

闭式 U 型地表水换热器传热数值模拟与实验研究

郑红旗¹ 徐催² 陈九法¹ 张建忠³

1 东南大学能源与环境学院

2 上海建筑设计研究院有限公司

3 南京市建筑设计研究院有限公司

摘要 :针对工程设计中闭式地表水换热器基础数据缺乏的问题,本文建立了闭式 U 型地表水换热器的三维传热模型,利用 FLUENT 软件,分别模拟了夏季与冬季工况下,换热器不同进口温度、不同湖水温度下换热器的传热特性。结果表明,换热器进出口平均温度与湖水温差、换热器进口温度与湖水温差是影响单位管长换热量的根本因素,并根据模拟结果分别拟合了两种温差与单位管长换热量的关系曲线。利用自主设计的实验台,在夏季与冬季分别进行了散热与取热实验,将由拟合公式计算的结果与实验结果进行了对比,误差在 $\pm 10\%$ 以内。本文给地表水换热器的工程设计提供了一条新思路。

关键词 :闭式地表水换热器 温差 单位管长换热量

Numerical Simulation and Experimental Study on Heat Transfer Characteristic of Closed-loop U-shaped Surface Water Heat Exchanger

ZHENG Hong-qi¹, XU Cui², CHEN Jiu-fa¹, ZHANG Jian-zhong³

1 School of Energy & Environment, Southeast University

2 Shanghai Architectural Design & Research Institute Co., Ltd.

3 Nanjing Architectural Design & Research Institute Co., Ltd.

Abstract: Three-dimensional model of closed-loop surface water heat exchanger was built, and heat transfer performance of different inlet water temperature of heat exchanger and lake water temperature were studied based on FLUENT software under summer and winter operation condition. Results indicate that temperature difference between average temperature of inlet and outlet and lake water temperature, and temperature difference between inlet and lake water temperature are the fundamental factor to inflect heat transfer quantity. Relationship curves between two temperature difference and heat transfer quantity per meter were fitted. Field tests on heat rejected to and extracted from lake were carried out based on experimental table developed independently. Results based on curve fitting and experimental results were compared, and relative error is in range of $\pm 10\%$. This paper provides a new idea of engineering design and application of closed-loop surface water heat exchanger.

Keywords: closed-loop surface water heat exchanger, temperature difference, heat transfer quantity per meter

0 引言

面对降低建筑能耗的迫切需求,地表水源热泵技术作为一种绿色、环保的空调技术,对它的研究与应用得到了空前的重视。地表水源热泵分开式系统与闭

式系统。目前,地表水源热泵的工程应用主要采用的是开式系统,对闭式系统尤其是闭式地表水换热器的设计还缺乏技术支持^[1]。本文以南京某闭式湖水热泵空调系统为背景,对工程中采用的闭式 U 型地表水换热器的传热特性进行数值模拟与实验研究,为设计

收稿日期:2009-7-5

作者简介:郑红旗(1983~),男,硕士研究生,东南大学能源与环境学院(210096) E-mail: hongqizheng@126.com

合理、可靠的地表水换热器提供了一条新思路。

1 闭式 U 型地表水换热器传热数学模型的建立

本文选取闭式单 U 型管换热器作为研究对象,它与周围湖水的传热问题是一个三维非稳态传热问题,利用 FLUENT 软件模拟它在非稳态条件下不同工况的传热情况。

1.1 控制方程

换热器与湖水的传热过程是非稳态传热,考虑到管内流体是不可压缩流体,因此它的控制方程可以写成如下形式^[2,3]:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

质量守恒方程:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) = u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \quad (2)$$

$$Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) = u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} \quad (3)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) = u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (4)$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

式中 u_x 、 u_y 、 u_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的速度; γ 指垂直方向上的体积力。

1.2 基本假设

模拟之前,首先做如下的基本假设:

①水体是封闭的,没有流体流入和流出,湖水没有受到扰动影响;

②单 U 管换热器在湖水中平铺,管内流体流速均匀一致;

③通过大地导热所占的比例很小,因此常忽略,故假设大地与湖底的接触面为绝热;

④模拟的水体深度为 4m,所以认为初始时整个

水体温度一致。

1.3 初始条件

系统制冷开始时湖水基本上是同温的,取春末的湖水温度作为制冷季节的初始水温,边界条件为:

$$t(z, \tau)|_{\tau=0} = t_0 \quad (6)$$

1.4 边界条件

采用第二类边界条件来表达湖底的边界条件,由假设可知湖底是绝热的,因此湖底的边界条件为:

$$\phi|_{y=0} = 0 \quad (7)$$

水面的边界条件为^[4,5]:

$$\phi|_{y=4} = \phi_n \quad (8)$$

式中 ϕ 表示热通量。

2 数学建模

在该工程中换热器采用外径 32mm,壁厚 3mm 的 HDPE 管。换热器长 200m,制作成 U 形状。考虑到换热器尺寸和水域尺寸相差很大,如果对整个模型建立网格,所有网格的数量将达到数百万级别,而目前实验室计算机计算能力有限,因此对整个模型进行了切分,用分段的方法来进行模拟。

具体做法是将 200m 的换热器划分为 20 份,即每次对 10m 长的换热器进行模拟。对于第一段换热器来说,给定循环水的入口流速以及温度,待出口温度稳定一段时间后停止运算,从第二段开始,把前一段的出口温度作为下一段的入口温度,如此类推,直到算出最后一段换热器的出口温度以及整个换热器在该工况下的总换热量。对湖水模型,湖水深 4m,宽 4m,长 10m。换热器水平铺设在湖水中,离湖底 0.3m。

3 数值模拟结果与分析

模拟选用的换热器进口温度、湖水温度均是制冷与制热工况下的典型温度。在实际工程中,为了防止湖水侧管内循环水结冰,常在封装前常加入防冻液,在模拟冬季工况时,是按照体积比为 90% 的水和 10% 的乙二醇所组成的混合溶液进行计算的。以下结果均是在管内流速 0.8m/s 的条件下得到的。

(1) 夏季工况的模拟结果与分析

图 1 表示了四种夏季工况下,针对每一种工况下 20 段换热器每段换热器进出口温度与湖水温度之差对应的单位管长散热量;将图 1 中离散的点拟合为

直线 $Y = 9.99289X - 8.26578$ 。图 2 表示的是换热器进口与湖水温度之差对应的单位管长散热量；将图 2 中离散的点拟合为曲线 $Y = 0.43383X^2 - 1.48247X + 23.16212$ 。

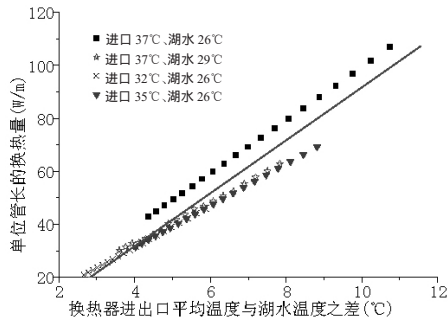


图 1 换热器进出口平均温度与湖水温度之差对应的单位管长散热量

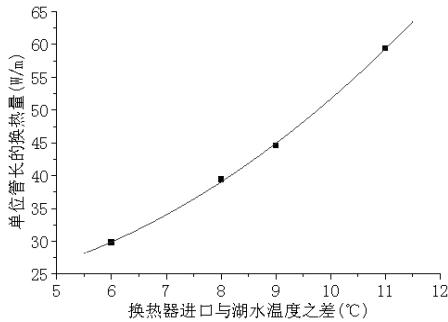


图 2 换热器进口与湖水温度之差对应的单位管长散热量

图 1 的曲线表明：对于不同换热器进口温度、不同湖水温度的四种散热工况，当换热器进出口平均温度与湖水温度之差相等时，它们单位管长的散热量接近相等，并且随换热器进出口平均温度与湖水温差的增加，单位管长的散热量而不断增大。图 2 表明随换热器进口温度与湖水温度之差的不断增加，对应的单位管长的散热量逐渐增加。图 1、图 2 均表明换热器内介质温度与湖水温差是影响散热量大小的根本因素。

(2) 冬季工况的模拟结果与分析

图 3 表示了三种取热工况下，针对每一种取热工况下 20 段换热器每段进出口平均温度与湖水温度之差对应的单位管长的取热量；将图 3 中离散的点拟合为直线 $Y = -6.62327X + 1.57368$ 。图 4 表示的是换热器进口与湖水温度之差对应的单位管长的取热量，将图 4 中离散的点拟合为直线 $Y = -4.629X + 0.817$ 。

图 3 的曲线表明：对于不同换热器进口温度、不同湖水温度的三种取热工况，当换热器进出口平均温度与湖水温度之差相等时，它们单位管长的取热量接

近相等，并且随湖水和换热器进出口平均温度温差的增加，单位管长的取热量不断增大。图 4 表明随湖水温度与换热器进口温度之差的越大，对应的单位管长的取热量越大。并且从图 4 可以看到，换热器进口 2°C、湖水 4°C 与换热器进口 4°C、湖水 6°C 时两者在图 4 中对应的点几乎重合，表明换热器内介质温度与湖水温差是影响换热量大小的根本因素。

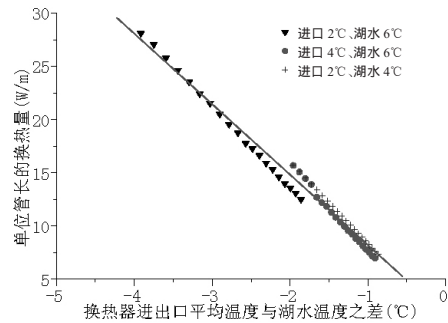


图 3 换热器进出口平均温度与湖水温度之差对应的单位管长取热量

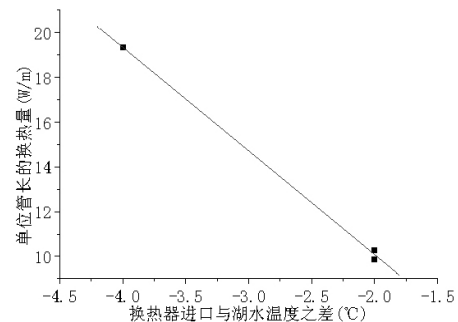


图 4 换热器进口与湖水温度之差对应的单位管长取热量

4 闭式 U 型地表水换热器的实验研究

为了进一步检验模拟结果的精度，分别在夏季与冬季在工程现场进行了散热与取热实验。

4.1 实验装置与实验原理

图 5 表示的是实验装置的流程图。

该实验装置包括测试设备、控制设备、测量设备、数据采集系统等部分组成。测试设备能够模拟夏天制冷工况和冬天制热工况，制成所需要的冷水和热水，用于传热实验。控制设备能够根据需要调节所需要的供水温度、流量和压力。测量设备由传感器和仪表组成，用于测量系统的温度、压力、流量等参数。控制设备和测量设备均采用美国 NI 的 FP 模块，使用 485 通信协

议,实现模块与上位机之间的联系。数据采集系统基于 Labview 软件平台,开发了自动化数据采集、数据存储、安全控制的计算机程序。

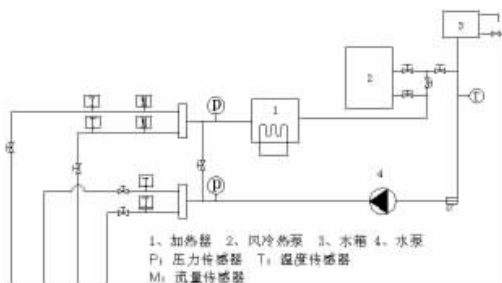


图5 实验装置流程图

4.2 实验结果

表1记录了在换热器进口35℃左右、湖水温度22.5℃与换热器进口4℃左右、湖水温度10.5℃时的散热与取热实验数据。

表1 U型管散热与取热实验结果

工况	进水温度 (°C)	回水温度 (°C)	湖水温度 (°C)	流量 (m³/h)	流速 (m/s)	总传热量 (kW)	单位管长换热量 (W/m)
散热	35.05	27.55	22.7	1.567	0.82	13.56	67.79
取热	4.0	7.79	10.5	1.567	0.82	6.93	34.63

4.3 实验结果与模拟结果的对比分析

为了使模拟的数据更具普遍性,将模拟的数据拟合曲线,如图1~图4所示。但它们的应用是有条件的,图1~图4的应用温度范围是分别是模拟时对应的温差范围,超过此范围应用该拟合公式可能会产生较大的误差。表2、表3分别从换热器进出口平均温度与湖水温差,以及换热器进口温度与湖水温差的角度,在实验既定的温差下,将该温差代入拟合公式,得到模拟结果,并将该结果与实验结果进行了对比,误差基本在±10%之内。

表2 进出口平均温度与湖水温差对应的单位管长的换热量

工况	进出口平均温度与湖水温差 (°C)	流速 (m/s)	单位管长换热量 (W/m)		模拟值与实验值相对误差 (%)
			实验值	模拟值	
散热	8.60	0.82	67.79	77.67	14.6
取热	-4.61	0.82	34.63	32.11	-7.3

表3 进口与湖水温差对应的单位管长的换热量

工况	进口温度与湖水温差 (°C)	流速 (m/s)	单位管长换热量 (W/m)		模拟值与实验值相对误差 (%)
			实验值	模拟值	
散热	12.35	0.82	67.79	71.02	4.8
取热	-6.5	0.82	34.63	30.91	-10.7

需要说明的是,列表中的温差-4.61℃、12.35℃、-6.5℃已超出了图2~4的应用范围,如果将模拟的数据点加密,并且温差在拟合公式允许的范围应用公

式,则模拟结果与实验结果的误差可能会更小。

模拟时假设湖水内部没有扰动,然而实际情况是水体内部可能由于受到风力或者流入流出水体的影响而产生扰动,模拟前,假设湖水水体内部的温度是一致的,即水体内部温度没有梯度,然而实际情况会有一定出入,这些因素都有可能造成模拟结果与实验结果的偏差。

5 结论

本文对闭式U型地表水换热器的传热特性进行的数值模拟与现场实验研究,基于模拟与实验结果,分析如下:

1)模拟结果表明,换热器进出口平均温度与湖水温差、换热器进口温度与湖水温差是影响闭式U型地表水换热器传热量大小的根本因素,拟合了两种传热温差与换热器单位管长换热量的关系曲线。

2)利用模拟得到的拟合公式计算得到的单位管长换热量,与现场实验结果相比,误差在±10%以内,模拟与实验数据吻合较好。文中得到的拟合曲线和实验结果,可以作为工程设计的参考,具有推广价值。

3)地表水体的热物性不像土壤那样千差万别,因此建立的数学模型与实际情况偏差不大,利用数值模拟的方法开展对闭式地表水换热器的研究是可靠的。

参考文献

- [1] 马最良,吕悦. 地源热泵系统设计与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2007
- [2] 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
- [3] 韩占忠,王敬,兰小平. FLUENT流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2004
- [4] 李亚农. 水库水温三维数值模拟与预测的应用[D]. 武汉:武汉大学,2003
- [5] 张鹤飞. 太阳能热利用原理与计算机模拟[M]. 西安:西北工业大学出版社,2004

(上接52页)

参考文献

- [1] 宋蓉坤. 埋地换热器含水层内传热的数值模拟与实验研究[D]. 天津:天津大学,2006
- [2] 廉乐明,李力能,吴家正,等. 工程热力学(第四版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1999
- [3] 胡宁,余跃进. 地源热泵垂直U型管换热器的传热模型分析[J]. 建筑节能,2008,(5):16-18
- [4] 吴挺,赵军,张春雷,等. 水平埋管周围土壤温度场数值模拟研究[J]. 华北电力大学学报,2004,31(6):68-71