地下同轴套管式换热器取热工况热响应实验分析

刘　婧[1]，高　科[1]，孟祥瑞[2]，李　冰[1]

(1. 吉林大学建设工程学院，吉林 长春 130026；2. 河南省有色金属地质矿产局第三地质大队，河南 郑州 450016)

摘　要：地源热泵系统凭借其节能和环保的特性，一经问世就迅速吸引了全世界的目光，成为了一个非常热门的研究课题。换热器的传热效率一直是地源热泵技术研究的主要问题之一，通过对比传统的单 U 型换热器，对新型的同轴套管型换热器的取热工况进行试验研究，并对采集的数据进行分析讨论，说明其具有良好的传热效果。

关键词：地源热泵；换热器；单 U 型；同轴套管型

中图分类号：TU833　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1672－7428(2012)10－0053－05

Experimental Research on Thermal Response of Taking Heat Conditions of Coaxial Casing-shaped Heat Exchanger/*LIU Jing*[1], *GAO Ke*[1], *MENG Xiang-rui*[2], *LI Bing*[1] (1. Construction Engineering College, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. No. 3 Geological Team, Henan Provincial Non-ferrous Metals Geological and Mineral Resources Bureau, Zhengzhou Henan 450016, China)

Abstract: Ground-coupled heat pump systems quickly attract attention in the world by the advantages of energy saving and no-pollution to the environment as a hot research topic. The efficiency heat exchanger of the heat transfer is always one of the main problems of the ground source heat pump technology research. Comparing with the traditional single U-shaped, the taking heat conditions of coaxial casing-shaped were also studied, and the experimental study of the collected data were discussed which explained good heat transfer effect.

Key words: ground-coupled heat pump; heat exchanger; single U-shaped, coaxial casing-shaped

0　前言

近年来，全世界都在不遗余力地进行能耗低、污染少以及能够可再生的新能源技术的研究与应用，地源热泵技术就是在这种形势下逐渐兴起的一种利用地表浅层热能的新技术，其具有良好的经济、环境和社会等效益，可有效地缓解常规能源枯竭所带来的压力和常规能源的消耗给环境带来的污染等问题，具有广阔的发展前景。

在地源热泵系统中，其研究的核心和应用的基础主要是对地埋管换热器的选型和设计的研究，目前主要的竖直地埋管换热器的形式大体分为 4 种：单 U 型，双 U 型，1＋2 型和套管型，为了保证地埋管换热器具有更好的传热效果，研制出了一种新型的同轴套管地埋管换热器，其结构如图 1 所示。其工作原理与 U 型管大体一致：在内、外管之间注入循环液，利用地下岩石的热传导将循环液加温或冷却，再将循环液从内管中抽出。

鉴于对其传热性能优劣的研究，本文对比单 U 型换热器，对同轴套管型换热器的取热工况进行试验研究，利用 Excel 对采集的数据进行分析，并用 MATLA 软件计算其导热系数，说明了同轴套管型换热器具有良好的取热效果，所以在地埋管换热器的研究中，同轴套管型换热器仍然是其研究的方向。

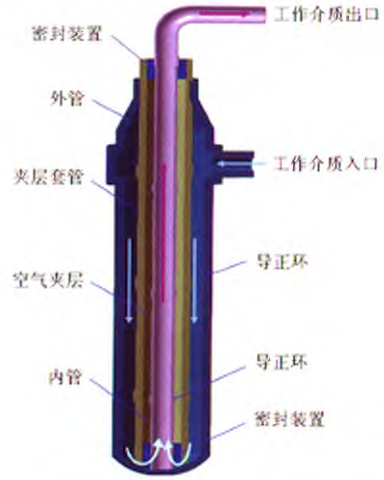

图 1　同轴套管型换热器结构图

收稿日期：2012－05－09

基金项目：国家自然科学青年基金(51004052)；国家高技术研究发展计划“863”项目(2009AA06Z201)；国土资源部公益性行业科研专项经费(SinoProbe－09－05)

作者简介：刘婧(1988－)，女(汉族)，辽宁人，吉林大学硕士生，地质工程专业，从事岩土钻凿技术研究工作，吉林省长春市西民主大街 6 号，825011753@qq.com。

万方数据

1 测试原理

本文采用的测试方法是现场热响应测试法,其主要的工作原理是:将钻孔中的换热器与测试仪的管道入口 A 和出口端 B 相连,形成一个闭合的回路,利用水泵驱动管路中的液体循环,以热泵和加热器作为热源或以热泵作为冷源对液体进行加热或制冷,并利用加热器或电动三通分流阀对输入或提取的热量进行控制,保证输入地下或从地下提取的热量恒定。测试仪将采集连续运行数十小时以上的地埋管换热器的进出口流体温度、流体流量值、热泵制热或制冷量、电加热器制热量等数据,采用参数估计法结合 MATLAB 软件编制程序,可反推地层平均热传导系数和钻孔热阻等土壤的热物性参数。具体原理图见图 2。

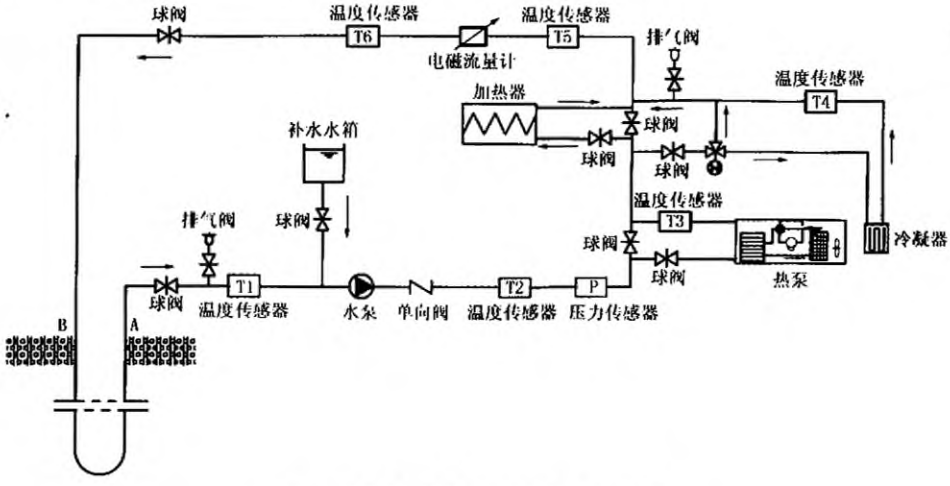

图 2 地层热物性原位测试仪原理及流程图

2 测试仪器

测试仪的各个设备和管道安装在拖车上,车厢的外观尺寸为 3.4 m × 1.7 m × 1.8 m(长 × 宽 × 高),车厢内镶有 40 mm 厚的苯板,外包 0.7 mm 厚的彩钢板。见图 3。

图 3 测试仪拖车外部结构

该测试仪主体结构主要组成有:热泵机组、循环水泵、电加热器、补给水箱、数据采集系统、电磁流量计及传感器(温度传感器、压力传感器)及控制阀等。测试仪的具体结构布置及流程见图 4。

数据采集系统及控制系统工作过程为:温度传感器采集到的信号(热阻信号)后传递给信号变速器,经过信号变速器后,热阻信号全部转换为 4 ~ 20 mA 的电信号,之后信号变送器将信号输送给无纸记录仪,而压力变送器和智能电磁流量计直接将电信号输送给无纸记录仪,无纸记录仪接收到信号后一方面输出数字信号,另一方面将信号输送给 PID 控制器,PID 控制器将电信号传输给电加热器的功率调节器,功率调节器所输入的电信号调节加热功率,以保证入井循环液的温度恒定。

3 试验与分析

3.1 试验场地浅层地热井分布及其井的参数

试验场地共有 5 口热交换井,井间距为 6 m。采用了 3 种类型的地下换热器,,分别是 2 个单 U 型、2 个双 U 型和 1 个同轴套管式换热器,具体见图 5,各井具体结构见表 1。

3.2 管材性能及回填材料

管材采用的是高密度聚乙烯管(HDPE),导热系数为 0.42 W/(m · ℃),公称外径 32 mm,公称壁厚 3.0 mm,单重 0.28 kg/m,工程压力 1.25 MPa。回填材料使用的是一定比例的砂子、水泥和膨润土的混合物,具体配合比例见表 2 所示。

3.3 试验基本过程

本实验的试验对象是单 U 型井(2 号井)与同轴井(5 号井)。

万方数据

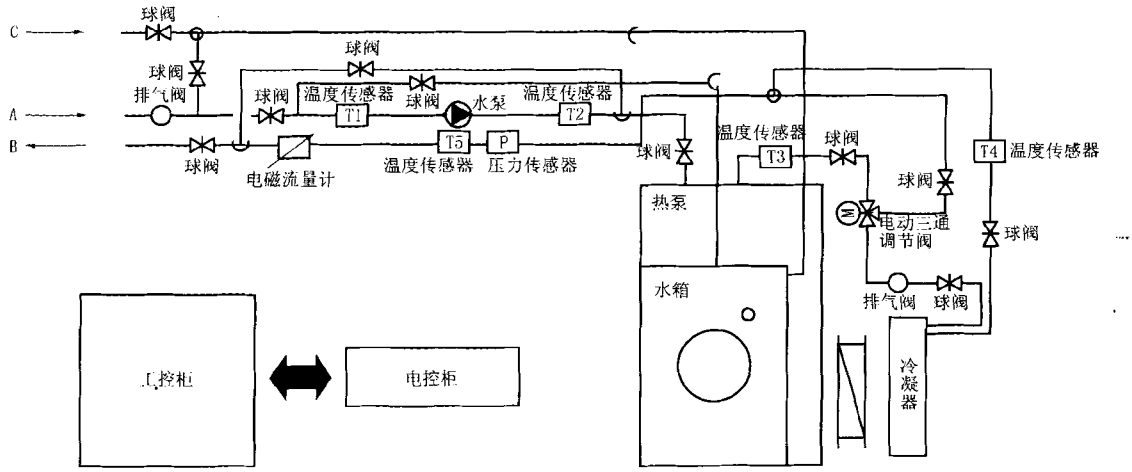

图 4　地层热物性原位测试仪的结构平面布置图

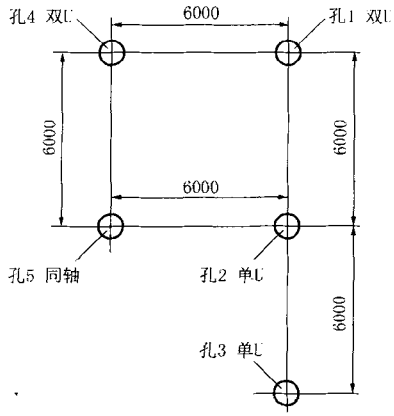

图 5　地埋管换热器水平布置图

表 1　地埋管换热器参数

编号	类型	钻孔直径/mm	管径/mm	钻孔深度/m	实际下管深度/m
1	双 U	180	32	105	98
2	单 U	180	32	105	89
3	单 U	180	32	105	91
4	双 U	180	32	105	88
5	同轴	250	110	105	96

表 2　实验回填材料配方

换热器序号	回填材料比例/%		
	砂子	水泥	膨润土
1	0	20	80
2	20	0	80
3	10	20	70
4	10	20	70
5	20	0	80

由于钻井时对原始地温产生扰动,故需待地温恢复接近到原始状态时才能开始测试试验,这个期限不应少于 48 h。在实验过程中,为了防止管路中的热量流失,更好地保证恒热流,需在裸露在空气中的管路外面缠上保温材料。测试仪管道的保温采用双层保温棉隔热外加具有隔热作用的铝箔胶带缠绕而成,以保证管路热流损失最小。

3.3.1　原始地温的确定

将测试仪与井相连,再检查电路系统连接无误后启动测试系统,开启水泵,将流量设定为 1 m^3/h,对测试仪进、出井温度的变化进行观测,当进出井温度变化很小时,可以把出井温度近似认为是周围土壤的原始地温,该试验进行 5 h。

3.3.2　单 U 井取热试验

原始地温测试结束后,开启热泵,将热泵调至制热模式,待循环流体温差基本稳定后打开加热器及 PID 控制器,设定温差为 -1.9 ℃(视温差情况而定约比试验温差小 1 ~ 1.5 ℃)进行 48 h 取热试验。

3.3.3　同轴井取热试验

原始地温测试结束后,开启热泵,将热泵调至制热模式,待循环流体温差基本稳定后打开加热器及 PID 控制器,设定温差为 -3.8 ℃(视温差情况而定)进行 48 h 取热试验。

3.4　试验结果分析

实验完成后,共得到 11 组数据,其中包括 6 个温度数据(出井温度 T_1,水泵后热泵机组前温度 T_2,热泵机组后加热器前温度 T_3,加热器后温度 T_4,流量计后温度 T_5、T_6),1 个温差数据($T_5 - T_1$),2 个压力数据(加热器前后 P_1、P_2),2 个流量数据(流量计 1 和流量计 2)。测试地层导热系数的主要数据有进井温度 T_5、出井温度 T_1 和进出井温差,分析时只对关键数据进行分析。

分析数据所用的软件主要是 Excel:首先将获取的数据导入 Excel 表格,分别选取进井温度、出井温度和进出井温差的数据画出图。然后根据图表中曲

万方数据

线的走势来判断设备的运行情况。

在试验过程中,取得了大量的试验数据,将这些数据进行整理,绘制了温度、流量、压力、功率等随时间变化的相关曲线图,并对单 U 和同轴型井进行对比分析。

3.4.1 大地初始温度的测定

大地初始温度是指无干扰地层的温度,本实验大地初始温度的测定时间为 6 h,当水泵循环一段时间以后(6 h 左右),当其进、出井的温度逐渐趋于稳定,则把这个稳定的出口温度视为大地的初始温度。具体见图 6、图 7。

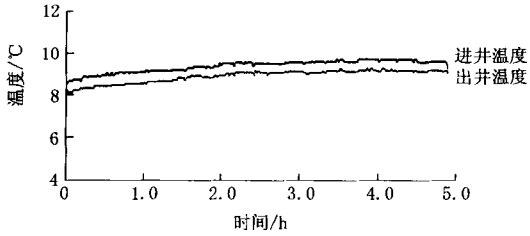

图 6 单 U 井初始温度

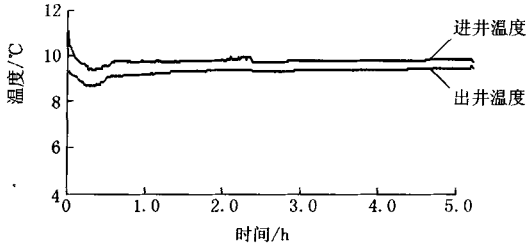

图 7 同轴套管井初始温度测量

从图 6、图 7 可以看出,单 U 井的初始温度为 9.2 ℃,同轴套管井的初始温度为 9.4 ℃,由于 2 口井的距离为 6 m,相隔很近,地层几乎无变化,所以初始温度应相同。测试结果的偏差,可能是因为测试的先后顺序和环境温度的变化所致。

3.4.2 温度曲线

实验采集了大量的温度和温差数据,温度变化是系统运行过程中最为重要的参数,直接影响着土壤耦合热泵系统的运行性能。具体见图 8、图 9 所示。

本实验每个井的取热工况运行了 48 h,从图 8、图 9 的曲线可以看出,进、出井的温度曲线是逐渐下降的,可以看出热泵机组试供暖运行,在不断从地下获取热量。

2 个井的进、出井的温度及温差走势大致一致,开始前 6 h 为水泵运行状态下的曲线走势,接下来 1 h是热泵刚开启的运行状态,其后为开加热器运行状态。

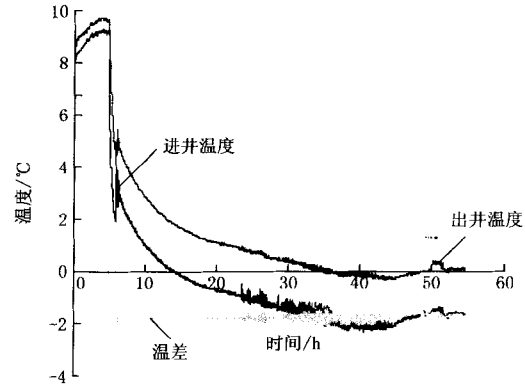

图 8 单 U 井取热工况运行时间 - 温度曲线

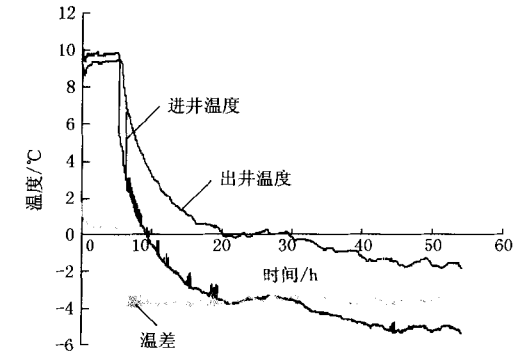

图 9 同轴套管井取热工况运行时间 - 温度曲线

对单 U、同轴套管井进行对比分析:从进、出井的温度变化曲线看出,虽然大体走势一致,但同轴套管井与单 U 井相比要陡一些,同轴套管井进井最低温度为 -5.3 ℃,出井最低温度为 -3.6 ℃,而单 U 井进井最低温度为 -1.8 ℃,出井最低温度为 -0.2 ℃左右,所以同轴套管井的取热最低温度要比单 U 要低很多,同样条件的井中,同轴井的取热量更多。从温差变化看出单 U 井的温差变化的频率要比同轴井的要高,可见其稳定相对同轴井更差。

3.4.3 流体平均温度拟合曲线

在线源模型的基础上,利用 MATLAB 软件,把利用传热模型计算的流体平均温度与实际测得的流体平均温度进行比较,具体如图 10、图 11 所示。

从图 10、图 11 可以看出,实际情况基本符合模拟的趋势变化(除部分有大的波动外),在模型计算结果的基础上,利用参数估计法不断调整流体平均温度与实际测量的温度方差和使其最小,求得地层平均热物性参数值(地层的平均导热系数和钻孔热阻),具体见表 3。

从上述结果可以看出,同轴井的导热系数要明显好于单U井,而且其钻孔的热阻值也要小于单U

万方数据

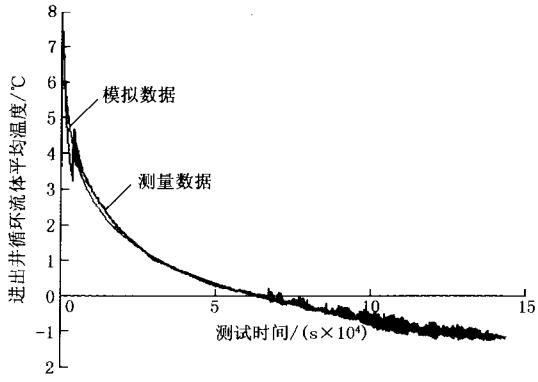

图 10　单 U 井进出井循环流体的平均温度

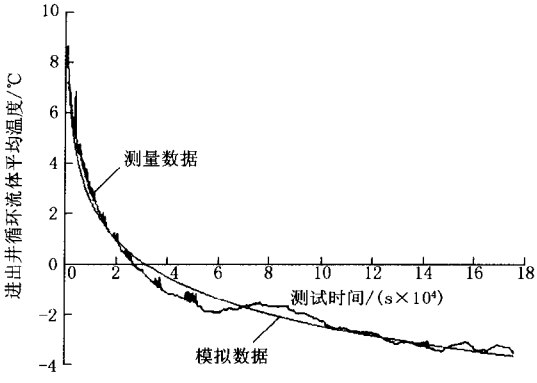

图 11　同轴井进出井循环流体的平均温度

表 3　地层平均导热系数和钻孔热阻计算结果

类型	导热系数	钻孔热阻
同轴井	1.3467	0.1298
单 U 井	1.3108	0.1309

井,所以同轴井的换热性能要明显好于单 U 井,其换热能力更强。

4　结论

通过上述对 2 种井的温度、温差、压力和流量的曲线分析,可以得出以下结论。

(1)单 U 井、同轴井在启动阶段进出井温度的变化规律基本一致,但是同轴套管井取热工况的进出井温度在同一时刻要低于单 U 井的进出口温度,同时从进出井温差角度衡量可以看出,同轴井的换热性能要优于单 U 井的换热性能。

(2)从经济角度可以看出,由于同轴井的换热性能要远远优于单 U 井,钻井利用率高于单 U 井,可以大幅度降低系统成本。

(3)从加工角度,同轴套管换热器的加工较为复杂,要求精度较高,单 U 井的加工技术已经十分成熟,所以在加工方面,同轴套管换热器还需要更成熟的技术。

参考文献:

[1]　王贵玲,张发旺,刘志明. 国内外地热能开发利用现状及前景分析[J]. 地球学报,2000,(2):134 - 139.
[2]　李小杰. 地源热泵单 U 型埋管换热器传热特性分析与实验研究[D]. 吉林长春:吉林大学,2006.
[3]　刘冬升. 地源热泵试验台及同轴套管换热器传热模型研究[D]. 吉林长春:吉林大学,2005.
[4]　孙友宏,王庆华. 地层热物性测试方法及仪器[J]. 中国建设信息供热制冷,2008,(11):31 - 32.
[5]　王庆华,孙友宏,陈昌富,等. BTR - 4000 型地层热物性原位测试仪及其应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2009,39(2).
[6]　王庆华. 浅层岩土体热物理性质原位测试仪的研制及传热数值模拟[D]. 吉林长春:吉林大学,2009.
[7]　张楠. 工业计算机控制系统在岩土钻测装备中的应用研究[D]. 吉林长春:吉林大学,2010.
[8]　刁乃仁,方肇洪. 地埋管地源热泵技术[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
[9]　何雪冰,丁勇,刘宪英. 地源热泵地埋管换热器传热模型及其应用[J]. 重庆建筑大学学报,2004,26(2).
[10]　宋欣阳. 用于地源热泵系统现场热响应测试的土壤热物性实验研究[D]. 天津:天津大学,2009.
[11]　张楠,孙友宏,王庆华. 基于组态软件、智能模块及 PLC 的岩土热物性原位测试仪监控系统[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2010,40(2).
[12]　赵啸琳. 非恒定加热功率下岩土热物性现场测试技术[D]. 山东济南:山东建筑大学,2009.
[13]　李朝佳. 浅层岩土热物性参数测试试验与研究[D]. 吉林长春:吉林大学,2009.
[14]　于明志,方肇洪. 现场测试地下岩土平均热物性参数方法[J]. 热能与动力工程,2002,17(101).
[15]　于明志,彭晓峰,方肇洪,等. 基于线热源模型的地下岩土热物性测试方法[J]. 太阳能学报,2006,27(3).
[16]　崔萍,刁乃仁,方肇洪,等. 地热换热器 U 型埋管的传热模型及热阻计算[J]. 暖通空调,2003,(6).

万方数据