

文章编号:1000-582X(2012)03-140-07

# 卫生热水蓄热方式对地埋管换热性能的影响分析

王 勇,唐 曦

(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆 400045)

**摘 要:**竖埋管地源热泵系统为室内环境控制提供冷热量。在空调工况下,热回收机组可以提供卫生热水。卫生热水的供应在冬夏不同的运行模式下,对地埋管的换热性能影响不同。通过某地源热泵工程设计,分析了冬夏季卫生热水系统在蓄热方式下对地源热泵系统地埋管换热性能的影响。利用卫生热水的蓄热能力,对地埋管换热器在不同工况下的动态换热性能进行了对比分析,并通过数值计算得到了不同运行模式下地埋管的换热性能参数。根据计算结果提出了在该工程负荷特性下的系统调节方式。

**关键词:**地源热泵;卫生热水;蓄热;地埋管换热性能

中图分类号:TU822

文献标志码:A

## Influence of heat storage mode of domestic hot water on the performance of ground heat exchanger in ground-source heat pump system

WANG Yong, TANG Xi

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** The vertical U-tube ground-coupled heat pump system provides cold and heat for the controlling of indoor environment. Under the air-conditioning condition, the vertical U-tube ground-coupled heat pump system with heat recovery can provide domestic hot water. The influence of supplying domestic hot water on the heat transfer performance of ground heat exchangers is different under different operating modes in summer and winter. Through a project design of ground-source heat pump system, the influence of supplying domestic hot water under heat storage mode on the heat transfer performance of ground heat exchangers in summer and winter is respectively analyzed. The dynamic performance of heat exchangers under different working conditions is analyzed, and through numerical calculation, the heat transfer performance parameters of ground heat exchangers under different operating modes are obtained. From the calculation results, the adjusting methods based on the load characteristics of this project represent.

**Key words:** ground-source heat pump; domestic hot water; heat storage; the heat transfer performance of ground heat exchangers

地埋管地源热泵系统利用土壤作为低位热源,为建筑供冷、供热,同时,还可以利用热回收式地源

热泵机组提供卫生热水。与采用燃料热水锅炉相比,利用热回收来供应卫生热水的地源热泵系统更

收稿日期:2011-10-14

基金项目:重庆市自然科学基金计划资助项目(CQ CSTC,2010BB4235)

作者简介:王勇(1971-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事建筑节能技术研究,(E-mail)cqwangyong@cqu.edu.cn。

加节能和满足环保要求。

目前,国外对于地源热泵供应卫生热水的研究多数集中在复合式系统方面的研究<sup>[1-6]</sup>, Arif Hepbasli 等对太阳能辅助式地源热泵供应卫生热水系统进行了火用分析和实验研究<sup>[3-5]</sup>, Trillat Berdal 对某住宅中地埋管地源热泵系统结合太阳能集热器供冷、供热及卫生热水进行了实验研究,实验结果表明多功能复合式系统供应卫生热水有利于降低冬夏季取热和排热的不平衡率<sup>[6]</sup>。国内,对于地源热泵系统供应卫生热水的研究多为强调其节能性优势及经济性评价<sup>[7-11]</sup>。文献[9]对天津某别墅地源热泵卫生热水系统进行了设计计算,并与空气源热泵供应卫生热水进行了经济性比较,得出了利用地源热泵系统供应卫生热水的运行费用比空气源热泵热水系统节省 53%,可经过 3.7 年追回投资。崔平等对中国香港地区某住宅建筑中供冷、供热和供应卫生热水的地源热泵系统进行了模拟研究,结果表明该系统能提供 95% 的卫生热水,并且有效地降低了地埋管换热器供冷季和供热季换热的不平衡率<sup>[10-11]</sup>。

夏季供应卫生热水,对于地埋管而言是释热状态,而在冬季状态下,地埋管对大地是吸热状态。采用地源热泵系统供应卫生热水,其供应系统有不同的方式<sup>[12]</sup>。在不同的卫生热水供应方式下,其地源热泵系统的运行模式也不同。不同工况以及不同的运行模式直接影响地埋管的换热性能,而地埋管的换热性能是决定地源热泵系统稳定运行的前提。目前,对卫生热水供应方式对地埋管换热性能影响的研究较少。因此,非常有必要对不同卫生热水供应模式下地埋管换热器的换热性能进行研究,笔者主要针对卫生热水在蓄热方式下地埋管的换热性能进行分析。

## 1 蓄热方式下的热平衡分析

利用热回收供应卫生热水的地源热泵系统中,机组设置双冷凝器,即空调用冷凝器和热回收器。夏季机组制冷运行,产生大量的冷凝热,通过回收冷凝热免费制取卫生热水,多余的热量通过空调用冷凝器释放到地下土壤。冬季机组制热运行,由蒸发器从地下土壤吸收热量,通过空调用冷凝器和热回收器分别供热和供应卫生热水。蓄热方式下的卫生热水供应方式应根据空调负荷及卫生热水负荷的动态变化进行调节。从热平衡的角度分析,空调冷、热负荷、机组冷凝热、热回收热量、地埋管换热器承担的负荷均随着建筑物内空调使用情况及卫生热水使用情况的动态变化而变化。

夏季工况,热平衡公式包括

$$Q_{Cl} + W_{Comp} = Q_{Cond}, \quad (1)$$

$$Q_{Cond} = Q_{re} + Q_{grou}. \quad (2)$$

式中: $Q_{Cl}$ 为空调冷负荷; $W_{comp}$ 为机组压缩机做功; $Q_{Cond}$ 为机组冷凝热; $Q_{re}$ 为热回收热量; $Q_{grou}$ 为地埋管换热器承担的负荷。

常规地源热泵空调系统中,将全部  $Q_{Cond}$  释放到地下换热器,即  $Q_{Cond} = Q_{grou}$ ,而利用热回收供应卫生热水的地源热泵系统,由于热回收器回收了部分冷凝热,有效地减少了地埋管换热器的排热负荷<sup>[13]</sup>,由式(1)、(2)可知,也即是在  $Q_{Cl}$  不变的情况, $Q_{Cond}$  也不变, $Q_{re}$  增大,则  $Q_{grou}$  减小。

冬季工况,热平衡公式包括

$$Q_{grou} + W_{comp} = Q_{Cond}, \quad (3)$$

$$Q_{Cond} = Q_{re} + Q_{HI}. \quad (4)$$

式中  $Q_{HI}$  为空调热负荷。

常规地源热泵空调系统中,冬季机组运行的  $Q_{Cond}$  全部用于承担空调热负荷,即  $Q_{Cond} = Q_{HI}$ ,而利用热回收供应卫生热水的地源热泵系统,冬季要同时满足供热及加热卫生热水,由式(3)、(4)可知,也即是在  $Q_{HI}$  不变的情况, $Q_{re}$  增大,则  $Q_{Cond}$  增大, $Q_{grou}$  增大。

从上述分析可以看出,在供应卫生热水的状态下,不同工况下对大地的换热量  $Q_{grou}$  不同,这将直接对地埋管的换热性能产生影响。笔者将通过具体案例进行分析。

## 2 工程背景

### 2.1 工程概况

工程位于四川省青川县唐家河景区接待中心,项目建筑总面积为 13 004.48 m<sup>2</sup>,包括 1 栋接待大厅、1 栋博物馆和 9 栋别墅型宾馆。每栋楼采用单独的带热回收式的地源热泵系统为其供冷、供热及供应卫生热水。现以 6 号楼为例,介绍地源热泵系统的设计内容,该楼为该景区接待中心内的宾馆,建筑面积为 832.5 m<sup>2</sup>,共 2 层,包括 15 间客房。经计算得,夏季空调冷负荷为 50.24 kW,冬季空调热负荷为 16.76 kW,冬季卫生热水最大设计小时耗热量为 49.4 kW。根据该工程卫生热水使用的实际情况,6 号楼蓄热水罐的保证时间确定为 3 h,计算得到该楼蓄热水罐容积为 2.4 m<sup>3</sup>。

由于 6 号楼冬季卫生热水负荷较大,使得冬季总负荷比夏季冷负荷大。冬季卫生热水需求量大,使得卫生热水的供应大大增加了冬季地埋管换热器承担的吸热负荷和埋管的数量,从而大幅度增加了

地源热泵系统的初投资,且对换热器的换热性能产生不利的影响。

## 2.2 埋管量的计算

### 2.2.1 热响应测试

为了了解工程所处区域的地质构造,地下岩土体的原始温度分布以及埋管的换热特性,进行了热响应测试。测试井孔径为 130 mm,埋管为双 U 型 PE 管,公称外径 DN32,钻井深度 100 m。

1)原始地温。从全天的地下岩土平均温度来说,浅层土壤受外界气候影响,温度较低,10 m 以下温度相对稳定,测试期间基本稳定在 14 °C 左右,与青川地区年平均气温 13.7 °C 相符。

2)热响应工况。使用电加热器连续加热 12 h,单管流量为 0.3 m<sup>3</sup>/h,双管总流量为 0.6 m<sup>3</sup>/h,单管加热量为 4.5 kW,双管总加热量为 9 kW。在加热前期,由于当地电压波动,供水温度有波动现象出现。随后电压较为平稳,供水温度也较平稳,温差保持在 6~7 °C(如图 1 所示)。随着时间的进行,供回水温差有减小的趋势,地下实际换热量也有所下降(如图 2 所示)。

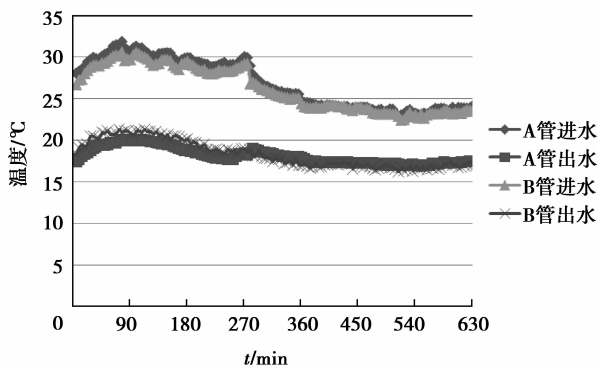


图 1 12 h 加热工况下进出水温度

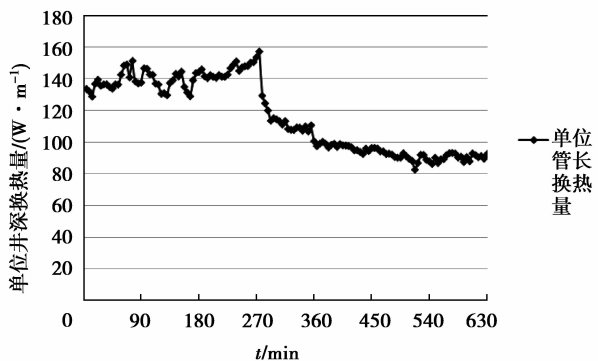


图 2 12 h 加热工况下单位井深换热量

通过热响应测试结果及分析,该地区地下换热

效果良好。在 12 h 加热工况下,得出了单位井深换热量与对应工况下的进水温度的线性关系

$$y = 8.2993x - 104.76. \quad (5)$$

式中:  $y$  为单位井深换热量, W/m;  $x$  为进水温度, °C。

试验工况下平均进水温度为 26 °C,与埋管设计工况下的进水温度符合,通过计算并加以修正得到,制冷工况下地下换热器单位井深换热量为 90 W/m,制热工况下地下换热器单位井深换热量为 48 W/m。

### 2.2.2 理论计算

据测试孔的施工过程以及地勘结果可知,该区域地质坚硬,钻孔越深,施工难度越大,该埋管区埋管造价达到了 200 元/m。结合其地下实际换热效果和钻孔深度方向上的难易程度,建议工程钻孔有效深度为 70 m。根据热响应测试得到的单位井深换热量进行初步计算,若按照夏季冷负荷计算,得到埋管数量为 8 个,若按照冬季热负荷计算,得到埋管数量为 5 个,若按照冬季热负荷和冬季卫生热水负荷总和计算,得到埋管数量为 20 个。

### 2.2.3 埋管量的确定

由于钻孔造价较高,若按照冬季总热负荷计算埋管数量,将造成初投资大幅度增加,相比较而言,蓄热水罐费用较小,从技术经济角度评价分析,利用冬季供热负荷及卫生热水负荷总和计算埋管量是不合适的,因而采用蓄热水罐蓄热的方式,可以大大减少初投资。设计中,综合考虑初投资及系统能效等因素,确定埋管数量为 15 个。

## 2.3 运行调节方式

通常情况下,对于宾馆类建筑,卫生热水需要全天 24 h 供应,但其使用时间相对集中,文献[15]指出:宾馆建筑卫生热水使用高峰一般为早上 6:00—8:00 和晚上 18:00—22:00 这 2 个时间段。而宾馆内的空调负荷高峰多出现在中午以及傍晚旅客回到宾馆后的时间段。

夏季工况下,当  $Q_{Cl}$  较大时,例如中午或傍晚,此时  $Q_{Cond}$  也随之增大,由于夏季卫生热水的需求量相对较小,则  $Q_{re}$  可以满足建筑卫生热水需求,还可以先利用蓄热水罐储存部分卫生热水。当  $Q_{Cl}$  较小而卫生热水负荷相对较大时,例如早上第 1 个卫生热水高峰来临时,用户可以使用蓄热水罐内储存的卫生热水。

冬季工况下,当同时出现空调负荷高峰和热水用水高峰时,例如傍晚旅客们回到宾馆的时间段,为了保证埋管换热器的高换热性能,可以预先启动

机组制取卫生热水,并储存于蓄热水罐内,达到用水高峰时优先使用蓄热水罐内的热水,从而避免了空调负荷和卫生热水负荷的叠加,减少了 $Q_{\text{grou}}$ 。待蓄能时间过后,卫生热水需求量也有所减少, $Q_{\text{re}}$ 减少,则机组采用混合模式运行对地埋管换热器换热性能的不利影响也有所减弱。对于 $Q_{\text{Hi}}$ 和 $Q_{\text{re}}$ 均较小的时间段,例如白天旅客们出游的时间段,主机可以采用间歇运行模式,停机时间内卫生热水可由蓄热水罐供应。

以上运行调节方式的理论分析是具体数值计算条件中运行模式的基础。

### 3 蓄热方式对地埋管换热器性能影响的数值计算

为了研究卫生热水蓄热方式对地源热泵系统中地埋管换热器换热性能的影响,利用CFD软件Phoenics3.6进行计算,分别计算了连续运行工况的换热性能参数及蓄能时间段内(即停机工况)的地温恢复情况,从而分析卫生热水蓄热方式对地埋管换热性能的影响。

#### 3.1 物理模型分析

##### 3.1.1 假设条件

- 1)土壤的物理成分、热物性参数保持不变,不随土壤温度变化而变化,即具有常物性;
- 2)埋管内液体流速均匀一致;
- 3)不考虑地下水分迁移对传热的影响;
- 4)忽略埋管与回填材料、回填材料与土壤之间的接触热阻;
- 5)地下土壤初始温度均匀一致。

##### 3.1.2 计算条件

###### 1)边界条件。

夏季工况:由于 $Q_{\text{grou}}$ 减少,使得进水温度降低。故选定2个进水温度,工况1进水温度为 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,工况2进水温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据文献[14]中推荐的流速值,地埋管双U形管最低设计流速不小于 $0.4\text{ m/s}$ ,单U形管最低设计流速不小于 $0.6\text{ m/s}$ 。因此,本次计算设定的管内流速均大于推荐值,夏季2个工况下进口流量均设定为 $0.8\text{ m}^3/\text{h}$ 。

冬季工况:冬季进水温度设定为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;进口流量设定为 $0.6\text{ m}^3/\text{h}$ ;

###### 2)初始条件。

根据岩土的热物性测试结果,岩土初始温度为 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

###### 3)运行模式。

夏季工况:根据本工程中卫生热水供应在蓄热

模式下的运行调节方式,设定地埋管换热器夏季运行模式为连续运行 $14\text{ h}$ ( $18:00-08:00$ )。

冬季工况:冬季工况下,卫生热水采用蓄热的方式,机组在运行模式及停机模式之间进行转换,对应的地埋管换热器也有连续运行和恢复2种不同工况。故冬季运行模式设定为连续运行 $14\text{ h}$ ( $18:00-08:00$ )后再停机 $3\text{ h}$ (蓄能时间段 $08:00-11:00$ )。

#### 3.2 模型的建立

根据该工程的实际设计条件建立物理模型:埋管深度为 $70\text{ m}$ ,钻孔直径为 $110\text{ mm}$ ,采用高密度聚乙烯双U型管,管径为 $\text{DN}25$ 。该工程地下岩土主要为砂岩,密度为 $2\ 400\text{ kg/m}^3$ ,导热系数为 $2.1\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ,热扩散率 $1.05\times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ ,比热为 $0.92\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ [16]。回填材料采用膨胀土和细沙混合,导热系数为 $2.41\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。土壤块、钻孔、及U型管模型如图3所示。

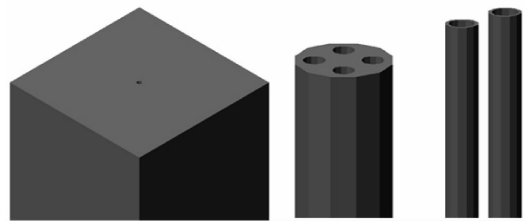


图3 土壤块、钻孔及U管模型

## 4 计算结果分析

#### 4.1 夏季计算结果

夏季系统在连续运行 $14\text{ h}$ 的工况下,由于卫生热水的供应减少了地埋管承担的负荷,在不同进水温度下钻孔内温度分布及换热器换热性能有所不同。夏季连续运行 $14\text{ h}$ 后岩土温度分布见图4。(a)、(b)分别为 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进水工况下, $z=1\text{ m}$ 深处和 $z=10\text{ m}$ 深处岩土温度分布;(c)、(d)分别为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进水工况下, $z=1\text{ m}$ 深处和 $z=10\text{ m}$ 深处岩土温度分布。

由图4可知,夏季连续运行 $14\text{ h}$ 后,钻孔附近温度升高,进水管侧的温度升幅最大。2个进水温度工况下岩土温度分布趋势一致,且影响程度均沿深度方向和径向减弱。

夏季2个运行工况下换热器进出水管水温分布趋势一致,但由于2个工况下的进水温度的差异导致进水管内温度分布呈现差异。对于浅层换热层, $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进水工况下进水管内温度高于 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进水工况,随着换热的进行,差值逐渐减小。另外, $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进

水温度工况下的出水温度比 30 °C 进水温度工况下的出水温度低,1、2 号 U 管在 2 个工况下的出水温度差值分别为 0.84 °C 和 1 °C(见图 5)。

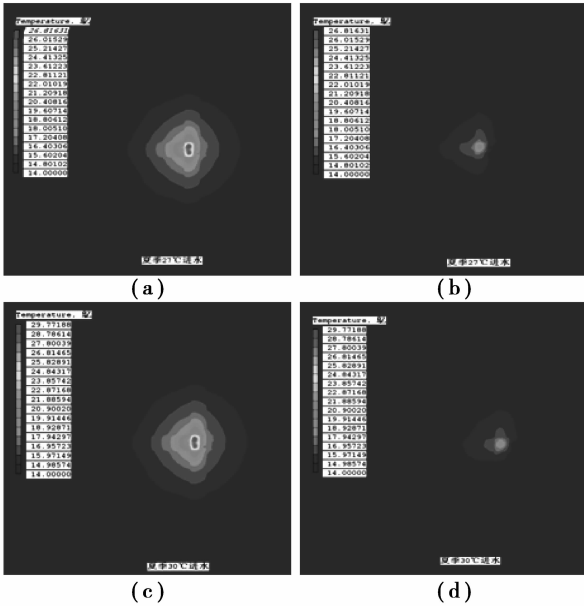


图 4 夏季连续运行 14 h 后岩土温度分布

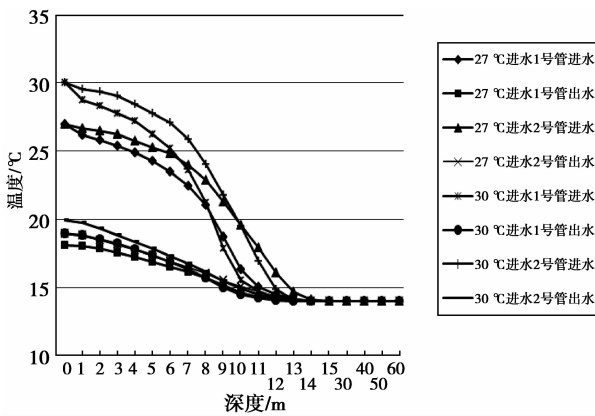


图 5 夏季工况换热器进出水管水温分布

取 1 号 U 管和 2 号 U 管的中心线位置为对称轴,距离钻孔中心不同半径处温度分布见图 6,可以看出,2 个工况下岩土沿径向温度分布的趋势一致,影响程度均沿径向向钻孔外逐渐减弱。钻孔附近浅层岩土的温升较大,且 2 个工况下的岩土温度差值较大,30 °C 进水工况下地下岩土温度明显高于 27 °C 进水工况下的岩土温度,最大差值为 2.21 °C,说明高进水温度在径向方向上所引起的岩土温升和热量堆积情况严重。

### 4.2 冬季计算结果

冬季工况下埋管区深度方向上  $z=1\text{ m}$  处岩土温度分布见图 7。(a)为连续运行 14 h 后的岩土温

度分布,(b)为连续运行 14 h,然后再停机 3 h 后的岩土温度分布。连续运行 14 h 后,钻孔附近温度降低,进水管附近的温度降幅最大。而 3 h 停机工况后,钻孔附近温度均得到不同程度的恢复。

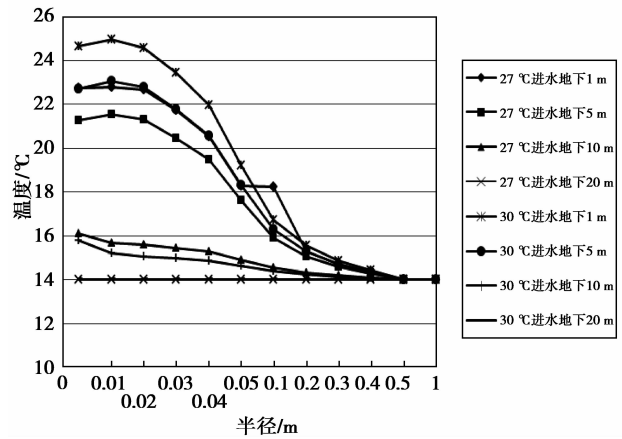


图 6 夏季工况径方向岩土温度分布

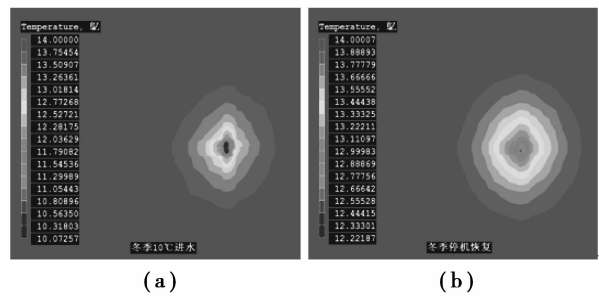


图 7 冬季运行 14 h 后和停机 3 h 后温度分布

由图 8-11 可知,连续运行 14 h 后,地下岩土温度沿深度方向和半径方向均有不同程度的降低,影响程度沿深度方向和径向逐渐减弱。钻孔附近浅层岩土温度降幅较大,与初始温度相比,岩土最大温降值为 2.89 °C。而在卫生热水采用蓄热方式下的

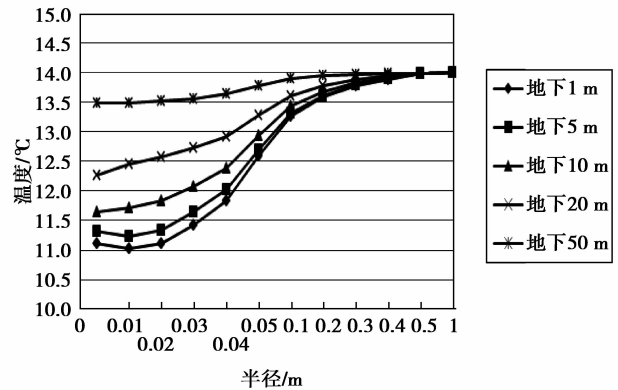


图 8 运行 14 h 后径向岩土温度分布

蓄能时间段内,不同深度不同半径处的岩土温度得到了不同程度的回升,最大恢复温度值达到 $1.8^{\circ}\text{C}$ 。

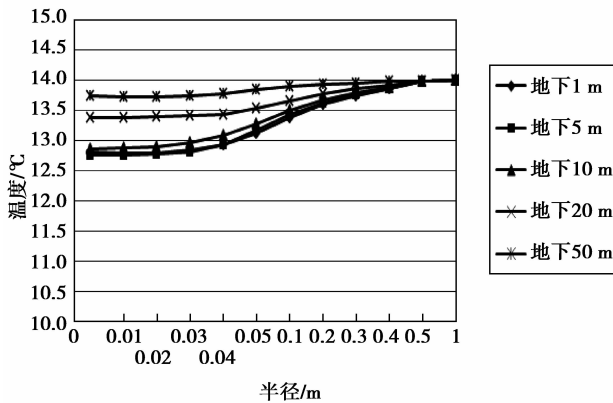


图9 停机3 h后径向岩土温度分布

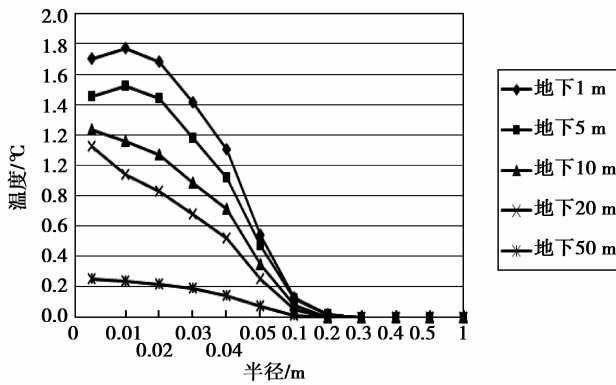


图10 冬季蓄能时间段后岩土温度恢复

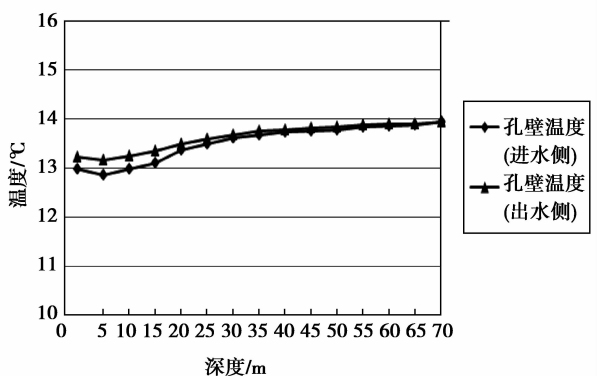


图11 冬季停机3 h后孔壁温度分布

## 5 实验验证

为检验数值计算的正确性,取某实际地源热泵工程中的运行数据作为验证,该工程选用余热回收型地源热泵机组实现制冷、制热及卫生热水的供应。夏季运行工况1为只进行制冷,工况2为制冷的同

时利用余热回收制取卫生热水。选取的2个工况段室外气象条件基本相同,建筑空调负荷差异很小,由图12可以看出,与工况1相比,由于工况2回收部分冷凝热制取卫生热水,向地下释放的热量减少,进水温度大幅度降低,出水温度也有所降低。两个工况下最大进水温度相差为 $2.5^{\circ}\text{C}$ 时,略小于理论计算的设定值,但最大出水温度相差为 $1.0^{\circ}\text{C}$ ,与夏季理论计算结果相近。分析其原因为:实验工况下连续运行时间为8 h,略小于计算条件下的运行时间。故该实验测试结果仍能较好地说明该理论计算的正确性。

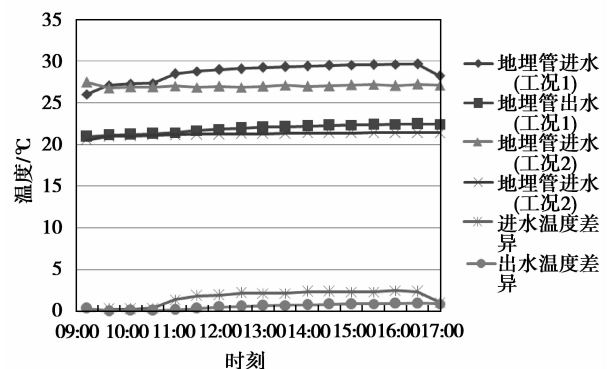


图12 2个运行工况下地埋管进出水温度

## 6 结论

1)夏季通过回收冷凝热制取卫生热水,使得释放到地下换热器的热量减少,进水温度有所降低。通过夏季理论计算得到, $30^{\circ}\text{C}$ 进水工况下出水温度高于 $27^{\circ}\text{C}$ 进水工况下的出水温度,连续运行14 h后,出水温度相差 $1^{\circ}\text{C}$ 左右。另外, $30^{\circ}\text{C}$ 进水工况下地下岩土温度明显高于 $27^{\circ}\text{C}$ 进水工况下的岩土温度,最大差值达到 $2.21^{\circ}\text{C}$ ,即说明夏季高进水温度引起的浅层岩土温度增幅较大,长期运行情况下,造成热量的堆积,从而形成热封锁区,不利于地源热泵系统的连续运行。而利用卫生热水蓄热方式可以减轻地埋管换热器承担的负荷,减少热量的堆积,有利于换热器长期的稳定运行。

2)对于冬季卫生热水负荷较大的宾馆类建筑,可以采用卫生热水蓄热的方式。根据卫生热水的使用特点,利用蓄热水罐的蓄热性能,减少了埋管数量,降低了地源热泵系统的初投资。而且卫生热水的蓄热方式对地埋管换热器的换热性能也具备有利影响。冬季连续运行14 h后,岩土最大温降值达到了 $2.89^{\circ}\text{C}$ ,随后的3 h蓄热时间段内,由于卫生热水的供应采用蓄热的方式,地下各处岩土温度得到

了不同程度的回升,最大恢复温度值达到 1.8℃。钻孔内 25 m 深度范围以下孔壁处温度几乎恢复到初始温度。卫生热水蓄热方式减缓了长时间、大负荷的连续运行工况所引起地下换热器换热性能的持续下降,也有利于地埋管换热器下一阶段运行。

#### 参考文献:

- [1] YAVUZTURK C, SPITLER D J. Comparative study to investigate operating and control strategies for hybrid ground source heat pump systems using a short time-step simulation mode [J]. *ASHRAE Transactions*, 2000, 106 (2): 192-209.
- [2] KAVANAUGH P S. A design method for hybrid ground-source heat pumps [J]. *ASHRAE Transactions*, 1998, 104(2): 691-698.
- [3] HEPBASLI A. Exergetic modeling and assessment of solar assisted domestic hot water tank integrated ground-source heat pump systems for residences [J]. *Energy and Buildings*, 2007, 39(12): 1211-1217.
- [4] OZGENERA O, HEPBASLI A. Experimental performance analysis of a solar-assisted ground-source heat pump greenhouse heating system [J]. *Energy and Buildings*, 2005, 37(1): 101-110.
- [5] HEPBASLI A, KALINCI Y. A review of heat pump water heating systems [J]. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 2009, 13(6/7): 1211-1229.
- [6] TRILLAT-BERDAL V, SOUYRI B, FRAISSE G. Experimental study of a ground-coupled heat pump combined with thermal solar collectors [J]. *Energy and Buildings*, 2006, 38(12): 1477-1484.
- [7] 王健敏, 廖德富. 学生公寓生活热水系统工程优化设计 [J]. *给水排水*, 2009, 35(15): 82-85.  
WANG JIAN-MIN, LIAO DE-FU. Optimization of the hot water system design of the student apartment [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2009, 35 (15): 82-85.
- [8] 胡松涛, 郭潇潇, 李绪泉. 地源热泵技术在生活热水供应中的应用 [J]. *流体机械*, 2007, 35(9): 62-64.  
HU SONG-TAO, GUO XIAO-XIAO, LI XU-QUAN. Application of ground source heat pump to domestic hot water supply [J]. *Fluid Machinery*, 2007, 35 (9): 62-64.
- [9] 梅奎. 地源热泵热水器系统设计及经济性分析 [C] // 第 13 届全国热泵与系统节能技术大会论文集. 敦煌: 第十三届全国热泵与系统节能技术大会, 2008: 95-101.
- [10] CUI P, WANG H X, FANG Z H. A simulation study on a new hybrid GCHP system in Hong Kong [C] // *Proceedings of the 5th International Conference on Sustainable Energy Technologies*, August 30-September 1, 2006, Vicenza, Italy. [S. l.]: [S. n.], 2006: 537-543.
- [11] CUI P, YANG H X, SPITLER J D, et al. Simulation of hybrid ground-coupled heat pump with domestic hot water heating systems using HVACSIM+ [J]. *Energy and Buildings*, 2008, 40(9): 1731-1736.
- [12] 陈文明, 王成勇, 王雁生, 等. 广州地区地源热泵热水系统的应用研究 [J]. *节能*, 2008, 308(3): 55-57.  
CHEN WEN-MING, WANG CHENG-YONG, WANG YAN-SHENG, et al. Study on ground-source heat pump systems (Gshps) applied in hot-water supply in Guangzhou [J]. *Energy Conservation*, 2008, 27(3): 55-57.
- [13] 李满峰, 周国峰, 范波. 土壤源热泵系统冷凝热回收的优化研究 [J]. *低温与超导*, 2010, 38(1): 61-66.  
LI MAN-FENG, ZHOU GUO-FENG, FAN BO. Study on the condensation heat recovery optimum of the ground-coupled heat pump system [J]. *Cryogenics and Superconductivity*, 2010, 38(1): 61-66.
- [14] 中国建筑科学研究院. GB50366-2009《地源热泵系统工程技术规范》[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [15] 周志仁, 谭洪卫, 王恩丞. 酒店热水用水规律与热泵热回收系统设计 [J]. *建筑节能*, 2009, 37(1): 27-30.  
ZHOU ZHI-REN, TAN HONG-WEI, WANG EN-CHENG. Study on the use law of domestic hot water in hotel and design of heat pump heat recovery system [J]. *Construction Energy Conservation*, 2009, 37 (1): 27-30.
- [16] 张家荣, 赵廷元. 工程常用物质的热物理性质手册 [M]. 北京: 新时代出版社, 1987.

(编辑 郑洁)