

# 关于固定管板式换热器不同工况下温度场的数值模拟

韩文娟, 甘昌顺, 杨丹丹

六盘水师范学院物理与电气工程学院, 贵州 六盘水

收稿日期: 2021年8月5日; 录用日期: 2021年9月18日; 发布日期: 2021年9月28日

## 摘要

本文模拟固定管板式换热器不同工况下的温度场情况。研究方法是: 使用UG软件构建固定管板式换热器的流场模型, 再用ANSYS软件对固定管板式换热器在不同管形(内置)、不同管数、换热面有无折流板、有无螺纹、不同换热材料、耦合与非耦合等情况时的温度场情况进行数值模拟分析。本文中的流体选用无相变、不可压缩的水和酒精, 固体选用铝和钢。研究结论: 1) 非耦合时, 同样前提下: 当换热器加设折流板、内设管芯棱边越多、管芯数目越多、换热面内设螺纹、流体进口流速越小、换热材料导热系数越大时换热效果越好; 2) 耦合时, 同样前提下: ① 同流体(固体), 不同固体(流体), 导热系数大的材料换热效果好; ② 换热面有螺纹比没有螺纹换热效果更好; 3) 同样前提下, 耦合比非耦合换热模拟结果更准确。

## 关键词

固定管板式换热器, 温度场, 数值模拟, 研究

# The Numerical Simulation of the Temperature Field of the Fixed Tube-Plate Heat Exchanger under Different Working Conditions

Wenjuan Han, Changshun Gan, Dandan Yang

School of Physics and Electrical Engineering, Liupanshui Normal University, Liupanshui Guizhou

Received: Aug. 5<sup>th</sup>, 2021; accepted: Sep. 18<sup>th</sup>, 2021; published: Sep. 28<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

The situation of the temperature field of the fixed tube-plate heat exchanger is simulated under different working conditions in this thesis. The research methods are as follows. The models of flow field are constructed using UG software, then the situation of the temperature field of the fixed tube-plate heat exchanger is simulated using ANSYS software when the shape and the number of tube those are set up in the heat exchanger are different, the baffle plates and the threads are set up or not in the heat exchange surface, or the heat exchange materials is different, or the condition is coupling and uncoupling, finally the simulation results are analysed. Water and alcohol that cannot be compressed without phase change are used as the fluid materials; aluminum and steel are used as the solid materials. The research conclusions are as follows: 1) Under the uncoupled circumstance and on the same premise, the heat transfer effect of the heat exchanger will become better when the baffle plate is added; the tube core having more edges or more tube cores are set in the heat exchanger, or the thread is set in the heat exchange surface, or the inlet velocity of fluid is lower, and the thermal conductivity of heat exchange material is higher; 2) Under the coupled circumstance and on the same premise: ① The heat transfer effect will become better when the thermal conductivity of the material of the heat exchange is higher when fluid (solid) is same, solid (fluid) is different; ② The heat transfer effect will become better in the situation of the heat exchange surface with screw thread than that without screw thread; 3) On the same premise, the coupling simulation results of the heat exchanger are more accurate than the uncoupled corresponding results.

## Keywords

Fixed Tube-Plate Heat Exchanger, Temperature Field, Numerical Simulation, Research

Copyright © 2021 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

温度场是物质系统内各点温度的集合，它反映温度在时间和空间上的分布[1]，关于温度场的研究对深入了解与解决传热相关问题至关重要且有较强的理论与实际意义。由于数值模拟对实际的物理、化学、工程等问题能进行预见性、合理性、可能性的模拟处理，能为解决实际问题提供启示性信息[2]，再加之使用传统实际实验方法耗时费力且材料成本较高等原因，越来越多的温度场问题使用数值模拟的方法进行解决。换热器中固定管板式换热器是应用较广泛的换热器，因其结构紧凑、制造简单、造价低、无内漏等优点使用占比较大。关于固定管板式换热器的研究很多，如于春柳等分析了固定管板式换热器管板热应力的产生机理，寻求出减小管板热应力的有效途径[3]；钱路燕等运用有限元分析方法，为固定管板式换热器的设计与制作提供了理论依据[4]；王树勇对固定管板式换热器壳程检测要求进行了探讨[5]；李龙斌等对固定管板式换热器换热管拉脱力进行数值计算，降低了换热器在使用过程中换热管被拉脱的风险[6]；李霞研究固定管板式换热器发生列管内漏失效的判断方法、处理措施、原因分析及预防措施等[7]……受这些研究启示，笔者从贴近现状的工况着手，模拟研究固定管板式换热器在不同管形(内置)、不同管数、换热面有无螺纹、不同换热材料、耦合与非耦合等情况时的温度场情况，通过模拟研究，能更好地认识固定管板式换热器的结构及工作原理，更深入地理解该类换热器换热微过程，从而能为固定

管板式换热器的优化设计提供一些参考和启示性信息。

## 2. 模拟过程

### 1) 流场模型的构建

模拟计算时先使用 UG 软件构建固定管板式换热器的流场模型,以管束为单管(三棱柱金属芯)、加设 3 个折流板、换热面设螺纹的固定管板式换热模型建模为例,具体参数见下表 1。

**Table 1.** The parameter of flow field model

**表 1.** 流场模型参数

名称	管长(mm)	管壳外圆直径(mm)	流体建模直径(mm)	金属芯直径(mm)
加折流板换热模型(折流板厚 2 mm)	100	6	4.5	
换热面设螺纹换热型(螺距 5 mm)	100	6	4.5	
单根圆柱金属芯换热模型	100		6	0.5
单根三棱柱金属芯换热模型	100		6	0.5

### 2) 数值模拟

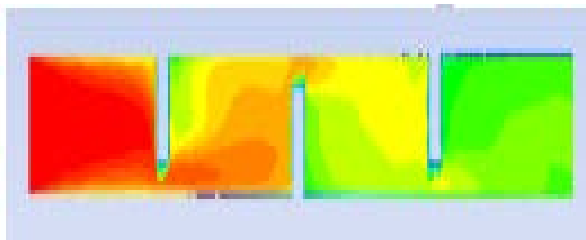
模拟中,流体选为不可压缩、无相变的水和酒精,它们的密度分别为  $0.998 \text{ g/cm}^3$  和  $0.789 \text{ g/cm}^3$ ,固定管板式换热器换热管管内、外直径分别取为 4.5 mm 和 6 mm,管程为 100 mm,使用 3 块厚度为 2 mm 的弓形折流板,固定管板式换热器内壁设置螺纹(螺距为 5 mm),管内直径 4.5 mm,管壁厚度为 0.75 mm,圆柱金属芯直径为 1 mm,三棱柱金属芯直径为 0.5 mm,水外圆直径为 6 mm,壁面温度为 300 K,流体的进口温度为 363 K 和 393 K 两种情况,流体速度为 0.5 m/s 和 0.8 m/s,计算网格单元数为 248,000 时,流体雷诺数小于 2000 的情况即流体视为层流时,在不同管形(内置)、不同管数、换热面有无折流板、有无螺纹、不同换热材料、耦合与非耦合等情况时固定管板式换热器的温度场情况进行模拟,得到相应温度场云图,最后运用控制变量法对不同条件下的温度场情况进行分析。

## 3. 数据结果

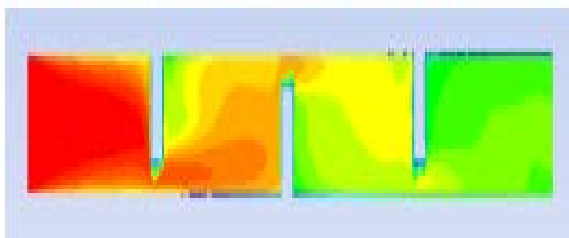
### 3.1. 非耦合情况时的温度场模拟云图

#### (一) 流体不同、有折流板时的温度场云图

在流体进口温度、流体进口速度、壁面温度、管径、管程(流体选为不可压缩、无相变的水和酒精,它们的密度分别为  $0.998 \text{ g/cm}^3$ ,  $0.789 \text{ g/cm}^3$ 。取管内、外直径分别为 4.5 mm 和 6 mm,壁面温度为 300 K,水和酒精的进口温度为 363 K,流体速度为 0.5 m/s、管程为 100 mm,使用 3 块厚度为 2 mm 的弓形折流板)相同时使用控制变量法所模拟的固定管板式换热器的温度场情况见图 1、图 2。图中不同颜色显示不同值大小,红色区域代表数值大些,蓝色区域代表数值小些,由红到蓝的区域代表的数值依次减小,以下同。



**Figure 1.** The temperature field of water  
**图 1.** 水的温度场

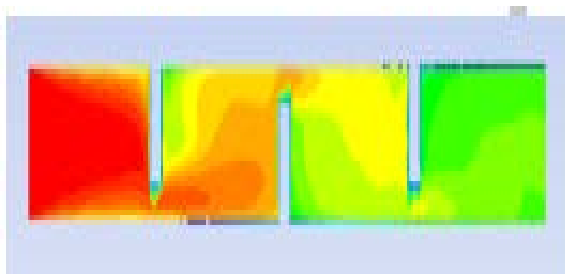


**Figure 2.** The temperature field of alcohol  
**图 2.** 酒精的温度场

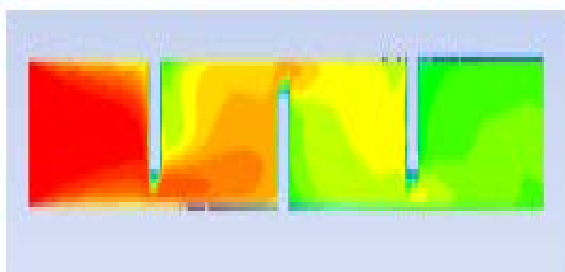
由图 1、图 2 中可看出，相同前提下，水和酒精两种流体的温度场相似，但水的换热效果要好些。这是因为由式  $\phi = -\lambda A \frac{\partial t}{\partial x}$  知，水的导热系数  $\lambda$  比酒精的大，热流量  $\phi$  大，所以换热效果相对好些。

**(二) 有折流板、水进口速度不同时的温度场云图**

取水的进口速度分别为 0.5 m/s、0.8 m/s 时，其他参数设置同于(一)中的数据，所模拟的固定管板式换热器的温度场情况见图 3、图 4。



**Figure 3.** The temperature field when the inlet velocity of water is  $V = 0.5 \text{ m/s}$   
**图 3.** 水进口速度  $V = 0.5 \text{ m/s}$  时的温度场

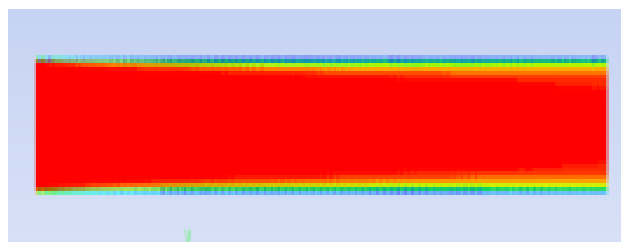


**Figure 4.** The temperature field when the inlet velocity of alcohol is  $V = 0.8 \text{ m/s}$   
**图 4.** 水进口速度  $V = 0.8 \text{ m/s}$  时的温度场

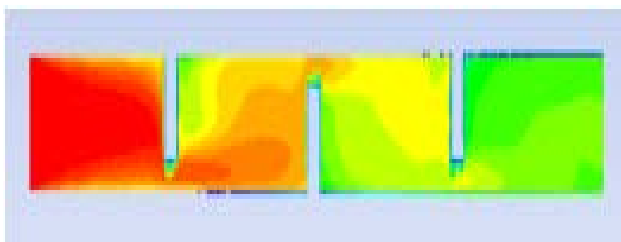
由图 3、图 4 中可看出，相同前提下，增加流体的进口速度，固定管式换热器的换热效果越差，这是因为随着流体速度增加，流体在管内的滞留时间较短，不能充分换热，从而使换热效率变差。

**(三) 有、无折流板的温度场模拟图**

固定管板式模型管长为 100 mm，管内直径 4.5 mm，管壁厚度为 0.75 mm，水进口速度  $V = 0.5 \text{ m/s}$ ，加 3 块厚度为 2 mm 的弓形折流板，其他参数设置同于(一)中的数据，所模拟的固定管板式换热器的温度场情况见图 5、图 6。



**Figure 5.** The temperature field without the baffle plate  
**图 5.** 无折流板时的温度场

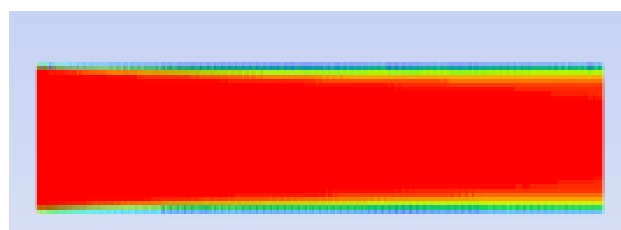


**Figure 6.** The temperature field with the baffle plate  
**图 6.** 有折流板时的温度场

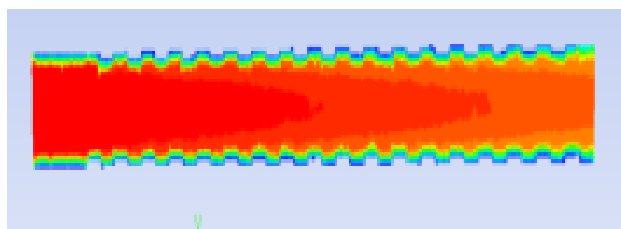
由图 5、图 6 中可看出，相同前提下，加折流板比不加折流板时的换热效果好。这是由于折流板具有扰流作用，折流板处流体形成湍流使换热面增大从而换热更充分导致的。

#### (四) 有、无螺纹时的流场模拟图

对固定管板式换热器内壁设置螺纹(螺距为 5 mm)，水(密度为  $0.998 \text{ g/cm}^3$ )，管内直径 4.5 mm，管壁厚度为 0.75 mm，其他参数设置同于(一)中的数据，所模拟的相应温度场云图为图 7、图 8。



**Figure 7.** The temperature field without screw thread  
**图 7.** 无螺纹时的温度场



**Figure 8.** The temperature field with screw thread  
**图 8.** 加螺纹时的温度场

由图 7、图 8 中可看出，相同前提下，加螺纹比不加螺纹时换热效果要好些。这是因为同条件下，螺纹呈凹凸状，增加了换热面积，换热充分，换热效果越好。

### (五) 金属芯形状不同时的温度场云图

水的进口温度为 393 K，水的进口速度为 0.5 m/s，管程为 100 mm，圆柱金属芯直径为 1 mm，三棱柱金属芯直径为 0.5 mm，水外圆直径为 6 mm，其他参数设置同于(一)中的数据，所模拟的固定管板式换热器的温度场情况见图 9、图 10。

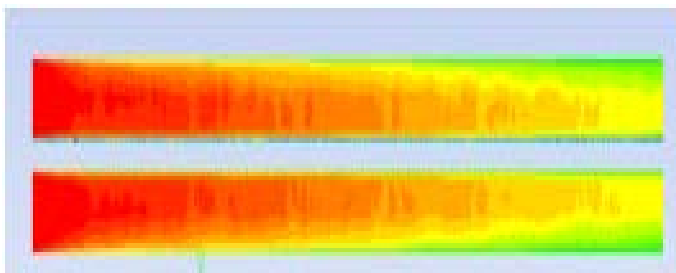


Figure 9. The temperature field with single cylindrical metal core  
图 9. 单根圆柱金属芯时的温度场

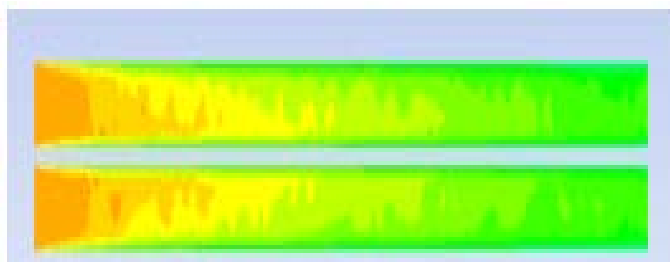


Figure 10. The temperature field with single triangular prism metal core  
图 10. 单根三棱柱金属芯时的温度场

由图 9、图 10 上可看出，相同前提下，水通过内设单根三棱柱芯管道时的换热效果比水通过内设单根圆柱金属芯管道时的换热效果好。这是因为三棱柱芯和圆柱金属芯的几何参数不同影响了换热面和流阻，且在棱处形成紊流，因而换热效果好些。

### (六) 单根与四根金属芯时的温度场云图

固定管板式换热器的管长为 100 mm，三棱柱金属芯直径为 0.5 mm，水的入口温度为 393 K，水外圆直径为 6 mm，水进口速度为 0.5 m/s，其他参数设置同于(一)中的数据，所模拟的固定管板式换热器的温度场情况见图 11、图 12。

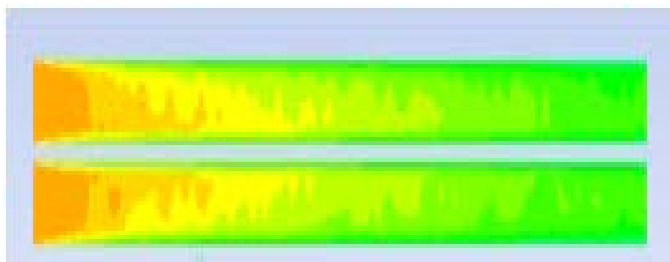
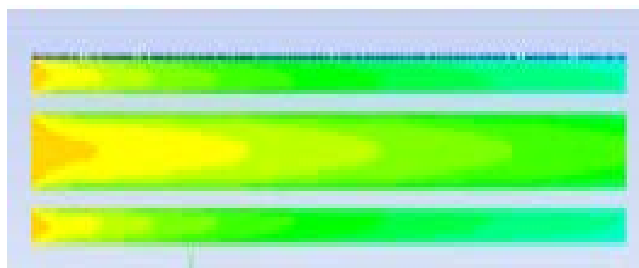


Figure 11. The temperature field with single triangular prism metal core  
图 11. 单根三棱柱金属芯时的温度场



**Figure 12.** The temperature field with four triangular prism metal cores

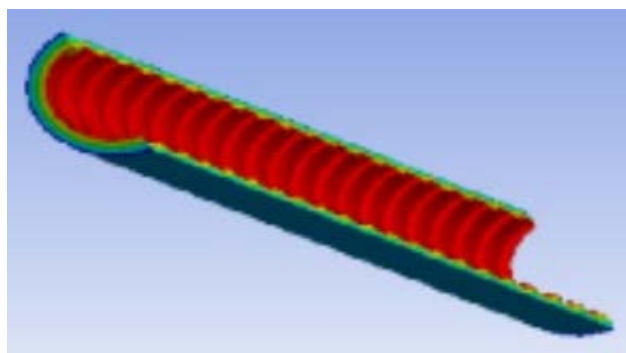
**图 12.** 四根三棱柱金属芯时的温度场

由图 11、图 12 中可看出，相同前提下，水流过内设四根三棱柱芯的管道比流过内设单根三棱柱金属芯管道时的换热效果好。这是因为随着三棱柱芯根数的增加，换热面积相应增加，所以换热效果更好。

### 3.2. 耦合情况模拟图

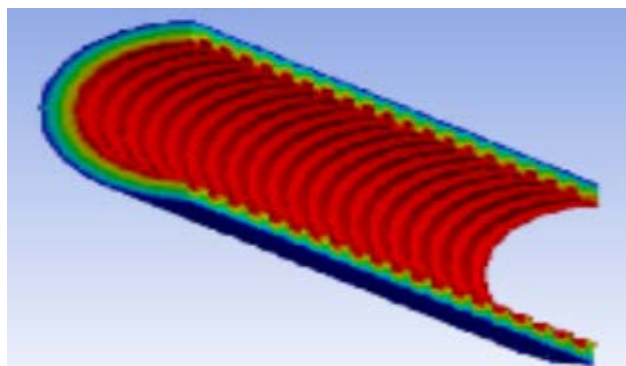
热流固耦合是流体和固体管道间的相接触的换热面为耦合面进行耦合，流体取为不可压缩、无相变的水(密度为  $0.998 \text{ g/cm}^3$ )和酒精(密度为  $0.789 \text{ g/cm}^3$ )，流体流动均为钢管道，钢的密度为  $7.8 \text{ g/cm}^3$ ，进口速度为  $0.5 \text{ m/s}$ 、壁面温度为  $300 \text{ K}$ 、管内直径为  $4.5 \text{ mm}$ ，管外直径为  $6 \text{ mm}$ ，进口温度  $363 \text{ K}$ ，所模拟的固定管板式换热器的耦合温度场情况见图 11、图 12。

(一) 同固体、不同液体的耦合温度场云图



**Figure 13.** The temperature field of coupled water-steel

**图 13.** 水 - 钢耦合时的温度场



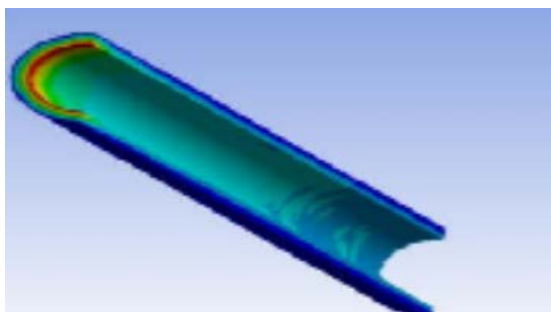
**Figure 14.** The temperature field of coupled alcohol-steel

**图 14.** 酒精 - 钢耦合时的温度场

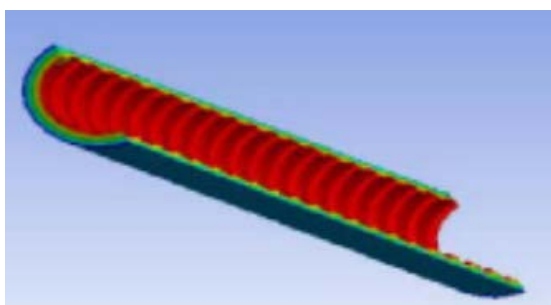
由图 13、图 14 可看出,相同前提下,水-钢的耦合温度场与酒精-钢耦合温度场相比较,水-钢的耦合时换热效果较好,这是由于酒精的导热系数比水的导热系数小的原因导致。

### (二) 有、无螺纹时的耦合温度场云图

固定管板式换热器管内有螺纹时,螺距设为 5 mm,内设折流板时,设置 3 个厚度为 2 mm 的弓形折流板,其他参数设置同于 3.1 的(一)中的数据,所模拟的相应耦合温度场云图为图 15、图 16。



**Figure 15.** The temperature field of coupled water-steel without screw thread  
**图 15.** 无螺纹时的水-钢耦合时的温度场

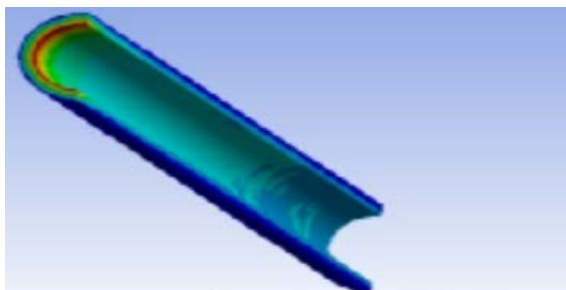


**Figure 16.** The temperature field of coupled alcohol-steel with screw thread  
**图 16.** 加螺纹时的水-钢耦合时的温度场

由图 15、图 16 中可看出,相同前提下,有、无螺纹的水-钢耦合温度场相比较,前者换热效果好,这是因为设置螺纹增大了热耦合面积的原因所致。

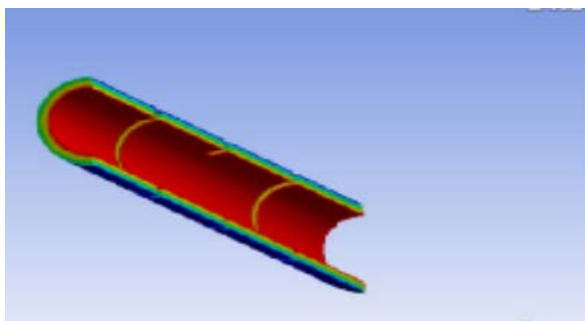
### 3.3. 耦合与非耦合温度场对比

同前提下,由于流固耦合建模更贴近实际,因此模拟的温度场比非耦合的温度场模拟结果更接近实际、更准确。



**Figure 17.** The temperature field of coupled water-steel without baffle plate  
**图 17.** 无折流板时的水-钢耦合时的温度场



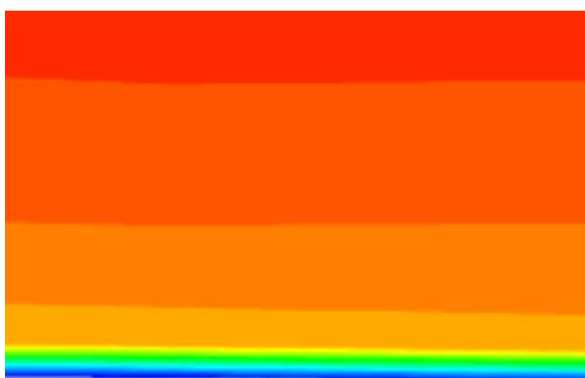


**Figure 18.** The temperature field of coupled alcohol-steel with baffle plate  
**图 18.** 加折流板时的水 - 钢热耦合时的温度场

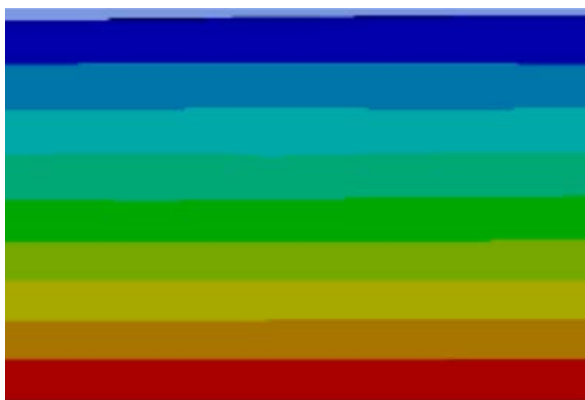
图 17、图 18 显示，相同前提下，对有、无折流板情况的水 - 钢耦合温度场进行比较，有折流板时换热效果较好，这是由于折流板的扰流作用增大热耦合面积所致。

### 3.4. 耦合与非耦合温度场对比

本课题中关于耦合与非耦合的流场对比情形较多，限于篇幅，此处仅列举对比同参数，同前提下的耦合与非耦合，流体为水，管道材料为钢(相关参数设置见 3.1 的(一)中数据)时的温度场模拟情况见图 19、图 20。



**Figure 19.** The temperature field of uncoupled water-steel with baffle plate  
**图 19.** 有折流板非耦合时的温度场



**Figure 20.** The temperature field of coupled water-steel with baffle plate  
**图 20.** 有折流板管水和钢热耦合时的温度场

由图 19、图 20 显示, 同前提下, 耦合温度场比非耦合的流场模拟结果更接近实际、更准确。

## 4. 结论

(一) 非耦合情况时, 相同前提下: 1) 材料不同时, 流体的导热系数越大, 换热效果越好; 2) 水进口速度不同时, 流体的进口速度越大, 固定管式换热器的换热效率变差; 3) 有、无折流板时, 加折流板比不加折流板时的换热效果好; 4) 有、无螺纹时, 加螺纹比不加螺纹时换热效果要好些; 5) 单根不同形状金属芯时, 换热管内设单根三棱柱芯管道时的换热效果比水通过内设单根圆柱金属芯管道时的换热效果好; 6) 金属芯不同数目时, 内设四根三棱柱芯的管道比流过内设单根三棱柱金属芯管道时的换热效果好。(二) 耦合情况时, 相同前提下: 1) 同固体、不同液体的耦合时, 导热系数大的流体换热效果较好。2) 有、无螺纹时, 有螺纹时换热效果较好。(三) 耦合与非耦合温度场对比, 流固耦合比非耦合时的温度场模拟结果更接近实际、更准确。由于本文数值模拟中对固定管式换热器的模型和边界条件的设置进行了较多简化, 模拟固定管式换热器的换热流场时只讨论了非流固耦合与流固耦合条件下的流体接触面间的传热情况, 没有模拟分析热对流、热辐射情况, 故所得结论是在一定的前提条件之下, 结论十分局限, 希望接下来能对固定管式换热器的温度场做更全面的探究工作。

## 基金项目

课题名称: 2019 年教育部高等学校大学物理课程教学研究立项项目(DJZW201934xn); 六盘水师范学院教学内容和课程体系改革研究项目(LPSSYjg-2021-20); 六盘水师范学院一流课程《热学》课程建设项目(LPSSYylkc202105); 六盘水师范学院科技创新团队项目(LPSSYKJTD201901); 国家自然科学基金项目(12065016); 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); 六盘水师范学院硕士学位培育点学科建设项目(LPSSYSSDYPY201704)。

## 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] 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.
- [3] 于春柳, 郑旭东, 任金平. 固定管板式换热器管板热应力分析及控制措施[J]. 化工机械, 2019, 46(2): 210-212.
- [4] 钱路燕, 贺斌, 兰万雷. 固定管板式换热器应力分析[J]. 工程建设与设计, 2020(1): 162-164.
- [5] 王树勇. 固定管板式换热器壳程检测问题探讨[J]. 化工设计通讯, 2020, 46(4): 59-60.
- [6] 李龙斌, 王松松, 王兆蕊. 固定管板式换热器换热管焊接结构对拉脱力影响研究[J]. 能源化工, 2020, 41(6): 62-67.
- [7] 李霞. 固定管板式换热器内漏问题探讨[J]. 炼油与化工, 2021, 32(3): 55-56.