材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022063002

流道缩扩比对半波纹微通道流动和传热特性的影响

曹卫华，张锁程，朱继元*，孙文骏

（桂林理工大学 机械与控制工程学院，广西 桂林 541004）

摘　要： 为探究流道缩扩比对半波纹微通道流动和传热特性的影响，设计了5种不同缩扩比的半波纹微通道模型，并对各通道内的层流流动（$200<Re<1\,000$，Re 为雷诺数）和传热进行了数值模拟研究。结果表明，半波纹微通道的压降和努塞尔数随着流道缩扩比的减小而增大；与光滑微通道相比，半波纹微通道具有更优的传热性能但压降损失也更高；引入 η 作为综合性能指标，发现减小流道缩扩比是提高半波纹微通道综合换热能力的有效方式，且当 $Re>490$ 时，其综合换热能力均优于光滑微通道。

关键词： 流道缩扩比；半波纹微通道；流动特性；传热特性

中图分类号： TK124　**文章编号：** 1001－5868(2023)01－0058－06

Effect of Divergent Ratio on Flow and Heat Transfer Characteristics of Half-corrugated Microchannel

CAO Weihua, ZHANG Suocheng, ZHU Jiyuan, SUN Wenjun

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

Abstract: In order to investigate the influence of divergent ratio on the flow and heat transfer characteristics of half-corrugated microchannel, five models of half-corrugated microchannel with different divergent ratio were designed, flow ($200<Re<1\,000$) and heat transfer behavior were researched by numerical simulation method, and the results were compared with smooth microchannel. The results show that the pressure drop and Nusselt number of half-corrugated microchannel increase with the decrease of the divergent ratio. Compared with smooth microchannel, half-corrugated microchannel has better heat transfer performance but higher pressure drop loss. By introducing η as the comprehensive performance index, it is found that reducing the divergent ratio is an effective way to improve the comprehensive heat transfer capacity of the half-corrugated microchannel. And when the $Re>490$, its comprehensive heat transfer capacity is better than that of smooth microchannel.

Key words: divergent ratio; half-corrugated microchannel; flow characteristic; heat transfer characteristic

0　引言

随着微电子技术的不断成熟，电子芯片正朝着高性能、高集成度和微型化方向发展[1]。但是，这些多样化的发展在很大程度上依赖于高效的热管理能力。自1981年Tuckerman等[2]首次提出用微通道来解决集成电路散热问题以来，微通道就常被用于解决电子元件因过热而失效的问题。然而，随着当前电子元件热流密度的急剧提高，传统的光滑微通道已无法满足工程散热需求。于是，各种强化微通道传热技术应运而生，主要分为有源强化技术和无源强化技术[3]，其中由于无源强化技术不需要额外

收稿日期：2022－06－30.

基金项目：国家自然科学基金项目(52075110,61961011).

* **通信作者：**朱继元　**E-mail：** 1398386556@qq.com

的力或功的作用，因此该方法在强化微通道传热方面已得到广泛应用。

在众多无源强化技术中，在微通道内引入凹穴、凸起物、弯曲翅片或者微针肋等结构以增强流体扰动是常用的手段之一。夏国栋等在矩形微通道侧壁加入了三角形凹穴[4]和水滴型凹穴[5]，结果发现凹穴的存在可以提高传热能力，Huang 等[6]对一种带有扇形凹穴的微通道换热器进行实验研究，也得到了相同的结论；郭丁彰等[7]将一种带劈缝的球凸结构加入微通道中，发现该结构具有良好的强化传热能力；Dey 等[8]对底面布置鱼鳞状凸起结构的仿生微通道进行研究，结果表明，与光滑微通道相比，仿生微通道的努塞尔数最大增加了 14%；叶仪等[9]将 Guass 型粗糙元引入光滑微通道中，探究了表面粗糙度对流动阻力特性及传热特性的影响；Wan 等[10]实验研究了低雷诺数下半波纹微通道的单相压降和换热性能，指出当热流密度大于 150 kW/m^2 时，其换热性能优于光滑微通道；Huang 等[11]在长直微通道的基础上设计了一系列正弦波微通道，发现正弦波微通道具有更高的传热速率，但流动摩擦较大。Xu 等[12]将不同结构及排列方式的微针肋引入微通道中，发现其热性能明显提高，并将其传热机理归结为流体的扰动和边界层的破坏与重建。然而，值得注意的是，上述被动式扰流结构的引入在强化微通道传热的同时也改变了内部流道结构，引入了一个新的参数——流道缩扩比。而目前对于流道缩扩比对微通道热性能影响的研究较少。据此，本文以半波纹微通道为研究对象，数值研究了层流下流道缩扩比对其流体流动和传热性能的影响，分析其内在的流动和传热规律。

1　模型与计算方法

1.1　物理模型

本文以半波纹微通道为研究对象，其物理模型如图 1 所示。微通道长 $L=36$ mm，宽 $W=1$ mm，高 $H=2$ mm。通道内尺寸宽 $w=0.5$ mm，半肋宽 $a=0.25$ mm，高 $h=1$ mm，下壁厚 $b=0.5$ mm。通道底面为波纹曲面，幅值 $A=0.3$ mm，周期 $T=6$ mm。整个通道主要由依次交替的收缩段与扩张段组成，单个周期内收缩段长度为 l_1，扩张段长度为 l_2，流道缩扩比 $\alpha=l_1:l_2$。入口处和出口处均设置长度为 3 mm 的光滑通道，利于流体的进入和防止回流现象发生。为探究流道缩扩比对半波纹微通道流动和传热特性的影响，通过改变 l_1 和 l_2，设计了 5 种不同缩扩比的半波纹微通道模型，分别命名为 Case2，Case3，Case4，Case5 和 Case6。此外，还模拟了光滑微通道作为流体流动和传热性能优劣比较的基准，命名为 Case1。各微通道尺寸参数如表 1 所示。

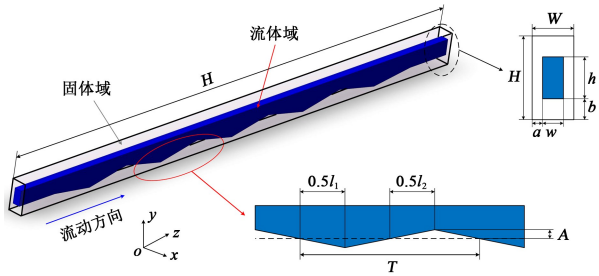


图 1　半波纹微通道模型

表 1　微通道尺寸参数

类型	命名	T/mm	A/mm	l_1/mm	l_2/mm	α
光滑微通道	Case1	/	/	/	/	/
半波纹微通道	Case2	6	0.3	4	2	2∶1
	Case3	6	0.3	3	3	1∶1
	Case4	6	0.3	2	4	1∶2
	Case5	6	0.3	1.5	4.5	1∶3
	Case6	6	0.3	1	5	1∶5

1.2　数值模型

采用数值模拟的方法对微通道模型进行研究。为简化计算过程，对计算的模型作出以下假设：流体为不可压缩流体；层流流动且流动为稳态；流体域为去离子水，固体域为铜，二者物性参数均为常数；忽略表面张力、体积力、重力和热辐射等作用。

基于上述假设，流体域的控制方程为：

连续性方程：

$$\nabla\cdot\vec{v}=0 \tag{1}$$

动量方程：

$$\rho_f(\vec{v}\cdot\nabla\vec{v})=-\nabla P+\mu_f\nabla^2\vec{v} \tag{2}$$

能量方程：

$$\rho_f C_{p,f}(\vec{v}\cdot\nabla T)=k_f\nabla^2 T_f \tag{3}$$

固体域的控制方程为：

能量方程：

$$k_s\nabla^2 T_s=0 \tag{4}$$

式中，$\vec{v}$ 为流体的速度矢量，m/s；ρ_f 为流体的密度，kg/m^3；μ_f 为流体的粘度，Pa·s；$C_{p,f}$ 为流体的比热容，J/(kg·K)；k_f 和 k_s 分别为流体域和固体域的导热率，W/(m·K)；T_f 和 T_s 分别为流体域和固体域的温度，K。

边界条件的设定：

(1)入口边界条件:采用速度入口边界条件,入口速度 U_{in} 为 0.3～1.5 m/s,入口温度 $T_{in}=293.15$ K;

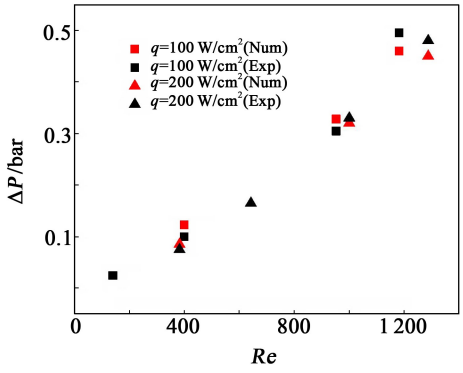
(2)出口边界条件:采用压力出口边界条件,出口压力为 0 Pa;

(3)壁面边界条件:微通道模型底面为恒温加热,$T=323.15$ K,两侧面设置为对称边界条件,其余面均设置为绝热面,流体域和固体域的交界处设置为固液交界面,流体流动时无速度滑移。

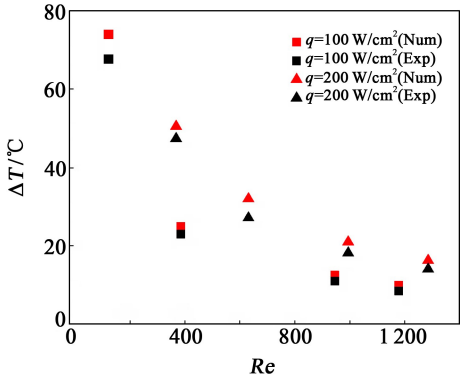
1.3 网格无关性及计算方法有效性验证

考虑到数值计算的准确性和经济性,对微通道模型进行网格无关性检验。以 Case3 通道为例,采用结构化网格对模型进行划分,近壁区网格加密处理。当入口速度为 1 m/s 时,取网格数为 39 W 的模型与 24 W 和 46 W 的进行比较,数值计算所得的压降误差分别为 2.5% 和 0.9%,表明当网格数为 39 W 时,计算结果受网格数量影响较小,满足网格无关性要求,因此采用该网格数进行计算。

为验证数值计算方法的有效性,基于 Qu 等[13]的实验研究建立了相同的微通道几何模型,并采用上述计算方法进行研究。图 2 为数值计算结果与文献实验结果的对比情况。可以看出,微通道进出口压降 ΔP 和流体进出口温度差 ΔT 的模拟值与实验值趋势一致,平均误差为 8.3%。由此表明数值计算方法的有效性。



(a) 压降



(b) 温差

图 2 模拟值与实验值之间的比较

1.4 数据处理

微通道水力直径 D_h 为

$$D_h=\frac{4A_c}{P} \tag{5}$$

式中,A_c 为入口截面面积,mm²;P 为入口截面周长,mm。

摩擦阻力系数 f 为

$$f=\frac{2\Delta pD_h}{\rho_f U_{in}^2 L} \tag{6}$$

式中,U_{in} 为流体入口速度,m/s;L 为通道长度,mm。

流体流动的雷诺数 Re 为

$$Re=\frac{\rho_f U_{in} D_h}{\mu_f} \tag{7}$$

其中,根据流体入口速度范围,可得本文中 Re 的取值为 200～1 000。

流体流动的换热量 Q 为

$$Q=\dot{m}C_{p,f}(T_{out}-T_{in}) \tag{8}$$

式中,$\dot{m}$ 为流体的质量流量,kg/s;T_{in} 和 T_{out} 分别为流体的进出口温度,K。

对流换热系数 h 为

$$h=\frac{Q}{A_s[T_{w,ave}-T_{f,ave}]} \tag{9}$$

式中,A_s 为对流换热面积,m²;$T_{w,ave}$ 和 $T_{f,ave}$ 分别为壁面和流体的平均温度,K。

努塞尔数 Nu 为

$$Nu=\frac{hD_h}{k_f} \tag{10}$$

2 结果与讨论

基于上述模型与计算方法,对 Case1～6 通道进行数值研究。通过流动特性、传热特性以及综合性能三个方面对各通道进行分析,系统探究了流道缩扩比对半波纹微通道内流体流动和传热性能的影响规律。

2.1 流动特性

图 3 所示为 $Re=800$,$x=0.5$ mm 时,Case1,Case2,Case3 和 Case6 通道内流场的纵截面速度分布云图。由图 3 可以看出,光滑微通道内流体流动平稳且速度分布均匀,中心处流速最大,越靠近壁面流速越小。半波纹微通道内流体受底面波纹结构的

影响，流动紊乱且速度分布不均匀。其中，在凹穴处，流体产生了不同厚度的滞留区域，该位置流速较小；在凸起处，流体在通道截面逐渐收缩的作用下加速流动，该位置流速较大。半波纹微通道内的最大流速比光滑微通道高，且随着流道缩扩比的增大而增大。因此，在相同边界条件下，最高流速出现在 Case2 通道内，同时为满足连续性流动条件，其在凹穴处流体滞留区域厚度也高于其他通道。

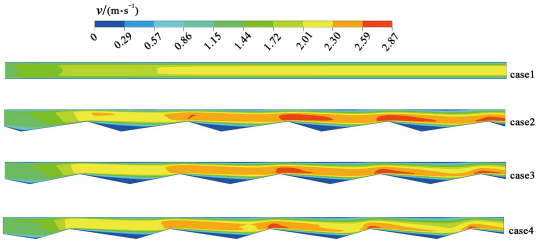


图 3　雷诺数为 800 时流场的纵截面速度分布云图

图 4 给出了 Re 为 200 和 800 时，各通道内局部压力沿着流动方向的变化情况。可以看出，光滑微通道的沿程压力曲线呈线性下降，半波纹微通道的沿程压力曲线呈周期性波纹状下降。形成波纹状压力曲线是因为流体在半波纹微通道内呈变截面流束形式流动。流体流经收缩段时，通道截面减小，流速增大，静压降低；流体流经扩张段时，通道截面增大，流速减小，静压增大，使得流体在方向反复改变的轴向压力梯度下流动，从而造成了周期性压力波动。

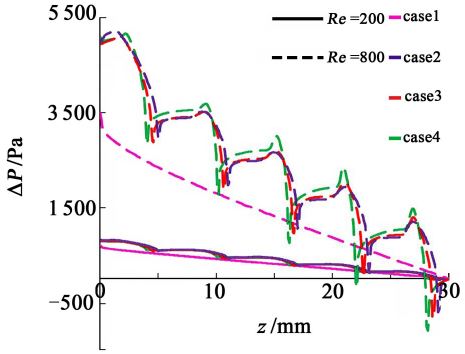


图 4　雷诺数为 200 和 800 时通道内沿程压力变化情况

由图 4 还可以看出，当 $Re=200$ 时，半波纹微通道内沿程压力曲线起伏较小。随着 Re 增大至 800，沿程压力曲线发生明显波动，并且在靠近出口的凹穴处产生了负压区。其原因是当 $Re=200$ 时，Case3 通道内流体流速较小，在凹穴处不具有足够的动能克服近壁区相邻流层间的粘滞力，只能沿着底面自左向右流动，因此压力波动不明显；而当 $Re=800$ 时，流体流速增大，在凹穴处流动方向发生改变，形成了速度方向与主流方向相反的漩涡，使得压力波动明显，并且漩涡的形成会使得该位置的正向压力梯度小于逆向压力梯度，因此在靠近出口的凹穴处会产生负压区。此外，通过对比半波纹微通道的沿程压力曲线还可以发现，随着流道缩扩比的减小，其沿程压力波动逐渐增大。

图 5 是各通道的压降随着雷诺数变化情况。从图中可直观看出，半波纹微通道的压降高于光滑微通道，且随着雷诺数的增大而相差越大。这是因为当雷诺数较小时，流体流动相对平稳，因此二者的压降相差较小；随着雷诺数逐渐增大，底面波纹结构对流体流动的阻碍作用增强，流体在凹穴处的分离与回流现象越来越明显，二者的压降也相差越来越大。在雷诺数相同的情况下，流道缩扩比减小，半波纹微通道的压降增高，并且随着雷诺数的增大，流道缩扩比对压降的影响越明显。

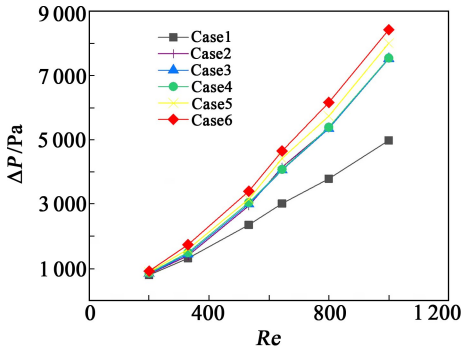
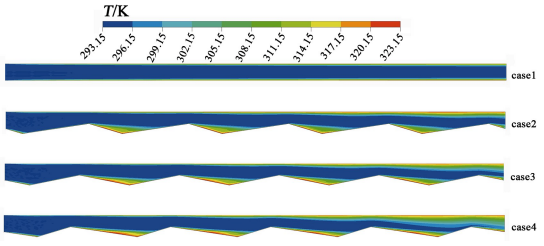


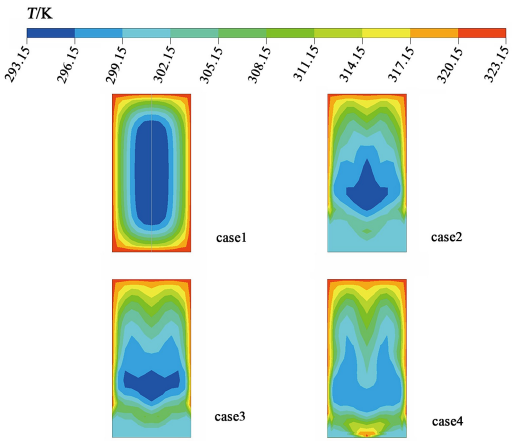
图 5　压降随着雷诺数变化情况

2.2　传热特性

图 6 所示为 $Re=800$，$x=0.5$ mm 和 $z=36$ mm 时，Case1，Case2，Case3 和 Case6 通道内流场的纵截面和横截面温度分布云图。由图 6 可以看出：(1)半波纹微通道内流体域的平均温度明显高于光滑微通道。结合流动特性分析可知，在该雷诺数下半波纹微通道内会产生二次流，促进了冷热流体的交换，使传热得到强化，因此流体域的温度会升高；(2)与光滑微通道相比，半波纹微通道内热边界更厚，因此传热效果更好。(3)在相同边界条件下，



(a) 横截面



(b) 纵截面

图 6 雷诺数为 800 时流场的横纵截面温度分布云图

半波纹微通道内流体域的平均温度随着流道缩扩比的减小而增大。

图 7 是各通道的平均努塞尔数随着雷诺数变化情况。可以看到,各通道的平均努塞尔数随着雷诺数的增大而增大。这是显然的,因为雷诺数的增大会使得流体流速增大,流量增加,从而带走更多的热量。半波纹微通道的平均努塞尔数大于光滑微通道,且随着雷诺数的增大而相差越大。这是因为低雷诺数状态下,各通道内流体流动特性相仿,因此平均努塞尔数无明显差距;随着雷诺数的逐渐增大,半波纹微通道内会产生二次流,既充分混合了冷热流体又不断破坏着底面边界层,强化了对流传热过程,使得二者的平均努塞尔数相差越来越大。此外,在相同雷诺数下,随着流道缩扩比的减小,半波纹微通道的平均努塞尔数逐渐增大。这是因为流道缩扩比的减小会增强沿程压力波动,提高了冷热流体的混合程度,使得流体带走的热量更多。

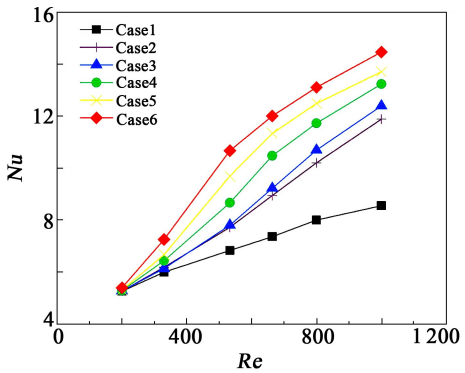


图 7 努塞尔数随着雷诺数变化情况

2.3 综合性能

通过以上讨论可以看出,流道缩扩比的减小在提高半波纹微通道传热能力的同时又增加了压降。因此,引入 η 作为综合性能指标对各通道进行评估,其定义为

$$\eta=\frac{Nu_r/Nu_s}{(f_r/f_s)^{1/3}} \tag{11}$$

其中,下标 r 表示半波纹微通道,下标 s 表示光滑微通道,η 越大表明综合性能越优。

图 8 是半波纹微通道的综合换热能力随着雷诺数变化情况。可以看出,半波纹微通道的综合换热能力随着雷诺数的增大而增大,当 $Re<220$ 时,其 η 值均小于 1,表明综合换热能力出现恶化;当 $Re>490$ 时,其 η 值均大于 1,表明综合换热能力得到提升。对比半波纹微通道的综合换热能力曲线可以发现,其综合换热能力随着流道缩扩比的减小而增大。因此,Case6 通道具有最优的综合性能。观察 Case1 和 Case6 通道的 η-Re 曲线可以得出,当雷诺数 $Re<220$ 时,选择光滑微通道更佳;当雷诺数 $Re>220$ 时,选择 Case6 通道更佳。

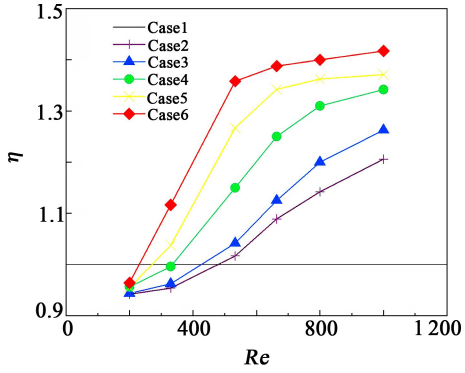


图 8 综合换热能力随着雷诺数变化情况

3 结论

(1)与光滑微通道相比,半波纹微通道具有更高的压降,且压力沿着流动方向呈周期性波纹状下降趋势。从整体来说,半波纹微通道的压降随着流道缩扩比的减小而增大;

(2)二次流的产生是半波纹微通道的传热性能优于光滑微通道的主要原因,且随着雷诺数的增大,其强化传热效果越明显;在相同边界条件下,半波纹微通道的努塞尔数随着流道缩扩比的减小而增大;

(3)综合考虑压降和传热特性发现,减小流道缩扩比是提高半波纹微通道综合换热能力的有效方式;

(4)在研究范围内,当 $Re<220$ 时,半波纹微通道的 η 值均小于 1,表明该雷诺数下光滑微通道的

综合性能更优；当 $Re>490$ 时，η 值均大于 1，表明该雷诺数下半波纹微通道的综合性能更优。

参考文献：

[1] 刘益才. 电子芯片冷却技术发展综述[J]. 电子器件，2006，29(1)：296-300.
Liu Yicai. Recent development and prospects of the electronic apparatus cooling[J]. J. of Electron Devices，2006，29(1)：296-300.

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

[3] 郭　磊. 电子器件散热及冷却的发展现状研究[J]. 低温与超导，2014，42(2)：62-66.
Guo Lei. Development of heat dissipation in electronics components[J]. Cryogenics & Superconductivity，2014，42(2)：62-66.

[4] 夏国栋，李云飞，翟玉玲，等. 变截面微通道散热器流动和传热特性[J]. 北京工业大学学报，2015，41(2)：287-292.
Xia Guodong，Li Yunfei，Zhai Yuling，et al. Fluid flow and heat transfer on microchannel heat sink with changeable cross-sections[J]. J. of Beijing University of Technol.，2015，41(2)：287-292.

[5] 贾玉婷，夏国栋，马丹丹，等. 水滴型凹穴微通道流动与传热的熵产分析[J]. 机械工程学报，2017，53(4)：141-148.
Jia Yuting，Xia Guodong，Ma Dandan，et al. Entropy generation analysis of flow and heat transfer in microchannel with droplet reentrant cavities [J]. J. of Mechanical Engineering，2017，53(4)：141-148.

[6] Huang B，Li H，Xu T. Experimental investigation of the flow and heat transfer characteristics in microchannel heat exchangers with reentrant cavities[J]. Micromachines，2020，11(4)：403.

[7] 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 Dingzhang，Huang Xinyue，Li Ping. Flow structure and heat transfer characteristics of microchannel heat sinks with split protrusion[J]. Chinese Science Bulletin，2019，64(14)：1526-1534.

[8] Dey P，Hedau G，Saha S K. Experimental and numerical investigations of fluid flow and heat transfer in a bioinspired surface enriched microchannel [J]. Inter. J. of Thermal Sciences，2019，135：44-60.

[9] 叶　仪，殷晨波，贾文华，等. Gauss 型粗糙表面对微通道流动与换热的影响[J]. 农业机械学报，2013，44(12)：294-300.
Ye Yi，Yin Chenbo，Jia Wenhua，et al. Effects of Guassian rough surface on fluid flow and heat transfer in microchannels [J]. Trans. of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2013，44(12)：294-300.

[10] Wan Z，Lin Q，Wang X，et al. Flow characteristics and heat transfer performance of half-corrugated microchannels[J]. Appl. Thermal Engineering，2017，123：1140-1151.

[11] Huang H，Wu H，Zhang C. An experimental study on flow friction and heat transfer of water in sinusoidal wavy silicon microchannels [J]. J. of Micromechanics and Microengineering，2018，28(5)：055003.

[12] Xu F，Wu H. Experimental study of water flow and heat transfer in silicon micro-pin-fin heat sinks[J]. J. of Heat Transfer，2018，140(12)：112401.

[13] Qu W，Mudawar I. Experimental and numerical study of pressure drop and heat transfer in a single-phase micro-channel heat sink[J]. Inter. J. of Heat and Mass Transfer，2002，45(12)：2549-2565.

作者简介：

曹卫华(1981－)，女，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，博士，副教授，主要从事表面处理研究。