

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.06.020



# 严寒地区埋管换热器周围土壤冻结区域分布特征实验研究

张之强<sup>1a,1b</sup>, 金光<sup>1a</sup>, 吴晷<sup>1a,1b</sup>, 田瑞<sup>2</sup>, 郭少朋<sup>1a</sup>

(1. 内蒙古科技大学 a. 能源与环境学院, b. 内蒙古自治区白云鄂博矿多金属资源综合利用重点实验室, 内蒙古包头 014010; 2. 内蒙古工业大学风能太阳能利用技术省部级共建教育部重点实验室, 呼和浩特 010051)

**摘要:**建立了模拟严寒地区土壤热失衡状态下地源热泵冬季运行情况的实验装置, 实验研究了埋管周围土壤冻结区域的分布特征, 给出了冻结相变锋面的平均移动速度。结果表明, 土壤冻结区域呈不对称性分布, 流体进口温度为  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 埋深为 350、700、1 050 mm, 热响应区在 40~60 mm 段, 冻结锋面的平均移动速率分别为 5.5、6.67 mm/h, 热响应区在 60~80 mm 段, 冻结锋面的平均移动速率分别为 1.54、1.82、1.82 mm/h; 土壤冻结在一定程度上有利于埋管与周围土壤之间的换热, 在严寒地区地源热泵的设计中应考虑土壤冻结现象。

**关键词:**严寒地区; 地源热泵; 土壤冻结; 冻结锋面; 冻结相变

**中图分类号:**TK529 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)06-0143-06

## Experimental analysis of the distribution characteristics of the frozen soil area around ground heat exchanger in cold region

Zhang Zhiqiang<sup>1a,1b</sup>, Jin Guang<sup>1a</sup>, Wu Xuan<sup>1a,1b</sup>, Tian Rui<sup>2</sup>, Guo Shaopeng<sup>1a</sup>

(1a. School of Energy and Environment, 1b. Key Laboratory of Integrated Exploitation of Bayan Obo Multi-Metal Resources, IMUST, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, P. R. China;

2. Key Laboratory of Wind Energy and Solar Energy Utilization Technology, Ministry of Education, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, P. R. China)

**Abstract:** An experimental device is established in this paper, the operating condition of ground source heat pump under the condition of soil thermal imbalance in cold region in winter is simulated. The experiment studies the distribution characteristics of the frozen soil area around the buried pipe, and gets the average moving speed of freezing front. The results show that the distribution of frozen soil area is asymmetric. When the fluid inlet temperature is  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  and buried depth is 350, 700 and 1 050 mm, the average moving speed of freezing front is 5.5 and 6.67 mm/h in the heat response areas of 40~60 mm, and the average moving speed of freezing front is 1.54, 1.82 and 1.82 mm/h in the heat response areas of 60~80 mm. The

**收稿日期:**2017-03-15

**基金项目:**内蒙古自治区自然科学基金(2014MS0530, 2015MS0561)

**作者简介:**张之强(1990-), 男, 主要从事地源热泵技术研究及应用, (E-mail)charles\_zhang90@163.com。

金光(通信作者), 女, 教授, 博士, (E-mail)hgjg@imust.cn。

**Received:**2017-03-15

**Foundation item:** Natural Science Foundation of Inner Mongolia Autonomous Region(No. 2014MS0530, 2015MS0561)

**Author brief:** Zhang Zhiqiang(1990-), main research interest: ground source heat pump technology, (E-mail)charles\_zhang90@163.com.

Jin Guang(corresponding author), professor, PhD, (E-mail)hgjg@imust.cn.

frozen soil to a certain extent in favor of heat transfer between buried pipe and surrounding soil, so the frozen soil should be considered in the design of GSHP in cold area.

**Keywords:** cold region; ground source heat pump; soil freezing; freezing phase transition; freezing front

浅层地热能作为一种高效的可再生能源越来越受到人们的重视,地热能的主要利用方式之一地源热泵系统也越来越多的应用到实际工程当中。但在大多数工况下地源热泵从土壤中获得的热量不平衡,土壤的热量失衡会对地源热泵系统造成不利影响<sup>[1-3]</sup>。在中国北方严寒地区冬夏季冷热负荷严重不平衡,尤其是对于连续运行的土壤源热泵系统,导致了系统热失衡现象较为严重<sup>[4-6]</sup>。土壤长期处于取热量大于蓄热量的情况下,土壤温度场得不到恢复,土壤温度整体下降,严重时会出现土壤冻结现象。土壤热失衡的出现严重影响了埋管换热器的换热特性,进而导致热泵机组蒸发温度的降低、COP 制冷系数减小、系统效率下降,系统出力不足等问题<sup>[7-10]</sup>,但土壤冻结现象的出现会在一定程度上减缓以上问题的继续恶化。目前, Li 等<sup>[11]</sup>基于内热源理论,建立了地源热泵系统三维模型,模拟了换热管群的温度分布和长期的运行性能,结果表明,埋管周围土壤温度不断增加最终导致系统的恶化并提出了减轻系统恶化的方案。苑中显等<sup>[12]</sup>针对用液氮或液态 CO 对建筑物地基实施冻结处理的相变传热问题,进行了计算机数值模拟研究,得出适合某一实际工程的冷冻管布置优化方案。季阿敏等<sup>[13]</sup>在综合考虑水变成冰后,冰的比热减小及水结冰时会放出相变潜热,从而使土壤的冻结比热有所增大这两方面因素的基础上,引入了全比热概念,建立了土壤冻结过程数学模型,对土壤冻结时间进行数值模拟,并采用有限差分法进行了数值求解,结果表明,使用计算机数值分析的方法进行冻结过程模拟,对冻结工艺、冻结设施的优化设计具有实际意义。于明志等<sup>[14]</sup>基于线热源理论,分析了土壤冻结对垂直埋管传热的影响规律,结果表明土壤含水量与土壤初始温度较高时,对于地源热泵系统的运行是有利的。杨卫波等<sup>[15]</sup>建立了埋管换热器周围土壤冻结的数学模型,该模型仅考虑了热量沿径向的传递,采用有限容积法求解了第二类边界条件下土壤温度场的变化,结果显示提高土壤含水率有利于降低土壤的冻结速度。魏亚志等<sup>[16]</sup>,根据冻土层换热特点建立了一种简化传热模型,对水平埋管周围土壤瞬态温度分布进行了模拟计算,分析了冻土层和土壤含水率对 GHE 热损失的影响,结果表明,土壤冻结情况对 GHE 的传热损失相对于非冻土情况下增大。

目前,尚未有采用实验方式对严寒地区埋管换热器周围土壤冻结区域的分布特征的研究。本文建立了模拟严寒地区的地源热泵实验装置,对土壤冻结区域的分布特征进行了分析,计算了冻结锋面的平均移动速度,因地制宜的对地源热泵冻结相变问题展开了研究;探讨了优化地源热泵的设计方案,使其系统在寒冷地区也能发挥最大的优势,进而达到环保和节能的目的。

## 1 实验装置

图 1 给出了实验系统装置图。系统主要由主体沙箱、恒温水浴、渗流给水箱以及温度数据采集系统组成;整个主体沙箱为不锈钢长方体,长宽高分别为 1 300、1 300、1 500 mm,其内部可填充土壤;沙箱四周设有水套,水套宽度为 50 mm、高度为 1 500 mm,且方形水套底端和顶端与沙箱上下边缘平齐。主体沙箱中心设有直径为 150 mm 的圆形回填区域,回填区域使用不锈钢丝网缠绕,用于回填材料的放置;回填区中心插入壁厚为 1 mm、外壁直径 10 mm 的 U 型紫铜换热管;U 型管进出口与恒温水浴相连,可以向沙箱内提供恒定的冷热量;恒温水浴工作范围为 0~100 ℃,温度波动为 ±0.1 ℃。为了保证室温的波动对实验结果影响最小化,使用的是 30 mm 厚的聚丙烯和丁晴橡胶组成的保温材料包裹主体沙箱外表面;该保温材料有密度低、导热系数低的优点。

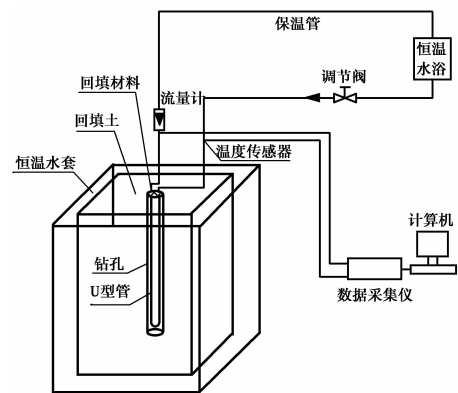


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental device diagram

图 2 给出了温度测点布置图。主体沙箱内分别布置了 3 层温度传感器,埋深分别为 350、700、1 050 mm;每层传感器测点到热源中心的距离依次是 40、

60、80、105、130、155、180、205、280、380、480、580 mm。在 U 型管壁布置有温度传感器间隔为 200 mm,如图 2 所示编号分别为 101、102、…、115;在实验前已对温度传感器做了恒温水浴标定。

采用铜-康铜(K 型)热电偶对换热管的进出口温度进行测量,精度为±0.1℃;传感器的数据信息都通过 Agilent 34970A 进行现场采集,并传送至计算机中做数据处理。

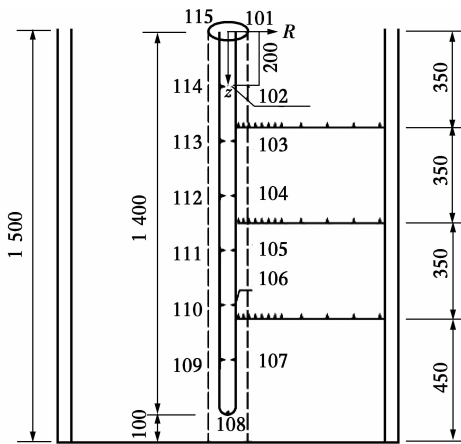


图 2 温度测点布置图

Fig. 2 Temperature measuring point layout plans (unit:mm)

## 2 实验工况

实验装置中所填土壤为实验装置所在地 1~2 m 浅层土壤,土壤类别为粉质粘土,土壤含水量为 15%,初始温度为 9℃,干密度为 1 500 kg/m<sup>3</sup>;实验选用循环工质为乙二醇的水溶液,其浓度比为 50%,冰点可达零下 33℃左右,满足实验要求;实验过程中固定 U 型管内循环工质流量为 36 L/h,入口流体  $t_{in} = -15℃$ 。设置参数如表 1 所示,系统连续运行 72 h。

表 1 实验设置参数表

Table 1 Experimental setup parameter

项目	参数
土壤初始温度/℃	9
土壤类别	粉质粘土
土壤密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	1 500
土壤含水量/%	15
回填区深度/mm	1 400
进口流体/℃	-15
管内流体流量/(L·h <sup>-1</sup> )	36
U 型管内径/外径/mm	8/10
U 型管管材	紫铜
U 型管两支管间距/mm	60
乙二醇水溶液浓度/%	50

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤冻结区域 U 型管壁温度分布

当系统达到稳定时,取 72 h 的 U 型埋管管壁温度数据、沿径向距离的温度数据分析,如图 3、4 分别给出了 U 型埋管沿埋管深度的温度分布图和土壤沿径向温度分布图。

循环工质从 U 型埋管的进水口流入,出水口流出,其间会与周围土壤进行换热。经过土壤换热作用,U 型埋管管壁上的温度和其周围土壤温度分布会沿深度方向不同。实验仅仅考虑进水支管一侧的相关变化。由图 3 可知 U 型管壁温度从入口处到出口处温度逐渐升高,且 U 型管进水支管和出水支管同一水平面上的温度差从上到下有逐渐减小的趋势。在埋深  $Z=350$  mm 处,进、出水支管之间的温差较大,可以推断该深度土壤进、出水支管两侧的冻结区域大小不一样,不对称性应该比较明显,并且冻结区域主要集中在进水支管一侧,而在出水支管一侧冻结区域很小。

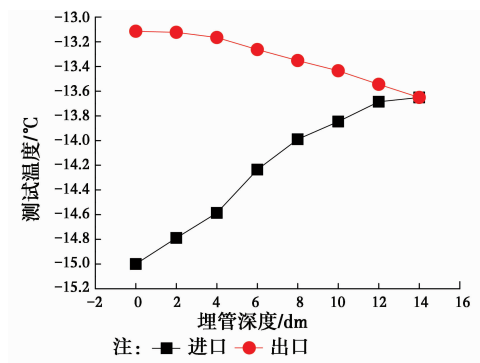


图 3 U 型管沿埋管深度温度分布图

Fig. 3 Temperature distribution along the depth of the U-tube

### 3.2 土壤径向温度分布

图 4 给出了第 72 h 时刻埋深  $Z$  为 350、700、1 050 mm 处土壤沿径向温度分布。可以看出,径向距离为 40 mm 处土壤温度最低,处于冻结状态,此时称为冻结区;80~110 mm 处温度在  $-1~0℃$  之间,土壤介于冻结与未冻结之间,是固液共存的状态;固相与液相之间存在一个界面,这个界面会随着时间的变化而移动,称为可移动冻结锋面,此时称为模糊区;110 mm 之后温度逐渐上升土壤处于未冻结状态,此时称为未冻结区。同时可以看出,周围土壤各层温度沿径向方向逐渐增大,且增大的趋势随着深度的增加而增加;在土壤温度开始大于  $0℃$  处的径向距离  $R$  不大,约在 80~110 mm,并且埋深  $Z=350$  mm > 埋深  $Z=700$  mm > 埋深  $Z=1 050$  mm,即土壤冻结区域从上到下依次减小。这是因为土壤

的热扩散系数比较小,导致仅在埋管附近的小区域内温度梯度较大,热响应剧烈,远距离处的土壤温度变化并不明显,所以,由管内流体的低温所产生的冻结区域并不大,约为 80~110 mm;U 型管沿程温度不同,导致周围土壤出现冻结区域的分布在不同深度也不同。

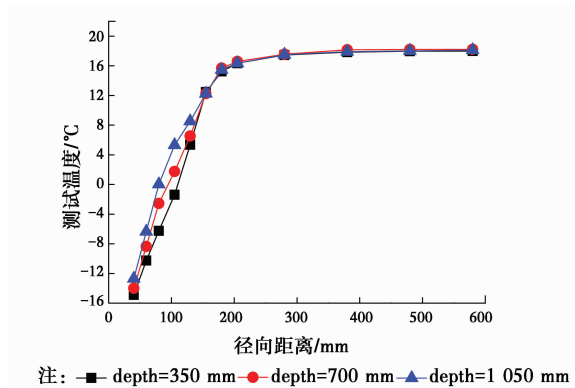


图 4 土壤径向温度分布图

Fig. 4 Soil radial temperature distribution map

### 3.3 土壤纵向温度分布

图 5 给出了土壤温度最低处  $R=40$  mm 的土壤纵向温度随时间的变化的趋势。由于该位置土壤与埋管比较接近,处在热响应比较剧烈的区域,所以,受管内低温循环工质的影响比较明显。随着运行时间的增加,土壤温度逐渐下降,埋深  $Z=350$  mm 处土壤温度在第 5 h 开始低于土壤的相变温度,已处于开始冻结状态;埋深  $Z=700$  mm 处土壤在第 8 h 才开始冻结; $Z=1050$  mm 处土壤在第 12 h 开始出现冻结。因此,在相同入口温度的前提下,开始出现冻结的时间,从埋深  $Z=350$  mm、 $Z=700$  mm、 $Z=1050$  mm 依次延长,并且土壤温度随深度增加的方向逐渐升高,但其温度升高的幅度却逐渐减小。

由图 5 还可以看出,前 10 h 左右,土壤纵向温度下降迅速,分析其原因,是由于土壤相对体积热容较小,自身温度迅速下降;10~28 h 左右,出现一段相对平缓的趋势,其原因是该时刻处于模糊区,有大量的潜热被释放出来,释放的潜热与埋管进行了换热,导致了温度场得到了一定的恢复,即下降的趋势变得平缓,这说明大量的相变潜热是在模糊区放出的。

大量相变潜热的产生使得体积相等的土壤可以储存更多的能量,土壤的冻结改变了土壤内在结构、土壤的热物性参数如导热系数、比热容等,在一定程度上有利于埋管与周围土壤之间的换热。所以,在严寒地区土壤源热泵系统的设计中,须适当考虑土壤中水分冻结的影响,否则,计算出的埋管周围

的温度场与实际情况偏差较大,同时,造成地源热泵换热器设计规模大于实际需要,从而增大地源热泵的初投资。

图 5 中在运行 28 h 以后,土壤温度开始出现下降的趋势,并且下降速率小于 0~10 h 阶段。这是因为土壤已经处于完全冻结状态,只有极少量的潜热被放出,少量潜热不能满足埋管的换热需求,所以,会导致土壤温度继续下降,并且,冻结区域会持续增加;另外,土壤冻结改变了土壤结构和土壤热物性,使其体积热容相对增大,也就是相同体积的土壤可以蕴藏更多的能量,所以,导致了其下降速率小于 0~10 h 阶段的情况。

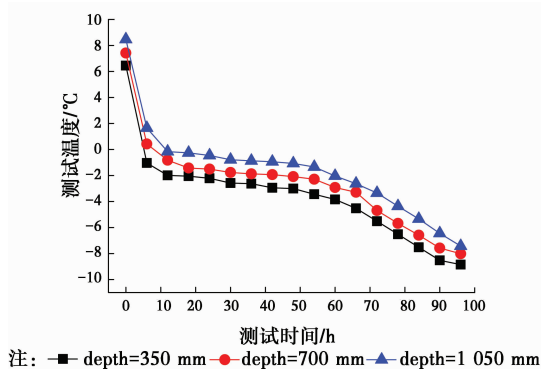


图 5  $R=40$  mm 处的土壤纵向温度随时间的变化图

Fig. 5 Soil longitudinal temperature change with the time at  $R=40$  mm

图 6 给出了  $R=60$  mm 处的土壤纵向温度随时间的变化分布图,由图可知埋深  $Z=350$  mm 处土壤温度在第 9 h 开始处于冻结状态;埋深  $Z=700$  mm 处土壤在第 12 h 才开始冻结; $Z=1050$  mm 处土壤在第 15 h 开始出现冻结。

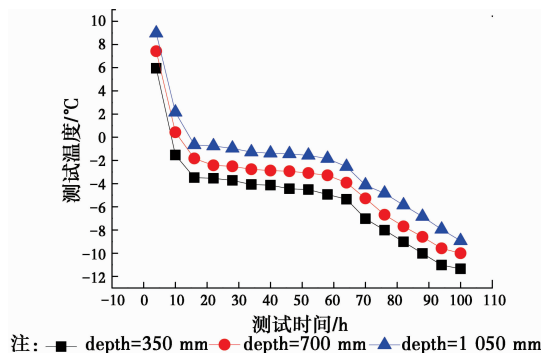
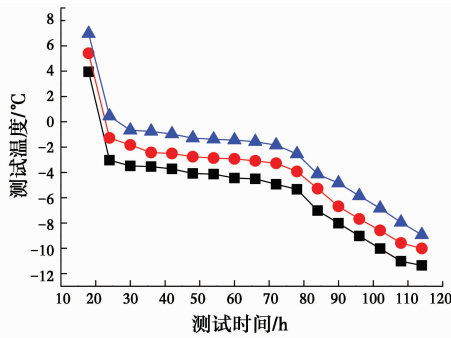


图 6  $R=60$  mm 处的土壤纵向温度随时间的变化图

Fig. 6 Soil longitudinal temperature change with the time at  $R=60$  mm

图 7 给出了  $R=80$  mm 处的土壤纵向温度随时间的变化分布图,由图可知埋深  $Z=350$  mm 处土壤温度在第 22 h 开始处于冻结状态;埋深  $Z=700$  mm

处土壤在第23 h才开始冻结;Z=1 050 mm处土壤在第26 h开始出现冻结。



注: —■— depth=350 mm —●— depth=700 mm —▲— depth=1 050 mm

图7 R=80 mm处的土壤纵向温度随时间的变化图

Fig. 7 Soil longitudinal temperature change with the time at R=80 mm

### 3.4 冻结锋面的平均移动速率

根据图5~图7的对比可以得到,不同深度、不同径向距离出现冻结的时间,整理数据如表2所示。

表2 出现冻结所需的时间

Table 2 The time required to freeze

深度/mm	出现冻结的时间/h		
	R=40 mm	R=60 mm	R=80 mm
350	5	9	22
700	8	12	23
1 050	12	15	26

将表2中的半径差值与深度的比值定义为移动速率,公式如

$$W = \frac{s_1 - s_2}{t_1 - t_2} \quad (1)$$

式中:W为冻结锋面平均移动速率,mm/h; $s_1, s_2$ 为土壤径向距离,mm; $t_1, t_2$ 为出现冻结消耗的时间,h。

如在埋深Z=350 mm处,R=40~60 mm段的冻结锋面平均移动速率 $W = (60 - 40) / (9 - 5) = 5$  mm/h。

使用式(1)计算可以得出,进口温度 $t_{in} = -15$  °C时,埋深为Z=350、700、1 050 mm,热响应区在R=40~60 mm段,冻结锋面的平均移动速率分别为5、5、6.67 mm/h,热响应区在R=60~80 mm段,冻结锋面的平均移动速率分别为1.54、1.82、1.82 mm/h。由此可得,相同进口温度下,越远距离段,冻结锋面的移动速度越慢,也就是越远处,达到土壤相变温度所需要的时间越长。其原因是在热泵运行过程中发生了固液相变及土壤中的水分迁移的现象。由于土壤发生冻结现象,部分土壤中的水分迁移到冻结土壤中,并放出了大量的潜热,

影响了冻结锋面的平均移动速度。

## 4 结论

1)U型埋管周围土壤冻结区域沿循环工质流动的方向逐渐变小,且冻结区域不大,当进口循环工质温度 $t_{in} = -15$  °C时,仅为80~110 mm,且具有不对称型。

2)根据土壤纵向温度分布的情况可以看出,埋深和半径依次增加会使得出现冻结的时间逐步延迟;并且,模糊区会释放大量的相变潜热,同时,土壤冻结会改变土壤的内在结构、土壤热物性参数如导热系数、比热容等,在一定程度上有利于埋管与周围土壤之间的换热,所以,在严寒地区土壤源热泵的设计中应考虑土壤冻结现象。

3)相同进口温度下,越远距离段,冻结锋面的移动速度越慢,当进口温度 $t_{in} = -15$  °C时,埋深为Z=350、700、1 050 mm,热响应区在R=40~60 mm段,冻结锋面的平均移动速率分别为5、5、6.67 mm/h,热响应区在R=60~80 mm段,冻结锋面的平均移动速率分别为1.54、1.82、1.82 mm/h。

## 参考文献:

- [1] 韩斯东,金光,毕文明,等. 某地源热泵地浅层土壤分层热物性响应实验[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(4): 144-149.  
HAN S D, JIN G, BI W M, et al. Test of shallow soil thermal properties of layered thermal response of a ground source heat pump system in a certain place [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(4): 144-149. (in Chinese)
- [2] 毕文明,岳丽燕,韩再生,等. 埋管换热性能综合微缩实验研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(1): 144-148.  
BI W M, YUE L Y, HAN Z S, et al. A comprehensive miniature test study of buried tube heat exchange performance [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(1): 144-148. (in Chinese)
- [3] 金光,王正文,吴晷,等. 混合式土壤源热泵系统的研究现状及展望[J]. 流体机械, 2016, 44(2): 82-88.  
JIN G, WANG Z W, WU X, et al. Research status and prospect of hybrid ground source heat pump systems [J]. Fluid Machinery, 2016, 44(2): 82-88 (in Chinese)
- [4] 杨卫波,张苏苏. 冷热负荷非平衡地区土壤源热泵土壤热失衡研究现状及其关键问题[J]. 流体机械, 2014, 42(1): 80-87.  
YANG W B, ZHANG S S. Research status and key problem of underground thermal unbalance of ground coupled heat pump operated in districts with unbalanced

- cooling and heating load [J]. *Fluid Machinery*, 2014, 42(1):80-87. (in Chinese)
- [5] HU T, ZHU J L, ZHANG W. Performance analysis of a heat pump system with hybrid heat sources[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2012, 22(1):37-42.
- [6] ZHANG L F, ZHANG Q, HUANG G S, et al. A p(t)-linear average method to estimate the thermal parameters of the borehole heat exchangers for in situ thermal response test [J]. *Applied Energy*, 2014, 131: 211-221.
- [7] YU X, WANG R Z, ZHAI X Q. Year round experimental study on a constant temperature and humidity air-conditioning system driven by ground source heat pump [J]. *Energy*, 2011, 36(2):1309-1318.
- [8] YANG W, ZHANG S S, CHEN Y P. A dynamic simulation method of ground coupled heat pump system based on borehole heat exchange effectiveness [J]. *Energy and Buildings*, 2014(77):17-27
- [9] SHANG Y, LI S F, LI H J. Analysis of geo-temperature recovery under intermittent operation of ground-source heat pump[J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(4):935-943.
- [10] BOUHACINA B, SAIM R, BENZENINE H, et al. Analysis of thermal and dynamic comportment of a geothermal vertical U-tube heat exchanger[J]. *Energy and Buildings*, 2013, 58:37-43.
- [11] LI S H, YANG W H, ZHANG X S. Soil temperature distribution around a U-tube heat exchanger in a multi-function ground source heat pump system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29:3679-3686.
- [12] 苑中显, 叶芳, 陈峰, 等. 人工土壤冻结过程的计算机模拟[J]. *工程热物理学报*, 2000, 21(4):479-482.
- YUAN Z X, YE F, CHEN F, et al. Computational simulation to the artificially freezing process of shaft support in earth [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2000, 21(4):479-482. (in Chinese)
- [13] 季阿敏, 李杰, 糜仁华, 等. 土壤冻结时间的数值模拟及实验[J]. *哈尔滨商业大学学报*, 2004, 20(4):492-495.
- JI A M, LI J, MI R H, et al. Study on numerical simulation of freezing time of soil and experimental designed for its reliability [J]. *Journal of Harbin University of Commerce*, 2004, 20(4): 492-495. (in Chinese)
- [14] 于明志, 方肇洪, 李明钧, 等. 土壤冻结对地下换热器传热的影响[J]. *山东建筑工程学院学报*, 2001, 6(1): 42-46.
- YU M Z, FANG Z H, LI M J, et al. The influence of soil freezing on the heat transfer between heat exchanger or ground-source heat pumps and its ambient [J]. *Journal of Shandong Institute of Arch. AND ENG*, 2001, 6(1):42-46. (in Chinese)
- [15] 杨卫波, 施明恒, 刘光远, 等. 基于显热容法的土壤源热泵埋管换热器周围土壤冻结特性研究[J]. *暖通空调*, 2008, 38(4):6-10.
- YANG W B, SHI M H, LIU G Y, et al. Study on freezing characteristics of soil around ground heat exchangers of ground-source heat pumps based on apparent heat capacity method [J]. *HV & AC*, 2008, 38(4):6-10. (in Chinese)
- [16] 魏亚志, 张海东, 王爱爱, 等. 冻土层中水平埋管换热器换热特性的是指分析[J]. *建筑热能通风空调*, 2012, 29(3):1-4.
- WEI Y Z, ZHANG D H, WANG A A, et al. Numerical simulation of heat transfer characteristic of horizontal ground heat exchanger in frozen soil layer [J]. *Building Energy and Environment*, 2010, 29(3):1-4. (in Chinese)

(编辑 胡玲)