

微混合技术的原理与应用

乐 军 陈光文 袁 权

(中国科学院大连化学物理研究所, 大连 116023)

摘 要 介绍了微混合技术的发展现状; 以微混合器内的混合机制为主线, 探讨了不同的微混合器结构型式及其在微反应系统中的应用; 展望了微混合技术的应用前景。

关键词 微通道, 微化工技术, 微混合器, 微反应器, 过程强化

中图分类号 TQ 027.1; TQ 051.71 **文献标识码** A **文章编号** 1000-6613(2004)12-1271-06

微化工技术由于其超强的传热、传质能力, 将在化学、化工、能源、环境等领域得到广泛应用^[1-4]。其核心部件为完全或部分采用微加工技术制造出的微型化工系统, 通道特征尺度在数微米至数百微米范围。针对不同的应用背景, 已派生出具有各种功能的微化工器件, 如微全分析系统、微换热器、微混合器、微反应器等^[1]。

本文将着重阐述微化工技术中的重要组成部分——微混合技术的发展现状, 以流体混合机制为主线, 探讨不同结构型式的微混合器及其在化工过程中的应用。

1 微混合技术原理

传统混合过程依赖于层流混合和湍流混合。微化工系统中, 由于通道特征尺度在微米级, Reynolds 数远小于 2000, 流动多呈层流, 因此微流体混合过程主要基于层流混合机制, 其基本混合机理如下^[5]。

层流剪切 在微混合器内引入二次流, 使流动截面上不同流线之间产生相对运动, 引起流体微元变形、拉伸继而折叠, 增大待混合流体间的界面面积、减少流层厚度。

延伸流动 由于流动通道几何形状的改变或者由于流动被加速, 产生延伸效应, 使得流层厚度进一步减小, 改进混合质量。

分布混合 在微混合器内集成静态混合元件, 通过流体的分割-重排-再结合效应, 减小流层厚度, 并增大流体间的界面。

分子扩散 分子水平均匀混合的必经之路。在常规尺度混合器中, 只有当剪切、延伸和分布混合使流层厚度降至足够低的水平时, 分子水平的混合才有意义。而在微混合器中, 由于微通道当量直径可低至几个微米, 依据 Fick 定律:

$$t \sim l^2 / D \quad (1)$$

当待混合流体处于同一微通道内时, 分子扩散路径大大缩短, 因此仅依靠分子扩散就可在极短的时间内(毫秒至微秒级)实现均匀混合。

2 微混合器分类

依据输入能量的不同, 将其分为以下两大类。

(1) 非动力式微混合器 (passive micromixer) 除驱动流体流动的力(如压力、电渗驱动等)外, 混合不借助于外力进行, 混合器中不含任何可移动部件。

(2) 动力式微混合器 (active micromixer) 混合在电场、声场等外力作用下进行。

两者可进一步细分, 参见图 1。实际混合过程往往是多种混合机制协同作用的结果, 因此图 1 中不同类型微混合器间并无严格的界限。

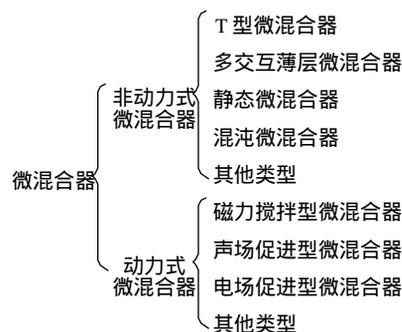


图 1 微混合器的分类

2.1 T型微混合器

T型微混合器结构简单, 两流体成 T 形或 Y 形配置进入直线形微通道进行混合。由于微通道特

收稿日期 2004-06-08; 修改稿日期 2004-06-19。

基金项目 国家自然科学基金(No. 20176057, No. 20490200), 国际科技合作重点项目计划(2001CB711203)及中国科学院大连化学物理研究所创新基金(No. K2003E2)共同资助。

第一作者简介 乐军(1976-), 男, 在读博士。联系人 陈光文, 博士, 研究员。电话 0411-84379031。

征尺度可达微米级,由式(1)知,即使没有对流作用,仅通过分子扩散,也可在较短长度内实现良好的混合效果。流体混合的通道尺度越小,扩散混合的时间越短。Koch等^[6]通过缩减T型通道尺寸,液层厚度仅为5 μm,在较短长度内实现了氨水和酚酞溶液的理想混合。Bokenkamp等^[7]在硅片上蚀刻2个串联的T型微混合器,调控第1个混合器出口通道长度和流体流速,可在110 μs内实现氯乙酸苯酯水解反应的引发和终止。

数值模拟与实验研究结果表明^[8,9],低 Reynolds 数时,黏性力为主要作用力,两液体成平行分层流动,混合主要通过分子扩散,混合效果随 Reynolds 数增加而下降;高 Reynolds 数时,惯性力作用增强,流动易受入口腔和T形混合区的扰动影响,出现漩涡流和缠绕流动,即对流混合的作用明显,混合效果随 Reynolds 数增加而保持在一定水平甚至有所提高。

Gobby等^[10]在模拟T型微混合器内的气体混合特征时发现,入口角度对混合性能无明显影响,然而在入口混合处引入小孔喷嘴节流元件,同等混合效果下,混合通道长度大大缩短。

此外,通过操作条件的调控可形成微通道内液-液弹状流来强化不互溶液体间的混合^[11]。

2.2 多交互薄层微混合器

T型微混合器提供的流体间界面有限。Erbacher等^[12]指出,宽度>500 μm的微通道不适于扩散混合,除非流速相当低。因此为促进混合,需要最大限度地缩减扩散路径,由式(1)知,通过微混合器的物理构造将待混合的两流体各自细分成 n 个薄层,并使其交互接触,扩散时间将缩减为:

$$t \sim l^2/n^2D \quad (2)$$

这种多交互薄层接触原则(multilamination)已被广泛用来加速层流下微混合器内流体间的混合^[12~21]。主要分为以下几种。

(1) 交指式微混合器(interdigital micromixer)

IMM(美国兹微技术研究所)的研究人员设计了不同操作方式(并流、逆流)的交指式微混合器,依据混合腔结构的不同分为狭缝形、三角形、方形和超级聚焦型(SuperFocus)^[13~15]。

如早期采用LIGA技术加工的具有狭缝混合腔的逆流交指式微混合器中^[13],每一流体通过V形分布区进入交指式通道(15对或18对、壁面为正弦形、宽25 μm或40 μm、深300 μm)被分为多片交互的薄层,但由于通道壁的间隔并不接触,正弦曲线状通

道可进一步增加各薄层之间的接触面积。通过覆盖于通道上方的狭缝(典型宽度350~2000 μm)与出口相连,形成混合区。实验发现通过调节狭缝与交指式微通道的宽度可在大部分流量范围内获得良好的混合效果,同时其层流区混合效果要远高于湍流区操作的间歇搅拌釜和T型混合器。

可视化实验和数值模拟发现,交指式微混合器中混合强化的主要原理如下^[14,15]。

扩散混合 交指式流动分布结构形成两流体的多交互薄层配置,层流厚度维持在微米级,扩散路径大大缩短。

延伸效应 如三角形混合腔的宽度逐渐变细使得流动加速,多交互薄层厚度进一步减小,导致混合强化。超级聚焦型微混合器更能体现此特点。

(2) 堆叠式微混合器 FZK(Karlsruhe研究中心)的研究人员将带有直线或曲线形微通道(特征宽度250 μm,深度<500 μm)的金属或陶瓷薄片层层堆叠,构成流体细分单元。两种流体在各层间交替流动,后接混合腔使细分的多交互薄层流体得以混合^[16],同时混合腔内可集成网状元件促进流体间的二次流,强化混合^[17]。Ehlers等^[18]认为,虽然流体薄层在微通道内为层流流动,但进入混合腔后,有可能转变为湍流流动,因此,混合机理不完全基于分子扩散,应考虑湍流作用。

(3) 其他多交互薄层配置微混合器 Manz与合作者^[12,19]以及Jensen研究组^[20,21]设计的液-液和气-液微混合设备中,均通过合适的流动分布结构将两流体分布成多层薄片,再交互接触到一个窄通道内,荧光摄影证实可在几十毫秒内完成高效液-液混合,同时可实现气-液反应所必需的快速、均匀分散。

2.3 静态微混合器

静态微混合器通过在微通道内集成静态微混合元件,促进流体的分布混合,改善混合质量,其混合原则见图2。

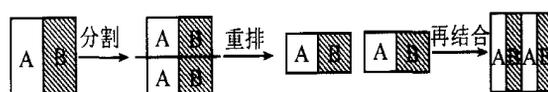


图2 静态微混合器的混合原则

可见,对于两分层流动液体,通过 n 个静态元件串联,理想情况下下层厚度将变为最初的 $1/2^n$,扩散混合所需的时间成指数性衰减,即

$$t \sim l^2 2^{-2n} D \quad (3)$$

静态微混合元件主要具有以下几种结构。

(1) 叉形元件 Schwesinger 等^[22]在混合通道上集成叉形元件(截面为三角形), 通过通道结构的变形使两流体被不断地分割、重排后又在叉形元件处汇合, 从而流体间接触面积越来越大, 扩散路径越来越短。针对不同体系的气-液与液-液混合实验结果也比较理想。

(2) 内插物 Bertsch 等^[23]在直径为 1 200 μm 的圆管中插入两种静态混合元件, 一种呈互相交联的通道, 另一呈螺旋形结构。实验和数值模拟表明静态元件引起了流体间的分割-重排-再结合行为, 且前者性能较优。

(3) 坡道形结构 IMM 设计的名为“Caterpillar mixer”的微混合器中^[24], 混合通道表面呈坡道形, 使得待混合流体在通道内类似坦克履带上下颠簸地向前流动, 从而引起流体间的分割-重排-再结合行为, 可实现高 Reynolds 数下的良好混合。模拟发现, 该微混合器在低 Reynolds 数时, 因流体界面间存在摩擦, 并不能形成理想的多交互薄层接触状态, 而是 S 形接触方式。优化设计的第二代静态微混合器内的流体界面配置更接近理想状态, 适于低 Reynolds 数下 (< 15) 高黏性物料的混合。

2.4 混沌微混合器

对于需快速混合或扩散系数很小的体系(如蛋白质等大分子溶液), 在通道内引入二次流, 使流体被拉伸继而折叠可更有效地促进层流状态下流体的混合。Aref 指出^[25], 用简单的二维非定常流场可诱发混沌现象, 无须借助外力, 就可实现流体的高效层流混合。同样, 三维流场沿通道轴向的周期性波动也可以实现混沌混合。基于此原理设计的微混合器称为混沌微混合器。

流体间产生混沌对流时, 扩散混合时间沿轴向成指数衰减^[26], 从而可在低 Reynolds 数下实现高效混合, 即

$$t \sim (l^2/D)\exp(-2y/l) \quad (4)$$

Lee 等^[27]在垂直流动方向上引入周期性压力扰动, 使微通道内产生二维非定常流动, 从而引起流体间的混沌混合。Aref 与合作者^[28, 29]设计了具有三维蛇形微通道的混合器, 理论分析和实验结果都表明蛇形微通道可引起混沌对流, 使流体被拉伸和折叠, 大大地缩短了扩散距离。Reynolds 数为 70 时, 酚酞显色反应证实其混合效率比 T 型微混合器高 16 倍。

Stroock 等^[26]在聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 上加工

出底部置有错排人字形肋片或斜形肋片的二维微通道。高 Peclet 数时, T 型微混合器在 3 cm 内几乎无混合; 斜形肋片微混合器中仅发生部分混合; 而错排人字形肋片微混合器中, 荧光摄影发现通道底部修饰的特殊结构使流体在通道中心处发生拉伸和折叠, 引起了流体的混沌对流, 从而当 Peclet 数高达 9×10^5 时, 仍能保证完全混合。

Kim 等^[30]在微通道底部蚀刻出斜形槽道, 使流体产生三维螺旋流动, 同时于顶部周期性设置长方形块状物, 使流场沿轴向发生周期性扰动, 从而引发流体间的混沌混合。实验证实, 在所考察的流速范围内, 混沌微混合器的特征混合长度比 T 型微混合器小 4~10 倍, 比斜形槽道微混合器小 2 倍。

在微通道内引起二次流并可能诱发混沌混合的微混合器构型还有: L 形二维或三维微通道网络^[31, 32]、微通道内壁上设置不同的沟槽、凸起^[33~36]、微通道壁面电势或润湿性的周期性变化^[37, 38]等。

2.5 其他类型的非动力式微混合器

Miyake 等^[39]在混合腔底部设置大量微型筛孔将一种液体分散入另一种液体, 增加了两者接触面积, 缩短了混合时间。类似于该接触方式, Nakajima 与合作者^[40, 41]采用“微通道乳化技术”, 即通过压力驱动分散相液体透过微通道板上的微槽或微孔阵列, 汇入流动或静止的连续相液体, 以形成尺寸分布均匀的乳液。

Günther 等^[42]引入气相来强化微通道内互溶液体间的混合, 由于形成稳定的弹状流型, 混合效率高于 Stroock 等^[26]和 Liu 等^[28]设计的混沌微混合器。Song 等^[43]则在微通道内引入第三种液体来强化两液体间的混合, 三者在微通道内形成塞状流动, 沿轴向塞状物内部不断循环产生混沌对流, 因而强化了混合。

2.6 动力式微混合器

动力式微混合器借助外力来进一步促进流体间的混合, 其加工方法复杂, 与其他过程集成难度较大。依据目前的研究状况, 主要分为以下几种。

(1) 磁力搅拌型 Lu 等^[44]于微通道底部集成微型磁搅拌棒, 在磁场驱动下进行搅拌, 实现快速混合, 其混合效率取决于搅拌速度。

(2) 声场促进型 Yang 等^[45]在微混合器背面集成超声波辐射装置, 使原本层流分层流动的两液体流动变得不稳定, 在 7 s 后即发生了高效混合。Liu 等^[46]在微通道顶部内表面蚀刻出凹槽, 从而在

待混合液体中引入气泡,通过顶部集成的声波发生器的作用,使气泡发生共振,引起液体绕气泡的流动。合理设计凹槽的排列方式,可实现快速混合。

(3) 电场促进型 Oddy 等^[47]采用交流电场,使原本稳定分层流动的流体在微通道径向产生二次流,被快速拉伸并折叠,实现了低 Reynolds 数下的快速混合。

其他类型如采用微阀等装置强化混合^[48],不再赘述。

3 微混合技术的应用

微混合技术可实现流体间的均匀、快速混合,具有常规混合设备不可比拟的优势,因而在化学合成、乳状液制备、高通量筛选以及生化领域有很大的应用前景。

3.1 化学合成

微混合技术可强化受传质控制的多相反应,同时它易与微反应系统的其他部件集成,具有内在的安全特性,使得化学反应更为可控,合成效率更高,可开发高附加值产品以及实现有毒危险品的现场生产。依据反应类型其具体应用可分为:气相反应,如氨催化氧化生成 NO^[49]及环氧乙烷合成^[50]等;气-液反应,如甲苯直接氟化^[51,52]等;液-液反应,如芳烃硝化^[53]、自由基聚合^[54]、相转移反应^[55]以及超细粒子合成^[56~58]等。

3.2 乳状液制备

乳状液的物化特性与分散相的尺寸及分布密切相关。微混合技术可实现液-液两相的均匀接触,乳化和相界面高,可制备出常规乳化设备难以形成的微米级均匀分散的乳状液。

Haverkamp 等^[59]采用交指式微混合器进行水/有机相的连续乳化实验,获得了 5.6 μm 均匀分布的乳状液(最小粒径为 3.6 μm)。Nakajima 与合作者^[40,41]采用“微通道乳化技术”可获得分布更为均匀的乳状液(粒径偏差 < 9%),60 天内仍保持稳定;由于微细尺度内界面张力占主导地位,且精密的微加工技术可保证微槽、微孔尺寸的均一性,因此可形成稳定的粒径分布均匀的乳状液。

3.3 高通量筛选

为筛选出高效的液-液反应催化剂,de Bellefon 等^[60]用两液体携带脉冲注入的催化剂与反应介质进入交指式微混合器,并在后接的管式反应器中完成反应。实验发现该微混合器可实现微量样品的快速、均匀混合,极大强化了传质和传热过程,拓宽了反

应操作区间,可实现低成本、高通量的催化剂筛选。同样,该原则也适用于气-液反应催化剂的快速筛选^[61]。

3.4 生化领域

在生化操作中,有效控制样品溶液间的混合至关重要,微混合技术提供了这个平台,并与反应、分离、分析等操作一起被集成到同一芯片上,形成芯片实验室(Lab-on-a-chip)。其应用主要有:

生化分析 如液相化学反应(蛋白质折叠、酶活性的定量评价)及动力学研究(速率常数、中间物种的检测)^[7,35,36];

DNA 微阵列技术 如 DNA 杂交速率的强化^[46];

生物测量技术 如生物传感器信号检测速率的提高^[62];

药物控制释放 如包裹蛋白质的微胶囊的制备^[63]。

4 建议与展望

随着微通道内单元操作与化学反应研究的深入,可以预见,微混合技术必将获得更为广阔的发展空间。它不仅在微反应系统中获得越来越多的应用,还将成为一个标准配置的功能单元被集成到现有的常规工艺路线中去。

对于微混合技术,应加强以下几方面的研究。

(1) 微混合器内的混合机制 微混合器内多相流混合的表征、混合行为的理论分析与数值模拟等,尤其应加强混沌微混合技术的研究。

(2) 微混合技术与其他单元过程的集成 系统研究微通道内混合与反应的作用机制,尤其应加强气-液微混合体系的研究。

(3) 微混合技术放大的关键问题 开展单/多相流体分配技术等关键问题的研究,确保并行放大后能保持单一微混合器中的优势。

微混合技术是一个多学科间交叉的新兴技术,它的发展和完善将为化学化工过程的强化提供强有力的技术平台。

符 号 说 明

d ——直径, m

D ——扩散系数, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$

l ——扩散层厚度, m

t ——混合时间, s

u ——流速, m s^{-1}

- 特征长度, m
 μ ——流体黏度, Pa·s
 ——流体密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
 y ——轴向距离, m

参 考 文 献

- Ehrfeld W, Hessel V, Löwe H. *Microreactors* [M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2000
- 陈光文, 袁权, 李淑莲. [J]. *催化学报*, 2002, 23 (6): 491~492
- 陈光文, 袁权. [J]. *化工学报*, 2003, 54 (4): 427~439
- Chen G W, Yuan Q, Li H Q, et al. [J]. *Chem. Eng. J.*, 2004, 101 (1-3): 101~106
- Harnby N, Edwards M F, Nierow A W. *Mixing in the Process Industries* [M]. 俞芷青, 王英琛等译. 北京: 中国石化出版社, 1991. 246~247
- Koch M, Witt H, Evans A G R, et al. [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 1999, 9 (2): 156~158
- Bokenkamp D, Desai A, Yang X, et al. [J]. *Anal. Chem.*, 1998, 70 (2): 232~236
- Engler M, Kockmann N, Kiefer T, et al. [J]. *Chem. Eng. J.*, 2004, 101 (1-3): 315~322
- Wong S H, Ward M C L, Wharton W C. [J]. *Sens. Actuators B: Chem.*, 2004, 100 (3): 365~385
- Gobby D, Angeli P, Cavriolidis A. [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2001, 11 (2): 126~132
- Burns J R, Ramshaw C. [J]. *Lab Chip*, 2001, 1 (1): 10~15
- Erbacher C, Bessoth F G, Busch M, et al. [J]. *Mikrochim. Acta*, 1999, 131 (1-2): 19~24
- Ehrfeld W, Golbig K, Hessel V, et al. [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1999, 38 (3): 1075~1082
- Hessel V, Hardt S, Lowe H, et al. [J]. *AIChE J.*, 2003, 49 (3): 566~577
- Hardt S, Schonfeld F. [J]. *AIChE J.*, 2003, 49 (3): 578~584
- Schubert K, Bier W, Herrmann E, et al. *Static Micromixer* [P]. US 6082891, 2000
- Schubert K, Fichtner M, Wiessmeier G, et al. *Static Micromixer* [P]. US 2002/0057627, 2002
- Ehlers S, Elgeti K, Menzel T, et al. [J]. *Chem. Eng. Process*, 2000, 39 (4): 291~298
- Bessoth F G, deMello A J, Manz A. [J]. *Anal. Commun.*, 1999, 36 (6): 213~215
- Losey M W, Schmidt M A, Jensen K F. [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2001, 40 (12): 2555~2562
- Floyd T M, Losey M W, Firebaugh S L, et al. *Novel Liquid Phase Microreactors for Safe Production of Hazardous Specialty Chemicals* [C]. 3rd International Conference on Microreaction Technology, Frankfurt, Germany, 1999
- Schwesinger N, Frank T, Wurmus H. [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 1996, 6 (1): 99~102
- Bertsch A, Heimgartner S, Cousseau P, et al. [J]. *Lab Chip*, 2001, 1 (1): 56~60
- Schonfeld F, Hessel V, Hofmann C. [J]. *Lab Chip*, 2004, 4 (1): 65~69
- Aref H. [J]. *J. Fluid Mech.*, 1984, 143: 1~21
- Stroock A D, Dertinger S K W, Ajdari A, et al. [J]. *Science*, 2002, 295 (5555): 647~651
- Lee Y K, Deval J, Tabeling P, et al. *Chaotic Mixing in Electrokinetically and Pressure Driven Microflows* [C]. The 14th IEEE Workshop on MEMS, Interlaken, Switzerland, 2001
- Liu R H, Stremmer M A, Sharp K V, et al. [J]. *J. Microelectromech. Sys.*, 2000, 9 (2): 190~197
- Beebe D J, Adrian R J, Olsen M G, et al. [J]. *Mech. Ind.*, 2001, 2 (4): 343~348
- Kim D S, Lee S W, Kwon T H, et al. [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2004, 14 (6): 798~805
- Yi M Q, Bau H H. [J]. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2003, 24 (5): 645~656
- Therriault D, White S R, Lewis J A. [J]. *Nat. Mater.*, 2003, 2 (4): 265~271
- Johnson T J, Ross D, Locascio L E. [J]. *Anal. Chem.*, 2002, 74 (1): 45~51
- Jen C P, Wu C Y, Lin Y C, et al. [J]. *Lab Chip*, 2003, 3 (2): 77~81
- Lin Y, Gerfen G J, Rousseau D L, et al. [J]. *Anal. Chem.*, 2003, 75 (20): 5381~5386
- Burke B J, Regnier F E. [J]. *Anal. Chem.*, 2003, 75 (8): 1786~1791
- Erickson D, Li D Q. [J]. *Langmuir*, 2002, 18 (5): 1883~1892
- Kuksenok O, Yeomans J M, Balazs A C. [J]. *Phys. Rev. E*, 2002, 65 (3): 031502
- Miyake R, Lammerink T S J, Elwenspoek M, et al. *Micro Mixer with Fast Diffusion* [C]. Proceedings of the "IEEE-MEMS '93", Fort Lauderdale, USA, 1993
- Kobayashi I, Nakajima M, Nabetani H, et al. [J]. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 2001, 78 (8): 797~802
- Sugiura S, Nakajima M, Iwamoto S, et al. [J]. *Langmuir*, 2001, 17 (18): 5562~5566
- Güther A, Jhunjhunwala M, Schmidt M A, et al. *Liquid Mixing Using Inert Gas and an Integrated Gas-Liquid Separator* [C]. 7th International Conference on Miniaturized Chemical and Biochemical Analysis Systems, California, USA, 2003
- Song H, Bringer M R, Tice J D, et al. [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83 (22): 4664~4666
- Lu L H, Ryu K S, Liu C. [J]. *J. Microelectromech. Sys.*, 2002, 11 (5): 462~469
- Yang Z, Matsumoto S, Goto H, et al. [J]. *Sens. Actuators A: Phys.*, 2001, 93 (3): 266~272
- Liu R H, Lenigk R, Druyor Sanchez R L, et al. [J]. *Anal. Chem.*, 2003, 75 (8): 1911~1917
- Oddy M H, Santiago J G, Mikkelsen J C. [J]. *Anal. Chem.*, 2001, 73 (24): 5822~5832
- Evans J, Liepmann D, Pisano A P. *Planar Laminar Mixer* [C]. IEEE 10th Annual International Workshop on MEMS, Nagoya,

- Japan, 1997
- 49 Srinivasan R, Hsing I M, Berger P E, et al. [J]. *AIChEJ.*, 1997, 43 (11): 3059 ~ 3069
- 50 Kestenbaum H, de Oliveira A L, Schmidt W, et al. Synthesis of Ethylene Oxide in a Microreaction System [C]. 3rd International Conference on Microreaction Technology, Frankfurt, Germany, 1999
- 51 Jahnisch K, Baerns M, Hessel V, et al. [J]. *J. Fluorine Chem.*, 2000, 105 (1): 117 ~ 128
- 52 de Mas N, Gunther A, Schmidt M A, et al. [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2003, 42 (4): 698 ~ 710
- 53 Burns J R, Ramshaw C. [J]. *Chem. Eng. Commun.*, 2002, 189 (12): 1611 ~ 1628
- 54 Bayer T, Pysall D, Wachsen O. Micro Mixing Effects in Continuous Radical Polymerization [C]. 3rd International Conference on Microreaction Technology, Frankfurt, Germany, 1999
- 55 Hisamoto H, Saito T, Tokeshi M, et al. [J]. *Chem. Commun.*, 2001, (24): 2662 ~ 2663
- 56 Werner B, Donnet M, Hessel V, et al. A Specially Suited Micromixers for Processes Involving Strong Fouling [C]. 6th International Conference on Microreaction Technology, New Orleans, USA, 2002
- 57 Wang H Z, Nakamura H, Uehara M, et al. [J]. *Chem. Commun.*, 2002, (14): 1462 ~ 1463
- 58 Edell J B, Fortt R, deMello J C, et al. [J]. *Chem. Commun.*, 2002, (10): 1136 ~ 1137
- 59 Haverkamp V, Ehrfeld W, Gebauer K, et al. [J]. *Fresen. J. Anal. Chem.*, 1999, 364 (7): 617 ~ 624
- 60 de Bellefon C, Tanchoux N, Caravieilhès S, et al. [J]. *Angew. Chem. Int. Edit.*, 2000, 39 (19): 3442 ~ 3445
- 61 de Bellefon C, Pestre N, Lamouille T, et al. [J]. *Adv. Synth. Catal.*, 2003, 345 (1-2): 190 ~ 193
- 62 Vijayendran R A, Motsegood K M, Beebe D J, et al. [J]. *Langmuir*, 2003, 19 (5): 1824 ~ 1828
- 63 Freitas S, Walz A, Merkle H P, et al. [J]. *J. Microencapsul.*, 2003, 20 (1): 67 ~ 85

Principles and Applications of Micromixing Technology

Yue Jun, Chen Guangwen, Yuan Quan

(Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023)

Abstract Micromixers with characteristic dimensions ranging from microns to sub-millimeters can achieve rapid and homogenous mixing, which is unattainable with their macroscale counterparts. This paper presents a detailed review on the state of the art in micromixing technology with emphases on mixing mechanisms in micromixers. Therefore, the authors mainly deal with micromixers with different structures as well as their applications in microreaction systems. Finally, the future of this technology is also envisaged.

Keywords microchannel, microchemical technology, micromixer, microreactor, process intensification

(编辑 史来娣)

启 事

本刊自 2004 年 7 月起, 加入中国台湾省中文电子期刊服务 —— 思博网 (CEPS)。CEPS 是目前中国台湾省最大的期刊全文数据库, 其访问地址为 www.ceps.com.tw。读者可以通过这一网址检索本刊自 2001 年起各期的全文。

由于本刊被 CEPS 收录, 故凡向本刊投稿者, 均视为其文稿刊登后可供 CEPS 收录、转载并上网发行; 其文章著作权使用费与稿酬本刊一次付清, 不再另付其他报酬。

感谢各位作者、读者的大力支持!

《化工进展》编辑部
2004 年 12 月