不同负荷单井循环地下水源热泵系统实验

宋 伟, 倪 龙, 姚 杨

(哈尔滨工业大学 热泵空调技术研究所,150090 哈尔滨)

摘 要: 针对单井循环地下水源热泵系统,搭建了物理模拟砂箱实验台研究其地下水流动和换热规律,并开展了负荷变化的实验研究.结果表明: 相同实验条件下,循环单井的取热量仅为抽灌同井的50.3%,填砾同井的45.9%,其径向热影响范围小于186.5 mm;而当抽水流量从0.54 m^3/h降低到0.315 m^3/h时,循环单井、抽灌同井、填砾同井的取热量分别降低了51.0%、31.6%和19.5%.可见循环单井承担负荷的能力最差,但抽水流量的变化对循环单井的影响更大;提高抽水流量能够显著提高热源井的取热量,增大热影响范围,从而提高热源井承担负荷的能力.

关键词: 地下水源热泵;单井循环;砂箱实验;抽水流量;负荷变化

中图分类号: TK529 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2014)08-0051-06

Experimental research on single well groundwater heat pump systems in building load variations

SONG Wei, NI Long, YAO Yang

(Institute of Heat Pump and Air Conditioning Technology, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: Because of insufficient research on single well groundwater heat pump systems, a physical simulation experiment table has been set up to study the flow and heat transfer law in these systems. Experimental research on building load variations has been carried out. The results show that in the same experimental conditions the absorption quantities of standing column well (SCW) are only 50.3% and 45.9% of pumping and recharging well (PRW) and pumping and recharging well filled with gravel (PRWFG) respectively. In addition, the radial thermal influence scope of SCW is less than 186.5 mm. However, the heat absorption quantities of SCW, PRW and PRWFG reduce to 51.0%, 31.6% and 19.5% individually, when the flow rate of outlet water drop from 0.54 m^3/h to 0.315 m^3/h. Thereby the load capacity of SCW is the least one in these three systems. However, the variation of the flow rate of outlet water can impact on SCW more significantly. It is more obvious that increasing the flow rate of the outlet water can improve the load capacity and the thermal influence scope of the thermal source wells. Thus, the load capacity of thermal source wells can be increased.

Keywords: groundwater heat pump; single well; sand tank experiment; flow rate of outlet water; building load variations

单井循环地下水源热泵系统目前共有3种形式,即循环单井、抽灌同井和填砾同井[1].3种热源井都是从含水层同一水平位置不同深度段取水和回水.从热源井构造角度上看,循环单井采用的是基岩含水层中的裸井,小部分回水进入基岩含水层,大部分回水在井孔内与孔壁换热后直接进入取水管.为了降低热贯通效应[2],在抽灌同井和填砾同井增加了井壁,并在井孔内设置隔板,将井内抽水区和回水区分离.其中,抽灌同井采用的是过滤器井(井孔直径和井管直径相同),回水进入地下含水层,与原水和含水层换热后进入抽水区;填砾同井井孔直径较井管直径大,孔隙一般采用

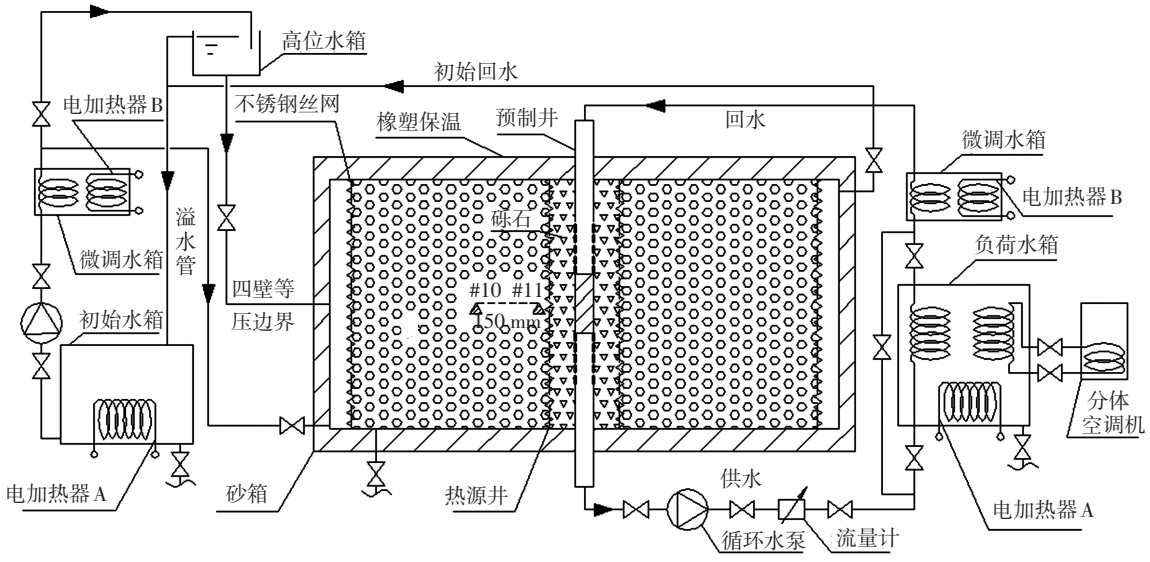
收稿日期: 2013-08-21.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41002085).
作者简介: 宋 伟(1982—),男,博士研究生;
姚 杨(1963—),女,教授,博士生导师.
通信作者: 倪 龙, nilonggn@163.com.

分选性较好的砾石回填,一部分回水进入地下含水层,一部分经过回填砾石区换热后进入抽水管.

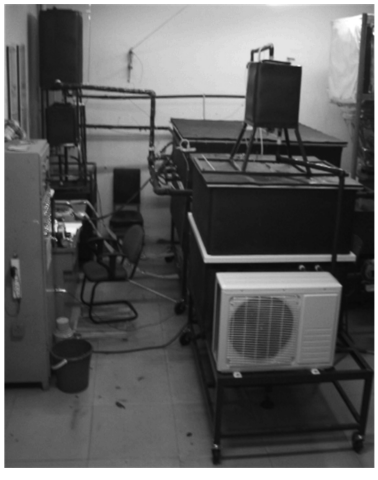
虽然单井循环地下水源热泵系统在国内外取得了一定应用[3-6],但关于负荷对地源热泵系统影响的实验研究还不多,大多集中在土壤源热泵系统和水源热泵系统,例如华中科技大学开展的土壤源热泵系统实验研究[7]、重庆某江水源热泵的现场实验[8]和南京天加空调设备有限公司开展的地下水源热泵运行特性研究[9]等.而实验室中可控边界条件和参数变化下的实验探索还较缺乏,为此,搭建了单井循环地下水源热泵系统的物理模拟砂箱实验台,研究不同负荷条件下单井循环地下水源热泵系统的热响应.

1 砂箱实验台

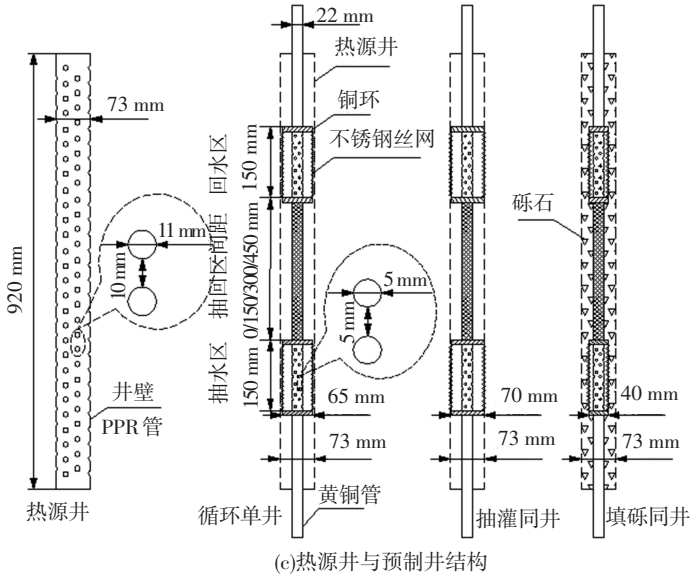
单井循环地下水源热泵系统的砂箱实验原理见图 1(a),实景照片见图 1(b).砂箱实验台部件参数见表 1.在地下水运动特性的研究中,通常将含水层远端边界考虑成等压、等温边界.所以在实验过程中,保持砂箱的等压、等温的边界条件是实现可信模拟的关键[10].砂箱箱体采用聚丙烯 PPR 板,砂箱外壁采用橡塑保温,砂箱内壁四周加设不锈钢丝网,砂箱内装填洗涤干净的粗砂[11].采用黄铜管模拟预制水井,其高度与含水层厚度相当,抽水区和回水区开孔长度均为 150 mm[12].热源井与预制井结构见图 1(c).



(a)砂箱实验台系统图



(b)砂箱实验台



(c)热源井与预制井结构

图 1 单井循环地下水源热泵系统砂箱实验台

实验开始前打开砂箱底部的进水阀门,缓慢地自下而上充水,充分排除砂箱中的气泡,该饱水过程一般约需 24 h[13].其次,调试实验工况,关闭砂箱底部进水阀门,改由高位水箱供水,持续

15 min，使砂箱中的“地下水”处于稳定状态，溢水管始终保持有水流溢出，控制边界水头恒定. 最后，打开预制热源井的进出口阀门，开启循环水泵，开始实验.

表 1　砂箱实验台各部件参数

砂箱/m	初始水箱/m	负荷水箱/m	高位水箱/m	电加热器 A/kW	电加热器 B/kW	循环水泵功率/kW	分体空调机/kW	热源井直径/mm	预制井直径/mm	砾石直径/mm	热源井深/mm
1.5×	0.7×		0.4×								
1.5×	0.7×	1×1×1	0.4×	1	0.5	0.28	2.5	73	22	2~4	920
1.0	0.7		0.8								

2　实验结果

本实验为热源井取热工况实验，砂箱初始地温为 20 ℃，热源井抽回区间距为 300 mm，砂箱满水压力为 17.4 kPa，通过观察靠近砂箱边界的测温点温度变化，在实验进行 23 min 时，各工况下的边界均保持绝热，故选择 23 min 作为各工况测试的统一时间进行对比分析.

通过两种方式改变负荷：一是改变热源井流量；二是改变负荷水箱温度. 每种热源井共 3 个工况：1）基准工况为负荷水箱温度 5 ℃、抽水流量 0.54 m^3/h；2）降低负荷水箱温度为 1.5 ℃左右，保持抽水流量 0.54 m^3/h 不变；3）负荷水箱温度 5 ℃不变，降低抽水流量为 0.315 m^3/h.

表 2 为 3 种井在不同取热工况下的平均抽/回水温度和取热量，其中取热量为

$$Q = \sum_t C_w Q_{w,p} (T_g - T_r), \qquad (1)$$

式中：T_g 为抽水温度，℃；T_r 为回水温度，℃；t 为时间，s；Q 为热源井的取热量，kJ；C_w 为水的容积比热容，kJ/(m³ · ℃)；$Q_{w,p}$ 为抽水流量，m^3/s.

2.1　抽回水温度影响分析

图 2 给出了循环单井 3 种实验工况下抽回水温度变化曲线. 在 3 种实验工况中，随着运行时间的延长，由于受到回灌冷水的影响，抽水温度逐渐降低，对于基准工况抽水温度在 23 min 内由 18.5 ℃降到 12.6 ℃，降低了 5.9 ℃，而回水温度最后基本稳定在 10.5 ℃. 但实验初期（前 1 min），由于负荷水箱换热管中储存有较低温度冷水导致回水温度急剧下降，也引起了抽水温度相对较快的变化.

结合图 2 和表 2，对比 3 种实验工况可以看出，当抽水流量均为 0.54 m^3/h 时，负荷水箱温度由 5.0 ℃降到 1.5 ℃时，抽水温度和回水温度均降低，但平均抽回水温差由 2.2 ℃增加到 3.0 ℃，导致取热量增加；而当负荷水箱温度维持 5.0 ℃不变，抽水流量由 0.54 m^3/h 减小到 0.315 m^3/h 时，抽水经过负荷水箱之后出水温度降低，导致抽回水温度反而降低，取热量显著减小.

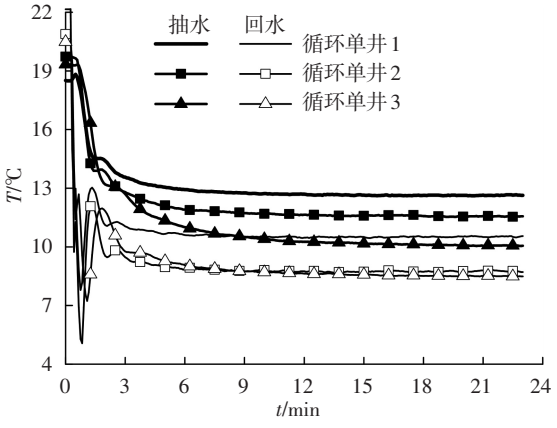


图 2　循环单井抽回水温度随时间的变化

对比循环单井 2 和循环单井 3，两者回水温度相差不多，但循环单井 2 的平均抽水温度较循环单井 3 高 1.2 ℃，取热量前者是后者的 2.7 倍，这说明在实验工况这种渗透性较好的条件下，提高抽水流量对于提高循环单井承担负荷的能力优势明显，这一点也得到了理论研究的证实[14]. 文献[14]中，模拟循环单井流量从 12 m^3/h 增加到 24 m^3/h 时，抽回水温差保持不变，平均抽水温度反而从 10.4 ℃增加到 12.3 ℃. 这是因为，当抽水流量增加时，水在井孔内流动遇到更大的阻力，这样有更多的地下水流入和流出井孔，地下水的原水交换比增加，热对流和对流换热加强，原水交换负荷比增加[15]，从而使系统承担更大的负荷. 因此，对于渗透性能较好的含水层，通过提高抽水流量来承担更大的负荷是一个利好的方法. 当然抽水流量也不能过分加大，一方面急剧增加潜水泵的功耗；另一方面流速过快的地下水冲刷井孔壁，对井孔不利，应该进行技术经济分析和安全评价.

对于抽灌同井和填砾同井，从表 2 可以看出，降低负荷水箱温度和降低抽水流量的影响基本与循环单井一致，不再赘述. 对比 3 种热源井的实验结果可以看出，相同工况下循环单井的抽回水平均温度和取热量最低，承担负荷的能力最差. 这是由热源井的构造决定的，循环单井为基岩中的裸井，中间没有隔断，虽然没有回灌困难的问题，但

最易发生热贯通.当抽水流量一定时,负荷增大使得各系统的平均抽水温度均有所下降,平均抽回水温差均略有上升.循环单井、抽灌同井和填砾同井的平均抽水温度分别下降了1.0、0.6和0.4 ℃,平均抽回水温差均升高了0.8 ℃,取热量分别增加了32.7%、17.2%和17.3%.可见,平均抽水温度随着平均抽回水温差的增大而降低,这与前期理论研究一致[6].

考察抽水流量降低对3种热源井的影响.负荷水箱温度5.0 ℃,当抽水流量从0.54 m^3/h降低41.7%到0.315 m^3/h时,循环单井的取热量降低了51.0%、抽灌同井的取热量降低了31.6%、填砾同井降低了19.5%.可见,抽水流量的降低对循环单井的影响更大.反过来看,提高抽水流量对循环单井换热量的影响更大,获得更大的好处,而抽灌同井和填砾同井这一好处相对较小.

表2 实验工况及实验结果

类型	初始地温/℃	流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	负荷水箱温度/℃	平均抽水温度/℃	平均回水温度/℃	取热量/kJ
循环单井1	20.2	0.540	5.0	12.9	10.7	1 845.4
循环单井2	20.1	0.540	1.5	11.9	8.9	2 448.3
循环单井3	20.0	0.315	5.0	10.7	8.9	904.7
抽灌同井1	20.7	0.540	4.8	17.2	12.8	3 667.8
抽灌同井2	20.7	0.540	1.0	16.6	11.4	4 298.4
抽灌同井3	20.8	0.315	4.8	16.6	11.4	2 509.1
填砾同井1	20.1	0.540	5.0	18.2	13.3	4 016.4
填砾同井2	19.9	0.540	1.7	17.7	12.0	4 712.9
填砾同井3	20.2	0.315	5.1	18.4	11.7	3 231.3

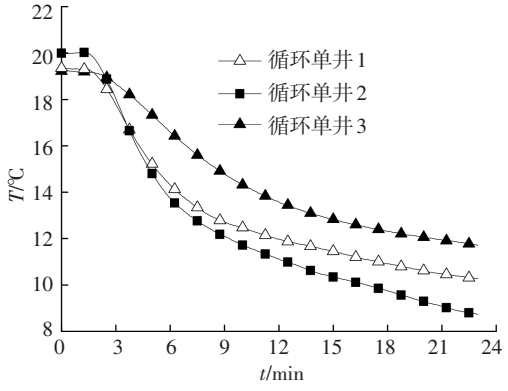
2.2 砂箱内部点温度影响分析

实验中在砂箱内共布置了24个测温热电偶,本节选取#10和#11两个典型测温点进行分析,#10测温点和#11测温点均位于与热源井垂直的中心线上,其中,#11测温点紧贴热源井布置在模拟“含水层”中,#10测温点距#11测温点的水平距离为150 mm,见图1(a).

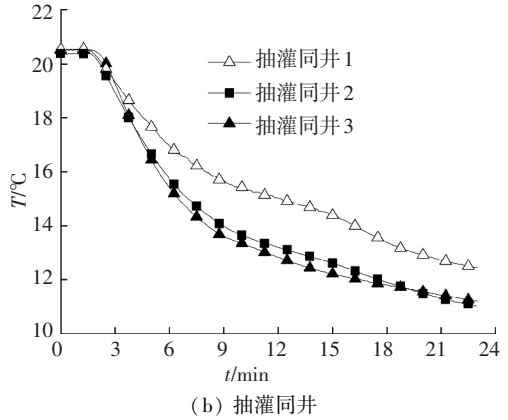
图3给出了循环单井、抽灌同井和填砾同井3种热源井实验中#11测温点在不同工况下温度随时间的变化曲线.从图3可以看出,不论哪种热源井和哪种工况,随着取热工况的进行,#11测点温度均降低,但3种热源井对不同工况的温度响应有所不同.对于循环单井(图3(a)),除去实验起始阶段,#11测温点温度高低的顺序为循环单井3>循环单井1>循环单井2;而对于抽灌同井和填砾同井,基准工况的温度最高,剩余两个工况的温度比较接近.其原因与热源井的结构和实验台的设计有关.对于循环单井,其适用于基岩层,热源井自身是没有井壁的.但实验台设计时,模拟含水层为砂层,如不设井壁极易坍塌,为此仍然采用聚丙烯PPR开孔管作为井壁,人为地增大了井孔内抽回水进出模拟“含水层”的阻力.这样当抽水流量较小时(对应于循环单井3的工况),回水基本在井孔内流动,虽然回水温度较低(8.9 ℃),但导热传热较慢,布置在模拟“含水层”中的#11测温点温度降低相对较慢;而对循环单井2的工况,虽然回水温度基本相同(图2),但抽水流量较大,井孔内流动阻力增加,部分回水进入模拟“含水层”,这样使得#11测温点温度降低较多;循环单井1工况与循环单井2工况相比,由于回水温度较高(图2),使得#11测温点温度降低相对较少.

对于抽灌同井和填砾同井,其热源井内有隔板,大部分回水流入模拟“含水层”,因此,#11测温点的温度主要受到回水温度的影响.如表2所示,基准工况回水平均温度最高、剩余两个工况回水温度基本一致,这一温度特性也反映在图3(b)和图3(c)上.

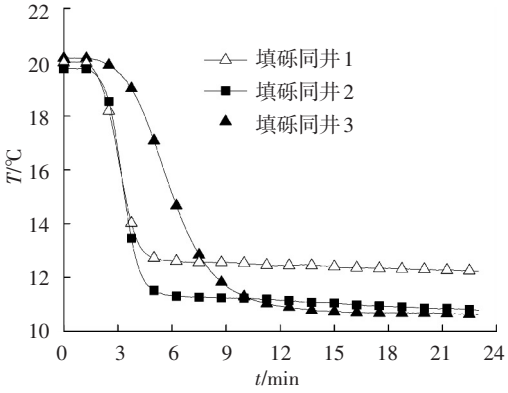
填砾同井与抽灌同井的不同在于填砾同井井壁与井孔之间的间隙采用砾石回填,而抽灌同井井壁与井孔同直径.按照本实验台的设计,抽灌同井的井孔直径和井壁直径均为73 mm,填砾同井井孔直径为73 mm、井壁管直径为40 mm(图1(c)).这一设计的不同也反映在#11测点温度变化上.如图3(b)所示,抽灌同井2和抽灌同井3两工况回水温度基本一致,均小于抽灌同井1工况,其#11测温点温度的变化也基本一致,也小于抽灌同井1工况.而图3(c)所示,#11测点虽然物理位置未变,但相对填砾同井热源井的位置要较抽灌同井远,这样当抽水流量降低时(对应于填砾同井3工况),其影响就较慢;比较填砾同井3工况与填砾同井2工况,回水温度相差不多,这样一段时间后#11测点温度又基本一致.



（a）循环单井



（b）抽灌同井

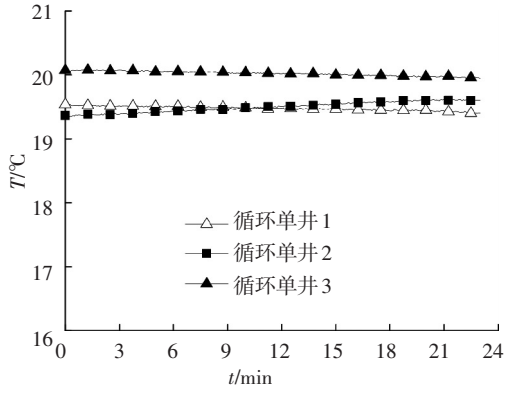


（c）填砾同井

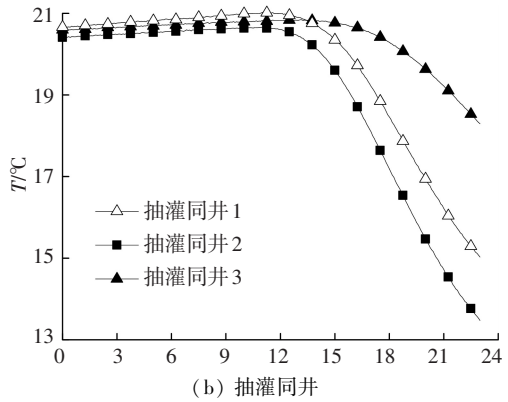
图 3　#11 测温点温度随时间的变化曲线

图 4 给出了#10 测温点温度随时间的变化曲线.对于循环单井的 3 种工况，从图 4(a)可以看出，在整个测试期间，不论流量和负荷水箱温度是否变化，#10 测温点的温度几乎没有变化，说明循环单井热源井回水冷量没能影响到#10 测温点.可见，循环单井的热影响范围很小，对于本实验工况，其径向热影响范围小于 186.5 mm，大部分回水的换热在热源井内部完成，这样也是其承担负荷能力较差的原因.

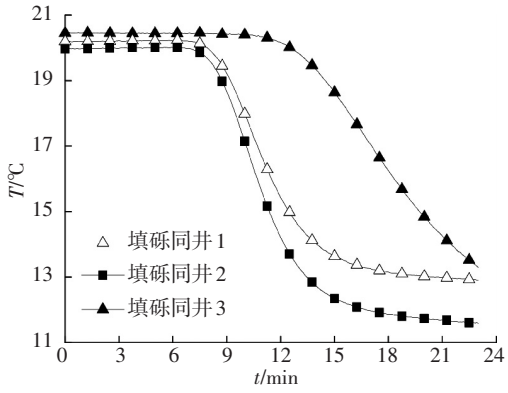
图 4(b)和图 4(c)中抽灌同井和填砾同井在 3 种不同工况下，#10 测温点的温度变化趋势类似.抽水流量减少(抽灌同井 3 和填砾同井 3)，#10测温点受到回水冷量的影响时间明显滞后，影响的幅度也较小，说明抽水流量降低使得热源井影响地下含水层温度的速度放缓，这也是取热量降低的原因.而当负荷增大(抽灌同井 2 和填砾同井 2)，#10 测温点的温度变化趋势虽与基准工况一致，受到回水冷量影响后迅速下降并接近回水温度.但在负荷较大的工况中，#10 测温点的温度降低更多，说明增大负荷会使抽水温度降低，热影响范围更大.



（a）循环单井



（b）抽灌同井



（c）填砾同井

图 4　#10 测温点温度随时间的变化曲线

3　结　论

1)在实验工况这种渗透性较好的条件下，提高抽水流量能够显著提高循环单井的取热量，抽水流量的降低对循环单井的影响更大.抽水流量

从0.54 m^3/h降低到0.315 m^3/h时,取热量降低了50.1%.

2)相同工况下循环单井的取热量最低,仅为抽灌同井的50.3%,填砾同井的45.9%,其抽回水平均温度也最低,最易发生热贯通.但提高抽水流量对循环单井换热量的影响较抽灌同井和填砾同井更大.

3)循环单井的热影响范围较抽灌同井和填砾同井小,承担负荷能力最差.对于本实验工况,其径向热影响范围小于186.5 mm.提高抽水流量能够增大热源井的影响范围,从而提高热源井承担负荷的能力.

参考文献

[1] 倪龙, 姜益强, 姚杨, 等. 单井循环地下换热系统健康运行的研究[J]. 流体机械, 2009, 37(4): 64-68.

[2] NI Long, LI Haorong, JIANG Yiqiang, et al. A model of groundwater seepage and heat transfer for single-well ground source heat pump systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31: 2622-2630.

[3] O'NEILL Z D, SPITLER J D, REES S J. Modeling of standing column wells in ground source heat pump systems[C]//Proceedings of the 10th International Conference on Thermal Energy Storage-ECOSTOCK, New Jersey: ECOSTOCK, 2006.

[4] LEE J. Y. Current status of ground source heat pumps in Korea[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13: 1560-1568.

[5] 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.

[6] 倪龙, 马最良. 热负荷对同井回灌地下水源热泵的影响[J]. 暖通空调, 2005, 35(3): 12-14.

[7] 於仲义, 胡平放, 袁旭东. 土壤源热泵地埋管换热实验研究[J]. 华中科技大学学报:城市科学版, 2008, 25(3): 157-161.

[8] 王勇, 卿菁, 刘清华. 闭式江水源热泵系统水流量最优值的计算方法[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(3): 109-113.

[9] 孙爱国, 梁路军. 水源热泵机组地下水变流量运行特性研究[J]. 暖通空调, 2010, 40(11): 83-85.

[10] 宋伟, 倪龙, 姚杨. 不同抽回间距的单井循环地下水源热泵系统实验研究[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 205-211.

[11] 宋伟, 倪龙, 姚杨. 单井循环系统在不同初始地温下的特性[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(3): 342-346.

[12] 倪龙, 宋伟, 唐明宇, 等. 单井循环地下换热系统初步试验研究[J]. 建筑科学, 2012, 28(增刊2): 195-197.

[13] 陈崇希, 万军伟, 詹红兵, 等. "渗流-管流耦合模型"的物理模拟及其数值模拟[J]. 水文地质工程地质, 2004, 1: 1-8.

[14] 倪龙. 同井回灌地下水源热泵源汇井运行特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.

[15] 倪龙, 姜益强, 姚杨, 等. 循环单井与含水层的原水交换[J]. 太阳能学报, 2010, 31(6): 743-748.

(编辑　赵丽莹)