

# 不同类型翅片对印刷电路板式换热器性能的影响研究

范成<sup>1,2</sup>, 陆道纲<sup>1,2</sup>, 曹琼<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>华北电力大学核科学与工程学院, 北京

<sup>2</sup>非能动核能安全技术北京市重点实验室, 北京

收稿日期: 2026年3月9日; 录用日期: 2026年3月19日; 发布日期: 2026年4月20日

## 摘要

随着印刷电路板式换热器(PCHE)在小型模块化反应堆系统中的日益广泛应用, 其热工水力性能与结构可靠性已成为影响整个能量转换系统经济性与安全性的关键因素。目前, 关于不同翅片结构对PCHE换热效率、流动阻力及力学性能综合影响的研究尚不充分。为此, 本研究采用热-流-固多物理场耦合方法, 系统分析了五种典型翅片构型在氦-氩混合工质作用下的综合特性。首先, 本研究验证了数值模拟方法的准确性; 其次, 对比了五种类型翅片的换热能力与流动阻力, 其中宽体翼型(NACA 0020)的换热效果最好, 开槽纺锤型的流动阻力最小; 最后, 对比分析了五种翅片的结构强度。研究发现, 总应力中换热器的机械应力占主要部分, 芯体的热应力相对较小。对于相同外形的换热器, 内部所有翅片顶面面积占比越大, 翅尖平均机械应力越小。基于ASME规范的应力评估表明, 所有构型均满足基本强度要求, 但安全裕度差异显著, 翅片面积占比最大的宽体翼型结构安全系数最高, 而部分为追求低流阻或强化传热设计的新型翅片, 因局部几何弱化导致安全系数接近工程下限。

## 关键词

印刷电路板式换热器, 翼型流道, 氦氩工质, 应力分析

# Study on the Effect of Different Fin Types on the Performance of Printed Circuit Heat Exchangers

Cheng Fan<sup>1,2</sup>, Daogang Lu<sup>1,2</sup>, Qiong Cao<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing

<sup>2</sup>Beijing Key Laboratory of Passive Safety Technology for Nuclear Energy, Beijing

Received: March 9, 2026; accepted: March 19, 2026; published: April 20, 2026

文章引用: 范成, 陆道纲, 曹琼. 不同类型翅片对印刷电路板式换热器性能的影响研究[J]. 核科学与技术, 2026, 14(2): 37-49. DOI: 10.12677/nst.2026.142004

## Abstract

With the increasing application of printed circuit heat exchangers (PCHEs) in small modular reactor systems, their thermal-hydraulic performance and structural reliability have become key factors affecting the economy and safety of the entire energy conversion system. Currently, research on the comprehensive effects of different fin structures on the heat transfer efficiency, flow resistance, and mechanical performance of PCHEs remains insufficient. To address this, the present study employs a thermal-hydraulic-structural multi-physics coupling method to systematically analyze the comprehensive characteristics of five typical fin configurations under a helium-xenon mixture working fluid. First, the accuracy of the numerical simulation method was validated. Second, the heat transfer performance and flow resistance of the five fin types were compared. Among these, the wide-body airfoil (NACA 0020) exhibited the best heat transfer effect, while the slotted spindle type showed the lowest flow resistance. Finally, the structural strength of the five fin types was compared and analyzed. The study found that mechanical stress constitutes the main part of the total stress in the heat exchanger, while the thermal stress in the core is relatively small. For heat exchangers with the same external shape, a larger proportion of the top surface area of all internal fins correlates with a lower average mechanical stress at the fin tips. Stress evaluations based on the ASME code indicate that all configurations meet the basic strength requirements, but the safety margins vary significantly. The wide-body airfoil, with the largest fin area proportion, has the highest safety factor. In contrast, some novel fins designed for low flow resistance or enhanced heat transfer exhibit safety factors approaching the minimum engineering requirement due to localized geometric weaknesses.

## Keywords

Printed Circuit Heat Exchanger, Airfoil-Shaped Channels, Helium-Xenon Fluid, Stress Analysis

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

随着全球能源需求的与日俱增,小型模块化反应堆(Small Modular Reactors, SMRs)因其部署灵活、初始投资低及适应多元场景等优势,在偏远地区能源供应、海洋开发及特种能源保障等领域展现出广阔应用前景[1]。在氦氙布雷顿循环系统中,中间换热器(或称回热器)作为系统核心部件,其性能直接影响整个能量转换系统的效率和紧凑性。印刷电路板式换热器(Printed Circuit Heat Exchanger, PCHE)通过独特的光化学蚀刻与扩散焊接技术制造,具有高比表面积(可超过  $2500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ )及卓越的耐压与耐高温性能(典型工况下可耐受  $60 \text{ MPa}$ 、 $800^\circ\text{C}$ ),在高温、高压的极端条件下表现出良好的可靠性[2]。

PCHE 的热工水力性能在很大程度上取决于其内部流道结构的设计。从流动形态角度,PCHE 流道可划分为连续型流道与间断型翅片流道两大类。早期研究多集中于连续型流道,如 Z 字型通道和波浪型通道。波浪型通道通过平滑的弧形转向替代 Z 字型的锐角转折,被证实可比 Z 字型通道降低约 48.4% 的压损,同时保持相当的传热性能[3]。然而,为获得更高的综合性能,研究者逐渐将重点转向间断型翅片结构。Tsuzuki [4]率先提出的 S 形翅片通道,其摩擦阻力约为传统 Z 字型通道的  $1/4\sim 1/5$ ,展现出显著的减阻效果。Kim [5]引入的翼型翅片通道借鉴了航空翼型的流线型设计,能基本消除流动分离,使压损进一步大幅降低。Jin [6]提出的开槽纺锤形翅片不仅将摩擦因子较标准翼型降低了约 20%,还因开槽设计增大

了传热面积,使整体热工性能得到综合提升。这些研究大多聚焦于翅片的热工水力性能,而对其在氦氘工质下的应力特性研究相对不足。

本文旨在采用热-流-固耦合的方法[7],系统研究氦氘工质条件下宽体翼型、窄体翼型、变体翼型、菱形和开槽纺锤形五种典型间断型翅片的稳态应力分布特性。通过分析不同翅片形状的应力产生机制和高应力区域分布,为提高可靠性的氦氘 PCHE 设计提供理论依据,对于小型模块化反应堆能量转换系统的高效紧凑换热器来说,提供一些关于换热能力、压力损失和结构安全的综合类的分析。

## 2. 模拟方法和验证

### 2.1. 几何模型

如图 1(a)所示,为本次 PCHE 计算的模型示意图,采用两热夹一冷的基本结构,并且冷热流道流动方向互逆。翅片类型只改变冷侧流道,翅片形状如图 1(b)所示。其中 FIN-1 采用的翼型翅片编号为 NACA 0020,FIN-2 采用的是 NACA 0010,FIN-3 为新型翅片,与标准翅片区别在于后半部分,把原版 NACA 0020 翅片尾部的凸曲线对称地为内凹线,并且与最大内接圆相切且过渡平滑,FIN-4 则是为了降低压力损失提出的新型纺锤开槽式翅片,FIN-5 为菱形翅片,除开 FIN-2 外的最大圆直径都与 NACA 0020 一致,为 1.2 mm,而 FIN-2 的最大内接圆直径为 0.6 mm。翅片尺寸参数如表 1 所示,其中冷热侧通道高度都为 1 mm,且壁厚为 0.5 mm。

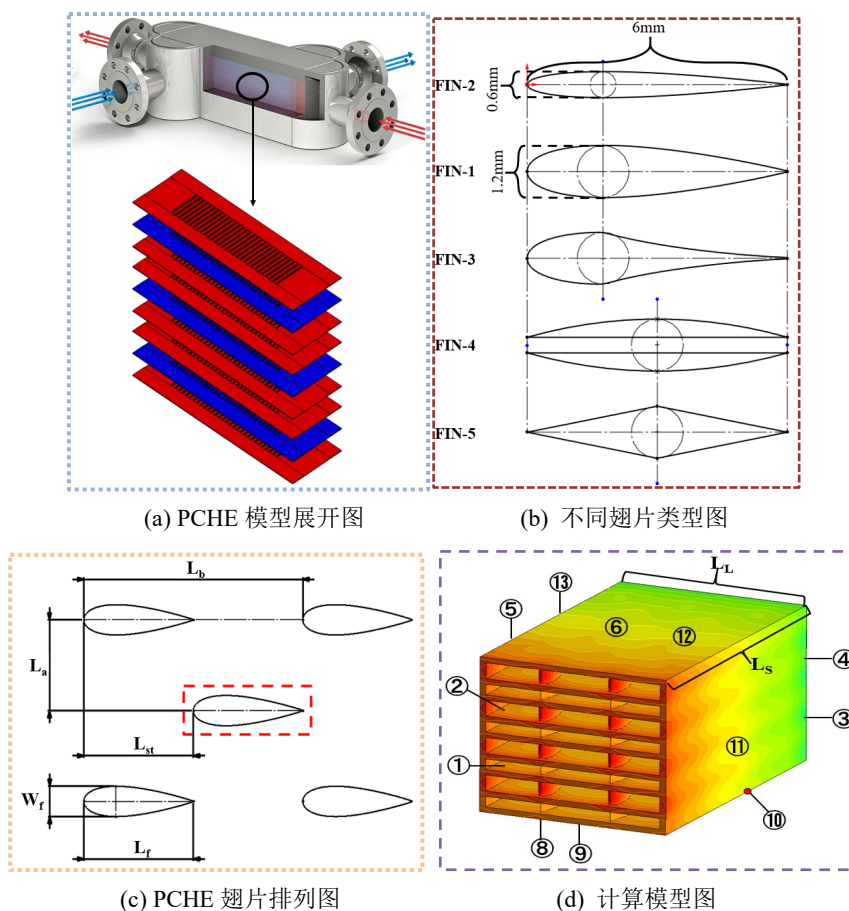


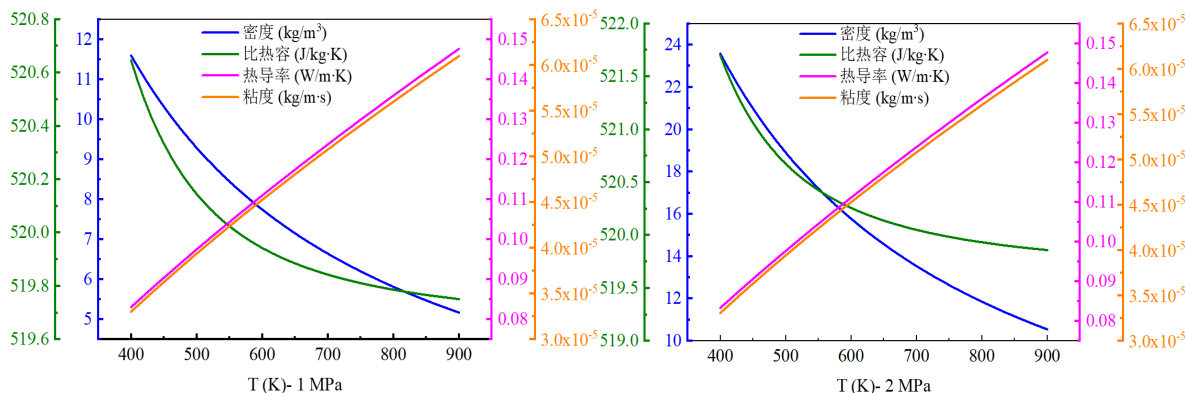
Figure 1. PCHE heat exchanger basic structure and fin types  
图 1. PCHE 换热器基本结构和翅片类型

**Table 1.** PCHE model parameters  
**表 1.** PCHE 模型参数

| $L_a/mm$ | $L_f/mm$ | $L_{st}/mm$ | $L_b/mm$ | $L_L/mm$ | $L_S/mm$ |
|----------|----------|-------------|----------|----------|----------|
| 3.6      | 6        | 6           | 12       | 61       | 19       |

## 2.2. 材料物性和应力评价标准

在本研究中，流动工质为 He-Xe，研究表明，特定混合比例的氦氙混合物能较好地兼顾换热性能和可压缩性，从而使压缩机和换热器的尺寸都较小。基于参考文献[8]，本课题组开发相关的两元气体物性混合程序，获得氦氙物性参数，如图 2 所示。



**Figure 2.** Graph of He-Xe physical properties as a function of temperature at 1 MPa and 2 MPa  
**图 2.** 在 1 MPa 与 2 MPa 下 He-Xe 物性随温度变化图

在进行应力评估时，根据本研究中的 PCHE 运行条件来看，适用于 ASME 规范第 III 卷第 1 分册 NH 分篇[9]针对高温部件规定的 A 级服役载荷等级作为应力评估标准。根据应力产生的原因，采用应力线性化把应力分解为一次应力，二次应力与峰值应力。其中一次应力主要由机械应力产生，它被分类为主膜应力( $P_m$ )，一次薄膜应力( $P_L$ )和一次弯曲应力( $P_b$ )，PCHE 通道中的流体压力是导致  $P_m$  的主要原因。设备的自重和支撑会引起弯曲，但这些载荷不在本文研究的范围。二次应力( $Q$ )主要是为了满足结构的连续性所需要的自平衡应力或者在结构不连续处，由机械应力和热膨胀差造成的。ASME BPVC 第 III 卷和 ASME BPVC 第 VIII 卷中，其评估公式为(1)~(5)。

$$P_m \leq S_t \tag{1}$$

$$P_L + P_b \leq 1.5S_t \tag{2}$$

$$P_m \leq KS_m \tag{3}$$

$$P_L + P_b \leq 1.5KS_m \tag{4}$$

$$P_b + P_m + Q_b + Q_m \leq 3S_m \tag{5}$$

其中  $S_m$  为 316 的许用应力， $K$  在本研究中取值为 1。

由公式(6)可以得出安全系数。

$$FS = \frac{S_m}{P_m + P_b + Q_b + Q_m} \tag{6}$$

本文所采用的固体材料为 316 不锈钢(SS316)，其导热系数为 16.27 W/(m·K)，密度为 8030 kg/m<sup>3</sup>，比

热容为 502.48 J/(kg·K)。对于 316 不同的许用应力( $S_m$ )与强度极限( $S_t$ )如表 2 所示。

**Table 2.** Allowable stress and ultimate strength of Alloy 316

**表 2.** 合金 316 的许用应力和强度极限

| $T/K$  | $S_t/MPa$ | $S_m/MPa$ |
|--------|-----------|-----------|
| 644.15 | 179.8     | 112.4     |
| 699.15 | 175.4     | 109.6     |
| 754.15 | 173.5     | 107.3     |
| 809.15 | 172.1     | 106.4     |

### 2.3. 数值方法和边界条件

本次模拟基于 Fluent，采用湍流(SST)k- $\omega$  模型，Simple 算法开展计算。本文假定流体的流动是稳态的，绝热边界条件。本文采用剪应力输运模型。根据调研小型模块反应堆实际运行温度 430 K~853 K 左右，在经过全长度的模拟后，选取最危险的区域高温出口段 56 mm 的截面温度作为进出口温度，在 CFD 中入口边界条件，冷侧每层流道的质量流量为 0.96 g/s，入口温度为 748 K。热侧每层流道的质量流量为 0.48 g/s，入口温度为 853 K。出口边界条件为压力出口，热侧压力为 1 MPa，冷侧压力为 2 MPa。对于 FEA 来说，固体温度和表面压力采用 CFD 计算所得到的温度场和压力场加载，并且程序自动控制添加弱弹簧，其边界条件如图 1(d)和表 3 计算边界条件所示。

**Table 3.** Calculation boundary conditions

**表 3.** 计算边界条件

| 边界条件       | Fluent          | 边界条件 | Ansys mechanical          |
|------------|-----------------|------|---------------------------|
| ①, ②       | Massflow inlet  | ⑨, ⑪ | Unconstrained             |
| ③, ④       | Pressure outlet | ⑩    | Imported body temperature |
| ⑤, ⑥, ⑦, ⑧ | Periodic        | ⑫, ⑬ | Unconstrained             |

由于翅片在换热器内为周期性排列，其中图 3 为最小的周期性单元。其中水力直径可写为：

$$D_h = \frac{4V_h}{S} \quad (7)$$

其中  $V_h$  和  $S$  分别为最小周期单元的体积与湿润面积，他们的计算公式如下，公式中  $L_a$  与  $S_a$  分别表示翅片截面周长与翅片截面面积， $H$  为翅片高度 1 mm。

$$V_h = (S_T S_L - S_a) H \quad (8)$$

$$S = 2(S_L S_T - S_a) + L_a H \quad (9)$$

范宁摩擦系数  $f$  的计算公式为：

$$f = \frac{\Delta p_f D_h}{2\rho_m u_m^2 L} \quad (10)$$

式中， $\Delta p_f$  为摩擦压降， $u_m$  为平均流速， $L$  为流道核心长度，

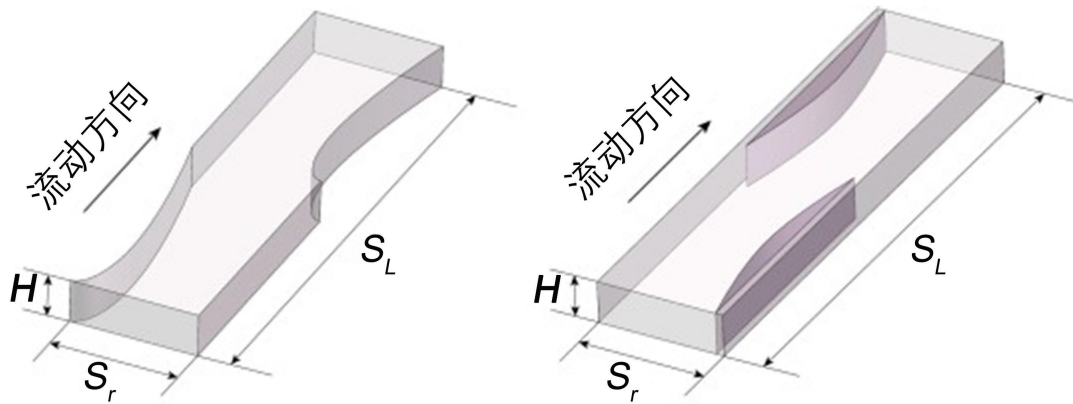


Figure 3. Minimum periodic unit  
图 3. 最小周期单元

此外，在本文中为了对比不同类型翅片的换热能力，使用科尔本因子( $j$  因子)能更好地比较不同结构的翅片下换热应能的优劣，其相关计算公式如下：

$$j = \frac{Nu}{Re Pr^{1/3}} \quad (11)$$

在以上公式中， $Nu$  代表努塞尔数， $Re$  代表雷诺数， $Pr$  代表普朗特数。

#### 2.4. 网格敏感性分析

如图 4(a)所示为网格的局部细节图，这五组网格中的每一组都在上、下墙以及翅片表面附近加入了边界层(流体与固体的接触面)，确保了壁面  $y^+$  值小于 1，从而可以准确捕获 PCHE 曲面附近的层流，并且对翅片尖端部分采用单独的网格加密。计算不同网格数量下的努塞尔数和单位长度下的压降。对于 FEA 模拟，采用上述最优网格尺寸计算得出的温度场与应力场加载到 Static Structural 中计算总应力。选取路径为图 4(b)所示，当路径上平均应力不再变化时，认为本文应力计算结果将与网格数量无关，后续模拟也将采用本节得出的最优尺寸。得出结果如图 5 所示，对于 CFD 计算网格为 465 万时，网格增加对  $Nu$  的变换较小；对于 FEA 计算时，当网格数量 167 万时，路径上的平均应力不再变化，后续计算将此网格数量。

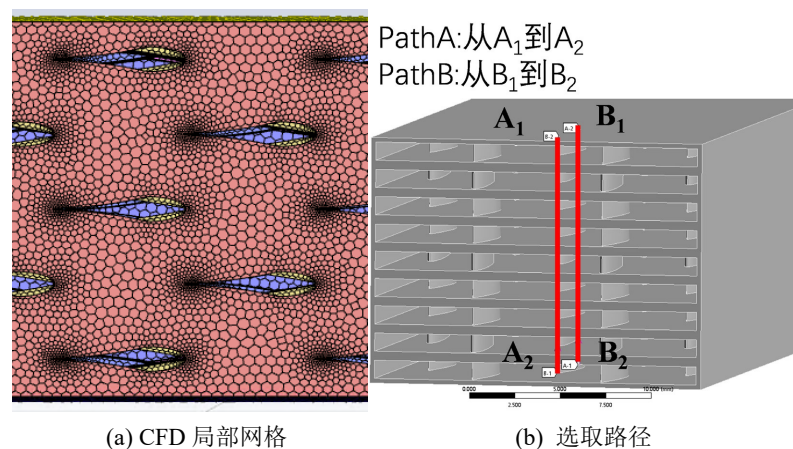


Figure 4. Computational mesh details and selected path illustration  
图 4. 计算网格细节与选取路径展示

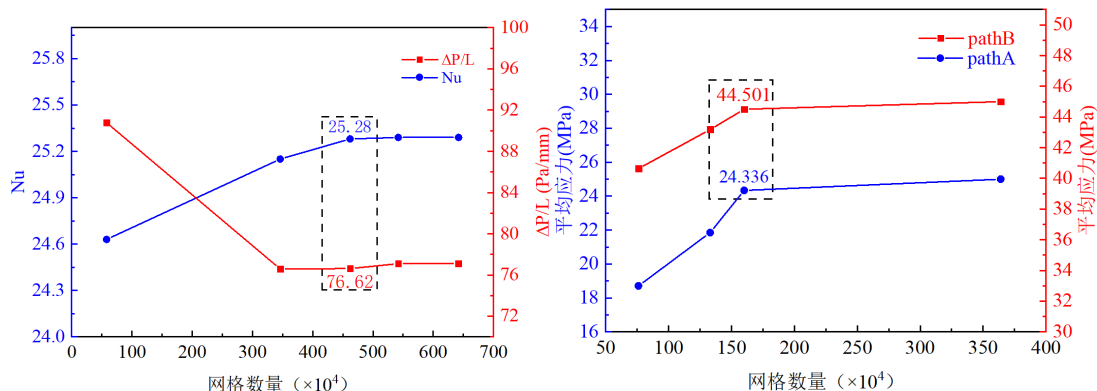


Figure 5. Mesh independence test for CFD and FEM computational models

图 5. CFD 和 FEM 计算模型网格无关性测试

## 2.5. 模型验证

为了验证 CFD 模拟方法的可靠性, 本次研究与两个结构等效直径的实验进行比较。提到的两个实验是 Taylor 等人的圆管加热实验和 Vitovsky 等人的准三角形通道实验, 本文验证模拟的方法与 Wang [10] 一致。表 4 详细说明了这两个实验的边界条件。相同的参数设置被应用于数值模拟, 得出的比较结果如图 6 所示, 图中可以看出 CFD 模拟结果与实验吻合良好, 具有较高可信度。

Table 4. Boundary conditions of the experiment

表 4. 实验的边界条件

| 实验者     | 序列     | $P_{out}$ (Pa) | $t_{in}$ (K) | $q_w$ ( $W/m^2$ ) | Re     |
|---------|--------|----------------|--------------|-------------------|--------|
| Taylor  | run707 | 928,019        | 298.8        | 157,094           | 34,443 |
| Makarov | Q6     | 403,000        | 298.7        | 12,993            | 29,524 |

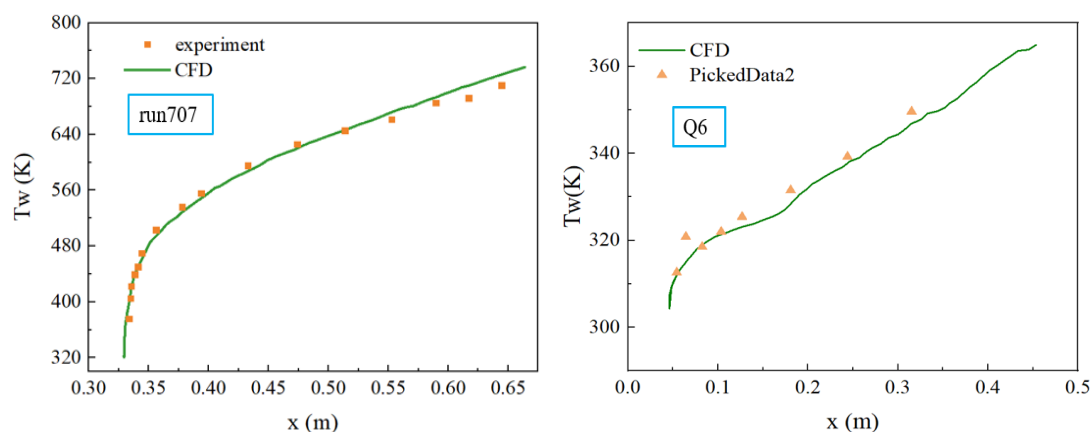


Figure 6. Comparison between experimental results and CFD model results

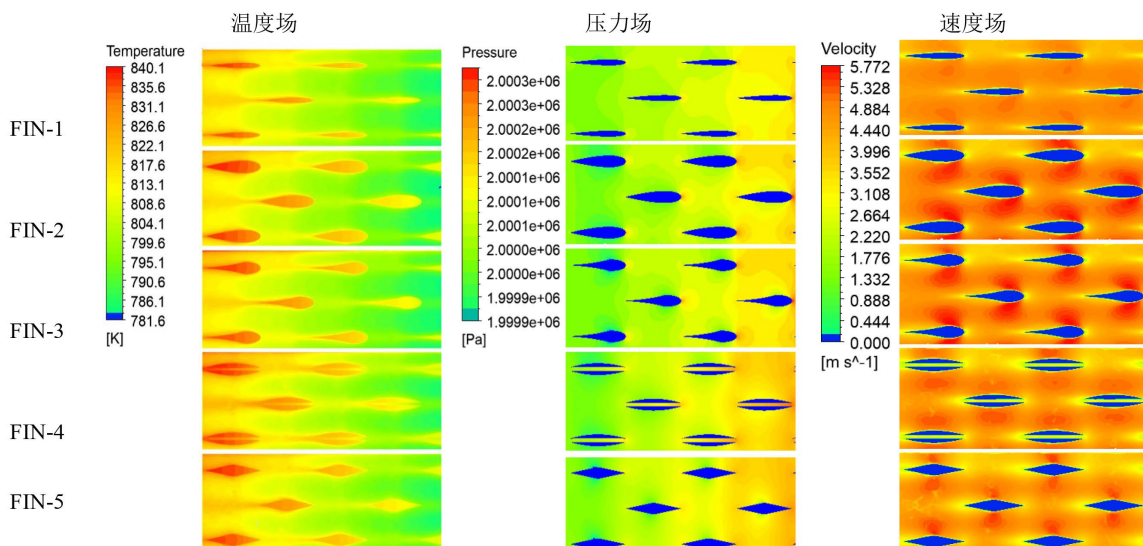
图 6. 实验结果和 CFD 计算模型结果比较

## 3. 计算结果和讨论

### 3.1. 热工流体参数分析

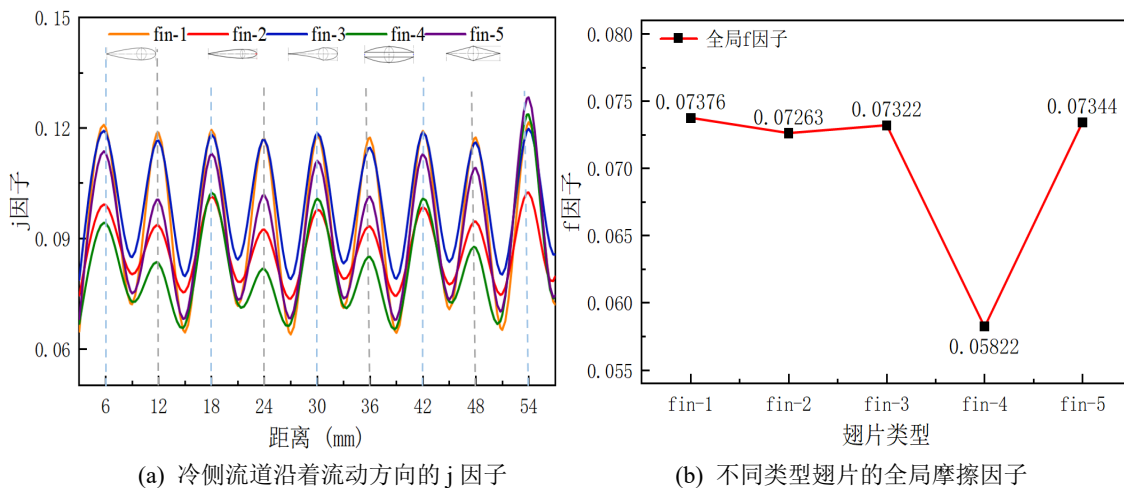
如图 7 所示, 展示了冷侧流道横截面的温度场和压力场。对于温度场可以看出换热器内部翅片部分

有较强的换热，在翅片头部有明显的颜色分层，表明此处为换热能力最明显区域，翅片尾部云图颜色过渡平缓，为换热相对缓慢。而对于压力场可以看出，翅片头部有明显红色部分，为来流撞击翅片头部的流动停滞区域。并且从速度场可以看出翅片在头部两侧有加速区域，翅片尾端可能存在流动分离现象。具体的换热能力和流动阻力接下来需要选取路径上的数据定量分析。



**Figure 7.** Flow field visualization of various types of fins  
**图 7.** 各种类型翅片流场可视化

为了更好地比较不同翅片的换热与流动阻力大小，在冷侧流道内每隔 3 mm 取一个流动截面，以此获得 20 个点位，得出的结果如图 8 所示。



**Figure 8.** Calculation results of heat transfer performance and flow resistance for different fins  
**图 8.** 不同翅片的换热能力和流动阻力计算结果

从图 8(a)中可以看出不同翅片换热能力最大的为 fin-1，其中 j 因子大最大的 fin-1 比最小的 fin-4 大了 7.7%。fin-4 的提出更多是为了降低流动阻力并提高换热系统的循环效率，从图 8(b)中可以看出 fin-4 相比于其他类型翅片有着显著降低的摩擦因子，对比于最大的 fin-1 降低了 21.1%，图 8 中虚线部分为翅

片首尾相接处，在此处出现明显的波峰，是由于在翅片前端出现的滞留现象会表现出更大的压降与更强的换热性能。而 fin-4 则是通过中间开槽出通道而有效减小流阻，同时开槽出的流道能提供更多的换热面积，使得 fin-4 的换热效果不会太差。

### 3.2. 机械应力结果

如图 9 所示为机械应力沿着路径的结果示意图，图中蓝色渐变区域和红色渐变区域分别代表处于不同的冷热通道之中的结果。单从两条路径均可以明显看出，最外侧热通道机械应力较高，这是因为两边受环境影响，通道内 1 MPa 与环境的压差使得应力呈现较大值。而在中间部分，可以看出蓝色渐变区域有明显的应力峰出现，这表明机械应力更多地集中于 2 MPa 的高压冷侧通道，在这之中翅片尖端或是翅片与板片连接处都有明显应力峰的出现。

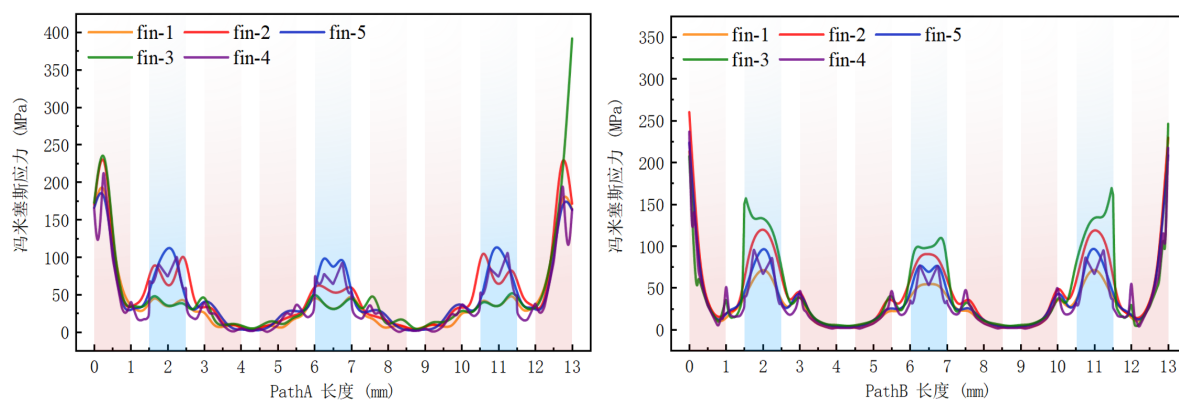


Figure 9. Mechanical stress path result diagram

图 9. 机械应力路径结果图

为了更好地了解机械应力与不同类型翅片有何关系，如图 10 所示，显示了不同翅片横截面积之比随着平均机械应力的变化图。其中翅片横截面积与流通截面积大小如表 5 所示，从左到右由大到小排列。

$$\text{横截面积之比} = \frac{\text{翅片顶面面积}}{\text{流道面面积}} \quad (12)$$

Table 5. Top surface data of various fin types

表 5. 各类型翅片顶面数据

|     | Fin-1    | Fin-3    | Fin-5    | Fin-4   | Fin-2    |
|-----|----------|----------|----------|---------|----------|
| 面积比 | 0.126732 | 0.091126 | 0.089286 | 0.08284 | 0.059641 |

图 10 中 PathA 表明横截面积与平均应力呈现明显的负相关的关系。呈现出的规律为面积比越大，平均机械应力越小，其中最大与最小的面积比差了 52.5%，平均机械应力相差 26.89%。这表明横截面更大的翅片具有更强的结构承载能力，使得外部载荷更能均匀地分摊于 PCHE 换热器的内部，从而降低局部应力的集中。对于 PathB 有类似的变化趋势，但是有 fin-3 这个意外，fin-3 主要在后半截尾部替换为了内凹弧，这不仅减少了翅片横截面积，同时也使得尾部更加尖锐与细长，不能有效地分摊应力，使得应力有较为明显的集中。

### 3.3. 热应力结果

如图 11 所示为热应力沿着选取路径的结果，从 PathA 可以看出热应力主要是在红色渐变区域的热

侧，应力峰大多是翅片与板片的连接处。在 PathB 路径上的热应力峰值则是多了冷侧翅片尖端。在翅片与板片的连接位置或者翅片尖端，由于处于几何结构的不连续，使得膨胀不均匀，更加加剧了热应力的集中。

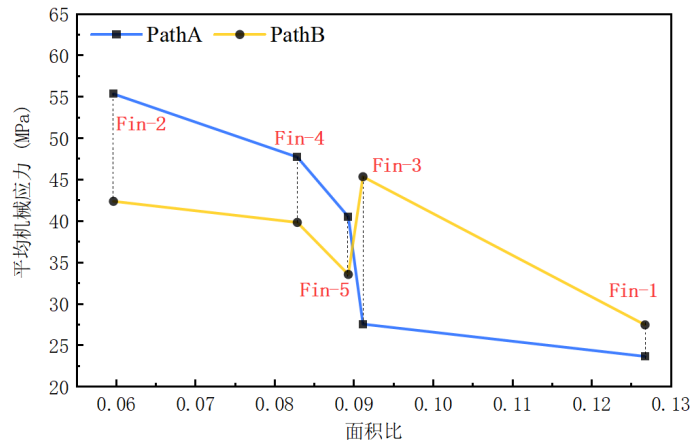


Figure 10. Mechanical stress variation with area ratio diagram  
图 10. 机械应力与面积比变化图

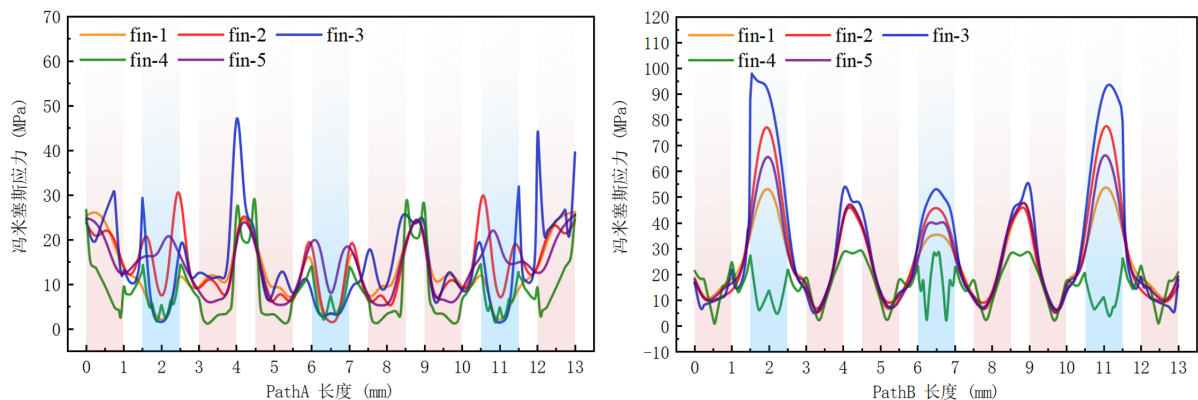


Figure 11. Thermal stress path result diagram  
图 11. 热应力路径结果图

如图 12 为冷侧沿着流动方向上翅片头部和尾部上的平均热应力，从中可以看出 fin-3 是处于最高值，fin-2 其次，这里结果与图 11 中结果相同。其中 fin-3 与 fin-2 由于其结构的细长使得热应力也在各种翅片类型中有显著升高，除此之外热应力最低的为 fin-1，由于冷热温差相对较小使得受热膨胀产生的热应力较小。

### 3.4. 总应力结果

总应力随着选取路径长度的变化结果如图 13 所示，从图中可以看出结果与机械应力结果类似，从数值上可以推测出机械应力占主要，并且最后由于机械应力和热应力的方向有不同，两者相互抵消，使得总应力的数值上没有出现较大的改变。

总的来说，机械应力与热应力都分别与比横截面积或者换热能力有较强的相关性，但不可忽视的是形状因素对应力有显著的影响，尖角与细长的结构会使得应力有明显的集中，对换热器可能造成较大的影响，需要结合换热器的运行工况和运行环境对换热器的结构安全做出具体评估。

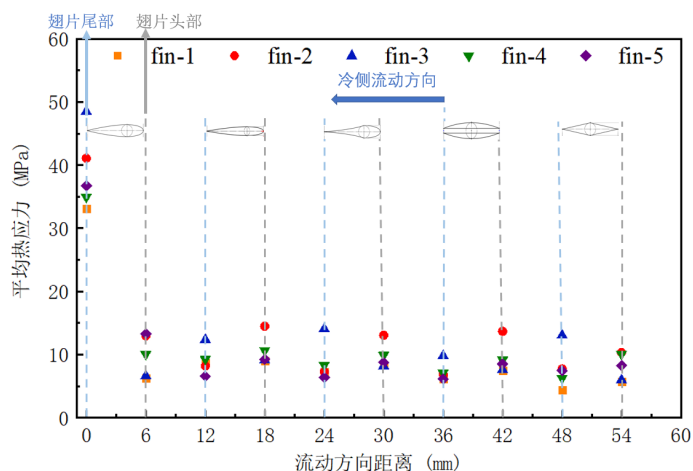


Figure 12. Average thermal stress at the fin ends along the flow direction  
图 12. 沿着流动方向的翅片首尾平均热应力

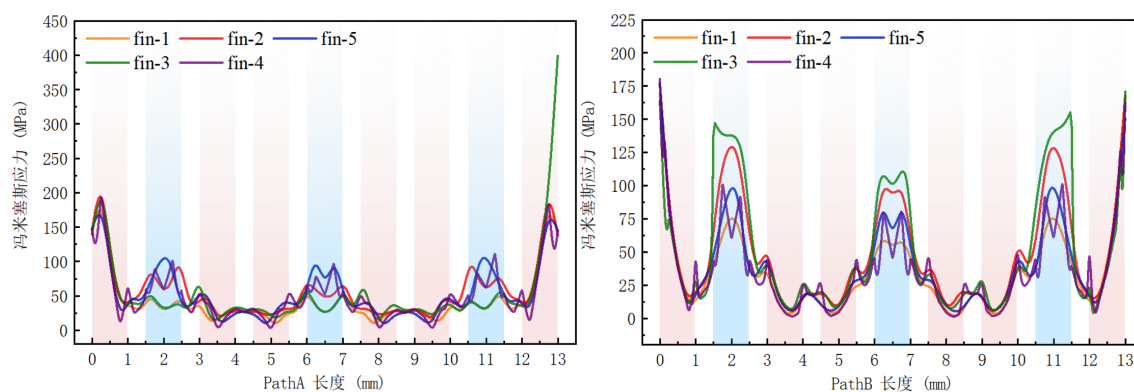


Figure 13. Total stress path result diagram  
图 13. 总应力路径结果图

#### 4. 应力评估结果

选取 PathA 和 PathB 为评估路径是因为这两个路径为设备中应力最高部分，由上文可知，翅片尾部尖端处为翼型 PCHE 最为危险部分。本章节提取了 PathA 和 PathB 上的应力，评价标准如章节 2.2 所示，安全评判标准如公式(1)~(5)所示。最终得出结果如表 6 和表 7 所示，从结果可以看出在评估结果都在许用应力和强度极限之下，对于稳态弹性应力评估没有问题，而对于疲劳寿命有待进一步评估。

Table 6. Primary stress evaluation results  
表 6. 一次应力评估结果

| 不同工况  | $P_m$ (MPa) |       | $S_r$ (MPa) | $P_L + P_b$ (MPa) |       | $1.5 S_r$ (MPa) | 是否符合标准 |
|-------|-------------|-------|-------------|-------------------|-------|-----------------|--------|
|       | PathA       | PathB |             | PathA             | PathB |                 |        |
| Fin-1 | 27.5        | 13.6  | 106.4       | 30.2              | 17.9  | 159.6           | Yes    |
| Fin-2 | 31.2        | 22.4  | 106.4       | 37.8              | 26.0  | 159.6           | Yes    |
| Fin-3 | 29.3        | 30.3  | 106.4       | 36.9              | 54.0  | 159.6           | Yes    |
| Fin-4 | 58.5        | 26.6  | 106.4       | 148.2             | 84.9  | 159.6           | Yes    |
| Fin-5 | 26.7        | 14.8  | 106.4       | 31.0              | 19.9  | 159.6           | Yes    |

**Table 7.** Secondary stress evaluation results  
**表 7.** 二次应力评估结果

| 不同翅片类型 | $P_m$ (MPa) |       | $S_m$ (MPa) | $P_L+P_b$ (MPa) |       | $1.5 S_m$ (MPa) | $P_m + P_b + Q_b + Q_m$ (MPa) |        | $3 S_m$ (MPa) | 是否符合标准 |
|--------|-------------|-------|-------------|-----------------|-------|-----------------|-------------------------------|--------|---------------|--------|
|        | PathA       | PathB |             | PathA           | PathB |                 | PathA                         | PathB  |               |        |
| Fin-1  | 27.2        | 15.2  | 172.1       | 30.1            | 18.2  | 258.2           | 63.999                        | 77.359 | 516.3         | Yes    |
| Fin-2  | 28.5        | 23.6  | 172.1       | 38.7            | 26.0  | 258.2           | 113.32                        | 130.73 | 516.3         | Yes    |
| Fin-3  | 27.6        | 31.2  | 172.1       | 40.9            | 68.1  | 258.2           | 86.148                        | 157.37 | 516.3         | Yes    |
| Fin-4  | 52.9        | 27.3  | 172.1       | 151.9           | 94.9  | 258.2           | 112.94                        | 102.43 | 516.3         | Yes    |
| Fin-5  | 23.6        | 14.7  | 172.1       | 30.4            | 18.4  | 258.2           | 110.78                        | 103.36 | 516.3         | Yes    |

其中安全系数的计算方法如公式(6)所示, 所得的结果如表 8 所示。从表中可以看出, PathB 比 PathA 的安全系数更低, 这也与上文中翅片尖端应力更加集中相对应。此外, fin-2 整体安全系数在 1 左右, 属于及格边缘, 在没有做设备循环寿命的情况下属于较为危险, fin-3 由于其极薄的翅片尾部后沿, 也使得 PathB 的安全系数接近于及格线水平。

**Table 8.** Safety factor evaluation results  
**表 8.** 安全系数评估结果

| 不同工况  | $P_m + P_b + Q_b + Q_m$ (MPa) |        | $S_m$ (MPa) | FS    |       |
|-------|-------------------------------|--------|-------------|-------|-------|
|       | PathA                         | PathB  |             | PathA | PathB |
| Fin-1 | 63.999                        | 77.359 | 172.1       | 2.7   | 2.2   |
| Fin-2 | 113.32                        | 130.73 | 172.1       | 1.5   | 1.3   |
| Fin-3 | 86.148                        | 157.37 | 172.1       | 2.0   | 1.1   |
| Fin-4 | 112.94                        | 102.43 | 172.1       | 1.5   | 1.7   |
| Fin-5 | 110.78                        | 103.36 | 172.1       | 1.6   | 1.7   |

## 5. 结论

本文根据对氦氙混合物的 PCHE 中五种不同翅片构型(fin-1 至 fin-5)的综合热工水力与结构分析, 得出的主要结论总结如下:

1) 翅片 fin-1 的换热性能最优, 其  $j$  因子较换热能力最低的 fin-4 高出 7.7%; 而减阻设计的 fin-4 可将摩擦因子较 fin-1 降低 21.1%, 表明通过几何优化可在单一性能维度获得显著收益, 但难以同时达到最优。

2) 在本次模拟工况下, 机械应力是占总应力的主要成分。翅片顶面面积与流道面积之比(面积比)与翅尖平均机械应力呈显著负相关, 面积比最大的翅片 fin-1 的机械应力最低。热应力水平与局部换热强度相关, 换热越强则热应力越高; 尖锐或细长几何特征(如 fin-3 内凹的尖细尾缘)会加剧应力集中。

3) 所有翅片均满足 ASME 规范中弹性应力评估要求, 但安全裕度差异显著。Fin-1 凭借最大面积比获得最高安全系数(2.2~2.7), 结构可靠性最优; 而追求低流阻或强化传热的 fin-2 和 fin-3 安全系数(1.1~1.5)接近工程下限, 长期服役存在风险。

通过综合对以上不同类型翅片的分析对比, fin-1 凭借其出色的换热能力以及结构的安全性能, 使得其可以作为大多情况下的最推荐的 PCHE 翅片类型, 其余翅片如果采用需要对翅片尖端进行额外的优化设计。

## 参考文献

- [1] Locatelli, G., Bingham, C. and Mancini, M. (2014) Small Modular Reactors: A Comprehensive Overview of Their Economics and Strategic Aspects. *Progress in Nuclear Energy*, **73**, 75-85. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.01.010>
- [2] Huang, C., Cai, W., Wang, Y., Liu, Y., Li, Q. and Li, B. (2019) Review on the Characteristics of Flow and Heat Transfer in Printed Circuit Heat Exchangers. *Applied Thermal Engineering*, **153**, 190-205. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.131>
- [3] Wen, Z., Lv, Y. and Li, Q. (2020) Comparative Study on Flow and Heat Transfer Characteristics of Sinusoidal and Zigzag Channel Printed Circuit Heat Exchangers. *Science China Technological Sciences*, **63**, 655-667. <https://doi.org/10.1007/s11431-019-1492-2>
- [4] 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>
- [5] 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>
- [6] Jin, W., Wang, L., Deng, L., Zhang, L. and Che, D. (2024) Thermal-Hydraulic Performance of Novel Slotted Fusiform Fin Printed Circuit Heat Exchanger for Supercritical CO<sub>2</sub> Brayton Cycle. *Applied Thermal Engineering*, **248**, Article 123104. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123104>
- [7] 黄伟峰, 王赟, 彭旭, 等. 氦气介质干气密封热-流-固耦合建模及性能分析[J]. 润滑与密封, 2021, 46(9): 1-8.
- [8] Tournier, J., El-Genk, M. and Gallo, B. (2006) Best Estimates of Binary Gas Mixtures Properties for Closed Brayton Cycle Space Applications. *4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC)*, San Diego, 26-29 June 2006, 1-14. <https://doi.org/10.2514/6.2006-4154>
- [9] American Society of Mechanical Engineers (2017) ASME BPVC Section III Division 1, Subsection NB. American Society of Mechanical Engineers.
- [10] Wang, H., Lu, D., Xu, C., Cao, Q., Li, Z., Fan, C., *et al.* (2025) Study on Flow and Heat Transfer Characteristics of Helium-Xenon Mixtures in Airfoil-Fin PCHes with Different Cross-Sectional Parameters. *Energy*, **325**, Article 136152. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136152>