

# 三种不同结构微混合器的性能分析及压损比较

夏国栋, 吴宏杰, 李 健, 崔珍珍, 周明正

(北京工业大学 环境与能源工程学院 强化传热与过程节能教育部重点实验室 北京 100124)

**摘 要:** 对平面内非对称圆形通道、扇形通道及错位通道 3 种不同结构类型的微混合器的混合特性进行了数值模拟和分析, 讨论在不同雷诺数下, 通道几何结构参数对微混合器混合强度及通道压力损失的影响. 研究结果表明: 在雷诺数大于 10 时, 3 种类型微混合器混合强度均随雷诺数增大而增大; 在不同雷诺数下, 错位通道微混合器混合效果最佳, 但其压力损失会相对增大.

**关键词:** 微混合器; 混合强度; 压力损失; 数值模拟

中图分类号: TK 124

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2013)03-0466-07

## Performance Analysis and Pressure Loss Compared for Three Different Structural Micromixers

XIA Guo-dong, WU Hong-jie, LI Jian, CUI Zhen-zhen, ZHOU Ming-zheng

(The Education Ministry Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Numerical simulations and analyses were presented on mixing performance for three different structural micromixers which include ones with circular sub-channel, fan-shaped sub-channel and dislocation sub-channel, respectively. For different  $Re$ , the mixing intensity and pressure loss of micromixer were influenced by the geometric structure parameters of the channels. The results show that when  $Re$  is more than 10, the mixing intensity of three different micromixers increases as  $Re$  increases. In addition, for different  $Re$ , the micromixer with dislocation sub-channel acquires the optimal mixing performance, but the pressure loss increases relatively.

**Key words:** micromixer; mixing intensity; pressure loss; numerical simulation

微流体系统作为物理科学与工程的一个跨学科分支, 用来处理亚毫米通道中流体流动, 已广泛应用在化学分析、临床医学及 DNA 测序等各领域. 微混合器作为微流体系统的重要组成部分, 在化学过程小型化、反应精确化的要求下得到了快速发展. 微混合器一般分为主动式微混合器和被动式微混合器. 其中: 主动式微混合器利用移动部件或外部能量实现有效的混合, 结构复杂, 集成困难; 被动式混合器不需要任何外部能源, 通过改变微通道的几何形

状, 改变流体的流场, 进而实现流体工质的有效混合, 其制造简便, 配套设施少, 在微流体系统中容易制造和集成; 因此, 被动式混合器得到了广泛的发展.

Ansari 等<sup>[1]</sup>提出了交错人字形微混合器, 该设计的主要理念是通过创造横向流动, 从而增加 2 种流体间的接触面积; Mengeaud 等<sup>[2]</sup>对锯齿形微通道进行了实验和数值模拟方面的研究, 利用微通道发生转折的区域形成漩涡, 提高混合效率; Liu 等<sup>[3]</sup>研究了三维蛇形通道微混合器、方波形微混合器和直

收稿日期: 2011-09-30.

基金项目: 国家“973”计划资助项目(2011CB710704); 国家自然科学基金资助项目(51176002); 教育部博士学科点专项基金资助项目(20111103110009).

作者简介: 夏国栋(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事两相流与传热方面的研究, E-mail: xgd@bjut.edu.cn.

通道微混合器; Ansari 等<sup>[4]</sup>对带有重复 L 形循环单元的三维蛇形通道的混合性能进行了参数研究,观察微通道几何参数对于流体流动和混合的影响; Mouza 等<sup>[5]</sup>利用分离重组的原理,对存在弧线通道的微混合器进行进一步完善,利用宽度均匀的分裂子通道内流体产生平衡碰撞,同时弧线型的子通道诱发 Dean 涡,增强混合;在此基础上,Ansari 等<sup>[6-7]</sup>对平面内非对称圆形通道分离重组微混合器的混合特性进行了数值模拟和实验研究,针对 Mouza 等<sup>[5]</sup>研究中出现的问题,利用微混合器非对称的子通道产生的不平衡碰撞,增强混合. 研究表明:在一定的雷诺数范围内,微混合器的混合效率受微通道几何结构参数影响较大;夏国栋等<sup>[8]</sup>研究了平面内非对称扇形通道分离重组微混合器的混合性能,结果表

明:由于扇形空腔的存在,其具有优越的混合效果. 综上所述,针对不同类型的被动式混合器已经展开了各种数值模拟和实验研究. 然而,关于比较不同几何形状被动式微混合器的流动和混合机理方面的研究较少. 本文针对3种被动式平面内非对称分离重组微混合器(圆形通道、扇形空腔通道、错位通道)的混合性能进行了研究.

### 1 物理问题及数学描述

#### 1.1 结构参数及数值模拟方法

图1为平面内非对称分离重组圆形通道、扇形空腔通道及错位通道结构微混合器的结构示意图. 3种不同结构类型的微混合器均由 T 型通道和等距布置在其上的4个 P-ASAR 结构循环单元组成. 2种

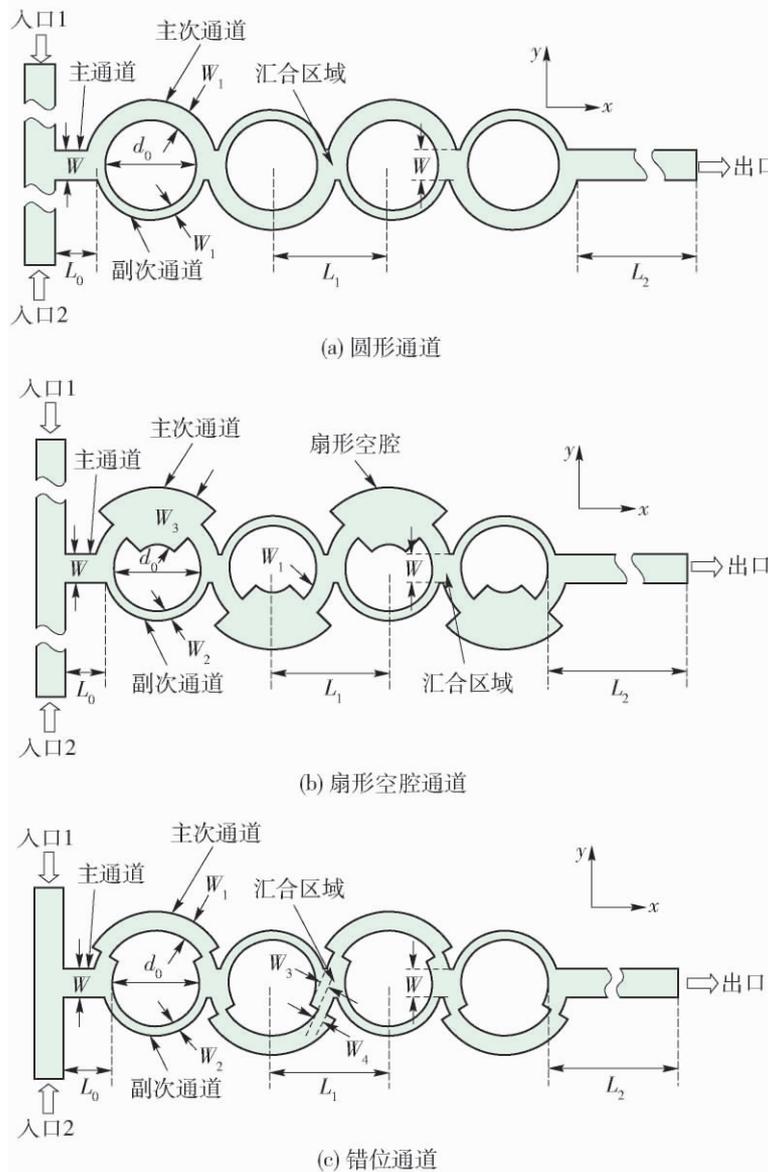


图1 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagrams

流体工质分别从2个不同的入口进入微混合器,在T型微通道内通过分子扩散作用完成初步混合后,2种流体共同进入微混合器的主通道,经过4个循环单元后进一步完成混合。其中:在每个循环单元中,主次通道均会被分割为2个宽度不等的子通道,流体工质被分裂为2股,经过一定距离后重新混合,准备以相同的循环方式进入下一循环单元。这种几何结构的设计是利用子通道宽度的不均匀性产生通道内质量流量的差别,利用主次通道(即宽度较大的次通道)与副次通道内流体的惯性力的差别,在循环单元间造成不平衡的流体碰撞,提高混合强度。为了便于比较,扇形空腔通道结构微混合器及错位通道结构微混合器以 Ansari 等设计的圆形通道结构为基础,改变了主次通道结构,其中扇形空腔结构微混合器在主次通道上布置了扇形空腔,错位通道结构微混合器在主次通道上布置了错位通道结构,3种通道结构微混合器的结构参数如表1所示。

表1 微混合器几何结构尺寸

Table 1 Dimensions for different mixers

混合器类型	w/mm	h/mm	L <sub>0</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	w <sub>1</sub> /w <sub>2</sub>	特殊部分
圆形	0.3	0.2	0.5	1.2	2.95	2	—
扇形	0.3	0.2	0.5	1.2	2.95	2	w <sub>1</sub> /w <sub>3</sub> =1/3
错位	0.3	0.2	0.5	1.2	2.95	2	w <sub>3</sub> /w <sub>4</sub> =1

本文采用 Fluent 三维双精度、非耦合隐式求解器进行数值模拟,利用二阶迎风格式进行空间离散化,采用六面体网格结构、分块耦合的方法对整个模型进行计算。数值模拟中,假定采用稳态、不可压流体,固体壁面采用无滑移边界条件,通道2个入口设为等速的速度边界条件,通道出口压力为零,其他固体壁面设为绝热边界条件;考虑雷诺数在1~80变化,利用2种无法发生化学反应的工作介质水和乙醇,混合分析更精确,并参考20℃时其物理性质,扩散系数 $D_{ab}$ 取为 $1.2 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 。同时,假定在多组分流体进行混合的情况下,流体工质混合在分子水平,且平均流速和压力相同,考虑通过对流和扩散发生传质过程。

根据这些假设,基于连续性方程、Navier-stokes 方程及对流扩散方程,控制方程可表示为

$$\nabla \cdot \bar{V} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \bar{V} \cdot \nabla \bar{V} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \bar{V} \quad (2)$$

$$\bar{V} \cdot \nabla C = D \nabla^2 C \quad (3)$$

## 1.2 网格独立性及数值计算有效性检验

在混合分析中,网格的质量决定数值分析结果的准确性,计算之前应先经过网格无关性验证,以确保数值模拟结果与网格尺寸无关。与非结构化网格相比较,结构化网格能在数值分析区域提供更充足的结点数目,适用于所有的几何结构,故本文数值模拟采用结构化网格。为了找出最优网格数,本文采用6个不同的结构化网格系统,以错位通道结构微混合器 $Re=80$ 、进口速度为0.3 m/s的计算单元为例,模拟采用网格数目分别为:21.1万、70.5万、110.7万、156.05万、210.46万,与网格数为279.42万计算单元的混合度最大误差分别为5.14%、2.19%、0.95%、0.32%和0.13%。进行网格独立性测试时,采用的网格数逐渐增大。研究发现:当各网格数均与最大网格数进行比较时,每次的混合强度模拟值的误差逐渐减小,当采用网格数为210.46万时,其与最大网格数279.42万对比,混合强度值的误差已达到0.13%。在综合考虑计算精度和计算成本的基础上,可采用210.46万做为最优网格数。收敛的标准为

$$\sum \sum |v_i(x, y, z) - v_{i,p}(x, y, z)| \leq 10^{-6} \quad (4)$$

本文利用混合工质水和乙醇溶液,在不同雷诺数下,对 Ansari 等<sup>[6-7]</sup>分析的非对称分离重组圆形通道微混合器、夏国栋等<sup>[8]</sup>分析的非对称分离重组扇形空腔微混合器及本文提出的错位通道微混合器的混合特性进行了数值模拟及混合强度值的计算,并与文献[7-8]进行了比较。如图2所示:数值模拟结果保持了很好的一致性,验证了该数值计算的有效性。

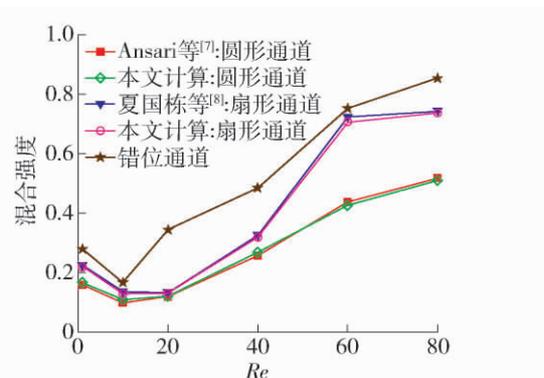


图2 混合强度计算值与文献[7-8]计算值比较

Fig. 2 Comparison of mixing index calculated between this thesis and Ref. [7-8]

### 1.3 混合效果量化分析

为了评价微混合器的混合程度,与以往文献相同,在流动方向上取一截面,定义该截面上混合物的质量分数变化为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (c_i - c_m)^2} \quad (5)$$

$$c_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n c_i \quad (6)$$

式中:  $N$  为横断面上浓度采样点的个数;  $c_i$  为第  $i$  个采样点上的质量分数;  $c_m$  为横断面上组分浓度的统计平均值,即:期望;  $\sigma$  为通道任意纵向位置整个横截面内的组分浓度标准方差.

为了定量分析微混合器的混合性能,混合强度定义为

$$M = 1 - \sqrt{\frac{\sigma^2}{\sigma_{\max}^2}} \quad (7)$$

式中:  $M$  为微混合器的混合强度;  $\sigma_{\max}^2$  为通道横截面的组分浓度最强方差. 混合强度在  $0 \sim 1$  变化,当  $M=0$  时  $\sigma = \sigma_{\max}$ ,为完全独立流,表明 2 流体间未发生混合;当  $M=1$  时  $\sigma=0$ ,为完全混合流,表明流体间已经完全混合.

## 2 结果与讨论

### 2.1 通道几何结构对混合强度的影响

图 2 为不同通道结构的微混合器混合通道出口处的混合度与混合工质雷诺数之间的变化关系. 结果显示: 3 种不同通道结构的微混合器混合通道出口处的混合强度均随雷诺数的升高而增大,这是因为 3 种微混合器都是基于非对称结构产生不平衡碰撞,改变微通道内的流体流型,进而加强扰动强化混合;与平面内非对称圆形通道分离重组微混合器相比较,扇形空腔分离重组微混合器和错位通道分离重组微混合器的混合强度显著提升,表明不同通道的几何形状对微混合器的混合强度影响较大,且经

过对错位通道微混合器进一步的数值模拟结果显示,通过增加循环单元数量,可以提高混合器的混合效果,但是混合强度提高不明显,为了更好地与 Ansari 等<sup>[6-7]</sup>及夏国栋等<sup>[8-9]</sup>的微混合器进行有效对比,仍采用 4 个循环单元.

由于流体流经弯曲管道时所受离心力的影响,3 种微混合器在垂直于流动方向的截面上会产生 1 对对称的反向运动漩涡,从而加剧微通道高度方向上流体的混合. 而在水平面内,如图 3(b)所示,夏国栋等设计的扇形空腔微混合器混合工质受主次通道上突扩的扇形空腔的影响,扇形空腔入口形成扩展涡系,漩涡的产生加大了微通道内流体间的扰动,增大了混合工质间的接触面积,强化了混合;主次通道的扇形空腔出口处,微通道截面面积的突然变小,流体的质量流速的突然增大加剧了其于次通道流体汇合时的不平衡碰撞,进而有效提高混合;图 3(c)所示为错位通道微混合器在主次通道上布置的错位通道结构,利用通道上的 2 次截流来改变流体的流型. 这种变截面截流的通道设计,2 次提高主次通道内流体质量流速,显著加强了流体间的扰动,且在错位截流通道的入口也形成了一个扩展涡系,而这个涡系的扰动程度远大于扇形空腔内涡系的扰动. 错位通道微混合器的设计,使每 2 个循环单元间主次通道流体的汇合处形成混合腔,且在腔内产生一个扰动漩涡,混合效果被大幅度提高,流体在混合腔内混合后再次分离进入下一循环.

### 2.2 不同截面处的混合强度比较

图 4 所示为 3 种不同通道结构的微混合器在不同雷诺数(1、10、20、80)下,混合强度沿微通道长度方向的变化. 由图 4 可知: 3 种微混合器的混合强度均随雷诺数的增大而增大,且在不同的雷诺数下,非对称分离重组错位通道结构微混合器的混合强度均大于其他 2 种结构类型的微混合器;雷诺数大小和微通道的几何结构参数是控制微通道内流体流动的



图 3 水平面内流线预测图

Fig. 3 Projected streamlines on the  $x-y$  plane

主要因素. 但当  $Re = 10$  时 3 种结构类型微混合器的混合强度均为最低值. 这种现象是因为在雷诺数较小时, 主要依靠分子扩散作用来实现微通道内的混合; 但随着雷诺数逐渐增大, 流体的层流运动由于受通道几何形状参数的影响增加了扰流源, 混合工

质之间的接触面积增大, 对流混合增强, 并逐渐取代了分子扩散作用占据了影响混合的主导地位, 从而导致混合强度在雷诺数在  $1 \sim 10$  变化时, 通道相同位置的混合强度逐渐减低; 扇形空腔微混合器在  $Re = 20$  时混合强度提高并不明显, 见图 4(c).

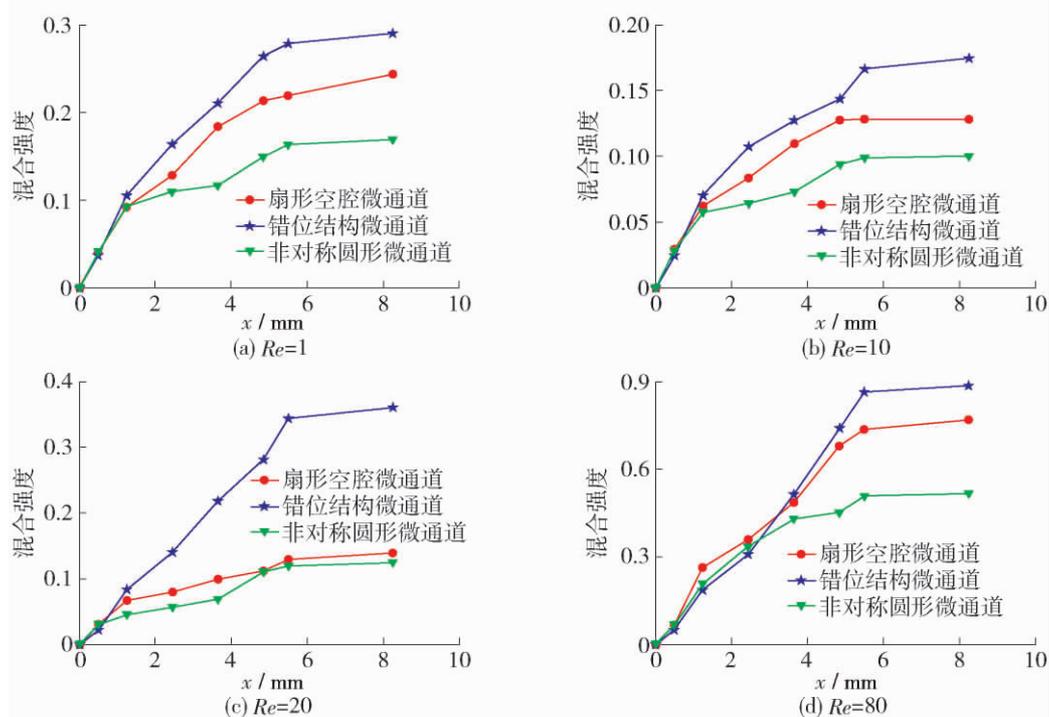


图4 混合强度沿通道长度方向的变化

Fig. 4 Distributions of the mixing index with fixed axial length

考虑非对称分离重组圆形通道微混合器的混合强度远小于其他 2 种类型的微混合器, 本文仅对非对称分离重组扇形空腔结构微混合器和错位通道微混合器的截面混合进行比较. 图 5 所示为 2 种不同类型微混合器同一通道长度截面处的混合情况, 模拟中红色代表液体 A, 蓝色代表液体 B, 2 种流体完全混合时质量分数为 50%. 图 5 上方为浓度分布标尺. 在  $x = 0.5 \text{ mm}$  处 2 种类型微混合器通道内的混合情况相同, 这是因为在  $x = 0.5 \text{ mm}$  截面之前 2 种混合器的几何结构完全相同; 在  $x = 1.25 \text{ mm}$  处, 次通道上的流体混合情况相同, 但由于主次通道几何结构的差异, 混合情况开始出现差异; 在  $x = 2.45 \text{ mm}$ 、 $3.65 \text{ mm}$ 、 $4.85 \text{ mm}$  处 2 种类型微混合器主次通道上混合强度的差距开始增大, 由图 2 也可以清晰表明错位通道结构微混合器的混合强度较扇形空腔结构微混合器有显著提高;  $x = 8.25 \text{ mm}$  处, 为 2 种不同结构类型微混合器通道出口处的混合情况.

### 2.3 压降分析

微混合器的压力损失是评价微混合器性能的重要指标. 由于实际流体具有黏性, 流动过程中就会受到阻力的作用. 微通道内流体的流动需考虑其沿程阻力损失和局部阻力损失. 引起局部损失的主要原因是由于边壁形状的急剧改变, 流体的惯性造成主流与边壁脱离, 形成漩涡区, 质点漩涡运动耗能, 同时漩涡不断被主流带向下游, 加剧下游一定范围内主流的紊动强度, 从而加大能量损失. 流速分布因边壁的改变而不断改变, 也将造成能量损失.

图 6 所示为通道几何结构不同的微混合器混合通道进出口压力差  $\Delta p$  与雷诺数之间的变化关系. 由图 6 可知, 数值模拟采用的 3 种微混合器几何结构不同, 混合通道内压降值  $\Delta p$  均随雷诺数的升高而增大; 但是不同几何通道结构对微混合器的压降大小影响较大, 平面内非对称分离重组扇形空腔结构微混合器混合通道内的压降最小, 在流速不变的情况下, 因其布置了扇形空腔结构进

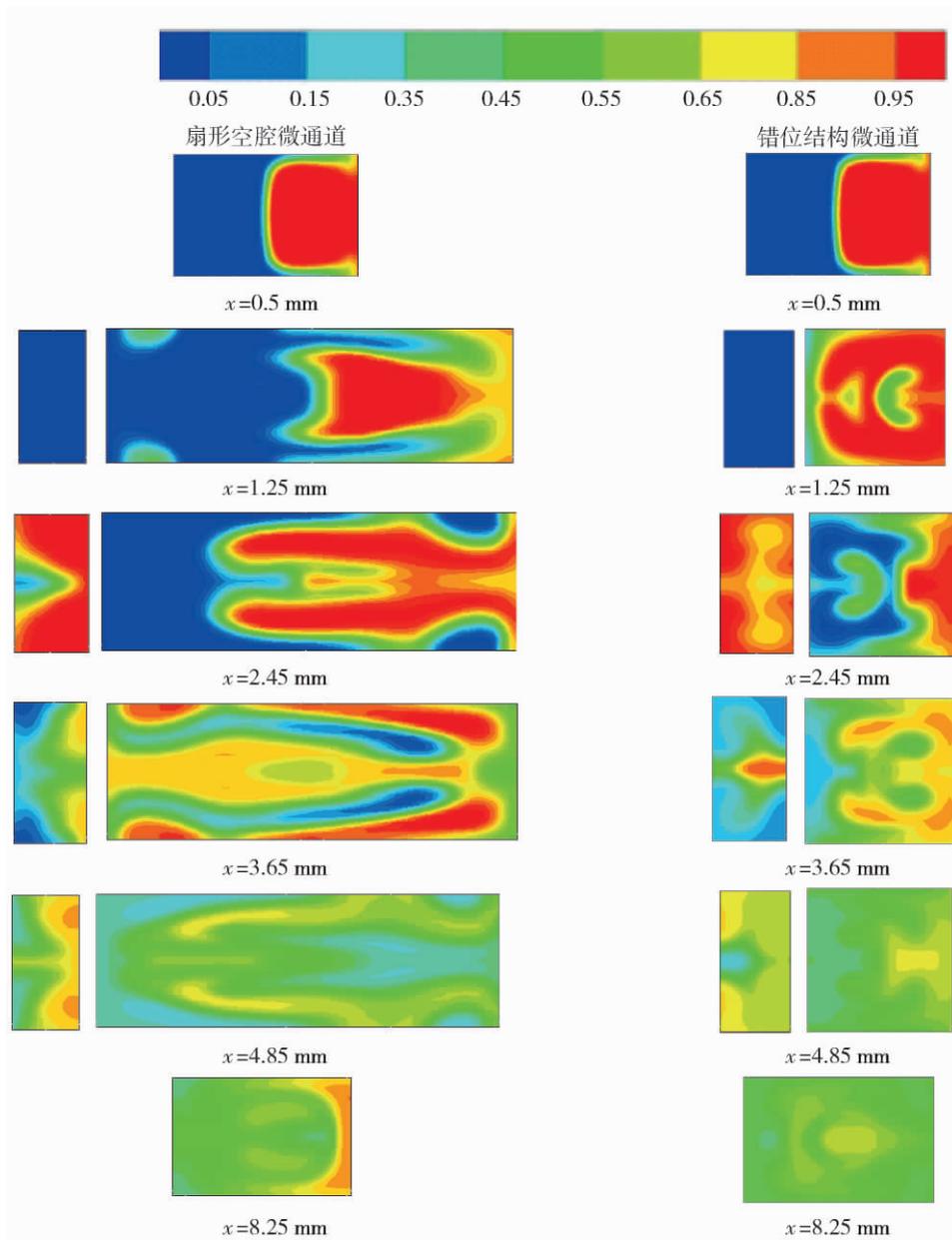


图5 沿通道长度方向,不同截面处混合效果比较

Fig. 5 Comparison of the mixing index with fixed axial length

而加大了混合通道的比表面积,故其压降值会减小;平面内非对称分离重组圆形通道结构压降居于二者之间;而非对称分离重组错位通道结构微混合器的压力差明显大于其他2种结构类型的微混合器,这是由于错位通道微混合器的压力损失不仅包括沿程阻力损失,而且由于错位通道微混合器存在微通道截面上截流效应,导致流线弯曲、流体束被压缩、部分流体被加速,由此带来的流体质点的碰撞也将造成局部能量损失;截留面后及混合腔中漩涡的产生,高速流体碰撞低速流体,也将增大阻力损失,而且流量越大这种碰撞损失越

大.考虑微混合器的压降较小,与宏观通道微混合器的压降损失不在同一数量级,故容易满足.当雷诺数一定时,要求达到的混合强度值越高,其消耗的泵功越大;而当消耗的泵功一定时,扇形通道微混合器的混合效果最好,但其能达到的最高混合强度低于错位通道微混合器,因此,在对微通道内流体混合要求较高的微混合器内,微混合器的混合强度是最重要的衡量指标;但是在某些特殊的微系统中,若考虑微系统集成方面存在的困难,可综合考虑混合强度和压降.

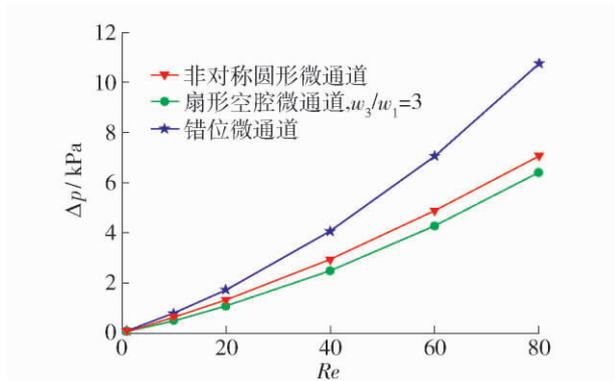


图6 压力损失  $\Delta p$  与  $Re$  数的关系

Fig. 6 Relationship between  $\Delta p$  and  $Re$

### 3 结论

1) 改变微通道几何结构可以改变微混合器的混合性能.

2) 当雷诺数较小时, 微通道内的混合主要取决于分子扩散作用, 混合强度随雷诺数增大而减小; 当雷诺数大于 10 后, 3 种类型的微混合器的混合强度均随雷诺数增大而增大.

3) 为满足不同微系统的需要, 在要求快速混合的微系统中应采用错位通道微混合器; 但在某些特殊情况下, 若考虑微系统的集成方面要求, 可采用混合效果稍差但通道压降较小的扇形空腔微混合器.

#### 参考文献:

[1] ANSARI M A, KIM K Y. Shape optimization of a micromixer with staggered herringbone groove [J]. Chem Eng Sci, 2007, 62: 6687-6695.

- [2] MENGEAUD V, JOSSERAND J, GIRAULT H H. Mixing processes in a zigzag microchannel: finite element simulations and optical study [J]. Anal Chem, 2002, 74: 4279-4286.
- [3] LIU R H, STREMLER M A, SHARP K V, et al. Passive mixing in a three-dimensional serpentine microchannel [J]. Microelectromech Syst, 2000, 9(2): 190-197.
- [4] ANSARI M A, KIM K Y. Parametric study on mixing of two fluids in a three-dimensional serpentine microchannel [J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 146: 439-448.
- [5] MOUZA A A, PATZA C M, SCHONFELD F. Mixing performance of a chaotic micromixer [J]. Chem Eng Res Des, 2008, 86: 1128-1134.
- [6] ANSARI M A, KIM K Y, ANWAR K. A novel passive micromixer based on unbalanced splits and collisions of fluid streams [J]. Micromech Microeng, 2010, 20(5): 055007.
- [7] ANSARI M A, KIM K Y, et al. Mixing performance of unbalanced split and recombine micromixers with circular and rhombic sub-channels [J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 162(2): 760-767.
- [8] 夏国栋, 李健, 吴宏杰, 等. 非对称分离重组扇形空腔微混合器的混合特性 [J]. 化工学报, 2011, 62(5): 1219-1225.  
XIA Guo-dong, LI Jian, WU Hong-jie, et al. Mixing performance of asymmetric split and recombine micromixer with fan-shaped cavity [J]. CIESC Journal, 2011, 62(5): 1219-1225. (in Chinese)

(责任编辑 张 蕾)