

文章编号: 1671-6612 (2024) 03-385-09

河北省某高校地源热泵系统地温场监测与分析

刘俊青¹ 吴晓轩² 刘彪² 牛晓洁² 张昌建²

(1. 中国煤炭地质总局水文地质局 邯郸 056000;

2. 河北工程大学能源与环境工程学院 邯郸 056000)

【摘要】 为了掌握地源热泵地埋侧土壤的吸热放热特性,以某高校地源热泵供暖供冷为例对地埋侧土壤的吸热放热特性进行了研究,对 6 口地埋井在纵向按照每 10 米一个测点进行了温度监测,经过 1a 的监测数据分析得出,热泵系统一年内向地下的净排热量为 10560.1GJ,热不平衡率为 61.8%,存在热累积现象。分析了岩土体在供暖季、过渡季、制冷季的温度变化情况,换热区域地层平均温度升幅在 1.65~2.24℃之间,平均累计上升 1.89℃,为该地区同类项目的开发具有一定的借鉴作用。

【关键词】 地源热泵;地温监测;热累积;吸热放热特性

中图分类号 TU83 文献标志码 A

Monitoring and Analysis of Ground Temperature Field in a Ground Source Heat Pump System of a University in Hebei Province

Liu Junqing¹ Wu Xiaoxuan² Liu Biao² Niu Xiaojie² Zhang Changjian²

(1. Hydrogeology Bureau of China Coal Geology Administration, Handan, 056000;

2. School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, 056000)

【Abstract】 In order to understand the heat absorption and release characteristics of the soil on the ground side of a ground source heat pump, this article takes the heating and cooling supply of a certain university's ground source heat pump as an example to study the heat absorption and release characteristics of the soil on the ground side. Six underground wells were monitored longitudinally at a measurement point every 10 meters. After a year of monitoring data analysis, it was found that the net heat output of the heat pump system to the ground within a year was 10560.1GJ, and the thermal imbalance rate was 61.8%. There is a phenomenon of heat accumulation. Analyzed the temperature changes of rock and soil during the heating season, transition season, and cooling season. The average temperature rise of the formation in the heat exchange area is between 1.65 and 2.24 °C, with an average cumulative increase of 1.89 °C. This provides a certain reference for the development of similar projects in the region.

【Keywords】 Ground source heat pump; Ground temperature monitoring; Heat accumulation; Heat absorption and release characteristics

0 引言

在能源需求量越来越大的今天,地源热泵技术作为对再生资源进行有效利用的一项新技术,已经成为国家重点推广和发展的重要技术之一,发

展潜力无穷。但地源热泵系统运行过程中还面临着许多问题,如土壤热失衡问题,由于建筑的年冷热需求量的不平衡,随着综合热量或冷量被释放到地面温度升高或者降低的逐渐不均衡,从而加剧了土

基金项目:河北省重大科技成果转化项目“矿山余热废热资源化利用成装备研发与产业化”(项目编号 21284102Z);河北省重点研发计划项目“太阳能、地热能、相变能多能互补(电、热、冷系统)关键技术与装备研发与示范”(项目编号 236Z4310G);河北省创新能力提升计划项目“河北省暖通空调后补助经费”(项目编号 22567691H)

作者(通讯作者)简介:刘俊青(1983.3-),男,本科,工程师,E-mail: 316097171@qq.com

收稿日期:2023-12-21

壤温度场的不平衡^[1-4]。因此有必要通过实验测试,为其推广应用提供更加完善的基础数据^[5]。针对此类问题,以河北省某高校土壤源热泵系统为研究对象,通过对地埋管换热器进行测点布置,数据采集,对土壤的吸热放热特性进行研究,综合分析是否存在土壤热失衡问题。

1 项目简介

河北省某高校地源热泵供暖供冷项目提供空调冷、热源及供暖热源,系统采用冷源侧定流量、负荷侧变流量的一级泵两管制系统。通过两管制室外管网,直接向单体建筑供冷、供热,系统配置五台水源热泵机组、两台冷却塔及一台智能换热机组,热泵机组与换热机组并联运行,竖直埋管地源热泵系统的土壤换热器敷设在周围。该项目服务面积为 213211m²,供冷总负荷为 19979kW,供热总负荷为 15834kW。供冷、供热系统方案为夏季设有冷却塔调峰、冬季设有换热机组补热的复合式竖直埋管地源热泵系统。在夏季,埋管地源热泵承担设计冷负荷的 80%,冷却塔承担设计冷负荷的 20%;在冬季,埋管地源热泵承担设计热负荷的 100%,换热机组用于调峰。

河北省某高校地源热泵供暖供冷项目整体设计钻孔 3300 眼,孔深 130 米,竖直埋管设计采用双 U 型 de25 形式,为目前河北省内单体规模最大的地源热泵项目。钻孔布置区域以图书馆为中心,分布于周边绿地、停车场、便道等公共区域内,竖管间距为 4 米,全部竖管换热器共分为 66 个小系统,每个小系统由约 50 个竖直孔组成,单孔供

回水采用单独阀门控制,可有效保证系统运行的安全性,小系统通过主管道采用同程并联的链接模式,可有效保证系统水流均衡分配,保证每个系统发挥最大的换热优势。水平管埋深平均为-2.5 米左右,整体钻孔区域内合理设置了若干个地层温度场检测孔,对地层进行分层温度扫描,换热全过程动态掌握地层温度场变化曲线。本项目在 3300 个埋管换热器中合理选择 6 个作为后期运行监测孔。图 1 为换热孔平面布置图。

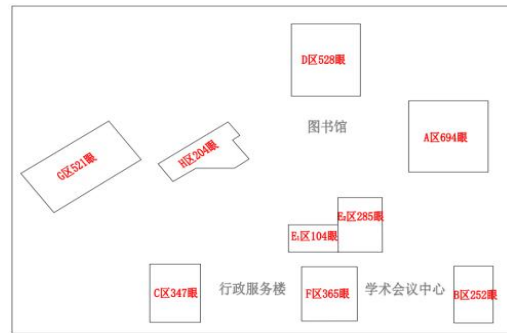


图 1 换热孔平面布置图

Fig.1 Layout Plan of Heat Exchange Holes

2 测试方案

2.1 地质概况

本项目位于邯郸东部地区,区内地层主要由耕土、黄土、粘土层、粉质粘土、砂质粘土、细沙、粘泥组成,如表 1 所示。对该项目所处位置进行地下温度监测数据分析整理得到浅层地热能原始温度情况,不同地层深度处的土壤原始温度各不相同,在纵向上存在逐层递增的趋势,表 2 为项目所在地区浅层地热能原始温度情况。

表 1 研究区地层特征表

Table 1 Stratigraphic Characteristics of the Study Area

地层	地层深度	厚度	岩性描述
耕土	0-1m	1m	以粉质粘土为主,含植物根系,结构松散
黄土层	1-7m	6m	黄土层
粘土层	7-15m	8m	褐黄色
粉质粘土+砂质粘土	15-25m	10m	褐黄色
粘土层	25-60m	35m	褐黄色
砂质粘土	60-70m	10m	褐黄色~灰白色,夹白色细砂
细砂层	70-90m	20m	褐黄色,含水层
粘泥层	90-110m	20m	褐黄色,密实度高
砂质粘土	110-113m	3m	褐黄色,夹杂大颗粒硬石
粘土层	113-120m	7m	褐黄色
砂质粘土层	121-200m	79m	砂质粘土层

表 2 浅层地热能原始温度情况

Table 2 Original Temperature of Shallow Geothermal Energy

地层深度/m	地下土壤原始温度/°C
10	16.1
20	16.3
30	16.5
40	16.7
50	16.7
60	17
70	17
80	17.3
90	17.5
100	17.6
110	17.7
120	18.1

2.2 监测设备

温度传感器采用 pt100, 以 10 米间距均匀绑定在垂直 U 型管上, 测点布置见图 2。温度传感器通过特制屏蔽线与设备机房的 12 路温度巡检仪连接, 以备实时监测、收集运行数据。建立地埋温度运行监控和实时数据采集系统, 监测系统主界面见图 3, 所采用的主要部件有: 补偿导线、6 套 12 路温度巡检仪、温度传感器、竖直埋管等。每个监测孔井深 134 米, 埋管深 130 米, 采用高密度聚乙烯塑料管 (HDPE) 双 U 型 De25 埋管换热器。每个井口均设置超声波流量计对流量进行监测。检查测试后各个井均正常循环。

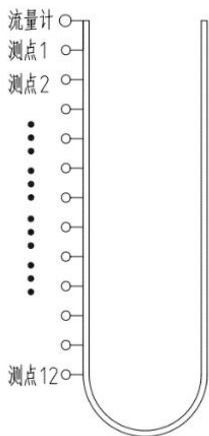


图 2 测点布置图

Fig.2 Layout of Measurement Points

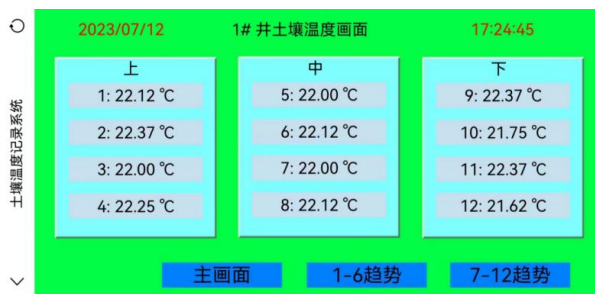


图 3 监测系统主界面

Fig.3 Main Interface of the Monitoring System

3 地源热泵运行时段

该项目自建成以来, 已平稳运行, 每年在 11 月 15 日-3 月 15 日对建筑物进行供暖, 3 月 16 日-5 月 24 日地源热泵系统未运行处于间歇期, 在 5 月 25 日-9 月 1 日对建筑物进行供冷, 9 月 2 日-11 月 14 日系统处于间歇期。

4 检测结果与讨论

4.1 年累计热负荷分析

地源热泵制冷季向地层散出的热量与供暖季从地层吸收的热量之间是否平衡或存在积累效应, 这对地源热泵系统能否长期高效应用具有十分重要的意义。研究地埋管换热区域热平衡之前, 需要先确定如何界定热平衡^[6]。地埋管换热系统的热平衡主要指经过 1 个运行周期地埋管换热区域吸热量与排热量基本相等, 换热区域地层温度基本不变。该项目对地源热泵系统运行数据进行监测, 依据实测数据分析了在 1a 供冷、供暖周期内地源热泵与地下岩土体间的换热情况^[7]。

换热量计算公式:

$$Q = \rho G c \Delta t \tau$$

式中, Q 为换热量, kJ; ρ 为循环水密度, kg/m^3 ; G 为地源侧主管道循环水量, m^3/h ; c 为水的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; Δt 为地源侧主管道供回水温差, $^\circ\text{C}$; τ 为系行运行时间, h。

由表 3、表 4 可以看出, 地源热泵全年向地下排热为 17090.2GJ, 从地层中取热为 6530.1GJ, 全年地源热泵向地下净排热量为 10560.1GJ, 热不平衡率为 61.8%。由于疫情影响及所供给建筑的负荷特性等影响, 夏热冬冷地区依靠地埋管换热时, 向地下岩土的排热量远大于取热量, 存在热堆积现象^[8]。

表 3 供暖季地源热泵系统换热情况

Table 3 Heat exchange situation of ground source heat pump system during heating season

埋管区域	日均换热功率/kW	日均换热量/GJ	运行天数/d	年总换热量/GJ
A	595.9	21.5	85	1827.5
B	232.9	8.4	47	394.8
D	665.9	23.9	85	2031.5
C+E1	378.8	13.6	38	516.8
F+E2	575.2	20.7	38	786.6
G+H	574.5	20.7	47	972.9

表 4 制冷季地源热泵系统换热情况

Table 4 Heat exchange situation of ground source heat pump system during the refrigeration season

埋管区域	日均换热功率/kW	日均换热量/GJ	运行天数/d	年总换热量/GJ
A	1455.7	52.4	117	6130.8
B	527.5	19	79	1501
D	1058	38.1	117	4457.7
C+E1	584	21	38	798
F+E2	1009.7	36.4	38	1383.2
G+H	1512.6	54.5	79	4305.5

4.2 单位井深的实际供冷/热量

该项目中共设埋管孔 3300 个，每个埋管孔深度为 130 米采用双 U 型 de25 形式，水平埋管深度为-2.5 米，每孔实际长度为 127.5 米，项目实际埋管总井深为 420750 米。制热季时埋管总的换热功率为 3023.2kW，单位井深的换热量为 7.18W/m；制冷季，埋管总换热功率为 6147.5kW，单位井深的换热量为 14.61W/m。该项目前期调研中埋管可提供的设计换热量为制冷 50-50W/m，供热 29-32W/m。实际运行情况与前期调研相比仍有较大差距，埋管侧换热能力仍有较大的潜力未利用。

4.3 纵向温度场讨论

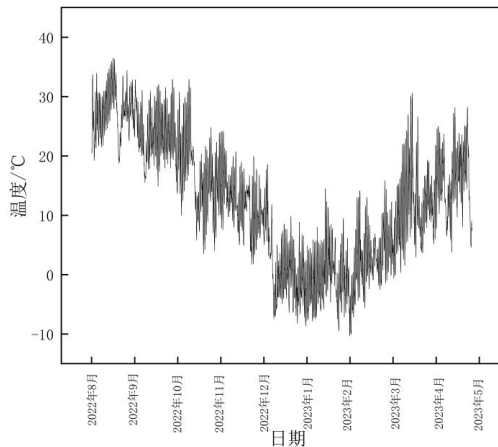


图 4 监测时间内气温变化曲线

Fig.4 Temperature variation curve during monitoring time

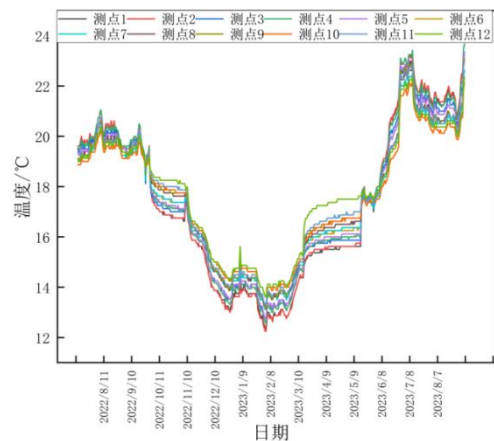


图 5 井 2 不同深度处温度变化曲线

Fig.5 Temperature variation curve at different depths of Well 2

邯郸地区属于寒冷地区，监测时间段内最高气温为 36.4℃，最低气温为-10.2℃，平均气温为 12.4℃。图 4 显示了监测时间段内邯郸市的气温变化曲线。地源热泵埋管侧各监测点温度随时间呈波状变化，井 1-6 全年温度变化趋势基本一致，制冷季时，地源热泵向地下散热，各测点温度均高于地下原始平均温度，运行平稳期时，不同深度处测点温度基本持平。制冷季结束进入间歇期，地源热泵机组停机，不再向地下土壤散热，地温进行缓慢恢复^[9]。供暖季开始地源热泵系统从地下取热，地温快速下降，运行平稳期地层温度变化较为平缓；供

暖季结束后, 地源热泵机组不再从地下取热, 测点温度逐渐升高, 地温开始恢复, 恢复速率大于制冷季结束后间歇期温度恢复速率, 以井 2 为例进行分析, 见下图, 图 5 为井 2 不同深度处测点温度变化图。

井 2 各测点温度平均波幅为 10.00℃, 各测点波动幅度在 8.63~11.37℃之间, 温度波动幅度较大, 测点各温度值随季节变化有着明显波动, 全年具有一定的周期性。监测点深度从 10 米到 120 米的范围内, 最低温度出现在地下 20 米处的测点 2, 为 12.25℃; 最高温度出现在监测点深度 40 处, 测点

最高温度为 23.68℃。随监测点深度的增加, 各测点平均温度也在逐渐增加, 从测点 1 平均温度 17.36℃逐渐递增至 17.81℃。在运行周期内, 各测点温度均值接近土壤原始平均温度。从图 3、图 4 中可以看出, 地表下 10 米至 20 米处, 监测点温度波动幅度较大, 为 11℃左右; 而地表下 60 米到 120 米深度处, 温度波动幅度较小在 8.75~10.00℃之间。地表附近深度处呈现与外界气温类似的变化趋势, 而随着地表下测点深度的增加, 地温受外界气候变化的影响因素较小。井 2 各测点温度波动特征如表 5 所示。

表 5 井 2 监测孔各测点温度波动特征

Table 5 Temperature fluctuation characteristics of each measuring point in Well 2 monitoring hole

监测点深度/m	最低点温度/℃	最高点温度/℃	平均温度/℃	波幅/℃
10	12.37	23.37	17.36	11
20	12.25	23.62	17.43	11.37
30	12.75	23.25	17.48	10.5
40	12.65	23.68	17.56	11.03
50	12.75	23.37	17.49	10.62
60	13.25	22.32	17.48	9.07
70	13.12	22.62	17.45	9.5
80	13.12	23	17.59	9.88
90	13.12	23.12	17.64	10
100	13.62	22.25	17.54	8.63
110	13.25	23	17.68	9.75
120	13.62	22.37	17.81	8.75

4.4 供暖季、空调季、间歇季温度变化趋势

4.4.1 制冷间歇季

图 6 为制冷结束后各测点温度变化趋势图, 由图可以看出, 制冷季结束后进入间歇季, 热泵系统不再向土壤进行排热, 土壤温度逐渐降低。制冷间歇季前期, 根据当年天气回暖情况以及学校要求, 实际制冷结束为 9 月 25 日, 因而此段时间内各测点温度均较高。地理侧共 8 个区, 平时 6 个区运行, 2 区静态, 但制冷季结束后, 打开所有的埋管区域混合水运行 48 小时, 从而出现间歇季各测点温度先下降后升高的趋势。气温下降时, 浅层地埋管周围土壤温度场平均温度降低的幅度会比较深地埋管周围土壤温度场降低的幅度大, 因而制冷间歇季各测点间水温存在波动特征。随监测点深度的增加, 各测点平均温度也在逐渐增加, 从测点 1 的 17.92℃逐渐增加到测点 12 的 18.64℃。间歇季地表侧各测点温度波动幅度较大, 均在 4℃以上,

随纵向深度的增加, 测点最高温度与最低温度波动幅度减小, 波幅在 3.13~3.62℃之间。间歇季初期, 地温恢复速率较快, 11 月初间歇季末期, 地源热泵系统开机, 为供暖季准备试运行, 各测点温度下降速率较快。

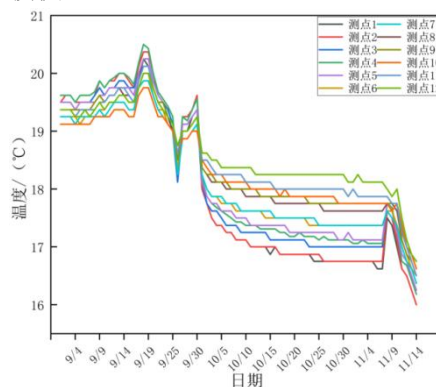


图 6 井 2 不同深度处制冷间歇季温度变化曲线
Fig.6 Temperature Change Curve of Cooling Intermittent Season at Different Depths in Well 2

表 6 井 2 制冷间歇季各测点温度波动特征

Table 6 Temperature fluctuation characteristics of each measurement point during the intermittent cooling season of Well 2

监测点深度/m	最低点温度/°C	最高点温度/°C	平均温度/°C	波幅/°C
10	16	20.25	17.92	4.25
20	16	20.37	18.01	4.37
30	16.25	20.25	18.1	4
40	16.18	20.5	18.2	4.32
50	16.25	20.25	18.18	4
60	16.5	20	18.19	3.5
70	16.37	19.87	18.18	3.5
80	16.5	20.12	18.39	3.62
90	16.5	20.12	18.44	3.62
100	16.62	19.75	18.38	3.13
110	16.5	20.12	18.53	3.62
120	16.75	20	18.64	3.25

4.4.2 供暖季

图 7 为供暖季各测点温度变化趋势图，进入供暖季，不同深度处各测点温度整体呈下降趋势，最高温度出现在 120 米深处，为 16.5°C，最低温度出现在 20 米深处的测点 2，温度最低点为 12.37°C。随监测点深度的增加，各测点平均温度也在逐渐增加，从测点 1 的 13.99°C、测点 2 的 13.80°C 逐渐增加到 14.72°C。而供暖季各测点波动幅度较大，主要集中在 3~3.5°C 之间。供暖季地源热泵运行初期，地温快速下降，初期温度最低点为 13°C；运行中期时各测点温度较为平缓，但依旧存在沿纵向深度上的温差分布现象；因其高校使用时间段特殊性，2023 年 1 月份处于假期状态，负荷降低，取热量减少，部分时段机组处于停机状态未运行，因而各测点水温存在上升趋势。供暖季运行末期，随着气温逐渐升高，不同深度测点温度也在逐步升高，但温度升高速率不及运行初期地温的下降速

率。以深度-30 米测点 3 为例，供暖季初期时测点温度为 16.25°C，运行期间测点最低温度为 12.81°C，供暖季运行结束后测点温度恢复到 14.75°C。

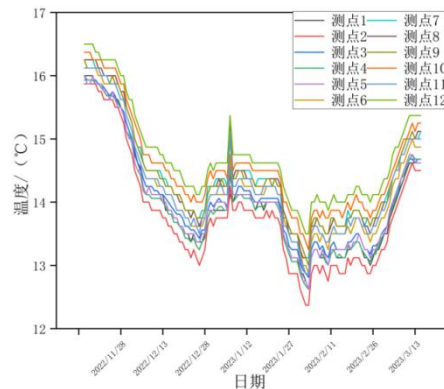


图 7 井 2 不同深度处供暖季温度变化曲线

Fig.7 Temperature variation curve during heating season at different depths of Well 2

表 7 井 2 供暖季各测点温度波动特征

Table 7 Temperature fluctuation characteristics of each measuring point in Well 2 during the heating season

监测点深度/m	最低点温度/°C	最高点温度/°C	平均温度/°C	波幅/°C
10	12.62	16	13.99	3.38
20	12.37	15.87	13.80	3.5
30	12.81	16	14.08	3.19
40	12.62	15.93	13.98	3.31
50	12.62	16	14.02	3.38
60	12.87	16.12	14.23	3.25
70	13.12	16.25	14.40	3.13
80	13	16.25	14.38	3.25
90	13	16.25	14.38	3.25

续表 7 井 2 供暖季各测点温度波动特征

Table 7 Temperature fluctuation characteristics of each measuring point in Well 2 during the heating season

监测点深度/m	最低点温度/°C	最高点温度/°C	平均温度/°C	波幅/°C
100	13.25	16.37	14.56	3.12
110	12.87	16.12	14.27	3.25
120	13.5	16.5	14.72	3

4.4.3 供暖间歇季

由图 8 可以看出, 供暖季结束后进入间歇季, 地表下各测点温度逐渐恢复。供暖间歇季各测点最低温度均出现在供暖季刚结束时, 随着时间的变化, 间歇季地温逐渐恢复, 各测点最高温度出现在间歇季末端位置。随纵向监测点深度的增加, 测点平均温度也在逐步增加, 从地表下 10 米处测点 1 平均温度 15.83°C 递增到测点 12 的 17.35°C。因季节变化, 间歇季气温逐渐增高, 据地表测较近的测点温度波动幅度较大, 地下 50 米到地下 10 米处, 各测点波动幅度在 3-3.5°C, 而纵向深度较深的其余各测点, 温度波动幅度较小, 在 2.38-2.75°C 之间。进入五月中旬, 地源热泵机组开始为制冷季试运行, 机组刚开始启动时, 末端负荷较大, 土壤侧温

升较为明显, 运行一周左右后, 末端负荷逐渐平稳, 各测点温度也逐渐稳定。

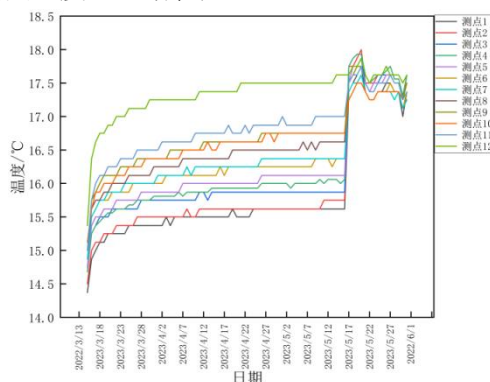


图 8 井 2 不同深度处供暖间歇季温度变化曲线

Fig.8 Temperature variation curve during intermittent heating seasons at different depths of Well 2

表 8 井 2 供暖间歇季各测点温度波动特征

Table 8 Temperature fluctuation characteristics of each measuring point in the intermittent heating season of Well 2

监测点深度/m	最低点温度/°C	最高点温度/°C	平均温度/°C	波幅/°C
10	14.37	17.75	15.83	3.38
20	14.5	18	15.93	3.5
30	14.75	17.87	16.11	3.12
40	14.68	17.93	16.19	3.25
50	14.75	17.75	16.24	3
60	15	17.62	16.35	2.62
70	14.87	17.62	16.39	2.75
80	15	17.75	16.54	2.75
90	15	17.75	16.70	2.75
100	15.12	17.5	16.64	2.38
110	15	17.75	16.82	2.75
120	15.37	17.87	17.35	2.5

4.4.4 制冷季

图 9 可以看出, 进入制冷季, 埋管开始向土壤排热, 地表下各测点周围土壤温度迅速升高, 测点最高温度在制冷季中期的地表 40 米处, 为 23.43°C; 各个测点最低温度均在制冷季开始时, 其中最低温度在测点深度 60 米、70 米和 100 米处, 都为 17.37°C。不同深度的测点温度波幅在 4.75-5.62°C 之间。夏季受高气温的影响, 地表侧温

度波动幅度相比于更深处测点波幅较大。随着监测点深度的增加, 各测点平均温度波动幅度不大。制冷季地源热泵运行初期, 地温快速上升, 尤其 7 月左右, 各测点温度急剧上升; 运行中期时各测点温度保持较高的温度一段时间后, 突然整体下降 2°C 左右。运行末期, 各测点温度波动幅度较平缓, 但仍存在沿纵向深度上的温差分布现象。

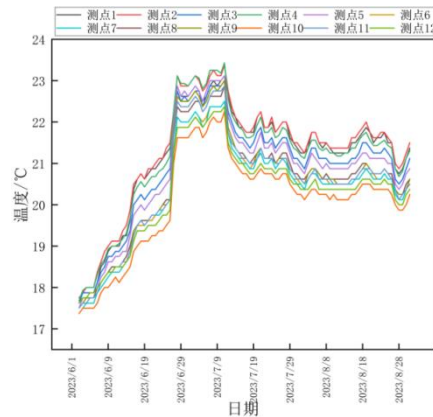


图 9 井 2 不同深度处制冷季温度变化曲线

Fig.9 Temperature Change Curve of Cooling Season at Different Depths in Well 2

表 9 井 2 制冷季各测点温度波动特征

Table 9 Temperature fluctuation characteristics of each measuring point in Well 2 during the cooling season

监测点深度/m	最低点温度/°C	最高点温度/°C	平均温度/°C	波幅/°C
10	17.5	23.12	21.2	5.62
20	17.75	23.37	21.32	5.62
30	17.62	23	20.94	5.38
40	17.68	23.43	21.19	5.75
50	17.5	23.12	20.83	5.62
60	17.37	22.5	20.41	5.13
70	17.37	22.5	20.40	5.13
80	17.5	22.87	20.56	5.37
90	17.5	23	20.56	5.5
100	17.37	22.25	20.10	4.88
110	17.5	22.87	20.52	5.37
120	17.62	22.37	20.30	4.75

对埋管侧运行周期内的地温监测数据分析得知，该项目地源热泵系统在运行 1a 后，不同深度处各测点温度均有不同程度的上升，其中，地下 10 米处测点 1 上升 2.24°C，测点 2 为 2.13°C，测点 3 为 1.96°C，测点 4 为 2.05°C，测点 5 为 1.94°C，测点 6 为 1.80°C，测点 7 为 1.79°C，测点 8 为 1.84°C，测点 9 为 1.79°C，测点 10 为 1.65°C，测点 11 为 1.81°C，测点 12 为 1.65°C。存在热累积现象，为保持地源热泵系统高效稳定运行，可以采用其他措施充分利用岩土体的换热能力，如在间歇季利用地源热泵系统制取生活热水使用，以减少热量积累^[10]。

5 结论

(1) 对河北省某高校埋管地源热泵系统运行监测表明，地源热泵系统夏季向地下排热量为

17090.2GJ，冬季从地层中的取热量为 6530.1GJ，系统向地下年净排热量为 10560.1GJ，热不平衡率为 61.8%，存在明显的热累积现象。

(2) 监测时间段内系统运行 1a 后，2022 年-2023 年同一时间段内，换热区域地层平均温度升幅在 1.65-2.24°C 之间，平均累计上升 1.89°C。

(3) 在寒冷地区，设计埋管地源热泵系统时应充分利用场地内岩土体的换热潜力，增加取热量向其他区域进行供热，同时可有效缓解热累积现象。

(4) 埋管地源热泵运行系统中应持续对地温场进行监测、分析，及时调整运行策略，以改善埋管换热器热平衡状况，保证地源热泵高效稳定运行。

参考文献:

- [1] 杨卫波,陈振乾,刘光远.土壤源热泵系统地下热平衡问题分析[C].中国制冷学会2009年学术年会论文集,2009:981-986.
- [2] 吴暄,刘卫,路子业,等.土壤蓄热-放热过程中埋管周围土壤温度特性模拟[J].农业工程学报,2017,33(3):204-213.
- [3] 梁欣阳,赵雪红,王青.埋管地源热泵工程运行换热区温度场变化特征分析[J].地下水,2022,44(6):11-16.
- [4] 郝梅.地源热泵系统埋管设计和热平衡分析[D].淮南:安徽理工大学,2022.
- [5] 徐秋敏,舒海文,端木琳.地源热泵地下埋管单管在大连夏季短时间运行的实验研究[J].制冷与空调,2005,(6):74-76.
- [6] 吕亮.浅析热平衡措施对上海地区地源热泵系统换热区域温度的影响[J].暖通空调,2023,53(8):53-57.
- [7] 李少华,林清龙,段新胜,等.杭州某埋管地源热泵系统地温场监测与分析[J].暖通空调,2020,50(8):70-74.
- [8] 孙婉,周念清,黄坚,等.地源热泵系统运行换热区内外地温场变化特征分析[J].太阳能学报,2017,38(10):2804-2810.
- [9] 纪宇乔,姜鸿基,曹慧哲,等.严寒地区深埋管热泵运行状态土壤平均温度研究[J].区域供热,2018,(5):58-64.
- [10] 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,(11):147-15.

(上接第359页)

- [42] Jiang Q, Ren Y, Yang Y, et al. Recent advances in carbon-based electrocatalysts for vanadium redox flow battery: Mechanisms, properties, and perspectives[J]. Composites Part B: Engineering, 2022:110094.
- [43] Xia L, Zhang Q, Wu C, Liu Y, et al. Graphene coated carbon felt as a high-performance electrode for all vanadium redox flow batteries[J]. Surface and Coatings Technology, 2019,358:153-158.
- [44] Li W, Zhang Z, Tang Y, et al. Graphene-nanowall-decorated carbon felt with excellent electrochemical activity toward $\text{VO}^{2+}/\text{VO}^{2+}$ couple for all vanadium redox flow battery[J]. Advanced science, 2016,3(4):1500276.
- [45] Park M, Jung Y, Kim J, et al. Synergistic effect of carbon nanofiber/nanotube composite catalyst on carbon felt electrode for high-performance all-vanadium redox flow battery[J]. Nano letters, 2013,13(10):4833-4839.
- [46] Liu J, Wang Z A, Wu X W, et al. Porous carbon derived from disposable shaddock peel as an excellent catalyst toward $\text{VO}^{2+}/\text{VO}^{2+}$ couple for vanadium redox battery[J]. Journal of Power Sources, 2015,299:301-308.