

环境地质

# 埋管换热器影响岩土体传热因素及热影响范围分析

胡彩萍

(山东省第一地质矿产勘查院, 山东 济南 250014)

**摘要:**该文介绍了埋管换热器传热模型,对影响地下岩土体传热的埋管换热功率、持续时间、热泵机组运行的方式与模式、换热器规格、管外回填材料以及地质-水文地质条件等因素进行了探讨,认为周围岩土体热响应范围大小与换热功率大小和持续时间长短、管外回填材料和周围岩土体导热性能高低呈正相关性,热泵机组间歇运行方式有利于地温场的及时恢复,冬季制热夏季制冷模式能削弱单一负荷聚集产生的热影响程度,同等条件下双 U 型 De32 埋管较单 U 型 De25 埋管热影响范围要大。由于埋管换热器吸热或放热不平衡而引起的冷热量累积效应,渗流速度越大,热影响范围则越大。济南东部碎屑岩区某模拟夏季工况试验表明,其他条件相同的前提下,8 kW 换热功率持续运行,以换热孔为中心,岩体温度响应速率和影响幅度与径向距离成负相关性,距离越近,响应速率和影响幅度越大,反之就越小;47 天后,埋管换热器热影响范围大于 5m。

**关键词:**浅层地热能;埋管;热影响范围;热响应速率;影响因素

中图分类号:TU831

文献标识码:B

**引文格式:**胡彩萍.埋管换热器影响岩土体传热因素及热影响范围分析[J].山东国土资源,2017,33(8):51-57. HU Caiping. Analysis on Heat Transfer Factors and Thermal Influence Range of Rock and Soil Influenced by Heat Transfer in Underground Pipe[J]. Shandong Land and Resources, 2017,33(8):51-57.

## 0 引言

埋管地源热泵系统是一种利用浅层地热能进行供暖和制冷的高效、节能、环保的空调系统,通过输入少量的高品位电能实现低温位向高温位热能的转移。进入 21 世纪,随着国家各级政府对可再生清洁能源利用和节能减排工作的重视与加强,各种鼓励政策陆续出台,浅层地热能的开发利用空前兴起,埋管热泵系统得到迅速发展。但前期场地勘察的忽视和缺失以及相关研究的落后,使埋管热泵工程设计,特别是埋管换热器间距设计存在极大盲目性。埋管间距过大,虽能获得较高的换热效率,但常会受到建设工程场地空间条件的限制;间距过小,再加之管群平面布置、换热器长度、规格及回填材料等选择不合理,则会在不同单个换热器间极易造成热短路,或以换热器为中心造成冷热负荷堆积,从而改变埋管区的地下温度环境,直接影响系统效能。

而要确定合理的埋管间距,必须以分析具体热泵工程所在场地的换热器热影响范围因素为前提。能否科学分析岩土体热传导影响因素,准确掌握埋管换热器状态下热传导影响因素和热影响范围,不仅直接决定了埋管换热器间距和数量,影响工程初期投资,更甚者则对整个热泵系统的运行效果造成影响<sup>[1-2]</sup>。

## 1 埋管换热器传热模型

进行埋管换热器影响范围因素研究,需以建立传热模型为基础。该文埋管换热器传热模型是基于系列解析解和叠加原理的埋管换热器的传热模型为基础的准三维非稳态模型<sup>[3-4]</sup>。大大减少了半经验模型中所做的简化假设,用函数表达式定量地反映出埋管换热器各种几何和物理参数以及岩土体热物性参数对传热的影响,精确地反映加热工况下任一时刻和空间位置的温度响应,以此分析热

收稿日期:2017-02-10;修订日期:2017-05-16;编辑:陶卫卫

基金项目:济南市浅层地热能调查评价(1212011220835)

作者简介:胡彩萍(1976—),女,山东莱西人,高级工程师,主要从事水工环地质工作;E-mail:caipinghu126@126.com

影响范围和影响程度。

### 1.1 钻孔外周围岩土体的非稳态传热模型

该模型用于岩土体的温度响应计算。利用线热源模型求出在单孔热响应作用下  $\tau$  时刻在柱坐标系中的点  $M(\rho, z)$  处的过余温度响应公式(1):

$$\theta(\gamma, z, \tau) = \frac{q_1}{4k\pi_0} \left\{ \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}}{2\sqrt{a\tau}}\right)}{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}} - \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}}{2\sqrt{a\tau}}\right)}{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}} \right\} dh \quad (1)$$

计算多个钻孔埋管换热器在阶跃加热下对岩土体引起的过余温度响应,可分别计算每个钻孔在该位置处引起的过余温度响应  $\theta_i(r, z, \tau)$ ,然后求和公式(2):

$$\theta_{multi} = \theta_0(r_0, z, \tau) + \sum_{i=1}^{N-1} \theta(r_i, z, \tau) \quad (2)$$

其中: $r_i$ 是相对坐标; $\tau$ 是阶跃加热的时间。

### 1.2 双 U 型管钻孔内准三维传热模型

钻孔内固体材料的轴向导热忽略不计,模型称为准三维模型。双 U 型管每个支管内循环流体的质量流率记为  $M$ ,流体的定压比热记为  $c$ 。4 个支管中的热量平衡可分别写作公式(3):

$$\left. \begin{aligned} \pm Mc \frac{dT_{j1}(z)}{dz} &= \frac{T_{j1}(z) - T_b}{R_{j1}^A} + \frac{T_{j1}(z) - T_{j2}(z)}{R_{j2}^A} + \frac{T_{j1}(z) - T_{j3}(z)}{R_{j3}^A} + \frac{T_{j1}(z) - T_{j4}(z)}{R_{j4}^A} \\ \pm Mc \frac{dT_{j2}(z)}{dz} &= \frac{T_{j2}(z) - T_{j1}(z)}{R_{j1}^A} + \frac{T_{j2}(z) - T_b}{R_{j2}^A} + \frac{T_{j2}(z) - T_{j3}(z)}{R_{j3}^A} + \frac{T_{j2}(z) - T_{j4}(z)}{R_{j4}^A} \\ \pm Mc \frac{dT_{j3}(z)}{dz} &= \frac{T_{j3}(z) - T_{j1}(z)}{R_{j1}^A} + \frac{T_{j3}(z) - T_{j2}(z)}{R_{j2}^A} + \frac{T_{j3}(z) - T_b}{R_{j3}^A} + \frac{T_{j3}(z) - T_{j4}(z)}{R_{j4}^A} \\ \pm Mc \frac{dT_{j4}(z)}{dz} &= \frac{T_{j4}(z) - T_{j1}(z)}{R_{j1}^A} + \frac{T_{j4}(z) - T_{j2}(z)}{R_{j2}^A} + \frac{T_{j4}(z) - T_{j3}(z)}{R_{j3}^A} + \frac{T_{j4}(z) - T_b}{R_{j4}^A} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中:正负号取决于流体流动的方向,即流体向下流动时取负号,向上流动时取正号。

假定单位钻孔深度上的热流密度为  $q_1$ ,钻孔深度为  $H$ ,管内循环流体质量流率为  $M$ ,循环流体定压比热为  $c$ 。对于串联布置的双 U 型埋管换热器,钻孔内的热阻为公式(4):

$$R_b = \frac{H}{4Mc} \cdot \frac{1 + \Theta''}{1 - \Theta''} \quad (4)$$

其中: $\Theta''$ 为流体的无量纲出口温度。

将导得的流体出口温度代入(式 4),即可得到埋管换热器的钻孔内热阻。

利用上述模型,进行条件概化和参数赋值,求得钻孔各个支管内循环流体沿钻孔深度方向的温度变化关系式,精确地确定埋管钻孔的传热热阻和传

热量,分析热传导规律和地温场特征。

## 2 岩土体传热影响因素分析

埋管地源热泵系统采用闭式循环与埋管区地下环境间进行冷热量交换,从而改变埋管换热器周围岩土体温度场。研究显示,能量交换这一吸热、放热过程引起的岩土体传热与埋管换热功率、持续时间、热泵机组运行的方式与模式、换热器规格、埋管间距、管外回填材料以及地质—水文地质条件等因素密切相关。

### 2.1 换热功率与持续时间

埋管换热器对周围岩土体的热响应范围(半径)大小与换热功率和持续时间相关,且呈正相关性。

依据山东建筑大学刁乃仁等<sup>[5]</sup>研究资料分析,单个埋管孔换热器按 1 kW 持续取热,距离埋管钻孔群或单个换热器越近的岩土体,其温度降低越快,降低的幅度也大,随着时间的延长,热影响向远端传递,约 40 天以后降低趋势减缓。若以相对温降幅度为 2%(实际温降约 0.3℃)作为岩土体热影响范围边界的确定依据,2 天时,热影响半径为 0.5 m;7 天后,半径增大为 1 m,50 天半径约 2.8 m,持续运行 120 天后,半径约为 4.8 m,距离埋管换热器 0.5 m 与 5 m 远处的岩土温度分别比初始温度降低了 2℃和 0.3℃。

取热功率增大,岩土体的热响应规律与之前相似,但响应强烈程度增强,热影响范围、同距离热影响幅度也相应地增大。取热功率 4 kW 运行 2 天,热影响半径为 1 m;7 天后,半径增大为 1.7 m,50 天半径约 5.5 m,120 天后,距离换热器 0.5 m 与 5 m 处的岩土温度分别降低了 8℃和 1℃左右。从以上分析可看出,不同换热功率、不同持续时间作用下的岩土体的热影响范围是不同的。

表 1 换热功率、持续时间与热影响半径关系

取热功率	1 天	2 天	7 天	28 天	50 天	90 天
1kW	0.4m	0.5m	1.0m	2.2m	2.8m	3.5m
4kW	0.6m	0.9m	1.7m	3.8m	5.5m	

### 2.2 运行方式和模式

运行方式分为连续运行和间歇运行 2 种。连续运行指在某一时间段(一般是一个完整的制冷期或

制热期)内热泵机组不间断地运行状态。也有的文献将冬夏季运行而春秋季节停止视为间歇运行<sup>[6-9]</sup>,该文不采用此类观点,而将只要冬夏季连续运行而不论春秋季节是否停止的情况作为连续运行看待。连续运行的建筑如住宅、宾馆、酒店等,一个取暖季和制冷季内全天 24 h 运行。间歇运行指热泵机组一个完整的制冷期或制热期内有所间断而不连续的状态。有的热泵机组一昼夜内夜间运行、日间停止,如部分居民楼,部分业主白天上班,家中无人,不开热泵机组,待晚上回到家后再启动;办公楼则白天上班时间机组运行,下班后则关停,还有的办公楼,周一至周五昼夜不停运行,周六和周日关停;展馆类建筑则只在开馆时才运行,闭馆期间大部分关停。运行模式该文大致分为 3 种,单冬季制热模式,如我国东北地区,夏季天气凉爽基本不用热泵制冷;单夏季制冷模式,如海南、广东等我国南方地区,冬季气温高,也基本不会利用热泵制热;第 3 种是冬季制热夏季制冷模式,如山东、河南等我国中部地区,冬季制热时间与夏季制冷时间大致相当。

间歇运行方式在热泵机组关停时段内<sup>[10-12]</sup>,聚集在岩土体中的冷热负荷逐步向周围地下环境释放,地温在一定程度上有所恢复,呈周期性波动规律;以埋管换热器为轴心,靠近轴部,因热影响幅度大,地温短时恢复明显,沿径向方向,由近及远,温度受间歇性运行影响幅度逐渐降低,热泵机组关停、启动对其影响的迟滞性越明显,因此间歇运行方式,有利于地温场的及时恢复,埋管换热器热影响范围小;而连续运行方式,换热器持续不断地向地下环境输入冷气或热量,冷热负荷不停聚集,并不断向外围扩散,因此热影响范围不断扩大<sup>[13-15]</sup>。从运行模式看,单一制冷或制热模式,或虽为冬天制热夏季制冷模式,但热泵建筑工程从冬季地下吸取的热量和夏季向地下排放的热量严重不平衡,都会造成多余的热量(或冷量)在地下不停积累,影响范围逐步扩大。地下水渗流条件较弱的地区,一年周期内地温恢复主要靠热泵机组关停期岩土体自我恢复能力,冬季制热夏季制冷模式,冷热负荷在一定程度上能够相互抵消,从而削弱单一负荷聚集产生的热影响程度,长期看,影响范围也会相对较小。

### 2.3 换热器规格

竖直 U 型埋管换热器按其结构分为双 U 型和单 U 型 2 种,二者对传热的影响表现在钻孔内传

热热阻和换热能力不同,直接关系到埋管换热器热影响范围的大小<sup>[16-18]</sup>。刁乃仁等<sup>[4]</sup>进行的竖直埋管换热器设计及系统优化研究表明,其他条件相同的前提下,双 U 型比单 U 型钻孔内热阻小 30% 左右,换热能力提高 7~20%,热影响范围与热阻大小呈负相关关系,与换热能力呈正相关关系。目前,浅层地热能工程中常用的竖直埋管材料为聚乙烯(PE),直径主要有 De25 和 De32 两种,工程多采用单 U32 型或双 U25 型,还有部分工程采用双 U32 型。管径大,管内循环液与管壁的接触面积大,换热效率相应提高,一般来讲,De32 比 De25 换热能力大 5%±,热影响范围前者也较后者大。

### 2.4 管外回填材料

回填材料选择对保证埋管换热性能极其重要,材料导热性能不良,钻孔内热阻大,同等条件下,所需的换热器长度将会增大,初投资费用也会相应增加,对热量交换而言,回填物导热系数越大,埋管换热效率也越高。目前作埋管回填材料较多的有水泥砂浆、石英砂、膨润土及其不同比例混合物等(也有采用工程场地原土),膨润土—水混合物导热系数通常较小,只有 0.65~0.9 W/m·℃,水灰比 0.6 的纯水泥 0.97 W/m·℃±,膨润土—石英添加剂混合物导热系数 1~2.42 W/m·℃,水泥基回填物(水泥、石英砂、膨润土、水、碱水剂等混合物,1999 年 Allan 等人研制)导热系数可达 2.161 W/m·℃,CS(添加粉煤灰、膨胀剂的水泥砂浆,陈卫翠等实验研究)2.34 W/m·℃±<sup>[7]</sup>。对埋管换热器热影响范围来讲,回填材料导热性能越好,同等条件下,热影响范围就越大。

### 2.5 地质—水文地质条件

#### 2.5.1 地质条件影响

地质条件对埋管换热器热影响范围的作用主要表现在岩土体热传导率的大小上,其次是孔隙(裂隙)率和含水率。热影响范围与热导率大小呈正相关性。一般而言,岩土体热导率越高,导热性能越好,同等条件下热量传递速率越快,由换热器径向向外,传递的距离越远,热影响的范围越大。典型岩石中,密度和硬度较大的变粒岩、花岗岩、砂岩等热导率较高,多大于 2.6 W/m·℃,此类岩石地区埋管换热器热影响范围较大,闪长岩、灰岩热导率次之,粉土及粘性土类最小,一般多小于

1.7 W/m·°C, 2250 多个样本统计平均值 1.6 W/m·°C 左右, 就单个地理管换热器来讲, 第四纪松散层地区热交换影响范围相比前两类最小。由于水和空气热导率较低, 分别为 0.599 W/m·°C 和 0.023 W/m·°C (浅层地热能勘查评价规范, DZ/T 0225-2009, 附录 B), 所以, 地质体中, 结构疏松、孔隙(裂隙)率越大、含水率越高, 地质体导热性能越差, 热影响范围越小。

表 2 典型岩性热导率室内测试值

岩土名称	样本数量(个)	平均热导率(W/m·°C)
松散岩类	2251	1.632
砂岩	239	2.602
灰岩	309	2.495
安山岩	232	1.772
闪长岩	223	2.482
花岗岩	820	2.688
变粒岩	268	3.05

### 2.5.2 水文地质条件影响

含水层厚度和渗流速率为 2 个重要的影响因素。地下水渗流, 有利于减弱或消除由于地理管换热器吸热或放热不平衡而引起的冷热量累积效应<sup>[19]</sup>, 冷热负荷迅速以水流为载体向远处传递, 渗流速度越大, 热影响范围则越大, 反之则小; 含水层厚度越大, 对冷热量交换功率影响越大。地下水流对热影响范围的影响, 以夏季工况为例, 渗流速度越大, 地理管换热器单位井深换热量越高, 换热器出口温度降低, 进出口管内循环液温差越大, 埋管区换热达到稳定的时间就越短。当地下水流速从 5 m/y 增大到 480 m/y 时, 单位井深换热量从 39.7 W/m 增加到 69.1 W/m, 增加了 73.6%<sup>[8]</sup>。相同渗流速率条件下, 影响范围大小还与地下水渗流方向有关, 地下水流动削弱了埋管垂直于渗流方向上的热影响, 而增强了沿渗流方向的热影响<sup>[9]</sup>, 使得沿渗流方向, 热影响范围增大, 且下游大于上游, 渗流速率越大, 下游方向热影响范围越大, 上游及其他方向热影响范围则相对越小(图 1)。对管群来讲, 渗流对热影响范围大小还与地下水流向与地理管阵列轴向有关, 据山东建筑大学刁乃仁等<sup>[5]</sup>研究, 当渗流方向不与管群阵列轴向垂直时, 地下环境温度场不再保持中心对称。因此, 地理管换热器设计时, 管群长轴方向与地下水流方向相垂直最有利于管群冷热负荷的消散, 有利于换热器与地下环境间的热量交换。

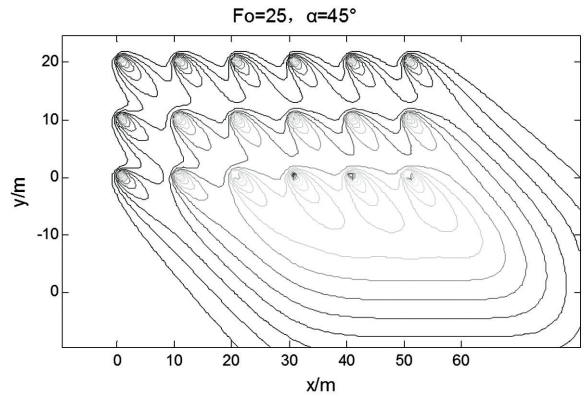


图 1 渗流作用下热影响范围形态图

## 3 热响应试验验证

为了解持续换热状态下单个地理管换热器热影响范围, 分析地下水渗流对地质体热传导性能的作用, 在山东省浅层地温能研究推广中心进行了一组热响应试验。

### 3.1 试验场地质—水文地质条件

热响应试验场地位于济南市章丘区西部, 工业三路以东, 场地 120 m 深度内地层为一套古生界二叠纪石盒子群砂泥岩组合, 砂岩泥岩比约 2:1。其中砂岩以黄绿色中粗、细粒砂岩以及灰色粉砂岩为主, J4 钻孔揭露厚度分别为 12.4 m, 38.3 m 和 15.9 m; 泥岩, 紫红—棕红色, 厚度为 31 m; 泥质粉砂岩, 灰—暗灰色, 厚 13 m(图 2)。

地下水为碎屑岩类裂隙水, 含水层岩性为砂岩, 单井涌水量 15~20 m<sup>3</sup>/h, 矿化度 400 mg/L 左右, 水化学类型为 SO<sub>4</sub>·CO<sub>3</sub>-Ca 型, 水位埋深 34.4~35.7 m, 地下水总体流向自西向东, 再转向北, 水力坡度 5%±。

### 3.2 场地岩石热物性及热响应特征

场地地层主要岩性为砂岩和泥岩, J4 孔共采集 24 组样品, 每组 3 件, 取 3 件样品测试结果的平均值作为研究数据。山东省地质科学研究院负责密度、孔隙率、含水率 3 个物理性质指标的测试; 山东省建筑大学热能学院负责热导率、比热容 2 个热物性指标的测试, 测试仪器为瑞典 Hot Disk TPS-2 500 S 热物性分析仪, 导热系数 0.01~400 W/m·K, 比热 ≤5 MJ/m<sup>3</sup>·K, 温度 15~1 000 K, 测试时间 1~640 S, 重复性 <±1%, 精度 <±2%。测试结果如表 3。

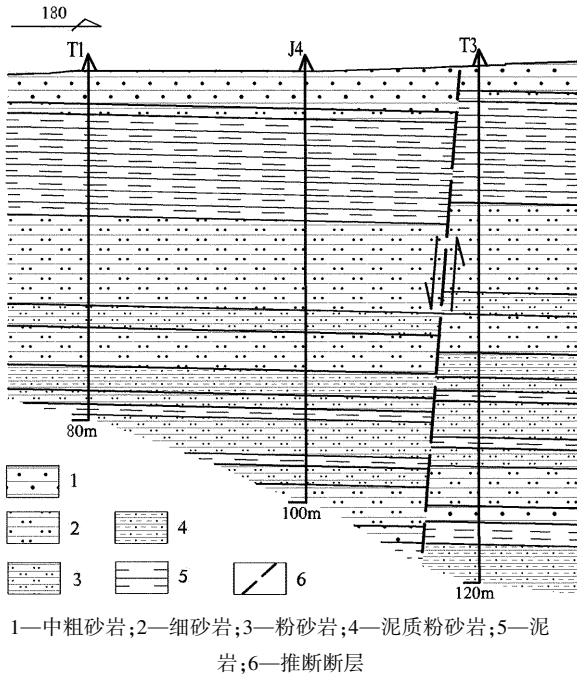


图 2 试验场地质剖面图

表 3 场地主要岩性物性与热物性特征值

岩性	热导率/ (w/m·℃)	比热容 KJ/ (Kg·℃)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	孔隙率 (%)	含水率 (%)
砂岩	2.300	0.782	2710	7.74	2.62
泥岩	2.183	0.711	2755	8.57	3.10

### 3.3 测试孔及地温监测系统设置

该次野外试验以 J4 为加热测试孔,该孔直径 150 mm,内置双 U 型聚乙烯 (PE100) 埋管,外径 32 mm,壁厚 3 mm,埋管长度 100 m,管外回填料为中砂。

在测试孔北侧分别距离 1.2 m, 1.6 m 和 2.0 m 处设立 3 个监测孔,每个孔均在 30 m 深度埋设一支 Pt1 000 Pa 温度传感器 (精度 0.01℃),编号分别为 T6, T9, T12。测试孔东侧地下水流下游 4.0 m 和西侧地下水流上游 5.0 m 处 50 m 深度各埋设一支铂温度传感器,编号分别为 T3 和 T1 (图 3)。

### 3.4 现场热响应测试

热响应测试在 J4 孔中进行。模拟夏季工况连续运行模式,设定温度 35℃ (加热功率 8 kW 左右),持续不断向岩层中输入热量,系统内循环液为自来水,流量 1.5 m<sup>3</sup>/h。对管内出入流体及 T1, T3, T6, T9, T12 进行温度监测,20 道巡检仪检录,间隔 3 分钟,数据自动存储。测试历时 47 天。

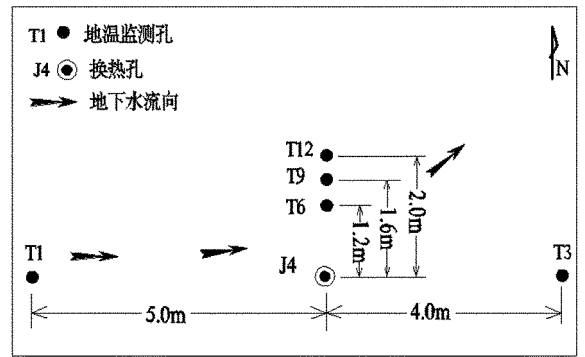


图 3 地温热响应试验布置图

### 3.5 监测数据分析

埋管热量传递方式为准三维非稳态,以热源为柱状轴心向外围辐射传导。J4 换热器为柱状热源,热量持续不断向周围岩层传导,随着时间的推移,以热源为中心,不同方位、不同距离处温度传感器产生响应,但响应速率和幅度有所不同 (表 4、图 4、图 5),并呈现出一定规律。

表 4 温度传感器监测数据

温度传感器编号	与热源距离 (m)	响应时间 (h)	平均速率 (m/d)	温度升高值 (℃)
T1	5.0	376	0.32	0.5
T3	4.0	572	0.17	0.2
T6	1.2	145	0.20	0.7
T9	1.6	304	0.13	0.5
T12	2.0	422	0.11	0.4

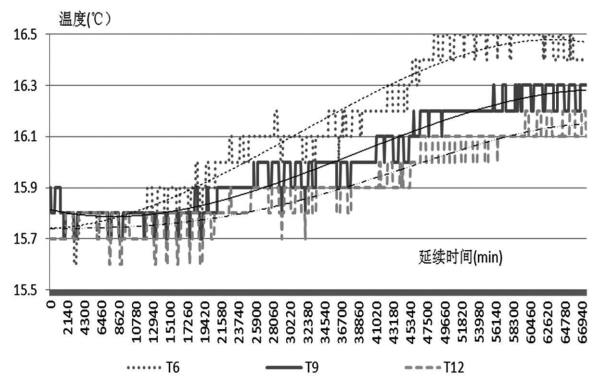


图 4 T6, T9, T12 温度传感器监测数据图

(1) 其他条件相同的前提下,以特定的换热功率持续运行,以换热孔为中心,岩体温度响应速率和影响幅度与径向距离成负相关性,距离越近,响应速率和影响幅度越大,反之就越小。靠近热源,岩土体的温度响应迅速,随着时间的延长,热干扰逐渐向远端岩土传递;起始岩土温度响应幅度较大,以后趋势

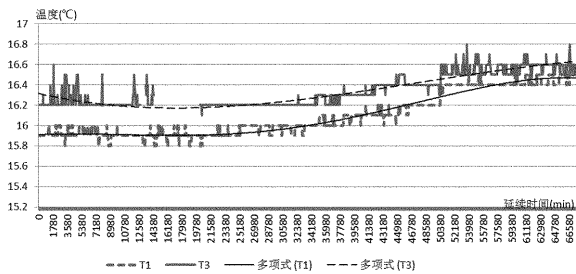


图 5 T1, T3 温度传感器监测数据图

减缓, 换热逐渐进入准稳定阶段。

T6-T12 传感器均埋设于地下水位之上, 且 T6 传感器距离热源最近, 最先监测到温度变化, 响应速率  $0.22 \text{ m/d}$ , 影响幅度也最大, 47 天后温度升高  $0.7^\circ\text{C}$ 。T12 传感器距离热源较远, 响应速率  $0.13 \text{ m/d}$ , 47 天后升高  $0.4^\circ\text{C}$ 。T9 传感器位置介于 T6 和 T12 之间, 响应速率和 47 天后升高温度值分别  $0.16 \text{ m/d}$  和  $0.5^\circ\text{C}$ 。距离对热响应的影响规律明显。

(2) 岩体温度热响应速率和影响幅度与地下水流方向有关, 但有时受构造影响较大。

T1 和 T3 温度传感器均埋设于水位以下的岩层中。试验场地地下水主要流动方向由西向东, T3 传感器位于下游, 距离热源  $4 \text{ m}$ , T1 位于水流上游, 距离热源  $5 \text{ m}$ 。地下水作为热量传递的一种载体, 在岩石裂隙中流动加快了能量的传递和扩散, 理论上, 在水流下游且距离热源距离近的 T3, 受地下水流影响, 其温度响应速率应大于在水流上游且距离热源较远的 T1, 也就是 T3 应先于 T1 监测到温度发生变化, 且相同时段内温度变化幅度 T3 也应大于 T1。但实际情况却是 T1 约  $376 \text{ h}$  后监测到温度升高, 响应速率  $0.32 \text{ m/d}$ , 47 天后升高  $0.5^\circ\text{C}$ 。而 T3 约  $572 \text{ h}$  后才监测到温度升高, 响应速率  $0.17 \text{ m/d}$ , 47 天后升高近  $0.2^\circ\text{C}$ 。不管是温度响应速率还是变化幅度, T1 均高于 T3。

物探结果显示, J4 与 T1 之间有条 NNW 向断层存在, 上述现象可得到合理解释。一是由于岩石破碎, 断层破碎带成为地下水强径流带, 周围厂区或居民区地下水开采, 断层西部地下水由西向东流至此后可发生转向, 断层两侧地下水均产生不同程度地向断层汇聚, J4 热源向 T3 方向传递的热量受到地下水渗流影响; 二是断裂东西两盘垂向滑动即使产生较小断距, 砂岩和泥岩互层的组合特征, 也会造成断层两侧不同岩性因错动产生直接对接, 使断层具有阻水性质, 热传导过程中降低或完全消除了地

下水流的作用。

(3) 监测数据表明, 模拟夏季工况连续运行模式下, 47 天后埋管换热器热影响范围大于  $5 \text{ m}$ , 监测器温度初期升高速率较快, 后期逐渐趋于稳定。因此, 相似水文地质条件下, 埋管换热器设计间距易大于  $5 \text{ m}$ 。

## 4 结论与建议

(1) 影响埋管热泵系统岩土体传热性能的因素很多, 热影响范围的大小既和单个换热器分担的冷热负荷、热泵机组运行方式与模式有关, 又与换热器的规格、埋管间距、管外回填材料以及地质—水文地质条件等因素有关。对整个浅层地热能工程来讲, 管群的热影响范围和对地质环境热影响程度还受管群平面布置形状、换热器材质等影响。上述因素综合作用, 影响着地下环境温度场的空间分布, 关系着工程能否高效、节能和持久运行, 埋管热泵工程设计中应予以重视。

(2) 热响应试验表明, 距离试验孔越近, 热响应速率和影响幅度越大;  $8 \text{ kW}$  功率持续加热, 47 天后距离试验孔  $1.2 \text{ m}$ ,  $1.6 \text{ m}$ ,  $2 \text{ m}$  处监测孔地温分别升高  $0.7^\circ\text{C}$ ,  $0.5^\circ\text{C}$  和  $0.4^\circ\text{C}$ , 位于地下水流上游  $5 \text{ m}$  处监测孔地温升高  $0.5^\circ\text{C}$ ; 相似水文地质条件下, 埋管换热器热影响范围大于  $5 \text{ m}$ 。鉴于该试验场选址时, 没有预料到场区内有断层存在, 关于构造对岩体热传导的影响缺乏足够的认识, J3 数据分析不具有普遍性; 同时由于选址前试验场内及附近水井数量少, 依照区域水文地质条件分析试验场区地下水流向时出现偏差, J6, J9, J12 三个地温监测孔没有布置在地下水主要径流方向上, 数据参考价值大打折扣。

(3) 热影响范围试验场选址时应首先排除构造的存在, 厂区内地层分布尽量一致, 地下水流向和埋藏明确。在水流方向的上下游以及垂直于地下水流向的方向上、距离试验孔不同距离上、地下水位上下均应布设温度传感器, 分析特定功率下岩土体热传导速率和影响范围以及地下水流在热传导过程中的作用。温度传感器埋置深度应大于恒温带的深度, 垂向位置应控制主要含水层, 兼顾隔水层, 同一含水层或隔水层在不同方向上均应控制; 地下水流下游温度监测孔与试验孔的距离应适当增大, 最远孔与试验孔的距离以大于当地源热泵工程埋管间距的  $1.5 \sim 2$  倍为宜。

## 参考文献:

- [1] 刁乃仁,方肇洪.埋管热泵技术[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [2] 王金香.多孔介质土壤热渗耦合模型及埋管周围土壤温度场数值模拟研究[D].大连:大连理工大学,2006.
- [3] 崔萍,刁乃仁,方肇洪,等.地热换热器U型管的传热模型及热阻计算[J].暖通空调,2003,33(6):13-16.
- [4] 曾和义,刁乃仁,方肇洪.竖直埋管地热换热器钻孔内的热阻[J].煤气与热力,2003,23(3):134-137.
- [5] 刁乃仁,崔萍,方肇洪.竖直埋管换热器常见涉及问题分析[J].地源热泵,2012,(10):5-10.
- [6] 余斌,王洋浩,颜亮.钻孔间距和布置形式对埋管管群传热影响的研究[J].制冷与空调,2010,10(5):31-34.
- [7] 陈卫翠,刘巧玲,贾立群,等.高性能埋管换热器钻孔回填材料的试验研究[J].暖通空调,2006,36(9):1-3.
- [8] 陈旭.地下水流动对埋管换热器的影响研究[J].空调技术,2013,(1):55-57.
- [9] 王洋浩,余斌,颜亮.地下水渗流对埋管管群传热的影响[J].化工学报,2010,61(S2):63-67.
- [10] 吴春玲,惠超微,王雯霞,等.地源热泵间歇运行方式对地温恢复和机组效能的影响[J].制冷与空调(四川),2014,28(4):410-414.
- [11] 尚妍,李素芬,代兰花.地源热泵间歇运行地温变化特征及恢复性研究[J].大连理工大学学报,2012,(3):350-356.
- [12] 刘文学,唐志伟,张宏宇,等.地源热泵间歇制热运行的试验研究[J].可再生能源,2008,26(1):59-61.
- [13] 王艳霞,蒋绿林,高伟.地源热泵长期运行对生态环境的影响[J].安徽农业科学,2008,36(24):10671-10672.
- [14] 周彦章,周志芳,付志敏.地源热泵系统可持续运行地下水量运移模拟[J].东南大学学报自然科学版,2009,(S2):297-303.
- [15] 程向明,张玉瑾.地源热泵多年长期运行工况对土壤温度场的影响[J].苏州科技学院学报(自然科学版),2016,33(3):71-75.
- [16] 朱宪良,郝赫,张素芳,等.地源热泵埋管单双U选择探讨[J].资源节约与环保,2015,(7):70-71.
- [17] 岳玉亮,齐月松,丁千茹.单、双U形管埋管换热性能对比研究[J].建筑科学,2011,27(8):95-98.
- [18] 薛玉伟,季民,李新国,等.单U、双U型埋管换热器换热性能与经济性研究[J].太阳能学报,2006,27(4):410-414.
- [19] 张春一,晋华,刘虎,等.渗流对竖直埋管换热器换热性能的影响[J].水电能源科学,2015,(10):108-111.

## Analysis on Heat Transfer Factors and Thermal Influence Range of Rock and Soil Influenced by Heat Transfer in Underground Pipe

HU Caiping

(No.1 Exploraiton Institue of Geology and Mineral Resources, Shandong Jinan 250014, China)

**Abstract:** In this paper, heat transfer model of buried pipe heat exchanger system has been introduced. Heat transfer power and the duration of the buried pipe, the mode of operation of heat pump unit, the specification of the heat exchanger, the external backfill material and geological and hydrogeological conditions, the heat transfer of underground rock mass have been studied. It is regarded that the range of thermal conductivity in the surrounding rock masses is positively correlated with the level of heat exchanger power, the length of the duration of thermal conductivity, the material of the external backfill and the heat conduction performance of the surrounding rock masses. The intermittent operation of heat pump unit is beneficial to the timely restoration of geothermal field. Winter heating and summer cooling mode can weaken the thermal influence of single load aggregation. The thermal influence of the double U-type De32 buried pipe is larger than of the single U-type De25 buried pipe under the same energy condition. The seepage action of groundwater is conducive to weaken or eliminate the cumulative effect of heat which is caused by the disequilibrium of the absorption or desorption of heat of the buried pipe exchanger. With stronger seepage action of groundwater comes lager range of thermal impact. A simulated summer working condition tests that the 8w heat transfer power is continuously running under the same condition as other conditions in the clastic rock area of eastern Jinan. It is showed that with the center of heat transfer hole, the temperature response rate and influence amplitude of rock mass are negatively correlated with radial distance, the nearer the distance, the greater the response rate and the impact amplitude, the less the converse will be, the more the thermal impact range of the buried pipe heat exchanger is greater than 5m in 47days.

**Key words:** Shallow geothermal energy; buried pipe; thermal influence range; thermal response rate; influencing factors