



## 多维度微混合芯片设计与应用研究进展

罗永皓<sup>1,2</sup>, 张伟业<sup>2,3</sup>, 王志<sup>3</sup>, 朱晓武<sup>2,4</sup>, 陈兴驰<sup>2</sup>, 董东东<sup>2</sup>

(1. 石河子大学化学化工学院/化工绿色过程兵团重点实验室, 新疆 石河子 832003; 2. 广东省科学院新材料研究所/现代材料表面工程技术国家工程实验室/广东省现代表面工程技术重点实验室, 广东 广州 510650; 3. 沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870; 4. 温州大学机电工程学院, 浙江 温州 325035)



**摘要:**微尺度下的流体混合与传统宏观流体混合有显著不同,由于内壁摩擦力、粘滞阻力及表面张力等特性的影响被放大,微尺度流体混合展现出特殊规律。近年来,微混合芯片因混合效率高、液体接触面积大、输出通量高、可自动化控制及制造成本低廉的优势,在化工、材料及生物医学等领域中得到快速发展。由于微混合芯片的流道尺寸大多在毫米级别以下,有的甚至只有几微米到几十微米,因此流体粘度对流动的影响更加显著。流场中流速的扰动会因粘滞力而衰减,使得流体流动趋于稳定,微流道内流体的流动表现为层流状态,导致微流体内部扰流效应具有一定的困难性。因此,为实现微流体的充分混合,开发快速高效微流体混合器是基本前提,突破微小尺度流道内流体的层流界限,促进微通道中的全方位扰流以达到充分混合状态则是关键。以被动式微混合器的研究进展作为切入点,从芯片的设计维度出发,递进式地介绍了多维度微混合芯片设计的发展历程,总结了低维度到高维度的基本结构设计思路及功能的专一化。归纳了微混合技术在微化工领域、生物医药领域及新能源领域中应用和研究进展,并讨论了在其他领域中应用的可行性。微混合技术凭借广泛的应用场景,在未来将有巨大的发展潜力和应用空间。

**关键词:** 微流体混合芯片; 微混合; 扰流效应; 被动混合; 多维构型; 微化工; 生物医药; 新能源

**中图分类号:** TQ021

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9981(2024)04-0509-13

**引文格式:** 罗永皓, 张伟业, 王志, 等. 多维度微混合芯片设计与应用研究进展[J]. 材料研究与应用, 2024, 18(4): 509-521.

LUO Yonghao, ZHANG Weiye, WANG Zhi, et al. Research Progress in Design and Application of Microfluidic Hybrid Chips [J]. Materials Research and Application, 2024, 18(4): 509-521.

### 0 引言

近年来,各类设备都在向微型化发展,人们对流体的研究也开始从宏观尺度向微观尺度递进,微纳米尺度下的流体流动研究越来越受到重视。20世纪90年代,Manz等<sup>[1]</sup>提出了一种小型的全化学分析系统模块化结构,该结构也称为微全分析系统,即芯片实验室(Lab-on-a-chip),其在微米或亚微米尺寸下对流体进行操控。微流控技术发展至今,以样品体积小且消耗少、分析检测效率高、分析速度快等优势,在微尺度下的分析检测领域中取得了重要成果<sup>[2]</sup>。该技术通过微流控制装置对微通道内的流体

进行控制与处理,已广泛应用于化工、微电子设备冷却<sup>[3]</sup>、微纳米材料的制备<sup>[4-5]</sup>和生物医学<sup>[6]</sup>等领域。

流体混合是流体流动研究中的一大重点。广义上讲,混合是指将两种或多种物料借助机械或流体动力等手段进行分散以实现均质化的过程。混合不仅可以制备均匀混合物,也可以为其他化学反应提供良好的接触条件。根据组分相态,混合通常分为液-液混合、固-固混合、液-固混合、气-液混合及气-液-固三相混合等<sup>[7]</sup>,其中液-液混合主要应用于化工<sup>[8]</sup>、聚合<sup>[9]</sup>等工业化生产中。对于微小尺寸的装置(毫米级至微米级),其内容物流体性质(包括表面

收稿日期: 2023-12-22

基金项目: 石河子大学创新发展专项(CXFZ202204); 广东省科学院发展专项资金项目(2022GDASZH-2022010107; 2022GDASZH-2022010203-003; 2019BT02C629); 广州市科技计划项目(202007020008; 202102020327)

作者简介: 罗永皓, 博士, 副教授, 研究方向为特种加工、微流控技术及3D打印。E-mail: 453277049@qq.com。

张力、特征尺寸等)表现出与宏观尺度条件下的显著不同,微尺度下的表面张力和内壁摩擦力对流体流动的影响远大于宏观尺度。与宏观流体混合目的相同,微流体混合同样追求在微型设备中实现多样品的充分快速混合。然而,由于微流体所具备的特殊流态性质,其形成机制与影响因素是目前微流体混合研究的重点之一<sup>[10]</sup>。

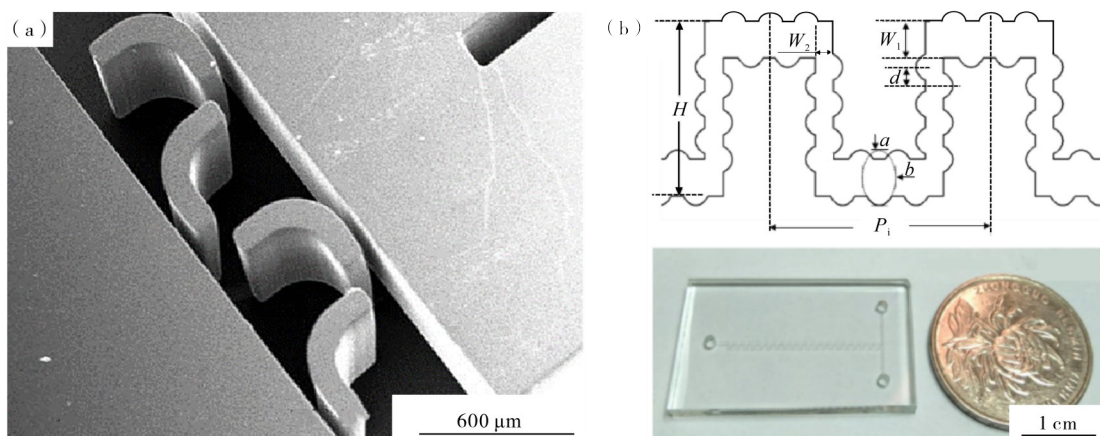
微尺度下流体流动的雷诺数( $Re$ )往往低于100,此时流体粘度对流动的影响更为显著,流场中流速的扰动会因粘滞力而衰减,使得流动区域稳定,流体表现为层流状态<sup>[11]</sup>。而流体混合则需增大雷诺数,使流场惯性力的影响占据主导,此时流速的微小变化更容易产生紊流。为了实现微流体的混合,首先要解决雷诺数过低的问题,作为流体载体的微混合器是研究的关键。微混合分为主动式和被动式两种<sup>[12]</sup>。主动式混合器,通过施加电场磁场等外力使流体产生扰动,进而增大流体的雷诺数,实现湍流流动;被动式混合器,通过设计微通道的内部构造来使流体自发产生扰动,从而增大流体的雷诺数,使流体实现从层流到局部湍流的转变。二者的区别在于是否施加外力,而最终目的均是改变流体的流动状态,使流体产生紊流而更好地混合。微混合器的作用在于促使流体接触并混合,进而发生相互作用或化学反应,充分且快速的混合对后续的反应至关重要。混合效率被用来衡量混合是否充分、迅速,如何提高混合效率是微混合器领域的重点研究方向。

本文对不同维度通道构造的被动式微混合器的设计思路及结构功能进行了归纳,总结了微混合技术的发展现状,并对其在微化工、生物医学及燃料电池中的实际应用进行了介绍,最后对微流控混合芯片未来发展趋势进行了总结与展望。

## 1 基于不同维度的微混合器流道设计

### 1.1 一维流态混合

微混合器中最简单、最基本的流道为T形或Y形<sup>[13-16]</sup>。该类混合器是通过引导两种流体从不同入口进入微通道并相互接触混合,混合过程仅取决于两流体界面上的扩散,所以过程进行的相当缓慢。为了提高混合效率,可以通过改变通道几何结构的方式如设置通道内障碍物或者增加壁面粗糙度等,促进流体速度矢量方向与大小的变化,从而使流体产生自发扰动<sup>[17-18]</sup>。Veenstra等<sup>[19]</sup>设计了一种用于将酚溶液混合到水中的T形混合器,该混合器的混合路径可以随时调节,通过简单地缩短混合通道,进而缩短扩散长度,以便在特定时间内控制特定化合物的混合。Garstecki等<sup>[20]</sup>在宽为200  $\mu\text{m}$ 、高为70  $\mu\text{m}$ 的Y型通道底部的流道内制作14—17  $\mu\text{m}$ 深的人字形凹槽,流体每经过一个凹槽就会发生速度矢量方向的变化,产生垂直于沟道方向的涡流,从而起到促进混合的效果。Lin等<sup>[21]</sup>在T型通道的底部布置J形障碍物(见图1(a)),J形挡板将流体分割成两组速度矢量方向不同的流体,经过挡板作用后的两组流体在汇合处形成对流碰撞,且挡板越多混合效果越显著。Zhao等<sup>[22]</sup>提出了一种具有侧壁锐边结构的声学微混合器,研究发现主导混合效果的因素由低流速下的声场转变为高流速下的水动力效应,并验证了几个参数对混合效果的影响,其中传感器振幅、曲率和锐边密度与混合效果呈正相关,而锐边倾角则呈负相关。Shi等<sup>[23]</sup>在改进的蛇形微通道两侧引入向外凸起的椭圆结构(见图1(b)),这些椭圆形凸起能够使流体产生涡流,进而提高低雷诺数下流体的混合效果。



(a)—装有J形挡板的微混合器<sup>[21]</sup>; (b)—有椭圆凸起的微混合器<sup>[23]</sup>。

(a)—micromixer with J-shaped baffle; (b)—micromixer with elliptical projection.

图1 一维结构微混合器

Figure 1 One-dimensional fluid micromixer

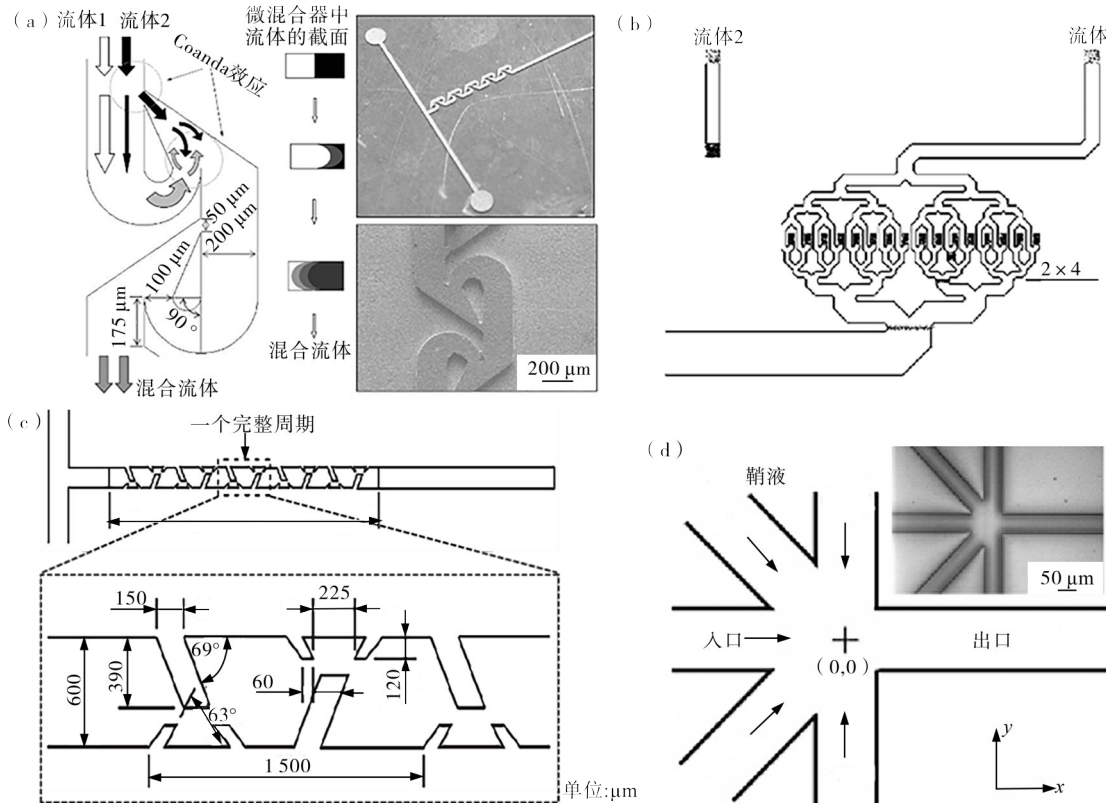
一维流态混合的研究主要聚焦于对通道内部流形的研究,是后续高维流道设计的基础。上述的一维T形或Y形微通道混合器,只是简单地在通道内部做文章,通常以设置简单的障碍物(如在通道内部添加一些形状各异的挡板等),实现流体产生自发扰动效果。虽然一维设计难度及成本很低,但混合效果并不理想。

1.2 二维流态混合

二维流态混合则是在一维基础上,对混合路径进行设计和改良出多通道。该类混合器是将两种相接触的样品沿入口通入,在混合路径上将样品流分割成两股之后再聚合,多次的速度矢量方向改变能有效地促进流体内部的自发扰流。Hong等<sup>[24]</sup>设计了一种在微尺度流动条件下具有优异混合性能的新型微混合器(见图2(a)),该混合器采用改进的二维特斯拉结构作为无源阀,使两股流体在通道作用下形成较大的速度矢量角度差,扰流效应显著。Bessoth等<sup>[25]</sup>在玻璃基板上刻蚀出微流控芯片(见图2(b)),该芯片由硅片从两面刻蚀而成,两相流体分别从正反两面进入后被平均分在16个混合单元中,

然后分割流体再聚合,此操作可以多次进行,混合效果虽然会有所提升,但是会占用较大的面积,需要考虑成本问题。在T形或Y形微混合器的基础上,把通道入口处改为多个参数相同的交错通道,该设计可以达到更好的混合效果。陈锦岚等<sup>[26]</sup>研发出一种复合侧壁结构微混合器(见图2(c)),在微通道的内壁插入复合结构,该构造混合器的混合效果较普通周期性排列的挡板有明显的提升。Shuai等<sup>[27]</sup>在混合单元内布置含有特定角度的阵列式间隙,研究间隙的几何形状对混合效果的影响,结果表明减小间隙宽度或增加间隙长度均有利于扰流效应的产生。

流体动力聚焦的方法在二维微混合器的设计中应用较多。流体聚焦是在一个带有三入口的长微通道的中间通道通入样品试液,两侧通道通入鞘液,样品溶液在两侧鞘液的挤压作用下实现了液流的压缩。聚焦流宽度减小的程度取决于样品流和鞘液层流之间的体积流量比,流量差越大中央液流宽度减小的程度越大,最终产生更有效的混合。Park等<sup>[28]</sup>设计出一种五入口混合器(见图2(d)),额外的两个对角鞘液流在聚焦过程中充当从中心流出的溶液和



(a)一采用改进特斯拉结构的微混合器原理示意图及显微照片<sup>[24]</sup>; (b)一多管道式二维微混合器<sup>[25]</sup>; (c)一复合侧壁结构微混合器<sup>[26]</sup>; (d)一五入口式二维微混合器<sup>[28]</sup>。  
 (a)—schematic diagram and micrograph of micromixer with improved tesla structure; (b)—multi channel two-dimensional micromixer; (c)—composite sidewall structure micromixer; (d)—five inlet two-dimensional micro mixer.

图2 二维结构微混合器  
 Figure 2 Two-dimensional micro-mixer

两侧通道之间的屏障,缩短了流体聚焦预混合的时间,且不影响后续的混合。

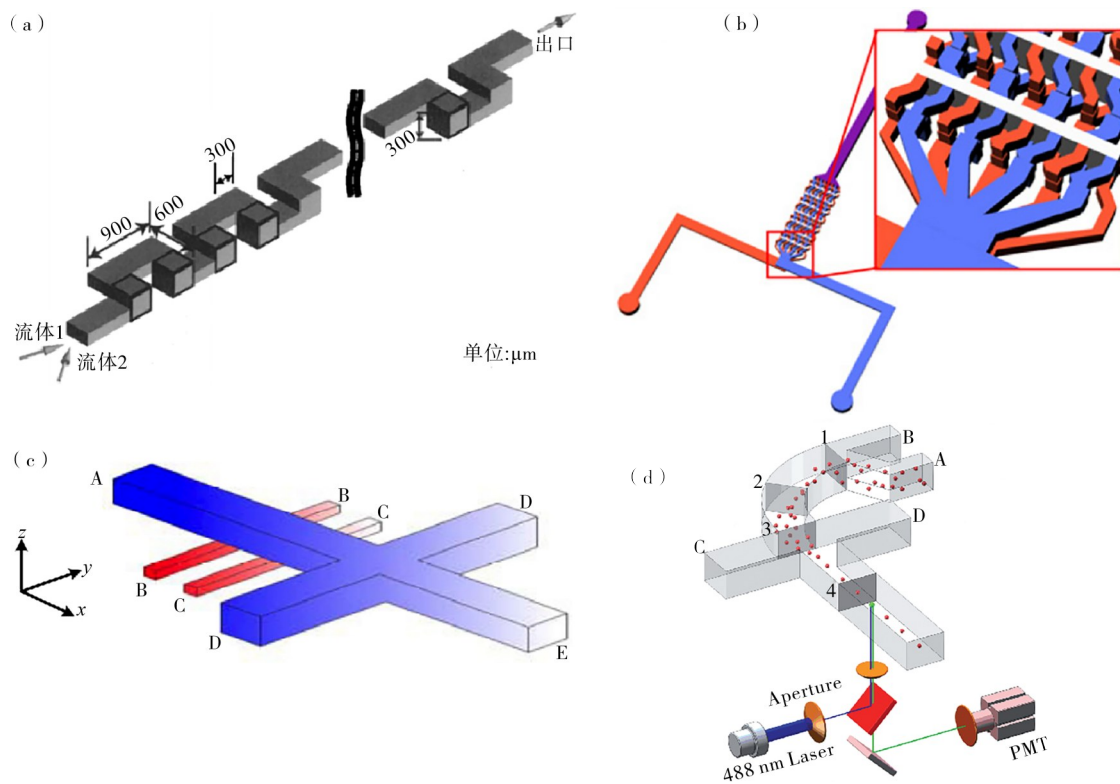
相比一维流态混合,二维流道的设计思路更为多样化,从简单的弯曲通道到集成化设计,将混合效果提升到一个新高度,但结构的复杂化使得设计难度及成本逐渐上升。

### 1.3 三维流态混合

在二维基础上拓展的三维流态混合,更是将多样化与复杂化体现的淋漓尽致。与二维混合器相比,三维混合器相当于拓展了一个 $z$ 轴方向的速度矢量分量。从整体流道来看,弯曲通道的设计方向由仅限于一个平面变成三维空间的任意方向,同理通道内部流形的改变也更加复杂多样。例如,二维的蛇形微混合器只是通过连续的弯曲通道设计,促进流体的速度矢量方向发生变化,从而加速混合,混合效果虽有提高但不显著,如果把这种蛇形的二维通道设计拓展成三维,可达到更好的混合效果。Liu等<sup>[29]</sup>采用双面KOH湿法蚀刻技术在硅片上制作出具有C形重复单元的三维蛇形微通道(见图3(a))。当两种流体流经蛇形沟道的转角处时会产生横向的

矢量方向改变,混合效果得到显著提升,在经过5个相同的蛇形区域后混合效率达到98%。另外,将简单的T形或Y形通道拓展成三维也应有不错的效果。研究人员基于层流原理设计了一种微混合器,通过荧光淬火的方式观察流体的混合情况,发现通道边缘的流体层比中心略厚,这不利于边界层处的扩散,导致整体混合时间偏长。Cha等<sup>[30]</sup>提出了一种新颖的棋盘式混合器(见图3(b)),混合器在1.4 mm内即可完成混合,而且在不影响性能的前提下,可以轻松增加流体流速。

应用流体聚焦的三维微混合器,可同时在水平和垂直方向上对流体实施压缩。Chang等<sup>[31]</sup>设计了一种能够在水平和垂直方向上实现聚焦的微混合器(见图3(c)),该装置能够实现压缩主流宽度进而促进速度矢量增大的作用。但是,该类装置的制造工艺相对复杂,需要采用多步光刻等手段,成本较高。为了解决上述问题,Mao等<sup>[32]</sup>基于三维流体动力聚焦技术,设计出一种微流控漂移式细胞芯片,即微流控漂移混合器(见图3(d))。该装置使用微流控漂移在垂直方向聚焦样品流,再经两个水平鞘液流的作用实现水平方向的聚焦,结果显示液流在垂直和水



(a)—三维蛇形微混合器<sup>[29]</sup>; (b)—三维棋盘式微混合器<sup>[30]</sup>; (c)—三维流体动力聚焦微混合器<sup>[31]</sup>; (d)—微流控漂移机制<sup>[32]</sup>。

(a)—three dimensional serpentine micro mixer; (b)—three dimensional checkerboard micro mixer; (c)—three-dimensional hydrodynamic focused micromixer; (d)—microfluidic drift mechanism.

图3 三维结构微混合器

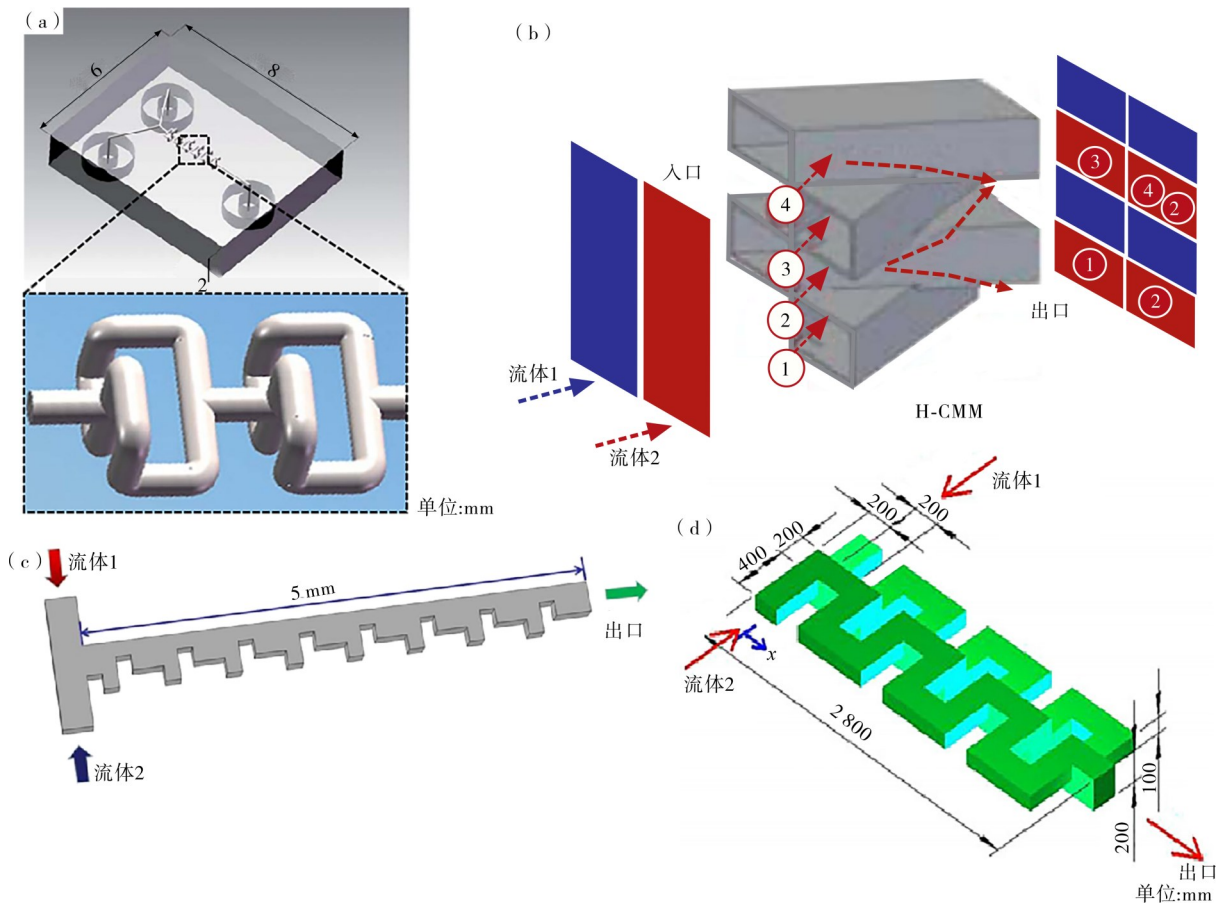
Figure 3 Three-dimensional fluidic micro-mixer

平方向上均实现了聚焦。

除以上几个基于二维流态拓展成三维结构的混合器外,独立设计的三维微混合器才是当前研究的热点。三维结构的混合器具有较好的混合效果,但加工工艺相对较复杂。Liao等<sup>[33]</sup>通过飞秒激光刻蚀的方法在玻璃内加工出结构较为复杂的3D混合器(见图4(a)),解决了3D复杂通道加工工序的难题。Lim等<sup>[34]</sup>通过光刻和双光子吸收立体光刻的顺序工艺,制造了一种嵌入微通道的新概念三维交叉流形微混合器(见图4(b)),发现即使在通道长度小于通道宽度5倍的情况下,也可以获得90%的高混合效率。阎怡安等<sup>[35]</sup>设计了一种人字脊蛇形通道微混合器,并对其混合结构进行研究。结果表明,在一定结构参数取值范围内,人字脊角度在 $40^{\circ}$ — $50^{\circ}$ 时对流体速度矢量方向的改变效果最好,扰流效应显著且混合充分,模拟和实验平均误差不超过10%,具有良好的一致性。Xiong等<sup>[36]</sup>基于Koch分

形(OKF)原理在微混合器中设置障碍物,研究了OKF的数量对混合性能的影响(见图4(c))。结果表明,通过改变OKF的位置可调整障碍物的引流效果,当8个OKF在微通道中错开且高度为0.2 mm时,OKF微混合器的混合效率提高至97.1%。

顺序层压微混合器也称为分离重组(SAR)微型混合器。顾名思义,是通过分流和重新汇合流体的连续过程,以及通过增加接触表面积和减少扩散路径,实现更快速的混合<sup>[37]</sup>。Melin等<sup>[38]</sup>制造并测试了多个交叉型微通道,当液体样品通过混合室时会产生速度矢量方向不断变化的流型,并在0.4 s内实现两种流体的均匀混合。Lotfiani等<sup>[39]</sup>基于分裂与重组(SAR)和涡流混合原理,使用软光刻技术在聚二甲基硅氧烷(PDMS)中制造出一种微流控芯片(见图4(d)),并对其进行了数值模拟分析。结果表明,该混合器在雷诺数低于0.3或高于50时混合效率很高,但中间雷诺数的混合性能很差,后续可以通



(a)—三维被动微流控混合器示意图<sup>[33]</sup>; (b)—水平交叉流形微混合器(H-CMM)的混合机构<sup>[34]</sup>; (c)—基于Koch分形(OKF)原理的障碍物三维微混合器<sup>[36]</sup>; (d)—SAR微混合器设计的几何形状和尺寸<sup>[39]</sup>。  
 (a)—schematic diagram of the three-dimensional passive microfluidic mixer; (b)—schematic diagrams of the mixing mechanism of the horizontally crossing manifold micromixer (H-CMM); (c)—3D micromixer with obstacles based on the Koch fractal principle (OKF); (d)—geometry and size of SAR micro mixer design.

图4 独立设计的三维微混合器

Figure 4 Individually designed three-dimensional micro-mixers

过添加额外的混合装置来进行改善。

目前,对三维微混合器提升混合效果的研究已经日益成熟,但依然存在通道设计复杂、成本高的问题。最关键的一点是能否应用到实际场景,这才是研究的意义所在。因此,三维微混合器的功能化才是当下乃至未来很长时间的重点研究方向。

基于不同维度的微混合流道设计均是利用几何

形貌来影响流态,以达到促进混合的效果。一般情况下,流道设计维度越高及形貌越复杂,相应的混合效果也会越好。然而,设计与制造难度的增加必将影响微流道的集成化应用。另外,各种阻流、扰流构造的加入,使流态复杂化的同时在一定程度上也会降低流速,不利于高通量需求下混合效率的提升。不同维度被动式微混合器代表性研究成果列于表1。

表1 不同维度被动式微混合器的形貌机理与特点

Table 1 Morphological mechanisms and characteristics of passive micromixers with different dimensions

维度	形貌设计	混合机理	混合效率	设计难度	参考文献
一维	T形或Y形微混合器	设置通道内障碍物或者增加壁面粗糙度等	低	低	[13]
	采用特斯拉结构微混合器	特斯拉阀的反向阻流效果	较高	较高	[24]
二维	多管道式微混合器	增加扩散时间和混合路径	中	中	[25]
	五入口式微混合器	流体动力聚焦	中	低	[28]
三维	三维蛇形微混合器	通过连续的弯曲通道改变流体流动方向,流经蛇形通道的转角处产生横向对流促进混合	较高	中	[29]
	棋盘式微混合器	基于层流原理的多层结构	高	高	[30]
	微流控漂移微混合器	三维流体动力聚焦	高	较高	[32]
	水平交叉流形微混合器	流体的分离-重组效应	高	较高	[34]

## 2 微流体混合技术的应用

微流体混合技术以强传热传质性质、微型化、高效率、低成本的特点,应用于各领域中。微混合技术的强传热传质性质可实现快速高效的混合,以快速、充分满足微化工的各种反应需求。混合设备的微型化、集成化的优势,在工业化大批量成产中也有着不俗的表现。例如:在生物医药领域,对生物样本中复杂的、具有异质性的组分进行检测时,通常检测手段昂贵且需消耗大量的样本,而微混合技术微型化及高灵敏度的优势可以完美地解决此类问题;在新能源领域,氢燃料电池涉及气液混合的问题,而充分快速混合正是微混合器最大的优势;在散热器领域,微混合技术的强传热传质性质得到充分发挥,有着不错的发展前景。

### 2.1 微化工领域中的应用

微化学工程与技术着重研究尺寸在微米级的化工微型设备的特征和规律。由于特征尺寸的微型化,微尺寸设备的表面作用力较常规尺寸设备有着显著增强,其在化工过程中主要受传热传质影响。微混合技术的强传热传质能力可以实现快速高效的混合,促进过程强化。微混合技术在许多化学反应过程中实现了工业化应用,如纳米材料制备、有机物合成、反应分离等。

纳米材料制备是微化工技术的主要应用领域。采用膜分散微混合技术将分散相与连续相在微米尺度的通道内快速均匀的混合,从而大幅增加传质面

积,通过特殊的通道构造实现流动均一、反应均匀。采用膜分散微混合技术与膜分散沉淀相结合的方法,可以制备出大小均一且形貌规则的颗粒,并赋予材料独特的性质,从而制备出高性能的纳米材料,这是传统的直接液相沉淀法无法达到的。Alessandra等<sup>[40]</sup>用全氟聚合物作为氢基阴离子交换膜(AEMs)的替代品,并将其应用于水电解器中,该全氟聚合物的相分离特性使膜离子迁移率( $\mu_{\text{eff}}$ )达到 $1.99 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,比FAA3-50商用膜高出一个数量级。谢煜等<sup>[41]</sup>利用膜分散微反应器实现了D-7-ACA的高效溶解,并研究了pH值、温度和循环流速等因素对D-7-ACA溶解度的影响,相较于传统搅拌法,微反应器使D-7-ACA的溶解度提高了5.91%。XU等<sup>[42]</sup>用中空纤维膜作为分散介质,采用双膜分散液相法(见图5(a))制备氧化锌,其平均粒径由传统法的182 nm减小至45 nm,实现了产品品质的提升。

相较于纳米材料的制备,微化工技术在聚合物反应领域中的应用同样广泛。例如,在微化工技术的强化聚合反应过程中,微混合器起到混合、传质和传热的作用,实现对目标聚合物的相对分子质量大小及分布控制、聚合物分子结构控制、聚合物形貌控制等<sup>[43]</sup>。近年来,清华大学微化工团队在聚丙烯酸树脂、活性聚异丁烯等聚合物产品的反应规律和微反应过程强化等方面取得了较好的结果,为高品质聚合物的生产开辟新的思路。谢沛等<sup>[44]</sup>针对4-溴-3-甲基苯甲醚间歇非均相合成技术存在的问题,将膜

块化的微反应系统(见图5(b))用于连续合成溴化间甲基苯甲醚,在保证安全的同时极大提高了反应效率,实现了4-溴-3-甲基苯甲醚的连续高效合成。间甲基苯甲醚是一种染料中间体,其传统合成方法生产效率低下。为解决该问题,王德强等<sup>[45]</sup>设计了一种装有反应釜的实验装置(见图5(c)),通过微反应器辅助合成了间甲基苯甲醚,实现了反应物两相的快速均匀混合,间甲基苯甲醚的合成效率达到99.0%以上。

此外,在反应分离领域中,常规的萃取分离方法存在溶剂使用量大、价格高、挥发性强、易燃易爆、工艺流程长,以及获得的产物纯度不理想等诸多缺点。

微化工技术在反应分离过程中的应用能够克服这些问题,可以实现分离效果好、产品纯度高、易于连续生产及自动控制。2008年,清华大学联合贵州瓮福集团<sup>[46]</sup>开发了微结构萃取器净化湿法磷酸技术,在该技术的基础上制作出微混合器(见图5(d)),该微结构的萃取设备大大地缩小了设备体积尺寸,有效地降低了成本。同时,该团队还研发出多种微结构元件和微结构设备,制出处理能力可达到 $12 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 的湿法磷酸净化微化工系统,该系统由微萃取器、微型反萃取器、脱色微型反应器和微型洗涤器反应单元组成,并建成了世界首套工业生产装置,相比国外引进的技术成本降低了4.2%。

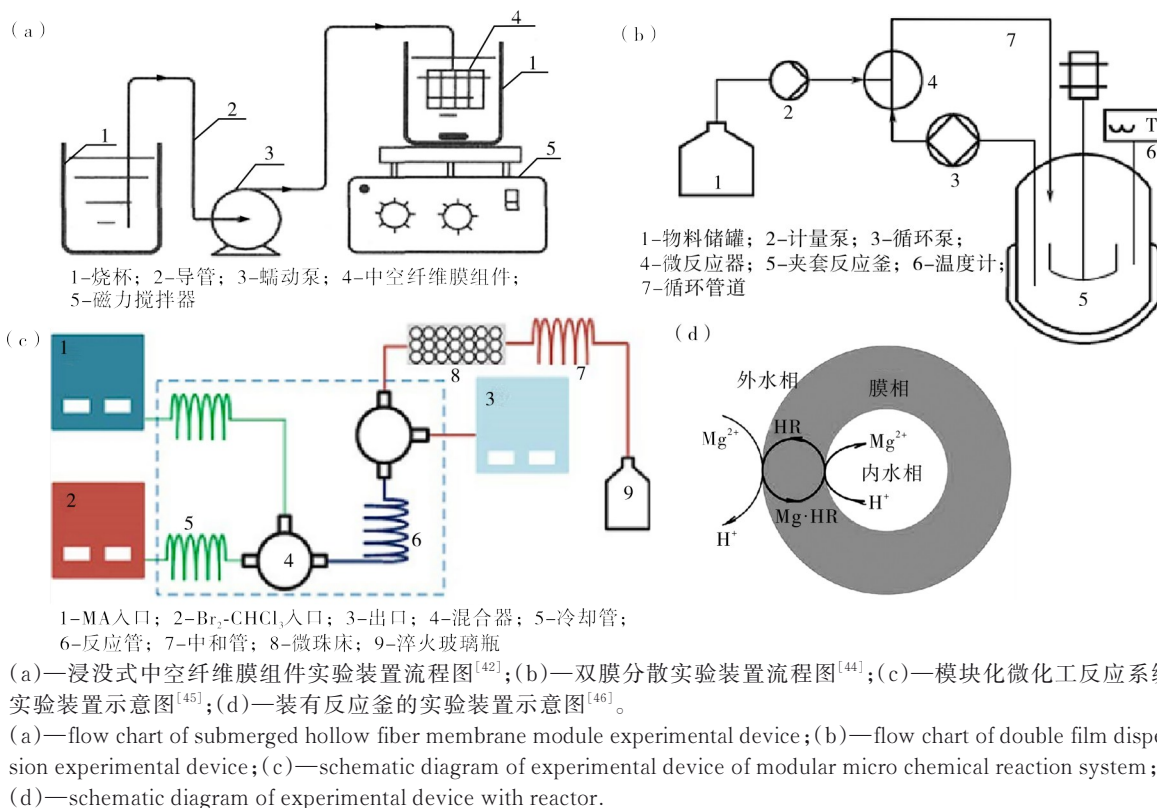


图5 微流体混合技术在微化工领域中的应用

Figure 5 Microfluidic mixing technology in microchemical applications

## 2.2 生物医药领域中的应用

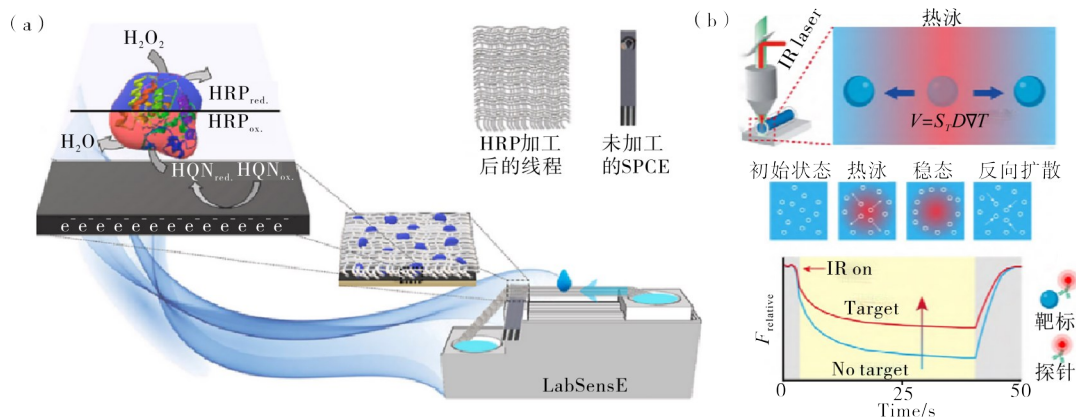
软光刻技术和微流体混合器集成技术的出现,使微混合技术在生命科学研究中的应用范围大幅扩大,如生物化学、生物医学、生物工程制造等多个领域。混合在许多化学和生物微流控应用中属于基本过程,生物医药行业中有许多方面涉及到混合,如酶分析、纳米合成、生物传感等。长期以来,酶分析都是临床医学和生物化学分析领域的支柱。随着微混合技术的发展,人们将原本在一间实验室中进行的操作转向小型化平台,要做到这一点系统中须携带

必要混合组件及检测系统的微结构。快速有效的混合对酶分析至关重要,尤其是在分析反应前期就要确定反应速率时。Lucas等<sup>[47]</sup>设计了一种化学处理过氧化物酶(HRP)的 electrochemical microfluidic device (见图6(a)),通过EDC/NHS交联将酶中的胺基与纤维素结构中的羧酸连接,实现HRP的固定化,通过将羧基与含胺大分子交联,建立了一种简单而成本低的微流体系统,为其他基于蛋白质的检测提供了一个新的平台。

微混合技术以独特的特性在生物医学研究中获得了广泛的应用,其在微/纳米材料合成领域的独特

优势开始吸引众多科研人员的眼光,随之被广泛应用于微/纳米材料的合成领域中<sup>[48]</sup>。与常规的微纳米材料合成方法相比,微混合技术具备微量、高效和集成化等优势。由于微混合芯片体积小的优势,使实验的原料消耗量较少,对于价值较高的试样来说降低了反应成本<sup>[49]</sup>。虽然微混合器所需试剂量很小,但是其传热传质效果远强于宏观尺寸的混合器,因而混合更充分均匀、效果更理想、反应更高效迅速<sup>[50]</sup>。对于工业化大批量生产的需求,微混合器可通过把多个结构单元组合起来的方式实现集成化,而功能方面同样也可以达到高度集成<sup>[51]</sup>。人体复杂的生命体系中存在多种生物分子,如蛋白质、核酸及微纳米级别的生物粒子,这些生物分子携带丰富的生物信息并参与到复杂生命体系活动的过程中,对关键分子和微纳米生物粒子的高灵敏、高特异的检测,从而更好理解多层次多尺度生物学过程、阐明

疾病发生发展机制、探索新型生物标志物等具有重要意义。微流控生物传感器综合了微混合技术和生物传感技术的诸多优势,在微量生物样本精准测量领域中取得了显著成就。随着微混合技术和生物传感技术的发展,将这两种技术综合的微流控热泳生物传感系统,在微量生物样本的快速、均相、精准检测方面取得了显著进展<sup>[52]</sup>。微量热泳技术(Microscale Thermophoresis, MST)通过检测物质在微观温度梯度场中的热泳运动及荧光强度变化,实现靶标的定量检测,其工作原理示意图如图6(b)所示。Antton等<sup>[53]</sup>采用数值模拟与实验相结合的方法,对不同流体进行混合并发现,当在微器件中央通道中施加垂直温度梯度时,较高的温度梯度和较低的总流量会使通道产生热引力效应而有效地促进混合,这种现象可用于微流体学,以优化不同流体的混合。



(a)—电化学微流控装置<sup>[47]</sup>; (b)—微量热泳技术(MST)的工作原理<sup>[52]</sup>。

(a)—electrochemical microfluidic device; (b)—working principle of microscale thermophoresis(MST).

图6 微流体混合技术在生物医药领域中的应用

Figure 6 Microfluidic mixing technology in biomedical applications

### 2.3 新能源领域中的应用

在越来越趋于微型化的大背景下,燃料电池也顺应该趋势向着微型化方向发展。随着环境友好型社会观念的提出,清洁能源正在逐渐替代传统化石能源<sup>[54]</sup>。由于氢氧燃料电池的排放物只有水(H<sub>2</sub>O),不会污染环境,其可作为环境友好型能源,而甲醇水蒸气重整制氢(MSR)是分步式制氢的主要实现方式。此外,甲醇在常温常压下以液态形式存在,为其存储和运输提供了极大的便利<sup>[55]</sup>。微混合器的优良性能、紧凑的结构和较高的工业化可行性,使其在中小型化工反应,特别是在甲醇重整制氢这类对安全性有较高要求的反应中具有非常广阔的应用前景。甲醇重整制氢的微反应系统由供料单元、汽化蒸发单元、重整反应单元及富氢气体后处理

单元等多个模块组成(见图7(a))。

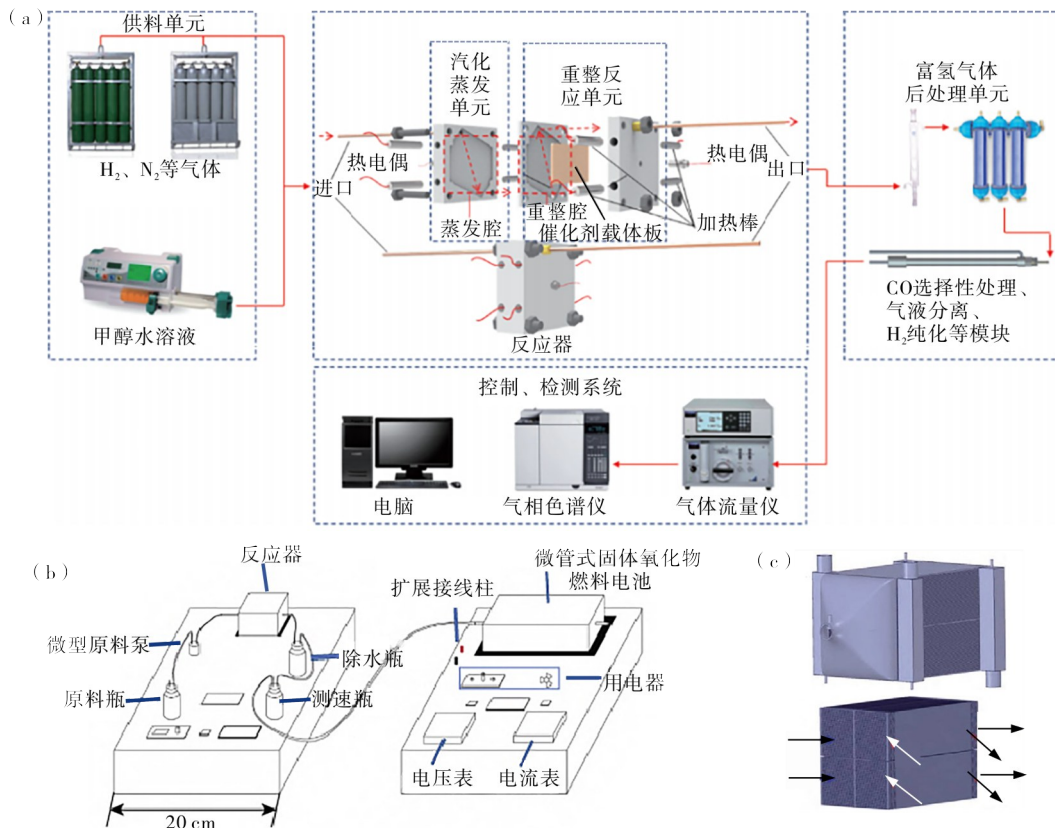
燃料电池主要有质子交换膜燃料电池(PEMFC)、固体氧化物燃料电池(SOFC)、碱性燃料电池(AFC)、磷酸燃料电池(PAFC)和熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)<sup>[56]</sup>。马跃等<sup>[57]</sup>提出了一种甲醇蒸汽重整制氢微管式固体氧化物燃料电池(MT-SOFC,见图7(b)),结合扫描电子显微镜(SEM)、X射线衍射仪(XRD)表征MT-SOFC和MSR催化剂材料特性,并使用色谱、电子负载分析该仪器的功能特性,在720℃时最大输出功率密度(MPD)可达0.53 W·cm<sup>-2</sup>。汽车行业是燃料电池应用大户,氢燃料电池受限于移动供氢技术的发展,虽有高压液态储氢、有机液体储氢等储氢技术,但这些技术具有成本高、稳定性差等各种缺陷。姚鹤等<sup>[58]</sup>针对一车用甲醇重整制氢微混合器建立了计



算流体动力学(CFL)三维流动仿真模型及化学反应动力学仿真模型,通过模拟与实验相结合的方法,分别从微混合器入口流速的均匀性、通道内部温度分布、反应物及产物分布、甲醇转化率、CO含量、CO<sub>2</sub>选择性等方面分析了微混合器的性能。结果表明,用该微混合器进行甲醇重整制氢反应,器件换热性能良好,物料在通道作用下充分混合,氢气氧化反应放出的热量足够甲醇重整反应所需热量,最终的甲醇转化率为86.0%、CO<sub>2</sub>选择性为90.1%、产物中CO含量为2.1%。该微混合器的整体几何模型与内部流道结构如图7(c)所示。

此外,微混合技术在微通道散热器领域的应用也颇为广泛。为了进一步提升大面积高功率电子器件的散热需求,研究人员采用两相混合模型对带

分流器的针翅式散热器的热液特性进行了三维数值分析。结果表明,与不带分流器的引脚式散热器相比,带分流器的散热器增加了传热表面积,实现更好的流动混合<sup>[59]</sup>。Runfeng等<sup>[60]</sup>以R134a为工作流体,设计和制作了一种结合微通道和射流冲击的混合式散热器,并在闭环系统中进行了测试,得到了不同热流密度和流量下散热器的热阻。为了进一步提高射流冲击与微通道复合的换热性能,Zhang等<sup>[61]</sup>研究了一种新型的可沿通道长度方向分配冷却水的分流式微通道散热器(D-MCHS),并对比研究了不同分区数的D-MCHS的冷却性能,发现通过增加分流区的数量可以提高D-MCHS的热均匀性。此外,通过外界辅助的方式,如外加磁场等来实现强化换热效果同样受到广泛的研究<sup>[62]</sup>。



(a)—典型甲醇重整制氢反应系统结构示意图;(b)—甲醇重整制氢微型燃料电池示意图<sup>[57]</sup>;(c)—微反应器几何模型与内部流道结构<sup>[58]</sup>。

(a)—structural diagram of typical methanol reforming hydrogen production reaction system;(b)—schematic diagram of methanol reforming hydrogen production micro fuel cell;(c)—geometric model and internal flow channel structure of microreactor.

图7 微流体混合技术在新能源领域中的应用

Figure 7 Application of microfluidic mixing technology in new energy field

微混合技术通常作用于微反应前的准备阶段,即通过混合来为反应提供实验原料,在整个过程中起至关重要的作用。因此,微混合的应用大多与微

反应重合,分别为整个过程的前后两部分。表2为各种微混合技术应用领域的实例与特点。

表2 微混合技术应用领域的实例与特点

Table 2 Examples and characteristics of the application field of micromixing technology

应用领域	应用方向	相关技术	设计实例	特点与优势	局限与不足	参考文献
微化学工程	纳米材料制备	膜分散微混合技术、纤维膜分散技术	中空纤维膜分散法制备硫酸钡纳米颗粒、双膜分散液相制备方法制备的氧化锌颗粒	反应物停留时间短、反应温度温和安全性高	模块化微反应系统应用领域局限	[35]
	有机物合成	4-溴-3-甲基苯甲醚间歇非均相合成技术	4-溴-3-甲基苯甲醚的连续高效合成	合成效率较高、反应成本低	实际应用中操作较为复杂	[39]
	反应分离	微结构萃取器净化湿法磷酸技术	微萃取器、脱色微型反应器及微型洗涤器	分离效果好、产品纯度高、易于连续生产	难以应用于大批量生产	[41]
生物医学	酶分析	执行停流反应的微混合器的微加工酶分析系统	高效进行基于动力学的停流酶分析	分析检测效率高	需要外加混合组件,结构复杂化	[42]
	纳米合成	光学检测技术与微流控技术的联用	可用于高真空环境中的微流控电化学池	微量、高效、高通量、可集成化	难以精确控制反应发生停止	[43]
	生物传感	微量热泳技术	C反应蛋白(C-reactive protein, CRP)的原位检测	实现反应蛋白的原位检测	外加温度产生设备,成本较高	[47]
新能源	氢燃料电池	甲醇重整制氢技术	质子交换膜燃料电池(PEMFC)、微管式固体氧化物燃料电池(MT-SOFC)	安全性有保障、甲醇转化率高	成本较高,可能产生有害气体	[52]
	微通道散热	射流冲击技术	射流-微通道复合散热器	满足大面积散热器件的需求	散热效率不够高,结构设计较为复杂	[56]

### 3 结语

本文介绍了以微混合技术为基础研发的3个维度被动式微混合器的性能及特点,并对微混合技术在微化工、生物医学和动力机械领域中的应用进行了具体介绍。

(1)随着技术的发展,一维与二维微混合器的研究已趋于成熟,而处于发展阶段且上限极高的三维微混合器是当下研究的热点。现阶段的微混合器功能以促进流体快速混合为主,有关微混合器的其他功能是未来的研究目标,如方向可控的微混合器等。

(2)目前,微混合技术在微化工领域的应用最为广泛,尤其是在纳米材料制备中,已可以制备出粒径极小的颗粒。在生物医学领域中,生物传感器整合了微流控技术与生物传感技术的诸多优势,在微量生物样本精确测量方面取得显著进展。在新能源领域中,以氢燃料电池为例,目前已实现微型化的要求,并且能够达到较高的制氢效率。

微混合技术具有诸多优势,但作为一项发展还不够成熟的新技术,仍然存在很多问题需要解决。基础理论方面,宏观的规律并不适用于微观流体的混合,而微尺度下的完整理论体系仍需修正与补充。应用方面,主动式混合器虽适用于工业化大批量生产,但存在难以控制反应进程的问题,被动式混合器需要以复杂的内部构造支撑混合效果,而复杂的结

构导致集成化难度提升,不适于批量化生产。因此,从芯片的设计、制造、性能测试到实际应用及产业化批量生产,各个过程都有待深入研究。此外,当前对微混合的研究主要集中于理论方面,对功能化的研究还不够深入。例如:在通道内设置能产生强流阻的原件,可使流体不在第一时间进入混合室,以此来满足一些延时反应的需求;相反,在通道中设置能促进流体加速的元件,可使流体快速到达出口,以满足流体需要快速转移的场景。所以,微混合技术还有很多未知的应用领域有待开发,只有当以上问题都解决之后,微混合才能实现大规模应用。

### 参考文献:

- [1] MANZ A, GRABER N, WIDMER H M. Miniaturized total chemical analysis systems: A novel concept for chemical sensing [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 1990, 1(1):244-248.
- [2] 张萌萌,谢于锰,梁焜明,等.毛细管微流控芯片器件研究进展[J]. *高分子材料科学与工程*, 2023, 39(5): 182-190.
- [3] DANIEL L, YOGENDRA J. Numerical modeling and experimental validation of two-phase microfluidic cooling in silicon devices for vertical integration of microelectronics [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 138:194-207.

- [4] SHEKHAR C K, RAJAN K, S P C. Reinforcement of micro and nano material with aluminum alloy (Al7075) metal matrix composite: A review [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2484(1):12023.
- [5] MARIIA S, EVGENIA K. Modification of cellulose micro- and nano- materials to improve properties of aliphatic polyesters/cellulose composites: A review [J]. *Polymers*, 2022, 14(7):1477.
- [6] SHI H, NIE K, DONG B, et al. Recent progress of microfluidic reactors for biomedical applications [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 361: 635.
- [7] REZA Y, SOPHIE D. Modeling the mixing phenomenon in water distribution networks: A state-of-the-art review [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2022, 148(2):3121002.
- [8] EKTA T, KUMAR P P, SUKUMAR P. Mixing characteristics and pressure drop analysis in a spiral micromixer [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2022, 236(6):2618-2629.
- [9] YAOLONG Z, XUEYE C. The mixing performance of passive micromixers with smart-rhombic units [J]. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2022, 43(3):439-445.
- [10] JUNCHAO W, NAIYIN Z, JINKAI C, et al. Predicting the fluid behavior of random microfluidic mixers using convolutional neural networks [J]. *Lab on a Chip*, 2021, 21(2):296-309.
- [11] MANSOUR M, KHOT P, THÉVENIN D, et al. Optimal Reynolds number for liquid-liquid mixing in helical pipes [J]. *Chemical Engineering Science*, 2020, 214:114522.
- [12] XUEYE C, SHUFEN L, YAO C, et al. A review on species mixing in droplets using passive and active micromixers [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2021, 101(3): 422-432.
- [13] JIE S T, HWA K Y, AZMI M I, et al. Numerical assessment on liquid mixing in a T-mixer containing trifin [J]. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2021, 16(6):e2703.
- [14] CLAUDIO C, LORENZO S, SIMONE C. Investigation of the symmetry-breaking instability in a T-mixer with circular cross section [J]. *Physics of Fluids*, 2020, 32(12):124106.
- [15] TAN J S, YU H K, ISMAIL A M, et al. Enhanced liquid mixing in T-mixer having staggered fins [J]. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2020, 15(6):e2538.
- [16] KU A, GS D, KV T, et al. Modeling and investigation on mixing characteristics of T & Y-shaped micromixers for microfluidic devices [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 59 (P1) : 501-505.
- [17] KALANTAR RASHIDI M. Mixing process and flow structure in electrokinetic micromixer with rough walls—a study on rough geometry [J]. *Experimental Techniques*, 2022, 47(1):1-17.
- [18] WENPENG G, LI T, BIQIANG Z, et al. Fundamental studies of rapidly fabricated on-chip passive micromixer for modular microfluidics [J]. *Micromachines*, 2021, 12(2):153-153.
- [19] VEENSTRA T T, ELWENSPOEK M C, VAN DEN BERG A, et al. Characterization method for a new diffusion mixer applicable in micro flow injection analysis systems [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 1999, 9(2):199.
- [20] GARSTECKI P, FISCHBACH M A, WHITESIDES G M. Design for mixing using bubbles in branched microfluidic channels [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(24):4108-1-4108-3.
- [21] LINYU C, YUNGCHIANG C, CHUNGYI W. Mixing enhancement of the passive microfluidic mixer with J-shaped baffles in the tee channel [J]. *Biomedical Microdevices*, 2007, 9(2):215-221.
- [22] XIONG Z, HONGQIANG C, YAXUAN X, et al. Sharp-edge-driven spiral acoustic micromixers for functional nanoarray engineering [J]. *Materials Today Nano*, 2023, 22:100338
- [23] SHI H, NIE K, DONG B, et al. Mixing enhancement via a serpentine micromixer for real-time activation of carboxyl [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 392:123642-123642.
- [24] CHIEN-CHONG H, JIN-WOO C, AHN CHONG H. A novel in-plane passive microfluidic mixer with modified Tesla structures [J]. *Lab on a Chip*, 2004, 4(2):109-113.
- [25] BESSOTH G, DEMELLO A J, MANZ A. Microstructure for efficient continuous flow mixing [J]. *Analytical Communications*, 1999, 36: 213.
- [26] 陈锦岚, 牛东, 蒋维涛, 等. 复合侧壁微结构增强被动微混合的数值模拟研究 [J]. *工程热物理学报*, 2022, 43(9): 2382-2388.
- [27] SHUAI Y, BINGYAN J, FENGZE J, et al. Numerical and experimental investigation of mixing enhancement in the passive planar mixer with bent baffles [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 191:122815.
- [28] PARK H, QIU X, RHOADES E, et al. Achieving uniform mixing in a microfluidic device: Hydrodynamic

- focusing prior to mixing [J]. *Anal Chem*, 2006, 78(13): 4465.
- [29] LIU R, STREMLER M, SHARP K, et al. Passive mixing in a three-dimensional serpentine microchannel [J]. *Micro Electromech Syst*, 2000, 9(2): 190.
- [30] CHA J, KIM J, RYU S K, et al. A highly efficient 3D micromixer using soft PDMS bonding [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, 16(9): 1778-1782.
- [31] CHANG C C, HUANG Z X, YANG R J. Three-dimensional hydrodynamic focusing in two-layer polydimethylsiloxane (PDMS) microchannels [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2007, 17(8): 1479-1486.
- [32] MAO X, LIN S, DONG C, et al. Single-layer planar on-chip flow cytometer using microfluidic drifting based three-dimensional (3D) hydrodynamic focusing [J]. *Lab Chip*, 2009, 9(11): 1583.
- [33] LIAO Y, SONG J X, LI E, et al. Rapid prototyping of three-dimensional microfluidic mixers in glass by femtosecond laser direct writing [J]. *Lab on a Chip*, 2012, 12(4): 746.
- [34] LIM T W, SON Y, JEONG Y J, et al. Three-dimensionally crossing manifold micro-mixer for fast mixing in a short channel length [J]. *Lab on a Chip*, 2011, 11: 100.
- [35] 闫怡安, 邓欣然, 姜玥, 等. 人字脊蛇形通道微混合器性能的研究 [J]. *真空科学与技术学报*, 2023, 43(7): 569-576.
- [36] XIONG Siyue, CHEN Xueye. Numerical simulation of three-dimensional passive micromixer based on the principle of Koch fractal [J]. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 2021, 19(5): 465-472.
- [37] ZAHRA F, HAMED M H, EHSAN I. Vortex-induced vibration effects on mixing performance [J]. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2022, 182(22): 109211.
- [38] MELIN J, GIME'NEZ G, ROXHED N, et al. A fast passive and planar liquid sample micromixer [J]. *Lab Chip*, 2004, 4(3): 214.
- [39] LOTFIANI A, REZAZADEH G. A new two-layer passive micromixer design based on SAR-vortex principles [J]. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 2021, 19(3): 309-329.
- [40] ALESSANDRA C, CAMPAGNA S Z, IRENE G, et al. Aquivion-based anion exchange membranes: Synthesis optimization via dispersant agents and reaction time [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 455: 140765.
- [41] 谢煜, 张民, 胡卫国, 等. 利用膜分散微反应器高效溶解 D-7-ACA 的研究 [J]. *化工学报*, 2023, 74(2): 748-755.
- [42] XU S, WEI J, DING Z W, et al. Preparation of zinc oxide ultrafine particles using double hollow fiber membrane dispersion technology [J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology*, 2010, 37(3): 68.
- [43] NURILA K, CECÍLIA L. Microfluidic synthesis of multilayered lipid-polymer hybrid nanoparticles for the formulation of low solubility drugs [J]. *Soft Matter*, 2023, 19(8): 1596-1605.
- [44] 谢沛, 王凯, 邓建, 等. 模块化微反应系统内溴化间甲基苯甲醚连续合成 [J]. *化工学报*, 2020, 71(9): 4168-4176.
- [45] 王德强, 王金婷, 王凯, 等. 循环微反应系统内间甲基苯甲醚的合成 [J]. *化工进展*, 2020, 39(12): 5228-5233.
- [46] WANG Z J, WEI C T. Progress on research of purification technology for wet-process phosphoric acid [J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2019, 48(10): 50.
- [47] LUCAS F, ROBERTO P O D, DEONIR A, et al. Novel and highly stable strategy for the development of microfluidic enzymatic assays based on the immobilization of horseradish peroxidase (HRP) into cotton threads [J]. *Talanta*, 2022, 252: 123889-123889.
- [48] KAVITHA I, SRABANI K, PALLAVI G, et al. Microfluidic nanomaterials: From synthesis to biomedical applications [J]. *Biomaterials*, 2022, 280: 121247.
- [49] JINGYU W, SAGAR Y, DAEYEON L, et al. Scaling up the throughput of microfluidic droplet-based materials synthesis: A review of recent progress and outlook [J]. *Applied Physics Reviews*, 2021, 8(3): 31304.
- [50] 李亚冰, 付蕾浩, 王振龙, 等. 基于三维微流控芯片的图案化 ZnO 纳米棒阵列的生长 [J]. *微纳电子技术*, 2022, 59(9): 936-944.
- [51] YU-SHRIKE Z, ALEMAN J, RYON S S, et al. Multisensor-integrated organs-on-chips platform for automated and continual in situ monitoring of organoid behaviors [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(12): E2293-E2302.
- [52] 刘超, 田飞, 邓瑾琦, 等. 基于微流控热泳的生物传感技术 [J]. *化学学报*, 2022, 80(5): 679.
- [53] ANTTON S, ANE E, MOUNIR M B. Analysis of thermophoresis for separation of polystyrene microparticles in microfluidic devices [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 189:

- 122690.
- [54] MUHAMMAD TAQI M, SUNG-WOO P, JONGHWAN K, et al. Performance characteristics of a robust and compact propane-fueled 150 W-class SOFC power-generation system [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(12): 6160-6171.
- [55] XUYANG C, WEI C, XIAOJIN T, et al. Research on the hydrogen production performance of methanol reforming microchannels with multi-scale structures [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(90):38155-38169.
- [56] PENG Jingxuan, HUANG Jian, WU Xiaolong, et al. Solid oxide fuel cell (SOFC) performance evaluation, fault diagnosis and health control: A review [J]. *Journal of Power Sources*, 2021, 505:230058.
- [57] 马跃, 林蔚然, 姚越, 等. 便携式甲醇蒸汽重整制氢耦合固体氧化物燃料电池实验装置设计[J]. *实验技术与管理*, 2022, 39(4): 173.
- [58] 姚鹤, 余皎, 沈建跃. 车用微反应器甲醇重整制氢系统的研究[C]. 上海: 中国汽车工程学会, 2020:7.
- [59] DAN W, TAO H. The parametric optimization to enhance the pin-fin microchannel heatsink performance using splitter and water/silver nanofluid applying the two phase mixture model [J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2023, 146:216-225.
- [60] RUNFENG X, PINGTAO Z, LIANG C, et al. Experimental study on cooling performance of a hybrid microchannel and jet impingement heat sink [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(24):13033.
- [61] ZHANG Y, WANG S, LIU Z. Effect of fluid distribution along the channel length on the cooling performance of microchannel heat sink [J]. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 2022, 32(12):3800-3823.
- [62] 江美霞, 龚俭龙. 基于三维集成电路带扰流微通道散热特性分析[J]. *广州城市职业学院学报*, 2022, 16(4): 80-84.

## Research Progress in Design and Application of Microfluidic Hybrid Chips

LUO Yonghao<sup>1,2</sup>, ZHANG Weiye<sup>2,3</sup>, WANG Zhi<sup>3</sup>, ZHU Xiaowu<sup>2</sup>, CHEN Xingchi<sup>2</sup>, DONG Dongdong<sup>2</sup>  
(1. School of Chemistry and Chemical Engineering/Key Laboratory for Green Processing of Chemical Engineering of Xinjiang Bingtuan, Shihezi University, Shihezi 832003, China; 2. National Engineering Laboratory of Modern Materials Surface Engineering Technology/Guangdong Provincial Key Laboratory of Modern Surface Engineering Technology/Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 4. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

**Abstract:** Different from the traditional macroscopic fluid mixing process, microscale fluid mixing follows unique principles due to the amplified effect of surface tension, friction, and viscous resistance. Due to the advantages of high mixing efficiency, large liquid contact area, high output flux, automated control, and low manufacturing cost, micromixing chips have been rapidly developed in recent years in fields such as chemicals, materials, and medicine. The typical runner sizes of these chips are below the millimeter level, often only a few micrometers to tens of micrometers. At this scale, the influence of fluid viscosity is more significant, leading to a laminar flow, which makes achieving thorough fluid mixing challenging. Therefore, achieving complete mixing of microfluidic is essential for developing fast and efficient micromixers. The key is to overcome the laminar flow regime within the micro-channels to facilitate thorough mixing. This paper takes the research progress of passive micromixers as a starting point, introducing their development from the design perspective. It summarizes the structural design principles from low to high dimensions and the specialization of functions. Furthermore, it reviews the applications of micromixing technology in microchemicals, biomedicine and new energy, and discusses its potential feasibility in other fields. With its wide range of application scenarios, micromixing technology holds great potential for future development and application prospects.

**Keywords:** microfluidic mixing chip; microscopic mixing; perturbation effect; passive mixing; multidimensional configuration; microchemical; biomedicine; new energy

(学术编辑: 孙文)