

天津地区新近系地热回灌井 不同完井工艺应用效果对比

王光辉¹, 赵娜², 赵苏民², 高亮², 李嫒嫒²

(1. 天津市国土资源和房屋管理局地质事务中心, 天津 300042)

(2. 天津地热勘查开发设计院, 天津 300250)

摘要: 针对新近系地层国内外普遍存在回灌效率低的问题, 通过对滤水管和射孔两种不同完井工艺对回灌效果的影响入手, 开展两种完井工艺地热回灌的试验研究。研究表明, 在地层沉积环境和地层参数相同的情况下, 射孔完井工艺回灌量大, 回灌持续性好, 不易产生堵塞, 比滤水管完井工艺效果显著, 对提高新近系地热回灌井的回灌效率具有明显的促进作用。

关键词: 新近系; 地热; 回灌; 射孔; 滤水管; 完井工艺; 天津地区

中图分类号: P634.5; P641.5 **文献标识码:** A

0 引言

天津地区地热资源主要分布在宝坻断裂以南的广大平原区(图1), 按开采热储可分为孔隙型和基岩裂隙型两种。目前, 基岩裂隙型热储的回灌率为100%, 而孔隙型热储回灌量小且衰减严重, 孔隙型热储回灌也是世界性难点^[1-2], 极大地制约了新近系热储的开发。天津地区热储通过多年的回灌研究, 认识到完井工艺影响回灌井的回灌效果。本文旨在对比滤水管和射孔两种完井工艺在新近系馆陶组孔隙型地热回灌井的应用效果。

1 矿区地质特征

天津地区馆陶组厚200~600 m, 一般分为馆Ⅰ砂岩段、馆Ⅱ泥岩段和馆Ⅲ砂岩段3层。岩性以含砾砂岩为主, 间夹厚度不等的泥岩、粉砂质泥岩, 底部常见暗色矿物较多的砂砾岩和砾岩, 富水段岩性



图1 天津地区构造分区图

Fig. 1 Tectonic division map of Tianjin area

1. 断裂; 2. 古近系缺失线

以中粗砂岩为主, 孔隙率20%~33%^[3-4]。馆陶组在宝坻断裂以南除在沧县隆起的双窑凸起、小韩庄

收稿日期: 2013-05-09; 改回日期: 2013-06-18; 责任编辑: 赵庆

基金项目: 国家十一五“863”课题“新近系孔隙型地热回灌配套钻井技术与地面设备研究”(编号:2006AA05Z325)资助。

作者简介: 王光辉(1981-), 男, 工程师, 从事水工环和地热地质工作。通信地址: 天津市和平区曲阜道, 天津市国土资源和房屋管理局地质事务中心; 邮政编码: 300042。

凸起、潘庄凸起、王草庄凸起等构造的高部位缺失外,均有分布。其沉积环境为准平原化过程中的低弯河和辫状河。

冀中坳陷的武清城区和黄骅坳陷的滨海新区为天津地区热储的集中开采区,主要热储层为馆陶组,其底部为厚 30~60 m 的底砾岩(砾径多 >5 mm,平均孔隙率 20%),在塘沽区最为发育,厚度可达 80 m 以上。馆陶组特征:出水温度 45~86 °C,单井涌水量一般 40~120 m³/h,矿化度一般 1~2 g/L(由北东向南西方向逐渐增加),水质以 Cl·HCO₃-Na 型为主,pH=7.32~8.82。

2 滤水管完井工艺应用情况

馆陶组地热井以往一般采用滤水管完井工艺,其主要作用是滤水挡砂、支撑井壁。实际生产中,孔隙型地层地热井主要根据砂岩的成岩性、胶结度、颗粒大小、渗透性等因素选择滤水管^[5]。滤水管的制作方式主要有套管表面打眼和滤水管外缠丝(单层或双层)两种。套管表面打眼的滤水管多用于砂岩致密胶结且长期开采不会发生坍塌的地层,外缠丝的滤水管多用于胶结条件不好且容易出砂的粉细砂类地层。

20 世纪 80 年代,地热研究单位在塘沽区开展了馆陶组回灌试验及回灌理论研究。回灌试验完井工艺采用单层滤水管,试验持续时间 263 h,最大灌量 86 m³/h,最小灌量 6 m³/h。试验过程中出现回灌量严重衰减现象,推测其主因为滤水管及其周围热储层的物理和化学堵塞。

2002 年,武清区建成 YR9 馆陶组地热回灌井。为避免悬浮颗粒对回灌通道的堵塞,YR9 地热井使用双层笼式填砾滤水管(主要参数:内缠丝间距 0.7 mm,外缠丝间距 0.5 mm,石英砂砾径 0.8~1.2 mm,厚度 10 mm),完井后测得该井出水量为 15~20 m³/h。由于水量小,又进行了射孔,出水量最终达到 93.8 m³/h。2005 年 1—3 月,对 YR9 地热井进行了供暖期生产性回灌试验,回灌水温 40~52 °C,回灌量从 49 m³/h 降至 20 m³/h,衰减明显,加压回灌效果也不理想,从而宣告试验失败。

馆陶组热储层地热回灌井采用单层滤水管和双层笼式填砾滤水管两种完井工艺的试验结果表明,在回灌水处理工艺完善,且无物理及气体堵塞的情况下,回灌量衰减明显,回灌效果均未达到孔隙型地

热回灌的理想目标。

3 射孔完井工艺回灌效果

2008 年,地热研究单位总结了以往馆陶组地热的回灌试验,确定以射孔方式作为馆陶组地热回灌井完井工艺。该工艺在废弃石油井的实验初步取得良好效果后,于 2011 年开始被应用于地热回灌井的施工中。

3.1 射孔完井工艺原理

射孔是指将射孔专用设备置入井下预定深度,射穿套管及套管水泥环直至地层,沟通井筒与含水层间流体通道的工艺技术。射孔器中的射孔弹引爆后,爆炸产生能量束击穿套管、击垮地层,当能量束打到地层上,迅速在岩石的接触面上形成高温、高压、高应变率区域,使岩石迅速崩解、破碎,后续射流又将这些破碎物挤入地层,从而形成孔道^[6]。根据射孔弹的结构、地层岩石性质,射孔弹穿出孔道长度一般为几厘米至几十厘米,孔道直径一般为几毫米至十几毫米。射孔工艺在油气开发中已是比较成熟的技术^[7-8],该技术近年来被试验性应用于孔隙型地热回灌井完井工艺中,效果较好。

在地热井施工中常采用电缆输送聚能式射孔技术。该工艺的优点是:①射孔枪和射孔弹的种类多,能使用大直径射孔枪和大药量射孔弹,满足高孔密、深穿透、大孔径的射孔要求;②射孔定位快速、准确;③电雷管引爆可靠性强;④作业简便快捷,能连续进行多层射孔。在地热回灌井施工中,通常选用直径 89 mm 射孔弹,直径 127 mm 的射孔器,射孔密度 15~20 孔/m,射孔螺旋式排列,一般射孔深度可达 50 cm 以上地层。

3.2 塘沽区射孔工艺回灌研究

为研究不同完井工艺对馆陶组的回灌效果,在塘沽地区选取了 3 个地热回灌井 TGR-28, TGR-29D, TGR-30,采用不同的完井工艺进行对比试验。

(1)地热井概况。TGR-28, TGR-29D, TGR-30 等 3 个地热回灌井相距较近(图 2),回灌井出水量 100~118 m³/h,水温均为 63 °C;TGR-28 与 TGR-30 为直井, TGR-29D 为定向井。根据测井解释成果,这 3 个回灌井各项参数见表 1^[9]。

(2)地热井完井工艺。地热回灌井 TGR-28, TGR-29D 均采用电缆输送聚能式射孔工艺成井,射孔器直径 102 mm,射孔弹直径 12.7 mm,射孔密

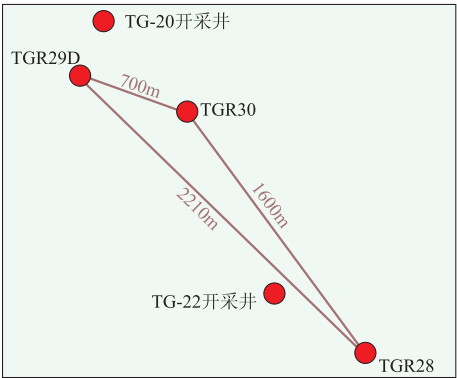


图 2 地热回灌井分布图

Fig. 2 Distribution of geothermal well for reinjection

度 15 孔/m。TGR-28 射孔长度 87 m,TGR-29D 射孔长度 92.3 m。

TGR-30 采用滤水管(梯形碳丝镀锌防腐筛网)成井,滤水管直径 177.8 mm,孔径 14 mm,孔隙率 12%,缠丝间距 0.5~0.7 mm,滤水管长度 100.16 m。

(3)回灌试验。回灌井建成后,回灌试验时,TGR-28 地热井在非采暖期进行,TGR-29D,TGR-30 在采暖期进行,均采用自然回灌的方式。回灌试验数据见表 2,历时曲线见图 3,图 4 和图 5。

表 1 地热回灌井参数

Table 1 Parameters of reinjection of geothermal well

项目	TGR-28	TGR-29D	TGR-30
成井日期	2011-02	2011-07	2012-04
井深/m	1891	1995.11	1930
孔隙度/%	26.6~34.77	26.14~32.24	24.66~28.15
泥质含量/%	7.94~20.22	11.49~25.19	15.3~23.4
取水层位置/m	1646~1773	1676.2~1861.5	1668.07~1803.7
取水层厚度/m	87	92.3	100.16
井身结构	二开直井	二开定向	二开直井
完井工艺	射孔	射孔	滤水管
水量/(m ³ /h)	118	106	100
水温/(℃)	63	63	63

表 2 回灌试验数据

Table 2 Reinjection test data

项目	TGR-28	TGR-29D	TGR-30
回灌日期	2011-06	2012-11	2012-11
回灌温度/(℃)	58~67	32~40	36~38
持续时间/h	306	193	233
静水位埋深/m	103.18	98.96	102.36
最大稳定灌量/(m ³ /h)	120	62	22
稳定水位埋深/m	16	82	36
稳定时间/h	94	37	96

按照《地热地质勘查规范》要求,对 3 眼地热回

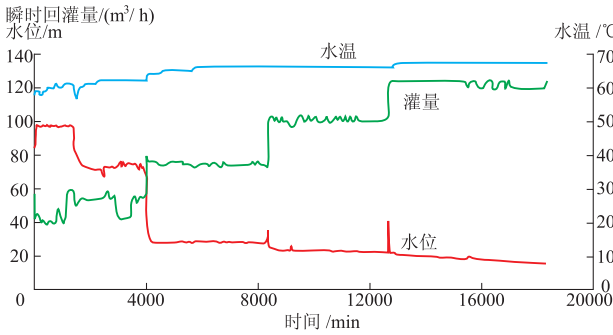


图 3 TGR-28 回灌试验历时曲线

Fig. 3 Reinjection test curve of TGR-28

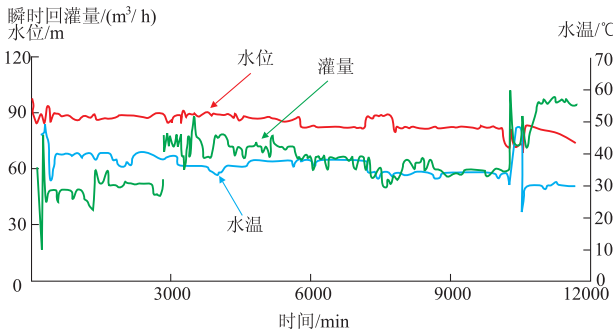


图 4 TGR-29D 回灌试验历时曲线

Fig. 4 Reinjection test curve of TGR-29D

灌井参数进行计算,得出 TGR-28 最大理论回灌量为 121 m³/h,TGR-29D 为 114 m³/h,TGR-30 为 35 m³/h。试验结果表明,在相同的地质及回灌水源条件下,塘沽地区射孔完井工艺比滤水管完井工艺的回灌效果好,为塘沽地区孔隙型地热回灌式开发提供了较好的示范作用。

3.3 武清地区射孔工艺回灌研究

滨海新区孔隙型地热回灌取得成功后,为检验射孔工艺在天津市不同地区孔隙型热储的回灌效果,选择武清区一对地热井试验射孔采灌效果。回灌井井深 1 978 m(斜深),目的层为馆陶组,测井成果显示水层共 7 层,厚 80.7 m,孔隙度 29.42%~36.70%,渗透率 $554.44 \times 10^{-3} \sim 1\,714.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,射孔总长度 81 m。于 2012 年 12 月 10 日进行了回灌试验^[10],回灌方式为自然回灌,回灌温度 35℃,最大稳定回灌量 120 m³/h,稳定时间 36 h,稳定动水位埋深 74~75 m(图 6)。试验结束后,在供暖季进行了实际生产,回灌量 128 m³/h,动水位 70 m 左右,未出现回灌量衰减的现象。由此证明在武清地区开凿射孔工艺的地热回灌井可实现该地区地热资源的采灌平衡。

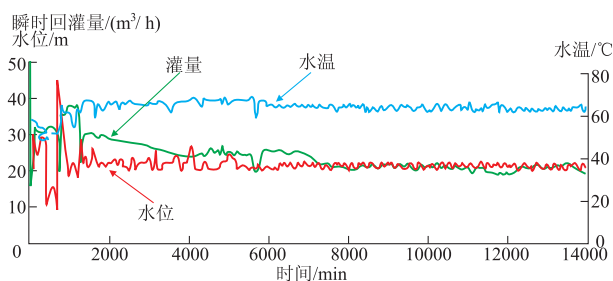


图5 TGR-30 回灌试验历时曲线

Fig. 5 Reinjection test curve of TGR-30

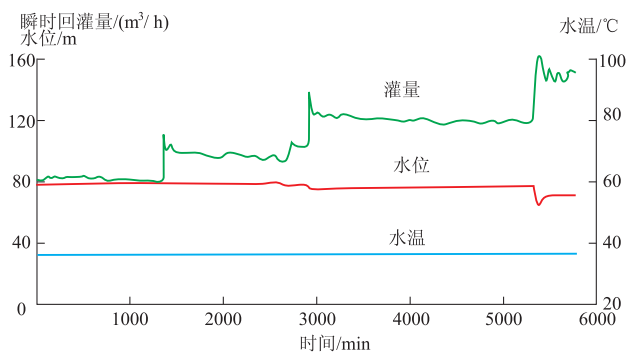


图6 武清地区地热回灌井回灌试验历时曲线

Fig. 6 Reinjection test curve of Wuqing geothermal well

4 原因分析

通过分析射孔完井工艺地热回灌试验效果,射孔完井工艺可实现孔隙型地热 100% 采灌,更适用于天津地区馆陶组热储回灌。笔者认为,影响孔隙型地热回灌效果的原因主要是钻井过程中对地层渗透率和泄流面积。现有的地热钻井技术普遍使用黏土和添加剂配置钻井液,钻井液循环过程中因井筒内的液柱压力作用,通过孔隙渗入地层,并在井壁形成泥皮,堵塞渗流通道,影响地层孔隙度和渗透率,而现有的洗井工艺虽能将井壁表面的泥皮破坏并冲刷掉,但很难彻底清除渗入地层的泥浆。孔隙型地热井取水段一般选择渗透率比较好的几个含水层成井,而这几个含水层也是受钻井液影响最大的地方。采用滤水管完井工艺,滤水管和取水层受到钻井液的影响,造成泄流面积减小最终导致取水段的渗透率降低而影响回灌效果。

射孔完井方式时,射孔弹进入地层深度大,一般穿透钻井液影响带(图 7),保证了井筒和热储层的

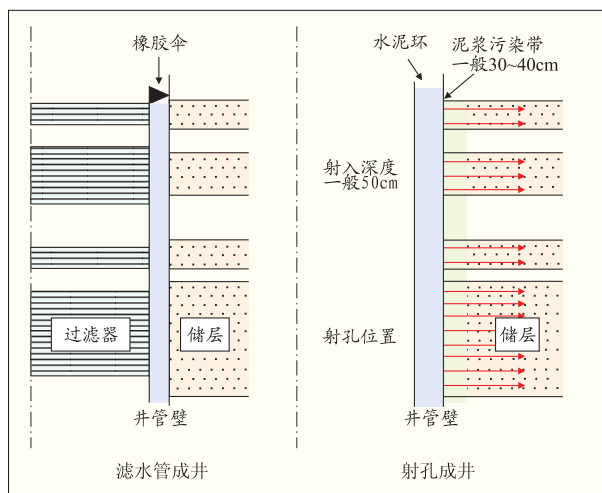


图7 滤水管及射孔成井示意图

Fig. 7 Sketch showing well completion of filter and perforation

联通性,射孔弹道内壁成为泄流断面,增加了泄流面积,起到增加地热井产能的作用,回灌水流在井筒压力作用下,可沿着孔道顺利进入热储层,回灌效果较好。

5 结语

射孔技术应用于新近系馆陶组地热完井工艺,实现地热回灌量大、回灌持续长的试验效果,对天津市新近系地热回灌的研究具有重要意义,为孔隙型地热开采提供了可靠的技术保证,对于周边省市开展同类型试验研究具有示范作用。

总结两种完井工艺回灌试验,在相同地质条件下,孔隙型地热回灌效果受完井工艺对热储层渗透率的影响,鉴于此,笔者认为,无论是射孔完井工艺还是滤水管完井工艺,只要解决了回灌井完井过程对热储层的影响,应该都可以实现地热开发利用的采灌目标,这将是天津市地热回灌研究的主要方向。

参考文献:

- [1] 刘久荣. 地热回灌的发展现状[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(3): 100-104.
- [2] Gudni Axelsson. Importance of geothermal reinjection. [C]// Fridleifsson I B, Holm D H, Wang K. Workshop for Decision Makers on Direct Heating Use of Geothermal Resources in Asia, Tianjin, China. UNU-GTP, TBLRREM and TBGMED, 169-183.
- [3] 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): 88-92.
- [4] 林建旺, 赵苏民. 天津地区馆陶组热储回灌量衰减原因探讨[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(5): 133-136.
- [5] 朱家玲, 林黎, 程万庆, 等. 新近系孔隙型地热回灌配套钻井技术与地面设备研究及应用[R]. 天津: 天津地热勘查开发设计院, 2010.
- [6] 李永壮, 苟红彬, 贾兰凤. 射孔技术在地热资源开发中的应用[J]. 工程勘察, 2002(3): 26-28.
- [7] 尹建, 郭建春, 曾凡辉. 低渗透薄互层压裂技术研究及应用[J]. 天然气与石油, 2012, 30(6): 52-56.
- [8] 薛世峰, 王斐斐, 王海静. 射孔井产率比及其影响因素数值分析[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(2): 102-105, 118.
- [9] 赵娜, 王连成, 高新智, 等. 天津市塘沽区新近系馆陶组地热资源保护性开发改造工程[R]. 天津: 天津地热勘查开发设计院, 2012.
- [10] 袁小飞, 卢宝, 邴国林, 等. 天和林溪小区地热对井勘探报告[R]. 天津: 天津地热勘查开发设计院, 2012.

Reinjection effect study of different geothermal well completion in Neogene System

WANG Guanghui¹, ZHAO Na², ZHAO Sumin², GAO Liang², LI Yuanyuan²

(1. Tianjin Bureau of Land, Resources and Real Estate Management, Center of Geology, Tianjin 300042, China;

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

Abstract: Based on the low geothermal reinjection efficiency in Neogene System all over the world, The article describes the two successful geothermal reinjection example in Neogene sandstone aquifer in Huan-ghua depression and Jizhong depression. Two well completion, i. e. the filter and perforation are applied in the two projects. Under similar sedimentation environment and parameter of the strata the perforation completion is more effective than the filter completion in larger reinjection volume and consistent reinjection without blocking.

Key Words: neogene system; geothermal; reinjection; perforation; filter; well completion; Tianjin