

# 回填空气间隙对地埋管岩土温度恢复性能的影响

王 勇, 金逸韬

(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:**地埋管地源热泵系统在换热孔回填过程中, 由于施工不当易产生空气间隙。通过建立岩土耦合单U三维传热模型, 按照实际工程中可能出现的3种不同空气层情况进行了计算分析, 把不同空气层情况对传热造成显著影响的因素“地温恢复性能”作为研究对象, 并根据理论计算结果与实际工程的运行数据进行了地埋管进、出水温度的对比验证。结果表明, 在岩土温度恢复期内, 空气间隙的存在提高了所在区域以内岩土的 average 过余温度, 降低了地埋管的换热性能。

**关键词:**土壤源热泵; 空气间隙; 温度恢复; 岩土平均过余温度

**中图分类号:** TU831      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-4764(2012)04-0142-07

## Influence of Backfill Air Gap on Soil Temperature Recovery in Ground-coupled Heat Pumps

WANG Yong, JIN Yitao

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

**Abstract:** Air gap may easily emerge in the progress of backfill in ground heat exchange due to field operation problems. The single U-tube three-dimensional numerical heat transfer model is set up and there are 3 kinds of backfill air gap assumptions for computational analysis, which are the most common situations in practical projects. Different air gap situations will have considerable effects on soil heat transfer, especially the factor of soil temperature recovery performance, which is investigated in this research, and there is practical project operating data for the comparison confirmation with the theoretical calculation results in inlet and outlet water temperatures. It can be concluded that the backfill air gap will increase the soil average excess temperature in the period of recovery inside the place where the air gap is, and degrade the heat transfer performance of the ground heat exchange.

**Key words:** ground-coupled heat pumps; air gap; temperature recovery; soil average excess temperature

地源热泵是随全球能源环境问题的可持续发展而兴起的一种节能环保的地热利用技术<sup>[1]</sup>。在地源热泵工程中, 地埋换热器周围岩土温度的恢复一直是研究、设计人员非常关心的问题, 相关学者对此进行了大量的研究<sup>[2]</sup>。刘俊等<sup>[3]</sup>提出地温的恢复特性主要取决于岩土热物性、管群布置、系统启停比、冷热负荷强度和冷热负荷不平衡率等因素。Shang

等<sup>[4]</sup>研究了间歇运行情况下, 影响地温恢复的因素: 岩土及回填材料的热物性、多孔性对岩土温度的恢复有较大影响, 当多孔性指数下降时, 岩土温度恢复所需的时间减少。赵利君等<sup>[5]</sup>通过对间歇运行岩土温度在不同深度及半径下的恢复率的研究, 发现由于岩土对传热的衰减作用, 离孔壁距离越远, 温度受到间歇运行工况的影响就越小; 岩土恢复能力随着

收稿日期: 2012-02-23

基金项目: 重庆市科委自然科学基金计划资助项目(CSTC 2010BB4235)

作者简介: 王勇(1971-), 男, 博士, 副教授, 主要从事建筑节能技术与可再生能源在暖通空调领域的应用研究, (E-mail) wyfreel@126.com。

运行周期的增加而不断降低。高源等<sup>[6]</sup>的实验结果表明,同一埋管深度处,机组的运行时间越长,岩土短期内可恢复的可用稳定温度越高,且需要的稳定恢复时间也越长。陈颖等<sup>[7]</sup>通过实验发现热泵机组开机 12 h 后,岩土温度趋于稳定;停机 12 h 后地下换热器处的岩土温度可恢复约 95%,但基本得以恢复需要停机 81 h。

由于埋管的钻孔造价较高,钻孔的深度、直径、管材及钻井周围岩土的热物性都难以随意更改,近年来岩土源热泵的换热性能研究除了较多的集中在回填材料的热物性上以外,越来越重视回填密实度对钻孔换热器的换热性能的影响。由于人工回填施工困难,会导致回填不密实,增加了传热总热阻,极大的影响了埋管换热性能<sup>[8-9]</sup>。Zhang 等<sup>[10]</sup>建立了一个由泥土、水、空气混合而成的岩土颗粒模型进行研究。研究表明:岩土的多孔性对岩土的传热、蓄热性能有较大的影响。随着多孔性数值的增加,岩土的导热系数和比热值会下降。朱清宇等<sup>[11]</sup>发现人工回填事实上更广泛地应用于各个土壤源热泵项目之中,但回填密实性的检测无法进行,且回填密实性在多大程度上影响 U 形管的换热效果也未得到合理的解释。在实际工程中,由于施工人员与施工单位的素质问题,非常不重视回填这道工序,人为的质量问题更加导致了回填的不密实。

笔者在已有研究成果的基础上,针对工程上易出现的埋管空气间隙,通过理论计算得到该条件下导致的地温分布情况,研究其对埋管岩土温度恢复性能的影响。

## 1 地下换热器与岩土的换热耦合计算模型

埋管与岩土之间的换热是一个不稳定的导热过程,其传热过程复杂且影响因素很多,如管内水流动、材料物性参数、岩土热物性参数、回填密实度以及地下水分迁移等问题。为了便于计算分析,作出以下简化:

1) 埋管内液体的流速在径向上均匀一致(忽略重力对流速的影响);

2) 由于岩土的温度变化范围不大,假定岩土的导热系数、比热、密度等物性参数不随温度的变化而变化,且是均匀一致的;

3) 埋管同截面具有相同的温度和流速;

4) 无地下水流动换热,忽略岩土的湿迁移。

### 1.1 数学模型的建立

1.1.1 管内流体 对于管内流动,流动为不可压缩

流体,采用标准  $k-\epsilon$  模型,近壁区利用壁面函数法求解。不考虑源项时,连续性方程、动量方程以及运输方程见式(1)~(5)<sup>[12-14]</sup>:

连续性方程:

$$\frac{\partial(u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu_t) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (2)$$

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\mu}{Pr_i} + \frac{\mu_t}{\sigma_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

湍动能方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

耗散率方程:

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中湍动粘度  $\mu_t$  和由于平均速度梯度引起的湍动能  $k$  的产生项  $G_k$  的表达式见式(6)和式(7):

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

$$G_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

式(1)~(7)中各常数的取值为:

$$C_\mu = 0.09, C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3。$$

对管内流体和管壁换热见式(8):

$$-k_p \frac{\partial T_p}{\partial \tau} \Big|_{\text{管内壁面}} = h(t_f - t_p) \quad (8)$$

式中:  $k_p$  为管壁传热系数;  $t_f$  为流体温度;  $t_p$  为管壁温度。其中在制冷工况下岩土对流体为冷却作用,对流换热系数  $h$  采用式(9)和迪图斯-贝尔特公式(10)求解:

$$h = Nu \frac{\lambda_f}{2r} \quad (9)$$

$$Nu = 0.023 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.3} \quad (10)$$

式中:  $\lambda_f$  为流体导热系数;  $r$  为管半径。

1.1.2 固体部分 无内热源非稳态导热方程见式(11)和式(12):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (11)$$

$$h = \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p dT \quad (12)$$

式中,  $k$  为传热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $\rho$  为密度。

不考虑接触热阻, 则不同材料接触面处温度相等:  $t_1 = t_2$ , 见式(13):

$$-k_1 \frac{\partial t_1}{\partial n} \Big|_{\text{材料1}} = -k_2 \frac{\partial t_2}{\partial n} \Big|_{\text{材料2}} \quad (13)$$

## 1.2 边界条件和初始条件设置

1.2.1 埋管进口 埋管的进口设为速度进口<sup>[15]</sup>, 速度值设定为  $0.43 \text{ m/s}$ (根据流量及内管径计算得出), 温度由前一次计算的埋管出口温度及冷凝器散热量决定, 通过 UDF 函数输入, 初始温度设为  $21 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

1.2.2 埋管出口 埋管的出口各参数都由埋管进口参数及管内流动换热情况确定, 设为压力出口。

### 1.2.3 U型管管壁

U型管管壁设为壁面<sup>[15]</sup>, 对于流动方程, 是固定、无滑移壁面, 对于边界节点速度为零; 对于能量方程, 选择耦合的传热条件, 是位于管内流体和管外回填材料这两个区域间的壁面。

1.2.4 回填侧壁 回填侧壁设为壁面, 是耦合的传热壁面, 位于回填材料和岩土这两个区域间。

1.2.5 岩土及回填上表面 岩土及回填上表面设为壁面, 选择对流换热边界条件, 考虑到岩土及回填上表面直接与空气接触, 传热量与室外空气温度、风速、辐射等因素有关, 定义为第三类边界条件, 边界周围空气温度设为  $31 \text{ }^\circ\text{C}$ (夏季室外计算平均温度), 经计算, 边界与空气之间的表面传热系数  $h = 1.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ <sup>[16]</sup>。

1.2.6 远边界岩土及底部岩土 远边界岩土及底部岩土设为壁面, 选择给定的壁面温度  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

## 1.3 回填条件的设置

根据回填物与孔壁和换热器管壁之间不同的回填密实度, 在系统连续运行  $9 \text{ h}$  及恢复  $15 \text{ h}$  的运行工况下, 建立了 3 种不同回填工况: 1) 回填物与孔壁及换热器管壁间均回填密实, 即无空气层工况, 简称工况 1; 2) 回填物与孔壁存在空气层工况, 简称工况 2; 3) 回填物与换热器管壁存在空气层工况, 简称工况 3。具体设置见表 1。工况 3 中, 为了便于模型的建立和网格划分, 将流体和回填材料之间  $3 \text{ mm}$  壁厚的 PE 管和  $1 \text{ mm}$  厚的空气薄层组合为一种材料, 简称“综合材料”, 根据两种材料组合前后传热热阻、密度、比热计算得到综合材料的热物性参数。

表 1 3 种不同回填工况空气层的设置

回填工况	空气层位置	空气层厚度/mm	计算选用的材料	计算选用材料的厚度/mm
工况 1	无			
工况 2	回填侧壁	1	空气	1
工况 3	进、出水管壁	1	综合材料	4

## 1.4 计算条件

以岩土源热泵单 U 型换热器为模型, 埋管深  $80 \text{ m}$ , 钻孔直径  $130 \text{ mm}$ , 流量  $0.82 \text{ m}^3/\text{h}$ , 输入岩土的冷负荷为  $3.347 \text{ kW}$ (恒定)。各材料的热物性参数如表 2 所示:

表 2 各材料热物性参数

材料	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	导热系数/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )	比热/ ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )
循环水	998.2	0.6	4 182
岩土	2 400	2.1	850
PE 管	950	0.45	2 300
回填材料	1 500	2.3	900
空气	1.225	0.024 2	1 006
综合材料	712.8	0.09	2 299

整个模型为一直径  $3 \text{ m}$ , 高  $100 \text{ m}$  的圆柱体, 采用 ANSYS 建模, 网格划分如图 1 所示。

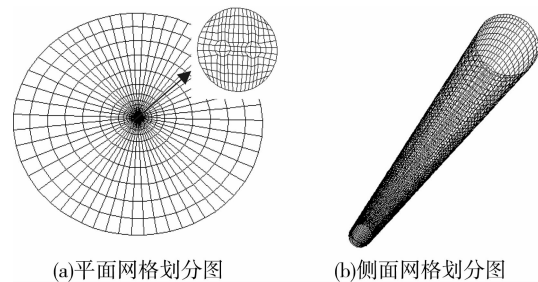


图 1 模型网格划分图

## 1.5 岩土平均过余温度及其计算方法

研究岩土温度的恢复情况, 目的是考查下一个运行周期前的岩土温度, 使得下一个运行周期尽量不受到上一个运行周期负荷痕迹的影响。笔者主要研究回填空气间隙对埋管周围岩土温度恢复性能的影响, 基于以下 2 点, 选择研究温度恢复的主要对象:

1) 近管壁处的岩土温度是影响埋管下一个运行周期埋管换热性能的主要因素。

2) 假设 3 种不同的回填工况, 其中工况 2 和工况 3 的空气层均位于回填区域内。

故选择回填孔壁及其以内的回填区域作为计算

岩土平均过余温度的对象。

计算方法如式(14)、(15)所示:

1)对于某一深度  $z$  处的回填区域截面,平均过余温度为:

$$\bar{\theta}_z = \bar{T}_z - T_0 = \frac{\iint_{\sigma_z} t_{xy} d\sigma_z}{\sigma_z} - T_0 \quad (14)$$

2)对于整个回填区域体,平均过余温度为:

$$\bar{\theta} = \bar{T} - T_0 = \frac{\iiint_V t_{xyz} dV}{V} - T_0 \quad (15)$$

式中,  $\sigma_z$  为深度为  $z$  米处回填区域截面;  $t_{xy}$  为  $\sigma_z$  区域内各单元面积的温度值;  $V$  为整个回填区域体积;  $t_{xyz}$  为  $V$  区域体内各单元体积的温度值,  $T_0$  为岩土初始温度值。

## 2 模型计算及分析

同种回填工况下,同半径处不同深度的岩土恢复初始温度的最大温差出现在出水管壁处,为1.2~

1.4 °C。考虑到竖向的岩土初始过余温差不是很大,在最初共 24 h 的运行与恢复时间段内,同半径处不同深度的岩土温度恢复情况基本相同,选取了深度为 25 m 的典型平面作为半径方向温度恢复的研究对象<sup>[4,17]</sup>。深度 25 m 处,3 种回填工况在恢复期的岩土过余温度如表 3、图 2 所示。

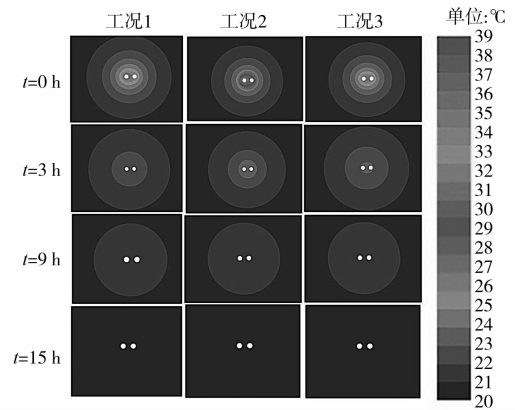


图 2 深度 25 m 处不同回填工况岩土温度分布

表 3 深度 25 m 处恢复工况下不同半径处岩土过余温度

恢复时间	回填工况	出水管壁	进水管壁	埋管中心	回填孔壁	$r=0.1$ m	$r=0.5$ m	$r=1.0$ m	$r=1.5$ m
0 h	工况 1	9.98	7.57	7.18	4.58	3.35	0.04	0.00	0.00
	工况 2	13.54	11.12	10.74	8.16	3.17	0.04	0.00	0.00
	工况 3	18.28	15.85	7.06	4.32	3.12	0.03	0.00	0.00
3 h	工况 1	2.45	2.46	2.40	2.22	2.05	0.09	0.00	0.00
	工况 2	3.85	3.87	3.73	3.36	2.26	0.08	0.00	0.00
	工况 3	4.72	4.76	3.16	2.62	2.30	0.08	0.00	0.00
6 h	工况 1	1.55	1.55	1.53	1.47	1.40	0.14	0.01	0.00
	工况 2	2.07	2.08	2.03	1.91	1.54	0.13	0.00	0.00
	工况 3	2.28	2.28	1.84	1.68	1.57	0.13	0.00	0.00
9 h	工况 1	1.15	1.15	1.14	1.11	1.07	0.18	0.01	0.00
	工况 2	1.40	1.40	1.38	1.33	1.16	0.17	0.01	0.00
	工况 3	1.47	1.47	1.29	1.22	1.17	0.17	0.01	0.00
12 h	工况 1	0.92	0.92	0.91	0.89	0.87	0.21	0.02	0.00
	工况 2	1.06	1.06	1.05	1.02	0.92	0.20	0.02	0.00
	工况 3	1.09	1.09	1.00	0.96	0.93	0.20	0.02	0.00
15 h	工况 1	0.77	0.77	0.76	0.75	0.73	0.22	0.03	0.00
	工况 2	0.86	0.86	0.85	0.83	0.77	0.22	0.02	0.00
	工况 3	0.88	0.88	0.82	0.79	0.77	0.22	0.02	0.00

从表 3 中可以发现,停机时刻,3 种回填工况在深度 25 m 处的热扩散影响半径均为  $r=0.1 \sim 0.5$  m,近管壁处(管壁至  $r=0.1$  m)的岩土过余温度均在停机时刻达到了最大值。与工况 1 相比,工

况 2 在回填孔壁及其以内岩土区域的温度上升了近 3.5 °C,而  $r=0.1$  m 处的岩土温度略有下降。这表明位于孔壁处的 1 mm 厚空气层把由内而外扩散的热量阻隔在钻孔内,使得回填孔壁以内的岩土温度

上升,不能有效的将输入热量向孔壁外的大地进行传热。类似的,与工况1相比,由于空气层存在于进、出水管壁处,工况3在此处的温度上升了近 $8.5^{\circ}\text{C}$ ,换热器管壁与回填物之间存在的空气层导致换热器无法有效的与大地进行换热。

岩土温度恢复的最初3 h内,温度下降较快,尤其是工况2的回填孔壁内区域以及工况3的管壁区域。这是因为在恢复初期,温度较高的岩土区域存在较大的温度梯度,使得传热速度加快。随着恢复的进行,3种回填工况岩土温度恢复的速度大幅减小,并在恢复9 h后基本趋于一致。

相反的,停机后3种回填工况在 $r=0.5\text{ m}$ 处的岩土温度却略微上升,近管壁处的热量以不稳定状态从靠近埋管的区域转移到了靠近远边界的岩土,形成了蓄热。而 $r=1.0\text{ m}$ 、 $1.5\text{ m}$ 处的岩土温度仍然保持初始温度,说明在运行和恢复总共24 h内, $r=0.5\text{ m}$ 以外的岩土几乎没有受到热扩散的影响。

岩土平均过余温度的计算对象和计算方法已经在前面阐述,根据式(14),可得到图3中的计算结果。

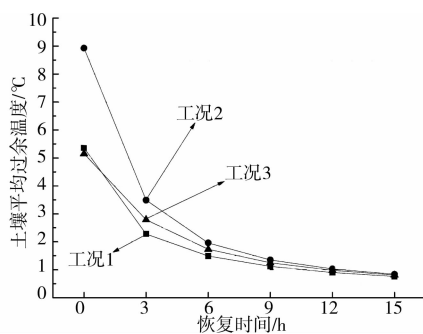


图3 深度25 m处不同回填工况岩土平均过余温度

从工况2与工况1的对比分析可知,由于工况2存在孔壁空气层,导致热量积累集中在孔洞中,使得孔洞内的初始平均过余温度高于工况1(两者分别为 $8.97$ 、 $5.39^{\circ}\text{C}$ )。恢复开始后,工况2的平均过余温度始终高于工况1,在恢复前6 h内,温度下降速度较快,9 h后两者的平均过余温度基本趋于一致( $0.80^{\circ}\text{C}$ 左右)。

工况3与工况1相比,由于热源热量集中在进、出水管壁附近,相同情况下通过管壁传导到孔洞回填材料中的热量比工况1少,因此,孔洞内的初始平均过余温度低于工况1(两者分别为 $5.15$ 、 $5.39^{\circ}\text{C}$ )。但在恢复开始后,由于积聚在管壁附近的热量得到迅速扩散,使得工况3的平均过余温度下降的速度比工况1慢。从图3中可以发现,从恢复后0~3 h间的某个时刻起,工况3的平均过余温

度略高于工况1,6 h后两者的平均过余温度基本趋于一致。

工况2与工况3相比,前者的空气层包围了整个平均过余温度的计算区域;而后的空气层只是计算区域中靠近管壁处的一部分,由于空气层的热阻效应,介于空气层与孔壁之间的其他计算区域吸收的热量较工况2少。故工况2的平均过余温度始终高于工况3。

由式(15)计算得出了竖向80 m回填孔洞体积内的岩土平均过余温度,如表4所示。通过与深度25 m处回填孔洞平面的岩土平均过余温度比较发现,两者的数值相差在 $\pm 2\%$ 以内,说明在土壤温度恢复的15 h内,深度25 m处的回填土壤温度变化情况与整个回填体积内的土壤温度变化情况相接近。

表4 深度25 m处回填孔洞平面(\*)与竖向80 m回填孔洞体积(\*\*)的岩土平均过余温度  $^{\circ}\text{C}$

回填工况	计算对象	0 h	3 h	6 h	9 h	12 h	15 h
工况1	*	5.39	2.28	1.49	1.12	0.90	0.75
	**	5.36	2.28	1.49	1.12	0.90	0.76
工况2	*	8.97	3.49	1.96	1.35	1.03	0.84
	**	8.93	3.49	1.96	1.35	1.03	0.84
工况3	*	5.15	2.79	1.73	1.24	0.97	0.80
	**	5.15	2.79	1.73	1.25	0.98	0.81

### 3 计算模型与实际运行工况的对比

#### 3.1 实际工程情况

根据重庆某公司的岩土源热泵地下换热器热响应实验,该埋管深50 m,钻孔直径130 mm,冷负荷为恒定的 $2.092\text{ kW}$ ,流量 $0.82\text{ m}^3/\text{h}$ ,埋管初始进水温度为 $21^{\circ}\text{C}$ 。经测试,岩土初始地温为 $20^{\circ}\text{C}$ 左右,地面10 m以下地温竖向分布基本一致。岩土及材料的热物性参数与笔者计算情况相接近。根据施工的情况,其回填状况与笔者计算假设中的工况2接近。实验按照上述负荷、流量的单U埋管连续运行9 h,停机恢复15 h。

#### 3.2 计算结果对比

假设一个该实验工况对应的数值计算条件,则此数值计算条件与数值计算条件相比<sup>[18]</sup>:1)两者是同类现象;2)同属非稳态对流换热,各物理量随时间变化趋势相同,其他几何条件、边界条件及物理条件都分别成比例,故单值性条件相似已得到满足;3)两者同名的已定准则 $Nu = f(Re, Pr)$ 相等。故可得

两个现象的流动及换热相似,可将该实验的实测结果与计算结果相比较。

实验及数值计算的埋管进、出水水温如图4所示。在实际运行的前4 h,系统处于向稳定运行的过渡期,在运行4 h后,实验结果与工况2的数值计算结果相接近,两者的误差小于 $\pm 7\%$ 。实验进、出水最终温度为32.5、30.5 $^{\circ}\text{C}$ ,回填工况2的进、出水温度分别为34.3、30.8 $^{\circ}\text{C}$ ,两者吻合的较好。

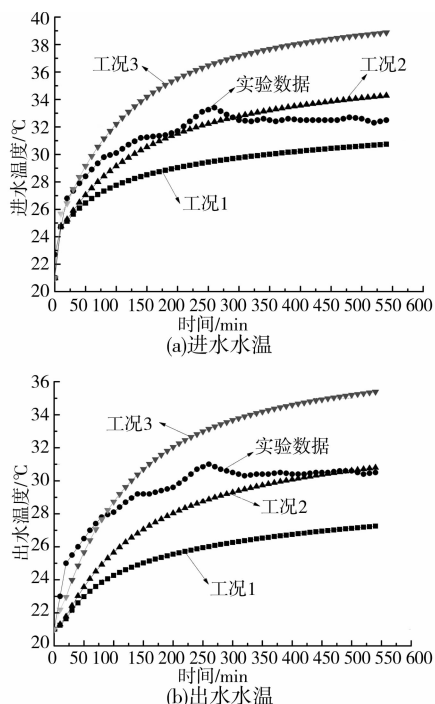


图4 实验数据与计算结果的埋管进、出水温度比较

## 4 结论

1) 在计算条件下,回填孔壁处的空气间隙对土壤温度恢复性能影响较大,降低了埋管的换热性能,与回填密实工况相比,回填孔壁及其以内岩土区域的初始过余温度上升了约3.5 $^{\circ}\text{C}$ ,岩土平均过余温度在恢复初始时上升了3.6 $^{\circ}\text{C}$ ,在恢复期的前6 h明显高于回填密实工况。与回填密实工况相比,进、出水管壁处的空气间隙使得管壁处岩土的初始过余温度上升了约8.5 $^{\circ}\text{C}$ ,管壁空气间隙对运行时埋管的进、出水温度影响较大。建议采用间歇运行的模式来保证运行后较低的土壤过余温度。

2) 数值计算结果与实验结果相比较,实验中单U埋管的换热性能与数值计算回填孔壁处存在空气间隙的状况下的换热性能相接近,说明该数值计算方法可以应用于不同回填工况下的埋管传热计算。

3) 由于岩土温度向岩土初始温度的恢复速率不一致,前期恢复时间较短,而到接近初始地温阶段,

恢复时间较长,故需要合理的恢复时间来保证埋管的换热能力。

## 参考文献:

- [1] 田慧峰,曹伟武. 埋管长度计算中关键参数的计算方法研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(1): 110-124.  
TIAN Huifeng, CAO Weiwu. The key parameters method of calculating geothermal heat exchanger length [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(1): 110-124.
- [2] Bhutta M M A B, Hayat N, Bashir M H, et al. CFD applications in various heat exchangers design; a review [J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 32: 1-12.
- [3] 刘俊,张旭,高军,等. 地源热泵土壤温度恢复特性研究[J]. 暖通空调, 2008, 38(11): 147-150.  
LIU Jun, ZHANG Xun, GAO Jun, et al. Research of soil temperature restoration characteristics of ground-source heat pump systems [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2008, 38(11): 147-150.
- [4] 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: 935-943.
- [5] 赵利君,周亚素,张行洋,等. 地源热泵埋管周围土壤温度恢复的模拟[J]. 建筑节能, 2010, 38(10): 34-38.  
ZHAO Lijun, ZHOU Yasu, ZHANG Xingyang, et al. Simulation on soil temperature recovery for ground source heat pump [J]. Construction Conserves Energy, 2010, 38(10): 34-38.
- [6] 高源,谢俊,董鹏博,等. 土壤源热泵间歇运行特性及地温恢复规律研究[J]. 节能, 2010, 34(12): 33-36.  
GAO Yuan, XIE Jun, DONG Pengbo, et al. The experimental study on intermittent movement and ground temperature restorative characteristics of ground source heat pump [J]. Energy Conservation, 2010, 34(12): 33-36.
- [7] 陈颖,杨敏,史保新. 土壤源热泵制冷间歇工况土壤温度响应实验研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(10): 1193-1197.  
CHEN Ying, YANG Min, SHI Baoxin. Experimental investigation on soil temperature restorative characteristics for soil source heat pump in intermittent cooling operation [J]. Acta Energy Solaris Sinica, 2009, 30(10): 1193-1197.
- [8] 孟召贤,余跃进,郭友明. 浅析回填材料在地源热泵应用中的影响[J]. 建筑节能, 2010, 38(3): 69-71.  
MENG Zhaoxian, YU Yuejin, GUO Youming. Influence of the backfill materials on the ground-source

- heat pump(Gshp) [J]. Construction Conserves Energy, 2010,38(3):69-71.
- [9] Zeng H Y, Diao N R, Fang Z H. Heat transfer analysis of borehole in vertical ground heat exchangers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46:4467-4481.
- [10] Zhang H F, Ge X S, Ye H, et al. Heat conduction and heat storage characteristics of soils [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27:369-373.
- [11] 朱清宇,肖龙. U形管换热器的回填工艺[J]. 供热制冷,2009,11:52.  
ZHU Qingyu, XIAO Long. The add-back process of U-tube ground heat exchange [J]. Heating & Refrigeration, 2009,11:52.
- [12] Wang Y, Wong K K L, Liu Q H, et al. Improvement of energy efficiency for an open-loop surface water source heat pump system via optimal design of water-intake [J]. Energy and Buildings, 2012,51:93-100.
- [13] Choi J C, Lee S R, Lee D S. Numerical simulation of vertical ground heat exchangers: intermittent operation in unsaturated soil conditions [J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38:949-958.
- [14] Florides G A, Christodoulides P, Pouloupatis P. An analysis of heat flow through a borehole heat exchanger validated model [J]. Applied Energy, 2012, 92:523-533.
- [15] 王勇,唐曦. 卫生热水蓄热方式对地理管换热性能的影响分析[J]. 重庆大学学报,2012,35(3):140-146.  
WANG Yong, TANG Xi. Influence of heat storage mode of domestic hot water on the performance of ground heat exchanger in ground-source heat pump system [J]. Journal of Chongqing University, 2012,35(3):140-146.
- [16] 唐曦,王勇. 水平埋管地下岩土传热模型中上垫面边界条件的确定方法研究[J]. 制冷与空调,2011,107(25):197-201.  
TANG Xi, WANG Yong. Method of ground surface boundary condition of soil heat transfer model around horizontal ground heat exchangers [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2011,107(25):197-201.
- [17] 李新国,赵军,周倩. U型垂直埋管换热器管群周围土壤温度数值模拟[J]. 太阳能学报,2004,25(5):703-707.  
LI Xinguo, ZHAO Jun, ZHOU Qian. Numerical simulation on the ground temperature field around U-pipe underground heat exchangers [J]. Acta Energy Solaris Sinica, 2004,25(5):703-707.
- [18] 张靖周,常海萍. 传热学[M]. 北京:科学出版社,2009.

(编辑 薛婧媛)