

基于弧形排列的梯形微通道数值模拟研究

熊鋆辉*, 李思杭, 李 壮#

辽宁石油化工大学机械工程学院, 辽宁 抚顺

收稿日期: 2026年4月14日; 录用日期: 2026年5月7日; 发布日期: 2026年5月13日

摘 要

鉴于梯形截面微通道散热器在水力和热工性能耦合优化方面的研究较少, 同时传统微通道散热器非直线流道结构与温度均匀性结合研究的不足, 本文在7种排列弧度的基础上对3种不同结构设计的梯形微通道进行层流单相流体流动的数值分析, 设计了长宽高为10 mm × 10 mm × 2 mm的热沉物理模型, 以水为冷却介质, 发热功率80 W的硅芯片为热源, 构建三维固-流热交换耦合数学模型, 分析排列弧度、倒置方式和随动方式对芯片换热性能和温度均匀性的影响。研究表明: 微通道向上排列的布局能促进芯片温度扩散, 降低芯片最大温度; IT构型的倒置方式和CBT构型的随动方式在对流换热系数和温度均匀性等方面均更优。其中: IT构型较PBT构型, Nu 和 h_{ave} 最高均提升1.5%, $T_{heat,max}$ 最大降低4.7 K, 温度均匀性方面最大改善20%; CBT构型较PBT构型, Nu 最高提升1.5%, h_{ave} 最大提升1.4%, $T_{heat,max}$ 最大降低4.6 K, 温度均匀性方面最大改善19%; 该研究为微通道散热器中通道排列布局设计和截面设计提供了理论依据和数值支撑。

关键词

微通道散热器, 梯形截面, 弧形排列, 放置方式, 随动方式

Numerical Investigation on Arc-Arranged Trapezoidal Microchannels

Junhui Xiong*, Sihang Li, Zhuang Li#

College of Mechanical Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning

Received: April 14, 2026; accepted: May 7, 2026; published: May 13, 2026

*第一作者。

#通讯作者。

Abstract

Given the limited research on the coupled optimization of hydraulic and thermal performance in trapezoidal cross-sectional microchannel heat sinks, as well as the insufficient integration of non-straight flow channel structures with temperature uniformity in conventional microchannel heat sinks, this paper presents a numerical analysis of laminar single-phase fluid flow in trapezoidal microchannels with three different structural designs based on seven arrangement arcs. A physical model of a heat sink with dimensions of 10 mm × 10 mm × 2 mm (length × width × height) was developed. Using water as the cooling medium and a silicon chip with a heat generation power of 80 W as the heat source, a three-dimensional solid-fluid conjugate heat transfer model was established. The effects of arrangement arc, inversion method, and following method on the heat transfer performance and temperature uniformity of the chip were analyzed. The results indicate that an upward arrangement of microchannels promotes chip temperature diffusion and reduces the maximum chip temperature. The inversion method of the IT configuration and the following method of the CBT configuration exhibit superior performance in terms of convective heat transfer coefficient and temperature uniformity. Specifically, compared with the PBT configuration, the IT configuration achieves maximum increases of 1.5% in both Nusselt number and average convective heat transfer coefficient, a maximum reduction of 4.7 K in maximum chip temperature, and a maximum improvement of 20% in temperature uniformity. Compared with the PBT configuration, the CBT configuration achieves a maximum increase of 1.5% in Nusselt number, a maximum increase of 1.4% in average convective heat transfer coefficient, a maximum reduction of 4.6 K in maximum chip temperature, and a maximum improvement of 19% in temperature uniformity. This study provides theoretical and numerical support for the design of channel arrangement layouts and cross-sectional geometries in microchannel heat sinks.

Keywords

Microchannel Heat Sink, Trapezoidal Section, Arc Arrangement, Placement Mode, Following Mode

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. 研究背景

伴随芯片集成度指数级增长催生的高热流密度散热难题, 1981年 Tuckerman 和 Pease [1]提出的微通道散热器(MCHS)凭借其卓越冷却能力成为主流解决方案, 此后学者们围绕其截面形状与几何尺度等结构参数开展了大量优化研究。Kose 等[2]对比矩形、梯形和三角形通道, 发现矩形在热工和水动力综合性能上表现更佳。Wang 等[3]研究水在梯形微通道中的层流流动, 验证了经典 N-S 方程和能量方程在水力直径小至 155 μm 的微通道对流建模中的有效性。Kumar 等[4]揭示了梯形微通道的换热量相比矩形显著提高 12%。Behnampour 等[5]研究三角形、矩形和梯形肋片对纳米流体换热的影响, 发现肋片能增强换热的同时增加流动压降。当前研究存在两个问题: (1) 对梯形截面的微通道散热器研究较少; (2) 传统微通道大多采用简单的直线型、平行排列模式[6], 与芯片非均匀热源分布的不匹配导致热点区域冷却不足与低温区域冗余并存, 严重制约了温度均匀性的提升。

针对这些问题, 本文创新性地设计了一种基于弧形排列的梯形微通道散热器。通过设计流道宏观排列, 引导冷却工质的流动与换热, 实现对热点区域的调控。同时, 梯形截面具备在制造工艺中的天然优

势以及众多研究显示其具备良好的换热潜力[4]。通过数值模拟探究排列弧度对芯片冷却效果的影响并引入倒置梯形这种梯形变体,旨在协同优化通道截面特性与宏观排列,从而揭示几何形态与整体布局之间的耦合效应。

2. 模型描述

2.1. 物理模型

图 1(a)-(c)分别为梯形微通道散热器的整体、流道排列布局 and 3 种流道结构图示,模型包含微通道模块和芯片模块。图 1(d)为梯形微通道散热器的整体网格示意图,采用六面体结构化网格对流体区域进行网格划分,对流固耦合面进行边界层网格加密,开展网格无关性验证最终计算区域网格数确定为 832,794。3 种不同结构设计梯形微通道的区别如表 1 所示。

Table 1. Nomenclature for three structurally designed trapezoidal microchannels

表 1. 3 种结构设计的梯形微通道的命名

序号	简称	解释说明
1	PBT	底角: 54.7° , $W_a < W_b$, 各梯形通道底边不随弯曲弧线变动, 处于水平状态
2	IT	底角: 54.7° , $W_a > W_b$, 各梯形通道底边不随弯曲弧线变动, 处于水平状态
3	CBT	底角为 54.7° , $W_a < W_b$, 各梯形通道间底边随弯曲弧线变动

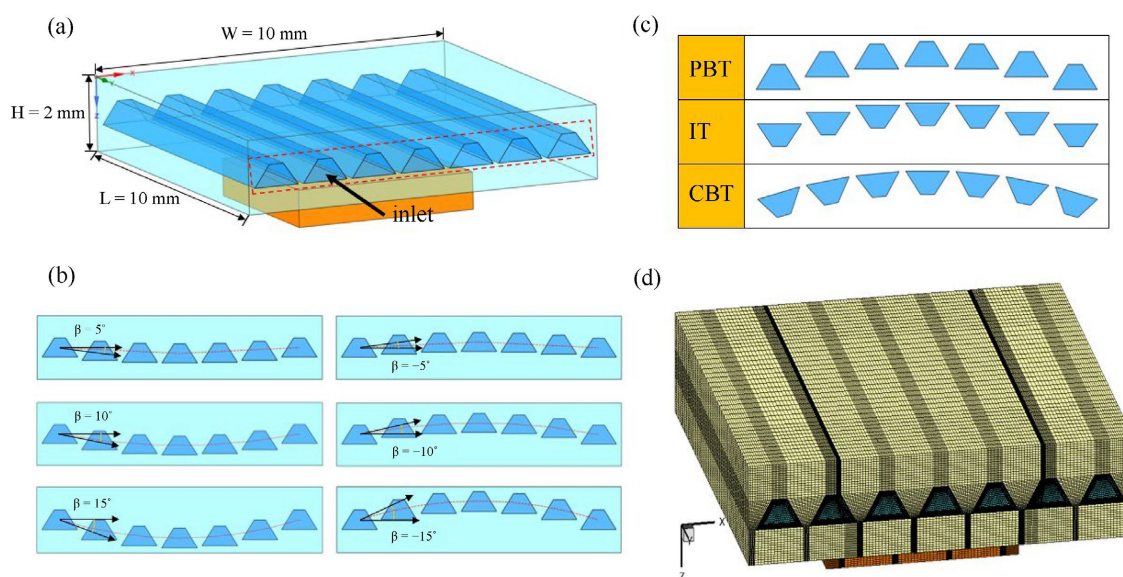


Figure 1. Schematics of the trapezoidal microchannel heat sink model. (a) Overall schematic; (b) Channel layout; (c) Channel structures and corresponding abbreviations; (d) Grid of the flow field computational model

图 1. 梯形微通道散热器模型示意图。(a) 整体示意图; (b) 流道排列布局示意图; (c) 不同结构流道示意图及对应简称; (d) 流场计算模型网格

2.2. 数值模型

为确保数值模拟的稳定性,对模型内的流体流动与传热过程做出了以下假设:

- (1) 流体流动与传热均处于三维稳态状态,忽略辐射传热、自由对流和粘性耗散;
- (2) 流体被视作单相、不可压缩且始终处于层流状态;
- (3) 微通道内液体流动的克努森通常远小于 10^3 ,故通道壁面均采用无滑移速度边界。

基于上述假设, 通过数值方法来求解控制守恒方程, 等式(1)是连续性方程, 等式(2)是层流条件下的动量方程, 能量方程见于等式(3)和(4)。

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

$$\rho_f \left(\vec{V} \cdot \nabla \right) \vec{U} = -\nabla P + \mu_f \nabla^2 \vec{V} \quad (2)$$

$$\rho_f C_{p,f} \vec{V} \cdot \nabla T = k_f \nabla^2 T \quad (3)$$

$$k_s \nabla^2 T = 0 \quad (4)$$

在本研究对不同流道几何结构散热器开展的单相流换热特性系统分析中, 核心传热参数对于全面表征其综合热力性能具有关键作用, 这些参数是量化评估与对比散热性能的重要基础。

水力直径(D_e)与梯形微通道几何参数有关, 按下式计算:

$$D_e = \frac{4A_c}{P} = \frac{2(W_a + W_b)H_t}{W_a + W_b + 2\sqrt{\left(\frac{W_a - W_b}{2}\right)^2 + H_t^2}} \quad (4)$$

式中, A_c 为单个流道流动截面积, 单位为; P 为湿周长, 即流道与流体接触面的长度。

泵送功率(P_p)决定了冷却系统的能量消耗, 可以通过以下公式获得:

$$P_p = \Delta P \cdot Q_v \quad (5)$$

平均传热系数(h_{ave})表征微通道的散热能力, 定义如下:

$$h_{ave} = \frac{Q_{tot}}{A_{conv} \Delta T} = \frac{q_{heat} V_{heat}}{A_{conv} (T_w - T_f)} \quad (6)$$

式中, 热负荷 Q_{tot} 为加热表面的总热量输入; A_{conv} 为对流传热面积, 即流道中流体与固体之间进行热交换的耦合接触界面; V_{heat} 为热源体积; T_w 为共轭区域平均温度。

平均努塞尔特数(Nu)可以反映微通道内对流换热的强度, 其与平均传热系数的相关性为:

$$Nu = \frac{hD_e}{\lambda} \quad (7)$$

热源温度均匀性($T_{heat,uni}$)可以评估电子设备是否有可能遭受局部损坏, 其表达式为:

$$T_{heat,uni} = \frac{T_{heat,max} - T_{heat,min}}{T_{heat,aver}} \quad (8)$$

式中 $T_{heat,min}$ 和 $T_{heat,aver}$ 分别代表热源的最小和平均温度。

3. 实验验证

为验证所建数学模型的准确性与可靠性, 我们设计并搭建了以去离子水为工质的实验平台, 用于模拟芯片热源的散热特性研究, 如图 2(a)所示。该平台由去离子水流道冷却单元、循环冷却单元及数据测量单元构成, 模拟热源加热功率设为 35 W。实验时, 通过蠕动泵调节流量, 待储水箱温度稳定在 20°C 且芯片温度达到稳态后, 开始记录数据。图 2(b)展示了实验结果与数值模拟的对比: 两者测得的芯片温度均随雷诺数增加而下降, 但实验值始终略高于模拟值, 这源于实验中的非理想因素及模拟对微通道的理想化假设。尽管如此, 两者间的相对误差始终控制在 5% 以内, 充分说明实验数据与模拟结果高度一致,

从而验证了数学模型的可靠性。

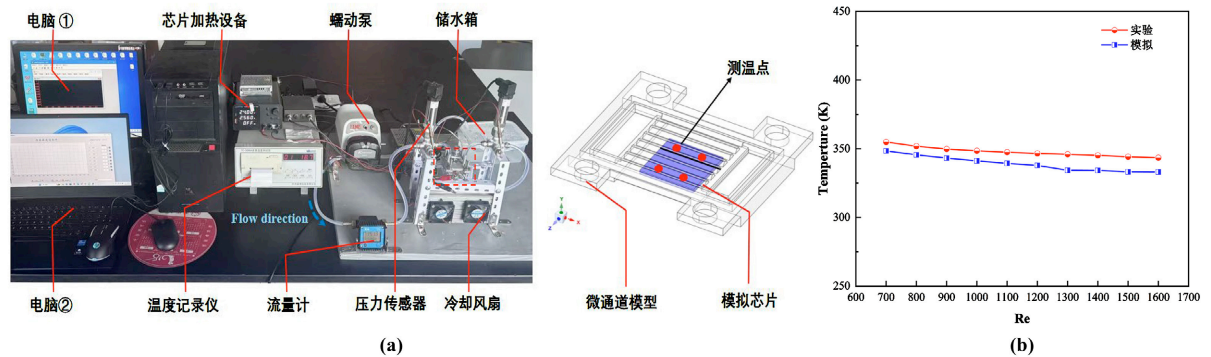


Figure 2. Experimental setup and results for model validation. (a) Experimental platform and measurement equipment; (b) Relationship between chip temperature and Reynolds number obtained from experiment and numerical simulation

图 2. 用于模型验证的实验装置及结果。(a) 实验平台与测试设备；(b) 实验和数值模拟的芯片温度与雷诺数的关系

4. 结果与分析

4.1. 弧形排列对流动与传热特性的影响

为探究微通道散热器的排列弧度对芯片散热的影响，本文以水平排列(0°)为基准，构建了向上弯曲(-5° 、 -10° 、 -15°)与向下弯曲(5° 、 10° 、 15°)共七种弧形结构，并基于 PBT 模型展开分析。图 3 展示了 XZ 截面 $Y = 5 \text{ mm}$ 处的温度分布云图，可以看到通道向下排列时，大于 345 K 的区域面积从 5° 开始增加，到 15° 面积最大，并且出现大于 350 K 的区域，这表明通道向下排列的布局对芯片温度扩散存在抑制作用进而降低芯片散热效果；通道向上排列时 345 K 的区域面积不断缩小，在 -15° 时达到最小，向上排列对芯片温度扩散存在促进作用。

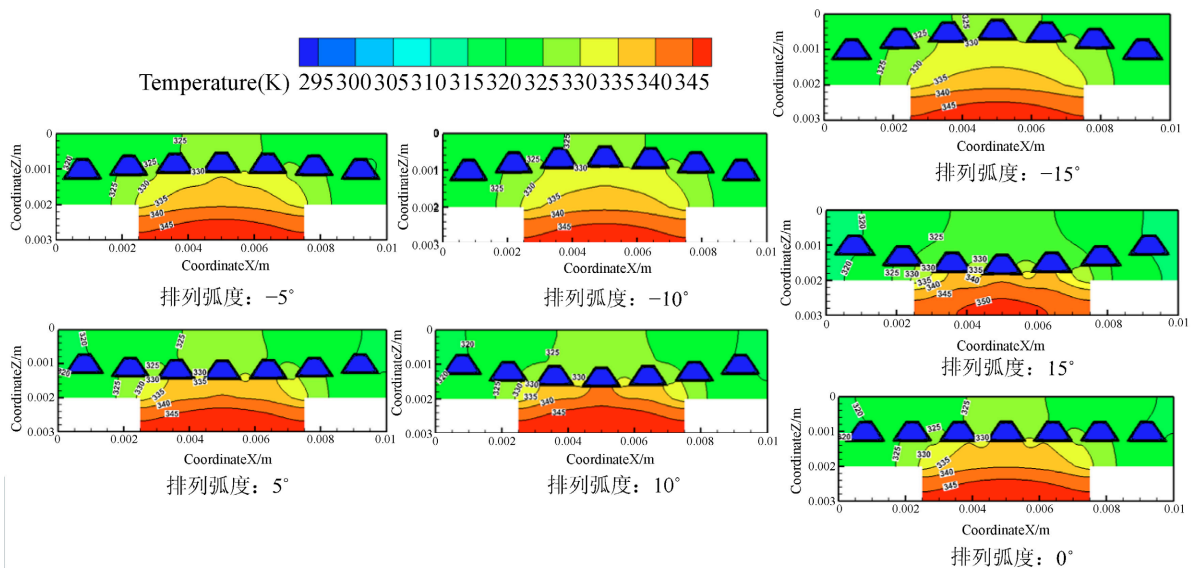


Figure 3. Temperature distribution: Temperature distribution in the XZ cross-section under the PBT model ($Re = 1254$, $Y = 5 \text{ mm}$)

图 3. 温度分布图：PBT 模型下的 XZ 截面温度分布图($Re = 1254$, $Y = 5 \text{ mm}$)

根据雷诺数的定义，在流体物性恒定条件下，其值仅由入口流速决定。PBT 模型中 $Re = 1254$ 对应入

口流速 2 m/s。图 4 给出了 YZ 截面的流速分布, 虽整体差异微小, 但从最大流速 V_{\max} 分析得: -15° 时 V_{\max} 达到 3.28148 m/s, 高于其他 6 种排列, 15° 时 $V_{\max} = 3.28115$ m/s 最小。结合温度分布可知, 向上弯曲结构通过提升局部流速, 增强了流体携热能力, 从而降低芯片温度。可见微通道排列弧度对散热性能影响显著, 优化布局与通道结构同等重要。

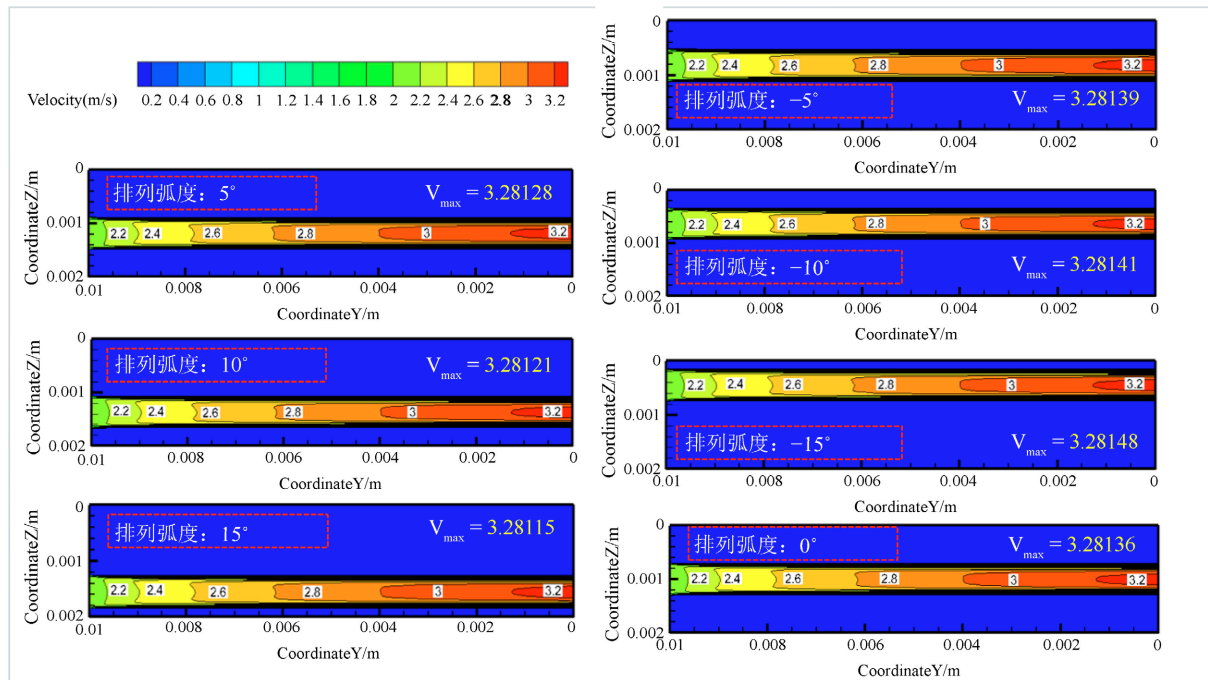


Figure 4. Velocity distribution: contours of velocity magnitude on the YZ plane at $X = 5$ mm for the PBT model

图 4. 流速分布图: PBT 模型 YZ 截面 $X = 5$ mm 的速度等值线

4.2. 通道截面形状与排列的协同效应

本研究对 3 种不同构型的微通道散热器的热性能进行分析, 并探讨不同排列弧度对其性能的影响。以 PBT 模型为对照对象, 分别与 IT 和 CBT 两种微通道散热器进行对比, 分析通道放置方式和通道随动方式对芯片散热性能的影响。

4.2.1. 放置方式的影响

为探究微通道热沉在两种不同放置方式下的热特性, 本研究分析了 PBT 和 IT 两种构型。图 6 给出了这两种构型在 7 种排列弧度下的压降 ΔP 、泵送功率 P_p 、努塞尔数 Nu 、对流传热系数 h_{ave} 、最高温度 $T_{heat,max}$ 和温度均匀性的变化规律。图 5(a) 显示, PBT 和 IT 模型的通道压降均随排列弧度增加基本不变, 约为 3498 Pa。不同弧度模型因模拟的系统误差产生微小偏差, 差值仅 0.1 Pa, 可忽略不计。两种模型的数值结果表明改变放置方式和排列弧度均不会改变微通道的压降, 这是因为放置方式和弧形排列没有改变梯形通道的截面面积和体积流量, 根据泊肃叶定律[7]得出压降不变。图 5(b) 中两种模型的泵功率均随排列弧度增加基本不变, 为 24.24 mW, 仅有可忽略的微小波动(源于压降的系统误差), 由于体积流量相同且压降不变, 改变放置方式和弧形排列不会改变微通道的泵功率, 能耗相同。图 5(c) 中 PBT 和 IT 模型的努塞尔数均随着排列弧度增加而减小, PBT 模型向上 15° 排列时 $Nu = 16.36$, 向下 15° 排列向下时 $Nu = 16.56$, 相比于向下 15° 排列增大了 0.2, 提高了 1.2%。IT 模型向上 15° 排列时 $Nu = 16.47$, 向下 15° 排列时 $Nu = 16.60$, 相比于 PBT 模型努塞尔数在 7 种弧度下均增大, 在 -15° 时提升最大, 提高了 1.5%。图 5(d)

中对流换热系数的变化规律与努塞尔数相同，IT 模型在排列弧度为 -15° 时对流换热系数 $h_{ave} = 15,704 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{k})$ ，较 PBT 模型提高了约 1.5%，这表明梯形通道放置方式的改变能小幅改善 MCHS 的对流换热速率。图 5(e)中 IT 模型的芯片最大温度在 7 种排列弧度下均小于 PBT 模型，在 15° 时 $\Delta T = 1.9 \text{ K}$ ，差值最大，可见放置方式在抑制芯片温度扩散时对芯片散热的影响更大；在 -15° 时 IT 模型 $T_{heat,max} = 348.07 \text{ K}$ ，较 PBT 模型最大降低 4.7 K，优化 1.3%；图 5(f)两种模型温度均匀性的值随着排列弧度增加而增大，表明向上排列时温度一致性优于向下排列且弧度越大效果越好，IT 模型在 -15° 时温度均匀性较 PBT 模型最大提高 20%，与水平排列相比提高 7%。这表明倒置梯形能够有效改善芯片表面温度分布的一致性。需指出，改变放置方式带来的 1.5% 的换热提升属边际改进，幅度低于针鳍微通道等显著方案[8] [9]；但该改进仅改变放置方向、无额外成本，在零成本优化中性价比高。此外，该设计能提高 20% 的芯片温度均匀性，可作为主流结构优化的辅助优化方案。

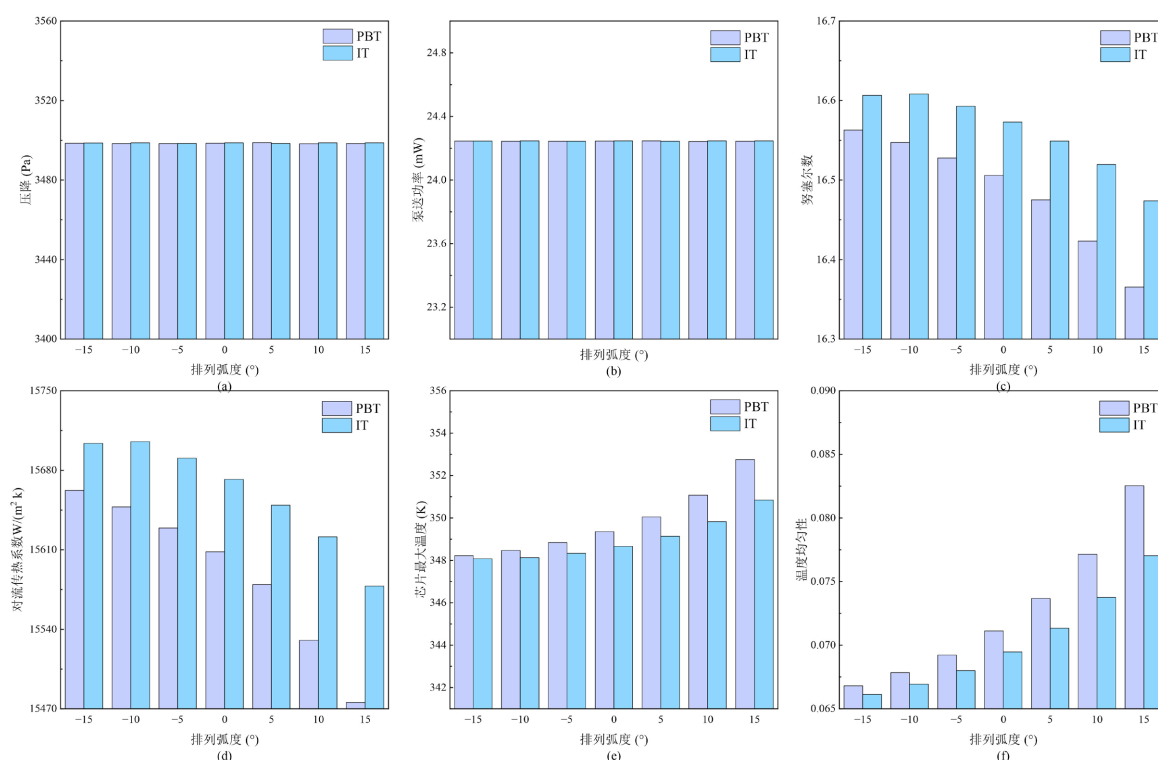


Figure 5. Relationship between the arrangement radian of the PBT and IT models and six performance parameters

图 5. PBT 和 IT 这两种模型的排列弧度与 6 种性能参数的关系

4.2.2. 随动方式的影响

为探究通道随动方式对弯曲构型微通道散热器与传热性能的影响，本研究重点开展了两种梯形通道构型 MCHS 的对比实验，其中两种构型的核心差异体现在梯形通道底边的随动方式：PBT 构型定义为各梯形通道间底边始终保持水平状态，不随散热器整体弯曲弧线发生位移；CBT 构型则定义为各梯形通道间底边随散热器整体弯曲弧线同步变动。图 6 系统呈现了两种构型微通道在 7 种不同排列弧度条件下，关键热性能参数随排列弧度的变化规律，所涉及性能参数包括压降 ΔP 、泵送功率 P_p 、努塞尔数 Nu 、平均对流传热系数 h_{ave} 、最高温度 $T_{heat,max}$ 、温度均匀性。图 6(a)和图 6(b)显示 CBT 模型的压降和泵功率呈现一条直线，均与排列弧度大小无关， $\Delta P = 3498 \text{ Pa}$ ， $P_p = 24.24 \text{ mW}$ ，均与 PBT 模型相等，这表明改变随动方式不改变微通道散热器的通道压降和泵功率，这是因为随动方式改变没有改变微通道的截面积

和体积流量, 同样根据泊肃叶定律得到 ΔP 不变, 进而得到 P_p 不变。图 6(c)和图 6(d)看出努塞尔数与对流换热系数均呈现出随排列弧度减小而单调递增的变化规律, 这一现象直接表明, 通道向上弯曲弧度的增大可有效提升平行弯曲通道(PBT)与随动弯曲通道(CBT)两种散热结构的综合换热性能。其中, CBT 模型在 -15° 时 $Nu = 16.60$ 和 $h_{ave} = 15,702 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{k})$, 分别较 PBT 模型最大提高 1.5%和 1.4%, 较水平排列时提高了 0.6%和 0.5%。

此外, 由图 6(e)和图 6(f)对可以发现, CBT 构型的最高芯片温度 $T_{heat,max}$ 以及温度均匀性始终优于 PBT 构型, CBT 模型在 -15° 时 $T_{heat,max} = 348.16 \text{ K}$, 较 PBT 模型最大降低 4.6 K, 较水平排列时降低 1.2 K, 在温度均匀性的优化上, CBT 模型最大提高 19%。上述现象充分证明, 基于随动方式设计的通道构型对提高散热系统的换热效率与温度均匀性具有促进作用, 其内在机理可阐释为: 随动式通道的空间走向与芯片散热过程中形成的温度梯度场具有良好的垂直匹配特性, 这种构型匹配关系可强化热量向冷却流体的传递效率, 从而实现散热性能的提升。与放置方式一样, 换热性能提升较小, 但在芯片热点区域温度分布的一致性上有着显著的提升, 不增加制造成本或结构复杂性, 在追求零成本优化的工程场景中具有较高的性价比。

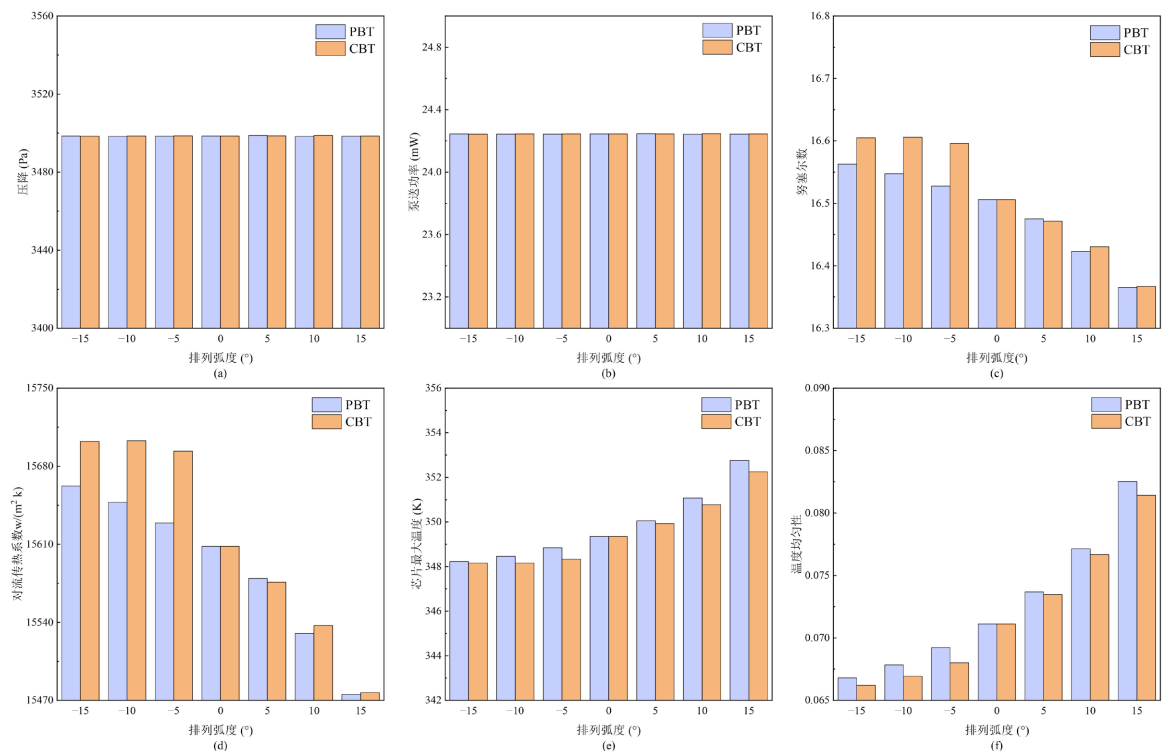


Figure 6. Relationship between the arrangement radian of the PBT and CBT models and six performance parameters
图 6. PBT 和 CBT 这两种模型的排列弧度与 6 种性能参数的关系

5. 结论

本研究基于数值模拟与实验验证, 以去离子水为流动工质, 在雷诺数为 1250 和水力直径为 0.6345 的条件下, 首先探究了弧形排列对梯形微通道的流动与换热特性的规律, 然后分析了 3 种不同结构设计的梯形微通道对芯片换热性能和温度分布一致性的影响, 得出以下结论:

- (1) 微通道的排列弧度大小对芯片散热性能具有一定影响, 具体表现为: 向上排列布局能提升局部流速, 对芯片温度扩散存在促进作用; 向下排列的布局对芯片温度扩散存在抑制作用, 换热效果有所减弱。
- (2) 相较于传统构型(PBT), 倒梯形放置方式(IT)可在一定程度上改善芯片换热性能与芯片表面温度

均匀性。与 PBT 模型相比, IT 模型的 Nu 数和对流传热系数分别最高可提升 1.5%, 热源最高温度最大降幅达 4.7 K, 相对优化幅度为 1.3%, 温度均匀性最大提高比例为 20%。

(3) 基于随动思想设计的通道结构(CBT)在对换热性能上提升较小, 在提升温度均匀性方面效果明显。相比 PBT 模型, CBT 模型的 Nu 数最高提升 1.5%, 传热系数最高提升 1.4%, 热源最高温度最大降低 4.6 K, 温度均匀性最佳改善 19%。

参考文献

- [1] Tuckerman, D.B. and Pease, R.F.W. (1981) High-Performance Heat Sinking for VLSI. *IEEE Electron Device Letters*, **2**, 126-129. <https://doi.org/10.1109/edl.1981.25367>
- [2] Kose, H.A., Yildizeli, A. and Cadirci, S. (2022) Parametric Study and Optimization of Microchannel Heat Sinks with Various Shapes. *Applied Thermal Engineering*, **211**, Article ID: 118368. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118368>
- [3] Wang, G., Hao, L. and Cheng, P. (2009) An Experimental and Numerical Study of Forced Convection in a Microchannel with Negligible Axial Heat Conduction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **52**, 1070-1074. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.06.038>
- [4] Kumar, P. (2019) Numerical Investigation of Fluid Flow and Heat Transfer in Trapezoidal Microchannel with Groove Structure. *International Journal of Thermal Sciences*, **136**, 33-43. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.10.006>
- [5] Behnampour, A., Akbari, O.A., Safaei, M.R., Ghavami, M., Marzban, A., Sheikh Shabani, G.A., *et al.* (2017) Analysis of Heat Transfer and Nanofluid Fluid Flow in Microchannels with Trapezoidal, Rectangular and Triangular Shaped Ribs. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, **91**, 15-31. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2017.04.006>
- [6] Shang, X., Li, Q., Cao, Q., Li, Z., Shao, W. and Cui, Z. (2023) Mathematical Modeling and Multi-Objective Optimization on the Rectangular Micro-Channel Heat Sink. *International Journal of Thermal Sciences*, **184**, Article ID: 107926. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107926>
- [7] Kandlikar, S.G., Garimella, S., Li, D.Q., Colin, S. and King, M.R. (2006) Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels. Elsevier, 1-450.
- [8] Li, W., Mao, N., He, T. and Gong, J. (2024) CFD Simulation of Novel Adaptive Pin-Fins Microchannel Heat Sink to Improve Thermal Management of Electronic Chips. *Applied Thermal Engineering*, **252**, Article ID: 123667. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123667>
- [9] Yu, M. and Zhu, J. (2023) Hotspot Thermal Management of Silicon-Based High Power Hetero-Integration. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **203**, Article ID: 123790. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123790>