



地下水渗流作用下埋管间歇散热特性

张琳琳^{1a}, 赵蕾^{1a}, 杨柳^{1b}, 胡松涛^{1a,2}

(1. 西安建筑科技大学 a. 环境与市政工程学院, b. 建筑学院, 西安 710055;

2. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 山东 青岛 266033)

摘要:为了探求地下水渗流对埋管换热器间歇运行性能所产生的影响,基于移动的有限长线热理论模型解析解,利用 MATLAB 软件编程计算,分析渗流对单钻孔埋管换热器的影响。同时对比分析了连续和间歇运行情况下其周围土壤的温度响应特征和过余温度场分布特点。研究表明:埋管周围土壤的温度变化是由热流密度、土壤本身的热物性和实际渗流速度耦合作用影响的,而在间歇运行下其因素影响更加明显。

关键词:地下水渗流;移动线热源模型;土壤温度响应;间歇运行

中图分类号:TK172;TK529 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)06-0134-07

Temperature responsive characteristics of soil to intermittent heat emission of a single heat exchanger with groundwater advection

Zhang Linlin^{1a}, Zhao Lei^{1a}, Yang Liu^{1b}, Hu Songtao^{1a,2}

(1a. School of Environmental and Municipal Engineering; 1b. School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China; 2. School of Environmental and Municipal Engineering,

Qingdao Technological University, Qingdao 266033, Shandong, P. R. China)

Abstract: In order to estimate the impact of groundwater advection on the performance of borehole heat exchangers under the intermittent operational mode, the solution of soil temperature response were programmed on the basis of the moving line heat source model and superposition principle by using MATLAB. The heat transfer processes of single borehole in the soil under the intermittent operational and continuous operational modes under the influence of groundwater advection were analyzed. Results show that the temperature change in the soil around borehole is influenced by the coupling of pipe heat flux, the soil thermal physical properties and the real advection velocity and especially under the intermittent operation, the effect was significant.

Key words: groundwater advection; moving line heat source model; soil temperature response; intermittent operation

因高效、节能、环保,运行费用低,土壤源热泵作为空调的冷热源而得到了广泛的应用。它是一种可

再生能源应用技术,有助于减少系统运行过程中的 CO₂ 排放量^[1]。但是,其节能效果与埋管换热器的

收稿日期:2015-06-10

基金项目:陕西省重点科技创新团队项目(2012KTC-11)

作者简介:张琳琳(1988-),女,博士生,主要从事土壤源热泵传热模型优化研究,(E-mail)zhangll226@163.com。

赵蕾(通信作者),女,教授,博士,(E-mail)leizhao0308@hotmail.com。

Received: 2015-06-10

Foundation item: The Key Scientific and Technological Innovation Team Project in Shaanxi Province(No. 2012KTC-11)

Author brief: Zhang Linlin (1988-), PhD candidate, main research interest: optimization of the ground source heat pump heat transfer model, (E-mail)zhangll226@163.com.

Zhao Lei (corresponding author), professor, PhD, (E-mail)leizhao0308@hotmail.com.

换热性能密切相关,而换热性能又取决于埋管换热器周围浅层土壤的水文地质条件,即其系统的运行性能与埋管周围岩土的热物性密不可分。

此外,地下水渗流也会影响埋管换热器的换热性能。Chiasson等^[2]通过有限差分法计算并分析了地下水流动对垂直埋管换热器性能的影响,指出若忽略地下水在土壤中迁移的影响则会导致其埋管设计偏大,使初投资增加。范蕊等^[3-4]采用整体求解方法对管内流体、地下埋管换热器及周围土壤的温度响应进行了数值求解,分析表明,地下水的流动对土壤初始温度场影响较为明显,且渗流速度越高影响越大,建议地下埋管应尽量选择埋设在地下水流速较大的区域。另外,关于地下水流动对于热响应实验的影响的研究也有所开展^[5-7],研究表明地下水渗流直接影响了埋管换热器与周围土壤的热量传递效率,对钻孔内热阻及土壤的综合导热系数的估计也有一定的影响,从而会影响对热泵系统的运行特性及系统的初投资的有效评估。可见,探求地下水渗流对埋管换热器传热性能的影响规律对于准确设计埋管换热器有重要的意义。

实际工程中热泵系统的运行时间由建筑物的使用时间决定,并非连续运行。热泵系统间歇运行有助于土壤温度的恢复和机组对地热的高效利用。高青等^[8]曾分别对土壤源热泵系统采用两口100、200 m深的竖井进行了自然状况下土壤初始温度分布、连续运行地温变化规律以及间歇性地温变化规律的试验研究,着重分析了间歇运行时的地温变化趋势,提出了可控性间歇性技术,间歇运行过程可提高或降低平衡稳定温度,提高机组运行效率。尚研等^[9]进行了热泵间歇运行试验,测试分析了热泵间歇运行过程中地温变化规律及其对换热效率和机组性能的影响,并对埋管与周围土壤的热湿耦合传递过程进行了数值模拟,分析了土壤物性和环境因素对地温恢复过程的影响,表明热泵可控间歇运行策略对于改善地下传热,提高热泵系统性能具有重要作用。

对于考虑地下水渗流作用下埋管间歇散热所引起的土壤温度响应还需要进一步的确定各影响的因素的影响作用。本文拟利用可考虑地下水渗流作用的移动有限长线热源模型对单孔竖井埋管换热器连续或间歇散热作用下的土壤温度响应和恢复特性加以深入的分析。

1 埋管换热器传热模型

1.1 移动有限长线源模型

因垂直埋管换热器钻井的直径远小于其深度,但深度也有限。为综合考虑地表温度以及地下水渗流作用的影响,可将其简化为半无限大介质中的线热源传热问题,基于以下假设:

- 1) 视土壤为各向同性的半无限大多孔介质,且物性不随温度的变化而变化。
- 2) 视土壤表面温度恒定为其初始温度值 T_0 , 忽略垂直地温梯度的影响;
- 3) 线热源的热流量为常数,即定热流。
- 4) 忽略地下水渗流速度沿埋管轴向的变化,视其为一维的均匀渗流。

引入当量渗流速度 $U = \frac{u\rho_w c_w}{\rho c}$ ^[10], 建立移动有限长线热源(MFLS)模型,即竖井中埋管与周围土壤的动态传热问题可描述为

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \frac{U}{a} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

其初始条件及边界条件为

$$\left. \begin{array}{l} \tau \geq 0, z = 0; T = T_0 \\ \tau \geq 0, 0 < r < \infty; T = T_0 \\ \tau > 0, r \rightarrow \infty; T = T_0 \\ \tau > 0, r' \rightarrow 0; -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} 2\pi r = q_l \end{array} \right\} \quad (2)$$

式中: $r' = \sqrt{x^2 + y^2}$, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + (z-h)^2}$ 。 U 为当量渗流速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; u 为渗流速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; $\rho_w c_w$ 为水的体积比热容, $\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$; ρc 为土壤的体积比热容, $\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$; a 为热扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; λ 为土壤导热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; q_l 为热源强度, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$; r 为径向长度, m 。

采用格林函数法和虚拟热源法,得到埋管散热所引起土壤的瞬变过余温度场为^[10-11]

$$\Delta T(x, y, z, r) = \frac{q_l}{2\pi\lambda} \exp\left[\frac{U \cdot x}{2a}\right] \times \left[\int_0^H f(x, y, z, \tau) dh - \int_{-H}^0 f(x, y, z, \tau) dh \right] \quad (3)$$

其中,

$$f(x, y, z, \tau) = \frac{1}{4r} \left[\exp\left(-\frac{U \cdot r}{2a}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{r - U \cdot \tau}{2\sqrt{a\tau}}\right) + \exp\left(\frac{U \cdot r}{2a}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{r + U \cdot \tau}{2\sqrt{a\tau}}\right) \right] \quad (4)$$

式中: H 为钻孔深度, m 。

当 $\tau \rightarrow \infty$ 时, 过余温度场达到稳定,

$$\Delta T(x, y, z) = \frac{q_l}{4\pi\lambda} \exp\left[\frac{U \cdot x}{2a}\right] \cdot \left[\int_0^H \frac{1}{r} \exp\left[-\frac{U \cdot x}{2a}\right] dh - \int_{-H}^0 \frac{1}{r} \exp\left[-\frac{U \cdot x}{2a}\right] dh \right] \quad (5)$$

1.2 模型验证

一深 60 m、单位井深热流量为 $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ 的单钻孔埋管在砂砾层中散热, 砂砾的导热系数为 $0.98 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 热扩散系数为 $0.7 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 体积比热容为 $1.4 \times 10^{-6} \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$, 孔隙率为 0.31。其中地下水渗流速度为 $3 \times 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 即当量渗流速度为 $9 \times 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。所引起钻孔中心水平面上土壤的稳定过余温度场的 MFLS 模型解如图 1 所示。

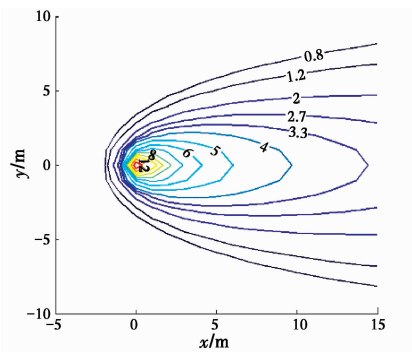


图 1 钻孔中心平面上过余温度

Fig. 1 Temperature change in the middle plane of borehole

选取一 $20 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 60 \text{ m}$ 的地块, 物性和地下水渗流速度设置如上所述的数值, 对定热流热源在其中的传热过程进行三维数值仿真, 所生成的 144 950 个非结构化网格示意如图 2 所示。选用 Realizable $k-\epsilon$ 模型, 并采用 SIMPLE 算法进行稳态求解。

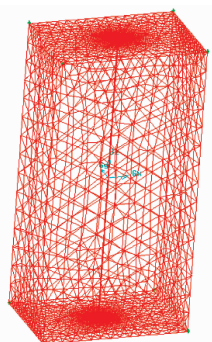


图 2 网格划分示意图

Fig. 2 Schematic of the grid meshing

定的温度分布云图以及钻孔中轴面上过余温度的数值解和解析解对比曲线。在离钻孔中心较近的地方, 两者之间出现了较大的偏差, 但是由于解析解模型简化钻井为线热源, 因此, 在 x 取值较小的情况下, 解析解求解是趋于无穷大的, 与实际情况不符。同时, 利用数值模拟和解析解模型均存在相关的简化和假设。因此, 排除离钻孔较近的点的值, 其余位置处的过余温度值均有较好的吻合度, 且两者的偏差在允许误差范围之内。则对于该解析解模型的正确性得到了很好的印证, 其程序可以直接用于分析和预测不同情况下埋管散热的土壤温度场情况。

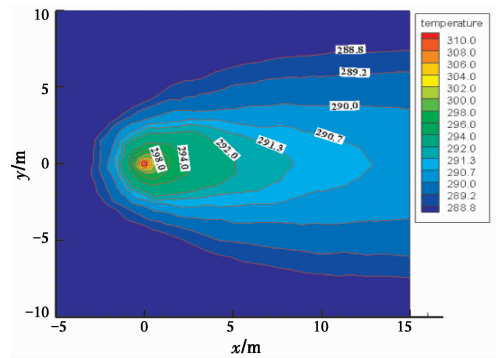
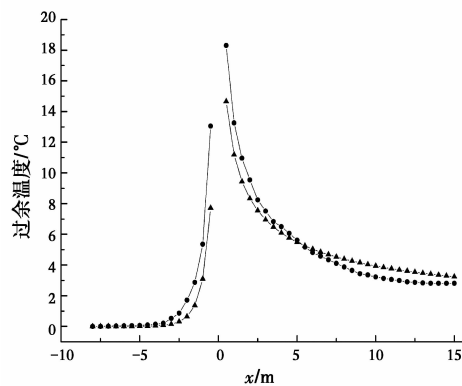


图 3 钻孔中心平面上数值过余温度云图

Fig. 3 Temperature cloud numerically in the middle plane of borehole



注: —▲— 解析解(MFLS) —●— 数值解

图 4 钻孔中心水平轴沿 x 轴方向上的过余温度值对比

Fig. 4 Comparison of temperature change along x -axis direction in the middle plane of borehole

2 地下水渗流对埋管传热的影响

以砂砾层中的埋管散热为例, 基于 MFLS 模型, 计算和分析地下水渗流对钻孔散热所引起的土壤过余温度场的影响规律。

图 3 和图 4 分别为钻孔中心水平面上土壤中稳

2.1 有无渗流单孔竖井连续放热的土壤温度响应对比

图5为无渗流和渗流当量速度为 $U=9 \times 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, $z=30 \text{ m}$ 水平面上离钻孔中心上、下游 0.5 m 处土壤的过余温度动态响应曲线。可见,无渗流时,其距钻孔中心上、下游 0.5 m 处的土壤温度变化是一致的,即土壤中的过余温度场沿钻孔中心对称分布;而在渗流作用下,上下游距钻孔中心 0.5 m 处土壤的温度变化明显不一致,下游处的温升明显高于上游相同距离处。这与文献^[12-14]关于地下水渗流影响下的温度等值线将明显沿地下水渗流方向偏移的结论是一致的。同时,渗流的影响导致上、下游的热作用区域与无渗流时发生了改变,即地下水渗流的影响导致下游的热作用区域增大,而上游的热作用区域缩小。也就是说,地下水渗流对与其逆向的传热有抑制作用,而对沿着渗流方向的传热有促进作用。因此,有无渗流对埋管周围土壤温度分布有很大的影响。

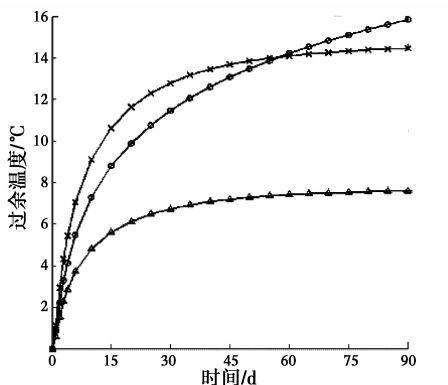


图5 有无渗流下,钻孔中心上下游 0.5 m 处土壤过余温度响应曲线

Fig. 5 Soil temperature response in the upstream and downstream of 0.5 m without groundwater advection

2.2 不同渗流速度下单孔竖井连续放热的土壤热作用距离

图6为沿 x 方向不同当量渗流速度时钻孔中心水平面埋管连续散热情况下对上、下游的热作用距离随时间变化的曲线。不同渗流速度下的热作用距离是不一样的,当量渗流速度为 $5 \times 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,上、下游的热作用距离几乎相等,且与无渗流时的热作用半径相等;当量渗流速度为 $9 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,上、下游的热作用距离也几乎相等,但略大于无渗流时的热作用半径;当量渗流速度大于 $9 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot$

s^{-1} 时,对下游较对上游的热作用距离大,下游的热作用距离大于没有渗流时的热作用半径,而对上游的热作用距离则小于无渗流时的情形。则说明渗流不仅影响埋管周围热量的传递,而且随着渗流速度的增大,沿着渗流方向的影响范围就会加大,越容易把埋管散出的热量随着渗流的流动携带出去。因此地下水渗流有利于埋管周围土壤的散热,缓解热量在埋管周围的堆积。

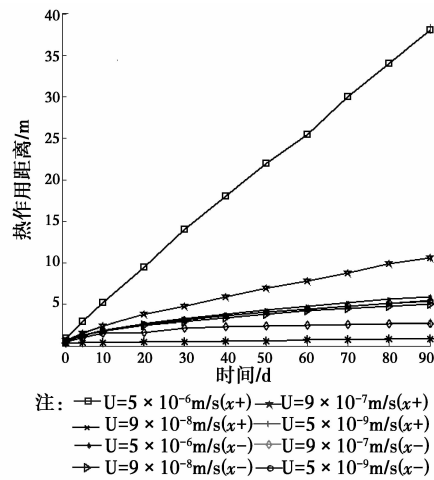


图6 不同渗流速度下,钻孔连续散热对其上下游影响的热作用距离

Fig. 6 Thermal effect distance of borehole with the different groundwater advection velocities

可见,地下水渗流有利于埋管散热。当渗流速度较大时,其渗流的影响就会使纯导热下的埋管换热与实际存在较大的偏差,而忽略其影响使结果失真而导致埋管换热器设计的偏差,会使系统的设计初投资增加。因此,当地下水渗流速度较高时,建立渗流作用下的埋管的传热分析是十分必要的。

3 单钻孔埋管间歇运行下的温度响应

通常,埋管与土壤间的热交换根据建筑空调需要多为间歇的,且有周期性。下面对地下水渗流作用下单孔埋管换热器恒热流连续散热和以恒定阶跃热流间歇散热所引起的土壤的温度响应加以对比。全天24小时内埋管的散热和停歇时间比为 $8:16$,单位井深热流量在散热时段为 $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$,停歇时段为 $-1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$,仍以砂砾层为例加以讨论。

3.1 渗流速度对单竖井间歇和连续散热的温度响应对比

图7给出了地下水当量渗流速度分别为 9×10^{-8} 、 9×10^{-7} 、 $9 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 0 时单竖井埋管间

歇和连续散热情况下土壤中 $x=0.5\text{ m}$ 、 $y=0\text{ m}$ 、 $z=30\text{ m}$ 处的动态温度响应曲线。可见,间歇散热时土壤温度总体也随着时间的推移而升高,但每个间歇时段内土壤温度都有一定的恢复。例如,埋管在当量渗流速度为 $9\times 10^{-7}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的土壤中连续散热 5 d 后, $(0.5, 0, 30)$ 处的温度升高了 $6.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而间歇散热则仅升高 $2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这表明间歇散热有利于地温恢复而使土壤升温速率减缓,此外,对比有无地下水渗流时埋管间歇散热所引起的土壤温度响应,地下水渗流有助于增强热量在土壤中的扩散能力,在埋管间歇散热最初的 50 d 内,有渗流时 $(0.5, 0, 30)$ 处土壤的温升比无渗流作用时明显,这是因为热量会随着渗流的流动在短时间内迁移到该处,而随着时间的推移,渗流作用下热量会较快地被带到更远处。而且,地下水渗流也有利于间歇时段地温更有效地恢复和热量更好地扩散,因此,随着时间的推移,该处的温度变化会更早地趋于一个较小的稳定值。也就是说,地下水渗流有助于提高埋管间歇散热模式下土壤的温度恢复能力。有助于增强埋管换热器的长期换热性能。

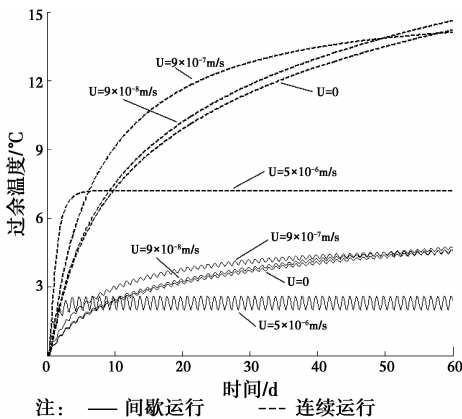


图 7 不同渗流速度作用下埋管间歇与连续散热时土壤的温度响应曲线

Fig. 7 Soil temperature responses to intermittent and continuous heat rejection in the soil with different groundwater advection velocities

渗流作用使土壤温度场达到稳定所需的时间大大缩短,且渗流速度越大,达到稳定所需要的时间越

短,稳定后的温升值也越小。间歇时段土壤温度的恢复幅度却越大。可见,当地下水渗流速度较大时,如不考虑其对埋管间歇散热所引起的土壤温度响应和恢复特性的影响,则关于埋管换热能力的计算就会产生很大的偏差。

3.2 热流密度对单竖井间歇和连续散热的温度响应对比

图 8 给出了不同热流密度下,埋管连续散热和间歇散热下的 $x=0.5\text{ m}$ 、 $y=0\text{ m}$ 、 $z=30\text{ m}$ 处土壤温度动态响应。可见,热流密度越大,土壤达到稳定所需要的时间就越长,稳定后的温升值也越大。然而在散热初始阶段,不同热流密度所引起的土壤温升变化差别很小,随着时间的推移,土壤温升差别增大。当散热时间为 20 d 时,单位长度热流密度为 50、60、70 W 时,间歇运行下的过剩温度分别比连续运行下过剩温度值低 10.8、9.3、7.5 $^{\circ}\text{C}$,即随着埋管散热的热流密度增大,其间歇运行的效果就越明显。

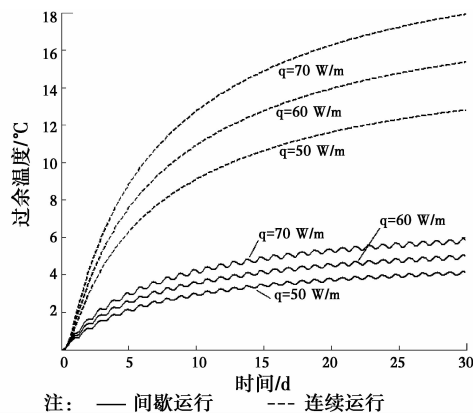


图 8 热流密度对单竖井间歇和连续散热的温度响应对比

Fig. 8 Soil temperature responses to intermittent and continuous heat rejection from a single borehole in the soil with different heat flux

3.3 地质结构对单竖井间歇散热的温度响应对比

为进一步考察地下水渗流作用下埋管在不同地质结构的土壤传热时的温度响应和恢复特性的差别,分别对砂砾、粘土、砂土和砂岩中埋管散热的情况进行分析,当量渗流速度取为 $9\times 10^{-7}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。除砂砾外的 3 种土壤的物性参数见表 1。

表 1 典型土壤的热物性参数表

Table 1 Typical soils thermal physical parameters

名称	孔隙率/%	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	导热系/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	热扩散系数/($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	实际渗流速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
粘土	47	1 500	2 200	0.9	2.72×10^{-7}	7.07×10^{-7}
砂土	20	2 000	700	1.9	1.35×10^{-6}	3×10^{-7}
砂岩	10	2 500	1 430	3.0	8.39×10^{-7}	7.67×10^{-7}

图9给出了渗流影响下的不同地质结构的土壤中单竖井埋管换热器间歇散热情况下 $x=0.5\text{ m}$ 、 $y=0\text{ m}$ 、 $z=30\text{ m}$ 处的动态温度响应曲线。可见,达到稳定后,砂砾中的温升最大,砂土的次之,砂岩的温升最小,达到稳定所需要的时间也较短。这是由于砂岩的导热系数较大,且渗流的实际流速也较大的缘故。但是,在埋管散热的最初阶段,砂土中的温升最大,砂砾中和砂岩中的分别次之,而粘土的温升最小。这是由于砂土的导热系数不是很小,而其热扩散系数又较大,且其中渗流的实际流速很小,热传导较热对流对热量在土壤中迁移的影响作用强,所以埋管散出的热量会在很短时间内迅速地传播到 $(0.5, 0, 30)$ 处。而砂岩和粘土中的渗流实际流速较大,热量能迅速地随渗流的迁移而被带走,因此最初砂土中该点的温度上升最为明显,而其余地质结构的土壤中的温度变化量相对较小。但是,由于热传导相对于地下水渗流对热量在土壤中迁移的影响作用还是占主导地位。因此,随着时间的推移,导热系数较大且热扩散系数较小的砂岩中热量会较多地蓄积,但因其容积比热容也很大,故该处的温度升高却较小。而砂砾的导热系数很小,热扩散系数也不是很大,就导致热量在该点蓄积使该处的温度升高更为明显,并且趋于稳定所需要的时间较长。

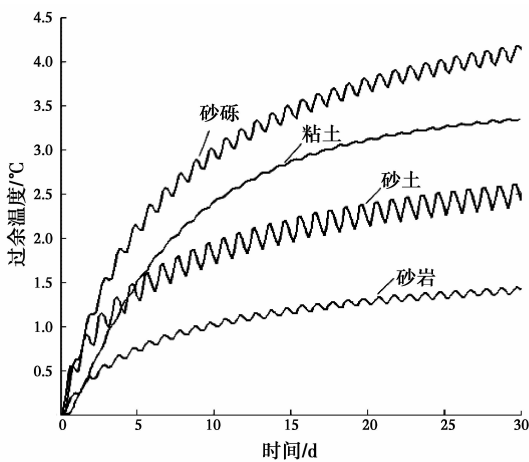


图9 不同土壤中埋管间歇散热的温度响应

Fig. 9 Soil temperature responses to intermittent heat rejection in different soils

对于不同地质结构的土壤中埋管间歇散热中停运期间土壤的温度恢复特性有显著的差别。在埋管间歇散热时段内,砂土的温度恢复幅度最大,砂砾的次之,而后为砂岩,而粘土的最小。这是由于砂土的热扩散系数最大,且导热系数也不是太小,则其土壤

中热量扩散的能力较大,达到与周围温度一致化的速度越快,因此在间歇散热的停运期间能较快的使其温度恢复。而粘土在间歇散热时的温度恢复特性最差,是由于其导热系数以及热扩散系数最小而导致其传热特性较其它土壤较差。因此土壤的传热性能越好,则在间歇散热时温度恢复幅度越大,反之越小。

综上所述,埋管周围土壤的温度变化是由土壤本身的热物性和实际渗流速度耦合作用影响的,而在间歇运行下其因素影响更加明显。在渗流的作用下,能有效的缓解土壤中热量的堆积,大大加快土壤稳定的时间和土壤恢复的能力。

4 结 论

基于移动的有限长线热源模型解析解,对埋管散热其周围土壤温度响应进行编程,通过数值仿真验证其解析解模型程序的正确性,进而可以利用解析解快速的分析渗流对埋管连续和间歇散热情况下土壤的温度分布影响。避免了数值模拟下所需要的时间和计算机性能的要求。

1) 渗流有利于土壤的散热,且渗流速度越大,土壤的热恢复性越好,土壤趋于稳定的时间越短。当埋管所处土壤渗流速度较大时则应考虑渗流的影响,否则会使设计跟实际存在偏差而导致初投资增加。

2) 埋管间歇散热时周围土壤温度的变化明显小于连续散热。土壤温度在其停运时段内有一定程度的恢复,但是土壤温度总体仍呈上升趋势。

3) 土壤的物性对间歇散热中停运期间土壤的温度恢复特征有很显著的影响。即土壤的传热性能越好,则在间歇散热时温度恢复幅度越大,反之越小。

综上所述,埋管周围土壤的温度变化是由埋管散热的热流密度、土壤本身的热物性和实际渗流速度耦合作用影响的,而在间歇运行下其因素影响更加明显。在渗流的作用下,能有效的缓解土壤中热量的堆积,大大加快土壤稳定的时间和土壤恢复的能力。因此,在设计埋管换热器系统时,应区别对待土壤中有无渗流。采取间歇运行模式,能够保证埋管地源热泵系统的高效运行。

参考文献:

- [1] Yang W, Zhou J, Xu W, et al. Current status of

- ground-source heat pumps in China [J]. Energy Policy, 2010, 38:323-332.
- [2] Chiasson A D, Rees S J, Spitler J D. A preliminary assessment of the effects of ground-water flow on closed-loop ground-source heat pumps systems [J]. ASHRAE Trans, 2000, 106:380-393.
- [3] 范蕊,马最良,姚杨,等. 地下水流动对地下埋管换热器影响的实验研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(8): 874-880.
Fan R, Ma Z L, Yao Y, et al. Experimental research on influence of groundwater advection on performance of GHE [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2007, 28(8): 1155-1161. (in Chinese)
- [4] 范蕊,马最良,热渗耦合作用下地下埋管换热器的传热分析[J]. 暖通空调, 2006, 36(2):6-10, 82.
Fan R, Ma Z L. Heat transfer analysis of underground heat exchangers under coupled thermal conduction and groundwater advection conditions [J]. Journal of HV & AC, 2006, 36(2):6-10, 82. (in Chinese)
- [5] Signorelli S, Bassetti S, Pahud D, et al. Numerical evaluation of thermal response test [J]. Geothermics, 2007, 36:141-166.
- [6] Raymond J, Therrien R, Gosselin L, et al. Numerical analysis of thermal response tests with a groundwater flow and heat transfer model [J]. Renewable Energy, 2011, 36:315-324.
- [7] Wagner V, Blum P, Kübert M, et al. Analytical approach to groundwater influenced thermal response tests of grouted borehole heat exchangers [J]. Geothermics, 2013, 46:22-31.
- [8] 高青,乔广,于鸣,等. 地温规律及其可恢复特性增强传热研究[J]. 制冷学报, 2003, 24(3):38-41.
Gao Q, Qiao G, Yu M, et al. Ground temperature property and restorative characteristics to enhance heat transfer in GSHP [J]. Journal of Refrigeration, 2003(3):38-41. (in Chinese)
- [9] 尚妍,李素芬,代兰花. 地源热泵间歇运行地温恢复变化特性及恢复特性研究[J]. 大连理工大学学报, 2012, 52(3), 350-356.
Shang Y, Li S F, Dai L H. Study of characteristics of soil temperature variation and recovery under intermittent operation of ground-source heat pump [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2012, 52(3):350-356. (in Chinese)
- [10] Molina-Giraldo N, Blum P, Zhu K, et al. A moving finite line source model to simulate borehole heat exchangers with groundwater advection [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2011, 50: 2506-2531.
- [11] 刁乃仁,李琴云,方肇洪. 有渗流时地热换热器温度响应的解析解[J]. 山东建筑工程学院学报, 2003, 18(3): 1-5.
Diao N R, Li Q Y, Fang Z H. An analytical solution of the temperature response in geothermal heat exchangers with groundwater advection [J]. Journal of Shandong University of Architecture and Engineering, 2003, 18(3):1-5. (in Chinese)
- [12] Angelotti A, Alberti L, Licata I L, et al. Energy performance and thermal impact of a borehole heat exchanger in a sandy aquifer: Influence of the groundwater velocity [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 77:700-708.
- [13] 张文科,杨洪兴,孙亮亮,等. 地下水渗流条件下埋管换热器的传热模型[J]. 暖通空调, 2012, 42(7): 129-134.
Zhang W K, Yang H X, Sun L L, et al. Heat transfer model of ground heat exchangers with groundwater seepage [J]. Journal of HV&AC, 2012, 42(7): 129-134. (in Chinese)
- [14] 蔡晶晶,陈汝东,王健. 地下水渗流对埋管传热影响的理论分析[J]. 流体机械, 2009, 37(12):62-67.
Cai J J, Chen R D, Wang J. Analysis of effects of groundwater advection on geothermal heat exchanger [J]. Fluid Machinery, 2009, 37(12): 62-67. (in Chinese)

(编辑 胡 玲)