

文章编号: 1671-6612 (2022) 01-040-08

水平埋管换热器换热性能数值模拟研究

穆玄¹ 邹行¹ 裴鹏¹ 林华颖¹ 郝定溢²

(1. 贵州大学矿业学院 贵阳 550025; 2. 中国矿业大学矿业工程学院 徐州 221116)

【摘要】 为进一步推广水平埋管式地源热泵系统的运用,以土壤毛细水理论为基础,结合数值仿真试验探讨了水平埋管换热器在不同地下水位深度、不同土壤类型、不同水平管换热器构造下的换热性能,通过对输出参数埋管出口水温、水平管延米换热量以及土壤温度场分布情况的分析,揭示了相关参数对水平管换热器性能的影响机制。研究表明:随着地下水位埋深变浅,埋管水平土壤含水饱和度从12%增加到100%时,在制冷工况下,水平管延米换热量增加了30%,出口水温降低了23%;水平管在土壤中换热性能最佳,土壤中固相颗粒导热系数对水平管换热器性能起着主导作用,土壤孔隙率的减小及固相颗粒导热系数的增加均能显著提高水平埋管换热效率;管体结构对换热性能同样有着明显的制约效果,采用水平“spiral”型埋管形式有着良好的换热性能,系统能效比较高。

【关键词】 地源热泵; 水平埋管; 换热性能; 数值模拟

中图分类号 TU83 文献标识码 A

Numerical Simulation of Heat Transfer Performance of Horizontal Buried Tube Heat Exchanger

Mu Xuan¹ Zou Hang¹ Pei Peng¹ Lin Huaying¹ Hao Dingyi²

(1. School of Mining, Guizhou University, Guiyang, 550025;

2. School of Mining Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, 221116)

【Abstract】 In order to further popularize the application of horizontal buried pipe ground source heat pump system, based on the theory of soil capillary water, this paper discusses the heat transfer performance of horizontal buried pipe heat exchanger under different underground water level depth, different soil types and different structure of horizontal pipe heat exchanger based on numerical simulation test. By analyzing the water temperature at the outlet of buried pipe, the heat transfer of horizontal pipe length meters and the distribution of soil temperature field, the influence mechanism of relevant parameters on the heat transfer performance of horizontal pipe is revealed. The results show that when the buried depth of underground water line becomes shallower and the water saturation of the horizontal soil increases from 12% to 100%, the heat transfer of the horizontal pipe length increases by 30% and the water temperature at the outlet decreases by 23% under the refrigeration condition. The heat transfer performance of horizontal pipe is the best in loam soil, and the thermal conductivity of solid particles in soil plays a leading role in the heat transfer performance of horizontal pipe. The decrease of soil porosity and the increase of the thermal conductivity of solid particles can significantly improve the heat transfer efficiency of horizontal buried pipe. The pipe structure also has obvious restriction effect on the heat transfer performance. The horizontal "Spiral" buried pipe form has good heat transfer performance and high energy efficiency ratio of the system.

【Keywords】 ground source heat pump; Horizontal buried pipe; Heat transfer performance; The numerical simulation

基金项目: 国家自然科学基金地区项目(52066005); 贵州省科技支撑计划(黔科合支撑[2020]2Y025);

贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合KY字[2017]117)

作者简介: 穆玄(1993-), 男, 研究生, E-mail: m1227626643@qq.com

通讯作者: 裴鹏(1982-), 男, 博士, 副教授, E-mail: ppei@gzu.edu.cn

收稿日期: 2021-07-03

0 引言

地源热泵是以浅层地表热能为热源,通过输入少量的高品位能源,实现低品位热能向高品位热能转移的热泵系统。地源热泵属于可再生能源利用技术,对能量的利用具有经济高效、无污染、运行费用低,不受地质条件限制等优点,被认为是一种极具潜力的绿色能源技术^[1-4]。

地埋管地源热泵是向土壤或把土壤作为热交换器来传输热量,地下换热器是系统中进行热量交换的主要设备^[5],其主要是通过埋管内流体与埋管周围土壤之间进行热量传递来实现热量的转移,因此其传热问题一直被诸多学者关注研究^[6-8],

水平埋管式地源热泵系统其管体布置于浅层土壤之中,其换热性能受土壤热参数影响较大^[9]。基于此国内外学者做了大量研究,Leong W H 等^[10]通过计算机模拟使用了五种不同饱和度(0、12.5、25、50和100%)的土壤(砂、粉质壤土和粉质粘土),指出土壤热泵系统的换热性能受土壤含水率及土壤类型影响。Hikari 等^[11,12]使用 FEELOW 模拟软件对水平“slinky”型螺旋管的优化设计进行了数值模拟研究,结果显示,模拟值与实验值有较好的一致性,证明了该数值模型可用于模拟研究水平“slinky”型螺旋管的换热问题以及用于其优化设计。

然而,之前的研究中,多将非饱和区域土壤不同深度含水饱和度和视作常数,往往忽略了地下水位线以上区域毛管水分布特征,从而使得其模拟结果与实际情况偏差较大,这在一定程度上不利于实际工程指导。因此该文基于土壤毛管水力特征曲线对土壤中非饱和区域水分的分布情况做了定量描述,并讨论了不同因素对水平管换热性能的影响,其研究结果可用于更准确地计算水平埋管换热器的换热性能和估算地源热泵机组的技术经济指标。

1 理论及控制方程

1.1 多孔介质中的水力传导

达西定律作为描述饱和岩土体中水分流动的经典定律,指出岩土体中的水分在压力梯度下由高水势流向低水势流动,方程如下^[13,14]:

$$v = -\frac{\kappa}{\mu} \nabla \psi \quad (1)$$

$$\nabla \psi = \nabla \psi_g + \nabla \psi_p \quad (2)$$

式中: v 为达西速度, m/s ; κ 为多孔介质的渗透系数, m^2 ; μ 为流体的动力粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; $\nabla \psi$ 为任意两点水势差; ψ_g 为重力势; ψ_p 为压力势。

同样的,将裂隙看做为多孔介质,裂隙流方程使用了达西定律的切向导数来定义沿内部边界(多孔介质中的裂隙)的流动。

$$u = -\frac{\kappa_f}{\mu} d_f (\nabla \psi_g + \nabla \psi_p) \quad (3)$$

式中: κ_f 为裂隙的渗透率, m^2 ; d_f 为裂隙张开度或厚度, m ; u 为裂隙中的达西流速, m/s 。

1.2 多孔介质中的热量传递

多孔介质中的能量守恒方程为^[15]:

$$(\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_w C_{p,w} v \nabla T + \nabla \cdot (-k_{eff} \nabla T) = Q_{wall} \quad (4)$$

式中: ρ 为土壤基质各相态的密度, kg/m^3 ; C_p 为土壤基质各相态质量比热容, $\text{J/kg}\cdot\text{K}$; T 为温度, K ; t 为时间, s ; ρ_w 为地下水的密度, kg/m^3 ; $C_{p,w}$ 为地下水的质量比热容, $\text{J/kg}\cdot\text{K}$; v 为土壤基质中流体速度, m/s (该速度场耦合于达西速度); k_{eff} 为多孔介质有效导热系数, $\text{W/m}\cdot\text{K}$; $(\rho C_p)_{eff}$ 为多孔介质的有效体积比热容, $\text{J/m}^3\cdot\text{K}$; Q_{wall} 为与埋管换热器的换热量, W/m^3 。

对裂隙中的热传递的控制方程为:

$$d_f (\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + d_f \rho C_p u \cdot \nabla_i T + \nabla_i \cdot q_{fr} = d_f Q + q_0 \quad (5)$$

$$q_{fr} = -d_f k'_{eff} \nabla_i T \quad (6)$$

式中: $(\rho C_p)_{eff}$ 为裂隙体积热容, $\text{J/m}^3\cdot\text{K}$; q_{fr} 为裂隙流体的传导热通量, W/m^2 ; u 为裂隙中达西速度, m/s ; k'_{eff} 为裂隙有效导热系数, $\text{W/m}\cdot\text{K}$; Q 为可能存在的热源, W/m^3 ; q_0 为流体和固体边界上的热通量, W/m^2 ; ∇_i 是切向梯度因子。

在此将岩体以及裂隙视作为多相介质,主要由固相、气相、液相等组成,表示为:

固相体积分数:

$$\chi_s = 1 - \eta \quad (7)$$

气相体积分数:

$$\chi_a = \eta - \theta \quad (8)$$

液相体积分数:

$$\chi_w = \theta \quad (9)$$

式中： η 为对应岩体或裂隙的孔隙度。 θ 为水分体积分数。

多孔介质有效导热系数 k_{eff} 与有效体积比热容 $(\rho C_p)_{eff}$ 可基于不同相态表示为^[17,18]：

$$k_{eff} = \sum_{i=1}^3 \chi_i k_i \quad (10)$$

$$(\rho C_p)_{eff} = \sum_{i=1}^3 \chi_i \rho_i C_i \quad (11)$$

式中： K_i 为为多孔介质或裂隙中固相、气相、液相的导热系数，W/m·K； ρ_i 为为多孔介质或裂隙中固相、气相、液相的密度，J/m³·K； C_i 为多孔介质或裂隙中固相、气相、液相的质量热容，J/Kg·K。

1.3 管道中的热传递

U 型管中不可压缩流体流动的能量方程如下^[16]：

$$\rho_f A C_{p,f} \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f A C_{p,f} u' \nabla T_f = \nabla A k_f \nabla T_f + \frac{f_D \rho_f A}{2 d_h} |u|^3 + Q_{wall} \quad (12)$$

式中， ρ_f 为管内流体密度，kg/m³； A 为流体流过的断面面积，m²； $C_{p,f}$ 为管中流体的质量比热容，J/kg·K； T_f 为循环流体的温度，K； t 为时间，s； u' 为水平管中换热工质的速度，m/s； k_f 为循环流体导热系数，W/m·K； f_D 为达西摩擦系数； d_h 为平均水力直径，mm。

U 型管与周围岩体热量交换方程如下：

$$Q_{wall} = (hZ)_{eff} (T_{ext} - T_f) \quad (13)$$

式中： $(hZ)_{eff}$ 为热传递系数有效值（其中 h 为管壁等效对流传热系数，W/m²·K； Z 为管壁周长，m）； T_{ext} 为管壁外多孔介质的温度，K。

在岩溶管道内的地下水传热方程类似于工质在 U 型管内的能量控制方程，其不同点主要在于岩溶管道将岩体视为管壁。

2 不同地下水位线深度对水平管换热性能的影响

2.1 仿真模型构建

基于土壤毛管水理论，该节主要考虑了三种水力模型。

地下水位线位于埋管上方，水位线距地表 0m，埋管水平孔隙含水饱和度（水所占的孔隙的体积与

岩石孔隙体积之比）100%，含水体积分数 0.434（见图 1）。

地下水位线位于埋管下方，水位线距地表 8m，埋管水平孔隙含水饱和度 50%，含水体积分数 0.218（见图 2）。

地下水位线位于埋管下方，水位线距地表 200m，埋管水平孔隙含水饱和度 12%，含水体积分数 0.052（视为残余水量）（见图 3）。

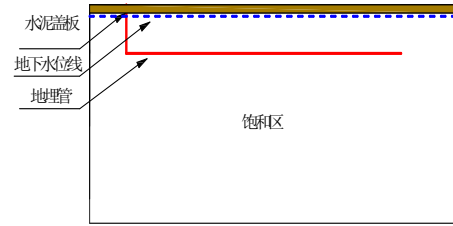


图 1 100%含水饱和度模型 X-Z 切面图

Fig.1 X-Z cross-sectional view of 100% saturation model

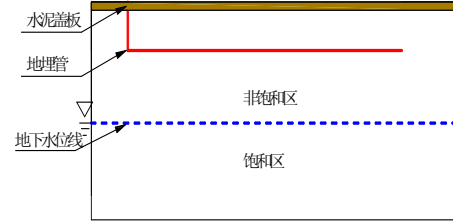


图 2 50%含水饱和度模型 X-Z 切面图

Fig.2 X-Z cross-sectional view of 50% saturation model

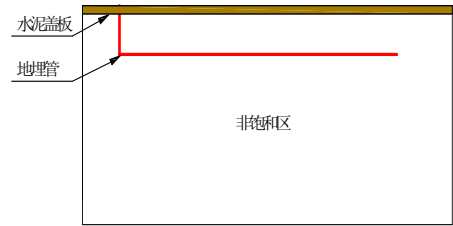


图 3 12%含水饱和度模型 X-Z 切面图

Fig.3 X-Z cross-sectional view of 12% saturation model

根据三种水力模型，模型的基本参数如表 1 所示。

表 1 模拟参数

参数	数值	单位
水平埋管内径	20	mm
水平管壁厚	3	mm
管壁导热系数	0.52	W/m·K
供暖期入水温度 T_f	276.15	K
制冷期入水温度 T_f	306.15	K
管内流体导热系数 k_f	0.6	W/m·K
管内循环流体速度 u	0.675	m/s
土壤基质初始温度 T'	288.15	K
埋管过流断面面积 A	3.14×10^{-4}	m ²

平均水力直径 d_h	20	mm
土壤孔隙度 η	0.434	cm^3/cm^3
土壤基质渗透率	10^{-12}	m^2

2.2 模拟结果与分析

模拟一个制冷期, 后文中截取的温度场选取时间点为制冷末期 (第 100 天), X-Y 切面位于埋管水平, 将同时展示 3 种不同含水饱和度分别在不同时间点的俯视温度云图, 具体俯视切面位置如图 4 所示。

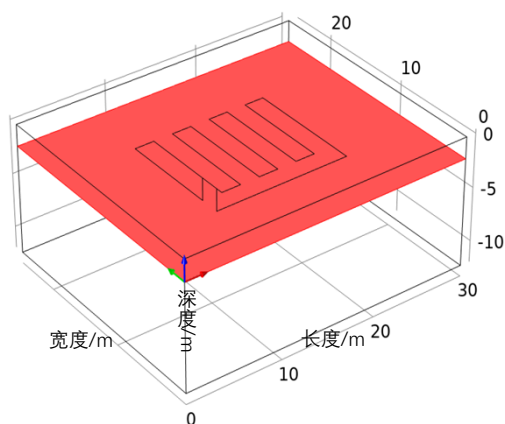
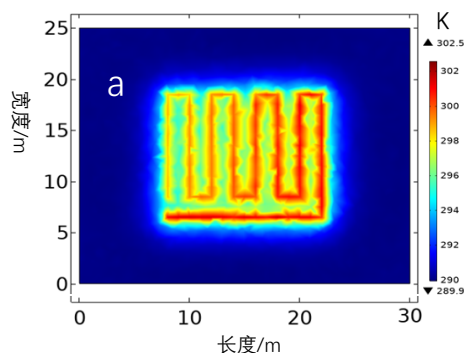


图 4 X-Y 切面展示图

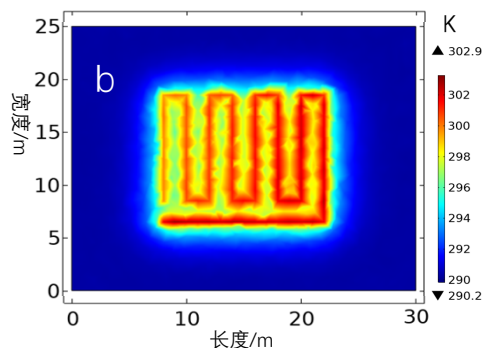
Fig.4 X-Y section display

2.2.1 制冷末期 (第 80 天) X-Y(Z=-2)切面温度场分布情况

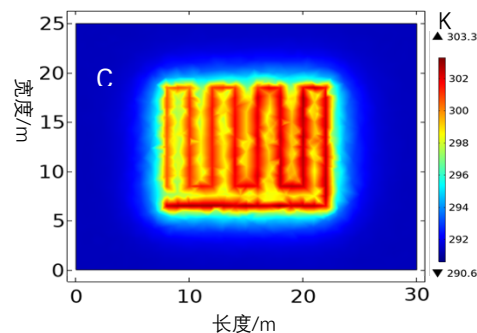
随着水平管内高温工质持续向土壤中排入热量, 埋管周围土壤温度均呈升高趋势。对比图 5 (a)、(b)、(c) 可知, 土壤含水饱和度越高, 受排热影响范围越小, 随着土壤含水饱和度的降低, 埋管区域土壤“热堆积”现象加剧, 表现为更多的高温黄色区域。数据表明, 土壤含水饱和度 100% 时, 埋管附近最高温度升至 302.5K, 土壤含水饱和度 50% 时, 埋管附近最高温度升至 302.9K, 土壤含水饱和度 12% 时, 埋管附近最高温度升至 303.3K, 比含水饱和度 100% 时多升高了 0.8K, 如图 5 所示。



(a) 含水饱和度 100%



(b) 含水饱和度 50%



(c) 含水饱和度 12%

图 5 制冷末期温度场分布图

Fig.5 Temperature field distribution diagram at the end of refrigeration

2.2.2 水平管出口水温

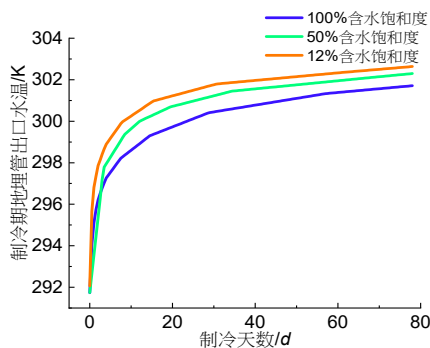


图 6 地埋管出口水温

Fig.6 Outlet water temperature of buried pipe

制冷期内随着土壤含水饱和度的增加,其出水温度越来越低,意味着埋管向土壤中提取了更多的“冷量”。数据表明,在制冷末期,土壤含水饱和度 100%时,出口水温 301.7K,埋管进出水温差高达 4.3K。土壤含水饱和度 50%时,出水口温 302.3K,埋管进出水温差 3.7K。当土壤含水饱和度降低至 12%时,其出口水温升高至 302.7K,较含水饱和度 100%时升高了 23.2%,埋管进出口水温差 3.3K,如图 6 所示。

2.2.3 延米换热量

埋管与周围土壤热量交换能力在制冷末期趋于平稳,此时,埋管延米换热量基于土壤含水饱和度的不同而存在差异。土壤含水饱和度 100%时,水平管延米换热量 35W/m,土壤含水饱和度 50%时,水平管延米换热量 30W/m,随着含水饱和度降低至 12%时,水平管延米换热量下降至 27W/m。土壤含水饱和度 100%较含水饱和度 12%每延米换热量提高了 30%,收益明显,其原因主要在于土壤含水饱和度越高,比热容更大,容纳热量的能力较强,因此在排入相同的热量时,含水饱和度高的土壤温升幅度会更小,如图 7 所示。

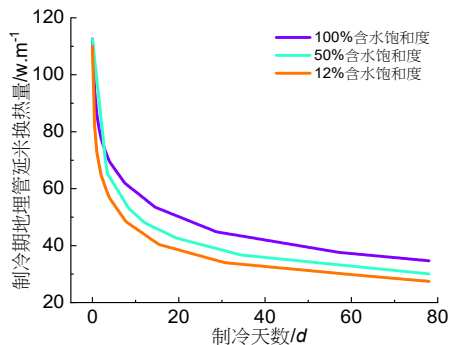


图 7 埋管延米换热量

Fig.7 Heat transfer per meter of buried pipe

3 不同土壤类型对水平管换热性能的影响

3.1 仿真模型构建

该节主要考虑了三种土壤类型,即砂土、壤土、黏土,具体模型如图 8 所示。

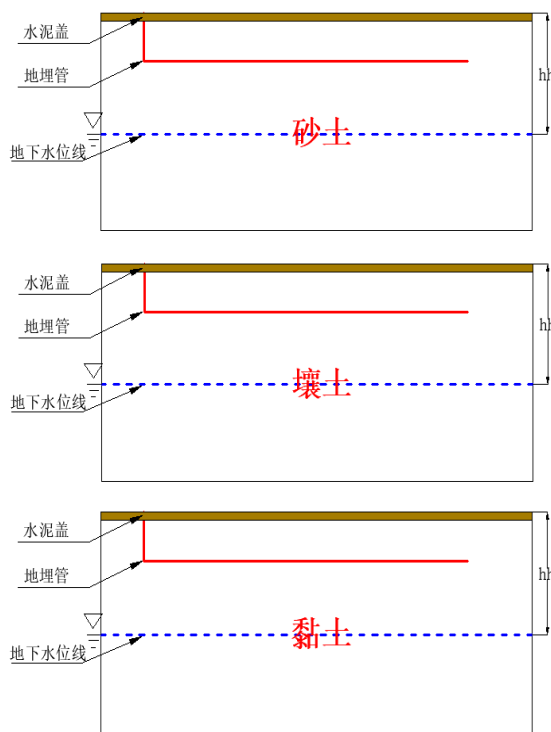


图 8 三种土壤类型及模型

Fig.8 Three soil types and their models

表 2 三种土壤的热力学性能

Table 2 Thermodynamic properties of three soils

土壤类型	导热系数 W/(m·K)	热扩散率 10 ⁻⁶ m ² /s	密度 kg/m ³
致密黏土	1.9	0.71	1925
致密砂土	3.8	1.27	1925
致密壤土	1.5	1.08	2060

根据三种土壤类型,模拟参数设置如表 3 所示。

表 3 模拟参数

Table 3 Simulation parameters

参数	数值	单位
水平埋管内径	20	mm
水平管壁厚	3	mm
管壁导热系数	0.52	W/m·K

制冷期入水温度 T_f	308.15	K
管内流体导热系数 k_f	0.6	W/m·K
管内循环流体速度 u	0.675	m/s
土壤基质初始温度 T'	288.15	K
埋管过流断面面积 A	3.14×10^{-4}	m ²
平均水力直径 d_h	20	mm

3.2 模拟结果与分析

3.2.1 温度场分布

在制冷末期, 壤土的温度场分布情况优于比热容最大的黏土及导热系数最大的砂土。数据表明, 在制冷期第 90 天, 砂土的土壤最高温度升至 304.7 K, 壤土的土壤温度升至 304.2 K, 黏土的土壤温度升至 304.8 K, 相较于砂土及黏土而言, 壤土的土壤温度场分布情况最佳, 热堆积程度最轻, 如图 9 所示。

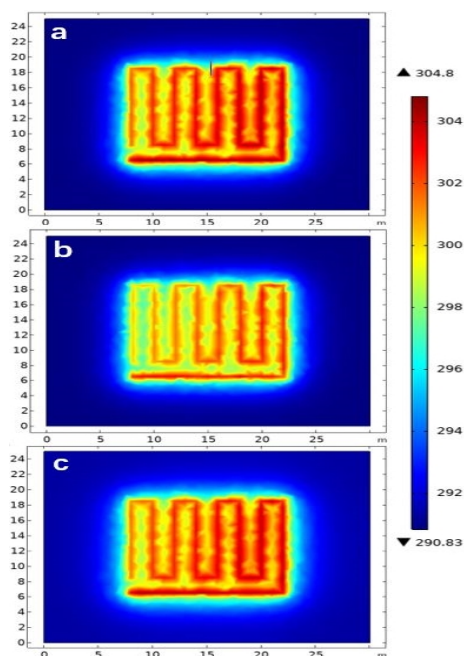


图 9 制冷期末期温度场分布: (a 黏土、b 壤土、c 砂土)

Fig.9 Distribution of temperature field at the end of the refrigeration period :(a clay, b loam, c sandy soil)

3.2.2 水平埋管出口水温

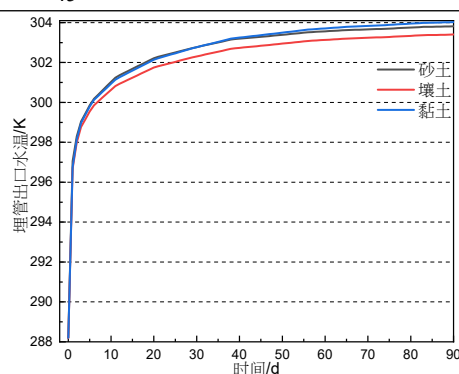


图 10 地埋管出口水温

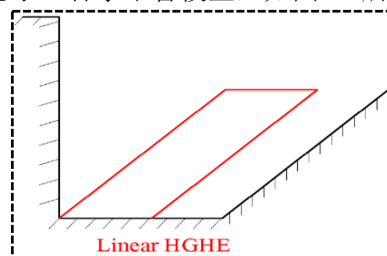
Fig.10 Outlet water temperature of buried pipe

在制冷期第 90 天, 砂土出水温度 303.8 K, 壤土 303.4 K, 黏土 304 K。水平管在壤土中有更低的出口水温, 制冷效率最佳。对于土壤导热系数最大的砂土而言, 其出水温度相较于黏土有一定的下降趋势, 在一定程度上可认为增加土壤的导热系数比增加土壤中水分能够获得更直观的效益。所列三种土壤中, 导热系数及比热容适中的壤土具有更低的出水温度, 意味着其与周围土壤的热交换过程最为利。因此, 影响埋管与土壤的换热过程并非完全取决于土壤中液相及固相所占比例, 而是在两者共同的影响机理作用下进行热量交换, 只有在土壤固相所占比例较大的情况下, 增加土壤中水分才能获得更大的换热效率, 如图 10 所示。

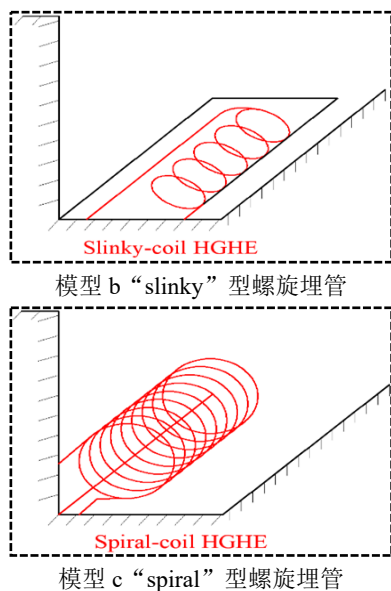
4 不同换热器构造对水平管换热性能的影响

4.1 仿真模型构架

基于目前常用的几种水平管换热器构造, 该节主要考虑了三种水平管模型, 如图 11 所示。



模型 a 水平直管



模型 b “slinky” 型螺旋埋管

模型 c “spiral” 型螺旋埋管

图 11 三种水平管埋管模型

Fig.11 Three models of buried horizontal pipes

根据三种水平管模型,模型参数设置如表 4 所示。

表 4 模拟参数

Table 4 Simulation parameters

参数	数值	单位
埋管内径	20	mm
螺旋管中心距	0.4	m
管壁导热系数	0.5	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
螺旋管半径	0.5	m
螺旋线圈轴向长度	30	m
进水工质温度	35	$^{\circ}\text{C}$
土壤初始温度	15	$^{\circ}\text{C}$

4.2 模拟结果与分析

4.2.1 温度场分布情况

采用水平直管布置方式,在经历 90 天的制冷期后,埋管附近土壤温度最高升至 304.4 K,水平“spiral”型螺旋埋管附近土壤温度升高至 306.9 K,水平“slinky”型螺旋埋管附近土壤温度升高至 307.6 K,比水平直管温度多升高了 3.2 K。同时可明显观测到水平“slinky”型螺旋埋管附近土壤热堆积现象严重,温度场分布情况较差,换热性能受之影响较大。相较而言,水平直管周围土壤温度场分布情况最佳,水平“spiral”型螺旋埋管附近土壤温度分布情况欠佳。

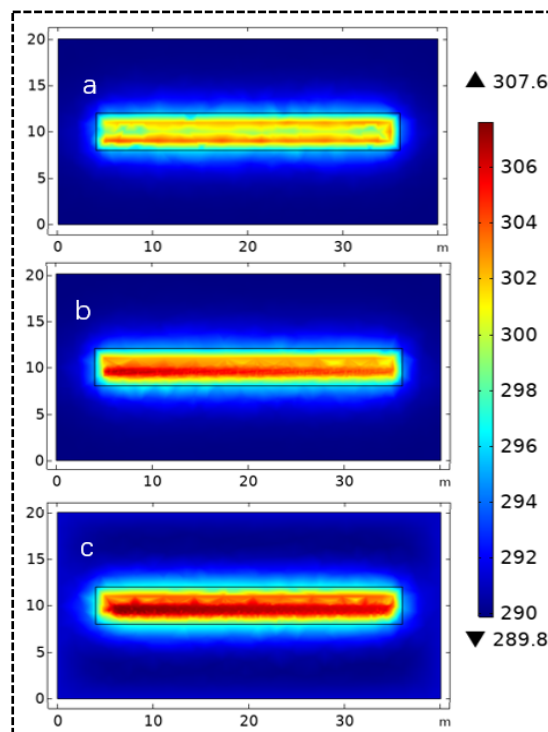


图 12 三种埋管方式温度场变化情况

Fig.12 Variation of temperature field in three buried pipe modes

4.2.2 水平管出口水温

水平“spiral”型螺旋埋管的出水温度 303.8 K,进出水温差 4.3 K,埋管与周围土体的热量交换能力较强,制冷效果显著。针对水平“slinky”型螺旋埋管与直埋管,在制冷季前期,水平“slinky”型螺旋埋管出水温度稍低于直埋管,因为水平“slinky”型螺旋埋管总铺设长度基数大,管路与周围土壤接触换热面积大,因此其换热效率相对于直管更加明显。但随着热量的不断投入,周围土壤温度持续走高,加上水平“slinky”型螺旋埋管本身管路间距较小,管间热干扰现象明显,从而导致埋管与周围土体温度交换能力急剧下滑,尽管其埋设管路较长,但其后期的制冷效率不及直管,如图 13 所示。

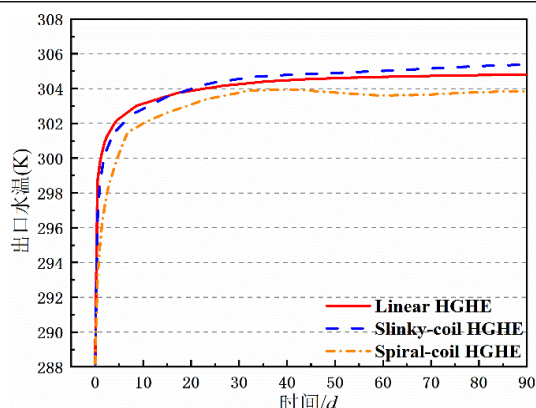


图13 三种埋管方式出水口温度变化情况

Fig.13 Variation of outlet temperature in three buried pipe modes

5 结论

(1) 地源热泵系统水平埋管换热器埋深较浅,其换热性能易受到土壤水力学特征的影响。改变地下水位线的埋设深度,将直接导致了水平埋管管体周围土壤含水量的变化,从而间接改变了管体周围土壤的热物理性质。土壤中水分含量越高,则水平管的换热性能越强,工作效率越高。数据表明,在306K的制冷工况下,土壤含水饱和度100%时,出口水温301.7K,埋管进出水温差高达4.3K;土壤含水饱和度50%时,出水口温302.3K,埋管进出水温差3.7K;当含水饱和度降低至12%时,出口水温升至302.7K,比含水饱和度100%时升高了23.2%,埋管进出口水温差3.3K。土壤含水饱和度越高其制冷效率越高,同时基于制冷末期温度场分布情况可观测到,当土壤含水饱和度较低时,土壤热失衡风险较大,容易引起“热堆积”现象而使得系统无法正常运行。由此可知,土壤的水力学特性对水平管的换热过程有着极其显著的影响。

(2) 在相同的地下水位深度下,由于土壤类型不同同样会引起土壤中水分分布的差异性,进而影响水平管的换热性能。本文对比了水平管换热器在砂土、壤土、黏土中的换热性能,其中水平管在壤土中的换热性能最佳,在黏土中的换热效果最差。土壤的导热系数与比热容同时决定了水平管的换热能力,且增加土壤导热系数比增加土壤比热容更能促进水平管与土壤的换热性能。

(3) 水平管的换热性能受管体自身构造的影响较大,连续模拟制冷90天后,采用“Slinky”型

螺旋埋管时土壤热堆积现象严重,采用水平直埋管时土壤仅有轻微的热堆积现象,更加利于相同长时间稳定运行。基于总换热量指标评价,采用“spiral”型螺旋埋管时末期制冷功率可达到4005W,采用水平直埋管时降低至3010W,当采用水平“slinky”型螺旋埋管时仅为2611W。由此可知,“spiral”型螺旋埋管能够获得更佳的换热效率,但缺点在于温度场分布情况并不乐观,当采用水平直管时,尽管其温度场分布情况有利,但由于其土壤利用率较为低下,导致其总换热量数值较小难以满足换热量要求。

参考文献:

- [1] 邓曙光.地源热泵系统仿真与性能分析[D].上海:同济大学,2009.
- [2] Zhijian Liu, Yuanwei Li, Wei Xu, et al. Performance and feasibility study of hybrid ground source heat pumps system assisted with cooling tower for one office building based on one Shanghai case[J]. Energy, 2019, 173:28-37.
- [3] 洪涛.成都地区地源热泵系统埋管方式及埋管间距研究[D].成都:西南交通大学,2008.
- [4] 吕涛,石镭瑞,尹健,等.地源热泵技术可行性分析[J].城市住宅,2020,27(8):204-205.
- [5] 马最良.地源热泵系统设计与应用[M].北京:机械工业出版社,2013.
- [6] 柳联生.我国城市生态住宅的发展[D].天津:天津大学,2008.
- [7] 杨卫波.土壤源热泵技术及应用[M].北京:化学工业出版社,2015.
- [8] 徐伟.中国地源热泵发展研究报告[M].北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [9] 马最良,吕悦.地源热泵系统设计与应用[M].北京:机械工业出版社,2013.
- [10] LEONG W H, TARNAWSKI V R, AITTOMAKI A. Effect of soil type and moisture content on ground heat pump performance[J]. International J of R efrigeration, 1998,21(8):595-606.
- [11] Fujii H, Nishi K, Komaniwa Y, et al. Numerical modeling of slinky-coil horizontal ground heat exchangers[J]. Geothermics, 2012,41:55-62.
- [12] Fujii H, Yamasaki S, Maehara T, et al. Numerical

- simulation and sensitivity study of double-layer slinky-coil horizontal ground heat exchangers[J]. *Geothermics*, 2013,47:61-68.
- [13] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].成都:中国水利水电出版社,1996.
- [14] 李恩羊.达西定律及其在非饱和土壤中的推广应用[J]. *农田水利与小水电*,1981,(1):42-44.
- [15] ZHOU W S, PEI P, HAO D Y, et al. A numerical study on the performance of ground heat exchanger buried in fractured rock bodies[J]. *Energies*, 2020,13:1647.
- [16] 张玲. 土壤热湿传递与土壤源热泵的理论与实验研究[D].杭州:浙江大学,2007.
- [17] 陈振乾,施明恒.研究土壤热湿迁移特性的非平衡热力学方法[J].*土壤学报*,1998,(2):218-226.