

4-28-2023

## Experimental study on heat transfer performance of double U-shaped buried tube heat exchanger

LI Lei

*China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; China Coal Pingshuo Group Co., Ltd., Shuozhou 036006, China, 1332084379@qq.com*

ZHANG Weidong

*CCTEG Xi'an Research Institute(Group)Co., Ltd., Xi'an 710077, China*

XU Shuanhai

*China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; China Coal Pingshuo Group Co., Ltd., Shuozhou 036006, China, xushuanhai@cctegxian.com*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://cge.researchcommons.org/journal>



Part of the [Earth Sciences Commons](#), [Mining Engineering Commons](#), [Oil, Gas, and Energy Commons](#), and the [Sustainability Commons](#)

---

### Recommended Citation

LI Lei, ZHANG Weidong, XU Shuanhai, et al. (2023) "Experimental study on heat transfer performance of double U-shaped buried tube heat exchanger," *Coal Geology & Exploration*: Vol. 51: Iss. 4, Article 14.

DOI: 10.12363/issn.1001-1986.22.09.0701

Available at: <https://cge.researchcommons.org/journal/vol51/iss4/14>

This Hydrogeology, Engineering Geology, Environmental Geology is brought to you for free and open access by Coal Geology & Exploration. It has been accepted for inclusion in Coal Geology & Exploration by an authorized editor of Coal Geology & Exploration. For more information, please contact [380940179@qq.com](mailto:380940179@qq.com).

---

## Experimental study on heat transfer performance of double U-shaped buried tube heat exchanger

### Authors

LI Lei, ZHANG Weidong, XU Shuanhai, ZHAO Yongzhe, DANG Dongsheng, WANG Qilong, GOU Li, and LEI Yanzi



移动阅读

李磊, 张卫东, 徐拴海, 等. 双 U 型埋管换热器换热性能试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(4): 125-132. doi: 10.12363/issn.1001-1986.22.09.0701

LI Lei, ZHANG Weidong, XU Shuanhai, et al. Experimental study on heat transfer performance of double U-shaped buried tube heat exchanger[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(4): 125-132. doi: 10.12363/issn.1001-1986.22.09.0701

## 双 U 型埋管换热器换热性能试验研究

李磊<sup>1,2</sup>, 张卫东<sup>2</sup>, 徐拴海<sup>1,2</sup>, 赵永哲<sup>1,2</sup>, 党东生<sup>2</sup>, 汪启龙<sup>2</sup>, 苟立<sup>2</sup>, 雷燕子<sup>2</sup>

(1. 煤炭科学研究总院, 北京 100013; 2. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西西安 710077)

**摘要:** 双 U 型埋管换热器(DUBTHE)在实际应用中易出现管路交叉, 引起热短路, 造成换热性能降低, 直接影响浅层地源热泵系统的运行效率。以西安某浅层地源热泵项目为工程背景, 基于无限长线热源理论和斜率法, 通过现场岩土热响应试验、不同测温法测温试验, 研究了岩土初始平均温度、导热系数和体积热容, 及管卡间距对 DUBTHE 换热性能的影响。结果表明: 多点式测温线缆测得的岩土初始平均温度为 17.08℃, 更接近实际地层温度。该地层的岩土综合导热系数和综合体积热容分别为 1.65 W/(m·K)、 $2.81 \times 10^6$  J/(m<sup>3</sup>·K)。DN25 DUBTHE 的夏、冬季单位延米换热量随着管卡间距减小而增加, 且增速随管卡间距的减小先增大后减小。当管卡间距分别为 1、2、3、4 m 时, DN25 DUBTHE 的夏季单位延米换热量较无管卡分别提高了 21.03%、19.48%、15.16%、3.92%; DN25 DUBTHE 的冬季单位延米换热量较无管卡分别提高了 20.83%、19.48%、14.94%、3.79%。工程中最优的管卡布置方式为 2 m 或 3 m 管卡间距的 DN25 DUBTHE。研究结果可为关中地区浅层地源热泵系统的优化设计提供经验借鉴与数据支撑。

**关键词:** 双 U 型埋管; 岩土热响应试验; 换热性能; 浅层地源热泵; 管卡间距

**中图分类号:** TU83 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2023)04-0125-08

### Experimental study on heat transfer performance of double U-shaped buried tube heat exchanger

LI Lei<sup>1,2</sup>, ZHANG Weidong<sup>2</sup>, XU Shuanhai<sup>1,2</sup>, ZHAO Yongzhe<sup>1,2</sup>, DANG Dongsheng<sup>2</sup>, WANG Qilong<sup>2</sup>, GOU Li<sup>2</sup>, LEI Yanzi<sup>2</sup>

(1. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. CCTEG Xi'an Research Institute(Group)Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** Double U-shaped buried tube heat exchanger (DUBTHE) are prone to pipe crossing and thermal short-circuiting in the practical applications, resulting in the reduced heat transfer performance and directly affecting the operational efficiency of shallow geothermal heat pump system. Based on the initial line thermal average temperature, thermal conductivity theory and slope method, and taking a shallow geothermal heat pump project in Xi'an as the engineering background. Then, this study investigate the effects of initial average temperature, thermal conductivity and volumetric heat capacity of rock-soil, and tube clamp spacing on the heat transfer performance of DUBTHE through field geotechnical thermal response testing and different temperature measurement methods. The results show that the initial average temperature of rock-soil measured by the multi-point temperature measurement cable is 17.08℃, which is closer to the actual formation temperature. Besides, the comprehensive thermal conductivity and volumetric heat capacity of rock-soil in the formation are 1.65 W/(m·K) and  $2.81 \times 10^6$  J/(m<sup>3</sup>·K), respectively. In addition, the heat exchange per linear meter of DN25 DUBTHE in summer and winter increases with the decreasing tube clamp spacing, with the acceleration increasing firstly and then decreasing with the decreasing tube clamp spacing. Definitely, the heat exchange per linear meter of DN25 DUBTHE in summer is increased by 21.03%, 19.48%, 15.16% and 3.92% respectively compared with that without tube clamp, and that in winter is increased by 20.83%, 19.48%, 14.94% and 3.79%, respectively, in case that the

收稿日期: 2022-09-18; 修回日期: 2023-02-08

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2021ZDLSF05-12); 中煤科工集团西安研究院有限公司科技创新基金项目(2021XAYKF01)

第一作者: 李磊, 1996 年生, 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 从事浅层地热能开发利用方向研究. E-mail: 1332084379@qq.com

通信作者: 徐拴海, 1963 年生, 男, 陕西宝鸡人, 博士, 研究员, 从事工程地质、水文地质、地热能开发等方向研究. E-mail: xushuanhai@cctegxian.com

tube clamp spacing is 1 2, 3, and 4 m. DN25 DUBTHE with a tube clamp spacing of 2 m or 3 m is the optimal arrangement in the project. Therefore, the results could provide experience and data support for the optimal design of shallow ground source heat pump systems in Guanzhong area.

**Keywords:** double U-shaped buried tube; geotechnical thermal response test; heat transfer performance; shallow geothermal heat pump; tube clamp spacing

地源热泵技术作为建筑节能领域的关键技术手段之一,已经广泛应用于各类建筑集中供暖和制冷系统<sup>[1]</sup>。单 U 型埋管换热器(Single U-shaped Buried Tube Heat Exchanger, SUBTHE)和双 U 型埋管换热器(Double U-shaped Buried Tube Heat Exchanger, DUBTHE)因其施工简单、维护费用低、换热效率高等优点,成为目前浅层地源热泵系统中应用最广泛的埋管形式<sup>[2-3]</sup>。与 SUBTHE 相比, DUBTHE 具有更高的换热效率和更低的热阻<sup>[4]</sup>。但在实际工程应用中, DUBTHE 支管管路易发生交叉引起热短路现象,因此,采用管卡将支管分开,降低其热短路程度<sup>[5]</sup>。由于沿管长方向布置不同间距的管卡可直接影响 DUBTHE 的换热性能和热短路严重程度,选择合理的管卡间距就显得尤为重要。目前,在实际工程应用中 DUBTHE 一般采用 4 m 管卡间距或无管卡。

关于 DUBTHE 换热性能理论与试验方面的研究,国内外诸多学者已作了大量贡献。杨培志等<sup>[6]</sup>通过模拟发现增大回填材料的导热系数和体积热容可以改善其换热性能,但与增大导热系数相比,增大体积热容对提升其换热性能影响不明显;邓军涛等<sup>[7-8]</sup>通过热响应试验分析了不同埋管形式、管径的埋管换热器换热性能,发现管径相同时, DUBTHE 的单位延米换热量随埋管深度的增加而减小,且 DN32 DUBTHE 的换热性能远优于 DN32 或 DN40 SUBTHE; G. A. Florides 等<sup>[9]</sup>通过土壤分层模型对 SUBTHE 和 DUBTHE 进行了模拟,发现相较于 SUBTHE,并联形式的 DUBTHE 换热效率提高了 26%~29%;沈国民等<sup>[10]</sup>通过数学模型发现 DUBTHE 的热短路现象比 SUBTHE 严重,且支管间距越大,热量损失越小;PU Liang 等<sup>[11-12]</sup>分析了埋管间距、埋深、布置方式对 DUBTHE 热短路现象的影响,发现增大埋管间距或增加钻井数量可有效降低热短路程度;A. Jahanbin<sup>[13]</sup>通过理论计算发现当横截面积相同时,椭圆 U 型管比圆形 U 型管的钻孔内热阻小且椭圆 U 型管越扁换热性能越好;Li Xinguo 等<sup>[14]</sup>建立了 SUBTHE 和 DUBTHE 的现场实验系统,发现在取热工况和放热工况下, DUBTHE 的换热量比 SUBTHE 分别高了 45% 和 50%;穆玄等<sup>[15]</sup>通过数值模拟发现岩溶导水构造明显增强了埋管管群的换热效率,不同的地质构造类型对埋管换热效率的影响也不一样;李娟等<sup>[16]</sup>利用 35 个现场换热孔岩土热响应试验数据

发现基岩地层条件下,埋管的换热能力明显优于第四系地层,且岩土初始平均温度每变化 1℃,换热能力相差 8% 左右;L. Schibuola 等<sup>[17]</sup>发现地下水渗流对地源热泵系统长期换热性能的影响尤为显著,且可缩短地温场的恢复周期;Li Wenxin 等<sup>[18]</sup>研究结果表明地下水对上游管道的影响比对下游管道的影响更大。

目前关于 DUBTHE 换热性能的研究,主要集中在回填材料、管型结构、地质条件等方面,虽提及增大支管间距可减少因热短路现象引起的热损失,但在实际应用中管卡间距对 DUBTHE 换热性能的影响程度尚待研究。为此,笔者在理论分析的基础上结合现场试验,探究了岩土初始平均温度、导热系数和体积热容,及管卡间距对 DUBTHE 换热性能的影响,以期对关中地区浅层地源热泵系统的优化设计提供借鉴。

## 1 试验概况

### 1.1 试验场地地层条件

试验场地位于陕西省西安市长安区某浅层地源热泵工程地点,场地地形南高北低,南侧与西侧(偏南)人工填土层较厚,稳定水位埋深为 14.17 m, 152 m 深度范围内地层岩性主要以黄土、粉质黏土和中砂为主,地层大致稳定,具一定沉积韵律,并无明显地质构造。场地地貌单元属于皂河二级阶地。场地地层野外特征见表 1。

### 1.2 试验方案及设备

为研究管卡间距对 DUBTHE 换热性能的影响,以及不同测温法对岩土初始温度的影响,在试验场地理设了管卡间距分别为 1、2、3、4 m 及无管卡的 DUBTHE 作为试验孔,测试每个埋管的单位延米换热量,并分析管卡间距对其的影响。在 SY1、SY4、SY5 试验孔采用无功循环法进行测温,并分析测得的岩土初始平均温度之间的差异;在 SY1 试验孔采用多点式测温线缆进行测温,并对比 2 种测温法的差异性。试验孔基本参数,见表 2;图 1、图 2 为管卡及 DUBTHE 示意。

试验设备主要由岩土热响应测试仪和多点式测温线缆装置 2 部分组成,如图 3 所示。岩土热响应测试仪主要包括不锈钢电加热保温水箱、循环水泵、数据监测与采集装置和电气控制装置 4 大部分。多点式测温线缆装置主要包括特种测温电缆、数字温度传感器和云采集器 3 大部分。

表 1 场地地层野外特征  
Table 1 Field characteristics of site strata

地层编号	岩性	岩性描述	底层深度/m	层厚/m
1	黄土	黄褐色，硬，土质均匀，具虫孔，针孔状构造，含蜗牛壳，有光泽	5.5	5.5
2	粉质黏土	黄褐色，黏性较强，含氧化铁及钙质结核，夹薄层中砂	52.7	47.2
3	中砂	灰色，密实，以石英、长石为主，级配良好，含圆砾	59.3	6.6
4	粉质黏土	灰色，黏性较强，含氧化铁及钙质结核，夹薄层中砂	103.3	44.0
5	中砂	灰色，密实，含石英、长石及圆砾，夹薄层粉质黏土	112.5	9.2
6	粉质黏土	灰色，黏性较强，含氧化铁，局部含个别结核	120.8	8.3
7	中砂	灰色，密实，以石英、长石为主，级配良好，局部含圆砾	130.4	9.6
8	粉质黏土	灰色，黏性较强，含氧化铁，局部含个别结核	152.0	21.6

表 2 试验孔基本参数  
Table 2 Basic parameters of test holes

试验孔编号	管卡间距 $D_1$ /m	管材及地埋管类型	有效埋管深度/m	回填材料
SY1	无管卡			
SY2	1	HDPE, DN25	152	河沙+原浆
SY3	2	双U型,		
SY4	3	并联连接		
SY5	4			



(a) 岩土热响应测试仪 (b) 多点式测温线缆装置

图 3 岩土热响应测试仪及多点式测温线缆装置

Fig.3 Thermal response tester and multi-point temperature measurement cable device for rock-soil



图 1 管卡

Fig.1 Tube clamp

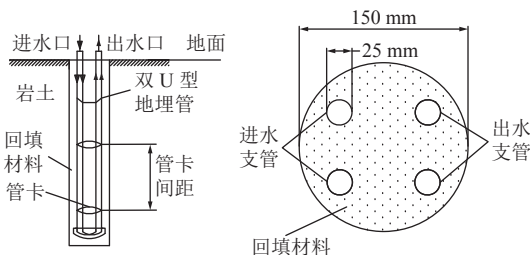


图 2 双 U 型地埋管换热器示意

Fig.2 DUBTHE

1.3 试验方法

本次现场岩土热响应测试采用恒热流法，岩土初始平均温度测试采用无功循环法和多点式测温线缆测温法，单位延米换热量是通过华中科技大学自主研发的 GTA-地源热泵岩土热物性分析软件计算。恒热流法是通过将测试仪与 DUBTHE 组成循环水系统，设定恒定加热功率，对试验孔进行一定时间的连续排热试

验，并实时监测记录加热功率、流量和进出水温。再根据测试数据反解求出岩土综合热物性参数，见第 2 节。

现场岩土热响应测试设定的流量和加热功率分别为 1.4 m<sup>3</sup>/h 和 8 kW，每 1 min 记录一次数据，测试时间不小于 48 h。SY1、SY4、SY5 采用无功循环法进行岩土初始温度测试，每 1 min 记录一次数据，测试时间不小于 12 h；SY1 采用多点式测温线缆进行测试，每 5 min 记录一次数据，全年实时监测。专业分析软件计算的试验孔参数设置见表 3。其中，制冷(供热)季运行时间份额是指地源热泵系统制冷(供热)季运行期间的天数占全年天数的百分比，制冷(供热)季运行份额是指地源热泵系统制冷(供热)季运行期间的实际工作小时数占整个制冷(供热)季总小时数的百分比。

2 基于无限长线热源理论的斜率法

周围岩土体与地埋管之间的传热分为钻孔内传热过程和钻孔外传热过程。由于孔内几何尺寸和热容量远小于孔外，孔内温度短时间内趋于稳定且变化缓慢，因此地埋管和钻孔内回填材料的传热可近似为稳态传热过程。在钻孔外部，周围岩土体可视为无限大物体，由于埋管深度和钻孔直径相差多个数量级，因而，可将地埋管看成是一个具有恒定热源的无限长线热源，不考虑轴向传热，其传热过程可认为沿径向方向的一维非稳态传热。

表 3 试验孔参数设置  
Table 3 Parameters setting of test holes

试验孔 编号	管卡间距 $D_i/m$	设计间距 $L/m$	制冷工况传热介质 平均温度 $t_c/^\circ C$	供热工况传热介质 平均温度 $t_w/^\circ C$	制冷季运行 份额 $F_w/\%$	制冷季运行 时间份额 $F_{w1}/\%$	供热季运行 份额 $F_s/\%$	供热季运行 时间份额 $F_{s2}/\%$	短期运行 时间/h
SY1	0								
SY2	1								
SY3	2	5	32.5	7.5	23.81	33.43	21.84	33.15	8
SY4	3								
SY5	4								

2.1 钻孔内传热分析

本试验中钻孔内为 DUBTHE, 共有 4 根支管。设通过 4 根支管单位长度的热流量分别为  $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$  和  $q_4$ , 将钻孔壁平均壁温  $T_b$  设为过余温度的零点, 则 DUBTHE 的能量方程<sup>[19]</sup>可表示为:

$$\begin{cases} T_{f1} - T_b = R_1 q_1 + R_{12} q_2 + R_{13} q_3 + R_{14} q_4 \\ T_{f2} - T_b = R_{21} q_1 + R_2 q_2 + R_{23} q_3 + R_{24} q_4 \\ T_{f3} - T_b = R_{31} q_1 + R_{32} q_2 + R_3 q_3 + R_{34} q_4 \\ T_{f4} - T_b = R_{41} q_1 + R_{42} q_2 + R_{43} q_3 + R_4 q_4 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $T_{f1}$ 、 $T_{f2}$ 、 $T_{f3}$ 、 $T_{f4}$  分别为各支管内流体平均温度, K;  $T_b$  为钻孔壁平均温度, K;  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  分别为各支管与钻孔壁之间的热阻, (m·K)/W;  $R_{ij}$  为两支管之间的热阻, (m·K)/W,  $i, j=1,2,3,4$ , 且  $i \neq j$ 。

工程中近似认为 4 根支管是中心对称分布的, 则  $R_1=R_2=R_3=R_4$ ,  $R_{12}=R_{21}=R_{23}=R_{32}=R_{34}=R_{43}=R_{41}=R_{14}$ ,  $R_{13}=R_{31}=R_{24}=R_{42}$ , 根据线性叠加原理, 由式(1)可得出传热过程中各项热阻的表达式:

$$R_1 = \frac{1}{2\pi\lambda_b} \left[ \ln\left(\frac{d_b}{d_{out}}\right) + \frac{\lambda_b - \lambda_s}{\lambda_b + \lambda_s} \cdot \ln\left(\frac{d_b^2}{d_b^2 - 4D^2}\right) \right] + R_p \quad (2)$$

$$R_{12} = \frac{1}{2\pi\lambda_b} \left[ \ln\left(\frac{d_b}{2\sqrt{2}D}\right) + \frac{\lambda_b - \lambda_s}{2(\lambda_b + \lambda_s)} \cdot \ln\left(\frac{d_b^4}{d_b^4 + 16D^4}\right) \right] \quad (3)$$

$$R_{13} = \frac{1}{2\pi\lambda_b} \left[ \ln\left(\frac{d_b}{4D}\right) + \frac{\lambda_b - \lambda_s}{\lambda_b + \lambda_s} \cdot \ln\left(\frac{d_b^2}{d_b^2 + 4D^2}\right) \right] \quad (4)$$

$$R_p = \frac{1}{2\pi\lambda_p} \cdot \ln\left(\frac{d_{out}}{d_{in}}\right) + \frac{1}{\pi d_{in} K} \quad (5)$$

式中:  $\lambda_b$  为回填材料导热系数, W/(m·K);  $\lambda_p$  为管壁导热系数, W/(m·K);  $\lambda_s$  为岩土导热系数, W/(m·K);  $d_b$  为钻孔直径, m;  $d_{in}$  为埋管内径, m;  $d_{out}$  为埋管外径, m;  $D$  为各支管中心距离, m;  $K$  为管内壁对流传热系数, W/(m<sup>2</sup>·K);  $R_p$  为管壁热阻, (m·K)/W。

根据相关规范要求, 埋管管内流体流动时应处于湍流状态, 可由迪图斯-贝尔特(Dittus-Boelter)公式计算努塞尔数  $Nu$ :

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (6)$$

式中:  $Re$  为雷诺数;  $Pr$  为普朗特数。

再根据下式计算管内流体与埋管内管壁的对流

传热系数  $K$ :

$$K = \frac{\lambda_w Nu}{d_{in}} \quad (7)$$

式中:  $\lambda_w$  为流体导热系数, W/(m·K)。

取单位长度埋管的热流量、管内流体平均温度分别为  $q$  和  $T_f$ , 假设  $q_1=q_2=q_3=q_4=q/4$ ,  $T_{f1}=T_{f2}=T_{f3}=T_{f4}=T_f$ , 则式(1)可表示为:

$$T_f - T_b = q R_b \quad (8)$$

推得埋管管内流体到钻孔壁传热热阻  $R_b$  的表达式为:

$$R_b = (R_1 + 2R_{12} + R_{13})/4 \quad (9)$$

2.2 钻孔外传热分析

假设钻孔外岩土体各向同性, 忽略轴向传热, 且埋管与周围岩土体的换热功率恒定, 则埋管与周围岩土体之间的换热可看作为在无限大介质中的一维非稳态传热问题, 其数学描述可表示为<sup>[5]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\rho_s c_s}{\lambda_s} \frac{\partial T}{\partial \tau} & \tau > 0, \frac{d_b}{2} \leq r < \infty \\ T = T_{ff} & \tau = 0, \frac{d_b}{2} \leq r < \infty \\ \frac{Q}{H} = -\pi d_b \lambda_s \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=\frac{d_b}{2}} & \tau > 0 \\ \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r \rightarrow \infty} = 0 & \tau > 0 \end{cases} \quad (10)$$

当恒定加热功率  $Q$  时间足够长(一般大于 10 h)时, 则由式(10)可得到钻孔周围岩土体温度的解析解:

$$T(r, \tau) - T_{ff} = \frac{q}{4\pi\lambda_s} \ln(\tau) + \frac{q}{4\pi\lambda_s} E_i\left(\frac{d_b^2 \rho_s c_s}{16\lambda_s \tau}\right) \quad (11)$$

$$\tau \geq 5d_b^2/4\alpha \quad (12)$$

当满足式(12)时,  $E_i$  的表达式为<sup>[20-21]</sup>:

$$E_i\left(\frac{d_b^2 \rho_s c_s}{16\lambda_s \tau}\right) \approx \ln\left(\frac{16\lambda_s \tau}{d_b^2 \rho_s c_s}\right) - \gamma \quad (13)$$

将式(13)代入式(11), 令  $r=d_b/2$ , 可得到  $\tau$  时刻钻孔壁平均温度  $T_b$  与周围岩土初始平均温度  $T_{ff}$  的关系式:

$$T_b - T_{ff} = \frac{q}{4\pi\lambda_s} \ln\tau + \frac{q}{4\pi\lambda_s} \left( \ln\frac{16\alpha}{d_b^2} - \gamma \right) \quad (14)$$

式中： $T(r, \tau)$  为  $\tau$  时刻半径  $r$  处岩土体温度，K； $c_s$  为岩土体平均比热容，J/(kg·K)； $T_{ff}$  为岩土初始平均温度，K； $H$  为埋管深度，m； $\rho_s$  为岩土体平均密度，kg/m<sup>3</sup>； $\alpha$  为岩土体热扩散系数，m<sup>2</sup>/s； $E_i$  为指数积分函数； $\gamma$  为欧拉常数， $\gamma \approx -0.5772$ 。

### 2.3 斜率法

当输入恒定加热功率  $H$  时，由式(8) 和式(14) 可得出管内流体平均温度  $T_f$  与周围岩土初始平均温度  $T_{ff}$  的关系式：

$$T_f = \frac{Q}{4\pi\lambda_s H} \ln\tau + \left[ \frac{Q}{H} \left( \frac{1}{4\pi\lambda_s} \left( \ln \frac{16\alpha}{d_b^2} - \gamma \right) + R_b \right) + T_{ff} \right] \quad (15)$$

从式(15) 可以看出， $\tau$  时刻管内流体平均温度  $T_f$  与时间  $\tau$  的对数呈线性关系。则式(15) 可写成：

$$T_f = m \ln\tau + n \quad (16)$$

其中：

$$m = \frac{Q}{4\pi\lambda_s H} \quad (17)$$

$$n = \frac{Q}{H} \left( \frac{1}{4\pi\lambda_s} \left( \ln \frac{16\alpha}{d_b^2} - \gamma \right) + R_b \right) + T_{ff} \quad (18)$$

## 3 结果与讨论

### 3.1 岩土初始平均温度

SY1、SY4、SY5 试验孔的埋管出水温度随时间变化曲线如图 4 所示。SY1 试验孔的埋管周围岩土体温度随深度变化曲线如图 5 所示。

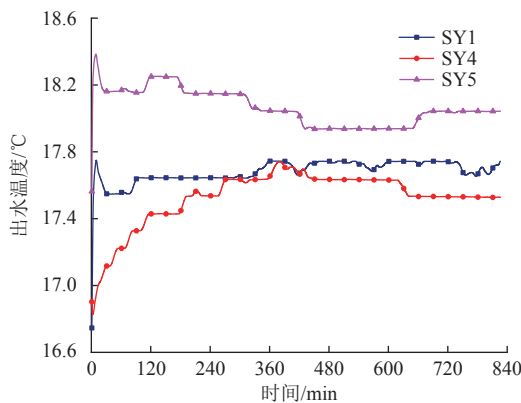


图 4 埋管出水温度随时间变化曲线

Fig.4 Curve of outlet water temperature of buried tube changing with time

由图 4 可知，随着测试时间的增加，埋管出水温度先变化幅度较大后逐渐趋于稳定。其主要是由于在测试前期，埋管内的循环水与周围岩土体的温差较大，导致两者的热交换程度较深，所以测试前期埋管的出水温度变化幅度较大，随着热交换的持续进行，两者温差逐渐变小，最后达到一种近似平衡的状态，该状态下的埋管出水温度可视为岩土的初始平均温度。

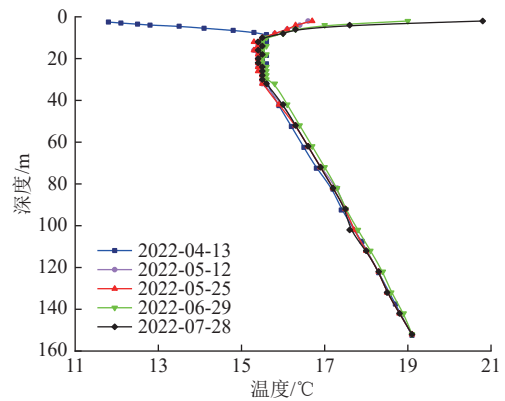


图 5 岩土体日常温度随深度变化曲线

Fig.5 Curve of rock-soil daily temperature changing with depth  
SY1、SY4、SY5 试验孔分别于 1.5、7、5.5 h 趋于稳定，因此，3 个试验孔测得的岩土初始平均温度分别为 17.70、17.58、18.00℃，再求算术平均值得到由无功循环法测取的岩土初始平均温度为 17.76℃。

由图 5 可知，随着深度的增加，4 月测取的温度先升高后不变再升高，5、6、7 月测取的温度先降低后不变再升高。从而可以得到该场地 152 m 深度内的变温层、恒温层和增温层范围分别为 0~9.7 m、9.7~30 m、30~152 m，并且在同一深度处，变温层的温度随着当地气温增加而增加，恒温层和增温层的温度随时间没有出现明显变化。因此，在岩土热响应试验期间内，取变温层同一深度处温度的平均值作为测试期间内该深度的温度，从而得到埋管周围岩土体温度随深度变化曲线如图 6 所示，并得到两者的拟合关系表达式。再以岩土体温度随深度变化曲线的积分平均值作为岩土初始平均温度，计算出由多点式测温线缆测取的岩土初始平均温度为 17.08℃。

对比无功循环法和多点式测温线缆测取的岩土初始平均温度，发现无功循环法测取的温度略高且不同时间测试的结果变化幅度较大。原因是在进行无功循环法测试时，埋管出地面处到岩土热响应测试仪之

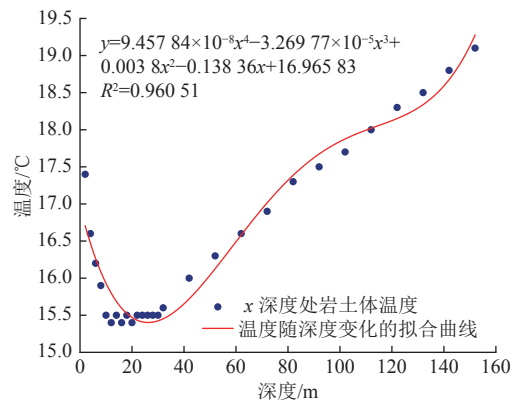


图 6 埋管周围岩土体温度随深度变化曲线

Fig.6 Curve of rock-soil temperature surrounding buried tube changing with depth

间的管道中循环水温度易受到天气的影响,气温高时测得的岩土初始平均温度偏高;并且在实际测试过程中易受人为因素和测试仪本身的影响,流量设置较低时测得的岩土初始平均温度偏高。相比而言,多点式测温线缆在长期测试下的温度变化幅度很小且同一深度处温度基本不变。因此,取多点式测温线缆测试的温度作为地层初始平均温度的计算值,即为 17.08℃。

### 3.2 岩土综合热物性参数

SY1、SY2、SY3、SY4、SY5 试验孔的埋管进出口水温随时间变化曲线如图 7 所示。由图 7 可知,测试开始 330 min 内,埋管进出口水温上升较快,此时以钻孔内传热为主。随着测试时间的继续增加,埋管进出口水温增长较慢,此时以钻孔外传热为主。并且进出口水温温差稳定在 4.9℃ 左右。

查阅《2007 ASHRAE Handbook—HVAC Applications(SI)》<sup>[22]</sup> 和表 1 中地层岩性特征,通过式(12) 计算可知,测试初期 12 h 内的数据误差较大,应舍弃。埋管管内流体平均温度  $T_f$  一般通过下式进行计算<sup>[23]</sup>, 12 h 后的测试数据见表 4。由表 4 可拟合出 SY1、SY2、SY3、SY4、SY5 试验孔的平均温度-时间对数直线,如图 8 所示。通过拟合关系式得到  $m$  和  $n$  值,再由式(17) 和式(18) 反算出岩土综合导热系数和综合体积热容,见表 5。

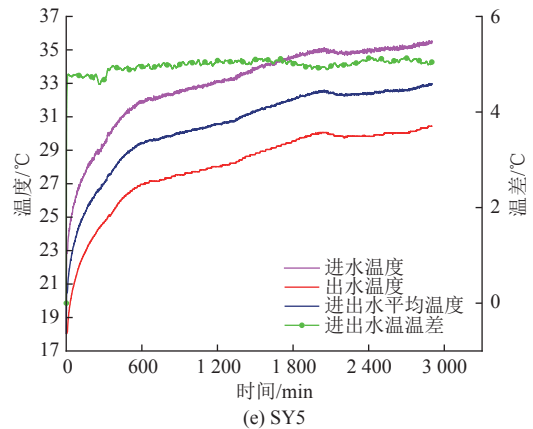
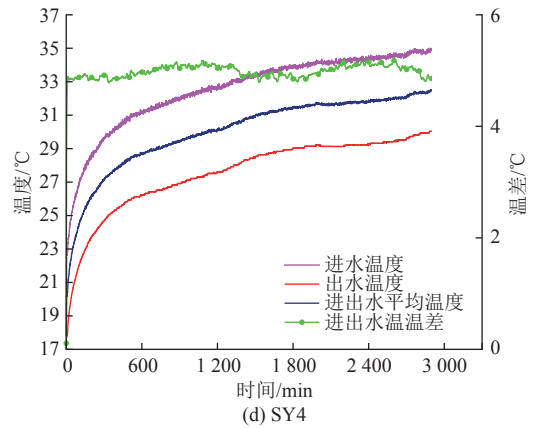
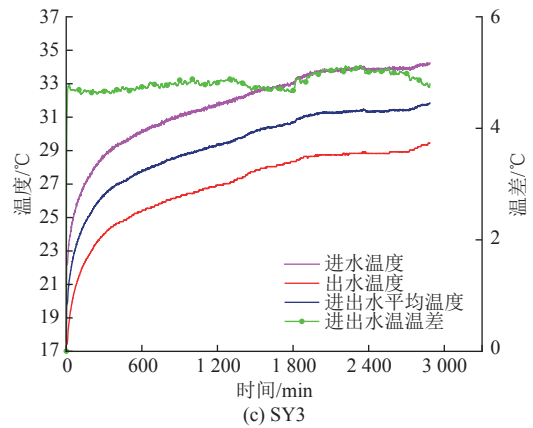
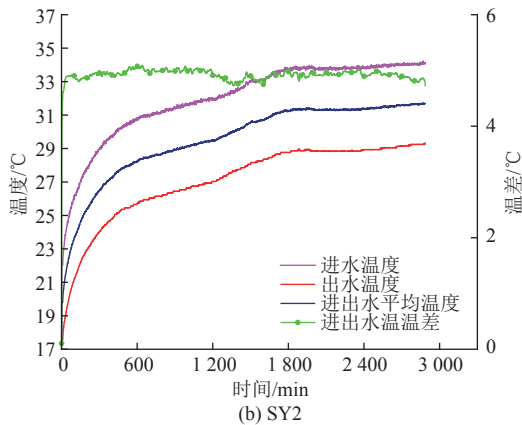
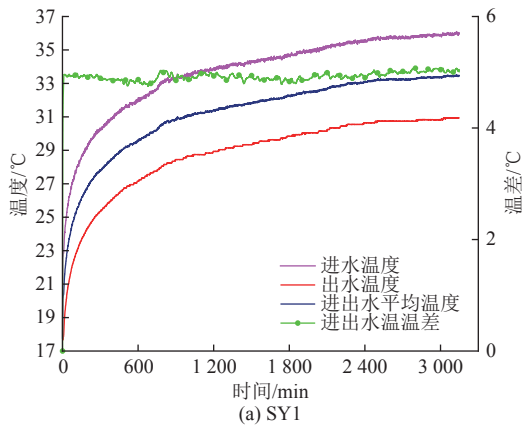


图 7 试验孔的埋管进出口水温随时间变化曲线  
Fig.7 Curve of inlet and outlet water temperature of buried tube in test holes changing with time

$$T_f = (T_{in} + T_{out})/2 \tag{19}$$

式中:  $T_{in}$  为进水温度, K;  $T_{out}$  为出水温度, K。

由表 5 可知, SY1、SY3 试验孔的测试结果与 SY2、SY4、SY5 试验孔存在较大差距。由于考虑到在进行多个试验孔连续热响应试验时可能造成相互干扰,引起试验的不准确性,所以各试验孔之间的实际距离都是大于 30 m 的,从而导致测试结果可能受到局部地下水渗流或地层岩性突变等因素的影响。因此, SY1、SY3 试验孔的测试结果不参与该地层的岩土热物性参数计算,取 SY2、SY4、SY5 试验孔测得的平均值作为



表 4 试验孔测试数据  
Table 4 Testing data of test holes

试验孔编号	循环流量 $V/(m^3 \cdot h^{-1})$	进水平均温度 $t_{in}/^{\circ}C$	出水平均温度 $t_{out}/^{\circ}C$	加热功率 $P/W$
SY1	1.41	34.78	29.84	7 789
SY2	1.41	33.08	28.16	7 875
SY3	1.43	32.85	27.98	7 892
SY4	1.42	33.60	28.58	7 867
SY5	1.42	34.14	29.11	7 989

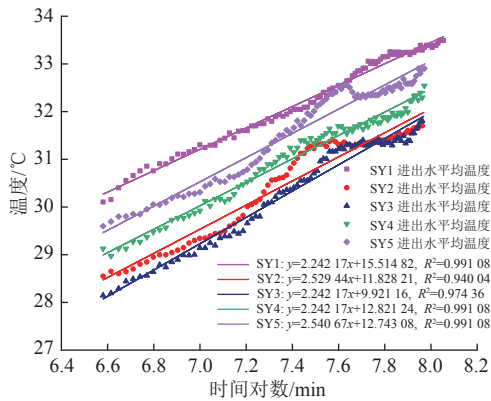


图 8 平均温度-时间对数拟合直线

Fig.8 Fitting straight line of average temperature-time logarithm

表 5 岩土综合热物性参数

Table 5 Parameter of comprehensive thermal properties of rock-soil

试验孔编号	拟合关系式	综合导热系数/ $(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	综合体积热容/ $(J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1})$
SY1	$y=2.242 17x+15.514 82$	1.82	$1.98 \times 10^6$
SY2	$y=2.529 44x+11.828 21$	1.63	$2.79 \times 10^6$
SY3	$y=2.758 51x+9.921 16$	1.50	$3.91 \times 10^6$
SY4	$y=2.457 85x+12.821 24$	1.68	$2.84 \times 10^6$
SY5	$y=2.540 67x+12.743 08$	1.65	$2.80 \times 10^6$

该地层的岩土热物性参数,则该地层的岩土综合导热系数和综合体积热容分别为  $1.65 W/(m \cdot K)$  和  $2.81 \times 10^6 J/(m^3 \cdot K)$ 。

### 3.3 单位延米换热量

通过将流量和加热功率分别为  $1.4 m^3/h$ 、 $8 kW$  时所获得的数据和表 3 中的参数输入 GTA-地源热泵岩土热物性分析软件,从而得到了 SY1、SY2、SY3、SY4、SY5 试验孔的夏、冬季单位延米换热量见表 6、如图 9 所示。由图 9 可以看出,随着管卡间距的减小,对应的夏、冬季单位延米换热量不断增加,且增速表现出先增加后减小的趋势。因此,在实际工程应用中缩短管卡间距可以有效改善 DUBTHE 的换热能力。若只是盲目地缩短管卡间距来换取 DUBTHE 换热能力的提升,而未考虑换热量的增量,施工难度及成本等问题,从而难以在实际工程中实现。

表 6 试验孔单位延米换热量  
Table 6 Heat exchange per linear meter of test holes

试验孔编号	夏季单位延米换热量 $Q_s/(W \cdot m^{-1})$	冬季单位延米换热量 $Q_w/(W \cdot m^{-1})$
SY1	46.45	29.57
SY2	56.22	35.73
SY3	55.50	35.33
SY4	53.49	33.99
SY5	48.27	30.69

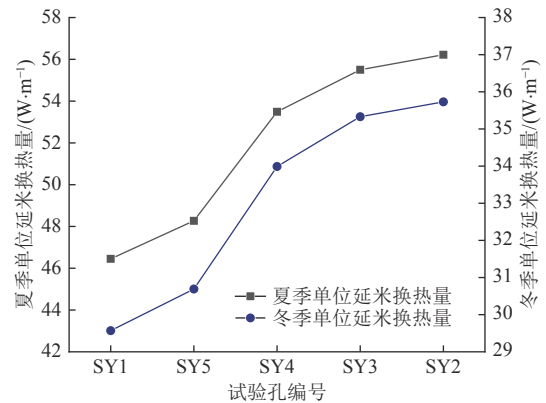


图 9 试验孔单位延米换热量变化曲线

Fig.9 Change curve of heat exchange per linear meter of test holes

因此,以无管卡时 DN25 DUBTHE 的夏、冬季单位延米换热量为基准,计算后发现 1、2、3、4 m 管卡间距的夏季单位延米换热量分别提高了 21.03%、19.48%、15.16%、3.92%,冬季单位延米换热量分别提高了 20.83%、19.48%、14.94%、3.79%。从换热量增幅角度看,1、2、3m 的增幅远大于 4 m; 1 m 和 2 m 的增幅相近且 2 m 和 3 m 的增幅差距较小。再结合管卡和施工成本,建议相似工程中管卡间距可采用 2 m 或 3 m。

## 4 结论

a. 多点式测温线缆不易受到天气及测试过程中人为因素的影响,测取的岩土初始温度更接近实际地层温度。

b. 采用恒热流线热源理论和斜率法可便捷地计算岩土综合导热系数和岩土综合体积热容,且适用性广泛。

c. 研究认为缩短管卡间距可以降低 DN25 DUBTHE 的热短路现象,有效提高 DN25 DUBTHE 的换热能力。

d. 采用 2 m 或 3 m 管卡间距的 DN25 DUBTHE 可有效提高浅层地源热泵系统的运行效率。

## 参考文献(References)

[1] SHAH A, KRARTI M, HUANG J. Energy performance evaluation of shallow ground source heat pumps for residential build-

- ings[J]. *Energies*, 2022, 15(3): 1025.
- [2] LI Zhongjian, ZHENG Maoyu. Development of a numerical model for the simulation of vertical U-tube ground heat exchangers[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29: 920–924.
- [3] BEIER R A. Transient heat transfer in a U-tube borehole heat exchanger[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 62: 256–266.
- [4] KERME E D, FUNG A S. Comprehensive simulation based thermal performance comparison between single and double U-tube borehole heat exchanger and sensitivity analysis[J]. *Energy & Buildings*, 2021, 241: 110876.
- [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.
- [6] 杨培志, 陈嘉鹏, 陈君文, 等. 双U型埋管换热器换热性能模拟分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(6): 1733–1738.  
YANG Peizhi, CHEN Jiapeng, CHEN Junwen, et al. Simulation and analysis of heat transfer performance of double U-tube ground heat exchangers[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(6): 1733–1738.
- [7] 邓军涛, 张继文, 郑建国, 等. 不同形式和管径的埋管换热器换热性能分析[J]. 太阳能学报, 2015, 36(11): 2590–2596.  
DENG Juntao, ZHANG Jiwen, ZHENG Jianguo, et al. Analysis on thermal performance of different type and diameter ground heat exchanger[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2015, 36(11): 2590–2596.
- [8] 邓军涛, 王娟娟, 郑建国. 不同管径和埋深埋管换热器换热性能分析[J]. 太阳能学报, 2021, 42(9): 416–421.  
DENG Juntao, WANG Juanjuan, ZHENG Jianguo. Analysis on thermal performance of ground heat exchanger with various diameters and depths[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(9): 416–421.
- [9] FLORIDES G A, CHRISTODOULIDES P, POULOUPTIS P. Single and double U-tube ground heat exchangers in multiple-layer substrates[J]. *Applied Energy*, 2013, 102: 364–373.
- [10] 沈国民, 张虹. 垂直U型埋管地热换热器短路现象的影响参数分析[J]. 太阳能学报, 2007, 28(6): 604–607.  
SHEN Guomin, ZHANG Hong. Parametric analysis of thermal interference in vertical U-tube heat exchangers for GCHP[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2007, 28(6): 604–607.
- [11] PU Liang, XU Lingling, QI Di, et al. Structure optimization for horizontal ground heat exchanger[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 136: 131–140.
- [12] PU Liang, XU Lingling, QI Di, et al. A novel tree-shaped ground heat exchanger for GSHPs in severely cold regions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 146: 278–287.
- [13] JAHANBIN A. Thermal performance of the vertical ground heat exchanger with a novel elliptical single U-tube[J]. *Geothermics*, 2020, 86: 101804.
- [14] LI Xinguo, CHEN Yan, CHEN Zhihao, et al. Thermal performances of different types of underground heat exchangers[J]. *Energy and Buildings*, 2006, 38(5): 543–547.
- [15] 穆玄, 裴鹏, 周鑫, 等. 岩溶构造对埋管群换热器效率影响数值模拟研究[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(10): 131–139.  
MU Xuan, PEI Peng, ZHOU Xin, et al. Numerical simulation of the influence of karst structure on heat transfer efficiency of buried pipeline group[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(10): 131–139.
- [16] 李娟, 郑佳, 雷晓东, 等. 地质条件及埋管形式对埋管换热器换热性能影响研究[J]. 地球学报, 2023, 44(1): 221–229.  
LI Juan, ZHENG Jia, LEI Xiaodong, et al. Study on the influence of geological conditions and heat exchanger type on BHE thermal performance[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2023, 44(1): 221–229.
- [17] SCHIBUOLA L, SCARPA M. Ground source heat pumps in high humidity soils: An experimental analysis[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 99: 80–91.
- [18] LI Wenxin, LI Xiangdong, PENG Yuanling, et al. Experimental and numerical studies on the thermal performance of ground heat exchangers in a layered subsurface with groundwater[J]. *Renewable Energy*, 2020, 147: 620–629.
- [19] 朱红梅. 基于双U型埋管的岩土热响应试验数据处理分析研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.  
ZHU Hongmei. Study on the insitu soil thermal response test data processing methods of double U-tube BHE[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014.
- [20] GEHLIN S. Thermal response test: Method development and evaluation[D]. Lulea: Lulea University of Technology, 2002.
- [21] YOON S, KIM M J. Prediction of ground thermal diffusivity from thermal response tests[J]. *Energy and Buildings*, 2019, 185: 239–246.
- [22] American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers. 2007 ASHRAE Handbook –HVAC applications (SI)[M]. New York: Stephen Comstock, 2007.
- [23] SPITLER J D, GEHLIN S E A. Thermal response testing for ground source heat pump systems: An historical review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 50: 1125–1137.

(责任编辑 聂爱兰)