

# 地埋管换热器传热模型的 回顾与改进<sup>\*</sup>

哈尔滨工业大学 范蕊<sup>☆</sup> 马最良

**摘要** 回顾了国内外关于地埋管换热器的设计计算理论、传热模型及其计算方法,发现几乎所有的模型都未考虑地下水渗流的影响。举例说明地下水流动对地埋管换热器有较大的影响,建立了考虑热传导和地下水流动共同作用的地埋管换热器的传热模型,并且对单井地埋管进行了初步分析,结果表明地下水渗流能增强盘管的换热能力。

**关键词** 地埋管地源热泵 地埋管换热器 地下水流动 热传导

## Review and improvement on heat transfer model of ground heat exchangers

By Fan Rui<sup>★</sup> and Ma Zuiliang

**Abstract** Reviews the existing calculation theories, numerical heat transfer models and their calculation methods for the design of ground heat exchanger (GHE), and finds that almost all the models are only based on the heat conduction theory without considering the influence of groundwater advection. Illustrates that the groundwater advection has a major influence on the heat transfer of GHE. Establishes the heat transfer model of GHE covering both heat conduction and groundwater advection. Through calculation for single well pipe GHE, finds that groundwater advection enhances the heat transfer.

**Keywords** ground source heat pump, ground heat exchanger, groundwater advection, heat conduction

★ Harbin Institute of Technology, Harbin, China

①

### 0 引言

地埋管地源热泵技术是目前空调领域中的前沿研究课题之一。地埋管地源热泵系统由于具有性能系数高、节能效果好、利用可再生能源、环保效果好、系统简单等优点,在欧美应用较为广泛,但在我国尚处于起步阶段,目前只有很少的地埋管地源热泵机组成功运行。我国地域辽阔,蕴藏着丰富的地表浅层(通常小于 400 m)地热资源,因此有效利用浅层地热资源,以克服传统热泵空调技术中的局限与不足,是非常有意义和有实用价值的。目前地埋管地源热泵之所以没有像空气源热泵那样迅速发展,除了地埋管地源热泵的初投资高和对岩土体的要求外,也不排除至今仍缺少可靠的系统设计和

模拟工具。Cane 和 Forgas 通过计算认为当前北美的地埋管地源热泵工程实例中地埋管换热器的管长都比实际偏大 10%~30%<sup>[1]</sup>,从而使得短期内回收资金更加不可能,不利于地埋管地源热泵的发展和推广。

地埋管换热器与岩土体之间的传热是非稳态的、无限大区域内的传热,过程十分复杂,影响因素繁多。从现有文献来看,关于地下换热器的传热机理分析主要集中在理论研究和试应用阶段,岩土体温度场的研究基于热传导原理,对于考虑地下水运

①<sup>☆</sup> 范蕊,女,1977 年 11 月生,在读博士研究生  
150090 哈尔滨工业大学市政环境工程学院  
(0451) 82291527  
E-mail: fan\_rui@163.com  
收稿日期:2005-06-13  
修回日期:2005-10-17

动的传热机理与换热机理等研究很少,而国内外文献表明地下水横向渗流对岩土体传热过程有极大的影响<sup>[2-5]</sup>。因此,为了了解设置埋管换热器后对原有地下环境特性的影响,对热传导和地下水运动共同作用下的埋管换热器传热机理进行研究十分必要。

### 1 埋管换热器的传热模型

影响埋管地源热泵系统性能的因素较多,包括地下水流动、回填材料的性能、换热器周围发生相变的可能性以及沿管长岩土体物性的变化等等,如何完善埋管换热器的传热模型,使其更好地模拟埋管换热器的真实换热情况,确定最佳埋管换热器的尺寸是发展和推广埋管地源热泵的关键。

埋管系统目前尚处于研究阶段,也一直是埋管地源热泵技术的难点,现有的埋管地源热泵设计方法大都基于埋管换热器的实验研究。埋管换热器一般有三种形式,即垂直埋管、水平埋管和螺旋埋管。水平埋管通常浅层埋设,开发技术要求不高,初投资往往低于垂直埋管;但由于水平埋管换热能力往往低于垂直埋管,而且敷设面积大,开挖工程量大,有时也未必经济。根据埋设方式不同,垂直埋管通常有 U 型管和套管两种,国内外埋管地源热泵工程常用 U 型埋管换热器,尽管套管式埋管换热器换热能力优于 U 型管换热器,但由于其初投资大,工程应用很少,仅用于浅层埋设方式。

现有的埋管换热器设计软件主要基于线热源理论、圆柱热源理论<sup>[6-8]</sup>、能量平衡理论<sup>[9-15]</sup>等建立控制方程。在设计埋管换热器时要考虑长时间运行后埋管换热器的取热、放热不平衡引起岩土体温度场温度的升高或降低,解析法由于能够简便、快捷地得到长时间的运行结果而备受青睐,但是如果考虑进出水管水温、水流速、各地质层以及回填土影响等因素时采用解析法求解就比较困难,因此,必须进行一些必要的简化,例如将 U 型管等价成一个当量单管以采用柱热源理论,或将其看成无限长的线热源以采用线热源理论等。对于长期运行而言,这些简化对结果影响不大,但是对于短时间运行则不然,此时采用数值解法比较有效。因此也有一些模型综合考虑了数值和解析两种方法。

采用解析法的计算模型主要有:Ingersoll 模

型<sup>[16-17]</sup>、IGSHPA 模型<sup>[18]</sup>、Hart 和 Couvillion 模型、Kavanaugh 模型<sup>[19]</sup>以及 Mei 模型<sup>[20]</sup>,具体可参考文献<sup>[21]</sup>。

采用数值法的设计计算模型主要有以下几种。

#### 1) Mei 和 Emerson 传热模型及计算方法<sup>[22]</sup>

Mei 和 Emerson 开发了一个适用于水平管段、考虑了管周围冻土影响的数学模型。该数学模型采用有限差分法求解三个一维偏微分方程,描述管周围、冻土区以及远端区域的放射性热传导过程。此外,又在此基础上附加上管内流体沿管长方向的一维传热方程,成为拟二维模型。该模型对于管壁、冻土区采用了不同的时间步长,对于管内流体和非冻土区采用了大得多的时间步长。Mei 和 Emerson 给出了 48 d 的模拟值和实验值的对比结果。

#### 2) Eskilson 传热模型及计算方法<sup>[23]</sup>

Eskilson 采用一个量纲一的温度反应因子  $g$ -函数来模拟埋管换热器管群的温度场。将埋管随时间变化的热流量分解成单步函数,然后再将这些单步函数叠加起来求取整个岩土体区域的温度场。

#### 3) Nwwa(national water well association)模型及计算方法

该模型是在 Kelvin 线热源方程分析解的基础上建立岩土层的温度场,进而确定换热器的尺寸。该方法也是一种常用的埋管换热器计算方法,它可以直接给出换热器内平均流体温度,并采用叠加法模拟热泵间歇运行的情况<sup>[24]</sup>。

#### 4) Glhepro 与 Gchpcalc 模型

Glhepro 模型是在瑞典 Lund 大学的传热模型基础上建立的,可分析 1 年或多年的情况来设计垂直埋管换热器长度。这种传热分析只适合于没有地下水运动、没有不平衡热吸入或放出的情况。而 Gchpcalc 模型是根据设计条件下岩土体吸收或放出的热量来计算换热器长度的<sup>[25]</sup>。

#### 5) Muraya 模型及计算方法<sup>[25]</sup>

Muraya 利用一个动态的、二维有限元模型分析 U 型管两脚间的热干扰问题。该模型试图通过定义换热器效率,基于岩土体构成和回填土特性、两脚间距、远端和管内温度以及热扩散率来量化这种干扰问题。该模型已经得到采用常热流、常壁温两种条件的柱热源理论解析法的验证。利用该模

型,可以计算取决于管几何形状的综合传热效率和回填土影响度。

#### 6) Rottmayer, Beckman, Mitchell 模型<sup>[26]</sup>

Rottmayer, Beckman 和 Mitchell 在 1997 年提出了一个二维的 U 型埋管换热器数值模型。在该模型中,对于每个 3 m 长的管段采用极坐标网格划分以模拟侧向传热,忽略垂直方向的热传导过程,并且对于管内流体考虑其沿管长的温度变化,因此这其实是个类似于三维的传热模型。在模型验证中发现,其与解析法结果相差 5%,并将此归咎于数值模拟过程中的管几何模型为非圆形所致,因此为了解决该问题,又提出了几何因子(在 0.3~0.5 之间),用来修正岩土体与回填土的热阻值,结果证明与解析法吻合较好。

#### 7) Shonder 和 Beck 模型<sup>[27]</sup>

Shonder 和 Beck 在 1999 年提出了 U 型埋管换热器的一维传热模型。在该模型中将 U 型管等效成单根管,假设在管外围有一薄层,用来模拟 U 型管和管内流体的热容;并假设在薄层、回填土以及周围岩土体中为一维动态热传导,内外边分别为薄层内侧的变热流条件和远端等温边界条件,采用有限差分法和 Crank-Nicolson 方法求解<sup>[24]</sup>。

国内对埋管换热器传热理论方面的研究明显滞后于实验研究,主要成果有:重庆大学结合能量守恒定律,以 Mei 三维瞬态远边界传热模型为理论基础,建立了埋管换热器的传热模型,对运行期和过渡期进行模拟,其计算结果与实测值均较吻合<sup>[28]</sup>。青岛理工大学建立了 U 型竖埋管周围岩土体温度场的二维非稳态传热模型,计算结果与实测值吻合较好,并计算得到了 U 型埋管换热器的热作用半径<sup>[29]</sup>。同济大学建立了一维非稳态传热模型<sup>[30]</sup>;山东建筑工程学院也对埋管换热器模型进行了深入的研究,提出了 U 型埋管换热器中介质轴向温度的数学模型<sup>[31]</sup>。哈尔滨工业大学提出了准三维非稳态 U 型埋管换热器传热模型,以对岩土体蓄冷与埋管地源热泵系统进行研究,模拟值与实验结果有较好的一致性<sup>[32]</sup>。

总之,有很多方法和商业设计软件用于埋管换热器的设计,所有这些设计软件都建立在热传导原理以及确定了岩土体导热系数和容积比热容基础上的。

然而,岩土体是固、液、气相混合的多孔介质,

对于地下竖埋管换热器而言,由于穿越各种不同性质的地质层,各地质层的性能都会极大影响其传热过程,尤其是盘管管段大部分位于地下水位以下的岩土体饱和区内,地下水流动的影响尤为重要,对于孔隙率大、渗透系数较高的含水层,作用更为明显,现有的国内外资料也已经证实了这一点。因此,考虑不同的地质层、地下水流动等因素的影响是很必要的。

## 2 地下水流动对埋管换热器的影响

在当前的现场测试岩土体导热系数分析方法以及埋管换热器设计中只考虑热传导过程,因此,地下水流动会以下面两种途径影响设计过程:1) 现场测试的岩土体导热系数值往往偏高;2) 用较高的导热系数设计的换热器容量可能会偏大。

在明尼苏达州,现场测试的岩土体导热系数极度偏高,经分析是地下水流动引起的<sup>[2]</sup>。英国的 Croydon 建筑是个 3 层办公楼,2000 年秋,英国工程师委员会资助在此建立迄今为止英国最大的地源热泵项目,在供暖季节,管内流体平均温度测试结果与模拟结果极为相近(采用岩土体能源设计者软件(Earth Energy Designer)进行模拟);但是在夏季,管内流体平均温度测试值比模拟值低很多,测试值只达到 3℃,经分析是由于地下水流动使管周围的温度降低而引起的<sup>[3]</sup>。此外,在几个现场测试和采用人工地下水流动的模拟实验中也发现了类似的现象<sup>[4]</sup>。

荷兰的 Witte 博士提出一种地热反应测试法,利用其开发的地热反应装置(如图 1 所示),可以现场测试在输入热量或冷量情况下闭环埋管换热



图 1 地热反应测试装置

器的传热过程,从而得出一些重要的参数,例如导热系数、远端温度、管道阻力等等。为了分析地下水流动对盘管传热的影响,对同一个埋管进行了

有地下水流动和无地下水流动实验,从距离实验管井 5 m 的另一口井抽水模拟地下水流动,实验结果见图 2。在实验初期的 18 h 内,地下水流动对实

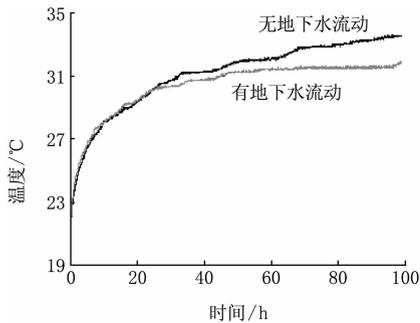


图 2 有、无地下水流动实验结果

验结果影响很小,这主要是由于实验初期温差大,热传导起主要作用,从第 20 h 起,同一时间无地下水流动的岩土体温度明显高于有地下水流动的岩土体温度,而且前者的温升率也明显高于后者。并且两个实验得出的岩土体导热系数值也相差很大,无地下水流动的实验结果为  $(2.34 \pm 0.007) \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,有地下水流动的实验结果为  $(3.22 \pm 0.018) \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;并且随着地下水流速的增加,岩土体的导热系数估计值也显著增加,即使在小流速时影响就已经很显著了(达西流速小于  $3.5 \text{ m/a}$  时,导热系数估计值就已经增加了 6%)<sup>[4]</sup>。由此可见,地下水流动极大地影响了埋管换热器的换热过程。

基于上述内容,笔者建立了考虑热传导和地下水流动共同作用下的埋管换热器的传热模型,并且对单井埋管进行了初步分析,结果表明地下水渗流能够增强盘管的换热能力,有渗流的岩土体温度场相对于无渗流的近于中心对称的岩土体温度场已经发生变形,因此如果盘管在有渗流的岩土体中,而在设计计算中未考虑渗流的影响,则会造成设计容量偏大,带来经济和资源上的浪费<sup>[34]</sup>。

因此,亟待解决的问题是进一步完善埋管换热器与岩土体的换热模型,充分考虑其穿越的不同地质层的影响,描述热传导与地下水流动共同作用下的传热过程。

### 3 结论

埋管换热器模型的完善与否是埋管地源热泵系统能否推广应用的主要影响因素。竖直埋管穿越的地质层以及地下水流动对其传热性能影响很大。因此,进一步深入研究传热机理,完善

埋管换热器的传热模型,探讨热传导和地下水流动二者共同影响下的埋管换热器的传热过程,对埋管地源热泵系统的发展和推广是很有必要的。

### 参考文献

- [1] Cane R L D, Forgas D A. Modeling of GSHP performance[G]//ASHRAE Trans, 1991, 97(1): 909-925
- [2] Chiasson A D. Advances in modeling of ground-source heat pump systems [M]. Oklahoma: Oklahoma State University, 1999
- [3] Witte H J L, Gelder A J V, Serrão M. Comparison of design and operation of a commercial UK ground source heat pump project [C]//1st International Conferral Ground Heat Exchanger, 2001
- [4] Witte H J L. Geothermal response tests with heat extraction and heat injection: example of application in research and design of geothermal ground heat exchangers[EB/OL]. 2001. <http://www.groenholland.nl/download/Lausanne>
- [5] 刁乃仁,李琴云,方肇洪.有渗流时地热换热器温度相应的解析解[J].山东建筑工程学院学报,2003,18(3):1-5
- [6] Carslaw H S, Jaeger J C. Conduction of Heat in Solids[M]. Oxford: Clarendon Press, 1947
- [7] Ingersoll L R, Zobel O J, Ingersoll A C. Heat Conduction with Engineering, Geological and Other Applications [M]. New York: McGraw-Hill Co, 1948
- [8] Carslaw H S, Jaeger J C. Conduction of Heat in Solids [M]. 2nd Ed. London: Oxford University Press, 1959
- [9] 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, 1997,103(1): 287-295
- [10] Mei V C, Baxter V D. Performance of a ground-coupled heat pump with multiple dissimilar U-tube coils in series[G]//ASHRAE Trans, 1986, 92(2A): 30-41
- [11] Leong W H, Tarnawski V R, Aittomaki A. Effect of soil type and moisture content on ground heat pump performance[J]. Int J Refrig, 1998,21(8):595-606
- [12] Couvillion R J, Hartley J G. Low-intensity heat and moisture transfer in moist soils—current models[G]//ASHRAE Trans, 1986,92(2): 756-775
- [13] Tarnawski V R. Effect of snow cover on ground heat

- pump performance and soil moisture freezing[J]. Int J Refrig, 1989, 12: 71-76
- [14] Piechowski M. Heat and mass transfer model of a ground heat exchanger; theoretical development[J]. International Journal of Energy Research, 1997, 21: 860-872
- [15] Piechowski M. Heat and mass transfer model of a ground heat exchanger; validation and sensitivity analysis [J]. International Journal of Energy Research, 1998, 22: 965-979
- [16] Ingersoll L R, Plass H J. Theory of the ground pipe heat source for the heat pump[J]. HPAC, 1948, 20 (7): 119-122
- [17] Ingersoll L R, Zobel O J, Ingersill A C. Heat Conduction with Engineering, Geological and Other Applications[M]. New York: McGraw-Hill Co, 1954
- [18] International Ground Source Heat Pump Association. Design and installations standards [S]. Stilwater, Oklahoma, 1991
- [19] Kavanaugh S P. Simulation and experimental verification of vertical ground coupled heat pump systems[D]. Oklahoma: Oklahoma State University, 1985
- [20] Mei V C, Fischer S K. Vertical concentric tube ground coupled heat exchangers [G] // ASHRAE Trans, 1983, 89(2): 391-406
- [21] 余延顺, 马最良. 土壤耦合热泵系统地下埋管换热器传热模型的研究[J]. 暖通空调, 2005, 35(1): 26-30
- [22] Mei V C, Emerson C J. New approach for analysis of ground-coil design for applied heat pump systems[G]// ASHRAE Trans, 1985, 91(2): 1216-1224
- [23] Eskilson P. Thermal analysis of heat extraction boreholes[D]. Lund: University of Lund, 1987
- [24] Cane R L D. Modeling of GSHP performance[G]// ASHRAE Trans, 1991, 97(1): 909-925
- [25] Muraya N K, O' Neal D L, Heffington W M. Thermal interference of adjacent legs in a vertical U-tube heat exchanger for a ground-coupled heat pump [G]// ASHRAE Trans, 1996, 102(2): 12-21
- [26] 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
- [27] Shonder J A, Beck J V. Determining effective soil formation thermal properties from field data using parameter estimation technique [G] // ASHRAE Trans, 1999, 105(1)
- [28] 刘宪英, 胡鸣明, 魏唐棣. 地热泵地下埋管换热器传热模型的综述[J]. 重庆建筑大学学报, 1999(4): 106-111
- [29] 李■, 仇中柱. 垂直埋管式土壤源热泵埋管周围土壤温度场的数值模拟[J]. 建筑热能通风空调, 2000, 19(4): 1-4
- [30] 张旭. 土壤源热泵的实验及相关基础理论研究[M]// 殷平. 现代空调 3. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001: 75-87
- [31] 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
- [32] 余延顺. 土壤蓄冷与土壤耦合热泵集成系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004
- [33] Austion W A. Development of an In-Situ for Measuring Ground Thermal Properties [M]. Oklahoma: Oklahoma State University, 1998
- [34] 范蕊, 马最良. 热渗耦合作用下的地下埋管换热器传热分析[J]. 暖通空调, 2006, 36(2)

(上接第 49 页)

## 4 结论

4.1 定末端压差控制的节能效果虽然优于定扬程控制,但是在特殊情况下可能出现水泵扬程不足,部分末端空调设备水流量达不到负荷要求的情况。因此在具体应用中应以实际系统的最不利环路中空调设备前后的静压差为基准静压差。

4.2 定扬程控制、定末端压差控制、最小阻力控制这三种变频控制的节能性能依次升高,但无论哪种控制在实际情况下都不可能使“水泵消耗的功率与流量的三次方成正比”,其管路水力特性曲线依次

降低,但皆高于初始的管路水力特性曲线。

## 参考文献

- [1] 姚国梁. 空调变频水泵节能问题探讨[J]. 暖通空调, 2004, 34(6): 32-34
- [2] 徐亦波. 空调冷热水循环泵变转速节能控制方法[J]. 暖通空调, 2004, 34(9): 32-35
- [3] 赵荣义, 范存养, 薛殿华, 等. 空气调节[M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994
- [4] 蔡增基, 龙天渝. 流体力学泵与风机[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999