不等径撞击流反应器流动与微观混合特性的研究

聂傲, 王智邈, 韩敬*, 李志鹏, 高正明

北京化工大学, 化工资源有效利用国家重点实验室, 北京 100029

*通讯作者, E-mail: hanj@mail.buct.edu.cn

收稿日期: 2017-12-26; 接受日期: 2018-05-15; 网络版发表日期: 2018-05-29

国家重点研发计划(编号: 2017YFB0306701)资助项目

摘要 撞击流是一种过程强化形式, 因其能产生较大的湍流动能与湍流耗散率而适用于快速反应体系. 本文采用粒子图像测速(PIV)技术与碘化物-碘酸盐平行竞争反应, 对不等径撞击流反应器内的流动与微观混合特性进行了研究. 结果表明, 在充分湍动情况下, 雷诺数的改变对撞击腔内无因次化的流体平均速度、脉动速度以及湍流动能分布影响不大, 微观混合效果随着撞击雷诺数的增加而增强; 适宜的上方空间有利于增强传递过程, 在较低的上方空间条件下驻点位置的偏移将受到显著影响; 在不同动量比条件下, 速度/动量比对无因次的驻点位置偏移影响显著, 10%的速度/动量比变化将造成35%的驻点偏移量. 该不等径撞击流反应器流动特性的研究为该型反应器的设计及优化提供了基础的数据.

关键词 不等径撞击流反应器, 流动特性, PIV技术, 微观混合特性

1 引言

撞击流反应器为一种典型的过程强化反应器, 其基本原理为同轴方向上的两股或多股流体在一定的空间区域内相向运动并碰撞^[1,2]. 碰撞后的两股流体由轴向方向的运动转变为垂直于轴向方向的运动, 并在所碰撞的区域内剧烈湍动. 因撞击流反应器具有较高的湍动程度与湍流耗散率的优点而广泛地应用于化工生产过程中, 如萃取^[3,4]、干燥^[5]、粉煤燃烧^[6]、吸收与解吸^[7]以及超细粉体制备^[8]等.

对于撞击流反应器的研究, 主要集中在反应器的流场与微观混合上. Icardi等^[9]利用直接数值模拟(DNS)和microPIV技术对撞击流内的流场以及平均速度进行研究, 发现不同雷诺数范围内(62~600)撞击流

反应器展现出4种不同的流场形式, 同时撞击流不稳定进口条件的给定将显著影响DNS的模拟结果. Gao等^[10]利用粒子图像测速(PIV)技术研究了不同流速比、上方空间、雷诺数(10620~21210)的情况下, 撞击流反应器内的速度与湍流动能场以及驻点位置的偏移. 结果发现, 微弱的流速比变化(5%)就会造成近70%的驻点位置偏移. 同时Li等^[11,12]利用PIV与高速相机研究了不同雷诺数(100~2000)时撞击流反应器内的流场情况, 并详细研究了喷嘴距离对驻点位置偏移的影响.

综上所述, 目前对于撞击流反应器的研究多集中于等径反应器内的流场与驻点位置的偏移方面^[13~15]. 同时根据前人对等径撞击流反应器微观混合性能的实验研究可知, 为了实现较好的微观混合效果, 需要保证参与撞击的物料的动量比为1^[16~18]. 但是, 在实际的工

引用格式: Nie A, Wang Z, Han J, Li Z, Gao Z. Experimental investigation of flow and reacting characteristics in asymmetric confined impinging jets reactor. *Sci Sin Chim*, 2018, 48: 648–657, doi: 10.1360/N032017-00218

业生产中, 由于反应机理的多样性和复杂性, 不可避免地会遇到反应物的流量比例或化学计量数之比不为1的情况. 因此, 就需要考虑采用不等径撞击流. 目前对于不等径撞击流的研究尚不充分. Kölbl等^[19]利用碘化物-碘酸盐体系对3~6 mm直径的撞击流的微观混合性能进行了研究.

本文针对不等径撞击流反应器, 采用PIV技术对3~4 mm不等径撞击流内部液体流动的规律进行了研究, 同时也考察了不同雷诺数与体积流量比等情况下不等径撞击流反应器内的微观混合效果.

2 实验装置与方法

2.1 实验装置

2.1.1 撞击流反应器

本研究中采用的撞击流反应器尺寸和三维结构分别如图1(a, b)所示, 撞击流反应器的入射管径分别为3和4 mm. 为了减小激光平面在入射时产生的折射和散射, 将撞击腔横截面设计为正方形, 且四面采用透明有机玻璃片密封. 定义撞击中心轴线到上方空间上沿的距离为表征撞击腔上方空间的特征尺寸 L , 其值可采用不同长度的密封塞进行调节.

在实验研究中, 选取撞击流内最主要和最具有代表性的中心区域进行研究, 即 X - Y 和 X - Z 平面. 其中 X - Y 平面大小为14.2 mm×35.0 mm, X - Z 平面大小为14.2 mm×14.2 mm.

2.1.2 撞击流实验系统

PIV实验流程如图2所示, 多级离心泵(4)将储水槽

(2)中含有的示踪粒子(平均粒径为10 μm , 密度为1500 kg/m^3)的去离子水分别从反应器(1)的两端泵入并相向碰撞, 撞击之后的去离子水经反应器(1)出口流入储水槽(2)中, 从而形成物料的循环流动.

微观混合实验中, 将配置好的两种反应物料分别放置在两个独立储槽中(即将图2中的储水槽用两个储液槽替换), 并将两个储槽内的溶液混合均匀. 多级离心泵将两股反应流体泵入撞击流反应器内, 进行相互撞击并反应. 通过变频器调节两股反应流体的流量, 充分反应后的溶液由撞击流反应器正下方的出口处用软管导出并取样.

2.2 实验方法

2.2.1 PIV实验

粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)技术是一种结合光学与计算机图像处理技术发展起来的一种可测量瞬时全场速度的非介入式流动测量技术, 其能够实现时间、空间的双重解析.

本实验中采用64×64 pixels的查询区间进行流场特性的分析, 相邻两帧之间的时间间隔设置为4 μs . 平均速度以及湍流动能统计无关性的测试结果如图3所示, 当统计样本数达到200个时, 其均方根速度统计结果相对于300个样本数的误差仅为2%, 可认为此时已达到了统计结果的稳定, 故以下的实验中每个实验的样本数为300个.

2.2.2 微观混合实验

碘化物-碘酸盐体系是一种经典的用于考察微观混合性能的反应体系, 被誉为“分子探针”. 该平行竞争

图1 撞击流反应器的尺寸(a)与平面示意图(b) (网络版彩图)

Figure 1 (a) Dimensions and (b) solid model of asymmetric CIJR (color online).

图2 撞击流装置流程图. (1) 反应器, (2) 储水槽, (3) 涡轮流量计, (4) 多级离心泵, (5) 阀门, (6) 变频器

Figure 2 Schematic diagram of experimental setup. (1) CIJR, (2) tank, (3) flowmeters, (4) pumps, (5) valve, (6) transducer.

图3 平均速度(a)和均方根(b)与样本数的关系

Figure 3 Relationship between average velocity (a), RMS (b) and the number of samples.

反应体系最初由法国学者Villermoux等^[20]提出, 随后被Guichardon等^[21,22]进一步完善. 该反应体系包括如下3个反应:

其中反应(1)是瞬间反应, 反应(2)是快速反应, 反应速率为

$$r_2 = k_2[\text{H}^+]^2[\text{I}^-][\text{IO}_3^-]. \quad (4)$$

根据实验测定, 反应速率常数 k_2 为溶液中离子强度 μ 的函数,

$$(1) \mu < 0.166 \text{ mol/L},$$

$$\lg k_2 = 9.28105 - 3.664\mu^{1/2}. \quad (5)$$

$$(2) \mu > 0.166 \text{ mol/L},$$

$$\lg k_2 = 8.383 - 1.5112\mu^{1/2} + 0.23689\mu. \quad (6)$$

由反应(2)生成的 I_2 进一步与 I^- 发生反应(3), 为可逆反应, 反应速率为

$$r_3 = k_3[\text{I}_2][\text{I}^-] - k_3'[\text{I}_3^-]. \quad (7)$$

实验测定生成的 I_3^- 的浓度可以在波长353 nm下由分光光度计测量得到.

根据以上竞争反应, 可定义离集指数为

$$X_s = \frac{Y}{Y_{\text{ST}}}, \quad (8)$$

其中,

$$Y = \frac{2(n_{\text{I}_2} + n_{\text{I}_3^-})}{n_{\text{H}_0^+}}, \quad (9)$$

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

其中, Y 为参加反应(2)的 H^+ 的物质的量($n_{\text{I}_2} + n_{\text{I}_3^-}$)与所加入的 H^+ 总量($n_{\text{H}_0^+}$)之比, Y_{ST} 表示完全离集的状况下 Y 的值. 当微观混合为理想状态时, $X_s = 0$; 而完全离集时, $X_s = 1$. 实际情况中 $0 < X_s < 1$.

3 结果与讨论

3.1 不等径撞击流反应器流场分析

3.1.1 雷诺数对流动特性的影响

图4为在相同流量比与上方空间条件下, 不同撞击雷诺数时, X - Y 、 X - Z 平面的平均速度矢量与湍流动能云图. 从 X - Y 平面的流场图中可以看出, 两股流体水平

图 4 X - Y 、 X - Z 平面平均速度矢量和湍流动能云图. (a) $Re_{3/4}=17596/25514$; (b) $Re_{3/4}=23461/33872$; (c) $Re_{3/4}=31282/45309$ (网络版彩图)

Figure 4 Flow field and TKE distribution on X - Y , X - Z plane. (a) $Re_{3/4}=17596/25514$; (b) $Re_{3/4}=23461/33872$; (c) $Re_{3/4}=31282/45309$ (color online).

相撞后, 向四周进行扩散, 并在撞击腔中心处形成湍流动能较大的区域, 撞击之后流体从撞击腔底部流出. 三组不同 Re 条件下的实验在速度和湍动能分布上具有相似性, 这与Gao等^[10]提出的撞击流反应器内无因次化湍流动能的分布具有相似性的观点一致.

无因次平均速度和脉动速度分布如图5所示. 以 X 方向为例, X 方向上无因次平均速度呈现关于撞击轴线的对称分布. 从不等径两进口管内分别向反应腔内

射入的两股流体, 在撞击之前平均速度分布保持水平, 在撞击区域内($-0.2 < X/R < 0.2$)形成高速梯度, 平均速度迅速衰减, 并在撞击腔中间区域形成平均速度为零的驻点, 而此时脉动速度达到最大值, 从而具有极大的湍流动能.

对于不同撞击雷诺数的情况, 平均速度以及脉动速度均表现出相同的分布规律. 故而在充分湍动的情况下($Re=18000\sim45000$), 只要保证入口处流体充分发

图 5 不同 Re 下无因次化的平均速度(a)与脉动速度(b)分布. (网络版彩图)

Figure 5 Normalized mean velocity (a) and RMS velocity (b) at different Re (color online).

展, 撞击雷诺数的大小对流体的平均速度和脉动速度分布影响不大.

3.1.2 上方空间对流动特性的影响

图6为不同上方空间情况下平均速度矢量与湍流动能云图. 从云图中可以看出, 当上方空间 $L=10$ 、 12.5 、 15 mm时, 平均速度与湍动能分布趋势具有相似性, 表现出来的差异是湍动能最大值和高端流动能区域面积且撞击驻点位置主要位于反应器中间区域

附近. 这是因为当空间增大时, 碰撞后的流体向上会形成自由稳定的流型, 相互作用效果减弱, 高端流动能区域减小的同时, 对驻点位置基本无影响, 故而驻点位置在反应器中心处附近.

但当 $L=5$ mm时, 撞击驻点较上述结构条件下发生了明显的偏移, 并且3 mm管径上方空间处出现了较大的涡流. 当上方空间较小时, 流体经过碰撞后向上在狭小的区域内反复碰撞, 与两股入射流体相互影响, 高端流动能区域增大, 但会使反应器内的流场产生不稳定

图 6 不同上方空间情况下平均速度矢量与湍流动能云图. (a) $L=5$ mm; (b) $L=10$ mm; (c) $L=12.5$ mm; (d) $L=15$ mm (网络版彩图)

Figure 6 Flow field and TKE on X - Y plane with different L . (a) $L=5$ mm; (b) $L=10$ mm; (c) $L=12.5$ mm; (d) $L=15$ mm (color online).

性, 撞击驻点则会偏移中心区域一段距离.

不同上方空间时 X 轴线上的无因次 U 分布如图7所示. 从图中可以看出, 当上方空间高度为10、12.5以及15 mm时, $U=0$ 的驻点位置分别约在 $X/R=0.05$ 、0.03和0.01处, 表明此时驻点较中心偏移量不大, 然而当上方空间为5 mm时, 其驻点偏移至 $X/R=0.125$ 处.

3.1.3 速度/动量比对流动特性的影响

图8为不同速度比条件下 X - Y 平面平均速度和湍流动能云图, 从图中可以看出, 不同的速度比下驻点的位置显著不同. 随着 U_4/U_3 的增大, 驻点平均位置逐渐由

4 mm一侧向3 mm一侧移动, 当 U_4/U_3 为1.083时, 驻点平均位置较为接近反应器中心轴线. 因此, 当使用不等径的4~3 mm撞击流反应器, 为使撞击驻点的平均位置趋近于中心轴线, 需要将流速比控制在1.083与1.14之间.

不同速度比下 X 轴向上的 U 分布如图9所示, 从图中可以看出, 不同速度比下的轴线 U 分布趋势是相一致的, 在撞击之前均有速度较为稳定的平台区, 之后在一定的区域内流体的速度梯度突然变大, 流体的运动速度在反应器的中间位置接近于0. 不同速度比下的撞击驻点的位置并不一致, 轻微的速度比波动将造成

图7 不同上方空间时X方向的速度变化(网络版彩图)

Figure 7 Normalized mean velocity along X axis at different L (color online).

驻点位置较大的偏移。

通过对PIV实验中不同瞬态结果的分析,可以得到不同时刻下驻点的瞬时位置,其平均值、波动情况

与速度/动量比的关系如图10所示。从图中可以看出,平均驻点位置是与撞击速度/动量比呈现出几乎线性的关系。同时,无论驻点的平均位置在何处,通过统计得到的瞬态驻点位置均表现出较大的波动,范围大致在 $X/R=\pm 0.24$ 之内(相对于平均驻点位置)。

3.2 不等径反应器的微观混合效果

3.2.1 撞击速度对微观混合的影响

图11为固定 H^+ 浓度(0.08 mol/L)、轴线上方空间特征长度($L=12.5$ mm)以及体积流量比($Q_3/Q_4=1/1$ 、 $U_3/U_4=16/9$)条件下,不同撞击速度对离集指数的影响。

从图11中可以看出,随着撞击速度的逐渐增加(7.01~14.9 m/s),离集指数 X_s 逐渐下降。这是由于随着撞击速度的增加,撞击流反应器内的雷诺数逐渐增加,增大了撞击区域的湍流动能,而由于撞击腔区域的限

图8 不同速度比下X-Y平面平均速度和湍流动能云图. (a) $U_4/U_3=0.984$; (b) $U_4/U_3=1.031$; (c) $U_4/U_3=1.083$; (d) $U_4/U_3=1.140$; (e) $U_4/U_3=1.203$ (网络版彩图)

Figure 8 Flow field and TKE on X-Y plane with different flow ratio. (a) $U_4/U_3=0.984$; (b) $U_4/U_3=1.031$; (c) $U_4/U_3=1.083$; (d) $U_4/U_3=1.140$; (e) $U_4/U_3=1.203$ (color online).

图 9 X 轴线上不同速度比对 X 轴向无因次平均速度的影响 (网络版彩图)

Figure 9 Normalized mean velocity along X axis at different impinging velocity ratios (color online).

图 10 驻点位置波动与速度/动量比之间的关系 (网络版彩图)

Figure 10 Stagnation point at different velocity/momentum ratio (color online).

制, 使得流体的能量迅速耗散, 从而显著增加反应器内的微观混合效果. 但当撞击速度大于 10 m/s 后, 离集指数的下降趋势较为缓慢.

3.2.2 体积流量比对微观混合的影响

图 12 为在恒定摩尔比的情况下, 体积流量比 ($R = Q_B/Q_A$) 对离集指数的影响.

从图 12 中可以清晰地看到, 随着体积流量比 R 的增加, 离集指数明显增大. 这是因为, 在恒定摩尔比时, 体积流量比的增加意味着酸浓度的增加. 较高的酸浓度导致最小离集尺度微团中反应物的局部过量 and 较高

图 11 撞击速度对离集指数的影响

Figure 11 Effect of impinging jet velocity on segregation index.

图 12 体积流量比对离集指数的影响

Figure 12 Effect of flow ratio on Segregation index.

的离集状态, 降低了微观混合效果, 同时体积流量比的增大, 使得酸溶液流量相对偏小, 两种流体在相互混合过程中所产生的涡流或者卷吸强度减弱, 降低了微观混合的效果.

4 结论

本文分别使用 PIV 技术与碘化物-碘酸盐体系对不等径撞击流反应器的流场以及微观混合特性进行了实验研究.

PIV 实验结果表明, 不同撞击雷诺数下平均速度以及脉动速度均表现出相似分布规律, 即在充分湍动的情况下, 撞击雷诺数的大小对无因次化的流体平均速度分布、脉动速度影响不大. 当上方空间高度为

10、12.5以及15 mm时, 驻点位置的偏移量不大, 然而当上方空间为5 mm时, 驻点位置的偏移量较大. 通过改变撞击速度比, 发现对于不等径的4~3 mm撞击流反应器, 为使撞击驻点的平均位置趋近于中心轴线, 需要将流速比控制在1.083与1.14之间, 且平均驻点位置与撞击速度比呈现几乎线性的关系.

采用碘化物-碘酸盐体系对反应器的微观混合性能进行研究时, 通过改变撞击速度和流量比, 发现随着撞击速度的逐渐增加, 离集指数逐渐下降, 但当撞击速度大于10 m/s后, 离集指数的下降趋势较为缓慢, 微观混合效果提升不大. 随着体积流量比 R 的增加, 离集指数明显增大.

参考文献

- 1 Wu Y. *Prog Chemistry*, 2001, 11: 8–13 (in Chinese) [伍沅. 化工进展, 2001, 11: 8–13]
- 2 Wu Y. *Chem Eng*, 2008, 9: 79–82 (in Chinese) [伍沅. 化学工程, 2008, 9: 79–82]
- 3 Tamir A. *Impinging-Stream Reactors Fundamentals and Applications*. Amsterdam: Elsevier Science, 1994
- 4 Saïen J, Zonouzian SAE, Dehkordi AM. *Chem Eng Sci*, 2006, 61: 3942–3950
- 5 Wu Y, Yang AS, Cheng R, Sun Q, Liu HY. *Chem Eng*, 1998, 26: 14–23 (in Chinese) [伍沅, 杨阿三, 程榕, 孙勤, 刘华彦. 化学工程, 1998, 26: 14–23]
- 6 Pitt GJ, Millward GR. *Coal and Modern Coal Processing*. New York: Academic Press, 1979
- 7 Kleingeld AW, Lorenzen L, Botes FG. *Chem Eng Sci*, 1999, 54: 4991–4995
- 8 Wu GH, Zhou HZ, Zhu SL. *J Inorg Mater*, 2006, 21: 1079–1084 (in Chinese) [吴国华, 周洪兆, 朱慎林. 无机材料学报, 2006, 21: 1079–1084]
- 9 Icardi M, Gavi E, Marchisio DL, Barresi AA, Olsen MG, Fox RO, Lakehal D. *Chem Eng J*, 2011, 166: 294–305
- 10 Gao Z, Han J, Xu Y, Bao Y, Li Z. *Ind Eng Chem Res*, 2013, 52: 11779–11786
- 11 Li WF, Yao TL, Wang FC. *AIChE J*, 2010, 56: 2513–2522
- 12 Li WF, Du KJ, Yu GS, Liu HF, Wang FC. *AIChE J*, 2014, 60: 3033–3045
- 13 Fonte CP, Sultan MA, Santos RJ, Dias MM, Lopes JCB. *Chem Eng J*, 2015, 260: 316–330
- 14 Icardi M, Gavi E, Marchisio DL, Olsen MG, Fox RO, Lakehal D. *Appl Math Model*, 2011, 35: 1591–1602
- 15 Liu Z, Guo L, Huang T, Wen L, Chen J. *Chem Eng Sci*, 2014, 119: 124–133
- 16 Johnson BK, Prud'homme RK. *AIChE J*, 2003, 49: 2264–2282
- 17 Aoki N, Mae K. *Chem Eng J*, 2006, 118: 189–197
- 18 Gao Z, Han J, Bao Y, Li Z. *J Chem Eng Jpn*, 2013, 46: 683–688
- 19 Kölbl A, Kraut M. *AIChE J*, 2011, 57: 835–840
- 20 Villermaux J, Falk L, Fournier MC. *Use a Parallel Competing Reactions to Characterize Micromixing Efficiency*. New York: American Institute of Chemical Engineering, 1992. 6
- 21 Guichardon P, Falk L. *Chem Eng Sci*, 2000, 55: 4233–4243
- 22 Guichardon P, Falk L, Villermaux J. *Chem Eng Sci*, 2000, 55: 4245–4253

Experimental investigation of flow and reacting characteristics in asymmetric confined impinging jets reactor

Ao Nie, Zhimiao Wang, Jing Han^{*}, Zhipeng Li, Zhengming Gao

State Key Laboratory of Chemical Resource Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China

^{*}Corresponding author (email: hanj@mail.buct.edu.cn)

Abstract: Impinging jet is one of the process intensifications. In order to investigate the flow characteristics and micromixing efficiency in asymmetric CIJR and provide fundamental data for optimizing existing reactors and improving the development of new reactors, 2D PIV system and iodide-iodate system were used. The result shows that in the high range of Re , Reynolds number has little difference on mean velocity, root mean square, turbulence kinetic energy. The distance between horizontal axis of jets and top wall of the mixing chamber L had a very complicated effect on the flow field and stagnation point. The increase of L within a certain range could increase TKE and enhance the micromixing efficiency in the impinging zone. The position of the stagnation point in asymmetric CIJR is significantly related to the jet velocity ratio. Changes in the ratio of 10% affected changes in stagnation point offset of 35%. Therefore, the jet velocity ratio must be carefully adjusted to ensure that the stagnation point is in the center of mixing chamber. Both the PIV and reacting data could be applied to further understand the mixing performance in the asymmetric CIJR and made optimization of the reactor.

Keywords: asymmetric confined impinging jets reactor, flow field, PIV, micromixing performance

doi: [10.1360/N032017-00218](https://doi.org/10.1360/N032017-00218)