材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.03.012

多孔侧肋双层微通道热沉构形优化

李文龙[1]，谢志辉[1*]，奚　坤[1]，关潇男[1]，戈延林[2,3]

（1. 海军工程大学 动力工程学院，武汉 430033；2. 武汉工程大学 热科学与动力工程研究所，武汉 430205；
3. 武汉工程大学 机电工程学院，武汉 430205）

摘　要： 建立了多孔侧肋双层微通道复合热沉模型，选取最大热阻最小化为优化目标、热沉单元端面纵横比为优化变量，在热沉总体积和流体区域体积占比给定的条件下，对复合热沉进行了构形优化，并分析了冷却剂入口速度、多孔材料孔隙率、上下通道高度比、流体区域体积占比、肋厚比等参数对热沉最优构形的影响。结果表明：给定初始条件，优化热沉单元端面纵横比，可使最大热阻减小 21.19%；在热沉单元端面纵横比较小时，减小孔隙率有利于降低最大热阻，而在热沉单元端面纵横比较大时，存在最优的孔隙率使得最大热阻最小；上下通道高度比和肋厚比的改变均未影响热沉最优构形。

关键词： 构形理论；电子器件冷却；多孔材料；微通道热沉；热管理

中图分类号： TK121　**文章编号：** 1001－5868(2021)03－0364－07

Constructal Optimization of Double-layered Microchannel Heat Sink with Porous Side Fins

LI Wenlong[1], XIE Zhihui[1], XI Kun[1], GUAN Xiaonan[1], GE Yanlin[2,3]

(1. College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, CHN;
2. Institute of Thermal Science and Power Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, CHN;
3. School of Mechanical & Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, CHN)

Abstract: A model of double-layered microchannel heat sink with porous side fins is developed. Taking minimizing the maximum thermal resistance as the optimization objective and the aspect ratio of heat sink cell as the optimization variable, the constructal optimization was carried out for the heat sink with porous side fins under the constraints of given total volume of heat sink and volume proportion of fluid region. The effects of inlet velocity of coolant, porosity, the height ratio of upper channels to below channels, the volume proportion of fluid region and rib thickness ratio on the optimal constructs are analyzed, respectively. The results show that, with given the initial conditions, the maximum thermal resistance is 21.19% lower than its initial value after the aspect ratio is optimized. Decreasing the porosity is beneficial to reduce the maximum thermal resistance when the aspect ratio is smaller, while there is an optimal porosity to make the maximum thermal resistance minimize at a large aspect ratio. The changes of height ratio of upper channels to below channels and rib thickness ratio show few effects on the optimal construct.

Key words: constructal theory; electronics cooling; porous medium; microchannel heat sink; thermal management

收稿日期：2021－02－16.

基金项目：国家自然科学基金项目(51979278，51579244，51506220).

* **通信作者：**谢志辉

0　引言

电子器件广泛应用于各种军用和民用设备中，发挥着重要的作用。随着电子科技的飞速发展，电子器件趋向于微型化、高频化和高密度集成化，其单位体积的发热率大增，器件的散热负荷激增，热点温度升高，严重时会热致失效，且温度场不均匀性所产生的热应力和形变也会降低器件的可靠性，影响设备整体性能的正常发挥[1-2]。传统的冷却技术难以满足高热流密度器件的散热需求，必须使用新方法、新技术对电子器件进行高效冷却。

微通道液冷热沉具有冷却能力强和易于实现高密度封装等优点，自提出以来受到众多学者的重视，成为一种解决高热流密度器件散热问题的有效手段[3-4]。提升热沉性能可采用优化通道几何参数[4]、在通道内添加扰流结构[5-6]、使用新型冷却剂[3,7]以及添加多孔材料[8-9]等方法。Hung 等[10]建立了完全填充多孔材料的矩形截面热沉模型，在给定泵功率的条件下，以最大热阻最小化为目标得到了热沉最优结构参数。Leng 等[11]提出了一种侧肋完全被多孔材料替代的新型热沉模型，相较于常规固体侧肋微通道热沉，其流动压降降低了 50%以上，而最高温度仅升高了 4.7%。

双层微通道热沉综合性能比单层微通道热沉更优[12-15]。Wang 等[13]提出了上下侧肋均为多孔材料的双层矩形截面微通道热沉模型，发现存在最优的通道个数和截面参数，使得热沉最大热阻最小。Li 等[14]在双层微通道热沉的研究中，首次提出了上层多孔侧肋、下层固体侧肋的双层微通道热沉模型，通过数值计算，发现在给定入口雷诺数或泵功率两种条件下，相较于侧肋为纯固体或纯多孔的双层热沉模型，新模型具有更小的最大热阻和更均匀的温度分布。Wang 等[15]通过遗传算法，对上层多孔侧肋、下层固体侧肋的双层微通道热沉进行多目标优化，得到了基于最大热阻最小和泵功率最小的 Pareto 最优热沉几何参数，并分析了最优热沉形状下底面温度随入口体积流率的变化。

Bejan 发现了可解释非平衡系统结构生成原因的新的物理定律——构形定律，提出了构形理论[16-20]。陈林根等[18]最早将其引入国内并以中文“构形”定名。目前，构形理论已被广泛应用于多个学科领域，以解释或设计各种结构问题，其在液冷微通道热沉的设计中同样展现出了明显优势[21-26]。Bello-Ochende 等[22]给定热沉单元体积和固体体积占比，通过理论分析和数值计算，得到了壁面最高温度最低的几何最优构形。Mardani 等[23]在对三角形截面微通道热沉的构形优化中，发现增加自由度个数可以显著降低热沉最高温度。石瀚楠等[24]提出了“辐射＋树状”复合脉管通道热沉的设计原型，使得热沉的最大温差和㶲当量热阻[25-26]进一步降低。王亮等[27]基于㶲耗散极值原理[25-26]，得到了三种工质回流式微通道热沉的最优构形，并且计算了不同条件下热沉的热应力和形变。陈林根等[28]分别在给定流体压降和泵功率两种条件下，得到了不同优化目标下双层微通道热沉的最优构形。一些学者也将构形理论应用到多孔介质内部的流动、传热及传质过程研究中[29-32]。针对平行板内填充多孔材料的传热问题，Bejan[29]通过解析法得到了平行板的最优间距，使得热流密度最大。Azoumah 等[30]得到了气-固反应器熵产率最小的最优构形。针对填充多孔材料树状通道的流动问题，Lorente 等[31]得到了压降最小时的二维和三维树状通道构形。周圣兵等[32]得到了基于三角形单元体的气-固反应器熵产率最小时的最优构形。

运用构形理论指导工程构形优化，属于有约束工程最优化问题，能最大限度地契合工程实际需要。基于构形理论对多孔侧肋双层复合微通道热沉的优化研究尚未见公开报道，本文在文献[13]模型的基础上，进一步运用构形理论给定热沉总体积和流体区域体积占比，以热沉最大热阻最小化为优化目标，对多孔侧肋双层微通道热沉进行构形优化，并分析冷却剂入口速度、多孔材料孔隙率、多孔区域体积占比、上下通道高度比、肋厚比等参数对热沉最优构形的影响，可为实际设计高热流密度电子器件热沉提供理论指导。

1　热沉模型和数值方法

1.1　几何模型

图 1 为多孔侧肋双层复合微通道热沉的整体示意图，热沉的长度、宽度分别为 L_x，L_y，给定热沉底面为正方形，即 $L_x=L_y=10$ mm，高度 $H=1$ mm。热沉整体由 N 个热沉单元组成，考虑对称性，选择其中一个热沉单元作为计算单元，如图 2 所示，热沉单元的长、宽、高分别为 L_x，G，H，上、下层通道宽度均为 W_c，高度分别为 H_1，H_2，侧肋全部由多孔材

料填充，单个侧肋厚度为 W_r，上、下层通道底肋厚度均为 W_b。热沉底部受到均匀的热流密度，为更好地强化传热，上、下层流体流动方向为交叉对流。

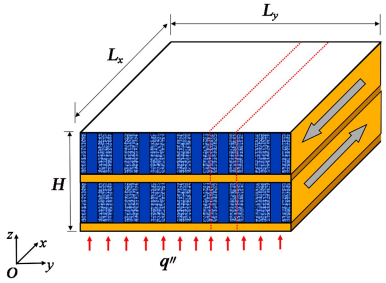


图 1 多孔侧肋双层微通道热沉模型[13]

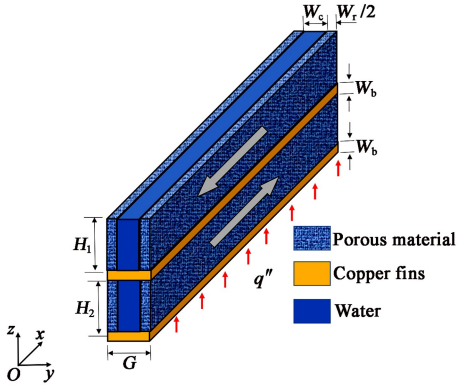


图 2 热沉单元

热沉总体积为

$$V = HL^2 \tag{1}$$

热沉中流体区域总体积为

$$V_f = N(H - 2W_b)(G - W_r)L \tag{2}$$

流体区域相对于热沉的体积占比为

$$\phi_f = V_f / V \tag{3}$$

热沉单元个数为

$$N = L / G \tag{4}$$

热沉单元端面纵横比定义为

$$\alpha = H / G \tag{5}$$

在式(1)～(3)的几何约束条件下，以热沉单元端面纵横比 α 为优化变量，对复合热沉进行构形优化。

1.2 传热模型

为突出主要因素、简化问题，对模型做如下假设：热沉上下通道底面热板及多孔实体材料均为黄铜(导热系数 k_s 为 400 W/(m·K^{-1}))，且各向同性；冷却剂为去离子水；流动状态为单相、稳态、层流、不可压缩，固体与流体接触面满足速度无滑移、温度连续和热流密度连续条件；流体和固体均为常物性；忽略热沉出入口截面上的纵向换热和重力的影响。

多孔介质区域控制方程为

$$\nabla \boldsymbol{V} = 0 \tag{6}$$

$$\frac{\rho_f}{\varepsilon^2}(\boldsymbol{V}\cdot\nabla)\boldsymbol{V} = -\nabla p + \frac{\mu_f}{\varepsilon}\nabla^2\boldsymbol{V} - \left(\frac{\mu_f}{K} + \frac{C_F\rho_f}{\sqrt{K}}|\boldsymbol{V}|\right)\boldsymbol{V} \tag{7}$$

$$(\rho c_p)_{eff}\boldsymbol{V}\nabla T = \nabla(k_{eff}\nabla T) \tag{8}$$

流体区域控制方程为

$$\nabla(\boldsymbol{V}) = 0 \tag{9}$$

$$\rho_f(\boldsymbol{V}\cdot\nabla)\boldsymbol{V} = -\nabla p + \mu_f\nabla^2\boldsymbol{V} \tag{10}$$

$$\rho_f c_{pf}\boldsymbol{V}\nabla T = \nabla\cdot(k_f\nabla T) \tag{11}$$

式中，$\boldsymbol{V}$ 为速度矢量(m/s)，p 为压力(Pa)，μ_f 为动力粘度(Pa·s)，K 为多孔介质渗透率(m^2)，ε 为孔隙率，C_F 为阻力系数，ρ 为密度(kg/m^3)，下标 f 代表流体，k 为导热系数(W/(m·K^{-1}))，c_p 为定压比热容(J/(kg·K))，下标 s 表示固体，其中 $(\rho c_p)_{eff} = \varepsilon\rho_f c_{p,f} + (1-\varepsilon)\rho_s c_{p,s}$，$k_{eff} = \varepsilon k_f + (1-\varepsilon)k_s$。

上下通道底板区域的能量方程为

$$\nabla^2 T = 0 \tag{12}$$

设置热沉工作时流体区域冷却剂入口及出口边界条件如下：入口温度 $T_{in} = 300$ K，入口速度 $V_{in} = 0.5$ m/s，出口压力 $p_{out} = 101.325$ kPa。在多孔区域，流体与固体交界面的边界条件满足：

$$\boldsymbol{V} = 0 \tag{13}$$

$$T_f = T_s \tag{14}$$

$$k_f\frac{\partial T_f}{\partial \boldsymbol{n}} = k_s\frac{\partial T_s}{\partial \boldsymbol{n}} \tag{15}$$

式中，$\boldsymbol{n}$ 为沿壁面法线方向。

热沉底面边界条件为

$$q'' = -k_s\frac{\partial T_s}{\partial \boldsymbol{n}} \tag{16}$$

式中，q''=100 W/cm^2 为底面热流密度。

在热沉单元外侧多孔面为对称边界条件：

$$\begin{cases}\dfrac{\partial \boldsymbol{V}}{\partial \boldsymbol{n}} = 0\\ \dfrac{\partial T}{\partial \boldsymbol{n}} = 0\end{cases} \tag{17}$$

热沉单元顶部及外侧固体面为绝热边界条件：

$$\begin{cases}\nabla \boldsymbol{V} = 0\\ \dfrac{\partial T}{\partial \boldsymbol{n}} = 0\end{cases} \tag{18}$$

1.3 数值方法与优化目标

模型参数初始值设置为：流体区域体积占比

$\phi_f=0.5$，多孔材料孔隙率 $\varepsilon=0.8$，渗透率 $K=4.73\times10^{-10}$ m^2，冷却剂入口速度 $V_{in}=0.5$ m/s，热沉单元纵横比 $\alpha=3$，通道高度比 $H_1/H_2=1$，肋厚比 $W_r/W_b=2$。

本文选择最大热阻为优化目标，其定义式为

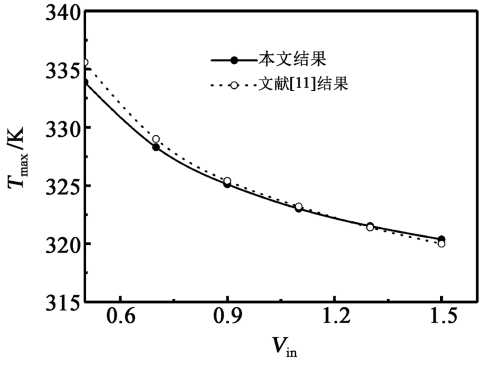
$$R_t=(T_{max}-T_{in})/Q \tag{19}$$

式中，T_{max}，T_{in} 分别为热沉最高温度和冷却剂入口温度，$Q=100$ W 为热沉底面受到的总热量。

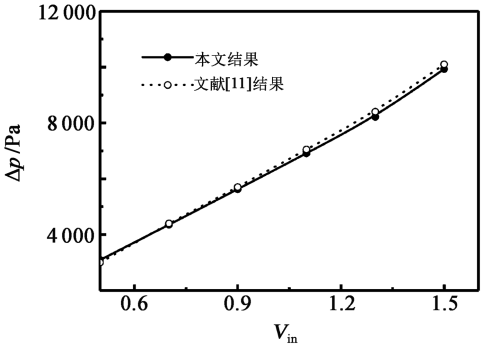
表 1 给出了 5 种不同网格划分策略所得的热沉最大热阻值 R_t 及相对误差，第 4 次之后继续加密网格，对计算结果几乎无影响，说明第 4 次之后计算结果已趋于稳定，本文采用第 4 次计算时使用的网格划分策略。连续性方程、动量和能量方程的收敛标准均为 10^{-6}。

表 1　网格独立性检验

计算次数	单元数	R_t/(K·W^{-1})	$\lvert(R_t^{j+1}-R_t^j)/R_t^j\rvert$
1	294 771	0.227 9	—
2	430 087	0.221 5	2.81%
3	627 048	0.234 1	5.68%
4	689 049	0.245 1	4.70%
5	882 482	0.245 0	0.08%



(a)　T_{max} 与 V_{in} 关系



(b)　Δp 与 V_{in} 的关系

图 3　模型有效性验证结果

为进一步验证算法的可靠性，建立文献[11]的热沉模型，以热沉最高温度 T_{max} 和入口与出口之间的压降 Δp 为评价指标进行对比，结果如图 3 所示。T_{max} 和 Δp 最大相差分别为 0.5%和 4.8%，说明本文算法可靠。

2　结果与讨论

2.1　热沉单元端面纵横比优化

图 4 给出了 $\phi_f=0.5$，$\varepsilon=0.8$，$V_{in}=0.5$ m/s，$H_1/H_2=1$，$W_r/W_b=2$ 时，热沉最大热阻 R_t 与流体流动所消耗的泵功率 P 随热沉单元端面纵横比 α 的变化规律。由图 4 可知，随着 α 的增大，R_t 先快速减小之后略有增加，即存在最优的 $\alpha_{opt}=7$，使得 R_t 取得最小值 $R_{t,m}=0.191\,3$ K/W，经过优化，$R_{t,m}$ 比初始值降低了 21.19%，而 P 随着 α 的增大呈现近似线性增加的趋势，当 α 从 3 增大至 15，P 增大了 3.65 倍。这说明热沉单元端面纵横比对最大热阻值和泵功率值均有较大影响，在一定边界条件下，通过优化热沉单元端面纵横比，可显著降低热沉最大热阻，而热沉单元端面纵横比增大时，泵功率也随之持续增大。这是由于不同的热沉结构改变了上下通道流体区域的流动边界层和热边界层，进而影响到传热效果。

图 5 分别给出 $\alpha=3,7,15$ 时，热沉单元侧表面的温度分布。由图 5 可知，温度在热沉高度方向上的变化更加明显，且最高温度的位置也会随着热沉结构的改变而改变。

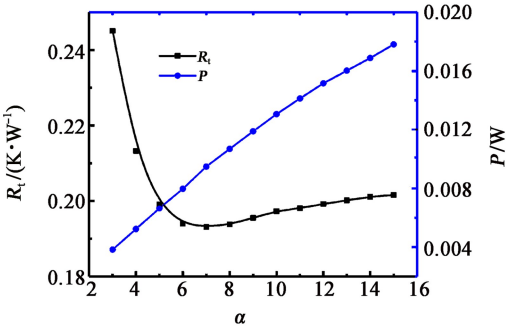


图 4　R_t，P 与 α 的关系

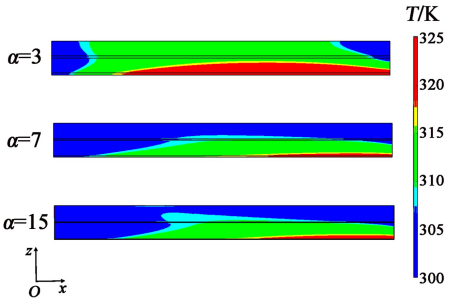


图 5　不同 α 条件下，热沉单元温度分布图

2.2 冷却剂入口速度对最优构形的影响

图 6 给出了 $\phi_f=0.5$，$\varepsilon=0.8$，$H_1/H_2=1$，$W_r/W_b=2$ 时，冷却剂入口速度 V_{in} 对热沉最大热阻 R_t 随热沉单元端面纵横比 α 变化规律的影响。由图 6 可知，给定 V_{in}，R_t 随 α 的增大先减小后增大，即均存在最优的 α_{opt}，使得 R_t 取得最小值 $R_{t,m}$，且 V_{in} 越大，R_t 取得最小值 $R_{t,m}$ 后随 α 的增大而增长的趋势越缓；同时，随着 V_{in} 的增大，α_{opt} 有所增加。α 相同时，V_{in} 越大，R_t 越小。这是由于入口速度的增大可强化对流换热，减小热沉最大热阻，但不同入口速度所产生的强化传热的综合效果又是不同的，所以对应不同入口速度的最优构形不尽相同。

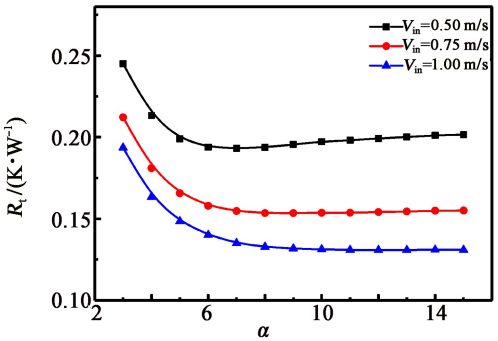


图 6 V_{in} 对 R_t 与 α 关系的影响

2.3 多孔材料孔隙率对最优构形的影响

图 7 给出了 $\phi_f=0.5$，$V_{in}=0.5$ m/s，$H_1/H_2=1$，$W_r/W_b=2$ 时，多孔材料孔隙率 ε 对热沉最大热阻 R_t 随热沉单元端面纵横比 α 变化规律的影响。由图 7 可知，给定 ε，均存在最优的 α_{opt}，使得 R_t 取得最小值 $R_{t,m}$，且不同 ε 条件下，α_{opt} 并不相同；α 不同时，R_t 随 ε 的变化规律也不相同。当 α 较小时，R_t 随 ε 的增大而增大，而当 α 较大时，R_t 随 ε 的增大先减小后增大，即存在最优的 ε_{opt}，使得 R_t 取得最小值 $R_{t,m}$。这是由于孔隙率的改变，会直接影响多孔区域的有效热导率和多孔及流体区域的流动状态，进而影响热沉传热效果；在较小的热沉单元端面纵横比条件下，多孔区域内部的导热热阻为热沉传热的主要热阻，较小的孔隙率有助于提高多孔区域的有效热导率，减小导热热阻，从而强化热沉换热效果；而在热沉单元端面纵横比较大的条件下，适当提高孔隙率可以增大多孔区域的对流换热面积，亦可强化热沉换热效果，而过大的孔隙率极大地降低了多孔区域的有效热导率，增大了多孔区域的导热热阻。两者的综合效应，造成了不同热沉结构条件下，最大热阻随孔隙率变化规律的不同。

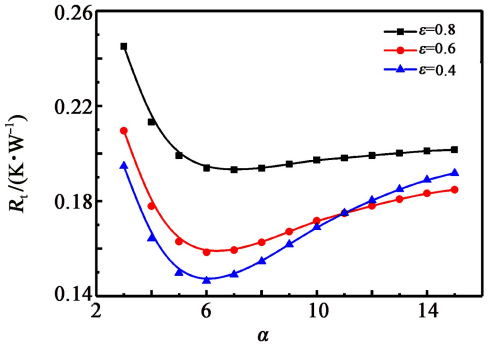


图 7 ε 对 R_t 与 α 关系的影响

2.4 上下通道高度比对最优构形的影响

图 8 给出了 $\phi_f=0.5$，$V_{in}=0.5$ m/s，$\varepsilon=0.8$，$W_r/W_b=2$ 时，上下通道高度比 H_1/H_2 对热沉最大热阻 R_t 随热沉单元端面纵横比 α 变化规律的影响。由图 8 可知，给定 H_1/H_2，R_t 随 α 增大均存在最小值 $R_{t,m}$，且 H_1/H_2 的改变也不会影响热沉最优构形，但增大 H_1/H_2，可使 $R_{t,m}$ 减小；不同 α 条件下，R_t 随 H_1/H_2 的变化规律不同。当 α 较小时，R_t 随 H_1/H_2 的增大而减小，而当 α 较大时，R_t 随 H_1/H_2 的增大先减小后增大，即此时存在最优的 $(H_1/H_2)_{opt}$，使得 R_t 取得最小值 $R_{t,m}$。这说明在不同热沉单元端面纵横比条件下，选择适当的上下通道高度比有助于提高热沉散热性能。这是由于增大上下通道高度比，一方面减小了下部通道冷却剂的体积流率，不利于底部通道对流换热，另一方面又会减小底部通道的导热热阻，更有利于热流通过导热传至上层通道，而在不同热沉单元端面纵横比条件下，二者对热沉总体传热效果影响的程度不同，使得热沉单元端面纵横比改变时，热沉最大热阻随上下通道高度比的变化规律不同。

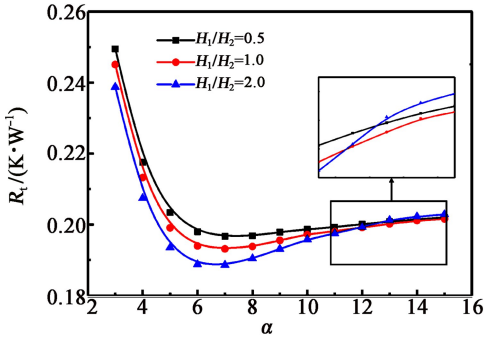


图 8 H_1/H_2 对 R_t 与 α 关系的影响

2.5 流体区域体积占比对最优构形的影响

图 9 给出了 $\varepsilon=0.8$，$V_{in}=0.5$ m/s，$H_1/H_2=1$，$W_r/W_b=2$ 时，流体区域体积占比 ϕ_f 对热沉最大

热阻 R_t 随热沉单元端面纵横比 α 变化规律的影响。由图 9 可知，不同 ϕ_f 条件下，随着 α 的增大，R_t 先减小后增大，均存在最优的 α_{opt} 使得 R_t 取得最小值 $R_{t,m}$，且 R_t 取得最小值后继续增大 α，R_t 增大的相对幅度随 ϕ_f 的增大而减小，如 ϕ_f 分别取 0.4，0.5，0.6 的条件下，在 $\alpha=14$ 时对应的 R_t 值，相对于该条件下的最小值 $R_{t,m}$，增大的相对幅度分别为 11.88%，4.37%，0.73%；给定 α，R_t 随 ϕ_f 的增大并不单调变化，存在两个临界点：α_{cr1} 和 α_{cr2}，当 $\alpha<\alpha_{cr1}$ 时，R_t 随 ϕ_f 的增大而增大，当 $\alpha>\alpha_{cr2}$ 时，R_t 随 ϕ_f 的增大而单调递减，而当 $\alpha_{cr1}<\alpha<\alpha_{cr2}$ 时，R_t 随 ϕ_f 的增大先减小后增大，即此时存在最优的 ϕ_{opt}，使得 R_t 取得最小值 $R_{t,m}$。这是由于不同热沉结构条件下，热沉内部传热的主要阻力不同；当热沉单元端面纵横比较小时，流体内部的导热热阻为热沉传热的主要热阻，故增大流体区域体积占比，虽增大了体积流率，但却使流体内部导热热阻大大增加；随着热沉单元端面纵横比的增大，流体内部的导热热阻大小与对流换热热阻相当，此时存在最优的流体区域体积占比，使热沉最大热阻最小；当热沉单元端面纵横比较大时，流体与肋片之间的对流换热热阻为热沉内部传热的主要热阻，故增大流体区域体积占比，增大了体积流率，有利于降低对流换热热阻，使热沉最大热阻降低。

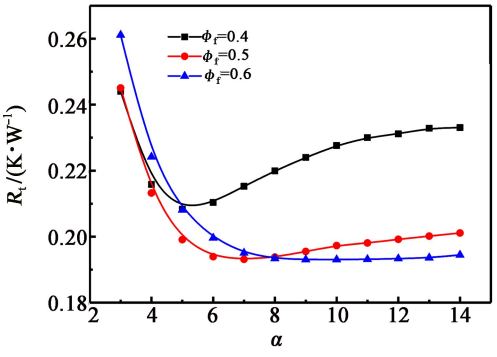


图 9　ϕ_f 对 R_t 与 α 的关系的影响

2.6　肋厚比对最优构形的影响

图 10 给出了 $\phi_f=0.5$，$\varepsilon=0.8$，$V_{in}=0.5$ m/s，$H_1/H_2=1$ 时，肋厚比 W_r/W_b 对热沉最大热阻 R_t 随热沉单元端面纵横比 α 变化规律的影响。由图 10 可知，不同 W_r/W_b 条件下，随着 α 的增大，R_t 先快速减小之后略有增加，即存在最优的 α_{opt}，使得 R_t 取得最小值 $R_{t,m}$，改变 W_r/W_b 并不影响 α_{opt} 值，而 $R_{t,m}$ 随 W_r/W_b 的增大略有增加，如 W_r/W_b 从 1 增大至 3，$R_{t,m}$ 由 0.019 19 K/W 增大至 0.019 38 K/W，增长量为 0.000 19 K/W，增长幅度仅为 0.99%；给定 α，R_t 随 W_r/W_b 的变化规律不同，存在一个临界值 α_{cr}，当 $\alpha<\alpha_{cr}$ 时，R_t 随 W_r/W_b 的增大而减小，当 $\alpha>\alpha_{cr}$ 时，R_t 随 W_r/W_b 的增大而增大。这说明，在计算参数取值范围内，改变肋厚比对热沉散热性能影响很小。这是由于热沉单元纵横比确定的条件下，肋厚比不同时，通道截面参数略有不同，从而影响流体区域与多孔肋片区域的换热效果，热沉单元纵横比越小，肋厚比的改变对通道截面参数的影响越大。

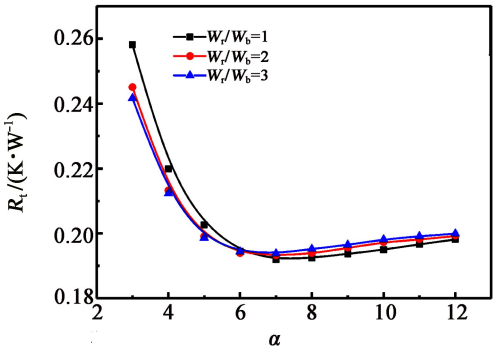


图 10　W_r/W_b 对 R_t 与 α 的关系的影响

3　结论

本文建立了上下侧肋均为多孔材料的双层矩形截面微通道热沉模型，在给定热沉体积及流体区域体积占比的条件下，得到了最大热阻最小情况下的最优构形，并分析了冷却剂入口速度、多孔材料孔隙率、流体区域体积占比、上下通道高度比、肋厚比等参数对热沉最优构形的影响。得到以下结论：

(1)给定初始条件，优化热沉单元端面纵横比，可使最大热阻减小 21.19%；不同入口速度条件下，热沉最优构形不同。

(2)在热沉单元端面纵横比较小时，减小孔隙率有利于降低最大热阻，而在热沉单元端面纵横比较大时，存在最优的孔隙率使得最大热阻最小。

(3)热沉最优单元端面纵横比随流体区域体积占比的增大而增大，不同热沉单元端面纵横比条件下，最大热阻随流体区域体积占比的变化规律并不单调。

(4)本文算例中，上下通道高度比和肋厚比的改变并未影响热沉的最优构形。

参考文献：

[1] Erp R V, Soleimanzadeh R, Nela L, et al. Co-designing electronics with microfluidics for more sustainable cooling[J]. Nature, 2020, 585(7824): 211-216.

[2] Abo-Zahhad E M, Ookawara S, Radwan A, et al. Performance, limits and thermal stress analysis of high concentrator multijunction solar cell under passive cooling conditions[J]. Appl. Therm. Eng., 2020, 164: 114497.

[3] Kumar K, Kumar R, Bharj R S. Entropy generation analysis due to heat transfer and nanofluid flow through microchannels: A review[J]. Int. J. Exergy, 2020, 31(1): 49-86.

[4] Alihosseini Y, Targhi M Z, Heyhat M M, et al. Effect of a micro heat sink geometric design on thermo-hydraulic performance: A review[J]. Appl. Therm. Eng., 2020, 170: 114974.

[5] 王 蓉. 高热流密度条件下内肋微通道复合热沉的性能分析与构形设计[D]. 武汉：海军工程大学，2020.
Wang Rong. Performance analysis and constructal design of internally finned microchannel composite heat sink with high heat flux[D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2020.

[6] Xie G N, Li S A, Sunden B, et al. A numerical study of the thermal performance of microchannel heat sinks with multiple length bifurcation in laminar liquid flow[J]. Numer. Heat. Transfer, Part A, 2014, 65(2): 107-126.

[7] Bahiraei M, Heshmatian S, Keshavarzi M. Multi-criterion optimization of thermohydraulic performance of a mini pin fin heat sink operated with ecofriendly graphene nanoplatelets nanofluid considering geometrical characteristics[J]. J. Mol. Liq., 2019, 276: 653-666.

[8] Hung T C, Yan W M. Thermal performance enhancement of microchannel heat sinks with sintered porous media [J]. Numer. Heat Transfer, Part A, 2013, 63(9): 666-686.

[9] Rasam H, Roy P, Savoldi L, et al. Numerical assessment of heat transfer and entropy generation of a porous metal heat sink for electronic cooling applications[J]. Energies, 2020, 13(15): 3851.

[10] Hung T C, Huang Y X, Sheu T S, et al. Numerical optimization of the thermal performance of a porous-microchannel heat sink[J]. Numer Heat Transfer, Part A, 2014, 65(5): 419-434.

[11] Leng C, Wang X D, Wang T H, et al. Fluid flow and heat transfer in microchannel heat sink based on porous fin design concept[J]. Int. Commun Heat Mass Transfer, 2015, 65(7): 52-57.

[12] Vafai K, Zhu L U. Analysis of two-layered micro-channel heat sink concept in electronic cooling[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1999, 42(12): 2287-2297.

[13] Wang S L, Li X Y, Wang X D, et al. Flow and heat transfer characteristics in double-layered microchannel heat sinks with porous fins[J]. Int. Commun. Heat Mass Transfer, 2018, 93(4): 41-47.

[14] Li X Y, Wang S L, Wang X D, et al. Selected porous-ribs design for performance improvement in double-layered microchannel heat sinks[J]. Int. J. Therm. Sci., 2019, 137(3): 616-626.

[15] Wang T H, Wu H C, Meng J H, et al. Optimization of a double-layered microchannel heat sink with semi-porous-ribs by multi-objective genetic algorithm[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2020, 149(3): 119217.

[16] Bejan A. Street network theory of organization in nature[J]. J. Adv. Transport, 1996, 30(2): 85-107.

[17] Bejan A. Constructal-theory network of conducting paths for cooling a heat generating volume[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1997, 40(4): 799-816.

[18] Chen L G, Feng H J, Xie Z H, et al. Progress of constructal theory in China over the past decade[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2019, 130: 393-419.

[19] Bejan A. Freedom and Evolution: Hierarchy in Nature, Society and Science[M]. Berlin: Springer, 2020.

[20] Chen L G, Wu W J, Feng H J. Consturctal Design for Heat Conduction [M]. London: Book Publisher International, 2021.

[21] Lu Z H, Zhang K, Liu J X, et al. Effect of branching level on the performance of constructal theory based Y-shaped liquid cooling heat sink[J]. Appl. Therm. Eng., 2020, 168: 114824.

[22] Bello-Ochende T, Liebenberg L, Meyer J P. Constructal design: geometric optimization of micro-channel heat sinks [J]. S. Afr. J. Sci., 2007, 103(6): 483-489.

[23] Mardani M, Salimpour M R. Optimization of triangular microchannel heat sinks using constructal theory [J]. J. Mech. Sci. Technol., 2016, 30(10): 4757-4764.

[24] 石瀚楠，谢志辉，孙丰瑞，等. 树状脉管圆盘热沉的传热分析与构形设计[J]. 工程热物理学报，2019，40(7)：1590-1595.
Shi Hannan, Xie Zhihui, Sun Fengrui, et al. Heat transfer analysis and constructal design research of tree-like vascular disc heat sink[J]. J. Eng. Thermophys, 2019, 40(7): 1590-1595.

[25] Guo Z Y, Zhu H Y, Liang X G. Entransy-A physical quantity describing heat transfer ability [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2007, 50(13-14): 2545-2556.

[26] 过增元. 热学中的新物理量[J]. 工程热物理学报，2008，29(1)：112-114.
Guo Z Y. New physical quantities in heat [J]. J. Eng. Thermophysics, 2008, 29(1): 112-114.

[27] 王 亮，谢志辉，孙丰瑞，等. 基于多物理场耦合计算的正六边形微通道热沉构形研究[J]. 中国科学：技术科学，2019，49(7)：741-752.
Wang Liang, Xie Zhihui, Sun Fengrui, et al. Constructal studies on hexagonal microchannel heat sinks based on multi-physics field coupling calculations[J]. Sci. China: Tech. Sci., 2019, 49: 741-752.

[28] Chen L G, Yang A B, Feng H J, et al. Constructal design progress for eight types of heat sinks[J]. Sci. China: Tech. Sci., 2020, 63(6): 879-911.

（下转第 417 页）

[17] Wakin M B, Laska J N, Duarte M F, et al. Compressive imaging for video representation and coding[C]// Proc. of the Picture Coding Symposium, 2006.

[18] Romberg J. Imaging via compressive sampling[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2): 14-20.

[19] Kim J, Lee J K, Lee K M. Accurate image super-resolution using very deep convolutional networks[C]// Proc. 2016 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 1646-1654.

[20] Kim J, Lee J K, Lee K M. Deeply-recursive convolutional network for image super-resolution [C]// Proc. IEEE Confer. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016.

[21] Ledig C, Theis L, Huszar F, et al. Photo-realistic single image super-resolution using a generative adversarial network [C]//Proc. IEEE Confer. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017.

[22] Shi W, Caballero J, Huszar F, et al. Real-time single image and video super-resolution using an efficient sub-pixel convolutional neural network[C]//Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 1874-1883.

[23] Ledig C, Wang Z, Shi W, et al. Photo-realistic single image super-resolution using a generative adversarial network[C]// Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017: 105-114.

[24] Zhang R, Isola P, Efros A A, et al. The unreasonable effectiveness of deep features as a perceptual metric[C]//Proc. IEEE/CVF Conf. on Computer Vision & Pattern Recognition, 2018.

[25] Chao D, Chen C L, He K, et al. Learning a deep convolutional network for image super-resolution[C]//Proc. European Conf. on Computer Vision, 2014: 184-199.

[26] He K, Zhang X, Ren S, et al. Deep residual learning for image recognition [C]//Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 770-778.

[27] Szegedy C, Ioffe S, Vanhoucke V, et al. Inceptionv4, inception-resnet and the impact of residual connections on learning[C]// IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016.

[28] Gan L. Block compressed sensing of natural images[C]// Proc. of the Inter. Conf. on Digital Signal Processing, 2007: 403-406.

[29] Fowler J E. Block-based compressed sensing of images and video[J]. Foundations and Trends in Signal Processing, 2012, 4(4): 297-416.

[30] Paszke A, Gross S, Chintala S, et al. Automatic differentiation in PyTorch [C]// NIPS 2017 Autodiff Workshop: The Future of Gradient-based Machine Learning Software and Techniques, 2017.

[31] Zhao H, Gallo O, Frosio I, et al. Loss functions for neural networks for image processing[J]. Computer Science, 2015: 1511.08861.

作者简介：

魏子然(1994—)，男，博士研究生，研究方向为信号压缩与恢复、压缩感知信号处理与图像重建技术，以及单像素成像技术。

(上接第 370 页)

[29] Bejan A. Designed porous media: maximal heat transfer density at decreasing length scales[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2004, 47(14-16): 3073-3083.

[30] Azoumah Y, Neveu P, Mazet N. Constructal design combined with entropy generation minimization for solid-gas reactors[J]. Int. J. Therm. Sci., 2006, 45(7): 716-728.

[31] Lorente S, Bejan A. Heterogeneous porous media as multiscale structures for maximum flow access[J]. J. Appl. Phys., 2006, 100(11): 114909.

[32] Zhou S B, Chen L G, Sun F R. Constructal entropy generation minimization for heat and mass transfer in a solid-gas reactor based on triangular element[J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 2007, 40(11): 3545-3550.

作者简介：

李文龙(1992—)，男，硕士研究生，研究方向为电子器件热管理与热设计；

谢志辉(1977—)，男，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为现代热力学、先进热管理理论与技术。

(上接第 379 页)

[20] Look D C, Molnar R J. Degenerate layer at GaN/sapphire interface: influence on Hall-effect measurements[J]. Appl. Phys. Lett., 1997, 70(25): 3377-3379.

[21] Van de Walle C G, Neugebauer J. First-principles calculations for defects and impurities: applications to Ⅲ-nitrides[J]. J. of Appl. Phys., 2004, 95(8): 3851-3879.

[22] Li G, Chua S J, Wang W. The Hall mobility and its relationship to the persistent photoconductivity of undoped GaN[J]. Solid State Communications, 1999, 111(11): 659-663.

作者简介：

李　佳(1995—)，男，湖北钟祥人，硕士研究生，主要从事 GaN 宽禁带半导体薄膜材料的制备及性能研究；

季小红(1972—)，女，江苏南通人，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为光电材料的制备、性能和应用研究。