

文章编号: 1671-6612 (2026) 02-155-09

# 渗流作用下 中深层地埋管取热性能和岩土温度场研究

郭子康<sup>1</sup> 鲍玲玲<sup>1,2</sup> 陈鹏云<sup>1</sup> 张永欢<sup>1</sup> 刘治鸣<sup>1</sup>

(1.河北工程大学能源与环境工程学院 邯郸 056038;

2.河北省暖通空调工程技术创新中心 邯郸 056038)

**【摘要】** 为探究渗流作用对中深层U型地埋管换热器出口温度及岩土恢复特性的影响,通过Gambit建立了三维中深层地埋管换热器传热模型,并利用实测数据加以验证。研究表明:地下水渗流作用有利于增强换热器取热性能,地埋管出口温度提升0.99℃;地下水渗流速度超过 $u=1\times 10^{-7}$ m/s,对地埋管性能影响较明显,有利于围岩温度恢复;岩土孔隙率的增加能够有效提高地埋管出口温度并且有利于岩土温度恢复;相较于浅层渗流层,深层渗流层对地埋管出口温度和围岩温度场恢复的影响较大。

**【关键词】** 中深层U型地埋管换热器;地下水渗流;岩土分层;岩土温度场

中图分类号 TK529 文献标志码 A

## Study on the Heat Extraction Performance and Soil Temperature Field of Buried Pipes in the Middle and Deep Layers under Seepage Action

Guo Zikang<sup>1</sup> Bao Lingling<sup>1,2</sup> Chen Pengyun<sup>1</sup> Zhang Yonghuan<sup>1</sup> Liu Zhiming<sup>1</sup>

(1.School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, 056038;

2.Hebei Province HVAC Engineering Technology Innovation Center, Handan, 056038)

**【Abstract】** To investigate the effects of seepage on the outlet temperature of a medium-deep U-shaped buried tube heat exchanger and on the thermal recovery characteristics of surrounding rock and soil, a three-dimensional heat transfer model for a medium-deep buried heat exchanger was developed in Gambit and validated with measured data. The findings indicate that groundwater seepage enhances the heat extraction performance of the exchanger, increasing the outlet temperature by 0.99 °C. When the groundwater seepage velocity exceeds  $u=1\times 10^{-7}$ m/s, its impact on heat exchanger performance becomes pronounced, facilitating thermal recovery of the surrounding rock. Furthermore, an increase in rock and soil porosity effectively raises the outlet temperature and promotes thermal recovery. Compared to shallow infiltration layers, deep infiltration layers have a greater impact on the temperature at the outlet of buried pipes and the recovery of the surrounding rock temperature field.

**【Keywords】** Medium deep U-shaped buried pipe heat exchanger; Groundwater seepage; Rock and soil stratification; Geotechnical temperature field

## 0 引言

近几十年来,由于全球能源消耗加剧,环境问

题严重,可再生能源受到了越来越多的关注。中深层地热能因其储量丰富、持续性强等特点,从而得

基金项目:中深层热储温度衰减机制及可再生能源耦合系统研究(E2023402072)

作者简介:郭子康(2000.12-),男,在读硕士研究生,E-mail:3329528586@qq.com

通讯作者:鲍玲玲(1982-),女,博士,教授,E-mail:lingling5934@163.com

收稿日期:2025-05-26

到了广泛的应用。地源热泵系统（Ground Source Heat Pump, GSHP），逐渐成为建筑供暖和制冷领域的重要技术之一。地埋管换热器作为 GSHP 系统的关键组成部分，其性能直接关系到系统的整体能效<sup>[1]</sup>。在地埋管换热器的实际运行中，地下水渗流是影响系统性能的主要因素之一<sup>[2]</sup>。

当前已有学者开展中深层地埋管换热器研究。Song<sup>[3]</sup>和 Lous 等<sup>[4]</sup>建立了考虑地下水渗流的中深层地埋管数值模型。Bao 等<sup>[5]</sup>建立了考虑岩土分层和渗流的传热解析模型，得到了温度响应的解析解。王昌龙等<sup>[6]</sup>在移动线热源模型的基础上考虑地下水渗流，提出了一种中深层地埋管换热器半解析模型，研究表明其精度高于无渗流的半解析模型。杨心柳<sup>[7]</sup>建立了中深层同轴换热器模型，研究发现渗流作用下换热器出口温度升高 1.1℃，取热功率增加 4.3%。冯绍航、陈静平等<sup>[8,9]</sup>建立了深层 U 型地热井换热数值模型，研究发现取热井壁壁面周围岩土温度恢复情况呈现先快后慢的趋势。当前，地下水渗流对中深层地埋管换热器的影响研究仍然较少，而地下水渗流对浅层地埋管换热器的影响已有大量研究。滕剑波等<sup>[10]</sup>依据相似准则，搭建同等比例缩小地埋管换热器实验模型，研究表明渗流会增强土壤与地埋管换热器的换热过程，有利于周围土壤温度的恢复。丁翰婉等<sup>[11]</sup>和刘兵红等<sup>[12]</sup>发现渗流有利于土壤温度的恢复，并且土壤的温度场向着地下水渗流的方向偏移，偏移距离和渗流速度有关。杨军等<sup>[13]</sup>建立了垂直 U 型地埋管换热模型，研究发现渗流速度为 10m/a 时，单位井深换热量相较于无渗流工况增加了 6.33%。刘媛媛等<sup>[14]</sup>建立了三维 U 型地埋管非稳态传热模型，研究发现地下水渗流会提高地埋管换热效率。孙琬等<sup>[15]</sup>通过分析不同地下水径流条件下的系统换热性能，发现单位井深换热功率与渗流速度呈线性关系。蔡学龙等<sup>[16,17]</sup>研究发现平行渗流方向传热能力较于无渗流条件下增加了 7%。

当下，针对地下水渗流对中深层 U 型换热器的研究仍少，有必要说明渗流速度、孔隙率等参数对换热器性能和岩土温度场的影响。本文依托实际工程，综合考虑地下水渗流和土壤分层，建立三维传热模型，通过数值模拟的方式，分析换热器取热性能和岩土温度场变化规律。

## 1 U 型井概况

### 1.1 位置结构

目标井为邯郸东部地区已建成使用的中深层 U 型井，该井由斜井和直井组成，分为注水井、连接井、水平井和出水井四部分。地热井井深结构、管径配比、几何尺寸等如图 1 所示。

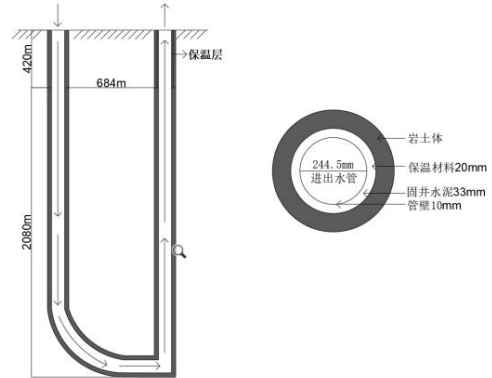


图 1 地热井几何结构

Fig.1 Geothermal well geometry

### 1.2 围岩分层

地热井所在地层自上而下分别为第四系（Q）、新近系上新统明化镇组（N2m）、新近系中新统馆陶组（N1g）、古近系渐新统东营组（E3d）、古近系始新统沙河街组（E2s）五类地质层。其中新近系明化镇组和馆陶组地质层为主要的热储地质层。基于各个地质层物性参数的不同，将地埋管理深分为五个地质区域，其物性参数如表 1 所示。

表 1 地质分层物性参数

Table 1 Geological stratification physical property parameters

地层	厚度 /m	深度 /m	体积比热容 / $(J/m^3 \cdot K)$	导热系数 / $[W/(m \cdot K)]$
第四系	420	420	$1.379 \times 10^6$	1.8
明化镇组	620	1040	$1.3 \times 10^6$	3.5
馆陶组	500	1540	$1.45 \times 10^6$	2.7
东营组	760	2300	$1.45 \times 10^6$	2.6
沙河街组	300	2600	$1.45 \times 10^6$	2.5

### 1.3 围岩温度

停钻 10 小时后开始以稳态测温法进行地温测量, 测温次数为 6 次, 最大测温深度为 2500m, 围岩温度测试结果如图 2 所示。经过校正, 该井地温梯度为 2.58°C/100m。

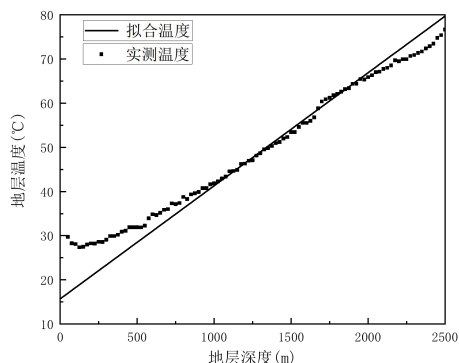


图 2 围岩温度

Fig.2 Surrounding rock temperature

## 2 模型建立

### 2.1 几何模型

本次模拟采用 ANSYS Fluent 软件进行模拟, 为保证模拟结果的准确性, 本次模拟严格按照 U 型地热井的井深几何数据搭建几何模型, 模型计算域如图 3 所示。在本研究中, 模型是根据实际尺寸建立的。其中, 地埋管设计为 U 型, 周围的岩土体则设定为长方体。岩土层自上而下共划分为五个层位, 分别是: 第四系 (深度范围 0-420 米)、第三系明化镇组 (420-1040 米)、第三系馆陶组 (1040-1540 米)、第三系东营组 (1540-2300 米), 以及第三系沙河街组 (2300-2600 米), U 型地热井结构示意图如图 4 所示。

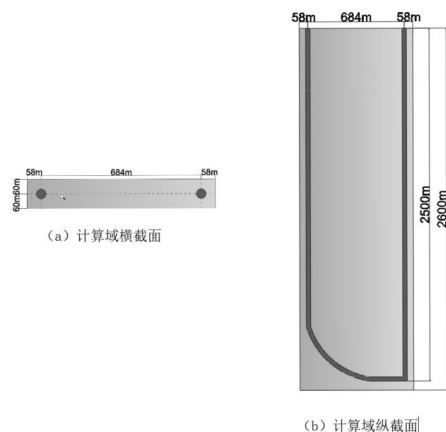


图 3 模型计算域

Fig.3 Model calculation domain

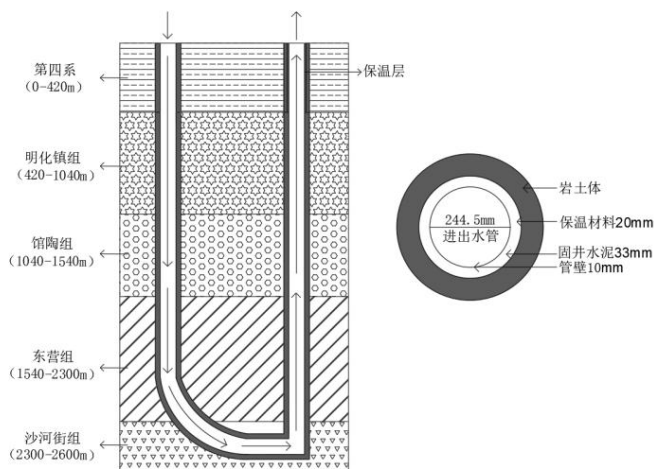


图 4 地埋管结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of the underground pipe structure

采用 ANSYS Gamit 软件进行建模和网格划分, 对流体流动区域边界层网格和地埋管水平段区域网格进行加密。同时对网格进行了无关性验证, 制定了 5 种不同网格数量分布方案, 如表 2 所示, 并计算得出第 720 小时出口温度如图 5 所示。在综合考虑计算精度和时间成本的前提下, 最终考虑采用方案 4 网格进行模拟计算。

表 2 网格数量分布方案

Table 2 Grid quantity distribution scheme

方案	1	2	3	4	5
网格数量 (万)	120	224	420	620	830

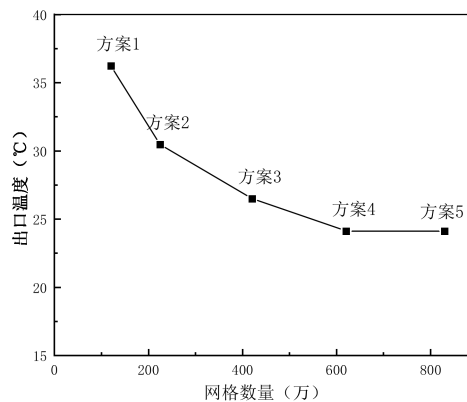


图 5 网格无关性验证

Fig.5 Grid independence verification

### 2.2 数学模型

#### 2.2.1 模型假设

(1) 地层表面温度视为恒定温度, 不随天气

等因素变化。当前计算域的尺寸和恒温边界的设定,是参考了文献[18]中的通用做法,该设定被广泛证明能够有效说明恒温边界条件下热影响区的扩展处于稳定状态,说明此模型具有可行性,同时平衡计算成本。

(2) 每一层岩土体视为多孔介质且各向同性,土壤横向温度均匀且物性参数不随温度变化。

(3) 地下水渗流只考虑水平方向且同一地层渗流速度一致,忽略轴向流动。邯郸东部地区中深层地质水文勘察数据(据《邯郸东部平原区地热资源地质勘察报告》),该区域中深层(埋深>400m)地层以砂泥岩互层为主,垂向渗透率仅为水平渗透率的1/10-1/50,轴向渗流量占比不足总渗流量的5%,因此忽略轴向流动对计算结果影响较小。

(4) 地下水渗流温度为土壤初始温度。

(5) 模型各个区域接触良好,忽略其接触热阻。

### 2.2.2 控制方程

循环水在埋管管内流动,从岩土体取热的过程是典型的热传导过程,包括管内流体与管壁换热过程、管壁的导热过程、回填材料导热过程、固井水泥导热过程、岩土体导热过程等五大过程。模拟涉及连续性方程、动量方程和能量方程。

管内循环水流动传热控制方程:

(1) 连续性方程:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

式中:  $p$  为循环水密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $u$  为速度矢量,  $\text{m}/\text{s}$ 。

(2) 动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_i u) = \nabla \cdot (\mu \nabla u_i) - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2)$$

式中:  $u_i$  为流体速度在  $x$  方向的分量,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $p$  为流体压力,  $\text{Pa}$ ;  $x$  为坐标轴。

(3) 能量方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho T u) = \nabla \cdot \left( \frac{k}{c_p} \nabla T \right) + S_T \quad (3)$$

式中:  $T$  为介质的温度,  $\text{K}$ ;  $k$  为介质的传热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $c_p$  为介质的定压比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $S_T$  为介质内热源项。

饱和多孔介质流动传热控制方程:

假设岩土体是由固液两态构成的、各向同性的饱和多孔介质,比热容和导热系数保持常物性。其中液态所占比例为  $\phi$ , 固态所占比例为  $1-\phi$ 。

(1) 连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (4)$$

式中:  $\phi$  为孔隙率。

(2) 动量方程:

$$\phi^{-1} \rho \frac{\partial u}{\partial \tau} + \phi^{-2} (u \cdot \nabla) u = -\nabla p + \quad (5)$$

$$\mu_m \nabla^2 u - \frac{\mu}{\alpha} \nabla^2 u - \frac{\mu}{\alpha} u - \frac{C_f \rho}{\sqrt{\alpha}} |u| u$$

式中:  $\mu_m$  为流体动力粘度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $C_f$  为无量纲阻力常数。

(3) 能量方程:

岩土体固态能量方程为:

$$(1-\phi)(\rho c)_s \frac{\partial T_f}{\partial \tau} = \quad (6)$$

$$(1-\phi) \nabla \cdot (\lambda_s \nabla T_s) + (1-\phi) q_s$$

式中: 下标  $s$  为岩土体固相。

岩土体液态能量方程为:

$$\phi(\rho c)_f \frac{\partial T_f}{\partial \tau} + (\rho c)_f (u \cdot \nabla) T_f \quad (7)$$

$$= \phi \nabla \cdot (\lambda_f \nabla T_f) + \phi q_f''$$

式中:  $f$  为岩土体液相;  $\rho c$  为体积比热容,  $(\text{J}/\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ;  $q''$  为单位体积内热源产生率,  $\text{W}/\text{m}^3$ 。

由于岩土体固液两态达到局部热平衡,则式

(7) 可改为:

$$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial \tau} + (\rho c)_f (u \cdot \nabla) T = \lambda_m \nabla^2 T + q_m \quad (8)$$

对于式(8)中采用局部热平衡的假设,参考了文献[19]中的数值分析结果,该结果表明:非局部热平衡模型和局部热平衡模型计算的结果和实验结果较好的吻合;所以在此时假设条件为局部热平衡是可行的,不会因为非局部热平衡条件而导致最终结果产生明显差异,说明了能量控制方程的可行性。

### 2.3 边界条件及参数设定

初始条件为管内循环水静止,循环水温度、管壁温度和固井材料温度与围岩温度一致。边界条件为计算域外侧温度与岩土体初始温度一致且保持

恒定, 岩土体温度采用实测拟合数据, 按照地层的分层特性, 地埋管具体参数如表 3 所示。

表 3 地埋管参数表

Table3 Parameters of buried pipes

参数	量值
井深	2500m
水平管长度	684m
注水井直径	311.7mm
出水井直径	244.5mm
对接井直径	244.5mm
管材定容比热	$3800 \times 10^3 / [J/(m^3 \cdot K)]$
管材导热系数	$41 / [W/(m \cdot K)]$
回填材料热容	$2500 \times 10^3 / [J/(m^3 \cdot K)]$
回填材料导热系数	$1.5 / [W/(m \cdot K)]$
地温梯度	$2.58^\circ C / 100m$
循环水流量	$19.4 / (kg/s)$
循环水导热系数	$0.618 / [W/(m \cdot K)]$
循环水比热容	$4.174 \times 10^3 / [J/(m^3 \cdot K)]$

### 2.4 模型验证

按照实测数据进行模拟计算得出出口温度, 将模拟出口温度与实测出口温度进行对比。

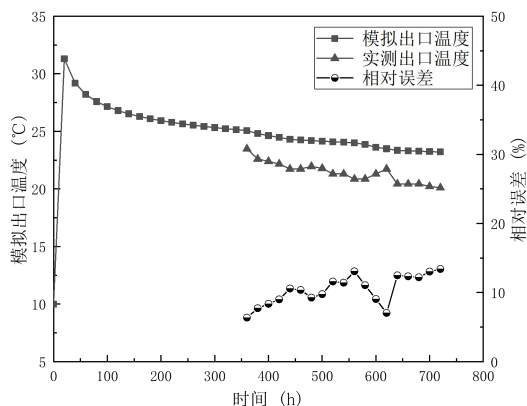


图 6 模拟结果与实测数据对比

Fig.6 Comparison between simulation results and measured data

图 6 是系统运行 720h 后的出口温度数据, 随着系统的运行, 出口温度逐渐趋于稳定。将模拟出口温度与实测出口温度在 360-720h 阶段进行对比验证, 验证得出模拟出口温度与实测出口温度最大相对误差为 13.40%, 最小相对误差为 6.36%, 平均相对误差为 9.88%。误差来源主要来自于物性参数、边界条件和渗流方向等方面, 本文模型岩土热

物性参数采用平均值、边界条件理想化、渗流方向忽略了其局部轴向渗流等, 因此产生了误差。但是, 综合看来误差主要来源于模型简化误差大小在可接受范围内, 因此认为本为提出的模型具有较高的准确性, 可以开展后续研究。

### 3 结果与分析

地下水渗流因素是影响地埋管换热器换热性能的主要因素之一。本文建立三维传热模型, 研究有无渗流条件、渗流速度、孔隙率、渗流位置等因素对地埋管出口温度及围岩温度场的影响规律。

#### 3.1 有无渗流条件

图 7 给出了 720h 后地埋管出口温度的变化情况, 从图中可以看出, 地埋管出口温度随热泵的运行逐渐下降并趋于稳定状态。在无渗流条件下, 地埋管出口温度始终低于有渗流条件下地埋管出口温度, 随着系统的运行, 二者温差逐渐增大, 表明渗流作用在系统运行中愈加明显。在系统运行 120 小时时, 有渗流作用下的出口温度比无渗流条件下高  $0.14^\circ C$ , 而 720 小时后, 温差增加至  $0.99^\circ C$ 。在系统运行 120 至 720 小时内, 有渗流作用下的平均出口温度比无渗流情况下高  $0.99^\circ C$ , 二者平均温差为  $0.99^\circ C$ 。

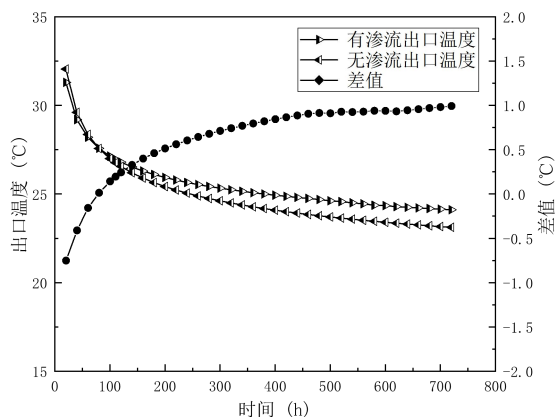


图 7 有无渗流工况地埋管出口温度对比

Fig.7 Comparison of outlet temperature of buried pipes with and without seepage conditions

#### 3.2 渗流速度

为了研究不同渗流速度下地埋管出口温度及围岩温度场的变化, 在其它参数不变的情况下, 模拟了渗流速度分别为  $u=1 \times 10^{-6} m/s$ 、 $u=1 \times 10^{-7} m/s$ 、 $u=1 \times 10^{-8} m/s$ 、 $u=1 \times 10^{-9} m/s$  的情况。

图 8 为地埋管换热器系统分别在  $u=1\times 10^{-6}\text{m/s}$ 、 $u=1\times 10^{-7}\text{m/s}$ 、 $u=1\times 10^{-8}\text{m/s}$ 、 $u=1\times 10^{-9}\text{m/s}$  时运行 720h 的出口温度。从图 8 中可以看出，120h 时出口温度由  $24.80^\circ\text{C}$  逐渐升高至  $24.81^\circ\text{C}$ ， $24.93^\circ\text{C}$ ， $26.80^\circ\text{C}$ ，平均出口温度为  $25.335^\circ\text{C}$ ，增加幅度分别为  $0.01^\circ\text{C}$ ， $0.12^\circ\text{C}$ ， $1.87^\circ\text{C}$ ；360h 时出口温度由  $23.26^\circ\text{C}$  逐渐升高至  $23.27^\circ\text{C}$ ， $23.39^\circ\text{C}$ ， $25.65^\circ\text{C}$ ，平均出口温度为  $23.90^\circ\text{C}$ ，增加幅度分别为  $0.01^\circ\text{C}$ ， $0.12^\circ\text{C}$ ， $2.26^\circ\text{C}$ ；480h 时出口温度由  $21.55^\circ\text{C}$  逐渐升高至  $21.56^\circ\text{C}$ ， $21.68^\circ\text{C}$ ， $24.69^\circ\text{C}$ ，平均出口温度为  $22.37^\circ\text{C}$ ，增加幅度分别为  $0.01^\circ\text{C}$ ， $0.12^\circ\text{C}$ ， $3.01^\circ\text{C}$ ；720h 时出口温度由  $20.52^\circ\text{C}$  逐渐升高至  $20.53^\circ\text{C}$ ， $20.65^\circ\text{C}$ ， $24.11^\circ\text{C}$ ，平均出口温度为  $21.45^\circ\text{C}$ ，增加幅度分别为  $0.01^\circ\text{C}$ ， $0.12^\circ\text{C}$ ， $3.46^\circ\text{C}$ 。

由图 8 可知，渗流速度的增加导致地埋管出口温度逐渐增加，且增加幅度逐渐增大。同时地埋管出口温度随运行时间的延长逐渐下降，这表示系统逐渐趋于稳定状态。

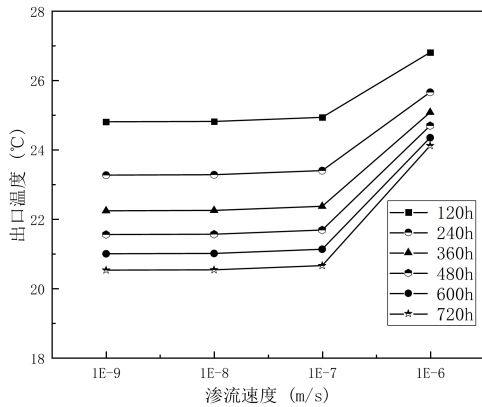
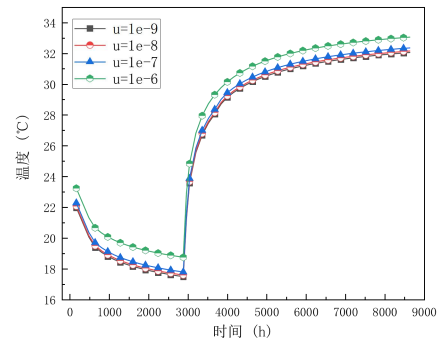


图 8 不同渗流速度地埋管出口温度图

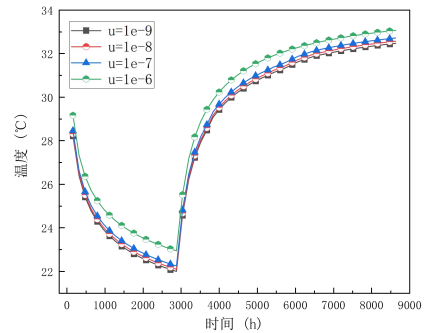
Fig.8 Temperature diagram of buried pipe outlet at different seepage velocities

对于地埋管换热器而言，地下岩土温度场热平衡可以保证系统运行的稳定性。然而，随着系统的运行，岩土温度会发生变化，从而影响系统性能。为研究不同渗流速度下地下岩土温度场的变化，对  $z=730\text{m}$  进水管右侧  $r=0.5\text{m}$ 、 $r=1\text{m}$ 、 $r=3\text{m}$ 、 $r=5\text{m}$  监测点进行监测，模拟结果如图 9 所示。

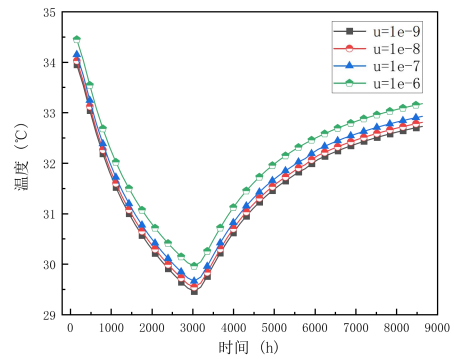
从图 9 可以看出，随着径向距离的增加，岩土体整体温度波动较小，分析其原因是靠近进水管壁面，管内流体与周围岩土体进行热交换，距离管壁较近的岩土换热强度大，温度降低，所以温度波动较大。



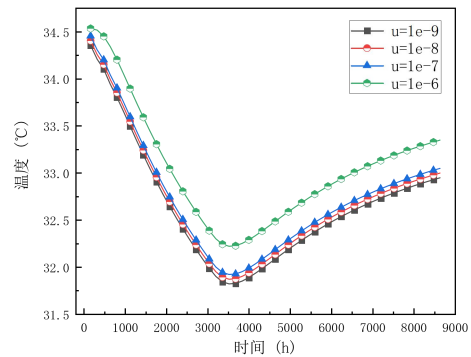
(a)  $r=0.5\text{m}$



(b)  $r=1\text{m}$



(c)  $r=3\text{m}$



(d)  $r=5\text{m}$

图 9 不同渗流速度下测点 ( $r=0.5\text{m}$ 、 $1\text{m}$ 、 $3\text{m}$ 、 $5\text{m}$ ， $z=730\text{m}$ ) 温度

Fig.9 Temperature at measuring points ( $r=0.5\text{m}$ ， $1\text{m}$ ， $3\text{m}$ ， $5\text{m}$ ， $z=730\text{m}$ ) under different seepage velocities

从图 9 (a) 中可以看出, 系统运行 1 年, 岩土体温度出现先降后增的现象, 且随着渗流速度的增加岩土体温度降低, 较低的渗流速度 (小于  $1 \times 10^{-7} \text{m/s}$ ) 的变化对岩土体温度影响较小。当渗流速度增加较高水平 (超过  $1 \times 10^{-7} \text{m/s}$ ) 后, 渗流所带来的影响较大。2880h 时, 随渗流速度的增加, 地温分别为  $21.21^\circ\text{C}$ 、 $21.31^\circ\text{C}$ 、 $21.51^\circ\text{C}$  和  $22.87^\circ\text{C}$ ; 8640h 时, 地温分别为  $32.05^\circ\text{C}$ 、 $32.15^\circ\text{C}$ 、 $32.35^\circ\text{C}$  和  $33.05^\circ\text{C}$ 。热恢复率分别为 92.82%、93.11%、93.69% 和 95.71%, 说明高渗流速度有利于地温恢复。

### 3.3 孔隙率

为了研究不同地下岩土孔隙率下地埋管出口温度及围岩温度场的变化, 在其它参数不变的情况下, 孔隙率分别设置为 0.30、0.35、0.40、0.45、0.50。

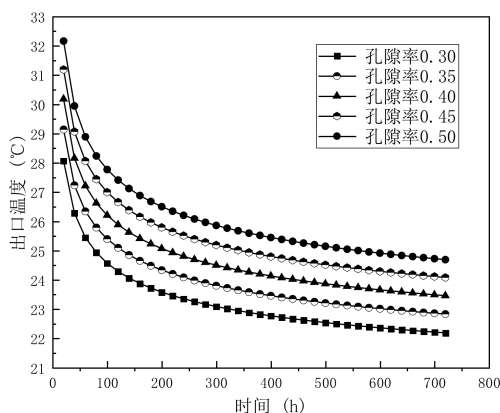
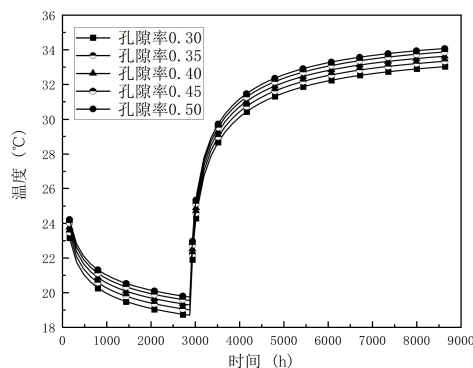


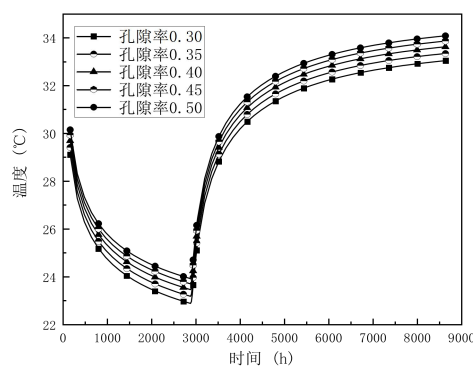
图 10 不同孔隙率从地埋管出口温度

Fig.10 Temperature at the outlet of buried pipes with different porosities

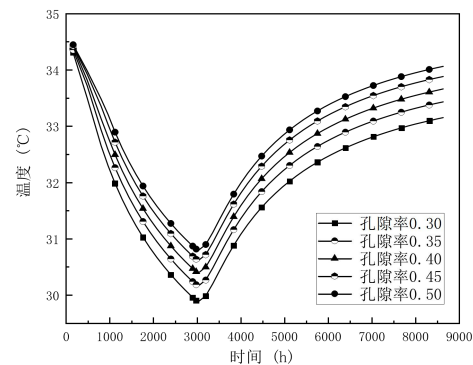
不同孔隙率地埋管出口温度情况模拟结果如图 10 所示, 从图 10 中可以看出, 随孔隙率的增大, 地埋管出口温度逐渐增大, 增加幅度逐渐减小。720h, 孔隙率为 0.30 时地埋管出口温度为  $22.19^\circ\text{C}$ , 孔隙率为 0.35 时地埋管出口温度为  $22.83^\circ\text{C}$ , 孔隙率为 0.40 时地埋管出口温度为  $23.46^\circ\text{C}$ , 孔隙率为 0.45 时地埋管出口温度为  $24.08^\circ\text{C}$ , 孔隙率为 0.50 时地埋管出口温度为  $24.69^\circ\text{C}$ , 温增分别为  $0.64^\circ\text{C}$ 、 $0.63^\circ\text{C}$ 、 $0.62^\circ\text{C}$ 、 $0.61^\circ\text{C}$ 。随着孔隙率的增加, 岩土层内地下水含量增多, 多孔介质热容增大, 传热系数降低, 不利于热量的传递。但随着孔隙率的增加, 岩土层内地下水含量增多, 导致地岩土与管壁对流换热增强。在两者的共同作用下, 孔隙率由 0.30 增大到 0.50, 地埋管出口温度提高  $2.50^\circ\text{C}$ 。



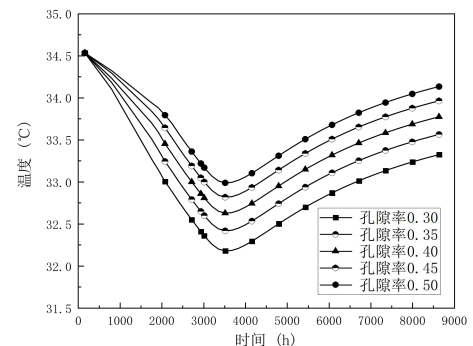
(a)  $r=0.5\text{m}$



(b)  $r=1\text{m}$



(c)  $r=3\text{m}$



(d)  $r=5\text{m}$

图 11 不同孔隙率下地层 ( $r=0.5\text{m}$ 、 $1\text{m}$ 、 $3\text{m}$ 、 $5\text{m}$ ,  $z=730\text{m}$ ) 温度

Fig.11 Temperature of formations with different porosities ( $r=0.5\text{m}$ ,  $1\text{m}$ ,  $3\text{m}$ ,  $5\text{m}$ ,  $z=730\text{m}$ )

从图 11 可以看出, 地埋管换热器运行一年后, 随着孔隙率的增大, 岩土温度波动幅度减弱, 温度变化减小, 且恢复后岩土温度最接近岩土初始温度。当  $r=0.5\text{m}$ , 孔隙率分别为 0.30、0.35、0.40、0.45、0.50 时, 恢复后岩土温度分别为  $33.02^\circ\text{C}$ 、 $33.34^\circ\text{C}$ 、 $33.60^\circ\text{C}$ 、 $33.85^\circ\text{C}$ 、 $34.05^\circ\text{C}$ , 温差分别为  $0.31^\circ\text{C}$ 、 $0.29^\circ\text{C}$ 、 $0.25^\circ\text{C}$ 、 $0.20^\circ\text{C}$ 。孔隙率增加对岩土温度的影响作用与围岩距离有关, 随距离的增加逐渐减弱。当  $r=3\text{m}$ , 孔隙率分别为 0.30、0.35、0.40、0.45、0.50 时, 恢复后岩土温度分别为  $33.15^\circ\text{C}$ 、 $33.43^\circ\text{C}$ 、 $33.66^\circ\text{C}$ 、 $33.87^\circ\text{C}$ 、 $34.06^\circ\text{C}$ , 温差分别为  $0.28^\circ\text{C}$ 、 $0.23^\circ\text{C}$ 、 $0.21^\circ\text{C}$ 、 $0.19^\circ\text{C}$ 。

### 3.4 渗流位置

为了研究地下渗流位置对地埋管出口温度及围岩温度场的影响, 在其它参数不变的情况下, 渗流位置分别在第四系、明化镇组、馆陶组、东营组、沙河街组。

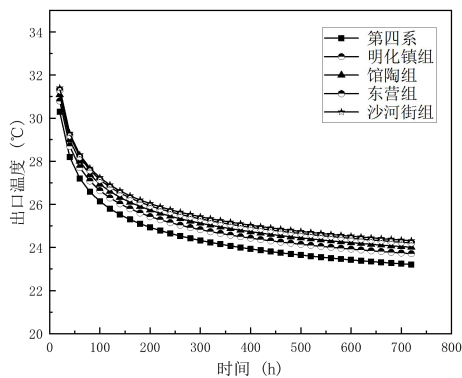


图 12 不同渗流层出口温度图

Fig.12 Temperature chart of different seepage layers at the outlet

图 12 为渗流位置分别在第四系、明化镇组、馆陶组、东营组、沙河街组时运行 720h 的出口温度。从图中可以看出, 地埋管出口温度随系统的运行呈下降趋势。渗流层位置越深, 中深层地埋管换热器取热效果增强越明显, 地埋管换热器出口温度随渗流层位置的下移逐渐升高。当系统运行 720h, 渗流位置分别在第四系、明化镇组、馆陶组、东营组、沙河街组时, 地埋管出口温度分别为  $23.21^\circ\text{C}$ 、 $23.71^\circ\text{C}$ 、 $24.01^\circ\text{C}$ 、 $24.21^\circ\text{C}$ 、 $24.31^\circ\text{C}$ 。由于土壤温度存在地温梯度, 中深层地埋管换热器埋深增加, 导致附近围岩温度不断升高, 这将造成更大的换热温差。中深层渗流层提升地埋管换热器性能较为显

著, 浅层渗流层取热性能提升效果相对不明显。

图 13 显示了  $r=0.5\text{m}$  时不同渗流层中心位置的岩土温度分布情况。其中各点处岩土温度在取热阶段均处于下降状态, 在恢复阶段温度逐渐上升, 但均未恢复到原地温。随渗流位置的下移, 同一深度下无渗流工况与渗流工况温差逐渐增大。当  $r=0.5\text{m}$ ,  $z$  分别取 210m、730m、1290m、1920m、2400m 时, 渗流工况地层温度分别为  $20.24^\circ\text{C}$ 、 $33.08^\circ\text{C}$ 、 $46.70^\circ\text{C}$ 、 $62.18^\circ\text{C}$ 、 $73.88^\circ\text{C}$ , 无渗流概况地层温度分别为  $19.24^\circ\text{C}$ 、 $31.82^\circ\text{C}$ 、 $44.76^\circ\text{C}$ 、 $59.68^\circ\text{C}$ 、 $70.88^\circ\text{C}$ , 温差为  $1.00^\circ\text{C}$ 、 $1.26^\circ\text{C}$ 、 $1.94^\circ\text{C}$ 、 $2.50^\circ\text{C}$ 、 $3.00^\circ\text{C}$ 。进一步证明相较于浅层渗流层, 深层渗流层的影响更明显。

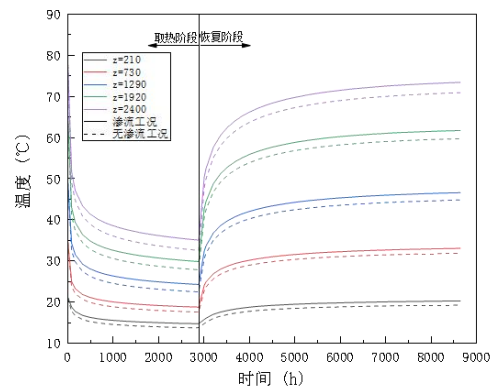


图 13  $r=0.5$  时不同渗流位置岩土温度

Fig.13 Soil and rock temperatures at different seepage locations at  $r=0.5$

## 4 结论

本文建立了三维中深层地埋管换热器传热模型, 并利用实测数据进行验证。在此基础上, 研究了在有无渗流、渗流速度、孔隙率、渗流位置等因素, 得出以下结论。

(1) 在系统运行 1 年间, 渗流作用会影响系统性能和岩土温度场。渗流工况可以提高有效地埋管出口温度, 系统运行 720h, 温度提高  $0.99^\circ\text{C}$ 。渗流工况有利于岩土场温度恢复, 主要基于以下两点: 一是地下水流动造成对流换热增强, 加速了热量由远端向换热区域的输送; 二是孔隙率的增加造成热容增大, 传热区域温度下降减缓。根据热力学第一定律, 在对流效应和热容效应的共同影响, 改善了岩土体的热回复性能。

(2) 地埋管出口温度随渗流速度的增加呈现

正相关趋势。但较低的渗流速度对地埋管出口温度无明显作用,渗流速度超过 $1 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 后,地埋管出口温度增加明显,围岩地温恢复明显。

(3) 孔隙率对地埋管出口温度有一定影响,随孔隙率的增加地埋管出口温度提高,岩土孔隙率增加有利于岩土温度的恢复。

(4) 地埋管换热器出口温度随渗流层位置的下移逐渐升高,深部渗流层对中深层地埋管换热器性能影响较明显。系统运行720h时,渗流层位于沙河街组时,地埋管出口温度较第四系渗流层提高 $1.1^\circ\text{C}$ 。

#### 参考文献:

- [1] A J L, B J R, A W X, et al. A review of ground investigations for ground source heat pump (GSHP) systems[J]. *Energy and Buildings*, 2016,117(Apr.):160-175.
- [2] Guo M, Diao N, Man Y, et al. Research and development of the hybrid ground-coupled heat pump technology in China[J]. *Renewable Energy*, 2016:871033-1044.
- [3] Song X, Zheng R, Li G, et al. Heat extraction performance of a downhole coaxial heat exchanger geothermal system by considering fluid flow in the reservoir[J]. *Geothermics*, 2018:76190-200.
- [4] Lous L M, Larroque F, Dupuy A, et al. Thermal performance of a deep borehole heat exchanger: Insights from a synthetic coupled heat and flow model[J]. *Geothermics*, 2015:57157-172.
- [5] Lingling B, Xue W, Pengfei J, et al. An analytical heat transfer model for the mid-deep U-shaped borehole heat exchanger considering groundwater seepage[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023,64.
- [6] 王昌龙,王鑫,鲁进利,等.渗流作用下的中深层地埋管换热器传热分析[J].*太阳能学报*,2023,44(3):304-310.
- [7] 杨心柳,刘强,曹倩,等.储层渗流对单地热井同轴换热器取热特性的影响[J/OL].*化工进展*,1-13[2024-11-06]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2024-0878>.
- [8] 冯绍航,陈静平,陈延信,等.管道水流速对深层U型地热井采热影响的数值模拟研究[J].*西安建筑科技大学学报(自然科学版)*,2012,44(4):586-592.
- [9] 陈静平.深层U型地热换热器换热过程模拟计算研究[D].西安:西安建筑科技大学,2012.
- [10] 滕剑波.基于渗流条件下地埋管换热器及热泵系统性能分析与研究[D].徐州:中国矿业大学,2023.
- [11] 丁翰婉.地下水渗流条件下土壤蓄热过程中地下传热特性的数值研究[D].北京:北京建筑大学,2016.
- [12] 刘兵红.地埋管换热器温度场影响因素及恢复规律研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2016.
- [13] 杨军,韩宗伟,张艳红,等.土壤热渗耦合作用下U型埋管换热器换热特性数值模拟[J].*可再生能源*,2014,32(6):822-828.
- [14] 刘媛媛,耿直,张元峰,等.单井U型地埋管换热器传热特性与热渗耦合特性分析[J].*综合智慧能源*,2023,45(4):81-88.
- [15] 孙婉.地下水渗流与地源热泵热量运移耦合模拟[J].*太阳能学报*,2021,42(5):16-23.
- [16] 蔡学龙,王松庆.跨越饱和/非饱和土壤条件下竖直地埋管换热器传热特性研究[J].*可再生能源*,2020,38(4):464-470.
- [17] 蔡学龙.跨越非饱和/饱和层状土壤条件下竖直地埋管换热器传热机理研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2020.
- [18] 王雪.中深层U型井下换热器热渗耦合传热性能研究[D].邯郸:河北工程大学,2022.
- [19] 姜培学,李勳,司广树.空气在多孔介质中对流换热的数值模拟[J].*工程热物理学报*,2001,(5):609-611.