

基于动态热负荷约束的同轴深井换热器传热特性模拟与分析

施志钢, 李志刚, 张 林, 夏世伟, 刘婉清, 高嘉宁

(青岛理工大学环境与市政工程学院, 青岛 266520)

摘 要: 针对中深层地源热泵系统中的深井换热器, 基于有限差分法构建数值模型, 对其在动态热负荷条件下的传热特性进行分析。通过建立数值模型, 结合青岛地区的实际气象数据和现场实验验证, 探讨不同流体速度、地温梯度及地质参数对深井换热器热性能的影响。结果表明, 深井换热器的进出口温度随动态热负荷波动, 但出口温度更为稳定; 流体速度的增大虽能提高热输出, 但会导致浅层岩土反向传热损失加剧; 高地温梯度可显著提升热输出性能, 且深层区域的换热效率优于浅层区域。

关键词: 地热能; 地源热泵; 换热器; 数值模拟; 动态热负荷; 单位深度热流量

中图分类号: TK529

文献标志码: A

0 引 言

随着全球能源结构转型和双碳目标的深入推进, 地热能作为一种清洁、可再生的新型能源, 正日益受到世界各国的高度重视^[1]。中深层地源热泵系统凭借其稳定高效、环境友好、可持续性强等优势, 已成为建筑供暖领域的重要技术发展方向^[2]。其中, 深井换热器(deep borehole heat exchanger, DBHE)作为连接地下热储与地面用热系统的关键设备, 其传热特性直接影响整个系统的能效和经济性, 是当前地热能开发利用研究的核心课题之一^[3]。

近年来, 数值模拟方法在深井换热器研究中得到广泛应用, 并在预测瞬态热交换过程方面表现出色。Welsch等^[4]采用有限元法, 揭示了单位深度热流量与入口温度之间的线性关系; Holmberg等^[5]通过设定恒定入口温度, 发现更深的钻孔有利于提高热交换率; Saadi等^[6]建立二维非稳态模型, 通过有限体积法研究了季节性对DBHE性能的影响。刘军等^[7]详细研究了12个参数(如单位深度热流量、入口流量和埋深等)对DBHE取热量的影响, 推荐循环入口流量为0.7 m/s, 单位深度热流量为142 W/m; 刘福强等^[8]建立了二维数值传热模型, 研究了内管管长、循环流量及管内流向对深井换热器传热特性的影响; 李思奇等^[9]研究并总结了不同井深条件下内管绝热性及分段绝热对换热的影响规律。尽管很多研究在热交换过程的理论解析和恒定初始条件下的求解方法方面做出了显著贡献, 但对动态热负荷作为输入条件的研究仍较少。

本文提出一种动态热负荷约束的建模和数值研究方法, 用于与建筑物的热负荷耦合并设置动态边界条件。控制方程由有限差分法离散化, 并根据青岛的供暖季现场测试进行验证。本文旨在展示动态建筑热负荷引起的进出口温度变化规律, 分析单位深度热流量(heat exchange rate per meter, HEPM)变化规律, 研究DBHE在不同流速和地热梯度下的输出能力。

1 模型的建立

1.1 物理模型

深井换热器主要有同轴套管式和U型管式两种结构形式, 现有研究成果的分析表明, 同轴套管式换热器在换热量方面展现出显著优势, 且具有更好的运行稳定性^[10]。同轴套管式深井换热器通常有外进内出和内进外出两种运行模式。根据现有研究, 外进内出的方式比内进外出的方式取热量大, 故本文采取外进内出的方式^[5]。其物理模型如图1所示, 流体通过环腔空间流入, 经过岩土加热后进入内管, 最终从内管上部流出。换热过程主要包括岩石中的热传导、外部流体与相邻岩石之间的热对流以及外部流体与内部流体之间的热对流。

1.2 控制方程

基于上述流动与传热过程的物理机制, 本文建立各控制体的能量守恒方程, 并通过式(1)^[11]描述了能量传递与转化的动态过程。

收稿日期: 2025-01-22

基金项目: 自然资源部滨海城市地下空间地质安全重点实验室开放课题(BHKF2023Z05); 德阳市揭榜挂帅重大攻关项目(2022JBZG002); 国家自然科学基金(52078257)

通信作者: 施志钢(1975—), 男, 博士、副教授, 主要从事地源热泵及可再生能源方面的研究。shi_zhi_gang@163.com

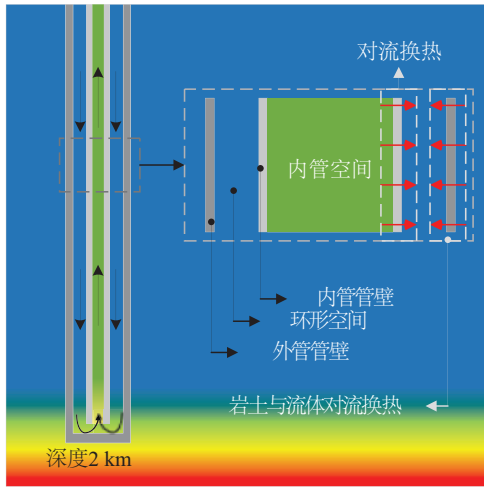


图1 深井换热器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the DBHE

$$\begin{cases} \frac{\partial T_{f,o}}{\partial \tau} + \frac{\partial(u_o T_{f,o})}{\partial z} = \frac{K_i(T_{f,i} - T_{f,o})}{\rho_f c_f F_o} + \frac{K_o(T_g - T_{f,o})}{\rho_f c_f F_o} \\ \frac{\partial T_{f,i}}{\partial \tau} = \frac{\partial(u_i T_{f,i})}{\partial z} + \frac{K_i(T_{f,o} - T_{f,i})}{\rho_f c_f F_{in}} \\ \rho_g c_g \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_g \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_g \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ K_i = \frac{\pi}{\frac{1}{2h_1 r_{ii}} + \frac{1}{2\lambda_{in}} \ln \frac{r_{io}}{r_{ii}} + \frac{1}{2h_2 r_{io}}} \\ K_o = \frac{\pi}{\frac{1}{2h_3 r_{oi}} + \frac{1}{2\lambda_o} \ln \frac{r_{oo}}{r_{oi}} + R_c} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $T_{f,o}$ ——环形空间水温， $^{\circ}\text{C}$ ； τ ——时间， s ； u_o ——井下同轴换热器外管流速， m/s ； z ——深度， m ； K_i ——单位长度换热系数； $T_{f,i}$ ——内管水温， $^{\circ}\text{C}$ ； ρ_f ——水的密度， kg/m^3 ； c_f ——水的比热容， $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ； F_o ——外套管横截面积， m^2 ； K_o ——单位长度换热系数； T_g ——钻孔壁温度， $^{\circ}\text{C}$ ； u_i ——井下同轴换热器内管流速， m/s ； F_{in} ——内管横截面积， m^2 ； ρ_g ——土壤密度， kg/m^3 ； c_g ——土壤比热容， $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ； T ——岩土温度， $^{\circ}\text{C}$ ； r ——径向长度， m ； λ_g ——土壤导热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ； h_1 ——内管内壁面对流换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ； r_{ii} ——内管内半径， m ； λ_{in} ——内管管壁导热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ； r_{io} ——内管外半径， m ； h_2 ——内管外壁面对流换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ； h_3 ——外管内壁面对流换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ； r_{oi} ——外管内半径， m ； λ_o ——外管管壁导热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ； r_{oo} ——外管外半径， m ； R_c ——外管与岩土接触热阻。

1.3 假设

为简化数值模型的计算，假设：

1) 忽略地下渗流的影响，岩土中的传热是纯热传导问题；

2) 忽略空气温度和辐射的季节性波动的影响；

3) 热物性参数是常数；

4) 计算域径向边界处的岩石温度场不受深井换热器的影响；

5) DBHE 中流体内部的径向热交换以对流为主，DBHE 内部轴向的热传导可忽略不计。

1.4 初始条件和边界条件

为方便计算，岩土初始条件遵循地温梯度 $0.03^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。对岩土边界来说，地表被视为恒定温度边界，底部边界也视为恒定温度边界。本文采用距离井壁 80 m 处作为无穷远边界。井壁作为 DBHE 和岩土的边界，符合第三类边界条件。详细网格划分如图 2 所示。

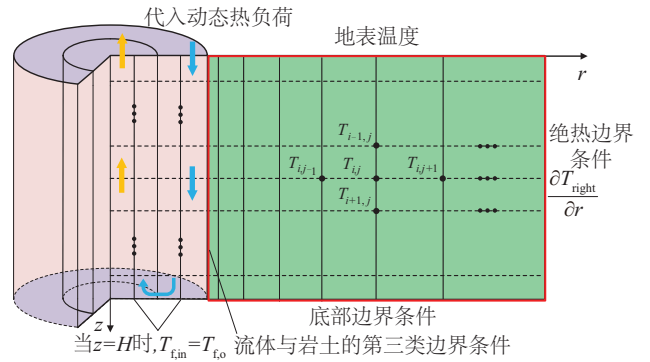


图2 网格划分

Fig. 2 Mesh generation

套管中流体的上下边界条件为：

$$\begin{cases} T_{f,i} = T_{f,o} - \frac{q}{c_f \rho_f u_o F_o}, z = 0 \\ T_{f,i} = T_{f,o}, z = H \end{cases} \quad (2)$$

式中： q ——地热井动态热负荷， kW ； H ——地热井边界深度， m 。

1.5 控制方程的离散过程

本文中，深井换热器中的流体采用直接解法，岩土采用迭代法；深井换热器中的流体控制方程采用二阶迎风格式进行离散，如式(3)、式(4)所示；岩土部分的热传导控制方程采用二阶隐式差分形式进行离散，如式(5)所示。

$$\frac{T_{f,oi}^{n+1} - T_{f,oi}^n}{\Delta \tau} + u_o \cdot \frac{3T_{f,oi}^{n+1} - 4T_{f,oi}^{n+1} + T_{f,oi}^{n+1}}{2\Delta z} = \quad (3)$$

$$\frac{K_o}{\rho_f c_f F_o} (T_i^{n+1} - T_{f,oi}^{n+1}) + \frac{K_i}{\rho_f c_f F_o} (T_{f,ini}^{n+1} - T_{f,oi}^{n+1})$$

$$\frac{T_{f,ini}^{n+1} - T_{f,ini}^n}{\Delta \tau} + u_{in} \cdot \frac{3T_{f,ini}^{n+1} - 4T_{f,ini}^{n+1} + T_{f,ini}^{n+1}}{2\Delta z} = \quad (4)$$

$$\frac{K_i}{\rho_f c_f F_o} (T_{f,oi}^n - T_{f,ini}^n)$$

$$\rho_g C_g \frac{T_{ij}^{n+1} - T_{ij}^n}{\Delta t} \cdot \Delta v =$$

$$\left(r_{j+} \cdot \lambda_{j+} \frac{T_{ij+1}^{n+1} - T_{ij}^{n+1}}{(\delta r)_{j+}} - r_{j-} \cdot \lambda_{j-} \frac{T_{ij}^{n+1} - T_{ij-1}^{n+1}}{(\delta r)_{j-}} \right) \cdot \Delta z \cdot \Delta t +$$

$$\left(r_j \cdot \lambda_{i+} \frac{T_{i+1j}^{n+1} - T_{ij}^{n+1}}{(\delta r)_{i+}} - r_j \cdot \lambda_{i-} \frac{T_{ij}^{n+1} - T_{i-1j}^{n+1}}{(\delta r)_{i-}} \right) \cdot \Delta t \cdot \Delta t \quad (5)$$

1.6 网格独立性分析

在非稳态传热数值模拟中,时间步长 Δt 、纵向步长 Δz 和径向步长 Δr 都会影响计算时间成本和结果精度,为提高数值求解的稳定性,进行网格独立性测试。对纵向步长 Δz 、径向步长 Δr 和时间步长 Δt 进行独立测试设置,出口流体平均温度如表 1 所示。模拟 DBHE 参数见表 2。地热参数见表 3。时间步长分别为 900、1800 和 3600 s。对于相同的网格节点数量,当节点数量为 6800 时,最大平均出口流体温差仅为 0.34 °C。此外,节点数量分别为 6800、13600、34000 和 68000 时,最大平均出口流体温差为 0.47 °C(时间步长 900 s)。根据表 3,不同计算时间步长和节点数量基本相同,误差可忽略。因此,可认为当时间步长和节点数量分别为 3600、6800 s 时,既能满足计算精度要求,又能满足计算速度要求。

表 1 用于独立性验证的平均出口温度

Table 1 Outlet temperature data for independence validation

时间步长/s	平均出口温度/°C			
	6800	13600	34000	68000
900	32.34	32.40	32.59	32.81
1800	32.20	32.23	32.58	32.59
3600	32.00	32.24	32.31	32.42

表 2 模拟所需的物理参数

Table 2 Physical parameters required for simulation

参数	取值
钻孔深度/m	2000
内管规格/mm	Φ160×19
外管规格/mm	Φ219×18
内管导热系数/[W/(m·K)]	0.4
外管导热系数/[W/(m·K)]	41
流量/(m³/h)	20
水的导热系数/[W/(m·K)]	0.599
水的比热容/[J/(kg·K)]	4180
平均地表温度/°C	20

表 3 岩土层的热物性参数

Table 3 Thermophysical parameters of rock and soil strata

岩土区域	导热系数/[W/(m·K)]	密度/(kg/m³)	比热容/[J/(kg·K)]
黏土(0~636 m)	1.8	1780	1379
泥岩(636~1198 m)	2.6	2030	1450
中沙(1198~1910 m)	3.5	1510	1300
砂岩(1910~3000 m)	5.3	2600	878

1.7 模型验证

为验证数值模型和程序的准确性,将仿真结果与青岛某小区的现场实验结果进行比较。地源热泵由一个 DBHE 组成,其中 2000 m DBHE 用于加热。在现场实验中分别通过温度传感器和电磁流量计连续监测进、出口温度和流量。供热时间是每年的 11 月 15 日—次年 4 月 5 日,监测时间为 2019 年 11 月 15 日—19 日加热期内的 120 h。进出口温度对比结果如图 3 所示。为了说明模拟结果与实测结果的拟合效果,采用均方根偏差(root mean squared error, RMSE)计算本次实验与模拟的值(式(6))。模拟的进出口温度的 RMSE 均为 0.78 °C,这与 Nordbeck 等^[12]研究的换热器出口温度运行 198 h 的验证值(0.87 °C)基本相同,偏差在可接受范围内。

$$E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (6)$$

式中: m ——模型验证的入口和出口温度样本的总数; y_i ——实验数据; $\hat{y}_i$ ——模拟结果。

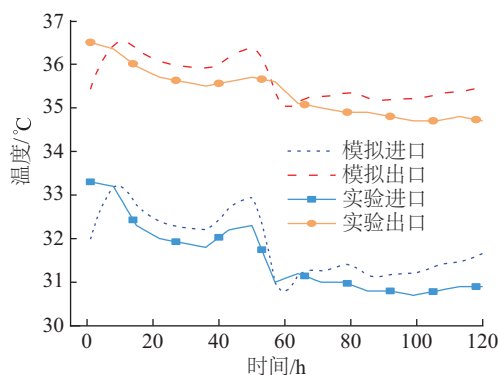


图 3 模型验证

Fig. 3 Model validation

2 结果和讨论

2.1 计算实例

本文的模拟计算采用青岛的气象数据,通过式(7)~式(9)概算出地热井的逐时热负荷,根据官方数据,青岛市供暖季为每年的 11 月 15 日—次年 4 月 5 日,小区供暖季的热负荷波动如图 4 所示。在这种情形下,最大热负荷为 217 kW。由

于加热时间长且个别时间的热负荷很大,因此需要分析极端寒冷时刻和整个加热季节的热性能和对周围岩石的影响。

$$Q'_n = q_f F \times 10^{-3} \quad (7)$$

$$Q = \frac{T_w - T'_n}{T'_w - T'_n} Q'_n \quad (8)$$

$$q = Q \left(1 - \frac{1}{O_{COP}} \right) \quad (9)$$

式中: Q'_n ——建筑物的供暖设计热负荷, kW; q_f ——建筑物的供暖面积热指标, W/m^2 ; F ——建筑物的建筑面积, m^2 ; Q ——逐时热负荷, kW; T_w ——室外逐时温度, $^{\circ}C$; T'_n ——室内设计温度, $^{\circ}C$; T'_w ——室外设计温度, $^{\circ}C$; O_{COP} ——热泵能效比。

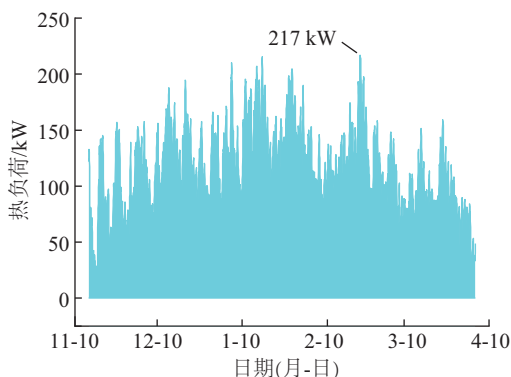


图4 青岛某建筑热负荷

Fig. 4 Heating load of a certain building in Qingdao

图5为整个加热期间进出口温度变化的模拟结果。进出口温度的变化趋势在一定程度上与热负荷的波动特征一致:最大热负荷对应于最低的进口温度和出口温度。因此, DBHE 的进口温度随热负荷的变化而波动,而出口温度稳定得多,说明 DBHE 具有出色的输出稳定性。

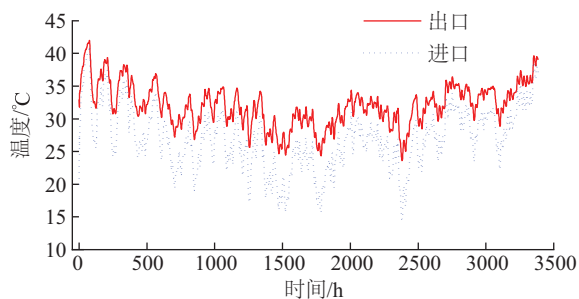
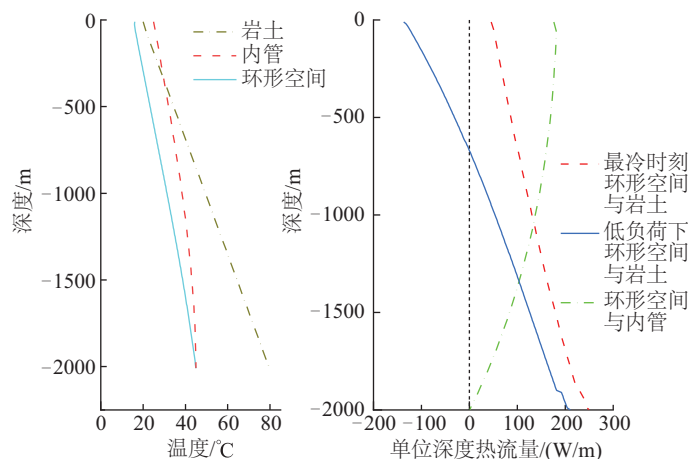


图5 模拟计算结果进出口水温

Fig. 5 Simulated inlet and outlet water temperatures

在最冷时刻,内管和环形空间中的流体也是值得关注的点,如图6所示。最冷时刻为2月21日22:00,此时热负荷最大,为217 kW。较大的热负荷会导致进口流体温度低于地表附近岩土温度,流体在环腔中的流动过程均为加热状态。在较小的热负荷情况下进口流体温度高于地表附近岩石温度,流体在环腔中流动过程为先放热后取热。这也是进口温度随热负荷变化而波动但出口温度明显稳定的原因之一。



a. 温度随时间的变化

b. 单位深度热流量与热损失

图6 流体温度、单位深度热流量和热损失随深度的分布

Fig. 6 Distribution of fluid temperature, heat exchange rate per meter, and heat loss with depth

在供暖系统的实际运行中,由于热负荷的动态变化,深井换热器的进出口水温呈现显著的时变特性,这直接导致单位深度热流量的非稳态特征。考虑到本文参考的实际工程,以流量 $20 m^3/h$ 、地温梯度 $0.03 ^{\circ}C/m$ 作为输入参数进行计算,得到单位深度热流量随时间变化的分布如图7所示。研究发现,深部高温岩土层具有最优的热量提取效率,这主要得益于其稳定的高温场环境,而浅层岩土层则呈显著的季节性波动特征,在供暖初期和末期由于热负荷较低导致热损失较大。

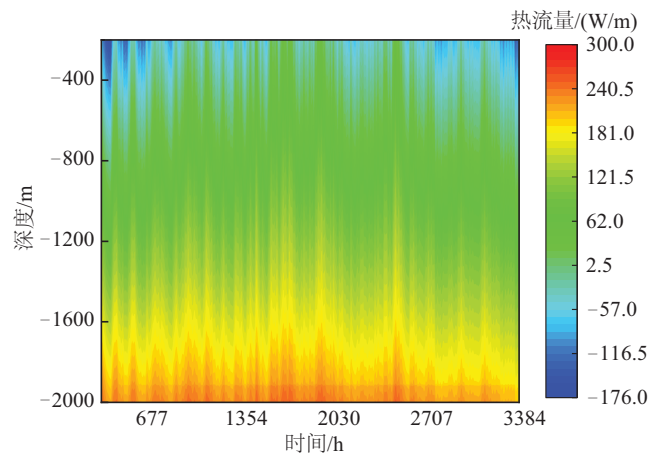
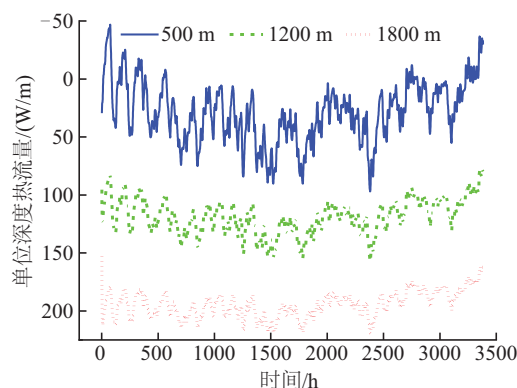


图7 单位深度热流量随动态负荷的变化

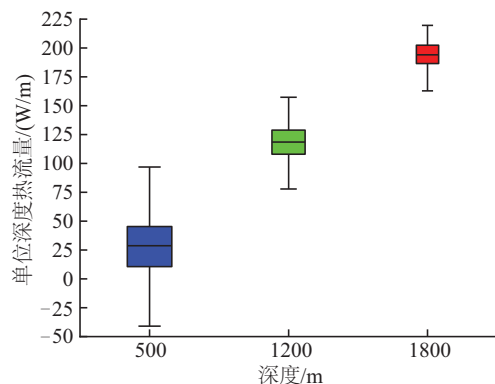
Fig. 7 Variation of heat exchange rate per meter with dynamic load

为探究换热效率的垂向分布特征,本文选取500、1200和1800 m 3个不同深度对其单位深度热流量的动态变化规律进行分析,如图8所示。结果表明:在深度500 m处,单位深度热流量受动态热负荷波动影响显著,表现出较大的变幅;深度1200 m处的换热性能显著改善,平均热流量较500 m处提升约60%,且波动幅度减小,显示出更好的稳定性;1800 m深

层区域展现出最优的换热性能,其单位深度热流量达到 500 m 处的 2.1 倍,且波动幅度进一步降低,表现出卓越的稳定性。这一结果展现出单位深度热流量随深度的增加而显著提升的规律,同时说明深层地温场具有更强的抗干扰能力和更稳定的换热特性。



a. 单位深度热流量随时间的变化



b. 单位深度热流量分布

图8 不同深度单位深度热流量变化

Fig. 8 Variation of heat exchange rate per meter at typical depths

图9展示了一个供暖期内同轴深井换热器由放热状态转换为吸热状态的临界深度随进口温度变化的情况。可看出,由于供暖季初期和末期的进口温度高,临界深度较深;

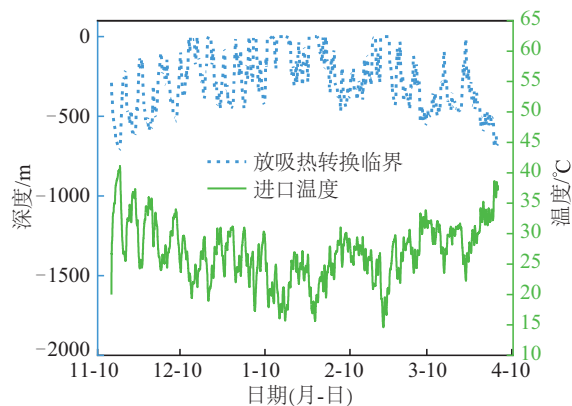


图9 进口温度和放吸热临界深度变化

Fig. 9 Variation of inlet temperature and critical thermal transition depth with time

在供暖季中期,由于建筑热负荷较大进而临界深度越浅,甚至在进口段即开始吸热。

2.2 流量的影响

本节分析流量对 DBHE 内管流体温度和外管流体温度性能的影响,以上述建筑热负荷作为输入参数,研究不同流量下的影响效果。图10显示了不同流量下内管和环腔的流体温度分布,在热负荷一定的情况下,随着流量的增大,DBHE 的进出口温度升高,但 DBHE 的进出口温差却减小。这意味着较低的流量下,DBHE 能在岩土中获得更多热量,但在考虑工程实际的情况下,较高的出口流体温度更有利于建筑供暖使用。

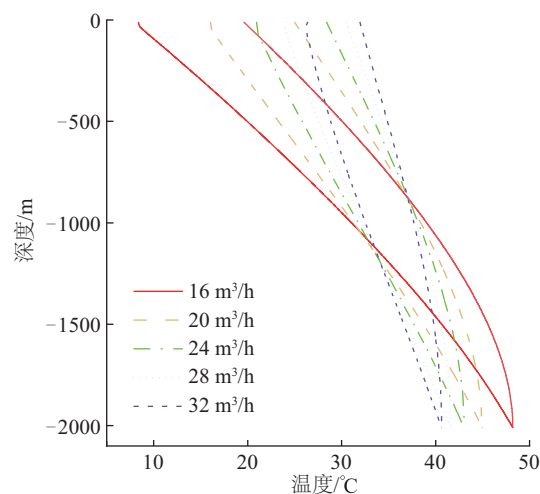


图10 最冷时刻内管和环腔的温度分布

Fig. 10 Temperature distribution in inner pipe and annular space at coldest moment

图11展示了不同流量下内管和环腔的热短路分布规律。随着流体速度的增大,内外管的热短路显著减小。当流体速度从 16 m³/h 增至 32 m³/h 时,平均热损失从 138 W/m 降

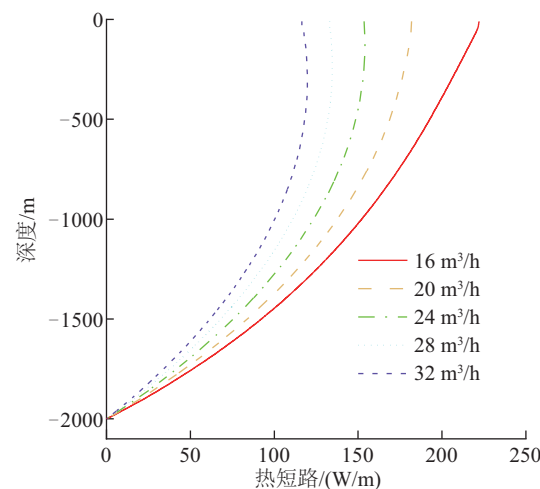


图11 内管与环形空间热短路变化

Fig. 11 Variation of thermal short circuit in inner tube and annular space

至 86 W/m, 降幅达 37.7%。在实际工程中可用提高流量的方法来降低热短路。图 12 揭示了流量对环腔与周围岩土热流量的影响规律。随着流量的增大, 环形空间与深层高温岩土的热流量逐渐增加, 导致 DBHE 的出口温度升高, 当回流体再次进入 DBHE 时, 其温度也逐渐升高, 造成浅层岩土处的单位深度热流量减少, 当进口温度升至超过浅层岩土的温度场时, 形成反向传热现象, 造成热损失。例如, 当流量从 16 m³/h 增至 32 m³/h 时, 单位深度热流量在 0~2000 m 范围内的分布从 100~227 W/m 变化至 -28~284 W/m。

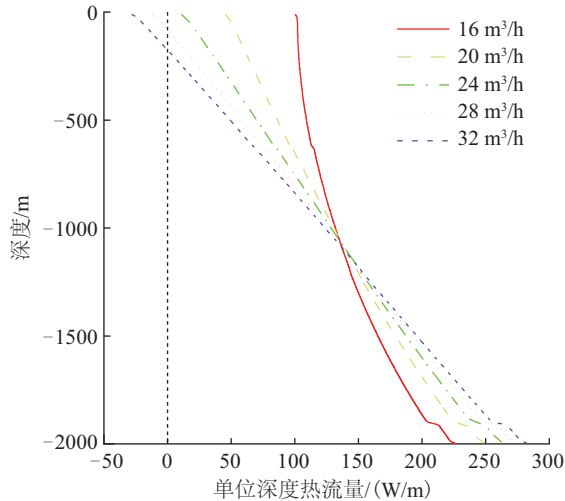
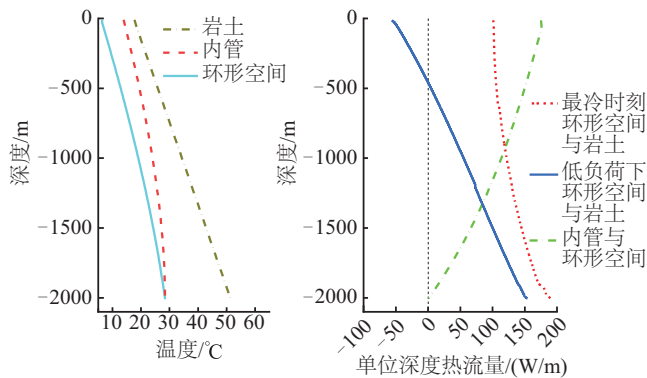


图 12 环形空间与岩土的单位深度热流量变化

Fig. 12 Variation of heat exchange rate per meter in annular space and surrounding rock

2.3 地温梯度的影响

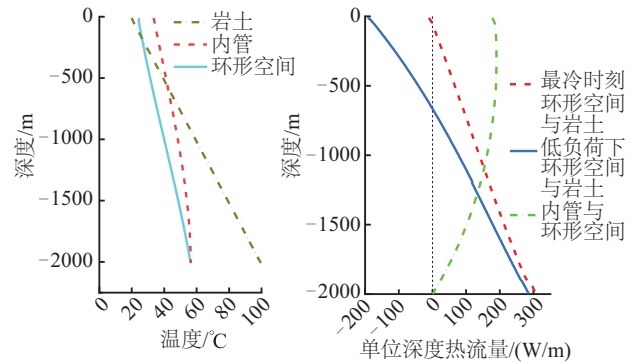
地温梯度作为影响深井换热器性能的关键地质参数, 其空间分布具有显著的区域性差异。为研究地温梯度对深井换热器传热特性的影响规律, 本文选取 0.02、0.03 和 0.04 °C/m 3 个不同梯度值进行对比分析, 如图 13、图 6 所示。结果表明, 地温梯度对深井换热器传热性能具有决定性影响。在 0.02 °C/m 梯度条件下, 外管进口温度为 6.6 °C, 井底温度达到 32.6 °C, 出口温度稳定在 15.5 °C, 此时外管单位深度热流量



I. 流体温度随深度的变化

II. 单位深度热流量和热短路

a. 0.02 °C/m



I. 温度随时间的变化

II. 单位深度热流量与热短路

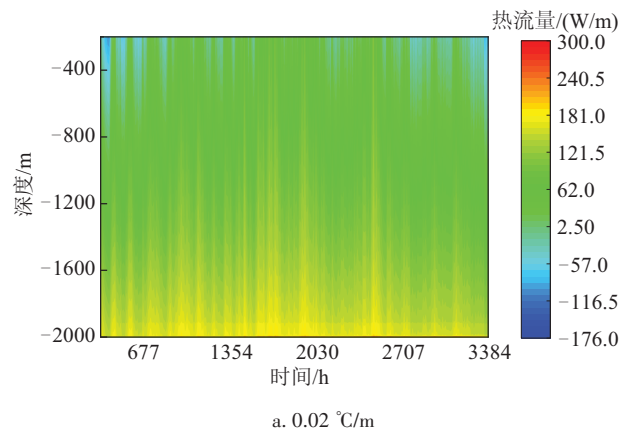
b. 0.04 °C/m

图 13 流体温度、单位深度热流量和热短路随深度的分布

Fig. 13 Depth-dependent variations in fluid temperature, heat exchange rate per meter, and thermal short circuiting

从进口 100 W/m 提升至底部 189 W/m, 增幅达 89%; 而在 0.04 °C/m 梯度条件下, 系统热性能显著提升, 最冷工况下外管进口温度升至 24.5 °C, 井底温度达到 56.3 °C, 出口温度维持在 33.5 °C, 单位深度热流量从 -10 W/m 显著提升至 303 W/m, 充分体现了高地温梯度的优势。另外, 在低负荷工况下, 3 种地温梯度条件均出现浅层岩土向深井换热器反向传热的现象, 且随地温梯度的增大而愈加显著。

图 14 展示了 0.02、0.04 °C/m 地温梯度条件下单位长度取热量的时空分布特征。结合 2.1 节中 0.03 °C/m 地温梯度的对比分析, 可得: 地温梯度对深井换热器的取热性能具有决定性影响。分析表明, 在 0.02 °C/m 梯度条件下, 供暖季平均单位长度取热量为 86 W/m, 峰值可达 240 W/m; 当梯度提升至 0.03 °C/m 时, 平均取热量增加 8.1%, 达到 93 W/m, 峰值提升 7.1%, 至 257 W/m; 在 0.04 °C/m 梯度条件下, 性能进一步提升, 平均取热量达到 100 W/m (较 0.02 °C/m 提升 16.3%), 峰值取热量显著增加 32.5%, 达到 318 W/m。值得注意的是, 在所有地温梯度条件下, 浅层岩土出现向深井换热器的反向取热现象, 且随梯度的增大而愈加显著。



a. 0.02 °C/m

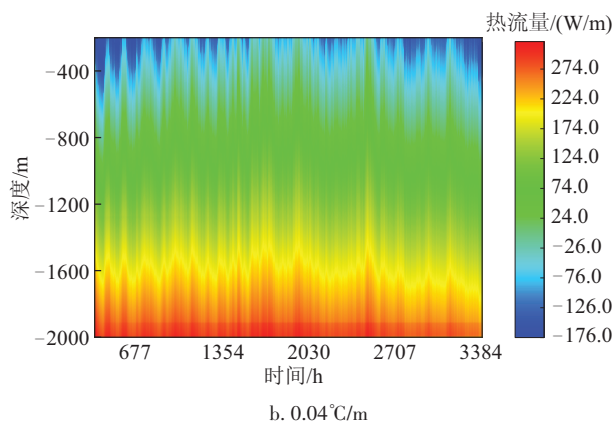


图 14 不同地温梯度下单位深度热流量随动态负荷的变化
Fig. 14 Heat exchange rate per meter depth versus dynamic heating load under different geothermal temperature gradients

为探究地温梯度对深井换热器取热性能的影响机制, 本文选取 500、1200 和 1800 m 3 个不同深度进行分析, 如图 15、图 8a 所示。结果表明, 地温梯度的提升显著改善了深部换热性能, 但对浅层区域产生了负面影响。在 0.02 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 梯度条件下, 500 m 处呈现出显著的热波动特征, 平均单位长度取热量为 49 W/m, 波动范围为 -23~116 W/m, 这反映了浅层地温场的不稳定性。1200 m 处性能显著提升, 平均取热量达到 99 W/m (较 500 m 提升 102%), 且波动幅度减小。1800 m 处展现出所选不同深度的最优换热性能, 平均取热量达到 144 W/m, 且保持 103~170 W/m 的稳定区间。当梯度提升至 0.04 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 时, 系统性能发生显著变化: 500 m 处平均取热量降至 8 W/m, 且出现了 -70 W/m 的峰值热损失, 表明高地温梯度加剧了浅层热波动; 1200 m 处平均取热量提升 39.4%, 达到 138 W/m; 1800 m 处性能提升最为显著, 平均取热量达到 244 W/m (较 0.02 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 提升 69.4%), 且展现了优异的稳定性, 说明地温梯度对深井换热器性能的影响规律在浅层区域受负面影响加剧, 而深层区域则获得显著性能提升。

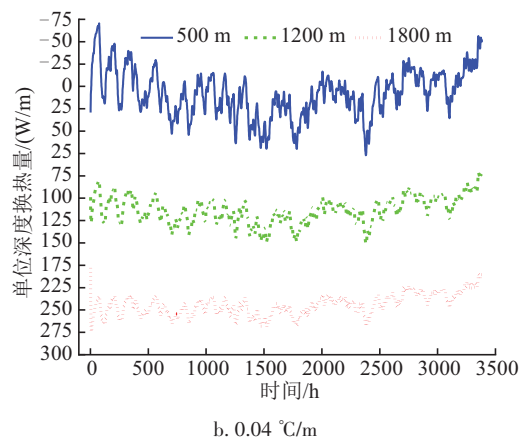
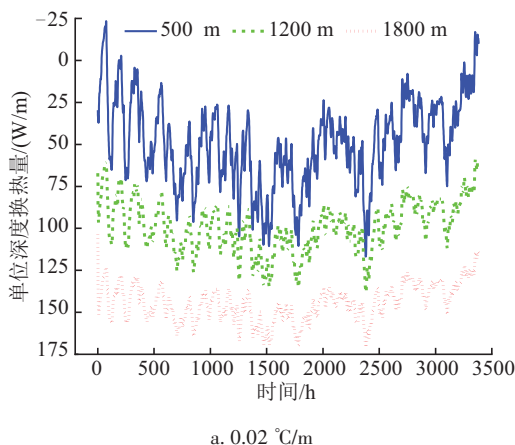


图 15 不同地温梯度下不同深度单位深度热流量变化

Fig. 15 Variation of heat exchange rate per meter depth at different depths under various geothermal temperature gradients

3 结 论

本文提出一种基于数值模拟的 DBHE 传热模型, 旨在优化中深层地热能建筑供暖中的应用。该模型采用有限差分法求解。本文给出了整个加热期间进出口温度的完整示例以及最冷时刻内外管水温, 研究了所有深度的单位深度热流量在一个供暖季随动态热负荷的变化, 并研究了 3 个不同深度的单位深度热流量的变化, 分析了不同流体速度和地质参数对 DBHE 热性能的影响。主要结论如下:

- 1) 深井换热器的进出口温度均随动态热负荷变化而波动, 但出口温度的波动小得多。对于流速为 20 m^3/h 的 2000 m DBHE, 加热期间最冷时刻的平均 HEPM 为 135 W/m。
- 2) 大流量 (如 32 m^3/h) 可显著提高热输出, 但会因浅层岩土反向传热损失热量导致热损失严重。
- 3) 较高的地温梯度显著提升了热输出。例如, 当地温梯度从 0.02 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 增至 0.03 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 时, 2 km 深井的热输出可提高 44% (低流量) 和 34% (高流量)。在地温梯度或导热系数较低的地区可通过增加井深或流量来补偿热输出。

[参考文献]

- [1] 李锦堂, 李骥, 张广秋, 等. 中深层地埋管热泵系统供暖源侧参数设计方法[J]. 太阳能学报, 2024, 45(9): 1-13.
LI J T, LI J, ZHANG G Q, et al. Optimum design method of source side parameter for deep borehole geothermal heat pump heating system [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(9): 1-13.
- [2] LUND J W, TOTH A N. Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review [J]. Geothermics, 2021, 90: 101915.
- [3] 赵鹏, 张东海, 李晓昭, 等. 基于 p 阶线性模型的地理

- 管换热器流体温度分布研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(6): 51-59.
- ZHAO P, ZHANG D H, LI X Z, et al. Study on fluid temperature distribution of buried tube heat exchanger based on p-order liner model [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2024, 45(6): 51-59.
- [4] WELSCH B, RÜHAAK W, SCHULTE D O, et al. Characteristics of medium deep borehole thermal energy storage[J]. *International journal of energy research*, 2016, 40(13): 1855-1868.
- [5] HOLMBERG H, ACUÑA J, NÆSS E, et al. Thermal evaluation of coaxial deep borehole heat exchangers [J]. *Renewable energy*, 2016, 97: 65-76.
- [6] SAADI M S, GOMRI R. Investigation of dynamic heat transfer process through coaxial heat exchangers in the ground [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2017, 42(28): 18014-18027.
- [7] LIU J, WANG F H, GAO Y, et al. Influencing factors analysis and operation optimization for the long-term performance of medium-deep borehole heat exchanger coupled ground source heat pump system [J]. *Energy and buildings*, 2020, 226: 110385.
- [8] 刘福强, 施志钢, 蔡超, 等. 中深层深井换热器实验测试及传热特性模拟研究[J]. *可再生能源*, 2023, 41(7): 891-898.
- LIU F Q, SHI Z G, CAI C, et al. The experimental test and the simulation study of the heat transfer characteristics of the deep well heat exchanger [J]. *Renewable energy resources*, 2023, 41(7): 891-898.
- [9] 李思奇, 赵军, 李扬, 等. 闭式中深层井下换热数值模拟与内管分段绝热影响研究[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(11): 369-374.
- LI S Q, ZHAO J, LI Y, et al. Numerical simulation of closed loop medium-deep downhole heat exchange: a focus on influence of segmented insulation on central pipe [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2020, 41(11): 369-374.
- [10] BROWN C S, KOLO I, BANKS D, et al. Comparison of the thermal and hydraulic performance of single U-tube, double U-tube and coaxial medium-to-deep borehole heat exchangers[J]. *Geothermics*, 2024, 117: 102888.
- [11] DENG J W, WEI Q P, HE S, et al. Simulation analysis on the heat performance of deep borehole heat exchangers in medium-depth geothermal heat pump systems [J]. *Energies*, 2020, 13(3): 754.
- [12] NORDBECK J, BEYER C, BAUER S. Experimental and numerical analysis of a cement based thermal energy storage system with a helical heat exchanger [J]. *Applied thermal engineering*, 2021, 185: 116339.

SIMULATION AND ANALYSIS OF HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF COAXIAL DEEP BOREHOLE HEAT EXCHANGERS BASED ON DYNAMIC HEATING LOAD CONSTRAINTS

Shi Zhigang, Li Zhigang, Zhang Lin, Xia Shiwei, Liu Wanqing, Gao Jianing

(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technological, Qingdao 266520, China)

Abstract: A numerical model based on the finite difference method is developed for deep borehole heat exchangers used in medium-deep ground source heat pump systems, and the heat transfer characteristics under dynamic thermal load conditions are analyzed. Using this model along with actual meteorological data from Qingdao and validation via field experiments, the effect of fluid velocity, geothermal gradient, and geological parameters on the thermal performance of the deep borehole heat exchanger are investigated. The results indicate that while the inlet and outlet temperatures of the exchanger fluctuate in response to dynamic thermal loads, the outlet temperature exhibits greater stability. Although increasing fluid velocity enhances heat extraction, it also leads to higher heat loss caused by reverse heat transfer in shallow rock and soil layers. Higher geothermal gradients significantly improve heat extraction performance, and heat exchange efficiency is found to be greater in deeper regions compared to shallow zones.

Keywords: geothermal energy; geothermal heat pumps; heat exchangers; numerical simulation; dynamic thermal load; heat flux per unit depth