

# 微尺度流动特性\*

## CHARACTERISTICS OF MICRO SCALE FLOW

李战华 崔海航

(中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室(LNM), 北京 100080)

LI Zhanhua CUI Haihang

(State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics(LNM), Institute of Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**摘要** 通过微推进器小型化的具体问题说明微型化不是简单的尺寸缩小。微尺度流动所基于的物理因素与宏观流动不同,体现在流动涉及的表面积与体积之比增强、梯度参数效应及界面力效应等。物理因素作用的改变或新的因素参与,使微尺度流动呈现新的特点,这为设计芯片和传感器中的流动提供了新的思路,正如文中介绍的增强层流混合方法。微尺度效应在流体力学理论方面也会有所体现,包括对基本方程、边界条件的修正。然而对流动现象的深入认识则是理论发展的关键。文中简单介绍了作者的研究组在微尺度液体流动实验方面的研究结果。

**关键词** 微电子机械系统 液体流动 尺度效应

**Abstract** Micro-fluid research was introduced by early experiments on refrigerators-on-a-chip and chromatograph. Recently, more attentions are promoted with the development of NEMS/MEMS. This paper illustrates the influences of miniaturization through some particular examples in micro-thruster-array that the miniaturization isn't simply a scale reduction. The basing physical factors of micro-fluid flow are different from those of macro-scale flow, such as the increment of surface-volume ratio related to the domain of flow, the effects of gradient parameters and interface forces. The change of some dominated physical factors or addition of new factors makes that the micro-fluid presents some new special behaviors. These characters provide a novel idea to the microchips and micro-sensors design, such as to enhance the laminar mixture mentioned in some literatures. The micro scale effects could be reflected in the theory of fluid mechanics, including the correction of basic equations, boundary conditions, etc. But the deep understanding to the flow phenomena is the key point of the development of theory. Some experimental results in the micro channel obtained by LNM are also presented briefly in this paper.

**Key words** Micro-electro-mechanical system; Liquid flow; Scale effect

Correspondent: LI Zhanhua, E-mail: lili@lnm.imech.ac.cn, Fax: +86-10-62561284

The project supported by the National Fundamental Research Development Project of China (No. G1999033106) and the National Climbing A Project of China.

Manuscript received 20011112, in revised form 20011123.

## 1 引言

微电子机械系统(MEMS)即采用集成微电子工艺、批量处理加工成的微型器件,具有集成度高、体积小等特点,广泛应用于机械、航空航天、生物医疗、化学分析等各个领域。许多 MEMS 器件含有与流动有关的部件,甚至是基于流动的某种原理而制成。例如,生物芯片中由微流道组成的微分析系统,即利用毛细管电泳效应分离样品;微推进器中的燃料腔和喷口等。这势必会遇到一个问题,即在特征尺度由宏观  $\text{cm} \sim \text{m}$  量级减小到  $\mu\text{m}$  量级,流动会发生什么变化?描述宏观流体力学运动的方程是否仍然适用? Ho and Tai<sup>[1]</sup> 和 Gad-el-Hak<sup>[2]</sup> 在其综述文章中引用了一些实验结果,表明在微管道中气体流动出现沿流向压力梯度的非线性变化和液体流动中表观粘性的改变。这些结果说明在某种条件下微尺度流动规律的确与宏观理论不一致。

其实微尺度现象的研究已有其历史,而且在流体力学其他领域如流变学、渗流力学、生物力学、胶体科学等都可以找到对细观现象研究的经验。但近来 MEMS 技术的发展并受其巨大的应用背景所激励引起了前所未有的对微尺度现象的研究高潮,这给予我们一个从新的角度研究微尺度流动规律的机会。

本文首先回顾自 70 年代开发芯片式制冷器和色谱仪的工作如何引起了对微尺度流动研究的兴趣。然后引用具体问题的研究结果说明微型化的影响,通过微推进器小型化的尺度效应,说明微型化不是简单的尺寸缩小。微尺度流动所基于的物理因素与宏观流动不同,表现为,表面力相对于体积力的作用、梯度参数效应及界面力效应的增强。物理因素作用的改变或新的因素参与,使微尺度流动呈现新的特点。文中介绍了研究和利用这些特点改变微尺度流动的文献结果,例如增强层流混合等。微尺度液体流动规律会影响生

\* 20011112 收到初稿,20011123 收到修改稿。本文由国家基础研究发展规划项目(G1999033106)和国家攀 A 项目资助。

物芯片和微传感器的性能,但由于缺乏对液体结构的了解,对液体流动规律的描述不足。最后介绍本研究组对微尺度液体流动规律研究的进展。

## 2 早期微尺度流动的研究

关于微尺度流动的研究最早可以追溯到 1970 年两个研究组开展的工作,即 Wu 与 Little<sup>[4]</sup> 进行的制冷方面的研究 和 Terry 进行的气相色谱芯片的研究<sup>[3]</sup>。70 年代出于对制冷研究的要求, Little 和他的同事<sup>[5]</sup> 开始制作芯片上的冷却器。这个制冷器使用玻璃作为衬底,用 HF 酸化学刻蚀流道。这样制成的流道具有圆形横截面,难以准确测量尺寸。为了克服这个困难,他们采用 Sandblasting 方法,可以制作出具有相当垂直的边壁面的流道,但底部很粗糙,这促使了对粗糙度影响的研究。他们加工出来的流道尺寸为宽 200 μm、深 50 μm,粗糙度量级在 20 μm,因此这种方法不适用更小尺度的管道。在改进管道刻蚀技术的同时,他们又发展了一种新颖的粘接方法,使制冷器可以承受 20 MPa 的压力。最终这种利用高压氮气的芯片式制冷器,可以在几分钟内将样品温度冷却到 80 K;这是第一批实用的微流体器件。另外, Terry 和他的同事<sup>[6]</sup> 于 1975 年开始研究一种基于微芯片的气相色谱系统。他们工作的主要贡献是,使用了气阀控制待分析混合气体的引入及利用薄膜式热传导传感器进行流量测量。他们的研究成果也成为最早的 MEMS 器件之一。但是当时阀门和传感器都是分别加工后再组装,还不是人们所期望的集成系统。

以上是早期工程上利用微制造技术的例子。在科学研究方面,80 年代地球物理学家最早将微制造技术用于研究模拟多孔介质流动即渗流。Lenormand 等<sup>[7]</sup> 用流道组成的格子网络进行实验,研究在压力驱动下非浸润流体(油)如何推动浸润流体(气体);借助微流道网络,他们得以直接观察流动并测量被油浸润部分的几何面积,从而验证了理论预测的分形现象。现在,微制造技术提供了更多的加工手段,制造出实验所需要的管道形状分布(图 1),为渗流科学向定量研究发展提供了新的手段。

进入 90 年代,基因工程推动了微检测技术的发展,使微制造技术得到前所未有的重视,极大地推动了对微尺度流动现象的研究<sup>[8,9]</sup>。

## 3 微型化引起的问题

研究微电子机械系统时常常涉及尺度效应。例如表面积与体积之比的增大、传热传质效率的提高等。下面通过实例具体说明微尺度的影响和效应及对微尺度理论的考虑。

### 3.1 微型化并不是简单的几何缩小

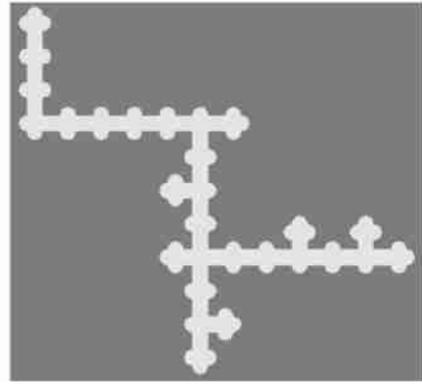


图 1 一种用于研究渗透现象的流动网络<sup>[3]</sup>  
Fig. 1 A flow network used to study percolation phenomena<sup>[3]</sup>

卫星在轨道上运行时需要推进器对其姿态进行控制。卫星小型化必然要求推进器的尺寸减小。在微推进器的研制中,提出过一种点阵式微喷方案,即在一块芯片上制作许多微喷(图 2)。假设一个独立的微喷(燃烧室—喷管系统)大约占有 2 mm<sup>2</sup> 的面积(即 0.5 个/mm<sup>2</sup>),其壁厚为 0.2 mm,如果希望进一步微型化,达到装置密度为数个/mm<sup>2</sup>,甚至作到 100 个/mm<sup>2</sup>,是否仅仅将尺寸缩小即可?文献[11]探讨了这个问题。考虑几个比例参数与尺度的关系:

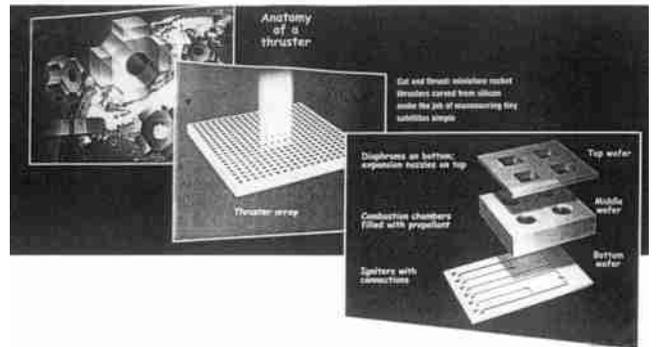


图 2 一种点阵式微喷<sup>[10]</sup>  
Fig. 2 A micro thruster array<sup>[10]</sup>

壁面传热量  $H_w$ /气体总焓  $G_o$

$$\frac{H_w}{G_o} \frac{L^2}{L^2} = L^0 \quad (1)$$

壁导热特征时间  $t_h$ /燃气流出时间  $t$

$$\frac{t_h}{t} \frac{L^2}{La} = \frac{L}{a} \quad (2)$$

其中  $a = \lambda / c$  是热导系数,  $\lambda$  是材料导热系数,  $\rho$  是气体密度,  $c$  是比热。

$$\begin{aligned} \text{推力} & F \quad \dot{G}V \quad A_t \quad L^2 \\ \text{冲量} & I \quad Ft \quad L^2 \cdot L \quad L^3 \\ \text{强度} & = \frac{Pd}{2} \quad L^0 \end{aligned}$$

具体推导请参考文献[12]。由此可知,壁面传热量  $H_w$  与气体总焓  $G_o$  之比与特征长度无关,说明尺寸缩小并不影响传给壁面的热量在流动总焓中的比例。

强度也与特征长度无关,小型化对器件的强度不会带来问题。推力和冲量与长度有关,即尺寸缩小使推力和冲量减少,这正是点阵式微喷方案提出的理由,即通过增加微喷的个数提高总体推力。问题出在壁面导热的特征时间  $t_h$  将会缩短,因为高温向壁面非正常传导的特征时间与壁厚的平方成正比,而工作时间和线性尺寸成正比。当线性尺度缩小 10 倍时,通过壁面导热所需的时间将要比工质流出燃烧室所需时间快很多,这说明工作单元的高温将迅速传导至邻壁单元而自动点燃其燃烧室的燃料。如以硅为材料,其装置密度大约可作到 1 至数个/mm<sup>2</sup>,而作到 100 个/mm<sup>2</sup> 的期望是完全不现实的。

此例子说明微型化会改变相关物理因素在过程中的重要性,使得原本次要的因素(这里指壁面非正常传导)变得重要起来,甚至会影响全局。因此,小型化不是简单的几何缩小。

### 3.2 尺度效应

#### 3.2.1 表面积与体积之比的增大

当流动的特征尺度由 cm~m 量级减小到  $\mu\text{m} \sim \text{mm}$  量级,表面积与体积之比由量级  $10^2 \text{m}^{-1}$  变成量级  $10^6 \text{m}^{-1}$ ,这对与表面有关的传热、传质过程有很大影响。例如对于热交换器,通过微加工方法可以在一定的体积下增加其换热面积。目前研制的一种袖珍式换热器,在  $14\text{mm}^3$  的体积内,可以进行热交换的表面积达到  $3600\text{mm}^2$ 。面积与体积之比达到  $257 \times 10^3/\text{m}$ ,大大提高了制冷器的效率<sup>[13]</sup>。

#### 3.2.2 梯度参数效应

尺度缩小使得流场中某些梯度量变大,与梯度量有关的参数的作用将增强。

1) 在传热学中,层流的对流换热系数  $h$  与  $Nu$  数、 $Re$  数、材料的导热系数  $\lambda$  及尺度  $l$  有关

$$h = \frac{Nu}{l} = 0.66 (Re)^{1/2} \frac{\lambda}{l} \quad (3)$$

当  $l$  从 cm 变成  $\mu\text{m}$ ,即  $l = 10^{-4} \text{cm}$ , 将比常规条件时高 1~2 个量级。从物理上解释,微尺度下由于气流流经长度很短,所以附面层很薄。同样温差下平均温度梯度大,使换热强度提高。这是小尺度下对流换热比常规条件时提高的根本原因<sup>[11]</sup>。

2) 对平行剪切流动,尺度缩小使沿壁面法向的速度梯度变大,剪切作用增强。粘性剪应力  $\tau_x$  与速度的一阶空间导数有关

$$\tau_x = \mu \frac{\partial u}{\partial z} = \mu \dot{\gamma} \quad (4)$$

假设流动的  $Re$  数等于 2,在直径  $D = 1 \text{cm}$  的管道和  $d = 25 \mu\text{m}$  的微管道中,同样介质流动沿径向的剪应变率  $\dot{\gamma}$  (速度的空间导数)将增大  $10^5$  量级以上。流变学研究表明,当  $\dot{\gamma}$  大于流体分子频率两倍时,流动

的流体将呈现非牛顿流的特性<sup>[2]</sup>

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial u}{\partial z} = 2 \dot{\gamma} = \left( \frac{m^2}{\tau} \right)^{1/2} \quad (5)$$

这里  $\tau$  是分子时间尺度,  $m$ 、 $\tau$  和  $\dot{\gamma}$  分别为分子的质量、特征长度和特征能量。液体在微尺度管道中会遇到高剪应变率,其流变特性有可能发生改变。

#### 3.2.3 表面(界面)力效应

1) 液体与固体之间的界面力、浸润、亲水性和疏水性等,在宏观尺度流动中往往是可以忽略的物理因素。在微尺度下,由于表面积相对体积的增大,使表面力影响增强;同时流场空间尺寸的缩小,也突出了这些界面力的作用。在电泳流动中,双电层可以达到几百纳米,对于几微米直径的管道,双电层的影响应该考虑。

2) 在微尺度下,特别是液体,流动  $Re$  数大多属于层流流动。在宏观尺度下湍流的混合效率比层流大,在需要提高混合效率时,可以用提前转捩或者改变来流状态使流动达到湍流。在微尺度下这些手段无法使用。微尺度条件提供了较大的表面积和较小的体积,可以利用改变表面来影响内部流动。文献[14]在槽道壁面分布电荷  $q$ ,电荷方向平行(图 3a)或垂直定向电场  $E$ (图 3b)。在定向电场的作用下,槽道内得到剪切流或三维流动(图 4)。这项研究有利于提高微尺度流动器件中流体的混合效果。

3) 低  $Re$  数绕流。低雷诺数流动即粘性力为主的流动,微型飞行器、血管清洁器等小尺寸器件的运动即属于这种流动。当表面力(主要指粘性力)的作用为主时,宏观尺度飞行器所依赖的高  $Re$  数流动规律不再适用。

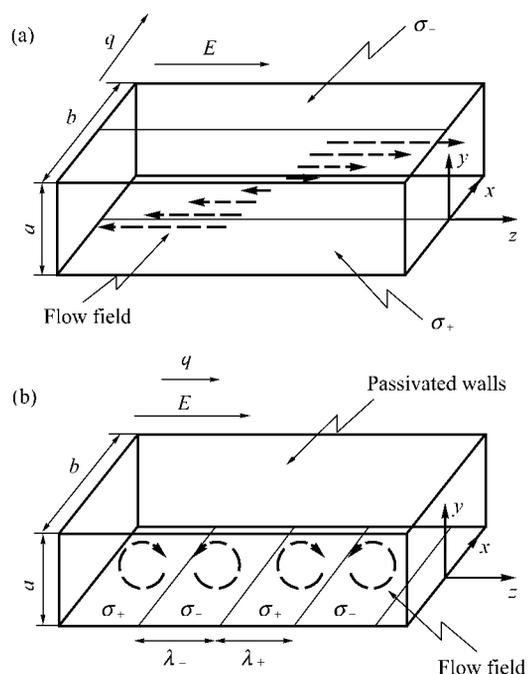


图 3 流道内壁电荷沉积的分布模式<sup>[14]</sup>

Fig. 3 Charge patterns deposited onto the interior of a flow channel<sup>[14]</sup>

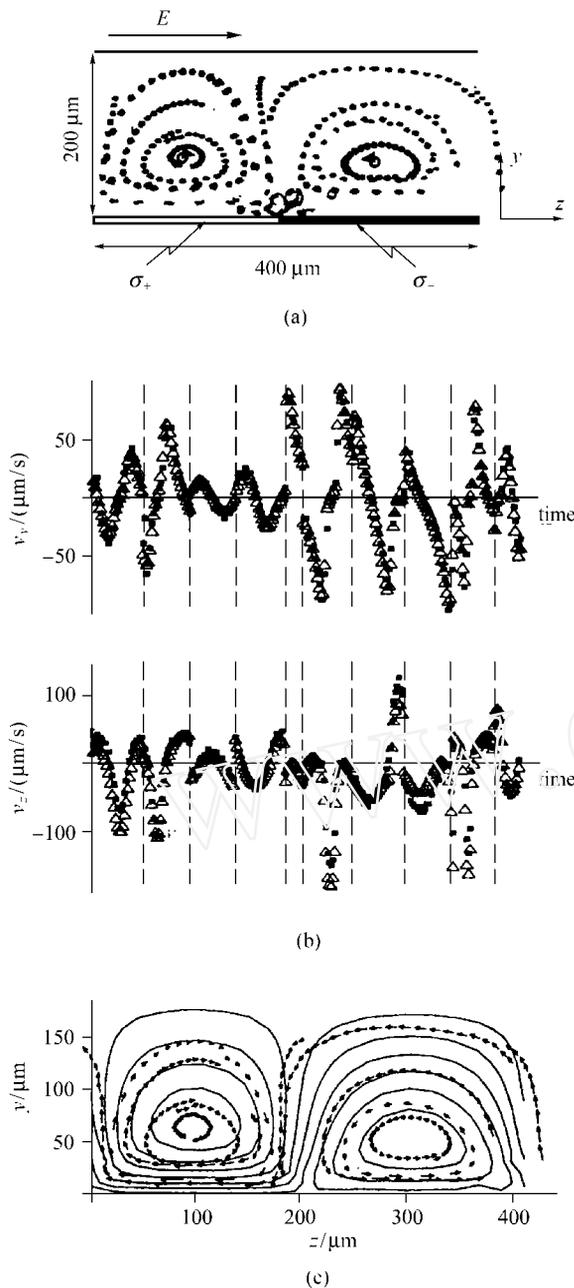


图 4 测量的流道内速度场的分布<sup>[14]</sup>

Fig. 4 Measured velocity field in the flow channel<sup>[14]</sup>

### 3.3 微尺度理论

#### 3.3.1 基本方程

正如第 1 节所述,宏观条件下流动的特征尺度一般在 cm ~ m, MEMS 器件或生物芯片里涉及流动的特征尺度范围为 μm ~ mm。特征尺度至少缩小了 3 个量级。流动特征尺度与流动介质的内禀特征尺度更为接近时,流动是否仍然符合连续介质假设下的流动方程,这是实际应用急需回答的问题。气体动力学研究中已有将这两个特征尺度联系在一起的理论,即 Knudsen 数。按照 Knudsen 数的范围,将气体流动分为连续流动、自由分子流动和过渡流动,各类流动有相应的基本方程。由于液体本身结构复杂,没有完善的分子动力学理论,如何确定液体分子的特征尺度(凝聚尺度),如何找到类似 Knudsen 数的无量纲参数将宏观特征尺度

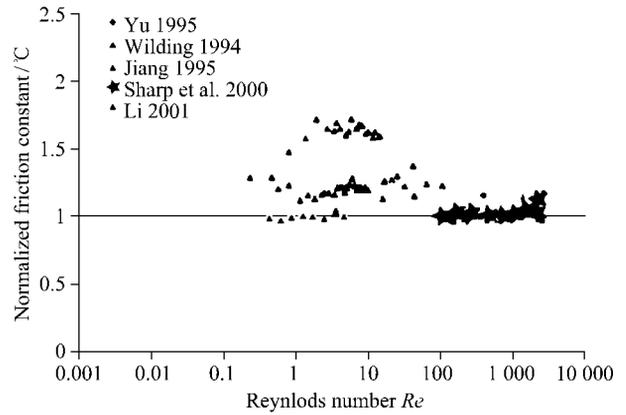


图 5 几个实验室获得的关于去离子水的  $C^*$  和  $Re$  结果的比较<sup>[13]</sup>

Fig. 5 Comparison of the experimental results about  $C^*$  and  $Re$  with de-ionized water obtained by several laboratories<sup>[13]</sup>

与微观特征尺度相联系,是微尺度液体流动理论发展的关键问题之一。在理论发展的同时,实验研究也在进行。由于尺度小,加工精度和测量精度都受到限制,不同环境的实验结果相差很大(图 5),其中  $C^* = (f \cdot Re)_{exp} / (f \cdot Re)_{th}$ 。随着对微流动现象认识的深入以及实验技术的不断改进,实验结果的可信度在提高。在 LNM 实验室微流动实验台上进行去离子水的实验结果表明,在 25 μm 微管范围内 ( $Re < 10$ ) 仍符合经典理论结果<sup>[15]</sup>。

如果仍在连续介质假设下考虑微尺度液体流动,那么对基本方程的改变可能表现在:

1) 在描述流动的方程中代表重力的体积力项与代表表面力的粘性项相比将变得不很重要,而会增加其他场的体积力项,例如电场力。在描述电泳流动的方程组中已有例子<sup>[16]</sup>。

2) 如同可压缩性效应通过第二粘性系数反应出来,微尺度效应也可能在表面力项中体现。

3) 对极性液体,Eringer<sup>[17]</sup> 提出过增加转动动量方程。

#### 3.3.2 本构方程

梯度量的影响可能会使流体物性发生变化,从而引起本构关系的改变。

#### 3.3.3 边界条件

对流固边界,宏观流动经常使用无滑移边界条件(NSBC);已有研究表明,微尺度下气体在过渡区的流动需要考虑边界滑移修正。对液体流动,Pit<sup>[18]</sup> 最近的实验发现,在某种液固界面滑移长度达到 400 nm 量级。

微尺度流动现象的研究是新的领域,特别是液体流动的理论缺乏,以上仅仅作为本课题组研究的体会。

## 4 结论

早期对芯片制冷器和色谱仪的开发引起了对微尺度流动的研究,近来 MEMS 技术的发展促进了对微尺

度现象的关注。这给予我们一个从新的角度研究微尺度流动规律的机会。这个领域需要化学、生物或物理学家从各自的研究角度来关注,对于微尺度流体力学,应该着重在:

#### 1) 基础研究方面

液体流动的分类,  $N-S$  方程适用性;液体分子的凝聚结构和极化状态在微尺度下对流动的作用;液固界面力、滑移边界条件的物理性质。

#### 2) 应用方面

微流动的器件:微流控分析系统、生物芯片、基因探针。

低  $Re$  数绕流:边界层控制、水下运动体。

测试技术:微流量测量、传感器研制(分布式水文仪)。

#### 致谢

作者在研究过程中与郑哲敏先生、凌国灿研究员进行过多次学术讨论,深得教益,在此表示衷心的感谢!

#### References

- 1 Ho Chi-ming, Tai Yr-chong. Micro-electro-mechanical-systems (MEMS) and fluid flows. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 1998, 30: 579 ~ 612.
- 2 Gad-el-Hak M. The fluid mechanics of microdevices ——the freeman scholar lecture. *J. of Fluids Engineering*, 1999, 121: 5 ~ 33.
- 3 Gordan N, Cheng J-T. Microfluid mechanics: progress and opportunities. *J. Phy: Condens. Matter*, 2001, 13: 271 ~ 295.
- 4 Wu P, Little W A. Mesurement of friction factors for the flow of gases in very fine channels used for microminiature Joule-Thomson refrigeration. *Cryogenics*, 1983, 23: 273 ~ 277.
- 5 Little W A. Microminiature refrigeration ——small is better. *Physica B* 109 + 110, 1992: 2 001 ~ 2 009.
- 6 Terry S C, Jerman J H, Angell J B. A gas chromatographic air analyzer fabricate on a silicon wafer, *IEEE Trans. Electron Devices*, 1979, 26: 1 880 ~ 1 886.
- 7 Lenormand R, Zarcone C. Invasion percolation in an etched network measurement of a fractal dimension. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, 54: 2 226 ~ 2 229.
- 8 LIU Jing. Heat transfer in micro/nano scale. Beijing: Science Press, 2001. 347 (In Chinese) (刘 静. 微米/纳米尺度传热学. 北京: 科学出版社, 2001. 347).
- 9 Gravesen P, Branebjerg J, Jesen O S. Microfluids ——a review. *J. of Micromechanics and Micro-engineering*, 1993, 4: 168 ~ 182.
- 10 Iannotta B. Pocket rocket. *New Scientist*, 1999, 10: 38 ~ 40.
- 11 XUE Minglun, LI Zhanhua. Some limitations of the digital micro propulsion miniature. *Micro-Nanometer Science & Technology*, 2000, 5 (1): 125 ~ 127 (In Chinese) (薛明伦, 李战华. 数字式推进器微型化程度的限制. 微米/纳米科学与技术, 2000, 5 (1): 125 ~ 127).
- 12 XUE Minglun, LI Zhanhua. Some considerations about the attitude control means of micro satellites. *Journal of Mechanical Strength*, 2001, 23 (4): 389 ~ 392 (In Chinese) (薛明伦, 李战华. 关于微卫星姿态控制手段的几点考虑. 机械强度, 2001, 23 (4): 389 ~ 392).

- 13 Sharp K V, Adrian R J, Santiago J G, et al. Liquid flows in microchannels. *Personal Communication*, 2001.
- 14 Stroock A D, Weck M, Chiu D T, et al. Patterning electro-osmotic flow with patterned surface charge. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 84 (15): 3 314 ~ 3 317.
- 15 LI Zhanhua, ZHOU Xinbei, ZHU Shannong. Flow characteristics of non-polar organic with small molecules in a microchannel. Accepted by *Acta Mechanica Sinica*, 2001 (In Chinese) (李战华, 周兴贝, 朱善农. 非极性小分子有机液体在微管道中的流量特性. 力学学报, 2001).
- 16 Probstein R F. *Physicochemical hydrodynamics*. Stoneham: Butterworth Publishers, 1989. 353.
- 17 Eringer A C. Theory of micropolar fluid. *J. Math. Mech.*, 1966, 16 (1): 1 ~ 18.
- 18 Pit R, Hervet H, Leger L. Direct experimental evidence of slip in hexadecane: solid interfaces, *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 85: 980 ~ 983.

#### 作者简介

李战华,女,1949年11月生,北京人,汉族。博士,研究员。1982年毕业于北京航空航天大学力学系,1982年至1989年中科院力学研究所工作。1990年获法国普瓦捷大学流体力学系硕士学位,1994年获法国巴黎皮埃尔玛丽居里大学(巴黎六大)流体力学系博士学位。自1995年工作于中科院力学研究所非线性力学国家重点实验室(LNM)。曾从事海洋工程、河口动力学研究,目前研究方向为微尺度流体力学及流动控制。通讯地址:中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室 LNM,北京 100080;电话:010-62524839,传真:010-62561284,E-mail:lili@lnm.imech.ac.cn

LI Zhanhua, born in Beijing in November 1949. She received the B. Sc. (1982) degree in mechanical engineering of BUAA (Beijing University of Aeronautics and Astronautics), the M. Sc. degree (1990) in mechanical engineering from University of Poitiers and Ph. D. degree (1994) in mechanics from University of Paris VI respectively in France. She has been engaged in research relate to her Ph. D. in Laboratory Biogeochemie Marine in ENS (Ecole Normale Superieur) during 1991-1994. She was an Assistant Professor (1982-1989), an Associate Professor (1995-1999) and is currently a Professor in Laboratory of Nonlinear Mechanics (LNM), Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Her research interests covered ocean engineering and estuary hydrodynamics. Her current research focuses on the micro scale fluid mechanics and boundary layer flow control. Address: LNM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 15 Zhongguan Cun Road, Beijing 100080; Tel: + 86-10-62524839, Fax: + 86-10-62561284, E-mail: lili@lnm.imech.ac.cn

崔海航,男,1975年6月生,陕西咸阳人,汉族。博士生。1997年毕业于西安交通大学能动学院,2001年6月获西安交通大学动力工程及工程热物理硕士学位,现为中科院力学所在读博士研究生。目前研究方向为微尺度流体力学及其应用。E-mail:wslml@263.net