



地源热泵地埋管换热器 传热研究(1):综述

西南交通大学 袁艳平[☆] 雷 波 余南阳 曹晓玲 张 丹

摘要 综述了地源热泵地埋管换热器传热问题分析解、数值解的研究情况,分析了埋管之间的热干扰、管井回填材料、土壤含水量以及埋管内循环流体流量对地源热泵运行特性的影响,总结了当前研究的不足,指出了下一步研究的方向。

关键词 地源热泵 地埋管换热器 传热 分析解 数值解 实验研究

Heat transfer of ground heat exchanger for GSHP (1): a review

By Yuan Yanping[★], Lei Bo, Yu Nanyang, Cao Xiaoling and Zhang Dan

Abstract Reviews the experimental investigation of analytical and numerical solutions of heat transfer of the ground heat exchanger for GSHP, analyses the influences of thermal interference between pipes, backfill materials of pipe wells, water content in soil and flow rate in pipes on the performance of the GSHP, summarizes the shortcoming of the present research work, and points out the following development direction.

Keywords GSHP, ground heat exchanger, heat transfer, analytical solution, numerical solution, experimental investigation

★ Southwest Jiaotong University, Chengdu, China

①

0 引言

地源热泵(GSHP)因其高效、节能、环保的特点而备受世界各国的青睐,近年来在国内也得到了快速发展,有关地源热泵系统的研究已成为清洁能源研究领域中的一个热点。随着研究的深入,近年来出现了使用辅助散热装置的混合地源热泵(HGGSHP)系统^[1-4],这种系统不仅可以减少地源热泵的初装费,而且还能解决冬、夏负荷不平衡问题。国内的学者对此类地源热泵也进行了研究^[5]。为了解决冬、夏负荷不平衡而导致的地源热泵出力衰减和满足电力移峰填谷的需要,马最良等人提出了一种全新的热泵空调系统形式——土壤蓄冷与土壤耦合热泵集成系统^[6-11]。

地埋管换热器是地源热泵技术的核心部件。地埋管换热器的传热是一个十分复杂的非稳态过程。一方面,换热器的埋管方式、土壤特性、地下水文参数、回填材料以及地面气象参数都影响着换热

器的传热过程。另一方面,地埋管传热过程又与地面热泵机组的运行特性相互影响。地埋管换热器主要分水平埋管和竖直埋管两大类。由于水平埋管换热器占地面积大,且传热过程受地表温度和大气温度影响较大,所以在实际应用中往往多采用竖直埋管。鉴于此,本文的综述分析对象仅限于竖直地埋管换热器。

1 分析解

1.1 线热源理论

Ingersoll 等人发展了 Kelvin 的线热源理论,用于求解地源热泵地埋管传热问题^[12]。其基本思

①☆ 袁艳平,男,1973年6月生,博士研究生,工学博士,副教授
610031 成都市西南交通大学机械工程学院建筑环境与设备
工程系

(028) 87634937

E-mail: ypyuan@home.swjtu.edu.cn

收稿日期:2007-08-20

修回日期:2008-03-10

想是将埋管换热器的换热简化为以换热器中心轴为热源的传热。建立模型时采用了以下假设:地层是初始温度均匀的无限大介质,其热物性均匀且不随温度变化;忽略深度方向(包括地表)的传热,只考虑径向导热;忽略钻孔的几何尺度而把它近似为轴心上的线热源。

岩土中各处的温度分布按下式计算:

$$z_s - z_0 = \frac{q'}{2\pi\lambda_s} \int_X^\infty \frac{e^{-\beta}}{\beta} d\beta = \frac{q'}{2\pi\lambda_s} I(X) \quad (1)$$

式中 z_s 为土层实时温度,℃; z_0 为土层初始温度,℃; q' 为线热源的热流, W/m; λ_s 为土层的导热系数, W/(m·K); β 为积分变量; $X = \frac{r}{2\sqrt{a_s\tau}}$, 其中 r 为土层离线热源的距离, m; a_s 为土层的热扩散率, m²/s; τ 为运行时间, s。

研究表明,第 3 个假设在时间很短时($\tau < 5r_0^2/a_s$, r_0 为钻孔半径, m), 大多数情况为数小时)是不成立的。线热源理论仅对真实的线热源才会有精确的理论解,而对于有一定热容量的埋管换热器,其解有较大的误差,尤其不能直接模拟换热器短时间内的换热。

1.2 圆柱源理论

1.2.1 常热流圆柱源理论

圆柱源理论将线热源推广到具有一个恒定半径的圆柱热源,得到的分析解具有清晰的物理意

$$\Delta z_{g,i} = \frac{1}{k_s L} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^j Q_j \left\{ G[Fo(z_i - z_j - 1)] - G[Fo(z_i - z_j)] \right\} \quad (3)$$

式中 $1 \leq i \leq n$, $1 \leq j \leq i$; Q_j 表示 j 时刻埋管换热器换热量。

τ_n 时刻的温度不但受该时刻热流的影响,同时还受该时刻之前各时刻热流的影响。研究表明,计算时刻的热流对该时刻温度的影响起主要作用,而此前各时刻的影响相对较小,离开开始计算时刻越久,其影响越小。因此,要想获得某时刻的温差值和热流值,必须逐一计算此前各时刻的温差值和热流值,计算一年或更长时间的换热器运行特性时,计算难度很大。因此,

义,比线热源具有更高的模拟精度,因而得到了更为广泛的应用。

Ingersoll 等人给出了恒定热流情况下的圆柱源分析解^[13]:

$$\Delta z_g = z_w - z_g = \frac{Q}{L} \frac{G(Fo, p)}{k_s} \quad (2)$$

式中 Δz_g 为无限远边界土壤温度与埋管井壁温度之差,℃; z_w 为无限远边界土壤温度,℃; z_g 为埋管井壁温度,℃; Q 为埋管换热器换热量, W; L 为埋管深度, m; $G(Fo, p)$ 为理论解的 G 函数,

$G(Fo, p) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^\infty f(\beta) d\beta$, 可以用数值解近似代替;

Fo 为 Fourier 数; p 为地下岩土计算点至钻井中心距离与钻井半径的比值; k_s 为岩土平均导热系数, W/(m·K)。

1.2.2 变热流圆柱源理论

在实际运行中,埋管换热器的取(放)热量随运行工况的变化而变化,而式(2)是基于常热流边界条件的,因此必须对其进行改进。Bernier 利用阶跃热流来处理变热流问题,把任何随时时间变化的负荷看成是若干个分段线阶跃热流对孔洞产生的热作用的叠加^[14]。由此,温度场的解就可以视为一系列不同时刻具有不同热流的阶跃负荷在无限大介质中产生的温度响应。

根据叠加原理, τ_n 时刻远边界土壤温度与埋管井壁温度的差值的计算式为

Yavuzturk 等人引入了“负荷累积”概念,用于处理历史热流对目前时刻温度场的影响^[15]。由于近期热流的影响远大于早期热流的影响,在模拟的过程中,从 τ_n 时刻进行逐项叠加,而对于 τ_n 时刻以前的热流的影响用平均热流值 $q_{mem,n}$ 来代替,不再进行逐项的叠加。 $q_{mem,n}$ 称为负荷累积,而 τ_n 至 τ_n 这段时间称为热影响主导期,该时间段需要叠加的项数用 A 表示。

引入负荷累积概念后, τ_n 时刻远边界土壤温度与埋管井壁温度差值的计算式为

$$\Delta z_{g,i} = z_{g,i} - z_{w,i} = \frac{1}{k_s L} \left\{ q_{mem,i-A} \left\{ G[Fo(z_i - z_0)] - G[Fo(z_i - z_{i-A})] \right\} + \dots + \sum_{j=1}^A q_{i-A+j} \left\{ G[Fo(z_i - z_{j-1})] - G[Fo(z_i - z_j)] \right\} \right\} \quad (4)$$

由式(4)可见,引入负荷累积概念后, τ_0 时刻温度的计算式中叠加的项数减少 $A-1$ 项,温度主要和热影响主导期时间有关。

常热流圆柱源理论和变热流圆柱源理论都假定在同一时刻、同一工况下,埋管深度不同以及左右侧埋管深度相同时的热流量是一致的,而这与事实是不符的。对于埋管和土壤耦合传热的计算域而言,埋管管壁处的温度梯度应该最大,而圆柱源理论正是对该处进行假设,因此这一假设势必会带来一定的误差。Yavuzturk 等人将埋管管壁边界条件简化为恒热流边界条件,将左侧热流定义为总热流的 40%,右侧热流定义为总热流的 60%^[16]。尽管这种处理方式具有一定的随意性,不过也有一定的道理,体现了左右两个埋管热流的不均匀性。

杨卫波等人利用变热流圆柱源理论对钻孔壁温进行了求解^[17]。王景刚等人利用变热流圆柱源理论建立了耦合地源热泵和地埋管换热器特性的数学模型,并对短时间步长的运行特性进行了模拟^[18]。方肇洪等人也进行了一系列的研究,采用虚拟热源法以及线性叠加原理,推导出了竖直和倾斜地埋管换热器的稳态温度场的解析解;通过对能量平衡方程式的分析与推导,获得了描述 U 形管换热器中流体温度沿深度变化的关系式;通过积分变换的方法求得了承压含水层的解析解;采用准三维模型对称布置的双 U 形地埋管换热器的传热情况进行了分析研究^[19-26]。

2 数值解

与分析解相比,虽然数值解不能清晰地表达物理意义,直观反映各因素的影响,但它能借助数值方法对更复杂的地埋管换热器传热模型进行求解,因此国、内外不少学者对地埋管换热器传热过程进行了数值模拟。从文献检索的情况来看,影响数值计算准确性的是建模过程中采用的简化,因此在综述的过程中,尽量转述文献所采用的各种假设,并在本节的最后进行总结。

任晓红等人利用有限差分法对单 U 形地埋管换热器进行了数值模拟^[27]。李新国等人采用专业多孔介质计算软件 Autough2 对换热器周围土壤温度进行了模拟计算^[28]。唐志伟等人利用有限容积法对单 U 形地埋管换热器的温度场和流场进行了数值模拟,在深度方向上每隔一定距离的平面内

耦合求解管内流体与土壤间的传热,实现两个区域间传热的耦合,从而构建准三维传热模型^[29]。在模拟的过程中,不考虑 U 形管底部弯管的影响,认为进水支管与出水支管都是有限长直管,两支管底部的流体温度相同,速度方向相反。吴玉庭等人数值模拟了冬、夏工况下不同 U 形管内流速、进口水温 and 埋管深度对单位井深热流量的稳态影响^[30]。高青等人数值研究了地源热泵地能利用中地下群井多源换热及其运行模式的影响规律^[31]。杨卫波等人以钻孔壁为界将 U 形地埋管的换热区域划分为钻孔内、外壁两部分,并分别采用稳态与非稳态传热来分析求解^[32]。Deerman 等人利用圆柱源理论对 U 形地埋管换热器传热过程进行了数值模拟,并和实验结果进行了对比,提出了利用连续测量数据估计土壤有效导热系数的方法^[33]。Lei 通过建立双圆柱坐标系将三维非稳态传热问题简化为二维非稳态传热问题,对竖直地埋管的温度场进行了数值模拟^[34]。Rottmayer 等人将地埋管换热器的传热简化为三维非稳态导热问题,利用有限差分法进行了数值求解^[35]。Yavuzturk 等人忽略地表面和管脚的末端效应,将换热器传热过程简化为二维传热,并利用有限容积法对二维地埋管温度场进行了计算,地埋管管壁边界条件简化为恒热流边界条件,将左侧热流定义为总热流的 40%,右侧热流定义为总热流的 60%^[16]。Bi 等人采用非均匀网格、利用有限差分法对地埋管换热器进行了模拟计算^[36]。Katsunori Nagano 等人将埋管换热器传热过程简化为非稳态导热问题,并以边界元数值方法编制了地源热泵模拟软件,该项研究成果的特别之处在于可以对地源热泵的寿命周期 CO_2 产生量进行计算^[37]。

由于 U 形竖直地埋管换热器几何形状以及管内流体和土壤耦合传热的复杂性,对其建立能精确模拟所有实际情况的模型并求解,以现有的计算技术来说几乎是不可能的,也是不必要的,因此所有的数值模拟都要作一定的简化。表 1 为所综述文章的假设条件汇总。不过,从检索得到的文献来看,未见有各种简化给地埋管换热器管内流场及管外温度场模拟计算造成误差的相关研究。

3 实验研究

实验研究也是研究地源热泵的重要手段之一。王勇等人对套管式换热器和 U 形地埋管进行了对

表 1 不同文献的假设条件

假设条件	文献编号											
	[27]	[28]	[29]	[30]	[31]	[32]	[33]	[34]	[35]	[16]	[36]	[37]
土壤导热只发生在水平方向	×	×	√	×	×	×	×	×	√	×	×	×
管内同一截面上流体温度、流速相同	√	×	√	×	×	×	×	√	×	×	×	×
土壤初始温度均匀一致	×	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
忽略土壤中水分迁移的影响	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
忽略大气温度波动的影响	×	√	√	√	√	√	√	√	×	√	√	√
地理管换热可处理为圆柱源	×	√	×	×	√	√	√	×	×	×	√	√
土壤热特性恒定	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
传热为二维的	×	×	√	×	×	×	√	×	×	√	√	×
传热为稳态的	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	×	×

注:√为采用,×为不采用。

比实验,结果表明,套管式换热器的换热性能要好于 U 形换热器^[38]。赵军等人的实验结果表明,内管材料的绝热性能越好,换热器的取热量就越大^[39],用微珠玻璃球模拟井下换热器周围对流型地层是可行的,而且换热器周围土壤介质中存在自然对流方式。高青等人对芯管束强化旋流新型地下换热系统进行了系统研究,实验表明,该地下换热管束较原来使用的 U 形管换热能力提高 1 倍以上^[40]。高青等人的实验表明,合理的间歇过程控制和间歇时间调整可以改良地温变化趋势,更大程度地提高换热井的换热能力^[41]。李新国等人分别对用砂石回填的单 U 形和双 U 形井埋管进行了夏季排热和冬季取热实验,研究发现,在排热工况和取热工况下,单 U 形埋管单位管长换热量均高于双 U 形^[42]。赵军等人对夏季排热工况下竖直井埋换热器与地基桩单 U 形埋管换热器进行了对比实验,结果表明,桩埋管换热器单位埋深换热量比井埋管要大 16%,桩埋管换热器的热作用半径要大于井埋管换热器的热作用半径^[43]。薛玉伟等人的实验结果表明,排热和取热工况下,双 U 形埋管单位井深换热量均高于单 U 形^[44]。赵军等人对 U 形埋管换热器进行了长期的性能实验研究,结果表明,由于冬、夏负荷不平衡,夏季工况很可能会出现换热性能恶化现象^[45]。赵军等人在埋管换热器圆柱热源模型的基础上,采用参数估计法建立了一套适用于现场确定土壤热物性的方法^[46]。Hepbasli 等人对竖直埋管换热器的制热工况进行了实验研究^[47]。

4 地源热泵埋管换热器的传热影响因素

4.1 埋管之间的热干扰

对于竖直 U 形埋管换热器,其钻孔孔径通常为 110~130 mm,在这样一个狭小的空间内,温

度不同的两个支管之间将必然发生热量回路现象,又称热短路。范军等人的研究发现,管距越大,支管间的热量回流越小;竖直单 U 形管支管间的热量回流还与回填材料的导热系数有关,当管间距一定时,导热系数大的回填材料有利于减少支管间的热量回流^[48]。但该研究工作并没有计算出热量回流量,只是根据出口流体温度来反推热流回流量,而且也没有考虑管间距和换热器的作用半径增大带来的影响。范蕊等人分析了有地下水渗流情况下的土壤蓄冷与土壤耦合热泵集成系统中竖直埋管换热器的管间距问题,结果表明对于夏季蓄冷、释冷的运行方式,较小的管间距有利于盘管蓄存高品质冷量,从而更加有利于空调运行;而对于冬季工况,较小的管间距不利于土壤温度的恢复^[49]。Muraya 等人建立了非稳态导热有限元模型,分析了埋管间距、土壤温度、回填土特性以及管脚温度对热回流的影响^[50]。杨卫波等人的研究表明,管脚间距的增加有利于增大单位埋管长度吸热量,这主要是因为管脚间距的加大有助于减小两管脚间热短路的影响^[51]。但考虑到盲目增大管脚间距会因孔径加大而增加钻孔费用及回填物的量,同时间距加大所换来的埋管吸热量增加幅度也较小。

4.2 地下水的影响

湿土壤含水对埋管换热器换热的影响,一方面是湿度本身的静态影响,另一方面是含湿量梯度造成的渗透或流动影响。土壤分干土壤、非饱和土壤、饱和湿土壤以及过饱和湿土壤,地下土壤湿度使传热问题从简单的导热问题变成既有对流又含有热湿扩散的复杂传热问题^[52]。

Eskilson 在 Carslaw 等人的研究^[53]基础上,讨论了稳定状态下地下水对埋管换热器换热的

影响,但他只研究了地下水的静态影响^[54]。而在工程实际中,地埋管换热器需要几年或更长的时间达到基本稳定状态,因此仅研究地下水的稳态影响缺乏实际工程意义。Chiasson 等人利用有限元方法求解了地下水作用下的二维非稳态传热问题,研究了单孔地埋管换热器和 4×4 孔地埋管换热器在不同地质条件下的热特性^[55]。

$$\theta(x, y, \tau) = \frac{q_1}{4\pi k} \exp\left(\frac{Ux}{2a_s}\right) \int_0^{\frac{\tau}{(a_s \rho_w c_w)}} \frac{1}{\eta} \exp\left(-\frac{1}{\eta} - \frac{U^2 r^2 \eta}{16 a_s^2}\right) d\eta \quad (5)$$

式中 $\theta = t - t_0$; q_1 为线热源热流强度; $U = u\rho_w c_w / (\rho c)$, 表示介质当量移动速度,其中 u 为整个区间的渗流速度(假设均匀且仅沿 x 方向); $\rho_w c_w$ 为水的体积比热容, ρc 为多孔介质(包括水)总的体积比热容; r 为介质离线热源的距离; η 为综合参数。

式(5)可以在一定程度上揭示传热过程中各影响因素的定量关系,有助于从本质上把握这一复杂的物理过程,同时该式也便于计算。不过,该式是基于单孔地埋管换热器的,还不能应用于地埋管群换热器。

Fan 等人建立了类似 Diao 等人建立的控制方程^[56-58]。不同的是, Fan 等人考虑到了系统夏季蓄冷、释冷运行过程中存在的固液相变问题,并采用固相增量法进行了处理,同时假定计算区域内渗流速度均匀,且仅沿 x 方向。研究表明,对于夏季蓄冷、释冷的运行方式,地下水流动增加了系统冷损失,对蓄冷不利;而对于冬季工况,渗流增强了换热器周围土壤的温度恢复能力,有利于地埋管吸热,所以传统的地埋管热泵系统宜埋在有渗流的土壤中。而土壤蓄冷与土壤耦合热泵系统主要适用于空调负荷为主、供暖负荷为辅的地区,因此适用于地下水流速较小或无渗流的土壤。

Leonga 等人利用 HGHEADS 程序对 5 种不同饱和度土壤中的 3 种地埋管换热器一年的运行特性进行了数值模拟^[59],结果表明,饱和度小于 12.5% 时,土壤含水量的变化会引起地源热泵性能的大幅度变化;而在 25% 之上,热泵的性能较好;在 50% 之上时,含水量的变化对热泵性能的影响不大。

4.3 回填材料的影响

回填材料的导热系数是决定地埋管换热器换热效果和系统效率的主要因素。李新国等人对采

Diao 等人假定地下岩土为均匀的多孔介质,热量的传递由介质(包括固体骨架和其中的流体)的导热和孔隙中流体(水)的对流传热而实现。将多孔介质中的渗流问题视为移动热源问题,从而将对流导热问题转化为带移动热源的纯导热问题,利用格林函数法,可求得介质中二维瞬态温度场表达式^[56]。

用不同回填材料的 U 形桩埋管和 U 形井埋管分别进行了取热和排热工况的实验研究,结果表明,相同实验工况下, U 形桩埋管的换热效果和换热稳定性要优于 U 形井埋管^[60]。王向岩等人在制热工况下,以超强吸水树脂与源土的混合物为回填材料,对地源热泵的运行特性进行了实验研究,结果表明,在回填材料中注入少量水的情况下,能够很好地改善土壤的非饱和性,增加土壤的导热系数,提高土壤的热恢复能力,明显增大地埋管的吸热量^[61]。这种回填材料适用于干旱、土壤非饱和以及地下水位比较低的地区。魏加项等人提出,为防止回填后在井壁处形成过大的接触热阻,可在回填材料中添加膨润土,膨润土能吸附 8~15 倍于自身体积的水量,膨润土还有蓄热性能,加入膨润土的回填材料能够很好地与周围土壤接触,减少了增加接触热阻的可能性,并且膨润土能保持大量的水分,从而起到强化换热的作用^[62]。刘冬生等人的实验结果表明,膨润土在干旱地区不适于作为回填材料,而且由于膨润土吸水膨胀的特性,其添加率不宜超过 5%^[63]。杨卫波等人的研究表明,增加回填材料的导热系数有利于增强埋管的换热强度,埋管出口温度及单位埋管深度的吸热量均会增大,但当回填材料的导热系数值增加到一定值后,单位深度埋管吸热量几乎不再增加^[64]。Jones 等人对可流动回填材料作了研究,结果表明,回填材料选用可流动介质可以增强换热效果^[64]。Yan 等人研究了放热工况下地埋管的换热性能,为了验证其分析结果,还进行了小尺寸的实验^[65]。

4.4 管内循环流体流量的影响

丁力行等人的研究表明,随着水流量的增加,进出口流体温差越来越小,单位管长换热量随流量增加呈现先增加后减小的趋势,进而认为

存在最佳流量^[66]。任晓红等人采用变流量间歇工况进行供热测试,结果也表明埋管换热器存在最佳水流量^[27]。杨卫波等人的研究发现,流量的增加一方面导致埋管进出口温差的减小,另一方面也因进出管脚内流体平均温度的降低而加大与远边界土壤间的温差,使换热得到加强;同时流量的增加也会强化管内换热的效果^[51]。赵军等人也认为从热泵系统优化的角度来看,埋管换热器的循环水量应该控制在一个合适的范围^[67]。

5 结论

5.1 因冬、夏负荷不平衡,土壤的温度场得不到有效的恢复,导致传统的土壤耦合热泵系统长久运行后出力衰减;另一方面,混合地源热泵(HGGSHP)的初装费相对较少,而初装费偏高正是制约地源热泵推广的主要因素。故混合地源热泵(HGGSHP)埋管换热器将是新的发展方向。

5.2 实际工程中的竖直埋管换热器穿过不同的地质层,包括非饱和区和饱和区,因此应该分层予以研究,在后续工作中应进一步研究地下水对埋管换热器的影响。另外,在排热工况下,土壤吸热会导致埋管附近水分迁移,这一方面会导致土壤导热系数的减小,另一方面会使土壤收缩,从而使土壤和埋管之间产生间隙,进而影响埋管与周围回填土的换热效果。关于这一问题的研究,还未见报道。

5.3 由于 U 形竖直埋管换热器几何形状以及管内流体和土壤耦合传热的复杂性,建立能精确模拟所有实际情况的模型并求解,以现有的计算技术来说几乎不可能,而且也是不必要的,因此所有的数值模拟都要作一定的简化。不过,从检索到的文献来看,未见有各种简化给埋管换热器管内流场及管外温度场是否造成误差的相关研究。

5.4 埋管传热过程与地面热泵机组的运行特性相互影响。热泵的制热(冷)量依赖于埋管换热器与地下土壤间的换热,而埋管换热器的传热特性又依赖于热泵机组埋管内流体的吸热(冷)量。因此,应构建埋管换热器与热泵机组耦合传热的模型,并在此基础上研究地源热泵换热器与热泵机组的最佳匹配。

参考文献:

[1] Chiasson A D, Spitler J D, Rees S J, et al. A model

for simulating the performance of a pavement heating system as a supplemental heat rejecter with closed-loop ground-source heat pump systems [J]. ASME Journal of Solar Energy Engineering, 2000,122(11): 183-191

[2] Chiasson A D, Spitler J D, Rees S J, et al. A model for simulating the performance of a shallow pond as a supplemental heat rejecter with closed loop ground source heat pump systems [G]// ASHRAE Trans, 2000, 106(2):107-121

[3] Yavuzturk C, Spitler J D. Comparative study of operating and control strategies for hybrid ground source heat pump systems using a short time step simulation model [G]// ASHRAE Trans, 2000, 106(2):192-209

[4] Ramamoorthy M, Jin H, Chiasson A, et al. Optimal sizing of hybrid ground-source heat pump systems using a cooling pond as a supplemental heat rejecter—a system simulation approach [G]// ASHRAE Trans, 2001,107(1):26-38

[5] 杨卫波,施明恒. 混合地源热泵系统(HGSHPS)的研究[J]. 建筑热能通风空调, 2006,25(3):20-26

[6] 余延顺. 土壤蓄冷与耦合热泵集成系统的蓄冷与释冷特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2004

[7] 姚杨,马最良,余延顺. 土壤蓄冷与土壤耦合热泵集成系统的研究[J]. 流体机械,2004,32(6):48-51

[8] 余延顺,马最良,姚杨. 土壤蓄冷与土壤耦合热泵集成系统中土壤蓄冷与释冷过程的特性研究[J]. 暖通空调,2004,34(5):1-6

[9] 余延顺,马最良,姚杨. 土壤蓄冷与土壤耦合热泵集成系统的模拟研究[J]. 暖通空调,2005,35(6):1-5

[10] 余延顺,马最良,姚杨. 固相增量法在土壤蓄冷与释冷过程数值模拟中的应用[J]. 暖通空调,2005,35(8):20-24

[11] 余延顺,马最良,姚杨. 土壤蓄冷与耦合热泵集成系统中土壤蓄冷的模拟研究[J]. 太阳能学报,2004,25(6):820-825

[12] Ingersoll L R, Plass H J. Theory of the ground pipe heat source for the heat pump [J]. Heating, Piping & Air Conditioning, 1948, 20:119-122

[13] Ingersoll L R, Zoeble O J, Ingersoll A C. Heat conduction with engineering, geological and other application[M]. New York: McGraw-Hill, 1954

[14] Bernier M. Ground-coupled heat pump system simulation [G]// ASHRAE Trans, 2001, 107(1): 605-616

- [15] Yavuzturk C, Spitler J D. A short time step response factor model for vertical ground loop heat exchangers [G] // ASHRAE Trans, 2001, 107(2):475-485
- [16] Yavuzturk C, Spitler J D, Ree S J. A transient two-dimensional finite volume model for the simulation of vertical U-tube ground heat exchangers [G] // ASHRAE Trans, 1999, 105(2):465-474
- [17] 杨卫波,施明恒. 地源热泵中 U 型埋管传热过程的数值模拟[J]. 东南大学学报, 2007, 37(1):78-83
- [18] 王景刚,马一太,张子平,等. 地源热泵的运行特性模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(3):361-366
- [19] 崔萍,刁乃仁,方肇洪. 地热换热器间歇运行工况分析[J]. 山东建筑工程学院学报, 2001, 16(1):52-57
- [20] 曾和义,刁乃仁,方肇洪. 竖直埋管地热换热器的稳态温度场分析[J]. 山东建筑工程学院学报, 2002, 17(1):1-6
- [21] 曾和义,方肇洪. U 型管地热换热器中介质轴向温度的数学模型[J]. 山东建筑工程学院学报, 2002, 17(1):7-11
- [22] 曾和义,方肇洪. 双 U 型埋管地热换热器的传热模型[J]. 山东建筑工程学院学报, 2003, 18(1):11-17
- [23] 曾和义,刁乃仁,方肇洪. 竖直埋管地热换热器钻孔内的传热分析[J]. 太阳能学报, 2004, 25(6):399-405
- [24] 刁乃仁,曾和义,方肇洪. 竖直 U 型管地热换热器的准三维传热模型[J]. 热能动力工程, 2003, 18(4):387-390
- [25] 李曼,刁乃仁,方肇洪. 单井回灌地源热泵承压含水层渗流解析解[J]. 山东建筑工程学院学报, 2006, 21(1):1-5
- [26] 陈卫翠,崔萍,方肇洪. 倾斜埋管地热换热器稳态温度场分析[J]. 山东建筑工程学院学报, 2005, 20(5):30-34
- [27] 任晓红,孙纯武,胡彦武. U 型埋管换热器三维数值模拟和供热实验研究[J]. 重庆大学学报, 2004, 26(5):90-95
- [28] 李新国,赵军,周倩. 埋地换热器理论模型与周围土壤温度数值模拟[J]. 太阳能学报, 2004, 25(4):492-496
- [29] 唐志伟,时晓燕,黄俊惠,等. 地源热泵 U 型管地下换热器的数值模拟[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(1):62-66
- [30] 吴玉庭,顾中煌,马重芳,等. U 型管传热量影响因素的数值模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(1):116-118
- [31] 高青,李明,闫燕. 地下群井换热强化与运行模式影响规律[J]. 太阳能学报, 2006, 27(1):83-99
- [32] 杨卫波,施明恒. 地源热泵中 U 型埋管传热过程的数值模拟[J]. 东南大学学报, 2007, 37(1):78-83
- [33] Deerman J D, Kavanaugh S P. Simulation of vertical U-tube ground-coupled heat pump systems using the cylindrical heat source solution [G] // ASHRAE Trans, 1991, 97(1):287-294
- [34] Lei T K. Development of a computational model for a ground-coupled heat exchanger [G] // ASHRAE Trans, 1993, 99(1):149-159
- [35] Rottmayer S P, Beckman W A, Mitchell J W. Simulation of a single vertical U-tube ground heat exchanger in an infinite medium [G] // ASHRAE Trans, 1997, 103(2):651-659
- [36] Bi Yuehong, Chen Lingen, Wu Chih. Ground heat exchanger temperature distribution analysis and experimental verification [J]. Applied Thermal Engineering, 2002, 22:183-189
- [37] Katsunori Nagano, Takao Katsura, Sayaka Takeda. Development of a design and performance prediction tool for the ground source heat pump system [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(14/15):1578-1592
- [38] 王勇,付祥钊. 地源热泵的套管式地下换热器研究[J]. 重庆建筑大学学报, 1997, 19(5):13-17
- [39] 赵军,涂锋华,戴传山,等. 对流型地层内井下换热器实验模拟研究[J]. 太阳能学报, 2002, 23(6):696-698
- [40] 高青,于鸣,白金玉,等. 提高地能利用的强化传热试验研究[J]. 太阳能学报, 2003, 24(3):307-310
- [41] 高青,李明,乔广,等. 间歇过程地温恢复特性及其规律模拟计算分析[J]. 热科学与技术, 2004, 3(3):224-228
- [42] 李新国,薛玉伟,赵军. 不同方式地下埋管换热器的实验研究[J]. 制冷学报, 2004, 25(2):39-42
- [43] 赵军,宋德坤,李新国,等. 埋地换热器放热工况的现场运行实验研究[J]. 太阳能学报, 2005, 26(2):162-165
- [44] 薛玉伟,季民,李新国,等. 单 U、双 U 型埋管换热器换热性能与经济性研究[J]. 太阳能学报, 2006, 27(4):410-414
- [45] 赵军,王华军,宋著坤,等. U 型管理地换热器长期性能的实验研究与灰色预测[J]. 太阳能学报, 2006, 27(11):1137-1141
- [46] 赵军,段征强,宋著坤,等. 基于圆柱热源模型的现场测量地下岩土热物性方法[J]. 太阳能学报, 2007, 28

- (9), 934-936
- [47] Hepbasli A, Akdemir O, Hancioglu E. Experiment study of a closed loop vertical ground source heat pump system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2003, 44(4): 527-548
- [48] 范军, 刁乃仁, 方肇洪. 竖直 U 型埋地换热器两支管间热量回流的分析[J]. *山东建筑工程学院学报*, 2004, 19(1): 1-4, 39
- [49] 范磊, 马最良. 双功能地下管群换热器的管间距分析[J]. *建筑热能通风空调*, 2006, 25(1): 11-14
- [50] Muraya N K, Neal D O, Hefington W M. Thermal interference of adjacent legs in a vertical U-tube heat exchanger for ground-coupled heat pump [G] // *ASHRAE Trans*, 1996, 102(2): 12-21
- [51] 杨卫波, 施明恒. 基于元体能量平衡法的垂直 U 型埋管换热特性的研究[J]. *热能动力工程*, 2007, 22(1): 96-100
- [52] 高青, 李明, 于鸣, 等. 湿土壤含湿特性对传热影响研究[J]. *热科学与技术*, 2005, 4(2): 136-140
- [53] Carslaw H S, Jeager J C. *Conduction of heat in solids* [M]. 2nd edition. Oxford: Oxford Press, 1959
- [54] Eskilson P. *Thermal analysis of heat extraction boreholes* [D]. Lund: University of Lund, 1987
- [55] Chiasson A D, Ree S J, Spitler J D. A preliminary assessment of the effects of groundwater flow on closed-loop ground-source heat pump systems [G] // *ASHRAE Trans*, 2000, 106(A): 380-393
- [56] Diao Nairen, Li Qinyun, Fang Zhaozhong. Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2004, 43 (12): 1203-1211
- [57] Fan Rui, Jiang Yiqing, Yao Yang, et al. A study on the performance of a geothermal heat exchanger under coupled heat conduction and ground water [J]. *Energy*, 2007, 32(11): 2199-2209
- [58] 范磊, 马最良. 地下水流动对地下管群换热器传热的影响分析[J]. *太阳能学报*, 2006, 27(11): 1155-1162
- [59] Leonga W H, Tarnawskib V R, Aittomaki A. Effect of soil type and moisture content on ground heat pump performance [J]. *International Journal of Refrigeration*, 1998, 21(8): 595-606
- [60] 李新国, 汪洪军, 赵军, 等. 不同回填材料对 U 型垂直埋管换热性能的影响[J]. *太阳能学报*, 2003, 24(6): 810-813
- [61] 王向岩, 马伟斌, 黄远峰, 等. 超强吸水树脂与源土混合作为地源热泵供热系统回填材料的实验研究[J]. *太阳能学报*, 2007, 28(1): 23-27
- [62] 魏加项, 唐志伟, 丁万磊, 等. 地源热泵系统中集热器强化传热初步研究[J]. *北京工业大学学报*, 2004, 30(1): 55-58
- [63] 刘冬生, 孙友宏, 庄迎春. 增加地源热泵竖直埋管地下换热器换热性能的研究[J]. *吉林大学学报*, 2004, 34(4): 648-652
- [64] Jones W V, Beard J T, Ribando R J. Thermal performance of horizontal closed-loop ground-coupled heat pump systems using flowable fill [C] // *Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, 1996: 748-754
- [65] Gu Yan, O' Neal Dennis L. Modeling the effect of backfills on U-tube ground coil performance [G] // *ASHRAE Trans*, 1998, 104(2): 89-94
- [66] 丁力行, 陈季芬, 彭梦琰. 土壤源热泵垂直单埋管换热性能影响因素研究[J]. *流体机械*, 2002, 30(3): 47-49
- [67] 赵军, 张春雷, 李新国, 等. U 型埋地换热器三维传热模型及实验对比分析[J]. *太阳能学报*, 2006, 27(1): 63-66
- *****
- (上接第 14 页)
- [5] 朱世琦, 王代禹, 习亚华. 漫湾水电站坝体廊道温降效应研究[J]. *制冷*, 2000, 19(4): 1-6
- [6] 牟灵泉. *地道风降温计算与应用* [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982
- [7] 付祥钊. *流体输配管网* [M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006
- [8] 王树禾. *图论* [M]. 北京: 科学出版社, 2004
- [9] 徐瑞龙. *通风网路理论* [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993
- [10] 肖益民. 地下洞室群自然通风网络计算机分析模型[J]. *暖通空调*, 2004, 34(8): 87-90
- [11] Koinakis C J. Combined thermal and natural ventilation modeling for long-term energy assessment: validation with experimental measurements[J]. *Energy and Buildings*, 2005, 37(2): 311-323
- [12] Axley J, Grot R. The coupled airflow and thermal analysis problem in building airflow system simulation [G] // *ASHRAE Trans*, 1989, 95(2): 621-629
- [13] 章熙民, 任泽霖, 梅飞鸣, 等. *传热学* [M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993