

多级搅拌槽内流动特性实验及模型研究

周国忠¹⁾ 高正明¹⁾ 王英琛¹⁾ 施力田¹⁾ 刘青²⁾

(1)北京化工大学化学工程学院,北京 100029; 2)橡塑新材料国家工程研究中心,北京 102549)

摘要: 利用隔盘、环板等内构件将搅拌槽内分为四级,采用饱和 KCl 溶液作示踪剂,利用特制的电导率仪-微机系统进行动态数据采集,测定了不同的操作参数和内构件尺寸对停留时间分布(RTD)的影响,分析了影响返混的主要因素。环板与槽壁的间隙、隔盘外径与环板内径的影响较强,盘、板间距的影响相对较弱。利用 Monte Carlo 方法(MCM)对系统的停留时间分布进行了数值模拟计算。

关键词: 多级搅拌; 搅拌槽; 停留时间分布; 流动特性

中图分类号: TQ 052

引言

多级搅拌槽是在长径比较大的槽体内加装隔盘、环板等内构件而构成的。该结构具有多槽串联的优点,设备紧凑,操作简便,并降低了多槽串联的设备投资和操作管理费,有良好的应用前景。国内外的研究者都对此类结构的搅拌槽进行过研究^[1-5]。本文根据停留时间分布,结合流动模型,考察了不同内构件尺寸和操作参数对槽内流体流动特性的影响。

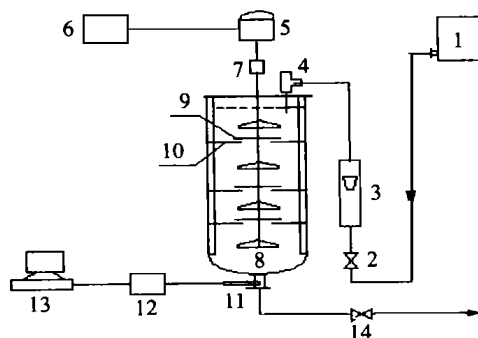
1 实验技术

1.1 实验装置

实验装置由加料系统,搅拌系统,电导测量和记录系统组成,如图 1 所示。搅拌槽内径为 0.476 m,液位高 1.2 m。槽内均布 4 块挡板。利用隔盘、环板结构将搅拌槽分为四级。采用隔盘、环板结构后流体在槽内的流动呈 S 型,级间流通截面积减小,将能够有效地减少短路与返混。为考察隔盘、环板的各种参数对流动状况的影响,实验采用了 4 种不同盘板参数的组合,如表 1 所示,每种组合又改变 3 种盘、板间距,共有 12 种组合。

1.2 实验方法及数据处理

实验采用电导法测量停留时间分布。示踪剂为饱和 KCl 溶液。由于搅拌槽容积较大,盐离子浓度很低,测量时间又较长,对电导率仪的灵敏性和稳定



1. 高位水槽; 2. 进水阀门; 3. 转子流量计; 4. 示踪剂加入口; 5. 电机; 6. 可控硅调速装置; 7. 扭矩传感器; 8. 搅拌槽; 9. 隔盘; 10. 环板; 11. 电导电极; 12. 电导率仪; 13. 计算机; 14. 出水阀门

图 1 停留时间分布测定实验装置

Fig. 1 The experimental set-up for RTD measurement

表 1 隔盘、环板参数组合表

Table 1 Parameters for different combination of disks and ring disks

组合	环板与釜壁 间隙 / mm	环板内径与 槽径之比 D_1/D_T	隔盘外径与槽径 之比 D_2/D_T
	8	0.6	0.7
	1	0.6	0.7
	8	0.13	0.21
	1	0.13	0.21

性提出了很高的要求,市售电导率仪不能满足实验需要。为此,采用特制的电导电极,并且与北京化工大学电测研究室合作开发了一种新型的电导率仪,采用 IME50E10 芯片,使用电可编程模拟电路

(EPAC)技术,将元件级提升到功能模块级。仪器通过串行口与计算机连接,由数据采集软件来控制数据采集过程,并实时绘图,动态、直观地显示数据采集过程。

采用滑动平均法^[6]对实验测量的实时信号曲线进行平滑。

2 结果与讨论

2.1 停留时间分布

不同型式及不同内构件参数的反应设备有不同的停留时间分布,即使相同的设备,由于操作条件不同,其停留时间分布也不会相同。实验针对不同流量、不同转速及不同内构件尺寸的停留时间分布进行了测量。依据实测出口浓度曲线,按下列各式计算出停留时间分布密度函数 $E(t)$, 平均停留时间及方差²。

$$E(t) = \frac{c(t_i)}{t_i c(t_i)} \quad (1)$$

$$= \frac{t_i E(t_i)}{E(t_i)} = \frac{t_i c(t_i)}{c(t_i)} \quad (2)$$

$$s^2 = \left[\frac{\sum_i t_i^2 E(t_i)}{\sum_i E(t_i)} - \left(\frac{\sum_i t_i E(t_i)}{\sum_i E(t_i)} \right)^2 \right] \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

将实验测得的停留时间分布曲线与全混流模型和四槽串联模型的计算值进行比较,见图 2。从图中可以看出,与单个全混槽相比,加装隔盘、环板后方差显著减小,具有多级串联槽的特征。在适宜的

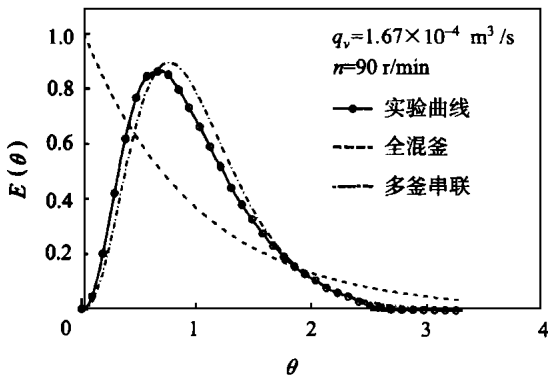


图 2 实验与模型计算值的比较

Fig. 2 Comparison between experimental values and model values

操作条件和槽内结构下,槽内的流动与四个串联槽的流动已经比较接近。图 3~5 分别是不同转速、流量和内构件参数下测得的停留时间分布曲线。从图

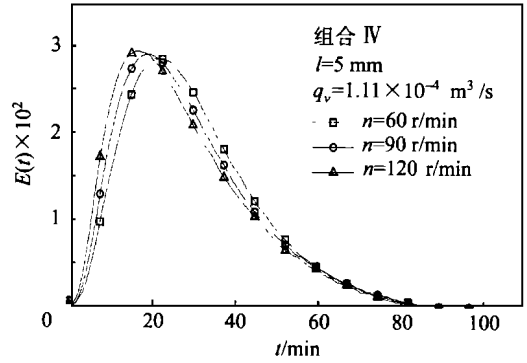


图 3 不同转速下的停留时间分布

Fig. 3 RTD at different rotating speeds

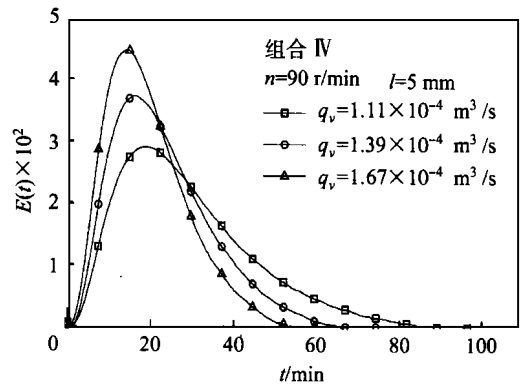


图 4 不同流量下的停留时间分布

Fig. 4 RTD at different flow rates

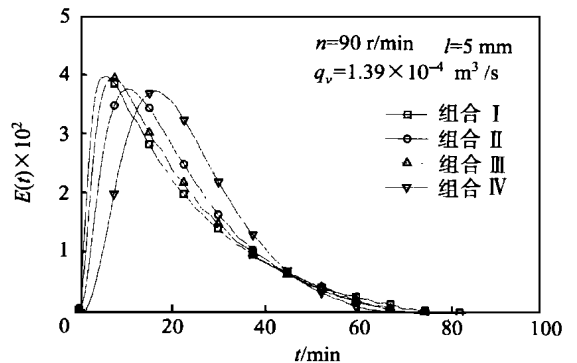


图 5 不同参数组合下的停留时间分布

Fig. 5 RTD at different parameter combinations

中可以看出,流量、搅拌转速和内构件参数对流体在搅拌槽内的停留时间分布都有显著的影响。随流量的增大和转速的降低,流体流动愈向平推流靠近,返

混愈小。采用表 1 中组合 的内构件参数可获得较好的效果。

2.2 轴向返混

停留时间分布与返混程度密切相关。一般而论,一定的返混度必然造成一定的停留时间分布,但一定的停留时间分布却可由不同状况的返混度所造成^[7]。利用停留时间分布,并结合一个合理简化的流动模型,能够进一步分析各因素对返混程度的影响。本文用轴向扩散模型分析了内构件尺寸对轴向扩散的影响。

轴向扩散模型^[8]的方差表达式为:

$$\sigma^2 = (2/Pe) - 2(1/Pe)^2(1 - e^{-Pe}) \quad (4)$$

式中, Pe 为 Peclet 准数,它可表征返混程度的大小, Pe 大则返混程度小, Pe 小则返混程度大。从停留时间分布的测量数据求得 σ^2 后,即可用牛顿切线法求出 Pe 。

在槽内结构确定的情况下, Pe 准数只随操作条件(包括流量和转速)而变,操作条件用搅拌转速与平均停留时间的乘积 n 来描述。

(1) 环板与槽壁间隙的影响:图 6 是改变环板与槽壁间隙, Pe 随操作条件的变化。从图中可以看出,在相同的操作条件下,减小环板与槽壁的间隙后 Peclet 准数明显增大,表明返混程度得到了抑制。

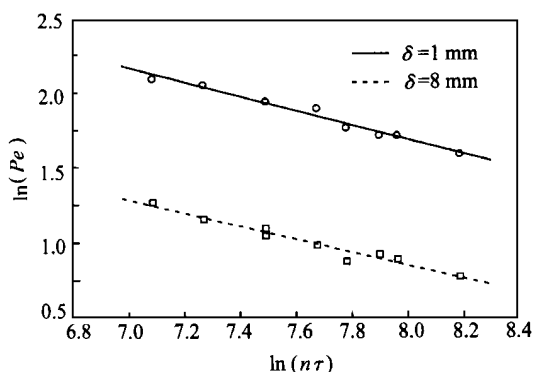


图 6 不同环板与槽壁间隙下轴向返混的比较
Fig. 6 Comparison of back mixing on different spacing between tank and ring disk

(2) 隔盘、环板间距的影响:图 7 是改变隔盘与环板的间距, Pe 随操作条件的变化。由图中可以看出,间距变化后, Pe 准数略有增大,但变化不是很明显。这表明在实验范围内减小隔盘与环板的间距对抑制轴向返混作用较小。

(3) 隔盘、环板直径的影响:图 8 是改变环板内

径和相应隔盘外径, Pe 随操作条件的变化。由图中可以看出,相同操作条件下,减小环板内径后 Peclet 准数显著增大,表明返混程度得到有效抑制。改变此参数主要是减小了各级间流体流动的通道面积,从而增大了返混流动阻力,减少了返混。

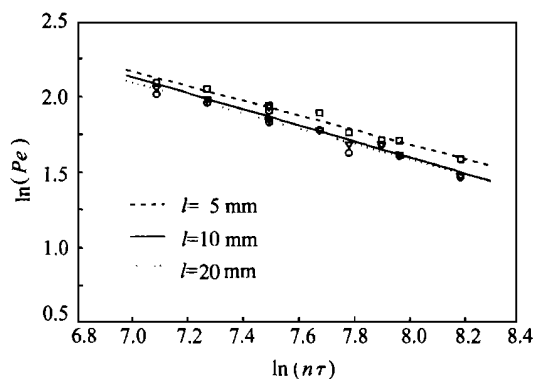


图 7 不同隔盘与环板间距下轴向返混的比较
Fig. 7 Comparison of back mixing on different spacing between disk and ring disk

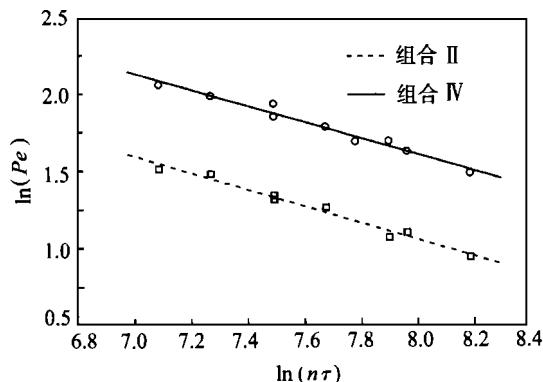


图 8 不同隔盘与环板直径下轴向返混的比较
Fig. 8 Comparison of back mixing on different diameter of disk and ring disk

(4) 操作条件的影响:从图 6~8 均可看出操作条件对流动的影响,即 n 值减小, Pe 准数增大,返混程度降低。这意味着降低搅拌转速,增大过流量有利于减小返混。但从反应器内流体混合的角度考虑,这样的操作条件较易出现不良混合区和旁路。若搅拌转速过小还会影响反应器内的混合模式,从而影响反应过程。因此,应注意采用适宜的操作条件。

3 停留时间分布的数值模拟

简单的连续流动系统能够给出停留时间分布的

显式数学表达式,然而对于一些复杂的连续流动系统,想要获得确定的显式数学表达式并不是一件容易的事,有时甚至是不可能的。流元在连续流动系统中的停留时间及其分布实质上是一随机过程,因此,可以考虑用概率统计方法获得连续流动系统的 RTD。文献[9]提出的具有吸收态的马尔可夫链随机模型就是利用概率统计方法给出 RTD,此外还可以用 Monte Carlo 方法来计算 RTD^[10]。

对实验工作用 Monte Carlo 方法进行了模拟计算。平均停留时间是根据各级的体积和流量来确定,调节返混流量比,使模拟计算结果所得方差与实验测定结果相吻合,则此结果即可看成问题的一个解。图 9 是实验结果与 Monte Carlo 方法模拟结果的比较。由图中可以看出,模拟计算结果与实验结果是比较接近的。

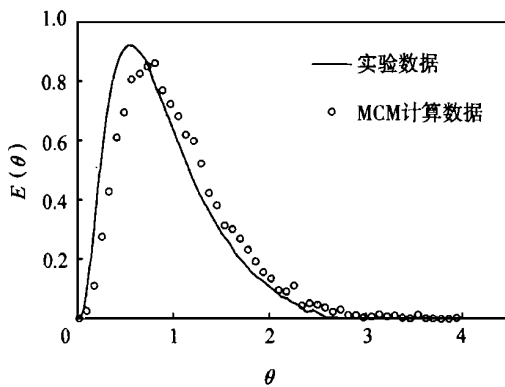


图 9 实验测定与 MCM 计算结果的 RTD 比较
Fig. 9 Comparison of RTD between experimental values and MCM values

对实验中不同的实验条件进行了模拟计算。计算结果表明,级间最大返混量约为过流量的 16% 左右,在合适的内构件及操作条件下,最大返混量仅有过流量的 4% 左右,说明级间返混量是较小的。

4 结 论

(1) 在槽内加装隔盘、环板后,流体流动向平推流靠近,明显降低了返混;在适宜内构件尺寸下,四级槽内的流动与 4 个串联槽内的流动已经比较接近。

(2) 实验结果表明:环板与槽壁的间隙,隔盘外径及环板内径是影响流体返混的重要因素;而隔盘、环板间距的影响相对较小。降低搅拌转速,增大过流量有利于减少返混,但容易出现不良混合区和旁

路,应考虑选用适宜的操作条件。

(3) 利用 Monte Carlo 方法对系统的停留时间分布进行了模拟计算,模拟结果与实验结果相近。级间最大返混量为过流量的 16% 左右,在合适的内构件和操作条件下,最大返混量为过流量的 4% 左右。

符 号 说 明

- c —— 浓度, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$
- D_1 —— 环板内径, m
- D_2 —— 隔盘外径, m
- $E(t)$ —— 停留时间分布函数
- l —— 隔盘与环板的间距, m
- n —— 搅拌转速, $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$
- Pe —— Peclet 准数
- q_v —— 体积流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- D_T —— 搅拌槽直径, m
- 环板与釜壁的间隙, m
- σ^2 —— 方差
- 平均停留时间, s
- 无因次时间

参 考 文 献

- [1] 叶岁生,朱彬华,彭定一,等. 多层隔板釜式搅拌反应器研究. 化学工程,1983(4):66~72
- [2] 赵兵,卢立柱,林平,等. 下压式多段混合搅拌槽的实验研究. 化工学报,1994,45(1):65~71
- [3] 内山汎. 连续多段搅拌反应槽. JP,B01 7960274. 1979
- [4] 内山汎. 连续多段搅拌反应槽. JP,B01 7960275. 1979
- [5] 孙建中,潘勤敏,顾培韵,等. 共轭二烯烃溶液聚合连续搅拌塔式反应器的研究. 化学反应工程与工艺,1993,9(4):437~443
- [6] 刘文彦. 现代测试系统. 长沙:国防科技大学出版社,1995
- [7] 陈敏恒,袁渭康. 研究逆向混合与停留时间分布的一个模型. 科学通报,1962(7):43~45
- [8] 陈甘棠主编. 化学反应工程. 北京:化工出版社,1984
- [9] 戎顺熙,范良政. 连续流动系统停留时间分布的随机模型和模拟. 化工学报,1986(3):259~268
- [10] 赵公会,李佐虎,陈家镛. Monte Carlo 方法在计算多颗粒反应系统中的应用. 化工学报,1988(4):392~400

- reactor. *Int J Multiphase Flow*, 1996, 22(3): 575 ~ 591
- [9] Boemer A, Qi H, Renz U. Verification of Eulerian simulation of spontaneous bubble formation in a fluidized bed. *Chemical Engineering Science*, 1998, 63(10): 1835 ~ 1846
- [10] Ding J, Gidaspow D. A bubbling fluidisation model using kinetic theory of granular flow. *AIChE Journal*, 1990, 36(4): 523 ~ 538
- [11] Tsuji Y, Morikawa Y, Shiomi H. LDV measurements of an air-solid two-phase flow in a vertical pipe. *J Fluid Mech*, 1984, 139: 417 ~ 434

Numerical simulation of pneumatic conveying

XIE Zhuo-li ZHANG Zheng

(College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: It has been shown that modified $k-\epsilon$ model can be used to describe the turbulent kinetic energy of gas phase; kinetic fluctuation transport equation of granular flow can be used for that of particle phase, and a physical model and numerical simulation of pneumatic conveying have been established. Both dilute and dense conveying processes in vertical pipe has been predicted by using developed model. The mean gas velocity distribution, particle velocity distribution as well as pressure drop have been studied in different loading ratio of particles to gas. The results of the numerical simulation coincide with available experimental data to indicate that the flow patterns for both phases and pressure drop obtained in the present work are satisfied.

Key words: pneumatic conveying; two-phase flow; two-fluid model; numerical simulation

(上接第 21 页)

Experimental and model study on flow characteristics in a tank with multistage agitation

ZHOU Guo-zhong¹⁾ GAO Zheng-ming¹⁾ WANG Ying-chen¹⁾ SHI Li-tian¹⁾ LIU Qing²⁾

(1) College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

2) National Engineering Research Center of Rubber and Plastics New Material, Beijing 102549, China)

Abstract: In a stirred cylindrical tank, disks and ring disks were used to divide the tank into four stages. Saturated solution of KCl was used as tracer and a special system of conductivity meter and computer was used to collect data. Influences of different parameters of the structure and operation to residence time distribution (RTD) were measured. The key parameters to back-mixing were the gap between the ring disk and the tank wall, the inner diameter of the ring disk and outer diameter of the disk, while the spacing between the disk and ring disk had little influence. The choice of flow rate and rotation speed should have the consideration of the requirements of both flow and mixing. Monte Carlo method (MCM) was used to predict RTD in stirred tank. The results are in agreement with what was measured in the experiments.

Key words: multistage agitation; stirred tank; residence time distribution; flow characteristics