

引用格式:李超,江超,官燕玲,等. 深层埋管换热岩土温度响应及影响半径[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(6): 859-868.

LI Chao, JIANG Chao, GUAN Yanling, et al. Ground temperature response and thermal effect radius of heat transfer of deep buried pipe [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(6): 859-868.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.06.004

深层埋管换热岩土温度响应及影响半径

李超,江超,官燕玲,宗聪聪,曲华,吴巧兰

(长安大学,陕西西安 710018)

摘要:为了分析深层埋管换热时的岩土温度响应及换热影响半径,研究结合西安某个实际深层埋管供暖工程,基于钻井测井温度、岩土岩性解释以及现场实验建立了埋管换热的全尺寸数值模型。通过对埋管在5 a,即5个供暖期和4个恢复期换热的数值分析,给出了埋管周围岩土温度波动(ΔT)在不同深度上随运行时间的变化情况。在此基础上,考虑到理论研究及工程应用,选择了3种不同的 ΔT 限值来确定埋管的换热影响半径,同时分析了影响半径的影响因素。结果表明,在 ΔT 限值足够小至接近0时,埋管换热的影响半径主要受埋管周围岩土自身参数的影响;当 ΔT 限值增大时,影响半径主要受 ΔT 限值的影响。

关键词:地热能;深层埋管换热;岩土温度响应;换热影响半径;数值模型

中图分类号:TE965

文献标识码:A

Ground temperature response and thermal effect radius of heat transfer of deep buried pipe

LI Chao, JIANG Chao, GUAN Yanling, ZONG Congcong, QU Hua, WU Qiaolan

(Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710018, China)

Abstract: In order to analyze the ground temperature response and thermal effect radius of the heat transfer of the deep buried pipe, a full-scale numerical model of buried pipe heat transfer is established based on the well logging temperature, ground lithology interpretation, and field heat transfer experiments of an actual deep-buried pipe heating project in Xi'an. By the numerical analysis of the heat transfer of the buried pipes in five years, namely five heating periods and four recovery periods, the variation of ground temperature fluctuation (ΔT) around the buried pipe at different depths with running time is summarized. On this basis, by considering the theoretical research and engineering application, three different ΔT limits are selected to determine the thermal effect radius, and the factors affecting the thermal effect radius are analyzed. The results show that when ΔT limit is small enough to close to zero, the thermal effect radius is mainly affected by the geotechnical parameters around the buried pipe, and when ΔT limit increases, the thermal effect radius is mainly affected by ΔT limit.

Keywords: geothermal energy; deep-buried pipe heat exchange; ground temperature response; thermal effect radius; numerical model

当前,随着中国社会经济的快速发展,能源消耗也在不断增长,为了缓解传统能源供不应求的压力,同时高质量实现碳达峰、碳中和的目标,可再生能源成为人们日益关注的焦点^[1-2]。地热能作为一种清洁

环保的可再生能源,在中国的利用较早且近几年呈现较好的发展势头^[3]。埋管换热器是地热能利用的一种主要形式,根据埋管的深度不同分为浅层和深层。浅层埋管换热器的研究较早,相关的理论及应

收稿日期:2022-06-17。

第一作者简介:李超(1992—),男,博士,助教,从事地热能开发及利用等相关研究。地址:陕西省西安市长安大学渭水校区住宅小区,邮政编码:710018。E-mail:Lichao_changan@163.com

通信作者简介:江超(1984—),男,博士,讲师,从事新能源利用及建筑节能优化控制相关研究。地址:陕西省西安市长安大学渭水校区住宅小区,邮政编码:710018。E-mail:ChaoJiang@chd.edu.cn

用已经很成熟,深层埋管换热技术则是在近几年受到较多关注。

深层埋管换热可避免抽取地下水,是一种区域清洁供暖的新技术。深层埋管换热的关键包括埋管的换热特性及换热时的岩土温度响应,目前埋管换热特性方面的研究相对较多,主要有解析及数值模型的建立及应用,埋管换热的现场实验等。

在深层埋管换热的解析模型研究方面,LUO等^[4-6]基于浅层土壤源热泵系统的有限长线热源模型和有限长圆柱热源模型,提出了套管式深层埋管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;LI等^[7-8]基于无限长线热源模型和对数平均温差原理,提出适用于不同型式深层埋管换热的解析模型,所提模型可以充分考虑埋管周围岩土的分层岩性及温度梯度。

在深层埋管换热的数值研究方面,FANG等^[9]基于有限差分的数值方法建立了套管式深层埋管的换热模型,讨论了不同岩土导热系数、地温梯度及埋管深度下的埋管换热情况,同时分析了内管保温以及近地面处的浅层外管保温对埋管换热的影响;李思奇等^[10]利用ANSYS Fluent软件建立了深层井下换热数值模型,研究了内管绝热性和绝热段长度对换热性能的影响;CAI等^[11-12]利用OpenGeoSys软件对深层埋管的多管换热展开研究,重点讨论了多管的长期换热特性。

在深层埋管换热的实验研究方面,HUANG等^[13]基于现场实验,采用分布式光纤的实时监测技术,对套管式深层埋管的长期换热性能进行了分析预测;王兴等^[14]设计了深层埋管换热的现场试验,并通过实验分析了埋管连续及间歇运行时的换热特性。

基于深层埋管换热的解析模型、数值模型及实验方法,文献[15-17]对埋管的换热特性均进行了研究。

基于深层埋管换热系统的单取热特性,为了指导实际工程中的埋管尺寸设计,同时合理确定规模化应用时的埋管间距,人们会比较关注埋管换热过程中的岩土温度响应以及埋管的换热影响范围。从当前有关深层埋管的研究来看,主要集中在埋管的换热特性方面。因此,研究提出对套管式深层埋管在长期换热时埋管周围的岩土温度场响应及埋管换热影响半径展开研究,旨在为深层埋管地热能的科学利用提供帮助。

1 数值计算建模

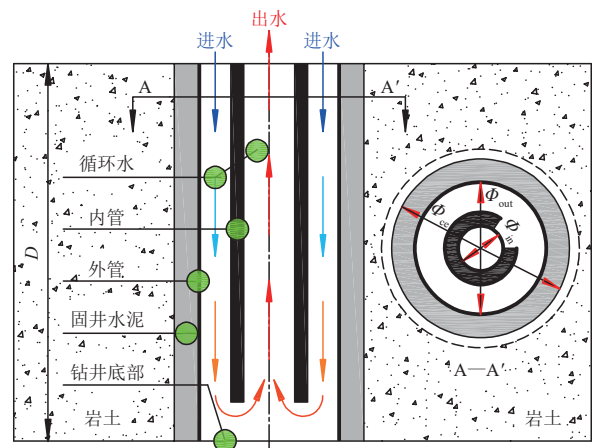
1.1 物理模型

研究讨论的套管式深层埋管的结构如图1所示,埋管系统由内向外分别为循环出水、内管、循环进水、外管、固井水泥及岩土。埋管换热时,由外管进水,在管内循环水与埋管周围岩土换热升温后,再从内管出水。

1.2 几何模型

结合图1中的埋管物理模型,建立深层埋管耦合管内外换热的全尺寸数值模型。图2给出了模型的几何尺寸及部分深度上的网格划分示意图。

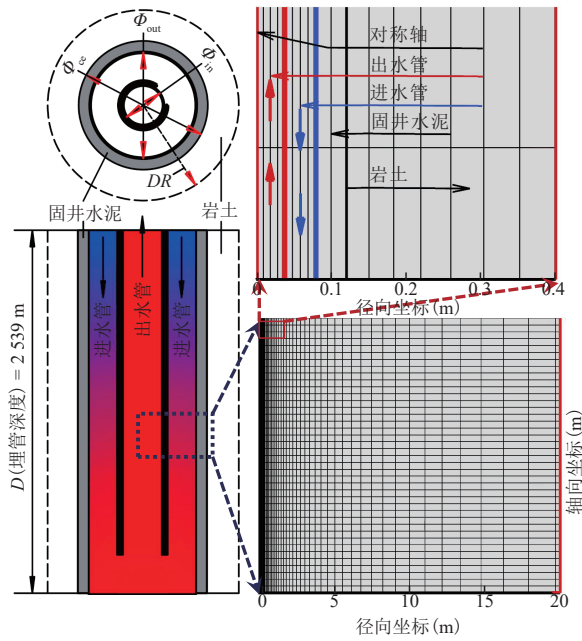
图2中,模型的计算域半径 DR 为300 m,埋管深度 D 为2 539 m。外管采用J55的石油钢管, Φ_{out} 为 $\Phi 177.8 \text{ mm} \times 9.19 \text{ mm}$ (外直径 \times 壁厚);内管为保温钢管, Φ_{in} 为 $\Phi 114.3 \text{ mm} \times 19.15 \text{ mm}$ (外直径 \times 壁厚)。固井水泥层外径 Φ_{ce} 为215.9 mm。为了将钻井竖向岩性解释数据带入模型中,对模型进行分层建立。模型在竖向共有52个分层单元,1~49及52层的分层单元厚度均为50 m,第50和51个分层单元的厚度分别为88 m和1 m。对于不同计算区域的网格采用不同的划分尺寸,埋管及埋管近壁面均采用较密的网格即网格尺寸较小,岩土层的网格采用递增式尺寸,靠近固井层外侧的岩土网格密度较大。



注: Φ_{out} 为外管直径,mm; Φ_{in} 为内管直径,mm; Φ_{ce} 为固井水泥层的外直径,mm; D 为埋管深度,m;A-A'为俯视图的视角。

图1 套管式深层埋管结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of deep-buried coaxial double-pipe



注: DR 为模型的计算域半径, m 。

图2 套管式深层埋管的几何结构及网格划分
Fig. 2 Geometric structure and mesh division of deep-buried coaxial double-pipe

1.3 数学模型

计算深层埋管的流动以及管内外耦合换热时,先算稳态流场,待流场收敛后再求解瞬态换热过程。假设埋管的管内循环水为常物性不可压缩流体,对于管内循环水的湍流流动及换热过程,可以用连续性方程(1),动量方程(2)和(3),以及能量方程(4)来描述。假设埋管及周围的固井水泥、岩土均为固体且为常物性,其中的传热为纯导热,埋管管壁、固井水泥及岩土的导热过程也可以用能量方程(4)来描述。

$$\nabla \mathbf{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho v_x v_x)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho v_r v_x)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left(r \mu \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right] \quad (2)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho v_x v_r)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho v_r v_r)}{\partial r} = \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial r} - 2 \mu \frac{v_r}{r^2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla [v(\rho E + p)] = S_h + \nabla \left[k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j J_j + (\tau_{\text{eff}} v) \right] \quad (4)$$

$$E = \int_{T_{\text{ref}}}^T c dT + \frac{v^2}{2} \quad (5)$$

式(1)一式(5)中: x 为轴向坐标, m ; r 为径向坐标, m ; v 为速度, m/s ; v_x 为轴向速度, m/s ; v_r 为径向速度, m/s ; ρ 为密度, kg/m^3 ; p 为压力, Pa ; μ 为分子黏度, $Pa \cdot s$; E 为能量, J ; k_{eff} 为有效导热系数, $W/(m \cdot K)$; T 为温度, K ; h_j 为物质 j 的比焓, J/kg ; J_j 为物质 j 的扩散通量; τ_{eff} 为应力张量, Pa ; c 为热容量, $J/(kg \cdot K)$; S_h 为体积热源, W/m^3 ; T_{ref} 为模拟的基准参考温度, 取值为 $298.15 K$ 。

采用 ANSYS Fluent 17.0 来模拟埋管内的水流流动及埋管换热过程, 湍流模型选择 Standard k - ϵ , 近壁面采用标准壁面函数, 选择二阶迎风离散格式。

1.4 模型的初始及边界条件

对于整个模型的初始温度, 采用浅层常温层温度 T_0 及地温梯度来确定模型温度竖向分布的场函数。结合文献调研及现场测井温度, 得到 T_0 为 $15.5^\circ C$ ^[18-19], 地温梯度为 $29.4^\circ C/km$ 。在初始条件下, 埋管内的水流静止, 管内的水体、管壁以及管外固井水泥层的初始温度均与同一深度的岩土温度相同。对于模型中的分层岩土热物性参数, 结合钻井解释数据来分层设置, 不同类型岩土的热物性参数参照文献[20]。

对于模型的边界条件设置, 计算域岩土的上表面及侧面均采用绝热边界, 下表面边界采用恒热流边界, 数值为 $70.8 mW/m^2$ ^[21]。为了实现埋管在 5 a, 即 5 个供暖期和 4 个恢复期的换热模拟, 采用 TUI 文件编写整个埋管换热过程的计算程序。计算中, 每个供暖期埋管的质量流率为 $4.88 kg/s$, 而在每个恢复期, 埋管流率为 0。

1.5 模型验证

研究中所使用的数值建模方法在文献[16]中有详细的描述, 所建模型经过了网格独立性分析及时间步长稳定性分析, 同时也得到了现场实验的验证。

2 模拟工况的设置

研究针对埋深为 2 500 m 的套管式深层埋管换热系统, 讨论埋管在 5 a, 即 5 个供暖期和 4 个恢复期换热过程中的埋管周围岩土温度变化特性, 分析埋

管的换热影响半径。同时,对比分析不同温度波动限值及埋管换热强度下的岩土温度响应及埋管换热影响半径的差异。

结合上述研究内容,该研究共设置了3种模拟工况,分别命名为GK-7、GK-12和GK-17,工况命名中的数字代表了埋管的进水温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。3种模拟工况的初始温度场及速度场如图3所示,其中埋管的断面平均质量流率为 4.88 kg/s 。

3 计算结果及分析

3.1 埋管5 a 换热过程中的岩土温度响应

以GK-7为例,图4给出了埋管运行5 a内,即5个供暖期及4个恢复期结束时的岩土温度分布。为了清晰反映埋管周围岩土温度的变化情况,在300 m的计算域半径上选择了60 m的模型半径范围来展示岩土温度分布。

由图4可以看到,在每个供暖期结束时,埋管周

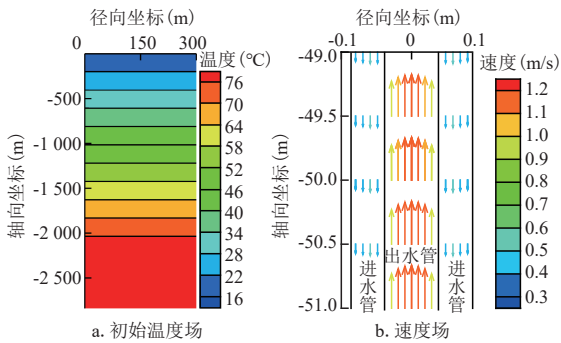


图3 各工况的初始温度场及速度场

Fig. 3 Initial temperature field and velocity field of each working condition

围的岩土温度降到最低,表现为温度等值线偏离初始值(温度初始值为水平线,见图3)的幅度最大;在每个恢复期结束时,埋管周围岩土的温度会得到一定的恢复,表现为温度等值线偏离初始值的幅度减小。但是从等值线偏离初始值的位置来看,虽然恢复期埋管周围的岩土温度得到了一定的恢复,但埋管周围岩土温度受到影响的径向距离随埋管运行时间的延续是逐步增大的。埋管周围岩土温度受到影响的径向距离即为埋管换热影响半径。

3.2 不同深度岩土温度波动随运行时间的变化

为了研究埋管的换热影响半径,首先需要讨论埋管换热时埋管周围岩土温度相对于初始温度的差值,此处称之为岩土温度波动,用 ΔT 来表示。 ΔT 的具体计算方法是用岩土初始温度减去运行至某时刻的实时温度, ΔT 为正值表示岩土温度较初始温度降低。

以GK-7为例,图5给出了深度分别为50,500,1 000,1 500,2 000,2 500 m时埋管周围岩土温度偏离初始值的大小。

从图5可以看到,埋管以年为周期换热5 a的过程中,每个供暖期开始即上一个恢复期结束时,埋管周围 ΔT 最小,随着每个供暖期时长的增加, ΔT 逐渐增大,并在该供暖期结束时刻达到最大。每个供暖期结束即下一个恢复期开始时,埋管周围岩土温度变化幅度 ΔT 最大,随着每个恢复期时长的增加, ΔT 逐渐减小,并在该恢复期结束时刻达到最小。以每个供暖期结束时刻的点做时间轴,可以看到1 a内的 ΔT 关于时间轴近似对称,但总体上时间轴右侧的 ΔT 略高。由此说明,同一个供暖期内埋管取热时长越

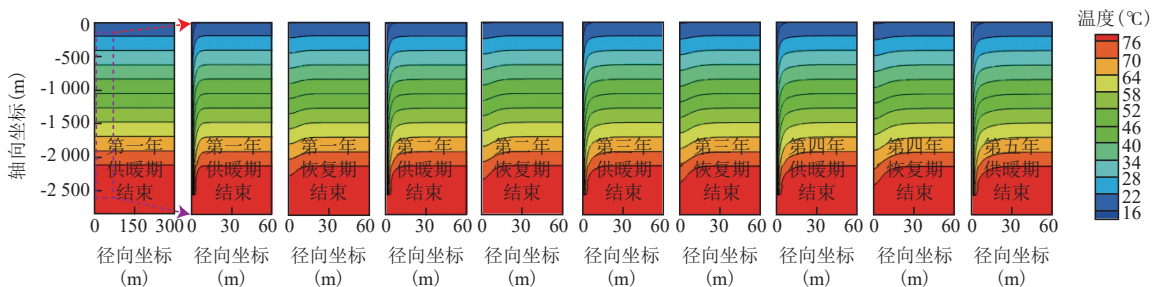
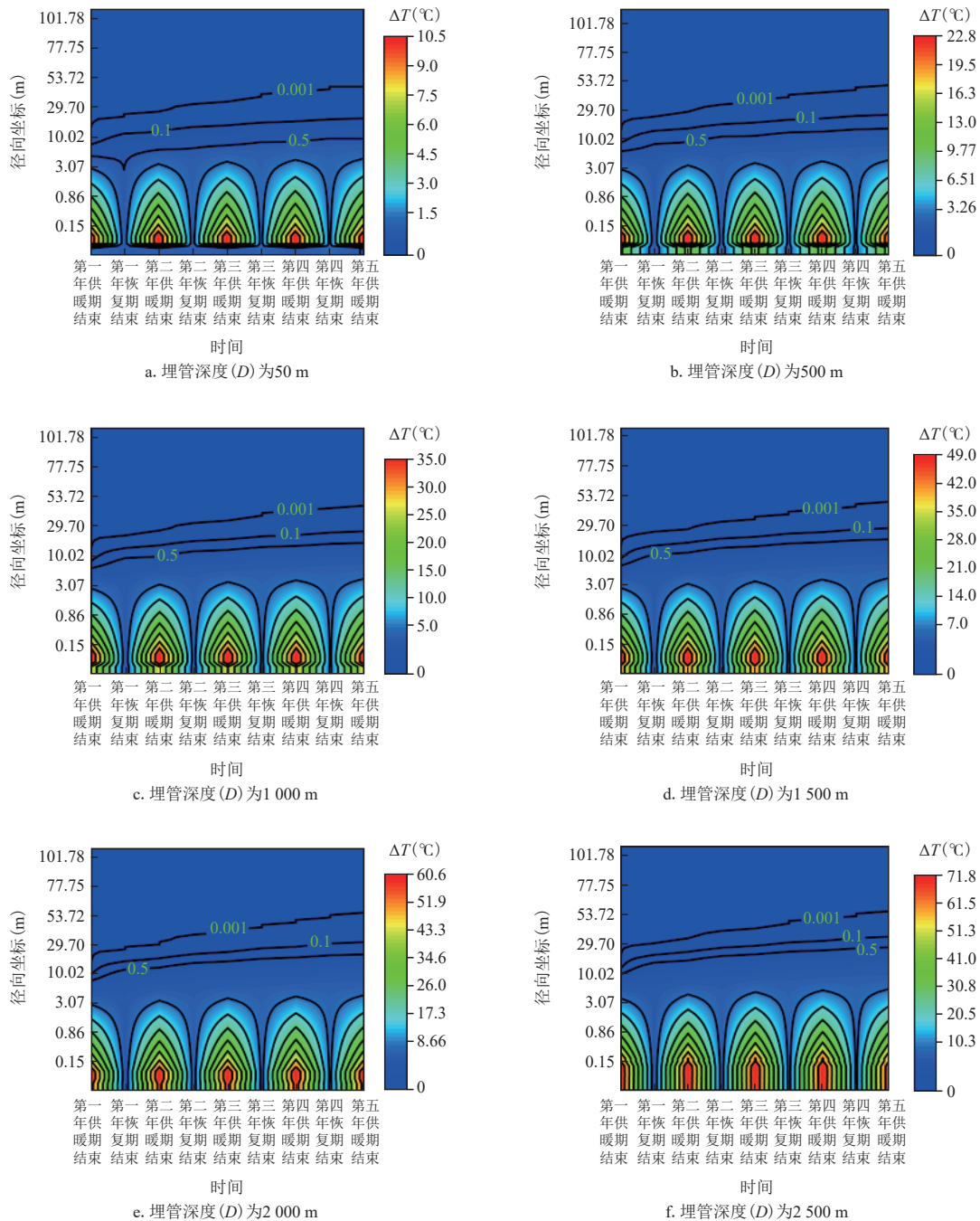


图4 不同换热阶段的岩土温度等值线

Fig. 4 Contour map of ground temperature at different heat transfer stages



注:等值线0.001、0.1和0.5分别表示岩土温度偏离初始值的大小为0.001、0.1、0.5 °C。

图5 GK-7在6种不同深度下埋管周围的岩土温度随径向距离及运行时间的变化情况

Fig. 5 Ground temperature changes around pipe of GK-7 with radial distance and running time at six different depths

长,埋管周围岩土的 ΔT 越大即受到的影响越大,恢复期内岩土的 ΔT 会逐渐减小说明恢复期内的岩土温度可以得到有效的恢复,但不能恢复至初始值。

3.3 埋管换热的影响半径

对于埋管换热影响半径的计算,首先计算岩土

温度在换热过程中的温度波动大小(ΔT),其次确定同于计算埋管换热影响半径的温度波动限值,通过分析埋管周围岩土温度波动 ΔT 达到临界点所对应的径向距离,即可得到不同温度限值下的埋管换热影响半径。考虑到理论研究及实际工程应用,研究中 ΔT 取了3个限值,分别为0.001、0.1、0.5 °C。

3.3.1 ΔT 为0.001 °C时的埋管换热影响半径

以GK-7在深度为50 m处的岩土温度变化为例,分析 $\Delta T=0.001$ °C时的埋管换热影响半径。表1给出了深度为50 m时,埋管周围岩土的 ΔT 随各供暖期、恢复期以及埋管周围岩土温度受到影响的径向距离的变化。

结合表1中的数据,找出在5 a的换热时长内,埋管周围岩土温度波动限值 $\Delta T=0.001$ °C时所对应的径

向距离,即为该埋管深度50 m下,不同时间点的埋管换热影响半径。可以看到,所对应的径向距离即为埋管换热的影响半径,且在各个供暖及恢复期结束时刻的大小依次为14.76, 25.69, 27.69, 33.70, 35.70, 41.71, 43.71, 47.72, 47.72 m。

同上述分析方法,在 $\Delta T=0.001$ °C时,可以得到深度分别为500, 1 000, 1 500, 2 000, 2 500 m时的埋管换热影响半径,结果如表2所示。

由表2可知,在温度波动限值 $\Delta T=0.001$ °C时,不

表1 深度为50 m时,埋管周围岩土的 ΔT (°C)随时间及埋管周围岩土温度受到影响的径向距离的变化
Table 1 Ground temperature variation ΔT (°C) around buried pipe with running time and radial distance at the depth of 50 m

径向距离 (m)	ΔT (°C)									
	第一年 供暖期结束	第一年 恢复期结束	第二年 供暖期结束	第二年 恢复期结束	第三年 供暖期结束	第三年 恢复期结束	第四年 供暖期结束	第四年 恢复期结束	第五年 供暖期结束	
14.76	0.001	0.049	0.070	0.130	0.150	0.204	0.221	0.269	0.283	
16.25	0	0.030	0.048	0.094	0.114	0.158	0.177	0.217	0.233	
17.89	0	0.016	0.031	0.065	0.083	0.119	0.137	0.170	0.186	
19.70	0	0.008	0.018	0.043	0.057	0.086	0.102	0.130	0.145	
21.69	0	0.004	0.010	0.026	0.037	0.060	0.072	0.096	0.108	
23.69	0	0.001	0.005	0.016	0.024	0.041	0.050	0.070	0.080	
25.69	0	0.001	0.002	0.009	0.015	0.028	0.035	0.050	0.059	
27.69	0	0	0.001	0.005	0.009	0.018	0.024	0.036	0.042	
29.70	0	0	0	0.003	0.005	0.012	0.016	0.025	0.030	
31.70	0	0	0	0.002	0.003	0.008	0.010	0.018	0.022	
33.70	0	0	0	0.001	0.002	0.005	0.007	0.012	0.015	
35.70	0	0	0	0	0.001	0.003	0.004	0.008	0.010	
37.71	0	0	0	0	0	0.002	0.003	0.005	0.007	
39.71	0	0	0	0	0	0.001	0.002	0.004	0.005	
41.71	0	0	0	0	0	0.001	0.001	0.002	0.003	
43.71	0	0	0	0	0	0	0.001	0.001	0.002	
45.71	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0.001	
47.72	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0.001	

表2 不同深度、不同时间下埋管换热的影响半径
Table 2 Thermal effect radius of buried pipe at different depth and time

埋管深度 (m)	影响半径(m)									
	第一年 供暖期结束	第一年 恢复期结束	第二年 供暖期结束	第二年 恢复期结束	第三年 供暖期结束	第三年 恢复期结束	第四年 供暖期结束	第四年 恢复期结束	第五年 供暖期结束	
500	14.76	25.69	29.70	35.70	39.71	43.71	45.71	49.72	51.72	
1 000	14.76	23.69	27.69	33.70	35.70	41.71	43.71	45.71	47.72	
1 500	14.76	25.69	27.69	33.70	37.71	41.71	43.71	47.72	49.72	
2 000	16.25	29.70	33.70	39.71	43.71	47.72	51.72	55.73	57.73	
2 500	14.76	25.69	29.70	35.70	37.71	43.71	45.71	49.72	51.72	

同深度处下埋管换热影响半径均随运行时间的延续逐渐增大,但增加的速率逐年变缓。以埋深500 m处的埋管换热影响半径为例,各个供暖及恢复期结束时刻的大小依次为14.76, 25.69, 29.70, 35.70, 39.71, 43.71, 45.71, 49.72, 51.72 m。其中第2~5个供暖期相对于第1个供暖期埋管换热影响半径的年增加率分别为101.22%, 84.52%, 69.90%, 62.60%, 第2~4个恢复期相对于第1个恢复期埋管换热影响半径的年增加率分别为38.96%, 35.07%, 31.18%。该工况运行5 a的最大埋管换热影响半径为57.73 m。

3.3.2 ΔT 为0.1 °C和0.5 °C时的埋管换热影响半径

第3.3.1节中分析了温度波动限值 $\Delta T=0.001$ °C时对应的埋管换热影响半径,在实际工程中可能并不需要关注如此小的温度波动下的换热影响范围,因此,该节对温度波动限值 $\Delta T=0.1$ °C和 $\Delta T=0.5$ °C时

的换热影响半径进行分析,以期提供实际工程应用的参考数据。

参照第3.3.1节中的分析方法,表3和表4分别给出了 $\Delta T=0.1$ °C和 $\Delta T=0.5$ °C时不同深度、不同时间下埋管换热的影响半径。

由表3和表4可以看到,温度波动限值 ΔT 越大,对应的埋管换热影响半径越小。不同 ΔT 条件下埋管换热影响半径的变化规律基本一致,即均随运行时间的延续逐渐增大,但增加的速率逐年变缓。

3.3.3 不同 ΔT 下的埋管换热影响半径对比

在3.3.1及3.3.2节中分析了岩土温度波动限值 ΔT 分别为0.001, 0.1, 0.5 °C时的埋管换热影响半径,结合表2—表4中的数据,图6给出了3种 ΔT 条件下影响半径随埋管深度 D 及埋管换热时间的变化情况,用于对比并分析不同 ΔT 下的埋管换热影响半径差异。

表3 $\Delta T=0.1$ °C时不同深度、不同时间下的埋管换热影响半径
Table 3 Thermal effect radius of buried pipe when $\Delta T = 0.1$ °C

埋管深度 (m)	影响半径(m)								
	第一年 供暖期结束	第一年 恢复期结束	第二年 供暖期结束	第二年 恢复期结束	第三年 供暖期结束	第三年 恢复期结束	第四年 供暖期结束	第四年 恢复期结束	第五年 供暖期结束
500	7.48	12.16	12.16	14.76	16.25	17.89	19.70	19.70	21.69
1 000	9.09	14.76	16.25	17.89	19.70	21.69	23.69	25.69	25.69
1 500	8.25	13.40	16.25	17.89	19.70	21.69	23.69	25.69	25.69
2 000	9.09	14.76	16.25	19.70	19.70	23.69	23.69	25.69	27.69
2 500	10.02	17.89	19.70	23.69	23.69	27.69	29.70	31.70	31.70

表4 $\Delta T=0.5$ °C时不同深度、不同时间下的埋管换热影响半径
Table 4 Thermal effect radius of buried pipe when $\Delta T = 0.5$ °C

埋管深度 (m)	影响半径(m)								
	第一年 供暖期结束	第一年 恢复期结束	第二年 供暖期结束	第二年 恢复期结束	第三年 供暖期结束	第三年 恢复期结束	第四年 供暖期结束	第四年 恢复期结束	第五年 供暖期结束
500	5.58	3.07	6.79	7.48	8.25	9.09	9.09	11.04	11.04
1 000	6.79	9.09	10.02	12.16	13.40	14.76	14.76	16.25	17.89
1 500	6.79	10.02	11.04	13.40	14.76	16.25	16.25	17.89	17.89
2 000	7.48	11.04	12.16	14.76	16.25	17.89	17.89	19.70	19.70
2 500	9.09	13.40	14.76	17.89	19.70	21.69	21.69	23.69	23.69

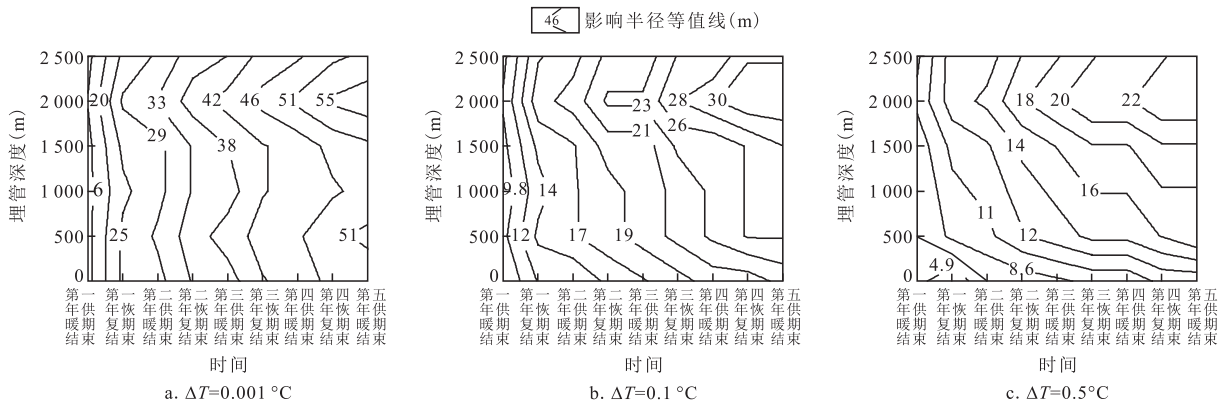


图6 3种 ΔT 下的埋管换热影响半径的等值线对比

Fig. 6 Contour comparison of thermal effect radii of buried pipe under three kinds of ΔT

由图6可知,不同温度波动限值 ΔT 得到的埋管换热影响半径差别很大,图中 $\Delta T=0.001\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $\Delta T=0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 时,得到的埋管换热影响半径有超过2倍的差距。在实际工程的应用中, ΔT 的选择不同,得到的影响半径也就不同,因此,在研究埋管换热影响半径时需要首先界定温度波动限值的大小。

对于埋管换热影响半径随埋管深度的变化,在 $\Delta T=0.001\text{ }^\circ\text{C}$ 时,图6中的影响半径随着埋管换热时长的延续呈现近似等距的增长,也就是说埋管换热的影响半径与埋管的取热时长有关,与埋管的埋深没有明显的关系。而在 ΔT 增加至 $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 时,影响半径随着埋管换热时长的延续呈现非等距的增长,整体上呈现深度越深影响半径越大。解释其原因为在 ΔT 足够小至接近0时,埋管换热的影响半径主要受埋管周围岩土自身参数的影响,不同埋深下的影响半径差异不大。埋管换热时,整个岩土换热后的温度变化量 ΔT 随深度的增加而增加,因此,当计算埋管换热影响半径的温度波动限值 ΔT 增大时,埋管深度越大的地方需要更大的径向距离才能达到设定的温度波动限值,从而使得埋管的换热影响半径随埋管深度增加整体上呈现递增的趋势。

3.3.4 不同取热强度下的埋管换热影响半径

为了分析不同取热强度下的埋管换热影响半径,共设置了3种恒定进水温度工况,分别为7, 12, 17 $^\circ\text{C}$ 。这3种工况在5个供暖期的实时换热强度 Q 和每个供暖期换热强度的时均值 Q_{T-a} 如图7所示。

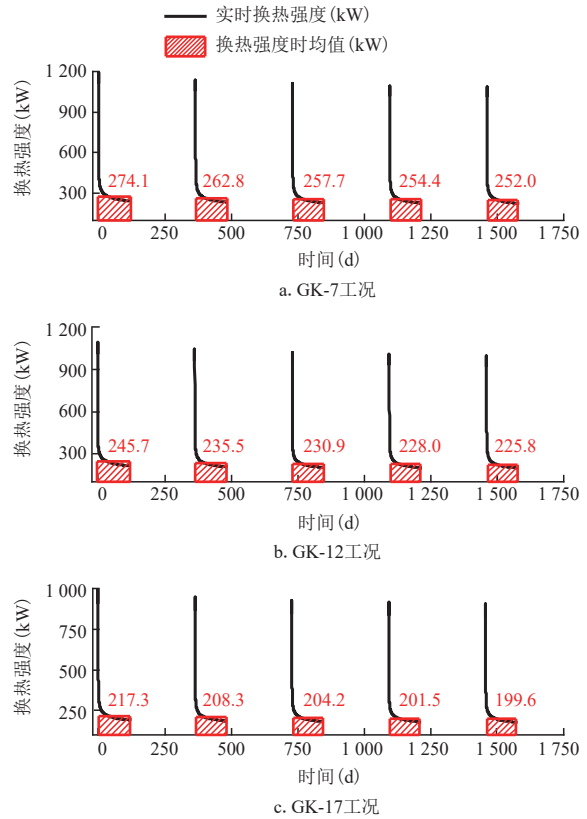


图7 3种进水温度下各个供暖期埋管换热的实时和时均换热强度

Fig. 7 Real-time and time-averaged heat transfer rates of buried pipe heat transfer in each heating period under three inlet water temperatures

由图7可知,埋管的进水温度越低对应的埋管换热强度越大。计算埋管在5个供暖期 Q_{T-a} 的平均值

表5 $\Delta T=0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$, $D=2\ 000\text{ m}$ 时, 3种进水温度工况在不同时间下的埋管换热影响半径对比
Table 5 Comparison of thermal effect radii of buried pipe under three inlet temperature conditions when $\Delta T=0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$, $D=2\ 000\text{ m}$

进水温度工况	影响半径(m)								
	第一年 供暖期结束	第一年 恢复期结束	第二年 供暖期结束	第二年 恢复期结束	第三年 供暖期结束	第三年 恢复期结束	第四年 供暖期结束	第四年 恢复期结束	第五年 供暖期结束
GK-7	16.25	29.70	33.70	39.71	43.71	47.72	51.72	55.73	57.73
GK-12	16.25	29.70	33.70	39.71	43.71	47.72	49.72	55.73	57.73
GK-17	16.25	27.69	31.70	39.71	41.71	47.72	49.72	55.73	57.73

Q_{ST-a} , GK-7、GK-12及GK-17的 Q_{ST-a} 分别为260.2, 233.2, 206.2 kW。计算进水温度为12 $^{\circ}\text{C}$ 和17 $^{\circ}\text{C}$ 的工况相对于进水温度为7 $^{\circ}\text{C}$ 工况的换热强度减小率, 分别为10.39%和20.78%。

在上述不同进水温度即不同埋管换热强度下, 利用3.3.1节中埋管换热影响半径的分析方法, 表5给出了3种工况在温度限值 $\Delta T=0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$, 埋深为2 000 m处, 各个供暖期及恢复期结束时刻的埋管换热影响半径。

由表5可知, 3种进水温度工况在各个供暖期及恢复期下的埋管换热影响半径在多数时间内相差不大。在部分供暖期和恢复期结束时刻, 进水温度越大即埋管换热量越小时埋管换热的影响半径也就越小。GK-7和GK-17在5个供暖期的 Q_{ST-a} 相差20.78%, 而表5中的埋管换热影响半径最大仅相差2.01 m(7.26%)。由此可知, 虽然增加埋管换热强度会一定程度的增加埋管换热影响半径, 但不同换热强度对应的埋管换热影响半径的差异不大。

4 结论

针对深层埋管地热能利用过程中的岩土温度响应及埋管换热影响半径, 通过建立深层埋管耦合管内外换热的全尺寸数值模型来展开研究。研究重点讨论了埋管在5 a, 即5个供暖期和4个恢复期换热过程中的岩土温度随运行时间的波动情况, 分析了不同温度波动限值以及不同埋管换热强度下的埋管换热影响半径及差异。研究得到以下结论:

1) 在5个供暖期及4个恢复期的埋管换热计算

中, 同一个供暖期内埋管取热时长越长, 埋管周围岩石的 ΔT 越大即受到的影响越大, 每个供暖期结束时, 埋管周围的岩土温度降到最低; 在每个恢复期, 岩石的 ΔT 会逐渐减小说明恢复期内的岩土温度可以得到有效的恢复, 但不能恢复至初始值。

2) 在岩土温度波动限值 ΔT 分别为0.001, 0.1, 0.5 $^{\circ}\text{C}$ 时, 不同 ΔT 下埋管换热影响半径的变化规律基本一致, 即均随运行时间的延续逐渐增大, 但增加的速率逐年变缓。不同温度波动限值 ΔT 得到的埋管换热影响半径差别很大, 如当 ΔT 为0.001 $^{\circ}\text{C}$ 和0.5 $^{\circ}\text{C}$ 且埋管深度为2 500 m时, 第5个供暖期结束时的影响半径分别为51.72 m和23.69 m, 得到的埋管换热影响半径有超过2倍的差距。在实际工程的应用中, ΔT 的选择不同, 得到的影响半径也就不同。因此, 在研究埋管换热影响半径时需要首先界定温度波动限值的大小。

3) 在温度波动限值 ΔT 足够小至接近0时, 埋管换热的影响半径主要受埋管周围岩土自身参数的影响, 不同埋深下的影响半径差异不大。当温度波动限值 ΔT 增大时, 埋管深度越大的地方需要更大的径向距离才能达到设定的温度限值, 从而使得埋管的换热影响半径随埋管深度增加呈现递增的趋势。

4) 当埋管换热强度不同时, 各个供暖期及恢复期下的埋管换热影响半径在多数时间内相差不大。在部分供暖期和恢复期结束时刻, 进水温度越大即埋管换热强度越小埋管换热的影响半径也就越小。但总体上来看, 不同换热强度对应的埋管换热影响半径的差异不大。

参考文献

- [1] 邢利钧. 绿色能源的合理利用与开发[J]. 绿色环保建材, 2021, 25(3): 50–51.
XING Lijun. Reasonable utilization and development of green energy[J]. Green Environmental Protection Building Materials, 2021, 25(3): 50–51.
- [2] 雷超, 李韬. 碳中和背景下氢能利用关键技术及发展现状[J]. 发电技术, 2021, 42(2): 207–217.
LEI Chao, LI Tao. Key technologies and development status of hydrogen energy utilization under the background of carbon neutrality[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(2): 207–217.
- [3] XU Y S, WANG X W, SHEN S L, et al. Distribution characteristics and utilization of shallow geothermal energy in China[J]. Energy and Buildings, 2020, 229: 110479.
- [4] LUO Y Q, GUO H S, MEGGERS F, et al. Deep coaxial borehole heat exchanger: Analytical modeling and thermal analysis[J]. Energy, 2019, 185: 1298–1313.
- [5] LUO Y Q, YU J H, 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.
- [6] LUO Y Q, XU G H, CHENG N. Proposing stratified segmented finite line source (SS–FLS) method for dynamic simulation of medium–deep coaxial borehole heat exchanger in multiple ground layers[J]. Renewable Energy, 2021, 179: 604–624.
- [7] LI C, JIANG C, GUAN Y L. An analytical model for heat transfer characteristics of a deep–buried U–bend pipe and its heat transfer performance under different deflecting angles[J]. Energy, 2022, 244: 122682.
- [8] LI C, JIANG C, GUAN Y L, et al. Development and applicability of heat transfer analytical model for coaxial–type deep–buried pipes[J]. Energy, 2022, 255: 124533.
- [9] FANG L, DIAO N R, SHAO Z K, et al. A computationally efficient numerical model for heat transfer simulation of deep borehole heat exchangers[J]. Energy and Buildings, 2018, 167: 79–88.
- [10] 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 Siqu, ZHAO Jun, LI Yang, et al. Numerical simulation of closed loop medium–deep downhole heat exchange: a focus on influence of segmented insulation on central pipe[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(11): 369–374.
- [11] CAI W L, WANG F H, CHEN C F, et al. Long–term performance evaluation for deep borehole heat exchanger array under different soil thermal properties and system layouts[J]. Energy, 2022, 241: 122937.
- [12] CAI W L, WANG F H, CHEN S, et al. Analysis of heat extraction performance and long–term sustainability for multiple deep borehole heat exchanger array: A project–based study[J]. Applied Energy, 2021, 289: 116590.
- [13] HUANG Y B, ZHANG Y J, XIE Y Y, et al. Long–term thermal performance analysis of deep coaxial borehole heat exchanger based on field test[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 278: 123396.
- [14] 王兴, 李超, 官燕玲, 等. 竖向U型深埋管建筑供暖连续及间歇运行的现场实验[J]. 区域供热, 2018, 2(3): 8–12.
WANG Xing, LI Chao, GUAN Yanling, et al. In–situ experiment of continuous and intermittent operation of vertical U–bend deep–buried pipe to supply heat in buildings[J]. District Heating, 2018, 2(3): 8–12.
- [15] 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.
- [16] HU X C, BANKS J, WU L P, et al. Numerical modeling of a coaxial borehole heat exchanger to exploit geothermal energy from abandoned petroleum wells in Hinton, Alberta[J]. Renewable Energy, 2020, 148: 1110–1123.
- [17] BÄR K, RÜHAAK W, WELSCH B, et al. Seasonal high temperature heat storage with medium deep borehole heat exchangers[J]. Energy Procedia, 2015, 76: 351–360.
- [18] 官燕玲, 张小刚, 梁草茹, 等. 西安地区土壤源热泵埋管换热的岩土影响因素区域分布[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2016, 46(4): 565–572.
GUAN Yanling, ZHANG Xiaogang, LIANG Caoru, et al. Regional distribution of rock–soil influences for ground heat exchange of ground–source heat pump in Xi’an Area[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2016, 46(4): 565–572.
- [19] 任建喜, 刘嘉辉, 高虎艳, 等. 西安地铁沿线地层地温春季分布规律观测研究[J]. 铁道工程学报, 2012, 29(3): 101–106.
REN Jianxi, LIU Jiahui, GAO Huyan, et al. Study on distribution law and observation of ground temperature in spring along Xi’an subway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012, 29(3): 101–106.
- [20] LI C, GUAN Y L, LIU J H, et al. Heat transfer performance of a deep ground heat exchanger for building heating in long–term service[J]. Renewable Energy, 2020, 166: 20–34.
- [21] 饶松, 姜光政, 高雅洁, 等. 渭河盆地岩石圈热结构与地热田热源机理[J]. 地球物理学报, 2016, 59(6): 2176–2190.
RAO Song, JIANG Guangzheng, GAO Yajie, et al. The thermal structure of the lithosphere and heat source mechanism of geothermal field in Weihe Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(6): 2176–2190.