

内螺纹换热管温度场研究

韩文娟, 刘 海*, 刘小宝

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: 2026年1月23日; 录用日期: 2026年3月16日; 发布日期: 2026年3月30日

摘 要

本文对不同结构参数(如有无螺纹、不同螺距、不同螺旋角、不同螺纹高度等)的内螺纹换热管在不同工况条件(如流体不同进口温度、不同进口速度、不同流体材料等)时的流动传热情况进行数值模拟研究。使用UG软件构建内螺纹换热管的流动传热模型、运用ANSYS软件对所建模型进行网格划分和流动传热过程模拟及后处理分析, 研究结论: 相同前提下, 流体进口温度越大、螺距越小、螺旋角越小、螺纹越高, 换热管的换热效果越好; 有螺纹比无螺纹时换热管的换热效果好、螺纹比直纹的换热效果要好; 本文中低雷诺数、单一热传导方式模拟时, 流体进口速度越小, 换热效果越好。通过本文研究, 加深对内螺纹换热器的流动传热机制的认识, 为内螺纹换热器的结构优化及工况设计提供一些参考信息。

关键词

内螺纹管, 温度场, 数值模拟

The Research on the Temperature Field of the Internal Threaded Heat Exchanger Tubes

Wenjuan Han, Hai Liu*, Xiaobao Liu

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

Received: January 23, 2026; accepted: March 16, 2026; published: March 30, 2026

Abstract

The situation of the flow heat transfer of the internal thread of the heat exchange tubes with different structural parameters (such as having or no threads, different pitches, different thread angles,

*通讯作者。

different thread heights,etc) and different working conditions (such as different inlet temperature of the fluid, different inlet velocity of the fluid, and different fluid materials, etc) is simulated and researched in this thesis. The flow field models of the internal thread of the heat exchange tubes are constructed by using UG software, the constructed models are meshed, the flow heat transfer process is numerically simulated and the post-processing analysis is done by using ANSYS software. The research conclusions as follows: Under the same premise. The heat transfer effect is better when the inlet temperature of the fluid is higher, or the pitch is smaller, or the thread angle is smaller, or the thread is higher; The heat transfer effect is better when the heat exchange tube has threads than that without thread; The heat transfer effect is better when the heat exchanger tube has thread than that has the straight grain; The heat transfer effect is better when the inlet velocity of the fluid is lower, the simulation is done using a single heat conduction mode with a low Reynolds number in this thesis. The understanding of the flow heat transfer mechanism of the internal thread heat exchanger is deepened, and some reference information is provided for the structure optimization and working condition design of the internal thread heat exchanger through the research in this thesis.

Keywords

Internal Thread of the Heat Exchange Tubes, Flow Heat Transfer, Numerical Simulation

Copyright © 2026 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

换热管是换热器中的核心元件,在换热器传热强化中起到至关重要的作用[1][2]。内螺纹换热管是在换热管内壁采用加工工艺使其具有一定旋转螺纹的翅片[3],具有结构紧凑、换热效率高、成本低廉且流动阻力增加不多等特点,在化工、船舶、制冷工程等领域有着广泛的应用。关于内螺纹换热管的研究很多,上世纪70年代末80年代初,三菱重工等公司在变压操作下充分发挥内螺纹管的换热优势,在超临界反应堆上做试验并研制出世界上第一个采用内螺纹的超临界水冷壁冷却系统[4]-[7];1994年,陈剑波等人对内螺纹管内纯工质流变换热问题展开研究为内螺纹管内纯工质流变换热问题的推广提供了可靠依据[8];2004年,李隆键等人在试验中发现三维内螺纹在传热性能方面有很大提高,但其流动阻力也有所增大[9][10];2014年,靳遵龙等人利用CFD对螺纹管进行数值模拟得到减小螺距、增大螺纹高度可以显著改善传热效果但会增大流动阻力的结论[11]-[14];2021年,付江奇等人模拟研究内螺纹管发现高雷诺数条件下的数值运算与ANSYS仿真的结果有很大的偏差,并对常用的计算模型进行了分析[15][16];2024年,王彦红等阐明了沿圆周方向上换热恶化及不均匀传热机理,并探究了内螺纹管螺纹数量及压力对换热的影响[17][18]。这些研究在内螺纹换热管的研究进展中发挥了重要作用,同时也对本文的研究有着重要启示。本文对不同结构参数(如有无螺纹、不同螺距、不同螺旋角、不同螺纹高度等)的内螺纹换热管在不同工况条件(如流体不同进口温度、不同流速、不同流体材料等)时的流动传热情况进行数值模拟研究,为内螺纹换热器的运行工况设计提供一些参考信息。

2. 内螺纹换热管的结构与工作原理

内螺纹换热管是指在管内壁上开一道或多道膛线而形成的螺旋上升的管道,其实物图见图1、剖视图见图2,其工作原理是工质在管内加热时,内部流体在内螺纹换热管离心力的作用下,以较小速度将液体

送至管壁进行换热而不会产生过大的冲击。管道内部，内螺纹起到了一个至关重要的作用，内螺纹管中的流体受内螺纹螺旋上升的影响而开始旋转，在离心力的作用下不断地接近并最终到达管壁的表面，完成对壁表面水膜的补充。由于内螺纹凹槽内三个方向粘着力的原因，内螺纹沟槽中的液滴也不容易被气流带走，这种稳定性有助于维持水膜而不会立刻蒸发。同时，内螺纹的存在还在一定程度上提升了管道中的湍流流动，使工质增大了对流换热，从而提高了换热效率，增强换热能力，改善了管壁的冷却效果，延长设备使用寿命，同时降低了能量消耗。



Figure 1. The physical picture of the internal thread heat exchange tube
图 1. 内螺纹换热管的实物图

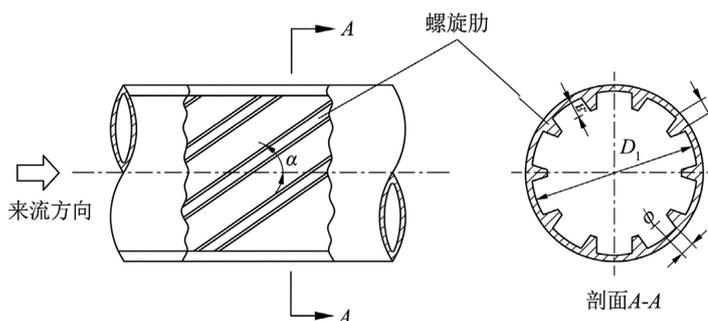


Figure 2. The sectional view of the internal threaded heat exchanger tube
图 2. 内螺纹换热管的剖视图

3. 相关模拟知识

本文数值模拟时运用到 UG 及 ANSYS 软件，UG 软件是基于 C 语言开发实现的一个在二维和三维空间无结构网格上使用自适应多重网格方法开发的一个灵活的数值求解偏微分方程的软件工具；ANSYS 软件是一款有限元分析软件，主要包括前处理模块、分析计算模块和后处理模块三个部分，前处理模块是整个仿真过程的基础，可以快速方便地构造有限元模型，分析计算模块可以进行多物理场的耦合分析，后处理模块可将计算结果以图形、图表或曲线形式显示或输出，通过三模块组合使用可以实现更加精确和高效的数值仿真。本文在做内螺纹换热管换热流场模拟仿真实验时涉及到热量传递等知识，相关方程式如下：

热传导方程傅里叶定律

$$\Phi = -\lambda A \frac{\partial t}{\partial x} \quad (1)$$

式(1)中， Φ 是热流量， λ 是导热系数， A 是传热面积， $\partial t/\partial x$ 是物体沿 x 方向的温度变化率，负号则表示热量的传递方向与温度升高的方向相反。

能量方程:

$$\frac{\partial(pT)}{\partial t} + \frac{\partial(p\mu T)}{\partial x} + \frac{\partial(p\nu T)}{\partial y} + \frac{\partial(p\omega T)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_T \quad (2)$$

上式(2)中, p 为密度, c_p 为质量比定压热容, S_T 为热源被转化的热能。

4. 数值模拟

4.1. 模型的构建

以外圆直径为 80 mm、内圆直径为 50 mm、管程为 200 mm、螺纹大径为 56 mm、螺距为 5 mm、螺旋角度为 600 的内螺纹换热管几何模型为例介绍模型的构建方法: 在 UG 软件“新建”中设置单位及储存位置进入构建模型界面, 构建基准平面, 以基准平面原点为圆心设置直径为 80 mm 可得所需圆如图 3 所示。

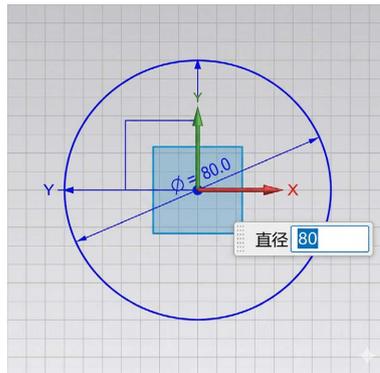


Figure 3. The sketch of the model

图 3. 模型草图

进行“拉伸”指令, 选中所作圆输入所需构建模型长 200 mm 得到圆柱体, 如图 4 所示。

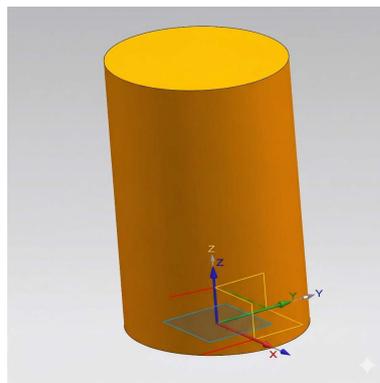


Figure 4. The cylinder

图 4. 圆柱体

选择坐标系原点为指定点、输入直径 50 mm、深度 200 mm, 设置为“减去”并“运用”, 进行螺纹刀指令后选定所作螺纹面, 设置大径为 56 mm、长度为 200 mm、螺距为 5 mm 及角度为 600 得到内螺纹管几何模型, 如图 5 所示。

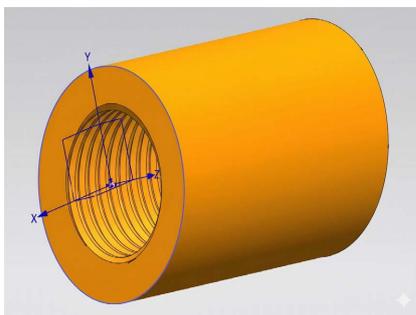


Figure 5. The constructed model
图 5. 构建的模型

4.2. 数值模拟

4.2.1. 内螺纹换热管几何模型面的命名与网格划分

(1) 依次将几何结构、网格及 Fluent 模块分别拖到操作页面，并为三者进行关联处理；(2) 几何结构模块中导入所建模型进行编辑；(3) 进入几何结构模块操作页面，展开部件，将固体换为液体。本文对内螺纹换热管的流动传热情况进行研究，将里面的流体如带螺纹状的水柱作为研究对象；(4) 进行各个面的命名退出几何结构模块。(5) 在网格中进行设置及划分。使用几何结构设置，物理偏好为 CFD，求解器偏好为 Fluent，单元尺寸根据所建模型大小来进行设置，模型尺寸大或小可根据最后生成的网格数来进行更改；(6) 尺寸调整中进行增长率设置，自行依据设置的单元尺寸进行修改；(7) 膨胀中选择平滑过渡。设置完毕，点击生成网格。网格划分如图 6 所示。

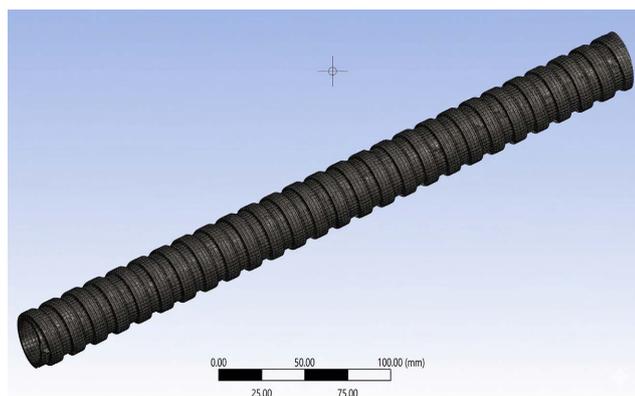


Figure 6. The mesh analysis chart
图 6. 网格解析图

4.2.2. 模拟计算

(1) 进入 Fluent 模块进行编辑。(2) 模型处打开能量方程，材料选择流体，在 Fluent 数据库找 water-liquid 即为液体水，并在单元区域条件的流体应设为 water-liquid；(3) inlet 设置边界条件，类型选择 velocity-inlet 并进行进口速度、温度设置。同样的方法为 wall 设置温度，为 outlet 选择类型 outflow 并进行运用；(4) 求解方法选择 SIMPLE，在计算监库里设置残差；(5) 进行初始化后为运行设置迭代次数开始计算迭代如图 7，图中黑线代表连续性，红、绿、蓝分别代表速度在 x、y、z 方向上的分量，浅蓝色代表能量。当迭代曲线趋于平稳，并且计算精度达 10^{-4} 及以上为仿真技术标准，本文的模拟工作达到了计算精度要求，仿真数据有效。

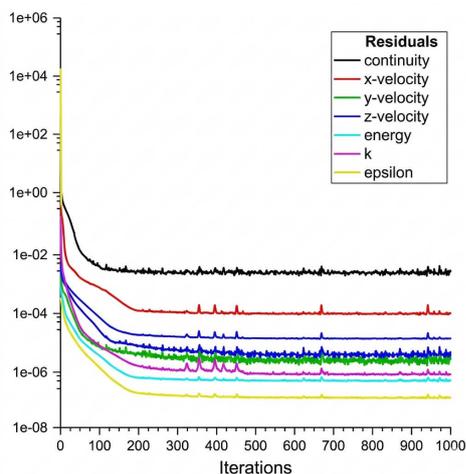


Figure 7. The calculated iterative graph
图 7. 计算迭代图

(6) 在云图处分别新建一个横、纵切面，点击温度就能依次查看到所需要的变化云图，如图 8 所示。图左边为标尺，颜色往上代表相应数值越大，反之越小。

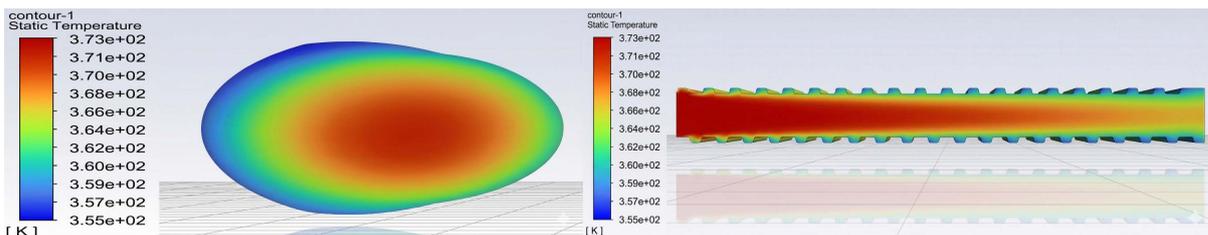


Figure 8. The cross and longitudinal sectional map of the temperature field
图 8. 温度场横纵切面图

5. 模拟结果

5.1. 流体不同进口速度时内螺纹换热管各流场云图对比

取内螺纹换热管管径为 30 mm、管程为 400 mm、小径为 26 mm，流体为水、进口温度为 363 K，在其他所有变量都相同的情况下，流体进口速度分别为 0.03 m/s 和 0.08 m/s 时所模拟的温度场云图对比见图 9。

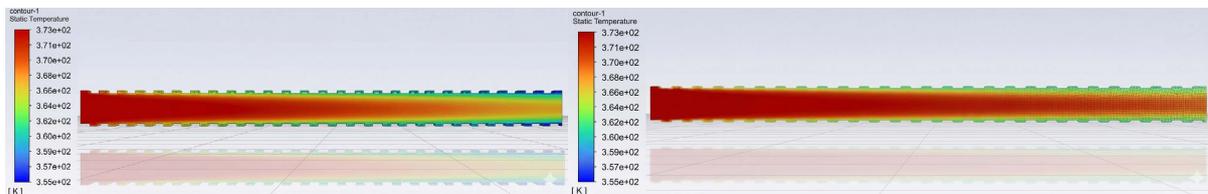


Figure 9. The temperature contour map at fluid inlet velocities of 0.03 m/s (left) and 0.08 m/s (right)
图 9. 流体进口速度为 0.03 m/s (左)和 0.08 m/s (右)的温度云图

从云图 9 看出，其它条件相同下，流体进口速度为 0.03 m/s 比 0.08 m/s 时的换热效果好，这是由于本次模拟只使用了单一热传导的传热方式，相同前提下，流体速度较小时，流体在换热管中停留的时间

较长，换热进行更充分从而换热效果更明显。

5.2. 有、无螺纹换热管的换热流场云图对比

构建管径为 30 mm、管程为 400 mm 的无纹管及内螺纹换热管(螺纹小径 26 mm，螺距 15 mm，螺旋角 60°)几何模型，取流体为水，流体进口速度为 0.05 m/s、温度为 363 K，在其他所有变量都相同时的温度场云图对比见图 10。

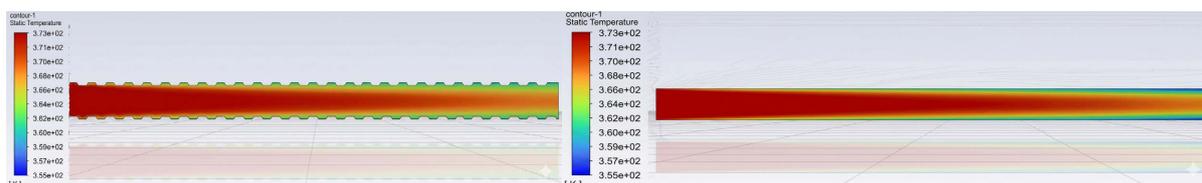


Figure 10. The temperature contour map of the inner threaded pipe (left) and the plain pipe (right)

图 10. 内螺纹管(左)和无纹管(右)的温度云图

从图 10 可看出，其他条件都相同的情况下，有螺纹比无螺纹时换热管的进出口压降大。

5.3. 不同螺距时的换热流场云图对比

取内螺纹换热管管径为 30 mm、管程为 400 mm、小径为 26 mm，螺距分别为 15 mm、30 mm，流体均为水、流体进口温度为 363 K、流体进口速度为 0.05 m/s，在其它情况都相同的情况下所模拟的温度场云图对比见图 11。

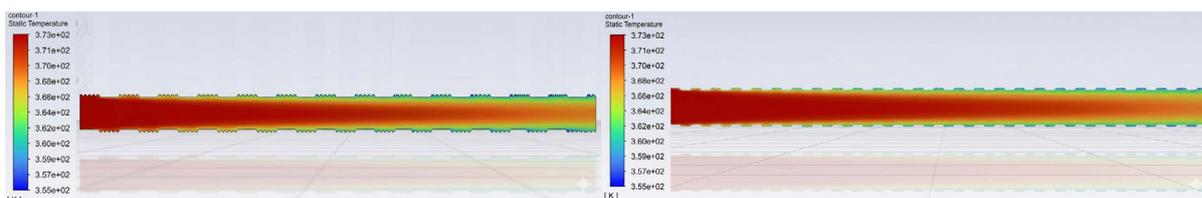


Figure 11. The temperature contour map with pitch of 15 mm (left) and 30 mm (right)

图 11. 螺距为 15 mm (左)、30 mm (右)温度云图

从云图 11 可看到，在其它条件都相同情况下，换热管螺距为 15 mm 比螺距为 30 mm 时的换热效果要好些。

5.4. 不同螺旋角度时换热管的换热流场云图对比

取管径为 30 mm、管程为 400 mm、小径为 26 mm、螺距为 15 mm、流体为水、流体进口温度为 363 K、流体进口速度为 0.05 m/s，螺旋角分别为 25° 和 60° 的内螺纹换热管，在所有变量都相同的情况下所模拟的温度场云图对比见图 12。

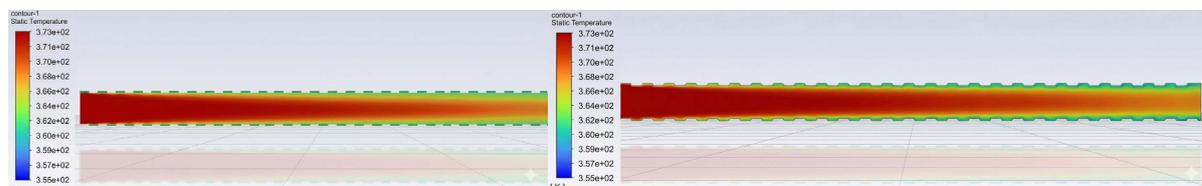


Figure 12. The temperature contour map with helix angles of 25° (left) and 60° (right)

图 12. 螺旋角为 250 (左)、600 (右)的温度云图

从图 12 可看出,在其它条件相同的情况下,换热管在螺旋角为 250 比螺旋角为 600 时的换热效果好一些。

5.5. 不同螺纹高度时的换热流场云图对比

取内螺纹换热管管径为 30 mm、管程为 400 mm、流体为水、流体进口温度为 363 K,在其他所有变量都相同的情况下,螺纹高度分别为 2 mm 和 5 mm 时所模拟的温度场云图对比见图 13。

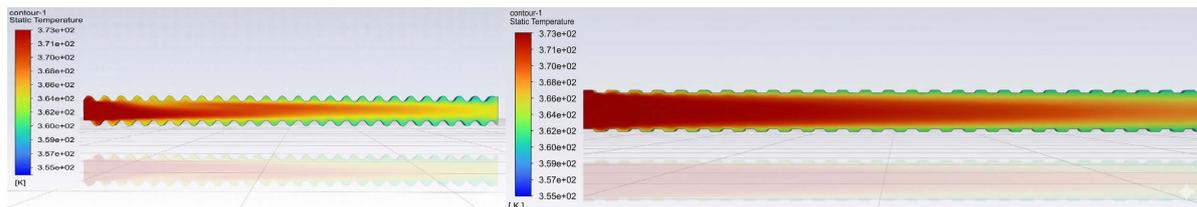


Figure 13. The temperature contour map with thread heights of 2 mm (left) and 5 mm (right)

图 13. 螺纹高度 2 mm (左)、5 mm (右)的温度云图

由云图 13 可看出,在其它条件相同的情况下,换热管螺纹高度为 5 mm 比 2 mm 时的换热效果明显。

5.6. 不同流体材料时的换热流场云图对比

取内螺纹换热管管径为 30 mm、管程为 400 mm、流体进口速度 0.05 m/s、温度为 323 K,在其他所有变量都相同的情况下,流体分别为水和乙醇时所模拟的温度场云图对比见图 14。

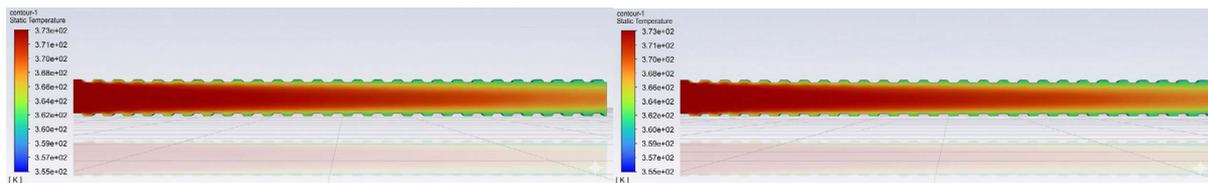


Figure 14. The temperature contour map with water (left) and ethanol (right) as the fluid

图 14. 流体为水(左)、乙醇(右)的温度云图

由云图 14 可看出,在其它条件相同的情况下,换热管在流体为水时要比流体为乙醇时的换热效果好。

5.7. 不同螺纹形状的换热流场云图对比

取内螺纹换热管管径为 30 mm、管程为 400 mm、流体进口速度为 0.05 m/s、温度为 363 K,在其他所有变量都相同的情况下控制螺旋纹螺纹圈数和直纹齿数相同(螺旋纹圈数 26.7 取整 27,直纹齿数 27),螺纹形状为螺旋纹和直纹时所模拟的温度场云图对比见图 15。

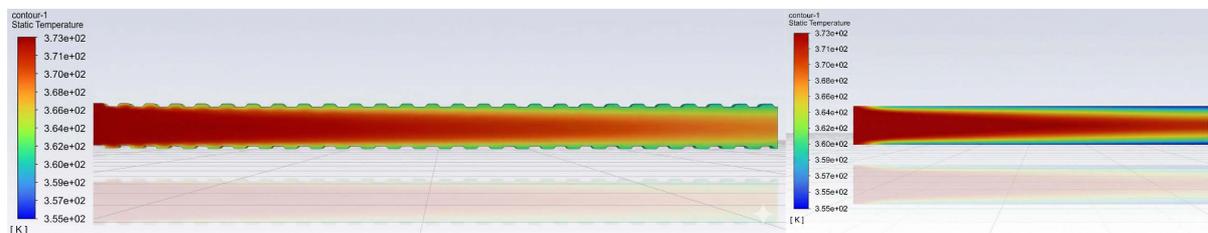


Figure 15. The temperature contour map with helical ribs (left) and straight ribs (right)

图 15. 螺旋纹(左)、直纹(右)的温度云图

从图 15 可看出,在其它条件相同的情况下,螺旋纹比直纹时换热管的换热效果好。

5.8. 不同进口温度时水的换热流场云图对比

取相同的内螺纹换热管几何尺寸，管径为 30 mm、管程为 400 mm、流体进口速度为 0.05 m/s、流体为水，在其他所有变量都相同的情况下，取进口温度为 323 K、363 K 时所模拟的温度场云图对比见图 16。

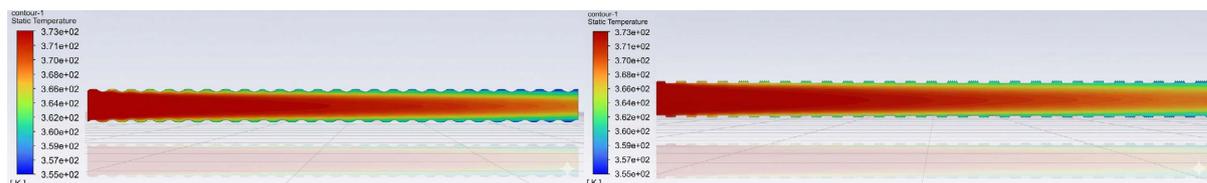


Figure 16. The temperature field contour map with water inlet temperatures of 323 K (left) and 363 K (right)

图 16. 水的进口温度 323 K (左)、363 K (右)的温度场云图

从云图 16 可看出，在其它情况相同的情况下，换热管在流体进口温度为 363 K 比 323 K 时的换热效果好。

6. 结果分析

6.1. 流体不同进口速度时的温度场分析

将前面图 9 流体进口速度分别为 0.03 m/s、0.05 m/s 和 0.08 m/s 时换热管温度模拟云图数据整理见表 1。

Table 1. The table of the temperature records of the heat exchange tubes at different fluid inlet velocities

表 1. 流体不同进口速度时换热管的温度记录表

流体进口速度(m/s)	进口温度(K)	出口温度(K)	进出口温降(K)
0.03	363	328.832	34.168
0.05	363	335.622	27.378
0.08	363	341.652	21.348

从表 1 数据可看出，其他条件都相同的情况下，流体进口速度为 0.03 m/s、0.05 m/s、0.08 m/s 时的进出口温降逐渐减小，这是由于本次模拟是在雷诺数较小的情况下，只讨论了单一热传导的传热方式，相同前提下，流体速度越小时，流体在换热管中停留时间越长，换热更充分从而换热效果更明显。

6.2. 有、无螺纹换热管的温度场分析

将前面图 10 有、无螺纹换热管的温度场云图数据整理见表 2。

Table 2. The table of the temperature records of the heat exchange tubes with and without threads

表 2. 有、无螺纹时换热管的温度记录表

螺纹类型	进口温度(K)	出口温度(K)	进出口温降(K)
无螺纹	363	349.357	13.643
有螺纹(螺距 15 mm)	363	335.622	27.378

从表 2 数据可看出，其他条件都相同的情况下，有螺纹比无螺纹时换热管的进出口温差大，换热效

果更好。这是因为换热管有螺纹时涡流程度增加，流体混乱程度加剧，换热截面增加，换热量增大，所以有螺纹比无螺纹时换热管的换热效果更好。

6.3. 不同螺距内螺纹换热管的温度场分析

将前面图 11 不同螺距内螺纹换热管的温度云图数据整理见表 3。

Table 3. The table of the temperature records of the heat exchange tubes at different thread pitches

表 3. 不同螺距时换热管的温度记录表

螺距(mm)	进口温度(K)	出口温度(K)	进出口温降(K)
15	363	335.622	27.378
30	363	336.817	26.183

从表 3 数据可看出，其他条件都相同的情况下，随着螺距的减小，换热管进出口温度差值是在增大的，体现为换热效果更好。这是由于螺距减小，增加了“凹凸”感即粗糙程度，流体混乱程度加剧，换热面积增加，换热量增大(据公式 $\Phi = -\lambda A \frac{\partial t}{\partial x}$ ，其他条件都相同的情况下，面积 A 增大，换热量 Φ 越大)，所以螺距小相比螺距大时的换热管换热效果更好。

6.4. 不同螺旋角时的温度场分析

将前面图 12 不同螺旋角时换热管的换热流场云图数据整理见表 4。

Table 4. The table of the temperature records of the heat exchange tubes at different helix angles

表 4. 不同螺旋角度时换热管温度情况记录表

螺旋角(°)	进口温度(K)	出口温度(K)	进出口温降(K)
15	363	331.215	31.785
25	363	335.549	27.451
60	363	335.622	27.378

从表 4 数据可看出，其他条件都相同的情况下，随着螺旋角的减小，换热管进出口温度差值在增大，换热效果越好。这是由于螺旋角越小，螺纹越“锋锐”，流体流道凹凸感越强，流体紊流程度加剧，换热效果更好。

6.5. 不同螺纹高度时的温度场分析

将前面图 13 不同螺纹高度时的换热流场云图数据整理见表 5。

Table 5. The table of the temperature records of the heat exchange tubes at different thread heights

表 5. 不同螺纹高度时换热管的温度情况记录表

螺纹高度(mm)	进口温度(K)	出口温度(K)	进出口温降(K)
2	363	335.622	27.378
5	363	326.262	36.738

从表 5 数据可看出，在其它条件相同的情况下，螺纹高度为 5 mm 比 2 mm 时换热管的进出口温降

大, 体现为换热效果更好。这是由于螺纹高度增加后流体紊流程度加剧, 换热面积增大, 换热能力增强。

6.6. 不同流体材料时的温度场分析

将前面图 14 不同流体材料时的换热流场云图数据整理见表 6。

Table 6. The table of the temperature records of the heat exchange tubes with different fluid materials

表 6. 不同流体材料时换热管的温度情况记录表

流体	进口温度(K)	出口温度(K)	进出口温降(K)
水	323	311.424	11.576
乙醇	323	313.572	9.428

从表 6 数据可看出, 在其它条件相同的情况下, 流体为水时比流体为乙醇时换热管的进出口温降大, 这是由于不同流体的导热系数不同, 如进口温度 323 K 时水和乙醇的导热系数分别为 0.668 W/(m·K)和 0.156 W/(m·K), 前者较大。由公式 $\Phi = -\lambda A \frac{\partial t}{\partial x}$ 可知, 前提相同时, 导热系数 λ 越大, 换热量 Φ 越大, 换热效果越好。

6.7. 不同螺纹形状时温度场分析

将前面图 15 螺旋纹和直纹的换热流场云图数据整理见表 7。

Table 7. The table of the temperature records of the heat exchange tubes with helical ribs and straight ribs

表 7. 螺旋纹和直纹时换热管的温度情况记录表

螺纹形状	进口温度(K)	出口温度(K)	进出口温降(K)
螺旋纹(管径 30 mm)	363	335.622	27.378
直纹(管径 30 mm)	363	337.866	25.134

从表 7 数据可看出, 在其它条件相同的情况下, 换热管在螺旋纹比在直纹时的进出口温度差值大, 这是因为螺旋纹时, 流体混乱程度增大, 从而换热能力增强, 所以相对而言, 螺旋纹相比直螺纹时换热管的换热效果要好。

6.8. 不同进口温度时的温度场分析

将前面图 16 水的进口温度分别为 323 K 和 363 K 的换热流场云图数据整理见表 8。

Table 8. The table of the temperature records of the heat exchange tubes at different inlet temperature of the water

表 8. 水的不同进口温度时换热管的情况记录表

进口温度(K)	出口温度(K)	进出口温降(K)
323	311.424	11.576
363	335.622	27.378

从表 8 数据可看出, 在其它条件都相同情况下, 流体进口温度越高, 换热管的换热效果越好。这是因为据公式 $\Phi = -\lambda A \frac{\partial t}{\partial x}$ 知, 前提相同时, 流体进口温度越大, 温度梯度 $\partial t / \partial x$ 越大, 换热量 Φ 越大, 从而换热效果越好。

7. 结论与展望

本文通过数值模拟得出内螺纹换热管温度场情况是相同前提下, 流体进口温度越大、螺距越小、螺旋角越小、螺距越高, 换热管的换热效果越好; 有螺纹比无螺纹时换热管的换热效果好、螺纹比直纹的换热效果要好; 本文在低雷诺数、单一热传导方式模拟时, 流体进口速度越小, 换热效果越好。本文运用 UG 软件和 ANSYS 软件对内螺纹换热管在不同结构参数和不同工况下的换热流场进行数值模拟研究, 得出了一些内螺纹换热管的优化建议, 但仍有许多不足之处需要进行改进: (1) 本文只是对流体模型进行模拟研究, 未考虑流固耦合情况, 希望今后能在流固耦合情况下对内螺纹管换热情况进行研究; (2) 本文只对单类螺纹的内螺纹换热管进行模拟研究, 希望接下来能对多类螺纹的内螺纹换热管的换热流场进行研究; (3) 本文在对内螺纹换热管换热流场进行模拟研究时由于雷诺数较低主要考虑了单一传热方式, 未考虑多种传热方式同时发生的情况, 故所得结论有局限性, 希望在接下来的工作中能用多种换热方式对内螺纹管的换热情况进行深入研究。

基金项目

2022 年贵州省省级“金课”(热学线下课程, GSylkc202209), 六盘水师范学院一流课程热学课程建设项目(LPSSYylkc202105), 教育部高等学校物理学类专业教学指导委员会项目(JZW-25-RX-13), 《热学》六盘水师范学院校级课程思政示范课程(2023-06-002), 六盘水师范学院校级项目《面向应用型创新人才培养的《工程力学》课程教学内容改革与实践》项目(2022-07-029), 六盘水师范学院校级项目《“大思政”视域下工程力学课程教学探讨》(2024-08-003), 贵州省科学技术协会青年科技人才托举工程项目(编号: GASTYESS202424), 六盘水科技发展自筹经费项目(编号: 52020-2025-0-2-05)。

参考文献

- [1] 张定才, 闫晓婷, 黄军亚, 等. 结构参数对内螺纹管湍流传热影响的分析[J]. 中原工学院学报, 2023, 34(3): 46-52.
- [2] 祝超, 牛胜利, 王俊. 内螺纹管中超临界水的传热数值模拟[J]. 热能动力工程, 2023, 38(6): 96-106.
- [3] 李帅帅. 垂直上升内螺纹管流动传热特性研究[J]. 河南科技, 2013(1): 29.
- [4] 王为术, 徐维晖, 毕勤成, 等. 垂直上升内螺纹管内流动沸腾传热特性[J]. 化工学报, 2014, 65(3): 884-889.
- [5] 王为术, 徐维晖, 陈听宽, 等. 内螺纹管内流动传热特性研究进展[J]. 华北水利水电学院学报, 2011, 32(4): 81-87.
- [6] 陈一平, 杨东, 吕当振, 等. 优化内螺纹管传热特性实验研究[J]. 湖南电力, 2011, 31(6): 1-6.
- [7] 陈听宽, 陈宣政, 陈学俊, 等. 亚临界及近临界压力区垂直水冷壁光管和内螺纹管传热特性的试验研究[J]. 动力工程, 1991(1): 17-22.
- [8] 陈剑波, 李美玲, 裴振华. 低沸点工质在水平蒸发换热强化管内换热特性研究[J]. 上海机械学院学报, 1994(3): 6-12.
- [9] 李隆键, 辛明道, 崔文智. 三维内肋螺旋管内强化换热实验[J]. 热能动力工程, 2004(3): 270-273.
- [10] 孙东亮, 樊菊芳, 王良璧. 内螺纹肋管内流动与传热的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2005(3): 483-485.
- [11] 李占锋, 杨学忠. 螺旋槽管管内湍流流动与换热的三维数值模拟[J]. 低温与超导, 2008(11): 56-60.
- [12] 靳遵龙, 赵金阳, 王永庆. 螺旋内肋管换热及流体流动数值研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(4): 41-44.
- [13] Raj, R., Lakshman, N.S. and Mukkamala, Y. (2015) Single Phase Flow Heat Transfer and Pressure Drop Measurements in Doubly Enhanced Tubes. *International Journal of Thermal Sciences*, **88**, 215-227. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.10.004>
- [14] 张定才, 朱春洁, 张振, 等. 内螺纹管对流传热特性研究[J]. 制冷与空调, 2014, 14(8): 25-29.
- [15] 刘爽, 周杰. 三维内肋管紊流换热和阻力特性的试验研究[J]. 建筑节能, 2017, 45(8): 88-90+104.
- [16] 付江奇, 王启民. 高雷诺数下基于 ANSYS 内螺纹管换热计算的 k- ϵ 模型分析[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2021, 17(1): 32-35.

-
- [17] 张定才, 马静云, 梁冰, 等. 内螺纹管湍流特性的数值模拟[J]. 中原工学院学报, 2023, 34(4): 51-58.
- [18] 王彦红, 孙文清, 李雨健, 等. 竖直内螺纹管中超临界 RP-3 航空煤油换热特性数值研究[J]. 工程热物理学报, 2024, 45(3): 826-835.