

[引用本文]关春敏,赵树旺,张文科,等.中深层地热能供暖地埋管换热器传热分析[J].暖通空调,2021,51(6):107-112

中深层地热能供暖地埋管换热器 传热分析*

山东建筑大学 关春敏[☆]

山东中瑞新能源科技有限公司 赵树旺

山东建筑大学 张文科 孙炳岩 王建华 孙知晓

山东中瑞新能源科技有限公司 方肇洪

摘要 介绍了中深层地热能套管式换热器的结构和工作原理,建立了换热管内循环流体及钻孔周围岩土介质的能量控制方程。以某地源热泵工程项目为例,分析了钻井深度、循环液流量及大地热流对地埋管换热器名义取热量的影响,以及循环液进出口温度的变化、地埋管换热器的热影响半径、钻孔壁的温度分布,揭示了项目运行时取热量、循环液及地下岩土相关参数的变化。

关键词 中深层地热能 地埋管换热器 传热 取热量 热影响半径 循环液 地下岩土

Heat transfer analysis of ground heat exchangers for medium-deep geothermal energy heating

By Guan Chunmin[★], Zhao Shuwang, Zhang Wenke, Sun Bingyan,
Wang Jianhua, Sun Zhixiao and Fang Zhaohong

Abstract Presents the structure and working principle of medium-deep geothermal energy double tube heat exchangers, and establishes the energy control equations for the circulating fluid in the heat exchange tubes and the rock and soil media around the borehole. Taking a ground source heat pump project as an example, analyses the effects of drilling depth, circulating fluid flow and geothermal flow on the nominal heat extraction of ground heat exchangers, as well as the changes of both the inlet and outlet temperatures of the circulating fluid, the thermal influence radius of ground heat exchangers, and the temperature distribution of the borehole wall. Reveals the changes of the heat extraction and the relevant parameters of circulating fluid and underground rock and soil during project operation.

Keywords medium-deep geothermal energy, ground heat exchanger, heat transfer, heat extraction, thermal influence radius, circulating fluid, underground rock and soil

[★] Shandong Jianzhu University, Jinan, China

0 引言

在能源紧张及气候变暖、雾霾天气频频出现等环境问题的压力下,热泵清洁供暖技术成为业界关注和研究的热点^[1]。地源热泵技术作为一种新能源技术,具有环保节能、能效比高等优势^[2]。

浅层地源热泵技术主要利用地下深度范围在50~200 m的浅层地热能,但需要占据一定的土地

面积布置地埋管,而且在冷热负荷不平衡地区或单供暖地区,地下介质的温度逐年变化会导致地下传热性能越来越差。

鉴于浅层地热能地源热泵技术的缺点,为提高

[☆] 关春敏,女,1995年8月生,在读硕士研究生
250101 山东省济南市历城区临港开发区港沟街道凤鸣路
1000号山东建筑大学热能工程学院
E-mail:1018655984@qq.com

收稿日期:2020-03-26

一次修回:2020-08-04

二次修回:2021-05-05

* 国家自然科学基金资助项目(编号:51708336),山东建筑大学博士基金资助项目(编号:XNBS1605)

地热能的利用效率,国内外的专家学者近些年开展了对中深层地热能的研究,把钻孔埋管的深度加大到1 500~3 000 m,称之为中深层地埋管换热器技术。一个钻孔地埋管换热器可满足几千甚至上万平方米的建筑物供暖,不仅减少了占地面积,而且可利用的土壤温度显著提高,地下温度基本稳定,适合于单供暖的情况。相对于水热型的中深层地热系统,中深层地埋管换热器技术采用闭式埋管循环系统,故对地质条件的限制比较少,可以灵活应用于多种地质条件。避免了开式系统与地下水或岩层的直接接触或质传递,从而避免了对地下水生物化学方面的影响。

在从地下 1 500~3 000 m 深、温度在 70~90℃甚至更高范围的岩石中提取地热能作为热泵系统低温热源的过程中,为了保证地下换热装置的结构稳定性,通常采用套管结构,即循环水在内外管嵌套的地埋管内流动,实现与地下介质的换热。外管通常采用钢管起固定及强化传热的作用,而内管则用塑料管以对循环水进行一定程度的保温。从提高换热效果的角度考虑,循环水在水泵的驱动下从内外管的空隙向下流动,到达竖直管的底部后,再由内管向上流出换热装置,地埋管换热器的结构及循环水流动方式如图 1 所示。

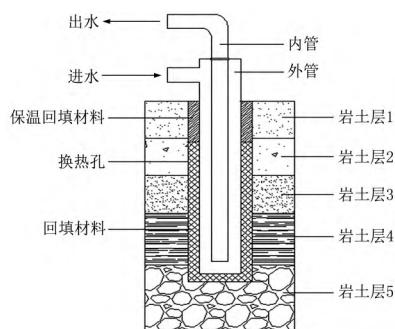


图 1 中深层套管式地埋管换热器示意图

中深层地源热泵作为一种对地热能利用较为高效的方式,受到业内研究人士的重视且已逐渐推广应用。但是,由于中深孔地源热泵打井和埋设管道的成本相对较高且一旦施工结束后无法进行维修,所以必须对工程项目进行分析和预测,探索不同因素对套管换热器取热能力的影响,研究循环水在系统运行过程中的温度变化,以及揭示单取热工况对地下土壤介质的影响。本文根据中深层套管式地埋管换热器的传热模型,以实际供暖工程项目

为研究对象,对地埋管换热器的运行工况进行传热分析,为实际的技术应用提供理论指导,进一步促进中深层地热能的推广应用。

1 地热井工程概况

该工程位于河北省邯郸市,地处寒冷地区,当地大气年平均温度为 13℃,地表对流换热系数为 15 W/(m²·K)。单井的地下介质包括 5 个地层,各个地层介质的信息见表 1。

表 1 邯郸某工程中深层钻井地层信息

地层	距地面 距离/m	导热系数/ (W/(m·K))	单位体积热容/ (MJ/(m ³ ·K))
第四系	418.35	1.042	3.73
明化镇组	1 030	2.700	2.31
馆陶组	1 530	2.580	2.35
东营组	2 295	2.530	2.31
沙河街组	2 500	2.750	2.33

该工程钻井深度为 2 500 m,钻井口径为 $\Phi 311$ mm,使用闭式套管式换热器,以水为循环介质,套管的内外管均为钢管。其中,内管经过保温处理后的导热系数为 0.02 W/(m·K),单位体积热容为 3.627 MJ/(m³·K);外管的导热系数为 45 W/(m·K),单位体积热容为 3.634 MJ/(m³·K)。在 0~420 m 处设置隔热段,隔热段使用导热系数为 1.48 W/(m·K)的普通水泥回填,而 420~2 445 m 处使用导热系数为 2.68 W/(m·K)的普通水泥回填,经过计算,回填材料的平均导热系数为 2.476 W/(m·K),平均单位体积热容为 2.632 MJ/(m³·K)。

2 传热模型

求解套管式地埋管换热器的传热模型需考虑换热器及周围岩土地层的实际特点。由于钻孔埋管的深度很大,整个钻孔可穿越若干具有不同介质的地层,每个地层介质的参数应分别统计,钻孔底部的温度可能比地表温度高 50℃或者更高,轴向地温梯度不可忽略。由于地下介质的温度沿钻孔深度方向逐渐变化,热量自地下至地面以导热的方式进行传递,成为传热分析中必须注意的一个因素。循环液的流动方式已在图 1 中说明,向下和向上的流动要区别对待。此外,整个传热研究较为复杂,为便于探索,可对一些情形进行简化。因此,可总结建立传热模型的前提条件,并对循环液和岩土层分别建立能量控制方程,进而对传热模型求解分析。

2.1 前提条件

建立中深层地埋管换热器的传热模型,需要基于一定的前提条件,对其进行总结如下:

1) 在所考察的范围内将岩土层看作是均匀的介质^[3],或分层均匀的介质,介质的物性不随温度改变,传热机理仅考虑导热。

2) 不考虑地下水流动的影响^[4],将单一套管式地埋管的换热问题简化成二维非稳态的导热问题。

3) 套管理管内外管中流体的流动和传热都按一维问题考虑,即不考虑管内流体在横截面上的速度和温度分布,而仅考虑在横截面上的平均温度和平均流速。

4) 根据所考虑的时间尺度,在径向限定一个足够大而有限的范围,认为在该径向边界上的温度保持原来的温度而没有受到套管传热的影响。

5) 在所考察的范围内有均匀向上的大地热流。大地热流是指由地心向外传递的能量,即单位时间内流经地表单位面积的热量^[5],其计算公式如下:

$$q = \lambda_d \frac{dt}{dz} \quad (1)$$

式中 q 为大地热流, W/m^2 ; λ_d 为地层的导热系数, $W/(m \cdot K)$; t 为地温, $^{\circ}C$; z 为轴向距离, m 。

6) 初始时刻岩土在径向的温度分布是均匀的,在轴向则存在温度梯度。因为大地热流被认为是均匀的,所以不同水平地层中的地温梯度也不同。

7) 地表以上的空气与地面进行对流换热,空气的温度及表面对流换热系数保持不变。

2.2 控制方程

2.2.1 套管内外管流体温度的控制方程

来自土壤的热量在径向传递过程中受到的阻碍包括外管内循环液和钻孔壁之间单位长度的热阻 R_1 和内管流体与外管流体之间单位长度的热阻 R_2 ,其计算公式如下:

$$R_1 = \frac{1}{\pi d_{2i} h_2} + \frac{1}{2\pi \lambda_{p2}} \ln \frac{d_{2o}}{d_{2i}} + \frac{1}{2\pi \lambda_g} \ln \frac{d_b}{d_{2o}} \quad (2)$$

$$R_2 = \frac{1}{\pi d_{1i} h_1} + \frac{1}{2\pi \lambda_{p1}} \ln \frac{d_{1o}}{d_{1i}} + \frac{1}{\pi d_{1o} h_2} \quad (3)$$

式(2)、(3)中 d_{2i} 和 d_{2o} 分别为外管的内径与外径, m ; h_2 和 h_1 分别为套管外管与内管的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; λ_{p2} 、 λ_g 、 λ_{p1} 分别为套管外管、回填浆料及套管内管的导热系数, $W/(m \cdot K)$; d_b 为

钻孔直径, m ; d_{1i} 、 d_{1o} 分别为内管的内径与外径, m 。

套管内流体的流动方式为外进内出,内管和外管中流体流动的能量方程式分别为

$$C_1 \frac{\partial t_{f1}}{\partial \tau} = \frac{t_{f2} - t_{f1}}{R_2} + C \frac{\partial t_{f1}}{\partial z} \quad (4)$$

$$C_2 \frac{\partial t_{f2}}{\partial \tau} = \frac{t_b - t_{f2}}{R_1} + \frac{t_{f1} - t_{f2}}{R_2} - C \frac{\partial t_{f2}}{\partial z} \quad (5)$$

式(4)、(5)中 C_1 、 C_2 分别为内、外管道热流通道单位长度的热容量, $J/(m \cdot K)$; C 为流体的热容量, $J/(s \cdot K)$; t_{f1} 、 t_{f2} 分别为内、外管中流体的温度, $^{\circ}C$; τ 为时间, s ; t_b 为钻孔壁的温度, $^{\circ}C$ 。

C_1 、 C_2 、 C 的计算式如下:

$$C_1 = \frac{\pi}{4} d_{1i}^2 \rho c + \frac{\pi}{4} (d_{1o}^2 - d_{1i}^2) \rho_1 c_1 \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{\pi}{4} (d_{2i}^2 - d_{1o}^2) \rho c + \frac{\pi}{4} (d_{2o}^2 - d_{2i}^2) \rho_2 c_2 + \frac{\pi}{4} (d_b^2 - d_{2o}^2) \rho_g c_g \quad (7)$$

$$C = mc \quad (8)$$

式(6)、(7)中 ρ 、 ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_g 分别为水、内管、外管和回填浆料的密度, kg/m^3 ; c 、 c_1 、 c_2 、 c_g 分别为水、内管、外管和回填浆料的比热容, $J/(kg \cdot K)$; m 为套管内水的质量流量, kg/s 。

2.2.2 岩土中的能量控制方程

每个岩土层的导热方程如下:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \quad (9)$$

式中 a 为地层的热扩散率, m^2/s ; r 为径向坐标, m 。

由于柱坐标中径向温度梯度分布受地埋管换热器的影响,分布不均匀,其中心部分的温度梯度大而边缘部分的温度梯度小,在径向可以采用不均等的差分步长。为此引进新坐标 σ :

$$\sigma = \ln \frac{r}{r_0} \quad (10)$$

式中 r_0 为钻孔的半径, m 。

对式(9)进行坐标变换得:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \sigma^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \quad (11)$$

如果 σ 坐标采用等步长 $\Delta\sigma$,则对应的 r 坐标就成为一个等比级数:

$$\frac{r_{i+1}}{r_i} = \frac{r_1}{r_0} = \exp(\Delta\sigma) = \beta \quad (12)$$

式中 r_{i+1} 为第 $i+1$ 个径向节点的径向坐标, m ;

r_i 为第 i 个径向节点的径向坐标, m; r_1 为第 1 个径向节点的径向坐标, m。

计算中, 取 $\beta=1.2$, $\Delta\sigma=0.182\ 32$ 。

3 项目的传热分析

3.1 名义取热量的研究

3.1.1 名义取热量的定义

名义取热量是一个通过模拟来确定的虚拟的量化指标, 便于工程师与非专业人士进行沟通。其定义为在特定运行工况下, 一个钻孔换热器可以提供的最大取热量。这种特定工况指的是^[6-8]:

1) 取热量在 3 个月内(90 d)是恒定的。

2) 岩土层的初始温度分布值是预先确定好的, 在这里认为取热开始时岩土层未受中深层地埋管换热器系统的扰动。

3) 中深层地埋管换热器系统的进口温度在整个取热期间不得低于 $5\ ^\circ\text{C}$ 。

3.1.2 钻井深度对名义取热量的影响

为了研究钻井深度对名义取热量的影响, 在该工程的基础上, 其他条件不变只改变钻井深度, 分别对钻井深度为 1 500、1 800、2 100、2 400、2 700、3 000 m 的情况进行了模拟研究, 得到了名义取热量随钻井深度的变化, 如图 2 所示。

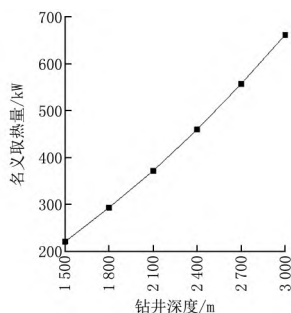


图 2 名义取热量随钻井深度的变化

从图 2 可以看出, 随着钻井深度的增大, 名义取热量也明显增大, 这是因为钻井越深, 越接近地心, 受到地心温度的影响就越大, 钻孔底部的温度也越高, 地埋管换热器可以通过与土壤的换热获得更多的热量。但是, 钻孔越深也就意味着工程成本越高, 因此应以此工程模拟为依据并综合考虑经济效益与取热量, 选择最优的钻孔深度以实现效益最大化。

3.1.3 循环液流量不同时的名义取热量

根据 $Q=cm\Delta t$ (其中 Q 为换热量; Δt 为温差) 可知, 循环液流量越大, 地埋管换热器取得的热量越多。为了对此进行验证, 分别对循环液流量为

20、30、40、50、60、70、80 m^3/h 时的运行工况进行模拟, 得到循环液流量对钻孔地埋管换热器名义取热量的影响, 结果如图 3 所示。

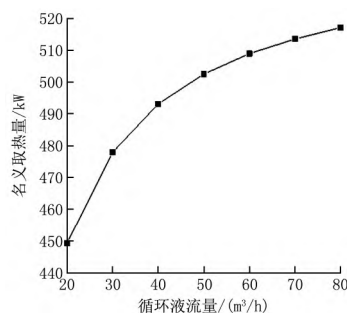


图 3 名义取热量随循环液流量的变化

由图 3 可以看出, 随着地埋管换热器中循环液流量的增大, 名义取热量也呈现增大的趋势, 但是增加幅度越来越小。这是由于当循环液流量较大时, 地埋管换热器持续从土壤中吸收较多的热量, 使得土壤温度下降后不能较快地恢复。如果要维持取热量的稳定, 则循环水进出口温度会降低, 甚至会低于结冰点, 从而影响整个系统的正常运行。同时, 循环液流量增大时, 对循环水泵的要求也随之提高。因此, 在建设实际工程时应选取合适的循环液流量, 以达到更好的运行效果, 建议以 $35\sim 50\ \text{m}^3/\text{h}$ 为宜。

3.1.4 大地热流不同时的名义取热量

大地热流是能够反映土壤热状态的物理量^[9], 它反映了在单位时间、单位面积内由地心向地表传输能量的多少。本文模拟了大地热流分别为 0.04、0.05、0.06、0.07、0.08 W/m^2 时名义取热量的变化, 结果如图 4 所示。

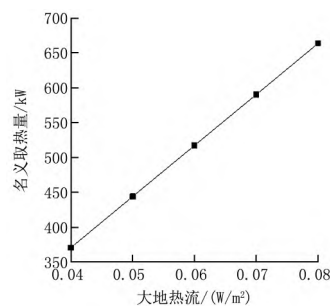


图 4 名义取热量随大地热流的变化

从图 4 可以看出, 随着大地热流的增大, 地埋管换热器的名义取热量呈现明显的增大趋势。这说明当地下介质的导热系数不发生变化时, 大地热流越大意味着地下介质的温度梯度越大, 地埋管换热器可以从周围土壤中获得更多的热量, 越有利于

地埋管换热器的运行。

3.2 模拟数据与实验数据的对比

在本次模拟中,除了对名义取热量的研究外,其余的研究均在额定取热量 490 kW 下进行,为了探究该取热量的选取是否合理,将通过实验获得的取热量数据与其进行对比,实验运行时的循环液流量为 $45 \text{ m}^3/\text{h}$,该工况的实验时间为 2019 年 7 月 31 日 09:00 至 8 月 10 日 09:00,共 240 h,其中实验在进行过程中是每隔一段时间读取一个数据,对比结果如图 5 所示。

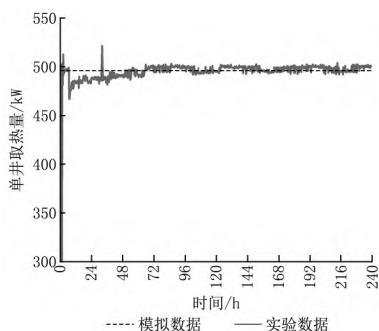


图5 模拟数据与实验数据的比较

从图 5 可以看出,实验数据与选定的模拟数据中的取热量有一定的误差,其原因可能是由于地下地质结构较为复杂,可能存在地下水渗流的影响,使得地埋管换热器在真实的运行工况下无法保证其取热量为一个恒定的数值,但实验数据仍然围绕模拟选定的取热量数据波动,存在的误差较小,可以忽略。因此,在接下来的模拟中选择取热量为 490 kW 是合理的。

3.3 进出口温度随时间的变化

循环水进出口温度的变化也是衡量土壤受地埋管换热器影响的一个标准,此处通过模拟考察了系统在连续运行工况下持续运行 5 a 进出口温度的变化,如图 6 所示。

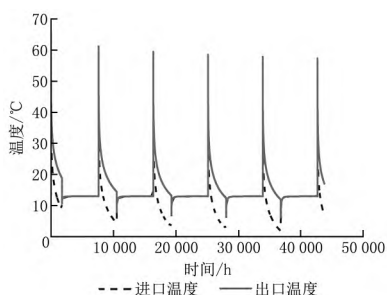


图6 系统连续运行 5 a 进出口温度随时间的变化

由图 6 可以看出,循环液的进出口温度逐年缓

慢下降,但在第 5 年仍然能保持在 60°C 左右,说明虽然地埋管换热器的取热会对土壤造成一些影响,但是土壤温度在非供暖时间段可以得到较好的恢复,以维持其供热能力。

3.4 换热器对土壤的热影响半径

热影响半径定义为:在钻孔深度范围内,某深度处某个半径坐标的土壤温度与该土层土壤初始温度之差的绝对值小于 0.5°C 时,则认为这个半径为该深度的热影响半径^[10]。

通过模拟得出地埋管换热器运行 10 a 后钻孔 500、1 000、1 500、2 000、2 500 m 深处土壤的径向温度分布,如图 7 所示。由图 7 可以看出:随着径向距离的增大,土壤温度先逐渐升高后基本保持不变;径向距离相同时,随着深度增大,土壤温度逐渐升高。

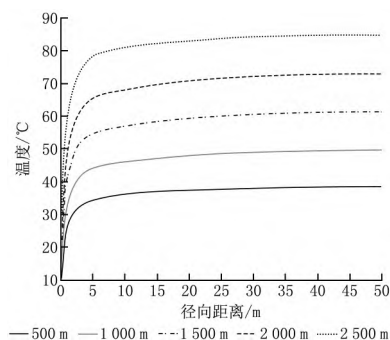


图7 不同深度土壤温度沿径向的变化

将地埋管换热器运行第 1 h 的土壤温度分布作为土壤的初始温度,然后用已经得出的 10 a 后土壤在不同深度处的径向温度分布与其作差,并找出绝对值小于 0.5°C 时的径向距离,即热泵运行到该时刻在该深度处的热影响半径,将其统计列入表 2 中。

表2 不同深度处的热影响半径

	深度/m				
	500	1 000	1 500	2 000	2 500
热影响半径/m	36.76	36.76	36.76	44.14	36.76

由表 2 可以看出,随着深度的增加,地埋管换热器的热影响半径呈现先增大后减小的趋势,这可能是由于当深度增加到某一数值时,地埋管换热器中的循环液与地下介质之间的换热密度增大,土壤温度受影响的范围也会变大;而在钻孔的底部,由于此时循环液已经到达了地埋管换热器的边界处,与土壤之间的换热程度减弱,对土壤中温度的影响范围也随之减小。同时,可以看出,该地埋管换热器在运行 10 a 后的最大热影响半径为 44.14 m,因此,为了防止热干扰现象的发生,在距离该地埋管

换热器中心 88.28 m 的区域内不宜设置其他地埋管换热器。

3.5 钻孔壁温度沿深度方向的变化

在整个换热过程中,钻孔壁的温度受土壤温度与地埋管换热器内循环液温度的双重影响,图 8 显示了地埋管换热器运行的第 720 h(1 个月)、1 440 h(2 个月)、2 160 h(3 个月)、2 880 h(4 个月)钻孔壁温度分布情况。

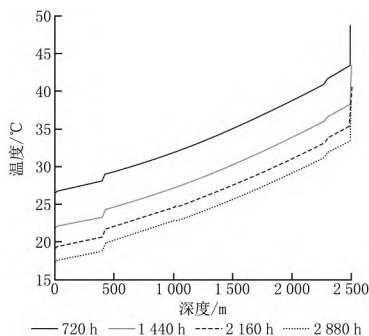


图 8 不同时刻钻孔壁温度分布

由图 8 可以看出,钻孔壁温度先升高,在 480 m 左右处出现一个小幅波动,然后继续升高。这是由于在距地面 0~480 m 左右的深度处土壤温度低于循环液进口温度,钻孔壁会吸收循环液中的热量,而在 480 m 以下的位置,土壤温度高于循环液温度,循环液开始从钻孔壁处吸收热量,同时钻孔壁也会吸收来自土壤的热量,在二者的双重影响下,钻孔壁温度继续升高。同时,随着地埋管换热器运行时间的增长,钻孔壁温度呈现降低的趋势,这说明,地埋管换热器的运行会使土壤温度有一定程度的降低。

4 结论

1) 地埋管换热器的名义取热量随着钻井深度、循环液流量及大地热流的增大而逐渐增大。钻井深度增大意味着工程项目的初投资增加,应结合经济成本考虑钻井深度。循环液流量的增加对水泵的要求提高,且名义取热量随流量的增大幅度越来越小,应根据不同项目设定合理的流量值。大地热流的增大可以使名义取热量呈现明显的增大趋势,说明当地下介质的导热系数不发生变化时,大地热流越大,地下介质的温度梯度越大,地埋管换热器可以从周围土壤介质获得更多的热量,有利于地埋管换热器的运行。

2) 随着运行时间的增加,循环液进出口温度

逐年缓慢下降,但在第 5 年仍然可以维持在 60 °C 左右,这说明地埋管换热器仍然能够维持良好的取热能力。

3) 地埋管换热器运行 10 a 后,随着深度的增加,热影响半径先增大后减小,这可能是由于随着深度的增大,地埋管换热器中的循环液与地下介质之间的换热密度增大,土壤温度受影响的范围也随之增大;而在钻孔的底部,由于循环液已经到达了地埋管换热器的边界处,与土壤介质之间的换热程度减弱,对土壤温度的影响范围也随之减小。

4) 地埋管换热器钻孔壁的温度随着深度的增大而升高,随着时间的增长而降低,这是因为当深度越大时,土壤温度越高;而随着地埋管换热器运行时间的增长,周围土壤的温度也会受到一定程度的影响而有所降低。

参考文献:

- [1] 高秀芝,王泮浩,戢坤池,等. 热泵供暖技术发展现状 & 展望[J]. 制冷与空调,2019,19(5):71-78,83
- [2] 刁乃仁,方肇洪. 地埋管地源热泵技术[M]. 北京:高等教育出版社,2006:2-3
- [3] 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
- [4] 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,2019:30
- [5] 谢洋洋. 吉林松原中深层地热供暖潜力及模型研究[D]. 长春:吉林大学,2019:27-28
- [6] 方亮. 地源热泵系统中深层地埋管换热器的传热分析及其应用[D]. 济南:山东建筑大学,2014:47-48
- [7] 邵珠坤. 深孔套管式地埋管换热器传热数值分析及其应用[D]. 济南:山东建筑大学,2018:30
- [8] 王德敬,胡松涛,高志友,等. 中深层套管式地埋管换热器性能的参数分析[J]. 区域供热,2018,37(3):1-7
- [9] 田禹. 山东及周边邻省大地热流值特征研究——热流值与计算段深度关系分析[J]. 国土与自然资源研究,2017,39(1):74-76
- [10] 杜甜甜,满意,姜国心,等. 中深层地埋管换热器最佳钻孔间距的模拟研究[J]. 煤气与热力,2019,39(11):21-24,42

更正

本刊 2021 年第 5 期第 89 页上图的图题应为“图 2 封闭楼梯间自然排烟做法二”,下图的图题应为“图 1 封闭楼梯间自然排烟做法一”。

特此更正并向指正的读者表示感谢。

(本刊)