

## 翼型肋片印刷电路板式换热器内超临界甲烷的流动与换热性能

兰志向<sup>1</sup>, 李伟<sup>2</sup>, 刘鹏云<sup>2</sup>, 赵乾<sup>1</sup>, 刘纳<sup>1,\*</sup>, 郭健翔<sup>1</sup>, 魏业欣<sup>1</sup>, 于永强<sup>1</sup>, 梁茂冰<sup>1</sup>

(1. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 青岛 266525; 2. 东营交通发展集团 山东鲁东路桥有限责任公司, 东营 257091)

**摘要:**针对超临界甲烷在翼型肋片印刷电路板式换热器内的流动和换热性能开展了数值模拟。对比了 6 种不同型号 NACA00XX 翼型肋片的流动和换热性能;研究了翼型肋片均匀分布时,交错、垂直和水平间距 3 种布局参数对流动和换热性能的影响;设计了 3 种前疏后密和 3 种前密后疏的不均匀分布形式的翼型肋片,将流动和换热性能与均匀分布的进行了对比分析。结果表明:NACA0025 翼型肋片的综合性能最佳;翼型肋片均匀分布时,无量纲交错间距和无量纲垂直间距分别为 1 和 4 时综合性能最佳;翼型肋片非均匀分布时,前密后疏分布的综合性能优于均匀分布的,而前疏后密分布的综合性能劣于均匀分布的;保持翼型肋片数量不变,在拟临界点附近布置更密的翼型肋片能够强化综合性能。

**关键词:**印刷电路板式换热器;翼型肋片;换热;数值模拟

中图分类号:TK124

文献标志码:A

文章编号:1673-4602(2024)04-0080-11

### Flow and heat transfer performance of supercritical methane in an airfoil fin printed circuit heat exchanger

LAN Zhixiang<sup>1</sup>, LI Wei<sup>2</sup>, LIU Pengyun<sup>2</sup>, ZHAO Qian<sup>1</sup>, LIU Na<sup>1,\*</sup>,  
GUO Jianxiang<sup>1</sup>, WEI Yexin<sup>1</sup>, YU Yongqiang<sup>1</sup>, LIANG Maobing<sup>1</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Shandong Ludong Road and Bridge Co, Dongying Transportation Development Group, Dongying 257091, China)

**Abstract:** Numerical simulation was carried out to investigate the flow and heat transfer performance of the supercritical methane in an airfoil fin printed circuit heat exchanger(PCHE). The flow and heat transfer performance of six different types of NACA00XX airfoil fins were compared and analyzed. The effects of three layout parameters, namely staggered pitch, vertical pitch and horizontal pitch, on the flow and heat transfer performance when the airfoil fins are uniformly distributed were investigated. Three forms of front dense and rear sparse and three forms of front sparse and rear dense non-uniform distributions of airfoil fin were proposed, and their flow and heat transfer performance were compared with that of the uniform distribution. The results show that NACA0025 airfoil fins offer the best comprehensive performance. When the airfoil fins are uniformly distributed, and when the dimensionless staggered pitch and dimensionless vertical pitch are 1 and 4 respectively, the

收稿日期:2023-02-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51904325)

作者简介:兰志向(1998—),男,河北邯郸人。硕士,研究方向为微尺度传热传质。E-mail:lanzhixiang1203@163.com。

\*通信作者:刘纳(1985—),女,山东济宁人。博士,副教授,主要从事微尺度传热传质和高效紧凑换热器等方面的研究。  
E-mail:liuna@qut.edu.cn。

comprehensive heat transfer performance is the best. When the airfoil fins are non-uniformly distributed, the comprehensive performance of front dense and rear sparse distributions is better than that of the uniform distribution, while the comprehensive performance of front sparse and rear dense distributions is lower than that of the uniform distribution. The comprehensive heat transfer performance can be enhanced by arranging denser airfoil fins near the quasi-critical point for keeping the number of airfoil fins constant.

**Key words:** printed circuit heat exchanger(PCHE); airfoil fins; heat transfer; numerical simulation

海上浮式液化天然气技术已逐渐成为我国能源领域的重要发展方向。海上浮式液化天然气装置的工作空间狭小、面临的海况环境恶劣,要求天然气液化及液化天然气气化装置的主换热器具备结构紧凑、换热高效、耐低温高压、耐腐蚀、强度高等特点<sup>[1-3]</sup>。印刷电路板式换热器(Printed Circuit Heat Exchanger, PCHE)作为一种新开发的换热器,能够满足浮式液化天然气装置对主换热器的严格要求,在浮式液化天然气技术领域具有广泛的应用前景<sup>[4]</sup>。

PCHE 采用光化学蚀刻和扩散焊技术加工而成,能够在高温跨(73~1173 K)和高压(高达 60 MPa)下可靠工作<sup>[5]</sup>。在过去的几年时间里,研究人员对超临界流体在 PCHE 中的热工水力性能进行了广泛的研究。Z 型通道是最常见的 PCHE 流动通道,与直通道相比,Z 型通道的换热性能有所提升,但是由于水力直径的减小、流道的增长以及通道弯曲处存在流体分流等原因,使 Z 型通道的 PCHE 压降过大<sup>[6]</sup>。因此针对压降问题,研究人员设计了多种不连续的 PCHE 通道。TSUZUKI 等<sup>[7-8]</sup>开发了一种 S 型肋片,研究表明,S 型肋片通道的 PCHE 与 Z 型通道的 PCHE 具有相同的传热性能,但 S 型肋片通道的压降只有后者的 1/5。KIM 等<sup>[9]</sup>设计了翼型肋片来强化 PCHE 的热工水力性能,翼型肋片通道的压降是 Z 型通道的 1/20,两者的单位体积传热速率几乎相同。YOON 等<sup>[10]</sup>对比了直通道、Z 型通道、S 型肋片通道和翼型肋片通道 PCHE 的综合换热性能,发现翼型肋片通道的综合换热性能最好。因此,翼型肋片通道的 PCHE 因良好的传热性能而受到广泛关注。

MA 等<sup>[11]</sup>研究了翼型肋片的尾端壁圆角在不同横向间距和纵向间距时对 PCHE 热工水力性能的影响。CHU 等<sup>[12]</sup>研究了翼型肋片布局的几何参数对 PCHE 局部和整体换热性能的影响,结果表明,超临界 CO<sub>2</sub> 物性的剧烈变化使换热速率降低,但沿主流方向的压力损失基本保持不变。CUI 等<sup>[13]</sup>为进一步提高翼型通道 PCHE 的性能,基于 NACA0020 标准翼型提出了 2 种新型肋片。ZHAO 等<sup>[14]</sup>研究了超临界液化天然气作为工质时翼型肋片的布局结构对传热和流动阻力的影响,结果表明,翼型肋片稀疏交错排列时 PCHE 具有较好的热工水力性能。CHU 等<sup>[15]</sup>通过数值模拟研究了超临界 CO<sub>2</sub> 在弧形翼型通道 PCHE 内的热工水力特性。TANG 等<sup>[16-17]</sup>研究了翼型肋片结构和布局对超临界液化天然气在 PCHE 通道内的流动和换热特性的影响,探究了准临界温度附近具有翼型肋片和涡发生器 PCHE 的强化传热机理,并进一步探究了超临界液化天然气在具有该结构的 PCHE 通道内的热工水力性能。

CHEN 等<sup>[18]</sup>对 NACA0010、NACA0020、NACA0030 和 NACA0040 翼型肋片 PCHE 的流动和换热性能进行了数值分析,结果表明,整体传热性能随翼型最大厚度的增加而降低,NACA0010 翼型肋片 PCHE 的综合性能最好。TANG 等<sup>[17]</sup>通过数值模拟研究并对比了 NACA0015、NACA0018、NACA0021 和 NACA0024 翼型肋片 PCHE 的流动和换热特性,结果表明,综合性能随翼型最大厚度的增大而增大,NACA0024 翼型肋片 PCHE 的综合性能最好。对于翼型肋片类型的影响,CHEN 等<sup>[18]</sup>和 TANG 等<sup>[17]</sup>的研究结果并不一致。ZHU 等<sup>[19]</sup>研究了翅片排列、攻角、水平和交错间距对非对称翼型肋片通道 PCHE 热工水力性能的影响,结果表明,无量纲水平间距、交错间距和攻角分别为 4、1.0 和 1.269 时,PCHE 呈现出最佳的整体性能。HAN 等<sup>[20]</sup>研究了超临界 CO<sub>2</sub> 在均匀分布、前密后疏和前疏后密分布的改进型翼型肋片通道内的流动和传热性能,结果表明,肋片前疏后密分布时具有最佳性能,研究结论是否同样适用于其他超临界工质,有待开展进一步研究。

综上所述,目前相关研究主要集中于新型肋片结构的适用性及翼型肋片布局和结构的优化,在肋片布

局和结构优化方面的研究结果并不完全统一且大部分都是针对翼型肋片均匀分布情况开展,对超临界流体在非均匀分布翼型通道 PCHE 内的流动和换热特性鲜有报道。本文采用数值模拟方法系统研究了超临界甲烷在 PCHE 通道内流动时翼型肋片型号和布局参数对流动和换热特性的影响,并研究了超临界甲烷在翼型肋片非均匀分布的 PCHE 通道内的流动和换热特性,对比分析了翼型肋片型号、布局参数以及非均匀分布时的流动和换热特性及综合性能。

## 1 数值方法

### 1.1 超临界甲烷的热物性

当流体的温度和压力均高于临界点时即为超临界流体。超临界流体没有气态和液态之分,也不再发生相变现象,其热物性,如密度  $\rho$ 、比热容  $c_p$ 、导热系数  $\lambda$  和动力黏度  $\mu$ ,随温度剧烈变化。本文模拟工质采用超临界甲烷,当温度和压力高于 190.56 K 和 4.59 MPa 时甲烷不再发生相变现象。超临界甲烷在 PCHE 通道内流动换热时,压力变化较小,对物性影响很小,因此其热物性可以看作是温度的单值函数。通过 REFPROP 软件得到超临界甲烷在 180~300 K、7 MPa 时的热物性,拟合为温度的分段多项式函数。REFPROP 软件查得的热物性与拟合公式计算结果间的偏差在  $\pm 5\%$  以内,如图 1 所示。

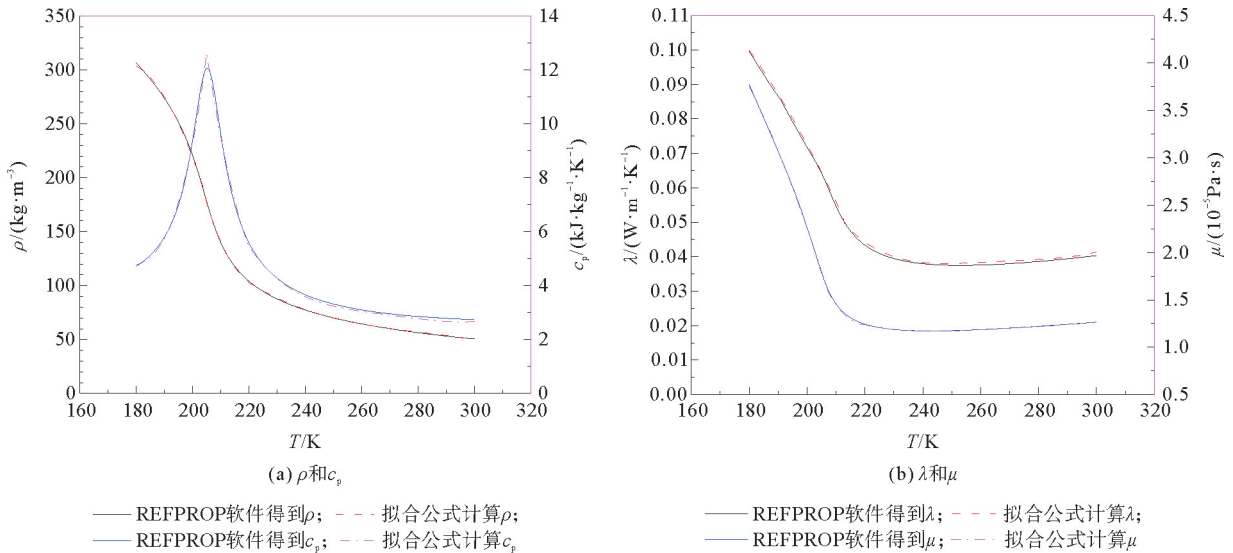


图1 7 MPa时超临界甲烷的热物性

### 1.2 数据处理

通道进口雷诺数  $Re_{in}$ :

$$Re_{in} = \frac{Gd_{in}}{\mu} \quad (1)$$

式中:  $G$  为质量流速;  $d_{in}$  为通道进口的当量直径;  $\mu$  为动力黏度。

$$d_{in} = \frac{4A_{in}}{P} \quad (2)$$

式中:  $A_{in}$  和  $P$  分别为通道进口处的截面积和湿周。

用科尔本传热因子  $j$  来表征不同型号翼型肋片通道的换热性能。

$$j = \frac{Nu}{RePr^{1/3}} \quad (3)$$

式中:  $Nu$  为努塞尔数;  $Pr$  为普朗特数。

用范宁摩擦因子  $f$  来表征不同型号翼型肋片通道的阻力,阻力越大,流动性能越差。

$$f = \frac{\Delta p_f d_h}{2\rho u^2 l} \quad (4)$$

式中:  $\Delta p_f$  为摩擦压降;  $\rho$  为平均密度;  $u$  为平均速度;  $l$  为通道长度,  $d_h$  为通道当量直径。

$$\Delta p_i = \Delta p - \Delta p_a \tag{5}$$

式中: $\Delta p$  和  $\Delta p_a$  分别为总压降和加速压降。

$$\Delta p_a = \rho_{out} u_{out}^2 - \rho_{in} u_{in}^2 \tag{6}$$

式中: $\rho_{in}$  和  $\rho_{out}$  分别为通道进、出口处的工质密度; $u_{in}$  和  $u_{out}$  分别为通道进、出口处的工质流速。

采用  $H$  因子评价翼型肋片通道 PCHE 内的流动和换热综合性能:

$$H = \frac{j/j_{ref}}{(f/f_{ref})^{1/3}} \tag{7}$$

其中,下标 ref 代表比较基准。

### 1.3 数值模型

考虑到 PCHE 几何结构的周期性,建立了超临界甲烷在翼型肋片 PCHE 内流动换热的三维数值模型。取一个流道作为计算区域,沿流动方向布置翼型肋片,模型进口设置 40 mm 稳流段,模型出口设置 20 mm 延长段抑制出口回流。通道高度固定为 1 mm,通道长度和宽度随翼型肋片布置结构参数的不同而不同。选择 NACA00XX 标准翼型肋片,翼型肋片布置的几何参数见图 2,翼型弦长( $L_c$ )和肋片高度( $t$ )取为定值,最大翼面厚度( $L_t$ )随翼型类型的不同而不同。 $L_h$ 、 $L_v$  和  $L_s$  分别代表翼型肋片布置的水平间距、垂直间距和交错间距,其无量纲的定义式见式(8)一式(10)。

$$\zeta_h = \frac{L_h}{L_c} \tag{8}$$

$$\zeta_v = \frac{L_v}{L_t} \tag{9}$$

$$\zeta_s = \frac{2L_s}{L_h} \tag{10}$$

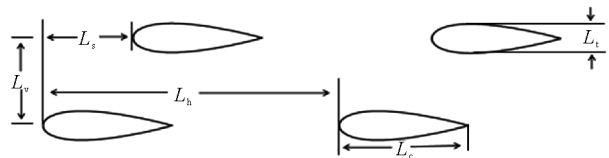


图 2 翼型肋片布置的几何参数

无量纲水平间距( $\zeta_h$ )和无量纲垂直间距( $\zeta_v$ )可以无限增大,极限情况是无肋光滑通道;无量纲交错间距( $\zeta_s$ )的变化范围为 0~1。

计算域的边界条件如图 3 所示。超临界甲烷在 7 MPa 时的拟临界温度为 205 K,为了探究该温度附近的流动和换热性能,通道进口温度取 195 K,进口为速度进口边界条件, $Re$  范围为  $1.0 \times 10^4 \sim 1.4 \times 10^5$ ;计算域的顶、底壁面和翼型肋片的侧壁面温度均设为 300 K,其余两侧面为周期性边界条件;出口为压力出口边界条件,出口压力为 7 MPa。

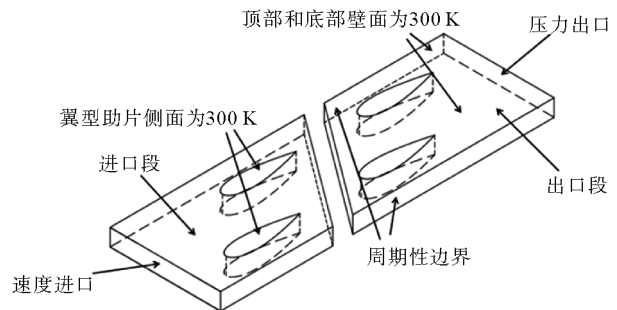


图 3 计算域的边界条件

采用前处理器 GAMBIT2.4.6 对计算域进行网格划分,为了控制网格数量、提高网格质量,将计算域划分为六面体网格,如图 4 所示。由于超临界流体流动和换热时对边界网格密度有较高要求,计算域的上、下壁面和翼型肋片侧面均采用了 8 层边界层网格,其中第一层网格高度为 0.01 mm。

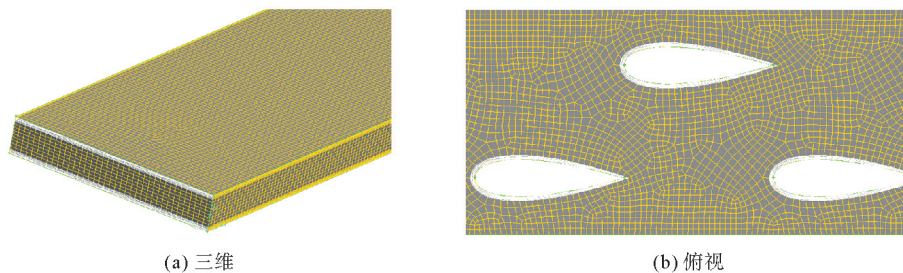


图 4 六面体网格

采用基于有限体积法的商业软件 ANSYS FLUENT 2021R1 进行数值计算,工质在计算域的流动是稳态的。PALKO 等<sup>[21]</sup>指出靠近壁面处为细网格时采用 SST  $k-\omega$  湍流模型对超临界流体流动的预测结果很好,因此本文采用 SST  $k-\omega$  湍流模型。模拟计算中采用双精度,速度和压力的耦合采用 SIMPLE 算法,采用二阶迎风格式离散对流项。为保证计算的收敛性,各参数的残差均设置为小于  $10^{-6}$ 。

#### 1.4 网格独立性验证和模型验证

为确保数值模拟结果与网格数无关,采用了网格数为 42 万~378 万的 7 套网格对超临界甲烷在翼型肋片均匀分布、 $Re$  为  $2 \times 10^4$  时的流动换热过程进行模拟,网格独立性验证结果如图 5 所示,当网格数达到 168 万以上时,超临界甲烷的  $Nu$  和  $\Delta p$  模拟结果的相对偏差均在 1% 以内,满足网格独立性要求。因此,本文的数值模拟最终选择 168 万网格数作为参考网格。

为了验证数值模拟的可靠性,将 DANG 等<sup>[22]</sup>的实验结果与同工况下的数值模拟结果进行对比,如图 6 所示。 $Nu$  模拟结果和实验结果的最大偏差和平均相对偏差分别为 8.3% 和 3.8%;  $f$  模拟结果和实验结果的最大偏差和平均相对偏差分别为 -6.9% 和 -2.0%,表明模拟结果与实验结果符合良好,数值模型准确可靠。

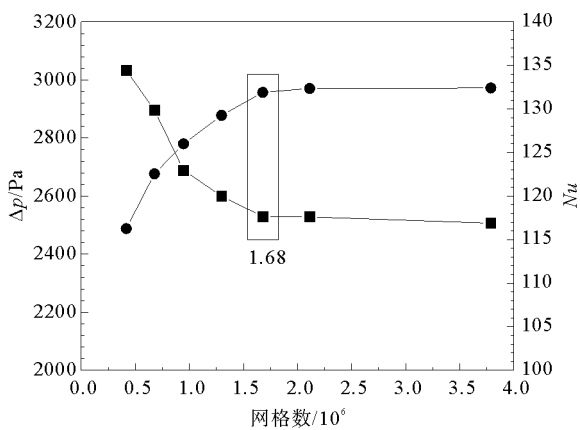


图5 网格独立性验证

—■—  $\Delta p$ ; —●—  $Nu$

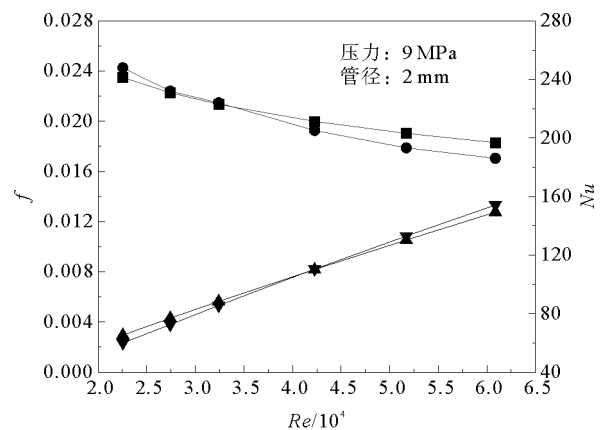


图6 模型验证结果

—■—  $f$  模拟结果; —●—  $f$  实验结果;  
—▲—  $Nu$  模拟结果; —▼—  $Nu$  实验结果

## 2 结果与讨论

### 2.1 翼型肋片类型的影响

研究了在 PCHE 通道中采用不同型号翼型肋片对其流动和换热特性的影响。选取了 NACA0010、NACA0020、NACA0025、NACA0030、NACA0040 和 NACA0050 6 种 NACA00XX 标准翼型作为肋片,所有型号翼型肋片的  $L_c$  和  $t$  分别取 4 和 1 mm,  $L_t$  依次取 0.4、0.8、1.0、1.2、1.6 和 2.0 mm。通道的长、宽和高分别为 220、6 和 1 mm。不同型号翼型肋片布置的几何参数均相同,  $L_s$ 、 $L_v$  和  $L_h$  分别为 4、3 和 8 mm。沿流动方向布置 20 排翼型肋片,  $Re_{in}$  范围为  $1.0 \times 10^4 \sim 1.4 \times 10^5$ 。

图 7 给出了不同型号翼型肋片的  $j$  和  $f$  的对比情况。结果表明:不同型号翼型肋片的  $j$  和  $f$  均随  $Re_{in}$  的增大而减小;不同型号翼型通道的  $j$  和  $f$  均大于光滑流道; $j$  和  $f$  均随  $L_t$  的增大而增大。由于随着  $L_t$  的增加,翼型通道最小横截面处的面积会随之减小,在  $Re_{in}$  相同的情况下,最小横截面处的流体速度便会增大,因此通道局部的换热性能得到增强,但是相应的压降也会有所增加。可见,在无肋光滑通道内加入不同型号的翼型肋片,提高换热性能的同时增大了流动压降。

以光滑通道作为基准,图 8 给出了不同型号翼型肋片通道的综合性能的对比情况。结果表明,不同型号翼型肋片通道的  $H$  因子均随  $Re_{in}$  的增大而减小。NACA0010、NACA0020、NACA0025、NACA0030、NACA0040 和 NACA0050 的综合性能与光滑通道的平均相对偏差依次为 13.93%、17.39%、17.54%、16.56%、13.65% 和 8.90%。可见 NACA0025 翼型通道的综合换热性能最佳,其次为 NACA0020 和

NACA0030;NACA0050 的综合性能最差,NACA0010 和 NACA0040 的次之。由此可见,分析翼型通道的综合换热性能时,翼型的最大翼面厚度并非越厚越好,也不是越薄越好,而是存在最佳值。下文研究中均采用 NACA0025 翼型肋片。

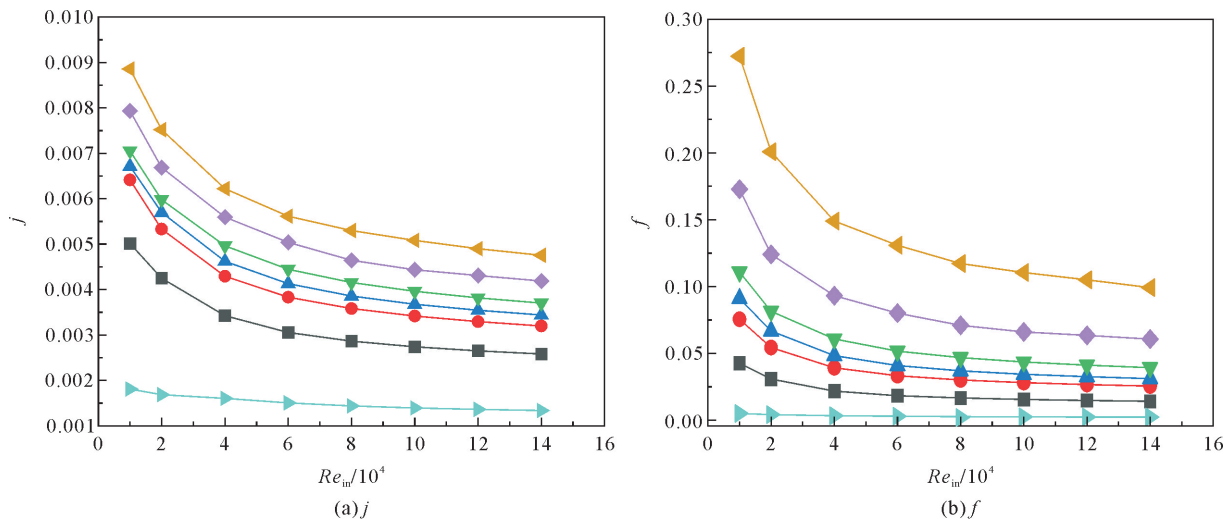


图 7 不同型号翼型肋片通道的流动和换热性能

—■— NACA0010; —●— NACA0020; —▲— NACA0025; —▼— NACA0030; —◆— NACA0040; —▲— NACA0050; —◆— 光滑通道

## 2.2 均匀分布翼型肋片布局的影响

### 2.2.1 交错间距 $L_s$

图 9 给出了  $L_s$  对翼型通道内流动和换热性能的影响。 $L_v$  和  $L_h$  设为定值,分别为 3 和 8 mm。 $\zeta_s$  的取值范围为 0~1。 $\zeta_s = 0$  时,翼型肋片顺排布置; $\zeta_s = 1$  时,翼型肋片完全交错布置。结果表明: $j$  随  $\zeta_s$  的变化不大,意味着交错排列对传热性能的影响有限,这是由于随着  $\zeta_s$  的增加,换热面积保持不变;而  $f$  随  $\zeta_s$  的增大先降低后增大, $\zeta_s = 0.8$  时  $f$  最小。翼型肋片的交错排列有助于形成平滑的流动通道,提高了流动的均匀性,同时具有流线型的翼型肋片避免了涡流分离的形成,从而使交错排列的流动阻力小于顺排的流动阻力。

图 10 给出了不同  $L_s$  的综合性能对比情况,其中顺排布置的综合性能作为比较基准。结果表明,交错排列的综合性能随交错间距的增大而增大。除了低  $Re_{in}$  和低  $L_s$  的 5 个综合性能数据外,交错排列的综合性能大于顺排布置的,翼型肋片完全交错布置时(即  $\zeta_s = 1.0$ )的综合性能最优。因此,下文研究中取  $\zeta_s = 1.0$ 。

### 2.2.2 垂直间距 $L_v$

图 11 给出了翼型肋片  $L_v$  对流动和换热性能的影响。 $L_s$  和  $L_h$  分别取 4.0 和 8.0 mm, $\zeta_v$  的取值范围为 1.5~4.5。数值模型的长度和高度分别为 220 和 1 mm; $L_h$  保持不变时,PCHE 内翼型肋的密度和数值模型的宽度随  $L_v$  而变,数值模型的宽度为  $L_v$  的 2 倍。结果表明, $j$  和  $f$  均随  $L_v$  的增大而降低。随着垂直间距的增大,热交换面积减小,流体扰动减弱,导致流动和换热性能降低。在所研究的雷诺数范围内,当  $\zeta_v$  由 1.5 增大到 4.5 时, $j$  和  $f$  的平均值分别降低了 42.2% 和 290.6%。此外, $L_v$  对流动和换热性能的影响随  $L_v$  的增大而减小。

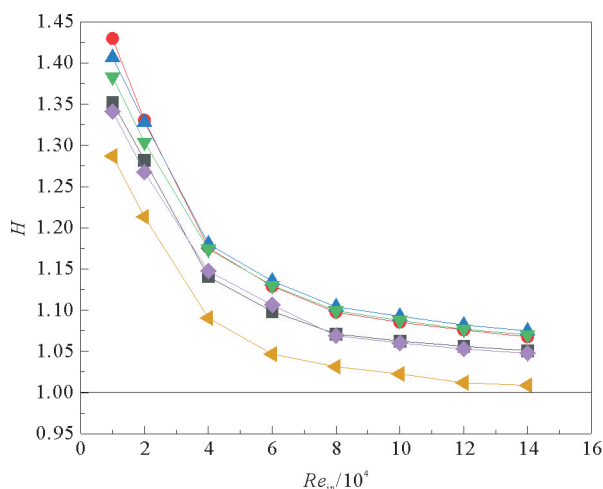


图 8 不同型号翼型肋片通道的综合性能对比

—■— NACA0010; —●— NACA0020; —▲— NACA0025; —▼— NACA0030; —◆— NACA0040; —▲— NACA0050

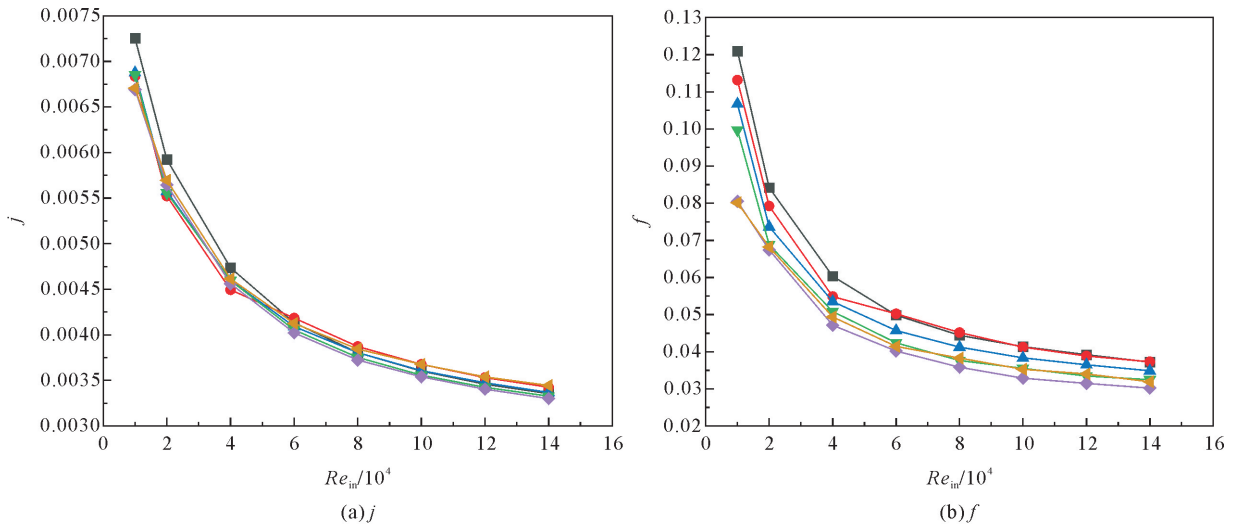


图9 不同交错间距的流动和换热性能

—■—  $\zeta_v=0$ ; —●—  $\zeta_v=0.2$ ; —▲—  $\zeta_v=0.4$ ; —▼—  $\zeta_v=0.6$ ; —◆—  $\zeta_v=0.8$ ; —◀—  $\zeta_v=1.0$

图12给出了不同 $L_v$ 的综合性能对比情况。 $Re_{in}$ 相同时,当 $\zeta_v$ 从1.5增大到4.0时,综合性能随 $\zeta_v$ 的增大而增大,当 $\zeta_v$ 从4.0增大到4.5时,综合性能反而降低,可见 $\zeta_v$ 为4.0时的综合性能最佳。下文研究中取 $\zeta_v=4.0$ 。

### 2.2.3 水平间距 $L_h$

图13给出了 $L_h$ 对流动和换热性能的影响。 $\zeta_s$ 和 $\zeta_v$ 分别取1.0和4.0, $\zeta_h$ 的取值范围为2~11。数值模型的长、宽和高分别为220、8和1 mm,翼型肋片的数量随 $L_h$ 的不同而不同。结果显示: $j$ 和 $f$ 均随 $L_h$ 的增大而降低,且 $L_h$ 对流动和换热性能的影响随 $L_h$ 的增大而减小。在所研究的雷诺数范

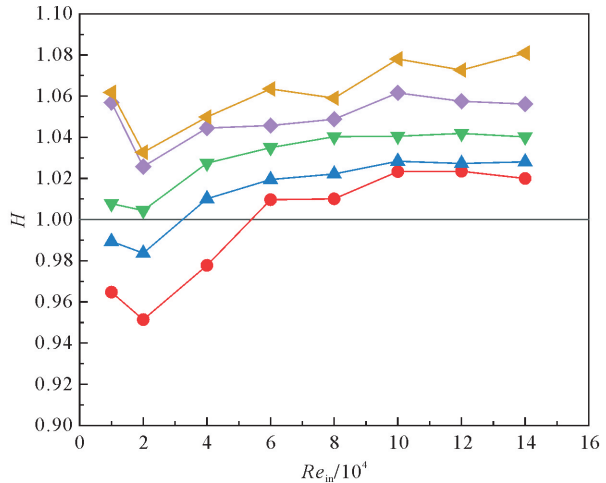


图10 不同交错间距的综合性能对比

—●—  $\zeta_s=0.2$ ; —▲—  $\zeta_s=0.4$ ; —▼—  $\zeta_s=0.6$ ; —◆—  $\zeta_s=0.8$ ; —◀—  $\zeta_s=1.0$

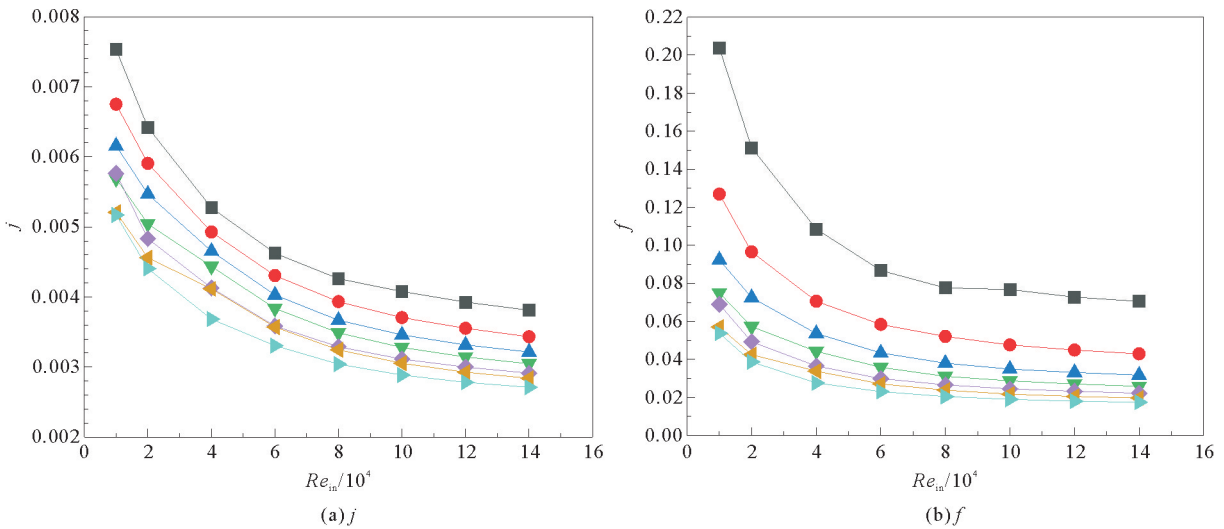


图11 不同垂直间距的流动和换热性能

—■—  $\zeta_v=1.5$ ; —●—  $\zeta_v=2.0$ ; —▲—  $\zeta_v=2.5$ ; —▼—  $\zeta_v=3.0$ ; —◆—  $\zeta_v=3.5$ ; —◀—  $\zeta_v=4.0$ ; —▶—  $\zeta_v=4.5$

围内,当  $\zeta_h$  从 2 增大到 11 时,  $j$  和  $f$  的平均值分别下降了 22.8% 和 59.3%。这是由于肋片数量随  $L_h$  的增大而减少,热交换面积减少,同时削弱了流动扰动,导致  $j$  和  $f$  变小。

图 14 显示了不同  $L_h$  的综合性能对比情况。结果显示,当  $Re_{in}$  大于  $2 \times 10^4$  时,  $\zeta_h$  为 2 时综合性能最差。当  $\zeta_h$  大于 3.0 时,综合性能变化不大。  $\zeta_h$  改变了相邻肋片间的通道大小,由于流线型的外形,翼型肋片后部很难形成尾流涡旋,意味着沿着流动方向前面的肋片对后面的肋片影响很小。

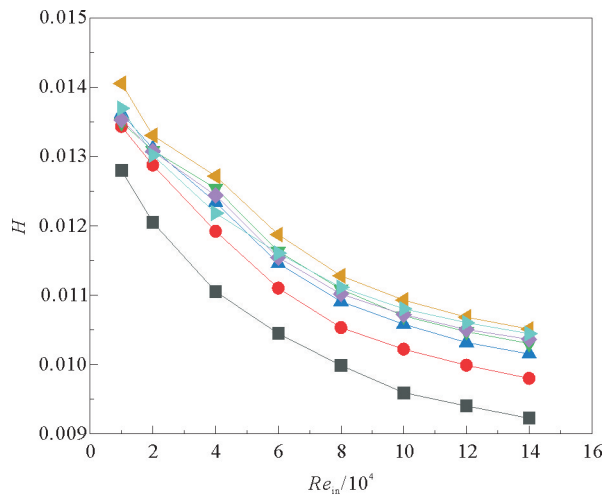


图 12 不同垂直间距的综合性能对比

—■—  $\zeta_v=1.5$ ; —●—  $\zeta_v=2.0$ ; —▲—  $\zeta_v=2.5$ ; —▼—  $\zeta_v=3.0$ ;  
—◆—  $\zeta_v=3.5$ ; —▲—  $\zeta_v=4.0$ ; —▲—  $\zeta_v=4.5$

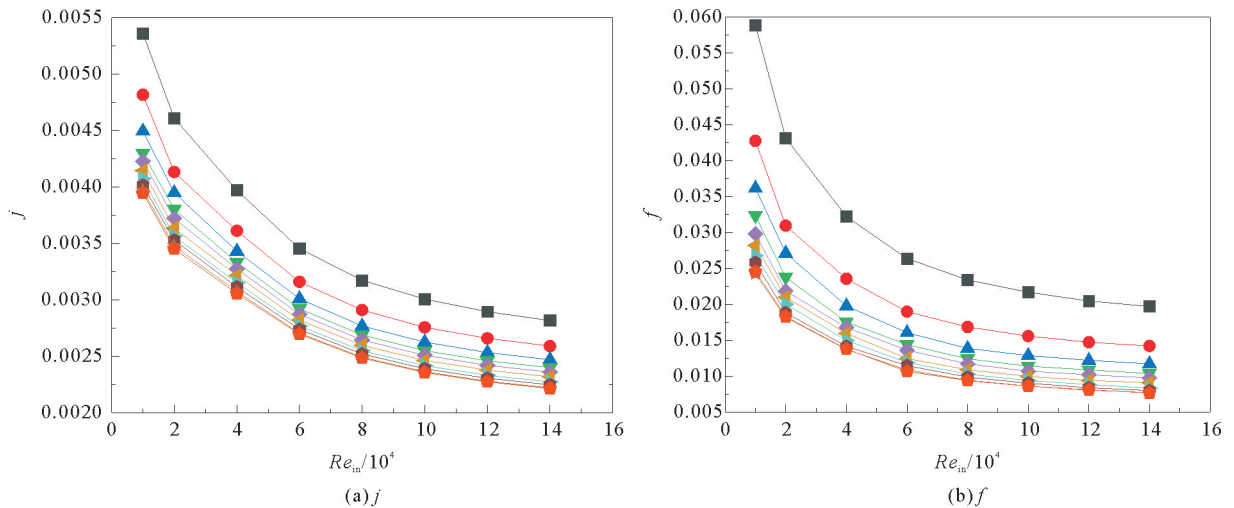


图 13 不同水平间距的流动和换热性能

—■—  $\zeta_h=2$ ; —●—  $\zeta_h=3$ ; —▲—  $\zeta_h=4$ ; —▼—  $\zeta_h=5$ ; —◆—  $\zeta_h=6$ ; —▲—  $\zeta_h=7$ ; —▲—  $\zeta_h=8$ ; —●—  $\zeta_h=9$ ; —★—  $\zeta_h=10$ ; —◆—  $\zeta_h=11$

### 2.3 非均匀分布翼型肋片的流动和换热性能

在 PCHE 通道中,超临界甲烷的温度在加热过程中会逐渐升高,其热物性在准临界温度附近发生剧烈变化。图 15 给出了沿主流方向翼型肋片均匀分布时计算域中心截面处的  $c_p$  分布。每排翼型肋片首部所在宽度方向截面的平均  $c_p$  分布如图 16 所示,其中  $N$  为沿流动方向翼型肋片排数。由图 15 和图 16 可见,沿主流方向  $c_p$  先增大后减小,第 6 排翼型肋片所在截面处的  $c_p$  平均值大于其他排,表明拟临界点附近需要翼型通道具有更大的换热能力。因此,在肋片数量一定的情况下,翼型肋片采用非均匀的分布形式

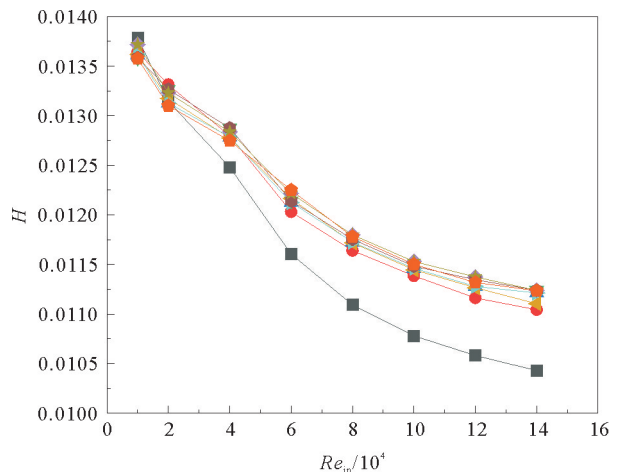


图 14 不同水平间距的综合性能对比

—■—  $\zeta_h=2$ ; —●—  $\zeta_h=3$ ; —▲—  $\zeta_h=4$ ; —▼—  $\zeta_h=5$ ; —◆—  $\zeta_h=6$ ;  
—▲—  $\zeta_h=7$ ; —▲—  $\zeta_h=8$ ; —●—  $\zeta_h=9$ ; —★—  $\zeta_h=10$ ; —◆—  $\zeta_h=11$

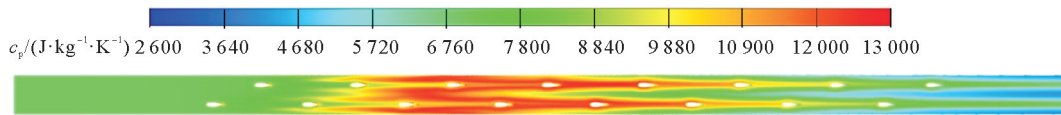


图15 Case 1 中心截面处的定压比热容分布

有望进一步强化 PCHE 内超临界流体的换热。在考虑综合性能和肋片个数足够体现肋片非均匀分布影响的前提下,选取  $\zeta_s$ 、 $\zeta_v$  和  $\zeta_h$  分别为 1、4 和 5 的均匀分布形式为优化基准。基于超临界甲烷的热物性沿流动方向的变化,提出了 3 种前密后疏和 3 种前疏后密的翼型肋片分布形式,将流动和换热性能与均匀分布的进行对比。所有肋片分布形式的数值模型尺寸、肋片数量以及第 1 排和最后 1 排肋片位置均相同。表 1 中列出了不同肋片分布的  $L_s$  布置情况,所有肋片分布形式中  $L_h=2L_s$ ,  $\zeta_v=4.0$ 。

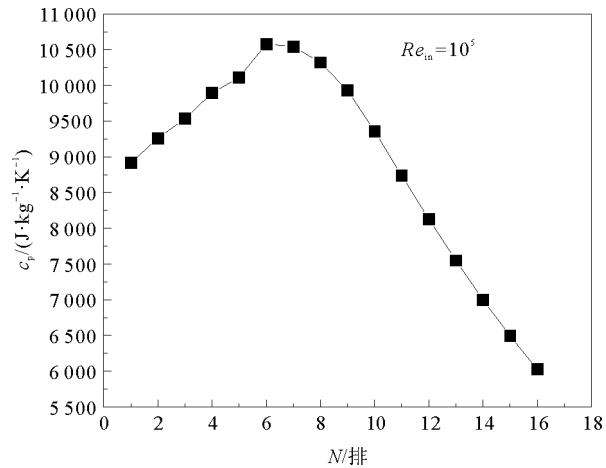


图16 Case 1 各排肋片所在横截面处的平均定压比热容

表 1 不同的翼型肋片分布

序号	翼型肋片分布	$L_{s,N}/\text{mm}$
Case 1	均匀	$L_{s,N(N=1-15)}=10$
Case 2	前密后疏	$L_{s,N(N=1-7)}=8.0$ , $L_{s,N(N=8)}=10.0$ , $L_{s,N(N=9-15)}=12.0$
Case 3	前密后疏	$L_{s,N(N=1-7)}=5.5$ , $L_{s,N(N=8)}=10.0$ , $L_{s,N(N=9-15)}=14.5$
Case 4	前密后疏	$L_{s,N(N=1-7)}=3.0$ , $L_{s,N(N=8)}=10.0$ , $L_{s,N(N=9-15)}=17.0$
Case 5	前疏后密	$L_{s,N(N=1-7)}=12.0$ , $L_{s,N(N=8)}=10.0$ , $L_{s,N(N=9-15)}=8.0$
Case 6	前疏后密	$L_{s,N(N=1-7)}=14.5$ , $L_{s,N(N=8)}=10.0$ , $L_{s,N(N=9-15)}=5.5$
Case 7	前疏后密	$L_{s,N(N=1-7)}=17.0$ , $L_{s,N(N=8)}=10.0$ , $L_{s,N(N=9-15)}=3.0$

图 17 给出了不同翼型肋片分布时流动和换热性能的对比情况。图 17(a)表明,  $Re_{in}$  相同时, 3 个前密后疏分布的  $j$  因子均大于均匀分布的, 3 个前疏后密分布的  $j$  因子均小于均匀分布的。Case4 的  $j$  因子最大, 其次是 Case3 和 Case2; Case7 的  $j$  因子最小, 其次是 Case6 和 Case5。在所研究的  $Re_{in}$  范围内, 与均匀分布相比, Case2—Case7 的平均相对偏差分别为 0.7%、1.8%、3.9%、-0.6%、-1.3% 和 -1.7%。对比表明: 前密后疏的翼型肋片分布改善了翼型通道的换热性能, 而前疏后密的分布形式削弱了换热性能。图 17(b)显示了不同翼型肋片分布的  $f$  因子对比情况, 结果表明: Case2、Case3、Case4、Case5、Case6 和 Case7 的  $f$  因子与均匀分布的平均相对偏差分别为 -0.1%、0.2%、4.4%、-0.9%、-0.6% 和 2.2%, 其中 Case4 的  $f$  因子最大。

以均匀分布的流动和换热性能作为比较基准, 将非均匀分布的翼型肋片综合性能的对比情况示于图 18。结果表明: 与均匀分布相比, 当翼型肋片前密后疏分布时, 提高了超临界甲烷的综合性能; 当翼型肋片前疏后密分布时, 削弱了综合性能。Case2—Case7 的综合性能与均匀分布的平均相对偏差分别为 0.74%、1.72%、2.41%、-0.30%、-1.07% 和 -2.35%。肋片前密后疏的分布中, Case4 的综合性能最佳, 其次是 Case3 和 Case2; 前疏后密的分布中, Case7 的综合性能最差, 其次是 Case6 和 Case5。因此, 肋片数量一定时, 在准临界点附近布置更密集的翼型肋片可以提高翼型通道的综合性能。

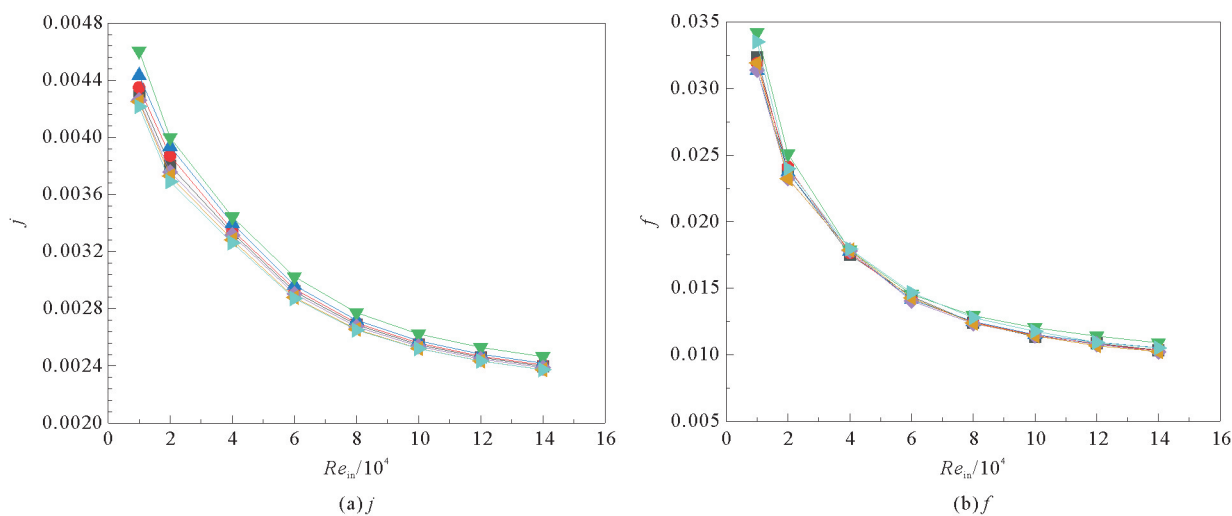


图 17 不同翼型肋片分布的流动和换热性能

—■— Case 1; —●— Case 2; —▲— Case 3; —▼— Case 4; —◆— Case 5; —◀— Case 6; —▶— Case 7

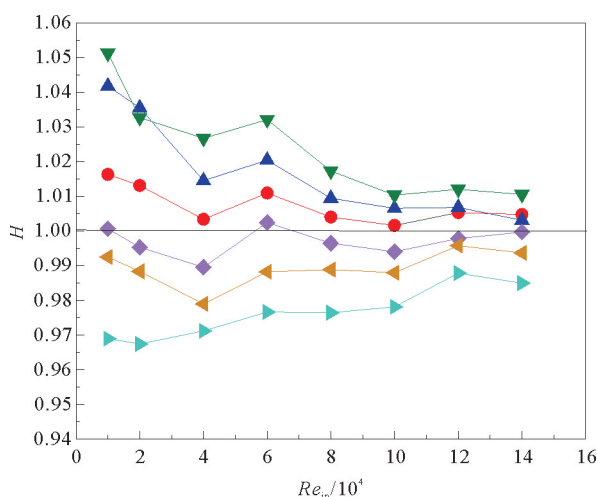


图 18 不同翼型肋片分布的综合性能对比

前密后疏: —●— Case 2; —▲— Case 3; —▼— Case 4  
前疏后密: —◆— Case 5; —◀— Case 6; —▶— Case 7

### 3 结论

本文采用数值模拟方法研究了超临界甲烷在翼型通道 PCHE 内的流动和换热特性,对比分析了翼型肋片类型、肋片分布结构参数及非均匀分布形式对传热因子、摩擦因子及综合换热性能的影响,主要结论如下:

1) 不同型号翼型肋片通道的传热因子和摩擦因子均随最大翼面厚度的增大而增大,均大于光滑通道,且 NACA0025 翼型通道的综合换热性能最佳。

2) 无量纲交错间距和无量纲垂直间距分别为 1 和 4 时,翼型通道具有最佳的综合性能;无量纲水平间距为 2 时,综合性能最差,大于 3 时,对综合性能的影响不大。

3) 肋片数量一定时,与均匀分布相比,翼型肋片前密后疏排布时提高了综合性能,前疏后密排布时降低了综合性能。分析表明,在拟临界点附近布置更密集的肋片可以进一步提高翼型通道的综合性能。

**参考文献(References):**

- [1] POPOV D,FIKIIN K,STANKOV B,et al. Cryogenic heat exchangers for process cooling and renewable energy storage: A review[J]. *Applied Thermal Engineering*,2019,153:275-290.
- [2] XU X Y,MA T,LI L,et al. Optimization of fin arrangement and channel configuration in an airfoil fin PCHE for supercritical CO<sub>2</sub> cycle[J]. *Applied Thermal Engineering*,2014,70(1):867-875.
- [3] MYLAVARAPU S K,SUN X,GLOSUP R E,et al. Thermal hydraulic performance testing of printed circuit heat exchangers in a high-temperature helium test facility[J]. *Applied Thermal Engineering*,2014,65(1/2):605-614.
- [4] BAEK S,HWANG G,JEONG S,et al. Development of compact heat exchanger for LNG FPSO[C]//The Twenty-First International Offshore and Polar Engineering Conference. *OnePetro*,2011.
- [5] REAY D,RAMSHAW C,HARVEY A. *Process intensification:Engineering for efficiency,sustainability and flexibility*[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann,2013.
- [6] NIKITIN K,KATO Y,NGO L. Printed circuit heat exchanger thermal-hydraulic performance in supercritical CO<sub>2</sub> experimental loop[J]. *International Journal of Refrigeration*,2006,29(5):807-814.
- [7] TSUZUKI N,KATO Y,ISHIDUKA T. High performance printed circuit heat exchanger[J]. *Applied Thermal Engineering*,2007,27(10):1702-1707.
- [8] TSUZUKI N,UTAMURA M,NGO T L. Nusselt number correlations for a microchannel heat exchanger hot water supplier with S-shaped fins[J]. *Applied Thermal Engineering*,2009,29(16):3299-3308.
- [9] KIM D E,KIM M H,CHA J E,et al. Numerical investigation on thermal-hydraulic performance of new printed circuit heat exchanger model[J]. *Nuclear Engineering and Design*,2008,238(12):3269-3276.
- [10] YOON S H,NO H C,KANG G B. Assessment of straight, zigzag, S-shape, and airfoil PCHEs for intermediate heat exchangers of HTGRs and SFRs[J]. *Nuclear Engineering and Design*,2014,270:334-343.
- [11] MA T,XIN F,LI L,et al. Effect of fin-endwall fillet on thermal hydraulic performance of airfoil printed circuit heat exchanger[J]. *Applied Thermal Engineering*,2015,89:1087-1095.
- [12] CHU W X,LI X H,MA T,et al. Study on hydraulic and thermal performance of printed circuit heat transfer surface with distributed airfoil fins[J]. *Applied Thermal Engineering*,2017,114:1309-1318.
- [13] CUI X Y,GUO J F,HUAI X L,et al. Numerical study on novel airfoil fins for printed circuit heat exchanger using supercritical CO<sub>2</sub>[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,2018,121:354-366.
- [14] ZHAO Z C,ZHAO K,JIA D D,et al. Numerical investigation on the flow and heat transfer characteristics of supercritical liquefied natural gas in an airfoil fin printed circuit heat exchanger[J]. *Energies*,2017,10(11):1828.
- [15] CHU W X,BENNETT K,CHENG J,et al. Thermo-hydraulic performance of printed circuit heat exchanger with different cambered airfoil fins[J]. *Heat Transfer Engineering*,2020,41(8):708-722.
- [16] TANG L H,PAN J,SUNDÉN B. Investigation on thermal-hydraulic performance in a printed circuit heat exchanger with airfoil and vortex generator fins for supercritical liquefied natural gas[J]. *Heat Transfer Engineering*,2021,42(10):803-823.
- [17] TANG L H,CUI L,SUNDÉN B. Optimization of fin configurations and layouts in a printed circuit heat exchanger for supercritical liquefied natural gas near the pseudo-critical temperature[J]. *Applied Thermal Engineering*,2020,172:115131.
- [18] CHEN F,ZHANG L,HUAI X,et al. Comprehensive performance comparison of airfoil fin PCHEs with NACA 00XX series airfoil[J]. *Nuclear Engineering and Design*,2017,315:42-50.
- [19] ZHU C Y,GUO Y,YANG H Q,et al. Investigation of the flow and heat transfer characteristics of helium gas in printed circuit heat exchangers with asymmetrical airfoil fins[J]. *Applied Thermal Engineering*,2021,186:116478.
- [20] HAN Z,GUO J,LIAO H,et al. Numerical investigation on the thermal-hydraulic performance of supercritical CO<sub>2</sub> in a modified airfoil fins heat exchanger[J]. *The Journal of Supercritical Fluids*,2022,187:105643.
- [21] PALKO D,ANGLART H. Theoretical and numerical study of heat transfer deterioration in high performance light water reactor[J]. *Science and Technology of Nuclear Installations*,2008,2008:405072.
- [22] DANG C,HIHARA E. In-tube cooling heat transfer of supercritical carbon dioxide Part 1: Experimental measurement[J]. *International Journal of Refrigeration*,2004,27(7):736-747.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)