

# 基于非等温管道流动的浅层地热泵有限元分析

於一明<sup>1</sup>, 刘干斌<sup>2</sup>, 蒋 蓓<sup>3</sup>

(1. 杭州市国土资源局, 杭州 310012; 2. 宁波大学 岩土工程研究所, 浙江 宁波 315211;  
3. 浙江建设职业技术学院 建筑工程系, 杭州 311231)

**摘 要:** 基于流场、温度场多场问题的有限元方法, 对非等温管道流动的浅层地源热泵这一工程技术进行了数值模拟分析。首先, 在假定的基础上给出了地源热泵多场问题的数学控制方程, 然后利用 COMSOL Multiphysics 有限元软件建立了相应数值模型, 对地源热泵的相关施工参数影响进行了分析。结果表明: 随埋深增加, 地埋管出水温度增加, 每延米管长换热功率减少; 地埋管内径越小, 其出水温度越低, 每延米管长换热功率也减小。两管靠得越近, 两者之间的热阻就越小, 导致热短路现象, 进而影响进水管温度。随着导热系数的增大, 出水温度将降低, 每延米管长换热功率将增大, 在回填材料导热系数小于或略大于岩土体导热系数时, 使用好的导热系数回填材料在提高每延米管长换热功率效果方面比较明显, 这种效果在进一步提高回填材料导热系数时将趋缓。

**关键词:** 地源热泵; 流场; 温度场; 数值模拟

**中图分类号:** TU831; TU833

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-8798(2015)03-0218-07

## Finite element analysis of ground source heat pump based on non-isothermal pipe flow

YU Yiming<sup>1</sup>, LIU Ganbing<sup>2</sup>, JIANG Bei<sup>3</sup>

(1. Hangzhou Land Resources Bureau, Hangzhou 310012, China;  
2. Institute of Geotechnical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;  
3. Department of Architectural Engineering, Zhejiang College of Construction, Hangzhou 311231, China)

**Abstract:** In view of the engineering technology of the ground source heat pump based on the non-isothermal pipe flow, finite element method based on flow field and temperature field is used to simulate it. Firstly, these control equations for the ground source heat pump's problems are presented. Then, a related model is established by using finite element software called COMSOL Multiphysics. And the influence of construction parameters are analyzed. The research results show that with the increase of buried depth, temperature of water coming from tubes

**收稿日期:** 2015-04-01

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51278256, 51178227)

**作者简介:** 於一明(1978— ), 男, 浙江省杭州人, 工程师, 硕士研究生, 主要从事土地资源管理及土木工程研究。

increases and the thermal power per linear meter decreases. When distance between the two pipes gets closer, the thermal resistance gets smaller, which leads to thermal short-circuiting, affecting the temperature of the inlet pipe. With the increase of the coefficient of thermal conductivity, the temperature of outlet water decreases while the thermal power per linear meter increases. When the backfill material's coefficient of thermal conductivity is less than or slightly higher than that of rock soil mass, using backfill materials which have high coefficient of thermal conductivity can greatly improve thermal power per meter. But this effect will slow down when further improving the backfill material's coefficient of thermal conductivity.

**Key words:** ground source heat pump; flow field; temperature field; numerical simulation

地源热泵是一种陆地浅层能源通过输入少量的高品位能源(如电能)实现由低品位热能向高品位热能转移的可再生能源利用技术。该技术将热交换器埋入地下,通过循环液在U形管中的循环流动,实现与地层土壤的冷热交换,以达到夏季降温和冬季供暖的目的。它具有节能、环保、经济、应用范围广等优点;但从多物理场角度来讲,地源热泵包括了热场和流场,并且流场对U形管换热问题有重要影响。因此,地埋管热交换是典型的多物理场问题。

目前,学者与工程师们对地源热泵问题已进行了相当的研究,仇安娜等<sup>[1]</sup>及严济才<sup>[2]</sup>对地源热泵的结构、工作原理及其优点进行了详细的介绍;郭凯敏<sup>[3]</sup>在阐述地源热泵工作原理后,介绍了其广阔的应用前景;张国柱等<sup>[4]</sup>在一定假定的基础上对寒区隧道地源热泵供热系统进行分析,得到了热段温度场的解析解;李新等<sup>[5]</sup>建立了螺旋埋管地热泵换热器的线圈热源模型,并求得了其解析解。

综上所述,目前对地源热泵多场问题的研究主要集中在该技术工作原理、优缺点的探索上,但这些都仅仅是一个定性的阐述。以简化的解析解来描述该技术的研究并不多见,且解析解往往是将流场和温度场两部分割裂开来,无法得到一种较为准确的解析解模型,因此具有较大的局限性。本研究利用COMSOL Multiphysics有限元软件基于非等温管道流动理论对浅层地源热泵进行了有限元数值模拟,并对相关施工参数进行了详细分析,其研究结果对工程实践具有一定的指导意义。

## 1 控制方程

任一问题的控制方程均建立在一定假定的基础上,针对非等温管道流动的浅层地热泵作如下基本假定:

- 1) 速度断面充分发展,不会在同一个断面处改变;
- 2) 在管段之间,断面面积允许改变;
- 3) 经验函数描述黏性损失;
- 4) 冲击可以忽略;
- 5) 流体速度方向沿管轴;
- 6) 管周围温度相等;
- 7) 管壁的热传递是准静态的。

在上述假定的基础上,现给出地源热泵多场问题的数学控制方程。

### 1.1 动量方程与连续方程

管道流问题通过求解动量方程与连续方程,可以计算管道中不可压缩流体的压力、水流速度。具体如下:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\nabla p - f_D \frac{\rho}{2d_h} u |u| + F, \quad (1)$$

$$\frac{\partial A\rho}{\partial t} + \nabla \cdot (A\rho u) = 0. \quad (2)$$

式中:式(1)右边第二项表示由于黏性剪切产生的流体压力下降; $u$ —通过管道断面的平均速度; $\rho$ —流体的密

度;  $p$ —水头压力;  $f_D$ —达西摩擦因子,  $f_D = 8 \left[ \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + (B+C)^{-1.5} \right]^{1/12}$ , 其中,  $B = \left[ -2.457 \ln \left( \left( \frac{7}{Re} \right)^{0.9} + 0.27(e/d) \right) \right]^{16}$ ,  $C = \left( \frac{37530}{Re} \right)^{16}$ ,  $Re$  为雷诺数,  $Re = \frac{\rho u d_h}{\mu}$ ,  $\mu$  为流体黏性系数,  $e$  为表面粗糙度;  $F$ —体积力;  $d_h$ —平均水力直径,  $d_h = \frac{4A}{Z}$ ,  $A$  为管道面积,  $Z$  为湿周;  $\nabla$ —梯度,  $\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)^T$ ;  $t$ —时间参数。

令  $e_t = (e_{t,x}, e_{t,y}, e_{t,z})$ , 为沿管轴单位切向矢量。因与管轴垂直的流体速度分量均假设为 0, 故方程 (1) 可改写成:

$$e_t \cdot \left[ \rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\nabla p - f_D \frac{\rho A}{2d_h} u |u| + F \right]. \quad (3)$$

式 (3) 中: 切向速度可以被定义成  $u = u e_t$ 。

## 1.2 热平衡方程

对于不可压缩的管道流体, 其热平衡方程有:

$$\rho A C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho A C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot A k \nabla T + f_D \frac{\rho A}{2d_h} |u|^3 + Q + Q_{\text{wall}}. \quad (4)$$

式 (4) 中:  $C_p$ —常压下流体比热容;  $k$ —热传导系数; 右边第二项对应黏性剪切产生的摩擦热;  $Q$ —广义热源;  $Q_{\text{wall}}$ —通过管壁的热量,  $Q_{\text{wall}} = (hZ)_{\text{eff}} (T_{\text{ext}} - T)$ ,  $(hZ)_{\text{eff}}$  为热传递系数  $h$  与管壁周长乘积的有效值,  $T_{\text{ext}}$  为管壁外侧的温度。

## 2 有限元模型

基于上述数学控制方程, 利用 COMSOL Multiphysics 有限元软件, 对地源热泵技术建立有限元模型。

### 2.1 模型几何尺寸及参数

U 形管取 dn25 聚乙烯管, 外径为 25 mm, 内径为 20.4 mm, 两管中心距为 0.1 m, 钻孔深 60 m。根据 GB 50366—2009《地源热泵系统工程技术规范》要求, 钻孔直径不宜小于 0.11 m, 现取钻孔直径为 0.15 m。钻孔内设置单 U 形管, U 形管内的循环介质采用纯水, 流体速度取 0.4 m/s。规范指出钻孔间距离宜为 3~6 m, 这个参数实际上是换热管在岩土体内温度扩散范围理论与经验的总结给出, 因此, 本模型岩土体半径取 3 m, 其模型如图 1 所示。

为了方便网格划分, 将 U 形管管底 U 弯管简化为直角管。循环介质、U 形管管壁、回填材料及岩土体的各种所需参数及取值如表 1 所示。

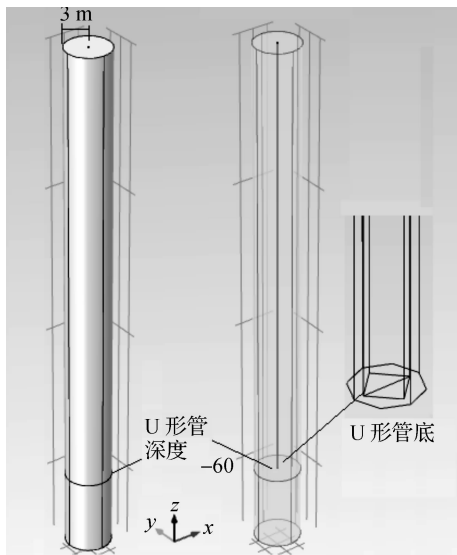


图 1 模型示意图

Fig. 1 Diagram of model

表 1 模型参数

Table 1 Parameters of model

参数名称	单位	数值
进水温度	℃	35
循环液密度	kg/m <sup>3</sup>	1 000
循环液导热系数	W/(m·K)	0.58
循环液比热容	J/(kg·K)	4 186.8
循环液运动黏滞系数	m <sup>2</sup> /s	1.00E-06
管壁表面粗糙度	mm	0.001 5
管壁导热系数	W/(m·K)	0.42
回填材料密度	kg/m <sup>3</sup>	1 900
回填材料导热系数	W/(m·K)	2.2
回填材料比热容	J/(kg·K)	836.8
岩土体平均密度	kg/m <sup>3</sup>	1 800
岩土体导热系数	W/(m·K)	1.3
岩土体平均比热容	J/(kg·K)	1 000

## 2.2 初始值及边界条件

### 2.2.1 岩土体

考虑到地表换热的复杂性和实际情况,地埋管一般埋设在地表 2 m 以下,模型的顶面为地表下 2 m。假设该顶面温度为 28 °C。

土体温度的初始值根据一般地温的分布规律假设如下:距顶面 15 m 以下温度恒定为 18 °C;从顶面到顶面下 15 m 处,温度从 28 °C 到 18 °C 沿深度线性变化。

边界条件:在研究单孔周围无其他地热孔相互作用时,土体周围的边界条件均设为常温,且该温度值与初始值相同;当研究在单孔周围有其他地热孔相互作用时,岩土体表面和底面仍设为常温边界,但四周边界设为绝热边界。

### 2.2.2 U 形管

为了不引起计算时的数值震荡,假设初始流速为 0.02 m/s,初始时循环液温度与四周土体温度相同,管内初始气压为大气压。进水口为已知流速边界,出水口为恒压边界,其压力为大气压。出水口温度边界为 Heat OutFlow 边界,进水口为已知进水温度边界,进水温度值为过渡函数形式,即  $T_{s_{ini}} + (T_{in} - T_{s_{ini}}) \cdot \text{step}(t)$ ,  $T_{s_{ini}}$  为岩土体顶面的初始温度,  $T_{in}$  为进水的最终温度,  $T_{in}$  为 35 °C,  $\text{step}(t)$  为一平滑的阶跃函数,  $t$  大于 100 s 后其值恒为 1; 0~100 s 时  $\text{step}(t)$  随时间变化曲线如图 2 所示。

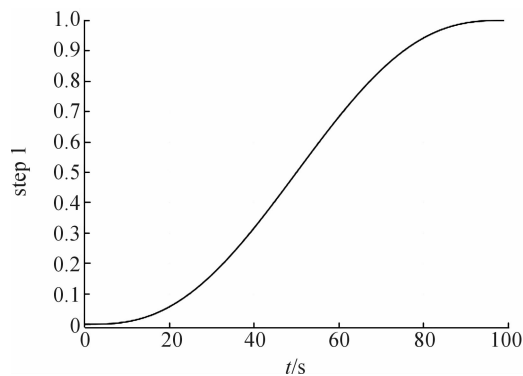


图2 平滑阶跃函数

Fig. 2 Smooth step function

## 3 计算结果分析

影响地源热泵换热功率的施工参数有:埋管深度、管型、支管间距、回填材料热物性等。

### 3.1 埋管深度的变化

在其他参数不变的情况下,埋管及钻孔深度发生变化时,其出水口温度变化如图 3 所示。

图 4 为 18 d 时出水温度与埋深关系曲线。由图 4 可以看出,出水温度随埋深增加而增加,但是随着埋深增加其增长速率会减慢。40~60 m 出水温度降低 1.00 °C, 60~80 m 出水温度降低 0.77 °C。说明随着埋管孔深的增长,其增加部分换热效率在降低。

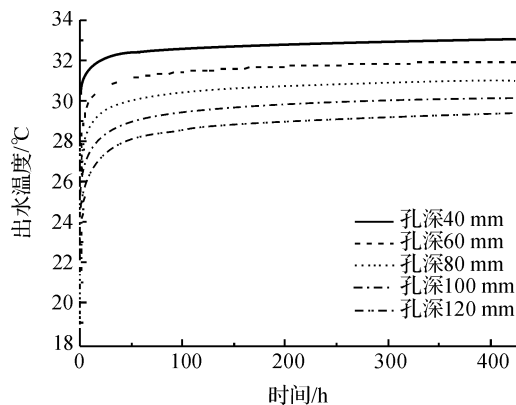


图3 18 d 连续运行不同埋管埋深出水温度对比

Fig. 3 Comparison of outlet water's temperature of different buried depths with 18 days continuous running

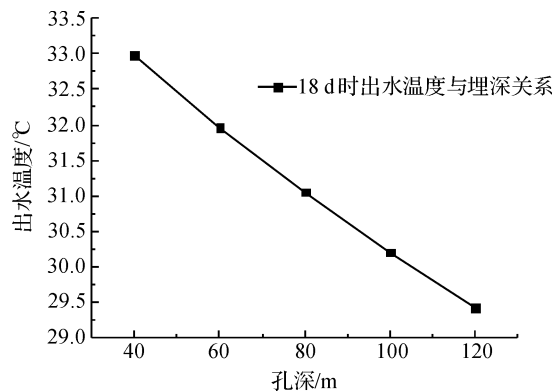


图4 出水温度与埋深关系图

Fig. 4 Relation between water temperature and buried depth

图 5 和图 6 为地埋管埋深与每延米管长换热功率的对比图。由图 5 中可知,随着地埋管埋深的增加,每延米管长的换热功率将减少。由图 6 可知,随着埋深增大,换热功率减少的速率将逐步增大。因此,在实际工程中,单纯地通过增加埋管深度来提高单钻孔换热能力,所带来的成本增加和换热能力的增加并不成正比。

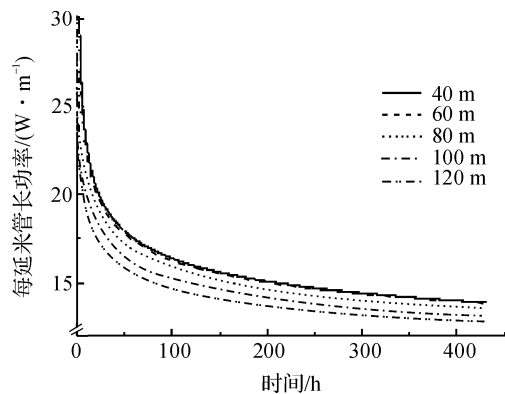


图 5 不同埋管埋深的换热功率随时间变化曲线

Fig. 5 Heat transfer power of different buried depths changes with time

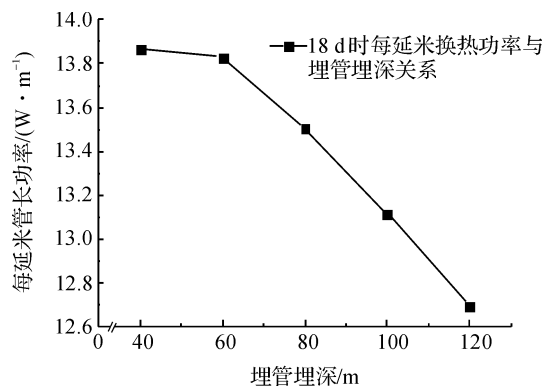


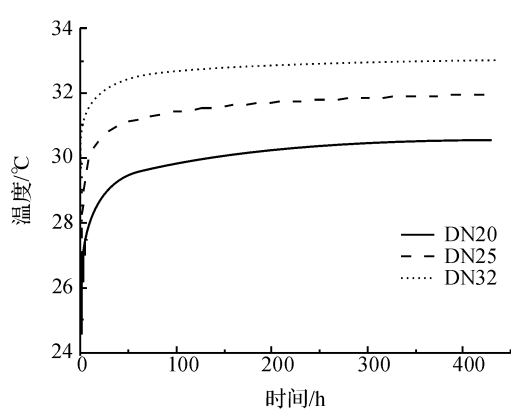
图 6 换热功率随埋管埋深变化曲线

Fig. 6 Heat transfer power changes with different buried depths

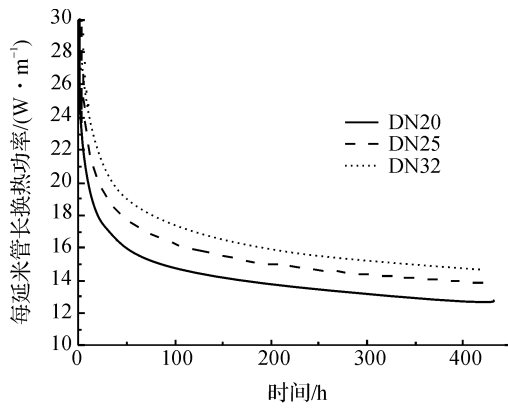
### 3.2 管型号的变化

常用于地埋管的 PE 管材,其型号一般有 dn32、dn25、dn20 三种。图 7 所示为不同管型在 18 d 连续运行时,出水温度和每延米管长换热功率随时间变化曲线。

图 7(a)为不同管型 18 d 连续运行出水温度随时间变化曲线,由图可知,内径越小的管材,其出水温度越低。图 7(b)所示为不同管型 18 d 连续运营每延米管长换热功率随时间变化曲线,由图可知,内径越小的管材其每延米管长换热功率也小。据此可知,在地埋管设计时,应合理地选择地埋管的管型,以此来保证在常规流速情况下,既能使出水温度与进水温度的温差不大,又能确保地埋管换热效率。



(a) 出水温度对比



(b) 换热功率对比

图 7 管型对出水温度和换热功率的影响

Fig. 7 Influence of different pipe diameters on outlet water's temperature and heat transfer power

### 3.3 支管间距

支管间距分别取为 2 倍外径(0.05 m)、3 倍外径(0.075 m)和 4 倍外径(0.1 m),分别进行模拟。18 d 连续运营出水温度随时间变化曲线对比如图 8(a)所示,18 d 连续运营每延米管长换热功率随时间变化曲线对比如图 8(b)所示。由图可知,随着支管间距的减小,出水温度将会随之升高,每延米管长换热功率随之减小。其原因是:由于两管靠得越近,它们之间的热阻就越小,导致热短路现象,回水管温度受到了进水管温度的影响增大而产生的。

由图 8(b)可知,当这种扰动在 2 倍以上的管径时,每延米管长换热功率的影响相对很小。本工作也试图计算小于 2 倍管径的情况。结果发现:在小于 2 倍管径时,计算出水温度会严重波动,而且随着时间向后增长波动越大。这说明,两管之间热短路现象严重,两管之间回填材料温度变化剧烈,需要增大之间的网格才能清楚地计算,但这无疑增大了计算量。由此推测,在实际工程中,应在施工中确保两管之间距离大于 2 倍管径情况下,尽可能增大两管之间的距离。

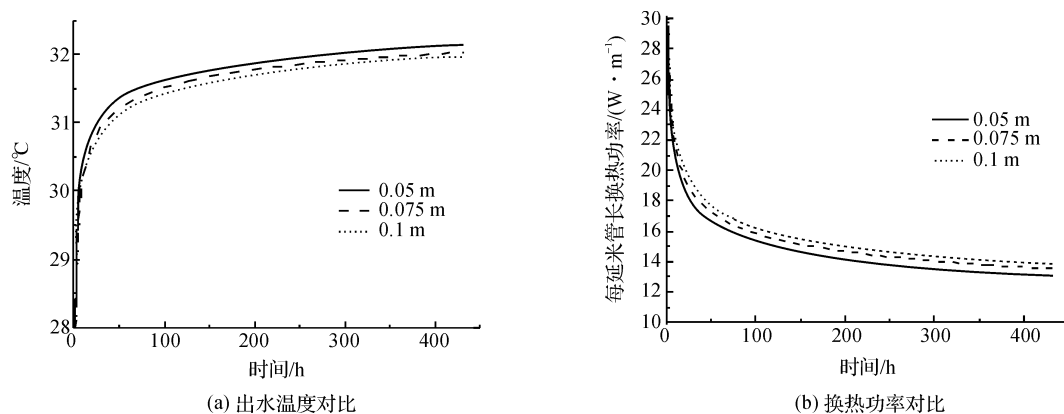


图8 支管间距对出水温度和换热功率的影响

Fig. 8 Influence of different tube distances on outlet water's temperature and heat transfer power

### 3.4 回填材料导热系数的变化

回填是地埋管换热器施工过程中的主要环节,即在钻孔完毕后、下完 U 形管后,向钻孔中注入回填材料。它介于地埋管换热器的埋管与钻孔孔壁之间,用来增强埋管和周围土壤的换热,同时防治地面水通过钻孔向地下渗透,以保护地下水不受地表污染物的污染,并防治各个蓄水层之间的交叉污染,它对保证地埋管换热器的性能有重要的意义。已有研究指出,最佳的回填材料是是将钻孔过程中所排出的地层土或岩石进行回填,以得与地层相一致的导热性能。但是由于施工过程的影响,这些排出的岩土体受到了扰动,已经发生了本质性的改变,不具有与原有地层参数相同的性能,除非地层为均质岩土,而事实上地层往往为各向异性,所以这种做法具有很强的局限性。一般来讲,回填材料可以用与地层相近的材料,如膨润土、水泥、砂等充填并夯实。这样既方便又有效,而且已经在许多工程中得到了有效的利用。

取常用的回填材料进行研究,以此来分析回填材料对地埋管的影响。模拟中,回填材料选择及其参数取值情况如表 2 所示。

表2 不同回填材料的导热系数

Table 2 Thermal conductivity of different backfill materials [ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ]

回填材料	导热系数 $k_b$
水泥砂浆	0.74
含有 15% 膨润土、85% $\text{SiO}_2$ 砂子的混合物	1.10
含有 20% 膨润土、80% $\text{SiO}_2$ 砂子的混合物	1.64
水泥硅砂(砂、水泥比为 2)	2.20
水泥硅砂(砂、水泥比为 2.5)	2.42

18 d 连续运营出水温度随时间变化曲线如图 9(a)所示,18 d 连续运营的每延米管长换热功率随时间变化如图 9(b)所示。由图可知,随着导热系数的增大,出水温度将降低,每延米管长换热功率将增大。

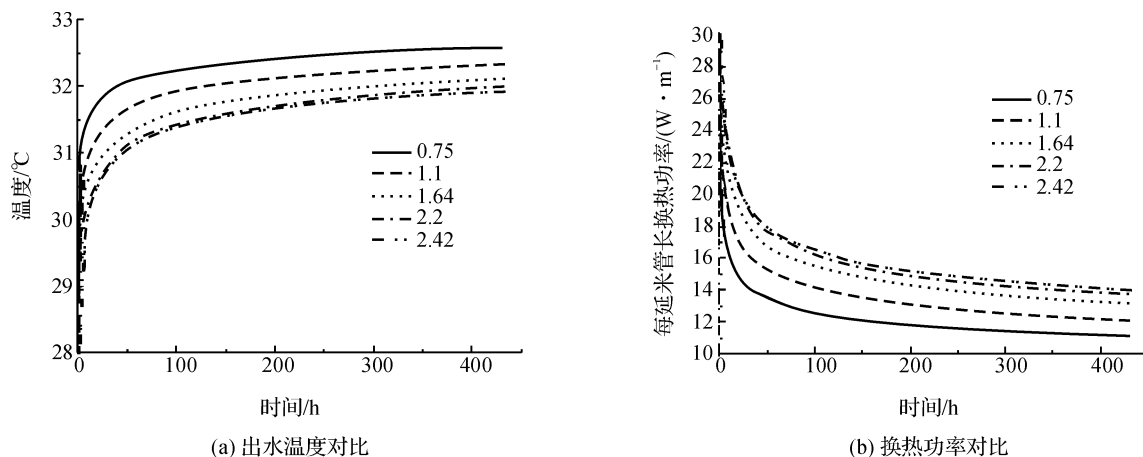


图9 回填材料导热系数对出水温度和换热功率的影响

Fig. 9 Influence of different thermal conductivity of backfill materials on outlet water's temperature and heat transfer power

图 10 所示为 18 d 时每延米管长换热功率与回填材料导热系数的关系曲线。由图可知,在回填材料导热系数范围小于岩土体导热系数(此处为  $1.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )或在略大于岩土体导热系数的范围内时,使用更好的导热系数回填材料,在提高每延米管长换热功率效果方面比较明显。当选用的回填材料导热系数远大于岩土体导热系数时,选用更好导热系数回填材料其效果并不显著。

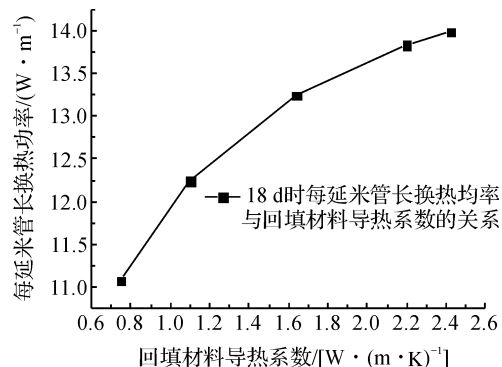


图 10 换热功率与回填材料导热系数的关系

Fig. 10 Relation between heat transfer power of backfill materials and thermal conductivity

#### 4 结 论

基于 COMSOL Multiphysics 软件,建立了有限元模型。从埋管深度、管型、支管间距、回填材料热物性等方面进行了参数影响分析,获得了上述参数对地源热泵出水温度和换热功率的影响。其主要结论如下:

1) 随埋深增加,地埋管出水温度增加,每延米管长换热功率减少;在实际工程中,单纯通过增加埋管深度来提高换热能力所带来的成本增加和换热能力的增加不成正比。

2) 地埋管内径越小,其出水温度越低,每延米管长换热功率也减小。因此,在地埋管设计时应合理地选择地埋管的管型,以此来保证在常规流速情况下,既能使出水温度与进水温度的温差不大,又能确保地埋管换热效率。

3) 两管靠得越近,两者之间的热阻就越小,导致热短路现象,进而影响进水管温度。由此,随着支管间距减小,出水温度随之升高,每延米管长换热功率随之减小。在实际工程中,应在施工中确保两管之间距离大于两倍管径情况下,尽可能增大两管之间的距离。

4) 随着导热系数的增大,出水温度将降低,每延米管长换热功率将增大。在回填材料导热系数小于或略大于岩土体导热系数时,使用好的导热系数回填材料在提高每延米管长换热功率效果方面比较明显,这种效果在进一步提高回填材料导热系数时将趋缓。

#### 参考文献:

- [1] 仇安娜,唐远明. 环保节能地源热泵技术应用研究[J]. 环境保护与循环经济, 2008(12): 34-37.
- [2] 严济才. 地源热泵空调系统施工工艺及经济分析[J]. 铁道工程造价管理, 2007, 22(1): 41-43.
- [3] 郭凯敏. 浅谈地源热泵[J]. 西部探矿工程, 2013(11): 153-154, 159.
- [4] 张国柱,夏才初,孙猛,等. 寒区隧道地源热泵型供热系统取热段温度场解析[J]. 岩土力学与工程学报, 2012, 31(增 2): 3795-3802.
- [5] 李新,方亮,赵强,等. 螺旋埋管地热换热器的线圈热源模型及其解析解[J]. 热能动力工程, 2011, 26(4): 475-479.