

地热回灌井井底压强新解

周萌,任晓霞,杨淑云

(中国地质环境监测院,北京 100081)

摘要:前人对地热回灌井的井底压强评价主要通过水位和井内水温、密度分布进行相对静态计算。为了更客观地研究井底压强计算,该文进行了更全面的分析。当在对模拟地热回灌井的尾水出水口压力进行计算时,发现了尾水对下部水柱产生 13.07 m 水柱当量压强,并结合估计的回灌平衡状态下井内温度(密度)分布,计算出井底压强及其他相关数据,并与静井状态进行了对比,认为在回灌井结构不变的前提下,井底的压强主要由尾水出水口压力、动水位和温度(密度)分布共同决定。

关键词:地热;回灌;动水位;井底;压强

中图分类号:P641.5⁺5

文献标识码:B

引文格式: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):37-40.ZHOU Meng, REN Xiaoxia, YANG Shuyun. New Arithmetic on Evaluating the Intensity of Pressure on the Bottom of Geothermal Re-injection Well[J].Shandong Land and Resources, 2016,32(1):37-40.

0 引言

众所周知,地热是一种绿色可持续发展的资源,具有分布广、规模大、利用方式多等特点。举世闻名的冰岛拥有洋中脊火山和丰富的冰雪融水结合的优质地热资源,全年持续高温高压自喷,无需回灌。但是,中国的地热资源以中低温孔隙型为主,且埋深一般在 500~4 000 m,资源密集和丰富程度远不及冰岛,若用于洗浴、种养殖和供暖则需要开发大量地热水,而孔隙型地层的含水率偏低且补给困难。因此,需主动维持地层中的水量和水压,即采用人工回灌等方式^[1-2],才能实现地热在中国的可持续利用。

在回灌过程中,研究者需持续观测水位,并实时分析回灌效果。前人利用井内温度的分布,得知密度的分布,结合水位高度,计算出井底压力值^[3]。该文在前人研究的基础上,对回灌尾水管道没入水面以下的回灌方式进行了模拟分析,发现尾水水流会增加井内水柱对井底的压力。

1 模拟地热回灌井基本情况

该文参照天津、德州等地开发古近系热储的结

构,虚拟了一个地热回灌井^[4],此回灌井采用二开直井结构,其中一开用套管来封闭浅部松散低温层,垂直长度为 500 m,内径为 0.3 m;二开为裸眼成井,形成井与地层的水通道,垂直长度为 400 m,内径为 0.2 m。回灌前静水位为 55 m(距离井口的埋深,类似垂直位置数据均为定义),回灌达到平衡时动水位为 50 m。回灌装置较简单,尾水管从井口进入一开,井口未安装封闭的井口装置。管道末端埋深 70 m,没入静水位以下 20 m,以避免尾水保留在空气并溶解氧气,减少对套管的氧化作用;尾水管为圆形开口,管外径 0.16 m,内径 0.15 m,静井时管内的水位也为埋深 55 m 处。回灌流量为 60 m³/h,温度为 25.0℃,密度为 996.950 kg/m³,在入井口处已具有 5 m 水柱当量的静压。回灌设施与主要尺寸信息见图 1。

2 静井状态下井内温度分布情况

2.1 井内温度分布

该回灌井穿透浅部第四系和古近系顶部松散层,二开揭示古近系砂岩热储层。参考河北雄县地

收稿日期:2015-06-30;修订日期:2015-08-05;编辑:曹丽丽

作者简介:周萌(1982—),女,山西运城人,工程师,主要从事水工环领域信息化工作;E-mail:zhoum@mail.cigem.gov.cn

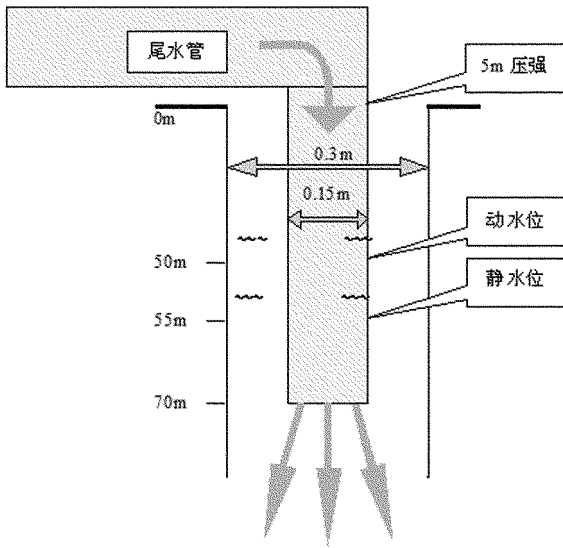


图 1 回灌井剖面图

热井在静井状态下的测温曲线^[5],在第四系和古近系内温度为稳定上升,在水面 100 m 处为 20.0℃,900 m 处为 52.0℃,归纳出其温度—埋深相关函数为:

$$t = 20 + 0.04H \quad (1)$$

式中: t —地热水温度(℃); H —距离井口的埋深(m)。引用至该模拟回灌井,得出温度—埋深关系曲线(图 2)。

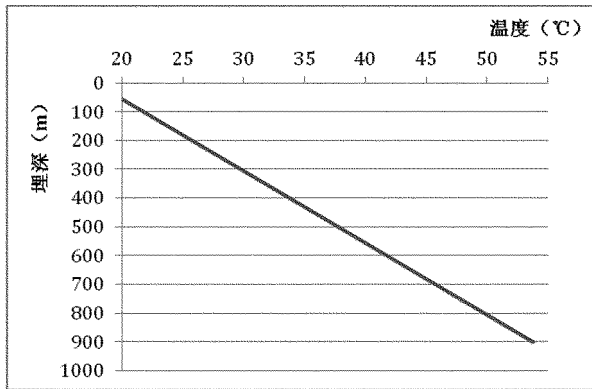


图 2 地热水温度—埋深关系曲线

2.2 地热水密度

因水在常见压力范围内体积变化较小,因此,在此忽略压力因素,引用标准大气压下不同温度时水的密度(表 1)^[6],进行适应性插分取值,得知地热井内任一埋深处的计算密度。对该回灌井每 20 m 水柱进行分段压强计算,得到了压强—埋深曲线(图 3)。

表 1 标准大气压下水温与密度对照

温度(℃)	密度(kg/m ³)	温度(℃)	密度(kg/m ³)
0	999.87	50	988.07
4	1000	60	983.24
10	999.73	70	977.81
20	998.23	80	971.83
30	995.67	90	965.34
40	992.24	100	958.38

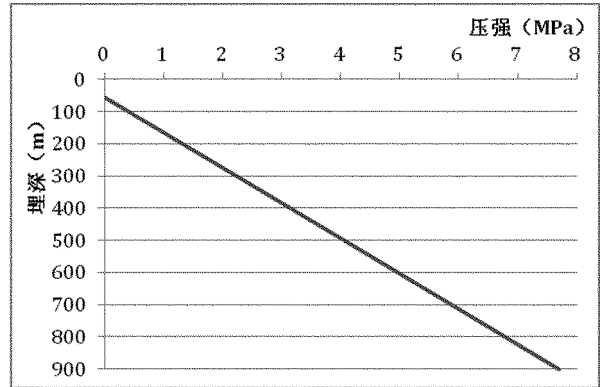


图 3 回灌井内地热水压强—埋深曲线

计算得知,静井状态下,845 m 水柱形成的井底压强为 8.231 MPa,平均密度为 992.952 kg/m³,对应的平均温度为 37.8℃,井底压强相当于 841.61 m 的回灌水(25℃)水柱。尾水回灌将降低井内平均温度,但即便井内水柱完全被尾水冷却至 25℃,其水柱高度应降低至 841.61 m,即埋深约 58.4 m,仅比静水位下降 3.4 m。

这时,可以发现如下矛盾:回灌的冷水温度比井内低,则回灌平衡后动水位应该比静水位低,而实际上,很多地热井都很难实现规模回灌,即回灌至 40 m³/h 以上时,就出现井底严重堵塞,动水位急剧上升,甚至溢出井口。该模拟回灌井的动水位比静水位上升了 5 m,表明井底压力是随人为行为而变化的。

该回灌井实现 60 m³/h 的规模,倒推分析得知,井内水柱对井底的压力有了明显增长,才能推动大量尾水进入储层。案例中,动水位比静水位上升 5 m,井内温度降低且水柱密度变大,能否增加足够的水柱压强?

3 回灌平衡情况分析

井底压力为井内水柱形成。相对于静井时,回灌直接改变了尾水管出水口处的水流状态,间接改变了动水位、水柱流动速度(由静止变为向下)、水

柱温度及密度,最后改变了井底压力。因此,需针对这些直接变化和间接变化进行深入分析。

3.1 尾水管出水口处压力场分析

该回灌井采用开放式井口、尾水管没入液面以下排放,没有安装封闭的井口装置,地热水在出水口位置以上、尾水管与一开套管间的环空地区,是与大气直接接触的。地热用户没有对回灌尾水进行专门额外加压,尾水仅带有地热利用系统产生的余压。因此,将尾水出水口处作为井内水柱状态的分界面,分析此面承受的上部尾水水柱和环空地热水的压力。回灌尾水管出水口对分界面压力计算公式如下:

$$F_{\text{出}} = P_{\text{出}} \times s_{\text{出}} = (P_{\text{静}} + P_{\text{动}}) \times s_{\text{出}} \\ = [\rho_{\text{回}} \times g \times (h_{\text{外}} + h_{\text{内}}) + \rho_{\text{回}} \times g \times h_{\text{动}}] \times s_{\text{出}} \\ = [\rho_{\text{回}} \times g \times (h_{\text{外}} + h_{\text{内}}) + \rho_{\text{回}} \times g \times (u_{\text{出}}^2/2g)] \times s_{\text{出}} \quad (2)$$

式中: $F_{\text{出}}$ —尾水管出水口压力; $P_{\text{出}}$ —尾水管出水口压强; $s_{\text{出}}$ —尾水管出水口面积(0.0707 m^2); $P_{\text{静}}$ —尾水管出水口静压强; $P_{\text{动}}$ —尾水管出水口动能折合压强; $\rho_{\text{回}}$ —回灌尾水密度(25°C 为 996.950 kg/m^3); g —重力加速度(9.81 m/s^2); $h_{\text{外}}$ —尾水原有压强折合水头(5 m); $h_{\text{内}}$ —地热井内尾水高度(70 m); $h_{\text{动}}$ —尾水动水头; $u_{\text{出}}$ —尾水管出水口流速(0.94 m/s)。

计算得:

$$F_{\text{出}} = 12963.39 \text{ N}$$

另外,环空水柱产生的压力计算公式如下:

$$F_{\text{环}} = P_{\text{环}} \times s_{\text{环}} = \rho_{\text{回}} \times g \times h_{\text{动}} \times s_{\text{环}} \quad (3)$$

式中: $F_{\text{环}}$ —尾水管出水口位置环空水柱向下压力; $P_{\text{环}}$ —尾水管出水口位置环空水柱向下压强; $s_{\text{环}}$ —环空横截面积(0.0506 m^2); $\rho_{\text{回}}$ —取回灌尾水密度(为 996.950 kg/m^3); $h_{\text{动}}$ —动水位相对于尾水管出水口位置的高度(20 m)。计算得:

$$F_{\text{环}} = 9888.44 \text{ N}$$

则分界面总压力:

$$F_{\text{界}} = F_{\text{出}} + F_{\text{环}} = 22851.83 \text{ N}$$

总压强为 0.323 MPa ,相当于 25°C 下 33.07 m 水柱压强,其中环空水柱贡献值为 14.31 m ,尾水管水流贡献值为 18.76 m 。而当前环空水柱高度仅为 20 m ,比实际的水柱当量少 13.07 m ,显然,仅考虑动水位高度是不能得出正确判断的。

3.2 出水口至井底水柱产生压强分析

因 25°C 回灌尾水的大规模注入,地热井温度分布也与静井时发生大规模变化。但因缺乏地热井周

边地层物性信息,由基础参数模拟预测井内温度/密度分布难以实现,而且也没有检索到公开发表的回灌井测温数据。在此,首先计算尾水在出水口以下每 200 m 垂直流程内的流速(影响尾水与地层热交换时长)、井筒内周长(影响水与地层接触面积)、静井地温均值(影响尾水温度),然后对每个阶段底部的尾水温度进行估计,对应查出密度,进而计算累计的井底压力(一开阶段压力也采用井底面积计算),引用参数与计算结果见表 2。

表 2 回灌平衡下各井段温度与压强情况

阶段 埋深	垂直长度 (m)	流速 (m/s)	时长 (m)	井筒内 周(m)	静井平均 温度($^\circ\text{C}$)	流过后 温度($^\circ\text{C}$)	流过后 密度(kg/m^3)	累计压强 (MPa)
出水口 至 100m	30	0.24	2.12	0.942	21.2	-24	997.206	0.293
至 300m	230	0.24	14.13	0.942	25.8	-25	996.950	2.249
至 500m	430	0.24	14.13	0.942	33.8	-28	996.182	4.204
至 700m	630	0.53	6.28	0.628	41.8	-33	994.641	6.155
至 900m	830	0.53	6.28	0.628	49.8	-38	992.926	8.104

尾水出水口面上部压强为 0.303 MPa ,下部水柱形成的总压强为 8.104 MPa ,则井底压强为 8.427 MPa ,相当于 25°C 下 861.66 m 水柱,而实际动水位以下水柱为 850 m ,利用约分后的总热量法计算其平均温度为:

$$t_{\text{均}} = \sum (t_{\text{段}i} \times V_{\text{段}i} + t_{\text{环}} \times V_{\text{环}}) / V_{\text{总}} \quad (4)$$

式中: $t_{\text{均}}$ —平均温度; $t_{\text{段}i}$ —表 2 中各段水柱温度; $V_{\text{段}i}$ —各段水柱体积; $t_{\text{环}}$ —尾水出水口以上环空水柱温度,取 25°C ; $V_{\text{环}}$ —环空水柱体积。计算得出:

$$t_{\text{均}} = 33.8^\circ\text{C}$$

得到回灌平衡后的状态与静井状态下的对比,由以上评估结果可以看出, $60 \text{ m}^3/\text{h}$, 25°C 的回灌水流使井内平均温度降低了 4.0°C ;回灌平衡后的井底压力比静井时增加了 25°C 下 20.05 m 的压强,其成因主要由如下 3 方面组成(表 3)。

表 3 静井与回灌平衡状态下井底情况对比

状态	水柱平均 温度	井底压强 (10^5 Pa)	折合 25°C 水柱高度(m)	水面高度 (m)
静井	37.8	8.231	841.61	850
回灌平衡	~33.8	8.427	861.66	855

(1)环空区水位上升 5 m ,但其贡献折合到完整的一开截面时,仅相当于 3.58 m 的 25°C 水柱。

(2)尾水管水流形成的 12963.39 N 压力在由一开至二开转变时损失后,其水柱贡献值由 18.76 m 减小至 8.34 m 。

(3)另外,井内温度降低,密度增大,及其他计算和估计误差,形成了剩余 8.13 m 水柱增量。

4 结论与建议

该文采用回灌井模型和静井测温数据,对静井和回灌平衡下的井底压强进行了计算分析,认为在工作状态下,回灌井井底压强主要由动水位以下水柱的重力和尾水管出水压力组成。为进一步完善相关研究和保障地热循环利用,提出如下建议:

(1)加强对原始资料和动态资料的获取。该文中缺乏地热井穿过的各段地层物性数据,这需要加强对地热钻井中的取心和测试工作,以形成宝贵的原始资料。另外,缺乏在回灌平衡下的井内温度/压力变化数据,因此,需要对生产阶段的地质资料的获取。

(2)适度封闭加压可高效利用余能和提高回灌效果。该文计算出了所论述回灌尾水管的“加压”

效果,所以在此建议,对井口进行封闭,可以充分利用尾水管道中的余压,进而提高回灌效果。

参考文献:

- [1] 张学真.地下水人工补给研究现状与前瞻[J].地下水,2005,(1):25-28,66.
- [2] 周训,周海燕,方斌.浅析开采条件下地下热水资源的演变[J].地质通报,2006,(4):482-486.
- [3] 周训,陈明佑,赵维明.深层地下水钻井井内动水位升高值的计算[J].勘察科学技术,2000,(5):33-35.
- [4] 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.
- [5] 李卫卫,饶松,唐晓音.河北雄县地热田钻井地温测量及地温场特征[J].地质科学,2014,(3):850-863.
- [6] 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.

New Arithmetic on Evaluating the Intensity of Pressure on the Bottom of Geothermal Re-injection Well

ZHOU Meng, REN Xiaoxia, YANG Shuyun

(China Geo-environment Monitoring Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: The pressure on the bottom of geothermal re-injection well have been evaluated by predecessors through relative static calculation on water table, water temperature and density. In this paper, comprehensive analysis has been carried out in order to study the calculation of the pressure on the bottom of the well. While calculating the pressure of the outlet of tail water in a simulated re-injection well, the intensity of pressure equivalent of 13.07m water bar caused by tail water stream to the lower water bar has been discovered. The temperature (along with density) distribution of geothermal water in the well at different depth has been estimated while the well was steady with re-injection, and the pressure from the bottom and other relevant data have been gained as well. After the data comparison between the original steady well and balanced re-injection well, it is showed that in the same framework of re-injection well, the intensity of pressure on the bottom mainly determined by the tail water stream pressure at the outlet of re-injection pipe, the height of dynamic water table and the distribution of water temperature (along with density) in the well.

Key words: Geothermal; re-injection; dynamic water table; bottom of well; intensity of pressure