

文章编号 1004-924X(2013)08-1988-07

疏水网覆盖的开放微管道中的液体运输

马增帅, 叶雄英*, 商院芳, 杜 敏

(清华大学 精密仪器系 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:考虑完全开放的微管道中液体运输不稳定,不利于生物气溶胶采样和监测的自动化集成,本文提出了用覆盖有疏水网的开放微管道来实现液体的可靠运输。通过理论分析得到了该微管道液体运输特性的估计公式,并用水作为试验介质对其运输特性进行了实验分析。分析实验显示,开放微管道中液体运输的稳定性依赖于栅网特性、液体性质和流动速度、管道尺寸和表面特性。栅网表面疏水性越好,孔径越小,微管道中液体的最大许可压强就越大,液体运输就会越稳定。对于孔径 50 μm 、表面涂覆有 Teflon 的栅网,最大许可压强可达 2 000 Pa。管道中的最大许可流速取决于管道尺寸和最大许可压强;对于较浅、较长的管道,最大许可流速较小。当液体流过干的疏水管道时,液体的表面张力会阻碍流动,管道截面尺寸越小,表面张力的阻碍效果越明显。

关键词:微流体;开放微管道;液体运输;疏水网;表面张力

中图分类号: TH703; X835 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132108.1988

Fluidic transportation of open microchannels with hydrophobic mesh

MA Zeng-shuai, YE Xiong-ying*, SHANG Yuan-fang, DU Min

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,
Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

* Corresponding author, E-mail: xyyc@mail.tsinghua.edu.cn

Abstract: Because unstable transportation of the fluid in an open microchannel restrains the integration of sampling and detection for bioaerosols, this paper proposes an open microchannel covered with a hydrophobic mesh to transport water in stability. On the basis of theoretical calculation, it gives an estimation formula of fluid transportation characteristics for the open microchannel and analyzes experimentally the fluid transportation characteristics by taking the water as transported media. The results in analysis and experiments demonstrate that the stability is dependent on the mesh properties and flow velocity, and is sensitive to the geometric parameters and the surface properties of the microchannel. The more hydrophobic the mesh is and the smaller the mesh holes are, the higher the maximum allowable pressure in the microchannel is and thus the water transportation is more stable. For a Teflon-coated mesh with a hole size of 50 μm , the maximum allowable pressure is up to about 2 000 Pa. Furthermore, the maximum allowable flow velocity in the channel is determined by the channel geo-

收稿日期:2013-03-01;修订日期:2013-04-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 91023027)

metric parameters and the maximum allowable pressure of the mesh film. The maximum allowable velocity decreases with the decreasing height and increasing length of the microchannel. For a hydrophobic channel, the capillary pressure originated from the surface tension deteriorates the stability of the water transportation, and the adverse effect is more significant in a smaller channel.

Key words: microfluidic; open microchannel; fluidic transportation; hydrophobic mesh; surface tension

1 引言

越来越多的研究表明,接触生物气溶胶会给身体带来一系列的不良反应^[1-4],严重的甚至可能危及生命,所以,在工作场所和家庭中实时监测空气中的生物气溶胶状况十分必要。为了实现气溶胶的实时监测,对其进行高效采集是基础^[5]。目前已开发出多种生物气溶胶采样方法,包括过滤、固体撞击、液体冲击和静电沉积^[6]等。为了实现实时和自动化检测,可采用以液体为采样介质的气溶胶到水溶胶采样的技术^[7]。

在气溶胶采样过程中,为了将空气中的生物质采集到液体中,需要使用开放的管道。开放管道或表面的液体运输可以利用重力^[8]、热梯度驱动^[9]、电润湿^[10-11]等方法。Han 等人^[8]利用静电沉积将微生物收集到干燥的疏水凹槽中,然后倾斜基底,让一个液滴在重力作用下滚过疏水凹槽,从而将微生物转移到液滴中,实现气溶胶到水溶胶的采样;但这种采样方法操作繁琐,不利于采样、检测的自动化集成,且在长时间采样中干燥表面会影响微生物的活性。文献^[6]介绍了利用静电力将微生物收集到开放的储液池中,然后采用微泵将液体输出进行后续检测的方法;这种储液池有利于保持微生物活性,但是完全开放的结构很不稳定,要求芯片在工作中必须平稳放置,否则采样液体很容易溢出。Amar 等人^[9]利用热梯度驱动悬浮在油薄膜中的液滴,铺展油膜的基底不需要进行图形化处理,但是这种方法需要在液滴运行路径铺满油膜,且需要可移动的热源。文献^[10-11]将正负电极制作在一片基底上,利用介质上电润湿效应实现了开放表面的液滴运输;但电润湿需要复杂的电极阵列,增加了芯片复杂程度,且这些电极可能会影响气溶胶静电收集芯片的电场分布。

Meng 等人^[12]在用于微流体芯片的排气结构

中,制作了疏水孔用于气体排出,同时可以防止液体溢出。其第一代排气结构是在硅片上制作孔径为 50 μm 的通孔,并利用 Teflon 制作疏水涂层,文中没有实测的最大许可背压,也没有讨论其输运特性,且这种结构加工成本高。其第二代排气结构利用聚丙烯疏水多孔膜覆盖沟道,测得的最大许可背压达 2.4×10^5 Pa,但并无对其输运特性的讨论,而且这种疏水膜孔径不到 3 μm ,且不是直通孔,无法用于气溶胶采集。本文面向气溶胶采样,通过在开放管道表面覆盖疏水网,实现了可靠的液体输运,并对其液体输运特性进行了理论和实验分析。

2 开放管道设计

2.1 开放管道原理

气溶胶到水溶胶的采样,一方面要求管道是开放的,以保证空气中的生物质能够进入液体;另一方面为了避免液体在流动过程中外泄,管道必须封闭。本文设计了一种开放的管道,其顶部开放面覆盖有疏水栅网,如图 1 所示。疏水栅网孔中的水在表面张力的作用下会形成一个弯月面,阻止水从栅网孔中流出。这样空气中的生物质就能通过栅网孔进入管道,同时管道中的液体可以稳定流动而不会外溢。

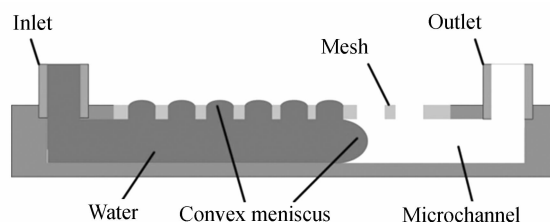


图1 水在覆盖有疏水网的开放管道中流动示意图
Fig. 1 Schematic of water flowing in a dry open channel covered with a hydrophobic mesh

为了实现液体的可靠输运,管道中液体的最

大压强必须小于疏水网的最大许可压强。最大许可压强取决于疏水网表面特性和液体性质。而管道中液体的最大压强由管道尺寸和管道表面特性以及液体在管道中的流动速度决定。为了表征开放管道中的液体输运特性,这里引入 3 个压强:最大许可压强 p_b , 毛细压强 p_c 和管道中的压降 p_f 。最大许可压强指栅网孔中由表面张力形成的液体弯月面所能承受的最大压差,与栅网表面特性、栅网孔径及液体表面张力系数有关。当液体流过干燥的疏水微管道时,表面张力会阻碍液体的流动,液体前端弯月面产生的压差定义为毛细压强,毛细压强与管道尺寸、表面特性及液体表面张力系数有关。此外,当液体以一定速度流过管道时,由于液体黏性导致的沿程水头损失必须予以考虑,也就是管道中的压降 p_f 。

2.2 估算最大许可压强 p_b

根据液体表面张力理论,对于一个有方孔的栅网, p_b 可以按照下式计算:

$$p_b = \frac{\sum_i F_i}{S} = \frac{4\sigma \cos(\pi - \theta)}{a}, \quad (1)$$

其中: σ 为液体表面张力, a 为栅网方孔的边长, θ 为液体对于栅网的接触角。计算中假设水温为 20 °C, 此时水的表面张力系数 $\sigma = 0.0728 \text{ N/m}$ (后面计算中都采用此参数)。最大许可压强 p_b 和孔边长的关系如图 2 所示, 可以看到采用疏水性好、网孔小的栅网可以得到更大的 p_b 。

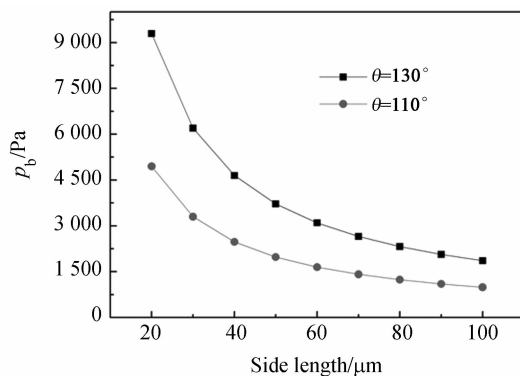


图 2 疏水网最大许可压强-孔径关系(θ 是水对于疏水网的接触角)

Fig. 2 Relationships between pressure p_b and side length of the holes(θ is the contact angle for the mesh)

2.3 估算毛细压强 p_c

对于一个宽为 w , 高为 h 的矩形截面管道, 毛

细压强 p_c 可以用下式计算:

$$p_c = \frac{\sum_i F_i}{S} = \frac{\sum_i \sigma l_i \cos(\pi - \theta_i)}{wh}, \quad (2)$$

其中, l_i 是液体与管道第 i 条边接触线的长度, θ_i 是液体对于管道第 i 条边的前进角, 对于矩形管道有 $i = 1, 2, 3, 4$ 。毛细压强和管道高度的关系如图 3 所示。液体在疏水网表面的流动阻力计算比较复杂, 现在有很多的研究文献^[13-14], 由于这不是本文的研究重点, 文中采用了简化分析, 即把栅网作为一个光滑的表面。计算中认为栅网与管道的表面特性相同。

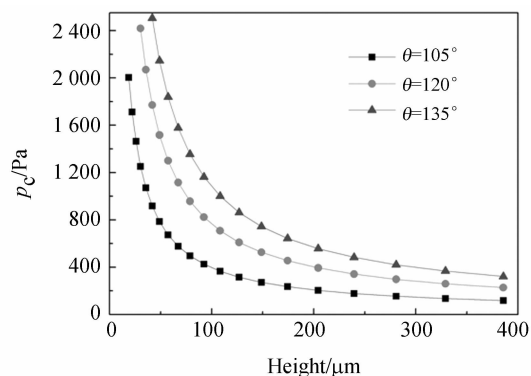


图 3 微管道中毛细压强-高度关系(管道宽 1.8 mm, θ 是水对于管道的前进角)

Fig. 3 Capillary pressure vs channel height with different channel surface properties (channel width is 1.8 mm, and θ is the advancing contact angle for the channel)

2.4 估算微管道中压降 p_f

当液体以速度 v 流过管道时, 在黏性力作用下由沿程水头损失 h_f 而引起的压降 p_f 可以表示为:

$$p_f = \rho g h_f, \quad (3)$$

其中: ρ 为液体密度, 对于水取 1000 kg/m^3 , g 为当地重力加速度, 文中取为 9.8 m/s^2 。关于矩形管道中定常层流的沿程水头损失有很多理论和仿真研究^[15-16], 对于宽为 w , 高为 h , 长为 l 的微管道, 考虑到无滑移边界条件, 沿程水头损失可以表示为^[15]:

$$h_f = \lambda \frac{1}{d_H} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (4)$$

其中:

$$\lambda = \frac{C}{R_e},$$

$$C = \frac{24 d_H^2}{h^2} \left[1 - \frac{192h}{\pi^5 \omega} \tanh \left(\frac{\pi \omega}{2h} \right) \right],$$

$$R_e = \frac{\rho v d_H}{\mu},$$

$$d_H = \frac{2\omega h}{\omega + h},$$

其中: μ 为液体的动力黏度。对于 20 °C 的水, 动力黏度 $\mu = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

2.5 开放微管道的设计约束

为确保液体在开放管道中可靠输运而不外溢, 当液体流过干燥管道时, 毛细压强 p_c 与管道中压降 p_f 的和必须小于最大许可压强 p_b , 即

$$p_c + p_f < p_b, \quad (5)$$

如果微管道是亲水的, 毛细压强就不会阻碍液体的流动, 或者当水充满管道后, 毛细压强不存在, 在这两种情况下式(5)应改为:

$$p_f + p_o < p_b, \quad (6)$$

其中: p_o 为管道出口处的压强。

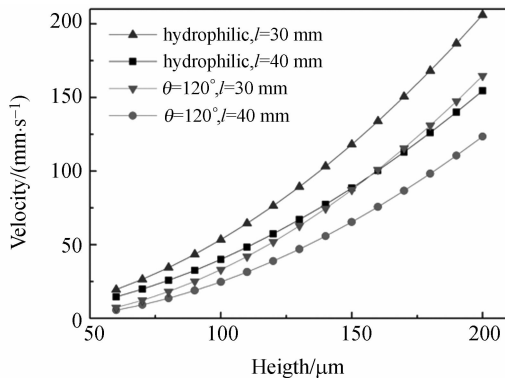


图 4 微管道中最大许可速度-管高关系(l 是管长, 管宽为 1.8 mm, 最大许可背压取 2 000 Pa, θ 是水对于管道的前进角)

Fig. 4 Maximum allowable velocity vs channel height with different channel lengths l (The channel width is 1.8 mm and the pressure p_b is 2 000 Pa. θ is the advancing contact angle for the channel)

利用约束条件式(5)或(6), 可以得到管道中液体的最大许可速度。为了简化分析, 假设出口处压强为 0。计算中假设管道各个壁面性质相同。利用式(4)计算压降时要求流动定常, 当液体流过干燥管道时并不是定常流动, 利用式(4)作近似计算。最大许可速度与管道高度的关系如图 4 所示, 包括疏水管道和亲水管道两种情况。可以看出, 管高一定时, 在亲水管道中最大许可速度较

大, 且最大许可速度随管高增加而增大, 随管长的增加而减小。

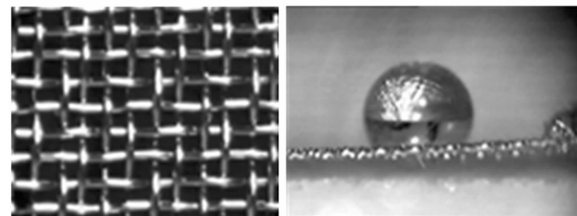
3 实验

3.1 样片制作

实验中制作了不同尺寸的微管道来测试和优化开放管道的液体输运特性。

PDMS 微管道采用软光刻工艺制作^[17]。PDMS 结构层从模具揭下后, 倒过来粘接在基底上, 管道裸露朝上, 形成开放管道。然后用压敏胶 (ARclad IS-7876, Adhesives Research, Inc.) 将栅网粘接到开放管道上。制作的微管道宽分别为 0.8 mm 和 1.8 mm, 深 75 μm 和 115 μm , 长 3 cm 和 4 cm。压敏胶厚约 60 μm , 最终得到的开放管道高度约 135 μm 和 175 μm 。

所用栅网为不锈钢滤网, 有一定刚度, 管道较窄, 可以保证管道顶面平整。栅网孔为方形, 使用的两种栅网孔边长分别为 50 μm 和 77 μm 。部分栅网涂覆 Teflon (AF2400, DuPont), 部分没有做处理。图 5 所示为未经处理的栅网和栅网上的水滴。



(a) 栅网 (b) 水滴
(a) Mesh (b) Water droplet

图 5 孔径 50 μm 的栅网和栅网上的水滴

Fig. 5 Pictures of a mesh with side length of 50 μm and a water droplet on the mesh

3.2 实验装置

实验装置如图 6 所示。由于入口、出口和管子尺寸都远大于微管道尺寸, 测得的水头高度 H 视为加在微管道入口的总水头。

在测量最大许可压强 p_b 时, 封闭出口, 每次将水头高度 H 增加 1 cm 并保持 30 s 使系统压强稳定。不断升高 H , 直至有水从栅网孔中溢出, 此时对应的压强即最大许可压强 p_b 。

毛细压强是微管道中水由静止到开始流动时对应的转折压强。实验中采用 CCD 测量微管道中液体前端的前进速度, 并记录相应的水头高度

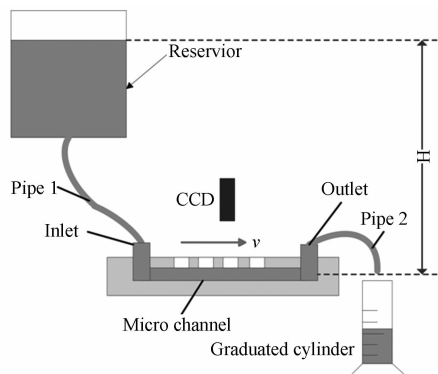


图 6 实验装置示意图

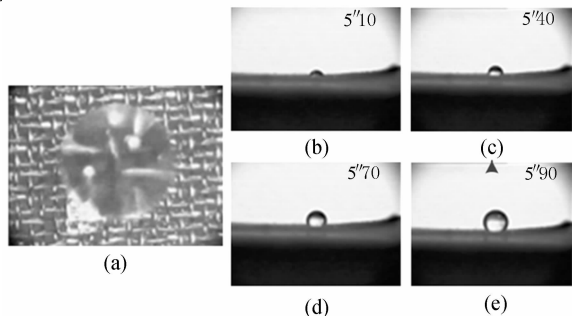
Fig. 6 Schematic of setup for velocity and pressure measurement

H. 每次测量之前需把管道烘干。

当管道系统充满水时,利用量筒和秒表测量流量,然后结合管道截面积计算得到管道中水的流速。

4 结果和讨论

最大许可压强 p_b 的理论值和实际测量结果如表 1 所示。可以看出,涂覆 Teflon 的栅网能承受的最大许可背压远大于没有处理的栅网。孔径为 $50 \mu\text{m}$ 的栅网在表面涂覆 Teflon 后能够承受的背压达 $2\,000 \text{ Pa}$,毛细压强和压降测试实验中采用的就是该栅网。 p_b 的理论值大约是实测值的 2 倍,这主要是由于网孔尺寸不均匀和测量误差导致的,如图 7 所示,水滴只从栅网最大的孔处溢出。水滴溢出后并不铺开,而是形成一个水珠,图 7(a)是其俯视图,图 7(b-e)显示了水滴溢出栅网



(a) 水珠俯视图 (b-e) 水滴溢出栅网过程的侧视图
(a) Top view of a beaded drop (b-e) Side views of the drop at sequential time

图 7 水滴溢出栅网图片

Fig. 7 Pictures of a water drop outflowing from the mesh

网的过程。首先,水从最大的栅网孔中溢出,并和邻近网孔中的水连通,如图 7(b)所示,这时栅网看似被水润湿。然后,水从最大的孔和邻近孔中外流,水滴长大,接触角也逐渐增大,如图 7(c-d)。最终形成一个水珠,如图 7(e)。这表明水的外流最初只发生在最大的网孔和邻近网孔,采用尺寸均匀性好的网孔其最大许可压强将会更大。

表 1 不同栅网的最大许可压强

Tab. 1 Maximum allowable pressures (p_b) of channels covered with different meshes

表面处理	无		涂 Teflon	
接触角/ $^\circ$	110		130	
边长/ μm	77	50	77	50
p_b (实测)/Pa	800	900	1 200	2 000
p_b (理论)/Pa	1 285	1 978	2 414	3 718

当水流过干燥管道时,表面张力产生的毛细压强阻碍水的流动,此时的速度-压强关系如图 8 所示。在图 8 的每条曲线上都有一个转折点,且在转折点之后水的流速迅速增加,转折处的压强被作为毛细压强 p_c 。对于这种现象可解释为在压强小于毛细压强的时候,水只能在重力作用下极缓慢流动,由于速度极慢,沿程水头损失可忽略不计;当压强大于毛细压强时,黏性力和压强差平衡,这时的流速增加较快。毛细压强 p_c 的实测值和理论值如表 2 所示。水对于 PDMS 和压敏胶的前进角都是 120° ,对于 Teflon 涂膜的栅网接触角是 150° (K12 表面张力仪, KRuSS, Germany)。实验结果与理论计算一致。

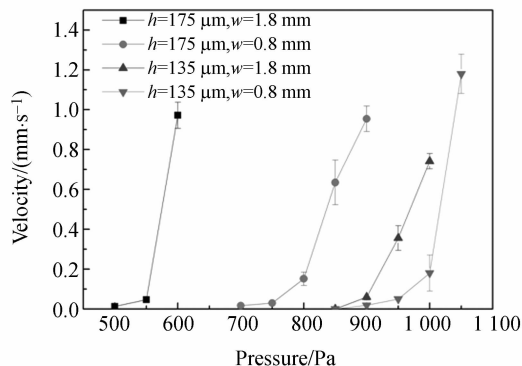


图 8 毛细压强测量中不同深度 h 和宽度 w 管道中的速度-压强关系

Fig. 8 Velocity vs pressure in microchannels for capillary pressure testing

表 2 不同尺寸微管道对应的毛细压强

Tab. 2 Capillary pressure (p_c) in microchannels with different dimensions (Pa)

管道 *	p_c (实测)	p_c (理论)
1	550	675
2	800	740
3	900	860
4	950	924

* 1. $h=175 \mu\text{m}$, $w=1.8 \text{ mm}$; 2. $h=175 \mu\text{m}$, $w=0.8 \text{ mm}$;
3. $h=135 \mu\text{m}$, $w=1.8 \text{ mm}$; 4. $h=135 \mu\text{m}$, $w=0.8 \text{ mm}$.

管道中充满水时的速度-压强关系如图 9 所示。管道截面尺寸主要通过等效水力直径影响摩擦阻力系数。由于管道深度远小于宽度,管道的

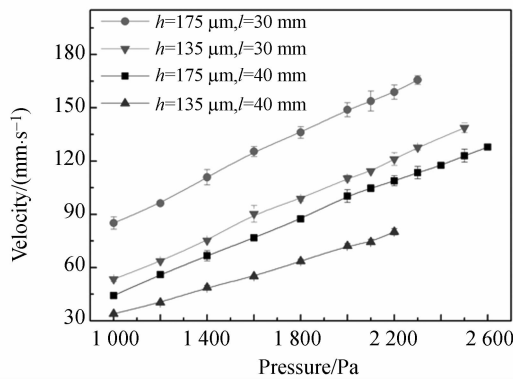


图 9 不同深度 h 和长度 l 管道中的速度-压强关系
Fig. 9 Velocity vs pressure with different channel dimensions(channel width is 1.8 mm)

等效水力直径取决于管道深度,故这里固定管道宽度而对不同深度的管道进行比较分析。由图 9 可知,压强一定,管道越深,长度越短,对应的流速越大。图中每条曲线的最大压强就是测量中每个管道的最大许可压强,这些压强值都大于表 1 中的最大许可压强实测值。这一方面是由于栅网孔径分布不均匀,另一方面是由于沿程水头损失作用,管道中压强分布沿流动方向减小,导致最大压强没有出现在孔径最大的地方,从而得到的压强大于静止状态下测得的最大许可压强。

5 结 论

本文根据生物气溶胶的采样需求,提出了覆盖有疏水网的开放管道,并对其输运特性进行了理论和实验分析。实验结果显示:具有较好疏水性和较小孔径的栅网可以实现更高的最大许可压强,表面涂覆 Teflon 的 $50 \mu\text{m}$ 孔径栅网可以承受 2 000 Pa 的背压。利用这种栅网制作的开放微管道可以实现可靠的液体输运,且对特定管道能够允许 100 mm/s 以上的水流速度,这些性能满足了生物气溶胶采样的需求。为了实现高富集系数的生物气溶胶采样,应该采用尽量浅的管道,但浅管道只能够允许较低的流速。下一步,将采用该开放微管道进行生物气溶胶的静电采集,进一步测试其生物收集效率。

参考文献:

[1] 杜睿. 大气生物气溶胶的研究进展[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(4): 546-552.
DU R. The progress of atmospheric bioaerosol research [J]. *Climate and Environmental Research*, 2006, 11(4): 546-552. (in Chinese)

[2] DOUWES J, THORNE P, PEARCE N, et al.. Bioaerosol health effects and exposure assessment: Progress and prospects [J]. *The Annals of Occupational Hygiene*, 2003, 47(3):187-200.

[3] ROBBINS C A, SWENSON L J, NEALLEY M L, et al.. Health effects of mycotoxins in indoor air: A critical review [J]. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 2000, 15(10):773-784.

[4] FUNG F, HUGHSON W G. Health effects of indoor fungal bioaerosol exposure [J]. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 2003, 18(7):535-544.

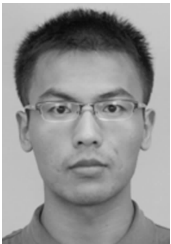
[5] 梁晓军,刘凡. 低浓度空气微生物采样与效果评价技术研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2011, 28(3): 278-282.
LIANG X J, LIU F. Research progress on low concentration bioaerosol sampling technology and capacity evaluation [J]. *Journal of Environment and Health*, 2011, 28(3): 278-282. (in Chinese)

[6] TAN M M, SHEN F X, YAO M S, et al.. Development of an automated electrostatic sampler for bioaerosol detection [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2011, 45(9): 1154-1160.

[7] XU Z, WU Y, SHEN F, et al.. Bioaerosol science, technology, and engineering: Past, present, and future [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2011, 45(11): 1337-1349.

- [8] HAN T, MAINELIS G. Design and development of an electrostatic sampler for bioaerosols with high concentration rate [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2008, 39(12): 1066-1078.
- [9] BASU A S, GIANCHANDANI Y B. Virtual microfluidic traps, filters, channels and pumps using Marangoni flows [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2008, 18: 115031.
- [10] YI U C, KIM C J. Characterization of electrowetting actuation on addressable single-side coplanar electrodes [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, 16: 2053-2059.
- [11] CHANG J H, KIM D S, PAK J J. Simplified ground-type single-plate electrowetting device for droplet transport [J]. *Journal of electrical engineering and technology*, 2011, 6: 402-407.
- [12] MENG D D, KIM J, KIM C J. A degassing plate with hydrophobic bubble capture and distributed venting for microfluidic devices [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, 16: 419-424.
- [13] DAVIS A M J, LAUGA E. The friction of a mesh-like super-hydrophobic surface [J]. *Physics of Fluids*, 2009, 21: 113101.
- [14] CHENG Y P, TEO C J, KHOO B C. Microchannel flows with superhydrophobic surfaces: Effects of Reynolds number and pattern width to channel height ratio [J]. *Physics of Fluids*, 2009, 21: 122004.
- [15] 苏尔皇. 液压液体力学[M]. 北京:国防工业出版社, 1979.
- SU E H. *Hydro-fluid Mechanics* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1979. (in Chinese)
- [16] 张敏, John C. Chai, 张钧波, 等. 矩形通道充分发展层流的精确和数值解[OL]. [2007-12-24] 中国科技论文在线, <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200712-602>.
- ZHANG M, JOHN C C, ZHANG J B, *et al.*. Exact and numerical solutions of fully developed laminar flow in rectangle channel [OL]. [2007-12-24]. Sciencepaper online, <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200712-602>. (in Chinese)
- [17] DU M, YE X, LIU L T, *et al.*. Normally closed Shape-Memory-Alloy microvalve for microflow control [J]. *Nonotechnology and Precision Engineering*, 2011, 9(6): 551-554.

作者简介:



马增帅(1990—),男,河南新乡人,博士研究生,2011年于华中科技大学获得学士学位,主要从事微流体技术及生物气溶胶采集技术的研究。E-mail: mzs11@mails.tsinghua.edu.cn



商院芳(1986—),男,湖北黄冈人,博士研究生,2009年于华中科技大学获得学士学位,主要从事非制冷红外成像技术的研究。E-mail: shangyf09@mails.tsinghua.edu.cn



杜敏(1985—),男,江苏无锡人,博士研究生,2007年于华中科技大学获得学士学位,主要从事微流体技术及微流体器件的研究。E-mail: duminchina@gmail.com

导师简介:



叶雄英(1961—),女,广东人,教授,博士生导师,1989年于日本东京大学获得博士学位,主要从事微/纳机电系统(MEMS/NEMS)研究,特别是微流体器件及其生化检测应用和基于碳纳米管的纳机电传感器的研究。E-mail: xyeye@mail.tsinghua.edu.cn