

文章编号:0253-4339(2025)01-0053-18

doi:10.12465/j.issn.0253-4339.2025.01.053

# 单相液冷微通道散热器结构研究进展

赵颀 崔晓钰

(上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093)

**摘要** 微通道冷却是解决高热流密度散热问题最有效的技术之一,具有传热效率高、热阻低、结构紧凑等优点,但同时存在压降增加的问题。微通道的结构是影响其流动与传热性能的重要因素。针对该问题,简述了国内外对单相液冷微通道散热器在结构设计方面的研究进展,分为通道几何结构、扰流结构、针肋结构、多层结构、仿生结构和复合强化结构。结合各结构强化传热的原理,分析其在传热系数、压降、综合性能、均温性等方面的优缺点,并对微通道散热器常用的基体材料与加工方法进行了成本分析。基于上述总结与介绍,从应用角度展望了微通道散热器的前景与发展方向,指出复合结构的应用、仿真与实验的结合、材料学与加工技术的进步以及学科交叉是今后结构研究的重点。

**关键词** 微通道;传热系数;单相流;结构设计

**中图分类号**:TB61<sup>+</sup>1;TB657.5

**文献标识码**:A

## Research Progress of Microchannel Heat Sink Structures Based on Single-Phase Flow

Zhao Jie Cui Xiaoyu

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

**Abstract** Microchannel cooling, with its high heat transfer efficiency, low thermal resistance, and light weight advantages, is one of the most effective technologies for solving the problem of heat dissipation with high heat flux; however, it faces the issue of increased pressure drop. The microchannel structure determines the thermal-hydraulic performance. This study describes the research progress on single-phase liquid-cooled microchannel heat sinks in terms of domestic and international structural design to address this problem. Among them, single-phase heat dissipation structures are divided into variable cross-sectionals, flow disruption, pin-fin, double-layered, bionic, and hybrid-reinforced structures. The advantages and disadvantages of the heat transfer coefficient, pressure drop, comprehensive performance, and temperature uniformity were analyzed based on the principle of enhancing heat transfer in various structures. A cost analysis of the commonly used matrix materials and processing methods for microchannel heat sinks was conducted. Finally, we provided the prospect and development direction of microchannel heat sinks from an application perspective. The application of composite structures, integration of simulation and experimentation, advances in material science and processing technology, and the nexus of disciplines are noted as the focus of future structural research.

**Keywords** microchannel; heat transfer coefficient; single-phase flow; structural design

近年来,集成电子器件逐渐向高度小型化的方向发展,未来集成器件的热流密度可达 $1\ 000\ \text{W}/\text{cm}^{2[1]}$ 。据统计,80%的芯片故障是由高温造成的,因此迫切需要找到更高效的散热技术,于是微通道散热技术应运而生。微通道散热器相比于常规尺度散热器不仅具有更大的传热面积和更高的散热效率,还更加紧凑、轻便,特别适用于处理空间受限或对重量敏感场景下高热流密度器件的散热问题<sup>[2]</sup>。目前应用最广泛的冷却方式为单相液体冷却,单相液体冷却应用简单,稳定性强,但工质充注量大,摩擦阻力也更大。微

通道单相液冷技术在一些领域已得到应用,如大功率LED光源发热结的快速冷却<sup>[3]</sup>、太阳能电池的冷却<sup>[4-5]</sup>、数据中心的CPU芯片冷却<sup>[6]</sup>、高速列车牵引系统的IGBT模块冷却<sup>[7]</sup>、燃料电池散热<sup>[8]</sup>、火箭推进器冷却等<sup>[9]</sup>。根据散热需求采用合理的微通道结构对提高传热性能有重要作用,因此研究人员在微通道的结构设计上进行了大量工作。对于单相液冷微通道,强化结构的设计基于边界层重建与二次流动,促进流体混合,改变流体流路等思路,其中不同结构各自具有独特的优点。本文结合国内外研究进展,总

总结了单相液冷微通道散热器在结构设计上的发展进程以及不同结构对压降和传热性能的影响,分析了影响不同结构应用成本的因素,最后对其发展方向及应用前景进行了展望。

通常,描述微通道散热器的性能使用摩擦系数、泵送功率、努塞尔数、热阻和热效率等作为评价指标。为了更好地描述微通道散热器的综合性能,通常还采用对比的方法对强化结构的性能进行评价,即将强化结构和相同工况下水力直径相等的光滑微通道对应的传热与阻力增强因子相除。

综合性能因子<sup>[2]</sup>表示为:

$$\psi = \frac{Nu_{ave} / Nu_{0,ave}}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (1)$$

式中: $Nu_{ave}$  和  $Nu_{0,ave}$ 、 $f$  和  $f_0$  分别为强化结构和光滑微通道的平均努塞尔数与摩擦系数。 $\psi$  能够评价微通道散热器的整体性能,即努塞尔数与摩擦阻力的增幅之比。

## 1 通道几何结构

通过改变微通道的几何结构能够增加传热面积,改变流动模式,进而提高流量分配和温度的均匀性。其中又分为纵横比、截面形状和流道形状的改变。

### 1.1 纵横比

D. B. Tuckerman 等<sup>[10]</sup>率先提出了用于高热通量散热的微通道散热器。在宽为 50  $\mu\text{m}$ 、间隔为 50  $\mu\text{m}$ 、深为 302  $\mu\text{m}$  的矩形通道中研究水的单相流动,其散热量高达 790  $\text{W}/\text{cm}^2$ ,这样的散热性能远远超过了传统换热方式的水平。矩形截面微通道由于加工简单、成本可控、流动稳定、方便堆叠与集成的特性,仍是现阶段关注的重点。合理的结构设计对提升其流动与传热性能有重要影响,其中通道宽度与高度是影响性能的关键几何参数,通常采用无量纲参数纵横比( $\beta_{AR} = H_{ch}/W_{ch}$ )描述。研究人员对不同纵横比的矩形微通道的性能进行了研究并试图找到最佳配置。Wang Hongtao 等<sup>[11]</sup>采用去离子水为工质,在雷诺数  $Re$  为 200~700、热通量为 100  $\text{W}/\text{cm}^2$  工况下,设计加工了  $\beta_{AR} = 1.030 \sim 20.333$  不等的 12 种矩形微通道并展开实验研究。结果表明:在相同的  $Re$  下, $\beta_{AR}$  越高,热阻越小,压降和传热系数越高。但当  $\beta_{AR}$  提高至 11.442 时,热阻和压降变化的梯度变缓,因此判断当  $\beta_{AR} = 8.904 \sim 11.442$  时可以为矩形微通道提供最佳的热效率。Ma Yinjie 等<sup>[12]</sup>对  $\beta_{AR} = 1 \sim 10$  的矩形微通道进行数值研究也发现了类似的现象,当  $\beta_{AR} > 5$  时,继续增加  $\beta_{AR}$  不会显著降低热阻,由此推断  $\beta_{AR}$

为 5 时为最佳配置。

### 1.2 异型截面

国内外学者对于通道截面形状对流动与传热性能的影响进行了大量研究。除矩形截面外,对三角形<sup>[13-14]</sup>、梯形<sup>[15-16]</sup>截面的研究成为热点,但对于何种截面为最优截面存在分歧<sup>[17-18]</sup>。Wang Hongtao 等<sup>[11]</sup>认为产生分歧的原因是忽略了水力直径和通道数对性能的影响,于是在保持两者相等的情况下,对矩形、梯形和三角形截面的微通道进行了数值模拟。结果表明,矩形截面的压降最大,三角形截面的压降最小。当泵功为 1 W 时,三角形和梯形截面的热阻分别比矩形截面高 11.82% 和 1.01%,此时矩形截面的传热系数分别比三角形和梯形高约 25.83% 和 24.47%。

还有学者对比了更多不同几何形状截面微通道的压降和传热性能,A. A. Alfaryjat 等<sup>[19]</sup>加工了具有相同水力直径的六边形、圆形、菱形截面的微通道,在  $Re$  为 100~1 000、热通量为 500  $\text{kW}/\text{m}^2$  工况下进行实验研究。结果表明,六边形截面微通道的传热系数和压降比圆形截面、比菱形截面分别高 3.5%、8.6% 和 24.0%、3.3%,但菱形截面微通道的平均表面温度最低。不同截面形状的微通道如图 1 所示。V. S. Duryodhan 等<sup>[20]</sup>设计了两种具有发散与收敛截面的微通道(图 1(b))。实验证明,发散与收敛截面的压降可以等效于相同水力直径下直通道的压降。随后在  $Re$  为 30~240、热通量为 0.3~9.5  $\text{W}/\text{cm}^2$  工况下

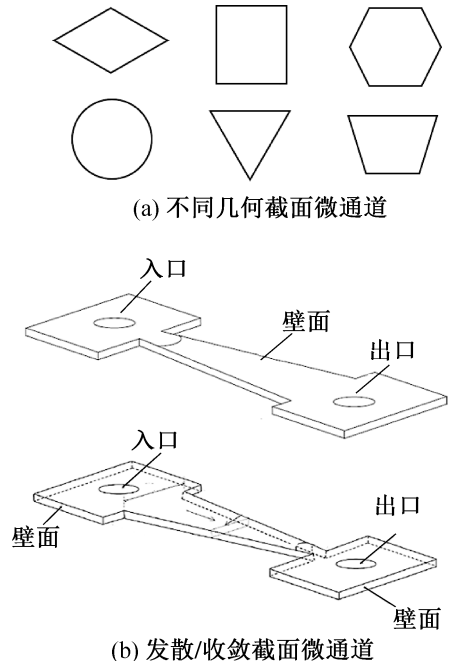


图 1 不同截面形状的微通道

Fig.1 Microchannels with different cross-sectional shapes

进行数值模拟<sup>[21-22]</sup>。结果表明,发散和收敛截面均能够比平直截面表现出更好的流动传热性能,其中收敛截面的压降和努塞尔数均大于发散截面。

### 1.3 流道形状

除了对通道截面进行改造,随着加工技术的进步,部分学者提出可以通过改变内部流道形状以进一步提高传热性能。M. Khoshvaght-Aliabadi 等<sup>[23]</sup>设计了一种正弦形(波浪形)微通道(图 2(a))。研究表明,随着  $Re$  的增加,正弦结构所需泵功比平直结构大 2.5~7.8 倍,热阻最多比平直通道降低约 57.4%,原理是当流体流经凸起处时,会产生名为迪恩涡的二次流使流体混合增强从而强化传热。H. A. Mohammed 等<sup>[24]</sup>设计了振幅为 0.062 5~0.250 0 的波浪形微通道,在  $Re$  为 100~1 000、热通量为 100 W/m<sup>2</sup> 工况下数值研究发现,随着振幅的增加,传热系数与压降均逐渐增加且高于平直微通道。总体而言,当振幅在 0.062 50~0.218 75 具有最佳的传热性能。Sui Y. 等<sup>[25]</sup>据此提出梯级振幅布置的优化设计方案,能够在不改变通道紧凑度的情况下更好地提高局部传热性能。然而,上述学者均从模拟的角度进行分析,并未进行实验验证,Huang Houxue 等<sup>[26]</sup>在振幅为 0.05~0.40 的正弦微通道内实验研究了  $Re$  为 5~823、热负荷为 0~180 W 工况下去离子水的流动与传热性能,实验结果与上述模拟预测趋势相同。基于上述研究可知,正弦形微通道虽然带来较高的压降,但通常能提供较高的传热系数,在某些情况下使其成为高热流密度电子器件冷却的更优选择。

还有一种流道形状为锯齿形微通道,通道中同时存在迪恩涡和混沌平流两种流动机制从而产生强烈的流动混合效应。Peng Yi 等<sup>[27]</sup>设计制造了 4 种不同角度(30°~90°)的锯齿形微通道(图 2(b)),在质量流量为 10~45 g/min、热源初始温度为 50~75 °C 工况下对其进行实验研究。结果表明,减小锯齿角度能够改善传热性能,当锯齿角度为 30°时具有最高的传热系数和最低的热阻。当质量流量为 25 g/min,热源初始温度为 75 °C 时,45°的锯齿角具有最好的表面均温性,并且随着角度从 45°增至 90°逐渐恶化。胡玉茹<sup>[28]</sup>对锯齿形微通道内部流场进行数值模拟,观察到流体在尖角处会受到离心力作用产生速度梯度从而增强扰动,使其压降高于同工况下的直通道。

综上所述,微通道散热器的纵横比和截面形状趋向多样化,包括不同尺寸的矩形、圆形和多边形微通道,在未来也可能会出现更多的异型截面微通道。而非平直流道可以通过增强流动混合强化传热,其中波浪形和锯齿形微通道由于性能优异且易

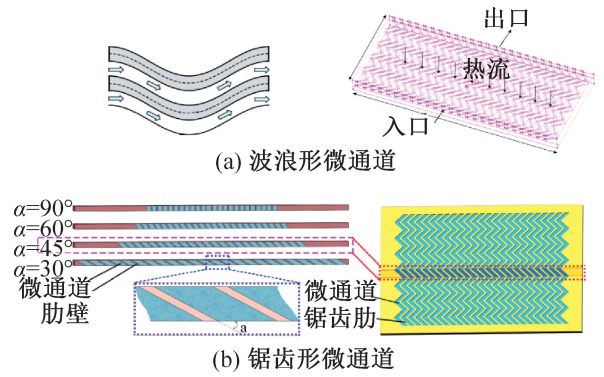


图 2 不同流道形状的微通道

Fig.2 Microchannels with various flow path shapes

于制造,在未来很可能得到广泛应用。在半导体、新能源汽车等领域快速发展的时代背景下,微通道的尺寸在未来可能会进一步减小,同时具有可伸缩、可调整的纵横比或截面/流道形状,以适应不同尺寸和形状的热源。

## 2 扰流结构

### 2.1 肋柱结构

除了对微通道的截面和流道形状进行优化,在微通道中加工肋柱也能够增加传热面积,通常是沿通道侧壁或底面的凸起,能够促进流体与流动边界层和热边界层的混合,因此该结构能够更有效地移除热量,但也会使压降增加。常见的肋柱形状有矩形<sup>[29-30]</sup>、三角形<sup>[31-32]</sup>和半圆形<sup>[33-34]</sup>。肋柱形状对传热性能有不同程度的改善,为了确定最优的侧壁肋柱形状,M. M. U. Rehman 等<sup>[35-36]</sup>在  $Re$  为 100~1 000、热负荷为 100 W/cm<sup>2</sup> 工况下对微通道内的椭圆形、梯形、水滴形和矩形肋(图 3(a))进行数值模拟。结果表明,椭圆形肋具有全局最高的努塞尔数  $Nu$ ,而矩形肋的  $Nu$  最低; $Re < 600$  时,椭圆肋表现出最好的综合性能;除此之外水滴肋为最优结构。

除了肋柱的形状设计,关于肋柱布置形式对流动与传热性能的影响也有讨论。T. Desrues 等<sup>[37-38]</sup>对布置侧壁垂直矩形肋(VR, vertical rib)和横向肋(SR, spanwise rib)的微通道进行数值模拟,证明其具有强化传热和增加压降的特性。Wang Guilian 等<sup>[39]</sup>将 VR 与 SR 结合设计的新型肋称为双向肋(BR, bi-directional rib),如图 3(b)所示,在  $Re$  为 100~1 000、热通量为 100 W/cm<sup>2</sup> 工况下对其进行实验和数值研究,并与 VR 和 SR 进行了对比。结果表明,在相同的流量下,BR 的  $Nu$  比 VR、SR 分别高 1.4~2.0 倍、1.20~1.42 倍,因为 BR 通过中断热边界层并在垂直方向和水平方向上诱导流动混合来提供更高的传热

性能。但由于BR具有更大的流动阻碍面积,所以摩擦阻力比VR、SR分别高8.85倍、4.42倍。

Wang Ruijin等<sup>[30]</sup>在 $Re$ 为62.5~625.0、热负荷为 $100\text{ W/cm}^2$ 工况下,对单排和双排布置的倾斜矩形肋结构(图3(c))进行了数值模拟。研究发现,倾斜布置

的肋在不影响传热性能的基础上能够有效减小压降,且双排布置的传热性能优于单排布置。Zhang Shizhong等<sup>[40]</sup>设计了一种三叶型肋(图3(d)),采用了3组不同的布置形式,研究表明,与光滑微通道相比,全壁布置具有全局最高的 $\psi$ 为1.13~1.61。

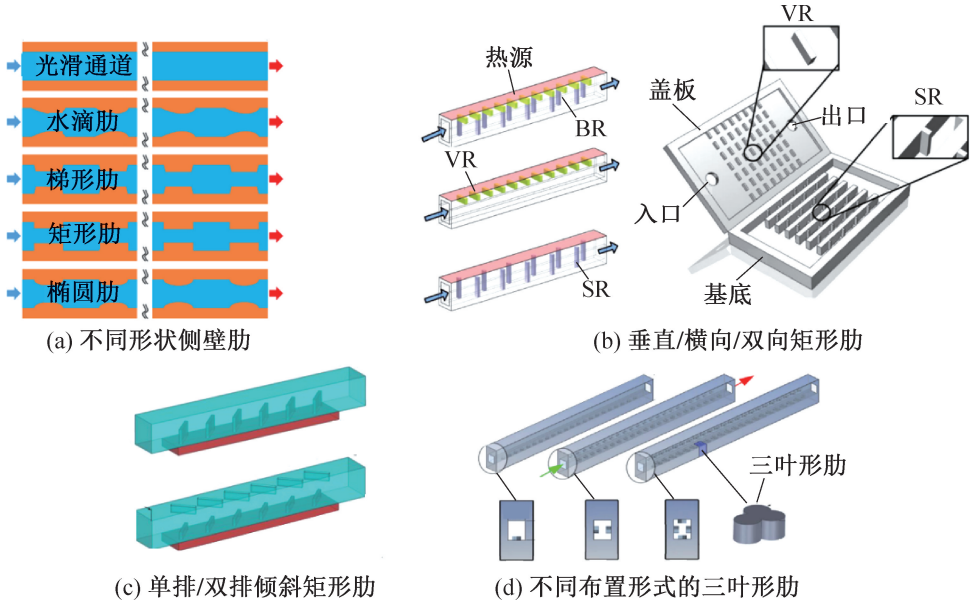


图3 肋柱结构

Fig.3 Ribbed structures

## 2.2 凹腔结构

凹腔的作用与肋柱相似,均是通过增加传热面积,干扰热边界层的中断和再发展以及通过涡流混合实现强化传热。但侧壁加工凹腔能够降低流速,凹腔中形成的涡流能够将滑动摩擦转化为滚动摩擦从而显著抑制流动阻力的增加。

Ma D. D.等<sup>[41]</sup>设计了侧壁具有对称三角形凹腔的结构(图4(a))并进行数值模拟。相比于光滑微通道,其 $Nu$ 提高了1.56~1.29倍。E. Bayrak等<sup>[42-44]</sup>设计了对称或偏置的矩形、半圆形、梯形的侧壁凹腔结构(图4(b))。实验或模拟研究证明,与光滑微通道相比,传热性能均得到了不同程度的强化。部分学者对于最优的侧壁凹腔结构并未达成一致意见<sup>[44-48]</sup>。Zhu Qifeng等<sup>[49]</sup>为了系统地对比各凹腔结构的流动与传热性能,设计了矩形、三角形、梯形、水滴形和半圆形结构偏置凹腔(图4(c))。在 $Re$ 为190~610、热通量为 $100\text{ W/cm}^2$ 工况下进行数值研究。结果表明,矩形凹腔的压降最低,三角形凹腔压降最大,但同时也具有最高的 $Nu$ 和最高的综合性能因子,因此三角形凹腔在改善流动与传热方面具有显著优势。此外,赵星霖等<sup>[50]</sup>针对凹腔的布置方式对传热性能的影响进行探索,设计了两面开槽和四面开

槽的微通道(图4(d))。结果表明,两面开槽与四面开槽结构的平均传热系数相比于光滑通道分别提高了33.8%和40%。

基于上述研究可知,微通道散热器的压降和传热性能均与流动状态高度耦合,因此将各种扰流结构集成在微通道中引起了研究人员的极大兴趣,其中肋柱与凹腔是应用较为广泛的强化手段。凹腔的存在不会阻碍流体的流动,通常会提供较好的传热性能和较低的压降增幅,适用于许多对能耗有要求的场景。肋柱虽然具有更好的传热性能,但通常伴随着较高的压降。因此,在特定应用中需要结合如传热性能、压降、能耗、制造难度和应用环境等对两者进行选用,以最大程度地满足散热需求。

## 2.3 肋柱与凹腔的组合结构

在微通道中同时添加肋柱和凹腔是另一种强化传热的手段,该组合结构能够有效增加传热面积,还能在强化传热的同时最大限度地降低压降。Zhai Y. L.等<sup>[51]</sup>以水为工质,在 $Re$ 为100~1000、热负荷为 $100\text{ W/cm}^2$ 工况下对具有半圆形凹腔和4种不同形状肋柱的微通道(图5(a))进行了数值研究。研究发现,凹腔组合矩形肋的 $\psi$ 始终最低,当 $Re>300$ 时,凹腔组合半圆肋的 $\psi$ 最高。此外,Li Yifan等<sup>[52-53]</sup>提

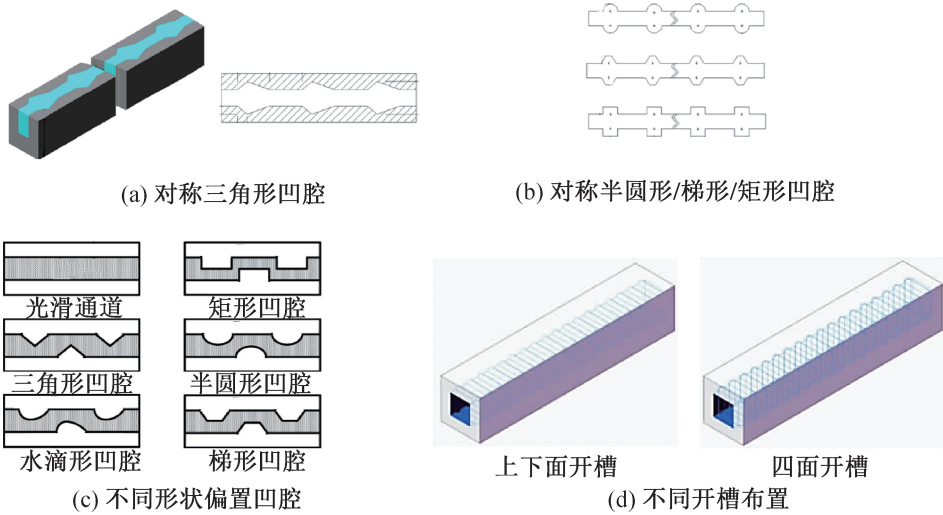


图4 对称/偏置凹腔结构

Fig.4 Symmetric/Offset cavity structure

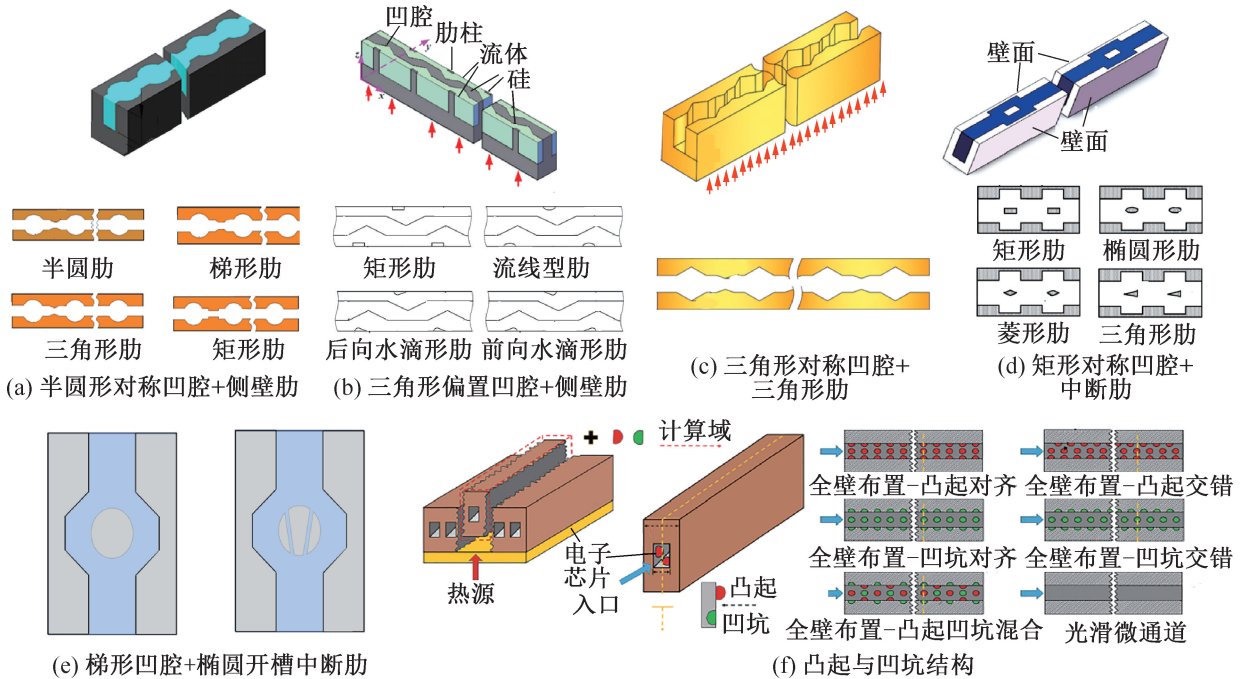


图5 肋与凹腔的组合结构

Fig.5 Combination structures of ribs and cavities

出了三角形凹腔组合不同形状肋的微通道(图5(b-c)),数值研究表明,所有的组合结构均具有强化传热、降低流体与壁面平均温差特性,其中三角形偏置凹腔和侧壁构造前向水滴形肋的组合结构具有最高的 $\psi$ 。

还有一种肋柱位于微通道底部,称为中断肋,其形状也会影响散热性能。Zhu Qifeng等<sup>[54]</sup>在侧壁矩形凹腔的基础上设计了矩形、菱形、三角形、椭圆形4种不同形状的中断肋(图5(d))。在 $Re$ 为100~900、热通量为100 W/cm<sup>2</sup>工况下进行数值模拟。结果表

明,当 $Re < 500$ 时,矩形肋的 $\psi$ 最高,除此之外椭圆形肋的 $\psi$ 最高。M. A. Alfellag等<sup>[55]</sup>提出了一种基于梯形凹腔的椭圆中断肋的结构(图5(e))。在 $Re$ 为100~1 200、热通量为100 W/cm<sup>2</sup>工况下进行数值模拟,研究表明,开槽的椭圆肋能够更好地提高综合性能,在特定结构布置下具有最大的 $\psi$ 为1.37。

近年来,凸起与凹坑的强化结构获得了更多的关注,它是一种特殊的肋柱与凹腔结构,具有加工简单、成本可控的优点,在电子设备冷却和生物医疗设备等方面得到应用。M. M. U. Rehman等<sup>[56]</sup>在矩形微通

道壁面加入凸起与凹坑,并考虑了不同布置方式(图5(f))对流动与传热性能的影响。在 $Re$ 为100~1000、热通量为50~100 W/cm<sup>2</sup>工况下对其进行数值模拟。结果表明,与光滑微通道相比,全壁布置对齐凸起的平均 $Nu$ 最多增加了115%,而摩擦系数最多增大了152%,具有全局最高的 $\psi$ 。

综上所述,肋柱和凹腔的组合结构在增加传热面积、降低压降增幅、改善湍流效应、增强流体混合方面优势显著。但其设计与制造过程复杂,为了确定最佳形状、尺寸及排列方式,需要更多的设计与制造成本,此外还可能引起流动不稳定性,这在某些应用场景是不可接受的。在未来的应用中,应综合考虑其优势和局限性,根据散热场景进行定制和优化,同时需要使用计算流体力学模拟和实验验证来确定最优的结构设计,以实现最佳的综合性能。

### 3 针肋结构

近10年来,一些学者利用边界层重建和二次流动的概念将微通道侧壁去除,仅在底部添加肋柱,设计了针肋微通道,它是解决高热通量问题的另一种散热结构。相比于光滑微通道,除了增加传热面积外,针肋间的流动形态更为复杂,能够有效地强化传热并改善进出口流场分布。部分学者就针肋形状对流动与传热性能的影响进行了研究。Wang P. 等<sup>[57]</sup>制造了圆形、方形、菱形和水滴形4种不同形状的微针肋散热器(图6(a))。采用去离子水为工质,在 $Re$ 为150~750工况下进行实验研究,结果表明,水滴形肋的 $Nu$ 最高,其次是菱形、圆形和方形;菱形肋的压降最低,其次是方形、水滴形和圆形;菱形肋的 $\psi$ 最高,对于改善流动与传热性能最有帮助。

除了上述规则几何形状的针肋,部分学者从优化流场的角度出发设计了异形针肋。夏国栋等<sup>[58]</sup>设计了长菱形针肋(图6(b))。该结构不仅能够拓展传热面积,还可以避免针肋尾部涡脱落造成的阻力损耗。采用去离子水为工质进行实验和数值研究发现,与相同尺寸的圆形、菱形针肋相比,长菱形针肋具有全局最高的 $Nu$ 和 $\psi$ 。为解决单一圆形针肋在尾部容易形成大面积的回流,使尾部侧面传热面积无法利用的问题,崔珍珍等<sup>[59]</sup>设计了一种圆形针肋交叉布置三角形小肋的组合式针肋(图6(c))。三角形小肋的存在能够破坏边界层的发展,在圆肋尾部形成纵向涡,减小尾部回流,增强流场的扰动,提高流场和温度均匀性。采用水为工质进行数值模拟发现,与不含尾部肋的圆形针肋相比,压降最多增加76%, $Nu$ 最多增加118%。当冲角 $\theta$ 为30°时,具有最高的综合性能

因子1.42~1.62。

针肋排布方式、布置密度、纵横比也会对散热器的性能有重大影响。Liu Zhigang 等<sup>[60-61]</sup>研究表明,叉排的摩擦系数大于顺排,且随针肋高度的增加而减小,与顺排布置相比,叉排布置的传热系数更大。E. Rasouli 等<sup>[62]</sup>以PF-5060为冷却工质,在 $Re$ 为8~1189、热通量为0~100 W/cm<sup>2</sup>工况下,对不同节距比和纵横比的微针肋进行数值模拟(图6(d))。研究发现,当节距比或纵横比其中一个保持不变时,随着另一参数的增大, $Nu$ 增大而流动压降减小。杨宇辰等<sup>[63]</sup>对孔隙率为0.743和0.836的微针肋进行数值研究发现,在相同 $Re$ 下,孔隙率越大, $Nu$ 也越大,这是因为更大的孔隙率促进了针肋尾部涡的形成,加强了通道内流体的混合和扰动。冯帅<sup>[64]</sup>提出微针肋直径的最佳范围是100~200  $\mu\text{m}$ ,孔隙率的最佳范围是0.65~0.85。为了解决芯片表面温度沿流向分布不均匀的问题,提出了一种梯级分布针肋微流道,在保证孔隙率为0.72的前提下,沿流动方向针肋直径依次为200、150、100  $\mu\text{m}$ (图6(e))。与均匀布置相比,梯级分布设计使中下游形成传热强化区,平均传热系数最多增加了36.8%,同时改善了芯片表面温度均匀性。P. Bhandari 等<sup>[65]</sup>通过改变肋高度设计了7种具有相同传热面积的阶梯式针肋散热器(图6(f))。以去离子水为工质进行数值研究发现,相比于均匀阵列结构,阶梯式结构的传热系数最多增加约25%。高度递增的结构有利于增强流体混合,能够实现更高的传热系数,但同时也产生了更大的压降,其中三阶梯式递增配置始终表现出全局最优的综合性能。

综上所述,针肋结构是一种高效的强化传热结构,通常位于通道底部,通过增加传热面积,破坏流动边界层,引发湍流的方式提高传热性能,但同时存在压降过大的问题。对于针肋形状、排列方式、布置密度、布置高度的进一步研究有利于提高其综合性能。针肋微通道在电子设备散热、绿色化工等多个领域具有广泛的应用潜力。

### 4 多层结构

上述单层微通道中随着单相流体沿热源流动,会出现流体温度升高的问题,导致流程方向均温性较差,严重时甚至会影响到发热器件的正常运行。为此,K. C. Wong 等<sup>[66-68]</sup>提出了双层微通道结构(图7(a)),它能够使更多的冷却工质流经散热器的顶层和底层以消散更多的热量。Wu J. M. 等<sup>[69]</sup>研究单层和双层微通道的热阻、壁面温度、压降等参数发现,与单层

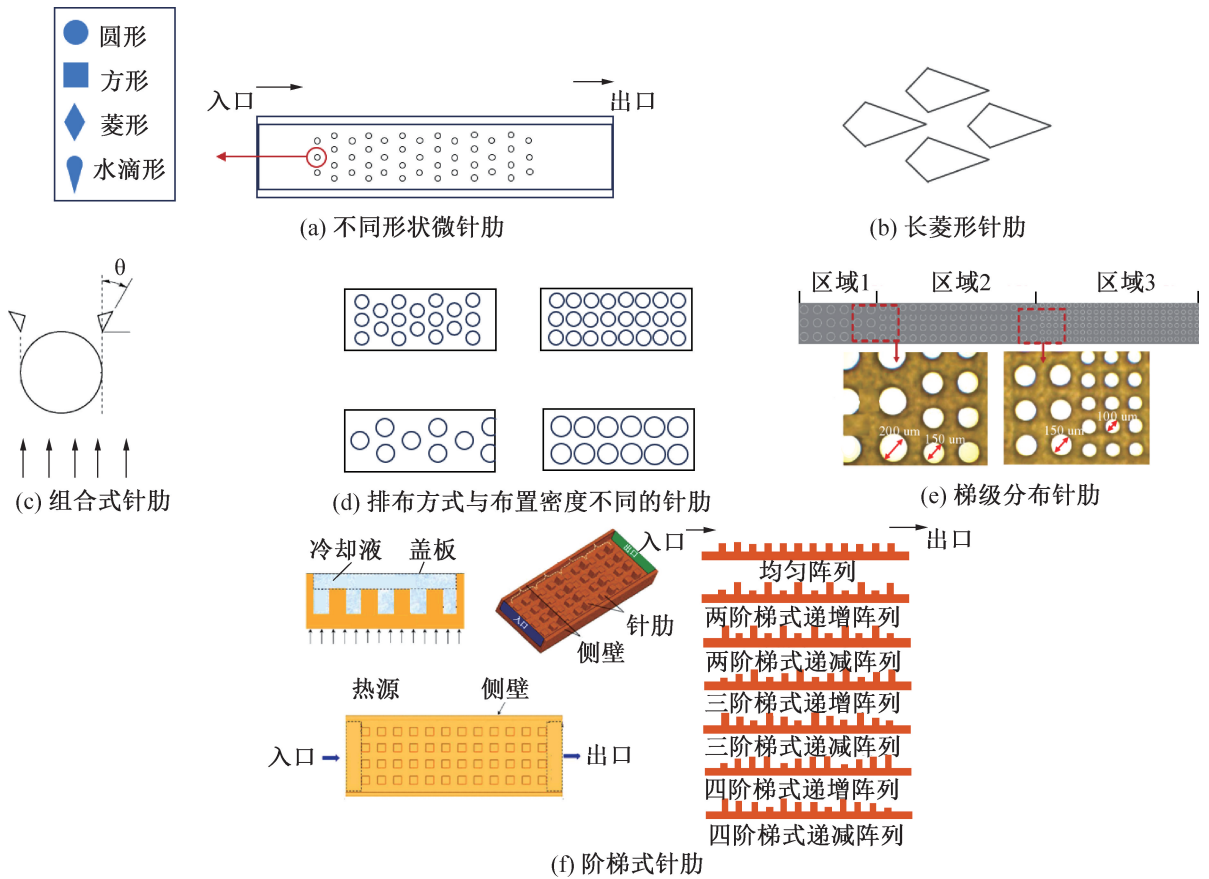


图 6 针肋结构

Fig.6 Pin-fin structures

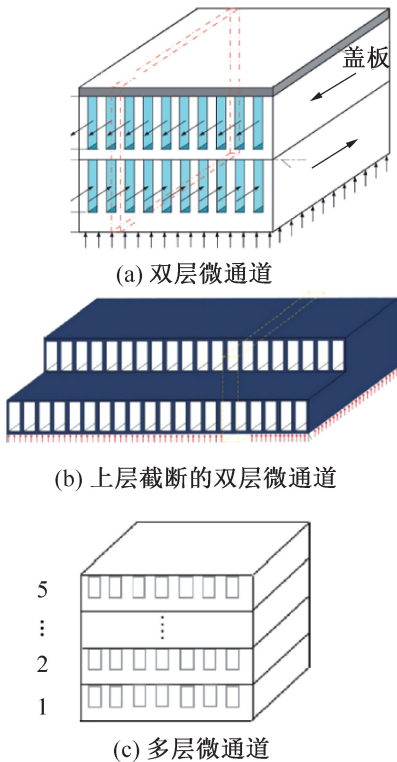


图 7 多层微通道结构

Fig.7 Multi-layer microchannel structures

结构相比,采用逆流布置的双层微通道散热器不仅能够降低热阻,而且能够降低基底表面的最高温度和流向温升,同时压降也大幅降低。然而双层布置结构顶部工质的温度总是高于底部入口处工质的温度,这不可避免地导致顶部的中高温下游工质加热底部的中低温上游工质。Leng Chuan 等<sup>[70-71]</sup>为了防止这种加热效应,提出一种具有截断顶部通道的新型双层微通道散热器(图 7(b)),进一步降低了总热阻和底面的最大温差。

N. Lei 等<sup>[72]</sup>设计制造了 1~5 层的矩形微通道结构(图 7(c))对其进行实验研究。在总流量相同的情况下,由于单个通道中的流速降低,多层结构的压降远小于单层的压降,且层数越多,压降越小。同时多层微通道的传热性能强于单层结构,且层数越多,热阻越小。当流量增至一定范围时,单层通道中流态转变为湍流。而多层通道中仍为层流,剧烈的扰动会赋予单层结构更高效的传热强化效果。

基于上述研究可知,多层微通道能够提供更大的传热面积,有助于提高传热效率,同时也具有更复杂的流路,有助于流体的混合和分配。在实际应用中,平衡传热面积与流量分配的问题是设计与应用多层

微通道的重点与难点,应根据流体物性及流速等因素进行取舍。

## 5 仿生结构

仿生结构微通道是一种灵感来源于生物学的设计,利用生物系统中的结构和原理来改善微通道的性能。该设计方法旨在模仿生物体系中的一些功能,以实现更有效的流体分配、传热、混合等过程。Peng Yi等<sup>[73-74]</sup>根据植物叶片的叶脉结构,设计了叶脉分形微通道散热器(图8(a))并数值研究其流动与传热性能。在热通量为 $100\text{ W/cm}^2$ 、流量为 $10\text{ mL/s}$ 工况下,该结构的表面最大温差相比于平直通道降低了75%,压降降低了57%。

为了适配常见的方形芯片,徐国强等<sup>[75]</sup>设计了一种Y型微通道结构(图8(b))并以水为工质对其进行数值模拟。在 $Re$ 为1118、热通量为 $10\text{ W/cm}^2$ 时,Y型结构的截面最高温度比平直通道低 $1.4\text{ }^\circ\text{C}$ ,压降低 $13\text{ kPa}$ 。并指出在研究工况范围内,通道级数为3级、分叉角度为 $60^\circ$ 、分支数为2时为最优的布置结构。马欣荣等<sup>[76]</sup>进一步设计了双层Y形结构并在热通量为 $2.5\times 10^3\text{ W/m}^2$ 工况下进行数值研究。在传热面积相同,入口速度为 $1\text{ m/s}$ 时,相比于单层Y型结构,双层逆流Y形结构的截面最高温度降低了 $3.1\text{ }^\circ\text{C}$ ,压降减少了 $755.2\text{ Pa}$ 。

刘显茜等<sup>[77]</sup>借鉴昆虫翅膀,设计了一种仿生翅

脉微通道(图8(c))。采取体积分数为50%的乙二醇溶液作为冷却液,在 $Re$ 为643.23、传热系数为 $2\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ 工况下对其进行数值研究。结果表明,仿生翅脉结构的表面最高温度比平直结构降低了 $3.01\text{ K}$ ,压降降低了 $87\text{ Pa}$ 。董涛等<sup>[78]</sup>和吴龙文等<sup>[79]</sup>也分别从昆虫中得到灵感,分别设计制造了仿蜂巢结构微通道(图8(d))和蛛网结构微通道(图8(e)),用于电子芯片散热。研究表明,与平直通道相比,仿生分形流道在拓展传热面积、提高散热量、减少泵功、降低发热器件表面最大温差及提升温度分布均匀性等方面具有独特优势,且效果通常随分形级数的增加而增加。Chen Yongping等<sup>[80-81]</sup>受哺乳动物循环与呼吸系统的启发,建立了肺气管分形微通道散热器(图8(f))的模型。在入口流速为 $1\text{ m/s}$ 、入口温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 、芯片功耗为 $30\text{ W}$ 工况下,肺气管型微通道的表面最大温差最多比平直通道低 $14.3\text{ }^\circ\text{C}$ 。申鑫等<sup>[82]</sup>借鉴鱼鳞和鲨鱼皮盾鳞结构,设计了一种鱼鳞仿生结构微通道(图8(g-h)),在 $Re$ 为 $290\sim 1180$ 、热流密度为 $50\text{ W/cm}^2$ 工况下进行数值模拟,研究表明,新型微通道的 $\psi$ 均在 $1.05\sim 2.08$ ,综合性能获得显著提升。其中品字形排布的等比劈缝鱼鳞结构由于压降更低,二次流扩散面积及有效传热面积较大,因此综合性能最好。

综上所述,学者们从植物、昆虫、动物等生物体系中得到启发从而设计了各种仿生微通道。目前大部

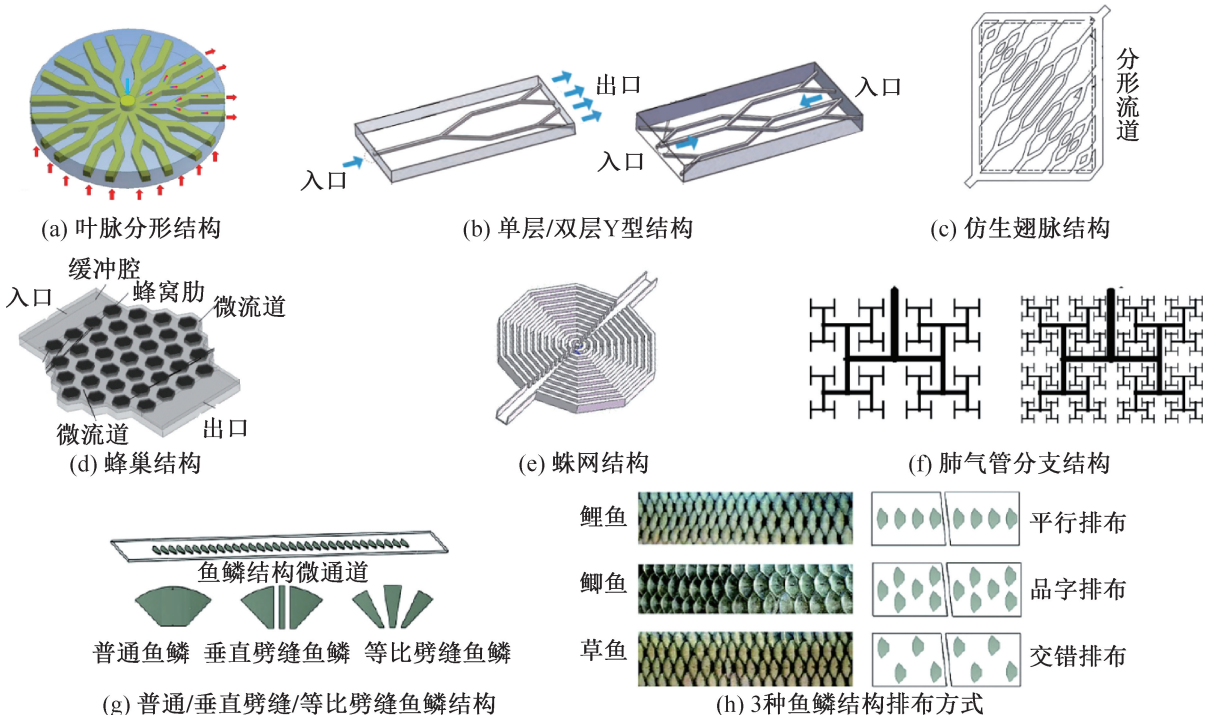


图8 仿生微通道结构

Fig.8 Biomimetic microchannel structures

分仿生微通道能够降低流阻,减小尺寸与质量,同时由于其高效的冷却工质传输特性,具有均温性强的特点,能够有效解决电子设备因局部热点而出现的故障,在集成芯片热管理领域的发展中具有很大的竞争力。仿生结构微通道的发展仍然是一个活跃的研究领域,在该领域跨学科研究和合作非常重要,需要利用生物学、机械工程、材料科学和流体力学的知识来推动创新。目前对于仿生微通道散热器的研究大多集中于理论与数值计算,今后的研究可以侧重于实验装置的研制以测试其实际冷却性能。

## 6 复合强化结构

随着电子设备集成度的提高,单一形式的微通道散热器在某些场景已经无法满足散热需求。为了解决这一挑战,研究人员将不同的强化结构进行组合,设计了复合强化结构微通道,使其应用领域进一步拓展。

其中,在横断区内布置中断肋的复合结构受到了广泛关注<sup>[83-84]</sup>。Chai Lei等<sup>[85]</sup>在横断区布置5种中断肋(图9(a))。采用去离子水为工质对其进行数值研究。结果表明,复合结构的传热系数与压降均大于各单一结构,其中横断区复合椭圆肋表现出最佳的综合性能。类似地,A. Datta等<sup>[86]</sup>将横断区,中断肋与渐缩渐扩结构复合,设计了如图9(b)所示的结构,指出具有内部渐缩结构的中断肋能够实现最优的综合性能。涡流发生器(VG, vortex generator)也是一种特殊的中断肋,它能够产生强烈的纵向涡以加强流动

扰动,增强流体的混合效果,从而改善传热性能。G. Biswas等<sup>[87]</sup>对内置涡流发生器的微通道综合性能进行研究,并与光滑微通道进行对比,发现内置涡流发生器的微通道的 $\psi$ 相比于光滑微通道可提高约40%。Feng Zhenfei等<sup>[88]</sup>提出了一种在横断区布置纵向涡流发生器对(LVG, longitudinal vortex generator)的结构(图9(c))。采用去离子水为工质,在 $Re$ 为133~596、热通量为 $100\text{ W/cm}^2$ 工况下进行数值模拟,研究表明,LVG存在最佳布置参数,在该布置下能够获得最大的 $\psi$ 为1.45。

还有部分学者将双层微通道与扰流结构进行复合,K. Derakhshanpour等<sup>[89]</sup>在双层微通道侧壁设置了半圆形肋(图9(d))。半圆肋的加入导致热边界层和混沌平流的再发展,进而导致传热系数显著提高。D. Debbarma等<sup>[90]</sup>通过在双层微通道中布置凹坑和凸起,以水为工质,在 $Re$ 为89~924、热通量为 $100\text{ W/cm}^2$ 工况下进行数值模拟,研究表明,同时布置凸起和凹坑结构的散热器的 $Nu$ 比光滑双层通道提高了36%,壁面最大温差降低了63%。

在单相液冷散热中,微通道虽然能够有效提高传热性能,但所需的代价通常是泵送功率的提高。如何改善表面结构,减小流动阻力已成为关键技术问题之一。其中一种方案是在微通道中使用纳米结构的超疏水表面,如霍素斌<sup>[91]</sup>制备出了具有超疏水特性的铝基微通道,实验证明流动阻力最多可减少40%。这是由于超疏水表面产生了“滑移效应”,降低了流体在壁面处的流动阻力。然而,高质量的纳米结构微

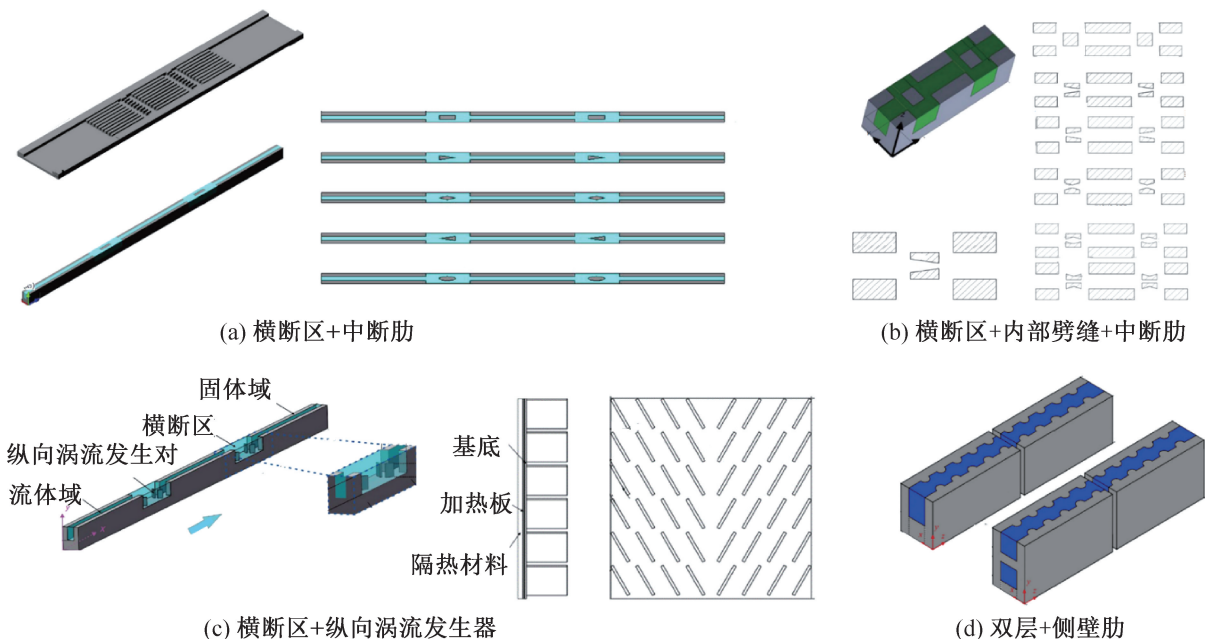


图9 复合强化结构

Fig.9 Composite structure microchannels

通道壁面制造困难,因此 Chuan Leng 等<sup>[92]</sup>引入了烧结多孔结构作为超疏水结构的替代解决方案并证实多孔结构表面上同样可以引起“滑移效应”。

基于上述设计理念,一些基于多孔介质的新型复合微通道开始发展。R. Moosavi 等<sup>[93-94]</sup>把横向涡流发生器(TVG, transverse vortex generator)与多孔介质微通道复合(图 10(a))。在  $Re$  为 125~1 000、热通量为 100 kW/m<sup>2</sup> 工况下对其进行数值研究。结果表明,布置有 TVG 结构的多孔微通道比光滑微通道的传热系数最多高 12 倍,压降相比于未添加多孔介质的微通道有所降低。Wang Shuolin 等<sup>[95]</sup>将多孔材料作为双层微通道的侧壁(图 10(b)),试图在达到较好的传热性能的同时降低压降。以水为工质,在  $Re$  为 65~200、热通量为 100 W/cm<sup>2</sup> 工况下进行数值模拟。结果表明,在  $Re$  相同的情况下,相比于双层实心壁面结构,虽然泵送功率降低了 45.3%~48.5%,但热阻增加了 14.8%~16.2%,从而使传热恶化。Li Xianyang 等<sup>[96]</sup>对该结构进行优化,将实体壁面较好的导热性能与多孔材料降低压降的特性结合,设计出上层采用多孔壁、下层采用实心壁的双层微通道(图 10(c))。在  $Re$  为 194~392、热通量为 100 W/cm<sup>2</sup> 工况下对改进的结构与单层实心、单层多孔、双层实心和双层多孔 4 种结构进行性能对比。结果表明,改进的设计相比于其余 4 种结构的热阻降低了 9.27%~14.98%,温度均匀性提高了 14.57%~58.04%。

S. Boland 等<sup>[97]</sup>提出了一种具有波浪形顶部多孔翅片的双层微通道散热器(WTPF, wavy top porous fins),如图 10(d)所示。由于正弦结构引起的二次流

和顶部多孔肋中的流动混合效应,在  $Re$  为 214~389、热通量为 100 W/cm<sup>2</sup> 时,WTPF 的热阻比实心肋双层直微通道低约 3.7%~13.9%。

多孔介质与仿生微通道的复合结构也受到了部分学者的关注。P. Dey 等<sup>[98]</sup>设计了一种仿生鱼鳞型多孔肋结构(图 10(e))。在  $Re$  为 200~1 100、热通量为 50 W/cm<sup>2</sup> 工况下进行数值模拟,研究表明,与光滑微通道相比,设置实心和多孔鱼鳞型肋的最大传热系数分别增强了 78.8%和 78.1%,摩擦系数分别升高了 48.5%和 37.8%,最大  $\psi$  分别为 1.56 和 1.60。因此,多孔鱼鳞结构能够更好地实现传热和压降之间的平衡。Wang M. 等<sup>[99]</sup>设计了二阶蜂窝肋结构(图 10(f))并分别对其填充固体和多孔介质。在  $Re$  为 50~150、热通量为 50 W/cm<sup>2</sup> 工况下对其进行数值模拟,结果表明,具有二阶蜂窝多孔肋的微通道的  $\psi$  最高,相比于实心肋的  $Nu$  增加了 0~1.6%,压降减少了 81.1%~81.7%。

综上所述,某些复合强化结构通常会在相邻微通道的横断区内布置扰流结构,在促进横向流体的运输和混合的同时引入湍流来破坏热边界层和流动边界层。此外,基于多孔介质的复合强化结构则能够在增加传热面积的同时产生“滑移效应”以显著降低流阻。复合强化结构可以根据特定的应用需求进行非标定制,在热管理领域具有重要意义。目前,限制其发展的主要问题是工艺的复杂性,因此在实际应用中需要根据散热需求与应用成本进行取舍。

前文介绍了在单相液冷技术中典型的 6 种微通道散热器结构,将各典型结构的热阻、摩擦系数、热效

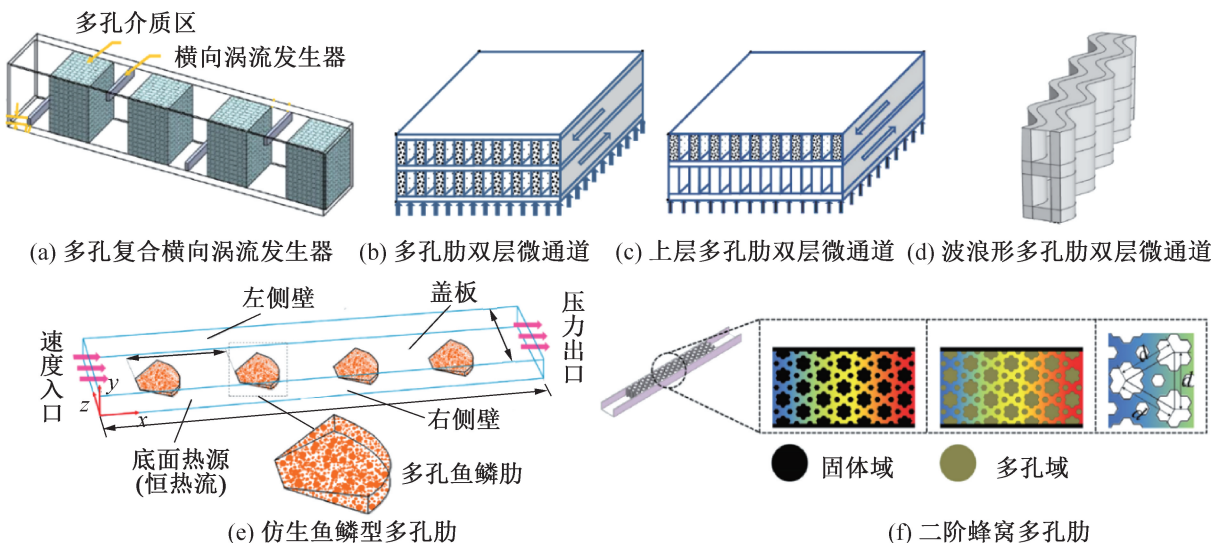


图 10 基于多孔介质的复合结构

Fig.10 Composite structures based on porous medium

率、综合性能因子等性能参数进行横向的量化对比, 如表 1 所示。

表 1 典型微通道散热器性能对比  
Tab.1 Typical microchannel heat sinks performance comparison

典型结构	具体结构	工质	热流密度/ (W/cm <sup>2</sup> )	Re/流量/ 流速	热阻/ (W/K)	$f/f_0$	$\eta_{\text{eff}}/\eta_{\text{eff},0}$	$\psi$	文献
通道几何结构	矩形				0.107	1.00	1.00	—	
	三角形	水	100	600	0.130	0.71	1.61	—	Wang Hongtao 等 <sup>[11]</sup>
	梯形				0.112	0.97	1.14	—	
扰流结构	波浪形	水	300	400	—	1.56	—	2.530	Sui Y. 等 <sup>[25]</sup>
	肋柱			600	3.100	3.38	—	1.275	Zhang Shizhong 等 <sup>[40]</sup>
	凹腔	水	100	610	6.500	1.04	—	1.375	Zhu Qifeng 等 <sup>[49]</sup>
	凹腔+肋柱			600	3.670	2.00	—	1.450	Zhu Qifeng 等 <sup>[54]</sup>
针肋结构	菱形	水	99	500	0.290	1.60	—	0.975	夏国栋等 <sup>[58]</sup>
	长菱形				0.170	1.64	—	1.100	
多层结构	双层	水	258	100 mL/min	0.290	0.40	—	—	Lei N. 等 <sup>[72]</sup>
	三层				0.250	0.30	—	—	
仿生结构	蛛网型	(CH <sub>2</sub> OH) <sub>2</sub>	60	210 mL/min	0.860	0.80	—	—	吴龙文等 <sup>[79]</sup>
	鱼鳞型	水	50	740	1.180	—	—	1.325	申鑫等 <sup>[82]</sup>
复合结构	横断+涡流发生器		100	596	—	1.33	—	1.450	Feng Zhenfei 等 <sup>[88]</sup>
	双层+侧壁肋	水	100	395	4.000	2.30	—	1.400	K. Derakhshanpour 等 <sup>[89]</sup>
	多孔+鱼鳞肋		50	650	—	1.25	—	1.480	P. Dey 等 <sup>[98]</sup>
	多孔鳍+微歧管		500	1.2 m/s	23.900	0.79	—	1.350	陈超伟等 <sup>[100]</sup>

## 7 成本分析

虽然微通道散热器的结构优化通常对提高流动与传热性能具有很好的效果,但不可避免地会导致成本增加,而加工成本也是每一种几何结构散热器最终是否具有实用价值的重要因素,基体材料成本、设计复杂性与工艺复杂性在决定微通道散热器加工成本时起到关键作用。其中材料选择需要根据实际应用场景与材料的价格进行取舍,而设计复杂性和工艺复杂性一般会相互影响,越复杂的设计通常需要更精密的加工工艺。

选择高导热系数的材料通常是微通道散热器设计的核心,材料价格是影响成本的因素之一。常见的微通道基体材料及参数对比<sup>[101-102]</sup>如表 2 所示。

目前,最常使用的基体材料为铜、铝、硅 3 种,均相对容易加工且易于获取,能够满足微通道复杂形状和微细结构的需求,在大规模制造时具有性价比<sup>[103]</sup>。铜具有良好的导热性能和机械强度,常见于计算机、服务器等需要高效散热的应用中;铝则因为

相对较低的成本和轻质化使其在消费电子产品、航空航天领域得到广泛应用。铜相对铝更加昂贵,因此铝

表 2 常见基体材料及参数

Tab.2 Summary of performance indicators for common thermal conductive materials

材料种类	导热系数/ [W/(m·K)]	密度/ (g/cm <sup>3</sup> )	价格/ (元/kg)
铜	400	8.92	69
铝	238	2.70	19
硅	151	2.30	11
不锈钢	15~30	7.70~7.93	14
氧化铝	17	3.60	3
碳化硅/铝	175	3.03	90
碳化硅/铜	280~360	7.00~9.00	92
金刚石	2 000~2 320	3.47~3.50	2 000
金刚石/铝	350~750	3.00	250
金刚石/铜	400~930	5.00	302

成为市场上应用最多的散热器基体材料。硅的导热系数相对较低,更多的应用于半导体和微电子领域,如能源、化工、生物、司法等领域的微流控芯片就是直接在硅基芯片上加工微流道进而对流体进行精确操控<sup>[104]</sup>。

碳化硅具有比硅单质更高的导热系数,但也更加脆硬,给加工制造过程带来了挑战,为此, R. J. Kee 等<sup>[105]</sup>提出了一种压力层压集成结构新技术,将铝、铜等金属材料添加至碳化硅粉末中形成复合材料,能够大幅降低制造难度,具有一定成本效益。

随着电子器件热流密度的迅速增长,迫切需要具有更高导热系数的材料,金刚石作为微通道基体材料具有极高的硬度,极好的导热性能,还具有较好的抗腐蚀性和电绝缘性。虽然金刚石具有这些独特的优点,但由于价格昂贵、加工难度较大,使其在大规模生产应用中受到限制。近年来,对于金刚石/铜基复合材料的研究得到重视,它结合了金刚石优异的导热系数和铜的韧性,同时还具有较小的密度和相对低廉的价格<sup>[106]</sup>,是最有发展前景的新型基体材料之一。

在微通道中实现微尺度强化结构的制造也对加工工艺提出了挑战,随着先进制造方法的发展,可以使用蚀刻(湿法/干法)、微机械切削工艺、微电火花处理、激光切割技术、烧结、气相沉积、热压注塑成型和 3D 打印等方法进行加工制造,不同工艺也造成成本不同,归纳 Deng D. 等<sup>[107-108]</sup>提到的典型结构微通道散热器的加工方法与成本,如表 3 所示。

由表 3 可知,湿法蚀刻、烧结、微机械切削、微电火花处理的加工成本较低,通常可以用来加工结构相对简单的微通道结构。而干法蚀刻、3D 打印、热压/注塑成型、气相沉积、激光切割的成本较高,能够用来加工如多层结构、仿生结构以及复合结构等设计复杂度较高的结构。但每一种加工技术也有其特有的缺陷,如蚀刻技术耗时长,而且一般与有毒的化学溶液相关;烧结工艺难以精确控制最终产品的形状和尺寸;微机械切削容易产生切削毛刺和刀具磨损;微电火花处理和气相沉积的生产率低,难以实现大规模生产;3D 打印的几何精度和表面平坦度较差;热压/注塑成型的壁厚很难控制;激光切割设备昂贵,加工时间长,并导致通道表面光洁度差<sup>[2,107]</sup>。总之,在选用微通道加工工艺时,应同时考虑加工精度与加工成本之间的关系。

## 8 结语

微通道冷却技术是一种高效的冷却技术,通过对近年来成果的调研可知,对于微通道散热器结构优化

表 3 典型结构微通道散热器加工方法及成本  
Tab.3 Typical structure microchannel heat sink processing methods and costs

典型结构	加工方法	加工成本
通道几何结构	湿法蚀刻	低
	干法蚀刻	高
	微电火花处理	低
	微机械切削	低
扰流结构	干法蚀刻	高
	微机械切削	低
	激光切割	高
针肋结构	湿法蚀刻	低
	干法蚀刻	高
	激光切割	高
多层结构	3D 打印	高
	激光切割	高
仿生结构	3D 打印	高
	微机械切削	低
	激光切割	高
	热压/注塑成型	高
复合结构	微机械切削	低
	烧结	低
	气相沉积	高
	3D 打印	高
	激光切割	高

的方向旨在提高其传热系数或均温性的同时尽可能降低压降。本文基于单相液冷微通道的结构对流动与传热性能影响的角度进行综述,提炼出 6 种典型的结构,针对不同的强化结构可得到如下结论:

1) 不同结构微通道散热器的流动与传热特性各异。通过改变纵横比,截面和流道的几何形状能够改变传热面积或增强扰动;侧壁或底部的肋柱和凹腔以及针肋结构是基于边界层重建,流动中断与增强流体混合角度设计的强化结构;多层结构能够显著降低压降和流速,降低壁面的流向温升;仿生结构通过改变流道布置,能够提升发热器件表面的温度均匀性。面对日益复杂的散热场景,需要深入理解各结构的强化传热机理与特性,做到因地制宜,扬长避短,更好地发挥不同结构的作用。

2) 复合结构微通道一般能将各结构的特点结合,适应更广泛的应用场景。各强化结构的复合并非简单地堆砌,也并非一定具有更优的性能,其应用建立在对各基础强化结构的深入理解上。目前制约复

合结构微通道应用的主要原因是其在材料、设计、制造、装配等工艺方面具有局限性,批量生产成本较高,随着新的加工技术与材料的研发应用,复合结构微通道将会日趋成熟,成为具有广泛应用前景的新型散热设备。

3)在微通道散热器的工业应用与商业化中,降低加工成本是首要任务,其中加工成本主要由基体材料和工艺复杂度决定。在基体材料方面,近年来散热器基体材料主要集中于铜、铝、硅,但随着电子器件热流密度的提高,金刚石/铜复合材料由于其高导热系数和相对较低的成本具有突出的应用前景。在加工技术方面,归纳了蚀刻、微机械切削工艺、微电火花处理、激光切割技术、烧结、气相沉积、热压注塑成型和3D打印等制造方法的成本与局限性。对于强化结构的工艺选择,应同时考虑加工精度与加工成本之间的关系。

4)单相液冷微通道散热器的结构研究仍处于不断演进的阶段,目前的研究方向侧重于增加传热面积和改善流动形态。在结构方面,未来微通道散热器将继续向小型化、复合化发展。在材料方面,未来的发展可引入纳米涂层技术、碳纳米管、石墨烯和金属有机骨架材料,改变微通道的表面特性和纹理。在学科交叉方面,可引入自动化智能控制系统,以实时监测和调整控温策略,从而最大程度地提高散热效率。

#### 参考文献

[1] GONG Liang, ZHAO Jin, HUANG Shanbo. Numerical study on layout of micro-channel heat sink for thermal management of electronic devices [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 88: 480-490.

[2] LU Kaijie, WANG Chunju, WANG Changrui, et al. Topological structures for microchannel heat sink applications - a review [J]. *Manufacturing Review*, 2023, 10:2.

[3] 袁柳林, 刘胜, 陈明祥, 等. 基于微通道致冷的大功率LED阵列封装热分析 [J]. *半导体光电*, 2006, 27(6): 712-716. (YUAN Liulin, LIU Sheng, CHEN Mingxiang, et al. Thermal analysis of high power LED array packaging with microchannel cooler [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, 27(6): 712-716.)

[4] TEO H G, LEE P S, HAWLADER M N A. An active cooling system for photovoltaic modules [J]. *Applied Energy*, 2012, 90(1): 309-315.

[5] VALEH-E-SHEYDA P, RAHIMI M, KARIMI E, et al. Application of two-phase flow for cooling of hybrid microchannel PV cells: a comparative study [J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 69: 122-130.

[6] LI Zhen, KANDLIKAR S G. Current status and future trends in data-center cooling technologies [J]. *Heat Transfer Engineering*, 2015, 36(6): 523-538.

[7] KIM S M, MUDAWAR I. Review of databases and predictive methods for pressure drop in adiabatic, condensing and boiling mini/micro-channel flows [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 77: 74-97.

[8] KARAYIANNIS T G, MAHMOUD M M. Flow boiling in microchannels: fundamentals and applications [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 115: 1372-1397.

[9] WADEL M F. Comparison of high aspect ratio cooling channel designs for a rocket combustion chamber with development of an optimized design [M]. Ohio: National Aeronautics and Space Administration, Lewis Research Center, 1998.

[10] TUCKERMAN D B, PEASE R F W. High-performance heat sinking for VLSI [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 1981, 2(5): 126-129.

[11] WANG Hongtao, CHEN Zhihua, GAO Jianguo. Influence of geometric parameters on flow and heat transfer performance of micro-channel heat sinks [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 107: 870-879.

[12] MA Yinjie, LIU Cheng, E Jiaqiang, et al. Research on modeling and parameter sensitivity of flow and heat transfer process in typical rectangular microchannels: from a data-driven perspective [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2022, 172: 107356.

[13] MARDANI M, SALIMPOUR M R. Optimization of triangular microchannel heat sinks using constructal theory [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, 30(10): 4757-4764.

[14] MARDANI M, SALIMPOUR M R. Numerical optimization of an array of triangular microchannels using constructal theory [J]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2019, 12(2): 595-601.

[15] FANI B, ABBASSI A, KALTEH M. Effect of nanoparticles size on thermal performance of nanofluid in a trapezoidal microchannel-heat-sink [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2013, 45: 155-161.

[16] FANI B, KALTEH M, ABBASSI A. Investigating the effect of Brownian motion and viscous dissipation on the nanofluid heat transfer in a trapezoidal microchannel heat sink [J]. *Advanced Powder Technology*, 2015, 26(1): 83-90.

[17] CHEN Yongping, ZHANG Chengbin, SHI Mingheng, et al. Three-dimensional numerical simulation of heat and fluid flow in noncircular microchannel heat sinks [J].

- International Communications in Heat and Mass Transfer, 2009, 36(9): 917–920.
- [18] GUNNASEGARAN P, MOHAMMED H A, SHUAIB N H, et al. The effect of geometrical parameters on heat transfer characteristics of microchannels heat sink with different shapes [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2010, 37(8): 1078–1086.
- [19] ALFARYJAT A A, MOHAMMED H A, ADAM N M, et al. Influence of geometrical parameters of hexagonal, circular, and rhombus microchannel heat sinks on the thermo-hydraulic characteristics [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2014, 52: 121–131.
- [20] DURYODHAN V S, SINGH S G, AGRAWAL A. Liquid flow through a diverging microchannel [J]. Microfluidics and Nanofluidics, 2013, 14(1): 53–67.
- [21] DURYODHAN V S, SINGH S, AGRAWAL A. Liquid flow through converging microchannels and a comparison with diverging microchannels [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2014, 24(12): 125002.
- [22] DURYODHAN V S, SINGH A, SINGH S G, et al. Convective heat transfer in diverging and converging microchannels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 80: 424–438.
- [23] KHOSHVAGHT-ALIABADI M, FEIZABADI A, NOURI M. Design of novel geometries for minichannels to reduce junction temperature of heat sinks and enhance temperature uniformity [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 192: 116926.
- [24] MOHAMMED H A, GUNNASEGARAN P, SHUAIB N H. Numerical simulation of heat transfer enhancement in wavy microchannel heat sink [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2011, 38(1): 63–68.
- [25] SUI Y, TEO C J, LEE P S, et al. Fluid flow and heat transfer in wavy microchannels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(13/14): 2760–2772.
- [26] HUANG Houxue, WU Huiying, ZHANG Chi. An experimental study on flow friction and heat transfer of water in sinusoidal wavy silicon microchannels [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2018, 28(5): 055003.
- [27] PENG Yi, LI Zhibin, LI Shaobo, et al. The experimental study of the heat transfer performance of a zigzag-serpentine microchannel heat sink [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021, 163: 106831.
- [28] 胡钰茹. 异形微通道两相流强化混合特性分析与数值仿真 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020. (HU Yuru. Analysis and numerical simulation of enhanced mixing characteristics of two-phase flow in special-shaped microchannels [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.)
- [29] KMIOTEK M, SMUSZ R. Effect of thin obstacles heights on heat transfer and flow characteristics in microchannels [J]. Archive of Mechanical Engineering, 2023, 70(4): 553–566.
- [30] WANG Ruijin, WANG Jiawei, LIJIN Beiqi, et al. Parameterization investigation on the microchannel heat sink with slant rectangular ribs by numerical simulation [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 133: 428–438.
- [31] CHAI Lei, WANG Liang, BAI Xin. Thermohydraulic performance of microchannel heat sinks with triangular ribs on sidewalls – part 1: local fluid flow and heat transfer characteristics [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 127: 1124–1137.
- [32] CHAI Lei, WANG Liang, BAI Xin. Thermohydraulic performance of microchannel heat sinks with triangular ribs on sidewalls – part 2: average fluid flow and heat transfer characteristics [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 128: 634–648.
- [33] CHAI Lei, XIA Guodong, WANG Huasheng. Parametric study on thermal and hydraulic characteristics of laminar flow in microchannel heat sink with fan-shaped ribs on sidewalls – part 1: heat transfer [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 97: 1069–1080.
- [34] CHAI Lei, XIA Guodong, WANG Huasheng. Parametric study on thermal and hydraulic characteristics of laminar flow in microchannel heat sink with fan-shaped ribs on sidewalls – part 3: performance evaluation [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 97: 1091–1101.
- [35] REHMAN M M U, CHEEMA T A, AHMAD F, et al. Thermodynamic assessment of microchannel heat sinks with novel sidewall ribs [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2019, 34(2): 243–254.
- [36] AHMAD F, CHEEMA T A, KHAN A, et al. Hydrothermal investigation of the performance of microchannel heat sink with ribs employed on side walls [J]. Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics, 2021, 46(3): 255–272.
- [37] DESRUES T, MARTY P, FOURMIGUÉ J F. Numerical prediction of heat transfer and pressure drop in three-dimensional channels with alternated opposed ribs [J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 45: 52–63.
- [38] XIA Guodong, ZHAI Yuling, CUI Zhenzhen. Numerical investigation of thermal enhancement in a micro heat sink with fan-shaped reentrant cavities and internal ribs [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 58(1/2): 52–60.
- [39] WANG Guilian, QIAN Nan, DING Guifu. Heat transfer

- enhancement in microchannel heat sink with bidirectional rib[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 136: 597–609.
- [40] ZHANG Shizhong, AHMAD F, ALI H, et al. Computational study of hydrothermal performance of microchannel heat sink with trefoil shape ribs[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 74412–74424.
- [41] MA D D, XIA G D, WANG W, et al. Study on thermal performance of microchannel heat sinks with periodic jetting and throttling structures in sidewalls[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 158: 113764.
- [42] BAYRAK E, OLCAY A B, SERINCAN M F. Numerical investigation of the effects of geometric structure of microchannel heat sink on flow characteristics and heat transfer performance[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, 135: 589–600.
- [43] XIA G D, JIANG J, WANG J, et al. Effects of different geometric structures on fluid flow and heat transfer performance in microchannel heat sinks[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 80: 439–447.
- [44] KUMAR P. Numerical investigation of fluid flow and heat transfer in trapezoidal microchannel with groove structure [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, 136: 33–43.
- [45] AHMED H E, AHMED M I. Optimum thermal design of triangular, trapezoidal and rectangular grooved microchannel heat sinks [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2015, 66: 47–57.
- [46] JIA Yuting. Entropy generation analysis of flow and heat transfer in microchannel with droplet reentrant cavities[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(4): 141–148.
- [47] HOU Tingbo, CHEN Yuanlong. Pressure drop and heat transfer performance of microchannel heat exchanger with different reentrant cavities[J]. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 2020, 153: 107931.
- [48] PAN Minqiang, WANG Hongqing, ZHONG Yujian, et al. Numerical simulation of the fluid flow and heat transfer characteristics of microchannel heat exchangers with different reentrant cavities [J]. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 2019, 29(11): 4334–4348.
- [49] ZHU Qifeng, XIA Huixue, CHEN Junjie, et al. Fluid flow and heat transfer characteristics of microchannel heat sinks with different groove shapes [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, 161: 106721.
- [50] 赵星霖, 王平阳, 黄佳卉. 带有横向微槽道的超临界 LNG 紧凑型换热器换热强化模拟研究[J]. *低温工程*, 2020(6): 1–8. (ZHAO Xinglin, WANG Pingyang, HUANG Jiahui. Simulated research of enhanced heat transfer characteristics of supercritical LNG compact heat exchanger with transverse micro-grooves channels [J]. *Cryogenics*, 2020(6): 1–8.)
- [51] ZHAI Y L, XIA G D, LIU X F, et al. Heat transfer in the microchannels with fan-shaped reentrant cavities and different ribs based on field synergy principle and entropy generation analysis [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 68: 224–233.
- [52] LI Yifan, WANG Zhipeng, YANG Junlan, et al. Thermal and hydraulic characteristics of microchannel heat sinks with cavities and fins based on field synergy and thermodynamic analysis [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 175: 115348.
- [53] YAO Peitao, ZHAI Yuling, LI Zhouhang, et al. Thermal performance analysis of multi-objective optimized microchannels with triangular cavity and rib based on field synergy principle [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, 25: 100963.
- [54] ZHU Qifeng, CHANG Kungeng, CHEN Junjie, et al. Characteristics of heat transfer and fluid flow in microchannel heat sinks with rectangular grooves and different shaped ribs [J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2020, 59(6): 4593–4609.
- [55] ALFELLAG M A, AHMED H E, FADHIL O T, et al. Optimal hydrothermal design of microchannel heat sink using trapezoidal cavities and solid/slotted oval pins [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 158: 113765.
- [56] REHMAN M M U, CHEEMA T A, AHMAD F, et al. Numerical investigation of heat transfer enhancement and fluid flow characteristics in a microchannel heat sink with different wall/design configurations of protrusions/dimples [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2020, 56(1): 239–255.
- [57] WANG P, CHEN L. Thermal and hydraulic performance of micro pin fin heat sinks with different pin fin shapes [C]// *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Xiamen: IOP Publishing, 2019, 542(1): 012053.
- [58] 夏国栋, 崔珍珍, 翟玉玲, 等. 长菱形微针肋热沉的流动与换热特性 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2014, 38(2): 130–134. (XIA Guodong, CUI Zhenzhen, ZHAI Yuling, et al. Flow and heat transfer characteristics for long-diamond shaped micro pin fin [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2014, 38(2): 130–134.)
- [59] 崔珍珍, 夏国栋, 吴宏杰, 等. 组合式微针肋的强化换热特性 [J]. *北京工业大学学报*, 2012, 38(11): 1698–1703. (CUI Zhenzhen, XIA Guodong, WU Hongjie, et al. Heat transfer characteristic for combined micro pin fins [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2012,

- 38(11): 1698–1703.)
- [60] LIU Zhigang, ZHANG Chengwu, GUAN Ning. Experimental investigation on resistance characteristics in micro/mini cylinder group[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2011, 35(1): 226–233.
- [61] ROTH R, LENK G, COBRY K, et al. Heat transfer in freestanding microchannels with in-line and staggered pin fin structures with clearance[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 67: 1–15.
- [62] RASOULI E, NADERI C, NARAYANAN V. Pitch and aspect ratio effects on single-phase heat transfer through microscale pin fin heat sinks[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 118: 416–428.
- [63] 杨宇辰, 夏国栋, 陈卓, 等. 不同孔隙率圆形微针肋热沉流动及传热特性[J]. *工程热物理论*, 2017, 38(8): 1714–1718. (YANG Yuchen, XIA Guodong, CHEN Zhuo, et al. Flow and heat transfer characteristics across circular shaped micro pin-fin heat sinks with different porosity[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(8): 1714–1718.)
- [64] 冯帅. 基于芯片层间冷却的梯级分布针肋微流道内单相/两相流动与传热强化特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020. (FENG Shuai. Study on single/two phase flow and heat transfer enhancement characteristics using integrated gradient distribution pin fins for intra-chip cooling[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.)
- [65] BHANDARI P, PRAJAPATI Y K. Fluid flow and heat transfer behavior in distinct array of stepped micro-pin fin heat sink[J]. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 2021, 28(4): 31–61.
- [66] WONG K C, AHMAD MUEZZIN F N. Heat transfer of a parallel flow two-layered microchannel heat sink [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2013, 49: 136–140.
- [67] LU Bin, MENG W J, MEI Fanghua. Experimental investigation of Cu-based, double-layered, microchannel heat exchangers [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2013, 23(3): 035017.
- [68] LIN Lin, CHEN Yangyang, ZHANG Xinxin, et al. Optimization of geometry and flow rate distribution for double-layer microchannel heat sink [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, 78: 158–168.
- [69] WU J M, ZHAO J Y, TSENG K J. Parametric study on the performance of double-layered microchannels heat sink [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 80: 550–560.
- [70] LENG Chuan, WANG Xiaodong, WANG Tianhu. An improved design of double-layered microchannel heat sink with truncated top channels [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 79: 54–62.
- [71] LENG Chuan, WANG Xiaodong, WANG Tianhu, et al. Multi-parameter optimization of flow and heat transfer for a novel double-layered microchannel heat sink [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 84: 359–369.
- [72] LEI N, SKANDAKUMARAN P, ORTEGA A. Experiments and modeling of multilayer copper minichannel heat sinks in single-phase flow[C]//*Thermal and Thermomechanical Proceedings 10th Intersociety Conference on Phenomena in Electronics Systems*. San Diego, CA, USA: IEEE, 2006: 9–18.
- [73] PENG Yi, LIU Wangyu, CHEN Wei, et al. A conceptual structure for heat transfer imitating the transporting principle of plant leaf[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 71: 79–90.
- [74] HUANG Pingnan, DONG Guanping, ZHONG Xineng, et al. Numerical investigation of the fluid flow and heat transfer characteristics of tree-shaped microchannel heat sink with variable cross-section[J]. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 2020, 147: 107769.
- [75] 徐国强, 王梦, 吴宏, 等. Y形构形微通道流动换热特性的数值分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2009, 35(3): 313–317. (XU Guoqiang, WANG Meng, WU Hong, et al. Numerical analysis of flow and heat transfer characteristics of Y-fractal-link micro channel networks [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(3): 313–317.)
- [76] 马欣荣, 白鸿武. 双层Y形分叉仿生微通道换热性能及优化设计[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(24): 112–117. (MA Xinrong, BAI Hongwu. Heat transfer performance and optimization design of double-layer Y-shaped bifurcation biomimetic microchannel [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(24): 112–117.)
- [77] 刘显茜, 孙安梁, 田川. 基于仿生翅脉流道冷板的锂离子电池组液冷散热[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(7): 2266–2273. (LIU Xianxi, SUN Anliang, TIAN Chuan. Research on liquid cooling and heat dissipation of lithium-ion battery pack based on bionic wings vein channel cold plate[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(7): 2266–2273.)
- [78] 董涛, 陈运生, 杨朝初, 等. 仿蜂巢分形微管道网络中的流动与换热[J]. *化工学报*, 2005, 56(9): 1618–1625. (DONG Tao, CHEN Yunsheng, YANG Zhaochu, et al. Flow and heat transfer in comby fractal microchannel network [J]. *CIESC Journal*, 2005, 56(9): 1618–1625.)

- [79] 吴龙文, 卢婷, 陈加进, 等. 芯片散热微通道仿生拓扑结构研究[J]. 电子学报, 2018, 46(5): 1153-1159. (WU Longwen, LU Ting, CHEN Jiajin, et al. A study of bionic micro-channel topology for chip cooling[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(5): 1153-1159.)
- [80] CHEN Yongping, CHENG Ping. Heat transfer and pressure drop in fractal tree-like microchannel nets [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(13): 2643-2648.
- [81] 徐尚龙, 郭宗坤, 秦杰, 等. 树形微通道热沉仿生建模及三维热流特性数值分析[J]. 中国机械工程, 2014, 25(9): 1185-1188. (XU Shanglong, GUO Zongkun, QIN Jie, et al. Three dimensional numerical simulation of fluid flow and heat transfer in tree-shaped microchannels [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(9): 1185-1188.)
- [82] 申鑫, 翟玉玲, 陈文哲, 等. 鱼鳞仿生结构微通道的流动与传热特性研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2023, 48(1): 102-111. (SHEN Xin, ZHAI Yuling, CHEN Wenzhe, et al. Flow and heat transfer characteristics of microchannel with fish scale structure[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2023, 48(1): 102-111.)
- [83] 蓝永琪, 胡振俊, 郑思尧, 等. 横断区内布置楔形肋的间断微通道热沉流动和传热特性[J]. 机床与液压, 2021, 49(16): 127-132. (LAN Yongqi, HU Zhenjun, ZHENG Siyao, et al. Flow and heat transfer characteristics of interrupted microchannel heat sink with wedged ribs in the transverse zones [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(16): 127-132.)
- [84] WONG K C, LEE Jianhong. Investigation of thermal performance of microchannel heat sink with triangular ribs in the transverse microchambers [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2015, 65: 103-110.
- [85] CHAI Lei, WANG Liang. Thermal-hydraulic performance of interrupted microchannel heat sinks with different rib geometries in transverse microchambers [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2018, 127: 201-212.
- [86] DATTA A, SAH S, MAJUMDER A, et al. Designing interrupted microchannel heat sink with ribbed microchambers by single and Bi-objective optimizations of numerical results [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2021, 146(6): 2681-2697.
- [87] BISWAS G, CHATTOPADHYAY H, SINHA A. Augmentation of heat transfer by creation of streamwise longitudinal vortices using vortex generators [J]. Heat Transfer Engineering, 2012, 33(4/5): 406-424.
- [88] FENG Zhenfei, LAN Yongqi, HU Zhenjun, et al. Effects of longitudinal vortex generator pairs in transverse microchambers on thermal - hydraulic performances and entropy generation in an interrupted microchannel heat sink [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2022, 147(15): 8551-8567.
- [89] DERAKHSHANPOUR K, KAMALI R, ESLAMI M. Improving performance of single and double-layered microchannel heat sinks by cylindrical ribs; a numerical investigation of geometric parameters [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2021, 126: 105440.
- [90] DEBBARMA D, PANDEY K M, PAUL A. Performance enhancement of double-layer microchannel heat sink by employing dimples and protrusions on channel sidewalls [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 2022(20): 1-25.
- [91] 霍素斌. 微铝管超疏水表面制备及水流动特性的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007. (HUO Subin. Investigations on the fabrication of super-hydrophobic surface on aluminum micro-tubes and water flow characteristics in the tubes [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.)
- [92] CHUAN Leng, WANG Xiaodong, WANG Tianhu, et al. Fluid flow and heat transfer in microchannel heat sink based on porous fin design concept [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2015, 65: 52-57.
- [93] MOOSAVI R, BANIHASHEMI M, LIN Chengxian, et al. Combined effects of a microchannel with porous media and transverse vortex generators (TVG) on convective heat transfer performance [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021, 166: 106961.
- [94] MOOSAVI R, BANIHASHEMI M, LIN C X. Thermal performance evaluation of a microchannel with different porous media insert configurations [J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2022, 32(5): 1488-1516.
- [95] WANG Shuolin, LI Xianyang, WANG Xiaodong, et al. Flow and heat transfer characteristics in double-layered microchannel heat sinks with porous fins [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2018, 93: 41-47.
- [96] LI Xianyang, WANG Shuolin, WANG Xiaodong, et al. Selected porous-ribs design for performance improvement in double-layered microchannel heat sinks [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 137: 616-626.
- [97] BOLAND S, MAJIDI S. Thermal improvement in double-layered microchannel heat sink with incorporating wavy porous fins [J]. Heat Transfer Engineering, 2022, 43(6): 485-502.

- [98] DEY P, SAHA S K. Fluid flow and heat transfer in microchannel with porous bio-inspired roughness [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, 161: 106729.
- [99] WANG M, ZHANG W Q, XIN G M, et al. Improved thermal-hydraulic performance of a microchannel with hierarchical honeycomb porous ribs [J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2023, 101(2): 1083-1094.
- [100] 陈超伟, 王鑫煜, 辛公明. 多孔鳍歧管微通道流动传热特性研究[J]. *制冷学报*, 2022, 43(3): 62-70. (CHEN Chaowei, WANG Xinyu, XIN Gongming. Flow and heat transfer characteristics in manifold microchannel with porous fins [J]. *Journal of Refrigeration*, 2022, 43(3): 62-70.)
- [101] MORADIKAZEROUNI A. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using single and multi-phase cooled heat sinks: a review [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 49: 104097.
- [102] DU Liang, HU Wenbo. An overview of heat transfer enhancement methods in microchannel heat sinks [J]. *Chemical Engineering Science*, 2023, 280: 119081.
- [103] REHMAN Z, AHMAD F, MUHAMMAD H A, et al. Study of thermal characteristics of energy efficient micro channel heat sinks in advanced geometry structures and configurations: a review [J]. *Frontiers in Energy Research*, 2022, 10: 951066.
- [104] 张颖龙, 陈庆霖, 胡杰, 等. CO<sub>2</sub>-on-a-Chip: 二氧化碳微流控技术研究现状及展望[J]. *制冷学报*, 2023, 44(4): 34-43. (ZHANG Yinglong, CHEN Qinglin, HU Jie, et al. CO<sub>2</sub>-on-a-chip: current status and prospects of carbon dioxide microfluidic technology [J]. *Journal of Refrigeration*, 2023, 44(4): 34-43.)
- [105] KEE R J, ALMAND B B, BLASI J M, et al. The design, fabrication, and evaluation of a ceramic counter-flow microchannel heat exchanger [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(11/12): 2004-2012.
- [106] LIU Ruxia, LUO Guoqiang, LI Yuan, et al. Microstructure and thermal properties of diamond/copper composites with Mo<sub>2</sub>C in-situ nano-coating [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 360: 376-381.
- [107] DENG D, ZENG L, SUN W. A review on flow boiling enhancement and fabrication of enhanced microchannels of microchannel heat sinks [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 175: 121332.
- [108] ASIM M, MOHAMMAD S, KANWAL A, et al. Comparative study of the parameters affecting the performance of microchannels' heat exchangers: latest advances review [J]. *Energy Science & Engineering*, 2023, 11(10): 3869-3887.

#### 通信作者简介

崔晓钰, 女, 教授, 上海理工大学能源与动力工程学院, 13166199495, E-mail: xiaoyu\_cui@usst.edu.cn。研究方向: 制冷与低温, 换热器强化换热。

#### About the corresponding author

Cui Xiaoyu, female, professor, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, 86-13166199495, E-mail: xiaoyu\_cui@usst.edu.cn. Research fields: refrigeration and cryogenic, heat transfer enhancement of heat exchanger.