

前疏后密叉排微细通道热沉特性研究

潘瑶 李林 陈彬彬 杨瑞琦 杨金国 刘伟

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 本文通过肋片前疏后密的排布方式改进叉排微细通道热沉的性能, 对前疏后密叉排微细通道热沉的传热和流动特性进行了数值模拟和实验研究。研究表明, 前疏后密的肋片排布方式能增强换热效果, 相比普通叉排排布方式换热能力提高约 50%。流量 400 mL/min, 热负荷 240 W (30 W/cm²) 时, 热源表面温度约为 57.7°C。

关键词 前疏后密; 叉排; 微细通道

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2013)04-0733-05

Research on Fluid Flow and Heat Transfer of Staggered Fin Mini-channel Heat Sinks With Frontal Sparser and Rear Denser Arrangement

PAN Yao LI Lin CHEN Bin-Bin YANG Rui-Qi YANG Jin-Guo LIU Wei

(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract Frontal sparser and rear denser arrangement was proposed in mini-channel heat sinks for performance improvement. Fluid flow and heat transfer processes in staggered fin mini-channel heat sinks with frontal sparser and rear denser arrangement were analyzed with numerical simulation and experiment. The result shows that frontal sparser and rear denser arrangement can improve heat transfer performance. Compared with uniform staggered fin heat sinks, these proposed heat sinks have a 60 percent improvement of heat transfer coefficient. The temperature of heat source was about 57.7°C when the volume flow rate was 400 mL/min and thermal load stayed 240 W (30 W/cm²).

Key words frontal sparser and rear denser; staggered arrangement; mini-channel

0 引言

近二十年来, 随着电子技术的不断发展, 电子设备功率增加、集成度加大、体积缩小, 热流密度随之急剧上升, 工作温度大为增高。由于温度过高, 电子器件的性能随之下降, 甚至烧毁, 其可靠性和寿命将大为降低。微通道热沉^[1]自提出以来, 以其传热效率高、结构紧凑以及冷却性能良好等优点, 得到广泛关注。

自 20 世纪 80 年代中期开始, 对于微通道内的流动和传热研究一直是国际微电子学界和传热学界的热点^[2]。Rahman 和 Gui^[3,4]对梯形微通道中的摩擦系数和 Nu 数与经验公式进行了对比。为了进一步提高热沉的换热性能, Kishimoto^[5]等提出叉排布置的菱形肋片微通道结构, 该结构能增加流体的扰动并抑制热边界层的发展。邹江^[6]等对微小交错流道散热器进行了实验研究, 发现交错流道换热性能明显优于直通道。

虽然叉排微通道热沉能有效增强扰动, 提高换热性能, 但工质在流经热沉下游时, 换热效果逐渐减弱。本文考虑对靠近热沉出口部分的叉排肋片局部加密, 提高叉排微细通道热沉的整体换热性能。通过数值模拟和实验测试, 研究前疏后密叉排微细通道热沉的传热和流动特性。

1 数值模拟

1.1 物理和数学模型

前疏后密叉排微细通道热沉结构如图 1 示, 热沉整体尺寸为 46 mm×26 mm×4.5 mm, 四周壁面厚 2 mm, 上下盖板均厚 1.5 mm。采用两个入口和两个出口, 其间距各为 14 mm, 进出口之间相距 36 mm。肋片分布在热沉流体区中间, 长 30 mm。靠近入口处的前半段肋片均长 5 mm, 共 3 排, 改变靠近出口的后半段肋片长度, 进行局部加密。其中肋片高为

收稿日期: 2013-01-09; **修订日期:** 2013-03-06

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2013CB228302); 国家自然科学基金资助项目 (No.51036003); 教育部博士点基金 (No.20100142110037)

作者简介: 潘瑶 (1989-), 女, 硕士研究生, 主要从事航天器热控技术, 高热流密度电子器件散热方面的研究。**通信作者:** 刘伟, 教授, 博导, w_liu@hust.edu.cn

h , 肋片宽为 W_1 , 肋长为 L_l , 肋片长度方向间距为 L_s , 宽度方向间距为 W_2 , 其中 $L_s = L_l$, 具体尺寸见表 1。

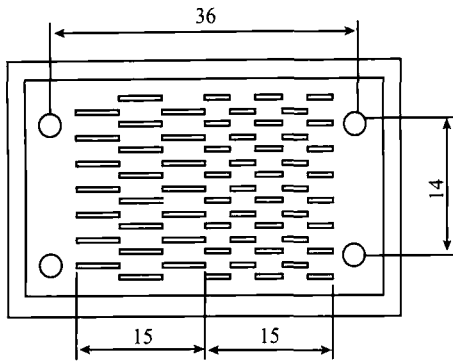


图 1 微细通道热沉结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mini-channel heat sinks

表 1 模拟前疏后密微细通道热沉几何尺寸
Table 1 Dimensions of frontal sparser and rear denser mini-channel heat sinks in numerical simulation

L_l/mm	W_1/mm	h/mm	L_s/mm	W_2/mm
5、2.5~5	0.5	1.5	5、2.5~5	2.1

取微细通道热沉整体作为模拟对象, 使用 FLUENT^[7] 软件求解热沉内流动与换热问题。假设层流流动、连续介质, 入口速度、温度分布均匀。设置热沉材料为紫铜, 冷却工质为水, 进口温度为 20°C, 采用速度入口。热沉底部居中布置有 40 mm×20 mm 的定热流加热面, 其余表面作绝热处理。流体区域和肋片均采用结构化网格, 并实现网格独立化。采用 SIMPLE 算法解决速度与压力的耦合问题, 能量方程和动量方程均采用二阶迎风差分格式。

由于本文研究的微细通道热沉当量尺寸在毫米量级, 远大于分子平均自由程, 适用于连续性假设。采用热沉的平均换热系数 h 评价热沉的换热效果, 计算公式如下:

$$Q = c_p m (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \quad (1)$$

$$q = Q/A = c_p m (T_{\text{out}} - T_{\text{in}})/A \quad (2)$$

其中, Q 为工质流过热沉带走的热量, q 为热流密度, c_p 为水的比热容, m 为工质质量流量, T_{in} , T_{out} 分别为微细通道热沉进口和出口的流体温度, A 为模拟热源加热面的面积。

微细通道热沉的平均换热系数 h :

$$h = \frac{Q}{A(T_w - T_f)} = \frac{q}{T_w - T_f} \quad (3)$$

其中, T_w 为热沉底部平均温度, T_f 为流体平均温度。

1.2 模拟结果分析

图 2 为改变后半段肋片区域的排数对微细通道热沉传热性能的影响。从图中可以看出, 随着加密排数的增加, 热沉的换热系数有所提高。这是因为靠近出口处肋片排数的增加抑制了热边界层沿肋片的发展, 增强了对流体的扰动, 有利于工质与热沉间的换热。在体积流量为 188.4 mL/min 的情况下, 加密排数为 6 排的微细通道热沉相对于未加密热沉换热系数 h 提高了 3.9%。

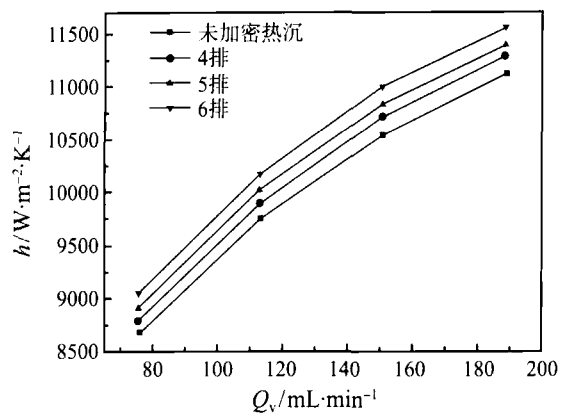


图 2 不同加密排数下换热系数变化图

Fig. 2 Heat transfer coefficient varies with number of rows

2 热沉实验

2.1 实验系统

设计如图 3 所示实验系统, 采用加热块模拟发热元件, 其产生的热量传递给微细通道热沉, 微泵驱动工质在微细通道热沉内以对流换热的方式将热量带走, 工质温度上升。之后工质流向散热器, 在散热器内与冷源 (环境水) 交换热量, 工质温度降低。冷却后的工质重新进入到储液器内, 在微泵作用下再次进入到热沉中带走热量, 如此循环。系统中加热块和传输管路均用隔热材料包裹, 模拟绝热环境。

实验段为采用紫铜加工的前疏后密叉排微细通道热沉, 外框尺寸和模拟热沉相同, 表 2 为热沉内部具体尺寸。在加热块、热沉进出口管道、散热器进出口和环境布置有 T 型热电偶测温。其中加热块的测温点沿加热块四周均匀布置, 在距离加热面下 2 mm 处共钻有 8 个深 6 mm 的 $\varnothing 1$ mm 孔放置热电偶。采用差压变送器测量热沉进出口管道间的压差。由于实验系统采用不锈钢管道, 管径和流量较小, 缺少合适的流量计。所以实验中, 通过称重法标定流量与泵功率和电位器电压之间的关系, 拟合它

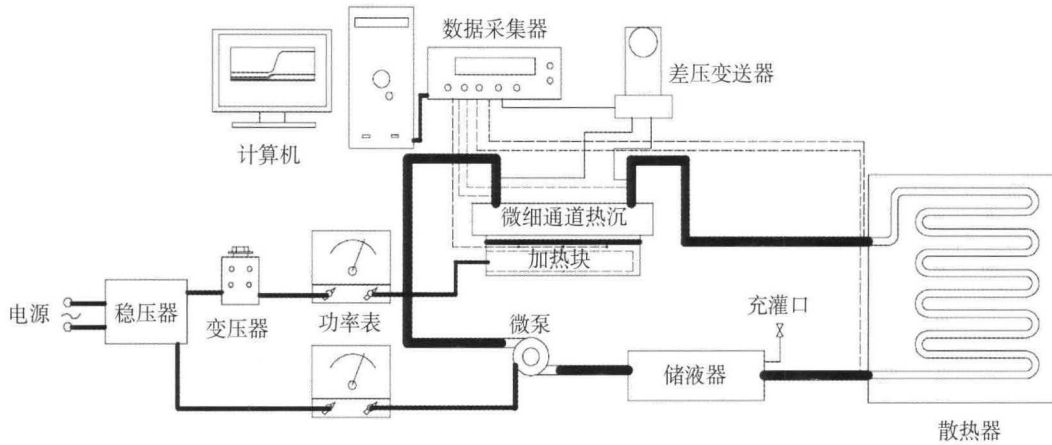


图 3 实验系统示意图
Fig. 3 Schematic diagram of experimental system

们之间的关系式。这样, 在实验过程中, 通过测量泵功率和电位器电压可间接测得系统流量。

表 2 实验前疏后密微细通道热沉几何尺寸

Table 2 Dimensions of frontal sparser and rear denser mini-channel heat sink in experiment

L_1/mm	W_1/mm	h/mm	L_s/mm	W_2/mm
5、3	1	1.5	5、3	2.2

2.2 实验数据分析

实验分别测量了体积流量从 100 mL/min 至 400 mL/min, 改变加热功率的 7 组实验数据, 每组数据中加热功率从 10 W 开始, 先增至 20 W, 此后再以 20 W 为增幅逐步增加到 240 W。

不同体积流量下, 加热块测点平均温度均随加热功率的增加而增加, 如图 4 所示。从图中可以看出, 当加热功率为 240 W, 即热流密度达到 30 W/cm² 时, 各体积流量下, 加热块测点处的平均温度均未超过 82°C。其中, 在体积流量 400 mL/min, 加热功率 240 W 时, 加热面测点平均温度仅为 57.7°C; 在体积流量 100 mL/min, 加热功率 240 W 时, 加热面测点平均温度为 81.8°C。这是由于随着体积流量的增加, 增强了热沉的换热, 降低了热沉内流体的平均温度, 在带走相同热量的情况下, 使加热面的温度降低。

为不破坏热源表面, 加热块的测温点布置在距离加热面 2 mm 处, 测点与热沉底部之间不仅存在导热热阻, 还存在加热面与热沉底部之间的接触热阻。

为减小接触热阻对热沉实验的影响, 加热面和热沉底面均打磨平整光滑。加热面和热沉接触底面涂抹导热膏, 用夹具施加一定量的预紧力, 进一步减小接触热阻, 降低接触热阻对热沉性能测试的影响。

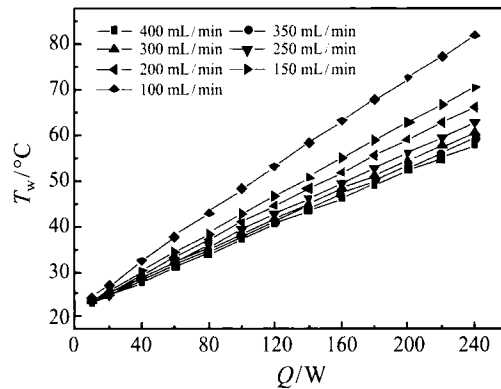


图 4 不同体积流量下热源测点温度随加热功率变化图
Fig. 4 Temperature of heat source varies with heating power and volume flow rate

热沉底部实际温度应为测量温度减去加热块导热热阻和接触热阻造成的温差, 所得温度即为热沉底部平均温度 T_w 。

$$T_w = T'_w - Q(R_1 + R_2) \quad (4)$$

其中, T'_w 为加热块测点温度, Q 为加热功率, R_1 为加热块处导热热阻, 由方程 (5) 计算得出, R_2 为接触热阻, 铜/铜单位面积接触热阻为 $(0.25 \sim 2.5) \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ^[8], 本文取 $0.25 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 。

$$R_1 = \frac{\delta}{\lambda A} \quad (5)$$

其中, δ 为测点与加热面的距离 2 mm, A 为加热面面积 8 cm², λ 为紫铜导热系数 387.6 W/(m·K)。

得到热沉底部实际温度后, 由方程 (1)~(3) 计算热沉换热系数。图 5 对比了前疏后密叉排微细通道热沉与均匀分布叉排热沉^[9]的换热系数。发现采用前疏后密方式的热沉换热系数明显高于均匀分布的热沉, 在体积流量 200 mL/min 左右, 不加密热沉的

换热系数不到 $8000 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$ ，而前疏后密热沉换热系数超过 $12000 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$ ，提升超过 50%。

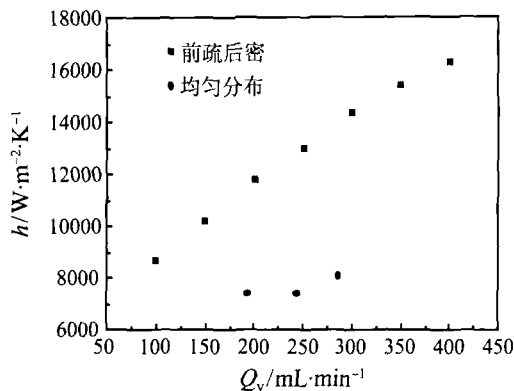


图 5 前疏后密热沉与均匀分布热沉换热系数对比图
Fig. 5 Comparison of heat transfer coefficient between frontal sparser and rear denser fin heat sinks and uniform heat sinks

这是因为前疏后密的肋片排布方式，抑制了热边界层沿肋片的发展，增强了出口附近流体的扰动，使热沉换热加强。而且前疏后密热沉采用紫铜材料，相对于不加密叉排热沉采用的黄铜，其导热系数更高，有利于热沉整体换热系数的提高。

实验中测量热沉进出口压差的测孔位于距离热沉约为 40 mm 的三通接头上，所以热沉实际压降 Δp 由下式计算：

$$\Delta p = \Delta p' - \rho g h_w \quad (6)$$

其中， $\Delta p'$ 为测量压差， ρ 为工质密度， h_w 为水头损失。

图 6 是修正后的热沉压降随体积流量的变化图。从图中可以看出热沉压降随着体积流量的增加而增加，且增幅也随之增加。在体积流量为 $100 \text{ mL}/\text{min}$ 时，压降 Δp 仅为 121.2 Pa ，体积流量升为 $400 \text{ mL}/\text{min}$ 时，压降 Δp 高达 2754.3 Pa 。

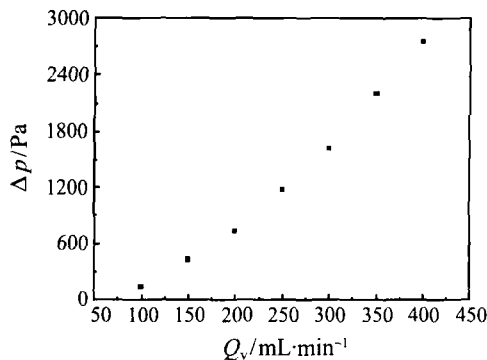


图 6 前疏后密热沉压降随体积流量变化图
Fig. 6 Pressure drop in frontal sparser and rear denser fin heat sinks varies with volume flow rate

由图 5 和图 6 不难发现，随着体积流量的增加，热沉换热系数增加的幅度逐步降低；热沉压降增加的幅度逐步升高。推测热沉存在换热极限，即在体积流量增加到一定情况下，换热系数将不随体积流量增加而增加。所以热沉更适用于在小流量下能够满足换热需求的场合。

3 实验与模拟对比

为验证数值模拟的正确性，对实验中前疏后密叉排微细通道热沉进行数值模拟，在热流密度 $30 \text{ W}/\text{cm}^2$ 情况下，将模拟结果与实验数据进行了比较。由图 7 和图 8 可以看出，模拟的换热系数和热沉压降随体积流量的变化趋势和实验结果相同，都随着体积流量的增加而增大。并且随着体积流量的增加，热沉的换热系数增幅在逐步降低，热沉压降的增幅则逐步升高。

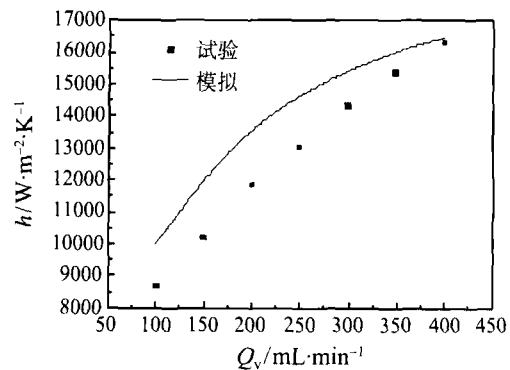


图 7 换热系数实验值与模拟值对比图
Fig. 7 Comparison of heat transfer coefficient between experiment and numerical simulation

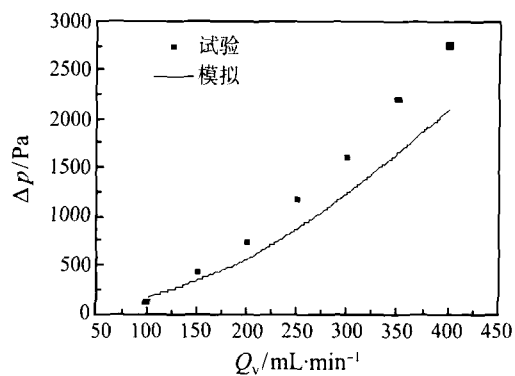


图 8 热沉压降实验值与模拟值对比图
Fig. 8 Comparison of heat transfer coefficient between experiment and numerical simulation

从图 7、8 中可以看出，换热系数的模拟值和实验值随流量变化趋势相同，模拟值与实验值最大不超过 20%。当流量较大时，模拟值与实验值相

差低于 5%。这主要是实验中制作工艺、粗糙度以及接触热阻等因素对换热系数的影响所导致的。模拟的热沉压降与实验结果相差均在 25%左右,这主要是实验中热沉压差的测点与模拟热沉进出口位置之间的存在水力损失,实验中加工工艺等因素导致损失水头计算存在偏差。

综上所述,实验结果验证了数值模拟中微细通道热沉的流动与传热特性。采用前疏后密的排布方式能提高叉排微细通道热沉的换热系数。

4 结 论

本文通过数值模拟和实验测试,研究了前疏后密叉排微细通道热沉的传热和流动特性,得到如下主要结论:

加密叉排微细通道热沉靠近出口的肋片,能提高换热系数。实验用前疏后密热沉换热的热流密度能达到 30 W/cm^2 ,且加热面温度不超过 60°C ,具有良好的换热效果。

前疏后密叉排微细通道热沉的换热系数和压降均随体积流量的增大而增大,但换热系数的增幅随体积流量增加而降低,热沉压降的增幅则随体积流量的增加而增加。

数值模拟与实验结果较为吻合,表明前疏后密叉排热沉有较好的应用前景。

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] 过增元. 国际传热研究前沿——微细尺度传热 [J]. 力学进展, 2000, 30(1): 1-6

Guo Zengyuan. Frontier of Heat Transfer-Microscale Heat Transfer [J]. Advances in Mechanics, 2000, 30(1): 1-6

[3] Rahman M M, Gui F J. Experimental Measurements of Fluid Flow and Heat Transfer in Microchannel Cooling Passages in a Chip Substrate [C]//Advances in Electronic Packaging, ASME EEP, 1993: 685-692

[4] Rahman M M, Gui F J. Design Fabrication and Testing of Microchannel Heat Sink for Aircraft Avionics Cooling [C]//Proceedings of the 28th Intersociety Energy Conversion Eng Conf. 1993: 1-6

[5] Kishimoto T. Cooling Characteristics of Diamond-Shaped Interrupted Cooling Fin For Cooling Characteristics of Diamond-Shaped Interrupted Cooling Fin for High-Power Lsi Devices [J]. Electronic Letters, 1987, 23(9): 456-457

[6] 邹江, 彭晓峰, 颜维谋. 微小交错流道散热块传热性能 [J]. 航空动力学报, 2008, 23(5): 845-850

ZOU Jiang, PENG Xiaofeng, YAN Weimou. Thermal Performance of Staggered Mini-Duct Heat Sinks [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(5): 845-850

[7] Fluent I. FLUENT 6.3 User's Guide [M]. 2003

[8] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 第 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 67-68

YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat Transfer [M]. 4th Edition. Beijing: Higher Education Press, 2006: 67-68

[9] 金漫丽. 高效微小通道热沉的设计及实验研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011

JIN Manli. Design and Experimental Study of High Performance Miniature Channel Heat Sinks [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011