



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403013

引用格式:刘成路,胡振阳,赵永哲,等.中深层同轴地埋管换热器井下换热关键参数及影响规律分析[J].科学技术与工程,2025,25(8):3134-3141.

Liu Chenglu, Hu Zhenyang, Zhao Yongzhe, et al. Analysis of key parameters and influence law of downhole heat transfer in medium-depth coaxial buried tube heat exchangers[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(8): 3134-3141.

中深层同轴地埋管换热器井下换热关键参数及影响规律分析

刘成路^{1,2}, 胡振阳^{1,2}, 赵永哲^{1,2}, 苟立^{1,2}

(1. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 西安 710065; 2. 西安煤科地热能开发有限公司, 西安 710086)

摘要 为探明中深层同轴地埋管换热器的高效换热特性,基于流体流动传热方程,构建中深层同轴地埋管换热器与周围岩土体的传热模型,应用 COMSOL 软件进行换热数值分析与计算,研究该模型在不同埋深、内管导热系数、循环水流量、固井材料导热系数条件下名义取热量的变化情况。结果表明:内管导热系数、循环水流量及固井材料导热系数对名义取热量影响较大;内管导热系数从 0.5 W/(m·K)降至 0.002 W/(m·K),名义取热量增幅为 289.4%;循环水流量从 20 m²/h 升至 45 m²/h,名义取热量增幅为 124%;固井材料导热系数从 0.8 W/(m·K)升至 1.8 W/(m·K),名义取热量增幅为 2%。最后依托中煤科工西安研究院(集团)有限公司中深层地热能建筑供热试点示范项目,对该项目连续运行(168 h)工况下实验与模拟数据进行差异化分析。研究成果对中深层同轴地埋管换热器优化设计及中深层地热井高效开发利用具有一定的指导意义。

关键词 中深层同轴地埋管换热器; 高效换热; 流体传热模型; 名义取热量

中图法分类号 P967;

文献标志码 A

Analysis of Key Parameters and Influence Law of Downhole Heat Transfer in Medium-depth Coaxial Buried Tube Heat Exchangers

LIU Cheng-lu^{1,2}, HU Zhen-yang^{1,2}, ZHAO Yong-zhe^{1,2}, GOU Li^{1,2}

(1. CCTEG Xi'an Research Institute(Group) Co., Ltd., Xi'an 710065, China;

2. Xi'an Coal Science Geothermal Energy Development Co., Ltd., Xi'an 710086, China)

[Abstract] In order to explore the efficient heat transfer characteristics of medium-deep coaxial buried pipe heat exchangers, a heat transfer model was constructed between the medium-deep coaxial buried pipe heat exchanger and surrounding rock and soil based on the fluid flow heat transfer equation. COMSOL software was used for numerical analysis and calculation of heat transfer, and the nominal heat transfer of the model was studied under different burial depths, inner pipe thermal conductivity, circulating water flow rate, and cementing material thermal conductivity conditions. The research results indicate that the thermal conductivity of the inner pipe, the flow rate of circulating water, and the thermal conductivity of the cementing material have a significant impact on the nominal heat extraction. The thermal conductivity of the inner tube decreases from 0.5 W/(m·K) to 0.002 W/(m·K), with a nominal increase in nominal heat extraction of 289.4%. The circulating water flow rate from 20 m²/h rises to 45 m²/h, with a nominal increase in nominal heat extraction of 124%. The thermal conductivity of cementing materials increases from 0.8 W/(m·K) to 1.8 W/(m·K), with a nominal increase in heat extraction of 2%. Finally, relying on a Pilot Demonstration Project of Medium and Deep Geothermal Energy for Building Heating at CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., differential analysis was conducted on experimental and simulation data under continuous operation for 168 h of the project. The research results have certain guiding significance for the optimization design of medium-deep coaxial buried pipe heat exchangers and the efficient development and utilization of medium-deep geothermal wells.

[Keywords] medium-deep coaxial buried pipe heat exchangers; efficient heat exchange; fluid heat transfer model; nominal heat extraction

随着全球能源危机愈演愈烈,地热能作为一种清洁型能源正逐渐发挥其优势作用,地热能是一种

从地下抽取的天然的热能,这种能量源于地球内部的熔岩,以热力形式存储于地下,是导致火山爆发

收稿日期:2024-04-24; 修订日期:2024-12-20

基金项目:中煤科工西安研究院(集团)有限公司科技创新基金(2022XAYJS03)

第一作者:刘成路(1996—),男,汉族,山东济宁人,硕士,助理工程师。研究方向:钻井工程及地热能开发利用。E-mail:1343867994@qq.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

和地震的直接能量来源。透过地下水的流动和熔岩涌至离地面 1~5 km 的地壳,热力得以被转送至较接近地面的地方。作为蕴藏在地球内部的天然热能和一种极具竞争力的清洁可再生能源,地热能具有储量大、分布广、绿色低碳、适用性强、稳定性好等优势。高温地热资源将成为未来能源结构调整、发展清洁能源的主力之一。

目前主流的地热能开发利用方式分为浅层地源热泵、中深层水热型、中深层换热型及干热岩地热 4 种。其中以中深层换热型方式开发地热能的特点是“只取热不取水”,对地下水资源及地质环境几乎没有影响,其基本原理是在地层中埋藏由内管和外管构成的中深层同轴地埋管换热器,用以提取地壳下干热岩的热量并利用循环水输送至地面能源站。不同于浅地埋管技术,中深层及深层地埋管系统受到地埋管全段周围的分层岩土岩性以及温度梯度分布^[1-5]影响较大。文献[6-7]利用格林函数和线性叠加原理,提出有限长线热源模型和有限长圆柱热源模型,该模型从钻孔长度有限性层面对无限长线热源模型和无限长圆柱热源模型进行了改进和优化。Luo 等^[8-9]提出了一种适用于 C-DGHE 换热分析的分段有限长线热源模型和分段有限长圆柱热源模型,该模型考虑中深层地埋管换热器周围岩层温度分布的非均匀性,进一步改进优化了有限长线热源模型和有限长圆柱热源模型。中外已有不少学者对中深层同轴地埋管换热器的换热性能进行研究,并分析如井型与井径^[10-11]、流速与流量^[12-13]、地层条件与渗流^[14-15]等因素对地热井取热能力与换热效率的影响。唐晓音等^[16]基于 FEFLOW 软件模拟了入口流量、入口温度、换热井深度以及供水管管材导热系数 4 种参数对地埋管换热器换热性能的影响。张育平等^[17]通过研究分析钻井也循环过程中的传热特性,并建立钻井液与地层瞬态传热解析解模型,给出了一种计算原始地温梯度、初始地层温度高效算法,对于精确刻画中深层地热井与岩层换热特性具有实际意义。韩永亮等^[18]通过建立地热井分层换热模型,精细刻画地层并构建均质模型和分层模型。采用数值模拟分析方法,对地热井换热性能及连续运行过程的取热能力进行系统分析,对中深层同轴套管式换热系统设计和地温场热恢复研究提供了借鉴和参考。

在前人研究的基础上,基于流体流动传热方程,构建中深层同轴地埋管换热器与周围岩土体的传热模型,以名义取热量^[19]为研究目标,讨论单个中深层同轴地埋管换热器换热性能评估参数下某个因素独立作用时的地埋管换热性能,旨在探索特

定工况下中深层同轴地埋管换热器的最佳换热性能,对中深层地热能的开发利用具有指导意义。

1 传热模型建立

1.1 中深层同轴地埋管换热器原理

中深层同轴地埋管换热器是中深层地热井井下换热系统的核心,其组成结构及工作原理如图 1 所示,主体为单井井内封闭式循环换热结构,包括岩土体、井壁、外管和内管。通过向高温地层钻进数千千米深度,应用固井工艺封闭地热井,并在井内安装内管和井底装置,建立中深层同轴地埋管换热器系统,以“取热不取水”形式在地面循环泵的作用下,循环水从环空流入经井底加热后从中心内管流出至能源站。

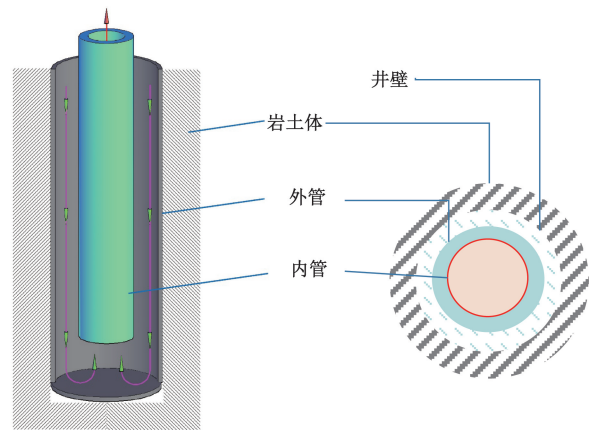


图 1 中深层同轴地埋管结构及原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure and principle of mid to deep coaxial buried pipes

1.2 模型假定条件

中深层同轴地埋管换热器工作原理是一个复杂且非稳态的传热过程,为了便于对传热过程进行量化,给出如下基本假设:①下各个分段地层岩土循环水为各向同性;②固井材料、管内循环水及内外管热物理性质参数稳定不变;③根据卢德唐等^[19]研究表明,地层垂直方向上的温度梯度与水平方向上的温度梯度比值总是小于 1%,因此忽略垂直方向上的地层及内外管热传导;内管内及环空内同一截面上循环水任一点的温度、流速均匀一致;④忽略大气与地表之间的热对流交换,将地表温度看做定值,不考虑地下水对传热的影响;⑤忽略井筒及环空内循环水流动过程中的摩擦生热。

1.3 物理模型的建立

将流体在中深层同轴地埋管换热器中的循环总结为两个阶段,既下注段和上返段。下注段循环水进入环空,外管受岩土体与固井材料之间的热传

导,循环水下注过程不断被加热最终到达地埋管底部后温度升至最高。上返段循环水从内管底部升至出口,由于受内管传热系数的影响,管壁内外之间循环水存在热交换,循环水温度不断降低。结合前面模型假定条件将上述复杂传热问题简化为以钻孔轴线为轴的圆柱体导热问题。

(1) 岩土体内传热方程。

$$\frac{1}{a_g} \frac{\partial T_g}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_g r \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial z} \right) \quad (1)$$

式(1)中: a_g 为不同地层岩土体热扩散率, m^2/s ; T_g 为岩土体温度, $^{\circ}\text{C}$; r 为径向坐标, m ; λ_g 为岩土体导热系数; τ 为时间, s ; z 为距地面距离, m 。

(2) 固井水泥环内传热方程。

$$\frac{1}{a_s} \frac{\partial T_s}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_s r \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) \quad (2)$$

式(2)中: a_s 为固井材料热扩散率, m^2/s ; T_s 为固井材料温度, $^{\circ}\text{C}$; λ_s 为固井材料导热系数。

(3) 外管内传热方程。

$$\frac{1}{a_o} \frac{\partial T_o}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_o r \frac{\partial T_o}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_o \frac{\partial T_o}{\partial z} \right) \quad (3)$$

式(3)中: a_o 为外管热扩散率, m^2/s ; T_o 为外管温度, $^{\circ}\text{C}$; λ_o 为外管导热系数。

(4) 内管传热方程。

$$\frac{1}{a_i} \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_i r \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} \right) \quad (4)$$

式(4)中: a_i 为内管热扩散率, s ; T_i 为内管温度, $^{\circ}\text{C}$; λ_i 为内管导热系数。

(5) 环空内能量守恒方程。

$$c_o \frac{\partial t_o}{\partial \tau} = \frac{t_b - t_o}{R_1} + \frac{t_i - t_o}{R_2} - C \frac{\partial t_o}{\partial t} \quad (5)$$

$$c_o = \pi(d_{oi}^2 - d_{io}^2)\rho_c + \pi(d_{oo}^2 - d_{oi}^2)\rho_{oc} + \pi(d_b^2 - d_{oo}^2)\rho_{scs} \quad (6)$$

$$C = mc \quad (7)$$

式中: c_o 为外管道热流通道单位长度的热容量, $\text{J}/(\text{m} \cdot \text{K})$; C 为循环水的热容量, $\text{J}/(\text{s} \cdot \text{K})$; t_i 、 t_o 分别为内、外管中循环水的温度, $^{\circ}\text{C}$; t 为时间, s ; t_b 为钻孔壁的温度, $^{\circ}\text{C}$; ρ 、 ρ_o 、 ρ_s 分别为循环水、外管、固井材料的密度, kg/m^3 ; c 、 c_o 、 c_s 分别为循环水、外管、固井材料的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; d_{oi} 、 d_{io} 、 d_{oo} 、 d_{ob} 分别为外管内半径、内管外半径、外管外半径、钻孔半径, m ; m 为循环水的质量流量, kg/s 。

(6) 内管能量守恒方程。

$$C_i = \pi d_{ii}^2 \rho_c + \pi(d_{io}^2 - d_{ii}^2)\rho_i c_i \quad (8)$$

式(8)中: c_i 为内管热流通道单位长度的热容量, $\text{J}/(\text{m} \cdot \text{K})$; d_{ii} 为内管内半径, m ; ρ_i 为内管比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; c_i 为内管的比热容, $\text{J}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

初始条件:假设内管循环水、环空循环水及初始地层温度三者相等,地温梯度为 $0.03 \text{ K}/\text{m}$,地表温度取 280.15 K ,则岩土体初始温度为

$$T = 280.15 + 0.03z \quad (9)$$

边界条件:外部环空循环水与内管循环水能量方程的边界条件为

$$t_o = t_i - \frac{Q}{C}, z = 0, t_o = t_i, z = H \quad (10)$$

式(10)中: Q 为取热功率, kW ; H 为地埋管底部距地面的深度。

地层中的热量传递过程为:地层→固井材料→外管→循环水,其中由地层到固井材料、固井材料到外管的换热方式主要是热传导,则总热阻 R 为

$$R = R_1 + R_2 \quad (11)$$

$$R_1 = \frac{1}{\pi d_{ii} Nu_o} + \frac{1}{2\pi\lambda_o} \ln \frac{d_{io}}{d_{ii}} + \frac{1}{2\pi\lambda_s} \ln \frac{d_b}{d_{io}} \quad (12)$$

$$R_2 = \frac{1}{\pi d_{oi} Nu_i} + \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{d_{oo}}{d_{oi}} + \frac{1}{\pi d_{oo} Nu_o} \quad (13)$$

式中: R_1 为固井材料到环空循环水之间的热阻; R_2 为内外管循环水之间的热阻; Nu_o 为环空对流换热系数; Nu_i 为内管对流换热系数。

2 模型应用与讨论

2.1 模型数据来源

为精确分析评价不同单个因素作用时中深层同轴地埋管换热性能特性,传热模型来自中煤科工西安研究院(集团)有限公司中深层地热能建筑供热试点示范项目,模型所用参数如表1所示,考虑到实际工况的持续性,取该项目连续运行一周(168 h)的数据进行模拟分析。

表1 模型参数

Table 1 Model parameters

参数	数值
钻孔深度/ m	3 500
钻孔半径/ mm	241.3
内管半径/ mm	114.3
外管半径/ mm	177.8
外管导热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	40
地层导热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	3.25
固井材料导热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1.1
水的导热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	0.63
内管体积热容/ $(\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3})$	4×10^6
地层体积热容/ $(\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3})$	2.87×10^6
固井材料体积热容/ $(\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3})$	2.5×10^6
水的体积热容/ $(\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3})$	4.19×10^6
水的密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	996
水的黏度/ $(\text{Pa} \cdot \text{s})$	0.73×10^{-3}

名义取热量定义为在特定运行工况下,一个地埋管换热器可以提供的最大取热量^[20]。这种特定工况为:①地下岩土体初始温度为定值,既认为井下换热开始时未受中深层同轴地埋管换热器系统的影响;②中深层同轴地埋管换热器系统在连续运行90 d后的流体入井温度不低于5℃。

名义取热量的计算公式为

$$Q_{nom} = cm\Delta T \tag{14}$$

式(14)中: Q_{nom} 为名义取热量; c 为循环水的比热容, $J/(kg \cdot K)$; m 为水的质量流量, m^3/h ; ΔT 为地埋管换热器进出水温差, K 。

2.2 埋深因素影响

为了研究不同同轴地埋管换热器埋深条件下名义取热量的变化情况,采用所举项目实际工况为基本条件,以 $30 m^3/h$ 为固定循环水流量进行模拟分析和数据整合,得到图2、图3所示结果。从数据层面来看,埋深从500 m增加到3 500 m,名义取热量由369 kW增长至2 795 kW,名义取热量与埋深呈正相关性,即同轴地埋管换热器埋深越深受到地心温度影响越大,加热段越长,循环水换热量越高,返出循环水温度越高,名义取热量越高。该正相关性与地温梯度密切相关,由图4可知,地区平均地温梯度越高则同轴地埋管换热器名义取热量越高。不同地区的地温梯度也略有不同,以关中地区为例,其各构造单元的地温梯度均随深度增大而逐渐减小,且减小幅度也逐渐减小,最终趋于稳定,每百米增温范围在 $1.64 \sim 3.0 \text{ }^\circ\text{C}$,大部分地区3 000 m处地温梯度为 $2.5 \sim 3.0 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ ^[21]。但总体考虑到同轴地埋管换热器的成本随着埋深的增加大幅提高,实际工程项目应当均衡考虑取热效益与埋深成本。

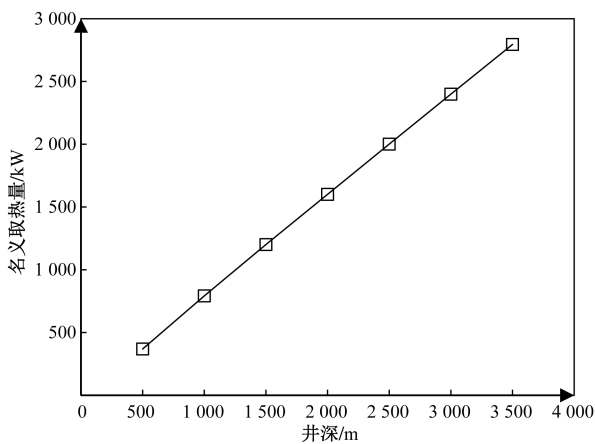


图2 不同埋深条件下名义取热量变化图

Fig. 2 Changes in nominal heat extraction under different burial depth conditions

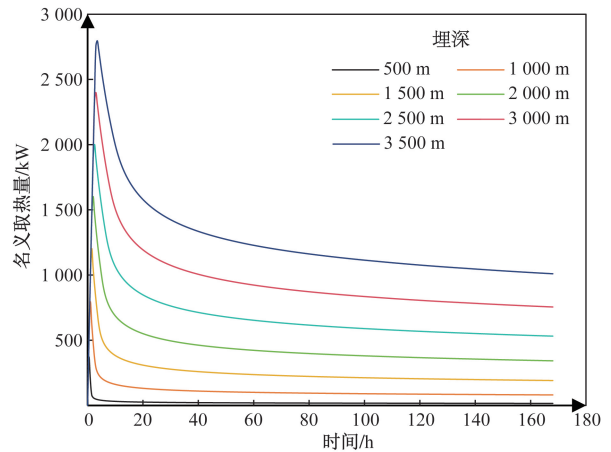


图3 不同埋深条件下名义取热量随时间变化趋势图

Fig. 3 Trend chart of nominal heat extraction over time under different burial depth conditions

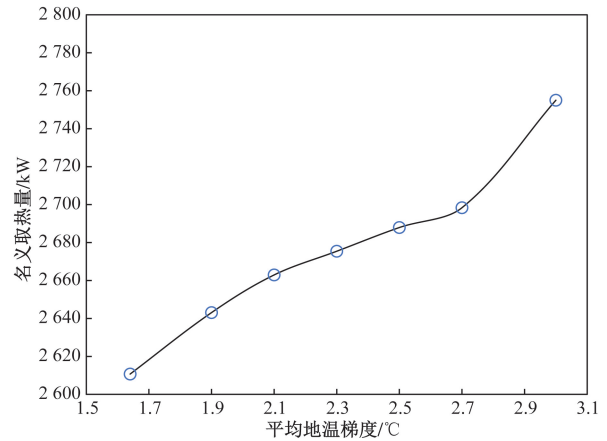


图4 不同平均地温梯度下名义取热量变化图

Fig. 4 Changes in nominal heat extraction under different average ground temperature gradients

2.3 循环水流量因素影响

为了研究不同循环水流量条件下的同轴地埋管换热器名义取热量变化特征,在埋深3 500 m的同轴地埋管换热器中,分别以20、25、30、35、40、45 m^3/h 的循环水流量运行工况进行模拟分析和数据整合,得到图5和图6所示结果。名义取热量的高低与循环水流量基本成线性相关的关系,即循环水流量越大,则名义取热量越高,当循环水流量从 $20 m^3/h$ 增至 $45 m^3/h$ 时,名义取热量增长幅度为124%,增幅明显。但从另一方面来看当循环水流量增加,名义取热量随时间的变化幅度也越明显,以循环水流量为 $20 m^3/h$ 和 $45 m^3/h$ 两种运行工况为例,名义取热量上升至峰值的时间分别为5 h和2 h;下降至平均值的时间分别为61.5 h和49 h。因为较大的循环水流量会加速地埋管换热器与周围岩土层的换热过程,使地埋管的换热效率大大提高,名义取热量相应增加。但增加循环水流量会减

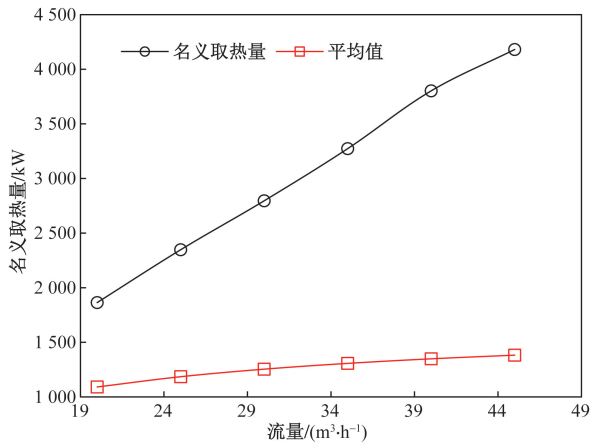


图5 不同流量下名义取热量变化图

Fig. 5 Changes in nominal heat extraction under different flow rates

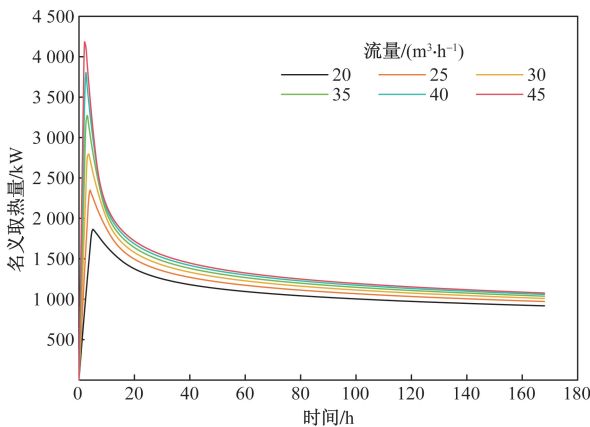


图6 不同流量下名义取热量随时间变化趋势图

Fig. 6 Trend chart of nominal heat extraction over time under different flow rates

少外管流体与井眼周围岩土层换热时间, 地埋管底部温度随着流量的增加有所降低, 造成底部流体温度衰减的更快, 表现在图6中则是取热量曲线下降幅度更为明显。综上, 对供暖效果没有过高要求时, 维持同轴地埋管换热器循环系统低流量(低流速)运行可以在一定程度上提高系统性能, 并且可降低循环泵耗能, 提高运行效率。

2.4 固井材料导热系数影响因素

为了研究固井材料导热系数对名义取热量的影响, 在埋深3500 m, 循环水流量 $30 \text{ m}^3/\text{h}$ 的同轴地埋管换热器中, 取导热系数分别为0.8、1.0、1.2、1.4、1.6、1.8 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的固井材料进行模拟分析和数据整合, 得到图7~图9所示结果。同轴地埋管换热器固井材料导热系数从0.8 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 增长至1.8 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 名义取热量由2741.3 kW增长至2795.9 kW。提高固井材料导热系数便降低了岩土体与固井材料之间的热阻 R_1 , 同时也降低了热

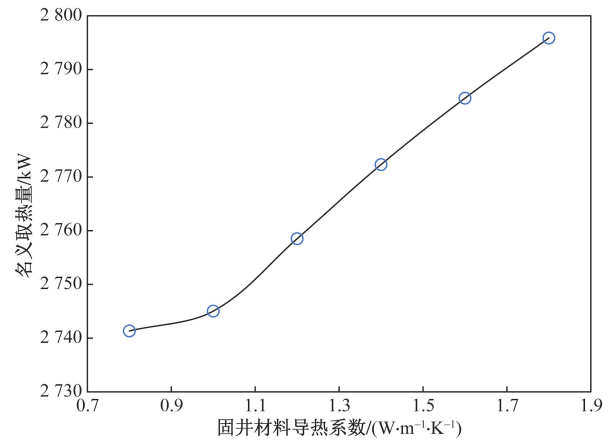


图7 固井材料导热系数与名义取热量关系图

Fig. 7 Diagram of the relationship between thermal conductivity of cementing materials and nominal heat extraction

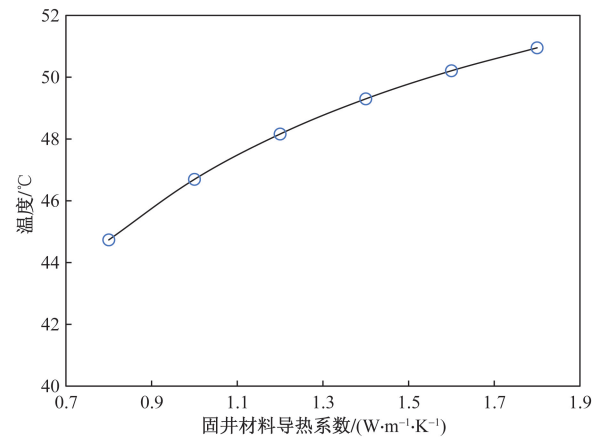


图8 固井材料导热系数与供水平均温度关系图

Fig. 8 Relationship between thermal conductivity of cementing materials and average water supply temperature

损失, 地埋管换热器周围岩土体与固井材料之间的换热更加充分。从沿地埋管温度分布图可以看出, 当固井材料导热系数从0.8 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 增长至1.8 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 地埋管底部最高温度仍为117°C, 供水平均温度从44.7°C升至51.0°C, 沿地埋管全段温度分布均值从69.6°C增长至77.6°C, 这是因为经长时间充分换热后按照地温梯度计算117°C为该目标地层的最高温, 但因固井材料导热系数提高使得地埋管与周围岩土体之间的换热效率提升, 平均温度上升, 供水平均温度上升。综上, 固井材料的变化带来名义取热量提升比例为2%, 由此可知, 单方面提升固井材料导热系数对名义取热量影响较小, 开发同轴地埋管换热器项目时可优先考量其他因素。

2.5 内管导热系数影响因素

为了研究内管导热系数对名义取热量的影响, 在埋深3500 m, 循环水流量 $30 \text{ m}^3/\text{h}$, 的同轴地埋

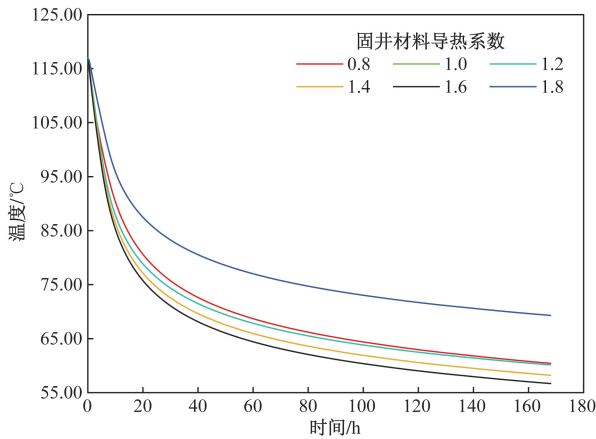


图9 不同固井材料导热系数地理管换热器底部温度与时间分布关系图

Fig. 9 Diagram of temperature and time distribution at the bottom of buried pipe heat exchangers with different thermal conductivity coefficients of cementing materials

管换热器中,分别以 0、0.002、0.005、0.02、0.2、0.5 W/(m·K)的内管导热系数进行模拟分析和数据整合,得到图 10 和图 11 所示结果。由图 11 可知,在同轴地理管换热器连续运行的 7 d(168 h)内,可大致分为三个阶段,升温段、降温段、维稳段。升温段井身岩土体温度较高,循环水吸收热量返出温度快速上升,名义取热量快速提升;降温段底部岩土体导热系数低,随着运行时间推移,周围地层热量无法快速传递至地理管换热器并在井壁造成冷堆积,循环流体从井底吸取热量减少,返出循环水温度和取热量到达峰值后逐渐下降,直至维持稳定状态进入维稳段。进一步,内管导热系数越低,升温段越短,降温段和维稳段越长,反之内管导热系数越高,升温段越长,降温段和维稳段越短。由图 10和图 11可知,当内管导热系数为 0 时,地理管换热器全程无热量损失,名义取热量 3 037.3 kW 为最高值,循环水吸收的热量全部返出至供水口。内管导热系数在 0.002 ~ 0.005 W/(m·K),名义取热量由 2 795.9 kW 降至 2 657.3 kW,变动幅度为 0.05%。内管导热系数高于 0.005 W/(m·K)时会受到热短路现象的影响,即内管热循环水在上返过程中与环空冷循环水发生热交换,不断释放热量降低自身温度。当内管导热系数从 0.5 W/(m·K)降至 0.002 W/(m·K),名义取热量增长幅度为 289.4%,由此可知同轴地理管换热器名义取热量的大小与内管导热系数密切相关,且随着内管导热系数的增加而降低,在项目开发中应着重考虑内管的选用。

2.6 连续运行工况

除分析影响同轴地理管换热器名义取热量的因素外,对中煤科工西安研究院(集团)有限公司中

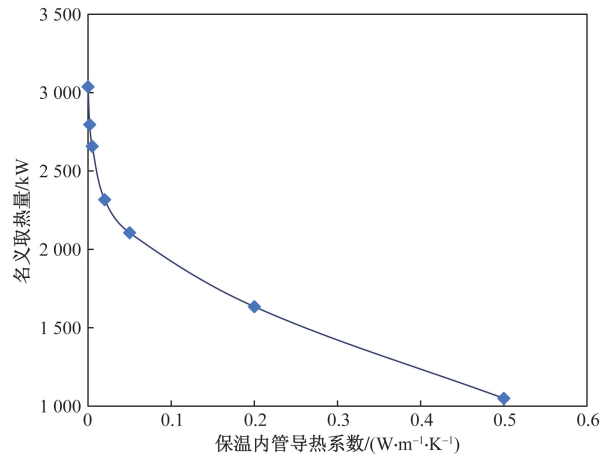


图 10 名义取热量与保温管传热系数

Fig. 10 Nominal heat extraction and heat transfer coefficient of insulation pipes

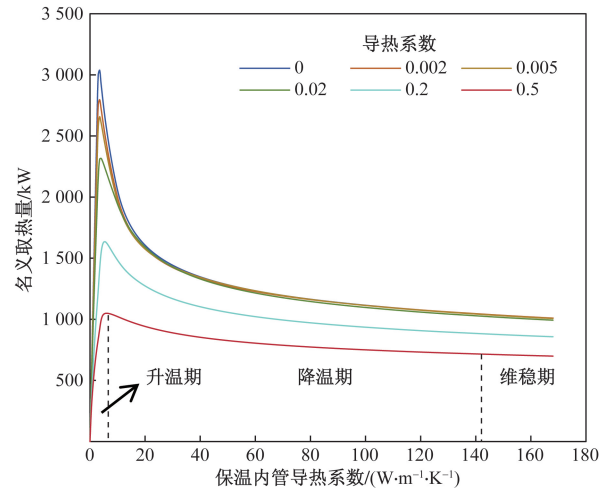


图 11 不同导热系数内管随时间变化

Fig. 11 Time variation of inner tubes with different thermal conductivity coefficients

深层地热能建筑供热试点示范项目与所建传热模型进行了连续运行工况下的差异化分析,模型结果旨在对实际运行工况进行改进和指导,以下分别提取了模型和实验 7 d(168 h)内的同轴地理管换热器供水温度数据和名义取热量数据,如图 12 和图 13 所示。

由图 12、图 13 可知,从数据层面来看模拟平均供水温度和平均取热量分别为 50.95 °C 和 1 254.35 kW;实验平均供水温度和平均取热量分别为 50.61 °C 和 1 242.58 kW,其温度和取热量相对误差分别为 0.67% 和 0.94%。模拟数据与实验数据整体趋势一致,但存在一定的误差,其原因是多方面的。首先同轴地理管换热器实验数据中名义取热量和供水温度均高于模拟数据,受大地热流不规则分布的影响导致同轴地理管换热器底部目标地层的热资源分布也具有随机性,实验同轴地理管换

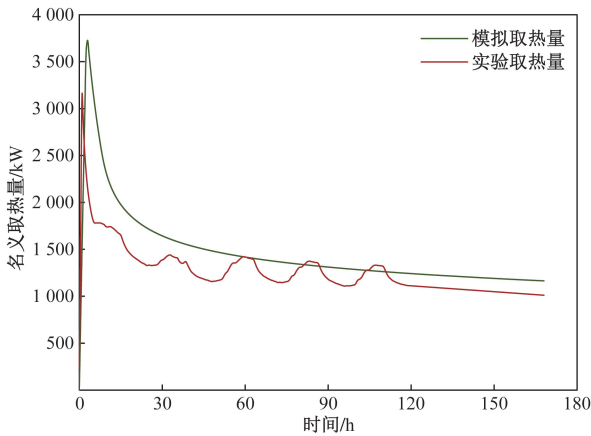


图 12 模拟与实验名义取热量随时间变化对比图
Fig. 12 Comparison between simulated and experimental nominal heat extraction over time

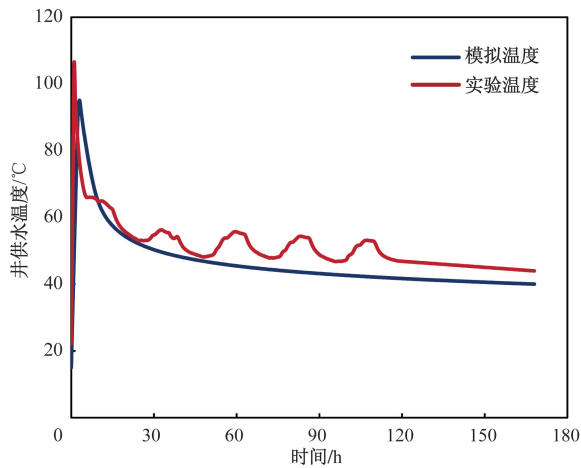


图 13 模拟与实验供水温度随时间变化对比图
Fig. 13 Comparison of simulated and experimental water supply temperature changes over time

热器有可能在钻井过程中钻遇异常高温地层。其次因为模拟工况中以恒定流量连续运行,而实际工况中则需要根据供暖现状实时调整供热系统循环流量大小,由前文可知,同轴埋管换热器供水温度和取热量随循环水流量变化而变化;因同轴埋管换热器底部周围岩土层地质环境复杂,可能存在地下水渗流等因素影响,导致取热量难以维持恒定数值,但该因素对取热量影响较小。从实验数据可以看出同轴埋管换热器在连续运行 7 d(168 h)后供水温度仍能保持在 43 °C,取热量维持在 1 077 kW,说明同轴埋管换热器与底部岩土层达到换热均衡状态,虽然底部产生一定量冷堆积,但在非运行期间可以缓慢恢复至初始状态^[22-23]。

3 结论

在深入研究中深层同轴埋管换热器运行原

理的基础上,构建适用的传热模型,并结合实际工程案例对所构建模型进行差异化对比分析,得到如下结论。

(1)同轴埋管换热器名义取热量与埋深呈正相关,埋深从 500 m 增加到 3 500 m,名义取热量由 369 kW 增长至 2 795 kW,可在合理的成本预算内适当增加埋深,均衡考虑取热效益与埋深成本。

(2)同轴埋管换热器名义取热量与循环水流量基本成线性相关,当循环水流量从 20 m³/h 增至 45 m³/h 时,名义取热量增长幅度为 124%,但随着循环水流量的增加,取热量随时间的下降趋势也愈明显,在实际运行中应根据热负荷合理调整循环水流量。

(3)固井材料导热系数从 0.8 W/(m·K) 增长至 1.8 W/(m·K),名义取热量由 2 741.3 kW 增长至 2 795.9 kW,增长幅度为 2%,对名义取热量能力的提升有限,因此开发同轴埋管换热器项目时可优先考虑其他因素。

(4)同轴埋管换热器名义取热量的大小受内管导热系数影响较大,高于 0.005 W/(m·K) 时会受到热短路现象的影响,当内管导热系数从 0.5 W/(m·K) 降至 0.002 W/(m·K),名义取热量增长幅度为 289.4%,在同轴埋管换热器开发项目中应着重考虑选用低导热性能的内管。

(5)连续运行模式下同轴埋管换热器取热能力最终会达到稳定状态,届时底部岩土层与埋管换热器之间达到换热均衡状态,虽然底部会产生一定量冷堆积,但在非运行期间可以缓慢恢复至初始状态。

参 考 文 献

- [1] 孔彦龙, 陈超凡, 邵亥冰, 等. 深井换热技术原理及其换热能力评估[J]. 地球物理学报, 2017, 60(12): 4741-4752.
Kong Yanlong, Chen Chaofan, Shao Haibing, et al. Principles of deep well heat exchangetechnology and its heat exchange capacity assessment[J]. Journal of Geophysics, 2017, 60(12): 4741-4752.
- [2] Hepbasli A, Canakci C. Geothermal district heating applications in Turkey: a case study of Izmir-Balcova[J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44(8): 1285-1301.
- [3] 沈浩. 关中地区中深层地热埋管分层换热特性分析及试验研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2022.
Shen Hao. Characterization and experimental study of layered heat exchange of middle and deep geothermal buried pipe in Guanzhong area[D]. Beijing: General Research Institute of Coal Science, 2022.
- [4] 李奉翠, 韩二帅, 梁磊, 等. 中深层地热井下同轴换热器长期换热性能研究[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(2): 194-201.
Li Fengcui, Han Ershuai, Liang Lei, et al. Study on the long-term

- heat transfer performance of coaxial heat exchanger under medium and deep geothermal wells[J]. *Coalfield Geology and Exploration*, 2021, 49(2): 194-201.
- [5] 刘少勇, 刘铮, 陈永安. 井群排布形式对中深层地埋管换热器性能的影响[J]. *电力勘测设计*, 2022(12): 5-11.
Liu Shaoyong, Liu Zheng, Chen Yong'an. Influence of well cluster arrangement form on the performance of medium-depth buried tube heat exchanger[J]. *Electric Power Survey and Design*, 2022(12): 5-11.
- [6] 曾和义, 刁乃仁, 方肇洪. 竖埋管地埋管换热器的稳态温度场分析[J]. *山东建筑工程学院学报*, 2002(1): 3-8.
Zeng Heyi, Diao Nairen, Fang Zhaohong. Steady state temperature field analysis of vertical buried pipe geothermal heat exchanger[J]. *Journal of Shandong Architectural Engineering Institute*, 2002(1): 3-8.
- [7] 曾和义, 刁乃仁, 方肇洪. 地源热泵竖埋管的有限长线热源模型[J]. *热能动力工程*, 2003, 18(2): 166-170.
Zeng Heyi, Diao Nairen, Fang Zhaohong. Finite-length line heat source modeling of vertical buried pipe for ground source heat pump [J]. *Thermal Power Engineering*, 2003, 18(2): 166-170.
- [8] Luo Y, Guo H, Meggers F, et al. Deep coaxial borehole heat exchanger: analytical modeling and thermal analysis [J]. *Energy*, 2019, 185: 1298-1313.
- [9] Luo Y, Yu J, Yan T, et al. Improved analytical modeling and system performance evaluation of deep coaxial borehole heat exchanger with segmented finite cylinder-source method [J]. *Energy and Buildings*, 2020, 212: 109829.
- [10] 尚宏波, 赵春虎, 靳德武, 等. 中深层地热单井换热数值计算[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(6): 159-166.
Shang Hongbo, Zhao Chunhu, Jin Dewu, et al. Numerical calculation of heat exchange in a single well of medium-depth geothermal[J]. *Coalfield Geology and Exploration*, 2019, 47(6): 159-166.
- [11] Abdelhafiz M M, Oppelt J, Mahmoud O, et al. Effect of drilling and wellbore geometry parameters on wellbore temperature profile: Implications for geothermal production[J]. *Advances in Geo-Energy Research*, 2023, 8(3): 170-180.
- [12] 鲍玲玲, 徐豹, 王子勇, 等. 中深层同轴套管式地埋管换热器传热性能分析[J]. *地球物理学进展*, 2020, 35(4): 1217-1222.
Bao Lingling, Xu Bao, Wang Ziyong, et al. Analysis of heat transfer performance of medium-depth coaxial cased subterranean tube heat exchanger[J]. *Advances in Geophysics*, 2020, 35(4): 1217-1222.
- [13] 吴暄, 梁思源, 郑明杰, 等. 套管式地埋管换热器传热特性数值模拟[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2020, 34(12): 226-236.
Wu Xuan, Liang Siyuan, Zheng Mingjie, et al. Numerical simulation of heat transfer characteristics of cased underground tube heat exchanger [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2020, 34(12): 226-236.
- [14] 张东海. 分层和渗流条件下竖直地埋管换热器传热特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
Zhang Donghai. Study on heat transfer characteristics of vertical buried tube heat exchanger under stratified and seepage conditions [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [15] Du D S, Li Y Q, Wang K P, et al. Experimental and numerical simulation research on heat transfer performance of coaxial casing heat exchanger in 3 500 m-deep geothermal well in Weihe Basin [J]. *Geothermics*, 2023, 109: 102658.
- [16] 唐晓音, 程璐瑶, 许威, 等. 西安地区中深层套管式地埋管换热性能数值模拟[J]. *地质科学*, 2021, 56(3): 985-999.
Tang Xiaoyin, Cheng Luyao, Xu Wei, et al. Numerical simulation of heat transfer performance of medium-depth cased buried pipe in Xi'an area [J]. *Geoscience*, 2021, 56(3): 985-999.
- [17] 张育平, 张斯佳, 马真迪, 等. 中深层地热井地温影响规律及预测方法[J]. *西安科技大学学报*, 2024, 44(1): 114-122.
Zhang Yuping, Zhang Sijia, Ma Zhendi, et al. Influence law and prediction method of ground temperature in medium and deep geothermal wells [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2024, 44(1): 114-122.
- [18] 韩永亮, 王凯鹏, 王义杰, 等. 中深层地热井换热特性多因素影响规律研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(1): 104-116.
Han Yongliang, Wang Kaipeng, Wang Yijie, et al. Study on multifactorial influence law of heat transfer characteristics in middle and deep geothermal wells [J]. *Coalfield Geology and Exploration*, 2024, 52(1): 104-116.
- [19] 卢德唐, 曾亿山, 郭永存. 多层地层中的井筒及地层温度解析解[J]. *水动力学研究与进展(A辑)*, 2002(3): 382-390.
Lu Detang, Zeng Yishan, Guo Yongcun. Analytical solution of wellbore and formation temperatures in multilayer formations [J]. *Hydrodynamics Research and Progress (Series A)*, 2002(3): 382-390.
- [20] 张兵兵. 中深层套管式地埋管换热器与地源侧水系统能效研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2019.
Zhang Bingbing. Study on the energy efficiency of medium-depth cased underground tube heat exchanger with ground source side water system [D]. Jinan: Shandong University of Architecture, 2019.
- [21] 王璐, 段晨阳, 孙佳芮, 等. 关中地区地温梯度分布规律及其影响因素研究[J]. *地下水*, 2023, 45(6): 42-44, 83.
Wang Lu, Duan Chenyang, Sun Jiarui, et al. Research on the distribution law of ground temperature gradient and its influencing factors in Guanzhong region [J]. *Groundwater*, 2023, 45(6): 42-44, 83.
- [22] 王卫莲, 鲍玲玲, 靳鹏飞. 非供暖季中深层热储自然恢复与蓄热对比分析[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(1): 215-222.
Wang Weilian, Bao Lingling, Jin Pengfei. Comparative analysis of natural recovery and thermal storage of deep thermal storage in non-heating season [J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(1): 215-222.
- [23] 韩元红, 张育平, 刘俊, 等. 西安中深层同轴套管换热井取热能力及热影响半径[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(18): 7527-7533.
Han Yuanhong, Zhang Yuping, Liu Jun, et al. Heat extraction capacity and thermal influence radius of coaxial casing heat exchange wells in the middle and deep layers of Xi'an [J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(18): 7527-7533.