

# 温室地埋管强化换热方案探讨及数值模拟分析

郭仁宁,李小艳,孙琦

(辽宁工程技术大学 机械工程学院,辽宁 阜新 123000)

**摘要:**为了提高地热资源在温室供热中的利用效率,定性研究了地源热泵地埋管管内强化传热方式,针对横纹管、缩放管和波纹管为研究对象并以光滑管作参照,建立了以水为传热介质的强化传热模型,利用 Fluent 软件,采用 simplec 算法和标准 k- $\epsilon$  模型,分析了不同的管内结构对管内传热过程的影响,并探讨其强化传热机理,从光滑管和几种强化传热管的传热特性中可得出,在研究范围内,它们的传热效果按优劣依次为横纹管、缩放管、波纹管,为温室供热地埋管的选择提供了可靠的依据。

**关键词:**温室供热;强化传热;横纹管;缩放管;波纹管;数值模拟

**中图分类号:**TK172

**文献标识码:**A

**文章编号:**1002-2767(2011)11-0107-04

随着节能技术的发展,农业温室中的耗能问题更为凸显,传统温室设施的供热主要采用燃煤热水加温、燃气热水加温和燃油热风炉加温系统,这些加温方式需要大量燃烧化石类能源,加温过程中的排气对人和作物的健康都有危害。因此,许多清洁能源应用技术如浅层地能利用技术——地源热泵技术逐渐引起广大设施园艺工程工作者的关注。地源热泵系统是以大地为热源,通过地下的埋管换热系统与温度较为恒定的大地进行热交换从而为温室供热,是一种符合现代农业可持续发展的绿色节能技术。在地源热泵系统中,地埋管换热系统的优化直接影响到整个工作系统效率的提高,因此,地埋管的换热强化问题成了很多学者共同关注的问题<sup>[1-2]</sup>。目前这方面的研究尚待深入,在管内强化传热技术中,由于异型管不但可以增加传热面积而且可以减少热阻,近年来受到了很大程度的重视。有关强化换热管的管内热力特性和流动特性及其传热强化机理仍有待更多的研究探讨,以便为相关工作中换热效率的提高提供更明确直观的依据。

大型商业 CFD 软件 Fluent 可以比较快捷、准确地反映出流体在换热管中流动的过程,如速度场、压力场、温度场和湍动能等的分布,可直观地了解到管内流体的流动特性。利用 Fluent 对恒壁温工况下光管及其它 3 种强化传热管管内紊流的流动和传热特性进行了数值模拟,实现了管

内流场的可视化,分析研究了不同的管内结构对管内传热过程的影响,并对它们的强化传热机理进行了对比探讨,为温室地埋管的选择提供了可靠的参考依据。

## 1 管内强化传热机理

管内流体强化传热的主要机理是增加二次传热表面和破坏原来未强化的流体的速度和温度分布场<sup>[3-4]</sup>。该文所研究的管内传热强化主要表现在靠近壁面流体速度近似为零的低速区,即熟知的层流底层,大部分的热阻都集中在层流底层低速区,任何粗糙表面和翅片等强化技术都是通过改变管内结构,扰动流体流动,破坏边界层从而达到提高换热的目的<sup>[3-5]</sup>。

可实现的管内强化传热一般有螺旋槽管、横纹管、缩放管和波纹管等,流体在强化传热管内的流动由于受离心力和扭转力的作用,比直管内要复杂得多,并且,由于二次流的影响,管道中心区具有较高轴向流速的主流流体将不断地与近壁面处较低轴向流速的流体混合,强化湍流强度,从而提高传热效果<sup>[6-7]</sup>。

## 2 数值模拟

### 2.1 建立模型

模拟过程中作假设:土壤温度恒定,流动状态稳定,即流场分布只与空间位置有关,与时间无关;流体物性(密度、比热和流体的粘度等)不随温度变化;流体忽略重力影响。4 种传热管的物理模型结构均采用比较成熟的优化结构,为避免参数差异的影响,管道的水力直径均取 40 mm,长度 600 mm。该文数值模拟采用有限容积法对控

收稿日期:2011-06-28

第一作者简介:郭仁宁(1956-),男,辽宁省沈阳市人,硕士,教授,从事流体机械及工程研究。

制方程离散,计算过程利用分离隐式求解器进行稳态计算。

## 2.2 边界条件和流动参数

采用六面体网格,并对壁面区域网格进行加密;工质入口温度  $T=300\text{ K}$ ,压力为一个标准大气压,边界条件采用速度入口,壁面恒温,出口为自由出流。忽略管壁传热温差;管壁为刚性,无变形。计算在整个区域内进行,采用六面体结构化网格离散处理(一阶迎风离散格式),为了能更好地捕捉到湍流的性质,该文计算模型采用标准  $k-\epsilon$  模型且壁面采用非平衡壁面函数法,压力—速度耦合采用 Simplec 算法。

## 3 模拟结果与分析

利用 Fluent 对光滑管、横纹管、缩放管和波纹管的湍流流动进行了三维数值模拟,Fluent 自带处理器截取多个不同截面,观察流动过程中流体的温度、速度及努塞尔数的分布规律,比较分析传热强化管结构对管内传热特性和流动特性的影响。

### 3.1 各传热管的传热过程

通过传热特性图 1~图 4 可清晰地看到管内传热的整个过程。

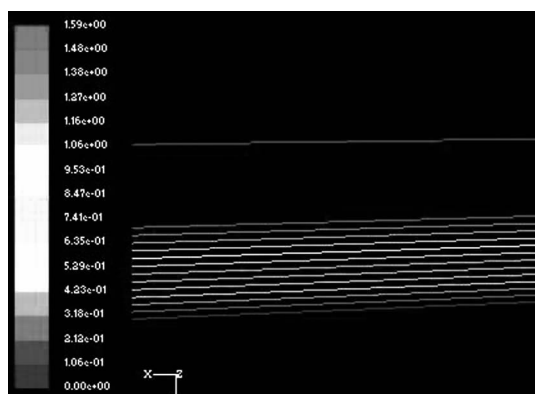


图 1 光滑管截面速度等值线

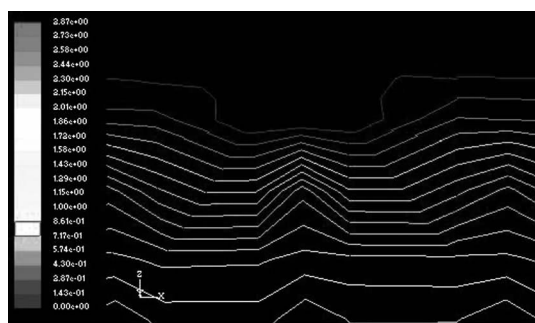


图 2 横纹管截面速度等值线

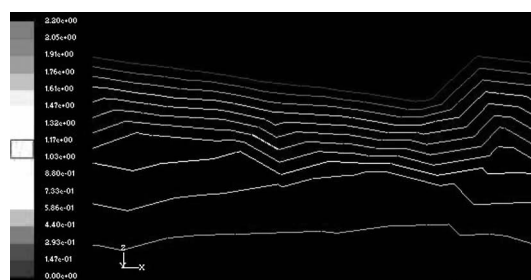


图 3 缩放管截面速度等值线

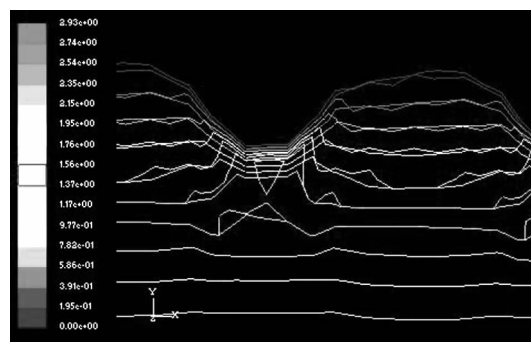


图 4 波纹管截面速度等值线

表面传热系数的大小主要受过渡区的径向速度和湍流强度变化的影响,三者的分布规律一致。图 1~图 4 中分别显示了流体在不同壁面结构中速度矢量变化产生扰流的过程,这是传热得以强化的主要原因,可以看出 3 种强化管与光滑管相比流体的速度模量和流动方向均产生了较大变化,流体的扰动作用有了不同程度的加强。

由图 1~图 4 可知,流体经过横纹管环形凸肋时管壁面的速度方向发生变化,产生径向扰动,从而破坏了边界层底层的形成,在一定程度上强化了传热,当流体经过横纹管的环形凹槽时,壁面速度轴向冲刷边界层,从而形成轴向旋涡,增加了流体边界层的扰动,促使边界层表面更新加剧,有利于使热量通过边界层进行传递;在缩放管中,收缩段处流通面积缩小使得流体的流速增加,高速流体冲刷和干扰管壁面流体边界层,过渡段由于流体质点速度的变化产生剧烈的漩涡和二次流,促进核心流体与边界层的混合,使得边界层减薄从而达到强化传热效果;图 4 的波纹管,不仅波谷段速度不断增大,高速冲刷边界层,而且在每个波峰来流的上游都出现了封闭的回流区,整个回流区以一定的速度循环流动,这样就不断的把回流区内靠近管中心区域的冷流体带到管壁处与管壁进行热交换,再把管壁处的热流体带到管中心区,使热量如此传递开来。

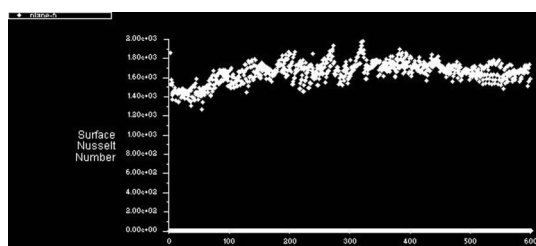


图5 光滑管轴向壁面努塞尔数分布

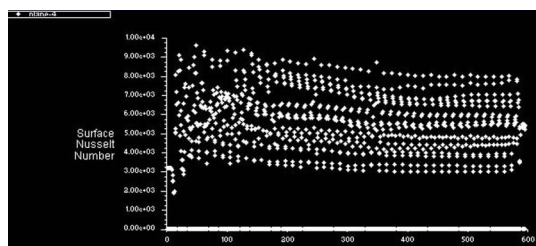


图6 横纹管轴向壁面努塞尔数分布

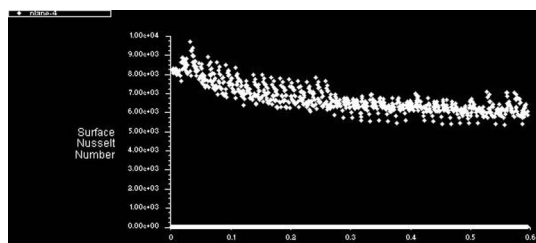


图7 缩放管轴向壁面努塞尔数分布

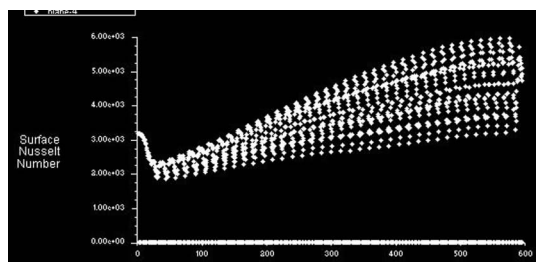


图8 波纹管轴向壁面努塞尔数分布

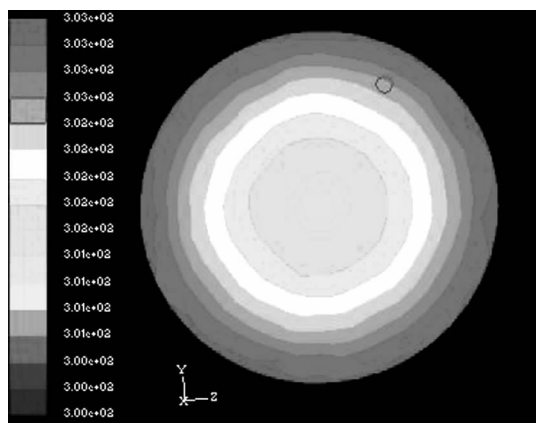


图9 光滑管出口截面温度

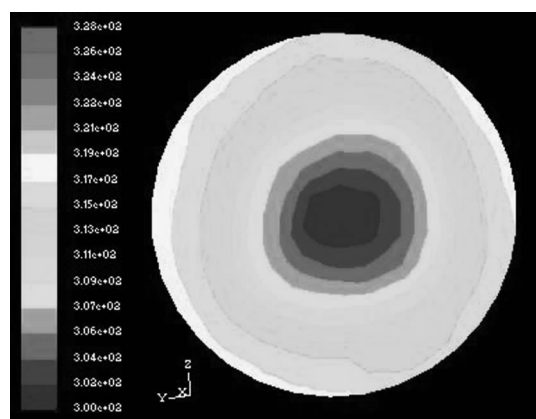


图10 横纹管出口截面温度

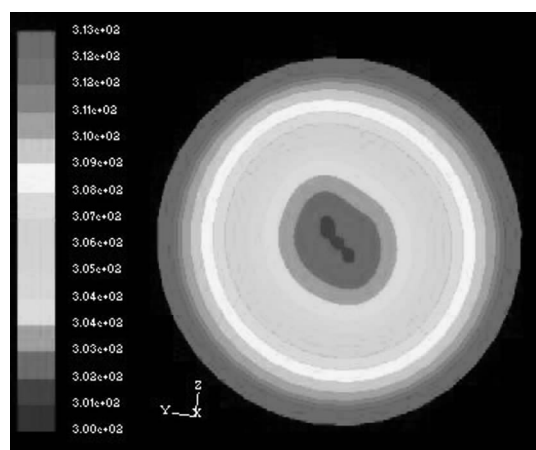


图11 缩放管出口截面温度

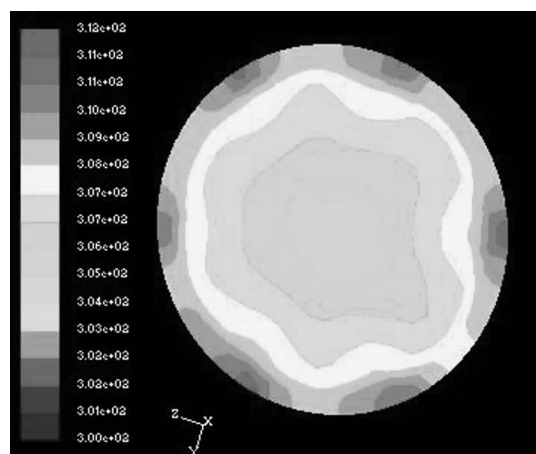


图12 波纹管出口截面温度

### 3.2 传热效果比较

从图5~图8的各强化传热管壁面努塞尔数分布和图9~图12的出口温度可看出,整个管道的传热过程中横纹管壁面平均努塞尔数较大,其传热效果最为明显,最高温度达到311~317℃,但其壁面努塞尔数浮动较大,流道内壁面各点的

传热有差异,轴心处温度较低,表明其在整个管道区域内扰动掺混效果欠佳;缩放管传热效果较横纹管差,出口温度范围为 306~313℃,但其平均努塞尔数最大,在流道内扰动掺混效果有所提高,温度分布均匀度较好;波纹管出口温度达到了 306~310℃,其努塞尔数沿轴向不断增大,流体扰动掺混效果表现最佳,流体出口温度均匀度最好。

#### 4 结论

温室地源热泵系统的换热效率的提高很大程度上依赖于埋管的选择,该文使用计算流体力学(CFD)软件 Fluent 分析计算了发生在 3 种不同结构强化传热热管中的流动与传热过程并与光滑管进行了对比,对强化传热热管的流动及传热过程做了详细的介绍,得出了几种强化传热管传热过程、传热原理及传热效果的对比结果。

对 3 种强化传热管的强化传热机理分析得出:横纹管通过不断的改变表面形状,即内部交替的环形凸肋和凹槽使流体不断的产生径向扰动和轴向旋涡,增加了对流体边界层的冲刷和边界层的扰动,有利于热量通过边界层向流体主体的传递,使传热能力大大增强;缩放管通过扩张段与过渡段的周期性变化使流体的湍动强化,过渡段处流通面积缩小使得流体的湍流程度大大提高,高速流体冲刷和干扰管壁面流体边界层,扩张段流

体的速度变化使流体产生涡流和二次流,促进了核心流体与边界层的混合,减薄层流底层,从而达到强化传热的效果;波纹管波峰处回流区的存在和表现是它强化传热的关键所在。

在该研究范围内,综合考虑努塞尔数、传热效果和流动阻力,它们的优劣顺序为:横纹管、缩放管、波纹管,实际工作中可以根据温室供热系统的状况进行选择。

#### 参考文献:

- [1] 柴立龙,马承伟,张晓蕾,等.地源热泵温室降温系统的试验研究与性能分析[J].农业工程学报,2008,24(12):150-154.
- [2] 左睿,蒋绿林,高伟.地热技术在温室供暖中的应用[J].安徽农业科学,2009,37(13):6139-6140.
- [3] 宇波,王秋旺,陶文铨.波纹内翅片管换热与阻力特性的实验研究[J].工程热物理学报,2000,21(3):334-337.
- [4] Yu Bo, Tao W Q. Pressure drop and heat transfer characteristics of turbulent flow in annular tubes with internal wave-like longitudinal fins[J]. Heat and Mass Transfer, 2004,40:643-651.
- [5] 钱颂文,朱冬升,李庆领,等.管式换热器强化传热技术[M].北京:化学工业出版社,2003.
- [6] 刘吉普.横纹槽换热管力学性能试验研究[J].化工机械,1998,25(3):70-72.
- [7] 黄德斌,邓先和,邢华伟.异型管内水力、传热性能的数值模拟[J].高校化学工程学报,2003,17(2):146-150.

## Heat Transfer Enhancement Program on Underground Pipes of Greenhouse and Numerical Simulation

GUO Ren-ning, LI Xiao-yan, SUN Qi

(Mechanical Engineering College of Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000)

**Abstract:** In order to improve the efficiency of geothermal resources in greenhouse heating, the study on heat transfer enhancement of underground pipe was carried out and a heat exchanger model of heat transfer enhancement was established, which was made for the different tubes with water for heat transfer medium. The influences of different tube structure on heat transfer enhancement were studied by solving the 3D N-S equations and energy equations using the simplec method and the standard k- $\epsilon$  turbulence model in Fluent, and the mechanism of heat-transfer enhancement was discussed. From the heat transfer comparison graph of these three kinds enhanced tubes compared with that of the smooth tube, the order of the strengthening heat transfer effect of these three tubes was transversally corrugated tube, converged-diverging tube and corrugated tube.

**Key words:** greenhouse heating; heat transfer enhancement; transversally corrugated tube; converged-diverging tube; corrugated tube; numerical simulation