

# 关于U形管式换热器温度场的数值模拟研究

韩文娟<sup>1\*</sup>, 梁雪娇<sup>1</sup>, 严成贵<sup>1</sup>, 彭义敏<sup>1</sup>, 李德翠<sup>2</sup>

<sup>1</sup>六盘水师范学院物理与电气工程学院, 贵州 六盘水

<sup>2</sup>六盘水市第四中学, 贵州 六盘水

Email: hanwenjuanying@163.com

收稿日期: 2020年11月6日; 录用日期: 2020年11月19日; 发布日期: 2020年11月26日

## 摘要

本文研究非流固耦合时U形管式换热器的温度场情况。研究方法是: 使用UG软件建立U形管式换热器的流体(文中选用水)几何模型, 使用ANSYS软件对温度场(水无相变时的温度场)进行模拟。研究结论: 随着换热器管程越长、管径越小, 流体入口温度越高、流体入口流速越小, 换热器换热效果越好。通过模拟分析, 能更好地认识U形管式换热器的结构及工作原理, 更深入理解该类换热器换热微过程及温度场情况, 从而能为U形管式换热器的优化提供一些参考和启示性信息。

## 关键词

U形管式换热器, 温度场, 数值模拟, 研究

# The Research of the Numerical Simulation of the Temperature Field of U-Tube Heat Exchanger

Wenjuan Han<sup>1\*</sup>, Xuejiao Liang<sup>1</sup>, Chenggui Yan<sup>1</sup>, Yimin Peng<sup>1</sup>, Decui Li<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Physics and Electrical Engineering, Liupanshui Normal University, Liupanshui Guizhou

<sup>2</sup>Liupanshui No.4 Middle School, Liupanshui Guizhou

Email: hanwenjuanying@163.com

Received: Nov. 6<sup>th</sup>, 2020; accepted: Nov. 19<sup>th</sup>, 2020; published: Nov. 26<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

The temperature field of U-tube heat exchanger neglecting fluid-solid coupling is researched in this paper. The research methods are as follows: The fluid (water is selected) geometry model of U-tube heat exchanger is established using UG software firstly; then the temperature field (the

\*第一作者。

文章引用: 韩文娟, 梁雪娇, 严成贵, 彭义敏, 李德翠. 关于 U 形管式换热器温度场的数值模拟研究[J]. 应用物理, 2020, 10(11): 476-482. DOI: 10.12677/app.2020.1011062

temperature that there is no phase change) of the models is simulated using ANSYS software. The research conclusions are as following. With the increase of pipe length, the decrease of pipe diameter, the decrease of inlet velocity of fluid and the increase of inlet temperature of fluid, the heat transfer effect is better. Through the simulation analysis, the structure and working principle of U-tube heat exchanger can be better understood; the heat transfer micro process and temperature field of this kind of heat exchanger can be better and more deeply understood; some reference and enlightening information for the optimization of U-tube heat exchanger are provided.

## Keywords

U-Tube Heat Exchanger, Temperature Field, Numerical Simulation, Research

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

换热器是将某种流体热量以一定的传热方式传递给其它流体的设备[1],在化工、石油、动力、制冷、能源等行业中得到广泛应用[2]。U形管式换热器是换热器中最基本的一种,因具有热补偿性能好、传热性能好、承压能力强、结构简单、造价便宜等优点而得到很好地运用和发展[3]。关于U形管式换热器的研究很多,如Shabnam Gharibi、Emad Mortezaadeh等建立了U形管换热器的三维数值模型研究换热器性能[4][5],曹永等对U型管内部流场情况利用RNGk-ε湍流模型进行了数值分析[6],孙晓盟等建立U形管式换热器三维稳态流动数学模型求得了流场分布[7]。笔者受这些研究思路的启示,从贴近现状的工况着手,建模、研究非流固耦合时U形管式换热器的温度场情况,能更好地认识U形管式换热器结构及工作原理,更深入地理解该类换热器换热微过程,从而能为U形管式换热器的优化设计提供一些参考和启示性信息。

## 2. 研究方法

### 2.1. 传热原理与控制方程

1) 传热原理: 传热是热从高温物体向低温物体的传递,或从物体高温区向低温区传递的过程,有热传导、热对流和热辐射三种方式。本文主要对U形管式换热器不同温度水在接触面进行热传导、热对流的温度场进行模拟; 2) 控制方程: 本文采用的流体是水,水可看作是不可压缩的流体。流体的换热过程可以用连续方程、动量方程和能量方程来表示:

a) 连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

对于不可压缩流体,其流体密度为常数。其连续方程可简化为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$\rho$ 表示流体密度, $\tau$ 表示时间, $u$ 、 $v$ 、 $w$ 分别表示速度矢量在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的坐标分量(以下同),(2)式表明控制体内流体质量单位时间的增量等于流入或流出控制面流体净质量。

b) 动量方程:

$$x \text{ 方向 } \rho \left( \frac{\partial \mu}{\partial \tau} + \mu \frac{\partial \mu}{\partial x} + v \frac{\partial \mu}{\partial y} + \omega \frac{\partial \mu}{\partial z} \right) = \mu \left( \mu \frac{\partial^2 \mu}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 \mu}{\partial y^2} + \omega \frac{\partial^2 \mu}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} - F_x \quad (3)$$

意义为: 流体动量在控制体内的时间变化率与流体动量净通量经过控制面的矢量和等于作用在控制体内流体上外力的矢量和。y 方向、z 方向情形相似此处略。

c) 能量方程:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + \mu \frac{\partial t}{\partial x} + v \frac{\partial t}{\partial y} + \omega \frac{\partial t}{\partial z} = \alpha \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \omega \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

d) 式为描写粘性流体流动过程的控制方程, 对于不可压缩粘性流体的层流和湍流流动都适用, 本文研究流体雷诺数小于 2000 的层流情况。

## 2.2. 研究步骤

本文主要模拟稳态下 U 形管式换热器的温度场(温度场是各个时刻物体中各点温度所组成的集合)。情况, 通过模拟计算, 得到不同参数时 U 形管式换热器温度场的模拟云图进行分析, 然后得出影响 U 形管式换热器温度场的因素。本文研究 U 形管式换热器温度场的方法是: 在忽略流固耦合的前提下, 运用 UG 建立不同尺寸的 U 形管式换热器流体几何模型, 使用 ANSYS 软件进行模拟[8]计算, 得到不同参数(如管程、流体入口温度、流体速度、管径等)条件下的温度场(水无相变时的温度场)云图, 最后运用控制变量法对不同参数条件下的温度场进行数值分析。模拟过程为: 1) 参照换热器设计手册, 计算所需的建模数据; 2) 草图建立→拉伸、求和、导出模型; 3) 模型导入→命名→网格划分→模拟计算→结果分析。

## 3. 数据结果

### 3.1. 管程不同时的流场模拟云图

取流体入口温度为 363 K, 壁面温度为 293 K, 管径为 6 mm, 速度为 0.1 m/s, 而管程分别取为 1780 mm、2096 mm 时所模拟的温度场云图见图 1 和图 2。图中左侧的色带为温度值的标尺, 不同颜色显示不同值大小, 总的颜色变化从上到下由红色变到蓝色, 红色颜色区域数值大些, 蓝色区域数值大些, 中间由黄到绿的区域依次减小, 以下同。

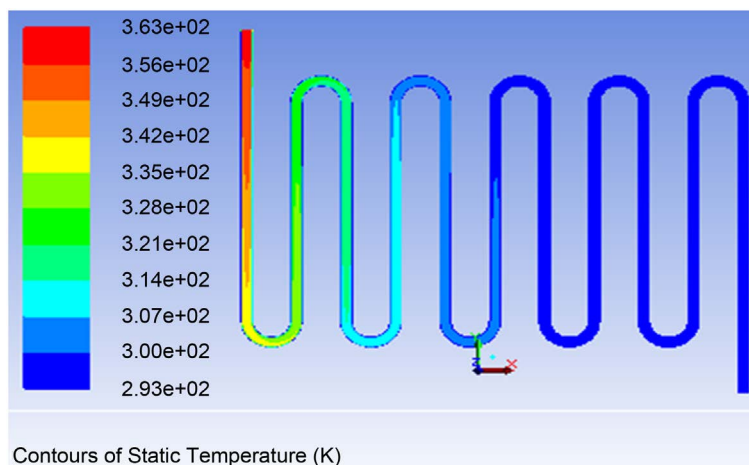
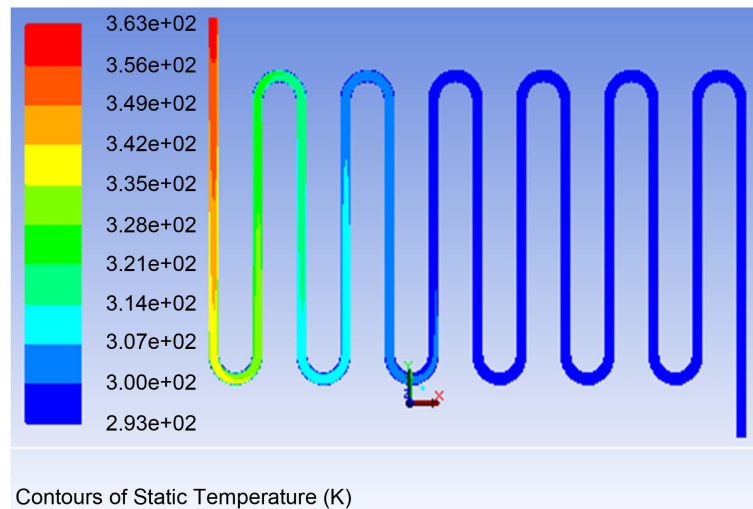


Figure 1. The chart of the temperature field when the pipe length is 1780 mm  
图 1. 管程为 1780 mm 时的温度场云图



**Figure 2.** The chart of the temperature field when the pipe length is 2096 mm  
**图 2.** 管程为 2096 mm 时的温度场云图

由图 1 和图 2 看出，同样前提下，管程越长，换热效果越好。

### 3.2. 流体入口温度不同时的温度场模拟云图

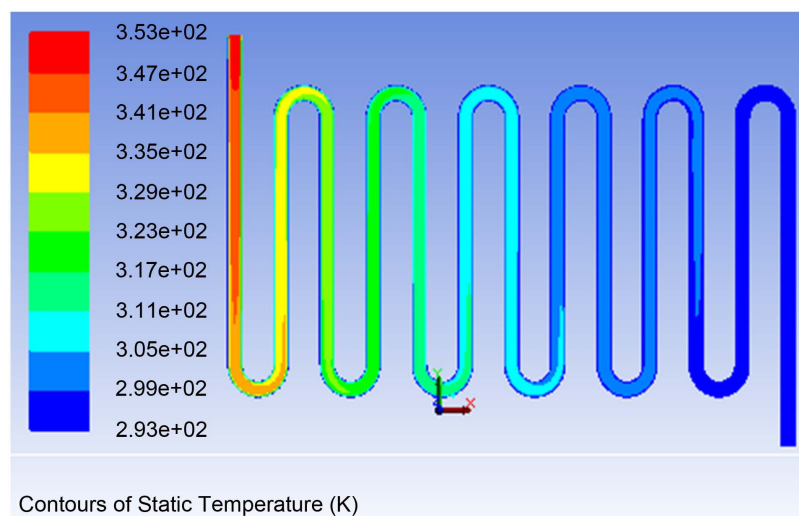
取管程为 2096 mm，壁面温度为 293 K，管径为 8 mm，速度为 0.1 m/s，而流体入口温度分别取为 353 K、363 K 时所模拟的温度场云图见图 3 和图 4。

由图 3 和图 4 看出，流体入口温度越大，换热效果越好。

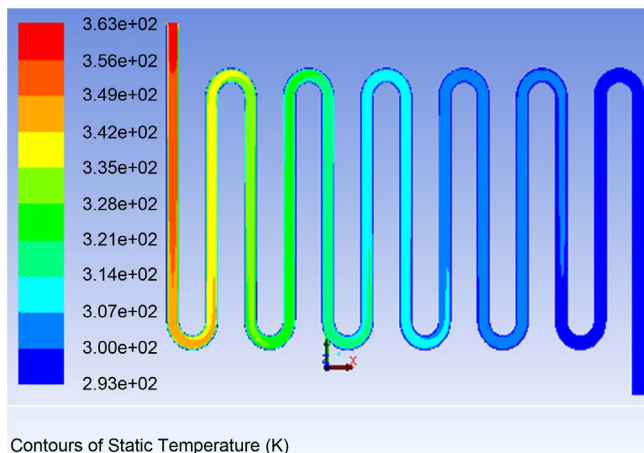
### 3.3. 流体流速不同时的温度场模拟云图

取流体管程为 2096 mm，壁面温度为 293 K，管径为 6 mm，入口温度为 363 K，而流体速度分别取为 0.1 m/s、0.2 m/s 时所模拟的温度场云图见图 5 和图 6。

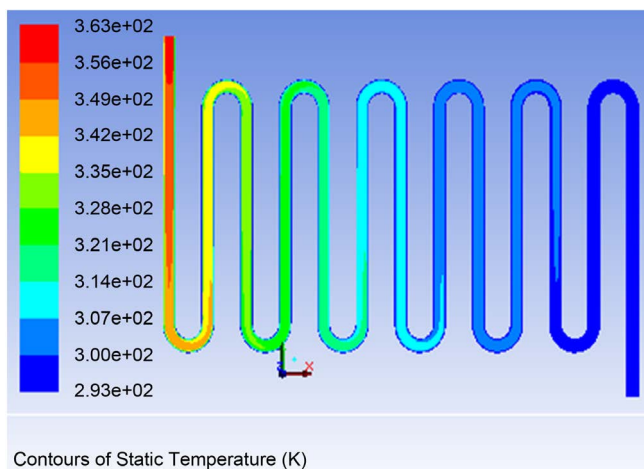
由图 5 和图 6 看出在相同管程位置，其温度下降趋势趋于相同，入口速度越小，换热性能越好。



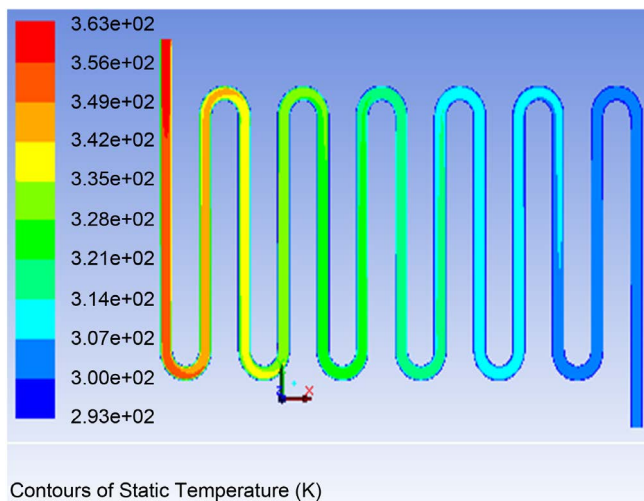
**Figure 3.** The chart of the temperature field when the inlet temperature is 353 K  
**图 3.** 入口温度为 353 K 时的温度场云图



**Figure 4.** The chart of the temperature field when the inlet temperature is 363 K  
**图 4.** 入口温度为 363 K 时的温度场云图



**Figure 5.** The chart of the temperature field when the inlet velocity of fluid is 0.1 m/s  
**图 5.** 流速为 0.1 m/s 时的温度场云图



**Figure 6.** The chart of the temperature field when the inlet velocity of fluid is 0.2 m/s  
**图 6.** 流速为 0.2 m/s 时的温度场云图

### 3.4. 管径不同的温度场模拟云图

取换热器管程为 2096 mm，壁面温度为 293 K，流体速度为 0.1 m/s，流体入口温度为 363 K，而换热器管径分别取为 6 mm，8 mm 时所模拟的温度场云图见图 7 和图 8。

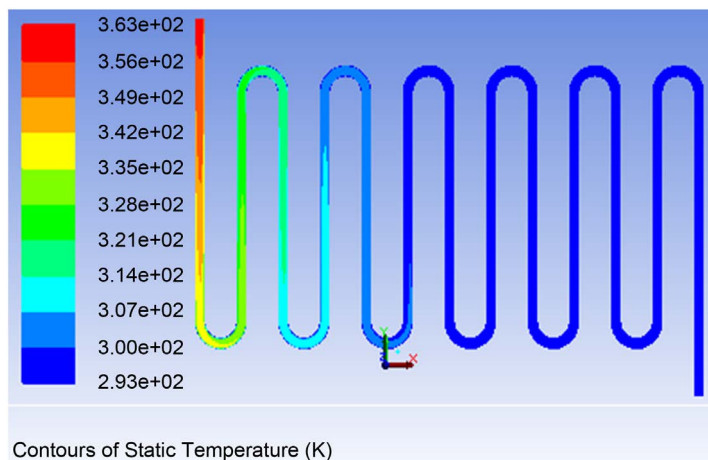


Figure 7. The chart of the temperature field when the pipe diameter is 6 mm  
图 7. 管径为 6 mm 时的温度场云图

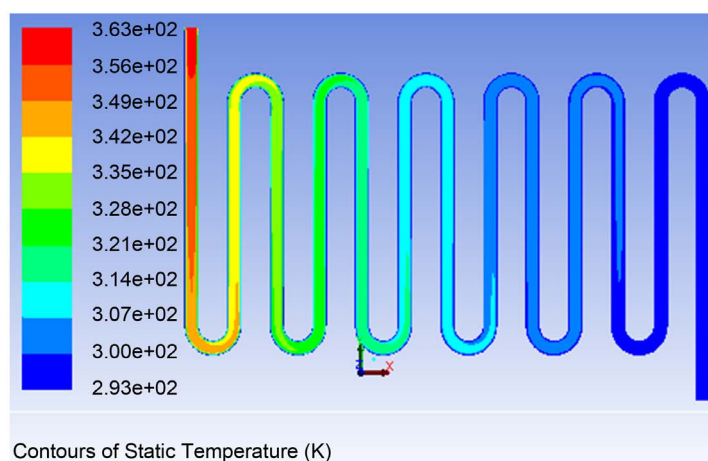


Figure 8. The chart of the temperature field when the pipe diameter is 8 mm  
图 8. 管径为 8 mm 时的温度场云图

由图 7 和图 8 看出流体在管径不同的换热器的相同管程位置处，其温度下降趋势趋于相同，换热器管径越小，换热效果越好。

## 4. 模拟分析与结论

1) **管程对温度场的影响**：由图 1 和图 2 可看出，换热器管程越长，换热效果越好，相关理论解释：由式  $\dot{h}_f = \lambda \frac{l u^2}{d^2}$  中，其余参数不变时，管道长度  $l$  (即换热器管程) 越长，沿程阻力  $\dot{h}_f$  则越大，流体流速越小，在管中停留的时间较长，能充分换热，换热效果越好；2) **流体入口温度对温度场的影响**：由图 3 和图 4 可看出，流体入口温度越大，换热效果越好，这是由于入口温度越大，流体热能越多，流体温度下降相对越慢，从而能更好换热，换热效果越好；3) **流体流速对温度场的影响**：由图 5 和图 6 可看出，流

体入口速度越小, 换热效果越好, 这是由于流体入口速度越小, 在管中停留的时间较长, 换热充分, 从而换热效果越好; **4) 管径对温度场的影响:** 由图 7 和图 8 可看出, 换热器管径越小, 换热效果越好, 这是由于换热器管径越小, 流体速度相对较慢, 流阻大, 在管中停留的时间较长, 充分换热, 从而换热效果越好。

本文对 U 形管式换热器的温度场情况进行模拟得到如下结论: 随着换热器管程越长、管径越小、流体入口温度越高、流体入口流速越小, 能充分换热, 换热器的换热效果越好。通过模拟分析, 能更好地认识 U 形管式换热器的结构及工作原理, 更深入理解该类换热器的换热微过程, 从而能为 U 形管换热器换的优化提供一些参考和启示性信息。

## 基金项目

2019 年教育部高等学校大学物理课程教学研究立项项目(DJZW201934xn); 六盘水师范学院大学生项目(LPSSYDXS19077); 六盘水师范学院《热学》精品课(LPSSYjpkc201605); 六盘水师范学院硕士学位培育点学科建设项目(LPSSYSSDYPY201704); 关于混合式教学模式下的大学物理课程教学实践和应用(2018520116); 六盘水师范学院大学生项目(LPSSYDXS19078)。

## 参考文献

- [1] 史中美, 王中铮. 热交换器原理与设计[M]. 第 5 版. 南京: 东南大学出版社, 2014.
- [2] 钱颂文. 换热器设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [3] 刘家杰. 换热器行业未来发展趋势探析[J]. 中国市场, 2016(3): 61-64.
- [4] Gharibi, S., Mortezaazadeh, E., Bodi, S.J.H.A., *et al.* (2018) Feasibility Study of Geothermal Heat Extraction from Abandoned Oil Wells Using a U-tube Heat Exchanger. *Energy*, **153**, 554-567.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.003>
- [5] 宋小飞. 地源热泵 U 型管地下换热器的 CFD 数值模拟[J]. 北京科技大学学报, 2007(3): 329-333.
- [6] 曹永. U 型管内部流场运动数值分析[J]. 制冷与空调, 2014, 28(5): 611-614.
- [7] 孙晓盟, 王洪志, 林国庆, 等. U 型管式换热器进口截面流场数值模拟[J]. 当代化工, 2014, 43(6): 1117-1120.
- [8] 董其伍. 换热设备 CAD 系统开发技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.