

研究论文

硅基正弦波纹微通道内的流动阻力特性

张 弛, 吴慧英, 黄后学

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要: 硅基正弦波纹微通道在微尺度强化换热、微流体器件中均有重要运用, 而目前尚未见有关于其内部流动特性的实验报道。利用标准微机电系统 (MEMS) 工艺在硅基芯片上加工制成一系列具有不同相位差和周期、当量直径为 $160\ \mu\text{m}$ 的正弦波纹微通道, 通过实验研究了其内部流动阻力特性。研究表明: 正弦波纹微通道较平直微通道阻力均有增加, 且增加幅度与波纹微通道两侧壁的相位差和周期有关。对于周期相同的波纹微通道, 两侧壁相位差越大, 阻力也越大。对于相位差相同的波纹微通道, 周期对阻力的影响则较为复杂: 当相位差为 0 时, 呈现出周期越大、阻力越小的趋势 (除最小周期通道外); 当相位差为 π 时, 呈现出周期越大、阻力越大的趋势。研究还发现: 随着周期减小, 相位差对阻力的影响减小, 当周期缩短至 $0.5\ \text{mm}$ 时, 相位差为 0 和 π 的波纹微通道内的阻力特性曲线几乎重合。

关键词: 正弦波纹微通道; 硅基芯片; 流动阻力; 相位差; 周期

DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2012.04.003

中图分类号: TK 124

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2012) 04-1011-08

Flow friction in silicon-based sinusoidal wavy microchannels

ZHANG Chi, WU Huiying, HUANG Houxue

(School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A series of sinusoidal wavy microchannels with different phase shifts and wavelengths were fabricated on the silicon wafer based on the MEMS technology. Flow frictions in these sinusoidal wavy microchannels were investigated experimentally. Results show that the flow friction in wavy microchannels is higher compared with the smooth straight microchannels with the same hydraulic diameter. Both the phase shift and the wavelength have effect on the flow friction in wavy microchannels. For the microchannels with the same wavelength, the flow friction increases as the phase shift increases. However, the influence of wavelength is complicated. For the microchannels with phase shift of 0 , the flow friction normally increases as the wavelength decreases with the exception for the microchannel with the smallest wavelength. For the microchannels with phase shift of π , the flow friction decreases as the wavelength decreases due to the decrease of the throat size in the microchannels. The investigation also shows that as the wavelength decreases, the influence of phase shift on the flow friction decreases. For the wavelength of $0.5\ \text{mm}$, there is little difference in the flow friction between the microchannels with 0 and π phase shifts.

Key words: sinusoidal wavy microchannel; silicon chip; flow friction; phase shift; wavelength

2011-09-05 收到初稿, 2011-12-22 收到修改稿。

联系人: 吴慧英。第一作者: 张弛 (1988—), 男, 硕士研究生。

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目 (50925624); 国家重点基础研究发展计划项目 (2012CB720404); 上海市优秀学术带头人计划项目 (11XD1403100)。

Received date: 2011-09-05.

Corresponding author: Prof. WU Huiying, whysrj @ sjtu.edu.cn.

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (50925624) and the National Basic Research Program of China (2012CB720404).

引 言

随着微机电系统 MEMS 技术的日益发展, 电子元件的集成度和微型化水平不断提高, 微电子散热面临严峻挑战, 传统的散热方式, 如风扇冷却等已无法满足其冷却需求, 散热问题已成为制约微电子及相关产业进一步发展的瓶颈。1981 年, Turkerman 等^[1]率先提出“微通道热沉”散热理念, 此后微通道散热器便以其紧凑高效的特点受到广泛关注。

由于微通道内的流动特性直接影响到微通道热沉的换热性能, 各国学者对微通道内的流动阻力特性开展了大量的研究。早期的研究主要针对平直微通道: Wu 等^[2-3]研究了不同结构的梯形截面硅基微通道内水的层流流动特性, 实验发现摩擦常数 fRe 与通道几何结构有关, 并给出了拟合关联式。Qu 等^[4]对当量直径为 $348.9\ \mu\text{m}$ 的铜基矩形微通道中单相水的流动特性进行了实验研究及数值计算, 发现压差分布的实验值与数值计算结果吻合很好。

随着对平直微通道研究的深入, 一些学者开始研究通过改变通道结构来影响其内部流动进而实现强化换热的目的。甘云华等^[5]基于热边界层中断技术, 设计了一种交错结构的微通道热沉, 通道当量直径为 $155.3\ \mu\text{m}$, 研究发现具有交错结构的微通道热沉在强化换热的同时减小了微通道进出口压差。唐慧敏等^[6]设计了一组锯齿形的微通道热沉, 通道当量直径分别为 $133.3\ \mu\text{m}$ 和 $160\ \mu\text{m}$, 研究发现具有锯齿结构的微通道能够在进出口压差增加不大的情况下显著强化换热。夏国栋等^[7-9]以去离子水为工质, 对周期性变截面微通道内流体流动与传热特性进行了实验研究, 发现换热性能提高的同时阻力相应增加。刘恩光等^[10]设计了两侧壁集成有微针肋的微通道, 通道当量直径为 $160\ \mu\text{m}$, 研究发现具有微针肋的通道能较好地强化换热, 但阻力亦有所增加。Sui 等^[11-12]对正弦波纹微通道内的流动阻力和传热特性进行了数值模拟和实验研究, 发现矩形截面 ($205\ \mu\text{m} \times 404\ \mu\text{m}$) 铜基波纹微通道内的流动阻力相比平直微通道流动阻力增加并不明显^[12]。

目前国内外在微通道流动换热研究方面虽已取得诸多进展, 然而与电子芯片散热有关的硅基芯片正弦波纹微通道的实验研究尚未见报道。为此, 本

文以去离子水为工质, 对当量直径 $160\ \mu\text{m}$ 、具有不同相位差和周期的系列硅基正弦波纹微通道内的流动特性开展实验研究, 探索相位差和波动周期对流动阻力的影响及规律, 为新型高效电子芯片散热系统设计提供依据。

1 实验系统和方法

1.1 实验装置

实验系统如图 1 所示, 主要由储液罐、流量调节阀、过滤器、压力传感器、实验测试段、CCD、集液器、电子天平、数据采集器组成。实验以去离子水为工质, 在高压氮气驱动下, 储液罐内的工质依次经流量调节阀、过滤器、入口压力传感器、微通道测试段、出口压力传感器, 最终流入置于电子天平上的集液器。工质的质量流量采用直接称重法来测量, 电子天平精度为 $0.01\ \text{g}$, 秒表精度 $0.01\ \text{s}$ 。加热功率由高精度稳压电源提供, 精度为 0.1% 。测试段进出口水温由两根 T 型热电偶 (精度 0.1°C 、直径 $0.1\ \text{mm}$) 来测量。进出口水温和压力由安捷伦数据采集卡 34970A 收集并输入电脑。

实验中测试段 (图 2) 主要由集成有正弦波纹微通道的硅基实验片和承载硅片的基座构成。其中, 实验片采用标准微机电系统 (MEMS) 工艺加工制成, 主要由耐热玻璃、硅基及金属铂加热膜组成。首先采用干法刻蚀工艺在硅基芯片上刻出微通道, 然后采用静电键合工艺将耐热玻璃和硅基芯片键合在一起。基座则使用绝热性能良好的有机材料制成, 实验片被安置在基座中, 进出口采用 O 型圈与外接管路系统相连, 以确保良好的密封性。

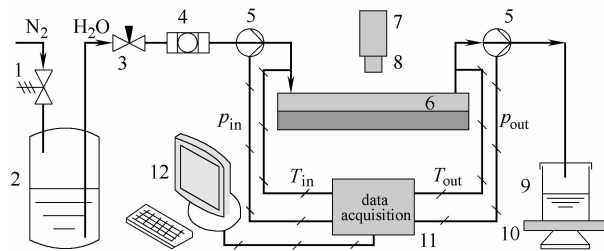


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic plot of experimental system

- 1—gas valve; 2—liquid tank; 3—liquid valve; 4—filter;
5—pressure transducer; 6—test section; 7—high speed camera; 8—microscope; 9—liquid collection tank;
10—electronic balance; 11—data acquisition system; 12—computer

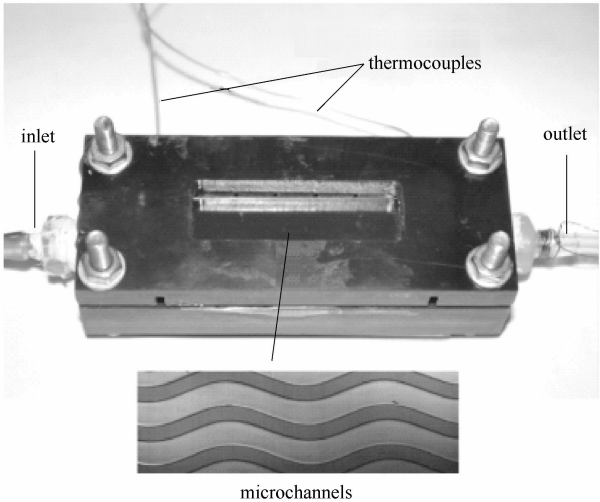


图 2 测试段照片
Fig. 2 Test section

1.2 通道结构

本文研究的正弦波纹微通道两侧壁由两条正弦曲线构成，其结构控制方程分别为

$$\begin{cases} y_1 = A \sin \frac{2\pi x}{l} \\ y_2 = A \sin \frac{2\pi}{l}(x - D_1) + D_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$y_2 = A \sin \frac{2\pi}{l}(x - D_1) + D_2 \quad (2)$$

式中 A 为振幅， l 为正弦曲线周期， D_1 、 D_2 分别为控制两正弦曲线相位差和间距的形状参数。两正弦曲线相位差 φ 与 l 及 D_1 的关系可由式(3)计算

$$\varphi = \frac{2\pi D_1}{l} \quad (3)$$

为比较各个通道的流动阻力特性，需保证各通道具有相同的当量直径，当量直径采用文献 [13] 推荐的方法计算

$$D_h = \frac{4V}{S} \quad (4)$$

式中 V 为一个周期正弦波纹微通道所占据的体积； S 为一个周期波纹微通道的内表面积，为上下底面和两个侧面面积之和。由数值计算结合式(1)、式(2)、式(4) 可知，当量直径 D_h 由周期 l 和 D_2 两个参数决定，所以为保证当量直径的一致，需在改变通道周期的同时调整参数 D_2 的取值。

本文设计制作了 11 种不同相位差和周期的正弦波纹微通道，以及 1 种用于比较的平直微通道。表 1 给出了 12 种微通道的几何参数，其中 L 、 L^* 分别代表微通道的水平表观长度和实际流动长度，由表可见：11 种正弦波纹微通道与平直微通道具有相同的当量直径和表观长度。

图 3 给出了表 1 中部分微通道的 CCD 照片，由此可直观了解实验所用正弦波纹通道的结构特点。

2 数据处理及误差分析

本文流体 Re 定义式为

$$Re = \frac{\bar{u}D_h}{\nu} \quad (5)$$

式中 D_h 为通道当量直径； ν 为工质运动黏度； $\bar{u}$ 为工质平均流速

$$\bar{u} = \frac{M}{N\rho A_c} \quad (6)$$

式中 ρ 为工质密度； A_c 为单根通道截面积，取一个波纹周期内的截面积积分平均值； N 为平行微通道数量； M 为流经平行微通道的工质总质量流率，由电子天平称重获得。

表 1 微通道结构及尺寸参数
Table 1 Geometric parameters of silicon microchannels

Channel No.	Types	$D_h/\mu\text{m}$	$A/\mu\text{m}$	$l/\mu\text{m}$	$D_1/\mu\text{m}$	$D_2/\mu\text{m}$	φ	L/mm	L^*/mm	N
1	straight	160	—	—	—	—	—	52	52	10
2	wavy	160	200	4000	0	429.8	0	52	55.9	10
3	wavy	160	200	4000	500	429.8	$\pi/4$	52	55.9	10
4	wavy	160	200	4000	1000	429.8	$\pi/2$	52	55.9	10
5	wavy	160	200	4000	1500	429.8	$3\pi/4$	52	55.9	10
6	wavy	160	200	4000	2000	429.8	π	52	55.9	10
2a	wavy	160	200	2000	0	457.0	0	52	59.4	10
2b	wavy	160	200	1000	0	505.6	0	52	65.7	10
2c	wavy	160	200	500	0	588.4	0	52	76.5	10
6a	wavy	160	200	2000	1000	457.0	π	52	59.4	10
6b	wavy	160	200	1000	500	505.6	π	52	65.7	10
6c	wavy	160	200	500	250	588.4	π	52	76.5	10

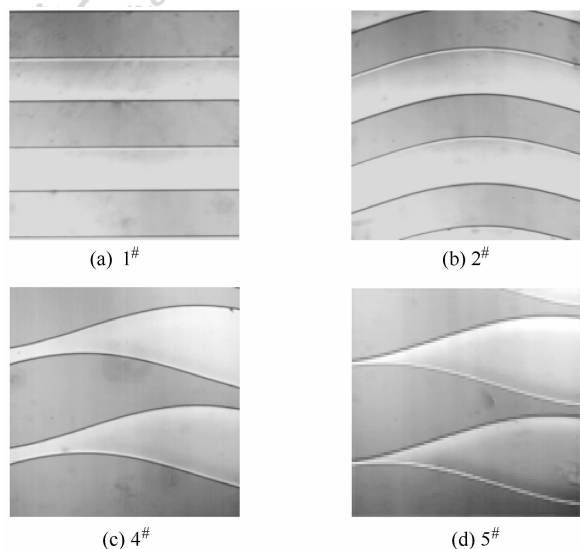


图 3 部分微通道照片

Fig. 3 Photos of typical microchannels

摩擦阻力系数 f 定义式

$$f = \frac{\Delta p D_h}{2 \rho \bar{u}^2 L^*} \quad (7)$$

式中 Δp 为微通道沿程阻力压降, L^* 为微通道实际流动长度。

根据实验仪器精度及误差传递原理, 可得本文各测量值最大相对误差, 见表 2。

表 2 测量误差

Table 2 Measurement errors

Parameters	Maximum error/%
D_h	1.88
L	0.2
Δp	1.11
M	0.98
f	6.5
Re	8.9

3 实验结果及分析

3.1 相同周期、不同相位差正弦波纹微通道内的流动阻力特性

图 4 给出了实验测得的平直微通道以及 5 种具有相同周期、不同相位差的正弦波纹微通道的质量流率-压降关系, 由图可见: (1) 所有微通道在进出口压差增大时, 通道内质量流率均有上升, 其中 1# 平直微通道在压差上升时质量流率增加最为迅速; (2) 2# ~ 6# 波纹微通道周期相同, 随着 2# ~ 6# 通道两侧壁相位差的增加, 通道质量流率随压差增加而增加的速率放缓, 当两侧壁相位差为 π 时

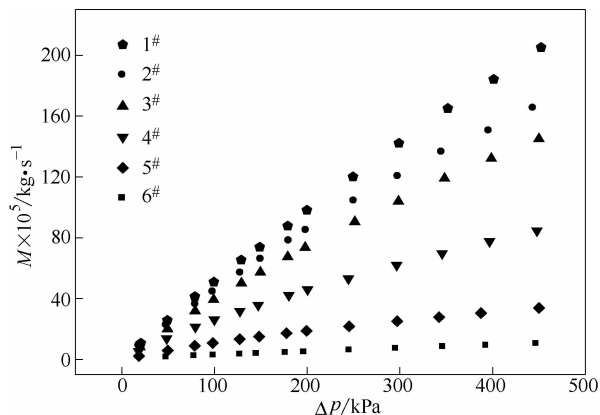


图 4 平直微通道和波纹微通道在相同压差下质量流率的比较

Fig. 4 Comparison of mass flow rates among various microchannels

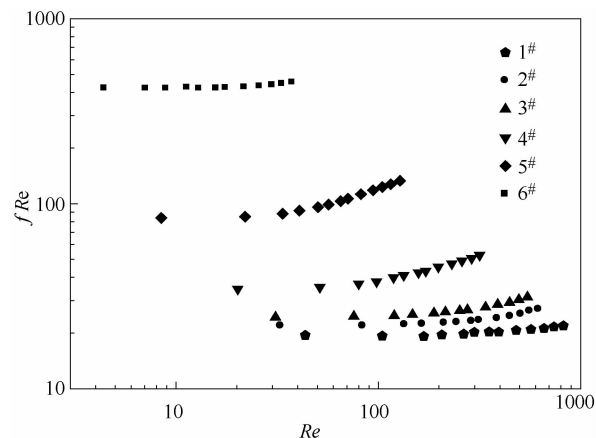


图 5 平直微通道和波纹微通道摩擦常数 fRe 的比较

Fig. 5 Comparison of fRe among various microchannels

(对应 6# 微通道), 质量流率随压差增加几乎不变。

图 5 进一步给出了上述 6 种微通道中摩擦常数 fRe 随 Re 的变化关系, 由图可见: (1) 相比波纹微通道, 平直微通道的摩擦常数最小, 仅为 20 左右; (2) 随着波纹微通道两侧壁相位差的增大, fRe 不断增大, 当相位差为 π 时, 波纹微通道的摩擦常数最大, 约为 451, 较相应平直微通道摩擦常数增加了约 21 倍。图 5 中波纹微通道相对于平直微通道阻力增加的原因主要有以下两方面。

(1) 对于两侧壁相位差为 0 的波纹微通道, 由于壁面波纹结构的影响, 其内部流动会产生与主流方向垂直的速度分量 v_2 (图 6), 从而造成波纹微通道阻力的上升。

(2) 对于两侧壁有相位差的波纹微通道 [图 3 (c)、(d)], 除以上原因外, 其沿流动方向通道宽度会出现周期性的收缩和扩张, 这种类似于缩放喷

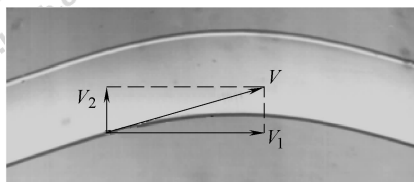


图6 波纹近壁面处流体速度分解示意

Fig. 6 Flow velocity disintegration in wavy microchannel

管的收缩和扩张结构带来了阻力的更大提升,且这一部分的阻力提升主要取决于通道最窄处的宽度,即喉部宽度。由于相位差为 π 的波纹微通道的喉部宽度最小(不足 $30\text{ }\mu\text{m}$),这就导致其相对于平直微通道,阻力增加最大。

3.2 相同相位差、不同周期正弦波纹微通道内的流动阻力特性

本文研究发现,对于相位差为0和 π 这两种情况,周期对正弦波纹微通道内流动阻力的影响会呈现不同的规律,下面将分别阐述。

图7为相位差为0,波纹周期分别为4、2、1、0.5 mm的波纹微通道内的阻力结果比较。

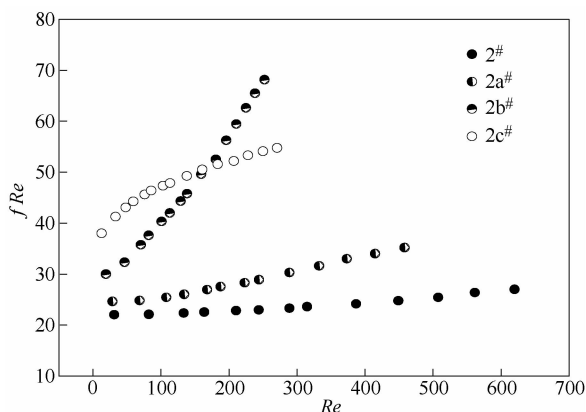
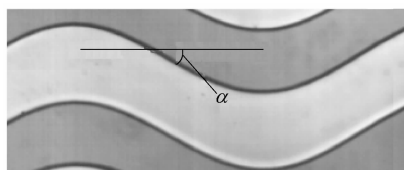
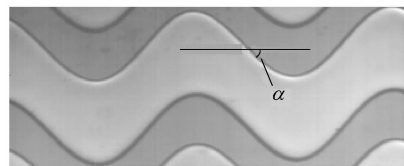


图7 相位差为0时不同波纹周期的波纹微通道内的摩擦常数比较

Fig. 7 Comparison of fRe among wavy microchannels with 0 phase shift

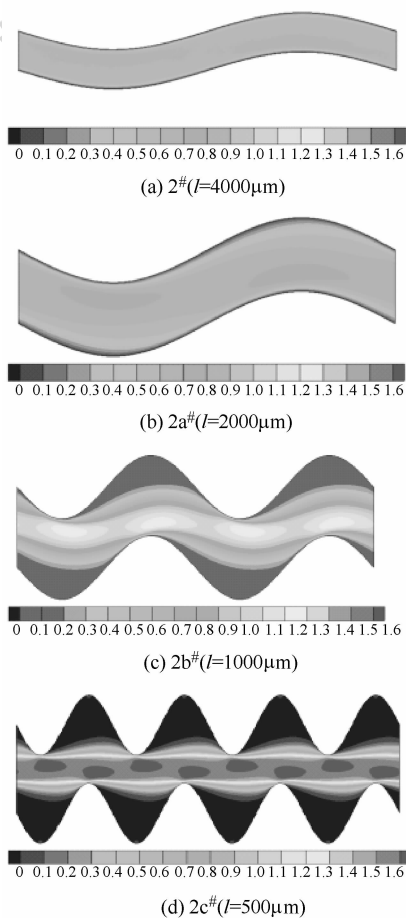
(1) $2^\#$ 、 $2a^\#$ 和 $2b^\#$ 三种波纹微通道摩擦常数的大小与波纹周期呈反比,即周期越小,摩擦常数越大,周期较小的 $2b^\#$ 通道的摩擦常数最大。这一现象可用图8所示的波纹结构来解释,由图8可知,减小周期会使波纹通道侧壁与主流方向的攻角 α 增大,其产生的与主流方向垂直的速度分量也越大,通道内流体波动越剧烈,造成的阻力损失也就越大。

(2) 与上述现象一致,在小 Re 情况下,具有最小周期的 $2c^\#$ 通道的摩擦常数低于 $2^\#$ 、 $2a^\#$ 和

(a) $2a^\#$ (b) $2b^\#$ 图8 波动管壁与主流方向攻角 α Fig. 8 Comparison of α between channels $2a^\#$ and $2b^\#$

$2b^\#$ 三种通道,而当 Re 大于150后, $2c^\#$ 通道的摩擦常数反而较周期较大的 $2b^\#$ 通道小。为解释这一现象,本文根据Navier-Stokes方程,应用有限体积法和周期性边界条件^[14]对正弦波纹微通道内的流动进行了数值模拟。速度场模拟结果如图9所示,由图可见:随着波动周期的减小,波纹通道中大部分流体有集中向通道中心通过的趋势,随着 Re 的增加,这一趋势越为明显。当 Re 大到一定值时,大部分流体工质在周期最小的 $2c^\#$ 通道中会沿通道中心以类似于直通通道内的流动方式通过,虽然此时 $2c^\#$ 通道两侧壁波动十分剧烈,但大量工质并不流经此剧烈波动区,因此造成 $2c^\#$ 通道在大 Re 时流动阻力反而低于具有较大周期的 $2b^\#$ 通道。

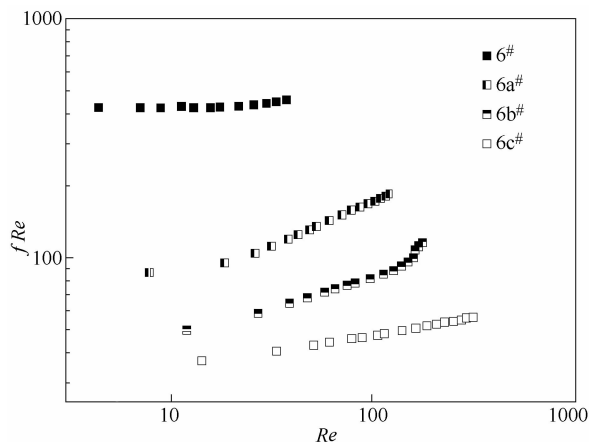
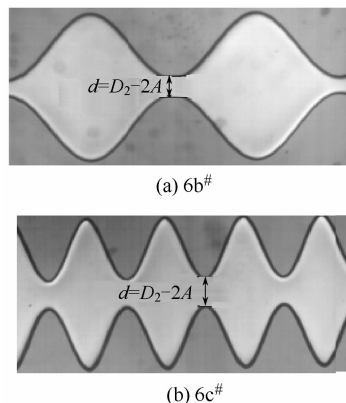
图10为相位差为 π ,波纹周期分别为4、2、1、0.5 mm的波纹微通道内的阻力结果比较,由图可见:相位差为 π 的4种不同周期波纹微通道的摩擦常数 fRe 均随 Re 增加而上升,但与相位差为0时不同的是,相位差为 π 的4种波纹微通道的摩擦常数与波纹周期呈正比,即周期越大,摩擦常数越大,周期最大的 $6^\#$ 微通道摩擦常数最大,而周期最小的 $6c^\#$ 通道摩擦常数最小。造成这一情况的原因是:不同于0相位差的波纹微通道的等截面分布, π 相位差的波纹微通道(图11)沿流动方向通道截面出现了周期性的收缩和扩张,这种类似于缩放喷管的收缩和扩张结构带来了阻力的极大提升,且阻力提升主要取决于通道最窄处宽度,即喉部宽度,并与喉部宽度呈反比。图11所示的 $6b^\#$ 和 $6c^\#$ 通道的喉部宽度由 $(D_2 - 2A)$ 确定。由于 $6c^\#$ 通道周期最小,为保持它与 $6^\#$ 、 $6a^\#$ 、 $6b^\#$ 通道具有相同的当量直径, $6c^\#$ 通道的 D_2 必须取值

图 9 $Re=60$ 时通道内部速度场Fig. 9 Velocity field in channel at $Re=60$

最大(表 1), 这也就导致了 $6c^\#$ 通道的喉部宽度(D_2-2A)最大, 其阻力损失最小, 而具有较小 D_2 和较小喉部宽度(D_2-2A)的 $6^\#$ 通道的阻力损失最大。

3.3 相位差分别为 0 和 π 的 4 组不同周期波纹通道内的流动阻力对比

为进一步揭示波动周期和相位差对波纹微通道内流动阻力的影响规律, 图 12 给出了相位差分别为 0 和 π 、周期由大变小的 4 组波纹微通道内的阻力特性对比。由图 12 可见: 具有较大波动周期的第一组通道 $2^\#$ 和 $6^\#$ (周期 l 为 $4000\ \mu\text{m}$) 在相同 Re 下摩擦常数的差距最大, 随着波动周期的减小, 第二、三组通道 (周期 l 分别为 $2000\ \mu\text{m}$ 、 $1000\ \mu\text{m}$) 之间摩擦常数的差异逐渐减小, 直到周期最小的第四组通道 $2c^\#$ 和 $6c^\#$ (周期 l 为 $500\ \mu\text{m}$), 不同相位差之间的摩擦常数几无差别, 几乎重合。上述结果表明: 相位差对波纹微通道内阻力特性的影响随波动周期的减小而减小, 当周期小至某一特

图 10 相位差为 π 时不同波纹周期的波纹微通道内的摩擦常数比较Fig. 10 Comparison of fRe among wavy microchannels with π phase shift图 11 相位差为 π 的波纹通道结构照片Fig. 11 Photos of wavy microchannels with π phase shift

定值(对本文为 $500\ \mu\text{m}$)时, 相位差为 0 和 π 的两种微通道内的阻力特性几乎一致。出现这种现象的主要原因在于随着周期的减小, 控制 $2c^\#$ 和 $6c^\#$ 通道两侧壁间距的几何参数 D_2 变大, 这两种通道中的流体会沿通道中心线附近的空隙以类似直通通道内的流动方式通过 [图 9(d)], 剧烈波动的侧壁对流动的影响变得并不明显, 所以通道两侧壁相位差的不同也就对流动阻力无明显影响了。

4 结 论

本文基于 MEMS 技术对具有不同周期和相位差的硅基正弦波纹微通道内的流动阻力特性进行了实验研究和分析, 得到以下主要结论。

(1) 相比于相同水力直径的平直微通道, 所有波纹微通道均使流动阻力有所增加, 且阻力增加幅度与波纹通道周期和相位差有关。

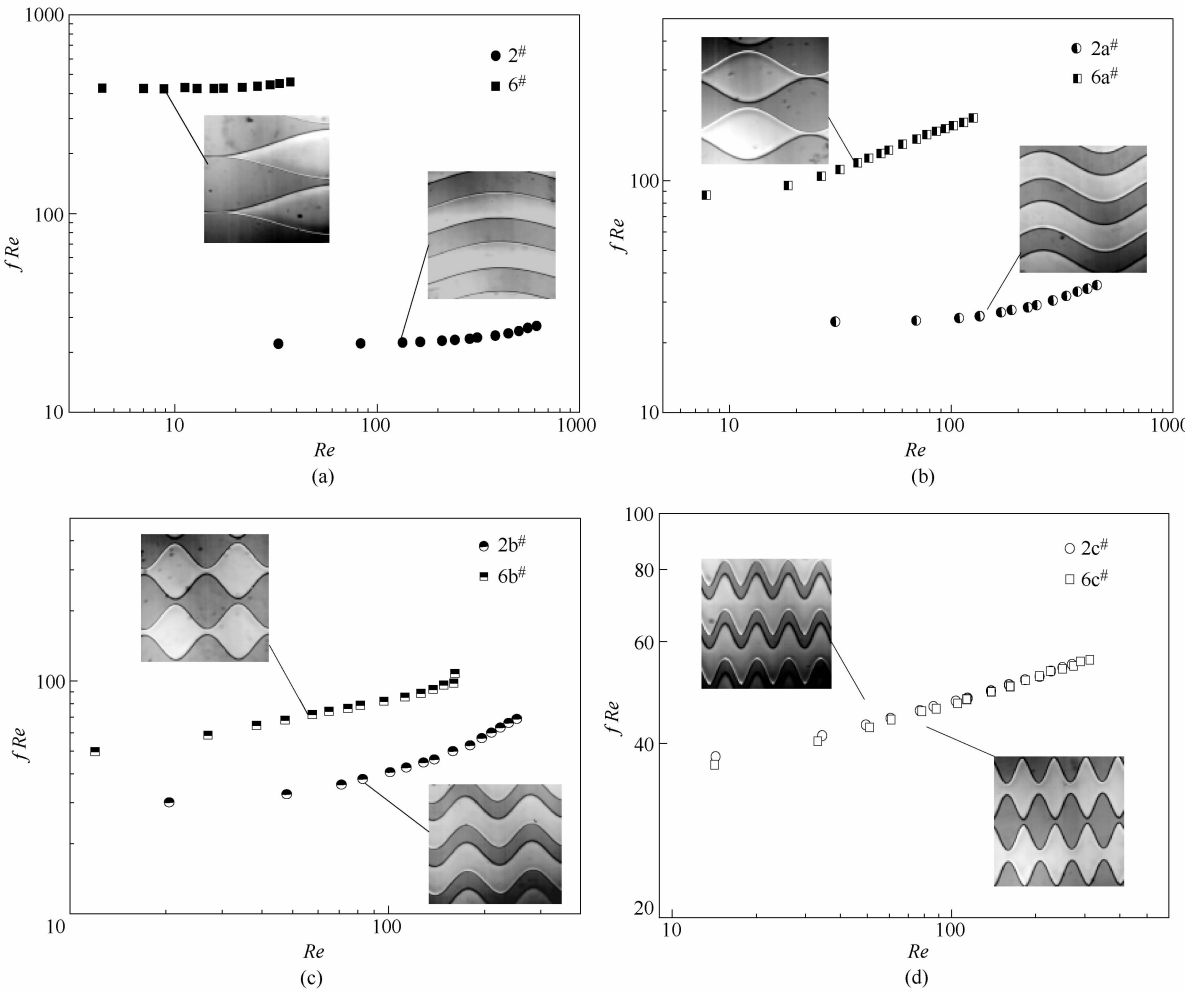


图 12 不同周期下 0 和 π 相位差微通道内 fRe 的比较

Fig. 12 Comparison of fRe between wavy microchannels with 0 and π phase shift under different wavelengths

(2) 对于周期为 4 mm 的微通道，流动阻力随通道两侧壁相位差的增加而增加，当两侧壁相位差超过 $\pi/2$ 之后，通道流动阻力随相位差增大而增加的速度明显加快；当相位差达到 π 时，通道内摩擦常数可超过相应平直微通道约 21 倍。

(3) 在低 Re 条件 ($Re < 150$) 下，两侧壁相位差为 0 的正弦波纹微通道内的流动阻力随通道波纹周期的减小而增大；而随着 Re 增加，具有最小周期的 2c# 波纹微通道（周期为 0.5 mm）内的流体有集中于通道中心以直通道方式通过的趋势，致使这一周期微通道内的摩擦常数反而低于相同 Re 下具有较大周期的 2b# 波纹微通道（周期为 1 mm）。

(4) 两侧壁相位差为 π 的正弦波纹微通道内的流动类似扩缩管流动，其阻力主要由微通道最窄处的喉部宽度决定，喉部越宽，阻力越小。由于正弦

波纹微通道设计中喉部宽度与波纹周期呈反比，因此导致周期最大（为 4 mm）的 6# 波纹微通道阻力最大，周期最小（为 0.5 mm）的 6c# 波纹微通道阻力最小。

(5) 通道两侧壁相位差大小对波纹微通道内阻力的影响随波纹周期的减小而减小，实验发现，当波纹微通道周期小至 0.5 mm 时，相位差分别为 0 和 π 的波纹微通道表现出几乎一致的流动阻力特性。

符 号 说 明

- A ——波纹通道振幅， μm
- A_c ——单个通道的横截面积， m^2
- D_h ——波纹通道当量直径，mm
- D_1, D_2 ——分别为控制两侧壁正弦曲线相位差和间距的形状参数， μm
- f ——阻力系数

L ——波纹通道水平表观长度, mm

L^* ——波纹通道实际流动长度, mm

l ——波纹通道波动周期, μm

M ——流过一组平行微通道的质量流量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$

N ——每组平行通道所包含的通道个数

Δp ——通道两端的压力差, Pa

Re ——Reynolds 数

S ——波纹微通道一个周期的内表面积, mm^2

$\bar{u}$ ——工质流动的平均速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

V ——波纹微通道一个周期的体积, mm^3

ν ——工质运动黏度, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

ρ ——工质密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

φ ——正弦波纹通道两侧壁相位差

References

- [1] Tuckerman D B, Pease R F W. High performance heat sink for VLSI [J]. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, 1981, **2** (5): 126-129
- [2] Wu H Y, Cheng P. Friction factors in smooth trapezoidal silicon microchannels with different aspect ratios [J]. *International Journal of Heat and Transfer*, 2003, **46** (14): 2519-2525
- [3] Wu H Y, Cheng P. An experimental study convective heat transfer in silicon microchannels different surface conditions [J]. *International Journal Heat and Mass Transfer*, 2003, **46** (14): 2547-2556
- [4] Qu W L, Mudawar I. Experimental and numerical study of pressure drop and heat transfer in a single-phase microchannel heat sink [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, **45**: 2549-2565
- [5] Gan Yunhua (甘云华), Xu Jinliang (徐进良). Experimental investigation of laminar heat transfer in silicon micro-channels with new structure [J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences* (中国科学院研究生院学报), 2005, **22** (2): 157-163
- [6] Tang Huimin (唐慧敏), Wu Huiying (吴慧英), Wu Xinyu (吴信宇). Experimental study of flow and heat transfer characteristics in silicon based corrugated microchannels [J]. *Journal of Aerospace Power* (航空动力学报), 2010, **25** (6): 1264-1269
- [7] Xia Guodong (夏国栋), Xu Zhibo (徐志波), Qi Jingzhi (齐景智). Flow and heat transfer characteristics in a periodical changeable cross-section microchannel heat sink [J]. *Journal of Aerospace Power* (航空动力学报), 2010, **25** (1): 6-10
- [8] Xia Guodong (夏国栋), Chai Lei (柴磊), Yang Ruibo (杨瑞波), Zhou Mingzheng (周明正). Influence of structural parameters on fluid flow and heat transfer in microchannel with periodically changeable cross-sections [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2009, **60** (11): 2705-2711
- [9] Xia G D, Chai L, Wang H Y, Zhou M Z, Cui Z Z. Optimum thermal design of microchannel heat sink with triangular reentrant cavities [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, **31**: 1208-1219
- [10] Liu Enguang (刘恩光), Wu Huiying (吴慧英), Tang Huimin (唐慧敏). Flow and heat transfer characteristics in silicon-based microchannels with internal ribs [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2009, **60** (8): 1906-1911
- [11] Sui Y, Teo C J, Lee P S, Chew Y T, Shu C. Fluid flow and heat transfer in wavy microchannels [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, **53**: 2760-2772
- [12] Sui Y, Lee P S, Teo C J. An experimental study of flow friction and heat transfer in wavy microchannels with rectangular cross section. *International Journal of Thermal Sciences*, 2011, **50**: 2473-2482
- [13] Yin Jixiang (阴继翔), Li Guojun (李国君), Feng Zhenping (丰镇平). Numerical study on the characteristics of flow and heat transfer in wavy channels with different phase shifts [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University* (西安交通大学学报), 2004, **38** (7): 693-697
- [14] Patankar S V, Liu C H, Sparrow E M. Fully developed flow and heat transfer in ducts having streamwise-periodic variations of cross-section area [J]. *ASME J. Heat Transfer*, 1977, **99** (2): 180-186