

# 地埋管绝热措施下的换热强度

刘秋新, 童亮, 包阔

(武汉科技大学城市建设学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 地源热泵系统换热效果所受到的影响因素很多, 地源热泵换热量的大小是反映系统换热性能优劣的重要参数. 通过CFD数值模拟软件分析了单U地埋管保温、不保温和保温长度不同及不同流量下的换热情况, 得出了地埋管的单位井深换热量是随着流量的增大而增大, 保温地埋管换热能力要高于非保温管, 且保温层深度要适宜的结论. 同时, 结合实际工程实测数据进行对比分析, 验证了模型及数值模拟结果的正确性.

**关键词:** 地源热泵; 单位井深换热量; 保温; 数值模拟

中图分类号: TU831.6

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)05-0751-04

## Heat transfer intensity of ground heat exchanger under adiabatic measures

LIU Qiuxin, TONG Liang, BAO Kuo

(Urban Construction College, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430070)

**Abstract:** There are many factors affecting the heat transfer effects for ground source heat pump systems. The heat exchange amount of ground source heat pump(GSHP) is an important index to reflect heat transfer performance. By using CFD software, the heat exchange capability of single-U buried pipe under different flow rate and thermal insulation conditions is analyzed. A conclusion is derived there from that the heat exchange amount per unit depth of well increases with the flow rate, the heat exchange capability of thermal insulation buried pipe surpasses non-thermal insulation pipe and the depth of Insulation pipe should be appropriately chosen. Furthermore, the validity of the model and simulation result is verified through comparison with project measured data.

**Key words:** ground source heat pump; transferring heat per unit of borehole depth; thermal insulation; numerical simulation

当今社会资源匮乏, 但是能源需求不断增加, 为缓解巨大的能源与环境压力, 节能减排已经成为了社会发展的新主题<sup>[1]</sup>. 人们积极探索各种不同的措施来摆脱能源困境, 将可再生能源列入国家能源发展的优先领域<sup>[2]</sup>. 发展地源热泵系统是运用可再生能源的重要手段. 目前, 使用可再生能源逐步取代常规能源是一个世界性的趋势, 地源热泵空调系统通过吸收大地的能量, 再由热泵机组向建筑物供冷供热, 可广泛应用于商业楼宇、公共建筑、住宅公寓、学校、医院等建筑物, 是可再生能源在建筑中应用的重要组成部分<sup>[3]</sup>.

地源热泵是一种利用地下浅层地温地热资源的高效节能空调系统. 土壤源地源热泵系统研究的重点和难点就是地埋管换热性能, U型地埋管是地源热泵系统的重要组成部分, 它作为地源热泵主机和土壤之间的换热介质, 与土壤之间的换热能力极大地影响着地源热泵系统的运行效率. 同时, 地埋管间存在的热短路现象对实际的换热效果也必将

产生一定的影响. 在实际的工程中, U型地埋管间发生热短路现象是不可避免的, 其受到管内流体的温度和流量、保温情况、埋管间距、运行时间等因素的影响.

通过CFD数值模拟软件建立土壤源地埋管回水管段换热模型, 对保温管、不保温管及不同保温长度的单U型地埋管进行数值模拟, 重点分析保温与不保温之间的区别及不同保温长度对地埋管换热性能的影响, 创新性的提出了地埋管换热的影响因素并且给出了加强换热的措施.

## 1 数值模拟

### 1.1 假设条件

U型竖直埋管与土壤间的换热是一个极其复杂的过程, 为了减少网格的数量和降低计算的难度. 因此, 在保证模拟结果的精度能够符合工程实际要求的前提下, 对整个模拟过程, 做出如下的假设<sup>[4]</sup>:

(1) 土壤是均匀的,在整个U型地埋管与土壤换热过程中,土壤的热物性保持不变,且忽略U型管周围土壤沿深度方向的传热,只考虑水平方向上热量的传递。

(2) 忽略土壤中水分迁移的影响。

(3) 忽略回填材料与U型管管壁、土壤之间的接触热阻。

(4) 忽略地表温度的变化对土壤温度的影响,认为土壤温度是均匀一致的,符合半无限大平面传热介质的特点。

(5) 忽略U型管底部弯管对管内流体的影响,认为进出水支管皆为有限长直管,且两支管底部的流体温度相同,速度方向相反。

(6) 管内同一截面流体温度、速度相同。

## 1.2 模型建立

采用AUTOCAD作为建模软件,PHOENICS作为数值模拟软件。首先通过AUTOCAD对埋管井、U型地埋管和保温材料进行建模,生成PHONICS可直接识别的STL矢量文件并导入其中,从而建立起与工程实际相符的物理计算模型,见图1所示。

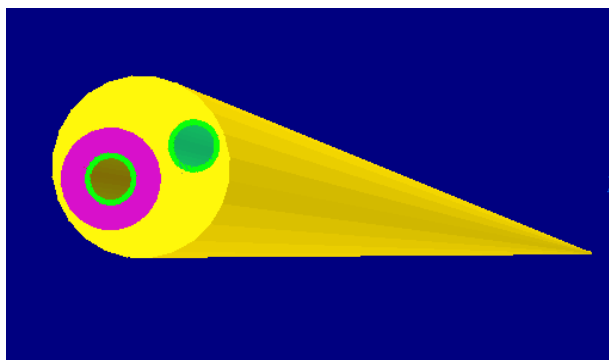


图1 保温地埋管模型

Fig.1 Thermal exchanger model

图1中埋管井周围介质设置为土壤参数,土壤的初始物性参数为:温度为18℃,导热系数为2.0 W/(m·K),密度为2 000 Kg/m<sup>3</sup>;回填材料的导热系数为2.404 8 W/(m·K),保温材料的导热系数为0.037 W/(m·K),地埋管的导热系数为0.43 W/(m·K)。水的进口温度为10℃,流量分别为0.5 m<sup>3</sup>/h, 0.65 m<sup>3</sup>/h, 0.8 m<sup>3</sup>/h。模型具体的尺寸为:土壤块45 m×4 m×4 m(高×长×宽);换热井深41 m,外径0.13 m;U型管长40 m,外径0.032 m,内径0.025 m;保温管外径为0.062 m,内径0.032 m,长度分别做了长为30 m, 20 m, 10 m, 0 m的对比。

模型设置好后,对模型进行网格划分。XY截面上换热井外的网格划分为2个/m,换热井内的网格划分为100个/m;XZ和YZ界面上的网格划分为1

个/m。迭代次数为2 500次,每步的运行时间为4 h,按运行时间的大小设置不同的步数<sup>[5]</sup>。

通过调节进口参数,改变地埋管中液体流量,分析不同流量(0.5 m<sup>3</sup>/h、0.65 m<sup>3</sup>/h、0.8 m<sup>3</sup>/h)下,地埋管与土壤间的换热能力,同时分别对在埋管回水段深度为10 m、20 m、30 m处保温以及不保温四种不同情况下进行地埋管换热能力数值模拟,数值模拟分为连续运行和间歇运行两种工况进行,模拟结果见图2~3所示。

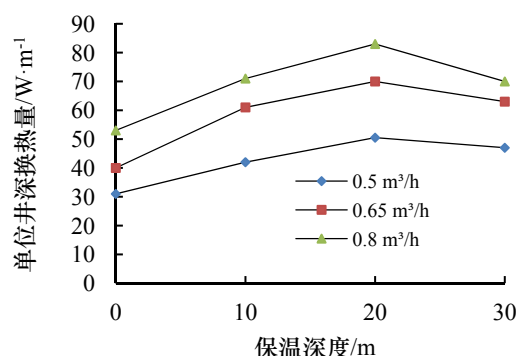


图2 连续运行工况下,地埋管换热情况

Fig.2 Buried tube heat exchanger under continuous running condition

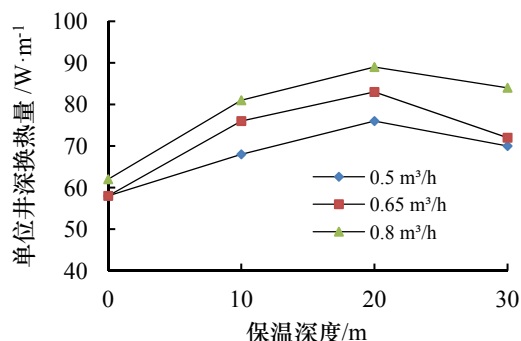


图3 间歇运行工况下,地埋管换热情况

Fig.3 Buried tube heat exchanger under intermittent operation condition

从图2和图3可以看出,在连续或间歇运行工况下,地埋管的换热量随其内部液体流量的增大而增大,保温地埋管的单位井深换热量要明显高于不保温井。在相同流量下,保温层深度为20 m时,地埋管的单位井深换热量最大。

## 2 工程实测

### 2.1 工程概况

该实测工程地处武汉市沌口开发区。由上述数值模拟结果可知U型管在保温长度为20 m时其换热量达到最大值,为了一方面验证该数值模拟结论的重要性,一方面对该地源热泵系统进行能耗分析,

我们选取了该地源热泵系统4口井(分别编号为0#、1#、2#、3#)进行地埋管热物性测试,其中0#井地埋管不做保温处理,1#、2#、3#井地埋管回水段分别在10 m、20 m、30 m深处做保温处理,通过测试结果分析地埋管在保温与不保温、不同保温长度时各自的换热量。

## 2.2 系统测试

采用相关设备及附件,同地埋管连接成为一个闭式循环测试系统,通过记录系统的流量和进回水温度差计算地埋管系统的换热强度。具体的系统测试原理见图4所示,电加热器用于加热循环水,提供夏季工况基本参数;小型风冷冷凝机组用于降低循环水温,提供冬季工况基本参数。

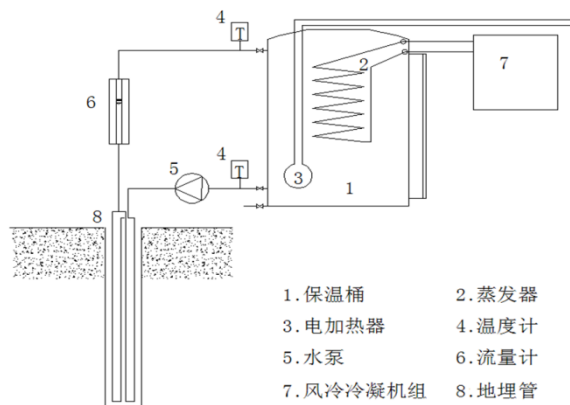


图4 测试系统原理图

Fig.4 Test system schematic diagram

0#、3#测试井深度均为60 m,根据地勘测试报告可知,钻井深度范围内的地质分布情况为:地表面至地下12 m为黏土层,地下13 m至地下20 m为泥岩层,地下20 m至地下60 m为灰岩层。地埋管所采用PE塑料管,内径0.025 m,公称壁厚0.003 5 m,钻孔直径为125 mm。

## 2.3 测试数据和分析

当测试夏季工况时,在进行循环前,开启电加热器对保温桶中的水进行加热处理,当达到夏季工况时,启动水泵使整个测试系统开始循环,通过流量计记录流量,温度计记录进出口处的温度,数据记录时间间隔为10 s,每口测试井读数60次;同理,当测试冬季工况时,应先开启风冷冷凝机组对保温桶中的水进行降温处理直至达到冬季工况。选取50次有效记录数据,并根据即时数据按换热量基本公式进行计算后<sup>[6-7]</sup>,将计算得到的即时换热量结果进行描点作图,如图5~6所示。

在夏季工况下,每口测试井各记录有效数据50次,总记录时间为500 s,根据图中数据的描点分布

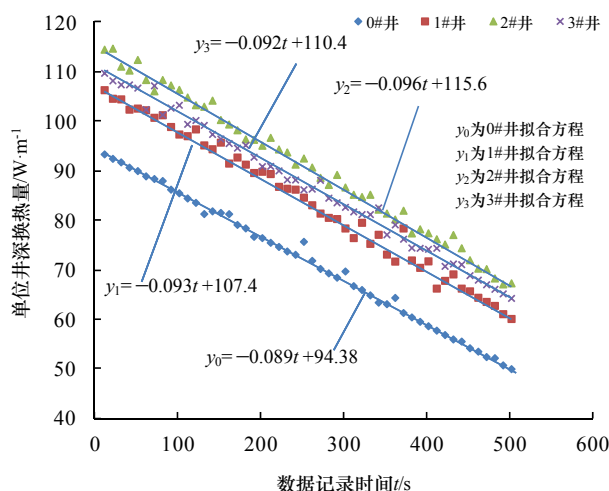


图5 夏季工况单位井深换热量

Fig.5 Heat exchange unit depth in summer conditions

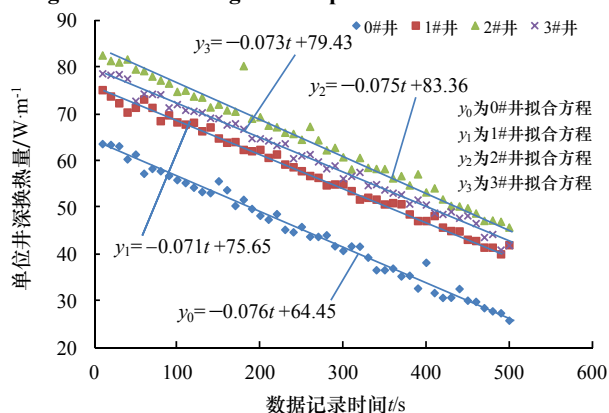


图6 冬季工况单位井深换热量

Fig.6 Heat exchange unit depth in winter conditions

情况,可以看出各点在一条直线附近,故可选择线性函数作拟合曲线,运用曲线拟合的最小二乘法拟合出夏季工况各测试井单位井深换热量的方程式,见图5中所示。同理,在图6中,冬季工况下与夏季工况下做同样的处理,所得拟合方程见图6所示。

由于测试过程是一个动态过程,只取一瞬间测试值来代表该地源热泵系统单位井深换热量是不正确的<sup>[8]</sup>。因此,为了能够得出在实际工况下,各井的单位井深换热量情况,对拟合方程  $y_0$ 、 $y_1$ 、 $y_2$  和  $y_3$  分别对记录时间(1~500 s)积分,可得在测试时间段内,夏季和冬季两工况下,每口测试井各自的单位井深换热总量,再除以总的测试时间(500 s)可以求出该系统单位井深换热量。

以夏季工况下,0#井为例进行计算,由方程  $y_0$  积分式:

$$\int_1^{500} y_0 = \int_1^{500} (-0.089t + 94.38) dt \quad (1)$$

可计算得0#井在夏季工况下,单位井深的换热总量为35 970.66 J/m,再除以测试时间500 s,可得夏季工况下,0#井单位井深换热量为71.94 w/m。其它计算结果见表1所示。

表1 地埋管单位井深换热量  
Tab.1 Heat exchange of underground pipe unit depth

测试井编号	单位井深换热总量/J·m <sup>-1</sup>		测试时间/s	单位井深换热量/W·m <sup>-1</sup>	
	夏季工况	冬季工况		夏季工况	冬季工况
0 #	35 970.66	22 660.59	500	71.94	45.32
1 #	41 967.65	28 874.39		83.94	57.75
2 #	45 684.45	32 221.68		91.37	64.44
3 #	43 589.65	30 510.61		87.18	61.02

由表1可知,地源热泵地埋管回水段采用保温措施后,换热量将远远高于未采取保温措施的地埋管,并且在深度为20 m处采取保温措施,效果最佳.各测试井夏季工况下的换热量大于冬季工况.

3 结论

本文通过运用CFD模拟软件对地埋管地下换热情况进行了数值模拟,得出地源热泵地埋管的单位井深换热量受到地埋管保温措施和管内流量大小的影响:

- (1) 经过模拟和实际实验研究表明保温地埋管的换热量远远高于未保温地埋管.
- (2) 同时,对实际工程中地源热泵系统地埋管换热强度进行了现场测试,测试结果表明地埋管保温后单位井深换热量比未保温时大幅度提高.
- (3) 当保温层深度为20 m时,地埋管换热效果最好.

通过模拟和实地实验,得出结论是我们之前做的CFD数值模拟对分析地埋管换热强度是十分准确的.在地源热泵施工中,将地埋管进行保温处理将大大提高其换热效率.

参考文献      References

[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, 28(12): 34-37.  
JI Anna, TANG Yuanming. Application of environmental protection and energy saving ground source heat pump technology[J]. Environmental Protection and Recycling Economy, 28(12): 34-37.

[2] 杨惜春. 气候资源的法律概念及其属性探讨[J]. 气象与环境学报, 2007, 23(1): 39-44.  
YANG Xichun. A study on the legal concepts and attributes of climate resources[J]. Journal of Meteorology and Environment. 2007, 23(1): 39-44.

[3] 徐伟,张时聪. 中国地源热泵技术现状及发展趋势[J]. 太阳能, 2007(3): 11-14.  
XU Wei, ZHANG Shichong. China's ground source heat pump technology and development trend[J]. Solar Energy, 2007(3): 11-14.

[4] 宋小飞,温冶,司俊龙. 地源热泵U型管地下换热器的CFD数值模拟[J]. 北京科技大学报, 2007, 29(3): 329-333.  
SONG Xiaofei, WEN Ye, SI Junlong. Numerical simulation of U-tube underground heat exchanger for ground source heat pump[J]. Journal of Beijing University of Science And Technology, 2007, 29(3): 329-333.

[5] 中华人民共和国建设部. 地源热泵系统工程技术规范: GB-50366-2009版[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.  
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Ground-source Heat Pump System Engineering Specification: GB-50366-2009[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009.

[6] 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.  
TANG Zhiwei, SHI Xiaoyan, HUANG Junhui, et al. Numerical simulation of U-tube underground heat exchanger for ground source heat pump[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2006, 32(1): 62-66.

[7] 方肇洪,刁乃仁. 地热换热器的传热分析[J]. 建筑热能通风空调, 2004, 23(1): 11-20.  
FANG Zhaohong, DIAO Nairen. Heat transfer analysis of geothermal heat exchanger[J]. Building Energy & Environment, 2004, 23(1): 11-20.

[8] 刘秋新,韩进能,高春雪,等. 地源热泵耦合地埋管换热计算若干问题的研究[J]. 低温与超导, 2008, 36(5): 64-68.  
LIU Qiuxin, HAN Jinneng, GAO Chunxue et al. Study on several problems of heat transfer calculation of ground source heat pump coupled ground buried pipes[J]. Low Temperature and Superconductivity, 2008, 36(5): 64-68.

(编辑 桂智刚)