

文章编号: 1672-9897(2007)03-0054-05

磁性纳米颗粒对微槽道液体流动的混合增强作用

王化峰¹, 程万², 李战华¹

(1. 中国科学院力学研究所 LNM 实验室, 北京 100080; 2. 中国科学技术大学力学和机械工程系, 合肥 230026)

摘要: 为了改进微流控芯片中液体混合效率, 尝试在一种液体中加入磁性纳米颗粒, 增强与另外一种液体混合。在外加磁场作用下, 对 Y 型微槽道中磁性与非磁性液体流动混合进行了实验观测, 所需混合长度较无磁场时缩短了约 2 个数量级。利用 CFD 软件进行数值模拟, 验证了外磁场作用下纳米磁性液体对流动混合有着明显的强化作用。

关键词: 微流体; 微芯片; 混合增强; 纳米颗粒; 磁驱动

中图分类号: O361.3 **文献标识码:** A

The enhancing effect of magnetic nano-particles on the liquid's mixing in microchannels

WANG Hua-feng¹, CHENG Wan², LI Zhan-hua¹

(1. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080, China; 2. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: On behalf of the improvement of the liquids mixing in microchips, a new method for enhancing the mixing between two liquids was tested by using magnetic particles into one kind of liquid. The mixing process of two liquids in Y-type microchannel was observed, the mixing length under the stationary magnetic field could be decreased to 2 orders of magnitude comparing with the case of no magnetic field. The results of the numerical simulation indicate also that the mixing is enhanced obviously.

Key words: microfluidic; microchip; enhancing mixing; nano-particles; magneto-driven

0 引言

微芯片中液体流动的 Re 数很低, 流动处于层流状态, 不同液体之间的混合主要依靠扩散作用。描述对流与扩散关系的无量纲数是 Peclet 数, 其定义为:

$$Pe = Uw/D \sim O(w^2) \quad (1)$$

其中 U 为流速, w 流动混合特征尺度, 这里为管道宽度, D 为液体分子的扩散系数, 计算公式为 $D = \frac{\sigma T}{6d}$, 其中 σ 为 Boltzmann 常数, η 为液体黏度, d 为颗粒直径。显然随着流动特征尺度的降低, Pe 数将

减小, 意味着扩散作用更为重要。如果微槽道宽 $w = 100\mu\text{m}$ 、高 $h = 30\mu\text{m}$ 、流速 $U = 0.4\text{mm/s}$, 扩散系数 $D = 10^{-7}\text{cm}^2/\text{s}$, 若使两种液体达到充分混合, 液体需要流过的长度 L 为 0.4m ($L = Qw/hD = Pe \cdot w$)。这给芯片的制作带来困难, 为了缩短混合长度, 需要采取增强混合的措施。

目前已有不少文献介绍了增强混合的方法, 例如: 主动式震荡混合^[1], 在混合管道侧壁制作一组垂直辅助管道, 在蠕动泵的作用下辅助管道中的液体来回震荡, 从而对主管道中的液体起到混合的效果。此外可以利用壁面粗糙结构增强混合^[2], 即在管道内壁

收稿日期: 2005-09-19; 修订日期: 2006-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(10272107)和中科院创新方向性项目(KJCX2-SW-L2)。

作者简介: 王化峰(1980-), 男, 山东菏泽人, 硕士。研究方向: 生物芯片中的流动问题。E-mail: lili@imech.ac.cn

制作一系列鱼骨状沟槽,利用表面结构对流场的扰动促进混合。由于部分生物分子自身带有磁性或很容易与磁性颗粒结合^[3],目前磁性颗粒在微流动分析控制中已开始得到应用^[4]。Martin 等采用了外加磁场增强混合^[5];A. Rida 等人提出了利用操控磁性颗粒在液体中分布进行混合^[6];王永宁等人提出了一种旋转磁场促进混合的方法,可以将混合时间缩短到 1s 以内^[7]。笔者对恒定磁场作用是否可以促进微槽道中的磁性液体与其它液体的混合进行了研究。

首先在单磁极恒定磁场作用下,对 Y 型微槽道中磁性液体与中性液体混合过程进行了实验观测,然后利用 CFD 软件进行了相应的数值模拟。

1 磁驱动混合的实验研究

1.1 实验条件

1.1.1 实验装置

实验在 LNM 实验室的超净室进行。实验装置(图 1)包括荧光显微镜(OLYMPUS 倒置显微镜 IX71, 10X 物镜)、CCD 摄像头(DVC Company Mod 1312MLV-TE)和自制针状恒定磁极,使用低压 24V 直流电源。根据磁极线圈的圈数 n 和电流强度 I 估算外加磁场强度 H 约为 2000Gs,考虑到磁通量在磁极附近的损失,估计其磁场强度约为 1000Gs 左右。

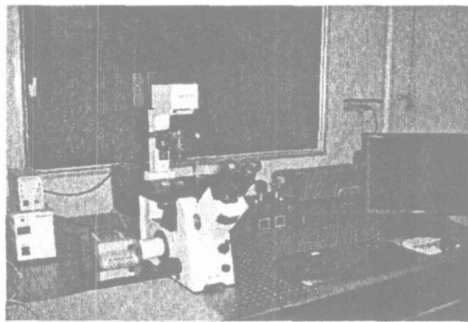


图 1 实验系统照片

Fig.1 Experimental system photo

1.1.2 微槽道

使用软光刻的方法用 PDMS(SYL GARD 184, Dow Corning)制作 Y 型微槽道。如图 2 所示,进样管道长度为 10mm,截面尺寸为 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ 。混合管道长 15mm、截面尺寸为深 $50\mu\text{m}$ × 宽 $100\mu\text{m}$ 。在距废液池 5mm 处单侧安装一个针状磁极,直径为 0.2mm,针尖距离混合管道 1mm。

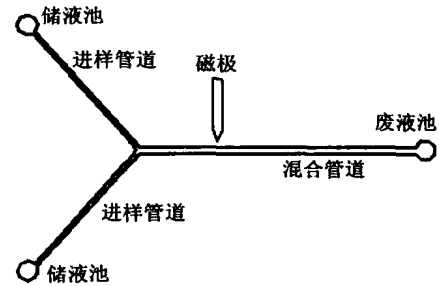


图 2 微流道示意图

Fig.2 Diagram of the microchannel

1.1.3 实验液体

实验液体之一是去离子水,另一种液体为含有纳米磁性颗粒的液体,其中磁性颗粒的平均粒径为 10 ~ 20nm,颗粒的质量浓度为 30%,饱和磁化强度 200Gs。按照不发生聚集的条件,磁颗粒本身的热运动能量必须大于颗粒之间相互作用的最大势能,于是有颗粒直径 d 的限制条件^[8]:

$$d \left[\frac{144 \mu_0 T}{\mu_0 M^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

其中 μ_0 为液体磁导率, M 为磁性颗粒的磁性强度, μ_0 为 Boltzmann 常数, T 为环境温度。实验用磁性颗粒的直径满足这一条件,可以稳定的分布在液体中,以一种胶体的状态存在,从而使磁性液体既具有普通磁性材料的磁性,同时又具有液体的流动性。

1.1.4 流体流动条件

液体流动采用压力驱动。储液池与废液池的液面差 h 为 1cm,相应压力差 P 约为 98Pa。进样管道与混合管道的压降比约为 1:1。实验温度为 25℃,此时水的黏度为 0.8904mPa·s,混合管道中流体的平均速度为:

$$\bar{U} = \frac{d_h^2 P_2}{32 \mu L} = 523 \mu\text{m/s} \quad (3)$$

其中 P_2 为混合管道的压力降, d_h 为混合管道的水力学直径, L 为混合管道的长度。

1.2 实验结果

由于显微镜视场的限制,无法同时看到混合管道全程的流动过程,我们分段观测了混合过程。图 3 为磁极附近液体混合随时间的变化,图 4 为磁极下游 2mm 处(左图)和管道终端处(右图)在磁场作用开始 1s 后液体的混合状态。其中黑色液体为磁性液体,

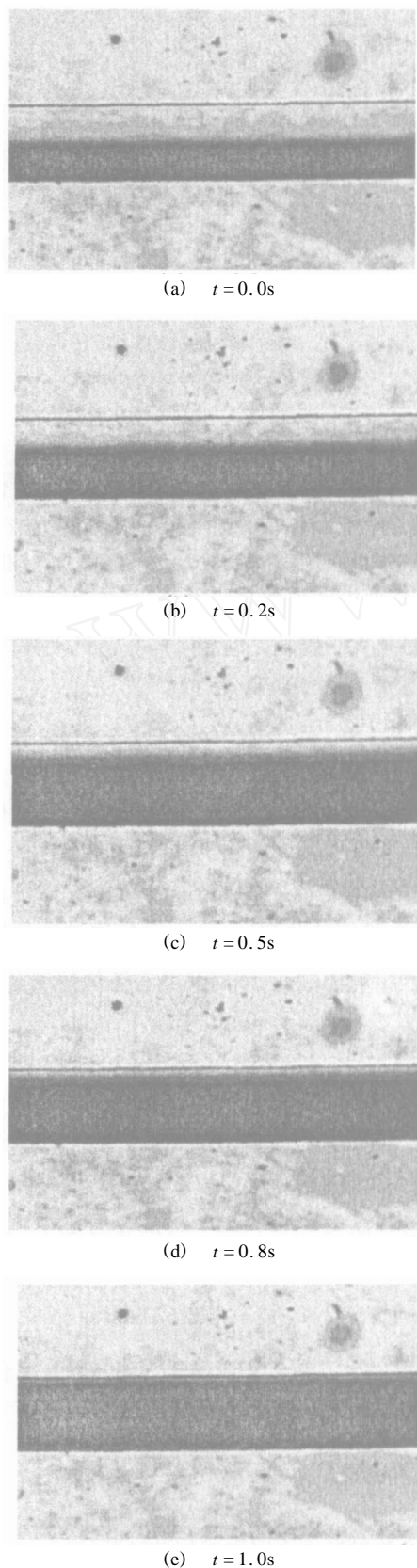


图3 磁场作用下磁极附近不同时刻的混合状态

Fig.3 Heterochronic mixing states near the pole of an extra stationary magnetic field

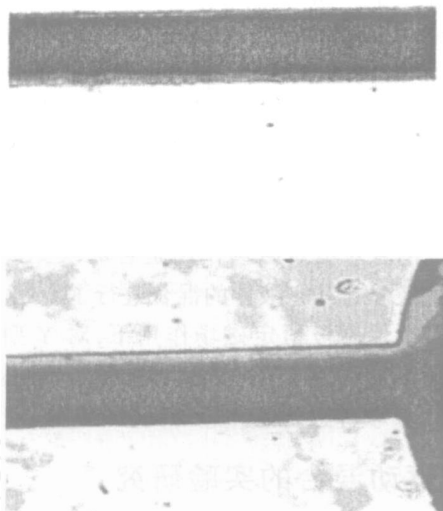


图4 磁极下游2mm处(左)与废液池处(右)的混合效果

Fig.4 The mixing states of 2mm downstream of pole (left) and near waste pool (right)

白色为去离子水。

初始状态即 $t = 0.0s$, 没有外加磁场作用, 两种液体明显分开(图3(a))。接通电路后, 磁性液体向上层移动(图3(b))。 $t = 0.5s$ 时, 磁性液体已经占据管道宽度的 $4/5$ 左右。自接通电路至磁性液体在该位置充分混合约历时不到 $1s$ 。

图4(左)表明磁场作用 $1s$ 后在磁极下游 $2mm$ 处两种液体已达到充分混合状态。而根据公式(1)实验流速对应的 Peclet 数为 0.5×10^4 。如果没有外加磁场, 混合长度达 $0.5m$ 。在外加磁场作用下, 混合长度缩小为约 $5mm$, 缩小了近 100 倍。

在混合管道末端靠近废液池处(图4(右))在磁极同侧再次出现分层现象。当把磁极向上游移动后, 分离现象会更加明显, 说明单磁极的磁力线走向会影响磁性颗粒的分布。

2 磁驱动混合的数值模拟

本节中, 利用 CFDRC 软件对磁驱动促进混合进行数值模拟, 验证实验结果。

2.1 流动方程及边界条件

根据目前的研究, 去离子水在微米管道中的流动规律仍可用 N-S 方程描述^[9]。在外加磁力作用下, 磁性液体运动的控制方程为(忽略重力作用):

$$\frac{dV}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 V + \mu_0 (M \cdot \nabla) H \quad (4)$$

其中 ρ 为液体密度, μ 为液体黏度, μ_0 为磁导率, M

为溶液中由于磁性颗粒的存在而表现出的整体磁性， H 为外加磁场强度。这里 $\mu_0 (M \cdot \nabla) H$ 为单位体积磁性液体的磁力作用项。

根据 2.1 节分析,在满足公式(4)条件下,纳米磁性颗粒均匀悬浮于基液中。故表示质量守恒的连续性方程在形式上与普通流体没有区别,仍可以用如下形式表示:

$$\frac{\partial}{\partial t} + \nabla \cdot (V) = 0 \quad (5)$$

在流场作用下物质输运方程为:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + V \cdot \nabla C_i = D_i \nabla^2 C_i \quad (6)$$

其中 C_i 为组分浓度, D_i 为扩散系数。

入口边界条件: $V = V_0$; 固壁边界条件: $\nabla M \cdot n = 0$, 管壁磁流量为零; $V = 0$, 无滑移边界条件; $\nabla C \cdot n = 0$, 扩散物质无穿透边界条件。

2.2 计算条件

在模拟过程中采用了极性电泳模块来模拟磁动力学问题。根据磁性颗粒受到的磁场力由磁场梯度确定,这一点和极性分子在电场梯度中受到力的作用相似。假设电场力与磁场力大小相同,即:

$$\mu_0 (M \cdot \nabla) H = (m \cdot \nabla) E \quad (7)$$

其中 m 为电极性、 E 电场强度。

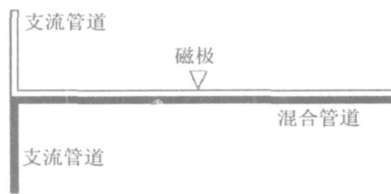


图 5 流动液体磁驱动混合方式示意图

Fig. 5 Diagram of magneto-driven mixing of the fluid flow

如图 5 所示,管道交叉点下游 2 倍管道宽度处放置点状磁极。竖向的支流管道为进样管道宽 $50\mu\text{m}$, 横向为混合管道宽 $w = 100\mu\text{m}$, 管道内的两种溶液, 黑色为磁性溶液, 另一种为缓冲液。磁性溶液饱和磁化强度为 200Gs , 其黏度、密度近似与去离子水相同。管道内液体流速为 $400\mu\text{m/s}$ 。计算模型的空间尺寸为宽 $w = 100\mu\text{m}$ 、长为 $16w$ 。计算网格在管道宽度方向为等距 100, 长度方向为等距 500。管道交叉点下游 2 倍管道宽度处引入 1 个点状磁极。外加磁场最大强度为 1200Gs 。

2.4 数值模拟结果

图 6 为磁性液体流经磁极后不同时刻的浓度分布图。图中 SAM 代表磁性溶液的浓度, 以缓冲液为基准, 磁性液体的最大质量浓度为 30%。

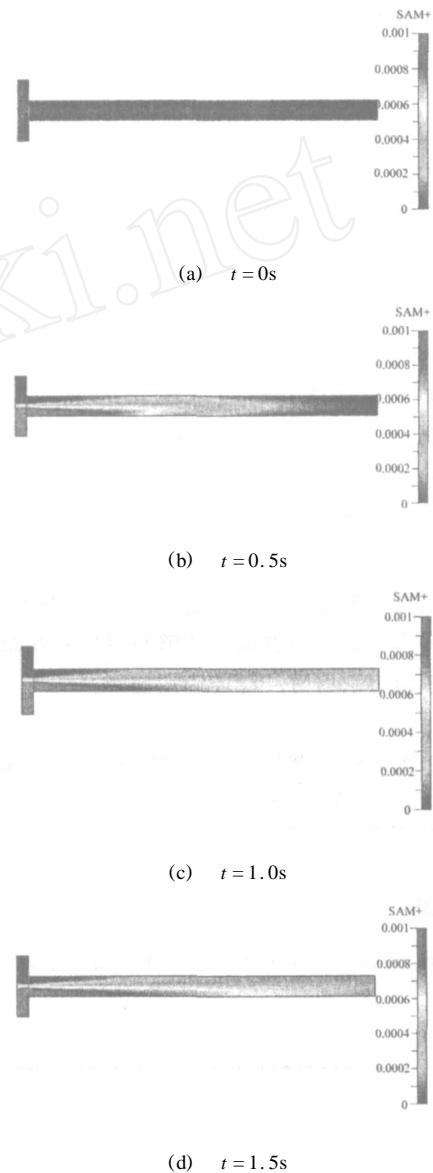


图 6 单磁极恒定磁场作用下磁性液体在不同时刻的浓度分布

Fig. 6 Heterochronic distribution of the concentration of magnetic liquid under an extra stationary magnetic field with a single pole

图 6 (b) 中浓度分布尚有很明显的界线, 而图 6 (c) 可以看出已经达到一定的混合效果, 浓度分布集中在一个狭窄的范围之内。图 6 (d) 下游 $10w$ 处已经达到完全混合效果。根据计算条件和公式(1), 没有外加磁场时, 所需混合长度为 0.4m 。外加磁场作用后, 在 1mm 处已充分混合, 混合长度缩短了 400 倍。

实验平均流速 $523\mu\text{m/s}$ 稍大于数值模拟的平均流速 $400\mu\text{m/s}$,但在磁场作用下,混合长度都缩短了2个数量级。

3 结论

对外加恒定磁场作用下,Y型微槽道中磁性液体与中性液体混合过程进行了实验研究,并进行了数值模拟。主要结论如下:

(1) 在流场速度为 0.5mm/s 时,外加恒定磁场强度只需要达到 10^3Gs 量级,两种液体在 1s 左右的时间即可充分混合,混合长度比没有磁性液体作用时缩小了2个数量级;

(2) 在同样磁场强度条件下,对同样的几何尺寸微槽道流动进行了数值模拟,结果表明当流动速度为 $400\mu\text{m/s}$ 时,液体在 1.5s 可以在10倍宽度范围达到充分混合,混合长度缩短了400倍,证实了磁场对磁性液体的混合作用。

由于使用单磁极,实验显示出磁力线方向影响了磁性颗粒的分布。后续研究中采用了双磁极,进一步改进了液体在整个流道的混合效果^[10]。由于一些生物分子带有一定的磁性或者能够与磁性颗粒结合,因此这种混合方法有着广泛的应用前景。

致谢:感谢国家自然科学基金(10272107)和中科院创新方向性项目(KJ CX2-SW-L2)给予的资助,感谢刘宗源高工在实验技术上的指导和李振国同学在文章修改中的帮助。

参考文献:

- [1] TABELING P, CHABERT M, DODGE A, et al. 2004 Chaotic mixing in crosschannel micromixers [J]. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A362*: 987-1000.
- [2] STROOCK A D, DERTINGER S K W, AJDARI A, et al. 2002 Chaotic mixer for microchannels. *Science*, 295: 647-651.
- [3] CATHERINE C Berry. Possible exploitation of magnetic nanoparticle-cell interaction for biomedical applications [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2005, 15(5): 543-547.
- [4] MENSING G A, PEARCE T M, GRAHAM M D, et al. An externally driven magnetic microstirrer [J]. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A362*: 1059-1068.
- [5] MARTIN A M GJ S. Magnetic bead handling on-chip: new opportunities for analytical applications [J]. *J. Microfluid Nanofluid*, 2004(1): 22-40.
- [6] RIDA A, GJ S M A M. Manipulation of self-assembled structures of magnetic beads for microfluidic mixing and assaying [J]. *Anal. Chem.* DOI:10.1021/ac049415.
- [7] 王永宁,李成武,郭小英,等.微流通道中的磁力搅拌混合及其应用研究[J].*高等学校化学学报*,2005(增).
- [8] 李德才.磁性液体的理论及应用[M].北京:科学出版社,2003.
- [9] CUI H H, SILBER-LI ZH, ZHU S N. Flow characteristics of liquids in microtubes driven by a high pressure[J]. *Physics of Fluids*, 2004, 16(5): 1803-1810.
- [10] 李振国,李战华.Y型微管道中磁性纳米液体对混合率的影响[J].*传感技术学报*,2006,19(5):1701-1704.
- [1] TABELING P, CHABERT M, DODGE A, et al. 2004 Chaotic mixing in crosschannel micromixers [J]. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A362*: 987-1000.
- [6] KYRIAKIDES N K, KASTRINAKIS E G, NYCHAS S G, et al. Aspects of flow structure during a cylinder wake induced laminar/turbulent transition [J]. *AIAA Journal*, 1999, 37(10): 1197-1205.
- [7] OVCHINNIKOV V, PIOMELLI U, CHOUDHARI M M. Numerical simulations of boundary-layer transition induced by a cylinder wake [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006, 547: 413-441.
- [8] ZDRAVKOVICH M M. Flow around circular cylinders [M], volume 1, Oxford University Press, 1997.
- [9] STAPOUNTZIS H, ALYGIZAKIS E, PAPANICOLAOU P, et al. Free surface effects on scalar dispersion behind a circular cylinder [C]. 8th international symposium on fluid control, measurement and visualization, 2005, Chengdu, China.

(上接第45页)