

文章编号: 1000-8055(2025)00-20250344-10

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20250344

典型离散翅片微通道流动沸腾特性研究

王玉兵^{1,2}, 张大林¹, 詹宏波², 刘世睿¹, 朱光亚¹

(1. 南京航空航天大学 航空学院

飞行器环境控制与生命保障工信部重点实验室, 南京 210016;

2. 中航工业金城南京机电液压工程研究中心

航空机电系统综合航空科技重点实验室, 南京 211106)

摘 要: 基于离散翅片微通道流动沸腾的多相流换热器是一种可工程化的热沉技术, 可应对高热流密度的飞行器散热需求。实验研究了 R134a 制冷剂在 4 种典型离散翅片微通道中的流动沸腾换热特性。微通道的当量直径为 0.67 mm, 实验工况范围为: 干度为 0~1, 质量流率为 150~300 kg/(m²·s), 热流密度为 10~25 kW/m²。实验结果表明: 微通道流动沸腾压降和传热系数随工质质量流率和热流密度的增大而提高, 不同翅片之间对比结果表明: 翅片形状对于压降的影响相比于传热系数更为显著, 以质量流率为 150 kg/(m²·s)、热流密度为 10 kW/m² 工况为例, 方形、圆形和正弦形翅片的压降相较于菱形翅片高出约 272.4%、116.9%、48.7%, 平均沸腾传热系数相较于菱形翅片仅提高 20.6%、11.0%、2.7%; 以质量流率为 300 kg/(m²·s)、热流密度为 25 kW/m² 工况为例, 方形、圆形和正弦形翅片压降相对于菱形翅片分别增加 351.1%、121.1%、94.7%, 平均沸腾传热系数较于菱形翅片分别提高约 24.7%、11.0%、8.8%。基于试验数据修正了离散翅片微通道流动沸腾压降和传热预测关联式, 并进行不同翅片综合性能的对比分析, 结果表明菱形翅片综合性能更优。

关 键 词: 微通道; 离散翅片; 流动沸腾; 压降特性; 传热性能

中图分类号: V245.3

文献标志码: A

Investigation on flow boiling characteristics in mini channels of typical discrete fin

WANG Yubing^{1,2}, ZHANG Dalin¹, Zhan Hongbo², LIU Shirui¹, ZHU Guangya¹

(1. Key Laboratory of Aircraft Environment Control and Life Support,

Ministry of Industry and Information Technology, College of Aerospace Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aero Electromechanical System Integration,

Jincheng Nanjing Institute of Aircraft System,

Aviation Industry Corporation of China, Limited, Nanjing 211106, China)

Abstract: Mini channels with micro pin fins are engineerable heat sinks that can address the high heat flux dissipation for aerospace cooling systems. An experimental investigation of R134a flow boiling heat transfer was conducted in mini channels with circular, square, diamond, and sinusoidal fins, all of which had a hydraulic diameter of 0.67 mm. The experimental parameters covered a dryness range of 0 to 1, mass flux rates ranging from 150 to 300 kg/(m²·s), and heat flux between 10 and 25 kW/m². Results

收稿日期: 2025-07-21

基金项目: 航空科学基金(20240028052003)

作者简介: 王玉兵(1980—), 男, 研究员, 博士生, 研究方向为飞行器环境控制。E-mail: wangyb_njzx@163.com

通信作者: 张大林(1970—), 男, 教授, 博士, 研究方向为飞行器环境控制。E-mail: zhangdalin@nuaa.edu.cn

引用格式: 王玉兵, 张大林, 詹宏波, 等. 典型离散翅片微通道流动沸腾特性研究[J]. 航空动力学报, 2025, 41(X): 20250344. WANG Yubing, ZHANG Dalin, Zhan Hongbo, et al. Investigation on flow boiling characteristics in mini channels of typical discrete fin[J]. Journal of Aerospace Power, 2025, 41(X): 20250344.

indicated that both the flow boiling pressure drop and the heat transfer coefficient in mini channels increased with higher mass flux and heat flux. A comparative analysis revealed that fin shape had a more pronounced effect on the pressure drop than on the heat transfer coefficient. e.g., when the mass flux was $150 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ and the heat flux density was $10 \text{ kW}/\text{m}^2$, the pressure drops of square, circular, and sinusoidal fins were approximately 272.4%, 116.9%, and 48.7% higher than those of diamond-shaped fins, while the average boiling heat transfer coefficients only increased by 20.6%, 11.0%, and 2.7% compared with diamond-shaped fins. When the mass flux was $300 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ and the heat flux density was $25 \text{ kW}/\text{m}^2$, the pressure drops of square, circular, and sinusoidal fins rose by 351.1%, 121.1%, and 94.7% in contrast to diamond-shaped fins, and their average boiling heat transfer coefficients went up by about 24.7%, 11.0%, and 8.8%, respectively, in relative to diamond-shaped fins. Based on the experimental test data, the prediction correlation for discrete fin microchannel flow boiling pressure drop and heat transfer was revised, and a comparative analysis of the overall performance of different fins was carried out. The results demonstrated that diamond-shaped fins had superior overall performance.

Keywords: mini channel; discrete fins; flow boiling; pressure drop; heat transfer

高效紧凑换热器是实现机载制冷系统轻量化设计的关键技术之一。与传统尺寸的换热器相比,微通道换热器凭借其结构紧凑、高效换热等显著优势^[1],被认为是解决机载设备高热流密度散热的有效方法,是一种可工程化的先进热沉技术^[2-5]。目前,国内外机载微通道换热器的主要构型仍为传统板翅式,采用钣金成型翅片和钎焊加工的芯体,为满足设备进一步轻量化的需求,微通道当量直径需进一步减小,但传统板翅式构型的微通道换热器受限于加工工艺,进一步减小通道尺寸会导致通道质量难以控制。相比之下,离散翅片微通道的加工工艺更易于实现微小通道。同时,离散翅片扰流结构增大了换热面积、更好地混合气液两相、抑制蒸汽堵塞以及增强气泡成核效应,展现出比常规微通道更优异的换热性能^[6-9],更适应机载多相流换热器轻量化设计需求。

在离散翅片微通道蒸发器中,流动沸腾侧换热性能对蒸发器总传热系数起主导作用,决定了蒸发器的换热性能。带离散翅片扰流结构的微通道流动沸腾,由于扰流结构的引入,其压降特性和换热机理研究更加复杂^[7-14]。为了深入探究翅片形状对微通道内流动阻力和传热性能的影响,众多学者进行了不同翅片性能的对比测试。Wan 等^[15]试验测试对比了 4 种不同错排离散翅片微通道流动沸腾换热性能,实验结果表明方形离散翅片作为热沉更佳。Sun 等^[16]分析了 4 种不同离散翅片微通道,试验结果表明三角形离散翅片微通道的传热性能更佳。Qin 等^[17]基于试验测试证明菱形翅片流动和传热性能优于圆形、椭圆以及

三角形翅片。Chen 等^[18]试验测试发现流线型仿生结构可以有效提升最大临界热流和传热系数。Li 等^[19]和 Wang 等^[20]对比不同角度、通道宽度下交错排布的菱形离散翅片微通道的压降和换热性能,试验结果表明角度为 60° 、通道宽度为 1.4 mm 的菱形翅片是最佳选择。本文通过试验测试不同形状离散翅片微通道的流动沸腾压降和换热性能,旨在对比典型离散翅片微通道的综合性能,识别综合性能更佳的离散翅片类型,为工程实践中翅片的选型提供参考,从而为先进机载制冷系统的设计研发提供基础参数和技术支撑。

1 实验装置及数据处理方法

1.1 实验系统

图 1 为实验系统原理示意图,实验系统分为制冷剂回路、实验件和测控系统 3 个部分。

制冷剂回路由齿轮泵、过滤器、质量流量计、加热组件、测试段、冷凝器、储液罐和阀门组成。试验选用制冷剂 R134a 作为工质,制冷剂在齿轮泵的驱动下依序流经过滤器、质量流量计进入加热组件预热,然后进入实验件沸腾蒸发,最终进入冷凝器被冷水机组中循环的冷却液冷凝后返回储液罐,形成完整循环回路。实验件内的制冷剂通过可调直流电源控制功率加热,制冷剂的质量流率通过调整齿轮泵的转速和旁通阀门控制。冷凝器与冷水机组相连,通过调节冷水机组中防冻液的温度,控制冷凝器出口处的制冷剂温度。测控系统通过数据采集模块记录实验件上的温度、压力等传感器数据。

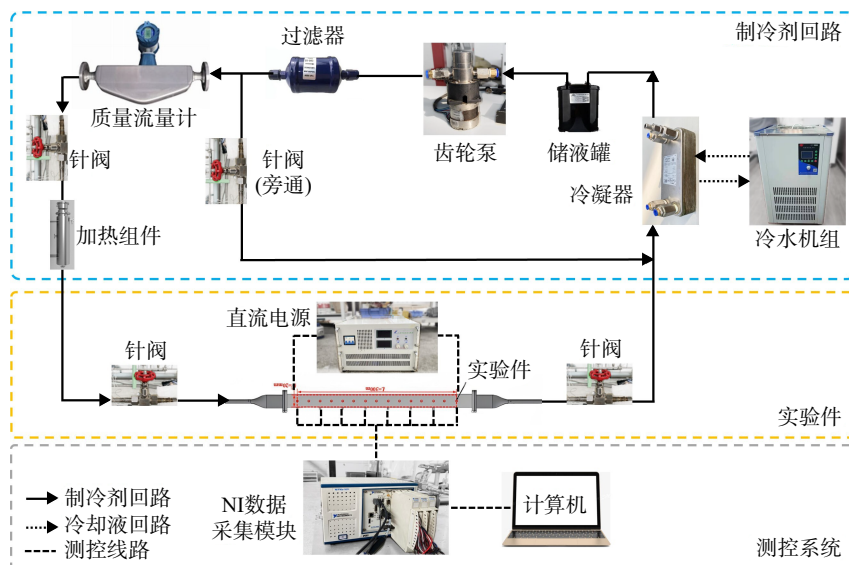


图 1 试验系统示意图

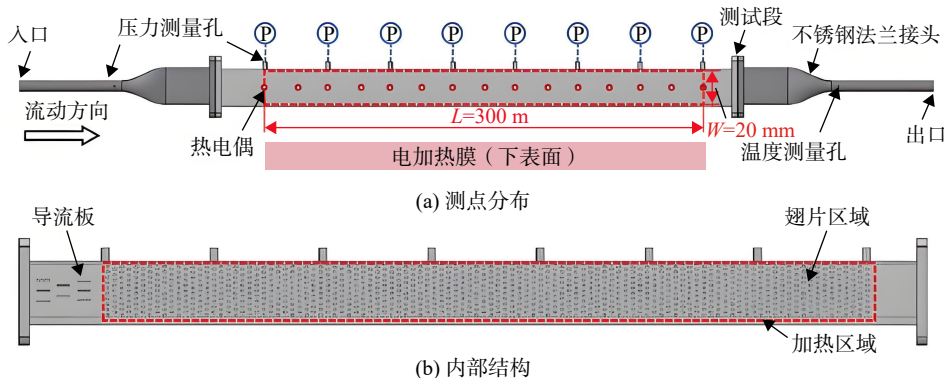
Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

1.2 实验件

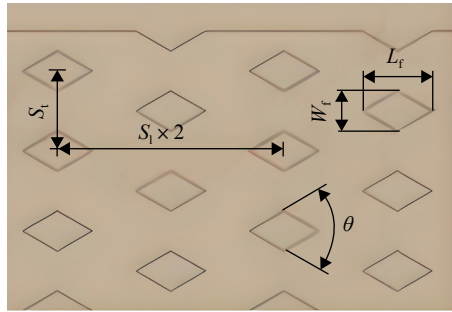
如图 2 所示, 实验件由单通道与插排离散翅片阵列构成, 采用 3D 打印加工一体成型。其中矩形通道长为 350 mm, 流道截面为 20 mm(宽) × 0.5 mm(高), 结构参数如下: 上下壁厚各为 1 mm, 测压侧壁厚为 1 mm, 测温侧壁厚为 3 mm。离散翅片阵列总长为 300 mm, 起始于入口下游 30 mm 处, 入口布置导流板以确保制冷剂均匀进入翅片区域。下表面配置 300 mm × 20 mm 电加热膜, 完全覆盖翅片区域并维持稳定热流。测试通道单侧设有 8 个等距测压口, 通过绝对压力传感器监测压力场。上表面均匀布置 15 个 T 型热电偶测量壁温, 通道两端法兰接头处均设置压力测量孔(用于连接绝对压力传感器)和温度测量孔(用于连接 T 型热电偶)。

基于参考文献分析, 常见的离散翅片主要有

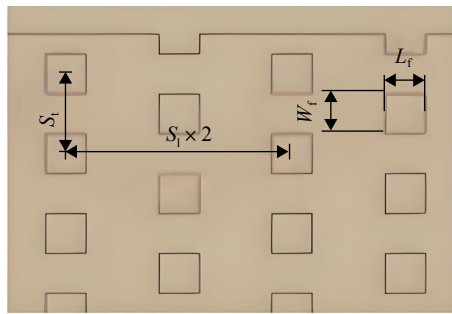
圆形、菱形、正方形、长方形、三角形、五边形、六边形、椭圆形、梯形、水滴形、S 形、水翼形和正弦形等整形结构以及其他开口结构, 工程实践表明开口型翅片的曲线/非对称结构会导致焊接接触面不规则分布, 需额外处理曲面区域, 显著增加焊接面积和工序复杂度, 并不适用于机载换热器设计。综合已有文献中的不同翅片结构的微通道沸腾流动特性, 可以发现菱形、方形、圆形、水滴形和椭圆形翅片最为常见。水滴形翅片因前端圆弧与后端尖尾的非对称结构易导致流动分离点后移, 诱发尾流区大范围涡旋, 显著增大摩擦压降, 同时气泡在尾部聚集易形成干涸点, 加剧局部流动阻力。椭圆形翅片因流道对称且表面曲率平缓, 虽能维持均匀流速分布, 但缺乏有效扰动机制, 导致液相滞留时间延长。因此, 本文最终选定菱形、方形、圆形和正弦形 4 种构型进

图 2 实验件布置示意图^[21]Fig. 2 Schematic diagram of the arrangement of test sections^[21]

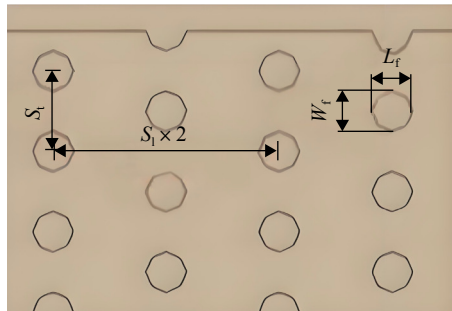
行深入对比测试。图 3 为本文使用的 4 种翅片形状^[21]。



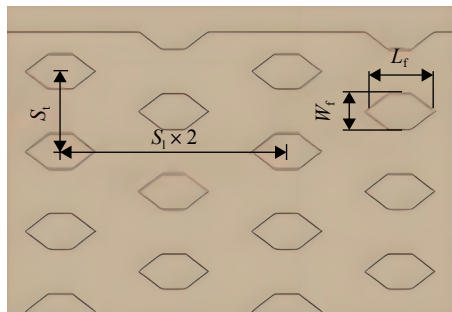
(a) 菱形



(b) 方形



(c) 圆形



(d) 正弦形

图 3 不同形状翅片 CAD 模型图^[21]

Fig. 3 CAD model for different pin fins^[21]

离散翅片扰流结构阵列的几何尺寸如表 1 所示, 包括尺寸参数: 翅片高度 h_{fin} 、翅片长度 L_{fin} 、翅片宽度 W_{fin} 、纵向节距 $S_{t,fin}$ 、横向节距 $S_{l,fin}$ 和计算参数: 水力直径 $D_h = 2h_{fin}(S_{t,fin} - W_{fin}) / (S_{t,fin} - W_{fin} + h_{fin})$ 、翅片列数 $N_{l,fin} = 300/S_{l,fin}$ 和换热面积。

表 1 不同形状翅片尺寸设计

Table 1 Geometry parameters of different pin fins

参数	翅片形状			
	菱形	方形	圆形	正弦形
翅片高度 h_{fin}/mm	0.5	0.5	0.5	0.5
翅片长度 L_{fin}/mm	1.73	1	1	1.73
翅片宽度 W_{fin}/mm	1	1	1	1
纵向间距 $S_{t,fin}/\text{mm}$	2	2	2	2
横向间距 $S_{l,fin}/\text{mm}$	2.8	2.8	2.8	2.8
水力直径 D_h/mm	0.67	0.67	0.67	0.67
翅片列数 $N_{l,fin}$	108	108	108	108

1.3 数据处理

基于微通道离散翅片的几何结构, 通道最大流速对应的雷诺数 Re 计算公式为:

$$Re = \frac{GD_h}{\mu} \quad (1)$$

式中质量流率 G 由通道最小流通截面积 A_{min} 确定, D_h 为最小流通截面尺寸的水力直径, 具体通过下式计算:

$$G = \frac{\dot{m}}{A_{min}} \quad (2)$$

$$A_{min} = \frac{W}{S_{t,fin}} h_{fin} (S_{t,fin} - W_{fin}) \quad (3)$$

$$D_h = \frac{4h_{fin}(S_{t,fin} - W_{fin})}{2(S_{t,fin} - W_{fin} + h_{fin})} \quad (4)$$

式中 $\dot{m}$ 为质量流量, W 为微通道宽度, $S_{t,fin}$ 为翅片纵向间距, h_{fin} 为微通道高度, W_{fin} 为翅片宽度。

试验中局部沸腾传热系数 h_{tp} 由下式计算:

$$h_{tp} = \frac{q}{T_{w,i} - T_{sat,i}} \quad (5)$$

式中 q 为热流密度, 可通过式(6)计算, 其中 Q 为试验件直流电源加热功率, A_h 为通道内沸腾换热面积。 $T_{w,i}$ 是局部壁面温度, $T_{sat,i}$ 为局部饱和温度。

热流密度 q 的计算公式为

$$q = \frac{Q}{A_h} \quad (6)$$

微通道内制冷剂干度 x 计算式为

$$x = \frac{H_i - H_{i,l,sat}}{H_{i,g,sat} - H_{i,l,sat}} \quad (7)$$

式中 H_i 为局部位置 i 对应焓值, 按式(8)计算;

$H_{i,g,\text{sat}}$ 和 $H_{i,l,\text{sat}}$ 分别为对应位置气态和液态饱和焓值。

$$H_i = H_e + \frac{QL_i}{\dot{m}} \quad (8)$$

式中 H_e 为进口处焓值, 根据通道进口处的温度和压力确定, L_i 为局部位置 i 对应的加热段长度, L 为加热段总长。

压降 dp 定义为^[22]:

$$dp = \Delta p_{\text{loss},\text{in}} + \Delta p_{\text{go}} + \Delta p_{\text{ac}} + \Delta p_{\text{tp},\text{f}} + \Delta p_{\text{loc}} + \Delta p_{\text{g}} + \Delta p_{\text{lo}} + \Delta p_{\text{loss},\text{out}} \quad (9)$$

式中 $\Delta p_{\text{loss},\text{in}}$ 和 $\Delta p_{\text{loss},\text{out}}$ 为进出口压力损失; Δp_{go} 和 Δp_{lo} 为过热和过冷区的单相流阻; Δp_{ac} 为由流体密度变化引起的加速压降; $\Delta p_{\text{tp},\text{f}}$ 为两相摩擦压降; Δp_{loc} 为由通道的截面、方向等变化和局部扰动等引起的两相局部压降; Δp_{g} 为由流动方向上重力作用而产生的重力压降。流动沸腾压降中两相摩擦压降的影响占主导因素, 离散翅片微通道的狭小尺寸与翅片扰流作用显著增强了气液摩擦压降。针对微通道两相摩擦压降的计算, 可采用分液相摩擦压降倍率法:

$$\phi_1^2 = \left(\frac{\Delta p}{\Delta L} \right)_{\text{tp},\text{f}} / \left(\frac{\Delta p}{\Delta L} \right)_{\text{ls}} \quad (10)$$

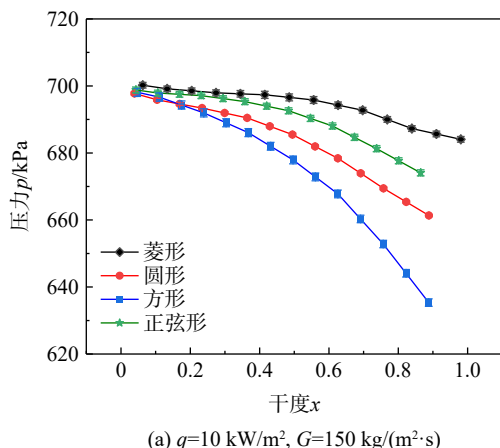
其中分液相摩擦压降倍率因子 ϕ_1^2 定义为:

$$\phi_1^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (11)$$

经验参数 C 需根据流动状态、制冷剂种类和通道结构进行调整。洛马参数 X 的计算式为:

$$X = \sqrt{\left(\frac{\Delta p}{\Delta L} \right)_{\text{ls}} / \left(\frac{\Delta p}{\Delta L} \right)_{\text{gs}}} \quad (12)$$

分相摩擦压降梯度表达式为:



$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta L} \right)_{\text{ls}} = \frac{[G_{\text{max}}(1-x)]^2}{2D\rho_l} f_{\text{ls}} \quad (13)$$

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta L} \right)_{\text{gs}} = \frac{(xG_{\text{max}})^2}{2D\rho_g} f_{\text{gs}} \quad (14)$$

测试区域沿流动方向被分为 N 段, 其中 N_{sub} 为过冷区域段, N_{ove} 为过热区域段, 各区域长度由热平衡确定。过冷/过热区的单相流阻定义为

$$\Delta p_{\text{lo}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{sub}}} \Delta p_{\text{lo},i} \quad (15)$$

$$\Delta p_{\text{go}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{ove}}} \Delta p_{\text{go},i} \quad (16)$$

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta L} \right)_{\text{lo}} = \frac{G_{\text{max}}^2}{2D\rho_l} f_{\text{lo}} \quad (17)$$

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta L} \right)_{\text{go}} = \frac{G_{\text{max}}^2}{2D\rho_g} f_{\text{go}} \quad (18)$$

式中 f_{ls} 、 f_{gs} 、 f_{lo} 、 f_{go} 分别为分液相、分气相、全液相、全气相 Moody 摩擦因子, 可用单相流的方法计算。下标 ls、gs 分别表示分液相、分气相, lo 和 go 分别表示全液相和全气相。

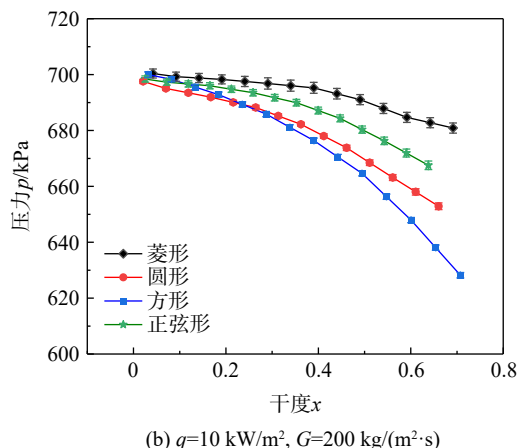
平均相对误差 (MAD, 量符号记为 E_{MAD}) 计算公式为:

$$E_{\text{MAD}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left| \frac{Y(j)_{\text{cal}} - Y(j)_{\text{exp}}}{Y(j)_{\text{exp}}} \right| \quad (19)$$

2 实验结果分析

2.1 压降特性

图 4 为不同形状离散翅片微通道沿程压力随干度变化趋势图。微通道流动沸腾总压降随着质



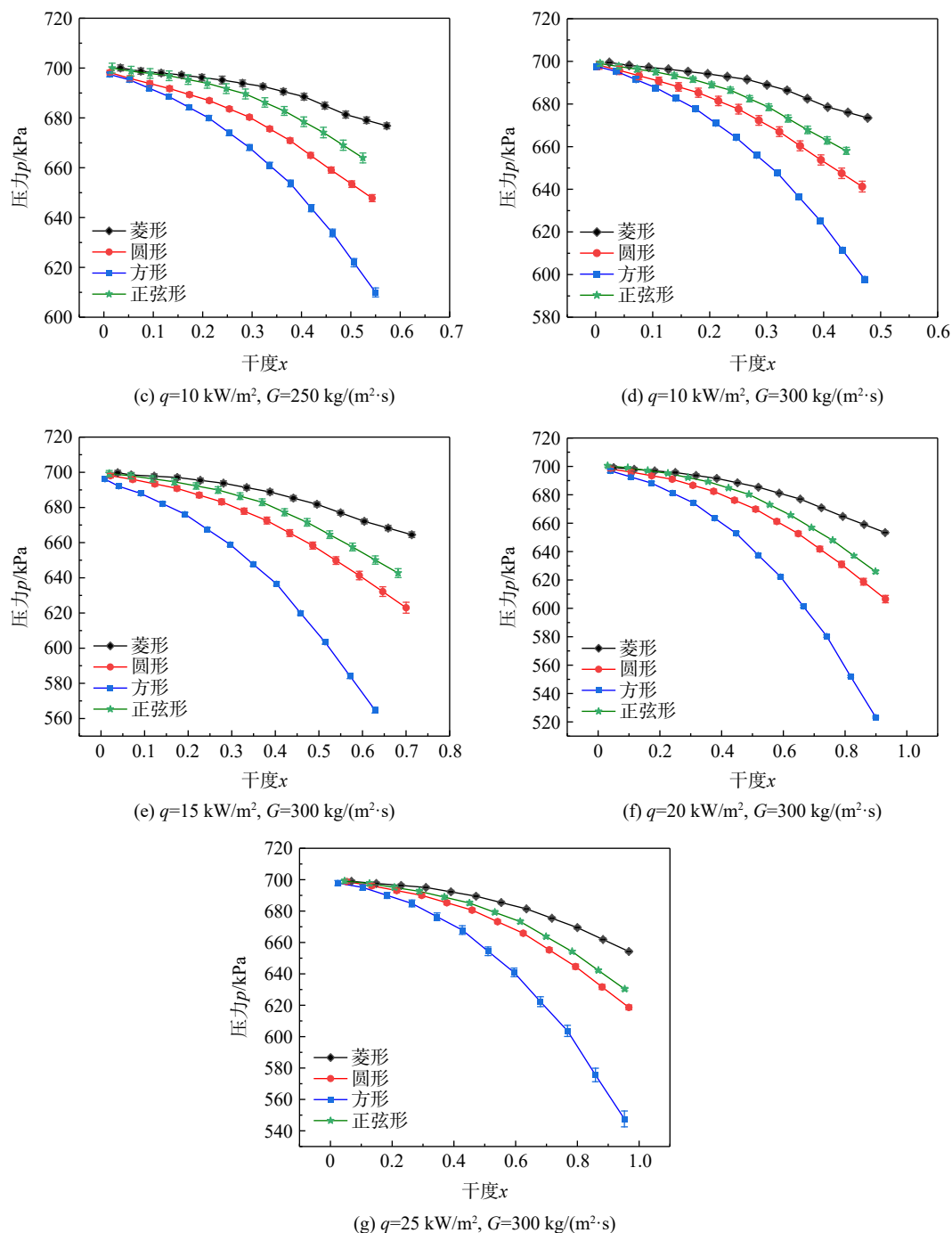


图 4 不同形状离散翅片微通道压力随干度变化趋势图

Fig. 4 Pressure variation of flow boiling in microchannels with different shapes of discrete fins with different mass flow rate and heat flux

量流率和热流密度增大而增大, 在不同质量流率 G 和不同热流密度 q 下沿程压力变化趋势一致, 当干度大于 0.3 后, 压降变化更为剧烈, 在一定范围内随着干度升高, 流型会发生转变, 气相流速急剧增加, 气液界面剪切力取代壁面剪切力成为压降主导, 同时气相聚集成大气泡堵塞通道, 导致两相摩擦压降更为显著。对比不同翅片, 菱形

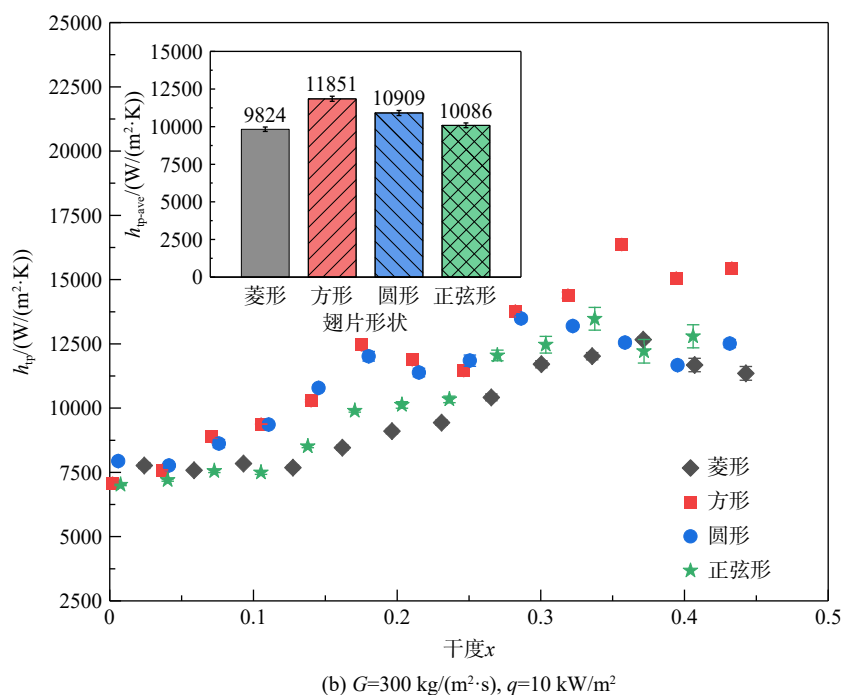
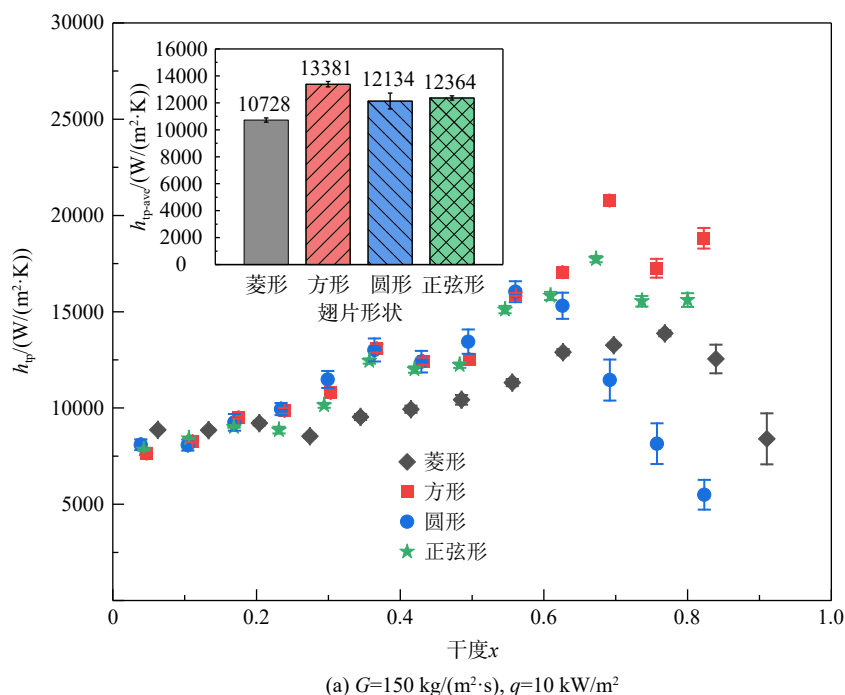
翅片由于头部存在剪切角有利于避免冷却剂与翅片之间的剧烈碰撞, 从而减小摩擦阻力。因此, 菱形翅片的压降最小。正弦形和圆形翅片比菱形翅片产生更大的压降, 这可能是由于正弦形和圆形翅片的圆弧对气相的分离作用较小, 对气相加速的贡献更大, 并引起更大的加速压力损失。方形微针翅片表现出相对最大的压降, 可能是由于

正面接触制冷剂面积较大, 造成制冷剂扰动较大, 引起了更大的压力损失。4 种不同翅片对于气液相的扰动作用差异较大, 导致流动阻力特性的差异较大, 其中方形翅片、圆形翅片和正弦形翅片的微通道总压降相较于菱形翅片的微通道更大。例如质量流率为 $150 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、热流密度为 $10 \text{ kW}/\text{m}^2$ 工况下, 方形、圆形和正弦形翅片的压降相较于菱形翅片高出约 272.4%、116.9%、48.7%, 质量流率为 $300 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、热流密度为 $25 \text{ kW}/\text{m}^2$ 工况下, 方形、圆形和正弦形翅片压降相对于菱

形翅片分别增加 351.1%、121.1%、94.7%。

2.2 传热特性

图 5 展示 4 种不同翅片在不同质量流率和加热热流密度工况下, 局部沸腾传热系数 h_{tp} 随干度的变化趋势和平均传热系数 $h_{\text{tp-ave}}$ 对比图, 图中 $p_{\text{sat,in}}$ 表示工质的进口饱和压力。微通道流动沸腾的平均传热系数随工质质量流率和热流密度的提高而增大。当干度小于 0.1 时, 各翅片形状对应的局部表面传热系数基本保持稳定; 当干度大于 0.1 时, 不同翅片由于对气液相掺混



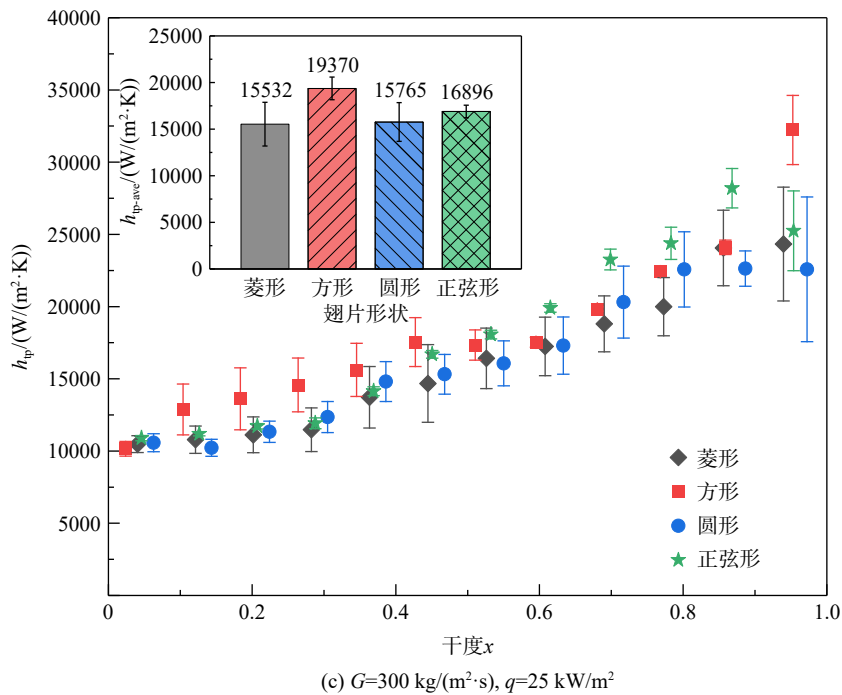


图 5 局部沸腾传热系数沿程变化($p_{\text{sat,in}}=700\text{ kPa}$)

Fig. 5 Variation of local boiling heat transfer coefficient along the channels ($p_{\text{sat,in}}=700\text{ kPa}$)

效应不一致,局部对流换热变化趋势不同,其中方形翅片通过增强汽泡扰动、破坏液膜热阻层,相对其他翅片换热效应更佳,但翅片形状对换热性能的总体影响相对于压降并不显著。热流密度为 10 kW/m^2 时,质量流率为 $150\text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ 和 $300\text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ 时,方形、圆形和正弦形翅片微通道的平均沸腾传热系数相较于菱形翅片微通道分别提高 20.6% 和 24.7% 、 11.0% 和 13.1% 、 2.7% 和 15.3% ;当质量流率为 $300\text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$,热流密度从 10 kW/m^2 提高到 25 kW/m^2 时,方形、圆形和正弦形翅片微通道的平均沸腾传热系数较于菱形翅片微通道分别提高约 20.6% 和 24.7% 、 1.5% 和 11.0% 、 2.7% 和 8.8% ,相同工况下翅片形状对传热的影响远小于压降。

2.3 预测公式修正及综合性能对比

本文参考文献提出的经验关联式^[23],离散翅

片微通道流动沸腾摩擦压降倍率因子 ϕ_1^2 和传热系数 h_{tp} 的预测关联式仅存在经验参数 C 和系数的差异,修正后经验关联式系数见表 2,试验值 dp_{exp} 和 $h_{\text{tp-exp}}$ 与修正预测值 dp_{pre} 和 $h_{\text{tp-pre}}$ 的对比如图 6 所示,修正后的公式 98% 预测数据点的相对偏差在 $\pm 30\%$ 以内,在干度为 $0\sim 1$ 、质量流率为 $150\sim 300\text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ 、热流密度为 $10\sim 25\text{ kW/m}^2$ 的典型工况范围内,对不同形状离散翅片微通道的压降和传热性能预测具有良好适用性。

基于 4 种不同形状离散翅片微通道压降与换热性能的对比如实验,结果表明方形翅片虽然流阻最大,但其换热性能相对较好;而菱形翅片流阻最小,但换热性能最差;圆形和正弦形翅片的流阻和换热性能均在两者之间。实际选型时如对流阻力更加敏感,使用菱形翅片更佳,对于换热性能更加关注,可使用方形翅片。但若对流动阻

表 2 摩擦压降倍率因子和换热关联式修正系数

Table 2 Friction pressure drop multiplier and heat transfer correlation correction coefficient

参数	关联式	修正系数			
		菱形	方形	圆形	正弦形
摩擦压降倍率因子	$\phi_1^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2}$	$C=11$	$C=45$	$C=20$	$C=8$
传热系数	$h_{\text{tp}} = \xi^a (\phi_1^2)^b h_{\text{sp,lo}} + C$	$a=0.2, b=0.03, C=2\ 500$	$a=0.2, b=0.03, C=4\ 500$	$a=0.2, b=0.03, C=3\ 500$	$a=0.2, b=0.03, C=3\ 500$

注: ξ 为放大系数; $h_{\text{sp,lo}}$ 为单相相传热系数; a 、 b 、 C 为常数; X 为洛马参数。

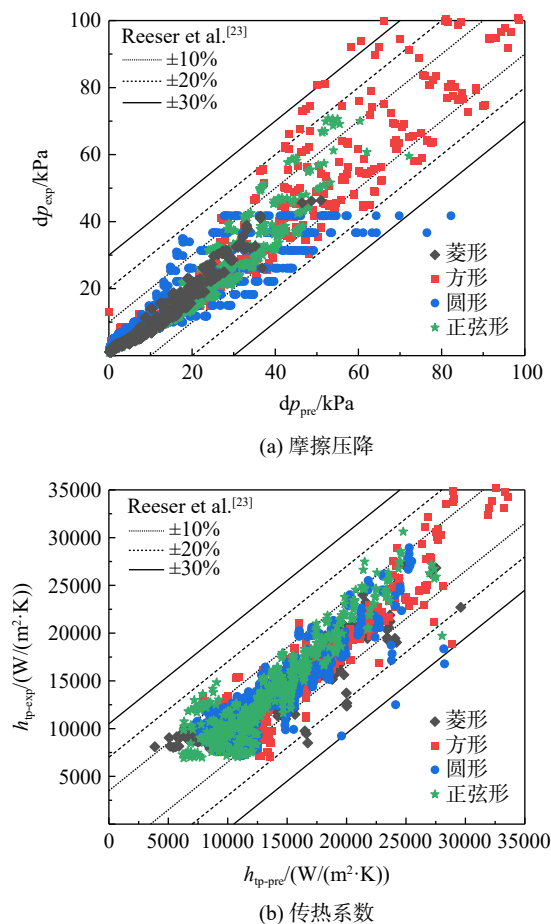


图 6 试验值与修正后预测值对比图

Fig. 6 Comparison between experimental test and correlation predictions

力和传热性能同等关注,需采用同时考虑沸腾换热与压降特性的综合评价方法,来评估不同翅片形状微通道的综合性能,本文采用一种综合考虑换热与压降的评价因子^[24-25],通过沸腾传热系数扩大倍数(HH,量符号记为 F_{HH})与两相摩擦压降扩大倍数(PP,量符号记为 F_{PP})的比值(HP,量符号记为 R_{HP})进行综合性能评估。其中,HH和PP的计算以当量直径相同的离散翅片微通道试验结果为基准。

$$R_{HP} = \frac{F_{HH}}{F_{PP}} = \frac{h_{tp}/h_s}{\Delta p_{tp}/\Delta p_s} \quad (20)$$

式中下标 tp 代表离散翅片微通道流动沸腾相关系数,下标 s 表示离散翅片微通道单相流动相关系数。HP 值越高表明综合性能更佳。根据上文阐述的修正压降与传热系数关联式,图 7 对比了 4 种离散翅片微通道流动沸腾综合性能。菱形翅片因最低的两相摩擦压降获得最优综合性能指标,而换热性能最佳的方形翅片则因压降激增导致综

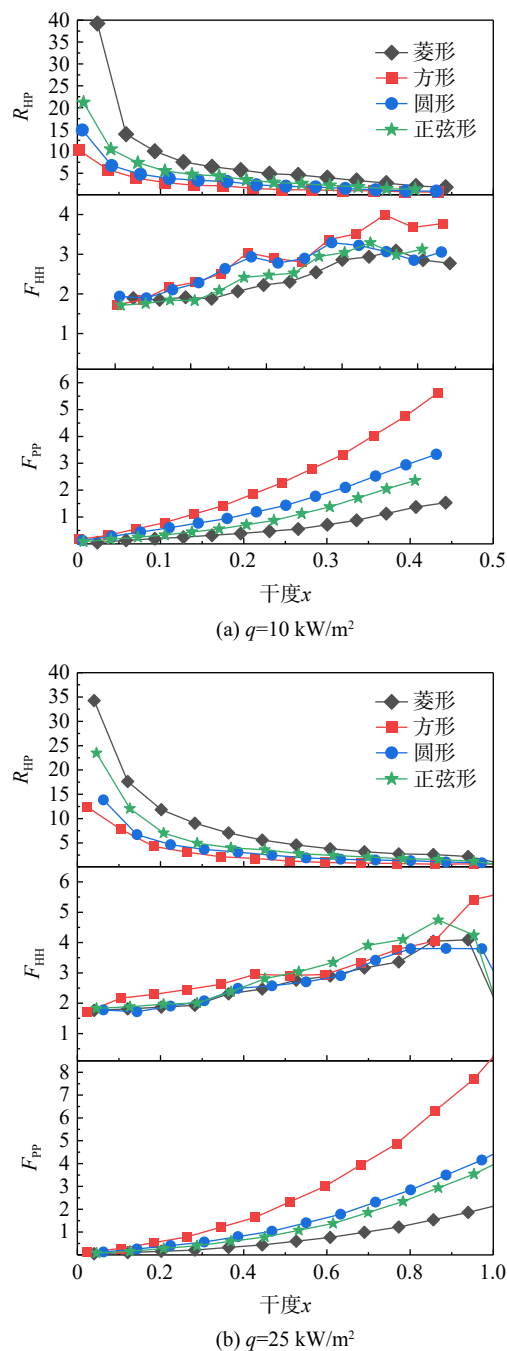


图 7 不同形状翅片微通道性能综合指标对比图

($p_{sat,in}=700$ kPa, $G=300$ kg/(m²·s))

Fig. 7 Overall performance comparison between various pin fins ($p_{sat,in}=700$ kPa, $G=300$ kg/(m²·s))

合表现并不理想。

3 结 论

本文通过实验测试离散翅片几何构型对流动沸腾压降和换热性能的影响,并基于实验数据修正相关经验关联式,通过压降和传热的综合性能对比分析识别性能较优的翅片构型,为机载蒸发器轻量化设计提供参考,本文主要结论如下:

1) 4 种典型翅片对于气液相的扰动作用差异较大, 导致流动阻力特性的差异较大, 微通道总压降从大到小依次为方形翅片、圆形翅片、正弦形翅片和菱形翅片微通道;

2) 方形翅片微通道相对其他翅片微通道的换热性能更佳, 但在实验工况范围内翅片形状对换热性能的总体影响相对于压降并不显著;

3) 基于试验数据修正了 Reeser 等的离散翅片微通道流动沸腾经验关联式, 综合评价分析表明, 菱形翅片综合性能更优。

参考文献:

- [1] 谢洪涛, 李星辰, 绳春晨, 等. 微通道换热器结构及优化设计研究进展[J]. 真空与低温, 2020, 26(4): 310-316.
XIE Hongtao, LI Xingchen, SHENG Chunchen, et al. Progress in structure and optimal design of microchannel heat sink[J]. Vacuum and Cryogenics, 2020, 26(4): 310-316. (in Chinese)
- [2] LIANG Gangtao, MUDAWAR I. Review of channel flow boiling enhancement by surface modification, and instability suppression schemes[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 146: 118864.
- [3] 魏进家, 张永海. 柱状微结构表面强化沸腾换热研究综述[J]. 化工学报, 2016, 67(1): 97-108.
WEI Jinjia, ZHANG Yonghai. Review of enhanced boiling heat transfer over micro-pin-finned surfaces[J]. *CIESC Journal*, 2016, 67(1): 97-108. (in Chinese)
- [4] 李根, 方贤德, 罗组分, 等. 过载环境下水平管内水的流动沸腾特性[J]. 航空动力学报, 2022, 37(1): 46-54.
LI Gen, FANG Xiande, LUO Zufen, et al. Flow boiling characteristics of water in a horizontal tube under hypergravity environment[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2022, 37(1): 46-54. (in Chinese)
- [5] 方贤德, 李国华, 袁宇良, 等. 过载环境下 1.002mm 管内流动沸腾传热的实验[J]. 航空动力学报, 2019, 34(8): 1644-1651.
FANG Xiande, LI Guohua, YUAN Yuliang, et al. Experiment on flow boiling heat transfer in 1.002 mm tube under hypergravity[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2019, 34(8): 1644-1651. (in Chinese)
- [6] MARKAL B, KUL B, AVCI M, et al. Effect of gradually expanding flow passages on flow boiling of micro pin fin heat sinks[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 197: 123355.
- [7] ZHUANG Xiaoru, XIE Yichen, LI Xiang, et al. Experimental investigation on flow boiling of HFE-7100 in a microchannel with pin fin array[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 225: 120180.
- [8] ZHAO Zhenxing, HU Bin, HE Jing, et al. Effect of fin shapes on flow boiling heat transfer with staggered fin arrays in a heat sink[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 225: 120179.
- [9] MCNEIL D A, RAEISI A H, KEW P A, et al. A comparison of flow boiling heat-transfer in in-line mini pin fin and plane channel flows[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30(16): 2412-2425.
- [10] VASILEV M P, ABIEV R S, KUMAR R. Effect of circular pin-fins geometry and their arrangement on heat transfer performance for laminar flow in microchannel heat sink[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, 170: 107177.
- [11] MARKAL B, KUL B. Effect of a new type staggered pin fin configuration on flow boiling characteristics of micro-heat sinks[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2023, 45(10): 552.
- [12] JIA Y, HUANG J, WANG J, LI H. Heat transfer and fluid flow characteristics of microchannel with oval-shaped micro pin fins[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 179: 121709.
- [13] LI Y, WANG Q, LI M, et al. Investigation of flow and heat transfer performance of double-layer pin-fin manifold microchannel heat sinks[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 215: 1190110.
- [14] MA Xiang, JI Xinyu, WANG Jinyu, et al. Flow boiling heat transfer characteristics on micro-pin-finned surfaces in a horizontal narrow microchannel[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 194: 123071.
- [15] WAN Wei, DENG Daxiang, HUANG Qingsong, et al. Experimental study and optimization of pin fin shapes in flow boiling of micro pin fin heat sinks[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 114: 436-449.
- [16] SUN Ruirui, HUA Junye, ZHANG Xiuqiang, et al. Experimental study on the effect of shape on the boiling flow and heat transfer characteristics of different pin-fin microchannels[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2021, 57(12): 2081-2095.
- [17] QIN Luwen, LI Shuhong, ZHAO Xiaobao, et al. Experimental research on flow boiling characteristics of micro pin-fin arrays with different hydrophobic coatings[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2021, 126: 105456.
- [18] CHEN Hongqiang, GAO Quan, ZHANG Yonghai, et al. Experimental study of the flow boiling heat transfer characteristics of teardrop-like micro-pin-finned chip surface in semi-open microchannel[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2025, 238: 126442.
- [19] LI Jie, ZHANG Dalin, WANG Yubing, et al. Pressure drop of R134a in mini channels with micro pin fins during flow boiling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 217: 119195.
- [20] WANG Yubing, LI Jie, ZHANG Dalin, et al. Investigation of the flow boiling performance in mini channel with micro pin fin[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2023, 59(8): 1543-1563.
- [21] LIU Shirui, DING Xiaoya, JIANG Renjie, et al. Investigation of the flow boiling characteristic in mini channel with various micro pin fin[J]. *IET Conference Proceedings*, 2025, 2024(13): 1093-1098.
- [22] 方贤德. 高等两相流与传热[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2021.
FANG Xiande. Advanced two-phase flow and heat transfer[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2021. (in Chinese)
- [23] REESER A, BAR-COHEN A, HETSRONI G. High quality flow boiling heat transfer and pressure drop in micro gap pin fin arrays[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 78: 974-985.
- [24] KIM S M, MUDAWAR I. Universal approach to predicting saturated flow boiling heat transfer in mini/micro-channels: Part II two-phase heat transfer coefficient[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 64: 1239-1256.
- [25] KIM S M, MUDAWAR I. Universal approach to predicting two-phase frictional pressure drop for mini/micro-channel saturated flow boiling[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 58(1/2): 718-734.

(编辑: 王碧珺)