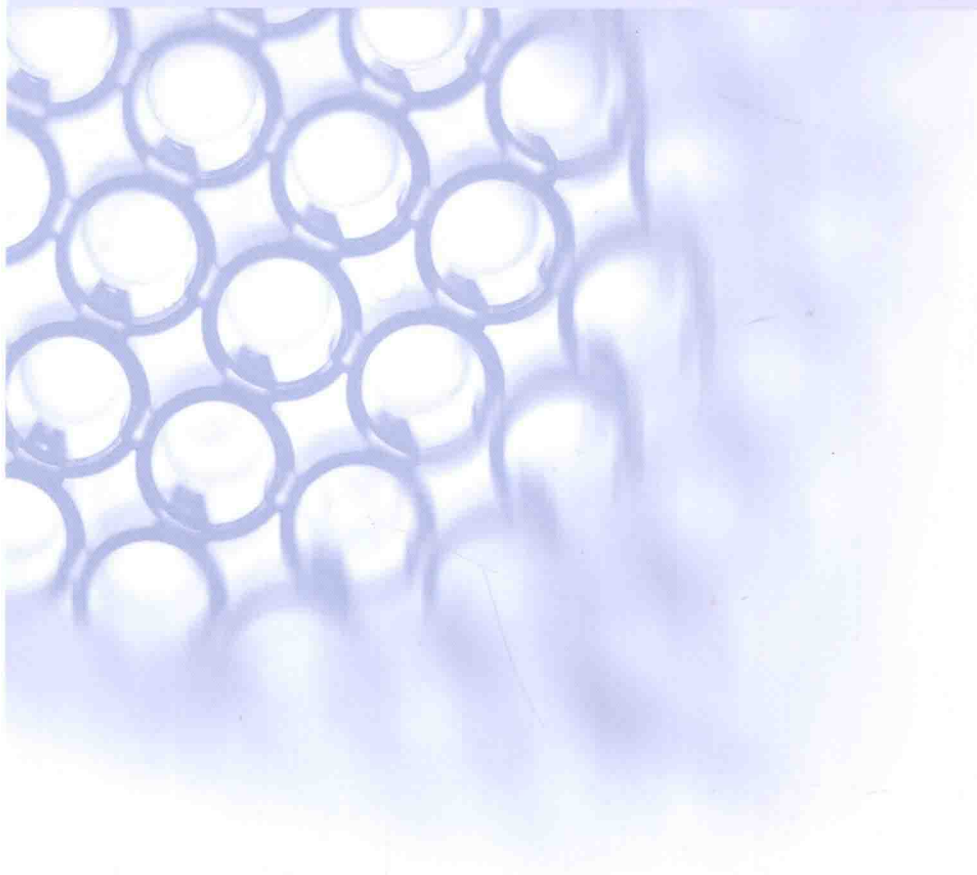


高等学校教材

反应工程简明教程

吴元欣 张 珩 主编



 高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

高等学校教材

反应工程简明教程

Fanying Gongcheng Jianming Jiaocheng

吴元欣 张 珩 主编

吴元欣 张 珩 薛永萍 杨昌炎 王鹤文 合编



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

反应工程是研究化学反应的工程问题的工程学科,它要解决的是反应器的设计、反应技术的开发、反应过程的放大和反应过程的优化。本书系统、简明地阐述了反应工程的基本原理及其应用,全书共9章,包括:绪论、均相反应动力学、理想反应器、非理想流动、多相系统中的化学反应与传递现象、多相催化反应器的设计、反应器设计的一般原则和方法、气液相反应及反应器、新型反应器。

本书可作为高等学校化学工程与工艺、制药工程及相关专业的教材,也可供化工与制药工程行业从事设计、研究、生产的工程技术人员参考。与本书有关的课堂教学录像、课程大纲等配套教学资源,详见 <http://www.icourses.cn/mooc/>。

图书在版编目(CIP)数据

反应工程简明教程/吴元欣、张琦主编. —北京:高等教育出版社, 2013. 12.

ISBN 978-7-04-038964-7

I. ①反… II. ①吴… ②张… III. ①化学反应工程—高等学校—教材 IV. ①TQ03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 277970 号



策划编辑 刘 佳 责任编辑 刘 佳 封面设计 于文燕 版式设计 杜微言
插图绘制 宗小梅 责任校对 刁丽丽 责任印制 尤 静

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 化学工业出版社印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 15.75
字 数 380 千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>
版 次 2013 年 12 月第 1 版
印 次 2013 年 12 月第 1 次印刷
定 价 23.40 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 38964-00

前 言

化学反应工程是一门以工程学相关理论和技术为基础来研究化学反应的工程问题的应用性工程学科。在当今世界科学技术突飞猛进的发展进程中,我国化学工业整体水平需要全面提升,进一步提高化工生产的关键设备——反应器技术水平势在必行,对反应工程理论阐述与实践应用也提出了更高要求。因此,为适应和应对现代化工发展的新挑战,作者根据工程教育的新要求编写了《反应工程简明教程》。

为了满足化学工程与工艺专业和制药工程等专业的教学需要,2010年作者根据多年从事化学工程领域教学与科研的工作经验,主编了《化学反应工程》一书。该书已经出版使用三年有余,伴随了许多化学工程与工艺专业和制药工程专业学生的成长,因而它本身也已有了广泛的使用者和读者群。为使教材更具系统、科学和简明的特点,在该书的基础上,我们编写了《反应工程简明教程》。本书的编写主要遵循和体现了下述思想和原则:① 系统性:在全书结构上,作者按照理论完备、系统完整的思想进行设计,力求在篇幅不大的情况下,以形成完整的理论体系;② 科学性:在内容选择上,作者按照主线分明、科学新颖的思路进行规划,力求在系统的框架内,以突出反应工程的科学思想和理论精髓;③ 简明性:在内容与形式的统一上,作者按照精挑细选、文字精炼的思路进行撰写,力求在科学的理论指导下,使教材更加精练、简化、易懂。本书是武汉工程大学2010年国家精品课程化学反应工程和2013年第二批国家级精品资源共享课立项项目的配套教材。

本书共9章,绪论对反应工程学科性质、研究对象和研究目的等作出高度的概括,第1章到第7章从均相反应动力学、理想反应器、非理想流动、多相系统中的化学反应与传递现象、多相催化反应器的设计、反应器设计的一般原则和方法、气液相反应及反应器等方面全面系统阐述和反映反应工程的基本理论与方法,内容横向满足化学工业、制药工业的反应器设计与开发的要求,纵向适应上游反应理论发展和下游反应器开发应用的需要。第8章介绍新型反应器,通过新型反应器发展实例来说明反应工程基本理论与方法的最新应用成果,以便使反应工程的课程体系与内容更加丰富。

本书由武汉工程大学组织有关专家共同编写。吴元欣、张珩主编。参加编写的人员有:绪论,吴元欣;第1章,吴元欣、张珩、薛永萍;第2章,吴元欣、薛永萍、张珩;第3章,杨昌炎、王鹤文;第4章,吴元欣、张珩、薛永萍;第5章,王鹤文、杨昌炎;第6章,吴元欣、薛永萍、张珩;第7章,杨昌炎、王鹤文;第8章,王鹤文、杨昌炎。全书由张珩统稿,吴元欣定稿。

本书可作为高等学校化学工程与工艺专业、制药工程及相关专业的教材,也可供化工与制药

行业从事设计、研究、生产的工程技术人员参考。

编者水平所限,加之时间仓促,书中不妥及错误和不尽人意之处恐难避免,热切希望专家和广大读者不吝赐教,批评指正。

吴元欣

2013年10月于武昌叠翠湖

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010)58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

绪论	1	的影响	28
0.1 化学反应工程的性质、研究 内容与方法	1	1.4.3 温度对可逆放热反应速率 的影响	28
0.1.1 化学反应工程的性质、研究 内容与方法	1	习题	31
0.1.2 化学反应工程学科的发展	2	第2章 理想反应器	33
0.2 化学反应与化学反应器分类	3	2.1 概述	33
0.2.1 化学反应与相态	3	2.1.1 理想流动模型	33
0.2.2 化学反应器分类	4	2.1.2 理想反应器的分析与设计原理	34
0.3 反应器的操作方式	7	2.2 间歇搅拌釜式反应器	35
0.4 反应器的工业放大	8	2.2.1 等温间歇反应器及体积的计算	35
第1章 均相反应动力学	10	2.3 连续搅拌釜式反应器	38
1.1 基本概念和定义	10	2.3.1 等温单级 CSTR	38
1.1.1 反应速率	10	2.3.2 等温多级 CSTR 串联	40
1.1.2 反应速率方程	11	2.3.3 等温多级 CSTR 串联的图解 计算	40
1.1.3 反应速率常数与反应活化能	12	2.3.4 等温串联釜式反应器体积优化	43
1.1.4 反应进度	12	2.3.5 等温多级 CSTR 并联	45
1.1.5 转化率	12	2.3.6 非等温 CSTR	46
1.1.6 选择性和收率	13	2.4 连续搅拌釜式反应器的稳态操作	47
1.2 等温恒容反应体系	14	2.4.1 釜式反应器操作的热稳定条件	47
1.2.1 单一反应体系	14	2.4.2 稳态操作点的热稳定性与 参数灵敏性分析	48
1.2.2 平行反应体系	17	2.4.3 操作参数对热稳定性的影响	49
1.2.3 连串反应体系	19	2.5 管式反应器	50
1.2.4 平行-连串反应体系	21	2.5.1 等温管式反应器	50
1.3 等温变容反应体系	22	2.5.2 PFR 的串联和并联	52
1.3.1 膨胀因子与膨胀率	23	2.5.3 循环操作	54
1.3.2 非恒容体系的反应速率表达式	24	2.6 各种理想反应器及其组合的 性能比较	55
1.3.3 复合反应膨胀因子与膨胀率	26	2.6.1 反应器浓度分析	55
1.4 温度对反应速率的影响	27	2.6.2 反应器体积、转化率的比较	56
1.4.1 温度对化学平衡的影响	27	2.6.3 反应收率的比较	59
1.4.2 温度对可逆吸热反应速率			

2.6.4 不同型式反应器的组合	63	4.3 多相催化反应的本征动力学	101
习题	64	4.3.1 本征动力学的意义	101
第3章 非理想流动	68	4.3.2 双曲线型速率方程	101
3.1 概述	68	4.3.3 幂函数型速率方程	106
3.2 非理想流动对反应过程的影响	69	4.3.4 控制步骤的判定	107
3.2.1 返混和停留时间分布的概念	69	4.4 多相催化反应的宏观动力学	107
3.2.2 停留时间分布的影响	70	4.4.1 分子扩散和努森扩散	107
3.2.3 返混的影响	70	4.4.2 多相催化反应的宏观动力学	108
3.3 停留时间分布的数学描述	71	4.4.3 扩散控制的判定	111
3.3.1 停留时间分布函数和停留时间分布密度函数	71	4.4.4 催化剂失活	112
3.3.2 停留时间分布的数字特征	72	习题	114
3.3.3 无量纲停留时间	72	第5章 多相催化反应器的设计	116
3.4 停留时间分布的测定	73	5.1 多相催化反应器类型	116
3.4.1 脉冲输入法	73	5.1.1 固定床反应器类型及工业应用	116
3.4.2 阶跃输入法	77	5.1.2 流化床反应器类型及工业应用	118
3.5 理想流动模型的停留时间分布	78	5.2 固定床内的传递现象	120
3.5.1 平推流模型	78	5.2.1 固定床内的流体流动	120
3.5.2 全混流模型	78	5.2.2 质量和热量的轴向扩散	122
3.6 非理想流动模型	80	5.2.3 径向传质与传热	123
3.6.1 层流模型	80	5.3 固定床催化反应器的数学模型	125
3.6.2 多釜串联模型	82	5.4 绝热固定床催化反应器	127
3.6.3 轴向扩散模型	83	5.4.1 绝热反应器	127
3.7 非理想流动对反应器性能的影响	88	5.4.2 催化剂用量	129
3.7.1 离析流模型的转化率	88	5.4.3 多段绝热反应器的设计	131
3.7.2 轴向扩散模型的转化率	89	5.5 连续换热反应器	136
习题	93	5.5.1 连续换热反应器的分类和特征	136
第4章 多相系统中的化学反应与传递现象	96	5.5.2 一维拟均相模型	137
4.1 催化剂	97	5.5.3 二维拟均相模型	141
4.1.1 固体催化剂的宏观结构与特性	97	5.6 固定床催化反应器的热稳定性	142
4.1.2 多相催化过程与步骤	98	5.6.1 多重稳态的可能性	142
4.2 催化剂表面上的吸附	99	5.6.2 热点、失控和参数敏感性的概念	143
4.2.1 物理吸附和化学吸附	99	5.7 流化床反应器的流化特性	144
4.2.2 均匀表面吸附模型	99	5.8 流化床反应器的数学模型及设计	145
4.2.3 非均匀表面吸附模型	100	5.8.1 两相模型	145
		5.8.2 鼓泡床模型	151

5.8.3 流化床反应器设计的特别考虑	158	7.3.4 慢速反应	188
5.9 流化床反应器的放大	159	7.3.5 快速反应	188
习题	160	7.4 气液反应过程的几个重要参数	190
第6章 反应器设计的一般原则 和方法	164	7.4.1 膜内转化系数 γ	190
6.1 概述	164	7.4.2 增强因子 β	190
6.1.1 反应器设计的一般程序	164	7.4.3 液相反应利用率 η	191
6.1.2 反应器设计决策的基本问题	166	7.5 气液反应器	193
6.2 操作条件的选择	166	7.5.1 气液反应器的主要类型	193
6.2.1 单一反应体系	166	7.5.2 气液反应器特性与选型	195
6.2.2 复合反应体系	167	7.6 气液反应器的设计方程	196
6.2.3 催化剂对选择性的影响	168	7.6.1 填料塔反应器	196
6.3 反应器型式和操作方式	170	7.6.2 鼓泡塔反应器	200
6.3.1 反应器选型的一般原则	170	7.6.3 搅拌鼓泡釜式反应器	209
6.3.2 反应器组合	170	习题	211
6.3.3 反应器型式对收率的影响	171	第8章 新型反应器	214
6.3.4 加料方式对收率的影响	171	8.1 概述	214
6.4 反应器结构与换热方式	172	8.2 旋转填充床反应器	215
6.4.1 选择反应器结构和换热方式 的一般原则	172	8.2.1 旋转填充床反应器的结构 与原理	215
6.4.2 温度敏感性的定量判据	173	8.2.2 旋转填充床反应器的应用	217
6.4.3 敏感性放热反应的对策	174	8.3 撞击流反应器	218
6.4.4 吸热反应的温度控制	174	8.3.1 撞击流反应器的分类、特性 与原理	219
习题	174	8.3.2 撞击流反应器的应用	223
第7章 气液相反应及反应器	176	8.4 超临界反应器	224
7.1 气液反应平衡	176	8.4.1 超临界流体的特性	224
7.1.1 气液相平衡	176	8.4.2 超临界反应器的应用	225
7.1.2 亨利定律	177	8.5 微波反应器	228
7.1.3 化学反应对气液相平衡的影响	177	8.5.1 微波反应器的基本原理	228
7.2 气液反应过程	179	8.5.2 微波反应器的应用	229
7.2.1 气液相间传质模型	179	8.6 磁流化床反应器	234
7.2.2 气液反应过程	181	8.6.1 磁流化床反应器的结构及特点	234
7.3 气液反应宏观动力学	183	8.6.2 磁流化床反应器的应用	235
7.3.1 基础方程	183	习题	237
7.3.2 瞬间反应	184	参考文献	238
7.3.3 中速反应	185	主要符号一览表	240

绪 论

成语道：“瓜熟蒂落”与“水到渠成”，它是自然规律的反映，也是自然科学发展的写照。1957年在荷兰首都阿姆斯特丹，来自欧洲的化学工程师与化工科学家相聚一起开了一次特别的会议——第一届国际化学反应工程会议，标志着化学反应工程作为一门独立的学科受到工业界和学术界的高度重视。这次会议，对反应工程学科的范畴、研究方法及与相邻学科领域界定做出了明确的说明。使化学反应从“技艺”走向科学——这是学科发展的瓜熟蒂落。会议起初只在欧洲与北美之间轮流主办。2002年第一次在中国香港主办，此后轮流在欧、亚、美三大洲举行，至今已举办了22届。而20世纪四五十年代计算机技术的发展则催生化学反应工程学科的独立——这是学科发展的水到渠成。

用化学方法将原料加工成产品，是化学工业和其他过程工业如石油、能源、冶金及轻工业等采用的手段。不论是哪个工业部门的哪一种产品的生产，采用化学方法加工时，一般包括三个部分，即①原料的预处理；②化学反应；③产物的分离与纯化。其中，第二部分为整个加工过程的核心，是单元反应的化学过程。第一、三部分属于单元操作的物理过程范畴，其设计从属于第二部分。而第二部分则是化学反应工程学科的研究对象。本章将主要介绍化学反应工程学科的发展过程、研究内容、研究方法，使读者了解本课程的概貌。

0.1 化学反应工程的性质、研究内容与方法

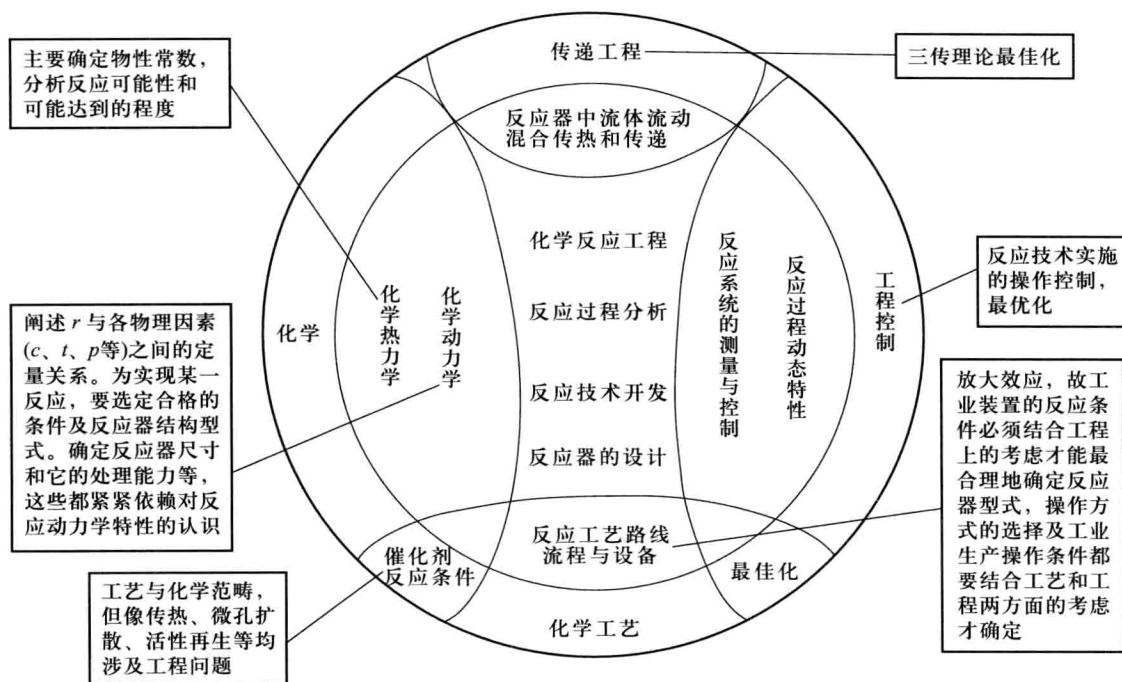
0.1.1 化学反应工程的性质、研究内容与方法

化学反应工程是关于工业化学反应过程的科学，是化学工程学科的一个主要分支，属于工程科学。其研究内容主要是反应动力学和反应器的设计与分析。

反应动力学着重研究化学反应进行的机理和速率，为了获得进行工业反应器的设计和操作所需的动力学知识，研究反应动力学是必不可少的。研究内容主要包括本征动力学和宏观动力学，描述化学反应本身规律的动力学称为本征动力学，而考虑了物理传递因素影响的动力学则称为宏观动力学。化学反应工程的另一主要任务是利用动力学知识，寻找最佳工作状态和最适宜的反应器型式，以获得最大的经济效益，即反应器的设计与分析。具体来讲，主要包括以下几个方面：

- (1) 解决反应过程和反应器的设计与放大问题。
- (2) 开发新的反应技术和设备。
- (3) 改进和强化现有反应过程的技术和设备，使之优质、高产、低耗、安全。
- (4) 优化反应过程，提高经济和社会效益。

综上所述，反应器的设计与分析的核心内容是选型、设计、放大及优化。化学反应工程的学科范畴及与其他学科的关系如图0.1所示。



数学和计算技术以及计算机技术有交互作用

图 0.1 化学反应工程的学科范畴及与其他学科的关系

虽然化学反应各不相同,但它们之间总有相似之处。为了方便研究,将化学反应进行分类。化学反应工程一般是按照反应物系的相态进行分类,分为均相反应和非均相反应。也可根据反应过程是否使用催化剂,分为催化反应和非催化反应。需指出的是,使用固体催化剂的反应一般为非均相反应。如在钒催化剂上进行二氧化硫的氧化反应,虽然反应物和产物均为气相,但不属于均相反应,而是气固相催化反应。

工业化学反应过程不仅包含化学现象,也包含了物理的传递现象。传递现象主要是质量、热量和动量的传递,加上化学反应,即通常所说的“三传一反”。

化学反应工程对化学产品及过程的开发和反应器的设计放大起着非常重要的作用,通过充分运用反应工程的知识,使反应器放大倍数大大增加,减小了试验放大次数,从而缩短了开发新产品的周期。对于现有企业设备的改善和优化,也需要运用反应工程的知识来分析和寻求解决方案。因此,从实验室研究开始到新产品的工业化生产,或现有设备的改造,从事这方面工作的科技工作者都需要具备化学反应工程知识。此外,在环境保护、燃料燃烧、制药工业、新材料、新能源及生物工程等方面也起到了非常重要的作用。

0.1.2 化学反应工程学科的发展

化学反应工程是建立在化学、物理学及数学等基础学科上的一门应用型学科。它萌芽于 20 世纪 30 年代,德国科学家丹克莱尔(Damköhler)较为系统地论述了扩散、流体流动和传热对反应器产率的影响,为化学反应工程奠定了基础。与此同时,蒂勒(Thiele)等人对扩散也做了开拓性研究。20 世纪 40 年代末期,霍根(Hougen)与华生(Waston)将化学反应工程有关内容作为专

门课程编入高等院校教科书中,引起了国际化工界的广泛重视,为化学反应工程学的建立奠定了理论基础。1957年在荷兰阿姆斯特丹举行的第一届欧洲化学反应工程会议上确认了“化学反应工程”这一术语,标志着化学反应工程成为化学工程的一个重要分支学科。此后,化学反应工程的研究成果与日俱增。任何一个学科的发展都归功于生产发展和要求,化学反应工程学科的发展也不例外。正是由于石油化工的快速发展,促使了化学反应工程学科的发展。

电子计算机的出现及普遍应用,为在化学工程研究中采用数学模型方法提供了有力的手段。20世纪60年代以来,对工业反应器中化学反应及传递过程的数学描述方法不断得到改进,一些小试成果已可以直接通过模型化方法成功地进行工业放大。同时,全面系统地论述化学反应工程基本原理及应用的专著和教科书也相继问世,标志着化学反应工程学科已逐步趋于成熟。

近年来,随着石油化学工业的迅速发展及各种工业催化反应过程的成功开发,以及高新技术的发展和应用(如微电子器件、光导纤维、新材料及生物技术的应用等),扩大了化学反应工程学科的研究领域,使化学反应工程学科的研究领域向纵深发展,出现了催化反应工程、聚合反应工程、生化反应工程、制药反应工程等更加专业化的分支,标志着化学反应工程学科进入了新的发展阶段。

0.2 化学反应与化学反应器分类

0.2.1 化学反应与相态

对于工业反应装置可按反应物的相态来分类(见表0.1)。考虑到化学反应是化学加工过程的主体,而装置是实现反应的客观环境。化学反应的特性是第一位的,而反应动力学就是描述这种特性的,因此动力学是代表过程的本质性因素,而装置的结构、型式和尺寸则是在物料的流动、混合、传热和传质等方面的条件上发挥其影响。因此反应装置中上述这些传递特性也是影响反应结果的一个重要方面。

表 0.1 反应物相态与反应器型式

反应物相态		反应器型式	
均相	单相	气相	管式反应器
		液相	管式反应器、釜式反应器、塔式反应器
非均相	两相	气固相	固定床反应器
			流化床反应器
			移动床反应器
	气液相	鼓泡塔	
		鼓泡搅拌釜	
	固液相	釜式反应器、塔式反应器	
三相	气液固相	滴流床反应器	
		浆态床反应器	

0.2.2 化学反应器分类

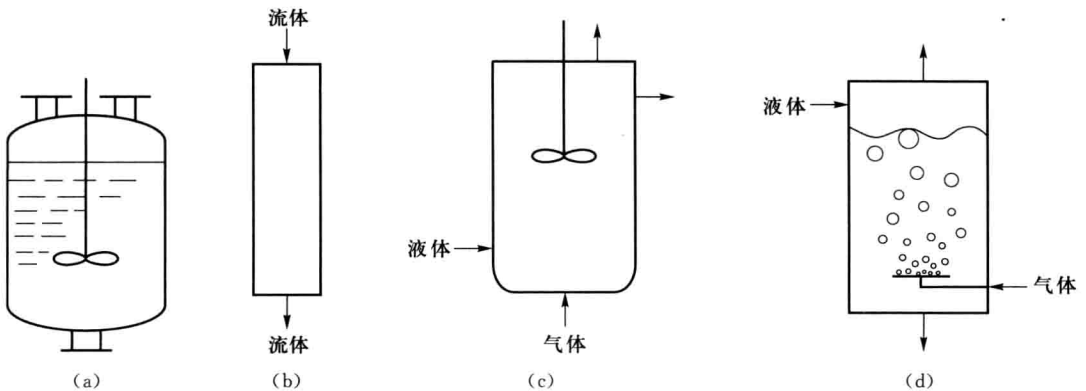
工业反应器是化学反应工程的主要研究对象,其类型繁多,根据不同的性质,可以分为很多类型。按结构原理的特点分类具体见表 0.2 和图 0.2 所示。

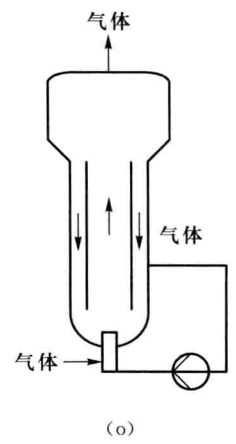
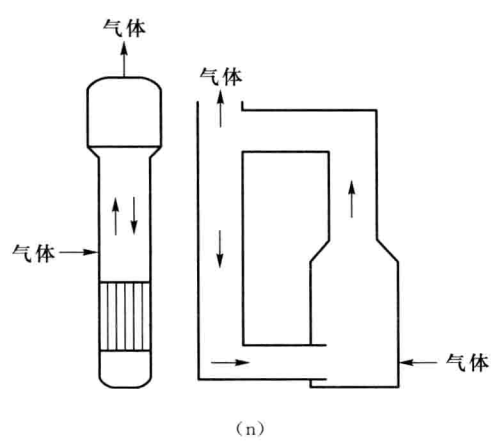
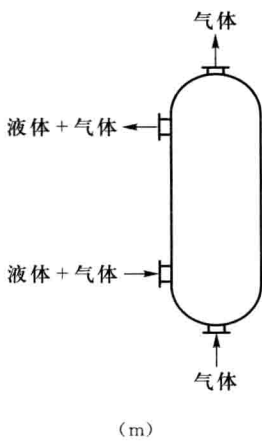
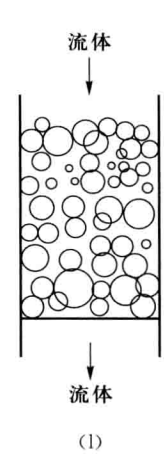
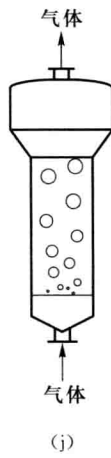
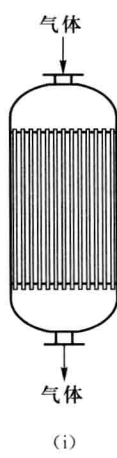
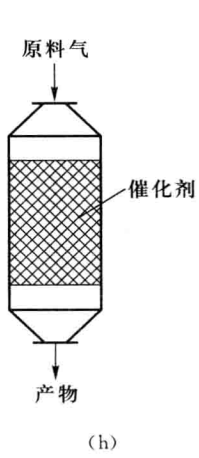
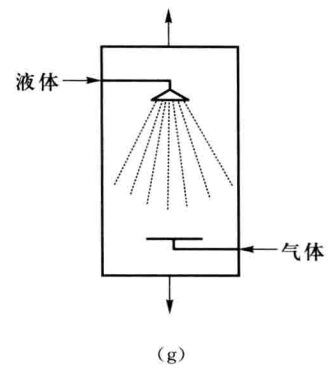
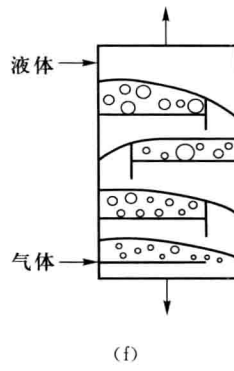
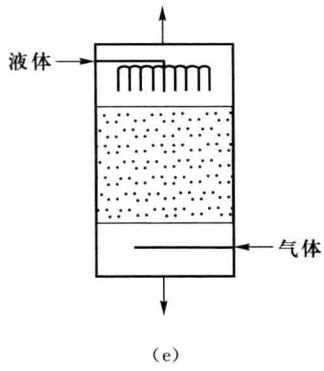
表 0.2 反应器的型式与特性

反应器型式		适用的反应		
名称	示意图 (图 0.2)	类型	特点	举例
釜式反应器	(a)	液相、液液相、 液固相、气液相	温度、浓度容易控制,产品质量可调	苯的硝化,氯乙烯聚合,顺丁橡胶聚合,苯的氯化
管式反应器	(b)	气相、液相	返混小,所需反应器容积较小,比传热面积大,但对慢速反应,管要很长,压降大	石脑油裂解,管式法生产聚乙烯、聚丙烯,环氧乙烷水合生产乙二醇
空塔或 搅拌塔	(c)	液相、液液相	结构简单,返混程度与高径比及搅拌有关,轴向温差大	苯乙烯的本体聚合,己内酰胺缩合,醋酸乙烯溶液聚合
鼓泡塔或 挡板鼓泡塔	(d)	气液相、气液 固(催化剂)相	气相返混小,但液相返混大,温度较易调节,气体压降大,流速有限制,有挡板可减少返混	苯的烷基化,乙烯基乙炔的合成,二甲苯氧化
填料塔	(e)	液相、气液相	结构简单,返混小,压降小,有温差,填料装卸麻烦	化学吸收,丙烯连续聚合
板式塔	(f)	气液相	逆流接触,气液返混均小,流速有限制,如需传热,常在板间另加传热面	苯连续磺化,异丙苯氧化
喷雾塔	(g)	气液相快速反应	结构简单,液体表面积大,停留时间受塔高限制,气流速度有限制	氯乙醇制丙烯腈,高级醇的连续硝化
固定床反应器	(h)	气固(催化剂 或非催化剂)相	返混小,高转化率时催化剂用量少,催化剂不易磨损,传热控温不易,催化剂装卸麻烦	甲醇氧化制甲醛,合成氨,乙烯法制醋酸乙烯
列管式固定 床反应器	(i)	气固(催化剂 或非催化剂)相	传热好,温度均匀,易控制,催化剂不易磨损,对高转化率有利	乙苯脱氢,乙炔法制氯乙烯
流化床反应器	(j)	气固(催化剂或 非催化剂)相、气 液固(催化剂)相	固体返混小,固气比可变性大,颗粒传送较易,床内温差大,调节困难;催化剂带出少,分离易,气流分布要求均匀,温度调节较困难	石油催化裂化,矿物的焙烧或冶炼,焦油加氢精制和加氢裂解,丁炔二醇加氢

续表

反应器型式		适用的反应		
名称	示意图 (图 0.2)	类型	特点	举例
移动床反应器	(k)	气固(催化剂或非催化剂)相	流体与固体(催化剂)颗粒呈逆流流动	催化剂的再生,煤的气化
滴流床反应器	(l)	气液固(催化剂)相	反应气体与液体呈并流(或逆流)经过催化剂床层,传热好,温度均匀,易控制	石油馏分加氢脱硫
撞击流反应器	(r)	液液(固)相	可强化传质、传热,微观混合效果好	液液相反应
浆态床反应器	(m)	气液固相	反应气体与液体、固相并流接触,传热好,温度均匀,易控制	半水煤气一步法浆态床合成二甲醚
气升式生化反应器	(n)	气液相	可强化传质、传热和混合	动物细胞增殖、酶的催化反应
液体喷射循环型生化反应器	(o)	气液相	气液间接触面积大,混合均匀,传质、传热效果好	微生物细胞增殖、酶的催化反应
柱式酶反应器	(p)	液固(酶)相	可连续操作,传热好,温度均匀,易控制	细胞增殖、酶的催化反应
固定床生化反应器	(q)	液固(催化剂)相	可连续操作,返混小,底物利用率高和固定化生物催化剂不易磨损	动植物细胞增殖、酶的催化反应
膜反应器	(r)	气液相	小分子产物可以透过膜与底物分离,防止产物对酶的抑制作用	微生物细胞增殖、酶的催化反应





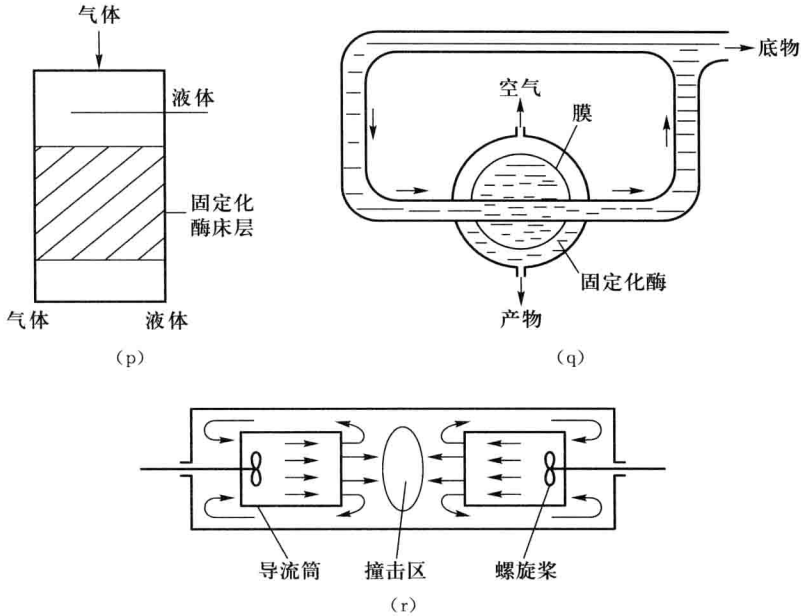


图 0.2 不同类型反应器示意图

反应器最好按二级区分进行分类,第一级区分按相态分类,其反映反应动力学的内因规律,第二级区分按设备特性分类,其反映反应条件和环境外因及传递规律。例如气固相催化固定床反应器。

0.3 化学反应器的操作方式

工业反应器有不同的操作方式:间歇操作;连续操作;半间歇操作。

间歇操作是指一批物料一次性投入反应器,经过一段时间反应后,达到所要求的反应程度后卸出全部物料,再进行清洗,进而进行下一批物料的投放、反应和卸料。

间歇反应过程是一个非稳态过程,反应器内物系组成随反应时间而变化,这是间歇反应的基本特征。采用间歇操作的反应器叫做间歇反应器。间歇反应器中反应物系的浓度随时间而变如图 0.3 所示。

由图 0.3 可知,随着时间的变化,反应物 A 的浓度不断降低,而产物 R 的浓度则不断增加。对于不同的反应,需具体分析。由于间歇反应器在反应过程中没有物料的输入和输出,也没有物料的流动。整个反应可视为恒容下进行。工业上采用间歇操作的反应器基本都是搅拌釜式反应器,适用于生产量少、产品品种多变的制药、染料、精细化工产品 and 聚合反应过程。

连续操作是将物料连续地输入反应器,同时连续地将

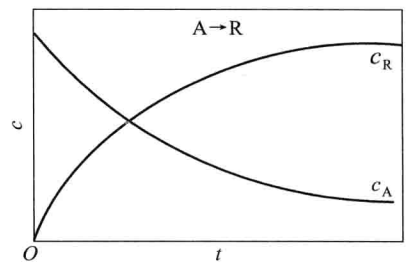


图 0.3 间歇反应器中反应物系浓度与时间的关系

产物输出反应器的操作方式。采用连续操作的反应器称为连续反应器。连续操作的反应器多属于稳态操作,反应器内各点的浓度及温度参数不随时间而改变,但随着位置的改变而改变,反应器内反应物系浓度随反应轴向距离而变化的情况见图 0.4。

反应物 A 的浓度沿着反应物流方向逐渐降至出口浓度。对产物 R 来说浓度的变化恰好相反。图 0.3 和图 0.4 虽非常相似,但其根本区别在于前者的浓度随时间改变,而后者的浓度随位置而改变。

因连续反应器具有稳定、劳动生产率高、便于实现机械化等优点,大规模工业生产的反应器绝大部分采用连续反应器。

工业生产上还有一类介于间歇与连续之间的操作状态,即半连续操作。它是将一种或几种反应物一次投入反应器内,而另一些反应物则连续投入反应器以适应某些反应过程的特殊需要。如工业上生产氯苯是以氯气连续通入一次性投入的苯中进行反应而得到的。

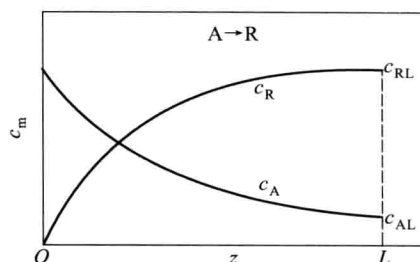


图 0.4 连续反应器中反应物系浓度与反应轴向距离的关系

0.4 反应器的工业放大

一个新的化工产品从实验室研究成功到工业规模生产,一般都要经历几个阶段,即需进行若干次不同规模的试验。随着规模的增加,反应器也要相应地增大,但到底要如何增大才能达到所预期的效果,这便是反应器的工业放大问题。一个工业反应过程开发就其核心而言需要解决三方面的问题:

- (1) 反应器的选型;
- (2) 反应器操作条件的优化;
- (3) 反应器的放大。

早期,化工生产过程中的开发工作是以逐级经验放大为基本方法。即通过小型反应器进行工艺试验,优选出操作条件和反应器型式,确定所能达到的技术指标。据此再设计和制造规模稍大一些的装置,进行模型试验。根据模型试验的结果,再将规模增大,进行中间试验,由中间试验的结果,放大到工业规模的生产装置。

显然,逐级经验放大法是一种立足于依靠对已有设备操作经验,以感性认识为主进行放大的方法。此法盲目性大,放大倍数小,费时费钱很难有普遍意义,且因“放大效应”,即放大后的指标与小试指标之间会出现很难预测的差别,或者可以预测但却无法控制的差别,常常难以达到人们预期的技术经济指标。因此,长期以来“放大效应”阻碍着工业开发工作的进展和质量的提高。除此之外,此法只能用于单元操作的物理过程,而无法用于函数关系为非线性的单元反应的反应过程放大。

20 世纪 60 年代发展起来的数学模型法是一种比较理想的反应器放大方法。其实质是通过数学模型来设计反应器,预测不同规模的反应器工作状态,优化反应器操作条件。所建立的数学模型是否适用取决于对反应过程实质的认识,而认识又源于实践,因此,实验仍然是数学模型法的重要依据。这与逐级经验放大法无论是方法或是目的却迥然不同。在反应工程中,数学模型