

研究论文

小型受限撞击流反应器内混合特征及激励强化

杜柯江, 李伟锋, 单志昊, 刘海峰, 王辅臣

(华东理工大学煤气化及能源化工教育部重点实验室, 上海煤气化工程技术研究中心, 上海 200237)

摘要: 利用平面激光诱导荧光技术(planar laser induced fluorescence, PLIF)研究了小型受限撞击流反应器(confined impinging jets reactor, CIJR)内混合特征及激励强化, 射流入口 Reynolds 数范围为 75~150。研究表明, 在受限撞击流反应器内, 由分离流模式向自持振荡模式转变过程中, 两股流体间的混合效果逐渐提升; 当流动为分离流模式时, 激励能有效地强化两股流体间的混合, 而当流动转变为自持振荡模式时, 激励对流体混合的影响较小。

关键词: 混合; 传质; 流动; 激励; 小型撞击流反应器; 平面激光诱导荧光技术

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20141811

中图分类号: TQ 021.1

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2015) 07—2395—07

Mixing characteristics and enhancement of excitation in mini confined impinging jets reactor

DU Kejiang, LI Weifeng, SHAN Zhihao, LIU Haifeng, WANG Fuchen

(Key Laboratory of Coal Gasification and Energy Chemical Engineering of Ministry of Education,
East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: An experimental study is undertaken on liquid mixing process in mini confined impinging jets reactor (CIJR) with excitation by using planar laser induced fluorescence (PLIF) technique quantitatively, and the jet inlet Reynolds number is in the range of 75 to 150. The results show that the mixing effect of two fluids significantly increases during the segregated steady flow translates to the dynamic chaotic flow regime in CIJR. The excitation affects the mixing process in CIJR and the mixing performance is enhanced in the segregated flow regime. However, the excitation has no significant influence on the mixing for the flow in the oscillation regime.

Key words: mixing; mass transfer; flow; excitation; mini CIJR; planar laser induced fluorescence

引 言

受限撞击流反应器和 T 型反应器在快速混合工业过程中是最为典型的两种小型反应器, 因其独特的工艺特性和较大的应用潜力, 受到越来越多研究者的青睐, 并广泛应用于聚合物注射快速成型、生物细胞破碎及纳米微颗粒合成等领域^[1]。

近 30 年来, 众多研究者利用可视化技术对受限撞击流反应器内的流动特征和混合过程进行了大量的实验研究, 划分了反应器内的流动模式, 揭示了受限撞击流反应器的混合机理, 考察了操作条件、流动边界和反应器结构尺寸等对混合过程的影响。文献中的研究表明, 当 $Re < 100$ 时, 受限撞击流反应器内出现分离流模式, 随着 Reynolds 数的增

2014-12-08 收到初稿, 2015-03-16 收到修改稿。

联系人: 李伟锋。第一作者: 杜柯江 (1989—), 男, 硕士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (91434130)。

Received date: 2014-12-08.

Corresponding author: LI Weifeng, liweifeng@ecust.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (91434130).

加, 流动模式变得复杂, 受限撞击流逐渐转变成自持振荡模式^[2-11]。Santos 等^[6]对 $100 < Re < 150$ 的过渡流动形态特征做了详细的研究, 发现两种模式之间的转变约在 $Re > 120$ 时出现。本课题组对 Reynolds 数为 $100 \sim 2000$ 的工况做了进一步研究, 并对振荡模式做了更为详细的区分, 当 $Re > 300$ 时, 自持振荡模式转化为无规则的振荡模式^[11]。

小型受限撞击流反应器在大多数实际混合过程应用中, 由于自身尺寸结构较小, 喷嘴入口的 Reynolds 数往往较小, 一般低于 100, 流体处于分离流模式, 混合效果较差。因此, 如何提升低 Reynolds 数下流体间的混合效果成为了近期研究的难点。本课题组前期对激励作用下的自由平面撞击流和轴对称撞击流进行了实验研究, 发现射流入口周期性的流量波动会使撞击面产生周期性的振荡, 这种振荡可能对流体间的混合具有促进作用^[12-13]。Ito 等^[14]采用一种振动技术作用于 Y 型微通道混合器内的流体, 有效地促进了流体的混合。Ian 等^[15]通过实验和数值模拟验证了 T 型混合器中周期性

脉动的流体能够强化混合。Icardi 等^[16]利用 microPIV 对受扰动作用的受限撞击流反应器进行了实验研究, 指出外部扰动会使内部流场变得紊乱, 并在直接数值模拟 (DNS) 中引入类似的小扰动进行了分析。

到目前为止, 对受限撞击流反应器的研究多集中在其内部流动模式的划分及其混合过程的描述上, 而由外部主动式施加激励强化低 Reynolds 数下流体间混合的研究鲜有文献报道。因此, 本文利用平面激光诱导荧光技术对小型受限撞击流反应器内的混合特征及激励强化进行实验研究, 一方面进一步揭示受限撞击流反应器的混合机理, 另一方面为强化低 Reynolds 数下流体的混合提供一种有效方法。

1 实验方法

1.1 实验流程

实验流程如图 1(a)所示, 初始浓度为 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的罗丹明 6G (示踪剂) 溶液 stream A 经流

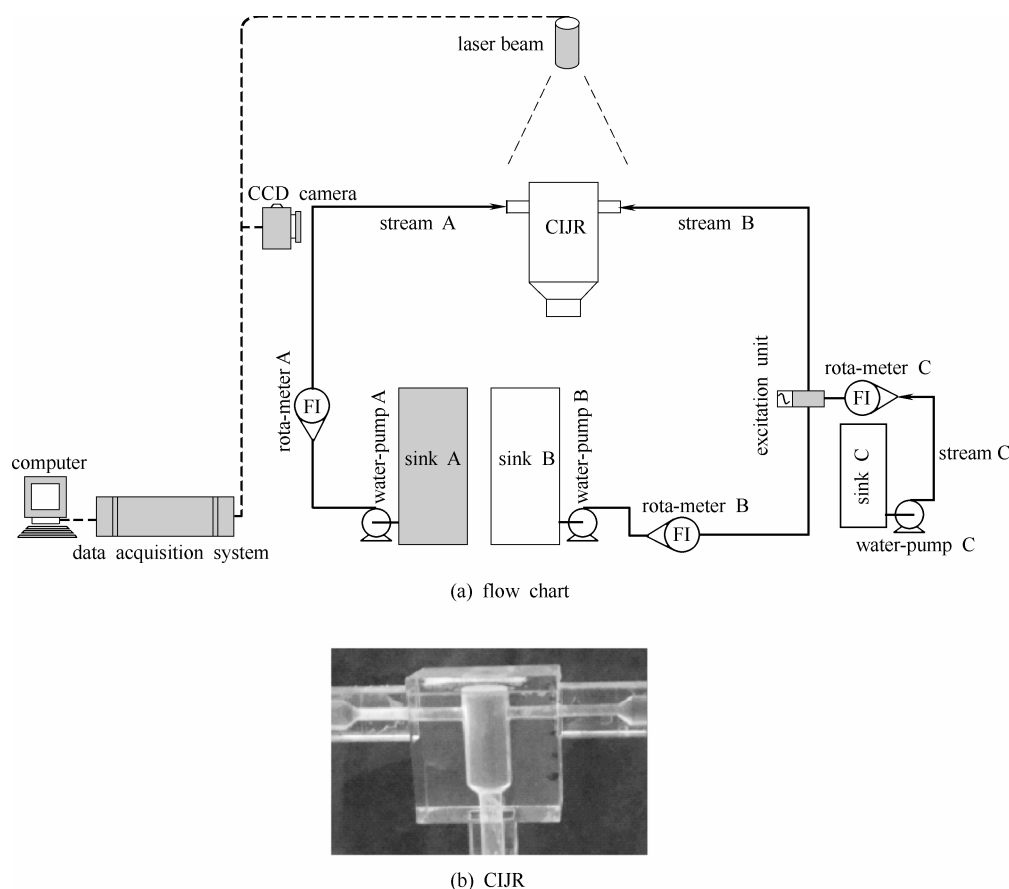


图 1 实验装置流程

Fig. 1 Flow chart of experiment

量计量后喷入受限撞击流反应器（具体结构尺寸如图 2 所示）中，与另一股无示踪剂的水流 stream B 相撞形成撞击流，在反应器内相互混合。混合溶液中示踪剂在波长为 532 nm 的激光激发下发射波长为 560 nm 的荧光，射入装有滤光片的 CCD 相机。数码信号经数据采集系统处理输入计算机，可实时显示出动态灰度流场图。由于捕获图像的灰度值与溶液中的浓度值呈线性关系，因此利用 DANTEC 公司的商业 Dynamic Studio 软件可将流场灰度图转换为示踪剂浓度分布图。

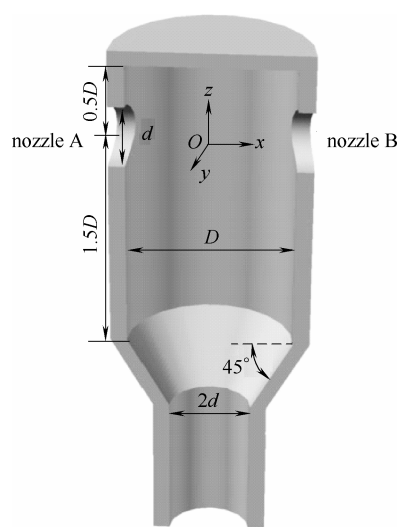


图 2 受限撞击流反应器剖面

Fig. 2 Cross-sectional of confined impinging jets reactor

本实验中的流体介质为水，实验温度为 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。图 1(a) 中水泵为 LXHES 公司生产的 LX-102 型静音水泵，最大流量为 $166 \text{ ml} \cdot \text{s}^{-1}$ ；流量计为余姚仪表有限公司生产的 LZB-2 和 LZB-3 型小量程精密转子流量计，其测量范围分别为 $0.0067 \sim 0.067 \text{ ml} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.042 \sim 0.42 \text{ ml} \cdot \text{s}^{-1}$ ，基本误差小于 4%。为了减小圆柱形有机玻璃对激光的折射作用，在加工时反应器外部采用了整体方形结构，如图 1 (b) 所示。采用 DANTEC 公司生产的 Nd: YAG 连续固体激光器发射激光，经过片光镜后形成厚度为 0.5 mm 的平面激光源。CCD 相机镜头前装有滤光片，可以滤掉高强度的绿光，只捕获橙色荧光。相机的分辨率为 $1392 \times 1040 \text{ pixel}$ ，测量的空间分辨率为 $40 \sim 60 \mu\text{m}$ ，采样频率为 10 Hz。

激励由图 1 中的激励装置产生，电磁阀（电磁阀响应时间小于 5 ms）周期性开启和闭合形成周期性脉动水流 stream C 加入 stream B 后，从喷嘴中喷出。激励流量调节方法如图 3 所示，激励频率 f （即

电磁阀开闭频率）通过 OMRON 公司生产的 H5CX-L8D 型计时器设定，激励振幅 K 通过调节 stream C 的体积流量 Q_C 相对 stream B 的体积流量 Q_B 的百分比确定，定义如下

$$K = \frac{Q_C}{Q_B} \times 100\% \quad (1)$$

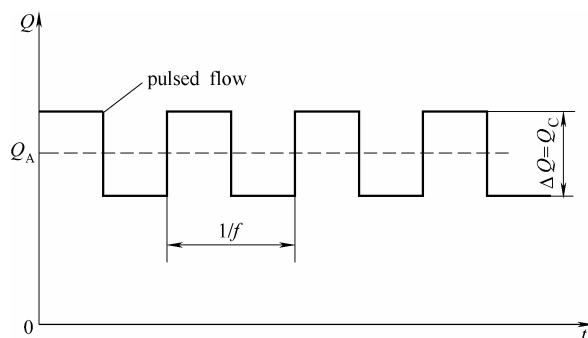


图 3 激励流量调节

Fig. 3 Sketch map of flow-rate controlling of impinging jets in CIJR with pulsation

实验中，stream A 的体积流量 Q_A 固定，通过调节 stream B 的体积流量 $Q_B = Q_A$ 来确定喷嘴入口射流 Reynolds 数，定义如下

$$Re = \frac{4\rho Q_A}{\pi\mu d} \quad (2)$$

式中， Q_A 为喷嘴入口射流 stream A 的体积流量， d 为喷嘴直径， ρ 和 μ 分别为水 20°C 时的密度和动力学黏度。因为在水中示踪剂的含量较少，所以可以用水的物性参数代替示踪剂溶液的物性参数。本文实验工况的具体参数见表 1。

表 1 实验工况

Table 1 Experimental parameters

Operating/geometric parameters	Value
nozzle diameter, d/mm	2
dimensionless chamber diameter, D/d	4.76
Re	75—150
excitation frequency, f/Hz	0—20
excitation amplitude, $K/\%$	20

1.2 实验标定和定量分析

配制浓度分别为 0、0.03、0.05、0.1、0.15、0.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的罗丹明 6G 标准溶液，调节激光器、CCD 相机及反应器到合适位置，并保持 CCD 相机的焦距及曝光度不变。然后依次将标准溶液浓度由低到高注入反应器满溢后进行标定。取每个标准溶液灰度图 150 张，进行时均处理，并做灰度值标准偏差计算，结果显示其值均小于 5%，符合实验要求，

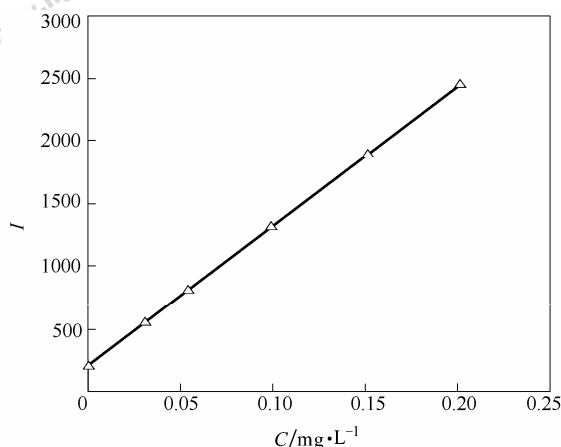


图 4 罗丹明 6G 与荧光强度的标定曲线

Fig. 4 Relationship of concentration of Rhodamine 6G and fluorescence intensity

浓度分布均匀。标定曲线如图 4 所示, 横坐标 C 为罗丹明 6G 溶液的浓度, 纵坐标 I 为荧光强度, 在实验范围内, 荧光强度与罗丹明 6G 溶液的浓度呈线性关系。

本文利用分隔强度 (intensity of segregation, IOS) 和混合质量 (mixing quality, M) 定量地描述流体的混合效果^[17-18], 定义为

$$\text{IOS} = \frac{\overline{C'^2}}{\overline{C}(1-\overline{C})} \quad (3)$$

$$C = \overline{C} + C' \quad (4)$$

$$M = 1 - \sqrt{\text{IOS}} \quad (5)$$

$$\phi = \frac{M_{\text{excitation}}}{M_{\text{free}}} \quad (6)$$

式中, C 为示踪剂在溶液中的浓度, $\overline{C}$ 为 C 的平均值, C' 为 C 相对平均值的波动, $\overline{C'^2}$ 为 C 方差, M 为混合质量, M_{free} 为无激励的混合质量, $M_{\text{excitation}}$

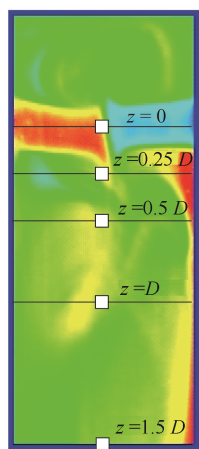


图 5 位置特征

Fig. 5 Map of location features

为激励的混合质量, ϕ 为相对混合系数。IOS 为一定空间尺度下混合物中不同组分之间的分隔强度, 当两股流体完全隔离时, IOS=1, 当流体均匀混合时, IOS=0, 其他混合程度下, IOS 值介于 0 与 1 之间, 即 IOS 值越小, 两股流体的混合效果越好。特别地, 当 IOS<0.05 时, 体系达到了 95% 以上的均匀混合, 可粗略地认为两流体已经完全混合。图 5 为位置特征图, 图片为无激励时, $Re=150$ 的瞬时伪彩图。通过分析不同截面的 IOS 值就能定量地表征不同位置截面的混合程度。

2 实验结果与讨论

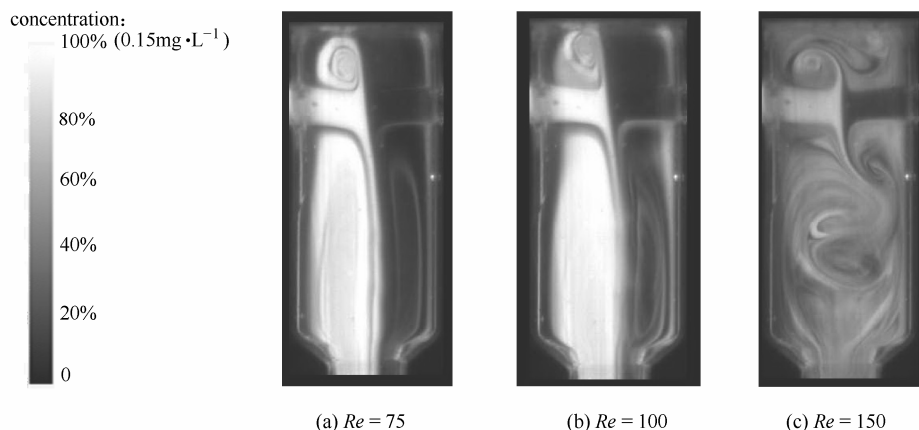
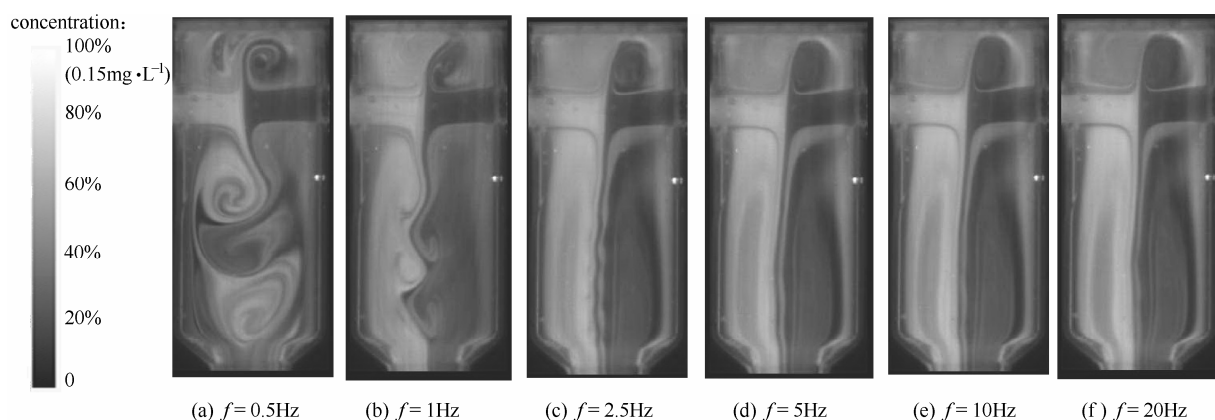
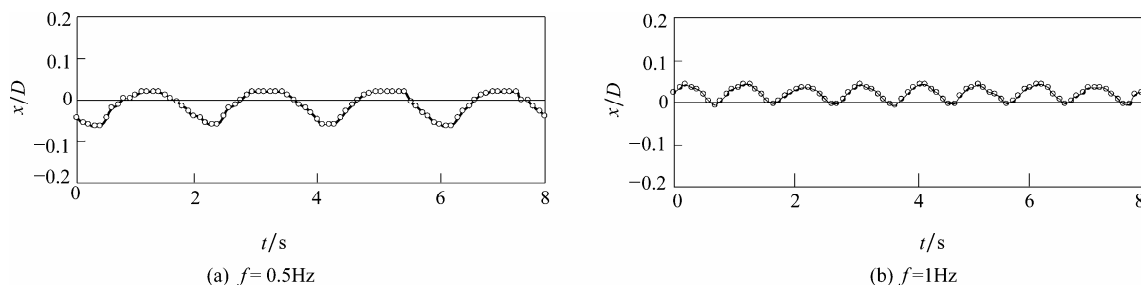
2.1 无激励时受限撞击流反应器内的混合特征

首先考察无激励时受限撞击流反应器内的混合特征, 图 6 为无激励时不同 Reynolds 数下受限撞击流反应器内示踪剂浓度分布 ($y=0$ 平面)。当 $Re=75$ 时, 受限撞击流反应器内出现分离流模式, 此时两股流体仅在撞击面上发生因浓度差引起的分子扩散的静态微观混合, 混合效果较差。随着喷嘴射流入口 Reynolds 数的增大, 受限撞击流反应器内的流动模式开始出现变化, 当 $Re=100$ 时, 撞击面的中心区域仍为分离流模式, 而撞击面边缘出现微小的扰动, 混合效果较 $Re=75$ 时有所提升, 但整个流场的混合效果仍然较差。当 Reynolds 数增大至 150 时, 受限撞击流反应器内流动模式已转变为自持振荡模式^[11], 撞击面发生剧烈的拉伸与卷吸, 促进了流体间的传质与混合, 反应器出口处浓度分布均匀。以上结果说明 Reynolds 数增大引起的流动模式转变能显著提升流体的混合效果, 同时也表明撞击流为分离流模式时, 流体间的混合效果不好。

2.2 激励作用下受限撞击流反应器内的混合特征

图 7 列出了 $Re=75$ 、 $K=20\%$ 时不同激励频率下受限撞击流反应器内示踪剂浓度分布 ($y=0$ 平面)。可视化实验结果表明, 激励能诱导撞击面周期性的轴向振荡 (如图 8 所示, x 为撞击驻点在 t 时刻在 x 轴上的位置点, D 为反应器内径), 进而诱导撞击面发生周期性的偏斜振荡, 最终诱导撞击面上周期性地生成旋涡, 促进了两股流体的混合。

但是随着激励频率增大, 撞击面轴向振荡的振幅变小, 撞击面上生成旋涡的尺度也随之减小, 当 $f > 2.5$ Hz 时振荡和旋涡逐渐消失。这符合本课题组之前研究^[19]推导出的半经验公式 $A/(\frac{1}{2}u_0K) = \frac{2}{5}(1/f)$ 的结论。由该公式可知, 撞击面的振幅 A 与激励频

图 6 无激励时不同 Reynolds 数下受限撞击流反应器内示踪剂浓度分布 ($y=0$ 平面)Fig. 6 Concentration field in confined impinging jets reactor without excitation of various Reynolds numbers ($y=0$ plane)图 7 $Re=75$ 、 $K=20\%$ 时不同激励频率下的受限撞击流反应器内示踪剂浓度分布 ($y=0$ 平面)Fig. 7 Concentration field in confined impinging jets reactor with different excitation at $Re=75$ and $K=20\%$ ($y=0$ plane)图 8 $Re=75$ 、 $K=20\%$ 时的典型撞击面轴向振荡时间序列 ($y=0$ 平面)Fig. 8 Time history of position of stagnation point on axis in confined impinging jets reactor with different excitation at $Re=75$ and $K=20\%$ ($y=0$ plane)

率 f 呈反比关系, 也即当喷嘴入口初速度和激励振幅一定时, 激励频率越大, 撞击面的振幅也会越小。因而同一 Reynolds 数下, $K=20\%$ 时, 随着激励频率的增大, 激励对撞击流的作用逐渐减弱。

2.3 受限撞击流反应器内混合过程的定量表征

图 9 为无激励时受限撞击流反应器内不同 z/D 截面的 IOS 值。从图中可以看出, 随着 z/D 的增大, 不同 Reynolds 数的 IOS 值均不断变小。而在

$Re=100$, $z/D=0.25$ 处, 其 IOS 值出现先减小后增大的变化, 是由于在此工况下, $z/D=0.25$ 截面位置处形成了大尺度卷吸旋涡, 对流体间的混合有一定的提升作用, 其 IOS 值也随之减小。但是这种宏观大尺度结构的形成对流体间混合的提升作用也是有限的, 因为所有 $Re \leq 100$ 的工况, z/D 截面上的 IOS 值都大于 0.2, 远没达到完全混合 95% 要求, 这也充分验证了分离流模式流体的混合效果较差。可是

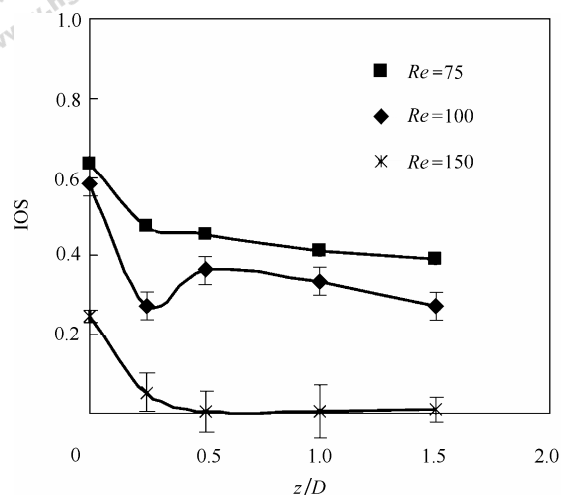


图 9 无激励时受限撞击流反应器不同 z/D 截面的 IOS 值
Fig. 9 IOS of different Reynolds numbers change along radial of impinging plane

当 $Re=150$, $z/D \geq 0.5$ 时, IOS 值小于 0.05, 满足完全混合 95% 要求, 说明撞击面的自持振荡可以极大地强化流体间的混合。所以随着 Reynolds 数的增大, 不同截面的 IOS 值都随之减小, 特别是 Reynolds 数从 100 到 150 时, IOS 值急剧降低。

由图 7 可知, 激励对受限撞击流反应器内的混合过程具有明显的促进作用, 不仅使撞击面出现周期性的振荡现象, 也使流体的浓度分布更加均匀。为了定量考察激励对受限撞击流反应器内混合过程的影响, 对 $K=20\%$ 时不同 Reynolds 数下反应器出口 $z/D=1.5$ 截面处的 IOS 值随激励频率的变化做了分析, 结果如图 10 所示。随着激励频率 f 的增大, IOS 值呈现先急剧增大后趋于平缓不变的变化趋势, 且拐点都出现在激励频率 $f=2.5$ Hz 时。可见,

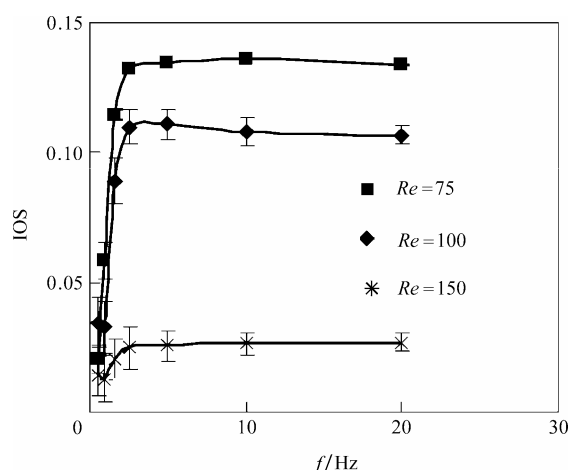


图 10 不同 Reynolds 数下反应器出口 $z/D=1.5$ 截面处的 IOS 值随激励频率的变化

Fig. 10 IOS of different Reynolds numbers change with excitation frequency at $z/D=1.5$

IOS 值随 f 的变化趋势与实验中观察到的撞击面振幅随激励频率增大而减小的现象相互吻合。而对比图 9 中 $z/D=1.5$ 截面处的 IOS 值可知, 当 $Re=75$, 100 时, 激励作用下的 IOS 值较无激励时的 IOS 值都明显减小, 当 $Re=150$ 时, 激励作用下的 IOS 值对比无激励作用时变化不大。说明流动为分离流模式时, 激励使流体间的混合效果明显改善, 而对处于自持振荡模式的撞击流影响较小。这是因为自持振荡是受限撞击流固有的, 在较低激励振幅下, 外界的扰动难以对其产生影响。而分离流模式流体的混合效果本就较差, 激励诱导撞击面发生周期性振荡, 促进了湍动小尺度结构的生成, 加剧了两股流体间的相互卷吸, 从而强化了撞击流的混合。

为了进一步定量考察激励提升混合效果的程度, 对相对混合系数进行分析。图 11 是不同 Reynolds 数下反应器出口 $z/D=1.5$ 截面处的相对混合系数随激励频率的变化。当 $Re=75$, 100 时, 同一激励振幅下, 激励频率越小, 激励对流体混合的强化作用越强。到 $Re=150$ 时, ϕ 值在 1 附近, 激励对流体的混合效果影响不明显。这说明对于受限撞击流反应器内的混合过程, 激励对混合效果较差的分离流模式有效, 对自持振荡模式的影响较小。

一般地, 在小型受限撞击流反应器的实际应用中, 流体介质的黏度较高, 喷嘴直径小, 导致入口的 Reynolds 数偏低。如果反应器内出现分离流模式时, 本文的激励方法能有效地诱导撞击面发生周期性的振荡, 促进流体之间相互卷吸, 加剧流体的质量传递, 达到很好的混合效果。此方法对强化小型受限撞击流反应器的混合过程具有重要的借鉴价值。

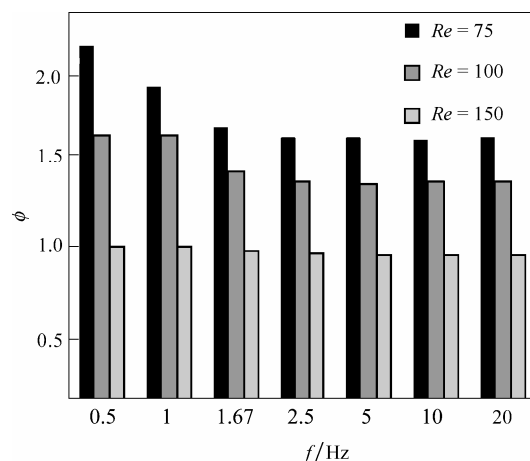


图 11 不同 Reynolds 数下反应器出口 $z/D=1.5$ 截面处的相对混合系数随激励频率的变化

Fig. 11 ϕ of different Reynolds numbers change with excitation frequency at $z/D=1.5$

3 结 论

本文采用平面激光诱导荧光技术对小型受限撞击流反应器内的混合特征及激励强化进行了可视化实验研究, 得出以下结论。

(1) 在无激励时, 受限撞击流反应器内处于分离流模式时, 两股流体间的混合效果较差。而转变为自持振荡模式时, 两股流体间的混合效果显著提升, 反应器出口达到完全混合的程度。说明 Reynolds 数是影响流体混合的重要因素。

(2) 当流动为分离流模式时, 激励能够较好地改善流体的混合效果, 而对处于自持振荡模式流体的混合效果的影响较小。

(3) 本文为强化小型反应器内流体间的混合效果提供一种有效方法, 研究结果也能为小型受限撞击流反应器的设计、结构优化和工业方法提供理论指导。

符 号 说 明

- C ——示踪剂浓度, $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$
 D ——反应器内径, mm
 d ——喷嘴直径, mm
 f ——激励频率, Hz
IOS ——分隔强度
 K ——激励振幅
 M ——混合质量
 Q ——体积流量, $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$
 Re ——喷嘴出口 Reynolds 数
 μ ——流体的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$
 ρ ——流体的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
 ϕ ——相对混合系数

References

- [1] Tamir A. Impinging-Stream Reactors: Fundamentals and Applications [M]. Amsterdam: Elsevier, 1994.
- [2] Santos R J, Teixeira A M, Lopes J C R. Study of mixing and chemical reaction in RIM [J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, **60**(8/9): 2381-2398.
- [3] Devahastin S, Mujumdar A S. A numerical study of flow and mixing characteristics of laminar confined impinging streams [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2002, **85**(2/3): 215-223.
- [4] Mahajan A J, Kirwan D J. Micromixing effects in a two-impinging-jets precipitator [J]. *AIChE Journal*, 1996, **42**(7): 1801-1814.
- [5] Tucker C L, Suh N P. Mixing for reaction injection molding (I): Impingement mixing of liquids [J]. *Polymer Engineering & Science*, 1980, **20**(13): 875-886.
- [6] Santos R J, Erkoc E, Dias M M, Teixeira A M, Lopes J C B. Hydrodynamics of the mixing chamber in RIM: PIV flow-field characterization [J]. *AIChE Journal*, 2008, **54**(5): 1153-1163.
- [7] Santos R J, Erkoc E, Dias M M, Lopes J C B. Dynamic behavior of the flow field in a RIM machine mixing chamber [J]. *AIChE Journal*, 2009, **55**(6): 1338-1351.
- [8] Erkoc E, Santos R J, Nunes M I, Dias M M, Lopes J C B. Mixing dynamics control in RIM machines [J]. *Chemical Engineering Science*, 2007, **62**(18/19/20): 5276-5281.
- [9] Qiu S X, Xu P, Qiao X W, Mujumdar S Arun. Flow and mixing characteristics of pulsed confined opposed jets in turbulent flow regime [J]. *Heat & Mass Transfer*, 2013, **49**(2): 277-284.
- [10] Krupa K, Nunes M I, Santos R J, Bourne J R. Characterization of micromixing in T-jet mixers [J]. *Chemical Engineering Science*, 2014, **111**: 48-55.
- [11] Li W F, Du K J, Yu G S, Liu H F, Wang F C. Experimental study of flow regimes in three-dimensional confined impinging jets reactor [J]. *AIChE Journal*, 2014, **60**(8): 3033-3045.
- [12] Li W F, Huang G F, Tu G Y, Liu H F, Wang F C. Experimental study of oscillation of axisymmetric turbulent opposed jets with modulated airflow [J]. *AIChE Journal*, 2013, **59**(12): 4828-4838.
- [13] Li W F, Huang G F, Tu G Y, Liu H F, Wang F C. Experimental study of planar opposed jets with acoustic excitation [J]. *Physics of Fluids*, 2013, **25**(1): 014108-014123.
- [14] Ito Y, Komori S. A vibration technique for promoting liquid mixing and reaction in a microchannel [J]. *AIChE Journal*, 2006, **52**: 3011-3017.
- [15] Ian G, Nadine A. Enhancement of microfluidic mixing using time pulsing [J]. *Lab on a Chip*, 2003, **3**: 114-120.
- [16] Icardi M, Gavi E, Marchisio D L, Barresi A A, Olsen M G, Fox R O, Lakehal D. Investigation of the flow field in a three-dimensional confined impinging jets reactor by means of microPIV and DNS [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, **166**(1): 294-305.
- [17] Danckwerts P V. The definition and measurement of some characteristics of mixtures [J]. *Applied Scientific Research, Section A*, 1952, **3**: 279-296.
- [18] Marko H, Michael S, Norbert R. Experimental investigation of liquid-liquid mixing in T-shaped micro-mixers using μ -LIF and μ -PIV [J]. *Chemical Engineering Science*, 2006, **61**(9): 2968-2976.
- [19] Li W F, Qian W W, Yu G S, Liu H F, Wang F C. Experimental study of oscillation behaviors in confined impinging jets reactor under excitation [J]. *AIChE Journal*, 2015, **61**(1): 333-341.