基于不同 G 函数的 U 型中深层地埋管传热模型对比研究

王昌龙[1,2]，孙婉玉[1,2]，郭艳春[2]，蒋天茁[1,2]，孙彦红[1]
(1.安徽工业大学 建筑工程学院，安徽 马鞍山 243002；2.自然资源部 浅层地热能重点实验室，北京 100195)

摘 要：U 型中深层地埋管换热器(U-bend Deep Borehole Heat Exchanger,UDBHE)具有广阔的应用前景。文章基于无限柱热源(Infinite Cylindrical Source,ICS)和无限线热源(Infinite Line Source,ILS)模型的 G 函数,建立了 4 种 UDBHE 传热模型，采用 ICS 或 ILS 模型的 G 函数，考虑或忽略钻孔壁热流随时间变化，分别简称为 ICS-q,ILS-q,ICS-c,ILS-c 模型。通过与较为准确的二维数值模型及实验数据在 2 种边界条件下的对比,分析了这 4 种模型的准确性。结果表明:ILS-q 模型在整体上最为准确,而 ICS-q 模型在分析 UDBHE 长期性能时最为准确;4 种模型在前期均存在较大误差,但在足够长时间后,除了 ILS-c 和 ICS-c 模型在入口温度边界下仍有较大误差外,其他模型的误差均较小。研究结果可为 UDBHE 传热模型研究提供参考。

关键词：U 型中深层地埋管换热器；G 函数；传热模型；无限柱热源模型；无限线热源模型
中图分类号：TK521 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5292(2026)01-0033-08

0 引言

能源是全球经济发展的重要战略资源，但化石能源的使用造成了大量温室气体排放和严重环境污染，因此利用可再生能源成为了人们关注的焦点[1]。近年来,可再生能源中的地热能因其具有清洁环保、经济可行、分布广泛等优点得到了广泛应用[2]。在浅层地埋管换热器研究、应用日臻成熟的基础上，一些研究者提出了中深层地埋管换热器的概念[3,4],以进一步开采中深层地热能。U 型中深层地埋管换热器（U-Bend Deep Borehole Heat Exchanger,UDBHE)具有传热性能高、占地面积少的优点，具有良好的应用前景。因此，针对 UDBHE 的研究成为热点,其中包括一些现场实验研究[5,6]。

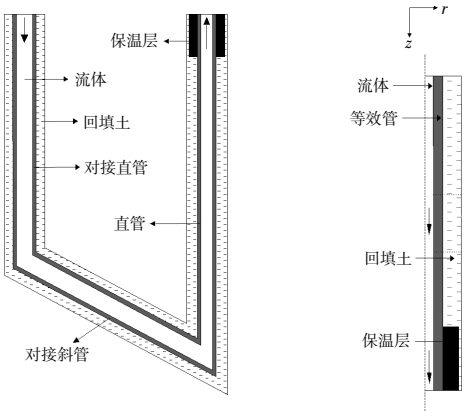
地埋管换热器的换热性能是影响地源热泵效率的主要因素[7],因此,建立准确的 UDBHE 传热模型对其传热性能进行预测具有重要意义。Li C[5]考虑岩土分层和地温梯度,提出了基于无限线热源（Infinite Line Source,ILS）模型的 UDBHE 解析模型，并通过现场实验和数值模拟对解析模型进行了验证。Bao L L[8]采用准三维模型分析了钻孔内的稳态传热,采用移动有限线热源模型分析了地下水渗流作用下岩土中的瞬态传热情况,建立了 UDBHE 的解析模型,并通过实验进行了验证。Wang C L[9]考虑了钻孔内外的瞬态传热情况,提出了 UDBHE 的半解析传热模型，并通过实验数据和二维数值模型进行了验证。此外，一些研究者提出了仅仅模拟 UDBHE 径向和轴向传热的二维数值模型[10,11],还有一些研究者利用 Fluent 或 OpenGeoSys 软件建立了三维数值模型[7,12]。大多数研究人员采用数值模型或现场实验对 UDBHE 的传热性能进行研究，仅有少数研究是在解析或半解析模型上进行的。而文献[5,8]建立的解析模型忽略了钻孔壁热流随时间变化,会导致一定的误差[9]。现有的解析模型都是基于 ILS 和移动有限线热源模型的 G 函数发展而来，缺乏对典型 G 函数应用于 UDBHE 传热模型的详细研究。

本文基于最常见的无限柱热源(Infinite Cylindrical Source,ICS）模型和 ILS 模型的 G 函数,建立了 4 种 UDBHE 的传热模型,其采用 ICS 或 ILS 模型的 G 函数,考虑或忽略钻孔壁热流随时间变化,分别简称为 ICS-q,ILS-q,ICS-c,ILS-c 模型;然后,将其与文献[9]中的二维数值模型在 2 种边界条件(给定入口温度和给定热输出功率)下进行了对比,研究了这 4 种模型的准确性。

收稿日期：2024-09-03。
基金项目：自然资源部浅层地热能重点实验室开放课题(KLSGE202401-15)。
作者简介：王昌龙(1990-),男,博士,讲师,研究方向为地源热泵、建筑节能。E-mail:clwang2017@163.com

1 4种UDBHE传热模型的建立

UDBHE的结构如图1所示。



(a)UDBHE简化前 (b)UDBHE简化后

图1 UDBHE示意图

Fig.1 Diagram of UDBHE

UDBHE由对接直管、对接斜管和直管三部分组成。传热过程包括:管内流体与管壁内表面之间的对流传热;管壁、回填土和岩土中的热传导。在热交换过程中,流体首先流经对接直管,然后流经对接斜管,最后从直管中流出。在此过程中,流体与岩土进行热交换,从而提取地热能。如果岩土温度高于相同深度的流体温度,那么热量将从岩土向流体进行传递;然而,在浅层区域,流体温度可能高于相同深度的岩土温度,则热量将从流体向岩土进行传递。由于传热过程中3根管之间的相互作用较小,则将UDBHE的3根管简化为图1(b)所示的等效管。等效管的总长度等于对接直管、对接斜管和直管的长度之和。此外,忽略钻孔各部分(回填土、管道和流体)的热容,假设钻孔内的传热为稳态传热,并且岩土中的瞬态传热采用ICS或ILS模型的G函数进行分析。

基于上述假设,建立以下4种UDBHE传热模型。

1.1 ICS-c模型

ICS-c模型采用ICS模型的G函数,并忽略了钻孔壁热流随时间的变化。

等效管中流体的能量方程为

$$-\dot{V}(\rho c)_{\mathrm{f}}\frac{\partial T_{\mathrm{f}}}{\partial z}+q_{\mathrm{b}}=0 \tag{1}$$

$$q_{\mathrm{b}}=\frac{T_{\mathrm{b}}-T_{\mathrm{f}}}{R_{\mathrm{b}}} \tag{2}$$

其中,R_{b}的表达式为

$$R_{\mathrm{b}}=\begin{cases}\dfrac{1}{2\pi r_{\mathrm{i}1}h_1}+\dfrac{1}{2\pi\lambda_{\mathrm{p}}}\ln\dfrac{r_{\mathrm{o}1}}{r_{\mathrm{i}1}}+\dfrac{1}{2\pi\lambda_{\mathrm{ce}}}\ln\dfrac{r_{\mathrm{b}}}{r_{\mathrm{o}1}}, & 0\leqslant z\leqslant L_1\\ \dfrac{1}{2\pi r_{\mathrm{i}2}h_2}+\dfrac{1}{2\pi\lambda_{\mathrm{p}}}\ln\dfrac{r_{\mathrm{o}2}}{r_{\mathrm{i}2}}+\dfrac{1}{2\pi\lambda_{\mathrm{ce}}}\ln\dfrac{r_{\mathrm{b}}}{r_{\mathrm{o}2}}, & L_1<z\leqslant L_1+L_2\\ \dfrac{1}{2\pi r_{\mathrm{i}3}h_3}+\dfrac{1}{2\pi\lambda_{\mathrm{p}}}\ln\dfrac{r_{\mathrm{o}3}}{r_{\mathrm{i}3}}+\dfrac{1}{2\pi\lambda_{\mathrm{ce}}}\ln\dfrac{r_{\mathrm{b}}}{r_{\mathrm{o}3}}, & L_1+L_2<z\leqslant L_1+L_2+L_3-L_{\mathrm{ins}}\\ \dfrac{1}{2\pi r_{\mathrm{i}3}h_3}+\dfrac{1}{2\pi\lambda_{\mathrm{p}}}\ln\dfrac{r_{\mathrm{o}3}}{r_{\mathrm{i}3}}+\dfrac{1}{2\pi\lambda_{\mathrm{ins}}}\ln\dfrac{r_{\mathrm{o}4}}{r_{\mathrm{o}3}}+\dfrac{1}{2\pi\lambda_{\mathrm{ce}}}\ln\dfrac{r_{\mathrm{b}}}{r_{\mathrm{o}4}}, & L_1+L_2+L_3-L_{\mathrm{ins}}<z\leqslant L_1+L_2+L_3\end{cases} \tag{3}$$

应用ICS模型的G函数[13]对岩土中的径向一维传热进行分析:

$$T_{\mathrm{b}}=T_0-q_{\mathrm{b}}G_{\mathrm{ICS}}(t) \tag{4}$$

$$G_{\mathrm{ICS}}(t)=\frac{1}{\pi^2\lambda_{\mathrm{s}}}\int_0^{\infty}\frac{1-\exp\left[\dfrac{-\lambda_{\mathrm{s}}t}{(\rho c)_{\mathrm{s}}}x^2\right]}{x^2\left[\mathrm{J}_1^2(x)+\mathrm{N}_1^2(x)\right]}\cdot\left[\mathrm{J}_1(x)\mathrm{N}_0(x)-\mathrm{J}_0(x)\mathrm{N}_1(x)\right]\mathrm{d}x \tag{5}$$

UDBHE一般涉及2类边界条件:一类是给定入口温度;另一类是给定热输出功率。表达式为

$$T_{\mathrm{f}}(z=0)=\begin{cases}T_{\mathrm{in}},\text{给定入口温度}\\ T_{\mathrm{f}}(z=L_1+L_2+L_3)-\dfrac{(L_1+L_2+L_3)Q_{\mathrm{out}}}{\dot{V}(\rho c)_{\mathrm{f}}},\\ \text{给定热输出功率}\end{cases} \tag{6}$$

结合式(1),(2)和式(4),可以得到:

$$-\dot{V}(\rho c)_{\mathrm{f}}\frac{\partial T_{\mathrm{f}}}{\partial z}+\frac{T_0-T_{\mathrm{f}}}{R_{\mathrm{b}}+G_{\mathrm{ICS}}(t)}=0 \tag{7}$$

为求解式(7),将UDBHE沿轴向均匀划分为I段,将流体离散为(I+1)个节点,如图2所示。

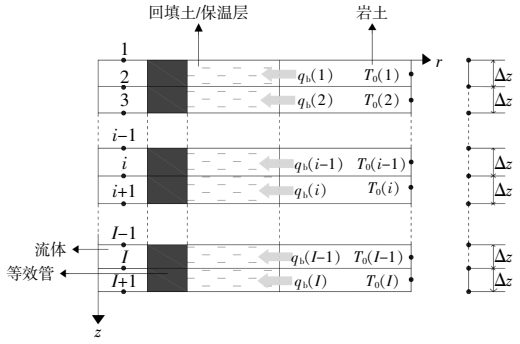


图2 UDBHE的空间离散图

Fig.2 Spatial discretization of UDBHE

基于有限差分法在空间上将式(7)进行离散:

$$-\frac{\dot{V}(\rho c)_{\mathrm{f}}}{\Delta z}[T_{\mathrm{f}}(i)-T_{\mathrm{f}}(i-1)]+\frac{T_0(i-1)-0.5T_{\mathrm{f}}(i)-0.5T_{\mathrm{f}}(i-1)}{R_{\mathrm{b}}+G_{\mathrm{ICS}}(t)}=0 \tag{8}$$

对式(8)进行化简,可得:

$$T_{\mathrm{f}}(i)=\frac{\frac{\dot{V}(\rho c)_{\mathrm{f}}}{\Delta z}[R_{\mathrm{b}}+G_{\mathrm{ICS}}(t)]T_{\mathrm{f}}(i-1)+T_0(i-1)-0.5T_{\mathrm{f}}(i-1)}{\frac{\dot{V}(\rho c)_{\mathrm{f}}}{\Delta z}[R_{\mathrm{b}}+G_{\mathrm{ICS}}(t)]+0.5},\quad 2\leqslant i\leqslant I+1 \tag{9}$$

对式(6)进行离散,可得:

$$T_{\mathrm{f}}(i)=\begin{cases}T_{\mathrm{in}},(\text{给定入口温度},i=1)\\ T_{\mathrm{f}}(I+1)-\dfrac{(L_1+L_2+L_3)Q_{\mathrm{out}}}{\dot{V}(\rho c)_{\mathrm{f}}},(\text{给定热输出功率},i=1)\end{cases} \tag{10}$$

通过求解式(9)和式(10),可以计算得到任意时刻所有流体节点的温度。

1.2　ILS-c 模型

ILS-c 模型采用 ILS 模型的 G 函数，并忽略了钻孔壁热流随时间的变化。ILS-c 模型与上述 ICS-c 模型基本相同,唯一的不同之处为 G 函数。在 ILS-c 模型中应用的 G 函数表达式[13]为

$$G_{\mathrm{IIS}}(t)=\frac{1}{4\pi\lambda_{\mathrm{s}}}\int_A^{\infty}\frac{\exp(-x)}{x}\mathrm{d}x \tag{11}$$

$$A=\frac{(\rho c)_{\mathrm{s}}r_{\mathrm{b}}^2}{4\lambda_{\mathrm{s}}t} \tag{12}$$

1.3　ICS-q 模型

ICS-q 模型是在 ICS-c 模型的基础上考虑了钻孔壁热流随时间的变化，其采用 ICS 模型的 G 函数和热流叠加原理对岩土一维径向传热进行分析。因此,将式(4)改为

$$T_{\mathrm{b}}^M=T_0-\sum_{n=1}^{M}\left(q_{\mathrm{b}}^n-q_{\mathrm{b}}^{n-1}\right)G_{\mathrm{ICS}}(t^M-t^{n-1}) \tag{13}$$

联立式(2)和式(13),可以得出如下方程:

$$q_{\mathrm{b}}^M(i-1)=\frac{T_0(i-1)-0.5T_{\mathrm{f}}^M(i-1)-0.5T_{\mathrm{f}}^M(i)-B(i-1)}{R_{\mathrm{b}}+G_{\mathrm{ICS}}(\Delta t)} \tag{14}$$

$$B(i-1)=\sum_{n=1}^{M-1}\left[q_{\mathrm{b}}^n(i-1)-q_{\mathrm{b}}^{n-1}(i-1)\right]G_{\mathrm{ICS}}(t^M-t^{n-1})-q_{\mathrm{b}}^{M-1}(i-1)G_{\mathrm{ICS}}(\Delta t) \tag{15}$$

联立式(1)和式(14),可以得到以下方程:

$$T_{\mathrm{f}}^M(i)=\frac{T_0(i-1)+\frac{\dot{V}(\rho c)_{\mathrm{f}}}{\Delta z}[R_{\mathrm{b}}+G_{\mathrm{ICS}}(\Delta t)]T_{\mathrm{f}}^M(i-1)}{\frac{\dot{V}(\rho c)_{\mathrm{f}}}{\Delta z}[R_{\mathrm{b}}+G_{\mathrm{ICS}}(\Delta t)]+0.5}-\frac{0.5T_{\mathrm{f}}^M(i-1)-B(i-1)}{\frac{\dot{V}(\rho c)_{\mathrm{f}}}{\Delta z}[R_{\mathrm{b}}+G_{\mathrm{ICS}}(\Delta t)]+0.5},\quad 2\leqslant i\leqslant I+1 \tag{16}$$

将式(10),(14)和式(16)联立求解,可以计算得到各时间节点的所有流体节点的温度。

1.4　ILS-q 模型

ILS-q 模型是在 ILS-c 模型的基础上考虑了钻孔壁热流随时间的变化，其与上述的 ICS-q 模型基本相同，而不同之处为 ILS-q 模型所采用的 G 函数是 $G_{\mathrm{IIS}}(t)$。

上述公式中，所涉及的变量、参数如表 1 所示。

表 1　变量、参数介绍

Table 1 Introduction of parameters

参数	符号	单位
中间变量	A	
中间变量	B	
ICS 模型的 G 函数	G_{ICS}	(m·K)/W
ILS 模型的 G 函数	G_{IIS}	(m·K)/W
对接直管内流体的对流换热系数	h_1	W/(m²·K)
对接斜管内流体的对流换热系数	h_2	W/(m²·K)
直管内流体的对流换热系数	h_3	W/(m²·K)
UDBHE 沿轴向的均匀划分段数	I	
第一类零阶贝塞尔函数	J_0	
第一类一阶贝塞尔函数	J_1	
对接直管长度	L_1	m
对接斜管长度	L_2	m
直管长度	L_3	m
保温层长度	L_{ins}	m
第 M 个时间节点	M	
第 n 个时间节点	n	
钻孔壁处的热流	q_{b}	W/m
钻孔壁半径	r_{b}	m
钻孔壁与流体之间的热阻	R_{b}	(m·K)/W
对接直管内半径	r_{i1}	m
对接斜管内半径	r_{i2}	m
直管内半径	r_{i3}	m
对接直管外半径	r_{o1}	m
对接斜管外半径	r_{o2}	m

续表 1

参数	符号	单位
直管外半径	r_{o3}	m
保温层外半径	r_{o4}	m
时间	t	s
岩土初始温度	T_0	℃
钻孔壁温度	T_b	℃
流体温度	T_f	℃
积分变量	x	
第二类零阶贝塞尔函数	N_0	
第二类一阶贝塞尔函数	N_1	
轴向坐标方向长度	z	m
相邻 2 个时间节点之间的时间间隔	Δt	s
回填土热导率	λ_{ce}	W/(m·K)
保温层热导率	λ_i	W/(m·K)
对接直管、对接斜管、直管及等效管热导率	λ_p	W/(m·K)
岩土热导率	λ_s	W/(m·K)
流体体积流量	$\dot{V}$	m³/s
流体体积比热容	$(\rho c)_f$	J/(m³·K)
管道体积比热容	$(\rho c)_p$	J/(m³·K)
岩土体积比热容	$(\rho c)_s$	J/(m³·K)

上述 4 种传热模型的优势在于建模过程简便、计算时间短,而不足之处在于模拟精度可能偏低。

2 结果和讨论

为了研究上述 4 种传热模型的准确性,将其应用于一个实际工程的 UDBHE,并与文献[9]所建立的二维数值模型及文献[14]中的实验数据进行对比。实际 UDBHE 的参数如表 2 所示[5]。

表 2 实际 UDBHE 的相关参数

Table 2 Parameters of the real UDBHE

参数	数值
对接直管长度 L_1/m	1 700
对接斜管长度 L_2/m	1 261
直管长度 L_3/m	2 781
对接直管外半径 r_{o1}/m	0.069 9
对接直管内半径 r_{i1}/m	0.062 2
对接斜管外半径 r_{o2}/m	0.069 9
对接斜管内半径 r_{i2}/m	0.062 2
直管外半径 r_{o3}/m	0.088 9
直管内半径 r_{i3}/m	0.079 7
保温层外半径 r_{o4}/m	0.120 7
钻孔半径 r_b/m	0.120 7
直管内保温层长度 L_{ins}/m	590
对接斜管沿深度的偏转角度 β/(°)	31
回填土体积比热容 $(\rho c)_{ce}$/(J·m⁻³·K⁻¹)	2.1×10^6
回填土热导率 λ_{ce}/(W·m⁻¹·K⁻¹)	1.34

续表 2

参数	数值
体积流量 $\dot{V}$/(m³·h⁻¹)	23.5
保温层体积比热容 $(\rho c)_{ins}$/(J·m⁻³·K⁻¹)	3.06×10^5
保温层热导率 λ_{ins}/(W·m⁻¹·K⁻¹)	0.031 2
流体体积比热容 $(\rho c)_f$/(J·m⁻³·K⁻¹)	4.2×10^6
流体热导率 λ_f/(W·m⁻¹·K⁻¹)	0.615
管道体积比热容 $(\rho c)_p$/(J·m⁻³·K⁻¹)	3.85×10^6
管道热导率 λ_p/(W·m⁻¹·K⁻¹)	14.48
地温梯度 a/(℃·m⁻¹)	0.027 03
岩土表面温度 T_{sur}/℃	20.524
热输出功率 Q_{out}/W	516 780

由于地温梯度不随深度变化,故初始岩土温度分布为

$$T_0=\begin{cases}T_{sur}+a\cdot z, 0\leqslant z\leqslant L_1\\ T_{sur}+a\cdot[L_1+(z-L_1)\cdot\cos\beta], L_1<z\leqslant L_1+L_2\\ T_{sur}+a\cdot[L_1+L_2+L_3-z], L_1+L_2<z\leqslant L_1+L_2+L_3\end{cases} \tag{17}$$

式中:T_{sur} 为岩土表面温度,℃;a 为地温梯度,℃/m;β 为对接斜管沿深度的偏转角度,(°)。

Li C[14]测量了岩土沿深度的热物性,因此本文将其作为传热模型的输入数据。

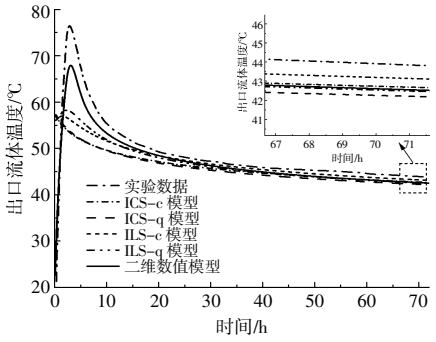
在 UDBHE 的热响应实验或实际运行过程中,通常采用给定入口温度和给定热输出功率的边界条件。因此,上述 4 种传热模型均考虑了这 2 类边界条件。

2.1 恒定入口温度边界条件下各模型比较

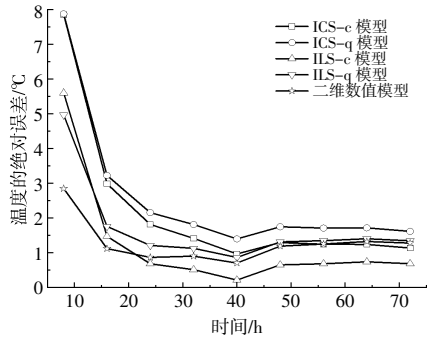
在给定入口温度为 12 ℃的边界条件下,利用 4 种传热模型对 UDBHE 出口流体温度进行模拟,并与二维数值模型及实验数据对比。

在入口温度边界条件下,各模型与实验数据的对比如图 3 所示。

由图 3 可以看出,相比于其他模型,前 20 h 内二维数值模型的计算结果更接近于实验数据。但随着时间的增加,ILS-c 模型的计算结果与实验数据的吻合度最高。在 72 h 时,各模型(ICS-c,ICS-q,ILS-c,ILS-q,二维数值模型)所计算的出口流体温度绝对误差分别为 1.14,1.62,0.69,1.35,1.28 ℃。上述结果表明各模型精度偏低,其主要原因可能是文献[14]所测量的岩土热导率的误差较大。本文作者前期将岩土热导率的数值修正为 2.18 W/(m·K),结果发现二维数值模型的误差大幅缩小,并且其与实验数据的吻合度大幅提



(a)各模型出口流体温度计算值和实验值



(b)各模型所计算的出口流体温度的绝对误差

图 3　恒定入口温度边界条件下各模型与实验数据的对比

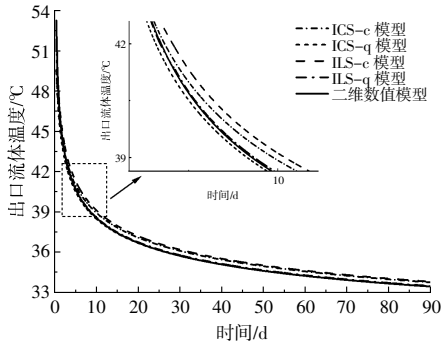
Fig.3 Comparison of these models and experimental data under the constant inlet temperature boundary condition

高[9]。因此,二维数值模型被视为较为精确的模型。

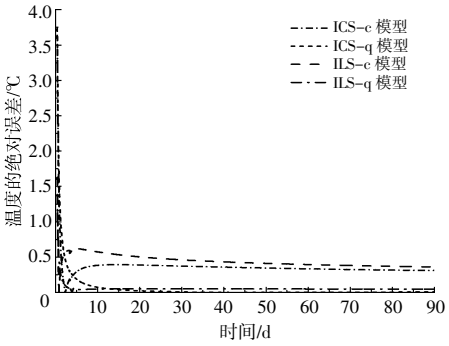
为了比较 4 种模型在长期传热过程中的性能,将二维数值模型与 4 种模型进行比较,研究 4 种模型在 2 种边界条件下的准确性。

在入口温度边界条件下,各模型 90 d 内的出口流体温度及误差分布的比较如图 4 所示。

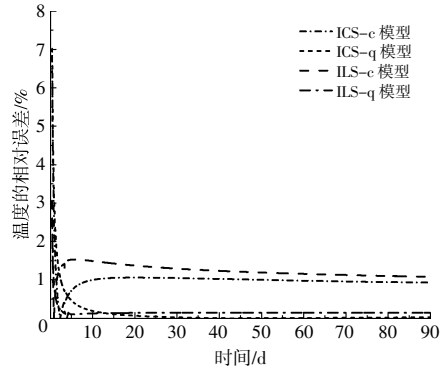
由图 4 可见,4 种传热模型（ICS–c,ICS–q,ILS–c,ILS–q 模型）的出口流体温度在前 10 h 与二维数值模型明显偏离,故忽略前 10 h 的数据能够更直观地体现出各模型的变化趋势,因此,其他图表均默认忽略了前 10 h 的数据。从图 4(a)可以看到,随着时间的增加,4 种模型的出口流体温度逐渐接近二维数值模型, 其中,ICS–q 和ILS–q 模型与二维数值模型吻合较好,但 ICS–c 和 ILS–c 模型与二维数值模型温度的偏差较大。从图 4(b),4(c)可以发现,4 种模型的绝对误差与相对误差的变化趋势相似。随着时间的增加,ICS–q 和 ILS–q 模型的绝对（相对）误差均先减小后增大,ICS–c 和 ILS–c 模型的绝对(相对)误差均先增大后减



(a)各模型出口流体温度计算值



(b)各模型所计算的出口流体温度的绝对误差



(c)各模型所计算的出口流体温度的相对误差

图 4　各模型在恒定入口温度边界条件下 90 d 内的出口流体温度及误差分布

Fig.4 The outlet fluid temperature distribution and error distribution of these models during 90 d under the constant inlet temperature boundary condition

小。在 80 h~90 d 内,ICS–q 和 ILS–q 模型的绝对误差基本小于 0.06 ℃,ICS–c 和 ILS–c 模型的绝对误差基本为 0.3~0.6 ℃。并且,在 13 d 后的时间内,4 种模型中,ICS–q 模型和 ILS–q 模型的绝对误差小于 ICS–c 和 ILS–c 模型。在 80 h 时,4 种模型的出口流体温度绝对误差分别为 0.19,0.30,0.60 和 0.06 ℃,相对误差分别为0.5%,0.7%,1.4% 和 0.1%。在 90 d 时,4 种模型的出口流体温度绝对误差分别为 0.31,0.01,0.36 和 0.05 ℃,相对误差

分别为 0.9%,0.0%,1.1%和0.1%。4 种模型中,ICS-c 和 ILS-c 模型的相对误差远大于另外 2 种模型。

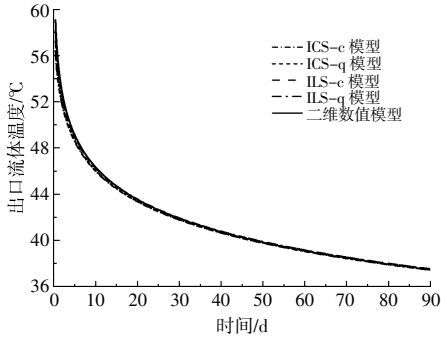
由此可以得出,ICS-q 和 ILS-q 模型对长期运行下的出口流体温度的预测精度较高。其中,ICS-q 模型的预测精度最高,ILS-c 模型的预测精度最低。

2.2 恒定热输出功率边界条件下各模型比较

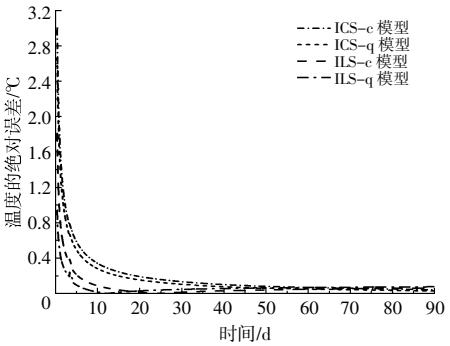
在恒定热输出功率 Q_{out}=516 780 W 的条件下,利用 4 种模型对出口流体温度做模拟,并与二维数值模型进行比较。

在恒定热输出功率条件下,各模型 90 d 内出口流体温度和误差分布的比较如图 5 所示。

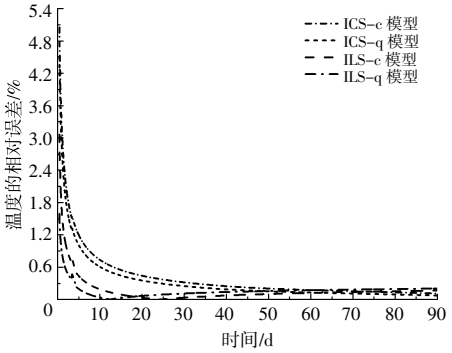
从图 5(a)可以看到,随着时间的增加,4 种模型的出口流体温度与二维数值模型的出口流体温度基本吻合,但 ICS-q 和 ICS-c 模型仍会低估出口流体温度,而 ILS-q 和 ILS-c 模型则会先低估后高估出口流体温度。从图 5(b)和图 5(c)可以得到,在前期,ILS-q 与 ILS-c 模型的绝对(相对)误差小于 ICS-q 与 ICS-c 模型,而随着时间的增加,ILS-q 与 ILS-c 模型的绝对(相对)误差反而大于 ICS-c 与 ICS-q 模型。在 80 h 时,4 种模型的出口流体温度的绝对误差分别为 0.77,0.65,0.35 和



(a)各模型出口流体温度计算值



(b)各模型所计算的出口流体温度的绝对误差



(c)各模型所计算的出口流体温度的相对误差

图 5 恒定热输出功率条件下各模型 90 d 内的出口流体温度及误差分布

Fig.5 Under the condition of constant heat output rate the outlet fluid temperature and error distribution of these models during 90 d

0.19 ℃,相对误差分别为 1.6%,1.3%,0.8%和 0.5%。在 90 d 时,其绝对误差分别为 0.04,0.03,0.06 和 0.08 ℃,相对误差分别为 0.1%,0.1%,0.2%和 0.2%。ILS-q 和 ILS-c 模型的出口流体温度的相对误差先快速减小,后缓慢减小,最后缓慢增大;ICS-q 和 ICS-c 模型的出口流体温度的相对误差先快速减小,后缓慢减小。经过足够长的时间后,4 种模型出口流体温度的相对误差均小于 0.5%。

与 ICS-q 和 ICS-c 模型相比,ILS-q 和 ILS-c 模型在短期和中期的误差较小,但在长期的运行中误差较大。由此可以得出,4 种模型中,ILS-q 模型在短期和中期中的模拟精度较高,ICS-q 模型在长期运行中的模拟精度较高。

2.3 模型分析

上述研究结果表明,4 种模型都会一直低估或先低估后高估 UDBHE 性能。其原因主要有 2 个,一是 4 种模型中使用的 G 函数不准确。研究者[13,15]发现,ILS 和 ICS 模型的 G 函数值比真实值偏大,尤其是在短时间内,这意味着 ILS 和 ICS 模型会高估岩土的热阻,从而低估 UDBHE 取热段的换热性能,并高估 UDBHE 排热段的换热性能。实际上,ILS 模型将钻孔看作一条线,即将钻孔也看作岩土,因而在一定程度上考虑了钻孔热容;而 ICS 模型将钻孔看作一个圆柱外表面,因而完全忽略了钻孔热容。相比于浅层地埋管,UDBHE 的钻孔半径越大,钻孔长度越长,钻孔热容的影响很可能也越大。同时,UDBHE 的岩土初始温度范围较大,单位深度的换热量较大,因而钻孔内流体温

度随时间及深度的变化较大，从而增大了钻孔热容的影响。ILS 模型的 G 函数比 ICS 模型的 G 函数更准确,这是 ILS-q(或 ILS-c)模型基本上比 ICS-q 模型(或 ICS-c 模型)更准确的原因。二是钻孔壁热流随时间的变化而变化。由于钻孔壁热流随时间变化,钻孔壁热流将不是常数,并且可能存在正值与负值的转变，然而 ILS-c 与 ICS-c 模型都忽略了钻孔壁热流随时间的变化，因而会进一步降低其准确性。对比 4 种模型发现,忽略钻孔壁热流随时间变化会导致 UDBHE 性能先被低估后被高估。

为了评估钻孔壁热流随时间的变化，分别计算了 80 h 和 90 d 内钻孔壁热流的标准差。2 种边界条件下钻孔壁热流在不同时间段的标准差分布如图 6 所示。

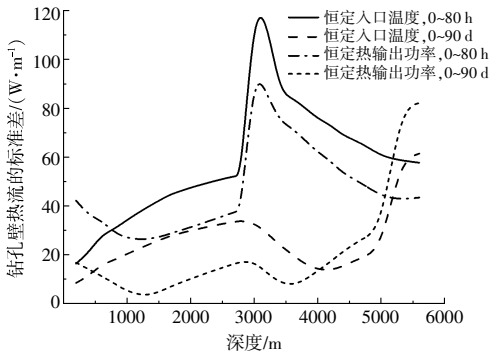


图 6　2 种边界条件下钻孔壁热流在不同时间段的标准差分布

Fig.6 The standard deviation distribution of heat flow at the borehole wall during different time periods under two boundary conditions

由图 6 可见,在较长时间段内,除直管段中的浅层管段外,钻孔壁热流的标准差均较小,说明忽略钻孔壁热流随时间变化的影响随时间逐渐减弱。与恒定热输出功率边界条件相比,恒定入口温度边界条件下的标准差更大，即钻孔壁热流随时间的变化更大，这可以解释为什么忽略钻孔壁热流随时间变化在入口温度边界条件下所引起的误差较大。

3　结论

本文在传统的 ICS 和 ILS 模型的 G 函数基础上，建立了 2 种边界条件下的 4 种 UDBHE 传热模型(ICS-c,ICS-q,ILS-c,ILS-q 模型),并与二维数值模型、实验数据进行对比。通过对研究结果的分析,得出以下主要结论。

①在 2 种边界条件下 UDBHE 的 4 种模型中,ILS-q 模型整体上表现出较高的精度,ICS-q 模型在足够长的时间后表现出较高的精度,ICS-c 模型的精度最低。但 4 种模型在前 80 h 基本均存在不可忽略的误差,在足够长的时间后,ILS-q 和 ICS-q 模型已经足够准确，但 ILS-c 和 ICS-c 模型在入口温度边界条件下仍存在较大误差。

②4 种模型的误差主要有 2 个原因：一是所采用的 ICS 和 ILS 模型的 G 函数不够准确；二是钻孔壁热流随时间变化较大。忽略钻孔壁热流随时间变化会导致 UDBHE 性能先被低估后被高估。尽管 ICS-q 和 ILS-q 模型考虑了钻孔壁热流随时间的变化，但它们仍然受到第一个原因的影响。

③本文的研究结果表明，在分析 UDBHE 传热性能时,有必要考虑钻孔壁热流随时间的变化。而为了准确模拟 UDBHE 在 80 h 内的传热性能,不应采用精度较低的 ICS 和 ILS 模型的 G 函数,而应采用更准确的 G 函数。

参考文献：

[1] Cui P,Yang W B,Zhang W K,et al.Advances in ground heat exchangers for space heating and cooling:Review and perspectives[J].Energy and Built Environment,2024(5):255-269.

[2] 高有川,许天福,于涵,等.U 型井取热不取水地热开采潜力及影响因素分析[J].可再生能源,2023,41(2):199-206.

[3] 孔彦龙,陈超凡,邵亥冰,等.深井换热技术原理及其换热量评估[J].地球物理学报,2017,60(12):4741-475.

[4] 杜甜甜,满意,姜国心,等.套管式中深层地埋管换热器传热建模及取热分析[J].可再生能源,2020,38(7):887-892.

[5] 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.

[6] 周聪,张育平,朱昱谌,等.创新型竖向 U 型深埋管供暖换热性能实验 [J]. 技术与创新管理,2019,40(2):163-167.

[7] 李超,官燕玲,杨瑞涛,等.U 型深埋管固井层对埋管换热性能影响的研究 [J]. 太阳能学报,2021,42(2):267-273.

[8] Bao L L,Wang X,Jin P F,et al.An analytical heat transfer model for the mid-deep U-shaped borehole heat exchanger considering groundwater seepage [J]. Journal of Building Engineering,2023,64:105612.

[9] Wang C L,Sun W Y,Fu Q,et al.Semi-analytical and numerical modeling of U-bend deep borehole heat exchanger[J].Renewable Energy,2024,222:119959.

[10] Huang S,Li J Q,Zhu K,et al.Thermal recovery characteristics of rock and soil around medium and deep U-type borehole heat exchanger [J].Applied Thermal Engineering,2023,224:120071.

[11] Zhang W K,Wang J H,Zhang F F,et al.Heat transfer analysis of U-type deep borehole heat exchangers of geothermal energy [J].Energy & Buildings,2021,237: 110794.

[12] Jiang J H,Wang F H,Yang X,et al.Evaluation of the long-term performance of the deep U-type borehole heat exchanger on different geological parameters using the Taguchi method[J].Journal of Building Engineering, 2022,59:105122.

[13] Li M,Lai A C K.Review of analytical models for heat transfer by vertical ground heat exchangers (GHEs):A perspective of time and space scales[J].Applied Energy, 2015,151:178-191.

[14] 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,2022,166:20-34.

[15] Nian Y L,Cheng W L.Analytical g-function for vertical geothermal boreholes with effect of borehole heat capacity [J].Applied Thermal Engineering,2018,140: 733-744.

Comparative study on heat transfer models of U-bend deep borehole heat exchanger based on different G functions

Wang Changlong[1,2], Sun Wanyu[1,2], Guo Yanchun[2], Jiang Tianzhuo[1,2], Sun Yanhong[1]

(1.School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China; 2.Key Laboratory of Shallow Geothermal Energy, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Beijing 100195, China)

Abstract: The U-bend deep borehole heat exchanger (UDBHE) has a promising application potential. This paper is based on the G functions of infinite cylindrical source (ICS) and infinite line source (ILS) models, four heat transfer models of UDBHE are established, and they adopt the G function of ICS or ILS model, and consider or ignore the time-varying heat flow at the borehole wall, which are abbreviated as ICS-q, ILS-q, ICS-c and ILS-c models, respectively. The accuracy of the four models is studied by comparing with a more accurate two-dimensional numerical model and experimental data under two boundary conditions. The results show that the ILS-q model is the most accurate on the whole, and that the ICS-q model is the most accurate in analyzing the long-term performance of UDBHE. The four models have large errors in the early stage, but after enough long time, the errors of them are small except that the ILS-c and ICS-c models have large errors under the inlet temperature boundary condition. The errors mainly result from two aspects: the G functions of ICS and ILS models have some errors; ignoring the time-varying heat flow will cause some errors. The results can provide reference for the heat transfer model study of UDBHE.

Keywords: U-bend deep borehole heat exchanger; G function; heat transfer model; infinite cylindrical source; infinite line source model