

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.04.004



武汉与重庆典型地质结构下的地埋管 换热性能

王勇, 谢焯, 李文欣

(重庆大学 绿色建筑与人居环境营造教育部国际合作联合实验室;
国家级低碳绿色建筑联合研究中心, 重庆 400045)

摘要:地埋管地源热泵换热器的换热性能受到不同地质结构的影响。以武汉和重庆地区的典型地质构成为边界条件,建立了三维地埋管的单孔双 U 管换热模型,通过模型计算,获得了两种地质条件下的地埋管换热性能,以重庆地区的地源热泵热响应测试结果以及工程运行数据出发,对模型的计算结果进行了验证,结果表明,模型吻合度较好,可以应用于工程分析。以模型为条件,进行地质结构对换热性能的影响度分析,预测了两地地埋管地源热泵的换热性能并计算得到换热器的平均换热系数分别为武汉地区 $K_1=1.65(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$,重庆地区 $K_2=1.51(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$ 。

关键词:地埋管;地质结构;换热模型;换热性能

中图分类号:TK529 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)04-0017-09

Analysis on heat transfer performance of ground heat exchangers with typical geological structure in Wuhan and Chongqing

Wang Yong, Xie Ye, Li Wenxin

(Joint International Research Laboratory of Green Buildings and Built Environments, Ministry of Education;
National Centre for International Research of Low-carbon and Green Buildings, Ministry of Science & Technology,
Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The heat transfer performance of ground heat exchangers (GHEs) is influenced by different geological structures. A three-dimensional heat transfer model of double U-type GHEs is established with typical geological structure of Wuhan and Chongqing as boundary conditions separately. The heat transfer performances are obtained through the model calculation. The simulation results are validated by a practical thermal response test of a ground source heat pump (GSHP) system, which shows a good match between the simulated and experimental results. The influence of geological structure on heat transfer performances is investigated and the heat transfer performance of GSHP systems can be predicted. Besides, the average heat transfer coefficient of GHEs is calculated in these two area with the proposed model, and the average heat transfer coefficient of the heat exchanger is $K_1=1.65(\text{w}/\text{m}\cdot\text{K})$ in Wuhan area, $K_2=1.51(\text{w}/\text{m}\cdot\text{K})$

收稿日期:2016-12-10

基金项目:国家自然科学基金(51576023);高等学校学科创新引智计划(B13041)

作者简介:王勇(1971-)男,教授,博士生导师,主要从事建筑节能、可再生能源利用技术研究,(E-mail) wyfree1@126.com。

Received:2016-12-10

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51576023); Institution of Higher Learning Discipline Innovation Conference Program (No. B13041)

Author brief: Wang Yong (1971-), professor, doctoral supervisor, main research interests: energy efficiency and renewable energy utilization technology, (E-mail) wyfree1@126.com.

in Chongqing area, respectively.

Keywords: ground heat exchangers; geological structure; heat transfer models; heat transfer performance

不同地质结构的导热系数是影响埋管换热器 (GHEs) 换热性能的重要因素^[1]。已有研究^[2-6]表明,埋管的传热主要受到土壤热物性的影响。实际工程中地质结构并非单一类型的,而是由几个平行或者近于平行的物性参数一致的岩层构成,呈现水平分层的特点。不同地质类型的热物性参数有很大的不同,即使是同一地质层也存在差异^[7],之前的研究^[8-10]已经就考虑了均匀地质结构的埋管换热性能进行了研究。某实验工程实测各分层热阻在 $0.134\ 4\sim 0.171\ 7\ (\text{m}\cdot\text{K})/\text{W}$ 之间变化,所以在确定地源热泵系统的岩土物性参数时应考虑竖向地质存在不均匀性的分层结构^[11-12]。张琳琳等^[13]以有限长线热源为基础,考虑了地质分层、渗流等情况,建立了钻孔内、外的埋管传热解析模型,指出了分层模型可反映分层土壤中温度沿轴向非均匀分布的特征。於仲义等^[14]以能效系数作为埋管换热特性指标,分析了无渗流情况下土壤分层对埋管换热特性的影响,指出相同厚度的高导热系数土壤层处于钻井上部时可增强区段能效系数,增大该土壤层厚度可增强埋管总的换热能效,高导热系数土壤层的厚度越大,埋管能效系数下降幅度越小,换热效果越好。贾宇等^[15]介绍采用岩土合理分层最后进行加权平均的方式求得岩土的初始平均温度可减小测试误差。Signorelli 等^[16]利用三维有限元数值模型研究热响应实验数据,指出土壤分层对于热导率的评估与均质土壤下不同,在地下水存在的情况下显得尤为重要。Fujii 等^[17]将可回收的光纤传感器安置在埋管换热器的 U 型管内,记录埋管换热器的垂直温度分布,结合柱源模型对土壤分层下进行传热分析计算,从而评估土壤热导率。虽然部分学者就地质分层对埋管换热性能的影响进行了很多的研究,但是针对某种典型地质结构情况下的埋管换热器 (GHEs) 的换热性能分析比较的文章还相对较少。

基于对岩土的地质勘测,可以分析埋管换热器的换热情况^[18]。本文以重庆和武汉地区实际地勘测试和热响应测试为基础,分析总结出重庆和武汉地区典型的地质结构,以此建立了竖直双 U 型埋管多层地质结构模型。

徐美智等^[19]发现介质的流速,加热功率、以及岩土的初始平均温度对平均换热系数 K 没有影响,

因而引入平均换热系数 K 和埋管的进出水温以及换热量一起作为换热器换热性能的评价指标。引入岩土导热系数 λ 和岩土体深度 h_i 来表征不同地质结构。用重庆地区实际热响应测试来验证模型的正确性后,通过模拟来对比两种典型地质条件下埋管换热器的换热性能。

1 研究方法

1.1 地质分布基本情况

在对重庆和武汉地区的大量地勘资料和热响应测试报告分析的基础上,结合相关资料^[11,20-25]中的原始数据,对两地的地质结构进行归纳和分析得出重庆地区和武汉地区典型的地质结构分布情况,如表 1 所示。

表 1 武汉典型地质分布

Table 1 Geological distribution in Wuhan

类型	地质类型	深度范围/m	导热系数 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{C}^{-1})$
地质一层	杂土、粉质粘土	0~10	1.2~1.9
地质二层	砂砾	10~20	1.5~2.3
地质三层	砂岩	20~50	2.1~3.5
地质四层	砂岩+泥岩	50~100	2.4~3.8

表 2 重庆典型地质分布

Table 2 Geological distribution in Chongqing

类型	地质类型	深度范围/m	导热系数 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{C}^{-1})$
地质一层	杂土、粉质粘土	0~5	1.2~1.9
地质二层	泥岩	5~30	1.87~2.1
地质三层	砂岩+泥岩	30~100	2.1~3.5

1.2 模型的建立

由于埋管换热器与土壤的实际换热过程非常复杂,为建立模型,需要进行合理的假设:

1) 岩土合并为 3 层,每层岩土都是均匀的,但上下层间岩土类型不一致,导热系数不同。

2) 忽略热湿迁移的影响,忽略渗流对换热器及岩土导热系数的影响。

3) 埋管周围是无限大空间,埋管所在区域的岩土基准温度一致,且绝热面半径为 3 m。

- 4)忽略重力的影响,管内流速不变。
- 5)不考虑太阳辐射的影响。
- 6)地埋管换热器 U 型弯管连接部分的弯头利用 UDF 程序连接。
- 7)忽略了地埋管换热器的水平干管以及竖直埋管上部的土壤。

在此基础上建立了三维非稳态单孔换热模型,采用 gambit 建模。双 U 型地埋管换热器竖直埋深 100 m,模型尺寸半径为 3 m,钻孔直径 140 mm,地埋管采用直径为 32 mm 的 PE 管。埋管进口设置为速度进口即 velocity,进口包括循环水入水管 1、2 的进口和忽略底端弯头后出水管 3、4 的进口。进口温度设置依靠 UDF 程序输入,定义循环水入水管 1、2 的进口温度等于循环水出水管 3、4 的出口温度与温差的叠加,出水管底端的进口温度等于入水管底端的出口温度。埋管出口均设置为 outflow,流体速度及 UDF 中温差的取值以工况设定为准。埋管管壁,岩土和回填材料的所有表面均设置为 wall,管壁和回填材料,回填材料和土壤以及不同地质层的岩土之间的传热类型选择为 coupled。对于岩土体和回填材料的上表面,忽略太阳辐射的影响,传热选项为绝热,考虑室外温度,风速的影响,根据式(1)^[26,27]对流换热系数设定为 $9.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 。对于底部边界,井深 100 m 底部岩土温度达到稳定值,设置边界温度恒定且等于岩土初始温度。对于最远边界半径 3 m 处设置岩土远边界温度恒定且温度恒等于岩土初始温度。建模过程中在对土壤分层时在每个水管中也形成了两个界面,将其设置为 interior 选项。地埋管模型网格采用结构性网格,模拟总网格数为 30 万。数值计算运行步长 120 s,总计算步数 720 步,总计算时长 24 h。地埋管单孔平面示意图和地埋管模型如图 1、图 2 所示。

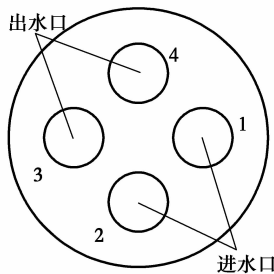


图 1 地埋管平面图
Fig.1 Schematic plan of GHEs

$$h_c = 5.8 + 3.7v \quad (1)$$

式中: h_c 为表面对流换热系数; v 为地表附近空气流速, m/s。

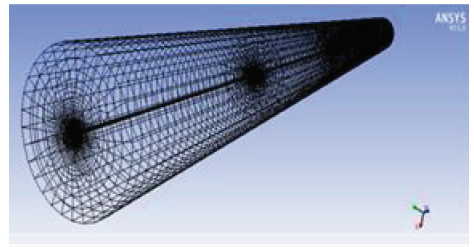


图 2 地埋管模型示意图
Fig.2 Model of GHEs

1.3 边界条件和初始条件

通过实际勘测和查阅相关资料^[22-23,25],可知武汉地区土壤层和砂砾层的导热系数接近,由文献[30]所得结论可知,岩土体上层导热系数变化很小时,不会对岩土的平均换热系数造成较大影响,可以认为地质结构相似。为了简化计算,以及与重庆地区地质情况进行相应对比,将武汉地区土壤层、砂砾层简化为一层处理,因此,地质结构简化为 3 层。计算中将武汉典型地质结构的地埋管模型定义为 model1,将重庆典型地质结构的地埋管模型定义为 mode2。模型岩土、回填材料,PE 管的导热系数等热物性参数如表 3、表 4 所示。

表 3 模型 1(武汉)材料物性参数表

Table 3 Material physical parameters of model 1(Wuhan)

类型	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热容/ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{C})^{-1}$	导热系数/ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{C})^{-1}$
地质一层	1 925	1 038	1.2
地质二层	2 600	1 153	3
地质三层	2 800	1 160	3.5
回填材料	1 900	1 245	2.0
PE 管	950	2 300	0.45
循环水	998.2	4 182	0.6

表 4 模型 2(重庆)材料物性参数表

Table 4 Material physical parameters of model 2(Chongqing)

类型	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热容/ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{C})^{-1}$	导热系数/ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{C})^{-1}$
地质一层	1 925	1 038	1.2
地质二层	2 167	1 235	1.9
地质三层	2 291	1 468	2.6
回填材料	1 900	1 245	2.0
PE 管	950	2 300	0.45
循环水	998.2	4 182	0.6

在地源热泵测试之前必须进行岩土温度测试,在实测过程中由于大气温度、地表面风速、太阳辐射等多种因素的影响,岩土温度在竖直方向上存在不

均匀性。根据樊燕等^[28]对不同岩土深度下岩土温度的变化进行测试,依据《地源热泵工程技术规范》(2009年版)中地源热泵岩土原始平均温度的计算方法,得到重庆地区不同深度下岩土的初始平均温度。由于各深度温度分布的不均匀性,采用不同深度下测试温度的平均温度作为地源热泵测试岩土的初始平均温度。根据原始温度分布,分析总结得出重庆不同深度下岩土的初始平均温度如表 5 所示。

表 5 重庆地区不同深度岩土平均温度

Table 5 Average temperature of ground at different depths in Chongqing

深度/m	岩土温度/℃	岩土平均温度/℃
50	18.8	18.85
40	18.9	
30	18.9	
20	18.9	
10	19.4	

武汉地区的岩土初始温度通过查阅资料^[23,29]以及武汉地区岩土年平均温度,选取 17℃为武汉地区的岩土年平均温度。两种模型中双 U 支管流速根据实际测试取 $0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,钻孔内流量 $2.31 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,加热功率均为 8 kW。

2 控制方程

实验证明,埋管中的循环水流动为湍流流动,对于管内流动,流体为不可压缩流体,采用标准 $k-\epsilon$ 模型,近壁区利用壁面函数法求解。不考虑源项时,连续性方程、动量方程、能量方程以及标准 $k-\epsilon$ 方程见式(2)~(8)。

连续性方程

$$\frac{\partial(u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

动量方程

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

能量方程

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{Pr_t} + \frac{\mu_t}{\sigma_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

湍动能方程

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (5)$$

耗散率方程

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

式(6)中湍动粘度 μ_t 和由于平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项 G_k 的表达式见式(7)和式(8)。

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (8)$$

式(2)~(6)中各常数的取值为: $C_\mu = 0.09$ 、 $C_{1\epsilon} = 1.44$ 、 $C_{2\epsilon} = 1.92$ 、 $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\epsilon = 1.3$ 。

3 模型验证

为从理论上对比重庆与武汉两种不同地质情况下换热器的换热性能。首先应检验模型的正确性,从而通过地质条件等参数的变化,通过模型求解得到计算结果。为此,以重庆的 model2 为例进行模型验证。表 4 的物性参数与实际情况一致,竖向分层分别在 5、30 m 处。实验过程中,在埋管竖向上分别安装温度探头,以对比实验与模型的差异。

用 Fluent 软件求解垂直双 U 多层埋管三维模型,可以计算得到换热器进出口温度以及不同深度处进出水的温度。本文所建立的垂直双 U 多层埋管单孔模型是参照实际地质结构,总结该地区典型地质结构建立的,软件运行时的边界条件也实际热响应测试时的运行参数相同,所以将垂直双 U 多层埋管单孔模型数值解与实际热响应测试的结果进行对比分析,验证建立的垂直双 U 多层埋管单孔模型的准确性。选取 model2(重庆)埋管进出口温差和不同深度处埋管出水温度测试值和数值解作为比较对象,以数值计算结果与测试结果的拟合优度作为两者吻合程度的评价标准。数值计算结果与测试结果的拟合优度可以用式(9)进行计算。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N T_{\text{exp},i}^2}{\sum_{i=1}^N T_{\text{cal},i}^2} \quad (9)$$

以重庆某实测工程数据进行验证,对比分析不同深度处的出水温度,以及进出水温差。实测值和数值解出水温度对比见图 3。由图 3 可知,在设定的初始条件下垂直双 U 多层单孔模型出口温度测试值与数值解的温度发展趋势基本相同,实测值和数值解出水温度之间的平均值分别为 1.22、1.60、

1.34 °C,且经计算,拟合优度分别为 0.919、0.918、0.945,吻合度较高;比较进出水温差,得实测值进出水温差的平均值与数值计算进出水温差的平均值为

2.795 °C和 3.181 °C,拟合优度为 0.777。结果显示地源热泵垂直双 U 多层地理模型与实际热响应工况接近,所建物理模型可以应用于实际工程。

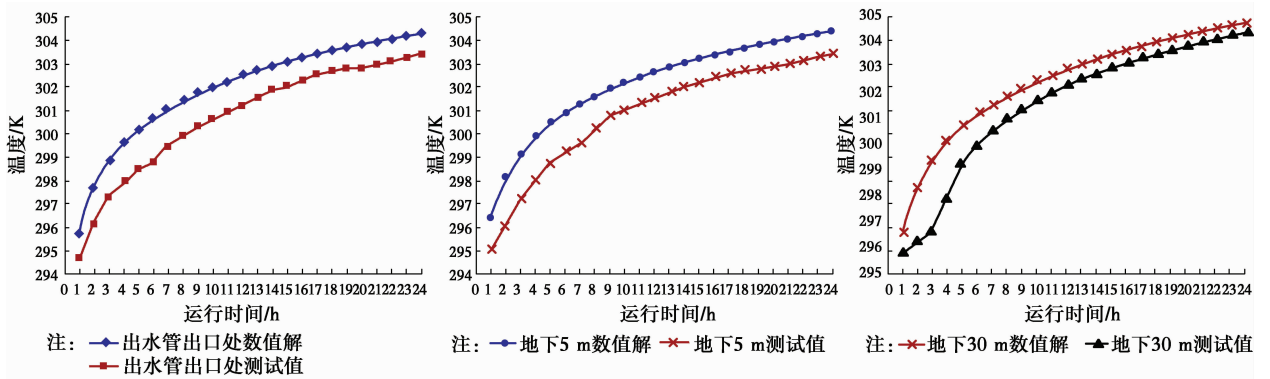


图 3 实测值和数值解出水温度对比图

Fig. 3 Comparison between numerical simulation result and testing data of model 2(Chongqing)

分析误差可能是物理模型中忽略了地下水的热湿迁移。且实际测试过程中,感温探头固定在地理管管壁外,也即实际测量的是管壁温度,而非管内流体温度,所以导致模拟数值解普遍比测试值偏高。

4 武汉和重庆典型地质结构下换热器换热性能对比

在验证模型的基础上,对重庆和武汉地区典型地质条件下换热器换热性能进行分析比较。从相关文献^[19,30]中可以得知,岩土体的初始温度,加热功率以及不同介质流速对平均换热系数 K 没有影响。但对 GHEs 的进出水温度有影响。因此分别对两种模型的进出口温度、换热量和平均换热系数进行分析比较。

4.1 进出水温度分析

在两种地质条件下地埋管进出口温度的计算结果如图 4、5 所示。

从图 4 和图 5 中可以看出,在地质条件不同,其他参数条件均相同的情况下,两地 GHEs 进出口温度不同,说明在这两种典型的地质条件下,GHEs 换热性能存在差异。利用 Fluent 软件最终计算得到地埋管在各分层处的四根支管温度分布云图以及不同深度处的进出水温度分布。图 6 是模拟运行结束时两种地质结构下不同深度处进出水温度分布。图 7 和图 8 是重庆和武汉地质各层的温度分布云图。从图中可以定性的观察到地源热泵系统双 U 地埋管的换热效果。

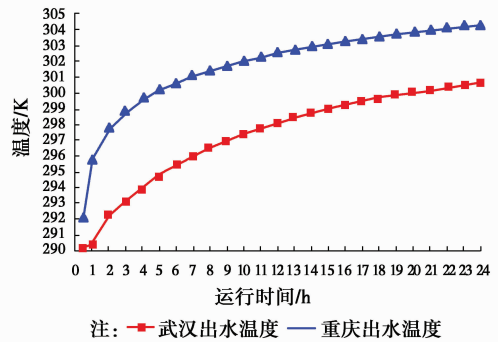


图 4 模型 1(武汉)和模型 2(重庆)地埋管出水温度分布图

Fig. 4 Outlet water temperature of model 1(Wuhan), model 2(Chongqing)

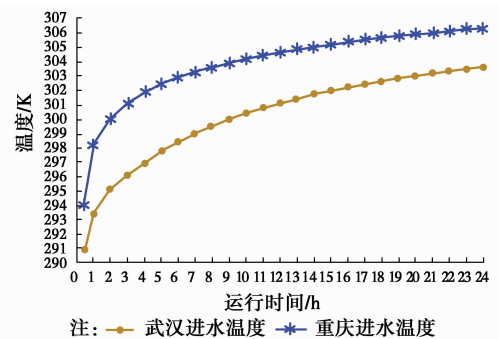


图 5 模型 1(武汉)和模型 2(重庆)地埋管进水温度分布图

Fig. 5 Inlet water temperature of model 1(Wuhan), model 2(Chongqing)

由图 6~8 可以看出,在两种地质条件下,GHEs 的换热性能的变化规律相同。两个模型的 4 根地埋支管换热都比较均匀,随着深度的增加,换热效果逐

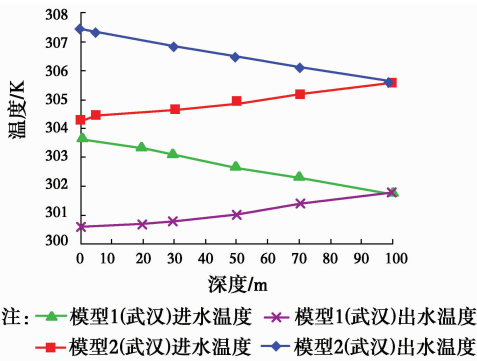


图 6 24 h 时两种地质结构下不同深度处进出水温度分布

Fig. 6 Inlet and outlet water temperature at different depths of model 1 (Wuhan), model 2 (Chongqing) after simulation run 24 hours

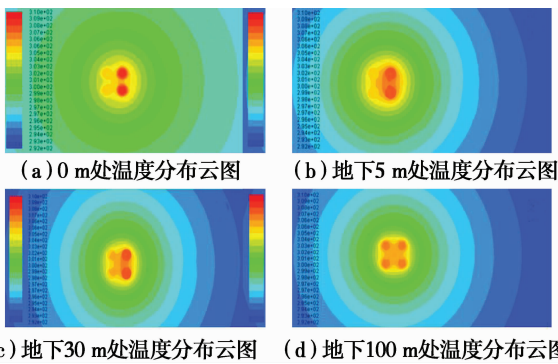


图 7 模型 2 重庆地质条件下进出水及岩土温度分布云图

Fig. 7 Temperature nephogram of model 2 (Chongqing)

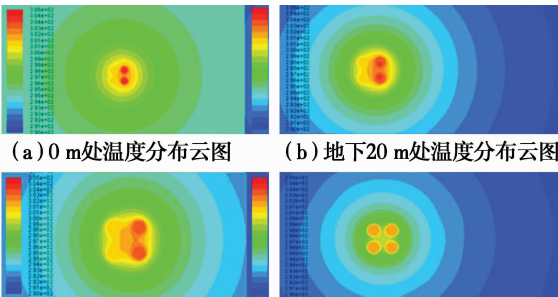


图 8 模型 1 武汉地质条件下进出水及岩土温度分布云图

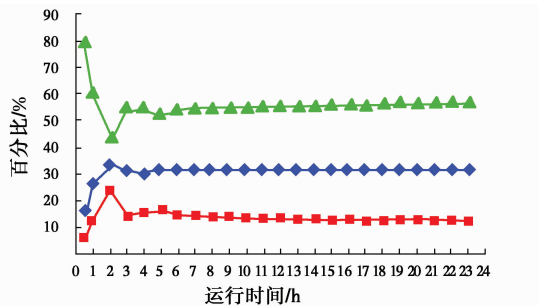
Fig. 8 Temperature nephogram of model 1 (Wuhan)

渐加强,在地下 100 m 处,换热已基本达到稳定^[31],该深度处 4 根支管的水温基本相等。地理管在靠近地表段的换热效果明显要比中下段的弱,且中间段的换热效果与最下段的换热效果差异较小。

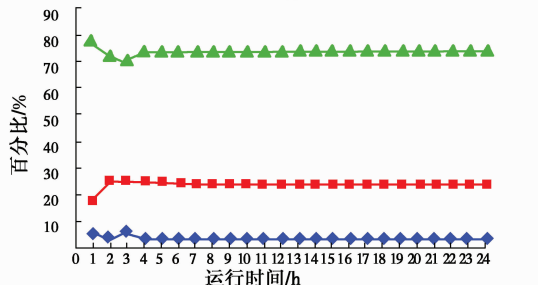
4.2 换热量分析

利用从 Fluent 软件中提取各分层处的进出水温,可以求得地源热泵竖直双 U 地理管模型的各地

质层换热量占总换热量的百分比,进而比较分析各地质层换热量的强弱程度。由图 9 可得,在系统运行前 4 h 左右,竖直双 U 多层单孔模型地理管换热一直处于震荡状态,换热还未达到稳定状态;待系统运行稳定后,两种模型的换热都主要集中在下层,此深度段的换热量均达到总换热量的 50% 以上,这是因为下层岩土体深度大,岩土体温度恒定且导热系数较大,地理管在下层岩土体中换热充分。上层段的换热量最少,此深度段的换热量分别占到总换热量约 13%、3%。这是因为上层的换热系数小,无法获得较大的换热量。更为重要的是,上部的岩土温度随运行时间的增加而增加,从而降低了进水管在该深度的换热温差,从而导致换热量减少。



注: 0~20 m 换热量百分比 20~50 m 换热量百分比 50~100 m 换热量百分比 (a) 武汉



注: 0~5 m 换热量百分比 5~30 m 换热量百分比 30~100 m 换热量百分比 (b) 重庆

图 9 模型 1 (武汉) 和模型 2 (重庆) 各地质层换热量 Fig. 9 Heat transfer for each layer in model 1 (Whuan) and model 2 (Chongqing)

从长期的换热效果来看,上层的导热系数变化最不易导致换热量的变化,而下层的导热系数变化最容易导致换热量的变化,即:岩土体的地质层竖直自上到下,换热性能对导热系数变化的敏感度逐渐加强。

4.3 平均换热系数分析

除了比较 GHEs 的进出水温度,引入平均换热系数 K 作为 GHEs 换热性能的评价标准,平均换热系数 K 为

$$K = \frac{Q}{L(t_m - t_0)} = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{1}{R_b + R_s} \quad (10)$$

式中: Q 为单孔换热功率, W ; L 为埋管长度, m ; R_b 为换热孔回填材料的热阻, $(m \cdot K/W)$ 。

在数值模拟和实测分析时,一般采用对数平均温差代替几何平均温差计算平均换热系数。且对数平均温差计算见式(11)

$$\Delta t = \frac{(t_1 - t_0)(t_2 - t_0)}{\ln \frac{(t_1 - t_0)}{(t_2 - t_0)}} \quad (11)$$

式中: t_0 为埋管区域岩土初始温度, $^{\circ}C$; t_1 为换热器进口温度, $^{\circ}C$; t_2 为换热器出口温度, $^{\circ}C$ 。

模拟运行 24 h 后对应的地理管进出水温如表 6 所示。

表 6 模拟运行 24 h 时模型 1(武汉)、模型 2(重庆)进出水温度

Table 6 Inlet and outlet water temperature of model 1(Wuhan), model 2(Chongqing) after simulation fun 24 hours

模型	进口温度/ $^{\circ}C$	出口温度/ $^{\circ}C$	岩土初始温度/ $^{\circ}C$
Model. 1	34.26	31.13	18.85
Model. 2	30.48	27.43	17

通过式(10)、(11)求出两种地质条件下换热器平均换热系数 K , 武汉地区 $K_1 = 1.65(W/m \cdot K)$, 重庆地区为 $K_2 = 1.51(W/m \cdot K)$, 比较 K_1 、 K_2 看出两种模型的平均换热系数 K 之间存在差异, 进一步说明两地的 GHEs 换热性能存在差异。

5 结论

1) 通过对比分析数值计算结果和实测值, 可近似得到两种典型地质条件下 GHEs 的换热性能, 而且数值解和实测值拟合度较高。因此, 所建模型可应用于实际工程。

2) 通过对地理管出水温度以及平均换热系数 K 的分析比较可知, 由于地质条件的不同导致重庆地区和武汉地区 GHEs 的换热性能存在差异。从本案例看, 在输入相同的 8 kW 热量的条件下, 24 h 连续运行达到稳定工况后, 武汉地区典型地质条件下地理管的出水温度为 27.43 $^{\circ}C$, 平均换热系数 $K_1 = 1.65(W/m \cdot K)$, 重庆地区典型地质结构下地理管的出水温度为 31.13 $^{\circ}C$, 平均换热系数 $K_2 = 1.51(W/m \cdot K)$ 。

3) GHEs 在两种典型地质结构下与岩土的换热规律相似, 随着深度的变大换热效果逐渐加强, 靠近地表段换热效果最弱, 中段和下端换热效果差异小。同时, 可以对竖直单孔双 U 管多层模型的各地质层导热系数变化带来的换热量相应的变化进行定性的预判。

参考文献:

- [1] HAEHNLEIN S, BAYER P, BLUM P. International legal status of the use of shallow geothermal energy [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(9): 2611-2625.
- [2] LUO J, ROHN J, BAYER M, et al. Analysis on performance of borehole heat exchanger in a layered subsurface [J]. *Applied Energy*, 2014, 123: 55-65.
- [3] BLUM P, CAMPILLO G, KÖLBEL T. Technoeconomic and spatial analysis of vertical ground source heat pump systems in Germany [J]. *Energy*, 2011, 36(5): 3002-3011.
- [4] 李小玲, 马贵阳. 土壤热泵单 U 型埋管换热器短期运行换热分析 [J]. *辽宁石油化工大学学报*, 2010(1): 51-54, 59.
LI X L, MA G Y. Short-term operation analysis of heat exchange on single U-tube heat exchanger of ground coupled heat pump [J]. *Journal of Liaoning Shihua University*, 2010(1): 51-54, 59. (in Chinese)
- [5] 赵进, 王景刚, 杜梅霞, 等. 地源热泵土壤热物性测试与分析 [J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2010(1): 58-60, 69.
ZHAO J, WANG J G, DU M J, et al. Testing and analysis on the soil thermal properties by ground source heat pump [J]. *Journal of Hebei University of Engineering(Natural Science Edition)*, 2010(1): 58-60, 69. (in Chinese)
- [6] 高青, 余传辉, 马纯强, 等. 地下土壤导热系数确定中影响因素分析 [J]. *太阳能学报*, 2008(5): 581-585.
GAO Q, YU C H, MA C Q, et al. Analysis of influence factors on determining the ground thermal conductivity [J]. *Acta Energlae Solaris Sinica*, 2008(5): 581-585. (in Chinese)
- [7] BERTERMANN D, KLUG H, MORPER-BUSCH L, et al. Modelling vSGPs (very shallow geothermal potentials) in selected CSAs (case study areas) [J]. *Energy*, 2014, 71(15): 226-244.
- [8] ACUÑA J, PALM B. Distributed thermal response tests on pipe-in-pipe borehole heat exchangers [J]. *Apply Energy*, 2013, 109: 312-320.

- [9] MICHPOULOS A, BOZIS D, KIKIDIS P, et al. Three years operation experience of a ground source heat pump system in Northern Greece [J]. *Energy Build*, 2007, 39(3):328-334.
- [10] 王勇, 金逸韬. 回填料空气间隙对埋管岩土温度恢复性能的影响[J]. *土木建筑与环境工程*, 2012, 34(4): 142-148.
WANG Y, JIN Y T. Influence of backfill air gap on soil temperature recovery in ground-coupled heat pumps [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2012, 34(4):142-148. (in Chinese)
- [11] 陈金华. 竖直双 U 埋管换热器分层换热模型研究[D]. 重庆:重庆大学, 2015.
CHEN J H. A study on layered heat transfer model of vertical double U-tube ground heat exchangers [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese)
- [12] 盛建军, 刘金祥, 戴霖姗, 等. 基于热响应测试的分层土壤埋管换热器数值模拟研究[J]. *建筑节能*, 2014(7):45-48.
SHENG J J, LIU J X, DAI L S, et al. Numerical simulation of ground heat exchanger in layer soil based on the thermal response test [J]. *Building Energy Efficiency*, 2014(7):45-48. (in Chinese)
- [13] 张琳琳, 赵蕾, 杨柳. 分层土壤中竖直埋管换热器传热特性[J]. *化工学报*, 2015(12):4836-4842.
ZHANG L L, ZHAO L, YANG L. Heat transfer characteristics of vertical borehole heat exchanger in stratified soils [J]. *CIESC Journal*, 2015(12): 4836-4842. (in Chinese)
- [14] 於仲义, 陈焰华, 雷建平. 阵列式 U 形埋管群换热能效特性研究[J]. *暖通空调*, 2015(2):124-128.
YU Z Y, CHEN Y H, HU P F, LEI F. Heat transfer energy efficiency characteristics of U-tube ground heat exchangers in stratified soil[J]. *Heating Ventilation & Air Conditioning*, 2015(2):124-128. (in Chinese)
- [15] 贾宇, 李百战, 丁勇, 等. 规范中岩土初始平均温度测试方法的讨论[C]//全国暖通空调制冷 2010 年学术年会论文集, 2010.
JIA Y, LI B Z, DING Y, et al. The discuss on test methods of soil initial average temperature in standard [C]// The national hvac refrigeration academic conference in 2010. (in Chinese)
- [16] SIGNORELLI S, BASSETTI S, PAHUD D, et al. Numerical evaluation of thermal response tests [J]. *Geothermics*, 2007, 36:141-166.
- [17] FUJII H, NISHI K, KOMANIWA Y, et al. Numerical modeling of slinky-coil horizontal ground heat exchangers [J]. *Geothermics*, 2012, 41: 55-62.
- [18] MONTAGUD C, CORBERÁN JM, RUIZ-CALVO F. Experimental and modeling analysis of a ground source heat pump system [J]. *Apply Energy*, 2013, 109: 328-336.
- [19] 徐美智. 不同地质结构对埋管换热器的影响研究[D]. 重庆:重庆大学, 2014.
XU M Z. The study on influence of ground heat exchanger along with different geological structure [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)
- [20] 龚皓玥, 陈金华. 重庆地区竖直双 U 形埋管换热器周围土壤温度恢复性能研究[J]. *暖通空调*, 2016(3):89-93, 55.
GONG H Y, CHEN J H. Study on soil temperature restoration on around vertical double U-type ground heat exchanger in Chongqing [J]. *Heating Ventilation & Air Conditioning*, 2016(3):89-93, 55. (in Chinese)
- [21] 宁国民, 陈国金, 徐绍宇, 等. 武汉城市地下空间工程地质研究[J]. *水文地质工程地质*, 2006(6):29-35.
NING G M, CHEN G J, XU S Y, et al. Engineering Geological research on the underground space of Wuhan City [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2006(6):29-35. (in Chinese)
- [22] 谢连平, 钟洛加, 周衍龙. 武汉城市地下空间开发利用与环境地质[J]. *环境科学与技术*, 2009(12):209-214.
XIE L P, ZHONG L J, ZHOU Y L. Study on urban underground space development and utilization and environmental geology in Wuhan city [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009(12):209-214. (in Chinese)
- [23] 万兆, 管昌生, 胡平放. 岩土温度场对垂直埋管换热影响的数值分析[J]. *武汉工程大学学报*, 2011(6):65-67, 71.
WAN Z, GUAN C S, HU P F. Numerical analysis of the influence of geotechnical temperature field on heat transfer of GSHP buried tube[J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2011(6): 65-67, 71. (in Chinese)
- [24] 刘彦广, 王贵玲, 陆川. 我国省会城市岩土导热系数区域差异规律[J]. *供热制冷*, 2015(12):54-56.
LIU Y G, WANG G L, LU C. The law of regional-difference of thermal conductivity of soil in provincial capital cities of China [J]. *Heating & Refrigeration*, 2015(12):54-56. (in Chinese)
- [25] 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. 69-70.
DIAO N R, FANG, Z H. Ground-coupled heat pump technology [M]. Beijing: Higher Education Press,

- 2006; 69-70. (in Chinese)
- [26] 唐曦,王勇. 水平埋管地下岩土传热模型中上垫面边界条件的确定方法研究[J]. 制冷与空调, 2011, 25 (Sup1):197-201
- TANG X, WANG Y. Method of ground surface boundary condition of soil heat transfer model around horizontal ground heat exchangers [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2011, 25 (Sup1): 197-201. (in Chinese)
- [27] SHANG Y, LI S, LI H. Analysis of geotemperature recovery under intermittent operation of ground source heat pump [J]. Energy and Buildings, 2011, 43(4): 935-943.
- [28] 樊燕. 动态负荷下地源热泵设计方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2009.
- FAN Y. Ground source heat pump design methods of dynamic load [D]. Chongqing: Chongqing University. 2009. (in Chinese)
- [29] 纪世昌. 土壤源热泵 U 型垂直埋管温度场数值模拟研究[D]. 武汉:华中科技大学,2006.
- JI S C. The study of numeric simulation of temperature field of U-vertical buried pipe of GSHP[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2006. (in Chinese)
- [30] 尹畅昱. 不同分层地质结构下地源热泵竖直双 U 埋管换热影响研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.
- YIN C Y. The study on influence of ground heat double-U exchanger of GSHP under layered geological structure [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)
- [31] 王勇, 刘方, 付祥钊. 基于层换热理论的竖直埋管换热器设计方法[J]. 暖通空调,2007(9):35-39.
- WANG, Y, LIU, F, FU, X Z. Design of vertical ground heat exchangers based on a layer heat transfer theory [J]. Heating Ventilation & Air conditioning, 2007(9):35-39. (in Chinese)

(编辑 胡玲)