

文章编号: 1006-7329(1999)05-0021-06

地源热泵地下垂直埋管换热器的试验研究

刘宪英 王勇 胡鸣明 魏唐棣

(重庆建筑大学 城市建设学院 400045)

21-26

TK172

F11232.2

TU111.1

摘要 介绍了地源热泵的发展意义及前景,参照国外地下埋管换热器岩土温度场的求解方法,采用线源理论及热阻网络分析方法建立了传热模型,提出了采用计算法确定大地初始温度并与实测值进行了对比。在建设的垂直埋管换热器试验装置上进行了单管、三管串联运行试验,为开发地源热泵技术提供了可供参考的数据。

关键词 地源热泵; 地下垂直埋管换热器; 传热模型 空调设备

中图法分类号 TU111.1

文献标识码 A

由于地源热泵具有可利用地下岩土这个到处都有的低位热源,夏热冬冷地区大地初始温度一般在 15~20℃左右,因此可降低夏季制冷,冬季供暖的能耗;它可利用大地的蓄热能力,夏季利用冬季蓄存的冷量供冷,同时蓄存热量以备冬用;冬季利用夏季蓄存的热量供热,同时蓄存冷量以备夏用,地下蓄能系统冷热联供冬夏两季都能充分发挥效益。它克服了目前广为采用的风冷热泵空调器对建筑外观的破坏和夏季排热、冬季排冷,以及噪声等对住宅热环境造成的进一步恶化;地下埋管换热器蓄能系统运行简单,管理方便,基本不需维护;地下埋管可环绕住宅设置,可布置在花园、草坪、农田下面或湖泊、水池内;也可在建筑施工时埋于底层地面以下;可布置在土壤、岩石及地下水层内,不必远距离输送,不必大面积开挖,也不占用地面。为此,地源热泵实是一种既节能、对环境又无害的绿色空调设备,符合我国可持续发展的要求。

1 地下埋管换热器传热理论模型

1.1 传热模型的采用

参照国外地下埋管换热器岩土温度场的求解方法^[1],采用线源理论及热阻网络分析方法建立传热模型。线源理论就是把地下埋管换热器的中心轴线视为线热源,以该轴为中心呈辐射状向周围传热。由于线热源只有长度量,无面积量,而距线热源不同距离的各个传热面的面积在变化,因此通常以单位面积传热为基础定义的传热系数分析使用不方便;另外,在实际运用过程中,总换热量主要取决于换热器的长度;在造价上,地下埋管换热器部份的成本也主要取决于钻孔深度或土方的开挖量,而换热器本身的成本仅占小部分。为了对不同换热器进行比较,文中引入一个新的概念——平均传热系数,定义为换热器内介质温度与大地初始温度每相差点 1℃,通过长度 1 m 的孔洞(或管长),单位时间传递的热量,用符号 K 表示,单位为 $w/m \cdot ^\circ C$ 。

1.2 传热热阻分析

对地下埋管换热器的研究,很重要的是进行热阻分析,地下埋管换热器在传热过程中存在 6 个阶段对应的热阻,其传热热阻网络见图 1。下面以套管式换热器为例,分析其各热阻。

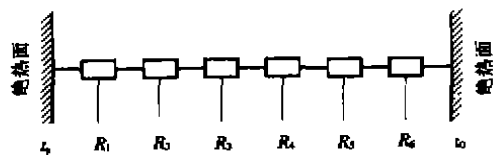


图 1 地下埋管换热器传热热阻网络

收稿日期: 1999-06-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目, NO: 59778007

作者简介: 刘宪英(1936-),男,河北省唐山市人,重庆建筑大学教授,主要从事制冷空调节能方面的研究。

- R_1 ——套管内对流换热热阻;
 R_2 ——套管管壁热阻;
 R_3 ——套管外管壁与回填填料的接触热导系数热阻;
 R_4 ——回填填料的导热热阻;
 R_5 ——回填填料与孔壁的接触热导系数热阻;
 R_6 ——大地热阻,即岩土总热阻(也称热源外阻, $R_1 \sim R_5$ 之和称热源内阻),其值为:

$$R_6 = (t_{m \cdot r} - t_0) / q \quad (1)$$

式中 $t_{m \cdot r}$ ——孔洞壁面温度;

t_0 ——大地初始温度;

q ——通过 1m 长孔洞壁面交换的热量, W/m。

$$q = K \cdot \Delta t = [1 / (R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6)] (t_p - t_0) \quad (2)$$

式中 t_p ——套管内水的平均温度。

埋地 U 形管换热器的热阻情况与套管式基本相同,仅是具体热阻值有所不同,有关各热阻计算公式见文献[2]。

1.3 各热阻值的讨论

根据建设的实验装置,与热阻计算有关的具体数据如下:重庆地下大多为砂岩,经现场取样,实验室测试,其热工参数为:密度

$\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$, 导热系数 $\lambda_0 = 2.03$

W/m, 比热 $C = 0.256 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$, 导热

系数 $a = 9.2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 。埋地套管:

孔洞直径 110 mm, PVC 套管 $\phi 98 \times$

4mm, PVC 导热系数 $\lambda_2 = 0.21 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ 。埋地 U 形管为 $\phi 31 \times 3 \text{ mm}$, 其它同套管。套管及 U 形管与孔壁之间的间隙回填介质,均采用钻孔排出的砂岩浆,其导热系数与砂岩近似相同。管内介质为水,水流量为 100 L/h, 平均水温 $t_p = 37.5^\circ\text{C}$, 按恒热流计算,其各热阻计算值,见表 1。

在实际工程中,由于孔洞尺寸和埋管管径均限制在一定范围内,因此降低热源内阻,主要措施是增大埋管内的对流换热系数,降低回填物与管壁、孔壁的接触热导系数,增大填料的导热系数等。

1.4 换热过程中地温变化及大地热阻 R_6 计算

1.4.1 换热过程地温变化的计算机分析

单孔地下换热器可模拟为一单管线热源。大地为一无限大物体,初始温度为常数 t_0 , 从时间 $\tau = 0$ 时持续地释放热量(冬季为持续地吸收热量,假定放热为-,吸热为+),放热率为 $q(\tau)$ 。整个过程为二维非稳态导热,把 $0 \sim \tau$ 的时间过程分割成无数个微小的时间间隔,则该持续线热源可看做不同时刻 τ_1 的瞬间释放热量 $q(\tau_1) d\tau'$ 的无穷多个顺序排列的瞬间线热源的集合,取 τ' 时刻的瞬间 $d\tau'$ 来分析。该时刻的瞬间线热源在其后的一段时间 $\tau - \tau'$ 内。将在物体中引起微小温度变化,根据文献[3],可用下式表示:

$$d\theta = \frac{q(\tau') d\tau' / (\rho c)}{4\pi a (\tau - \tau')} \exp\left[-\frac{r^2}{4a(\tau - \tau')}\right] \quad (3)$$

式中 $r^2 = (x - x')^2 + (y - y')^2$, r 是点 (x, y) 与线热源之间的距离, m。

对上式进行一定的变换,并引用新变量 $\eta = \frac{r^2}{4a(\tau - \tau')}$, 令 $q = \text{常数}$, 可得

$$\theta_{(x, y, \tau)} = \frac{q}{4\pi\lambda} \int_{r^2/4a\tau}^{\infty} \frac{1}{\eta} \exp(-\eta) d\eta = -\frac{q}{4\pi\lambda} E_1\left(-\frac{r^2}{4a\tau}\right) \quad (4)$$

$$E_1(x) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\eta} \exp(1-\eta) d\eta = \int_1^{\infty} \frac{1}{\xi} \exp(-x\xi) d\xi, \quad x > 0 \quad (5)$$

式中, ξ 为无量纲变数, $\xi = \eta/x$, $E_{i(\xi)}$ 称为指数积分, θ 为过余温度, $\theta_{(\tau, r)}$ 即 τ 时刻, 距线热源 r 远处的大地温度与大地初始温度(理论上为离线热源无限远处大地温度)的差。利用计算机程序可算得进出水平均温度(本例取 37.5°C)的情况下, 连续运行数小时后孔壁处或某 r 处的过余温度。由于地源热泵一般都是间歇运行, 同理也可计算出按不同停机比情况下, 距线热源 r 处的过余温度值, 实验验证, 计算值与实测值能较好吻合。

利用同一程序可算出不同运行工况下, 径向距离 1.5 m 和 3 m 处过余温度值, 通过这一值可以确定地下垂直埋管之间的距离。计算结果是连续运行 85 h , 径向 1.5 m 处过余温度小于 0.1°C ; 连续运行 380 h , 过余温度才达到 1°C 左右。如果间歇运行, 过余温度将比上述值更小。为此, 可以得到结论: 短时间或间歇运行的换热器管间距取 1.5 m , 长时间连续运行的管间距取消 $2\sim 3\text{ m}$ 为好。

1.4.2 大地热阻 R_0 的计算

根据(1)式对大地热阻的定义, 可有

$$R_0 = \frac{t_{\eta \cdot \tau} - t_0}{q} = \frac{\theta_{(\eta \cdot \tau)}}{q} = -\frac{1}{4\pi\lambda} E_i\left(-\frac{r_0^2}{4a\tau}\right) = \frac{1}{4\pi\lambda} E_i\left(\frac{r_0^2}{4a\tau}\right) \quad (6)$$

式中 $\theta_{(\eta \cdot \tau)}$ ——第 τ 时刻, r_0 处(即孔壁处)的过余温度值, $^\circ\text{C}$ 。

将大地的 λ 、 a 、 t_0 和设定的 q 值输入计算机, 使用自编的程序, 可求得连续运行各时刻的 R_0 值。同理, 也可求出间歇运行, 不同开、停机比情况下的 R_0 值。计算需往返多次才能得到正确结果。计算值与实测值较好吻合^[2], 限于篇幅, 有关计算值与实测值的对比从略。

2 大地初始温度(地温)的确定

由于实际工程地点各异, 埋管深度不同, 实测地温比较困难, 本文采用计算方法确定, 并与实测值进行了比较。地温受地表面温度年周期性变化和日周期性变化的影响, 发生周期性变化。地温周期性变化的幅值随地层深度的增加按自然指数规律减小, 由于日周期性波动的周期小, 工程上一般不考虑地表面温度日周期性变化对地温的影响。

地温 $t_{(y, \tau)}$ 随地层深度 y 和时间 τ 的变化按下式计算^[4]:

$$t_{(y, \tau)} = t_{cp} + \theta_d e^{-\sqrt{\frac{w}{2a}}y} \cos\left(w\tau - \sqrt{\frac{w}{2a}}y\right) \quad (7)$$

式中 y ——从地表面算起的地层深度; τ ——从地表面温度年波幅出现算起的时间; $t_{(y, \tau)}$ ——在 τ 时该, 深度 y 处的地温; t_{cp} ——地表面年平均温度; θ_d ——地表面年周期性波动波幅; w ——温度年周期性波动频率; $w = 2\pi/T = 0.00717$; T ——温度年波动周期, $T = 8760\text{ h}$ 。

根据中央气象局 1964 年版(中国地温)提供的重庆地表面年平均温度 $t_{cp} = 19.5^\circ\text{C}$, 年周期性波幅 $\theta_d = 13.2^\circ\text{C}$, 可计算出 $y = 1\sim 10\text{ m}$ 地温(计算年波幅从 1 月 15 日算起), 其平均值见表 2, 实测值(逐日实测平均值)与计算值对比见表 3。

表 2 地温计算值

温度 ℃	月 份											
	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
-1--10 m 地温平均值	18.08	17.25	17.02	17.45	18.44	19.70	20.92	21.75	21.98	21.55	20.57	19.30

从表 3 看出, 计算值与实测值非常接近。8 个月的两者比较, 最大偏差为 $+1.55^\circ\text{C}$, 平均偏差为 $+0.39^\circ\text{C}$ 。为此建议: 为便于推广地源热泵和简化实测的工作量, 地温可用上述计算方法确定, 即取实际埋管深度地温的计算平均值作为依据。冬季地源热泵 1 月份供热负荷最大; 夏季 7 月份供冷负

荷最大,为此地源热泵计算,冬季取 1 月份地温平均值;夏季取 7 月份地温平均值。根据本计算实测结果,重庆冬季大地初始温度近似取 18℃,夏季取 21℃。

表 3 地温计算值与实测值对比

月份		-2 m	-3 m	-6 m	-9 m	月份		-2 m	-3 m	-6 m	-9 m
9	计算值℃	25.82	24.40	20.59	19.27	1	计算值℃	14.10	16.80	20.22	20.17
	实测值℃	26.30	25.48	22.66	20.82		实测值℃	14.20	16.70	19.68	19.65
10	计算值℃	23.69	23.61	21.18	19.62	2	计算值℃	12.73	15.11	19.29	20.02
	实测值℃	24.44	23.55	21.70	20.59		实测值℃	13.08	15.45	18.92	19.78
11	计算值℃	20.44	21.71	21.31	19.94	3	计算值℃	13.18	14.60	18.41	19.73
	实测值℃	20.85	21.42	20.99	20.38		实测值℃	13.35	15.14	18.82	19.95
12	计算值℃	16.93	19.72	20.97	20.14	4	计算值℃	15.31	15.40	17.82	19.38
	实测值℃	17.54	20.36	21.23	20.53		实测值℃	14.87	15.70	18.04	19.77

3 实验系统及运行情况

3.1 单管模拟实验

实验用垂直埋管 3 根,如图 2 所示,深度均为 10 m,钻孔直径 $\phi 110$ mm,2 号及 3 号孔均为 dN25 的 PVCU 形管,1 号孔除设有 U 形管外,还装有 dN90 mm 的 PVC 套管。孔内回填物 2 号孔用砂浆,3 号和 1 号孔套管周围的缝隙用钻孔回收的砂岩浆回填。文献[2]对试验方法及试验结果进行了详细讨论,得到了夏季换热(进水 35℃,流量 100 L/h)单管换热器平均传热系数的回归方程:

$$\text{套管式: } K = 3.14 + 1.82 \tau^{-0.04} \text{ W/m} \cdot \text{℃} \quad (9)$$

$$\text{U 形管(填料为砂岩浆): } K = 2.69 + 0.95 \tau^{-0.32} \text{ W/m} \cdot \text{℃} \quad (10)$$

结论是套管优于 U 形管,砂岩浆填料优于砂浆填料。

3.2 U 形管串联运行试验

1998 年冬、夏连续进行了 U 形三管串联运行试验,其实验方法是把 1、2、3 号孔 U 形管换热器连接起来,利用电加热器把水箱内水加热到 35℃(夏)和 10℃(冬),利用转子流量计测试水量,温度由 TV08 数字采集仪 + 铜 - 康铜热电偶测试。测试结果见表 4^[5]。

表 4 U 形三管串联运行试验结果

测试时间	测试项目					
	水流量 l/h	进水温度 ℃	出水温度 ℃	换热量 W	单位孔深换热量 W/m	平均传热系数 W/m·℃
1998年7月10-19日连续运行10d的平均值	305	35.10	31.30	1 348	44.9	3.68
	201	34.95	30.65	1 005	33.5	2.84
1998年1月10-19日连续运行10d的平均值	298	10.1	14.20	1 421	47.37	8.09
	203	10.2	14.90	1 109.6	36.98	6.78

3.3 套管三孔串联运行试验

根据单管试验结果,为了研究地下管群换热器的传热规律,建设了地下管群试验装置(见图

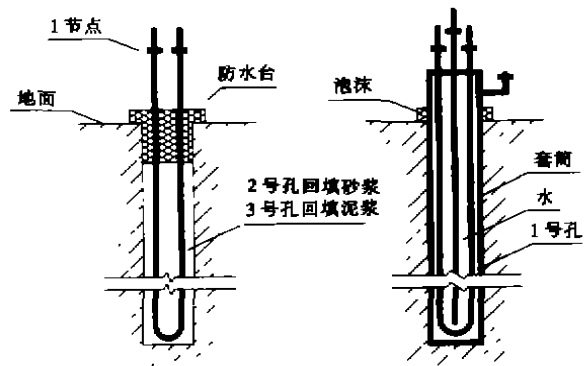


图 2 单管实验装置

3) 管群埋管采用套管形式, 钻孔直径 100 mm, 套管直径为 dN50、75 和 90 mm 三种, 孔洞深均为 10 m。埋管分为五排, 每排三根套管, 管路为串联连接, 整个水系统为同程式, 室内设流量计、水泵、板式换热器和热泵空调器。套管外管壁或孔洞边沿、水管进、出口及室内、外均装有铜 - 康铜热电偶测温点, 二次仪表用经严格标定的 WP - L80 型带打印多路巡回测量显示控制仪 (精度 0.2%), 水流量用转子流量计测试。为了研究水平埋管的换热规律和利用地热的冷暖地板研究, 室外还建设了 3 × 4 m 的二层水平埋管, 埋深分别为 1m 和 2 m, 管长为 50 m; 室内设计了盘管地板。

该装置于 1998 年 8 月建成, 经调试和试运行, 10 月 11 日正式投入测试。12 月 3 日开始进行热泵供暖运行, 运行设备是在 26 m² 的房间内设 1 台大 1P 风冷热泵空调器, 把空调器原室外侧风冷换热器改为水冷板式换热器。管群换热器只用了第 III 排 dN75 的三根套管。其它排数阀门均关闭, 用水泵使系统内水循环。空调器 24 h 间歇运行, 开、停机比用时间控制器调定在 6: 15(分) 左右。水 - 空气地源热泵使用三个月来, 运行正常, 工况稳定, 收到了很好的效果。图 4 是 1999 年 1 月 22 日全天运行记录图, 其它天数运行记录基本相同。

从图 4 可得到: 单位时间地下一排 (3 根管) 套管换热器换热量 $Q_k = m c_p \Delta t = 385(14.65 - 10.92) \times 1.163 = 1670 \text{ W}$; 单位孔深换热量 $q_k = 1670 / (3 \times 10) = 55.67 \text{ W/m}$; 平均传热系数 $K = 55.67 / (18 - 12.79) = 9.26 \text{ W/m} \cdot \text{C}$; 维持 26 m² 房间室内温度 17 ~ 18 C, 单位时间单位面积耗电量为 $4.91 \text{ kWh} / (26 \times 24) = 7.86 \text{ W/m}^2$ 。根据文献 [6] 规定, 节能住宅冬季采暖用电量指标为 16 W/m², 上述地源热泵运行实际耗电量 7.86 W/m², 不仅能满足节能标准规定, 而且比规定的指标还低 51%, 表明开发和推广地源热泵技术和设备具有很大的经济和社会效益。

5 结 论

1) 采用线热源理论及热阻网络分析方法, 建立地下岩土埋管传热模型是可行的, 其计算结果与实测结果能较好的吻合。

2) 经实测验证, 地温采用余弦函数法计算, 有一定的参考和实用价值。

3) 通过单管和三管串联地下 U 管和套管换热器的运行试验结果表明: 套管换热器具有传热系数高, 单位管长换热量大等优点, 是一种很有前途的地下换热器形式。

4) 经 3 个月来的地下套管换热器与水 - 空气热泵的冬季联合运行, 工况稳定, 效果明显, 表明地源热泵具有重大的节能意义。

5) 有关地下管群换热器的试验理论模型进一步的检验和完善, 夏季运行效果, 管群换热器的强化传热及与室内热泵设备的匹配等工作, 正在进行中, 此处不做详述。

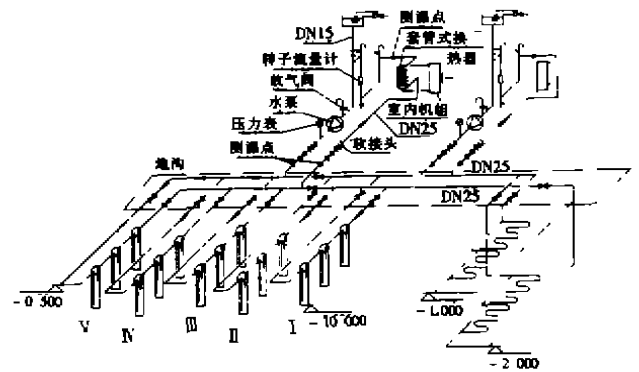


图 3 地源热泵地下埋管系统原理图

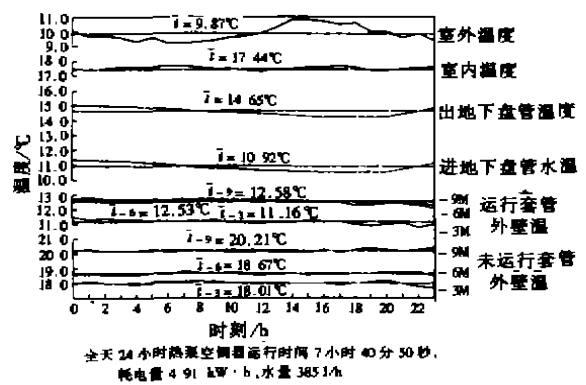


图 4 1999 年 1 月 22 日地源热泵运行记录

参 考 文 献

- [1] D. A. Ball et al. Design Method for GSHP[J]. ASHRAE Trans, DC - 83 - 03, p416 ~ 440
- [2] 王 勇, 等. 地源热泵的套管式地下换热器研究[J]. 重庆建筑大学学报, 1997(5): 13 ~ 17
- [3] 张洪济. 热传导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992. 10
- [4] 《地下建筑暖通空调设计手册》编写组. 地下建筑暖通空调设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983. 6
- [5] 曾 森. 地源热泵地下换热器换热计算模拟与实验研究[D]. 重庆建筑大学研究生论文, 1998 年 12 月
- [6] 重庆市地方标准, DB50/5009 - 1999 重庆市民用建筑热环境与节能设计标准(居住建筑部分)[S]. 重庆市技术监督局重庆市建设委员会联合发布, 1999. 5

Experimental Research on Vertical Buried Tube Type of Underground Exchanger for Ground - Source Heat Pump

LIU Xian-ying WANG Yong HU Ming-ming WEI Tang-di

(Faculty of Urban Construction Engineering, Chongqing Jianzhu University, 400045, China)

Abstract This paper introduces the importance of developing the Ground - Source Heat pump and describes the prospects of it. with the method used abroad to acquire the temperature profiles within surrounding soil of the underground heat exchanger with buried tubes, in this paper the line heat source theory and thermal resistance network analysis method were used to set up the heat transfer model. The original temperature of the ground is determined by calculation and is compared with test results. Experiments of running single tube and running three series connection tubes are carried out on the built underground exchangers of vertical buried tube type. And the data which can provide reference for the Ground - Source Heat pump technique are acquired.

Key Words Ground - Source Heat pump; Vertical Buired Tube Type of Underground Exchanger; Heat Transfer Model