



东营市河口区砂岩热储回灌试验研究

宋新强¹, 高延华², 谢发菊¹

(1. 东营市自然资源和规划局河口分局, 山东 东营 257200; 2. 山东省地矿工程集团有限公司, 山东 济南 250000)

摘要: 地热是一种清洁能源, 可用于居民供暖、生活洗浴、温泉理疗、温池游泳、温室花卉和养殖。大力开发地热资源, 对缓解能源紧张, 减少环境污染, 促进经济可持续发展具有重要意义。尾水回灌是砂岩热储开发利用面临的主要难题, 尾水的大量外排会污染周边地表水及土壤, 不利于地热资源的可持续利用, 文中以东营市河口区为例, 对回灌试验进行了分析研究, 为地热资源的可持续利用提供参考。

关键词: 地热; 清洁能源; 砂岩热储; 回灌试验; 东营市河口区

中图分类号: P314 **文献标识码:** A **doi:** 10.12128/j.issn.1672-6979.2024.11.005

引文格式: 宋新强, 高延华, 谢发菊. 东营市河口区砂岩热储回灌试验研究[J]. 山东国土资源, 2024, 40(11): 33-36.
SONG Xinqiang, GAO Yanhua, XIE Faju. Study on Sandstone Thermal Storage Recharge Experiment in Hekou District in Dongying City[J]. Shandong Land and Resources, 2024, 40(11): 33-36.

0 引言

地热资源是一种清洁低碳、安全稳定、开发技术先进的非碳基能源^[1], 但地热资源的安全稳定是建立在取热不耗水或取热不取水的基础上。地热水的大规模开采外排, 会造成集中开采区水位下降和资源浪费^[2-6]。东营市河口区地热资源十分丰富, 有20余年的开采历史, 为保障地热资源的可持续开采, 2019年, 在河口区西侧开展了回灌研究工作, 取得了丰富的试验数据。

1 地质背景

东营市河口城区在构造单元划分上, 位于华北板块华北拗陷区济阳拗陷沾化潜断陷沾化潜凹陷。中生代以来, 受燕山运动和喜马拉雅运动的影响, 一直缓慢下降, 沉积了巨厚的新生代地层^[7-10]。区内热储类型为层状孔隙型热储, 属低温地热资源, 主要热储层为新近纪馆陶组^[11-15]。馆陶组地层发育较稳定, 顶板埋深1 115~1 340 m, 底板埋深1 900~1 962 m, 与下伏古近纪东营组呈不整合接触, 热储

砂层厚度为100~150 m, 分上下两段, 下段岩性以灰白色含砾粗砂岩及砾岩为主, 夹棕红色泥岩、含砾砂岩等, 砂岩分选性较好, 磨圆度中等, 呈微胶结状。上段多为紫红色泥岩、砂质泥岩或泥岩砂岩互层, 泥岩质纯、性软, 遇水膨胀, 颗粒呈次圆状、次菱形状, 分选较好, 胶结性差, 偶见灰绿色中砂岩, 成分以石英为主, 长石次之, 富含暗色矿物, 颗粒呈次圆状, 胶结性差。馆陶组平均孔隙度30%, 热储温度60~75℃, 单井涌水量大, 一般超过80 m³/h, 地热水矿化度小于10 g/L, 水化学类型为Cl-Na型。

2 回灌试验

2.1 回灌条件

地热回灌试验研究采用了该区域内一口勘探井的试验数据, 回灌井编号ZK01, 回灌井成井深度1 750 m, 采用大口径填砾工艺, 孔径450 mm, 井壁管规格为177.8 mm×8.05 mm, 滤水管总长102.6 m, 利用有效热储约103 m, 降深5.2 m时, 涌水量为100 m³/h, 回灌目的层为新近纪馆陶组, 回灌水源采用自来水。

收稿日期: 2024-05-08; 修订日期: 2024-07-23; 编辑: 曹丽丽

基金项目: 东营市自然资源和规划局, 东营市河口区城区地热地质调查与回灌试验

作者简介: 宋新强(1978—), 男, 山东东营人, 高级经济师, 主要从事工程地质勘察工作; E-mail: wangdechao666@163.com

2.2 设备组成

回灌设备有除砂器、粗(精)效过滤器、排气装置、储水袋(储备自来水、调增回灌量)、井口装置、潜水泵等(图 1)。除砂器为一级过滤装置,主要去除回灌水中的粗颗粒物。采用两台过滤器关联安装,两级过滤不仅可以去除回灌流体中的悬浮物,还可以将部分微生物滤掉,有效防止井内回灌时物理堵塞和生物堵塞。过滤器进出口两端安装有压力监测仪器,可随时监测压力变化,保证过滤效果。排气装置为放气阀,设置的主要目的是释放回灌尾水中的多余气体,避免回灌过程中产生气体堵塞。储水袋用于补充自来水,正常自来水量仅有 15 m³/h,利用储水袋不断进行储水,以便增加回灌量。

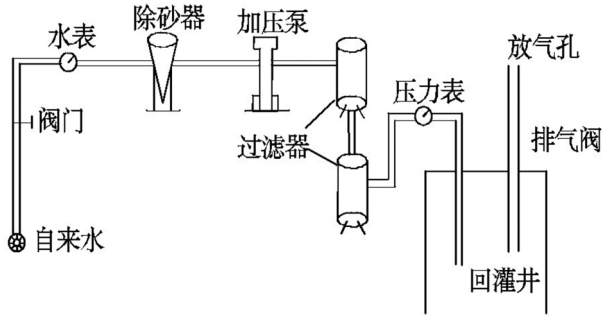


图 1 试验工艺流程示意图

2.3 回灌过程

通过人工控制阀门调整回灌量的大小,共开展 3 个阶段的回灌试验,结果显示,随着回灌量的增加,回灌井的水位升高幅度也逐渐增加。初始水位 29.7 m,当回灌量 11.1 m³/h 时,水头高度降至 32.25 m,当回灌量 19 m³/h 时,水头高度升至 24.56 m 左右,当回灌量增加至 27 m³/h 时,水头高度升至 20.5 m 左右(表 1)。

表 1 回灌试验数据一览表

井号	回灌热储层	回灌量/(m ³ /h)	回灌类型	回灌水温度/℃	水头高度/m
ZK01	新近纪馆陶组	11.1	自然回灌	18	32.25
		19.0			24.56
		27.0			20.50

3 试验结果分析

3.1 回灌量与水头变化

通过回灌过程数据可以看出,回灌量的变化引

起回灌水头的变化,基本规律是回灌水头随着回灌量的增加而升高,二者线性关系近似见公式(1):

$$\Delta H = -0.0328q^2 + 1.9675q - 20.346 \quad (1)$$

式中: ΔH —水头升降(m); q —回灌量(m³/h)。

如将回灌看作抽水的逆过程,可推算该井的最大自然回灌量约 62 m³/h。

自然回灌初期,水位波动较大,主要表现为试验开始后的前 17 h 内,水位出现下降趋势,随着回灌量增加又出现上升趋势,一是回灌之初,要打破回灌层地热流场原平衡状态,回灌水需要一定的能量积累,即回灌水进入地下流场有一定的滞后性,从而造成回灌井内水位快速上涨;二是由于回灌水温度较低,而井内“原水”温度相对较高,自来水温度较低,两者混合后有一个温度逐渐升高的过程。当回灌量达到一定程度后,回灌井水位能够保持一定的状态,此时达到了一个新的平衡。最后随着回灌量的增加,水位不断增加,基本保持正相关关系。本次回灌未采用加压的方式,但根据回灌效果推测,如果采用加压方式,最终还会达到一个理想状态,也是回灌目的层的另一个平衡状态,回灌压力继续增大,回灌量基本保持稳定。

3.2 水质、水温变化

对比回灌前后热储层水质情况,各离子浓度均有较大的变化。通过表 2 可以看出,除 HCO₃⁻、NO₃⁻ 浓度增加外,其他离子浓度均减少。Mg²⁺、HCO₃⁻、F⁻ 浓度变化小于 50%,其他离子浓度变化率均超过了 50%。回灌后、回灌前井口出水温度未发生变化^[16]。

表 2 试验前后水质变化一览表 单位:mg/L

项目	分析结果		变化率/%
	回灌前	回灌后	
K ⁺	20.37	7.37	-63.82
Na ⁺	2775.00	370.34	-86.65
Ca ²⁺	246.80	67.75	-72.55
Mg ²⁺	39.41	33.15	-15.88
NH ₄ ⁺	7.60	0.79	-89.61
Cl ⁻	4281.08	506.66	-88.17
HCO ₃ ⁻	166.66	225.30	35.19
SO ₄ ²⁻	585.17	237.58	-59.40
F ⁻	0.68	0.86	26.47
I ⁻	1.00	0.10	-90.00
Br ⁻	5.07	0.67	-86.79
NO ₃ ⁻	0.026	0.29	1015.38
H ₂ SiO ₃	43.01	17.10	-60.24

试验后取样时间距离试验结束约 20 d,水质分析结果与自来水水质更为接近,从侧面说明了热储层中地热水的运移并非理想中的那样通畅,造成这种运移缓慢的原因不排除与回灌水质和温度有一定的关系。回灌前后的出水温度是一致的,说明热储的赋存条件好,使灌入的低温水源短期内得到了热量补给。

4 回灌影响因素分析

4.1 回灌量

根据山东省内及该次回灌试验数据结果,一定时间内,回灌井筒的压力^[17-20]随回灌水量的增加逐渐增大,当回灌水量超过一定数值,回灌水量与水头之间的关系将产生变化,这种变化是复杂的,与热储特征条件、回灌水源有关,甚至关系到回灌井的成井工艺。

4.2 水化学

水化学条件的变化是复杂的,它会改变地热水的密度,单考虑温度、压力条件改变时,以 Ca^{2+} 为例,参照 CaCO_3 溶解度曲线(图 2), CaCO_3 在一定压力下,随温度升高,溶解度呈降低趋势,如果过饱和状态,也就是在压力释放条件下,还是会发生结垢反应的,这里可以按照《地热资源地质勘查规范》(GB11615—2010)中水质评价要求,参照工业上用锅垢总量来衡量二氧化硅、钙和铁等组分因温度变化是否产生结垢,回灌井水质分析成果显示,锅垢总量要远大于 500,回灌水属锅垢很多的流体。也就是说,如果采用原水回灌,回灌水在回灌扰动、管道输送及其他工艺流程能够发生结垢现象,堵塞管道。回灌量不变的情况下,单一的温度变化对水化学特征影响较小,但由于温度、压力的改变发生结垢现象,造成化学堵塞,会影响回灌效果。

4.3 回灌井结构

根据目前的钻探固井工艺,在地热开发方面,主要有 3 种井结构类型:一是变径钻探(二开、三开钻进)、胶皮伞止水、黏土封井;二是大口径钻探、滤水层充填砾料、黏土止水封井;三是变径钻探、水泥固井,射孔开孔工艺。上述 3 种地热井结构均有一定的优缺点,目前试验性及后续的生产性回灌初级阶段,适宜推广的是大口径、滤水层充填砾料、黏土止水封井的地热井结构,该井工艺相对简单、回灌层有

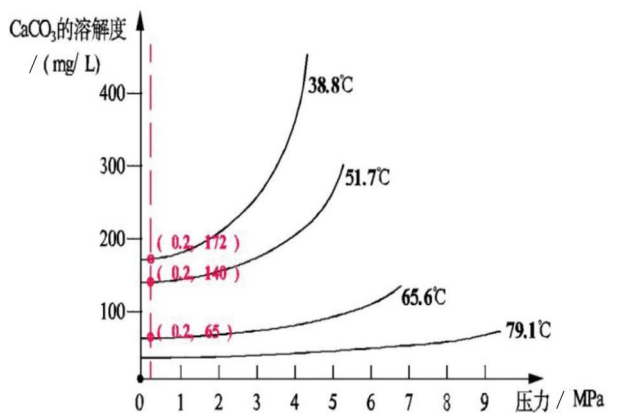


图 2 CaCO_3 溶解度曲线

较好的隔离空间,不易堵塞,回灌水不直接冲击含水层,使用寿命长,可灌采灵活转换。

4.4 回灌方式

按照回灌水的注入方式,可将回灌分为自然回灌和加压回灌,从经济角度考虑,多采用自然回灌。回灌水的入井方式可分为从泵管进行回灌和环状间隙进行回灌。从环状间隙进行回灌容易带大量气体进入含水层,不利于回灌的进行,气体的进入使得地热水的回灌量减小,而从泵管进行回灌可以防止气体进入含水层,回灌效果较好。

4.5 地面设施

针对孔隙热储地热回灌的堵塞问题,国内外尝试很多方法欲加以解决,结合天津砂岩孔隙热储地热回灌经验,通过地面设施对回灌水进行除砂、粗、精二级过滤可有效防止物理堵塞和生物堵塞,对开采井和回灌井进行排气、密封保护可有效防止氧化物沉淀的生成,并采用定期回扬等方式,达到理想的效果,采取合理的地面工艺进行回灌可以大大缓解堵塞现象的发生。

5 结论

砂岩热储回灌与热储层自身条件紧密相关,热储含水层骨架的挤压空间涉及颗粒大小、稳定性、应力释放及矿物质沉积等物理及化学问题,较为复杂。另外,砂岩热储回灌还受回灌水源条件、回灌设备、回灌井结构等多方面的影响,在今后的地热开发过程中,要加强回灌影响因素的研究,找到切实解决的办法,从而实现地热资源的可持续开发利用。

参考文献:

- [1] 李肖兰,杜绍伟,张玲,等.山东省地热资源分布与开发利用研究[J].山东国土资源,2021,37(1):37-43.
- [2] 陈莹,王攀科,吴焯,等.河南兰考地区地热回灌影响因素分析及对策[J].钻探工程,2022,49(6):146-152.
- [3] 张景辉,杨康敏,兑艳亭,等.地热井采灌技术研究及试验[J].内蒙古石油化工,2022,48(5):93-96.
- [4] 王俞文,牛海瑞,王茜,等.中深层砂岩热储层高效回灌研究[J].石油石化绿色低碳,2022,7(1):65-71.
- [5] 吴丽莉,孟凡奇,董玉龙.山东省郓城县岩溶热储回灌试验[J].山东国土资源,2017,33(6):38-42.
- [6] 刘春华,王威,卫政润.山东省水热型地热资源及其开发利用前景[J].中国地质调查,2018,5(2):51-56.
- [7] 刘桂仪.鲁北平原深层地下水基本特征与水环境问题[J].山东地质,2001,17(5):43-47.
- [8] 颜世强,刘桂仪,孟庆峰,等.德州市地热资源及开发利用[J].山东地质,2001,17(2):48-52.
- [9] 王彦俊,王贞国,王岩,等.德州市地热资源开发与保护[J].山东国土资源,2005,21(5):31-35.
- [10] 周世海,杨询昌,梁伟,等.德州市城区地热水人工回灌试验研究[J].山东国土资源,2007,23(9):11-14.
- [11] 冯克印,贾超,丁朋朋,等.鲁北深部砂岩热储开发地质环境变形效应研究[J].山东国土资源,2023,39(3):51-56.
- [12] 魏立山.德州市平原县地下水热水资源开发利用研究[D].青岛:中国海洋大学,2016:120.
- [13] 王晨旭,张致远,何佳晨.开封凹陷盆地地热流体可采量定量评价[J].地下水,2023,45(1):53-55.
- [14] 杨询昌,康凤新,王学鹏,等.砂岩孔隙热储地温场水化学场特征及地热水富集机理:鲁北馆陶组热储典型案例[J].地质学报,2019,93(3):738-747.
- [15] 张银妹,王来宾,崔娅杰,等.河北省集中开采区馆陶组热储可持续开发利用模式分析[J].地下水,2023,45(2):77-79.
- [16] 王明珠,沙福建,冯克印,等.山东省德州市德城区地热采灌工程合理井距与热突破时间推算[J].山东国土资源,2023,39(12):28-32.
- [17] 贺森,张乐,高延华,等.东营市南展区砂岩热储地热回灌量与温度的关系探讨[J].山东国土资源,2018,34(1):44-48.
- [18] 刘志涛,张志胜,胡松涛,等.地热井井筒热效应研究[J].山东国土资源,2014,30(8):54-57.
- [19] 周萌,任晓霞,杨淑云.地热回灌井井底压强新解[J].山东国土资源,2016,32(1):38-41.
- [20] 王兆林,刘苏哲,纪洪磊,等.山东省惠民县淄角地区砂岩热储地热尾水回灌研究[J].山东国土资源,2023,39(3):72-78.

Study on Sandstone Thermal Storage Recharge Experiment in Hekou District in Dongying City

SONG Xinqiang¹, GAO Yanhua², XIE Faju¹

(1. Hekou Branch Bureau of Dongying Bureau of Natural Resources and Planning, Shandong Dongying 257200, China; 2. Shandong Geological and Mineral Engineering Group Limited Corporation, Shandong Jinan 250000, China)

Abstract: As a clean energy source, geothermal energy has advantages that other energy sources cannot possess. Geothermal energy can be used for heating residents, bathing in daily life, hot spring therapy, swimming in heated pools, as well as greenhouse gardening and aquaculture. Developing geothermal resources vigorously is of great significance for alleviating energy shortages, reducing environmental pollution, and promoting sustainable economic development. Tail water recharge is the main challenge faced by sandstone thermal storage development and utilization. The large amount of discharged tail water poses a threat of pollution to surrounding surface water and soil, which is not conducive to sustainable utilization of geothermal resources. In this paper, taking Hekou district in Dongying city as an example, the recharge experiment has been studied and analyzed. It will provide some references for sustainable utilization of geothermal resources.

Key words: Geothermal energy; clean energy; sandstone thermal storage; recharge test; Hekou district in Dongying city