

# 东营市南展区砂岩热储地热回灌量与温度的关系探讨

贺森<sup>1</sup>,张乐<sup>1</sup>,袁一鸣<sup>1</sup>,张建英<sup>2</sup>,高延华<sup>3</sup>

(1.东营市国土资源局,山东 东营 257091;2.东营市国土资源局东营分局,山东 东营 257091;3.山东省地矿工程集团有限公司,山东 济南 250014)

**摘要:**东营地区地热资源丰富,主要开采层位为新近纪馆陶组、古近纪东营组,热储类型为低温温热水、热水型层状孔隙-裂隙型砂岩热储,地下热水补给条件较差。近年来,随着地热资源的开发利用规模的加大,开采密集地带的热水头明显下降,存在资源枯竭,引发地质环境问题的威胁。采用回灌方式补充地下水源,是实现地热资源可持续利用和地质环境保护的有效措施。为研究该区地热回灌可行性与回灌制约因素,在南展区开展了多次回灌试验,试验表明,该层热储回灌空间大,回灌条件较好,压力对回灌效果影响明显,回灌水体温度对回灌效果影响较大。利用回灌量与回灌水头之间的影响关系,模拟计算不同温度下回灌水头的变化情况,探讨了回灌量与回灌水体温度的影响关系,对回灌研究具有一定的指导意义。

**关键词:**地热资源;砂岩热储;温度;回灌量;南展区;东营市

**中图分类号:**P314.1

**文献标识码:**B

**引文格式:**贺森,张乐,袁一鸣,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.HE Miao, ZHANG Le, YUAN Yiming, etc. Study on the Relationship between Re-injection Volume and Temperature of Sandstone Geothermal Reservoir in Nanzhan Area of Dongying City[J].Shandong Land and Resources, 2018,34(1):44-48.

地热回灌是人工将利用过的地热尾水或常温地下水、地表水灌回到热储中<sup>[1-3]</sup>,是维持地热资源可持续开采和预防地面沉降等地质环境问题<sup>[4-8]</sup>的有效措施,但是地热回灌技术复杂,回灌过程中可能引起回灌井井管及其周围热储的物理、化学阻塞,使得回灌效率降低,并有可能导致回灌井损坏等。为此,在东营市开展了多次回灌试验研究<sup>①</sup>,对回灌影响因素<sup>[9-10]</sup>进行了分析与研究,提出了回灌水头(压力)、回灌井工艺、回灌水源等对回灌效果的影响。根据以往研究成果,回灌压力影响回灌效果,温度直接影响回灌水密度,进而影响回灌压力,因此,回灌水温度对回灌效果的影响同样不容忽视。南展区回灌试验采用同层对井回灌模式,试验持续时间较长,取得了丰富的动态数据,通过研究该区回灌试验<sup>[11-14]</sup>中回灌水头高度、回灌温度、回灌量三者之

间的关系,模拟计算不同温度下的水头高度,进一步分析回灌温度与回灌量的关系。

## 1 回灌试验概况

### 1.1 热储条件

南展区位于东营市六户镇东南,行政区划隶属东营市东营区。构造单元划分上,该区位于华北坳陷济阳坳陷区东营凹陷东南部的牛庄洼陷内,区域上发育有王岗断裂构造背斜带。区内热储类型为层状热储<sup>[15]</sup>,属低温地热资源中的温热水—热水型地热资源<sup>[1]</sup>,主要热储层位为古近纪东营组及新近纪馆陶组。

(1)东营组热储底板埋深约1 600~1 900 m,与下伏沙河街组呈整合或假整合接触,砂层厚度130

收稿日期:2017-04-24;修订日期:2017-09-04;编辑:曹丽丽

作者简介:贺森(1984—),男,山东东营人,工程师,主要从事矿产勘查工作;E-mail:dydk05@126.com

①山东省地矿工程集团有限公司,山东省东营市南展区地热资源普查报告,2014年12月。

~200 m, 该层岩性为砂泥岩互层, 半胶结状, 正韵律沉积, 下部颗粒粗, 以含砾砂为主, 孔隙度较大, 平均孔隙度约 29%, 富水性较强, 单井涌水量大, 可达 80~100 m<sup>3</sup>/h, 水温 53~76℃, 矿化度 18.0~20.0 g/L, 水化学类型主要为 Cl-Na·Ca 型和 Cl-Na 型。

(2) 馆陶组热储顶板埋深 1 000 m 左右, 底板埋深 1 350~1 500 m, 与下伏古近纪东营组呈不整合接触关系, 砂层厚度在 120~150 m 之间, 盖层分上下两段, 下段岩性为灰色、灰白色块状砾岩、含砾砂岩、砂岩。上段岩性为紫红色、灰绿色泥岩与粉砂岩互层, 孔隙度大, 平均孔隙度为 31%, 热储温度一般为 53~55℃, 单井涌水量大, 一般在 80 m<sup>3</sup>/h 左右, 矿化度 17.8~20.0 g/L, 水化学类型为 Cl-Na 型。

## 1.2 试验场地

地热回灌试验采用了该区域内一对地热勘探井的试验数据, 其中一口为水源井(ZK01), 另一口为回灌井(ZK02), 水源井成井深度 1 716 m, 井壁管规格为 177.8 mm×8.05 mm, 滤水管长 128.91 m, 取水段区间为 1 463.33~1 704.91 m, 降深 21.55 m 时, 涌水量为 90.8 m<sup>3</sup>/h; 回灌井成井深度 1 750 m, 井壁管规格为 177.8 mm×8.05 mm, 滤水管长 128.64 m, 取水段区间为 1 553.6~1 745.9 m, 降深 22.20 m 时, 涌水量为 100 m<sup>3</sup>/h。两井取水层均为东营组, 两井之间间距 532.3 m。回灌试验采用变频、回灌加压泵控制回灌量大小, 除砂器、粗(精)效过滤器对回灌水进行二级过滤, 以及排气装置、反冲储水箱、反冲水泵等回灌设备, 回灌井井口安装可密封井口装置, 两井之间通过镀锌管、法兰进行连接, 回灌水由水源井经输水管道注入回灌井。试验前期, 采取小流量进行回灌, 回灌水温度逐渐上升然后趋于稳定, 回灌井水位逐渐上涨, 当水头突破初始水位与井口的高度差产生喷涌后, 进行密封回灌, 回灌压力、回灌温度及回灌量同步进行观测, 根据试验情况, 逐步提高回灌量, 最终达到设计的稳定回灌压力, 并维持一定的回灌时间, 试验共持续 50.5 d, 总回灌量约 5.98 万 m<sup>3</sup>。

## 2 回灌量与回灌温度关系分析

### 2.1 回灌量与水头高度关系分析

为研究回灌量同回灌压力的关系<sup>[16]</sup>, 该试验进

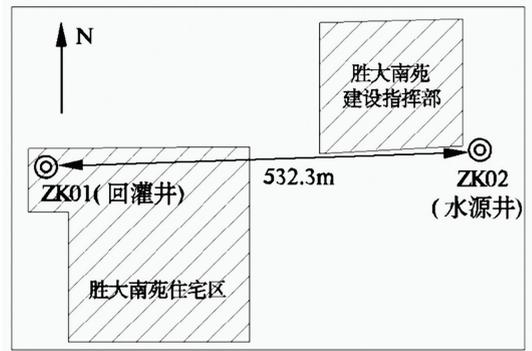


图1 回灌试验平面位置示意图

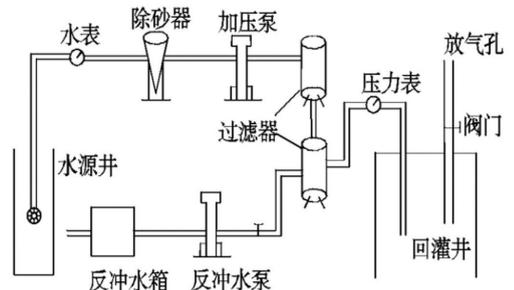


图2 试验工艺流程示意图

行了 4 个流量段回灌, 试验初期水头高度通过人工测量得出, 密封回灌阶段水头高度通过压力表读数进行换算, 回灌过程中的水头高度以回灌前静水位为起算点。根据回灌试验数据, 当回灌量为 42.6 m<sup>3</sup>/h 时, 水头高度 46.45 m, 随着回灌量增加, 水头高度不断升高, 当回灌量增加至 57.7 m<sup>3</sup>/h 时, 水头高度 85.21 m。结合回灌量与水头高度关系图(图 3), 可以看出回灌量与回灌压力之间相互影响, 二者呈正比例关系, 即回灌量与水头高度之间呈正比例关系, 两者线性相关关系式近似为:

$$H \approx 2.56Q - 66.73$$

式中:  $H$ —水头高度(m);  $Q$ —回灌量(m<sup>3</sup>/h)。

### 2.2 回灌温度与水头高度关系分析

回灌压力与回灌量相互关联, 而使回灌压力发生变化的因素除了回灌量以外, 流体重力也是重要影响因素, 根据物理学原理, 流体重力与其体积、密度有关, 根据地热井成井结构, 回灌井井筒<sup>[17-18]</sup>内总体积不发生变化, 密度是影响回灌水重力的唯一因素。流体温度影响密度, 进而影响重力, 因此, 可借助回灌量与水头高度的关系, 研究温度与水头高度的关系, 进一步分析温度与回灌量的关系。该次

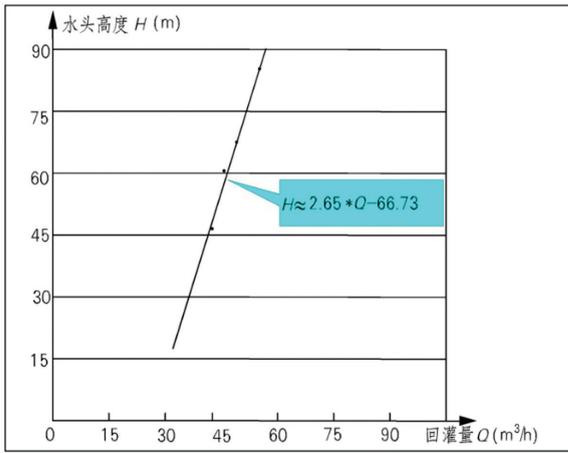


图 3 回灌量-水头高度关系图

地热水密度参照《地热资源地质勘查规范》(GB/T11615-2010)不同温度下水的密度,进行适应性插分取值。

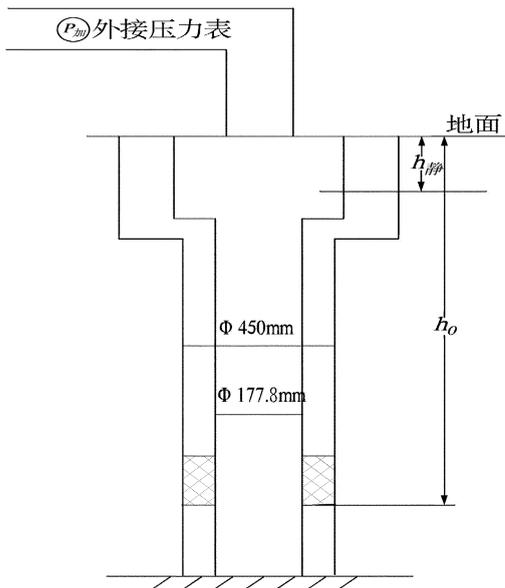


图 4 回灌井剖面图

讨论二者之间的关系,暂不考虑回灌目的层压力的变化,只研究井管内由回灌水温度改变引起的压力变化。假设回灌井井管内原有地热水被回灌水源完全置换,置换后井管内水温一致,以南展区地热回灌试验值为参考,模拟计算在保持回灌量不变,即保持井底压力<sup>[19-20]</sup>(滤水管底压力)不变的条件下,以不同温度(50℃,40℃,30℃)水源进行回灌的回灌井水头高度情况。以井口处为分界面,井底承受压力为外界压力与井筒内热水产生的压力之和,井底

压力计算公式为:

$$F = F_{外} + F_{内} = (P_{加} + \rho_0 g h_0) \times S = \rho_1 g \times (H + h_0 - h_{静})$$

得出水头高度计算公式:

$$H = \frac{P_{加} + \rho_0 g h_0}{\rho_1 g} - (h_0 - h_{静})$$

式中: $F_{外}$ —密封回灌回灌压力; $F_{内}$ —井筒内热水产生压力; $S$ —井底面积; $P_{加}$ —密封回灌产生压强(MPa)(数据来源于东营市南展区回灌试验资料); $\rho_0$ —实际回灌试验中热水密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ); $\rho_1$ —模拟回灌热水密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ); $g$ —重力值,取  $9.8 \text{ N}/\text{kg}$ ; $h_0$ —回灌井滤水管埋深(m); $h_{静}$ —静水位埋深(m); $H$ —回灌后水头高度(m)。

计算结果如表 1 所示。

表 1 回灌温度与水头高度对应关系

井号	回灌试验情况				模拟计算结果			
	回灌热储层	回灌量( $\text{m}^3/\text{h}$ )	回灌压强(Mpa)	回灌水温度( $^{\circ}\text{C}$ )	水头高度(m)	水头高度(m)		
					50 $^{\circ}\text{C}$	40 $^{\circ}\text{C}$	30 $^{\circ}\text{C}$	
热 1	Ed	42.6	0	61.8	46.45	37.25	30.71	26.22
		48.1	0.15	63.3	60.25	49.73	43.13	38.61
		51.4	0.25	63.5	70.65	59.9	53.26	48.7
		57.7	0.39	63.8	85.21	74.12	67.41	62.81

计算结果显示,在保持一定回灌量的情况下,随着回灌水温度降低,水头高度也在下降,为确定二者关系,绘制温度-水头高度曲线(图 5),该曲线近抛物线形式,建立如下公式:

$$H = at^2 + bt + c$$

式中: $H$ —水头高度(m); $t$ —回灌温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

根据表 1 计算结果,代入法求得  $a \approx 0.01, b \approx -0.25, c$  为常数  $N$ 。得出水头高度与回灌温度之间的关系式:

$$H = 0.01t^2 - 0.25t + N$$

### 2.3 回灌量与回灌温度关系分析

#### 2.3.1 回灌量与回灌温度关系分析

在分析回灌温度同水头高度的公式关系时,发现常数  $N$  只受回灌量影响,且与回灌量呈正相关,当回灌量一定时, $N$  为定值,不妨将其当作回灌量,结合水头高度与回灌量呈正相关的关系,分析回灌温度与回灌量的关系。在保持回灌量不变的情况下,随着温度升高,水头高度增大。反之,回灌温度变小,回灌井水头高度变小,井内剩余回灌体积空间增加,要达到原来的水头高度,回灌量会相应增加。即:两者之间呈反比例关系。

#### 2.3.2 回灌量与回灌温度干扰因素分析

根据以往地热回灌经验,影响回灌效果的因素

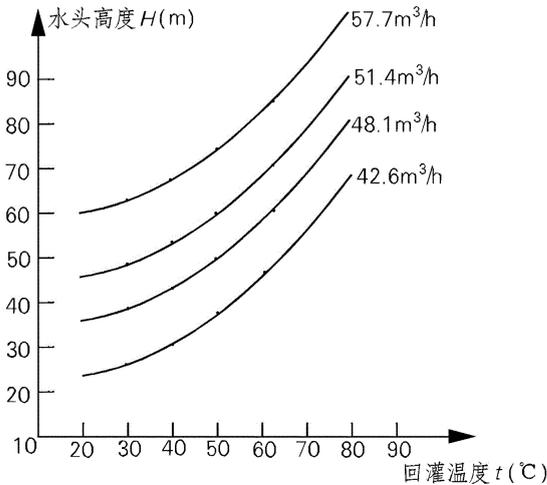


图 5 温度-水头高度关系曲线图

较多,包括回灌井成井结构、热储层特征、回灌压力大小、水化学特征等。该次研究回灌量与回灌温度之间关系过程中忽略了热储层特征变化及两种地热混合后水化学特征的影响,因此,确定二者为该次研究的干扰因素。

(1)热储特征因素分析

热储特征通过热储特征参数体现,主要包括回灌渗透系数、导水系数、导压系数(表 2)。随着回灌试验进行,热储特征参数发生改变,热储层渗透性能发生改变。热储层结构复杂,不同温度水体进入后,对热储层的影响及其反作用目前难以明确,只研究井管内水头高度变化,可降低热储特征因素的干扰。

表 2 回灌热储特征参数

回灌阶段	渗透系数 K (m/d)	导水系数 T (m <sup>2</sup> /d)	导压系数 (m <sup>2</sup> /d)
一	0.4084	35.6533	179162.41
二	0.3544	30.9391	155472.96
三	0.3479	30.3717	152621.46
四	0.2934	25.6138	128712.66

(2)水化学因素分析

矿化度对水的密度有直接影响,由于南展区地热回灌属同层回灌,水化学特征条件基本一致,根据水质分析结果,水源井与回灌井两者矿化度差值小于 2 g/L,差别甚微,但如果考虑温度、压力条件改变下的综合影响因素,这是一个复杂过程。就本次回灌来说,通过回灌井回灌前、回灌中的化学成分对比,其中变化较大的离子有: K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,从水化学场来说,影响较大的有 Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>,以 Ca<sup>2+</sup> 为例,参照 CaCO<sub>3</sub> 溶解度曲

线(图 6),CaCO<sub>3</sub> 在一定压力下,随温度升高,溶解度呈降低趋势,如:0.2 MPa 的相同压力条件下,38.8℃时的溶解度为 172 mg/L,51.7℃时的溶解度为 140 mg/L,65.6℃时的溶解度为 65 mg/L,变化较小,这可以说明,单一的温度下降的条件下,不会发生 CaCO<sub>3</sub> 沉积现象,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,造成化学堵塞,影响回灌效果。

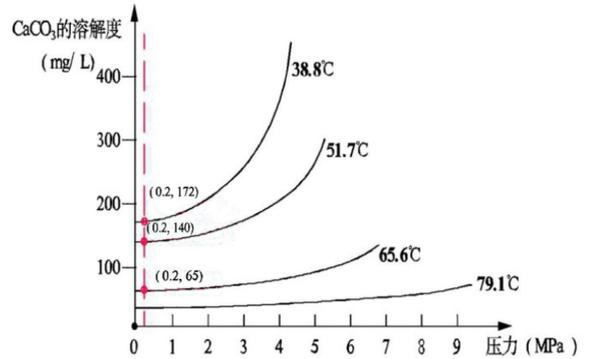


图 6 CaCO<sub>3</sub> 溶解度曲线

3 结论

以水头高度为结合点,利用回灌量、回灌温度同水头高度关系,创建回灌量与回灌温度的关系式,经分析得出:

(1)回灌温度通过改变回灌压力对回灌量产生影响,二者呈反比例关系,即低温水源回灌效果理论上要优于高温水源。

(2)回灌温度与回灌量的关系式是在南展区回灌试验基础上模拟推导得出,对于其他干扰因素的影响关系尚不明确,有待进一步优化。根据单井试验建立温度、回灌量之间的关系,对今后的回灌研究具有一定的指导意义。

参考文献:

[1] 周世海,杨尚昌,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.  
 [2] 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):39-42.  
 [3] 赵季初.鲁北砂岩热储地热水回灌试验研究[J].山东国土资源,2013,29(9):24-31.  
 [4] 李莲花,张建斌.地热水资源开发引起的环境问题分析[J].地下水,2004,26(1):194-195.  
 [5] 李晓华,马驰.地热水资源开发引起的环境问题分析[J].安徽

农业科学,2009,37(18):8675-8677.

- [6] 胡彩萍,张景燕,郝梦圆,等.黄河三角洲生态区孔隙热储地热开发对地面沉降的影响分析[J].山东国土资源,2017,33(2):39-42.
- [7] 胡彩萍,潘拥军.东营市地热资源开发保护与行政保障措施探讨[J].山东国土资源,2012,28(9):81-83.
- [8] 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):31-33.
- [9] 高宝珠,曾梅香.地热对井运行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.
- [10] 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,2008,35(6):125-128.
- [11] 王坤,朱家玲.中低温孔隙型地热田回灌试验研究[J].太阳能学报,2001,22(2):236-238.
- [12] 高宗军,郭加朋,李哲,等.东营市城区地热储人工回灌条件及分区研究[J].地下水,2009,31(5):4-8.
- [13] 谭志容.东营市城区馆陶组热储回灌性能分析[J].山东国土资源,2010,26(8):13-17.
- [14] 张平平,王秀芹.回灌水温对砂岩热储回灌效果的影响分析——以德州市地热田馆陶组热储为例[J].山东国土资源,2015,31(6):68-71.
- [15] 徐希强,刘善军,王伟德,等.山东省地热资源及勘查开发对策[J].山东国土资源,2015,31(5):31-35.
- [16] 杨询昌,王成明,冯守涛.德州市城区地热水动态与开采量关系[J].山东国土资源,2011,27(7):25-28.
- [17] 陈国富,陈虹雁,王学工.井筒内水头高度与井底压力对比试验[J].工程勘察,1997,(4):32-35.
- [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] 张春志,李朋,张秋锋.鲁东构造型地热田回灌过程中压力对回灌量的影响研究——以威海市宝泉汤为例[J].山东国土资源,2015,31(2):17-20.

## Study on the Relationship between Re - injection Volume and Temperature of Sandstone Geothermal Reservoir in Nanzhan Area of Dongying City

HE Miao<sup>1</sup>, ZHANG Le<sup>1</sup>, YUAN Yiming<sup>1</sup>, ZHANG Jianying<sup>2</sup>, GAO Yanhua<sup>3</sup>

(1.Dongying Bureau of land and resources, Shandong Dongying 257091, China;2.Dongying Branch Bureau of Dongying Bureau of Land and Resources, Shandong Dongying 257091, China;3. Shandong Geo - engineering Exploration Limited Corporation, Shandong Jinan 250014, China)

**Abstract:** There is rich geothermal resources in Dongying area, and the main mining layers are Neogene Guantao formation and Paleogene Dongying formation. Thermal reservoir are warm - hot water type and layered pore fissure type sandstone reservoir. The geothermal water supply condition is poor. In recent years, accompanying with the increase of the scale of exploitation and utilization of geothermal resources, geothermal water head in the mining area has been decreased obviously, and there is a threat to resource depletion and geological environment. Re - injection is an effective way to realize the sustainable utilization of geothermal resources and the protection of geological environment. In order to study the feasibility of geothermal reinjection and controlling factors for re - injection in Dongying city, recharge tests have been carried out in Nanzhan area. It is showed that the reservoir has a large space and the recharge condition is good, pressure on the recharge effect is obvious, but the influence of temperature on the water recharge recharge effect can not be ignored. Based on the test process, by using the relation between recharge and recharge of water head, the changes under different temperatures have been simulated and calculated, the influence of the injection volume and injection water temperature has been studied. It will provide some references for re - charge study in future.

**Key words:** Geothermal resources; sandstone geothermal reservoir; temperature; re - injection volume; Nanzhan area; Dongying city