

带非均匀肋的逆流微通道的数值研究

王首元 王志强

(山东大学核科学与能源动力学院 济南 250061)

摘要 本文通过CFD数值模拟方法,研究了逆流微通道散热器高温区形成机理,并提出了“出口顶肋结构”和“通道中顶肋结构”。结果表明:边缘通道进口效应和相邻通道的横向传热是导致“平行四边形”高温区的根本原因。“均匀底肋结构”可以整体强化换热,但依然存在“平行四边形”高温区。“出口顶肋结构”针对边缘通道,在其进口区域弱化换热,出口区域强化换热,改变了“平行四边形”高温区形态,使壁面最大温差降低了33.3%。“中顶肋结构”对通道中部高温区强化换热,使壁面最大温差进一步降低58.3%,且在小流量(1.64 g/s)下可以实现“均匀底肋结构”及“出口顶肋结构”大流量(2 g/s)时相同的壁面平均温度,同时使壁面温差降低64.8%和47.2%,压降降低9.1%和12.0%。

关键词 微通道散热器;芯片;肋片;温差;逆流

中图分类号: TB61*1; TB657.5

文献标识码: A

Numerical Study of Counterflow Microchannels with Non-Uniform Ribs

Wang Shouyuan Wang Zhiqiang

(School of Nuclear Science, Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract The formation mechanism of high-temperature zones in counterflow microchannel heat sinks was investigated through computational fluid dynamics numerical simulations. The following two novel structures were proposed: an outlet top-rib structure and a channel center top-rib structure. The results showed that the inlet effect of edge channels and transverse heat transfer between adjacent channels were the identified as fundamental causes of the parallelogram-shaped high-temperature zones. The uniform bottom rib structure enhanced overall heat transfer; however, the parallelogram-shaped high-temperature zones still persisted. For edge channels, the outlet top rib structure weakened heat transfer at the inlet region and strengthened heat transfer at the outlet region, thereby modifying the morphology of the parallelogram-shaped high-temperature zones and decreasing the maximum wall temperature difference by 33.3%. The channel center top rib structure enhanced heat transfer in the high-temperature zones at the channel center, further reducing the maximum wall temperature difference by 58.3%. Furthermore, it achieved the same average wall temperature as the uniform bottom-rib structure at a low flow rate (1.64 g/s) and outlet top-rib structure at a large flow rate (2 g/s), while reducing wall temperature difference by 64.8% and 47.2%, and pressure drop by 9.1% and 12.0%, respectively.

Keywords microchannel heat sink; chip; fin; temperature difference; counterflow

随着信息技术和航空航天等产业的超高速发展,电子芯片也向“高功耗、小空间”方向发展,这导致电子芯片的热流密度持续攀升。当前英伟达高性能显卡的功率介于300~500 W量级,其最高端显卡B200的功率甚至达到了1 000 W以上^[1]。由Arrhenius方程可知,电子元件温度每提高10℃,使用寿命下降50%^[2]。因此,降低芯片温度并实现更均匀的温度分布成为研究热点。微通道散热器具有结构紧凑、换热面积大的特点,与电子芯片“高功耗、小空

间”的发展方向契合度高,因此,成为解决狭小空间内高热流问题的核心技术路径。

目前已有大量学者对微通道散热器结构进行研究^[3-7]。T. Alam等^[3]研究了锥形肋锥角对传热性能的影响。他们提出高雷诺数(Re)和低雷诺数锥角对努塞尔数(Nu)的影响完全相反。Yuan Jin等^[4]在热沉中心位置增加针肋,他们设计的针肋结构提高了局部传热系数。S. Sarvar等^[5]研究了在针肋结构下,添加超疏水表面的影响,他们提出超疏水表面可以



令 Nu 提高 6.6% 且壁面温度降低 9.4 K。Ma Xiang 等^[6]提出了一种新型的 Y 字形肋,并提出了在攻角为 60° 时, Nu 提升 69.26%。他们利用遗传算法和多目标优化得到了最佳攻角为 69.76° 。Chen S. J. 等^[7]研究了肋的形状对换热与流动特性的影响,提出了当 Re 大于 200 时添加肋对换热提升显著,并且对于 Nu , 椭圆形肋小于矩形肋。

顺、逆流微通道的温度不均匀性如图 1 所示。顺流微通道存在芯片壁面温度分布不均匀问题,如图 1 (a) 所示^[8],靠近散热器入口侧的壁面温度较低,而靠近出口侧的壁面温度较高。

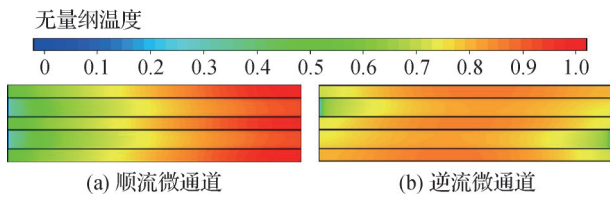


图 1 顺、逆流微通道的温度不均匀性^[8]

Fig.1 Temperature non-uniformity of parallel and counter flow microchannels^[8]

因此,有学者提出逆流微通道结构^[8-12]。进出口交替排列可以使换热更充分,温度分布更均匀。A. Tikadar 等^[8]在传统逆流微通道的基础上打断通道,形成连通通道,该结构在 Re 为 1 044 时, Nu 提升了 36.43%。S. W. A. Shah 等^[9]将渐扩通道和逆流微通道结合,并设计了变高度针肋,该结构提供了气泡成核位点并加快气泡脱离,相比不加针肋结构传热性能提升了 66.6%。M. W. Uddin 等^[10]提出了连通通道对逆流微通道换热性能提升显著,并且矩形连通通道的 PEC (performance evaluation criteria, 性能评价准则) 最高。M. Khoshvaght-Aliabadi 等^[11]研究了波形通道侧壁对逆流微通道的换热性能影响,提出波浪型和组合型散热器整体性能优于直型,其中波浪形散热器在 Re 为 900 时 PEC 达 2.22。李昀等^[12]从逆流微通道的流量分配角度,提出芯片壁面温度分布由散热器流量较大的一侧主导,且两侧流量差距越大,壁面温度均匀性越差。这些研究都体现了逆流微通道相比顺流微通道具有更好的壁面温度均匀性,冷热流体的交替提供了更高的横向换热。

但逆流微通道并未完全消除壁面温度分布不均匀的问题,如图 1(b) 所示^[8],对于不同结构的逆流微通道^[13-15],壁面温度分布都呈现“平行四边形高温区”的规律。许多学者将逆流微通道散热器处理为周期性结构,导致忽视了逆流微通道散热器整体依然存在温度分布不均匀的情况,即壁面最大温差大,因此

壁面最大温差依然有优化的空间。

为进一步降低“平行四边形高温区”导致的壁面温度差,本文分析了平行四面形高温区出现的机理,并针对此机理提出了“出口顶肋结构”和“中顶肋结构”逆流微通道散热器,大幅降低了壁面最大温差。

1 模型与方法

1.1 模型介绍

1.1.1 物理模型

本文中逆流微通道的几何结构依据 NVIDIA 公司生产的主流高端显卡 NVIDIA GeForce RTX 4090 设计,其典型功耗约为 400 W。

本文研究了 4 个物理模型,模型透视图如图 2 所示。

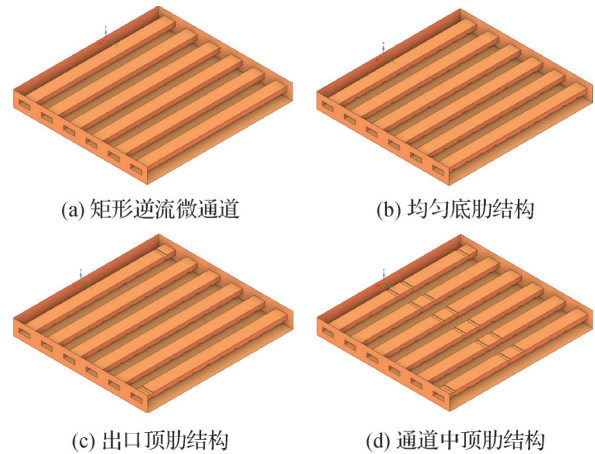


图 2 物理模型

Fig.2 Physical model

Case a 为矩形逆流微通道。

Case b 为在 Case a 基础上在通道底面增加 10 个均匀分布的肋,称为“均匀底肋结构”。

Case c 为在 Case b 基础上,将 2 个边缘通道的入口处第一个底肋去掉,并在出口处第一个底肋对应上方增加一个相同尺寸的顶肋,称为“出口顶肋结构”。

Case d 为在 Case c 基础上,在每条通道中部第 5 个与第 6 个底肋对应增加 2 个相同尺寸的顶肋,称为“通道中顶肋结构”。

微通道设计尺寸和肋设计尺寸如表 1 所示。

微通道设计参数与流道排布如图 3 所示,图中 1、3、5 为入口,2、4、6 为出口(为展示肋结构已将 z 轴翻转)。

1.1.2 控制方程

根据管流 Re 定义式:

$$Re = \rho U D_h / \mu \quad (1)$$

表1 微通道尺寸与肋尺寸

Tab.1 Microchannel dimensions and rib dimensions

参数	数值	参数	数值
总宽度 W_0/mm	24	基板厚度 H_1/mm	1
总高度 H_0/mm	2.75	通道高度 H_2/mm	0.75
总长度 L_0/mm	26	盖板厚度 H_3/mm	1
边缘宽度 W_1/mm	1	肋宽度 l_r/mm	0.5
通道宽度 W_2/mm	2	肋高度 h_r/mm	0.125
通道间距 W_3/mm	2	肋间距 d_r/mm	2

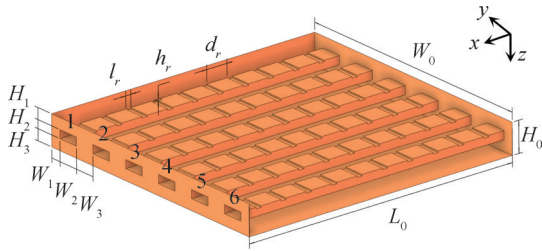


图3 微通道设计参数与流道排布

Fig.3 Microchannel design parameters and flow channel arrangement

式中: ρ 为冷却水密度, kg/m^3 ,本文取值为 $998.2 \text{ kg}/\text{m}^3$; U 为冷却水进口平均速度, m/s ; μ 为冷却水动力黏度, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$,本文取值为 $0.001003 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$; D_h 为水力直径, mm ,在矩形通道中的表达式为:

$$D_h = \frac{2W_2H_2}{W_2 + H_2} \quad (2)$$

式中: W_2 为通道宽度, mm ,取 2 mm ; H_2 为通道高度, mm ,取 0.75 mm 。

本文单通道的冷却水流量为 $1.2\sim 2 \text{ g}/\text{s}$,对应的速度为 $0.80\sim 1.34 \text{ m}/\text{s}$ 。通过上述计算可知,本文 Re 区间为 $870\sim 1450$ 。参考光滑圆管流动的临界 Re 为 2300 ,可以认为本文的流动为层流状态。

因此,本文无需考虑湍流模型,仅需求解下面的层流控制方程组。

1)连续性方程。

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (3)$$

2)动量方程。

$$\rho(\vec{v} \cdot \nabla \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{v}) \quad (4)$$

3)能量方程。

流体域:

$$\rho c_p (\vec{v} \cdot \nabla T) = k_f \nabla^2 T \quad (5)$$

固体域:

$$k_s \nabla^2 T_s = 0 \quad (6)$$

式中: \vec{v} 为流体速度, m/s ; p 为流体压强, Pa ; c_p 为流体比定压热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; k_f 为流体导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;

T 为流体温度, K ; k_s 为固体导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; T_s 为固体温度, K 。

1.1.3 物性参数

固体域材料为铜,导热系数为 $387.6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。流体域材料为水,密度为 $998.2 \text{ kg}/\text{m}^3$,比定压热容为 $4182 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$,导热系数为 $0.6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,动力黏度为 $0.001003 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 。

1.1.4 边界条件

单通道入口为质量流量边界条件,流量为 $2 \text{ g}/\text{s}$,入口温度为 293 K ;所有出口均为压力出口,表压为 0 。散热器底面为等热流边界条件,其总功率为 400 W ,面积为 $24 \text{ mm}\times 26 \text{ mm}$,因此可以计算出其热流密度为 $64 \text{ W}/\text{cm}^2$ 。流固交界面为耦合传热壁面,散热器盖板表面、侧壁绝热,所有壁面无滑移。

1.2 数值方法和网格无关解

应用Ansys fluent 2024 R2软件,采用双精度求解器进行数值计算。求解方法选择SIMPLEC算法,动量和能量等离散格式均为二阶迎风格式。迭代收敛时能量方程和连续方程的收敛标准为 10^{-5} 。图4所示为“均匀底肋结构”模型的网格无关性验证。

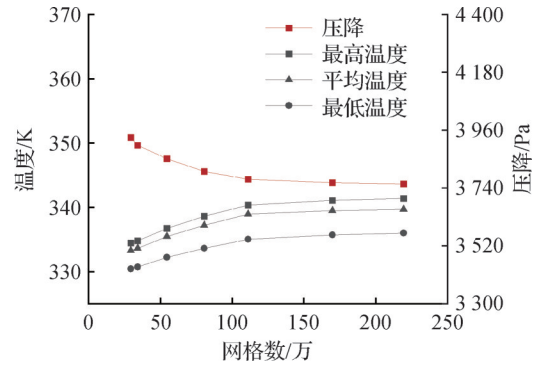


图4 网格无关解验证

Fig.4 Grid independence verification

分别对比了在 30 万、 34 万、 55 万、 81 万、 111 万、 170 万、 219 万的网格下,散热器底面的最高温度、最低温度、平均温度与进出口压降。当网格数从 81 万增至 219 万时,壁面平均温度分别增加了 0.51% 、 0.16% 、 0.06% ,而压降分别降低了 0.80% 、 0.34% 、 0.13% 。综合考虑计算精度和时间成本,本文采用 111 万网格展开数值计算研究。

2 结果与分析

2.1 平行四边形高温区机理分析

2.1.1 矩形逆流微通道

计算结果显示,矩形逆流微通道(Case a)的散热器壁面最高温度为 369.1 K ,最低温度为 357.3 K ,平

均温度为 366.3 K, 壁面最大温差为 11.8 K。图 5 所示为 Case a 的壁面温度云图, 出入口位于图片的左右两侧。可以看出, 壁面高温区分布呈“平行四边形”。

取图 5 左侧的微通道出入口平面分析“平行四边形高温区”的机理, 如图 6 所示, 1、3、5 为通道入口, 2、4、6 为通道出口。在图示平面上存在 2 种换热途径: 1) 散热器底面加热导致的纵向换热; 2) 逆流微通道相邻通道间由温差驱动的横向换热。

对于通道进口 1、3、5, 由于进口位置流体温度低, 流固之间温差大, 这使得该区域的壁面温度较低。对于通道出口 2、4、6, 由于流体沿程吸热, 温度升高, 流固之间的温差变小, 这使得该区域的壁面温度较高。

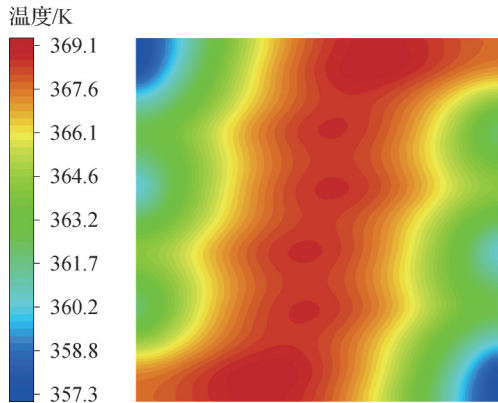


图 5 矩形逆流微通道壁面温度云图

Fig.5 Temperature contour of the bottom surface of rectangular counter-flow microchannel



图 6 平行四边形高温区机理分析图

Fig.6 Mechanism analysis diagram of parallelogram high-temperature zone

此外, 逆流散热器通道间的横向换热并不均匀, 对于边缘通道入口 1, 横向换热的热量仅来自出口 2 单侧。对比入口 3, 横向换热来自出口 2、4 双侧。这导致入口 1 的壁面低于入口 3 的壁面温度。同理, 对于边缘通道出口 6, 横向换热的热量仅向入口 5 单侧传递。对比出口 4, 横向换热通向入口 3、5 两侧。所以出口 6 的壁面温度高于出口 4 的壁面温度。因此, 在图 6 所示这侧出现了进口 1、3、5 壁面温度逐渐升高, 出口 2、4、6 的壁面温度也逐渐升高。在微通道另一侧的出入口平面, 则是出口 1、3、5 的壁面温度逐渐降低, 入口 2、4、6 的壁面温度也逐渐降低的温度分布特征。因此, 从散热器底面整体来看, 壁面温度呈现平行四边形的分布特征。

2.1.2 均匀底肋结构

为了验证均匀肋对壁面温度的影响, 本文设计了均匀底肋结构 (Case b)。

计算结果显示, Case b 的壁面最高温度为 340.5 K, 最低温度为 335.1 K, 平均温度为 339.1 K, 壁面最大温差为 5.4 K。通道底添加均匀肋后, 壁面平均温度降低了 27.2 K。这是由于肋增加了流固之间的换热面积, 可以增强局部换热, 所以壁面平均温度降低。

图 7 所示为 Case b 的壁面温度云图, 出入口位于图片的左右两侧。可以看出, “平行四边形高温区” 依然存在。

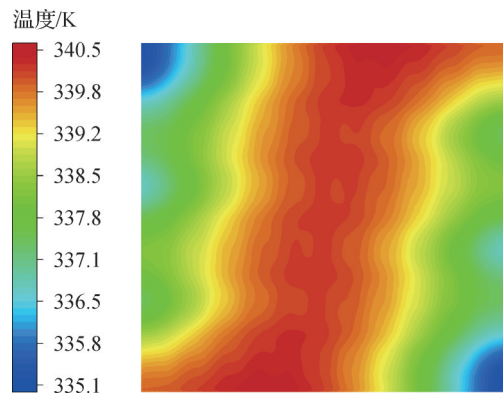


图 7 均匀底肋结构壁面温度云图

Fig.7 Wall temperature contour of uniform bottom rib structure

显然, 在通道底添加均匀肋虽然可以降低壁面温度, 但并未改变壁面温度分布形式。因此, 需要考虑在特定区域增加和减少底肋和顶肋的方式, 形成“非均匀肋结构”, 以提高壁面温度均匀性。

2.2 非均匀肋逆流微通道

2.2.1 出口顶肋结构

根据平行四边形温度分布的机理, 本文在每个边缘通道的出口增加 1 个顶肋, 入口位置删除 1 个底肋, 设计了出口顶肋结构 (Case c), 旨在研究边缘通道的出口强化换热和入口弱化换热对平行四边形高温区的影响。

计算结果显示, Case c 的壁面最高温度为 339.8 K, 最低温度为 336.2 K, 平均温度为 338.6 K, 壁面最大温差为 3.6 K。

图 8 所示为 Case c 的壁面温度分布云图, 出入口位于图片的左右两侧。可以看到, 删除边缘通道入口底肋削弱了入口位置的局部换热, 而增加边缘通道出口顶肋增强了出口位置的局部换热。因此, 靠近边缘通道入口处的壁面温度提升, 靠近边缘通道

出口处的壁面温度降低。对比 Case c 和 Case b, 在平均温度仅差为 0.5 K 的前提下, 出口顶肋结构使壁面最大温差从 5.4 K 降至 3.6 K, 壁面最大温差降低了 33.3%。

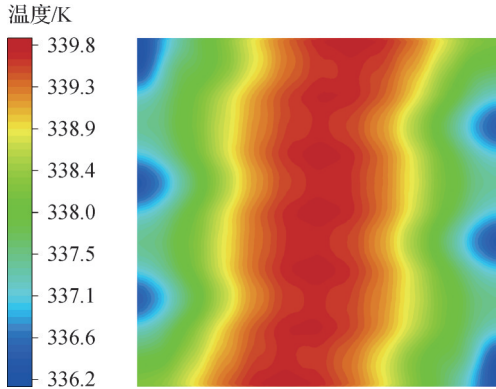


图 8 出口顶肋结构壁面温度云图

Fig.8 Wall temperature contour of outlet top rib structure

对比图 7 和图 8 可知, 高温区分布从平行四边形变为矩形, 说明出口顶肋结构可以改变壁面温度分布, 从而降低壁面最大温差。

2.2.2 通道中顶肋结构

由于“矩形高温区”的存在, 本文将针对此高温区, 在通道中部添加顶肋 (Case d), 旨在降低通道中部温度, 进一步降低壁面最大温差。

图 9 所示为 Case d 的通道中顶肋结构壁面温度云图。计算结果显示, 通道中顶肋结构的壁面最高温度为 334.2 K, 最低温度为 332.7 K, 平均温度为 333.6 K, 壁面最大温差为 1.5 K。

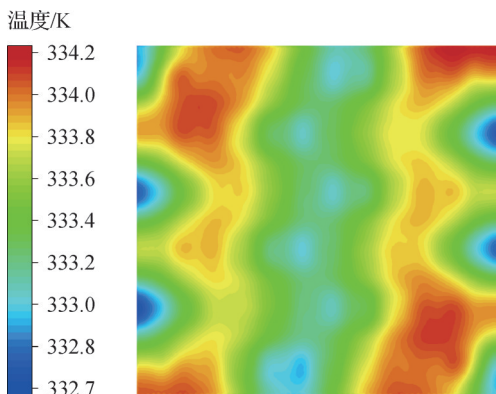


图 9 通道中顶肋结构壁面温度云图

Fig.9 Wall temperature contour of channel center top rib structure

可以看到, 中顶肋增强了通道中部的局部换热, 该区域壁面温度降低, 且壁面最大温差从 3.6 K 降至 1.5 K, 相较于 Case c 降低了 58.3%。

2.3 压降对比

通道中顶肋结构 (Case d) 可以实现更低的壁面最大温差, 但伴随的是压降的提升, 如表 2 所示。

表 2 温差与压降对比

Tab.2 Comparison of temperature difference and pressure drop

算例	壁面最大温差 $\Delta T/K$	压降 $\Delta p/Pa$
Case b	5.4	3 667.4
Case c	3.6	3 788.9
Case d	1.5	4 440.4

可以看到, 虽然 Case d 壁面温差最小, 但压降也最高, 因此, 本文通过降低 Case d 的入口流量来研究压降和壁面最大温差的变化。

Case d 在入口流量为 1.2~2 g/s 的压降、平均温度、最高温度、最低温度变化如图 10 所示。

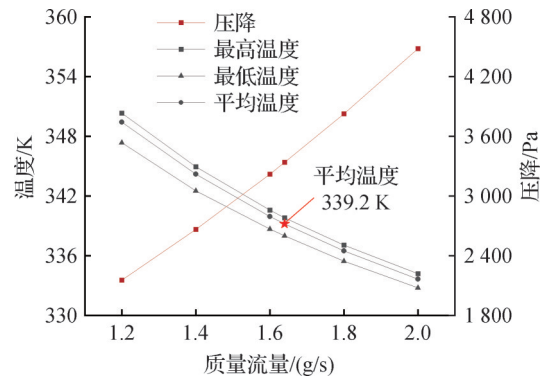


图 10 通道中顶肋结构随入口流量的参数变化

Fig.10 Parameter variation of the channel center top rib structure with inlet flow rate

可以看出, 当流量为 1.64 g/s, Case d 的平均温度为 339.2 K, 该温度与 Case b 及 Case c 在 2 g/s 时的平均温度 (339.1 K 和 338.6 K) 非常接近, 即三者整体换热效果基本一致。但此时 Case d 的壁面温差为 1.9 K, 远低于 2 g/s 流量时的 Case b 和 Case c 的壁面温差, 降低百分比分别为 64.8% 和 47.2%。同时, Case d 此流量下的压降为 3 335.3 Pa, 低于 Case b 和 Case c 在 2 g/s 流量时的压降, 降低百分比分别为 9.1% 和 12.0%。

因此, 通道中顶肋结构可以在较小流量下实现其他结构较大流量下的整体换热效果, 并同时降低压降和最大温差。

3 结论

本文通过分析矩形逆流微通道及均匀底肋结构

的温度场和流动特征,获得了平行四边形高温区的形成机理,针对性的设计了“出口顶肋结构”和“通道中顶肋结构”,并计算了2种结构的壁面温度与压降,得到如下结论:

1)平行四边形高温区出现的原因是边缘通道出口仅有单侧通道的横向冷却,边缘通道入口仅向单侧相邻通道横向散热。因此,边缘通道的出口位置壁温高,入口位置壁温低,高温区呈平行四边形。

2)在边缘通道出口位置添加顶肋可以降低边缘通道出口的壁面温度,在入口位置删除底肋可以提高入口位置的壁面温度,壁面最大温差比“均匀底肋结构”降低了33.3%,并将温度分布从平行四边形转变为矩形。

3)通过添加中顶肋,可以进一步降低矩形高温区的温度,对比出口顶肋结构,壁面最大温差降低58.3%。

4)不同流量对比计算表明,通道中顶肋结构可以在小流量(1.64 g/s)下实现均匀底肋结构及出口顶肋结构大流量(2 g/s)时相同的壁面平均温度,同时使壁面温差降低64.8%和47.2%,压降降低9.1%和12.0%。

需要指出的是,本文对该方向的研究尚属首次,因此对流动参数、传热参数以及肋结构、通道结构对温度均匀性的影响的探索依然处于起始阶段,未来需要对这些参数进行更深入的研究。

本文受山东省自然科学基金(ZR2024ME120)资助。(The project was supported by Shandong Municipal Natural Science Foundation Project (No. ZR2024ME120).)

参考文献

- [1] 钱吉裕,王锐.电子设备热设计技术概述[J].电子机械工程,2025,41(5):1-26.(Qian Jiyu, Wang Rui. An overview of thermal design technologies for electronic device [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2025, 41(5): 1-26.)
- [2] Kandlikar S G, Colin S, Peles Y, et al. Heat transfer in microchannels—2012 status and research needs [J]. Journal of Heat Transfer, 2013, 135(9): 091001.
- [3] Alam T, Ansari M M, Kulakrni K S, et al. Optimization of tapered pin fins for enhanced heat transfer in microchannel heat sink [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2025, 214: 109889.
- [4] Yuan Jin, Deng Ningfang, Qu Yongfeng, et al. A novel center-hybrid pin-fin microchannel heat sink with embedded secondary microchannels for hotspot thermal management [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2025, 207: 109381.
- [5] Sarvar S, Kabirzadeh P, Miljkovic N. Combining pin-fins and superhydrophobic surfaces to enhance the performance of microchannel heat sinks [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2025, 160: 108351.
- [6] Ma Xiang, Basem A, Singh P K, et al. Efficient cooling capability in microchannel heat sink reinforced with Y-shaped fins: Based on artificial neural network, genetic algorithm, Pareto front, and numerical simulation [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2025, 68: 105936.
- [7] Chen S J, Li Sunwei, Hu Zhenzhong. Fluid flow and heat transfer characteristics of manifold microchannel heat sinks with ribs of different shapes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2025, 251: 127300.
- [8] Tikadar A, Oudah S K, Paul T C, et al. Parametric study on thermal and hydraulic characteristics of inter-connected parallel and counter flow mini-channel heat sink [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 153: 15-28.
- [9] Shah S W A, Jiang Xingchi, Li Y K H, et al. Ultra-stable counter flow diverging minichannel heat sink with integrated microstructures for superior cooling performance [J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 258: 124560.
- [10] Uddin M W, Sifat N S. Comparative study on hydraulic and thermal characteristics of minichannel heat sink with different secondary channels in parallel and counter flow directions [J]. International Journal of Thermofluids, 2023, 17: 100296.
- [11] Khoshvaght-Aliabadi M, Feizabadi A. Profit and performance boost of straight, wavy, and combined minichannel heat sinks by counter-current pattern [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 43: 103220.
- [12] 李昀,杨振,姚元鹏,等.流量分配对逆流微通道内流动沸腾影响的研究[J].工程热物理学报,2023,44(3):712-719.(Li Yun, Yang Zhen, Yao Yuanpeng, et al. Study on the effect of flow distribution on flow boiling in counter-flow microchannels [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(3): 712-719.)
- [13] Khoshvaght-Aliabadi M, Abbaszadeh A, Rashidi M M. Comparison of Co- and counter-current modes of operation for wavy minichannel heat sinks (WMHSs) [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 171: 107189.
- [14] Wang Dahai, Wang Dongyu, Hong Fangjun, et al. Improved flow boiling performance and temperature uniformity in counter-flow interconnected microchannel heat sink [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 241: 122370.
- [15] Wang Dahai, Zhang Chaoyang, Hong Fangjun. Enhanced flow boiling heat transfer performance of counter-flow interconnected microchannels via microporous copper

surfaces [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2025, 244: 126905.

通信作者简介

王志强,男,教授,山东大学核科学与能源动力学院,13306402833, E-mail: jackywzq@sdu.edu.cn。研究方向:清洁燃烧及污染物排放控制、高效储热/储能技术应用研究、氢能及燃料电池、碳排放控制及资源化利用。

About the corresponding author

Wang Zhiqiang, male, professor, School of Nuclear Science, Energy and Power Engineering, Shandong University, 86-13306402833, E-mail: jackywzq@sdu.edu.cn. Research fields: clean combustion and pollutant emission control, applied research on high-efficiency thermal/energy storage technologies, hydrogen energy and fuel cells, as well as carbon emission control and resource utilization.