

抽灌同井季节性储能分析

倪 龙, 姜益强, 姚 杨, 马最良

(哈尔滨工业大学 热泵空调技术研究所, 哈尔滨 150090, nilonggn@163.com)

摘 要: 为了探究抽灌同井季节性储能的可能性和潜力, 采用经过现场试验验证过的数学模型对抽灌同井常年运行工况进行了数值模拟, 并以抽回水温度为基础建立了季节性储能的定量分析模型. 结果表明, 由于热贯通的存在, 前一个运行周期会对后面运行周期的抽水温度产生重大的影响, 证实抽灌同井出现了明显的季节性储能现象. 当负荷基本平衡时, 逐年的抽水平均温度和储能比基本保持不变. 对于北京地区夏冬运行模式, 此时季节性储能提供了约 73% 的低位热量和 24% 的热汇. 而当累积负荷不平衡时, 热源井的抽水温度出现明显升高或降低, 严重时使热源井失效.

关键词: 地源热泵; 抽灌同井; 季节性储能; 储能比

中图分类号: TK529

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)08-1287-05

Analyses of seasonal thermal energy storage for a pumping & recharging well

NI Long, JIANG Yi-qiang, YAO Yang, MA Zui-liang

(Institute of Heat Pump and Air Conditioning Technology, Harbin Institute of Technology,
Harbin 150090, China, nilonggn@163.com)

Abstract: Using the mathematical model validated by a field test, the perennial operation of pumping & recharging well (PRW) was simulated to explore the feasibility and potential of seasonal thermal energy storage (STES) of PRW. Meanwhile, a quantitative analysis model of STES was established based on the pumping and reinjection temperature. Results show that for the existence of thermal breakthrough, the operation of previous seasons has much effect on the temperature of pumping water in the later operation seasons. This behavior verifies that the PRW apparently has the phenomenon of STES. If the accumulated loads of space heating and cooling are kept in balance, the pumping temperature and the thermal energy storage ratio will basically remain unchanged. For a PRW in Beijing with summer-winter operation mode, the STES approximately provides 73% of low-temperature heat source and 24% of heat sink. However, if the accumulated loads are in unbalance, the pumping temperature will increase or reduce much annually and even the PRW may not work.

Key words: ground source heat pump; pumping & recharging well; seasonal thermal energy storage; ratio of energy storage

抽灌同井是地下水热泵在国内外的应用催生的成果. 其最早的报道是 1992 年丹麦技术大学校园内的一个足尺寸试验井^[1], 2001 年首次在我国北京某工程上成功投入运行^[2]. 随后在我国的推广与应用速度很快, 到 2006 年, 已有 250 多个工程项目采用抽灌同井, 建筑面积 360 多万

m^[3]. 该热源井适用于有合适埋深、较大厚度和回灌条件的含水层, 并能够提供适度水量和水质的地下水. 由于抽灌同井抽水和回灌在一口水井内同时进行, 含水层同一径向位置、不同深度处同时发生着抽水和回水现象, 使得地下水更容易从回水区域流到抽水区, 从而发生热贯通现象^[4], 当然这也使抽灌同井不需要像传统地下水热泵交换抽水井和回灌井就可以利用回灌的冷量或热量形成的季节性储能. 北京开展的某抽灌同井现场试验也表明, 抽灌同井冬夏均运行时, 季节性储能

收稿日期: 2008-10-19.

基金项目: 教育部博士点基金新教师项目(200802131051).

作者简介: 倪 龙(1979—), 男, 博士, 讲师;

姚 杨(1963—), 女, 教授, 博士生导师.

是抽灌同井低位热量来源的重要组成部分^[5]。目前,研究人员已经开始认识到蓄能将会是地源热泵低位热量的一个重要来源^[6-9]。但对抽灌同井这种特殊井结构形成的季节性储能现象的研究还不多,本文通过具体算例阐述了抽灌同井常年运行时的季节性储能现象,并进行了定量分析。

1 抽灌同井常年工况分析

抽灌同井内通过隔板把井分成3部分,井的下部是低压吸水区,上部是高压回水区,中间为隔断区。当潜水泵运行时,地下水从低压吸水区被抽至井口换热器中,向热泵提供低位热量或吸收冷凝热,再由同井返回到高压回水区。

模拟的建筑物为北京某办公建筑,共5层,总建筑面积5 100 m²,设计热负荷336 kW,设计冷负荷575 kW,全年累积热负荷1 247 GJ,累积冷负荷1 136 GJ。根据逐时负荷特性,采暖期定为11月8日至次年的3月2日,共115 d,空调期为6月11日至9月8日,供90 d。抽灌同井所在的含水层为均匀的砂砾含水层,初始温度15℃,渗透系数8.64 m/d,厚度40 m,埋深30 m,容积比热容为2 600 kJ/(m³·℃),导热系数2.5 W/(m·℃),热弥散度1 m。抽灌同井直径500 mm,抽水过滤网长度12 m,回水过滤网长度14 m,抽回水过滤网间距10 m,抽回水流量均为50 m³/h。

为了阐述抽灌同井的季节性储能现象,需要长时间(几年)的抽水温度、含水层温度场数据。为此,建立了抽灌同井地下水流动和传热的数学模型,该模型分为两部分:依据质量守恒、地下水动力学方程建立的地下水流动数学模型和依据能量守恒等建立的含水层传热的数学模型。抽灌同井地下水流动数学模型用于求解地下水渗流场,求得的地下水渗流速度作为含水层传热数学模型的已知条件,进一步逐时求解含水层温度场和抽灌同井的抽回水温度。采用该数学模型对丹麦技术大学校园内现场试验和北京开展的现场试验进行了数值模拟,模拟结果与抽水温度、含水层温度的实测值的误差均在10%以内,这表明所建立的数学模型是正确的,更为详细的论述可参阅文献[10]。

图1给出了抽灌同井8年中抽水温度 T_g 的变化。运行模式是先冬季取热工况运行,然后是过渡季I停车,而后是夏季排热工况,最后是过渡季II停车(简称为冬夏模式),年复一年,如此反复。由于抽水的影响,回水通过渗流从回水区渗流到

抽水区的趋势不可避免,这将加速热量或冷量从回水区到抽水区的传递,从而改变抽水温度。如图1所示,冬季取热工况时,抽水温度随着热泵的运行而逐渐降低,夏季排热工况抽水温度随着热泵的运行而升高。而且第一年的空调季初始抽水温度仅为12.4℃,低于含水层原始温度(15℃),排热工况运行770 h后抽水温度才恢复到含水层初始温度。这是因为排热工况运行之前,含水层经历了冬季取热工况和停车两个阶段。取热工况期间,取热之后的回水携带的大量冷量被转移到含水层中,通过对流、传导等方式将冷量逐渐从回水区传到抽水区,形成季节性储冷,使得抽水区含水层和地下水温度降低,从而导致夏季排热工况初期抽水温度低于含水层原始温度。但随着排热过程的持续,蓄存的冷量逐渐被消耗和中和,抽水温度也随之升高。

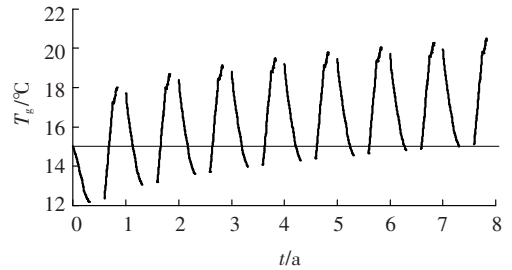


图1 抽灌同井抽水温度随时间的变化

由图1还可以看出,随着运行时间的延长,抽水温度总体上是升高的。这是由于制冷运行的累积排热量要大于制热运行的累积取热量。统计表明,一个空调季热源井的累积排热量为1 321 GJ,而一个采暖季热源井的累积取热量仅为964 GJ,前者大约是后者的1.37倍。这样含水层就会富积一部分热量,从而导致抽水温度的总体升高。

图2给出了8年中采暖季和空调季的抽水平均温度和温度极值。由图2可知由于累积排热量大于取热量,不论是抽水平均温度还是温度极值,均随着运行年数的延长而增加。采暖季抽水平均温度在热泵运行的第3年就超过了含水层初始温度,而采暖季抽水最低温度在第8年也超过了含水层初始温度。当然随着运行年数的增加,受影响的含水层体积逐渐增大,这种增加的趋势有所减弱。热泵运行的8年中,采暖季抽水平均温度升高了3.5℃,空调季抽水平均温度升高了2.6℃。从本算例的计算结果来看,这样的温度变化对于水源热泵机组的效率影响不大,但含水层中温度变化较为剧烈,对含水层微生态环境的影响还不得而知。

图3分别给出了热泵运行1年末和8年末含

水层温度相对于初始温度的变化图(横坐标为距井轴的距离 r ,纵坐标为埋深 d). 由图 3 (a) 可知,经过 1 年的运行,含水层温度并没有恢复到初始值,而是有升有降. 井轴附近含水层温度较高,在距井轴较远的地方含水层温度反而较初始值低,也即是说井轴附近的含水层集中的热量要大于夏季排入的热量和冬季取出的热量之差;并且随着时间的推移,第一个冬季取热的影响会逐渐向远处移动而被削弱. 这对于第 2 年冬季的取热大有好处,因此,第 2 年冬季热源井的抽水温度较上一年冬季高. 夏季排热工况的存在,很好地改善了下一年冬季热泵的取热,起到了季节性储能的效果. 而从图 3 (b) 可以看出,经过 8 年的运行,含水层温度基本上全面高于初始温度,0 °C 等温度变化线已经移到了 95 m 处,其右侧温度理论上低于初始温度,但降低很小 (<0.001 °C),可以认

为第 1 个冬季对含水层温度的降低已经被夏季排热占优所补偿,第一个冬季产生的蓄冷效应基本消失. 此时含水层富积了很大一部分热量. 这一方面改善了冬季的取热工况,另一方面也可能恶化后续的制冷工况.

2 季节性储能分析

传统的地下水源热泵通过冬夏生产井和回灌井的交替可以很好地利用季节性储能. 而抽灌同井由于自身井结构的特殊性,抽水管和回水管不便于交换,但由于热贯通的原因,季节性储能现象仍会出现. 抽灌同井的季节性储能现象是一种自发行为,它是热源井运行过程中的一种热量自动传递现象. 由于热贯通,取热时回灌水携带的冷量或者排热时携带的热量会有一部分移动到抽水段,形成季节性储能,从而对后期的抽水温度产生影响.

常规的储能系统,包括含水层储能,大致有两个显著的特点:一是储能和释能均在同一地方进行,例如储能盘管也是释能盘管,储能井亦是生产井;二是储能和释能分别进行,储能和释能在一地方因此它们只能分别进行,这时就有明确的储能和释能量. 然而抽灌同井的季节性储能是由于热贯通产生的,回灌的冷量或者热量只有通过热贯通传递到抽水段才能形成季节性储能,对下一个运行工况产生影响. 热贯通在运行过程中持续发生,提取热量的同时也在回灌冷量,排放热量的同时也在蓄存热量,冷量和热量在含水层中又相互抵消. 能量从回水段传递到抽水段也需要时间,从而使回灌能量的影响产生滞后. 因此,到底有多少热量或者冷量由于热贯通从回水段传递到抽水段而形成季节性储能很难定界. 再加上这是一种自发的行为,伴随着运行过程发生,因此我们不去确定储能和释能的大小. 我们关心的是前一年的运行对热源井后续的运行有何影响,夏季排热工况(冬季取热工况)的存在对冬季取热工况(夏季排热工况)有何影响,从地下水中提取的低位热源(汇)有多少来自于季节性储能. 为此定义一个评价参数——储能比.

储能比定义为从地下水中提取的热源(汇)中有多大比例来自于该取热工况(排热工况)以前的运行而形成的季节性蓄热(冷). 对于冬季取热工况,储能比指的是低位热源中季节性蓄热的比例;对于夏季排热工况,储能比指的是热汇中季节性蓄冷的比例. 这样根据定义,只有冬季运行时,由于不存在夏季工况,没有储热效应,只有因

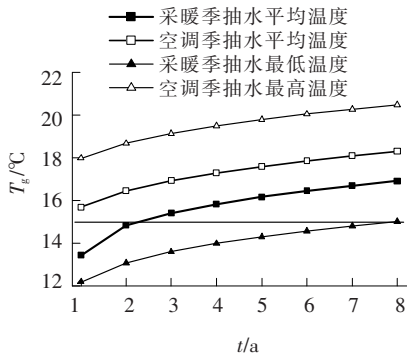


图 2 抽灌同井抽水平均温度和极值随时间的变化

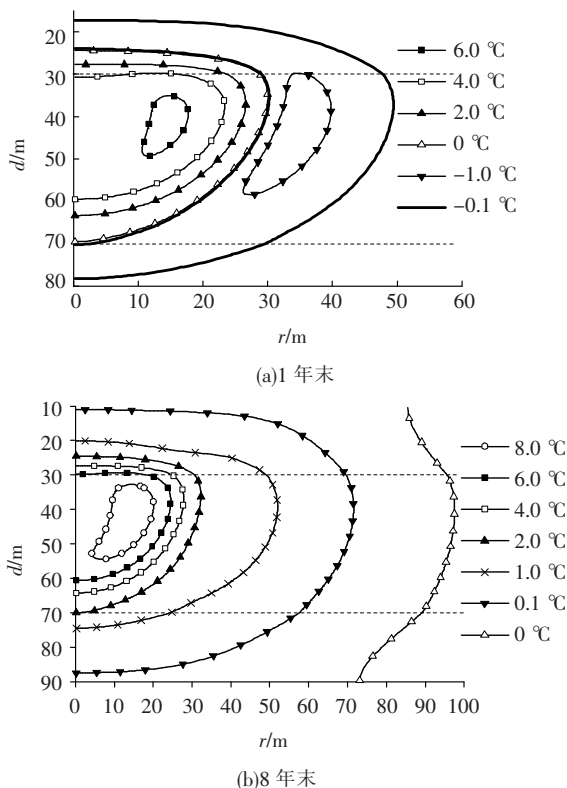


图 3 含水层等温度变化图

为热贯通造成的储冷效应,取热工况的储能比设为0;只有夏季运行时没有储冷效应,只有储热效应,排热工况的储能比也为0.

现就取热工况定义储能比.当热源井采用冬

夏运行模式时,可以认为第一个冬季取热工况的储能比为0,所提取的低位热量全部来自含水层,以此为基础定义冬季取热工况的储能比 ψ_s ,如图4所示.

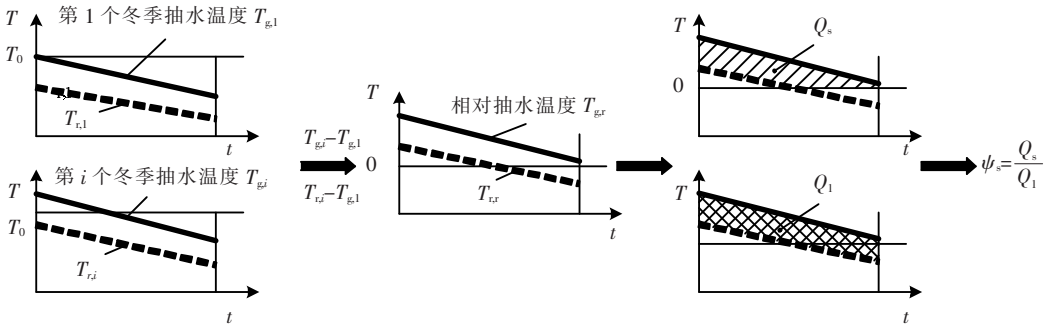


图4 储能比的定义

图4中,第一个冬季抽水温度和回水温度分别为 $T_{g,1}$ 、 $T_{r,1}$,待求储能比的冬季抽回水温度分别为 $T_{g,i}$ 、 $T_{r,i}$.以第一个冬季抽水温度 $T_{g,1}$ 为基准得到第 i 个冬季的相对抽回水温度 $T_{g,r} = T_{g,i} - T_{g,1}$ 、 $T_{r,r} = T_{r,i} - T_{g,1}$.如果没有储热或储冷效应,第 i 个冬季的相对抽水温度 $T_{g,r}$ 应等于0.正是由于储热或储冷效应使得相对抽水温度不等于0.为此,定义相对抽回水温度与 $T = 0$ 围成的面积为储能负荷 Q_s ,即由于储能提供的低位热量.当然也可能由于储冷效应过强,相对抽水温度全部在 $T = 0$ 的下面,此时取热工况的储能负荷 $Q_s = 0$.一般情况下,储能负荷 Q_s 为

$$Q_s = \sum_i C_w Q_{w,p} [T_{g,r} - \max(T_{r,r}, 0)]. \quad (1)$$

式中: Q_s 为储能负荷,kJ; C_w 为地下水容积比热容,kJ/($m^3 \cdot ^\circ C$); $Q_{w,p}$ 为抽水流量, m^3/s .

则储能比 ψ_s 定义为

$$\psi_s = \frac{Q_s}{Q_1} \times 100\%. \quad (2)$$

式中 Q_1 为热源井的累积负荷(kJ),可按下式计算:

$$Q_1 = \sum_i C_w Q_{w,p} (T_{g,r} - T_{r,r}). \quad (3)$$

类似地,计算夏季排热工况的储能比时,以热源井夏冬运行模式(即先按夏季工况运行,然后是过渡季,再是冬季工况和过渡季)的第一个夏季排热工况的抽水温度为基准,认为第一个夏季排热工况的储能比为0,来计算后续年份夏季排热工况的储能比.

图5给出了图1中北京抽灌同井算例的储能比.由图5可知,抽灌同井冬季取热工况的储能比逐年增加,第8年时高达97.9%,也即是8年累积的季节性储热提供了近98%的低位热量;而其

夏季排热工况的储能比逐渐降低,由第1年的45.1%降低到第8年的0,这正反映了热源井每年的排热量比取热量大许多,随着时间的推移,冬季储冷效应越来越小,以至于消失.

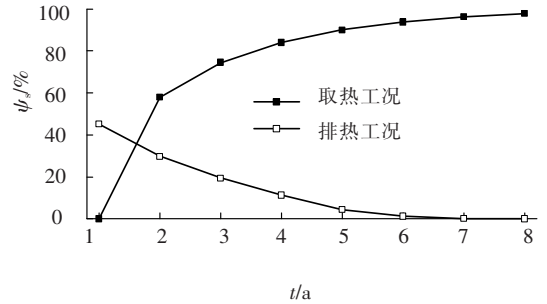


图5 抽灌同井冬夏运行模式储能比

从上面的分析可以看到,由于累积排热负荷和累积取热负荷的不平衡,从而导致某一工况的储能比很高,而另一工况的储能比很低;而当负荷基本保持平衡时,逐年的抽水平均温度和储能比的变化应该较小.图6给出了夏冬运行模式且累积取热负荷和排热负荷基本一致时,采暖季、空调季抽水平均温度及储能比.考虑到夏冬运行模式时,排热量会有一部分在含水层外围扩散,图6中累积排热负荷是取热负荷的1.05倍.由图6可以看出,从第三年起采暖季抽水平均温度基本稳定在 $15.3^\circ C$,空调季抽水平均温度稳定在 $16.3^\circ C$,

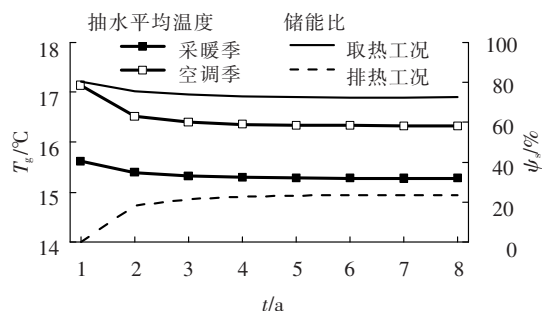


图6 负荷基本平衡时的抽水平均温度和储能比

此时季节性储能提供了约 73% 的低位热量和 24% 的热汇. 这样的抽水温度对于热源井和热泵机组是极其有利的,可以保证抽灌同井长期稳定的运行.

3 结 论

1) 抽灌同井常年运行时,出现了明显的季节性储能现象,季节性储能提供了很大一部分热源或热汇.

2) 当累积负荷不平衡时,长期运行热源井的抽水温度会出现明显升高或降低,严重时使热源井失效. 因而,在抽灌同井的设计阶段就应该考虑到地下负荷不平衡问题,给出适当的解决措施.

3) 当累积排热负荷与累积取热负荷基本平衡时,逐年的抽水平均温度和储能比基本保持不变. 对于北京地区夏冬运行模式,此时季节性储能提供了约 73% 的低位热量和 24% 的热汇.

参考文献:

[1] SORENSEN S, REFFSTRUP J. Prediction of long-term operational conditions for single-well groundwater heat pump plants [C]//Proceedings of the 27th Inter-society Energy Conversion Engineering Conference. San Diego, CA, USA: Society of Automotive Engineers, 1992:109-114.

[2] XU Shengheng, RYBACH L. Utilization of shallow resources performance of direct use system in Beijing [J]. Geothermal Resource Council Transactions, 2003, 27: 115-118.

[3] 杨自强, 曲满洪. 单井抽灌技术在我国的应用与发展[J]. 暖通空调, 2006, 36 (增刊): 208-210.

[4] 倪龙, 马最良, 孙丽颖. 抽灌同井热力特性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2006, 27 (2): 195-199.

[5] 倪龙, 马最良, 徐生恒, 等. 北京某同井回灌地下水地源热泵工程现场试验研究[J]. 暖通空调, 2006, 36 (10): 86-92.

[6] 汪训昌. 关于发展地源热泵系统的若干思考[J]. 暖通空调, 2007, 37 (3): 38-43.

[7] WANG Huajun, QI Chengying. Performance study of underground thermal storage in a solar-ground coupled heat pump system for residential buildings [J]. Energy and Buildings, 2008, 40 (7): 1278-1286.

[8] HAN Zongwei, ZHENG Maoyu, KONG Fanhong, *et al.* Numerical simulation of solar assisted ground-source heat pump heating system with latent heat energy storage in severely cold area [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28 (11-12): 1427-1436.

[9] WANG Huajun, QI Chengying, WANG Enyu, *et al.* A case study of underground thermal storage in a solar-ground coupled heat pump system for residential buildings [J]. Renewable Energy, 2009, 34 (1): 307-314.

[10] 倪龙. 抽灌同井源汇井运行特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.

(编辑 赵丽莹)