

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2013.02.015

冬季工况下埋管地源热泵系统中大地的自调节能力分析

王 勇, 杜红梅, 罗 敏

(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘 要:以夏热冬冷地区某实际埋管地源热泵系统为分析对象,对夏季采用冷却塔供冷而仅冬季采用埋管和消防水池联合供热的系统运行参数进行了 6 a 测试。建立了埋管三维管群模型,通过数值计算方法对埋管周围岩土的温度分布进行了热平衡分析和计算。通过测试数据与理论计算结果进行对比分析,得到了影响大地自调节能力的影响因素。

关键词:地源热泵;大地自调节能力;热平衡;三维模型

中图分类号:TU831 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)02-0092-08

Analysis of the Ground Adjustment Ability of the Ground-Source Heat Pump Systems in Winter

Wang Yong, Du Hongmei, Luo Min

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract:Based on an actual ground-source heat pump system in hot summer and cold winter area, the system operation parameters were tested for 6 years under the state of using cooling tower for cooling in summer but the ground heat exchanger and fire pool for heating in winter. A three-dimensional (3D) tube-group model was established, and the thermal balance analysis and calculation of the ground temperature distribution around the ground heat exchanger were conducted by the numerical calculation. According to the comparison between the test data and the theoretical results, the influencing factors of the ground adjustment ability were obtained.

Key words:ground-source heat pump;ground adjustment ability;thermal balance;3D model

地源热泵系统已经成为了应用最广泛的“绿色”空调系统,在恰当的管理下,能达到高效和节能的效果,估计全世界有超过 110 万个已经运行的地源热泵系统^[1-3]。但多数建筑冬夏冷热负荷不同,从而引起埋管换热器的吸热和放热不平衡,多余的热量或冷量堆积在地下,土壤温度偏离初始温度。目前,对地源热泵系统热不平衡的研究多数集中引起热不平衡的原因及解决措施上,即复合式系统及运行控制策略的研究^[4-6]。

受太阳辐射、大气循环、降水等因素的作用,土壤与大气进行着能量的交换导致土壤温度周期性的日变化和季节变化,其趋势呈现为竖向上的梯度变化^[7]。地源热泵系统利用土壤作为系统的低位冷热源,即土壤本身具备一定的能量,可以称为大地能。大地能通过和外界的能量交换调节土壤温度,使得土壤温度按照一定的规律变化。对于埋管地源热泵系统,建筑负荷通过埋管向土壤释热或吸热,对原始土壤温度的变化形成一定的外扰,使得土壤温

收稿日期:2012-06-28

基金项目:重庆市科委自然科学基金(CSTC,2010BB4235)

作者简介:王勇(1971-),男,副教授,博士,主要从事新能源利用技术、建筑节能等研究,(E-mail)wyfree1@126.com。

度升高或降低。当输入到土壤中的热量控制在一定的范围内,则土壤温度变化值可以控制在一定范围内。当一个供冷(供热)季结束后,下一个供热(供冷)季开始前,通过大地土壤上下层热量的扩散、地表与大气之间热量传递和辐射换热等自然换热条件下,使得土壤温度能够逐渐基本恢复到初始温度。这种大地抗外扰的能力可以称为大地的自调节能力。

在大地蓄热能力分析中,大地的自然调节能力是不能忽略的^[8]。为此,必须正确了解地源热泵系统热平衡率的本质。地源热泵系统利用埋管进行取热和放热,释放到大地中的热量或冷量因大地的蓄能能力而被储存在大地中。由于蓄冷或蓄热的不平衡可能会导致多年地温偏移初始温度,而影响系统的正常运行。但这种不平衡是以超过大地的自调节能力体现出来的。若不能正确理解热平衡的意义,在工程实施中可能会增加埋管量或其他技术措施来保证大地的热平衡,但这会增加地源热泵系统的初投资,同时也不能保证地源热泵的高效运行。由于埋管换热是一个复杂的非稳态过程,土壤温度受诸多因素的影响,并不能简单的以建筑冷热负荷的差异来判断土壤热平衡^[9]。大多学者以土壤温度的恢复情况来判断土壤的热平衡^[10-11],即地源热泵系统运行一个循环周期后土壤温度能够恢复到初始温度则表示系统是热平衡的。影响土壤温度恢复的因素很多,包括对土壤的物性参数、室外气候条件、埋管布置形式、系统的运行方式以及建筑负荷强度等^[12-13]。由于多种因素的存在,对热平衡的研究显得较为复杂。但研究大地的自调节能力是热平衡研究的基础,因此有必要对大地的自调节能力进行研究。

在夏热冬冷地区,夏季冷负荷大于冬季热负荷,埋管地源热泵系统是夏季向土壤放热而冬季向土壤取热,研究的重点集中在夏季埋管换热研究和复合式地源热泵系统的优化与控制研究^[14-16],对于只有冬季向土壤取热的地源热泵系统的运行情况研究较少。本文主要是针对夏热冬冷地区某实际工程,在夏季采用冷却塔供冷,而仅冬季采用埋管取热的地源热泵系统供热的运行模式下,对系统运行参数进行了分析。通过该系统多年的冬季运行数据分析和土壤温度实验测试,并建立了埋管换热器三维管群模型,利用 FLUENT 软件计算,讨论和分析大地对释冷量的自调节能力范围。

1 地源热泵工程概况

某医院用地源热泵系统位于夏热冬冷地区的重庆市,该建筑有 11 层,1~10 层主要为病房及医生

办公室,11 层主要为手术室和医生办公室。夏季全楼最大冷负荷 1 650 kW,其中手术室冷负荷 208 kW;冬季全楼最大热负荷为 759 kW,其中手术室热负荷 138 kW。埋管系统采用 DN32 聚乙烯管,孔深 80 m,设计流量 128 L/s,流速 0.66 m/s,共 240 个换热孔,孔间距 3 m。

该地源热泵系统 2006 年冬季开始运行至今。图 1 为医院地源热泵系统图,11 层手术室采用水水热泵机组,热负荷 138 kW,其余均采用水空气热泵机组,其中消防水池起减压作用。从负荷大小可以看出,手术室夏季冷负荷相对较小,对埋管换热的影响较小,可以忽略。根据建筑使用情况,可以认为夏季采用冷却塔供冷,冬季采用地源热泵系统供热。图 2 为埋管换热器各测点布置图,埋管外壁面温度测点布置在进出水管-1、-9、-29 m,以及出水管-59 m 处。根据该建筑地源热泵系统的实际使用情况,只有冬季使用地源热泵系统,建筑通过埋管与土壤的热交换将冷量释放到大地,系统只向大地取热,这与一般夏热冬冷地区地源热泵系统的使用情况不同。为此,本文主要讨论该运行模式下土壤温度的变化,从而分析大地对冷量的自身调节能力。根据 DEST 软件建模计算该建筑逐时负荷,冬季累积热负荷 902 532.92 kWh,累积单位孔深热负荷 47 kWh/m,该建筑的运行热负荷大部分集中在 40%~80% 的范围。

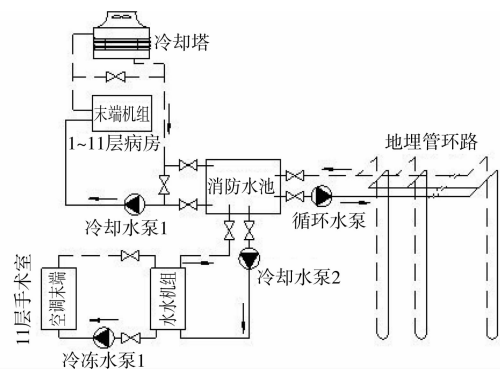


图1 医院地源热泵系统图

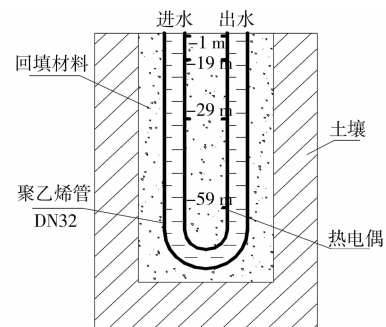


图2 埋管及测试布置示意图

2 实验数据分析

2.1 多年运行数据分析

项目于 2008 年建立了较为完整的系统运行数据资料,包括系统的启停状态和末端用户供水温度。根据原始记录数据整理,从 2008—2011 年冬季供暖期间(12 月、1 月、2 月),冷却水泵一直连续运行,而地埋管循环水泵则间断开启。冬季 1 月份热负荷最

大,选取 1 月份典型日循环水泵启停情况以及末端用户机组供水温度,见图 3。

从图 3 可以看出,冬季运行期间,末端用户供水温度均在 15°C 以上, 22°C 以下,大部分时间保持在 $17\sim 20^{\circ}\text{C}$ 。地埋管侧循环水泵间歇运行,随着循环水泵的开启,供水温度上升,且可保持在一个较高的温度范围,但在不同时间段内,其提供的最高温度有所不同,这主要受系统形式以及室外空气温度的影响。

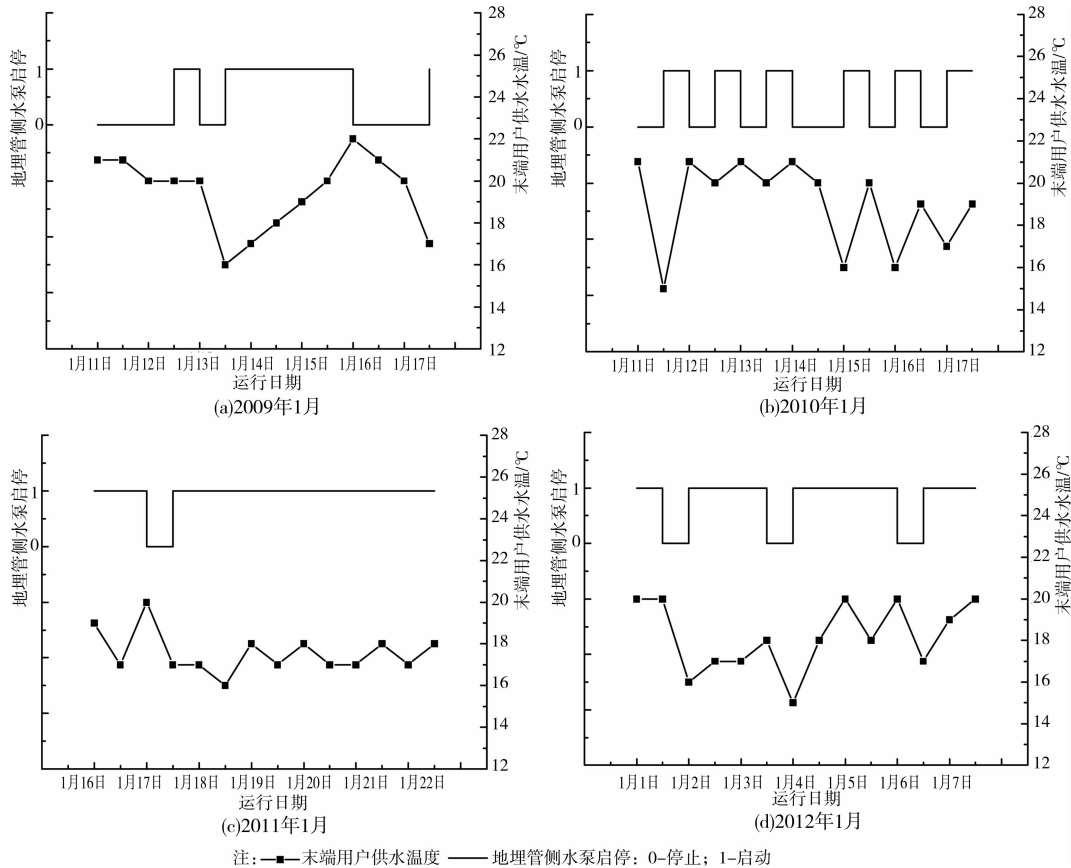


图 3 2009 年至 2012 年地源热泵系统运行情况

从系统形式上看,由于系统中增加了消防水池,其 830 m^3 的水容量有一定的蓄热作用,地埋管环路水与大地之间交换得到的热量则先储存在消防水池中。当消防水池温度达到 20°C 后,该温度已经接近土壤的温度,若继续开启地埋管循环水泵,地埋管换热效果差,同时增加了水泵能耗,该段时间循环水泵停止运行。当末端用户供水温度低于 18°C ,即消防水池中的水温低于 18°C ,此时启动循环水泵,经过地埋管换热,消防水池中的水温升高,升高到 20°C 后循环水泵又停止运行。与常规的地源热泵系统相比,加入消防水池后,这种系统运行方式可以提高末端机组的供水温度,使得机组的效率大大提高,但进入地埋管水的水质要求提高。同时由于系统形式的特殊性,循环水泵间歇运行,也为土壤温度提供了恢

复时间,管壁周围土壤温度不至于过低而导致系统效率降低。

为了分析室外空气温度的影响,典型年重庆市 1 月 1 日—1 月 22 日室外逐时空气干球温度变化见图 4。如 1 月 16 日—1 月 22 日,17 日开始降温,到 21 日早上降到最低 5.0°C 。系统运行情况如图 3 (c),17 日地埋管循环水泵停止运行后,因为气温降低,建筑热负荷增大,消防水池中储存的热量很快使用完,用户进水温度直接降到 17°C ,而后几天内,地埋管循环水泵均开启以维持用户进水温度 $16\sim 18^{\circ}\text{C}$,同时因为昼夜温差的不同,用户进水温度也有所波动。由此看出当室外空气温度降低时,系统所需提供的热量随着建筑热负荷的增大而增大,由于消防水池的蓄能能力有限^[17],消防水池储存的热量

在较短时间内被末端用户置换完毕,需要开启地理管以提高用户供水温度。

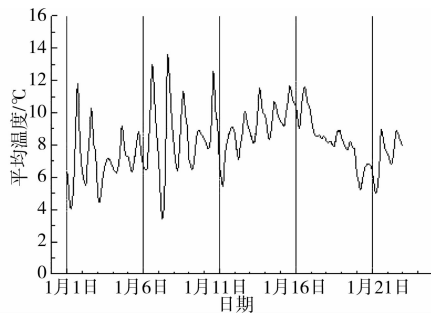


图4 1月1日—1月22日室外逐时空气干球温度

2.2 土壤温度分析

根据测试 2006 年 8 月土壤初始自然温度为 21.3°C 。2012 年 1 月 7 日系统运行了 1 个月后,管壁周围平均温度 18.9°C ,见图 5。此时地理管侧流量为 $201\text{ m}^3/\text{h}$,进出水温差约 $1\sim 1.5^{\circ}\text{C}$,即地理管提供的热量约 $233\sim 350\text{ kW}$,约为 DEST 软件计算出的建筑热负荷的 $31\%\sim 50\%$ 。地理管承担的热负荷比设计热负荷小,根据实际使用情况调查,主要有以下几个原因:1)手术室的使用时间根据手术安排,并不是 24 h 连续开启;2)实际医院入住率基本保证在 100%,大部分科室走道中也增加了床位,同时白天探病的亲人较多,人数大大的增多,从而增加了人体散热量,使得热负荷减小;3)医院新风主要靠卫生间排风和自然通风,冬季病人一般不喜欢开窗,则新风热负荷减小;4)根据不同病人的情况,一些病人手术后因为供暖时空气干燥而容易缺水,则并未使用。

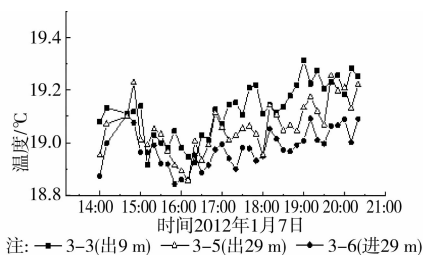


图5 2012年系统运行1个月后管壁温度

2012 年 3 月 1 日早上 8 点地理管循环水泵停止运行,管壁周围温度开始恢复,测试是从中午 11:50 开始,各点管壁温度恢复情况见图 6。由于土壤温度的恢复在初始时刻变化最大,在早 8:00 地理管循环水泵停止运行时刻管壁温度约 18.5°C 。从图中可以看出,各点温度缓慢上升,12 h 后,到晚上 20:00 各点温度约为 $19.5\sim 19.8^{\circ}\text{C}$,比岩土初始自然温度低 $1.7\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ 。

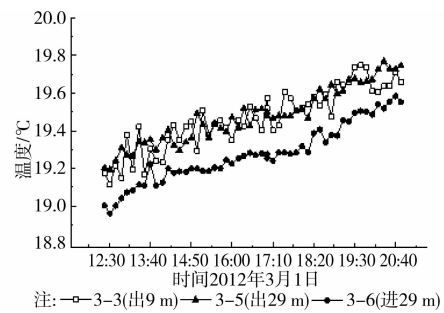


图6 2012年系统运行3个月后管壁温度恢复

根据多年系统运行数据分析和土壤温度分析,系统运行一个循环周期后,管壁周围土壤温度能够基本恢复到初始温度,冷量没有堆积在管壁周围,且能保持系统长期高效运行。这是因为冬季建筑通过地理管向土壤吸收的热量没有破坏大地的自调节能力。由此看出,在这种运行模式下,当地理管向土壤的取热量在一定范围内时,土壤温度可以通过大地的自调节能力,使其管壁周围温度恢复到初始温度。地理管周围岩土自调节能力的研究可以通过数值计算方法进行分析确定。

3 大地自调节能力分析

3.1 地下换热器传热模型建立

3.1.1 物理模型 地理管与大地的传热是一个复杂的非稳态传热过程,线热源模型最简单而又较实用^[18-19]。但线热源模型忽略了地表对土壤温度的影响以及竖向温度的变化,为了分析大地对温度的自平衡能力的大时,需要考虑上表面的换热、土壤远边界条件的精确设置以及短时间内计算的准确性,需要采用三维模型^[20-21]。本文采用了三维管群模型,为了简化,作如下假设:

1)忽略地表辐射换热对岩土温度的影响,认为岩土初始温度均匀一致,为当地的冬季岩土初始温度。

2)在整个传热过程中岩土的物理成分、热物性参数不变。

3)仅考虑纯导热,忽略各种接触热阻。

4)不考虑水分迁移对热量传递的影响。

5)忽略底部 U 型管与土壤间的换热。

管群三维模型土壤长 \times 宽 \times 高为 $24\text{ m}\times 20\text{ m}\times 80\text{ m}$,共 12 个钻孔,钻孔直径 0.130 m ,孔间距 4 m 。U 型管外径为 0.032 m ,内径 0.026 m ,管道中心距离为 0.06 m ,如图 7。由于 U 型管底部弯管处换热量较小,此处忽略不计。采用软件 Gambit 软件进行模型的建立及划分网格,同时因为管壁周围对换热影

响较大,对埋管周围网格进行了局部加密,总网格个数为 1 800 160,如图 8。同时各种材料的物性参数见表 1。

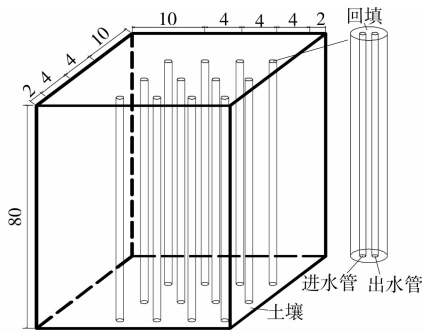


图 7 三维管群模型示意图(单位:m)

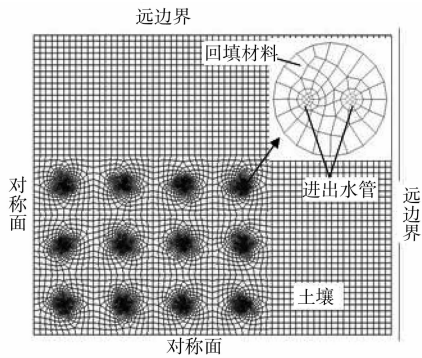


图 8 网格划分

表 1 各种材料的物性参数

材料	密度/ (kg · m ⁻³)	导热系数/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	比热/ (J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)
PE 管	950	0.440	1 000.0
土壤	2 570	2.035	921.1
回填材料	1 600	1.500	1 200.0

3.1.2 数学模型

1) 控制方程

土壤的传热模型是三维的非稳态传热,式(1)为直角坐标系中的传热方程。

$$\rho_v \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial t}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda \frac{\partial t}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial t}{\partial z}) + \dot{Q} \quad (1)$$

式中 ρ 、 c_p 、 \dot{Q} 分别表示土壤的密度、比热和内热源。土壤内部无内热源,则 $\dot{Q} = 0$ 。

U 型管内流体流动是紊流流动, $k-\epsilon$ 双方程模型是紊流粘性系数模型中应用最广泛和最成功的一种模型。管中流动水为粘性常数的不可压缩流体,且不考虑重力作用,式(2)~(6)为简化后的控制方程。

连续性方程:

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

动量方程:

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

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:

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

湍动粘度:

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

湍动能 k 的产生项

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

各常数的取值为:

$$C_\mu = 0.09, C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3, \sigma_T = 0.9, Pr_t = 0.85.$$

2) 边界条件和初始条件

进口:设置为速度进口,进口速度为 0.44 m/s,进口温度根据 DeST 软件计算得到的逐时负荷 Q 和每一步迭代得到的出水温度 t_2 ,由式(9)计算出相应进水温度 t_1 。

$$Q \left(1 - \frac{1}{COP} \right) = C_p m (t_1 - t_2) \quad (9)$$

出口:设置为压力出口,出口温度由每一步迭代求得。

进水管底部:进水管底部设置为压力出口;出水管底部设置为速度进口,速度为 0.44 m/s,且其进水温度等于进水管底部出水温度。

上表面:设置为固定壁面,采用第 2 类边界条件,边界周围空气温度为重庆市典型年室外逐时干球温度。边界与空气之间的表面传热系数根据式(10)^[11]计算, v 为低空附近空气速度。

$$h = 5.8 + 3.7v \quad (10)$$

下表面及远边界:设置为固定壁面,采用第 1 类

边界条件,温度采用测试得到的冬季岩土初始温度 19.5℃。

钻孔孔壁及 U 型管管壁:钻孔孔壁设置为固定壁面,壁厚度为 0 mm;U 型管管壁设置为耦合壁面,管壁厚度为 3 mm,从而进行 U 型管内流体、回填材

料以及岩土的耦合传热计算。

3)计算工况及时间步长

为了分析土壤温度自身调节能力的大小,讨论不同累积热负荷大小和不同负荷强度情况下土壤温度的变化情况,计算工况见表 2。

表 2 计算工况

工况	累积热负荷比例	负荷强度比例	累积热负荷/kWh	累积单位孔深热负荷/(kWh·m ⁻¹)	平均单位孔深换热量/(W·m ⁻¹)
1	1	1	225 633.23	11.75	10.88
2	2	2	451 266.46	23.50	21.76
3	4	4	902 532.92	47.00	43.52

冬季运行 12 月、1 月和 2 月,1 d 运行 12 h,停机 12 h,恢复期为 3 月和 4 月,时间步长为 12 h,共 302 步,采用 FLUENT 软件计算。

3.2 计算结果和讨论

在分析土壤温度变化时,由于在短期内埋管竖直方向温度变化较小,且埋管换热主要集中在埋管上部,则以地下 30 m 处土壤温度为代表,不同工况下冬季运行 3 个月后和恢复 2 个月后土壤温度分布见图 9。

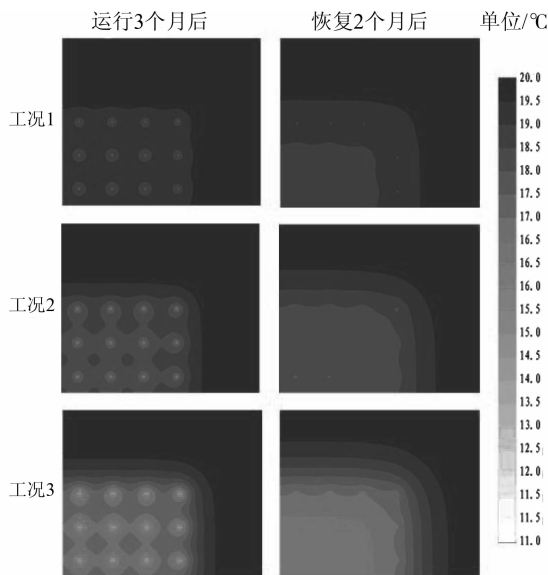


图 9 不同工况下土壤温度分布

从图 9 可以看出,工况 1 下,运行 3 个月后钻孔之间基本没有相互影响,且经过 2 个月的恢复期后,埋管区域温度基本恢复到了初始温度。而工况 3 下,运行期间钻孔之间相互影响大且恢复 2 个月后,埋管中间区域温度仍然较低,即工况 3 下所需土壤温度的恢复时间更长。为了分析土壤温度随运行时间的变化情况,根据模型边界条件的设置选取管群中心最不利的钻孔 1 和远边界换热最有利的钻孔 2

为分析对象。钻孔 1 和钻孔 2 地下 30 m 处孔壁平均温度随运行时间变化见图 10。

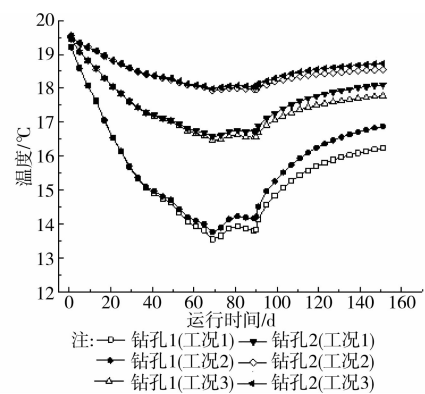


图 10 不同工况下钻孔 1 和钻孔 2 孔壁温度

从图 10 可以看出:工况 1,冬季地源热泵系统运行 3 个月后孔壁温度缓慢下降到 18.0℃,比初始温度仅降低了 1.5℃,同时恢复速度也较慢,恢复 2 个月后孔壁温度到达 18.6~18.8℃,与初始温度相差不到 1℃,钻孔 1 和钻孔 2 温度接近,这是因为承担的热负荷小,冷扩散半径小,钻孔之间没有受到相互热干扰;工况 3,承担负荷较大,孔壁温度下降速度快,在运行 3 个月后,孔壁温度降低到了 14℃,比初始温度降低了 5.5℃,但其恢复速度也较快,恢复 2 个月后两个钻孔分别恢复到了 16.2℃和 16.9℃;工况 2 孔壁温度介于工况 1 和工况 3 之间,运行 3 个月后,孔壁温度降低到 16.6℃,而恢复 2 个月后能分别恢复到 18.1、18.5℃,此时钻孔 2 的温度已经接近工况 1 下孔壁温度。

经过以上分析看出热负荷大于工况 2 后,土壤温度下降速度大。在工况 3 下,冬季运行仅 20 d 后,孔壁温度就降低到了 16.6℃,此时累积热负荷为 182 193.32 kWh,还小于工况 1 的 3 个月累积热负荷值。这是因为当热负荷强度增大到一定值后,

需要向土壤吸收的热量增大,破坏了大地的自调节能力,使得冷量堆积在管壁周围,即在短时间内土壤不能温度恢复到接近初始温度。但对于工况3,大地的自调节能力有所破坏,在供热末期孔壁温度在13~14℃,此时埋管出口水温在11~12℃,仍然能保证地源热泵系统的正常运行。

对比系统实际运行工况和计算结果,实际运行工况介于工况2和工况1之间,在这种间歇运行的情况下,可认为工况2为大地自调节能力的临界点,平均单孔吸收的热量21.76 W/m,大地的自调节能力能够得到有效的保证。因此,从以上分析可以看出,自调节能力大小不仅与累积热负荷大小有关,而且与逐时的负荷强度有关。

4 结论

1) 间歇运行模式为地源热泵系统正常运行条件中较重要的影响参数。保证间歇运行的技术方案较多,而利用消防水池的蓄热能力来降低埋管的运行时间,是值到考虑的技术方案。通过该医院住院部地源热泵系统的测试和分析发现,在冬季,利用消防水池蓄热能力来保证土壤温度恢复时间,从而提高埋管的换热效率,该方案有利系统长期高效运行。

2) 大地的自调节能力是研究地源热泵系统高效运行中不可忽略的一个重要方面。忽略该参数会导致盲目采用辅热或辅冷等其他技术措施来保证其正常运行,其不必要的技术措施会造成初投资或运行费增加。因此,大地的自调节能力分析的准确性有利保障地源热泵的技术体系。从该医院多年测试数据以及理论计算结果分析,当负荷强度以及累积热负荷限定在一定的区间内时,不会造成热平衡失调而导致的地温过度变化。对于该项目的具体情况,其单孔承担的热量控制在21.76 W/m左右,大地的自调节能力能够保证埋管周围的岩土温度在季节周期内恢复到初始温度,保证大地温度的恒定。

3) 从计算分析以及测试结果可以看到,大地对释冷量的自调节能力,取决于负荷特征以及土壤的地质结构以及系统的运行模式。在负荷特征中,累积负荷以及逐时负荷强度是其重要影响参数。本文通过案例定义和分析了大地的自调节能力,在不同条件下,大地的自调节能力是不同的,应做具体分析。

参考文献:

[1] Spitler J D. Ground-source heat pump system research-

past, present and future [J]. HVAC&R Research, 2005,11(2):165-167.

[2] Younis M, Bolisetti T, Ting D S K. Ground source heat pump systems: current status [J]. International Journal of Environmental Studies, 2010,67(3):405-415.

[3] Abdeen M O. Ground-source heat pumps systems and applications [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008,12(2):344-371.

[4] 於仲义, 胡平放, 王彬, 等. 混合式地源热泵系统优化设计[J]. 暖通空调, 2007,39(9):105-109.

Yu Z Y, Hu P F, Wang B, et al. Optimizing design of hybrid ground-source heat pump systems [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2007,39(9):105-109.

[5] Man Y, Yang H X, Fang Z H. Study on hybrid ground-coupled heat pump systems [J]. Energy and Buildings, 2008,40(11):2028-2036.

[6] Hackel S, Neillis G, Sanford K. Optimization of cooling dominated hybrid ground coupled heat pump systems [J]. ASHRAE Transactions, 2009:565-580.

[7] 张慧智, 史学正, 于东升, 等. 中国土壤温度的季节性变化及其区域分异研究[J]. 土壤学报, 2009,46(2):227-234.

Zhang H Z, Shi X Z, Yu D S, et al. Seasonal and regional variations of soil temperature in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2009,46(2):227-234.

[8] 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, 2007,39(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 Ventilating & Air Conditioning, 2007,39(9):35-39.

[9] 马宏权, 龙惟定. 埋管地源热泵系统的热平衡[J]. 暖通空调, 2009,39(1):102-106.

Ma H Q, Long W D. Ground heat balance in GSHP [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2009,39(1):102-106.

[10] 杨卫波, 陈振乾, 施明恒. 跨季节蓄能型地源热泵地下蓄能与释能特性[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2010,40(5):973-978.

Yang W B, Chen Z Q, Shi M H. Underground energy storage and release characteristics of ground source heat pump with seasonal energy storage [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010,40(5):973-978.

[11] 杨燕, 翟晓强, 余鑫, 等. 地源热泵空调系统热平衡及土壤温度分布实验研究[J]. 工程热物理学报, 2011,32(11):1819-1822.

Yang Y, Zhai X Q, Yu X, et al. The experimental study on heat balance and soil temperature distribution of

- ground source heat pump of air-conditioning system [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, 32(11):1819-1822.
- [12] Shang Y, Li S F, Li H J. Analysis of geo-temperature recovery under intermittent operation of ground-source heat pump [J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(4):935-943.
- [13] 刘俊, 张旭, 高军, 等. 地源热泵土壤温度恢复特性研究 [J]. *暖通空调*, 2008, 38(11):147-150.
Liu J, Zhang X, Gao J, et al. Research of soil temperature restoration characteristics of ground-source heat pump systems [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2008, 38(11):147-150.
- [14] Hackel S, Pertzborn A. Effective design and operation of hybrid ground-source heat pumps: Three case studies [J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(12):3497-3504.
- [15] Yang H, Cui P, Fang Z. Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: A review of models and systems [J]. *Applied Energy*, 2010, 87(1):16-27.
- [16] 谢鹂, 徐菱虹, 张银安. 混合式地源热泵系统不同控制策略的分析与比较 [J]. *暖通空调*, 2009, 39(3):110-114.
Xie L, Xu L H, Zhang Y A. Analysis and comparison of different control strategies for hybrid ground-source heat pump systems [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2009, 39(3):110-114.
- [17] 王明国, 付祥钊, 王勇, 等. 消防水池在地源热泵系统运行特性的数值分析 [J]. *制冷与空调*, 2008, 22(6):102-108.
Wang M G, Fu X Z, Wang Y, et al. The numerical analysis about the operation characteristics of the fire pool in the GSHP system [J]. *Refrigeration & Air Conditioning*, 2008, 22(6):102-108.
- [18] Esen H, Inalli M, Esen Y. Temperature distributions in boreholes of a vertical ground-coupled heat pump system [J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(12):2672-2679.
- [19] 刘宪英, 王勇, 胡鸣明, 等. 地源热泵地下垂直埋管换热器的试验研究 [J]. *重庆建筑大学学报*, 1999, 21(5):21-26.
Liu X Y, Wang Y, Hu M M, et al. Experimental research on vertical buried tube type of underground exchanger for ground-source heat pump [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 1999, 21(5):21-26.
- [20] 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.
- [21] Bauer D, Heidemann W, Diersch H J G. Transient 3D analysis of borehole heat exchanger modeling [J]. *Geothermics*, 2011, 40(4):250-260.

(编辑 王秀玲)