

# 地源热泵夏季运行地温场变化特性试验研究

孙婉<sup>1,2</sup>, 周念清<sup>1</sup>, 黄坚<sup>2</sup>, 王洋<sup>2</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海市地矿工程勘察院, 上海 200072)

**摘要:** 以同济大学某实验室地埋管地源热泵工程为例, 通过对地埋管换热区地温场及地源热泵系统运行参数进行监测, 分析研究了地源热泵系统夏季运行地温场的变化特性以及地温场变化对地源热泵系统运行效率的影响。结果表明: 夏季累计运行 44 d, 土壤平均升温幅度为 0.64 °C; 不同深度测点温度变化幅度随深度增加逐渐减小, 120 m 深度地温几乎无变化; 换热区土壤地温恢复速率为 0.14 °C · 100 d<sup>-1</sup>; 随着换热区土壤温度的升高, 地源侧进出水温差降低幅度为 0.87 °C, 机组性能系数亦随之降低, 系统换热效率下降。

**关键词:** 地源热泵; 地温场; 机组性能系数

**中图分类号:** TU831.3

**文献标志码:** A

## Experimental Study on Ground Temperature Change Characteristics of Ground-source Heat-pump System Running in Summer

SUN Wan<sup>1,2</sup>, ZHOU Nianqing<sup>1</sup>, HUANG Jian<sup>2</sup>,  
WANG Yang<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Institute of Geological Engineering Exploration, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** Ground temperature and systematic parameters of running ground-source heat-pump system were collected from a laboratory in Tongji University, and the change laws of the parameters were analyzed to evaluate its effect on the system. The following conclusion can be drawn: the ground temperature rises 0.64 °C in 44 d, the range of temperature variation decreases with depths, and the temperature will be a relative constant when depth is deeper than 120 m. The ground temperature recovery rate is 0.14 °C · 100 d<sup>-1</sup>, and with the increasing of soil temperature, the temperature gap of inlet and outlet water will decrease 0.87 °C and the system performance rate and heat transfer efficiency will decline.

**Key words:** ground-source heat-pump; ground temperature; coefficient of performance

换热区地温场的变化对地埋管地源热泵系统的运行效率有着显著影响, 但在地源热泵的实际工程应用中, 对换热区土壤温度场及系统运行参数的监测仍然偏少, 这与我国地源热泵系统的高速推广发展情况极不协调<sup>[1]</sup>。目前国外很多学者对地埋管换热器内及换热器与周围土壤之间的热量传递进行了研究, 从而对地源热泵系统设计及运行提供参考, 解决了设计及运行过程中诸多实际问题<sup>[2-4]</sup>。Li 等<sup>[5]</sup>在长江中下游典型气候特征条件下, 对地源热泵长期运行, 地埋管换热器管群周围土壤温度场分布及变化进行了模拟。基于线热源理论, 采用流体力学软件 FLUENT 建立三维模型。结果表明, 长江中下游地区由于夏季注入到土体中的热量过多, 如果不加以调节将造成地埋管换热器周围土壤温度持续升高, 从而使系统工作性能恶化甚至最终使系统完全瘫痪。王鹏英<sup>[6]</sup>以上海地区地埋管热泵系统为例, 对放热量为 83.05 W · m<sup>-1</sup>、取热量为 62.49 W · m<sup>-1</sup>的地源热泵工程进行模拟。结果表明, 在系统运行过程中, 土层温升比较明显, 特别是第 1 年和第 2 年。根据计算, 5 年土层总温升约 2.77 °C, 5 年后的增温速率为 0.41 °C · 年<sup>-1</sup>。张磊等<sup>[7]</sup>通过建立地源热泵管群传热模型, 对全年供冷量大于、小于及等于供热量 3 种情况, 在先夏季供冷后冬季供热与先冬季供热后夏季供冷运行模式下地温场的变化及其对系统运行效率的影响分别进行研究。结果表明: 全年供冷量大于供热量时, 至 10 年运行结束, 前者中心埋管处温升低于后者, 差值约为 1.5 °C; 管群外围距中心埋管 15 m 处温度值, 前者高于后者, 差值约为 0.6 °C。尚妍等<sup>[8]</sup>对地源热泵机组进行间歇运行试验, 得到地源热泵机组在制热运行模式下采取间歇运行策略能改善土壤温升的现象, 从而提高热泵性能系数。总之, 目前国内外相关研究大部分集中在基于实际

收稿日期: 2015-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(41272249); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20110072110020)

第一作者: 孙婉(1982—), 女, 高级工程师, 博士生, 主要研究方向为浅层地热能。E-mail: sunwan820224@126.com

通讯作者: 周念清(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为地下水数值模拟与水环境评价。

E-mail: nq.zhou@tongji.edu.cn

工程的理论分析和数值模拟,并借助工程应用软件进行模拟分析,得到了一些研究成果,但是普遍缺少对实际工程项目的长期监测数据及对模拟试验研究的验证,使得研究成果的应用推广受到了一定的限制。

在我国长江中下游地区夏季的制冷需求要大于冬季的供热需求,夏季持续制冷使换热区土壤温度快速升高,从而影响系统运行效率。因此,掌握和了解地埋管地源热泵系统夏季运行换热区土壤温度场的特征是进行经济运行的关键。本文以同济大学某实验室地埋管地源热泵工程为例,对系统夏季运行地温场及地源热泵系统运行参数进行了实际监测,对地埋管地源热泵系统夏季运行地温场特性及地源热泵系统运行效率进行了试验研究,给上海地区地源热泵系统的设计及运营管理提供指导。

## 1 试验场概况

### 1.1 工程概况

试验场建筑类型为办公建筑,共 2 层,建筑面积 476.4 m<sup>2</sup>,空调计算冷负荷为 71.46 kW,热负荷为 50.02 kW。采用竖直地埋管地源热泵空调系统形式,地下共设置 21 个单 U 换热孔,孔距 4 m,共分 5 个环路:换热孔 K1 单独为一个环路,孔深 120 m;K2~K6 为一个环路,孔深 120 m;K7~K11 为一个环路,孔深 100 m;K12~K16 为一个环路,孔深 60 m;K17~K21 为一个环路,孔深 60 m。换热孔布置见图 1。室内采用双风机变风量空调系统。

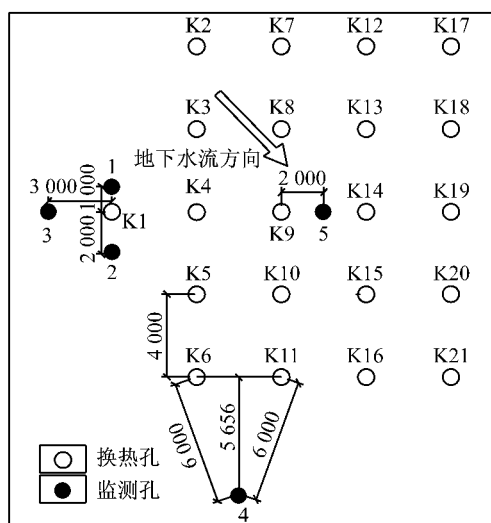


图 1 地埋管及地温监测孔平面布置图(单位:mm)

Fig.1 Layout of buried pipe and temperature monitoring hole (Unit: mm)

### 1.2 地质条件

场区位于上海第四系滨海平原古河道沉积区,

120 m 以浅土层主要由饱和黏性土、粉土等组成,地层具有成层分布特点,地层结构及特性见表 1。

表 1 地层特征

Tab.1 Stratum feature

序号	土层名称	层底深度/m	厚度/m	导热系数/(W·(m·K) <sup>-1</sup> )
1	粉质黏土	6.5	3.9	1.597
2	淤泥质粉质黏土	12.5	6.0	1.559
3	淤泥质黏土	16.3	3.8	1.214
4	黏土	40.3	24.0	1.245
5	粉质黏土	60.0	19.7	1.488
6	含黏性土粉砂	62.5	2.5	1.820
7	黏土	66.5	4.0	1.659
8	粉质黏土	80.0	13.5	1.600
9	细砂	84.5	4.5	2.770
10	粉砂	96.5	12.0	2.229
11	粗砂	102.5	6.0	2.168
12	粉质黏土	108.5	6.0	1.547
13	粉质黏土	115.3	6.8	1.490
14	细砂	118.5	3.2	1.722
15	粉质黏土	120.0	1.5	1.526

场区地下水可分为潜水和承压水。潜水岩性以砂质粉土为主,水位埋深 0.50~1.50 m,主要接受大气降水补给,水位呈季节性周期变化。场区 120 m 以浅深度内主要分布有第二承压含水层,顶板埋深 80.0 m,底板埋深 102.5 m,厚度 22.5 m。对试验场区第二承压含水层水位动态进行监测,得到研究区域平均地下水水力坡度为 0.004 5,地下水流速细砂为  $1.35 \times 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,粉砂为  $4.5 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,粗砂为  $1.8 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,12 月—次年 1 月为高水位期,8—9 月为低水位期。

场区土层的综合导热系数为  $1.6 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ,80 m 以浅土层,主要以黏土、淤泥质黏土、粉质黏土为主,导热性较差,一般在  $1.8 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$  以下;80.0~102.5 m 深度土层,主要以粉砂、细砂及粗砂为主,导热性好,一般在  $2.1 \sim 2.8 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$  之间;108.5 m 以深土层,主要以粉质黏土及黏土为主,导热性降低。

## 2 监测系统设置

### 2.1 监测点布设

共设置 5 个地温监测孔,48 个监测点。其中,1~4 号监测孔深度为 120 m,位于换热区外围区域,对温度影响半径进行监测;5 号监测孔深度为 100 m,位于换热区中心区域,对换热区内部温度变化进行监测。监测孔布设见图 1。测温点的数量和深度根据地层情况确定,基本按照每一主要土层不少于一个测温点的原则进行布设,布设深度分别为 2.5、10、

23、41、55、70、82、102及120 m. 其次还对埋管系统总的进出水温度、流量及冷冻水回路的进出水温度、流量、机组耗电量进行了监测。

## 2.2 监测设备

温度监测采用 SLET1000-3 数字式温度传感器,测量精度为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ . 流量监测采用 LWGY 系列涡轮流量计,测量精度为 1.0%. 监测数据采用自动化采集、传输和存储。

## 3 地温监测结果分析

### 3.1 地源热泵系统运行情况

试验场地温监测自 2012 年开始,其中 2012 年 1 月—2013 年 6 月地源热泵空调系统未使用. 地源热泵系统于 2013 年 7 月 10 日—9 月 26 日对建筑物进行供冷,分为 3 个运行段,分别为 7 月 10 日—7 月 30 日、8 月 8 日—8 月 17 日、9 月 14 日—9 月 26 日,累计供冷 44 d,1 056 h. 之后空调系统停用,地温进入恢复阶段. 2013 年 7、8 及 9 月份,空调运行期间月平均气象温度分别为 27.2、27.3 及 21.1 $^{\circ}\text{C}$ .

### 3.2 地温随时间变化特征分析

各监测孔不同深度监测点 2012 年 1 月—2015 年 7 月的温度变化曲线见图 2a~e. 各监测孔温度变

化趋势总体相同,2012 年 1 月—2013 年 6 月,由于地源热泵系统未运行,因此除 2.5 m 深度受气温影响出现波动外,其他深度地温随时间无变化,曲线显示地层原始温度。

2013 年 7 月地源热泵系统开始夏季制冷,地温随时间出现波动,随着制冷时间增加,埋管换热器持续向地下土壤排热,地温逐渐升高,2013 年 10 月夏季制冷结束,地温达到最大值. 随后地源热泵系统进入间歇期,埋管换热器停止向地下土壤排热,随着堆积在地下土壤中的热量逐渐扩散及迁移,地温逐步下降,2015 年 3 月地温基本恢复到了原始地温。

从不同监测孔来看,除位于距离换热区 5.6 m 处的 4 号监测孔地温几乎未出现变化外,位于外围区域的 1~3 号监测孔温度达到峰值时间较位于内部区域的 5 号监测孔温度达到峰值时间滞后,外围区域监测孔温度峰值出现在 2013 年 11 月,内部区域监测孔温度峰值出现在 2013 年 10 月。

### 3.3 地温垂向变化特征分析

各监测孔月平均地温随深度变化曲线见图 3a~e. 2.5 m 深度地温主要受环境气候温度影响,7、8 月随着气温升高温度逐渐增高,并且地温变化略滞后于环境温度变化,9、10 月气温降低,地温增高幅度减缓。

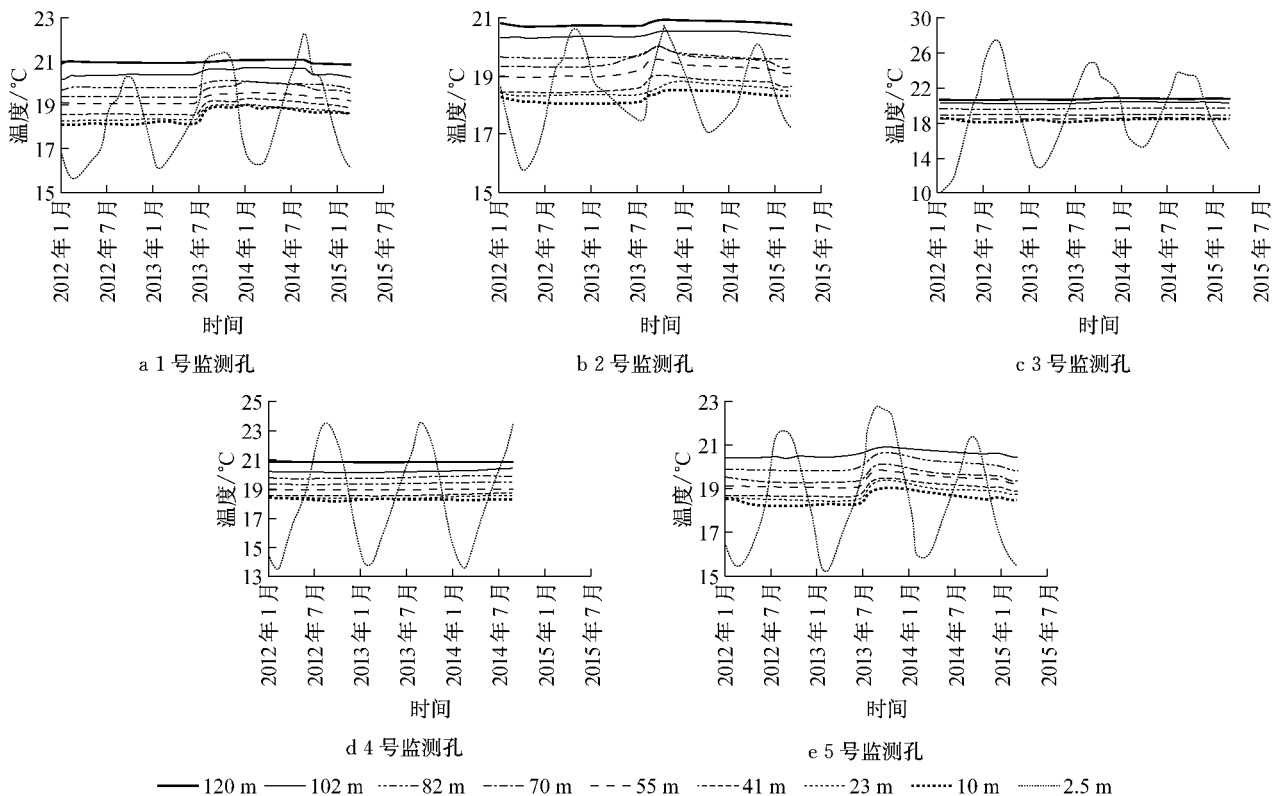


图2 各监测孔各测点的温度变化曲线(2012年1月—2015年7月)

Fig.2 Temperature variation curve at each monitoring hole (January 2012—July 2015)

1~4号监测孔位于埋管区外围区域,距离换热孔较远,因此各深度测点温度变化幅度较小,其中距离换热孔最远的4号监测孔地温无变化。从具体监测结果看,位于埋管区外围区域监测孔10、23、41、55及70 m深度地温变化幅度较大,82、102及120 m深度地温几乎无变化。5号监测孔位于埋管区内部区域,各深度测点温度变化幅度较大。从具体的监测结果看,10、23、41、55、70、82、102、120 m深度地温变化幅度随深度增加逐渐减小,120 m深度地温几乎无变化。这表明,地温变化幅度与土层原始温度有

关,深度越深原始地温越高,原始地温与换热孔温差越小,因此地温变化幅度越小。

5号监测孔与1~3号监测孔相比,5号监测孔82 m及102 m深度地温变化幅度大于1~3号监测孔,这是由于这段深度土层位于场区第二承压含水层,受地下水径流传热影响,热量向下游运移,对下游区域地层温度造成影响,5号监测孔位于部分换热孔的下游区域,因此82 m及102 m深度地温变化幅度较1~3号监测孔大。

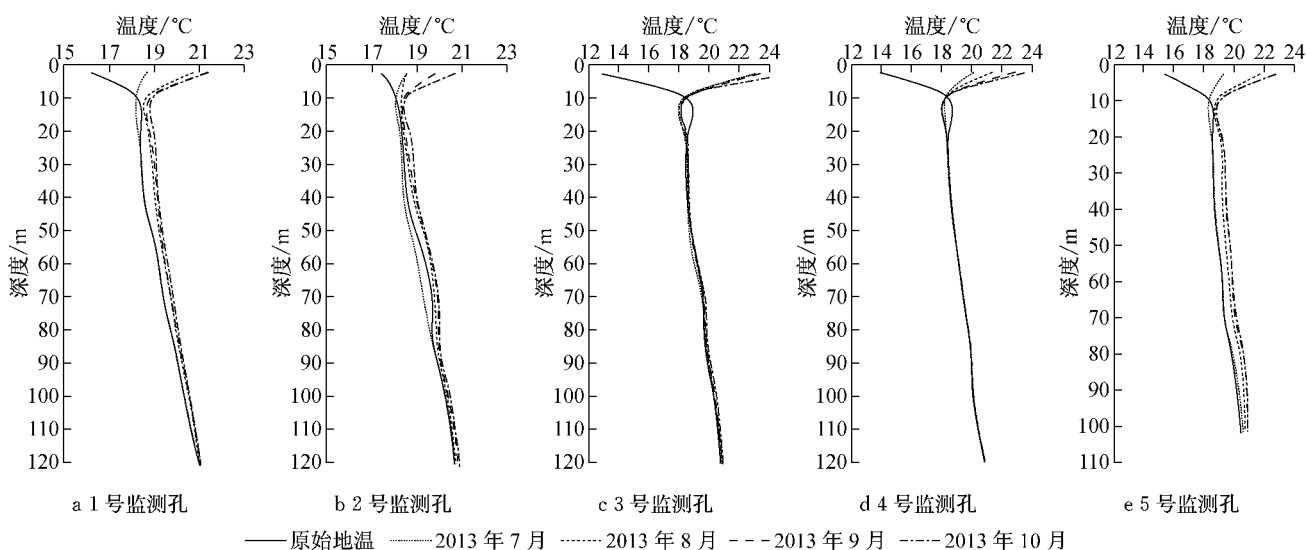


图3 各监测孔月平均地温随深度变化曲线

Fig.3 Average temperature variation with depth at each monitoring hole

### 3.4 地温径向变化特征分析

为了解换热孔换热量向周围扩散情况,对位于换热区外围区域的1~4号监测孔地层月平均温度沿钻孔径向的变化曲线进行整理分析,如图4所示。

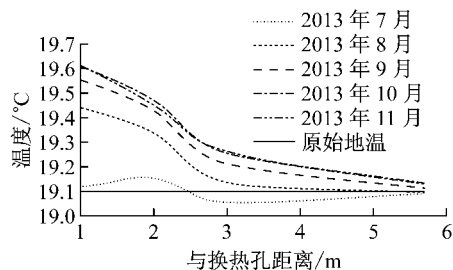


图4 地温沿钻孔径向变化曲线

Fig.4 Ground temperature along drilling hole

由地温沿钻孔径向变化曲线可以看出,换热区周围地温在径向上呈现波状衰减的变化趋势,受空凋制冷影响,距离换热孔1 m处地温升温幅度最大,随着与换热孔距离的增大,温度升温幅度逐步减小。根据监测结果,距离换热孔2 m及3 m范围内的地

温波动明显,距离换热孔5.6 m处地温几乎无波动,与原始地温基本一致,因此可以得出本试验场地理管换热对地温的影响半径在3.0~5.6 m之间。

### 3.5 地温变化幅度及恢复情况分析

对相同深度测点温度取平均值,得出2013年夏季累计运行44 d后各深度地层温度升温幅度,见表2。经过夏季44 d运行后,地层平均升温0.64 °C,其中10~102 m升温幅度较大,在0.43~0.83 °C之间,120 m深度升温幅度最小,仅为0.17 °C。

对各监测孔内测点温度取平均值,得出2013年夏季累计运行44 d后各孔温度升温幅度,见表3。由监测结果可见,经过夏季44 d运行后,位于埋管区外围的1~4号监测孔升温幅度较位于埋管区内部的5号监测孔升温幅度小。前者升温幅度在0.03~0.42 °C之间,后者升温幅度为0.77 °C。同时,位于埋管区外围的监测孔升温幅度随监测孔离埋管区距离的增大而减小,4号孔离埋管区距离最大为5.6 m,因此地源热泵夏季运行44 d对4号孔处地温影响几乎

为零.

表 2 各深度地层平均温度及地温升温幅度

Tab.2 Average temperature and temperature rise range of each deep strata

深度/m	原始地温/ ℃	2013 年夏季累计运 行 44 d 后各深度土 层平均温度/℃	升温幅 度/℃
10	18.27	18.97	0.70
23	18.39	19.22	0.83
41	18.63	19.45	0.82
55	19.06	19.79	0.73
70	19.45	20.19	0.74
82	19.81	20.53	0.71
102	20.32	20.75	0.43
120	20.84	21.02	0.17
平均	19.35	19.99	0.64

表 3 各监测孔平均温度及地温升温幅度

Tab.3 Average temperature and temperature rise range at each monitoring hole

孔号	原始地 温/℃	2013 年夏季累计运 行 44 d 后各孔平均 温度/℃	升温幅 度/℃
1	19.53	19.95	0.42
2	19.39	19.77	0.38
3	19.53	19.65	0.12
4	19.32	19.35	0.03
5	19.14	19.92	0.77

对 2013 年夏季运行 44 d 后地温恢复情况进行分析,由监测结果可见,2013 年夏季运行 44 d 后,土壤温度恢复缓慢,经过 304 d 间歇期,各监测孔均未恢复到原始地温.对土壤温度恢复速率进行计算,取土壤恢复 304 d 后温度与原始温度差值除以恢复时间再乘以 100 d,得出埋管区 10~80 m 黏土层地温恢复速率约为  $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ d})^{-1}$ ,80~102 m 含水砂层地温恢复速率约为  $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ d})^{-1}$ ,土壤地温平均恢复速率为  $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ d})^{-1}$ .可见,含水砂层地温恢复速率较黏土层大,这是由于受地下渗流影响,堆积的热量随地下水发生了运移所致,地下水渗流有利于土壤热量扩散.

#### 4 地源热泵运行情况与地温变化关系分析

埋管地源热泵系统运行导致换热区土壤温度大幅变化,夏季持续运行将造成地源侧回水温度不能满足热泵机组要求,从而对热泵机组的性能造成影响,使系统运行效率降低.因此,对热泵机组性能系数(COP)、地源侧进出水温差与换热区土壤温度

关系进行准确分析,可为实际运行提供参考依据,从而采取适当的调节措施,提高系统运行效率.

图 5 为热泵机组性能系数(COP)、地源侧进出水温差与换热区土壤温度关系.可以看出,夏季 7、8、9 月份随着运行时间的增加,热泵系统通过埋管换热器持续向地下土壤排热,换热区土壤温度随之逐渐升高,地温平均升高幅度为  $0.64\text{ }^{\circ}\text{C}$ .随着换热区土壤温度的升高,地源侧进出水温差逐渐降低,降低幅度为  $0.87\text{ }^{\circ}\text{C}$ .机组 COP 亦随之降低,由 7 月份的 4.32 降低到 4.11,系统换热效率下降.

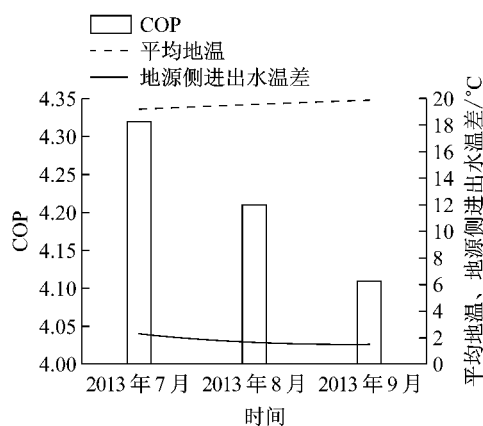


图 5 热泵机组性能系数、进出水温差与地温关系

Fig.5 Relationship between performance coefficient of heat pump unit, water temperature difference and ground temperature

这是因为随着地源热泵的持续运行,与地层换热,地下土壤温度升高,与管内流体温差减小,导致单位并深换热功率下降,从而使得热泵机组的性能系数随之下降.

#### 5 结论

(1) 埋管地源热泵系统夏季运行,换热区土壤温度随之升高,系统累计运行 44 d,土壤平均升温幅度为  $0.64\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

(2) 不同深度测点温度变化幅度随深度增加逐渐减小,120 m 深度地温几乎无变化.这表明:地温变化幅度与土层原始温度有关,深度越深原始地温越高,原始地温与换热孔温差越小,因此地温变化幅度越小.地源热泵系统设计在换热器埋深深度计算选取阶段应充分考虑地层原始温度对埋管换热器换热效率的影响,换热器换热效率随着深度增加有衰减趋势,盲目增加换热器的埋深将造成系统初投

资及后期运行费用的增加。

(3) 换热区周围土壤温度在径向上呈现波状衰减的变化趋势,随着与换热孔距离的增大,温度升温幅度逐步减小。试验场地埋管换热对地温的影响半径在 3.0~5.6 m 之间。上海人口密集、建筑密度大、地下空间开发利用程度高,一些重要的地下工程,如地铁等,以及建筑密集区域,地源热泵工程的建设及运行方式都应进行规范,那么了解和掌握地源热泵系统长期运行的热影响半径和热影响程度对工程设计及系统运行都至关重要。

(4) 对土壤温度恢复速率进行计算,取土壤恢复 304 d 后温度与原始温度差值除以恢复时间再乘以 100 d,土壤地温平均恢复速率为  $0.14\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ d})^{-1}$ ,并且受地下水渗流影响,含水砂层地温恢复速率较黏土层大。地下水的渗流有利于土壤热量扩散,从而有利于地下埋管换热器的换热,因此实际工程设计中,地下水渗流对地埋管地源热泵系统换热性能的影响不可忽略。

(5) 地源热泵系统运行,随着换热区土壤温度的升高,地源侧进出水温差逐渐降低,降低幅度为  $0.87\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。机组性能系数(COP)亦随之降低,由 7 月份的 4.32 降低到 4.11,系统换热效率下降。上海地区地下土壤多以黏性土为主,土层导热性较差,并且夏季制冷需求高,容易出现地温大幅上升的热堆积情况。因此,上海地区地源热泵系统设计及应用应考虑地源热泵系统持续运行地温升高对系统运行效率的影响,在日运行高峰及月运行高峰时段采取时段歇运行、分区运行等措施进行削峰,以保证地源热泵系统高效运行。

#### 参考文献:

- [1] 王华军,杨立新,顾吉浩,等. 地源热泵系统运行中土壤温度场变化特性的实例分析[J]. 暖通空调, 2011, 41(7): 119.  
WANG Huajun, YANG Lixin, GU Jihao, *et al.* Case analysis of soil temperature field during operation of ground-source heat pump systems [J]. HV&AC, 2011, 41(7): 119.
- [2] CUI Ping, YANG Hongxing, FANG Zhaohong. Heat transfer analysis of ground heat exchangers with inclined boreholes [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26: 1169.
- [3] Demir H, Koyun A, Temir G. Heat transfer of horizontal parallel pipe ground heat exchanger and experimental verification [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29: 224.
- [4] Pussoli B F, Barbosa J R, Silva L W, *et al.* Heat transfer and pressure drop characteristics of peripheral-finned tube heat exchangers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55: 2835.
- [5] LI Shuhong, YANG Weihua, ZHANG Xiaosong. Soil temperature distribution around a U-tube heat exchanger in a multi-function ground source heat pump system [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29: 3679.
- [6] 王鹏英. 上海地区别墅建筑地源热泵空调系统设计[J]. 暖通空调, 2003, 33(6): 80.  
WANG Pengying. Design of the ground source heat pump system for villas in Shanghai area [J]. HV&AC, 2003, 33(6): 80.
- [7] 张磊,钱华,郑晓红,等. 地源热泵系统长期运行模式对地温场影响[J]. 建筑热能通风空调, 2012, 31(5): 1.  
ZHANG Lei, QIAN Hua, ZHENG Xiaohong, *et al.* Influence of the GSHP system by long-running mode on the geothermal field [J]. Building Energy & Environment, 2012, 31(5): 1.
- [8] 尚妍,李素芬,代兰花. 地源热泵间歇运行地温变化特性及恢复特性研究[J]. 大连理工大学学报, 2012, 52(3): 350.  
SHANG Yan, LI Sufen, DAI Lanhua. Study of characteristics of soil temperature variation and recovery under intermittent operation of ground-source heat pump [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2012, 52(3): 350.