

废弃油井直接换热技术及应用效果评价

胡 霞¹, 吕建才¹, 张新成²

1. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712; 2. 大庆油田水务公司, 黑龙江 大庆 163453

摘 要: 基于呼伦贝尔地区的地下地质特征, 在工作区内选取深度、井身结构和套管程序都适宜的废弃油井, 依据《浅层地热能勘查评价规范》将底部射孔层位进行封堵改造, 实现了超导液闭式循环, 达到了深井直接换热的目的。通过对区内 ZK1 油井的直接换热试验, 经稳定测试取得了单井换热功率约 162 kW, 每延米换热量为 90 W 的良好应用效果。ZK1 油井直接换热改造的成功, 标志着废弃油井直接换热改造是可行的, 并总结了一套改造技术流程及取热利用方案, 同时为类似改造工程积累了值得进一步推广的经验, 为清洁能源地热的利用开辟了一条新的途径。

关键词: 废弃油井; 地热能; 换热技术; 岩石热导率; 地温梯度

开放科学标志码(OSID):



DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2020.05.013

EVALUATION ON APPLICATION EFFECT OF DIRECT HEAT EXCHANGE TECHNOLOGY IN ABANDONED OIL WELLS

HU Xia¹, LYU Jian-cai¹, ZHANG Xin-cheng²

1. Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing 163712, Heilongjiang Province, China;

2. Daqing Oilfield Water Supply Co., Ltd., Daqing 163453, Heilongjiang Province, China

Abstract: Based on the subsurface geological characteristics of Hulun Buir area, the abandoned oil wells with suitable depth, well structure and casing program are selected in the work area. According to the "Criteria for Exploration and Evaluation of Shallow Geothermal Energy", the bottom perforation layers are sealed and transformed to achieve the superconductive liquid closed circulation and direct heat exchange in deep wells. Through the direct heat exchange test of ZK1 oil well, a good application effect of single well heat transfer power about 162 kW and heat transfer energy of 90 W/m are obtained by stability test. The successful result of ZK1 oil well indicates that the direct heat exchange transformation of abandoned oil wells is feasible. Moreover, it summarizes a set of transformation process and heat utilization scheme, which provides experience for similar projects and opens up a new way for utilization of clean geothermal energy.

Key words: abandoned oil well; geothermal energy; heat exchange technology; thermal conductivity of rock; geothermal gradient

0 前言

近年来, 发展清洁能源越来越受到重视。地热作

为非化石能源中的重要一员, 具有清洁环保、稳定性好、可循环利用等特点, 是一种现实并具竞争力的可再

收稿日期: 2020-03-23; 修回日期: 2020-04-15。编辑: 张哲。

基金项目: 中国石油天然气集团有限责任公司科技重大专项“油区地热资源潜力评价”项目(2016A-4802(GF))。

作者简介: 胡霞(1981—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事新能源地质研究工作, 通信地址 黑龙江省大庆市让胡路区大庆油田勘探开发研究院勘探大楼, E-mail://hux@petrochina.com.cn

生能源^[1].

目前利用废弃油井直接换热是一种可行且非常有前景的地热能利用方式,可以将大量的废弃井变废为宝,带来巨大的经济和社会效益.当前废弃油井直接换热技术日趋成熟^[2-3].为了能够利用油田的废弃油井提取地热能,探索相关取热的方法,2017年在内蒙古呼伦贝尔市新巴尔虎左旗大庆油田呼伦贝尔分公司贝28作业区内^[4-5]进行了“取热不取水”改造试验测试,利用单井闭式循环,提取深部地层热能,达到了单井换热功率162.17 kWh,每延米换热量为90 W的改造效果.通过联合地面热泵机组为2000 m²建筑设施供暖,系统在两个供暖期内运行稳定,试验首获成功,取得较好的经济和社会效益.

原站房供热主要采用燃烧天然气及渣油等高价值能源,能耗比高,污染大,经济性低.通过对一个供暖期经济测算,利用单井循环供热较原锅炉取暖节省供暖费用50.4元/m².整个系统建设主要有取热井改造、现场原位热响应试验、供暖系统安装、地温场恢复监测、运行效果及效益评价等几个重点环节.

1 废弃油井改造方法

开天窗侧钻法、直接射孔法和改造泵室射孔法是废弃井改造开采地热水常用的3种主要方法^[6].改造废弃油井时,选择适合改造直接换热的井孔是重要的前提,尽量选择已下入套管,井身结构完整的废弃井.本次试验特点是“取热不取水”,改造方法有别于常规地热井改造.

作业区附近共有8口废弃井,选取岩石热导率较高和井况良好的废旧油井进行改造.ZK1井井底深度2140 m,井底初始温度70.1℃,管径123 mm,水泥固井厚度3~5 cm.内管材料上部200 m保温管DN90,管箍接口厚度10 mm,下部1600 m塑料管DN80,管箍接口厚度8 mm,符合改造要求.将ZK1井作为直接换热技术试验的改造井,同时选取周边ZK2井作为监测井,以便收集试验过程中的实时数据资料.

取热井改造前,对废弃油井底部射孔层位进行封堵,通过机械封堵法在油井射孔层顶界1800 m处安装可钻式封隔器.在封隔后进行打压试验,以检验射孔整体的封闭效果.在保证射孔封闭良好的基础上进行洗井,主要去除井内残留原油,保证在注入循环液后

不会对换热器造成腐蚀^[7-9].

以油田钻孔原套管作为换热器的外壁管,管径123 mm.为避免地表及变温层岩土体温度变化对取热效果产生干扰,换热器芯管顶部0~200 m处安装新型保温材料管,管径(Φ)90 mm,壁厚5 mm,通过转换接头与下部芯管连接.200~800 m换热器芯管为Φ90 mm PPR管,采用热熔连接.800~1760 m换热器芯管为Φ75 mm PPR管,采用热熔连接.换热器底部40 m为不锈钢配重进水管,管径90 mm,通过转换接头与芯管连接(图1).

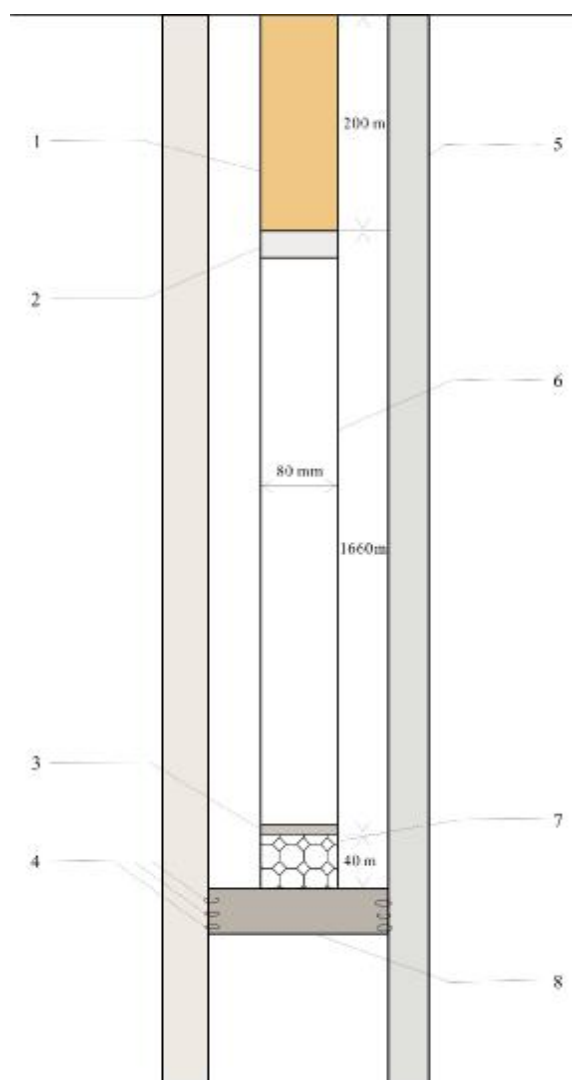


图1 取热井井身结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram for the structure of heat extraction well
1—保温管(thermal insulation pipe); 2、3—转换接头(adapter); 4—原射孔(original perforation); 5—外壁管(external wall tube); 6—芯管(core tube); 7—滤水管(filter pipe); 8—封隔器(packer)

我国地热资源主要以中低温为主,为了弥补地热热储温度较低的缺陷,我们采用了地热井下换热器与热泵联合供热的地热利用新模式^[10-14]并在井内安装套管式换热器的新方法(如图1所示)。

2 改造效果分析

2.1 现场原位热响应试验

原位热响应试验采用RCR36-12/1型地温能冷、热响应测试仪试验平台,测试平台的水路循环系统与所要测试的换热器管路相连接,形成闭式环路,通过平台内的循环水泵驱动环路内的循环液不断循环,同时平台提供一个能量可调节的冷、热源,提供的冷、热量通过水路系统中的循环液释放给换热系统,最终经换热系统释放到大地^[10]。试验功率可达36 kW以上,移动性能好,采用风冷热泵建立稳定的地埋管换热器运行工况,精确计量地埋管换热器进水温度、出水温度和流量。

参考《浅层地热能勘查评价规范》(DZ/T0225-2009),稳定工况现场热响应试验的目的是为地埋管热泵的设计和区域地温能评价提供依据,获取岩土初始平均温度、单孔取热量等参数。

2.1.1 岩土初始平均温度

岩土初始平均温度 t_0 是地温能评价的重要参数,根据《浅层地热能勘查评价规范》(DZ/T0225-2009)的规定,现场热响应试验前,应首先进行无负荷循环测试(即无功循环法)。无功循环法是在不向地埋管换热器加载冷、热量的情况下,使水在地埋管内循环,在循环水的温度达到稳定时,循环水与岩土达到热平衡,该温度即为岩土初始平均温度。

岩土初始平均温度计算方法如下:

$$t_0 = \frac{\sum t_{out}}{n} \quad (1)$$

式中, t_0 —岩土初始平均温度,℃; t_{out} —地埋管换热器出水温度,℃; n —循环次数。

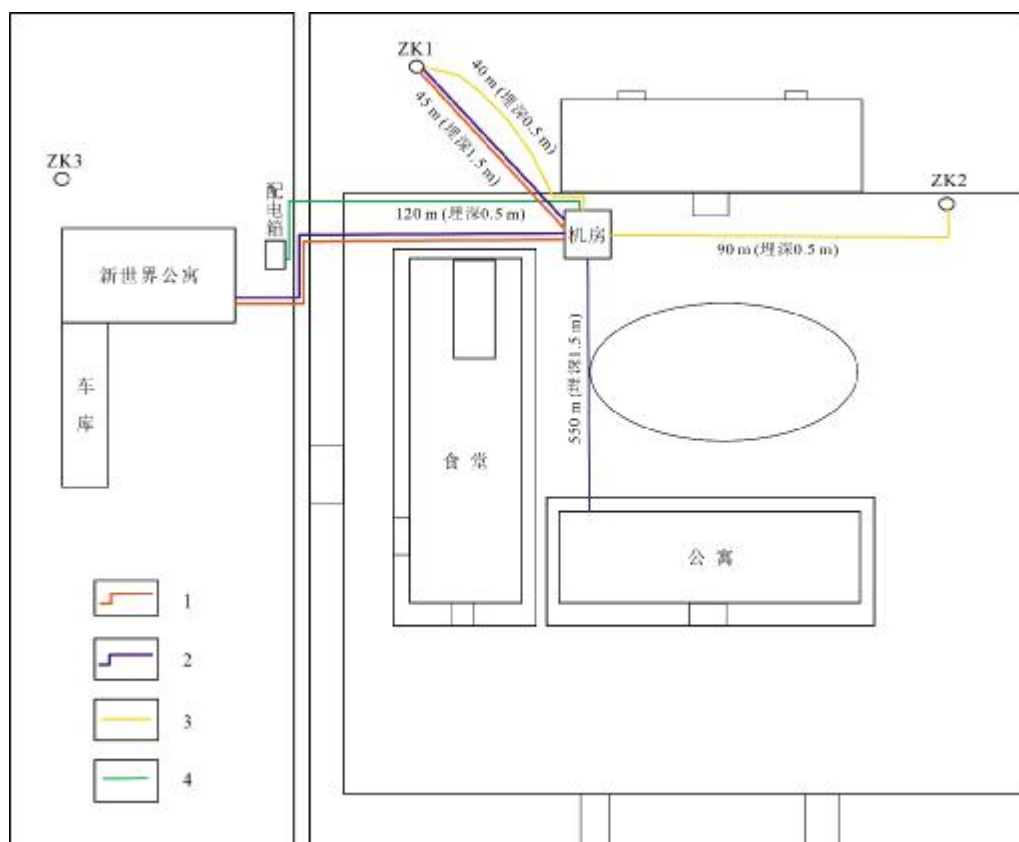


图2 供暖系统外网管线示意图

Fig. 2 Schematic diagram for the external network pipeline of heating system

1—外网保温管(热)(external moisturizing pipe, hot); 2—外网保温管(冷)(external moisturizing pipe, cold); 3—监测光纤(monitored optical fiber); 4—电缆(cable)

根据温度测试,该井井底初始温度为 70.1℃,利用以上方法测试该换热孔岩土初始平均温度为 26℃。

2.1.2 现场原位热响应试验

单孔换热量是综合反映地埋管换热器施工条件、管材、岩土热物性、运行工况等众多因素的参数。单井换热量计算公式:

$$Q=CM\Delta T \quad (2)$$

式中, Q —单井换热量, J; C —水的比热, J/kg℃; M —水的质量, kg; ΔT —换热前后温差,℃。

为保证地源热泵系统较高的能效比(COP),换热孔进水温度为 4.1℃,出水温度约为 18℃,温差为 13.9℃。在极寒季节,该井持续供热情况下单井换热器内循环水流量为 10.0 m³/h。将 $C=4200$ J/kg℃, $M=10$ m³/h, $\Delta T=13.9$ ℃代入公式(2)计算,得:

$$Q=583.8 \times 10^6 \text{ J}=162.17 \text{ kWh}$$

因此,该试验井的换热能力 162.17 kWh。该井封堵后实际可利用井深为 1800 m,则该井单位换热量即为: $q=162.17/1800 \text{ kWh/m}=90.1 \text{ Wh/m}$,即该井每小时换热量为每延米 90.1 W。

2.2 供暖系统安装

2.2.1 监测系统安装

整套监控系统由探测光缆和分布式光纤温度监控系统构成。其中分布式光纤温度监控系统集成了传统的测温主机功能和上位机监控功能,多套监控系统可以构成多区域监控网络。

具体安装方式为,在取热井 ZK1 及监测井 ZK2 两口井内下入光缆,安装监测机组 1 套,采用分布式光纤地温场温度监控系统,以光纤拉曼(Raman)散射技术为基础,结合高频脉冲激光、光波分复用、光时域反射、高速信号采集及微弱信号处理等先进技术用于地温在 40~120℃范围的温度检测。探测光缆每隔 2 m 设置一个数据采集点,监测系统从被监控区域逐点实时采集温度值,实时显示从当前区域采集所得到的温度并形成实时数据库。

2.2.2 机房建设

本试验工程中供暖目标建筑为新世界公寓及车库,供暖建筑面积 2000 m²。末端为散热器供热形式,地源热泵相应选用高温地源热泵系统,外网管线示意图如图 2。采暖系统通过恒温控制器,对机组进行联动控制,根据室内负荷变化,控制机组的运行和启停,既

达到供热的舒适效果又避免能源浪费,以最大满足需求的负荷进行机房内机组数量及型号选择,根据换热量的负荷考虑极端环境,选择 2 台 HSBLR-D392a 型高温热泵机组(制热量 392 kW,制热功率 89.9 kW)供暖。

2.3 地温场恢复监测

本次研究采集了 2017 年 12 月 28 日~2018 年 8 月 24 日监测数据,以进行供暖期地温变化情况以及停止供暖后地温恢复期的分析。

取热井在供暖期及恢复期不同深度地温场变化曲线如图 3 所示。由图 3 可以看出,供暖初期,随着气温日渐寒冷,供暖需求日益增高,地温呈波动下降;供暖末期,随着气温日渐回升,供暖负荷要求逐渐降低,地温呈现小幅度波动回升;在供暖停止后,地温首先出现

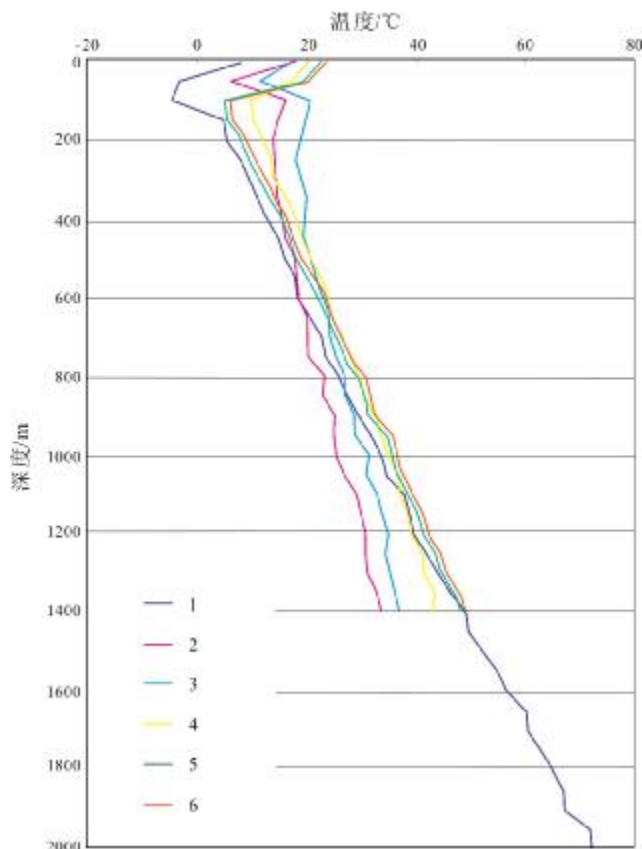


图 3 取热井不同深度地温场变化曲线

Fig. 3 Temperature variation curves of geothermal field at different depths in heat extraction well

1—基础温度(foundation temperature); 2—2018-04-26 测温(temperature measured on 2018-04-26); 3—2018-05-25 测温(temperature measured on 2018-05-25); 4—2018-06-25 测温(temperature measured on 2018-06-25); 5—2018-07-25 测温(temperature measured on 2018/07/25); 6—2018-08-24 测温(temperature measured on 2018-08-24)

了较大幅度的显著回升(即在图中供暖期及恢复期分界处),之后温度仍呈波动上升趋势;截至7月末,地温场温度逐渐趋于稳定。

绘制停止供暖后恢复期地温随深度变化曲线(图4)。对比基础温度可知,5月末900 m以浅地温已经恢复,6月末1100 m以浅地温均已恢复,7月末1400 m以浅温度即全部恢复,9月末2000 m以浅温度全部恢复,监测井井底温度在供暖期及恢复期全程保持71℃不变。

从以上地温场监测情况看,在高寒地区利用油井直接换热有以下特点:

1)利用油井取热供暖时,单个油井在取热供暖过程中影响范围较小,基本不会对临近油井地下温度产生影响;

2)利用油井取热结束后,深部地层会对取热层进行热量补充,补充速度随着深度增加而增加,2000 m以浅地层可在9月末恢复完毕,即在下一个供暖季来临前恢复至地层初始状态。

2.4 运行效果及效益评价分析

改造试验于2017年11月18日开始,海拉尔地区

已经进入寒冬季节,当日室外温度为-20~-31℃。供暖初期,换热孔出水温度为22.2℃,进水温度为5.1℃;运行35 d后,换热孔出水温度为18.4℃,进水温度为4.5℃;热泵出水温度为45℃,回水温度为35℃。现场供暖室内温度18~21℃,整个供暖期间符合供暖标准要求。

利用废弃井改造,节省大量钻井费用开销。供暖费用与原燃油、燃气、燃煤供暖方式相比,年运行费用分别节省24.11、29.47及10.16万元,减少了一次性能源消耗。结合热泵进行取热供暖,消耗电能,能有效减少二氧化碳、二氧化硫的排放,经济效益与环境效益良好。

3 结论

通过废弃井改造成功,得到以下结论:

1)改造废弃油井直接取热试验首试成功,表明取热不取水技术可行,节省钻井费用,经济效益较好;

2)深井1800 m封闭式循环直接换热,单井换热功率约162.17 kW,每延米换热热量90.1 W,联合地面热泵机组为2000 m²建筑设施供暖;

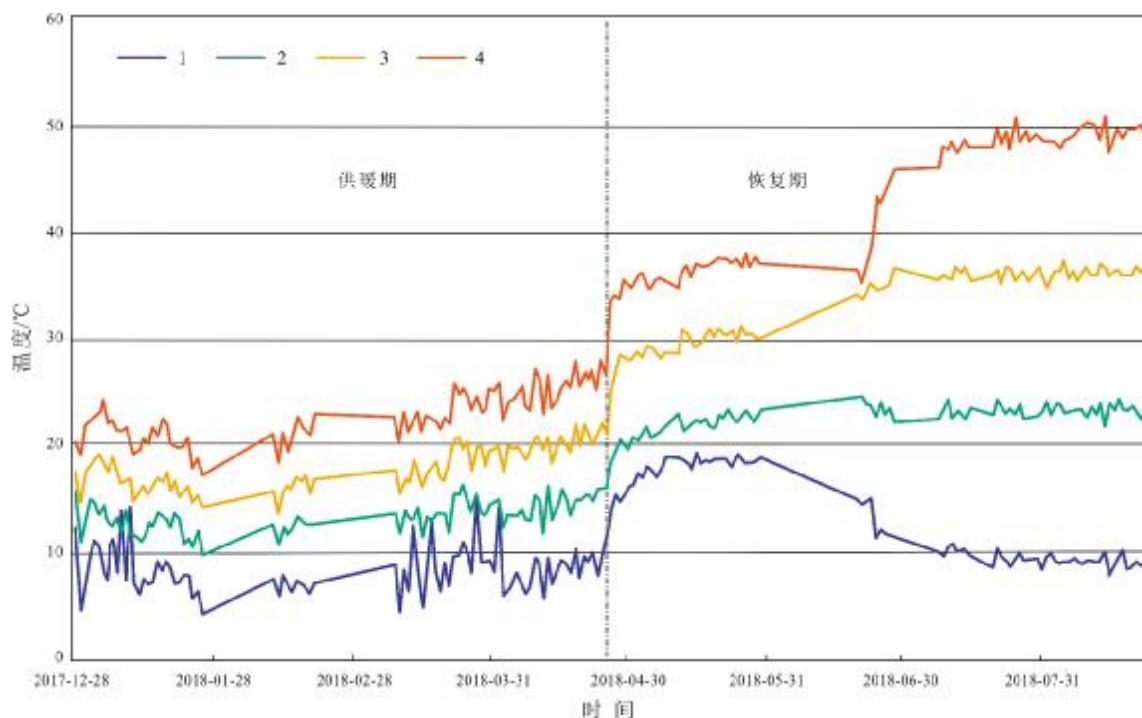


图4 取热井恢复期温度随深度变化曲线

Fig. 4 Temperature curves of different depths during recovery period of heat extraction well

1—200 m 深度(at the depth of 200 m); 2—600 m 深度(at the depth of 600 m); 3—1000 m 深度(at the depth of 1000 m); 4—1400 m 深度(at the depth of 1400 m)

3)取热结束后,深部地层会对取热层进行热量补充,补充速度随着深度增加而增加,2000 m以浅地层可在150 d左右恢复至地层初始状态。

4 讨论和建议

贝28作业区废弃井改造虽首试成功,但直井换热面积有限,单井换热的影响半径较小。在废弃井改造过程中,可以考虑利用主水平井眼钻进鱼骨状分支井,可大大增加水平段的换热面积。将换热空间由线转变为面或体,可使单井的换热功率大大提升,改进示意图见图5。利用结构完好的深层废弃油井,在井底适当层位进行开窗水平侧钻,同时加以鱼骨状分支井施工,在分支注入超导液,从井口到水平井段下套管封井,井内下保温隔热管至井底,外部套管和隔热管之间环形空间注入冷超导液,经井下换热后,热液从保温隔热管内部提升至地表进行集中换热,供给终端用户使用^[15-20]。

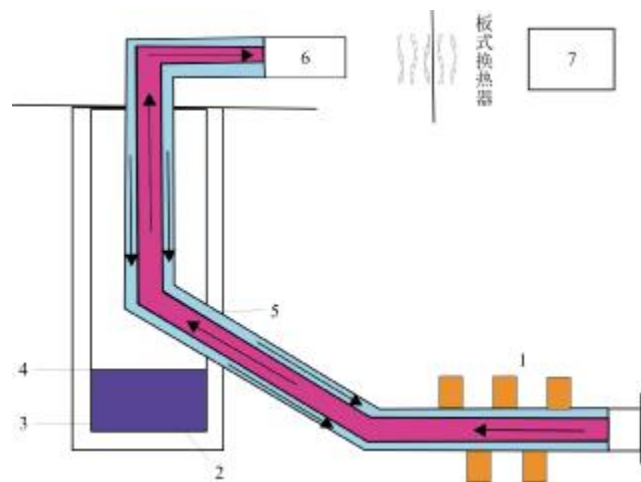


图5 取热井改进技术示意图

Fig. 5 Schematic diagram for the improved technology of heat extraction well

1—鱼骨分支井 (fishbone multilateral well); 2—井底超导液 (bottom superconductive fluid); 3—人工井底 (artificial bottom hole); 4—封隔器 (packer); 5—换热超导液 (heat exchange superconductive fluid); 6—换热站 (heat exchange station); 7—终端 (terminal)

本次将油田废弃井改造成有价值的地热井工程试验的成功,证明了技术上完全可行,而且运行成本低,市场前景广阔,可为同类改造提供借鉴,这一改造

方法值得推广。

参考文献:

- [1]2016年中国地热国际论坛:地热将成我国非化石能源增量主力[J]. 化学工程师,2016(11):36.
- [2]王贵玲.中国地热志——华北 东北 西北卷[M].北京:科学出版社,2018:20-130.
- [3]张薇,王贵玲,刘峰,等.中国沉积盆地型地热资源特征[J].中国地质,2019,46(2):255-268.
- [4]张振强.内蒙古呼伦贝尔盟北部地区花岗岩特征与金矿化的关系[J].贵金属地质,2000,9(4):206-210.
- [5]刘华南,刘家军,李小伟,等.内蒙古新地沟金矿床黄铁矿热电性特征及深部找矿意义[J].中国地质,2018,45(4):819-838.
- [6]宋恩武,李岚,王少娟,等.将废弃油(气)井改造为地热井的方法[J].地热能,2006(1):25-27.
- [7]阚长宾,元发庆,于晓聪,等.利用废弃油井开发地热能[J].可再生能源,2008,26(1):90-92.
- [8]赫广迅.地热井下换热器——热泵联合使用机理研究[D].天津:天津大学,2010.
- [9]董秋生,黄贤龙,郎振海,等.废弃油井改造为地热井技术分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(6):18-21.
- [10]环衍忠,王学工,王世壮,等.废弃油井改造成地热井的可行性[C]//中国能源研究会.北京地热国际研讨会论文集.北京:中国能源研究会,2002:381-385.
- [11]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.
- [12]戴传山,刘雪玲,孙平乐.地热井下换热器研究与应用进展[J].能源研究与信息,2008,24(1):7-11.
- [13]丁海英,陈强.单、双U换热器地热井热响应测试与分析[C]//第十三届中国科协年会第14分会场—地热能开发利用与低碳经济研讨会论文集.北京:中国科学技术协会学会学术部,2011:159-162.
- [14]周晓奇.东濮凹陷废弃井改造成地热井先导试验[J].油气井测试,2018,27(4):27-34.
- [15]张雁隆.鱼骨状分支水平井的钻井施工[J].油气田地面工程,2013(12):126-127.
- [16]张雁隆.套管开窗侧钻的关键技术及配套设备[J].油气田地面工程,2014(1):84.
- [17]王峰.侧钻双分支水平井井眼轨迹控制[J].石油钻采工艺,2005,27(1):6-8.
- [18]王杰,王永,袁辉.鱼骨状分支水平井钻井工艺技术研究[J].中国化工贸易,2014(17):14,18.
- [19]王云鹤.营451复杂断块鱼骨状分支水平井优化设计技术[J].石化技术,2015(4):73,56.
- [20]刘蜀东,李晓平,张健,等.鱼骨状分支水平井气水两相产能分析[J].天然气地球科学,2015,26(3):550-555.