

土壤源热泵系统测试与设计方法研究

山占鹏, 杨昌智

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 土壤源热泵能否被进一步推广应用, 很大程度取决于其准确、可靠的测试与设计方法。现行规范中采用恒热流热响应法测试土壤的导热系数等热物性参数, 设计人员据此进行埋管量设计。然而, 受测试条件和理论模型限制, 整个测试过程及后续数据处理方法存在诸多不确定因素, 客观上造成通过测试较难提供准确的热物性参数, 设计时也难以准确计算所需埋管量。为解决这一问题, 首先基于线热源模型和理论分析, 提出了反映土壤侧换热规律的动态传热模型。其次, 进行恒温热响应测试, 研究土壤源热泵不同运行模式下的换热特性。实验验证结果表明, 建立的模型对恒温热响应测试出口温度的估计, 运行 5 h 后绝对误差小于 0.5 °C, 相对误差小于 2%。提出的土壤源热泵测试与设计方法, 可为土壤源热泵系统优化设计和高效运行提供理论指导。

关键词: 土壤源热泵; 传热模型; 换热特性; 测试方法; 设计方法

中图分类号: TU83; TK523

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)06-0835-07

Restudy on the test and design method of ground source heat pump system

SHAN Zhanpeng, YANG Changzhi

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: One of the keys to further popularize the application of ground source heat pumps (GCHP) lies in their accurate and reliable testing and design methods. In the current specification, the constant-heat flow thermal response method is used to test the thermal conductivity and other thermal parameters of the soil, and the designer designs the size of the ground heat exchanger (GHE) accordingly. Due to the limitation of test conditions and theoretical models, there are many uncertain factors in the whole test process and subsequent data processing method, which objectively make it difficult to provide accurate thermal property parameters through the test, and which also make it difficult to accurately calculate the required size of GHE during design. To solve these problems, based on the linear heat source model and theoretical analysis, this paper firstly proposes a dynamic heat transfer model reflecting the soil side heat transfer law. Secondly, the constant-temperature thermal response test is carried out to study the heat transfer performance and related influencing factors under different operating modes of GCHP. The experimental verification results show that the absolute error of the model established in this paper is less than 0.5 °C and the relative error is less than 2% for the estimation of the outlet temperature of the constant temperature thermal response test after 5 h of operation. The new method for testing and design of GCHP proposed in this paper can provide an important theoretical direction for the optimal design and efficient operation of GCHP.

Key words: ground source heat pump; heat transfer model; heat transfer performance; test method; design method

土壤源热泵作为一种浅层地热能利用技术, 因其效率高、不受季节气候影响, 易与其他能源耦合等特点, 受到越来越多的关注^[1-2]。目前, 土壤源热泵系统已广泛应用于住宅和公共建筑的采暖、制冷和生活热水, 安装量在不断增加^[3]。据报

道, 到 2017 年底, 中国已安装的地源热泵装机总量达 2 万兆瓦, 居世界第一^[4]。随着土壤源热泵的进一步推广应用, 准确、可靠的热响应测试和工程设计方法显得越来越重要。

对于土壤源热泵系统工程设计而言, 地埋管

收稿日期: 2021-07-26

修改稿日期: 2021-08-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578221)

第一作者: 山占鹏(1996—), 男, 硕士生, 主要从事可再生能源技术研究。E-mail: shan_zp@hnu.edu.cn

通信作者: 杨昌智(1963—), 男, 教授, 主要从事建筑节能方向研究。E-mail: yang0369@126.com

换热器(Ground heat exchanger, GHE)的换热能力是核心内容,该值取决于系统所处深度范围内土壤的综合热物性^[5],因此设计前须进行土壤热物性测试.传统土壤热物性参数主要是通过查表^[6]或者实验室取样测值^[7]的方法获得.目前,现场热响应测试被认为是确定热物性参数和 GHE 设计尺寸的一种可靠方法^[8-9],大型土壤源热泵系统设计前进行热响应测试已成为许多国家的普遍做法.我国现行的《地源热泵系统工程技术规范(2009 版)》^[10]沿用了这种现场测试技术,即采用恒流热响应法(Thermal response test, TRT)测试土壤的导热系数和钻孔热阻,进而由此计算给定传热温差下单位井深换热量的参考值,设计人员据此进行埋管量的设计.

由于 GHE 设计参数对土壤源热泵系统初投资具有重要影响,许多学者研究了提高热响应测试结果准确性的方法.对于换热模型解析和数值方法,许多学者进行了相关研究^[11-18].此外,人们也研发了一些新的热响应测试方法^[19-21].尽管目前进行了大量的研究工作,但目前通常的土壤源热泵设计方法是基于 TRT,通过数值或解析模型间接计算埋管换热能力.受测试条件和理论模型限制,存在以下不足:(1)TRT 无法直接计算 GHE 的瞬态换热能力,基于 TRT 的间接计算会因 GHE 精确的几何细节(如回填材料的热物性等)较难准确获得^[22]而导致结果不准确;(2)TRT 假定注入土壤的热流为单孔的预期负荷,但由于土壤自然对流的存在,使得合适的热流注入速率难以准确确定^[23].工程中通常选择 30~80 W/m 间任意值^[24]的做法增加了现场测试结果的不确定性;(3)GHE 瞬态换热量随系统运行的变化在设计前无法预知,导致设计阶段有时会使用过多的辅助热源或应用较大的安全系数对系统进行过度设计,进一步造成初投资浪费.

恒温热响应测试是近年来出现的一种测试方法,该方法可直接获得 GHE 单位井深换热量.目前陆续有学者对恒温热响应测试进行了研究.Wang 等^[25]通过改进 TRT 装置进行了恒温热响应测试,结果表明与传统的恒流法相比,恒温热响应测试具有精度更高、实现稳态时间更短、温度测试范围更广等重要优点.Yu 等^[26]通过恒温热响应测试估算了土壤导热系数,结果表明恒温热响应测试可以明显缩短 GHE 与周围土壤达到稳态传热的时间.Aydin 等^[27]提出了一种通过恒温热响应测试计算土壤导热系数的新方法,该方法无需

估计土壤热容.此外,Choi 等^[28]提出了一种新的恒温热响应测试装置,并估算了 GHE 的设计参数.Jia 等^[29]使用可以同时进行注热和取热的恒温热响应测试装置,估算了土壤导热系数.

为进一步解决工程设计中存在的上述问题,结合恒温热响应测试测试时间短、运行稳定性好的优点,本文提出一种土壤源热泵系统测试与设计方法.该方法首先基于线热源模型和理论分析,提出了反映土壤侧换热规律的恒温热响应测试动态传热模型,并通过现场测试验证了模型的正确性.其次,通过恒温热响应测试,研究了不同模式下 GHE 的传热特性.最后,针对不同运行模式下土壤源热泵系统的工程设计,特别是间歇运行,提出单位井深换热量积分平均值的新指标,该指标可避免因采用连续运行模式下 GHE 换热量稳态值而有可能导致的系统设计容量过大问题.本文所提出的新的测试方法规避了 TRT 测试时,因求解土壤导热系数和钻孔热阻等热物性参数而产生的不确定因素,通过恒温热响应测试可较准确、快速地计算出 GHE 的瞬态换热量的值.本文所提出的土壤源热泵测试与设计方法,可为土壤源热泵系统设计和运行提供一定理论指导.

1 恒温热响应测试传热模型

根据无限线热源模型,埋管流体的过余温度响应可写成时间与距离的函数,当 $\alpha\tau/r^2 \geq 5$ 时,如式(1)所示^[30].

$$T(r, t) - T_0 = \frac{Q}{4\pi\lambda H} E_i\left(\frac{r^2}{4\alpha\tau}\right) \approx \frac{Q}{4\pi\lambda H} \left[\ln\left(\frac{4\alpha\tau}{r^2}\right) - \gamma \right] \quad (1)$$

式中: $T(r, t)$ 为 τ 时刻半径 r 处的土壤温度,℃; T_0 为土壤远边界初始温度,℃; Q 为埋管热流, W; H 为钻孔深度, m; λ 为土壤导热率, W/(m·℃); α 为土壤热扩散系数, m²/s; γ 为欧拉常数, $\gamma=0.577\ 2$.

令钻孔灌浆回填材料的热阻为 R_b ,则由传热学理论,埋管内流体平均温度与钻孔壁温之间的关系可表示为式(2).

$$T_f - T_b = \frac{Q}{H} R_b \quad (2)$$

$$Q = c_f M (T_{out} - T_{in})$$

$$T_f = \frac{(T_{in} + T_{out})}{2} \quad (3)$$

式中, c_f 为循环流体质量比热, J/(kg·℃); T_{in} 为 GHE 进口温度测量值,℃; T_{out} 为 GHE 出口温度测量值,℃; T_f 为 GHE 内流体平均温度,℃;

T_b 为钻孔壁温, $^{\circ}\text{C}$; M 为循环流体质量流量, kg/s .

结合式(3), 令 $r=r_b$, 由式(1)和式(2)可得出埋管内流体出口温度随时间的变化关系式:

$$\frac{\theta_0}{\theta} = k_1 M \ln \tau + k_2 M - \frac{1}{2} \quad (4)$$

$$\theta_0 = T_{\text{out}} - T_0, \theta = T_{\text{in}} - T_{\text{out}} \quad (5)$$

$$k_1 = \frac{c_f}{4\pi\lambda H} \quad (6)$$

$$k_2 = \left[c_f \left(\frac{\ln(\frac{4\alpha}{r_b^2}) - \gamma}{4\pi\lambda H} + \frac{R_b}{H} \right) \right] \quad (6)$$

分析式(4)可以看出, 需要确定两个未知参数, 反映土壤热物性的参数 k_1 和 k_2 . 对于一个确定的钻孔来说, 孔深、管径、回填材料等均为常数, 其进出口温度无量纲数仅与流量和运行时间有关. 由于土壤注入热流 Q 已知, 故给定初始设计的进出口温差 θ 时, 流量 M 便可确定. 此时, 固定 GHE 的入口温度(例如 35°C), GHE 出口温度 T_{out} 是 $\ln \tau$ 的一次函数. 通过恒温热响应测试在稳定运行期间所获得的流量 M 及不同时刻进出口温度 ($T_{\text{in}}, T_{\text{out}}$), 便可根据式(4)确定热物性参数 k_1 、 k_2 的值.

进一步, 可得单位井深换热量为

$$q_1 = \frac{c_f M (T_{\text{in}} - T_{\text{out}})}{H} \quad (7)$$

上述基于线热源恒温热响应动态传热模型的实际意义在于: 可以通过热响应测试获得反映土壤热物性的参数 k_1 和 k_2 ; 利用该传热模型, 结合热泵模型可构成整个土壤源热泵系统动态仿真模型, 进行土壤源热泵系统设计和优化. 因为热泵性能与 GHE 的传热特性是通过流体温度来耦合的, 所以在给定房间负荷及 GHE 设计进口温度的条件下, 可通过迭代确定运行一定时间后流体出口温度值, 从而可以简单、快速计算出单位井深瞬时换热量, 计算过程详见图 1.

2 GHE 传热性能实验研究

2.1 实验系统介绍

本实验于 2021 年 4 月 20 日至 5 月 20 日在湖南省长沙市进行, 实验装置示意图如图 2 所示, 主要包括: 循环管路系统、PID 控制系统及测量系统. 其中地下埋管部分由一个埋设有外径 32 mm、内径 26 mm 的高密度聚乙烯垂直单 U 型管的钻孔组成, 钻孔直径 150 mm, 井深为 18.8 m, 采用膨润土-砂浆混合物回填. 图 3 是现场恒温热响应测试平台. 实验使用的设备型号参数如表 1 所示.

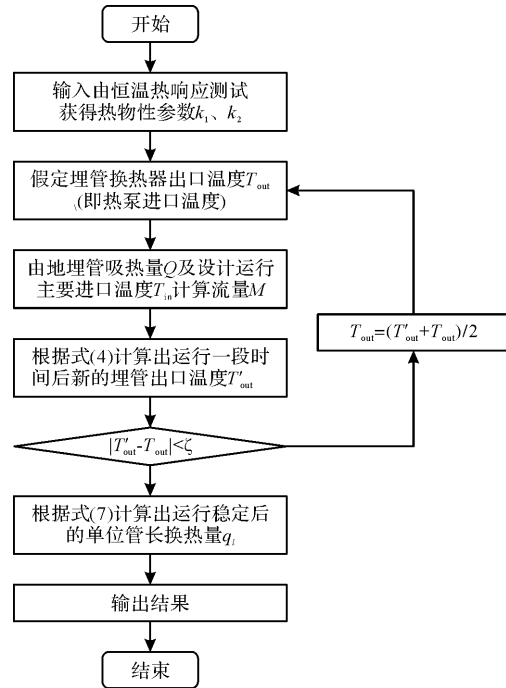


图 1 恒温热响应动态传热模型应用计算程序框图

Fig. 1 Flow chart of the constant-temperature TRT dynamic heat transfer model calculation and application

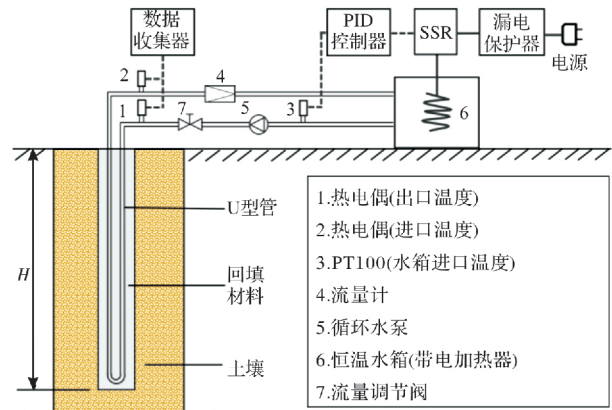


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the test rig



图 3 恒温热响应测试平台

Fig. 3 Test rig of the constant-temperature TRT

保温水箱内设置功率为 4 kW 电阻加热器, 通过与 PID 控制器结合控制进口温度恒定. 其原理是

PID 控制器根据地埋管进口处 PT100 传感器测量的入口温度和设定温度之间的差值,将所需要的输出发送到电磁继电器(SSR),SSR 通过控制电阻加热器频率调节加热器的实时输出,来保证 GHE 进口温度恒定.流量通过控制阀调节.在实验期间,暴露在室外环境中的管道和水箱进行保温处理,最大限度减少外部环境传热干扰.该测试系统相比传统 TRT 装置,在原先设备基础上增加了 PID 控制系统,因此成本也会随之增加.

该测试所用的仪器及其精度如表 2, GHE 进出口温度采用 PT100 铂电阻传感器测量,分别设置在 GHE 出水和回水管道上,每 5 秒自动测量一次.流量采用电磁流量计测量,用钳形电流表测量电加热器的功率.

表 1 测试使用的设备参数

Tab. 1 Parameters of the equipment used in this test

组成部分	参数	值
循环水泵	流量	2.5 m ³ /h
	功率	750 W
PID 控制器	控制精度	±0.1 ℃
保温水箱	体积	120 L
电加热器	加热功率	4 kW(最大)

表 2 测量仪器及其精度

Tab. 2 Measuring instruments and their accuracies

仪器	型号	测量范围	精度
PT100	HR-WZP	-5~200 ℃	±0.1 ℃
K 型热电偶	绎捷 R7600	0~1 300 ℃	±0.1 ℃
钳形电流表	UT216D	0~60 A	0.1 A
		0~600 V	0.1 V
流量计	KROHNE H320	0.5~5 m ³ /h	±1.0%

2.2 实验内容

从 2021 年 4 月底开始,设定进口温度 37 ℃,进行多次连续运行和间歇运行实验.实验中流量 0.72 m³/h,通过测试比较 GHE 在不同运行模式下的传热特性.

2.3 土壤初始温度

本次测试开启电加热之前,先开启循环水泵让水在钻孔中循环. GHE 进出口温度每隔 5 秒测量一次,直到进出口温度达到稳定状态(5 h 内温度相差不超过 0.1 ℃),以此作为地下土壤的初始温度.在现场测试中发现,经过 40 h 后进出口温度趋于一致,测量值为 19.8 ℃,因此将 19.8 ℃作为未受扰动的土壤初始温度.

2.4 模型验证

本文建立了恒温热响应测试传热模型,将进口温度和流量作为模型输入参数,通过对比 GHE 出

口温度计算值与实测值的一致性进行模型验证.已知钻孔的相关参数:钻孔深度 H 为 18.8 m,钻孔半径 r_b 为 0.055 m,土壤导热率 λ 为 2.52 W/(m·℃),土壤热扩散系数 α 为 9.2×10^{-7} m²/s,钻孔热阻 R_b 为 0.12 m·℃/W.由现场的测试,得到土壤的初始温度 19.8 ℃.进口温度设定为 37 ℃、流量为 0.32 m³/h.图 4 给出了夏季工况下连续运行 48 h GHE 出口温度计算值和实测值的变化曲线,图 5 为其误差分析.

由图 4 可知, GHE 出口温度计算值与实测值吻合度较好.开始的 5 h 内出口温度随进口温度的波动具有明显的振荡变化,此后逐渐趋于稳定.分析图 5 可得,实测进口温度到达设定值 37 ℃后的最大超调量为 0.5 ℃.前 5 h 内, GHE 出口温度的计算值与实测值绝对误差较大,最大绝对误差达 4 ℃,此后随着运行时间的增加绝对误差逐渐减小.主要原因是钻孔内传热由刚开始的非稳态逐渐向稳态过渡.进一步分析可以看出,当系统连续运行经过 15 h 后,计算值与实测出口温度之间的绝对误差均小于 ±0.1 ℃,相对误差均在 2%以内,表明 GHE 换热模型与实验结果具有很好的一致性.

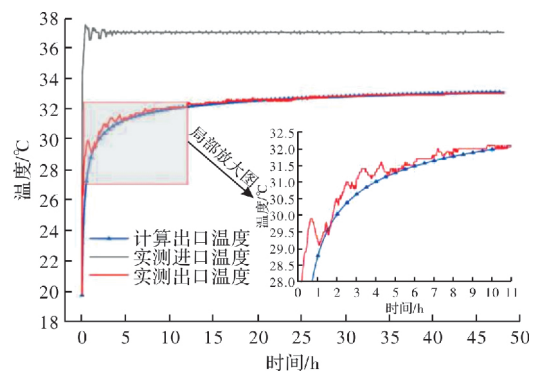


图 4 GHE 出口温度计算值与实测值的对比

Fig. 4 Comparison of outlet temperature of GHE for calculated value and test value

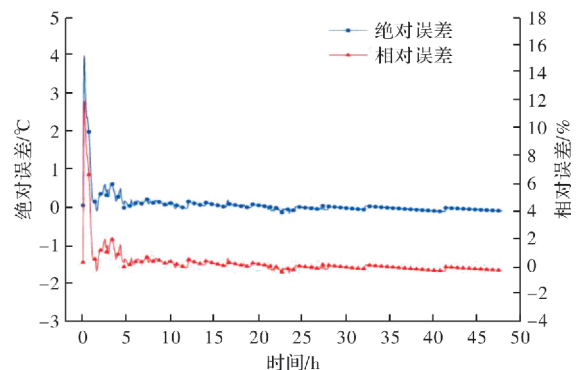


图 5 GHE 出口温度计算值与实测值误差分析

Fig. 5 Error analysis for calculated and test outlet fluid temperature of GHE

3 实验结果与分析

本节对 GHE 在不同运行模式下传热特性的实验结果进行了介绍和分析。

3.1 连续运行

图 6 所示为连续运行 48 h 下 GHE 的出口温度和单位井深换热量随时间的变化。分析图 6 可知,开始的 5 h 内 GHE 出口温度迅速上升,此后随着运行时间的增加趋于平缓。如第 5 小时内温升为 0.2°C ,而在第 10 小时内温升不足 0.1°C ,超过 35 h 后出口温度为 35.1°C ,5 h 内温升不超过 0.1°C ,达到稳定状态,此时的温差为 1.9°C 。这主要是因为土壤源热泵在启动开始一段时间传热是不稳定的,但当运行一段时间后会逐渐达到稳定状态,此时 GHE 的各特性参数变化比较缓慢。此外可以看出,单位井深换热量随运行时间的增加表现为先急剧下降后趋于平缓,运行 35 h 稳定后单位井深换热量为 42.2 W/m 。分析可知,主要原因是连续运行导致地温升高,埋管内流体与土壤间温度梯度变小,换热能力下降。

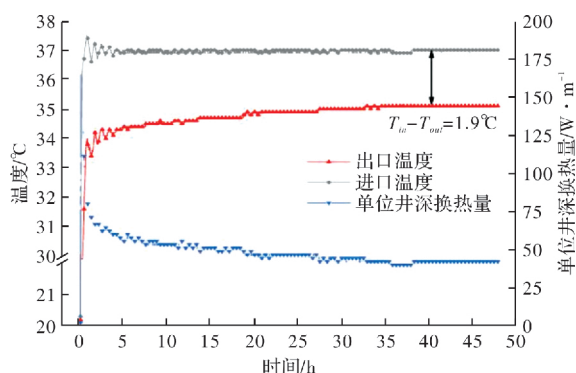


图 6 连续运行下 GHE 的传热特性

Fig. 6 Heat transfer performance of GHE under different operation modes

根据《地源热泵系统工程技术规范》(2009 版)》^[10]的要求,在工程应用中,当水温 12 h 内波动不超过 1°C 时达到稳态。恒温法热响应测试达到稳态的时间约为 35~40 h,TRT 则约为 55~60 h^[26]。本文实验表明达到稳态时间约为 35 h,与 TRT 相比,恒温热响应测试可以缩短测试周期。因此,随着土壤源热泵的进一步推广和应用,对缩短测试持续时间的需求也日益增加,恒温热响应测试是一种较好的解决方法。

3.2 间隙运行

图 7 所示为间歇运行(间歇比 1:1)48 h 下 GHE 的出口温度和单位井深换热量随时间的变化。分析图 7 可以看到,间歇运行下 GHE 出口温

度和温差随运行时间在小范围内波动,但无明显的上升趋势,稳定后的进出口温差为 2.5°C 。单位井深换热量表现为周期性的波动变化,刚开始运行的前 5 h 急剧下降,稳定后趋于平缓。分析可知,前 5 h 内,埋管中的温度与土壤间温度梯度大,换热量大;随着系统运行时间的增加,运行稳定后单位井深换热量为 55.6 W/m 。

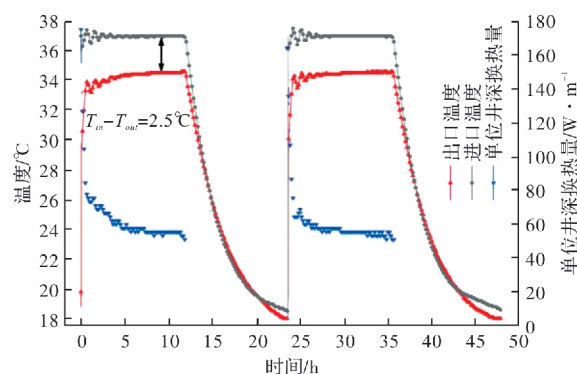
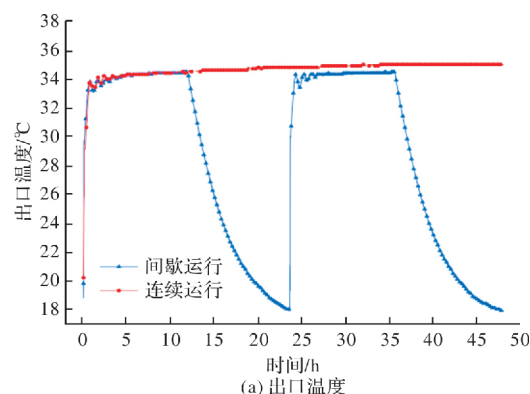


图 7 间歇运行下 GHE 的传热特性(间歇比 1:1)

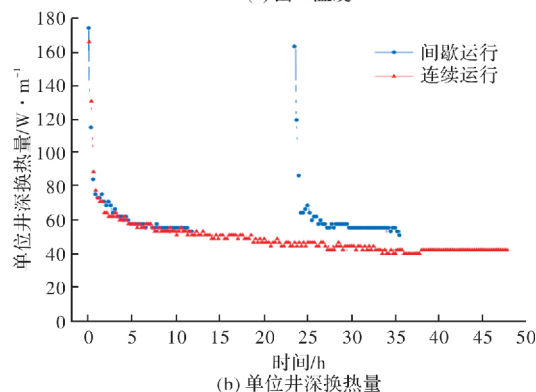
Fig. 7 Heat transfer performance of GHE under different operation modes (intermittent ratio 1:1)

3.3 对比与讨论

图 8 给出了两种不同运行模式下 GHE 传热性能的对比。



(a) 出口温度



(b) 单位井深换热量

图 8 不同运行模式传热性能的对比

Fig. 8 Comparisons of heat transfer performance under different operation modes

分析图 8(a)可以看出,开始启动时两种运行

模式的出口温度随时间变化的规律一致. 运行 35 h 后, 连续运行出口温度为 35.1 °C, 间歇运行出口温度为 34.5 °C, 两者相差 0.6 °C. 由图 8(b)可知, 刚开始启动的 12 个小时内, 两种运行模式的单位井深换热热量几乎相同, 但随着运行时间的增加, 连续运行模式下的单位井深换热热量逐渐下降, 35 h 后间歇运行的单位井深换热热量比连续运行高达 13.4 W/m.

由此不难发现, 相同的进口温度和流量, GHE 间歇运行下出口温度更低, 单位井深换热热量更大, 换热效率也更高, 且随运行时间的增加, 对传热性能的影响更加明显. 主要原因是间歇运行相较连续运行, 积聚在 GHE 周围的热量有更多的时间可以扩散, 土壤温升更小, 从而使换热得到加强.

值得注意的是, GHE 的换热能力现有的研究大多数都是根据式(7)来计算, 在土壤源热泵系统工程设计中常采用以该方法为基础的 GHE 换热性能的稳态值(如本文连续运行 35 h 后的单位井深换热热量)作为依据. 显然, 该方法更多地侧重于土壤源热泵系统在连续运行模式下换热性能瞬态值的计算, 并未考虑在热响应测试在达到稳定状态之前的换热时间. 其次, 实际的系统运行工况更多的是间歇运行, 因而采用连续运行模式下 GHE 换热性能的稳态值, 可能会导致系统设计容量偏大. 为进一步反映地 GHE 在连续运行和间歇运行两种不同模式下的综合换热特性, 本文提出了一个考虑系统不同运行模式和运行时间的新指标 Q_{av} , 其定义如下:

$$Q_{av} = \int Q d\tau / \Delta\tau = \begin{cases} \frac{\int Q d\tau}{\Delta\tau}, & \text{连续运行.} \\ \frac{\sum_{i=1}^n \int Q_i d\tau}{\sum_{i=1}^n \Delta\tau_i}, & 0 \leq i \leq n, \text{间歇运行.} \end{cases} \quad (8)$$

式中: Q_{av} 表示埋管热流的积分平均值, W; $\Delta\tau$ 表示运行时间, s; i 表示间歇运行的第 i 个启动时段. 对于连续运行, Q_{av} 就是求运行时间内 GHE 瞬态换热量的积分平均值; 对于间歇运行, 则是将各启动时段内的换热量和运行时间求和, 再计算其平均值. 进一步, 单位井深换热热量 q_l 的积分平均值可以表示为

$$q_{av} = \frac{Q_{av}}{H} \quad (9)$$

式中, q_{av} 为单位井深换热量的积分平均值, W/m.

基于 q_{av} 的研究结果, 本文通过实验测试数据, 利用该指标对 GHE 在连续运行和间歇运行模式下的换热性能进行计算, 结果如图 9 所示. 可以看出, 间歇运行下单位井深换热量的稳态值和积分平均值均比连续运行高, 再次表明间歇运行可以提升土壤源热泵的换热性能. 其次, 连续运行下单位井深换热量的稳态值为 42.2 W/m, 积分平均值为 49.1 W/m, 两者相差 6.9 W/m; 间歇运行下的稳态值为 55.6 W/m, 积分平均值为 61.4 W/m, 两者相差 5.8 W/m. 两种模式下, 单位井深换热量的积分平均值均比稳态值高. 究其原因, 主要是积分平均值考虑了测试在达到稳态之前的运行时间的加权作用. 基于实际运行大多为间歇运行的特点, 该指标相比式(7)的计算方法, 更能反映 GHE 的传热特性. 采用该值作为设计参考值, 可以避免因采用稳态值而可能导致的系统容量过大, 造成初投资浪费的问题, 同时设计时也能保证整个季节的运行安全.

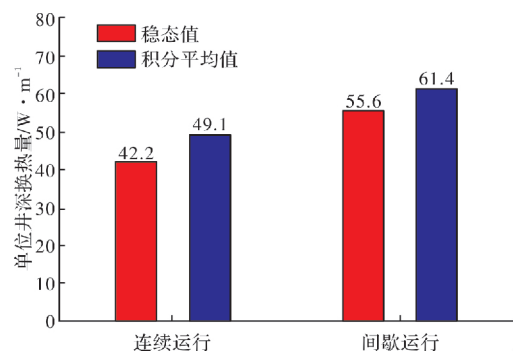


图9 不同运行模式下单位井深换热热量的稳态值和积分平均值

Fig. 9 Steady-state value and integral average of the heat transfer rate per unit depth of borehole under different operation modes

4 结论

本文针对土壤源热泵系统在工程设计中存在的 TRT 较难提供准确热物性参数、埋管计算量不准确问题, 提出了一种土壤源热泵系统测试与设计方法, 主要结论如下:

(1) 提出的土壤源热泵系统测试与设计方法, 可通过恒温热响应测试直接确定土壤热物性的参数 k_1 和 k_2 , 进而快速、准确计算 GHE 出口温度和单位井深换热热量. 该方法规避了 TRT 因求解土壤导热系数和钻孔热阻等热物性参数而产生的不确定因素, 可为土壤源热泵工程设计提供理论指导;

(2)本文建立的恒温热响应测试动态传热模型对 GHE 出口温度的估计,同实验结果相比,运行 5 h 后绝对误差小于 0.5 °C,相对误差小于 2%,在工程应用中具有可行性^[8];

(3)实验研究结果表明,间歇运行相较连续运行,可提升 GHE 的换热性能.本文提出的单位井深换热量积分平均值新指标,考虑了土壤源热泵系统不同运行模式和运行时间的影响,可有效避免因采用传热稳态值而导致的系统容量设计过大问题.

参考文献 References

- [1] LI H, XU W, YU Z, et al. Discussion of a combined solar thermal and ground source heat pump system operation strategy for office heating [J]. *Energy and Buildings*, 2018,162:42-53.
- [2] WANG Z, WANG F, LIU J, et al. Field test and numerical investigation on the heat transfer characteristics and optimal design of the heat exchangers of a deep borehole ground source heat pump system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017,153:603-615.
- [3] QIAO Z, LONG T, LI W, et al. Performance assessment of ground-source heat pumps (GSHPs) in the Southwestern and Northwestern China[J]. *Renewable Energy*, 2020,153:214-227.
- [4] 本刊讯.《中国地热能发展报告(2018)》白皮书发布[J]. *地质装备*, 2019,20(2):3-6.
News of this edition.《China Geothermal Energy Development Report (2018)》White Paper Released[J]. *Geological equipment*, 2019,20(2):3-6.
- [5] 杨卫波. 土壤源热泵技术及应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2015.
YANG Weibo. *Soil source heat pump technology and its application* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015.
- [6] KAVANAUGH S P, RAFFERTY K. Ground-source heat pumps: Design of geothermal systems for commercial and institutional buildings[M]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 1997.
- [7] ASHRAZ. SW—Soil and water: measurement of the thermal conductivity of sandy loam and clay loam soils using single and dual probes[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2001,80(2):209-216.
- [8] ASHRAE. ASHRAE Handbook-HVAC applications (SI)[M]. Atlanta:ASHRAE, Inc., 2011.
- [9] SKOUBY A. Closed-loop/geothermal Heat Pump Systems: Design and Installation Standards[Z]. Oklahoma; International Ground Source Heat Pump Association, 2010.
- [10] 中国建筑科学研究院. 地源热泵系统工程技术规范: GB50366—2005 第2版(2009年版) [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009.
China Academy of Building Research. Technical code for ground-source heat pump system:GB 50366—2005 (2009 Edition) [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [11] CARSLAW H S, JAEGER J C. Conduction of heat in solids[M]. London:Clarendon press, 1947.
- [12] INGERSOLL L R, ZOBEL O J, INGERSOLL A C. Heat conduction: With engineering geological and other applications[J]. *Physics Today*, 1955,8(3):17.
- [13] ESKILSON P. Thermal analysis of heat extraction boreholes[D]. Sweden: University of Lund, 1987.
- [14] GEHLIN S E, HELLSTROM G. Comparison of four models for thermal response test evaluation[J]. *ASHRAE transactions*, 2003,109:131.
- [15] SHONDER J A, BECK J V. A new method to determine the thermal properties of soil formations from in situ field tests[R]. Rept. ORNL/TM-2000. Tennessee: Oak Ridge National Laboratory (US), 2000,97.
- [16] YAVUZTURK C, SPITLER J D. A short time step response factor model for vertical ground loop heat exchangers[J]. *ASHRAE Transactions*, 1999, 105(2): 475-485.
- [17] SIGNORELLI S, BASSETTI S, PAHUD D, et al. Numerical evaluation of thermal response tests [J]. *Geothermics*, 2007,36(2):141-166.
- [18] GEHLIN S. Thermal response test: Method development and evaluation[D]. Lulea, Sweden: Lulea University of Technology, 2002.
- [19] RAYMOND J, LAMARCHE L, MALO M. Field demonstration of a first thermal response test with a low power source[J]. *Applied Energy*, 2015,147:30-39.
- [20] FUJII H, OKUBO H, NISHI K, et al. An improved thermal response test for U-tube ground heat exchanger based on optical fiber thermometers[J]. *Geothermics*, 2009,38(4):399-406.
- [21] ACUÑA J, PALM B. Distributed thermal response tests on pipe-in-pipe borehole heat exchangers[J]. *Applied Energy*, 2013,109:312-320.
- [22] CHOI W, OOKA R. Development of TPRT (thermal performance-response test) for borehole heat exchanger design[C]// In Proceedings of IGHSPA Technical/Research Conference and Expo. Denver: IGHSPA, 2017, 240-247.