材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250801002

波浪形双层微通道热沉性能的传热优化分析

王宝雪，云和明*，刘文竹，胡明哲
（山东建筑大学 热能工程学院，济南 250101）

摘　要： 文章基于CFD软件对波浪形双层微通道热沉的热性能进行三维数值研究，将传统的波浪形双层微通道热沉在通道入口净截面积不变的情况下对其入口截面形状进行改进。在入口流速u=1～2 m/s，热通量q=1×10^5～6×10^5 W/m^{2}范围内进行了一系列数值模拟，研究微通道热沉入口形状、流速以及热通量的对其温度、压降的影响。基于㶲耗散理论进行对比，得到波浪形双层微通道热沉传热的更优方案，在边界热流一定的条件下，㶲耗散越小的微通道热沉换热效果更好。结果表明，随着微通道入口流速的增大，热沉温度逐渐降低，进出口压差逐渐增大，㶲耗散逐渐减小。相较于上层五边形-下层矩形的入口结构，上下层均为矩形的入口结构能使微通道热沉的温度更高，综合性评价因子更大，㶲耗散更小，传热效率更高。

关键词： 双层微通道；强化换热；电子冷却；流动；波浪形
中图分类号： TK124　**文章编号：** 1001－5868(2025)06－1034－07

The Optimization Analysis of Wavy Double-Layered Microchannels Heat Sink by Entransy Dissipation

WANG Baoxue, YUN Heming, LIU Wenzhu, HU Mingzhe
(**School of Thermal Energy Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, CHN**)

Abstract: Based on the CFD software of the wavy microchannel radiator thermal performance of the three dimensional numerical study, the traditional wavy double microchannel heat sink channel entry under the condition of invariable in the area of the cross section shape was improved, the inlet velocity is 1～2 m/s, A series of numerical simulations were carried out in the heat flux range of 1×10^5～6×10^5 W/m^2 to study the influence of different micro-channel inlet shapes, inlet velocity and heat flux on heat sink temperature and pressure drop. Based on the comparison analysis of the entransy dissipation theory, a more optimal solution for heat transfer in wavy double-layer microchannels is obtained. The better the heat transfer effect of microchannels under specific boundary heat flow circumstances, the lesser the energy dissipation. The findings demonstrate that as the microchannel′s inlet flow rate rises, the heat sink temperature gradually falls, the pressure differential between the inlet and exit rises, and the energy dissipation gradually falls. Compared to the upper Pentagon lower rectangular inlet shape, the temperature of the microchannel heat sink is higher with the upper and lower rectangular inlet shape. The heat transmission efficiency is higher, the PEC is larger, and the energy dissipation is less.

Key words: double-layer microchannel; heat transfer enhancement; electronics cooling; flow; wave

收稿日期：2025－08－01.
基金项目：山东省研究生质量提升计划项目(SDYAL21159)；山东建筑大学研究生质量提升项目(YZKC202213).
* **通信作者：**云和明

0　引言

随着电子器件功率的不断增加，散热问题日益凸显，高效的热管理更能保障微通道散热器安全平稳运行。自1981年微通道换热器被Tuckerman等[1]首次提出，就广泛应用于各个领域。近年来，学者对微通道换热器展开大量研究，但早期大部分研究还只集中在单层微通道热沉。直到1999年Vafai等[2]首次提出双层微通道热沉的概念，根据一系列研究对比得出双层微通道相比于单层微通道在相同情况下换热能力更佳。叶飞虎等[3]建立了一种具有三维双层微通道的热沉模型，对微通道的占空比和上下层的高度对逆流条件下热沉总热阻的影响进行分析，并最终确定了微通道的最佳设计尺寸。冷川等[4-5]提出截断型双层热沉，通过研究表明，当传统双层微通道热沉有较长的底部通道、较大的通道数、较小的肋宽比和泵总功率时，在通道顶部添加截断设计可显著提高双层散热器的冷却性能。Derakhshanpour等[6-10]通过新型设计的带有圆柱形肋的单层和双层微通道散热器进行三维数值模拟，结果表明，圆柱肋的加入导致混沌平流和热边界层重新发展，这反过来又引起了传热系数的明显提升。李文龙等[11-18]建立了带多孔侧肋的双层微通道复合散热器模型，在给定散热器总体积和流体区体积比例的条件下，优化了复合散热器的配置。Liu等[19-21]重点对具有双层交错腔的微通道散热器进行数值研究，结果显示，在射流和节流效应的作用下，双层交错腔可以加强流体的混合和热边界层的重新发展。Maheswari等[22-24]进行了三维数值研究，在开孔条件下新型双层微通道散热器矩形翅片具有不同的开孔形状；数值结果表明，改良的双层微通道散热器显著提高了传热速率。曹卫华等[25]探究了流道缩扩比对半波纹微通道流动和传热特性的影响，结果表明，半波纹微通道的压降和努塞尔数随着流道缩扩比的减小而增大；减小流道缩扩比是提高半波纹微通道综合换热能力的有效方式，且当Re>490时，半波纹微通道的综合换热能力均优于光滑微通道。范贤光等[26]研究了不同雷诺数Re下凹槽形状及布局对微通道性能的影响，结果表明，在给定的雷诺数范围内，圆形凹槽的传热性能仅次于三角凹槽，而梯形和矩形凹槽的传热性能较差。

本文提出一种新型波浪形双层微通道散热器，在微通道上下层通道入口净截面积不变的情况下改变通道上层截面形状，通过数值仿真模拟研究微通道热沉入口形状、流速以及热通量的对其温度、压降的影响。并基于烟耗散理论进行对比，可为实际设计高热流密度电子器件热沉提供理论指导。

1　数值模拟方案

1.1　几何模拟

本文对波浪形双层微通道散热器的三维模型进行数值模拟。其中双层指散热器有两层底面为波浪形的通道，这两层通道上下层连接。所构建的波浪形双层微通道的外形尺寸如图1～3所示。热沉材料为铜，其热物理性质恒定，导热系数为398 W/(m·K)。散热器外侧壁面绝热，可忽略辐射传热。为简化计算并确保研究的一致性，所有模拟中均采用单相液态水作为冷却剂。

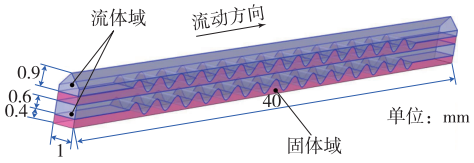


图1　微通道Case1几何模型

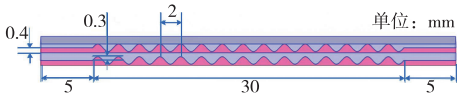
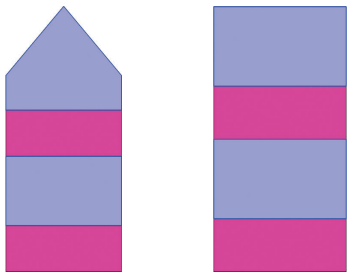


图2　微通道Case1侧面图



(a) Case1入口截面　　(b) Case2入口截面

图3　Case1和Case2入口截面

1.2　数学模型

本文共创建并模拟了两种不同的波浪形双层微通道结构，分别为上层入口形状为五边形、下层入口形状为矩形的波浪形双层微通道(Case1)和上下层入口形状均为相同尺寸矩形的波浪形双层微通道(Case2)。为便于分析，作出以下假设：流体为常物性不可压缩流体，连续流体、无内热源，稳态层流流动。流体域的控制方程可分别简化为连续性

方程：

$$\nabla \cdot \boldsymbol{U}=0 \tag{1}$$

动量方程为：

$$\rho(U\cdot\nabla)U=\left\{-p\boldsymbol{I}+\mu\left[\nabla\boldsymbol{U}+(\nabla\boldsymbol{U})^{\mathrm{T}}\right]\right\}+\boldsymbol{F} \tag{2}$$

能量方程为：

$$\rho C_p\boldsymbol{U}\cdot\nabla T+\nabla\cdot\boldsymbol{q}=Q \tag{3}$$

固体域稳态导热的能量方程为：

$$\nabla^2 T=0 \tag{4}$$

流体入口初始温度为293 K，底部恒定热通量加热。其方程为：

$$k_{\mathrm{s}}\frac{\partial T}{\partial Z}=-\boldsymbol{q} \tag{5}$$

其他外表面为绝热边界条件。流固界面的热通量和温度的方程为：

$$k_{\mathrm{s}}\frac{\partial T_{\mathrm{s}}}{\partial \boldsymbol{n}}=k_{\mathrm{s}}\frac{\partial T_{\mathrm{f}}}{\partial \boldsymbol{n}} \tag{6}$$

$$T_{\mathrm{s}}=T_{\mathrm{f}} \tag{7}$$

式中，ρ表示密度，$\boldsymbol{U}$为速度矢量，p为压力，$\boldsymbol{I}$为单位矩阵，μ表示动态粘度，$\boldsymbol{F}$为体积力矢量，C_p表示比热容，T表示温度，$\boldsymbol{q}$为热通量矢量，Q为热源项，k_{s}表示固体热导率，k_{f}为流体热导率，$\boldsymbol{n}$为流固界面法向量。

为了研究微通道的热性能，使用以下相关参数的定义：

入口雷诺数（Re）：

$$Re=\frac{\rho_{\mathrm{in}}u_{\mathrm{in}}D_h}{\mu_{\mathrm{in}}} \tag{8}$$

式中，D_h为通道的水力直径，u_{in}表示平均流体速度。

达西阻力系数（f）：

$$f=\frac{2\Delta pD_h}{\rho_{\mathrm{m}}u_{\mathrm{in}}^2L} \tag{9}$$

平均努塞尔数（Nu）：

$$Nu=\frac{H\cdot h}{\lambda_m} \tag{10}$$

传热系数（h）：

$$h=\frac{qA_{\mathrm{b}}}{(T_{\mathrm{w}}-T_{\mathrm{f}})A_{\mathrm{ht}}} \tag{11}$$

式中，A_{b}为加热面面积，A_{ht}为固液交界面面积，单位均为m^2；H表示微通道上下层入口通道高度的总和，单位为m；T_{w}表示加热面的平均温度，T_{f}表示平均流体温度，单位均为K。

为了评估微通道的整体热性能，使用了综合性能评价因子（PEC），其计算公式为：

$$PEC=\left(\frac{Nu}{Nu_0}\right)\Big/\left(\frac{f}{f_0}\right) \tag{12}$$

式中，Nu_0和f_0分别表示具有光滑底面的单层微通道的努塞尔数和摩擦系数。

边界条件设置如下：通道进口（$x=0$ mm）$t=293.15$ K，$u=1\sim2$ m/s（对应的Re为879～1 759）；通道出口（$x=40$ mm）$p=0$；底面为恒热流加热条件，热通量$q=1\times10^5\sim6\times10^5$ W/m^2；其他外表面为绝热边界条件。

1.3 网格划分

利用COMSOL软件进行数值求解，采用自由四边形网格。在$q=4\times10^5$ W/m^2，$u=1.4$ m/s条件下，以上层进口形状为五边形、下层进口形状为矩形的波浪形双层微通道为例，对主要参数$T_{\max}$的计算进行检验，模型网格在粗化、常规、细化的情况下数量分别为49 236，78 593，133 600个，最高温度相对误差分别为0.24%，0.1%。选取78 593网格数对上层进口形状为五边形、下层进口形状为矩形波浪形双层微通道进行划分，如图4所示。

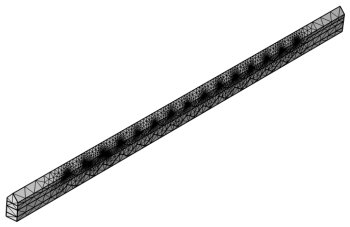


图4 网格划分图

1.4 模型验证

当进行有效性验证时，建立与文献[27]中MCH-13实验相同的几何模型并采用相同的数值方法进行计算，结果如图5。本文数值方法计算结果与实验结果趋势一致，最大误差为8.3%，平均误差为4.6%，由此表明数值计算方法的有效性。

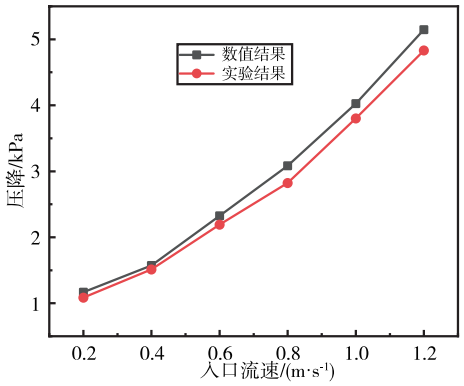


图5 数值模拟结果与实验结果的对比

2　模拟结果及讨论

本研究对波浪形双层微通道的热性能进行计算分析，研究了在底表面施加恒定热流密度（$q=4\times10^5$ W/m^2）条件下，不同微通道入口形状和入口流速对其温度和压降的影响。

2.1　微通道入口形状与入口流速对热沉的影响

2.1.1　微通道入口形状和流速对热沉温度的影响

设计不同配置微通道的主要目的是降低衬底的最高温度并提高其温度均匀性。衬底材料温度分布不均匀会导致芯片产生较大的热应力，从而增加芯片的热不稳定性和热击穿概率。为了分析热特性，提取 $q=4\times10^5$ W/m^2 时微通道的温度分布轮廓。图 6 为 Case1 在入口流速取 1～2 m/s 范围内热沉通道纵截面的温度分布。

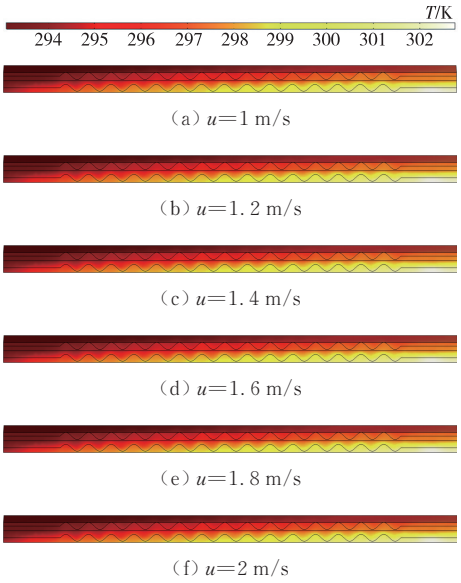


图 6　不同入口流速下 Case1 在 $y=-0.5$ mm 处 x-z 截面上的温度分布云图

可以看出，随着入口流速的逐渐增大，高温区域沿着流动方向的扩展幅度显著增强，热量传递的效率也随之提升，更多热量被迅速携带至下游区域。这种变化不仅使热沉的温度逐步降低，还有效缓解了局部温度过高的问题。同时，高温区的分布愈发均匀化，局部热点现象明显减弱，整体传热效果更加显著，表现出良好的传热均匀性和稳定性。

图 7 描述了当 $q=4\times10^5$W/m^2 时，在入口流速不同的情况下热沉 Case1 和 Case2 的最高温度变化情况。在入口流速相同的情况下，Case1 的最高温度高于 Case2。

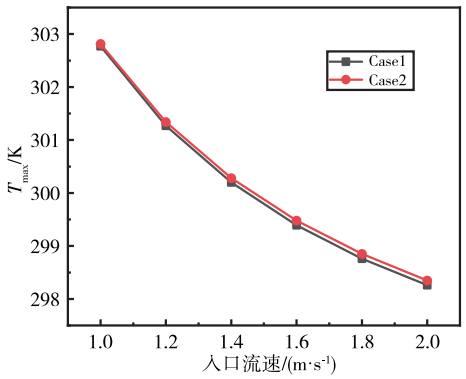


图 7　不同几何结构的波浪形双层微通道热沉的最高温度 T_{max} 随入口流速变化的关联图

图 8 描述了当 $q=4\times10^5$ W/m^2 时，在入口流速不同的情况下热沉的温度均匀度的变化趋势[28]，温度均匀度为热沉平均温度和最高温度的比值，即 T_{ave}/T_{max}。在入口流速相同的情况下，Case1 的温度均匀度较高于 Case2。

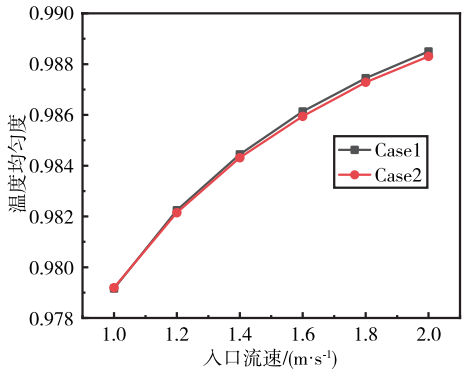


图 8　不同几何结构的波浪形双层微通道热沉的温度均匀度随入口流速变化的关联图

由图 8 可以看出，随着入口流速的增大，热沉的温度均匀度逐渐升高。在相同的入口流速下，上层入口截面为五边形的双层微通道热沉与固体接触面积更大，有更大的传热面积，热沉平均温度 T_{ave} 更加接近热沉最高温度 T_{max}。

2.1.2　微通道入口形状和入口流速对热沉压降的影响

图 9 显示了在 $q=4\times10^5$ W/m^2 的条件下努塞尔数随入口流速的变化。可以观察到，努塞尔数随入口流速的增大而增加，Case1 相比于 Case2 可以获得更高的努塞尔数。

采用 *PEC* 来评价流动和传热的综合性能，图 10 为当热通量一定时波浪形双层微通道在上层入口截面形状不同的条件下 *PEC* 随入口流速变化的关

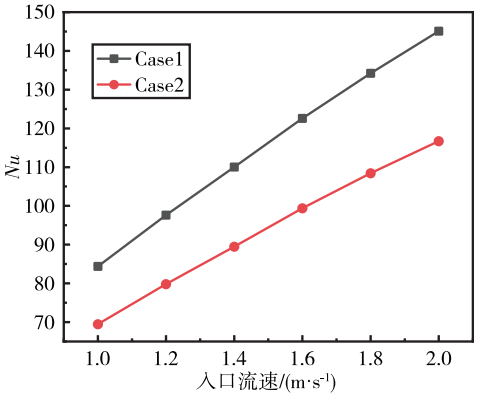


图9 不同几何结构的波浪形双层微通道热沉*Nu*随入口流速变化的关联图

联图。可以看出，在相同的热通量下，随着入口流速的增大，Case1的微通道综合强化换热因子要低于Case2，其中Case2的*PEC*整体呈现上升趋势，表明Case2微通道的强化换热能力随着入口流速的增大而提高。由于接触面积不同，Case1的达西阻力数大于Case2，微通道强化换热因子也呈现减小趋势，在入口流速为1 m/s时取得最大值，表明此时微通道换热能力最好，随着入口流速的增大换热能力逐渐减低。

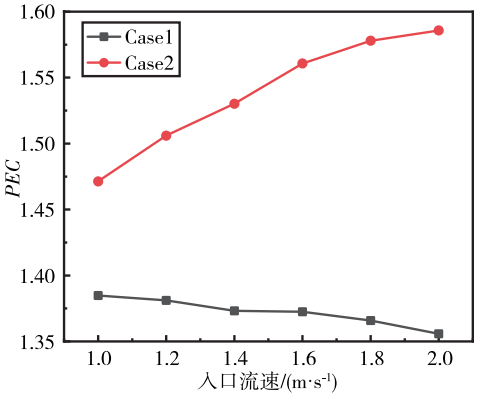


图10 不同几何结构的波浪形双层微通道热沉*PEC*随入口流速变化的关联图

2.1.3 微通道入口形状和入口流速对热沉㶲耗散的影响

㶲是过增元提出的一个反映物体热量传递能力的物理量，单位体积内的㶲耗散率定义为$E_{h\Phi}$，单位为(W·K)/m^3，其表达式为：

$$\dot{E}_{h\Phi}=\lambda(\nabla T)^2 \tag{13}$$

整个热沉的总㶲耗散$E_{Vh\Phi}$的表达式为：

$$E_{h\Phi}=\int_V \dot{E}_{Vh\Phi}\,\mathrm{d}\upsilon=\int_V\left|-q\cdot\nabla T\right|\mathrm{d}\upsilon \tag{14}$$

图11为当热通量一定时两种微通道热沉在上层入口截面形状不同的条件下总㶲耗散随入口流速变化的关联图。可以看出，两种微通道的总㶲耗散值随着入口流速的增大逐渐减小，微通道的传热效率逐渐提高。在入口流速相同的条件下，Case1的总㶲耗散较Case2高，表明将双层微通道上层入口截面形状改为五边形后，并没有提升热沉的传热效率。

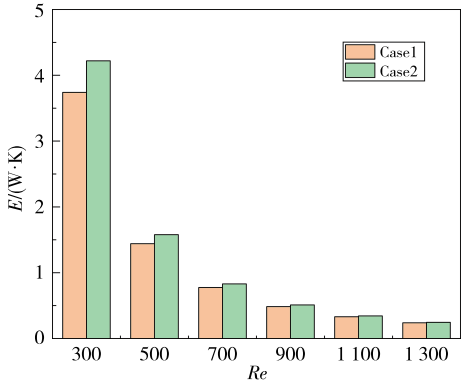


图11 不同雷诺数下热沉的㶲耗散

2.2 微通道入口形状和热通量对热沉的影响

2.2.1 微通道热沉入口形状和热通量对*PEC*的影响

图12为当入口流速一定时波浪形双层微通道在上层入口截面形状不同的条件下*PEC*随热通量变化的关联图。从图中可以看出，在相同的入口流速下，随着热通量的增大，Case1的微通道综合强化换热因子*PEC*要低于Case2，其中Case1的*PEC*整体呈现整体下降趋势，表明Case1微通道的强化换热能力随着热通量的增大而降低。Case2微通道强化换热因子呈现先减小后增大的趋势，当热通量$q=1\times10^5$ W/m^{2}时取得最大值，$q=5\times10^5$ W/m^{2}时微通道的*PEC*最小，表明在入口流速为$q=1\times10^5$ W/m^{2}时微通道换热能力最好，而当$q=5\times10^5$ W/m^{2}时微通道的换热能力最差。

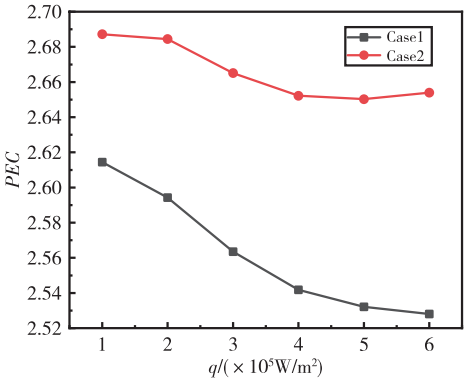


图12 不同热通量下热沉的*PEC*

2.2.2　微通道入口形状和流速对热沉熵耗散的影响

图13为当入口流速一定时两种微通道热沉在上层入口截面形状不同的条件下总熵耗散随热通量变化的关联图。可以看出，两种微通道的总熵耗散随着热通量的增大而逐渐增大，当热通量$q=1\times10^5$ W/m^{2}时取得最小值，其传热效率最高，增大热通量会降低热沉的传热效率，削弱其传热效果。在热通量相同的条件下Case1的总熵耗散较Case2高，表明Case2的换热效果优于Case1。

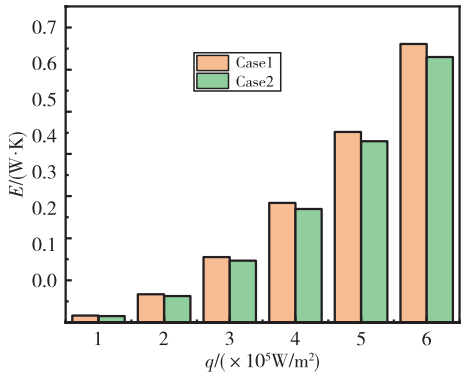


图13　不同热通量下热沉的熵耗散

3　结论

本文基于CFD技术对波浪形双层微通道热沉进行数值模拟，同时基于熵耗散理论进行对比分析，结论如下：

（1）在模拟的层流范围内，随着入口流速的增大，两个微通道热沉的T_{max}逐渐降低，温度均匀度逐渐增大，Nu逐渐增大。相较于入口形状为上层五边形-下层矩形，当入口形状上下层均为矩形时微通道热沉的PEC更大。当热通量相同时，随着入口流速的增大，入口形状上下层均为矩形时微通道热沉的整体呈现下降趋势，入口形状为上层五边形-下层矩形时微通道热沉的PEC整体呈现上升趋势。当入口流速相同时，随着热通量的增大，入口形状为上层五边形-下层矩形时微通道热沉的PEC呈现整体下降趋势，入口形状上下层均为矩形时微通道热沉的PEC呈现先减小后增大的趋势。

（2）热沉总熵耗散随着入口流速的增大逐渐减小，随着热通量的增大逐渐增大。上下层均为矩形时热沉的总熵耗散比入口形状为上层五边形-下层矩形时微通道的小，传热效率更高。

参考文献：

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

[2] Vafai K, Zhu L. Analysis of two-layered micro-channel heat sink concept in electronic cooling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, 42(12): 2287-2297.

[3] 叶飞虎. 树型微通道热流耦合场数值研究[J]. 洁净与空调技术, 2015(3): 22-24.
Ye Feihu. Numerical study on heat-flow coupling field in tree-shaped microchannel[J]. Contamination Control & Air-Conditioning Technology, 2015(3): 22-24.

[4] 冷　川. 截断型双层微通道热沉设计与优化[D]. 北京：华北电力大学, 2016.
Leng Chuan. Design and optimization for the double-layered microchannel heat sink with! truncated top channels[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.

[5] Xie G, Li S, Sunden B, et al. Computational fluid dynamics for thermal performance of a water-cooled minichannel heat sink with different chip arrangements[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2014, 24(4): 797-810.

[6] 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.

[7] Wang B X, Peng X F. Experimental investigation on liquid forced-convection heat transfer through microchannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1994, 37: 73-82.

[8] Peng X F, Peterson G P. Convective heat transfer and flow friction for water flow in microchannel structures[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1996, 39(12): 2599-2608.

[9] Qu W, Mudawar I. Experimental and numerical study of pressure drop and heat transfer in a single-phase micro-channel heat sink[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(12): 2549-2565.

[10] Steinke M E, Kandlikar S G. Single-phase liquid friction factors in microchannels[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2006, 45(11): 1073-1083.

[11] 李文龙，谢志辉，奚　坤，等. 多孔侧肋双层微通道热沉构形优化[J]. 半导体光电, 2021, 42(3): 364-370, 417.
Li Wenlong, Xie Zhihui, Xi Kun, et al. Constructal optimization of double-layered microchannel heat sink with porous side fins [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(3): 364-370, 417.

[12] Chen L, Yang A, Feng H, et al. Constructal design progress for eight types of heat sinks[J]. Science China Technological Sciences, 2020, 63(6): 879-911.

[13] Yang A, Chen L, Xie Z, et al. Thermal performance analysis of non-uniform height rectangular fin based on constructal theory and entransy theory[J]. Science China Technological Sciences, 2016, 59(12): 1882-1891.

[14] Rasam H, Roy P, Savoldi L, et al. Numerical assessment of heat transfer and entropy generation of a porous metal heat sink for electronic cooling applications[J]. Energies, 2020, 13(15): 3851.

[15] Tao W Q, He Y L, Chen L. A comprehensive review and comparison on heatline concept and field synergy principle[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 135: 436-459.

[16] Hajmohammadi M R, Rezaei E. Proposing a new algorithm for the optimization of conduction pathways based on a recursive localization[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 151: 146-153.

[17] Chen L, Feng H, Xie Z, et al. Progress of constructal theory in China over the past decade[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 130: 393-419.

[18] Hajmohammadi M R, Ahmadian M, Nourazar S S. Introducing highly conductive materials into a fin for heat transfer enhancement[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 150: 420-426.

[19] Liu L, Cao Z, Xu C, et al. Investigation of fluid flow and heat transfer characteristics in a microchannel heat sink with double-layered staggered cavities[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 187: 122535.

[20] Xu C, Xu S, Eticha R D. Experimental investigation of thermal performance for pulsating flow in a microchannel heat sink filled with PCM (paraffin/CNT composite)[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 236: 114071.

[21] He Z, Yan Y, Zhang Z. Thermal management and temperature uniformity enhancement of electronic devices by micro heat sinks: a review[J]. Energy, 2021, 216: 119223.

[22] Maheswari A, Prajapati Y K. Thermal performance enhancement and optimization of double-layer microchannel heat sink with intermediate perforated rectangular fins[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 185: 108043.

[23] Zhang Y D, Chen M R, Wu J H, et al. Performance improvement of a double-layer microchannel heat sink *via* novel fin geometry—a numerical study[J]. Energies, 2021, 14(12): 3585.

[24] Leng C, Wang X D, Wang T H, 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.

[25] 曹卫华, 张锁程, 朱继元, 等. 流道缩扩比对半波纹微通道流动和传热特性的影响[J]. 半导体光电, 2023, 44(1): 58-63.
Cao Weihua, Zhang Suocheng, Zhu Jiyuan, et al. Effect of divergent ratio on flow and heat transfer characteristics of half-corrugated microchannel[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2023, 44(1): 58-63.

[26] 范贤光, 黄江尧, 许英杰. 凹槽型微通道传热与流动性能的数值分析[J]. 半导体光电, 2020 ,41(2): 232-236, 241.
Fan Xianguang, Huang Jiangyao, Xu Yingjie. Numerical analysis on heat transfer and flow characteristics of grooved microchannel [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020 , 41(2): 232-236, 241

[27] 梁德杰. 底面具有波纹结构的微通道设计与强化传热性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016: 37-42.
Liang Dejie. Design of micro channels with corrugated bottom and investigations on its performance of heat transfer enhancement [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016: 37-42.

[28] 吉亚萍, 云和明, 耿文广, 等. 方形微通道热沉的(烬)耗散优化分析[J]. 化工学报, 2020, 71(S2): 166-175.
Ji Yaping, Yun Heming, Geng Wenguang, et al. Optimization analysis of (fire) dissipation of square microchannel heat sink [J]. CIESC Journal, 2020, 71(S2): 166-175.

作者简介:

王宝雪(1998—),女,硕士研究生,主要研究方向为微尺度传热;

云和明(1976—),男,副教授,主要研究方向为微尺度对流传热。