

DOI: 10.3901/JME.2023.04.257

# 非均匀热流下功率模块微小通道热沉传热特性研究<sup>\*</sup>

高智刚<sup>1</sup> 尚小龙<sup>1</sup> 郑达文<sup>1</sup> 王天虎<sup>1</sup> 李朋<sup>1</sup> 白俊华<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学精确制导与控制研究所 西安 710072;

2. 西安石油大学石油工程学院 西安 710065)

**摘要:** 针对飞行器大功率电动舵机伺服系统功率模块内各器件发热损耗不同引起温度不均的问题,开展非均匀热流下微小通道热沉传热特性分析。依据功率模块三相桥电路的实际构型和工作特点,在数值计算方法和网格无关性验证基础上,利用FLUENT建立多种结构微小通道热沉的数值模型,对冷却通道在高、低热流区的典型周向传热特性及热沉总体性能进行探讨。研究发现,相同通道截面下,各通道圆周方向壁温呈非均匀分布,但不同通道的相同位置处局部传热系数较为一致;对于等流通面积的变截面冷却通道,通道数量及结构对局部传热影响突出。非均匀热流分布和通道流向、通道构型相匹配有助于改善基底均温性,渐缩通道构型和小截面多通道构型强化传热优势明显,具有较低热阻和较好均温性。

**关键词:** 功率模块; 电动伺服系统; 微小通道热沉; 非均匀热流; 传热特性; 结构优化

**中图分类号:** TK172

## Heat Transfer Characteristics Analysis of Microchannel Heat Sink on Power Module with Non-uniform Heating Dissipation

GAO Zhigang<sup>1</sup> SHANG Xiaolong<sup>1</sup> ZHENG Dawen<sup>1</sup> WANG Tianhu<sup>1</sup>  
LI Peng<sup>1</sup> BAI Junhua<sup>2</sup>

(1. Institute of Precision Guidance and Control, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072;

2. College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065)

**Abstract:** Aiming at solving the problem of non-uniform heating mode from power module caused by the different heating dissipation of components, the numerical model of microchannel heat sink with multi-structure on flight vehicle actuator is built considering the actual structure and working conditions of power module, and based on the validation test of numerical model and mesh independent, the circumferential heat transfer mechanism of microchannel at the typical non-uniform heating region and the overall thermal performance of heat sink are investigated respectively by FLUENT. The simulation results reveal that under the same cross-section shape of microchannels, the non-uniform temperature distribution of inner wall in microchannels is demonstrated circumferentially, and the identity of heat transfer coefficient of observed lines in the corresponding position of different channels is verified. Under the constant flow area, the channel number and geometric structure play an important role on local thermal performance, viz. the matched-degree of the effect factors such as the non-uniform heat flux distribution, the flow direction of coolant and the channel geometric structure can improve the temperature uniformity of substrate obviously. The channels with decrement cross section structure from high heat flux region to the lower one and the structure with more channels and smaller sizes, have the lower overall thermal resistance and better temperature uniformity of substrate.

**Key words:** power module; electrical servo system; microchannel heat sink; non-uniform heating; heat transfer characteristics; structure optimization

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(52007153, 52106112)和陕西省自然科学基金基础研究计划(2022-JM185)资助项目。20220308收到初稿, 20220618收修改稿

## 0 前言

电动舵机伺服系统是飞行器控制回路的最终输出执行机构,随着飞行器性能不断提升,电动舵机伺服系统也面临着功率损耗和热流密度大幅增加的难题。同时,由于伺服系统功率模块中驱动电路的三相桥结构和脉宽调制工作特点,其功率损耗与发热常处于上、下半桥不均匀的状态,引起了对外散热的非均匀热流。而非均匀热流对器件、芯片等的散热及均温性极为不利,会导致热应力和界面分层,造成其可靠性和电性能降低<sup>[1]</sup>。微小通道热沉冷却技术是现今散热技术中极具发展前景的一种,最早由 TUCKERMAN 等<sup>[2]</sup>于 1981 年提出,具有结构简单、紧凑、单位体积散热能力高等特点,可用于解决电动舵机功率模块等大功率器件的散热问题。将功率模块与微小通道热沉散热器紧密贴合,通过冷却介质在散热器通道内流动以带走功率模块所产生热量,从而达到散热目的。

很多学者对微小通道热沉的传热机理和传热性能开展了研究。XIA 等<sup>[3-4]</sup>发现热沉的微尺度效应对流动和换热有着相当大的影响。WU 等<sup>[5]</sup>同时考虑压降和换热效率的影响,提出了用微通道截面的长宽比来计算摩擦系数的方程式。STEVANOVIC 等<sup>[6]</sup>针对电源模块设计了一种集成的微小通道散热器,交叉歧管结构有效降低了压降和热沉表面温度梯度。揭贵生等<sup>[7]</sup>从理论上探索了层流范围内任意尺寸平板式水冷散热器的参数优化方法。ZHAO 等<sup>[8]</sup>对微型方形针翅结构热沉的流动与传热特性进行了数值研究,对比了针状及圆柱状翅片结构对热沉性能的影响。LENG 等<sup>[9]</sup>对双层微通道散热器进行了单目标和多目标优化,WU 等<sup>[1]</sup>提出了一种局部通道宽度优化的双层紧凑构型,均使得双层微通道散热器的热性能得以显著提高。李昊等<sup>[10]</sup>对液冷通道进行拓扑优化设计,有效降低了散热器最高温度。YUAN 等<sup>[11]</sup>设计了一种新型连通凹槽微通道并与其他几何构型进行对比,结果表明连接的沟槽可诱导流体沿不同温度梯度流动,有助于提高传热性能。WANG 等<sup>[12]</sup>发现通过优化冷却通道的形状、数量和冷却流体的入口速度等,可防止由于温升过高而导致的部件故障。

但是由于功率模块的结构和发热特点,微小通道热沉在非均匀热流影响下的基底温度均匀性仍存在风险。伺服电机的功率驱动多采用脉宽调制(Pulse width modulation, PWM)方式,通过控制绝缘栅双

极型晶体管(Insulated gate bipolar transistor, IGBT)等功率器件通断时间,实现对电机转动速度的调节。在应用中,常采用相较于全桥调制具有更低功耗的半桥调制方式,例如采用 H\_PWM-L\_ON 型半桥调制时,各相上半桥臂 IGBT 为 PWM 调制、下半桥臂 IGBT 恒导通,计算可得随着占空比的改变,上半桥臂的功率损耗发热量可达下半桥臂的 1.40~1.91 倍<sup>[13]</sup>。FENG 等<sup>[14]</sup>研究发现,两侧非均匀热流会导致明显传热恶化的发生,且会出现很大的温度梯度。而传热恶化会导致热量聚集、散热效率降低,过高的温度梯度则会造成高热应力,因此非均匀热流会对功率模块的可靠运行带来显著不利影响。而现今针对微小通道热沉在非均匀发热功率影响下的传热性能研究报道较少,大多数研究集中在等热流条件下通过改变热沉结构来达到优化散热的目的,对由功率模块实际工作状态引起的非均匀热流下微小通道热沉传热特性和传热机理,尚有待进一步探索。

因此,本文以大功率电动舵机伺服系统的功率模块非均匀发热与相应微小通道热沉散热为研究背景,对非均匀热流影响下微小通道的圆周传热特性和热沉的全局散热性能开展数值研究。同时,设计了多种具有相同流通总面积的微小通道热沉构型进行性能对比,为提升功率模块微小通道热沉的传热性能、改善功率模块的均温性提供理论支撑和工程指导。

## 1 微小通道热沉模型及计算方法

### 1.1 物理模型

依据实际功率模块的外形尺寸,建立热沉物理模型为  $L \times W \times H = 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ,热沉基底材料为无氧铜,冷却介质采用去离子水,其物性参数如表 1 所示。由于功率模块采用半桥调制模式,上半桥臂发热量约为下半桥臂的 2 倍,且上、下半桥的 IGBT 分别被均匀布置在功率模块两侧,故热沉基底热流采用  $q$ 、 $2q$  均分设置,设计冷却通道为矩形截面直通道结构,其示意图如图 1 所示。

表 1 冷却工质及热沉材料物性参数表

材料	密度 $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	热导率 $/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	比热容 $/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	动力黏度 $/(\text{Pa} \cdot \text{s})$
去离子水	998.2	0.6	4 182	$1.003 \times 10^{-3}$
无氧铜	8 978.0	387.6	381	—

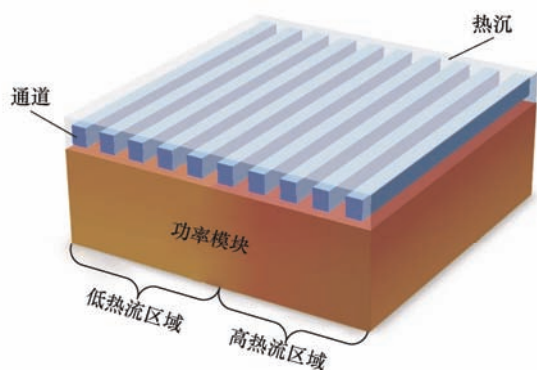


图1 功率模块热特征及微小通道热沉结构图

为便于表示非均匀热流分布区域及通道布置, 将基底划分为 I、II、III、IV 四个区域, 如图 2 所示。基底各区域热流分布、通道流动方向布置、尺寸及通道总个数如表 2 所示。

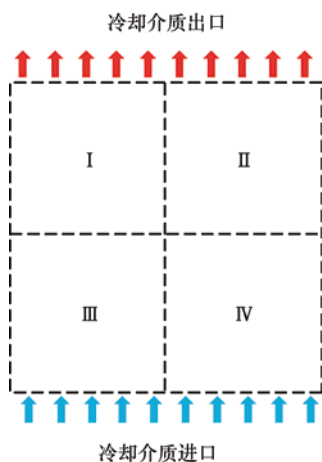


图2 热沉基底区域划分图

表2 各构型热流分布和通道参数

工况	热流/( $\times 10^5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ )				通道个数	通道尺寸/mm $\times$ mm	平均水力直径/mm	进口雷诺数
	I	II	III	IV				
Case 0	1.8	3.6	1.8	3.6	10	3 $\times$ 2.5 ( $i=0, 1, \dots, 9$ )	2.727	950
Case 1	1.8	1.8	3.6	3.6	10	3 $\times$ 2.5 ( $i=0, 1, \dots, 9$ )	2.727	950
Case 2	3.6	3.6	1.8	1.8	10	3 $\times$ 2.5 ( $i=0, 1, \dots, 9$ )	2.727	950
Case 3	1.8	3.6	1.8	3.6	20	3 $\times$ 1.25 ( $i=0, 1, \dots, 19$ )	1.765	615
Case 4	1.8	3.6	1.8	3.6	16	3 $\times$ (2.5-0.125 $\times i$ ) ( $i=0, 1, \dots, 15$ )	1.990	693

各构型的通道截面形状如图 3a 所示, 设置通道  $C_i$  (从左到右依次为  $C_1 \sim C_{10}/C_{20}/C_{16}$ ) 沿圆周方向的观测线定义如图 3b 所示, 表征热沉基底均温性的基底观测线  $B_i$  如图 3c 所示, 其中热沉基底各观测线间距  $W_b$  和  $W_s$  分别为 5 mm 和 2.5 mm。在此基础上, 可探究在非均匀热流影响下, 具有相同流通总面积

微小通道的布置方向、通道数量、通道截面尺寸等因素对热沉传热性能的影响规律。

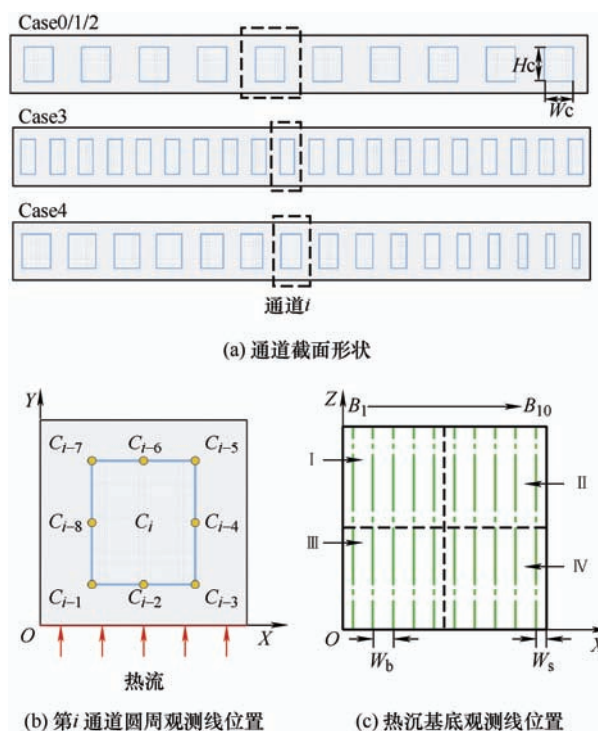


图3 通道截面形状、通道及基底观测线位置示意图

## 1.2 基本假设

为了简化分析, 突出非均匀传热特性, 模型所做简化如下。

- (1) 通道内工质为单相、不可压缩且层流流动。
- (2) 忽略热沉与环境间的散热。
- (3) 无氧铜与去离子水为常物性。
- (4) 忽略体积力和黏性热的影响。
- (5) 高热流区和低热流区的热流比为 2, 忽略二者在功率模块内的传导过程。

## 1.3 控制方程及边界条件

在流体域求解连续、动量、能量守恒方程, 在固体域求解能量方程。

流体域的控制方程为

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

$$\rho_f (\mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V}) = -\nabla P + \nabla (\mu_f \nabla \mathbf{V}) \quad (2)$$

$$\rho_f c_{p,f} (\mathbf{V} \cdot \nabla T_f) = k_f \nabla^2 T_f \quad (3)$$

固体域的能量方程如下

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

式中,  $\mathbf{V}$  为冷却工质的速度矢量 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $\rho_f$  为冷却工质密度 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $P$  为流动压力 (Pa),  $c_p$  为流体定压比热 ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  $\mu_f$  为冷却工质动力黏度 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ),  $k_f$  和  $k_s$  分别为流体和固体的导热系数 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ),

$T_f$  和  $T_s$  为流体和固体的温度(K)。

依据功率模块发热特性, 热沉基底采用非均匀热流边界, 具体参数如表 2 所示; 冷却通道进口采用速度边界  $u = 0.35 \text{ m/s}$ , 进口温度为  $283 \text{ K}$ ; 出口采用自由出流边界, 外界为大气压; 其余壁面均采用无滑移壁面边界。

#### 1.4 网格无关性验证及计算模型验证

为保证计算精度和高效性, 采用六面体结构化网格对计算区域进行划分, 网格图如图 4 所示。边界层第一层厚度为  $0.01 \text{ mm}$ , 边界层层数为 10 层。使用高、低热流区交界处的 2 个矩形直通道开展网格独立性试验, 网格数分别为 15.8 万、26.4 万和 43.5 万, 通过对比不同网格下两通道的温度沿程分布, 26.4 万与 43.5 万两种网格的计算结果差异在  $0.2\%$  以内, 故为兼顾计算精度和计算时间, 选择网格密度为 13.2 万/通道, 开展后续非均匀热流下功率模块微通道热沉传热特性研究。其中, 流体域最大网格尺寸为  $0.007 4 \text{ mm}^3$ 。

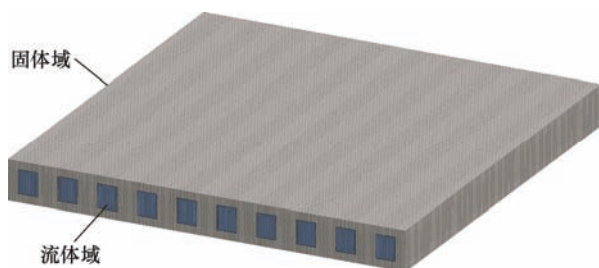


图 4 计算区域网格图

依据本文所建立数值模型及计算方法, 对经典微通道热沉试验数据<sup>[15]</sup>进行验证, 计算值与试验值对比结果如图 5 所示。可以看出, 二者吻合良好, 温度最大差值在  $2.7 \text{ K}$  以内, 故本文采用的数值模型和求解方法具有较好的计算精度。

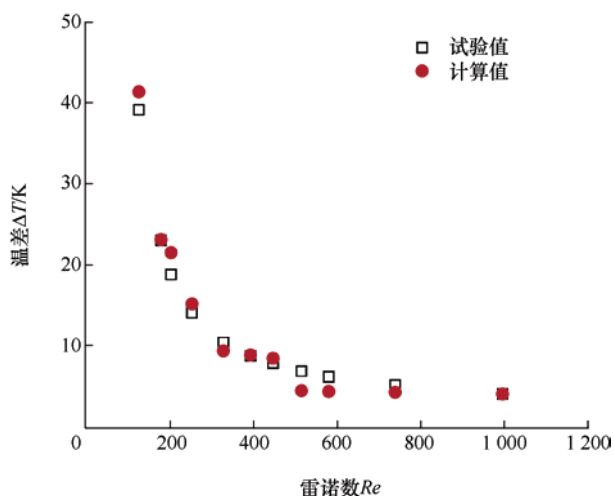


图 5 计算值与试验值对比图

#### 1.5 参数定义

通道局部传热系数, 可用来评价热沉各通道内的传热强弱

$$\alpha_i = \frac{q_{wi}}{T_{wi} - T_{fi}} \quad (5)$$

式中,  $q_{wi}$  为通道壁面局部热流;  $T_{wi}$  为通道内壁面局部温度,  $T_{fi}$  为流体局部温度。

通道进口雷诺数

$$Re_{in} = \frac{\rho_{in} u_{in} D_h}{\mu_{in}} \quad (6)$$

式中,  $\rho_{in}$ 、 $u_{in}$  和  $\mu_{in}$  分别为进口处流体密度、速度和动力黏度,  $D_h$  为通道水力直径。

热沉的全局努塞尔数为

$$Nu = \frac{\alpha_m D_h}{k_f} \quad (7)$$

式中,  $\alpha_m$  为平均传热系数。

热阻作为表征微通道热沉热性能的重要参数, 定义为

$$R = \frac{T_{max} - T_{min}}{q_w A_b} \quad (8)$$

式中,  $q_w$  为基底加热热流,  $A_b$  为基底加热面积。

热沉总体均温性可由基底最大温差来表征

$$\Delta T = T_{max} - T_{min} \quad (9)$$

## 2 结果及分析

### 2.1 基准工况通道局部传热性能研究

对基准工况 Case 0 低热流区域通道  $C_1$  及高热流区域通道  $C_{10}$  的传热特性进行对比分析。由图 6 可知, 在功率模块非均匀热流的作用下, 通道  $C_1$

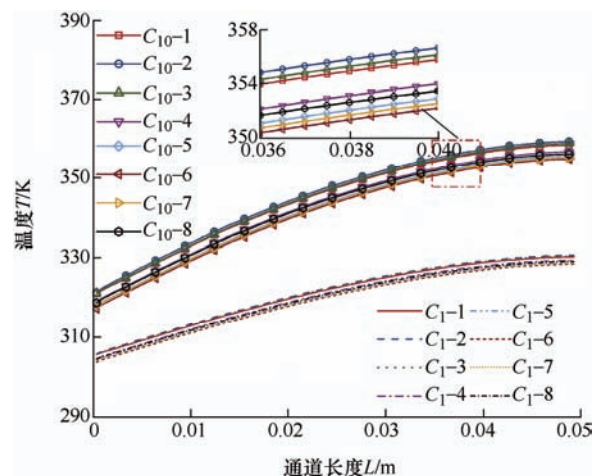


图 6 Case 0 通道  $C_1$  和通道  $C_{10}$  各观测线温度

及  $C_{10}$  中的壁温沿圆周方向均呈非均匀分布。同一通道内, 最高温度和最低温度分别发生在靠近和远离热沉基底的中间观测线位置( $C_{i-2}$  和  $C_{i-6}$ ), 处于高热流区域的通道  $C_{10}$  更为明显, 该通道内观测线间的温度最大差值可达 4.5 K。同时, 通道  $C_1$  和通道  $C_{10}$  各圆周位置的温差随着通道被不断加热呈单调增加趋势, 两通道间最大温差在 28.6 K 左右。

由图 7 可知, 各通道圆周方向局部传热系数沿通道管长均呈现下降趋势。虽然各通道圆周方向温度非均匀分布且通道间差异较大, 但不同通道相同观测位置处的局部传热系数较为一致。矩形截面夹角处观测线( $C_{i-1}/C_{i-3}/C_{i-5}/C_{i-7}$ )的局部传热系数明显低于壁面中点处观测线( $C_{i-2}/C_{i-4}/C_{i-6}/C_{i-8}$ )的对应值, 说明矩形截面结构的夹角抑制了传热强化, 揭示了通道截面几何形状对通道局部传热的影响。

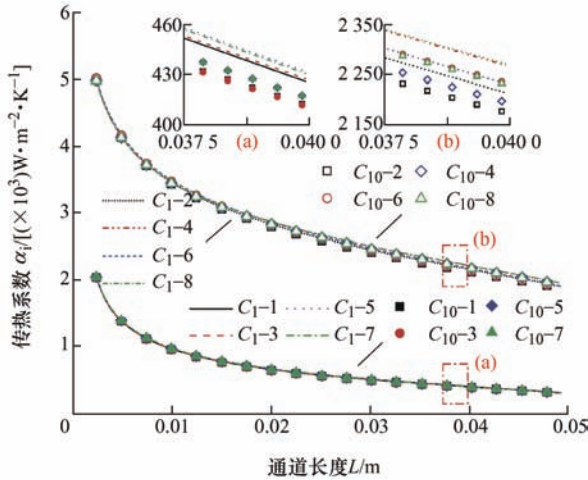


图 7 Case 0 通道  $C_1$  和通道  $C_{10}$  各观测线传热系数

根据图 8 可知, 由于 Case 0 中通道从低热流区(通道  $C_1 \sim C_5$ )到高热流区(通道  $C_6 \sim C_{10}$ )均布排列, 故热沉中各通道平均温度呈单调递增趋势, 相邻通道间最大温差发生在高低热流交界区域的通道  $C_5$  和  $C_6$  处。虽然各通道内冷却工质平均温度的最大温差达 23.1 K, 但各通道在高、低热流区域的平均传热系数则相差不大, 显示在不同热流下, 相同构型各通道的传热性能较为一致。

观察热沉基底温度分布, 可对热沉均温性进行分析。图 9 可见, 热沉基底的最高温差约为 53.7 K, 最低、最高温度分别位于低热流区  $B_1$  观测线入口位置和高热流区  $B_{10}$  观测线出口位置。相邻观测线间最大温差仍出现在高、低热流交界区域, 可达约 7 K( $B_6-B_5$ ), 而高低热流区两侧随着远离两种热流的交界区域, 相邻观测线间温度变化逐渐变小, 到两端时( $B_2-B_1$  和  $B_{10}-B_9$ )最大温度变化小于 1.3 K。

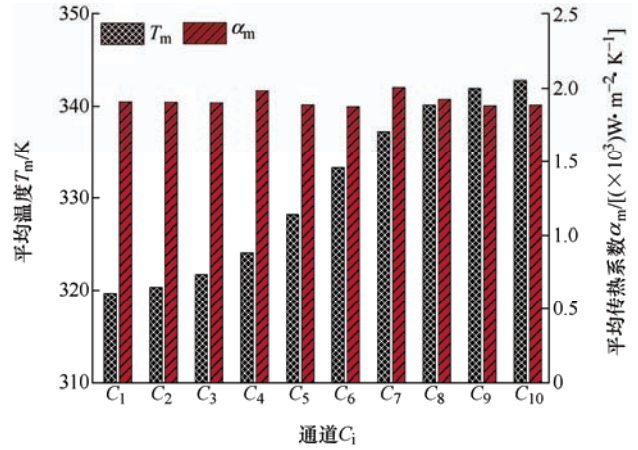


图 8 Case 0 热沉各通道平均温度及平均传热系数

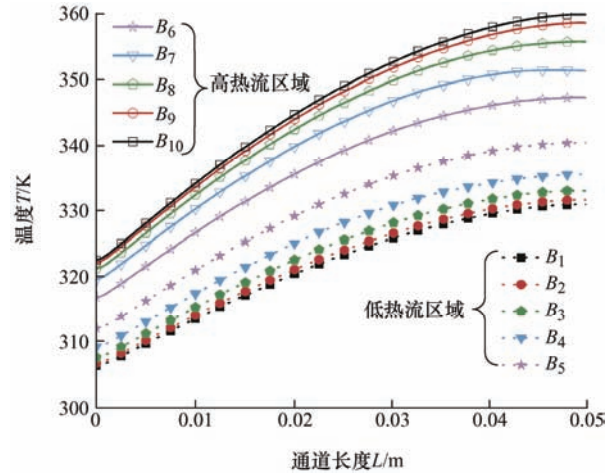


图 9 Case 0 热沉基底各观测线温度

## 2.2 各工况局部传热性能对比

对于总流通面积相同, 通道布置方式、通道尺寸及通道数不同的 Case 1 至 Case 4 分别与 Case 0 进行通道局部传热性能对比, 如图 10~13 所示。其中, Case 3 和 Case 4 中微通道截面形状仍为矩形, 且通道高度与 Case 0 相同, 仅通过调整通道宽度来实现不同通道数的布置。

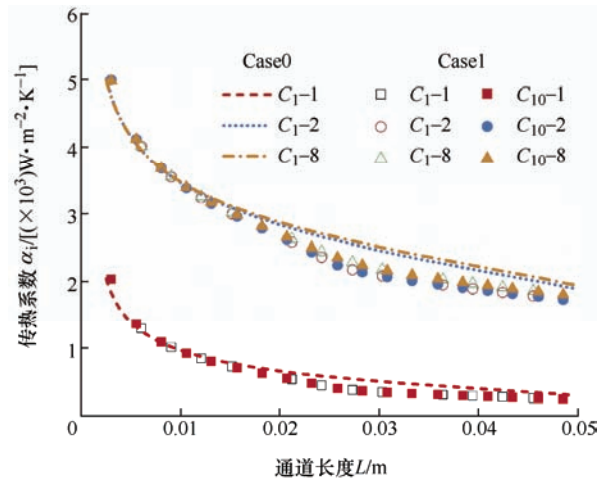


图 10 Case 1 与 Case 0 观测线传热系数对比

图 10 显示在不同热流布置方式下, Case 1 各观测线传热系数较 Case 0 有所降低, 表明冷却通道设置为由高热流向低热流方向流动时传热效率较低。典型通道  $C_1$  和  $C_{10}$  在高热流区传热系数与 Case 0 相比基本一致, 在低热流区传热系数相对降低。在高、低热流交界面附近处, Case 1 与 Case 0 对应观测线差别较大, 预示了此处对流传热结构的改变。

对比如上分析, 由图 11 可知, Case 2 采用由低热流区向高热流区的通道流动方向设计时, 传热效率则高于 Case 0, 最大差值仍发生在高低热流交界区域。此外, Case 1 和 Case 2 中各圆周观测线分布趋势与 Case 0 差别不大, 说明对于相同通道结构而言, 沿通道圆周的传热分布规律较为一致, 且基底非均匀热流分布对局部传热系数的影响较小。

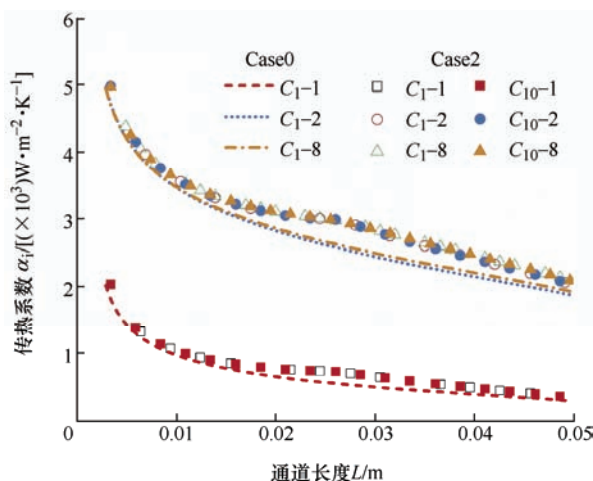


图 11 Case 2 与 Case 0 观测线传热系数对比

如图 12 所示, 小截面多通道设计的 Case 3 构型传热系数明显优于 Case 0, 但由于通道的高宽比发生变化, 通道宽度变窄造成通道底面积较小换热能力受限, 使得位于底面热流中心的观测线 2 传热系数略低于 Case 0 相应观测线, 但观测线 1 和 8 传热优势明显。由此可以看出, 通道沿圆周方向的局部传热系数与其截面形状和尺寸相关。相同现象也出现在 Case 4 的  $C_{16-2}$  观测线上, 因此, 可以推断窄截面矩形通道的底部中心区域传热系数较低。

由图 13 可见, 对于各通道截面尺寸相同的等截面基准构型 Case 0 和通道截面尺寸从低热流区到高热流区逐渐缩小的渐缩通道构型 Case 4 而言, 两者  $C_1$  通道中圆周方向传热系数差别较小。

但是高热流区  $C_{16}$  通道却与 Case 0 的通道圆周传热系数差异明显, Case 4 的小截面通道  $C_{16}$  较 Case 0 的通道传热系数在观测线 1 和 8 处提升明显, 相应传热系数增加约  $10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , 而受通道宽度缩小影响,  $C_{16-2}$  观测线的传热系数较 Case 0 对应观测线显著降低。可见相同流通面积下, 渐缩通道构型各通道强化传热优势明显, 但底部较窄的通道可能会引起较小的局部传热系数, 这与图 12 分析结果一致。

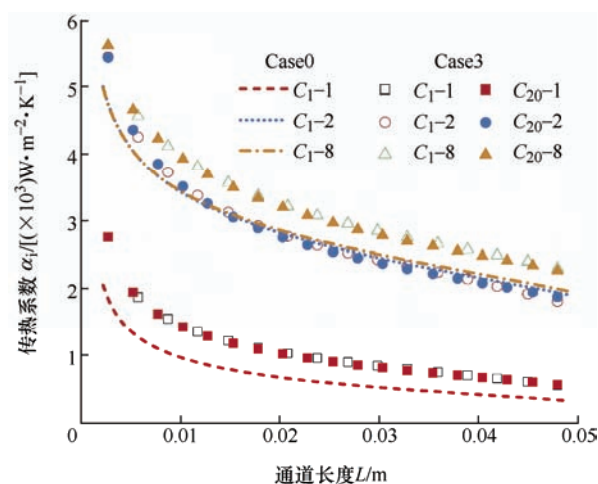


图 12 Case 3 与 Case 0 观测线传热系数对比

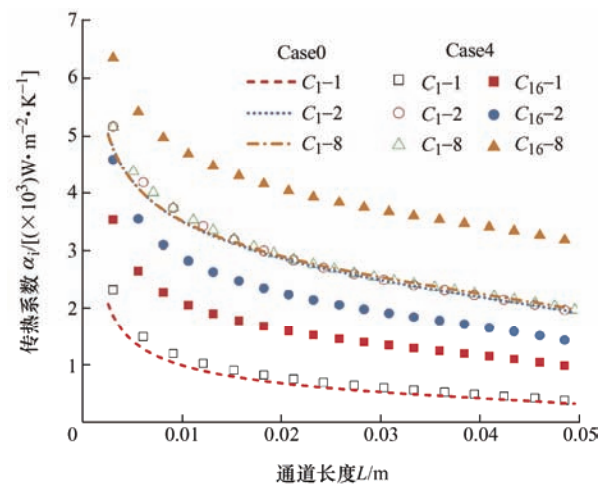


图 13 Case 4 与 Case 0 观测线传热系数对比

由图 14 可见, 对于各通道截面积不变的几种构型 (Case 0~Case 3) 而言, 虽然高低热流区分布和截面尺寸有所不同, 但各通道的平均传热系数变化不大, 其中 Case 3 工况各通道传热系数最高。而渐缩截面构型 Case 4 中各通道平均传热系数随着水力直径的减小而单调上升, 且增长幅度在高热流区域更为明显。这表明在等流通面积前提下, 通道数量及结构对通道局部传热的影响突出, 故优化通道几何构型对热沉通道性能提升作用明显。

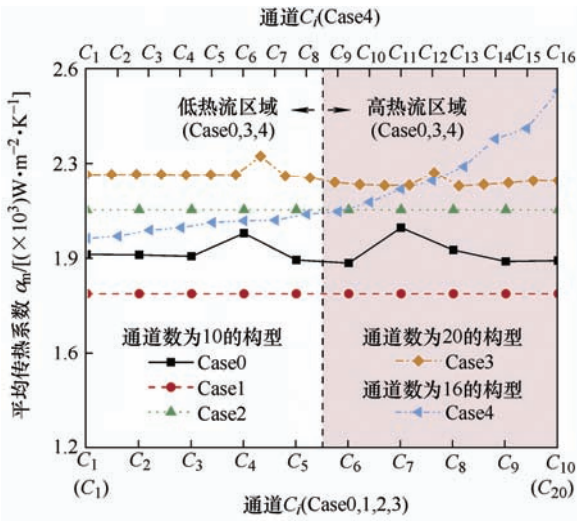


图 14 平均传热系数通道间变化

### 2.3 各工况热沉传热性能对比

对各工况的热沉全局性能参数(热阻  $R$ 、 $Nu$  和基底最大温差  $\Delta T$ )进行对比分析。根据图 15 可知,在本文计算工况中,对于不同布置方向各工况(Case 0/Case 1/Case 2),最大热阻值发生在 Case 0 工况,通道布置方式为冷却工质由高热流区流向低热流区的 Case 1 工况热阻值最小,但  $Nu$  也相应减小。变通道截面及数量的工况中(Case 3/Case 4),热阻值减小明显,尤其是 Case 3 中  $Nu$  显著增大,说明该构型下热沉具有较好的传热性能。

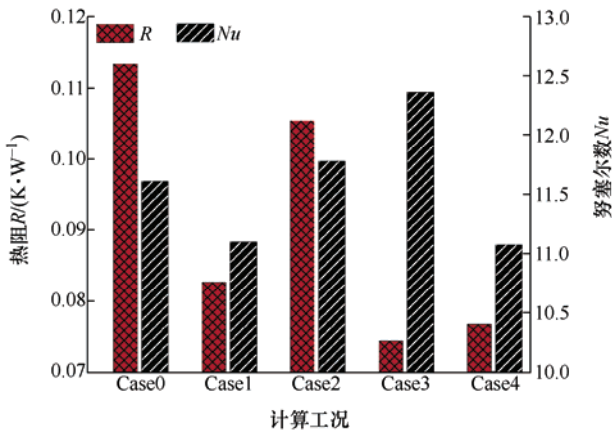


图 15 热阻及努塞尔数

在工程实际中,热沉对功率模块的降温效果及均温性,同样也值得关注。如图 16 可见,Case 1 中各观测线自身的线上温差  $\Delta T_{Bi}$  较小,各观测线间的温差也较为一致,而 Case 2 观测线上的温差最大。Case 0、Case 3 和 Case 4 各基底观测线温差沿低热流到高热流方向呈上升趋势,在高低热流交界区温差增大更为明显,但温差值仍小于 Case 2。

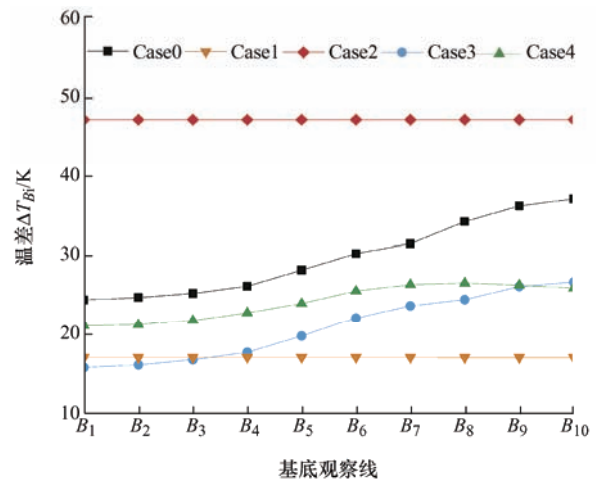


图 16 基底观测线最大温差图

同样结论可由图 17 观察得出,在相同通道构型的不同流通方向布置方式下,Case 1 相对于 Case 0 和 Case 2 均温性更为优异,Case 0 和 Case 2 中热沉基底最大温差分别可达 37.4 K 和 47.6 K,而 Case 1 中基底最大温差可控制在 17.4 K 以内。同时可知,在相同非均匀热流布置下,Case 3 和 Case 4 相对于 Case 0 在均温性方面有明显改善。

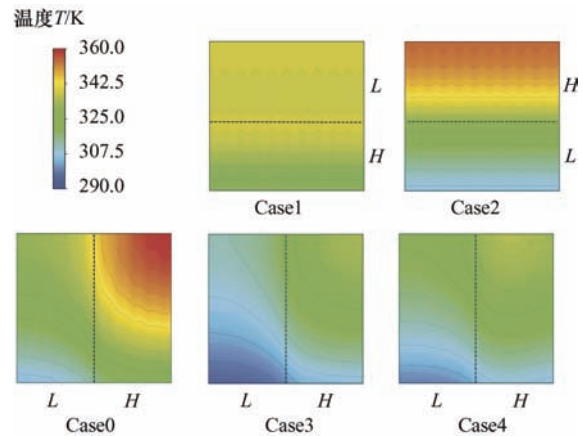


图 17 热沉基底温度云图

## 3 结论

针对功率模块非均匀热流影响,开展了不同构型和布置方向微小通道热沉的通道圆周方向局部传热性能和热沉总体性能研究,得到主要结论如下。

(1) 在非均匀热流作用下,高、低热流区域不同通道的相同位置处传热系数较一致,通道截面几何形状对截面圆周方向的局部传热存在明显影响。

(2) 相同通道构型采用不同热流布置方式时,基底非均匀热流分布对局部传热系数影响较小,但局部传热系数在高低热流交界区域存在差异。

(3) 等流通面积微小通道均匀布置状态下, 通道的数量及结构对通道局部传热特性和热沉综合传热性能均影响突出。

(4) 热沉基底温度均匀性方面, 冷却工质由高热流区流向低热流区的构型温差最小, 小截面多通道和渐缩通道构型也可明显改善基底均温性。

### 参 考 文 献

- [1] WU Ruikang, ZHANG Xinfeng, FAN Yiwen, et al. A Bi-Layer compact thermal model for uniform chip temperature control with non-uniform heat sources by genetic-algorithm optimized microchannel cooling[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, 136: 337-346.
- [2] TUCKERMAN D B, PEASE R F W. High-performance heat sinking for VLSI[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 1981, 2(5): 126-129.
- [3] XIA Guodong, LÜ Yuanzheng, CHENG Lixin, et al. Experimental study and dynamic simulation of the continuous two-phase instable boiling in multiple parallel microchannel[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 138: 961-984.
- [4] 王少锋, 夏国栋, 吕远征, 等. 混合比例对复合纳米流体在微通道内的流动换热特性影响研究[J]. *工程热物理学报*, 2020, 41(7): 1689-1693.  
WANG Shaofeng, XIA Guodong, LÜ Yuanzheng, et al. Effect of mixing ratio on the flow and heat transfer characteristics of hybrid nanofluids in microchannels[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2020, 41(7): 1689-1693.
- [5] WU H Y, CHENG Ping. Friction factors in smooth trapezoidal silicon microchannels with difference aspect ratios[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46(14): 2519-2525.
- [6] STEVANOVIC L D, BEAUPRE R A, GOWDAA V, et al. Integral micro-channel liquid cooling for power electronics[C]// 25th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Palm Springs, CA, NewYork: IEEE, 2010: 1591-1597.
- [7] 揭贵生, 孙驰, 汪光森, 等. 大容量电力电子装置中板式水冷散热器的优化设计[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(2): 99-105.  
JIE Guisheng, SUN Chi, WANG Guangsen, et al. Optimization design of water-cooled heat sink applied to large-capacity power electronic equipment[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(2): 99-105.
- [8] ZHAO Jin, HUANG Shanbo, GONG Liang, et al. Numerical study and optimizing on micro square pin-fin heat sink for electronic cooling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 93: 1347-1359.
- [9] LENG Chuan, WANG Xiaodong, WANG Tianhu, et al. Optimization of thermal resistance and bottom wall temperature uniformity for double-layered microchannel heat sink[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 93: 141-150.
- [10] 李昊, 丁晓红, 景大雷. 液冷通道分布优化设计的仿真和试验研究[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(10): 198-206.  
LI Hao, DING Xiaohong, JING Dalei. Experimental and numerical investigation of fluid cooling channel layout designed by topology optimization[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(10): 198-206.
- [11] YUAN Ding, ZHOU Wei, FU Ting, et al. Heat transfer performance of a novel microchannel embedded with connected grooves[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 34(6): 380-390.
- [12] WANG Lei, JIA Zhenyuan, ZHU Yuqin, et al. Flow field and temperature field of water-cooling-type magnetic coupling[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 32(4): 71-82.
- [13] 高智刚, 李朋, 周军, 等. 无刷电动舵机功率驱动电路发热特性分析[J]. *西北工业大学学报*, 2016, 34(1): 153-158.  
GAO Zhigang, LI Peng, ZHOU Jun, et al. Thermal characteristics analysis of power driver for brushless electromechanical actuator[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2016, 34(1): 153-158.
- [14] FENG Shuai, YAN Yunfei, LI Haojie, et al. Thermal management of 3D chip with non-uniform hotspots by integrated gradient distribution annular-cavity micro-pin fins[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 182: 116132.
- [15] LEE P S, HO J C, XUE H. Experimental study on laminar heat transfer in microchannel heat sink[C]// 8th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, SAN DIEGO, CA, NewYork: IEEE, 2002: 379-386.

作者简介: 高智刚(通信作者), 男, 1982 年出生, 博士, 副教授, 硕士生导师。主要研究方向为飞行器高性能电动伺服技术。  
E-mail: gaozhigang@nwpu.edu.cn