

化学反应器 流动模型

韩其勇



武汉大学出版社

化学反应器的流动模型

韩其勇 编著

责任编辑 金丽莉

•

武汉大学出版社出版

(武昌 珞珈山)

新华书店湖北发行所发行 武汉市汉桥印刷厂印刷

•

787×1092毫米 1/32 2.875印张 58千字

1989年1月第1版 1989年1月第1次印刷

印数: 1—1000册

ISBN 7—307—00404—6/()·37

定价: 0.67元

序 言

“化学反应工程”是本世纪50年代发展起来的一门工程学科。它是研究以工业规模进行化学反应的规律，例如研究工业反应器中化学反应的速度，影响反应速度的各种因素以及如何获得最优的反应结果等问题。由于在工业反应器中进行的过程不但包括有化学反应过程，而且伴有物理过程，如热量的传递、物质的流动、混合和传递等，所有这些传递过程必然会影响反应的最终结果。对于这种既有化学过程又有物理过程的复杂问题，就不可能按“化学工程”通常采用的实验的、综合的研究方法，而要采用数学模型的方法予以解决。

数学模型的方法就是将复杂的研究对象合理简化成等效的某个模型。有了这个简化的模型，就可对其进行数学描述，所得数学关系式即为原型的一个等效的数学模型，然后通过求解或进行数值运算而研究其特性。

数学模型的方法能使复杂的反应工程问题分解成三个较为单纯的问题：化学方面的问题归结为研究化学反应，提出反应的动力学模型；传递方面的问题归结为研究不同类型的反应器，提出反应器的传递模型；最后，将有关动力学模型和传递模型相结合，通过分析，从而得出若干理论性的结论。

一个新的反应过程的开发，当化学反应规律已经弄清楚并建立了动力学模型以后，在工程阶段首先遇到的问题就是反应器的选型，即选择什么型式的反应器来进行该反应过程。

因此，必须了解对于这个特定反应，哪些传递因素是有利的，哪些传递因素是有害的，然后才能确定适宜的反应器类型，建立传递模型并进行定量计算。

传递过程的影响，实际上就是在工业上实现某一化学反应时，物理因素或工程因素的影响。在诸传递因素中，物料的流动状况是一个极为关键的问题。因为流动现象是放大过程中最不易确定的因素，装置大小不同，流动情况往往会有较大出入；另一方面，传热和传质总是流动所伴生的现象，只有在流动模型确定以后，才能正确考虑传热、传质等过程。流动模型也是一种传递模型。因此，本书只打算从“流动模型”这一侧面去阐明“化学反应工程”中这个十分重要的问题。有关热质传递模型和动力学模型，书中没有或很少涉及，读者可以从其他有关资料中找到。

本书是根据综合性大学和高等师范院校理科化学工程基础课程的教学要求编写的参考书。可供理科化学系各专业学生、研究生及有关教师参考。

本书编写过程中得到曹正修和郑洁修两位老师的指导和帮助，谈介义老师为本书绘制了插图，王济群老师为本书的修改提出了许多宝贵意见，在此，向这些老师们表示衷心感谢。

由于编者水平所限，书中错漏在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

1986年8月

内 容 提 要

本书通过“流动模型”阐明“化学反应工程”中一些重要的基本概念和问题。其中对返混和停留时间分布、理想反应器和非理想反应器数学模型的建立和计算、微观混合和宏观混合等均有较详细的论述。全书力求做到概念准确，叙述简明。

本书是根据综合性大学和高等师范院校理科化学工程基础课的教学目的编写的教学参考书，可供理科化学系学生和研究生以及有关教师参考。

目 录

第一章 化学反应器类型	(1)
第一节 反应器的分类	(1)
一、搅拌釜式反应器	(1)
二、管式反应器	(3)
三、塔式反应器	(3)
四、沸腾床反应器	(4)
第二节 理想反应器和非理想反应器	(7)
一、理想反应器	(8)
二、非理想反应器	(10)
第二章 物料的返混和停留时间分布	(11)
第一节 返混与停留时间分布	(11)
第二节 停留时间分布的表示方法	(13)
一、停留时间分布函数 $F(\tau)$	(13)
二、停留时间分布密度 $E(\tau)$	(15)
三、分布函数 $F(\tau)$ 与分布密度 $E(\tau)$ 之间的关系	(18)
第三节 停留时间分布的数字特征	(20)
一、平均停留时间 $\bar{\tau}$	(20)
二、方差	(21)
三、以无因次时间表示的停留时间分布各函数	(22)
第四节 停留时间分布的测定	(23)
一、阶跃响应法	(24)
二、脉冲响应法	(25)
第五节 停留时间分布曲线的应用	(26)

第三章 理想流动模型	(30)
第一节 平推流模型	(30)
一、平推流模型	(30)
二、平推流反应器的计算	(31)
第二节 全混流模型	(33)
一、全混流模型	(33)
二、全混流反应器的计算	(36)
三、两种理想反应器性能的比较	(37)
第四章 非理想流动模型	(41)
第一节 多釜串联模型	(41)
一、模型的建立	(41)
二、多釜串联模型的计算	(46)
第二节 扩散模型	(47)
一、模型的建立	(47)
二、扩散模型参数的求取	(50)
三、扩散模型的计算	(54)
第三节 组合模型	(58)
第五章 微观混合和宏观混合	(63)
一、微观混合时反应器的计算	(64)
二、宏观混合时反应器的计算	(66)
附录 1 一阶线性常微分方程的解	(71)
附录 2 多釜串联模型当 $N \rightarrow \infty$ 时, $E(\theta) \rightarrow \infty$ 的证 明	(72)
附录 3 返混很小时扩散模型的 $E(\theta)$	(73)
附录 4 扩散模型二阶常系数微分方程的 求解	(76)
附录 5 积分指数函数表	(82)
参考书目	(83)

第一章 化学反应器类型

化学反应器是化工厂的核心设备，也是化学反应工程学研究的中心课题。化学工业的产品种类繁多，因此用于生产不同产品的工业反应器也是多种多样的。反应器可以按不同特点进行分类，例如，可以按反应器的结构或反应物的相态进行分类，也可以按不同的操作方法进行分类。这里先简单介绍几种常见的工业反应器。

第一节 反应器的分类

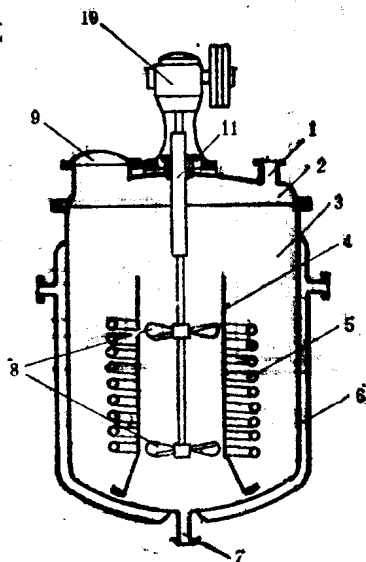
按工业反应器的结构型式分，最常见的有如下几种：

一、搅拌釜式反应器

典型搅拌釜式反应器示意图如图1-1，它的基本构件是

图1-1 搅拌釜式反应器

1.排气口，2.上盖，3.釜体，4.导流筒，5.换热蛇管，6.换热夹套，7.卸料口，8.搅拌桨叶，9.加料口，10.减速器，11.搅拌器轴。



槽体、顶盖、电机带动的机械搅拌器、夹套和内部的换热蛇管。釜式反应器结构特点是高径比很小，一般约为1~2左右。因为绝大多数釜式反应器都装有机机械搅拌器，故常称为搅拌釜式反应器或搅拌槽式反应器，一般简称反应釜。各种搅拌釜式反应器的主要区别在于搅拌器的型式和换热方式不同，如图1-2和1-3。

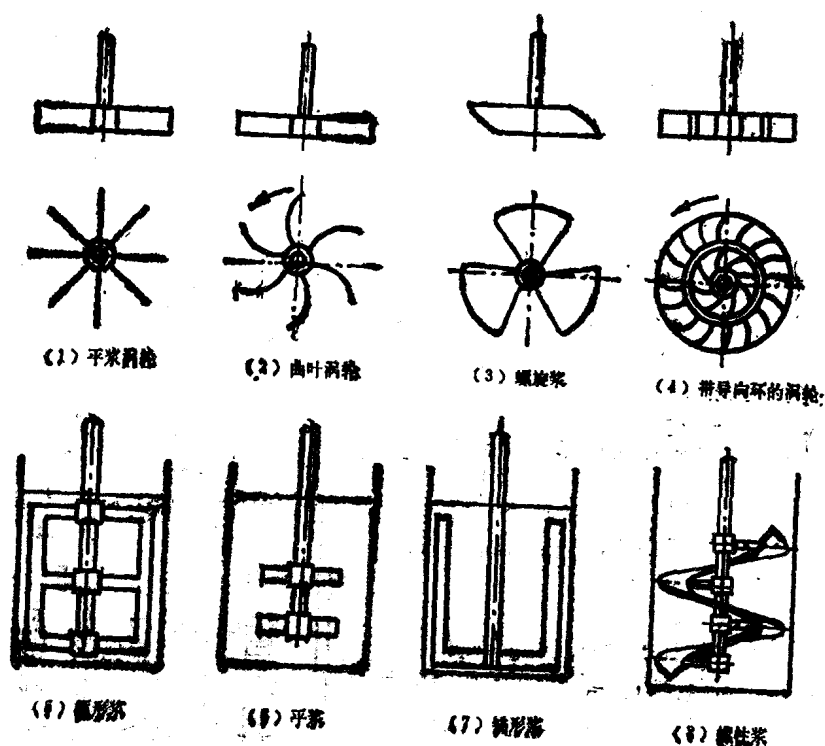


图 1-2 搅拌器基本类型

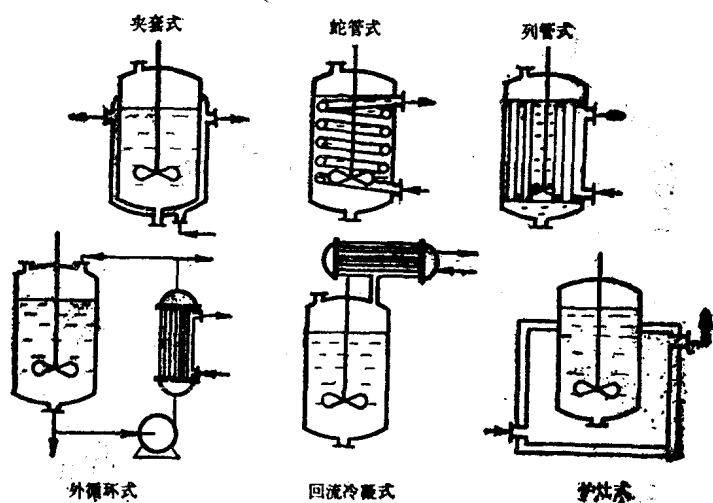


图1-3 反应釜换热方式

二、管式反应器

管式反应器实质上是一根或一组长径比很大的管子所构成的装置，如由直管和弯头等组成的盘管反应器（图1-4）、由多根列管组成的固定床反应器（图1-5）以及螺杆式反应器等。



图1-4 盘管反应器

三、塔式反应器

典型鼓泡反应塔主要由塔体、气体分布器和内蛇管换热器组成（图1-6）。鼓泡反应塔是

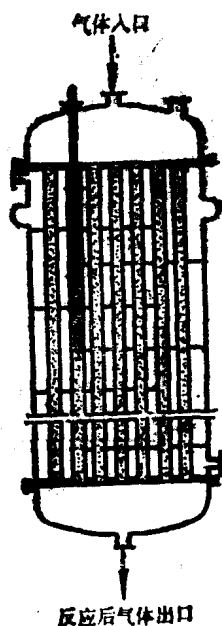


图1-5 固定床反应器

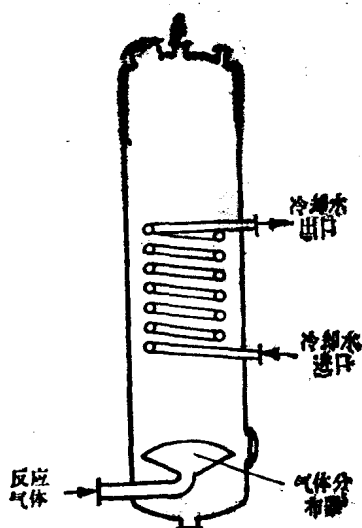


图1-6 鼓泡反应塔示意图

最典型的气液反应器，它的特点是气体以鼓泡形式通过液体，气泡的形状和大小及其分布是鼓泡反应塔最基本的特性。

此外还有填料塔、泡罩塔、喷雾塔和筛板塔等塔式反应器（如图1-7）。它们的共同特点是气液相界面比表面积大，主要用于快速气液反应。塔式设备的高径比一般都大于4。

四、沸腾床反应器

工业沸腾床的基本构件是壳体、气体分布板、换热器和

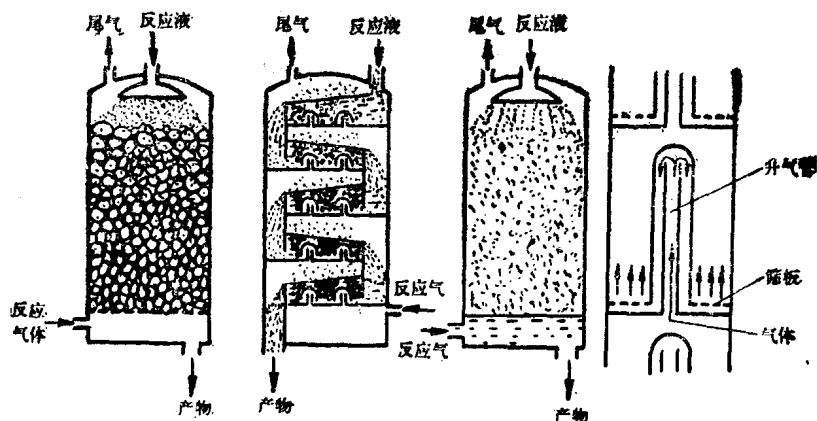


图1-7 塔结构示意图

固体回收装置等，其示意图见图1-8。

以上是按反应器的结构型式分类。不难看出，同类结构反应器的物料具有共同的传递过程特性，尤其是流体的流动和传热特性。

按反应物料的相态，反应器可分为均相反应器和非均相反应器两大类。

反应的相态情况不同则其反应特性不同。均相反应器内反应无相界面，可以忽略扩散阻力，则反应速率只与温度和浓度有关；非均相反应器内反应有相界面，扩散阻力不容忽略，反应速率不仅与温度和浓度有关，而且与相界面大小及相间扩散速率有关。

同一结构型的反应器，往往既能作为均相反应器，又能作为非均相反应器。如搅拌釜式反应器，它既可作为液相均相反应器，又可作为气-液、液-液、液-固、气-液-固非均相反应器。管式反应器既可作气相或液相均相反应器，又

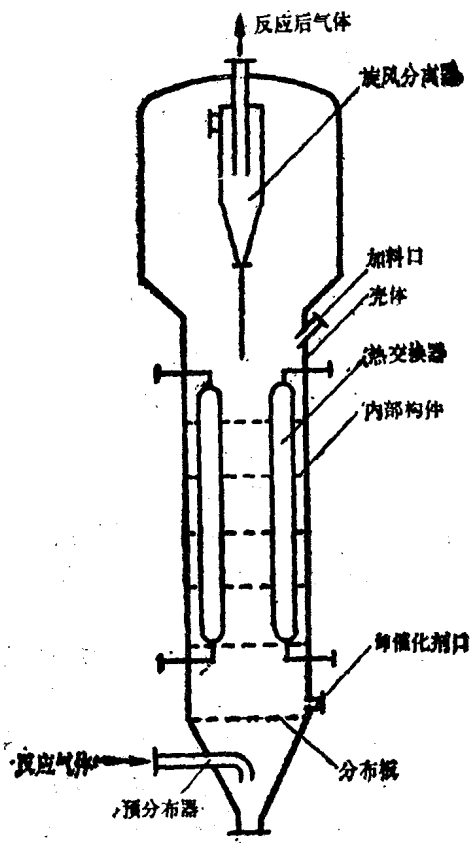


图1-8 沸腾床反应器示意图

可作气-液、气-固非均相反应器。至于塔式反应器和沸腾床反应器，它们是气-液和气-固非均相反应器。

按操作方法不同，反应器可分为间歇式、连续式和半连续式反应器三种。例如，釜式反应器又可分为间歇搅拌釜、

连续搅拌釜、多釜串联反应器等。大规模生产多半用连续式反应器。

在化学反应工程中，又常按反应器内物料流动与混合状况将反应器进行分类。因为在连续操作的反应器内，物料的流动与混合状况和由此而产生的反应时间、反应物浓度和温度等反应参数的分布状况反映了工业化学反应器的最根本特征。抓住了这一基本特征就可以将形形色色的反应器归结为三个基本类型。这就是：

(1) 平推流反应器。

(2) 全混流反应器。

(3) 非理想流反应器。

其中在平推流反应器和全混流反应器中的流体流动是两个极端状况，这两种极端状况下的流动称为理想流动，相应的反应器称为理想反应器。平推流又称活塞流或理想排挤，全混流又称理想混合。在化学工业中不管反应器的结构如何千差万别，它们不是趋于理想反应器就是属于非理想反应器。

第二节 理想反应器和非理想反应器

在化工生产中，当反应器操作连续化以后出现了一个极其重要的宏观动力学因素——返混。返混是指不同时刻进入反应器的物料之间的混和，也就是具有不同性质（浓度甚至温度）物料之间的混合。由于物料的返混，改变了反应器内的浓度分布，造成了停留时间分布，从而影响了反应器的生产能力。由于返混的影响遍及各类连续反应器，因此它是判别各类反应器性能特征的一个关键工程因素。对于连续操作的反应器，我们可以根据返混的情况将其分为两类——理想

反应器和非理想反应器。

一、理想反应器

在理想反应器中，流体的流动处于两种极端状况，依不同流动状况，理想反应器又分为平推流反应器（活塞流反应器）和全混流反应器（理想混合反应器）。

1. 平推流反应器

在平推流反应器中流体的流况示意如图1-9。

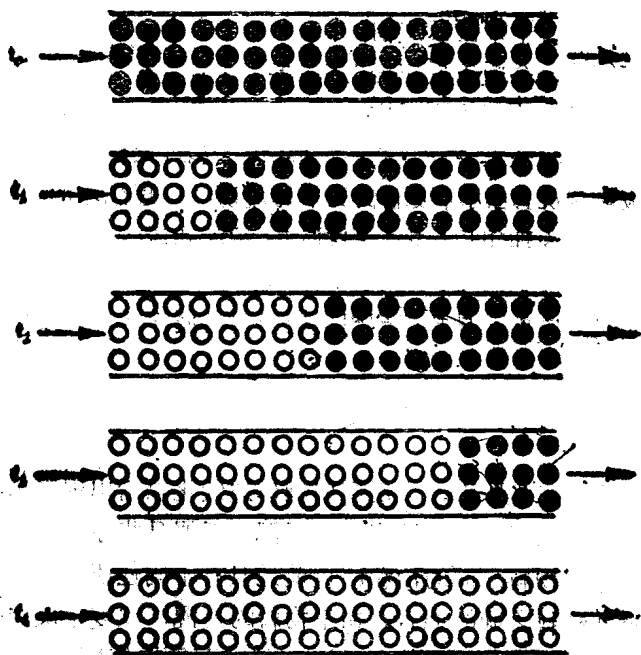


图1-9 平推流示意图

图中 t_0 、 t_1 、 t_2 、 t_3 和 t_4 分别表示不同的观察时间，在时间为 t_0 时，管内流着深色物料，从时间 t_1 开始改通浅色物

料（切换），在 t_2 、 t_3 和 t_4 等不同时刻，浅色物流逐渐置换深色物流，而浅、深两色物流绝对互不相混，浅色物流象活塞一样推着深色物流，故称此种流况为平推流或活塞流。物料在平推流反应器中流动时，其径向具有严格均匀的速度分布，即各质点的流速完全相同，它们在反应器内的停留时间也完全相同。在连续操作的长径比足够大的管式反应器中，物料的流况趋近于平推流，所以又称理想管式反应器，但这种反应器不一定总是管式的，它是一种没有返混的反应器。

2. 全混流反应器

在全混流反应器中，流体的流况示意如图1-10， t_0 时反应器内全为深色物料。 t_1 时，切换通入浅色物料。 t_2 时，器内浅、深两色物料已完全混在一起，出口物料混合的情况与器内相同； t_3 和 t_4 等时刻，器内和出口处浅色物料的浓度在不断增加，直至全为浅色物料所取代。在全混流反应器中，

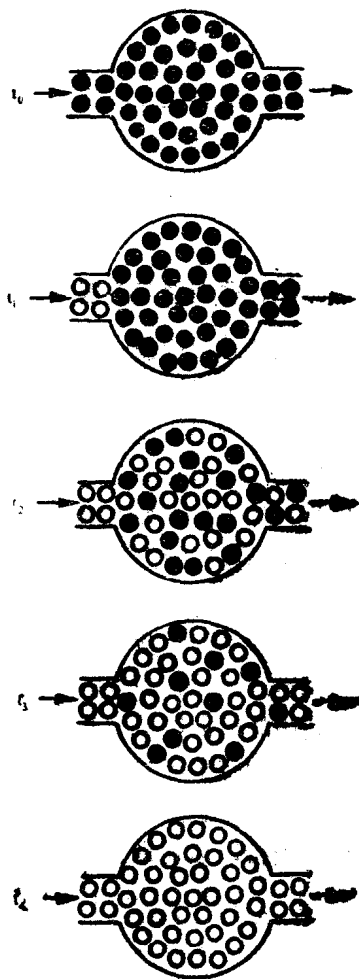


图1-10 全混流示意图

先后进入反应器的物料质点之间立刻充分混合，使器内各处浓度完全均匀，而且出口物料的浓度与器内浓度完全一样。物料质点在反应器内停留时间有长有短极不均一，在强烈搅拌的连续釜式反应器中，物料的流况近似理想混合，所以全混流反应器又称理想釜式(槽式)反应器。全混流反应器是与平推流反应器对应的另一极端流况的反应器，它是返混最大的反应器。

二、非理想反应器

在理想反应器中，流体流动和混合是处于两种极端状态，即没有返混(平推流)或返混达到极限(全混流)。实际生产中所用的连续反应器内物料的返混程度介于两种理想流动之间，即有部分返混现象。如何真实地描述部分返混现象是一件十分困难的事，在化学反应工程研究中一般都采用“数学模型”的方法，即把一个复杂的实际过程简化为一个简单的等效的物理图象，然后用一定的数学方程加以描述，这就是所谓的“数学模型”。对于非理想反应器一般多用两种模型来描述：多釜串联模型和扩散模型，前者是假定实际设备中的返混等效于若干个理想釜式反应器串联时的情况，后者是假定实际的返混相当于平推流再叠加一定的轴向扩散。有关理想反应器或非理想反应器的数学模型的详细讨论，留待以后几章去进行。