

冻结土壤、水-水平换热管耦合传热分析

杨伟^{1a}, 薛思浩^{1a}, 杨秋实^{1b}, 康凯², 张树光^{1c}

(1. 辽宁工程技术大学 a. 建筑工程学院; b. 测绘与地理科学学院; c. 土木与交通学院, 辽宁阜新 123000;
2. 阜新市热力总公司, 辽宁阜新 123000)

摘要:以冻结土壤、水-水平换热管之间耦合传热作用为研究对象,对冻结条件下非饱和土壤连续性方程和热量迁移方程,采用有限容积数值方法进行离散求解,给出了部分温度场、冻结率分布图,并分析了耦合传热原因。分析结果表明:冻结土壤温度场是大致与地表平行的水平线,固液相变区峰值发生在有回水管的上部,低值发生在无水平换热管的地方,水平换热管使冻结锋面向地表方向偏移,水平换热管进回水位置布置方式不同影响冻结土壤相变区域的大小与位置,回水管在单侧和中间布置是较优的布置方式。

关键词:冻结土壤;水平换热管;固液相变区;温度场;耦合分析

中图分类号:TU995;TK124

文献标志码:A

文章编号:1674-4764(2012)S1-0120-04

Analysis of coupled heat transfer between freezing soil, water and horizontal heat exchange tube

YANG Wei^{1a}, XUE Sihao^{1a}, YANG Qiushi^{1b}, KANG Kai², ZHANG Shuguang^{1c}

(1. Liaoning Technical University a. College of Architecture Engineering; b. College of Mapping and Geographic Sciences, c. College of Civil & Traffic, Fuxin City 12300, China; 2. Fuxin thermal corp, Fuxin City 12300, China)

Abstract: The research object is the coupled heat transfer effect between freezing soil, water and horizontal heat exchange tube, use finite volume numerical method to dispersed solving for continuity equation and heat transfer equation of unsaturated freezing soil, gives part of the temperature fields and freezing percentage distribution graphs, and analyzes the reason of the coupled heat transfer. The analysis result shows that: the temperature field of freezing soil are some horizontal lines parallelling to the ground surface. The peak value of solid-liquid phase change region appears in the upper part where there is backwater pipe, the low value appears in the place where there isn't horizontal heat exchange tube. The horizontal heat exchange tube makes the freezing front deviate towards the ground surface. The arrangement difference of inlet and outlet position of horizontal heat exchange tube will effect the size and position of the phase change region of freezing soil. Arranging the backwater pipe at one side or middle position is the optimized mode.

Key words: freezing soil; horizontal heat exchange tube; solid-liquid phase change region; temperature field; coupled analysis

随着地热资源的开发利用^[1], 地埋管地源热泵技术得到了广泛应用^[2]。地埋管地源热泵系统的核部件地埋管换热器传热模型的研究一直是该领域研究的重点内容。地埋管换热器一般包括垂直埋管和水平埋管两部分, 垂直埋管部分是换热器主要能量交换部分, 水平埋管部分主要完成垂直埋管部分的进水分配和回水汇集功能, 和土壤间有能量交换功能。

现阶段所研究《GB 50366—2005 地源热泵系统工程技术规范(2009年版)》(以下简称《规范》)的理论主要包括基于线热源^[3]或圆柱热源^[4]理论的解析模型、能量平衡的数值模型^[5]和《规范》^[6]进行计算和设计, 较少考虑土壤冻结条件下水平埋管和土壤间的耦合传热影响。按《规范》中设计地埋管换热器时, 避开了水平埋管和土壤间的耦合传热。在北方寒冷地区水平埋管在冻土层以下, 在最冷月内管内温度高于

附近土壤温度, 上部土壤冻结时, 液态的水凝结成冰, 释放出相变潜热; 同时上部土壤的物理性质发生变化, 相应地影响水平埋管的换热性能。

土体的冻结过程^[7]是温度场、水分场及应力场相互作用的一个极其复杂的热力学、物理化学和力学的综合问题。冻土可看作多孔多相(土-冰-水-气)系统^[8], 冻过程则是含相变的水、热输运过程^[9], 其中各相含量及分布因冻结时有冰-水相变, 其热学和力学性质与含水量或含冰量有关。对冻土的水、热与水平埋管间的耦合问题的深入研究有助于对含水土壤冻结过程^[10]的深入理解和认识, 对地埋管换热器的换热量的定量研究, 对于冻土地区地埋管换热器的设计、施工和安全运行有实际的指导意义。本文通过采用有限体积法、结合边界条件及计算参数求解微分方程, 研究冻结土壤-水平埋管的温度场相互影响。

1 物理模型

根据冻结土壤-水平埋管实际相互关系,可按二维物理模型(如图 1)进行研究。模型、高 H 、宽 L 。土壤按多孔介质考虑。土壤上部表面与室外空气接触,为第三类边界条件,室外空气温度为 T_h ;土壤下部为第一类边界条件,温度为 T_c ;左右两侧为对称边界条件。地表下 1.5 m 位置水平埋设进入垂直埋管换热器的低温进水管两根,从垂直埋管换热器经过换热后的高温回水管两根,管间距均为 400 mm,埋管外径 32 mm,外包有 20 mm 保温材料。

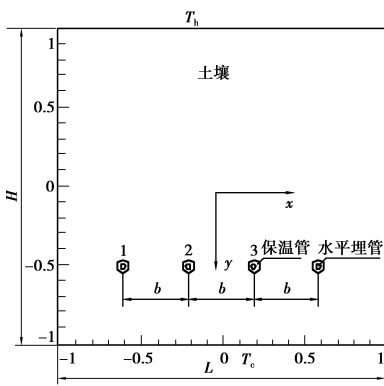


图 1 物理模型

2 数学模型

2.1 控制方程

为了简化分析,作如下假设:1)土体冻结属于原位冻结,忽略水分迁移、水在相变时的体积变化;2)视水、冰、土壤为不可压缩介质,常物性,各向同性;3)忽略土体内部对流换热。

连续性方程^[11]:

$$\begin{aligned} & \rho_w a \frac{\partial u_w}{\partial T} + (\rho_i - \rho_w) \left(\frac{\partial I}{\partial u_w} \right)_T \frac{\partial u_w}{\partial \tau} + \\ & (\rho_i - \rho_w) \left(\frac{\partial I}{\partial T} \right)_{u_w} \frac{\partial T}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\frac{k}{g} \frac{\partial u_w}{\partial y} \right) + \\ & \rho_i V_i \left(\frac{\partial I}{\partial u_w} \right)_T \frac{\partial u_w}{\partial y} + \rho_i V_i \left(\frac{\partial I}{\partial T} \right)_{u_w} \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

能量方程:

$$u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} = \frac{k_{eff}}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$H = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT + \beta L \quad (3)$$

$$\beta = \begin{cases} 0 & T < T_{melt} \\ 1 & T > T_{melt} \end{cases} \quad (4)$$

式中, ρ_w 为水密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ_i 为冰密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; a 为土体的压缩系数, $\text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$; u_w 孔隙水压力, Pa ; V_i 为冻胀速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; I 为冰相体积含量; k 为导热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 与孔隙率及未冻水含量有关; 重力加速度 g ; T 表示温度, T_{ref} 基准温度, T_{melt} 相变温度; k_{eff} 为有效导热系数, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$,

$k_{eff} = \gamma k_s + (1 - \gamma) k_f$; k_s 为水导热系数, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$, k_f 土壤导热系数, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$, γ 为孔隙率; c_p 定压比热容, $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$; H 任意时刻比焓; h_{ref} 基准焓; β 液相率; L 水的相变潜热, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.2 边界条件

研究区域选定为 $H=L=2000 \text{ mm}$, 埋管间距 $b=400 \text{ mm}$, 埋深 1500 mm 。上部为第三类边界条件, 环境温度 $T_h=262.15 \text{ K}$, 空气与土壤表面对流传热系数 $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$; 下部为第一类边界条件, $T_c=275.15 \text{ K}$, 左、右侧为对称边界, 固相线、液相线温度取为 273.15 K , 水的相变潜热 $L=335000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。273.15 K 水的热物性参数为: 密度 $\rho_w=999.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 导热系数 $k_s=0.551 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$, 定压比热容 $c_p=4.212 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$, 孔隙水压力 $u_w=0 \text{ Pa}$ 。273.15 K 冰的热物性参数为: 密度 $\rho_i=900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 定压比热容 $c_p=2.080 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ 。土壤的热物性参数为^[12]: 密度 $\rho_s=900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 导热系数 $k_f=1.46 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$, 液相率 $\beta=0.234$, 定压比热容 $c_p=1.835 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$, 孔隙率 $\gamma=0.006$, 基准焓 $h_{ref}=0 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。保温材料热物性参数为: 密度 $\rho=1500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 导热系数 $k_f=0.038 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 。重力加速度 $g=9.807 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。未冻区压缩系数 $a_0=1.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$, 相变区压缩系数 $a_1=6.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$, 已未冻区压缩系数 $a_2=5.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$; 导水系数, $k=3.4 \times 10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.3 网格划分与数值求解

计算网格采用结构化网格^[13], 为了验证网格数对计算结果的影响, 本文增加了网格总数 10% 及 20%, 计算得到结果偏差均在 1.0% 之内, 说明本文采用的网格具有独立性。

对控制方程(1)~(4)采用同位网格系统得有限容积(FVM)数值方法进行离散求解^[14-15], 离散过程中对流项与扩散项分别采用延迟修正的 3 阶 QUICK 差分格式与^[16] 阶中心差分格式。对耦合控制方程的离散方程组采用 SIMPLEC 算法求解。

3 结果和讨论

分别针对设定进口水温度为 275.15 K, 回水温度为 278.15 K 工况进行计算。部分计算结果见图 2。

从图 2 冻结土壤温度等值图、结冰率等值图可以看出: 冻结土壤温度等值图、结冰率等值图是冻结土壤、水-水平换热管综合作用的结果。

1) 冻结土壤、水-水平换热管温度场没能形成以换热管为中心圆形分布的温度场, 而是形成了大致与地表平行的水平线温度场。

2) 269 K、275 K 等温线基本水平表明水平换热管向地表影响土壤内的温度范围在 0~0.6 m 范围, 向埋管下部影响土壤内的温度范围在 0~-0.5 m 范围; 回水管在两侧, 进水管在中间时土壤温度相对均匀, 表明高温回水传递给土壤热量比传递给进水管热量少, 在此部分形成了高温回水向低温进水传递热量的短路现象明显; 回水管在单侧和中间布置(图 a、b)短路损失热量少, 是较优的布置方式。

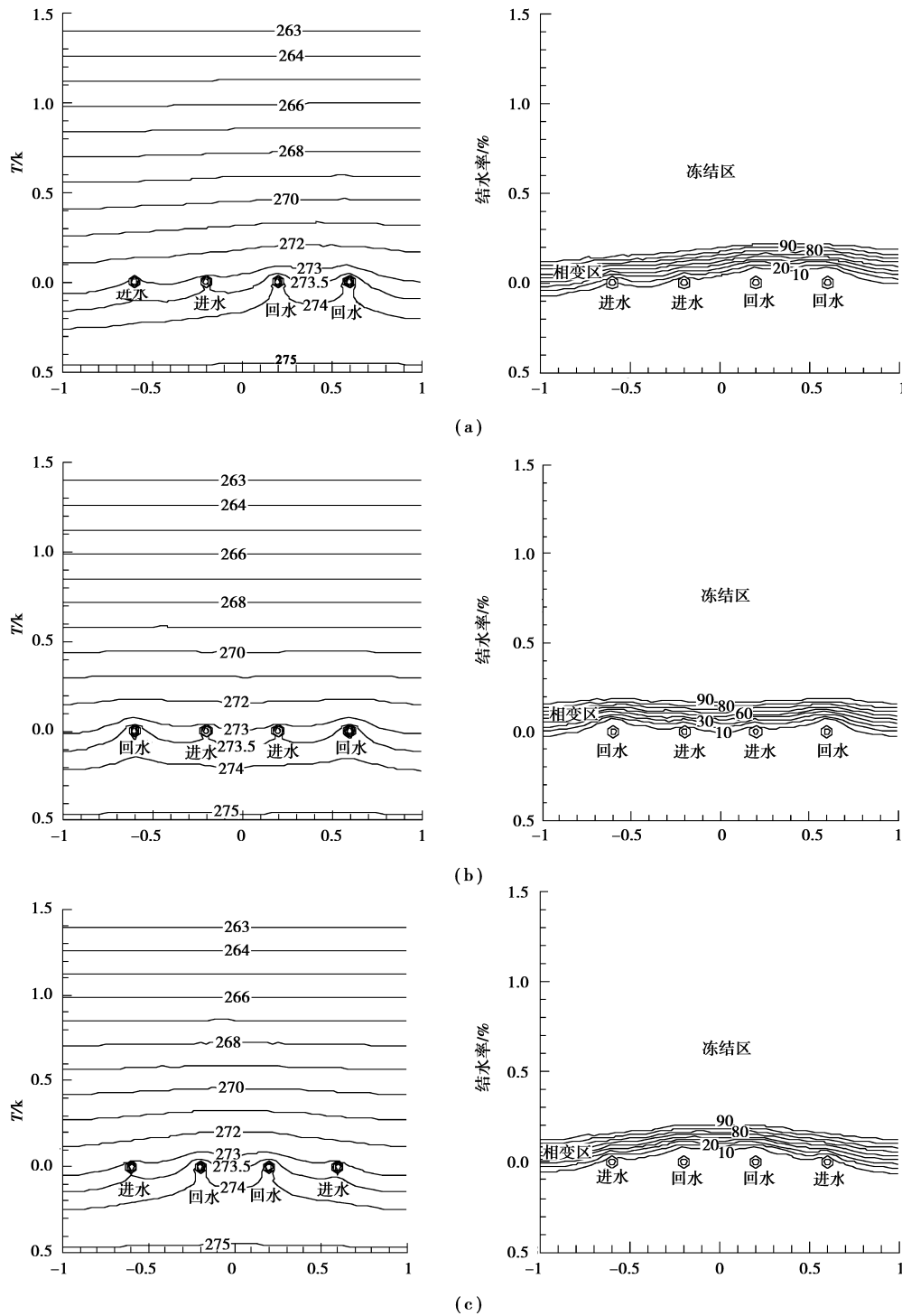


图2 冻结土壤温度、结冰率等值图

(a)管1、2进水,管3、4回水;(b)管2、3进水,管1、4回水;(c)管1、4进水,管2、3回水

3)冻结区发生在0.2~1.5 m区间,固液相变区发生在0.2~-0.15 m区间;固液相变区高峰值发生在有回水管的上部,低值发生在无水平换热管的地方,水平换热管使冻结锋面向地表方向移动。回水管在单侧和中间布置(图a、b)影响土壤固液相变区较大;回水管在两侧布置土壤固液相变区较小,表明回水管热量散失主要由进水管吸收,短路热量损失大于土壤吸收的热量,主要原因是固液相变区水冻结成固

体时向外释放潜热,延缓了地表冷量向下传导的速度。

4)保温材料仅能减小水平换热管向土壤的热量散失,不能改变向土壤的散失热量的趋势。

4 结论

对冻结土壤、水-水平换热管耦合作用的研究,获得了如下结论:

1)温度场是大致与地表平行的水平线。

2)水平换热管进回水位置布置方式不同影响冻结土壤相变区域的大小与位置,水平换热管使冻结锋面向地表方向移动。

3)回水管在单侧和中间布置短路损失热量少,是较优的布置方式。

4)对于具体的工程,应结合冻结土壤、水-水平换热管所赋存具体环境进行分析,定性确定相变区域、换热管之间耦合作用程度强弱,建立相应较为简单合理且又行之有效的微分方程,以便耦合作用的定量研究。

参考文献:

- [1] Lcar K B, Goricanec D, Krope J. Economy of exploiting heat from low-temperature geothermal sources using a heat pump [J]. *Energy and Buildings*, 2008, 40(3):323-329.
- [2] Denis M, Philippe P. Fast fluid and ground temperature computation for geothermal ground-loop heat exchanger systems[J]. *Geothermics*, 2008, 37(6):651-665.
- [3] Ingersoll L R, Plass H J. Theory of the ground pipe heat source for the heat pump [J]. *ASHVE Transactions*, 1948 (47): 339-348.
- [4] 涂爱民,董华,杨卫波,等.基于圆柱源理论模型的U型埋管换热器的模拟研究[J].*太阳能学报*,2006(27)3:259-264.
TU Aimin, DONG Hhu, YANG Wei, et al. Simulation Research of Vertical U-TUBE Ground Heat Exchangers Based on Cylindrical Heat Source Model[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2006(27)3:259-264.
- [5] 刁乃仁,方肇洪.地理管地源热泵技术[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [6] 中国建筑科学研究院. GB 50366—2005 地源热泵系统工程技术规范(2009年版)[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [7] 何平,程国栋,朱元林.土体冻结过程中的热质迁移研究进展[J].*冰川冻土*,2001,23(1):2-9.
HE Ping, CHENG Guodong, ZHU Yuanlin. The progress of study on heat and mass transfer in freezing soils[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 23(1):2-9.
- [8] 武建军,韩天一.饱和正冻土水-热-力耦合作用的数值研究[J].*工程力学*,2009,26(4):246-251.
WU Jianjun, HAN Tianyi. Numerical research on the coupled process of the moisture-heat-stress fields in saturated soil during freezing[J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(4):246-251.
- [9] 宋存牛.冻融过程中土体水热耦合作用理论和模型研究进展[J].*冰川冻土*,2010,32(5):982-988.
SONG Cunniu. A Review on the theory and models about coupled heat-moisture-stress interaction during soil freezing and thawing[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*. 2010, 32(5):982-988.
- [10] 吴礼舟,许强,黄润秋.冻土中冻结锋面移动的影响因素[J].*湖南科技大学学报:自然科学版*. 2010,25(4):51-53.
WU Lizhou, XU Qing, HUANG Runqiu. Effect factor of freezing front movement process for frozen soil[J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology: Natural Science Edition*, 2010, 25(4):51-53.
- [11] 曹宏章.饱和颗粒土冻结过程中的多场耦合研究[D].北京:中国科学院研究生院(工程热物理研究所),2006.
- [12] Shen M, Branko L. Modelling of coupled heat, moisture and stress field in freezing soil[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1987, 14:237-246.
- [13] 陶文铨.数值传热学[M].2版.西安:西安交通大学出版社,2009.
- [14] 杨伟,杨琳琳,孙跃.辽宁大隆矿区矿井巷道空气温度的数值模拟与分析[J].*中国地质灾害与防治学报*,2010,21(2):84-88.
YANG Wei, YANG Linlin, SUN Yue. Numerical simulation of air temperature of laneway in Dalong Mine, Liaoning Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2010, 21(2):84-88.
- [15] 杨伟,杨琳琳,张树光,等.高温巷道内自然对流换热的数值模拟分析[J].*扬州大学学报:自然科学版*,2011,14(30):116-119.
YANG Wei, YANG Linlin, ZHANG Shuguang, et al. Numerical simulation analysis of convective heat transfer in high temperature roadway[J]. *Journal of Yangzhou University: Natural Science Edition*, 2011, 14(30):116-119.
- [16] 杨伟,杨琳琳,安静,等.高温矿井综采工作区通风条件温度场的数值模拟分析[J].*煤田地质与勘探*,2011,39(5):55-58.
YANG Wei, YANG Linlin, AN Jing, et al. Numerical simulation and analysis of mine ventilation temperature field of integrated mining area in high temperature mine[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2011, 39(5):55-58.

(编辑 胡志平)