



矩形直肋地埋管换热器换热特性模拟分析

马景辉, 汪 辰, 魏厚福, 杨艺真
(浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018)

摘 要: 为强化地源热泵系统竖直地埋管换热器换热性能, 设计了一种矩形直肋地埋管换热器, 建立了矩形直肋地埋管换热器地下传热模型, 利用 Matlab 软件模拟分析了直肋地埋管结构参数、运行参数对单 U 型和双 U 型地埋管换热器换热性能的影响。结果表明: 当入口水温 $32\text{ }^{\circ}\text{C}$, 流速 0.6 m/s , 埋深 100 m 时, 8 片直肋单 U 型与双 U 型 PE 地埋管的单位埋深换热量与光滑管相比, 分别提高了 19.12% 和 18.28% 。根据矩形直肋地埋管各参数与单位埋深换热量的相关性分析, 肋片高度和肋片个数对换热性能的影响最为显著。

关键词: 竖直地埋管换热器; 矩形直肋; 强化传热; 相关性分析

中图分类号: TU83

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2019)05-0400-07

Simulation study on heat transfer characteristics of ground heat exchangers with radial rectangular fins

MA Jinghui, WANG Chen, WEI Houfu, YANG Yizhen
(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang
Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To enhance the heat exchange performance of vertical ground heat exchangers (GHE) for ground source heat pump system, a ground heat exchanger with radial rectangular fins was designed, and ground heat transfer model was established. Matlab software was utilized to simulate and analyze the effects of structure parameters and operation parameters of ground heat exchanger with radial rectangular fins on the thermal performance of single U-tube and double U-tube ground heat exchangers. The simulation results show that the heat exchange capacity per unit borehole depth of single-U and double-U PE tube with 8 fins is 19.12% and 18.28% higher than that of the smooth U-tube, under the condition of the inlet water temperature of $32\text{ }^{\circ}\text{C}$, the flow rate of 0.6 m/s and the buried depth of 100 m . According to the correlation analysis between parameters and heat exchange capacity per unit borehole depth, the effect of fin height and number of fins on heat exchange performance are most significant.

Key words: vertical ground heat exchangers (GHE); radial rectangular fin; heat transfer enhancement; correlation analysis

0 引 言

地源热泵技术利用地下层地热资源作为冷热源, 属于可再生能源高效利用技术之一, 在解决能源与环境问题、实现节能减排等方面具有重要意义。

地埋管换热器是地源热泵系统的重要组成部分, 其换热性能的优劣直接关系到系统的运行效率和初投资大小^[1]。

地埋管换热器的换热性能主要受管内流体与管壁换热效果、换热器的结构参数以及回填材料热物

收稿日期: 2018-10-19 网络出版日期: 2018-12-29

作者简介: 马景辉(1972-), 男, 山西太原人, 副教授, 博士, 主要从事建筑节能、被动式建筑设计策略、空调系统优化控制等方面的研究。

性等因素影响^[2-3]。近年来,关于强化地埋管换热器换热性能的研究受到国内外学者的广泛关注。王宏磊^[4]对含有内肋片的换热器进行了分析,得出含4片内肋管的热效率最高,为普通光滑管的1.33倍。肖益民等^[5]将换热器结构改进成三根进水管和一根保温出水管形式,有效减小了换热器的热阻。袁亚飞^[6]提出一种地埋管微肋换热器,得出单U型外肋状翅片管换热器在不同条件下换热性能均优于普通单U型管换热器。Ren等^[7]认为换热器管材的热工性能是影响其换热性能的重要因素,钢管的流体出口温度比聚乙烯(Polyethylene, PE)管高出1.4~1.7℃,每米换热量提高70%。

综上所述,既有研究中以改变管内流体的流态和埋管材质强化地埋管换热器换热性能为主,通过优化传统PE光滑管形状结构、减小综合传热热阻、提高地埋管换热器换热性能的研究还不够全面。本文设计了一种矩形直肋地埋管换热器,建立矩形直肋地埋管换热器地下传热模型,利用Matlab软件模拟分析直肋地埋管结构参数、运行参数对单U型和双U型地埋管换热器换热性能的影响。

1 矩形直肋地埋管换热器的传热过程

矩形直肋地埋管换热器示意图如图1所示,其中: r_o 为U型管的外半径,m; r_i 为U型管的内半径,m; δ 为肋厚,m; H 为肋高,m; L 为肋长,m。地埋管换热器的传热过程如图1(a)所示,该传热过程由内向外为:管内流体→埋管壁→回填材料→土壤,是受多种因素影响的非稳态三维传热过程。矩形直肋地埋管换热器示意图如图1(b)所示,本文忽略回填材料和土壤竖直方向的传热,应用基于叠加原理的 g -函数方法^[8-9]和准三维模型^[10-12],分析矩形直肋地埋管传热过程中各部分热阻,建立管内流体能量平衡方程。

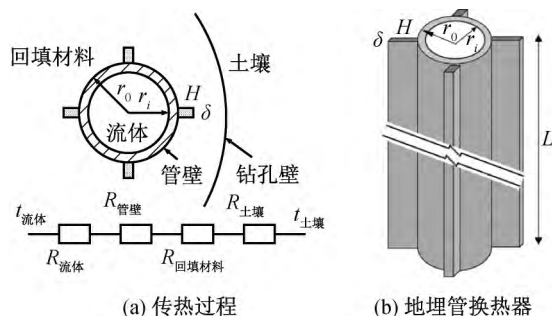


图1 矩形直肋地埋管换热器示意

1.1 地埋管换热器水平方向传热过程

1.1.1 埋管内流体至埋管壁的传热

管内流体至管壁的传热过程中,热阻为:管内流体流动产生的对流换热热阻,埋管壁的导热热阻,假设支管外壁与回填材料之间存在饱和水蒸气层产生的对流换热热阻。在此过程中,埋管壁的导热热阻最大,可以通过在支管外壁增设外肋片强化传热。

对于外壁无矩形直肋的光滑管,该传热过程的热阻为:

$$R'_p = \frac{1}{2\pi r_i h} + \frac{1}{2\pi k_p} \ln \frac{r_o}{r_i} + \frac{1}{2\pi r_o h_f} \quad (1)$$

其中: k_p 为U型管管材的导热系数, $W/(m \cdot K)$; h 为U型管内流体和内管壁间的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; h_f 为支管外壁与回填材料间存在的饱和水蒸气层所产生的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$,本文取值 $8.5 W/(m^2 \cdot K)$ 。

由于本文U型管外壁上具有矩形直肋,埋管外壁结构和光滑管相比有所改变。为求得加外肋片后的热阻,可先得其肋效率 η_f 为:

$$\eta_f = \frac{\tanh(mH')}{mH'} \quad (2)$$

其中: $m = \sqrt{\frac{2h_f}{\lambda\delta}}$; $H' = H + \frac{\delta}{2}$; λ 为肋片导热系数, $W/(m \cdot K)$ 。

由式(1)、式(2)可得具有外肋片的外管壁综合传热热阻 R_{pf} 和管内流体至支管外壁的总热阻 R_p ,即:

$$\begin{cases} R_{pf} = \frac{1}{h_f(A_r + \eta_f \cdot A_f)} \\ R_p = \frac{1}{2\pi r_i h} + \frac{1}{2\pi k_p} \ln \frac{r_o}{r_i} + R_{pf} \end{cases} \quad (3)$$

其中: A_r 为肋片间根部的表面积, m^2 ; A_f 为肋片的表面积, m^2 。

由上述可见,钻孔内的传热热阻是地埋管换热器换热性能的重要影响因素。改变矩形直肋U型管的结构参数,减小支管内流体至支管外壁的传热热阻,可强化换热性能。

1.1.2 埋管壁至钻孔壁的传热

钻孔内线热源水平截面示意图如图2所示。将U型管支管中流体到管壁的传热情况简化为一个位于支管中心线 (x_1, y_1) 处,发热量为 q 的线热源,根据虚拟热源法可得该温度场的钻孔壁过余温度为^[8]:

$$T(x, y) = \frac{q}{2\pi k_b} \left[\ln \frac{r_b}{\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2}} + \right]$$

$$\sigma \cdot \ln \frac{r_b/b}{(x-x'_1)^2+(y-y'_1)^2} \Bigg], r \leq r_b \quad (4)$$

其中: $\sigma = \frac{k_b - k_s}{k_b + k_s}$; $b = \frac{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}{r_b}$; $x'_1 = \frac{x_1}{b^2}$; $y'_1 = \frac{y_1}{b^2}$; k_s 为钻孔外土壤的导热系数, $W/(m \cdot K)$; k_b 为钻孔内回填材料的导热系数, $W/(m \cdot K)$; r_b 为钻孔的半径, m 。

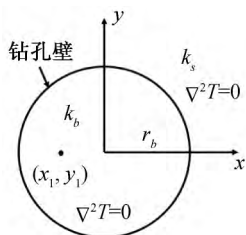


图2 钻孔内线热源水平截面示意

将几何尺寸代入式(4),可得支管外壁与钻孔壁间的热阻 R'_{11} 和两支管间的热阻 R_{12} :

$$\begin{cases} R'_{11} = \frac{1}{2\pi k_b} \left(\ln \frac{r_b}{r_o} + \sigma \cdot \ln \frac{r_b^2}{r_b^2 - D^2} \right) \\ R_{12} = \frac{1}{2\pi k_b} \left(\ln \frac{r_b}{2D} + \sigma \cdot \ln \frac{r_b^2}{r_b^2 + D^2} \right) \end{cases} \quad (5)$$

其中 D 为支管中心距的一半, m 。

1.1.3 钻孔外的传热

钻孔外的传热过程,根据虚拟热源法原理,应用钻孔深度和地面作为边界条件的二维导热有限长线热源模型^[13],可以得出温度响应趋于稳定后的地下温度场分布情况和钻孔壁上的温度。

1.2 钻孔内的热平衡方程

1.2.1 单 U 型地埋管

钻孔内的热平衡方程可由流体在 U 型管内的流动过程得出,对式(6)求解后可得出单 U 型地埋管中流体沿程的温度分布^[11,14]:

$$\begin{cases} -M \cdot c_p \frac{dT_{f1}}{dz} = \frac{T_{f1} - T_b}{R_1^\Delta} + \frac{T_{f1} - T_{f2}}{R_{12}^\Delta} \\ M \cdot c_p \frac{dT_{f2}}{dz} = \frac{T_{f2} - T_b}{R_2^\Delta} + \frac{T_{f2} - T_{f1}}{R_{12}^\Delta} \end{cases} \quad (6)$$

其中: c_p 为流体的定压比热容, $J/(kg \cdot K)$; M 为 U 型管内流体的质量流量, kg/s ; T_{f1} 为支管内向下流动流体的温度, $^\circ C$; T_{f2} 为支管内向上流动流体的温度, $^\circ C$; T_b 为钻孔壁温度, $^\circ C$; z 为钻孔深度, m 。

由式(3)、式(5)可知,支管内流体与钻孔壁间的热阻 R_{11} 为:

$$R_{11} = R'_{11} + R_p \quad (7)$$

由于单 U 型地埋管支管的对称性,即 $R_{11} =$

R_{22} 。根据线性叠加原理,式(6)中的热阻为:

$$\begin{cases} R_1^\Delta = R_2^\Delta = R_{11} + R_{12} \\ R_{12}^\Delta = \frac{R_{11}^2 - R_{12}^2}{R_{12}} \end{cases} \quad (8)$$

1.2.2 双 U 型地埋管

双 U 型地埋管布置示意图如图 3 所示。双 U 型地埋管换热器管呈(1—3,2—4)并联对称布置,热阻可简化为 R_{11} 、 R_{12} 和 R_{13} 。根据线性叠加原理,双 U 型地埋管热平衡方程中的热阻为^[15]:

$$\begin{cases} R_1^\Delta = R_{11} + R_{12} + R_{13} \\ R_{12}^\Delta = \frac{R_{11}^2 + R_{12}^2 + 2R_{11} \cdot R_{12} - 4R_{12}^2}{R_{12}} \\ R_{13}^\Delta = \frac{(R_{11} - R_{13}) \cdot (R_{11}^2 + R_{13}^2 + 2R_{11} \cdot R_{13} - 4R_{12}^2)}{R_{13}^2 + R_{11} \cdot R_{12} - 2R_{12}^2} \end{cases} \quad (9)$$

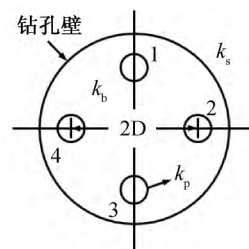


图3 双 U 型地埋管布置示意

钻孔的热平衡方程同单 U 型地埋管,各支管内流体与钻孔壁间热阻 R_{11} 和 R_{12} 、两支管间热阻 R_{13} 可由式(3)、式(4)确定。

据上分析,本文利用 Matlab 软件分别建立矩形直肋单 U 型和双 U 型地埋管换热器的传热模型并进行研究。

2 参数及条件

2.1 模型基本参数

模型中地埋管换热器的 U 型管内径和外径分别为 26 mm 和 32 mm,支管间距为 90 mm,钻孔直径为 150 mm,各材料的热物性参数^[16-17]见表 1。

表 1 各材料的热物性参数

材料类型	密度 $/(kg \cdot m^{-3})$	比热容 $/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	导热系数 $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$
水	996	4174	0.62
PE 管	950	2300	0.45
回填材料	1900	900	2.34
土壤	1925	1335	2.07

注:U 型管中热媒为水,管材和肋片材料选取 PE,回填材料选取 CS^[18],土壤的热物性由各岩土层比例加权平均计算确定。

本文中典型工况为夏季连续运行 48 h, 地埋管换热器埋深 100 m, 流体流速 0.6 m/s (流量为 19.11 L/min), 流体进口温度 32 °C。

2.2 土壤初始温度

根据传热学理论, 土壤的传热过程可以看成是半无限大物体在周期性变化的第一类边界条件下的非稳态导热过程。土壤表面温度呈周期性波动, 按简谐波规律变化。设过余温度 $\theta(H, \tau) = t(H, \tau) - t_m$, 通过求解温度控制方程, 可得土壤温度场随深度和时间变化的表达式:

$$t(H, \tau) = t_m + A_m e^{-H\sqrt{\frac{\pi}{aT}}} \cos\left[\frac{2\pi}{T}(\tau - \tau_0) - H\sqrt{\frac{\pi}{aT}}\right] + \frac{H}{30} \quad (10)$$

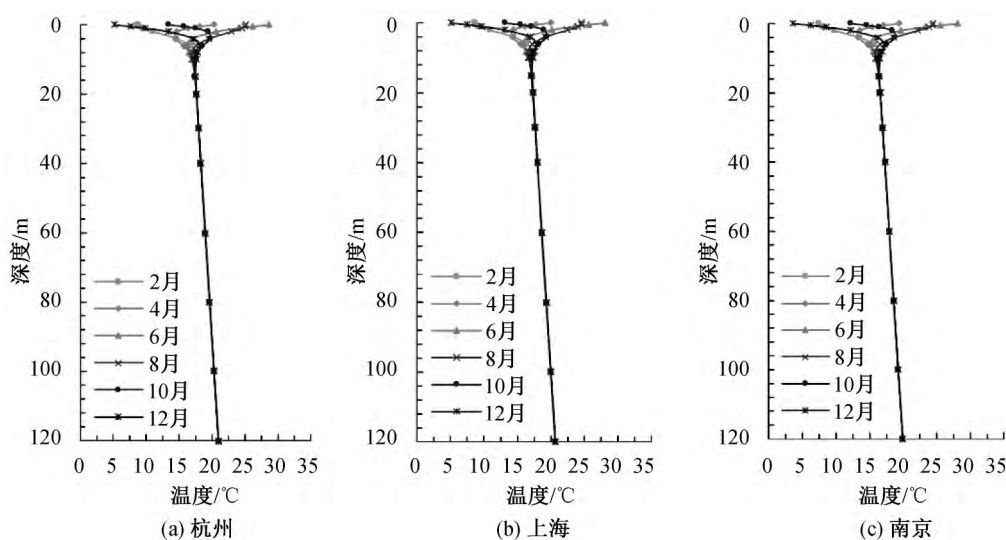


图4 杭州等地区土壤温度分布曲线

3 地埋管换热器传热影响因素分析

3.1 肋片结构参数对单 U 型地埋管换热性能的影响

典型工况下, 单 U 型地埋管换热器单位埋深换热量随肋片的高度和厚度变化如图 5 所示。地埋管换热器单位埋深换热量随着肋高的增大而增加, 但增长幅度逐渐下降。肋高大于 2 mm 的单位埋深换热量随着肋厚的增加呈先增后减的趋势。肋高为 5 mm, 肋厚分别为 3、4 mm 和 5 mm 时, 单位埋深换热量为 56.01、56.18 W/m 和 56.19 W/m。结合管材及工程安装等情况, 本文以肋高 5 mm 和肋厚 3 mm 为对象开展相关分析。

3.2 肋片个数对单 U 型地埋管换热性能的影响

典型工况下, 单 U 型地埋管换热器单位埋深

其中: t_m 为土壤表面年平均温度, °C; A_m 为土壤表面年周期性波动幅度, °C; a 为土壤热扩散率, m^2/h ; T 为温度年波动周期, h; τ_0 为土壤表面最高温度出现时刻, h; $H/30$ 为平原地区地层深度对土壤温度影响的附加值, °C。

图 4 是根据中国气象数据网累年月平均土壤表面温度 (1981—2010 年)^[19], 计算得到杭州等地区土壤温度分布结果。如图 4 所示, 当地下深度为 0~10 m 时, 土壤温度受外界气象的影响波动幅度较大, 随着深度的增加而逐渐减小。当地下深度大于 20 m 时, 土壤温度基本保持恒定状态, 且随着深度的增加而缓慢上升。在地下深度为 100 m 内时, 按深度的累加平均后的土壤温度约为 18 °C, 因此本文定土壤初始温度条件为 18 °C。

换热量随埋深及肋片个数变化的计算结果如图 6 (a) 所示。当埋深为 100 m 时, 8 片直肋管的单位埋深换热量为 56.01 W/m, 与光滑管的单位埋深换热量为 47.02 W/m 相比提升了 19.12%。可见增设一定个数的外肋片有助于提升地埋管换热器的换热性能。但埋深一定时, 单位埋深换热量随肋片个数的增加而增加, 且增加幅度逐渐减缓。这是因为随着肋片个数的增加, 肋片和 U 型管外管壁间的热短路现象加重, 导致热量在两个肋片间的回填土处堆积, 造成热损失。当埋深为 60、80、120 m 和 140 m 时, 8 片直肋管与光滑管的单位埋深换热量相比, 分别提升了 19.68%、19.40%、18.84% 和 18.57%。可见肋片个数一定时, 单位埋深换热量的增益随着埋深的增加而减少。

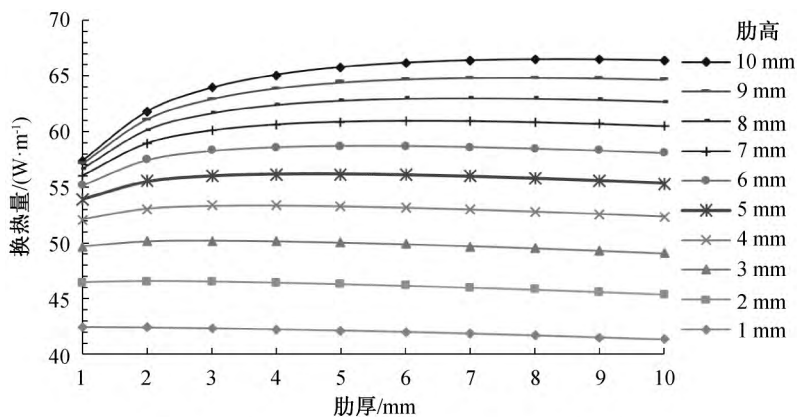


图5 肋片结构参数对单U管单位埋深换热量的影响曲线

单井的总换热量如图6(b)所示。当埋深为100 m时,8片直肋地埋管的单井换热量为5601 W,比120 m

埋深的光滑管单井换热量多约23 W。使用埋深100 m的8片直肋地埋管换热器可将埋深减少20 m。

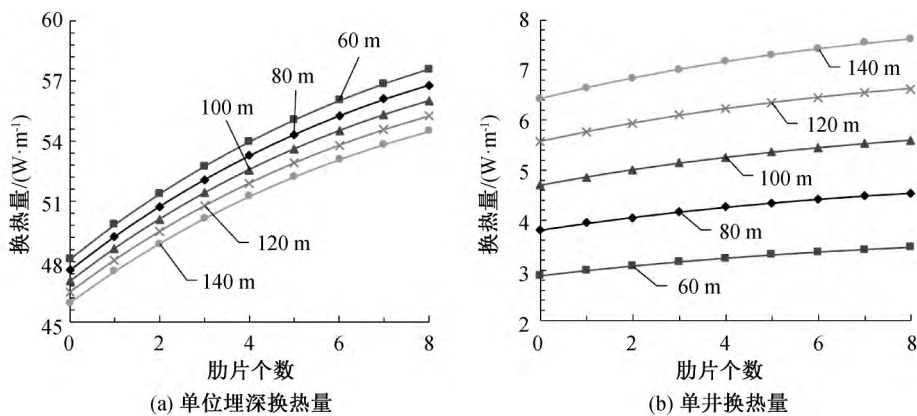


图6 埋深及肋片个数对换热量的影响曲线

3.3 埋管运行参数对单U型地埋管换热性能的影响

典型工况下,单U型地埋管换热器单位埋深换热量随流体流速变化如图7(a)所示。由于流速增加引起的流体质量流量的增加,管内流体的对流换热系数变大,地埋管换热器的单位埋深换热量随着流体流速的增加而增大。当流体流速从0.4 m/s(12.74 L/min)增至1.2 m/s(38.23 L/min)时,单位埋深换热量从54.03 W/m增加到58.11 W/m,增大了7.55%,而流体进出口温度差由6.13℃减

至2.2℃。当流速大于0.8 m/s(25.48 L/min)时,单位埋深换热量的增加幅度趋缓,继续增大流速对换热量的提升有限。

如图7(b)所示,从单位埋深换热量随流体进口温度变化的计算结果可见,随着流体进口温度的增加,单位埋深换热量逐渐增加。这主要是管内流体温度与周围土壤温度差逐渐增大,造成地埋管换热器与周围土壤传热效果增强。当进口温度从28℃增至36℃,流体进出口温度差由3.7℃增大到4.77℃,单位埋深换热量从49.00 W/m增加到63.02 W/m。

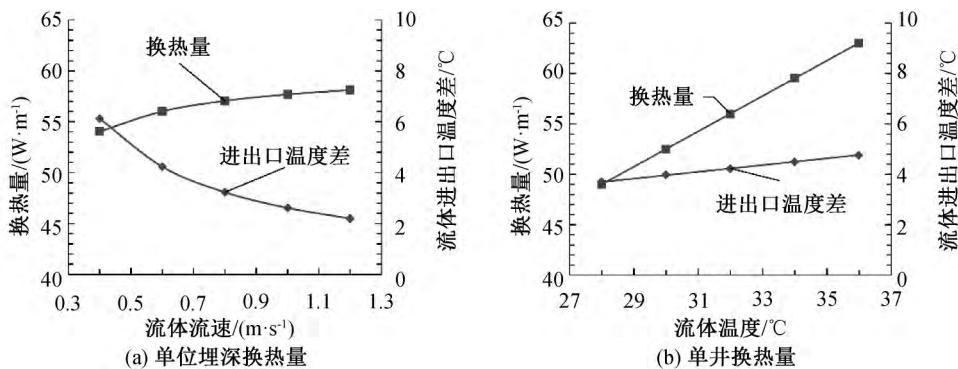


图7 流体流速与进口温度对单位埋深换热量的影响曲线

3.4 回填材料参数对单 U 型地埋管换热性能的影响

保持典型工况, 针对膨润土 ($0.65 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), 水灰比为 0.6 的纯水泥 ($0.97 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), CS 材料 ($2.34 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) 三种典型回填材料^[20], 及导热系数分别为 1.3 、 $1.6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和 $1.9 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 其他性能回填材料^[21] 的地埋管换热器换热量进行计算分析。如图 8 所示, 回填材料为膨润土, 水灰比为 0.6 的纯水泥, CS 材料的地埋管换热器的单位埋深换热量分别为 44.87 、 $49.31 \text{ W}/\text{m}$ 和 $56.01 \text{ W}/\text{m}$, 可见地埋管换热器的换热效果随着回填材料导热系数的增加而增强, 且增强趋势逐渐减弱。流体进出口温度差随着回填材料的导热系数的增加而变大。

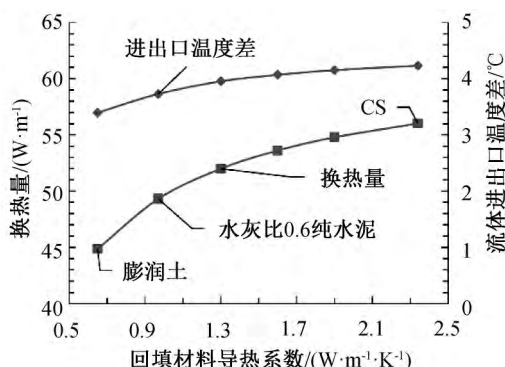
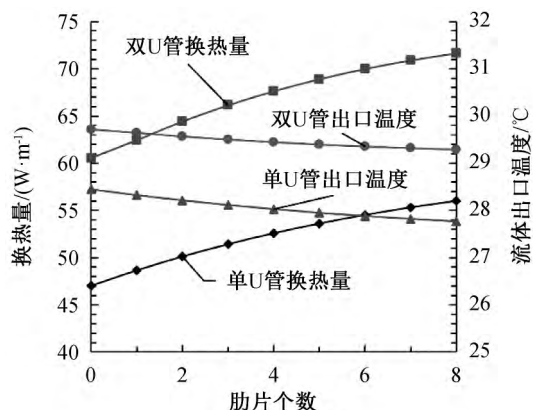


图8 回填材料导热系数对单位埋深换热量的影响曲线

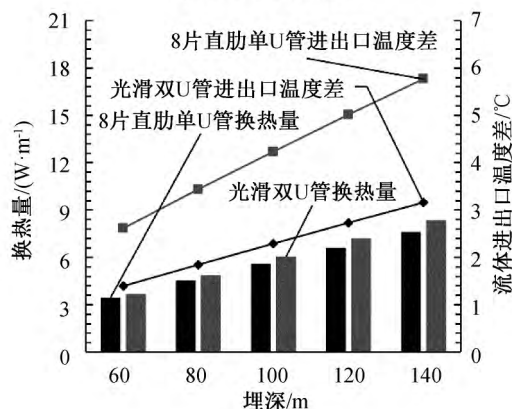
3.5 单、双 U 型地埋管换热器对比分析

如图 9(a) 所示, 当支管内流体流量相同, 100 m 埋深, 入口水温 32°C , 流速 0.6 m/s 的典型工况下, 直肋单 U 型和双 U 型地埋管的单位埋深换热量随肋片个数的增加而增加。8 片直肋双 U 型地埋管单位埋深换热量为 $71.63 \text{ W}/\text{m}$, 与光滑双 U 型地埋管相比提高了 18.28% , 是 8 片直肋单 U 型地埋管的 1.28 倍。8 片直肋双 U 型地埋管的出口温度为 29.29°C , 与光滑双 U 型地埋管相比低 0.42°C , 比 8 片直肋单 U 型地埋管高 1.53°C 。

保持支管内流体流量不变, 典型工况下 8 片直肋单 U 型地埋管和光滑双 U 型地埋管的单井换热量如图 9(b) 所示。100 m 埋深 8 片直肋单 U 型地埋管的单井换热量和进出口温差为 5601 W 和 4.23°C , 与 80 m 埋深的双 U 型光滑地埋管单井换



(a) 单位埋深换热量



(b) 单井换热量

图9 肋片个数对换热量的影响曲线

热量和进出口温度差相比, 分别多 720 W 和 2.39°C 。使用直肋单 U 型地埋管, 虽然由于埋深增加导致初投资的提高, 但流量是双 U 型地埋管的一半, 可以减少地源侧流体输配能耗。

3.6 换热性能影响因素相关性分析

表 2 为矩形直肋单 U 型和双 U 型地埋管换热器换热性能影响因素的相关性分析结果。如表 2 所示, 肋片高度、肋片个数对单 U 型和双 U 型换热器换热性能的影响最为显著, 相关系数分别为 0.750 、 0.479 和 0.846 、 0.432 , 这是因为两者均能有效增大直肋 U 型管的换热面积。肋片厚度、流体进口温度和回填材料对换热性能的改变均有作用, 应在条件允许范围内选取合适的参数值。流体流速和埋深与换热量相关性较弱, 当改变两者参数值时, 并不能有效提升地埋管换热器的换热性能。为提升地埋管换热器的换热性能, 应重点考虑对肋高、肋片个数的参数选择。

表2 单 U 型和双 U 型地埋管换热器各参数与换热量间的相关系数

参数	肋高	肋片个数	回填材料	进口温度	肋厚	流体流速	埋深
单 U 型换热量	0.750	0.479	0.389	0.311	0.231	0.056	-0.064
双 U 型换热量	0.846	0.432	0.265	0.276	0.218	0.010	-0.036

注: 使用 CORREL 函数计算相关系数矩阵。相关系数值趋向于 +1 为正相关, 趋向于 -1 为负相关, 趋向于 0 为互不相关。

4 结 论

本文通过建立矩形直肋地埋管换热器传热模型,对矩形直肋地埋管结构参数、运行参数对单 U 型和双 U 型地埋管换热器换热性能的影响进行模拟分析,结论如下:

a)入口水温 32 °C,流速 0.6 m/s,埋深 100 m 时,具有肋高 5 mm,肋厚 3 mm,8 片直肋的单 U 型和双 U 型 PE 地埋管的单位埋深换热量与光滑管相比,分别提高了 19.12% 和 18.28%,换热性能得到有效提高。

b)100 m 埋深 8 片直肋单 U 型地埋管的单井换热量为 5601 W,大于 120 m 埋深光滑管的单井换热量,采用 8 片直肋单 U 型地埋管换热器可减少 20 m 埋深。

c)支管流量相同时,100 m 埋深 8 片直肋单 U 型地埋管的单井换热量和进出口温度差均大于 80 m 埋深光滑双 U 型地埋管,采用 8 片直肋单 U 型地埋管换热器可以减少地源侧流体输配能耗。

d)根据矩形直肋地埋管换热器换热性能影响因素的相关性分析,肋高和肋片个数对单 U 型和双 U 型地埋管换热器换热性能的影响最为显著。为提升矩形直肋地埋管换热器的换热性能,应首先考虑肋高、肋片个数的参数选择。

本文针对矩形直肋地埋管换热器换热特性开展了相关理论模拟分析,优化地埋管管群换热模型、提升源侧系统热性能是下一步研究的重点。今后,将针对矩形直肋地埋管地源热泵系统的系统性能及土壤热平衡特性开展相关研究。

参考文献:

- [1] Lin Q L, Ma J H, Lei S. Study on finned pipe performance as a ground heat exchanger[C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Materials Science, Energy Technology and Environmental Engineering. Zhuhai, Guangzhou. IOP Publishing Ltd, 2017;012120.
- [2] Lee C, Park M, Nguyen T B, et al. Performance evaluation of closed-loop vertical ground heat exchangers by conducting in-situ thermal response tests [J]. Renewable Energy, 2012, 42(1): 77-83.
- [3] Borinaga-Trevino R, Norambuena-Contreras J, Castro-Fresno D. How to correct the ambient temperature influence on the thermal response test results [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 82(3): 39-47.
- [4] 王宏磊.土壤源热泵 U 型内肋埋管换热器传热特性竖直

模拟[D].西安:西安科技大学,2011:47-48.

- [5] 肖益民,刘希臣,张华廷,等.竖直地埋管换热器的结构改进与性能试验[J].哈尔滨工业大学学报,2015,47(2): 92-97.
- [6] 袁亚飞.土壤源热泵垂直埋管微肋换热器的强化换热性能研究[D].西安:长安大学,2017: 37-62.
- [7] Ren C, Deng Y L, Cao S J. Evaluation of polyethylene and steel heat exchangers of ground source heat pump systems based on seasonal performance comparison and life cycle assessment[J]. Energy and Buildings, 2018, 162: 54-64.
- [8] Hellstrom G. Ground heat storage: Thermal analyses of duct storage systems[D]. Skane: University of Lund, 1991: 73-98.
- [9] Eskilson P. Thermal analysis of heat extraction boreholes[D]. Skane: University of Lund, 1987: 8-12.
- [10] 刁乃仁,曾和义,方肇洪.竖直 U 型管地热换热器的三维传热模型[J].热能动力工程,2003,18(4): 387-390.
- [11] 曾和义,方肇洪. U 型管地热换热器中介质轴向温度的数学模型[J].山东建筑工程学院学报,2002,17(1):7-11.
- [12] Zeng H Y, Diao N R, Fang Z H. Heat transfer analysis of boreholes in vertical ground heat exchangers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003,46(23): 4467-4481.
- [13] 曾和义,刁乃仁,方肇洪.竖直埋管地热换热器的稳态温度场分析[J].山东建筑工程学院学报,2002,17(1): 1-6.
- [14] 曾和义,刁乃仁,方肇洪.竖直埋管地热换热器钻孔内的传热分析[J].太阳能学报,2004,25(3):399-405.
- [15] 曾和义,方肇洪.双 U 型埋管地热换热器的传热模型 [J].山东建筑工程学院学报,2003,18(1):11-17.
- [16] 朱祖文,蒋云云,何一坚.天津地区双 U 型地源热泵地埋管换热器性能模拟研究[J].流体机械,2013,41(6): 58-64.
- [17] 段新胜,林清龙,毛汉川,等.岩土层原位导热系数的多元线性回归分析方法[J].太阳能学报,2018,39(2): 385-389.
- [18] 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,2006:123.
- [19] 中国气象数据网.中国地面累年值月值数据集(1981-2010 年)[G/OL].(2012-08-28)[2018-09-10]. <http://data.cma.cn/data/detail/dataCode/A.0029.0004.html>
- [20] 陈卫翠,刘巧玲,贾立群,等.高性能地埋管换热器钻孔回填材料的实验研究[J].暖通空调,2006,36(9):1-6.
- [21] 丁勇,李百战,卢军,等.地源热泵系统地下埋管换热器设计[J].暖通空调,2005,35(3):86-89.

(责任编辑:康 锋)