

电子芯片冷却用微通道热沉的场协同与焓耗散优化分析

李 萌¹ 云和明^{1*} 耿文广^{2*} 于仓仓¹ 贾兴龙¹

(1. 山东建筑大学热能工程学院, 山东 济南 250101; 2. 齐鲁工业大学 (山东省科学院) 山东省科学院能源研究所 山东省生物质气化技术重点实验室, 山东 济南 250014)

摘 要: 采用CFD共轭传热数值模拟技术, 获得层流状态下的平直微通道热沉、叶脉状微通道热沉、蜘蛛网状微通道热沉的温度场、速度场和压力场, 研究在相同热功率下的不同拓扑结构微通道热沉的传热性能, 并结合场协同理论与焓耗散理论对3种不同结构的冷却效果进行综合比较, 为微电子器件散热优化提供参考。结果表明: 在相同入口质量流率时, 蜘蛛网微通道的最高温度(T_{\max})最低, 努赛尔数(Nu)最大, 传热协同角 θ 最小, 焓耗散值(E)最小, 具有理想的传热性能。

关键词: 数值模拟; 场协同; 焓耗散理论; 拓扑结构; 微通道热沉

中图分类号: TK01

文献标识码: A

文章编号: 1004-7948 (2020) 12-0009-07

doi: 10.3969/j.issn.1004-7948.2020.12.003

Optimization analysis of field synergy principle and entransy dissipation of microchannel heat sink for electronic chip cooling

LI Meng YUN He-ming GENG Wen-guang YU Cang-cang JIA Xing-long

Abstract: The temperature field, velocity field and pressure field of the flat microchannel heat sink, the vein-shaped microchannel heat sink, and the spider web-shaped microchannel heat sink in the laminar flow state was obtained by using CFD conjugate heat transfer numerical simulation technology. The heat transfer performance of micro-channel heat sinks with different structures was compared with each other based on field synergy principle and entransy dissipation theory under the same thermal power conditions, which provides a theoretical basis for heat dissipation optimization of microelectronic devices. The results show that the spider web microchannel have the best heat transfer performance at the same inlet mass flow rate condition with the lowest maximum temperature T_{\max} , the largest Nusselt number, the smallest heat transfer synergy angle θ , and the smallest entransy dissipation number E .

Key words: numerical simulation; field synergy; entransy dissipation theory; topological structure; microchannel heat sink

1 概述

随着电子元件小型化和集成化的发展, 电子元件的结构日益复杂化, 其工作效率逐渐提高, 芯片的热流密度急剧增加, 容易产生局部高温热点。过高的温度会严重损害电子器件使用性能与耐用性, 对热管理提出了更加严峻的挑战^[1]。热管理较差会导致超过50%的设备故障; 而传统的受迫对流空气冷却方式已不适用于当今高热芯片的散热^[2-4]。在电子工业中因微通道热沉尺寸小, 大大减轻了散热器负荷, 可高效排出余热, 从而在电子芯片散热领域具有广泛的应用前景。

Tuckerman^[5]等提出了微通道散热技术, 使微通道热沉的研究引起了研究人员的广泛关注。清华大学的过

增元院士^[6]等探究了尺寸效应对于微尺度单相流体流动和传热的影响, 并指出流动特征尺寸与微通道表面粗糙度对散热效果有一定影响。He^[7]等通过对梯形和三角形两种非圆截面微通道的数值模拟, 并利用场协同原理分析了微通道几何参数对传热效果的影响。Razali^[8]等研究了通道形状对直微通道性能的影响, 发现方形微通道比矩形微通道具有更好的传热性能。Sidik^[9]等研究并指出通过改变流道结构可以改善热性能, 结果表明, 改变流道结构有利于节约能源和成本。肖春梅^[10]等建立了三角形、梯形、矩形的微通道模型, 并对其流动与换热特性进行了数值模拟和分析, 研究发现截面的平均 Nu 数在入口处最高, 随着流体流动不断降低。何颖^[11]采用Fluent软件对等边三角形微通道的换热特性进行了数值模拟, 分析等腰三角形截面微通道温度和速度在充分发展区域内的流动传热特性, 并对等腰三角形微槽的几何参数进行优化和验证。赵瑾^[12]采用数值模拟的方法, 对比研究了传统平直微流道热沉、矩形柱鳍微流道热沉、热

作者简介: 李萌, 硕士在读, 研究方向为微细尺度流动传热等。

通信作者: 云和明, 博士, 副教授; 耿文广, 博士。

收稿日期: 2020-10-13

流微通道热沉及双层平直微通道热沉的流动传热特性。

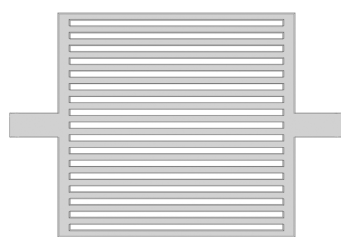
许多学者受仿生学启发构建了有利于强化传热的拓扑结构,吴龙文^[13]通过数值模拟,借鉴自然界多种优良特性的网络拓扑结构,设计了多种仿生微通道并提出了一种新型的仿蜘蛛网状微通道结构用于芯片的冷却散热。

本文通过构建相同特征尺寸下的平直微通道、叶脉状微通道、蜘蛛网状微通道热沉,利用有限元分析法进行数值模拟,探究不同形状对微通道热沉传热特性、流动特性的影响,并结合强化传热理论中的场协同理论、焓耗散理论进行优化分析,为微通道热沉高效传热提供理论基础。

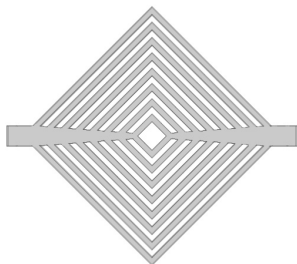
2 模型构建

2.1 几何模型

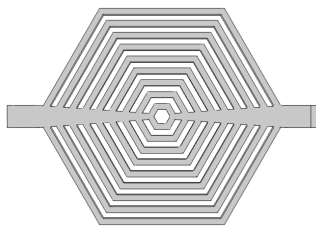
本文所研究的微通道热沉用于带走高热电子芯片在使用过程中产生的热量,3种热沉微通道总长度相同,3种微通道热沉几何模型如图1所示。



(a) 平直微通道热沉



(b) 叶脉状微通道热沉



(c) 蜘蛛网状微通道热沉

图1 3种微通道热沉几何模型

2.2 数学模型

以微通道热沉中流体水为研究对象,建立传热流动方程。不同的模型应当建立不同的控制模型,本文采用流固耦合数值模拟的方法,利用Comsol5.5软件对3种不同形状的微通道热沉进行了分析。为了简化问题,做以下假设:

(1) 流体为层流和稳定流动;

(2) 流体为不可压缩黏性流体;

(3) 水的物性参数为常数。

根据以上假设,采用三维方程组求解问题,其控制方程如下:

连续线性方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad (2)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \quad (3)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \quad (4)$$

$$\text{其中 } \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (5)$$

能量方程:

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k_f \nabla^2 T \quad (6)$$

$$k_s \nabla^2 T = 0 \quad (7)$$

$$k_s \frac{\partial T}{\partial z} = -\dot{q} \quad (8)$$

$$-k_s \frac{\partial T_s}{\partial \mathbf{n}} = -k_f \frac{\partial T_f}{\partial \mathbf{n}} \quad (9)$$

$$T_s = T_f \quad (10)$$

$$k_s \nabla^2 T = 0 \quad (11)$$

式中: μ ——流体的黏性系数 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$); ρ ——流体的密度 (kg/m^3); c_p ——流体的定压比热容 [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]; \dot{q} ——热流密度矢量 (W/m^2); k_f ——流体热导率 [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]; k_s ——固体的热导率 [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]。

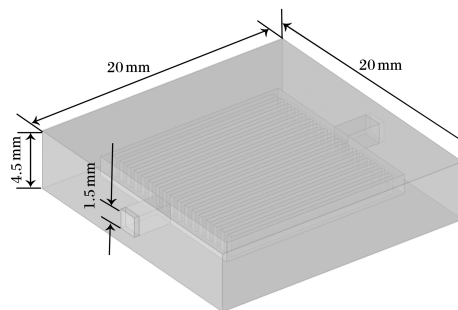
2.3 边界条件

①冷流体为去离子水,入口温度为 25°C ;

②模型与周围环境接触的所有外表面为绝热;

③热沉底部设置恒定热流 $20 \text{ W}/\text{cm}^2$ 。

所有微通道热沉的尺寸均为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$ 。3种模型的微通道总长度均为 241.6 mm ,微通道截面尺寸为宽度 0.4 mm 、高度 1.5 mm 。以平直微通道为例,模型尺寸如图2所示。



(a) 主视图

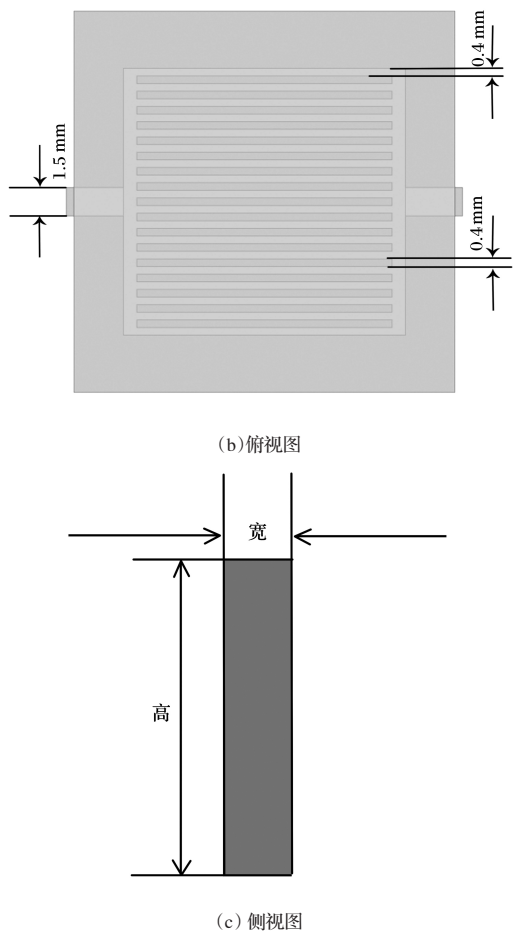


图2 微通道热沉尺寸

不同微通道模型尺寸如表1所示。

表1 不同微通道尺寸/mm			
模型	微通道总长	微通道宽度	入口宽度 入口长度
直微通道	241.6	0.4	1.5 3.0
叶脉状微通道	241.6	0.4	2.0 1.5
蜘蛛网状微通道	241.6	0.4	1.5 2.0

2.4 网格划分与网格无关性验证

为保证数值模拟计算结果的准确性，在进行网格划分时需要合理构建网格单元。网格划分过密，对计算结果影响不大，且会增加计算时间；网格划分较稀疏，会导致计算结果不准确，因此有必要构建合适的网格大小以平衡计算精度和计算速度。本文采用 Comsol Multi - physics 软件进行物理场网格划分，以叶脉状微通道模型为例，分别进行常规、细化、较细化处理，网格单元总数分别为 218 015、551 974、1 519 816 个。在模型边界处由于温度梯度变化较大进行局部细化，微通道热沉局部网格加密图如图3所示。

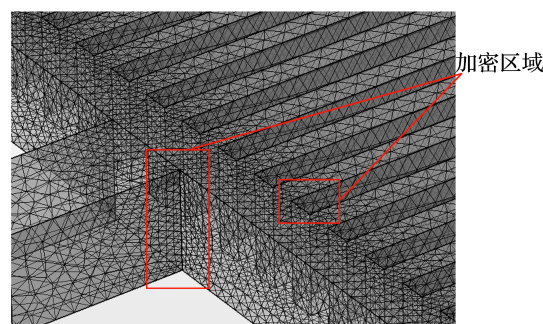


图3 微通道热沉局部网格加密图

以叶脉状微通道为例，取入口流体 $Re=400$ ，热通量 $=2 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ ，对比不同网格精度下的微通道热沉最高温度和进出口压差变化，相对于网格细化情况下热沉的最高温度 (T_{max}) 的相对误差分别为 0.476%、0.279%，进出口压差相对误差分别为 6.52%、7.3%。综合考虑计算时间和计算精度，选取细化网格时网格数为 551974 时较为经济合理。

3 模拟结果及讨论

3.1 温度、速度场及压降特征分析

3.1.1 温度场特征分析

给定流体入口 Re 为 400，热沉底部热通量为 $2 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ ，3 种微通道热沉的温度分布场云图如图4所示。

由图4 (a) 可知，流体在入口段温度较低，入口平

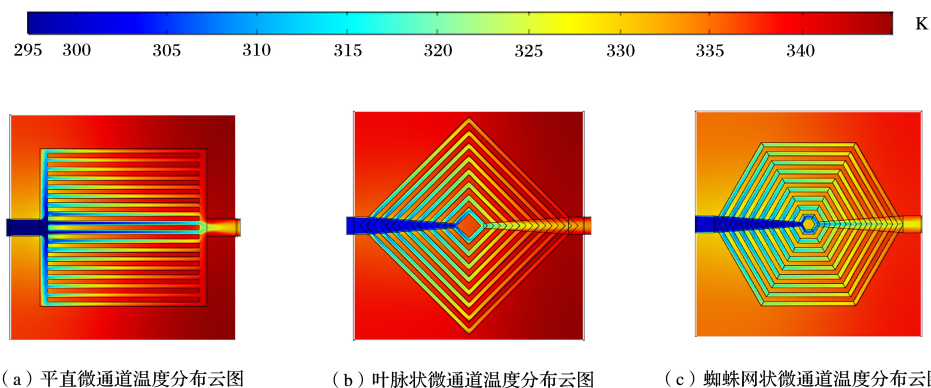


图4 3种微通道热沉温度场云图

均温度为 298.2 K。随流体流动在出口侧温度逐渐升高，出口平均温度为 331.31 K，平直微通道热沉的最高温度为 340.1 K。通道内流体以出口处为顶点呈现三角低温区分布，这是因为中轴线处流体流速高、质量流率大，在热沉相同热通量条件下横截面流体进出口温差小，温度较低。

由图 4 (b) 可知，在叶脉状微通道热沉中，出口温度高于入口段平均温度，流体入口处平均温度为 298.15 K，出口段平均温度为 331.49 K，叶脉状微通道热沉的最高温度为 339.65 K。

由图 4 (c) 可知，蜘蛛网状微通道热沉出口温度较

高，流体入口平均温度为 298.2 K，出口平均温度为 326.75 K，热沉最高温度为 334.52 K。蜘蛛网状微通道的温度分布比平直微通道、叶脉状微通道分布更加均匀，说明蜘蛛网状微通道具有更好的均匀性。

3.1.2 速度场特征分析

3 种微通道热沉的速度场云图如图 5 所示。由图 5 可知，流速在入口段与出口段最高，在中轴线附近通道流速较高。这是因为在中轴线处流体分流作用小，流向变化小使阻力较小，流速较大；在出口处由于流体汇聚、流道体积减小，使流速增加。

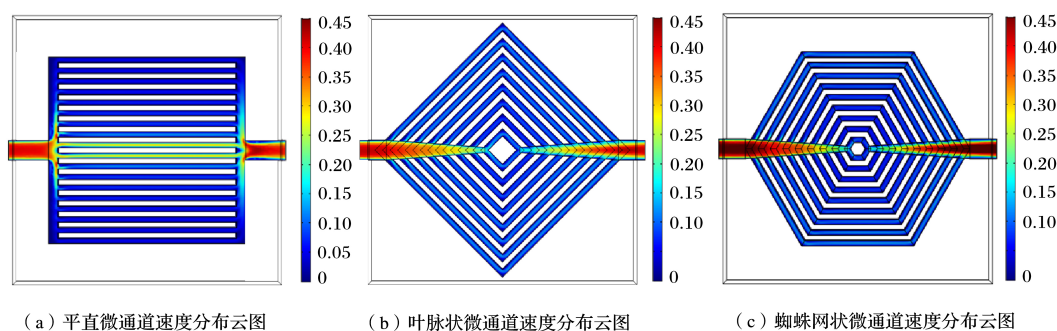


图 5 3 种微通道热沉的速度场云图

由图 5 (a) 可知，在不同热沉的分支通道中，平直微通道的中轴线处分支压力较两侧分支通道压力大，压力分布不均匀；叶脉状微通道与蜘蛛网状微通道的各并

联分支通道压力相差不大，流阻均匀性好。

3.1.3 压力场特征分析

3 种微通道热沉的压力场分布云图如图 6 所示。

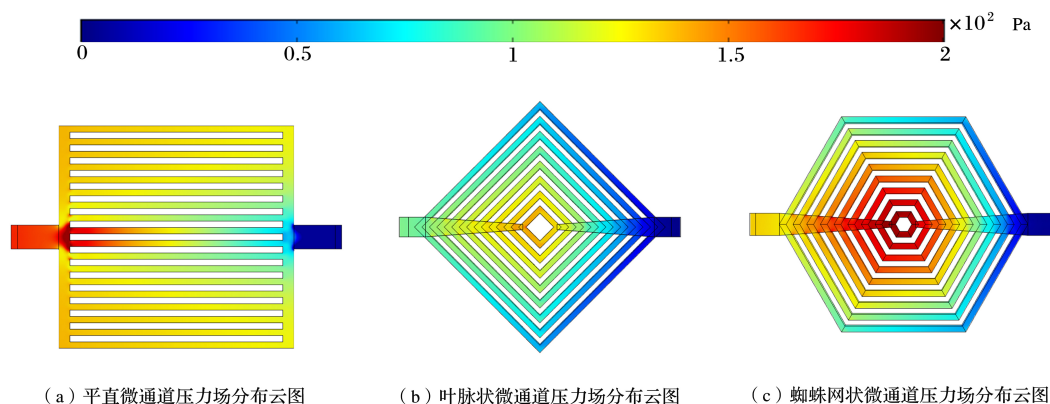


图 6 3 种微通道热沉的压力分布云图

由图 6 可知，通道压力均在入口处较大，在出口处较小。由图 6 (a) 可知，平直微通道流体压力在入口中轴线与分支分流处突增。这是由此处局部高流速与分流作用产生的绕流共同导致。由图 6 (b) 可知，中叶脉状微通道在入口处压力较大，出口处压力较小。这是因为在入口段流体分流作用与通道壁面碰撞压力较大，在出口段流体汇聚压力较小。由图 6 (c) 可知，通道流体压力在内环较大，外环通道压力小。这是由于通道内环较短，流体流动方向变化快，导致与壁面碰撞压力增大。

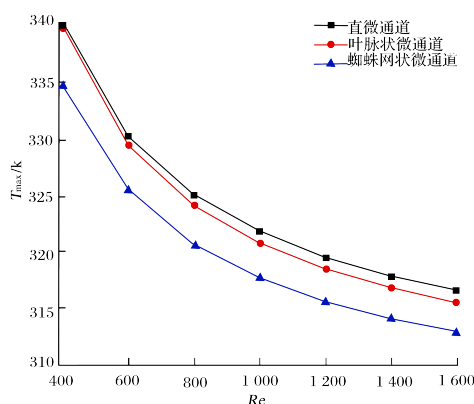
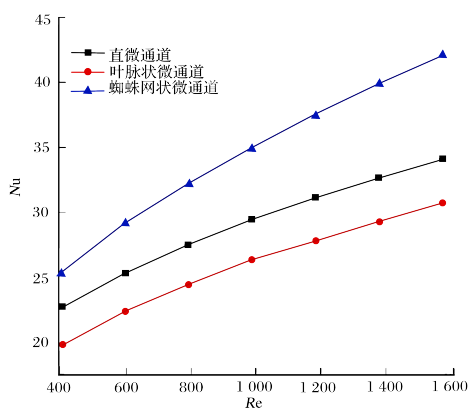
3.2 传热协同特性分析

3.2.1 最高温度 (T_{max})、 Nu 数变化

从图 4 ~ 图 6 各微通道热沉压力场云图中，很难判定 3 种热沉传热效果和流动特性的优劣，因此利用热沉的最高温度 (T_{max})、 Nu 数比较 3 种微通道的换热效果。

3 种微通道热沉在不同 Re 下最高温度 (T_{max}) 变化如图 7 所示，不同微通道形式 Nu 随 Re 变化关联如图 8 所示。

由图 7 可知，随着 Re 数值的增大，3 种微通道热沉的最高温度 T_{max} 均逐渐减小，说明 Re 增大增加了流体的

图7 不同微通道形式最高温度 T_{\max} 随 Re 变化关联图图8 不同微通道形式 Nu 随 Re 变化关联图

质量流率, 流体对流换热系数增大, 传热效果强化; 在相同的 Re 数值下, 平直微通道、叶脉状微通道、蜘蛛网状微通道的最高温度 T_{\max} 依次降低, 表明蜘蛛网状微通道热沉具有良好的传热效果。

由图8可知, Nu 数值随着 Re 数值的增大而逐渐升高, 这是因为 Re 增大, 流体的质量流率增加, 增大了对流换热系数, 换热效果增强; 相同 Re 条件下蜘蛛网状微通道的 Nu 最大, 说明此通道的换热效果最优。

3.2.2 速度场与温度场协同分析

场协同原理是1998年由过增元院士^[14]首先提出, 他认为流体的速度矢量和温度梯度间的夹角与传热效果之间具有决定性的影响。速度矢量和温度梯度间的夹角称为传热协同角。根据场协同原理, 当传热协同角越小时说明流体运动方向与温度升高方向协同程度越高, 越有利于传热。

在流体的流动区域内, 以对流换热能量方程为基础进行积分, 并忽略流体进口、出口处的轴向导热, 然后进行无量纲化处理, 得到努赛尔数 Nu 与速度、温度场的关系:

$$Nu = \frac{1}{4} Re Pr \int_{\Omega} \bar{U} \cdot \nabla \bar{T} d\bar{V} \quad (12)$$

式中: Re ——雷诺数; Pr ——普朗特数; Nu ——努谢尔特数。

由公式(4)可知, Nu 的大小不仅与 Re 和 Pr 有关, 还与 $\int_{\Omega} \bar{U} \cdot \nabla \bar{T} d\bar{V}$ 的大小有关, 其中 $\bar{U} \cdot \nabla \bar{T}$ 可以表示为:

$$\bar{U} \cdot \nabla \bar{T} = |\bar{U}| |\nabla \bar{T}| \cos \theta \quad (13)$$

由式(5)可知, θ 越小, 则 $\bar{U} \cdot \nabla \bar{T}$ 越大, 从而使 Nu 越大, 流动的对流换热效果越好。由此可以推出传热协同角 θ 的表达式为:

$$\theta = \arccos \frac{\bar{U} \cdot \nabla \bar{T}}{|\bar{U}| |\nabla \bar{T}|} \quad (14)$$

根据场协同原理, 对微通道热沉内的流体部分进行数值模拟, 得到3种微通道的传热协同角云图如图9所示。

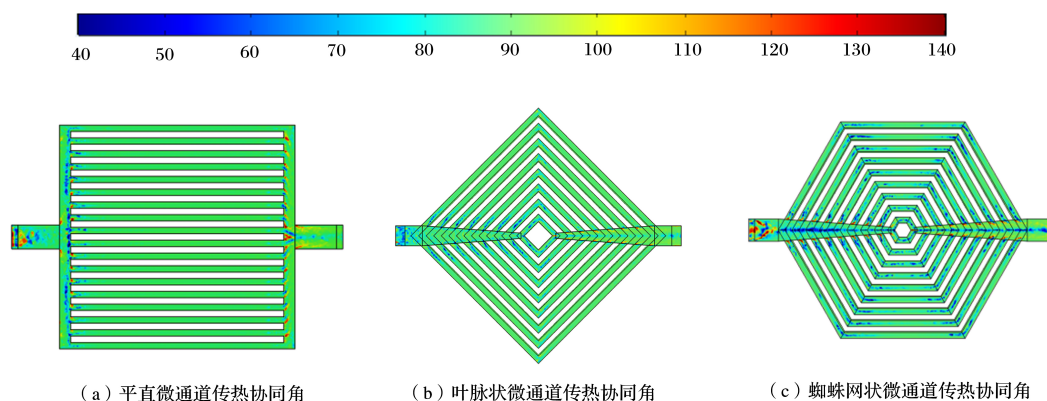


图9 3种微通道的传热协同角云图

由图9可知, 流体传热协同角在微通道热沉的中轴线处较小, 说明在中轴线附近的速度与温度协同程度较好, 有利于强化传热。在图9(a)中入口处纵向通道传热协同角较小, 在入口处分支和出口处汇聚的顶角处传热协同角呈现传热恶化, 不利于带走热量; 由图9(c)可以看出, 流体在入口处的分支处传热协同角较小, 由于分

流作用增强流体流动强化传热, 在出口侧的主干汇集处附近传热协同角较大, 产生逆向涡流传热效果恶化, 不利于强化传热。在图9中明显可以看出, 传热协同角在流道拐角处传热协同角小, 这是因为在拐角处的流体绕流增强, 有利于传热。

为从数值上更直观看3种微通道换热效果, 计算

微通道热沉中流体的平均传热协同角 θ ，如图10所示。

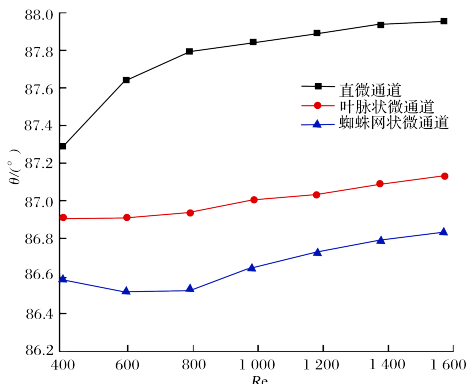


图10 不同微通道形式 θ 随 Re 变化关联图

由图10可知，随着 Re 增大， θ 逐渐上升，速度场与温度场的协同效果逐渐变差，不利于强化换热；在相同 Re 时， $\theta_{\text{蜘蛛网状微通道}} < \theta_{\text{叶脉状微通道}} < \theta_{\text{平直微通道}}$ ，由此可知蜘蛛网状微通道强化传热效果最佳。

3.2.3 流动传热的焓耗散分析

由于热和电很多的物理量具有类比性，过增元院士根据电学中的相关规律提出热学新的物理量——焓，其对比关系如表2所示。

焓的定义式为：

$$E_{vh} = \frac{1}{2} Q_{vh} U_{vh} = \frac{1}{2} Q_{vh} T \quad (15)$$

表2 热学与电学中物理量的对比关系^[15-17]

项目	电势	电流	电流密度	电阻	电量	电势能
符号	U_e	I	\dot{q}_e	R_e	Q_{ve}	$E_e = (Q_{ve} U_e)/2$
单位	V	A	$C/(m^2 \cdot s)$	$V \cdot s/C$	C	J
项目	热势	热流	热流密度	热阻	热容量	
符号	$U_h = T$	\dot{Q}_h	\dot{q}_h	R_h	$Q_{vh} = Mc_p T$	
单位	K	J/s	$J/(m^2 \cdot s)$	$s \cdot K/J$	J	

式中： Q_{vh} ——物体内存存的热量(J)； U_{vh} ——物体的热势(K)； T ——温度(K)。

若研究对象不存在内热源，根据其导热过程能量守恒方程变换推导获得：

$$\rho c_p U \cdot \nabla \left(\frac{T^2}{2} \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \lambda |\nabla T|^2 \quad (16)$$

$$U \cdot \nabla (e_{vh}) = \nabla \cdot (\dot{e}_h) - \phi_h \quad (17)$$

式中： e_{vh} ——物体的焓耗散项； \dot{e}_h ——流体微元的焓耗散项； ϕ_h ——热量扩散过程中的焓耗散，其表达式为：

$$\phi_h = \lambda |\nabla T|^2 \quad (18)$$

根据焓耗散极值原理，当导热过程在定壁温条件时，焓耗散值越大其换热效率越高^[18]，当对流换热过程中定热流条件时，焓耗散值越小，换热装置的换热效率就越高。

3种微通道的焓耗散分布云图如图11所示。

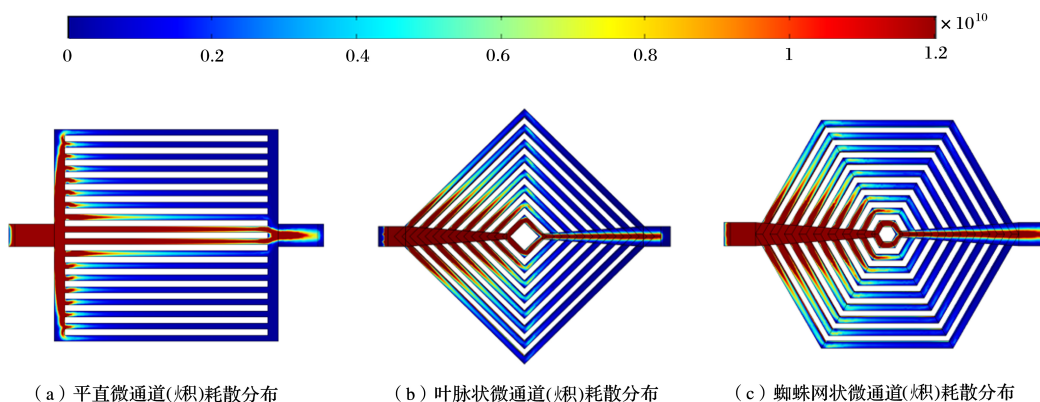


图11 3种微通道焓耗散云图

由图11可知，在3种微通道的焓耗散云图呈现不均匀分布，入口处 E 较大；随着流体流动 E 逐渐减小，在出口处的中轴线附近焓耗散值 E 较大。根据焓耗散极值原理，在等热流条件下，焓耗散值越小表明其传热能力较大，因此在入口处的微通道由于流阻较大，对流换热系数较小，换热效果差，而出口处流阻较小， E 降低，提高了微通道的传热能力。

3种微通道模型的焓耗散值随 Re 变化的关联如图12所示。由图12可知，3种微通道的总焓耗散值随 Re 的增

大而逐渐减小。这是因为质量流率的增加加强了流体扰动效果，对提高流体的传热能力有利。在相同 Re 条件下，蜘蛛网状微通道具有最小的焓耗散值，传热效率最高。

4 结语

本文研究了平直微通道、叶脉状微通道、蜘蛛网状微通道热沉在相同特征尺寸下的传热、流动特性，利用Comsol软件进行数值模拟并根据温度场、速度场、压力场分析了不同热沉传热效果，主要结论如下：

(1) 在层流范围内，随着流体 Re 增加，3种热沉的

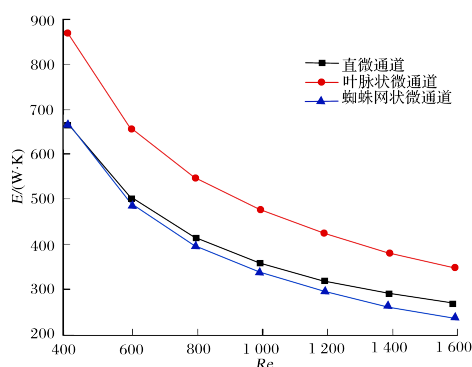


图12 微通道热沉焔耗散 E 随 Re 变化关联图

最高温度 T_{\max} 逐渐降低,努赛尔数 Nu 逐渐升高;在相同 Re 下,蜘蛛网状微通道的 T_{\max} 最低、 Nu 最大,即随着 Re 升高,微通道热沉的传热效果变好,在相同 Re 下蜘蛛网状微通道热沉的传热效果最好。

(2) 随着 Re 逐渐升高,微通道热沉的传热协同角呈现逐渐上升的趋势,表明随着流体的质量流率增加,微通道热沉的温度场与速度场协同程度变差;在相同 Re 条件下,蜘蛛网状微通道热沉协同角最小,协同程度好,传热效果优良。

(3) 蜘蛛网状微通道的焔耗散值最小,传热能力最强,具有理想的传热特性。

参考文献

- [1] Rosa P, Karayiannis T G, Collins M W. Single-phase heat transfer in microchannels: The importance of scaling effects[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 29(17/18): 3447-3468.
- [2] Kandlikar S G, Grande W J. Evaluation of single phase flow in micro-channels for high heat flux chip cooling—Thermohydraulic performance enhancement and fabrication technology[J]. Heat Transfer Engineering, 2004, 25(8): 5-16.
- [3] Villard O G J. Interference-reducing antennas for shortwave broadcast listeners [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 1988, 34 (2) : 159-166.
- [4] Japar W M A A, Sidik N A C, 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.
- [5] Tuckerman D B, Pease R F W. High-performance heat sinking for VLSI[J]. IEEE Electron Device Letters, 1981, 2(5): 126-129.
- [6] Guo Z Y, Li Z X. Size effect on single-phase channel flow and heat transfer at microscale[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2003, 24(3): 284-298.
- [7] He T Y L. A numerical study of laminar convective heat transfer in microchannel with non-circular cross-section[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2006, 45(2): 1140-1148.
- [8] Razali A, Sadikin A. CFD simulation study on pressure drop and velocity across single flow microchannel heat sink [J]. Journal of Advanced Research Design, 2018 (5): 12-21.
- [9] Sidik N A C, Alawi O A. Computational investigations on heat transfer

enhancement using nanorefrigerants [J]. Journal of Advanced Research Design, 2014(1): 35-41.

- [10] 肖春梅,陈永平,施明恒,等. 非圆形微通道热沉的流动换热特性数值模拟[J]. 热能动力工程, 2008(6): 640-644.
- [11] 何颖. 三角形截面微通道中流体的流动和换热特性的理论研究和结构优化[D]. 昆明:昆明理工大学, 2015.
- [12] 赵瑾. 微流道热沉流动换热特性及热应力分析[D]. 青岛:中国石油大学(华东), 2015.
- [13] 吴龙文. 相控阵天线散热微通道冷板拓扑结构研究[D]. 成都:电子科技大学, 2017.
- [14] Guo Z Y, Li D Y, Wang B X. A novel concept for convective heat transfer enhancement [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1998, 41(14): 2221-2225.
- [15] Singh P, Zhang M, Ahmed, et al. Effect of micro-roughness shapes on jet impingement heat transfer and fin-effectiveness [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 132: 80-95.
- [16] 管宁. 微肋阵流动与强化传热研究[D]. 济南:山东大学, 2016.
- [17] Guo Z Y, Zhu H Y, Liang X G. Entransy—A physical quantity describing heat transfer ability[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2007, 50(13/14): 2545-2556.
- [18] 朱强华,崔苗,高效伟. 带斜孔肋大宽高比矩形通道的强化传热特性[J]. 航空动力学报, 2016, 31(4): 780-787.