

中国油区地热开发利用进展

饶松¹, 高腾¹, 肖红平², 黄顺德¹, 胡圣标³

1. 长江大学地球科学学院, 武汉 430100

2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

摘要 地热与石油是共生于沉积盆地的2种资源。地热能开发利用与油气相关技术高度融合。中国油区地热资源丰富, 拥有大量废弃钻井、地热利用市场空间巨大。梳理了中国油区地热资源勘查评价与开发利用技术现状, 包括地热地球物理勘探技术、地热地质评价技术、地热开发技术和地热利用方式等, 指出其当前发展过程中面临着资源条件限制决策者、技术创新力度不够、激励政策不够完善等挑战。提出可采用深井直接换热技术、多分支径向水平井取热技术、热电发电技术、纳米技术等新兴技术加快油田地热开发利用。

关键词 油区地热开发; 地热资源评价; 深井换热; 多分支径向水平井取热; 热电发电

节能减排和应对气候变化使得新能源和可再生能源的开发利用已成为世界各国能源发展的重要战略。地热能作为一种极具竞争力的清洁和可再生能源, 具有资源量大、能源利用效率高、成本低、节能减排效果好等诸多优点, 是人类未来的重要替代新能源之一。近年来, 在政府一系列政策的推动鼓励下, 中国正迎来地热能开发利用新的热潮。在当前形势下, 大规模开发利用地热资源是贯彻落实国家能源安全战略部署, 应对全球气候变化和节能减排, 助力实现“2030碳达峰, 2060碳中和”目标的具体举措。

地热与石油是共生于沉积盆地的2种资源, 沉积盆地油气田分布区往往也是地热资源广泛分布

的地区^[1]。地热能是油企发展新能源最直接现实的资源, 并与油气主营业务高度融合: 一是地热资源常与油气伴生; 二是油气开发过程中, 油气分离出的地热水可直接利用; 三是地热能勘查与开发利用技术在很多方面如物探、钻完井、录测井、测试、水力压裂、回灌、管道等技术, 以及地下热力学建模、流体力学技术等与油气相关技术重叠^[2-7]。截至目前, 中国石油、中国石化、中国海油三大石油公司均已涉足地热领域, 并实施了一系列地热能开发利用活动。近年来, 中国在油区地热资源勘探、评价和开发利用方面的研究工作开展得如火如荼, 特别是在实践中因地制宜地打造了“雄县模式”, 成为目前油区中-深层地热开发利用的样板间^[8]。为有

收稿日期: 2022-03-21; 修回日期: 2022-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877210, 42074096); 油气资源与勘探技术教育部重点实验室青年创新团队项目(PI2018-04)

作者简介: 饶松, 副教授, 研究方向为地热地质学, 电子信箱: raosong08@163.com; 高腾(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为油区地热资源评价, 电子信箱: gaoteng_yu@163.com

引用格式: 饶松, 高腾, 肖红平, 等. 中国油区地热开发利用进展[J]. 科技导报, 2022, 40(20): 65-75; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.20.008

效应对外部环境变化、顺应能源行业发展趋势, 2021年4月, 中国石油推进总部结构改革及业务板块调整, 专门设立新能源与新材料发展办公室, 新能源发展与油气主业合并成立油气和新能源板块, 凸显新能源与新材料业务的战略意义, 表明央企对地热能在内的新能源的高度重视。本研究总结油区地热资源开发利用优势, 梳理中国油区地热资源勘查评价与开发利用技术现状, 分析开发利用过程中面临的挑战, 探讨油区地热开发利用发展方向。

1 油区地热开发利用优势

1.1 资源丰富

大地热流是表征地温场的综合性参数, 能够准确地反映区域内的地温场特征, 因此是地热资源勘查的最重要指标之一^[9]。从中国主要含油气盆地的现今热状态(图1、表1)来看, 东部地区(松辽盆地、渤海湾盆地等)为“热盆”, 西部地区(塔里木盆地、准噶尔盆地等)为“冷盆”, 中部地区(鄂尔多斯

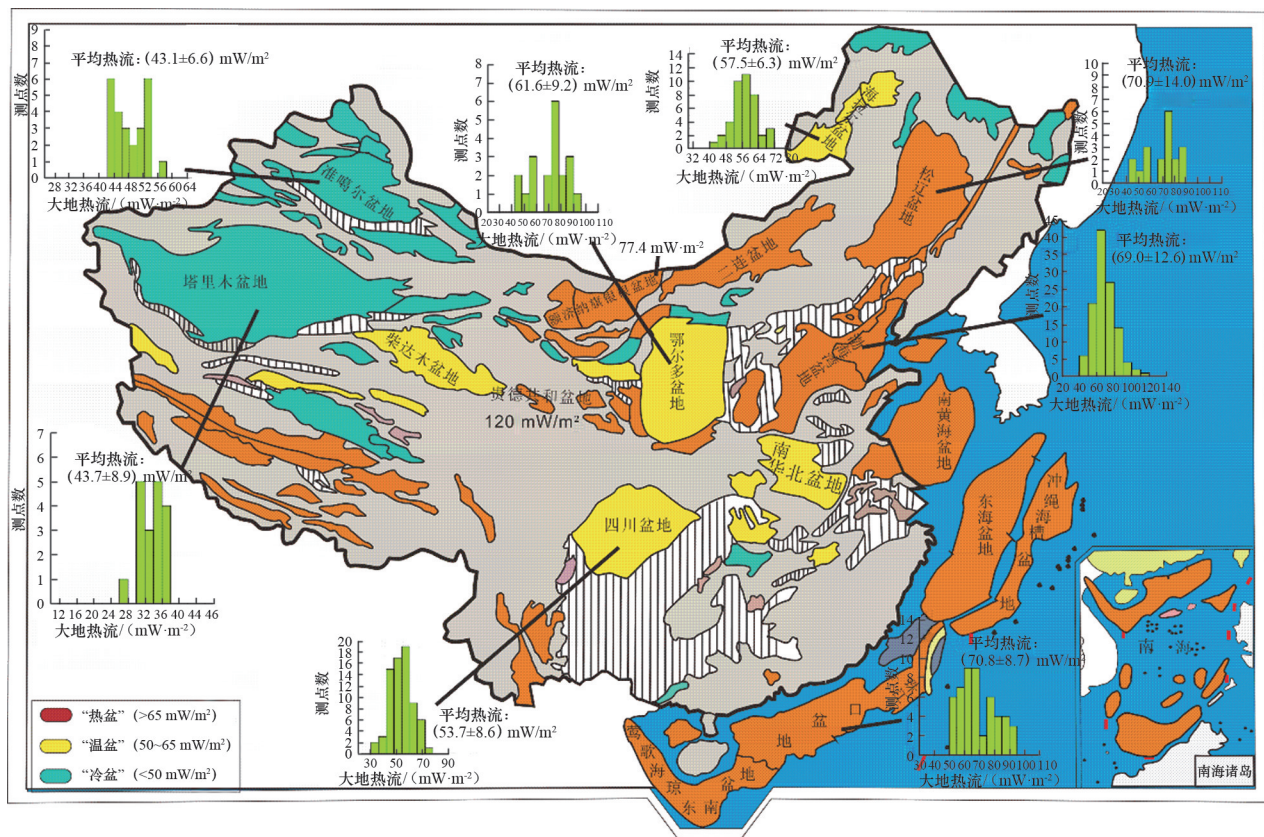


图1 中国主要含油气盆地现今热状态(据文献[10]修改)

表1 中国主要含油气盆地热流与地热资源量

盆地	热流范围/($\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$)	平均热流/($\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$)	地热资源量/ 10^{18} J	文献
松辽	44.0~95.0	70.9	3453.37	[11]
渤海湾	43.9~113.9	65.0	8715.07	[12]
鄂尔多斯	43.3~88.7	64.7±8.9	3710.18	[13]
四川	35.0~69.0	53.2	4469.55	[14]
塔里木	26.0~65.0	43.0±8.5	4240.71	[15]
准噶尔	23.4~56.1	42.5±7.4	3209.17	[16]
吐哈	44.0~55.8	47.8	1487.89	[17]
柴达木	33.0~70.0	55.1±7.9	2119.13	[18]
珠江口	24.2~121.0	71.5±13.4		[19]

盆地、四川盆地等)为“温盆”,沉积盆地现今地温场的差异必然导致盆地内地热资源禀赋和赋存特征出现较大差异^[10-20]。

阎敦实等^[21]对华北、冀东、大港油田3 km以内的新近系及古潜山地热资源进行了评价,其总资源量折合标准煤289亿t。李克文等^[7]估算了中国主要油田区地热资源总量,结果表明中国主要油田区5 km深度内地热资源量折合标准煤6000亿t。据中石油勘探院初步测算,中石油东部油区地热资源量折合标准煤3468亿t,年可采资源量折合标准煤5.2亿t。王社教等^[20]评估了中国11个主要含油气盆地主要热储(单层厚度大于5 m的水层)的地热资源储量,结果折合标准煤10850亿t。从现有评价结果来看,包括大庆、胜利、辽河、大港、中原和华北油田等在内的中国东部油区,地热赋存条件好、资源量丰富,尤其是位于渤海湾盆地的华北油田,其古潜山碳酸盐岩岩溶热储温度高、水质好、孔渗性好、易于回灌,是优质地热资源富集区。

1.2 有助于实现能源接替

油田在开采过程中伴随着大量的地热水。目前中国许多主力油田进入开发后期,油气开采突破边际效益,油田平均含水量高达90%以上,严格来讲,这些油田已不是传统意义上的油田,而是“水田”,或者说是地热田。据统计,油田每年产出水达5亿t,平均温度40~50℃,有些甚至高达110℃,其蕴含的地热资源量可观。据测算,中国中小型油气田可用于发电的地热资源,能够建成2000 MW规模发电能力的发电厂。对这部分资源加以利用,不仅可以解决采出水的问题,还能够使资源得到充分利用,是高含水油田实现能源接替和可持续发展的必然选择。

1.3 勘探开发技术成熟

地热能开发利用与石油公司油气主营业务高度融合。油区有着翔实的地质资料,为地热能开发提供重要的基础数据;地热资源勘查与开发利用技术与油气相关技术在多方面重叠,可以直接利用石油行业内的成熟技术开发地热,此外油田人员、相关设备也为地热能开发利用提供了便利的转化

条件^[2]。

在以往的地热勘探中,地热井钻探成本占总成本的60%以上,高昂的初期投资及勘探、钻井存在的风险为地热开发带来了严峻的挑战。油区现存有大量废弃钻井,据统计目前国内废弃井已突破10万口,仅大庆、辽河和华北油区共有报废、长停井超过2.8万口,这些井大多井身结构完好,具备改造为地热井的可行性。重新改造现有废弃井使之变成“热井”或“油-热-电”联产井,不仅可以激活油田废弃资产,还可以降低钻完井过程中的成本和风险^[22]。

1.4 市场空间巨大

油田既是能源开采者,又是能源消耗大户,其每年消耗相当于几千万吨标准煤的油气、电力资源,用于石油开采、输油伴热、清洗输油管道、生活采暖、农业生产等。如大庆油田采暖锅炉、转油站及联合站每年消耗原油4.2万t、天然气9.5亿m³、原煤44万t,年合计消耗196万t标准煤;辽河油田每年消耗原油26万t、天然气3.8亿m³、原煤5.6万t,累计年消耗154.4万t标准煤。地热能可替代部分化石能源,在油田生产、生活、农业等方面发挥巨大的作用。

2 油区地热勘查评价与开发利用技术现状

油区地热勘查评价与开发利用技术涉及多学科、多领域、多行业。具体包括资源勘探与评价、钻完井、改造废弃油气井、尾水回灌与数值模拟、换热保温与防腐防垢、直接利用与发电、地面运行管理等相关技术。可概括为以下4方面:地热地球物理勘探技术、地热地质评价技术、地热开发技术、地热利用。

2.1 地热地球物理勘探技术

传统油气勘探技术同样适用于地热勘探。与油气勘探相似,地热地球物理勘查技术主要包括地热勘探、电法勘探、重力勘探、地震勘探、重磁电震综合勘探、航空航测等,目前发展均较为成熟。

地热勘探通过在浅地表直接测量地层温度和岩石热物理性质参数,是地热资源勘查中最直接、最有效的勘探技术,但地层温度测量往往需要借助钻孔完成,因此适用于钻孔丰富的地区。电法勘探技术通过不同方法测得区域内电阻率分布差异解释地热系统构成要素分布情况,尤其适用于确定断裂构造、热储埋深与分布范围,识别热储特征等方面,目前应用较多的是感应类电法勘探,如大地电磁法、可控源电磁法。重力勘探技术利用适用于热储埋深较小且受地形影响较小的地热勘探,特别是识别地热区基底起伏等。地震勘探技术中应用最多的是基于被动源的微动测深技术。地震勘探技术能准确圈定地层结构、热储埋深及断裂特征,如利用地震相干属性识别岩溶热储裂缝在雄安新区取得了较好的效果^[23]。通常地震勘探成本较高,因此在实际勘探中重力勘探和电法勘探的应用更为广泛。航空磁测技术是确定磁性基底深度的最强大、最便宜的方法,通常结合重力数据可探测垂直和次垂直断裂,确定盆地结构、反演盆地深部温度。

2.2 地热地质评价技术

地热地质评价技术主要包括热储评价、地热资源量评价、地热开发区优选等。热储评价的重点在于了解地热资源形成的基本条件,明确优质热储、热储物性、热储温度场及其空间展布。热储评价是地热资源量评价的基础。

地热资源量评价方法很多,常用的有热储体积法、类比法、数值模拟法、解析法、统计分析法等。适用于油区的地热资源评价方法见(表2)^[20]。目前,考虑油气水三相饱和度的动态变化的体积法与蒙特卡洛法相结合是油区静态地热资源量评价的主要发展趋势;解析法适用于开采初期初步评价地热流体可开采量,作为开采量控制依据;数值模拟法建立在详实的开发数据基础之上,通过模拟地下热储中热水系统的运动规律来进行地热资源量的动态预测、开发设计及地热田动态监测等,是目前地热田规划和管理的有効技术手段,适用于资料丰富的油区。

表2 油区地热资源评价方法及其适用情况(据文献[20]修改)

评价方法	适用地区	适用阶段	适用工作程度
类比法	研究区地热地质条件与已知地热田类似	预可行性及可行性勘查阶段	研究程度偏低
开采系数法	适用地区广	可行性勘查阶段	有一定的地质基础
平面裂隙法	裂隙发育区	开采阶段	地质条件要求特殊
热储法	适用地区广	地热勘查开发各阶段	地质资料丰富
最大允许降深法	普遍适用	开采阶段	有一定开采规模,开采参数按开采计划进行
解析模型法	热储可以概化为均质、各向同性等条件下的承压含水层	可行性勘查阶段	地热田中存在多个地热井
数值分析法	普遍适用	开采阶段	勘查程度高、具有开采历史、监测资料较齐全

2.3 地热开发技术

油区地热资源开发技术包括废弃井改造、钻完井、热储压裂改造、地热水回灌、地热开发数值模拟等技术,目前中国在地热钻完井方面达到国际先进水平,地热水回灌技术和地热开发模拟技术是发展的重点^[2]。

2.3.1 油、气、热协同开发技术

随着油田含水率进一步提高,油气开发突破边际效益,此时可以将油气生产过程中产生的地热水用于发电或直接利用形成规模经济,以提高高含水油田开发效益。20世纪90年代,华北油田开始利用油田水进行供暖和农业生产,同时代替化石燃料

进行伴热输油等,取得了很好的经济效益和环境效益。对于有底水或边水的油田可以采取高部位采油气、低部位采水的地热开发模式(图2^[23]),以实现

油、气、热协同开发与利用,推动油气产业向地热产业有序转型^[23]。目前华北油田的任丘、八里庄、南孟等油气田的油、气、热协同开采已形成示范效应。

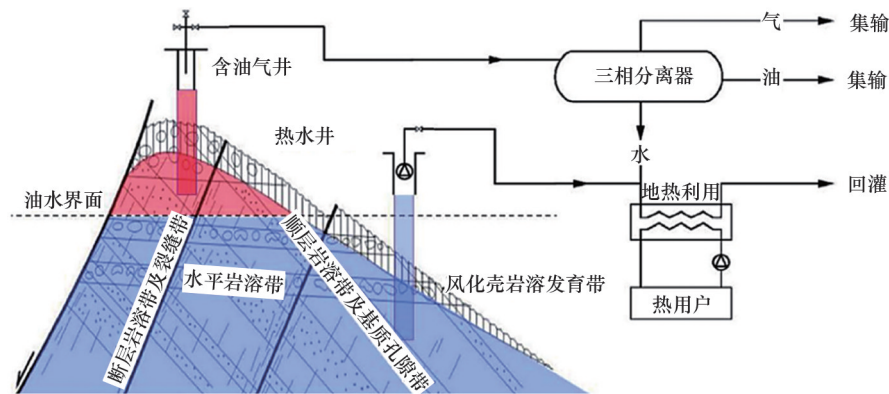


图2 油水同采示意

2.3.2 废弃油气井改造技术

从废弃油气井中开采地热能需要将废弃井改造为地热生产井,目前井筒的改造方法包括开天窗侧钻法、改造泵室射孔法和直接射孔法。如:中原油田对马古6井采用改造泵室射孔法开展改造实验,成功实施了井口恢复、储层解堵和试水测试,验证了改造方案和工艺配套技术的可行性和可靠性^[24];大港油田使用直接射孔法对滨海新区T38井、T38-1、T38-2井3口废弃油井进行改造后,采用“一采两灌”的地热开发模式,通过降压试验,获得T38-1开采井出水量 $60\text{ m}^3/\text{h}$,水温 62°C ,静水位 102 m ,动水位 130 m ,达到供暖要求^[4];辽河油田首个地热应用示范项目—欢三联地热工程,将10口废弃油水井成功改造为地热井,改造完成后每年可节约天然气900余万 m^3 ,减排 CO_2 3万t,减少运行成本600余万元。以上现场实验都验证了废弃油气井改造成地热井的可行性,不仅造价低,而且工期短,但都是开放系统,需要通过回灌来保持地层水位,维护成本较高,且可能会污染储层,所以现阶段进行大规模推广应用还存在一定难度^[25]。

2.3.3 地热回灌技术

目前油区地热能的开发主力为水热型地热资

源。水热型地热系统需要通过回灌来维持地层压力,避免因压力衰减而导致产量下降,同时还需避免产生热突破^[26]。碳酸盐岩热储孔渗性好,易于开采与回灌,不易发生地面沉降,回灌率可达到90%以上,已基本实现了循环利用。碳酸盐岩热储是目前雄安新区及其周边油区地热开发的主力。砂岩热储平均仅有30%左右的回灌率,热储阻塞、普遍回灌率低是制约砂岩热储开发的关键难题。

“雄县模式”作为油区中—深层地热开发利用的样板间,以地热回灌和数值模拟为技术支撑的雄县地热开发水平已经达到了世界先进水平,其核心是“取热不取水”,即同层回灌技术。一般采用对井采灌模式,为提高地热井的使用效率,还陆续开发出两采一灌、五采三灌的地热井群模式,目前集中采灌模式已被写入雄县地热开发利用规划中。图3^[23]为雄安新区古潜山热储对井采灌地热流体循环示意图,采水井通过降低井内压力进行诱喷或排液,采出的低密度高温热水经换热后形成高密度低温水注入回灌井,在密度差、重力和泵动力的推动下,水体在“地层→采水井(低密度)→地表换热→回灌井(高密度)→地层”之间形成循环,从而实现采灌全封闭取热不取水和地热水循环利用^[23]。

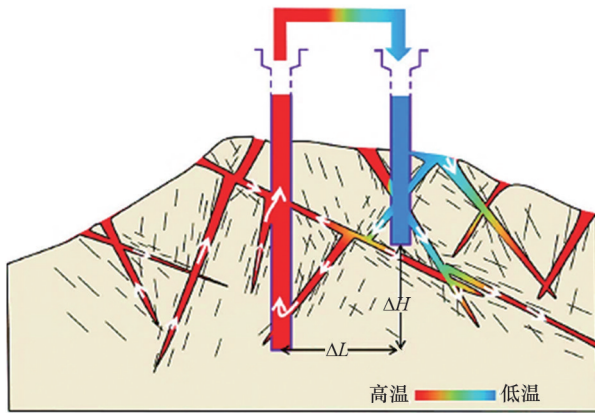


图3 古潜山热储地热流体循环示意图

2.4 油区地热利用方式及现状

2.4.1 地热直接利用

地热资源的直接利用是最普遍的利用方式,已在全球 88 个国家得到广泛应用。截至 2019 年底,中国地热直接利用装机容量为 40.61 GW, 占全球 38%, 连续多年位居世界首位^[2]。油田地热的直接利用方式可分为 2 类:一类是传统的直接使用,包括供暖、农业生产、温泉疗养等,截至 2019 年底,中国地热采暖装机容量达 7.01 GW, 总供暖面积超过 $1.5 \times 10^8 \text{ m}^2$, 地热热泵持续快速发展, 总装机容量达到 26.5 GW, 年利用量折合标准煤 3520 万 t, 实现供暖制冷面积 $5 \times 10^8 \text{ m}^2$ 以上^[2];另一类是油田生产应用,包括伴热输油、油田回注和利用地热能提高采收率等,如热水驱油被用于降低原油黏度和流度比,提高原油采收率。

2.4.2 地热发电

中国在地热发电方面增长缓慢,截至 2019 年底,中国地热发电装机容量仅有 4.456 万 kW^[27]。发电技术主要有闪蒸发电技术、双工质发电技术、联合循环或混合式地热发电技术,其中有机朗肯循环双工质发电技术(ORC)尤其适合中低温地热发电^[28-30]。

20 世纪 70 年代,中国先后建了 7 个中低温地热电站,目前仅广东丰顺的 300 kW 仍在低效运行,在羊八井高温地热电站年建成 2.518 万 kW 满负荷发电后,中国地热发电长期处于基本停滞的状态,直到 2009 年后才略有小增,“十二五”末总装机规模 27.28 MW。“十三五”期间开始建设羊易等地热

电站,羊易电站一期 1.6 万 kW, 2018 年发电及并网,构成了目前全国地热发电 4.456 万 kW 总装机容量的现状^[27]。

华北油田于 2009 年开始在推广原有的地热供暖和集输伴热基础上,于“十二五”期间进行地热资源综合开发特别是中低温地热发电尝试,2011 年在留北油田利用伴生地热资源建成中国第 1 台(世界第 2 台)400 kW 中低温双工质螺杆地热发电站,其额定功率 360 kW, 供电功率(净发电功率)310 kW, 虽然发电效率偏低,但该发电站已成为中国在中低温地热发电的成功典范。从 2011 年 4 月至 2012 年底,留北潜山地热综合利用初步取得了地热发电的阶段性成果,提液增油 4.23 万 t, 地热发电运行 2899 h, 发电 32.4 kW·h, 节约燃油 4609 t, 折合标煤 6572 t, 减少 CO₂ 排放 1.673 万 t^[31]。此外 2022 年 2 月华北油田在冀中地区实施的 300 kW 地热发电项目正在进行装机调试,留北、大王庄油田 1 MW 地热发电项目预计 2022 年也将装机投运。

2.4.3 地热综合利用

为了提高地热能利用效率,最大限度地回收地热能。纵向上提倡地热资源综合梯级利用,即通过调整的热电联产系统将地热发电和直接使用相结合,温度自高至低逐级提取热量,实现资源最大化高效利用^[32]。中石化博野地热发电供暖和现代农业一体化地热梯级利用模式也是油区地热开发利用的典范。

横向上提倡地热+模式,即地热能、与风能、太阳能等清洁能源综合利用,形成分布式能源系统以提高能源利用效率。如深层含水层储热技术,可作为一种较理想的大规模跨季节储能方式,它既能将不稳定的能源如风能、太阳能转化为稳定连续的地热能,形成基于“地热+”的多能互补模式,也可作为区域地热资源的必要补充及增强^[33]。

3 油区地热开发利用面临的挑战

目前油区地热的开发利用日益受到重视,取得了显著发展,但在深入、全面、快速发展的过程中仍存在不少挑战,主要表现在以下 3 个方面。

1) 资源条件制约决策者。

中国油区蕴含丰富的水热型地热资源,虽然中国地热资源评价给出了水热型地热资源储量折合8530亿t标准煤,但这些储量大多是中低温地热资源,与高温地热资源的发电效率相比偏低^[34];而高温地热资源主要分布于交通条件较差的川西、西藏地区,开发成本与市场收益不成正比,这也是中国地热发电长期停滞不前的主要原因。因此要结合资源条件、充分发挥技术和区位优势,在资源禀赋好的东部油区大力开展地热直接利用,在满足油田生产和生活用热需求的基础上,辐射周边城镇,提升油田综合开发效益。

2) 技术创新力度不够。

目前在中低温地热发电方面,发展主要受技术成熟度和经济性的影响,地热发电企业难以做到地面技术与地下勘探兼顾,且地热发电设备陈旧,发电机组导致热转换效率低和电力传输损耗大,成本高;国内创新力度不够,目前新建的中低温地热电站与国外相比,装机容量小,经济效益低,且未形成规模化生产。提高地热发电效率及相应技术的创新是解决中国油区地热发电困境的关键。

3) 相关激励政策不够完善。

根据相关数据,地热开发的预估成本比太阳能和核能低,与风能相当。“十一五”期间中国风力发电增加了670倍,“十二五”期间太阳能发电增加了100倍,然而“十三五”国家重点支持地热能,但地

热发电只增长了46%,仅完成了计划指标的4%。地热能开发企业无法享受与太阳能、风能等其他清洁能源同等的补贴待遇,地热水管理制度的协调工作有待进一步提升,此外,统一细分的行业标准的缺乏也制约了地热产业发展。因此,要理顺管理流程,建立统一的矿权制度,规范行业发展标准,营造有利于地热能开发利用的政策和行业环境。

4 油区地热开发利用技术展望

在油区地热开发利用方面,大量专家、学者以提高地热资源开发潜力和热转换效率为目标开展了大量工作,同时一些新技术如:深井直接换热技术、多分支径向水平井取热技术、热电发电技术、纳米技术被认为可以推动油区地热开发利用进程。

4.1 深井直接换热技术

深井直接换热又称套管换热,通过在深井中安装同轴套管进行单井内部流体循环,基于热传导与地层换热,从而以“取热不取水”的方式开发地热能。深井直接换热技术是目前国内外地热开发探索的新方向,实践证明井下换热器(borehole heat exchanger, BHE)可用于油区深层地热能的开采。目前,常见的井下换热器主要有同轴式、U型管式和双U型管式等4种(图4),其中以U型管式和双管式井下换热器最为常见。

U型管井下换热器的底部有一个连接2个平行

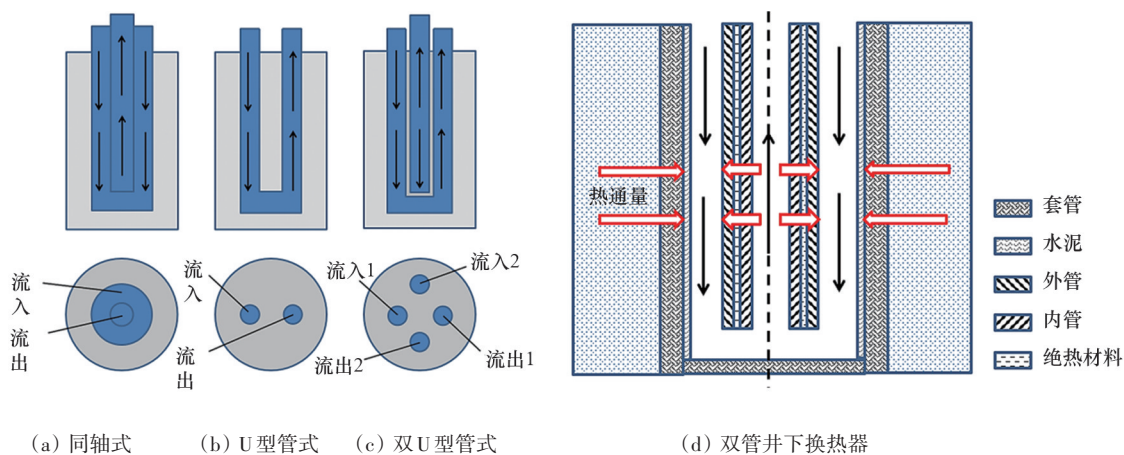


图4 3种井下换热器及双管井下换热器

管的特征弯管。在U型管井下换热器中,工作流体在U型闭环内循环,即工作流体从其中一个平行管中注入,同时从围岩中吸收热量,流体到达井底后改变方向并携带热量上升到井口,当热量被提取后,流体再次注入环形空间循环利用。

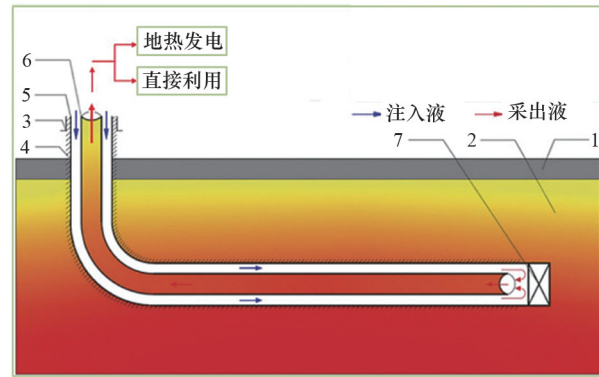
在双管换热器中,流体被注入套管和外管之间的环形空间并流向井底,同时从周围地层中吸收热量,流体到达井底后,通过内管之间的通道上升至井口。当流体中的热量被利用后,被再次注入环形空间,实现流体循环。与U型管换热器相比,双管换热器内外管之间的隔热材料有助于减少循环流体上升过程中的散热量,同时循环流体与围岩更大的接触面积提高了换热效率。在相同的流量下,双管换热器的流体流速更低,因此管内流体循环所需的泵压更低,能耗也更低。此外,双管换热器的同轴几何学在降低循环流体和井孔之间的热阻方面更具优势。由于油区大量废弃的油井已经存在外管(套管),改造成双管换热器可更加节省资金和时间。因此,双管换热器是当前深井直接换热研究的重点。

为评估U型管和双管换热器在废弃井地热开发上的潜力,国内外学者建立了不同的数学模型,开展了大量的案例研究。尽管案例情况各不相同,但基本确定了影响地热开发潜力的关键参数,如流体注入温度、流体注入速率、隔热材料类型、井底温度和循环流体性质等^[35-38]。

4.2 多分支径向水平井取热技术

在油气开发领域,水平井、丛式井被广泛应用于复杂油气藏高效开发、老油田剩余油挖潜、气藏及凝析气藏开发、注水开发等。同样,多分支径向水平井也可以用于地热开发。在相同的流速下,注入直井的流体持续从围岩吸收热量并在井底达到最高温度(图5),而在水平井中,注入的流体在温度最高的井底被持续加热,这使得流体到达井口时可以携带更多的热能,因此可通过改造废弃水平井来提高地热采收效率。

目前国内外陆续报道了利用水平井进行地热开发的成功工程案例。Zhang等^[39]通过水平井分段压裂改造技术,验证了利用水平井采出的循环流体



1—盖层;2—储层;3—地面套管;4—水泥;5—套管;
6—隔热材料;7—底部密封

图5 利用水平井开发利用油区地热

进行地热发电的可行性,并在大庆油田进行了实例研究。Feng等^[40]研究了2种同轴井下换热器,利用水平井中的强制对流显著提高热提取和热交换效率。Cui等^[41]开展了水平井中安装双管换热器进行地热开发的数值模拟,结果表明采用更长的水平井能显著提高采热效率,使用多分支水平井模式时的地热发电成本比单口水平井可降低约1/3。由中国煤炭地质总局水文地质局承担实施的“取热不取水”地热开发利用工程,施工垂直深度2500 m、水平距离684 m、总换热长度5499 m的大型U型对接井,通过换热实验,获得换热量为1565 kW,在采用燃气调峰补充的模式下,能够满足8万~10万m²节能建筑物供暖,一个供暖季可节约标准煤1040 t,环境效益显著。

4.3 热电发电技术

制约中国中低温地热资源高效开发利用的最大技术障碍之一是中低温地热发电发展缓慢,而热电发电技术被认为是加快中低温地热发电发展的重要方向。热电发电技术基于温差热电效应直接将地热能转化为电能,具有运行简单、无机械能损耗、体积小、原地发电、生态环境影响小等优点,提高热电发电效率的核心在于高性能热电材料和相应器件的研发^[30]。

Li等^[42-43]先后设计了2款热电发电机,一款温差为200℃,装机容量为500 W另一款温差为120℃,装机容量为1 kW,实验表明热电器件的发

电功率与冷热端间的温差几乎成正比,但热电转换效率偏低,最高转换率仅为4.5%,目前工程推广仍存在一定难度。Wang等^[44]将热电技术与油气生产相结合,在胜利油田提出了油气生产井下热电发电的设计方案,即通过在管道上安装热电装置,利用管道和环形器之间的温差发电,计算结果表明热电对电的最大效率为4.1%,最大功率为8538 W。谢和平等^[30]创新性地提出了基于大尺寸单晶热伏材料将热能直接高效转化为电能的中低温地热发电技术构想,以及基于冷、热、电联供一体化的工程实施和精准对接的技术原理与构想,该技术构想有望引领全球地热发电新的技术革命。热电技术具有广泛的发电温度范围,最低可至30°C,因此发展空间巨大。

4.4 纳米技术

近年来,纳米技术被广泛应用于分子器件、电气工程、石油工程等领域。在地热开发利用方面,纳米技术的应用主要体现在以下3个方面:与热电材料相结合提高热电发电性能、增加热提取效率、纳米涂层结构减少热交换器和循环工质的腐蚀。

高品质的热电材料能显著提高热电转换效率,将纳米技术与热电材料相结合有望大幅提高热电材料品质。 Bi_2Te_3 (低温热电材料)和 PbTe (中温热电材料)体系一直被看作是理想的候选热电材料,如Wang等^[45]认为利用高性能纳米结构的 Bi_2Te_3 热电发电机可以提高热电转换效率,Szczecz等^[46]指出了温度为167°C时层状 Bi_2Te_3 - Sb_2Te_3 纳米复合材料能够显著增强热电性能,这些研究展示了纳米材料在油区热电发电技术中的广阔前景。

纳米技术在油区地热开发中的另一个重要应用是利用纳米流体进行热提取。所谓纳米流体是指将纳米材料分散在基液中的流体,在基液中添加纳米级颗粒可以提高流体导热系数从而增强传热能力。Sui等^[47]利用 Al_2O_3 纳米流体作为工质开发废弃油井中的地热能,结果证明纳米流体不仅能够增加返回流体进而提取更多地热能,而且能够提高油田地热资源的开发温度。

此外,与传统材料相比, ZrO_2 - TiO_2 、 SiO_2 等纳米涂层能够有效防止地热系统腐蚀,在地热换热器表

面使用聚四氟乙烯和碳纳米涂层后,换热器耐高温、耐腐蚀性和阻燃性显著提高。

5 结论

1) 中国含油气盆地蕴含着丰富的地热资源,油区地质资料丰富、开发技术成熟、设备人员齐全、市场利用空间巨大,大量废弃钻井消除了钻井初期资金成本高的最大障碍,开发利用油区地热是高含水油田实现能源接替和可持续发展的必然选择。

2) 虽然目前油区地热开发利用日益受到重视,取得显著发展,但在全面深入发展的过程中仍存在一定的障碍,表现在资源条件制约决策者、技术创新力度不够、相关激励政策不够完善等方面。

3) 一些可能加快油田地热开发利用的新兴技术如深井直接换热技术、多分支径向水平井取热技术、热电发电技术、纳米技术是未来油区地热发展的重要方向。

参考文献(References)

- [1] 汪集旻, 邱楠生, 胡圣标, 等. 中国油田地热研究的进展和发展趋势[J]. 地学前缘, 2017, 24(3): 1-12.
- [2] 王社教, 陈情来, 闫家泓, 等. 地热能产业与技术发展趋势及对石油公司的建议[J]. 石油科技论坛, 2020(3): 9-16.
- [3] 高德君. 重视油田地热资源开发利用优势推动绿色发展——以胜利油田为例[J]. 中国国土资源经济, 2017, 30(4): 30-34.
- [4] 唐永香, 李嫻嫻, 俞初安. 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.
- [5] Wang S J, Yan J H, Li F, et al. Exploitation and utilization of oilfield geothermal resources in China[J]. Energies, 2016, 9(10): 798.
- [6] 刘均荣, 于伟强, 李荣强. 油田地热资源开发利用技术探讨[J]. 中国石油勘探, 2013, 18(5): 68-73.
- [7] 李克文, 王磊, 毛小平, 等. 油田伴生地热资源评价与高效开发[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 3-15.
- [8] 庞忠和, 孔彦龙, 庞菊梅, 等. 雄安新区地热资源与开发利用研究[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(11): 1224-1230.
- [9] 汪集旻, 庞忠和, 胡圣标, 等. 地热学及其应用[M]. 北

- 京: 科学出版社, 2015.
- [10] Jiang G Z, Hu S B, Shi Y Z, et al. Terrestrial heat flow of continental China: Updated dataset and tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 2019, 753: 36–48.
- [11] 姜光政. 中国东北地区大地热流测量与岩石圈热结构[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [12] Wang Z T, Rao S, Xiao H P, et al. Terrestrial heat flow of Jizhong depression, China, Western Bohai Bay basin and its influencing factors[J]. *Geothermics*, 2021, 96: 102210.
- [13] 高珊. 鄂尔多斯盆地现今地温场与热史恢复[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [14] 徐明, 朱传庆, 田云涛, 等. 四川盆地钻孔温度测量及现今地热特征[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(4): 1052–1060.
- [15] 冯昌格, 刘绍文, 王良书, 等. 塔里木盆地现今地热特征[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(11): 2752–2762.
- [16] 饶松, 胡圣标, 朱传庆, 等. 准噶尔盆地大地热流特征与岩石圈热结构[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(8): 2760–2770.
- [17] 张世煥, 任战利, 马团校, 等. 吐鲁番-哈密盆地现今地温与油气关系研究[J]. *地质科学*, 2000, 35(4): 432–440.
- [18] 李宗星, 高俊, 郑策, 等. 柴达木盆地现今大地热流与晚古生代以来构造-热演化[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(10): 3687–3705.
- [19] 唐晓音, 黄少鹏, 杨树春, 等. 南海珠江口盆地钻井BHT温度校正及现今地温场特征[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(8): 2911–2921.
- [20] 王社教, 李峰, 闫家泓, 等. 油田地热资源评价方法及应用[J]. *石油学报*, 2020, 41(5): 45–56.
- [21] 阎敦实, 于英太. 京津冀油区地热资源评价和利用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2000.
- [22] 多吉, 王贵玲, 郑克棣. 中国地热资源开发利用战略研究[M]. 武汉: 科学出版社, 2017.
- [23] 罗宁, 张军, 李健敏, 等. 雄安新区及其周边古潜山地热资源开发利用前景[J]. *天然气工业*, 2021, 41(7): 160–171.
- [24] 王培义, 马鹏鹏, 刘金侠, 等. 废弃井改造为地热井工艺技术研究[J]. *地质与勘探*, 2017, 053(4): 788–793.
- [25] 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.
- [26] 曹倩, 方朝合, 李云, 等. 国内外地热回灌发展现状及启示[J]. *石油钻采工艺*, 2021, 43(2): 203–211.
- [27] 郑克棣. 中国地热利用: 虽已享誉世界 但仍大有可为[J]. *中国电业*, 2020(10): 24–26.
- [28] 严雨林, 王怀信, 郭涛. 中低温地热发电有机朗肯循环系统性能的实验研究[J]. *太阳能学报*, 2013, 34(8): 1360–1365.
- [29] 王建永, 王江峰, 王红阳, 等. 有机朗肯循环地热发电系统工质选择[J]. *工程热物理学报*, 2017, 38(1): 11–17.
- [30] 谢和平, 昂然, 李碧雄, 等. 基于热伏材料中低温地热发电原理与技术构想[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(2): 1–12.
- [31] 张桂迎, 李金永, 贾稳芝, 等. 华北油田留北潜山地热开发综合利用先导试验[J]. *石油石化节能与减排*, 2013, 3(6): 38–42.
- [32] 秦祥熙, 张萌, 叶佳, 等. 河北沧县台拱带中、低温地热资源ORC发电与综合梯级利用[J]. *地球学报*, 2019, 40(2): 307–313.
- [33] 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): 17–24.
- [34] 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): 449–459.
- [35] Cheng W L, Li T T, Nian Y L, et al. Evaluation of working fluids for geothermal power generation from abandoned oil wells[J]. *Applied Energy*, 2014, 118: 238–245.
- [36] Wight N M, Bennett N S. Geothermal energy from abandoned oil and gas wells using water in combination with a closed wellbore[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 89: 908–915.
- [37] Alimonti C, Soldo E. Study of geothermal power generation from a very deep oil well with a wellbore heat exchanger[J]. *Renewable Energy*, 2016, 86: 292–301.
- [38] Templeton J D, Ghoreishi-Madiseh S A, Hassani F, et al. Abandoned petroleum wells as sustainable sources of geothermal energy[J]. *Energy*, 2014, 70: 366–373.
- [39] Zhang Y J, Li Z W, Guo L L, et al. Electricity generation from enhanced geothermal systems by oilfield produced water circulating through reservoir stimulated by staged fracturing technology for horizontal wells: A case study in Xujiaweizi area in Daqing Oilfield, China[J]. *Energy*, 2014, 78: 788–805.
- [40] Feng Y, Tyagi M, White C D. A downhole heat exchanger for horizontal wells in low-enthalpy geopressured geothermal brine reservoirs[J]. *Geothermics*, 2015, 53: 368–378.
- [41] Cui G D, Ren S R, Zhang L, et al. Geothermal exploitation from hot dry rocks via recycling heat transmission fluid in a horizontal well[J]. *Energy*, 2017, 128: 366–

- 377.
- [42] Liu C W, Chen P Y, Li K W. A 500 W low-temperature thermoelectric generator: Design and experimental study [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39 (28): 15497–15505.
- [43] Lei W, Li K W, Zhang S G, et al. Modeling the effects of module size and material property on thermoelectric generator power[J]. *ACS Omega*, 2020, 5(46): 29844–29853.
- [44] Wang K, Liu J R, WU X R. Downhole geothermal power generation in oil and gas wells[J]. *Geothermics*, 2018, 76: 141–148.
- [45] Wang Z L, Wu W. Nanotechnology-enabled energy harvesting for self-powered micro-nanosystems[J]. *Ange wandte Chemie*, 2012, 51(47): 11700–11721.
- [46] Szczech J R, Higgins J M, Jin S. Enhancement of the thermoelectric properties in nanoscale and nanostructured materials[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2011, 21(12): 4037–4055.
- [47] Sui D, Langaker V H, Yu Z. Investigation of thermophysical properties of nanofluids for application in geothermal energy[J]. *Energy Procedia*, 2017, 105: 5055–5060.

Progress and prospective of geothermal exploitation and utilization in oil fields of China

RAO Song¹, GAO Teng¹, XIAO Hongping², HUANG Shunde¹, HU Shengbiao³

1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China

3. Key Laboratory of Shale Gas and Geoenvironment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract Geothermal energy and petroleum are two kinds of resources coexisting in sedimentary basins. The exploitation and the utilization of the geothermal energy are highly integrated into the oil and gas related technologies. Oil fields in China contain rich geothermal resources, with a large number of abandoned drilling wells, and a huge geothermal utilization market space. This paper reviews the geothermal resource exploration, evaluation, development and utilization technologies in oil fields of China, including the geothermal geophysical exploration technology, the geothermal geological evaluation technology, the geothermal development technology and the geothermal utilization methods. However, the geothermal development and utilization in oil fields still poses some challenges, for example, the resource condition constraints the decision making, the insufficient technological innovation, and the imperfect incentive policies. Finally, some emerging technologies are proposed to accelerate the geothermal development and utilization in oil fields, such as the deep well direct heat transfer technology, the multi-branch radial horizontal well heat capture technology, the thermoelectric power generation technology and the nano technology.

Keywords geothermal development in oil regions; geothermal resource evaluation; deep well heat transfer; multi-branch radial horizontal well heat extraction; thermoelectric power generation ●



(责任编辑 刘志远)