

文章编号: 1673-9469 (2017) 01-0066-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2017.01.015

影响竖直地埋管深度的因素分析

赵新卓¹, 王春红², 郭文建¹, 吴晓华¹, 史启朋¹

(1. 山东省鲁南地质工程勘察院, 山东 兖州 272100; 2. 河北工程大学 地球科学与工程学院 河北 邯郸 056038)

摘要:《地源热泵工程技术规范》尚未对地埋管换热孔深度做出具体要求, 通过建立三维数值传热模型, 计算了不同深度时的传热情况, 分析各种因素对地埋管换热器深度的影响, 认为换热管内的流体流量为影响换热孔深度的一个重要因素, 地温梯度、回填材料热物性和管道间距也对不同深度换热孔的换热能力产生了一定影响。因此在实际工程中, 需要将换热孔深度加大时应相应提高管内流体流量, 并合理加大换热管尺寸。

关键词: 换热孔深度; 数值传热模型; 流体流量; 换热孔参数

中图分类号: TU83

文献标识码: A

Analysis on the influence factors of the depth of vertical buried tubes

ZHAO Xinzhuo¹, WANG Chunhong², GUO Wenjian¹, WU Xiaohua¹, SHI Qipeng¹

(1. Lunan Geo-engineering Exploration Institute, Shandong Yanzhou 272100, China;

2. School of Earth Science and Technology, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

Abstract: Shallow geothermal energy is defined in *The Standard for Evaluation of Shallow Geothermal Energy* as the heat energy which is “contained in the surface depth no more than 200 meters and not exceeds 25℃”. In addition, there is no specific rule on the Borehole Heat Exchanger(BHE) depth in *Technical Code for Ground-Source Heat Pump System*. Generally take 100 – 120 meters, according to the actual engineering experience and calculation. A three-dimensional numerical heat transfer model is proposed in this paper, which calculates the heat transfer in different depths and analyzes the influence of various factors on the depth of BHE. Concluded that the flow rate in the pipe is the most important factor. Geothermal gradient, thermal physical properties of backfill material and the spacing between pipes also have influence on the heat transfer of the BHE in different depths. So in actual project, if we want increase BHE depth, we should increase the flow rate in the pipe and reasonably increase BHE size.

Key words: depth of borehole heat exchanger; numerical heat transfer models; flow rate; parameters of BHE.

随着我国经济发展, 城市进程化加快, 建筑能耗所占比重越来越大。而浅层地温能的开发利用, 对减少常规能源消耗、节能减排具有重要意义。目前其主要利用方式为水源热泵和地源热泵两种。地源垂直埋管方式由于具有相对占用地表面积较小的特点, 适合我国国情, 得到较广泛的应用^[1]。工程应用深度一般在 100 m 内, 有时 120 m 左右。

《浅层地温能评价规范》^[2]说明: 浅层地温能是指地表以下一定深度范围内(一般为恒温带至 200 m 埋深), 温度低于 25℃, 在当前技术经济条件下具备开发利用价值的地热能。在相对有限的地域内, 增加垂直埋管深度可提高土地或能量资源利用率。但是对于垂直换热孔而言, 增加深度并不意味着每延米的换热量都是完全相同的。这种偏差受

收稿日期: 2016-12-14

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(D20090000833)

作者简介: 赵新卓(1980-)女, 河北唐山人, 工程师, 研究方向为水工环勘查。

到各种因素影响,如换热管直径、介质(水)流量、管距、回填材料性能等,这些因素产生的影响也是相互关联的,使对非稳态的传热过程分析更加困难。

1948年 Ingersoll 和 Plass 提出的线热源理论^[3-4]是目前大多数土壤源热泵系统设计的理论基础。但是对线热源轴线方向没有定义差别。《地源热泵工程技术规范》^[5]提出钻孔内两根管子之间的热阻 R_{12} 的概念,但不能表述出不同深度时热阻的区别。曾和义、刁乃仁^[6]对不同的布置情况进行计算并对比,根据计算结果,不同深度的钻孔热阻没发现明显差别。於仲义、胡平放研究了土壤源热泵系统地埋管埋深度主要因素^[7],认为取决于工程现场的地质状况和当地的工程费用而定,根据两者取用最佳的钻井长度。并指出加大钻井深度只能有限提高地埋管的排热或取热能力。王艳对介质流速对换热的影响做了数值分析^[8],建议进口流速设计在 $0.4 \sim 0.6$ m/s的范围内。国内外的大部分地源热泵设计专业软件基本都是把深度数值作为已知参数输入,不能对各种综合条件对深度的影响加以分析。专利^[9]提供了一种分层测试的方法,可对不同深度处多个温度光纤取样点测量,进而计算不同层位处地层热导率等参数。虽然对地层热参数分层处理效果较好,但是也不能反映和解析不同深度时综合的温度响应。

上述研究表明,不同深度下,影响单位换热量大小的因素较多,如介质流量、传热管管径、流速变化引起的壁面传热系数变化、壁厚、回填材料导热系数等。已经明确的是:钻孔较浅时,受恒温层上部地层温度的季节波动影响,换热效果不稳定。随钻孔深度增加,换热管间距引起的“热短路”效应明显,导致单位延米换热量下降。深度增加后还会使管路延长,增加管道阻力。

根据以上分析,钻孔内的传热是一个长时间、非稳态的复杂过程,使得一般的传热模型趋于繁复,一旦根据已知条件建立计算模型后,各参数的特征相对单一,难以适应变流量、变口径、变管道间距的分析要求。所以要完成该项研究任务,必须建立一个适当简化、又能完全反应各必备要素的数值模型,通过改变假设参数,找出影响因素与深度的关系。

1 数值计算模型

1.1 水平模型

由于在实际测试工程中地温场的恢复时间较长,通过实地实验来获得传热特征是困难的。所以本文

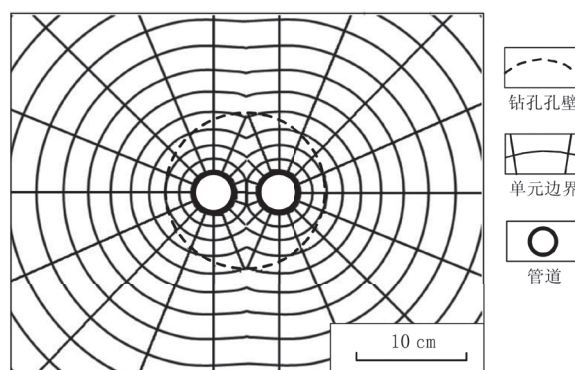


图1 数值计算模型单元网格结构图

Fig.1 The subdivision grid of the numerical model

采用三维数值传热模型计算,来模拟不同深度水流温度、地层温度的变化。在三维数值传热计算中,需要将地层、回填材料、管材的热物性参数等试验条件全面输入,以保证计算准确、可靠。

图1中两根换热管保持一定间距,每根管周边的计算单元呈辐射状、层次扩展,随距离增大,单元体积增大,以减少计算单元数量。局部不规则的单元适当变形处理,试验数据证明不影响计算精度。该模型特点为在控制计算误差合理范围内计算单元体积增大,适应于长时间的传热计算。

数值模型基本计算公式如下:

$$T = \sum_{i=1}^N \frac{2 * (T_i - T_0) * J_s}{(R_i + R_0) * V_0 * \rho c} + T_0 \quad (1)$$

式中 T_0 : 某时刻的网格单元温度; T : 下一步长时需计算的网格单元温度; T_i : 与计算网格单元相邻的单元在某时刻的温度; R_i : 与计算网格单元相邻的单元的热阻; R_0 : 计算单元的热阻; V_0 : 计算单元的体积; ρc : 计算单元的体积热容; J_s : 每一个计算步长的时间; N : 与计算网格单元相邻的单元的数量。

$$R_i = \frac{M}{2 * \pi * \lambda} * \ln \left(\frac{d_0}{d_i} \right) \quad (\text{径向}) \quad (2)$$

$$R_i = \frac{L}{S * \lambda} \quad (\text{圆周方向与不规则单元}) \quad (3)$$

式中 λ : 地层热导率; M : 辐射状分区数目; d_0 : 计算单元弧段所在的圆的外径; d_i : 计算单元弧段所在的圆的内径; L : 计算单元长度或弧段长度; S : 计算单元截面积。

R_0 的计算方法与 R_i 相同,管道与介质流体的壁面传热热阻参照相应规范。

1.2 垂直模型

在换热管长度方向上,不同位置管内流体的温度是有较大差别的,为了在数值传热模型中表述这种差别与影响,将图1所示网格结构分成约10~20组叠加构造,用以代表不同深度地层。

在模型的垂直方向,每个计算单元按照约5~10 m设定,当换热管内水的流速为0.4~0.6 m/s,在时间步长25 s时,介质流动距离也在一个垂直计算单元长度左右,垂直模型能反映出不同深度的传热变化。为简化计算,将实际地温梯度引起的垂向计算单元之间的热传递不予考虑。

换热管内流体在实际中是连续运动的,利用微分原理,将流体切割成一系列长柱状体,将连续流动视为断续运动。在每一个计算步长内,每个运动流体的移动长度和流速相关。通过每一步的断续推移,模拟管内温度传递状态。计算方法(图2)。

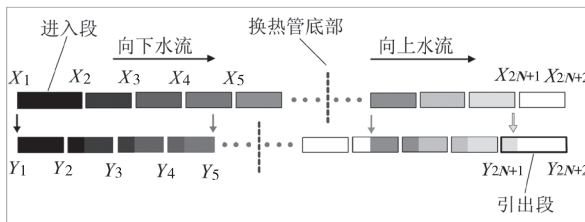


图2 管内流体传递计算结构图

Fig.2 The fluid transfer calculation chart

首先求取转换系数 K_j^i :

当 $(X_i - Y_j) * (Y_{j+1} - X_{i+1}) < 0$ 时,

$$K_j^i = \frac{\|X_{i+1} - Y_j\| - \|X_i - Y_{j+1}\| - \|X_{i+1} + Y_{j+1} - X_i - Y_j\|}{2 * (Y_{j+1} - Y_j)} \quad (4)$$

当 $(X_i - Y_j) * (Y_{j+1} - X_{i+1}) \geq 0$ 时,

$$K_j^i = \frac{X_{i+1} - X_i}{Y_{j+1} - Y_j} \quad (5)$$

上部表示某一时刻水流分段温度情况,下部表示下一时刻温度计算结果。 X_1 、 X_2 、 Y_1 、 Y_2 等表示一维坐标数值变量,设置地层分层为 N 层,使用变量表示一定流量下水流柱体的长度,上部 X_1 — X_2 为进入段, X_2 — X_3 为第一层, X_3 — X_4 为第二层,依次排序,至换热管底部后层号递减, X_{2N+1} — X_{2N+2} 为第一层。下部 Y_1 — Y_2 为第一层, Y_2 — Y_3 为第二层,依次排序,至换热管底部后层号递减, Y_{2N} — Y_{2N+1} 为第一层, Y_{2N+1} — Y_{2N+2} 为引出段。将引出段温度计算得出结果后,增加温差(恒功率模式)或设定一定温度(恒

温度模式),赋值于进入段,进入下一步长的计算。

将得到 K_j^i 的数值判别是否大于1,大于1的数取值为1。此时以下公式成立:

$$K_j^1 + K_j^2 + K_j^3 + \dots + K_j^{2N+1} = \sum_{i=1}^{2N+1} K_j^i = 1 \quad (6)$$

以 T^i 表示上一时刻各段温度,以 T_j 表示下一时刻各段温度,则:

$$T_j = K_j^1 * T^1 + K_j^2 * T^2 + \dots + K_j^{2N+1} * T^{2N+1} = \sum_{i=1}^{2N+1} K_j^i * T^i \quad (7)$$

依次求出 T_j 后,进入图1所示单元分别计算,计算得到 T^i 的数值结果进入下一循环。

1.3 模型参数

该数值模型可以对恒温工况和恒功率工况进行模拟。虽然恒功率方式在《地源热泵工程技术规范》中推荐使用,易于求解地层的综合热导率,便于设计使用参数。但这种求解综合热导率的方式未考虑换热管内流体流量因素,并且对不同深度传热情况平均化处理^[10]。而恒温模式数据结果直观,能更直接地反应钻孔内部的传热区别。利用数值计算模型,也可以从恒温模式中导出温度曲线,与实际测试数据拟合,计算地层综合参数。这种方法由于加入了流量数据,计算结果更加准确。所以本文采用恒温工况方式进行数值模型计算,表1为恒温

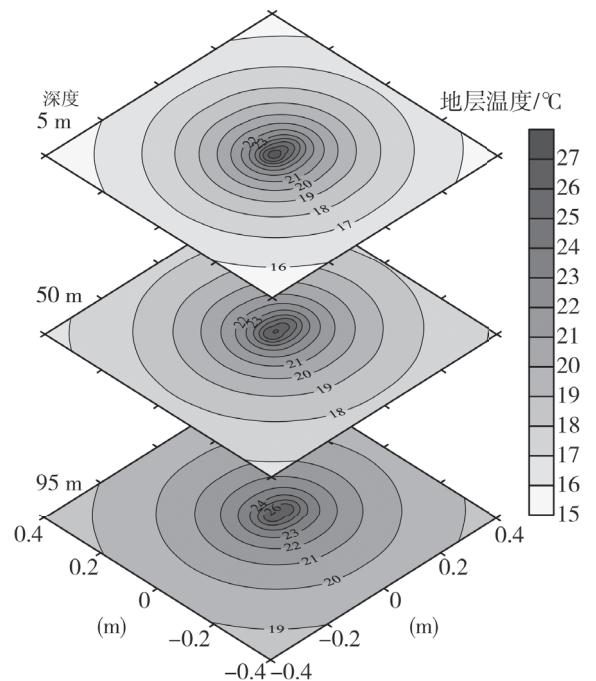


图3 典型参数地层剖面温度响应图

Fig.3 The temperature response figure of stratigraphic profile typical parameters

表 1 数值计算模型参数表
Tab.1 The parameters list of numerical calculation model

项目	典型	扩展	工程常用
钻孔直径 /m	0.15		0.14 ~ 0.2
钻孔深度 /m	100	20 ~ 200	50 ~ 120
管道外径 /mm	32		25 ~ 32
管道内径 /mm	26		20 ~ 26
管道形式	单 U		单 U\双 U
管间距 /m	0.06	0.06\0.1	0.04 ~ 0.1
地温梯度 /(℃ · 100 m ⁻¹)	4		2 ~ 4
地层综合热导率 /(w · ℃m ⁻¹)	2		1 ~ 3
地层体积热容 /(mJ · m ³ ℃ ⁻¹)	2		1.5 ~ 3
回填材料热导率 /(w · ℃m ⁻¹)	2	1\2	1 ~ 3
回填材料体积热容 /(mJ · m ³ ℃ ⁻¹)	2		1.5 ~ 3
管内流量 /(m ³ · h ⁻¹)	1	0.2 ~ 2	0.5 ~ 2
进水温度 (夏) /℃	30	24\27\30	24 ~ 35
进水温度 (冬) /℃	8		6 ~ 12

度工况下各参数情况。

说明：典型参数指初始参数；扩展参数指研究某单项参数的影响时，将该项扩展成多个数据，此时模型的其他参数归为典型状态。

在典型的夏季工况模拟数据模型计算下，48 h 后不同深度地层剖面温度响应如图 3，在不同深度处，均为靠近换热管位置温度梯度大，外部温度梯度变小。受地温梯度影响，95 m 处边部温度高。相对地，50、5 m 处边部温度低。5 m 处两根管路之间温度梯度明显，50 m 处相对则稍小，至换热孔底部 95 m，则两根管热管之间温度基本一致。

两种工况，分别设置 3 种流量，0.5、1、2 m³/h。对应管内流速分别为 0.262、0.523、1.046 m/s。模拟时间取 30 d。6 条换热功率随时间变化曲线见图 4。

在各种不同质量流量模式下，换热功率初期下降较快，后期下降较慢，各曲线互不交叉，下降趋势统一。流量大时，相对换热功率大。温差大时，换热功率大。经过对换热功率曲线进行数据拟合，发现一次对数不能满足精度要求，而双重对数则能很好地对时间换热功率曲线拟合。对测试曲线截取 2 d 或 3 d 进行拟合后，其推测的 30 d 数据与模型数据差别不到 0.5%。说明在实际测试中，可用 2 ~ 3 d 的测试原始数据可推导到较长时间后的换热功率。拟合公式为：

$$Q=K_0*\ln(\ln(\tau)-K_1)+K_2 \tag{8}$$

式中 Q ：换热功率； K_0 ：拟合系数； K_1 ：拟合系数，一般取值范围 7.5 ~ 8.5； K_2 ：拟合系数； τ ：时间。

图 4 各条曲线与拟合公式均说明：2 ~ 3 d 时的换热功率与 30 d 相差约 1/4。在常规的工程恒温度测试中，人们常将 2 d 时的换热功率数值直接使用，是一种误解，应予以重视与更正。

2.2 质量流量与深度

虽然 2 d 与较长时间的测试换热量结果相差较大，但在相对固定的系统参数情况下，48 h 的换热量结果仍有明确的相对参照作用。另一方面，在实际工程测试时，也难以做到更长的时间。所以将 48 h 为节点，通过数值模型计算不同深度、流量等参数条件下的换热能力。

2 模型计算数据分析

2.1 长时间数据拟合

对工程中经常使用的冬夏输入温度 8℃、30℃

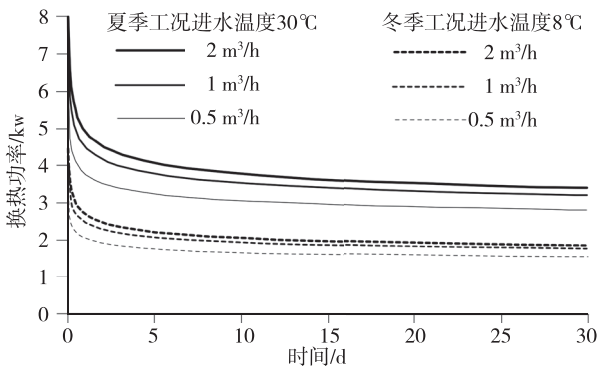


图 4 长时间恒温度工况换热功率图
Fig.4 The heat power figure of constant temperature condition for a long time

图5显示了3种不同的流量下,冬季进水8℃,夏季进水30℃下的6条深度-换热功率曲线。6条曲线在20 m处的反向延长线都指向原点,随深度增加,夏季工况的三种流量的换热量曲线斜率变小,每延米平均的换热量降低,整个换热井的换热量没有随深度增加而正比增加。相对流速低时,如流量0.5 m³/h,整个换热井的总换热量随深度增加时的增幅就变得更小。在这种特定情况下,通过加深钻孔来获得更大的换热能力意义不大。在冬季工况下,较小流量时也具有这种变化特征,但整体降幅变小。当流速变大时,随深度增加,曲线斜率增加,换热功率增加幅度大于深度增加的幅度。

6条换热曲线的综合特征说明两点:一是随深度增加,换热管两根之间的热传导成为一个干扰因素,同等深度时,在流量较小的情况下,由于管间相对温差更大些,因此“热短路”现象更明显;二是地温梯度影响:随换热孔深度增加,其平均原始地层温度相应增大,相对夏季工况,流体与地层之间的温差减小,而冬季工况变大。这种温差的变化导致冬季工况与夏季工况曲线特征产生较大差异。

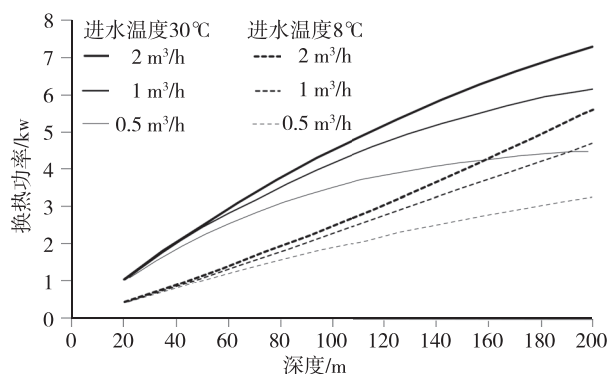


图5 不同流量时深度—换热功率图

Fig.5 The depth - heat power figure in different flow rates

2.3 换热孔参数与深度

换热管间距与回填材料的热物性参数对换热能力是有一定影响的。以典型数据为对比参数,也分别计算将换热管间距与回填材料热导率减少时的换热功率。冬季与夏季工况下,流量1 m³/h时不同参数的换热情况见图6。

以间距0.1 m、热导率2 w/℃m时的换热功率曲线为参照,当回填材料热导率减少为1 w/℃m与换热管间距减少至0.06 m时,换热功率均有不同程度下降,反映出参数变化引起的差异。由于不是同一种参数比较,相互之间的换热功率差值没

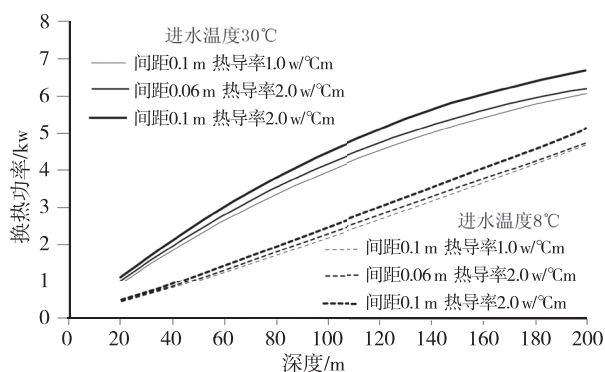


图6 不同参数时深度—换热功率图

Fig.6 The depth - heat power figure in different parameters

有直接比较意义。但是存在一个主要特点:0.1 m、1.0 w/℃m与0.06 m、2.0 w/℃m两曲线间中间距离稍大,而两端接近闭合。说明在换热管间距较大时,随深度增加受管间热短路影响相对较小,所以0.1 m、1.0 w/℃m换热功率曲线在深度增加时相对斜率增加。在实际工程中,换热孔设计较深时,应适当加大换热管间距,特别是在换热孔的上部位置,由于管间温差大,更应保持合理的换热管间距。

2.4 质量流量与传热系数

在《浅层地温能评价规范》中提到的传热系数概念,并没有与流量因素关联,是缺乏完整性的,

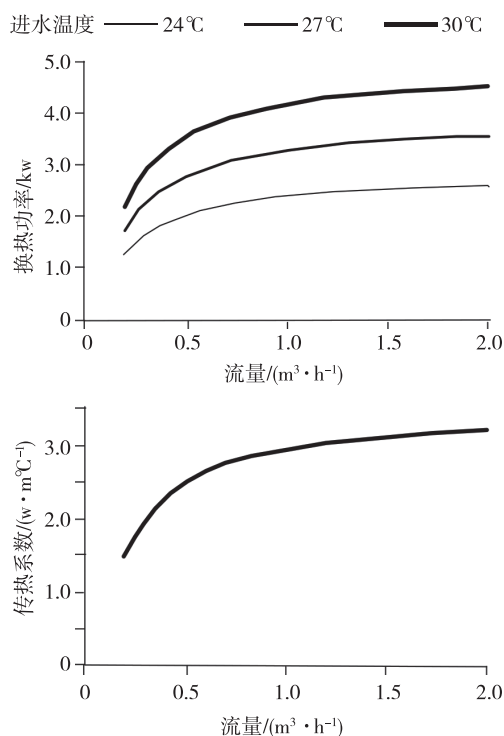


图7 不同进水温度时流量—换热功率、传热系数图

Fig.7 The depth - heat power and heat transfer coefficient figure in different inlet water temperature

将典型参数以不同进水温度输入数值计算模型，结果见图 7。

由图 7 可见在不同流量下，同一进水温度的换热功率不同，其中流量超过 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ 后，随流量增加，换热量增加幅度变小。按照传热系数公式，将三种进水温度时的换热功率转换成传热系数，见图 7 右侧：三条不同进水温度下的传热系数曲线重合。随流量不同，传热系数数值仍存在同样变化趋势。

2.5 流量增大措施

增大流量是有利于提高换热能力的，但流量增大会带来水流功率消耗增大，据《地源热泵工程技术规范》：

$$P_d = 0.158 * \rho^{0.75} * \mu^{0.25} * d_j^{1.25} * V^{1.75} \quad (9)$$

式中 P_d ：单位长度的沿程阻力； μ ：流体的动力黏度； d_j ：管道内径； V ：流体流速。

可见，流速或流量增大，会显著增加流程阻力，增大功耗。

通过将流速 V 替为为流量 Q ：

$$V = \frac{Q}{900 * d_j * \pi} \quad (10)$$

上式可变形为：

$$P_d = \frac{1.441 * \rho^{0.75} * \mu^{0.25} * Q^{1.75}}{d_j^{2.25} * 10^7} \quad (11)$$

管道内径的指数数值大于流量指数，在深度加大时，通过改变管道直径，可以在较大程度上，降低流动阻力。表 2 为 ASHRAE 推荐的深度—管道直径关系。

表 2 深度—管道直径对照表

Tab.2 The comparison table of depth- pipe diameter

深度 /m	管径规格
30 ~ 60	DN20
45 ~ 90	DN25
75 ~ 150	DN32
90 ~ 180	DN40

如表 1 所示，本次模型只对单 U 管道进行计算，对双 U 与套管等形式未作扩展计算，但所得出的基本结论是一致相关的。在实际工程中，还需考虑由于管材直径加大后壁厚增加带来的传热热阻增加的影响，以及深度加大后对管道承压的要求。

3 结论

流量参数是影响不同深度换热能力的重要因素；

换热孔在 100 m 内时，常规参数状态下，流量变化影响较小，随深度加大，流量参数影响权重因素加大；其中，夏季放热工况下较冬季工况随深度增加换热能力增加的幅度减小；孔内回填材料热物性参数、管道间距等因素也使深度较大的换热孔的冬夏换热性能产生不同的变化。

通过加大换热管内径，增加介质流量，增大管间距等措施，可提高深度较大换热孔的换热能力。但是，随深度增加，钻进难度增加，可钻性差，单位成孔成本提高，所以实用的深度加大方案存在一定限制。

利用这种数值计算方法，同样可以在恒温度测试时通过拟合法求出热导率等参数，由于引入了流量参数，使深度加大时的求解结果更加准确。

该计算方法采用热传导模型，未考虑地下水渗流条件。一般地下含水层的分布是广泛的，地层的透水性是有较大区别的。在地层渗透系数与水力梯度较大的情况下，该模型计算所得结论的适用性还须进一步考证。

参考文献：

- [1] 张明杰，王景刚，鲍玲玲. 我国地源热泵的发展现状及国外热泵推广策略[J]. 河北工程大学学报：自然科学版，2008，25(2)：25-28.
- [2] DZT 0225-2009，浅层地热能勘查评价规范[S].
- [3] INGERSOLL L R, PLASS H J. Theory of the ground pipe heat source for the heat pump[J]. HPAC, 1948, 20(7): 119-122.
- [4] INGERSOLL L R, ZOBEL O, INGERSOLL A C. Heat Conduction with Engineering, Geological and Other Applications[M]. New York: McGraw-Hill Co, 1954.
- [5] GB 50366-2009，地源热泵工程技术规范[S].
- [6] 曾和义，刁乃仁，方肇洪. 竖直埋管地热泵换热器钻孔内的传热分析[J]. 太阳能学报，2004，25(3)：399-405.
- [7] 於仲义，胡平放，袁旭东. 土壤源热泵埋管换热实验研究[J]. 华中科技大学学报：城市科学版，2008，25(3)：157-161.
- [8] 王 艳，刁乃仁. 竖直 U 型埋管热作用半径的数值分析[M]. 北京：地质出版社，2011.
- [9] 杨卫波. 一种地下岩土分层热物性现场热响应测试方法：中国，CN201210207869[P]. 2012-10-10.
- [10] 赵 进，王景刚，杜梅霞，等. 地源热泵土壤热物性测试与分析[J]. 河北工程大学学报：自然科学版，2010，27(1)：58-60.

(责任编辑 王利君)