

# 双层矩形扩张微通道换热行为数值模拟研究

李思杭, 熊鋈辉, 张禹, 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13日; 录用日期: 2026年5月6日; 发布日期: 2026年5月12日

## 摘要

针对传统微通道散热器热工水力性能耦合优化的不足, 以及变截面结构与双层微通道架构融合研究的匮乏问题, 本文提出一种新型双层矩形扩张微通道热沉(DL-MCHS), 并采用数值模拟方法对其换热行为展开系统研究。设计了长宽高为30 mm × 15 mm × 3 mm的热沉物理模型, 以水为冷却介质, 发热功率100 W的硅芯片为热源, 构建三维固-流热交换耦合数学模型, 探究了不同体积流量对该热沉传热与流动特性的影响规律。结果表明, 当体积流量从 $2.08 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 提升至 $6.24 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 芯片最高温度由338.53 K降至330.05 K, 系统热阻由0.4538 K/W降至0.369 K/W, 降幅分别达2.5%和18.7%, 但散热强化效应存在边际递减趋势, 流量超过 $5.20 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 后降温效果显著减弱; 同时, 体积流量提升使流动阻力增大, 压降从163.64 Pa增至432.14 Pa, 泵送功率从0.68 mW上升至1.80 mW, 二者均呈线性特征。本研究揭示了双层矩形扩张微通道热沉的热工水力性能耦合机制, 为高热流密度电子器件热管理的微通道结构设计与流量优化提供了理论依据和数据支撑。

## 关键词

双层微通道热沉, 扩张形通道, 数值模拟

# Numerical Study on Heat Transfer Behavior of Double-Layer Rectangular Expanding Microchannels

Sihang Li, Junhui Xiong, Yu Zhang, Zhuang Li\*

College of Mechanical Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning

Received: April 13, 2026; accepted: May 6, 2026; published: May 12, 2026

## Abstract

Aiming at the shortcomings of the coupled thermal-hydraulic optimization of conventional

\*通讯作者。

文章引用: 李思杭, 熊鋈辉, 张禹, 李壮. 双层矩形扩张微通道换热行为数值模拟研究[J]. 建模与仿真, 2026, 15(5): 22-30. DOI: 10.12677/mos.2026.155067

microchannel heat sinks and the lack of research on the integration of variable cross-section structures and double-layer microchannel architectures, a novel Double-Layer rectangular expansion Microchannel Heat Sink (DL-MCHS) is proposed in this paper, and its heat transfer behavior is systematically investigated using numerical simulation. A physical model of the heat sink with dimensions of 30 mm × 15 mm × 3 mm is designed. With water as the cooling medium and a silicon chip with a heating power of 100 W as the heat source, a three-dimensional solid-fluid thermal exchange coupled mathematical model is established to explore the effects of different volume flow rates on the heat transfer and flow characteristics of the heat sink. The results show that as the volume flow rate increases from  $2.08 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  to  $6.24 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ , the maximum chip temperature decreases from 338.53 K to 330.05 K, and the system thermal resistance decreases from 0.4538 K/W to 0.369 K/W, with reductions of 2.5% and 18.7%, respectively. However, the heat transfer enhancement effect exhibits a marginal diminishing trend, and the temperature reduction is significantly weakened when the flow rate exceeds  $5.20 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ . Meanwhile, the increase in volume flow rate leads to higher flow resistance: the pressure drop rises from 163.64 Pa to 432.14 Pa, and the pumping power increases from 0.68 mW to 1.80 mW, both showing linear characteristics. This study reveals the coupled thermal-hydraulic mechanism of the double-layer rectangular expansion microchannel heat sink, providing a theoretical basis and data support for the microchannel structure design and flow rate optimization in thermal management of high-heat-flux electronic devices.

## Keywords

Double-Layer Microchannel Heat Sink, Expanding Channel, Numerical Simulation

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. 引言

微通道热沉最早是由 Tucheran 和 Pease [1]在上世纪 80 年代初设计并提出的,研究表明,微通道热沉具有体积小、价格低廉、散热性能好等优良特点。从此以后,许多学者都致力于微通道热沉的研究,极大地促进了微通道发展,进一步提高了微通道热沉的冷却性能。为克服传统微通道的局限性,大量研究集中于微通道的结构创新与性能优化,主要围绕两个方向展开:一是通道横截面形状的优化,如三角形、矩形、梯形、圆形等[2]-[4]、二是通道拓扑结构和布局的创新,如分形、波浪形等复杂流道设计[5]-[8]等。在这一演进过程中,双层微通道散热器(DL-MCHS)的引入代表了该领域的重要飞跃。尽管在单层/双层微通道和变截面通道领域均已取得显著进展,但将变截面几何与双层微通道架构进行系统性融合的研究仍相对匮乏,存在以下明显局限:(1) 现有关于双层微通道的研究多集中于平行布置的通道,而对上下层均为扩张形矩形截面,并系统考虑影响的双层微通道热沉研究尚十分有限;(2) 变截面结构的几何参数,对 DL-MCHS 热工水力性能的耦合影响机制尚不清晰。

为此,本文提出一种新型微通道热沉(DL-MCHS),全面评估与对比各结构的综合热工水力性能,旨在为高热流密度电子器件的高效热管理提供新的设计思路与理论支撑。

## 2. 物理模型和模拟计算

### 2.1. 物理模型

本文所研究的物理模型如图 1 所示。本文设计的微通道总体结构视图如图 1(a)所示,微通道的热沉

的长宽高固定为  $L \times W \times H = 30 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 。图 1(b)为侧视图，可以看出，小端和大端的中心点在同一条水平线上。其红色区域为模拟芯片其尺寸大小为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。其发热功率为  $100 \text{ W}$ ，小端高度  $H_s = 0.37 \text{ mm}$ 、大端高度  $H_b = 1.23 \text{ mm}$ 、两相邻通道中心线之间的水平距离  $d = 0.8 \text{ mm}$  和两相邻通道中心线之间的水平距离  $h = 1.4 \text{ mm}$ 。

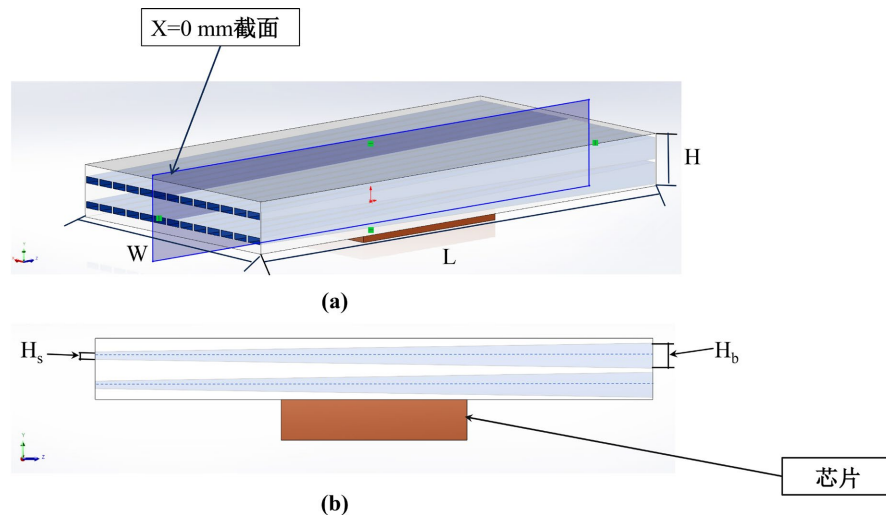


Figure 1. (a) is a three-dimensional schematic diagram of the microchannel heat sink, (b) is side view

图 1. (a)为微通道热沉的三维示意图；(b)为侧视图

## 2.2. 数学模型

采用了三维固 - 流热交换耦合模型来模拟微通道热沉的水热行为，并做出了以下假设以简化数值计算：

- (1) 传热都是稳态的；
- (2) 流体流动为不可压缩的单相层流，处于完全发展状态；
- (3) 对于冷却剂和固体材料，热物理性质被认为是常数；
- (4) 传热过程中忽略辐射传热；
- (5) 除底面热源外，均忽略热沉壁面与环境间的传热和辐射；
- (6) 粘性耗散的影响可以忽略。

在上述假设下，模拟模型的质量、动量和能量方程简化为如下表达式：

连续方程：

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

动量方程：

$$\rho \left( \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} \right) = -\nabla P + \nabla \cdot \left( \mu \nabla \vec{V} \right) \quad (2)$$

液体能量方程：

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

固体能量方程：

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

其中,  $\vec{V}$ 、 $P$ 、 $\rho$ 、 $\mu$ 、 $C_p$  和  $k$  分别是速度矢量、压力、密度、动态粘度、恒压比热和热导率。相关控制方程采用有限体积法求解。流动模型选用层流模型, 离散化采用二阶迎风方案。压力速度耦合方法设置为 SIMPLE。各方向速度和连续性方程残差收敛标准设置为残差求解精度为  $10^{-5}$ , 能量方程残差收敛标准设置为  $10^{-6}$ 。

边界条件:

- (1) 入口: 在所有微通道入口处施加入口温度为 293.15 K 的冷却剂的均匀体积流率;
- (2) 出口: 微通道出口设置为压力出口;
- (3) 流体 - 固体界面: 固 - 液界面满足无滑移边界条件、温度连续性和温度梯度;
- (4) 热源: 热源设置为体积热源, 功率设置为 100 W, 转换为单位体积发热的等效热通量为:  $q_{heat} = 1,000,000,000 \text{ W/m}^3$ ; 固体和冷却介质的物性参数如表 1 所示。

**Table 1.** Thermophysical properties of solid and cooling medium

**表 1.** 固体和冷却介质的热物理性质

|      | 材料 | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $C_p$ (J/kg·K) | $\lambda$ (W/(m·K)) | $\mu_f$ (Pa·s) |
|------|----|-----------------------------|----------------|---------------------|----------------|
| 热沉   | 铜  | 8978                        | 381            | 387.6               | -              |
| 热源   | 硅  | 2328                        | 705            | 148                 | -              |
| 冷却介质 | 水  | 998.2                       | 4182           | 0.6                 | 0.001003       |

### 2.3. 参数定义

水力直径( $D_e$ )与微型通道几何参数有关, 按下式计:

$$D_e = \frac{1}{L_f} \int_0^L D_e(x) dx \quad (5)$$

其中,  $L$  为通道长度,  $L_f = 30 \text{ mm}$ 。

整个流道的体积流量( $Q_v$ )可按下式计算:

$$Q_v = A_m u_{in} = N A_c u_c \quad (6)$$

其中,  $A_m$  为进口通道的截面积;  $N$  为平行流道的数量;  $u_c$  为单个流道的流体流速。

雷诺数( $Re$ )由以下公式给出:

$$Re = \frac{\rho_f u_{in} D_e}{\mu_f} \quad (7)$$

其中,  $\mu_f$  为液体的粘度。

压力降( $\Delta P$ )反映流体流动过程中的能量损失, 定义如下:

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} \quad (8)$$

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:

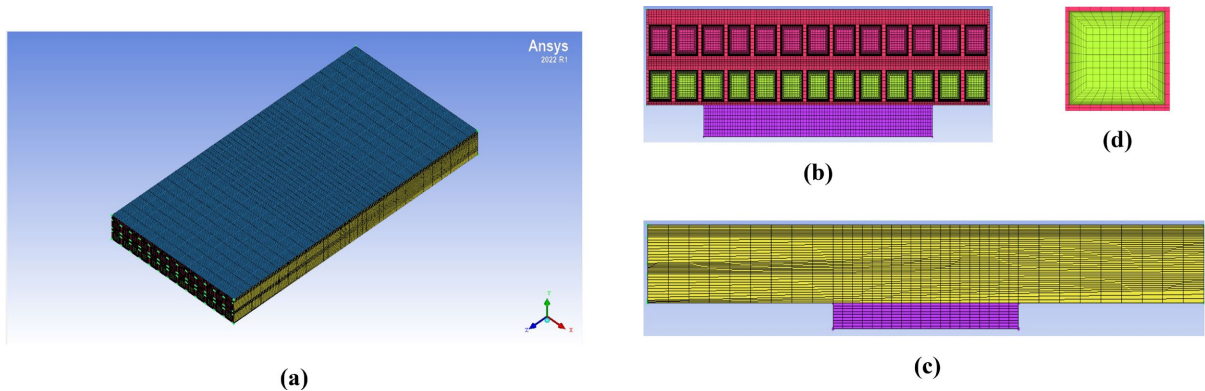
$$P_p = \Delta P \cdot Q_v \quad (9)$$

总热阻( $R_{th}$ )反映介质之间的传热能力, 在一定程度上表示热源表面最高温度的变化, 定义如下:

$$R_{th} = \frac{T_{max} - T_{in}}{Q_{tot}} \quad (10)$$

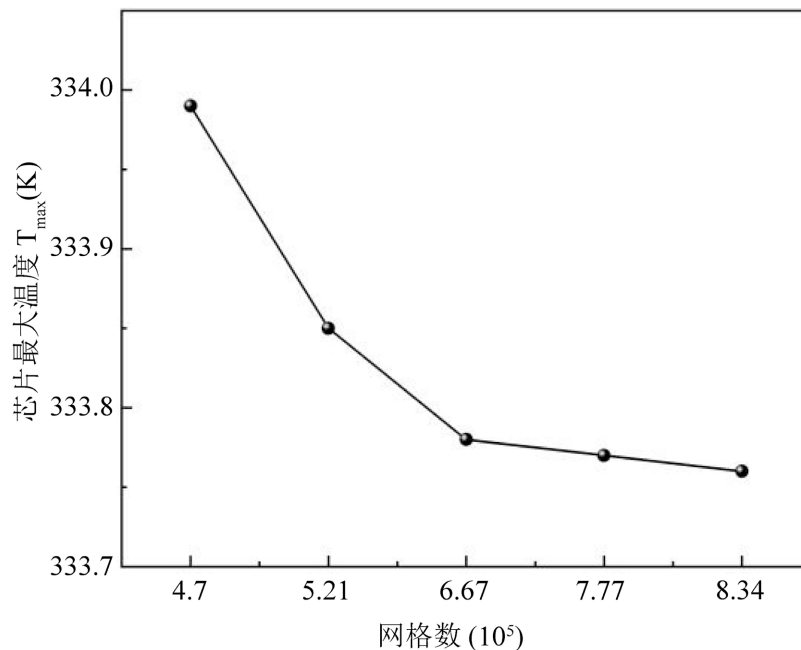
### 3. 网格无关性验证

为了保证模拟准确性，同时还要平衡计算资源，需要对网格进行独立性验证，以确定使用合理的网格分辨率。对模型进行网格无关性验证。同时，因为在流体和固体交界面处存在相互作用的边界层效应，为了提高计算精度，因此在流体和固体交界面处相互作用的接触区域设置了边界层加密。其仿真模型网格细节如图 2 所示。



**Figure 2.** Details of mesh generation. (a) Overall view; (b) front view; (c) side view; (d) schematic of local boundary layer  
**图 2.** 网格划分细节图。(a) 整体视图；(b) 正视图；(c) 侧视图；(d) 局部边界层示意图

为了确保数值计算精度并提高模拟效率，对网格进行独立性验证，以找到时间和计算成本最低的最佳网格数量。如图 3 所示为 DL-MCHS 在不同网格数量下的热源最大温度。



**Figure 3.** Grid independence verification  
**图 3.** 网格无关性验证

从图中可以发现，采用网格数量为 776,593 与最细网格数相比的热源最大温度相对误差最小，因此本研究选用的网格数量为 776,593。

## 4. 结果与讨论

本节研究不同体积流量情况下, 双层矩形扩张微通道热沉(DL-MCHS)水力与热力性能的影响。重点分析了传热特性(芯片最大温度和  $T_{\max}$  和热阻  $R_{th}$ )流动特性(压降 $\Delta P$ 、泵送功率  $P_p$ )。

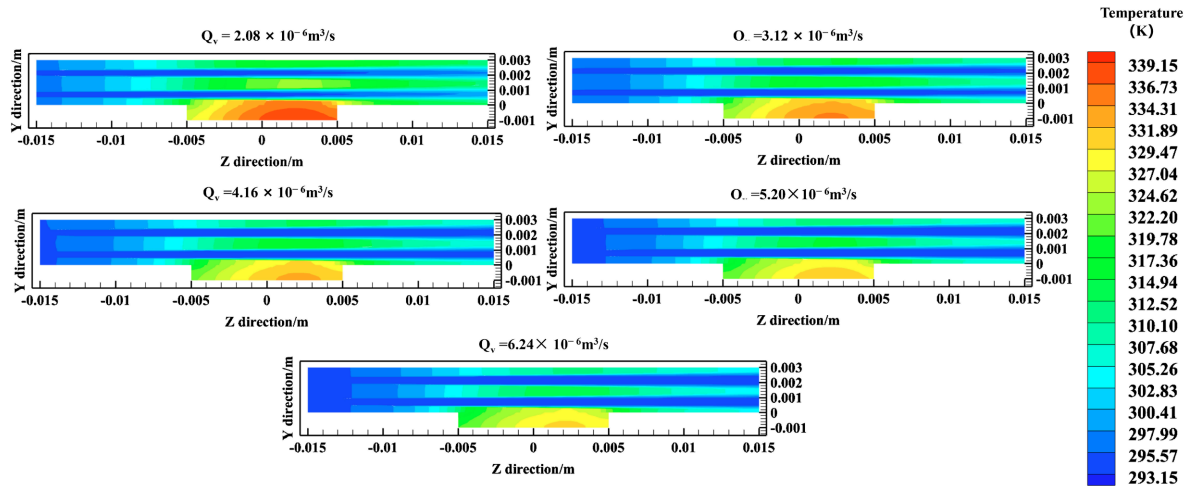


Figure 4. Temperature contours at  $x = 0$  mm cross-section for different volume flow rates

图 4. 不同体积流量  $X = 0$  mm 截面温度云图

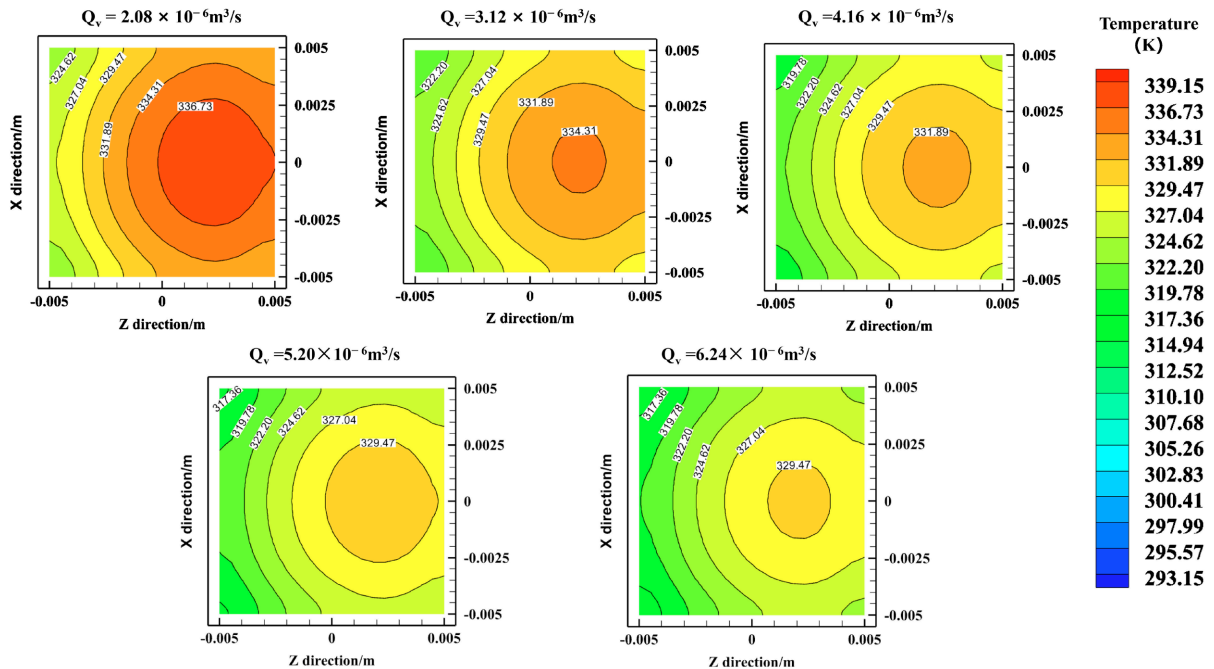


Figure 5. Contours of maximum chip temperature at different volume flow rates

图 5. 不同体积流量在  $Y = -1$  mm 截面的芯片温度云图

从图 4 中可以看出, 不同进口体积流量所对应的  $X = 0$  截面温度分布云图。可以清晰地观察到, 随着  $Q_v$  从  $2.08 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  逐步增大至  $6.24 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ , 高温区域面积显著缩小, 整体温度水平也相应下降。其中, 在  $Q_v = 6.24 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  时, 该模型达到最优散热状态, 高温区范围最小且温度峰值最低。这一变化规律体现了流量对对流换热强度的主导作用: 随着体积流量增大, 流体流速提高, 流动扰动增强, 边

界面厚度减薄，从而显著提升了换热效率。同时，较高的流量也增强了流体的热运输能力，有效降低了近壁区温度。

从图 5 中可以看出随着体积流量从  $2.08 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  提升至  $6.24 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ，微通道截面中心最高温度由 336.73 K 降至 329.47 K，降幅约 2.16%；低温区域面积显著扩张，温度分布均匀性明显改善(其中  $Y = -1 \text{ mm}$  截面位于芯片底部)。

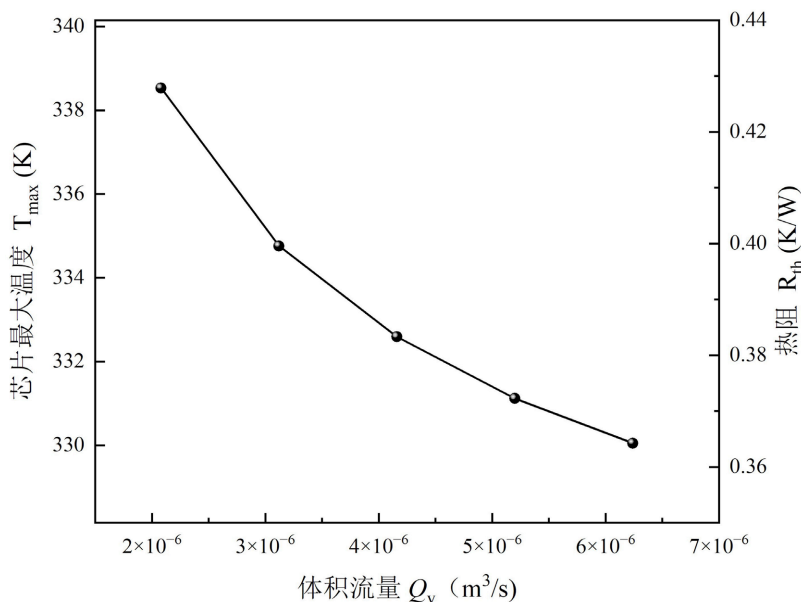


Figure 6. Maximum temperature and thermal resistance of the chip at different volume flow rates

图 6. 不同体积流量的芯片最大温度和热阻情况

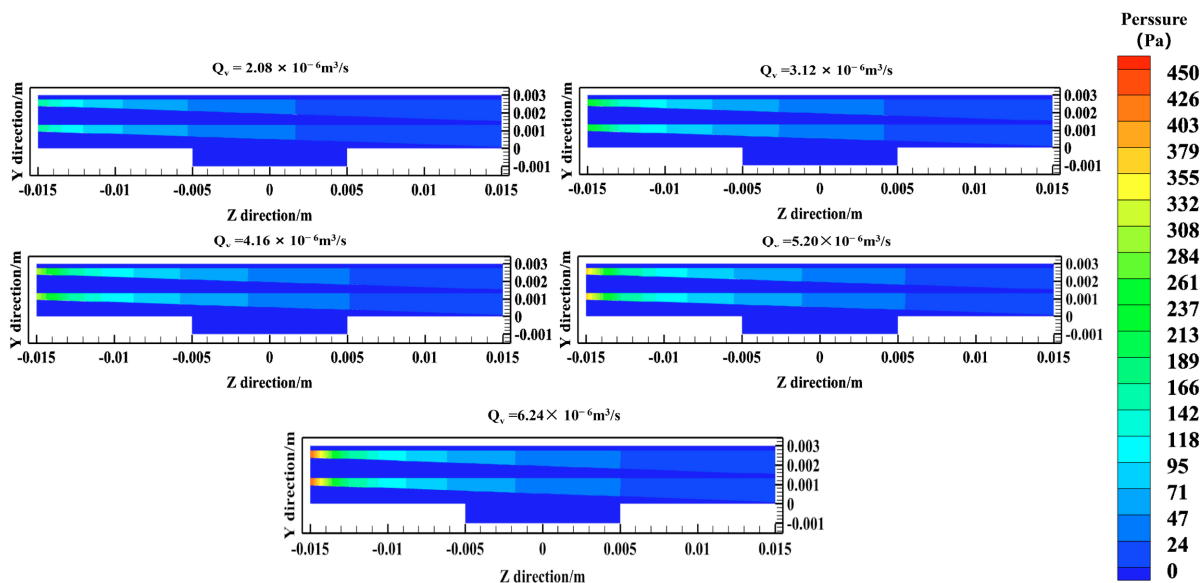


Figure 7. Contours of pressure drop distribution at different volume flow rates

图 7. 不同体积流量在  $X = 0 \text{ mm}$  截面的压降分布云图

图 6 给出了芯片最高温度与热阻随体积流量的变化规律。随着体积流量  $Q_v$  从  $2.08 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  提升至

$6.24 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ , 芯片最高温度  $T_{\max}$  由 338.53 K 降至 330.05 K, 降幅达 2.5%; 系统热阻  $R_{th}$  由 0.4538 K/W 降至 0.369 K/W, 降幅达 18.7%。这一结果表明, 增大冷却工质的体积流量可显著强化微通道散热器的散热能力, 有效降低芯片热应力与工作温度。同时, 曲线斜率随流量增大而逐渐减小, 说明在本研究流量范围内, 散热强化效应存在边际递减趋势。当流量超过  $5.20 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  后, 继续提升流量对降低芯片温度和系统热阻的贡献逐渐减弱, 这为后续微通道散热器的流量优化设计提供了实验依据。

图 7 随着体积流量从  $2.08 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  提升至  $6.24 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ , 微通道总压降从 163.64 Pa 线性增长至 432.14 Pa, 压力场梯度与分层特征显著增强。压降与流量的线性关系验证了层流流动状态, 表明在该工况下可通过泊肃叶定律预测阻力特性。工程设计中需综合考虑散热性能与流动阻力, 选取兼顾冷却效果与能耗的最优流量区间。

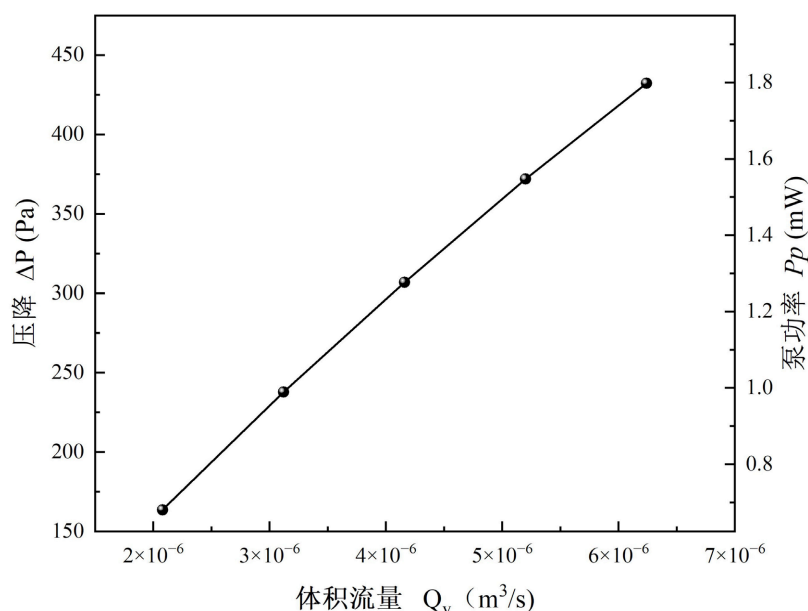


Figure 8. Pressure drop and pumping power at different volume flow rates  
图 8. 不同体流量的压降和泵功率情况

图 8 展示了微通道散热器压降  $\Delta P$  与泵功率  $P_p$  随体积流量  $Q_v$  的变化规律。随着  $Q_v$  从  $2.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  提升至  $6.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ , 系统压降由 163.64 Pa 逐步增长至 432.14 Pa; 泵功率同步从 0.68 mW 上升至 1.80 mW。这一趋势表明, 体积流量的提升会显著增加微通道内的流动阻力, 导致压降线性增长, 进而推动泵功率同步上升。结合前文散热性能分析可知, 增大流量虽能有效降低芯片温度与热阻, 但需以牺牲泵功为代价。本研究中压降与泵功率的线性变化特征, 验证了层流主导的流动状态, 也为后续平衡散热效率与能耗成本的优化设计提供了关键数据支撑。

## 5. 结论

本文以高热流密度电子器件高效热管理为目标, 提出新型双层矩形扩张微通道热沉结构, 通过建立三维固-流热交换耦合数值模型, 系统研究了体积流量对该热沉传热特性与流动特性的影响规律, 明确了其热工水力性能的耦合机制, 主要得出以下结论:

(1) 增大冷却介质的体积流量能显著强化双层矩形扩张微通道热沉的散热能力, 有效降低芯片工作温度与系统热阻, 在体积流量  $2.08 \times 10^{-6}$  至  $6.24 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  范围内, 芯片最高温度与系统热阻均随流量提升呈下降趋势, 且热阻的降幅远高于芯片温度降幅, 说明流量提升对改善热传递效率的作用更为显著。

(2) 该热沉的散热强化效应存在明显的边际递减特征, 当体积流量超过  $5.20 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$  后, 通过增大流量降低温度、减小热阻的效率显著减弱, 此临界流量为后续该类型微通道散热器的流量优化设计提供了关键参考。

## 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] Alfaryjat, A.A., Mohammed, H.A., Adam, N.M., Stanciu, D. and Dobrovicescu, A. (2018) Numerical Investigation of Heat Transfer Enhancement Using Various Nanofluids in Hexagonal Microchannel Heat Sink. *Thermal Science and Engineering Progress*, **5**, 252-262. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.12.003>
- [3] Gunnasegaran, P., Mohammed, H.A., Shuaib, N.H. and Saidur, R. (2010) The Effect of Geometrical Parameters on Heat Transfer Characteristics of Microchannels Heat Sink with Different Shapes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **37**, 1078-1086. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.06.014>
- [4] 鲁进利, 周宾, 许忠林, 等. 不同截面微通道中流动阻力特性[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2011, 41(3): 554-557.
- [5] Jing, D. and Song, J. (2019) Comparison on the Hydraulic and Thermal Performances of Two Tree-Like Channel Networks with Different Size Constraints. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **130**, 1070-1074. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.11.010>
- [6] Jing, D. and Yi, S. (2019) Electroosmotic Flow in Tree-Like Branching Microchannel Network. *Fractals*, **27**, Article ID: 1950095. <https://doi.org/10.1142/s0218348x19500956>
- [7] Jing, D., Song, S. and He, L. (2019) Reexamination of Murray's Law for Tree-Like Rectangular Microchannel Network with Constant Channel Height. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **128**, 1344-1350. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.006>
- [8] Li, H., Ding, X., Jing, D., Xiong, M. and Meng, F. (2019) Experimental and Numerical Investigation of Liquid-Cooled Heat Sinks Designed by Topology Optimization. *International Journal of Thermal Sciences*, **146**, Article ID: 106065. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.106065>