

竖直埋管换热器热响应半径计算方法

李晓星^{1,2}, 胡夏闽², 张正威^{1,2*}

(1. 浙江农林大学风景园林与建筑学院, 杭州 311300; 2. 南京工业大学土木学院, 南京 210009)

摘要: 随着能源压力的日益增大, 世界各国都十分重视可再生能源的利用与开发, 地源热泵技术作为一种清洁、高效的可再生能源, 近年得到了较快的发展。该文利用无限长线热源传热计算模型, 讨论了介质内过余温度场的分布特性。结果表明: 介质内温度响应在孔壁处最大, 随离孔壁距离的增加呈指数衰减, 随时间的增加而增大; 热传播区域随时间的增加而增大, 随介质的热扩散系数的增加而增大。针对工程中群埋管换热器情况, 利用叠加原理计算群埋管的孔壁温度, 定义换热器的热响应半径为其他钻孔引起的过余温度影响系数 $\leq 5\%$ 时相邻钻孔中心线之间的垂直距离。在大量计算分析基础上, 提出了竖直埋管换热器热响应半径计算方法。计算结果表明该文方法具有较好的计算精度, 竖直埋管换热器的热响应半径随岩土热扩散系数增大而增大, 随持续运行时间增加而增大, 随钻孔排数增加而增大, 随着钻孔孔径增大而增大; 钻孔布置方式不同对钻孔热响应半径的影响较明显, 相同布置方式下钻孔直径对其热响应半径的影响较小。针对工程中常见的 115 和 135 mm 2 种孔径, 绘制了不同岩土介质下钻孔单排、双排和三排以上布置时热响应半径-运行时间的关系曲线。工程算例表明该文方法简单方便, 为工程设计提供了便利。

关键词: 传热; 计算; 热泵系统; 竖直埋管换热器; 计算模型; 热响应半径

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.033

中图分类号: TU833.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-17-0248-06

李晓星, 胡夏闽, 张正威. 竖直埋管换热器热响应半径计算方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 248—253.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.033 <http://www.tcsae.org>

Li Xiaoxing, Hu Xiamin, Zhang Zhengwei. Calculation method of thermal response radius for vertical borehole heat exchangers [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(17): 248—253. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.033 <http://www.tcsae.org>

0 引言

随着能源压力的日益增大, 地源热泵技术发展迅速。国内外学者基于内外场分算的方法, 提出了多种地下埋管换热器传热计算模型, 分解析模型和数值模型两大类。解析模型有: 无线长线源模型^[1-3]、有限长线源模型^[4]、无限长柱源模型^[5-6]、有限长柱源模型^[7]、数值模型有 g-function Model^[8]、Mei and Emermon's Model^[9]、Duct storage (DST) Model^[10]、Muraya's Model^[11]、Rottmayer and Mitchell's Model^[12]、Shonder and Beck's Model^[13]。相比解析模型, 数值模型提高了计算精度和分析的灵活性, 可以考虑沿钻孔深度方向的轴向传热。但由于使用极坐标或柱坐标网格, 对于实际工程的复杂系统, 其计算成本大, 计算效率较低, 不便集成到整体建筑能耗分析程序中。此外, 还有学者提出基于内外场合算方法的传热模型^[14-18]和均匀介质渗流的计算模型^[19-22]。但关于换热器热响应半径的研究文献甚少, 给工程设计带来一定的不确定性。如何根据场地地质条件合理确定竖直埋管换

热器间距一直是困扰设计人员的主要问题之一。Hart and Couvillion^[3]研究单孔换热器传热性能时提出远场热响应半径 r_o 概念, 根据远场处介质温度等于初始温度求得。对于工程上常见群管换热器情况, 由于介质温度随离热源距离的增加呈指数衰减, 故按 r_o 布置钻孔将会导致占用较大的场地, 既不合适也无必要。由于地域的不同, 岩土热物性、系统规模及使用方式均会有很大差异。国内外有关规范关于竖直埋管换热器间距的取值也各不相同, 如奥地利是 2.5 m, 瑞典是 10 m^[23]。中国现行规范^[24]是 3~6 m, 但未给出具体的计算方法。Signorelli 等通过实际算例表明换热器热作用半径为 15 m^[25]。王艳和刁乃仁采用数值模型对换热器热作用半径的影响因素进行了分析^[26], 但未给出量化的结果或方法。王美燕和张正威^[27]考虑土层的“过滤”作用提出了一种基于无量纲参数关系曲线的换热器热作用半径估算方法, 由于需要分析建筑物的逐时负荷及冷热负荷不平衡率, 工程应用有一定难度。文献[28]研究表明, 在材料均质常热物性假定条件下, 由于埋管换热器深度方向长度与水平方向相比差 3 个量级, 现有计算模型在系统使用周期内计算结果并无明显差异。为此, 本文采用形式相对简单的无限长线源模型, 不考虑热-力相互耦合作用^[29-31], 分析岩土介质过余温度场的分布及其热响应半径的一般规律。在大量计算分析基础上, 提出竖直埋管换热器热响应半径计算方法。

收稿日期: 2015-01-30 修订日期: 2015-07-24

基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (LY12D02001), 浙江农林大学人才项目 (2010FR099)

作者简介: 李晓星, 女, 山东枣庄人, 从事浅层地热能利用研究。南京 南京工业大学土木工程学院, 210009。Email: lixiaoxing3665@163.com

*通信作者: 张正威, 男, 江苏沐阳人, 博士, 教授, 主要从事浅层地热能利用和建筑节能技术研究。杭州 浙江农林大学园林与建筑学院, 311300。

Email: zwzhang10@126.com

1 理论模型及计算方法

1.1 无限长线热源模型

模型假定岩土体为均匀常物性介质, 有均匀的初始温度。利用三维无限大介质传热格林函数沿热源线在时间域和空间域上积分可得无限大空间介质中任意一点 $M(r, z)$ 在 τ 时刻的过余温度。根据该模型, 换热器单位长度恒定热负荷 q_l 条件下, τ 时刻岩土中的过余温度分布为^[5]:

$$\theta = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\tau} \frac{q_l}{\rho c} G(x, y, z, \tau; x', y', z', \tau') d\tau' dh \quad (1)$$

$$= -\frac{q_l}{4\pi k} Ei\left(-\frac{r^2}{4a\tau}\right)$$

$$G(x, y, z, \tau; x', y', z', \tau') = \frac{1}{8\left[\sqrt{\pi a(\tau - \tau')}\right]^3} \exp\left[-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4a(\tau - \tau')}\right] \quad (2)$$

式中: $Ei(\cdot)$ 为指数积分函数; r 为圆柱坐标系中径向坐标, $r = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}$; a 为介质的热扩散系数, $a = k/\rho c$, m^2/s ; k 为导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; ρc 为多孔介质总容积比热, $J/(m^3 \cdot ^\circ C)$; $G(x, y, z, \tau; x', y', z', \tau')$ 为无限空间介质传热格林函数; τ' 为脉冲点源作用时刻; h 为线热源长度。

1.2 热响应半径计算方法

1.2.1 群管换热器孔壁温度计算

实际地源热泵工程中, 地埋换热器通常由多个钻孔构成, 钻孔等距布置, 如图 1, 钻孔编号为 1、2、3... i ... N 。由于常物性假设条件下的导热问题符合叠加原理条件, 编号 i 钻孔的孔壁过余温度可按下式计算。

$$\begin{array}{ccccccc} \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & & \\ 1 & 2 & 3 & & & & \\ \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & & \\ & & & i-1 & i & & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \circ & \circ & \circ & j-1 & j & \circ & \\ \circ & \circ & \circ & & & \circ & \\ & & & N-1 & N & & \end{array}$$

注: i, j 为钻孔编号, N 为钻孔总数。

Note: i, j is the borehole No., N is the number of borehole.

图 1 群管布置

Fig.1 Group drilling borehole layout

$$\theta_{bi}(\tau) = \theta_{bi0}(r_b, \tau) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \theta_{ij}(r_{ij}, \tau) \quad (3)$$

$$= (1 + l_i) \theta_{bi0}(r_b, \tau) \quad (4)$$

$$l_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \frac{\theta_{ij}(r_{ij}, \tau)}{\theta_{bi0}(r_b, \tau)}$$

式中: $\theta_{bi}(\tau)$ 为第 i 个钻孔孔壁过余温度, $^\circ C$; $\theta_{bi0}(r_b, \tau)$ 为第 i 个钻孔自身引起的孔壁过余温度, $^\circ C$; $\theta_{ij}(r_{ij}, \tau)$ 为第 j

个钻孔引起第 i 个钻孔孔壁附加过余温度, $^\circ C$; r_{ij} 为第 j 个钻孔至第 i 个钻孔的距离; l_i 为其他钻孔对第 i 个钻孔的过余温度影响系数。

1.2.2 热响应半径定义

理论上置于半无限地层中的换热器会对整个地层的温度产生影响。对于单孔换热器, 由于其引起的过余温度随距离的增大呈指数衰减, 当其衰减到足够小且由其引起的过余温度在换热器设计中可以忽略时, 所对应的距离即可认为是换热器的热作用半径。对于多孔换热器, 还须考虑其他钻孔的影响。在系统运行周期内, 其他钻孔引起的过余温度影响系数 $l \leq 5\%$ 时, 可以认为相邻钻孔的影响可以忽略不计。此时相邻钻孔中心线之间的垂直距离即为埋管换热器的热响应半径。此时其他钻孔对目标孔引起的附加过余温度占该钻孔孔壁温度 $\leq 4.7\%$, 满足工程设计要求。

由于位于中心区域钻孔的过余温度影响系数较其他区域大, 故确定钻孔影响半径时宜选中心区域钻孔确定, 工程上偏于安全。对于图 2 多排钻孔布置情况, 按 $l \leq 5\%$ 控制条件计算热响应半径, 并以此为孔距等距布置钻孔。计算表明: 仅靠近计算孔周边的孔对计算孔的孔壁温度影响较大 (图 2 中阴影部分), 离计算孔 2 倍孔距外的其他孔对计算孔的附加过余温度影响系数小于 0.05%, 故对于 3 排以上钻孔可按 3 排计算其热响应半径。据此并结合工程实际将钻孔布置方式分为单排、双排和多排 (3 排及 3 排以上) 等间距布置 3 种类型。

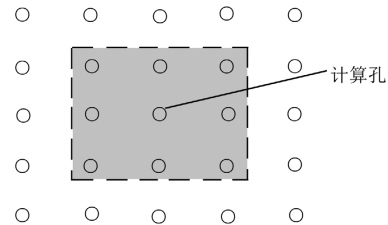


图 2 群管计算简图

Fig.2 Calculation diagram of group drilling borehole

1.2.3 热响应半径计算方法

将式 (1) 改写为:

$$\theta = -\frac{q_l}{4\pi k} Ei\left(\frac{-r^2}{4a\tau}\right)$$

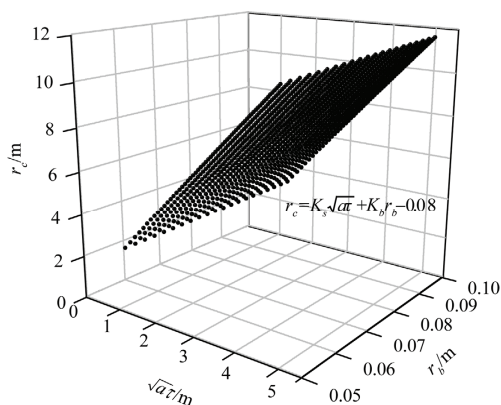
$$= \frac{q_l}{4\pi k} \left[\ln\left(\frac{4a\tau}{r^2}\right) - \gamma - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \left(\frac{r^2}{4a\tau}\right)^n}{n!n} \right] \quad (5)$$

式中: γ 为欧拉常数, 取值 0.5772。

参考规范^[24]中典型岩土体的热物性, 岩土热扩散系数取 $0.5 \times 10^{-6} \sim 1.6 \times 10^{-6} m^2/s$, 假定系统冷热负荷平衡, 计算时间按单一制冷/制热工况取 1~5 个月, 钻孔直径按工程常规取 100~200 mm。分别计算不同孔径、不同 $a\tau$ 下换热器的热响应半径, 如图 3。经数值拟合得:

$$r_c = K_s \sqrt{a\tau} + K_b r_b - 0.08 \quad (6)$$

式中: r_c 为热响应半径, m; r_b 为钻孔半径, m; K_s 、 K_b 分别为岩土介质和钻孔直径修正系数。当钻孔单排布置时, $K_s=1.91$, $K_b=5.56$; 钻孔双排布置时, $K_s=2.20$, $K_b=6.27$; 钻孔 3 排及 3 排以上布置时, $K_s=2.37$, $K_b=6.30$ 。



注: r_c 为热响应半径, r_b 为钻孔半径 m; a 为介质的热扩散系数, τ 时刻。
Note: r_c is responsive radius, r_b is borehole radius, a is thermal diffusion coefficient; τ is time.

图 3 热响应半径

Fig.3 Radius of thermal response

2 结果与分析

2.1 岩土过余温度场沿径向分布

图 4 分别为不同热扩散系数和不同热流强度下岩土介质内过余温度响应沿径向分布, 计算钻孔半径 $r_b=0.055$ m, 钻孔深度 $H=100$ m。

从图 4 可以看出, 介质内过余温度响应在孔壁处最大, 随离孔壁距离增加呈指数衰减; 随着时间增加逐渐增大。热作用半径随介质热扩散系数的增加而增大, 随作用时间的增加而增大。相同作用时间下, 热流强度的变化对热作用半径的影响不明显。表明热流强度影响介质内过余温度及其梯度, 介质热扩散系数及作用时间影响热量传递区域。取 $k=1.2$ W/(m·°C), $a=1.0 \times 10^{-6}$ m²/s, $q_l=30$ W/m, 当时间为 3 个月时, 离钻孔中心 3 m 处的过余温度约为 1.8°C, 离钻孔中心 4 m 处约为 1.0°C; 当时间为 6 个月时, 离钻孔中心 3 m 处的过余温度约为 3.0°C, 离钻孔中心 4 m 处约为 2.0°C。

2.2 热响应半径计算结果与分析

表 1 为钻孔单排、双排和多排布置, 式 (6) 计算结果与理论解的对比。从表 1 可以看出本文拟合公式计算结果与理论解之间最大相对误差分别为 1.81%、2.63%和 2.65%, 说明拟合计算公式 (6) 具有较好的计算精度, 满足工程要求。

对于工程上常用的单 U 和双 U 形竖直埋管换热器, 钻孔直径分别为 115 和 135 mm。从式 (6) 可以看出, 由于热响应半径和钻孔直径差一个量级, 故单 U 和双 U 钻孔直径的变化对其计算结果影响较小。本文计算了双 U 形竖直

埋管换热器 (钻孔直径 135 mm), 不同布置方式、不同岩土介质条件下, 埋管换热器热响应半径随时间的变化曲线, 并绘于图 5 中。对于单 U 形竖直埋管换热器 (钻孔直径 115 mm) 可参照确定, 工程上偏于安全。

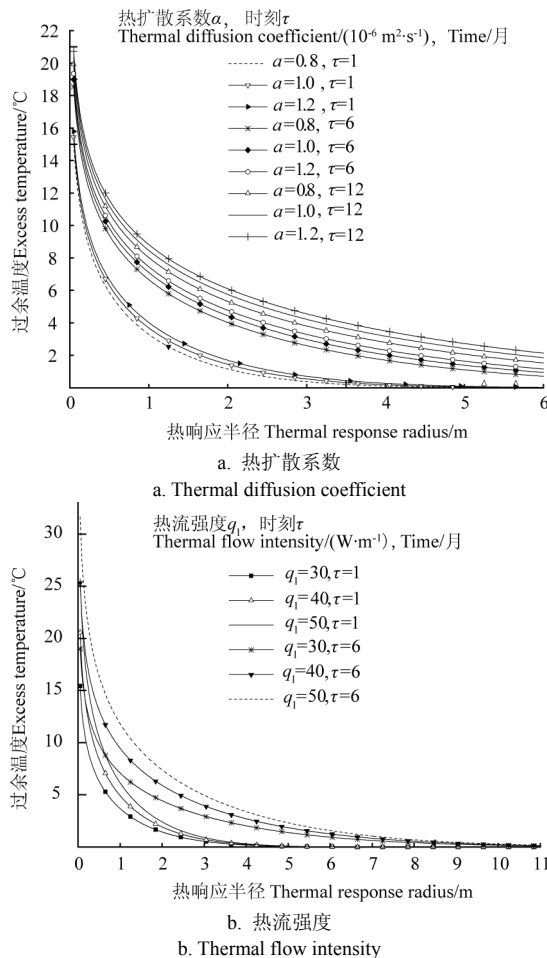


图 4 不同热扩散系数与热流强度的过余温度沿径向分布

Fig.4 Temperature rise in radial direction under thermal diffusion coefficient or various thermal flow

从图 5 可以看出, 竖直埋管换热器的热响应半径随岩土热扩散系数增大而增大, 随持续运行时间增加而增大, 随钻孔排数增加而增大, 随着钻孔孔径增大而增大。

钻孔布置方式不同对钻孔热响应半径的影响较明显, 相同布置方式下钻孔直径对其热响应半径的影响较小。对于夏热冬冷地区地源热泵系统, 单一制冷/制热工况运行时间通常为 16 h/d。按夏/冬季分别运行 3~4 个月为例, 累计持续运行时间约为 2~3 个月。设钻孔双排布置, 钻孔直径 135 mm, 对于热扩散系数在 $0.5 \times 10^{-6} \sim 0.86 \times 10^{-6}$ m²/s 内的岩土介质, 其热响应半径在规范推荐范围内; 而当 $a > 0.86 \times 10^{-6}$ m²/s 时, 热响应半径大于规范的推荐值上限 6 m, 此时应当适当扩大钻孔间距。如累计持续运行时间大于 3 个月, 热响应半径超出规范的建议值将更多。

表 1 本文方法计算结果与理论解对比

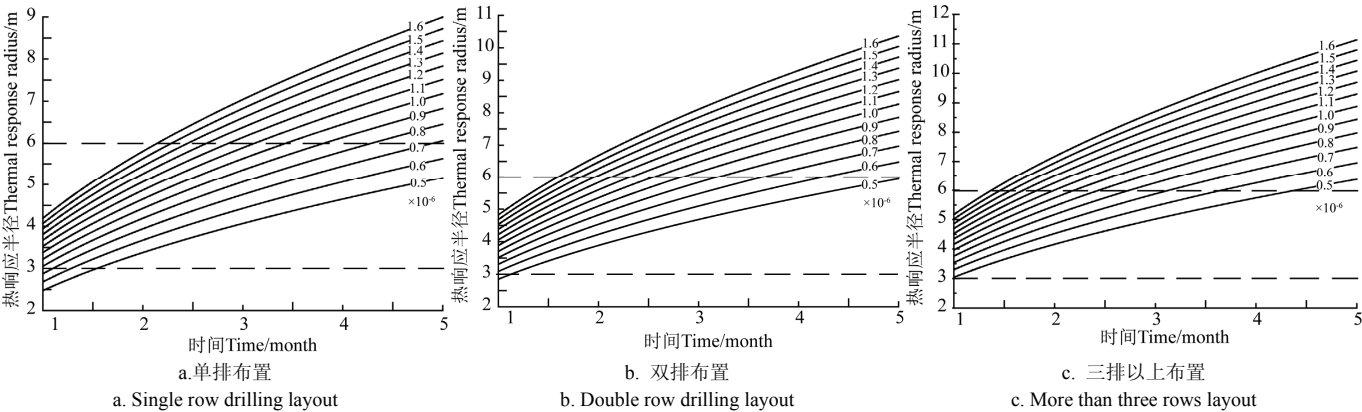
Table 1 Comparison of thermal response radius between calculating results of paper model and analytical solution m

钻孔布置方式 Borehole arrangement	孔径 Borehole diameter /mm	1 个月 One month			2 个月 Two months			3 个月 Three months			4 个月 Four months			5 个月 Five months		
		本文方法 Method in this paper	理论解 Analytical solution	误差 Error/%	本文方法 Method in this paper	理论解 Analytical solution	误差 Error/%	本文方法 Method in this paper	理论解 Analytical solution	误差 Error/%	本文方法 Method in this paper	理论解 Analytical solution	误差 Error/%	本文方法 Method in this paper	理论解 Analytical solution	误差 Error/%
单排布置 Single row layout	100	3.28	3.34	1.81	4.55	4.61	1.17	5.53	5.56	0.62	6.35	6.36	0.15	7.08	7.06	0.26
	120	3.33	3.38	1.48	4.61	4.67	1.23	5.59	5.63	0.85	6.41	6.44	0.48	7.14	7.15	0.15
	140	3.39	3.42	0.98	4.66	4.72	1.12	5.64	5.69	0.92	6.47	6.51	0.67	7.19	7.22	0.41
	160	3.45	3.46	0.37	4.72	4.76	0.91	5.70	5.75	0.87	6.52	6.57	0.73	7.25	7.29	0.55
	180	3.50	3.49	0.33	4.78	4.81	0.62	5.75	5.80	0.75	6.58	6.63	0.70	7.30	7.35	0.59
	200	3.56	3.52	1.05	4.83	4.85	0.25	5.81	5.84	0.56	6.64	6.68	0.61	7.36	7.40	0.58
双排布置 Double row layout	100	3.78	3.81	0.88	5.24	5.28	0.67	6.37	6.39	0.34	7.32	7.32	0.05	8.15	8.14	0.23
	120	3.84	3.85	0.36	5.31	5.33	0.54	6.43	6.46	0.40	7.38	7.40	0.20	8.22	8.22	0.00
	140	3.90	3.89	0.28	5.37	5.38	0.30	6.49	6.52	0.33	7.44	7.46	0.23	8.28	8.29	0.11
	160	3.96	3.92	1.01	5.43	5.43	0.00	6.56	6.57	0.15	7.51	7.52	0.17	8.40	8.35	0.64
	180	4.03	3.96	1.78	5.49	5.47	0.46	6.62	6.61	0.09	7.57	7.57	0.00	8.40	8.41	0.04
	200	4.09	3.98	2.63	5.56	5.51	0.93	6.68	6.66	0.37	7.63	7.62	0.16	8.47	8.46	0.07
多排布置 More than three rows layout	100	4.05	4.08	0.79	5.63	5.67	0.67	6.84	6.87	0.41	7.87	7.88	0.15	8.77	8.76	0.08
	120	4.11	4.13	0.28	5.69	5.72	0.52	6.91	6.94	0.42	7.93	7.95	0.26	8.83	8.84	0.10
	140	4.18	4.16	0.35	5.76	5.77	0.24	6.97	6.99	0.32	7.99	8.01	0.26	8.89	8.91	0.17
	160	4.24	4.20	1.06	5.82	5.81	0.11	7.03	7.04	0.13	8.06	8.07	0.17	8.96	8.97	0.14
	180	4.30	4.23	1.84	5.88	5.85	0.51	7.10	7.09	0.11	8.12	8.12	0.00	9.02	9.02	0.00
	200	4.37	4.25	2.65	5.95	5.89	0.97	7.16	7.13	0.42	8.18	8.17	0.17	9.08	9.08	0.00

2.3 工程实例分析

工程为常州方圆制药有限公司新厂区综合楼地源热泵系统，位于常州工业园区，五层框架结构，建筑面积 16 670 m²，空调面积 10 215 m²。场地地质属长江下游三角洲冲积平原，土层及其厚度自地表向下分别为：杂填土 2.20 m，粉质黏土（粉砂）73.20 m，细砂 10.60 m，砾

砂 14.00 m。地下水位地表下 5 m。
现场热响应测试计算得：平均初始地温 18.9℃，综合导热系数 2.04 W/(m³·K)，综合热扩散系数 0.70×10⁻⁶ m²/s。系统单一工况运行时间取 4 个月，累计持续运行时间 3 个月，钻孔直径 135 mm，三排布置。查图 5c 得热响应半径为 5.8 m，符合规范要求。



注：虚线为地源热泵系统工程技术规范^[24]推荐的钻孔间距范围。
Note: Dotted line is the range of borehole spacing recommend by technical code for ground-source heat pump system^[24].

图 5 不同热扩散系数的热响应半径（钻孔直径 135 mm）
Fig.5 Thermal response radius under different thermal diffusion coefficient (bore diameter 135 mm)

3 结 论

1) 实际地源热泵系统运行时常根据需要采用昼夜和季节间歇运行工况。对于昼夜间歇运行工况，由于间歇时间较短，计算时常忽略其引起的钻孔壁温度变化，工程上偏于安全。对于季节间歇运行工况，因土壤的导热

性能较差，可将其视为蓄能体。对于长江中下游及华北地区，通常根据冷热负荷平衡条件进行系统设计。在冷热负荷平衡条件下，系统运行全周期内钻孔区域土壤不会产生热量的累积，因而计算时仅需考虑单一工况，故本文计算方法亦适用于系统间歇运行情况。计算时按系统单一制冷或制热工况中较长运行时间的工况计算，计

算时间取系统实际累计持续运行时间计算。

2) 竖直埋管换热器的热响应半径随岩土热扩散系数增大而增大。当钻孔双排布置、系统运行时间 4 个月、热扩散系数分别为 0.5、0.8、1.2 m²/s 时, 热响应半径分别为 4.5、5.8、7.2 m; 随持续运行时间增加而增大。当钻孔双排布置、土壤热扩散系数 $\alpha=0.8$ m²/s、系统运行时间为 2、3、4 个月时, 热响应半径分别为 4.2、5、5.8 m; 随钻孔排数增加而增大。当运行时间 3 个月、土壤热扩散系数为 0.8 m²/s, 单排、双排、三排布置时, 热响应半径分别为 4.5、5.0、5.5 m。

本文提出的竖直埋管换热器热响应半径计算方法考虑了土壤热物性、系统运行时间、钻孔布置方式和孔径等因素, 形式简单, 计算精度高。绘制了计算图表, 便于工程设计使用。

[参 考 文 献]

- [1] Kelvin W. Mathematical and Physical Papers[M]. London: Cambridge University Press, 1882.
- [2] Ingersoll I L R, Plass H J. Theory of the ground pipe heat source for the heat pump[J]. ASHVE Transactions, 1948, 6(1): 119—122.
- [3] Hart D P, Couvillion R. Earth Coupled Heat Transfer[M]. Publication of the National Water Well Association, 1986.
- [4] Zeng H Y, Diao N R, Fang Z H. A finite line-source model for boreholes in geothermal heat exchangers[J]. Heat Transfer-Asian Research, 2002, 31(7): 558—567.
- [5] Carslaw H S, Jaeger J C. Conduction of Heat in Solids[M]. Oxford UK: Clarendon Press, 1947, 78—88.
- [6] Kavanaugh S. Simulation and Experimental Verification of Vertical Ground-coupled Heat Pump Systems[D]. Oklahoma USA: Oklahoma State University, 1985.
- [7] 战国会, 俞亚南. 地源热泵有限长圆柱面和圆柱体热源模型[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2011, 45(6): 1104—1107.
- [8] Zhan Guohui, Yu Yanan. Finite long cylindrical surface and cylinder source model of ground source heat pump[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2011, 45(6): 1104—1107. (in Chinese with English abstract)
- [9] Eskilson P. Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes[D]. Sweden: University of Lund, 1987.
- [10] Mei V C, Emerson C J. New approach for analysis of ground-coil design for applied heat pump systems[J]. ASHRAE Trans (United States), 1985, 91(2): 1216—1224.
- [11] Hellström G. Duct Ground Heat Storage Model: Manual for Computer Code[D]. Sweden: University of Lund, 1989.
- [12] Muraya N K, O'Neal D L, Heffington W M. Thermal interference of adjacent legs in a vertical U-tube heat exchanger for a ground-coupled heat pump[J]. ASHRAE Transactions-American Society of Heating Refrigerating Airconditioning Engin, 1996, 102(2): 12—21.
- [13] Rottmayer S P, Beckman W A, Mitchell J W. Simulation of a single vertical U-tube ground heat exchanger in an infinite medium[J]. ASHRAE Transactions-American Society of Heating Refrigerating Airconditioning Engin, 1997, 103(2): 651—659.
- [14] Shonder J A, Beck J V. Symposium papers-ch-99-2-thermal properties and estimation techniques of ground-coupled heat pump boreholes, grouts and fills-determining effective soil formation thermal properties from field[J]. ASHRAE Transactions-American Society of Heating Refrigerating Airconditioning Engin, 1999, 105(1): 458—468.
- [15] 张正威, 王美燕. 基于内外场合算的垂直埋管换热器传热模型[J]. 工程力学, 2014, 31(6): 269—274.
- [16] Zhang Zhengwei, Wang Meiyuan. Unified heat transfer model of vertical U-tube heat exchangers for ground source heat pump system[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(6): 269—274. (in Chinese with English abstract)
- [17] 陈忠购, 张正威. 分层渗流地层中竖直埋管的换热计算模型[J]. 太阳能学报, 2013, 34(5): 831—838.
- [18] Chen Zhonggou, Zhang Zhengwei. Analysis model for vertical borehole heat exchanger considering the layer-characteristics of soil and seepage[J]. Acta Energiac Solaris Sinica, 2013, 34(5): 831—838. (in Chinese with English abstract)
- [19] 陈忠购, 赵石尧, 张正威. 内置并联 U 形埋管能量桩的换性能研究[J]. 工程力学, 2013, 30(5): 238—243.
- [20] Chen Zhonggou, Zhao Shirao, Zhang Zhengwei. Heat transfer analysis of energy piles with parallel connected U-tubes[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(5): 238—243. (in Chinese with English abstract)
- [21] 张正威, 陈忠购, 李西斌. 地埋管换热器和能量桩传热性能研究[R]. 沈阳: 21 届全国结构工程学术会议特邀报告, 2012, 76—87.
- [22] Zhang Zhengwei, Chen Zhonggou, Li Xibin, et al. Heat transfer analysis of vertical U-tube heat exchangers and energy pile[R]. Shen Yang: The 21st Special Report of The National Construction Engineering Academic Conference, 2012, 76—87. (in Chinese with English abstract)
- [23] 赵石尧, 张正威. 饱和岩土介质传热特性研究[C]//兰州: 第 23 届全国结构工程学术会议论文, 2014: 435—444.
- [24] Zhao Shirao, Zhang Zhengwei. Heat transfer analysis of saturated soils in ground source heat pump system[C]//Lanzhou, Gansu: The 23rd National Structure Engineering Academic Conference Papers, 2014, 435—444. (in Chinese with English abstract)
- [25] Wang Y, Papamichos E. An analytical solution for conductive heat flow and the thermally induced fluid flow around a wellbore in a poroelastic medium[J]. Water Resources Research, 1994, 36(5): 3375—3384.
- [26] Diao N R, Li Q Y, Fang Z H. Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2004, 43(12): 1203—1211.
- [27] Molina-Giraldo N, Blum P, Zhu K, et al. A moving finite line source model to simulate borehole heat exchangers with groundwater advection[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2011, 50: 2506—2513.
- [28] 王子阳, 张仪萍, 战国会. 有渗流时埋管换热器传热模型[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2012, 46(8): 1450—1455.
- [29] Wang Ziyang, Zhang Yiping, Zhan Guohui, et al. Study on heat transfer model of underground heat exchangers with groundwater advection[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2012, 46(8): 1450—1455. (in Chinese with English abstract)
- [30] Haehnlein S, Bayer P, Blum P. International legal status of the use of shallow geothermal energy[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14: 2611—2625.
- [31] GB 50366-2009 地源热泵系统工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [32] Signorelli S, Kohl T, Rybach L. Sustainability of production from borehole heat exchanger fields[C]//Proceeding of the 29th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. California: Stanford University, 2004.
- [33] 王 艳, 刁乃仁, 王京. U 型管地热换热器热作用半径的数值模拟[J]. 建筑热能通风空调, 2011, 30(3): 46—49.
- [34] Wang Yan, Diao N R, Wang Jing. Numerical simulation on thermal influencing radius of U-tube ground heat exchange[J]. Building Energy & Environment, 2011, 30(3): 46—49. (in Chinese with English abstract)

- [27] 王美燕, 张正威. 竖直埋管换热器热作用半径的估算方法[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2013, 47(12): 2153—2159. Wang Meiyang, Zhang Zhengwei. Method for estimating thermal effect radius of vertical borehole heat exchangers[J]. Journal of Zhejiang University : Engineering Science, 2013, 47(12): 2153—2159. (in Chinese with English abstract)
- [28] 赵石尧, 张正威. 竖直埋管换热器钻孔外换热解析模型研究现状[J]. 暖通空调, 2014, 44(1): 115—120. Zhao Shirao, Zhang Zhengwei. A review of the analytical models for vertical borehole heat exchangers[J]. Journal of HV&AV, 2014, 44(1): 115—120. (in Chinese with English abstract)
- [29] Seneviratne H N, Carter J P, Airey D W, et al. A review of models for predicting the thermomechanical behavior of soft clays[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1993, 17(10): 715—733.
- [30] Zommerman R W. Coupling in poroelasticity and thermoelasticity[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(1): 79—87.
- [31] Blond E, Schmitt N, Hild F. Response of saturated porous media to cyclic thermal loading[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2003, 27(11): 883—904.

Calculation method of thermal response radius for vertical borehole heat exchangers

Li Xiaoxing^{1,2}, Hu Xiamin², Zhang Zhengwei^{1,2*}

(1. The college of Landscape Architecture, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou 311300, China;

2. The college of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: At present, energy and environmental issues have become one of the most principal factors affecting the development of modern society. Energy conservation, exploitation of green renewable energy and environment protection has become urgent tasks in China. With the utilization of renewable energy sources and protection of environment, more and more researchers in the world pay attentions to the thermal environment of the geotechnical engineering. Some environment protection and energy saving technologies can cause the changes of soil temperature or even chemical contaminants diffusion, such as the development and utilization of shallow geothermal energy, nuclear waste disposal, landfill construction, thermal storage. Changes in the mechanical properties of the soil that caused by soil temperature field may lead to soil deformation, falling of ground stability and bearing capacity. Therefore, the research on heat transfer characteristics of rock and soil media has important theoretical values and practical significance in the development of geothermal resources, nuclear waste disposal, energy storage, landfill, heating pipe design and other aspects. The ground-source heat pump (GCHP) technology, as a clean and efficient renewable energy, has developed rapidly in recent decade. The distribution characteristics of the excess temperature in the soil medium were studied with the infinite line source heat transfer model in this paper. The results showed that the temperatures response at the surface of the borehole wall was the biggest in the soil medium around the ground, and heat exchanger which decayed exponentially with distance from the wall of the borehole, increased with operating time of the system. The heat transfer area also increased along with the thermal diffusion of medium and running time of the system. For the group of ground heat exchangers in the engineering, the temperature on the borehole wall of the group buried pipe was calculated according to the superposition principle, it was defined that the thermal response radius of the ground heat exchangers was the vertical distance between the adjacent borehole center when the excess temperature impact factor caused by other boreholes was less than or equal to 5%. With numerical analysis, the calculation method of the thermal response radius of the vertical ground heat exchangers was proposed. The calculating results showed that this method had better precision. The thermal response radius of the vertical ground heat exchanger increased along with the growth of the thermal diffusivity of the ground, duration of working time, borehole row numbers and borehole diameter, and was influenced significantly by the layout of the ground heat exchangers, and less by the borehole diameter under the same layout of the ground heat exchangers. In the case of common borehole diameter in the engineering, such as 115 and 135 mm, the graph of thermal response radius along with running time could be presented with different soil media of a single row, double rows and more than three rows drilling layout in this paper. The engineering examples showed that the method was simple and convenient for engineering design.

Key words: heat transfer; calculation; heat pump system; vertical borehole heat exchangers; theoretical model; thermal response radius