

密集型桩埋换热器管群周围土壤换热特性的数值模拟

天津大学 赵 军[☆] 王华军

摘要 以一实际地源热泵系统为例,在全年逐时负荷计算的基础上,对大面积密集型桩埋换热器管群周围土壤的换热特性进行了数值模拟。提出了土壤换热中热屏障的概念,并分析了热屏障的形成原因及其特性,即形状不规则、动态变化和危害性。长期运行中,热屏障带的温度增长速率要高于土壤平均温度的增长,建议从负荷平衡和热屏障两个角度进行分析,以保证地源热泵系统稳定可靠的运行。

关键词 地源热泵 埋地换热器 管群特性 热屏障 数值模拟

Numerical simulation on heat transfer characteristics of soil around compact pile-buried underground heat exchangers

By Zhao Jun[★] and Wang Huajun

Abstract With an actual ground source heat pump system example, based on the hourly calculation of annual cooling and heating load, carries out numerical simulation on heat transfer characteristics of the soil around compact pile-buried underground heat exchangers with large land area. Presents the concept of heat barrier, and analyses its formation and some characteristics including irregular shape, dynamic changes and potential harmfulness. For the long term operation, the growth rate of temperature is higher than that of average temperature of the soil, the system analysis should therefore be implemented from the viewpoint of both energy equilibrium and heat barrier in order to ensure the whole stability and reliability.

Keywords ground source heat pump, underground heat exchanger, pipe-group behavior, heat barrier, numerical simulation

★ Tianjin University, Tianjin, China

①

0 引言

在地源热泵工程中,埋地换热器周围土壤温度变化一直是研究、设计人员非常关心的问题,并对此开展了许多积极的理论探讨与实验工作^[1-3]。但是,上述诸多研究都是针对单井(或桩)进行的,其结果较难完全反映实际的管群特性。李新国等人采用多孔介质软件,对单双季运行模式下的垂直埋地换热器管群周围土壤温度场进行了阶段性模拟,得到了较有意义的结论,如对于地源热泵系统,为实现长期稳定运行,应使每年土壤的取热量和放热量保持平衡^[4]。显然,这一原则可归结于能量守恒原理,但问题在于满足冷热负荷平衡是否就一定能够保证地源热泵系统稳定可靠运行呢?对此有必

要进行更进一步的探讨。本文以南京地区一实际地源热泵系统为例,对大面积密集型地下桩埋换热器管群的换热特性进行数值模拟,并初步探索一些可用于系统运行与设计的合理化指导依据。

1 模型描述

1.1 模拟对象

模拟对象为南京地区一实际地源热泵工程中的 2#楼(共 6 栋楼),建筑面积为 10 155.6 m²,采

①[☆] 赵军,男,1964 年 6 月生,博士,教授,博士生导师,副院长
300072 天津大学机械学院热能工程系
(022) 27403138 27890058
E-mail: zhaojun@tju.edu.cn
收稿日期:2005-07-27
修回日期:2005-09-07

用吊顶辐射供暖供冷系统加置换新风空调系统。2#楼地下换热系统共使用 186 根挤压桩,单桩直径为 300 mm,有效深度为 30 m,桩内换热器采用双 U 型高强度聚乙烯管(HDPE),规格为 DN25。本项目埋桩布置方式与通常的桩基布置有所不同,其桩与桩之间的距离较小(1.8~2.1 m),远小于以往研究中所提出的热作用半径(单桩约为 2.5~4.5 m)^[5-6]。因此,本文中桩与桩之间的传热影响成为了不可忽略的因素。

1.2 土壤初始温度

结合气象资料,采用文献[7]提出的模型,对南京地区地下土壤温度变化情况进行了模拟,结果如图 1 所示。从图中可以看出,南京地区地下土壤温

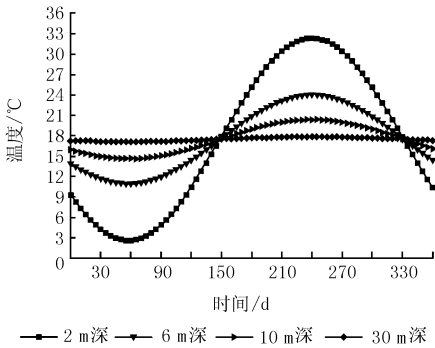


图 1 南京地区地下土壤温度变化情况

度随时间呈周期性变化;深度越小,土壤温度的波动越大,当土壤深度超过 20~30 m 后,土壤温度的波动范围已经很小(小于 0.5℃),基本上保持相对稳定。南京地区 20~30 m 深处的土壤全年平均温度为 17.5℃。考虑到地下换热主要集中在土壤深层部分,文中即以上述温度作为无穷远边界的土壤温度。

1.3 计算模型及参数设置

采用二维、无限大、均质、无内热源、非稳态热传导模型^[8],忽略沿土壤深度方向热流变化的影响。计算域为实际尺寸:116.73 m×72.33 m,网格类型为非规则三角形,数目约为 10 万个,其中桩基内部双 U 型桩埋换热器网格如图 2 所示。土壤(黏土)、HDPE 管

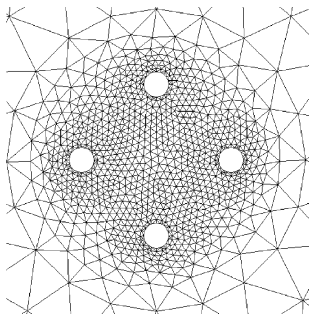


图 2 双 U 型桩埋换热器管周围网格(放大图)

及回填材料(膨润土和长江细沙)热物性参数的选取见表 1。

表 1 材料热物性参数表

名称	密度/(kg/m ³)	导热系数/(W/(m·K))	比热容/(J/(kg·K))
土壤	1 460	1.30	1 200
回填材料	2 650	2.00	650
HDPE 管	1 100	0.42	1 465

为了准确反映实际冷热负荷变化情况,采用 EnergyPlus 软件对 2#楼进行了典型年逐时冷热负荷计算,结果如图 3 所示(冷负荷为正值,热负荷为负值),并以此作为周期性边界条件进行地下温度场模拟。平均每口桩基全年累计放热量为 9 746 MJ,累计吸热量为 7 845 MJ,放热量比吸热量高出约 24%。图 3 还表明,每年 4~5 月和 9~10 月有一段间歇期,这对于地下换热器的稳定运行是比较有利的。

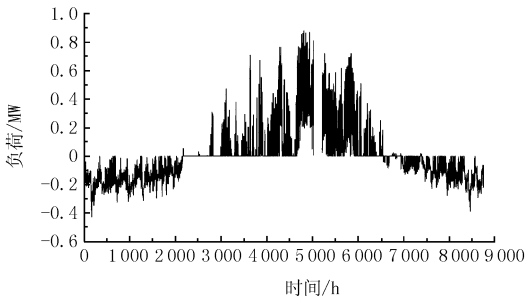


图 3 地下冷热负荷全年变化情况

2 模拟结果

为研究方便,首先对结构简单的单桩、三桩、四桩以及九桩布置情况进行了模拟,然后考虑整个地下桩群的特性。模拟时间周期设定为 1 a(8 760 h),即从 6 月 1 日放热工况开始到第 2 年 6 月 1 日终止。

以三桩模拟结果为例进行分析。图 4 为温度监测点分布图,图 5 显示了各监测点的全年温度变化情况。随着冷热负荷的变化,桩群周围的土壤温度也经历了一个“升温→降温→升温”的过程,变

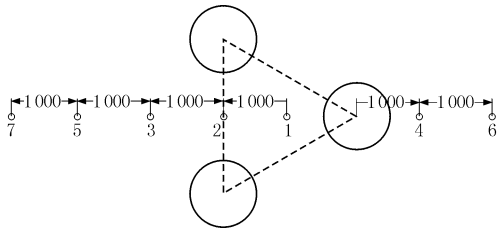


图 4 温度监测点分布图

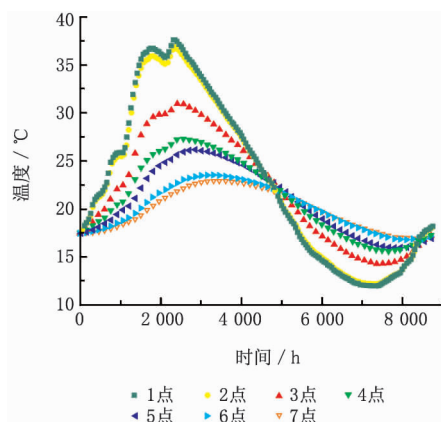


图5 各监测点的全年温度变化情况

化曲线与正弦或余弦曲线比较接近。从各监测点的全年温度变化可知,距离桩群越近,温度变化越剧烈,但总体温度变化规律却大致相同,只是在时间相位上的滞后或提前。相比之下,夏季排热工况温度变化振幅大于冬季取热工况。需要特别指出的是,图5中反映出土壤温度升高并不十分显著,这主要是桩基数目较少而相互作用较弱的缘故。下文对整个2#楼地下温度场的模拟表明,随着桩基数目的增加,热作用范围也在不断扩大,局部甚至还会发生重叠现象。

通过模拟还反映出一些比较特殊的现象:夏季工况结束后,桩群周围土壤温度场并没有立刻进入

恢复阶段,而是存在一个较大的热惯性。这种热惯性会随着桩群的密集程度增加而增加,甚至在冬季工况初期时,这种作用仍然存在。从短期运行角度,热惯性作用实际上已经超过了土壤恢复效应。桩群的热作用范围变得较大,扩张到了6~8 m左右,这也表明管与管之间已开始发生强烈的相互作用。

上述热惯性作用的持续累积将会形成一个“热屏障”。所谓热屏障,是指从桩群边缘到热作用边缘之间温度相对较高的区域。对于热屏障的产生原因,可以作进一步解释。首先,正如图5所示,土壤吸放热过程是一个相对缓慢且滞后的过程,其时间长短受土壤物性、冷热负荷以及管群结构布置等多因素影响。在峰值负荷期间,由于埋地换热器的排热热流很大,对管群密集程度较高的区域造成了很大的排热负担,一旦超过土壤本身自然的热扩散能力或限度,就会在局部区域产生暂时的能量聚集,持续累积下去,最终就会形成热屏障。因此,热屏障主要受土壤物性、管群布置及冷热负荷比等因素的制约。一般而言,土壤热扩散率越小(通常小于 $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,如黏土、砂土、淤泥等)、管群布置越密(管间距远小于单桩热作用半径)、冷热负荷比越大(偏离冷热负荷平衡较远),热屏障现象越明显。

图6给出了2#楼区域连续运行6 a地下温度

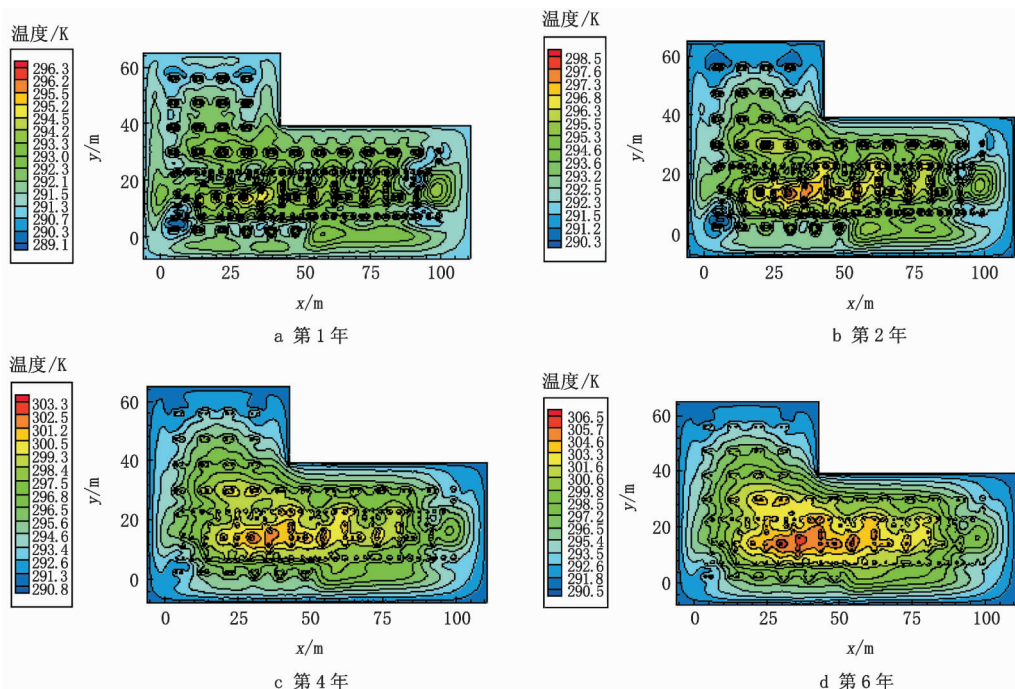


图6 2#楼区域地下温度场分布情况

场的模拟结果。可以看到,热屏障具有三个特性,即形状不规则、动态变化和危害性。系统运行伊始,由于持续高排热热流,在一些管群密集程度较高的区域开始出现小的热屏障带。小热屏障带一方面阻止或妨碍本管群中埋地换热器的传热,另一方面还在不断向外扩张,进而影响其他管群排热,这使得管与管之间的相互作用开始增强,促使原先分散的小热屏障带逐渐地联系在一起,形成面积更大的热屏障带。从上述分析可知,在地源热泵系统中,热屏障对于夏季工况有危害性,其直接后果就是使桩基周围土壤温度急剧升高,出现温度峰值。一旦峰值超出一定范围(通常不应超过 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$),就会威胁夏季空调工况,甚至在一定时期内,出现热泵无法工作的情况。

由此可见,冷热负荷平衡并非是评判地源热泵系统能否稳定运行的惟一准则。尤其是对于土壤热扩散能力较差而管群密集度较高的地源热泵系统,还需要考虑热屏障等问题,2#楼地下系统就属于这种情况。

图 7 给出了 2#楼区域热屏障带温度和土壤平均温度的变化曲线。从图中可以看出,热屏障带

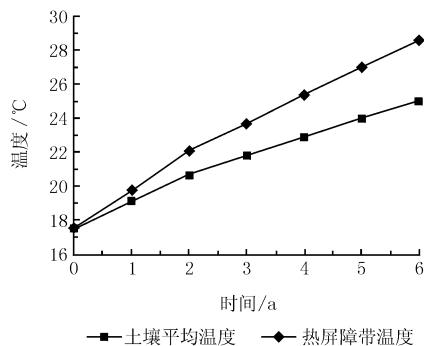


图 7 热屏障带温度和土壤平均温度变化曲线

和土壤的温度增长速率有所不同,前者要大于后者。在最初两年内,热屏障带和土壤温度都增长较快,分别达到 $1.6\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 和 $2.3\text{ }^{\circ}\text{C/a}$,以后就开始变缓,分别稳定在 $1.1\sim 1.2\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 和 $1.6\sim 1.7\text{ }^{\circ}\text{C/a}$,这与文献[9]的实验结果是基本吻合的。

在实际的 2#楼地源热泵系统中,采取了两种方法来防止和减弱热屏障的峰值温度。一是在 2#楼周围增补一定数量的换热井,以减小单位桩埋换热器的热负荷(降至原来负荷的 $60\%\sim 70\%$);二是利用部分排热量来提供建筑生活热水,以减小地下排热量。运行结果表明,上述两种措施均收到了

较好的实际效果,这些措施对于其他地区类似的地源热泵工程也具有一定的指导意义。

3 结论

3.1 在全年逐时负荷计算的基础上,对大面积密集型桩埋换热器管群周围土壤的换热特性进行了数值模拟,首次提出了热屏障的概念,并分析了热屏障的主要形成原因及其特性。

3.2 在长期运行中,热屏障带的温度增长速率要高于土壤平均温度的增长,其后果是造成土壤温度的急剧升高,出现温度峰值,对空调工况造成一定威胁。

3.3 热屏障带受土壤物性、管群布置以及冷热负荷比等因素影响较大。土壤热扩散率越小、管群布置越密、冷热负荷比越大,热屏障带现象越明显。

3.4 冷热负荷平衡并非是评判地源热泵系统能否稳定运行的惟一准则。尤其是当管群密集程度较高时,必须从负荷平衡和热屏障两个角度进行分析;必要时,可以采用减小单位换热器热负荷以及利用排热量提供热水等措施来改善土壤温度场。

3.5 本文的工作是初步的,还有一些问题需要更进一步的研究,如深度方向热流变化、热湿迁移、局部自然对流、热短路、随机负荷等。

参考文献

- [1] Eskilson P. Thermal analysis of heat extraction boreholes [D]. Sweden: University of Lund, 1987
- [2] Mei V C. Theoretical heat pump ground soil analysis with variable ground far-field boundary conditions [J]. AICHE Journal, 1986, 32(7):1211-1215
- [3] 仇中柱,于立强. U 型垂直埋管式土壤热泵埋管周围温度场的理论研究[J]. 暖通空调,2002,32(1):17-20
- [4] 李新国,赵军,周倩. U 型垂直埋管换热器管群周围土壤温度数值模拟[J]. 太阳能学报,2004, 25(5): 703-707
- [5] 徐伟. 地源热泵工程技术指南[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2001
- [6] Kavanaugh S P. Simulation and experimental verification of vertical ground coupled heat pump systems[D]. Oklahoma: Oklahoma State University, 1995
- [7] Popiel C O, Wojtkowiak J. Measurements of temperature distribution in ground[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2001,25:301-309
- [8] 俞昌铭. 热传导[M]. 北京:高等教育出版社,1983
- [9] 赵军,宋德坤,李新国. 地源热泵吸热工况运行实验研究[J]. 太阳能学报, 2005,26(4):162-165