

中深层地热能取热技术研究进展

宋先知¹, 李根生¹, 王高升¹, 石宇², 杨睿月¹

1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 成都 611756

摘要 总结了国内外关键取热技术研究现状, 包括对井循环取热技术、单井闭式循环取热技术、重力热管循环取热技术、单井开式循环取热技术、U型井闭式循环取热技术和多分支径向井循环取热技术, 分析了关键取热技术的特点、适用条件和未来攻关方向, 阐述了不同取热技术的发展阶段和应用场景, 提出了面向中深层地热能高效开采的发展建议。

关键词 中深层地热能; 取热技术; 清洁能源

近年来, 在“双碳”目标和能源革命推动下, 实现绿色低碳转型逐渐成为世界各国发展战略。地热能作为一种重要的清洁可再生能源, 具有分布广泛、储量丰富、安全优质和供能稳定等优势, 大力推进地热能开发对推动绿色低碳发展具有重要意义。中国中深层地热资源丰富, 每年可采量折合标煤 18.65 亿 t^[1], 约为中国 2021 年能源消费总量的 35.59%, 因此加快中深层地热能开发有望为调整中国能源结构, 打造多元能源供给体系提供重要支撑。2022 年国家发展改革委等九部门联合发布《“十四五”可再生能源发展规划》, 进一步指出要在北方地区大力推进中深层地热能供暖, 开展中深层地热能供暖利用模式和应用范围示范。

近 20 年来, 中国中深层地热供暖开发利用在深度与广度上发展迅速, 规模已经达到世界首位^[2]。2010 年中国中深层地热供暖面积达到 3500 万 m²。

2020 年底则增至 5.8 亿 m²。考虑到中国中深层地热丰富的资源量, 中深层地热供暖仍具有广阔的发展空间。此外, 冰岛、德国和法国等国也在持续扩大中深层地热供暖规模。冰岛通过开发中深层地热可以为 90% 的家庭进行集中供暖^[3], 国家每年能源进口费可以节省 1000 亿冰岛克朗。德国已经逐步将中深层地热储层作为开发重点对象^[4], 旨在将每年地热产能扩大至 300 TW·h, 从而满足全德国 1/4 的供热需求。

中深层地热能取热技术是开发中深层热储的关键手段。本研究详细介绍国内外中深层地热能关键取热技术的研究现状, 分析不同取热技术的特点、适用条件、应用场景和发展趋势, 提出发展建议, 以为推进中深层地热能高效开发提供科学依据。

收稿日期: 2022-09-23; 修回日期: 2022-10-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1501804, 2019YFB1504102); 国家自然科学基金重大项目(52192624); 高等学校学科引智计划(111计划)项目(B17045); 北京高校卓越青年科学家计划项目(BJJWZYJH01201911414038)

作者简介: 宋先知, 教授, 研究方向为智能钻完井、地热钻完井、井筒多相流理论与技术, 电子邮箱: songxz@cup.edu.cn

引用格式: 宋先知, 李根生, 王高升, 等. 中深层地热能取热技术研究进展[J]. 科技导报, 2022, 40(20): 42-51; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.20.006

1 中深层地热能关键取热技术发展现状

为了实现区域供暖或发电,中深层地热能开采技术通常对取热量要求较高。此外,需要遵循“完全同层回灌”或“取热不取水”的原则,以推进中深层地热能可持续开发。目前国内外持续进行技术攻关,形成了对井循环取热技术、单井闭式循环取热技术、重力热管循环取热技术、单井开式循环取热技术、U型井闭式循环取热技术和多分支径向井循环取热技术等,为中深层地热能的有效开发提供了重要支撑。其中对井循环取热技术、单井开式循环取热技术和多分支径向井循环取热技术属于开式循环取热,应用中需注意“完全同层回灌”的原则。而单井闭式循环取热技术、重力热管循环取热技术和U型井闭式循环取热技术属于闭式循环“取热不取水”技术。

1.1 对井循环取热技术

对井循环取热技术属于开式循环取热,即通过循环流体与高温储层直接接触进行充分换热^[5]。图1展示了对井循环取热系统工作原理。该系统主要包括地面设施、注入井(直井或定向井)、生产井(直井或定向井),以及基质渗透率较大或/和富含裂隙的地下储层。在循环过程中,低温流体自注入井泵入到地下储层,与热储岩石充分换热后,高温流体自生产井产出用于地热供暖等,之后经换热器冷却后由注入井再次回灌至储层,往复循环开采地热能。该系统井型结构简单、易于操作,同时基于开式循环进行取热,换热充分、取热量高,因此在中深层地热能开发领域应用广泛^[6-7]。

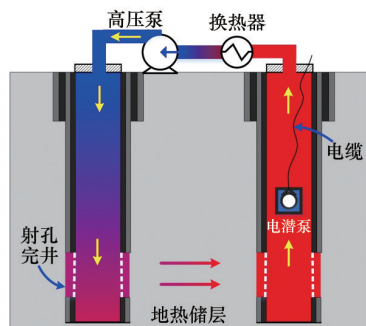


图1 对井循环取热系统

目前对井循环取热技术在国内京津冀、陕西、山东等地得到了推广应用。2021年7月,中石化新星公司在河北雄县的地热开发项目被国际可再生能源机构列入全球推广项目名录,被业界称为“雄县模式”,标志着对井循环取热技术的商业化应用取得了重要突破。此外,法国、日本和英国的中深层地热能开发项目均应用了对井循环取热技术^[8],旨在获取足够热量用于地热发电。此外,基于对井循环取热的油田地热开发逐渐引起重视。已在大港、辽河、华北等油田通过废弃井改造开展了应用研究^[9]。2011年华北油田留北油藏发电机投入运行实现并网发电,产出水温度110~120℃,按照“油-热-电”地热综合利用方案,部署了10口产液井,平均单井日产液量600 m³,同时部署了3口回注井,平均单井日回注量2000 m³,截至2011年底,累计发电31×10⁴ kW·h^[10]。大港油田3口井深超过3000 m的废弃井被成功改造,采用“一采两灌”开发模式获取了回灌井瞬时回灌量最大64 m³/h、稳定回灌井60 m³/h的试验参数,水温62℃,取热功率超过1.50 MW,满足供暖要求^[11]。

围绕对井循环取热技术产能预测和参数优化,国内外学者开展了广泛研究。Cao等^[12]基于单孔隙度理论建立了3D热-流-固耦合模型,研究发现当储层温度超过170℃,取热功率有望达到20 MW。此外,随着生产进行,岩石变形会导致渗透率增加,但是这不利于流体与岩石之间的充分换热,会加剧热突破。Sun等^[13]基于离散裂缝网络建立了2D热-流-固耦合模型,研究表明受岩石变形的影响,裂缝渗透率甚至会提高数倍。Liu等^[14]基于分形理论生成离散裂缝,建立了3D热-流-固耦合模型,研究发现注入水温和岩石热膨胀系数等对裂缝渗透率的影响显著。

综上,对井循环取热技术换热充分、热量产出高,特别适合于开发渗透率较大、易回灌的中深层热储。但是在对井循环取热技术的现场应用中仍存在一些难题亟待攻关。首先,由于地热水矿化度较高、特殊组分和有机物质较多,回灌井容易产生腐蚀和结垢,对设备造成腐蚀破坏,而回灌井堵塞会影响尾水回灌率。因此未来需要对防腐、化学及

物理除垢等技术开展深入研究。其次,砂岩热储容易出砂造成堵塞,导致尾水回灌率降低。因此采用射流解堵或地面除砂等技术手段提高回灌率有望成为未来研究的重要方向。此外,该技术至少需要两口井,钻完井的数量相对较多。在地热现场作业中,钻完井成本在总投入中占比较大,甚至达到50%^[15],可能会导致较高成本,利用废弃井改造有望成为促进该技术规模应用的重要途径。

1.2 单井闭式循环取热技术

单井闭式循环取热技术是一种典型的“取热不取水”地热开发方式,由于闭式循环的特点^[16-17],在无水、不易回灌或极难回灌的地热储层开发中应用潜力巨大。单井闭式循环取热技术包括多种井型结构,图2^[16]展示直井闭式循环取热系统工作原理。该系统由高压泵、换热器、钻入地层中的直井,以及井内呈同轴位置关系的中心保温管等组成。在此

系统中,首先将取热流体从地面通过高压泵注入环空,由于温度差异,环空中的取热流体通过强制对流换热从井壁提取热量,在井底处温度达到最高,然后高温流体通过中心管返回地面,流经热交换器将热能用于供暖等,之后被冷却的流体再次经高压泵进入井筒环空,如此往复实现“取热不取水”。需要指出,该系统的高效换热区域主要位于井底,因此为了提高取热量,需要增加换热面积。有学者提出了利用水平井和分支井增加单井闭式系统换热面积进而强化换热的技术思路^[18-19]。图3^[20]、图4^[19]分别展示了水平井闭式和分支井闭式取热系统工作原理。可以看出,2种系统主要通过井底处的长水平井筒和分支井筒来增加与储层的换热面积,这也有利于提高流体在井内的换热时间,使换热更充分。

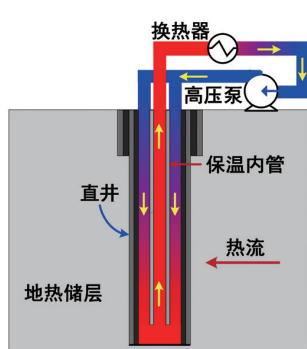


图2 直井闭式循环取热系统

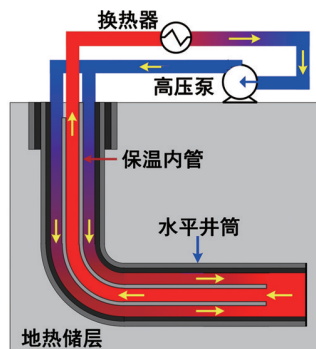


图3 水平井闭式循环取热系统

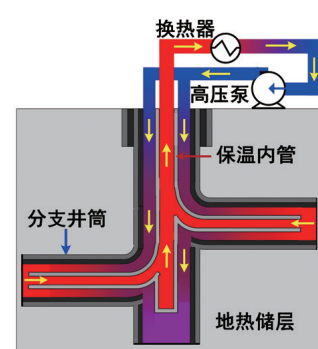


图4 分支井闭式循环取热系统

需要指出,在闭式循环取热过程中,由于流体与储层高温岩石之间的热交换是非接触式,因此相比开式循环取热,例如对井循环取热方式,闭式循环的取热能力相对有限。研究表明,开式循环系统的取热功率可能达到闭式循环系统10倍以上^[20-21]。但是开式循环系统由于对流体注入要求较高,在开发不易回灌或极难回灌的地热储层时会受到较大限制,而闭式循环系统的流体只通过井内循环即可完成换热,因此在该类储层的开发中有明显优势。Morita等^[22]在夏威夷HGP-A井首次进行了直井闭式循环取热技术的现场试验,最高出口温度和取热功率可以分别达到98℃和560 kW,验证了该系统

取热可行性。2018年,任虎俊^[23]在河北省邯郸市开展了直井闭式取热技术的现场试验,地热井的井深为1570 m,结果表明当流量为23.9 m³/h时,取热功率可以达到280 kW。宋先知等^[24]围绕直井闭式循环取热进一步建立了基于井身结构设计、保温结构设计、井下高效取热装置开发等在内的高效取热技术体系,并于2018年通过河北省雄安新区的现场试验验证了技术可行性。该试验井井深为1800 m,保温段为900 m,试验结果表明取热功率在2周后趋于稳定,达到160 kW,而通过保温段的流体温度降幅小于1℃。

此外,国内外学者围绕单井闭式循环取热方式

的产能预测开展了大量研究。Holmberg等^[25]通过有限差分方法离散能量方程,建立了2D瞬态产能模型,分析了不同井深下的传热特征。Song等^[16]基于有限差分建立了2D瞬态传热模型,研究表明当储层温度超过150℃,单井闭式系统的取热功率有望达到1.10 MW。同时发现高导热水泥可以有效提高取热功率。Wang等^[19-20]利用有限元方法建立了3D瞬态流动传热模型,研究了水平井和分支井闭式循环取热规律,结果表明储层内的长水平井筒和分支井筒可以显著提高换热量。Sun等^[26]建立了稳态解析模型,研究了超临界CO₂在井筒循环过程中的传热特征。总体而言,关于直井闭式循环取热的理论研究较为充分,同时现场试验也验证了技术可行性,目前水平井和分支井闭式循环取热技术仍处于理论研究阶段。为了实现单井闭式循环取热技术推广应用,仍需在循环工质优选,高效保温管柱、高导热材料、高温高压经济钻完井等方面进行深入研究。

1.3 重力热管循环取热技术

重力热管循环取热技术也是一种“取热不取水”地热开发方式。该技术与单井闭式循环取热技术的换热原理不同,后者是通过井内强制对流进行取热,重力热管循环取热技术则是通过相变(蒸发和冷凝)将热储中热能传输至地面。图5^[27]展示了重力热管循环取热系统工作原理。首先将重力热管内部抽成负压状态,底部液体吸热汽化,受热虹吸作用向上流向地面,经换热器放出热量后冷凝为

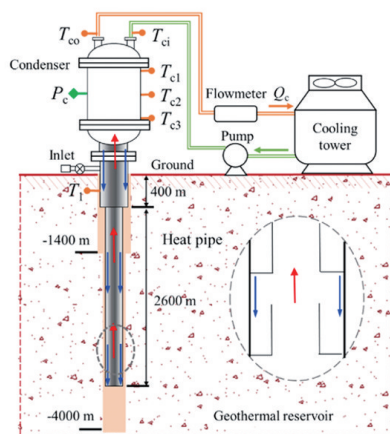


图5 重力热管循环取热系统

液体,在重力作用下沿着管壁回到底部,如此反复循环,持续提取地热能。需要指出,重力热管可以通过热虹吸效应完成自循环,因此不需要高压泵提供额外动力,有利于降低成本。此外,蒋方明等^[28]也提出了一种将CO₂地质封存与热管采热结合技术。在热管底部进行压裂,往热储中注入CO₂后,通过CO₂相变改善热补给,提高取热量。

重力热管循环取热技术属于闭式循环,更加适用于开发无水、不易回灌或极难回灌的地热储层。2015年,Zhang等^[29]对3000 m长的重力热管进行结构改进,通过真空泵的辅助,在34.3℃的蒸汽温度下获得174 kW的热能。2016年,张龙^[30]在陕西省西安市开展现场热管试验,管长3000 m,结果表明现场热管试验井不受常规传热极限的影响,通过3次系统结构装置改进,系统最大换热量达190 kW。2022年,Huang等^[27]在中国唐山马头营隆起利用3000 m重力热管进行了连续抽热、热回收和热响应现场试验,热管附近的地层平均温度为95.6℃,最高温度为128℃。在冷凝器温度变化范围为58.8~64.2℃条件下,该系统经过30天连续抽采,平均热采量达到190 kW。实验表明热管采热时基本无液体堆积,运行稳定可靠。

此外,黄文博等^[31]以管长4500 m的运行系统为对象,基于Fluent软件及UDF(user defined functions)编程功能建立了能够耦合求解重力热管内部相变-流动过程与裂隙热储渗流过程的数值模型。研究发现井底存在裂隙热储时,热管系统的采热量有望达到直井闭式循环取热系统的1.8倍。李庭樑等^[32]搭建了管长30 m的超长重力热管实验平台。研究发现在恒定加热功率下,热管采出功率随冷却水流量的增加呈现先增加后趋于平缓的变化规律。2022年,Chen等^[33]以工质沿超长重力热管方向的温度梯度为指标,提出了一种快速筛选工作液的评价标准。总体而言,利用重力热管开采中深层地热能的研究仍处于起步阶段,管内的运行压力和工质选取等问题有待明确。此外,考虑到热管内复杂的相变流动传热过程,仍需要开展深入的模型研究。由于加工困难,翅片等结构的重力热管难以应用,影响换热效率,重力热管的结构有待改进。

1.4 单井开式循环取热技术

单井开式循环取热技术主要利用一口直井完成流体采出和回灌,然后通过流体与岩石的直接接触,增强系统换热,适用于渗透率较大、易回灌的中深层热储开发。该技术同样涉及多种井型结构,图6^[34]展示直井开式循环取热系统工作原理。首先钻一口直井到目的层位,下套管固井,在井筒上部和下部分别射孔,形成注入段和生产段。然后安装保温内管,下入封隔器将注水段和采水段进行封隔。之后循环流体由高压泵进入井筒,从注入段进入储层,在地热储层中进行充分换热,再从生产段进入井内,由保温内管返回地面,通过换热器用于供暖利用等。需要指出,储层厚度会直接决定该系统注

入段长度、注采间距和生产段长度^[34]。当储层厚度比较有限时,由于注入段长度、注采间距和生产段长度降低,可能会加剧系统热突破,影响直井开式系统的取热效果。因此有学者提出了基于水平井和分支井的开式循环取热方式^[35-36]。图7^[35]、图8^[36]分别展示了水平井开式和分支井开式取热系统工作原理。可以看出,水平井开式系统是通过在薄储层中钻取长水平井,利用完井作业形成较长的注入段、注采间距和生产段,从而改善系统取热效果。分支井开式系统则是通过在主井眼内钻取分支井,形成“一层多井”,进一步增加薄储层中井眼总长度,大幅延长注入段、注采间距和生产段,改善系统注采和取热能力。

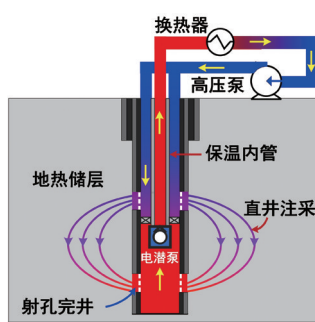


图6 直井开式循环取热系统

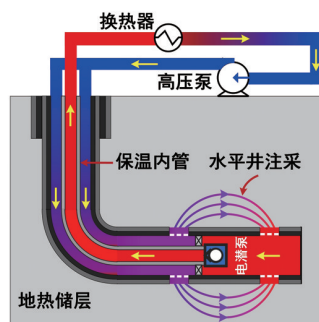


图7 水平井开式循环取热系统

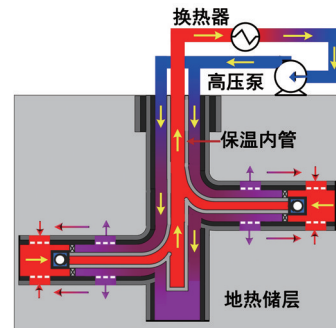


图8 分支井开式循环取热系统

直井开式循环取热技术首先被 Sørensen 等^[37]提出,并在丹麦科技大学进行应用,验证了该技术的可行性,其中试验井垂深为 45 m,地下储层的平均温度为 8.8℃。此外,该技术在 1995 年被引入国内后用于开发浅层地热。2005 年,倪龙等^[38]在北京开展了现场试验,该试验井的井深为 98 m,循环流量为 89.6 m³/h,试验结果表明最高出口温度为 15.88℃,由于热突破的影响,进出口温差最大值仅为 1.63℃。目前围绕中深层地热的单井开式循环取热技术现场试验暂未见文献报道。

围绕单井开式循环取热技术的理论研究相对有限。Sørensen^[37]等针对直井开式系统,采用解析解计算流动过程,利用有限元方法离散能量方程,通过把方程之间的耦合变量作为源/汇项,将流动传热模型简化为 1D 尺度。Ni 等^[39]结合达西定律和能量方程,建立了 2D 流动传热模型,研究了储层内

温度、压力演变特征和注采参数影响规律。Wang 等^[34]围绕直井开式循环取热系统将井筒和储层的流动传热过程进行耦合,建立了 3D 产能预测模型,研究表明当储层深度超过 1300 m,采用 20 kg/s 的流量进行注入,取热功率有望达到 2.60 MW。同时计算结果表明随着井深增加,井内非保温管会导致严重热损失,因此需要进行全井筒保温。此外,基于双孔隙度模型和局部非热平衡理论,Wang 等^[35-36]进一步完善了储层取热模型,研究了水平井和分支井开式循环取热特征,结果表明当储层厚度比较有限时,长水平井筒和分支井筒能够显著改善换热,取热功率甚至可以提高 1.88 MW。总体而言,目前仍需要围绕单井开式循环取热技术的开展更加广泛的理论研究,特别是需要考虑复杂的中深层热储条件,例如天然裂缝、溶洞等。此外,在水平井和分支井开式循环取热机制、参数优化设计以及多井型

开式系统适应性分析等方面需要开展深入研究。同时为了验证基于单井开式循环取热技术开发中深层地热能的可行性,有必要开展现场试验,同时仍需推进经济钻完井研究,提高系统的经济效益。

1.5 U型井封闭式循环取热技术

U型井封闭式循环取热技术也是一种“取热不取水”地热开发方式,适用于开发无水、不易回灌或极难回灌的地热储层。图9^[40]展示了U型井封闭式循环取热系统工作原理。该系统由统由高压泵、地面管线、换热器和U型对接井构成。地热开发过程中,工作流体在高压泵的作用下泵入井底,在U型井长

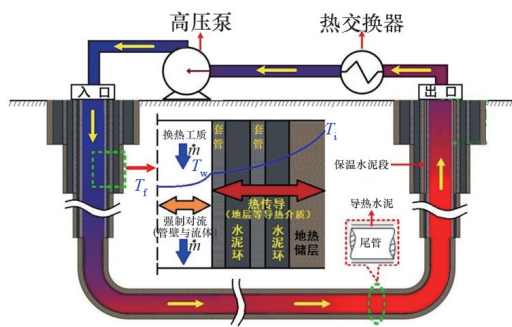


图9 U型井封闭式循环取热系统

水平段与地热储层持续进行充分换热,之后上返至地面用于地热供暖,经换热器冷却后再一次经高压泵注入井下水平段中取热,如此往复循环。在整个过程中,井筒内流体与套管壁发生强制对流换热^[40],各层套管、水泥环与井周地层则以热传导方式进行热交换。

目前国内的中深层U型井封闭式循环取热实例主要位于陕西、河北等地^[41],处于科研测试阶段,具体信息见表1^[42]。2016年,陕西省煤田地质集团在西安市经济技术开发区草滩经开花城完成了国内首个U型对接井项目。2020年,张育平等^[43]结合草滩示范项目开展现场实验并进行数值模拟,研究发现该U型井的换热量为111.19 W/m,第一次恢复期结束时的影响半径为16 m。河北工程大学的试验井位于邯郸东部平原区,是中国地热领域第1眼大口径长距离U型对接井,直井段井径311 mm,水平段井径216 mm。2020年,翟丽娟^[44]对该井展开了4个工况条件下的研究,试验过程中地热井的注入流量为64.1~97.6 m³/h,注水温度为7.4~20.1℃,出水温度为18.9~36.7℃,U型地热井的换热量为1250~1472 kW。

表1 中国U型井封闭式循环取热现场实例

示例项目	岩层	井底温度/℃	垂深/m	水平段长度/m	供热能力/kW
西安草滩1#	泥岩、砂岩	80	2100	186.6	479.5
西安草滩2#	泥岩、砂岩	92	2497	174.3	732.4
延长石油石化	泥岩、砂岩	95	2800	600+	—
邯郸河北工程大学	—	—	2500	684	1565

此外,宋先知等^[40]基于有限差分方法建立了2D瞬态传热模型,研究表明当储层深度为3500 m,取热功率有望达到1.80 MW,同时发现适当提高注入流量可以有效增加取热功率。李俊岩^[45]采用了全隐格式的有限差分方法对中深层U型井传热方程进行求解,发现了在循环水流速一定时,入口温度每降低1℃,地热井取热量约增加40 kW,而当入口温度从5℃升至20℃时,热损失会增加19.33%。Wei等^[46]通过有限体积方法建立了2D产能预测模型,研究了U型井水平段长度的影响。李超等^[47]通过Fluent软件建立了3D数值计算模型,结果表明

地层和固井水泥的导热系数对U型井取热效果影响显著。总体而言,目前围绕U型井封闭式循环取热技术的理论研究已经比较深入。为了进一步改善井筒换热,有必要在循环工质优选和高导热材料等方面进行攻关。此外,由于目前技术条件下U型井施工成本较高,会影响地热开发经济效益,仍需在U型井经济钻完井领域取得突破。

1.6 多分支径向井循环取热技术

多分支径向井循环取热利用多分支径向水平井技术在主井眼上沿一个或多个层位侧钻若干分支井眼^[48],从而扩大井眼与储层的接触面积,增大

井眼与储层连通性,改善系统的取热效果。图10^[49]展示了多分支径向井循环取热系统工作原理。首先将主井眼钻至高温地热储层,在上部高温岩体中由主井眼侧钻注入分支井眼,下部岩体中侧钻生产分支井眼,在主井眼内下入保温内管,利用封隔器封隔保温内管与环空。由环空注入低温流体,从上层分支井眼进入地热储层,通过与高温岩体直接接触进行充分换热,之后流入下层生产井眼,经中心内管采出至地面进行供暖利用。

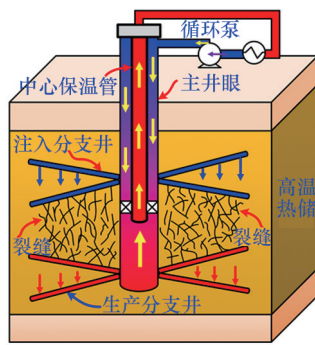


图10 多分歧径向井循环取热系统

多分支径向井循环取热技术属于开式取热,更适用于开发渗透率较大、易回灌的中深层热储。此外,相比于对井或单井开式循环取热技术,该技术一方面可以实现同井注采,减少钻完井数量;另一方面可以通过“一层多井、一井多层”的方式增加泄流面积,增加系统的注入能力和取热功率,进一步改善取热效果。Song等^[49]通过建立的3D流动传热模型深入研究了注采参数、储层物性、分支井结构等对多分支径向井循环取热的影响规律。Song等^[50]提出了有限元-多目标优化与决策一体化方法,得到了最佳开发方案,为该技术的应用提供了科学依据。Shi等^[51]基于离散裂缝建立了3D热-流-固耦合模型,研究了裂缝数量、方位角和形状的影响规律,发现具有较长裂缝、较多裂缝方位的复杂缝网有利于取热。同时搭建了长短期记忆网络(LSTM)和多层感知器(MLP)叠加神经网络,实现了不同约束条件下产能的准确、稳定预测^[52]。目前围绕多分支径向井循环取热技术的理论研究比较深入,但多分支径向水平井技术仍然主要处于现

场试验阶段,为了推进该取热方式的现场应用,亟需对多分支径向井钻完井技术进行持续攻关。

2 中深层地热能关键取热技术发展建议

目前在中深层地热开采过程中,对井循环取热技术由于具有储层控制体积大,取热能力较高等优势,已经形成了示范工程,初步实现了商业化应用。而单井闭式循环取热技术、重力热管循环取热技术和U型井闭式循环取热技术主要处于现场试验阶段。由于这3种技术均可以实现“取热不取水”,因此在泥岩、砂岩等不易回灌或极难回灌热储的开发中优势显著。但由于是闭式循环取热,取热量受到一定限制,为了改善换热,需要在高效循环工质、高导热材料、高效换热结构等方面进行持续研究。

单井开式循环取热技术目前在现场主要用于浅层地热能开发,在中深层地热开发中仍处于理论研究阶段。相比于对井循环取热技术,单井开式循环取热技术能有效降低地热井数量,削减钻完井成本。同时对比闭式循环取热技术,该技术可以通过开式循环来强化换热,提高取热量,因此有望成为促进中深层地热经济高效开发的重要方式。多分支径向井循环取热技术可以通过储层内径向分支井筒改善井-储沟通,显著提高取热量。目前多分支径向水平井技术主要处于现场试验阶段,为了论证取热技术可行性,仍需对多分支径向井钻完井技术进行攻关研究。需要指出,对井循环取热技术、单井开式循环取热技术和多分支径向井循环取热技术均属于开式循环取热,在现场应用中需注意“完全同层回灌”,因此这3种技术更适合开采碳酸盐岩等渗透性好、易回灌的储层。考虑到开式循环取热过程中会存在腐蚀和结垢等问题,影响生产稳定性和尾水回灌率,未来仍需要对防腐除垢进行深入研究。

结合不同取热技术的优势,进一步总结得出了应用场景,如表2所示。此外,中深层地热能开采过程中存在成本较高,投资回收期较长等问题,因此现阶段可以推进对井循环取热、单井闭式循环取

热、单井开式循环取热、多分支径向井循环取热等技术与废弃井改造的结合,从而改善系统经济性,实现取热技术推广应用。同时有必要对经济高效钻完井技术进行攻关研究,为实现降本增效和大规模应用提供重要支撑。

表2 中深层地热能关键取热技术应用场景

技术名称	技术优势	适用地层
对井循环取热技术	储层控制体积大、取热能力较高	碳酸盐岩等渗透性好、易回灌地层
单井闭式循环取热技术	取热不取水、安装筒易、成本低、无污染	泥岩、砂岩等不易回灌或极难回灌地层
重力热管循环取热技术	取热不取水、成本低	泥岩、砂岩等不易回灌或极难回灌地层
单井开式循环取热技术	减少钻完井数量与成本、尾水同层回灌	碳酸盐岩等渗透性好、易回灌地层
U型井闭式循环取热技术	取热不取水、增加换热面积、改善井筒换热	泥岩、砂岩等不易回灌或极难回灌地层
多分支径向井循环取热技术	改善井-储沟通、提高取热能力	碳酸盐岩等渗透性好、易回灌地层

3 结论

目前全球能源转型正处于关键的机遇期,地热能作为一种分布广泛、储量丰富、供能稳定的清洁能源,有望为促进绿色低碳发展,推动能源结构转型提供重要支撑。中国中深层地热资源丰富,有望在“十四五”迎来蓬勃发展期。为了抓住这一战略机遇期,首先需要持续推进地热领域科技创新,发展新理念,研发新技术,驱动地热产业转型升级,从而实现降本增效,推动中国中深层地热能规模化开发。

此外,需要因地制宜开发中深层地热能,坚持“完全同层回灌”或“取热不取水”的原则,促进中深层地热能可持续开发。加强以中深层地热能为基础的绿色建筑,形成重点示范工程,逐步向全国推广。同时需要重视国际交流与合作,引进国外先进技术,培养国际化高端人才,为促进中深层地热能产业高质量发展提供支撑。

参考文献 (References)

- [1] 王贵玲, 张薇, 梁继运, 等. 中国地热资源潜力评价 [J]. 地球学报, 2017, 38(4): 449-450, 134, 451.
- [2] Zhang Q, Chen S Y, Tan Z Z, et al. Investment strategy of hydrothermal geothermal heating in China under policy, technology and geology uncertainties[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 207: 17-29.
- [3] Ragnarsson Á, Steingrímsson B, Thorhallsson S. Geothermal development in Iceland 2015-2019[C]//Proceedings World Geothermal Congress. Hague: International Geothermal Association, 2020: 1-15.
- [4] Moeck I, Bracke R, Weber J. The energy transition from fossil fuels to geothermal energy-A german case study[C/OL]. [2022-10-01]. https://www.geotis.de/homepage/site-content/info/publication_data/congress/congress_data/Moeck_WGC_2020_Energy_Transition.pdf.
- [5] 马峰, 王贵玲, 魏帅超, 等. 2018年地热勘探开发热点回眸[J]. 科技导报, 2019, 37(1): 134-143.
- [6] Zhao Z H, Dou Z H, Liu G H, et al. Equivalent flow channel model for doublets in heterogeneous porous geothermal reservoirs[J]. Renewable Energy, 2021, 172: 100-111.
- [7] Liu Y G, Long X L, Liu F. Tracer test and design optimization of doublet system of carbonate geothermal reservoirs [J]. Geothermics, 2022, 105: 102533.
- [8] Lu S M. A global review of enhanced geothermal system (EGS) [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 2902-2921.
- [9] 宋先知, 许富强, 宋国锋. 废弃井地热能开发技术现状与发展建议[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(6): 1-7.
- [10] 辛守良, 朱健, 王家立, 等. 留北潜山油藏地热综合利用[J]. 石油石化节能, 2012, 2(12): 41-42, 52.
- [11] 唐永香, 李嫻嫻, 俞初安, 等. 油田区地热资源的集约化开发利用分析: 以滨海新区为例[J]. 中国矿业, 2019, 28(4): 98-103.
- [12] Cao W J, Huang W B, Jiang F M. A novel thermal-hydraulic-mechanical model for the enhanced geothermal system heat extraction[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 100: 661-71.
- [13] Sun Z X, Zhang X, Xu Y, et al. Numerical simulation of the heat extraction in EGS with thermal-hydraulic-mechanical coupling method based on discrete fractures model [J]. Energy, 2017, 120: 20-33.
- [14] Liu J, Xue Y, Zhang Q, et al. Coupled thermo-hydro-mechanical modelling for geothermal doublet system with 3D fractal fracture [J]. Applied Thermal Engineer-

- ing, 2022, 200: 117716.
- [15] Saleh F, Teodoru C, Salehi S, et al. Geothermal drilling: A review of drilling challenges with mud design and lost circulation problem[C]//Proceedings of 45th Annual Stanford Geothermal Workshop. Stanford: Stanford University, 2020: 1–8.
- [16] Song X Z, Wang G S, Shi Y, et al. Numerical analysis of heat extraction performance of a deep coaxial borehole heat exchanger geothermal system[J]. *Energy*, 2018, 164: 1298–1310.
- [17] Thomasson T, Abdurafikov R. Dynamic simulation and techno-economic optimization of deep coaxial borehole heat exchangers in a building energy system[J]. *Energy and Buildings*, 2022, 275: 112457.
- [18] Wang G S, Song X Z, Shi Y, et al. Comparison of production characteristics of various coaxial closed-loop geothermal systems[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 225: 113437.
- [19] Wang G S, Song X Z, Shi Y, et al. Heat extraction analysis of a novel multilateral-well coaxial closed-loop geothermal system[J]. *Renewable Energy*, 2021, 163: 974–986.
- [20] Wang G S, Song X Z, Song G F, et al. Analyzes of thermal characteristics of a hydrothermal coaxial closed-loop geothermal system in a horizontal well[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 180: 121755.
- [21] Wang Y R, Wang Y M, You S J, et al. Operation optimization of the coaxial deep borehole heat exchanger coupled with ground source heat pump for building heating [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 213: 118656.
- [22] Morita K, Bollmeier W S, Mizogami H. An experiment to prove the concept of the downhole coaxial heat exchanger (DCHE) in Hawaii[C]//Transactions-Geothermal Resources Council Annual Meeting. Reno: Geothermal Resources Council, 1992, 1: 9–16.
- [23] 任虎俊. 水热型地热能同轴管换热技术研究-以河北省邯郸地区为例[J]. *中国煤炭地质*, 2018, 30(6): 105–108.
- [24] 宋先知, 张逸群, 李根生, 等. 雄安新区地热井同轴套管闭式循环取热技术研究[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2021, 54(9): 971–981.
- [25] Holmberg H, Acuña J, Næss E, et al. Thermal evaluation of coaxial deep borehole heat exchangers[J]. *Renewable Energy*, 2016, 97: 65–76.
- [26] Sun F R, Yao Y D, Li G, et al. Performance of geothermal energy extraction in a horizontal well by using CO₂ as the working fluid[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 171: 1529–1539.
- [27] Huang W B, Cen J W, Chen J W, et al. Heat extraction from hot dry rock by super-long gravity heat pipe: A field test[J]. *Energy*, 2022, 247: 123492.
- [28] 蒋方明, 黄文博, 曹文炅. 干热岩热能的热管开采方案及其技术可行性研究[J]. *新能源进展*, 2017, 5(6): 426–434.
- [29] Zhang L, Wu Z, Deng B. Experimental analysis and improvement measures of extracting geothermal heat from a super long gravity heat pipe (in Chinese)[J]. *Energy Conserv*, 2015, 10: 77–80.
- [30] 张龙. 某超长重力热管提取地热的热工分析及改进措施[D]. 西安: 西安工程大学, 2016.
- [31] 黄文博, 曹文炅, 李庭樑, 等. 干热岩热能重力热管采热系统数值模拟研究与经济性分析[J]. *化工学报*, 2021, 72(3): 1302–1313.
- [32] 李庭樑, 岑继文, 黄文博, 等. 超长重力热管传热性能实验研究[J]. *化工学报*, 2020, 71(3): 997–1008.
- [33] Chen J L, Huang W B, Cen J W, et al. Heat extraction from hot dry rock by super-long gravity heat pipe: Selection of working fluid[J]. *Energy*, 2022, 255: 124531.
- [34] Wang G S, Song X Z, Shi Y, et al. Numerical investigation on heat extraction performance of an open loop geothermal system in a single well[J]. *Geothermics*, 2019, 80: 170–184.
- [35] Wang G S, Song X Z, Shi Y, et al. Production performance of a novel open loop geothermal system in a horizontal well[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 206: 112478.
- [36] Wang G S, Song X Z, Yu C, et al. Heat extraction study of a novel hydrothermal open-loop geothermal system in a multi-lateral horizontal well[J]. *Energy*, 2022, 242: 122527.
- [37] Sørensen S N, Reffstrup J. Prediction of long-term operational conditions for single-well groundwater heat pump plants[R]. Warrendale: SAE International, 1992.
- [38] 倪龙, 马最良, 徐生恒, 等. 北京某同井回灌地下水地源热泵工程现场试验研究[J]. *暖通空调*, 2006(10): 86–92.
- [39] Ni L, Li H R, Jiang Y Q, et al. A model of groundwater seepage and heat transfer for single-well ground source heat pump systems[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(14): 2622–2630.
- [40] Song X Z, Shi Y, Li G S, et al. Numerical analysis of

- the heat production performance of a closed loop geothermal system[J]. *Renewable Energy*, 2018, 120: 365–378.
- [41] 关春敏. 中深层U型井地源热泵的传热分析及系统优化[D]. 济南: 山东建筑大学, 2022.
- [42] 罗娜宁, 刘林, 申小龙, 等. 中深层U型井供热技术原理与实践[J]. *节能技术*, 2021, 39(5): 436–441.
- [43] 张育平, 王兴, 薛宇泽, 等. 关中盆地中深层地热能开发“保水取热”供暖关键技术[J]. *区域供热*, 2020(4): 122–128.
- [44] 翟丽娟. 中深层U型对接井“取热不取水”技术研究[J]. *中国煤炭地质*, 2020, 31(增刊1): 12–15, 65.
- [45] 李俊岩. 中深层地热能深U型埋管换热器取热特性研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.
- [46] Wei C J, Mao L J, Yao C S, et al. Heat transfer investigation between wellbore and formation in U-shaped geothermal wells with long horizontal section[J]. *Renewable Energy*, 2022, 195: 972–989.
- [47] 李超, 官燕玲, 杨瑞涛, 等. U型深埋管固井层对埋管换热性能影响的研究[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(2): 267–73.
- [48] Shi Y, Song X Z, Wang G S, et al. Numerical study on heat extraction performance of a multilateral-well enhanced geothermal system considering complex hydraulic and natural fractures[J]. *Renewable Energy*, 2019, 141: 950–963.
- [49] Song X Z, Shi Y, Li G S, et al. Numerical simulation of heat extraction performance in enhanced geothermal system with multilateral wells[J]. *Applied Energy*, 2018, 218: 325–337.
- [50] Song G F, Song X Z, Li G S, et al. An integrated multi-objective optimization method to improve the performance of multilateral-well geothermal system[J]. *Renewable Energy*, 2021, 172: 1233–1249.
- [51] Shi Y, Song X Z, Li J C, et al. Analysis for effects of complex fracture network geometries on heat extraction efficiency of a multilateral-well enhanced geothermal system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 159: 113828.
- [52] Shi Y, Song X Z, Song G F. Productivity prediction of a multilateral-well geothermal system based on a long short-term memory and multi-layer perceptron combinational neural network[J]. *Applied Energy*, 2021, 282: 116046.

Research progress on heat extraction technology for developing medium-deep geothermal energy

SONG Xianzhi¹, LI Gensheng¹, WANG Gaosheng¹, SHI Yu², YANG Ruiyue¹

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing, Beijing 102249, China

2. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

Abstract The medium-deep geothermal energy in China is abundant, with a great potential for development and utilization. To accelerate the exploitation of the medium-deep geothermal energy is important for promoting the rapid development of China's clean heating industry, with a diversified energy supply system and with the goals of the “carbon peaking and carbon neutrality” in the future. In the context of the efficient exploitation of the medium and deep geothermal energy, this paper reviews the researches of the heat extraction technology for exploiting the medium-deep geothermal energy, including various heat extraction technologies based on the doublet-well circulation, the closed-loop circulation in a single well, the circulation in a gravity heat pipe, the open-loop circulation in a single well, the circulation in a U-shaped well and the circulation in a multilateral radial well. The characteristics, the application conditions and the future researches of key heat extraction technologies are analyzed, as well as the development stage and the application scenarios of different heat extraction technologies. The suggestions for efficient exploitation of the medium-deep geothermal energy are proposed.

Keywords medium-deep geothermal energy; heat extraction technology; clean energy ●



(责任编辑 刘志远)