

废弃井地热能开发技术现状与发展建议

宋先知, 许富强, 宋国锋

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

摘要:地热能是替代石油等化石燃料的可再生能源之一,然而目前其开发成本高昂,难以大规模开发利用。石油行业每年都会产生大量废弃井,利用废弃井进行地热开发不仅可以缓解能源问题,节省钻井成本,还可以有效控制废弃井所造成的污染。为此,结合废弃井地热开发的研究现状,对废弃井改造的可行性进行了分析,对改造目标井的选取、利用途径等进行了阐述,对废弃井的改造和取热方式进行了讨论。整体而言,目前国内外废弃井地热能开发还处于理论研究和试验性研究阶段,与大规模工业应用还有较大差距。因此,对于废弃井地热能开发研究,建议从地热发展整体趋势出发,重点攻克多分支定向井关键技术、改善废弃井系统取热性能、建立智能决策与优化系统、加强地面配套设施研究。研究结果及发展建议对采用废弃井获取地热资源具有一定的指导作用。

关键词:废弃井;地热能;油井改造;技术现状;发展建议

中图分类号:TK52 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0890(2020)06-0001-07

Technical Status and Development Suggestions in Exploiting Geothermal Energy from Abandoned Wells

SONG Xianzhi, XU Fuqiang, SONG Guofeng

(State Key Laboratory of Petroleum Resources and Exploration, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China)

Abstract: Geothermal energy, as one of the renewable energy resources replacing fossil fuels, is difficult to drill and utilize in a large-scale due to its high development cost. A large number of oil and gas wells are abandoned in the petroleum industry every year. If those wells can be used in geothermal energy development, it not only alleviates energy problems and reduces drilling costs, but also effectively controls pollutions from well abandonment. Therefore, the feasibility of the abandoned wells transformation was analyzed combining with the current research status of geothermal exploitation and the selection and utilization methods of target wells were elaborated. In addition, the transformation and heat extraction modes in abandoned wells were discussed in this paper. In general, the exploitation of geothermal energy from abandoned wells is still in the stage of theoretical and experimental research, far from large-scale industrial application. It is suggested to start from the overall trend of geothermal development, focus on key technologies of multi-lateral wells, improve the heat extraction performance of abandoned well systems, establish the intelligent decision-making and optimization system, and strengthen the research on ground supporting facilities. The results of the research and development suggestions will provide a guideline in obtaining geothermal resources from abandoned wells.

Key words: abandoned wells; geothermal energy; oil well transformation; technical status; development suggestion

近年来,化石能源需求量逐年增大,导致供需压力不断加大,由其引起的环境污染也日益加剧,可再生能源的开发利用是解决上述问题的有效途径。国际能源机构(IEA)指出,到2040年可再生能源至少占到全球总发电量增长的一半^[1]。与太阳能、风能和潮汐能等其他可再生资源相比,地热资源具有地域分布广、资源量大、清洁环保和热能连续性好等优势。然而,根据IEA的报告数据^[2]:2017年,与生物能源(50%)、水力发电(31%)、风能(9%)和太阳能(8%)等相比,地热能仅占全球可再生能源消费

收稿日期:2020-07-21; 改回日期:2020-09-27。

作者简介:宋先知(1982—),男,黑龙江依安人,2004年毕业于石油大学(华东)石油工程专业,2010年获中国石油大学(北京)油气井工程专业博士学位,教授,博士生导师,主要从事油气井流体力学与工程、人工智能、水射流理论与技术和地热钻井完井理论与技术等方面的研究工作。E-mail: songxz@cup.edu.cn。

基金项目:国家重点研发计划项目“热储内多场耦合流动传热机理与取热性能优化”(编号:2018YFB1501804)、国家自然科学基金优秀青年科学基金项目“油气井流体力学与工程”(编号:51822406)、高等学校学科引智计划(111计划)项目“深部地热资源开发基础研究”(编号:B17045)和北京高校卓越青年科学家计划(编号:BJJWZYJH01201911414038)联合资助。

量的2%。地热能市场份额低的重要原因就是其开发成本高昂,其中钻探成本更是占地热项目总成本的50%^[3],降低地热钻井成本是促进地热能规模化利用的重要措施,而利用废弃井开发地热资源可望成为解决地热井开发成本问题的有效途径。

根据相关统计,目前世界范围内有2 000~3 000万口废弃井^[4]。例如,美国得克萨斯州有超过36.4万口废弃井,其中至少1.8万口废弃井的井深超过3 000 m,井底温度普遍在125~175 ℃^[5];我国2005年废弃井数为7.68万口,2010年已增加到9.2万口^[6],目前我国废弃井数已突破10万口。国内外学者对废弃井改造措施和取热应用进行了大量研究,提出了采用增强型地热系统(enhanced geothermal systems, EGS)和井下换热器(borehole heat exchanger, BHE)取热等方法,讨论了废弃井地热资源的发电、供暖和脱盐等用途。但是,总体而言,目前国内外废弃井地热能开发仍处于理论研究和试验性研究阶段。因此,梳理废弃井地热开发技术现状对废弃井的改造和应用具有重要意义。基于此,笔者结合国内外废弃井地热能开发现状,归纳总结了现有废弃井改造措施,对废弃井改造的可行性进行了分析,同时对改造目标井的选取、废弃井地热能取热方式和利用途径等进行了阐述,并对废弃井地热开发技术提出了攻关建议。

1 废弃井地热能开发的可行性

随着开发的不断进行,储层中的石油会逐渐枯竭,当其超出经济上的可行点,生产井就要被废弃。如果不采取必要措施,废弃井会带来许多问题,如排放甲烷等^[7]。废弃井需严格按照处置规范进行封井,会耗费大量人力、物力和财力。即使采取了有效的封井措施,如遇到废弃井井控装置老化、地震等自然风险或被人为破坏,依旧会造成严重问题。

通常油田所在地区地热梯度较高,许多废弃井都蕴含丰富的地热资源。根据中国大地热流数据(更新至2016年)^[8-9],我国油田分布广泛的松辽盆地、渤海湾盆地和鄂尔多斯盆地地热资源都十分丰富,有着极高的开采利用价值。以胜利油田为例,其大多数油井井深1 000~3 000 m,产出流体温度可达60~100 ℃,有些甚至会更高^[10],可用来进行废弃井转地热井改造。

此外,利用废弃井进行地热井改造具有以下优

势^[11-13]: 1)可利用现有井筒进行改造,从而大幅降低钻井成本; 2)可降低封井成本,减少后期设备检查、维护等的支出; 3)可利用现有生产数据(主要为储层热物性参数)制定科学、合理的地热开发方案; 4)可为油田生产提供能源,创造收益; 5)有助于我国地热能的推广和利用; 6)有助于实现地热资源的科学、高效开发。

为了更好地从废弃井中获取地热资源,国内外学者进行了大量数值模拟研究^[14-22]和现场试验研究^[23-26],现已形成了较为完备的开发利用理论体系,验证了废弃井转地热开发具有较好的可行性,并积累了较为丰富的现场改造经验。T. Kujawa等人^[14-15]最早进行了废弃井地热能利用的研究,研究采用双管换热器从废弃油井中提取热量,认为工质入口温度、流量和内管的绝热性能对取热具有重大影响; A. P. Davis等人^[16]将一口井深3 000 m的废弃井用于发电,研究了以异丁烷为工质从废弃油井中获取地热的能力,并认为最大取热功率在很大程度上取决于井底温度和注入压力;程文龙等人^[17-18]研究了7种有机工质对取热效果的影响,建立了一个井深6 000 m的废弃油井单井筒传热模型,分析了保温管厚度等因素对出口温度的影响;卜宪标等人^[3]提出了一个考虑废弃井围岩传热的瞬态模型,并模拟了发电过程中的岩石温度分布,得出同轴换热器的性能取决于工质流量和地热梯度; Y. Noorollahi等人^[19]根据实地数据进行了井深分别为3 861和4 423 m的废弃油井的取热研究,得出除了质量流量和地热梯度以外,套管几何形状对油井内热传递也存在影响,井底温度分别为138.7和159.8 ℃的AZ-II井、DQ-II井净发电量分别达138和364 kW; R. Caulk等人^[20]研究了加利福尼亚州废弃油气井对增强地热系统和低温深井换热器的适用性,得出在深度大于1 250 m、温度梯度较高(7.0 ℃/100m)区域中,使用同轴换热器可以轻松获得出口温度40 ℃以上的工质,在温度梯度低于4.5 ℃/100m区域中,只能在3 000~5 000 m井深处获得该目标出口温度;梁昌文等人^[21]将废弃油井作为注入井和采出井,以高温溶腔为主要热储,研究得出影响工质出口温度最重要的因素为入口温度、地温梯度和质量流量,认为在实际开采过程中应重点考虑上述因素。

除了数值模拟,国内外学者也进行了废弃井转地热井的现场试验研究。T. Kohl等人^[22]研究了在瑞士运行了数年的废弃井换热器系统,得出其生产温度仍然可达40 ℃; D. Weijermars等人^[23]进行了现

场试验, 利用井底温度接近 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的废弃油井提取地下热量来驱动空调系统, 并取得了成功。甄华等人^[24]分析了大港油田的地质特征, 探讨了废弃油井改造方法, 对 3 口废弃井进行了改造试验: GS43 井产量 $1\ 500\ \text{m}^3/\text{d}$, 井口水温高于 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$; GX307 井产量 $1\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$, 井口水温高于 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$; XH24-28 井产量 $1\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$, 井口水温 $66\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。华北油田辛集市改造后的废弃油井产量 $100\ \text{m}^3/\text{h}$, 出水温度 $64\text{ }^{\circ}\text{C}$; 改造后的 B9 井产量 $100\ \text{m}^3/\text{h}$, 出水温度 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。韦雅珍等人^[25]在雁 1 井、雁 28 井、留 24 井和留 44 井进行了地热开发先导试验, 在新留检 1 井进行了排量 $1\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$ 、扬程 $1\ 000\ \text{m}$ 的潜水电泵试采试验, 试验得出其平均产液量为 $1\ 932\ \text{m}^3/\text{d}$, 井口流体温度可达 $116\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。国内的上述现场试验主要是利用潜水电泵直接抽取储层流体, 如不及时回灌可能会造成地下水位下降, 而且该工艺维护成本高, 推广应用存在一定难度, 但相关研究验证了废弃井转地热井开发的可行性。

2 废弃井改造技术及地热能的应用

2.1 废弃井的选取

废弃油气井数量众多, 但不是所有废弃井都适合改造再利用。废弃井改造过程中, 目标井选取应该遵循以下原则: 1) 存在地热开发价值的废弃井, 有较高的储层温度、较好的渗透率和孔隙度(开式系统利用), 上述物性参数需要根据该井已有历史数据进行分析, 并对目标井的经济价值进行评价; 2) 产出热量应便于利用, 需要在废弃井周围有地热发电站(用于发电)、居民区(用于制冷供暖和洗浴)等, 应尽量避免因供热路径长而产生过多的热量损耗; 3) 应尽量选取完井方式为套管完井的废弃井, 便于后期改造; 4) 具备合理的注采井间距, 两口井之间距离应不小于 $40\ \text{m}$, 以避免井间相互作用^[3], 造成过早热突破。

对于废弃井的选取, Liu Xiaolei 等人^[26]提出了结合地质、储层、生产和经济参数的废弃井开发地热资源筛选标准路线图, 以评估低温余热回收的方式、地点和时间等内容。该路线图已在意大利 Villafortuna Trecate 油田进行了测试, 结果表明, 单井在 10 年内可以回收大约 $25\ \text{GW}\cdot\text{h}$ 的电力, 装机容量为 $500\ \text{kW}$ 。

总之, 废弃井的选取需要考虑多种因素, 其筛选指标的综合性评价也是未来研究的重点。

2.2 废弃井的改造及取热方式

国内之前的废弃井地热开发现场试验, 主要是采用潜水电泵直接抽取储层流体, 井筒的改造方法主要包括开天窗侧钻法、改造泵室射孔法和直接射孔法, 这 3 种方法都具有造价低、工期短的特点, 相关方法的油井剖面如图 1 所示^[24]。但正如上文所述, 这些方法需通过回灌来保持地层水位, 维护成本高, 且对储层的污染较为严重, 所以推广应用存在一定难度。目前, 相关研究主要集中于利用 EGS 或 BHE 取热方面, 对由 BHE 衍生而来的双管井下换热器(double-pipe wellbore heat exchanger, Double-Pipe WHE)也有一些研究^[14]。

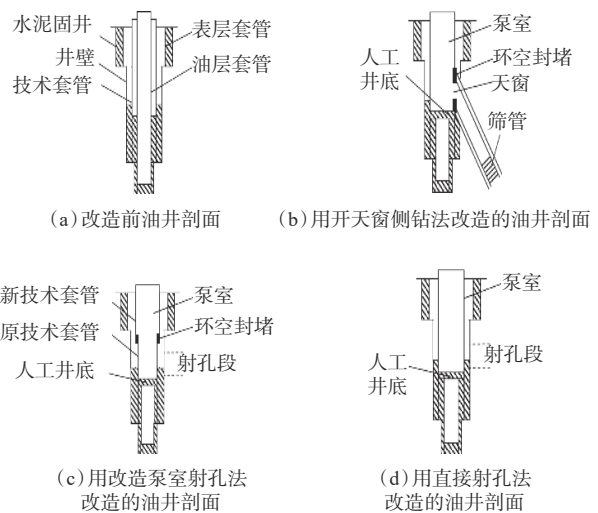


图 1 不同改造方法下的油井剖面

Fig.1 Oil well profile using different transformation methods

EGS 之前主要用于干热岩开发, 主要由注入井、生产井、热储和地面设施等组成。该方法的工作方式为: 首先对目的热储层段进行人工水力压裂, 然后将具有良好导热性的工质通过注入井泵入地层, 进入热储中的工质与高温岩体裂隙网络充分接触后以高温蒸汽等形式从生产井产出, 由地面发电装置转化为电能^[27]; 此后, 再次将工质泵入地层进行循环取热。目前, 利用废弃井发电的研究主要集中在开环系统上, 许多国家(主要包括中国^[28]、美国^[23]、克罗地亚^[29]、新西兰^[30]、波兰^[31]、阿尔巴尼亚^[32]和以色列^[32]等)资助 EGS 研究, 以确保其更加适用于废弃井取热。

与 EGS 不同, BHE 的取热效率取决于热交换器配置和热储岩石热学性质, 而不是孔隙度和渗透率之类的水力性质, 其主要原因是取热过程循环工质不与热储直接接触。BHE 主要包括同轴 BHE、U 形管 BHE 和双 U 形管 BHE 等 3 种, 如图 2 所示^[13]。

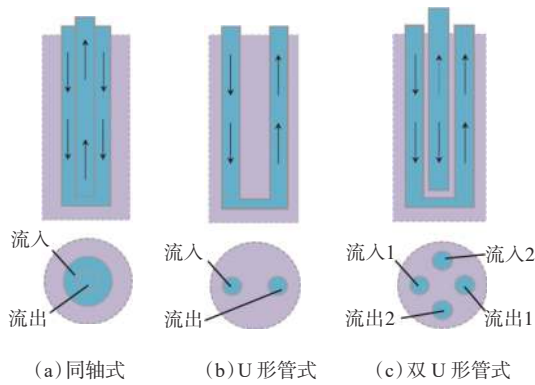


图2 三种井下换热器示意

Fig.2 Schematic diagram of three types of downhole heat exchangers

Double-Pipe WHE 的工质循环过程与同轴 BHE 相似, 如图 3 所示^[13]。Double-Pipe WHE 内外管之间存在绝热保温材料, 有助于减少内管工质向环空的散热量, 可在一定程度上提高出口温度。另外, Double-Pipe WHE 的灌浆量小于 BHE, 循环工质流动面积更大, 所以 Double-Pipe WHE 更适用于废弃井地热开发。Double-Pipe WHE 的内管外侧包裹有绝热保温层, 工作时将循环工质自油套环空注入, 依靠地层与套管间的热传导获取热量。当工质到达废弃井人工井底后, 由于内管底部与废弃井底部没有完全连接, 工质通过内管回流到井口, 经工业应用后, 从内管流出的工质可再次注入油套环空, 实现一次循环^[33]。

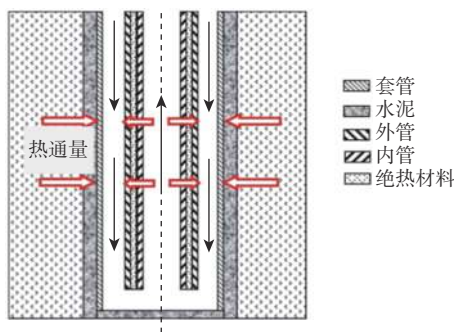


图3 双管井下换热器示意

Fig.3 Schematic diagram of a double-pipe wellbore heat exchanger

与开式系统相比, Double-Pipe WHE(或其他 3 种 BHE)作为闭式系统主要具有以下技术优势: 1) 循环工质与热储没有直接接触, 可以降低套管腐蚀和结垢风险, 无需水处理系统^[34]; 2) 闭式循环可以防止二氧化碳和其他气体泄漏^[20]; 3) 与 EGS 相比, 闭式系统的泵送功率更低, 这是由闭环系统中自然对

流(热虹吸效应)导致的被动热交换所引起的, 所以在相同泵压下闭式系统可以泵入更多的工质^[35]; 4) 闭式系统对储层压裂要求低, 既可以降低作业成本, 又可以避免诱发微地震^[13]; 5) 闭环构造可以使用沸点更低的有机工质来代替水, 有助于取热^[18]; 6) 不会出现工质损失、污染储层等情况。

闭式系统中, 尽管有利用 U 形管 BHE 进行取热研究的文献报道^[34, 36], 但对于废弃井取热而言, Double-Pipe WHE 更有优势^[37]: 1) Double-Pipe WHE 流动截面积较大, 在相同流量下的工质流速低, 有助于换热, 此外低流速所需泵压较低, 有助于降低生产成本; 2) Double-Pipe WHE 仅需要灌浆来密封井底, 热阻小而换热面积大, 有助于取热。

综上所述, 采用 Double-Pipe WHE 来开发废弃井是目前较好的取热方式。

2.3 地热能应用途径

通常情况下, 地热热源可分为高温(>150 °C)、中温(90~150 °C)和低温(<90 °C)3 种。废弃井热源一般属于中低温地热资源, 低温可以用来洗浴、供暖和制冷, 中温可结合先进的能量转换装置用于工业发电^[16]。有机朗肯循环(organic rankine cycle, ORC)发电需要至少 74 °C 的出口温度^[38], 而世界上许多油气井产生的流体温度为 65~150 °C, 因此从理论上来说, 可用该系统进行发电^[26]。图 4 为地热 ORC 系统示意图^[39]。

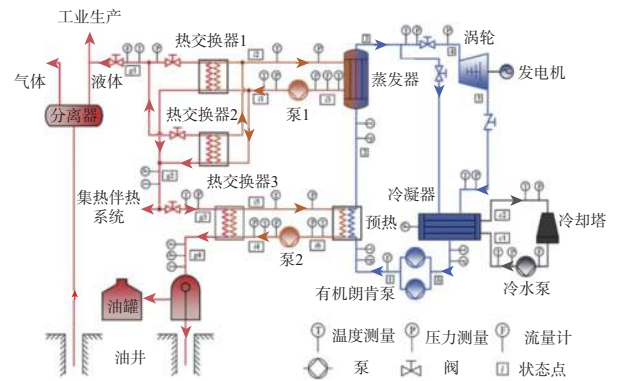


图4 地热有机朗肯循环系统示意

Fig.4 Schematic diagram of geothermal organic rankine cycle (ORC) system

目前的废弃井地热发电研究, 主要倾向于评估 ORC 性能和优选循环工质等方面。B. Saleh 等人^[40]研究了在 373 K 或更高温度下 31 种纯组分工质的 ORC 热循环效率, 认为低临界温度的流体更适合作为循环工质; A. P. Davis 等人^[16]研究了用异丁烷作为工质从废弃油井中获取热量的能力, 并认为最大

功率主要取决于井底温度和注入压力;张圣君等人^[41]进行了低温地热发电系统中亚临界 ORC 和跨临界功率循环中工质的参数优化和性能比较,得出跨临界功率循环中的 R125 具有出色的经济和环境性能,可以最大限度地利用地热能;D. Tempesti 等人^[42]提出了使用太阳能和低温地热的微型热电联产 ORC 系统,并研究了 3 种工质(R134a、R236fa 和 R245fa)对取热的影响,得出 R245fa 可产生最佳的循环效率,而 R134a 则可以释放出最高的热量;M. Ebrahimi 等人^[43]对 ORC 系统进行了参数优化,得出 R125 为最佳工质,并认为使用多口废弃井进行发电效果更好;程文龙等人^[18]研究得出,R134a 和 R245fa 比 R600a、R600、丙烯、R290 和 R143a 更适合用于废弃井所产地热发电。

考虑大多数废弃井温度低于 150 ℃,即使优化发电系统性能、优选循环工质,也很难获得满足工业应用需求的发电效率^[32,44],并且发电需要地面设备和输电设施建设,这无形中增加了成本,所以利用废弃井所产生的中低温地热进行发电离工业应用还存在一定距离。制冷和供暖是目前废弃井地热应用的主要形式,目前国内外都有大量数值模拟研究和实际应用^[23-25,28,45]。例如,Nian Yongle 等人^[45]提出了一种利用废弃油井的新型地热供暖系统,并建立了一个结合井眼传热、地层和建筑能量传输的综合模型,研究了产量、室温和流体生产温度模型的影响,并根据加热面积确定了最佳的工质流量范围。

处理油井产出水也是利用废弃井所产地热的重要方式。在油气开采期间,采出水始终存在且比例逐渐增大,采出水中通常含有较高的溶解性固体总量(total dissolved solids, TDS),需要进行脱盐处理,并分离出其中的油组分、地层矿物、化学品和溶解气体^[46]。据统计,每年都可获取近 $2.5 \times 10^9 \text{ m}^3$ 采出水,用来提取大量副产品并进行利用^[47]。相关研究表明,温度梯度为 0.05 ℃/m 的井深 4 000 m 废弃井每天可提供近 600 m^3 净水^[48]。采出水处理过程中,用以提供动力的费用可占总处理成本的 60%^[49]。膜蒸馏^[50]技术的开发和推广,意味着利用废弃井提供的低温热源处理高 TDS 采出水成为可能;在为脱盐装置供电方面,地热能源与目前最常见的太阳能相比更加稳定,这也说明废弃井所产地热在油田将会有更广泛的应用。

此外,废弃井所产地热能在油井伴热开发^[51-52]、农产品干燥、矿石回收和水产养殖等领域也有很好

的应用前景。具体用途需结合废弃井周边环境、废弃井储层性质等因素综合考虑,因地制宜。

3 废弃井转地热井技术攻关建议

目前,废弃井地热能开发尚处于理论研究和试验性研究阶段,与大规模工业应用还存在一定距离。对于废弃井转地热井技术攻关,笔者认为应重点攻克多分支径向井关键技术、改善废弃井系统取热性能、建立智能决策与优化系统、加强地面配套设施研究。

1) 攻克多分支径向井关键技术。多分支径向井技术是指在地层的某一层位或多个层位从主井眼上沿径向侧钻一口或多口径向井眼。目前,国内外废弃井改造对象多为直井,在主井眼不同层位侧钻出多口径向井眼,采用上注下采(或下注上采)的方式,即可利用单口井眼实现取热,同时径向井可增大控制面积,有助于获取较高热量。

2) 改善废弃井系统取热性能。蒋方明等人^[53]在研究重力热管取热时,提出在井筒附近进行小型水力压裂,并注入二氧化碳增强换热。另外,利用紊流器和波纹管加强管内工质扰动^[54],也可达到增强换热的目的。上述方法都为提升废弃井闭式系统取热性能开拓了思路,说明可通过改进闭式系统内部结构或对储层进行改造来强化工质换热。开式取热系统的热采效率远高于闭式系统,对于开式取热系统,需加强循环工质漏失和净化等方面的研究,降低生产成本。同时,需开展开式循环系统工质与储层配伍性研究,减少对储层的损害。

3) 建立智能决策与优化系统。油气井生产过程中会产生大量数据资料,整合后可作为智能平台数据库。智能决策应从储层物性、净现值、井身结构和技术等方面出发,筛选所需数据,综合判断目标井是否满足改造要求,并有针对性地得出最佳取热方式。在选择工艺参数时,需全面考虑储层寿命、经济效益等因素,开展多目标优化,制定更符合技术-经济-热力学要求的方案,优化参数可包括入口温度、工质类型、流量、保温管导热系数和长度等。

4) 加强地面配套设施。受废弃井位置、采出液温度和循环工质输运成本等因素的影响,部分地热能很难实现经济利用。因此,加强满足废弃井中低温地热能发电、脱盐、取暖、制冷和循环水净化处理等应用的设备和系统研究,因地制宜,多渠道利用,提高废弃井所产地热能的应用效率。

4 结束语

油田所在地区温度梯度普遍较高,利用废弃井开发地热资源,是废弃井再利用的重要方式。废弃井所产地热能在发电、供暖制冷、处理油井产水、油井伴热开发、农产品干燥、矿石回收和水产养殖等领域都有很好的应用前景。目前,国内外废弃井地热开发研究主要集中于利用EGS或BHE进行取热,且仍处于理论研究和试验性研究阶段,今后应重点在多分支径向井技术、废弃井系统取热性能、智能决策与优化系统和地面配套设施研究等方面进行攻关。需要特别指出的是,废弃井所产地热能的研究和开发,对我国科学利用可再生资源、缓解能源压力、优化能源结构、实现绿色低碳发展,都具有重要意义。

参 考 文 献

References

- [1] IEA. World energy outlook 2014[R]. International Energy Agency, 2014.
- [2] FATIH B. Renewables 2018[R]. International Energy Agency, 2018.
- [3] BU Xianbiao, MA Weibin, LI Huashan. Geothermal energy production utilizing abandoned oil and gas wells[J]. *Renewable Energy*, 2012, 41: 80–85.
- [4] KOTLER S. Abandoned oil and gas wells are leaking[R/OL]. [2020-07-21]. <http://www.zcommunications.org/abandoned-oil-and-gas-wells-are-leaking-by-stevenkotler>.
- [5] MICHAELIDES E E. Future directions and cycles for electricity production from geothermal resource[J]. *Energy Conversion & Management*, 2016, 107: 3–9.
- [6] 李景明, 王红岩, 赵群. 中国新能源资源潜力及前景展望[J]. *天然气工业*, 2008, 28(1): 149–153.
LI Jingming, WANG Hongyan, ZHAO Qun. Potential and prospects on new energy sources in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(1): 149–153.
- [7] KANG M, KANNO C M, REID M C, et al. Direct measurements of methane emissions from abandoned oil and gas wells in Pennsylvania[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(51): 18173–18177.
- [8] JIANG Guangzheng, HU Shengbiao, SHI Yizuo, et al. Terrestrial heat flow of continental China: updated dataset and tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 2019, 753: 36–48.
- [9] 姜光政, 高翔, 饶松, 等. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(8): 2892–2910.
JIANG Guangzheng, GAO Peng, RAO Song, et al. Compilation of heat flow data in the continental area of China (4th edition)[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(8): 2892–2910.
- [10] 刘尧军. 东营地热资源研究[J]. *地热能*, 2001(4): 8–12.
LIU Yaojun. Research on Dongying geothermal resources[J]. *Geothermal Energy*, 2001(4): 8–12.
- [11] DAVIS A P. Geothermal power production from abandoned oil wells[D]. San Antonio: The University of Texas at San Antonio, 2009.
- [12] WANG Shejiao, YAN Jiahong, LI Feng, et al. Exploitation and Utilization of Oilfield Geothermal Resources in China[J]. *Energies*, 2016, 9(10): 798–811.
- [13] NIAN Yongle, CHENG Wenlong. Insights into geothermal utilization of abandoned oil and gas wells[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 87: 44–60.
- [14] KUJAWA T, NOWAK W, STACHEL A A. Analysis of the exploitation of existing deep production wells for acquiring geothermal energy[J]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2005, 78: 127–135.
- [15] KUJAWA T, NOWAK W, STACHEL A A. Utilization of existing deep geological wells for acquisitions of geothermal energy[J]. *Energy*, 2006, 31(5): 650–664.
- [16] DAVIS A P, MICHAELIDES E E. Geothermal power production from abandoned oil wells[J]. *Energy*, 2009, 34(7): 866–872.
- [17] CHENG Wenlong, LI Tongtong, NIAN Yongle, et al. Studies on geothermal power generation using abandoned oil wells[J]. *Energy*, 2013, 59: 248–254.
- [18] CHENG Wenlong, LI Tongtong, NIAN Yongle, et al. Evaluation of working fluids for geothermal power generation from abandoned oil wells[J]. *Applied Energy*, 2014, 118: 238–245.
- [19] NOOROLLAHI Y, POURARSHAD M, JALILINSRABADY S, et al. Numerical simulation of power production from abandoned oil wells in Ahwaz Oil Field in Southern Iran[J]. *Geothermics*, 2015, 55: 16–23.
- [20] CAULK R, TOMAC I. Reuse of abandoned oil and gas wells for geothermal energy production[J]. *Renewable Energy*, 2017, 112: 388–397.
- [21] 梁昌文, 陈科, 郑红梅. 利用废弃油井和高温溶腔开采地热能的数值模拟[J]. *太阳能学报*, 2017, 38(2): 386–392.
LIANG Changwen, CHEN Ke, ZHENG Hongmei. Numerical simulation of exploiting geothermal energy using abandoned oil well and hot cavity[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2017, 38(2): 386–392.
- [22] KOHL T, BRENNI R, EUGSTER W. System performance of a deep borehole heat exchanger[J]. *Geothermics*, 2002, 31: 687–708.
- [23] WESTPHAL D, WEIJERMARS R. Economic appraisal and scoping of geothermal energy extraction projects using depleted hydrocarbon wells[J]. *Energy Strategy Reviews*, 2018, 22: 348–364.
- [24] 甄华, 莫中浩. 报废油井改造成地热井的方法[J]. *煤气与热力*, 2007, 27(1): 47–50.
ZHEN Hua, MO Zhonghao. Methods for transforming abandoned oil well into geothermal well[J]. *Gas & Heat*, 2007, 27(1): 47–50.
- [25] 韦雅珍, 王凤清, 任宝玉. 华北油区地热排采技术研究[J]. *石油钻采工艺*, 2009, 31(增刊1): 93–95, 100.
WEI Yazhen, WANG Fengqing, REN Baoyu. Drainage and production by using geothermal in Huabei oil region[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2009, 31(supplement 1): 93–95, 100.
- [26] LIU Xiaolei, FALCONE G, ALIMONTI C. A systematic study of harnessing low-temperature geothermal energy from oil and gas reservoirs[J]. *Energy*, 2018, 142: 346–355.
- [27] 李登伟, 张烈辉, 郭了萍, 等. 中国21世纪可替代能源和可再生能源[J]. *天然气工业*, 2006, 26(5): 1–4.
LI Dengwei, ZHANG Liehui, GUO Liaoping, et al. Alternative and renewable energies of China in the 21st Century[J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(5): 1–4.
- [28] 董秋生, 黄贤龙, 郎振海, 等. 废弃油井改造成地热井技术分析

- [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(6): 18–21.
- DONG Qiusheng, HUANG Xianlong, LANG Zhenhai, et al. Technical analysis on transforming abandoned oil well into geothermal well[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2016, 43(6): 18–21.
- [29] KUREVIJA T, VULIN D. High enthalpy geothermal potential of the deep gas fields in Central Drava Basin, Croatia[J]. *Water Resources Management*, 2011, 25(12): 3041–3052.
- [30] REYES A G. Abandoned oil and gas wells: a reconnaissance study of an unconventional geothermal resource[R]. Lower Hutt, New Zealand: GNS Science, 2007.
- [31] BARBACKI A P. The use of abandoned oil and gas wells in Poland for recovering geothermal heat: proceedings of World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28-June 10, 2000[C].
- [32] LUND J W, FREESTON D H, BOYD T L. Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review[J]. *Geothermics*, 2010, 40(3): 159–180.
- [33] CHENG Wenlong, LIU Jian, NIAN Yongle, et al. Enhancing geothermal power generation from abandoned oil wells with thermal reservoirs[J]. *Energy*, 2016, 109: 537–545.
- [34] GHARIBI S, MORTEZAZADEH E, HASHEMI A B S J, et al. Feasibility study of geothermal heat extraction from abandoned oil wells using a U-tube heat exchanger[J]. *Energy*, 2018, 153: 554–567.
- [35] GEHLIN S E A, HELLSTRÖM G, NORDELL B. The influence of the thermosiphon effect on the thermal response test[J]. *Renewable Energy*, 2003, 28(14): 2239–2254.
- [36] GHOREISHI-MADISEH S A, HASSANI F P, AL-KHAWAJA M J. A novel technique for extraction of geothermal energy from abandoned oil wells[R]. American Solar Energy Society, 2013.
- [37] 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.
- [38] Geo-Heat Center, Oregon Institute of Technology. Hot springs power & ice[J]. *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin*, 2006, 27(3): 1–18.
- [39] YANG Yi, HUO Yaowu, XIA Wenkai, et al. Construction and preliminary test of a geothermal ORC system using geothermal resource from abandoned oil wells in the Huabei oilfield of China[J]. *Energy*, 2017, 140: 633–645.
- [40] SALEH B, KOGLBAUER G, WENDLAND M, et al. Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles[J]. *Energy*, 2007, 32(7): 1210–1221.
- [41] ZHANG Shengjun, WANG Huaixin, GUO Tao. Performance comparison and parametric optimization of subcritical organic rankine cycle (orc) and transcritical power cycle system for low-temperature geothermal power generation[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(8): 2740–2754.
- [42] TEMPESTI D, MANFRIDA G, FIASCHI D. Thermodynamic analysis of two micro CHP systems operating with geothermal and solar energy[J]. *Applied Energy*, 2012, 97: 609–617.
- [43] EBRAHIMI M, TORSHIZI S E M. Optimization of power generation from a set of low-temperature abandoned gas wells, using organic rankine cycle[J]. *Journal of Renewable & Sustainable Energy*, 2012, 4(6): 866–872.
- [44] ANGRISANI G, DIGLIO G, SASSO M, et al. Design of a novel geothermal heating and cooling system: Energy and economic analysis[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 108: 144–159.
- [45] NIAN Yongle, CHENG Wenlong. Evaluation of geothermal heating from abandoned oil wells[J]. *Energy*, 2018, 142: 592–607.
- [46] TORRES L, YADAV O P, KHAN E. A review on risk assessment techniques for hydraulic fracturing water and produced water management implemented in onshore unconventional oil and gas production[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 539: 478–493.
- [47] GREGORY K B, VIDIC R D, DZOMBAK D A. Water management challenges associated with the production of shale gas by hydraulic fracturing[J]. *Elements*, 2011, 7(3): 181–186.
- [48] KIAGHADI A, SOBEL R S, RIFAI H S. Modeling geothermal energy efficiency from abandoned oil and gas wells to desalinate produced water[J]. *Desalination*, 2017, 414: 51–62.
- [49] KISS A A, FLORES L S J, INFANTE F C A. Towards energy efficient distillation technologies – making the right choice[J]. *Energy*, 2012, 47(1): 531–542.
- [50] DUONG H C, COOPER P, NELEMANS B, et al. Evaluating energy consumption of air gap membrane distillation for seawater desalination at pilot scale level[J]. *Separation and Purification Technology*, 2016, 166: 55–62.
- [51] BENNETT K. Power generation potential from coproduced fluids in the Los Angeles Basin[D]. Stanford, California: Stanford University, 2012.
- [52] WANG Kai, LIU Junrong, WU Xingru. Downhole geothermal power generation in oil and gas wells[J]. *Geothermics*, 2018, 76: 141–148.
- [53] 蒋方明, 黄文博, 曹文炆. 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.
- JIANG Fangming, HUANG Wenbo, CAO Wenjong. Mining hot dry rock geothermal energy by heat pipe: conceptual design and technical feasibility study[J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2017, 5(6): 426–434.
- [54] CHENG S W Y, KURNIA J C, SASMITO A P, et al. The effect of triangular protrusions on geothermal wellbore heat exchanger from retrofitted abandoned oil wells[J]. *Energy Procedia*, 2019, 158: 6061–6066.