DOI:10.11705/j. issn. 1672 -643X. 2014. 05. 047

西安市城区地热水人工加压回灌试验研究

吴继强，张纪哲，李晓辉，史方方，张 萍，白 萌
（西安市水资源利用技术服务中心，陕西 西安 710054）

摘　要：为研究西安市地热水回灌的可行性及适合的回灌模式，本文以陕西宾馆地热井加压回灌试验为例进行了试验研究，结果表明：在西安城区地热水中开展单井加压回灌是可行的，通过分析加压前后回灌能力的变化、压力与回灌量之间的关系以及回灌量与出水量之间的联系，对回灌过程中的堵塞机理进行了分析，结果说明加压回灌可以有效提高回灌能力，增大回灌量。

关键词：地热；加压回灌；空调尾水；西安市城区
中图分类号：TU911.112　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1672-643X(2014)05-0215-04

Experiment on artificial pressure re-injection of geothermal water in Xi'an suburb

WU Jiqiang, ZHANG Jizhe, LI Xiaohui, SHI Fangfang, ZHANG Ping, BAI Meng
(*Technical Advisory Center of Xi'an Water Resources Utilization*, *Xi'an* 710054, *China*)

Abstract: In order to study the feasibility of geothermal water re-injection and the appropriate recharge mode, the paper took geothermal pressure re-inject experiments in Shaanxi Hotel for examples. The result showed that pressure re-injection of single well is feasible in Xi'an suburb . Through the analysis of the change of re-injection capacity before and after artificial pressure, it analyzed the relationship between pressure and re-injection volume and the connection between re-injection volume and water yield, and analyzed the plug mechanism in the process of re-injection s. The results showed that the pressure re-injection can effectively improve the re-injection ability and increase the re-injection volume.

Key words: geothermal; pressure re-injection; airconditioning tailrace; Xi'an suburb

地热水资源作为一种清洁型能源，对发展经济、改善能源结构、保护环境及实施可持续发展战略意义重大，是经济－能源－环境可持续发展战略中的一个重要组成部分。

自20世纪90年代以来，渭河盆地地热资源的开发利用逐渐兴起，至90年代末形成高潮[1]。截止2012年西安市已有热水井200多眼，年开采热水量超过700万m^3，并且以3～5眼/年的速度增加。西安市利用地热水供暖、洗浴，减少了燃煤排放造成的环境污染，产生了良好的经济效益和社会效益。但由于开采井数和开采量的不断增加，且长期只采不灌，使得西安市各热储层水位快速下降，已形成了较大范围的降落漏斗，且漏斗中心区的地热水井出现了掉泵和不能连续供水的情况，个别地热井由于水位降低接近泵室管底部，长期不能恢复而导致报废。目前认为回灌可以有效地解决地热开发利用所带来的诸多问题[2,5]。但地热回灌技术复杂，回灌过程中可能引起回灌井井管及其周围热储的物理、化学堵塞，使得回灌效率降低，并有可能导致回灌井损坏等[3,4]。

为进行地热回灌技术研究，为西安地热资源的可持续开发利用提供技术支撑，西安市水资源利用技术服务中心2012年在陕西宾馆开展了地热水单井加压回灌试验研究，分析了加压回灌对回灌效率、回灌水量及回灌效果的影响因素，明确了回灌量与出水量、回灌压力之间的关系。

1　地热井回灌试验概况

1.1　试验场地及试验井概况

陕西宾馆地热井位于渭河盆地西安凹陷西南部。该井于2000年11月24日开钻，于2001年4月23日钻至井深3 854.50 m完钻，自上而下洗井后热水自流，井口出水水温102℃，开采层段为

收稿日期：2014-05-11；　**修回日期**：2014-06-06
基金项目：陕西水利科技计划项目(2013slkj－43)
作者简介：吴继强(1984-)，男，陕西凤翔人，硕士研究生，工程师，从事水资源管理及地热水回灌研究工作。

2871.86 ~3807.90 m,开采热储为新近系高陵群和古近系白鹿塬组,地层厚度 936.04 m,含水层厚度 169.3 m,含水层岩性为浅灰色细 - 中砂岩和灰白色含砾粗砂岩及砂砾岩,水化学类型为 SO_4^{2-}-Na^+ 型,矿化度6 294.6 mg/L。

1.2 主要试验设备

此次加压回灌试验的主要设备包括多级变频加压泵一台,电磁流量计一台、防腐蚀耐高温温度变送器一台、热水深井泵一台、水泵控制柜一台及回灌回扬管路系统。

1.3 回灌工艺

本次试验利用陕西宾馆水源热泵空调尾水作为回灌水源进行回灌,空调尾水通过管道输送至蓄水池中,由潜水泵送至变频泵中,再由变频泵通过加压由回灌管道输送至回灌井中,从而完成加压回灌;抽水回扬时,关闭回灌管道,启动热水泵,利用压力表、耐高温耐腐蚀的热水表和温度计控制抽水过程,从而完成回扬试验。加压回灌试验系统设备平面示意见图 1。

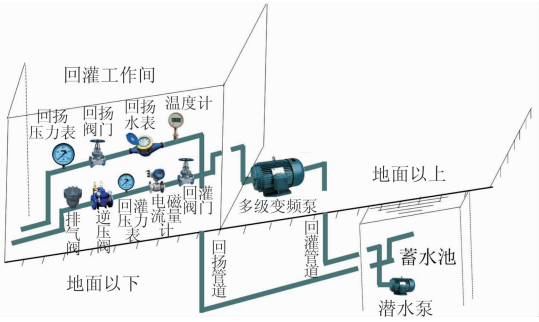

图 1 加压回灌试验系统设备平面布置示意图

1.4 回灌模式

本次回灌试验采用单井加压回灌模式,回灌过程中采用梯级回灌,分别采取不同回灌水量或回灌压力进行,研究回灌压力和回灌量之间的关系。

2 试验结果分析

此次回灌试验从 2012 年 8 月 2 日开始,到 9 月 10 日结束,有效试验时间 38 d,期间完成了自然回灌 2 次、加压回灌 8 次,共完成回灌水量 4 758 m^3。

2.1 加压前后回灌效果的对比

对比自然回灌和加压回灌后单位回灌量的变化可以得出,加压回灌可以有效增加回灌量,且增加的程度与所施加的压力成正相关关系,详见图 2 和表 1。

分析可知,自然回灌时单位回灌量为 5.72 ~ 5.75 m^3/h,加压回灌后,随着压力的增大单位回灌量也逐渐增大,当施加压力在 0.4 ~ 1.41 MPa 时,单位回灌量较自然回灌时提高了 78% ~ 178%,详见表 1。

表 1 稳定回灌阶段特征参数统计一览表 MPa, m^3/h, %

序号	稳定压力	初始回灌量	单位回灌量	增加回灌量 *	提高率
1	0	6.96	5.72		
2	0	6.24	5.75		
3	0.4	11.7	10.17	4.44	78
4	0.6	13.8	10.59	4.85	85
5	0.8	15.0	13.63	7.90	138
6	1.0	17.4	14.77	9.04	158
7	1.2	19.8	15.31	9.58	167
8	1.41	20.40	15.96	10.23	178

注:* 增加回灌量表示加压稳定回灌阶段单位回灌量与自然回灌稳定阶段单位回灌量之间的差值。

对比自然回灌和加压回灌时的单位回灌量可知,由于加压在一定程度上打开了热储层的流体通道并加快了流体迁移的速度,使得回灌流量有所加大;而所加压力越大,回灌流体的速度越快,从而使得回灌量越大。

2.2 回灌量与回灌压力的关系分析

回灌初期,回灌井内尚有部分空间且其中的空气未全部排掉,地下热水也未形成稳定的渗流场,所施加的压力也未稳定,综合导致回灌初期瞬时回灌量及波动范围较大;当回灌井内全部充满水后,孔内压力就会明显增加,此时所施加的压力也逐渐趋于稳定,瞬时回灌量及其波动范围明显变小;回灌压力稳定后,地热水稳定渗流场也逐渐形成。因此,回灌中后期瞬时回灌量趋于相对稳定,随着回灌时间的延长,回灌能力缓慢降低。详见图 3 ~ 8。

回灌压力稳定后的单位回灌量与回灌压力之间的关系为:单位回灌量 q' 随着回灌压力的增大而增大,单位压力瞬时回灌量随着压力的增大而减小,并均呈对数函数关系(见图 9 和图 10)。

2.3 回灌量与出水量关系分析

从稳定回灌量与稳定压力关系曲线(图 9)及单位压力回灌量与回灌压力关系曲线(图 10)中可以看出,回灌量与回灌压力关系同常规稳定流抽水流量与降深关系基本一致。基于此,可将回灌量等同于抽水流量(Q),回灌压力等同于降深(s),单位压力回灌量相当于单位降深流量(q),如果将回灌压力换算成降深,则 0.1 MPa 相当于 10 m 降深。因此,在相同"降深"情况下,回灌量小于抽水流量,且回灌量为抽水量的 19% ~58%,详见表 2。

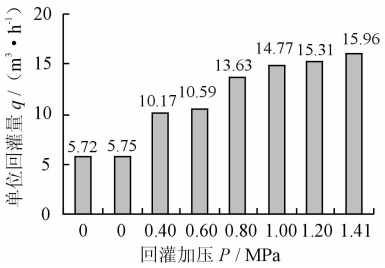

图 2　加压前后单位回灌量柱状对比图

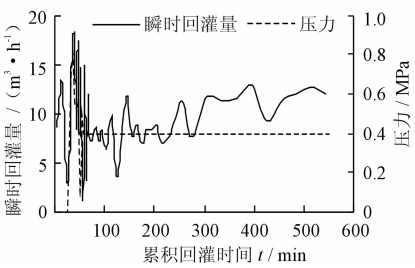

图 3　回灌压力与回灌量变化历时曲线(P = 0.4MPa)

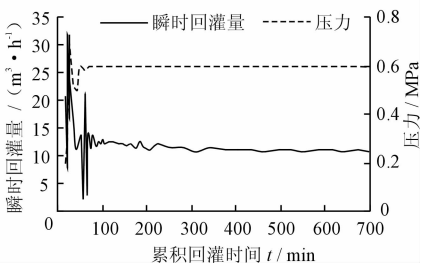

图 4　回灌压力与回灌量变化历时曲线(P = 0.6MPa)

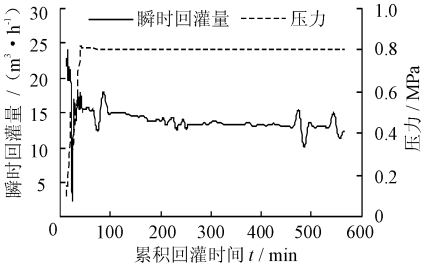

图 5　回灌压力与回灌量变化历时曲线(P = 0.8MPa)

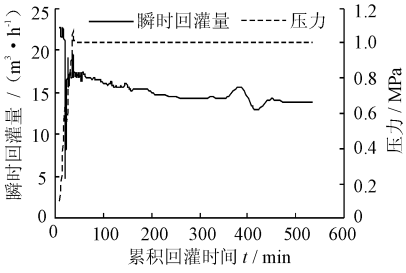

图 6　回灌压力与回灌量变化历时曲线(P = 1.0MPa)

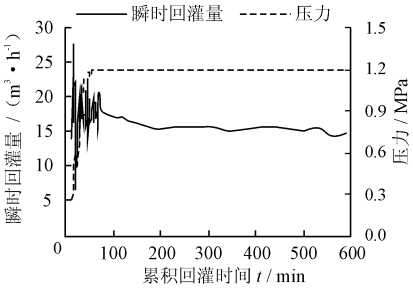

图 7　回灌压力与回灌量变化历时曲线(P = 1.2MPa)

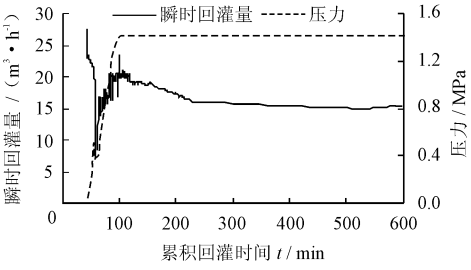

图 8　回灌压力与回灌量变化历时曲线(P = 1.41MPa)

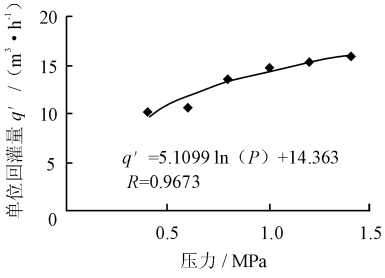

图 9　稳定回灌量与稳定压力关系曲线

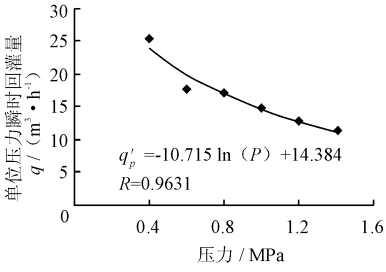

图 10　单位压力回灌量与回灌压力关系曲线图

表 2　地热回灌试验回灌量与抽水量对比　　m, m³/h, m³/h·s, %

抽水			回灌			q_p'/q
降深 S	抽水流量 Q	单位降深流量 q	降深 s'	抽水流量 Q'	单位降深流量 q_p'	
40	17.8	0.4403	40	10.17	0.2544	57.77
60	29.7	0.4870	60	10.59	0.1764	36.23
80	41.7	0.5231	80	13.63	0.1704	32.58
100	53.6	0.5530	100	14.77	0.1477	26.70
120	65.5	0.5786	120	15.31	0.1276	22.05
141	78.0	0.6023	141	15.96	0.1132	18.79

注:①抽水流量根据试验井成井时的抽水试验数据取得的相关性公式 $Q = 0.5957S - 5.9958$ 计算得出。② 单位降深流量根据试验井成井时的抽水试验数据取得的相关性公式 $q = 0.176S^{0.2468}$ 计算得出; ③ 回灌降深 $s' = 100 \times P$ (1 MPa = 100 m 水柱, P 为回灌压力,单位 MPa)。

2.4　堵塞机理分析

地热回灌注水过程中,由于受地下水温度及回灌热储层的影响,回灌井周围会产生物理阻塞、生物阻塞和化学阻塞,从而使回灌井周围渗流场始终处于动态变化之中,并随着回灌时间的延长回灌能力呈减小趋势,分析阻塞原因有:

(1)回灌水从回灌井向热储层运动,由于水的运动促使周围岩屑不停地运动,岩石碎屑很容易堆积在回灌井滤水管处堵塞滤水管,当大量的岩石碎屑在热储层中运动时,会引起热储层的物理堵塞,从

而造成回灌能力的减小,但当加压回灌所施加压力达到一定程度时,将打通回灌通道,提高回灌能力;

(2)此次回灌用水为地下潜水,由于回灌水的温度与热储层的温度不同,从而导致热水中的化学成分发生变化,在冷水和热水或热储层接触处生成一些新的物质,导致热储层的生物堵塞和化学堵塞,同时回灌水中的某些溶解物质也能使含水介质发生水岩作用,产生堵塞。

上述原因会导致局部热储层的阻塞和渗透性的降低。因此回灌时会在回灌井周围产生一个低渗透带,该地带成圆柱状包围在回灌井外面,渗透系数比原来的渗透系数显著变小,且不是常量。在时间上表现为,随回灌时间的推移,同一位置处的阻塞程度越来越大,渗透系数值越小;在空间上表现为随着距井轴而变化,距井轴越近,阻塞程度越大,渗透系数值越小,如图 11 所示。

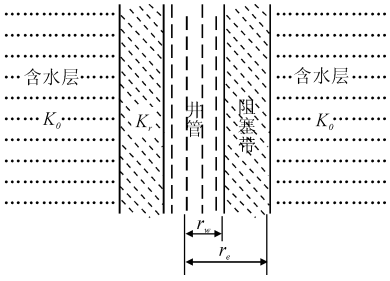

图 11 回灌井周围阻塞模式图

根据此次加压回灌试验结果表明,回灌时施加压力会减缓堵塞造成的回灌能力的降低,且压力越大,回灌能力的提高幅度越大,即通过施加压力可以打通回灌通道、提高渗透率,增加回灌量。

3 结 语

(1)加压回灌可以有效提高回灌能力,大幅增加回灌量,为切实解决地热水回灌量小的问题提供了有效途径。

(2)回灌过程中所施加压力越大,单位回灌量也就越大,说明加压回灌在一定程度上可以疏通渗流通道,提高回灌(渗水)能力。

(3)回灌过程中当回灌井内全部充满水后,回灌压力逐渐稳定,地热水稳定渗流场逐渐形成,瞬时回灌量趋于相对稳定,但随着回灌时间的延长,回灌井周围会产生物理阻塞和化学阻塞,回灌能力缓慢降低,停灌回扬或提高回灌压力,可减少回灌井管及周围热储的物理化学阻塞,提高回灌能力。

参考文献:

[1] 王 兴. 渭河盆地地热资源赋存与开发[M]. 西安:陕西可续技术出版社,2005.

[2] 何满潮,刘 斌,姚磊华,等. 地热水对井回灌渗流场理论研究[J]. 中国矿业大学学报. 2004,33(3):245 - 248.

[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] 贾旭兵. 关中盆地地下热水的可更新性与回灌问题研究[D]. 西安:长安大学. 2009.

[5] 蔡义汉. 地热直接利用[M]. 天津:天津大学出版社,2004.

(上接第 214 页)

4 结 语

有限元方法考虑围岩和衬砌材料的非线性及衬砌结构与围岩联合承载作用,模拟隧洞的开挖施工过程,能方便地模拟隧洞开挖支护各阶段施工过程围岩的应力场、位移场,定量的分析围岩隧洞的稳定性,对支护结构进行优化设计,其成果可作为设计和施工时参考。

参考文献:

[1] 中国水电顾问集团西北勘测设计研究院. 黄河羊曲水电站工程施工规划设计报告[R]. 西安:中国水电顾问集团西北勘测设计研究院,2011.

[2]吴家冠,段亚辉. 江坪河水电站溢洪洞围岩稳定性仿真分析[J],岩土力学,2009,30(8):2431 - 2435 + 2441.

[3]樊有望,徐光黎,吴张中. 基于 Mohr - Coulomb 准则的排水隧洞围岩稳定性有限元分析[J]. 探讨与分析,2008,12(1):34 - 36.

[4]张 波,盛和太. ANSYS 有限元数值分析原理与工程应用[M]. 北京:清华大学出版社,2005.

[5]吕西林,金国芳,吴晓涵. 钢筋混凝土结构非线性有限元理论与应用[M]. 上海:同济大学出版社,1997.

[6]中华人民共和国国家电力行业标准. DL/T5195 - 2004 水工隧洞设计规范[S]. 北京:中国电力出版社,2004.