

循环单井热泵系统负荷调峰优越性分析

张海琳, 余跃进, 胡纯良

(南京师范大学 能源与机械工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 介绍了循环单井热泵系统, 并基于换热效果、环境影响、地质要求、占地面积、调峰方式等方面与地下水源、土壤源热泵系统进行了比较。主要针对负荷高峰期间运行时, 证明循环单井可通过增加井水与地下水原水的交换量、排放热泵回水两种特有的调峰方式来进行调峰, 并且优于地下水源、土壤源热泵系统。

[关键词] 循环单井, 地下水源, 土壤源, 优越性, 调峰

[中图分类号] TU831 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2012) 01-0033-05

Analysis of the Superiority of Standing Column Well Pump System in Peaking Load

Zhang Hailin, Yu Yuejin, Hu Chunliang

(School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: The article introduces the system of standing column well, and makes comparisons with groundwater source and ground source heating pump system from such perspectives as the effect of heat transfer, environmental impact, geological requirements, floor space, and way of peak shaving. Then, mainly in the run-time, it proves two unique ways of peak shaving on peak load periods in standing column well by increasing the exchange capacity of raw water and heat pump return water discharge. The comparison with the other two systems the SCW shows its superiority.

Key words: standing column well, groundwater source, ground source, superiority, peak shaving

目前, 我国建筑能耗已超过全国能源消费总量的 1/4, 随着人民生活水平的提高将逐步增加到 1/3 以上, 其中空调能耗占建筑总能耗的 60% ~ 70%。建筑能耗巨大, 能源浪费现象十分严重。我国房屋建筑面积超过 400 亿 m^2 , 其规模已超过所有发达国家, 但在每年 20 亿 m^2 的建筑竣工面积中, 只有 6 000 多万 m^2 是节能建筑, 仅占 3% 左右。如何能在 2015 年达到建筑节能 65% 的要求? 这不仅需要国家从规范开始立项, 更需要从源头开始。鼓励太阳能、地热能等可再生能源利用, 是缓减我国能源短缺局面、调整我国能源结构不合理性、保护环境的有效方式。

1 单井循环系统原理

随着地源热泵在国内的研究和应用日益广泛, 它的节能应用特性受到了越来越多的关注。近年来出现的循环单井系统是土壤耦合热泵套管换热器的一种变形, 在强岩层之下取消了套管外管, 水直接在井孔内循环与井壁岩土进行热交换后再通过板换^[1]与热泵换热。整个井即为一个地下换热器, 而传热介质就是井中的地下水和含水层中渗入、渗出的地下水原水^[2]。

本文所述循环单井是单井循环地下换热系统中的一种, 据可获得的文献来看, 单井循环地下换热系统目前共有 3 种, 分别是循环单井、抽灌同井和填砾抽灌同井, 如图 1、图 2、图 3 所示(由于井深太大, 示意图在井深方向缩短很多, 下同)。

循环单井的出现始于 20 世纪 70 年代, 是与地下水源热泵一同兴起的地热能可持续开发利用方式, 现

收稿日期: 2011-10-24.

通讯联系人: 余跃进, 教授, 研究方向: 建筑节能. E-mail: dlkj@njnu.edu.cn

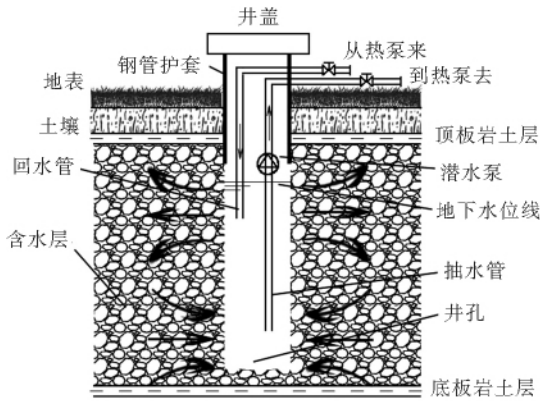


图 1 循环单井

Fig.1 Standing column well

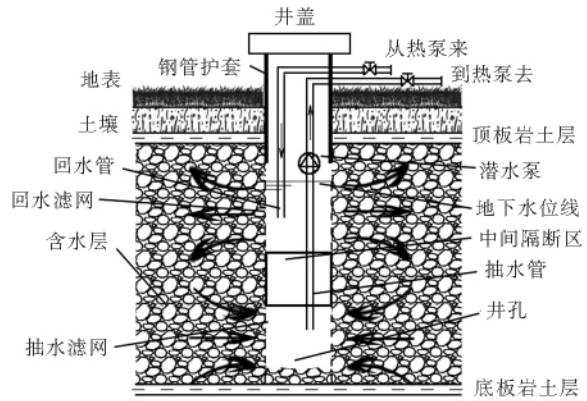


图 2 抽灌同井

Fig.2 Pumping and recharging well

全美大约安装有 1 000 个循环单井;抽灌同井的最早报道是 1992 年丹麦技术大学校园内的一个试验井,而国内则在 2000 年底,由异井回灌地下水源热泵演变而来;同年,在抽灌同井的基础上加以改进之后,我国专利报道了填砾抽灌同井。

抽灌同井和填砾抽灌同井通过中间隔断区把井分成三部分,井的下部是低压吸水区,上部是高压回水区,中间设立隔断区。系统运行时,地下水从低压吸水区被抽至井口进入热泵换热器,与热泵低温水换热后返回到高压回水区。中间隔断区的存在是为了减轻回水和抽水的掺混。填砾抽灌同井是抽灌同井的改进,采用较井孔直径稍大的填砾井孔直径,填砾井与滤网之间采用分选性较好的砾石回填以增强孔壁与含水层之间的渗透性,继而使回水更容易并增强换热。抽灌同井和填砾抽灌同井国内应用较多。

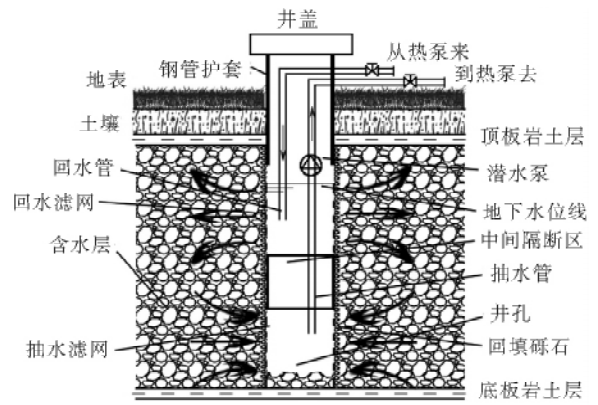


图 3 填砾抽灌同井

Fig.3 Gravel-backfill pumping and recharging well

循环单井系统的地热换热器由一口深入强岩层之下并取消套管外管的裸井构成,并辅有井盖、钢管护套、回水管、抽水管和潜水泵。设置钢管护套的目的是为了防止井孔坍塌,按照纽约矿产资源局的规定,循环单井的钢管护套应深入基岩下 21.5 m,对于非断裂岩层最少应深入 11 m,而在强岩层之下无需安装管套。潜水泵的设置应根据负荷的大小来确定,对于住宅等负荷较小的系统,循环井较浅,潜水泵一般放在井的下部;而对于商业和公共建筑,系统较大,循环井较深,潜水泵一般置于井的上部,通过深入井底部的吸水管与泵相连。由于循环单井中间没有隔断区,地下水大部分在井孔内循环,直接与井壁岩土进行热交换,另一部分于抽、回水区与井外含水层进行质交换^[3]。地下水在岩石空隙中的运动称为渗流(渗透),地下储能层一般在承压含水层,所以对于循环单井系统,只考虑在承压含水层中的渗流影响。

2 循环单井系统与土壤源、地下水源热泵系统的比较

循环单井系统是一种半开式的介于土壤源和地下水源热泵之间的地源热泵系统。

由表 1 可以看出,循环单井系统是土壤源与水源热泵系统的一个折中系统。换热效果、对地下水和微生物的影响均介于土壤源与水源之间。由于循环单井与含水层耦合的特殊构造,在地下水不充足的情况下,由于井很深,可以达到 460 m(理论可以达到 560 m)^[4],井内水循环承担绝大部分负荷,同样可以进行有效的换热,不会像水源热泵那样对地下水有很强的依赖性。土壤源热泵除了桩基埋管和桩间埋管外,一般都需要很大的室外埋管面积,才能满足负荷要求,循环单井由于每 m 井所能承担的负荷约为 200 W 左右,再加上井很深,所以打井数目远小于土壤源热泵,节省了很大的室外面积。

表 1 循环单井与土壤源、地下水源热泵的比较

Table 1 Comparison of standing column well and ground source , groundwater source heating pump

| 系统比较 | 土壤源 | 地下水源 | | 循环单井 |
|----------|---------------------|--------------------------------------|---|-----------------------|
| | | 异井回灌 | 同井回灌 | |
| 换热形式 | 通过地埋管 ,回填材料与土壤的间接换热 | 出水为不受回水影响的理想的地下水换热 | 纯粹的渗透换热 | 与凹凸不平的井壁直接接触换热和部分渗透换热 |
| 地下水影响 | 影响最小 | 可能出现不同区域间水污染、地面下沉和地下水温度场的影响 | 可能会出现不同水层之间的污染和地下水温度场的影响 | 介于土壤源和水源之间 |
| 对微生物生长影响 | 对浅层土壤微生物有轻微影响 | 对细菌群体的生长起到抑制作用 ,影响地下水中细菌同化作用 ,破坏生态平衡 | 对细菌群体的生长起到抑制作用 ,影响地下水中细菌同化作用 ,破坏生态平衡(较异井严重) | 介于土壤源和水源之间 |
| 地质条件 | 无特殊要求 | 有充足地下水源 | 有充足地下水源 | 地下水水质较好 |
| 占地面积 | 埋管占地面积很大 | 介于土壤源和循环单井之间 | 介于土壤源和循环单井之间 | 很少 |

3 循环单井系统负荷调峰方式

关于上述研究已有很多 ,本文针对循环单井在负荷调峰方面的优越性进行分析.

多数情况下 ,全年冷热负荷并不平衡 ,会引起多余的热量(冷量)在地下积累 ,引起土壤年平均温度的持续上升(下降) . 这样会引起热泵的换热效率大大降低 ,影响整个系统性能 ,也破坏土壤的生态环境.

现有的大多数土壤源热泵实例是以冷、热负荷较大者作为设计的基准 ,这样不仅增加初投资 ,而且随着系统长期运行 ,效率会逐步降低 ,此方法不能从根本上解决问题.

土壤源热泵调峰一般辅以冷却塔、太阳能等其他冷热源 ,将土壤承担不了的负荷转移给锅炉或者冷却塔等 ,增加了系统的初投资和繁杂性;也可对地埋管采取分区调控的方式与地下岩土进行间歇换热.

地下水源热泵可以通过增加取水量使冷热堆积得到缓解. 但是大量的抽、灌水容易发生流贯通 ,进而引起热贯通的发生^[5] ,并且地下水属于一种地质资源 ,若大量的取用地下水 ,特别是异井回灌 ,井内水位下降很大、并且会出现严重补水不足的情况. 若无可靠的回灌 ,则会对地面建筑产生破坏性作用 ,严重的还会产生海水倒灌、河床升高等环境问题. 地下水源热泵系统同样可以辅以热水锅炉或蓄水调峰的系统形式来实现联合供热(冷) .

对于循环单井除了可以加辅助冷、热源来联合供冷(热) 之外还有它独特的调峰方式 ,可以增加井水与地下水原水的交换量或者地下水的排放量^[6] 来进行调峰.

下图是循环单井的地下水流动图.

可以看出从热泵来的水首先经过管道流动 ,至回水区后 ,大部分循环水在井孔内循环后重新回到抽水区 ,由潜水泵抽至热泵入口 ,井孔内的循环可视为有渗流的管道流动;另一部分水由于回水口正压 ,渗入含水层 ,参与到含水层中原水的交换换热 ,井内的水量得不到平衡后抽水区就形成负压 ,抽吸一部分含水层中的原水. 从流态来看 ,含水层中的渗流为层流 ,管、井内流动为紊流 ,井壁与含水层的耦合区域由于之间质交换的存在 ,流态表现出不稳定性^[7] . 从换热来看 ,导热发生在含水层中的固体骨架和顶、底板岩土层之间. 对流传热发生在管、井内流动和含水层中的地下水流经固体骨架和顶、底板岩土层处. 由于含水层是固、液、气的多孔介质 ,多孔介质孔隙内速度脉动会引起热量的平均化(弥散现象) ,从而导致换热增强 ,所以含水层中还存在着不可忽视的热弥散^[8] ,尤其是在靠近井壁处.

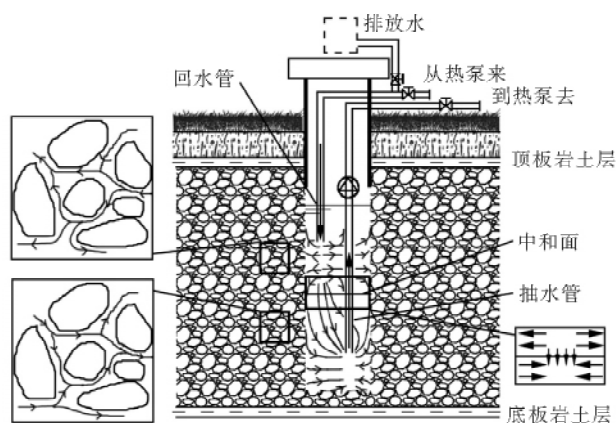


图 4 循环单井地下水流动图

Fig.4 Groundwater flows of standing column well pump system

3.1 增加井水与地下水原水的交换量

井孔中的地下水与含水层之间的原水交换是循环单井的一个重要特点,这也是循环单井区别于埋地土壤换热器的根本原因(如图 4 所示)原水交换使得循环单井系统的热交换效率大大高于土壤源热泵套管换热器,承担负荷的能力得到显著提高.有研究表明,当原水交换比 29.6% 时,这部分原水交换能承担总热负荷的 23.4%,并且基本不随时间变化.用原水交换比和原水交换负荷比可以表征井孔与含水层之间的原水交换量和这部分原水交换所能提供的热量占总负荷的比例^[9].

原水交换比:

$$r_{o,w} = \left(1 - \frac{A_{h,n} |u_{z,min}|}{Q_{w,p}} \right) \times 100\% . \quad (1)$$

原水交换负荷比:

$$r_{o,L} = - \frac{\int_{z_1}^{z_2} 2\pi r_h C_w u_{r,ha} (T_{ha} - T_r) dz}{Q_{w,L}} \times 100\% , \quad (2)$$

其中 $A_{h,n}$ 为井孔净面积(除去抽水管的井孔面积); $u_{z,min}$ 为井孔内轴向分速度最小值; $Q_{w,p}$ 为抽水流量; r_h 为井孔半径; C_w 为地下水容积比热容; $u_{r,ha}$ 为井孔与含水层结合界面上的地下水径向流速(流出为正); T_{ha} 为井孔壁面温度; T_r 为回水温度; $Q_{w,L}$ 为循环单井热负荷; z_1 z_2 分别为井孔的起止深度.

当出现负荷高峰期时,可以通过装在回水管上的压力阀控制井内压力,从而增加循环单井与地下水原水的交换量来使循环单井承担负荷的能力得到提升.

3.2 控制地下水的排放量

由于井内上部向外渗流,下部向内渗流,必然在井壁的某个位置处使得渗流方向发生转化,而这个转化位置速度为 0,即没有地下水流入或流出井壁,这个位置即为中和面(如图 4 所示).

在负荷高峰时,为了满足负荷要求,通过排放掉少量的热泵回水可以诱导部分地下水原水进入井中进行调峰(如图 4 所示),其实就是通过减少回水量,在一定程度上降低井底抽水区的压力,使得井内外压差变大.这样可以降低井水温度波动性,提供一个稳定的井水温度,进而使热泵在高效工况下运行,虽然回水减少会造成水位下降,但通常在数 m 以内,相对于数百 m 的井深而言很小,并且系统大部分时间都是在没有排放水的情况下运行.由达西定律:

$$Q = k\omega \frac{h}{L} , \quad (3)$$

式中 Q 为渗透流量; K 为渗透系数; ω 为过水断面; h 为上下游过水断面的水头差; L 为上下游过水断面的距离.

排放出一定的循环水后,使得压头差 h 增加,从而渗透流量 Q 也相应的增加了.另外,井内流速、速度场、渗流速度等都将产生一定的影响.随着排放水量的增加,会使得回水区的压力降低,管内流速减小,靠近井口区域的井壁和井外渗流速度减小;而靠近井底的渗流是增加的,渗流影响半径也相应增大.

当无排放水时,井内流速、井壁和井外渗流速度都关于井中点对称,中和面位置位于井中点;当有排放水时,井内流速、井壁和井外渗流速度都不具有对称性,中和面位置上移,排放量越大中和面位置越靠近井口,如图 5 所示.

中和面上移说明渗入井内的原水增加,渗出至含水层的热泵回水减少.由于渗流阻力较大,渗入井内的含水层的原水量并不能与排放水量相等,并且还有一定滞后性.排放水量过多时,井内水位降过快,中和面上移过多,回水区域缩小,所以不能无限制的排放热泵回水.据研究,当排放水量在 5% ~ 30% 时,相对于原系统而言,井壁净流入的地下水流量与排放流量近似相等^[10].从上图可以看出当排放水量达到 30% 时,中和面离井中的水面只有 1/4 井深,可见排水量不应再多于 30%.

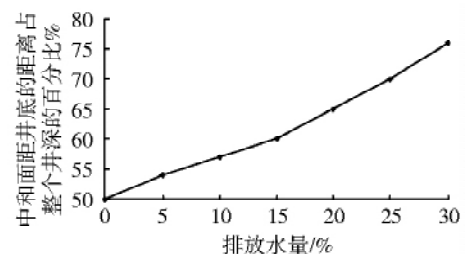


图 5 排放量对中和面位置的影响
Fig.5 Influence of bleeding water to the location of middle surface

4 结语

循环单井系统是介于土壤源热泵和地下水源热泵之间的折中系统, 具有比土壤源换热效果好, 比地下水源对环境要求低及破坏少的优点. 本文从换热效果、环境影响、地质要求、占地面积、调峰方式等方面将其做了一个整体比较, 并且重点介绍了两种调峰方式, 体现了循环单井的优越性. 由于与国外的地质条件的差异, 在国内使循环单井系统要得到有效利用, 还缺乏更加深入地研究, 并且需要工程实测数据的检验, 不可能一蹴而就.

[参考文献] (References)

- [1] 倪龙, 押淑芳, 李安民, 等. 地下水地源热泵热源井设计方法研究[J]. 暖通空调, 2010, 40(9): 82-87.
Ni Long, Ya Shufang, Li Anmin, et al. Study of designing method for heat source well of ground water heat pump[J]. Heating Ventilating and Air Conditioning, 2010, 40(9): 82-87. (in Chinese)
- [2] 李旻, 刁乃仁, 方肇洪. 单井回灌地源热泵地下传热数值模型研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(12): 1394-1401.
Li Min, Diao Nairen, Fang Zhaohong. Study on numerical heat transfer models of standing column well[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2007, 28(12): 1394-1401. (in Chinese)
- [3] Ress S J, Spitler J D, Deng Z, et al. A study of geothermal heat pump and standing column well performance[J]. ASHRAE Transactions, 2004, 110(1): 3-13.
- [4] Deng Z. Modeling of standing column wells in ground source heat pump systems[D]. US: Oklahoma State University, 2004: 6-8.
- [5] 胡继华, 张延军, 于子望, 等. 水源热泵系统中地下水流贯通及其对温度场的影响[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2008, 38(6): 992-998.
Hu Jihua, Zhang Yanjun, Yu Ziwan, et al. Groundwater flow transfixion of groundwater source heat pump system and its influence on temperature field[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2008, 38(6): 992-998. (in Chinese)
- [6] Yavuzturk C. Performance analysis of U-tube, concentric tube, and standing column well ground heat exchangers using a system simulation approach[J]. ASHRAE Transactions, 2002, 108(1): 925-938.
- [7] 倪龙, 余延顺, 姜益强, 等. 循环单井地下水多流态流动特性[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2010, 34(3): 367-371.
Ni Long, Yu Yanshun, Jiang Yiqiang, et al. Characteristics of groundwater multi-pattern flow in standing column well[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2010, 34(3): 367-371. (in Chinese)
- [8] 倪龙, 马最良. 热弥散对同井回灌地下水源热泵的影响[J]. 建筑热能通风空调, 2005, 24(4): 7-18.
Ni Long, Ma Zuiliang. The effect of heat dispersion on groundwater heat pump with pumping and recharging in the same well[J]. Building Energy and Environment, 2005, 24(4): 7-18. (in Chinese)
- [9] 倪龙, 姜益强, 姚杨, 等. 循环单井在不同水文地质条件下的运行特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(4): 47-51.
Ni Long, Jiang Yiqiang, Yao Yang, et al. Characteristics of standing column well operating at different hydro geological conditions[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(4): 47-51. (in Chinese)
- [10] 林元同. 单井循环水源热泵系统特性研究[D]. 南京: 南京理工大学动力工程学院, 2009: 24-39.
Lin Yuantong. Performance analysis of standing column well groundwater heat pump systems[D]. Nanjing: College of Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, 2009: 24-39. (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]