



基于 Origin 的渗透系数衰减方程在地热水回灌中的应用

赵鹏飞

盘锦辽河油田水文地热有限公司, 辽宁 盘锦 124010

摘要: 孔隙型热储层的回灌过程中, 由于物理堵塞、生物化学堵塞、悬浮物堵塞和气体堵塞, 热储层的渗透性下降, 回灌能力变弱。为了定量查明渗透系数的衰减, 以辽南地区某回灌试验为例, 使用 Origin 软件计算出研究区渗透系数衰减方程, 在此基础上计算了回灌井灌压-时间关系曲线和回扬周期。研究表明, 利用 Origin 软件求取渗透系数衰减方程具有方便快捷、规范性好等优点, 可在回灌试验数据处理中推广使用。

关键词: Origin 软件; 回灌试验; 渗透系数衰减方程; 回扬周期; 地热水

APPLICATION OF ORIGIN-BASED PERMEABILITY COEFFICIENT ATTENUATION EQUATION IN GEOTHERMAL WATER RECHARGE

ZHAO Peng-fei

Panjin Liaohe Oilfield Hydrogeothermal Co., Ltd., Panjin 124010, Liaoning Province, China

Abstract: During the recharge process of pore-type thermal reservoir, the permeability of thermal reservoir decreases and recharge capacity weakens due to physical, biochemical, suspension, and gas blockages. To quantify the attenuation of permeability coefficient, taking the recharge test in Southern Liaoning as an example, the Origin software is used to calculate the attenuation equation of permeability coefficient in the area, and then the relation between recharge pressure in the well bore and time, as well as the pump lifting cycle. The results show that the application of Origin to obtain the permeability coefficient attenuation equation has the advantages of convenience, efficiency and good feasibility, which can be widely used in the data processing of recharge test.

Key words: Origin software; recharge test; permeability coefficient attenuation equation; pump lifting cycle; geothermal water

0 引言

地热资源是可再生资源。在我国通过多年的开发利用, 地热能规模不断扩大, 获得了明显的经济、环境和社会效益, 但过量开采使热储层水位持续下降, 地热井产水能力减弱, 开采成本增加; 而且由于供暖中开发利用效率低, 弃水温度过高, 长期排放势必造成资源

的严重浪费和弃水中有害物质及余热对环境造成污染。

为了解决地热资源开发过程中所遇到的上述问题, 我国开始采用回灌开采的模式来代替过去的只开采不回灌模式, 这样不仅可以有效地维持热储压力, 防止弃水污染环境, 还能通过深循环, 充分利用热储层中岩石骨架中的热能, 延长热储开发利用年限, 保证地热

收稿日期: 2019-01-15; 修回日期: 2020-09-04. 编辑: 张哲.

作者简介: 赵鹏飞(1986—), 男, 工程师, 主要从事水文地质和工程地质、岩土工程方面的研究工作, 通信地址 辽宁省盘锦市兴隆台区盘锦辽河油田水文地热有限公司, E-mail//zhpf86@163.com

井长年稳定生产,保护宝贵的地热资源^[1-3].

在回灌过程中发现,孔隙型热储层回灌量小且衰减严重,热储层容易堵塞.为了定量查明渗透系数的衰减,本研究使用 Origin 软件求取渗透系数衰减方程,以辽南地区某回灌试验为例,求取渗透系数衰减方程,进一步进行相关计算,以得到对孔隙型热储层回灌的分析思路和解决方案.

1 基于 Origin 软件的计算渗透系数衰减方程

Origin 是 Microcal 公司推出的数据分析和绘图软件.数据分析包括曲线拟合、统计、排序、计算等各种完美的数学分析功能,而基于模板的绘图可以做出几十种二维和三维图形.Origin 软件具有简单、易懂、直观、形象、图形化及对使用者不要求有较高的计算机语言编程基础等优点,全世界已有数以万计的科研和工程技术人员在使用.

Origin 求渗透系数衰减方程步骤如下:1) 双击软件图标,从主菜单栏中单击“文件”,新建工作表;2) 在新建的工作表中粘贴处理好的时间-瞬时渗透系数表;3) 选中“数据”,点击“绘图”,选择“散点图”,屏蔽部分初始数据;4) 点击“分析”,选择“指数拟合”;5) 在“指数拟合”下选择“Exponential”,选择“Exp2pMod1”即选择了 $y=ae^{bx}$ 函数,点击“拟合”;6) 对图表的刻度、图例等进行调整;7) 点击“文件”导出图形.

可以看出,利用 Origin 软件求取渗透系数衰减方程方便快捷,规范性好,可在回灌试验数据处理中推

广使用.

2 地热水回灌试验

2.1 试验区热储层特征

试验区位于下辽河平原南部,热储层为馆陶组,岩性为灰色中砂岩、含砾砂岩,属于孔隙型热储层.热储层深度 1100~1400 m,砂岩单层厚度大,一般 10~20 m,累计厚度 100~200 m;物性好,有效孔隙度 20%~35%,渗透率一般为 $105 \times 10^{-3} \sim 500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$.单井产水量可达 1200~2400 m^3/d ,水温可达 52~70 $^{\circ}\text{C}$.矿化度在 2.0 g/L 左右.

2.2 回灌试验流程

回灌试验系统主要包括开采井、除砂器、气水分离器、过滤器、回灌井等,回灌试验流程见图 1. 整个流程密封处理,降低生物化学堵塞.进行回灌试验时,启动抽水井水泵,记录流量计、压力计、温度计以及水位计等数据.

2.3 回灌试验过程

回灌水源为开采井热水,温度 65 $^{\circ}\text{C}$ 左右,静水位 55 m;回灌过程中对水温、水量、水压进行观测.试验于 2017 年 6 月 2 日开始,至 6 月 7 日结束,依据试验数据绘制历时曲线,见图 2.

3 结果与分析

3.1 渗透系数衰减方程

地下水回灌是抽水的逆过程,对于同一含水层而

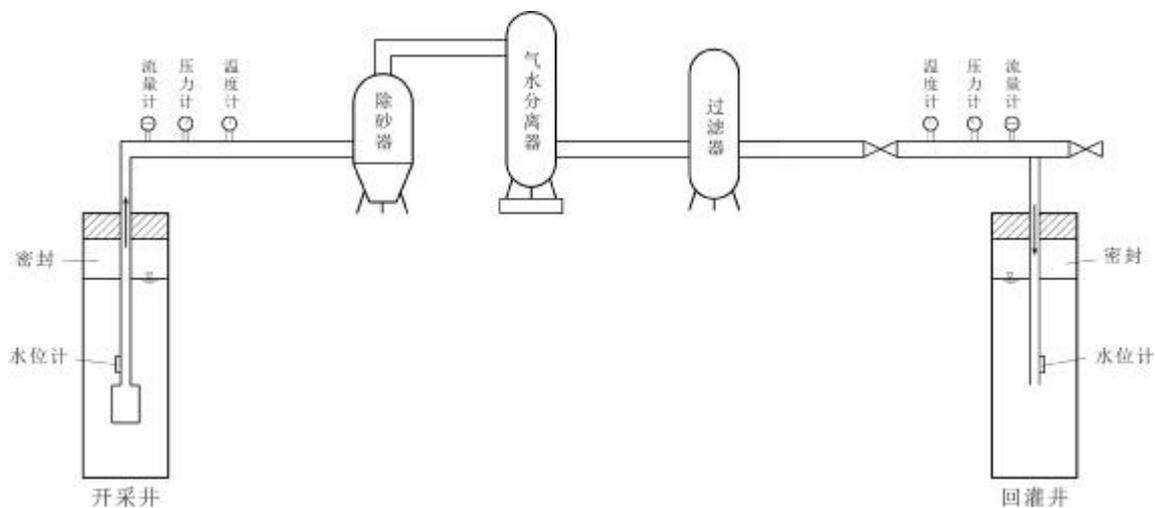


图 1 回灌试验流程

Fig. 1 Flowchart of recharge test

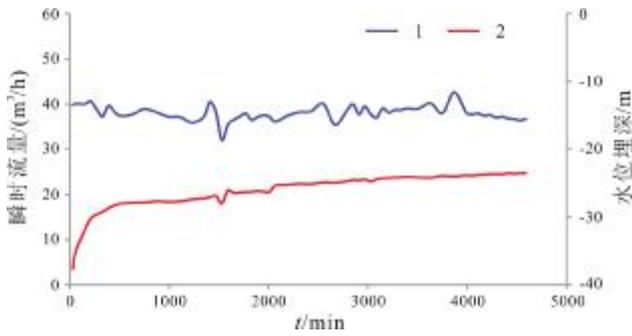


图 2 回灌试验历时曲线

Fig. 2 Duration curves of recharge test

1—瞬时流量(instantaneous flow); 2—水位埋深(groundwater depth)

言, 回灌和抽水只是水的运动方向不同, 适用于抽水的理论公式对回灌同样适用^[4-6]. 理论公式为:

$$K_{\text{注}} = \frac{0.366Q_{\text{注}} \lg R}{MH} \lg \frac{R}{r_w} \quad (1)$$

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

式中: $K_{\text{注}}$ 为注水渗透系数 (m/d); $Q_{\text{注}}$ 为注水流量 (m³/d); H 为水位埋深回升值 (m); R 为影响半径 (m); M 为含水层有效厚度(m); r_w 为井孔半径(m).

通过对回灌过程的分析可知, 在距井轴某处, 随回灌时间的推移, 堵塞会越来越严重, 导致渗透系数不断减小, 因此回灌渗透系数可表示为随时间变化的函数, 可表示为 $K = K_0 e^{-\lambda t}$. 式中 K_0 为渗透系数初始值, λ 为渗透系数衰减系数^[1].

将回灌试验的原始观测数据代入式(1)(2), 进行迭代计算, 求得回灌过程中不同时刻的渗透系数, 用 Origin 软件作回归分析, 得到渗透系数的衰减曲线, 见图 3.

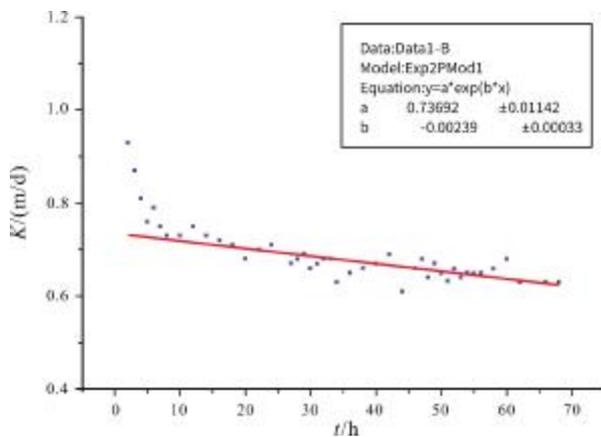


图 3 回灌试验的渗透系数衰减曲线

Fig. 3 Permeability coefficient attenuation curve of recharge test

渗透系数衰减曲线的回归方程:

$$K(t) = 0.737 e^{-0.00239 t} \quad (3)$$

3.2 不同回灌量下回灌井井筒中灌压-时间关系曲线

计算回灌井井筒中灌压的公式可由公式(4)推导出来:

$$H = \frac{Q \lg \frac{R}{r_w}}{2.73MK(t)} \quad (4)$$

当渗透系数取图 3 所示的渗透系数衰减方程中的 $K(t) = 0.737 e^{-0.00239 t}$, 带入相关参数, 所得的回灌井井筒中灌压时间关系曲线如图 4 所示.

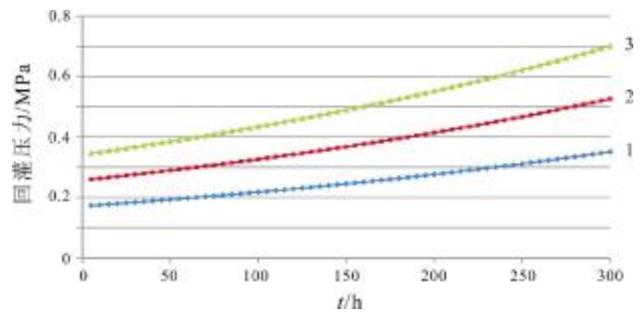


图 4 回灌井井筒中灌压-时间关系曲线

Fig. 4 Curves of recharge pressure in the wellbore vs. time

回灌流量(recharge flow): 1—40 m³/h; 2—60 m³/h; 3—80 m³/h

从图 4 看出, 当回灌流量一定时, 灌压为时间的增函数, 图中 3 条曲线的回灌流量从下到上分别为 40、60、80 m³/h. 可以看出随着时间的增加, 每个回灌量所需的灌压增大. 这主要是因为随着回灌时间的增加, 热储层渗透系数降低, 若要灌进同样的流量, 必然要增大灌压.

3.3 自然回灌和压力回灌下回扬周期

由前文分析可知, 在地热水的回灌过程中热储层发生堵塞, 在相同的回灌压力下, 回灌量会随时间的推移而不断衰减, 致使回灌效率降低. 这时采用回扬的措施可以在短时间内消除或缓解堵塞, 回扬的目的是疏通回灌水的运移通道, 提高回灌效率^[1].

在生产实践中, 需要计算不同回灌量下自然回灌和压力回灌下的回扬周期. 本次试验中潜水泵的扬程余压到回灌井井口剩余 0.2 MPa, 故压力回灌使用 0.2 MPa. 在公式(3)(4)中带入相关参数, 计算结果见表 1^[7].

表 1 自然回灌与压力回灌下回扬周期
Table 1 Pump lifting cycle under natural and pressure recharge

自然回灌		压力回灌(0.2 MPa)	
Q/(m ³ /h)	t/d	Q/(m ³ /h)	t/d
40	20.4	40	25.8
60	13.3	60	18.7
80	8.3	80	13.7

4 结论

1) 地热水回灌过程中由于热储层的物理堵塞、生物化学堵塞、悬浮物阻塞等, 渗透系数是衰减的, 且服从衰减方程 $K=K_0e^{-\lambda t}$. 渗透系数衰减是砂岩型热储层回灌能力下降的主要原因。

2) 渗透系数衰减方程是计算回灌井井筒中灌压-时间关系曲线、回扬周期等相关数据的基础。

3) 利用 Origin 软件求取渗透系数衰减方程具有方便快捷、规范性好等优点, 可在回灌试验数据处理中推广使用。

参考文献(References):

[1] 何满潮, 刘斌, 姚磊华, 等. 地下热水回灌过程中渗透系数研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2002, 32(4): 374-377.
He M C, Liu B, Yao L H, et al. Study on hydraulic conductivity during geothermal reinjection [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2002, 32(4): 374-377.

[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, 35(6): 125-128.
Lin L, Wang L C, Zhao S M, et al. A discussion of the factors affecting geothermal reinjection in the geothermal reservoir of porous type in Tianjin [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(6): 125-128.

[3] 林建旺, 刘小满, 高宝珠, 等. 天津地热回灌试验分析及存在问题[J]. 河南理工大学学报, 2006, 25(3): 200-204.
Lin J W, Liu X M, Gao B Z, et al. Analyses and discussion on geothermal reinjection test in Tianjin [J]. Journal of Henan Polytechnic University, 2006, 25(3): 200-204.

[4] 薛禹群. 地下水水力学原理[M]. 北京: 地质出版社, 1986: 76-77.
Xue Y Q. Principles of groundwater dynamics [M]. Beijing: Geology Press, 1986: 76-77. (in Chinese)

[5] 白宏洁, 方永伦, 郭健. 开封市超深层地下水回灌研究[J]. 人民黄河, 2010, 32(9): 48-49.
Bai H J, Fang Y L, Guo J. Study on reinjection test of ultra deep groundwater in Kaifeng [J]. Yellow River, 2010, 32(9): 48-49. (in Chinese)

[6] 朱红丽, 刘小满, 杨芳, 等. 开封市深层地热水回灌试验分析与研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2011, 30(2): 215-219.
Zhu H L, Liu X M, Yang F, et al. Analysis and study on geothermal reinjection test of deep groundwater in Kaifeng [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2011, 30(2): 215-219.

[7] 赵建康, 张勇, 崔进. 压力回灌技术在水源热泵系统中的应用研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(3): 55-58.
Zhao J K, Zhang Y, Cui J. Application research on pressure recharge in underground-water source heat pump system [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010, 37(3): 55-58.

(上接第 91 页/Continued from Page 91)

[30] 傅良魁, 李金铭, 陈兆洪. 埋藏极化体激电时间谱视参数的实验研究结果[J]. 地质与勘探, 1985, 21(12): 38-43.
Fu L K, Li J M, Chen Z H. Experimental results of apparent parameters of IP time spectrum of buried polarized bodies [J]. Geology and Prospecting, 1985, 21(12): 38-43. (in Chinese)

[31] 张世龙, 康伟浩, 任二峰, 等. 井中三分量磁测在青海祁连小水沟地区铁多金属矿的应用[J]. 地质与资源, 2019, 28(4): 401-404.
Zhang S L, Kang W H, Ren E F, et al. Three-component magnetic survey in the borehole of Xiaoshuigou iron polymetallic deposit, Qinghai province [J]. Geology and Resources, 2019, 28(4): 401-404.