

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

张平平,王秀芹

(山东省鲁北地质工程勘察院,山东德州 253072)

摘要:根据砂岩孔隙型热储地热流体回灌试验中不同尾水温度与回灌量、回灌水位之间的关系,研究了相同回灌量条件下尾水温度对回灌效果的影响,并通过消除回灌尾水温度对井筒存储效应的影响,将回灌时水位升幅的观测值校正为同一温度下的真实水位升幅,从而对不同温度尾水回灌的渗透性能进行了分析。

关键词:砂岩热储;回灌水温;井筒效应;渗透系数;馆陶组;德州市

中图分类号:P314.1 **文献标识码:**B

引文格式: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):64-67. ZHANG Pingping, WANG Xiuqin. Effect Analysis on Reinjection Water Temperature to Reservoir Reinjection in Sandstone——Setting Geothermal Reserve in Guantao Formation in Dezhou City as an Example [J]. Shandong Land and Resources, 2015, 31(6): 64-67.

山东省德州市蕴藏有丰富的地热资源,主要开采热储为馆陶组热储。区内地热资源的大量开采,导致了地热水位的急剧下降,而地热回灌是一种避免地热废水直接排放引起的热污染和化学污染的可行性措施,并对维持热储压力,保证地热田的开采技术条件具有重要的作用^[1]。因此,德州市进行了多次地热回灌试验研究,对回灌影响因素进行了分析,提出了水位(压力)、水质、回灌工艺等对回灌效果的影响,但水温对回灌效果影响的研究甚少^[2-4],笔者通过同一组采灌井进行的不同温度尾水回灌试验,对回灌效果进行了对比分析,并通过消除因水温产生的井筒效应,计算了回灌过程中的实际水头升幅,对其渗透性能进行了初步的分析研究^①,供学界同仁商讨。

1 地热回灌背景条件

1.1 回灌热储条件

区内主要开采热储为馆陶组,为孔隙型沉积盆地碎屑岩孔隙—裂隙热储,地表无热流显示,地热资源类型属热传导型。底板埋深1 200~18 00 m,在

拗陷区中心埋深深,厚度大,四周埋深浅,厚度薄;热储岩性主要为细砂岩、粗砂岩、含砾砂岩、砂砾岩;热储厚度80~120 m,占地层厚度的37%~45%,在取水段1 000~1 500 m深度内,单井出水量为70~120 m³/h;热水矿化度为6~10 g/L,水化学类型为Cl-Na型,井口水温为45~65℃,属低温地热资源中的温热水—热水型地热资源^[5-6]。

1.2 回灌水源条件

区内现有馆陶组地热井约207眼,主要分布于市县城区,用于供暖,洗浴,其中供暖所开采的地热水占90%以上,供暖后的地热弃水排放量约3 461万m³/a,水温28~34℃。供暖尾水在开发利用后仅温度发生了变化,水化学成分未变,采用地热供暖尾水作为回灌水源,不会对热储的水质产生不良影响,同时能够减少或消除地热开发对环境的不良影响,是回灌水源的最佳选择。

1.3 回灌动力条件

地热资源的开采造成了馆陶组热储压力的大幅下降。目前来看,区内热储压力水头以3.12~5.48 m/a的速率下降。其中热储压力下降最为突出的德

收稿日期:2014-09-19;修订日期:2014-12-01;编辑:陶卫卫

作者简介:张平平(1984—),女,辽宁辽中人,工程师,主要从事水工环及地热地质工作;E-mail:zpp840419@163.com

①鲁北地质工程勘察院,赵季初、杨训昌等,山东省德州市地热资源调查评价报告,2007年

州市城区,2013年供暖期平均水位埋深为60.76 m;非供暖期平均水位埋深为53.17 m,所辖各县市城区地热水位埋深20~52 m之间,全区在自然条件下可提供0.2~0.6 MPa的压差。

2 地热回灌试验

2.1 回灌井组概况

为研究不同温度尾水的回灌效果,在同一组采灌井进行2次回灌试验,2井均采用二开成井结构,取水层位为新近纪馆陶组热储含水层。其中开采井深度为1 457.57 m,井壁管规格为139.7 mm×6.98 mm,滤水管长115.32 m,取水段区间为1127.00~1460.00 m,降深29.92 m时,涌水量为90.00 m³/h;回灌井深度为1 402.75 m。井壁管规格为177.8 mm×8.05 mm,滤水管长135.53 m,取水段区间为1130.7~1 393.3 m,洗井结束后进行抽水试验,水位降深13.65 m时,涌水量为102.00 m³/h。

2.2 回灌试验

2.2.1 高温尾水回灌试验

该试验于2012年进行,初始水位埋深30.69 m,采用无压自然回灌,并以流量阶梯式进行,近似为5 m³/h,10 m³/h,20 m³/h,30 m³/h,40 m³/h,50 m³/h,60 m³/h,70 m³/h 8组定流量(表1)。回灌水温49~50℃。

表1 高温尾水回灌试验数据

序号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
回灌量(m ³ /h)	7.80	11.40	19.50	26.40	43.51	50.00	60.26	69.30
水位升幅(m)	3.42	4.49	7.27	10.22	16.79	19.02	22.78	28.65

2.2.2 低温尾水回灌试验

该组试验于2013年供暖期进行,试验前水位埋深36.6 m,试验同样采用无压自然流量阶梯递增回灌方式,但由于尾水量限制,近似定流量分别为10 m³/h,20 m³/h,30 m³/h,40 m³/h 4组(表2),回灌尾水水温32℃。

表2 低温尾水回灌试验数据

序号	①	②	③	④
回灌量(m ³ /h)	10.20	23.00	31.80	42.30
水位升幅(m)	2.05	5.34	9.09	15.29

2.3 试验结果分析

在回灌过程中,回灌井水头升幅随着回灌量不

断变化,且呈正相关关系,回灌量较为稳定时,水位最终趋于稳定。因是同一套回灌井组进行的不同温度尾水回灌试验,故排除了含水层、井结构、地面净化设备等对回灌效果的干扰,即同等灌量条件下,不同水温对应回灌水头升幅直接反应了回灌效果,水头升高幅度越小,则回灌效果越好。根据以上2组回灌试验数据(表1、表2),将其近似同回灌量对应水位升幅进行对比,可以看出低温尾水回灌水位升幅较小,即:水温为32℃与49~50℃尾水进行回灌,在小于40 m³/h回灌量条件下,低温尾水回灌水位升幅相对较小,回灌效果较好;大于40 m³/h回灌量条件下的水位升幅,由于尾水水量限制,无法直观进行对比,还需进一步深入研究。

3 回归分析

在自然无压回灌条件下,最大回灌量取决于回灌井水位的最大允许升幅,即回灌井水位埋深。低温尾水回灌试验由于尾水水量限制,最大稳定回灌量仅为40 m³/h,对应水位升幅16.79 m,从目前水位埋深来看,具有较大水头升幅空间,因此,对2组试验数据进行回归分析,进一步判断回灌量大于40 m³/h时的水温对回灌效果的影响。

回灌量与回灌井水位升幅呈正相关关系,即回灌量与水位升幅符合3次多项式回归(图1)。根据该多项式,回灌量为70 m³/h时,水位升幅为41.6 m,在目前水位埋深36.6 m条件下,推算最大自然回灌量为66.7 m³/h。由此可见,与高温尾水回灌量69.3 m³/h对应水位升幅28.65 m相比,低温尾水回灌效果并非完全优于高温尾水,而是以某一值为界,水位升幅低于该值时,低温水表现出更好的回灌性能,水位升幅高于该值时,高温水回灌性能更好。通过对该次试验数据进行回归分析,2组温度尾水回灌性能分界对应水位升幅值为16.8 m,回灌量为44 m³/h。

4 渗透性能分析

4.1 渗透系数与水位升幅关系

在回灌过程中,含水层渗透性的分析,可以理论认为回灌就是抽水的逆过程,采用抽水试验公式求取回灌过程中的渗透系数。取水头近似稳定时段回灌量代替出水量,近似稳定回灌水头升幅代替抽水

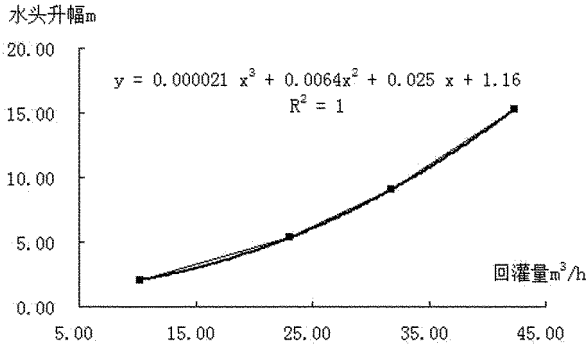


图 1 回灌量与水头升幅相关曲线

过程中的水位降深。其计算公式:

$$k = 0.366Q'(\lg R - \lg r)/MH \quad (1)$$

$$R = 10H\sqrt{K} \quad (2)$$

式中: K —回灌渗透系数 (m/d); H —回灌水头升高 (m); M —回灌热储含水层厚度 (m); R —回灌影响半径 (m); r —回灌井井底半径 (m); Q' —回灌水量 (m^3/d)。

另外,可将回灌看作是向钻孔中压水,采用《水利水电工程钻孔压水试验规程》(SL31-2003)压水试验法求取回灌渗透系数:

$$K = \frac{Q}{2\pi HL} \ln \frac{L}{r_0} \quad (3)$$

式中: K —岩体渗透系数 (m/d); Q —压入流量 (m^3/d); H —试验压力,以水头表示 (m); L —试段长度 (m); r_0 —井孔半径 (m)。

由以上 2 组公式看,相同回灌量条件下,渗透系数均与回灌水头升幅呈反比,即回灌水头升幅越大,渗透系数越小,回灌水头升幅越小,渗透系数越大,相对渗透性能越好。

4.2 回灌中动水位升高值计算

深层地下热水钻井在开采过程中井内水温明显高于开采前的水温,水的密度随之降低,可导致动水位高于开采前的静水位^[6-7]。抽水时如此,回灌时也存在相似情况,即回灌前,静水条件下井口水温较低,由上至下逐渐增大,而回灌中,回灌井内充满回灌尾水,水温上下一致,不同温度地热水密度不同,如果直接将回灌时近似稳定水位与回灌前静水位之差作为水头升幅,势必会影响对尾水水温与回灌效果关系的判断。因此,要消除温度对井筒存储效应的影响,求取真实的水头升幅数据。

在地下水动力学中,井底压力也可以作为井内水位高度来表示。即井底压力为:

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad (4)$$

式中: P —井底压力 (MPa); ρ —水的密度 (kg/m^3); g —重力加速度 (9.81 m/s^2); h —井内水柱高度 (m)。

由于地热井在静止状态下,井内水柱温度由上至下逐渐增高,因此井底压力近似计算为:

$$P = 1/2(\rho_k + \rho_d) \cdot g \cdot h \quad (5)$$

式中: ρ_k, ρ_d 分别为井口水温和井底水温对应的水的密度 (kg/m^3)^[6]。

根据公式 2,分别将 2 组试验前水柱高度换算成 50℃地热水对应水柱高度。静止状态下按照井口水温 16℃,井底水温 53℃计算,2012 年高温尾水回灌前井内水柱高度为 1 372.06 m,换算成 50℃地热水柱高度为 1 378.75 m;2013 年低温尾水回灌前井内水柱高度为 1 366.15 m,换算成 32℃地热水柱高度为 1 372.81 m。回灌中水位近似稳定时,井内充满回灌尾水,水柱上下水温一致,由公式(1)分别换算成 50℃水温对应水柱高度,与回灌前水位做差,即可得出回灌中真实的水头升幅(表 3)。从结果可以看出,近似回灌量条件下,高温尾水回灌水头真实升幅相对较小,根据公式(1)(3),均可证明高温尾水作为回灌水源时渗透系数大于低温尾水,表现出更好的渗透性能。

表 3 地热回灌试验水头升高对比

回灌试验组	平均稳定回灌量 (m^3/h)	相对静水位水头升高 (m)	回灌水温 ($^{\circ}C$)	地热水密度 (m^3/kg)	换算成 50℃水柱高度/m	水头升幅换算结果/m
高温尾水回灌	11.40	4.49	49.5	987.78	1380.47	-2.51
	19.50	7.27	49	987.56	1380.79	-0.04
	26.40	10.22	50	988.00	1384.57	3.53
	43.51	16.79	49	987.56	1394.15	9.48
低温尾水回灌	10.20	2.05	32	994.7	1376.24	4.66
	23.00	5.34	32	994.7	1378.72	7.98
	31.80	9.09	32	994.7	1382.28	11.75
	42.30	15.29	32	994.7	1388.23	17.99

5 结语

上述试验及计算分析结果表明,在自然无压回灌条件下,最大回灌量取决于回灌井允许水头升幅,用不同温度的尾水进行回灌,存在某一数值,当回灌井允许水头升幅低于该值时,低温尾水最大回灌量大于高温尾水;当回灌井允许水头升幅高于该值时,低温尾水最大回灌量小于高温尾水。这种现象是由于尾水与回灌井内水温存在差异,不同温度水的密

度不同,这样就造成了井内水的压密或缓释,从而影响了回灌水头升幅,但通过消除温度对井筒存储效应的影响,总体看,回灌水温越高,回灌渗透性能越好。

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,(3):100-104.
- [2] 赵季初.鲁北砂岩热储地热尾水回灌试验研究[J].山东国土资源,2013,29(9):24-31.
- [3] 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.
- [4] 周世海,杨询昌,梁伟,啜云香,李志恒.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.
- [5] 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.
- [6] 周训,陈明佑.深层地热水钻井内动水位升高值的计算[J].勘查科学技术,2000,(5):33-35.
- [7] 卢德唐,侯彬彬,王磊.考虑井筒热效应的气体井底压力计算[J].中国科学技术大学学报,2010,40(3):259-265.

Effect Analysis on ReInjection Water Temperature to Reservoir ReInjection in Sandstone

——Setting Geothermal Reserve in Guantao Formation in Dezhou City as an Example

ZHANG Pingping, WANG Xiuqin

(Lubei Geo-engineering Exploration Institute, Shandong Dezhou 253072, China)

Abstract: According to the relationships between different tail water temperatures and reinjection volume and water level in reinjection experiments of sandstone porous type geothermal reservoirs, the influence of temperature to reinjection under the conditions of the same reinjection volume has been studied. Through eliminating the influence of temperature to the wellbore storage, converting the observation values of the water level to the real level in the same temperature, the permeability of the tail water reinjection in different temperatures has been analyzed.

Key words: Sandstone reservoir; reinjection temperature; wellbore effect; infiltration coefficient; Guantao formation; Dezhou city