

文章编号 1004-924X(2015)10-2877-10

内置周期挡板的 T-型微混合器

何秀华, 颜 杰, 王 岩

(江苏大学 能源与动力工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要:设计了一种通道内布置周期挡板结构的高效 T-型微混合器来提高微流控系统的混合效率。该微混合器结构简单, 周期布置的挡板可以有效地缩短流体混合所需的通道长度和时间, 混合效率高。安排了正交实验组, 利用计算流体力学软件 ANSYS CFX 研究了通道结构参数对混合效果的影响。采用静态田口分析法对数值模拟结果进行分析。结果表明: 通道结构参数对混合效果的相对影响程度排列如下: 挡板攻角(θ) > 通道高度(H) > 挡板宽度(L) > 相邻混合单元之间距离(D)。根据结构参数对混合效果的影响程度, 得出研究参数范围内的最优组合为: $\theta=75^\circ$, $H=0.4W_m$, $L=0.7W_m$, $D=0.6W_m$ (这里 W_m 为通道宽度, 等于 $200\ \mu\text{m}$)。实验显示, 结构参数符合最优参数组合的微混合器的混合效果提升显著, 雷诺数 $Re=54$ 时即可实现完全混合 (混合指标 $M>95\%$)。文中研究了通道结构对进出口压降的影响, 结果显示, 攻角 θ 对进出口压降的影响趋势在不同雷诺数下相同, 参数 H, D 亦如此。

关键词:微流控; 微混合器; 田口方法; 微混合; 混合效率; 正交试验设计

中图分类号: TP271.3; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152310.2877

T-shaped micromixer with periodic baffles

HE Xiu-hua, YAN Jie, WANG Yan

(School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

* Corresponding author, E-mail: xiuhua.he@ujs.edu.cn

Abstract: An effective passive micromixer based on the T-shaped channel with periodic baffles mounted on the bottom of main channel was designed to enhance the mixing performance of the microfluidic system. Instead of complex spacial geometries, simple periodic geometric features were used to decrease the required mixing distances and time and to obtain remarkable mixing efficiency. With an orthogonal array, the effects of geometrical parameters on the mixing performance were studied by numerical simulations using commercial computational fluid dynamics code ANSYS CFX. A static Taguchi analysis was taken to evaluate the relative effectiveness of the geometrical parameters. The analysis results indicate that the relative effectiveness can be ranked as: the angle of attack (θ) > microchannel height (H) > baffle width (L) > baffle spacing (D). Based on the relative effectiveness of the geometrical parameters, an optimal parameter group selected are $\theta=75^\circ$, $H=0.4W_m$, $L=0.7W_m$, $D=0.6W_m$ (here W_m is the channel width with a value of $200\ \mu\text{m}$). It demonstrates that the mixing performance of the micromixer with optimal parameter group is improved obviously, and a complete mixing (mixing index M is better than 95%) can be obtained when the Reynolds number Re is 54. The char-

收稿日期: 2015-04-17; 修订日期: 2015-06-05.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51276082); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

acteristics of the pressure drop depending on the geometrical parameters are also investigated, and the result shows that the selected θ affects the pressure drop in a similar way under different Reynolds numbers, so does the selected H and D .

Key words: microfluidics; micromixer; Taguchi method; micromixing; mixing efficiency; orthogonal experiment design

1 引言

随着微细加工技术的快速发展,微流控系统特别是微泵,微阀,微混合器的研究取得了长足的进步,微流控系统在微机电系统(Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS)和微全分析系统(Micro-total Analysis Systems, MAS)等众多领域具有广阔的应用前景。高效快速的混合是微流控设备的重要环节,微混合器作为微流控系统的关键组成部分,对微流控系统整体功能的实现具有直接影响,在生化分析和化学合成等方面得到了广泛应用^[1-5]。

根据有无外加动力源,微混合器可以分为主动式微混合器和被动式微混合器两大类^[6-8]。主动式微混合器依靠附加的结构或者超声波,电场力,磁力,电渗流,电泳等外加动力来搅动流体促进混合。主动式微混合器的混合效果较好,但结构复杂,加工困难,不易于操作和维护,且不利于集成^[9-13]。因此,微混合器的研究更倾向于不需要额外设备,易于加工,经济且易于集成的被动式微混合器。被动式微混合器主要依赖分子扩散作用或混沌对流来实现流体混合。根据被动式微混合器的主要混合机理,被动式微混合器可以进一步分为层迭式,分离重组式,混沌对流式和注入式等^[14-17]。

流道内放置障碍或流道壁面上构造挡板以产生混沌流动是提高混合器效果的有效手段。Bertsch 等人^[18]研究发现宏观尺度的混合器结构同样适用于微尺度混合器,为微混合器的结构设计提供了重要思路。Stroock 等人^[19]研究证明底部设有沟槽的 T-型流道内在很低的雷诺数下也可以产生混沌对流混合。Ansari 等人^[20]设计了一种流道底部有交错人字形凹槽的被动式微混合器,利用凹槽产生横向流动,增加流体间的接触面积,有效提高了混合效果。Ali 等^[21]在 T-型流道内布置了正方形挡板扰动流体,数值模拟和实验

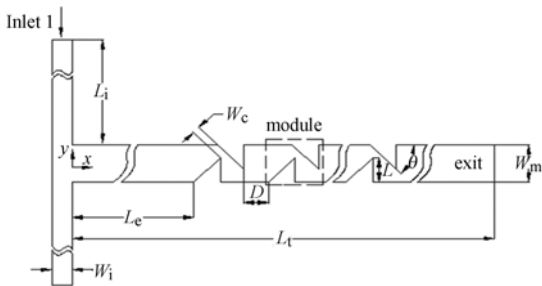
结果表明这种结构有较好的混合效果同时压降相对较低。Kai-Yo Hsiao 等人^[22]设计了一种在 T-型流道内布置成对矩形小翼的被动式微混合器,矩形小翼对相当于布置在流道内的涡流发生器,产生纵向漩涡,诱发混沌对流来促进混合的进行,其混合效率远大于普通的 T-型微混合器。Yu-qiang Fang 等人^[23]提出了在流道中布置周期挡板的微混合器,由于周期布置的挡板对流动产生强烈扰动,受流道结构的限制,混合介质接触面被不断的拉伸、剪切、折叠,流道内形成了混沌对流,从而大大提高了对流扩散的强度,促进了介质的混合。

上述流道内置阻块的微混合器设计方案混合效率较高,但是往往需要较宽和较长的流道,体积一般较大,难以集成在微流控系统有限的体积内;同时往往会出现复杂的空间结构,阻碍了加工精度的改善。较大的体积,较高的输入压力,加工方面的困难,给该类微混合器的封装和集成带来了很大挑战,限制了这一类微混合器的应用前景。为此,本文提出了一种新型的流道内布置周期性三角形挡板的平面 T-型微混合器,该微混合器流道结构都由直线和平面构成,避免了曲线和曲面的出现,而且挡板布置在流道壁面上,给加工带来很大方便,保证了足够的加工精度,较短的流道也有利于集成在微流控芯片内。数值模拟结果表明,相对于普通 T-型流道,新型流道的混合效果得到了显著提升。针对模拟结果采用田口方法研究几何参数对混合性能的影响,可快速准确地找出对微混合器性能影响较大的几何参数,从而提高结构优化的效率,缩短研发周期,降低研究成本^[24]。根据田口方法的分析结果,得到了最优结构参数组。

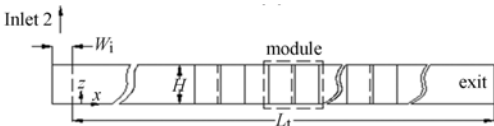
2 微混合器设计

微流道如图 1 所示,微混合器结构是在 T-型直流道内布置周期性三角形挡板形成的,2 个三

角形挡板构成一个混合单元。所有的参数都以流道宽度 W_m 来表示, $W_m = 200 \mu\text{m}$ 。进口流道的宽度 $W_i = 0.5W_m$ 。选择挡板宽度(L),流道高度(H),挡板布置攻角(θ),相邻混合单元之间的距离(D)作为影响因子进行研究。根据前人研究经验确定了影响因子的取值范围以及相关结构参数,主流道进口到第一个混合单元间的距离 $L_e = 5W_m$,主流道的总长 $L_t = 30W_m$,进口到主流道的长度 $L_i = 5W_m$,保持相邻挡板间的最小距离 $W_c = 40 \mu\text{m}$ 不变,混合单元数 $N_m = 8$ 。保持相邻挡板间最小距离 $W_c = 40 \mu\text{m}$ 不变是为了便于比较相同特征雷诺数下,不同结构参数对混合器性能的影响。



(a) 俯视图
(a) Top view



(b) 侧视图
(b) side view

图 1 内置周期挡板结构的微流道示意图

Fig. 1 Schematic diagram of microchannel with periodic baffles

表 1 几何参数取值

Tab. 1 Values of geometrical parameters

序号	参数 因子	水平		
		1	2	3
a	θ	45°	60°	75°
b	L	$0.6W_m$	$0.65W_m$	$0.7W_m$
c	D	$0.7W_m$	$0.6W_m$	$0.5W_m$
d	H	$0.4W_m$	$0.5W_m$	$0.6W_m$

依据田口方法设计正交试验组。田口方法提出了信噪比(SNR)的概念,通过参数设计,正交

实验,找到信噪比大的因素和水平的最佳组合,此时所得结构受外界干扰波动小,稳定性最好,能最大程度满足设计要求。

4 个参数因子的 3 个水平的数值如表 1 所示。采用的 $L_9(3^4)$ 正交阵列如表 2 所示,采用正交试验组,确定 4 因子 3 水平最优参量所需的数值模拟次数从 81 次减少到仅需 9 次。

表 2 $L_9(3^4)$ 正交阵列

Tab. 2 $L_9(3^4)$ orthogonal array

序号	参数组合			
	a	b	c	d
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

3 数值模拟条件设定

采用计算流体动力学软件 CFX 对微混合器内的流场形态和混合情况进行数值模拟。数值模型的控制方程包括: N-S 方程,连续性方程,动量方程和等温稳态不可压缩流体对流扩散方程。采用有限体积法模拟三维稳态微混合器, SIMPLEC 算法耦合压力和速度,空间离散采用二阶迎风格式。

数值模拟中注入微混合器 2 个进口的流体分别定义为质量分数为 1 的去离子水 A 和质量分数为 0 的去离子水 B。假设进口流体的物理性质相同,进口流速相同。取密度 $\rho = 1 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,动力黏度系数 $\nu = 9.7 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。两种混合介质不发生化学反应,可以忽略溶解热效应,无需引入能量方程。2 个进口设为统一入口速度边界条件,零压力出口。其它壁面设为无滑移边界条件。选择最小截面处流速作为特征流速计算雷诺数 $Re(Re = \rho v d \nu^{-1})$, ρ , ν 和 d 分别表示流体的密度,最小截面处的特征流速和水力直径,其中水力直径 $d = 4AP^{-1}$, A , P 分别表示特

征截面的面积和周长)。选择雷诺数 $Re=0.125, 0.5, 3, 9, 27, 54, 81$, 此雷诺数范围内, 流动形态包括了层流、涡旋流和席卷流。数值模拟中, 将上游和下游都包含在扩展后的计算域, 从而可以合理使用统一的入口边界条件和充分发展出口边界条件。

为了不同几何结构的微混合器效果, 定义混合程度指标 M :

$$M=1-\frac{\sigma}{\sigma_0}, \quad (1)$$

其中: ω_0 表示混合过程开始时组分的质量分数的方差, σ 表示截面上组分的质量分数的方差, 可分别表示为:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2, \quad (2)$$

$$\sigma_0^2 = \bar{c}_0(1-\bar{c}_0). \quad (3)$$

式中: n 表示截面上组分质量分数采样点的数量 (即网格节点数), c_i 表示采样点 i 上 A 溶液的质量分数, \bar{c} 表示截面上组分质量分数的期望值, $\bar{c}=0.5$ 。 \bar{c}_0 表示混合过程开始时截面上组分质量分数的期望值。 流道任意截面上混合指标 M 的值都可以根据上述公式进行计算。 M 的值介于 $0 \sim 1$ 之间, $M=1$ 表示已经完全混合, 反之 $M=0$ 表示混合没有进行。 以下讨论主要根据流道出口处混合指标 M 的值来判断微混合器的效果。

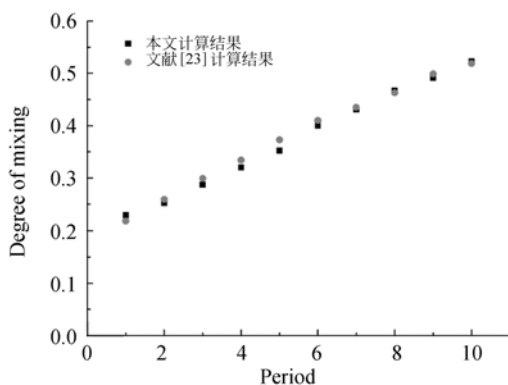


图 2 混合强度计算值与文献[23]计算值比较

Fig. 2 Comparison of calculated mixing indexes between this article and Ref[23].

首先进行网格无关性验证。采用六面体结构化网格对模型进行划分, 当计算网格的边长不超过 $5 \mu\text{m}$ 时, 数值模拟结果与实验结果吻合较好^[22], 因此, 在所有的数值模拟中的网格全部采用这一数量级的尺寸。采用分块耦合的方法进行

计算, 同时, 为了削弱数值扩散对数值模拟结果的影响, 对特定区域进行网格加密。当各变量的相对残差小于 10^{-6} 时, 认为计算结果已经收敛。

为了检验本文数值计算方法的有效性, 对 Yuqiang Fang 等人^[23]设计的被动式微混合器进行了数值模拟及混合强度计算, 并将计算结果与文献[23]中的计算结果进行比较, 文献[23]的数值计算结果与实验结果吻合良好, 可信度较高。对比情况如图 2 所示, 可以看出周期数分别为 1、3、4、5 时的相对误差较大, 分别为 5.0%、4.0%、4.2%、5.6%, 全都小于 10%, 在可接受范围内, 数值计算方法获得的结果与文献[23]中的计算结果保持了较好的一致性, 证明本文所采用的数值计算方法可行。

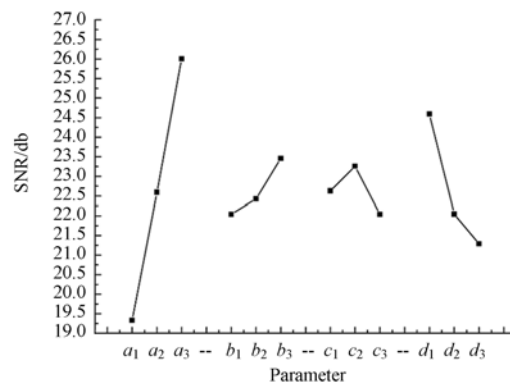


图 3 设计参数 (如表 1 所示) 对信噪比的影响

Fig. 3 Influence of design parameters (listed in Table 1) on signal to noise ratio

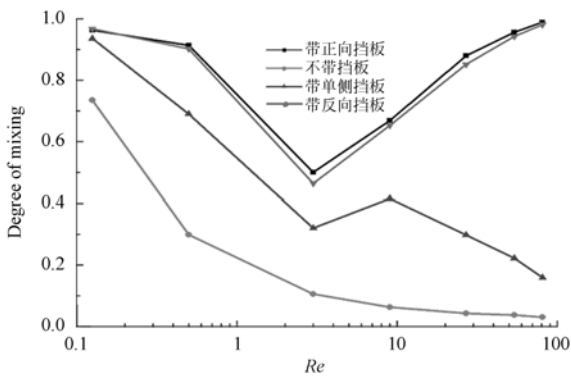
根据数值模拟计算结果, 由式 (2) 可以得到特定雷诺数下出口截面质量分数方差。运用“望大”特性评估选定范围内几何参数对混合效果的影响:

$$\eta = -10 \log \sigma^2, \quad (4)$$

可以得到每种结构的信噪比。混合指标 M 的值或信噪比 η 的值越大, 说明混合越均匀。雷诺数 $Re=54$ 时的信噪比 η 计算结果如图 3 所示。信噪比 η 的值越大, 说明该因子对目标参数的影响越大, 由图 3 可以直观看出几何参数对混合效果的相对影响大小排列顺序如下: 挡板攻角 (θ) > 流道高度 (H) > 挡板宽度 (L) > 相邻混合单元之间的距离 (D)。根据相对影响大小, 选定的最优结构设计参数为: a_3 ($\theta=75^\circ$), b_3 ($L=0.7W_m$), c_2 ($D=0.6W_m$), d_1 ($H=0.4W_m$)。

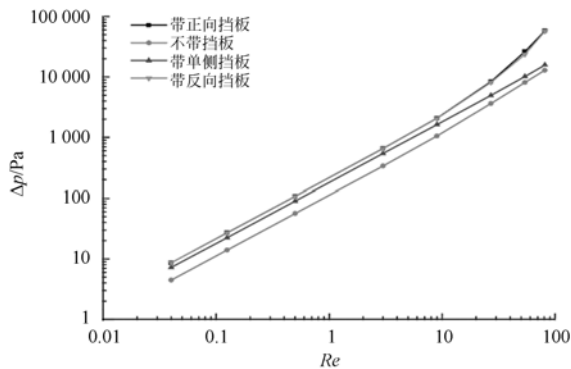
4 结果与讨论

为了获得更好的混合效果同时减少相应的能量消耗,在选择雷诺数范围内对比研究了 4 种结构相似的微通道混合情况,包括 T-型通道、带单侧挡板通道、带反向挡板通道和带正向挡板通道。4 种结构都是同一 T-型通道变化而来的。带正向挡板的通道即为新提出的结构(结构参数为 $\theta = 75^\circ$, $L = 0.7W_m$, $D = 0.6W_m$, $H = 0.4W_m$);带反向挡板的通道,除了挡板安放角度相反外,与带正向挡板的通道几何尺寸相同;带单侧挡板的通道就是把带正向挡板通道的一侧挡板去掉。通道内混合情况和压力降与雷诺数之间的对应关系分别如图 4 所示。



(a) 混合程度

(a) Degrees of mixing



(b) 压降

(b) Pressures applied

图 4 挡板结构对出口处的影响

Fig. 4 Influence of the baffles between inlets and exit of microchannel.

从图 4 中可以看出,当雷诺数较低时,通道内的流动主要以层流的方式进行,挡板对混合还无法产生实质的影响,此时的混合主要依靠分子扩散作用。随着雷诺数的增加,流体流速加快,在通道内的停留时间减少,影响了分子扩散,混合效果明显变差。然而,由于挡板间间隙的节流作用,流体接触面积增加,混合距离缩短,在一定程度上促进了混合的进行,内置挡板的微混合器的混合效果明显优于普通的 T-型微混合器。

随着雷诺数的增加,通道内的流动状态逐渐由层流向涡流和席卷流状态过渡。如图 5(a)所示,当 $Re=3$ 时,流动完全处于层流状态,混合主要依赖分子扩散作用和收缩段的节流作用,效果较差。当 $Re=9$ 时,如图 5(b)所示,三角形挡板后开始出现漩涡,由于流速较低,漩涡的强度和影响区域都较小,对混合的影响还较弱。

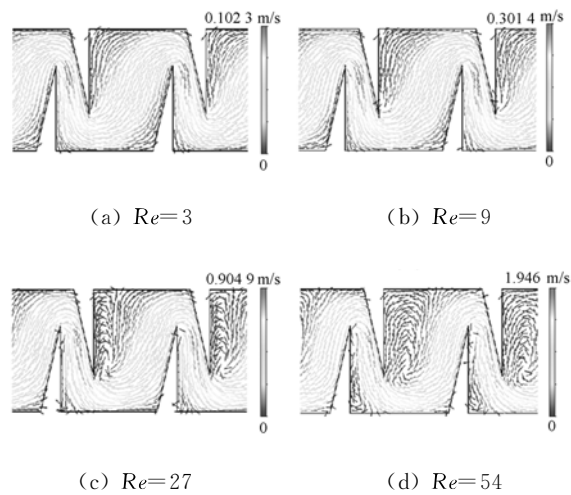


图 5 第 4,5 两个混合单元之间的中间平面上 ($z=40 \mu m$) 的流动状态 ($\theta = 75^\circ$, $L = 0.7W_m$, $D = 0.6W_m$, $H = 0.4W_m$)

Fig. 5 Flow patterns on the middle horizontal cross section ($z=40 \mu m$) between the forth and the fifth module ($\theta = 75^\circ$, $L = 0.7W_m$, $D = 0.6W_m$, $H = 0.4W_m$)

雷诺数增加到 $Re=27$ 时,如图 5(c)所示,挡板后的混合区域内已经可以观察到明显的漩涡流,此时漩涡的强度和影响区域都明显增大,逐渐成为影响混合的主导因素。同时还可以发现,挡板之间的扩散段出现了一个分离涡,虽然此时的分离涡还处于发展初期,但这预示着随着雷诺数的增加,混合区域产生了混沌对流。当雷诺数 $Re=54$ 时,如图 5(d)所示,随着流速的增加,挡板后

的混沌对流运动得到加强, 漩涡的能量增加, 对流动的扰动也越来越剧烈, 两种液体的接触面被不断的扭曲、拉伸、剪切和折叠, 混合介质充分接触, 接触面积大幅增加, 混合效果明显提高。

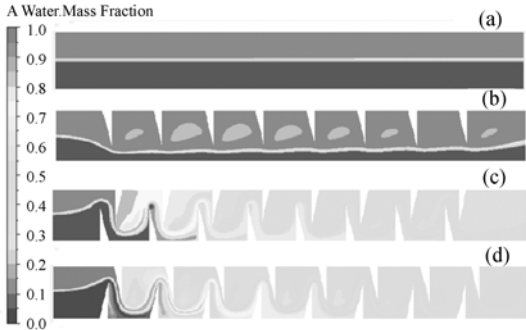


图 6 $x=800\sim 3\ 000\ \mu\text{m}$ 区域内中间平面 ($z=40\ \mu\text{m}$) 上溶液的质量分数分布, (a) T-型流动, (b) 带单侧挡板流动, (c) 带反向挡板流动, (d) 带正向挡板流动, $Re=54$ 。

Fig. 6 Simulated concentration distributions on middle horizontal cross section at $z=40\ \mu\text{m}$, $x=800\sim 3\ 000\ \mu\text{m}$ of the microchannel (a) without baffles, (b) with single baffles, (c) with baffles opposite direction and (d) baffles forward direction at $Re=54$.

如图 6 所示, 布置成对挡板的流道的混合效果比只在一侧布置挡板的流道好得多, 这是因为在混沌对流占主导地位的混合阶段, 成对的挡板后面产生的漩涡的强度更大, 对流动的扰动作用更强。在所需输入压力几乎相同的情况下, 带正向挡板的流道的混合效果优于带反向挡板的流道。雷诺数 $Re=54$ 时, 带正向挡板的微混合器的最后一组挡板后的流动可以视为已经完全混合 ($M>95\%$), 竖直截面上溶液的浓度分布几乎是均匀的, 如图 7 所示。

研究在雷诺数 $Re=54$ 时取得的最优参数组 ($\theta=75^\circ$, $L=0.7W_m$, $D=0.6W_m$, $H=0.4W_m$) 在其它雷诺数时是否依然是混合效果最优的。如图 3 所示, 挡板布置攻角 θ 是所分析的 4 个参数因子中对混合效果影响最大的因子, 在可选范围内取得最优值 $\theta=75^\circ$ 。由图 8(a) 可以看出, 当攻角 $\theta=75^\circ$ 时, 混合效果随雷诺数增加而逐渐减小的趋势持续到 $Re=3$; 当 $Re>3$ 以后, 随着雷诺数的增加, 混合效果逐渐变好。攻角 $\theta<75^\circ$ 时, 混合指标减小的趋势一直持续到 $Re=9$, 但随后的增

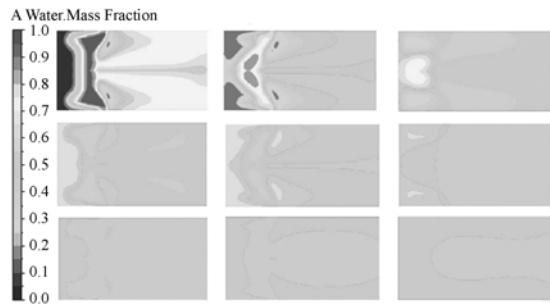
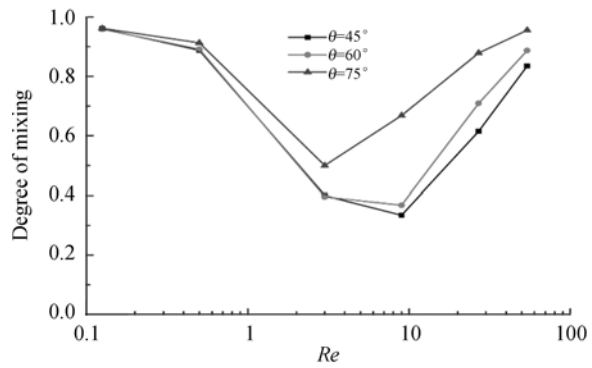


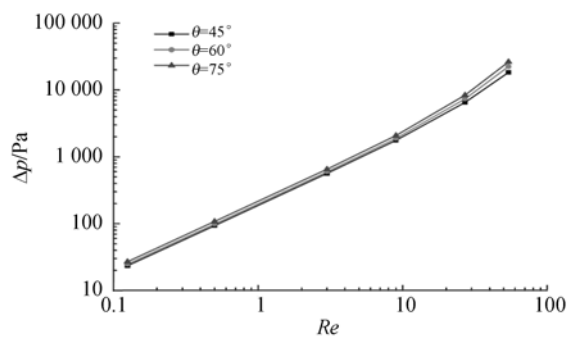
图 7 各对挡板后竖直截面及出口截面上溶液的质量分数分布数值模拟结果, ($\theta=75^\circ$, $L=0.7W_m$, $D=0.6W_m$, $H=0.4W_m$), $Re=54$ 。

Fig. 7 Simulated concentration distributions on the vertical cross section behind each module and at the exit ($\theta=75^\circ$, $L=0.7W_m$, $D=0.6W_m$, $H=0.4W_m$) at $Re=54$.



(a) 混合程度

(a) Degrees of mixing



(b) 压降

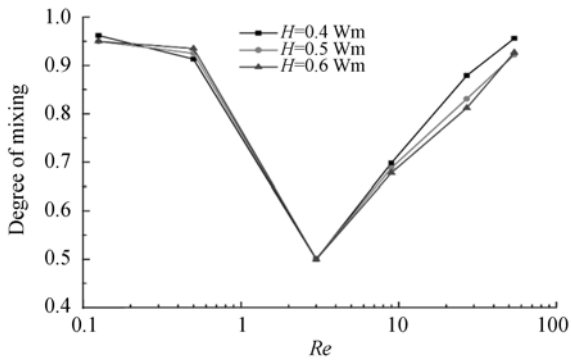
(b) Pressures applied

图 8 挡板攻角 θ 对出口处的影响 ($H=0.4W_m$, $L=0.7W_m$, $D=0.6W_m$)。

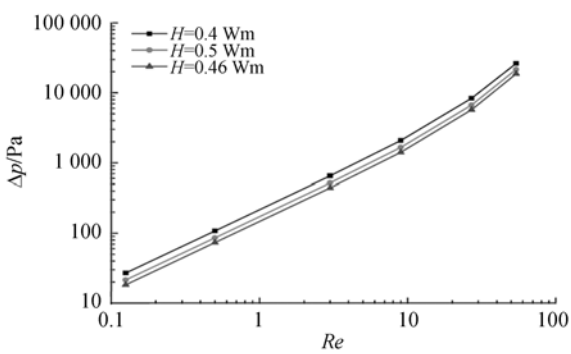
Fig. 8 Effect of the angle of attack between inlets and exit ($H=0.4W_m$, $L=0.7W_m$, $D=0.6W_m$).

长幅度较大。不同攻角的混合效果相差较大,攻角 $\theta=75^\circ$ 时混合指标 M 相对于较小的攻角得到了较大提升。这主要是因为攻角越大,收缩段的节流作用越强,流经此处的流体速度增加的越多,相同雷诺数下更容易在扩散段及挡板后产生漩涡,且漩涡强度和影响范围较大,对流动的强烈扰动显著提高混合效率。从图 8(b)中可以看出,不同攻角 θ 对进出口压降的影响趋势是相似的,如前分析可知,相同雷诺数 Re 下,攻角 θ 越大,流体流经扩散收缩段产生的漩涡强度越强,引起的压力损失也就越大。因此,为了获得更好的混合效果,在进口输入压力允许范围内,应尽量增大挡板布置时的攻角。

流道高度 H 是对混合效果影响较大的另一因素。如图 9(a)所示,在雷诺数较小($Re < 9$)时,



(a)混合程度
(a)Degrees of mixing

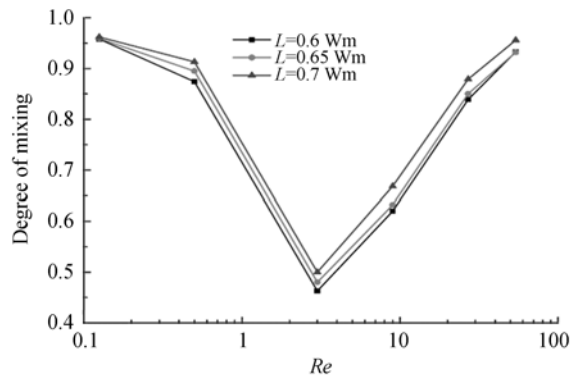


(b)压降
(b)Pressures applied

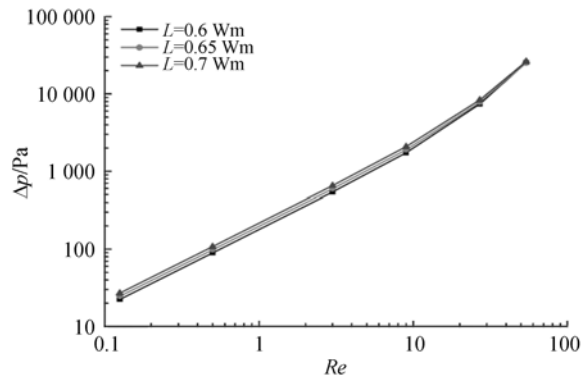
图 9 流道高度 H 对出口处的影响 ($\theta=75^\circ, L=0.7W_m, D=0.6W_m$)。

Fig. 9 Effect of the microchannel height between inlets and exit ($\theta=75^\circ, L=0.7W_m, D=0.6W_m$).

流道高度对混合效果的影响并不明显。随着雷诺数的增加,趋向于流道高度越小混合效果越好,这主要是因为较高雷诺数下,流道高度越小,流体经过收缩段的速度增量越大,越容易产生漩涡,混沌对流的产生促进了混合效果的提高。图 9(b)表明进出口压力降与流道高度的变化趋势相反且差异明显,随流道高度的增加,压降相应减小。



(a)混合程度
(a)Degrees of mixing



(b)压降
(b)Pressures applied

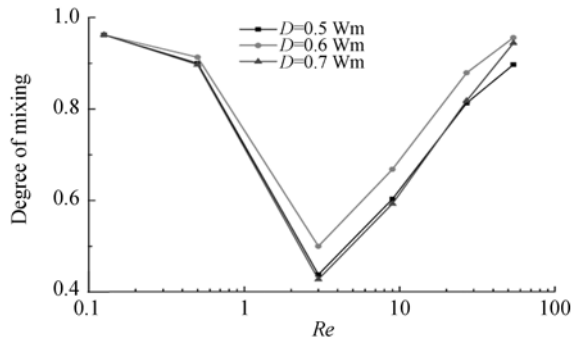
图 10 挡板宽度 L 对出口处的影响 ($\theta=75^\circ, D=0.6W_m, H=0.4W_m$)。

Fig. 10 Effect of the baffle width between inlets and exit ($\theta=75^\circ, D=0.6W_m, H=0.4W_m$).

图 10(a),(b)所示的是挡板宽度 L 对微混合器性能的影响,从图中可以看出,不同雷诺数下参数 L 对混合效果和压力降的影响趋势相同。随宽度 L 不同,流体流动所受的横向力不同。相同雷诺数下, L 越大,流动所受横向力越大,混合介质接触面受到的横向扰动作用就越强,导致一种介质被运输到另一种介质所处的区域,增加了接触面积,提高了混合效果。而且, L 越大,相邻挡

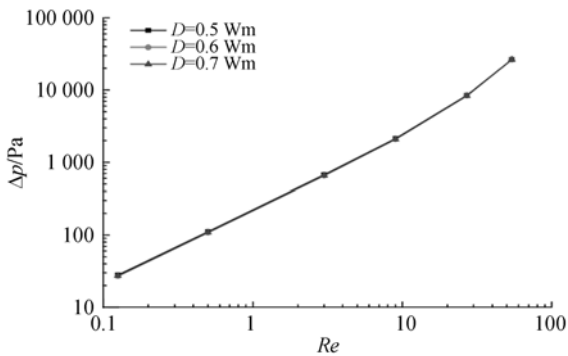
板间的收缩-扩散段越长,挡板后产生的漩涡越强,对混合效果影响越大。不同 L 对进出口压降的影响趋势相同, L 越大,压降越大。综合考虑混合指标和压降,条件允许情况下应尽量选择较大的 L 值。

图 11(a)表明混合单元之间的距离 D 对微通道内的混合效果的影响趋势相同。当雷诺数较小时,流道内还没有漩涡产生,混合单元之间的距离 D 对混合效果的影响较小。随着雷诺数的增加,流道内开始产生混沌对流,混合单元之间合适的距离有利于漩涡的产生和充分的发展,对混合效果的影响更明显, $Re=3\sim 54$ 时 $D=0.6W_m$ 对混合更为有利。由图 11(b)可以看出,不同参数 D 对微通道内的压降的影响非常小。



(a)混合程度

(a)Degrees of mixing



(b)压降

(b)Pressures applied

图 11 相邻混合单元之间距离的影响 ($H=0.4W_m$, $L=0.7W_m$, $\theta=75^\circ$)。

Fig. 11 Effect of the baffle spacing between inlets and exit ($H=0.4W_m$, $L=0.7W_m$, $\theta=75^\circ$).

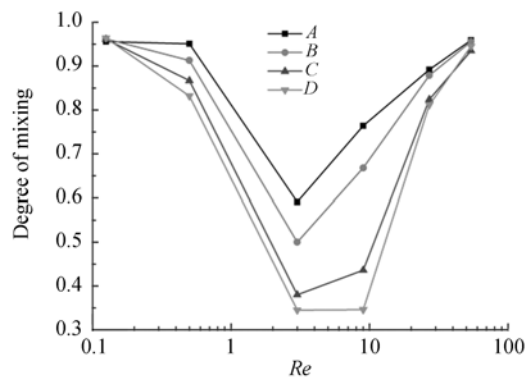


图 12 最窄截面宽度 W_c 对混合效果的影响 (A) $W_c=30\ \mu\text{m}$; (B) $W_c=40\ \mu\text{m}$; (C) $W_c=50\ \mu\text{m}$; (D) $W_c=60\ \mu\text{m}$ 。

Fig. 12 Effect of throat width W_c on the degree of mixing (A) $W_c=30\ \mu\text{m}$; (B) $W_c=40\ \mu\text{m}$; (C) $W_c=50\ \mu\text{m}$; (D) $W_c=60\ \mu\text{m}$

在研究各结构参数对微混合器性能的影响时,严格控制最窄截面处宽度 W_c 为 $40\ \mu\text{m}$,是为了便于比较相同雷诺数下流道结构对混合性能的影响。保持最优参数组 $\theta=75^\circ$, $H=0.4W_m$, $L=0.7W_m$, $D=0.6W_m$ 不变,分别改变最窄截面处宽度为 $W_c=30\ \mu\text{m}$, $50\ \mu\text{m}$, $60\ \mu\text{m}$,研究了最窄截面宽度对混合效果的影响。混合效果数值模拟如图 12 所示,可以看出,当雷诺数较小 ($Re<0.5$) 时,混合主要依靠分子扩散, W_c 的宽度对混合程度的影响较小。但是随着雷诺数的增加 ($Re=1\sim 27$),流速的增加导致流体在流道中的停留时间减少,扩散混合作用被大幅削弱,此时扩散收缩段成为混合进行的关键部位。 W_c 越小,相同特征流速下扩散收缩段产生的漩涡流动强度越大,对混合效果的提升越明显。在此雷诺数范围内减小 W_c 的值对混合效果的改善更显著。随着雷诺数的进一步增加 ($Re>30$),此阶段扩散收缩段产生的漩涡扰动足够强烈,混合趋向均匀, W_c 大小对混合效果的影响程度较弱,但对压降性能影响很大, W_c 越小进出口压降越大。

综上所述,适当减小最小截面处宽度 W_c 的值确实可以在一定程度上提高混合效果,但是 W_c 的减小增大了加工难度,同时大幅增加进出口压降 ($Re=54$ 时, $W_c=30\ \mu\text{m}$ 时的进出口压降 Δp 比 $W_c=40\ \mu\text{m}$ 时增加了 15.5% ,而混合程度 M 值只增加了 0.3%),减小 W_c 的值意义不大。

5 结 论

本文用数值模拟的方法研究了流道中周期布置成对三角形挡板结构的平面T-型微混合器的性能。采用田口方法设计正交实验组,根据正交实验组参数进行数值模拟,运用静态分析法分析数值模拟结果,通过计算混合指标 M 和信噪比来比较结构参数对混合效果的影响程度。当雷诺数足够大时,周期布置三角形挡板结构的平面T-型微混合器流道内产生了混沌对流,有效地提高了混合效果。数值模拟结果表明,无论在分子扩散机理占主导地位的阶段,还是混沌对流机理占主导地位的阶段,流道内布置周期挡板结构都可以

显著地提高混合效果。流道结构参数对混合效果的相对影响大小排列如下:挡板攻角(θ) $>$ 流道高度(H) $>$ 挡板宽度(L) $>$ 相邻混合单元之间的距离(D)。在所研究的参数范围内可以确定流道结构最优参数组合: $\theta = 75^\circ$, $L = 0.7W_m$, $D = 0.6W_m$, $H = 0.4W_m$, 结构参数满足最优参数组合的微混合器的混合效果优异,雷诺数超过50即可实现完全混合($M > 95\%$)。参数 θ 在不同的雷诺数下对进出口压降的影响趋势相同,参数 H, D 也是如此。一般来说,出口混合指标 M 与进出口压降是正相关的,混合效果越好,进出口压降越大。适当减小最小截面处宽度 W_c 的值确实可以在一定程度上提高混合效果,但是 W_c 的减小增大了加工难度,同时会大幅增加进出口压降。

参考文献:

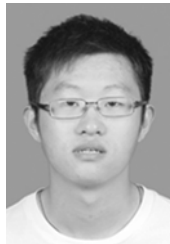
- [1] OTTINO J M, WIGGINS S. Designing optimal micromixers [J]. *Science*, 2004, 305: 485-486.
- [2] JEONG G S, CHUNG S, KIM CH-B, *et al.*. Applications of micromixing technology [J]. *Analyst*, 2010, 135: 460-473.
- [3] METTLER M S, STEFANIDIS G D, VALCHOS D G. Enhancing stability in parallel plate microreactor stacks for syngas production [J]. *Chemical Engineering Science*, 2011, 66: 1051-1059.
- [4] MATSUBARA H, HINO Y, TOKIZANE M, *et al.*. Microflow photo-radical chlorination of cycloalkanes [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 167: 567-571.
- [5] LI Y, XU F, LIU C, *et al.*. A novel microfluidic mixer based on dual-hydrodynamic focusing for interrogating the kinetics of DNA-protein interaction [J]. *Analyst*, 2013, 138: 4475-4482.
- [6] HESSEL V, LOWE H, SCHONFELD V. Micromixers—a review on passive and active mixing principles [J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, 60: 2479-2501.
- [7] CAPRETTO L, CHENG W, HILL M, *et al.*. Micromixing within microfluidic devices [J]. *Topics in Current Chemistry*, 2011, 304: 27-68.
- [8] VIMALK, MARIUS P, NIGAM K D P. Single-phase fluid flow and mixing in microchannels [J]. *Chemical Engineering Science*, 2011, 66: 1329-1373.
- [9] HIMSTEDT H, YANG Q, DASIL P, *et al.*. Ulbricht Magnetically activated micromixers for separation membranes [J]. *Langmuir*, 2011, 27: 5574-5581.
- [10] ODDY M H, SANTIAGO J G, MIKKELSEN J C. Electrokinetic instability micromixing [J]. *Analytical Chemistry*, 2001, 73: 5822-5832.
- [11] LEE C Y, LEE G B, FU L M, *et al.*. Electrokinetically driven active micromixers utilizing zeta potential variation induced by field effect [J]. *Micromechanics and Microengineering*, 2004, 14: 1390-1398.
- [12] YARALIOGLU G, WYGANT I O, MARENTIS T C, *et al.*. Ultrasonic mixing in microfluidic channels using integrated transducers [J]. *Analytical Chemistry*, 2004, 76: 3694-3698.
- [13] AHMED D, MAO X, JULURI B, *et al.*. A fast microfluidic mixer based on acoustically driven side wall-trapped microbubbles [J]. *Microfluid Nanofluid*, 2009, 7: 727-731.
- [14] YANG J T, LIN K W. Mixing and separation of two-fluid flow in a micro planar serpentine channel [J]. *Micromechanics and Microengineering*, 2006, 16: 2439-2448.
- [15] 张平,胡亮红,刘永顺. 主辅通道型微混合器的设计与制作 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(4): 872-879.
ZHANG P, HU L H, LIU Y S. Design and fabrication of micromixer with main-assist channels [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 872-879. (in Chinese)

- [16] ANSARI M A, KIM K Y, ANWAR K, *et al.*. A novel passive micromixer based on unbalanced splits and collisions of fluid streams[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2010, 20 (5): 055007.
- [17] 何秀华, 韦丹丹, 邓志丹, 等. 基于对数螺旋线的新型被动式微混合器的性能[J]. *排灌机械工程学报*, 2014, 32 (11): 968-972.
HE X H, WEI D D, DENG ZH D, *et al.*. Mixing performance of an novel passive micromixer with logarithmic spiral channel[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2014, 32 (11): 968-972. (in Chinese)
- [18] BERSCH A, HEIMGARNER S, COUSSEAU P, *et al.*. Static micromixers based on large-scale industrial mixer geometry [J]. *Lab On a Chip*, 2001, 1: 56 - 60.
- [19] STROOCK, DERTINGER, AJDARI A, *et al.*. Chaotic mixer for microchannels [J]. *Science*, 2002, 295: 647-651.
- [20] ANSARI M A, KIM K Y. Shape optimization of a micromixer with staggered herringbone groove [J]. *Chemical Engineering Science*, 2007, 62: 6687-6695.
- [21] ASGAR A, BHAGAT S, ERIK, *et al.*. A passive planar micromixer with Obstructions for mixing at low Reynolds numbers[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2007, 17: 1017-1024.
- [22] HSIAO KY, WU C Y, HUANG Y T. Fluid mixing in a microchannel with longitudinal vortex generators [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 235: 27-36.
- [23] FANG Y Q, YE Y H. Mixing enhancement by simple periodic geometric features in microchannels [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 187: 306-310.
- [24] TAGUCHI G, YOKOYAMA T, WU Y. *Taguchi Methods: Design of Experiments* [M]. Tokyo: Quality Engineering Series, 1993.

作者简介:



何秀华(1961—),女,四川成都人,教授,硕士生导师,2010年于江苏大学获得博士学位,主要从事流体机械内部流动及其性能研究。E-mail: xiuhua.he@uj.s.edu.cn



颜杰(1990—),男,江苏泗洪人,硕士研究生,2013年于江苏大学获得学士学位,主要从事微混合器内部流动及其应用研究。E-mail: yanjie@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)