

梳状并行微通道内液液分布规律研究

杨星宇, 马优, 朱春英, 付涛涛, 马友光

(天津大学化工学院, 化学工程联合国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 为了实现工业化应用, 微反应器的并行放大已成为最有效的放大策略之一。在微反应器的放大过程中, 相分布规律的研究是非常重要的。采用高速摄像机研究了梳状并行微反应器的支通道间距和流量对液液两相分布的影响。当连续相和分散相流量 Q_c 及 Q_d 都较小时, 不同支通道间距的微反应器内前方支通道的分散相含率较低, 后方支通道的分散相含率较高, 同时液滴长度的均匀性较差。随着 Q_c 与 Q_d 的增大, 三种不同构型微反应器内分散相的体积相含率的数值分布逐渐趋于集中。在较高的两相流量下, 支通道内液滴长度的均匀性显著提高, 其变异系数小于 0.15。在实验范围内, 支通道间距 $S = 0.6$ mm 的微反应器中液滴尺寸均匀分布的操作范围最大。

关键词: 并行微通道; 微反应器; 两相流; 液滴; 分布

中图分类号: TQ 021.4

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2023) 02-0698-09

Study on liquid–liquid distribution in comb parallel microchannels

YANG Xingyu, MA You, ZHU Chunying, FU Taotao, MA Youguang

(State Key Laboratory of Chemical Engineering, School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: For industrial applications, the parallel amplification of microreactors has become one of the most effective strategies, in which the study on the phase distribution in the parallel multiple microchannels is an important foundation. In this study, the influences of the subchannel interval and flow rates on distribution of liquid–liquid two–phase in comb parallel microchannels were investigated by the use of a high–speed camera. Results indicated that for low flow rates of dispersed and continuous phases (Q_c and Q_d), the dispersed phase volume fraction in the front branch microchannels was low, while it was high in the rear branch microchannels and the uniformity of daughter droplets was worse. With the increases of two–phase flow rates Q_c and Q_d , the dispersed phase volume fractions in three different configurations of microreactors were inclined to be consistent. At higher two–phase flow rate, the uniformity of droplets size in the branch microchannels could be significantly increased, and the variation coefficient is less than 0.15. Within the experimental range, the operating range of uniform droplet size distribution in the microreactor with the subchannel interval $S = 0.6$ mm is the largest.

Key words: parallel microchannels; microreactor; two–phase flow; droplet; distribution

收稿日期: 2022-08-02 修回日期: 2022-09-15

通信作者: 马友光(1964—), 男, 教授, ygma@tju.edu.cn

第一作者: 杨星宇(2000—), 女, 硕士研究生, 2021207108@tju.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(21978197, 21776200)

引用本文: 杨星宇, 马优, 朱春英, 付涛涛, 马友光. 梳状并行微通道内液液分布规律研究[J]. 化工学报, 2023, 74(2): 698–706

Citation: YANG Xingyu, MA You, ZHU Chunying, FU Taotao, MA Youguang. Study on liquid–liquid distribution in comb parallel microchannels[J].

CIESC Journal, 2023, 74(2): 698–706

引言

近二十年来,微化工技术经历了从基础研究到大规模工业应用的快速发展^[1-6]。与传统的间歇式反应器相比,微反应器具有更大的比表面积、更高的传热和传质速率以及更高的安全性,已成为重要的过程强化技术之一,在多相流快速反应,强放热反应以及高温、高压、高风险等极端条件下的加工工业中显示了巨大的优势,目前已被广泛应用于氧化反应^[7-9]、材料制备^[10-11]、药物传输^[12-16]、光化学过程^[17-18]、人工智能^[19-21]等领域。

为了将微反应器投入到大规模的工业生产中,微反应器的放大是至关重要的。目前,已有众多学者对微反应器的放大进行了研究,并提出了许多放大策略^[22-26],如并联数量放大法^[27]、微通道截面尺寸放大法^[28]等。

Lao等^[29]采用并行通道制备了水-油-水多重复合乳液(W/O/W)。首先,内部油包水的单乳液液滴在T形分岔口处产生,然后利用并行通道结构将大乳液液滴分割成多个更小的均匀小乳液液滴,小液滴的尺寸与数量通过活动壁面结构选择性阻断来主动控制,最后在下流的流动聚焦结构中形成双重乳液,该方法制备的多重复合乳液液滴具有良好的均一性。Moritani等^[30]采用微流控并行网络结构制备了大量的均匀液滴。采用等分割比与等分配比两种不同的方案来控制液滴的生成频率与子液滴尺寸。在分割比为0.1时,母液滴可破裂成15个均匀性良好的子液滴;当分割比维持在0.05~0.1时,子液滴尺寸不随流量比与黏度比而改变。此外,Wang等^[31]研究了对称并行微通道内高黏液相中气泡的生成过程与均匀性。基于气液两相流动阻力模型,研究了气相压力、液相流率、液相黏度和微通道构型对气泡尺寸分布的影响。研究发现,下游阻力的差异、上游通道的压力波动以及空腔内气泡行为的反馈效应都会影响气泡生成尺寸的均一性。在满足Murray定律^[32]的通道中,在低气相压力、高液相流率和液相黏度的工况下,下游通道之间气液流动阻力差较小,导致气弹运动速率差异较小,均匀性更好。Yusuf等^[33]研究了并行微通道内光催化反应过程。在模拟太阳光的条件下,对并行微通道内不同初始浓度的4-硝基苯酚进行了光降解实验,并估算了硝基苯酚的分解速率和表观动力学速率常数。Liu等^[34]研究了并行微通道内液滴破裂动力学以及液液

分布规律。实验中观察到了三种不同的流型:短液滴流、长液滴流、平行流。短液滴流流型下,支通道C1~C3内的分散相含量($\varphi_{i,C} = i$ 支通道内分散相流量/分散相总流量)依次下降。当连续相流量增大时,会导致两相分布的不均匀性增加;而当分散相流量增大时,两相分布的均匀性得以改善。长液滴流流型下,分散相与连续相流量对两相分布均匀性的影响与短液滴流流型类似。他们进一步研究了动量通量差 $\Delta\rho u^2$ 对相分布的影响。当 $\Delta\rho u^2 < 0$ 时,随着 $\Delta\rho u^2$ 增大,C1~C5通道内的分散相含量依次明显减小;当 $\Delta\rho u^2 > 0$ 时,随着 $\Delta\rho u^2$ 增大,C1~C5通道内分散相含量依次略有降低;当 $\Delta\rho u^2$ 达到0.92后,各通道内分散相含量保持不变。

虽然对并行微通道内气液两相流分布和流动均匀性已有大量的研究,但操作条件以及支通道间距对梳状并行微通道内液液流动分布和液滴破碎行为的影响尚不完全清楚。因此,进一步研究操作条件对并行微通道内液滴分布和液滴破碎行为的影响,对微反应器的有效放大具有重要意义。本文拟通过改变梳状并行微通道的间距,采用高速摄像机研究其液液分布规律,考察操作条件与支通道间距对分散相含率和子液滴长度的影响。

1 实验材料与方法

实验所用的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)微流控设备由天津微纳制造技术有限公司制造。通道通过精密铣床在PMMA平板上加工而成,刻有微通道的PMMA平板与一块大小相同的PMMA平板贴合并由螺母密封。通道结构如图1所示,微流控装置主要包括两个部分结构:T形生成口和具有5个分支通道的梳状并行微通道,分支通道从左到右依次被标注为S1~S5。主通道截面为0.4 mm × 0.4 mm(宽×高)。支通道的长度为6 mm,截面为0.2 mm × 0.4 mm(宽×高)。为了深入研究分支通道间距对液滴

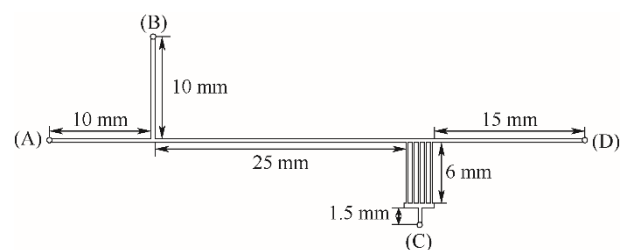


图1 并行微通道示意图

Fig.1 Schematic diagram of the parallel microchannels

破裂的影响,设计了三种不同间距的微反应器,其相邻支通道间距(S)分别为0.4、0.6、1.0 mm。分散相以 Q_d 的流量从(B)处流入T形口的旁路通道,连续相以 Q_c 的流量从(A)处流入主通道。生成的液滴经由一段25 mm的直通道继续流向下游,一直运动到并行支通道处。产生的子液滴进入一个空腔后从(C)口流出微通道,空腔是为了平衡五个平行支通道的出口处压力,减少出口压力不同造成的反馈效应。母液滴继续沿着主通道流动,最后从(D)口流出并流入收集瓶。

图2为实验所需的设备装置。实验装置主要包括三部分:微通道设备、流体输送系统以及图像采集设备。使用两台微量注射泵(Harvard Apparatus, PHD 22/2000, USA)分别驱动连续相流体与分散相流体注入微通道芯片内。注射泵的流速范围为: $6.00 \times 10^{-6} \sim 220.82 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ 。使用内径约为1 mm的聚四氟乙烯(PTFE)软管连接注射器与微通道入口。微流控芯片放置在倒置显微镜(ECLIPSE Ti-CU, Nikon, 日本)上,利用高速摄像机(Fastcam SA1.1, 日本)捕捉图像,实验中拍摄速率的范围为1000~4000帧/秒。12 VDC卤素灯(OLYMPUS, TH4-200, 日本)作为光源,放置于微流控芯片下方。一旦改变实验中的操作条件,待微通道内两相的流动状态稳定5 min后再进行记录。实验过程中,温度保持在 $(293.15 \pm 1) \text{ K}$ 。

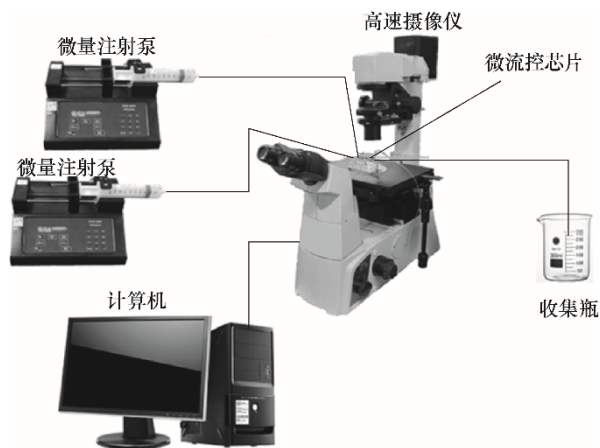


图2 实验装置图

Fig.2 Schematic diagram of the experiment setup

实验中使用了两种流体:去离子水和矿物油。去离子水用作分散相,黏度为 $22.25 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 的矿物油(分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司)用作连续相。为了降低连续相与分散相之间的表面张力以便形成稳定的液滴,在连续相中加入了4%(质量)的山梨醇月桂酸酯(Span 20)作为表面活性剂,两相间的界面张力为 $2.3 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 不同微通道内液滴的破裂流型

实验中,液滴通过S1~S5的并行分岔口时,根据

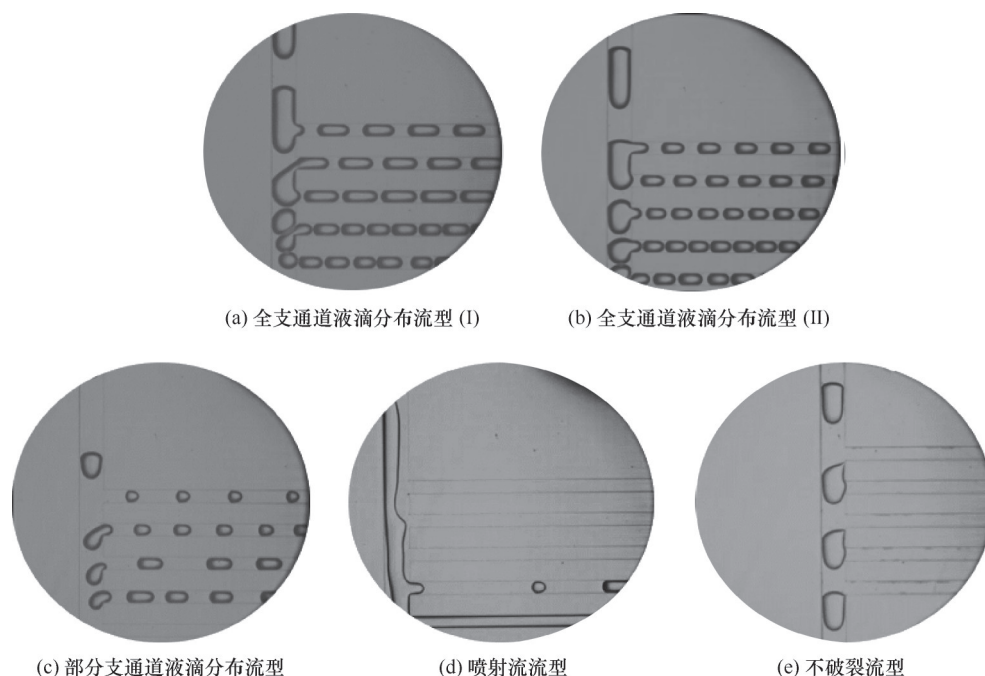


图3 液滴的分布流型

Fig.3 Flow patterns of droplet distribution

分布规律,可划分为四种流型:全支通道液滴分布、部分支通道液滴分布、喷射流和不破裂流型。如图3所示。

(1)全支通道液滴分布流型:如图3(a)、(b)所示。母液滴在五个支通道内均存在子液滴。母液滴沿着主通道流经支通道入口时,母液滴头部向支通道发展,由于主通道流体的推动和支通道宽度的限制,只有部分母液滴进入支通道,并逐渐形成一个颈部,颈部慢慢变细最后被夹断形成子液滴。在后方通道中因母液滴多次破裂后尺寸较小,不再发生破裂而直接进入支通道的情况。

(2)部分支通道液滴分布流型:如图3(c)所示。当分散相流量相对较小时,母液滴的长度较短,仅部分支通道内含有子液滴。

(3)喷射流流型:如图3(d)所示。该流型主要出现在分散相流量较高的区域。在T形口附近连续相的剪切力不足以将分散相夹断形成液滴,两相流体在主通道内呈层状流动。分散相液体从主通道以及支通道S5中流出微流控装置。偶尔会有液滴从分散相脱离进入支通道。

(4)不破裂流型:如图3(e)所示。液滴流动到支通道入口时,在连续相的推动以及入口尖角的作用下,液滴发生变形,但最终由于液滴的黏性阻力以及表面张力的作用并没有发生破裂,而是沿着主通道流出微流控装置。

实验中,分散相的流量范围为 $0 < Q_d < 6.0 \text{ ml} \cdot \text{h}^{-1}$,连续相的流量范围为 $0 < Q_c < 5.0 \text{ ml} \cdot \text{h}^{-1}$,四种流型的流型图如图4所示。从图中可见,随着支通道间距的增大,全支通道液滴分布流型的范围增大,为主要的流型。喷射流主要集中在连续相流量 Q_c 较小的情况下。

2.2 液液两相分布

采用体积相含率来表示各支通道内液液两相的分布情况。分散相的相含率定义为支通道内分散相的体积与支通道总体积的比值,用 ε 来表示。

$$\varepsilon_i = \frac{\sum V_{d,i}}{V} \quad (1)$$

式中, ε_i 指的是第 i 个支通道内分散相的相含率,其中 $i = 1 \sim 5$; $V_{d,i}$ 表示第 i 个支通道内的单个分散相液滴的体积, mm^3 ; V 表示支通道的体积, mm^3 。

在流量比 $Q_d/Q_c = 1$ 时,通过改变连续相流量 Q_c 与分散相流量 Q_d ,研究了支通道间距对相分布的影响。图5展示了各支通道内分散相的分配情况。当

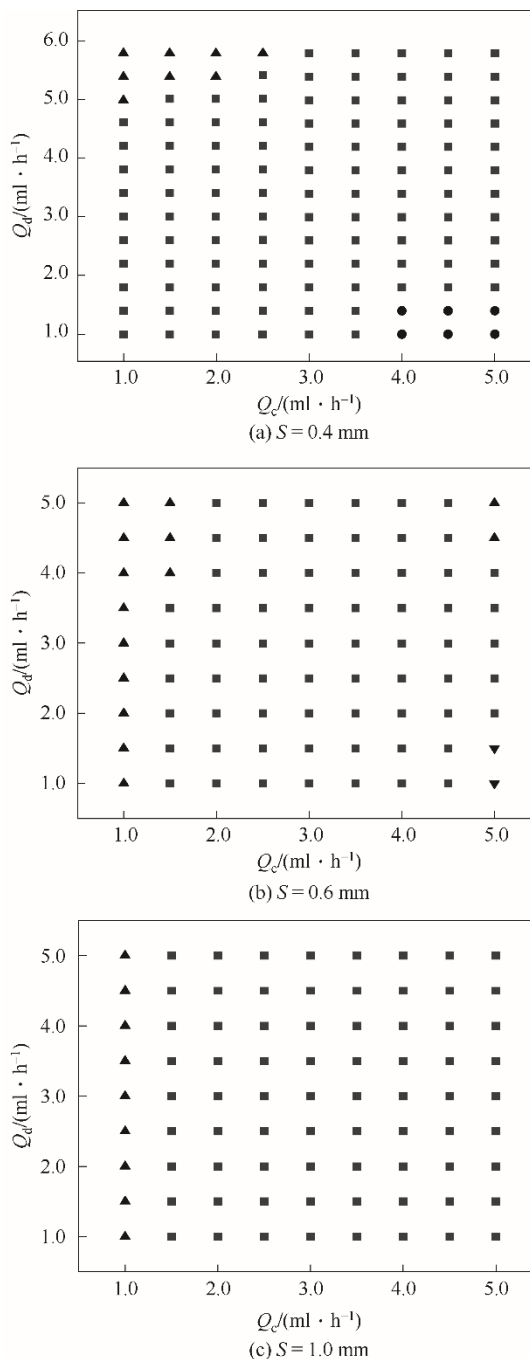


图4 不同流率范围内液滴分布流型图

■ 全支通道液滴分布流型; ● 部分支通道液滴分布流型;
▲ 喷射流流型; ▼ 不破裂流型

Fig.4 Flow patterns of droplet distribution in parallel microchannels with different flow rates

支通道间距较小时 ($S = 0.4 \text{ mm}$),在流量比 $Q_d/Q_c = 1$ 的条件下,两相总流量从小到大变化,前方支通道 (S_1, S_2) 内的分散相含率始终保持较低水平,而后方支通道 (S_4) 内的分散相含率始终保持较高水平。支通道间距较小时,各支通道间流动阻力的差异较小,同时在 $Q_d/Q_c = 1$ 时,不同的两相总流量下母液滴

的尺寸相近^[35],从而导致了各支通道内相含率分布规律是相同的。

而当支通道间距较大($S = 0.6 \text{ mm}$ 或 $S = 1.0 \text{ mm}$)时,从图中可以看出,随着两相总流量增大,前方支通道(S1,S2)内的分散相含率仍然保持较低水平,但是分散相含率的最大值点由S3或S4通道变为S5支通道,在支通道间距 $S = 0.6 \text{ mm}$ 的微反应器内发生转变时两相流量为 $Q_c=Q_d=3.0 \text{ ml} \cdot \text{h}^{-1}$,而 $S = 1.0 \text{ mm}$ 的微反应器内于 $Q_c=Q_d=4.0 \text{ ml} \cdot \text{h}^{-1}$ 处发生转变。结合图3可以看出,当母液滴经过前方支通道(S1,S2)破裂后,其长度有所下降,经过S5支通道入口时,母液滴不发生破裂而是直接进入支通道内。而发生母液滴不破裂直接进入支通道内的情况时,S5通道内的分散相含率必定低于S4内分散相含率[如图5(a)中 $S = 1.0 \text{ mm}$ 和图5(b)中 $S = 0.6 \text{ mm}$]。随着两相流量增大,支通道内分散相含率逐渐增大,如图5(d)中所示, $S = 0.6 \text{ mm}$ 和 $S = 1.0 \text{ mm}$ 时,母液滴在各支通道分岔口均发生破裂。且随着两

相流量的增大,来自连续相的推动力占据主导地位,两相流在整个微通道内的流动状态趋于稳定,不同支通道间距的微反应器中分散相含率的差异减小。

如图6所示,当两相流量分别为 $Q_c=1.5 \text{ ml} \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_d=3.5 \text{ ml} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,不同支通道间距内的分散相含率明显较流量比 $Q_d/Q_c = 1$ 时的更均匀。这是由于当分散相流量明显大于连续相流量时,液滴尺寸较大,在每个支通道内均发生完全阻塞破裂,两相流在整个微通道内的流动状态趋于稳定,故不同支通道间距的微反应器内相含率都较均匀。

2.3 子液滴尺寸分布

图7展示了流量比 $Q_d/Q_c = 1$ 时两相流量对液滴尺寸分布的影响。如图7(a)中各支通道子液滴长度(l_{si})分布情况所示,在两相流量较低($Q_c \leq 1.5 \text{ ml} \cdot \text{h}^{-1}$)的情况下,可以看出S1、S2、S3三个支通道内液滴的尺寸比较接近,而S4和S5通道内的液滴尺寸变化较大。这是因为两相总流量较小时,通道内流

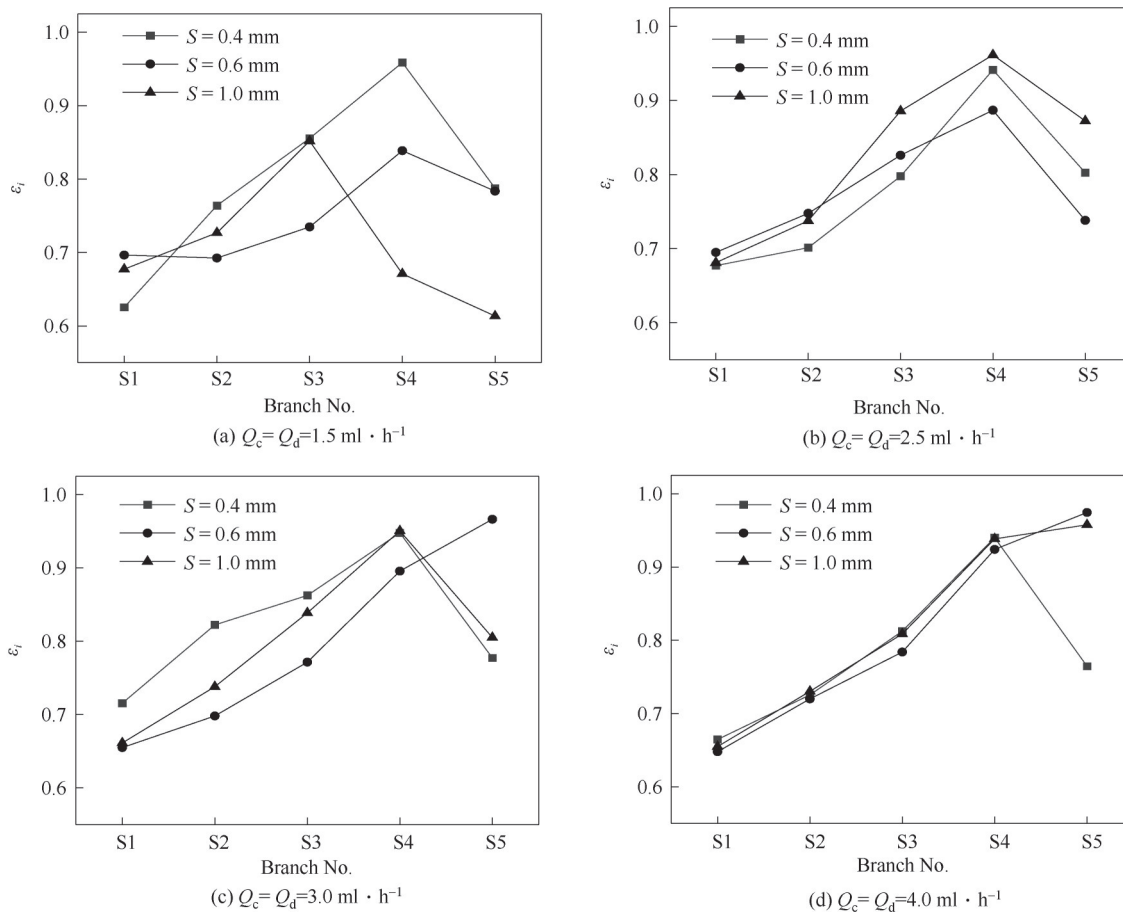


图5 支通道内分散相的体积相含率($Q_d/Q_c=1$)

Fig.5 Dispersed phase volume fraction in branching microchannels ($Q_d/Q_c=1$)

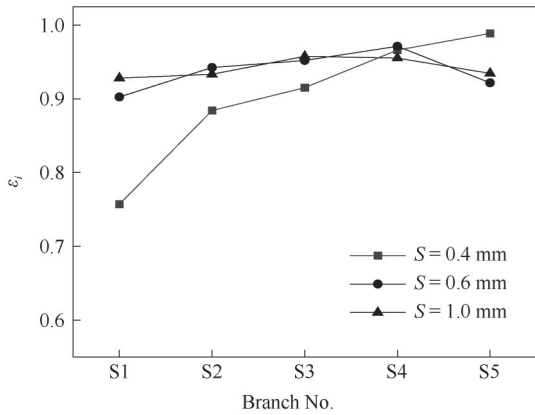
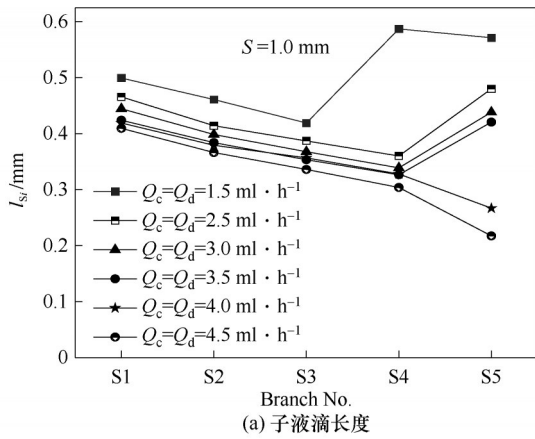
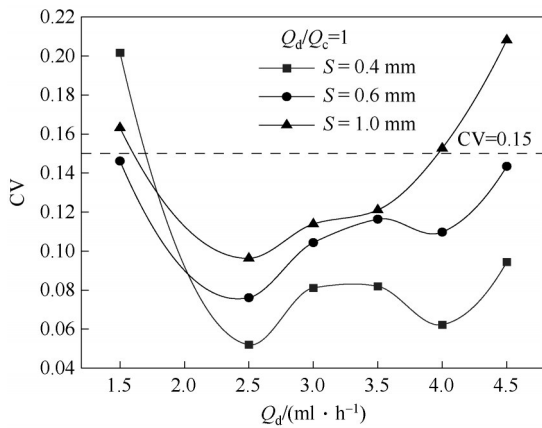


图6 支通道内分散相的体积相含率
($Q_c=1.5 \text{ ml}\cdot\text{h}^{-1}$, $Q_d=3.5 \text{ ml}\cdot\text{h}^{-1}$)

Fig.6 Dispersed phase volume fraction in branching microchannels ($Q_c=1.5 \text{ ml}\cdot\text{h}^{-1}$, $Q_d=3.5 \text{ ml}\cdot\text{h}^{-1}$)



(a) 子液滴长度



(b) 子液滴尺寸的变异系数

图7 分散相流量对子液滴长度及均匀性的影响

Fig.7 Influence of dispersed phase flow rate on the length and uniformity of daughter droplets

液滴直接进入S5支通道,导致S5支通道内液滴长度最大。而当 $Q_c > 3.5 \text{ ml}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,五个支通道入口处母液滴均会发生破裂,其子液滴分别进入五个支通道内。由于较高的两相总流量下,通道内的压降与流动阻力均较大,越靠后的支通道内流动阻力越大,液滴更倾向于破裂进入靠前的支通道内,越靠后的支通道内破裂的子液滴长度越小。

为了深入研究支通道内子液滴的均匀性,引入变异系数CV,并定义其为多个支通道内液滴尺寸的标准差与平均值之比。

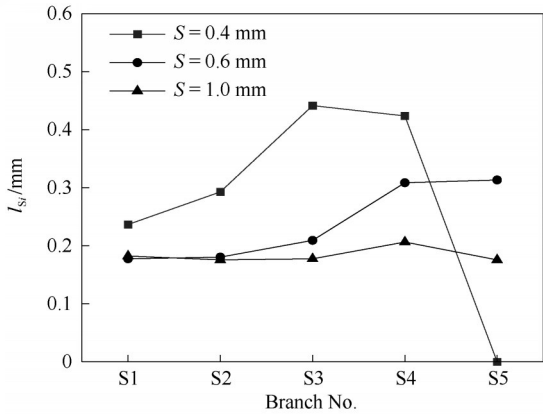
$$CV = \frac{\sqrt{\sum_i (l_{si} - \bar{l})^2 / (N - 1)}}{\bar{l}} \quad (2)$$

其中, i 为支通道的编号, N 为支通道的总数。本实验中 $i=1\sim 5$, $N=5$ 。 \bar{l} 为5个支通道内液滴长度的平均值。一般认为,当 $CV < 0.15$ 时可视为液滴的均匀性较好。

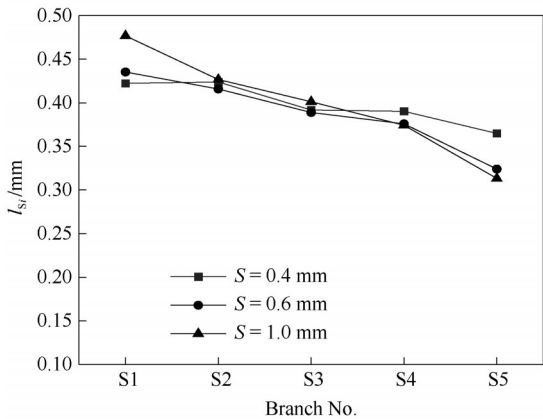
由图7(b)可看出,当流量比固定时,不同支通道间距的微反应器内,子液滴均匀性的变化趋势相近,且在两相流量介于 $2.0\sim 4.0 \text{ ml}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间时均匀性最好,其中,支通道间距 $S = 0.4 \text{ mm}$ 的微反应器内液滴尺寸的均匀性大于 $S = 0.6 \text{ mm}$ 和 $S = 1.0 \text{ mm}$ 。结合上文中分散相含率的图可以分析得出,当 $Q_c = Q_d = 1.5 \text{ ml}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,支通道间距 $S = 0.4 \text{ mm}$ 的相含率分布均匀性最差,故此时其变异系数相对也较大。但由实验结果可以看出,相含率分布不均匀并不代表液滴尺寸的变异系数大,主要因为各支通道内液滴尺寸尽管相近,但液滴数量不同,如图3(b)所示。支通道内的分散相含率和液滴尺寸分布同时与流动阻力、两相流量及推动力等不同因素有关,在不同的流量及支通道间距下,起主导作用的因素不同,导致相含率分布与液滴尺寸变异系数呈现出不同的变化规律。当两相流量较高时($Q_d > 1.5 \text{ ml}\cdot\text{h}^{-1}$ 且 $Q_c > 1.5 \text{ ml}\cdot\text{h}^{-1}$),流体的惯性力逐渐占据主导地位,随着支通道间距的减小,通道入口至各支通道出口的流动阻力的差异减小,各支通道内子液滴的变异系数减小,均匀性提高。操作范围内,对于 $CV < 0.15$ 的液滴的均匀分布, $S = 0.6 \text{ mm}$ 的微反应器的操作范围大于其他两个微反应器。

从图8(a)中可以看出,在两相流量 $Q_c = 4.0 \text{ ml}\cdot\text{h}^{-1}$, $Q_d = 1.0 \text{ ml}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,对于三个不同支通道间距的微反应器,随着支通道间距的增大,各支通道内子液滴长度的差异减小,即间距为 1.0 mm 的微反应器

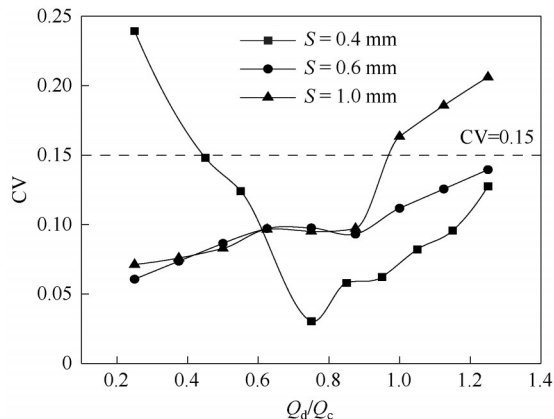
动阻力的影响较小,容易出现子液滴不破裂直接进入S4和S5支通道的情况,导致S4和S5支通道内液滴长度较大。当 $1.5 \text{ ml}\cdot\text{h}^{-1} < Q_c \leq 3.5 \text{ ml}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,母液滴在S4支通道入口处仍然会发生破裂,破裂后的母



(a) 子液滴长度($Q_c = 4.0 \text{ ml} \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_d = 1.0 \text{ ml} \cdot \text{h}^{-1}$)



(b) 子液滴长度($Q_c = Q_d = 4.0 \text{ ml} \cdot \text{h}^{-1}$)



(c) 支通道内子液滴尺寸的变异系数($Q_c = 4.0 \text{ ml} \cdot \text{h}^{-1}$)

图8 支通道间距对子液滴长度及均匀性的影响

Fig.8 Influence of subchannel interval on the length and uniformity of daughter droplets in branch channels

中液滴的均匀性相对较好。从图8(b)看出,在两相流量 $Q_c = Q_d = 4.0 \text{ ml} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,各支通道内子液滴长度均逐渐减小,而支通道间距为0.4 mm的微反应器内子液滴长度变化的跨度相对较小,即间距为0.4 mm的微反应器中液滴的均匀性相对较好。

图8(c)中展示了不同支通道间距的微反应器内,当连续相流量 $Q_c = 4.0 \text{ ml} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,变异系数 CV 随

着分散相流量 Q_d 的变化规律。支通道间距为0.6和1.0 mm的微反应器内 CV 的变化趋势相近。而支通道间距为0.4 mm的微反应器内,在流量比 $Q_d/Q_c < 0.75$ 的情况下, CV 的变化趋势是单调递减,在流量比 $Q_d/Q_c > 0.75$ 后 CV 略微增大,且 CV 最小,即均匀性相对较好。对于支通道间距为0.4 mm的微通道中,当 Q_d/Q_c 较低时,母液滴尺寸较小,液滴更倾向于在靠前的支通道中破裂,甚至会出现 S4 或 S5 通道内无液滴的情况,导致在低流量比下 CV 值较大。而在支通道间距为0.6和1.0 mm的微反应器内,液滴在各个支通道内破裂得相对较均匀,且未出现液滴仅进入部分支通道的情况。因此,在低流量比下支通道间距为0.6和1.0 mm的微反应器内均匀性较好。而随着流量比增大,进入后方支通道的难度加大,导致越靠后的支通道内液滴长度越小,变异系数 CV 的值增大,均匀性减小。综上所述,支通道间距为0.6 mm的微反应器内,液滴均匀分布的操作范围最大,效果最好。

3 结 论

采用高速摄像机研究了平行多通道微反应器内支通道间距对水-硅油液液两相流分布规律的影响,实验使用了三种不同结构的微反应器,其相邻的平行支通道间距分别为0.4、0.6、1.0 mm,得到如下结论。

(1) 实验观察到了四种不同的流型:全支通道液滴分布流型、部分支通道液滴分布流型、喷射流流型以及不破裂流型。

(2) $Q_d/Q_c = 1$ 的条件下,两相总流量较小时,前方支通道内的分散相含率 ε_i 较低,后方支通道内的分散相含率 ε_i 较高。随着两相总流量的增大,三种不同构型微反应器内分散相的体积相含率的数值分布趋于集中。

(3) 综合考虑支通道内分散相的相含率和液滴尺寸,支通道间距 $S = 0.6 \text{ mm}$ 的微反应器内液滴均匀分布的操作范围最大。

本文实验研究了不同支通道间距的梳状并行微通道内液滴尺寸的均匀性以及各支通道内的分散相含率,研究结果对液液两相微反应器的设计、优化及操作均具有重要的参考价值。为使梳状并行微通道能更好地应用于工业生产中,不同类型流体液滴的非对称破裂机理以及分配机制都需要进

一步研究,不同支通道内液滴分配行为的模型化也亟待探索。

参考文献

- [1] Jähnisch K, Hessel V, Löwe H, et al. Chemistry in microstructured reactors[J]. *Angewandte Chemie*, 2004, **43**(4): 406-446.
- [2] Gemoets H P L, Su Y H, Shang M J, et al. Liquid phase oxidation chemistry in continuous-flow microreactors[J]. *Chemical Society Reviews*, 2016, **45**(1): 83-117.
- [3] Mark D, Haeblerle S, Roth G, et al. Microfluidic lab-on-a-chip platforms: requirements, characteristics and applications[J]. *Chemical Society Reviews*, 2010, **39**(3): 1153-1182.
- [4] 王冠球,林冠屹,朱春英,等.微通道反应器的一维放大及气液传质特性[J].*化工学报*, 2021, **72**(2): 937-944.
Wang G Q, Lin G Y, Zhu C Y, et al. One-dimensional amplification and gas-liquid mass transfer characteristics of microchannel reactor[J]. *CIESC Journal*, 2021, **72**(2): 937-944.
- [5] Jensen K. Flow chemistry—microreaction technology comes of age [J]. *AIChE Journal*, 2017, **63**: 858-869.
- [6] Wang K, Luo G S. Microflow extraction: a review of recent development[J]. *Chemical Engineering Science*, 2017, **169**: 18-33.
- [7] Zhao H L, Liu S E, Shang M J, et al. Direct oxidation of benzene to phenol in a microreactor: process parameters and reaction kinetics study[J]. *Chemical Engineering Science*, 2021, **246**: 116907.
- [8] Li G X, Liu S, Dou X Y, et al. Two-stage temperature control for the synthesis of adipic acid through K/A oil oxidation in a microreactor system [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2021, **60**(26): 9389-9398.
- [9] Son S F, Asay B W, Foley T J, et al. Combustion of nanoscale Al/MoO₃ thermite in microchannels[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2007, **23**(4): 715-721.
- [10] Song Y, Shang M J, Li J G, et al. Continuous and controllable synthesis of MnO₂/PPy composites with core-shell structures for supercapacitors[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, **405**: 127059.
- [11] Zhang H, Lu K, Li B M, et al. Microfluidic, one-batch synthesis of Pd nanocrystals on N-doped carbon in surfactant-free deep eutectic solvents for formic acid electrochemical oxidation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, **12**(38): 42704-42710.
- [12] Maeki M, Kimura N, Sato Y, et al. Advances in microfluidics for lipid nanoparticles and extracellular vesicles and applications in drug delivery systems[J]. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2018, **128**: 84-100.
- [13] Sanjay S T, Zhou W, Dou M W, et al. Recent advances of controlled drug delivery using microfluidic platforms[J]. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2018, **128**: 3-28.
- [14] Liu C, Feng Q, Sun J. Lipid nanovesicles by microfluidics: manipulation, synthesis, and drug delivery[J]. *Advanced Materials*, 2019, **31**(45): 1804788.
- [15] Damiati S, Kompella U B, Damiati S A, et al. Microfluidic devices for drug delivery systems and drug screening[J]. *Genes*, 2018, **9**(2): 103.
- [16] Kulkarni M B, Goel S. Advances in continuous-flow based microfluidic PCR devices—a review [J]. *Engineering Research Express*, 2021, **2**(4): 042001.
- [17] Shi X Q, Liu S E, Duanmu C S, et al. Visible-light photooxidation of benzene to phenol in continuous-flow microreactors[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, **420**: 129976.
- [18] Su Y H, Kuijpers K P L, König N, et al. A mechanistic investigation of the visible-light photocatalytic trifluoromethylation of heterocycles using CF₃I in flow[J]. *Chemistry*, 2016, **22**(35): 12295-12300.
- [19] Shen C, Zheng Q B, Shang M J, et al. Using deep learning to recognize liquid-liquid flow patterns in microchannels[J]. *AIChE Journal*, 2020, **66**(8): e16260.
- [20] Kockmann N, Gottsponer M, Roberge D M. Scale-up concept of single-channel microreactors from process development to industrial production[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, **167**(2/3): 718-726.
- [21] Kockmann N, Roberge D M. Scale-up concept for modular microstructured reactors based on mixing, heat transfer, and reactor safety[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2011, **50**(10): 1017-1026.
- [22] Guo W X, Zhu C Y, Fu T T, et al. Controllable droplet coalescence in the T-junction microchannel with a funnel-typed expansion chamber [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020, **59**(22): 10298-10307.
- [23] Isozaki A, Harmon J, Zhou Y Q, et al. AI on a chip[J]. *Lab on a Chip*, 2020, **20**(17): 3074-3090.
- [24] 郭戎威,付涛涛,朱春英,等.微通道内气-液两相流及并行放大的研究进展[J].*化学工业与工程*, 2021, **38**(6): 74-86.
Guo R W, Fu T T, Zhu C Y, et al. Research progress on gas-liquid two-phase flow and numbering-up strategy in microchannel [J]. *Chemical Industry and Engineering*, 2021, **38**(6): 74-86.
- [25] Saber M, Commenge J M, Falk L. Microreactor numbering-up in multi-scale networks for industrial-scale applications: impact of flow maldistribution on the reactor performances[J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, **65**(1): 372-379.
- [26] Haber J, Jiang B, Maeder T, et al. Intensification of highly exothermic fast reaction by multi-injection microstructured reactor [J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2014, **84**: 14-23.
- [27] Wang K, Lu Y C, Luo G S. Strategy for scaling-up of a microsieve dispersion reactor[J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2014, **37**(12): 2116-2122.
- [28] Nieves-Remacha M J, Kulkarni A A, Jensen K F. Hydrodynamics of liquid-liquid dispersion in an advanced-flow reactor[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, **51**(50): 16251-16262.
- [29] Lao K L, Wang J H, Lee G B. A microfluidic platform for formation of double-emulsion droplets[J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2009, **7**(5): 709-719.
- [30] Moritani T, Yamada M, Seki M. Generation of uniform-size droplets by multistep hydrodynamic droplet division in microfluidic circuits[J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2011, **11**

- (5): 601–610.
- [31] Wang H, Shen Q Y, Zhu C Y, et al. Formation and uniformity of bubbles in highly viscous fluids in symmetric parallel microchannels[J]. *Chemical Engineering Science*, 2021, **230**: 116166.
- [32] Tondeur D, Luo L G. Design and scaling laws of ramified fluid distributors by the constructal approach[J]. *Chemical Engineering Science*, 2004, **59**(8/9): 1799–1813.
- [33] Yusuf A, Palmisano G. Three-dimensional CFD modelling of a photocatalytic parallel-channel microreactor[J]. *Chemical Engineering Science*, 2021, **229**: 116051.
- [34] Liu L Y, Jiang S K, Zhu C Y, et al. Distribution of liquid-liquid two-phase flow in branching T-junction microchannels[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, **431**: 133939.
- [35] Tan J, Xu J H, Li S W, et al. Drop dispenser in a cross-junction microfluidic device: scaling and mechanism of break-up[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2008, **136**(2/3): 306–311.