



# 东营市城区馆陶组热储回灌性能分析\*

谭志容

(山东省鲁北地质工程勘察院, 山东 德州 253015)

**摘要:** 东营市城区馆陶组热储为新近系松散碎屑岩层状热储, 目前地热资源开采量约 95 万  $\text{m}^3/\text{a}$ , 回灌是解决热储压力下降与地热尾水排放对环境造成不良影响的最佳措施, 该文采用自然回灌试验方法探讨回灌条件下馆陶组热储的渗透性能, 并与德州市城区馆陶组热储压力回灌试验成果进行了对比, 对该热储的回灌性能进行了分析, 为指导该区地热回灌提供了科学依据。

**关键词:** 馆陶组热储; 自然回灌; 压力回灌; 渗透系数; 东营市城区

**中图分类号:** P314.1; P641.25

**文献标识码:** A

新近纪馆陶组碎屑岩地层在整个华北平原广泛分布, 该地层中砂岩较厚、孔隙度高, 蕴藏着丰富的地热水资源, 是中低温地热资源开发的主要目标热储。东营市城区内馆陶组地层顶界面埋深一般为 980~1 100 m, 地层厚度一般为 320~440 m, 砂岩占地层总厚度的 45%~50%, 孔隙度为 30%~36%, 渗透率为  $(800\sim 1\ 400)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ , 井口水温一般在 53~55℃, 是良好的地热储层。目前东营市城区内该热储共有地热井 8 眼, 地热资源开采量约 95 万  $\text{m}^3/\text{a}$ 。由于馆陶组热储埋深大, 地热水补给极其微弱, 地热资源开采造成的热储压力水头下降幅度达 0.98 m/a, 回灌作为解决热储压力下降问题的最佳措施引起了国内地热研究的高度重视。该文通过一组回灌试验探讨对该热储实施回灌的可行性, 并针对回灌问题进行了深入的研究<sup>[1-5]</sup>。

## 1 馆陶组热储回灌条件

地热回灌的条件主要包括较适宜的回灌水源、较大的储水空间、较好的渗透循环条件及较大的压力差等。

### 1.1 回灌水源

该区内现有馆陶组热储地热井 8 眼, 年开采量约 95 万  $\text{m}^3/\text{a}$ , 主要用于供暖。地热水在开发利用期间仅温度发生了变化, 水化学成分未变。由于利

用后的地热尾水水质与热储水质一致, 采用地热尾水作为回灌水源, 不会对热储的水质产生不良影响, 是回灌水源的最佳选择。此外, 区内还分布有 10 余眼东营组热储地热井, 水质与馆陶组热储的水质相似, 其供暖尾水也是馆陶组热储回灌的优质水源。

### 1.2 回灌储水空间

区内馆陶组热储砂岩厚度大, 岩性粗, 且呈层状较均匀分布。砂岩岩性以中细砂岩—砂砾岩为主, 其中底砾岩粒径一般为 2~10 mm, 孔隙度 30%~36%, 热水储存空间大。此外, 通过近十年的开采, 热储中压力下降明显, 形成了水位降落漏斗, 为回灌提供了储水空间。

### 1.3 热储渗透性能

区内馆陶组热储层渗透性能较好, 渗透率为  $(800\sim 1\ 400)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ , 据单孔稳定流抽水试验成果, 热储渗透系数为 1.59~2.0 m/d, 具备良好的回灌渗透条件。

### 1.4 回灌动力条件

前已述及, 区内馆陶组热储压力水头以约 0.98 m/a 的速率逐年下降, 目前水位埋深在 26~32 m 左右, 自然回灌条件下可以提供 0.2~0.3 MPa 的压差。如采用压力泵进行回灌, 考虑到滤水管的安全, 可以加压至 2~3 MPa。综上所述, 区内馆陶组热储

\* 收稿日期: 2010-01-30; 修订日期: 2010-07-15; 编辑: 程光锁

作者简介: 谭志容(1975—), 女, 湖北荆州人, 工程师, 主要从事水工环地质勘查工作; E-mail: tanzirong@163.com。

具备良好的回灌条件。

## 2 回灌试验

### 2.1 回灌试验基本情况

为验证馆陶组热储的回灌性能,在东营市城区一住宅小区进行一组回灌试验,回灌水源井成井深度 1 657 m,取水段 1 411.5~1 636.8 m,为古近纪东营组热储。回灌井成井深度 1 351 m,取水段 1177.3~1 293.0 m,为新近纪馆陶组热储。两井间

的距离为 498 m,回灌试验前进行了 48 h 左右的试抽与洗井工作,两井之间未发现干扰现象。水质测试结果表明,回灌水源井与回灌井水化学类型均为 Cl-Na 型,矿化度偏差约 2.9%,水质相似(表 1),回灌试验不会对馆陶组热储造成水化学污染。

采用无压自然回灌方式进行回灌试验,第一回灌阶段试验历时 30 h 左右,第二回灌阶段试验历时约 121.4 h,回灌井水位与回灌量成正相关关系,水位高时回灌量增加,其历时曲线如图 1 如示。

表 1 回灌水源与馆陶组热储水化学特征(mg/L)

地热井	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub>	矿化度
水源井	46.5	5200	1565.98	254.14	11811.27	17.5	84.93	19080
回灌井	47.38	6187.37	1025.01	112.18	10900	93.42	84.87	18520

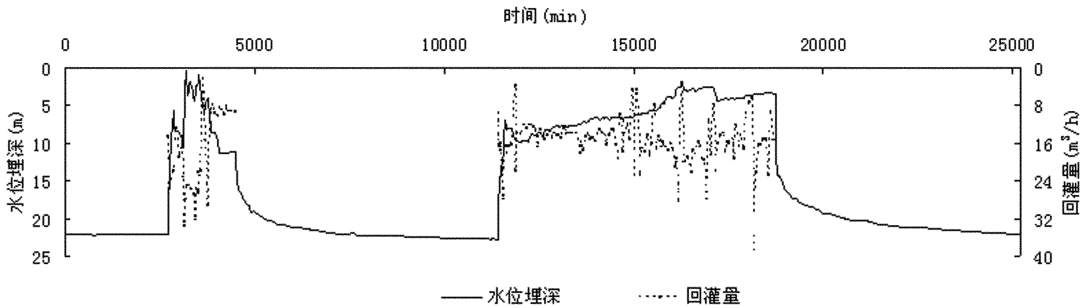


图 1 回灌井水位与回灌量历时曲线图

### 2.2 回灌渗透性能分析

采用 Visual MODFLOW 4.0 软件自带的参数估算 PEST 程序包进行回灌条件下馆陶组热储的参数求解。由于距回灌井 2 217 m 处的观测井在整个回灌期内水位保持稳定,没有受到回灌的影响,在数值模型建设时拟定模拟区范围为 2 km×2 km,以回灌井为中心,四周概化为定水头边界。

#### 2.2.1 水文地质参数识别

采用第一回灌阶段的回灌量与水位埋深数据(图 2)对所建数值模型进行参数识别,调用 PEST 程序包进行参数优化结果表明,回灌条件下,馆陶组热储的渗透系数为 0.102 m/d,弹性释水率为 2.057 × 10<sup>-6</sup>/m。根据 PEST 求取的参数对数值模型的参数进行设置,模型运行结果表明水位计算数据与观

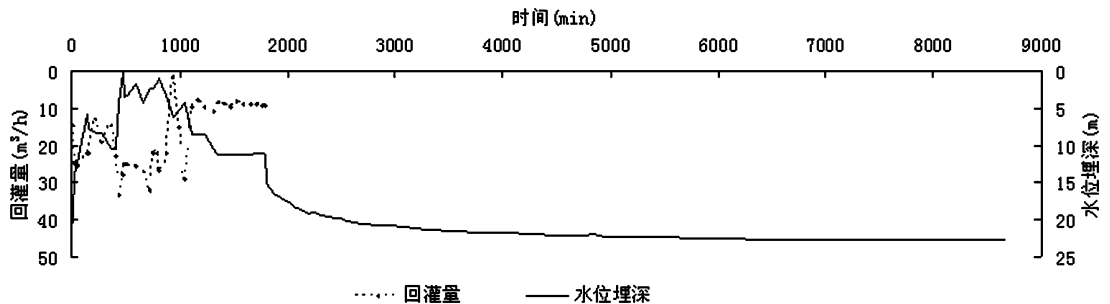


图 2 回灌阶段回灌量与水位埋深历时曲线图

测数据基本吻合,两者差值不超过 1.0 m(图 3),因此,所求取的水文地质参数能较真实地反映馆陶组热储在回灌条件下的渗透性能。

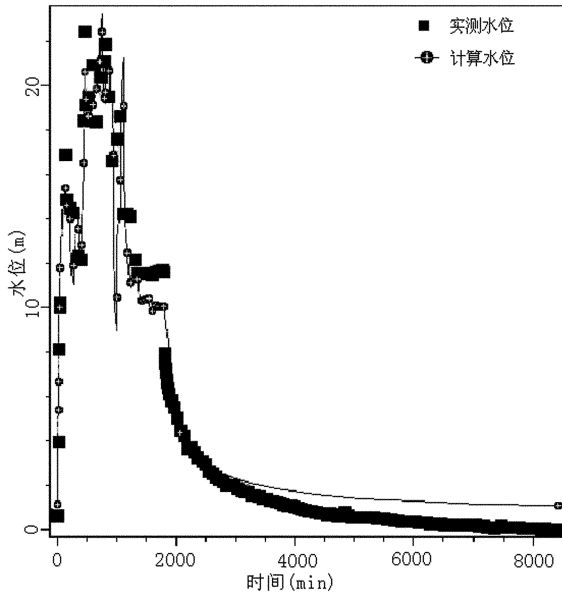


图 3 第一回灌阶段水位观测值与计算值对比曲线图

### 2.2.2 水文地质参数验证

采用第二回灌阶段的回灌量与水位埋深数据(图 4)对以上数值模型进行验证,模拟结果表明,第一回灌阶段试验数据求取的水文地质参数能使第二回灌阶段的水位计算数据与水位观测数据基本吻合,两者差值大多不超过 1.5 m(图 5),从而验证了所求取参数的正确性。因此,回灌条件下,馆陶组热储的渗透系数为 0.102 m/d,弹性释水率为  $2.057 \times 10^{-6}$  /m。

### 2.2.3 渗透性能影响因素分析

根据回灌井完井时的单孔稳定流抽水试验资料,抽水条件下馆陶组热储的平均渗透系数约 1.863 m/d,平均导水系数为 112.71 m<sup>2</sup>/d,该渗透系数是回灌条件下热储渗透系数的 18 倍,由此可见,回灌时热储的渗透性能产生了较大的影响。

推测回灌时热储渗透性能降低的原因可能是由于热储的堵塞造成的,回灌堵塞的原因主要有悬浮物堵塞、微生物生长堵塞、化学沉淀堵塞、气泡堵塞、黏粒膨胀和扩散堵塞、含水层细颗粒堵塞等 6 种情况。鉴于该次回灌时间短,回灌水源水质与热储水质相似,发生微生物生长堵塞与化学沉淀堵塞的可

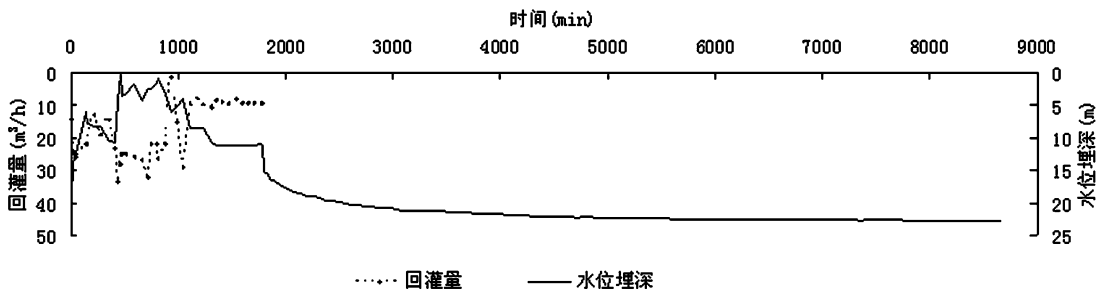


图 4 第二阶段回灌量与水位埋深动态曲线图

能性较小。由于区内地下水中铁离子含量高(6.2~7.8 mg/L),与空气接触后能很快形成 Fe(OH)<sub>3</sub> 沉淀,该次回灌时没有采用过滤器对回灌水源进行过滤,因此,造成回灌时热储渗透率低的原因可能是悬浮物堵塞。

### 2.3 馆陶组热储回灌性能分析

回灌试验表明,虽然馆陶组热储砂层厚度大、颗粒粗,孔隙度与渗透率较大,有利于地热水运动和储存,具备良好的回灌条件,但回灌时热储渗透性能下降急剧,不利于回灌的开展。

目前回灌已经成为世界范围内数十个重要地热田生产运行中的一日常工作,但在孔隙型热储中进行回灌成功的例子很少。造成孔隙型热储回灌难的原因主要是含水层堵塞<sup>[6]</sup>,如何解决热储回灌渗透性能降低的问题成为了该类热储回灌的关键。

区内油田注水与地热回灌十分相似,石油储层也多为孔隙型,调查表明,油田注水井的压力为 9~30 MPa 时,单井注水量可达 200~500 m<sup>3</sup>/d,因此,如采用油田注水技术进行地热回灌,有可能解决回灌条件下热储渗透性能差的问题。

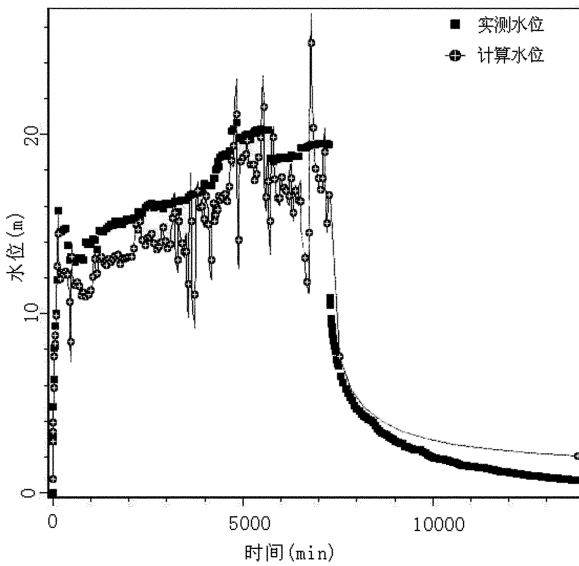


图 5 第二回灌阶段水位观测值与计算值对比曲线图

表 2 德州市城区馆陶组热储回灌试验基本情况

回灌压力 (MPa)	回灌延续时间 (min)	累计回灌量 (m <sup>3</sup> )	单位稳定回灌量 (m <sup>3</sup> /h)	稳定延续时间 (min)	回灌平均水温 (°C)	回扬次数 (次)	累计回扬时间 (min)	累计回扬水量 (m <sup>3</sup> )
0.1	1610	253.6	7.1	810	51.2	1	30	21.75
0.34	2176	426.4	8.3	330	51.0	1	30	20.39
0.45	675	144	10.2	87	50.9	1	90	53.4
0.6	443	105.2	11.6	150	51.5	0	0	0

$$K = \frac{Q}{2\pi \cdot H \cdot L} \ln \frac{L}{r_0}$$

式中： $K$  为热储渗透系数(m/d)； $Q$  为加压回灌流量(m<sup>3</sup>/d)； $H$  为回灌压力换算成的水头高度(m)； $L$  为热储厚度(m)； $r_0$  为钻孔直径(m 取滤水管直径)。

估算结果表明(图 6)，热储的渗透系数随回灌压力的增大而减小，两者相关系数为 -0.903，呈完

### 3 讨论

该次回灌试验采用的是自然回灌方法，在有压回灌条件下，回灌量随回灌压力的增大而增加，据德州市城区馆陶组热储回灌试验(表 2)，回灌量与回灌压力的相关系数为 0.972，为完全相关。采用 EXCEL 软件对回灌量与回灌压力之间的关系进行趋势分析，结果表明，两者基本上呈线性相关(图 6)，关系式为：

$$Y = 9.2053X + 5.871, \text{ 决定系数 } R^2 = 0.944$$

式中： $Y$  为回灌量(m<sup>3</sup>/h)； $X$  为回灌压力(MPa)。

压力回灌条件下热储的渗透系数采用《水利水电工程钻孔压水试验规程》(SL31-2003)中推荐的渗透系数计算公式进行估算：

全负相关。当回灌压力为 0.34~0.6 MPa 时，渗透系数与回灌压力的相关系数达 -0.996，此时，热储的渗透系数为 0.075~0.095 m/d。由抽水试验求取的热储渗透系数为 2.3~2.6 m/d，由此可见，加压回灌条件下，热储渗透性能的衰减远大于自然回灌。

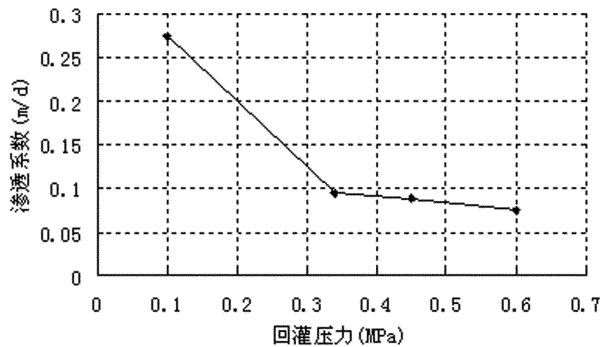
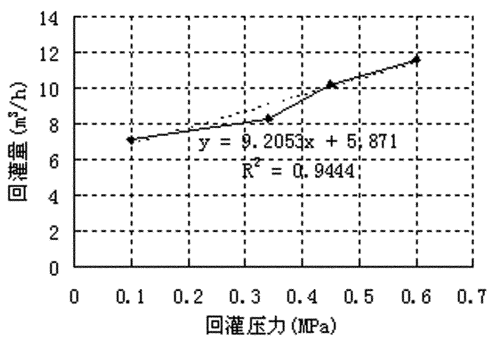


图 6 德州市馆陶组热储回灌量、热储渗透系数与回灌量压力关系图

## 4 结论

(1)区内馆陶组热储砂层厚度大、颗粒粗,孔隙度与渗透率较大,有利于地热水运动和储存,具备良好的回灌条件。

(2)回灌条件下,东营市城区馆陶组热储的渗透系数为  $0.102 \text{ m/d}$ ,热储渗透性能下降急剧,不利于回灌的开展。

(3)加压回灌条件下,热储渗透性能的衰减远大于自然回灌。

(4)可以采用油田注水技术进行地热回灌,有可能解决回灌条件下热储渗透性能差的问题。

## 参考文献:

- [1] 张新文,胡彩萍,胡松涛,等.东营市中心城区地热田地热回灌可行性分析[J].山东国土资源,2009,25(8):17-20.
- [2] 林黎,王连成,赵苏民,等.天津地区孔隙型热储层地热流体回灌影响因素探讨[J].水文地质工程地质,2008,(6):125-128.
- [3] 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.
- [4] Peter Seikt[德国],Markus Wolfgamm[德国],刘道选,等.德国砂岩热储层地热水回灌试验[J].地热能,2009,(5):3-11.
- [5] 彭新明,张勇.国内地热回灌模式浅议[J].西部探矿工程,2006(2):113-114.
- [6] Pierre Ungemach, Reinjection of cooled geothermal brines into sandstone reservoirs[J]. Geothermics,2003,(32):743-761.

# Analysis on Recharge Property of Guantao Geothermal Reservoir in Dongying City

TAN Zhirong

(Lubei Geo-engineering Exploration Institute, Shandong Dezhou 253015, China)

**Abstract:** Guantao geothermal reservoir in Dongying city is Neogene fragmental sedimentary geothermal reservoir. Its extraction of geothermal resources is about  $95 \text{ m}^3/\text{a}$  at present. Recharge is the best way to solve the pressure drawdown in the reservoir and environmental pollution. In this paper, penetration performance of Guantao geothermal reservoir under the recharge condition is discussed, the results are compared with the pressurized reinjection experiment in Guantao geothermal reservoir in Dezhou city, and the recharge property of this geothermal reservoir is analyzed as well. It will provide a scientific basis for geothermal recharge in this area.

**Key words:** Guantao geothermal reservoir; natural recharge; pressurized recharge; penetration ratio; districts in Dongying city