

# 旋转填料床与盘管组合反应器中的流动特性

张巧玲, 刘有智, 李光明, 马娇丽

(中北大学化工与环境学院 山西省超重力化工工程技术研究中心, 山西 太原 030051)

**摘要:**以饱和的 NaCl 水溶液为示踪剂, 采用脉冲法考察了液体流量、转子转速对旋转填料床与盘管组合反应器停留时间分布 (RTD) 曲线的影响。用轴向扩散模型对流动状况和返混程度进行了表征。结果表明, 组合反应器内的流体流动型态与盘管相同, 接近活塞流, 且流量越大, 平均停留时间越短。旋转填料床转子转速对组合反应器停留时间分布影响很小。

**关键词:**旋转填料床; 盘管; 停留时间分布; 轴向扩散

中图分类号: TQ052

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2011)01-0068-03

## Flow characteristics of combined reactor composed of rotating packed bed and coil pipes

ZHANG Qiao-ling, LIU You-zhi, LI Guang-ming, MA Jiao-li

(College of Chemical Engineering and Environment, North University of China, Research Center of Shanxi Province for High Gravity Engineering and Technology, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** A new type reactor, composed of rotating packed bed (RPB) and coil pipes, is designed, and its residence time distribution (RTD) is investigated by using pulse method and saturated NaCl solution as tracer at different flow rates and rotating speed, axial dispersion model is used to represent flow status and back-mixing. The results show that the flowing state of the fluid in combined reactor is similar to the tubular which approaches plug flow, and residence time decreases with increasing flow rate. But the rotor speed of RPB has little effect on the RTD.

**Key words:** rotating packed bed; coil pipes; residence time distribution; axial dispersion

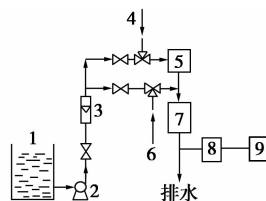
旋转填料床是一种新的过程强化设备, 具有体积小, 易操作, 安装灵活等优点<sup>[1]</sup>。由于其具有高效的传质传热性能, 作为一种重要的反应器, 近年来已被广泛应用于纳米颗粒的合成<sup>[2-5]</sup>、高聚物的合成<sup>[6]</sup>、有机物的合成<sup>[7-8]</sup>等。由于反应物料在旋转填料床中的停留时间很短, 只有不到 1 s 的时间, 因而仅有快速的气-液或液-液反应体系才能在旋转填料床内完成反应。为了进一步拓宽旋转填料床在化学反应中的应用领域, 常常需要将其与其他反应器耦合。盘管反应器具有效率高、体积小特点, 反应体系在盘管中呈活塞流状态。该研究将旋转填料床与盘管作为一种新型组合反应器, 将旋转填料床的高效传质特性与盘管的活塞流特性相结合, 并对其液体停留时间分布进行研究, 为建立组合反应器流动模型和操作条件的优化提供依据<sup>[9]</sup>。

## 1 实验方法与装置

选用饱和的 NaCl 水溶液作为示踪剂, 根据“刺激-响应”技术, 采用脉冲法测定流体的停留时间分

布曲线。

实验装置如图 1 所示。



1—储水槽; 2—泵; 3—转子流量计; 4—入口 1; 5—旋转填料床; 6—入口 2; 7—盘管; 8—电导率仪; 9—示波器

图 1 实验装置图

自来水由储水槽经转子流量计泵入旋转填料床 (测盘管时直接泵入盘管), 示踪剂 NaCl 水溶液由旋转填料床入口 1 (测盘管时由入口 2 注入) 瞬时注入, 注有示踪剂的水溶液由液体分布器经高速旋转的填料快速分散, 并由旋转填料床出液口流入下部的盘管, 在盘管出口用电导率仪连续测定出口处溶液的电导率随时间的变化, 并用示波器连续记录相应的电压信号。由于液体的浓度、电导率、电压值

收稿日期: 2010-08-06

基金项目: 山西省科技攻关项目 (20090321113)

作者简介: 张巧玲 (1965-), 女, 博士生, 副教授, 从事化学工程与工艺方面的研究, qlzhang-65@sohu.com; 刘有智 (1958-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为化工过程强化。

三者成线性关系<sup>[10-11]</sup>, 因而, 数据处理时记录的电压曲线  $V(t)$  可等效为浓度  $C(t)$  曲线。

## 2 结果与讨论

实验分别测定了水的不同流量对盘管停留时间分布和无因次方差的影响以及不同流量和转速对旋转填料床与盘管组合反应器停留时间分布和无因次方差的影响。停留时间分布函数  $E(t)$ 、平均停留时间  $t_m$ 、无因次方差  $\delta_\theta^2$  分别按式(1)、(2)、(3)计算:

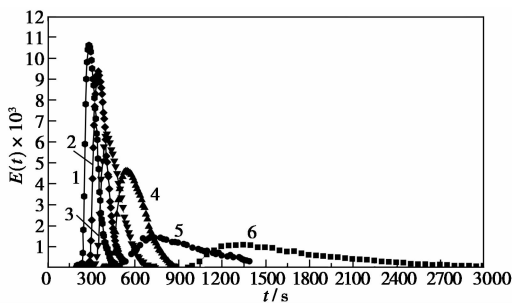
$$E(t) = \frac{c(t)}{\int_0^\infty c(t) dt} \quad (1)$$

$$t_m = \frac{\int_0^\infty tE(t) dt}{\int_0^\infty E(t) dt} = \int_0^\infty tE(t) dt \quad (2)$$

$$\delta_\theta^2 = \int_0^\infty \theta^2 E(\theta) d\theta - 1 \quad (3)$$

### 2.1 流量对盘管停留时间分布的影响

关闭通往旋转填料床的阀门, 开启通往盘管的阀门, 示踪剂 NaCl 水溶液由入口 2 瞬时注入盘管中, 将水的流量由 10 L/h 增加到 60 L/h, 考察不同流量对盘管停留时间的影响, 结果如图 2 所示。



水的流量/L·h<sup>-1</sup>: 1—60; 2—50; 3—40; 4—30; 5—20; 6—10

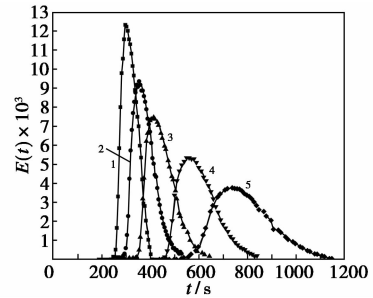
图 2 盘管中流量对停留时间分布的影响

从图 2 可知, 当流量为 10 L/h 时停留时间曲线分布最宽, 峰高最矮。之后随着液体流量的增大, 出峰时间提前, 且峰宽变窄, 峰高变高。这是因为随着流量的增加, 流速也相应增大, 对应的平均停留时间相应缩短。

### 2.2 流量对组合反应器停留时间分布的影响

关闭通往盘管的阀门, 开启通往旋转填料床的阀门, 示踪剂 NaCl 水溶液由入口 1 瞬时注入在组合反应器中, 维持旋转填料床转子转速为 800 r/min, 考察不同流量对停留时间分布的影响, 结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 在组合反应器中平均停留时间分布的变化规律与在盘管中相似, 即随着液体



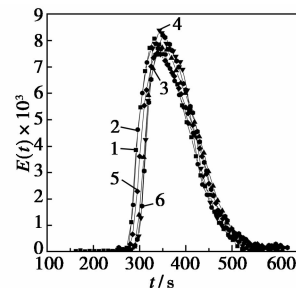
流量/L·h<sup>-1</sup>: 1—60; 2—50; 3—40; 4—30; 5—20

图 3 组合反应器中流量对停留时间分布的影响

流量的增大, 出峰时间提前, 且峰宽变窄, 峰高变高。二者不同的是, 在相同的流量时, 组合反应器中平均停留时间比盘管略有提前, 峰高与盘管相比也略有提高。这可能是因为液体进入旋转填料床以后, 经液体分布器进入快速旋转的填料并迅速分散, 在高速的剪切力作用下液体被剪切成液滴、液丝或液膜, 示踪剂饱和的 NaCl 水溶液在水中的分散更均匀; 另一方面, 由于旋转的填料与液体之间的高剪切作用, 使得液体的推动力增加, 线速度提高, 从而使得停留时间缩短, 峰高提高。

### 2.3 转子转速对组合反应器停留时间分布的影响

在组合反应器中, 维持水的流量为 40 L/h, 调节转子转速为 0 ~ 2000 r/min, 考察不同转速对组合反应器停留时间分布的影响, 结果如图 4 所示。



转子转速/r·min<sup>-1</sup>: 1—0; 2—400; 3—800; 4—1200; 5—1600; 6—2000

图 4 组合反应器中转子转速与停留时间分布的关系

从图 4 可以看出, 在组合反应器中转子转速对平均停留时间分布的影响很小, 当转子转速由 0 增加到 200 r/min 时, 峰高和峰宽无明显变化。这是因为在组合反应器中, 物料在旋转填料床中的停留时间很短(不到 1s), 而在盘管中的停留时间相对很长, 即在组合反应器中停留时间主要取决于盘管中的停留时间, 旋转填料床对平均停留时间分布的影响可忽略。

## 2.4 轴向扩散

为了更好地对流动状况和返混程度进行定量描述,笔者用轴向扩散模型分析各操作参数对轴向扩散的影响,模型方程见式(4):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - u \frac{\partial C}{\partial z} \quad (4)$$

在闭-闭式边界条件下得到的轴向扩散模型的方差表达式见式(5):

$$\delta_\theta^2 = \frac{2}{Pe} - \frac{2}{Pe^2}(1 - e^{-Pe}) \quad (5)$$

式(5)中  $Pe$  为贝克来数,其物理意义是表示流动量与扩散量的比值。当  $Pe$  趋于 0 时,呈全混流流动; $Pe$  越大越接近平推流流动,此时扩散的影响较小,离散符合正态分布。该实验中  $Pe$  数随流量和转速的变化如表 1 至表 3 所示。

表 1 盘管中流量与无因次方差和  $Pe$  的对应关系

流量/ $L \cdot h^{-1}$	10	20	30	40	50	60
方差 $\delta_\theta^2$	0.38	0.19	0.15	0.14	0.13	0.12
$Pe$	3.95	9.4	12.2	13.2	14.3	15.5

从表 1 可看出,在盘管中随着流量的增大,方差  $\delta_\theta^2$  逐渐减小, $Pe$  逐渐增大,即流量越大返混越小,越接近于活塞流,实验结果与盘管属活塞流的理论基本一致。

表 2 组合反应器中流量与无因次方差和  $Pe$  的对应关系

流量/ $L \cdot h^{-1}$	20	30	40	50	60
方差 $\delta_\theta^2$	0.18	0.16	0.13	0.13	0.12
$Pe$	10.0	11.4	14.3	14.3	15.5

从表 2 可看出,流量对组合反应器方差  $\delta_\theta^2$  和  $Pe$  的影响与盘管相比无明显差别,即流量越大返混越小,越接近于活塞流。因为组合反应器中停留时间主要取决于盘管中的停留时间,旋转填料床对组合反应器的影响几乎可以忽略,即组合反应器中流体的流动近似于活塞流状态。

表 3 组合反应器中转速与无因次方差和  $Pe$  的对应关系

转速/ $r \cdot \min^{-1}$	0	400	800	1200	1600	2000
方差 $\delta_\theta^2$	0.14	0.16	0.16	0.15	0.18	0.15
$Pe$	13.2	11.4	11.4	12.2	10.0	12.2

从表 3 可知,在组合反应器中,转速对方差和  $Pe$  的影响很小,即调节旋转填料床转子的转速,方差  $\delta_\theta^2$  和  $Pe$  几乎不变,说明不同转速对流体的流动状态没有明显的影响,组合反应器中的流体状态仍然与盘管中流体状态一致,接近于活塞流状态。

## 3 结语

在旋转填料床与盘管组合反应器中,流量对停留时间的影响较大,流量越大,平均停留时间越短。旋转填料床转子转速对组合反应器停留时间分布影响很小。利用方差表示的轴向扩散模型计算得出的  $Pe$  表明,增大流量有利于减小返混。组合反应器中流体的流动型态与盘管中接近,均属活塞流型态。

## 参考文献

- [1] 刘有智. 超重力化工过程与技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2009:47-70.
- [2] Li Y, Liu Y Z. Synthesis and catalytic activity of copper (II) resorcylic acid nanoparticles[J]. Chem Res Chin Univ, 2007, 23(2): 217-220.
- [3] Chen J F, Zhou M Y, Shao L, et al. Feasibility of preparing nano-drugs by high-gravity reactive precipitation[J]. Int J Pharm, 2004, 269(1): 267-274.
- [4] Chen J F, Wang Y H, Guo F, et al. Synthesis of nanoparticles with new technology: High-gravity reactive precipitation[J]. Ind Eng Chem Res, 2003, 39: 948-954.
- [5] Li Y, Guo Y, Liu Y Z. Synthesis of high purity  $TiO_2$  nanoparticles from  $Ti(SO_4)_2$  in presence of EDTA as complexing agent[J]. Particology, 2005(3): 240-242.
- [6] 张雷, 高花, 邹海魁, 等. 丁基橡胶聚合新型超重力反应器工艺[J]. 化工学报, 2008, 59(11): 260-263.
- [7] Zhang D, Zhang P Y, Zou H K, et al. Application of HIGEE process intensification technology in synthesis of petroleum sulfonate surfactant[J]. Chem Eng Processing, 2010, 49: 508-513.
- [8] 北京化工大学. 一种制备异氰酸酯的方法: 中国, 200710098040. 4[P]. 2008-01-16.
- [9] Choi Byung S, Wan Bin, Philyaw Susan, et al. Residence time distributions in a stirred tank: Comparison of CFD predictions with experiment[J]. Ind Eng Chem Res, 2004, 43: 6548-6556.
- [10] 王承学, 胡永琪, 郭轲. 化学反应工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009, 64-76.
- [11] 赵秋月, 张延安, 曹晓畅, 等. 带搅拌装置的管式反应器停留时间分布曲线[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2006, 27(2): 206-208. ■

欢迎订阅《现代化工》杂志, 邮发代号 82—67。