

地源热泵间歇运行地温变化特性及恢复特性研究

尚妍, 李素芬*, 代兰花

(大连理工大学 海洋能源利用与节能教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对土壤源热泵运行过程中地下传热衰减问题,进行了热泵间歇运行实验,测试分析了热泵间歇运行过程中地温变化规律及其对换热率和机组性能的影响.建立基于渗流的三维非稳态传热模型,对地下垂直U形埋管与周围土壤的热湿耦合传递进行数值计算,模拟了热泵运行状态下地温变化及热泵停歇状态下地温恢复特性;数值分析了土壤导热系数、土壤孔隙率、不同回填材料及太阳辐射能对地温恢复过程的影响.实验与数值计算都表明,热泵可控间歇运行策略对于改善地下传热,提高热泵系统性能具有重要作用,探讨热泵可控间歇运行问题对于地热能高效一体化利用具有理论意义.

关键词: 土壤源热泵; 间歇运行; 地温恢复

中图分类号: TK124; TK529 **文献标志码:** A

0 引言

土壤源热泵因其节能、环保等优点在全球范围内逐步得到广泛应用.岩土作为吸热与排热场所,其温度场直接影响地下岩土的传热,进而影响热泵机组的功耗和系统性能指标.随着热泵的连续运行,岩土在热湿传递的作用下导致地下换热埋管周围的土壤温度场随时间而改变,传热驱动势衰减,传热速率降低.可控间歇技术通过合理地控制热泵运行时间,使土壤处于间歇蓄/放热状况,从而使地下土壤的温度得到周期恢复,有助于改善岩土传热,增强地下换热能力,提高土壤源热泵系统运行热经济性. Hepbasli 等通过热泵实验,得出连续运行地温变化规律、进出口水温变化规律,以及地下水、回填土对热泵运行的影响^[1~4]. 高青等在实验基础上加入了数值模拟研究,得出地下渗流、回填材料、管群运行对地温变化规律的影响,并对间歇运行模式进行研究,得出自然状况地下温度分布、间歇性地温变化规律及平均换热率的变化规律^[5~12]. 但对于热泵间歇过程中地温变化对机组性能和功耗的影响,以及地温恢复过程的影响因素研究较为缺乏.

本文通过大连地区制热模式下热泵间歇运行实验,研究热泵间歇运行过程中地温变化规律及其对换热率、机组功耗和系统性能指标的影响.

1 热泵间歇运行土壤温度变化及热泵性能实验研究

1.1 实验系统简介

本文的热泵实验系统由地下U形埋管换热器、热泵机组、储水器及空调系统组成,建于大连理工大学. 热泵机组选用型号为 HSSWR-23(S) 的户式热泵机组,地下U形埋管共有9根,其中埋深75 m、25 m各1根,埋深50 m 7根,见图1;测温井有12个,分布在U形埋管周围,图2给出了50 m埋管周围测温井点分布. 实验中,温度测量采用PT100铜-康铜热电阻,允许误差为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$. 参数测试采用采控系统,运用鲁班软件实现每5 min不间断自动采集存储数据.

1.2 实验内容

自2008年11月末开始,进行多次不同间歇模式下实验. 实验中,地下U形埋管进口水流量 $3.8\text{ m}^3/\text{h}$,室外温度 $-2\sim-1^\circ\text{C}$.

收稿日期: 2010-09-06; 修回日期: 2012-03-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50676015).

作者简介: 尚妍(1982-),女,博士;李素芬*(1955-),女,教授,博士生导师, E-mail: lisuf@dlut.edu.cn.

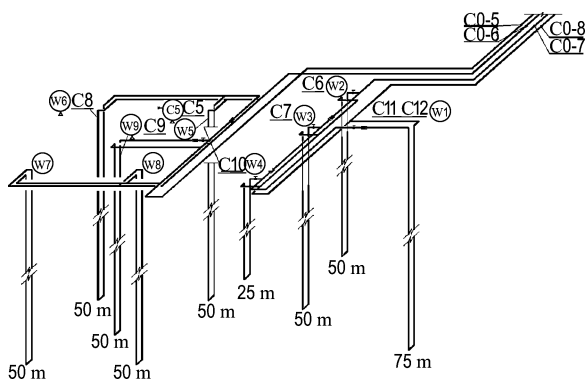


图1 地下换热器示意图

Fig. 1 The sketch map of the heat exchanger underground

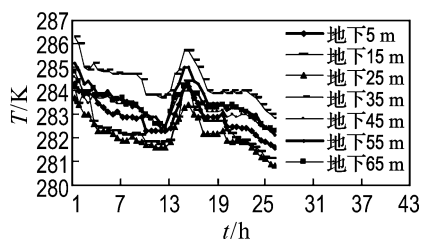
	W5	W2	W3	W6	W9
5 m	C5-1	C6-1	C7-1	C8-1	C9-1
15 m	C5-2	C6-2	C7-2	C8-2	C9-2
25 m	C5-3	C6-3	C7-3	C8-3	C9-3
35 m	C5-4	C6-4	C7-4	C8-4	C9-4
45 m	C5-5	C6-5	C7-5	C8-5	C9-5
	50 m	50 m	50 m	50 m	50 m

图2 50 m埋管测温井测点

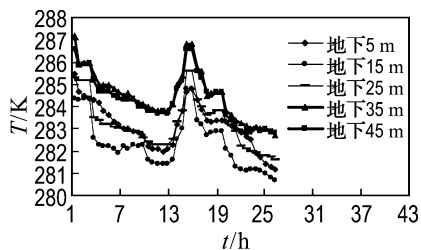
Fig. 2 The temperature measured well of 50 m tube underground

1.3 热泵间歇运行地下温度场变化规律

图3、4分别给出了制热模式下不同埋管深度、不同间歇工况,近壁面地下土壤温度的实验测试曲线。



(a) 埋管深 75 m



(b) 埋管深 50 m

图3 不同埋管深度下地下土壤温度场变化曲线

Fig. 3 The varying curves of soil temperature field under different depth underground

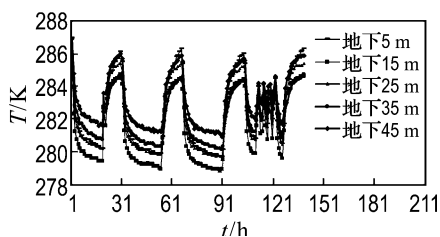


图4 间歇多次工况下土壤温度场变化曲线

Fig. 4 The varying curves of soil temperature field under different intermittent operations

在热泵运行过程中,靠近井壁的地下土壤温度逐渐降低,在最初的2 h较快,随后趋于平稳。这是因为在热泵运行初期,土壤与管内流体温差大,单位时间换热量(Q)大(见图5),随着运行的延续,温差逐渐减小, Q 减小,温度变化趋于平缓。

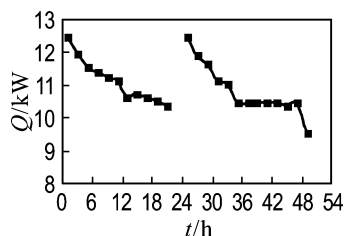


图5 单位时间换热量变化曲线

Fig. 5 Q vs. t

图6给出了制热模式下不同恢复时间下土壤温度与初始温度的差值对比曲线。土壤恢复6 h,与初始温度平均温差在1.67 K左右,恢复12 h在0.42 K左右,恢复24 h在0.25 K左右。由此可见,虽然恢复时间愈长,恢复前后土壤温差愈小,但到达一定程度后,温差值变化不大。这说明,地温的恢复主要发生在间歇的初期,而后期的恢复速率很慢,这是因为,恢复初期,由于土壤自身温差大,换热量大,温度变化明显,随着恢复过程

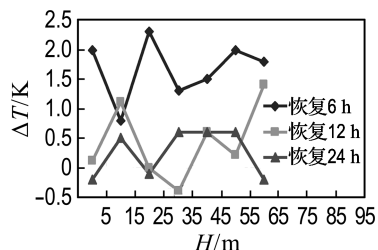


图6 不同恢复时间下土壤温差对比

Fig. 6 The comparison of the soil temperature differences under different recovery time

的延长,土壤温差减小,温度变化也相应缓慢,因此,不必间歇周期过长去等待地温的绝对恢复。

1.4 热泵间歇运行时土壤温度对机组性能的影响

图7给出了制热模式下间歇运行的机组功耗和性能指标的变化曲线,可以看出,在热泵运行过程中,机组性能系数逐渐下降,压缩机功率逐渐增加,这是因为随着取热的不断进行,地下土壤温度不断下降,与管内流体温差减小,地下埋管单位时间换热量下降(图5)。根据热泵循环的能量平衡方程,供给热量等于取自土壤的热量与输入净功之和,随着热泵的运行,单位时间换热量降低,取自土壤的热量减少,在保证供给热量的情况下,压缩机的输入功率必然增加,机组性能系数随之下降。对于热泵间歇工况,停机后再运行,地温得到恢复,地下换热得到改善,压缩机功率及机组性能系数得到有效恢复。由此可见,地温对热泵性能指标的影响非常关键。

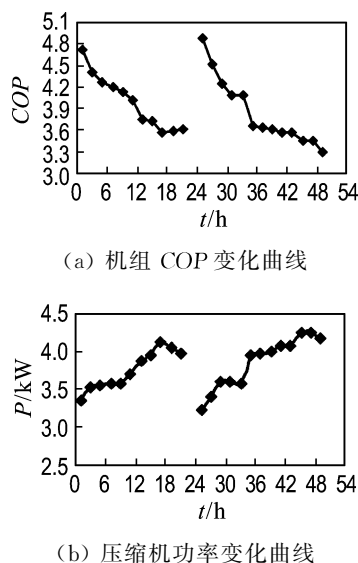


图7 土壤温度场对机组性能系数与压缩机功率的影响

Fig. 7 The influences of the soil temperature field on the COP and compressor power

2 热泵间歇运行地温变化数值研究

2.1 几何模型

本文针对土壤源热泵间歇运行过程,建立了地下垂直U形埋管换热器与周围土壤热湿耦合非稳态传热模型,依据实验室数据,U形埋管直径32 mm,两支管中心距58 mm,竖井直径110

mm,外围土壤直径6 m。

2.2 三维非稳态传热模型的简化

为了便于模型的求解,结合实际传热过程,对U形埋管的传热作如下假设:

(1)忽略重力项对U形埋管内液体流速的影响;

(2)土壤是均匀的,而且在整个传热过程中土壤的热物性不变;

(3)忽略土壤冻融对土壤温度传递及U形埋管换热器的影响。

2.3 控制方程

针对图1所示的物理模型,考虑热泵运行与停机两个过程。

热泵运行时,U形埋管换热器内流动介质为水,湍流流动,忽略组分之间黏性。采用Realizable $k-\epsilon$ 模型^[13]。

Realizable $k-\epsilon$ 模型关于 k 和 ϵ 输运方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_1 E \epsilon - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k_e} \quad (2)$$

其中 $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.2$, $C_1 = \max \{0.43, \eta/(\eta+5)\}$, $C_2 = 1.9$, $\eta = (2E_{ij}E_{ij})^{1/2} k/\epsilon$, $E_{ij} = \partial \mu_i / \partial x_j + \partial \mu_j / \partial x_i$ 。

热泵停机时,U形埋管换热器内水静止,仅在温度梯度的作用下与壁面换热。

竖井内回填土与土壤均视为多孔介质,考虑水的渗流影响,地下水作层流流动,采用饱和多孔介质模型,其连续方程为

$$\frac{\partial(\phi \rho)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (3)$$

式中: ϕ 为多孔介质的孔隙率; ρ 为流体的密度; V 为流体的表观速度,可以通过达西定律求得,也可以由实验获得。运动方程遵循达西定律:

$$\nabla p = - \frac{\mu}{\alpha} V \quad (4)$$

多孔介质的动量方程具有附加的动量源项,一部分是黏性损失项,另一部分是内部损失项。

对于饱和均匀多孔介质,

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_3 \frac{1}{2} \rho |v_j| v_j \right) \quad (5)$$

其中 α 是渗透系数, C_3 是内部阻力因子。

对于多孔介质流动,其能量方程修改了传导流量和过渡项:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\gamma \rho_f E_f + (1 - \gamma) \rho_s E_s) + \nabla \cdot (\mathbf{v} (\rho_f E_f + p)) = \nabla \cdot \left[k_{\text{eff}} \nabla T - \left(\sum_i h_{ij} j_i \right) + (\bar{\tau} \cdot \mathbf{v}) \right] + S_f^h \quad (6)$$

式中: E_f 为流体总能; E_s 为固体总能; γ 为孔隙率; k_{eff} 为有效热传导系数; S_f^h 为流体焓的源项。

2.4 边界条件

(1) 入口

考虑到管内湍流流动特点,在管内中心处速度最大,越靠近壁面由于黏性阻力的影响,速度减小,在壁面处,近似处理为0,因此入口沿 x 、 z 方向速度不为常数,沿 y 方向呈抛物锥分布,经过拟合,可得关系式为

$$y = v - (v/0.000\ 256) [(x+0.029)^2 + z^2] \quad (7)$$

式中: v 为入口中心流速; $x = -0.029$, $z = 0$ 时, y 最大,为入口中心流速。

(2) 土壤顶面

仅考虑土壤与大气对流换热,对流换热系数

h 由式(8)得到:

$$Nu = hl/\lambda = C(GrPr)^n \quad (8)$$

式中: Nu 为努谢尔数; C 为常数,冬季取 0.54,夏季取 0.58; Gr 为格拉晓夫数; Pr 为普朗克数。

(3) 土壤远端

土壤远端视为定温,温度为 287 K。

(4) 土壤与回填土

土壤与回填土视为多孔介质,孔隙率为定值,各个方向的黏性阻力系数 $1/\alpha$ 与内部阻力系数 C_2 由以下两式计算得到:

$$\alpha = \frac{D_p^2}{150} \frac{\epsilon^3}{(1 - \epsilon)^2} \quad (9)$$

$$C_2 = \frac{3.5}{D_p} \frac{(1 - \epsilon)}{\epsilon^3} \quad (10)$$

其中 D_p 为平均粒子直径, ϵ 为孔隙率。

2.5 U形埋管近壁面土壤温度模拟值与实验值对比

图 8 给出了大气温度为 272 K,土壤源热泵运行 12 h,近壁面温度的数值模拟结果。图中横纵坐标为几何尺寸。

取图 3(a)近壁面测点的实验值与模拟值进行对比,平均误差为 0.4 K,如图 9 所示。

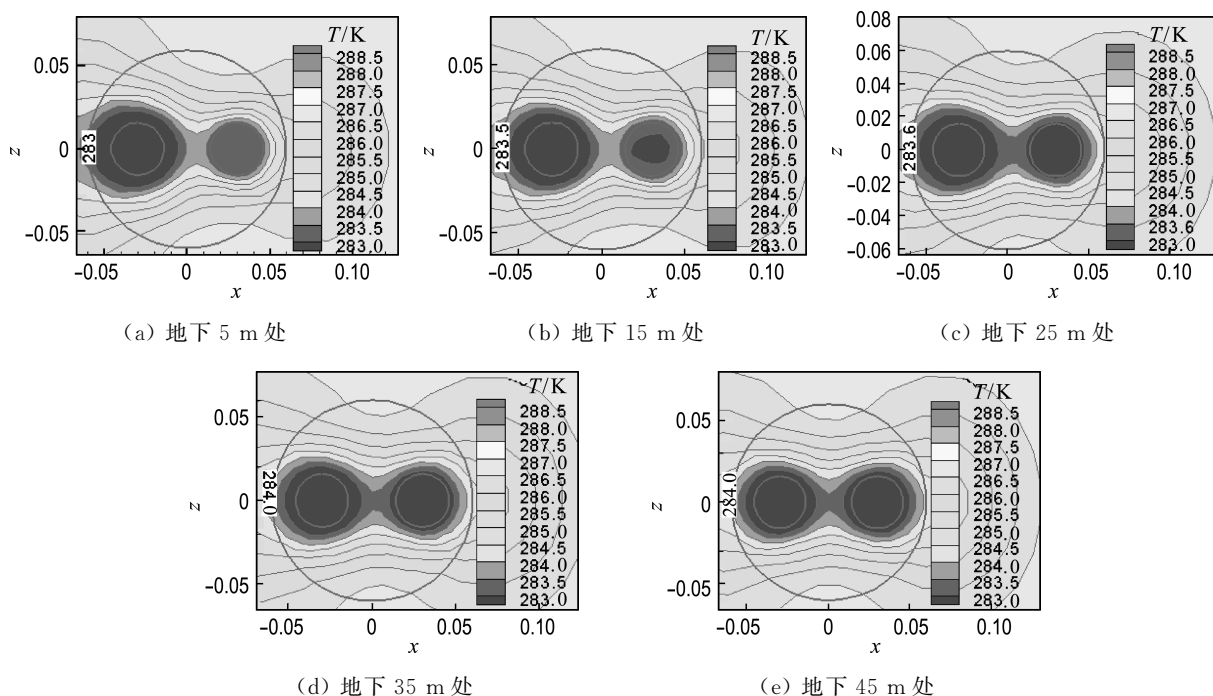


图 8 土壤源热泵连续运行 12 h 地下温度场模拟结果

Fig. 8 The ground temperature field simulation results of the ground-source heat pump system under continuous 12 hours-operation

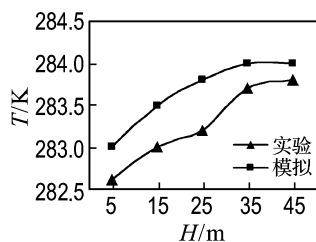


图9 土壤源热泵运行12 h土壤温度模拟结果与实验结果对比

Fig. 9 The comparison of the simulation results and the experiment results of soil temperature upon 12 hours-operation of ground-source heat pump

分析误差存在的原因:(1)假定土壤温度分布恒定.实际土壤温度沿深度方向逐渐增加,而模拟当中土壤的温度为恒定值.(2)实验误差.实验当中的温度采集由热电偶完成,热电偶本身存在一定误差.

3 地温恢复影响因素分析

本文对于制热模式,数值模拟了土壤物性和环境因素对地温恢复过程的影响.模拟以热泵运行12 h的土壤温度为初始点,恢复时间为6 h.

3.1 土壤导热系数对土壤温度恢复的影响

图10给出导热系数 λ 为0.93、1.10、1.50 W/(m·K)时,土壤恢复6 h不同深度的模拟温度值.

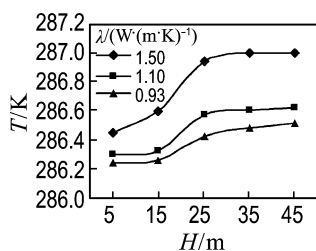


图10 3种土壤导热系数下土壤温度值曲线

Fig. 10 The soil temperature curves under three soil heat conductivity

土壤导热系数为0.93 W/(m·K)时,恢复6 h土壤温度平均恢复到286.38 K;土壤导热系数为1.10 W/(m·K)时,土壤温度平均恢复到286.48 K;土壤导热系数为1.5 W/(m·K)时,土壤温度平均恢复到286.80 K.可见,土壤导热系数大时,土壤温度恢复快,这是因为土壤导温系

数 K 与土壤导热系数成正比关系,即

$$K = \lambda / c_v \quad (11)$$

式中: λ 为土壤导热系数,W/(m·K); c_v 为土壤定容比热容,J/(m³·K).

随着土壤导热系数增加,在土壤定容比热容不变的情况下,土壤导温系数增大,即单位时间单位热量下土壤所发生的温度变化大.因此,土壤导热系数愈大,土壤温度恢复愈快.

3.2 土壤孔隙率对土壤温度恢复的影响

图11给出土壤孔隙率分别为0.20、0.37、0.47的3种土壤恢复6 h不同地下深度的模拟温度值.

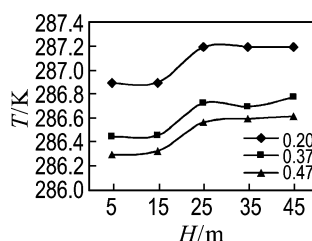


图11 不同孔隙率土壤温度值曲线

Fig. 11 The soil temperature curves under different soil porosity

土壤孔隙率为0.20时,恢复6 h土壤温度平均恢复到287.08 K;土壤孔隙率为0.37时,土壤温度平均恢复到286.63 K;土壤孔隙率为0.47时,土壤温度平均恢复到286.48 K.可见,土壤孔隙率越小土壤温度恢复越快.这是因为,决定土壤温度恢复速率的导温系数 K 与土壤定容比热容 c_v 成反比.在土壤被视为饱和多孔介质时,孔隙率增大意味着水分增多,水的热容量大于土壤热容量,考虑土壤渗流作用时,含水土壤的热容量由土壤自身热容量与水分热容量两部分组成,由此计算土壤的导温系数可知,孔隙率越小时,导温系数越大,温度变化越快.因此,土壤孔隙率越小,土壤温度恢复越快.

3.3 回填材料对土壤温度恢复的影响

图12给出回填材料分别为砂黏土、水泥砂浆、黏土,恢复6 h不同地下深度的模拟温度值.

回填材料为砂黏土时,恢复6 h土壤温度平均恢复到286.6 K;回填材料为水泥砂浆时,土壤温度平均恢复到286.84 K;回填材料为黏土时,土壤温度平均恢复到286.48 K.可见,回填材料

为水泥砂浆时,土壤温度恢复最快,这是因为3种回填土的导热系数、孔隙率均不相同,综合计算其导温系数可知,水泥砂浆的导温系数最高,黏土最低,因此,回填土为水泥砂浆时温度恢复最快。

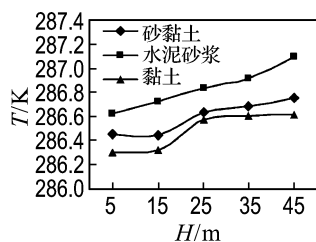


图 12 不同回填材料下土壤温度模拟值

Fig. 12 The simulation results of soil temperature under different backfill material

3.4 太阳辐射对土壤温度恢复的影响

对不考虑太阳辐射、考虑太阳辐射(对太阳辐射吸收率为 1.0、0.6)情况土壤恢复过程进行模拟,土壤恢复 6 h 不同地下深度的模拟温度值如图 13 所示(模拟结果误差波动在 ± 0.03 K)。

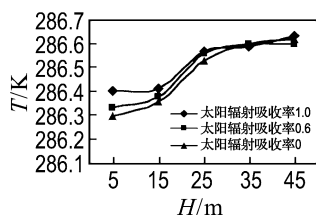


图 13 考虑与不考虑太阳辐射情况下土壤温度值曲线

Fig. 13 The soil temperature curves under considering solar radiation or not

不考虑太阳辐射时,土壤恢复 6 h, 5、15、25、35、45 m 时土壤温度分别恢复到 286.29、286.36、286.53、286.60、286.62 K。对太阳辐射吸收率为 1.0 时,各个深度土壤温度分别恢复到 286.41、286.41、286.57、286.59、286.63 K;对太阳辐射吸收率为 0.6 时,各个深度土壤温度分别恢复到 286.34、286.38、286.56、286.60、286.60 K。由此可见,对于含湿岩土,相对于土壤物性而言,太阳辐射对土壤温度恢复的影响较小,且仅限于土壤表层 5 m 以内。考虑太阳辐射时,土壤温度恢复较快,且对太阳辐射吸收率越大,土壤温度恢复越快。其原因为考虑太阳辐射时,土壤表面与

大气换热的同时,接收大量太阳辐射能量,致使土壤表面温度升高,再通过土壤本身的热扩散,逐步提升土壤温度,从而使土壤温度恢复速率加快。

综上所述,在所模拟的各种影响因素中,土壤物性对地温恢复过程影响明显,太阳辐射对地温恢复过程影响相对较小,且仅影响土壤表层 5 m 左右。

4 结 论

(1)土壤源热泵系统间歇运行实验表明,随着运行时间的延长,压缩机功耗明显增加,而单位时间换热量和热泵 COP 值均明显下降。

(2)土壤在热泵运行和停机过程中温度变化不是均匀的,地温的变化主要发生在间歇的初期,而后期的变化速率很慢,因此,对于地温恢复过程,不必要间歇时间过长去等待地温的绝对恢复。

(3)土壤物性对土壤的温度恢复均有明显的影响。土壤导热系数增大,土壤温度恢复加快,恢复周期缩短;土壤孔隙率增大,土壤温度恢复减慢,恢复周期延长;回填土为水泥砂浆时,土壤的温度恢复周期最短。因此,关于地温恢复的研究不应忽略土壤物性的影响。

(4)对于含湿岩土,考虑太阳辐射时,土壤恢复速率在制热模式下加快,制冷模式下减慢,对太阳辐射吸收率越大,影响越明显,且仅影响土壤表层。因此,对于地温恢复的研究,可以做次要考虑。

(5)热泵可控间歇运行对于改善地下传热,提高热泵系统性能具有重要作用。

参考文献:

- [1] HEPBASLI A, AKDEMIR O, HANCIOGLU E. Experimental study of a closed loop vertical ground coupled heat pump system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2003, **44**(4):527-548
- [2] MICHPOPOULOS A, BOZIS D, KIKIDIS P. Three-years operation experience of a ground source heat pump system in Northern Greece [J]. *Energy and Buildings*, 2007, **39**(3):328-334
- [3] INALLI M, ESEN H. Experimental thermal performance evaluation of a horizontal ground-source heat pump system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2004, **24**(14-15):2219-2232

- [4] 范蕊,马最良. 地下水流动对地下埋管换热器影响的实验研究[J]. 太阳能学报, 2007, **28**(8):874-880
- [5] 高青,李明. 地下群井换热强化与运行模式影响规律[J]. 太阳能学报, 2006, **27**(1):83-88
- [6] 范蕊,马最良. 地下水流动对地下管群换热器传热的影响分析[J]. 太阳能学报, 2006, **27**(11):1155-1162
- [7] 王金香,李素芬. 地下含湿岩土热渗耦合模型及换热埋管周围土壤温度场数值模拟[J]. 太阳能学报 2008, **29**(7):837-842
- [8] 顾中焱,吴玉庭,唐志伟. U形管地下换热系统非稳态传热数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2006, **27**(2):313-315
- [9] ALLAN M L, KAVANAUGH S P. Thermal conductivity of cementitious grouts and impact on heat exchanger length design for ground source heat pumps [J]. *ASHRAE Transactions*, 2000, **106**:350
- [10] HIKMET E, MUSTAFA I. Numerical and experimental analysis of a horizontal ground-coupled heat pump system [J]. *Building and Environment*, 2007, **42**(3):1126-1134
- [11] STEVENS J W. Coupled conduction and intermittent convective heat transfer from a buried pipe [J]. *Heat Transfer Engineering*, 2002, **23**(4):342-343
- [12] BOSE J E, SMITH M D, SPITLER J D. Advances in ground source heat pump systems — an international overview [C] // *Proceedings of the 7th Heat Pump Conference*. Beijing: [s n] 2002:3132-3142
- [13] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD软件原理与应用[M]. 1版. 北京:清华大学出版社, 2004

Study of characteristics of soil temperature variation and recovery under intermittent operation of ground-source heat pump

SHANG Yan, LI Su-fen*, DAI Lan-hua

(Key Laboratory of Ocean Energy Utilization and Energy Conservation of Ministry of Education,
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The analyses of the variation rule of the soil temperature and its influence on the heat exchange rate and unit performance are studied by using the intermittent operation experiment of the heat pump, which is aiming at the problem of the attenuation of the soil temperature during the operation. The 3-dimensional unsteady state heat transfer seepage model is developed according to the groundwater advection and heat-transfer process between the vertical U tube underground and its ambient soil, based on which, the temperature variation under the operation of heat pump and the soil temperature recovery characteristics under the intermittent operation are simulated, the soil temperature recovery process influenced by the thermal conductivity, soil porosity, different backfill materials and solar radiation energy is discussed. It is presented by both the numerical simulations and experiments that: the intermittent operation of the heat pump plays an important role in improving the heat transfer underground, enhancing the heat pump property and has theoretical significance to the utilization of the geothermal energy.

Key words: ground-source heat pump; intermittent operation; soil temperature recovery