

土壤源地源热泵地埋管换热器管群换热分析

汤昌福^{1,2}, 张文永^{1,2}, 朱文伟^{1,2}, 俞显忠^{1,2}, 刘桂建³

(1. 安徽省煤田地质局勘查研究院, 安徽合肥 230088; 2. 合肥市浅层地热能工程技术研究中心, 安徽合肥 230088;
3. 中国科学技术大学地球与空间科学学院, 安徽合肥 230026)

摘要:基于线热源理论和叠加原理建立了土壤源地源热泵地埋管换热器管群地下传热基本数学模型,并运用拉普拉斯变换和数值反演技术进行了求解. 研究了埋管进口流体温度相同时,地埋管换热器管群连续运行换热能力和出口流体温度变化规律. 研究表明,换热初期管群各埋管换热能力和单埋管时相同;随着换热的进行,由于热干扰影响,各埋管的换热能力低于单个钻孔情形,出口流体温度比单个钻孔的出口温度高;埋管间距越大,管群埋管之间的热干扰越小.

关键词:管群;线热源;叠加原理;拉普拉斯变换

中图分类号:TK529 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2014.11.006

引用格式: Tang Changfu, Zhang Wenyong, Zhu Wenwei, et al. Heat transfer analysis of a multi-borehole heat exchanger of ground source heat pump systems[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014, 44(11):921-925.

汤昌福, 张文永, 朱文伟, 等. 土壤源地源热泵地埋管换热器管群换热分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2014, 44(11):921-925.

Heat transfer analysis of a multi-borehole heat exchanger of ground source heat pump systems

TANG Changfu^{1,2}, ZHANG Wenyong^{1,2}, ZHU Wenwei^{1,2}, YU Xianzhong^{1,2}, LIU Guijian³

(1. Exploration Research Institute, Anhui Provincial Bureau of Coal Geology, Hefei 230088, China;
2. Hefei Research Center of Shallow Geothermal Engineering and Technology, Hefei 230088, China;
3. School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Based on the line source theory and superposition principle, a mathematical model for heat transfer underground with a multi-borehole heat exchanger of ground source heat pump (GSHP) was developed and solved by the Laplace transformation and numerical inverse technique. Variations of heat transfer capacity and outlet fluid temperatures were studied with uniform inlet fluid temperatures for all boreholes. It is found that at an early stage, performance of each of the multiple boreholes is the same as that of a single borehole. However, performance of the multi-borehole heat exchanger is reduced due to the interference among the boreholes. The average heat flux is lower and outlet fluid temperature is higher than that of a single borehole. In addition, the interference can be weakened when the spacing of the multiple boreholes is larger.

Key words: multi-borehole; line source; superposition principle; Laplace transformation

收稿日期:2014-07-21;修回日期:2014-10-27

基金项目:安徽省国土资源厅公益性基金项目(安徽省地勘基金 2009-36)资助.

作者简介:汤昌福,男,1982年生,博士.研究方向:资源与环境保护. E-mail: cftang@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:刘桂建,教授. E-mail: lgj@ustc.edu.cn

0 引言

土壤源地源热泵系统具有环保高效的特点,近年来在我国获得广泛推广和应用.在实际工程应用中,地源热泵系统地下换热器由多个钻孔组成(管群).此外,由于场地的限制,钻孔之间的间距是一定的,管群埋管之间的换热存在干扰,与单个钻孔情形相比,其换热能力将被削弱.因此,地埋管换热器管群的换热分析对于地源热泵系统的设计非常重要.目前大部分研究都是针对单个钻孔进行,关于管群效应对地埋管换热器地下换热特性的影响方面的研究较少.

Eskilson^[1]运用线源理论和叠加原理分析了每个钻孔周围的土壤热阻.Zhang^[2]运用有限元方法分析了钻孔布置、钻孔大小、岩土导热系数以及钻孔间距对多钻孔换热的影响.上述研究中,作者基于单个钻孔定义了换热系数考察钻孔之间的换热干扰.李新国等^[3]采用专业的多孔介质模拟软件研究了不同工况下 U 型垂直埋管换热器管群地下温度变化规律及其对地源热泵应用效果的影响,并建议当冷热负荷相差较大时采用混合式地源热泵系统.何雪冰等^[4]介绍了地源热泵地下埋管换热器传热模型的理论基础和应用方法,并提出采用管群换热修正系数计算埋管之间的干扰对埋管换热的影响.高青等^[5-6]基于有限元传热分析平台分析了地源热泵地下群井多源换热及运行模式影响规律,探讨了地下初始温度、井群基本构造尺寸等对地下土壤温度场分布的影响.研究发现土壤源热泵地下群井应用中影响因素关系复杂,存在交互影响,要充分认识多热源群井的运行特性,才能充分利用地下热能.纪世昌等^[7]在单根 U 型垂直埋管传热模型的基础上建立了管群的传热模型,运用 Matlab 软件进行了求解,并模拟了夏季制冷工况下热泵连续运行时地埋管管群周围温度场的变化情况.

上述研究大都基于有限元计算平台^[2,4-6],并假设各埋管的换热量相同^[1,4-7].然而在实际应用过程中,循环流体从同一个分水器和进入各个埋管,管群各个埋管入口流体温度可以认为是相同的,而埋管的换热能力会有所不同.本文基于叠加原理和线热源理论,建立了地埋管管群地下换热模型,并运用拉普拉斯变换进行求解,分析了进口流体温度相同时地埋管换热器连续运行时管群的换热规律.

1 基本数学模型

1.1 单个钻孔传热模型

假设:①无限大均质地层,地下换热满足线热源假设,埋管沿长度方向传热量忽略,岩土层导热系数 λ ,体积热容 ρc ,地层初始温度 T_0 ;②钻孔深度 H ,钻孔半径为 r_b ,钻孔内稳态传热过程,总热阻为 R_{bt} ,钻孔与岩土层之间延米换热量为 q ;③埋管进口温度 T_{in} 保持不变,循环流体质量流量 \dot{m}_f 保持不变.根据线热源理论,恒定单位延米换热量 ($q=1 \text{ W/m}$) 地下温度响应 T_u 满足^[8]

$$T_u - T_0 = \left[\frac{1}{4\pi\lambda} \right] \cdot Ei \left[\frac{r^2}{4\alpha t} \right] \quad (1)$$

式中, α 为热扩散系数, $\alpha = \lambda/(\rho c)$; Ei 为累积分函数,

$$-Ei(-x) = \int_x^\infty \left[\frac{e^{-u}}{u} \right] du \quad (2)$$

当延米换热量 q 随时间发生变化时,地下温度可以根据卷积方法计算^[1,8],

$$T(t) - T_0 = \int_0^t \left[q(t-\tau) \cdot \frac{dT_u}{d\tau} d\tau \right] \quad (3)$$

埋管内流体平均温度 T_f 为

$$T_f(t) - T_0 = \int_0^t \left[q(t-\tau) \cdot \frac{dT_u}{d\tau} d\tau \right] + q \cdot R_{bt} \quad (4)$$

此外,根据能量守恒,埋管内进口温度 T_{in} 、出口温度 T_{out} 、流体平均温度 T_f 满足

$$q = (\beta/2) \cdot (T_{in} - T_{out}), \beta = 2\dot{m}_f c_f / H \quad (5a)$$

$$T_f = (T_{in} + T_{out})/2 \quad (5b)$$

联合式(5a)和(5b)可以得到,

$$T_f = T_{in} - q/\beta \quad (6a)$$

$$T_{out} = T_{in} - 2q/\beta \quad (6b)$$

将式(6a)代入方程式(4),得到流体入口温度方程

$$T_{in} - T_0 = \int_0^t \left[q(t-\tau) \cdot \frac{dT_u}{d\tau} d\tau \right] + q \cdot R_{bt} + q/\beta \quad (7)$$

为求解方便,对方程进行无量纲化,定义如下无量纲量,

$$T_D = \frac{T - T_0}{T_{in} - T_0}, q_D = \frac{q}{2\pi\lambda(T_{in} - T_0)}$$

$$R_D = 2\pi\lambda \cdot (R_{bt} + \frac{1}{\beta}), r_D = \frac{r}{r_b}, t_D = \frac{\alpha t}{r_b^2}$$

方程(1)和(7)无量纲形式可以写为

$$T_{wD}(t_D, r_D) = \frac{1}{2} \cdot \text{Ei} \left[\frac{r_D^2}{4t_D} \right] \quad (8)$$

$$1 = \int_0^{t_D} \left[q_{D,j}(t_D - \tau) \cdot \frac{dT_{wD}}{d\tau} d\tau \right] + q_{D,i} \cdot [2\pi\lambda \cdot (R_{bt} + 1/\beta)] \quad (9)$$

1.2 管群传热模型

设共有 N 个钻孔, 钻孔 $i (i=1, 2, \dots, N)$ 位置 (x_{wi}, y_{wi}) , 深度均为 H, 钻孔延米换热量为 $q_i(t)$. 根据叠加原理, 可以得到钻孔 i 中埋管流体温度满足^[1,8]

$$T_{fD,i} = \sum_{j=1}^N \int_0^{t_D} \left[q_{D,j}(t_D - \tau) \cdot \frac{dT_{wD}}{d\tau} d\tau \right] + q_{D,i}(t_D) \cdot R_{D,i} \quad (10)$$

钻孔 i 内埋管进口流体温度满足

$$1 = \sum_{j=1}^N \int_0^{t_D} \left[q_{D,j}(t_D - \tau) \cdot \frac{dT_{wD}}{d\tau} d\tau \right] + q_{D,i}(t) \cdot R_{Di} \quad (11)$$

1.3 模型求解

1.3.1 拉普拉斯变换

函数 $f(t)$ 的拉普拉斯变化定义为^[9]

$$L[f(t)] = \bar{f}(s) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt \quad (12)$$

式中, s 为拉普拉斯变量; $\bar{f}(s)$ 为函数 $f(t)$ 的变换函数. 温度响应 T_{wD} 的拉普拉斯变换为^[9]

$$L[T_{wD}(t_D, r_D)] = L \left[\frac{1}{2} \cdot \text{Ei} \left[\frac{r_D^2}{4t_D} \right] \right] = \frac{K_0(r_D \sqrt{s})}{s} \quad (13)$$

式中, K_0 为 0 阶第二类修正贝塞尔函数. 对方程 (11) 进行拉普拉斯变化,

$$1/s = \sum_{j=1}^N \bar{q}_{D,j} \cdot \bar{sT}_{wD}(r_{Dj}) + \bar{q}_{D,i} \cdot R_{Di}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

方程 (14) 矩阵形式可以表示为

$$\begin{pmatrix} \bar{sT}_{wD,1} + R_{D1} & \bar{sT}_{wD,2} & \dots & \bar{sT}_{wD,N} \\ \bar{sT}_{wD,2,1} & \bar{sT}_{wD,2} + R_{D2} & \vdots & \bar{sT}_{wD,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{sT}_{wD,N,1} & \bar{sT}_{wD,N,2} & \dots & \bar{sT}_{wD,N} + R_{DN} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{q}_1 \\ \bar{q}_2 \\ \vdots \\ \bar{q}_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/s \\ 1/s \\ \vdots \\ 1/s \end{pmatrix} \quad (15)$$

运用高斯消元法求解方程 (15) 可以得到拉普拉斯空间钻孔的延米换热热量 $\bar{q}_i (i=1, 2, \dots, N)$.

1.3.2 拉普拉斯反变换——Stehfest 数值反演

Stehfest 于 1970 年^[10] 建立了 Stehfest 数值反演方法, 将复杂的拉普拉斯空间函数反演到时域空间. Stehfest 数值反演公式为^[9-10]

$$f(t) = \left[\frac{\ln 2}{t} \right] \cdot \sum_{i=1}^M V_i \bar{f} \left[\frac{\ln 2}{t} i \right] \quad (16)$$

式中, M 为偶数 (这里取 $M=8$). 系数 V_i 和项数 M 有关,

$$V_i = (-1)^{C_{M/2+i}} \cdot$$

$$\sum_{k=\lceil \frac{i-1}{2} \rceil}^{\min(i, \frac{M}{2})} \left[\frac{k^{C_{M/2+i}} (2k)!}{(M/2-k)! k! (k-1)! (i-k)! (2k-i)!} \right] \quad (17)$$

因此, 在获得拉普拉斯空间钻孔的延米换热热量 $\bar{q}_i(s)$ 后, 即可以通过 Stehfest 数值反演方法获得各个埋管时域空间延米换热热量 $q_i(t)$, 进一步可以得到埋管流体出口温度 $T_{out,i}(t) (i=1, 2, \dots, N)$.

2 结果分析

运用上述方法研究了地理管换热器 3×3 管群运行特性. 参数设置如下: $T_0=18 \text{ }^\circ\text{C}$, 岩土导热系数 $2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; 岩土体积热容 $2000 \text{ kJ}/(\text{K} \cdot \text{m}^3)$; 钻孔直径 126 mm , 埋管内径 27 mm , 外径 32 mm ; 埋管钻孔内热阻相同, $R_{bt}=0.12 \text{ m} \cdot \text{K}/\text{W}$; 循环流体为水, 埋管内流体速度 0.6 m/s ; 入口温度 $T_{in}=33 \text{ }^\circ\text{C}$; 埋管间距 6 m . 管群布置如图 1 所示.

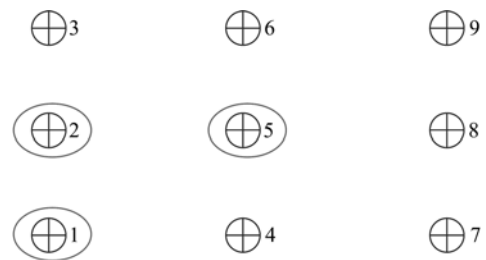


图 1 地理管换热器 3×3 管群布置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of 3×3 multi-borehole for ground heat exchanger

图 2 给出了连续运行 100 d, 地理管换热器各埋管延米换热量和流体出口温度的变化情况. 从图 2 可以发现, 随着换热的进行, 延米换热热量不断减小, 出口温度逐渐升高. 在运行早期, 各钻孔之间不存在干扰或干扰很小, 各埋管延米换热热量相同. 随着换热的进行, 各个钻孔之间开始产生干扰, 各埋管运行特性偏离单个钻孔情形: 管群埋管平均换热能力小于

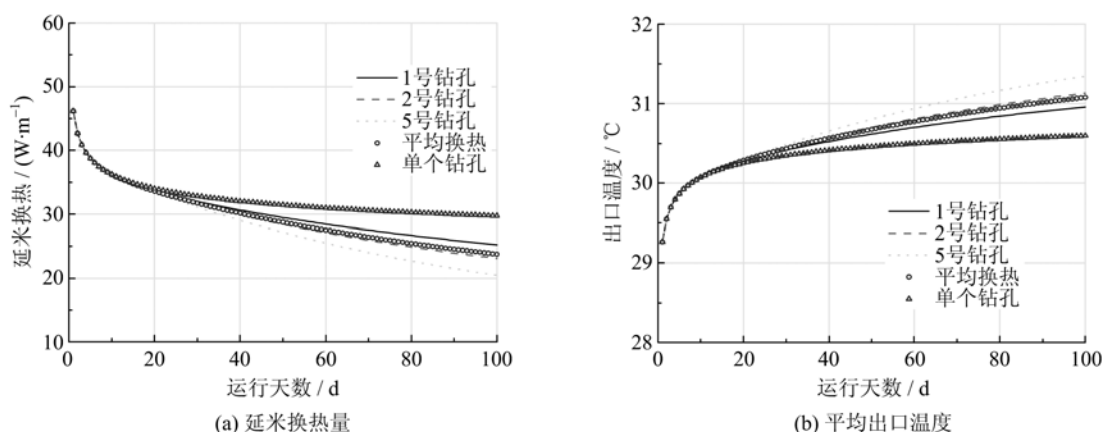


图 2 管群换热动态特性

Fig. 2 Heat exchange performance of multi-borehole

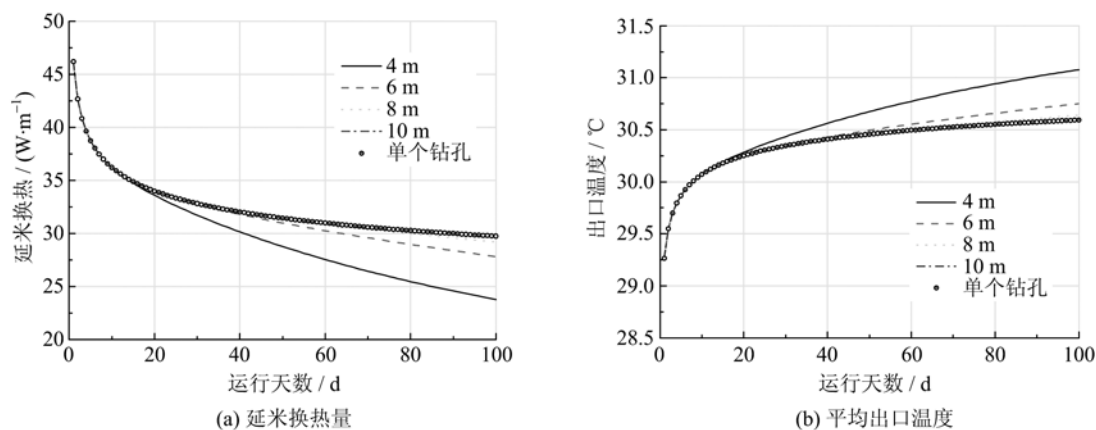


图 3 钻孔间距对管群换热动态特性的影响

Fig. 3 Effects of borehole space on heat exchange performance of multi-borehole

单个钻孔情形,平均出口温度也高于单个钻孔时流体出口温度.并且,由于5号钻孔位于管群中间,受四周钻孔的影响,热干扰最严重,延米换热量下降最大,流体出口温度最高;1号钻孔位于管群的边角,受热干扰影响最小,换热能力下降较小,流体出口温度比5号低.

图3计算了钻孔间距(4,6,8,10 m)对地埋管换热器管群传热动态特性的影响:间距越大,干扰影响发生的时间越晚,同期管群换热能力越大,出口温度越低.埋管间距10 m时,管群单个埋管平均延米换热量以及平均出口温度和单个钻孔时几乎相同.因此,在实际应用过程中,在场地允许的情况下可以加大钻孔间距以减少管群埋管之间热干扰的影响.

3 结论

本文建立了地埋管换热器管群地下传热基本模

型,并运用拉普拉斯变换和 Stehfest 数值反演方法进行求解,研究了各埋管进口温度相同时埋管布置形式为 3×3 管群的地下换热动态特性:

(I) 由于热干扰的影响,管群各埋管换热能力低于单个钻孔情形,出口流体温度比单个埋管出口温度高;各埋管所受到热干扰大小和埋管在管群中的位置有关,其换热能力降低程度(和单个钻孔情形相比)也有所不同;

(II) 管群间距越大,热干扰发生的时间越晚,换热能力降低程度越小.在实际地埋管换热器管群设计中,可适当增加埋管间距以减小热干扰的影响.

参考文献 (References)

- [1] Eskilson P. Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes [D]. Lund, Sweden: Lund Institute of

- Technology, 1987.
- [2] Zhang Q. Heat Transfer Analysis of Vertical U-tube Heat Exchange in a Multiple Borehole Field for Ground Source Heat Pump Systems [D]. Lexington, USA: University of Kentucky, 1999.
- [3] Li Xinguo, Zhao Jun, Zhou Qian. Numerical simulation on the ground temperature field around U pipe underground heat exchangers [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2004, 21(3): 703-707.
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, 21(3): 703-707.
- [4] He Xuebing, Ding Yong, Liu Xianying. Heat transfer model and application of buried tube heat exchanger for ground source heat pump [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2004, 26(2): 76-80.
何雪冰, 丁勇, 刘宪英. 地源热泵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): 76-80.
- [5] Gao Qing, Li Ming, Yan Yan. Effect on ground source field heat transfer of original earth temperature and configuration of multi-boreholes [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2005, 4(1): 34-40.
高青, 李明, 闫燕. 群井地下换热系统初温和构造因素影响传热的研究 [J]. 热科学与技术, 2005, 4(1): 34-40.
- [6] Gao Qing, Li Ming, Yan Yan. Operation strategy on the heat transfer enhancement in the underground multi-boreholes [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2006, 27(1): 83-89.
高青, 李明, 闫燕. 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): 83-89.
- [7] Ji ShiChang, Hu Pingfang. Research on thermal disturbance among U-vertical buried multi-pipes [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2007, 7(4): 35-37.
纪世昌, 胡平放. U 型垂直埋管换热器管群间热干扰的研究 [J]. 制冷与空调, 2007, 7(4): 35-37.
- [8] Diao Nairen, Fang Zhaohong. Ground-coupled Heat Pump Technology [M]. Beijing: High Education Press, 2005.
刁乃仁, 方肇洪. 埋管地源热泵技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [9] 孔祥言. 高等渗流力学 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999.
- [10] Stehfest H. Algorithm 368: Numerical inversion of Laplace transforms [J]. Communications of the ACM, 1970, 13(1): 47-49.

(上接第 920 页)

- [21] Wang Weining, Xu Guangquan, He Xiaowen. Distribution and analysis of factors influencing three nitrogen compounds in groundwater of Huaibei Plain [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(2): 45-48.
王伟宁, 许光泉, 何晓雯. 淮北平原地下水三氮浓度分布规律及其影响因素分析 [J]. 水资源保护, 2010, 26(2): 45-48.
- [22] He Jin, An Yonghui, Zhang Fucun. Geochemical characteristics and fluoride distribution in the groundwater of the Zhangye Basin in Northwestern China [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2013, 135: 22-30.
- [23] de Andrade E M, Palácio H A, Souza I H, et al. Land use effects in groundwater composition of an alluvial aquifer (Trussu River, Brazil) by multivariate techniques [J]. Environmental Research, 2008, 106: 170-177.
- [24] Devic G, Djordjevic D, Sakan S. Natural and anthropogenic factors affecting the groundwater quality in Serbia [J]. Science of the Total Environment, 2014, 468: 933-942.
- [25] Li Yasong, Zhang Zhaoji, Fei Yuhong, et al. Improvement of Nemerow index method and its application [J]. Water Resources Protection, 2009, 25(6): 48-50.
李亚松, 张兆吉, 费宇红, 等. 内梅罗指数评价法的修正及其应用 [J]. 水资源保护, 2009, 25(6): 48-50.
- [26] Zhang Bing, Song Xianfang, Zhang Yinghua, et al. Hydrochemical characteristics and water quality assessment of surface water and groundwater in Songnen plain, Northeast China [J]. Water Research, 2012, 46: 2 737-2 748.