人字脊蛇形通道微混合器性能的研究

闫怡安¹ 邓欣然² 姜玥¹ 李小号¹ 谢元华¹ 刘坤^{1*}
(1. 东北大学机械工程与自动化学院 沈阳 110819;
2. 中国昆仑工程有限公司 北京 100037)

Performance of Serpentine Channel Micromixer with Herringbone Ridge

YAN Yian¹, DENG Xinran², JIANG Yue¹, LI Xiaohao¹, XIE Yuanhua¹, LIU Kun^{1*}

School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
China Kunlun Contracting & Engineering Corporation, Beijing 100037, China)

Abstract Micromixer is an important part of microchip integrated system, widely used in biological analysis, chemical synthesis and other fields. In order to improve the mixing efficiency of passive micromixers under low Reynolds number laminar flow conditions, a serpentine channel micromixer with herringbone ridges was designed in this paper, and its mixing structure and fluid parameters were analyzed. Based on the study on the effect of herringbone ridges height and angle on fluid mixing, the influence of flow rate on mixing effect was analyzed when the herringbone ridges angle $\theta = 45^{\circ}$ and d/H was 1/2. At the same time, PBS solution and Trypan blue dyeing solution were selected for experimental tests to comprehensively evaluate the mixing performance of the micromixer. The results show that, in a certain range of structural parameters, the greater the ratio of herringbone height to channel height, the more sufficient the fluid mixing, and the optimal herringbone angle is between 40° and 50°. The lower the flow velocity, the higher the mixing quality. The average error of simulation and experiment is less than 10%. This study provides a reference for improving the mixing efficiency of passive micromixers.

Keywords Micromixer, Fluid flow, Herringbone ridge, Serpentine channel

摘要 微混合器是微芯片集成系统中重要的组成部分,广泛应用于生物分析,化学合成等领域。为了提高被动式微混合器在低雷诺数层流条件下的混合效率,本文设计了一种人字脊蛇形通道微混合器并对其混合结构和流体参数展开分析研究。 在人字脊高度和角度对流体混合作用研究的基础上,取人字脊角度 θ = 45°, d/H 为 1/2 时,分析流量大小对混合效果的影响。 同时,选用 PBS 溶液和台盼蓝染色液进行实验测试,综合评估微混合器混合性能。结果表明:在一定结构参数取值范围内,人 字脊高度与通道高度之比越大,流体混合越充分,最佳人字脊角度在 40°~50°之间;流体流动速度越小,混合质量越高。模拟 和实验平均误差不超过 10%,具有良好的一致性。本研究为被动式微混合器混合效率的提升提供参考。

关键词 微混合器 流体流动 人字脊 蛇形通道 中图分类号: O35 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjyst.202211020

微混合器是指在微通道或微腔室内实现样品 快速均一混合的一种微流控器件,适用于两种或多 种不同反应物在微尺度条件下充分的混合。微混 合技术在生物芯片、微化学分析、环境检测等领域 应用广泛^[1]。目前在微混合领域中,增强混合效果 的方式主要分为两种:主动混合方式和被动混合方 式^[2]。主动混合方式中,通常是施加一种外力促进 流体之间交叉接触,提高混合质量,混合过程会涉 及到不同的物理手段,比如声波、磁场、压力扰动和 热力学方法等。考虑到外力介入的因素,主动式微 混合器往往设计复杂,加工难度大^[3-5]。被动混合方 式中微混合器通常是设计复杂交错的微通道结构 来使流体形成混沌对流,进而增加流体之间的接触 面积和接触时间。

收稿日期:2022-11-23

基金项目: 辽宁省应用基础研究计划项目 (2022JH2/101300215); 沈阳市自然科学基金 (22-315-6-01)

^{*} 联系人: E-mail: kliu@mail.neu.edu.cn

早期研究的微混合器多以被动混合方式为 主[6.7],通过对通道的一个或多个表面进行图形化, 流体以层流扩散原理来进行混合,混合时间长并且 可控性差。随着 MEMS(Micro Electromechanical System)技术的不断发展,被动混合方式混合效果的 提升受到越来愈多的关注,被动式微混合器的研究 也越来越多。以Y形和T形微混合器最为常见,其 结构制作简单,加工工艺成熟,但其受到分子扩散 系数的影响,混合强度较低。而微混合器中,流体 流动以层流为主,混合主要依赖于分子扩散,因此, 增大流体间的接触面积和减小扩散路径是提高微 混合效率的主要方式。人字脊形状的混合结构弥 补了这一缺陷, 脊结构的存在增强了流体界面的拉 伸和折叠,以指数方式增加了流体之间的接触面积, 从而使流体之间产生较为广泛地质量扩散。Ansari 等¹⁸ 对交错人字槽微混合器中通道单壁上的沟槽形 状了优化,研究直通道内槽高和槽角对混合质量影 响情况,结果表明,沟槽形状对混合十分敏感.槽深 对混合的影响远大于槽角。Choudhary 等^[9] 实现了 微通道内交错人字脊的不同设计,并对其混合性能 进行比较,结果发现,随着人字脊结构中不对称程 度的增加,流体混合时间总体减少。高阳等^[10]建立 人字脊微混合器的物理模型,对不同驱动方式、不 同内部结构下的混合情况进行模拟分析和实验对 比,研究发现,人字脊结构对混合质量有较大提升 的作用。以上研究结果表明,人字脊形状的混合结 构对于增加流体间的接触面积和促进混合效率的 提升具有较大的促进作用。但是单一的人字脊结 构的微混合器并不能将混合效率进行二次提升,因 此,在方便加工制造的前提下,将不同混合结构进 行集成实为一种有效的办法。本文提出一种人字 脊蛇形通道的被动式微混合器,在人字脊混合结构 的基础上,设计弯曲的蛇形通道以增强扰动,重点 围绕人字脊的结构参数和混合器的工作参数对混 合器混合性能展开分析研究,通过蛇形通道和人字 脊结构的结合达到提高混合质量的目的,为后续微 混合芯片的研发提供参考。

1 模拟与实验方法

1.1 微混合器设计

混合器的人口为Y型通道,中间连有圆形缓冲 池。主通道中水平通道宽度 40 μm,竖直通道宽度 100 μm,高度皆为 15 μm。主通道中竖直通道的底 部设有平行的人字脊结构,每个结构的宽度为 15 μm,高度为 d,每两个人字脊之间的距离 15 μm,人 字脊结构与通道之间的夹角 θ,每7个平行结构构 成半个混合单元,下半个混合单元与其方向相反, 整个混合通道中总共有两个混合单元。表1为微混 合器内部重要几何参数和流体参数设计取值。

表1 混合器结构参数设计

Tab. 1 D	Design parameters	of mixer	structure
----------	-------------------	----------	-----------

参数	通道高度 H/μm	人字脊高度 d/μm	人字脊角度 θ/°	流量 Q/µL/min	入口速度 v/ m/s	雷诺数 Reynold Number (Re)
1	15.0	1.0	30	2.5	2.2×10^{-3}	5.8×10^{-2}
2	15.0	3.0	40	5.0	4.6×10 ⁻³	1.1×10^{-1}
3	15.0	5.0	45	10.0	9.1×10^{-3}	2.1×10^{-1}
4	15.0	7.5	50	20.0	1.8×10^{-2}	4.3×10^{-1}
5	15.0	10.0	60	40.0	3.6×10 ⁻²	8.5×10^{-1}
6	15.0	12.0				

1.2 数值模拟模型设置

利用 FLUENT 软件对微混合器内部流场进行 数值模拟^[11,12], 为减少计算时间, 仅对其中一个混合 通道进行模拟, 模型选择为不可压缩模型, 选择压 力基求解器, 基于 Navier-Stokes 方程进行稳态求解。

连续性方程:

$$\nabla \cdot \overrightarrow{v} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \overrightarrow{v} \cdot \nabla \overrightarrow{v} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \overrightarrow{v} \tag{2}$$

扩散方程:

$$\overrightarrow{v} \cdot \nabla C = D \nabla^2 C \tag{3}$$

式中, \vec{v} 是流体速度矢量, ρ 是流体密度, p 是压强, μ 是流体的动力粘度, C 是溶液浓度, D 是流体扩散 系数。

两个入口的流入液体分别设置为水和乙醇,本 模型中重力影响忽略不计。通过流体参数计算出 的 Re 均小于 2000, 故选择层流模型^[13], 边界条件设 为速度入口、压力出口, 选择无滑移壁面条件^[14]。

混合溶液雷诺数计算公式如下:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \tag{4}$$

式中, *ρ*是流体密度, *v*是流体的平均速度, *d*是通道的特征长度, *μ*是流体的动力粘性系数。

1.3 实验材料与实验操作

实验材料与设备: PBS 溶液(磷酸缓冲盐溶液) (无色), 台盼蓝染色液(深蓝色)(Phygene Life Sciences Co. Ltd), 聚二甲基硅氧烷(PDMS), 2.5~ 120.0 μL/min 十通道注射泵(Longer Sci-Tec Co. Ltd), 20.0~480.0 μL/min 双通道注射泵(JiaShan Ruichuang Sci-Tec Co. Ltd),注射针头为 0.5 mm×20 mm 的 1 mL 注射器,0.5 mm×0.9 mm 的 PE 导管,0.5 mm×0.7 mm 的不锈钢接头,实验耗材均从沈阳莱博公司 (Shenyang Laibo Science and Trade Co. Ltd)购买。

实验操作流程如下:截取长度适中的 PE 导管, 一部分的导管一端与1 mL 标准医用注射器相连, 另一端与不锈钢接头连接,插入芯片的入口,另一 部分导管与不锈钢接头连接,插入微混合器的出口 连接到废液池。将微混合器固定在载物台中,并将 与导管连接好的注射器放置注射泵上,固定活塞芯 杆与针筒。如图1所示为实验原理示意图。



Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

1.4 数据处理

图 2A 所示为人字脊蛇形通道微混合器混合结构示意图。模拟分析中,如图 2B(a)中红线所示,取 混合通道中13 个垂直于混合通道的截面,通过CFD-POST 后处理获取每个截面上的乙醇质量分数分布云图。 定义混合质量指标 σ^[15]:

$$\sigma_m = 1 - \sqrt{\frac{\sigma^2}{\sigma_{\max}^2}} \tag{5}$$

式中, σ 为同一截面上的质量分数的标准差, σ_{max} 为 流体未混合时的最大标准偏差, σ_m 为样本质量分数 的平均值。 σ 为0时表示各组分间完全没有发生混 合, σ 为1表示各组分间彻底的混合,混合强度值在 0~1范围内变化,数值越接近于1混合效果越好。

实验分析中,由于微通道尺寸过小,难以定量 分析各个点浓度信息,选择通过显微镜与 CCD 相 机进行图像采集,在方框区域内去除边界点平均取 三条线,利用软件提取线上的灰度值分布(0~255), 并利用式(6)计算三条线上灰度值方差的平均值, 图 2B(b)中为采样区域和采样线,实验分析中的采 样位置从上往下依次为混合路径点 1-6。定义图片 中像素点灰度值的方差 $\sigma_{\rm M}$ 表示样本混合程度^[16]:

$$\sigma_{\rm M} = \left[1 - \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{I_i - I_{\rm min}}{I_{\rm max} - I_{\rm min}}\right)}\right] \tag{6}$$

式中,n 为取样点的数目; I_i 为点i处的灰度值; I_{max} 为未发生混合时的灰度值; I_{min} 为流体完全混合时的灰度值。由公式特征可知,混合质量 $\sigma_M \in [0,1], 0$ 表示液体没有发生混合,1表示液体完全混合。

2 结果和讨论

2.1 混合通道的几何参数对混合效果的影响

混合通道几何参数是流体混合的基础,不同的 参数设计导致不同的混合质量。仿真模拟时固定 通道高度 *H*为 15 µm, θ 为 45°, 分别计算了在入口 流量为 10 µL/min 下人字脊高度为 1.0、3.0、5.0、7.5、 10.0、12.0 µm 时的六种混合情况;同时,固定通道高 度 *H*为 15 µm, *d/H*为 1/2, 即*d* = 7.5 µm, 分别计算人 字脊的角度 θ 为 30°, 40°, 45°, 50°和 60°时的五种混 合情况。取其中 *d* = 3.0 µm 时 θ = 45°、*d* = 7.5 µm 时 θ = 30°和 *d* = 7.5 µm 时 θ = 45°为例, 对比同一通



- 图2 微混合器通道结构及其对混合质量的影响。A:通道结构; B:取样面(a)模拟中取样面,(b)实验中取样面; C:同一通道截面中的速度矢量(c)*d* = 3.0 μm, θ = 45°, (d) *d* = 7.5 μm, θ = 30°, (e) *d* = 7.5 μm, θ = 45°; D:混合质量(f)不同 θ 时的混合质量,(g)不同 *d*/H 时的混合质量
- Fig. 2 Micromixer channel structure and its effect on mixing quality. A: Channel structure; B: Surface of sampling (a) Sampling cross-sections in simulation, (b) Sampling cross-sections in experiment; C: Velocity vector in the same channel section (c) d = 3.0 μ m, $\theta = 45^{\circ}$, (d) $d = 7.5 \mu$ m, $\theta = 30^{\circ}$, (e) $d = 7.5 \mu$ m, $\theta = 45^{\circ}$; D: Mixing quality (f) Mixing quality at different θ , (g) Mixing quality at different d/H

道截面处的速度矢量,如图 2C 所示。

在图 2C 中能够清晰看到通道中有漩涡的存在, 对比分析图 2C 中的(c)与(e),能够明显发现,随着 人字脊高度 d 的增大,漩涡的大小也随之增大,这是 因为 d 的增大会进一步压缩流经的流体,增加了流 体在竖直方向上流动的强度,进而增加了混合效果。 通过对比分析图 2C 中的(d)与(e)发现,随着人字 脊角度 θ 的变化,同一高度的人字脊通道中的漩涡 的强度变化不大,但数量会发生一定的变化。

为了定量地比较分析不同几何参数对通道混 合效果的影响,对模拟分析取样面中第7个取样截 面处的混合质量进行了计算。图2D中(f)分析表明, 当人字脊角度θ发生变化时,同一位置处的混合质 量也随之发生改变,且θ在40°~50°之间时的混合质 量较好。因为人字脊角度的存在会使得通道内的 流体发生旋转,随着人字脊角度的变化,旋转的强 度也随之改变,从而影响了混合质量;图2D中(g) 分析表明,当θ不变时,随着 d/H的增加,同一截面 中同一流体的质量分数分布变得更加均匀,说明通 道的混合性能随着漩涡强度的增加而增加。其中, 曲线斜率在 1/2 时最大,随后混合质量提升的趋势 逐渐趋于平缓,在 d/H为 4/5 时,混合质量达到最高, 这也说明了随着微混合器中人字脊高度的增加,流 体混合程度有逐渐增大的趋势。

为了分析入口流量大小对微混合器混合效果 的影响情况,本文取人字脊角度 θ = 45°, d/H 为 1/2 时的结构参数,设计制造微混合芯片,设置入口流 量梯度,通过仿真和实验的对比,进行入口流量大 小对混合效果影响的验证。

2.2 入口流量大小对混合效果的影响

入口流量大小会对混合效果产生影响,入口流 量大小不同,混合质量也不同。图 3A 中红色区域 代表乙醇,蓝色代表水,绿色代表乙醇和水完全混 合时的颜色状态,红蓝之间的颜色变化代表质量分 数的梯度分布。由图中明显看到,流体流过人字脊 结构之前,混合单元能够清晰地看到两种流体的分 界面,这是因为该部分的混合主要取决于流体交界 处分子的自由扩散。流经人字脊结构之后的流体 混合效果较好,这是由于人字脊的存在使得原来处 于蠕动流下分界鲜明的两种流体的界限被打乱,分



图3 入口流量大小对混合质量的影响。A: 不同 Re下主通道乙醇质量分数分布; B: 混合质量(a)不同入口流量下混合路径与混合质量之间的关系, (b)相同入口流量(10.0 μL/min)下有无人字脊结构的混合质量对比

Fig. 3 Effect of inlet flow size on mixing quality. A: Distribution of ethanol mass fraction under different *Re*; B: Mixing quality (a) Mixing quality as the function of mixing path under different inlet flow rates, (b) Comparison of mixing quality of the mixers with/without herringbone ridges at the same inlet flow rate (10.0 μL/min)

界面扭曲程度变大,促进了传质作用,加速了混合。 雷诺数越大,同一混合单元的流体分界界面就越清 晰,雷诺数最小时的出口质量分数云图最均匀。

为了更直观地了解不同人口流量下混合距离 与混合质量的关系,分别计算了这13个截面的混合 质量,结果如图 3B 所示。图 3B(a)能很明显看出, 不同的入口流速下,曲线的趋势基本上是一致的, 在混合通道中,流体流经人字脊结构之前,其混合 质量变化不大。而当流体流经人字脊时,由于人字 脊有倾斜角,流体会产生横向流速,并被迅速拉伸 折叠,从而增大了两种工质之间的接触面积,形成 了对流混合。同时, Re 越大, 速度越大, 而较大的速 度会导致较短的平均停留时间,从而导致较低的混 合质量。图 3B(b)可以看出,带有人字脊结构的通 道的混合效果要远远高于无人字脊的结构,混合质 量为 81.75%。根据混沌理论[17],流体在流经有人字 脊结构的单元时,因倾斜脊的存在,流体会产生横 向流速,两种流速的共同作用下,流体会发生旋转, 产生的横向扩散比无人字脊的结构强度要高,而且 由于反转人字脊的存在,通道的结构发生了变化, 流体间的分界面来回波动,流体被压缩,局部速度 突然变大,并且出现了在垂直方向上的流速,间接 的增大了流体间的接触面积。根据扩散机理^[18],两 种工质发生互相掺混才会最大程度的加快混合,微 芯片中横向与纵向这两种流动的结合大大提高了 芯片的混合效果。基于以上两种理论,结合模拟分 析结果,由此可以推论:分子扩散与对流混合主导 了在低 Re 下设计的微芯片的混合过程, 且这两种 混合机制的结合大大增加了混合效果。

2.3 微混合实验

为了更明显地显示混合前后的流体变化,本文 中的微混合实验选用 PBS 溶液(磷酸缓冲盐溶液) (无色)和台盼蓝染色液(深蓝色)为待混合工质,当 两者接触时 PBS 会稀释台盼蓝,使台盼蓝的颜色变 浅,以此来判别两种流体的混合程度。人字脊蛇形 通道微混合芯片采用 PDMS 制作,使用等离子清洗 机与玻璃进行封装,将微混合芯片制作成完整的微 混合器。

为了观察不同人口流量下的混合实验效果,在 入口流量为 2.5、5.0、10.0、20.0 和 40.0 µL/min 的条 件下, 微混合实验效果如图 4A 所示。由于倒置生 物显微镜和 CCD 相机本身的参数限制,记录时无 法截取完整的混合通道,只能分别截取混合通道的 上半部分和下半部分。图中能明显看出,在流动的 过程中,两种流体的交界面沿着流动方向逐渐变宽, 当流体流过人字脊后,两种流体的颜色分布发生了 明显变化,说明二者发生了一定程度的混合。入口 流量为 2.5 µL/min(Re = 0.0581)时, 混合通道的出口 看不到明显的颜色变化,随着入口流量的进一步增 大,混合通道的出口处流体分界越来越明显,这可 能是由于在低流速下,两种流体接触时间较为充足, 流体之间充分接触,进而提高混合质量,而高流速 下,两种流体接触时间较短,故出现一定的流体分 界现象。

流量大小不同,混合质量也不同。如图 4B 所 示。图中能明显看出,混合路径点 2-3 处的混合质 量提升最明显,曲线的斜率最大,以入口流量为 10.0 μL/min 为例,混合质量从 14.6% 急速上升至 69.9%, 由于流体流经人字脊时,脊结构起了导向作用,使



图4 混合实验分析及误差对比。A:不同入口流量下混合实验(a) 2.5 μL/min, (b) 5.0 μL/min, (c) 10.0 μL/min, (d) 20.0 μL/min, (e) 40.0 μL/min; B:不同入口流量下的混合质量对比; C:不同入口流量下误差分析(f) 2.5 μL/min, (g) 5.0 μL/min, (h) 10.0 μL/min, (i) 20.0 μL/min, (j) 40.0 μL/min, (k)平均误差

Fig. 4 Mixing experimental analysis and error comparison. A: Mixing experiment at different inlet flow rates (a) 2.5 μL/min, (b) 5.0 μL/min, (c) 10.0 μL/min, (d) 20.0 μL/min, (e) 40.0 μL/min; B: Comparison of mixing quality at different inlet flow rates; C: The error analysis at different inlet flow rates (f) 2.5 μL/min, (g) 5.0 μL/min, (h) 10.0 μL/min, (i) 20.0 μL/min, (j) 40.0 μL/min, (k) Mean deviation

流体发生横向流动,部分流体在此时转为螺旋式前进,产生了一定程度地对流扩散,同时人字脊两测 长短边的交替与流体分界面的波动,这二者的共同 作用导致了流体间接触面积的增大,从而大幅度提 升了混合质量。当流体流经下一个人形脊时,即混 合路径点4-5时,由于两种工质中分子的浓度差变 小,点4-5处混合质量提升的幅度比点2-3处明显 减小。此外,混合质量还随着入口流量的增大而减 小,入口流量为2.5 μL/min时,最终混合质量 89.7%,而当入口流量为40.0 μL/min,最终混合质量 仅为 71.9%。在这五种入口流量下,分子扩散与对 流混合主导了此芯片的混合过程,流速越小,流体 间接触的时间越长,同一处的混合质量越好。因实 验所用注射泵可调最低流速为 2.5 μL/min,本文以 2.5 μL/min 为实际使用中使微混合器具有应用价值 的最低流速,在当前数值范围内,此流速下,本文设 计的人字脊蛇形通道微混合器混合效率最高,其值 为 89.7%。

为了验证本文混合区模拟结果的可靠性,将实 验中提取数据的6个区域处的混合质量与模拟时相 应位置的数据进行对比,并计算平均误差。如图 4C 所示,能明显看出,模拟与实验时混合质量随混合 路径的趋势变化是一致的,都是随着距离的增加, 混合质量逐渐上升。此外,如图 4C 中(k)所示,最 大平均误差在入口流量为 40.0 μL/min 时出现,入口 流量为 2.5 μL/min 时的平均误差最小。值得注意的 是,所有情况下的平均误差均不超过 10.0%,证明本 研究中该混合区的数值模拟结果与实验结果非常 相近。

3 结论

本文提出了一种人字脊蛇形通道结构的微混 合器,在混合区域几何结构参数对流体混合作用研 究的基础上,通过仿真和实验的结合,分析入口流 量大小对微混合器中流体混合效果的影响。人字 脊和蛇形通道的结构设计可以让流体在微通道内 产生螺旋流模式,同时使流体形成了与流动方向不 同的对流,增加了两种流体的接触时间和接触面积, 这两种混合机制的结合大大提升了混合质量。人 字脊高度与通道高度之比越大,流体混合越充分, 最佳人字脊结构与通道间夹角θ在40°~50°之间。 在模拟流速范围内,流体流速越低,混合质量越好。 模拟和实验平均误差不超过10%。本文工作为微 尺度下混合实验研究提供理论参照,并为集成化微 混合器的性能优化提供设计方向。

参考文献

- Jeong G S, Chung S, Kim C B, et al. Applications of micromixing technology[J]. An-alyst, 2010, 135(3): 460-473
- [2] Hessel V, Lowe H, Schonfeld F. Micromixers-a review on passive and active mixing principles[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(8-9): 2479–2501
- Le T N, Suh Y K, Kang S. A numerical study on the flow and mixing in a microchannel using magnetic particles[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2010, 24(1): 441–450
- [4] Li J, Zhang M, Wang L, et al. Design and fabrication of microfluidic mixer fromcarbonyl iron-pdms composite membrane[J]. Microfluid Nanofluid, 2011, 10(4): 919–925
- [5] Lee C Y, Chang C L, Wang Y N, et al. Microfluidic mixing: a review[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2011, 12(5): 3263–3287
- [6] Wang L X, Zhang R Y, Chen G S, et al. Evaluation

method of concentration distribution for mixing characteristics of T-type micromixer[J]. Research Bulletin of Analytical Chemistry, 2008, 8(9): 1241–1244 (王灵秀,张仁 元,陈观生,等. T型微混合器混合特性的浓度分布评价 法[J]. 分析化学研究简报, 2008, 8(9): 1241–1244(in chinese))

- [7] Xia G D, Li J, Zhou M Z, et al. Effect of Structural parameters of Tesla Micromixer on mixing strength[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(3): 433–436 (夏国栋,李建,周明正,等. Tesla微混合器结构参数对混合强度的影响[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(3): 433–436(in chinese))
- [8] Ansari M A, Kim K Y. Shape optimization of a micromixer with staggered herringbone groove[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(23): 6687–6695
- [9] Choudhary R, Bhakat T, Singh R K, et al. Bilayer staggered herringbone micro-mixers with symmetric and asymmetric geometries[J]. Microfluid Nanofluid, 2011, 10: 271–286
- [10] Gao Y. Numerical study on transmission process of micromixer based on microfluidic theory[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015 (高阳. 基于微流控理论的 微混合器传输过程的数值研究[D]. 沈阳; 东北大学, 2015(in chinese))
- [11] He X H, Wang Y, Gao L F. Built-in block and baffle for mixer performance[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2008, 36(12): 1282-1286 (何秀 华, 王岩, 高凌峰. 内置阻块和挡板为混合器的性能[J]. 排灌机械工程学报, 2008, 36(12): 1282-1286(in chinese))
- [12] Shih T R, Chung C K. A high-efficiency planar micromixer with convection and diffusion mixing over a wide reynolds number range[J]. Mircrofluidics and Nanofluidics, 2008, 5: 175–183
- [13] Li P, Zhou D H, Ge Y Y. Design and analysis of lifting platform of underground parking garage based on AN-SYS[J]. Journal of Chifeng University(Natural science edition), 2019, 35(8): 66-68 (李培,周道鸿,葛园园. 基 FANSYS的地下停车库升降平台设计与分析[J]. 赤峰 学院学报(自然科学版), 2019, 35(8): 66-68(in chinese))
- [14] Liu Y, Mao H Y, Fan W B, et al. Design and simulation of a passive micro-mixer with baffle structure[J]. Micronano electronics, 2018, 55(4): 258-264 (刘洋, 毛海央, 范文兵,等. 一种挡板结构被动式微混合器的设计与仿 真[J]. 微纳电子技术, 2018, 55(4): 258-264(in chinese))
- [15] Lu Z, McMahon J, Mohamed H, et al. Passive microfluidic device for sub millisecond mixing[J]. Sensors and

Actuators B Chemical, 2010, 144(1): 301-309

- [16] Meinhart C D, Wereley S T, Santiago J G. A piv algorithm for estimating time-averaged velocity fields[J]. Journal of Fluids Engineering, 2000, 122(2): 285–289
- [17] Sommerer J C, Ott E, Tél T. Modeling two-dimensional fluid flows with chaos theory[J]. Johns Hopkins APL

Technical Digest, 1997, 18(2): 193-203

[18] Wang R J. Study on diffusion and mixing mechanism of fluid in microchannel and its micromixer[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2005 (王瑞金. 微通道中流体扩散 和混合机理及其微混合器的研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2005(in chinese))

文章简介

微混合器是指在微通道或微腔室内实现样品快速均一混合的一种微流控器件,适用于两种或多种不同 反应物在微尺度条件下充分的混合。微混合器中的通道尺寸是用微米来衡量的,在微尺度的条件下,由于 微通道中流体的雷诺数较低,微流体的流动基本为层流状态,两种及多种液体之间的充分混合需要借助微 通道结构或外力的精确调控来增加不同液体之间的接触面积和接触时间,从而达到所需要的混合程度。微 混合技术在生物芯片、微化学分析、环境检测等领域有着极高的应用价值,其在微流控器件上的应用也推 动了医学诊断、化学合成、生物传感器和基因组学分析的研究。

在被动式微混合器的研究中,以Y形和T形微混合器最为常见,其结构制作简单,加工工艺成熟,但其 受到分子扩散系数的影响,混合强度较低。在被动式微混合器中,流体流动以层流为主,混合主要依赖于分 子扩散。因此,想要提高被动式微混合器的混合效率,增大流体间的接触面积和减小扩散路径是提高微混 合效率的主要方式。本文提出一种人字脊蛇形通道的被动式微混合器,在人字脊混合结构的基础上,设计 弯曲的蛇形通道以增强扰动,脊结构的存在增强了流体界面的拉伸和折叠,以指数方式增加了流体之间的 接触面积,重点围绕人字脊的结构参数和混合器的工作参数对混合器混合性能展开分析研究,通过蛇形通 道和人字脊结构的结合达到提高混合质量的目的,为后续微混合芯片的研发提供参考。

通讯作者介绍



刘坤,教授、博士生导师,东北大学真空与流体工程研究所所长,主要从事真空科技 与微纳机械领域的教学和研究工作。先后承担国家自然科学基金联合基金重点项目、国 家科技重大专项课题、国防重点项目课题、教育部、省市和企业横向课题等项目 50 余项; 公开发表学术论文 100 余篇,其中 SCI/EI 检索 50 余篇;授权国家发明专利 30 余项、国际 发明专利 3 项, 8 项成果转化到企业成功应用;参编学术专著 3 部,主持和参与制订了 3 项真空技术领域的国际标准,其中包括第一项由中国主导的国际标准(ISO 21360-3 2019), 荣获教育部技术发明二等奖、航天科技集团、中国计量测试学会以及省市科技奖励等 10

余项,荣获辽宁省"学术头雁"、"兴辽英才"、"盛京人才"等荣誉称号。在国内外多个重要学术组织担任社 会职务,担任国际标准化组织真空技术委员会 (ISO/TC 112) 中方委员、中国真空学会真空冶金专委会副主 任兼秘书长、真空工程专委会副主任、国家真空技术装备工程实验室学术委员会委员、全国真空技术标准 化委员会委员、辽宁省真空技术产业创新战略联盟秘书长等。

团队简介

课题组微纳流动与微纳机械团队从微纳流体力学、胶体力学和传输过程等学科出发,研究微观、纳观 流体的基本流动与扩散传质问题,通过微纳方法制造生物芯片,并进行优化和测试。与美国哥伦比亚大学 (Columbia University)BioMEMS 实验室、美国洛克菲勒大学 (Rockefeller University)神经生理与行为科学实 验室等展开国际合作,关注在蛋白质痕量探测与神经元给药等生物芯片中粒子的微纳传输过程,结合微纳 机械设计理论、流体力学、热力学、粒子传输原理和表面与胶体力学等多学科的交叉,探索微纳生物芯片的 基本设计理论与微观传递过程。研究基于微纳流动与扩散传质理论,建立生物芯片的微纳尺度集成模型, 指导芯片的理论设计和优化、探索困扰实验摸索大量耗费时间和费用的现状问题。

近年来,团队获得了2项国家自然科学基金、2项教育部博士点基金、3项教育部基本科研费等课题资助,该学术方向已初具规模、初步建立了微纳流动研究的理论、模拟和实验平台。