

基于显热容法的地源热泵地埋管换热器周围土壤冻结特性研究

扬州大学 杨卫波[☆]

东南大学 施明恒

扬州大学 刘光远

东南大学 陈振乾

摘要 为了探讨寒冷地区土壤冻结对地源热泵地埋管换热器换热特性的影响,建立了考虑土壤冻结的地埋管周围土壤传热模型,并利用显热容法对冻结相变问题进行了处理。基于模型的数值求解探讨了土壤含水率、原始温度、热扩散率及 Stefan 数对埋管周围土壤温度分布及冻结速度的影响。结果显示,与未考虑土壤冻结相比,计算出的地埋管周围土壤温度高,传热热阻小,从而可以减小埋管的设计长度,降低系统初投资;提高土壤含水率有利于地源热泵的设计与运行;减小热扩散率和 Stefan 数可以有效地降低土壤的冻结速度。

关键词 地源热泵 地埋管换热器 土壤冻结 显热容法

Study on freezing characteristics of soil around ground heat exchangers of ground-source heat pumps based on apparent heat capacity method

By Yang Wei-bo[☆], Shi Mingheng, Liu Guangyuan and Chen Zhenqian

Abstract In order to search the effect of soil freezing on heat exchange characteristics of ground heat exchangers in cold zone, develops a heat transfer model of soil around ground heat exchangers taking soil freezing into consideration, and solves the freezing phase change problem by apparent heat capacity method. Based on the numerical solution of the model, discusses the influences of the water content in soil, soil initial temperature, soil thermal diffusivity and Stefan number on soil temperature distribution and freezing velocity. The results indicate that the soil temperature is higher compared with unfreezing conditions and thus the heat transfer resistance is smaller, which contributes to the decrease of design length of the buried coil and system initial cost. It also proves that the increase of water content in soil is favorable to the design and operation of ground-source heat pumps. Moreover, the decrease of soil thermal diffusivity and Stefan number can stay effectively the soil freezing velocity.

Keywords ground-source heat pump, ground heat exchanger, soil freezing, apparent heat capacity method

[☆] Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu Province, China

①

0 引言

地源热泵(ground-source heat pump, GSHP)系统相比传统空调系统因其良好的节能性、运行的稳定性及环保性等优点而得到较好的推广与应用。地源热泵研究的核心课题之一就是要解决地埋管换热器与周围土壤间的换热问题。在冬季供热工

①[☆] 杨卫波,男,1975年6月生,博士,讲师
225009 江苏省扬州市扬州大学能源与动力工程学院建筑环境与设备工程教研室
(0) 13665227437 (0514) 87017686
E-mail: yangwb2004@163.com
收稿日期:2007-05-28
修回日期:2008-02-23

况下,特别是在北方寒冷地区,当埋管从地下连续取热时,地源热泵蒸发器出口(埋管进口)流体温度会低于 0°C ,从而导致埋管周围含湿土壤有可能冻结,这在一定程度上直接影响了埋管的换热特性。由于地埋管与周围土壤间传热及相变传热机理的复杂性,关于地埋管周围土壤的冻结及其对埋管换热特性影响的研究很少有报道。

土壤的冻结过程是一个复杂的含湿多孔介质的非稳态相变传热过程,由于土壤水是含有各种杂质的非纯净物质,从而使得土壤水的相变过程不是严格地在某一温度下发生,而是在一个小的温度范围内完成。相变问题又称为 Stefan 问题,其特点是计算区域内存在一个位置随时间移动的两相界面,在该界面上放出或吸收潜热,因此亦称为“移动边界问题”。此类问题除极少数简单情况能进行分析与近似法求解外,主要依靠数值解法。迄今为止,研究者已提出了多种求解相变问题的数值计算方法,如变时间步长法^[1]、有限差分-有限元法^[2]、焓法^[3]和显热容法^[4-7]等。其中以显热容法较为简单实用、易于进行多维推广,并特别适用于求解发生在某一温度范围的相变传热问题^[8]。文献[5]比较了显热容法与精确解和有限元方法,结果表明显热容法的计算精度令人满意,在处理多维问题时优势明显。文献[9]对相变潜热的不同分布情况进行了研究,分析表明显热容法是处理较复杂相变问题的有效方法。文献[10]对显热容法和焓法进行了对比研究,表明显热容法更为简便。

基于显热容法思想,本文重点对地源热泵地埋管换热器周围土壤的冻结特性及其对埋管换热的影响进行研究,探讨土壤含水率、土壤原始温度、土壤热扩散率及 Stefan 数对地埋管周围土壤温度分布及土壤冻结特性的影响。

1 计算模型

1.1 物理模型

由于地埋管周围土壤的冻结是一个极其复杂的相变传热过程,为了简化问题以使数学研究成为可能,需作以下近似简化处理:1) 土壤为各向同性、均质、孔隙分布均匀的刚性含湿多孔介质体,且孔隙中充满水分;2) 土壤初始温度均匀一致,且不考虑深度方向的传热;3) 水结冰前后密度保持不变,即忽略水在相变时的容积变化;4) 忽略土壤热

湿迁移耦合作用及自然对流效应的影响;5) 冻结的和未冻结的土壤热物性参数均为常数;6) 土壤的冻结相变过程发生在一个小的温度范围内,且认为在土壤相变中存在三个区域:冻结区、未冻结区及介于两区之间的模糊两相区;7) 假设钻孔中回填材料的热物性参数与周围土壤保持一致,因为钻孔的直径与所讨论的传热区域相比是个小量;8) 认为地埋管是一条线热汇/源,实际工程中,这种假设适用于数小时至数月的运行时间范围。

根据以上简化假设,可将地埋管与周围土壤的换热过程描述为:一条线热汇(地埋管)埋设于初始温度均匀为 t_0 的无限大空间(土壤)中,土壤的含水率为 ϵ 。自 $\tau=0$ 时刻起,该线热汇开始从空间吸热,其单位长度热流强度为 q 。随着吸热过程的进行,埋管周围土壤的温度逐渐降低,并沿径向方向依次呈现出三个相区:冻结区、模糊两相区及未冻结区。如图 1 所示,图中下标 s 表示冻结, l 表示未冻结, m 表示模糊两相区; t_m 为冻结中心温度, Δt 为土壤冻结相变温度区间的一半; $S_1(\tau)$, $S_2(\tau)$ 及 $S_m(\tau)$ 分别为土壤完全冻结、开始冻结时及土壤处于相变温度区间中心温度时的锋面半径; r 为径向半径。

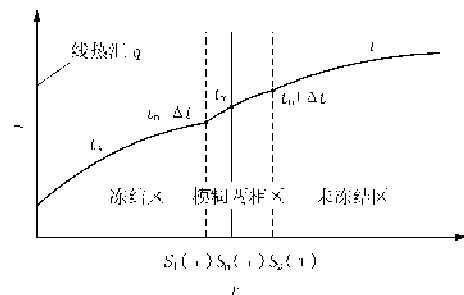


图 1 地埋管周围土壤冻结相变过程物理模型

1.2 数学模型

由以上物理模型可得如下各相区的控制方程。

冻结区

$$C_s \frac{\partial t_s}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_s r \frac{\partial t_s}{\partial r} \right) \quad 0 < r < S_1(\tau), \tau > 0 \quad (1)$$

$$-2\pi r \lambda_s \frac{\partial t_s}{\partial r} = q \quad r \rightarrow 0, \tau > 0 \quad (2)$$

未冻结区

$$C_l \frac{\partial t_l}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_l r \frac{\partial t_l}{\partial r} \right) \quad r > S_2(\tau), \tau > 0 \quad (3)$$

模糊两相区

$$C_m \frac{\partial z_m}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_m r \frac{\partial z_m}{\partial r} \right) + L \frac{df_s}{d\tau} \quad S_1(\tau) < r < S_2(\tau), \tau > 0 \quad (4)$$

相变界面

$$z_s(r, \tau) = z_m - \Delta z \quad r = S_1(\tau), \tau > 0 \quad (5)$$

$$z_i(r, \tau) = z_m + \Delta z \quad r = S_2(\tau), \tau > 0 \quad (6)$$

式(1)~(6)中 C_s, C_i, C_m 分别为冻结区、未冻结区及模糊两相区的土壤容积比热容, $J/(m^3 \cdot ^\circ C)$; $\lambda_s, \lambda_i, \lambda_m$ 分别为冻结区、未冻结区及模糊两相区的土壤导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; f_s 为冻结率; L 为单位容积土壤的相变潜热, J/m^3 。

分析可以看出,该导热问题较之一般的变系数导热问题要复杂得多,主要在于求解区域中存在着随时间移动的相变界面。为了处理这个问题,可以采用把它视为“单相”的非线性导热问题的处理方法——显热容法,其思想是:由于土壤的冻结相变不是严格地在某一特定的温度下发生,而是在一个小的温度范围内发生,因此可以把土壤中水的相变潜热看作是在这个小温度范围内有一个很大的显热容,显热容的大小由相变潜热和相变温度范围来

决定。这样就可以把上述分区描述的控制方程及界面守恒条件转化成在整个区域上适用的一个单相非线性瞬态导热问题,不需要跟踪两相界面,待求出温度场后,再根据温度确定相变界面的位置。

根据显热容法^[4-5],认为模糊两相区内导热系数随温度呈线性分布,热容量按平均法取值,且相变潜热不随温度变化(文献[9]研究表明用相变温度范围内的平均潜热代替实际相变潜热且视为常数是可行的),在发生相变的温度范围内构造等价比热容与等效导热系数函数,以代替模糊两相区控制方程式(4)右端第二项,只以温度为待求函数,则上述各相区控制方程可以统一表示为

$$C_v^* \frac{\partial z}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda^* r \frac{\partial z}{\partial r} \right) \quad (7)$$

其中

$$C_v^* = \begin{cases} C_s & z < z_m - \Delta z \\ \frac{\varepsilon L}{2\Delta z} + \frac{C_s + C_i}{2} & z_m - \Delta z \leq z \leq z_m + \Delta z \\ C_i & z > z_m + \Delta z \end{cases} \quad (8)$$

$$\lambda^* = \begin{cases} \lambda_s & z < z_m - \Delta z \\ \lambda_s + \frac{\lambda_i - \lambda_s}{2\Delta z} [z - (z_m - \Delta z)] & z_m - \Delta z \leq z \leq z_m + \Delta z \\ \lambda_i & z > z_m + \Delta z \end{cases} \quad (9)$$

式(7)~(9)中 C_v^* 为等效容积比热容, $J/(m^3 \cdot ^\circ C)$; λ^* 为等效导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$ 。

各热特性参数可确定如下^[11-13]:

冻结区

$$\left. \begin{aligned} \lambda_s &= \lambda_g(1 - \varepsilon) + \varepsilon \lambda_i \\ c_s &= c_g(1 - \varepsilon) + \varepsilon c_i \\ \rho_s &= \rho_g(1 - \varepsilon) + \varepsilon \rho_i \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

未冻结区

$$\left. \begin{aligned} \lambda_i &= \lambda_g(1 - \varepsilon) + \varepsilon \lambda_w \\ c_i &= c_g(1 - \varepsilon) + \varepsilon c_w \\ \rho_i &= \rho_g(1 - \varepsilon) + \varepsilon \rho_w \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式(10), (11)中 下标 g 表示干土壤, i 表示冻结冰, w 表示水; $c_s = C_s/\rho_s, c_g = C_g/\rho_g, c_i = C_i/\rho_i, c_w = C_w/\rho_w$, 其中 C 为容积比热容, ρ 为密度。

数学模型式(7)~(9)把有两个明显运动界面、三个不同区域的相变换热问题统一用一个数学模型

表示出来,最终转化成一个变物性的非稳态导热问题,可以非常方便地用普通的有限差分法求解,这是显热容法最突出的优点。但是需要指出的是,由于相变界面不可能始终位于离散化网格的节点上,因此必须根据相邻两个节点的温度值用插值法确定。

2 计算结果及讨论

由于控制微分方程中导热系数在相变区内是温度的函数,因此是一非线性问题,不能同线性方程那样采用叠加原理得到解析解,只能用数值解法。利用有限容积法^[13]对控制偏微分方程式(7)进行离散,采用 TDMA 算法对离散方程组进行求解,计算条件为 $\lambda_w = 0.56 W/(m \cdot ^\circ C)$, $\lambda_i = 2.24 W/(m \cdot ^\circ C)$, $\lambda_g = 2.0 W/(m \cdot ^\circ C)$, $c_w = 4.19 kJ/(kg \cdot ^\circ C)$, $c_i = 2.09 kJ/(kg \cdot ^\circ C)$, $c_g = 1.0 kJ/(kg \cdot ^\circ C)$, $\rho_w = 1000 kg/m^3$, $\rho_g = 1500 kg/m^3$, $L = 3.38 \times 10^5 kJ/m^3$, $z_m = 0 ^\circ C$, $\Delta z = 0.8 ^\circ C$, $q = 80 W/m$, 计算结果见图 2~7。

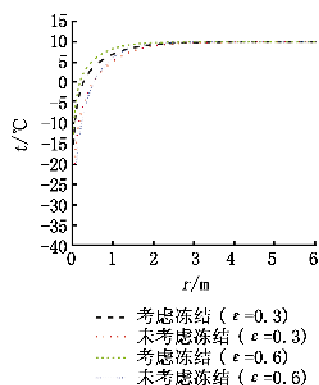


图2 考虑与未考虑土壤冻结时土壤温度分布的比较(运行 20 d, $t_0 = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$)

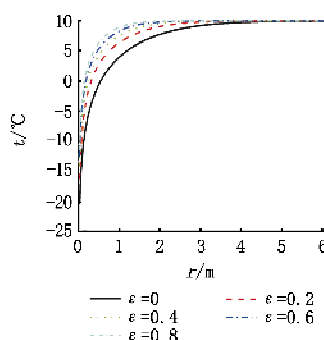


图3 土壤含水率对土壤温度分布的影响(运行 20 d, $t_0 = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$)

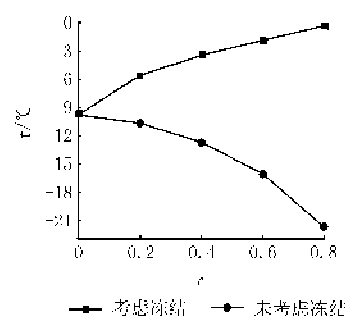


图4 $r=0.15\text{ m}$ 处考虑与未考虑冻结时土壤温度随含水率的变化(运行 20 d)

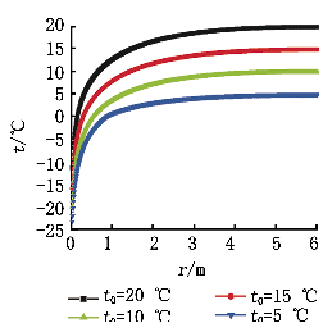


图5 土壤原始温度对温度分布及冻结区域的影响(运行 60 d, $\varepsilon=0.3$)

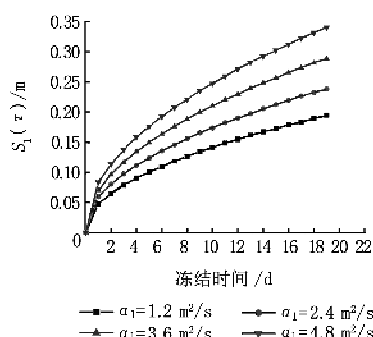


图6 热扩散率对冻结锋面半径的影响($\alpha_0 = 2\alpha_1$, $t_0 = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon=0.4$)

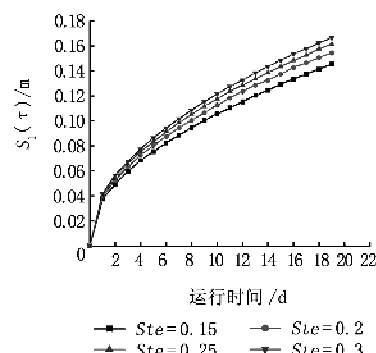


图7 Ste 对冻结锋面半径 $S_f(\tau)$ 的影响

2.1 土壤冻结与土壤含水率对土壤温度分布的影响

由图 2~4 可以看出,考虑冻结时计算得到的土壤温度要高于未考虑冻结时的温度,且随含水率的增加,考虑冻结时的土壤计算温度增大,与未考虑冻结的温差值也增大。如图 4 所示, $r=0.15\text{ m}$ 处,当 $\varepsilon=0$ 时两者一致,但随着 ε 的增大,两者计算温度变化趋势相反(考虑冻结时逐渐增大,而未考虑冻结时急剧降低),最终导致计算差值越来越大(如从 $\varepsilon=0.2$ 时的 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增加到 $\varepsilon=0.8$ 时的 $21.3\text{ }^{\circ}\text{C}$)。其原因主要是水分冻结时,有大量的潜热被释放出来,因此在吸收同等热量的情况下,土壤温度降低的幅度要小,而且随着含水率的增加,释放的潜热量也越多,温度降低幅度越小,埋管附近的土壤温度越高。因此,从土壤冻结导致温度升高可以看出土壤含水率的增加对地源热泵的设计及运行是有利的。如果设计时不考虑土壤中水分的冻结,则计算出的埋管周围土壤的温度与实际情况相差较大,且水分越多,差别越大。这在一定程度上直接影响地下回路中循环流体的选择。因

为循环工质的工作温度影响循环工质和防冻液类型的选择,也影响热泵的设计与选择,因此,设计时应适当考虑土壤中水分的冻结,否则地下回路中循环流体防冻液以及热泵的选择范围会大大减小。

从埋管设计的角度来看,当考虑土壤水分冻结时,计算出的埋管周围土壤温度会升高,则地埋管中流体的平均温度与远边界土壤原始温度之差就会减小,这意味着在埋管热流一定时远边界土壤至埋管流体间的传热热阻减小,从而导致设计的埋管长度可以减小。因此,如果不考虑土壤水分冻结,设计的埋管尺寸可能会大于实际需要,从而增加系统初投资。

2.2 土壤原始温度对土壤温度分布及冻结区域的影响

由图 5 可以看出,随着土壤原始温度的减小,埋管周围土壤温度降低,冻结区域(处于冰点以下的区域)增大。如图 5 所示,当 $t_0=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,在运行 60 d 后图中所示范围内土壤平衡温度几乎均处于冰点以上,冻结半径仅为 0.12 m ;而在 $t_0=5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,土壤平衡温度均处于冰点附近,且冻结半径增加到 1 m 。

而土壤冻结必然会对埋管换热特性产生很大的影响,这说明,对于寒冷及容易出现冻土地带的地区,在埋管设计时必须考虑土壤冻结的影响。

从另一个角度可以看出,土壤初始温度越高,在同样供热负荷情况下,地源热泵的运行性能越好;或在保持同样供热性能的条件下,设计的埋管换热器的规模可以减小,从而降低初投资。由此可得,土壤原始温度同其热特性参数一样,直接决定了地源热泵的运行特性,而这又取决于各地区的气候与地质情况,因此地源热泵的运行性能必然会因地而异。

2.3 热扩散率与 Stefan 数对土壤冻结锋面半径 $S_1(\tau)$ 的影响

分析图 6 可得,土壤的冻结锋面半径 $S_1(\tau)$ 与冻结区土壤的热扩散率 a_s 和未冻结区热扩散率 a_l 有很大关系,当二者一定时, $S_1(\tau)$ 随运行时间的变化类似于反抛物线形状,且呈现出先快后慢的趋势,并随运行时间的延长 $S_1(\tau)$ 逐渐增加。从图 6 还可看出, $S_1(\tau)$ 受热扩散率影响很大,随热扩散率的增大 $S_1(\tau)$ 增大,且增大幅度变大,冻结速度加快(在运行时间一定时, $S_1(\tau)$ 越大,则说明冻结速度越快)。这主要是因为热扩散率的增大导致土壤热扩散能力加强,热传递加快,从而在埋管吸热率一定时土壤温度降低越快,冻结速度加快,这意味着减小土壤热扩散率可以减缓土壤的冻结速度,以提高地源热泵运行性能。图 7 给出了 Stefan 数 Sze 对 $S_1(\tau)$ 的影响,由图可看出,其对 $S_1(\tau)$ 影响的变化趋势与热扩散率一致,即随 Sze 的增大, $S_1(\tau)$ 的增加幅度变大,且在 Sze 一定时随运行时间呈反抛物线形变化。从 Sze 的定义(即显热量与潜热量的比值)可以看出,这主要是由于释放潜热(分母部分)的减少而导致土壤冻结速度的加快,而潜热的减少是由于土壤含水率的降低而导致的。这也间接说明了土壤含水率的增大(潜热增大, Sze 减小)对于减缓土壤冻结速度是十分有利的,从而可以提高埋管周围土壤温度,改善热泵运行性能,因此,由 Sze 也可看出土壤含水率大是有利的。

3 结论

在寒冷地区地源热泵的应用设计中,土壤的冻结及其对埋管换热特性的影响是一个不可忽视的因素,本文将显热容法用于解决地源热泵埋管周围土壤的冻结相变传热问题,研究结果表明:

1) 寒冷地区设计地源热泵系统时,应适当考虑可能出现的土壤冻结问题,否则,计算出的埋管换热器周围土壤的温度会低于实际温度,这会导致埋管设计长度偏大,增大地源热泵系统的初投资,减小热泵工质和防冻液的选择范围。

2) 土壤含水率大小对埋管周围土壤温度分布及冻结速度影响很大,随含水率的增大,土壤温度会升高,冻结速度减缓。提高土壤含水率有利于地源热泵的设计与运行。

3) 埋管周围土壤冻结速度受热扩散率及 Sze 影响很大,减小土壤热扩散率及 Sze 有利于降低埋管周围土壤的冻结速度,从而可提高地源热泵的运行性能。

参考文献:

- [1] Gupta R S, Kumar D. Variable time step methods for one-dimensional Stefan problem with mixed boundary condition[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1981, 24: 251-259
- [2] 刘中良. 一种求解动边界问题的有限单元-有限差分法[J]. 华东石油学院学报, 1988, 12(2): 61-70
- [3] Shamsundar N, Sparrow E M. Analysis of multidimensional conduction phase change via the enthalpy model[J]. J Heat Transfer, 1975, 97(3): 333-340
- [4] Bonacina C, Comini G, Fasano A, et al. Numerical solution of phase-change problems[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1973, 16(6): 1825-1832
- [5] Rabin Y, Korin E. An efficient numerical solution for the multidimensional solidification (or melting) problem[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1993, 36(3): 673-683
- [6] 郭宽良,孔祥谦,陈善年. 计算传热学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1988
- [7] 孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998
- [8] 张寅平,胡汉平,孔祥冬,等. 相变储能[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1996
- [9] 刘中良,马重芳,孙旋. 相变潜热随温度变化对固-液相变过程的影响[J]. 太阳能学报, 2003, 24(1): 53-57
- [10] 叶宏,何汉峰,葛新石,等. 利用焓法和有效热容法对定型相变材料融解过程的比较研究[J]. 太阳能学报, 2004, 25(4): 88-91
- [11] 林瑞泰. 多孔介质传热传质引论[M]. 北京: 科学出版社, 1995
- [12] 王补宣. 工程传热传质学(下册)[M]. 北京: 科学出版社, 1998
- [13] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001