

文章编号: 1006-6616 (2017) 03-0498-09

天津滨海新区地热资源循环利用研究 ——馆陶组热储回灌技术研究与示范

阮传侠^{1,2}, 冯树友², 沈健², 林黎¹, 江国胜²

(1. 中国地质大学(北京)水资源环境学院, 北京 100083;

2. 天津地热勘查开发设计院, 天津 300250)

摘要: 可持续回灌是地热资源循环采用的基本。本文通过热储敏感性、堵塞原因、成井结构以及地面装置分析了回灌衰减的原因。认为物理堵塞是回灌堵塞的主要原因, 成井结构是维持可持续回灌的关键, 标准的地面设备可避免由于物理和化学原因引起的堵塞。本文采用成功的成井结构和标准的地面装置开展馆陶组热储回灌地热资源循环采用的示范工程建设, 回灌率达到 100 ~ 123 m³/h, 实现了天津滨海新区馆陶组热储回灌突破, 保证了滨海新区馆陶组地热资源循环利用。

关键词: 天津; 滨海新区; 馆陶组热储; 回灌研究; 工程示范

中图分类号: P 314

文献标识码: A

0 引言

新近系馆陶组热储层是天津市滨海新区地热资源开发利用的主要热储层, 地热流体用于供暖。近年来开发强度呈逐年增大, 热储压力也逐年下降趋势, 目前热储层的静水位埋深为 90 ~ 114 m, 最大降幅 6.5 m/a, 最大动水位已超过 146 m^[1-2], 给地热资源开发利用增加了困难和成本。开展地热资源回灌, 抑制水位过快下降成为实现本地区地热资源地热循环利用的关键。对以往成果进行系统分析研究, 针对滨海新区馆陶组热储条件, 分析影响地热资源循环利用的因素, 从热储回灌堵塞、成井工艺以及地面回灌工程, 确定馆陶组热储地热资源循环利用的回灌工程技术方案, 建设馆陶组热储地热资源循环利用的示范工程, 实现该区地热资源的可持续开发利用。

1 构造特征

滨海新区大部分位于Ⅲ级构造单元黄骅拗陷

内, 少部分位于Ⅲ级构造单元沧县隆起之上(见图1所示)。馆陶组(Ng)除在小韩庄凸起高部位有缺失外, 在本区普遍分布。是一套氧化环境下河流形成的红色陆相碎屑岩沉积。依据已有地质资料分析, 黄骅拗陷馆陶组沉积时期, 中北部为燕山山前冲积平原部分, 故发育冲积扇辫状河沉积。南部远离燕山物源影响范围, 而为低弯度河流沉积。本区的馆陶组与下伏地层呈角度不整合接触, 属于河流相碎屑岩沉积, 沉积旋回明显, 分为上粗段、中细段和下粗段。揭露顶板埋深 1129 ~ 1806 m, 总厚度 100 ~ 500 m。该层分布在本区横跨沧县隆起和黄骅拗陷两个构造单元。在沧县隆起地区埋藏较浅厚度为 100 ~ 200 m, 在黄骅拗陷地区底板埋藏比较深, 厚度为 200 ~ 500 m。

馆陶组沉积旋回性强, 呈粗-细-粗的岩性组合特征。自上而下分为三段, 即馆Ⅰ段、馆Ⅱ、馆Ⅲ:

馆Ⅰ段: 以浅灰色、灰绿色、薄层灰黄色砂岩及灰绿色泥质粉砂岩夹不等厚的暗棕红、暗紫色泥岩为主, 砂岩矿物成份主要为石英、长石, 较疏松, 砂岩具微细斜层理, 局部具波状微细交错

收稿日期: 2017-01-16

基金项目: 矿产资源补偿费项目(国土房任[2009]27号); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41502256)

作者简介: 阮传侠(1978-), 女, 汉, 高级工程师, 主要从事地热资源评价、动态监测和回灌研究。E-mail: rchx12@sohu.com。

层理;

馆Ⅱ段:以浅灰、深灰绿色泥岩为主夹灰绿、灰白色泥质粉砂岩,泥岩普遍含炭屑和炭质条带,具次生方解石脉,呈网状分布;

馆Ⅲ段:杂色砂砾岩夹薄层灰色泥岩与深灰绿色泥岩和砂岩,底部为杂色砂砾岩为其标志性层位,顶板埋深在1600~1680 m,其分布为西部薄,向东部逐渐加厚,厚约100~150 m,其中砂砾岩为45~100 m,塘沽地区达135 m,砂砾岩占本厚度的60~90%,砂砾岩平均孔隙率为20%,该段上部以中细砂岩为主,底部普遍发育异层厚度为30~80 m的底砾岩,底砾岩在塘沽地区最为发育,厚度可达80 m以上,岩性较好,在大港汉沽地区,由于有泥质填充,影响地层的富水性。该段矿物成份以石英、长石为主,砾石成份主要由石英、长石、燧石为主,次棱角、分选中等;砾径以中-细砾为主,一般在4~6 mm,见少量黄铁矿晶体及铁锰质结核分布^[2-4]。

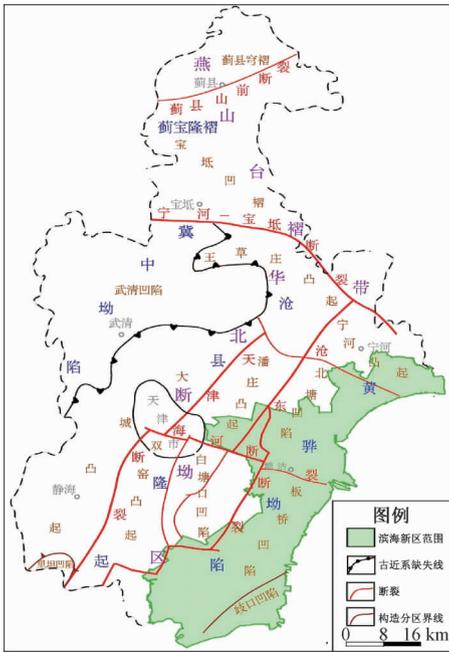


图1 滨海新区构造位置图

Fig. 1 Tectonic location map of Binhai New Area

2 馆陶组热储回灌影响关键问题分析

2.1 热储层敏感性分析

敏感性分析主要是对储层岩石的矿物组合,

胶结类型和胶结物、孔隙结构、物性参数以及粘土矿物的类型、数量、产状,岩石的膨胀性和阳离子交换能力等,并可以找出地层损害的潜在因素,为岩石敏感性试验提供依据。

(1) 水敏伤害:外来流体的盐度过低或盐度的急剧变化使得粘土矿物膨胀、脱落、运移,堵塞储层孔隙和喉道,引起渗透率下降的现象;

(2) 速敏伤害:储层中粘土及其他微粒在注入流体的影响下,在孔隙介质中迁移,随着迁移距离的增加,速度减慢,逐渐沉积下来堵塞孔隙、喉道,造成储层渗透率的损害。损害程度与回灌流体速度和流体pH值有关。

(3) 酸敏伤害:指酸液进入储层后,与酸敏性矿物发生反应,产生沉淀或放出颗粒而导致储层渗透率下降的现象;

(4) 碱敏伤害:试验证明,回灌流体Ph值越大,对新近系储层伤害越大。主要表现为注入碱性回灌流体,OH⁻的增加以及HCO₃⁻可能转化为CO₃²⁻,与储层中的岩石矿物、固体流体发生化学反应,生成如Si(OH)₄胶态沉淀、碱垢(CaCO₃)和新的矿物,堵塞孔、喉,引起储层伤害;

(5) 盐敏性:储层受低盐度的影响,粘土矿物发生水化、膨胀而导致渗透率下降的现象。流体盐度不同两个阶段,第一水化膨胀阶段,膨胀性不强;第二渗透膨胀阶段,粘土晶格间距可增大120倍。

2.2 堵塞成因分析

2.2.1 物理堵塞

(1) 回灌水中的悬浮物

回灌水中的悬浮固体颗粒所造成的阻塞热储层孔隙是地热回灌中最常见的问题,其中关系到细小颗粒的运移过程,颗粒大小、孔隙参数(大小、形状、浓度、扭曲度)以及在沉积中所涉及到的各种作用力(流体动力、保持力)。

当细小颗粒被吸附于井壁上时,会形成块状物,可通过回扬和酸处理的手段来消解,不会对回灌造成太大影响。较突出问题是当运动的细小颗粒在地层中的某一位置发生堵塞时,该位置的压力和悬浮流速已经不能维持颗粒正常运动,使颗粒被驻留,从而形成阻挡环状区域。这种堵塞通常是不可消除的,对回灌产生较大影响,主要

包括沉淀、惯性、水力影响、直接拦截、散乱性等几个方面。当回灌水中悬浮物含量过高,会堵塞多孔介质孔隙,使得回灌能力不断减小甚至无法回灌,因此通过预处理控制回灌水中悬浮物的含量是防止回灌井堵塞的主要措施。

(2) 气泡堵塞

水注入井中时,在流动情况下可能携带大量气泡,同时水中的溶解性气体可能因为温度、压力的变化释放出来。此外,还可能因生化反应生成气体物质^[3-6]。对于承压含水层,除防止注入水中夹带气泡外,对气体原因产生的气泡需特殊处理。

(3) 粘粒膨胀和扩散

粘粒膨胀和扩散是因化学反应产生的堵塞,主要由阳离子交换作用所致,可通过注入 CaCl_2 等盐来解决。

(4) 含水层细颗粒重组

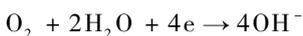
当注水井又兼做抽水井时,反复抽、注水会引起井壁周围的细颗粒介质重组,从而形成阻塞^[5]。

2.2.2 腐蚀因素

回灌的地热流体与含水层介质或地热流体不相容时,引起某些化学反应,除了形成化学沉淀造成堵塞外,还会影响水质。此外,地热流体对金属管材的腐蚀会生产一些难溶物质,不经过处理直接回灌也会产生堵塞,影响腐蚀的因素主要有:

(1) 氯离子 (Cl^-): 氯离子的离子半径小,穿透能力、吸附能力很强,且金属氯化物溶解度高,会催化促进腐蚀作用进行,它不作为反应物。

(2) 溶解氧 (O_2): 是地热流体中最重要的腐蚀性物质,在地热利用系统中会自空气中漏入,接受腐蚀金属所给出的电子受体,使得腐蚀作用不断进行,还可以和二价铁离子最终反应生产难溶的氢氧化铁,反应式:



(3) 硫酸根 (SO_4^{2-}): 作用于氯离子类似,造成的影响不如氯离子强烈,通常在氯离子浓度较低时会产生一定的腐蚀。

(4) PH 值: 在大多无 O_2 的地热流体中,碳钢

和低合金钢的腐蚀主要由 H^+ 的还原反应控制 ($2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$)。PH 值增高,腐蚀速率很快下降^[7]。

(5) 硫化氢 (H_2S): 金属腐蚀中起加速作用,与金属离子反应生产硫化物。在无氧条件下也可腐蚀金属管材,影响比较复杂^[8]。

(6) 二氧化碳 (CO_2): 对碳钢有较大的腐蚀作用,对碳酸钙的溶解有很大影响。

(7) 氨 (NH_3): 主要引起铜合金的应力腐蚀破裂。

(8) 总固形物: 总固形物数值高,表示水中有较高的离子浓度,会增大地热流体的导电性,强化了地热流体传递腐蚀电流的能力。

2.2.3 生物因素

回灌水中的或者当地的微生物在适应的条件下在回灌井周围迅速繁殖,形成生物膜,堵塞介质孔隙,降低含水层导水能力。

铁细菌的存在也会导致回灌堵塞的发生。它在铁质的输水管接触中加速 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} , 从而形成沉淀,适宜的水温、丰富的 Fe^{2+} 、溶解氧、适宜的 PH 值以及共生的有机物等会促进铁细菌的生长。

细菌污染后的水质处理比较麻烦,且常规的方法,如加入消毒杀菌剂等方法在回灌中适用性差,还可能污染地下水。

综合来说,回灌中悬浮物细小颗粒、化学变化以及气体等是产生堵塞的主要问题,因此要重点对地热井的成井工艺、回灌工艺和配套设备进行研究,保证回灌正常进行^[9-11]。

3 馆陶组热储回灌技术集成

依据滨海新区地热地质条件馆陶组热储地热回灌井成井结构设计分为:一开大口径填砾成井、二开过滤器成井和二开射孔成井三种工艺^[12-14]。

3.1 一开大口径填砾成井工艺

大口径填砾工艺,即完井后选择扩孔。在过滤器和井壁之间充填一定厚度的砾料,填砾时应保证砾料到位,起到滤水、挡砂的作用,形成很好的滤层。

3.2 二开过滤器成井工艺

二开过滤器成井工艺应用在较深地热井中,

采用水泥固井止水方法。水泥固井具体工艺是在过滤器上部加装盲管, 并预打旋流孔, 待井管下至预定位置后, 利用旋流孔进行注水泥固井作业。旋流孔下部加高强度橡皮伞, 防止水泥浆下沉(见图2)。

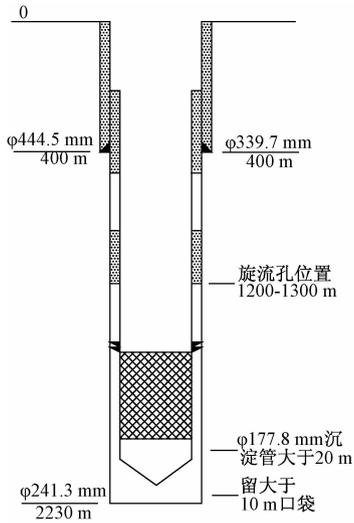


图2 二开过滤器成井工艺示意图

Fig. 2 Diagram of well completion technology of the filter for the second section

3.3 二开射孔成井工艺

射孔技术一般应用在较深地热井中(一般 > 1500 m)。该成井工艺结合测井曲线解释成果分析热储层的渗透率、孔隙度、含水层厚度及井温等参数, 通过射孔作业方式, 建立渗水通道成井。该工艺应用于赋水性好、渗透率大、地层成岩性好, 胶结较致密的热储层中。

3.4 馆陶组热储回灌地面配套设备及工艺

地面回灌配套设备可以有效避免回灌产生的物理和化学堵塞等, 减缓回灌量衰减, 保证地热流体回灌通畅、维护回灌井的持续有效运行^[1,15]。

3.4.1 回灌系统地面配套设备

地面配套设备要满足回灌水质要求, 不会因清洗反冲等操作中断回灌运行。回灌系统要严格保证密闭, 避免回灌流体回温度、压力等因素变化而产生沉淀, 从而导致储层堵塞。回灌系统地面配套设备包括过滤装置、排气装置、回灌管、水位测管及回灌管路等方面。

(1) 过滤: 为有效减少回灌中的堵塞, 保证回灌顺利, 在回灌井口需设置二级过滤器: 二级过

滤器进出口两端均需安装压力监测仪器, 根据压力的变化制定反清洗的时间, 以保证过滤效果。

(2) 排气罐: 回灌流体由于管径阻力和流动状态的变化, 水动力流场状态发生变化, 流体中的部分气体析出并生成气泡, 当驻留在岩石空隙中会产生气堵。在回灌前应设置排气装置, 地热尾水进入罐体, 管径的变化, 流速迅速降低, 压力下降, 气泡内的压力和罐内压力形成压差, 迫使气泡爆裂, 将气体释放出来。

(3) 回灌管网材质: 回灌地热流体温度通常较低, 应该首选非金属管材(玻璃钢管材或 PP-R 管材)用于回灌输水管道, 可以有效防止了腐蚀和各种堵塞。

(4) 井口装置: 回灌井井口要注意井口密闭性、水平、牢固等方面。当密封不严时, 井口瞬时产生负压吸入空气, 大量氧气驻留在井口至动静水位的井筒空间内, 发生氧化反应, 加速腐蚀, 溶解氧(O_2)则加速与水接触表面的腐蚀。

(5) 动态监测设备: 为了监测回灌条件下热储层压力场、温度场和水化学场的变化趋势, 保证地热资源的可持续利用。

4 工程示范

在以上研究成果的基础上, 开展了滨海新区的回灌技术应用的示范工程, 在滨海新区范围内选取三眼地热井, DL-25H、TGR-26D 和 TGR-28D, 这3眼地热井井身结构、地热井施工、地面回灌系统建设、回灌系统运行均采用本项目中的集成技术。根据不同区域热储参数的差异, 分别选择一开大口径填砾成井和二开射孔成井工艺进行地热回灌井的施工, 采用回灌集成技术, DL-25H 回灌井回灌量达到 $101.9 \text{ m}^3/\text{h}$, TGR-26D 井的得最大回灌量为 $114.5 \text{ m}^3/\text{h}$, TGR-28D 井最大回灌量为 $122.5 \text{ m}^3/\text{h}$, 取得了馆陶组热储层回灌的新突破, 可实现地热资源的循环利用^[1,16-17]。

4.1 DL-25H 回灌示范工程

DL-25H 回灌井于 2009 年 12 月 25 日开钻完钻深度 1362.39 m, 与 DL-25B (原有馆陶组地热回灌井) 相距 702.59 m。原回灌井采用滤水管完井工艺

成井, 热储层由于回灌堵塞导致回灌衰减。在分析本地区地质条件的基础上, 为避免回灌堵塞导致的回灌量衰减, 增大回灌量。根据本区馆陶组热储层埋藏浅、岩性结构松散, 胶结性较差, 渗透率高的地质特点, DL-25H 回灌井采用了大口径填砾的成井工艺, 通过增大过水断面面积, 提高回灌能力, 确保回灌可持续进行。通过与 DL-25B 回灌井的回灌结果对比分析, 验证本次的回灌效果。

4.1.1 井身结构及钻井液控制

(1) 井身结构

结合地层结构等因素, 为最大程度提高回灌能力, 井身结构确定为一开大口径填砾成井工艺。先用 $\phi 311.15$ mm 三牙轮钻头钻至 1362.39 m, 再用 $\phi 660$ mm 钻头扩孔至 346.18 m, 下部用 $\phi 460$ mm 钻头扩孔至 1362.39 m, 完井后将 $\phi 339.7$ mm 泵室管、 $\phi 219.1$ mm 井管、 $\phi 219.1$ mm 过滤器及 $\phi 219.1$ mm 沉淀管一同下入目的井深, 在泵室管和井管之间加装规格为 $\phi 339.7$ mm \times $\phi 219.1$ mm 的变径接头^[1]。井身结构示意图见图 3。

(2) 钻井液控制和完井

为使含水层畅通, 提高回灌效果, 采用下管前“破壁换浆”与下管后填砾前“正循环管外循环冲洗”的方法, 彻底清除井内泥浆, 破坏井壁泥饼, 使过滤器周围形成一个良好的人工过滤层。洗井采用空压机及水泥泵气水混合联合洗井, 洗井至水清砂净。

完井后降压试验确定出水量 107 m³/h, 稳定动水位 137.9 m, 水温 76 $^{\circ}$ C, 水化学类型为 Cl·

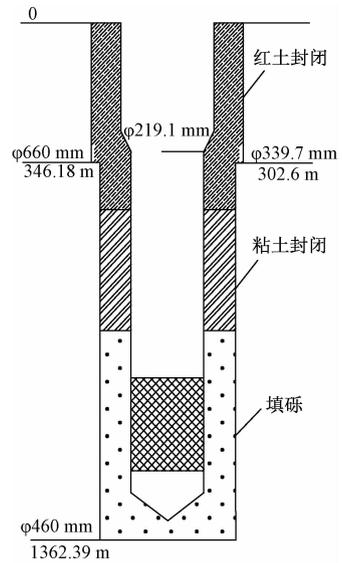


图3 DL-25H 地热回灌井井身结构示意图
Fig. 3 Diagram of the well bore construction of DL-25H geothermal reinjection well

HCO₃-Na 型, 矿化度 1726.2 mg/L, pH 值 7.57^[1,13]。

4.1.2 地面回灌系统建设

该示范工程建设过程中, 在原有技术分析基础上, 结合具体实例, 在水质化验的基础上对 DL-25H 井回灌地面系统进行设计安装。除了在粗过滤、精过滤、排气罐、加压等装置等方面进行施工安装, 还对回灌管路和回灌管材质等方面进行改进提高。

(1) 回灌系统流程

回灌系统建设包括过滤装置、排气装置、回灌管、水位测管及回灌管路等方面, 完成后回灌系统工艺流程如图 4 所示。

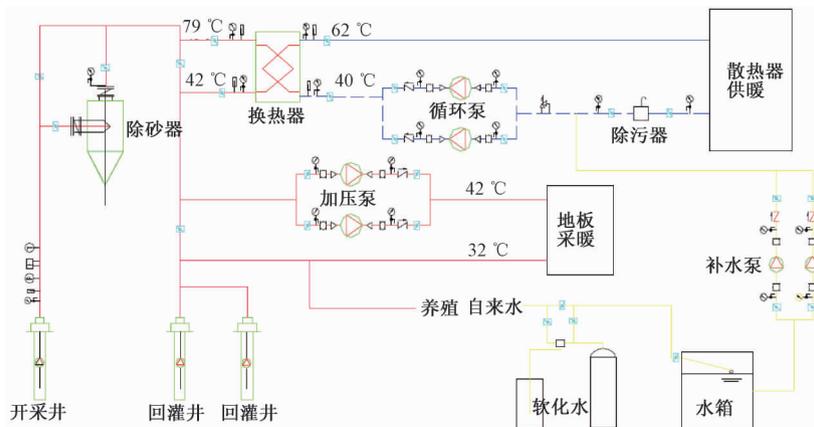


图4 DL-25H 回灌系统工艺流程图

Fig. 4 The technological process of DL-25H Well reinjection systems

(2) 回灌系统安装

根据水质结果, 回灌处理系统安装了旋流除砂器、粗过滤器、精过滤器和排气灌。

① 除砂器: 针对回灌流体含砂的特点, 地面系统中增加了除砂装置—旋流式除砂器。

② 粗过滤器: 粗过滤系统由四个过滤器并联组成, 单体罐过滤量为 20 t/h, 回灌并联设计过滤量可达 80 t/h。

③ 精过滤器: 精过滤系统也是由四个过滤器并联组成, 单体罐过滤量为 20 t/h, 回灌并联可达 80 t/h。由于过滤精度较高, 不仅能有效地防止井内回灌物理堵塞, 还可以拦截或吸附微生物和细菌。

④ 排气罐: 当地热尾水流经管道并经过两级过滤后, 流速、压力、水化学特性等均会发生变化, 特别是流速和压力的变化, 使部分气体施放出来。

⑤ 回灌管的选择: 为避免物理堵塞, 对回灌

管和水位测管进行改进, 采用 316 不锈钢材质管材, 抗氯化、抗侵蚀性能有较大程度提高。为避免回灌管路腐蚀结垢和保证回灌水质, 回灌输水管路全部采用 PPR 管, 该管道除具有耐热、耐压性外, 还具有耐腐蚀、不结垢等特点。

4.1.3 回灌试验

回灌试验均采用自然回灌方式, 回灌量由小到大逐级增加。在回灌实验前, 按照回灌运行方案, 提前做好回灌系统的管路、设备的清洗机连接工作等, 通过回灌试验确定回灌井的回灌能力。通过试验数据的采集, 绘制了 DL-25H 回灌井水位与水温、流量关系曲线如图 5 所示, 并对该井试验数据进行了分析, 确定该井的最大回灌能力为 101.9 m³/h, 原 DL-25B 地热回灌井的回灌能力仅有 25 m³/h, 认为现有的成井工艺和地面标准工艺流程, 对于提高地热回灌井的回灌量具有非常重要的作用。

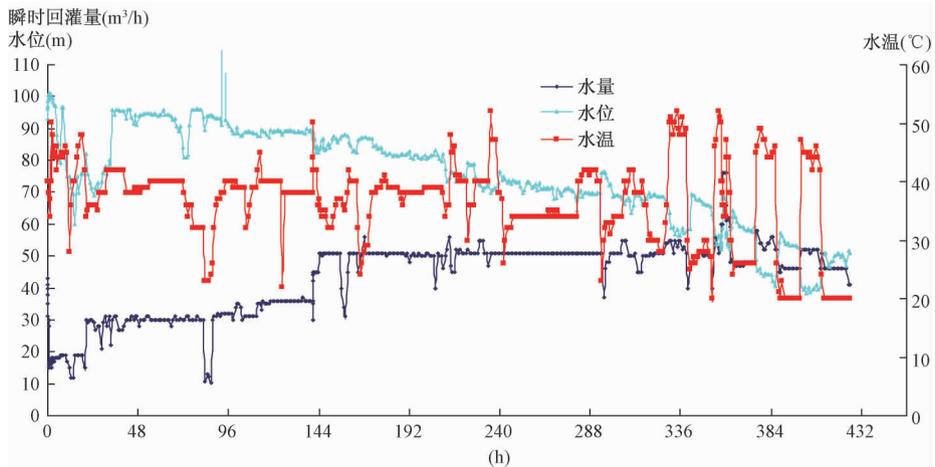


图 5 DL-25H 回灌井水位与水温、流量关系曲线

Fig. 5 The relation curve between water temperature, reinjection quantity and water level respectively in DL-25H well

4.2 TGR-26D 和 TGR-28 回灌示范工程

TGR-26D 和 TGR-28 分别位于滨海新区塘沽的渤海石油滨海新村和第五中心医院, 这 2 眼地热井进行了钻井工艺和地面回灌工艺的设计, 通过实践证明, 回灌量分别达到了 114.5 m³/h 和 122.5 m³/h, 与以往本地区回灌效果不佳的情况形成鲜明对比, 实现了滨海新区馆陶组热储回灌的新突破。

4.2.1 回灌井成井工艺

依据回灌技术分析结果, 该区域馆陶组回灌

井具备射孔成井条件, 因此, 在 TGR-26D 回灌井和 TGR-28 回灌井施工中, 设计采用了二开射孔成井工艺, 结合地层结构等因素, 井身结构确定为二开成井。完成钻孔施工后, 通过测井曲线解释成果分析热储层的渗透率、孔隙度及含水层的厚度, 同时应选择胶结性较好的地层进行, 在此基础上确定热储射孔层段。这 2 眼井的井身结构示意图见图 6 和图 7。

4.2.2 回灌系统建设

两个回灌系统的地面工艺设计与 DL-25H 的系

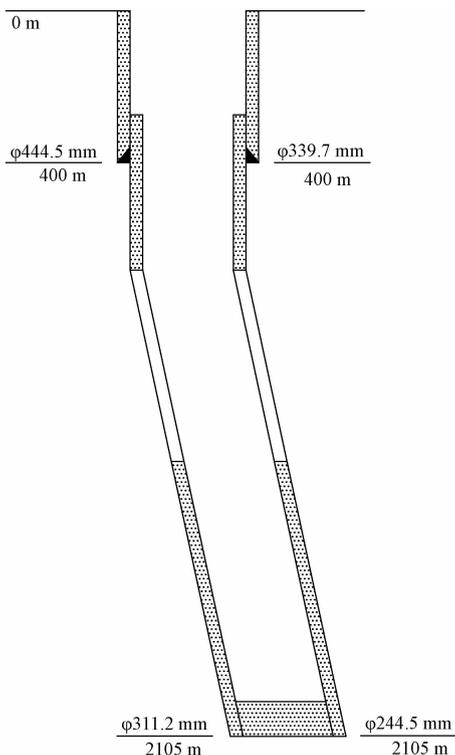


图 6 TGR-26D 井身结构示意图

Fig. 6 Diagram of TGR-26D well bore construction

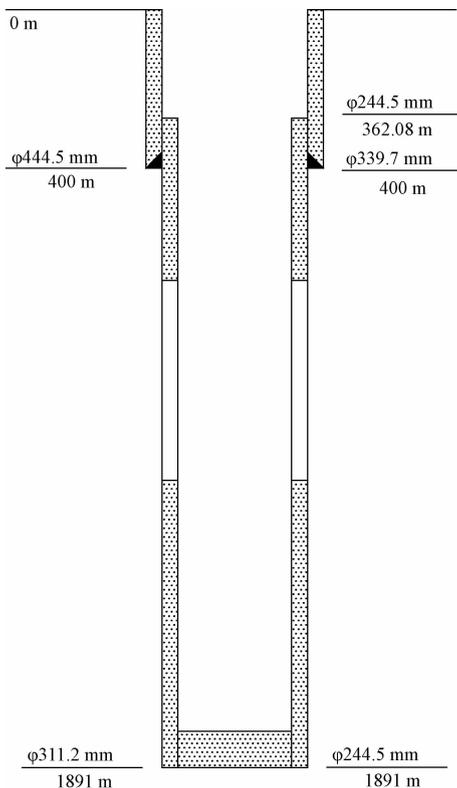


图 7 TGR-28 井身结构示意图

Fig. 7 Diagram of TGR-28 well bore construction

统类似，地面安装有粗过滤、精过滤、排气罐、加压等装置等。供热利用后的尾水经间接换热后的地热尾水进入回灌站房后，先经过加压泵进行加压，再进行粗过滤、精过滤，粗过滤器的过滤精度达到 $50\ \mu\text{m}$ ，精过滤器的过滤精度达到 $3\ \mu\text{m}$ ，过滤后的尾水进入排气装置，排除由于压力变化而从地热流体中析出的气体，最后从井口装置进入回灌井。

4.2.3 回灌试验

为了验证 TGR-26D 和 TGR-282 个回灌系统的

实际回灌效果，分别对 2 个系统进行了回灌试验，每个系统进行了 5 组回灌试验，回灌量分别为 $40\ \text{m}^3/\text{h}$ ， $60\ \text{m}^3/\text{h}$ ， $80\ \text{m}^3/\text{h}$ ， $100\ \text{m}^3/\text{h}$ ， $120\ \text{m}^3/\text{h}$ ，TGR-26D 回灌累计时间为 498 h，TGR-28 回灌累计时间为 305h，累计回灌 $27047\ \text{m}^3$ ，回灌试验曲线见图 8 和图 9。

根据试验数据分，TGR-26D 井的最大回灌量为 $114.5\ \text{m}^3/\text{h}$ ，TGR-28 的最大回灌量为 $122.5\ \text{m}^3/\text{h}$ 。

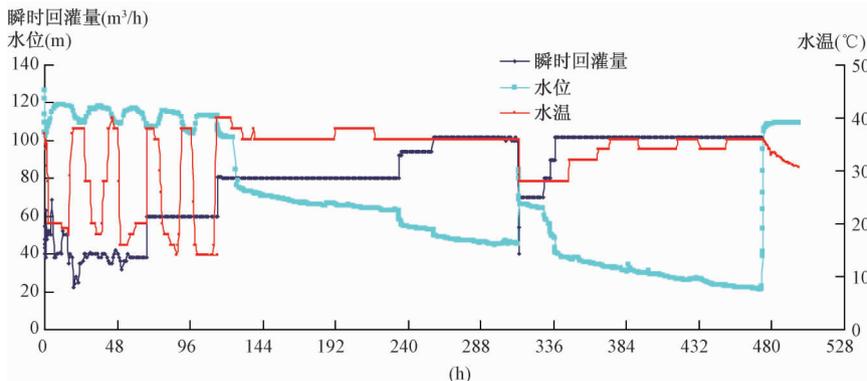


图 8 TGR-26D 回灌井水位与水温、流量关系曲线

Fig. 8 The relation curves between water temperature, reinjection quantity and water level respectively in TGR-26D well

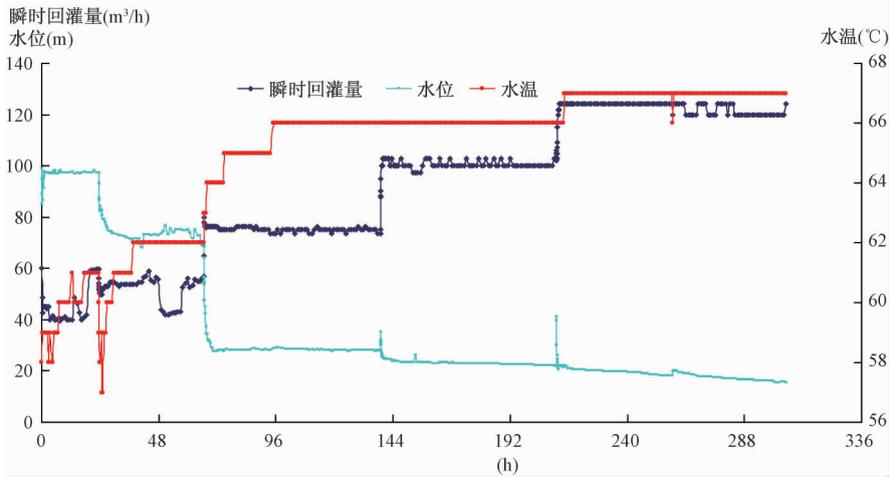


图 9 TGR-28 回灌井水位与水温、流量关系曲线

Fig. 9 The relation curves between water temperature, reinjection quantity and water level respectively in TGR-28 well

5 结论和建议

(1) 可持续回灌是保证地热资源循环利用的关键, 可通过以下方式解决馆陶热储的回灌问题:

- ① 回灌堵塞的主要原因为回灌流体中的细小的固体悬浮物, 化学反应以及气体。在孔隙热储层中, 回灌堵塞的主要原因是物理堵塞。合理的地面回灌系统和工艺流程能避免回灌过程中的物理和化学堵塞, 减少回灌量衰减, 保持可持续回灌。
- ② 成井工艺为解决回灌的关键, 在滨海新区馆陶组热储地热井的成井方式为: 一开过滤器成井工艺、二过滤器成井工艺和二开射孔成井工艺。

(2) 建立滨海新区馆陶组热储循环利用的示范工程: 成功的成井工艺和标准的地面回灌系统 (除砂器、粗过滤器、精过滤、排气罐以及回灌管路的材质), 在示范工程开展地热资源循环利用的试验, 回灌量能达到 100 ~ 123 m³/h, 这也是在天津滨海新区孔隙型热储回灌研究的突破性进展。

参 考 文 献

[1] 马忠平, 王艳宏, 沈健等. 天津馆陶组地热回灌井钻井和射孔工艺探讨 [J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 2014, 41 (8): 36 ~ 39.
 MA Zhong-ping, WANG Yan-hong, SHEN Jian, et al. Discussion on Drilling and Perforating Technologies for Geothermal Recirculation Well in Guantao Formation of Tianjin [J]. Exporation Engineering (Rock & soil Drilling and Tunneling), 2014, 41 (8): 36 ~ 39.

[2] 王连成. 天津市新近系馆陶组地热流体回灌研究 [D]. 中

国地质大学 (北京). 2014.
 WANG Lian-cheng. A Study of Geothermal Reinjection in Guantao Reservoir in Tianjin [D]. China University of Geosciences, Beijing. 2014.

[3] 于彦. 天津市滨海新区新近系馆陶组热储地热资源评价 [D]. 中国地质大学 (北京). 2014.
 YU Yan. Evaluation of geothermal resources in the Neogene geothermal reservoir in the New Coastal Area of Tianjin [D]. China University of Geosciences, Beijing. 2014.

[4] 江国胜. 天津市奥陶系热储层发育主控因素研究 [D]. 中国地质大学 (北京). 2014.
 JIANG Guo-sheng. The research on the main factors of controlling the development of Ordovician geothermal reservoirs in Tianjin [D]. China University of Geosciences, Beijing. 2014.

[5] 武晓峰, 唐杰. 地下水人工回灌与再利用 [J]. 工程勘察, 1998 (4): 37 ~ 42.
 WU Xiao-feng, TANG Jia. Artificial Recharge and Reusing of Ground Water [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1998 (4): 37 ~ 42.

[6] 贾旭兵. 关中盆地地下热水的可更新性与回灌问题研究 [D]. 长安大学. 2009.
 JIA Xu-bing. Study of renewal and the recharge question of geothermal waters in the Guanzhong Basin [D]. Chang'an University. 2009.

[7] 韩静. Q235 和管道钢在天津地热水中的腐蚀性能研究 [D]. 天津大学. 2010.
 HAN Jing. Study on corrosion resistance of Q235 and GB3091 steel in Tianjin geothermal water [D]. Tianjin University. 2010.

[8] 柴蕊. 天津市周良庄地热田地下热水的水化学及钙华研究 [D]. 中国地质大学 (北京). 2006.
 CHAI Rui. A study of hydrochemistry and tufa in thermal groundwater in the Zhouliangzhuang geothermal filed, Tianjin [D]. China University of Geosciences, Beijing. 2006.

[9] 高宝珠, 曾梅香. 地热对井系统中回灌井堵塞原因浅析及预

- 防措施 [J]. 水文地质工程地质, 2007, 34 (2): 75 ~ 80.
- GAO Bao-zhu, ZENG Mei-xiang. Cause analysis and preventive measures of the plugging in the geothermal well system [J]. hydrogeology and Engineering Geology, 2007, 34 (2): 75 ~ 80 (in Chinese with English abstract).
- [10] 林黎, 王连成, 赵苏民, 等. 天津地区孔隙型热储层地热水体回灌影响因素探讨 [J]. 水文地质工程地质, 2007, 35 (6): 125 ~ 128.
- LIN Li, WANG Lian-cheng, ZHAO Su-min, et al. Discussion on Influencing Factors of geothermal fluid recirculation in pore type thermal reservoirs in Tianjin area [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2007, 34 (2): 75 ~ 80 (in Chinese with English abstract).
- [11] 刘雪玲, 朱家玲. 新近系砂岩地热回灌堵塞问题的探讨 [J]. 水文地质工程地质, 2009, 5: 138 ~ 141.
- LIU Xue-ling, ZHU Jia-ling. Discussion on the clogging of the geothermal water in the recent series of sandstone [J]. hydrogeology and Engineering Geology, 2007, 34 (2): 75 ~ 80 (in Chinese with English abstract).
- [12] 曾梅香, 李会娟, 石建军, 等. 新近系热储层回灌井钻探工艺探索 [J]. 地质与勘探, 2007, 43 (2): 89 ~ 92.
- ZENG Mei-xiang, LI Hui-juan, SHI Jian-jun, et al. Exploration on the drilling technology of the new thermal reservoir in the back filling well [J]. Geology and Prospecting, 2007, 43 (2): 89 ~ 92 (in Chinese with English abstract).
- [13] 沈健, 王连成, 赵艳婷. 砂岩孔隙型回灌井成井工艺探析——以天津市滨海新区馆陶组热储为例 [J]. 中国房地产, 2016, 74 ~ 79.
- SHEN Jian, WANG Lian-cheng, ZHAO Yan-ting. Explore and Analyse of Sandstone Pore Type Reinjection Well's Drilling Technology-taking Tianjin Binhai New Area's Geothermal Reservoir of Guantao Formation for example [J]. China Real Estate, 2016, 74 ~ 79.
- [14] 钱洪强. 天津市东丽区寒武系热储层成井可行性及工艺研究 [D]. 中国地质大学 (北京), 2014.
- QIAN Hong-qiang. Study of the feasibility of geothermal well drilling technology in the Cambrian in the Dongli District of Tianjin [D]. China University of Geosciences, Beijing, 2014.
- [15] 甄垣津, 曾小强, 沈健, 等. 天津市地热供热单井回灌整合方法探析——以河西区某井为例 [J]. 天津科技, 2016, 43 (4): 56 ~ 59.
- ZHEN Yuan-jin, ZENG Xiao-qiang, SHEN Jian, et al. Analysis on the Integration Method of Single Well and Recharge of Geothermal Heat Supply in Tianjin: A Case Study of a Well in Hexi District [J]. Tianjin Science & Technology, 2016, 43 (4): 56 ~ 59.
- [16] 刘时彬. 地热资源及其开发利用和保护 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 237 ~ 242.
- LIU Shi-bin. The development, utilization and protection of geothermal resources [M]. Beijing: The Chemical Industry Publishing House, 2004: 237 ~ 242 (in Chinese with English abstract).
- [17] 朱家玲. 地热能开发与应用技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 99 ~ 111.
- ZHU Jia-ling, et al. The technology of development and utilization of geothermal energy [M]. Beijing: The Chemical Industry Publishing House, 2006: 99 ~ 111 (in Chinese with English abstract).

A STUDY ON THE RECYCLING UTILIZATION OF GEOTHERMAL RESOURCES IN BINHAI NEW AREA, TIANJIN ——STUDY AND DEMONSTRATION OF THERMAL STORAGE AND REINJECTION TECHNOLOGY OF GUANTAO RESERVOIR

RUAN Chuan-xia^{1,2}, FENG Shu-you², SHEN Jian², LIN Li¹, JIANG Guo-sheng²

(1. School of water resources and environment, China University of Geosciences, Beijing, 100083;

2. Tianjin Geothermal Exploration and Development Designing Institute, Tianjin, 300250)

Abstract: Sustainable reinjection is the basis of geothermal resource recycling. The reason of reinjection decrease is summarized through the analysis of reservoir sensitivity, blocking factors, well completion structure and ground installation, in which it is believed that physical blocking is the main cause of reinjection blocking. The well completion structure is the key to keep sustainable reinjection, while standard ground equipment can help avoiding blocking caused by physical and chemical reasons. In this article, successful well completion construction and standard ground installation are applied to the demonstration project construction of geothermal resources recycling of thermal storage and reinjection of Guantao Reservoir, and the reinjection rate is 100 ~ 123 m³/h, which is a breakthrough of thermal storage and reinjection of Guantao Reservoir and guarantees the recycling of geothermal resources of Guantao Reservoir in Binhai New Area, Tianjin.

Key words: Tianjin; Binhai New Area; Guantao Reservoir; reinjection research; demonstration project