材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.017

微针鳍散热器结构参数模拟及优化

王志敏[1]，叶贵根[1]*，薛世峰[1]，巩　亮[2]

（中国石油大学(华东)1. 储运与建筑工程学院；2. 新能源学院，山东 青岛 266580）

摘　要： 通过数值模拟研究了交错式微针鳍散热器的散热效应，分析了针鳍阵列间距和高度对散热器壁温和压降的影响。结果表明，压降随针鳍间距和针鳍高度的减小而呈非线性增加；壁温随针鳍间距的增大而上升，随针鳍高度的增加则呈现出波动趋势。基于上述研究，进一步利用响应表面近似法对微针鳍的横向间距、纵向间距和高度进行了优化，优化后压降最大可降低 61.11%。

关键词： 微针鳍散热器；热点；微流体冷却；参数优化

中图分类号： TK121　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0535－07

Simulation and Optimization of Structural Parameters of the Micro Pin-Fin Radiator

WANG Zhimin[1], YE Guigen[1], XUE Shifeng[1], GONG Liang[2]

(China University of Petroleum 1. College of Pipeline and Civil Engineering; 2. College of New Energy, Qingdao 266580, CHN)

Abstract: The heat dissipation effect of the interleaved micro-pin-fin heat sink was studied by numerical simulation, and the influence of the array spacing and height of the pin fins on the wall temperature and pressure drop of the heat sink was studied. Experimental results indicate that the press drop increases nonlinearly with the decreasing array spacing and height of the pin fins, while the wall temperature increases with the increase of the pin fin spacing, but it shows a fluctuation trend with the increase of the pin fin height. Based on the above research, it further optimizes the lateral spacing, longitudinal spacing and height of the microneedle fins with the method of response surface approximation. The pressure drop can be reduced by a maximum of 61.11% after optimization.

Key words: micro pin-fin heat sink; hot spot; microfluidic cooling; parameter optimization

0　引言

随着电子机械系统的不断发展，芯片系统功率不断提高，但同时也导致系统内部发热量过大。除了产生较大的平均热通量外，系统中还可能存在比平均热通量高很多倍的局部热点，这使得传统的风冷散热器已经无法满足散热需要。19 世纪 80 年代，Tuckerman 等[1]提出了使用微流体作为冷却剂的微通道散热器，为研究新的冷却技术带来了思路。

随着现代电子设备散热要求的提高以及微尺度制造技术的飞速发展，微通道散热器不只局限于平直微通道，许多高效的微通道结构被人们制造和研究，如微针鳍、回流腔、沟槽和肋片等结构[2-6]。微针鳍是目前比较流行的一种微通道结构，这种结构虽然增强了传热，但同时也导致模型内部压降显著增加。Kosar[7]和 Brunschwiler[8]等设计了相关实验，研究了圆柱针鳍翅片的排列方式(交错和平行)对模型内部压降的影响。Koz[9]和 Tullius[10]等对圆柱形针鳍阵列进行了参数化模拟，分析了针鳍内部的热和水力性能。Daniel 等[11-12]针对散热器中的热点问题开发了一种非均匀针鳍密度模型，通过增加背部针鳍的密度强化散热，从而达到消除高热量热点的目的。

收稿日期：2020－04－17.

基金项目：国家自然科学基金项目(11972376)；山东省自然科学基金项目(ZR2019MA007)；中央高校基本科研专项基金项目(19CX02032A).

* **通信作者：**叶贵根　　**E-mail：** yegg@upc.edu.cn

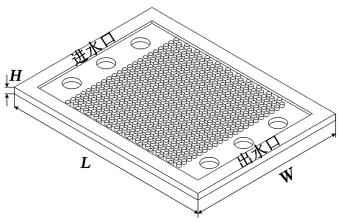
微通道散热器参数的优化对于芯片的降温控压是极为重要的，众多学者在这方面开展了大量研究。Shi 等[13-14]应用多目标进化算法，以最小化热阻和泵浦功率为目标，对矩形微通道进行优化，得到了其最佳结构参数。Hadad 等[15]采用 JAVA 算法和 NSGA-Ⅱ的现代优化算法对微通道散热器的多个参数进行了优化。Rao 等[16]使用响应面方法（Response Surface Methodology，RSM）和 JAVA 算法最大程度地减少矩形和梯形平行微通道散热器的热阻和泵浦功率。

综上可知，当前对微通道的优化设计研究主要集中在平直微通道的结构优化上。针对具有热点的微针鳍散热器的多参数优化研究尚处于起步阶段，其中，含有热点的微针鳍散热器的针鳍参数对热和液压性能的影响研究鲜有涉及。本文在前人研究的基础上，对具有热点的圆柱形微针鳍的散热器进行研究。通过数值模拟研究针鳍参数（横向间距、纵向间距和针鳍高度）对散热器温度和压降的影响，并利用多目标优化方法对针鳍的参数进行优化。

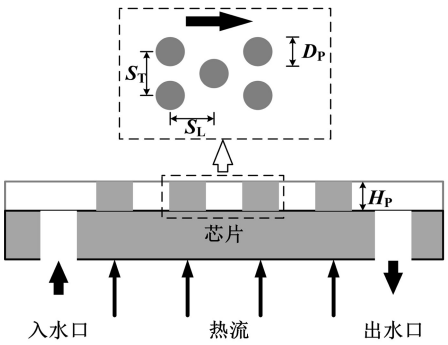
1 数值模型建立以及参数设置

1.1 数值模型及边界条件

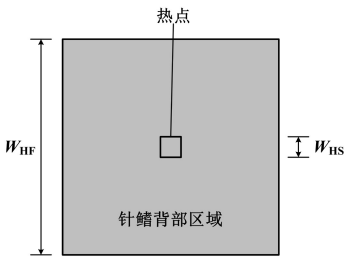
本文采用的微针鳍结构如图 1 所示，其中图 1(a)为模型整体示意图，图 1(b)为模型的针鳍排列方式示意图。该微针鳍结构拥有三个进水口和三个出水口，在针鳍区域的背部施加热流密度（如图 1(c)所示），其中，中心区域为热点区域。热量通过



(a) 整体模型图



(b) 针鳍排列示意图



(c) 针鳍背部热流施加区域示意图

图 1 微针鳍结构数值模型

热传导到达模型背部针鳍区域，冷却剂通过三个进水口进入模型内部，流经针鳍区域时通过热量交换带走热量，最后从出水口流出。本文设定针鳍的横向间距（S_T）和纵向间距（S_L）范围为 0.375～0.525 mm，针鳍高度（H_P）的范围为 0.1～0.3 mm。其他参数值在表 1 中列出。

模拟过程中遵循以下假设：

(1)流动是稳定的层流并且不可压缩；

(2)不考虑辐射换热；

(3)不考虑粘性耗散。

微通道散热器材料为硅，冷却剂为去离子水。硅的导热系数 k_{Si} 为温度 T 的函数[11]：

$$k_{Si}=2\,122.1-16.765T+4.818\,3\times10^{-2}T^2-4.744\,2\times10^{-5}T^3 \quad (1)$$

其中，温度单位为 K，公式使用范围为 280～373 K。硅和去离子水的其余热物理参数如表 2 所示。

表 1 模型几何参数 单位：mm

参数	L	W	H	D_P	W_{HF}	W_{HS}
数值	16	12	0.3	0.3	10	0.5

表 2 去离子水和硅的热物理参数

性能	硅	去离子水
密度/(kg·m^{-3})	2 330	998.2
热传导率/(W·m^{-1}·K^{-1})	由式(1)计算	0.6
比热容/(J·kg^{-1}·K^{-1})	700	4 182
粘度/(kg·m^{-1}·s^{-1})	—	0.001 003

三个进水口设置为速度入口，速度均为 1 m/s（对应流量为 67.86 mL/cm^3），温度为 294.15 K（21 ℃）。出水口设置为压力出口，为常温大气压。在背景区域施加恒定热流密度，为 250 W/cm^2；热点区域热流密度为背景区域的两倍，即 500 W/cm^2。其余壁面均设置为绝热壁面。

1.2 网格划分及网格独立性分析

微通道散热的关键在于破坏边界层流动，因此

流体与针鳍接触区网格的划分至关重要。本文通过设置边界层来细化固-液接触区网格，然后使用混合方法完成不同设计的网格划分，其中流体域和固体域分别与六面体和四面体网格混合。为了减小网格尺寸对计算结果的影响，对于不同工况，固液接触区的边界层厚度方向的网格层数均固定为 3 层，部分网格如图 2 所示。

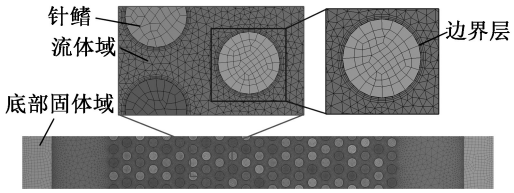


图 2　网格划分示意图

网格的数量对计算结果是否精确有着重要的影响。由于该区域结构复杂、针鳍数量较多，采用传统的网格独立性检验方法无法满足精度要求。本文主要在针鳍区域处减小了平均网格的大小，并使用文献[11]中的标准进行网格独立性检验，即：

$$C_i=\left|\frac{N^j-N^{j+1}}{N^j}\right|<5\times10^{-3} \tag{2}$$

式中，C_i 为网格独立性检验指数，N^j 为比较变量的计算值，N^{j+1} 为下一个精细网格中得到的计算值。在本文中对常规模型（$S_T=S_L=450\ \mu m$，$H_P=200\ \mu m$）进行网格独立性分析，并选用模型内部最高温度作为检验标准，即网格独立性检验指数设为 C_T。

表 3 列出了三个选定网格的网格独立性研究结果。根据这些结果，使用网格 2 的设置来平衡求解精度和计算时间。

表 3　网格独立性研究结果

网格	网格数目	模型内部最高温度	
		T_{max}/K	C_T
1	1 100 000	334.349	9.3×10^{-3}
2	2 783 502	331.25	2.2×10^{-3}
3	3 751 280	330.507	—

运用 ANSYS FLUENT 17.0 进行数值仿真。采用迭代方法 SIMPLEC 求解。运用二阶迎风格式求解动量和能量方程。通过设定不同的残差收敛标准，对模型计算进行评估。当能量残差达到 10^{-6} 时，计算时间和收敛情况良好，再增加收敛精度，计算机运行时间过长，而模拟结果并没有明显的提高。故设定收敛精度为 10^{-6} 时认为数值解收敛。

2　模拟结果与分析

2.1　横向间距对温度和压降的影响

图 3 给出了当纵向间距和针鳍高度保持不变时（$S_L=450\ \mu m$，$H_P=200\ \mu m$），横向间距 S_T 对微通道散热器热和水力性能的影响。从图中可以看出进出口压降 Δp 随着 S_T 的增大而呈非线性减小。这是因为 S_T 的增大能大大降低冷却剂的流动阻力，使冷却剂更好地在模型内部流动。模型内部最高温度 T_{max} 则随着 S_T 的增大呈先降低后上升的趋势，在 $S_T=400\ \mu m$ 时温度最低，为 328.8 K。当 S_T 由 375 μm 增加到 400 μm 时，内部最高温度出现大幅降低，为了分析其中缘由，提取了针鳍区域中间沿 x 方向冷却剂温度分布图，如图 4 所示。从图 4 可以看出，当冷却剂刚进入针鳍区域时，两者温度差异不大。但是，当冷却剂沿 x 方向流动时，$S_T=375\ \mu m$ 的模型内部冷却剂的温度上升速度却比 $S_T=400\ \mu m$ 的更快。冷却剂温度的升高导致冷却效率下降，故而模型内部具有更高的温度。

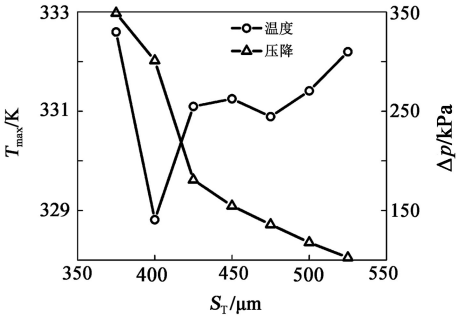


图 3　横向间距对温度和压降的影响

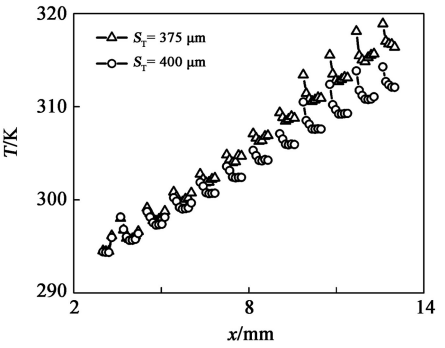


图 4　模型内部 x 方向冷却剂温度分布图

图 5 进一步给出了不同横向间距下模型内部沿 x 方向的温度和速度矢量分布。对比图 5 中温度图和流线图可以看出，随着横向间距的增加，冷却剂在针鳍间的流动速率逐渐下降，使得冷却剂的冷却效率进一步降低。在本文研究范围内，压降最高降低

了 70.7%，温度最高降低了 3.4 K。

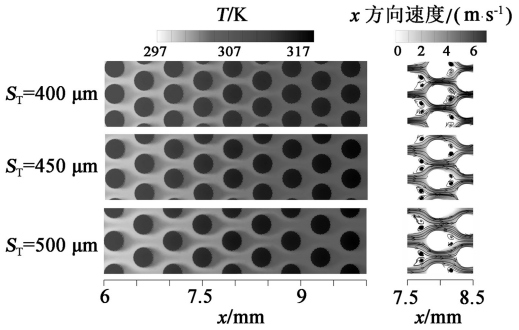


图 5 不同横向间距下模型内部沿 x 方向温度和速度矢量分布图

2.2 纵向间距对温度和压降的影响

图 6 显示了当横向间距和针鳍高度保持不变时（S_T=450 μm，H_P=200 μm），纵向间距 S_L 对微通道散热器热和水力性能的影响。从图中可以看出随着 S_L 的增大，模型内最高温度逐渐升高，而压降则逐步降低。S_L 的增大使冷却剂在针鳍间能够更好地流动，流动阻力降低。对比图 3 可以看出，相较于横向间距，纵向间距的改变对压降影响较小，且温度变化也更具规律性。图 7 给出了模型内部沿 x 方向的温度和速度分布。可以看出，纵向间距的改变

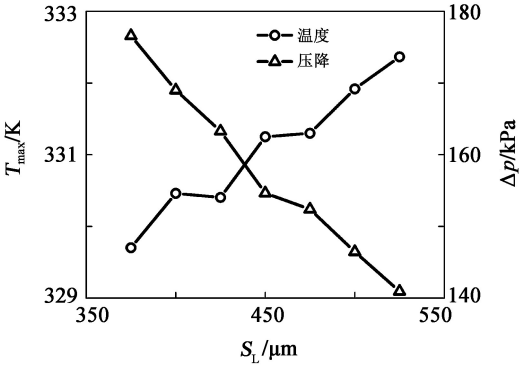


图 6 纵向间距对温度和压降的影响

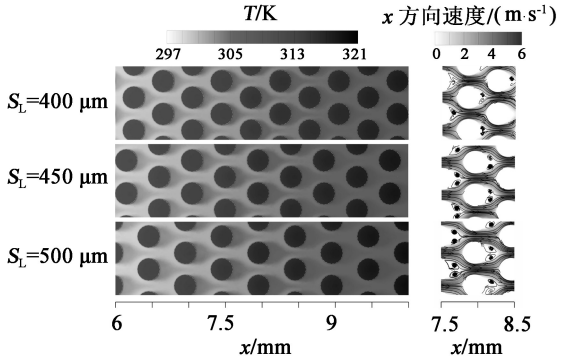


图 7 不同纵向间距下模型内部沿 x 方向温度和速度矢量分布图

并未对冷却剂流速产生较大影响，但由于纵向间距增大，传热面积随之减小，这导致模型内部温度呈现出上升趋势。在本文研究范围内，压降降低了 20.22%，温度提高了 2.7 K。

2.3 针鳍高度对温度和压降的影响

图 8 显示了当横向间距和纵向间距保持不变时（S_T=450 μm，S_L=450 μm），针鳍高度 H_P 对微通道散热器热和水力性能的影响。从图中可以看出，随着针鳍高度的提升，压降逐渐降低，但是温度呈上下波动趋势。可能原因如下：针鳍高度的提升使得流动空间增大，流动阻力降低，导致压降更小。温度方面，从图 9 中可以看出，针鳍高度越高，冷却剂流动速度越低，换热效率也相应越低。但是针鳍高度的提升同时有效地增加了换热面积，使散热器能够在相同时间内带走更多的热量，这提高了换热效率。因此，随着针鳍高度的增加，冷却剂流动速度下降，导致换热效率降低，而换热面积增大导致换热效率提高，两者之间的相互竞争使得温度出现波动。在研究范围内，压降最高可降低 85.6%。

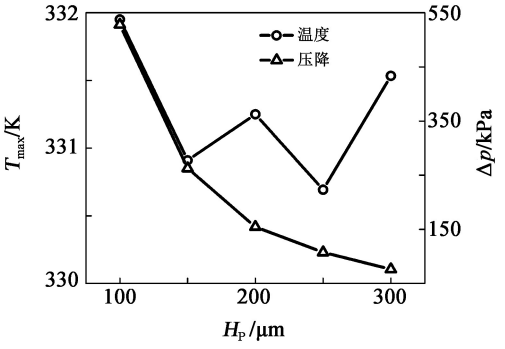


图 8 针鳍高度对温度和压降的影响

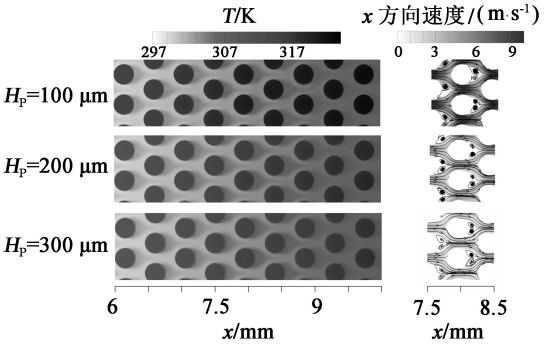


图 9 不同针鳍高度下模型内部沿 x 方向温度和速度矢量分布图

3 针鳍参数优化

3.1 优化方法

上述的模拟结果反映了针鳍间距对模型内最高

温度和压降的影响。为了得到最优化的间距，本文采用响应曲面近似（Response Surface Approximation，RSA）方法来实现模型多参数统一优化。

响应曲面近似方法是一种拟合多项式函数的方法，用于从数值计算中获得离散响应，然后建立目标函数的代理方程，它可以表示为

$$y(x)=\varphi_0+\sum_{j=1}^{N}\varphi_j x_j+\sum_{j=1}^{N}\varphi_{jj}x_j^2+\sum\sum_{i\neq j}\varphi_{ij}x_j \tag{3}$$

其中，x_j 是设计变量，N 为目标变量个数，φ 为回归系数，其值可以通过式 $(N+1)(N+2)/2$ 得到。在本文中，设计变量为 3 个：横向间距 S_T、纵向间距 S_L 和针鳍高度 H_P。目标变量为 2 个：壁面最高温度 T_{max} 和压降 Δp。

本文采用多重决定系数 R^2 来评估公式拟合的准确性。R^2 值越接近 1，公式拟合越准确。它的定义为

$$R^2=\frac{\sum_{i=1}^{Z}(\hat{y}_i-\bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{Z}(y_i-\bar{y}_i)^2} \tag{4}$$

其中，Z 是测试点的数量，y_i 是测试点的真实值，$\hat{y}_i$ 是拟合曲线的预测值，$\bar{y}_i$ 是测试点真实值的平均值。

通过多目标遗传算法（Multi-objective Evolutionary Algorithm，MOEA）对所求方程进行优化。在多目标优化问题中，目标函数往往受多种因素干扰。一个目标的改进可能会导致其他子目标的恶化。多目标优化问题就是找到一个最优解，称为 Pareto 最优解。本文采用多目标遗传算法中的 NSGA-Ⅱ算法程序，并对其进行评估。

3.2　优化结果

在响应面法中规定横向间距、纵向间距和针鳍高度的范围，响应面法自动生成一系列目标点。通过输入目标点的目标函数的数值，从而生成目标函数的方程。本文选取 35 个目标点对目标函数进行拟合，通过数值计算获得温度和压降，最终得到温度和压降关于横向间距、纵向间距和针鳍高度的显式表达式，即

$$\begin{aligned}\Delta p=&1.2\times10^4-40.2S_T+2.3S_L-47.9H_P+\\&4.8\times10^{-3}S_TS_L+0.1S_TH_P+6.1\times10^{-3}S_LH_P+\\&0.04S_T^2-0.01S_L^2+0.05H_P^2-8.6\times10^{-6}\cdot\\&S_TS_LH_P-2.3\times10^{-5}S_T^2S_L-7.8\times10^{-5}S_T^2H_P+\\&2.2\times10^{-5}S_TS_L^2-6.9\times10^{-5}S_TH_P^2-\\&7.0\times10^{-6}S_L^2H_P-1.3\times10^{-5}S_LH_P^2\end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}T_{max}=&106.2-0.2S_T-0.7\times10^{-3}S_L-0.05H_P+3\times\\&10^{-5}S_TS_L+1.1\times10^{-5}S_TH_P+2.1\times10^{-5}S_LH_P+\\&2.1\times10^{-4}S_T^2+7.3\times10^{-6}S_L^2+1.0\times10^{-4}H_P^2\end{aligned} \tag{6}$$

两公式的多重决定系数分别为 0.997 1 和 0.998 2，均非常接近 1，由此可以确定所拟合方程是准确和可靠的。

通过多目标拟合得到的 Pareto 最优解如图 10 所示。为了评估本文拟合的多目标优化方法的准确性，从图中选取三个点进行建模分析，对多目标优化的结果和数值模拟结果进行了分析和比较，如表 4 所示。两者之间的偏差 E 定义为

$$E/\%=\left|\frac{\alpha_{CFD}-\alpha_{MOEA}}{\alpha_{CFD}}\right|\times100\% \tag{7}$$

从图 10 中可以看出，Pareto 最优解与数值解吻合得很好，误差在 8%以内。

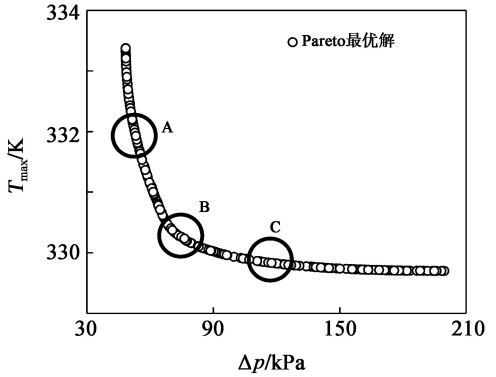


图 10　Pareto 最优解分布

表 5 则比较了三个 Pareto 最优解模拟值与常规模型（$S_T=450\ \mu m$，$S_L=450\ \mu m$ 和 $H_P=200\ \mu m$）的传热性能。在本文研究的范围内，针对 B 和 C 处，最高温度分别降低了 0.19 K 和 1.33 K，而 A 点的最高温度提高了 0.5 K。但是对于压降，A，B 和 C 三处的压降分别降低了 61.11%，51.99%和 27.41%。可以看出，优化针鳍参数后，可以在控制最高温度的同时，大幅降低模型内部的压降。

4　结论

本文对具有中心热点的微针鳍散热器模型进行了分析。以散热器内的最高温度和进出口压降为优化目标，对针鳍横向间距、纵向间距和针鳍高度三个参数进行优化。首先，建立了具有中心热点的微针

鳍散热器三维数值模型。接着,通过阶乘测试设计方法得到测试点,并通过三维数值模拟方法为每个测试点获得相对应的目标函数值。最后通过 RSA 方法得到目标函数方程,使用 MOEA 计算了 Pareto 最优解。本文所得到的主要结论如下:

(1)横向间距对模型的压降有较大影响。随着横向间距的减小,流动阻力逐渐增大,模型的压降非线性上升,温度则先下降后上升。在研究范围内,压降可降低 70.7%,温度最高降低 3.4 K。

(2)纵向间距对模型的压降影响最小且更具有规律性。压降随着纵向间距的增大而降低,同时温度呈上升趋势。在研究范围内,压降可降低 20.22%,温度提高 2.7 K。

(3)压降对针鳍高度相对敏感,针鳍高度的增加可以大幅降低模型内部压降。在研究范围内,压降最高可降低 85.6%。

(4)通过优化结构参数可以进一步提高微针鳍散热器的性能。优化后,可以在降低温度的同时有效降低微通道内部压差。相较于常规散热器,压降最高可降低 61%。

表 4 最优解与数值解对比

选取点	设计变量/μm			目标函数					
				T_{max}/K			Δp/kPa		
	S_T	S_L	H_P	MOEA 值	模拟值	E/%	MOEA 值	模拟值	E/%
A	500	420	270	331.69	331.75	0.02	55.4	60.14	7.88
B	480	375	260	330.31	331.06	0.23	73.16	74.24	1.45
C	470	375	230	329.89	329.91	0.01	107.04	112.26	4.65

表 5 最优解与常规模型对比

选取点	设计变量/μm			目标函数			
				T_{max}/K		Δp/kPa	
	S_T	S_L	H_P	Pareto 解	常规模型	Pareto 解	常规模型
A	500	420	270	331.75	331.25	60.14	154.64
B	480	375	260	331.06		74.24	
C	470	375	230	329.91		112.26	

参考文献:

[1] Tuckerman D B, Pease R F W. High-performance heat sinking for VLSI[J]. IEEE Electron Device Lett., 1981, 2(5): 126-129.

[2] Chai L, Wang L, Bai X. Thermohydraulic performance of microchannel heat sinks with triangular ribs on sidewalls-Part 2: Average fluid flow and heat transfer characteristics[J]. Inter. J. of Heat and Mass Transfer, 2019, 128: 634-648.

[3] Shafeie H, Abouali O, Jafarpur K, et al. Numerical study of heat transfer performance of single-phase heat sinks with micro pin-fin structures[J]. Appl. Thermal Engin., 2013, 58(1/2): 68-76.

[4] Wong K C, Lee J H. Investigation of thermal performance of microchannel heat sink with triangular ribs in the transverse microchambers[J]. Inter. Commun. in Heat and Mass Transfer, 2015, 65: 103-111.

[5] Chai L, Xia G, Liang Wang L, et al. Heat transfer enhancement in microchannel heat sinks with periodic expansion-constriction cross-sections[J]. Inter. J. of Heat and Mass Transfer, 2013, 62: 741-751.

[6] Wei X J, Joshi Y K, Ligrani P M. Numerical simulation of Laminar flow and heat transfer inside a microchannel with one dimpled surface[J]. J. Electronic Packaging, 2007, 129(1): 63-70.

[7] Kosar A, Mishra C, Peles Y. Laminar flow across a bank of low aspect ratio micro pin fins[J]. J. Fluids Eng., 2005, 127(3): 419-430.

[8] Brunschwiler T, Michel B, Rothuizen H, et al. Interlayer cooling potential in vertically integrated packages [J]. Microsystem Technol., 2009, 15(1): 57-74.

[9] Mustafa Koz, Kosar A. Parameter optimization of a micro heat sink with circular pin-fins[C]// Proc. ASME 8th Inter. Conf. on Nanochannels, Microchannels and Minichannels, 2010: 531-539.

[10] Tullius J F, Tullius T K, Bayazitoglu Y. Optimization of short micro pin fins in minichannels[J]. Inter. J. of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(15/16): 3921-3932.

[11] Lorenzini D, Green C, Sarvey T E, et al. Embedded single phase microfluidic thermal management for non-uniform heating and hotspots using microgaps with variable pin fin clustering[J]. Inter. J. of Heat and Mass Transfer, 2016, 103: 1359-1370.

[12] Lorenzini D, Joshi Y. Numerical modeling and experimental validation of two-phase microfluidic cooling in silicon devices for vertical integration of microelectronics[J]. Inter. J. of

Heat and Mass Transfer, 2019, 138: 194-207.

[13] 史晓军，李　珊，魏亚东，等. 纳米流体矩形微通道热沉结构参数多目标优化[J]. 西安交通大学学报，2018，52(5)：56-61.
Shi Xiaojun, Li Shan, Wei Yadong, et al. Multi-objective optimization on the geometrical parameters of a nanofluid-cooled rectangular microchannel heat sink[J]. J. of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(5): 56-61.

[14] Shi X, Li S, Mu Y, et al. Geometry parameters optimization for a microchannel heat sink with secondary flow channel[J]. Inter. Commun. in Heat and Mass Transfer, 2019, 104: 89-100.

[15] Hadad Y, Ramakrishnan B, Pejman R, et al. Three-objective shape optimization and parametric study of a micro-channel heat sink with discrete non-uniform heat flux boundary conditions[J]. Appl. Thermal Engin., 2019, 150: 720-737.

[16] Rao R V, More K C, Taler J, et al. Dimensional optimization of a micro-channel heat sink using Jaya algorithm[J]. Appl. Thermal Engin., 2016, 103: 572-582.

作者简介：

王志敏(1996－)，男，硕士研究生，主要研究方向为材料强度及其可靠性；

叶贵根(1983－)，男，博士，副教授，主要研究方向为微电子器件可靠性、冲击动力学、金属材料切削机理等。

(上接第 488 页)

[5] Jeon N J, Noh J H, Yang W S, et al. Compositional engineering of perovskite materials for high-performance solar cells[J]. Nature, 2015, 517: 476-480.

[6] Saliba M, Matsui T, Seo J Y, et al. Cesium-containing triple cation perovskite solar cells: improved stability, reproducibility and high efficiency [J]. Energy & Environmental Science, 2016, 9(6): 1989-1997.

[7] Min H, Kim M, Lee S, et al. Efficient, stable solar cells by using inherent bandgap of α-phase formamidinium lead iodide [J]. Science, 2019, 366(6466): 749-753.

[8] Wu X, Trinh M T, Niesner D, et al. Trap states in lead iodide perovskites[J]. J. of the American Chemical Society, 2015, 137(5): 2089-2096.

[9] Heo S, Seo G, Lee Y, et al. Deep level trapped defect analysis in $CH_3NH_3PbI_3$ perovskite solar cells by deep level transient spectroscopy[J]. Energy & Environmental Science: EES, 2017(5): 1128-1133.

[10] Jiang F, Choy W C, Li X, et al. Post-treatment-free solution-processed non-stoichiometric $NiO_{(x)}$ nanoparticles for efficient hole-transport layers of organic optoelectronic devices[J]. Adv. Materials, 2015, 27(18): 2930-2937.

[11] Tu Yongguang, Yang Xiaoyu, Su Rui, et al. Diboron-assisted interfacial defect control strategy for highly efficient planar perovskite solar cells[J]. Adv. Mater., 2018, 30(49): 1805085.1-1805085.8.

[12] Zhang H, Lin H, Liang C, et al. Organic-inorganic perovskite light-emitting electrochemical cells with a large capacitance[J]. Adv. Functional Materials, 2015, 25(46): 7226-7232.

[13] Niu T, Lu J, Munir R, et al. Stable high-performance perovskite solar cells via grain boundary passivation[J]. Adv. Mater., 2018, 30(16): 1706576.

作者简介：

宋　奇(1992－)，男，河北张家口市人，硕士，主要从事光电子材料与器件方面的研究；

何志群(1959－)，女，博士，教授，博士生导师，主要从事有机聚合物发光材料与器件、显示技术，以及有机聚合物新能源材料及太阳光伏电池方面的研究。