

金字塔型梯形截面通道对印刷电路板式换热器传热性能的影响

张子欣

兰州交通大学机电工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2026年5月25日; 录用日期: 2026年6月18日; 发布日期: 2026年6月25日

摘要

本文深入研究并分析了金字塔结构的高度对通道内流动与传热特性以及平均特性等参数的影响, 明确了结构高度增加会加剧流动非均匀性并提升阻力损失, 且换热强化存在边际效应; 得到了综合性能的雷诺数依赖性特征, 即 $Re < 10,000$ 时, $h_p = 0.14$ mm性能最优, 而 $Re > 10,000$ 时, $h_p = 0.16$ mm更具优势, 为PCHE的结构参数优化提供了定量指导依据。

关键词

印刷电路板式换热器, 强化传热, 金字塔, 数值模拟

Effect of Pyramid-Type Trapezoidal Cross-Section Channels on the Heat Transfer Performance of PCHE

Zixin Zhang

Department of Energy and Power Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: May 25, 2026; accepted: June 18, 2026; published: June 25, 2026

Abstract

This paper presents an in-depth analysis of the effects of pyramid structure height on flow and heat transfer characteristics, as well as average performance parameters. It clarifies that increasing the structural height intensifies flow non-uniformity and increases flow resistance loss, while the enhancement in heat transfer exhibits a marginal effect. Furthermore, the study reveals the Reynolds

number dependence of the comprehensive performance: the structure with $h_p = 0.14$ mm is optimal when $Re < 10,000$, whereas $h_p = 0.16$ mm demonstrates superior performance when $Re > 10,000$. These findings provide a quantitative basis for the structural parameter optimization of PCHE.

Keywords

Printed Circuit Heat Exchanger, Enhanced Heat Transfer, Pyramid Structure, 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

随着全球范围内对能源需求的持续增长，以及温室气体的排放问题日益严峻，推动能源结构向更加低碳、高效的方向转型已经成为各国发展的必然趋势。超临界二氧化碳(S-CO₂)布雷顿循环因其具有高循环效率、高功率密度以及系统紧凑等显著的优势，逐渐成为了先进能源动力系统的重要发展方向。在该类系统中，换热器作为关键部件，其换热性能会直接影响到循环效率与系统的稳定性。印刷电路板式换热(Printed Circuit Heat Exchanger, PCHE)作为一种新型紧凑型高效换热设备，不但可以在高温高压工况条件下稳定运行，还具有高传热效率、承压能力较强等优势。相较于传统的管壳式换热器，PCHE 在体积与性能方面均表现出了显著的优越性，已经被广泛认为是替代传统换热设备的理想选择。由于其内部的微通道结构较为复杂，深入研究分析 PCHE 的内部复杂流动与强化传热机理，探究结构对换热特性与阻力特性的影响规律，对于实现其性能提升具有重要的意义。

提升 PCHE 的性能是增强超临界压力条件下二氧化碳(S-CO₂)循环热效率的关键途径之一，研究者们常采用多种策略，如通过优化不同通道几何形状来实现 PCHE 效率的提升。Li 等人[1]结合实验测试与数值模拟方法，系统探究了超临界二氧化碳在印刷电路板式换热器于加热及冷却工况下的传热性能。数值计算选用 SST $k-\omega$ 湍流模型，模拟结果与实验数据吻合良好，验证了模型的可靠性。Chu 等人[2]通过实验手段对直通管换热器进行了研究，分析了不同介质与雷诺数对其流动传热性能的影响。结果表明，在相同工况下，超临界二氧化碳的换热效率更高。此外，由于物性差异，其雷诺数随流速增加的变化趋势较缓慢。Safari 等人[3]对比了矩形、梯形、三角形以及半圆形通道几何形状在 PCHE 中的换热表现，得出了梯形截面通道在所有工况中均表现出最佳的换热性能的结论。Yi 等人[4]通过三维数值模拟深入研究了在恒定水力直径条件下，不同的通道横截面形状：椭圆、半圆、方形、三角形、梯形及圆形的对超临界二氧化碳流动与传热性能的影响规律。结果表明梯形截面的通道因产生极端的速度分布和最强的二次流，表现出最优的传热能力。Lee 等人[5]通过数值模拟，系统性地研究分析了水力直径相同的半圆形、矩形、梯形和圆形四种截面形状的通道配置对换热器换热性能的影响，结果表明换热器的换热效率与通道内换热面积在一定范围内呈正相关。

本文以超临界二氧化碳布雷顿循环中的 PCHE 为研究对象，采用数值模拟的方法，构建 PCHE 梯形截面通道流动模型以代替传统半圆形截面通道，并且在其流动通道冲压金字塔凹凸结构，通过拓展通道内的换热面积，达到增强流体在通道内的扰动强度的效果，产生高水平二次流，探究不同雷诺数下通道内金字塔结构高度的改变对换热器性能带来的影响，从而提高冷热流耦合换热单元的换热性能。

2. 数值模拟方法

2.1. 数学模型

本文假设 PCHE 通道内的流动与传热过程为稳态湍流，且无内热源，忽略环境热交换。其在三维直角坐标系下的控制方程如下[6]：

连续性方程：

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0$$

动量守恒方程：

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} (\mu + \mu_t) \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] + \rho g_i$$

能量守恒方程：

$$\frac{\partial(\rho u_i c_p T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial(c_p T)}{\partial x_i} \right]$$

式中， ρ 、 C_p 、 μ 分别表示密度、定压比热和动力黏度， μ_t 为湍流黏度， Pr 和 Pr_t 则分别表示普朗特数和湍流普朗特数(Turbulent Prandtl number)。本文在进行数值模拟分析时需考虑截面形状对于 PCHE 特性的影响，故选取剪切应力输运模型(Shear Stress Transport $k-\omega$, SST $k-\omega$)模型，该模型兼具 $k-\omega$ 模型在近壁处的稳定性和 $k-\varepsilon$ 模型在远离壁面处的准确性，因此，即使是模拟超临界二氧化碳这样物性变化剧烈的流体在通道内的流动换热，依然可以获得较为准确的数值结果，以期更好反应流体在通道内的流动及传热特性[7]-[9]。在 SST $k-\omega$ 模型中，湍流动能 k 和比耗散率 ω 的输运方程分别表示为[10]：

湍动能 k 方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) G_k - Y_k + S_k$$

比耗散率 ω 方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) G_\omega - Y_\omega + S_\omega$$

式中， Γ_k 和 Γ_ω 表示有效扩散项， G_k 和 G_ω 表示产生项， Y_k 和 Y_ω 表由于湍流而产生的耗散项， S_k 和 S_ω 为用户定义的源项， D_ω 为交叉扩散项。为满足 SST $k-\omega$ 模型的计算要求，对所有通道近壁处网格进行加密，保证壁面无量纲参数 y^+ 小于 1 [11]。

雷诺数 Re 定义为：

$$Re = \frac{\rho D_c u_{in}}{\mu}$$

阻力系数 f 定义为：

$$f = \frac{\Delta p D_c}{2 \rho L u_{in}^2}$$

式中， L 为沿着流动方向的金字塔结构核心换热区域通道总长度，单位 m； Δp 为核心换热区进口与出口

间总的压力差, 单位 Pa; D_c 为水力直径, 单位 m。

水力直径 D_c 定义为:

$$D_c = \frac{4A_c}{P}$$

式中, A_c 为核心换热区入口处截面积, 单位 m^2 ; P 为湿润周长, 即管壁与流体接触面的长度, m。

平均努塞尔数 Nu_m 定义为:

$$Nu_m = \frac{h_m D_c}{\lambda_f} = \frac{Q}{A_0 \Delta T_m} \cdot \frac{D_c}{\lambda_f}$$

式中, h_m 为平均对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; A_0 为换热面面积, m^2 ; ΔT_m 定义为:

$$\Delta T_m = \frac{(T_w - T_i) - (T_w - T_o)}{\ln\left(\frac{T_w - T_i}{T_w - T_o}\right)}$$

主流方向为 X 向的涡量(流体速度矢量的旋度)分量定义为:

$$\Omega_x = \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y}$$

二次流强度可以用参数 Se 来描述, 流动方向 X 向的平均二次流强度 Se_m 和局部二次流强度 Se_s 定义为:

$$Se = \frac{\rho D^2 |\Omega_x|}{\mu} = \frac{\rho D^2 |\partial v / \partial z - \partial w / \partial y|}{\mu}$$

$$Se_m = \frac{1}{V} \iiint_V Se dV$$

$$Se_s(x) = \iint_{A_x} Se dA_x / \iint_{A_x} dA_x$$

为强化换热器内部热交换, 许多研究者开发了表面粗糙化、内置肋片及改变流道形状等技术, 旨在降低通道内换热面的表面热阻并增强对流换热。然而, 强化传热往往伴随流道内部压降的升高, 导致系统泵功需求增加。因此, 需引入参数以评判强化传热技术的好坏。综合性能评价指标(Performance Evaluation Criteria, PEC)常用于评估不同结构 PCHE 的整体换热性能[12] [13], 若 PEC 大于 1, 则表明强化传热收益超过泵功的增加所带来的损耗, 即综合换热性能较为优秀。 PEC 计算如下:

$$PEC = \frac{Nu_m / Nu_{ref}}{(f / f_{ref})^{1/3}}$$

式中, 带有下标 ref 的为参考结构的相关物理量。

在研究耦合通道模型时, 可以沿着管道等距建立多个垂直于流动方向截面, 相当于将整个通道划分为许多子换热器, 在耦合换热的模型中,

局部平均热通量:

$$q_{ave} = \frac{1}{2}(q_h + q_c) = \frac{1}{2} \left(\frac{m_h (H_{h,in} - H_{h,out}) + m_c (H_{c,out} - H_{c,in})}{A} \right)$$

局部平均对流换热系数:

$$h_b = \frac{q_{ave}}{|T_{w,ave} - T_b|}$$

式中, m 为质量流量, H 为比焓, A 为单个子换热器的换热面积; 下标 ave 表示平均值, h 与 c 分别指代热侧和冷侧, in 及 out 分别代表通道进口与出口; T_b 为沿主流方程横截面上的流体质量加权平均温度, $T_{w,ave}$ 为壁面平均温度

T_b 定义为:

$$T_b = \frac{\int_A \rho u c_p T dA}{\int_A \rho u c_p dA}$$

在整个换热器通道内的流动换热系数由局部换热系数 h_b 平均值求得。鉴于耦合换热管道内周向热通量与壁面分布呈现显著非均匀性, 故亦对局部壁面的对流换热系数进行了计算。

局部壁面对流换热系数:

$$h_{local} = \frac{q_{local}}{T_w - T_b}$$

局部努塞尔数定义:

$$Nu_{local} = \frac{h_{local} D_c}{\lambda_f}$$

2.2. 物理模型

PCHE 的组成部分分别有: 进出口集束管段、进出口封头以及换热器芯体三部分组成。换热芯体通常数量巨大, 若将完整 PCHE 模型构建并计算, 将产生巨大的计算量且难以实现, 为了提高计算效率, 本文选取冷热流体通道及其周围固体部分耦合成一个核心换热单元来计算, 如图 1 所示, 冷侧流体流向为 X 正方向, 热侧流体流向为 X 负方向。为了避免入口效应, 使工质在核心换热段充分发展, 在核心换热段入口处加设绝热段; 为了防止工质在核心换热段出口产生回流, 影响计算准确性, 在核心换热段出口处也设绝热段, 确保计算结果更加准确。如图 1 为核心换热单元以及进出口处绝热延伸段示意图以及金字塔单元结构示意图。

金字塔尺寸如表 1 所示。固体域材料选用 SS316L 不锈钢, 冷、热流体域工质均选择超临界二氧化碳进行模拟计算。PCHE 在垂直于流动方向(Y 方向)具有周期性, 故而将计算域的顶端和底端壁面采用周期性边界条件, 其余左右两侧壁面以及前后壁面均为绝热边界条件。

2.3. 网格无关性验证

在数值模拟中, 网格是决定 PCHE 数值模拟精度、收敛性与可靠性的核心前提, 网格质量对计算的速度, 计算结果的准确性均有较大的影响。因此, 在一定的网格数量范围内得到最高质量的网格对于得到准确的仿真结果至关重要。尤其本文换热工质为超临界二氧化碳, 其物性变化剧烈, 且通道内金字塔内壁面结构复杂, 网格质量直接决定换热系数、压降、努塞尔数、摩擦因子等关键结果的可信度。综合考虑 PCHE 管道结构, 本文采用 ANSYS Meshing 软件对计算域进行网格划分并开展网格无关性验证, 核心换热区域的网格质量是影响仿真结果准确性的关键因素。

由于金字塔内壁面通道的 PCHE 结构较为复杂, 对其计算域直接进行网格划分得到网格质量较差, 首先将计算域分为三部分, 通道内冷侧流体域、通道内热侧流体域以及外部固体域, 对三个计算域分别进行网格划分。为保证金字塔近壁面处的网格精度, 确保边界层网格 $y^+ = 1$, 同时控制流体中心区域的

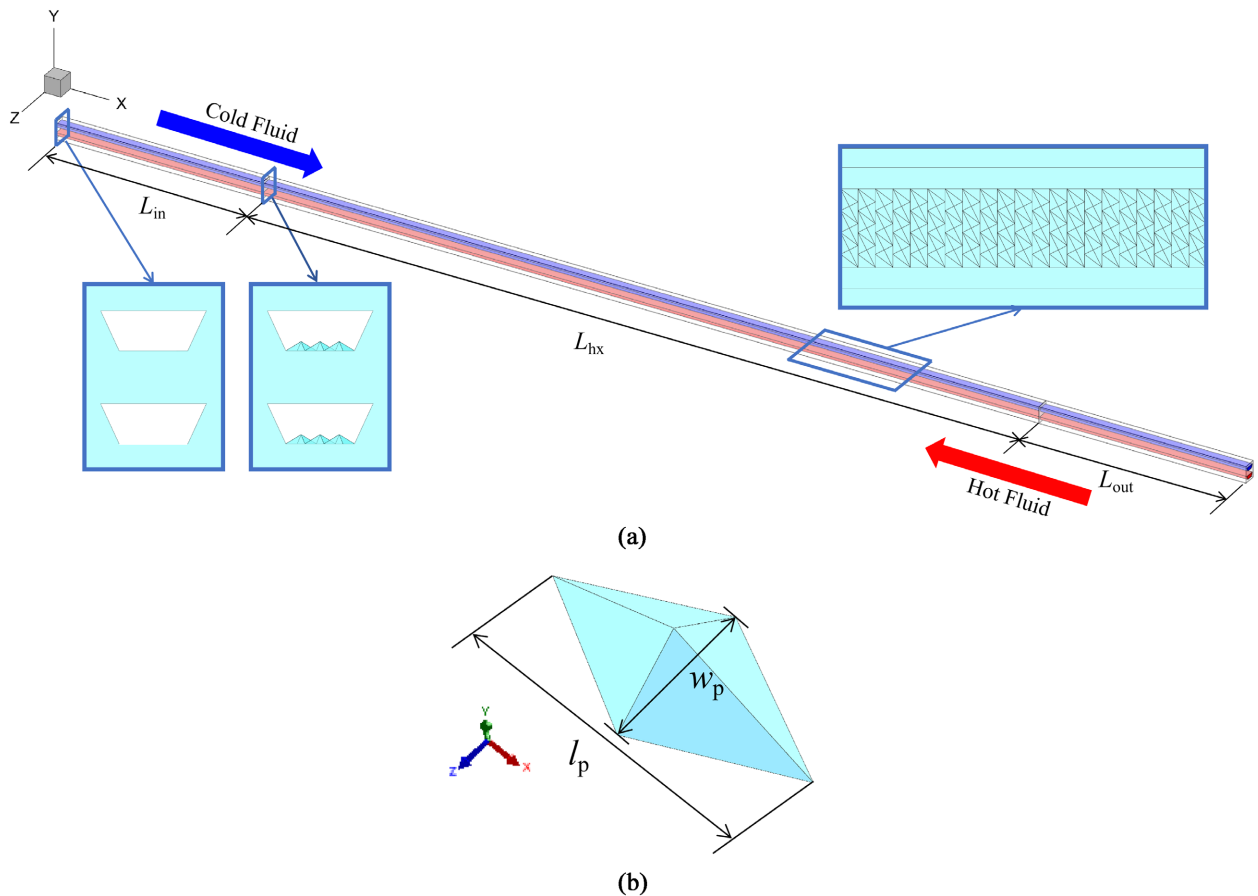


Figure 1. (a) Coupled numerical model of hot and cold fluids for PCHE with pyramidal structure walls; (b) schematic diagram of the pyramid structure unit

图 1. (a) 金字塔结构壁面 PCHE 冷热流体耦合数值模型; (b) 金字塔结构单元示意图

Table 1. Pyramid structure parameters

表 1. 金字塔结构参数

金字塔结构几何参数	网格数量	Nu_m
长度	l_p	0.00058656
高度	h_p	0.0000012
宽度	w_p	0.00029328

网格数量，提高计算效率。最后通过 interface 将网格组合，最终得到整体计算域的网格。

本文使用目前主流仿真软件 ANSYS FLUENT 软件对不同通道截面的金字塔内壁面 PCHE 的流动与传热特性进行数值仿真研究。操作压力为 8.5 MPa，可以确保二氧化碳在通道内处于超临界状态。在模型中采用 SST $k-\omega$ 湍流模型进行计算，压力和速度耦合曲线采用二阶迎风格式的 SIMPLEC 算法。当流体在出口处温度变化小于 10^{-6} 时，认为计算达到收敛。

如表 2 所示，选取在 $Re=5000$ 条件下的半圆形截面、矩形截面、以及梯形截面金字塔内壁面 PCHE 的通道模型进行网格无关性验证。通过改变网格单元尺寸以及边界层情况划分数量不同的网格。将不同网格数量下的模拟结果进行比较并对网格数量对计算结果的独立性进行评估。均以第四套网格为基准，计算其他几套网格与其之间的相对误差。因此，在后续的计算中选择第四套网格进行数值模拟。

Table 2. Grid independence verification for the inner wall of the semi-circular channel pyramid
表 2. 半圆形截面通道金字塔内壁面网格独立性考核

编号	网格数量	Num	ΔNum (%)	f	Δf (%)
1	4,215,557	42.75	3.039%	0.0745	1.455%
2	6,758,227	43.27	1.859%	0.0751	0.661%
3	7,587,235	43.97	0.272%	0.0755	0.132%
4	7,952,425	44.09	0	0.0756	0

2.4. 数值准确性验证

选择简化后的相似几何模型可靠实验结果进行数值方法的准确性验证，将提取的 S-CO₂ 出口温度与实验值[14]进行对比，结果如图 2 所示。表明在不同的工作压力、进口温度和进口流量下，数值模拟得到的热侧出口温度与实验值吻合较好，最大误差仅为 0.42%。计算最大误差均在可接受范围内，说明金字塔内壁面通道 PCHE 所采用的数值计算方法以及流固体域所使用的耦合关系均属正确范围，模型可靠。

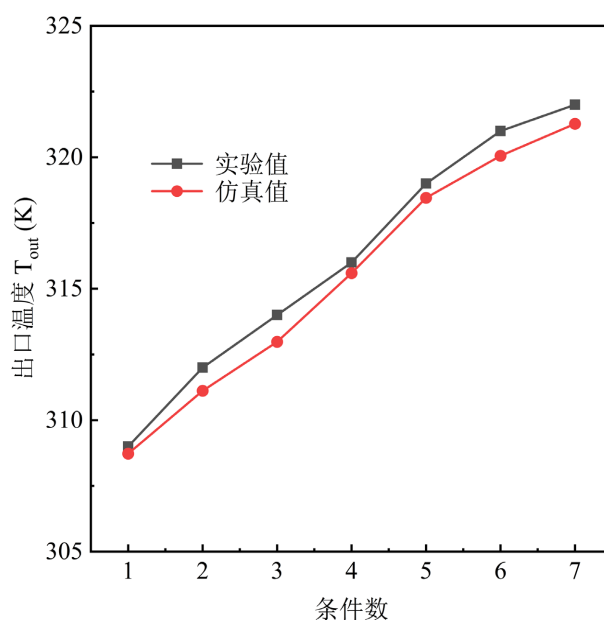


Figure 2. Verification of numerical accuracy
图 2. 数值准确性验证

3. 计算结果分析与讨论

3.1. 不同金字塔高度对 S-CO₂ 在 PCHE 内截面速度的影响

图 3 分别为 $X = 0.18693\text{m}$ 截面处不同金字塔结构高度下梯形截面通道 PCHE 沿流动方向的冷侧 S-CO₂ 速度分布云图。由图可以看出，随着金字塔结构高度的增加，在金字塔塔顶周围流体的速度均明显大于位于塔底周围流体的速度。对比图 3(a)~(c) 可以发现，伴随着金字塔结构高度的增大，通道内流体的高速核心区速度有所提高；通道内壁面附近的流体由于逆压梯度的增大，发生边界层分离的现象，壁面附近低速流体变多。由于核心区高速流体的增多，整个通道内的总传热量相应增加。

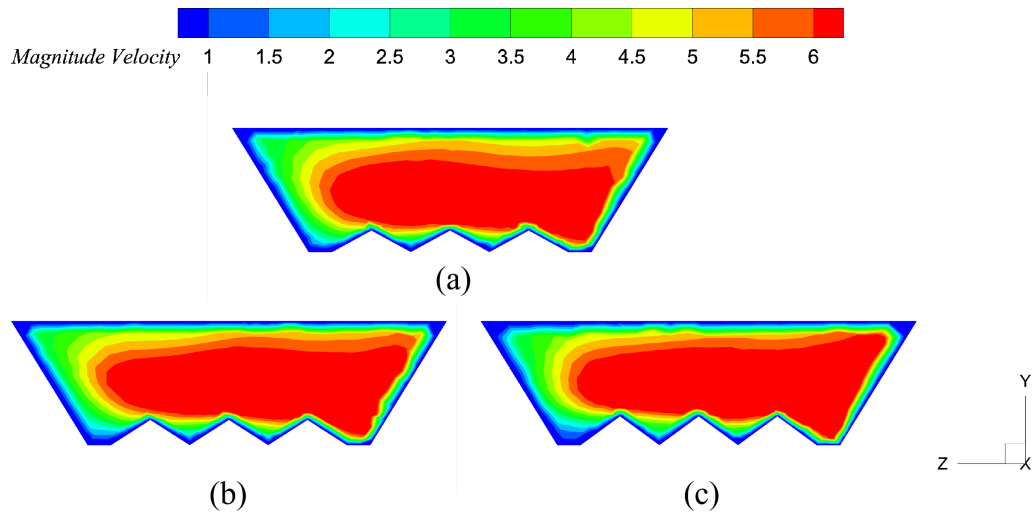


Figure 3. Cross-sectional velocity distribution contours of cold side S-CO₂ under different pyramid heights
图 3. 不同金字塔高度下冷侧 S-CO₂ 截面速度分布云图。(a) $h_p = 0.12$ mm; (b) $h_p = 0.14$ mm; (c) $h_p = 0.16$ mm

3.2. 不同金字塔高度对 S-CO₂ 在 PCHE 内二次流强度的影响

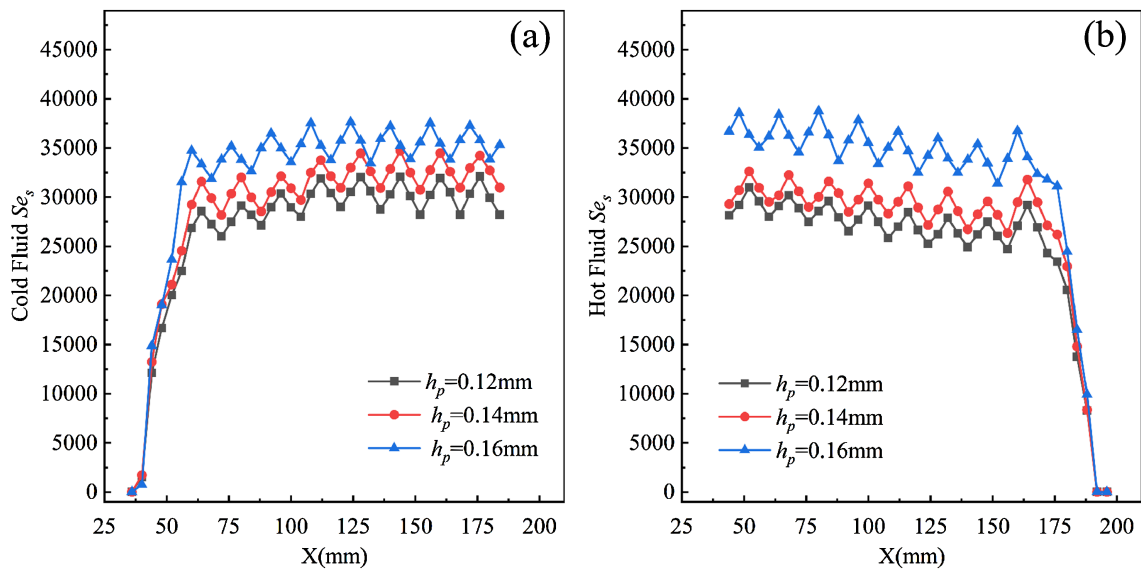


Figure 4. Secondary flow intensity of S-CO₂ under different pyramid structure heights for both hot and cold sides
图 4. 不同金字塔结构高度下冷热两侧 S-CO₂ 二次流强度 (a)冷侧 S-CO₂; (b)热侧 S-CO₂

图 4(a)、图 4(b)分别为通道内沿程冷热两侧 S-CO₂ 不同金字塔结构高度下梯形截面通道 PCHE 的二次流强度定量分布图。如图可以观察到，无论是冷侧还是热侧，二次流强度均呈现出明显的周期性波动。不同金字塔高度下的二次流强度分布大致相似，图 4(a)中，通道内冷侧 S-CO₂ 的 Se_s 水平在 $h_p = 0.14$ mm 条件下较 $h_p = 0.12$ mm 平均提高了约 8%，在 $h_p = 0.16$ mm 条件下较 $h_p = 0.14$ mm 平均提高了约 11%。图 4(b)中，通道内热侧 S-CO₂ 在进入核心换热区初期急剧上升后保持微弱的上升趋势，二次流强度在 $h_p = 0.14$ mm 条件下较 $h_p = 0.12$ mm 同样平均提高了约 8%，而在 $h_p = 0.16$ mm 条件下较 $h_p = 0.14$ mm 平均提高了约 19%。表明当金字塔结构高度为 0.16 mm 时，流体在流场内被扰动切割的作用有所增强，尤其对热侧流场的二次流水平提升效果较为突出。

3.3. 不同金字塔高度对 S-CO₂ 在 PCHE 内温度分布的影响

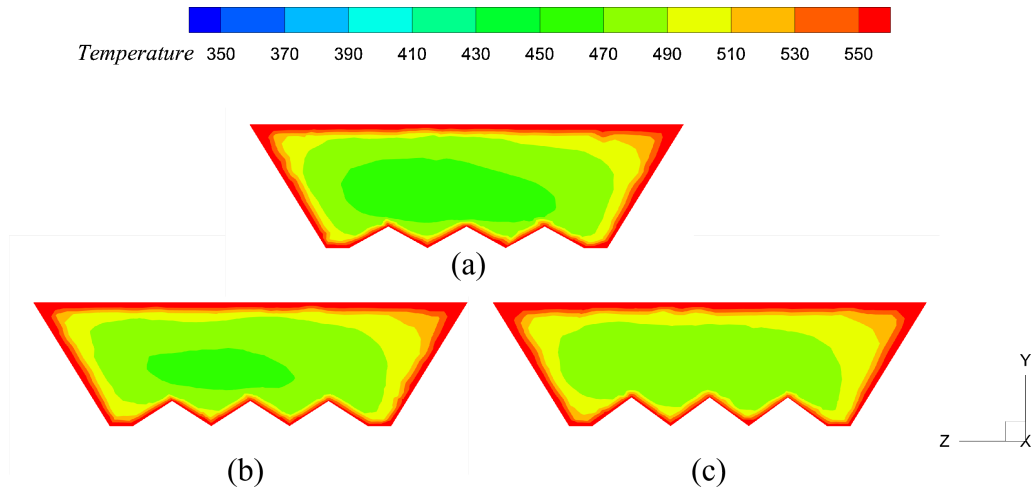


Figure 5. Cross-sectional temperature distribution contours along the flow direction of cold side S-CO₂ under different pyramid structure heights

图 5. 不同金字塔结构高度下冷侧 S-CO₂ 沿流动方向截面温度分布云图。(a) $h_p = 0.12$ mm; (b) $h_p = 0.14$ mm; (c) $h_p = 0.16$ mm

图 5 分别为沿流动方向 $X = 0.18693$ m 截面处不同金字塔结构高度下 PCHE 的冷侧 S-CO₂ 温度分布云图。由图可以观察到，随着金字塔结构高度的提高，通道内流体的核心区域温度相对升高，流体整体温度有所上升。PCHE 通过边界层高温流体向通道内核心区域流体传递热量的方式加热通道内核心区域流体，在 $h_p = 0.16$ mm 时，通道内流体的温度分布的均匀性最高，通道核心区域流体温度的分层现象减弱，提高通道内流体平均温度的同时，有效地改善了流场内温度分布的均匀性。

3.4. 不同金字塔高度对 S-CO₂ 在 PCHE 内局部对流换热系数的影响

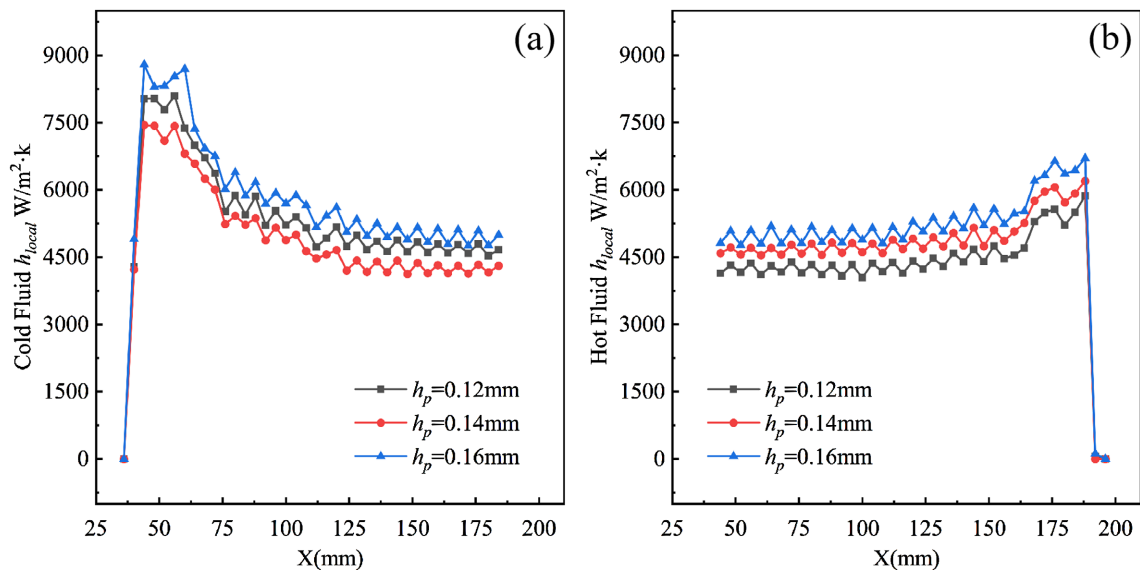


Figure 6. Local convective heat transfer coefficient along the flow direction of S-CO₂ under different pyramid heights for both hot and cold sides (a) cold side S-CO₂; (b) hot side S-CO₂

图 6. 不同金字塔高度下冷热两侧 S-CO₂ 沿程对流换热系数。(a) 冷侧 S-CO₂; (b) 热侧 S-CO₂

图 6(a)、图 6(b)分别为通道内沿程冷热两侧 S-CO₂ 不同金字塔结构高度下 PCHE 的局部对流换热系数(hlocal)的定量分布图。如图可以观察到,无论是冷侧还是热侧,均呈现周期性波动并在流体进入核心换热段之后急剧上升至峰值然后随着沿程下降,在流动中后期基本保持不变。图 6(a)中,通道内冷侧 S-CO₂ 的局部对流换热系数在 $h_p = 0.14 \text{ mm}$ 条件下较 $h_p = 0.12 \text{ mm}$ 平均提高了约 9%,在 $h_p = 0.16 \text{ mm}$ 条件下较 $h_p = 0.14 \text{ mm}$ 平均提高了约 7.68%。图 6(b)中,对流换热系数在 $h_p = 0.14 \text{ mm}$ 条件下较 $h_p = 0.12 \text{ mm}$ 平均提高了约 10.48%,而在 $h_p = 0.16 \text{ mm}$ 条件下较 $h_p = 0.14 \text{ mm}$ 平均提高了约 7.15%。说明金字塔结构高度的提升可以提高流体的换热效率,但仅通过提高金字塔结构高度的方式提高对流换热系数的程度有限。

3.5. 不同金字塔高度对 S-CO₂ 在 PCHE 内平均特性的影响

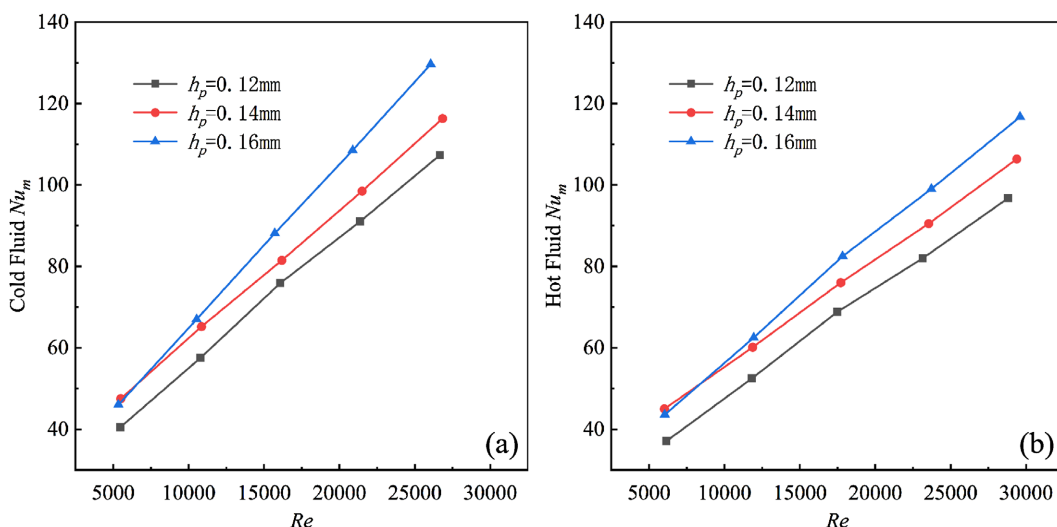


Figure 7. Average nusselt number of S-CO₂ under different pyramid heights for both hot and cold sides
图 7. 不同金字塔高度下冷热两侧 S-CO₂ 平均努塞尔数。(a) 冷侧 S-CO₂; (b) 热侧 S-CO₂

图 7(a)、图 7(b)分别表示了斜向布置金字塔结构的条件下,冷热两侧 S-CO₂ 的平均努塞尔数 Nu_m 随雷诺数 Re 和金字塔高度的变化规律。由图可以清晰地看出,无论是冷侧还是热侧流体,以及任何金字塔高度,平均努塞尔数 Nu_m 均随着雷诺数 Re 的增大而近似呈线性增长趋势。

冷热两侧在同 Re 条件下 Nu_m 绝对值和增长斜率可存在差异,主要是由于冷热两侧的 S-CO₂ 物性的差异以及在流场内随着换热的发生带来的物性变化。具体而言,图 7(a)中,通道内冷侧 S-CO₂ 的 Nu_m 在 $h_p = 0.14 \text{ mm}$ 的条件下较 $h_p = 0.12 \text{ mm}$ 平均提高了约 8.64%~17.36%;在 $h_p = 0.16 \text{ mm}$ 的条件下较 $h_p = 0.14 \text{ mm}$ 平均提高了约 2.8%~12.37%。图 7(b)中,通道内热侧 S-CO₂ 的 Nu_m 在 $h_p = 0.14 \text{ mm}$ 条件下较 $h_p = 0.12 \text{ mm}$ 平均提高了约 10.42%~21.66%,而在 $h_p = 0.16 \text{ mm}$ 条件下较 $h_p = 0.14 \text{ mm}$ 平均提高了约 4.36%~11.01%。值得一提的是,由图可以看出,在 Re 小于 5500 时, $h_p = 0.14 \text{ mm}$ 的 Nu_m 略高于 $h_p = 0.16 \text{ mm}$,故而后续引入综合换热系数 PEC ,可以更加直观得出换热效果最好的金字塔结构高度。

图 8(a)和图 8(b)分别表示了斜向布置金字塔单元结构 PCHE,冷热两侧 S-CO₂ 的阻力系数 f 随雷诺数 Re 和金字塔高度的分布图。可以观察到,热侧 S-CO₂ 对于金字塔高度所诱导的流动扰动更为敏感,响应更加明显。图 8(a)中冷侧 S-CO₂ 随着 Re 的增加而下降。具体而言,图 8(a)中,通道内冷侧 S-CO₂ 的 f 在 $h_p = 0.14 \text{ mm}$ 的条件下较 $h_p = 0.12 \text{ mm}$ 增大了约 20.34%;在 $h_p = 0.16 \text{ mm}$ 的条件下较 $h_p = 0.14 \text{ mm}$ 增大了约 8.72%~18.6%。图 8(b)中,通道内热侧 S-CO₂ 的 Nu_m 在 $h_p = 0.14 \text{ mm}$ 条件下较 $h_p = 0.12 \text{ mm}$ 平均增大了约 23.6%,而在 $h_p = 0.16 \text{ mm}$ 条件下较 $h_p = 0.14 \text{ mm}$ 平均增大了约 19.6%。

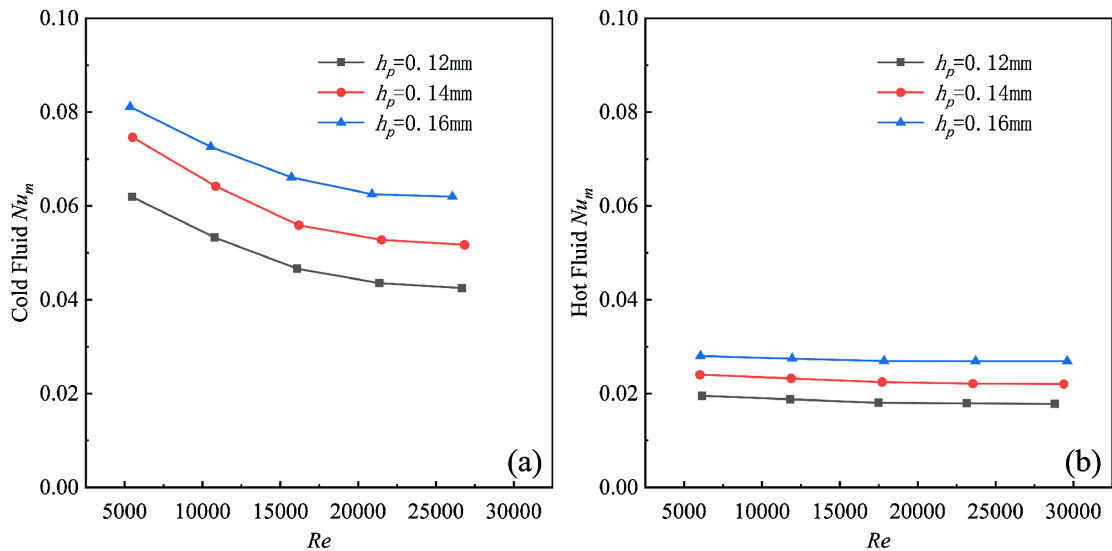


Figure 8. Friction factor of S-CO₂ under different pyramid heights for both hot and cold sides
图 8. 不同金字塔高度下冷热两侧 S-CO₂ 阻力系数。(a) 冷侧 S-CO₂; (b) 热侧 S-CO₂

3.6. 综合换热特性

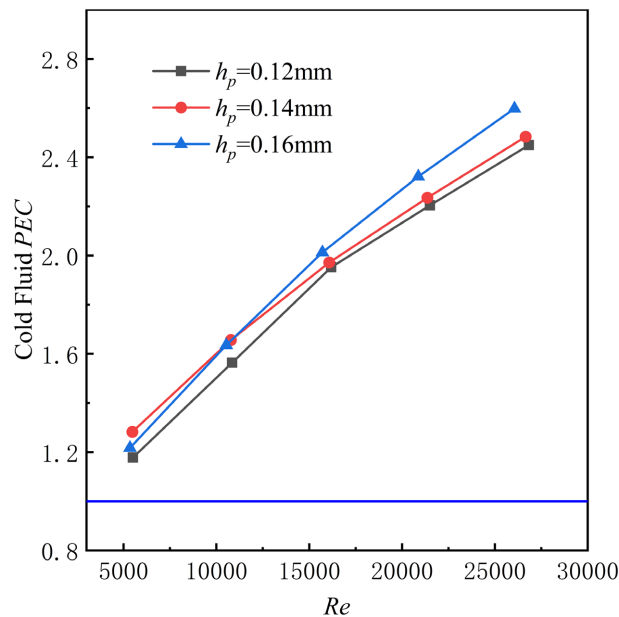


Figure 9. Performance evaluation criterion of S-CO₂ under different pyramid heights for both hot and cold sides
图 9. 不同金字塔高度下冷热两侧 S-CO₂ 综合性能评价指标

图 9 为梯形截面通道斜向布置金字塔结构单元的条件下, S-CO₂ 的综合性能评价指标 PEC 随雷诺数 Re 和金字塔高度的变化规律。由图可以观察到, 在 $Re = 5500$ 时, $h_p = 0.14\text{mm}$ 具有最佳的换热效果, 其 PEC 值较 $h_p = 0.16\text{mm}$ 时, 提高了约 5.67%。而在 $Re = 11,000$ 时, $h_p = 0.16\text{mm}$ 在三种金字塔结构高度条件下, 具有最佳的换热性能, 随着 Re 的增大, 其换热性能较其他两种金字塔结构高度的差距逐渐增大, 在 $Re = 26,000$ 时, 和 $h_p = 0.12\text{mm}$ 相比, $h_p = 0.16\text{mm}$ 的综合换热性能提高了 7.34%。可见得在研究范围内, Re 小于 10,000 时, $h_p = 0.14\text{mm}$ 是较好的选择, Re 大于 10,000 时, $h_p = 0.16\text{mm}$ 的换热效率最

高, 换热效果最佳。此外, 可以看出流场内传热强化效果会随 Re 的增大而有所增强, 故而在实际应用中设计高通量 PCHE 时, 应综合考虑高度与 Re 的匹配。

4. 结论

本文基于数值模拟方法, 研究了金字塔结构相对高度(h_p)对 S-CO₂ 在 PCHE 通道内流动与换热特性的影响规律, 重点分析了不同高度参数下流速分布、温度场演化及传热性能的变化特征, 并在不同雷诺数范围内对其适用性进行了对比评价。

(1) 在研究范围内, 随着 h_p 的增大, 流动核心区速度提高, 同时壁面附近低速区增强, 反映出流动非均匀性加剧; 二次流强度沿程呈波动变化, 并在特定高度条件下得到强化。对应地, 对流换热系数随 h_p 的增大而提高, 但整体增幅有限, 说明高度增加对换热的促进作用存在边际效应。同时, 阻力损失随结构高度增加呈上升趋势, 体现出强化换热与流动损失之间的耦合关系。

(2) 综合换热性能(PEC)表明, 金字塔高度对通道整体换热性能具有明显区间依赖性: 在研究范围内, Re 小于 10,000 时, $h_p = 0.14$ mm 的结构综合性能最优; Re 大于 1000 时, $h_p = 0.16$ mm 表现出更高的综合换热能力。该结果表明, 不同雷诺数范围内存在最优结构尺度, 使得换热增强与阻力代价达到更优平衡, 体现出金字塔结构参数优化对 PCHE 性能提升的定量指导意义。

参考文献

- [1] Li, H., Kruijenga, A., Anderson, M., Corradini, M., Luo, Y., Wang, H., *et al.* (2011) Development of a New Forced Convection Heat Transfer Correlation for CO₂ in Both Heating and Cooling Modes at Supercritical Pressures. *International Journal of Thermal Sciences*, **50**, 2430-2442. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.07.004>
- [2] Chu, W., Li, X., Ma, T., Chen, Y. and Wang, Q. (2017) Experimental Investigation on SCO₂-Water Heat Transfer Characteristics in a Printed Circuit Heat Exchanger with Straight Channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **113**, 184-194. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.05.059>
- [3] Safari, Y., Abdollahi, S.A., Mahmoudi, M., Safaei, M., Taghinia, F., Pasha, P., *et al.* (2023) Numerical Study of Heat Transfer of Wavy Channel Supercritical CO₂ PCHE with Various Channel Geometries. *International Journal of Thermofluids*, **18**, Article ID: 100330. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100330>
- [4] Yi, Z., Meng, Q. and Lin, C. (2025) Thermohydraulic Performance of Twisted Tubes with Different Cross-Sectional Shapes Using Supercritical CO₂. *Applied Thermal Engineering*, **277**, Article ID: 127083. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.127083>
- [5] Lee, S. and Kim, K. (2013) Comparative Study on Performance of a Zigzag Printed Circuit Heat Exchanger with Various Channel Shapes and Configurations. *Heat and Mass Transfer*, **49**, 1021-1028. <https://doi.org/10.1007/s00231-013-1149-4>
- [6] William, K., Michael, C., Bernhard, W. 对流传热与传质[M]. 第4版. 赵镇南, 译. 北京: 高等教育出版社, 2007: 16-27.
- [7] Han, C., Zhang, Y., Yu, H., Lu, Y. and Jiao, B. (2018) Numerical Analysis on Non-Uniform Flow and Heat Transfer of Supercritical Cryogenic Methane in a Heated Horizontal Circular Tube. *The Journal of Supercritical Fluids*, **138**, 82-91. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2018.04.007>
- [8] Fan, Y.H. and Tang, G.H. (2018) Numerical Investigation on Heat Transfer of Supercritical Carbon Dioxide in a Vertical Tube under Circumferentially Non-Uniform Heating. *Applied Thermal Engineering*, **138**, 354-364. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.060>
- [9] Xiang, M., Guo, J., Huai, X. and Cui, X. (2017) Thermal Analysis of Supercritical Pressure CO₂ in Horizontal Tubes under Cooling Condition. *The Journal of Supercritical Fluids*, **130**, 389-398. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.04.009>
- [10] Menter, F.R. (1994) Two-equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*, **32**, 1598-1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>
- [11] 张海燕. 超临界压力 CO₂ 通道内流动换热特性研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所), 2021.
- [12] Saeed, M. and Kim, M. (2017) Thermal and Hydraulic Performance of SCO₂ PCHE with Different Fin Configurations.

-
- Applied Thermal Engineering*, **127**, 975-985. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.113>
- [13] Oleiwi Samarmad, A. and Mohammad Jaffal, H. (2023) Performance Evaluation of a Printed Circuit Heat Exchanger with a Novel Two-Way Corrugated Channel. *Results in Engineering*, **19**, Article ID: 101303. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101303>
- [14] Liu, B., Lu, M., Shui, B., Sun, Y. and Wei, W. (2022) Thermal-Hydraulic Performance Analysis of Printed Circuit Heat Exchanger Precooler in the Brayton Cycle for Supercritical CO₂ Waste Heat Recovery. *Applied Energy*, **305**, Article ID: 117923. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117923>

附录

D_e	当量直径, m
A_0	换热面面积, m^2
T_w	耦合面平均温度, K
T_f	工质平均温度, K
Nu_m	通道平均努塞尔数
f	阻力系数
PEC	综合换热性能
Se	流体区域体积平均二次流强度
L_{hx}	通道核心换热段长度, m
L_{in}	通道入口充分发展段长度
L_{out}	通道出口防止回流段长度
l_p	金字塔结构长度, m
w_p	金字塔结构宽度, m
h_p	金字塔结构高度, m
h	对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
Re	雷诺数
u, v, w	速度分量, m/s
Δp	通道进出口之间的压差, Pa
希腊字母	
μ	动力粘度, $kg/(m \cdot s)$
λ	导热系数, $W/(m \cdot K)$
ρ	流体工质密度, kg/m^3
下标	
in	进口
out	出口
local	局部值
ref	光滑通道参考值
f	流体区相关的变量或参数
s	固体区域相关的变量或参数
w	壁面
c	冷侧流体通道
h	热侧流体通道