

研究论文

DOI: 10.11949/0438-1157.20200681

方形微通道热沉的焓耗散优化分析

吉亚萍¹, 云和明¹, 耿文广², 李萌¹, 于仓仓¹, 陈宝明¹

(¹ 山东建筑大学热能工程学院, 山东 济南 250101; ² 齐鲁工业大学 (山东省科学院), 山东省科学院能源研究所, 山东省生物质气化技术重点实验室, 山东 济南 250014)

摘要: 基于CFD软件建立了两种不同结构的方形微通道热沉, 并对其进行数值计算, 模拟得到热沉的温度场和压力场。在此基础上, 研究了不同微通道分布方式、不同质量流率和不同热通量对热沉的温度、压降的影响, 同时基于焓耗散理论对比分析来获得方形微通道热沉换热效果较好的优化方案, 在固定边界热流条件下, 焓耗散越小, 换热效果越好。计算结果表明: 随着质量流率的增大, 热沉温度逐渐降低, 进出口压差逐渐增大, PEC逐渐增大, 焓耗散逐渐减小; 随着热通量的增大, 热沉温度逐渐升高, 进出口压差逐渐降低, PEC逐渐增大, 焓耗散逐渐减小。微通道分布方式为上层内切圆半径-下层外接圆半径分布时热沉的温度更低, PEC更大, 焓耗散更小, 传热效率更高。

关键词: 微通道; 热沉; CFD; 电子元件冷却; 焓耗散; 优化

中图分类号: TK 124

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2020) S2-0166-10

Entransy dissipation theory optimization analysis of square microchannel heat sink

JI Yaping¹, YUN Heming¹, GENG Wenguang², LI Meng¹, YU Cangcang¹, CHEN Baoming¹

(¹ School of Thermal Energy Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China; ² Energy Institute, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Shandong Provincial Key Laboratory of Biomass Gasification Technology, Jinan 250014, Shandong, China)

Abstract: Two kinds of square microchannel heat sinks with different structures were established based on CFD software, and numerical calculations were carried out to simulate the temperature field and pressure field of the heat sink. On this basis, the effects of different microchannel distribution patterns, different mass flow rates and different heat fluxes on the temperature and pressure drop of the heat sink are studied. At the same time, based on the comparison analysis of the entransy dissipation theory, a better optimization scheme of heat sink in square microchannel is obtained. A better optimization scheme, under the fixed boundary heat flow condition, the smaller the entransy dissipation, the better the heat exchange effect. The calculation results show that with the increase of mass flow rate, the heat sink temperature gradually decreases, the pressure drop increases gradually, the PEC gradually increases, and the entransy dissipation decreases; as the heat flux density increases, the heat sink temperature gradually increases, the pressure drop gradually decreases, the PEC gradually increases, and the entransy dissipation gradually decreases. The microchannel distribution pattern is the upper inscribed circle radius-

收稿日期: 2020-06-02 修回日期: 2020-07-07

通信作者: 云和明 (1976—), 男, 博士, 副教授, yunheming@163.com; 耿文广 (1977—), 男, 博士, gengwg@sderi.cn

第一作者: 吉亚萍 (1995—), 女, 硕士研究生, jijiyap@163.com

引用本文: 吉亚萍, 云和明, 耿文广, 李萌, 于仓仓, 陈宝明. 方形微通道热沉的焓耗散优化分析[J]. 化工学报, 2020, 71(S2): 166–175

Citation: JI Yaping, YUN Heming, GENG Wenguang, LI Meng, YU Cangcang, CHEN Baoming. Entransy dissipation theory optimization analysis of square microchannel heat sink[J]. CIESC Journal, 2020, 71(S2): 166–175

lower layer circumcircle radius distribution, the temperature of the heat sink is lower, the PEC is larger, the entransy dissipation is smaller, and the heat transfer efficiency is higher.

Key words: microchannels; heat sink; CFD; electronic component cooling; entransy dissipation; optimization

引言

随着微电子器件的小型化和集成化的发展,芯片的散热量急剧增加,给热管理带来了巨大的挑战。目前优化流动路径和增大传热对电子芯片散热有着显著的影响,它一方面提高了散热效率,另一方面又降低了成本。近几十年来,许多强化传热技术已被开发出来,用来改善不同系统的传热性能^[1-2]。近年来备受关注的用来提高通道内传热速率的途径有微通道和纳米通道的应用。在微通道内使用强制流动是冷却产生高温的电子器件的一种方法。

1981年,Tuckerman等^[3]首次提出使用小直径通道有助于冷却电子器件,随着直径的减小,传热系数增大;并指出与常规换热器相比,微通道的换热系数可提高40倍。2000年,Fedorov等^[4]在不可压缩和层流条件下应用了Navier-Stokes方程,提出了换热微通道的三维模型,微通道的结构对传热效率有着明显的影响。自Bejan等^[5-11]提出构形理论之后,这一理论逐渐发展成为一种优化微通道几何结构的方法。这一理论的广泛应用并不仅限于传热领域,其已经应用于流体流动等多个不同领域^[12-18]。基于构形理论,Wechsato等^[19]开发了对盘形器件进行冷却的对流树形结构,结构优化设计的目的,一方面尽可能减小造成的流动阻力,另一方面尽可能减小产生的热阻。Ramiar等^[20]对纳米流体在二维微通道中的共轭传热进行了数值计算,并研究了Reynolds数、纳米颗粒导电率对微通道的影响。Kaya^[21]研究了树形结构的分支长度和角度对微通道压降和传热的影响。Bello-Ochende等^[22]基于有限元法对三维微通道热沉的几何优化进行了数值研究。Ghaedamini等^[23]使用径向微通道,采用对流方法研究了圆盘微通道热沉的冷却。Tao等^[24]设计了一种双层新型带回路的叶状通道来冷却锂离子电池系统。翟玉玲等^[25]研究了带有三角形内肋及三角形凹穴的复杂结构微通道热沉,对比分析了热沉结构的变化对熵产率及热能传输系数的影响。Tan等^[26]研究了芯片冷却过程中微通道拓扑结构对其传热性能的影响,结果表明蜘蛛网状微通道具有最佳

的传热性能。Huo等^[27-28]研究了通道数量和流向对热沉冷却性能的影响,结果表明,在保证温度均匀性的前提下,可同时满足最大温降和最大压降的要求,却很难同时满足压降和传热能力的要求。王亮等^[29-30]基于构形理论对微通道圆盘热沉最大热应力和最大热应变进行了研究,并提出了微通道正六边形热沉,分析了最大热阻和当量热阻对其产生的影响。李勇铜等^[31]采用扩展型达西模型和局部非热平衡传热模型数值研究了复合微肋微通道热沉的流动与传热特性。郭丁彰等^[32]提出了带劈缝的球凸结构,并对布置该结构微通道内的流场结构和换热特性进行了数值分析。Farzaneh等^[33]在构造理论的基础上,研究了带有和不带回路的树形微通道对方形热沉的冷却效果。目前对方形微通道热沉微通道分布方式的研究较少,且很少有研究是基于焓耗散理论来分析热沉的传热能力。本文基于文献[33]进一步研究了在方形微通道热沉不同微通道分布方式、不同质量流率和不同热通量对其温度和压降的影响,并结合焓耗散理论对比分析方形微通道热沉的传热特性,为方形微通道热沉的设计提供理论研究。

1 数值模拟方案

1.1 几何模型

方形微通道热沉几何模型见图1,热沉的高度 $H=4.5\text{ mm}$,体积 $V=5652\text{ mm}^3$,热沉的微通道体积与固体体积分别为 V_m 与 V_s , V_m 与 V_s 的比例定义为体积占比 $\varphi=0.05$ 。微通道高度 $h=0.3\text{ mm}$,宽度为 D ,环形连接通道的宽度为 D_R , D_R/D 的比例设定为1/3。热

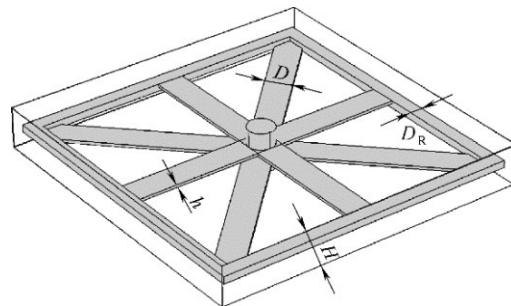


图1 方形微通道热沉几何模型

Fig.1 Square microchannel heat sink geometry model

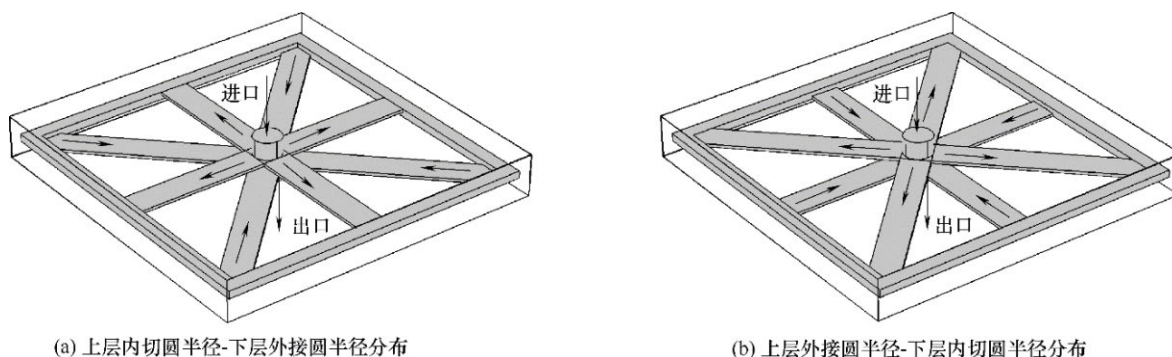


图2 微通道分布

Fig.2 Microchannel distribution

沉材料为硅,冷却流体为去离子水。

1.2 问题描述

对于图1所示方形微通道热沉,冷却流体由上层微通道中心处流入,经过上层通道流向热沉的边缘环形通道,再由边缘环形通道进入下层回流通道,返回热沉下层微通道圆心后由下方出口流出。微通道热沉的流动构型主要取决于上层供液通道和下层回流通道的分布两个因素。对于本文方形微通道热沉,上、下层通道的分布为该方形的内切圆半径方向和外接圆半径方向,微通道分布见图2,不同几何模型分类见表1。

表1 不同几何模型分类

Table 1 Classification of different geometric models

序号	通道分布	方案编号	图号
1	上层内切圆半径-下层外接圆半径分布	case1	图2(a)
2	上层外接圆半径-下层内切圆半径分布	case2	图2(b)

1.3 数学模型

考虑方形微通道热沉内的流动和换热特点,本文作如下假设:流体为常物性、不可压缩、连续流体,无内热源,忽略重力、浮升力及热辐射的影响,流体流动为稳态层流流动。

基于上述假设,对流换热过程的控制方程组为:

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

$$\rho(\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} = \nabla \cdot \left\{ -p\mathbf{I} + \mu \left[\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T \right] \right\} + \mathbf{F} \quad (2)$$

$$\rho c_p \mathbf{U} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q \quad (3)$$

固体域稳态导热的能量方程为:

$$\nabla^2 T = 0 \quad (4)$$

热沉及流体入口初始温度设为 300 K。热沉底部为恒定热通量加热,其方程为:

$$k_s \frac{\partial T}{\partial Z} = -\dot{q} \quad (5)$$

热沉其他外表面均采用绝热边界条件。固体和流体界面的热通量和温度的连续性方程为:

$$k_s \frac{\partial T_s}{\partial \mathbf{n}} = k_f \frac{\partial T_f}{\partial \mathbf{n}} \quad (6)$$

$$T_s = T_f \quad (7)$$

式中, ρ 为流体密度, kg/m^3 ; $\mathbf{U}$ 为速度矢量, m/s ; p 为压力, Pa ; $\mathbf{I}$ 为单位矩阵; μ 为黏性系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; $\mathbf{F}$ 为体积力矢量, N/m^3 ; c_p 为流体比定压热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; T 为温度, K ; $\mathbf{q}$ 为热通量矢量, W/m^2 ; Q 为包含黏性耗散和压力功在内的热源项, W/m^3 ; k_s 为固体热导率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; k_f 为流体热导率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; $\mathbf{n}$ 为流固界面的法向量。

1.4 边界条件

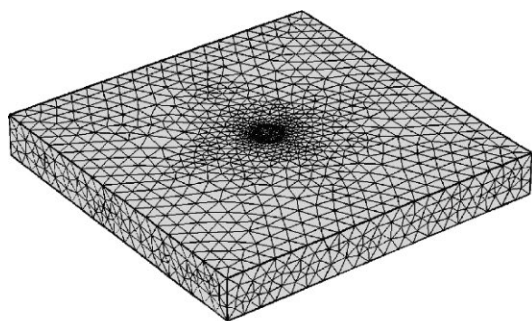
入口边界条件采用质量流率入口条件,质量流率为 m , 压力出口边界条件为 $p=1 \text{ atm}$ ($1 \text{ atm}=101325 \text{ Pa}$), 通道壁面处采用标准无滑移边界条件。热沉底部为恒定热通量加热,热通量为 q 。

1.5 网格划分

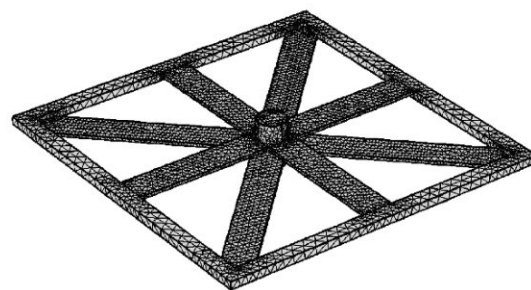
采用 COMSOL Multiphysics 软件进行数值求解, 网格结构采用自由三角形网格和自由四边形网格相结合, 为保证计算精度, 对网格进行了独立性检验。在 $q=30 \text{ W/cm}^2$ 、 $m=2 \text{ g/s}$ 时以微通道方形热沉上层内切圆半径-下层外接圆半径分布为例, 对其主要参数 $T_{\max}$ 的计算进行检验, 粗化网格、常规网格、细化网格的网格数量分别为 156983、379040、928075 个, 最高温度相对误差分别为 0.4%、0.1%。为了保证计算精度和节省计算时间, 本文采用常规网格划分网格, 网格划分见图3。

1.6 模型验证

在数值模拟过程中, 对文中的计算方法进行验证是实现准确分析的必要过程。本文计算了文献[34]中三维圆盘微通道热沉微通道分支数分别为 3、4、5、6 时的工况, 并采用与文献相同的边界条件与



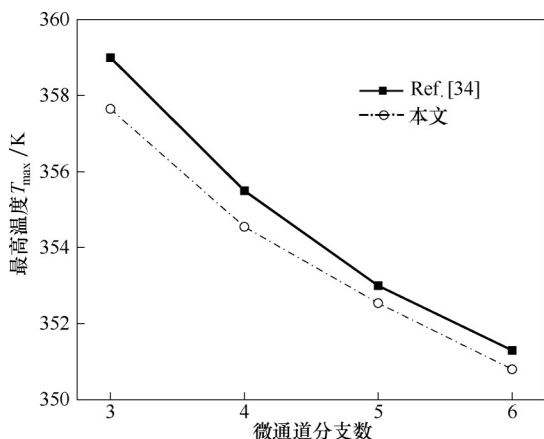
(a) 热沉外表面



(b) 热沉内部微通道

图3 网格划分图

Fig.3 Grid distribution

图4 本文与文献[34]的最高温度 T_{max} 对比Fig.4 Comparison of maximum temperature T_{max} between this paper and Ref. [34]

假设,用来检验本文计算方法的可靠性。图4是本文与文献[34]的最高温度 T_{max} 对比,其中 T_{max} 依次相差 0.38% ~ 0.14%,因此可知本文计算方法可靠。

2 模拟结果及讨论

2.1 微通道分布方式和质量流率对热沉的影响

本节研究在方形微通道热沉在 $q=30 \text{ W/cm}^2$ 时不同微通道分布方式和不同质量流率对其温度和压降的影响,并结合焓耗散理论对比分析方形微通道热沉的传热特性。

2.1.1 微通道分布方式和质量流率对热沉温度的影响 不同质量流率下热沉的温度分布见图5和图6,图中颜色图例下面的标值为温度值,单位为 K。

由图5、图6可知,随着质量流率的增大,两种微通道分布方式的热沉温度逐渐降低,温度分布也逐渐趋于均匀;在同一质量流率下,case1 的温度不仅低于 case2 的温度,且温度分布更均匀。

图7为不同质量流率下热沉的最高温度 T_{max} ,可

以看出,随着质量流率的增大,热沉的温度逐渐降低,增大质量流率,即冷却流体增多,带走了更多的热量,降低了热沉温度;在同一质量流率下,case1 的最高温度低于 case2,case1 的最高温度 T_{max} 相较于 case2 低 0.16% ~ 0.25%,因为方形热沉微通道分布方式为 case1 时,下层回流径向微通道与固体的接触面积比 case2 的大,接触面积越大,传热面积越大,故 case1 的最高温度更低。

图8为不同质量流率下热沉的温度均匀度。温度均匀度定义为平均温度 T_{ave} 与最高温度 T_{max} 的比值,即温度均匀度 $= T_{ave}/T_{max}$ 。当整个热沉在最高温度下工作时,即温度均匀度等于 1 时,整个热沉是最理想的设计。从图8中可以看出,随着质量流率的增大,方形热沉的温度均匀度逐渐升高;在同一质量流率下,case1 的温度均匀度高于 case2。case1 的温度均匀度相较于 case2 高 0.03% ~ 0.13%,因为 case1 整体温度低于 case2,case2 的平均温度更接近其最高温度,导致 case1 的温度均匀度高于 case2。

2.1.2 微通道分布方式和质量流率对热沉压降的影响 不同质量流率下热沉的压力分布见图9、图10,图中颜色图例下面的标值为压力值,单位为 Pa。

由图9、图10可知,随着质量流率的增大,case1 和 case2 的压力逐渐增大,压力分布逐渐不均匀;在同一质量流率下,case1 的压力大于 case2。case1 的进出口压差相较于 case2 高 2.16% ~ 3.50%,因为 case2 的温度高于 case1,随着温度升高,冷却流体密度减小,导致 case2 进出口压差小于 case1。

强化换热的评价准则是有关于传热系数、阻力系数以及 Reynolds 数的函数,当 Reynolds 数取值时,若换热装置的传热系数比较高,并且该装置的阻力系数较小时,则该装置的强化换热效果是好

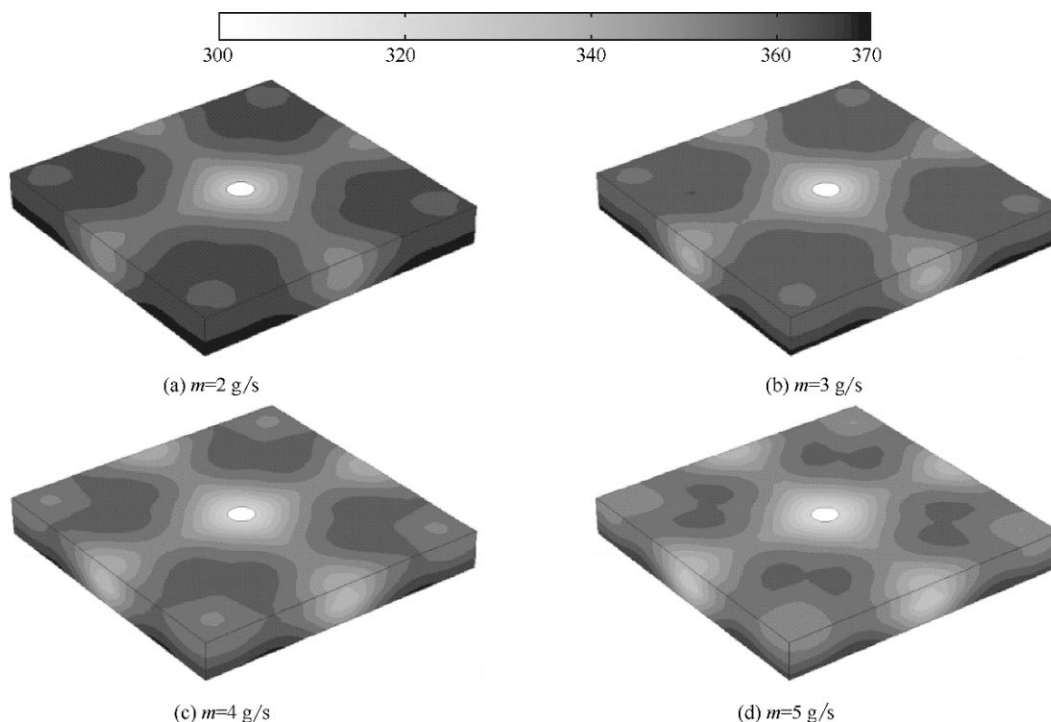


图5 不同质量流率下 case1 的温度分布

Fig.5 Temperature distribution of case1 at different mass flow rates

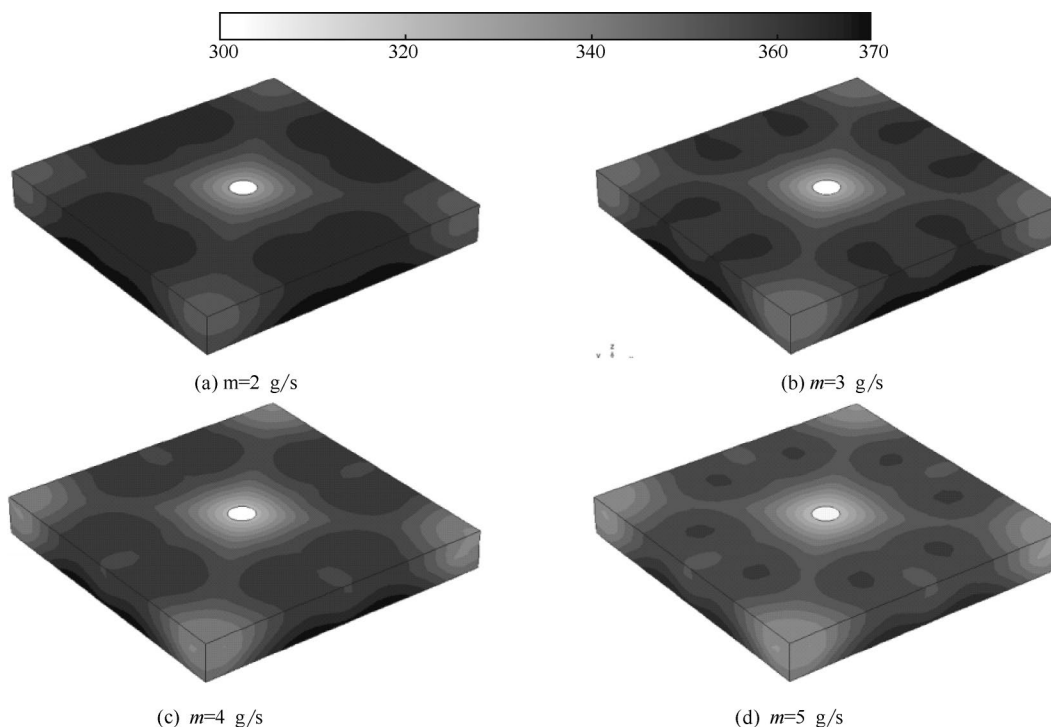


图6 不同质量流率下 case2 的温度分布

Fig.6 Temperature distribution of case2 at different mass flow rates

的。等流量下,评价强化的因子为 $PEC =$

$$\left(\frac{Nu}{Nu_0} \right) / \left(\frac{f}{f_0} \right), \text{其中, } Nu, Nu_0 \text{ 为平均 Nusselt 数, } f, f_0 \text{ 为}$$

达西阻力系数; Nu_0 和 f_0 是相同层流条件下,相同当

量直径下光滑圆管的数值。当 PEC 大于 1 时,表明等流量下强化换热后的换热效果比强化换热工作前的换热效果要好,并且随着 PEC 值的增大,换热装置的强化换热效果相应变好。

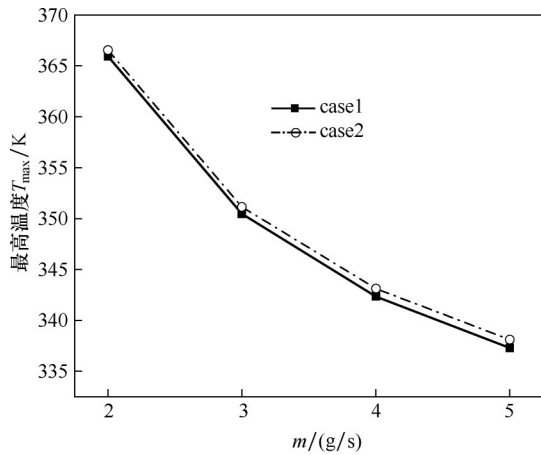
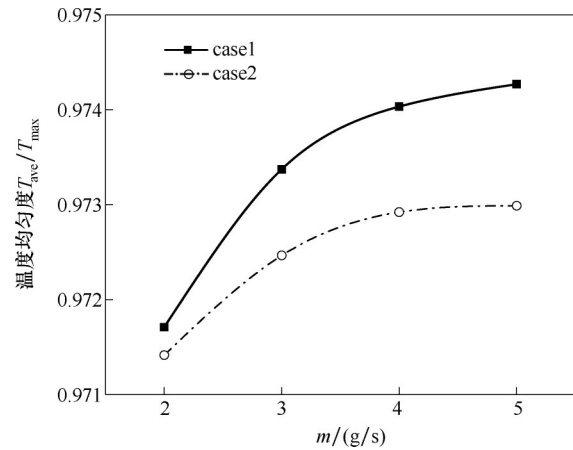
图7 不同质量流率下热沉的最高温度 $T_{\max}$ Fig.7 Maximum temperature $T_{\max}$ of heat sink at different mass flow rates

图8 不同质量流率下热沉的温度均匀度

Fig.8 Temperature uniformity of heat sink at different mass flow rates

图 11 是不同质量流率下热沉的 PEC, 可以看出: 随着质量流率的增大, case1 和 case2 的 PEC 都呈现上升趋势, 即随着质量流率的增大, 热沉换热效果越好; 在同一质量流率下, case1 的 PEC 要高于 case2, case1 的 PEC 相较于 case2 高 0.07% ~ 4.39%。随着质量流率的增大, 会导致对流传热系数增大, 进而增大了 Nu , 最终导致热沉的 PEC 升高。

2.1.3 微通道分布方式和质量流率对热沉焓耗散的影响 Guo 等^[35]提出了一个物理量——焓, 它反映了物体热量传递的能力, 单位体积内焓的耗散率

定义为焓耗散函数 $\dot{E}_{h\phi}$, 单位为 $W \cdot K/m^3$, 其表达式为:

$$\dot{E}_{h\phi} = -\dot{q} \cdot \nabla T \quad (8)$$

式中, ∇T 是温度梯度, K/m 。

整个热沉的总焓耗散 $\dot{E}_{vh\phi}$ 的表达式为:

$$\dot{E}_{vh\phi} = \int_V \dot{E}_{h\phi} dv = \int_V |-\dot{q} \cdot \nabla T| dv \quad (9)$$

式中, $\dot{E}_{vh\phi}$ 是总焓耗散, $W \cdot K$ 。

经式(8)、式(9)计算得出 case1 和 case2 的总焓耗散, 不同质量流率下热沉的总焓耗散见图 12。

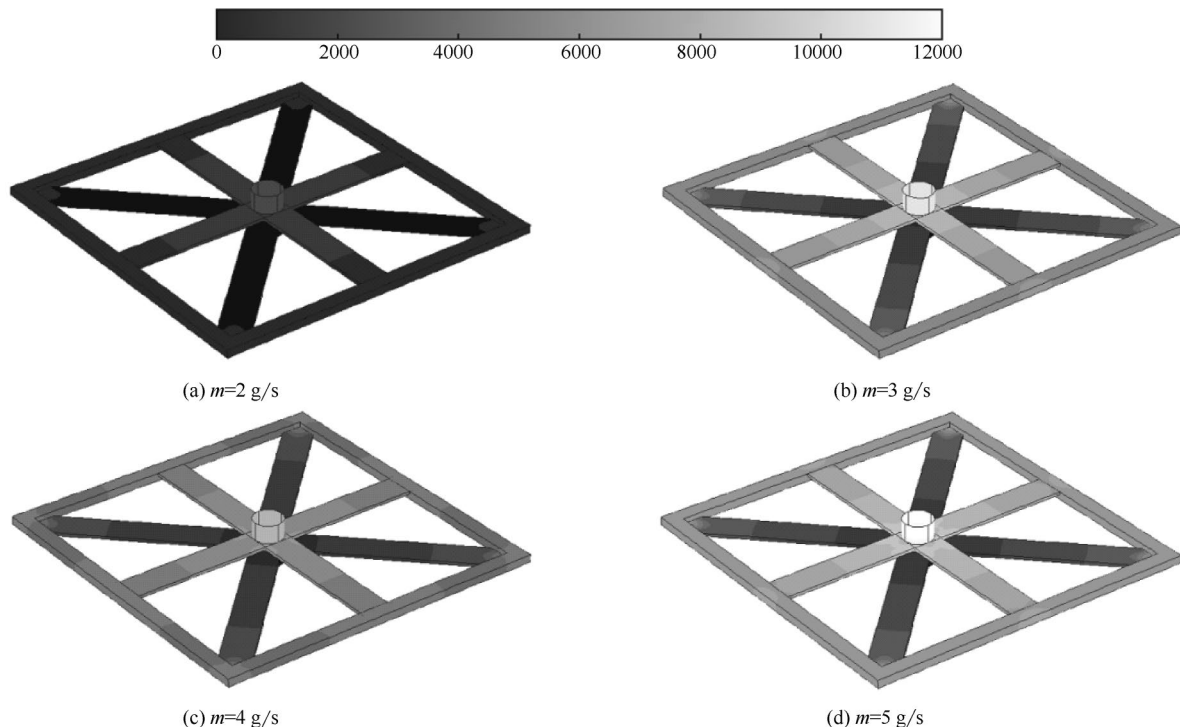


图9 不同质量流率下 case1 的压力分布

Fig.9 Pressure distribution nephogram of case1 at different mass flow rates

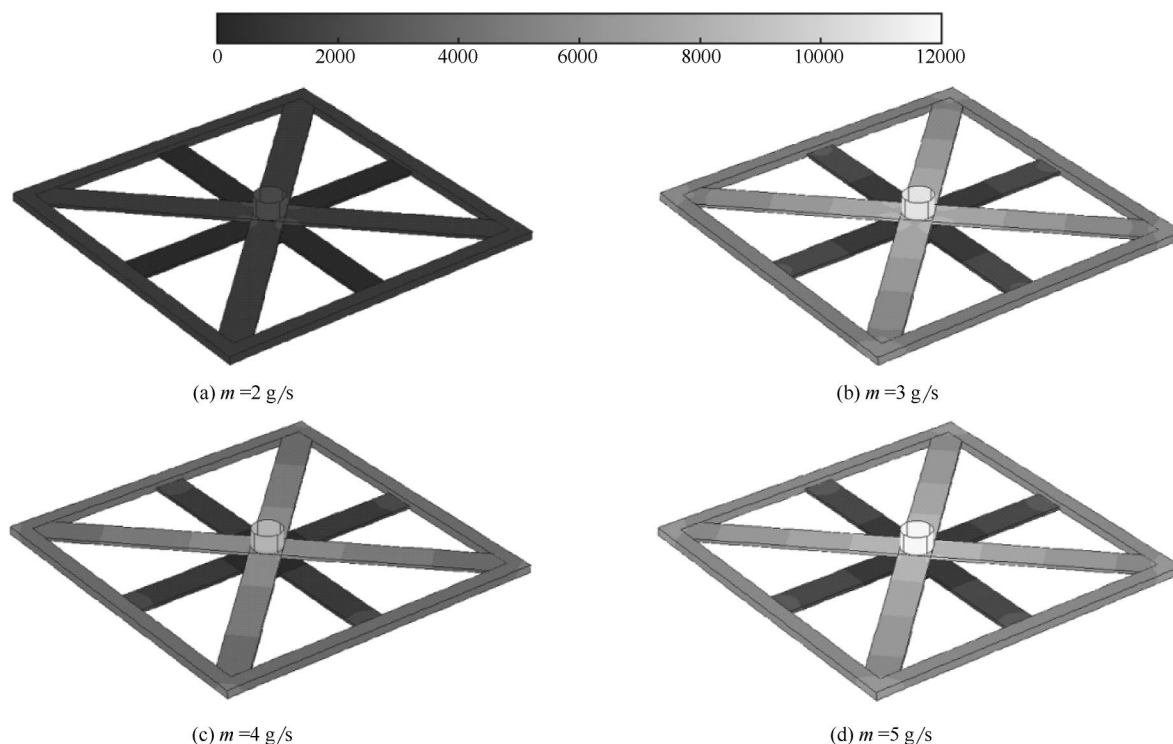


图10 不同质量流率下case2的压力分布

Fig.10 Pressure distribution nephogram of case2 at different mass flow rates

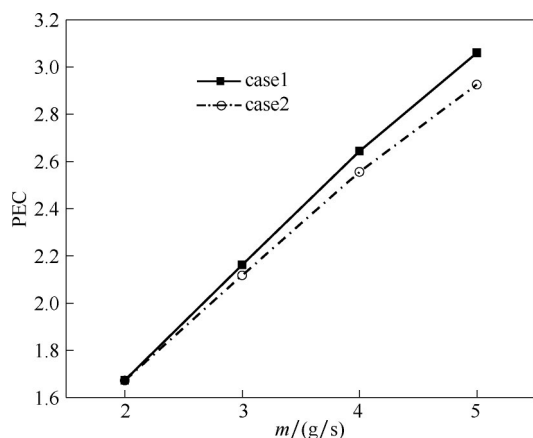


图11 不同质量流率下热沉的PEC

Fig.11 PEC of heat sink at different mass flow rates

由图12可知,随着质量流率的增大,case1和case2的总焓耗散逐渐降低;在同一质量流率下,case1的总焓耗散相较于case2低12.30%~19.46%。由焓耗散理论可知,对于固定的边界热流,当焓耗散最小时,传热过程被优化,即case1的换热效果优于case2。

2.2 微通道分布方式和热通量对热沉的影响

本节研究在方形微通道热沉在 $m=3\text{ g/s}$ 时不同微通道分布方式和不同热通量对其温度和压降的影响,并结合焓耗散理论对比分析方形微通道热沉的传热特性。

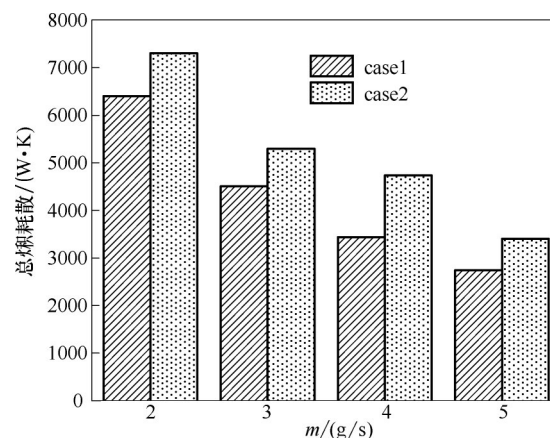


图12 不同质量流率下热沉的总焓耗散

Fig.12 Total entransy dissipation of heat sink at different mass flow rates

2.2.1 微通道分布方式和热通量对热沉温度的影响 图13是不同热通量下热沉的最高温度 $T_{\max}$,可以看出:随着热通量的增大,热沉的温度逐渐升高;在同一热通量下,case1的最高温度低于case2,case1的最高温度 $T_{\max}$ 相较于case2低0.14%~0.27%。

图14是不同热通量下热沉的温度均匀度,从图中看出:随着热通量的增大,case1和case2的温度均匀度逐渐减低;在同一热通量下,case1的温度均匀度低于case2。case1的温度均匀度相较于case2高0.05%~0.18%。

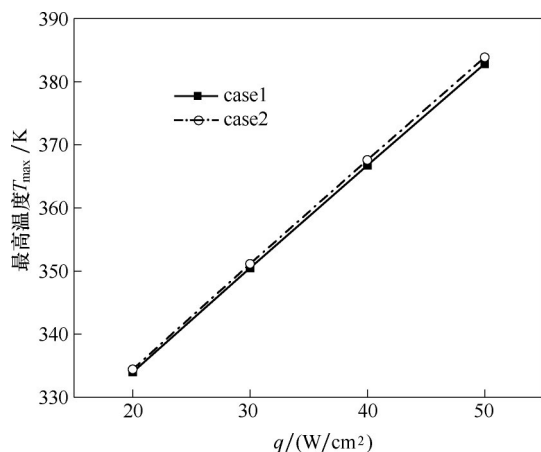
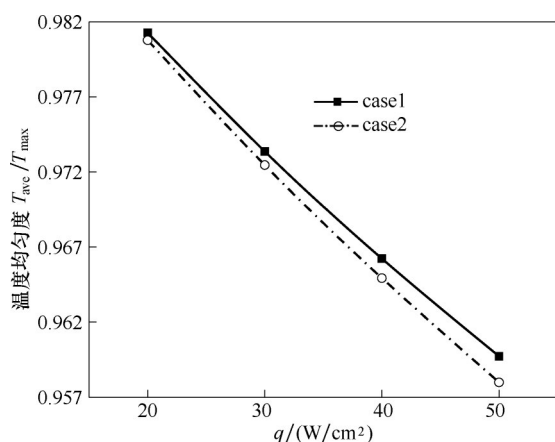
图13 不同热通量下热沉的最高温度 T_{max} Fig.13 Maximum temperature T_{max} of heat sink under different heat fluxes

图14 不同热通量下热沉的温度均匀度

Fig. 14 Temperature uniformity of heat sink under different heat fluxes

2.2.2 微通道分布方式和热通量对热沉压降的影响 图15是不同热通量下热沉的PEC,可以看出:随着热通量的增大,case1和case2的PEC都呈现出上升趋势;在同一热通量下,case1的PEC大于case2,case1的PEC相较于case2高2.91%~2.89%。随着热通量的增大,热沉换热效果越好,而在同一热通量的下,case1的换热效果优于case2。

2.2.3 微通道分布方式和热通量对总焓耗散的影响 经式(8)、式(9)计算得出,不同热通量时case1和case2的总焓耗散,不同热通量下热沉的总焓耗散见图16。

由图16可知,随着热通量的增大,case1和case2的总焓耗散均逐渐升高;在同一热通量下,case1的总焓耗散小于case2,case1的总焓耗散相较于case2低14.50%~15.69%。由焓耗散理论可知,即case1的换热效果优于case2。

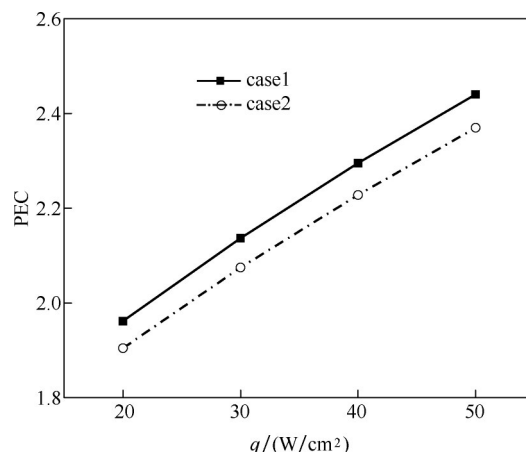


图15 不同热通量下热沉的PEC

Fig.15 PEC of heat sink under different heat fluxes

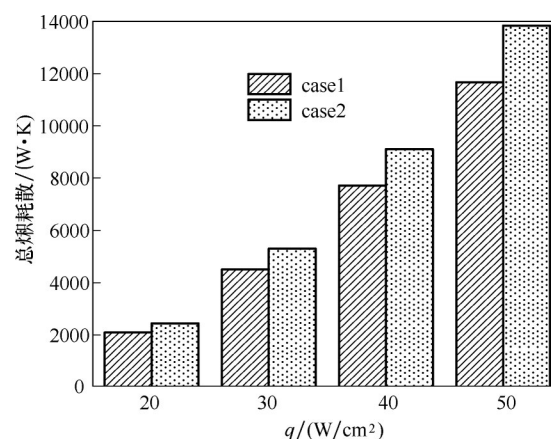


图16 不同热通量下热沉的总焓耗散

Fig. 16 Total entransy dissipation of heat sink under different heat fluxes

3 结 论

基于CFD技术利用COMSOL Multiphysics软件对方形微通道热沉进行数值模拟,同时基于焓耗散理论进行对比分析获得换热效果较好的优化方案,焓耗散越小,换热效果越好。结论如下。

(1)随着质量流率的增大,热沉温度逐渐降低,温度均匀度逐渐增大;随着热通量的增大,热沉温度逐渐升高,温度均匀度逐渐减小。当微通道分布方式为上层内切圆半径-下层外接圆半径分布时热沉的温度比微通道分布方式为上层外接圆半径-下层内切圆半径时的温度低,温度分布更均匀。

(2)随着质量流率的增大,热沉进出口压差逐渐增大,PEC逐渐增大;随着热通量的增大,热沉进出口压差逐渐降低,PEC逐渐增大。当微通道分布方式为上层内切圆半径-下层外接圆半径分布时热沉的PEC比微通道分布方式为上层外接圆半径-下

层内切圆半径时的PEC大。

(3)随着质量流率的增大,热沉总焓耗散逐渐减小;随着热通量的增大,热沉总焓耗散逐渐增大。微通道分布方式为上层内切圆半径-下层外接圆半径分布时热沉的总焓耗散比微通道分布方式为上层外接圆半径-下层内切圆半径时的总焓耗散小,传热效率更高。

参考文献

- [1] Laohalertdech S, Naphon P, Wongwiset S. A review of electrohydrodynamic enhancement of heat transfer [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, **11**(5): 858-876.
- [2] Murshed S M S, Castro C A N D, et al. A review of boiling and convective heat transfer with nanofluids [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, **15**(5): 2342-2354.
- [3] Tuckerman D B, Pease R F W. High-performance heat sinking for VLSI [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 1981, **2**(5): 126-129.
- [4] Fedorov A G, Viskanta R. Three-dimensional conjugate heat transfer in the microchannel heat sink for electronic packaging [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, **43**(3): 399-415.
- [5] Bejan A. Constructal-theory network of conducting paths for cooling a heat generating volume [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, **40**(4): 799-816.
- [6] Bejan A, Lorente S. *Design with Constructal Theory* [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.
- [7] Bejan A. *The Physics of Life: The Evolution of Everything* [M]. New York: St. Martin's Press, 2016.
- [8] Lorente S. The constructal law: from microscale to urban-scale design [J]. *Annual Review Heat Transfer*, 2017, **19**(8): 335-368.
- [9] Almerbati A, Lorente S, Bejan A. The evolutionary design of cooling a plate with one stream [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, **116**: 9-15.
- [10] Bejan A. Constructal law, twenty years after [J]. *Proceedings of the Romanian Academy, Series A, Mathematics, Physics, Technical Science, Information Science*, 2018, **18**(Spec. issue): 309-311.
- [11] Chen L G, Xiao Q H, Feng H J. Constructal optimizations for heat and mass transfers based on the entransy dissipation extremum principle, performed at the Naval University of Engineering: a review [J]. *Entropy*, 2018, **20**(1): 74-88.
- [12] Wechsato W, Lorente S, Bejan A. Tree-shaped insulated designs for the uniform distribution of hot water over an area [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, **44**(16): 3111-3123.
- [13] Gosselin L, Bejan A. Emergence of asymmetry in constructal tree flow networks [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, **98**(10): 104903.
- [14] Arion V, Cojocari A, Bejan A. Constructal tree shaped networks for the distribution of electrical power [J]. *Energy Conversion & Management*, 2003, **44**(6): 867-891.
- [15] Merckx G W, Jean-Christophe D. *Constructal Theory of Social Dynamics* [M]. Berlin: Springer, 2007.
- [16] Reis A H, Bejan A. Constructal theory of global circulation and climate [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2006, **49**(11/12): 1857-1875.
- [17] Bejan A, Lorente S. The constructal law of design and evolution in nature [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 2010, **365**(1545): 1335-1347.
- [18] Pan M Q, Wu Q Y, Jiang L B, et al. Effect of microchannel structure on the reaction performance of methanol steam reforming [J]. *Applied Energy*, 2015, **154**: 416-427.
- [19] Wechsato W, Lorente S, Bejan A. Dendritic heat convection on a disc [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, **46**(23): 4381-4391.
- [20] Ramiar A, Ranjbar A A, Hosseinzadeh S F. Effect of axial conduction and variable properties on two-dimensional conjugate heat transfer of Al_2O_3 -EG/water mixture nanofluid in microchannel [J]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2012, **5**: 79-87.
- [21] Kaya F. Numerical investigation of effects of ramification length and angle on pressure drop and heat transfer in a ramified microchannel [J]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2016, **9**: 767-772.
- [22] Bello-Ochende T, Liebenberg L, Meyer J P. Constructal cooling channels for micro-channel heat sinks [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, **50**(21/22): 4141-4150.
- [23] Ghaedamini H, Salimpour M R, Campo A. Constructal design of reverting microchannels for convective cooling of a circular disc [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2011, **50**(6): 1051-1061.
- [24] Tao D, Yan R, Zhang G D, et al. Novel leaf-like channels for cooling rectangular lithium ion batteries [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, **150**: 1186-1196.
- [25] 翟玉玲, 夏国栋, 刘献飞, 等. 复杂结构微通道热沉液体强化传热过程的热力学分析[J]. *化工学报*, 2014, **65**(9): 3403-3409.
- [25] Zhai Y L, Xia G D, Liu X F, et al. Thermodynamic analysis of enhanced heat transfer process in microchannel heat sinks with complex structure [J]. *CIESC Journal*, 2014, **65**(9): 3403-3409.
- [26] Tan H, Wu L W, Wang M Y, et al. Heat transfer improvement in microchannel heat sink by topology design and optimization for high heat flux chip cooling [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, **129**: 681-689.
- [27] Huo Y T, Rao Z H, Liu X J, et al. Investigation of power battery thermal management by using mini-channel cold plate [J]. *Energy Conversion & Management*, 2015, **89**: 387-395.
- [28] Zhang T S, Gao Q, Wang G H, et al. Investigation on the promotion of temperature uniformity for the designed battery pack with liquid flow in cooling process [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, **116**: 655-662.
- [29] 王亮, 谢志辉, 孙丰瑞, 等. 高热通量回流式圆盘热沉构形设计中的应力-应变分析[J]. *节能*, 2018, **37**(12): 53-59.
- [29] Wang L, Xie Z H, Sun F R, et al. Stress-deformation analysis in the constructal design of reverting microchannel circular heat sink with high heat flux [J]. *Energy Conservation*, 2018, **37**(12): 53-59.
- [30] 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.
- [30] Wang L, Xie Z H, Sun F R, et al. Constructal studies on hexagonal microchannel heat sinks based on multi-physics field coupling calculations [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2019, **49**(7): 741-752.

- [31] 李勇铜, 巩亮, 徐明海, 等. 金属泡沫复合微肋微通道热沉的流动传热特性分析[J]. 科学通报, 2019, 64: 215–222.
Li Y T, Gong L, Xu M H, et al. Thermal hydraulic performance of micro-channel heat sink with composite metal foam-solid fin design [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, **64**: 215–222.
- [32] 郭丁彰, 黄心悦, 李平. 布置带劈缝球凸结构微通道热沉内流动和换热特性[J]. 科学通报, 2019, **64**(14): 1526–1534.
Guo D Z, Huang X Y, Li P. Flow structure and heat transfer characteristics of microchannel heat sinks with split protrusion [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, **64**(14): 1526–1534.
- [33] Farzaneh M, Salimpour M R, Tavakoli M R. Design of bifurcating microchannels with/without loops for cooling of square-shaped electronic components [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, **108**: 581–595.
- [34] Wang X Q, Yap C, Mujumdar A S. Laminar heat transfer in constructal microchannel networks with loops [J]. Journal of Electronic Packaging, 2006, **128**(3): 273–280.
- [35] Guo Z Y, Zhu H Y, Liang X G. Entansy — a physical quantity describing heat transfer ability [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, **50**(13/14): 2545–2556.