

DOI: 10.7652/xjtuxb201805008

纳米流体矩形微通道热沉结构参数多目标优化

史晓军, 李珊, 魏亚东, 高建民

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710054, 西安)

摘要: 为了开发高效低阻的纳米流体微通道热沉,对单层矩形纳米流体微通道热沉几何结构参数进行了多目标优化。设计变量为高宽比 α 和微通道宽度与间距比 β ,优化目标是使全局热阻和泵功最小。对 Pareto 最优解进行 K 均值聚类分析发现,在 5 个聚类点的最高点和最低点之间存在有效权衡点,让泵功和热阻均处于较优范围内。实际设计中可以根据泵功或所需的热阻来选择最优结构参数。相对于高宽比,热阻和泵功对微通道宽度与间距比更敏感。尤其当 β 大于 1.15 时,其对热阻和泵功的影响非常强烈。相对于热阻,泵功对设计变量更敏感,在 α 和 β 的设计空间内,泵功的变化幅度约为 360%,而热阻的变化幅度只有 135%。纳米流体的热阻比去离子水显著减小,且随泵功的增大,去离子水和纳米流体热阻之差有缓慢增大的趋势。

关键词: 微通道热沉;纳米流体;多目标优化;结构参数

中图分类号: TH113 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)05-0056-06

Multi-Objective Optimization on the Geometrical Parameters of a Nanofluid-Cooled Rectangular Microchannel Heat Sink

SHI Xiaojun, LI Shan, WEI Yadong, GAO Jianmin

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China)

Abstract: To develop the microchannel heat sinks with high heat transfer coefficient and low pressure drop, a multi-objective optimization on the geometrical parameters of a single-layer nanofluid-cooled microchannel heat sink with rectangular cross section was performed. The channel aspect ratio α and channel width ratio β were selected as design variables. The optimization objective is to minimize the thermal resistance and pumping power of the heat sink. The K -means clustering analysis was applied for the Pareto optimal solutions, and it was found that there is a tradeoff between the highest and lowest points of the five clusters which can make both pumping power and thermal resistance within the optimal range. The optimal geometrical parameters can be selected based on the requirements of pumping power or thermal resistance in the actual design process. The thermal resistance and pumping power are more sensitive to the width ratio β than to the aspect ratio α . The width ratio β has more significant effect on thermal resistance and pumping power especially when β is greater than 1.15. Compared with the thermal resistance, the pumping power is more sensitive to the design variables. In the design space of variables α and β , the pumping power varies by about 360%, while the thermal resistance only varies by about 135%. The thermal resistance of nanofluid is significantly lower than that of

deionized water. The difference of thermal resistance between deionized water and nanofluid increases slowly with the increase of pumping power.

Keywords: microchannel heat sink; nanofluid; multi-objective optimization; geometrical parameters

纳米流体是一种将固体纳米粒子分散到基液中形成的胶状混合物,即平均粒径小于 100 nm 的纳米粒子弥散在水、油和乙二醇等传统换热流体中。由于分散的固体粒子的热导率一般比基液高出几个数量级,因此形成的纳米流体有较高的热导率。相对于传统的换热流体,纳米流体显示了非常高的换热特性^[1]。Jung 等对粒径为 170 nm 不同体积分数的水基 Al_2O_3 纳米流体在矩形微通道内的对流换热进行了实验研究,发现层流状态下,纳米颗粒体积分率为 1.8% 的水基 Al_2O_3 纳米流体与蒸馏水相比,对流换热系数提高了 32%^[2]。Minea 数值模拟了层流状态下水基 Al_2O_3 纳米流体在管内的对流换热特性,结果发现,相同雷诺数下水基 Al_2O_3 纳米流体的传热系数比纯水提高了 3.4%~27.8%^[3]。

将纳米流体与微通道热沉相结合,是目前传热学解决超高热流密度电子设备散热问题的前沿技术之一^[4-5]。纳米流体微通道热沉设计的关键是确定最佳几何结构参数,从而使热沉整体性能最优。

肋效率法和数值计算法是优化微通道热沉的两种主要方法。前者将微通道之间的间隔部分等效成肋片,计算冷却介质流过该“肋片”时的散热,但该方法需要进行大量假设。例如:魏琪以热沉的熵产为目标函数建立优化模型,研究了微通道的尺寸和横截面形状对热沉性能的影响^[6];邵宝东等以热阻和压降作为优化目标,采用序列二次规划方法对热沉微通道进行优化,结果表明矩形微通道比三角形、梯形微通道的传热效率更高,并且在不同的加权系数下,相应最优热沉微通道的尺寸不同^[7]。数值计算法是采用数值模拟方法,对微通道热沉流动和换热特性进行计算,得到关于目标函数的代理模型,最后再使用优化工具求解设计变量的最优值。例如:Husain 建立了三维传热模型,分析了热沉的最优尺寸^[8];Kulkarni 在对具有矩形横截面的双层微通道热沉进行三维流动换热分析的基础上,选择与通道截面有关的两个几何变量和上下通道流量比作为优化设计变量,以热阻和泵功作为目标函数,采用响应面近似法逼近目标函数,之后使用多变量遗传算法进行了多目标优化设计^[9]。

本文采用数值计算优化方法,以纳米流体微通

道热沉整体性能热阻和压降作为优化目标,对纳米流体微通道热沉主要尺寸(微通道宽度、高度和间距)进行多目标优化,分析了通道高宽比和微通道宽度与间距比对整体热沉换热性能的影响。首先采用以实验数据验证的纳米流体微通道流动与换热的数值计算方法,得到设计变量空间内各个设计点的泵功和热阻目标函数,然后建立目标函数关于优化变量的代理模型,通过多目标优化算法得到设计空间内最优解集,接着对最优解集进行 K 均值聚类分析,并选出最优的结构。本文采用的方法涉及的简化假设较少,并且综合了代理模型、遗传算法和 K 均值聚类分析 3 种优化设计方法的优点,使得优化过程计算量小、计算结果精度相对较高,具有全局寻优能力、聚类收敛速度快、精度高等优点。

1 物理模型和数值计算方法

所研究的单层平行矩形微通道热沉如图 1 所示。热沉基质材料为铜, L (长) $\times W_0$ (宽) $\times H$ (高)为 60 mm $\times$ 20 mm $\times$ 2 mm,其中有微通道的宽度 W 为 10 mm。考虑到微加工过程以及流体压力引起的微通道材料应力和挠度的变化,热沉基底厚度 H_b 选择为 1 700 μm ,绝热玻璃盖板厚度 H_g 为 1 000 μm ,微通道深度 H_c 为 300 μm 。

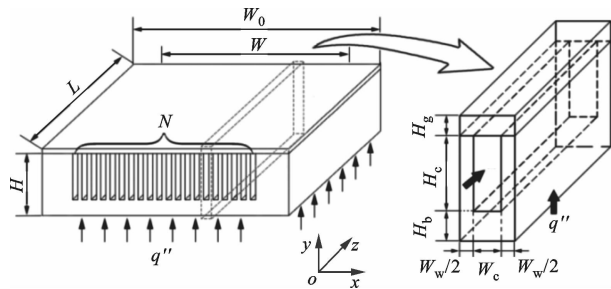


图1 平行矩形微通道热沉几何结构示意图

采用文献[10]提出的微通道中纳米流体流动与换热数值计算方法进行模拟。利用 Fluent 中的 UDF,将计算流体域网格单元区域内纳米流体热物性计算与 DPM 两相流计算模型相耦合,提高了纳米流体在通道内流动换热过程中纳米流体热物性计算的准确性,同时考虑了纳米颗粒之间、纳米颗粒与固体壁面以及与基液之间的相互作用,并考虑了微

通道轴向导热。为了求解三维 N-S 方程、能量方程以及固体导热方程,采用如下假设:流动和传热过程为稳态;流体不可压缩;固体热物性不变;忽略通道外壁面与环境之间的热辐射和自然对流换热。

水基 Al_2O_3 纳米流体入口温度为 303.15 K,入口速度根据入口质量流量计算;出口压力为 112 kPa;微通道底面施加均匀恒定热流密度 q'' ,为 $5 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 。假定其余壁面为绝热壁面,在固-液交界面处添加滑移壁面边界条件。纳米颗粒直径为 40 nm,体积分数为 1% 和 2%。在微通道入口处通过面喷射源的方式喷入颗粒,采用颗粒在固体壁面上反弹的边界条件。基液的热导率和黏度随温度变化,热物理性质如表 1 所示。

表 1 去离子水和 Al_2O_3 纳米颗粒物性

工质	去离子水	纳米颗粒
密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	998.2	3 970
比热容/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	4 182	765
热导率/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$-0.933\ 14 + 8.53 \times 10^{-3} T - 1.125\ 9 \times 10^{-5} T^2$	25
黏度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	$0.017\ 23 - 9.259\ 51 \times 10^{-5} T + 1.268\ 1 \times 10^{-7} T^2$	

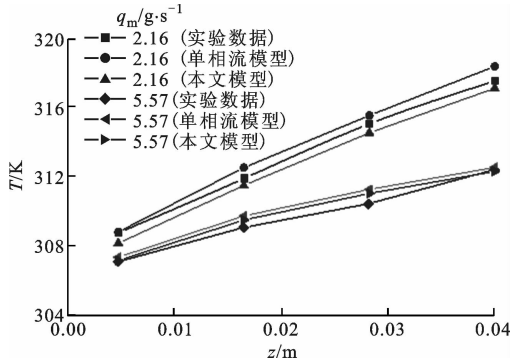
采用经典文献[11]的实验数据对数值计算方法进行了验证,结果如图 2 所示。对于体积分数为 2% 的水基 Al_2O_3 纳米流体(下文称为 2% 纳米流体),质量流量 q_m 为 2.09 g/s 时,单相流模型与实验结果平均误差为 0.62 K,而本文提出的模型与实验结果的平均误差为 0.3 K;质量流量为 5.49 g/s 时,单相流模型与实验结果的平均误差为 0.54 K,而本文提出的模型得出的模拟结果与实验值吻合更好。本文模型与实验结果的平均误差为 0.34 K。对于 1% 纳米流体,结果与 2% 纳米流体时相似。可见相对于单相流模型,本文模型得出的模拟结果与实验值吻合更好。

实验所得的压降随雷诺数的变化与模拟结果的对比如图 3 所示。由图可见,二者吻合较好。

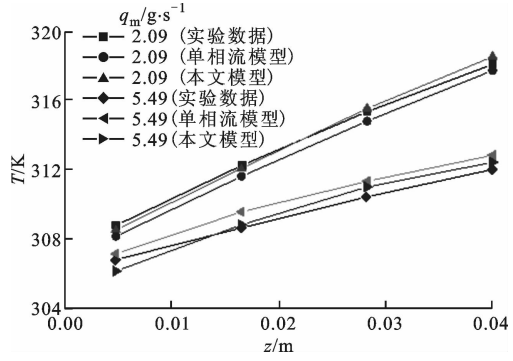
2 热沉优化方法

2.1 优化变量和目标函数

设计变量确定为高宽比 α 和微通道宽度与间距比 β ,其中 α 为微通道深度 H_c 与宽度 W_c 的比值,即 $\alpha = H_c/W_c$, β 为微通道宽度 W_c 与间距 W_w 的比值,即 $\beta = W_c/W_w$ 。设计变量的设计空间 $\alpha \in (1,4)$, $\beta \in$



(a) 1% 纳米流体



(b) 2% 纳米流体

图 2 微通道热沉温度分布的实验值与模拟结果对比

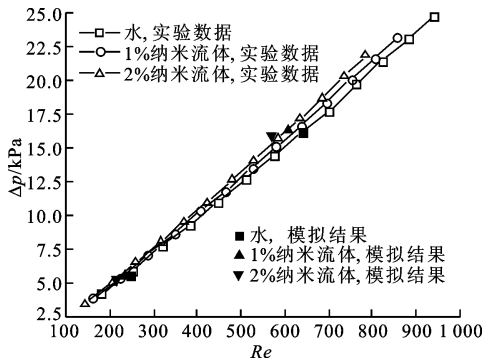


图 3 微通道压降的实验值与模拟结果对比

(0.8,1.2)。优化目标是选取不同的 α 和 β ,在热沉工作介质体积流量一定时,使得全局热阻 R_t 和泵功 P_p 两个优化目标函数最小。

全局热阻定义为

$$R_t = \frac{T_{s,\max} - T_{f,\text{in}}}{qA_s} \tag{1}$$

式中: A_s 为热沉底部的面积; $T_{s,\max}$ 为热沉的最大温度; $T_{f,\text{in}}$ 为流体介质入口温度。

泵功定义为

$$P_p = NuA_c \Delta p \tag{2}$$

式中: Δp 为微通道的压降; u 为微通道内介质的平均流速; A_c 为单个微通道的横截面面积; N 为微通

道个数。

为了通过构造代理模型获得这两个目标函数关于设计变量的关联式,需要设计模拟实验点,并采用所建模拟方法得到各实验点的目标函数。

热沉流体介质采用 1% 纳米流体,体积流量为 $6 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$,其余条件如上文所述。采用析因实验设计方法得到 12 个实验点。各设计点的结构参数、目标函数值的计算结果如表 2 所示。

表 2 各设计点结构参数及相应的目标函数值									
序号	α	β	$H/\mu\text{m}$	$W_c/\mu\text{m}$	$W_w/\mu\text{m}$	N	$R_t/\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$	P_p/W	
1	1	0.8	300	300	375.0	15	0.060 1	0.723 8	
2	2	1.0	300	150	150.0	33	0.044 2	1.145 0	
3	3	1.2	300	100	83.3	55	0.044 2	1.372 0	
4	4	0.8	300	75	93.8	59	0.045 0	2.518 7	
5	1	1.0	300	300	300.0	17	0.060 5	0.725 8	
6	2	1.2	300	150	125.0	36	0.048 7	0.657 1	
7	3	0.8	300	100	125.0	45	0.043 7	2.028 9	
8	4	1.0	300	75	75.0	67	0.044 6	2.342 2	
9	1	1.2	300	300	250.0	18	0.058 0	0.556 8	
10	2	0.8	300	150	187.5	30	0.048 1	1.294 2	
11	3	1.0	300	100	100.0	50	0.043 1	1.757 9	
12	4	1.2	300	75	62.5	73	0.043 9	2.131 7	

2.2 代理模型

采用响应表面估计法(RSA)建立目标函数的代理模型,其一般表达式为

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

式中: x 为设计变量,即本文中的 α 和 β ; N 指设计变量的个数,本文中 $N=2$; 对于本文所用的二阶多项式模型, φ 为系数,其值可通过式 $(N+1)(N+2)/2$ 得到,本文中 φ 共有 6 个,其值可由式 $[\varphi] = [\mathbf{X}^T \mathbf{X}]^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y}$ 求得。

对表 2 中的设计变量和目标函数,采用 Matlab 多元非线性拟合工具,得到代理模型表达式为

$$R_t = 0.101\,48 - 0.022\,3\alpha - 0.045\,875\beta + 0.000\,8\alpha\beta + 0.003\,333\,3\alpha^2 + 0.021\,25\beta^2 \quad (4)$$

$$P_p = -0.943\,74 + 0.427\,36\alpha + 3.386\,1\beta - 0.169\,95\alpha\beta + 0.061\,992\alpha^2 - 2.058\,1\beta^2 \quad (5)$$

拟合后得到的响应面和实验数据分布如图 4 和图 5 所示。计算决定系数 R^2 和调整决定系数 R_{adj}^2 属于检验代理模型可信度的方差分析法,用来衡量拟合公式与实际值的吻合程度, R^2 和 R_{adj}^2 越接近 1,

说明拟合程度越好, R^2 和 R_{adj}^2 分别定义为

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^Z (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^Z (y_i - \bar{y}_i)^2}$$
$$R_{\text{adj}}^2 = 1 - \frac{(Z-1) \sum_{i=1}^Z (\hat{y}_i - y_i)^2}{(Z-1-g) \sum_{i=1}^Z (y_i - \bar{y}_i)^2}$$

式中: Z 为实验点数,本文 $Z=12$; g 是设计变量自由度,等于设计变量个数减 1; y_i 、 $\hat{y}_i$ 、 $\bar{y}_i$ 分别为实验点处的真实值、拟合曲线的预测值和实验点真实值的平均值。

本次拟合的 R^2 和 R_{adj}^2 结果如表 3 所示,其值均大于 0.95,说明拟合结果与实验点结果非常吻合,拟合可信度较高,可用于下一步的优化分析。

表 3 代理模型可信度检验		
代理模型	R^2	R_{adj}^2
热阻	0.986 2	0.985 3
泵功	0.983 0	0.981 8

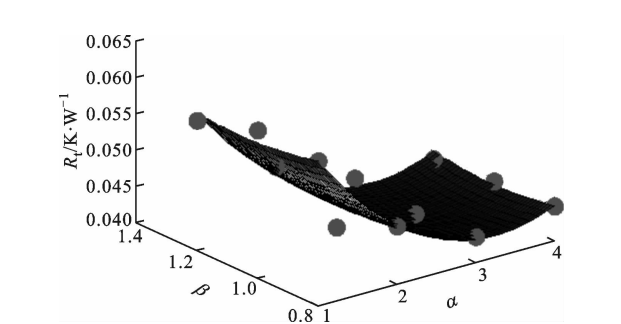


图 4 热阻代理模型计算值和实验数据分布

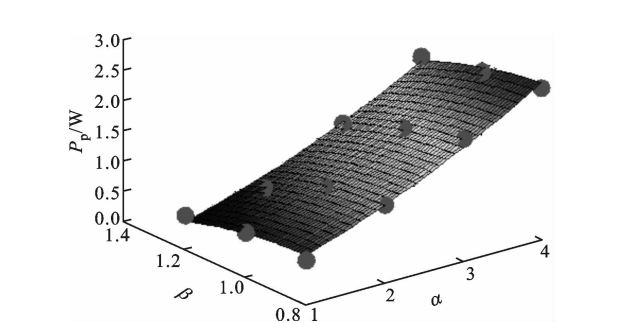


图 5 泵功代理模型计算值和实验数据分布

2.3 多目标遗传优化

多目标优化问题中的各个子目标之间一般是对立的,一个子目标的改善有可能会引起另一个或者另几个子目标变差。随着微通道高宽比的增大,热阻减小,压降增大;随着微通道宽度与间距比增大,压降减小,热阻增大。因此,只能根据不同子目标的

优先级和比重对各子目标进行协调和权衡处理,使各个子目标都尽可能地达到最优化。多目标优化与单目标优化问题的本质区别在于,它的解并非唯一,而是存在一组由众多 Pareto 最优解组成的最优解集合,集合中的各个元素称为 Pareto 最优解或非劣最优解。

多目标遗传优化算法(MOEA)是一种常用的解决多目标优化问题的有效算法,其中带精英策略的非支配排序的遗传算法(NSGA-II)是由科学家 Deb 在非支配排序遗传算法(NSGA)的基础上发展起来的,计算复杂性大大降低,具备最优保留机制并无需确定共享参数。

本文用 Matlab 的 NSGA-II 算法程序对上文的代理模型进行求解。逐个调整各个参数后,算法种群数为 100,后代数为 200,交叉和突变概率分别为 0.85 和 0.2,交叉和突变参数分别为 20 和 200,最优个体系数为 0.3,适应度函数偏差设为 10^{-100} ,经过迭代计算,得到 30 个最优解,称为 Pareto 最优解集,如图 6 所示。由图可见,两个目标函数泵功和热阻本质上是对立的,一个目标函数的改进将导致另一目标函数变差,对应其中一个目标函数的每个固定值,另一目标函数都存在一个最佳值。

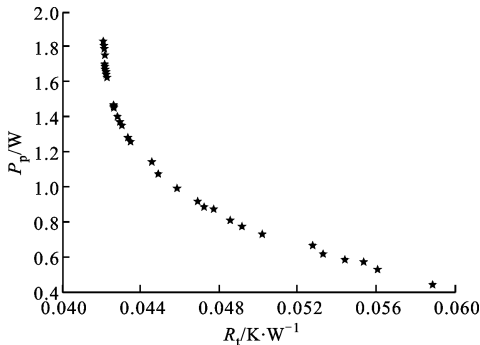


图 6 代理模型 Pareto 最优解

2.4 K 均值聚类分析

Pareto 最优解集中的每个解理论上都是某种情况下的最优解,一般按照实际需要对其进行选取。为了便于分析,对 Pareto 最优解进行聚类分析,以便找到解集中的一组代表性的解决方案。本文采用 K 均值聚类分析法,结果如图 7 所示。

与 5 个聚类点相应的设计变量、目标函数值如表 4 所示。

3 优化结果与分析

由图 7 可见,在 A 点处,以较高泵功为代价获得的热阻较小,而在 C 点处,较低泵功处的热阻较大。

表 4 聚类点及相应的目标函数值和设计变量

聚类点	$R_t / K \cdot W^{-1}$	P_p / W	α	β
1	0.042 3	1.745 3	3.042 6	0.996 8
2	0.042 9	1.431 7	2.817 4	1.117 2
3	0.044 3	1.160 4	2.505 2	1.171 0
4	0.048 1	0.853 6	1.935 6	1.182 1
5	0.056 6	0.520 7	1.167 0	1.188 6

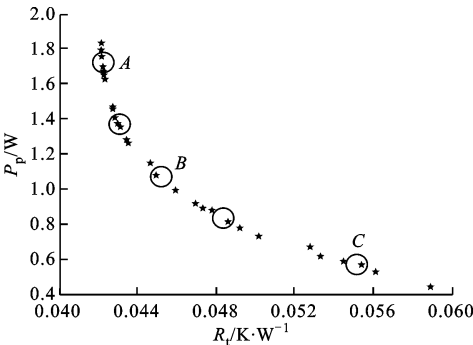


图 7 代理模型 Pareto 最优解 K 均值聚类

A 点处的泵功约是 C 点处的 3 倍,而热阻约是 C 点处的 0.76 倍。在 B 点处,Pareto 最优解的梯度有明显变化,当热阻小于 $0.045 K \cdot W^{-1}$ 时,热阻减小,泵功急剧上升。从 Pareto 最优解可以看出,A 点和 C 点之间存在有效权衡点,可以使泵功和热阻都处在较优范围内。实际设计中可以根据泵功或所需的热阻来选择最优解。

5 个聚类点处的设计变量及其对应热阻和泵功如图 8 所示,随着 α 的增大,热阻减小,泵功增大。这是由于 α 增大,流通横截面减小,使得流速增大,故换热增强,压降与流速的二次方成正比,因而压降急剧增大。热阻和泵功随 α 的变化较缓和,表明 α 在 1~4 的设计空间内对热沉最优热阻的影响比较缓和;随着 β 的增大,热阻增大,泵功减小,尤其是在 β 大于 1.15 时, β 每一个微小的变动都会对最优热阻和泵功产生巨大影响,随着 β 增大,热阻迅速增大,泵功则急剧下降。与 α 相比, β 在更小的变化范围内使得热阻和泵功发生更大幅度的变化,说明热沉性能对 β 的变化更加敏感。泵功对设计变量的变化比热阻更敏感,在 α 和 β 的设计空间内,泵功的变化幅度约为 360%,而热阻的变化幅度只有 135%。

在相同体积流量下,去离子水、1%和 2%纳米流体的 5 个聚类点对应的优化结构的热阻和泵功如图 9 所示。由图可见,纳米流体的热阻比去离子水显著减小,这是因为纳米流体的对流换热系数显著高于去离子水。在相同泵功下,相对于去离子水,纳

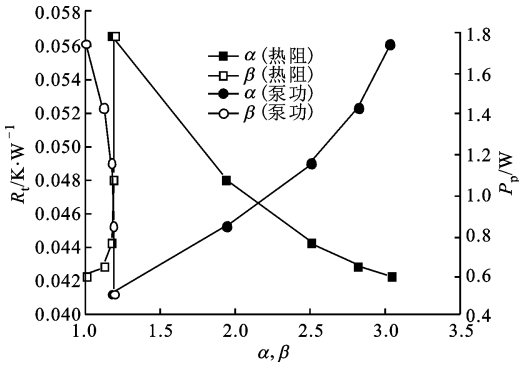


图 8 聚类点处设计变量及目标函数分布

米流体的热阻平均减小 3.5%，且随着泵功的增大，去离子水和纳米流体热阻之差有缓慢增大的趋势。1%和 2%纳米流体的 5 个聚类点处的热阻差异很小。从图 9 中还可以看出，当泵功约小于 0.9 W 时，1%纳米流体的热阻要小于 2%纳米流体的热阻。这说明对结构优化之后，在不消耗额外泵功的前提下，1%纳米流体的强化换热效果可达到更高浓度纳米流体的换热效果。这主要是因为，纳米流体在微通道中的换热和流动特性不但与工质参数相关，还与微通道的结构参数有关。当高宽比增大时，由于优化时固定通道高度不变，通道宽度减小，通道个数增加，微通道水力直径减小，工质流动速度增大，全局热阻减小，泵功增大；随着间距比的增大，热阻增大，泵功减小。与高宽比相比，间距比可在更小的变化范围内使热阻和泵功发生更大幅度的变化，因此可通过结构优化来实现微通道的高效低阻。在较低流阻范围内，结构参数对 1%纳米流体的换热影响更大一些。即对 1%纳米流体微通道结构进行优化之后，高宽比和间距比的变化带来的热阻减小幅度大于使用 2%纳米流体带来的热阻减小幅度，同时结构优化之后增加的泵功相对于使用 2%纳米流体带来的泵功增加要小。

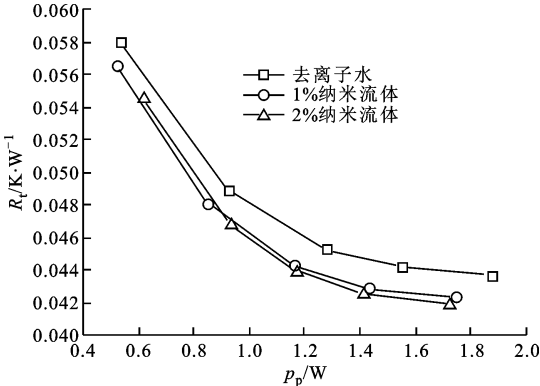


图 9 纳米流体浓度对聚类点处热阻和泵功的影响

4 结 论

对横截面为矩形的单层纳米流体微通道热沉几何结构参数进行了优化,设计变量为高宽比和微通道宽度与间距比,优化目标是使得全局热阻和泵功最小。首先,建立了考虑通道中纳米流体热物性静态和动态机制的微通道热沉流固耦合数值计算方法,平均温度分布的数值结果与经典实验数据吻合;采用该数值计算方法得到设计变量空间内各个设计点的泵功和热阻目标函数,然后建立了具有足够精度的目标函数关于优化变量的代理模型,通过多目标优化算法得到设计空间内 Pareto 最优解集,对最优解集进行 K 均值聚类分析,并选出热阻和压降最优的结构,所得主要结论如下。

(1)以提高泵功为代价可减小热阻,较窄的微通道在较高泵功下可获得较低的热阻。对 Pareto 最优解进行 K 均值聚类分析发现,在 5 个聚类点的最高点 A 和最低点 C 之间存在有效权衡点,可以使得泵功和热阻都处在较优范围内。实际设计中可以根据泵功或所需的热阻来选择最优解。

(2)相对于高宽比,热阻和泵功对微通道宽度和间距比更敏感。尤其当 β 大于 1.15 时,其对热阻和泵功的影响非常强烈, β 的微小变动就会对最优解的热阻和泵功产生很大影响。

(3)相对于热阻,泵功对设计变量更敏感,在 α 和 β 的设计空间内,泵功的变化幅度约为 360%,而热阻的变化幅度只有 135%。

(4)纳米流体的热阻比去离子水显著减小,且随着泵功的增大,去离子水和纳米流体热阻之差有缓慢增大的趋势。当泵功小于 0.9 W 时,1%纳米流体的热阻要小于 2%纳米流体的热阻,这说明对结构优化之后,在不消耗额外泵功的前提下,1%纳米流体的强化换热效果可达到更高浓度纳米流体的换热效果。

参考文献:

[1] SARKAR J, GHOSH P, ADIL A. A review on hybrid nanofluids: recent research, development and applications [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 43: 164-177.

[2] JUNG J Y, OH H S, KWAK H Y. Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2009, 52 (1/2): 466-472.

(下转第 132 页)