材料、结构及工艺

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20250427003

基于场协同和㶲耗散的双层微通道强化传热的数值模拟

胡明哲，云和明*，王宝雪，刘文竹

（山东建筑大学 热能工程学院，山东 济南 250101）

摘 要： 采用CFD技术数值模拟了波浪形双层微通道热沉的流动传热过程，并分析了雷诺数和上层截断长度比对流动和传热性能的影响。基于场协同原理与㶲耗散理论，对比分析了四种双层微通道热沉的流动传热特性，并揭示了其强化传热的内部机理。计算结果表明，在层流状态下，随着雷诺数增加，微通道热沉的平均温度逐渐降低，努塞尔数、表面传热系数和综合强化换热因子逐渐升高，㶲耗散值逐渐减少；在相同雷诺数下，波浪形底面上层通道长度比为0.2的双层微通道传热协同角最小，其中，底面为波浪形上层通道长度比为0.2的波浪形双层微通道热沉，在传热和流动特性上表现最优。

关键词： 微通道热沉；强化传热；场协同原理；㶲耗散理论；表面传热系数

中图分类号： TK124；TN03 **文章编号：** 1001－5868(2025)03－0498－10

Numerical Simulation of Enhanced Heat Transfer in a Double-Layer Microchannel Based on Field Synergy and Entransy Dissipation

HU Mingzhe, YUN Heming, WANG Baoxue, LIU Wenzhu

(**Shandong Jianzhu University, School of Thermal Energy Engineering, Jinan 250101, Shandong, CHN**)

Abstract: The flow and heat transfer processes in a wavy double-layer microchannel heat sink were numerically simulated using CFD techniques. The effects of Reynolds number and the upper-layer truncation length ratio on flow and heat transfer performance were analyzed. Based on the field synergy principle and entransy dissipation theory, the flow and heat transfer characteristics of four types of double-layer microchannel heat sinks were comparatively analyzed, revealing the internal mechanisms responsible for enhanced heat transfer. The simulation results show that under laminar flow conditions, the average temperature of the microchannel heat sink gradually decreases as the Reynolds number increases. In contrast, the Nusselt number, surface heat transfer coefficient, and the integrated performance evaluation criterion increase with Reynolds number, while entransy dissipation decreases. At the same Reynolds number, the synergistic angle of heat transfer is smallest when the upper channel length ratio of the wavy-bottom structure is 0.2. Among the configurations studied, the wavy-bottom double-layer microchannel heat sink with an upper channel length ratio of 0.2 exhibits the best overall performance in terms of heat transfer efficiency and flow characteristics.

Key words: double-layer microchannel; heat transfer enhanced; field synergy principle; entransy dissipation theory; surface coefficient of heat transfer

收稿日期：2025－04－27.

基金项目：山东省研究生质量提升计划项目(SDYAL21159).

* **通信作者：**云和明

0　引言

随着电子设备的小型化和高性能化，高功率密度的电子组件所产生的热量成为制约其性能发挥的关键因素。传统散热技术已难以满足日益增长的热管理需求，尤其是在微电子和光电子领域。为解决该问题，微通道散热器成为近年来热管理领域的研究热点[1-2]。微通道散热器以其微尺度设计和高换热效率，有效解决了高热流密度设备的冷却问题。自Tuckerman和Pease[3]在20世纪80年代初提出微通道冷却理念后，该技术逐渐走向实际应用，并随着制造技术的进步，推动了体积小、性能高的微电子设备的发展[4-6]。相比传统散热技术，微通道散热器需要的冷却剂更少，设计更紧凑，且可靠性更高。但单层微通道设计在底面温度均匀性上存在局限，增加流速虽可降温，却会提高泵送功率和噪音，影响传热效率。为此，Vafai和Zhu[7]创新地提出一种双层微通道散热器设计，以提升微通道散热性能。该双层微通道散热器在传热性能上优于单层设计，引发了对微通道层数影响的研究兴趣[7-10]。

Leng等[11-12]引入一种上层截断的双层微通道散热器，数值模拟显示该设计能显著提升热传递能力。赵光攀等[13]在传统设计基础上，通过部分阻断上层流道并在下层引入微型针状肋片，发现六边形下层与截断矩形上层的组合散热效果最佳。翟玉玲等[14]研究了双层微通道热沉的顺流和逆流模式。Xie等[15]提出的数值模拟分析结果表明，双层微通道设计能提高热传递效率并减少压降。

Shen等[16]研究揭示了在双层微通道散热器中增加多重交替流动结构能提升热传递性能，并使基板温度分布更均匀，同时保持合理的压力损失。Hung等[17]和Wu等[18]通过数值模拟分析了影响双层微通道热沉性能的多种因素，包括衬底材料和厚度、冷却剂种类、通道尺寸等，为优化设计提供了参考。

微通道的结构优化对提升传热性能至关重要。洪坚[19]通过数值模拟发现，梯形截面微通道在传热效率上优于其他形状的微通道。徐岩哲[20]对比了六种不同波形设计的双层微通道散热器，发现纵向布置的正弦波形散热器在换热性能上最为优秀。臧鲁浩和王俊超等[21-22]通过数值模拟显示，波浪形微通道和扇形穴-梯形肋微通道比平直微通道具有更好的传热性能。曹卫华等[23-24]改变微通道热沉的流道减缩比和增加类水滴型肋片分析了结构优化对微通道的流动和传热特性的影响。高智刚等[25]研究了正弦波式微通道散热器的多个参数，特别是波长和振幅，这些参数的调整可以显著优化散热器的传热性能。Patel和Mehta[26]提出变宽度双层微型通道热沉，可增强整体传热性能。Hu等[27]发现扩展微通道散热器的长度能提高其热传递能力。上述研究表明，通过微通道结构的精心设计，可以有效提升散热器的热传递效率和冷却效果。

在微通道散热器的拓扑优化研究中，刘文竹等[28]发现当设计域长宽比为25∶64时，微通道散热器的物理场协同效果和流动特性最优。李萌等[29]的研究表明，蜘蛛网状拓扑结构的微通道在相同入口质量流量下展现出最小的传热协同角和最高传热效率，显著提升了热交换界面的协同作用。Li等[30]深入研究了复杂微通道内纳米流体的热传递行为，发现凹穴结构能显著降低传热协同角，有效增强传热效率。李凡等[31]通过对微通道散热器内部肋片的间距和高度通过熵耗散理论分析，发现肋片数量和高度的增加会先增大后减小系统的熵耗散值，显著影响热传递效率。黄平南等[32]通过数值模拟，比较了带腔室和带肋片的变截面微通道散热器与传统光滑微通道，发现新设计在熵耗散值和传热效果上更优。杨凤叶等[33]对超临界CO_2微通道平行流气冷器的流量分配和熵耗散进行了数值模拟，发现在等热流条件下，特定组合尺寸和扁管长度的调整可以最小化熵耗散值。秦兴宇等[34]采用熵耗散理论探讨了热管的热传输效率优化，阐述了熵耗散理论的物理意义及其在工程优化中的应用。陈诚[35]基于熵耗散理论，采用数值模拟、实验验证和理论分析对扭转流换热器进行了结构改进和性能优化。这些研究为提高热泵系统和微通道散热器的能效和性能提供了优化方向。

本文以波浪形双层微通道为研究对象，采用CFD数值模拟技术，研究层流状态下双层波浪形微通道热沉在不同挡板分布和微通道上下通道长度比条件下的流动传热机理和影响规律。利用数值模拟的方法，计算微通道热沉在各种工作条件下的速度场、温度场和压力场情况，计算出T_{ave}，Nu，f以及PEC等关键参数并对比常规未截断双层矩形流道热沉。

然后进一步结合场协同原理和熵耗散理论，展开对微通道热沉流动传热特性的优化分析。

1 数值模拟方案

1.1 几何模型

构建波浪形底面、上下入口截面形状都为矩形的双层微通道作为研究对象。不同挡板双层微通道和不同上下通道长度比微通道热沉几何模型的分类见表1，图1和2为相关示意图。

表1 波浪形双层微通道热沉几何模型分类

通道分布	方案编号
上下通道长度比为0.2的双层微通道热沉	工况1
上下通道长度比为0.4的双层微通道热沉	工况2
上下通道长度比为0.6的双层微通道热沉	工况3
上下通道长度比为0.8的双层微通道热沉	工况4

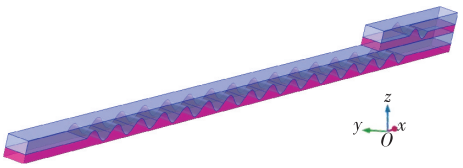
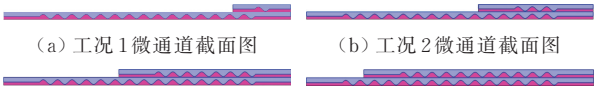


图1 工况1微通道三维示意图



（a）工况1微通道截面图 （b）工况2微通道截面图

（c）工况3微通道截面图 （d）工况4微通道截面图

图2 四种不同截断长度的双层微通道截面图

1.2 控制方程

连续性方程：

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

动量方程：

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

能量方程：

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

固体域稳态导热的能量方程为：

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

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

流固界面的热通量和温度的方程为：

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

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

式中，ρ表示密度，U为速度矢量，单位为m/s；P为压力，单位为Pa；$\boldsymbol{I}$为单位矩阵；μ表示动态粘度，单位为Pa·S；c_{p}表示比热容，单位为J/(kg·K)；T表示温度，单位为K；$\boldsymbol{q}$为热通量矢量，单位为W/m^2；Q为热源项，单位为W/m^3；k_{s}表示固体导热系数，单位为W/(m·K)；k_{f}为流体导热系数，单位为W/(m·k)；$\boldsymbol{n}$为流固界面的法向量。

为了研究微通道的热性能，使用了以下相关参数的定义。

入口雷诺数Re：

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

式中，D_{h}表示通道的水力直径，u_{m}表示平均流体速度。

微通道热沉的努塞尔数Nu计算公式为：

$$Nu = \frac{qd}{(T_{\mathrm{w}} - T_{\mathrm{ref}})kf} \tag{9}$$

达西阻力系数f的定义式为：

$$f = \frac{2\Delta p D_{\mathrm{h}}}{\rho_{\mathrm{m}} u^2{}_{\mathrm{in}} L} \tag{10}$$

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，单位为m^2，A_{ht}为固液交界面面积，单位为m^2；T_{w}表示加热面的平均温度，单位为K，T_{f}表示平均流体温度，单位为K。T_{Ref}作为参考温度，采用微通道中流体的平均温度。

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：

$$PEC = \left(\frac{Nu}{Nu_0}\right) \Big/ \left(\frac{f}{f_0}\right)^{1/3} \tag{12}$$

式中，Nu_0和f_0分别代表光滑底面单层微通道的努塞尔数和达西阻力系数。

1.2.1 边界条件与模型假设

通道入口为恒温度与速度边界条件，固体材料为铜，通道内冷却流体为单相去离子水，入口温度T=273 K，入口的流速范围为0.34～1.49 m/s，对应的雷诺数范围为300～1 300；出口设置为压力出口边界，其相对压力设为0 Pa。为便于分析，作出以下假设：流体以层流形态流动；流体视为不可压缩；去离子水的物理为变物性；忽略流体粘性耗散效应；模型外部视为绝热边界。

1.3 网格划分

利用COMSOL仿真软件，使用自由四面体的网格划分网格，当双层微通道进行数值模型时，需要对网格进行划分，网格的合理划分关系到模型计算结果的准确性和合理性，所以合理的网格划分十

分必要。本文将通过较细化、细化、常规、粗化、较粗化五种网格进行无关性验证。相应的网格数量分别为 1 329 949，443 591，220 168，62 495，36 316。图 3 为双层微通道网格划分示意图。

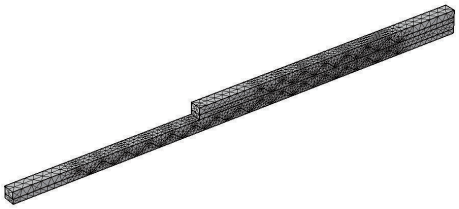


图 3　网格划分图

网格无关化验证工况选取 Re=1 300 和热流密度 q=4×10^5 W/m^2，模型选取工况 3 双层微通道对比不同网格数下双层微通道的加热面平均温度，加热面平均温度 T_{ave} 与总网格数关联图如图 4 所示。

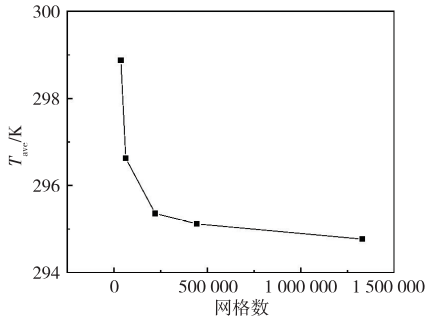


图 4　加热面平均温度与网格关联图

与 220 168 网格数对应的加热平均温度相比，其他网格数的平均温度误差为 1.9%，0.429%，0.08% 和 0.002%。随着网格数增加，温度趋于稳定，但过多网格会导致计算时间过长。因此，考虑到计算时间成本和精度，本文选择 220 168 网格数作为模拟的标准。

1.4　模型验证

为验证方法的准确性，本研究建立了与文献[36]相同的模型，并采用了一致的数值模拟方法，结果如图 5 所示。

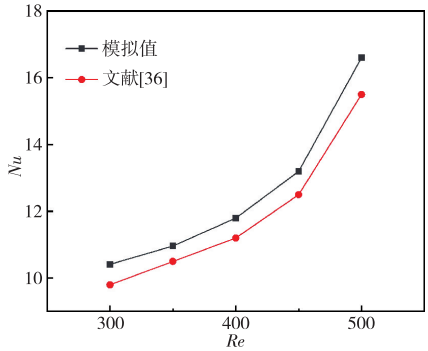


图 5　模拟与文献数据温差图

通过与文献中的实验结果对比，模拟数据的误差分别为 5.9%，4.2%，5.1%，5.3% 和 6.6%，均在 10% 以内，表明模拟结果与实验数据相符，验证了本文模型和计算方法的有效性。

2　模拟结果及讨论

2.1　温度场分析

图 6 显示了当给定流体入口雷诺数 Re 为 1 300，芯片功率为 32 W，时，x-z 截面上四种不同上下层通道长度比的波浪形双层微通道热沉的温度分布云图。

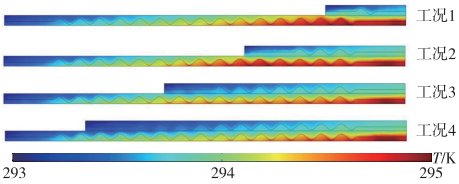


图 6　不同上下通道长度比条件下波浪形双层微通道热沉温度场云图

由图 6 可知，在双层微通道热沉中，通道入口处温度较低，随着流体的流动，微通道热沉温度随着流体的流动逐渐升高，下层热沉的流体温度明显高于上层热沉。在四种不同微通道热沉下层通道内，靠近壁面和位于波浪形波谷处的流体温度较高。相较于其他微通道，工况 1 的波浪形双层微通道下层微通道温度最高，上层微通道热沉的出口温度随着上下层通道长度比的增大而逐渐上升。由于冷却剂在通道内的单向流动，冷却流体的体温沿流动路径单调升高。这意味着冷却工质的冷却能力沿流方向逐渐下降，导致散热器底壁出现较高的温度梯度。

2.2　速度场分析

图 7 为四种不同上下层通道长度比的波浪形双层微通道热沉速度分布云图。由图可知，在不同上下层通道长度波浪形结构的波谷区域存在明显的流动停滞区，这是因为当流体进入波浪形结构的波谷区域时，因波浪形结构的阻挡造成流体流速减缓，因而产生层流停滞区。并且随着流体的流动，流体与流动方向上的波浪形结构发生碰撞使其重新流入波谷内，从而在波谷内形成涡流。在波浪形底面的波峰位置与流体接触的通道面积减小，流体流速增大，压力降低。所以不同波浪形结构的波谷区域内均有不同程度的涡流产生，并且在每层波浪形中间区域处的流体流速较大。

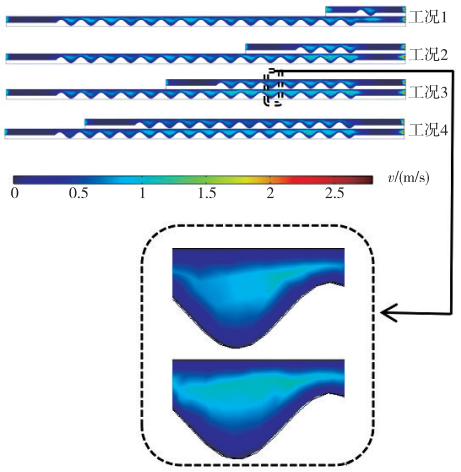


图7 不同上下通道长度比条件下波浪形双层微通道热沉速度场云图

2.3 压力场分析

由图8压力场云图可知，在四种不同上下层通道长度比的双层微通道热沉中，随着微通道热沉内流体流动，上下层微通道热沉内压力逐渐降低，各双层微通道热沉压力均在入口段较高，在出口段较低，微通道下层压差均大于上层。上层入口压力与上层通道长度成反比。

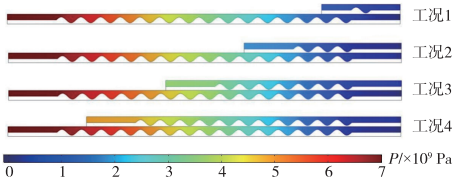


图8 不同上下通道长度比条件下波浪形双层微通道热沉压力场云图

2.4 传热性能分析

由图9加热面平均温度随雷诺数变化图可知，随着雷诺数Re不断增大，四种不同上下通道长度比的双层微通道热沉与常规双层热沉的平均温度T_{ave}逐渐减小。这是由于随着雷诺数的增大，热沉的对流传热效果逐渐增强，热沉内部冷却流体和壁面之间的温差逐渐减小，使得热沉平均温度逐渐降低。由图可知，工况1热沉的换热能力最强，传热效果最优。

由图10可知，随着雷诺数Re的不断增大，不同双层微通道热沉的Nu逐渐增大，表明随着雷诺数的增大流体质量流率增加，在相同的热通量下流体与壁面之前的热交换增强。在模拟的层流范围内，工况3，工况2，工况4的努塞尔数Nu相较于热沉工况1依次低3.11%～3.24%，5.44%～6.03%，

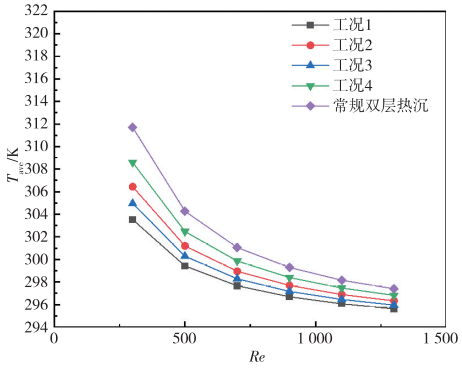


图9 不同上下通道长度比条件下波浪形双层微通道热沉加热面温度随雷诺数变化的关联图

5.68%～8.33%。并且四种不同工况的努塞尔数Nu远大于常规双层热沉，在雷诺数相同的条件下，工况1热沉的努塞尔数最大，对流换热效果最强，传热效果最优。

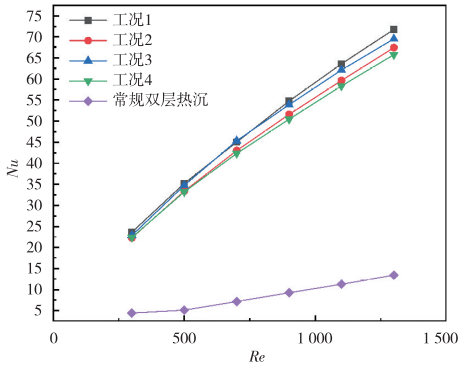


图10 不同上下通道长度比条件下波浪形双层微通道热沉努塞尔数随雷诺数变化的关联图

由图11可知，五种不同微通道热沉的f均随着Re的增大而减小。其中工况4热沉的达西阻力系数最大，常规双层热沉的达西阻力系数最小，是因为常规双层热沉其规则的流动特性和较小的壁面摩擦，通常具有较小的达西数。

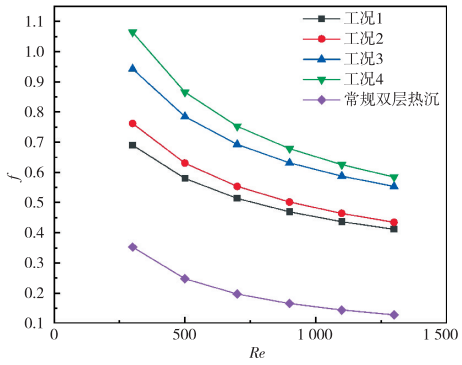


图11 不同上下通道长度比条件下波浪形双层微通道热沉达西数随雷诺数变化的关联图

由图12可知，随着雷诺数Re的增大，四种不同上下通道长度比条件下波浪形双层微通道热沉与常规双层热沉的PEC都呈现出逐渐上升的趋势。在模拟的层流范围内，热沉工况2，工况3，工况4，常规双层矩形的PEC相较于工况1依次低6.36%～8.29%，28.57%～30.12%，35.47%～36.42%。38.2%～40.8%。同一雷诺数时，工况1热沉PEC最大，综合强化传热效果最优。

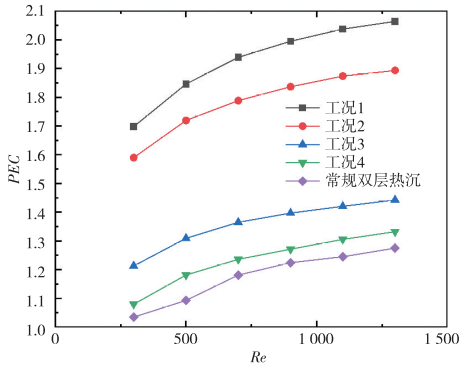


图12　不同上下通道长度比条件下波浪形双层微通道热沉综合强化因子随雷诺数变化的关联图

2.5　波浪形双层微通道热沉流动传热的场协同分析

场协同原理是由过增元院士在1998年提出，阐述速度与温度场的夹角越小，协同程度越好，传热效果越好[37-38]。为了描述速度场与温度场之间的协同性，使用传热协同角α评价：速度场和温度场的夹角越小，说明速度场与温度场的协同性越好，传热效率越高。其表达式为：

$$U\cdot\left(-\nabla\bar{T}\right)=\left|U\right|\left|-\nabla\bar{T}\right|\cos\alpha \tag{13}$$

$$\alpha=\arccos\frac{U\cdot\left(-\nabla\bar{T}\right)}{\left|U\right|\left|-\nabla\bar{T}\right|} \tag{14}$$

压降协同角是为了描述速度场和压力场的协同效果来定义的物理量，使用压降协同角β评价：速度场和压力场的夹角越小，说明速度场与压力场的协同性越好，微通道的功耗越低。其表达式为：

$$\overline{U}\cdot\left(-\nabla\overline{P}\right)=\left|U\right|\left|-\nabla\overline{P}\right|\cos\beta \tag{15}$$

$$\beta=\arccos\frac{\overline{U}\cdot\left(-\nabla\overline{P}\right)}{\left|U\right|\left|-\nabla\overline{P}\right|} \tag{16}$$

由图13可知，波浪形通道朝向入口截面处传热协同角较小，背离入口截面处区域传热协同角较大，这表明朝向入口截面部位的场协同性优于背离入口截面处，背离入口截面处的场协同性仍有提升空间。相较于其他波浪形双层微通道，上下通道长度比为0.2的波浪形双层微通道的传热协同角均在波浪形朝向入口截面处较小，而在波浪形背离入口截面处较大，有利于对流传热。波浪形背离入口截面附近速度场与温度场协同程度较差，传热协同角增大，为传热恶化区，不利于带走热量。这是因为在波浪形壁面的朝向入口截面处，流体直接冲击壁面，形成较高的动量交换和层流流体混合，这有助于提高速度场与温度场的一致性，从而减小传热协同角，在波浪形壁面的背离入口截面，流体发生分离现象，形成回流区，这会导致速度场和温度场的不一致性增加，传热协同角因此增大。波浪形底面上下通道长度比为0.2的微通道热沉（工况1）中冷却流体传热协同角较低、传热优化较强的区域占比较大，协同程度最高，对流传热效果最好。

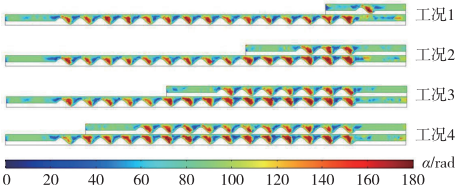


图13　不同上下通道长度比条件下波浪形双层微通道热沉传热协同角分布云图

由图14可知，四种不同通道的压降协同角在靠近波峰波谷壁面处较大，远离波峰波谷处较小。这是因为波浪型通道的截面在波峰和波谷处变化最为显著，导致流速和压力分布的不均匀性增加，从而在这些区域产生较大的压降协同角。上下通道长度比为0.2的波浪形双层微通道热沉蓝色区域占比较大，速度场和压力场协同程度最好，传热效果最优。

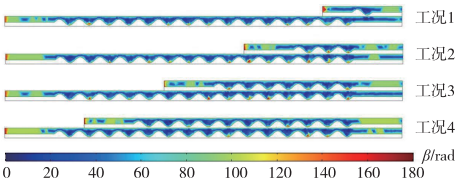


图14　不同上下通道长度比条件下波浪形双层微通道热沉压降协同角分布云图

由图15和16可知，图中四种不同上下通道长度比条件下的波浪形双层微通道热沉与常规双层热沉的传热协同角α和压降协同角β随着雷诺数Re增大，都呈现上升趋势。在模拟的层流范围内，热沉工况3，工况2，工况4，常规双层热沉的传热协同角α相较于热沉工况1依次高0.65%～0.67%，

0.8%～0.99%，0.86%～1.02%，3.95%～4.3%压降协同角 β 依次高 0.01%～0.82%，1.05%～1.2%，3.4%～4.57%。其中常规双层热沉比工况1低84.6%～88.8%。在 Re 相同的情况下，工况1表现出最小的 α，说明工况1热沉的对流传热效果最好，流动阻力损失也最小。

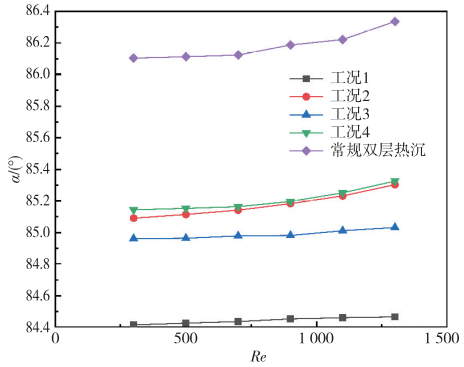


图15 不同上下通道长度比条件下波浪形双层微通道热沉传热协同角随雷诺数变化关联图

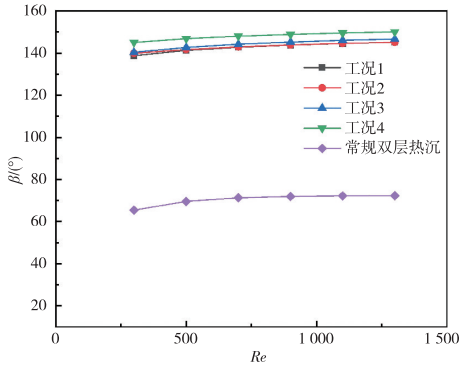


图16 不同上下通道长度比条件下波浪形双层微通道热沉压降协同角随雷诺数变化关联图

2.6 双层波浪形微通道热沉熵耗散分析

熵耗散极值原理是由过增元院士在2007年提出的一种新的物理量来描述热传递能力的物理量[39]。定义式为：

$$E_{vh}=\frac{1}{2}Q_{vh}U_{vh}=\frac{1}{2}Q_{vh}T \tag{17}$$

式中，Q_{vh} 为物体内部存在的热量；U_{vh} 为物体热势。

$$\dot{e}_{vh}=\lambda\left|\nabla T\right|^{2} \tag{18}$$

式中，$\dot{e}_{vh}$ 为熵耗散率。

总的熵耗散表达式如下：

$$E_{vh}=\iiint_{\Omega}\dot{e}_{vh}\,dV \tag{19}$$

当边界条件为等热流时，熵耗散值越小，微通道的传热能力越好，当边界条件为等壁温时，熵耗散值越大，微通道的传热能力越好。所以熵耗散极值原理也是评判传热效果能力的有效物理量。

图17为不同上下通道长度比条件下波浪形双层微通道热沉熵耗散率分布云图。由图可以看出，熵耗散值随着上层微通道长度减小而减小，这是因为微通道长度减小，流体在通道中流动的距离减少导致沿程的压力损失降低，从而减少了能量损失和熵耗散。当上下层通道长度比为0.2时，下层微通道区域熵耗散值较高，上层微通道的熵耗散值相对较低；当双层微通道上下通道长度比为0.2时，工况1热沉的熵耗散值最小，表明此时工况1双层微通道热沉的传热效率最优。

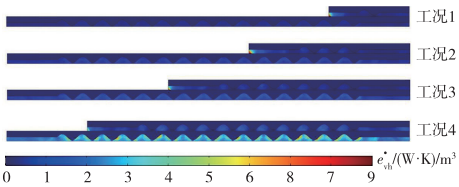


图17 不同上下通道长度比条件下波浪形双层微通道热沉熵耗散率分布云图

由图18可知，随着雷诺数 Re 的不断增大，四种不同上下通道长度比条件下波浪形双层微通道热沉与常规双层热沉的 E 逐渐降低；在相同 Re 下，随着上层微通道长度的减小，热沉的 E 逐渐降低。在模拟的层流范围内，热沉工况3，工况2，工况4与常规双层热沉的熵耗散值相较于热沉工况1依次高3.67%～19.8%，11.28%～23.52%，16.55%～26.65%，79.5%～85.9%。结果表明，在等热流的条件下，工况1双层波浪形微通道热沉具有最小的 E，传热效率最高，传热效果最好，说明可通过适当减小热沉上下通道长度比来提高热沉的传热效果。

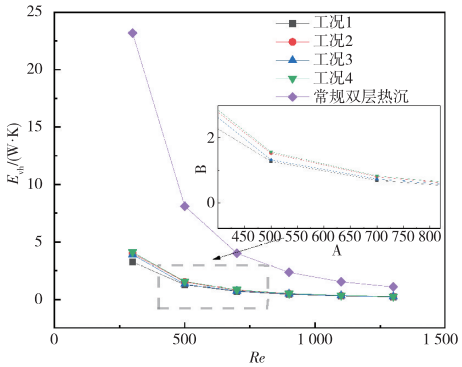


图18 不同上下通道长度比条件下波浪形双层微通道热沉熵耗散随雷诺数变化关联图

3　结论

本文采用CFD技术对波浪形双层微通道热沉进行了数值模拟，分别对波浪形双层微通道热沉在不同雷诺数下，不同上下层通道长度比条件下进行了数值计算和常规双层矩形热沉对比分析，通过计算获得微通道热沉内部各物理场，基于场协同原理和熵耗散理论深入分析波浪形双层微通道热沉强化传热的影响因素及其规律，研究结果如下：

（1）不同上下通道长度比条件下波浪形双层微通道热沉的数值计算中，随着雷诺数Re的增大，各波浪形双层微通道热沉的T_{ave}逐渐减小，Nu、PEC逐渐增大，达西阻力系数f逐渐减小，工况1热沉的平均温度T_{ave}最低、努塞尔数Nu和综合强化换热因子PEC最大，f最小，表明当上下通道长度比为0.2时波浪形双层微通道热沉流动传热效果最好，流动阻力最低；

（2）不同上下通道长度比的双层波浪形微通道热沉的α，β随着Re的增大逐渐增大，E随着Re的增大逐渐减小，在Re相同时，波浪形底面上下层通道长度比0.2的波浪形双层微通道热沉（工况1）的α最小，β最小，E最小，即当波浪形底面上下层通道长度比为0.2时Case1波浪形双层微通道热沉的传热效果最佳。

参考文献：

[1] Japar W, Sidik N, Mat S. A comprehensive study on heat transfer enhancement in microchannel heat sink with secondary channel[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2018, 99: 62-81.

[2] Naqiuddin N, Saw L, Yew M C, et al. Overview of micro-channel design for high heat flux application[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 901-914.

[3] Tuckerman D, Pease R. High-performance heat sinking for VLSI [J]. IEEE Electron device letters, 1981, 2 (5): 126-129.

[4] Jenkins L, Bennett A. 21st century challenge: thermal management design requirements [C]//The 23rd Digital Avionics Systems Conference, 2004: 9. D. 1-9.1.

[5] Darweesh A, Bauman S, French D, et al. Current density contribution to plasmonic enhancement effects in metal-semiconductor-metal photodetectors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(12): 2430-2434.

[6] 黄秉欢，米　创，李　逵，等. 微通道中凹穴复合肋片流动和换热特性研究[J]. 制冷学报，2023，44(4)：44-50.
Huang Binghuan, Mi Chuang, Li Kui. Investigation of flow and heat transfer characteristics for fins compound with cavities in microchannels [J]. Journal of Refrigeration, 2023, 44 (4): 44-50.

[7] 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.

[8] Saidi M H, Khiabani R H. Forced convective heat transfer in parallel flow multilayer microchannels [J]. Journal of heat transfer, 2007, 129(9): 1230-1236.

[9] Dixit P, Lin N, Miao J, et al. Silicon nanopillars based 3D stacked microchannel heat sinks concept for enhanced heat dissipation applications in MEMS packaging[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 141(2): 685-694.

[10] Liu Y, Luo X, Liu W. Cooling Behavior in a Novel Heat Sink Based on Muitilayer Staggered Honeycomb Structure [C]//International Conference on Micro/Nanoscale Heat Transfer, 2009: 131-135.

[11] Leng C, Wang X D, Wang T H. An improved design of double-layered microchannel heat sink with truncated top channels [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 79: 54-62.

[12] 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.

[13] 赵光攀，向立平，罗振兵，等. 不同结构形式双层微通道热沉的传热性能[J]. 工程热物理学报，2023，44(8)：2217-2223.
Zhao Guangpan, Xiang Liping, Luo Zhenbing, et al. Heat transfer performance of double-layered microchannel heat sinks with different structures [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(8): 2217-2223.

[14] 翟玉玲，夏国栋，杜　墨. 入口流动方式对双层微通道热沉传热性能的影响[J]. 中国科技论文，2015，10(17)：2050-2053，2058.
Zhai Yuling, Xia Guodong, Du Mo. Heat transfer performance of enhanced heat transfer process in microchannel heat sinks[J]. China Sciencepaper, 2015, 10(17): 2050-2053, 2058.

[15] Xie G, Liu Y, Sunden B, et al. Numerical investigation of heat transfer and pressure loss of double-layer microchannels for chip liquid cooling [C]//Heat Transfer Summer Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2012: 575-583.

[16] Shen H, Xie G, Wang C C. Heat transfer and thermodynamic analysis by introducing multiple alternation structures into double-layer microchannel heat sinks [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 145: 105975.

[17] Hung T C, Yan W M, Li W P. Analysis of heat transfer characteristics of double-layered microchannel heat sink [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(11/12): 3090-3099.

[18] 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.

[19] 洪 坚. 射流冲击的波形微通道流动与传热数值模拟研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
Hong jian, Numerical study of flow and heat transfer in waveform microchannels with jet impingement [D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.

[20] 徐岩哲. 波形双层微通道结构优化及纳米流体强化传热的数值研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2024.
Xu Yanzhe. Wumerical study on double-layer wavy microchannel structure optimizationand enhanced heat transfer of nanofluids[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2024.

[21] 臧鲁浩, 王俊超, 曹明轩, 等. U型波浪结构热沉的流动与热性能分析[J]. 新技术新工艺, 2023, 427(7): 60-67.
Zang Luhao, Wang Junchao, Cao Mingxuan, et al. Analysis of flow and thermal performance for U-shaped wavy structure heat sink[J]. New Technology and New Process, 2023, 427(7): 60-67.

[22] 王俊超,曹明轩,臧鲁浩,等. 扇形穴-梯形肋微通道散热器层流与传热特性[J]. 半导体光电,2023,44(3):408-416.
Wang Junchao, Cao Mingxuan, Zang Luhao, et al. Laminar flow and heat transfer characteristics of microchannel radiators with fan-shaped cavities and trapezoidal ribs [J]. Semiconductor Optoelectronics,2023, 44(3): 408-416.

[23] 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.

[24] 曹卫华,商维佳,朱继元. 基于类水滴状微结构的微通道流动和散热性能研究[J]. 半导体光电,2021,42(6):868-874.
Cao Weihua, Shang Weijia, Zhu Jiyuan. Study on flow and heat dissipation performance of micro-channels based on droplet-like microstructure. [J]. Semiconductor Optoelectronics,2021,42(6):868-874.

[25] 高智刚, 郑达文, 尚小龙, 等. 功率模块正弦微通道热沉周向传热特性分析[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(5): 1267-1275.
Gao Zhigang, Zheng Dawen, Shang Xiaolong, et al. Circumferential heat transfer analysis of sinusoidal microchannel heat sink on power module [J]. Journal of Engineering Thermophysics,2022, 43(5): 1267-1275.

[26] Patel N, Mehta H B. Experimental investigations on a variable channel width double layered minichannel heat sink [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 165: 120633.

[27] Hu N, Wang Q, Liu S, et al. A narrow shape double-layer microchannel heat sink (DL-MCHS) designed for high-power laser crystal[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 211: 118456.

[28] 刘文竹, 云和明, 王宝雪, 等. 基于场协同和耗散的微通道拓扑优化研究[J]. 化工学报, 2023, 74(8): 3329-3341.
Liu Wenzhu, Yun Heming, Wang Baoxue. Research on topology optimization of microchannel based on field synergy andentransy dissipation[J]. CIESC Journal, 2023, 74(8): 3329-3341.

[29] 李 萌, 云和明, 耿文广, 等. 电子芯片冷却用微通道热沉的场协同烬耗散优化分析[J]. 节能, 2020, 39(12): 9-15.
Li Meng, Yun Heming, Geng Wenguang, et al. Optimization analysis of field synergy principle and entransy dissipation of microchannel heat sink for electronic chip cooling[J]. Energy Conservation, 2020, 39(12): 9-15.

[30] Li F, Zhu W, He H. Field synergy analysis on flow and heat transfer characteristics of nanofluid in microchannel with non-uniform cavities configuration [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 144: 118617.

[31] 李 凡, 刘兴非, 刘彦杰, 等. 新型热泵热水系统冷凝器的传热特性与分析[J]. 制冷技术, 2021, 41(5): 26-31.
Li Fan , Liu Xingfei, Liu Yanjie, et al. Heat transfer characteristics and entransy analysis of a new type of condenser in the heat pump hot water system [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2021, 41(5): 26-31.

[32] Huang P, Pan M. Secondary heat transfer enhancement design of variable cross-section microchannels based on entransy analysis [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 141: 110834.

[33] 杨凤叶, 刘敏珊, 刘 彤, 等. 超临界CO_2微通道平行流气冷器流量分配优化研究[J]. 压力容器, 2013,30(8):33-37.
Yang Fengye, Liu Minshan, Liu Tong, et al. Research of flow distribution optimization of micro-channel parallel CO_2, gas cooler[J]. Pressure Vessel Technology, 2013, 30 (8): 33-37.

[34] 秦兴宇, 喻有理, 赵鼎熙, 等. 基于烬理论对热管传热效率最优化问题的讨论[J]. 物理与工程, 2024, 34(3): 157-163.
Qin Xingyu, Yu Youli, Zhao Dingxi, et al. Discussion on the optimization of heat pipe heattransfer efficiency based on entransy theory[J]. Physics and Engineering, 2024,34(3): 157-163

[35] 陈 诚. 扭转流换热器烬耗散性能分析与流动传热优化[D]. 郑州: 郑州大学, 2022.
Cheng Chen. Analysis of entransy dissipation performance and optimization of flow heat transfer in torsional heat exchanger [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University,2022.

[36] 曹子勇. 双层交错三角形凹穴微通道热沉流动与传热特性研究[D]. 常州: 常州大学, 2022.
Cao Ziyong. Research on flow and heat transfer characteristics of microchannel heat sink with double-layered staggered triangular cavities[D]. Changzhou: Changzhou University, 2022.

[37] Guo Z, Tao W, Shah R. The field synergy (coordination)

principle and its applications in enhancing single phase convective heat transfer[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(9): 1797-1807.

[38] Guo Z, Li D, Wang B. A novel concept for convective heat transfer enhancement [J]. International journal of heat and mass transfer, 1998, 41(14): 2221-2225.

[39] Guo Z Y, Zhu H Y, Liang X G. Entransy—A physical quantity describing heat transfer ability [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(13/14): 2545-2556.

作者简介：

胡明哲(2000—)，男，硕士研究生，主要研究方向为微尺度强化传热；

云和明(1976—)，男，博士，副教授，主要研究方向为微细尺度流动传热、数值模拟技术、电子器件冷却及强化传热与节能新技术。