

翼型印刷电路板式换热器的流动与换热特性

成金东, 王波*, 王雅亮, 沈佳飞, 孙聪聪, 陈相煜

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

Email: *wangbo@usst.edu.cn, 807306023@qq.com

收稿日期: 2021年7月27日; 录用日期: 2021年8月13日; 发布日期: 2021年8月20日

摘要

换热器是液化天然气(LNG)运输使用过程的关键设备, 印刷电路板式换热器具有体积小、耐高温高压等优点, 可以作为该过程的汽化器, 其流动换热特性对天然气汽化过程有着显著影响。因此, 本文采用数值模拟的方法, 以LNG为流动工质, 建立NACA0020翼型换热器模型, 研究翅片的不同交错间距和垂直间距对换热器流动换热性能的影响。研究表明, 翅片交错排列的综合换热性能优于翅片并排布置, 翅片交错间距 $L_s = 3 \text{ mm}$ 时, 换热器的流动换热性能最好。随着垂直距离的增大, 换热器的流动换热性能增强。将翼型印刷电路板式换热器与箭鱼型印刷电路板式换热器的模拟结果进行对比分析表明, 箭鱼型印刷电路板式换热器具有更好的减阻效果, 并且其综合换热性能比翼型印刷电路板式换热器更好。

关键词

液化天然气, 翼型印刷电路板式换热器, 换热性能, 压降损失, 热工水力性能

Flow and Heat Transfer Characteristics of Airfoil Printed Circuit Heat Exchanger

Jindong Cheng, Bo Wang*, Yaliang Wang, Jiawei Shen, Congcong Sun, Xiangyu Chen

School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Email: *wangbo@usst.edu.cn, 807306023@qq.com

Received: Jul. 27th, 2021; accepted: Aug. 13th, 2021; published: Aug. 20th, 2021

Abstract

Heat exchanger is the key equipment in the transportation and application of liquefied natural gas (LNG). Printed circuit heat exchanger has the advantages of small volume, high temperature and

*通讯作者。

文章引用: 成金东, 王波, 王雅亮, 沈佳飞, 孙聪聪, 陈相煜. 翼型印刷电路板式换热器的流动与换热特性[J]. 建模与仿真, 2021, 10(3): 877-889. DOI: 10.12677/mos.2021.103087

high pressure resistance, which can be used as the vaporizer of the process. Its flow and heat transfer characteristics have a significant impact on the vaporization process of natural gas. Therefore, numerical simulation method is used to establish NACA0020 airfoil heat exchanger model with LNG as flow working fluid to study the influence of different staggered and vertical fin spacing on the flow and heat transfer performance of heat exchanger. The results show that the comprehensive flow and heat transfer performance of staggered fins is better than that of side-by-side fins. With the increase of vertical distance, the flow and heat transfer performance of heat exchanger is enhanced. Comparing the simulation results of the airfoil printed circuit heat exchanger and the swordfish printed circuit heat exchanger, it shows that the swordfish printed circuit heat exchanger has better drag reduction effect, and its comprehensive heat transfer performance is better than that of the airfoil printed circuit heat exchanger.

Keywords

Liquified Natural Gas, Airfoil Printed Circuit Heat Exchanger, Heat Transfer Performance, Pressure Drop Loss, Thermal Hydraulic 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

天然气是一种环保高效的能源, 开采出的气态天然气需要经过冷凝成液态进行运输, 随后液态天然气需要进过汽化器汽化输送到能源消费端。印刷电路板式换热器(PCHE)作为一种新型的微通道换热器, 具有结构紧凑、耐高温高压等优点, 处理相同质量的天然气其体积和重量仅为传统汽化器的 1/50 和 1/10。因此将 PCHE 作为液化天然气汽化过程的核心设备成为了一种新的趋势。

PCHE 作为一种微通道换热器, 目前主要有直流道、Z 字型流道、S 型流道和翼型流道四种流道结构。高毅超等人[1]研究了管径(1~6 mm)和转折角(5° ~ 60°)对 Z 字型 PCHE 传热和压降的影响, 结果表明, 转角处回流和漩涡是影响其传热和流动的主要因素; 管径的增加减小了对流换热系数, 降低了流动压降; 转折角的增大增加了对流换热系数, 显著提高了压降。Lee 等[2] [3]采用数值模拟的方法研究了 Z 字型流道的结构参数对 PCHE 性能的影响, 所研究的结构参数包括通道角度、通道的椭圆纵横比以及通道横截面的不同形状(半圆形、矩形、梯形和圆形)。结果表明, 矩形通道的热工性能最好, 水力性能最差, 而圆形通道的热工性能最差。热工性能和压降都随着通道的半椭圆纵横比的增加而增加。此外, Lee 等人[4]还研究了插入直通道的 Z 字型 PCHE 热工水力性能的影响, 插入直通道的 Z 字型 PCHE 表现出比 Z 字型更好的热工水力性能。Tsuzuki [5]在 2007 年首次提出 S 型 PCHE, 其结构是根据 sin 曲线通道经打孔和错列布置后形成的。并且利用数值模拟的方法研究了翅片形状和角度对 S 型 PCHE 热工水力性能的影响。结果表明, 翅片角度对压降影响很大, 但对传热性能影响不大, 通过对综合传热性能分析得出了最佳流道, 其压降仅为具有相同传热性能的 Z 字型流道的五分之一。浦项科技大学的研究者首先提出了带有翼型翅片(NACA0020)的 PCHE, 然后 Kim 等人[6]采用数值模拟的方法研究了翼型 PCHE 和 Z 字型 PCHE 的热工水力性能, 结果表明, 翼型 PCHE 在与 Z 字型 PCHE 在相同传热性能的前提下, 压降仅为 Z 字型的二十分之一。他们将相同传热性能归因于传热面积的增加, 流动阻力的减小在于流线型的结构抑制了分离流的产生。Xu 等人[7]采用数值模拟的方法研究了超临界 CO_2 在矩形、圆形、椭圆形和翼型翅片中的热工水力性能, 结果表明, 翼型翅片热工水力性能明显优于其他翅片,

矩形翅片和圆形翅片的热工水力性能最差。Chen 等人[8]分析比较了 NACA 00XX 系列翼型 PCHE 的热工水力性能, 研究翼型翅片厚度对 PCHE 热工水力性能的影响。结果表明, 随着翼型翅片的厚度增加, PCHE 的热工水力性能下降。

因此, 翼型流道的仿生学结构在减小流动阻力方面具有很大的优势, 其均匀的流线型结构在增强扰动的同时可以明显地减少能量损失, 但是翼型翅片的不同布置方式会对其流动与换热产生显著的影响, 因此, 本文主要研究翼型翅片的不同布置方式对 PCHE 热工水力性能的影响, 并在翼型 PCHE 的基础上进一步对比分析了箭鱼型 PCHE 的流动与换热性能。

2. 数值模拟

2.1. 物理模型及边界条件

本文换热器采用错流换热的方式, 其冷通道模型如图 1 所示, 上下板厚度为 0.5 mm, 流体域高度为 0.75 mm, 其中翼型翅片采用 NACA0020 翼型结构, 翼型翅片长度为 4 mm, 模型进出口设置充分发展段, 防止出口处回流, 保证进口处均匀流动。整个模型尺寸为 3.9 mm × 1.75 mm × 50 mm (其中 3.9 mm 会随垂直距离变化), 图 2 为箭鱼型印刷电路板式换热器示意图, 将翼型翅片前端形状优化为箭鱼形状, 其余尺寸与翼型印刷电路板式换热器相同。两侧采用周期性边界条件, 上下采用恒定热流边界条件, 上下部输入的热流密度为 60 kW/m², 采用质量流量进口, 入口质量通量为 325 kg/m²s, 压力出口, 换热器工作压力设为 10.5 MPa, 入口温度为 121 K。

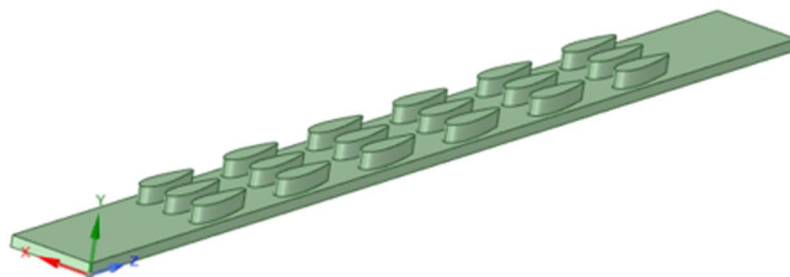


Figure 1. Airfoil printed circuit heat exchanger
图 1. 翼型印刷电路板式换热器

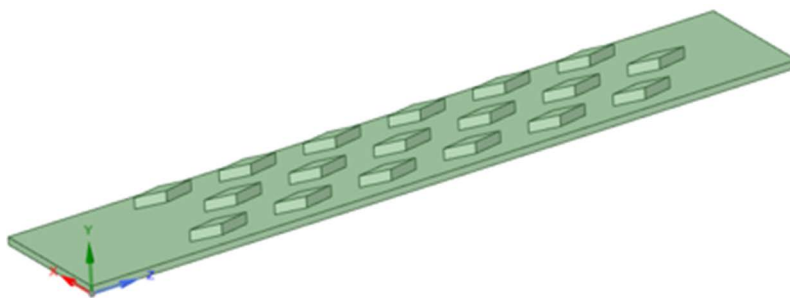


Figure 2. Swordfish type printed circuit heat exchanger
图 2. 箭鱼型印刷电路板式换热器

为了研究不同布置方式对 PCHE 热工水力性能的影响, 首先保持垂直距离 L_v 不变, 交错间距从 0 到 6 mm 创建 7 个模型, 然后改变垂直距离 L_v (1.3~3 mm) 分别创建 4 个模型, 如表 1 所示, 共计 28 个模型来对比分析翼型翅片不同布置方式对 PCHE 流动与换热性能的影响。图 3 为翼型翅片的排布参数, 主要包括交错间距 L_s 、垂直间距 L_v 和横向间距 L_c 。

Table 1. Structural parameters of different models
表 1. 不同模型结构参数

| 参数 | Ls (mm) | | | | | | |
|-------------|---------|---|---|---|---|---|---|
| Lv = 1.3 mm | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Lv = 1.7 mm | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Lv = 2 mm | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Lv = 3 mm | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |

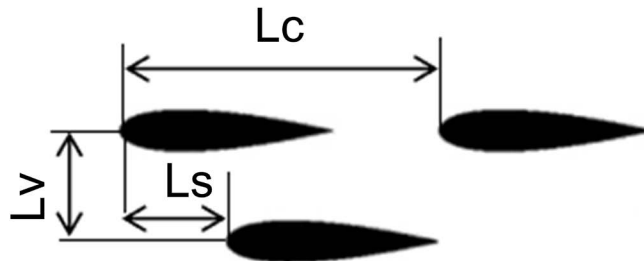


Figure 3. Configuration parameters of airfoil fin
图 3. 翼型翅片排布参数

2.2. 数学模型计算

流体流动与换热主要遵循三大基本守恒定律：质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律，在数学方法上将三大定律表示为控制方程来实现。

1) 质量守恒方程(连续性方程)：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \tag{1}$$

式中： ρ 为流体密度； t 为时间； \vec{V} 为速度矢量， V 为流体速度。

2) 动量方程：

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \tag{4}$$

3) 能量方程：

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\mu_i (\rho H + p)) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} + \mu_i \tau_{ij} \right) + S_h \tag{5}$$

式中： k_{eff} 代表有效导热率； H 为比焓； S_h 为体积热源。

本文换热器固体材料采用不锈钢，流体采用液化天然气(LNG)，其物性(密度、比热容、导热系数、动力粘度)随温度的变化如图 4 所示，通过编写 UDF 导入软件，运行压力设置为 10.5 MPa，采用 RNG k-ε 湍流模型，压力速度耦合采用 SIMPLE 算法，方程采用二阶迎风格式，残差设置为 10^{-6} ，当残差值以及出口温度、压力保持不变时认定结果收敛。

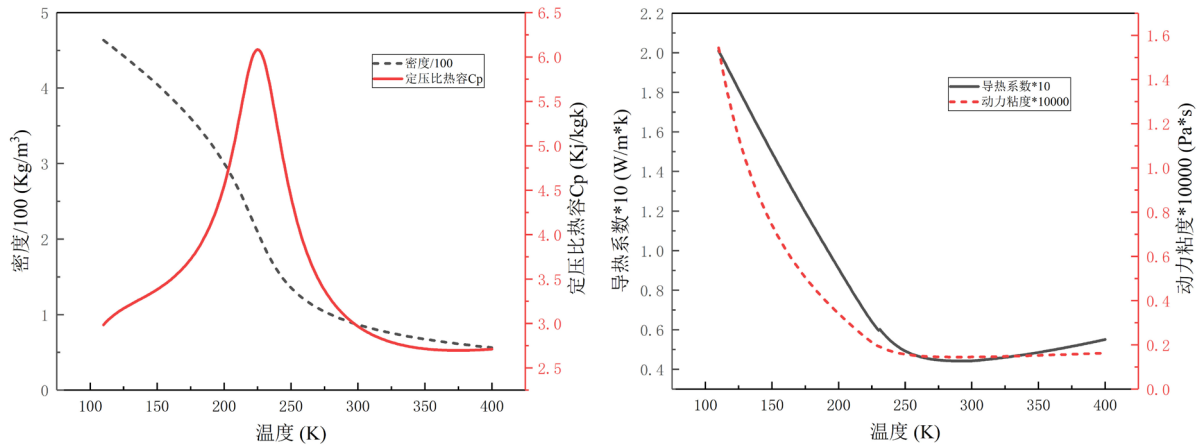


Figure 4. Variation of physical properties of LNG with temperature at 10.5 MPa

图 4. 10.5 MPa 下 LNG 的物性随温度的变化

由于翼型 PCHE 流动通道的不规则，选取一个周期的翼型流道作为研究对象，如图 5 所示，其当量直径采用如下计算式：

$$D_h = 4V/S \quad (6)$$

式中： V 为选取周期内流道的体积， S 为选取周期内流固接触面积。

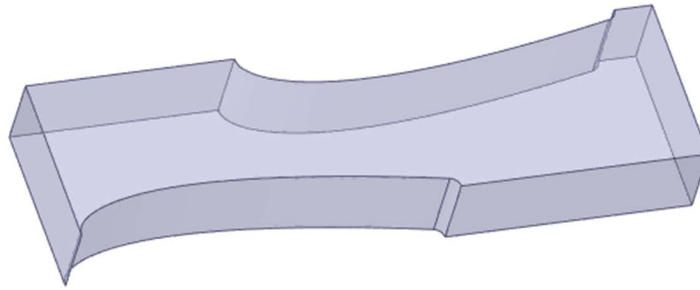


Figure 5. Single periodic flow passage of airfoil

图 5. 翼型单个周期性流道

$$\text{Re} = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad (7)$$

式中： ρ 为流体的平均密度， v 为流体的平均速度， D_h 为当量直径， μ 为流体平均动力粘度。

$$\text{Nu} = \frac{h D_h}{\lambda} \quad (8)$$

式中： h 为对流换热系数， λ 为流体导热系数。

$$h = \frac{q}{T_w - T_b} \quad (9)$$

式中： q 为壁面热流密度， T_w 为壁面平均温度， T_b 为流体平均温度。

$$\text{Eu} = \frac{\Delta P}{\rho v^2 / 2} \quad (10)$$

式中： ΔP 为进出口压降。

$$f = \frac{\Delta P D_h}{2\rho^2 v L} \quad (11)$$

式中： ΔP 为进出口压降， L 为换热器长度。

2.3. 网格独立性验证

由于翼型翅片结构较为复杂，对 PCHE 构建非结构化网格，采用进出口温差和压降作为参数进行网格无关性验证。如图 6 所示，当网格数量为 135 万时，换热器的压降和温差基本不发生变化，因此，选用 135 万的网格进行后续的仿真模拟。

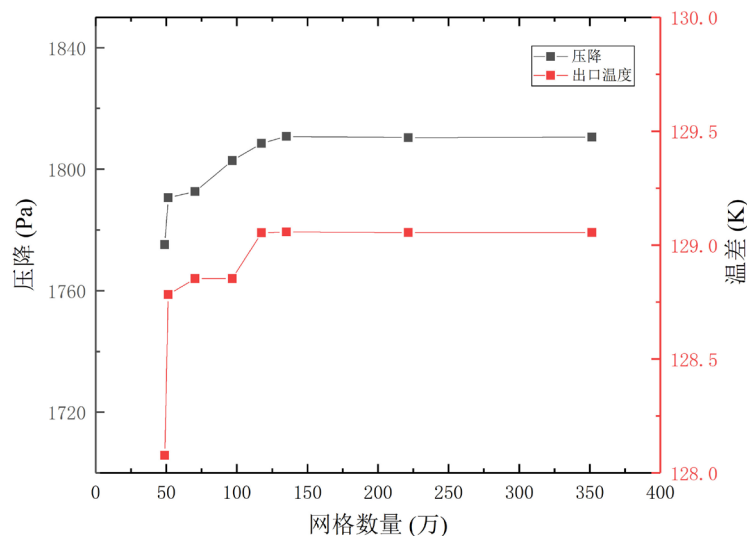


Figure 6. The pressure drop and outlet temperature of PCHE vary with the number of grids
图 6. PCHE 压降和出口温度随网格数量的变化

3. 计算结果分析

3.1. 交错间距 L_s 对 PCHE 流动与换热的的影响

图 7 为 $L_v = 1.3 \text{ mm}$ 时不同交错间距 L_s 下 PCHE 的速度分布云图，从图中可以看出，由于流道横截面积不断地增加和减小，LNG 在其中的流速也不断变化，当交错距离从 $L_s = 0 \text{ mm}$ 增大到 $L_s = 3 \text{ mm}$ 时，速度分布越来越均匀，当交错间距从 $L_s = 3 \text{ mm}$ 增大到 $L_s = 6 \text{ mm}$ 时，速度分布逐渐变的不均匀，速度变化程度随着 L_s 先减小再增大，且 $L_s = 0 \text{ mm}$ 和 $L_s = 6 \text{ mm}$ 时变化最剧烈，当 $L_s = 3 \text{ mm}$ 时，换热器的流场最均匀，交错排列的翼型翅片间的流速比并排排列的流速小，且并排排列的翅片间的速度不断突变，因此翼型翅片交错排列比并排排列形成的流场更加均匀，综上所述，当翼型翅片交错排列时，更有利于换热器形成均匀的流程，更有利于提高流程的均匀性。

图 8 和图 9 为对流换热系数 h 和压降随 L_s 的变化图，从图中可以看出，随着 L_s 的增加，对流换热系数 h 出现了先减小后增加的变化趋势，当 $L_s = 3 \text{ mm}$ 时其对流换热系数 h 最小， $L_s = 0 \text{ mm}$ 时其对流换热系数最大，压降随 L_s 变化趋势与 h 相同，当 $L_s = 3 \text{ mm}$ 时其压降最小， $L_s = 0 \text{ mm}$ 时其压降最大。即翼型翅片并排排列时其换热性能最好，但其压降损失也最大，当 $L_s = 3 \text{ mm}$ 时其压降最小，但其换热性能也最差，综上所述，翅片不同布置下增强换热的同时势必会引起流动压降的增加。因此，必需要研究其综合换热性能 Nu/Eu 来对换热器进行综合性能优化以提高其热工水力性能。

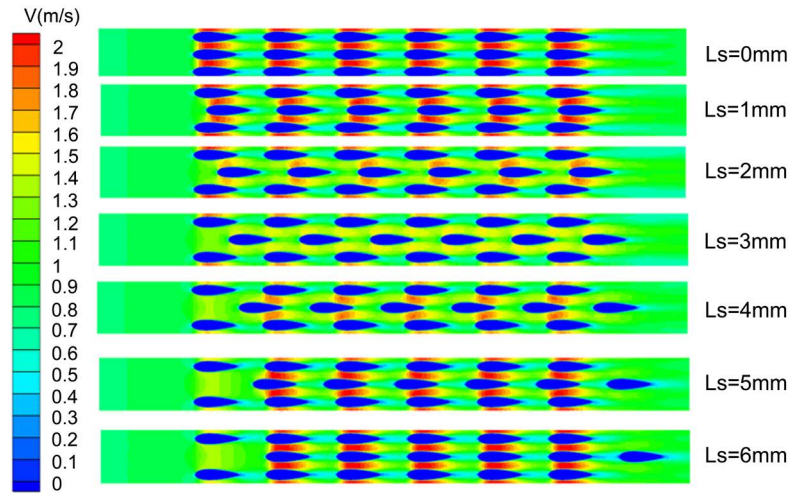


Figure 7. Velocity distribution nephogram under different L_s when $L_v = 1.3$ mm
图 7. $L_v = 1.3$ mm 时不同 L_s 下的速度分布云图

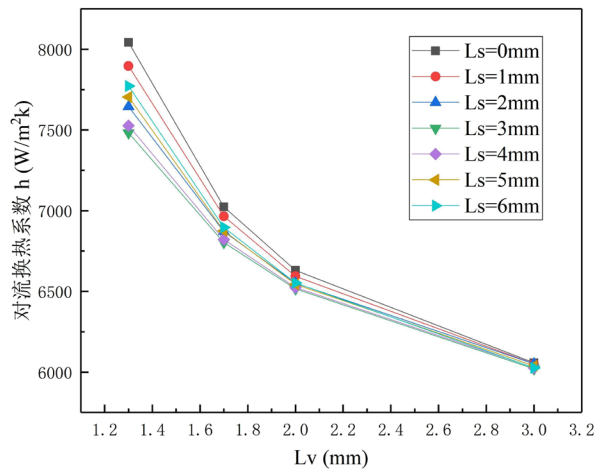


Figure 8. Variation of PCHE h with L_s
图 8. PCHE 对流换热系数 h 随 L_s 的变化

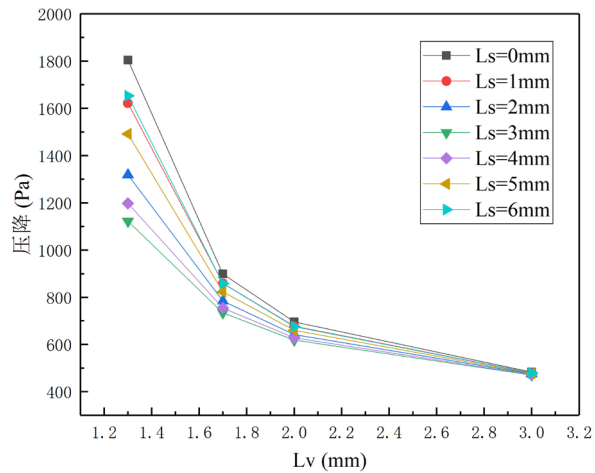


Figure 9. Variation of pressure with L_s
图 9. 压降随 L_s 的变化图

图 10 为摩擦因子 f 随 L_s 的变化图, 摩擦因子 f 的变化趋势与压降的变化趋势基本一样, 随着 L_s 的增加先减小后增加。当 $L_s = 3 \text{ mm}$ 时, 摩擦因子 f 最小。平行布置($L_s = 0 \text{ mm}$)时 f 最大。并且随着垂直间距 L_v 的增大, 不同交错间距下的摩擦因子的差距逐渐变小, $L_v = 1.3 \text{ mm}$ 时不同交错间距下的摩擦因子差距最大, 其并排平行布置($L_s = 0 \text{ mm}$)时比 $L_s = 3 \text{ mm}$ 时的摩擦因子增大了 9.2%。图 11 为 PCHE 的 Nu/Eu 随着 L_s 的变化图, 如图所示, 当 $L_s = 3 \text{ mm}$ 时, Nu/Eu 最大, 因此, 当错列布置 $L_s = 3 \text{ mm}$ 时, 换热器具有最好的综合换热性能。

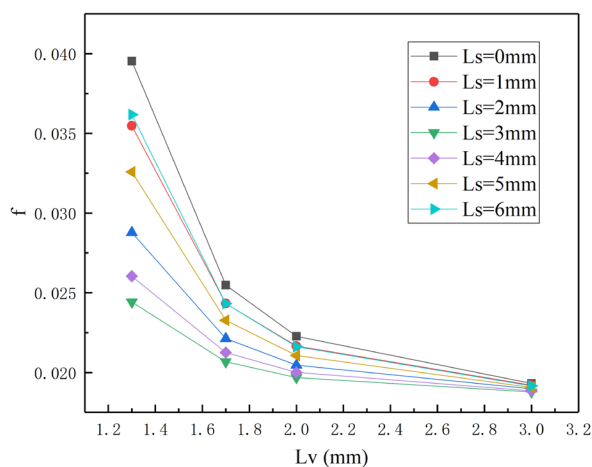


Figure 10. Variation of Friction factor f with L_s

图 10. 摩擦因子 f 随 L_s 的变化图

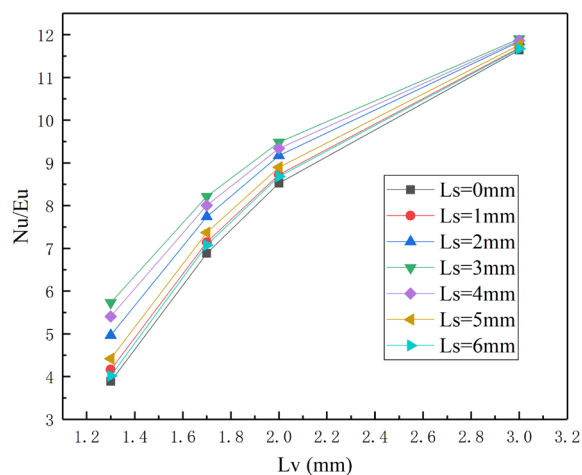


Figure 11. Variation of Nu/Eu with L_s

图 11. Nu/Eu 随 L_s 的变化图

3.2. 垂直间距 L_v 对 PCHE 流动与换热的影响

图 12 为 $L_s = 3 \text{ mm}$ 时不同 L_v 下换热器的速度分布云图, 从图中可以看出, 当 $L_v = 1.3 \text{ mm}$ 时流道内的速度最大, 最大流速可以达到 1.84 m/s , 且速度变化最剧烈。随着垂直间距 L_v 的增大, 速度分布逐渐变的均匀, 当 $L_v = 3 \text{ mm}$ 时其最大流速仅为 1.18 m/s 。 $L_v = 1.3 \text{ mm}$ 时, 两排翼型翅片之间的距离最窄, 流动截面积最小, 翼型翅片前宽后窄的结构导致流动截面积不断地增大与减小, 极大地扰动了 LNG 的流动与换热。因此, 当 $L_v = 1.3 \text{ mm}$ 时, 换热器的速度最大且变化最剧烈。

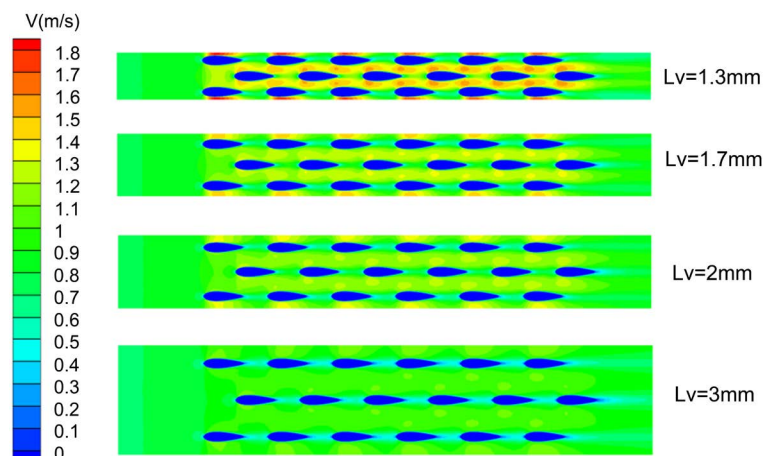


Figure 12. Velocity distribution nephogram under different L_v when $L_s = 3$ mm
图 12. $L_s = 3$ mm 时不同 L_v 下的速度分布云图

图 13 为不同 L_v 下对流换热系数 h 随 L_v 的变化图, 从图中明显可以看出, h 随着 L_v 的增加而减小, 即随着垂直间距的增大而减小, PCHE 的换热性能降低。从图 14 中可以看出, Nu 的变化趋势与 h 相反, 随着 L_v 的增加而增加, 这是因为 Nu 不仅受对流换热系数 h 的影响, 同时也与当量直径 D_h 有关, 随着 L_v 的增大, PCHE 的当量直径 D_h 增大, 并且当量直径增大的影响比对流换热系数减小的影响更为显著, 因此导致 Nu 随 L_v 的变化呈现出与对流换热系数相反的变化趋势。

从图 15 可以看出, 随着 L_v 的增加, 换热器的摩擦因子 f 逐渐变小, 并且随着垂直间距的增大, 交错间距的变化对摩擦因子的影响逐渐变小。 L_v 的增加导致翼型翅片之间的距离变大, 翅片间的流动速度变小, 流场变的均匀, 从而导致摩擦因子变小且随交错间距的变化减小。从图 13 和图 15 可以看出, $L_v = 1.3$ mm 时, 其对流换热系数较高, 但是其摩擦因子也是最大的, 因此, 需要对不同 L_v 下的综合换热性能进行对比分析。

图 16 为质量通量为 $325 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 时不同 L_v 下 PCHE 的 Nu/Eu 变化图, 由图可知, 随着 L_v 的增加, Nu/Eu 的值也增加, 即翅片布置的越稀疏, Nu/Eu 越大。且随着垂直间距 L_v 的增大, 翅片间的交错间距对换热器的综合换热性能的影响逐渐变小。综上所述, 在一定的范围内, 翅片布置的越稀疏, 换热器的综合换热性能越好, 翅片越稀疏, 交错间距对综合换热性能的影响越小。

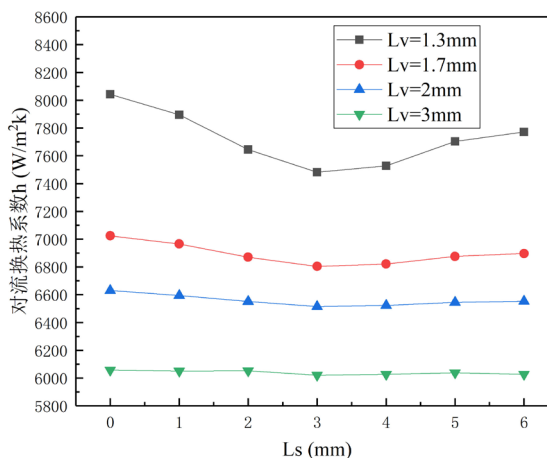


Figure 13. Variation of h with L_v
图 13. h 随 L_v 的变化图

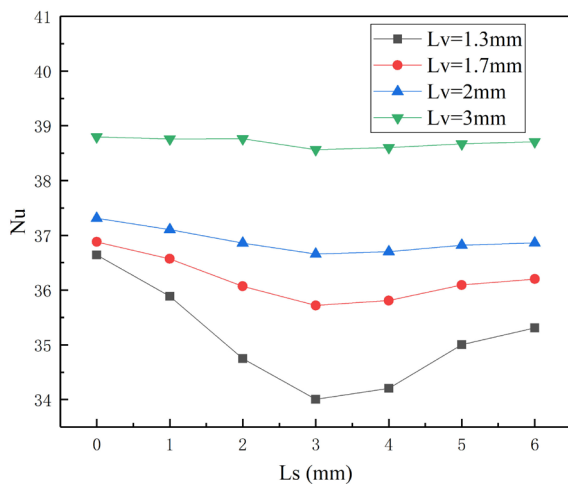


Figure 14. Variation of Nu with Lv
 图 14. Nu 随 Lv 的变化图

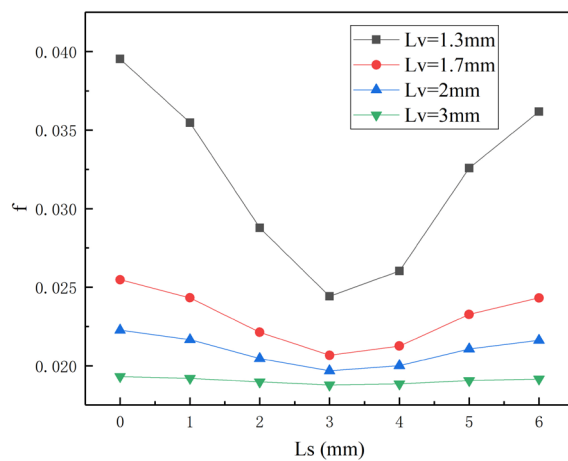


Figure 15. Variation of Friction factor f with Lv
 图 15. 摩擦因子 f 随 Lv 的变化

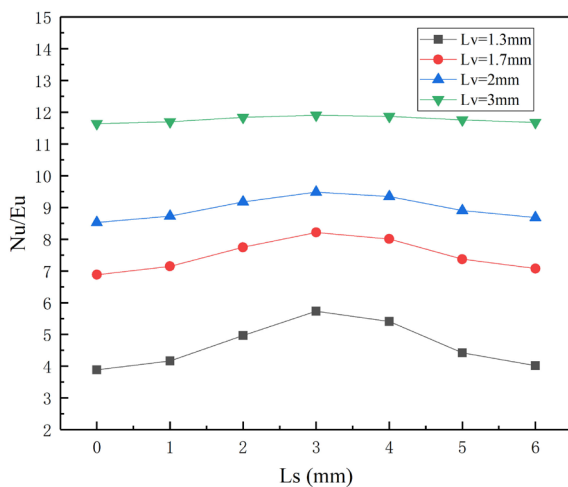


Figure 16. Variation of Nu/Eu with Lv
 图 16. Nu/Eu 随 Lv 的变化

3.3. 翼型 PCHE 与箭鱼型 PCHE 流动与换热性能对比

图 17、图 18 分别为质量通量为 325~725 $\text{kg/m}^2\text{s}$ 时的翼型 PCHE 和箭鱼型 PCHE 的 Nu 和压降对比图。从中可以发现，Nu 和压降都随着质量通量的增加而增加，翼型 PCHE 的 Nu 比箭鱼型略大一些，并且质量流量越大越明显，当质量通量为 725 $\text{kg/m}^2\text{s}$ 时，箭鱼型的 Nu 比翼型降低了 1.2%，但是，箭鱼型 PCHE 的压降明显更加低一些，当质量通量为 725 $\text{kg/m}^2\text{s}$ 时，箭鱼型的压降比翼型降低了 6.7%，这说明箭鱼型翅片的减阻效果要更好一些。因此需要进一步对两种换热器的综合换热性能进行对比分析。

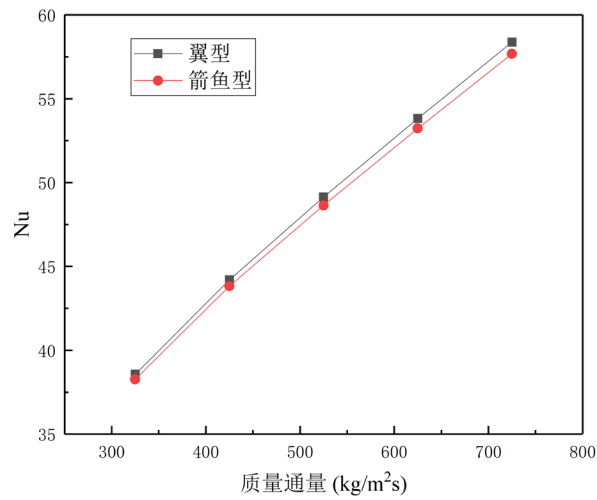


Figure 17. Variation of Nu with mass flux
图 17. Nu 随质量通量的变化

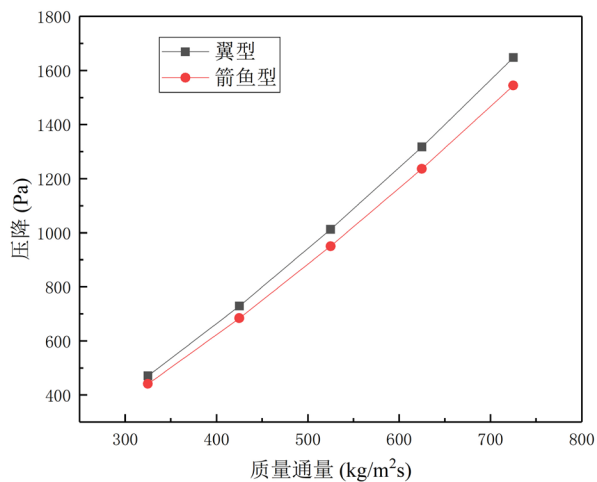


Figure 18. Variation of pressure drop with mass flux
图 18. 压降随质量通量的变化

图 19、图 20 分别为翼型和箭鱼型的 Eu 和 Nu/Eu 随质量通量变化的对比图，从图 19 中可以看出，在相同质量通量下，箭鱼型的 Eu 比翼型的小，而且 Eu 随着质量通量的增加而减小，这是因为 Eu 与压降成正比，与 v^2 成反比。随着质量通量的增加，压降会增加，但是流速增加的影响更加显著，因此，Eu 随着质量通量的增加而减小。从图 20 中可以看出，箭鱼型的 Nu/Eu 比翼型的略大一些，当质量通量为

725 kg/m²s 时, 箭鱼型的 Nu/Eu 相比翼型增加了 0.66%, 因此, 箭鱼型的综合换热性能更好, 而且当换热器长度增加时, 箭鱼型 PCHE 的优势将会进一步体现出来。

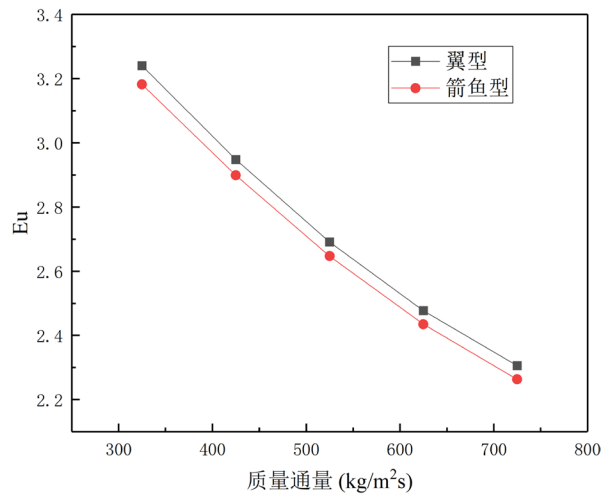


Figure 19. Variation of Eu with mass flux

图 19. Eu 随质量通量的变化

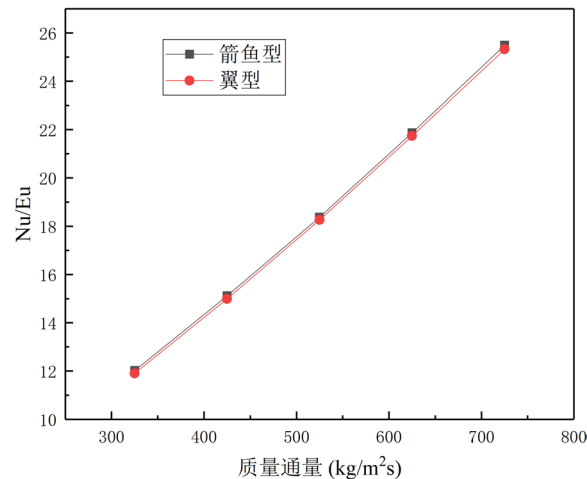


Figure 20. Variation of Nu/Eu with mass flux

图 20. Nu/Eu 随质量通量的变化

4. 结论

本文采用数值模拟的方法, 对翼型印刷电路板式换热器的流动与换热性能进行了分析, 研究了不同交错间距 L_s 和垂直间距 L_v 对换热器流动与换热性能的影响。并在综合换热性能较好的翅片布置方式下进一步对比分析了箭鱼型与翼型印刷电路板式换热器的性能, 得出结论如下:

1) 翼型翅片并排布置($L_s = 0$ mm)时具有最好的换热性能, 同时也具有最大的压降。同时考虑传热和压降时, 翼型翅片交错布置($L_s = 3$ mm)时具有最好的综合换热性能。

2) 随着翅片间垂直间距 L_v 的增大, 换热器的 Nu/Eu 增加, 翅片间的稀疏布置有利于增强换热器的综合换热器性能, 且翅片布置得越稀疏, 交错间距对综合换热性能的影响越小。

3) 箭鱼型 PCHE 的换热性能比翼型 PCHE 低, 但是, 其流动压降最大减小了 6.7%, 说明箭鱼型 PCHE

的仿生学结构具有更好的流动减阻效果。

4) 箭鱼型 PCHE 的 Nu/Eu 比翼型 PCHE 高, 说明箭鱼型 PCHE 的综合换热性能比翼型更好, 对于箭鱼型 PCHE 值得进一步研究。

参考文献

- [1] 李雪, 陈永东, 于改革, 吴晓红. 印刷电路板式换热器 Zigzag 通道流动与传热数值模拟[J]. 流体机械, 2017, 45(11):72-78.
- [2] Lee, S.M. and Kim, K.Y. (2012) Optimization of Zigzag Flow Channels of a Printed Circuit Heat Exchanger for Nuclear Power Plant Application. *Nuclear Science and Technology*, **49**, 343-351. <https://doi.org/10.1080/00223131.2012.660012>
- [3] Lee, S.M. and Kim, K.Y. (2014) A Parametric Study of the Thermal-Hydraulic Performance of a Zigzag Printed Circuit Heat Exchanger. *Heat Transfer Engineering*, **35**, 1192-1200. <https://doi.org/10.1080/01457632.2013.870004>
- [4] Lee, S.Y., Park, B.G. and Chung, J.T. (2017) Numerical Studies on Thermal Hydraulic Performance of Zigzag-Type Printed Circuit Heat Exchanger with Inserted Straight Channels. *Applied Thermal Engineering*, **123**, 1434-1443. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.198>
- [5] Tsuzuki, N., Kato, Y. and Ishiduka, T. (2007) High Performance Printed Circuit Heat Exchanger. *Applied Thermal Engineering*, **27**, 1702-1707. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.07.007>
- [6] Kim, D.E., Kim, M.H., Cha, J.E. and Kim, S.O. (2008) Numerical Investigation on Thermal-Hydraulic Performance of New Printed Circuit Heat Exchanger Model. *Nuclear Engineering and Design*, **238**, 3269-3276. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2008.08.002>
- [7] Xu, X.Y., Wang, Q.W., Li, L., Ekkad, S.V. and Ma, T. (2015) Thermal-Hydraulic Performance of Different Discontinuous Fins Used in a Printed Circuit Heat Exchanger for Supercritical CO₂. *Numerical Heat Transfer*, **68**, 1067-1086. <https://doi.org/10.1080/10407782.2015.1032028>
- [8] Chen, F., Zhang, L., Huai, X.L., Li, J.F., Zhang, H. and Liu, Z.G. (2017) Comprehensive Performance Comparison of Airfoil Fin PCHEs with NACA00XX Series Airfoil. *Nuclear Engineering and Design*, **315**, 42-50. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.02.014>