doi: 10.3969/j.issn.1005 – 0329.2025.02.009

热储层渗流对中深井地埋管系统换热性能及地层温度恢复的影响

谷　伟[1],丛培德[1],李　博[1],马玖辰[2,3]

(1. 天津地热开发有限公司,天津 300300;2. 天津城建大学 地热高效利用技术研究中心,天津 300384;
3. 天津大学 中低温热能高效利用教育部重点实验室,天津 300072)

摘　要: 为研究地热水渗流过程对于中深井地埋管的传热特性的影响,建立了井孔内外的非稳态传热模型,采用有限体积法(FVM)对井内外不同区域的瞬态温度进行计算,并与现场试验结果进行对比,以验证所提出的模型和算法的准确性。结果表明,与无地热水渗流工况相比,当热储层厚度为 400 m,渗流速度为 10×10^{-7} m/s,地埋管的进、出水温差 ΔT 及平均能效系数 $\overline{E}$ 分别提高了 5.5 ℃和 16.22%;当渗流速度为 10×10^{-7} m/s,热储层厚度由 50 m 增加至 600 m 时,供热期平均单位埋深换热量 $\overline{q}$ 上升 81.92%;热储层厚度为 600 m 时,间歇期地层温度恢复率达到 99.43%;地热水渗流速度和热储层厚度的增加显著提升了中深井地埋管的换热性能和地层温度恢复率。研究结果对中深井地埋管在复杂地质条件下的系统高效运行及实际工程应用提供了理论支撑。

关键词: 中深井地埋管;富水型热储层;传热;数值计算;渗流过程;换热性能

中图分类号: TK52　　**文献标志码:** A

The influence of thermal reservoir seepage on the heat exchange performance and stratum temperature recovery in medium-deep borehole exchanger systems

GU Wei[1], CONG Peide[1], LI Bo[1], MA Jiuchen[2,3]

(1.Tianjin Geothermal Development Corporation, Tianjin 300300, China; 2.Research Center for Efficient Utilization Technology of Geothermal Energy, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 3. Key Laboratory for Efficient Use of Low and Medium Grade Energy, Ministry of Education of China, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to investigate the impact of thermal reservoir seepage on the heat transfer characteristics of medium-deep borehole heat exchanger (MDBHE), a transient heat transfer model for both the inside and outside of the borehole was established. The finite volume method (FVM) is employed to calculate the transient temperature in different regions inside and outside the borehole, and the results were compared with field test data to validate the accuracy of the proposed model and algorithm. The results show that compared with the condition without geothermal water seepage, the scenario with a thermal reservoir thickness of 400 m and a seepage velocity of 10×10^{-7} m/s showed an increase of 5.5 ℃ in the temperature difference ΔT between the inlet and outlet of the pipe and a 16.22% improvement in the average energy efficiency coefficient $\overline{E}$. Additionally, when the seepage velocity is 10×10^{-7} m/s and the thermal reservoir thickness increases from 50 to 600 m, the average heat transfer power per unit buried depth $\overline{q}$ during the heating period rises by 81.92%. Furthermore, with a reservoir thickness of 600 m, the stratum temperature recovery rate during intermittent periods reaches 99.43%. The calculations demonstrated that as the thermal reservoir seepage velocity and the thickness of the thermal reservoir increase, there is a corresponding enhancement in the heat exchange performance of the MDBHE and in the temperature recovery rate of the stratum. These findings provide theoretical support for the efficient operation and practical engineering application of MDBHE in complex geological conditions.

Key words: medium-deep borehole exchanger; water-rich geothermal reservoirs; heat transfer; numerical calculation; seepage process; heat exchange performance

收稿日期: 2024 – 04 – 27　**修回日期:** 2024 – 11 – 16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41402228);天津市自然科学基金企业科技特派员项目(19JCTPJC48100)

0 引言

近年来，国内外学者针对地下水渗流对地埋管传热性能的影响进行了深入研究，考虑了在不同地质构造、不同深度下的地下水渗流影响[1-5]。RAYMOND 等[6]评估了地下水流动对浅层地埋管内传热的影响，研究表明，地下水流动增强了浅层地埋管和含水层之间的热传递。SONG 等[7]的研究表明，渗流速度升高可以有效提高深井地埋管的出口温度和换热功率。KANG 等[8]利用 FELLOW 软件对深井地埋管进行了有限元模拟，发现地下水渗流速度的增大会导致热扩散范围的增大。焦开拓等[9]证实了地下水渗流有可能带走地埋管运行过程中近端积累的热量。

然而，现有研究主要集中在浅层地下水流动或地下水渗流速度变化对地埋管传热性能的影响方面，较少涉及当存在地热水渗流条件下，不同厚度热储层对中深井地埋管传热特性和周围地层温度恢复的影响研究。导致在复杂地质条件下，中深井地埋管系统的设计优化和高效运行缺乏足够的理论支撑。

为弥补上述研究不足，本文建立了中深井地埋管（Medium-Deep Borehole Exchanger，MDBHE）井孔内外非稳态传热模型。采用有限体积法对井孔内、外的传热过程进行耦合求解。通过 Matlab 编程计算得到井内外不同区域的瞬态温度，以分析中深井地埋管及热储层的动态温度响应规律；研究不同热储层内地热水渗流对于中深井地埋管换热性能及周围土壤恢复的影响，为中深井地埋管供暖系统在实际工程项目中的初始选址、设计和运行效率优化提供理论支持。

1 流程与物理模型

采用天津市某中深井地埋管供暖系统作为实际工程模型进行分析，该系统承担建筑供暖面积 57 000 m^2。在供暖季节（11 月 15 日至次年 3 月 15 日）全天候运行。该供暖系统包括中深井地埋管、地源热泵以及供暖末端设备，安装于水资源丰富的地下区域，其系统原理如图 1 所示。

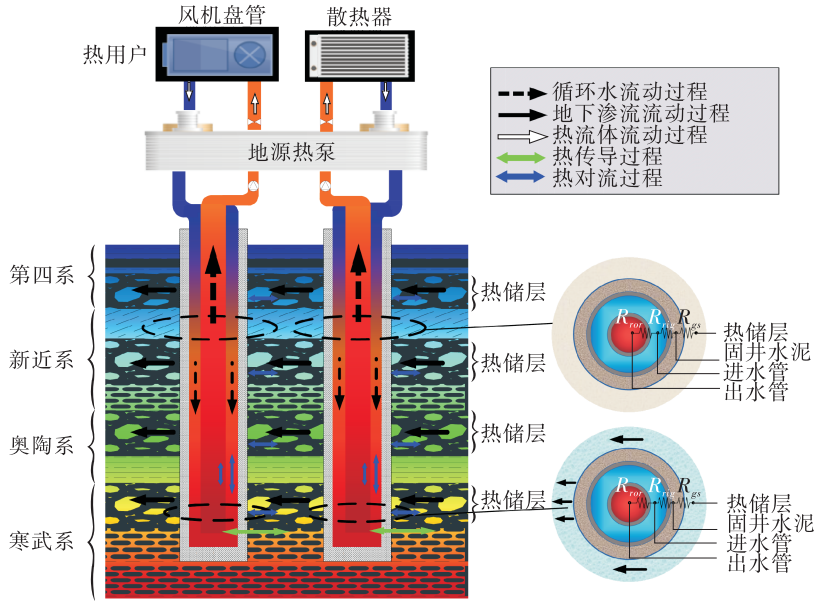


图 1 中深井地埋管系统原理

Fig.1 Schematic diagram of the MDBHE system

地埋管采用外进内出式套管型结构，内管选用Ⅱ型耐热聚乙烯管（PERT-Ⅱ），外管为 J55 型无缝钢管。采用水作为循环制冷剂，选择热力增强型水泥灌浆作为井孔固井水泥，中深井地埋管的主要设计参数见表 1。循环流体在进入地埋管后，沿外层套管向下流动至井底，再沿内层管道向上返回地面进入地源热泵机组，最后通过换热器将热量传递给供暖系统的末端设备。在中深井地埋管运行期间，井孔内的传热过程包括循环流体经套管向下再经内管向上流动的对流换热、套管内循环流体与内管循环流体之间的热传导、固井水泥与地埋管之间的热传导。井外传热过程包括热储层中地热水渗流引起的对流换热过程及周围地层的热传导。

表 1 中深井地埋管设计参数

Tab.1 Specific parameters of the MDBHE

参数	数值	参数	数值
地埋管长度 L/m	2 000	进水壁热导率λ_{an}/（W·m^{-1}·K^{-1}）	41
井孔直径 D/m	0.319	出水管壁热导率λ_{ce}/（W·m^{-1}·K^{-1}）	0.45
出水管外径 d_{ce}/m	0.09	固井水泥热导率λ_g/（W·m^{-1}·K^{-1}）	0.73
出水管壁厚 /m	0.011	固井水泥体积比热容$\rho_g c_g$/（J·m^{-3}·K^{-1}）	3.65×10^6
出水管内径 d_{ce}/m	0.245	循环液体热导率λ_r/（W·m^{-1}·K^{-1}）	0.65
进水壁厚 b_{an}/m	0.01	循环液体积比热容 $c_r\rho_r$/（J·m^{-3}·K^{-1}）	4.2×10^6

结合天津地区的水文地质特征和现场勘查数据，该地区的地质结构自上而下共分为 4 种地质层级。基于各类地质层的不同岩性构成，将 2 000 m 的地下深度分为 6 个不同的水平层次，每层的具体物理参数见表 2。

表 2 典型岩石（土）物性参数

Tab.2 The physical parameters of the stratigraphic layers

地层类型	岩性构成 /m	埋深 /m	孔隙率	水平渗透系数 /（m·s^{-1}）	体积比热容 /（J·m^{-3}·K^{-1}）	热导率 /（W·m^{-1}·K^{-1}）
第四系	黏土层	0~140	0.34	4.7×10^{-9}	3.6×10^6	1.5
	粉砂	140~220	0.24	4.2×10^{-7}	2.8×10^6	1.8
新近系	泥岩	220~660	0.34	2.0×10^{-6}	3.3×10^6	2.6
	泥岩 / 砂岩互层	660~1 060	0.26	4.2×10^{-6}	2.8×10^6	3.0
奥陶系	石灰岩	1 060~1 700	0.34	3.0×10^{-5}	3.3×10^6	3.2
寒武系	泥岩	1 700~2 100	0.10	1.0×10^{-8}	1.0×10^6	3.8

2 数学模型与求解方法

2.1 热储层渗流与传热模型

假定各地质层的岩性构成的热储层是均一且各向同性的多孔介质。此外，假设热 – 渗运移过程不会改变岩石或土壤层的孔隙率和热物性。地下渗流被假定为仅沿水平方向以均匀速率流动，而不考虑垂直方向的流动。此外，认为热储层中的固态基质和地下水能够迅速达到局部的热平衡，且处于同一温度。在这些假设的基础上，结合达西定律及多孔介质中的热质传递理论[10-11]，构建三维的非稳态质量守恒、动量守恒和能量守恒方程，其计算式分别如下：

$$\left[\varepsilon_s\gamma_f+\left(1-\varepsilon_s\right)\gamma_s\right]\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial u_f}{\partial x}=0 \tag{1}$$

$$u_f=-\frac{k\rho_f g}{\mu_f}\frac{\partial h}{\partial x} \tag{2}$$

$$\rho_e c_e\frac{\partial T}{\partial t}+\rho_f c_f u_f\frac{\partial T}{\partial x}=\lambda_e\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+H \tag{3}$$

式（3）中，热储层有效比热容$\rho_e c_e$是通过热储层岩土（石）比热容$\rho_s c_s$与地下水体积比热容$\rho_f c_f$加权平均值确定，见式（4）；热储层有效导热系数由式（5）确定。

$$\rho_e c_e=\varepsilon_s\rho_f c_f+\left(1-\varepsilon_s\right)\rho_s c_s \tag{4}$$

$$\lambda_e=\varepsilon_s\lambda_f+\left(1-\varepsilon_s\right)\lambda_s \tag{5}$$

式中，ε_s为热储层孔隙率；γ_f，γ_s分别为地下水及热储层岩土（石）压缩系数，（m·s）/kg；μ_f为地热水渗流速度，m/s；H为热源（汇）项排（取）热强度，J/（m^3·s）；λ_s为热储层固相基质导热率，W/（m·K）。

2.2 中深井地埋管传热模型

对于中深井地埋管的传热分析，设定以下模型假设：地埋管的进水和出水在任何横截面上的流量是均匀的，忽略管壁在垂直方向上的热传导，并假定进水管、井孔内的固井水泥及其周围的岩石层之间不存在接触热阻。基于上述假设条件，根据同轴套管式地埋管热阻与热容传热模型[12]，建立中深井地埋管进水管、出水管及井孔内部固井水泥的柱面坐标非稳态能量守恒方程如下：

$$\rho_r c_r\frac{\partial T_i}{\partial t}+\rho_r c_r\frac{\partial v_i T_i}{\partial z}-\lambda_r\frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2}=\frac{T_o-T_i}{A_{in}R_{ror}}+\frac{T_g-T_i}{A_{an}R_{rig}} \tag{6}$$

$$\rho_r c_r\frac{\partial T_o}{\partial t}+\rho_r c_r\frac{\partial v_o T_o}{\partial z}-\lambda_r\frac{\partial^2 T_o}{\partial z^2}=\frac{T_i-T_o}{A_{in}R_{ror}} \tag{7}$$

$$\rho_g c_g\frac{\partial T_g}{\partial t}-\lambda_g\frac{\partial^2 T_g}{\partial z^2}=\frac{T_s-T_g}{A_g R_{gs}}+\frac{T_i-T_g}{A_{an}R_{rig}} \tag{8}$$

式中，A_{an}，A_{in}分别为环形管和内管横截面积，m^2；c_r，c_g分别为中深层地埋管循环水和回填材料的定压比热容，J/（kg·K）；R_{rig}，R_{ror}，R_{gs}分别为循环

流体与进水管壁、回填材料之间的热阻，循环流体与出水管壁的热阻，回填材料与岩石（土）体之间的热阻，（m·K）/W；T_i，T_o 分别为中深层地埋管进、出水管内循环流体温度，K；T_g 为回填材料温度，K；T_s 为中深层地埋管所在岩土体温度，K；t 为时间，s；v_o 为地埋管内循环水流速，m/s；ρ_r，ρ_g 分别为中深层地埋管内循环流体和回填材料的密度，kg/m^3；λ_r，λ_g 分别为中深层地埋管进、出水管内循环流体和回填材料的导热系数，W/（m·K）。

其中，环形管的截面积、内管的截面积、固井水泥的截面积分别表示为式（9）~（11）。

$$A_{an}=\pi\left[\left(r_i-b_i\right)^2-r_o^2\right] \tag{9}$$

$$A_{\mathrm{in}}=\pi\left(r_o-b_o\right)^2 \tag{10}$$

$$A_g=\pi\left(r_b-r_i\right)^2 \tag{11}$$

式中，b_i，b_o 分别为中深井地埋管进、出水管壁厚，m；r_i，r_o 分别为中深井地埋管进、出水管半径，m。

根据图 1 所示中深井地埋管原理，R_{ror} 和 R_{rig} 分别为进水管和出水管内循环流体之间、进水管内循环流体与固井水泥之间的热阻，其计算式见式（12）（13）。R_{gs} 为固井水泥与热储层之间的热阻，见式（14）[13]。

$$R_{ror}=\frac{1}{Nu_o\lambda_r\pi}+\frac{1}{Nu_i\lambda_r\pi}\frac{r_h}{r_o}+\frac{\ln\left[r_o/\left(r_o-b_o\right)\right]}{2\pi\lambda_o^p} \tag{12}$$

$$R_{rig}=\frac{1}{Nu_i\lambda_r\pi}\frac{r_h}{r_1-b_1}+\frac{\ln\left[r_1/\left(r_1-b_1\right)\right]}{2\pi\lambda_i^p}+\frac{\ln\left[\left(r_b^2+r_1^2\right)^{1/2}/\sqrt{2}r_1\right]}{2\pi\lambda_g} \tag{13}$$

$$R_{gs}=\frac{\ln\left(r_b/r_i\right)-\ln\left[\left(r_b^2+r_i^2\right)^{1/2}/\sqrt{2}r_i\right]}{2\pi\lambda_g} \tag{14}$$

式中，r_h 为环形管的有效半径，$r_h=\left(r_i-b_i\right)-r_o$。

2.3 求解方法与模型验证

将中深井地埋管及其所在的热储层划分为 2 个相互作用但具有不同性质的连续介质，即双连续介质法，运用有限体积法（Finite Volume Method，FVM）来模拟和解析井孔内外的传热过程。借助 Matlab 进行编程，基于地埋管换热系统的动态温度模型，见式（6）~（8），计算并得出井内不同区域的瞬态温度变化。热储层的空间离散化通过应用非等距三角网格划分来完成，采用 BiCGSTABP 算法迭代求解，以优化计算精度。该物理模型的节点总数为 1 332 590，网格数为 2 672 403，通过网格的独立性测试，网格划分方法能够准确描述地热储层温度场的演化过程。

FVM 作为一种离散、求解偏微分方程的数值计算方法，与有限差分法（Finite Difference Method，FDM）相比，可以在非结构化网格中实施；FVM 中的边界条件要求也比 FEM 更少，从而提高了计算过程的稳定性[14]。采用 FVM 对中深井地埋管井孔内部与外部热储层的数值计算空间域和时间域进行离散化；将能量守恒控制方程分别推导转化为式（15）~（18），其中，上标 k，k–1 分别表示当前与上一个时间节点。

中深井地埋管进水管离散方程：

$$\frac{\rho_r c_r}{\Delta t}\left(T_{i,z}^k-T_{i,z}^{k-1}\right)+\frac{\rho_r c_r}{\Delta z}\left[\xi v_i\left(T_{i,z}^k-T_{i,z-1}^k\right)+\frac{\left(1-\xi\right)v_i}{2}\left(T_{i,z+1}^k-T_{i,z-1}^k\right)\right]-\frac{\lambda_r}{\Delta z^2}\left(T_{i,z+1}^k-2T_{i,z}^k+T_{i,z-1}^k\right)=\frac{T_{o,z}^k-T_{i,z}^k}{A_{in}R_{ror}}\frac{\mathrm{d}S_{in}}{\mathrm{d}V_{in}}+\frac{T_{g,z}^k-T_{i,z}^k}{A_{an}R_{rig}}\frac{\mathrm{d}S_{an}}{\mathrm{d}V_{an}} \tag{15}$$

中深井地埋管出水管离散方程：

$$\frac{\rho_r c_r}{\Delta t}\left(T_{o,z}^k-T_{o,z}^{k-1}\right)+\frac{\rho_r c_r}{\Delta z}\left[\xi v_o\left(T_{o,z}^k-T_{o,z+1}^k\right)+\frac{\left(1-\xi\right)v_o}{2}\left(T_{o,z+1}^k-T_{o,z-1}^k\right)\right]-\frac{\lambda_r}{\Delta z^2}\left(T_{o,z+1}^k-2T_{o,z}^k+T_{o,z-1}^k\right)=\frac{T_{i,z}^k-T_{o,z}^k}{A_{in}R_{ror}}\frac{\mathrm{d}S_{in}}{\mathrm{d}V_{in}} \tag{16}$$

中深井地埋管回填材料井孔离散方程：

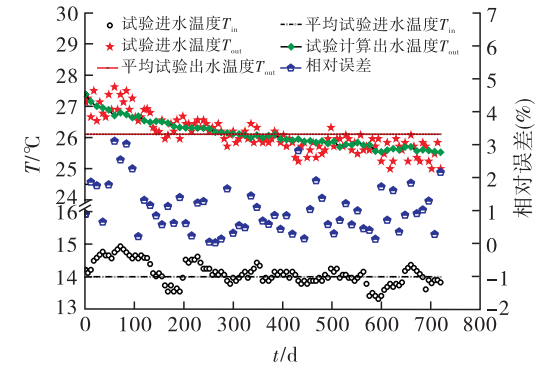
$$\frac{\rho_g c_g}{\Delta t}\left(T_{g,z}^k-T_{g,z}^{k-1}\right)-\frac{\lambda_g}{\Delta z^2}\left(T_{g,z+1}^k-2T_{g,z}^k+T_{g,z-1}^k\right)=\frac{T_{s,z}^k-T_{g,z}^k}{A_gR_{gs}}\frac{\mathrm{d}S_g}{\mathrm{d}V_g}+\frac{T_{i,z}^k-T_{g,z}^k}{A_{an}R_{rig}}\frac{\mathrm{d}S_{an}}{\mathrm{d}V_{an}} \tag{17}$$

中深井地埋管所在热储层离散方程：

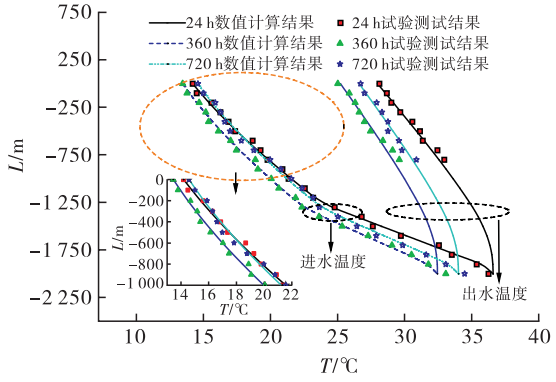
$$\frac{\rho_e c_e}{\Delta t}\left(T^k-T^{k-1}\right)+\frac{\rho_e c_e}{\Delta x}\left[\xi u_f\left(T_x^k-T_{x-1}^k\right)+\frac{\left(1-\xi\right)u_f}{2}\times\left(T_{x+1}^k-T_{x-1}^k\right)\right]=\lambda_e\left[\frac{\left(T_{x+1}^k-2T_x^k+T_{x-1}^k\right)}{\Delta x^2}+\frac{\left(T_{y+1}^k-2T_y^k+T_{y-1}^k\right)}{\Delta y^2}+\frac{\left(T_{z+1}^k-2T_z^k+T_{z-1}^k\right)}{\Delta z^2}\right]+H_{x,y,z}^k \tag{18}$$

式中，S_{an}，S_{in} 分别为环形管和内管面积，m^2；T_g^k，T_i^k，T_o^k 分别为第 k 个时间节点时固井水泥和地埋管进、出水管温度，℃；V_{an}，V_{in} 分别为环形管和内管体积，m^3；μ_f 为地热水渗流速度，m/s。

根据所建立的物理模型，为确保计算有效性，将计算区域设置为垂直范围 0~2 100 m，水平范围 400 m×300 m。上下表面为绝热定压界面，热储层为具有恒定渗流速度的水平流动边界，忽略垂直流动。在地下 100 m 深处，该区域的平均环境温度为 14.5 ℃。对于超过 100 m 的深度，各岩石和土层的温度则按 0.035 ℃ /m 的比率逐渐增加。假设中深井地埋管内部温度等于供热期开始前的岩土稳态温度，并且地埋管与热储层之间的换热满足第三类边界条件；井壁与固井水泥以及周边地层之间不存在接触热阻，三者温度相等，井壁被视为虚拟边界。



（a）地埋管出水温度变化



（b）地埋管进出水温度的垂向变化

图 2　模型计算结果与现场试验值的比较

Fig.2　Comparison between experimental measured values and calculated data

现场试验基于中深井地埋管供暖系统示范工程，试验时间为 2023 年 1 月 5 日 09:00 至 2023 年 2 月 5 日 09:00，总计 720 h，每分钟记录一次进出水管温度，循环流量为 30 m^3/h。计算结果表明，出水温度与监测数据的绝对误差小于 1.5 ℃，相对误差在 3% 以内，如图 2（a）所示；3 个运行周期的进出水管温度的相对误差在 2% 以下，绝对误差在 0.47 ℃以内，如图 2（b）所示。计算结果与试验数据吻合较好，表明该数学模型和求解方法可用于分析和预测中深井地埋管的传热性能。

3　计算结果分析

3.1　计算方案与评价参数

根据实际供热需求，计算周期分为供热期（120 d）和间歇期（245 d），运行期间中深井地埋管每天连续运行 24 h。为了研究热储层特性对中深井地埋管换热性能的影响，在埋深 2 000 m、入口温度 14.5 ℃的条件下，分别对不同地热水渗流速度和达西流速为 7.5×10^{-7} m/s 下不同热储层厚度进行了模拟计算分析，其中，存在地热水渗流的 50，200，400，600 m 厚度热储层分别设置于埋深 1 550~1 650 m，1 500~1 700 m，1 400~1 800 m 和 1 300~1 900 m 处。

无量纲数 Pe（Pelect）表征了热储层中渗流过程对流换热与导热的比例，Pe 值越大，表明热对流强度越大，且地埋管所在的地质构造由多个相互作用的热储层及岩层组成。因此，引入地热水渗流速度（u_f）和热储层厚度（L_a）与井深（L）之比对 Pe 进行修正，如下式所示：

$$Pe=\frac{\rho_f c_f u_f D_b}{\varepsilon_s\lambda_f+(1-\varepsilon_s)\lambda_s}\cdot\frac{L_a}{L} \tag{19}$$

式中，D_b 为中深井地埋管井孔直径，m。

引入平均单位埋深换热量 $\bar{q}$ 及平均能效系数 $\overline{E}$[15-20]，其计算式见式（20）（21），以分析中深井地埋管的换热性能，同时用平均热衰减率 $\overline{\eta}$ 计算不同工况下沿出口管道的热损失，见式（22）。

$$\bar{q}=\frac{1}{\tau}\int_0^\tau\frac{Q(t)}{L}\mathrm{d}t \tag{20}$$

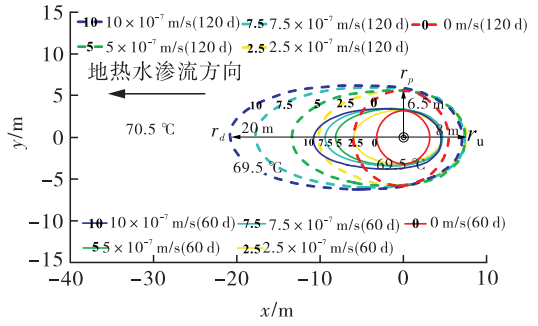
$$\overline{E}=\frac{1}{\tau}\int_0^\tau\frac{T_o(t)-T_i(t)}{\overline{T_s^0}-T_i(t)}\mathrm{d}t \tag{21}$$

$$\overline{\eta}=\frac{1}{\tau}\int_0^\tau\frac{T_{\mathrm{bottom}}(t)-T_o(t)}{T_{\mathrm{bottom}}(t)-T_i(t)}\mathrm{d}t \tag{22}$$

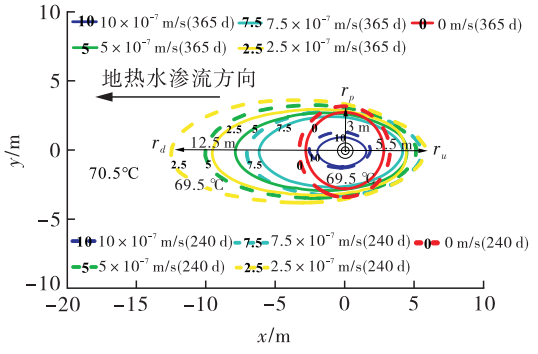
式中，$\overline{T_s^0}$ 为垂直方向的平均岩土温度，$\overline{T_s^0}=\frac{1}{L}\int_0^L T_s^0(z)\mathrm{d}z$；$T_{\mathrm{bottom}}$ 为井孔底部的动态温度。

3.2 地热水渗流速度分析

通过模拟计算，确定在不同地热水渗流速度下，供热期（60/120 d）及间歇期（240/360 d）时热储层温度场分布情况，见图 3。在地层的温度分析中，定义 1 ℃的温度变化范围作为热扩散区，将中深井地埋管与热扩散区的最远点距离热作用半径 r 作为评估指标。以 120 d 为例，随着渗流速度的增大，下游热作用半径 r_d 明显增大，上游热作用半径 r_u 和垂直的热作用半径 r_p 保持基本不变。与无渗流情况相比，热作用半径 r_d 增加，而在间歇期，地层温度的恢复率随着渗流速度增大而上升。计算结果表明，在间歇期，地热水渗流速度增大增强了对流换热强度，从而扩大了冷积累的扩散范围，加速了地层温度恢复。



（a）运行中期 / 末期（60 /120 d）

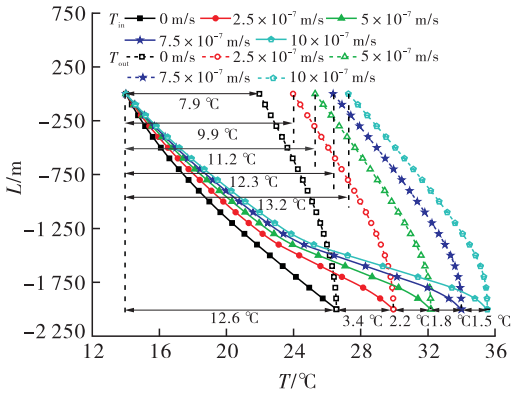


（b）间歇中期 / 末期（240/365 d）

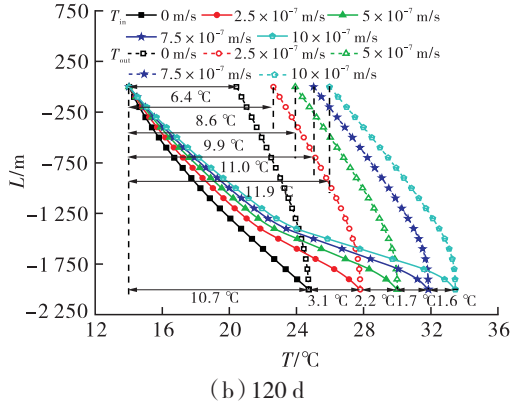
图 3 不同地热水渗流速度下埋深 1 600 m 处热储层温度等值线

Fig.3 Temperature contours in the thermal reservoir (1 600 m) during the calculation period for different geothermal seepage velocity

如图 4 所示，随着渗流速度的增加，地埋管的温差 ΔT 也有所提高，热储层中对流换热强度上升，地埋管与热储层之间的传热机制发生改变，显著提升了中深井地埋管的换热性能。由于地热水的流动，热储层中的热传递增强，地埋管的换热性能衰减也得到了缓解。



（a）10 d



（b）120 d

图 4 不同地热水渗流速度下中深井地埋管垂向温度分布

Fig.4 The comparison of circulating refrigerant vertical temperature profiles in the MDBHE under different geothermal seepage velocity

由图 5 可知，中深井地埋管的换热性能随着地热水渗流速度的增加而提高。随着渗流速度的增大，对流换热的强度增强，Pe 升高。当 Pe 从 0 增大到 15.2×10^{-2} 时，平均单位埋深换热量 $\bar{q}$ 和平均能效系数 $\bar{E}$ 分别提高了 101.52 W/m 和 16.22%。而平均热损失率 $\bar{\eta}$ 在 35.5% ~ 36.5% 之间波动，这表明热储层中地热水流动对换热器出水管热损失的影响较小。

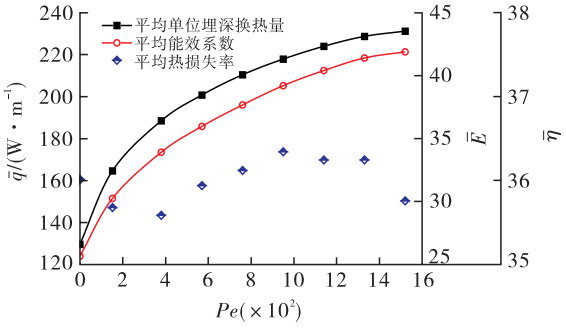


图 5 热储层 Pe 数对中深井地埋管换热性能及热损失率影响

Fig.5 Effect of Pe in thermal reservoir on heat performance and average heat loss ratio of the MDBHE

3.3 热储层厚度分析

以中深井地埋管埋深 1 600 m 处井壁温度为例，分析在不同热储层厚度工况下，随运行周期变换的地埋管井壁温度 T_b 变化。如图 6 所示，而在间歇期，随着时间的推移，由于地下热流补充，T_b 呈逐渐回升的趋势，且 T_b 上升所需的时间随着 L_a 的增加而缩短。间歇期结束时，50，200，400，600 m 这 4 个厚度的温度恢复率依次提高。井壁温度下降的幅度增大，同时扩大了冷量的运移区域，从而加快了土壤温度的回升，有效提升了中深井地埋管的换热效率以及热储层的温度恢复速度。

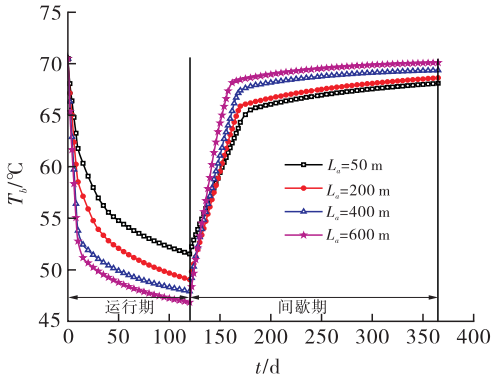
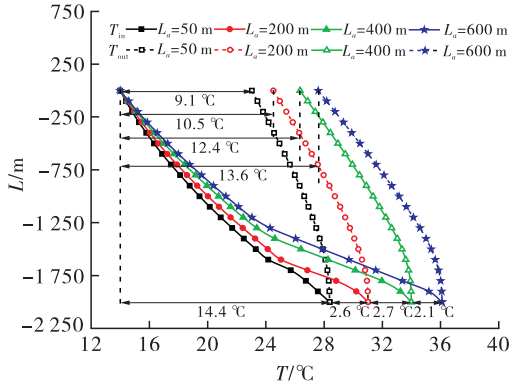


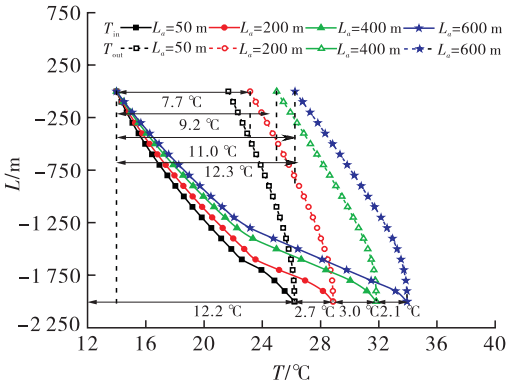
图 6 不同热储层厚度下埋深 1 600 m 处井壁温度响应动态变化曲线

Fig.6 Temperature variation at the borehole wall with a depth of 1 600 m during the operation and intermittent period under different thermal reservoir thickness

如图 7 所示，中深井地埋管进水管温度随深度增加而升高，在地埋管底部达到最高值。在供热期末（120 d），当 L_a 从 50 m 增加到 600 m 时，地埋管的进出水温差增加了 59.47%，这表明随着 L_a 的增加，有效提高了中深井地埋管的换热性能。



（a）10 d



（b）120 d

图 7 不同热储层厚度下中深井地埋管垂向温度分布

Fig.7 The comparison of circulating refrigerant vertical temperature profiles in the MDBHE under different thermal reservoir thickness

由式（19）可知，修正后的 Pe 随热储层厚度的增大而升高。当 Pe 从 0 逐渐增大到 17.11×10^{-2} 时，$\overline{q}$ 和 $\overline{E}$ 分别增大了 106.17 W/m 和 18.49%。此外，在相同地热水渗流速度下，随着 L_a 的增大，$\overline{q}$ 和 $\overline{E}$ 的增长幅度逐渐减小，并且在此过程中，热储层厚度的变化在提升中深井地埋管的换热性能的同时，对出水管的热损失影响不大，平均热损失率 $\overline{\eta}$ 维持在 36%~37% 的稳定范围内。

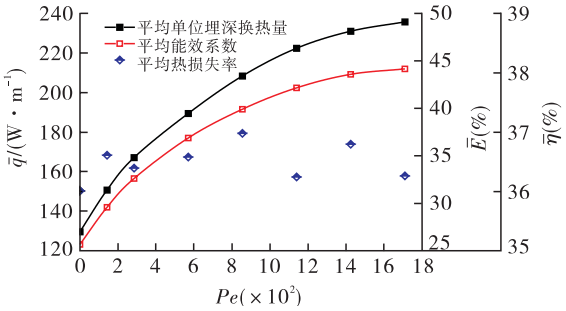


图 8 热储层 Pe 数对中深井地埋管换热性能及热损失率影响

Fig.8 Effect of Pe in thermal reservoir on heat performance and average heat loss ratio of the MDBHE

4 结论

（1）构建的中深井地埋管内外传热模型及其计算方法可用于分析和预测中深井地埋管的传热性能。

（2）当考虑热储层中地热水的渗流过程时，热量运移具有明显的方向性。随着渗流速度的增大，下游热作用半径扩大。当渗流速度从 2.5×10^{-7} m/s 增加到 10×10^{-7} m/s 时，中深井地埋管的平均单位埋深换热量 $\overline{q}$ 和平均能效系数 $\overline{E}$ 分别增加了 224 kW

和 21.87%。此外，在间歇期，较高的渗流速度对应着较高的地层温度恢复速率，有效减缓了热储层“冷堆积”现象。

（3）随着热储层厚度的增加，中深井地埋管的出水温度和换热能力均有显著提高。本文提出将地热水的渗流速度和热储层厚度作为修正项，对无量纲数 Pe 进行修正。随着热储层厚度 L_a 从 0 增加到 600 m，Pe 相应增大 17.11×10^{-2}。同时，$\bar{q}$ 和 $\overline{E}$ 分别增长了 81.92% 和 18.49%。在间歇期，随着热储层厚度的逐渐增加，井壁温度恢复所需时间明显缩短。

参考文献：

[1] CHEN C F, SHAO H B, NAUMOV D, et al. Numerical investigation on the performance, sustainability, and efficiency of the deep borehole heat exchanger system for building heating [J]. Geothermal Energy, 2019, 7(1): 18.

[2] LOUS M L, 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, 57: 157 – 172.

[3] 包图雅，米兰，马玖辰. 含水层热弥散效应对地埋管换热器井群传热性能的影响[J]. 可再生能源，2018，36(9)：1415 – 1422.
BAO T Y, MI L, MA J C. Effects of heat dispersion on heat transfer characteristic of borehole heat exchangers [J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(9): 1415 – 1422.

[4] 吴晅，潘亚楠，侯正芳，等. 蓄取热工况下同轴套管式地埋管换热器周围土壤温度变化规律[J]. 流体机械，2023，51(6)：46 – 52.
WU X, PAN Y N, HOU Z F, et al. Study on soil temperature variation around coaxial casing ground heat exchanger under heat and release storage condition [J]. Fluid Machinery, 2023, 51(6): 46 – 52.

[5] 黄凯良，侯旭，冯国会. 基于 TRNSYS 的严寒地区地热辅助的空气源热泵系统研究[J]. 流体机械，2023，51(7)：83 – 90.
HUANG K L, HOU X, FENG G H. Study on geothermal-assisted air source heat pump system in cold region based on TRNSYS [J]. Fluid Machinery, 2023, 51(7): 83 – 90.

[6] RAYMOND J, LAMARCHE L. Simulation of thermal response tests in a layered subsurface [J]. Applied Energy, 2013, 109: 293 – 301.

[7] SONG X Z, ZHENG R, LI G S, et al. Heat extraction performance of a downhole coaxial heat exchanger geothermal system by considering fluid flow in the reservoir [J]. Geothermics, 2018, 76: 190 – 200.

[8] KANG W K, LIU F, YANG F F, et al. Simulation of heat transfer performance using middle-deep coaxial borehole heat exchangers by FEFLOW [J]. Journal of Groundwater Science Engineering, 2020, 8(4): 315 – 327.

[9] 焦开拓，孙成珍，白博峰，等. 地下水渗流对中深层地埋管取热性能的影响规律[J]. 天然气工业，2022，42(4)：85 – 93.
JIAO K T, SUN C Z, BAI B F, et al. Effect of groundwater advection on heat transfer performance of deep borehole heat exchangers [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(4): 85 – 93.

[10] CASASSO A, SETHI R. Efficiency of closed loop geothermal heat pumps: A sensitivity analysis [J]. Renewable Energy, 2014, 62: 737 – 746.

[11] 马玖辰，邵刚，王宇，等. 抽 – 灌井分布模式对地埋管换热器井群传热特性的影响[J]. 应用基础与工程科学学报，2019，27(5)：1158 – 1171.
MA J C, SHAO G, WANG Y, et al. Influence of the distribution of pumping and injection wells on heat transfer characteristic of borehole heat exchangers [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27(5): 1158–1171.

[12] CUI Y L, ZHU J, TWAHA S, et al. A comprehensive review on 2D and 3D models of vertical ground heat exchangers [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2018, 94: 84 – 114.

[13] PAN A Q, LU L, CUI P, et al. A new analytical heat transfer model for deep borehole heat exchangers with coaxial tubes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 141: 1056 – 1065.

[14] REES S J, HE M M. A three-dimensional numerical model of borehole heat exchanger heat transfer and fluid flow [J]. Geothermics, 2013, 46: 1 – 13.

[15] 吴志伟，王通，王彦龙，等. 高效管换热器壳程传热强化效果及机理[J]. 压力容器，2023，40(8)：44 – 52.
WU Z W, WANG T, WANG Y L, et al. Shell-side heat transfer enhancement effects and mechanisms of heat exchangers with high-efficiency tubes [J]. Pressure Vessel Technology, 2023, 40(8): 44 – 52.

[16] 吴晅，潘亚楠，侯正芳，等. 蓄取热工况下同轴套管式地埋管换热器周围土壤温度变化规律[J]. 流体机械，2023，51(6)：46 – 52.
WU X, PAN Y N, HOU Z F, et al. Study on soil temperature variation around coaxial casing ground

heat exchanger under heat and release storage condition [J].Fluid Machinery,2023,51(6):46 – 52.

[17] 李琛,黄晓岚,金伟平,等.明胶/魔芋葡甘聚糖相行为调控共混膜结构及在热封包装中的应用[J].包装与食品机械,2024,42(3):8 – 17.
LI C,HUANG X L,JIN W P,et al.Regulation of phase behavior in gelatin/konjac glucomannan blend films and application in heat-seal packaging[J].Packaging and Food Machinery,2024,42(3):8 – 17.

[18] 姚小彦,陈晓文,黄勇,等.跨临界 CO_2 储能系统中填充床蓄冷性能的动态分析[J].流体机械,2024,52(6):49 – 57.
YAO X Y,CHEN X W,HUANG Y,et al.Dynamic analysis of the performance of filled-bed cooling storage in transcritical carbon dioxide energy storage systems [J].Fluid Machinery,2024,52(6):49 – 57.

[19] 吴志伟,王通,王彦龙,等.高效管换热器壳程传热强化效果及机理[J].压力容器,2023,40(8):44 – 52.
WU Z W,WANG T,WANG Y L,et al.Shell-side heat transfer enhancement effects and mechanisms of heat exchangers with high-efficiency tubes[J].Pressure Vessel Technology,2023,40(8):44 – 52.

[20] LIU J,WANG F H,CAI W L,et al.Numerical study on the effects of design parameters on the heat transfer performance of coaxial deep borehole heat exchanger [J].International Journal of Energy Research,2019,43(12):6337 – 6352.

作者简介:谷伟(1981),男,副总工程师,从事供热行业,涉及暖通、自动化、空气能、地热能等新能源应用及运营,E – mail:guwei4532@126.com。

通信作者:丛培德(1969),男,主要从事地热能等新能源开发及建筑供热、供冷应用,通信地址:300300 天津市河东区卫国道 189 号天津地热开发有限公司,E – mail:congpd168@126.com。

本文引用格式:
谷伟,丛培德,李博,等.热储层渗流对中深井地埋管系统换热性能及地层温度恢复的影响[J].流体机械,2025,53(2):65 – 73.
GU W,CONG P D,LI B,et al.The influence of thermal reservoir seepage on the heat exchange performance and stratum temperature recovery in medium-deep borehole exchanger systems[J].Fluid Machinery,2024,53(2):65 – 73.

(上接第 22 页)

[16] 徐梦菲.机械通风干湿联合冷却塔的换热性能及其运行调控研究[D].济南:山东大学,2022.
XU M F.Study on heat transfer performance and operation regulation of mechanical draft dry-wet hybrid cooling tower[D].Jinan:Shandong University,2022.

[17] 庞慧敏.防风板与喷淋预冷耦合作用下空冷塔热力性能的模拟研究[D].济南:山东大学,2023.
PANG H M.Simulation on thermal performance of natural draft dry cooling towers under the coupling effect of windbreaks and spray pre-cooling[D].Jinan:Shandong University,2023.

[18] 李启华,余锦,刘菊英.标准偏差和平均值的标准偏差探讨[J].金属材料与冶金工程,2013,41(5):45 – 48.
LI Q H,YU J,LIU J Y,et al.Discussion standard deviation and standard deviation of the mean value[J].Mental Materials and Metallurgy Engineering,2013,41(5):45 – 48.

[19] 谢春法,刘虎,尹清斌,等.核电钢质安全壳形位公差的控制方法[J].压力容器,2023,40(4):80 – 86.
XIE C F,LIU H,YIN Q B,et al.Shape and position tolerance control method of nuclear power steel containment[J].Pressure Vessel Technology,2023,40(4):80 – 86.

[20] 李根银,郁冶,王异成,等.风电场功率预测的研究进展及发展趋势[J].排灌机械工程学报,2024,42(8):778 – 784.
LI G Y,YU Y,WANG Y C,et al.Research progress and development trend of wind farm power prediction [J].Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2024,42(8):778 – 784.

[21] JCGM/WGI.Evaluation of measurement data guide to the expression of uncertainty in measurement:JCGM 100:2008[S].Joint Committee for Guides in Metrology,2008.

作者简介:王明伟(1984),男,助理工程师,主要从事冷却塔节能节水技术研究,E – mail:wangmingwei@casen-group.com。

通信作者:何锁盈(1987),男,博士,副教授,主要从事传热传质强化与过程节能研究,通信地址:250061 山东省济南市历下区经十路 17923 号山东大学千佛山校区,E – mail:suoyinghe@hotmail.com。

本文引用格式:
王明伟,张晓楠,孙全全,等.一种干湿联合式机械通风冷却塔运行性能的试验研究[J].流体机械,2025,53(1):16 – 22.
WANG M W,ZHANG X N,SUN Q Q,et al.Experimental study of operating performance of a mechanical draft dry-wet hybrid cooling tower[J].Fluid Machinery,2024,53(1):16 – 22.