

Effects of Fluids with Magnetic Nano-Particles in Y Shape Microchannels on the Mixing Rate

LI Zhen-guo^{1,2}, LI Zhan-hua^{*}(1. LNM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;
2. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: This paper presents a study about the mixing of magnetic nano-fluid and deionized water in a Y-shape micro-channel. The effect of static magnetic field (magnetic flux density 40 Gs) on the mixing is investigated at the case of $Re=0.5\sim 4$, and the volume fraction respectively from 0.38% to 1.54%. The results show that the mixing length is largely reduced by the static magnetic field. And the effects of Re and the volume fraction on the mixing length are analyzed.

Key words: Y-shape micro-channel; magnetic nano-particle; static magnetic field; mixing rate

EEACC: 7230; 7320W

Y 型微管道中磁性纳米液体对混合率的影响

李振国^{1,2}, 李战华^{1*}

(1. 中国科学院力学研究所 LNM, 北京 100080; 2. 中国科学技术大学力学与机械工程系, 合肥 230027)

摘要: 利用流动显示手段观测了 Y 型微管道内含纳米磁性颗粒的液体与去离子水的混合. 研究了在 $Re=0.5\sim 4$, 磁性颗粒体积分数 0.38%-1.54% 时, 外加静磁场(场强 40 Gs)对液体混合地影响. 证实了磁场作用可以使完全混合长度大大缩短. 同时初步分析了 Re 和体积分数 φ 对混合长度的影响.

关键词: Y 型微管道; 磁性纳米颗粒; 静磁场; 混合效率

中图分类号: O363.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2006)05-1701-04

随着 MEMS/NEMS 技术的发展, 微尺度下的流动和流动控制问题也日益引起广泛的关注. 微流控芯片中, 液体流动的 Re 数很低 (≤ 1), 液体的混合以扩散为主. 如果液体扩散系数 $D=10^{-9}$ mm²/s, 对 100 微米宽的流道所需混合长度将接近几十厘米甚至上百厘米. 如何有效提高混合来缩短混合长度是微流控芯片中的一个重要问题.

Volker Hesseld 等^[1]综述了各种提高混合率的方法, 总体上可以分为被动式和主动式两大类. 被动式混合通常采用改变流道的几何形状来增强混合, 如 Gobby 等^[2]使用 CFDRC 软件计算了气体在不同夹角的 Y 型管道中的混合问题. 但这类方法通常需要复杂的三维几何结构, 而且在极低的 Re 数下, 其

效率也不高. 主动式混合则通过外力的作用, 如动电 (electrokinetic) 诱导循环、超声波振动、磁场力等^[1]促进混合. 近年来, 磁场在微芯片中的应用受到人们的广泛关注^[3-4], 通过在液体内引进磁性颗粒(或有些液体本身内部含有磁性颗粒), 外加磁场力可以改变液体内磁性粒子的运动状态, 达到控制液体流动的目的. Rida 等^[5]研究了不同频率正弦磁场对 Y 型微管道中混合的影响, 在流速为 0.5 cm/s 时, 仅需 400 μ m 就可以达到 95% 的混合率. Sibani 等^[6]研究了旋转磁场下固相颗粒集聚成柔性链的挠度 (flexibility) 对混合的影响. 他们发现随着磁场旋转频率的提高, 会有有效的提高混合的效果.

本文通过实验, 研究了恒定对称双点磁极磁场

收稿日期: 2006-07-01

基金项目: 国家自然科学基金资助(10272107); 中科院创研项目资助(CJKM-0213)

作者简介: 李振国(1981-), 男, 硕士生, 主要从事微管道中液体流动研究, coxlee@gmail.com;

李战华(1949-), 博士学历(通讯联系人), Lili@imech.ac.cn.

下, Y型微流道内, 磁性液体浓度、流速的变化对混合率的影响. 本实验使用 Fe_3O_4 纳米磁性颗粒, 可以用铁磁流体的运动方程和浓度扩散方程^[7]来描述, 方程如下:

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = f_g - \nabla P + \mu_l \Delta \vec{V} + \mu_0 \vec{M} \cdot \nabla \vec{H} \quad (1)$$

$$\frac{dC}{dt} = D \Delta C \quad (2)$$

其中 \vec{V} 是流体速度, ρ 是液体密度, f_g 是重力, ∇P 是压力梯度, μ_l 是液体处于外磁场中的动力粘性系数, μ_0 是真空磁导率, \vec{M} 是磁化强度, \vec{H} 为外磁场强度, C 为浓度, D 扩散系数.

1 实验装置和方法

1.1 流场测量装置

实验在中国科学院力学研究所 LNM 实验室进行. 由倒置荧光显微镜(Olympus, Ix71)和光子探测器(Adron Ixon X-1807)组成流场观测系统, 其中显微镜物镜有 $10\times/0.7$ 、 $60/0.7$ 、 $100/1.35$ 三种规格, 光子探测器的采样频率为 35 Hz(图 1).

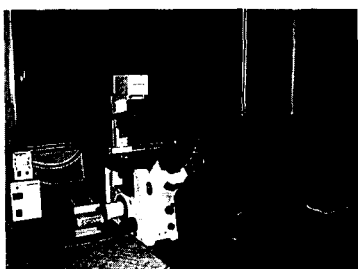


图 1 流场测量装置实物图

1.2 微管道及驱动装置

使用软光刻^[8-10]的方法用 PDMS(SYLGARD 184, Dow Corning)制作 Y型微管道, 分流道宽 $52.0 \mu m$ 、深 $67.1 \mu m$ 、长 0.5 cm , 主流道宽 $101.6 \mu m$ 、深 $67.1 \mu m$ 、长 1 cm (图 2).

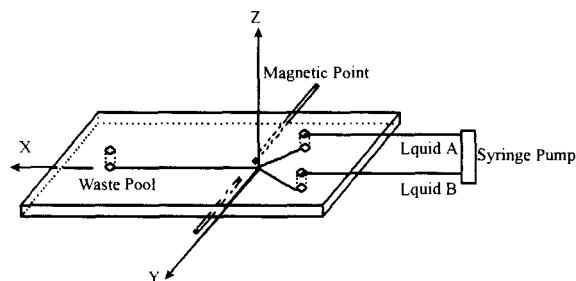


图 2 Y型微管道示意图

实验时, 使用一台注射泵(74900 series, Coleparmer Instrument Company)同时推进两个 1 毫升注射器, 一个装有去离子水, 另一个装有纳米磁性液体, 设置注射泵不同的推进速度就可以得到不同平

均 Re 数.

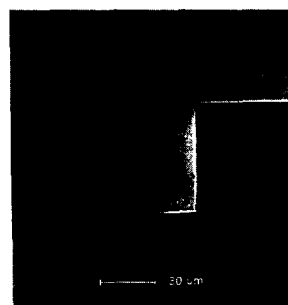


图 3 Y型微管道分流道横截面图

1.3 纳米磁性颗粒液体

磁性液体从安徽金科磁性液体有限公司购买, 其饱和磁化强度为 15.2 kA/m (190.8 Gs), 密度为 1.27 g/cm^3 , 磁性纳米颗粒体积分数为 6.92% , 纳米颗粒直径为 $10\sim 20 \text{ nm}$. 使用振动样品磁强计测量了实验样品 I, II, III 的体积分数与饱和磁化强度关系(LDJ9600, 美国 LDJ Electronics 公司)如图 4 所示. 图 4 中各点依次对应的体积分数分别为 3.08% 、 1.54% 、 0.77% 和 0.38% , 相应的饱和磁化强度分别为 $M_{s_0} = 11.02 \text{ kA/m}$, $M_{s_1} = 5.06 \text{ kA/m}$, $M_{s_{II}} = 2.31 \text{ kA/m}$ 和 $M_{s_{III}} = 1.09 \text{ kA/m}$. 图 5 是三种样品使用振动样品磁强计(LDJ9600)测量得出的磁化曲线.

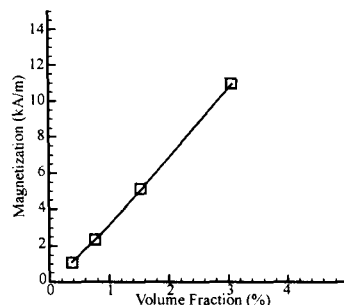


图 4 磁性液体的体积分数与饱和磁化强度关系

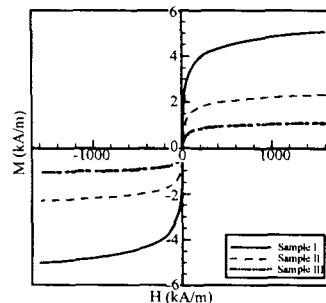


图 5 三种样品的磁化曲线(H~M)

1.4 外磁场

外磁场采用自制的双磁针电磁场, 由 24 V 直流电源驱动. 图 6 是通电后双磁针磁场的磁力线(使用小于 $40 \mu m$ 的铁颗粒).

图 7 是使用 SL-1 型毫特斯拉计测量通电后双

磁针电磁场磁感应强度. $x=0$ 处是双磁针孔隙一端, $x=3000$ 位置处是孔隙另一端. 从图 7 中可以看出两端磁感应强度大, 中间弱, 实验时微流道处于中间位置处.

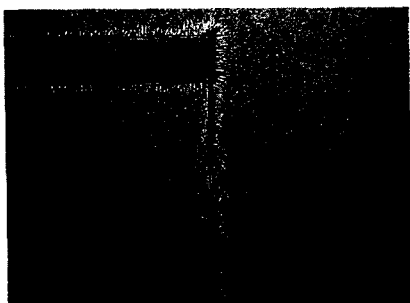


图 6 双磁针磁场的磁力线

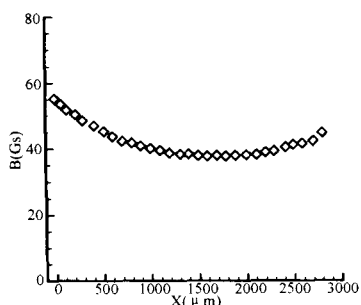


图 7 双磁针磁场的磁感应强度分布

1.5 图像采集及处理方法

实验中, 通过 CCD 采集黑白图像, 使用 10x 物镜, 采集频率 32.2 Hz. 由于 CCD 视野较小, 通过移动显微镜平台连续拍摄 150 张照片, 记录微管道全程混合情况.

混合率计算方法: 去离子水和纳米磁性液体在白光下灰度值不同. 通过计算不同位置处的灰度标准差来计算混合效果. 首先, 将 CCD 拍摄的照片沿流向顺序衔接, 得到一张微管道全程照片. 从入口开始, 沿流向每隔 500 个像素点 (相当于 7.5 倍管宽) 取一块区域, 按照 30×53 点阵读取灰度值, 然后计算其标准差. 以入口处所取区域的标准差为基准, 计算流向各 x 点处混合率. 混合率计算公式^[5-6]为:

$$\epsilon_i = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N (g_{jki} - \bar{g}_i)^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N (g_{jk1} - \bar{g}_1)^2}} \quad (3)$$

其中 ϵ_i 表示沿流向第 i 块区域的混合率, g_{jki} 是第 i 块区域中各点的灰度值, \bar{g}_i 是第 i 块区域中灰度平均值, g_{jk1} 和 \bar{g}_1 分别是第 i 块区域中各点的灰度值和灰度平均值.

流速分析: 由于本实验使用注射泵为推进装置, 其质量流量是一定的, 通过质量流量计算得到的平均 Re

数. 设置注射泵分别为 $1 \mu\text{L}/\text{min}$, $2 \mu\text{L}/\text{min}$, $4 \mu\text{L}/\text{min}$, $8 \mu\text{L}/\text{min}$, 则相对应的平均 Re 数分别为 0.50, 1.0, 2.0, 4.0.

2 实验结果

2.1 混合率与流向无量纲长度的关系

图 8 a/b 为 $Re=1.0$, 样品 I 在有/无外磁场下的照片. 右侧为入口, 流动方向由右向左. 上部黑色液体为含纳米磁性颗粒液体, 下部为去离子水. 可以看出, 有磁场时纳米磁性液体与去离子水很快混合.



(a) 有外磁场时的混合 (b) 无外磁场时的混合

图 8 有外磁场和无外磁场对比图

图 9 a/b/c 是 $Re=1.0$ 时, 三种不同浓度磁性液体与去离子水沿流向的混合率分布. 在没有外磁场时, 最大的混合率都小于 60%, 样品 II、III 混合率更是低于 40%. 而在外磁场的作用下, 样品 III (图 9 c) 在 $76w$ (w 为管道宽度) 处可以达到 60% 的混合率, 随着体积分数的提高, 样品 II (图 9 b) 在 $76w$ 处可以达到 80% 的混合率, 样品 I (图 9 a) 更是在 $12w$ 处就达到了 80% 的混合率. 显然外加磁场增强了两种液体的混合.

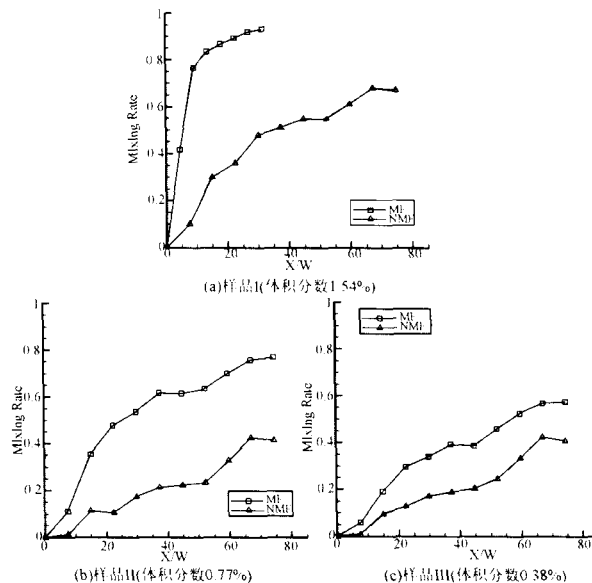


图 9 不同体积分数下液体混合率与流向无量纲距离的关系 (MF-有外加磁场, NMF-无外加磁场)

2.2 混合长度与 Re 数的关系

本节研究流速对达到一定混合率所需混合长度的影响。

(1) 无外加磁场 在没有外加磁场时,粒子扩散管宽 w 距离所需要的特征时间 $t_{mix}^{[11]}$:

$$t_{mix} = w^2/D \tag{4}$$

则液体混合长度为:

$$L_{mix} \sim U \times (w^2/D) \tag{5}$$

根据 Peclet 数 Pe 的定义:

$$Pe = \frac{Uw}{D} \tag{6}$$

$$D = \frac{kT}{6\pi\mu d_p} \tag{7}$$

其中 U 为平均流速, μ 为液体动力粘度; D 是扩散系数, 其中 k 为玻尔兹曼常数, $k=1.3806503 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$, T 为温度, d_p 为纳米颗粒平均直径. 混合长度式(5)可以写成:

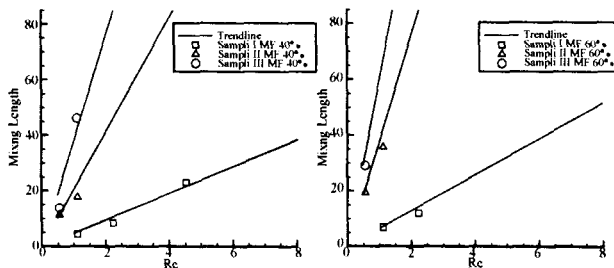
$$L_{mix} = Pe \cdot w = \frac{U \cdot w}{D} \cdot w = \frac{U \cdot w}{v} \cdot \frac{v \cdot w}{D} = Re \cdot \frac{v}{D} \cdot w \tag{8}$$

其中 v 为液体运动粘度. 无量纲混合长度 \bar{L}_{mix} 可以表示为

$$\bar{L}_{mix} = \frac{L_{mix}}{w} = Re \cdot \frac{v}{D} \tag{9}$$

公式(9)说明,在假设 v 和 D 不变的条件下,无量纲混合长度 \bar{L}_{mix} 与 Re 数成线性关系, Re 数越大,无量纲混合长度 \bar{L}_{mix} 越大. 在没有磁场作用下,对于不同体积分数的磁性液体,如果认为 D 是相同的,则无量纲混合长度 \bar{L}_{mix} 与体积分数没有关系.

(2) 外加磁场 图 10 给出了外加磁场作用下,两种液体达到不同混合率所需要的无量纲混合长度随



(a) 混合率 40% (b) 混合率 60%

图 10 外磁场作用下,不同混合率下无量纲混合长度与 Re 的关系

Re 的变化. 显然随着磁性粒子体积分数的增加,达到一定混合率所需无量纲长度缩短. 为了描述磁场作用下,液体的无量纲混合长度 \bar{L}_{mix} 与体积分数 φ 的关系,设磁场作用下的 \bar{L}_{mix} 为 \bar{L}_M , 则:

$$\bar{L}_M = k(\varphi) \cdot \frac{L_{mix}}{w} = k(\varphi) \cdot Re \frac{v}{D} = f(\varphi) \cdot Re \tag{10}$$

其中下标 M 表示有外磁场作用,这里 D 、根据 Einstein 粘度修正公式修正,其结果同去离子水的值近似,同时 $f(\varphi)$ 为与 φ 有关的函数. 根据图 10 中各条曲线斜率分析, $f(\varphi)$ 可以表示如下:

$$f(\varphi) = \begin{cases} c_1 \cdot \varphi^{-1} & \varphi \leq 0.77\% \\ c_2 \cdot \varphi^{-2} & \varphi > 0.77\% \end{cases} \tag{11}$$

其中 c 为待定常数. 显然对较小的体积分数 φ , $f(\varphi)$ 与 φ 的乘积成常数,而 φ 较大时, $f(\varphi)$ 与 φ^2 的乘积成常数. 由式(10)看出,当体积分数 φ 较小时,无量纲混合长度 \bar{L}_M 与体积分数 φ 一次倒数相关,而体积分数 φ 较大时,无量纲混合长度 \bar{L}_M 与体积分数 φ 二次倒数相关. 更准确的表达式有待进一步确定.

3 结论

利用流动显示手段观测了磁性液体在 Y 型微流道中的混合过程,体积浓度分别为 0.38%、0.77% 和 1.54%, Re 数范围 0.5~4,外加静磁场 $B=40 \text{ Gs}$,得出以下结论:

- ① 外加磁场作用下,达到样品充分混合(混合效率 80%)的距离大大缩短. 浓度为 0.77% 的样品在 76w 管道宽度处达到充分混合,而没有磁场时,此处混合效率只有 40%;
- ② 随着磁性颗粒体积分数 φ 的提高,达到充分混合的流向距离还可以缩短. 与浓度为 0.77% 的样品在 76 W 处达到充分混合相比,浓度 1.54 % 的样品可在 12 W 处即达到充分混合;
- ③ 随着 Re 数的提高,达到充分混合的距离会变大,即 Re 数越大越不容易混合;
- ④ 根据实验数据分析,在有外加磁场下,无量纲混合长度随 Re 数改变而线性变化,但其比例系数为体积分数的函数. 当体积分数 φ 较小时,无量纲混合长度与体积分数 φ 一次倒数相关,而体积分数 φ 较大时,无量纲混合长度与体积分数 φ 二次倒数相关.

感谢国家自然科学基金(10272107)和中科院创新项目(CJKM-0213)的资助. 感谢郑旭、王绪伟和郭强在实验方法的帮助.

参考文献:

[1] Volker Hessel, Holger Löwe, Friedhelm Schönfeld. Micromixers-a Review on Passive and Active Mixing Principle, Chemical Engineering Science, 2005, 60, 2479-2501.
 [2] D Gobby, P Angeli and A Gavrilidis, Mixing Characteristics of T-type Microfluidic Mixers, Journal of Micromechanics and Microengineering, 2001, 11, 126-132.

Q值为7.9.可见,Ar注入形成压阻以及通过压阻进行梁的谐振的测量是可行的并且方法、工艺较为简单.

致谢:本项目得到了‘973’项目(编号:2006CB300403)的资助,特此感谢.

参考文献:

- [1] Cleland A N and Roukes M L. Fabrication of High Frequency Nanometer Scale Mechanical Resonators from Bulk Si Crystals [J]. Appl. Phys. Lett. 69(18), Oct. 1996, pp. 2653-2655.
- [2] Erbe A, Weiss C, Zwerger W, et al. Nanomechanical Resonator Shuttling Single Electrons at Radio Frequencies[J], Physical Review Letters, August 2001, 87(9), 13, 096106.
- [3] Erbe A, Blick R H, Tilke A, et al. A Mechanically Flexible Tunneling Contact Operating at Radio Frequencies[J], Appl. Phys. Lett., Dec. 1998, 73(25):3751-3753.
- [4] Dustin W. Carr, Evoy S, Sekaric L, Craighead H G and Parpia J M. Measurement of Mechanical Resonance and Losses in Nanometer Scale Silicon wires[J]. Appl. Phys. Lett. August. 1999, 75(7):920-922.
- [5] Ekinci K L, Huang X M H and Roukes M L, Ultrasensitive Nanoelectromechanical Mass Detection [J], Appl. Phys. Lett., May 2004, 84(22):4469-4471.
- [6] Tortonese M, Barrett R C and Quate C F, Atomic Resolution with an Atomic Force Microscope Using Piezoresistive Detection[J], Appl. Phys. Lett. 1993, 62(8):834-836.
- [7] Mamin H J, Ried R P, Terris B D and Rugar D, High-Density Data Storage Based on the Atomic Force Microscope[J], Proc. IEEE 87, 1014(1999).
- [8] Murat Gel and Isao Shimoyama, sub-micro Thick high Sensitive Piezoresistive Cantivers by Boron Etch Stop and Argon Implantation[C]// Proceedings of MEMS 2003, Kyoto: 494-497.
- [9] Yang Heng, Yang Yongliang, Li Tie, Jiao Jiwei, Li Xinxin, Wang Yuelin, Fabrication of the Isolated Nano-beams in the Normal (111) Si Wafers with KOH Etching[C]//1st IEEE-NEMS, zhuhai, 18-21, Jan, 2006.
- [10] Tortonese M, Barrett R C, Quate C F, "Atomic Resolution with an Atomic Force Microscope Using Piezoresistive detection"[J], Appl. Phys. Lett., 1993, 62(8):448-451.
- [11] Su Y, Evans A G R, Brunnschweiler A, Ensell G, Koch M, "Fabrication of Improved Piezoresistive Silicon Cantilever Probes for the Atomic Force Microscope[J]" Sensors and Actuators A, 1997, 60:163-167.
- [12] Despont M, Takahashi H, Ichihara S, Shirakawabe Y, Shimizu N, Inoue A, Haberle W, Binnig G K, Vettiger P, "Dual-cantilever AFM probe for Combining Fast and Coarse Imaging with High Resolution Imaging"[J]. Proceedings of MEMS-conference, 2000:126-131.
- [13] J. A. Harley, T. W. Kenny, "High-Sensitivity Piezoresistive Cantilevers under 1000 Angstrom Thick [J]" Appl. Phys. Lett., 1999, 75(2):289-291.
- [14] Li Xinxin, Takahito Ono, Wang Yuelin, Masayoshi Esashi, "Ultrathin single-crystalline-silicon cantilever resonators: Fabrication Technology and Significant Specimen size Effect on Young's modulus[J]", Appl. Phys. Lett. 8, 2003, 83(15):3081-3083.
- [15] Mohanty P, Harrington D A, Ekinci K L, Yang Y T, Murphy M J and Roukes M L, Intrinsic Dissipation in High-Frequency Micromechanical Resonators[J]. Phys. Rev. B 66, 085416 (2002).
- [3] Martin A M Gijs, Magnetic Bead Handling on-chip: New Opportunities for Analytical Applications, Microfluid Nanofluid, 2004, 1:22-40.
- [4] Nicole Pamme, Magnetism and Microfluids, Lab on a Chip, 2006, 6:24-38.
- [5] Rida A and Gijs M A M. Manipulation of Self-Assembled Structures of Magnetic Beads for Microfluidic Mixing and Assaying, Analytical Chemistry, 2004, 76, 6239-6246.
- [6] Sibani Lisa Biswal, Alice P. Gast, Micromixing with Linked Chains of Paramagnetic Particles, Analytical Chemistry, 2004, 76:6448-6455.
- [7] 池长青等. 铁磁流体力学. 北京航空航天大学出版社, 1993.
- [8] Younan Xia and George M. Whitesides, Soft Lithography, Angew. Chem. Int. Ed., 1998, 37:550-575.
- [9] J. Cooper McDonald and George M. Whitesides, Poly(dimethylsiloxane) as a Material for Fabricating Microfluidic Devices, Accounts of Chemical Research, 2002, 35(7).
- [10] 崔铮. 微纳米加工技术及其应用. 高等教育出版社, 2005.
- [11] Abraham D. Stroock, Stephan K W, Dertinger et al. Chaotic Mixer for Microchannels, Science, 2002, 295:647-651.

(上接第 1704 页)