

文章编号: 1671-6612 (2019) 03-240-05

# 回填材料对地源热泵系统换热效率的影响分析

王恩琦<sup>1</sup> 黄体士<sup>1</sup> 张方方<sup>1</sup> 贾梦莹<sup>1</sup> 赵强<sup>2</sup>

(1. 山东方亚地源热泵空调技术有限公司 济南 250104; 2. 济南大学 济南 250022)

**【摘要】** 建立了区分岩土和回填区的埋管换热器分区数值分析模型。采用数值分析手段分析了回填材料导热系数在不同埋管间距、不同管径和不同埋管类型中的影响规律, 对回填材料在地源热泵系统中的实际工程应用具有指导意义。

**【关键词】** 地源热泵; 回填材料; 换热效率

中图分类号 TU83 文献标识码 B

## Analysis of the Influence of Backfilling Material on the Heat Transfer Efficiency of Ground Source Heat Pump System

Wang Enqi<sup>1</sup> Huang Tishi<sup>1</sup> Zhang Fangfang<sup>1</sup> Jia Mengying<sup>1</sup> Zhao Qiang<sup>2</sup>

(1. Shandong Fangya GSHP Technology Co., Ltd, Jinan, 250104; 2. University of Jinan, Jinan, 250022)

**【Abstract】** This paper establishes a numerical analysis model for the geothermal heat exchanger partition of geotechnical and backfilling areas. The influence of thermal conductivity of backfill materials on different pipe spacings, different pipe diameters and different buried pipe types was analyzed by numerical analysis. This has guiding significance for the practical engineering application of backfill materials in ground source heat pump system.

**【Keywords】** ground source heat pump; backfill material; heat transfer efficiency

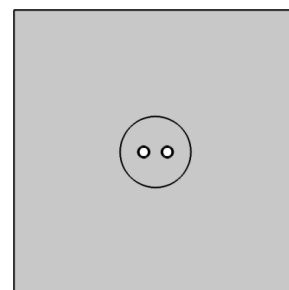
## 0 引言

在地源热泵系统的应用中, 为防止地表水通过钻孔向地下渗透污染地下水以及各个含水层之间的交叉污染, 地下换热器安装完毕后钻孔需要回填。回填材料将地下可利用的浅层地热能传递到换热器中供给系统的运行需要, 其对埋管换热器与土壤之间的换热能力有直接的影响。考虑到回填材料的配比实验只能获取回填材料的物性参数<sup>[1]</sup>, 而现场热响应测试仅能获得埋管换热器的循环水温度响应, 实际现场中的岩土参数由于组分、含水率等不同工况会给回填材料的影响规律分析造成难以预料的难度。因此, 为了研究回填材料对于浅层地热能最佳效率的影响, 本文建立了区分岩土和回填区的埋管换热器分区模型, 采用数值分析手

段分析回填材料对浅层地温能换热效率的影响。

## 1 模型假设

图1给出了单U型、双U型和3U型埋管换热器的一般性几何描述, 需要说明的是在后文具体讨论时参数有所改变。



(a) 单U型埋管换热器

作者简介: 王恩琦 (1968.11-), 男, 本科, 高级工程师, E-mail: sdyater@163.com

通讯作者: 张方方 (1983.12-), 女, 研究生, 工程师, E-mail: zhangfangfang0307@163.com

收稿日期: 2018-12-20



图 1 不同类型的埋地管换热器的几何模型

Fig.1 Geometric model of different types of geothermal heat exchanger

本文建立的埋地管换热器的数值分析模型以下假设为基础:

(1) 一般来讲, 土壤有固相、液相和气相三种物质组成。研究土壤的传热应该同时考虑热湿传递。由于饱和土壤的热导率和含水率有关, 因此热湿传递对于土壤的传热的影响显得尤为显著。在我们研究的问题中, 运行工况下土壤的温度一般在 0~40℃ 之间, 土壤温度变化范围不大, 并且水的热扩散率比土壤要低 2~4 个数量级。此外考虑到主要研究钻孔内回填材料的影响, 因此忽略土壤中水分和溶质的转移, 即假定土壤是均匀物质, 同时认为土壤的传热是通过热传导的方式来进行, 在土壤使用等效热导率来进行研究, 在回填材料、塑料管壁中也使用了同样的控制方程。此三部分在计算模型中都包含在固体域中。

(2) 在实际工程中, 为了保证管内流体的换热强度, 一般要求塑料管中的循环液要保持紊流状态, 此时管内流体的传热速率是管外物质的导热速率的几十倍。因此需在循环液和管壁的对流换热中保证循环液中的紊流状态。

(3) 地表温度随着气候变化呈现周期性的变化, 但是随着深度的增加, 其振幅逐渐减小。考虑到土壤的热扩散率数量级约为  $10^{-6}$ , 因此大于当深

度超过 15m 时温度振幅已经衰减至极小了。考虑到埋地管换热器的长度一般在 60m 以上, 因此绝大部分埋地管换热器处于岩土恒温带, 即假定模型的初始温度等于未受干扰的土壤温度。

## 2 控制方程

基于以上假设, 埋地管换热器可分为固体域和流体域两个区域, 从而建立数值分析模型。如图 2 所示, 灰色部分为固体域, 白色部分为流体域。针对固体和流体域来分别建立控制方程, 并通过对流换热通量边界条件相耦合, 从而建立了区分岩土区、回填区、管壁区和流体区的固-液两区域数值仿真计算模型。

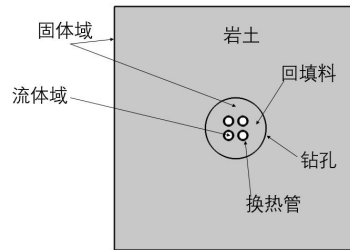


图 2 埋地管换热器的区域划分

Fig.2 Regional division of geothermal heat exchanger

### (1) 固体域

根据埋地管换热器的结构组成和周围的岩土分布, 固体域可以划分为三部分, 分别为岩土区、回填区和管壁区。对于固体域, 控制方程如式 (1) 所示。

$$\rho_{s,i} c_{p,s,i} \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \lambda_{s,i} \left( \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

式中:  $T$  为温度, K;  $\tau$  为时间, s;  $x, y$  为纵横坐标, m;  $\rho_s$  为岩土密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c_{p,s}$  为岩土热容,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;  $\lambda_s$  为岩土导热系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;  $i$  为物质种类, 即岩土、回填材料或管道;

边界条件如公式 (2) 所示。

$$\begin{cases} \tau = 0, -r_s \leq x \leq r_s, -r_g \leq y \leq r, T = T_g \\ \tau > 0, x = r_g, T = T_g \\ \tau > 0, y = r_g, T = T_g \\ \tau > 0, x = -r_g, T = T_g \\ \tau > 0, y = -r_g, T = T_g \\ \tau > 0, q = q_{f-p} (\text{管壁处}) \end{cases} \quad (2)$$

式中： $r_s$  为土壤计算半径，m； $T_g$  为岩土未受干扰的温度，K； $q_{f-p}$  为管壁处的热流量，W/m。

(2) 流体域

根据埋管换热的构成，流体域是管道内的换热器介质。对于流体域，其控制方程如式 (3) 所示。

$$\rho_f c_{p,f} \frac{\partial T_f}{\partial \tau} = \lambda_{\text{eff},f} \left( \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial y^2} \right) + q_v \quad (3)$$

式中： $T_f$  为流体平均温度，K； $\tau$  为时间，s； $x, y$  为纵横坐标，m； $\rho_f$  为流体密度，kg/m<sup>3</sup>； $c_{p,f}$  为流体热容，J/(kg·K)； $\lambda_{\text{eff},f}$  为流体导热系数，W/(m·K)； $q_v$  为流体的假定内热源，W/m<sup>3</sup>。

流体域的边界条件如式 (4) 所示。

$$\begin{cases} \tau = 0, T = T_g \\ \tau > 0, q_f = -q_{f-p} (\text{管壁处}) \end{cases} \quad (4)$$

式中： $T_g$  为岩土未受干扰的温度，K； $q_f$  为循环流体和管道壁面之间的对流换热器热流量，W/m。

(3) 两域的耦合条件

考虑到循环液与管道之间以对流换热为主，回填材料、塑料管壁和土壤中以导热为主，固体域和流体域之间的传热量采用管内一维对流换热计算公式进行换热量的全耦合计算，如式 (5) 所示。

$$q_{f-p} = \alpha \left( \pi d_{p,i}^2 / 4 \right) (T_f - T_b) \quad (5)$$

$$\alpha = \lambda_f \cdot Nu_{\text{avg}} / d_f$$

$$Nu_{\text{avg}} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.3}$$

式中： $h_b$  为钻孔深度，m； $d_{p,i}$  为管道内径，m； $T_b$  为钻孔平均壁温，K； $\alpha$  为对流换热系数，W/m<sup>2</sup>·K； $Nu_{\text{avg}}$  为平均努谢尔特数； $Re$  为雷诺数； $Pr$  为普朗特数。

3 回填材料导热系数的影响分析

已有文献的研究结果表明<sup>[2,3]</sup>钻孔热阻随回填材料导热系数的增大而减小，因此可定性分析得出钻孔效能随回填材料导热系数的增大而增大。然而回填材料将换热管道包裹其间，回填材料的使用效果必然受到管间距、管径和埋管类型等因素的影响<sup>[4-6]</sup>。

(1) 不同管间距下回填材料导热系数的影响规律

支管间距历来受到研究者的重视<sup>[7,8]</sup>，管道之间热短路的现象必然会影响到回填材料的使用效果。因此以管道外直径的倍数 (1~3 倍) 作为换热管中心的不等间距计算了 dn25 双 U 型埋管换热器的钻孔热阻。不同间距下钻孔热阻随回填材料导热系数的变化如图 3 所示。由图可见，随着管间距的增大，钻孔热阻持续减小，然而钻孔热阻的减小幅度越来越小。

不同间距下钻孔热阻随回填材料导热系数的变化说明埋管换热器采用较大的管间距有利于充分发挥高热回填材料的性能。其原因应在于较大的管间距减弱了换热管道之间的热短路程度，使换热管比较充分的将热量传输给回填材料，进而实现与周围土壤比较充分的换热。因此，为充分发挥回填材料对浅层地温能最佳效率的增益作用，应采取使换热管之间保证最大间距。

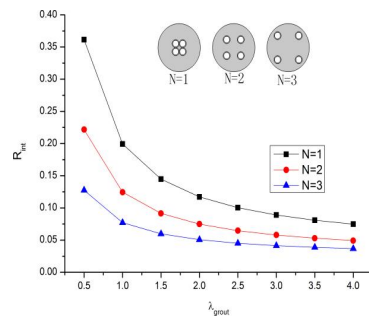


图 3 不同间距下钻孔热阻随回填材料导热系数的变化图

Fig.3 Variation of borehole thermal resistance with thermal conductivity of backfill material under different spacings

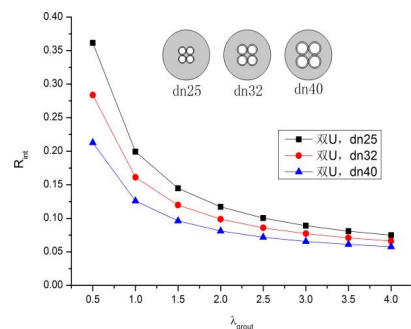


图 4 无间距、不同管径下钻孔热阻随回填材料导热系数的变化图

Fig.4 Variation of borehole thermal resistance with thermal conductivity of backfill material under non-pitch and different pipe diameters

(2) 不同管径下回填材料导热系数的影响规律

回填材料和换热管二者共同占据钻孔内部空间, 回填材料在钻孔中占据的空间与换热管的管径息息相关。因此采用如下两种工况, 计算分析了不同管径下回填材料导热系数对浅层地温能最佳效率的影响规律。当不采取技术措施时, 一般在安装过程中换热管道会紧凑地并和在一起, 此时换热管道之间的中心距即为管道外直径。目前这种现象在工程上是比较常见的, 此种工况可称为无间距工况。当采取技术措施时, 比如以管卡支撑换热管道, 从而产生一定间距是工程上应该采取的一种技术措施。此种工况可成为较大间距工况。

以双 U 型地埋管换热器为例, 分别计算 dn25、dn32 和 dn40 三种常用的地埋管换热器, 计算了无间距、不同管径下的钻孔热阻和效能随回填材料导热系数的变化。无间距工况、不同管径下钻孔热阻随回填材料导热系数的变化如图 6 所示。钻孔热阻随管道直径的增大逐渐减小, 说明管径的增大在无间距条件下对于地埋管换热器的换热效率起到增益作用。

以双 U 型地埋管换热器为例, 分别计算 dn25、dn32 和 dn40 三种常用的地埋管换热器, 计算较大间距、不同管径下的钻孔热阻随回填材料导热系数的变化。

较大间距、不同管径下钻孔热阻随回填材料导热系数的变化如图 5 所示。钻孔热阻随管道直径的增大逐渐减小, 然而随着回填材料导热系数的增大, 不同管径的地埋管换热器的钻孔热阻之间的差距越来越小。原因可能是当换热管道间距足够大时, 换热管和周围回填材料的换热比较充分。因此当换热管道间距足够大, 且回填材料导热系数足够大时, 可以采用较小管径的地埋管换热器达到同样的使用效果, 这可使管材造价降低。

(3) 不同埋管类型下回填材料导热系数的影响规律

不同的埋管类型(单 U 形、双 U 形和 3U 形), 对回填材料的使用将会导致两个结果: 一是循环流体的总比热容量增大, 这会使循环液的温变减小; 二是回填材料的总比热容量减小, 这会使回填材料部分的导热热阻减小。二者原则上均会导致钻孔热阻的减小, 从而对浅层地温能换热效率产生增益。

为了客观的探讨回填材料在不同类型地埋管换热器中对浅层地温能最佳效率的影响, 以优化间距进行计算分析, 此间距意味着换热管沿半径为 $(r_b-r_o,p)$ 的圆均匀分布。

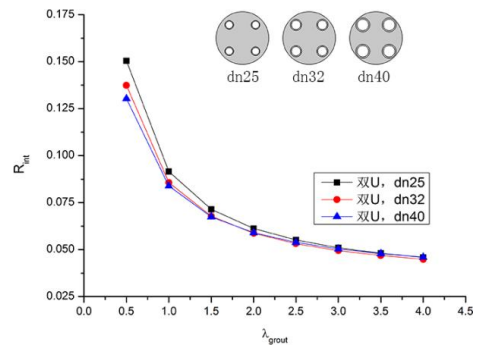


图 5 较大间距、不同管径下钻孔热阻随回填材料导热系数的变化图

Fig.5 Variation of borehole thermal resistance with thermal conductivity of backfill material under larger spacing and different pipe diameters

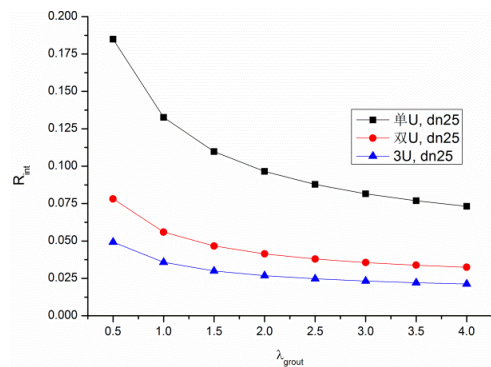


图 6 不同管型下钻孔热阻随回填材料导热系数的变化图

Fig.6 Variation of borehole thermal resistance with thermal conductivity of backfill material under different pipe types

以单 U 形管、双 U 形管和 3U 形管为例, 计算优化间距、不同埋管类型地埋管换热器的钻孔热阻随回填材料导热系数的变化, 计算结果如图 6。由图可得, 对任意回填材料, 钻孔热阻随管道数量的增大逐渐减小, 但是当单 U 形管变为双 U 形管时, 钻孔热阻减小幅度较大; 而当双 U 形管变为 3U 形管时, 随回填材料增大, 钻孔热阻减小幅度较小。原因在于, 当双 U 形管替代为 3U 形管时, 虽然循环液的比热容量增大和回填材料的比热容量减小, 但是这换热管道的间距却相对减小, 增益和损害互相抵消, 最终在增加管道换热面积的情况下, 虽有

增益,但效果并不明显。

#### 4 总结

本文采用数值计算手段计算分析了回填材料对浅层地温能最佳换热效率的影响规律,建立了区分岩土区、回填区、管壁区和流体区的埋管换热器固-液两区域数值分析模型;基于固-液两区域数值模型分析了回填材料导热系数在不同管间距、不同管径和不同埋管类型中的影响规律,结果表明:支管间距的增大减弱了换热管道之间的热短路程度,可比较充分的使埋管将热量传输给回填材料,进而与周围土壤比较充分的换热,对高性能回填材料的有效使用产生了增益作用;钻孔热阻随管道直径的增大逐渐减小,然而随着回填材料导热系数的增大,不同管径的埋管换热器的钻孔热阻之间的差距越来越小。因此当换热管道间距足够大,且回填材料导热系数足够大时,可以采用较小管径的埋管换热器达到同样的使用效果,这可使管材造价降低。当回填材料导热系数越大,换热管道充分换热时,换热管道数量越多,会对埋管换热器的换热产生增益效果。

#### 参考文献:

- [1] 张旭,高晓兵.华东地区土壤及土沙混合物导热系数的实验研究[J].暖通空调,2004,34(5):83-85.
- [2] 刁乃仁,方肇洪.埋管地源热泵技术[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [3] Sanner B, Mands E, Sauer MK. Larger geothermal heat pump plants in the central region of Germany[J]. Geothermics, 2003,32(4-6):589-602.
- [4] Kavanaugh S P, Allan M L. Testing of thermally enhanced cement ground heat exchanger grouts[J]. 1999.
- [5] Lenarduzzi F J, Cragg C B H, Radhakrishna H S. The importance of grouting to enhance the performance of earth energy systems[J]. 2000.
- [6] 庄迎春,孙友宏,谢康和.直埋闭式地源热泵回填料性能研究[J].太阳能学报,2004,25(2):216-220.
- [7] 范军,胡玉秋,孙奉仲,等.竖直双U型埋管地热换热器支管间热短路分析[J].可再生能源,2011,29(4):95-97.
- [8] 包强,邓启红,牛润卓.回填材料对土壤热泵U型埋管换热器性能的影响[J].建筑热能通风空调,2007,26(4):64-67.
- [9] 杨乐.地铁站轨行区排热系统空调季运行实测与节能研究[J].暖通空调,2018,48(2):44-47.
- [10] Weng Miaocheng, Yu Longxing, Liu Fang, et al. Full-scale experiment and CFD simulation on smoke movement and smoke control in a metro tunnel with one opening portal[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2014,42:96-104.
- [11] GB 50157—2013,地铁设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2013:234-271.
- [12] NFPA(2014). NFPA Standard 130: Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems, 2014 edn. Quincy, MA, USA: National Fire Protection Association.
- [13] GB 51298—2018,地铁设计防火标准[S].北京:中国计划出版社,2018:89-99.

(上接第 239 页)