

微通道扁管H型金字塔翅片通道内层流流动与强化传热特性

程剑冰

兰州交通大学机电工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2026年5月17日; 录用日期: 2026年6月10日; 发布日期: 2026年6月18日

摘要

本文提出一种新型H型金字塔翅片, 以平行流扁管微通道换热器为研究对象, 系统分析金字塔翅片与传统平直翅片的空气侧层流流动及传热特性差异。结果表明, 金字塔翅片通过周期性凸起结构在流道内诱导出强烈的二次流与局部涡旋, 有效破坏热边界层, 显著提升局部对流换热系数。在所研究的雷诺数范围内, 金字塔翅片的平均努塞尔数较平直翅片提高明显, 综合热性能评价因子 JF 始终大于1, 表明其传热强化收益超过阻力增加代价。二次流强度分布与局部换热系数分布高度一致, 揭示了涡旋结构对强化传热的本质作用。本研究为微通道换热器翅片结构的优化设计及CO₂热泵系统的高效运行提供了理论依据与技术支撑。

关键词

平行流微通道换热器, 金字塔型翅片, 空气侧传热, 二次流

Laminar Flow and Enhanced Heat Transfer Characteristics in a Microchannel Flat Tube Channel with H-Shaped Pyramid Fins

Jianbing Cheng

School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: May 17, 2026; accepted: June 10, 2026; published: June 18, 2026

Abstract

The paper proposes a novel H-shaped pyramid fin. Taking a parallel-flow flat-tube microchannel

heat exchanger as the research object, a systematic analysis is conducted on the differences in air-side laminar flow and heat transfer characteristics between the pyramid fin and the traditional plain fin. The results show that the periodic protrusion structure of the pyramid fin induces strong secondary flows and local vortices within the flow channel, effectively disrupting the thermal boundary layer and significantly enhancing the local convective heat transfer coefficient. Within the investigated Reynolds number range, the average Nusselt number of the pyramid fin is considerably higher than that of the plain fin, and the comprehensive thermal performance evaluation factor JF consistently exceeds 1, indicating that the benefits of heat transfer enhancement outweigh the penalty of increased flow resistance. The distribution of secondary flow intensity is highly consistent with that of the local heat transfer coefficient, revealing the essential mechanism by which vortex structures enhance heat transfer. This study provides a theoretical basis and technical support for the structural optimization of microchannel heat exchanger fins and the efficient operation of CO₂ heat pump systems.

Keywords

Parallel-Flow Microchannel Heat Exchanger, Pyramid Fin, Air-Side Heat Transfer, Secondary Flow

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

随着全球气候变化问题日益严峻，温室气体减排已成为国际社会的普遍共识。热泵技术凭借其高效的能源利用特性，被广泛认为是替代传统化石燃料供暖、推动建筑领域脱碳降耗的关键技术路径[1] [2]。在热泵系统中，换热器作为能量传递的核心部件，其换热性能直接决定整个系统的能效比、运行稳定性及节能潜力，是实现系统低碳运行的核心支撑。

在采用 CO₂ 作为工质的跨临界循环系统中传统翅片管式换热器虽技术成熟、成本低廉，但在紧凑性、换热效率及制冷剂充注量等方面存在明显短板。平行流扁管微通道换热器凭借其独特的结构优势，为解决上述瓶颈提供了有效方案[3] [4]。与常规换热器相比，微通道换热器具有单位体积换热面积大、制冷剂侧压降小、换热系数高以及制冷剂充注量显著减少等突出优点[5]，更契合节能技术发展趋势。特别是在 CO₂ 跨临界循环中，由于系统工作压力极高，微通道扁管优异的耐压能力使其成为 CO₂ 系统气体冷却器及蒸发器的理想选择[6]。

根据热阻叠加原理，空气侧的对流换热热阻通常占换热器总热阻的 70%以上[7]，因此，优化翅片结构、强化空气侧传热是提升微通道换热器整体性能的关键突破口，也是当前节能技术领域的研究热点。张克鹏[8]通过仿真手段对微通道换热器的翅片结构进行了优化。Shinde 和 Lin [9]针对低雷诺数应用场景，提出了适用于紧凑式换热器的空气侧换热和摩擦因子关联式，综合考虑了百叶窗翅片的多种几何参数。Saleem 和 Kim [10]发现百叶窗翅片在高速下换热优势明显，而波纹翅片在低风速下具有更低的流动阻力。戴亚东等[11]对翅片管蒸发式冷凝器的换热特性进行了研究与结构优化；李彬和欧阳新萍[12]开展了叠片式空气冷却器自然对流换热的实验研究；刘逸等[13]探讨了组合式翅片管换热器传热与阻力性能的影响因素。在微通道换热器翅片结构的专项优化方面，吴学红等[14]对微通道换热器复合翅片的传热特性进行了研究；侯伟隆等[15]提出非对称式百叶窗翅片，有效改善了扁管背风侧流动死区，提升了综合换热性能；赵日晶等[16]对竖插翅片微通道换热器空气侧流动换热进行了分析及参数优化。

尽管当前翅片结构研究取得了一定进展，但传统翅片结构的换热强化潜力已接近瓶颈，针对 CO_2 跨临界循环系统的专用翅片结构研究仍存在不足，尤其缺乏对新型翅片流动传热机理的系统阐释。因此，本文提出一种新型 H 型金字塔翅片，通过与传统平直翅片对比，系统分析金字塔翅片的空气侧层流流动与传热机理，揭示二次流与涡旋结构对热边界层的破坏机制，明确金字塔翅片的强化传热本质，为微通道换热器的结构优化及 CO_2 热泵系统的节能升级提供理论依据与技术支持。

2. 物理及数学模型

2.1. 物理模型

平行流扁管微通道换热器是一种高效的热交换器，广泛应用于制冷、空调和其他需要热交换的工业领域。主要由扁管、翅片、进口集流管以及出口集流管组成。制冷剂流动形式主要有单流程、双流程以及多流程等。本文将采用金字塔型翅片并对其进行仿真模拟。如下图 1 所示：左图为单流程平行流扁管微通道换热器的整体示意图。图中 1 表示微通道扁管，2 表示进口集流管，3 表示出口集流管，4 表示翅片，A 表示制冷剂进口，其对角位置为制冷剂出口。如下图 2 所示：将换热器扁管长度 T_l 设置为 810 mm，扁管宽度 T_d 设置为 26 mm，扁管高度 T_h 设置为 2 mm。在扁管上分布 17 个 $1\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ 的矩形微通道，

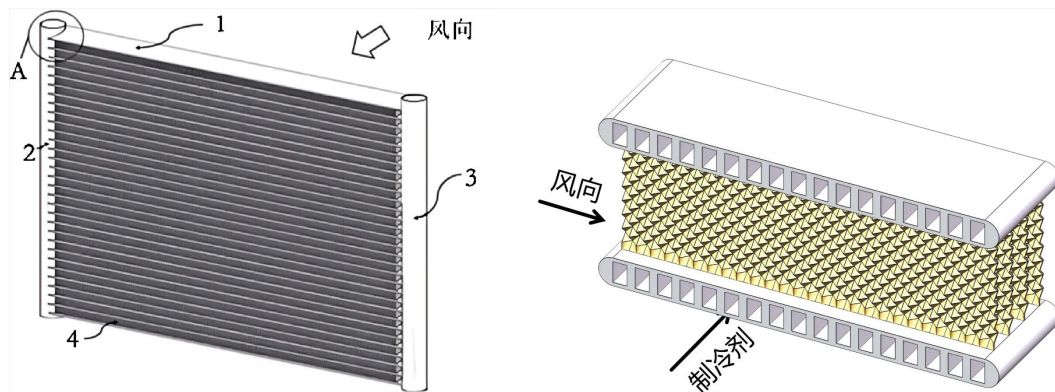


Figure 1. Schematic diagram of a parallel-flow flat-tube microchannel heat exchanger
图 1. 平行流扁管微通道换热器示意图

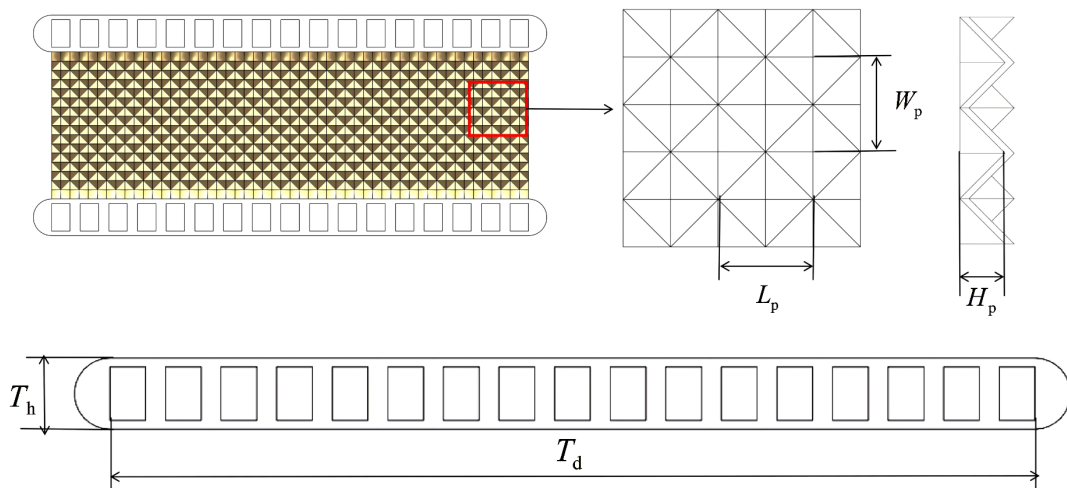


Figure 2. Schematic diagram of structural parameters of a parallel-flow flat-tube microchannel heat exchanger
图 2. 平行流扁管微通道换热器结构参数示意图

翅片间距设置 F_p 为 2 mm，翅片高度即扁管间距 F_h 设置为 8 mm，翅片长度 F_d 与扁管宽度 T_d 相等为 26 mm，翅片厚度 δ 设置为 0.1 mm。(本文所述 H 型翅片为微通道换热器专用金字塔型翅片，指由冲压成型的周期性凸/凹金字塔阵列构成、布置于两根相邻微通道扁管之间的空气侧强化传热元件。其流道截面呈类 H 形，通过金字塔单元诱导二次流破坏边界层，实现空气侧传热强化。)

2.2. 数学模型

为了方便计算平行流微通道金字塔翅片管换热器的传热及流动情况，本文做了以下简化以及假设：空气物性为常数，忽略其随温度的变化；流体和翅片的物性参数在计算中视为常数；翅片侧空气流动视为定常不可压缩流动；计算中忽略空气黏性耗散以及质量力对传热和流动的影响。根据上面假设，计算过程的控制方程可写为：

连续方程：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (i=1,2,3) \quad (1)$$

动量方程：

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu + \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (2)$$

流体域能量方程：

$$\rho c_p u_j \frac{\partial T_f}{\partial x_j} = \lambda_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial x_j^2} \quad (3)$$

固体域能量方程：

$$\lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x_j^2} = 0 \quad (4)$$

式中， μ ——流体动力黏度，Pa·s； λ_f 、 λ_s ——流体、固体导热系数，W/(m·K)； T_f 、 T_s ——流体、固体温度，K。

2.3. 计算域、边界条件及初始条件

由于平行流微通道金字塔翅片换热器在空气侧换热具有对称结构，本文选取 1/2 翅片以及与其连接的 1/2 扁管作为计算对象。本文计算域如图 3 所示，选取扁管以及与其连接的一半翅片作为计算对象。

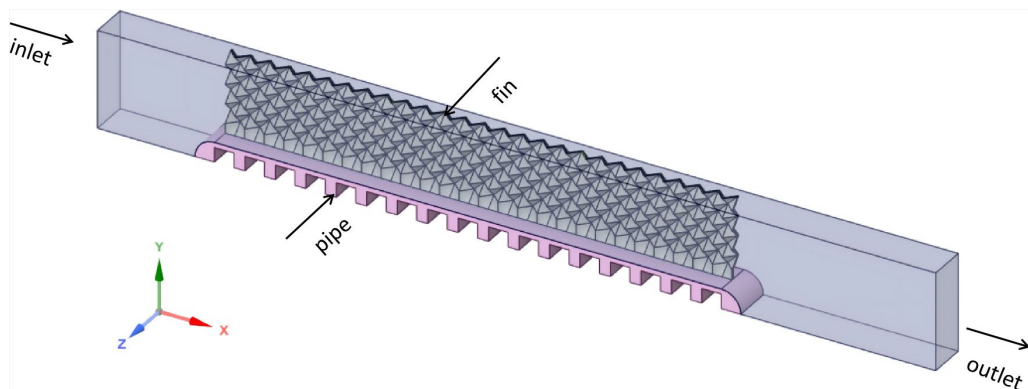


Figure 3. Computational domain of a parallel-flow flat-tube microchannel heat exchanger with pyramid-type fins
图 3. 平行流扁管微通道金字塔型翅片换热器计算域

扁管与翅片的材料设置为铝，流体设置为空气。在入口处设置 5 mm 延长段，出口处设置 15 mm 延长段。

由于平行流扁管微通道换热器在空气流动方向具有重复的几何结构，因此与翅片平行的空气域前后壁面设置为周期性边界条件。翅片与空气接触表面设置为 coupled 流固耦合面。进口采用速度入口，出口采用自然出流边界条件，扁管内壁面为等温壁面，其他面设为对称边界。在蒸发器中，CO₂制冷剂在扁管内发生两相沸腾蒸发过程。只要存在气液两相，其饱和温度就严格对应于该压力下的饱和温度。因此，在整个有效换热长度内，制冷剂侧的温度几乎保持恒定。因此，壁面等温假设是对蒸发工况下制冷剂侧热边界条件的高度近似，比变温假设更符合实际物理过程。边界条件如下：

进口：

$$u = u_{in}, v = w = 0, T = T_{in} = 265 \text{ K} \quad (5)$$

式中 $u_{in} = 1 \sim 3 \text{ m/s}$ 。

出口：

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

前后壁面：

$$\phi(x, y, z_{min}) = \phi(x, y, z_{min} + F_p) \quad (7)$$

扁管内壁面：

$$T = T_w = 300 \text{ K} \quad (8)$$

流固耦合面：

$$u = v = w = 0, T_f = T_s, \lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial n} = \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial n} \quad (9)$$

2.4. 相关参数定义

当量直径以及雷诺数定义如下：

$$d_e = 2 \frac{T_d F_h}{T_d + F_h} \quad (10)$$

$$Re = \frac{\rho u_{in} d_e}{\mu} \quad (11)$$

u_{in} 为空气入口流速，m/s。

Nu 定义如下：

$$h = \frac{m_a C_{p_a} (T_{in} - T_{out})}{A_a \Delta T_{in}}, \Delta T_{in} = \frac{T_{in} - T_{out}}{\ln \left(\frac{T_{in} - T_w}{T_{out} - T_w} \right)}, Nu = \frac{h d_e}{\lambda_f} \quad (12)$$

m_a 为流体质量流量， T_{in} 、 T_{out} 、 T_w 分别为流体进口温度、流体出口温度以及扁管内壁面温度。 A_a 为垂直流体流动方向的翅片投影面积和扁管与空气接触换热面积之和。

局部对流换热系数 h_{local} 定义如下：

$$q_{local} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_w, h_{local} = \frac{q_{local}}{T_w - T_b} \quad (13)$$

式中 T_w 为翅片表面温度, T_b 是沿流动方向横截面上的流体平均温度。

$$T_b = \frac{\iint T(x, y, z) u(x, y, z) dydz}{\iint u(x, y, z) dydz} \quad (14)$$

传热因子 j 、阻力因子 f 定义如下:

$$j = \frac{h}{\rho u_{in} C p_a} Pr^{2/3} \quad (15)$$

$$f = \frac{2(P_{in} - P_{out}) d_e}{\rho u_{in}^2 F_d} \quad (16)$$

P_{in} 、 P_{out} 为流体进出口压力。

以平直翅片为参考, 采用强化传热因子 JF 描述金字塔翅片的强化传热性能, 其定义式如下: 定义如下:

$$JF = (j/j_{ref}) / (f/f_{ref})^{1/3} \quad (17)$$

使用 Se 来描述计算区域的二次流强度, 平均二次流强度及沿流动方向局部二次流强度 Se_s 数学定义如下:

$$Se = \frac{\rho d_e^2 |\partial w / \partial y - \partial y / \partial z|}{\mu} \quad (18)$$

$$Se_s = \iint_{A_x} Se dA_x / \iint_{A_x} dA_x \quad (19)$$

2.5. 网格独立性验证

图 4 为本文所验证四套网格对 Nu 以及阻力因子 f 的影响。如图 4 所示: 网格数量分别为 125 万、250 万、332 万和 417 万。本文选取网格数量为 332 万计算基准。当网格为 125 万时, Nu 与 332 万网格

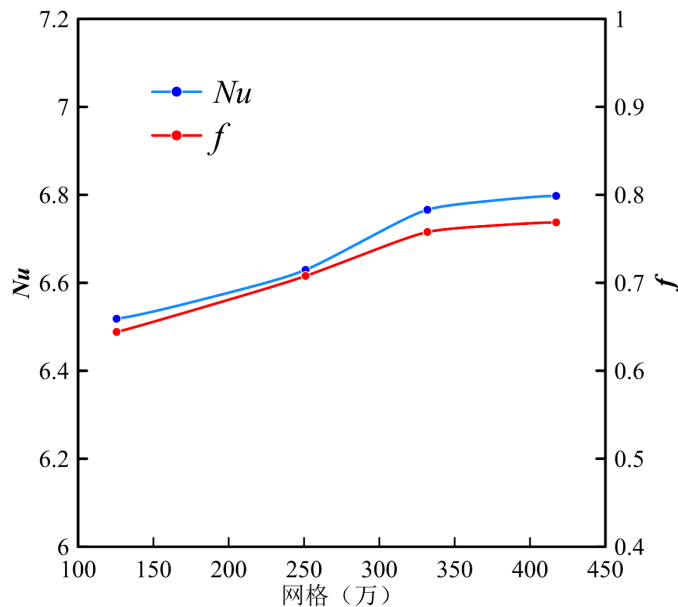


Figure 4. Grid independence verification
图 4. 网格独立性验证

相比误差为 3.66%，阻力因子 f 与 332 万网格相比误差为 3.75%；当网格为 250 万时， Nu 与 332 万网格相比误差为 2.02%，阻力因子 f 与 332 万网格相比误差为 2.07%；当网格为 417 万时， Nu 与 332 万网格相比误差为 -0.47%，阻力因子 f 与 332 万网格相比误差为 -0.48%。

2.6. 数值方法准确性验证

本文选取 Wei [17] 扁管外带球凹凸翅片进行了数值模拟研究。研究模型为 wei 所使用模型。将模拟结果与文献中的实验关联式进行对比，对比结果如图 5 所示，在速度为 2~6 m/s 时，其 Re 在其数值关联式范围内。数值结果与 Wei 关联式结果吻合较好， Nu 最大偏差为 7.85%，阻力因子 f 最大偏差为 -13.0%。这表明本文所使用数值模型较为可靠。

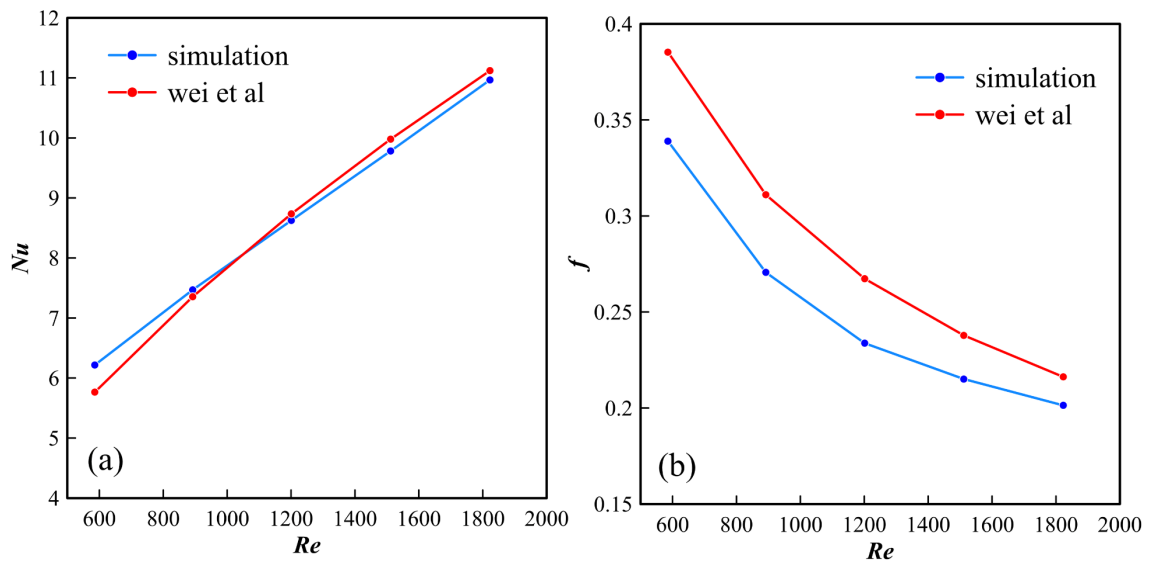


Figure 5. Numerical method validation (a) $Nu-Re$; (b) $f-Re$
图 5. 数值方法验证。(a) $Nu-Re$; (b) $f-Re$

3. 结果与讨论

3.1. 平行流扁管微通道金字塔型翅片管换热器流动与传热平均特性

本节两种翅片的厚度为 $\delta = 0.1$ mm，长度为 $F_d = 26$ mm，扁管间距为 $F_h = 8$ mm，翅片间距 $F_p = 2$ mm。金字塔主要参数为： $H_p = 0.5$ mm、 $L_p = 1$ mm、 $W_p = 1$ mm。如图 6 展示了平行流微通道换热器传热与流动平均特性。如图 a 所示，在所研究的 Re 范围内，金字塔型翅片的 Nu 始终高于平直翅片，表明其结构能更有效地扰动流体边界层，从而提升传热能力。如图 b 所示，金字塔型翅片的 f 始终高于平直翅片，意味着其复杂的几何形态在强化传热的同时，也带来了更大的流动阻力，会增加系统的泵功消耗。如图 c 显示金字塔型翅片的 JF 因子始终高于 1。这说明，虽然金字塔型翅片因强烈的二次流而产生了更高的流动阻力，但其带来的传热强化收益依然占据优势，体现出更优的综合热工性能。如图 d 展示了两种翅片二次流强度的差异。金字塔型翅片的 Se 数值远高于平直翅片，且随 Re 增大呈线性快速增长，而平直翅片的 Se 始终维持在极低水平。金字塔型翅片通过其独特的几何构型，在流道内诱导出远强于平直翅片的二次流。这种强烈的二次流一方面有效破坏了流体边界层，大幅提升了对流换热能力；另一方面也加剧了流体的湍流耗散与摩擦，导致流动阻力显著增加。从综合性能来看，金字塔型翅片的传热强化收益超过了阻力增加的代价，表现更优。

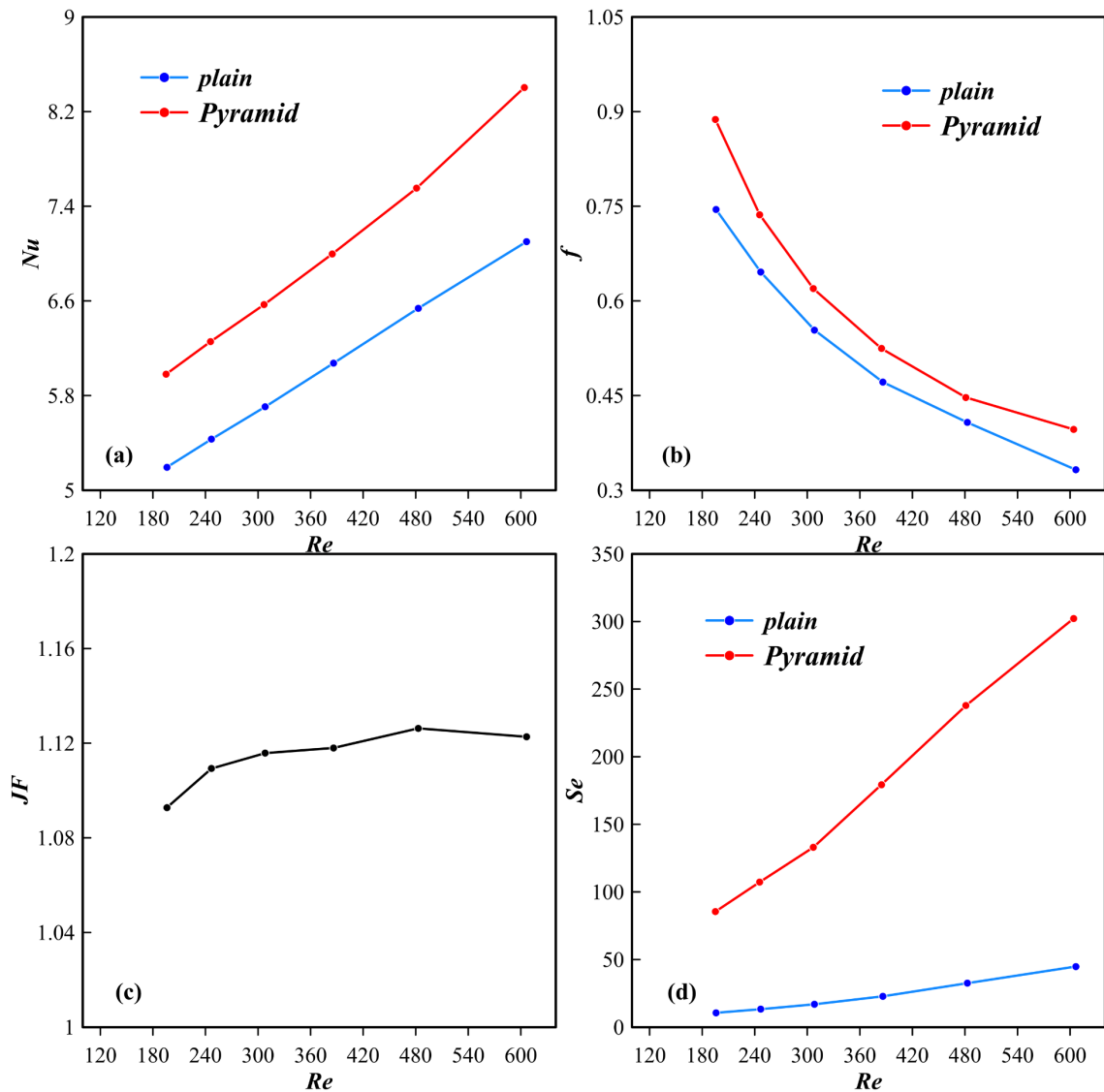


Figure 6. Comparison of heat transfer and flow characteristics of a parallel-flow microchannel heat exchanger. (a) Nu - Re ; (b) f - Re ; (c) JF - Re ; (d) Se - Re

图 6. 平行流微通道换热器传热与流动特性比较。(a) Nu - Re ; (b) f - Re ; (c) JF - Re ; (d) Se - Re

3.2. 沿流动方向截面 Se 与 Se_s 分布

如图 7 对比了平直翅片与金字塔型翅片沿流动方向的局部二次流强度分布。金字塔翅片微通道换热器沿流动方向的所有截面均呈现出强烈的局部高 Se 区域，这些区域对应金字塔凸起的位置。平直翅片微通道换热器 Se 分布整体平缓且数值偏低，仅在流道进出口附近出现微弱的高值区，沿程无明显局部峰值。如图 8 展示了初始峰值的产生在通道入口段，此时流体刚接触金字塔结构，受到壁面突然的几何扰动，边界层分离形成强烈的二次流。当流体流过初始扰动区后，流动逐渐发展并趋于稳定。随着流动向下游发展，在粘性耗散的作用下，小尺度的涡结构能量衰减。流动逐渐适应了周期性几何结构，二次流的生成与耗散在每个周期内达到一种动态平衡。

金字塔型翅片换热器通过周期性凸起结构，在流道内沿流动方向诱导出强烈的局部二次流，这既是其强化对流换热的核心机制，也带来了更高的流动阻力与能量耗散；而平直翅片换热器则呈现出均匀平

缓的低 Se 分布，流动更平稳、阻力更小，但二次流扰动弱，换热能力也相对较低。

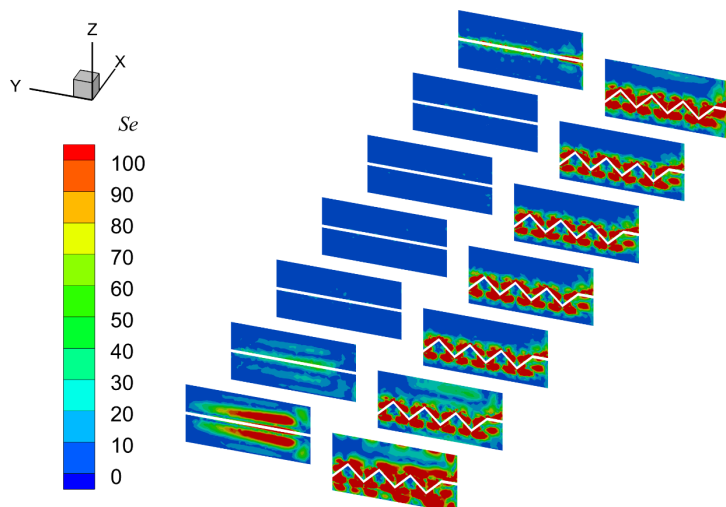


Figure 7. Se distribution in the cross-section along the flow direction of a parallel-flow microchannel heat exchanger
图 7. 平行流微通道换热器沿流动方向截面 Se 分布

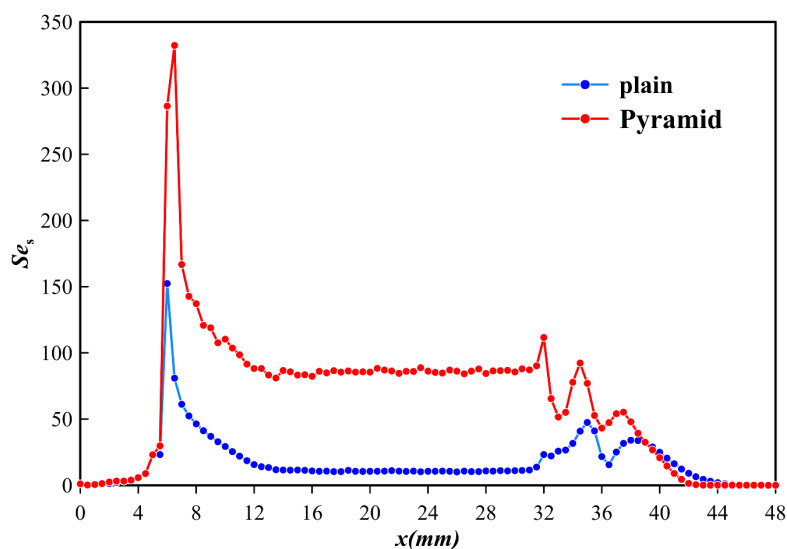


Figure 8. Se_s distribution in the cross-section along the flow direction of a parallel-flow microchannel heat exchanger
图 8. 平行流微通道换热器沿流动方向截面 Se_s 分布

3.3. 翅片表面 h_{local}

如图 9 展示了 $u = 1 \text{ m/s}$ 时平直翅片和金字塔翅片在沿流动方向三个截面周向局部对流换热系数 h_{local} 。平直翅片 h_{local} 整体处于较低水平，数值大多在 0 到 50 之间波动，曲线走势平缓，没有出现明显的尖锐峰值。因为在平直通道内，流体流动以大尺度回流为主，缺乏强烈的局部扰动，热边界层相对稳定，因此换热能力有限且分布均匀。同时，沿流动方向的两条曲线差异不大。金字塔翅片的 h_{local} 分布则呈现出截然不同的特征。曲线出现了多个尖锐的峰值，最高值接近 280，远高于平直翅片的水平，且在 $y = 1.5 \text{ mm}$ 、 2.5 mm 、 3.5 mm 等位置形成了显著的局部换热强化区域。这些峰值的位置，恰好与金字塔凸起的几何结构一一对应。

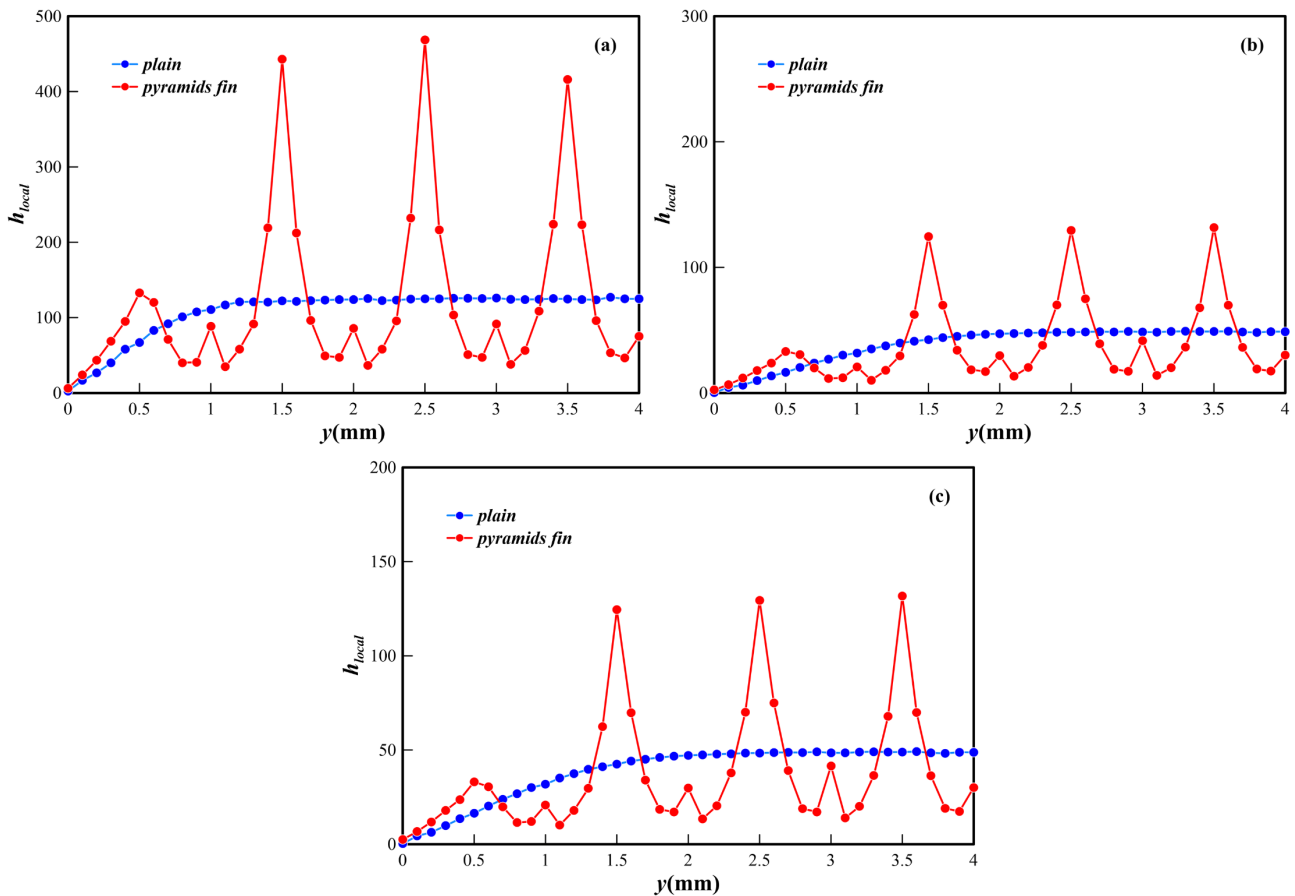


Figure 9. Circumferential local convective heat transfer coefficient h_{local} on the fin surface of a parallel-flow microchannel heat exchanger

图 9. 平行流微通道换热器翅片表面周向局部对流换热系数 h_{local}

如图 10 所示, 平直翅片表面的 h_{local} 入口段最高, 沿流体流动方向沿程平滑衰减。这种分布展示了低阻力、低扰动的平稳换热模式, 但换热效率随流动距离显著下降, 整体换热能力弱于金字塔型翅片。金字塔型翅片表面 h_{local} 呈现出周期性的网格状分布, 对应金字塔凸起的几何结构。每个金字塔结构的前缘与后缘均为 h_{local} 峰值区, 而凸起之间的谷底则为低值区。因为金字塔结构可以在流动内诱导出强烈的二次流与漩涡, 不断破坏流体边界层, 从而在每个凸起位置维持局部高换热强度。这种周期性扰动导致其整体换热性能优于平直翅片能有效避免边界层过度增厚导致的换热衰减。

3.4. 沿流动方向截面速度矢量分布

如图 11 为 $u = 1 \text{ m/s}$ 时, 平直翅片和金字塔翅片通道内沿流动方向($x = 9 \text{ mm}$ 、 19 mm 、 29 mm)的截面速度矢量分布。从图中可以看出, 金字塔型翅片通道内形成了周期性的涡旋结构, 这是流体流经翅片凸起时, 在凸起后方发生流动分离与再附的直接结果。在翅片凸起上方, 涡旋结构清晰可见; 在翅片之间的凹槽内, 形成了强烈的二次流与再循环流动, 速度矢量方向复杂, 流体被强烈扰动。在 $x = 9 \text{ mm}$ 时涡旋刚形成, 结构清晰且强度适中; 在 $x = 19 \text{ mm}$ 时涡旋发展充分; 在 $x = 29 \text{ mm}$ 处涡旋开始在粘性耗散作用下衰减, 但仍保持明显的涡结构。金字塔翅片的凸起结构极大地破坏了流动的层流特性, 显著增强了流体的混合程度与湍流强度, 为对流换热的强化提供了流动基础。平直翅片通道内未形成明显的涡旋结构, 仅在局部区域形成小范围的回流区, 速度矢量方向相对单一, 沿流动方向的流动结构无明显变化,

流体混合程度低，热边界层能够持续发展增厚，难以实现有效的换热强化。

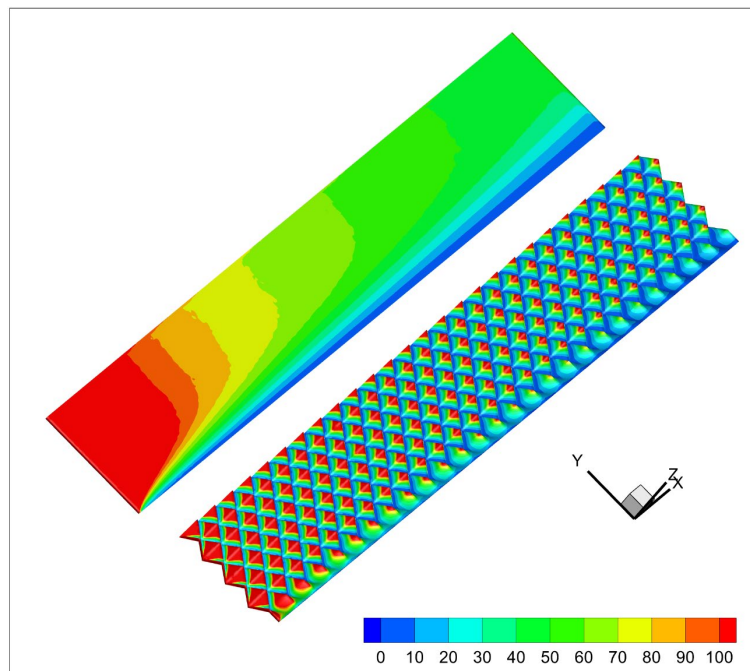


Figure 10. h_{local} distribution on the surface of plain fins and pyramid fins of a parallel-flow microchannel heat exchanger
图 10. 平行流微通道换热器平直翅片和金字塔翅片表面 h_{local} 分布

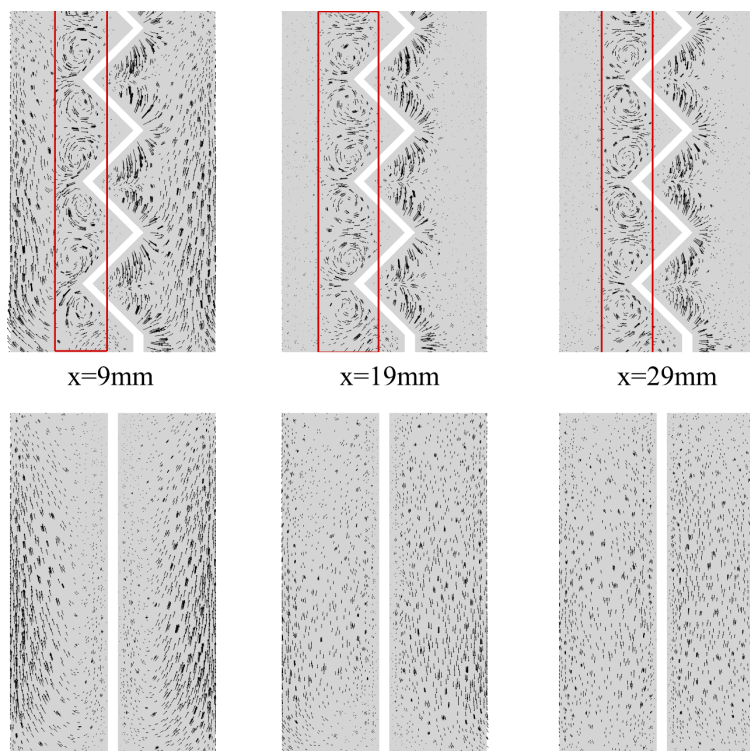


Figure 11. Velocity vector distribution in the cross-section along the flow direction for heat exchangers with plain fins and pyramid fins
图 11. 平直翅片和金字塔翅片换热器沿流动方向截面速度矢量分布

4. 结论

本文针对微通道换热器空气侧传热强化问题,提出了一种新型 H 型金字塔翅片结构,并与传统平直翅片进行了系统的数值对比研究,主要得出以下结论:

1) 金字塔翅片具有更优的综合热性能。在相同雷诺数条件下,金字塔翅片的平均努塞尔数显著高于平直翅片,虽然流动阻力相应增加,但综合热性能评价因子 JF 始终大于 1,表明其传热强化收益超过了阻力增加的代价。

2) 金字塔结构诱导出强烈的二次流。二次流强度 Se 的分布表明,金字塔翅片沿流动方向形成周期性高 Se 区域,与金字塔凸起位置一一对应,而平直翅片的 Se 始终处于极低水平。强烈的二次流是金字塔翅片强化传热的核心机制。

3) 局部换热系数呈现周期性分布特征。金字塔翅片表面局部对流换热系数 h_{local} 在凸起前缘与后缘形成明显峰值,形成周期性分布;而平直翅片的 h_{local} 沿流动方向单调衰减,缺乏局部强化区域。

4) 速度矢量分布揭示了涡旋演化规律。金字塔翅片通道内形成了周期性涡旋结构,涡旋在凸起后生成、发展并逐渐耗散,显著增强了流体混合与边界层扰动;平直翅片通道内无明显涡旋,流动平稳,换热能力有限。

参考文献

- [1] Lazzarin, R. (2020) Heat Pumps and Solar Energy: A Review with Some Insights in the Future. *International Journal of Refrigeration*, **116**, 146-160. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.03.031>
- [2] Gaur, A.S., Fitiwi, D.Z. and Curtis, J. (2021) Heat Pumps and Our Low-Carbon Future: A Comprehensive Review. *Energy Research & Social Science*, **71**, Article 101764. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101764>
- [3] Morosuk, T. and Tsatsaronis, G. (2009) Advanced Exergetic Evaluation of Refrigeration Machines Using Different Working Fluids. *Energy*, **34**, 2248-2258. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.01.006>
- [4] Voloshchuk, V., Gullo, P. and Sereda, V. (2020) Advanced Exergy-Based Performance Enhancement of Heat Pump Space Heating System. *Energy*, **205**, Article 117953. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117953>
- [5] Illán-Gómez, F., García-Cascales, J.R., Hidalgo-Mompeán, F. and López-Belchí, A. (2017) Experimental Assessment of the Replacement of a Conventional Fin-and-Tube Condenser by a Minichannel Heat Exchanger in an Air/Water Chiller for Residential Air Conditioning. *Energy and Buildings*, **144**, 104-116. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.041>
- [6] 密洁霞. 微通道蒸发器和翅片管式蒸发器性能对比试验[J]. 制冷与空调, 2021, 21(12): 48-52.
- [7] 杨世明, 陶文铨. 传热学[M]. 第 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2007: 248.
- [8] 张克鹏. 微通道换热器翅片结构优化[J]. 制冷与空调, 2021, 21(1): 32-35.
- [9] Shinde, P. and Lin, C.X. (2017) A Heat Transfer and Friction Factor Correlation for Low Air-Side Reynolds Number Applications of Compact Heat Exchangers (1535-RP). *Science and Technology for the Built Environment*, **23**, 192-210. <https://doi.org/10.1080/23744731.2016.1203240>
- [10] Saleem, A. and Kim, M.H. (2017) Air-Side Thermal Hydraulic Performance of Microchannel Heat Exchangers with Different Fin Configurations. *Applied Thermal Engineering*, **125**, 780-789. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.082>
- [11] 戴亚东, 孙红, 冯威, 等. 翅片管蒸发式冷凝器换热特性研究与结构优化[J]. 节能技术, 2023, 41(5): 400-407+419.
- [12] 李彬, 欧阳新萍. 叠片式空气冷却器自然对流换热实验研究[J]. 节能技术, 2023, 41(2): 130-134.
- [13] 刘逸, 陈培强, 陈鑫, 等. 组合式翅片管换热器传热与阻力性能影响因素研究[J]. 节能技术, 2021, 39(6): 498-504.
- [14] 吴学红, 孟浩, 冯丽华, 等. 微通道换热器复合翅片的传热特性研究[J]. 低温与超导, 2015, 43(2): 74-78.
- [15] 缙伟隆, 刘雨声, 冯嘉旺, 等. 微通道换热器非对称式百叶窗翅片性能研究[J]. 制冷学报, 2024, 42(4): 57-64.
- [16] 赵日晶, 位兴华, 黄东, 等. 竖插翅片微通道换热器空气侧流动换热分析及参数优化[J]. 制冷学报, 2024, 44(3): 87-94.

- [17] Wei, X.Q., Zhang, Y.H., Hu, W.L., *et al.* (2016) The Fluid Flow and Heat Transfer Characteristics in the Channel Formed by Flat Tube and Dimpled Fin. *International Journal of Thermal Sciences*, **104**, 86-100.
<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2015.12.018>