要求热能获取技术与储层属性较好地匹配,储层裂隙结构与水热传递属性的精细刻画是热能高效获取的关键。传统储层刻画依托于井间示踪试验,即通过向储层注入示踪流体,并在开采井监测示踪剂浓度,获得示踪剂突破曲线。根据曲线形态特征(包括初至时间、峰现时间、拖尾程度等),基于解析公式或经验公式,计算注采井间流体漏失率、井间渗流速度、渗流空间体积等参数,评估注采井间连通能力。为了更加精细刻画储层裂隙结构与属性,近年来学者们引入了先进的反演方法,例如变维度参数反演算法,可以在多井联合示踪试验和压水试验数据的支撑下,实现复杂裂隙网络几何重构,为水热产出能力预测和地热能开发利用方案的制定提供重要支撑。

2.3 中深部地热能开采方案优化

在储层裂隙结构或孔渗参数精细刻画基础上,多场耦合数值模拟与分析是中深部地热能开发利用方案制定的主要依据。随着数值模拟技术的飞速发展,目前地热开发利用方案的模拟优化已经较为全面地考虑不同参数对工程产热能力

的影响,包括:储层孔渗参数非均质性、裂隙空间结构、温度梯度、背景流场;注入温度、注入速率、注入流体性质、井间距等。针对地热资源开发过程中常见的储层堵塞问题,已有研究通过实验和模拟相结合的方法,分析注入流体组分、温度与储层流体化学组分之间关系,进一步优化地热系统循环流体物理与化学属性。此外,部分学者也提出采用 CO₂ 代替水,作为新型循环流体。由于 CO₂ 运动粘滞度低(流动性强)、热膨胀性高、密度随温度变化较大,模拟结果显示利用 CO₂ 作为载热流体的地热系统,热能提取效率高于水型地热系统。但目前尚无 CO₂ 型地热系统实际场地试验和应用的报道。

2.4 技术趋势总结与分析

目前全球地热资源利用程度较高的国家主要有冰岛、日本、菲律宾和新西兰、美国、墨西哥、意大利、土耳其等。这些国家凭借优良的天然地热资源禀赋,已经实现大规模商业化地热发电和供暖。在全球气候变化背景下,各国政府和企业不断投入资金,提高地热能能源结构中占比。资金除了用于地热资源勘查以外,主要攻关储层改造技术和地热发电及综合利用技术。一方面,通过人为改善热储层水热传递能力,提高地热可采资源量;另一方面,通过改进中低温热能利用系统,提高能量利用率。

在储层改造技术方面,自 20 世纪 70 年代美国 Fenton Hill 引入致密油气层水力压裂工艺显著提升了热储层渗透能力以来,水力压裂成为热储层改造的主流工艺。在过去半个世纪,通过压裂液种类、注入排量和注入方式的优化,储层改造的效果得到了一定程度的改善,且高能量诱发地震得以有效抑制。近年来,为了实现热储层复杂缝网大体积压裂,美国 FORGE 场地成功尝试了多期次、定向井压裂工艺,取得了良好的热储层改造效果。未来几十年,水力压裂仍将是国际上主流的热储层改造工艺。

在地热资源利用方面,对于开采温度超过 180℃ 的地热能可以直接借助于闪蒸系统进行发电,商业价值可观;而大多数地热场地开采井口温度低于 150℃,尽管借助于有机朗肯等双工质地热发电系统可以发电,但根据热力学第二定律,目前中

低温地热发电系统的热电转化效率不超过 9%,且该效率随着温度的降低而迅速下降。鉴于地热系统建设过程中钻井、储层改造等成本较高,多数地热田若仅利用地热能进行发电,难以实现商业化运行。构建地热综合利用系统,可有效提高地热能利用效率和工程效益。例如,可以构建发电-供暖耦合系统,温度较高的地热流体经过发电机组进行热电转化后,降温后的流体继续用于建筑供暖。热电联用已逐渐成为中深部地热能商业开发的主要发展方向。

3 我国中深部地热能开发利用技术研究现状

3.1 我国水热型地热资源开发利用技术

我国中深部水热型地热资源利用程度比较高,特别是在华北平原,地热资源丰富,且与严重雾霾区域吻合。近年来,利用中深部地热资源取代燃煤,用于建筑供暖取得了显著成效。雄安新区的雄县利用大型岩溶热储开展规模化供暖,单一项目已实现世界最大(450 万平方米)供暖能力。山东德州砂岩型热储示范工程首次实现了砂岩热储 100%回灌,并在德州城区实现了地热供暖的商业化运行。凭借悠久的历史地热资源开发历史和巨大的社会需求,我国在水热型地热资源勘查技术、地热能开采工艺等研究方面达到了世界先进水平,但水热型资源开采过程中同样面临回灌困难和能量利用率低等问题。近年来,我国推行“以灌定采”的水热型地热资源开发政策,热储层回灌效率低更是成为限制地热资源商业开发的重要瓶颈。

3.1.1 地热资源勘查技术

地球物理勘查在我国中深部地热资源调查、开发靶区选取、井位优化中发挥重要作用。自 2005 年以来,我国相继有重力勘探、磁法勘探、激电测深、高密度电法、大地电磁测深、可控源音频大地电磁测深进行地热资源勘查的报道。所采用的地球物理方法主要通过电阻率异常判断地热异常,并运用重力和磁法数据作为辅助,进行地热资源富集区域解释。特别是近年来我国自主研发的广域电磁勘探技术为深部地热资源勘查提供新的途径。

在传统中深部地热资源地质及地球物理勘查基础上,为了更高效、全面地了解中深部地热资源

禀赋和空间分布规律,2021 年中国地质调查局开发了重磁电震联合反演系统,可以实现不同类型地球物理勘查数据反演、融合和可视化,为中深部热储层范围圈定提供了重要平台。

水文地球化学勘查方法也被广泛用于我国地热资源成因模式分析。近年来,借助于青海共和盆地较为丰富的多期水文地球化学调查数据,进一步丰富了中深部地热评价的水文地球化学指标体系,更好地揭示了共和盆地地热富集模式。此外,笔者团队也开发同位素数值模拟程序,初步实现了同位素水文地球化学技术与数值模拟技术的结合,提高地热成因模式分析的定量化水平。

3.1.2 高温钻井技术

我国钻井技术处于世界领先水平。除了常规地热井以外,石油领域所采用的钻井技术已经实现了同心管换热井和 U 型井等复杂结构地热井钻进,从而丰富了水热型地热资源的热能获取方式。

地热钻井主要采用泥浆正循环钻进工艺,近年也有空气钻进工艺(例如气动潜孔锤和气举反循环等)研发和应用的报道。为了适应高温环境,目前研制有高温泥浆和固井水泥。然而,面对热储层高温、高应力等非常规环境,在孔内钻具、工艺方法等方面仍有待进一步优化,以降低地热钻井事故风险。

3.1.3 地热回灌技术

我国地热系统多采用“原水回灌”的运行方式,即从热储层抽取地下水,经管道输送至地表进行换热后,降温后的地热尾水回灌至原热储层。抽出水和回灌水在化学成分上往往差别很小,但回灌堵塞问题时有发生,主要诱因可归纳为:(1)地下水抽取-回灌过程水流运动引起含水层内颗粒的运动与再沉积;(2)一些气体和化学矿物的溶解度随着回灌过程中温度压力的变化而降低,导致气体及矿物沉淀积聚于孔隙中;(3)回灌水在抽出-回灌过程中氧化还原条件发生变化,致使回灌井内形成难溶的铁化合物附于井壁或沉淀于井周围;(4)还有回灌过程中温度变化至微生物生长适宜温度时,促使细菌快速繁殖及其胞外聚合物快速生成,诱发生物堵塞问题。针对不同类型的堵塞问题,目前通过室内实验结合个别地热资源开发场地储层条件和回灌流体组分进行了堵塞机理分

析,并建立了数学模型。但多种堵塞过程的耦合作用机理以及相关的解堵工艺目前研究较少,回灌效率低及回灌堵塞对工程寿命的负面影响仍是限制的水热型地热资源开发的重要因素。

3.1.4 地热发电与综合利用技术

我国中深部水热型地热资源以温度低于 150℃的中低温型资源为主,开发利用技术处于世界先进水平。自 2000 年以来,我国地热资源直接利用量稳居世界首位,主要用于建筑供暖。在地热发电方面,20 世纪 70 年代在广州丰顺和西藏羊八井相继建成中低温和高温地热发电系统。2018 年,继续建成羊易地热电站,引入 16MW 双工质地热发电机组并实现地热利用过程的 100%回灌。然而,高温地热发电系统运行过程中的管道结垢堵塞问题尚未得以有效解决。

为了提升中低温地热资源利用率,广州丰顺率先提出 5 级地热梯级利用模式:(1)92~75℃的热水用于发电;(2)75~65℃的温水用于驱动溴化锂吸收式制冷机组,实现酒店空调制冷;(3)65~55℃的温水用于加热空气,干燥衣物;(4)55~35℃温水用于洗浴;(5)35~25℃的温水借助于热泵技术用于酒店冬季供暖。

3.2 我国干热岩型地热资源开发

我国深部干热岩型地热资源开发利用的研究起步较晚。2012 年,国家设立 863 项目“干热岩热能开发与综合利用关键技术研究”,开启我国干热岩理论及实验研究的序幕。2019 年,启动“十三五”国家重点研发项目“干热岩能量获取及利用关键科学问题研究”,推动干热岩从理论研究走向工程实践。同年,中国地质调查局设立科技攻关项目,遴选青海省共和地干热岩区域,建设我国首个干热岩开发示范场地,以期实现兆瓦级发电目标。此后,在河北马头营初步建成 EGS 示范工程。江苏兴化也完成了深部热储层钻井和首期储层改造等工作,计划于 2025 年建成我国沿海地区首个 EGS 示范工程。经过 10 余年的努力,我国在深部干热岩型地热资源开发方面逐渐形成了一条相对完备的技术路线。

3.2.1 储层压裂改造技术

我国在干热岩储层水力压裂室内仿真实验和数值模拟方面开展了大量的研究,也开发数值模

拟程序 TOUGH2Biot 和 MutlifracS 等,为水力压裂方案优化设计提供了重要工具。近年来,在青海干热岩开发示范场地,首次开展了高温结晶岩体水力压裂现场试验,通过多期试验效果对比,总结了适合于青海共和干热岩储层水力压裂工艺:小排量、间歇式(分阶段,分单元)的泵注策略,并配合暂堵转向、多液性混合(酸液、清水、滑溜水、胶液)措施。该工艺有助于热储层形成剪切张拉混合缝并抑制高能量地震发生。

此外,中国地质调查局创新提出水力喷射酸化压裂热储改造技术,通过定点起裂、有效封堵、热储层穿透,实现了热储层大体积压裂改造。技术应用干热岩雄安新区岩溶热储,使得储层渗透率和单井涌水量提升超过 10 倍,井口温度提高了 6℃,显著提升了热储层产热能力。该项研究也证明了基于储层改造的增强型地热系统不仅适合于干热岩型地热能开发,对于中深部水热型热储层通过构建 EGS 同样有助于大幅度提升产热能力。EGS 有望发展成为中深层地热资源开发的主流工艺。

3.2.2 压裂监测技术

微地震监测是储层改造过程中关键环节,一方面是由于微地震事件的实时定位有助于及时掌握储层压裂改造状态,另一方面通过微地震事件监测可有效防止压裂诱发破坏性地震。特别是 2015 年,韩国 Pohang EGS 由于注入流体促使断层活化,形成 5.4 级破坏性地震,使得储层改造诱发地震风险成为我国社会对于干热岩资源开发的核心关切。

然而,我国微地震监测所采用的地震台站、信号处理与分析软件仍以进口为主。2019 年至今,在国家干热岩重点研发项目和中国地质调查局科研项目的支持下,吉林大学研究团队自主研发了微地震监测硬件设备和软件分析平台。在共和干热岩场地应用显示(图 5),该套系统能够实现地震波信号的无线高质量传输,微地震事件现场定位延时不超过 3 分钟,定位精度能够控制在井深的 2%,为共和干热岩场地压裂效果评估和注采井位优化提供了重要信息。

为了更好地解释储层改造所形成的人工裂隙结构,中石化首次将地面岩体测斜技术用于压裂过程监测,通过获取压裂诱发地面形变,反演解释

主体压裂方位,与微地震监测结果相互印证,提高裂隙分析精度。该项技术也证明了地面岩体变形数据可以作为深部热储层应力应变过程分析的重

要数据,未来可以将 InSAR 等遥感技术运用于储层改造监测,并探索其在地震超前预报方面的可能性。

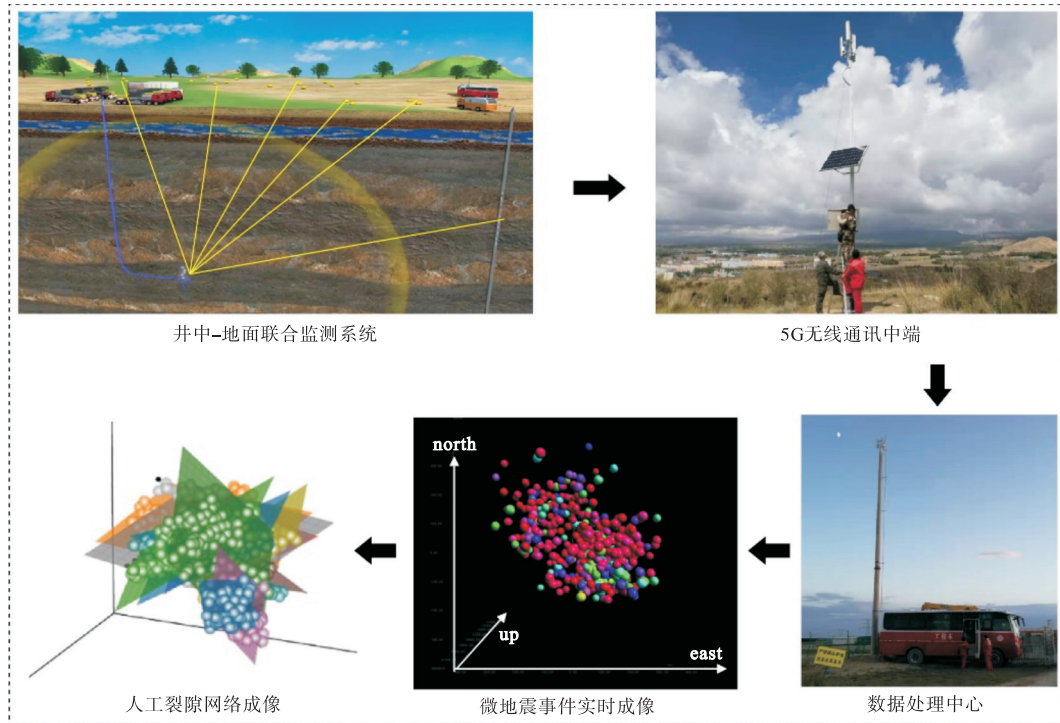


图5 共和场地微地震监测系统基本构成

3.2.3 储层表征技术

我国中深部热储层表征技术的发展落后于国外同类技术水平。目前普遍采用单一示踪试验数据定性评价井间连通性。近年来,笔者团队针对热储层表征过程中由于井数少而带来的监测数据有限的问题,先后提出了基于深度学习的参数降维算法和微地震-示踪试验数据融合技术,有效平衡深部热储层待定参数与监测数据数量,经过程序开发、理论验证,目前已成功应用于澳大利亚 Cooper 盆地和共和场地储层改造后的渗透率空间分布解释。此外,对于稀疏离散型裂隙网络,目前也构建了根据微地震事件时空分布的裂隙几何结构实时成像技术,并与示踪试验数据反演技术相结合,能够实现复杂裂隙网络几何结构和内部张开度的精细刻画,为地热资源优化开发奠定基础。

4 我国中深部地热能关键技术发展建议与展望

近年来,我国凭借多个增强型地热系统示范场地建设,成功将中深部地热能开发技术研究从

理论推向实际。在中深部地热资源勘查、高温钻井、储层改造、储层表征、热能高效获取、发电与利用等多个技术领域取得了诸多重要进展。结合我国中深部地热开发技术研究现状,提出以下几点建议。

(1) 因地制宜开发中深部地热能。

中国西部因青藏高原特殊的地质条件,地热的温度高,很多地方 4000 米深度以浅可钻遇温度超过 200℃ 的干热岩体。如青海共和盆地,距西宁两小时车程,交通便利,电网条件也非常好,且是清洁能源走廊,有黄河龙羊峡水电站,有风电、有太阳能光伏和光热发电。若共和盆地实现干热岩地热资源规模化开发,将与水-风-光发电形成良性互补。风能和太阳能受气候条件和昼夜交替影响,水力发电也受季节的影响。干热岩地热能发电灵活随时可启用,对电网进行调峰,尽管目前干热岩的发电的价格高,但若按调峰电价,干热岩发电有望取得良好的经济效益。

华北平原如河北马头营, 180℃ 的干热岩体要

到 5000 多米的深度才可以获得, 钻探和压裂的成本高, 发电几乎没有效益。因此可以开发中低温干热岩为居民区供暖、工厂或生态农业所用, 进而减少化石燃料的使用, 有效解决大气污染和雾霾问题。该类地热资源利用方式同样适用于我国东北和西北地区。由于我国三北(华北、东北和西北)地区的冬季供暖是一个万亿产业, 中低温干热岩供暖具有巨大的潜在经济和环境效益。

(2) 加强 EGS 核心技术研发。

EGS 建设的核心在于通过人工储层建造, 提升储层水热传递能力, 进而增加中深部热储层产热能力。该理念的提出是针对干热岩型地热资源(温度超过 180°C 的无水或含有少量水的高温岩体)开发。然而, 在工程实践中, EGS 也可以应用于储层温度低于 180°C 且具有一定含水率的水热型储层。2022 年, 我国雄安新区碳酸盐岩热储层通过储层改造使得热储层产热能力大幅度提升。河北马头营场地从储层温度条件上看热储层并不属于严格意义上的干热岩(180°C), 但通过构建 EGS 示范工程, 同样达到了提升中深部地热能利用水平的作用。

我国中深部地热资源储量丰富, 但受制于储层孔渗差的问题, 在原生储层状态下, 热能开发普遍存在流量低且回灌困难的问题, 导致可采出的中深层地热资源量并不乐观。通过 EGS 核心技术攻关和发展, 可以释放中深部地热资源潜力, 是大幅度提升地热能在我国一次能源消费占比的关键。

(3) 探索颠覆性储层改造和地热开发利用新技术。

地热资源富集与构造活动密切相关, 资源禀赋优良的热储层普遍存在应力集中且各向异性程度高的问题。这使得水力压裂储层改造过程中容易形成结构单一的主导裂缝, 不利于注采条件下储层内部换热。此外, 构造发育的区域开展水力压裂, 诱发地震风险较致密油气储层显著提升。全球目前建设有 EGS 示范工程 60 余处, 但其中成功实现规模化热能产出的不足 5 处, 多数工程因为地震风险高、或者压裂后注采井间短路、开采井温度偏低的原因而失败。工程实践和数值模拟分析均显示: 不同地区热储层地质条件迥异, 在现有水

力压裂技术框架下, 难以形成可复制的储层改造工艺实现低地震风险条件下的规模化人工造储。

目前, 已有利用单井换热和 U 型井换热技术开发中深部地热能的报道, 尽管换热效率较低, 但由于节省水力压裂带来的高成本和社会担忧, 若以地热供暖为目标, 仍是值得推广的新型中深部地热开发技术。随着井下换热技术和换热材料的不断研制, 基于单井、重力热管和 U 型井的采热技术工作效率有望进一步提升。

此外, 也有学者提出基于巷道开挖和崩塌的方式实现深部储层复杂人工裂隙网络建造。尽管现有技术条件下, 该工艺在实际工程中实现仍有困难。但是随着地下工程建造技术的发展, 这种人工储层建造方式同样有望产生颠覆性的效果。

(4) 提升中深部热储层可视化水平, 推动中深部地热能开发智能化平台建设。

影响中深部地热能开发的另一挑战在于深部热储层处于黑箱状态, 储层改造所激发的人工裂隙发育过程以及开采条件下储层人工裂隙水热传递状态未知, 导致储层改造和地热能获取具有盲目性。尽管通过多场耦合数值模拟技术, 可以仿真储层内部裂隙演化和水热传递过程, 但数值模型较实际储层状态过于简化, 即使可以通过少量实际场地观测数据对数值模型进行参数校正, 校正后的模型仍然无法准确预测未来的储层内部状态。

针对该问题, 亟需发展储层精细刻画技术, 通过多元地质、地球物理和水文等数据融合, 从不同角度揭示储层裂隙结构、渗透率、地应力等空间非均匀分布, 使得数值模型构建更加贴近实际储层条件。此外, 借助于先进的人工智能技术, 建立数据同化模型, 根据实时监测数据完成模型的自我更新, 进而不断提升预测精度。在此基础上, 进行施工过程智能优化调控, 也是中深部地热资源高效可持续发展的未来发展方向。

(5) 建立紧密的产-学-研结合发展模式

中深层地热开发是一个技术密集型系统, 对其工程开发需先从机理分析和可行性上着手。然而, 由于地下储层工况的复杂性和地面设备的不稳定性, 机理研究往往与实际脱节, 需与先导试验项目密切结合、互相指导, 开展产-学-研结合发展

模式,加强信息开放、数据共享、多部门交流与合作,充分发挥 EGS 示范工程在中深部地热资源开发技术进步中的推动作用。在不断往复中提高认知、突破关键点,提升中深层地热的经济开发和应用价值,为我国实现“双碳”目标助力。

(6) 国家增加研发和示范经费投入

世界范围内,干热岩开发的 EGS 仍处于初级阶段,工程研发周期长投资风险大,政府支持关键技术开发及集成示范研究,是最终实现干热岩资源可持续商业化开发的必经之路。在吸取国外干热岩示范场地建设经验的基础上,结合我国实际场地和技术条件,设立更多国家级研发项目,尽快建设更多干热岩开发利用工程示范基地,如西部高温干热花岗岩和三北中低温沉积盆地底部碳酸盐岩和火山岩地热供暖示范基地等。

5 结 论

我国中深部地热资源储量丰富,是国家实现“双碳”目标过程中不可或缺的清洁能源。本文综述了国内外中深部地热资源开发主要技术进展,认为目前限制中深部地热资源开发的主要问题在于多数热储层天然状态下孔渗条件差,限制了热储层的产热能力。因此,本文提倡深化 EGS 核心技术研究,重点突破大体积复杂裂隙网络建造技术和深部储层可视化技术瓶颈,通过人工储层建造释放巨大的中深部地热产热能力,全面提升地热能在我国一次能源消费结构中占比。

参考文献

转自《中国基础科学》. 2023, 25(03): 11-20

中核地质科技到西藏自治区 开展高温地热及综合矿业调研

中核地质科技

10月17~18日,中核地质科技有限公司(以下简称“中核地质科技”)总经理李华平一行赴藏就高温地热能及综合矿业开发进行调研,期间,拜访了自治区自然资源厅,拜会了多吉院士,并赴羊八井地热电站进行了实地考察。

中核集团(青藏)市场开发部主任张勇及李华平一行到西藏自然资源厅调研交流,李华平介绍了中核地质科技的基本情况、近年来在藏高温地热勘查成果及助力西藏重大工程建设情况,并和自然资源厅领导就西藏能源及矿产勘查开发、矿业权管理、地质勘查前沿科技进展、西藏基础地质调查及矿产调查等进行了深入交流。自然资源厅党组副书记、厅长杨安文向李华平一行来访表示热烈欢迎,并期望中核地质科技贯彻落实习总书记关于西藏工作的重要指示和新时代党的治藏方略,充分发挥公司人才优势、技术优势,加强双方合作,助力西藏优势矿产及战略性矿产勘查开发。自然资源厅副厅长徐建、厅长助理惠小朝、总工程师

陈富琦、开发利用处、地勘处、评审中心等相关处室领导参加了座谈会。

李华平一行到西藏自治区地质矿产勘查开发局拜会了多吉院士,向多吉院士汇报了中核集团在藏高温地热勘查开发工作进展,并与多吉院士就西藏高温地热成因机理、勘查技术方法、国外高温地热勘查开发情况等进行了交流。多吉院士对中核地质科技在谷露地热田取得的重大找矿突破给予了高度评价,对中核地质科技技术人员长期奋战在藏北高原表示钦佩,院士指出:高温地热发电是地热资源开发利用的重要形式,西藏高温地热资源丰富,开发西藏高温地热资源对改善西藏电力结构、促进西藏经济社会发展具有重要意义,期望中核地质科技坚持高温地热勘查事业,充分发挥自身地质勘查技术优势,在地热勘查开发关键技术领域持续加强科技攻关,突破关键难点,将西藏谷露、羊八井等地热田打造成中国高温地热发电的名片。