

研究论文

T 形微混合器内的混合特性

赵玉潮^{1,2}, 应 盈^{1,2}, 陈光文¹, 袁 权¹

(¹ 中国科学院大连化学物理研究所, 辽宁 大连 116023; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 以 Villiermaux-Dushman 快速平行竞争反应为模型体系, 研究了宽 600 μm 、深 300 μm 的 T 形微通道内的微观混合特性, 着重考察了不同进出口结构、微通道长度、体积流量比等对微通道内流体微观混合效果的影响. 实验结果表明: Péclet 数在 $7.0 \times 10^6 \sim 2.0 \times 10^8$ 之间, 无返混; 体积流量比愈小, 离集指数 X_s 愈小, 微观混合效果愈好. 不同进出口结构尺寸、体积流量比对微观混合的影响取决于 Reynolds 数的大小, $Re < Re_c$ 时, 影响较大, 且随 Re 增加, X_s 减小, 微观混合效果愈好; $Re > Re_c$ 时, X_s 趋于定值, 约为 2.7×10^{-4} , 接近理想微观混合效果.

关键词: 微混合器; 微观混合; 微通道; 微反应器

中图分类号: TQ 032

文献标识码: A

文章编号: 0438 - 1157 (2006) 08 - 1884 - 07

Characterization of micro-mixing in T-shaped micro-mixer

ZHAO Yuchao^{1,2}, YING Ying^{1,2}, CHEN Guangwen¹, YUAN Quan¹

(¹ Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, Liaoning, China;

² Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Villiermaux-Dushman fast parallel competing reaction was used to determine quantitatively the micro-mixing performance in the T-shaped micromixer with 600 μm width and 300 μm depth. The flow was almost ideal plug flow in the Reynolds number range 55—1600 and its corresponding Péclet number ranged from 7.0×10^6 to 2.0×10^8 . The effects of inlet and outlet scale, micro-channel length, volumetric flow ratio on the micro-mixing performance were studied in detail. The micro-mixing performance was expressed with segregation index, X_s . The smaller the X_s , the better the micro-mixing. The experimental results showed that X_s increased with increasing volumetric flow ratio at the same Re . There existed a critical Re_c under the condition of different inlet and outlet geometric structures. X_s decreased with increasing Re when $Re < Re_c$, while X_s reached about 2.7×10^{-4} and remained constant when $Re > Re_c$, indicating that almost perfect mixing in the T-shaped micro-mixer was achieved.

Key words: micro-mixer; micro-mixing; micro-channel; micro-reactor

引 言

混合是化工过程中的重要单元, 混合效果直接

影响后续过程效率. 微混合器是微化工系统的重要组成部分^[1], 与常规混合器相比, 微混合技术可实现流体间的快速、均匀混合, 具有常规混合技术不

2006 - 02 - 21 收到初稿, 2006 - 05 - 08 收到修改稿.

联系人: 陈光文. 第一作者: 赵玉潮 (1979 —), 男, 博士研究生.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (20176057, 20490208); 国际科技合作重点项目计划项目 (2001CB711203).

Received date: 2006 - 02 - 21.

Corresponding author: Prof. CHEN Guangwen. E - mail: gwchen@dicp.ac.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (20176057, 20490208) and the Key Program for International Cooperation of Science and Technology (2001CB711203).

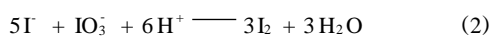
可比拟的优势. 应用微混合器可实现强放热和快速反应过程的强化与微型化, 如硝化^[2]、直接氟化^[3]、氧化^[4]、加氢^[5]、纳米粉体制备^[6]等过程, 近十几年来已引起国内外学者的广泛关注^[7-8].

微混合器依结构可分为多种型式, 其中 T 形微混合器是一种使两股流体混合均匀的最为简单的混合器之一^[9]. 对 T 形微混合器内流体的混合情况已有研究报道, Gobby 等^[10]用 CFD 方法考察了黏度、微通道尺度和操作条件等对两气相间混合特性的影响; Bökenkamp 等^[11]利用“湍流”机理设计了一种 T 形微混合器; 在层流区域内, Engler 等^[12]根据 Reynolds 数大小将微通道内流体流型划分为 3 种情况, 即严格层流、涡流和席卷流, 并认为席卷流能够进一步强化流体间的混合; Wong 等^[13]使用物理显色的方法研究了微通道内的混合效果; Hoffmann 等^[14]利用 μ -LIF 和 μ -PIV 技术研究了 T 形微混合器内流体混合情况. 关于化学法测定微反应器内混合效果, 也曾有不少学者进行了研究^[15-17], 但由于微通道内流体混合的复杂性, 至今仍在继续深入和发展, 尤其是进出口结构尺寸对混合效果的影响迄今未见报道.

本文利用化学法 (Villermaux-Dushman 快速平行竞争反应) 研究了 T 形微通道内分子尺度上的混合特性, 即微观混合, 考察了不同 Reynolds 数下微混合器的进出口结构尺寸对微观混合产生的影响, 并在微混合器内合成 CuO 细颗粒来验证其混合效果, 为微混合器的结构优化设计提供依据.

1 工作体系简介

工作体系采用 Fournier 等^[18-19]提出的应用于间歇式搅拌釜反应器的 Villermaux-Dushman 快速平行竞争反应体系, Guichardon 等^[20-21]对这一定量描述反应器内微观混合特性的方法进行了深入研究, 经巧妙改进并将其应用于连续式反应器.



其中, 式 (1) 为酸碱中和瞬间反应, 反应特征时间小于微观混合特征时间; 式 (2) 为氧化还原快速反应, 其反应特征时间与微观混合特征时间在同一量级. 微观混合均匀, 则只进行反应 (1); 混合不均匀, 反应 (2) 将同时发生, 生成的 I_2 继续与

I^- 发生反应生成 I_3^- . I_3^- 浓度用紫外分光光度计 (波长 353 nm) 检测, 进而计算出生成的 I_2 , 用以表示混合器内流体的混合效果.

对碘原子进行物料衡算

$$[\text{I}] = [\text{I}]_0 - \frac{5}{3}([\text{I}_2] + [\text{I}_3^-]) - [\text{I}_3^-] \quad (4)$$

对反应 (3)

$$K_3 = \frac{[\text{I}_3^-]}{[\text{I}_2][\text{I}]} \quad (5)$$

其中 K_3 为反应 (3) 的平衡常数

$$\lg K_3 = \frac{555}{T} + 7.355 - 2.575 \lg T \quad (6)$$

由式 (4) 和式 (5) 得

$$-\frac{5}{3}[\text{I}_2]^2 + ([\text{I}]_0 - \frac{8}{3}[\text{I}_3^-])[\text{I}_2] - \frac{[\text{I}_3^-]}{K_3} = 0 \quad (7)$$

由离集指数 X_s 定量表征微观混合效果

$$X_s = \frac{Y}{Y_{\text{ST}}} = \frac{2V_1([\text{I}_2] + [\text{I}_3^-])}{V_2[\text{H}^+]_0} \times \frac{6[\text{IO}_3^-]_0 + [\text{H}_2\text{BO}_3^-]_0}{6[\text{IO}_3^-]_0} \quad (8)$$

其中, Y 为反应 (2) 消耗掉的酸量与总体消耗掉的酸量之比, Y_{ST} 为完全离集时的 Y 值

$$Y = \frac{2V_1([\text{I}_2] + [\text{I}_3^-])}{V_2[\text{H}^+]_0} \quad (9)$$

$$Y_{\text{ST}} = \frac{6[\text{IO}_3^-]_0}{6[\text{IO}_3^-]_0 + [\text{H}_2\text{BO}_3^-]_0} \quad (10)$$

当 $X_s = 0$, 完全混合均匀; $X_s = 1$, 完全离集; $0 < X_s < 1$, 为部分混合. 连续式反应系统中的微观混合效果若用 X_s 定量表示, 则 $\text{I}^- / \text{IO}_3^- / \text{H}_2\text{BO}_3^-$ 溶液与硫酸溶液体积的流量比应满足

$$\frac{3V_1[\text{IO}_3^-]_0}{V_2[\text{H}^+]_0} = c_1 \quad (11)$$

$$\frac{V_1[\text{H}_2\text{BO}_3^-]_0}{V_2[\text{H}^+]_0} = c_2 \quad (12)$$

式中 c_1 、 c_2 为常数.

2 实验部分

2.1 药品和仪器

碘化钾、碘酸钾、硼酸、氢氧化钠、浓硫酸、邻苯二甲酸氢钾、硝酸铜、碳酸钠均为分析纯 (沈阳联邦试剂厂); 最大流量为 $30 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ 的柱塞式平流泵四台 (北京卫星厂); JASCO V-550 紫外分光光度计 (日本); Malvern Zetasizer 3000HSA 纳米粒度仪.

2.2 实验装置

图 1 为实验流程图, 图 2 为 T 形微混合器内部结构示意图, 其中 a、b 为孔径为 2.0 mm 的入

口, d、e 孔径为 0.5 mm, f、g 为孔径为 2.0 mm 的出口, c-d、d-e、e-g 间距分别为 15、30、15 mm. 微混合器的材质为 PMMA, 经精密数控机床加工而成, 通道宽 600 μm、深 300 μm.

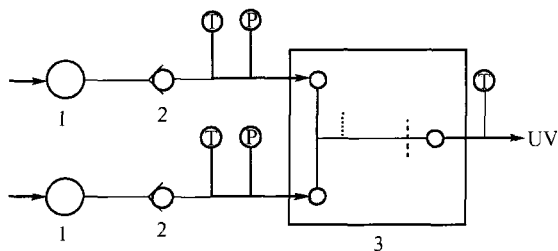


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

1—pump; 2—check valve; 3—T-shaped micromixer

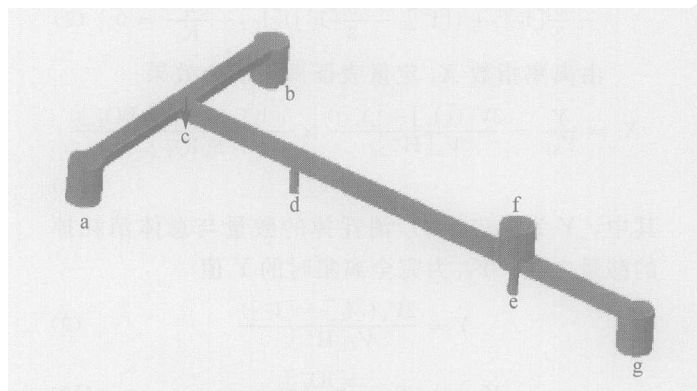


Fig. 2 Structure of T-shaped micromixer

2.3 标准曲线

根据 Beer-Lambert 定律, 吸光度 (A) 与光通过的液层厚度与浓度乘积成正比, 即

$$A = k[I_3] \quad (13)$$

式中 k 为包括液层厚度在内的比例系数, $m^3 \cdot mol^{-1}$.

配制一组不同浓度的 I_2 -KI 混合溶液, 测其吸光度, 吸光度 A 与 $[I_3]$ 的关系式为 (结果见图 3)

$$A = 25.44[I_3] \quad (14)$$

2.4 溶液配制

标准 NaOH 溶液配制: 以邻苯二甲酸氢钾进行标定. 浓硫酸稀释: 将浓硫酸稀释成浓度为 0.018、0.036、0.144、0.18 mol · L⁻¹ 的标准溶液 (用 NaOH 溶液标定). 配制 H₃BO₃、NaOH、KI、KIO₃ 混合溶液: 其溶质浓度分别为 0.25、0.125、0.0116、0.00233 mol · L⁻¹. 分别配制浓度均为 0.5 mol · L⁻¹ 的 Cu(NO₃)₂ 和 Na₂CO₃ 溶液. 实验均采用煮沸过的去离子水.

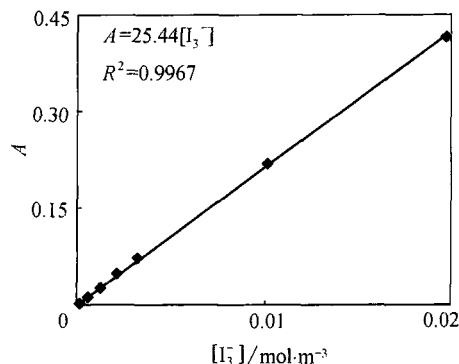


Fig. 3 Relationship between absorbance and $[I_3]$

2.5 分析方法

实验在 20~22 °C、100 kPa 下进行, 采用紫外分光光度计测量溶液的吸光度 (波长 353 nm), 利用式 (11) 计算 I_3 浓度. 为减少实验误差, 整个测量过程于 8 s 内完成, 待取得 3 个稳定值后, 开始记录数据. CuO 颗粒的粒径分布由 Malvern Zetasizer 3000 HSA 纳米粒度仪测量.

3 结果与讨论

3.1 宏观混合特性

宏观混合对平行竞争反应的影响, 可通过停留时间分布曲线考察, 即返混程度影响; Pe 由式 (15) 计算

$$Pe = \frac{u_m L}{D} \quad (15)$$

式中 u_m 为微通道内流体平均速度, $m \cdot s^{-1}$; L 为混合通道长度, m ; D 为扩散系数, $10^{-5} cm^2 \cdot s^{-1}$ (通常液体的扩散系数在 $10^{-5} m^2 \cdot s^{-1}$ 量级). 本实验条件下, Pe 在 $7.0 \times 10^6 \sim 2.0 \times 10^8$ 之间, 可认为无返混, 即宏观混合影响较小. 因此, 可认为该 T 形微混合器为理想平推流反应器.

3.2 微通道入口结构尺寸的影响

将等体积流量的硫酸溶液和 $I^- / IO_3^- / H_2BO_3$ 溶液, 分别流经入口 a 和 b, 出口 f; 入口 a 与 d, 出口 g 的两段通道, X_s 与 Re 的关系如图 4 所示. Re 由式 (16) 表示

$$Re = \frac{d_H u_m}{\mu} \quad (16)$$

式中 d_H 为通道的水力当量直径, m ; ρ 为混合溶液密度, $kg \cdot m^{-3}$; μ 为黏度, $10^{-3} Pa \cdot s$.

由图 4 可知, 存在一个使 X_s 产生骤变的临界值 Re_c ($Re_c \approx 400$). $Re < Re_c$ 时, 入口结构对离集指数 X_s 有较大影响, 即大孔径入口的 X_s 值大于

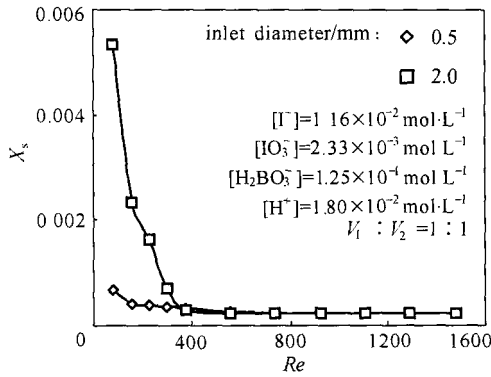


Fig. 4 Effect of inlet dimension on segregation index

小孔径的 X_s 值; 为了定性地描述 Re 对混合效果的影响, 特采用 CCD 摄像系统对流体混合过程进行拍摄, 结果见图 5. 由图 5 可知, 入口为 a 和 b, 当 Re 较低时 ($Re < 400$), 两流体呈并流流型, 且两流体界面较为明显, 混合效果较差; 随 Re 的增加, 两相间界面开始出现波动, 并最终达到混合均匀. 而在入口为 a 和 d 的情况下, 当 Re 较低时, 尽管两流体界面较为明显, 但由于流体呈环状流型, 接触面积至少为并流流型时的 2 倍, 使流体间混合得以强化, 与入口为 a 和 b 时相比, 微观混合效果得到明显改善, 与图 4 中 X_s 的急剧减小相一致. 但当 Re 极小时, 从图 5 可看到两流体基本呈完全分离状态, 但其离集指数 X_s 却很小, 说明出口对混合起到了一定的强化作用; 当 $Re > Re_c$ 时, 可以看到流体间界面已不明显, 混合亦接近均匀, 具体表现为离集指数 X_s 趋于定值, 约为 2.7×10^{-4} , 接近完全微观混合的程度, 即当 $Re > Re_c$ 时, 入口结构尺寸对微观混合效果无影响.

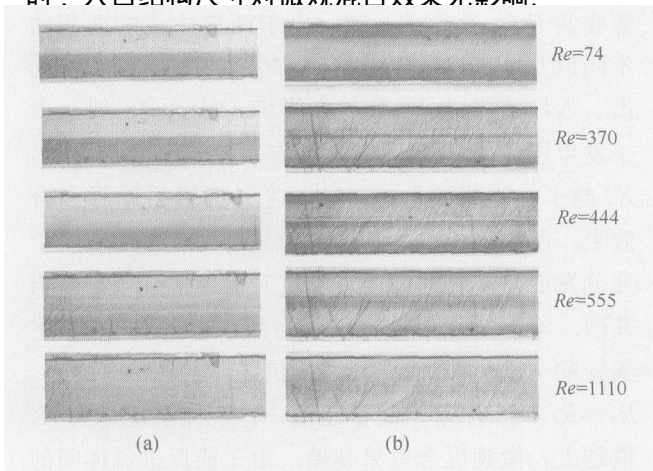


Fig. 5 Two liquid flow patterns under different feed inlets
(a) inlets a and b, outlet f; (b) inlets a and d, outlet g

3.3 微通道出口结构尺寸的影响

将等体积流量的硫酸溶液和 $I^- / IO_3^- / H_2BO_3^-$ 溶液, 分别流经入口 a 和 b, 出口分别为 e 和 f, X_s 与 Re 间的关系如图 6 所示. 由图可知, 同样存在一个使 X_s 产生骤变的临界值 Re_c ($Re_c \approx 400$), $Re < Re_c$ 时, 出口几何结构对离集指数 X_s 有较大影响, 即大孔径出口的 X_s 大于小孔径的 X_s ; 由于在相同体积流量下, 流体流经小孔时, 其流速为大孔的 16 倍, 在小孔通道内能够产生较大强度的涡流或卷吸流, 进一步强化流体间混合, 使微观混合效果增加, 表现为 X_s 的急剧减小; 而当 $Re > Re_c$ 时, X_s 趋于定值, 约为 2.7×10^{-4} , 即微观混合均匀. 此时出口结构尺寸对微观混合效果无影响.

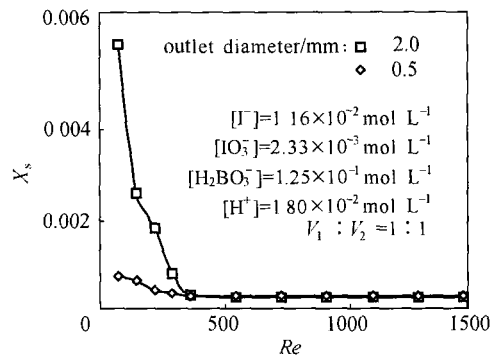


Fig. 6 Effect of outlet dimension on segregation index

3.4 T形微通道长度对微观混合效果的影响

将等体积流量的硫酸溶液和 $I^- / IO_3^- / H_2BO_3^-$ 溶液, 分别流经入口为 a 与 b, 出口分别为 f 和 g, 混合通道长度分别为 45 mm 和 60 mm, X_s 与 Re 的关系示于图 7. 结果显示 X_s 几乎不随通道长度而变, 由于此时的进出口结构尺寸完全一致, 说明微通道长度 ($L/d_H > 100$, 流体已充分发展) 对流体混合效果影响很小; 但同样存在一个使 X_s 发生骤变的临界 Reynolds 数 Re_c ($Re_c \approx 400$); 当 $Re < Re_c$ 时, 随 Re 增大, 流体界面扰动增强, 两流体接触面积增加, 强化了混合, 因此 X_s 随 Re 增加而减小; 当 $Re > Re_c$ 时, 由于两流体能够迅速混合均匀, 即离集指数 X_s 不随 Re 变化. 许多研究者发现在微通道内流体流动的转捩提前^[22-24], 即层流向湍流过渡时, Re 在 300 ~ 900 之间, $Re > Re_c$ 时, 此时为层流向湍流转变的过渡流动, 进一步促进流体间的混合.

3.5 体积流量比对微观混合效果的影响

酸浓度取值由式 (11) 与式 (12) 确定, 入口为 a 与 b, 出口为 g, 实验结果如图 8 所示. 离集

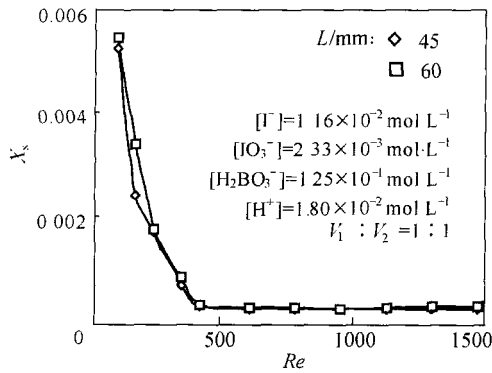


Fig. 7 Effect of microchannel length on segregation index

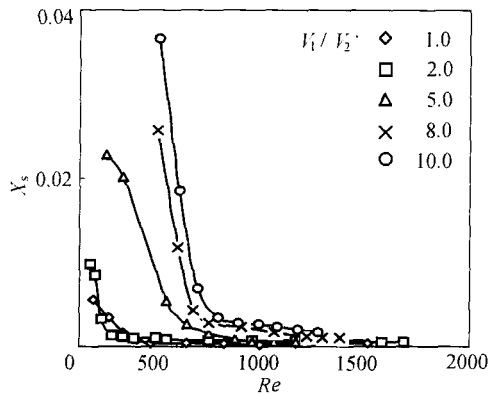


Fig. 8 Effect of volume flow ratio on segregation index

指数 X_s 随 Re 增加而减小，最后趋于定值，且在每个操作条件下，均存在一个使 X_s 发生骤变的临界 Reynolds 数 Re_c ，其大小随体积比增加而增加；当 $Re < Re_c$ 时，随体积流量比增加离集指数 X_s 逐渐增加，即相同 Re 下，体积流量比越大，微观混合效果越差。由于在相同 Re 下，两流体体积比越大，其中一种流体流速将越小，相互混合时产生的涡流或卷吸流强度越小，微观混合强化作用越小，即 X_s 值越大。

3.6 微混合器内 CuO 颗粒的制备

为了进一步考察微通道内流体间的混合效果，于微混合器内采用共沉淀方法合成 CuO 颗粒，并与传统搅拌釜中合成的 CuO 颗粒进行比较，结果见图 9。两种方法中反应物浓度、产物干燥和焙烧过程完全一样，微通道反应器内两溶液 $[Na_2CO_3, Cu(NO_3)_2]$ 体积流量均为 $20 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ ，入口为 a 和 b，出口为 g。

在微混合器内用共沉淀方法合成的 CuO 颗粒

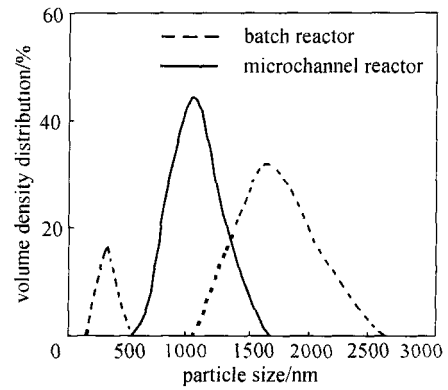


Fig. 9 Particle size distribution produced by microchannel reactor and batch reactor

粒径分布较传统搅拌釜中窄，粒度分布曲线基本呈正态分布，平均粒径为 996.8 nm；传统法制备的 CuO 粒径分布明显出现两个粒度分布峰，两个峰的平均粒径分别为 315.9 nm 和 1637.8 nm，且大粒径分布峰较宽。由于成核速率与溶液的局部过饱和度有关，这种局部过饱和是共沉淀法制备催化剂时产生粒径不易控制的主要原因，即溶液的微观混合效果直接影响颗粒的粒径分布。在微混合器内两种流体能够迅速达到微观混合均匀，溶液局部过饱和现象大大降低，因此，粒度分布较窄，且平均粒径较小；反之，共沉淀法制备催化剂过程中溶液不能迅速达到混合均匀，局部过饱和现象明显，导致粒径分布变宽，平均粒径较大。

4 结 论

采用化学法研究了微混合器的进出口结构尺寸对微观混合效果的影响，存在使离集指数 X_s 发生骤变的 Re_c 。当 $Re < Re_c$ 时，由于两流体接触面积的不同以及小出口通道内的流动扰动加剧，导致不同出、入口结构对 X_s 有较大影响；当 $Re > Re_c$ 时，由于发生层流向湍流的转捩提前，流体间混合加强， X_s 趋于一定值 2.7×10^{-4} ，达到理想的微观混合效果。微通道长度大于 45 mm 时，流体流动处于充分发展阶段，此时通道长度对流体混合效果影响甚微。不同体积流量比下，均存在一个使 X_s 发生骤变的 Re_c ， $Re < Re_c$ 时 X_s 值随 Re 增加而减小， $Re > Re_c$ 时 X_s 基本趋于定值；体积流量比越大 X_s 值越大，微观混合效果越差。由于能促进流体间的快速、均匀混合，微混合器内合成的 CuO 颗粒粒径分布窄且粒度小。

符 号 说 明

- A ——吸光度
 d_H ——微通道的当量直径, m
 $[i]$ ——组分 i 物质的量浓度, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$
 K_3 ——反应平衡常数, $\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$
 k ——吸光度比例系数, $\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$
 L ——混合通道长度, m
 Pe ——Péclet 数
 Re ——Reynolds 数
 T ——热力学温度, K
 u_m ——微通道内流体平均速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 V_1 ——含 H_2BO_3^- 、 IO_3^- 与 I^- 溶液的体积流量, $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$
 V_2 ——含 H^+ 溶液的体积流量, $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$
 X_s ——表示微观混合效果的离集指数
——混合溶液密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
 μ ——去离子水的黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$

下角标

- 0 ——初始时浓度
1 ——含 H_2BO_3^- 、 IO_3^- 与 I^- 的溶液
2 ——含 H^+ 的溶液

References

- [1] Chen Guangwen (陈光文), Yuan Quan (袁权). Microchemical technology. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2003, 54 (4): 427-439
- [2] Burns J R, Ramshaw C. A microreactor for the nitration of benzene and toluene. *Chem. Eng. Comm.*, 2002, 189 (12): 1611-1628
- [3] Jähnisch K, Baerns M, Hessel V, Ehrfeld W, Haverkamp V, Löwe H, Wille Ch, Guber A. Direct fluorination of toluene using elemental fluorine in gas/liquid microreactors. *J. Fluorine Chemistry*, 2000, 105 (1): 117-128
- [4] Chen G W, Yuan Q, Li H Q, Li S L. CO selective oxidation in a microchannel reactor for PEM fuel cell. *Chem. Eng. J.*, 2004, 101 (1/2/3): 101-106
- [5] Kobayashi J, Mori Y, Okamoto K, Akiyama R, Ueno M, Kitamori T, Kobayashi S. A microfluidic device for conducting gas-liquid-solid hydrogenation reactions. *Science*, 2004, 304: 1305-1307
- [6] Takagi M, Maki T, Miyahara M, Mae K. Production of titania nanoparticles by using a new microreactor assembled with same axle dual pipe. *Chem. Eng. J.*, 2004, 101 (1/2/3): 269-276
- [7] Jähnisch K, Hessel V, Löwe H, Baerns M. Chemistry in microstructured reactors. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2004, 43 (4): 106-446
- [8] Jensen K F. Microreaction engineering—is small better? *Chem. Eng. Sci.*, 2001, 56 (2): 293-303
- [9] Yue Jun (乐军), Chen Guangwen (陈光文), Yuan Quan (袁权). Principles and applications of micromixing technology. *Chemical Industry and Engineering Progress (China)* (化工进展), 2004, 23 (12): 1271-1276
- [10] Gobby D, Angeli P, Gavrilidis A. Mixing characteristics of T-type microfluidic mixers. *J. Micromech. Microeng.*, 2001, 11 (2): 126-132
- [11] Bökenkamp D, Desai A, Yang X, Tai Y C, Marzluff E M, Mayo S L. Microfabricated silicon mixers for submillisecond quench-flow analysis. *Anal. Chem.*, 1998, 70 (2): 232-236
- [12] Engler M, Kockmann N, Kiefer T, Woias P. Numerical and experimental investigations on liquid mixing in static micromixers. *Chem. Eng. J.*, 2004, 101 (1/2/3): 315-322
- [13] Wong S H, Ward M C L, Wharton C W. Micro T-mixer as a rapid mixing micromixer. *Sensors and Actuators B*, 2004, 100 (3): 359-379
- [14] Hoffmann M, Schlüter M, Rübiger N. Experimental investigation of liquid-liquid mixing in T-shaped micromixers using μ -LIF and μ -PIV. *Chem. Eng. Sci.*, 2006, 61: 2968-2976
- [15] Ehrfeld W, Golbigg K, Hessel V, Löwe H, Richter T. Characterization of mixing in micromixers by a test reaction: single mixing units and mixer arrays. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1999, 38 (3): 1075-1082
- [16] Panic S, Loebbecke S, Tuercke T, Antes J, Bošković D. Experimental approaches to a better understanding of mixing performance of microfluidic devices. *Chem. Eng. J.*, 2004, 101 (1/2/3): 409-419
- [17] Nagasawa H, Aoki N, Mae K. Design of a new micromixer for instant mixing based on the collision of micro segments. *Chem. Eng. Technol.*, 2005, 28 (3): 324-330
- [18] Fournier M C, Falk L, Villermaux J. A new parallel competing reaction system for assessing micromixing efficiency—experimental approach. *Chem. Eng. Sci.*, 1996, 51 (22): 5053-5064
- [19] Fournier M C, Falk L, Villermaux J. A new parallel competing reaction system for assessing micromixing efficiency—determination of micromixing time by a simple model. *Chem. Eng. Sci.*, 1996, 51 (23): 5187-5192
- [20] Guichardon P, Falk L. Characterisation of micromixing

- efficiency by the iodide-iodate reaction system. Part (): Experimental procedure. *Chem. Eng. Sci.*, 2000, 55 (19): 4233-4243
- [21] Guichardon P, Falk L, Villermaux J. Characterisation of micromixing efficiency by the iodide-iodate reaction system. Part (): Kinetic study. *Chem. Eng. Sci.*, 2000, 55 (19): 4245-4253
- [22] Wu P, Little W A. Measurement of friction factors for the flow of gases in very fine channels used for microminiature, Joule-Thompson refrigerators. *Cryogenics*, 1983, 23 (5): 273-277
- [23] Wang B X, Peng X F. Experimental investigation on liquid forced-convection heat transfer through microchannels. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1994 (suppl.), 37 (1): 73-82
- [24] Peng X F, Peterson G P. The effect of thermofluid and geometrical parameters on convection of liquids through rectangular microchannels. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1995, 38: 755-758

www.cnki.net