

U 型管传热量影响因素的数值模拟研究

吴玉庭 顾中焯 马重芳 唐志伟

(传热强化与过程节能教育部重点实验室及传热与能源利用北京市重点实验室,

北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100022)

摘要 地下换热器是地源热泵的重要组成部分, 垂直 U 型管是最常见的地下换热器形式。U 型管与土壤间的传热受诸多因素的影响。为分析这些因素对于 U 型管传热的影响, 本文建立了地源热泵垂直 U 型管地下换热器的三维全尺寸数值模型, 在此基础上采用 CFD 软件 FLUENT 对 U 型管的埋管深度、进口水温、管内流速等一系列因素在冬夏不同工况下对 U 型管传热量的影响进行了数值模拟研究。经过整理分析得出的各种因素对传热量影响可以为优化工程设计提供依据。

关键词 U 型管; 传热; 数值模拟

中图分类号: TK523 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2007)01-0116-03

NUMERICAL STUDY ON THE INFLUENCING FACTORS ON THE HEAT TRANSFER OF THE U-TUBE

WU Yu-Ting GU Zhong-Xuan MA Chong-Fang TANG Zhi-Wei

(College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract The ground heat exchanger is an important component of the Ground Coupled Heat Pump (GCHP) and the U-tube is most commonly used ground heat exchanger. The heat transfer between the U-tube and the soil is affected by many factors. To analyze the influence of these factors on the heat transfer of the U-tube, this paper built a full scale 3D numerical model of a U-tube ground heat exchanger of a Ground Coupled Heat Pump (GCHP). Then numerical studies on the influence of various factors such as U-tube depth, inlet temperature, fluid velocity on the heat transfer of the U-tube were carried out using CFD software FLUENT. The computed influence on the heat transfer can provide some insight to the optimization design.

Key words U-tube; heat transfer; numerical simulation

1 前言

垂直 U 型管是在当前的地源热泵工程中广泛采用的一种地下换热器。U 型管的井深、进口水温、管内流速等一系列因素影响 U 型管传热量。本文建立了 U 型管传热的数学模型, 通过数值模拟计算上述各种因素对传热量的影响, 得到了一系列计算结果。

2 数学模型和数值模拟方法

2.1 模型的建立

垂直 U 型管安放在竖井中, 竖井中填有回填土。U 型管中的流体通过管壁、回填土和周围的土

壤换热。本模型包括的几何体有 U 形管内的水、U 形管、回填土和土壤。钻孔和模拟范围内的土壤可看成是圆柱体。注意到 U 型管两只管腿中心线所构成的平面两侧的模型几何形状和传热、流动过程都是对称的, 实际建模时只需建立模型的一半。采用 GAMBIT 软件建立了以上几何模型。

2.2 假设条件

本文重点分析地源热泵稳定运行期间各种因素对 U 型管传热量的影响, 因而采用稳态模型进行数值模拟。稳态模型中土壤半径取为 3 m。将土壤和回填土中的传热视为纯导热。紊流模型采用 realizable $k-\epsilon$ 模型^[1]。

收稿日期: 2006-01-23; 修订日期: 2006-11-28

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (No.G2000026300)

作者简介: 吴玉庭 (1970-), 男, 河北井县人, 副研究员, 博士后, 研究方向为可再生能源的利用。

2.3 网格划分

采用 GAMBIT 软件划分网格。在 U 型管的直管段, 以 1 m 为间距在竖直方向上布置网格。在 U 型管的转弯处沿流向 40 等分密集布置网格。

3 模拟结果与讨论

本实验室在热泵工程中所用最大管内设计流速为 1.2 m/s, 此时管内流动雷诺数为 20000, 属于旺盛紊流。本文选取 1.2 m/s、1 m/s、0.8 m/s、0.6 m/s、0.4 m/s、0.3 m/s、0.25 m/s、0.2 m/s、0.15 m/s 和 0.12 m/s 进行计算。0.12 m/s 时雷诺数为 2000, 这样选取的流速覆盖了从过渡流到旺盛紊流的流态。U 型管进口水温根据工程实际情况为 2°C、4°C、6°C 和 8°C。

图 1 为冬季工况 60 m 竖井单位井深热流量 q (W/m) 在不同进口水温 T_{in} (°C) 下随流速 v (m/s) 的变化图。在流速不变时 U 型管进口水温越低, 土壤与水的传热温差越大, U 型管吸热量越大, 反之则吸热量小。

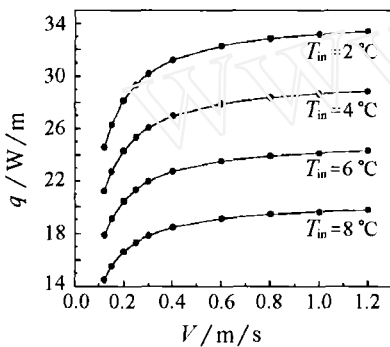


图 1 冬季工况 60 m 竖井单位井深热流量随流速变化

图 2 是冬季工况不同流速 v (m/s) 下单位井深热流量 q (W/m) 随进口水温 T (°C) 变化趋势。不同流速下单位井深热流量随进口水温变化的趋势相同, 冬季工况下热流量随进口水温增加而线性下降。如果降低地源热泵在冬季运行中 U 型管进口水温将有利于 U 型管与土壤传热。图 3 是在 0.6 m/s 流速时, 单位井深热流量 q (W/m) 在不同进口水温 T_{in} (°C) 下随埋管深度 H (m) 的变化。可以看出在流速为 0.6 m/s 时, 不同进口水温下单位井深热流量随埋管深度增加都几乎没有变化。

图 4 是在 2°C 进口水温时, 单位井深热流量 q (W/m) 在不同流速 v (m/s) 下随埋管深度 H (m) 的变化。从图中可以看出, 流速越低时埋管深度对单位井深热流量影响越大, 流速在 0.4 m/s 以上时几乎没有影响。在低流速时随着埋管深度增加单位井深热

流量有所下降, 这是因为埋管深度越大, 水在 U 型管内流动的时间越长, 温度上升越大, 但随着温度上升水与土壤的温差减小, 使沿程的传热量减小, 结果使单位井深平均热流量也减小了。而随着流速上升, 水从进口到出口时间减小, 这种效果也不明显了。夏季地理 U 型管向土壤中放出热量, 地面与空气的对流换热系数计算得到 $\alpha=18.2 \text{ W/m}^2\text{°C}$, 室外气温取 30°C。进口水温分别选取 20°C、25°C、30°C 和 35°C 计算, U 型管内水的流速和竖井深度的一系列数值和数学模型的其他条件与冬季工况一致。

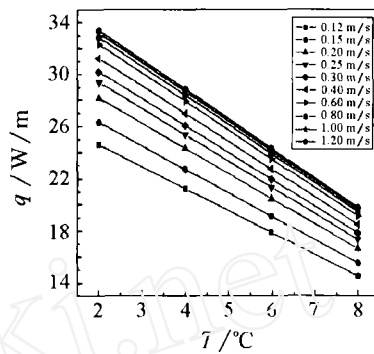


图 2 冬季工况 60 m 竖井单位井深热流量随进口水温变化

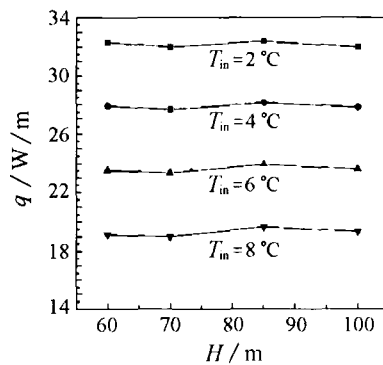


图 3 冬季工况 0.6 m/s 流速单位井深热流量随埋管深度变化

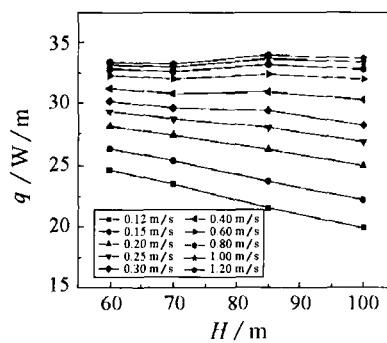


图 4 冬季工况 2°C 进口水温单位井深热流量随埋管深度变化

由图 5 可以看出进口水温一定时热流量随流速变化的趋势与冬季工况相似, 总体上随流速增加而

增大,但随流速增加热量对流速的变化率下降。流速在 0.25~0.4 m/s 时热流量增长较之前明显变慢,0.4 m/s 之后热流量随流速变化更缓慢。夏季工况 U 型管向土壤散热,进口水温高时,水与土壤的传热温差大,热流量就大,反之则小。将不同流速 $v(\text{m/s})$ 下单位井深热流量 $q(\text{W/m})$ 随进口水 $T(^{\circ}\text{C})$ 变化趋势绘成图 6。可以看出,夏季工况不同流速下单位井深热流量随进口水温增加线性上升。对比图 2 可知,冬夏工况热流量随进口水温变化的趋势相反,夏季工况加大 U 型管进口水温有利于传热。

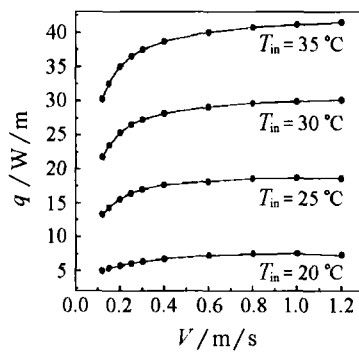


图 5 夏季工况 60 m 竖井单位井深热流量随流速变化

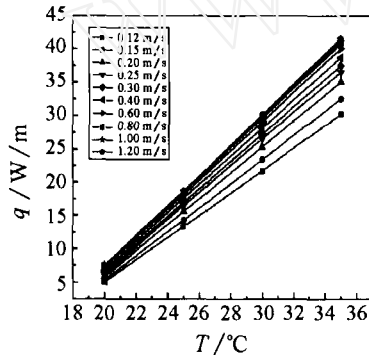


图 6 夏季工况 60 m 竖井单位井深热流量随进口水温变化

图 7 是 0.4 m/s 流速时不同进口水温下单位井深热流量 $q(\text{W/m})$ 随井深 $H(\text{m})$ 的变化趋势。图 8 是 35°C 进口水温时不同流速下单位井深热流量

$q(\text{W/m})$ 随井深 $H(\text{m})$ 的变化趋势。可看出夏季工况单位井深热流量随井深的变化趋势与冬季相同,流速在 0.4 m/s 以上时井深的影响很小。

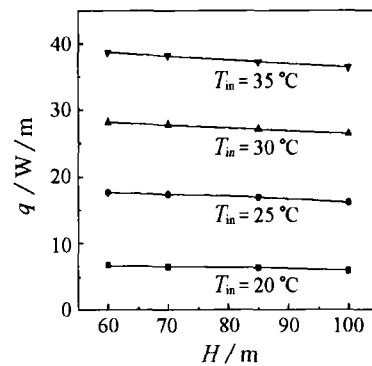


图 7 夏季工况 0.4 m/s 流速单位井深热流量随埋管深度变化

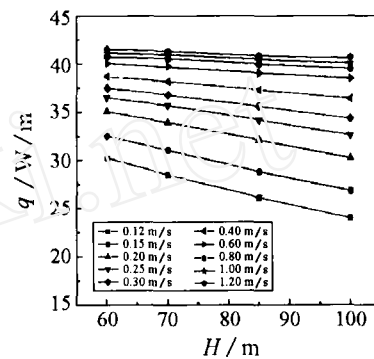


图 8 夏季工况 35°C 进口水温单位井深热流量随埋管深度变化

4 结 论

本文分别数值模拟了冬夏工况不同 U 型管内流速、进口水温和埋管深度对单位井深热流量的影响,热流量随流速增加而增大,热流量对流速的变化率随流速增大而减小。冬季减小进口水温,夏季增大进口水温都有利于增大土壤与 U 型管的传热。

参 考 文 献

- [1] 陶文铨. 数值传热学. 西安: 西安交通大学出版社, 2001