

# 中深层套管式地埋管换热器取热性能研究及经济性分析

姜静华<sup>1</sup>, 高远<sup>1</sup>, 张育平<sup>2</sup>, 王 铭<sup>1</sup>, 傅永泉<sup>3</sup>, 蔡皖龙<sup>1</sup>, 刘洪涛<sup>4</sup>, 王泮浩<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 陕西省煤田地质集团有限公司, 陕西 西安 710021;  
3. 陕西北方人居环境科技有限公司 陕西 西安 710054; 4. 陕西西咸新区沣西新城能源发展有限公司, 陕西 西安 712000)

**摘要:** 使用 FLUENT 软件建立了中深层套管式地埋管换热器三维数值传热模型, 基于正交试验极差法, 分析了入口温度、埋深、内管径、岩土热导率、地温梯度对中深层套管式地埋管换热器换热性能的影响。结果表明: 这五项因素对中深层套管式地埋管换热器换热性能的影响显著性依次为: 埋深、地温梯度、入口温度、岩土热导率、内管径; 其次基于平均能源成本法建立中深层套管式地埋管换热器经济性评价方法。研究结果表明: 中深层套管式地埋管换热器的平均能源成本随埋深增加呈先下降后上升趋势, 在选定参数条件下, 2 500 m 埋深的中深层套管式地埋管换热器平均能源成本最低、经济性最优, 所使用方法及所得结论可为中深层套管式地埋管优化研究与工程应用提供参考。

**关键词:** 中深层套管式地埋管换热器; 数值模拟; 换热性能; 正交试验; 平均能源成本法

**中图分类号:** TU832; TK529

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2021)06-0851-09

## Research on heat extraction performance of deep coaxial borehole heat exchanger and its economic analysis

JIANG Jinghua<sup>1</sup>, GAO Yuan<sup>1</sup>, ZHANG Yuping<sup>2</sup>, WANG Ming<sup>1</sup>, FU Yongquan<sup>3</sup>,  
CAI Wanlong<sup>1</sup>, LIU Hongtao<sup>4</sup>, WANG Fenghao<sup>1</sup>

(1. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;  
2. Shaanxi Coal Geology Group Co., Ltd., Xi'an 710021, China;  
3. Shaanxi North Human Settlement Environment Technology Co., Ltd., Xi'an 710054, China;  
4. Shaanxi Xixian Fengxi Energy Development Co., Ltd., Xi'an 712000, China)

**Abstract:** The paper, FLUENT software is used to establish a three-dimensional numerical heat transfer model of deep coaxial borehole heat exchanger, and based on the orthogonal test range method, the effects of inlet temperature, buried depth, inner diameter, geotechnical thermal conductivity and geothermal gradient on the heat transfer performance of deep borehole heat exchanger are analyzed. The results show that the significant effects of these five factors on the heat transfer performance of deep coaxial borehole heat exchanger are as follows: buried depth, geothermal gradient, inlet temperature, geotechnical thermal conductivity and inner diameter. Then, based on the average energy cost method, the economic evaluation method for deep coaxial borehole heat exchanger is established. It is found that the average energy cost decreases first and then increases with the increment of buried depth. With the given parameters in this paper, the deep coaxial borehole heat exchanger with 2 500 m buried depth has the lowest average energy cost and the best economy. The methods and conclusions can provide reference for the optimization research and engineering application of the deep coaxial borehole heat exchanger.

**Key words:** deep borehole heat exchanger; numerical simulation; heat transfer performance; orthogonal test; average energy cost method

加快清洁能源开发利用、着重升级能源消费方式、完善绿色低碳政策和碳交易市场体系等多

项实施手段。此次两会多位人大代表为地热能产业发声, 地热能利用技术已成为清洁能源供暖行

收稿日期: 2021-07-26

修改稿日期: 2021-11-16

基金项目: 国土资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室基金资助课题(KF2020-7); 陕西省科技计划基金资助项目(2020ZDLSF06-08)

第一作者: 姜静华(1998—), 女, 硕士生, 主要从事中深层地埋管换热特性研究。E-mail: jiang1998@stu.xjtu.edu.cn

通信作者: 王泮浩(1972—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事建筑节能与可再生能源利用技术方面研究。E-mail: fhwang@mail.xjtu.edu.cn

业发展热点。中深层地埋管地热供热技术因其占地面积小、取热不取水、环保零排放、系统能效高等多项优势受到推崇。其中中深层地埋管换热器作为中深层地埋管地热供热系统的核心部件,对其换热性能影响因素开展研究十分必要。

中深层地埋管换热器的形式目前主要有同轴套管型、U型管型等。其中同轴套管型因其钻井工艺成熟,应用更为广泛。关于中深层套管式换热器,目前已有较多相关研究报道。魏庆芄团队<sup>[1]</sup>总结了目前中深层地埋管地热供热工程实际应用效果,针对系统能效提升进行了分析。孔彦龙等<sup>[2]</sup>开展了中深层地埋管换热器长期取热能力评估,并得出可持续延米取热量一般不超过 150 W/m 的结论。官燕玲团队<sup>[3]</sup>建立耦合管内外换热的全尺寸数值计算模型,并在一个供暖季下研究了中深层地埋管换热器延米换热量变化规律。方肇洪团队<sup>[4]</sup>基于有限差分法建立中深层地埋管换热器二维数值计算模型,并制作了中深层地埋管最大换热能力评估线算图。卜宪标等<sup>[5-6]</sup>对不同地质条件下套管式地埋管换热器的取热能力进行分析,得出地温梯度的增加可以提高取热能力的结论。李鹏程<sup>[6]</sup>构建了中深层地埋管换热器传热解析模型并探究了钻井深度、地质参数等多种参数对中深层地埋管换热器换热能力的影响。Shabnam G<sup>[7]</sup>通过建立三维数值模型,探究了将废弃油井改造为中深层地埋管地热供热系统的可行性,结果表明该系统运行良好,具有实用经济价值。Luo YQ 等<sup>[8]</sup>结合分段的有限线源模型和准三维传热的解析方法,探究了存在地温梯度影响时套管式地埋管换热器的取热能力,提出了含地温梯度的解析模型。

综合以上研究,目前并未有综合考虑多影响因素的中深层套管式换热器取热性能分析报道。因此本文针对中深层套管式地埋管换热器的入口温度、埋深、内管径、岩土热导率与地温梯度 5 个因素设计了正交试验方案,并通过 FLUENT 软件进行数值模拟计算,以确定这 5 个因素对中深层套管式地埋管换热器换热性能的影响显著性大小,为中深层套管式地埋管的设计提供理论参考。同时针对西安市某处示范工程项目对中深层地热地埋管供热系统的初投资和运行成本进行了估算,并采用平均能源成本法来评价中深层套管式地埋管换热器的经济性,在特定参数下给出中深层套管式地埋管换热器的最优深度。

## 1 模型建立

### 1.1 基本假设

中深层套管式地埋管换热器的换热过程较为复杂,完全按实际情况开展分析具有一定困难。故在把握核心物理过程的前提下,本文所使用的计算模型将做出以下假设和简化:

(1)不存在地下水流动,管壁与岩土之间为纯导热过程;

(2)换热器管壁与固井材料、固井材料与钻孔的内表面充分接触,不存在空气,不考虑接触热阻;

(3)忽略大气温度变化对岩土表面温度的影响,认为岩土表面温度恒定不变。查阅西安多年平均气温数据,地表年平均温度取 15.6 °C;

(4)岩土的热导率、比热容、热扩散率等热物性参数保持不变,地温场遵循地温梯度沿竖直方向变化。

(5)换热器内同一横截面流体温度、速度分布均匀一致。

### 1.2 初始条件与边界条件

本文所建立的中深层套管式地埋管换热器传热模型的控制体包括:内管流体、环腔流体以及流体发生换热的岩土体。模型中内外管管壁、固井材料相对较薄,如若划分网格将大大增加网格数量,故为降低传热模型复杂度,提高计算效率,内外管壁、固井材料未划分网格,而是在 FLUENT 中设置薄壁热阻考虑其影响作用。此外,由于中深层套管式换热器的几何模型为标准圆柱体,在外形上高度轴对称,同时内管和环腔内的循环流体速度场和温度场也是高度轴对称的,故取 1/4 圆柱体进行网格划分以节省计算量。

中深层地埋管初始状态为管内循环流体静止,流体、管壁、回填材料与周围岩土温度相同。在 FLUENT 软件中设置边界条件时,将管内循环流体区域定义为流体 FLUID,固井材料和岩土区域定义为固体 SOLID。循环流体入口定义为速度入口 VELOCITY-INLET,出口定义为自由出口 OUTFLOW,模型中流固耦合面、管壁与固井材料、固井材料与岩土及岩土的外边界定义为 WALL。其中,由于套管式地埋管换热器的模型为 1/4 圆柱体,其竖直方向的侧面设置为对称面 SYMMETRY。

岩土温度场遵循地温梯度随深度变化,按表

达式(1)进行变化.

$$T_d = 15.6 + \frac{y}{1\ 000} \times 30 \quad (1)$$

式中:  $T_d$  为钻孔深度  $y$  处的岩土初始温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $y$  为钻孔深度,  $\text{m}$ .

设置模型地温梯度时,在 FLUENT 软件中 custom field function 功能模块编写该地温梯度函数,模型初始化后,使用 patch 功能初始化模型各个部分的温度分布.

### 1.3 数学模型

中深层地埋管的传热过程包括外管与岩土体的换热、环腔流体与外管壁面的对流换热、内管流体与环腔流体的对流换热.各部分能量方程如下.

内管流体能量守恒方程:

$$\frac{\partial T_{f_1}}{\partial t} + \frac{\partial (V_{f_1} \cdot T_{f_1})}{\partial z} = \frac{k_1 (T_{f_2} - T_{f_1})}{\rho_f A_1 c_{pf}} \quad (2)$$

式中:  $T_{f_1}$  为内管中流体温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $V_{f_1}$  为内管中流体流速,  $\text{m/s}$ ;  $T_{f_2}$  为环腔中流体温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $k_1$  为管内流体与环腔流体之间的总传热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $\rho_f$  为流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c_{pf}$  为流体比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $A_1$  为内管横截面积,  $\text{m}^2$ .

$$k_1 = \frac{\pi}{\frac{1}{2h_{r_1} r_1} + \frac{1}{2\lambda_p} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{2h_{r_2} r_2}} \quad (3)$$

式中:  $h_{r_1}$  为内管流体与管壁的对流换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $h_{r_2}$  为环腔流体与管壁的对流换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $\lambda_p$  为内管导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $r_1$  为内管内径,  $\text{m}$ ;  $r_2$  为内管外径,  $\text{m}$ .

环腔流体能量守恒方程:

$$\frac{\partial T_{f_2}}{\partial t} + \frac{\partial (V_{f_2} \cdot T_{f_2})}{\partial z} = \frac{k_2 (T_g - T_{f_2})}{\rho_f A_2 c_{pf}} + \frac{k_1 (T_{f_1} - T_{f_2})}{\rho_f A_2 c_{pf}} \quad (4)$$

式中,  $V_{f_2}$  为环腔中流体流速,  $\text{m/s}$ ;  $k_2$  为环腔流体与回填材料间的传热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $T_g$  为回填材料温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $A_2$  为环腔横截面积,  $\text{m}^2$ .

$$k_2 = \frac{\pi}{\frac{1}{2h_2 R_1} + \frac{1}{2\lambda_R} \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{2\lambda_g} \ln \frac{\sqrt{R_b^2 + R_2^2}}{\sqrt{2} R_2}} \quad (5)$$

式中,  $\lambda_R$  为外管导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $R_1$  为外管内径,  $\text{m}$ ;  $R_2$  为外管外径,  $\text{m}$ ;  $R_b$  为钻孔半径,  $\text{m}$ .

本文选择 Realizable  $k-\epsilon$  模型计算循环流体的紊流流动问题.同时为了处理网格畸变及纵横比较大等问题,压力速度耦合选用 PISO 算法,该算法更加适用于较大时间步长的计算,网格的纵横

比较大时采用该算法可以提高模拟计算的收敛性<sup>[9]</sup>.

### 1.4 几何模型与网格划分

为表征几何模型结构,且便于视觉表达,未按实际比例绘制几何模型示意图.所构建的套管式地埋管换热器几何模型示意图(外进内出式,环腔流入,中心流出)如图 1 所示:

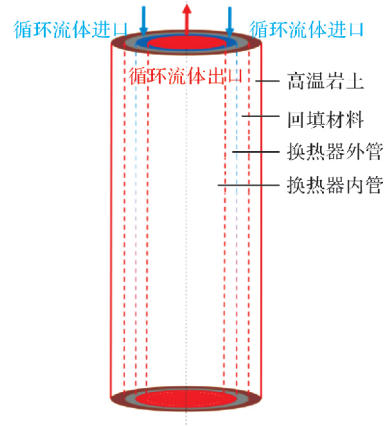
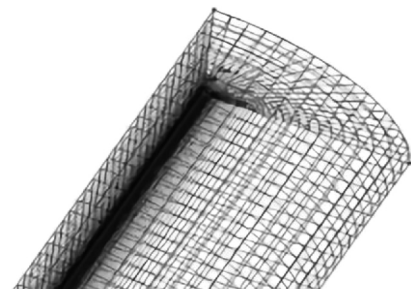


图 1 中深层套管式地埋管换热器示意图(外进内出式)

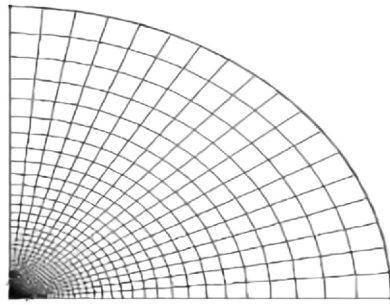
Fig. 1 Schematic diagram of the coaxial deep borehole heat exchanger (coaxial pipe with annular inlet).

中深层套管式地埋管换热器外管管材选用 J55 特种钢材,其热导率为  $45 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,内管材料选用高密度聚乙烯(HDPE),其热导率为  $0.44 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ .回填材料应在满足流动性、抗压能力要求的前提下选用高导热材料,本文选用高导热固井水泥作为回填材料,其密度为  $2\ 283 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,热导率为  $1.8 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,比热容为  $1\ 172 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ .在本文研究中将岩土设置成为单层地质结构层,岩土热物性依据陕西省地质结构进行设置,主要组成成分为含砂砾卵石,其热导率为  $2.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ .

由于中深层套管式换热器的高度对称性,本文取其中  $1/4$  圆柱体进行网格划分,同时可使网格数量进一步减少.采用 GAMBIT 软件进行几何建模并划分网格,各区域网格划分的最终结果如图 2 所示.



(a) 竖直方向



(b) 横截面

图2 各部分网格划分情况

Fig. 2 Grid division of each part

### 1.5 网格独立性验证

网格质量会对模拟输出结果的准确性产生直接影响,所以划分后应进行网格独立性检验,保证其划分情况不会对结果造成显著影响.本文划分了5个网格密度水平,模拟结果如图3所示.

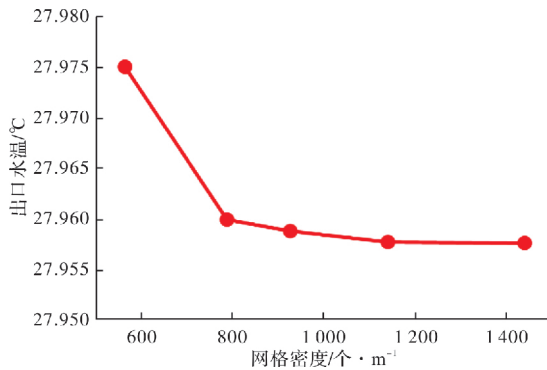


图3 预测不同网格密度下的出口温度

Fig. 3 Predicted outlet temperature under different grid density

由图3可以看出,模拟运行7 d(168 h)后,套管式地埋管换热器模型随着网格密度的增加,出口水温逐渐降低,并趋于平缓,出口水温最大温差约0.2℃.当网格密度大于926个/m时,出口水温变化小于0.01℃,为了便于计算,采用的网格密度为1141个/m.

## 2 模型验证

实验测试选取陕西省西安市某中深层地埋管地热供热示范项目.此示范工程项目的中深层套管式地埋管换热器主要结构参数如表1所示.

图4为中深层套管式地埋管换热器循环流体出口水温在12月10日~12月15日的实验值与模拟值,可以观察到,本研究模型出口水温与实测值误差控制在5%之内,最大仅为4.25%.因此可以证明,本文建立的中深层套管式地埋管换热器三维传热模型具有准确性.

表1 示范工程中中深层地埋管换热器主要参数

Tab. 1 Main parameters of the coaxial deep borehole heat exchanger used in the demonstration project

名称	选值	单位
埋深	2 000	m
内管外径	110	mm
内管壁厚	10	mm
外管外径	177.8	mm
外管壁厚	9.19	mm
固井管壁厚	66.6	mm

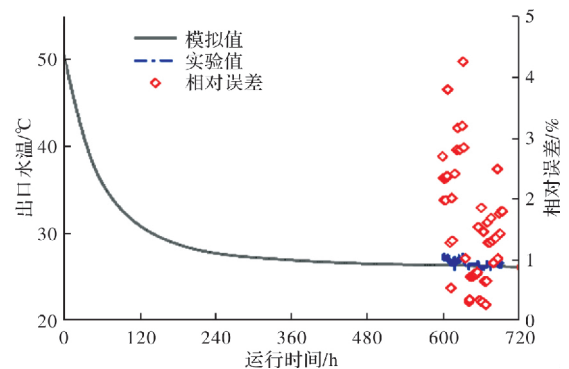


图4 实验结果与模拟结果对比

Fig. 4 Comparison between experimental values and simulation values

## 3 正交试验方案设计及试验结果

### 3.1 正交试验设计

正交试验指针对分析不同因素及其水平指标所产生具体影响而开展的试验.正交试验在设计过程中基于正交性原则,在所有的试验中选取分散较均匀、具有较强可比性的试验点开展试验过程,进而能够在有效减少试验开展次数的情况下,得出跟全面试验具有同等效果的结果,并迅速确定最优试验方案<sup>[10]</sup>.因具有高效、快捷且经济的优势,正交试验法被广泛应用于科学研究中.设计参数、地质条件、运行工况等多种因素都会对中深层地埋管换热器的换热性能产生重要影响,明确因素的影响显著性是十分必要的,因此本文将围绕着这些因素展开详细分析.在定流量工况下,重点考察入口温度、埋深、内管径、岩土热导率与地温梯度这5个主要因素对换热性能的影响.

正交试验总的影响因素为5个,各因素的水平数设为4,根据因素水平表选用正交试验表 $L_{16}(4^5)$ ,各因素的各水平取值相对应的试验方案和试验求解结果见表2,将出入口温差设定为目标参数.各工况循环水流量均为11.16 kg/s.

表 2 正交试验方案和试验结果

Tab. 2 Schemes and results of orthogonal test

工况	模拟参数				
	A: 入口温度 /℃	B: 岩土热导率 /W·(m·K) <sup>-1</sup>	C: 地温梯度 /℃·km <sup>-1</sup>	D: 埋深 /m	E: 内管径 /m
1	10	2	20	1 500	0.06
2	10	2.5	30	2 000	0.08
3	10	3	40	2 500	0.10
4	10	3.5	50	3 000	0.12
5	15	2	30	2 500	0.12
6	15	2.5	20	3 000	0.10
7	15	3	50	1 500	0.08
8	15	3.5	40	2 000	0.06
9	20	2	40	3 000	0.08
10	20	2.5	50	2 500	0.06
11	20	3	20	2 000	0.12
12	20	3.5	30	1 500	0.10
13	25	2	50	2 000	0.10
14	25	2.5	40	1 500	0.12
15	25	3	30	3 000	0.06
16	25	3.5	20	2 500	0.08

3.2 正交试验结果

以进出口水温为目标变量，模拟结果如表 3 所示。

表 3 正交试验结果

Tab. 3 Results of orthogonal test

工况	因数组合	出口温度/℃	出入口温差/℃
1	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub> E <sub>1</sub>	11.39	1.39
2	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub> E <sub>2</sub>	12.64	2.64
3	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>3</sub> E <sub>3</sub>	14.36	4.36
4	A <sub>1</sub> B <sub>4</sub> C <sub>4</sub> D <sub>4</sub> E <sub>4</sub>	17.41	7.41
5	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub> D <sub>3</sub> E <sub>4</sub>	15.68	0.68
6	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> D <sub>4</sub> E <sub>3</sub>	17.01	2.01
7	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>4</sub> D <sub>1</sub> E <sub>2</sub>	17.32	2.32
8	A <sub>2</sub> B <sub>4</sub> C <sub>3</sub> D <sub>2</sub> E <sub>1</sub>	19.23	4.23
9	A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub> D <sub>4</sub> E <sub>2</sub>	25.67	5.67
10	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>4</sub> D <sub>3</sub> E <sub>1</sub>	22.42	2.42
11	A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub> E <sub>4</sub>	25.48	5.48
12	A <sub>3</sub> B <sub>4</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub> E <sub>3</sub>	21.03	1.03
13	A <sub>4</sub> B <sub>1</sub> C <sub>4</sub> D <sub>2</sub> E <sub>3</sub>	28.65	3.65
14	A <sub>4</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub> D <sub>1</sub> E <sub>4</sub>	28.11	3.11
15	A <sub>4</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub> D <sub>4</sub> E <sub>1</sub>	29.21	4.21
16	A <sub>4</sub> B <sub>4</sub> C <sub>1</sub> D <sub>3</sub> E <sub>2</sub>	28.90	3.90

3.3 正交试验结果分析

正交试验极差法具有简单直观、清晰易懂的特点，该方法在考虑某一因素影响性时，认为目标参数的差异均是由该因素引起的<sup>[11]</sup>。该因素极差越大，表示该因素在试验范围内变化时，引起目标参数的变化越大，因而为主要影响因素<sup>[12]</sup>，计算式为：

$$k_i = \frac{1}{s} \sum_{k=1}^s y_k \tag{6}$$

$$R = \max(k_i) - \min(k_i) \tag{7}$$

式中： $k_i$  为该列因素取水平  $i$  时正交试验结果的算术平均值； $s$  为该列因素在水平  $i$  下的试验次数； $y_k$  为第  $k$  个试验的指标值； $R$  为该列因素的极差。中深层套管式地埋管换热器进出口温差的极差分析结果见表 4。

表 4 进出口温差极差的分析结果

Tab. 4 Analysis of temperature difference between inlet and outlet of orthogonal test

极差分析	入口温度	岩土热导率	地温梯度	埋深	内管径
$K_1$	15.80	11.38	12.78	7.85	12.24
$K_2$	9.24	10.18	8.56	16.00	14.53
$K_3$	14.60	16.37	11.80	11.36	11.05
$K_4$	14.87	16.57	15.79	19.30	16.68
$R_i$	6.56	6.39	7.23	11.45	5.63

经极差分析可得，入口温度、岩土热导率、地温梯度、埋深和内管径的极差分别为 6.56、6.39、7.23、11.45、5.63，因而各因素对中深层套管式地埋管换热器性能的影响显著性为：埋深>地温梯度>入口温度>岩土导热率>内管径。

4 换热量与成本分析

工程中十分关注的一个问题是中深层套管式换热器并深如何选取，才能在保证取热量的前提

下,尽可能减少资金投入.换句话说,是否存在一个最优深度,既能保证满足供热负荷,还可在初始投资和后续运行中体现经济性优势.本节将基于一中深层地热埋管供热系统开展经济性估算,以期对此问题进行展开说明.

#### 4.1 系统初投资

中深层地热埋管地热的初投资  $C_z$  由钻井成本  $C_d$ 、管材成本  $C_l$  和地源热泵机组成本  $C_{hp}$  组成,本文将参照陕西省西安市某示范项目对以上三部分成本进行估算,并以 20 a 为系统寿命周期计算每年的投资成本.

##### (1) 钻井成本

依据调研实际示范工程所用预算,得知陕西地区埋管换热器的钻井成本约为 500~600 元/m,本研究以 600 元/m 标准对钻井成本进行估算.据此各种不同钻井深度下的费用  $C_d$  如表 5 所示.

表 5 不同埋深埋管换热器钻井成本

Tab. 5 Drilling costs of deep borehole heat exchanger with different buried depths

埋深/m	1 500	2 000	2 500	3 000	3 500
钻井成本/千元	900	1 200	1 500	1 800	2 100

##### (2) 管材成本

中深层套管式换热器目前常用内外管管材如下:内管材料选取为高密度聚乙烯(HDPE)管,外管材料为 J55 特种钢管.根据示范工程项目的预算规划,高密度聚乙烯(HDPE)管成本为 40 元/m, J55 特种钢管成本为 400 元/m,即中深层套管式埋管换热器管材综合成本为 440 元/m,由此可以计算出各个埋深下的管材成本,数据如表 6 所示.

表 6 不同埋深埋管换热器管材成本

Tab. 6 Tube material costs of deep borehole heat exchanger with different buried depths

埋深/m	1 500	2 000	2 500	3 000	3 500
管材成本/千元	660	880	1 100	1 320	1 540

##### (3) 地源热泵机组成本

地源热泵机组的初投资可根据供热量进行估算,由工程示范项目数据估算出每千瓦换热量的地源热泵机组的价格为 600 元.

#### 4.2 水泵的运行成本

提高中深层套管式埋管换热器的入口流速有利于提高其取热能力,但同样也会出现阻力损失增大、水泵功耗增加、水泵运行成本上升等一系列问题.为明确水泵运行成本,本研究将通过计算套管式埋管换热器的沿程阻力与局部阻力

得出水泵的净功耗,最终依据陕西省目前电价计算出水泵运行成本.

中深层埋管换热器管内流体在流动过程中由于受到摩擦力作用,压降会产生阻力损失.摩擦力受当量糙粒高度  $K$  和流量  $q$  的影响.中深层套管式埋管换热器的内管为 HDPE 管,查得内管当量糙粒高度  $K_1$  为 0.001 5 mm,外管材料为无缝钢管 J55 特种钢材,查得该种钢材当量糙粒高度  $K_2$  为 0.015 mm.

##### (1) 沿程阻力

流体流动过程中由于受到沿程阻力而发生的损耗,是构成粘性耗散的一个关键部分.假设循环流体为不可压缩流体,则沿程阻力损失可用公式(8)进行求解.

$$h'_f = \lambda' \frac{l}{d} \frac{\rho u^2}{2} \quad (8)$$

式中,  $h'_f$  为沿程阻力损失, Pa;  $\lambda'$  为沿程阻力系数;  $l$  为管长, m;  $d$  为当量直径, m;  $\rho$  为循环流体的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $u$  为截面平均流速, m/s.

由资料<sup>[13]</sup>可知沿程阻力系数  $\lambda$ 、 $Re$  的计算式分别为

$$\lambda' = 0.11 \left( \frac{K}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0.25} \quad (9)$$

$$Re = \frac{ud}{\nu} \quad (10)$$

式中:  $\lambda'$  为沿程阻力系数;  $K$  为当量糙粒高度, mm;  $d$  为当量直径, m;  $Re$  为雷诺数;  $u$  为截面平均流速, m/s;  $\nu$  为运动粘度, m<sup>2</sup>/s.

循环流体在环腔中流动时,会与外管内壁及内管外壁产生摩擦.考虑到内外管管材存在差异,环腔区域的当量糙粒高度将综合考虑两类材料的特性,使用面积加权平均法对其进行计算,具体求解方法参照公式(11).

$$K_c = \frac{K_1 A_1 + K_2 A_2}{A_1 + A_2} \quad (11)$$

式中:  $K_c$  为平均当量糙粒高度, mm;  $K_1$  为内管外壁当量糙粒高度, mm;  $A_1$  为内管外壁面积, m<sup>2</sup>;  $K_2$  为外管内壁当量糙粒高度, mm;  $A_2$  为外管内壁面积, m<sup>2</sup>.

##### (2) 局部阻力

循环水在外管环腔底部流入内管时,会产生局部阻力,由于针对特定区域的阻力进行计算时复杂度较高,本文采用估算法进行计算.相关研究结果<sup>[14]</sup>表明,局部阻力损失和沿程阻力损失之间存在一定的关系,为了简便计算套管装置的局部阻力,本研究取沿程阻力的 2% 进行估算.

(3)总阻力

总阻力即为沿程阻力  $h'_f$  与局部阻力  $h'_s$  的  
加和：

$$h'_z=h'_f+h'_s \tag{12}$$

式中： $h'_z$  为换热器总阻力，Pa； $h'_f$  为沿程阻力，  
Pa； $h'_s$  为管段局部阻力，Pa。

(4)净耗功率

忽略地埋管换热器侧分集水器、机组蒸发器  
及其主管线的阻力损失，仅考虑地埋管环路的压  
力损失，则循环水泵净耗功率近似为

$$P=\frac{h'_zq}{1\,000} \tag{13}$$

式中： $P$  为水泵净耗功率，kW； $q$  为循环水的质  
量流量，kg/s； $h'_z$  为换热器总阻力，Pa。

(5)运行成本

本文采用西安市工业用电电价计算水泵的运行  
成本。根据陕西物价局《关于调整陕西电网电力价  
格的通知》规定中峰、谷、平值，求解出工业平均用  
电价格为 0.818 元/kW·h。在一个供暖季(120 d)下所  
需电费结果如图 5 所示。从图中可以看出，内外管  
径一定的条件下，埋深增大导致运行成本增加，且  
随着流量增长，运行成本增加幅度越来越大。

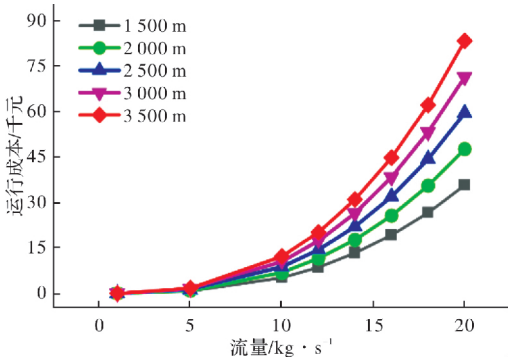


图 5 水泵运行成本随流量的变化

Fig. 5 Variation of pump operation cost with flow rate

在 Origin 软件中采用 Allometricl 模型进行拟  
合，得到运行成本随流量变化的拟合关系，具体  
结果列示在表 7 中：

表 7 中深层套管式地埋管换热器运行成本  
随流量变化的拟合结果

Tab. 7 Fit results of operation cost of deep borehole heat  
exchanger with flow rate

埋深/m	拟合结果
1 500	$0.008\,84q^{2.772}$
2 000	$0.011\,79q^{2.772}$
2 500	$0.014\,74q^{2.772}$
3 000	$0.017\,69q^{2.772}$
3 500	$0.020\,64q^{2.772}$

4.3 极限换热量

一个供暖季时间内地埋管换热器的换热量  $Q$   
与流量  $q$  的关系为

$$Q=\frac{c_p t \Delta T q}{1\,000} \tag{14}$$

式中： $Q$  为地埋管换热器换热量，kW·h； $c_p$  为  
循环水比热容，kJ/(kg·K)； $t$  为运行时间，h；  
 $\Delta T$  为进出口温差，K； $q$  为循环水质量流量，  
kg/s。

中深层套管式地埋管换热器的进出口温差保  
持不变前提下，循环水流量大时系统取热量更  
高，但循环水温降低幅度也更大，甚至可能出现  
地埋管出口水温过低导致系统结冰从而无法正  
常运行。通过改变流量，将中深层套管式地埋  
管换热器一个供暖季内所能取出的最多热量定  
义为极限换热量  $Q_{\max}$ 。模拟进出口温差保持  
10℃不变，分析不同流量下地埋管换热器的  
入口水温变化以确定流量和出口水温的关系。  
图 6 为 2 000 m 深地埋管换热器流量为 6.5  
kg/s、6.7 kg/s、7 kg/s、7.2 kg/s 和 7.4 kg/s  
时的供暖季末入口水温，考虑温度在 0℃以  
上(防止系统结冰)，此时最大流量约为 7.565  
kg/s，可以得出 2 000 m 深套管式地埋管换  
热器在供暖季内极限换热量为 911.141 kW·h。  
同理可以得到 1 500 m、2 500 m、3 000 m 和  
3 500 m 埋深下的极限换热量分别为 449.127  
kW·h、1 358.942 kW·h、1 889.970 kW·h 和  
2 508.317 kW·h，对应的流量分别为 3.729  
kg/s、11.283 kg/s、15.692 kg/s 和 20.826  
kg/s。

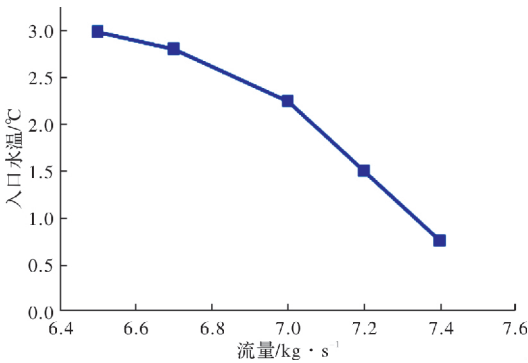


图 6 中深层地埋管换热器入口水温随流量的变化

Fig. 6 Outlet temperature variation of the deep borehole heat  
exchanger under different flow rates

4.4 平均能源成本

本文采用平均能源成本法来评价中深层套管  
式地埋管换热器的经济性，进而寻找中深层套  
管式地埋管换热器的最优深度。平均能源成本  
的含义为提取单位千瓦时热量的具体成本，可  
由初投

资  $C_z$ 、运行成本  $C_y$  组成的总成本和极限换热量  $Q_{\max}$  计算, 如式(15)所示:

$$AEC = \frac{C_z + C_y}{Q_{\max}} \quad (15)$$

式中:  $AEC$  为中深层套管式地埋管换热器的平均能源成本, 元/  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ;  $C_z$  为系统的初投资, 元;  $C_y$  为水泵的运行成本, 元;  $Q_{\max}$  为极限换热量,  $\text{kW} \cdot \text{h}$ .

#### 4.5 埋深和平均能源成本的关系

1 500 m、2 000 m、2 500 m、3 000 m 和 3 500 m 的套管式地埋管换热器平均能源成本分别为 0.152 元/  $\text{kW} \cdot \text{h}$ 、0.149 元/  $\text{kW} \cdot \text{h}$ 、0.138 元/  $\text{kW} \cdot \text{h}$ 、0.140 元/  $\text{kW} \cdot \text{h}$  和 0.155 元/  $\text{kW} \cdot \text{h}$ . 以埋深为横坐标, 该埋深下的平均能源成本为纵坐标, 绘制埋深和极限换热量、平均能源成本的关系图, 如图 7 所示.

从图 7 中可以看出, 随着埋深的加深, 对应的极限换热量也不断增大, 呈现出随埋深近似线性变化的特点; 埋深所对应的平均能源成本则表现出先减小后增加的趋势, 3 500 m 中深层套管式地埋管换热器的平均能源成本最高, 2 500 m 中深层套管式地埋管换热器平均能源成本最低, 两者相差 0.014 元/  $\text{kW} \cdot \text{h}$ . 从经济性角度考虑, 在这五个埋深中, 2 500 m 埋深经济性最优.

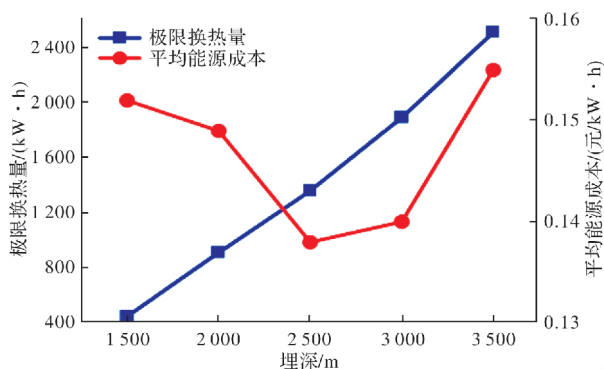


图 7 中深层地埋管换热器平均能源成本随埋深的变化

Fig. 7 Variation of the average energy cost of the deep borehole heat exchanger with buried depth

## 5 结论

(1)通过正交试验可得, 外进内出式中深层套管式地埋管换热器的影响因素在研究范围内的影响权重依次为: 埋深 > 地温梯度 > 入口温度 > 岩土热导率 > 内管径;

(2)为使中深层套管式地埋管换热器获取更高的换热量, 在地热资源丰富的地区综合考虑各类成本, 设计时在经济允许范围内应优先考虑加大

埋深并适时降低换热器的入口水温; 内管径变化在各因素中对取热能力影响最小, 在设计中应结合水泵功耗以确认内管径的取值范围综合考虑;

(3)综合系统初投资和运行成本, 本文提出了一种以平均能源成本为指标的中深层地埋管换热器经济性评价方法. 在本文给定的设计参数、地质条件及运行工况下随着埋深加深, 对应的平均能源成本在 1 500~3 500 m 范围内先减小后增大, 在 1 500 m、2 000 m、2 500 m、3 000 m 和 3 500 m 这 5 个埋深中, 2 500 m 埋深的平均能源成本最低, 经济性最优.

## 参考文献 References

- [1] DENG Jiewen, HE Shi, WEI Qingpeng, et al. Field test and optimization of heat pumps and water distribution systems in medium-depth geothermal heat pump systems[J]. Energy and Buildings, 2020, 209: 109724.
- [2] 孔彦龙, 陈超凡, 邵亥冰, 等. 深井换热技术原理及其换热量评估[J]. 地球物理学报, 2017, 60(12): 4741-4752.  
KONG Yanlong, CHEN Chaofan, SHAO Haibing, et al. Principle and capacity quantification of deep borehole heat exchangers[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(12): 4741-4752.
- [3] 王硕, 殷元生, 黄可钦, 等. 同轴套管深埋管换热器延米换热量变化规律的研究[J]. 工业加热, 2019, 48(2): 5-9.  
WANG Shuo, YIN Yuansheng, HUANG Keqin, et al. Research on the change of heat transfer rate per meter in deep coaxial borehole heat exchanger[J]. Industrial Heating, 2019, 48(2): 5-9.
- [4] LIANG Fang, DIAO Nairen, SHAO Zhukun, et al. A computationally efficient numerical model for heat transfer simulation of deep borehole heat exchangers[J]. Energy and Buildings, 2018, 167: 79-88.
- [5] 卜宪标, 冉运敏, 王令宝, 等. 单井地热供暖关键因素分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53: 1-8.  
BU Xianbiao, RAN Yunmin, WANG Lingbao, et al. Analysis of key factors affecting single well geothermal heating[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53: 1-8.
- [6] 李鹏程. 中深层地热源热泵套管式地埋管换热器传热特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.  
LI Pengcheng. Research of heat transfer characteristics of casing ground heat exchanger with medium and deep ground source heat pump[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.

- [7] SHABNAM G, EMAD M, SEYED J H A B, et al. Feasibility study of geothermal heat extraction from abandoned oil wells using a U-tube heat exchanger[J]. Energy, 2018, 153: 554-567.
- [8] LUO YQ, GUO HS, MEGGERS F, et al. Deep coaxial borehole heat exchanger: Analytical modeling and thermal analysis[J]. Energy, 2019, 185: 1298-1313.
- [9] 陶文铨. 计算传热学的近代进展[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- TAO Wenquan. Recent advances in computational heat transfer[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [10] 郝拉娣, 于化东. 正交试验设计表的使用分析[J]. 编辑学报, 2005(5): 334-335.
- HAO Ladi, YU Huadong. On use of orthogonal experimental design[J]. Acta Editologica, 2005(5): 334-335.
- [11] ELGENDY E, SCHMIDT J. Optimum utilization of recovered heat of a gas engine heat pump used for water heating at low air temperature[J]. Energy and Buildings, 2014, 80: 375-383.
- [12] DEMIR H, KOYUN A, TEMIR G. Heat transfer of horizontal parallel pipe ground heat exchanger and experimental verification[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(2/3): 224-233.
- [13] 蔡增基, 龙天渝. 流体力学泵与风机[M]. 第五版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- CAI Zengji, LONG Tianyu. Hydrodynamic pumps and fans[M]. 5th ed. Beijing: China Building Industry Press, 2009.
- [14] 张海琳, 余跃进, 胡纯良. 地埋管地源热泵地埋管管径的选取[J]. 暖通空调, 2012, 42(12): 114-117.
- ZHANG Hailin, YU Yuejin, HU Chunliang. Selection of pipe diameter for ground source heat pump system[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2012, 42(12): 114-117.

(编辑 吴海西 沈 波)

(上接第 841 页)

- [23] JIA J, LEE W L, CHENG Y. Field demonstration of a first constant-temperature thermal response test with both heat injection and extraction for ground source heat pump systems[J]. Applied Energy, 2019, 249: 79-86.
- [24] SANNER B, HELLSTROM G, SPITLER J, et al. Thermal response test-current status and world-wide application[C] // Proceedings world geothermal congress. Antalya, Turkey: International Geothermal Association, 2005.
- [25] WANG H, QI C, DU H, et al. Improved method and case study of thermal response test for borehole heat exchangers of ground source heat pump system[J]. Renewable Energy, 2010, 35(3): 727-733.
- [26] YU X, ZHANG Y, DENG N, et al. Thermal response test for ground source heat pump based on constant temperature and heat-flux methods[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 93: 678-682.
- [27] AYDIN M, ONUR M, SISMAN A. A new method for analysis of constant-temperature thermal response tests[J]. Geothermics, 2019, 78: 1-8.
- [28] CHOI W, KIKUMOTO H, OOKA R. New perspectives in thermal performance test: Cost-effective apparatus and extended data analysis[J]. Energy and Buildings, 2018, 180: 109-121.
- [29] JIA J, LEE W L, CHENG Y. Field demonstration of a first constant-temperature thermal response test with both heat injection and extraction for ground source heat pump systems[J]. Applied Energy, 2019, 249: 79-86.
- [30] INGERSOLL L R, PLASS H J. Theory of the ground pipe heat source for the heat pump[J]. Heat Piping Air Cond, 1948, 20: 119-122.

(编辑 吴海西 沈 波)