

# 板壳式换热器壳程流动与传热性能的数值模拟

潘书毅<sup>1</sup>, 赵巍<sup>1\*</sup>, 袁雨文<sup>2</sup>, 张华<sup>1</sup>, 石迎迎<sup>1</sup>, 袁兴阳<sup>1</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

<sup>2</sup>上海市质量监督检验技术研究院, 上海

Email: 374209632@qq.com, \*zw\_cherry@163.com

收稿日期: 2021年4月1日; 录用日期: 2021年5月14日; 发布日期: 2021年5月24日

## 摘要

板壳式换热器作为一种新型高效紧凑式换热设备, 因其换热效率高、压降低、节省占地面积、节约工程及设备安装费用、节省装置操作费用等优点, 被广泛应用于炼油、化工、制冷等领域。本文以一种板壳式换热器为对象研究, 建立了人字形板片的单流道物理模型并利用数值模拟软件模拟了波纹高度的变化引起的模型流场、速度场、压力场、温度场的变化情况, 通过对湍动能、摩擦系数和传热因子的分析, 研究了波纹高度的变化对于板壳式换热器流动和传热性能的影响。分析得到: 波纹高度的变化造成了内部流体流动状态的变化, 随着波纹高度的增大, 流体的流动状态由曲折流逐渐转变为十字交叉流, 波纹高度越低, 湍动能越好, 阻力性能越好, 但是传热性能变差。模拟表明波纹高度对板壳式换热器的流动和传热性能具有较大的影响, 是板壳式换热器优化设计的重要方向。

## 关键词

板壳式换热器, 数值分析, 波纹高度, 流动和传热性能

# The Numerical Simulation of the Flow and Heat Transfer on the Shell Side of the Plate and Shell Heat Exchanger

Shuyi Pan<sup>1</sup>, Wei Zhao<sup>1\*</sup>, Yuwen Yuan<sup>2</sup>, Hua Zhang<sup>1</sup>, Yingying Shi<sup>1</sup>, Xingyang Yuan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

<sup>2</sup>Shanghai Institute of Quality Inspection and Technical, Shanghai

Email: 374209632@qq.com, \*zw\_cherry@163.com

Received: Apr. 1<sup>st</sup>, 2021; accepted: May 14<sup>th</sup>, 2021; published: May 24<sup>th</sup>, 2021

\*通讯作者。

文章引用: 潘书毅, 赵巍, 袁雨文, 张华, 石迎迎, 袁兴阳. 板壳式换热器壳程流动与传热性能的数值模拟[J]. 建模与仿真, 2021, 10(2): 554-566. DOI: 10.12677/mos.2021.102056

## Abstract

As a new type of high efficiency and compact heat exchange equipment, plate and shell heat exchanger is widely used in oil refining, chemical industry, refrigeration and other fields because of its high heat exchange efficiency, low pressure, saving floor area, saving engineering and equipment installation costs, saving device operation costs and other advantages. In this paper, a single channel physical model of herringbone plate is established for a plate and shell heat exchanger. The flow field, velocity field, pressure field and temperature field caused by the change of corrugated height are simulated by numerical simulation software. The influence of corrugation height on the flow and heat transfer performance of plate and shell heat exchanger was studied. The results show that: the change of ripple height causes the change of internal fluid flow state. With the increase of ripple height, the flow state of fluid gradually changes from zigzag flow to cross flow. The lower the ripple height is, the better the turbulent kinetic energy is, the better the resistance performance is, but the heat transfer performance becomes worse. The simulation results show that the height of corrugation has a great influence on the flow and heat transfer performance of plate and shell heat exchanger, which is an important direction for the optimization design of plate and shell heat exchanger.

## Keywords

PSHE, Numerical Analysis, Corrugation Height, Flow and Heat Transfer Performance

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

板壳式换热器作为高效紧凑型换热器的一种具有换热效率高、端部温差小、压降低、节省占地面积、节约工程及设备安装费用、节省装置操作费用等优点，适合炼油、化工等领域大型化生产装置的使用要求[1]。因其紧凑且体积小、耐高温抗压、易清洗少结垢等的优点在食品制药等领域广为使用。板壳式换热器采用波纹换热板片，波纹板片依靠自身的波纹结构设计实现了低雷诺数下的湍流强化换热。

近年来一些研究人员对板式换热器的流动性能和传热性能进行了数值模拟研究：刘家瑞等人[2] [3]通过实验和数值模拟对板壳式换热器准则关系式进行了研究。曲宁[4]利用 Fluent 软件对波纹形板式换热器进行了流动与传热分析，对流体的速度场、温度场和压力场进行研究并拟合了相关准则关系式，得出各几何参数对于传热和阻力的影响，给出了优化后的几何参数。袁伍等人研究了不同流体入口速度对换热器压降和传热系数的影响[5]，刘家瑞对板壳式换热器流量的分布进行了研究[6] [7]。以及袁雨文做了关于波纹夹角对板壳式换热器流动和传热性能影响的研究[8]。栾志坚等[9]发现波纹间距和波纹高度的几何参数也会对流体的流动形式产生影响。张洋乐等[10]研究了强化换热板管对于板壳式换热器综合性能的提升。陈武滨[11]等人研究了不同截面形状换热板对于板片性能的影响。

波纹夹角、波纹高度、波纹间距是板壳式换热器板片的重要几何参数，本文受某生产企业委托，针对该企业某型号产品的波纹高度对该换热器流动和传热性能的影响进行模拟研究，对该产品的优化设计具有参考价值。本文建立了板壳式换热器单流道的物理模型，利用 CFD 模拟了不同波纹高度  $H$  下壳程流场的变化，分析研究此变化对于壳程流动和传热性能的影响。

## 2. 数值计算模型

### 2.1. 物理模型

物理模型如图 1 所示，通过两块波纹板正反堆叠构造出集合模型，由于正反堆叠，上下板波峰与波峰会产生交点，即下文所提到的触点。利用 UG 软件建立物理模型，通过 ICEM 软件进行网格划分，使用非结构化四面体网格。板片结构参数如表 1 所示。

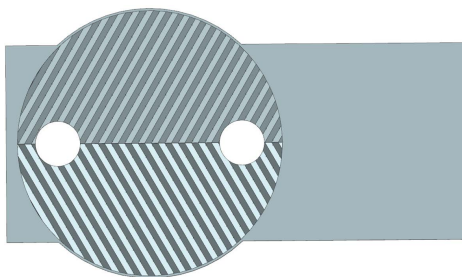


Figure 1. Physical model diagram  
图 1. 物理模型图

Table 1. Sheet structure parameter table

表 1. 板片结构参数表

波纹高度(mm)	波纹角度(°)	波纹间距(mm)	当量直径(mm)	导孔间距(mm)
1.7/2.2/2.7/3.2/3.7/4.2/4.7	60	7.9	3.4	164

### 2.2. 网格划分

由于该模型比较复杂，结构化的网格划分容易导致网格的扭曲度较大，很难进行，所以本文选用较普遍使用的非结构化四面体网格，并对关键区域进行网格加密，经网格无关性检验，满足精度要求。网格划分如图 2 所示。

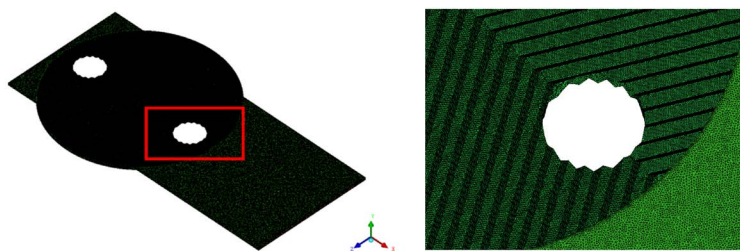


Figure 2. Mesh generation and detail drawing of physical model  
图 2. 物理模型的网格划分以及局部细节图

### 2.3. 数学模型

结合该换热器实际的流动与换热特点，对数学模型做出以下假设：流体为不可压缩的牛顿流体；流体的流动为定常流动；忽略重力和浮升力的影响；忽略流体的粘性耗散作用；与空气接触的板片与周围环境绝热。因此本次模拟主要运用连续性方程、动量方程和 RNGk- $\epsilon$  模型[12]。

对于单相不可压缩流体：

连续性方程：

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

式中  $t$  为时间, s;  $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别为控制体在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向上的速度分量, m/s。

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \text{div}(\rho u u) = \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \text{div}(\rho v u) = \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial z} + \text{div}(\rho w u) = \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \quad (4)$$

式中,  $p$  是控制体上的压强, Pa;  $\tau$  为作用在控制体表面上的粘性应力, Pa;  $F$  为作用在控制体上的上的外力, N。

RNGk- $\varepsilon$  模型:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left( P_{\mu} \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left( P_{\varepsilon} \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{C_{1\varepsilon}^*}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

式中:  $u_i$  为  $i$  方向上的速度分量;  $\mu$  为湍动粘度;  $G_k$  为由于平均速度梯度引起的湍动能  $k$  的产生项;  $C_{1\varepsilon}^*$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $\sigma_k$ 、 $\sigma_\varepsilon$  为经验常数;  $C_{1\varepsilon}^* = 1.42$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.68$ ,  $C_\mu = 0.0845$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

## 2.4. 边界条件

采用速度入口, 入口温度设置为 323 K, 出口设置为压力出口, 压力设为 101.325 kPa。外部边界设置为无滑移速度边界条件, 流道的壁面设置为温度 300 K 的恒温壁面, 其余均设置为绝热壁面。采用分离式求解器隐式求解, 压力与速度耦合, 使用 SMPLE 算法, 离散化为二阶精度的迎风模式[13]。在边界条件设置中, 还需要设置湍流强度和水力直径, 也即当量直径, 计算公式如下:

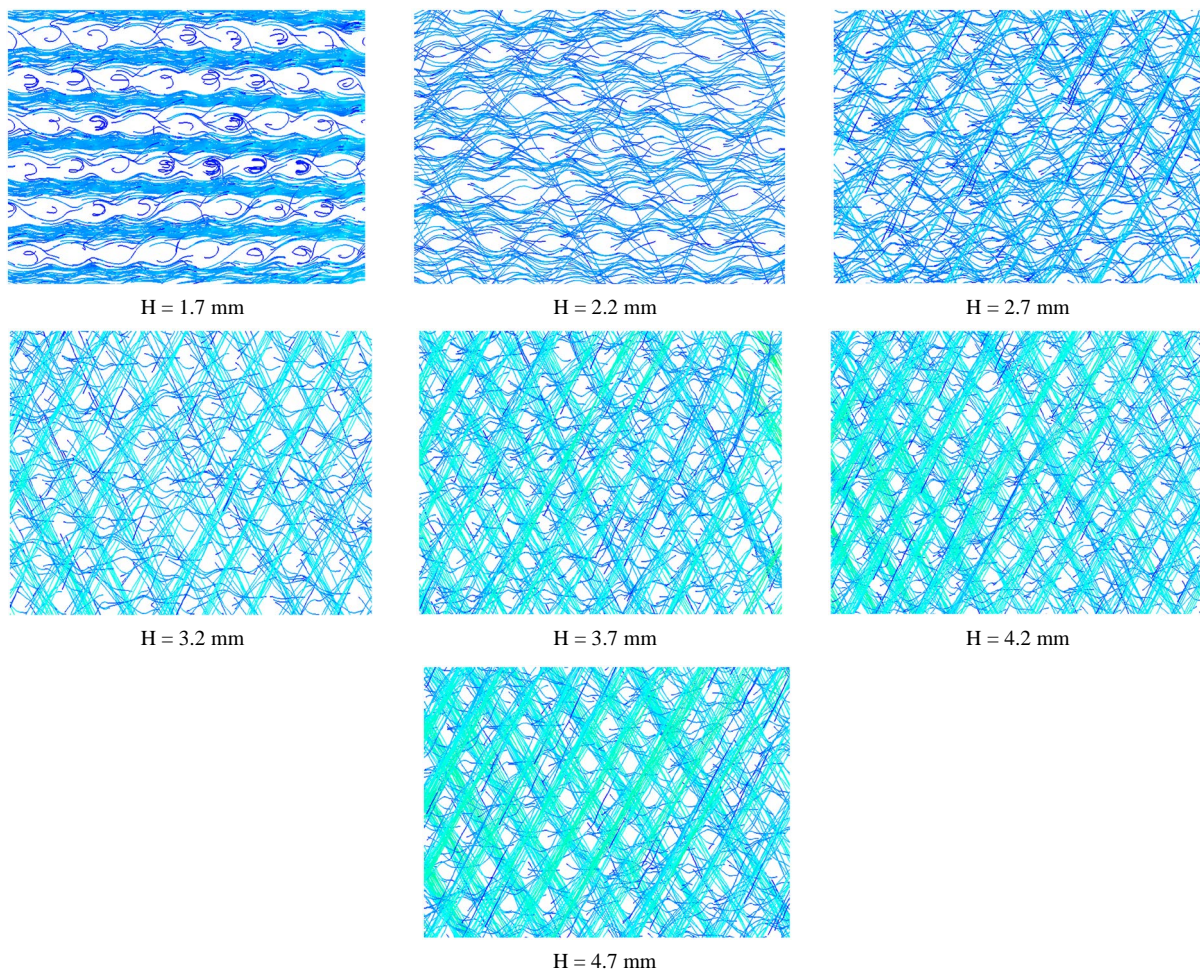
$$I = 0.16 \left( Re_{d_e} \right)^{\frac{1}{8}} \quad (7)$$

## 3. 模拟结果与讨论波纹高度的影响

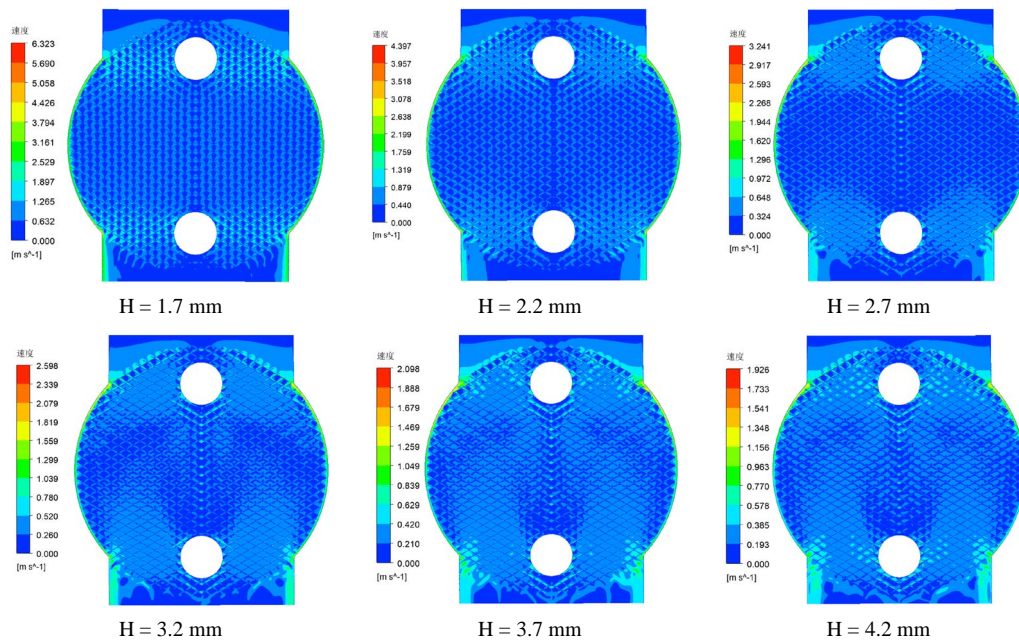
### 3.1. 流动性能分析

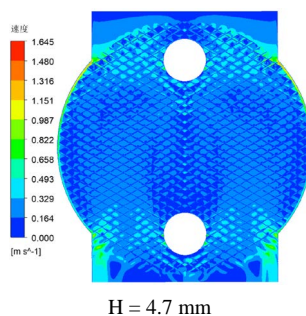
流体在板片间的流动方式主要分为曲折流与十字交叉流[14], 流体流动形式的变化是由于流体在沟槽中流动时, 受到相对板片上沿另一方向流动的流体作用的切向力以及流体间的相互拖拽共同造成的。随着内部流体的流速降低, 曲折流会逐渐抓变为十字交叉流。由于波纹高度的增加, 流体向着板片间的波峰与波谷发展, 从而产生十字交叉流。图 3 与图 4 为波纹高度不同的情况下  $xoz$  平面板间流体流线与流速分布云图。如图可以得出: 随着波纹高度的增加, 板片对流体的切向力增大, 十字交叉流逐渐出现, 并且随着波纹高度增大所占比例也逐渐增大, 与此同时曲折流所占比例不断减小[15]。当波纹高度为 1.7 mm 时, 流体速度相对较快, 流体主要以曲折流的方式在板片内部流动, 并且在触点后有涡流形成; 当波纹高度为 2.2~3.7 mm 时, 流体开始沿着板片的沟槽形成了十字交叉流, 触点后的涡流区减少, 高速区网格状分布; 当波纹高度为 3.7~4.7 mm 时, 十字交叉流占据的比例变大, 流动死区减少, 整体流速减慢。





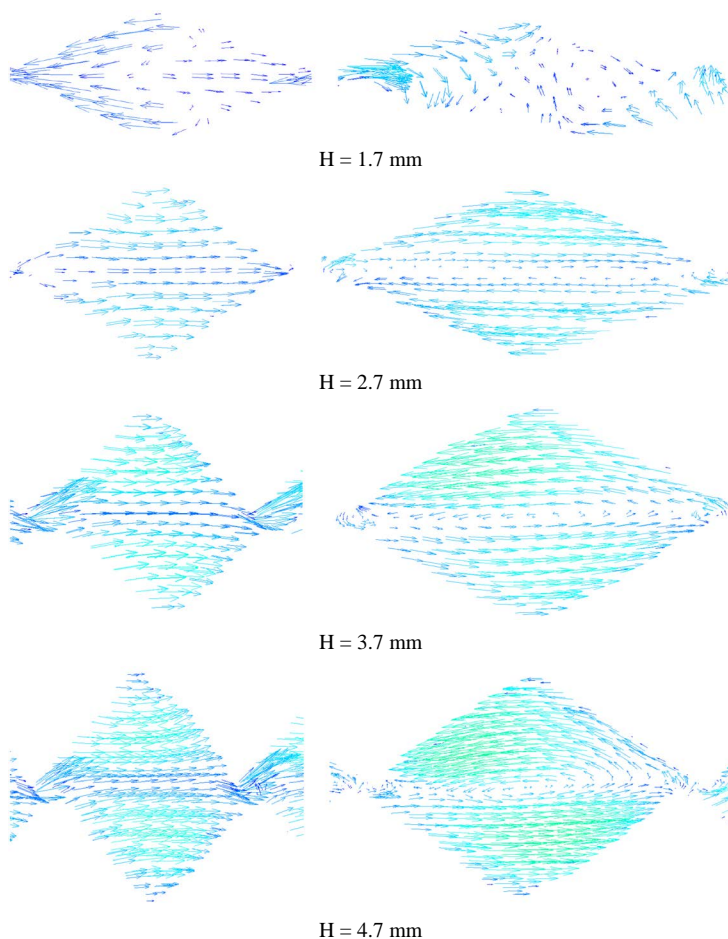
**Figure 3.** Streamline diagram corresponding to different corrugation heights  
**图 3.** 不同波纹高度对应流线图





**Figure 4.** Velocity distribution of different corrugation heights  
**图 4.** 不同波纹高度对应流速分布图

图 5 分别为  $yoz$  与  $xoy$  平面触点处的速度矢量图，观察得到：在波纹高度较小时，曲折流占主导，但是由于板壳式换热器中波纹的存在，流体在低雷诺数下也能充分发展，同时触点使流体流动受到阻碍，扰动剧烈，因此流速变化明显，流体在触点处方向发生改变，形成涡旋，导致流动死区；随着波纹高度的变大，十字交叉流所占的比重增大，流体在板槽间的流动受触点的影响降低，提升高度使得流体不易被对侧流体的反向牵引力改变方向，流体的流动空间增加，因此漩涡区缩小，扰流效果减少，由于控制了流量不变，湍流减弱，板内整体速度降低。



**Figure 5.** Velocity vector diagram of different corrugation heights  
**图 5.** 不同波纹高度对应触点速度矢量图

### 3.2. 湍动能分析

湍动能  $k$  是表示湍流流动强弱的参数[16]，其计算公式为：

$$k = \frac{3}{2}(UI)^2 \tag{8}$$

其中： $u$  为平均速度； $I$  为湍流强度

湍动能  $k$  越大表明湍流速度越高，湍动越剧烈。图 6 和表 2 为壳程流体的湍动能随雷诺数的变化情况。通过之前的分析可以得到，在总流量不变的前提下，波纹高度升高后，流体流速降低，最终整体流动的湍流程度变弱。通过对于图 5 中数据的分析可以得出，控制雷诺数不变，则湍动能在 1.7 mm 时达到最大，随着波纹高度增加，湍动能逐渐降低。控制波纹高度相同， $k$  随雷诺数的增大而变大，且增幅随高度降低而变大。由此可知，降低波纹高度在使流速增加的同时还能加强流体的湍动性能。

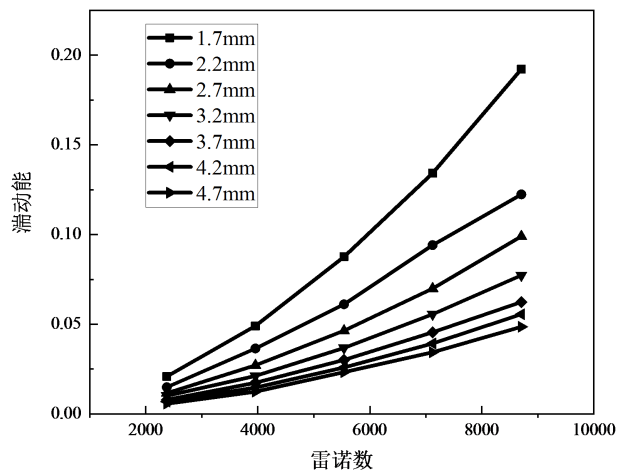


Figure 6. Turbulent kinetic energy at different wave heights  
图 6. 不同波纹高度的湍动能

Table 2. Numerical table of turbulent kinetic energy of plate ( $m^2/s^2$ )  
表 2. 板片湍动能数值表( $m^2/s^2$ )

雷诺数 \ 波纹高度(mm)	2374.03	3956.7164	5539.4029	7122.0895	8704.776
1.7	0.0209	0.0491	0.0876	0.1342	0.1922
2.2	0.0149	0.0365	0.0611	0.0941	0.1224
2.7	0.0116	0.0271	0.0464	0.0699	0.099
3.2	0.0101	0.0212	0.0368	0.0556	0.0773
3.7	0.0079	0.0174	0.0301	0.0455	0.0624
4.2	0.0069	0.0147	0.0259	0.0393	0.0556
4.7	0.0057	0.0124	0.0233	0.0344	0.0486

### 3.3. 阻力性能分析

图 7 为壳程不同波纹高度下流体在  $xoz$  平面两板间距 50% 处所在平面的压力分布云图。从图中可知，当波纹高度较小时，压力梯度呈等幅下降的水平分布，随着波纹高度的增大，压力梯度的变化按波纹纹路呈 M 形分布，这是由于随着波纹高度增大，流体的流态中十字交叉流占比逐渐变大而影响到压力梯度



的分布，也因此转为 M 形分布。观察表 3 数据，随着高度增大，进出口的压降减小，考虑到由两方面原因：一是流态的原因，流体在转为十字交叉流后减缓了湍流程度，导致了局部阻力损失减少，使得进出口压力差下降；二是由于波纹高度增大，使得内部流动面积变大的同时当量直径也变大，入口处流速和板内平均流速降低，导致压差降低。

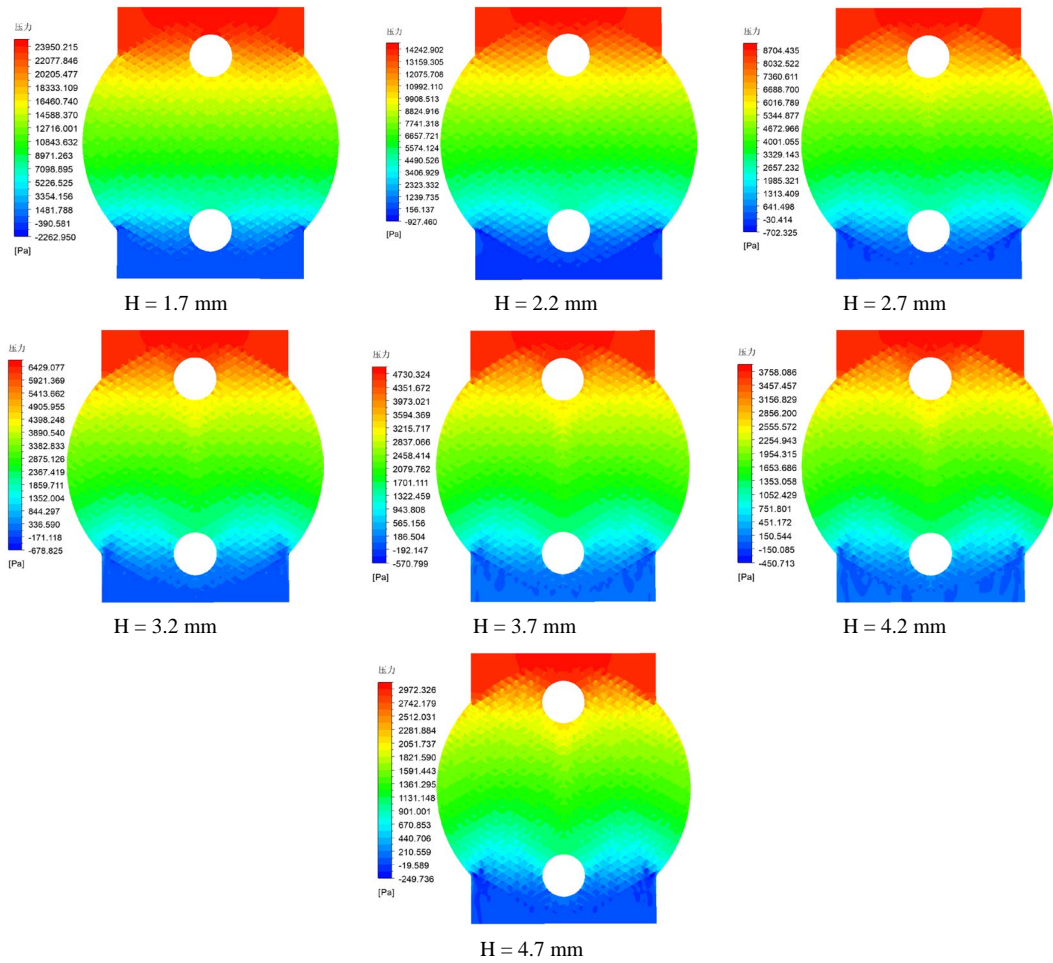


Figure 7. Pressure nephogram of different corrugation heights  
图 7. 不同波纹高度的压力云图

Table 3. Numerical table of plate pressure drop (Pa)

表 3. 板片压降数值表(Pa)

波纹高度(mm) \ 雷诺数	2374.03	3956.7164	5539.4029	7122.0895	8704.776
1.7	24273.45	64593.49	124099.7	199327.09	296023.78
2.2	15170.36	37925.95	72059.23	108088.92	162133.87
2.7	8779.641	22763.58	41832.11	66645.23	99192.52
3.2	6488.519	15298.78	28982.39	47088.19	69587.68
3.7	4768.08	12112.95	22927.21	37314.81	53666.32
4.2	3788.15	9624.68	18749.94	30376.41	44290.25
4.7	2990.48	8078.63	15802.6	26110.33	39001.53



换热器的阻力损失主要体现在压降与摩擦因子上，研究者在对其性能进行分析的过程中，摩擦因子是最重要的一个参考指标，该指标也可称为摩擦系数，该指标的表达式[17]如下：

$$f = \frac{2d_e \Delta P}{L \rho v^2} \quad (9)$$

图 8 和表 4 为壳程不同波纹高度下摩擦因子随雷诺数的改变情况，由之前的压力云图以及湍动能的分析可知：湍动能随着波纹高度增加而下降，压差则相反随之减小。综合以上变化规律可以得出：波纹高度的增加不利于阻力性能的提升。

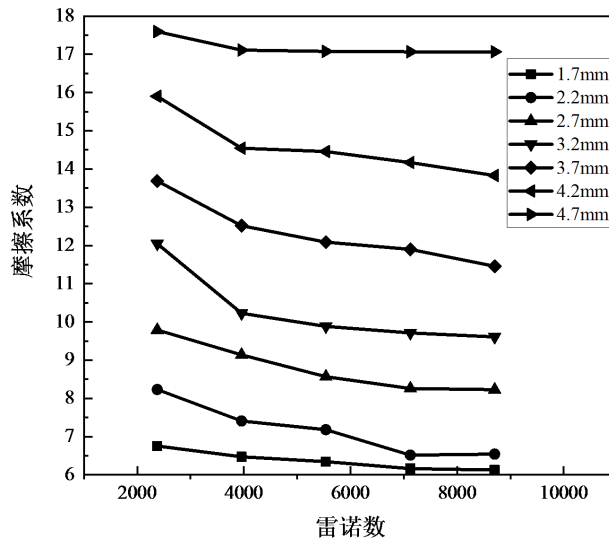


Figure 8. Friction coefficient of different corrugation heights  
图 8. 不同波纹高度的摩擦系数

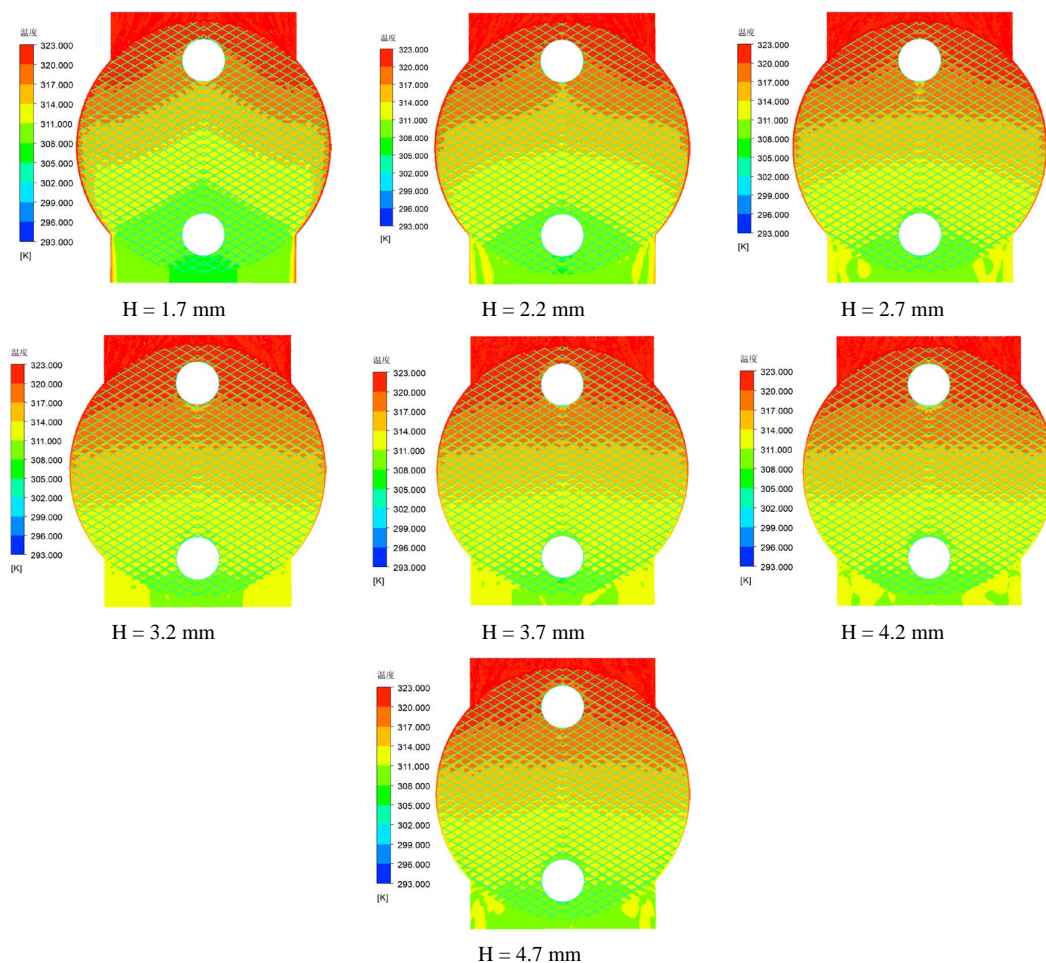
Table 4. Numerical table of plate friction coefficient

表 4. 板片摩擦系数数值表

雷诺数 \ 波纹高度(mm)	2374.03	3956.7164	5539.4029	7122.0895	8704.776
1.7	6.757	6.473	6.345	6.165	6.129
2.2	8.232	7.409	7.182	6.517	6.544
2.7	9.792	9.141	8.569	8.259	8.229
3.2	12.048	10.226	9.884	9.715	9.611
3.7	13.685	12.516	12.087	11.9	11.457
4.2	15.903	14.546	14.458	14.169	13.831
4.7	17.593	17.111	17.076	17.068	17.067

### 3.4. 传热性能分析

图 9 为壳程不同波纹高度下流体在两板间距 50% 处所在 xoz 平面的温度分布云图。观察得到流体的温度在触点前后的变化最大，这是由于在触点处流体发生了强烈的扰动，极大地强化了传热。随着高度的升高，由于流体的流型随着高度的变大转变为纯十字交叉流，温度梯度分布更加均匀，且整体流动空间因高度升高得到了扩大，流速分布均匀性变好，导致了流体的换热均匀性也逐渐变好。



**Figure 9.** Temperature distribution of different corrugation heights  
**图 9.** 不同波纹高度的温度分布

本文选择传热因子  $j$  和努塞尔数来比较分析不同波纹角度下板壳式换热器壳程的传热性能[17], 其中传热因子  $j$  的公式为:

$$j = \frac{Nu}{Pr^{1/3} Re} \quad (10)$$

图 10 和表 5 为壳程不同波纹高度下传热因子随雷诺数的变化情况, 表 6 与图 11 为波纹高度对努塞尔数的变化影响。根据之前流动性能的定性分析, 随着雷诺数的增大, 流体的湍流强度也逐渐增大, 从而使层流底层厚度逐渐减薄, 增强了传热效果[8]。这一分析可从表 6 得以验证。当雷诺数不变时,  $j$  随波纹高度增大呈逐渐增大的趋势并在 4.7 mm 时达到最大, 在波纹高度较小时, 湍流程度更强, 理应传热效果更好, 但波纹高度的增加让整体流动空间得到扩大, 换热更加均匀, 努塞尔数的增幅更大, 使得换热效果更好。因此可以得出: 通过提高波纹高度能有效强化换热。

#### 4. 结论

1) 随着波纹高度的增大, 流体的流动形式从曲折流变为十字交叉流。在波纹高度较小时, 流动的主要形式为曲折流, 随着波纹高度增大, 触点对流体的影响降低。在波纹高度较大时, 流动的主要形式为十字交叉流, 流体漩涡较小且触点对流体的扰流较小。

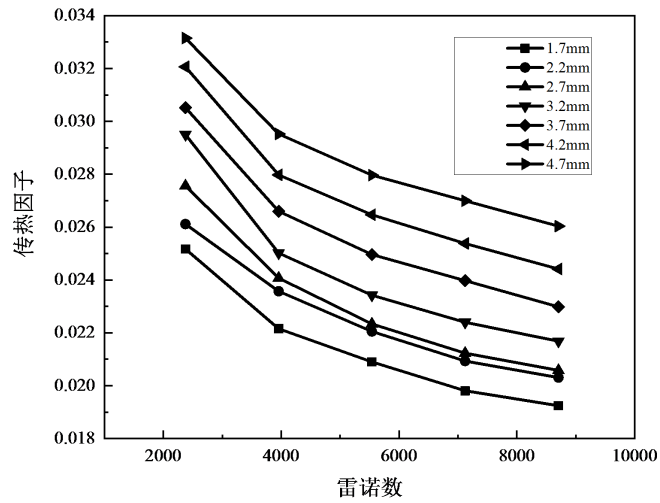


Figure 10. Heat transfer factors of different corrugation heights  
图 10. 不同波纹高度的传热因子

Table 5. Numerical table of plate heat transfer factor  
表 5. 板片传热因子数值表

波纹高度(mm)	雷诺数	2374.03	3956.7164	5539.4029	7122.0895	8704.776
1.7		0.0252	0.0222	0.0209	0.0198	0.0192
2.2		0.0269	0.0236	0.0221	0.0209	0.0203
2.7		0.0276	0.0241	0.0223	0.0212	0.0206
3.2		0.0295	0.0250	0.0234	0.0224	0.0217
3.7		0.0305	0.0266	0.0250	0.0240	0.0230
4.2		0.0321	0.0280	0.0265	0.0254	0.0244
4.7		0.0331	0.0295	0.0280	0.0270	0.0260

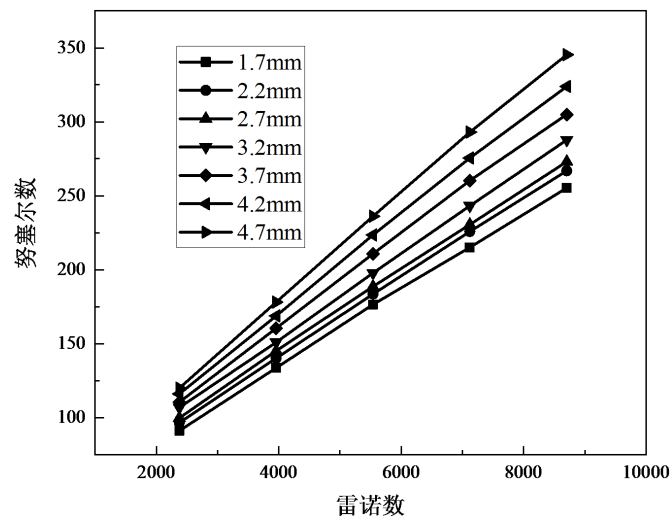


Figure 11. Nusselt number of different corrugation heights  
图 11. 不同波纹高度的努塞尔数

**Table 6.** Numerical table of plate Nusselt number  
**表 6.** 板片努塞尔数数值表

雷诺数 波纹高度(mm)	2374.03	3956.7164	5539.4029	7122.0895	8704.776
1.7	91.081	133.604	176.458	215.048	255.320
2.2	96.553	140.134	183.519	225.728	266.864
2.7	99.729	145.150	188.596	230.493	273.017
3.2	106.729	150.851	197.745	243.163	287.719
3.7	110.416	160.379	210.748	260.251	304.958
4.2	116.001	168.701	223.442	275.501	323.928
4.7	119.938	178.023	236.094	293.010	345.397

2) 在对其流动性能的研究中可知：当波纹高度相同时，随着雷诺数的增大，湍动能逐渐增大，并且波纹高度越小，湍动能增加的幅度越大，湍流流动越强。当雷诺数相同时，湍动能随波纹高度的减小而增大，且增大幅度随雷诺数的增大而逐渐变大；在对其阻力性能的研究中可知：随着高度增大，板片进出口的压降减小，但流体受到的阻力增加；在对其换热性能的研究中可知：随着高度的升高，温度梯度分布更加均匀，提高波纹高度可以有效强化换热。

3) 在板壳式换热器中，总流量不变时，随着波纹高度减小，湍动能随之增大，湍流程度得以提升，加强了流体的扰动，对于流动性能，较小的波纹高度具有更好的流动性能，但是较高得波纹高度具有更好得到传热性能。因此，在设计板壳式换热器时，应根据产品的实际应用条件，综合考量流动性能和传热性能，选择合适的结构参数。

## 基金项目

国家重点研发计划(2020YFF0303900)。

## 参考文献

- [1] 史秀丽, 张宏峰. 板壳式换热器发展现状及优越性[J]. 化学工程师, 2006(2): 30-31.
- [2] 刘家瑞, 赵巍, 黄晓东, 等. 板壳式换热器传热准则关系式的分析与实验研究[J]. 动力工程学报, 2015, 35(6): 469-475.
- [3] 刘家瑞, 赵巍, 黄晓东, 等. 一种板壳式换热器传热准则关系式的实验分析[J]. 动力工程学报, 2015, 35(11): 893-900.
- [4] 曲宁. 板式换热器传热与流动分析[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2005.
- [5] 袁伍, 罗小平, 王兆涛, 王梦圆. 板壳式换热器流固耦合换热的数值模拟[J]. 热能动力工程, 2019, 34(10): 150-155.
- [6] 刘家瑞, 赵巍, 黄晓东, 等. 一种板壳式换热器壳程物流分配特性的模拟与优化[J]. 化工进展, 2015, 34(10): 3569-3576.
- [7] 刘家瑞, 赵巍, 张华, 等. 板壳式换热器板程流量分布特性的模拟与优化[J]. 热能动力工程, 2016, 31(5): 7-15.
- [8] 袁雨文, 赵巍, 刘家瑞, 张华, 杨瑞华. 板壳式换热器板片流动与传热性能的数值模拟[J]. 能源工程, 2020(3): 39-45.
- [9] 栾志坚, 张冠敏, 张俊龙, 等. 波纹几何参数对人字形板式换热器内流动形态的影响机理[J]. 山东大学学报, 2007, 37(2): 34-37.
- [10] 张洋乐. 板壳式换热器板管内流场的数值模拟研究[J]. 石油化工设备技术, 2020, 41(5): 5-10+4.
- [11] 陈武滨, 江楠. 新型板壳式换热器壳程流动与换热的数值模拟[J]. 化学工程, 2012, 40(1): 30-34.



- [12] 蔡毅. 板式换热器性能的数值模拟和实验研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2008.
- [13] 李晓伟. 通道湍流换热强化的数值与实验研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2008.
- [14] 邱小亮. 人字形板片结构参数对板式换热器传热与流阻特性影响研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [15] 邱小亮, 林创辉, 彭雨, 陈华. 人字形板式换热器板片结构参数对流动型式的影响分析[J]. 洁净与空调技术, 2014(4): 11-15.
- [16] 陶文栓. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004: 333-392.
- [17] 徐志明, 王月明, 张仲彬. 板式换热器性能的数值模拟[J]. 动力工程学报, 2011, 31(3): 198-202.