

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202102033



土壤初始温度及地下水渗流对多供一回 中心回水管换热器的影响

刘典, 杜震宇

(太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 为研究地下水渗流对多供一回中心回水管换热器与周围岩土体换热情况的影响,以黄土高原地区实际土壤环境为依托,采用 DesignMoldeler 软件建立多供一回中心回水管换热器及周围土壤的三维热渗耦合传热模型,利用 Meshing 软件对模型进行网格划分,并采用 Fluent 软件对其进行数值模拟.分析岩土体分层条件下,沿埋深方向变化的土壤初始温度、不同地下水渗流方向及间歇运行模式对多供一回中心回水管换热器换热的影响.研究表明:分层土壤初始温度不同对不同类型的多供一回中心回水管换热器影响较大,故不可忽略;不同地下水渗流方向对不同类型的多供一回中心回水管换热器影响不同,存在一个最佳渗流方向使得换热效率达到最高;间歇运行模式可提高热泵运行效率,减小埋管的设计长度,从而减少初投资.

关键词: 分层土壤;多供一回中心回水管;地下水渗流方向;间歇运行

中图分类号: TK 523

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2021)06-0772-12

Influence of Initial Soil Temperature and Groundwater Seepage on Several Supply Pipes and One Central Return Pipe Heat Exchanger

LIU Dian, DU Zhenyu

(College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to study the influence of groundwater seepage on the heat exchange between the several supply pipes and one central return pipe heat exchanger and surrounding rock and soil, a three-dimensional coupled thermo-seepage heat transfer model of several supply pipes and one central return pipe heat exchanger and surrounding soil was established by DesignMoldeler software, based on the actual soil environment in the Loess Plateau. The model was meshed by Meshing software, and numerically simulated by Fluent software. Under the condition of rock and soil stratification, the effects of soil initial temperature varying along the buried depth, different groundwater seepage directions and intermittent operation modes on the heat transfer of several supply pipes and one central return pipe heat exchanger were analyzed. The research results show that layered soil with different initial temperatures has a greater impact that can not be ignored. Different groundwater seepage directions have different influence on different types of several supply pipes and one central return pipe heat exchangers, there is an optimal seepage direction to maximize the heat transfer efficiency. The intermittent operation mode can improve operation efficiency of the heat pump, and can reduce the design length of the buried pipe, thereby reduce the initial investment.

收稿日期: 2021-02-25

通信作者: 杜震宇(1964-),男,教授,博士,主要从事可再生能源利用的研究. E-mail: dsdd2004@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51476108);国家重点研发计划项目(2016YFE0133300-04)

Keywords: layered soil; several supply pipes and one central return pipe; groundwater seepage direction; intermittent operation

随着全球能源消耗的不断增长,资源面临枯竭,环境面临破坏,气候开始出现各种极端变化.地热能作为一种有前途的可再生能源已广泛应用于发电领域^[1].我国政府和社会公众越来越重视保护大气环境,城镇已普遍禁止采用中小型燃煤锅炉供热,热泵成为替代燃煤锅炉的供热方式^[2].根据获取热能的不同来源,热泵分为地源热泵,水源热泵和空气源热泵.地源热泵因其具有占地面积小、不会对地下水造成污染等优点,成为目前应用最为普遍的一种热泵系统^[3].

地埋管换热器是地源热泵系统的关键,其换热性直接影响整个系统的运行^[4].学者们已经对地埋管换热器进行大量研究,但都是基于土壤初始温度均匀一致且无地下水渗流等假设,与真实结果存在着一定的误差.随着时代及认知的发展,传统的未考虑土壤分层和地下水渗流的均质换热模型已经不再适用.在实际工程中,深度一般为30~100 m,周围地质情况复杂,地埋管在垂直方向上穿越不同的岩土层,且部分岩土层中存在地下水渗流,因此,垂直方向的各地质层的换热能力不同^[5].为了使模拟结果更接近于真实情况,越来越多的学者开始研究岩土体分层和地下水渗流对地埋管换热器换热性能的影响.

陈金华^[6]提出地下土壤在垂直方向上存在分层现象,初始温度和物性随着分层的不同而不同.张琳琳等^[7]对比分析土壤分层模型和均质模型情况下埋管周围温度场的分布,得出土壤分层导致每层钻孔壁温度因土壤物性变化各不相同,达到稳定的时间也各有差异.杜震宇^[8]对黄土高原某地地下埋管进行两年的监测,指出钻井的计算必须考虑岩土体分层的影响.刘逸等^[9]采用整体求解法,比较有、无地下水渗流工况下埋管的换热情况,得出地下水渗流时的土壤温度波动范围较地下水无渗流的大,地埋管换热器效果好.岳丽燕等^[10]搭建地埋管室内试验台,得出地下水渗流流速越大,地埋管换热器的换热量和综合导热系数也越大.王欣^[11]提出地下水渗流方向角的概念,指出U型管的供回水温差并不随着渗流速度的增大而无限增大,与地下水渗流方向有着一定的关系. Choi等^[12]基于有限元法,研究地下水渗流方向和速率对不同排列方式的地埋管管群的影响,指出考虑地下水渗流方向因素必不可少.

以上学者均从单一因素研究埋管与土壤换热的影响,而对于分层岩土和地下水共同作用的研究相对较少,且目前对多供一回新型换热器的研究是基于岩土体分层但初始温度均匀一致,且无地下水渗流等条件进行的.因此,本文以黄土高原某高速公路办公服务区的实际岩土层环境为基础,根据多孔介质理论,采用DesignMoldeler软件对多供一回中心回水管换热器(简称多供一回埋管换热器)及其周围岩土体建立三维非稳态热渗耦合传热模型,得到该地区不同类型多供一回埋管换热器的最佳地下水渗流方向和最佳管长.

1 数值模拟

1.1 多供一回埋管换热器的结构

以五供一回埋管换热器为例,其包括5根供水支管和一根管径较大的回水管,回水管置于换热器中心且用双壁管保温,双壁管夹层为真空,避免普通保温材料被水浸湿而失效^[13].五供一回埋管换热器结构三维视图,如图1所示.图1中:汇水器起到连接供回水管的作用;为了便于模拟分析,将圆台形简化成圆柱形.

1.2 模型的假设及简化

由于多供一回埋管换热器传热过程比较复杂,受到多种因素影响,所建立的模型无法做到与实际完全一致,因此,对模型进行如下7个假设及简化.

- 1) 将土壤视为饱和多孔介质,假设土壤中的地下水渗流方向仅沿水平方向,不考虑垂直方向.
- 2) 忽略含水层与非含水层之间的传质.
- 3) 在钻孔深度范围内,岩土体初始温度按照某一函数连续变化.
- 4) 在同一构造层范围内,岩土体组成成分、物性参数各向均匀一致,不随岩土体温度变化而变化.
- 5) 由于供回水管管径较小,因此,假设管内流体温度在水平截面上均匀一致.
- 6) 假设回填材料与地埋管及周围土壤之间接触良好,忽略接触热阻.

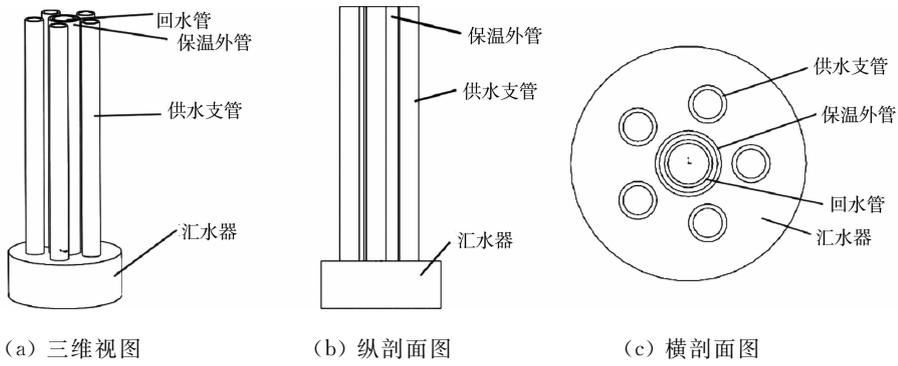


图1 五供一回埋管换热器结构三维视图

Fig. 1 Three-dimensional view of five supply pipes and one return buried pipe heat exchanger structure

7) 回水管保温绝热.

1.3 几何模型的建立及网格划分

在工程中,两管井间最大间距一般为 6 m,因此,单井的作用距离为 3 m. 只考虑单井内的多供一回埋管换热器与岩土体之间的换热,以长方体区域(长 \times 宽 \times 高为 6 m \times 6 m \times 90 m)为计算区域,依据现场勘查结果,将岩土体分为 5 层,按照原比例建模:埋管深度为 90 m;钻井直径为 150 mm;汇水器直径为 140 mm;供水管中心距钻井中心距离为 50 mm;供水管内径为 25 mm;回水管内径为 32 mm;汇水器厚度为 50 mm;双壁管外壁直径为 52 mm.

利用 Meshing 软件对多供一回埋管换热器模型进行网格划分,将网格划分的模型导入 Fluent 软件进行计算. 网格划分方式和网格质量严重影响模拟结果的准确性^[14]. 划分原则如下:温度变化剧烈的地方应该加密网格,温度变化平缓的地方可以相对稀疏网格^[15]. 因此,离多供一回埋管换热器越近,土壤网格越密;由于温度场变化不明显,离多供一回埋管换热器越远的土壤网格越稀疏,多供一回埋管换热器垂直方向温度变化很小,网格稀疏. 五供一回埋管换热器模型的网格划分,如图 2 所示.

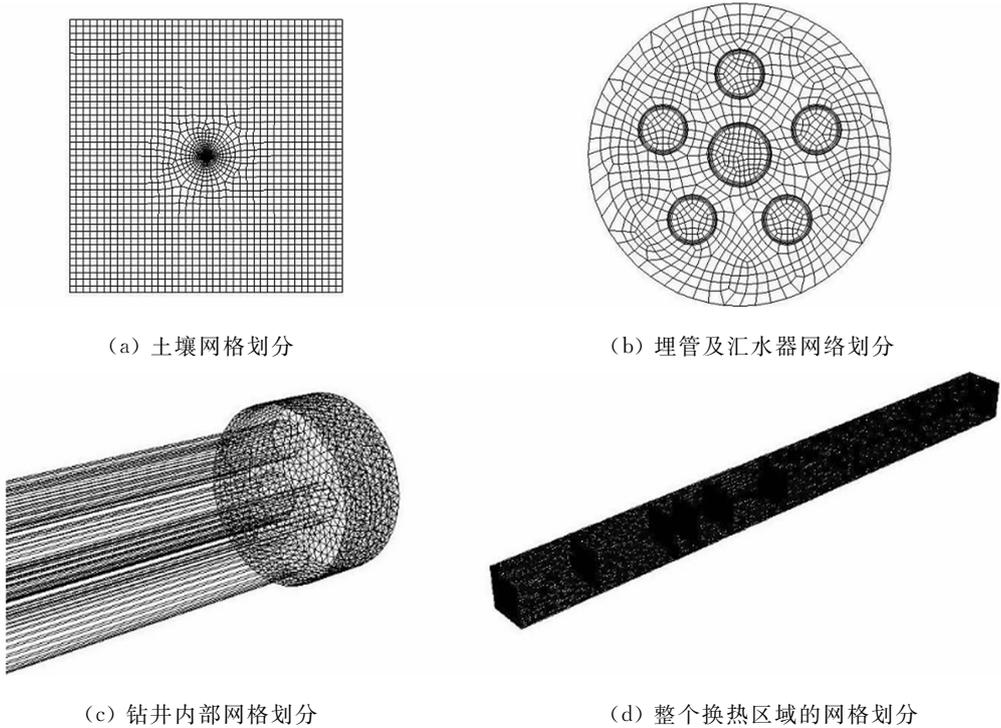


图2 五供一回埋管换热器模型的网格划分

Fig. 2 Mesh dividing of five supply pipes and one return buried pipe heat exchanger model

1.4 物性参数

根据黄土高原实际情况设置的岩土体分层情况,如图 3 所示.

岩土物性参数^[16],如表 1 所示. 表 1 中: Δh 为土壤分层厚度; ρ 为流体密度; c 为土壤比热容; v 为软

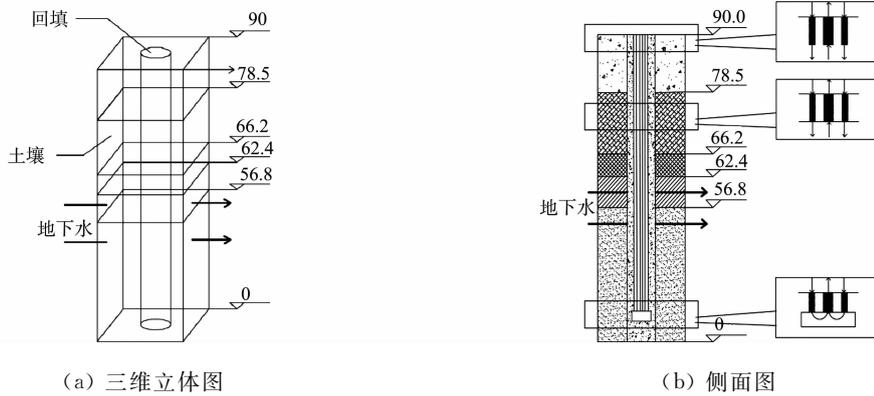


图 3 实际岩土体分层情况(单位:m)

Fig. 3 Stratification of actual rock and soil mass (unit: m)

化水的运动粘度,软化水是指经过软化后只有少量的可溶性镁盐和钙盐的天然水,软化水从根本上消除水碱,使设备安全运行,减少水管道的维修; φ 为孔隙率; λ 为土壤导热系数.

表 1 岩土物性参数

Tab. 1 Properties parameters of rock and soil

材质	$\Delta h/m$	$\rho/kg \cdot m^{-3}$	$c/J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$	$\lambda/W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	$\nu/\times 10^6 m^2 \cdot s^{-1}$	$\varphi/\%$
PE 管	—	950.0	2 300	0.44	—	—
软化水	—	999.1	4 188	0.58	1.186	—
回填材料	—	1 310.0	1 165	2.40	—	—
致密砂土	11.5	1 925.0	1 425	2.10~2.30	—	—
轻质砂土	12.3	1 284.0	1 425	0.90~1.90	—	—
卵石	3.8	2 650.0	1 425	2.30~3.70	—	—
中风化砂岩	5.6	2 570.0	1 425	2.10~3.50	—	0.37
强风化砂岩	56.8	2 730.0	1 425	2.10~3.50	—	0.32

1.5 网格无关性验证

两供一回、三供一回、四供一回、五供一回埋管换热器除供水管数量不同外,几何尺寸一致,网格划分原则相同,换热器、钻井内回填材料等的网格尺寸也基本一致,故对两供一回埋管换热器的网格无关性的验证也同样适用于其余多供一回埋管换热器.

选取网格总数分别为 113 395,399 865,665 664,990 865 和 1 100 325 的两供一回埋管换热器模型进行模拟,其出口平均温度分别为 294.53,294.74,294.78,294.80,294.82 K. 因此,不同网格总数的出口平均温度之间最大误差为 1.30%,最小为 0.09%;网格数量对温度分布基本没有影响. 综上,选取网格总数为 399 865 的模型进行模拟计算.

1.6 数学模型

多供一回埋管换热器与岩土体的传热是比较复杂的非稳态过程,包括换热器内介质与管壁、回填材料的传热、非渗流层土壤之间的导热及渗流层土壤之间的对流传热.

土壤层之间存在温度差异,必然发生热量交换. 非渗流层岩土体之间的传热仅是单纯的传热,渗流层之间的传热及渗流层与非渗流层岩土体之间的传热均是对流过程,故可以将渗流对埋管的换热作用附加到土壤导热系数中,建立等效数值模型.

1.6.1 埋管内水的流动方程、动量方程及能量守恒方程^[17] 质量方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0. \tag{1}$$

动量方程为

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial \tau} + \text{div}(\rho u_i u) = \text{div}(\eta \cdot \text{grad } u_i) + S_{u_i} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho f_{x_i}. \tag{2}$$

能量方程为

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + \text{div}(uT) = \text{div}\left(\frac{\lambda}{\rho c} \text{grad } T\right) + \frac{S_T}{\rho c}. \tag{3}$$

式(1)~(3)中: ρ 为流体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; τ 为运行时间, s ; \mathbf{u} 为速度矢量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; u_i 为速度矢量在坐标轴*i*的分量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; S_{u_i} 为广义源项; η 为流体的动力粘度; p 为压力, Pa; ρf_{x_i} 为体积力; c 为比热容; T 为温度, K; S_T 为粘性耗散项。

1.6.2 回填材料、非渗流土壤层之间的导热微分方程 微分方程为

$$\rho_{s,i} c_{s,i} \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} \right) + Q_i. \quad (4)$$

式(4)中: $\rho_{s,i}$ 为第*i*层岩土体的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $i=1, 2, \dots$; $c_{s,i}$ 为第*i*层岩土体的比热容, $\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$; T_i 为第*i*层岩土体温度, K; Q_i 为第*i*层的源项; z 为岩土层距离地面的距离, m; λ_i 为第*i*层岩土体的导热系数, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 。

1.6.3 渗流层多孔介质的能量方程、质量方程、动量方程 将有渗流层的土壤近似看成各向同性的理想多孔介质,且假设地下水沿一维水平方向流动。多孔介质区域并不是建立带有孔隙的立方体,而是用孔隙率 φ 表示多孔介质。多孔介质区域内的换热形式不仅有热传导还有热对流。假定饱和多孔介质中流体和固体可以瞬时达到局部平衡,并且认为热容量和热导率是恒定的^[18]。能量方程为

$$(\rho c)_{m,j} \frac{\partial T_j}{\partial \tau} + (\rho c)_{g,j} v \cdot \nabla T_j = \nabla (\lambda_{m,j} \nabla T_j) + q_{m,j}, \quad (5)$$

$$(\rho c)_{m,j} = (1 - \varphi) (\rho c)_{s,j} + \varphi (\rho c)_{g,j}, \quad (6)$$

$$\lambda_{m,j} = (1 - \varphi) \lambda_{s,j} + \varphi \lambda_{g,j}, \quad (7)$$

$$q_{m,j} = (1 - \varphi) q_{s,j} + \varphi q_{g,j}. \quad (8)$$

质量方程为

$$\frac{\partial (\varphi \rho_{m,j})}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho_{m,j} v) = 0. \quad (9)$$

动量方程为

$$\frac{\partial (\rho_{m,j} v)}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho_{m,j} v v)}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + S_i. \quad (10)$$

式(5)~(10)中: v 为地下水渗流的流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; $q_{m,j}$ 为第*j*层多孔介质的热源; $(\rho c)_{m,j}$ 为第*j*层多孔介质的表观比热容, $\text{J} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{K})^{-1}$; $(\rho c)_{s,j}$ 为第*j*层土壤的体积比热容, $\text{J} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{K})^{-1}$; $(\rho c)_{g,j}$ 为第*j*层地下水的体积比热容, $\text{J} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{K})^{-1}$; T_j 为第*j*层岩土温度, K; $\lambda_{m,j}$ 为第*j*层多孔介质的表观导热系数, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$; $\lambda_{s,j}$ 为第*j*层多孔介质中土壤的导热系数; $\lambda_{g,j}$ 为第*j*层多孔介质中水的导热系数, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$; μ 为多孔介质的有效粘度; S_i 是动量方程的源项,由达西黏性阻力项和惯性损失项组成。

式(7)由于假设多孔介质各向同性,且只考虑地下水沿一个方向流动,源项可简化为 $S_i = -$

$\left(\frac{\mu}{\alpha} v + \frac{1}{2} C_2 \rho |v| v \right)$, 其中, α 为渗透系数, C_2 为惯性阻力系数。

1.6.4 初始条件和边界条件的设置 张静等^[13]认为多供一回埋管换热器适宜速度为 $0.4 \sim 0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 在该速度范围内,相应的多供一回埋管换热器可替换单、双U换热器。因此,埋管入口速度设置为 $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。埋管土壤中有地下水渗流,地下水流动速度设置为 $600 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 即 $1.9 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 120 h流动距离为 8.2 m。现有大多数模型都是假设不同土壤的初始温度是均匀的,然而,通过对黄土高原寒冷地区地下岩土层的现场勘探及热响应测试,土壤的初始温度并不是均匀一致的,以钻孔底端为坐标原点,管段距离底端的距离为 h ,层与层之间初始温度 $(T_\infty(h))$ ^[8]为

$$T_\infty(h) = 0.016(90 - h) + 283.61, \quad 0 < h \leq 70, \quad (11)$$

$$T_\infty(h) = -0.012(90 - h) + 284.19, \quad 70 \leq h \leq 90. \quad (12)$$

将土壤初始温度、土壤四周的壁面温度均用UDF函数设置输入:供水水温设置为 300 K;室外空气温度设置为 298.75 K;土壤顶面与空气对流换热系数为 $0.48 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 。

1.6.5 数值模拟条件的设置 模型的入口边界设置为 velocity-inlet,出口边界设置为 pressure-outlet;埋管与钻井壁面、回填土与土壤交界面及不同岩土层之间均设置为耦合换热边界条件;计算区域四周设置为第一类边界条件;底面设置为绝热边界条件。

模型采用比标准模型性能好且能有效应用于各种类型的流动模拟(包含射流、混合流的自由流动、

管道内流动、边界层流动、以及带有分离层的流动)的 Realizable $k-e$ 模型^[19], 选择主要用于瞬态模拟, 特别是使用大的时间步长的 PISO 算法. 由实测温度场和地勘资料可知, 在地下 30~40 m 间存在地下水渗流^[9]. 因此, 非渗流层土壤设置为 soild, 地下水渗流层设置为 fluid 多孔介质. 动量、能量方程均采用二阶迎风离散格式, 暂态项采用隐式格式.

1.7 模型验证

模型使用文献[20]中的试验数据进行验证, 几何模型与物性参数均按文献[20]进行设置. 出口水温实测值与模拟值的比较, 如图 4 所示. 由图 4 可知: 模拟与实测结果相差不大, 最大误差为 7.7%, 小于 10.0%, 验证了模型的准确性. 因此, 文中数值模拟方法能比较真实地反应埋管换热情况.

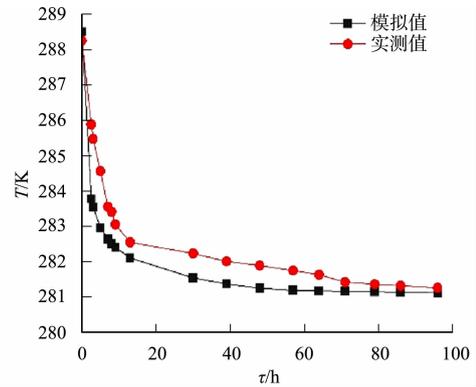


图 4 出口水温实测值与模拟值的比较

Fig. 4 Comparison of measured value and simulated value of outlet water temperature

2 模拟结果与分析

2.1 沿埋深方向变化的土壤初始温度

以三供一回埋管换热器为例, 对比分析分层土壤初始温度为连续变化的温度函数(8), (9)和初始温度为 284 K 条件下的换热情况. 在多供一回埋管换热器与岩土体传热的过程中, 存在一个临界位置, 该位置不再受到管内水温的影响, 从而保持初始温度, 从临界位置到埋管换热器的中心的距离就是多供一回埋管换热器的热作用半径.

土壤初始温度为恒温 284 K 的不同层温度云图, 如图 5 所示. 土壤初始温度为温度函数的不同层温度云图, 如图 6 所示. 由图 5, 6 可知: 当初始温度为 284 K 时, 各层土壤与多供一回埋管换热器换热量不同, 热作用半径也不同, 因为不同层土壤的导热系数不一样, 导热系数 λ 越大, 换热程度越大, 换热量增加, 热半径也相应较大, 而导热系数 λ 小, 则反之; 当初始温度是连续变化的温度函数时, 温度高于 284 K 的土壤与埋管内水温之间的温差较小, 换热量较少, 热作用半径也相应较小, 温度低于 284 K 的土壤与埋管内水之间温差较大, 换热量也相应较大.

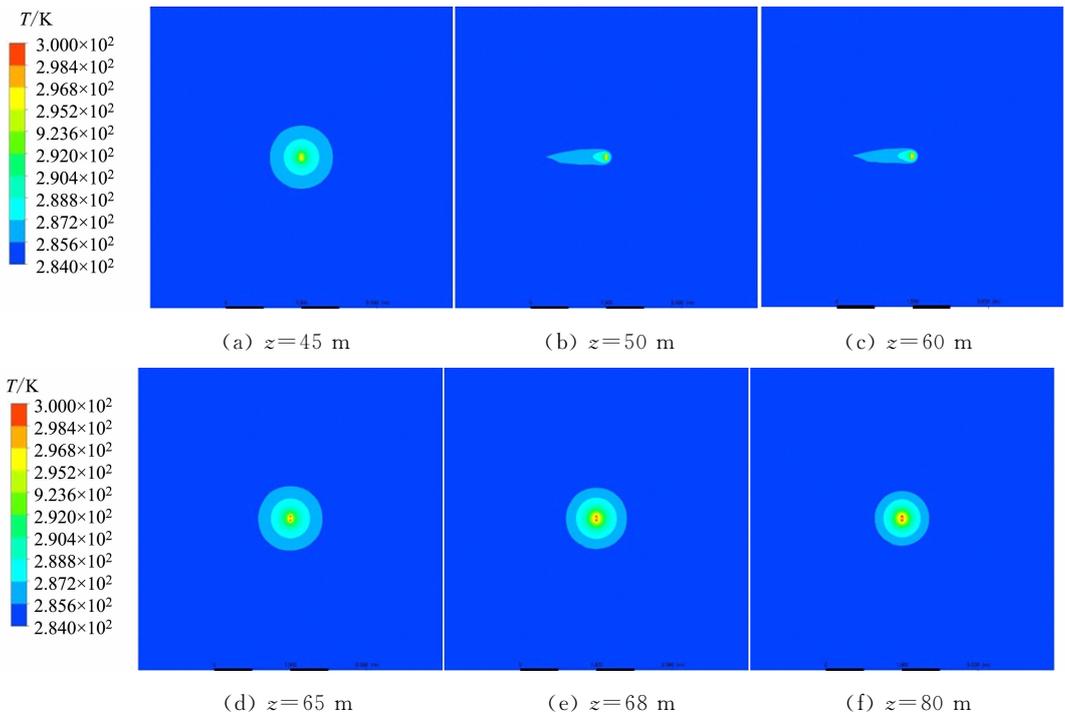


图 5 土壤初始温度为恒温 284 K 的不同层温度云图

Fig. 5 Temperature cloud diagram of different soil layer with initial 284 K constant temperature

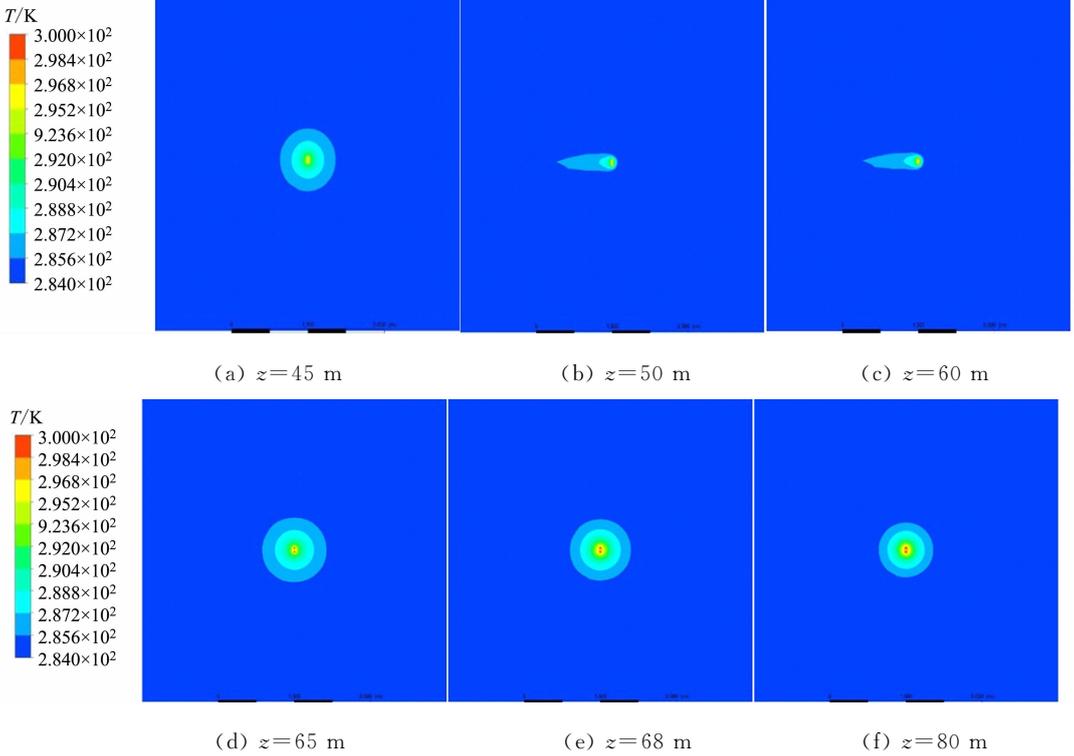


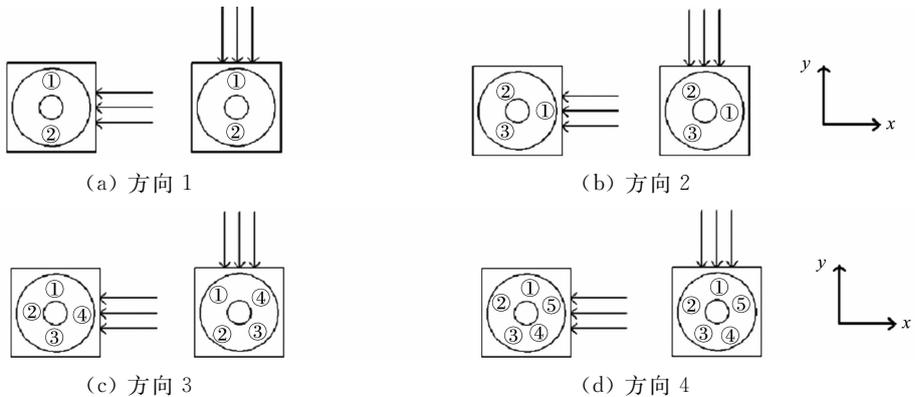
图6 土壤初始温度为温度函数的不同层温度云图

Fig. 6 Temperature cloud diagram of different layers with initial function temperature

当初始温度为 284.00 K 时,出口温度为 294.62 K,总换热量为 8 876.35 J;当初始温度为连续变化的温度函数时,出口温度为 294.75 K,总换热量为 8 656.19 J.因此,两种不同初始条件下的埋管总换热量相差 220.16 J,误差率达到了 2.48%.在进行多供一回埋管换热器模拟时,不同层岩土体之间的温度差异不能忽略.

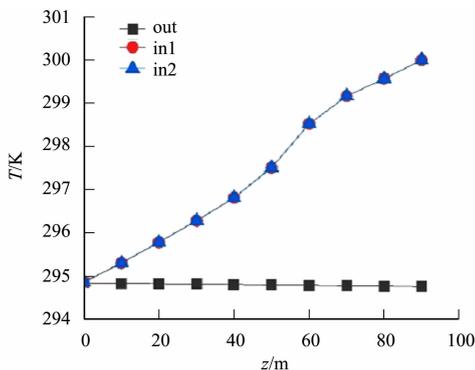
2.2 不同地下水渗流方向

不同地下水渗流方向下的多供一回埋管换热器 xy 平面示意图,如图 7 所示.图 7 中:1~5 为供水支管 1~5.多供一回埋管换热器各供水支管在不同地下水渗流方向下温度变化图,如图 8 所示.图 8 中:out 为出水管;in1~in5 为供水支管 1~5.

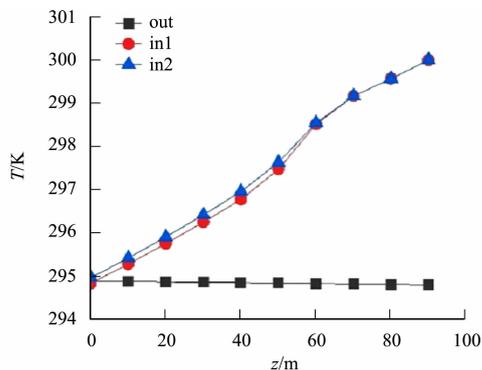
图7 不同地下水渗流方向下的多供一回埋管换热器 xy 平面示意图Fig. 7 Schematic diagram of xy plane of several supply pipes and one return buried pipe heat exchanger under different groundwater seepage directions

单位井深换热量是反映埋管换热能力的重要指标^[21].由图 8 可知:随着地下水渗流方向不同,不同岩土层所对应的各支管段的单位换热量也不同,因此,管内水温变化也不一样.

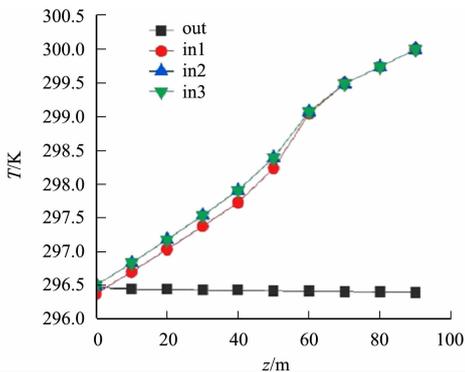
两供一回、三供一回、四供一回、五供一回埋管换热器的各供水支管沿埋管方向的单位轴向换热量,如表 2~5 所示.表 2~5 中: q 为两供一回换热器支管沿埋管方向的单位轴向换热量.



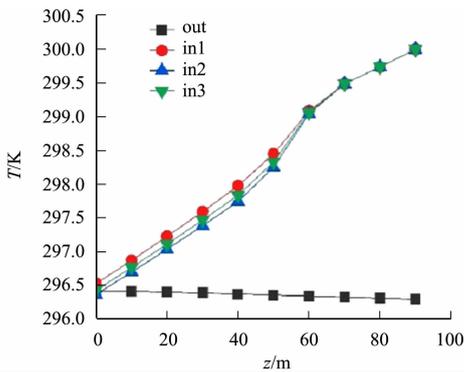
(a) 两供一回埋管换热器 x 方向



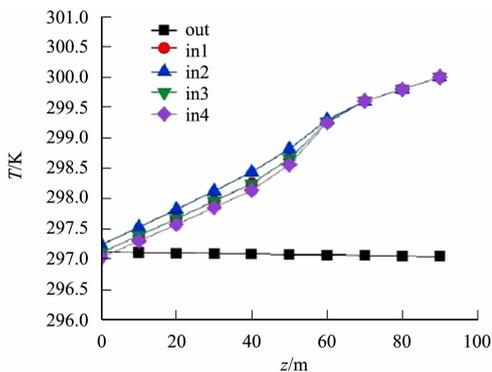
(b) 两供一回埋管换热器 y 方向



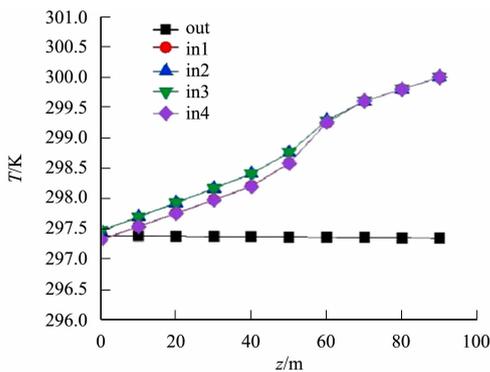
(c) 三供一回埋管换热器 x 方向



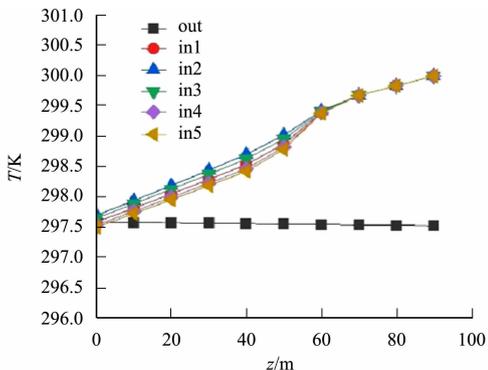
(d) 三供一回埋管换热器 y 方向



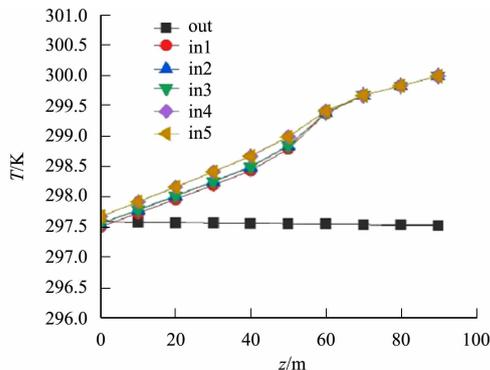
(e) 四供一回埋管换热器 x 方向



(f) 四供一回埋管换热器 y 方向



(g) 五供一回埋管换热器 x 方向



(h) 五供一回埋管换热器 y 方向

图 8 多供一回埋管换热器各供水支管在不同地下水渗流方向下温度变化图

Fig. 8 Temperature variation diagram of each water supply branch pipe of several supply pipes and one return buried pipe heat exchanger under different groundwater seepage directions

由表 2 及图 8(a), (b) 可知以下 2 点.

表2 两供一回埋管换热器各供水支管沿埋管方向的单位轴向换热量

Tab. 2 Unit axial heat transfer of each water supply branch pipe of two supply pipes and one return buried pipe heat exchanger along buried pipe direction

地下水 渗流方向	供水支管	$q/W \cdot m^{-1}$					
		砂土	粉土	卵石	中风化砂岩(有渗流)	强风化砂岩(有渗流)	强风化砂岩(无渗流)
x	in1	35.3	33.7	53.7	82.7	82.2	41.4
	in2	35.3	33.7	53.6	82.8	82.1	41.4
y	in1	35.3	33.8	53.8	85.2	84.4	40.9
	in2	35.4	33.7	53.4	74.4	74.7	42.1

1) 当地下水渗流为 x 方向时,地下水渗流对供水两支管的影响程度相同,因此,管内水温及各供水支管与相应岩土层的单位井深换热量相同;地下水渗流 x 方向和 y 方向换热量相差 66 W。

2) 当地下水渗流为 y 方向时,in1 位于地下水渗流上游,in2 位于地下水渗流下游,地下水渗流对两供水支管的影响程度不同,在含水层,in1 与相应岩土层的换热程度较无地下水渗流时更大,换热量更多,管内水温降得越多,热量随地下水流动不断从上游迁移到下游,抑制了 in2 与相应岩土层的换热,换热量比无地下水渗流相应减少。

表3 三供一回埋管换热器各供水支管沿埋管方向的单位轴向换热量

Tab. 3 Unit axial heat transfer of each water supply branch pipe of three supply pipes and one-return buried pipe heat exchanger along buried pipe direction

地下水 渗流方向	供水支管	$q/W \cdot m^{-1}$					
		砂土	粉土	卵石	中风化砂岩(有渗流)	强风化砂岩(有渗流)	强风化砂岩(无渗流)
x	in1	21.5	20.7	35.3	65.3	65.6	28.4
	in2	21.5	20.8	35.0	54.7	56.0	29.6
	in3	21.5	20.7	35.0	54.9	56.1	29.5
y	in1	21.5	20.9	35.2	58.8	59.7	29.5
	in2	21.6	20.9	35.7	63.9	64.4	28.9
	in3	21.6	20.8	35.0	50.6	52.2	30.4

由表3及图8(c),(d)可知以下2点。

1) 当地下水渗流方向为 x 方向时,in1 位于地下水渗流方向的上游,而 in2,in3 位于地下水渗流下游,在未经过地下水层时,3 根供水支管与土壤的换热情况基本一致,而当埋管经过含水层时,换热发生变化,地下水渗流促进了 in1 与岩土层的换热,使其换热量增大,且随着地下水的流动,势必会带走土壤中的热量,进而影响下游土壤温度波动范围及其与供水支管间的换热。

2) 当地下水渗流方向为 y 方向时,in2 位于渗流方向的上游,而 in1,in3 分别处于土壤中的不同位置,受地下水影响程度也不相同,因此,3 根供水各供水支管管段在经过含水层时,与相应的岩土层换热量不同,水温变化也有差别;地下水渗流 x 方向和 y 方向换热量相差 260 W。

表4 四供一回埋管换热器各供水支管沿埋管方向的单位轴向换热量

Tab. 4 Unit axial heat transfer of each water supply branch pipe of four supply pipes and one return buried pipe heat exchanger along buried pipe direction

地下水 渗流方向	供水支管	$q/W \cdot m^{-1}$					
		砂土	粉土	卵石	中风化砂岩(有渗流)	强风化砂岩(有渗流)	强风化砂岩(无渗流)
x	in1	16.6	16.1	27.9	48.8	50.0	23.9
	in2	16.5	16.1	27.3	37.9	40.2	25.1
	in3	16.6	16.1	27.8	48.8	50.1	23.9
	in4	16.6	16.1	28.1	55.2	56.1	23.3
y	in1	16.5	16.0	28.1	53.5	54.7	18.6
	in2	16.5	16.0	27.4	41.9	43.8	19.8
	in3	16.5	16.0	27.4	42.0	44.0	19.8
	in4	16.5	16.0	28.0	54.0	55.0	18.6

表 5 五供一回埋管换热器各供水支管沿埋管方向的单位轴向换热量

Tab. 5 Unit axial heat transfer of each water supply branch pipe of five supply pipes and one-return buried pipe heat exchanger along buried pipe direction

地下水 渗流方向	供水支管	$q/W \cdot m^{-1}$					
		砂土	粉土	卵石	中风化砂岩(有渗流)	强风化砂岩(有渗流)	强风化砂岩(无渗流)
x	in1	13.4	13.1	23.0	41.4	42.7	19.9
	in2	13.5	13.1	22.6	31.5	33.8	21.1
	in3	13.5	13.1	23.0	35.9	37.8	20.5
	in4	13.4	13.1	23.1	45.1	46.1	19.7
	in5	13.5	13.1	23.4	47.1	48.6	19.4
y	in1	13.4	13.1	23.3	46.8	47.8	19.5
	in2	13.4	13.1	23.1	43.4	44.9	19.7
	in3	13.5	13.1	23.1	33.0	35.3	22.1
	in4	13.4	13.1	22.6	33.6	35.3	20.8
	in5	13.5	13.1	23.2	42.9	44.6	19.8

由表 4, 5 及图 8(e), (f), (g), (h) 可知: 四供一回、五供一回埋管换热器受地下水渗流方向的影响情况与三供一回埋管换热器相似, 当地下水渗流方向不同时, 各供水支管处于地下水渗流层中不同位置, 受到的影响各不相同, 各岩土层各供水支管段单位轴向换热量均有差距; 地下水渗流 x 方向和 y 方向对四供一回和五供一回埋管换热器的换热量相差分别为 858, 17 W。因此, 当供水管数量 $n \leq 4$ 时, 随着 n 的增加, 地下水渗流方向对多供一回埋管换热器的影响越大, 当 $n \geq 5$ 时, 地下水渗流方向对多供一回埋管换热器的影响逐渐减弱。

当地下水渗流方向不同时, 岩土分层条件对多供一回埋管换热器供水支管产生的影响各有差异, 各供水支管内水与岩土体的轴向换热量大小也不同。供水管数量相同的多供一回埋管换热器中同一供水支管随着地下水渗流区域上、下游位置的改变, 受到的影响也发生改变。地下水渗流促进位于上游区域的供水支管与土壤之间的换热, 抑制位于下游区域的供水支管与土壤之间的换热。不同渗流方向下, 各类型的多供一回埋管换热器均存在一个最佳渗流方向, 使其与土壤之间的总换热量最大, 换热效率最高。最佳渗流方向并不是固定的, 不同供水管数量的多供一回埋管换热器的最佳渗流方向不同, 实际工程中, 为了增强换热能力, 提高埋管换热效率, 可以依据最佳渗流方向安装埋管换热器。

2.3 间歇运行模式

上文均是在夏季工况下连续运行 120 h 后得出的结果, 实际上, 为了能够优化机组运行工况, 需要给土壤一定的时间恢复温度, 使其处于冷热平衡状态, 从而能够真实地反映埋管与周围土壤的换热情况。因此, 需要考虑间歇运行的影响。间歇运行是指根据建筑环境中冷热负荷分布的不固定性及地温的可恢复性提出的高效利用地能的有效措施^[22]。根据房间功能的不同, 设置的间歇运行比也不同, 按照办公室的需求, 设置间歇运行比为 8 : 16 (热泵运行时间为 9:00—17:00)。

供冷期系统间歇运行 120 h 的埋管换热器内水温度变化, 如图 9 所示。由图 9 可知: 虽然出口温度不一致, 但不同类型埋管换热器内水温变化呈现出相同的规律; 当埋管换热器进水温度为 300 K 时, 埋管换热器内水与分层土壤之间发生剧烈换热, 水温开始降低, 周边岩土体温度相应升高, 土壤分层温度分布不同于初始温度分布; 与连续运行工况不同的是, 进水管内水温度并不是一直下降的, 在下降到地下水渗流区域 (即 z 为 50~60 m) 后, 水温与此时的岩土体温度接近, 埋管换热器内水与周围岩土体不再发生换热。

热回流引起埋管换热器与土壤之间的换热效率降低, 埋管换热器的热损失增大^[8]。热回流现象产生的原因有 2 个: 1) 供回水管路之间的热短路; 2) 供暖时, 供回水管内介质被岩土体冷却, 供冷时, 供回水管内介质被岩土体加热, 这两个过程对埋管换热器都有着负面的影响。由于岩土体层与层之间的温度不一致及地下水渗流的存在, 管内水温沿深度方向变化出现极小值。但是在地下水渗流区域, 流动的地下水能很快带走周围土壤积攒的热量, 因此, 虽管内水温度达到最低, 但是含水层附近的土壤温度波动幅度不大。间歇运行模式及地下水的存在能快速带走热量, 这是管内水温度保持不变的主要原因。当流

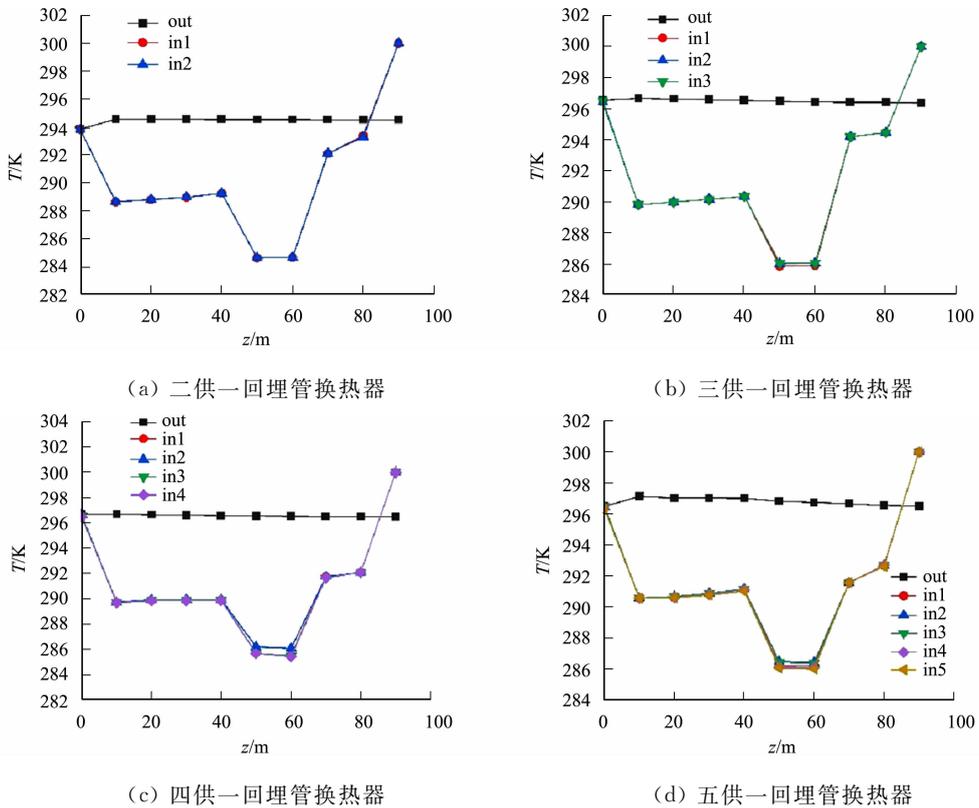


图9 供冷期系统间歇运行120 h的埋管换热器内水温度变化

Fig. 9 Water temperature variations in buried pipe heat exchanger during intermittent operation of system for 120 h in cooling period

体继续下降,此时,管内水温度低于周围土壤温度,发生热回流现象,造成出水温度升高,换热效率降低.含水层区域下的埋深即为无效埋深.

3 结论

1) 实际工程中,地下岩土体并不是由单一的物质组成,而是分层的,每层的物性不同.随着深度的不同,每一层土壤的温度也不同,换热过程中竖直方向必然会有传热现象发生.将土壤初始温度设置为恒定值,这会导致模拟的出水温度较真实情况偏小,总换热量相差达到220.16 J,误差率达到2.48%.因此,土壤深度不同,初始温度分层的现象不可忽略.

2) 在换热过程中,地下水流动抑制热量向上游传递,增强向下游的热量传递;地下水渗流方向对不同类型的多供一回埋管供水支管的影响不同.对比分析了地下水渗流方向为 x, y 方向,两供一回埋管换热器,三供一回、四供一回、五供一回埋管换热器换热量分别相差66,260,858,17 W.当供水管数量 $n \leq 4$ 时,不同方向对多供一回换热器换热的影响随着供水管数量的增加而增加,存在一个最佳渗流方向.两供一回、四供一回、五供一回埋管换热器的最佳渗流方向是 x 方向,三供一回埋管换热器的最佳渗流方向为 y 方向.当供水管数量 $n \geq 5$ 时,随着多供一回供水管数量的增加,地下水渗流方向对埋管换热器的影响逐渐减小.工程中可按照最佳地下水渗流方向安装埋管换热器,以此增大埋管换热量,提高热泵的运行效率.

3) 对不同数量供水管的多供一回埋管换热器进行了120 h的间歇运行模拟,得到多供一回埋管换热器内水温度沿埋管深度的变化与连续运行时不一致,埋管换热器内的水温度会在地下水渗流层区域(z 为50~60 m)达到最低值,再继续向下发生热回流现象,从土壤中吸收热量,导致换热效率降低.因此,含水层区域下的埋深即为无效埋深.基于提高换热效率和减少埋管设计长度的初投资,可以减小埋管设计长度,埋深到地下水层深度即可.

4) 模拟间歇运行比为8:16的多供一回埋管换热器间歇运行的换热情况,不同功能区间歇运行比

不同,因此,可进一步分析不同间歇比对埋管设计长度的影响。

参考文献:

- [1] MA Z D, JIA G S, CUI X, *et al.* Analysis on variations of ground temperature field and thermal radius caused by ground heat exchanger crossing an aquifer layer[J]. *Applied Energy*, 2020, 276(1): 1-11. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115453.
- [2] 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.
- [3] YOU Tian, WU Wen, SHI Wenxing, *et al.* An overview of the problems and solutions of soil thermal imbalance of ground-coupled heat pumps in cold regions[J]. *Applied Energy*, 2016, 177: 515-536. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.05.115.
- [4] 杨棟. 垂直双U型埋管换热器换热性能研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013.
- [5] 彭远玲. 基于岩土分层条件下渗流对竖直地埋管换热性能的影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [6] 陈金华. 竖直双U型埋管换热器分层换热模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [7] 张琳琳, 赵蕾, 杨柳, 等. 分层土壤中竖直埋管换热器传热特性[J]. *化工学报*, 2015, 12(66): 4836-4842. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20150818.
- [8] 杜震宇. 黄土高原寒冷地区地源热泵单U型地埋管换热器动态换热特性的试验与模拟研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
- [9] 刘逸, 陈培强. 地下水渗流对地埋管换热器换热影响研究[J]. *制冷*, 2019, 38(3): 10-16. DOI: 10.3969/J. ISSN.1005-9180.2019.03.002.
- [10] 岳丽燕, 黄贤龙, 孟令军, 等. 地下水渗流地埋管换热影响研究[J]. *世界地质*, 2017, 36(4): 1291-1296. DOI: 10.3969/j.issn.1004-5589.2017.04.0290.
- [11] 王欣. 地下水渗流方向对单U型埋管换热器换热特性影响的数值研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- [12] CHOI J C, PARK J, LEE S R, *et al.* Numerical evaluation of the effects of groundwater flow on borehole heat exchanger arrays[J]. *Renewable Energy*, 2013, 52: 230-240. DOI: 10.1016/j.renene.2012.10.0280.
- [13] 张静, 杜震宇. 多供一回中心回水管竖直埋管换热器换热性能的数值模拟[J]. *太阳能学报*, 2018, 49(8): 2176-2182.
- [14] 杨刚杰. 地埋管换热器传热过程的数值模拟研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.
- [15] JI Bingbing, CHEN Jinping. Detailed explanation of ANSYS ICEM CFD meshing technology examples[M]. Beijing: China Water Power Press, 2012.
- [16] 曾云帆. 动态负荷对土壤源热泵系统性能影响的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2013.
- [17] 陶文铨. 数值传热学[D]. 西安: 西安交通大学, 2001.
- [18] WANG Yao, WANG Songqing, HE Shijing. Simulation of temperature and moisture fields around a single borehole ground heat exchanger: Effects of moisture migration and groundwater seepage[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2019, 1007(10): 1-14. DOI: 10.1007/s10973-019-09193-6.
- [19] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [20] 康龙. 地源热泵U形埋管换热的数值模拟及优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [21] 陈旭, 范蕊, 龙惟定, 等. 竖直地埋管单位井深换热影响因素回归分析[J]. *制冷学报*, 2010, 31(2): 11-16. DOI: 10.3969/j.issn.0253-4339.2010.02.0110.
- [22] 高青. 地温规律及其可恢复特性增强传热研究[J]. *制冷学报*, 2003, 24(3): 38-41. DOI: 10.3969/j.issn.0253-4339.2003.03.008.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)