

具有曲线形隔板的双区反应器的 开发研究*

范立明 许秀成

(郑州工学院化学工程系)

摘要: 本文采用脉冲—响应技术测定了具有曲线形隔板的单槽双区反应器 (Double-region Reactor with Curvic Baffle-plate, 简称 DRCB 反应器) 的停留时间分布 (RTD), 并依据四种数学模型对该反应器的流动特性进行了数学分析。同时还对该反应器使用二叶平桨的搅拌功率及混合时间进行了测定, 并和普通挡板槽进行了分析对比, 从而为该反应器的进一步开发研究提供一些理论依据。

关键词: 停留时间分布, 数学模型, 无因次准数, 搅拌

中国图书分类号: TQ440.5

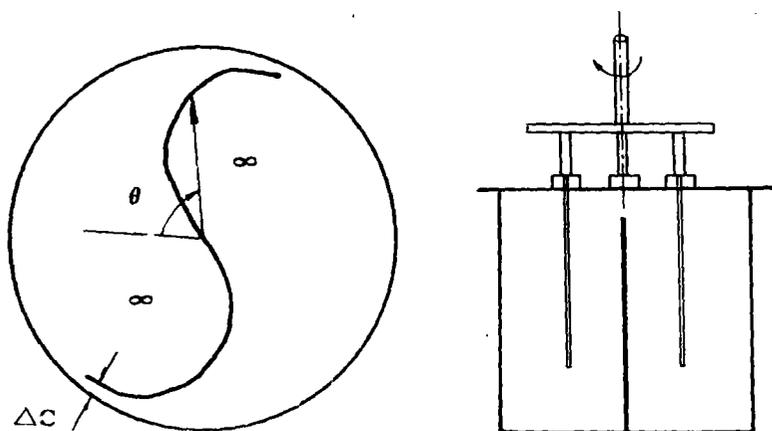


图1 DRCB 反应槽示意图

具有曲线形隔板的单槽双桨双区反应器 (DRCB 反应器), 如图 1 所示, 是我们试图开发的一种新型反应器, 用单槽双区槽代替双槽串联, 以克服单槽操作物料停留时间分布不佳, 而采用双槽串联操作又增加设备投资及占地面积大的矛盾。

该反应器与普通单槽反应器不同之处在于反应器内设置具有流线性导流作用的曲线形隔板, 将反应器划分为两个区域, 两区之间依靠曲线形隔板与槽壁之间的缝隙予以联通。

由于停留时间分布 (RTD) 是数学模拟法中最重要的基础概念之一, 通过停留时间分布的测定, 能预估实际反应器的特性, 确定所考虑的反应器与理想反应器的偏离程度, 找出改进和强化反应器的途径。为了衡量 DRCB 反应器能否代替串联的两槽应用于工业生产, 并了解其中物料的混合、死区、短路情况, 本文对该槽使用近似太极图形状的曲线形隔板时的停留时间分布进行了实验分析, 并依据不同的数学模型进行参数估值, 以分析其有关的流动特性。

* 收稿日期: 1991-04-04

另外，搅拌功率和混合时间是衡量搅拌操作的主要参数。在一定的搅拌功率下，谋求最短的混合时间，或在达到一定混合程度的前提下力求最小的功率消耗，都是构思、优化一个反应器所追求的目标。因而本文对 DRCB 反应器使用二叶平桨 ($d=140\text{mm}$, $W_p=28\text{mm}$ 两只) 的功率消耗及混合时间进行了测定，并和当量体积相同的普通挡板槽 (槽壁设置垂直挡板，挡板系数 K_B 分别为 0.25, 0.125) 使用二叶平桨 ($d=180\text{mm}$, $W_p=36\text{mm}$) 的功率消耗及混合时间的测定结果进行分析比较，以评价 DRCB 反应器搅拌特性的优劣。

1 实验装置与方法

实验装置如图 2 所示。

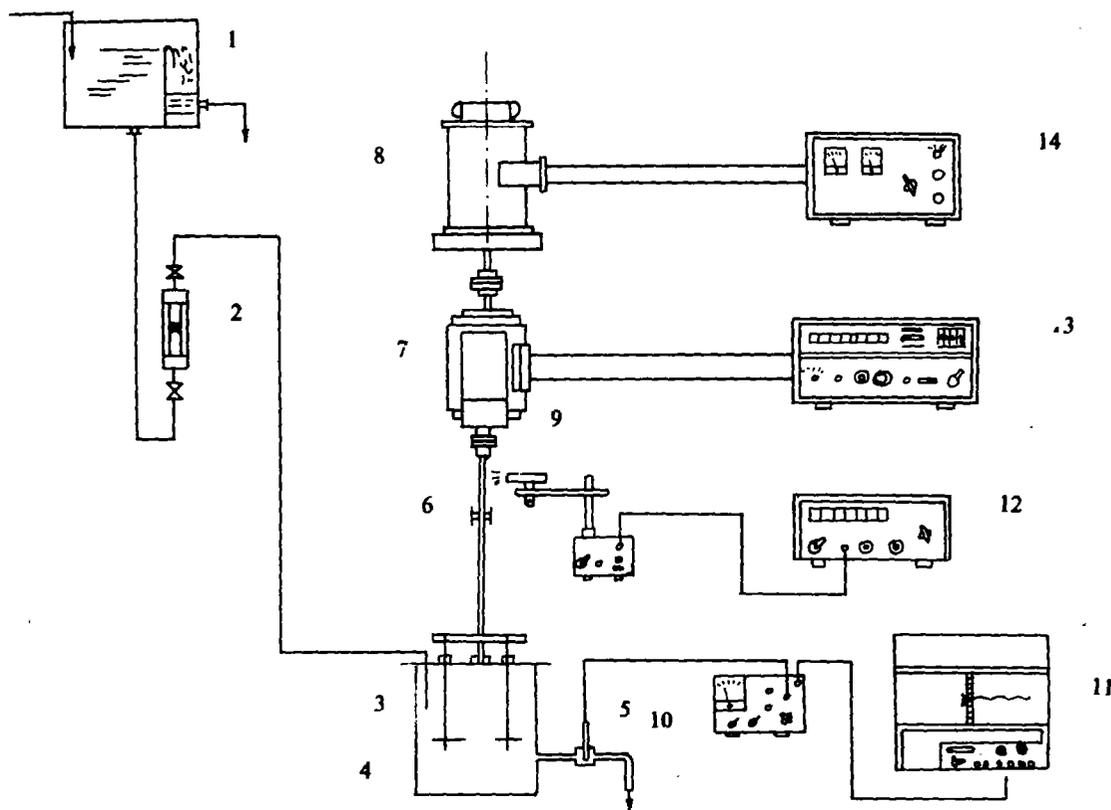


图 2 实验装置示意图

1、高位水槽 2、转子流量计 3、搅拌槽 4、搅拌桨叶 5、电导电极 6、止推轴承 7、转矩传感器 8、直流电机 9、光电探头 10、电导率仪 11、函数记录仪 12、转速数字显示仪 13、转矩数字显示仪 14、直流电机调速器

停留时间分布的测定，采用脉冲—响应技术，其示踪剂的加入方式采用脉冲法，由该法所得的响应曲线可以直接获得 RTD 分布密度⁽¹⁾：

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

根据电导率与溶质浓度之间的直线关系及电导率仪输出电压信号与电导率之间的直线关系, 则可以直接从函数记录仪所记录的电压信号随时间的变化曲线得到 RTD 分布密度^[2]:

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

搅拌功率的测定采用转矩转速测量法, 即通过对一定搅拌转速下搅拌轴所受转矩的测量而求得搅拌功率:

$$P = 1.02678(M_w - M_0)n \quad (3)$$

混合时间的测定采用电导率法, 以饱和 KCL 溶液为示踪剂, 手动液面倾注。

2 RTD 的数学处理:

为了对 DRCB 反应器中流体流动的有关特性, 如该反应器可能等效的理想混合串联槽数, 死区及短路的分率等进行定量分析, 本文根据该反应器的构造特点, 分别以完全混合、死区、短路、循环流等为基本单元分别建立不同的数学模型^[3], 并依据传递函数的概念和拉普拉斯变换^[1]推得其 RTD 分布密度表达式, 以便根据实验结果求取不同的参数。下面是其中四种模型示意图及数学式^[4]:

模型 A: 扩充的多级串联理想混合模型:

$$E(t) = \frac{N^N t^{N-1} e^{-Nt/\tau}}{\tau^N \Gamma(N)} \quad (4)$$

其中 $\Gamma(N)$ 是 Gamma 函数:

$$\Gamma(N) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{N-1} dx$$

模型 B: 带有内循环的两个理想混合反应器的串联模型:

$$E(t) = \frac{1}{\tau} \sqrt{\frac{k+1}{k}} \left\{ e^{-\frac{2}{\tau}[(k+1)-\sqrt{k(k+1)}]t} - e^{-\frac{2}{\tau}[(k+1)+\sqrt{k(k+1)}]t} \right\} \quad (5)$$

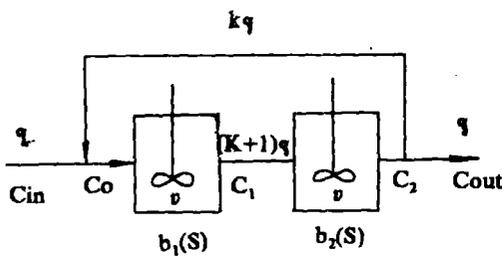


图3 模型 B 示意图

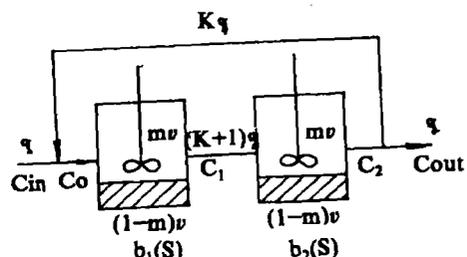


图4 模型 C 示意图

模型 C: 带有内循环的两个部分混合反应器的串联模型:

$$E(t) = \frac{1}{m\tau} \sqrt{\frac{k+1}{k}} \left\{ e^{-\frac{2}{m\tau}[(k+1)-\sqrt{k(k+1)}]t} - e^{-\frac{2}{m\tau}[(k+1)+\sqrt{k(k+1)}]t} \right\} \quad (6)$$

模型 D: 具有短路的两个理想混合反应器的串联模型:

$$E(t) = k'_2 \delta(t) + \frac{4k'(k'+1)}{\tau} e^{-\frac{2(1-k')}{\tau}t} + \frac{4(1+k')^2}{\tau^2} t e^{-\frac{2(1-k')}{\tau}t} \quad (7)$$

其中 $\delta(t)$ 为 Dirac 函数——单位脉冲函数

$$\delta(t) = \lim_{\tau \rightarrow 0} [U(t) - U(t - \tau)]$$

以上四种模型可从不同侧面反映 DRCB 反应器的流动特性。模型 A 反映了 DRCB 反应器可能等效的理想混合槽数；模型 B 反映了 DRCB 槽中的内循环程度；模型 C 则同时反映了该槽中可能存在的死区情况及内循环程度；模型 D 则描述了该反应器内物料的短路程度。

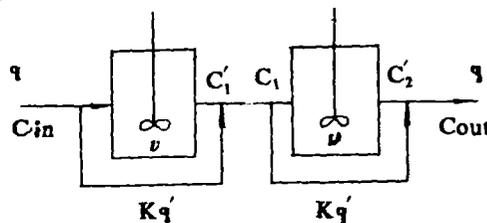


图5 模型D示意图

在以上四种模型中均含有需根据实验结果拟合的参数，本文采用精度较高的时间域最小二乘法⁽⁵⁾进行参数估值，其最终目标函数为：

$$S = \sum_{i=1}^n \left[\frac{u(t_i)}{C} - y_i(t_i, \bar{x}) \right]^2 \rightarrow \min \quad (8)$$

该目标函数的求解，属于多元函数最优化问题，本文采用阻尼最小二乘法求解，并依据下式求取拟合的相关系数：

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n [y_i - y_i(t_i, \bar{x})]^2}{\sum_{i=1}^n [y_i - \bar{y}]^2}} \quad (9)$$

其中： $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$

3 实验结果与分析：

RTD 数学模拟计算结果的几组典型数据如表 1 所示。

表1 RTD 数学拟合结果 (Q=400l/h τ=5.04min)

转速 r.p.m	间距 mm	模型 A		模型 B		模型 C			模型 D	
		N	R	k	R	k	m	R	k'	R
60	3	1.985	0.95	0.185	0.958	0.216	0.972	0.98	4.5×10^{-3}	0.968
120	3	1.88	0.953	0.353	0.963	0.265	0.984	0.974	8×10^{-3}	0.943
180	3	1.81	0.967	0.39	0.981	0.94	0.932	0.981	0.045	0.912
240	3	1.69	0.981	0.726	0.991	1.76	0.957	0.968	0.06	0.974
60	10	1.97	0.97	0.27	0.976	0.22	0.98	0.978	5×10^{-3}	0.96
120	10	1.86	0.94	0.21	0.968	0.295	0.93	0.98	0.015	0.93
180	10	1.79	0.91	0.76	0.95	1.77	0.95	0.96	0.03	0.91
240	10	1.30	0.98	0.874	0.976	2.26	0.956	0.963	0.083	0.91

从以上模拟计算结果可以看到，DRCB 反应器的停留时间分布比单槽有所改善，其等效的串联槽数均大于 1，短路的成份特别小，因而无疑对化学反应过程是十分有利的。由计算结果还可以看到，在较小的区间缝隙及较低转速下，其等效的串联槽数较高（接近

2), 有望用于取代串联的两槽进行操作。而在较大的区间缝隙及较高的转速下, 可在槽内实现一定的内循环。但槽内程度不同地存在死区是进一步改善该反应器流动特性应重点解决的问题。

此外, 对使用二叶平桨时, DRCB 反应器和与其具有相同当量直径的普通挡板槽的功率消耗及混合时间进行了对比测定, 其结果分别按无因次功率准数 $N_p = \frac{P}{\rho n^3 d^5}$, 无因次混合时间准数 $N_\theta = t_m \cdot n$, 达到一定的混合程度所消耗的混合能: $E_1 = \rho n^2 d^5 N_p N_\theta$, 以及在一定混合时间下所需的混合能: $E_2 = \rho d^5 t_m^{-2} N_p^3 N_\theta$ 等概念, 以及从能量角度考虑的相同搅拌功率之下混合时间的长短, $t_m = N_\theta N_p^{1/3} d^{5/3} (P/\rho)^{1/3}$, 几方面进行处理, 其结果列于表 2。

表 2 搅拌特性的测定结果

	N_p	N_θ	E_1	E_2	t_m
DRCB 槽	1.929	21.48	$4.45 \times 10^{-3} \rho n^2$	$2.06 \rho t_m^{-2}$	$1.01(P/\rho)^{1/3}$
单槽单桨 $K_B=0.25$	1.874	21.25	$7.4 \times 10^{-3} \rho n^2$	$3.35 \rho t_m^{-2}$	$1.485(P/\rho)^{1/3}$
单槽单桨 $K_B=0.125$	1.618	24.73	$7.56 \times 10^{-3} \rho n^2$	$4.62 \rho t_m^{-2}$	$1.65(P/\rho)^{1/3}$

由表 2 可以看到, 在达到一定的混合程度的前提下, DRCB 槽具有较小的混合能; 在达到一定混合时间的条件下, 其混合能也明显低于普通挡板槽。同时在相同的搅拌功率之下, DRCB 槽具有较短的混合时间。这都表明 DRCB 槽具有良好的搅拌特性。

根据文献^[6] 挡板对搅拌特性影响的研究

$$\frac{N_{PF} - N_P}{N_{PF} - N_{PN}} = \left(\frac{K_{BF} - K_B}{K_{BF} - K_{BN}} \right)^5 \quad (10)$$

其中: N_{PF} , N_{PN} 分别为全挡板条件($K_{BF}=0.35$)及无挡板条件($K_{BN}=0$)下的无因次功率准数;

N_P 为挡板系数 K_B 下的无因次功率准数;

代入实验结果, 可求得曲线形隔板的当量挡板系数 $K_{BE}=0.128$, 也就是说反应槽内设置的曲线形隔板, 其作用相当于在槽壁上设置了部分挡板, 因而有效地抑制了水平旋流, 同时由于其当量挡板系数较低, 所以功耗较小。由于曲线形隔板的流线性导流作用, 有效地促进了混合, 因而具有较小的混合能。

4 结论及进一步的工作:

初步实验表明, DRCB 反应器具有良好的停留时间分布, 同时, 该反应器达到相同混合程度的前提下, 具有较小的混合能, 从而具有良好的开发前景。因而需选择一些适合于该反应槽流动特性的反应过程, 以评价该反应槽的反应特性, 包括转化率, 实际反应所需的时间及反应槽体积, 促使该槽用于实际生产过程。

符号表:

$E(t)$: 停留时间分布密度

$C, C(t)$: 示踪剂浓度 g/l

u, u(t): 电压	mv	y_i : 实验测得的 RTD 函数值
N: 理想混合串联槽数		$y_i(t, \bar{x})$: 由公式 4,5,6,7 计算的 RTD 函数值
τ : 平均停留时间	min	R: 相关系数 $0 < R < 1$
t: 停留时间	min	N_p : 无因次功率准数
P: 搅拌功率	W	ρ : 流体密度 kg/m^3
M_w, M_0 : 搅拌轴在水中及空气中转矩 $\text{kg} \cdot \text{m}$		d: 桨叶直径 m
n: 转速	r/min	N_g : 无因次混合时间
k: 循环流倍率		W_p : 桨叶宽度 m
m: 完全混合区体积分数 $0 < m < 1$		E_1, E_2 : 混合能 J
k' : 短路分率 $0 < k' < 1$		t_m : 混合时间 sec
q: 流量	l/h	K_B : 挡板系数

参 考 文 献

- (1) Seinfeld, J.H. and Lapidus, L. 著, 赵维彰等译. 化工过程数学模型理论. 江苏科技出版社, 1981.
- (2) 吴玉亭. 单槽单桨式磷酸反应器搅拌特性研究. 研究生论文, 1986.
- (3) Khang, S.J. and Levenspeil, O., Chem.Eng.Sci. 31, 569 (1976)
- (4) 范立明. 具有类似太极图形状曲线形隔板的反应器的开发研究. 研究生论文, 1990.
- (5) 杨基础等. 化工学报, 2, 103 (1982).
- (6) 翁志学等. 化工学报, 3, 267 (1984)

Studies on the Developent of DRCB Reactor

Fan Liming Xu Xiucheng
(Zhengzhou Institute of Technology)

Abstract: The resident time distribution (RTD) of Double-region Reactor with Curvic Baffle-plate, DRCB reactor) is determined by the pulse-response technique. Four combined mathematical models are employed to analyse the RTD of DRCB reactor. The power consumption and mixing time of two flat paddle are measured by the means of torque meter and conductive method and then compared with that of the common single tank with same conditions as well. Therefore, it will provide a theoretical basis for the further development.

Keywords: resident time distribution (RTD), mathematical model, nondimensional number, agitation