

文章编号:1671-6833(2013)06-0108-04

## U型埋管换热器的传热性能数值模拟

吴金星<sup>1</sup>, 李俊超<sup>1</sup>, 潘彦凯<sup>1</sup>, 许克<sup>1</sup>, 王志杰<sup>2</sup>, 伍焱兵<sup>2</sup>

(1. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州自动化研究所, 河南 郑州 450003)

**摘要:** 针对土壤源热泵系统中单、双U型埋管换热器的传热问题, 建立三维几何模型, 用FLUENT软件进行模拟计算, 在相同工况下对比分析了钻井深度、流体速度、保温层等对单、双U型埋管换热器的单位井深换热量、流体出口温度及热短路的影响。结果表明, 双U型埋管换热器的单井换热量比单U型增加30%以上; 无保温层时, 双U型埋管换热器的热短路问题较严重; 出口管外敷设保温层可有效减小热短路的影响, 使单、双U型管换热器单井换热量均增加15%以上, 且双U型埋管换热器的综合性能更优; 保温层的最佳长度约为120 m。

**关键词:** 土壤源热泵; 换热器; U型埋管; 热短路; 保温层; 数值模拟

**中图分类号:** TK12; TK52 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2013.06.026

### 0 引言

土壤源热泵系统是以土壤作为冷热源, 通过水在埋管换热器内循环流动, 使系统与土壤进行热交换而获取冷热量。埋管换热器是热泵系统的关键, 其设计是否合理关系到整个系统的运行效率。曾和义等<sup>[1]</sup>在各支管间存在“热短路”的情况下, 导出了循环介质在沿钻井深度方向上温度变化的解析式。薛玉伟等<sup>[2]</sup>建立了单、双U型埋管换热器的实验系统, 结果表明双U型埋管单位井深换热量均高于单U型。林久宇<sup>[3]</sup>对双U型埋管换热器的热短路问题进行实验研究, 发现出水管加保温层后, 不仅使埋管换热器的换热量大大提高, 而且可有效减弱热短路问题。国外在20世纪50年代就开始了埋管换热器的研究<sup>[4-6]</sup>, 重点研究了土壤的导热性能、埋管换热器的结构型式等对换热的影响, 建立相应的理论模型, 并通过实验研究了回填材料的组分及其比例, 以强化埋管与土壤间的传热。笔者建立单、双U型埋管换热器的三维模型, 分析了单位井深换热量、工质出口温度及热短路问题。

### 1 计算模型及方法

#### 1.1 数学描述

U型埋管内流体流动和换热的控制方程<sup>[7]</sup>用

质量守恒、动量守恒和能量守恒三大定律来描述。模拟过程中的重点是两个传热过程的耦合, 即U型管内流体的对流换热和流体周围固体介质的导热。流体周围固体的物性参数包括: 土壤的物性参数  $\rho_1 = 2\ 000\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,  $\lambda_1 = 2\ \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,  $c_{p1} = 1\ 200\ \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ; 回填材料的物性参数  $\rho_2 = 1\ 800\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,  $\lambda_2 = 4\ \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,  $c_{p2} = 800\ \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ; 高密度聚乙烯管(HDPE)的物性参数  $\rho_3 = 950\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,  $\lambda_3 = 0.44\ \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,  $c_{p3} = 2\ 300\ \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ; 循环流体的物性参数  $\rho_4 = 998.2\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,  $\lambda_4 = 0.6\ \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,  $c_{p4} = 4\ 182\ \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

#### 1.2 几何模型及边界条件

单、双U型管换热器及钻井的几何模型如图1所示。双U型埋管深度分别取30, 60, 90, 120, 150, 180 m; 设U型管外径为25 mm、内径为20 mm; 两支管中心间距为100 mm, 两U型管的连接方式为并联; 单U型埋管换热器模型的几何参数与双U型基本相同。钻井直径为180 mm, 钻井周围土壤厚度为3 m, 外边界土壤的温度设为290 K。埋管内流体进口温度为308 K(夏季制冷工况), 流速分别取0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 m/s进行研究。假设土壤、回填材料及埋管换热器处于热平衡状态。

收稿日期: 2013-05-06; 修订日期: 2013-07-20

基金项目: 河南省重点科技攻关计划项目(132102210406); 郑州市科技创新团队建设项目(10CXTD158)。

作者简介: 吴金星(1968-), 男, 河南通许县人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事换热设备强化、CFD分析与节能技术研究, E-mail: wujx@zzu.edu.cn.

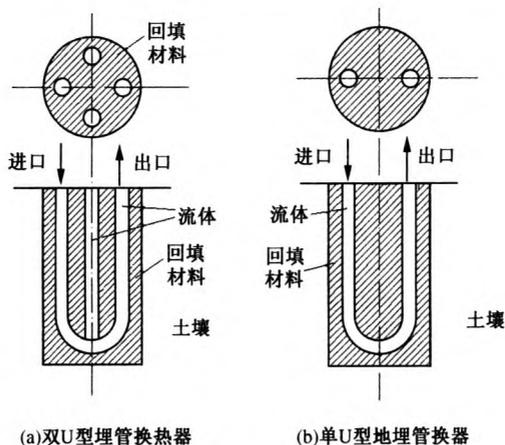


图 1 地埋管换热器及钻井的几何模型

Fig. 1 The geometry of ground-tube heat exchanger and well

1.3 数值计算方法

计算区域的网格是用结构化网格,考虑到 U 型管轴向温度变化缓慢,沿轴向的网格较稀疏,U 型管弯道处的半圆管段,流体流动变化剧烈,此段网格较密集.采用稳态隐式格式求解,近壁处节点采用壁面函数法处理,选用标准  $k-\epsilon$  方程湍流模型;压力与速度的耦合采用 SIMPLE 算法;动量、能量及湍流参量的求解为二阶迎风格式.迭代运算过程中,能量方程残差控制在  $10^{-8}$  数量级,其余残差均控制在  $10^{-6}$  数量级.

2 模拟结果及性能分析

2.1 单位井深换热量的对比

单位井深换热量可直观反映地埋管换热器的换热效果及热短路情况<sup>[8]</sup>,可定义为

$$q_1 = \frac{c_p \rho \pi r^2 u (T_{in} - T_{out})}{H}$$

式中: $q_1$  为单位井深换热量,  $W/m$ ;  $\rho$  为管内流体密度,  $kg/m^3$ ;  $c_p$  为管内流体比热,  $J/(kg \cdot K)$ ;  $r$  为管内径,  $m$ ;  $u$  为管内流体的流速,  $m/s$ ;  $T_{in}$  为管内流体进口温度,  $K$ ;  $T_{out}$  为管内流体出口温度,  $K$ ;  $H$  为钻井深度,  $m$ .以流速  $0.4 m/s$ 、井深  $150 m$  为例的单位井深换热量对比如图 2 所示,可见双 U 型埋管换热器比单 U 型提高约 35%.说明井深同时,单位井深换热量随埋管换热面积增大而增大.

2.2 U 型埋管出口温度的对比

单 U 型与双 U 型埋管出口温度的对比如图 3 所示,在相同进口条件下,单、双 U 型埋管换热器的流体出口温度变化趋势相似,单 U 型总是比双 U 型的流体出口温度更低.以速度  $0.4 m/s$ 、井深  $150 m$  为例,前者较后者的流体出口温度低 2.1

K.这是由于井内空间有限,双 U 型管进出口支管间换热量更大,热短路现象更严重.在制冷工况下,流体温度越低越有利于提高系统效率,这说明单 U 型埋管更优.

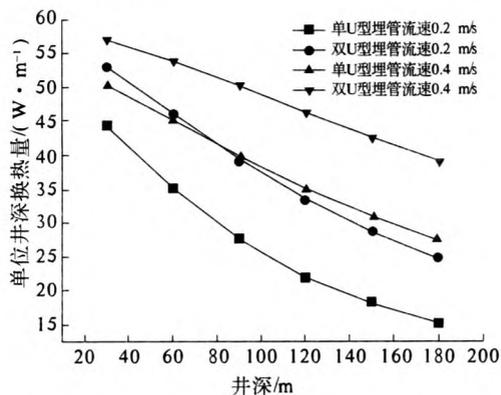


图 2 单 U 型与双 U 型埋管的单位井深换热量对比  
Fig. 2 Comparison of the heat exchanging quantity perwell-depth of single-U and double-U ground-tube

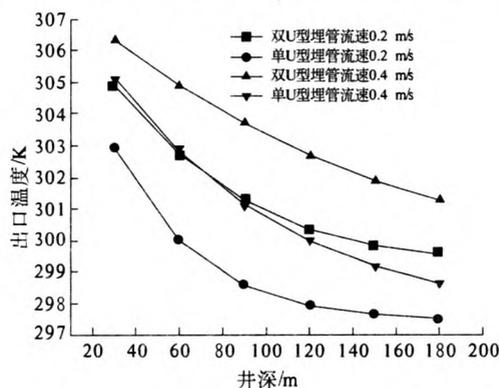


图 3 单 U 型与双 U 型埋管出口温度的对比  
Fig. 3 Comparison of outlet temperature between single-U and double-U ground-tube

2.3 无保温层时 U 型埋管热短路情况对比

U 型埋管换热器效率  $\epsilon$  定义为:U 型埋管与周围土壤的实际换热量  $Q$  与将埋管置于无限大土壤中的理论换热量(即无相互热干扰时,进、水管与周围土壤的换热量之和)之比.

井深、流速对热短路情况的影响分别如表 1, 2 所示.井深的影响:①双 U 型比单 U 型埋管的换热器效率  $\epsilon$  低 3% ~ 11%,即双 U 型埋管换热器的热短路现象更严重;②井深由  $30 m$  增加到  $180 m$  时,2 种 U 型埋管换热器效率都降低 15% 以上.这是由于井深增加,U 型埋管的支管间重叠长度也相应增加,导致热短路现象加剧.

流速的影响:①双 U 型埋管换热器的换热器效率  $\epsilon$  比单 U 型低 3% ~ 12%,说明管内流体速度越大,双 U 型埋管换热器的热短路情况越严重;②流体速度由  $0.2 m/s$  到  $1.2 m/s$  时,2 种 U

型埋管换热器效率都增加13%以上.这是由于随着管内流体流速增大,U型埋管内流体进出口温差减少,使热短路现象逐渐减弱.

表1 流速0.4 m/s时两种U型埋管的热短路情况

**Tab.1 The thermal interference situation of two types U ground-tube when the speed is 0.4 m/s**

井深/m	单U型埋管(双U型埋管)	
	U型管换热量 Q/W	换热器效率
30	1 508(1 709)	0.70(0.65)
60	2 711(3 239)	0.67(0.62)
90	3 592(4 515)	0.65(0.58)
120	4 209(5 560)	0.62(0.56)
150	4 637(6 393)	0.58(0.56)
180	4 927(7 047)	0.56(0.55)

表2 井深150m时两种U型埋管的热短路情况

**Tab.2 The thermal interference situation of two types U ground-tube when the well-depth is 150 m**

流速 m/s	单U型埋管(双U型埋管)	
	U型管换热量 Q/W	换热器效率
0.2	2 724(4 288)	0.55(0.54)
0.4	4 637(6 393)	0.58(0.56)
0.6	5 728(7 327)	0.63(0.59)
0.8	6 383(7 828)	0.66(0.60)
1.0	6 805(8 097)	0.68(0.61)
1.2	7 089(8 292)	0.69(0.61)

2.4 出口管外敷设保温层对热短路的影响

热短路现象显著降低了U型埋管换热器的效率,因此必须加以改善.出水管外保温层的敷设方式如图4所示.以流速0.2 m/s、井深150 m为例,模拟结果如图5所示.随着保温层长度的增加,流体出口温度呈下降趋势,保温层长度为150 m时出口温度有上升趋势.这是因为150 m处的

保温层阻碍了出水管下部与周围土壤的换热.图中出口温度最低点为120 m处,这说明此处是最佳保温层长度.

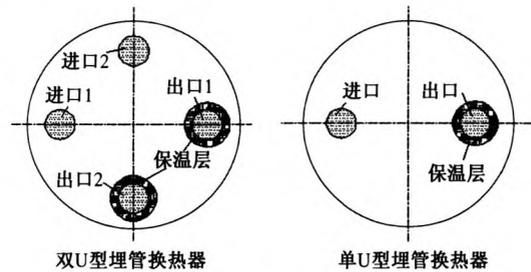


图4 敷设保温层的横截面示意图

Fig.4 Schematic diagram of cross surface with insulating layer

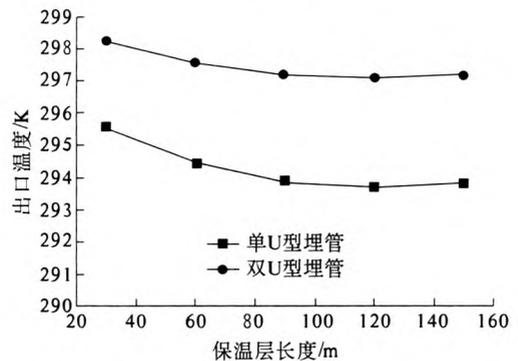


图5 保温层长度与换热器出口温度的关系

Fig.5 The relation of insulating layer's length and heat exchanger's temperature

图6为敷设保温层前后U型埋管换热器与周围土壤的横截面温度分布情况.可见,出口管敷设保温层对周围土壤的温度分布影响很明显.加保温层后,计算结果见表3.

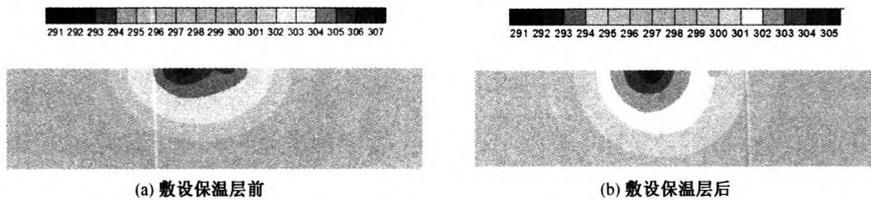


图6 敷设保温层前后的横截面温度分布

Fig.6 Temperature distribution of cross surface without and with insulating layer

表3 单、双U型埋管敷设保温层后的换热量情况

Tab.3 The heat exchanging quantity about single-U and double-U ground-tube with insulating layer

保温层长度/m	换热器出口温度/K		单井换热量/W		增加速率/%	
	双U	单U	双U	单U	双U	单U
	30	298.27	295.56	5 133	3 281	19.7
60	297.58	294.47	5 497	3 568	28.1	31.0
90	297.22	293.87	5 686	3 727	32.6	36.8
120	297.14	293.71	5 729	3 769	33.8	38.4
150	297.24	293.84	5 676	3 734	32.3	37.1

对比发现可知,①两种U型埋管换热器单并换热量的增加速率都在19%以上,且增加速率随保温层长度的增加而增加,但保温层长度为120 m时,换热量增加速率开始降低.②保温层长度相同时,双U型埋管换热量的增加量高于单U型.这又验证了双U型比单U型埋管的热短路现象更严重.③制冷工况下,敷设保温层后流体出口温度更低.总之,敷设保温层后,双U型比单U型埋

管换热器的综合性能更优。

### 3 结论

(1) 双U型埋管换热器的单井换热量比单U型增加30%以上,这与文献[2]的实验结果非常吻合。此外,采用双U型埋管使钻井数量减少,因此,可以降低系统的初投资。

(2) 相同工况下不敷设保温层时,双U型埋管换热器的换热效率比单U型低3%~12%,且在制冷工况下流体出口温度较高,说明双U型埋管换热器的热短路现象更严重,不敷设保温层的双U型埋管换热器性能较差。

(3) 出水管外敷设保温层,可解决U型埋管换热器的热短路现象,换热器的换热量提高15%以上,换热效果明显提高。

(4) 模拟结果表明:U型埋管换热器出水管外保温层的最佳长度约为120 m。

### 参考文献:

[1] 曾和义,方肇洪. 双U型埋管地热泵换热器的传热模型[J]. 山东建筑工程学院学报,2003,18(1): 11-17.

- [2] 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): 410-413.
- [3] 林久宇. 重庆地区U型垂直埋管换热器换热特性研究[D]. 重庆:重庆大学城市建设与环境工程学院,2010.
- [4] YAVUZTURK C, SPITLER J D. Field validation of a short time step model for vertical ground-loop heat exchangers[J]. ASHRAE Transactions, 2001,107(1): 617-625.
- [5] YAVUZTURK C, CHIASSON A D. Performance analysis of U-Tube, concentric tube, and standing column well ground heat exchangers using a system simulation approach [J]. ASHRAE Transactions, 2002,108(1): 925-938.
- [6] MARTIN C A, KAVANAUGH S P. Ground thermal conductivity testing-controlled site analysis [J]. ASHRAE Transactions, 2002,108(1): 945-952.
- [7] 王福军. 计算流体力学分析——CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [8] 李新国. 埋管换热器内热源理论与地源热泵运行特性研究[D]. 天津:天津大学机械工程学院,2004: 91-92.

## Numerical Simulation of Heat Transfer Performance of U Ground-Tube Heat Exchangers

WU Jin-xing<sup>1</sup>, LI Jun-chao<sup>1</sup>, PAN Yan-kai<sup>1</sup>, XU Ke<sup>1</sup>, WANG Zhi-jie<sup>2</sup>, WU Yan-bing<sup>2</sup>

(1. School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Zhengzhou Institute of Automation, Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** A three-dimensional geometric model of single-U, double-U ground-tube heat exchangers and surrounding soil was established in ground source heat Pump system. The effects of different borehole depth, flow velocity and thermal insulating layer on the heat exchanging quantity per well-depth were researched by FLU-ENT software. The temperature difference between the inlet and the outlet, the heat exchanging quantity per well-depth and the thermal interference about single-U and double-U ground-tube heat exchangers were compared under the same conditions. The results show that the heat exchanging quantity per well-depth of double-U ground-tube heat exchangers increases 30% or more, but their the thermal interference is more serious without thermal insulating layer. The influence of thermal interference can be reduced by the thermal insulating layer, which makes the heat exchanging quantity per well-depth increase more than 15%, and comprehensive performance of the double-U ground-tube was superior to single-U. The optimum length of the thermal insulating layer is 120 meters.

**Key words:** ground source heat pump; heat exchanger; U-tube ground tube; thermal interference; thermal insulating layer; numerical simulation