

具有多样性混合单元的分离重组微混合器的优化设计与数值分析

简佳培, 甘屹, 孙福佳

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2023年11月13日; 录用日期: 2023年12月31日; 发布日期: 2024年1月9日

摘要

分离重组(SAR)技术是增强微混合器混合效率的有效方法之一, 该技术是利用混合单元将流体不断地分离再重组来达到混合目的。目前, 大量的混合单元被提出。然而, 这些单元的组合对混合的影响尚未被研究。因此, 本文基于多样性混合单元, 提出一种具有高混合效率的分离重组微混合器。采用菱形、圆形、方形三种差异性结构, 这些结构两两组合出九种混合单元, 再将这此混合单元分别放入带有三个混合区域的微混合器模型, 并通过数值仿真和试验方法分析不同组合下的混合效率。仿真结果表明, 菱形结构对微混合器的混合性能提升最大, 圆形最弱, 带有菱形和方形结构的分离重组微混合器(YOSAR)组合最优。随着雷诺数的增加, YOSAR内流体的混沌平流和迪安流效应加剧, 混合效率增加。在雷诺数为100时, YOSAR混合效率达到99%, 接近于完全混合。同时, 实验结果和仿真结果具有一致性。

关键词

微混合器, 分离和重组单元, 优化, 混合效率

Optimized Design and Numerical Analysis of a Split and Recombination Micromixer with Diverse Mixing Units

Jiapei Jian, Yi Gan, Fujia Sun

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Nov. 13th, 2023; accepted: Dec. 31st, 2023; published: Jan. 9th, 2024

Abstract

The split and recombination (SAR) technique is one of the effective methods to enhance the mixing

文章引用: 简佳培, 甘屹, 孙福佳. 具有多样性混合单元的分离重组微混合器的优化设计与数值分析[J]. 建模与仿真, 2024, 13(1): 61-74. DOI: 10.12677/mos.2024.131007

efficiency of a micromixer. It utilizes mixing units to continuously separate and then reorganize fluids for mixing purposes. Although numerous mixing units have been proposed at present, the combined effect of these units on mixing has not been investigated. Hence, this article proposes a separation and recombination micromixer with high mixing efficiency based on diverse mixing units. Three differentiated structures, square, circle, and rhombus, are utilized and combined in pairs, resulting in nine different mixing units. These units are then integrated into a micromixer model with three mixing regions. The mixing efficiency of different combinations is analyzed using numerical simulation and experimental methods. The simulation results reveal that the rhombic structure enhances the mixing performance of the micromixer the most, while the circular structure is the weakest. The combination of the rhombic and square structures (YOSAR) demonstrates the optimum performance. As the Reynolds number increases, the chaotic advection and Dean flow effects intensify within the YOSAR, leading to improved mixing efficiency. At a Reynolds number of 100, the YOSAR mixing efficiency reaches 99%, approaching complete mixing. Meanwhile, the experimental and simulation results are consistent.

Keywords

Micromixer, Split and Recombination Unit, Optimization, Mixing Efficiency

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

微流控芯片(Microfluidic chip)是一种在微尺度空间对流体进行操控为主要特征的科学技术,具有反应迅速、通量高、过程可控、试剂消耗少等特点[1]。随着科技的发展,微流控芯片已广泛应用于生物[2] [3]、医学[4] [5]、化学[6] [7]等领域。其中微混合器是组成微流控芯片的重要部分,其能够缩短反应所需时间、节省实验室试剂成本、经济和劳动力成本[8]。由于微混合器通道尺寸级别只有微米级,流体主要出于层流状态,混合效率通常较低[9],所以提高微混合器的混合效率成为研究的重点和目标。

根据是否需要外部能量源,可以将微混合器分为主动式微混合器和被动式微混合器[10]。主动式微混合器需要设置外部能量源,常见的能量源有压力扰动式[11],电驱动式[12],磁力驱动式[13],声波驱动式[14],介电泳式[15]等。但是正是由于外部能量场的存在,微混合器的结构被变得复杂,加工成本升高且所需空间变大。

被动式微混合器的研究要早于主动式微混合器,且不需要外加能量源存在,操作更加简单,制作容易,适合批量化生产[16]。因此被动式微混合在近年中得到广泛的关注。常见的被动式微混合器有分离重组型(SAR)微混合器、嵌有障碍物或凹槽型微混合器等。嵌有障碍物或凹槽型微混合器是在微通道内或壁面设置障碍物[17]、挡板[18]、沟槽[19]、凸起物[20]等,使流体改变原来的运动轨迹,产生不同于原来的运动方向的流动,流体分子间的接触面积增大从而提高了混合效率。分离重组式微混合器通过对微通道的结构设计使流体进行反复的分流汇合运动,利用分层流的特点使流体产生混沌对流现象,流体横向速度分量增大了流体间接触面积,从而实现了高效混合[21]。相对于嵌有障碍物微混合器,分离重组式微混合器的流道更简单,更易于加工,成本更低。

对于分离重组式微混合器的研究,Ranjitsinha 等人[22]在传统蛇形微混合器中引入方形和圆形 SAR 混合单元,从而提高了微混合器的混合性能。Ansari 等人[23]提出了一种具有不对称子通道的平面圆形和

菱形 SAR 微混合器, 得出子通道的宽度比会影响微混合器混合性能的结论。Chen 等人[24] [25]分别提出了具有 E 字形和 F 形混合单元的平面 SAR 微混合器, 通过对微混合器的混合性能进行数值和实验分析, 表明 E 字形和 F 形混合单元处可以使流体在垂直于运动方向产生涡旋效果, 从而提升了微混合器的混合性能。Shah 等人[26]设计了三种含有菱形和圆形混合单元的 Y 形 SAR 微混合器, 并在不同雷诺数下, 对这些混合器的混合性能进行了数值研究。结果表明, 同时含有菱形和圆形混合单元的 SAR 微混合器表现出更好的混合性能。

上述设计中的微混合器, 是将不同种类 SAR 混合单元引入设计。这些混合单元以相同宽度通道的方形, 圆形, 菱形等形式出现[27]。由于这些混合单元的存在, 使流体产生了混沌平流、横向流动、旋转和回流, 从而增强混合效果[28]。目前对于 SAR 微混合器的大多研究仅是针对某一种 SAR 混合单元, 对于不同 SAR 混合单元的组合所能带来的混合效果尚未被研究。

为了探究不同的 SAR 混合单元组合, 以形成一种具有高混合性能的分离重组微混合器。本文首先提出一种分离重组微混合器模型, 并根据现有研究引入几种不同结构的 SAR 混合单元。然后, 采用适当的试验设计方法对这些 SAR 混合单元的组合进行研究。随后对试验设计结果进行分析, 确定不同结构的混合单元对微混合器混合性能的影响, 并得出最佳的混合单元组合。最后通过数值模拟和实验分析最佳组合微混合器在不同雷诺数下的混合效果与混合机理。

2. 理论与设计

在本节中, 首先介绍了本文研究涉及的微米尺寸范围内流体数值研究理论, 如控制方程、边界条件以及混合性能评价指标等, 然后对微混合器结构进行设计, 建立微混合器物理结构模型。随后根据田口法, 建立正交试验表。最后为确保数值模拟的精度, 对设计的微混合器进行网格无关性验证。

2.1. 数值理论

在本研究中, 采用基于有限元法(FEM)的 COMSOL 多物理场中的层流和稀物质传递模块对三维模型进行混合模拟[29]。层流模块中的连续性方程和 Navier-Stokes 方程用于描述微混合器中的流体流动。稀物质传递模块使用对流扩散方程, 用于研究微混合器内流体的混合。对应的方程如式(1)~(3)所示:

连续性方程(Steady equation):

$$\rho \Delta \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

纳维 - 斯托克斯方程(Navier Stokes equation):

$$\rho(\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = \nabla \cdot \left[-P \mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{V} + \nabla \mathbf{V})^T \right] + F \quad (2)$$

对流扩散方程(Convection Diffusion equation):

$$\nabla \cdot (-D \nabla C_i) + \mathbf{V} \cdot \nabla C_i = R \quad (3)$$

\mathbf{V} 是流体速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), μ 为动态粘度($\text{Pa} \cdot \text{s}$), ρ 为密度($\text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$), P 为流体压力(Pa), T 为粘性应力张量, C_i 为浓度($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$), \mathbf{I} 为单位矩阵, F 为体力($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$), R 为源项, D 为扩散系数($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)。模拟仿真设置中使用的动态粘度 μ 、密度 ρ 和扩散系数 D 分别设置为 $0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $1 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $1 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ [30]。

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_0, \text{ 入口} \quad (4)$$

$$\mathbf{V} = 0, \text{ 壁} \quad (5)$$

$$P = 0, \text{ 壁} \quad (6)$$

微混合器入口使用的边界条件是速度 V ，出口处为大气压力，除入口和出口外，微混合器的所有壁上都施加了无滑移条件[31]，如式(4)~(6)所述。入口 1 和入口 2 处的浓度值分别设置为 0 和 $1 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

采用雷诺数公式计算入口边界条件：

$$R_e = \frac{\rho V D_h}{\mu} \tag{7}$$

$$D_h = \frac{2XY}{(X+Y)} \tag{8}$$

其中 ρ 为流体密度， V 为速度， D_h 为特征长度。在特征长度的公式中 X 和 Y 为微混合器几何截面面积的宽度和深度。表 1 给出了在 $0.5 \leq R_e \leq 100$ 范围内，根据雷诺数公式计算得到的速度和流量值。

Table 1. Inlet velocity and inlet flow corresponding to each Reynolds number

表 1. 各雷诺数对应的入口速度和入口流量

Reynolds number	Velocity (ms^{-1})	Flow rate (μlmin^{-1})
0.5	0.0021	7.5
10	0.042	151
20	0.083	299
40	0.167	601
60	0.25	900
80	0.333	1199
100	0.417	1500

混合指数(M)用于表示微混合器的混合效率，其公式[32]为：

$$M = 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_{\max}^2} \tag{9}$$

式中 σ 和 σ_{\max} 为出口处垂直于流体流动方向的切割面上质量分数的标准偏差和最大标准差，其计算公式如下：

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=z}^n (C_i - C_{\infty})^2 \tag{10}$$

$$\sigma_{\max}^2 = C_{\infty} (1 - C_{\infty}) \tag{11}$$

其中 n 为垂直于流体流动方向的切面上不同位置的浓度值采样点个数。 C_i 为切割面上浓度的质量分数值。 C_{∞} 为最优混合值，值为 0.5。混合指数 M 的取值范围为 0~1。其中 $M = 0$ 表示未混合情况， $M = 1$ 表示完全混合情况。

压降实际上是在微型混合器的入口处需要的泵送压力，以使流体进入微通道。压降计算公式如下：

$$\Delta P = P_1 - P_2 \tag{12}$$

式中， P_1 ， P_2 分别为通道入口和出口的压力。

2.2. 微混合器结构设计

SAR 类微混合器主要通过微通道的结构使流体进行反复的分流汇合运动，利用分层流的特点使流体

产生混沌对流现象，混沌对流现象使流体产生了横向速度分量并增大了接触面积，从而实现高效混合。目前对于 SAR 微混合器的研究主要是利用 SAR 的混合机制，设计不同结构的分离重组单元来提高混合效率。常见的有菱形分离重组单元[33] [34]、圆形分离重组单元[35]、方形分离重组单元[24] [36]。不同的结构会带来不同的混合效果，然而目前大多数研究只是针对上述某一种分离重组单元，但在 Shah 等人[26]的研究中指出，含有不同种类分离重组单元的 SAR 微混合器表现出更好的混合性能。因此，本研究选择菱形(Y)、圆形(C)、方形(R)三种结构，将它们两两组合，形成 9 种不同结构的分离重组单元，具体尺寸如图 1 所示，其中所有尺寸单位均为 mm。

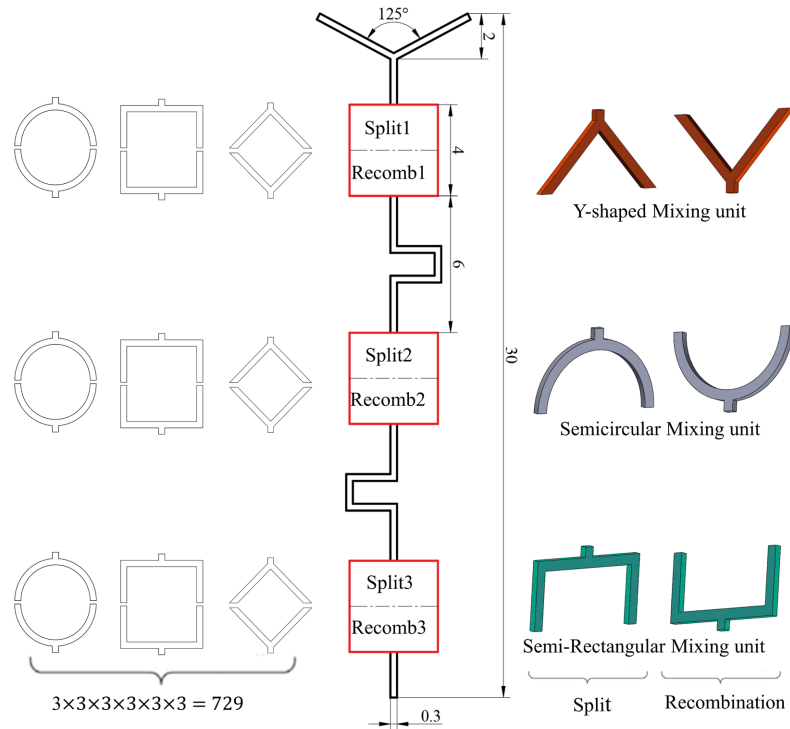


Figure 1. Schematic diagram of the structure of the micromixer
图 1. 微混合器结构示意图

2.3. 试验设计

建立好微混合器物理模型后将进行后续数值模拟工作，然而，所有混合单元组合会产生 729(3⁶)种微混合器，对所有的可能性进行研究会产生极大的资源浪费。为了解决这个问题，本文采用田口法，该方法使用正交表来设计试验组合，无需对每个参数的各个水平都进行一次试验，大大的节省了人力物力，同时该方法已被确定为与数值模拟相结合的理想方法并已广泛应用于试验设计中[37]。本研究有六个因素，每个因素有三个水平数，因此使用 Taguchi L₁₈(3⁶)正交表将试验设计总数从 729 次减少到 18 次，正交表如表 2 所示。

与其他经典优化方法相比，田口法的主要优点是引入了评价指标：信噪比(S/N)。可通过计算正交表中每个实验的 S/N 来确定各设计参数对目标函数的影响。信噪比的计算模型有望大、望目、望小三种。本文将混合指数 M 作为目标函数，因此选择望大特性的信噪比计算模型，其计算公式为：

$$\frac{S}{N} = -10 \log \sigma^2 \quad (13)$$

Table 2. Table of orthogonal experiments with 6 factors and 3 levels of mixed unit combination
表 2. 混合单元组合 6 因素 3 个水平的正交实验表

Case no.	S1	R1	S2	R2	S3	R3
1	C	C	C	C	C	C
2	C	C	Y	Y	R	R
3	C	Y	C	R	R	Y
4	C	Y	R	C	Y	R
5	C	R	Y	R	Y	C
6	C	R	R	Y	C	Y
7	Y	C	C	R	Y	R
8	Y	C	R	C	R	Y
9	Y	Y	Y	Y	Y	Y
10	Y	Y	R	R	C	C
11	Y	R	C	Y	R	C
12	Y	R	Y	C	C	R
13	R	C	Y	R	C	Y
14	R	C	R	Y	Y	C
15	R	Y	C	Y	C	R
16	R	Y	Y	C	R	C
17	R	R	C	C	Y	Y
18	R	R	R	R	R	R

2.4. 网格无关性验证

为了保证数值模拟的精度，对设计的模型进行网格灵敏性试验。首先随机选择正交表中的一组模型，采用不同网格数的网格对该模型进行网格划分，根据式(9, 10, 12)计算出混合指数、标准偏差以及压降，结果列于表 3 中。在足够精度和减少计算时间的条件下得到的网格称为最佳网格，考虑到精度和时间成本，本文选择网格数为 1,179,696 的网格作为最佳网格。

Table 3. Example of grid independence test
表 3. 网格独立性测试

Test number	Mesh number	Δp [Pa]	$\frac{ \Delta p^{i+1} - \Delta p^i }{\Delta p^i}$	M	$\frac{ M^{i+1} - M^i }{M^i}$	Time cost*
1	79,757	1413.4	-	0.365	-	0.9 h
2	295,516	1442	2.02%	0.299	18.08%	4.2 h
3	750,298	1450.5	0.59%	0.273	8.70%	9.5 h
4	1,179,696	1453.3	0.19%	0.270	0.98%	17.1 h
5	1,567,932	1454	0.05%	0.269	0.37%	27.8 h

3. 结果与讨论

3.1. 试验设计结果

对田口法设计的正交试验表中的组合进行数值模拟仿真，仿真选择在 $Re = 10$ 的条件下进行，因为微混合器常工作在低雷诺数情况下。表 4 记录了数值仿真结果，其中混合指数 M 、标准平方差 σ^2 ，信噪比 η 分别由公式(9)、(10)、(13)计算得来。

通过查看每个因素的信噪比图(图 2)，每个混合区域的最佳混合单元由各线段的最高值指定。结合信噪比 η 望大特性，得出最佳组合的微混合器(YOSAR)由 5 个菱形单元以及 1 个方形单元组成，其中前面 5 个混合单元均为菱形(Y)，最后一个为方形(R)。

Table 4. Mixing index, standard deviation squared, and signal-to-noise ratio of orthogonal arrays

表 4. 正交阵列的混合指数、标准差平方和信噪比

Case no.	Mixing index (M)	Square of standard deviation (σ^2)	S/N (η)
1	0.252	0.140	8.539
2	0.280	0.129	8.894
3	0.263	0.136	8.665
4	0.263	0.136	8.665
5	0.264	0.135	8.697
6	0.256	0.138	8.601
7	0.271	0.133	8.761
8	0.266	0.135	8.697
9	0.278	0.130	8.861
10	0.269	0.134	8.729
11	0.265	0.135	8.697
12	0.259	0.137	8.633
13	0.260	0.137	8.633
14	0.263	0.136	8.665
15	0.261	0.137	8.633
16	0.262	0.136	8.665
17	0.268	0.134	8.729
18	0.268	0.134	8.729

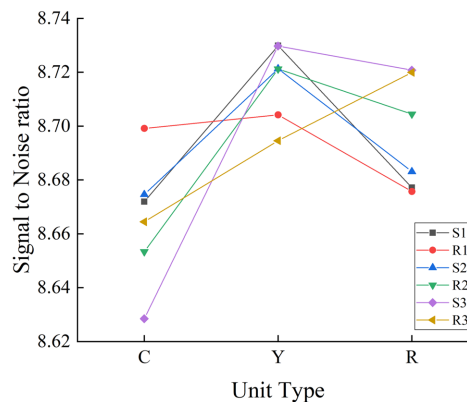


Figure 2. Performance of hybrid units within each design cell and signal-to-noise ratio
图 2. 各设计单元内混合单元的性能以及信噪比

3.2. 仿真结果

通过田口法得到最佳组合微混合器(YOSAR)后,对 YOSAR 在雷诺数为 0.5~100 范围内进行数值模拟,并与 Y 型直通微混合器(YSSAR)进行对比。图 3(a)和(b)展示了 $Re = 20$ 和 100 时 YOSAR 的混合单元出口处沿截面垂直分布的浓度以及浓度梯度。这些截面分别在沿微混合器长度方向 $x_1 = 8.5\text{ mm}$ 、 $x_2 = 18.5\text{ mm}$ 以及 $x_3 = 28.5\text{ mm}$ 处,垂直于微混合器流动方向。

当 $Re = 20$ 时, YOSAR 在第一个出口截面 x_1 上表现出较差的混合效率,因为流体刚进入通道,且流速较低,混合主要基于分子扩散过程。在截面 x_2 和 x_3 处,流体经过了多次分裂重组,在几何结构转弯处形成二次流,使混合质量得到改善。但由于流体流速较低,所以最终的混合效率仍较低。当雷诺数增加到 $Re = 100$ 时, YOSAR 在 x_2 和 x_3 截面处,混合得到了巨大的提升,特别是在 x_3 处,几乎已经接近于完全混合。这是由于在高雷诺数下,高流体流速产生高速二次流加剧混沌对流,从而实现很高的混合效率。

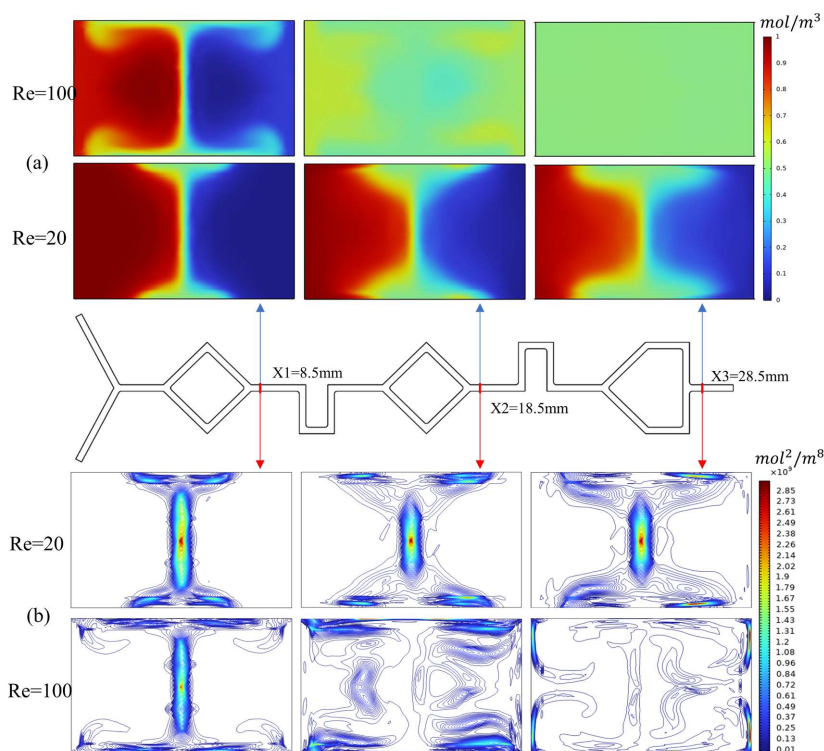


Figure 3. Comparison of concentration/concentration gradient distribution of the micro-mixer on three cutting surfaces. (a) Concentration; (b) Concentration gradient

图 3. 微型混合器在三个切割面上的浓度/浓度梯度分布比较。(a) 浓度; (b) 浓度梯度

为研究微混合器的混合性能,选择在不同雷诺数下计算微混合器的混合效率,混合效率和雷诺数的关系如图 4(a)所示。YOSAR 和 YSSAR 表现出不同的规律,对于 YOSAR 而言,其混合效率随雷诺数增加而增加,在 0.5~20 雷诺数范围内的混合效率较低,最高只有 40%。但是当雷诺数达到 40 的时候,其混合效率几乎是 $Re = 20$ 时的两倍,达到了 80%左右,在 $Re = 100$ 时, YOSAR 的混合效率为 99%,几乎接近于完全混合。高雷诺数意味着快的流体流动,随流体流速增大,流体在微通道内拐角处产生更强烈的二次流,对两相流体的扰动更强,使流体间接触面积加大,流体间相互作用加剧,所以其混合效率增加明显。对于 YSSAR,随雷诺数增加其混合效率几乎维持在 20%左右,因为直通结构很难引起混沌平

流，流体间的混合主要以分子扩散为主。

图 4(b)为雷诺数与压降关系图。从图中可以看出，YSSAR 微混合器压降随雷诺数增大而增大，且雷诺数与压力几乎呈线性相关，因为在直微通道内部仅存在扩散过程。而对于 YOSAR 微混合器，雷诺数与压力呈非线性关系，说明存在混沌平流增强了混合效果，当雷诺数在 0.5~20 范围内，压降较低，与 YOSAR 压降相差不大。然而，当雷诺数增加到 40~100，压降显著增加。

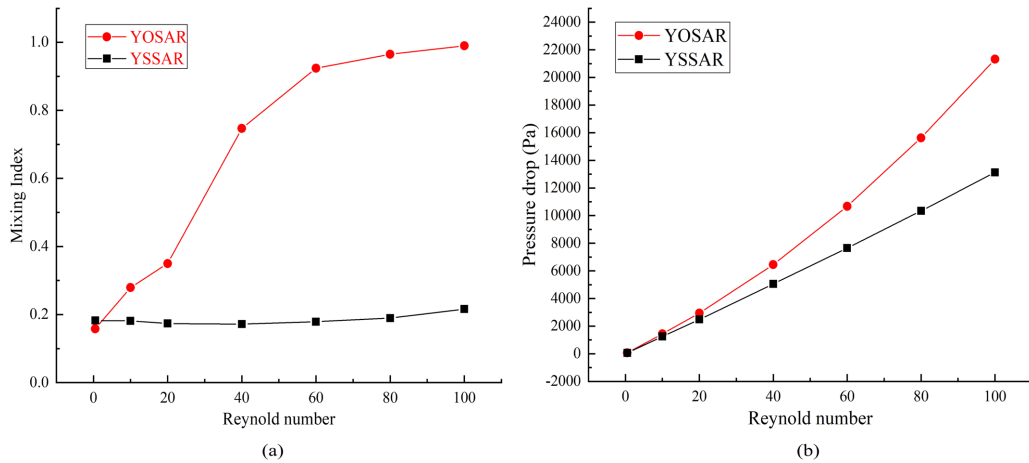


Figure 4. (a) Mixing index vs. Reynolds number for optimized micromixer; (b) Pressure drop vs. Reynolds number
图 4. (a) 优化后微混合器混合指数与雷诺数关系; (b) 压降与雷诺数关系

为了考察 YOSAR 中每个分裂重组单元对混合的增强作用，沿通道水平长度间隔 5 mm 计算每个单元的入口和出口处混合指数，其结果如图 5(a)所示。相邻截面的混合指数随雷诺数增加而增大，其中最大增量发生在第二截面与第三截面间，特别是 Re 大于 40 后，第三截面的混合指数是第二截面的 3~4 倍。对于混合单元对混合的增强作用，第一个分裂重组单元增强作用最大，最后一个分裂重组单元增强作用最弱。图 5(b)中，在各雷诺数下，混合指数与通道水平长度几乎线性相关，说明 YSSAR 流体的混合仅仅依靠分子间扩散进行的。

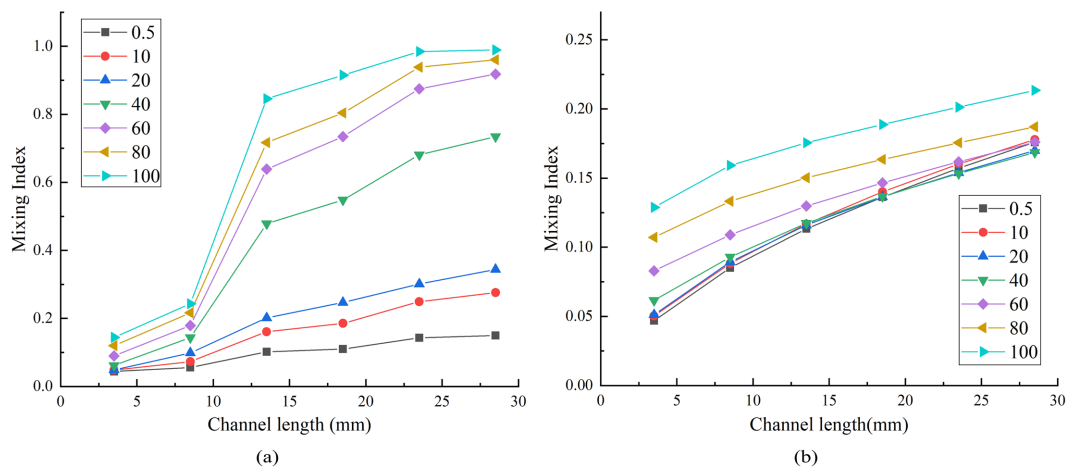


Figure 5. Mixing index of the micromixer versus channel horizontal length. (a) YOSAR; (b) YSSAR
图 5. 微混合器的混合指数与通道水平长度关系。(a) YOSAR; (b) YSSAR

为分析各分裂重组单元对混合作用的增强作用，对低中高三种雷诺数下各混合单元入口和出口截面

的浓度分布以及速度矢量进行分析。如图 6 所示，在低雷诺数 $Re = 10$ 情况下，各截面内速度矢量显示并无明显旋转，流动多为层流。混合过程主要依赖分子扩散，所以混合指数均不高。

在中雷诺数 $Re = 40$ 情况，流体在各混合单元出口截面 x_2 、 x_4 、 x_6 处，形成了沿逆时针和顺时针旋转的两对涡旋。在第二和第三混合单元入口截面 x_3 、 x_5 处，流体分别形成了向右以及向左的有序速度矢量。这表明，随着雷诺数增加，流体间惯性力也相应增加，从而提高了混沌平流效果，促进了流体混合。

当雷诺数增加到 80 时，混合指数得到了进一步的提升。流体从 Y 形通道进入后在 x_1 处就形成了沿逆时针和顺时针旋转的涡旋。紧接着流体经过第一混合单元后，速度矢量的旋转变得更加剧烈。流体经过向右凸的通道后，在截面 x_3 处形成了旋转中心位于截面左半边的一对沿逆时针和顺时针旋转的涡旋。流体经过第二以及第三混合单元后，在出口截面处的速度矢量与中雷诺数相似，只是此处的涡旋更加剧烈，两对涡旋的旋转中心更加靠近边界，表明流体间的相互作用加剧，同时混合指数也逐渐提高。

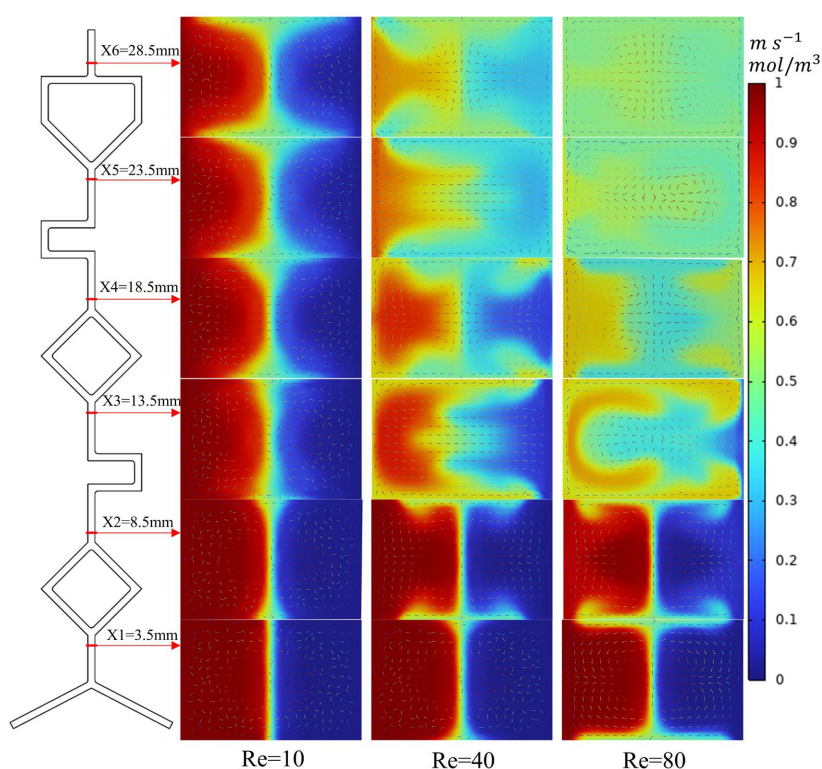


Figure 6. Concentration/velocity vector distribution of the micromixer over six cross-sections

图 6. 微型混合器在六个截面上的浓度/速度矢量分布

4. 实验研究

4.1. 实验设置和步骤

为了验证本研究提出的微混合器的混合性能，选择黄色和蓝色墨水作为工作流体进行实验，实验装置如图 7 所示。实验装置由双通道注射泵、注射器、工业相机、电脑以及微混合器芯片组成。注射泵(购于中国 INNOFLUID 公司)流量范围为 0.001 ul/min~127 ul/min, 用于推动注射器使流体进入微混合器通道。工业相机置于微混合器芯片上方，用于在实验过程中捕获图像。电脑与工业相机通过 USB 连接，用于实时显示实验过程图像。搭建好实验平台后，根据表 1 中的不同流量研究微混合器在不同雷诺数下的混合性能。注射泵将两种流体等流量泵送至芯片的两入口，工业相机拍摄芯片不同混合单元处的混合图像。

利用 MATLAB 图像处理工具对不同雷诺数下的混合实验图像进行分析。首先将图像转换为 RGB 格式并
 从其像素中提取数据，将图像的强度归一化，然后从其均值计算标准差，最后，根据公式(9)计算出口处
 混合指数[38]。

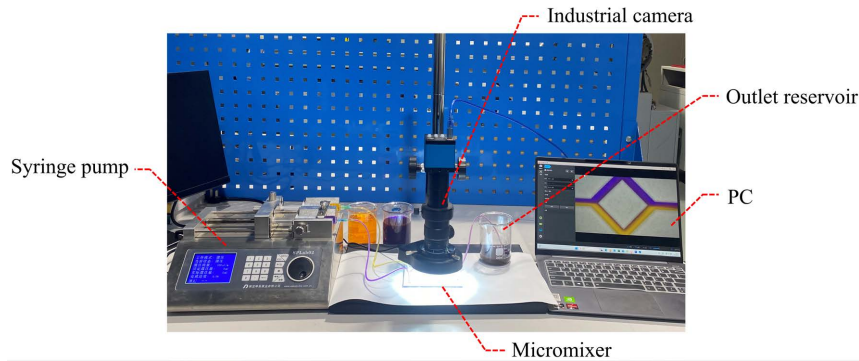


Figure 7. Mixed experimental setup diagram
 图 7. 混合实验装置图

4.2. 实验结果与讨论

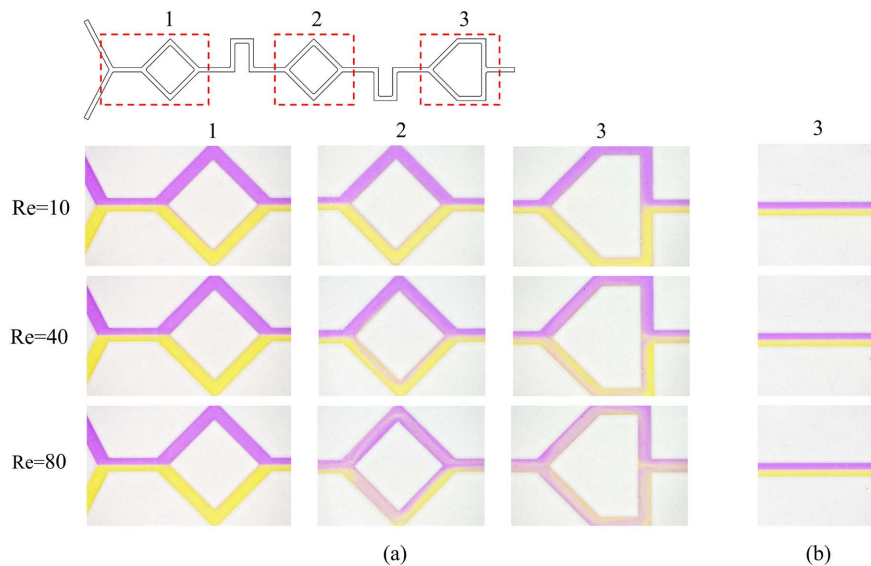


Figure 8. Comparison of mixing performance at different positions of the micromixer. (a) YOSAR; (b) YSSAR
 图 8. 微混合器不同位置的混合性能对比。(a) YOSAR; (b) YSSAR

图 8(a)和(b)分别展示了 YOSAR 和 YSSAR 在 $R_e = 10$ 、40、80 条件下的三个不同位置的实验混合图像。比较三个位置的实验结果，YOSAR 在每个混合单元后的混合效果都有所改善，且随雷诺数增加，微混合器表现出更好的混合性能。YSSAR 的混合效果在三个位置几乎不变。微混合器的混合性能在实验中表现出的变化规律与模拟结果一致。

图 9(a)为微混合器的实验与仿真混合指数对比图。从实验结果可以看出，YOSAR 混合指数随雷诺数增加而增加，在 $R_e = 100$ 时，混合效率达到 99%。而 YSSAR 混合指数保持在 20%左右。从折线图中可以看出，实验结果与仿真结果相差不大，但仍存在一定的偏差，其原因是在实际实验中，混合通道表面的粗糙度增加了流体的流动阻力，并且使用顶视图图像进行混合指数计算。然而，在模拟和实验结果中，

微混合器的混合效果的总体趋势是相同的。图 9(b)为微混合器出口处在不同雷诺数下的混合效果图像。与 YSSAR 相比, YOSAR 表现出优异的混合性能, 随着雷诺数的增加, 混合单元内的混合效果增强。微混合器中的不同混合单元以及方形弯道使流体产生二次流, 增强了流体混合。因此, 本文通过实验验证了仿真预测的结果。

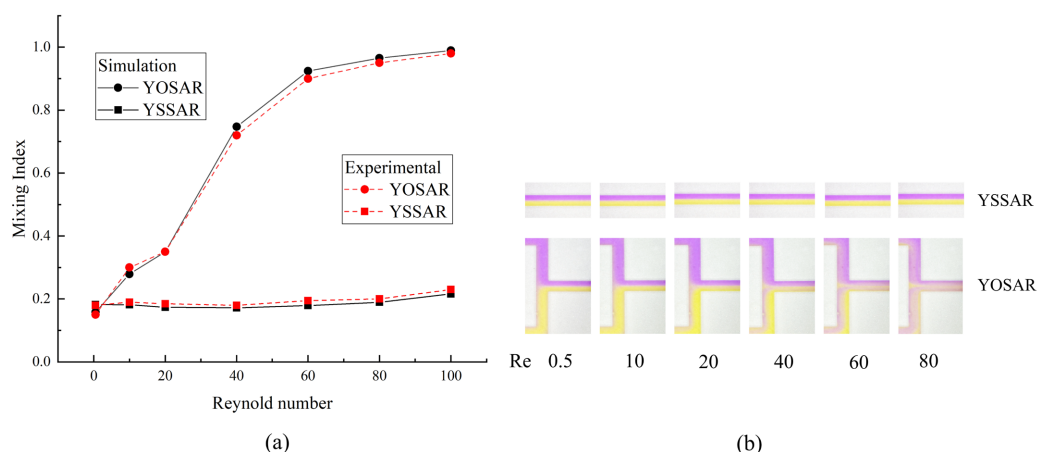


Figure 9. (a) Comparison of experimental and simulation results of micromixer mixing index at different Reynolds numbers; (b) Experimental mixing images near the micromixer outlet at different Reynolds numbers
图 9. (a) 不同雷诺数下微混合器混合指数的实验与模拟结果对比; (b) 不同雷诺数下微混合器出口附近的实验混合图像

5. 结论

本研究的目的是探究多样性的混合单元组合, 以形成一个具有高混合效率的微混合器。采用 3 种分离和重组单元, 菱形、圆形、方形, 它们两两组合形成 9 种混合单元, 将这些混合单元放入带有 3 个混合区域的微混合器中, 并使用田口法进行试验研究。通过对信噪比图进行分析, 表明菱形结构对微混合器的混合性能提升最大, 而圆形结构最弱。对最佳组合的分离重组微混合器(YOSAR)在雷诺数为 0.5~100 范围内的混合现象、混合效率、压力损失等进行分析。在低雷诺数时, 混合主要通过扩散作用进行, 此时混合效率以及压降较低。在高雷诺数下, YOSAR 微通道内的各拐角处会发生二次流, 形成涡旋, 这极大地促进了混合但是同时也会带来较高的压降。当雷诺数达到 60~100 时, 微混合器的混合指数达到 90~99%。实验采用红、黄两种油墨作为流体, 用于观察验证混合效果。实验结果表明, 随着雷诺数的增加, 混合指数与模拟结果具有良好的 consistency。

参考文献

- [1] Chin, C.D., Linder, V. and Sia, S.K. (2007) Lab-on-a-Chip Devices for Global Health: Past Studies and future Opportunities. *Lab on a Chip*, **7**, 41-57. <https://doi.org/10.1039/B611455E>
- [2] Ma, J., Wu, Y., Liu, Y., et al. (2021) Cell-Sorting Centrifugal Microfluidic Chip with a Flow Rectifier. *Lab on a Chip*, **21**, 2129-2141. <https://doi.org/10.1039/D1LC00217A>
- [3] Liu, T., Yin, Y., Yang, Y., et al. (2022) Layer-by-Layer Engineered All-Liquid Microfluidic Chips for Enzyme Immobilization. *Advanced Materials*, **34**, Article ID: 2105386. <https://doi.org/10.1002/adma.202105386>
- [4] Sun, J., Ren, Y., Ji, J., et al. (2021) A Novel Concentration Gradient Microfluidic Chip for High-Throughput Antibiotic Susceptibility Testing of Bacteria. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, **413**, 1127-1136. <https://doi.org/10.1007/s00216-020-03076-8>
- [5] Yang, B., Wang, P., Li, Z., et al. (2022) A Continuous Flow PCR Array Microfluidic Chip Applied for Simultaneous Amplification of Target Genes of Periodontal Pathogens. *Lab on a Chip*, **22**, 733-737.

- <https://doi.org/10.1039/D1LC00814E>
- [6] Fu, G., Zhou, W. and Li, X.J. (2020) Remotely Tunable Microfluidic Platform Driven by Nanomaterial-Mediated On-Demand Photothermal Pumping. *Lab on a Chip*, **20**, 2218-2227. <https://doi.org/10.1039/D0LC00317D>
- [7] Wei, Z., Fan, P., Jiao, Y., *et al.* (2020) Integrated Microfluidic Chip for On-Line Proteome Analysis with Combination of Denaturing and Rapid Digestion of Protein. *Analytica Chimica Acta*, **1102**, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2020.01.025>
- [8] Li, Z., Zhang, B., Dang, D., *et al.* (2022) A Review of Microfluidic-Based Mixing Methods. *Sensors and Actuators A: Physical*, **2022**, Article ID: 113757. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113757>
- [9] Angelopoulou, M., Petrou, P.S., Makarona, E., *et al.* (2018) Ultrafast Multiplexed-Allergen Detection through Advanced Fluidic Design and Monolithic Interferometric Silicon Chips. *Analytical Chemistry*, **90**, 9559-9567. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.8b02321>
- [10] Bayareh, M., Ashani, M.N. and Usefian, A. (2020) Active and Passive Micromixers: A Comprehensive Review. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, **147**, Article ID: 107771. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.107771>
- [11] Liu, G., Wang, M., Li, P., *et al.* (2022) A Micromixer Driven by Two Valveless Piezoelectric Pumps with Multi-Stage Mixing Characteristics. *Sensors and Actuators A: Physical*, **333**, Article ID: 113225. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.113225>
- [12] Nazari, M., Rashidi, S. and Esfahani, J.A. (2019) Mixing Process and Mass Transfer in a Novel Design of Induced-Charge Electrokinetic Micromixer with a Conductive Mixing-Chamber. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **108**, Article ID: 104293. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104293>
- [13] Kumar, C., Hejazian, M., From, C., *et al.* (2019) Modeling of Mass Transfer Enhancement in a Magnetofluidic Micromixer. *Physics of Fluids*, **31**, Article ID: 063603. <https://doi.org/10.1063/1.5093498>
- [14] Huang, P.H., Xie, Y., Ahmed, D., *et al.* (2013) An Acoustofluidic Micromixer Based on Oscillating Sidewall Sharp-Edges. *Lab on a Chip*, **13**, 3847-3852. <https://doi.org/10.1039/c3lc50568e>
- [15] Park, S., Chuang, H.S. and Kwon, J.S. (2021) Numerical Study and Taguchi Optimization of Fluid Mixing by a Microheater-Modulated Alternating Current Electrothermal Flow in a Y-Shape Microchannel. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **329**, Article ID: 129242. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.129242>
- [16] Chen, X. and Li, T. (2017) A Novel Passive Micromixer Designed by Applying an Optimization Algorithm to the Zig-zag Microchannel. *Chemical Engineering Journal*, **313**, 1406-1414. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.11.052>
- [17] Liu, C., Li, Y. and Liu, B.F. (2019) Micromixers and Their Applications in Kinetic Analysis of Biochemical Reactions. *Talanta*, **205**, Article ID: 120136. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.120136>
- [18] Chen, X. and Zhao, Z. (2017) Numerical Investigation on Layout Optimization of Obstacles in a Three-Dimensional Passive Micromixer. *Analytica Chimica Acta*, **964**, 142-149. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2017.01.066>
- [19] Dadvand, A., Hosseini, S., Aghebatandish, S., *et al.* (2019) Enhancement of Heat and Mass Transfer in a Microchannel via Passive Oscillation of a Flexible Vortex Generator. *Chemical Engineering Science*, **207**, 556-580. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.06.045>
- [20] Hossain, S., Husain, A. and Kim, K.Y. (2010) Shape Optimization of a Micromixer with Staggered-Herringbone Grooves Patterned on Opposite Walls. *Chemical Engineering Journal*, **162**, 730-737. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.05.056>
- [21] Wangikar, S.S., Patowari, P.K. and Misra, R.D. (2018) Numerical and Experimental Investigations on the Performance of a Serpentine Microchannel with Semicircular Obstacles. *Microsystem Technologies*, **24**, 3307-3320. <https://doi.org/10.1007/s00542-018-3799-0>
- [22] Kim, K., Shah, I., Ali, M., *et al.* (2020) Experimental and Numerical Analysis of Three Y-Shaped Split and Recombination Micromixers Based on Cantor Fractal Structures. *Microsystem Technologies*, **26**, 1783-1796. <https://doi.org/10.1007/s00542-019-04724-5>
- [23] Gidde, R.R., Wangikar, S.S., Pawar, P.M., *et al.* (2022) A Comparative Study: Conventional and Modified Serpentine Micromixers. *Chemical Product and Process Modeling*, **18**, 521-539. <https://doi.org/10.1515/cppm-2022-0022>
- [24] Ansari, M.A. and Kim, K.Y. (2010) Mixing Performance of Unbalanced Split and Recombine Micromixers with Circular and Rhombic Sub-Channels. *Chemical Engineering Journal*, **162**, 760-767. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.05.068>
- [25] Chen, X. and Shen, J. (2017) Simulation and Experimental Analysis of a SAR Micromixer with F-Shape Mixing Units. *Analytical Methods*, **9**, 1885-1890. <https://doi.org/10.1039/C7AY00022G>
- [26] Shah, I., Kim, S.W., Kim, K., *et al.* (2019) Experimental and Numerical Analysis of Y-Shaped Split and Recombination Micro-Mixer with Different Mixing Units. *Chemical Engineering Journal*, **358**, 691-706.

- <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.045>
- [27] Viktorov, V. and Nimafar, M. (2013) A Novel Generation of 3D SAR-Based Passive Micromixer: Efficient Mixing and Low Pressure Drop at a Low Reynolds Number. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **23**, Article ID: 055023. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/23/5/055023>
- [28] Afzal, A. and Kim, K.Y. (2012) Passive Split and Recombination Micromixer with Convergent-Divergent Walls. *Chemical Engineering Journal*, **203**, 182-192. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.06.111>
- [29] Mollajan, M., Razavi Bazaz, S. and AboueiMehrizi, A. (2018) A Thoroughgoing Design of a Rapid-Cycle Microfluidic Droplet-Based PCR Device to Amplify Rare DNA Strands. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, **11**, 21-29. <https://doi.org/10.29252/jafm.11.01.28110>
- [30] Chen, X. and Shen, J. (2017) Numerical and Experimental Investigation on Splitting-and-Recombination Micromixer with E-Shape Mixing Units. *Microsystem Technologies*, **23**, 4671-4677. <https://doi.org/10.1007/s00542-016-3208-5>
- [31] Lee, C.Y., Wang, W.T., Liu, C.C., et al. (2016) Passive Mixers in Microfluidic Systems: A Review. *Chemical Engineering Journal*, **288**, 146-160. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.10.122>
- [32] Hsiao, K.Y., Wu, C.Y. and Huang, Y.T. (2014) Fluid Mixing in a Microchannel with Longitudinal Vortex Generators. *Chemical Engineering Journal*, **235**, 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.010>
- [33] Xiong, S. and Chen, X. (2021) Simulation and Experimental Research of an Effective SAR Multilayer Interlaced Micromixer Based on Koch Fractal Geometry. *Microfluidics and Nanofluidics*, **25**, Article No. 92. <https://doi.org/10.1007/s10404-021-02495-y>
- [34] Liu, G., Wang, M., Dong, L., et al. (2022) A Novel Design for Split-and-Recombine Micromixer with Double-Layer Y-Shaped Mixing Units. *Sensors and Actuators A: Physical*, **341**, Article ID: 113569. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113569>
- [35] Li, J., Xia, G. and Li, Y. (2013) Numerical and Experimental Analyses of Planar Asymmetric Split-and-Recombine Micromixer with Dislocation Sub-Channels. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, **88**, 1757-1765. <https://doi.org/10.1002/jctb.4044>
- [36] Husain, A., Khan, F.A., Huda, N., et al. (2018) Mixing Performance of Split-and-Recombine Micromixer with Offset Inlets. *Microsystem Technologies*, **24**, 1511-1523. <https://doi.org/10.1007/s00542-017-3516-4>
- [37] Lashkaripour, A., Rodriguez, C., Ortiz, L., et al. (2019) Performance Tuning of Microfluidic Flow-Focusing Droplet Generators. *Lab on a Chip*, **19**, 1041-1053. <https://doi.org/10.1039/C8LC01253A>
- [38] Ansari, M.A., Kim, K.Y., Anwar, K., et al. (2010) A Novel Passive Micromixer Based on Unbalanced Splits and Collisions of Fluid Streams. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **20**, Article ID: 055007. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/20/5/055007>