材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021081901

基于类水滴状微结构的微通道流动和散热性能研究

曹卫华，商维佳，朱继元*

（桂林理工大学 机械与控制工程学院，广西 桂林 541004）

摘　要： 为了有效提高微通道散热器的散热性能，设计了一种含有类水滴状微结构的微通道散热器，并采用仿真模拟方法研究了微通道内类水滴状微结构的数量和高度变化对微通道的压力损失和散热性能的影响。在热流密度为 100 W/cm^2，入口端流体速度为 1 m/s 的条件下，设计了 9 组不同的含类水滴状微结构微通道。其中的 5 组通过改变单条微通道内类水滴状微结构的数量进行研究，得出当微结构数量为 7 时微通道的综合散热性能最优，其微通道底面平均温度下降了 18.42 K，散热系数提高了 37.63%。同时在微结构数量为 7 的基础上再次设计 4 组微通道，研究了微结构的高度对微通道散热性能的影响，得出当各微结构的高度沿流体流动方向逐次增高时，散热系数几乎不变，压力损失降低了 11.93%。

关键词： 微通道；类水滴状；散热性能；流动性能；热设计

中图分类号： TK124　**文章编号：** 1001－5868(2021)06－0868－07

Study on Flow and Heat Dissipation Performance of Micro-channels Based on Droplet-like Microstructure

CAO Weihua, SHANG Weijia, ZHU Jiyuan

(College of Mechanical and Control Engin., Guilin University of Technology, Guilin 541004, CHN)

Abstract: In order to effectively improve the heat dissipation performance of the micro-channel radiator, a microchannel radiator with droplet-like microstructure was designed, and the influence of the number and height of the droplet-like microstructure on the pressure loss and heat dissipation performance of the microchannel was studied by simulation method. In this paper, under the conditions as the heat flux of 100 W/cm^2 and the fluid velocity of 1 m/s at the inlet, 9 groups of different micro-channels with droplet-like microstructure were designed. Five groups were studied by changing the number of droplet-like microstructures in a single microchannel. It was found that when the number of microstructures was 7, the comprehensive heat dissipation performance of the microchannel was the best, and the average temperature of the bottom of the microchannel decreased by 18.42 K, the heat dissipation coefficient increased by 37.63%. At the same time, four groups of micro-channels were designed based on the number of 7 microstructures to study the influence of the height of the microstructures on the heat dissipation performance of the micro-channels. When the height of each microstructure in the micro-channels increased along the flow direction, the heat dissipation coefficient of the micro-channels basically unchanged, while the pressure loss was reduced by 11.93%.

Key words: microchannel; droplet like; heat transfer performance; flowing property; thermal design

收稿日期：2021－08－19.

基金项目：广西自然科学基金项目(2018GXNSFAA050006).

* **通信作者：**朱继元

0　引言

因微通道用于电子器件的冷却效果突出，国内外学者对微通道的内部结构开展了广泛研究。已有研究表明，在微通道底部或侧壁加工出微结构能够改变流体的流动特性[1-5]，极大地增强微通道的传热性能。

Lee 等[6]设计了不同倾斜角度的翅片微结构并观察它们的平均努塞尔数分布情况，结果表明倾斜角越小的翅片在雷诺数较高时有着最高的平均努塞尔数以及最高的压力损失。Khoshvaght 等[7]测试了相等截面积不同形状的针鳍状微结构，在所有情况下，其总传热系数和压降随着流速的增加而增加，而流速对压降的影响比传热系数更加明显。实验表明微结构会引起流体扰动和阻塞[8]，进而导致流体阻力和压降增加。Sakanova 等[9]发现引入的微结构越接近于流线型，其周围流体扰动的范围越小。有学者受仿生学启发，设计出鱼鳞状[10]、机翼状[11]等仿生微结构，这些微结构自身独特的流线形状在提高传热系数的同时有着良好的减阻特性。除此之外。王晗等[12]通过调整微结构的宽度和优化微结构的排布方式也获得了更好的热性能。

针对引入微结构造成压力损失过大的问题，本文设计了一种含有类水滴状微结构的微通道，并对微结构的数目和高度进行构形优化，可为实际微通道散热的优化设计提供参考。

1　试验模型与控制方程

1.1　类水滴状微结构的模型

本文设计了含类水滴状微结构的微通道，其结构如图 1 所示。其参数包括凹穴长度、微通道壁厚、微结构头部半径、微结构长度和凹穴内陷深度，具体数值见表 1 所列。

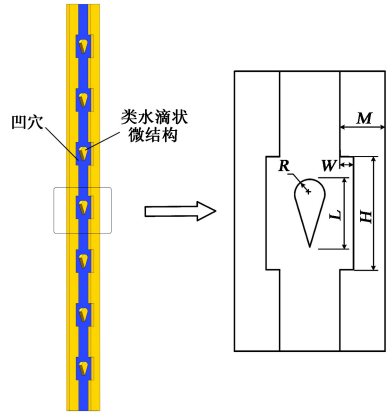


图 1　含类水滴状微结构微通道示意图

表 1　类水滴状微结构参数

参数	数值
凹穴长度 H/mm	0.75
微通道壁厚 M/mm	0.30
微结构头部半径 R/mm	0.10
微结构长度 L/mm	0.45
凹穴内陷深度 W/mm	0.09

1.2　控制方程

对于通道内的液体流动，其控制方程包括质量守恒方程和动量守恒方程。

质量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \tag{1}$$

动量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}+\rho g_i+F_i \tag{2}$$

式中，p 为静压，τ_{ij} 为应力张量，g_i 和 F_i 分别为 i 方向上的重力体积力和外部体积力（如离散相互作用产生的升力）。

应力张量由下式给出：

$$\tau_{ij}=\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right)\right]-\frac{2}{3}\mu\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\delta_{ij} \tag{3}$$

能量守恒方程：

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho u T)=\mathrm{div}\left(\frac{k}{c_p}\mathrm{grad}T\right)+S_T \tag{4}$$

式中，c_p 为比热容，T 为温度，k 为液体的传热系数，S_T 为流体的粘性耗散项。

为了评估类水滴状微结构微通道管的温度换热情况，定义散热系数 Q 为

$$Q=\frac{\overline{T}_{A1}-\overline{T}_i}{\overline{T}_{A1}-T_0}\times 100\% \tag{5}$$

式中，$\overline{T}_i$ 为所选微通道平均温度，$\overline{T}_{A1}$ 为 A1 微通道平均温度，T_0 为微通道入口端温度。

2　数值仿真分析

2.1　仿真条件

本文模拟仿真所用软件为 ANSYS Fluent 19.2。该软件利用二阶迎风方案对动量方程和能量方程进行求解，采用标准的 SIMPLE 算法求解压力场与速度场的耦合方程，且当求解质量和动量方程的残差达到 10^{-4} 且能量方程的残差值达到 10^{-6} 时，假定数值解

已收敛。本文的模拟仿真以水为流体，以铝作为微通道的管壁材料。在温度为 298 K 下，水的材料物性：密度为 998.2 kg/m^3，恒压热容为 4 182 J·kg^{-1}·K^{-1}，导热系数为 0.6 W·m^{-1}·K^{-1}，粘度系数为 1.003×10^{-3} kg/(m·s)；铝的材料物性：密度为 2 329 kg/(m·s)，恒压热容为 870 J·kg^{-1}·K^{-1}，导热系数为 202 W·m^{-1}·K^{-1}。为了简化问题，对模型做以下假设：

(1)液体流动处于三维状态，符合牛顿定律，是层流的、单相的、不可被压缩的；

(2)忽略黏度耗散、自然对流、热辐射和重力影响；

(3)流体流动和传热均处于稳态；

(4)流体和微通道特性都是恒定的。

基于以上假设，则设定边界条件如下：

(1)对于流场，入口速度是均匀的，入口流体的温度为 298 K，$v_0=1$ m/s，其中 $T_f=T_0=298$ K，$x=0$。式中，v_0 为流体的入口流速，T_f 为流体的温度，T_0 为流体的入口温度。

(2)在出口处，设置固定压强为 $p_{out}=p_f=1\,000$ Pa。

(3)将与流体耦合的固体壁设置为耦合边界条件，并且在流体-固体中间表面上施加防滑条件边界：$-k_s\left(\frac{\partial T_s}{\partial n}\right)_w=-k_f\left(\frac{\partial T_f}{\partial n}\right)_f$，$u=v=w=0$。对称条件用于微通道的两个侧壁：$\frac{\partial T_a}{\partial y}=0$。

(4)将均匀的热通量施加在微通道的底壁上，其热流密度为 $q=10^6$ W/m^2。

2.2 网格独立性研究

为了证明仿真计算的准确性，本文对单根普通长直微通道进行网格独立性研究。主要对流体域部分采用质量较高的六面体结构化网格进行划分，而剩余固体域部分，采用自由四面体网格进行划分。表 2 列出了选择 562 860 网格为基准的计算结果。

表 2 网格独立性研究

网格数	压力损失/Pa	最高温度/℃	压力损失误差/%	最高温度误差/%
224 304	5 389.67	359.13	3.20	0.28
299 726	5 311.88	359.67	1.70	0.13
379 782	5 266.07	359.93	0.90	0.06
465 797	5 234.37	360.11	0.30	0.01
562 860	5 221.05	360.14	基准	基准

2.3 微结构数量参数的影响分析

为探讨一定长度内类水滴状微结构数量对流体分配和散热性能的影响，本文设计了 5 组长度为 12.50 mm 的单条微通道，并将各微通道内的类水滴状微结构数量分别设置为 0，3，5，7，15 个，且等距分布在微通道中。各微通道内部结构如图 2 中 A1～A5 所示。

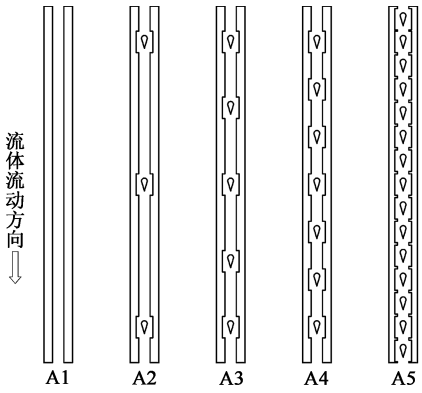


图 2 A1～A5 微通道示意图

基于以上设置的条件，模拟研究了 A1～A5 的压力场、流速场以及温度场，验证类水滴状微结构的数量参数对微通道散热性能的影响。

(1)压力分析

在微通道入口流速为 1 m/s 的情况下，沿流体流动方向上的压力变化曲线如图 3 所示。A1 的压力变化曲线匀速下降，这是由于不含微结构的微通道内仅受壁面的阻力，所以 A1 压力平稳下降。在引入类水滴状微结构后，A2 的压力变化曲线在整体保持下降趋势的同时，在微结构处其压力变化曲线出现了剧烈波动，说明通道内的流体与微结构产生了激烈的碰撞，打破了微通道原有的压力场。由图 3 中 A2～A4 的压力变化曲线看出，随着类水滴状微结构数量的增加，微通道的压力下降开始趋缓，说明随着相邻微结构之间的距离变短，单个微结构带来的压力损失降低。而从图 3 中 A5 可以得出：过多的微结构会带来巨大的压力损失。

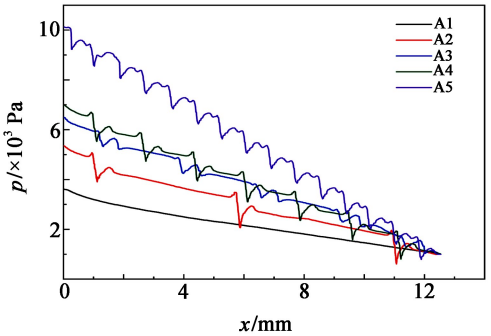


图 3 A1～A5 压力变化曲线图

类水滴状微结构处的流体压力变化云图如图 4 所示。在流体进入微结构前，微通道内的压力分布较为均匀。当流体流动到达凹穴时，由于通道截面变宽，流体在自身惯性下，不能随通道形状的变化而变化，此时流体两侧开始向两边流动，产生横向流动；同时流体对微结构发生冲击，在微结构的头部产生回流和涡流，使得局部压力增大，而这些回流和涡流是压力变化出现剧烈波动的主要原因。流体被微结构分为两股后进入两侧通道继续向前流动，此时凹穴内通道慢慢变宽且比原先无微结构微通道要宽的多，其壁面摩擦阻力小于无微结构微通道，使得压力迅速下降且在微结构两侧出现低压区。最后在流体流出凹穴时，受到凹穴边缘的阻碍作用，使得压力再次上升。流体流入正常通道后，两侧部分流体的流动方向与微通道侧壁存在一定夹角，导致在通道壁处出现低压区。这符合图 3 中 A2～A5 描绘的压力变化曲线先上升再下降、再上升、再下降的情况。

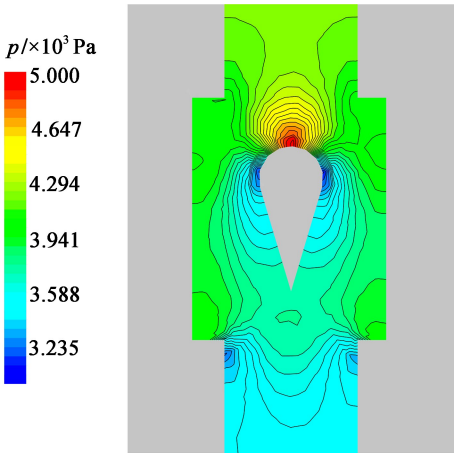


图 4　微结构周围流体压力切面云图

(2)流动分析

微通道内的流体在有无类水滴状微结构处的流速变化，如图 5 所示。在无类水滴状微结构中，流体的流动仅受两边壁面影响，流体沿流动方向在微通道内形成了外侧流速慢、内部流速快的边界层。而引进类水滴状微结构后，流体在微结构的分流作用下，原有保持的边界层会发生破坏。与此同时流体的中间流域向微结构两侧流动并产生了新的边界层，且在微结构两侧产生了较低流速的紊流区。当流体到达微结构后，边界层再逐渐恢复。

流体在类水滴状微结构处的切面速度，如图 6 所示。当流体被类水滴状微结构分流时，其流速切面如图 6(a)所示，在类水滴状微结构的分流作用下，流体向两侧流动，且在原来流体中间部分形成新边界层。在流体即将流出凹穴时，其流体的流速切面如图 6(b)所示。此时，两侧流体开始向中间汇聚，新形成的层流边界层开始融合。在这边界层破坏、形成和融合的过程中，会发生流体的横向流动，进一步促进微通道内冷、热流体的混合增强传热。

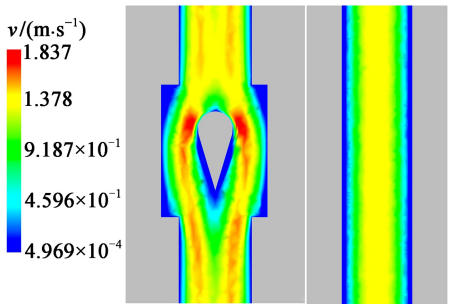
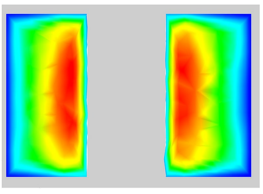
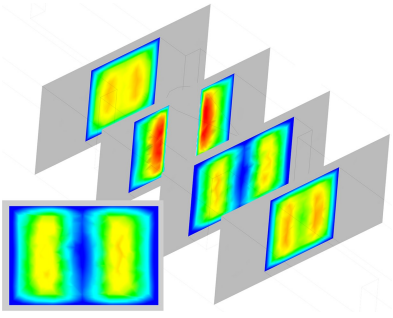


图 5　不同流速变化对比云图



(a)　流体被分流时



(b)　流体流出凹穴时

图 6　微结构不同位置的流速切面云图

(3)温度分析

本文在 A1～A5 的底部上设置热源，即 A1～A5 的微通道底面为换热面。A1～A5 的底部温度变化曲线如图 7 所示。无类水滴状微结构的 A1，其温度变化曲线随着微通道长度 X 的增加逐渐上升，而温度上升幅度逐渐减缓并趋于恒定。在引入类水滴状微结构后，A2～A5 各微通道的底面温度呈现出周期性的变化。在微结构前的区域，底面温度在热源的影响下持续上升；在微结构所在区域，底面温度出现剧烈下降；在微结构后的区域，温度再次剧烈上升。微通道中类水滴状微结构的数量对温度曲线变化有绝对影响，A2 的底面温度在类水滴状微结构区域处的波动尤为剧烈，其局部区域温度超过了 A1

表面温度。而在 A3，A4，A5 逐次增加微结构数量后，微通道的底面温度在微结构区域处波动逐渐变缓，底面温度也逐渐降低。这主要是因为类水滴状微结构的增加同时也增大了微通道的壁面换热面积，同时加速了流体边界层不断发生变化，进一步促进了冷、热流体的混合，提高了散热性能。A1～A5 的底面温度分布云图如图 8 所示。从图中可以观察到 A1 的底面温度呈现出中间低两侧高的特点。而 A2～A5 的底面温度在类水滴状微结构处出现低温区，并以类水滴状微结构为中心呈密集的温度梯度，这与图 7 中温度变化曲线的描述一致。随着引入类水滴状微结构的数量增多，微通道中较密集的温度梯度变得稀疏。A1～A5 的底面平均温度变化，如图 9 所示。从图中可以看出，A5 微通道整体温度变化较均匀。在相同的入口流速下，类水滴状微结构的引入可以使微通道的底面平均温度下降。随着引入微结构数量的增多，微通道的底面平均温度进一步下降，证明了类水滴状微结构提高微通道散热性能的有效性。其中 A2，A3，A4，A5 的底面平均温度较 A1 分别下降了 5，16，17.5 和 18.5 K，A2～A5 的散热系数分别为 10.44%，34.68%，37.63% 和 39.82%。

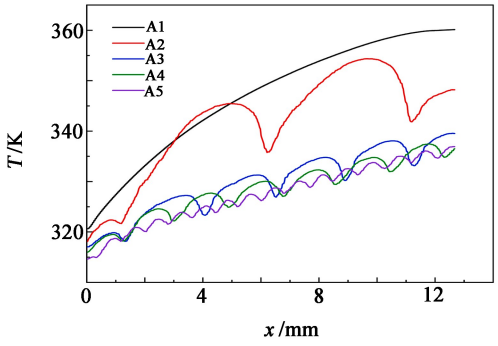


图 7 A1～A5 的底面温度变化曲线

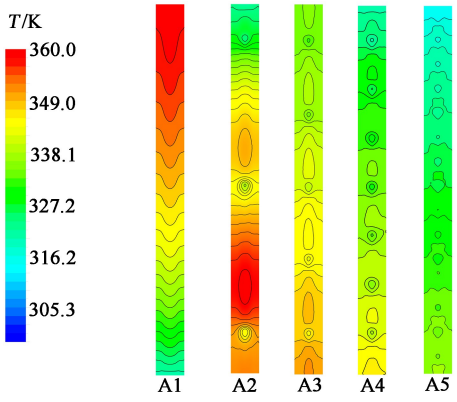


图 8 A1～A4 的底面温度分布云图

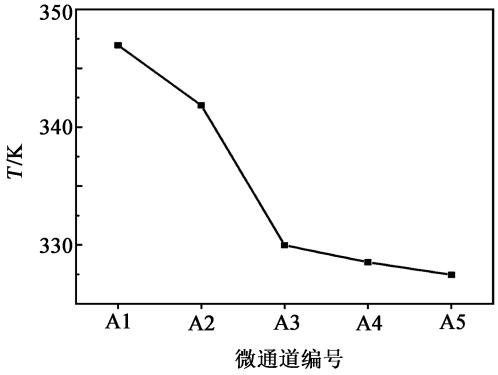


图 9 A1～A4 底面平均温度

通过增加类水滴状微结构的数量可以提高微通道的散热系数，但随着类水滴状微结构增加过多，其散热系数提高放缓。且在一定长度的微通道中类水滴状微结构过多，在实际生产中会引起后续加工、清理困难[13]等问题。所以为了兼顾以上情况，在微通道长度为 12.50 mm 时，类水滴状微结构数量设置为 7 时散热性能最优。

2.4 微结构高度参数的影响分析

在上文研究类水滴状微结构数量的基础上，本节继续探究类水滴状微结构的高度对温度场和压力场产生的影响。选择类水滴状微结构数量为 7，微通道长度为 12.50 mm，通过改变各微结构的高度，设计了 M1～M4 四组类水滴状微结构微通道。M1～M4 的结构如图 10 所示，M1～M4 的高度参数见表 3。

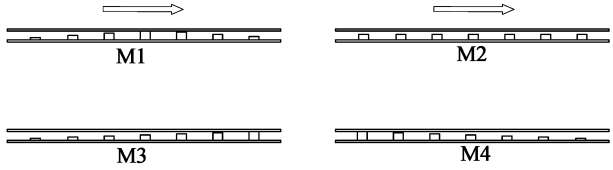


图 10 M1～M4 微通道示意图

表 3 M1～M4 内的微结构高度设置

M1	M2	M3	M4
0.10	0.25	0.40	0.10
0.20	0.25	0.35	0.15
0.30	0.25	0.30	0.20
0.40	0.25	0.25	0.25
0.35	0.25	0.20	0.30
0.25	0.25	0.15	0.35
0.15	0.25	0.10	0.40

(1)压力场分析

M1～M4 的压力变化如图 11 所示。M1～M4 这四种微通道虽然内部类水滴状微结构的高度不

同，但总体的压力损失十分接近。可以得出，在微通道中类水滴状微结构数量相同时，仅微结构的高度不同对微通道整体压力损失没有明显影响。而 M1～M4 四种微通道对比同样含 7 组类水滴状微结构的 A4，其压力损失降低 11.93%～16.75%。所以适当调整类水滴状微结构的高度参数会缓解压力损失，提高微通道的整体稳定性。

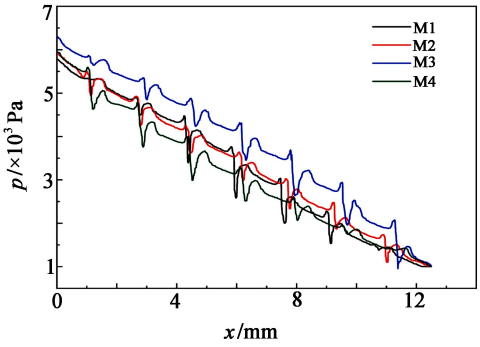


图 11　M1～M4 压力变化曲线

(2)温度场分析

M1～M4 微通道的底面平均温度如图 12 所示，可以看出，其中微结构的高度沿流速方向逐次增高的 M3 底面平均温度最低；而微结构的高度沿流速方向逐次降低的 M4 底面平均温度最高。各微通道内部的温度分布云图如图 13 所示，可以看出，仅在微通道入口处，微结构高度较低的 M1 和 M3，其底面温度明显高于 M2 和 M4。这是因为在类水滴状微结构高度较低时，流体流动主要流过微结构顶面，这一方面减少了微结构对流体的阻力，降低了部分压力损失，另一方面又使得微结构周围的流速降低，冷热流体混合变差，传热性能降低；反之随着微结构的高度逐次增高，传热性能提高。综合研究发现，微通道内各微结构高度沿流速方向逐次增高时(M3)散热系数最高，且 M3 散热系数比 A4 散热系数低 7.83%。

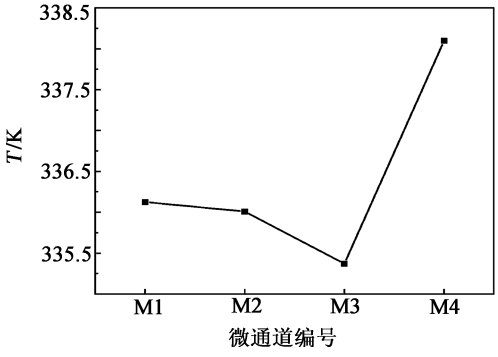


图 12　M1～M4 的底面平均温度

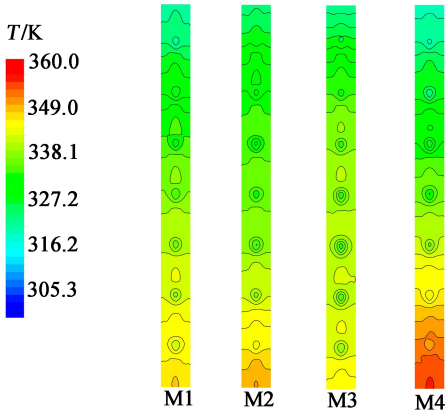


图 13　M1～M4 的底面温度分布云图

3　结论

本文设计了一种含类水滴状微结构的微通道，并综合研究了类水滴状微结构的数量和高度对其压降、流动及传热性能的影响。主要结论如下：

(1)在微通道中引入类水滴状微结构，一方面增加微通道内部流体的换热面积，另一方面因为微结构的分流作用使得原本的流动方式发生改变，使微通道的局部产生紊流、涡流和横向流动等流动方式，增强了内部流体的换热效率，显著提升了微通道的传热性能。

(2)合理增加微通道内类水滴状微结构的数量对微通道的散热有促进作用。综合考虑微通道的压力损失和散热性能，在单根长度为 12.5 mm 的微通道内，当类水滴状微结构的数量为 7 时，相较于不含类水滴状微结构微通道，其底面平均温度下降了 18.42 K，散热系数提高了 37.63%。

(3)在试验数据范围内，适当地调整类水滴状微结构的高度可以在保证散热的情况下，显著降低微通道内的压力损失。在微结构数量为 7 的情况下，采用沿流速方向各微结构高度逐次递增的微通道(M3)，相较 A3，其散热系数降低了 7.83%，压力损失降低了 11.93%。

参考文献：

[1] Ho C J, Chang P C, Yan W M, et al. Efficacy of divergent minichannels on cooling performance of heat sinks with water-based MEPCM suspensions [J]. Inter. J. of Thermal Sciences, 2018, 130: 333-346.

[2] Liu Hong, Li Peiwen, Lew J V. CFD study on flow distribution uniformity in fuel distributors having multiple structural bifurcations of flow channels [J]. Inter. J. of Hydrogen Energy, 2010, 35(17): 9186-9198.

[3] Manikanda K R, Kumaraguruparan G, Sornakumar T. Experimental and numerical studies of header design and inlet/outlet configurations on flow mal-distribution in parallel micro-channels[J]. Appl. Thermal Engineering, 2013, 58(1/2): 205-216.

[4] Ihsan A G, Nor A C S, Natrah K, et al. The effect of manifold zone parameters on hydrothermal performance of micro-channel heatSink: A review[J]. Inter. J. of Heat and Mass Transfer, 2017, 109: 1143-1161.

[5] Leela V V, Rajan K S. Computational analysis of new microchannel heat sink configurations[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 86: 595-604.

[6] Yong J L, Singh P K, Lee P S, et al. Fluid flow and heat transfer investigations on enhanced microchannel heat sink using oblique fins with parametric study[J]. Inter. J. of Heat and Mass Transfer, 2015, 81: 325-336.

[7] Khoshvaght-Aliabadi M, Deldar S, Hassani S M. Effects of pin-fins geometry and nanofluid on the performance of a pin-fin miniature heat sink (PFMHS)[J]. Inter. J. of Mechanical Sciences, 2018: 442-458.

[8] Wang Guilian, Qian Nan, Ding Guifu. Heat transfer enhancement in microchannel heat sink with bidirectional rib[J]. Inter. J. of Heat and Mass Transfer, 2019, 136: 597-609.

[9] Assel S, Tseng K J. Comparison of pin-fin and finned shape heat sink for power electronics in future aircraft[J]. Appl. Thermal Engin., 2018, 136: 364-374.

[10] Dey P, Saha S K. Fluid flow and heat transfer in microchannel with porous bio-inspired roughness[J]. Inter. J. of Thermal Sciences, 2021, 161: 106729.

[11] 张天一, 郭张鹏, 牛风雷, 等. 机翼型微通道高效紧凑换热器流动换热特性[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(10): 1779-1786.
Zhang Tianyi, Guo Zhangpeng, Niu Fenglei, et al. Flow heat transfer characteristics of airfoil microchannel efficient compact heat exchanger[J]. Atomic Energy Science Technology, 2020, 54(10): 1779-1786.

[12] 王 晗, 袁 礼, 王 超, 等. 周期性分流微通道的结构设计及散热性能[J]. 物理学报, 2021, 70(10): 200-211.
Wang Han, Yuan Li, Wang Chao, et al. Structural design and heat dissipation performance of periodic shunt microchannel[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(10): 200-211.

[13] 陈刘涛, 张华伟, 刘 源, 等. 定向凝固多孔铜热沉传热的分段强化[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(9): 1250-1254.
Chen Liutao, Zhang Huawei, Liu Yuan, et al. Segmentalized enhancement of heat sink heat transfer in directionally solidified porous copper[J]. J. of Qinghua University (Nature Science Edition), 2014, 54(9): 1250-1254.

作者简介:

曹卫华(1981—),女,湖南资阳人,博士,副教授,主要从事微结构加工方法及数字化设计研究;

朱继元(1978—),男,江苏丰县人,博士,副教授,主要从事表面处理研究。

(上接第 867 页)

[8] Kim S H, Balasubramani T, Sohn I B, et al. Precision microfabrication of AlN and Al_2O_3 ceramics by femtosecond laser ablation[J]. Proc. of SPIE, 2008, 6879: 68791O.

[9] Ren N F, Xia K B, Yang H Y, et al. Water-assisted femtosecond laser drilling of alumina ceramics[J]. Ceramics International, 2021, 47(8): 11465-11473.

[10] Zhang Y, Wang Y Q, Zhang J Z, et al. Micromachining features of TiC ceramic by femtosecond pulsed laser[J]. Ceram. Int., 2015, 41(5): 6525-6533.

[11] Lee H M, Choi J H, Moon S J. Determining the machining parameters for femtosecond laser helical drilling of aluminosilicate glass substrate[J]. Int. J. Precis. Eng. Manuf., 2017, 18(7): 923-930.

[12] Liu Y S, Wang C H, Li W N, et al. Effect of energy density and feeding speed on micro-hole drilling in C/SiC composites by picosecond laser[J]. J. Mater. Process. Tech., 2014, 214(12): 3131-3140.

[13] Sankaranarayanan S, Emminger H, Kar A. Energy loss in the plasma during laser drilling[J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 1999, 32: 1605-1611.

[14] Liu Y S, Wang J, Li W N, et al. Effect of energy density and feeding speed on micro-holes drilling in SiC/SiC composites by picosecond laser[J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2016, 84: 1917-1925.

[15] Fornaroli C, Holtkamp J, Gillner A. Laser-beam helical drilling of high quality micro holes[J]. Phys. Proc., 2013, 41: 661-669.

[16] Wang H J, Chen Q, Lin D T, et al. Effect of scanning pitch on nanosecond laser micro-drilling of silicon nitride ceramic [J]. Ceram. Int., 2018, 44(12): 14925-14928.

[17] Wu B, Tao S, Lei S. The interactions of microhole sidewall with plasma induced by femtosecond laser ablation in high-aspect-ratio microholes[J]. J. Manuf. Sci. Eng., 2012, 134: 011007.

[18] Shigematsu I, Kanayama K, Tsuge A, et al. Analysis of constituents generated with laser machining of Si_3N_4 and SiC [J]. J. Mater. Sci. Lett., 1998, 17: 737-739.

作者简介:

王宏建(1989—),男,博士,工程师,主要研究方向为半导体材料的激光加工技术与装备。