

基于分合式混合单元的微混合器设计与研究^{*}

谢海波, 赵新泊

(浙江大学 流体传动及控制国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要:为实现微尺度下流体的快速均匀混合,基于对流体的分割、合并实现流体间接触面积指数式增长的原理,提出了一种分合式(SAR)混合单元,通过仿真对其支路夹角进行了优化,并最终确定支路夹角 $\theta = 70^\circ$ 。利用成熟的标准 SU-8 光刻及 PDMS 制作工艺,制作了分合式与组合分合式两种微混合器。采用甘油-水按体积比 5 : 95(0.000 97 Pa·s)混合而成的溶液对两种微混合器和斜阻块式微混合器进行了实验($Re = 0.052 \sim 20$)。实验结果表明,斜阻块式微混合器在 $Re \geq 1.23$ 时,混合长度超过 20 mm,而分合式微混合器最大混合长度约 7.6 mm,组合分合式微混合器的混合性能最好,其最大混合长度约为 5.4 mm。设计的分合式和组合分合式微混合器制作方便,易与微流体系统集成。

关键词:微流体;被动式微混合器;分合式

中图分类号:TH162

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)04-0397-06

Design and study on micromixer based on splitting and recombination mixing unit

XIE Hai-bo, ZHAO Xin-bo

(State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to realize quick and uniform mixing of micro scale, a splitting and recombination (SAR) mixing unit based on principle of fluid splitting and recombination was designed. Its branch angle θ was optimized by fluent and $\theta = 70^\circ$ was chosen as the optimized structure parameter. The SAR-micromixer and compound-SAR-micromixer (CSAR-micromixer) were fabricated by a standard photolithographic technique which is much easier than the fabrication of some 3D micromixer. SAR-micromixer, CSAR-micromixer and slant block micromixer (SBM) were tested under $Re = 0.052 \sim 20$, using the mixture of glycerol and water with volumetric ratio 5 : 95(0.000 97 Pa·s). The test results show that, mixing length of SBM is larger than 20 mm when $Re \geq 1.23$, in contrast, maximum mixing of SAR-micromixer is only 7.6 mm and CSAR-micromixer which is the most efficient is about 5.4 mm. SAR-micromixer and CSAR-micromixer can be easily realized and integrated to microfluidic systems.

Key words: microfluid; passive micromixer; splitting and recombination(SAR)

0 引 言

各种用于化学分析、生物分析、记忆存储等的微全分析系统、芯片实验室不断出现。微流体系统在高度集成和便携性方面优势显著^[1-3]。

微混合器对大部分微流体系统而言是必要的组成部分。然而,由于在微流体内流动保持层流使得在微

尺度下混合非常困难。因此,微混合器的研究在近几年成为人们关注的领域。依据有无外界干扰力的存在可以分成两大类:主动式和被动式。

主动式一般可以获得很好的混合效果,主要原理有电动方式、电磁力式、脉动流式、超声波式等^[4-6]。然而,一般情况下主动式微混合器结构复杂、制作困难,不易与其他微器件集成。被动式微混合器主要依靠几

收稿日期:2010-12-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50705081)

作者简介:谢海波(1975-),男,江苏无锡人,副研究员,工学博士,主要从事微流控技术、流场可视化、电液传动等方面的研究。E-mail: hbxie@zju.edu.cn

何结构实现混合。因此,被动式微混合器结构简单、性能可靠。依据混合相的分布,被动式微混合器可以分成以下几类:层流式、分合式、混沌对流式及液滴式等几类^[7-8]。

分合式微混合器适合各种流动状态流体混合,对流体的粘度也不敏感,笔者提出了一种 SAR 混合单元,它对流道内流体进行水平分割、竖直组合,从而使流体间接触面积随流动距离的增长而呈指数倍增长。采用包括 SU-8 光刻胶、光刻及 PDMS 浇注工艺在内的成熟的二维微流道制作工艺制作出设计的三维结构。采用甘油和去离子水的混合溶液,并添加食用色素作为试验试剂,将设计的分合式微混合器与斜阻块式微混合器进行了比较,说明设计的微混合器混合效率高、结构简单、制作方便。

1 混合原理及微混合器设计

1.1 混合原理

根据分子扩散的菲克定律,扩散长度与特征尺寸 \sqrt{Dt} 成正比, D 是分子扩散系数,与流体性质、温度和压强有关,量级一般是 $10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, t 是流体在微流道内的停留时间^[9]。据此可知,即使是几十微米的微流道,完全混合所需扩散时间也是比较多的。一般情况下微混合器内雷诺数较小,流体基本保持层流。为缩小扩散混合所需长度,减小流体间距是关键,从而缩小分子扩散距离。基于上述机理,本研究设计了一种三维分合式微混合器,该分合式微混合器的入口和前两个单元如图 1 所示,流体 A 和 B 分别从两个入口被导入 SAR 微混合单元,在入口处流体的分布呈层流形式,如图 1(b) 截面 1 所示,流体继续沿着流道流动,被在空间上呈上下分布的两支路从中间水平分割,理想

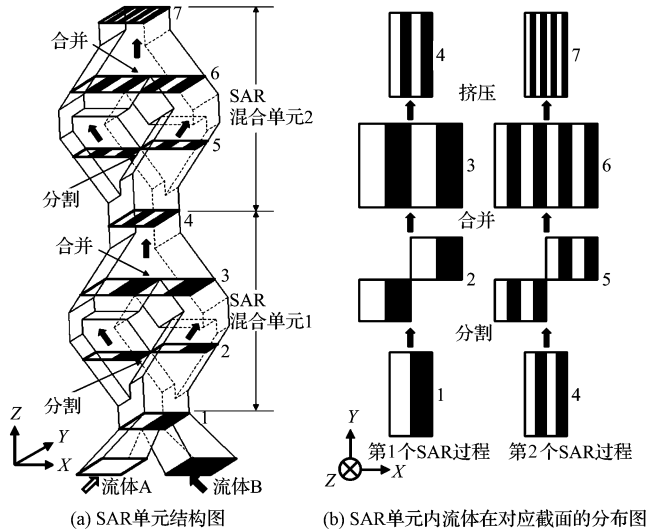


图 1 微混合器原理图

情况下流体的分布如图 1(b) 中截面 2,在截面 3 处被分割的流体又重新合并在一起,经过一个 SAR 单元,流体被分割合并一次,流体间的接触面积加倍,在第 1 个 SAR 单元的出口,合并后的流体在水平方向受到流道壁面的挤压,为下一次分割、合并做好准备,第 2 个 SAR 单元的混合过程与第 1 个 SAR 单元的一样,流体的横截面分布如图 1(b) 所示,这样经过 n 个 SAR 混合单元,理论上流体间接触面积增加至入口处接触面积的 $2^{n+1} - 1$ 倍,流体间接触面积随流动距离增加呈指数倍增长,流体间扩散距离也呈指数倍衰减,从而大大加速了流体间的混合速率。

1.2 微混合器设计

1.2.1 分合式单元结构尺寸

SAR 混合单元的尺寸如图 2 所示,流道宽度为 $100 \mu\text{m}$,单个单元入口出口段长度为 $25 \mu\text{m}$,单层流道的深度是 $100 \mu\text{m}$,而两支路的夹角 θ 是待优化结构参数。

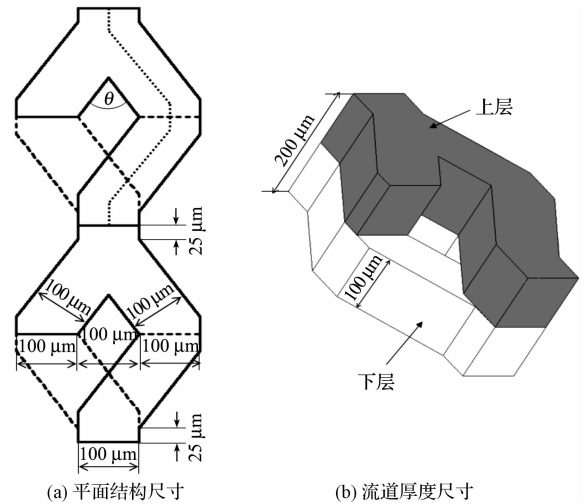


图 2 SAR 混合单元结构尺寸

1.2.2 数值仿真

流体控制方程,即连续性方程,动量方程和扩散方程^[10]如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho V) \tag{1}$$

$$\rho \frac{DV}{Dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 V \tag{2}$$

$$\frac{DC_A}{Dt} = D_{AB} \nabla^2 C_A \tag{3}$$

式中: μ, ρ —流体的动力粘度和密度; P, V —压强和速度矢量; C_A —流体 A 的摩尔浓度; D_{AB} —流体 A 在流体 B 中的扩散系数。

在有限元分析软件 Fluent 环境下,建立微混合器的三维模型,其中,动力粘度 $\mu = 8.937 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,

密度 $\rho = 997 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 出口压强 $p = 0 \text{ Pa}$, 扩散系数 $D = 2.88 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。支路夹角 θ 取值及对应的流道长度 L 如表 1 所示。 L 是流体在 SAR 混合单元中流经的长度,如图 2(a)中虚线所示:

$$L = 0.05 + \frac{0.1}{\tan(\theta/4)} + 0.3 \times \tan \frac{\theta}{4} \quad (4)$$

网格密度的分析表明,网格大小为 $3 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ 时,再增加网格密度,最终计算结果变化对分析来说可以忽略不计,因此不同支路夹角 θ 结构的单元网格数目在 170 000 ~ 270 000 之间。支路夹角 $\theta = 30^\circ$ 的 SAR 混合单元在 $Re = 1$ 时的仿真结果如图 3 所示,在入口处 $a - a'$, 流体 A 和 B 保持层流,在支路被分割,分割后的分布如图 3 截面 $b - b'$, 流体从中间沿水平方向被分割时上下两部分流体之间有相互作用力存在,因此分割不是理想分割,但从图中可以看出分割基本平均,两支路流体在截面 $c - c'$ 重新合并,如图中虚线箭头,流体旋转,彼此进入对方,使两流体间接触面积相比初始入口处大大增加,从而证明该结构设计原理。

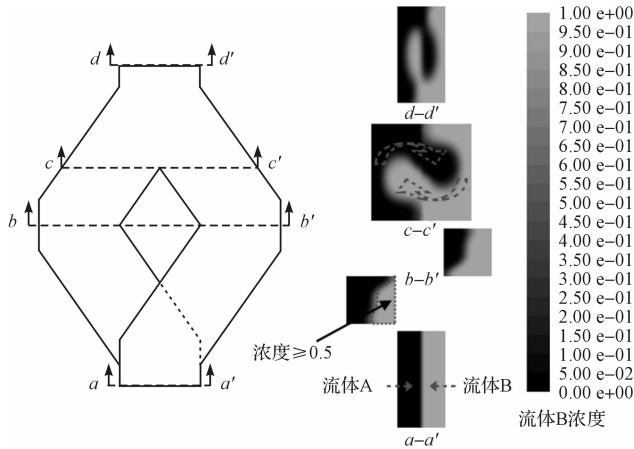


图 3 支路夹角 $\theta = 30^\circ$, $Re = 1$ 时流体在横截面上的浓度分布

1.2.3 混合效率评价

为了定量比较不同支路夹角的 SAR 单元的混合性能,基于横截面流体浓度分布标准偏差,混合指数 M 定义如下^[11]:

$$M = \left(1 - \frac{\int_A |c(x,y) - c_\infty| dA}{\int_A |c_0(x,y) - c_\infty| dA} \right) \quad (5)$$

式中: $c(x,y)$ —待评价横截面上流体的浓度分布函数, $c_0(x,y)$ —入口横截面上流体的浓度分布函数, c_∞ —完全混合后流道横截面上流体的浓度。

不同支路夹角时,流体在 SAR 单元中经过的长度不一样,为客观评价各个 SAR 单元的混合效果,定义单位长度混合效率如下:

$$M' = \frac{M}{L} \quad (6)$$

式中: M —对应单元的混合效率, L —流体在对应单元中流过的长度。

不同支路夹角时流道长度 L 值如表 1 所示。

表 1 不同支路夹角时流道长度 L

$\theta/(^\circ)$	L/mm	$\theta/(^\circ)$	L/mm
30	0.849 1	90	0.415 7
40	0.670	100	0.404 3
50	0.567 6	110	0.398 3
60	0.503 6	120	0.396 4
70	0.461 8	130	0.398 1
80	0.433 9		

应用上式,可得 $Re = 0.1 \sim 3$ 的仿真结果如图 4 所示,在小雷诺数流动状态 ($Re = 0.1 \sim 0.4$),支路夹角为 70° 的 SAR 单元的单位长度混合效率最好,随着雷诺数的增加,拥有大支路夹角的 SAR 单元的单位长度混合效率逐渐趋好,大的支路夹角更容易对流动造成扰动,因为在微混合器应用中,大多数情况下流动处于小雷诺数情况,因此,选取支路夹角 $\theta = 70^\circ$ 作为最后方案的结构参数。

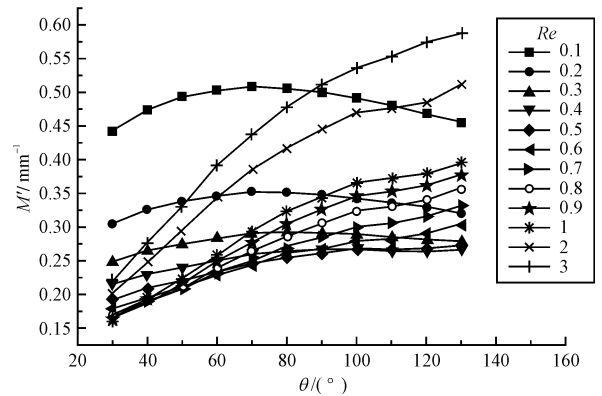


图 4 不同支路夹角 SAR 单元在 $Re = 0.1 \sim 3$ 时的单位长度混合效率

2 微混合器的制作

2.1 SU-8 胶制作工艺

2.1.1 SU-8 胶模型的制作

首先,用无水乙醇清洗 4 寸单面刨光的硅基片,用热板在 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 下加热 15 min 进行烘干。SU-8 胶的涂敷如下:先在 $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的情况下转动 18 s,然后在 $1000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的情况下转动 30 s。完成旋转涂敷后,将硅片置于热板之上进行前烘,在 $65 \text{ }^\circ\text{C}$ 时加热 5 min,在 $95 \text{ }^\circ\text{C}$ 时加热 60 min。然后进行曝光,将前烘的硅片置于曝光机上,上面盖上金属铬掩膜,曝光 30 s。然后进行后烘,将硅片置于热板之上,在 $65 \text{ }^\circ\text{C}$ 时加热

5 min,在 95 °C 时加热 20 min。然后进行显影,在这一步中没有曝光的 SU-8 胶在显影液中溶解,而曝光部分留下。为使在后面工序容易与 PDMS 模型进行分离,对 SU-8 模具进行了硅烷化处理,具体是先将显影后的硅片在三氟乙酸中浸泡 30 min,然后再将硅片置于干燥箱中在 120 °C 下加热 30 min。至此完成 SU-8 模具的制作。

2.1.2 PDMS 流道的制作

首先将弹性体基与交联剂按体积比 10 : 1 混合得到液态 PDMS。在干燥箱内去除气体后,将液态 PDMS 浇于 SU-8 模具上,再次去除气体,然后置于干燥箱内在 120 °C 下加热 30 min。然后取出在空气中冷却至室温,将 PDMS 微流道与光刻胶模具小心地分离。至此完成 PDMS 微流道制作。

2.1.3 PDMS 微流道与玻璃键合

在上层入口与出口位置打出直径为 2 mm 的孔。在超声波清洗机中用无水乙醇和去离子水将 PDMS 进行清洗(每次用时 10 min)干净。在上下两片 PDMS 中间注入少量无水乙醇,在显微镜下将两者对齐,放置一段时间待乙醇蒸发后,用夹具加持,即可进行实验。

2.2 制作简介

实验所用微混合器即利用上述工艺制作而成。如图 5 所示,分合式微混合器制作工艺主要包括 SU-8 胶模具的制作,PDMS 微流道制作以及上下 PDMS 微流道的键合,由 50 个 SAR 单元组成,总长度约 20 mm。为客观评价设计的分合式微混合器,本研究选择一种典型的斜阻块式微混合器作为比较,其相关尺寸如图 6 所示,阻块倾角是 45°,阻块宽度是 100 μm,流道总长是 20 mm。在分合式微混合单元基础上将 4 个这样的单元进行组合,可以得到如图 7 所示的更加有效的组合分合式微混合单元,它由完全相同的上下两层组成,每层的厚度为 100 μm,微流道的宽度仍为 100 μm,入口处两支路夹角也取 70°,为减小单元整体尺寸,出口处两支路夹角取 120°。考虑制作工艺水平,取两侧

SAR 单元的间距为 100 μm,单元整体长度为 1 337.74 μm,组合分合式微混合器由 15 个单元组成。

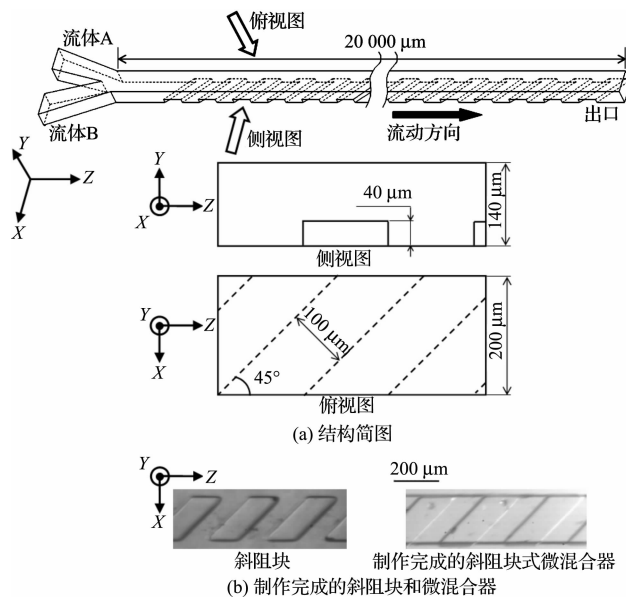


图 6 斜阻块式微混合器制作

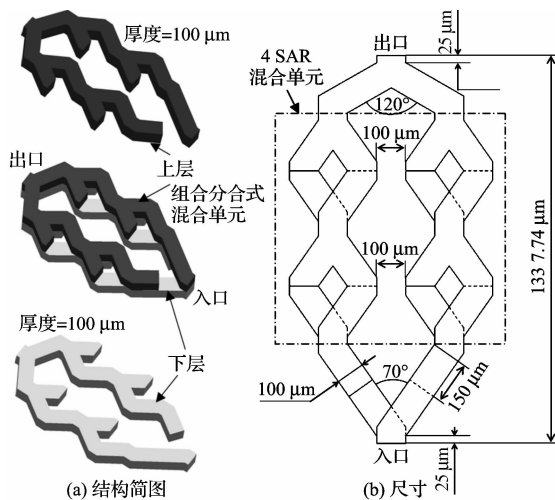


图 7 组合分合式微混合器制作

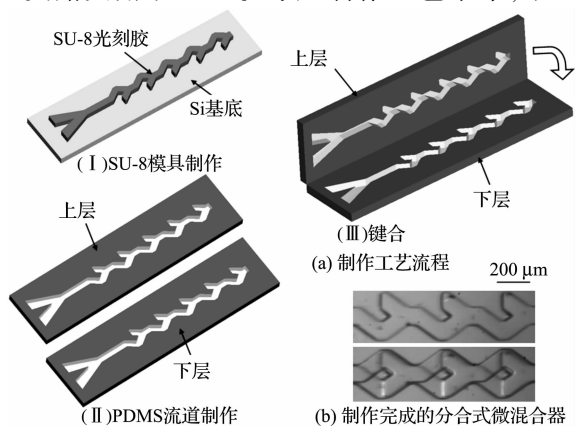


图 5 分合式微混合器制作

3 实验及混合效果评价方法

3.1 实验方法

检测微混合器混合性能的要求在线并且对流场没有干扰,因此采用流场可视化技术。实验流体采用加红蓝食用色素(杭州林峰食品添加剂厂)甘油-水混合溶液作为实验流体,溶液中甘油的体积份数分别是 5%,粘度是 0.000 97 Pa · s。用于截取流体混合状态图像的实验装置如图 8 所示。该实验装置由两台微量注射泵(KDS-200)、一台显微镜、一个数字摄像头及一台带有图像分析软件的计算机组成。



图 8 用于微混合器混合效果评价的实验装置

利用上述实验装置,可以清晰显示从入口到出口红蓝试剂逐渐混合的过程,3 种微混合器在 $Re = 0.5$ 时的混合效果图如图 9 所示,在入口处可以清楚地看到红蓝流体保持层流流动,在斜阻块式微混合器中,由于斜阻块对流体的导流旋转作用,从而促进流体间的混合,混合长度大约为 10 mm;在分合式微混合器中,依靠对流体的分割、合并使流体间接触面积迅速增加,流体混合需要扩散的距离急剧缩短,从而实现快速混合,从图中可以看出,在单元 13 处达到完全混合,混合长度为 5.2 mm;组合分合式微混合器具有分合式微混合器的优点,同时,在同样长度内包含更多的 SAR 单元,因此,它比分合式微混合器的混合效率更高,它的混合长度只有约 3.3 mm。

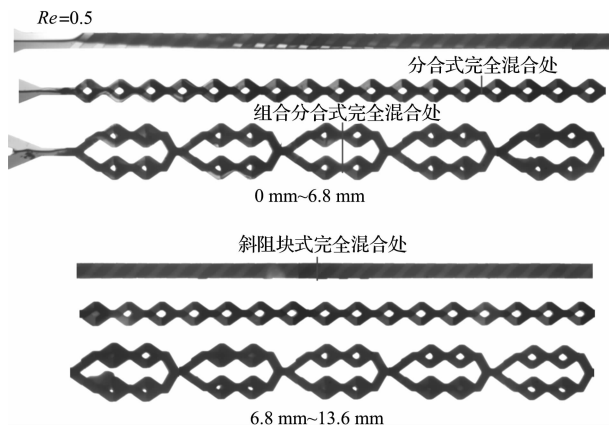


图 9 3 种微混合器在 $Re = 0.5$ 时的混合效果

3.2 混合效果评价方法

对上述两种微混合器混合效率的评价采用基于原色概念的混合长度^[12]。一种颜色是由红绿蓝 3 种颜色按照一定比例组成的,每一种原色的灰度值的取值范围是 0 ~ 255。提取混合图片上每一点的三原色值,图片上每一种原色灰度的标准偏差就代表混合的均匀程度。混合长度概念和确定方法如图 9 所示,图 9(a)表明取样图片是沿着微流道从入口到出口在每个单元中依次提取,方法如图 9(b)所示,为消除微流道壁面

在显微镜下的光学效应对原色灰度值的影响,斜阻块式微混合器样本图片为 $70 \mu\text{m} \times 170 \mu\text{m}$ 的菱形,对于分合式微混合器,在每一个混合单元支路上取 $70 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 大小的样本图片。混合实验中采用加色素的溶液,颜色的均匀性就代表了混合的均匀程度,随着混合距离的增加,原色灰度的标准偏差沿着流动方向不断减小,并在完全混合时收敛到最小,标准偏差从初始到收敛到最小值这一段距离就定义为混合长度。

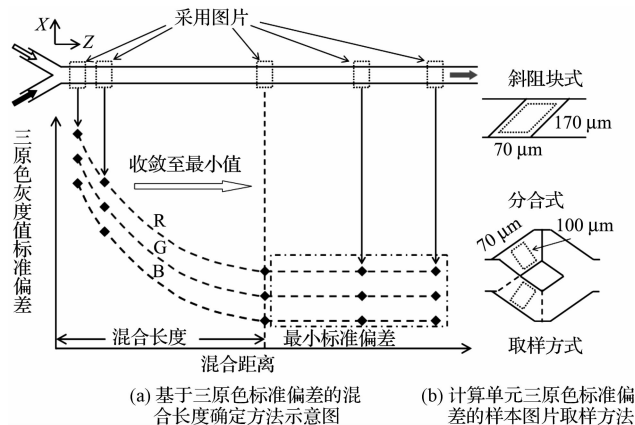


图 10 混合长度的确定方法

4 实验结果分析

4.1 $Re = 0.1$ 分合式微混合器实验结果及分析

利用上述混合长度的确定方法,分合式微混合器在 $Re = 0.1$ 时的混合长度确定方法如图 11 所示,在单元 1 中红绿蓝 3 种原色灰度值的标准偏差较大,尤其是红色,在单元 3 中各原色灰度值标准偏差有所减小,到单元 11 后,3 种原色灰度值的标准偏差收敛到一个稳定值,说明单元 11 之后,流体已经完全混合。标准偏差值在单元 11 之前有大幅波动是因为混合单元对流体的分割、合并,并且还有一定的旋转作用,三原色标准偏差值总变化趋势是逐渐减小的,混合长度最终为 4.4 mm。

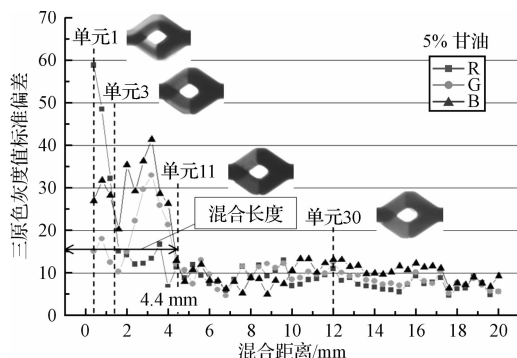


图 11 含 5% 甘油的溶液作为实验液体,分合式微混合器在 $Re = 0.1$ 时的混合长度

4.2 3 种微混合器实验结果及分析

3 种微混合器在 $Re = 0.052 \sim 20$ 之间的混合长度实验结果如图 12 所示,在 $Re \leq 1.23$ 时,3 种微混合器在微流道长度 20 mm 内都能使液体得到完全混合,斜阻块式微混合器依靠斜阻块对液体的螺旋导向,增加液体间的接触面积,促进混合,但是随着 Re 的不断增大,液体间的接触时间减小,而且减小趋势快于液体间接触面积的增加趋势,因此,混合长度不断增加,到 $Re = 1.23$ 时,其混合长度增加至 20 mm,再增大 Re ,斜阻块式微混合器要实现对流体的完全混合所需的流道长度就大于 20 mm 了。分合式微混合器依靠对流体的分割、合并使流体间的接触面积呈指数式增长,因此在 $Re \leq 3.09$ 时,虽然 Re 增大导致接触时间的减小使混合长度有增大趋势,但其增长相比于斜阻块式要慢,在相同流动状态下,分合式微混合器所需混合长度要小的多,当 Re 增大到一定程度时,流道对流体的扰动作用开始显现,在分割、合并和扰动的双重作用下,混合长度在 $Re = 3.09$ 之后开始有减小趋势,在实验范围内 ($Re = 0.052 \sim 20$),分合式微混合器所需最大混合长度约为 7.6 mm;组合分合式微混合器具有与分合式微混合器相同的混合单元,同时在相同长度内有更多的 SAR 单元,因此,其混合长度的变化趋势与分合式微混合器相同,但在相同流动状态时,所需混合长度更短,其最大混合长度约为 5.4 mm。

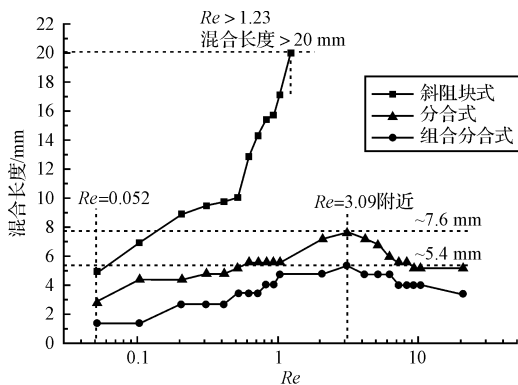


图 12 3 种微混合器在不同雷诺数时的混合长度

5 结束语

本研究提出了一种基于对流体分割-合并原理的 SAR 混合单元,对主要结构参数支路夹角进行了仿真优化,最终确定 $\theta = 70^\circ$,利用包括 SU-8 光刻胶、光刻及 PDMS 浇注工艺在内的成熟的二维微流道制作工艺制作出设计的三维分合式和组合分合式微混合器,与

现有分合式微混合器制作相比,制作方便,结构简单,并制作了斜阻块式微混合器作为比较。采用甘油-水混合制成的溶液对 3 种微混合器进行实验,结果显示,分合式和组合分合式微混合器比斜阻块式微混合器有效,尤其是组合分合式。分合式微混合器的结构是空间三维结构,但上下层结构完全相同,上下层的制作与平面结构的微流道制作完全相同,因此,设计的分合式微混合器制作方便,易与微流体系统集成。

参考文献 (References):

- [1] DEMELLO A J. Control and detection of chemical reactions in microfluidic systems[J]. **Nature**,2006(442):394-402.
- [2] BALAGADDE F K, YOU Ling-chong. Control in a micro-chemostat[J]. **Science**,2005(309):137-140.
- [3] THORSEN Y T, MAERKL S J, QUAKE S R. Microfluidic large-scale integration[J]. **Science**,2002(298):580-584.
- [4] WU X B, AN W D, LIN C H, et al. A rapid DNA digestion system[J]. **Biomed Microdevices**,2007(9):277-286.
- [5] LEE S H, KANG H J, CHOI B. A study on the novel micromixer with chaotic flows[J]. **Microsystem Technology**, 2009(15):269-277.
- [6] GLASGOW I, AUBRY N. Enhancement of microfluidic mixing using time pulsing[J]. **Lab on a Chip**,2003(3):114-120.
- [7] TAFTI E Y, KUMAR R, CHO H J. Effect of laminar velocity profile variation on mixing in microfluidic devices: the sigma micromixer[J]. **Applied Physics Letters**, 2008, 93(14):143504-143507.
- [8] SCHONFELD F, HESSEL V, HOFMANM C. An optimised split-and-recombine micro-mixer with uniform 'chaotic' mixing[J]. **Lab on a Chip**,2004(4):65-69.
- [9] SEONG G H, CROOKS R M. Efficient mixing and reactions with microfluidic channels using microbead-supported catalysts[J]. **Journal of the American Chemical Society**, 2002,124(45):13360-13361.
- [10] BIRD R B, STEWART W E, LIGHTFOOT E N. Transport Phenomena[M]. New York, USA, Wiley,2003.
- [11] YANG Jing-tang, HUANG K J, LIN Yu-chun. Geometric effects on fluid mixing in passive grooved micromixers[J]. **Lab on a Chip**,2005(5):1140-1147.
- [12] YANG Jing-tang, FANG Wei-feng, TUNG K Y. Fluids mixing in devices with connected-groove channels[J]. **Chemical Engineering Science**,2008,63(7):1871-1881.