

文章编号: 1673-9469(2012)01-0058-04

影响埋管换热器侧换热量因素分析

王景刚¹ 盛宏¹ 柳延超¹ 于海² 张春华²

(1. 河北工程大学 城建学院 河北 邯郸 056038; 2. 吉林市热力有限公司 吉林 吉林 132002)

摘要: 利用线热源模型, 结合约束最优化方法, 使用河北工程大学自主研发的岩土热物性测试仪, 测试并计算出石家庄市正定区岩土综合导热系数和埋管侧换热量值。根据测试结果, 分析实验中的测试时间、埋管内进出口水温平均值、测试功率等因素对埋管换热量的影响。测试结果表明: 20 h 后, 测试计算出的岩土综合导热系数趋于稳定; 岩土综合导热系数、埋管内进出口水温平均值、测试功率对埋管侧换热量值有影响, 且影响依次减少。

关键词: 岩土热物性测试; 埋管侧换热量; 影响因素

中图分类号: TU832

文献标识码: A

The analyses on influence factors of heat transfer rate of u - tube ground heat exchanger

WANG Jing - gang¹, SHENG Hong¹, LIU yan - chao¹, YU Hai², ZHANG Chun - hua²

(1. College of Urban Construction, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China; 2. Jilin Heating Limited company, Jilin Jilin 132002, China)

Abstract: Based on the theory of line - heat - resource, the soil comprehensive thermal conductivity coefficient and heat transfer rate of u - tube ground heat exchanger are tested and calculated in Zhengding of Shijiazhuang area with the constraint optimization method and using the soil thermal physical instrument produced by the Hebei University of Engineering. According to the experiment results, the impact factors of time step, average temperature of inlet, outlet u - tube ground heat exchanger and heating power on the heat transfer rate of u - tube ground heat exchanger were discussed. The results show that the comprehensive thermal conductivity of the soil tends to be stable after 20 hours; the comprehensive thermal conductivity of the soil, the average temperature of inlet and outlet u - tube ground heat exchanger, and the heating power could influence the heat transfer rate of u - tube ground heat exchanger, and the influence would reduce successively.

Key words: soil thermal physical properties test; heat transfer rate of u - tube ground heat exchanger; influence factors

在地源热泵设计中, 影响计算埋管换热量的因素很多, 其中地下岩土综合导热系数尤为重要^[1]。根据 Kavanaugh 的研究表明, 当地下岩土综合导热系数存在 10% 的偏差时, 地下埋管换热器长度会有 4.5% ~ 5.8% 的偏差^[2]; 另外, 埋管内进出口水温平均值和测试功率也对地下埋管换热量有影响。Ingersoll 和 Plass 提出的线热源理论^[3-4] 是研究埋管侧传热情况的基本模型, 方

法简单方便, 但是结果不够精确, 张燕^[5] 曾利用此理论对地下埋管换热进行动态模拟。陈旭等^[6] 利用热渗耦合理论对埋管单位井深换热量的影响因素进行分析, 由于热渗耦合理论综合考虑固体和流体在非等温渗流时的能量方程, 所以计算结果更加精确, 但是相对线热源理论更加复杂。约束最优化方法^[7] 是用来求解非线性约束条件最优化问题的数值迭代方法, 通过对目标函数使用约

束条件和进行迭代计算,能提高计算结果准确程度,对计算结果起到优化调整的作用。本文利用线热源理论,结合约束最优化方法,分析实际情况下不同因素对埋管换热量的影响。

1 测量原理和方法

1.1 测量原理

将线热源理论用于地下埋管换热器的设计计算并进行简化,得到 t 时刻埋管内流体平均温度 T_f 为^[8-9]

$$T_f = T_{ff} + \frac{Q}{H} \left[R_b + \frac{1}{4\pi\lambda_s} \text{Ei} \left(\frac{d_b^2 \cdot \rho_s \cdot c_s}{16\lambda_s t} \right) \right] \quad (1)$$

式中: T_{ff} - 无穷远处未受扰动土壤温度, °C; Q - 埋管侧换热量, W; H - 钻孔长度, m; R_b - 钻孔内传热热阻, (m · K) / W; λ_s - 岩土综合导热系数, W / (m · K); d_b - 钻孔直径, m; $\rho_s \cdot c_s$ - 体积比热容, J / (m³ · °C); $\text{Ei}(x)$ - 指数积分函数, $\text{Ei}(x) = \int_x^\infty \frac{e^{-s}}{s} ds$ 。

当 $x \geq 5$ 时, $\text{Ei}(x) = \ln\left(\frac{1}{x}\right) - \gamma$, γ - 欧拉常数 $\gamma = 0.577$, 令

$$k = \frac{Q}{4\pi\lambda_s H}$$

$$m = \frac{Q}{H} \left\{ \frac{1}{4\pi\lambda_s} \left[\ln\left(\frac{16\lambda_s t}{d_b^2 \cdot \rho_s \cdot c_s}\right) - \gamma \right] + R_b \right\} + T_{ff}$$

则式(1)简化为

$$T_f = k \ln(t) + m \quad (2)$$

根据《地源热泵系统工程技术规范》^[10], 采集已经测试的数据, 将其与约束最优化方法^[8]程序模拟的结果进行对比, 使得方差和函数 f 最小, 此时 λ_s 值是所求结果。

$$f = \sum_{i=1}^N (T_{cal_i} - T_{exp_i})^2 \quad (3)$$

式中 T_{cal_i} - 第 i 时刻由模型算出来的埋管中流体的平均温度, °C; T_{exp_i} - 第 i 时刻实际测出的流体的平均温度, °C; N - 实验测量数据的组数。

1.2 测量装置

本次测试采用河北工程大学自主研制的便携式岩土热物性测试仪。测试仪由进水管, 出水管, 流量计, 温度计, 循环水泵, 调节阀, 闸阀, 电加热器, 恒温水箱, 数据采集系统和计算机控制及处理装置组成, 如图 1 所示。

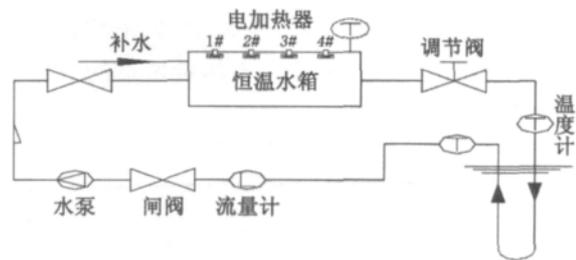


图1 岩土热物性测试仪原理图

Fig.1 The schematic diagram of soil thermal physical instrument

2 案例分析

2.1 测试工况和结果

测试地点为石家庄市正定区塔元庄村, 测试时间为 2010 年 11 月 22 日至 12 月 01 日。

测试功率 3 kW; 大地初使温度 16.5 °C; 采用单 U 型管埋管方式, 埋管深度 112 m; 钻孔直径 150 mm; 埋管直径 De32; 埋管内流速 0.252 m/s; 埋管内流量 0.73 m³/h; 管材用 HDPE; 埋管回填材料为砂土; 地下水位 30 m; 水径流方向由西向东, 水径流速度 30 m/s; 恒热流总时间 230 h; 测试时间 78 h。测试结果见表 1。

表 1 换热量测试结果

Tab.1 Results of heat transfer rate

求解变量	数值	求解变量	数值
测试功率/kW	3	调优后埋管侧换热量/W	1 985.1
初始探值/[W · (m · °C) ⁻¹]	1.59	调优前单位井深换热量/(W · m ⁻¹)	18.22
优化值/[W · (m · °C) ⁻¹]	1.55	调优后单位井深换热量/(W · m ⁻¹)	17.72
调优前埋管侧换热量/W	2 041	稳定后进出口水温/°C	27.67/24.60

从测试结果表 1 可以看出,优化值比初始探值小 0.04,调优后的单位井深换热量比调优前的小,此测试方法简单方便,当测试时间足够长,测试结果准确。

2.2 岩土综合导热系数对埋管换热量影响分析

岩土综合导热系数 λ_s 随时间变化如图 2 所示,可以看出 λ_s 在 20 h 之前趋于 5% 的波动区域内,在随后的时间里 λ_s 波动范围不大;换热量随 λ_s 变化见图 3,随着 λ_s 增加,地埋管换热量的增量先是增加很多,然后增量逐渐减少,岩土综合导热系数每增加 $1 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$,换热量增量的均值是 2 500 W。

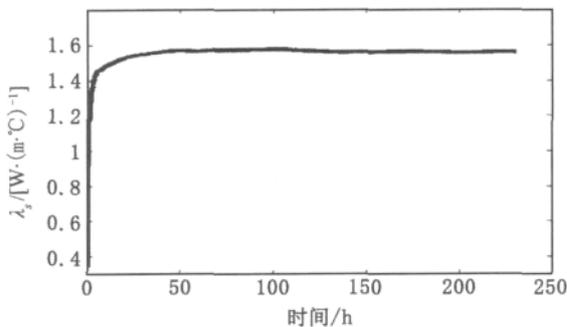


图2 λ_s 随时间变化曲线

Fig.2 The diagram of curve on λ_s with time

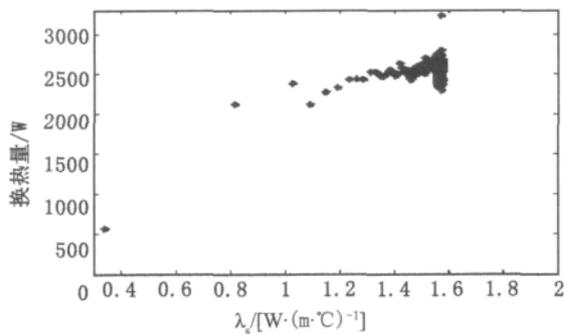


图3 换热量随 λ_s 变化曲线

Fig.3 The diagram of curve on heat transfer rate with λ_s

2.3 其他因素对埋管换热量影响分析

其他因素对埋管侧换热量影响见图 4,其中图 4 (a) 表示流体平均温度随时间变化,图 4 (b) 表示换热量随时间变化,图 4 (c) 表示功率随时间变化。由图 4 (a) 可知,随着测试时间增加,40 h 后地埋管内流体温度平均值由陡逐渐变缓,趋于稳定,稳定在 $25.543 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右;由图 4 (b) 可知,地埋管侧换热量值在 10 h 内已经趋于稳定,稳定在 2

564.5 W 左右,且在 40 h 后的变化趋势与埋管内流体温度平均值波动趋势一致,这是因为整个地埋管的流体平均温度与土壤初始温度的温差增加,导致地埋管测换热量增加,流体平均温度每变化 $1 \text{ }^\circ\text{C}$,换热量约变化 250 W。图 4 (c) 可以看出向地埋管侧注入的功率并不恒定,有一些波动,这种波动是由于电压不稳或者大地周围的震源引起的;由图 4 (b) 可知,地埋管侧换热量与功率的上下波动趋势一致,功率变化 1 W,地源测埋管换热量变化 0.71 W。

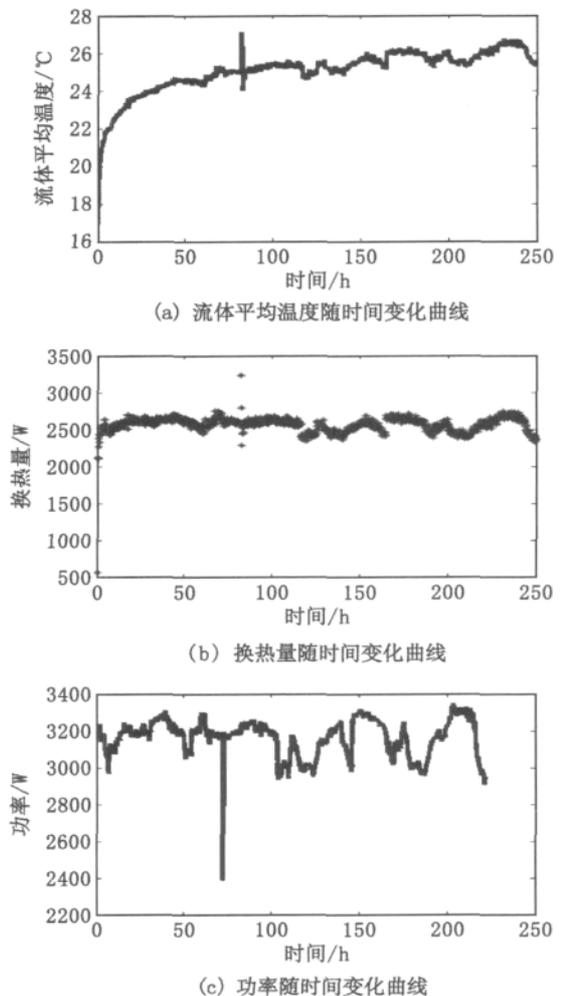


图4 其他因素对地埋管侧换热量影响

Fig.4 The diagram of other influences factors effect heat transfer rate of u-tube ground heat exchanger

3 结论

在 3 kW 测试功率条件下,20 h 后,岩土综合导热系数数值接近稳定。地埋管侧换热量值受进出

口水温平均值、测量功率、岩土综合导热系数等因素影响,其中岩土综合导热系数影响最重要,其每增加 $1\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 换热量增量均值是 $2\ 500\text{ W}$;其次是进出口水温平均值的影响,其每变化 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,换热量约变化 250 W ;最后是测试功率的影响,功率变化 1 W 地源埋管换热量变化 0.71 W 。

参考文献:

- [1] 方亮,张方方,方肇洪,等. 关于埋管换热器热响应试验的讨论[J]. 建筑热能通风空调,2009,28(4): 48-51.
- [2] STEPHEN P, KAVANAUGH. Field tests for ground thermal properties methods and impact on groundsource heat pump design[J]. Ashrae Transactions, 1992, 98(2): 607-6151.
- [3] CARSLAW H S, JAEGER J C. Conduction of heat in solids[M]. Oxford: Oxford University Press, 1959.

- [4] INGERSOLL L R, ZOBEL O J, INGERSOLL A C. Heat conduction with engineering geologica and other application[M]. New York: McGraw-Hill Co., 1948.
- [5] 张燕. U型埋管换热器动态模拟[D]. 成都: 西华大学, 2011: 6-15.
- [6] 陈旭,范蕊,马宏权,等. 竖直埋管单位井深换热量影响因素回归分析[J]. 制冷学报, 2010, 31(2): 11-16.
- [7] 李元科. 工程最优化设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 115-117.
- [8] 于明志,方肇洪. 现场测试地下岩土平均热物性参数方法[J]. 热能动力工程, 2002, 17(5): 34-37.
- [9] 赵进,王景刚,高晓霞,等. 地源热泵土壤热物性测试与分析[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2010, 27(1): 59-60
- [10] GB 50366-2005, 地源热泵系统设计规范[S].

(责任编辑 马立)

(上接第54页)

参考文献:

- [1] 孟繁丽,李亚峰,贾新军. 曝气生物滤池内的短程硝化研究[J]. 工业安全与环保, 2008, 34(9): 19-22.
- [2] 李亚新,侯建荣. 生物砂滤池处理微污染源水净化新工艺特性研究[J]. 给水排水, 1997, 2(7): 6-9.
- [3] 李德生,黄晓东,王占生. 微污染水净化新工艺-生物强化过滤研究[J]. 中国给水排水, 2000, 16(10): 18-20.
- [4] 郑俊,吴浩汀. 曝气生物滤池工艺的理论工程应用[M]. 化学工业出版社, 2005

- [5] 严子春,龙腾锐,何强. 曝气生物滤池及其处理效能因素分析[J]. 水处理技术, 2005, 31(5): 27-29.
- [6] 蔡苇,肖文胜,郭建林. 曝气生物滤池中用不同滤料处理生活污水的研究[J]. 工业安全与环保, 2010, 30(9): 21-22.
- [7] 刘莉,代纯伟. 哈尔滨群力污水处理厂工艺调试及优化调整[J]. 黑龙江科技学院学报, 2011, 21(5): 364-367.
- [8] 李思敏,缪保芬,李中巍,等. 气水比对生物砂滤工艺处理二级出水的影响[J]. 中国给排水, 2010, 26(11): 100-103.

(责任编辑 马立)