

桩基螺旋型地埋管换热器换热性能的数值模拟与验证

杨卫波, 杨晶晶, 孔磊

(扬州大学水利与能源动力工程学院, 扬州 225127)

摘 要: 为了探讨不同因素对桩基螺旋型地埋管换热器性能的影响, 建立了桩基螺旋型地埋管换热器的传热数学模型, 分析了桩基直径、桩基深度、螺旋管组数、土壤类型对桩基螺旋型地埋管换热量及土壤温度分布的影响, 结果表明: 增加桩基直径有利于改善桩基的蓄热能力、提高螺旋型埋管的换热性能, 但是单位管长换热量会减小, 因此, 桩基直径不可无限增加; 桩基深度的增加有利于提高桩基螺旋型埋管换热器的换热量, 而且对单位长度桩基的换热量影响很小, 因此, 可以通过增加桩基深度来提高换热量; 同样条件下, 黏土、砂土、砂岩中砂岩最有利于桩基换热器换热, 土壤温度上升速率和幅度最低, 而黏土换热效果最差, 土壤温度上升速率最快; 此外, 螺旋管组数越多, 换热器换热量越大, 但是单位管长换热量会大幅下降。试验验证表明: 所建桩基螺旋埋管模型预测出的换热量与土壤温度值与对应试验值吻合较好, 其最大相对误差分别在 9.7%与 9.2%以内。

关键词: 桩基; 换热器; 温度; 换热性能; 数值模拟; 试验验证

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.05.028

中图分类号: TU83

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-05-0200-06

杨卫波, 杨晶晶, 孔磊. 桩基螺旋型地埋管换热器换热性能的数值模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5): 200—205. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.05.028 <http://www.tcsae.org>

Yang Weibo, Yang Jingjing, Kong Lei. Numerical simulation and validation on heat exchange performance of pile spiral coil ground heat exchanger[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(5): 200—205. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.05.028 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

地埋管的换热性能与初投资是影响地源热泵发展的关键因素。然而, 传统竖直埋管的高钻孔费用与可用埋管面积的有限性使得地源热泵的应用在一定程度上受到限制。近些年来, 把螺旋埋管和建筑桩基结合起来的桩基螺旋埋管换热器成为地源热泵研究领域的一个新热点^[1]。该换热器将螺旋埋管按一定的螺距固定在建筑物地基的预制钢筋笼中, 经浇注混凝土而使其与建筑结构相结合, 以代替传统的竖直地埋管换热器, 通过桩基与周围大地形成换热。它不仅解决了竖直埋管钻孔施工困难和成本高的问题, 能更有效的利用建筑物的地下面积, 而且还增加了地埋管在桩基中的传热面积, 提高了换热效率, 因而具有更广阔的应用前景^[2]。

Morino 和 Oka^[3]最先提出了桩埋管换热器, 并且将其埋设在钢管桩中进行了试验研究; 吴毅^[4]建立了桩基螺旋管换热器非稳态数值模型, 并进行了试验验证, 分析了

桩基直径对地埋管换热器的影响, 结果显示: 同等条件下, 若换热量相同, 桩基直径越小, 过余温度响应越大; Laloui 等^[5]运用有限元法对地能转换桩的换热性能进行了数值分析, 证明桩基温度上升会使桩位移并扩张; Zarrella 等^[6]通过数值模拟将桩基内部埋设螺旋型管和埋设 U 型管进行了对比, 发现在同一能量桩内埋设螺旋型管比埋设 U 型管更具有换热优势。Man 等^[7-8]提出了考虑径向传热与桩基热容影响的圆柱源模型, 通过采用格林函数法得到一维与二维解析模型。Lee 等^[9]建立了桩基螺旋型埋管的三维有限差分传热模型, 并且通过解析解验证了模型的正确性, 探讨了不同区域能量桩换热性能的变化, 结果表明桩基外部的土壤类型对管内水温变化影响很大。刘希臣等^[10]试验研究了不同螺旋形式和流速对桩基螺旋埋管换热性能的影响, 结果显示, 不同埋管形式与流速导致埋管换热热阻不同。刘俊红等^[11]提出了桩基螺旋埋管的实心圆柱面热源模型, 并用格林函数法求得该模型的 2 个一维解析解表达式。Zhang 等^[12-15]发展了新的考虑地下水渗流的桩基埋管传热模型。

然而, 由于桩基螺旋型埋管换热器结构的复杂性, 导致影响其换热性能的因素较多, 为了准确设计桩基螺旋型地埋管换热器, 必须弄清不同因素对其换热性能的影响规律。为此, 本文建立了桩基螺旋型埋管换热器的传热数值模型, 利用模型探讨了桩基直径、桩基深度、螺旋埋管组数及土壤类型对桩基螺旋埋管换热性能及其土壤温度分布特性的影响, 并利用桩基螺旋型埋管换热试验台对模型进行了试验验证。

收稿日期: 2015-10-14 修订日期: 2015-12-29

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (BK20141278); 扬州市自然科学基金项目 (YZ2015101); 国家级星火计划项目 (2015GA690240); 扬州市科技计划项目 (2014-6); 广西建筑新能源与节能重点实验室 (桂林理工大学) 开放基金 (桂林能 15-J-22-3); 中国科学院可再生能源重点实验室开放基金 (y507k51001); 热流科学与工程教育部重点实验室 (西安交通大学) 开放基金项目 (KLTFSE2014KF05); 内蒙古自治区自然科学基金资助项目 (2014MS0530)

作者简介: 杨卫波, 男, 湖北安陆人, 博士后, 副教授, 硕士生导师, 主要从事地源热泵及建筑可再生能源利用方面的研究。扬州 扬州大学水利与能源动力工程学院, 225127。Email: yangwb2004@163.com

1 计算模型

1.1 物理模型

由于桩基螺旋埋管换热器结构的复杂性，为了便于模型建立，特作以下假设：

- 1) 由于桩基外部土壤和内部桩基沿深度方向温差较小，因此不考虑轴向温度变化，只考虑径向温度变化；
- 2) 同一深度土壤、桩基的初始温度均匀一致；
- 3) 土壤、埋管、桩基材料为均质各向同性固体，物性参数为常数；
- 4) 忽略地下水渗流和热湿迁移的影响；
- 5) 忽略螺旋管管壁与回填材料及回填材料与周围土壤间接接触热阻；
- 6) 因埋管较长，而埋管进出口温差较小，因此可认为微元管段内流体温度和速度一致；
- 7) 将螺旋型埋管的换热看作为作用于桩基外表面的—等价热源。

根据以上假设，桩基螺旋型埋管在土壤中的换热可看成在桩基外表面存在内热源的一维非稳态导热问题，如图1所示。

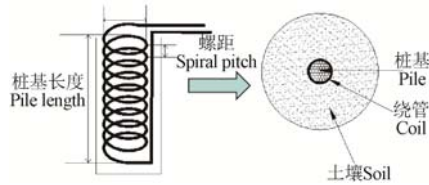


图1 桩基螺旋型埋管物理模型

Fig.1 Physical model of pile foundation with spiral coil

1.2 数学模型

1.2.1 固体一维非稳态导热方程

基于以上假设，在对称圆柱坐标系中，其一维非稳态导热问题的控制方程可表示为

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + Q, \quad (1)$$

式中 T 为控制体积在 t 时刻的温度， $^{\circ}\text{C}$ ； τ 为时间， s ； r 为桩基半径， m ； λ 为导热系数， $\text{W}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ ； ρ 为密度， kg/m^3 ； c_p 为比热容， $\text{J}/(\text{kg}^{\circ}\text{C})$ ， Q 为内热源。

1.2.2 管内水温计算

如图2所示，在桩基深度方向单位长度为 ΔZ 的桩基上，假设单位时间间隔内，管内流体和管外固体传热为准稳态，根据假设(5)，埋管外壁与桩基和土壤紧密接触，不存在接触热阻，管外壁温度等于与管壁接触的土壤温度。则管内流体换热过程可以看成由管内流体对流换热和管壁导热2个过程组成^[4]，根据能量平衡可得：

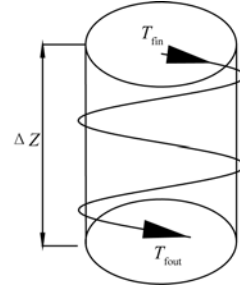
$$Q = (T_{\text{fin}} - T_s) L_p / R_t; \quad (2)$$

$$R_t = \frac{1}{2\pi d_{\text{in}} h L_p} + \frac{1}{4\pi \lambda_p L_p} \ln \left(\frac{d_{\text{in}}}{d_{\text{out}}} \right); \quad (3)$$

$$h = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \lambda_f / d_{\text{in}}; \quad (4)$$

$$T_{\text{fout}} = T_{\text{fin}} - \frac{Q}{C_{pf} \cdot m_f}. \quad (5)$$

式中 Q 为土壤内热源强度， W ； T_{fin} 、 T_{fout} 、 T_s 分别为微元管段的流体进口温度、出口温度和土壤温度， $^{\circ}\text{C}$ ； L_p 为单位桩深的螺旋管长度， m ； R_t 为单位桩深的当量热阻， $(\text{m}^{\circ}\text{C})/\text{W}$ ； C_{pf} 为管内流体比热容， $\text{J}/(\text{kg}^{\circ}\text{C})$ ； d_{in} 、 d_{out} 分别为螺旋型埋管的内、外直径， m ； λ_p 为管材的导热系数， $\text{W}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ ； h 为管内流体的对流换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ； m_f 为管内流体的质量流量， kg/s 。



注： T_{fin} 为单位长度桩基管段进口温度， $^{\circ}\text{C}$ ； T_{fout} 为单位长度桩基管段出口温度， $^{\circ}\text{C}$ ； ΔZ 为单位桩基长度， m 。

Note: T_{fin} is the inlet temperature of coil, $^{\circ}\text{C}$; T_{fout} is the outlet temperature of coil, $^{\circ}\text{C}$; ΔZ is the unit length of the pile, m .

图2 单位长度桩基管内流体换热示意图

Fig.2 Schematic of heat exchange of fluid inside coil for unit length of pipe foundation

1.3 定解条件

1.3.1 初始条件

$$T_f(z, \tau) = T_p(r, z, \tau) = T_s(r, z, \tau) = T_0 \quad (\tau = 0) \quad (6)$$

1.3.2 边界条件

1) 土壤远边界条件

$$T_s(r, z, \tau) = T_0. \quad (7)$$

2) 管外壁和固体交界面处边界条件

$$T_{s|r=r_{\text{out}}} = T_{p|r=r_{\text{out}}}; \quad (8)$$

$$Q_{p|r=r_{\text{out}}} = Q_{s|r=r_{\text{out}}}. \quad (9)$$

3) 管内壁为第三类边界条件

热泵运行时，

$$h = 0.023 \times Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \cdot \frac{\lambda_f}{d_{\text{in}}}. \quad (10)$$

热泵停止时，

$$h = 0. \quad (11)$$

式中下标 f 、 p 、 s 分别表示管内流体、管材、固体土壤； T_0 为土壤初始温度， $^{\circ}\text{C}$ ； z 为桩基深度， m ； τ 为时间， s 。

2 模型的试验验证

为了验证上述所建桩基螺旋型埋管换热器模型的预测精度，基于相似理论搭建了桩基螺旋型埋管换热系统性能试验装置，图3为试验系统实物图，详细试验台可参见文献[16]。以换热量及其土壤温度作为比较对象，将模拟值与试验值进行了对比，结果如图4所示。

分析图4a可以看出，换热量试验值与模拟值吻合较好，但整个运行期间试验值略大于模拟值，这是由于换热模型忽略了轴向导热，导致换热量模拟值略小于试验值。进一步分析图4b可以看出，换热器运行期间模拟最

大相对误差为 9.7%，其平均相对误差为 3.1%，该误差范围在工程上是允许的。



图 3 试验系统实物图
Fig.3 Picture of experimental system

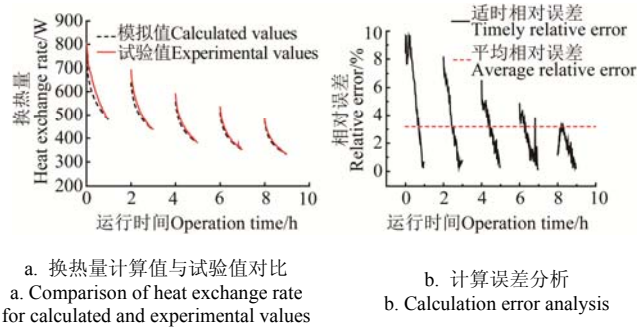


图 4 换热量计算值与试验值的对比及误差分析
Fig.4 Comparison between calculated value and experimental data for heat exchange rate and error analysis

图 5 给出了深度为 0.2 m 处不同径向处土壤温度模拟值与试验值的对比曲线及其误差变化曲线。

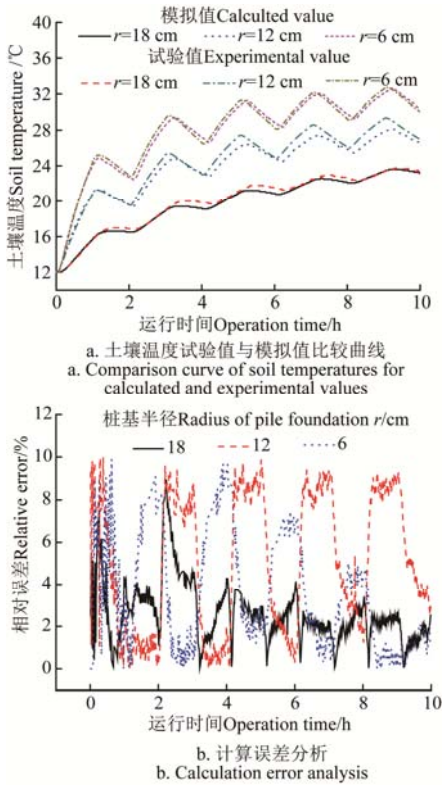


图 5 土壤温度计算值与试验值的对比及误差分析
Fig.5 Comparison between calculated value and experimental data for soil temperature and error analysis

由图 5 可得整个运行期间，土壤温度试验值与计算值变化规律完全一致，在半径为 $r=6$ 、 $r=12$ 、 $r=18$ cm 处土壤温度最大相对误差分别为 8.4%、9.2%、9.1%，对应平均相对误差分别为 2.3%、4.7%、3.4%，该误差范围在工程上是允许的。因此，本文所建立的桩基螺旋型埋管换热器传热模型在计算精度上是可行的，可以用来探讨桩基螺旋型换热器的换热性能和土壤温度变化规律。

3 计算结果与分析

考虑到实际运行工况，模拟计算采用日间放热 10 h 夜间停运 14 h 的间歇运行方式，螺旋型埋管材料为高密度聚乙烯 (high density polyethylene, HDPE)，用 TDMA 算法对离散方程进行求解，用 Matlab 编程进行数值模拟，模拟所采用的计算参数如表 1 所示。

表 1 计算条件 Table 1 Calculation conditions		
参数 Parameters	取值 Values	
管材导热系数 Thermal conductivity of pipe $/(W \cdot (m \cdot K)^{-1})$	0.48	
螺旋型管内外直径 Inside and outside diameter of coil/m	0.025/0.032	
螺距 Spiral pitch/m	0.2	
桩基长度 Pile length/m	8	
桩基直径 Pile diameter/m	1	
土壤导热系数 Soil thermal conductivity $/(W \cdot (m \cdot K)^{-1})$	0.9	
土壤密度 Soil density $/(kg \cdot m^{-3})$	1 500	
土壤比热容 Soil specific heat $/(J \cdot (kg \cdot K)^{-1})$	1 100	
水密度 Water density $/(kg \cdot m^{-3})$	1 000	
水比热容 Water specific heat $/(J \cdot (kg \cdot K)^{-1})$	4 189	
水导热系数 Water thermal conductivity $/(W \cdot (m \cdot K)^{-1})$	0.56	
管内水流速 Velocity of water inside pipe $/(m \cdot s^{-1})$	0.6	
模拟区域直径 Diameter of simulation region/m	10	
进口水温 Inlet water temperature $/^{\circ}C$	35	
土壤初始温度 Soil initial temperature $/^{\circ}C$	17.5	
模拟周期 Simulation period/d	90	

3.1 桩基直径的影响

为了探讨桩基直径对桩基螺旋型埋管换热性能的影响，以直径 0.6、1、1.4 m 为代表，分析了不同桩基直径下的换热量及其相应的土壤温度变化，结果如图 6 所示。

分析图 6a 可以看出，换热量随桩基直径增加而增大，如桩基直径分别为 0.6、1、1.4 m 时，运行 30 d 时其对应的换热量分别为 2.62、3.43、4.08 kW。当桩基直径从 0.6 增加到 1 m 时，换热量增加了 30.9%，但当桩基直径由 1 增加到 1.4 m 时，换热量仅增加了 18.9%，这说明桩基直径并非越大越好，在桩基直径较小时增加桩基直径可以大幅增加换热量，但随着桩基直径的增加，其换热量增幅越来越小。进一步分析图 6b 可以发现，桩基直径的增大会导致单位管长换热量的降低，如直径为 0.6 m 时，单位管长换热量为 34.79 W/m，而当桩基直径增加为 1.4 m 时，其对应值为 23.21 W/m。由此可看出，增大桩基直径虽然有利于增加桩基埋管总换热量，但是单位管长换热量会减小。因此，桩基直径不可无限制增加，应该根据总换热量、单位管长换热量、空调负荷需求来对其进行综合优化。

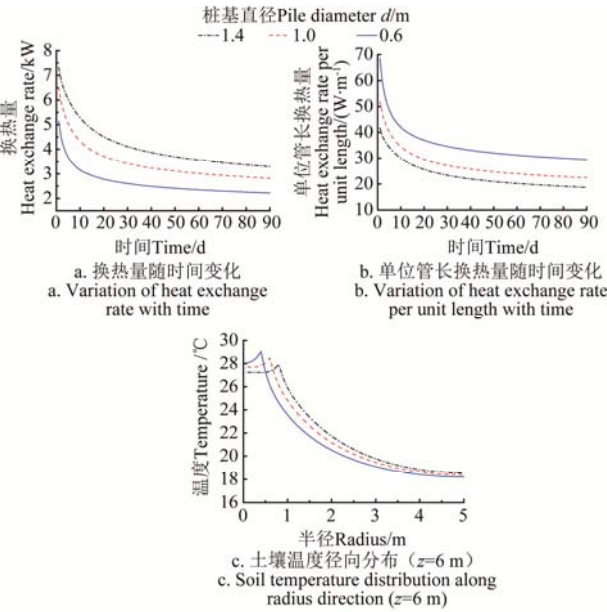


图 6 桩基直径对换热量与土壤温度分布的影响

Fig.6 Effects of pile diameter on heat exchange rate and soil distribution

进一步分析图 6c 可以看出，桩基和土壤温度分布是由桩基中心往外逐渐升高，在接近桩基表面处达到最高，然后向外温度急剧下降。如当桩基直径为 0.6、1、1.4 m 时，最高温度点所在的半径分别为 0.4、0.6、0.8 m，说明桩基直径越大，最高温度点也逐渐向外移动。桩基直径为 0.6、1、1.4 m 时深度为 6 m 处桩基温度最高值分别为 29.02、28.48、27.9℃，温度越高，意味着桩基储存热量的能力越小，因此桩基直径增加有利于桩基蓄存更多的热量，从而可增加埋管换热器的换热量。

3.2 桩基深度的影响

为了研究桩基深度对桩基螺旋型埋管换热器换热性能的影响，分别对深度为 8、10、12、14 m 的换热器进行了数值模拟，结果如图 7 所示。

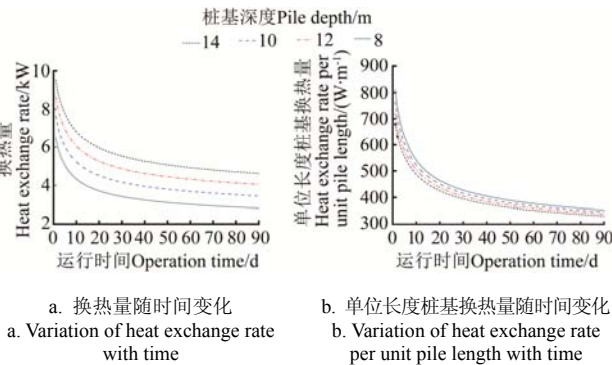


图 7 桩基深度对换热量的影响

Fig.7 Effect of pile depth on heat exchange rate

由图 7a 可以看出，桩基深度为 8、10、12、14 m 时的平均换热量分别为 3.43、4.17、4.86、5.51 kW，说明增加桩基深度，有利于提高换热器的换热量。进一步分析图 7b 可以发现，随桩基深度增加，其单位长度换热量会略微降低，如桩基深度为 8、10、12、14 m 时，其对应

的单位长度桩基平均换热量分别为 428.7、416.6、404.6、393.6 W/m，由此可看出桩基深度的增加对单位长度桩基的换热量影响较小。因此，当换热器内流体温降较小时，可以考虑增加桩基深度来增大换热器换热量，增加管内流体的温降幅度。

3.3 土壤类型的影响

为了探讨土壤类型对桩基螺旋型埋管换热性能的影响，以黏土、砂土、砂岩 3 种典型土壤为例，表 2 列出了对应的热物性参数，计算结果见图 8。

表 2 三种典型土壤参数

Table 2 Thermal properties for three soil type

土壤类型 Type	密度 Density/ (kg·m ⁻³)	比热容 Capacity/ (kJ·(kg·K) ⁻¹)	导热系数 Thermal Conductivity/ (W·(m·°C) ⁻¹)	热扩散率 Thermal diffusivity/ (m ² ·s ⁻¹)
黏土 Clay	1500	1100	0.9	0.545×10 ⁻⁶
砂土 Sand	2000	700	2.0	1.430×10 ⁻⁶
砂岩 Sandstone	2500	1400	3.2	0.900×10 ⁻⁶

从图 8a 中可以看出，3 种土壤中换热量均是随着时间增加而减小，并逐渐趋于平稳。同等条件下，黏土、沙土、岩土中的平均换热量分别为 3.43、4.35、5.54 kW，这说明砂岩最有利于换热器换热，其次是沙土，换热效果最差是黏土。

进一步分析图 8b 可以看出，在半径小于 1.5 m 的范围内，黏土的桩基和土壤温度是最高的，其次是砂土，砂岩的桩基和土壤温度是最低的，这主要是因为黏土的比热容和热扩散系数最小，换热器释放的热量不能快速向外扩散，导致桩基中心区域温度较高。在半径大于 1.5 m 范围，砂土的土壤温度是最高的，这是由于砂土的土壤热扩散系数大，热量扩散半径最大，因此距离桩基较远的砂土土壤温度最高。而砂岩的桩基和土壤温度是最低的，这是由于岩土不仅热扩散系数大，同时砂岩的比热容也最高，因此砂岩土壤温度上升速率和幅度最低。

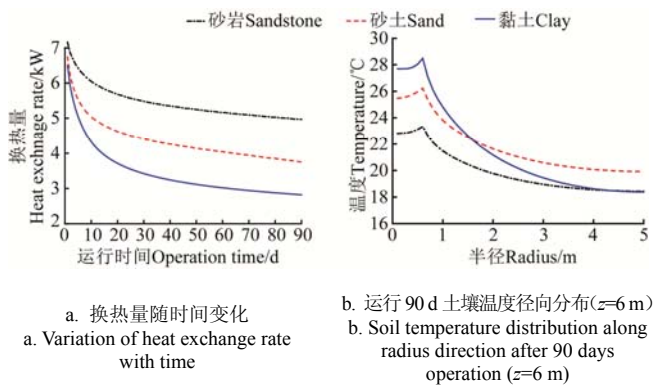


图 8 土壤类型对换热性能的影响

Fig.8 Effect of soil types on heat exchange performance

3.4 埋管组数的影响

为了探讨埋管组数对桩基螺旋埋管换热性能的影响，对单螺旋、双螺旋、三螺旋 3 种桩基螺旋型埋管换热器进行了数值模拟，计算结果如图 9 所示。

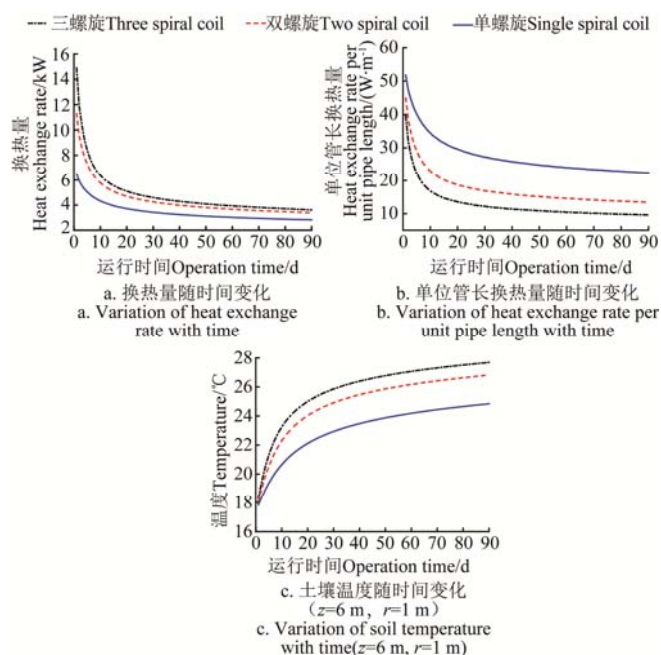


图9 埋管组数的影响
Fig.9 Effect of spiral coil number

从图 9a 中可以看出, 换热器运行期间前 15 d, 三螺旋和双螺旋的换热量相对于单螺旋换热器换热量的增幅很大, 运行 15 d 之后, 三螺旋和双螺旋换热器相对于单螺旋换热器换热量增幅减小并且趋于稳定, 这是由于运行前期桩基和土壤温度较低, 埋管组数越多, 换热量增幅较大; 但换热器运行一段时间后, 由于桩基和土壤温度会逐渐升高, 埋管组数的增加对增大换热量的贡献减小。因此通过增加螺旋埋管组数来强化桩基螺旋型埋管换热量主要适合于运行初期。正如图 9b 所示, 单螺旋、双螺旋、三螺旋换热器的平均换热量分别为 3.43、4.37、4.80 kW, 双螺旋换热器相对于单螺旋换热器换热量增长了 27.4%, 而三螺旋换热器相对于双螺旋换热器换热量仅增长了 9.8%。由此可以看出, 双螺旋换热器相对于单螺旋换热器换热量增量明显高于三螺旋换热器相对于双螺旋换热器换热量的相对增量。因此实际工程中, 螺旋埋管组数并非越多越好。

进一步分析图 9b 可以看出, 增加埋管组数会降低单位管长换热量, 如单螺旋、双螺旋和三螺旋对应的平均单位管长换热量分别为 27.3、17.4、12.7 W/m, 因此, 增加埋管组数虽然有利于增加桩基埋管总换热量, 但是单位管长换热量会减小, 在单螺旋的情况下, 可以考虑适度增加埋管组数来增加埋管换热量。

从图 9c 中还可以看出在整个运行期间, 同一位置处, 螺旋埋管组数越多, 土壤和桩基温度增长速度和幅度就越大, 不利于土壤温度恢复和换热器的长期运行。因此, 增加螺旋埋管组数仅能在短期内提高换热器换热量, 长期运行会导致土壤温度上升过快和过高, 降低单位管长的换热量。

4 结 论

1) 增加桩基直径有利于改善桩基的蓄热能力、降低桩基内部温度上升速率和幅度, 从而可提高螺旋型埋管

的换热能力, 如桩基直径分别为 0.6、1、1.4 m 时, 其对应换热量分别为 2.62、3.43、4.08 kW; 但增加直径会导致单位管长换热量减小, 如直径为 0.6、1.4 m 时, 其单位管长换热量分别为 34.79、23.21 W/m。因此, 桩基直径不可无限制增加, 应该根据总换热量、单位管长换热量来进行优化。

2) 桩基深度的增加有利于提高桩基螺旋型埋管换热器的换热量, 但桩基深度的增加对单位长度桩基的换热量影响很小, 如桩基深度为 8、10、12、14 m 时的平均换热量分别为 3.43、4.17、4.86、5.51 kW, 其对应的单位长度桩基平均换热量分别为 428.7、416.6、404.6、393.6 W/m。因此, 当桩基换热量不足时可以通过增加桩基深度提高换热量。

3) 土壤比热容和热扩散率越高, 埋管换热量越大; 同等条件下, 黏土、沙土和砂岩 3 种土壤中砂岩最有利于埋管换热, 如黏土、沙土、岩土的平均换热量分别为 3.43、4.35、5.54 kW。土壤温度上升速率低, 而黏土最不利于换热, 土壤温度上升率高;

4) 桩基螺旋型埋管换热器螺旋组数越多, 换热器换热量就越大, 但是单位管长换热量会大幅下降, 且会导致土壤温度上升速率和幅度增加, 如单螺旋、双螺旋、三螺旋换热器的平均换热量分别为 3.43、4.37、4.80 kW, 对应的平均单位管长换热量分别为 27.3、17.4、12.7 W/m。因此埋管螺旋组数并非越多越好, 应根据实际运行情况来合理选择。

5) 试验验证表明, 桩基螺旋型埋管换热器换热量与土壤温度的试验值与对应的模拟值吻合较好, 其最大相对误差分别在 9.7% 与 9.1% 以内, 试验数据和计算数据误差在工程允许范围之内。

实际应用中桩基螺旋埋管设计应综合考虑建筑桩基承载要求、建筑负荷大小及桩基埋管的换热特性, 这需要在建筑设计阶段, 建筑专业与暖通专业的密切配合, 在保证建筑桩基功能不受影响的前提下, 设计出满足暖通专业所要求的换热量的桩基螺旋埋管换热形式。

[参 考 文 献]

- [1] 余乐渊, 赵军, 李新国, 等. 竖埋螺旋管地热换热器理论模型及实验研究[J]. 太阳能学报, 2004, 25(5): 690—694. Yu Leyuan, Zhao Jun, Li Xingguo, et al. A heat transfer model and the experiments for vertical spiral geothermal heat pump[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2004, 25(5), 690—694. (in Chinese with English abstract)
- [2] Cui Ping, Li Xing, Man Yi, et al. Heat transfer analysis of pile geothermal heat exchangers with spiral coils[J]. Applied Energy, 2011, 88: 4113—4119.
- [3] Morino K, Oka T. Study on heat exchanged in soil by circulating water in a steel pile[J]. Energy and Buildings, 1994, 21(1): 65—78.
- [4] 吴毅. 螺旋管桩基换热器数值模型[D]. 成都: 西华大学, 2013. Wu Yi. A Numerical Model of Spiral Pipe Pile Foundation Heat Exchanger[D]. Chengdu: Xihua University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [5] Laloui L, Nuth M, Vulliet L. Experimental and numerical investigations of the behavior of a heat exchanger pile[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2006, 30(8): 763—781.

- [6] Zarrella A, De Carli M, Galgaro A. Thermal performance of two types of energy foundation pile: Helical pipe and triple U-tube [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 61(2): 301—310.
- [7] Man Y, Yang H X, Diao N, et al. A new model and analytical solutions for borehole and pile ground heat exchangers[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53: 2593—2601.
- [8] Man Y, Yang H X, Diao N R. Development of spiral heat source model for novel pile ground heat exchangers[J]. *HVAC&R Res*, 2011, 17(6): 1075—1088.
- [9] Lee J U, Kim T, Leigh S B. Applications of buildings-integrated coil-type ground-coupled heat exchangers: Comparison of performances of vertical and horizontal installations[J]. *Energy and Buildings*, 2015, 93: 99—109.
- [10] 刘希臣, 肖益民, 付祥钊, 等. 地源热泵桩基螺旋埋管换热性能实验研究[J]. *暖通空调*, 2013, 43(9): 107—110.
Liu Xichen, Xiao Yimin, Fu Xiangzhao, et al. Experiment of heat transfer performance of spiral pile foundation heat exchanger in ground source heat pump[J]. *HV&AC*, 2013, 43(9): 107—110. (in Chinese with English abstract)
- [11] 刘俊红, 张文克, 方肇洪. 桩埋螺旋管式地热泵换热器的传热模型[J]. *山东建筑大学学报*, 2010, 25(2): 95—100.
Liu Junhong, Zhang Wenke, Fang Zhaohong. Soil cylindrical heat source model for pipe ground heat exchangers with spiral coils[J]. *Journal of Shandong Jianzhu University*, 2010, 25(2): 95—100. (in Chinese with English abstract)
- [12] Zhang W K, Yang H X, Lu L, et al. Investigation on heat transfer around buried coils of pile foundation heat exchangers for ground-coupled heat pump applications[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55: 6023—6031.
- [13] Zhang W K, Yang H X, Cui P, et al. Study on spiral source models revealing groundwater transference effects on pile foundation ground heat exchangers[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 84: 119—129.
- [14] Zhang W K, Yang H X, Lu L, et al. The analysis on solid cylindrical heat source model of foundation pile ground heat exchangers with groundwater flow[J]. *Energy*, 2013, 55: 417—425.
- [15] Zhang W K, Yang H X, Lu L, et al. The research on ring-coil heat transfer models of pile foundation heat exchangers in the case of groundwater seepage[J]. *Energy and Buildings*, 2014, 71: 115—128.
- [16] 孔磊. 螺旋型埋管换热器换热性能的研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2015.
Kong Lei. Study on the Heat Exchange Performance of Spiral Ground Heat Exchanger[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2015. (in Chinese with English abstract)

Numerical simulation and validation on heat exchange performance of pile spiral coil ground heat exchanger

Yang Weibo, Yang Jingjing, Kong Lei

(School of Hydraulic & Energy Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: The new trends in energy savings and greenhouse gas reductions are expecting to explore the utilization of shallow geothermal energy. The most popular way to exploit shallow geothermal energy resources is the ground coupled heat pump (GCHP) system with using ground as a heat source. Because underground temperature is rather constant compared with ambient air temperature, the GCHP could achieve higher efficiency as well as more stable performance compared with traditional air source heat pumps. Thus the GCHP system becomes increasingly popular in commercial and institutional buildings. In general, a vertical borehole with ground heat exchanger (GHE) is used as the mainstream of GCHP system. However, the wide application of this type of GCHP technology has been limited by its higher initial cost and substantial land areas required to install the GHE. For this reason, the foundation piles of buildings have been used as part of GHE in recent years to reduce the cost of drilling borehole and save the required land area. This innovative idea of utilizing what are usually called “energy piles”, has led to notable progress in the field of GCHP systems. It has become particularly attractive because it lowers total cost and spatial requirements, and offers the higher renewable contribution. In this paper, a novel configuration of an energy pile with a spiral coil was proposed. In order to investigate the effects of various factors on heat exchange performance of the pile spiral coil GHE, a numerical model of the pile with a spiral coil was developed. Based on the numerical solution of the model, the effects of pile diameter, pile depth, spiral coil group number and soil type on the heat exchange rate and soil temperature distribution of the spiral pile GHE were analyzed. The results indicated that increasing foundation pile diameter can improve the thermal storage capacity and thus enhance heat exchange rate of pile. But increase in foundation pile diameter can also result in the decrease of heat exchange rate per unit pipe length. So the pile diameter cannot be increased unlimitedly. At the same time, increasing the pile depth can improve the heat exchange rate of pile, and have little influence on heat exchange rate per unit pipe length. Thus the thermal performance of pile foundation can be improved by increasing pile depth. As for soil type, among clay, sand and sandstone, the sandstone was most conductive to the pile heat transfer and thus the soil temperature rise rate was minimum. On the contrary, the clay was the worst for heat transfer of pile foundation and soil temperature rise rate was the fastest among the three soil types. Additionally, increasing spiral pipe group number helped to improve heat exchange rate, but the heat exchange rate per unit length can be reduced largely. The experimental validation showed that the heat transfer rate and soil temperature predicted by the model were in good agreement with the corresponding experimental data, and the maximum relative errors were within 9.7% and 9.2% for heat transfer rate and soil temperature, respectively.

Keywords: piles; heat exchanger; temperature; heat exchange performance; numerical simulation; experimental validation