

教育部高等学校

化工类专业教学指导委员会推荐教材

化学反应工程

(第二版)

吴元欣 丁一刚 刘生鹏 主编



化学工业出版社

教育部高等学校化工类专业教学指导委员会推荐教材

化学反应工程

(第二版)

吴元欣 丁一刚 刘生鹏 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书系统阐述了化学反应工程基本原理及其应用,全书共分9章,包括化学反应工程基础理论(均相反应动力学、间歇反应器及理想流动反应器、非理想流动及其反应器设计)、气-固相催化反应器、气-液相反应器、聚合反应器以及生物与制药反应器,并介绍了典型的新型反应器的研究进展。

本书可供高等院校化学工程与工艺、制药工程、生物工程等专业师生使用,也可供相关专业科研、技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化学反应工程/吴元欣,丁一刚,刘生鹏主编. —2版.
北京:化学工业出版社,2015.4
教育部高等学校化工类专业教学指导委员会推荐教材
ISBN 978-7-122-22883-3

I. ①化… II. ①吴…②丁…③刘… 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(2015)第018800号

责任编辑:何丽 徐雅妮
责任校对:吴静

文字编辑:丁建华
装帧设计:关飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印刷:北京永鑫印刷有限公司
装订:三河市宇新装订厂
787mm×1092mm 1/16 印张16 字数391千字 2015年7月北京第2版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:34.00元

版权所有 违者必究

教育部高等学校化工类专业教学指导委员会 推荐教材编审委员会

主任委员 王静康 冯亚青

副主任委员 张凤宝 高占先 张泽廷 于建国 曲景平 陈建峰

李伯耿 山红红 梁斌 高维平 郝长江

委员 (按姓氏笔画排序)

马晓迅 王存文 王光辉 王延吉 王承学 王海彦

王源升 韦一良 乐清华 刘有智 汤吉彦 李小年

李文秀 李文翠 李清彪 李瑞丰 杨亚江 杨运泉

杨祖荣 杨朝合 吴元欣 余立新 沈一丁 宋永吉

张玉苍 张正国 张志炳 张青山 陈 砺 陈大胜

陈卫航 陈丰秋 陈明清 陈波水 武文良 武玉民

赵志平 赵劲松 胡永琪 胡迁林 胡仰栋 钟 宏

钟 秦 姜兆华 费德君 姚克俭 夏淑倩 徐春明

高金森 崔 鹏 梁 红 梁志武 程 原 傅忠君

童张法 谢在庠 管国锋

序

化学工业是国民经济的基础和支柱性产业，主要包括无机化工、有机化工、精细化工、生物化工、能源化工、化工新材料等，遍及国民经济建设与发展的重点领域。化学工业在各国国民经济中占据重要位置，自2010年起，我国化学工业经济总量居全球第一。

高等教育是推动社会发展的重要力量。当前我国正处在加快转变经济发展方式、推动产业转型升级的关键时期。化学工业要以加快转变发展方式为主线，加快产业转型升级，增强科技创新能力，进一步加大节能减排、联合重组、技术改造、安全生产、两化融合力度，提高资源能源综合利用效率，大力发展循环经济，实现化学工业集约发展、清洁发展、低碳发展、安全发展和可持续发展。化学工业转型迫切需要大批高素质创新人才，培养适应经济社会发展需要的高层次人才正是大学最重要的历史使命和战略任务。

教育部高等学校化工类专业教学指导委员会（简称“化工教指委”）是教育部聘请并领导的专家组织，其主要职责是以人才培养为本，开展高等学校本科化工类专业教学的研究、咨询、指导、评估、服务等工作。高等学校本科化工类专业包括化学工程与工艺、资源循环科学与工程、能源化学工程、化学工程与工业生物工程等，培养化工、能源、信息、材料、环保、生物工程、轻工、制药、食品、冶金和军工等领域从事工程设计、技术开发、生产技术管理和科学研究等方面工作的工程技术人才，对国民经济的发展具有重要的支撑作用。

为了适应新形势下教育观念和教育模式的变革，2008年“化工教指委”与化学工业出版社组织编写和出版了10种适合应用型本科教育、突出工程特色的“教育部高等学校化学工程与工艺专业教学指导分委员会推荐教材”（简称“教指委推荐教材”），部分品种为国家级精品课程、省级精品课程的配套教材。本套“教指委推荐教材”出版后被100多所高校选用，并获得中国石油和化学工业优秀教材等奖项，其中《化工工艺学》还被评选为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

党的十八大报告明确提出要着力提高教育质量，培养学生社会责任感、创新精神和实践能力。高等教育的改革要以更加适应经济社会发展需要为着力点，以培养多规格、多样化的应用型、复合型人才为重点，积极稳步推进卓越工程师教育培养计划实施。为提高化工类专业本科生的创新能力和工程实践能力，满足化工学科知识与技术不断更新以及人才培养多样化的需求，2014年6月“化工教指委”和化学工业出版社共同在太原召开了“教育部高等学校化工类专业教学指导委员会推荐教材编审会”，在组织修订第一批10种推荐教材的同时，增补专业必修课、专业选修课与实验实践课配套教材品种，以期为我国化工类专业人才培养提供更丰富的教学支持。

本套“教指委推荐教材”反映了化工类学科的新理论、新技术、新应用，强化

安全环保意识；以“实例—原理—模型—应用”的方式进行教材内容的组织，便于学生学以致用；加强教育界与产业界的联系，联合行业专家参与教材内容的设计，增加培养学生实践能力的内容；讲述方式更多地采用实景式、案例式、讨论式，激发学生的学习兴趣，培养学生的创新能力；强调现代信息技术在化工中的应用，增加计算机辅助化工计算、模拟、设计与优化等内容；提供配套的数字化教学资源，如电子课件、课程知识要点、习题解答等，方便师生使用。

希望“教育部高等学校化工类专业教学指导委员会推荐教材”的出版能够为培养理论基础扎实、工程意识完备、综合素质高、创新能力强的化工类人才提供系统的、优质的、新颖的教学内容。

教育部高等学校化工类专业教学指导委员会

2015年1月

前言

“化学反应工程”是大化工专业的专业核心课程，是一门融合理论性、综合性、工程性的课程，具有专业面广、实用性和前沿性等特点。

自 2010 年本书作为化学反应工程国家精品课程配套教材问世以来，受到国内许多高等院校的关注和选用，并获 2012 年中国石油和化学工业优秀教材一等奖。为适应化学反应工程国家精品资源共享课教学需求，结合大化工专业与方向特色，本次修订更新了部分例题，并补充了大量的习题，更新了部分章节内容。

本书第 1 章~第 4 章为化学反应工程基本理论模块，涵盖了均相反应动力学、间歇反应器及理想流动反应器和非理想流动及其反应器设计等内容，是大化工各专业学生必学部分；第 5 章~第 8 章为反应器设计模块，满足了化学工程与工艺、制药工程和生物工程等不同专业及方向学生选学的需求；第 9 章为前沿知识拓展模块，介绍了国内外新型反应技术与设备的研究及其应用，旨在激发学生学习兴趣，开拓学生学习视野。

本书由武汉工程大学化学反应工程国家精品课程教学团队教师们共同完成，同时感谢许多兄弟院校的同行们对本书的部分章节提出的宝贵修改意见。

由于编者的学识与经验水平所限，书中存在缺点和不足之处，恳切希望读者不吝批评指正。

编者

2015 年 1 月

第一版前言

化学反应工程是大化工专业的专业核心课程，也是大学本科化工类专业学生的必修课程之一。化学反应器是工业生产的核心设备，被誉为化工厂的“心脏”。

化学工程与工艺专业由最初的无机化工、有机化工、精细化工等发展而来。目前各高等院校根据人才培养方案的不同，大多在化学工程与工艺、制药工程、生物工程等本科专业设有化学反应工程课程。有关化学反应工程的课程在不同的专业方向又设置了“化学反应工程”、“催化反应工程”、“聚合反应工程”、“生化反应工程”和“制药反应工程”等课程。为了适应大化工人才培养的需要，根据不同专业方向的特点，如何将不同专业方向的化学反应工程课程既考虑技术基础教学又突出专业方向是值得探索的。本教材编写的目的在于增强各专业的普适性，以期适应大化工类各专业教学的需要。

化学反应工程主要研究化学反应的工程问题，涉及反应过程动力学和反应器设计与分析两个方面，广泛地应用了化工热力学、化学动力学、流体力学、传热、传质以及过程优化与控制、经济学等方面的知识和经验，是这些知识和经验在工业反应器设计和最优化方面的综合。通过该课程的学习，不仅可掌握化学反应工程的基本理论、概念和研究方法，还可学会改进和加强现有反应技术和设备的方法，解决反应过程开发中的放大问题以及实现反应过程的最优化等。

本书在编写过程中注重教学内容的系统性、条理性和广泛性，重视反应器的分析、比较，在阐述基本概念、基本知识以及处理各种问题的思想和方法时，思路清晰，文字精练，通俗易懂，循序渐进。通过理想反应器的学习，让学生打下扎实的基础，学会针对反应工程分析问题和解决问题的方法；通过非均相反应器的学习，让学生掌握扩散、传质过程对反应过程的影响。

本书共9章，其中第1章~第4章为基础部分，第5章~第8章分述气-固相催化反应器、气-液相反应器、聚合反应器以及生物与制药反应器，第9章主要介绍新型反应器的研究进展。第1章、第2章由刘生鹏编写，第3章由丁一刚编写，第4章由杨昌炎编写，第5章由吴元欣、吴广文、金放编写，第6章由杨嘉谟编写，第7章由陈金芳编写，第8章由朱圣东、张珩、张秀兰编写，第9章由杜治平编写。全书整理、校对和编排工作由丁春华完成，吴元欣教授修改和定稿。

本书的完成主要是武汉工程大学化工与制药学院化学工程、化学工艺、生物化工、制药工程学科组教师的共同努力，同时感谢“绿色化工过程省部共建教育部重点实验室”的支持，许多兄弟院校的同行人对本书的部分章节也提出了很多宝贵意见，在此一并致以衷心的感谢。

然而，限于编者的水平，对书中存在的疏漏和不妥之处，恳切希望读者批评指正。

编者

2010年2月于武汉

目录

第1章 绪论 / 1

1.1 化学反应工程的发展、研究内容与方法	1
1.1.1 化学反应工程的发展	1
1.1.2 化学反应工程的研究内容和研究方法	2
1.2 化学反应器的工程分类	3
1.2.1 反应装置的类型	3
1.2.2 反应器中的相态	5
1.2.3 化学反应器的操作方式	6
1.3 化学反应工程在工业反应过程开发中的作用	6
1.4 反应过程的转化率、选择性和收率	7
1.4.1 反应进度	7
1.4.2 转化率	8
1.4.3 收率和选择性	9
参考文献	10
习题	10

第2章 均相反应动力学 / 12

2.1 基本概念和定义	12
2.1.1 反应速率	12
2.1.2 反应动力学方程	12
2.2 等温恒容过程	14
2.2.1 单一反应动力学方程的建立	14
2.2.2 复合反应	17
2.3 等温变容过程	22
2.3.1 膨胀因子	22
2.3.2 膨胀率	23
2.4 温度对反应速率的影响	26
2.4.1 温度对化学平衡的影响	26
2.4.2 吸热可逆反应	27
2.4.3 放热可逆反应——最优温度线	27
参考文献	29
习题	30

第3章 间歇反应器及理想流动反应器 / 32

3.1	概述	32
3.2	间歇反应器	33
3.2.1	等温间歇反应器的设计计算	33
3.2.2	变温间歇反应器的设计计算	36
3.3	理想流动下的釜式反应器	37
3.3.1	全混流模型	38
3.3.2	等温连续流动釜式反应器的设计计算	38
3.3.3	釜式反应器的组合与设计计算	40
3.3.4	串联釜式反应器体积优化	42
3.3.5	釜式反应器的定态操作	44
3.4	理想流动下的管式反应器	47
3.4.1	平推流模型	47
3.4.2	等温连续流动管式反应器的设计计算	47
3.4.3	变温连续流动管式反应器的设计计算	49
3.5	间歇反应器及理想流动反应器反应性能指标比较	51
3.5.1	反应过程浓度水平分析	51
3.5.2	反应性能指标比较	51
	参考文献	58
	习题	59

第4章 非理想流动及其反应器设计 / 61

4.1	概述	61
4.2	停留时间分布及其性质	62
4.2.1	停留时间分布的定量描述	62
4.2.2	停留时间分布函数的统计特征	63
4.2.3	无量纲时间表示的概率函数	63
4.3	停留时间分布的测定	64
4.3.1	脉冲示踪法	64
4.3.2	阶跃示踪法	65
4.4	理想流动模型	65
4.4.1	平推流流动模型	65
4.4.2	全混流流动模型	66
4.5	非理想流动现象	67
4.6	非理想流动模型	68
4.6.1	轴向扩散模型	69
4.6.2	多釜串联模型	72
4.7	非理想反应器的计算	76
4.8	流体混合对反应过程的影响	78

4.8.1	流体混合	78
4.8.2	离析流模型	79
4.8.3	不同混合态对反应过程的影响	81
	参考文献	83
	习题	83

第5章 气-固相催化反应器 / 86

5.1	概述	86
5.1.1	固体催化剂的组成与结构	86
5.1.2	气-固相催化过程	87
5.2	气-固非均相催化反应本征动力学	88
5.2.1	催化剂表面上的吸附与脱附	88
5.2.2	反应速率控制步骤	89
5.2.3	双曲线型的反应速率式 (Langmuir-Hinshelwood 方程)	90
5.3	气-固非均相催化体系的宏观动力学	93
5.3.1	气体在多孔介质中的内扩散	93
5.3.2	气-固相催化宏观动力学	93
5.3.3	扩散控制的判定	96
5.3.4	催化剂的失活与降活动力学	96
5.4	气-固非均相催化反应器的设计	98
5.4.1	气-固非均相催化反应器类型	98
5.4.2	气-固非均相催化反应器设计原则	99
5.4.3	固定床反应器的数学模型及设计	100
5.4.4	固定床反应器的设计计算	105
5.4.5	流化床反应器的数学模型及设计	117
	参考文献	127
	习题	128

第6章 气-液相反应器 / 130

6.1	气-液反应平衡	130
6.1.1	气-液相平衡	130
6.1.2	亨利定律	131
6.1.3	化学反应对气-液相平衡的影响	132
6.2	气-液相反应的宏观动力学	133
6.2.1	反应与传质过程	133
6.2.2	化学反应在相间传递中的作用	134
6.2.3	化学吸收的增强因子	135
6.3	气-液反应动力学特征	136
6.3.1	伴有化学反应的液相扩散过程	136
6.3.2	几个重要参数的讨论	144

6.4 气-液相反应器的设计计算	146
6.4.1 气-液相反应器的类型的选择	146
6.4.2 气-液相反应器的设计模型	148
参考文献	154
习题	154

第7章 聚合反应器 / 156

7.1 概述	156
7.2 聚合反应动力学	156
7.2.1 逐步缩合聚合	156
7.2.2 均相游离基链式加成聚合	158
7.2.3 均相游离基共聚合	159
7.2.4 离子型聚合	160
7.2.5 配位络合聚合	161
7.3 聚合体系的传递现象	161
7.3.1 流体的流动特性	162
7.3.2 聚合釜中的传质与传热	163
7.4 聚合反应器的设计	167
7.4.1 聚合反应器的设计计算	167
7.4.2 聚合釜的搅拌	169
7.4.3 搅拌釜的放大	174
参考文献	174
习题	175

第8章 生物与制药反应器 / 178

8.1 概述	178
8.2 酶催化反应动力学	178
8.3 微生物发酵动力学	182
8.3.1 微生物菌体生长动力学	182
8.3.2 微生物发酵基质消耗动力学	184
8.3.3 微生物发酵产物生成动力学	184
8.4 生化与制药反应器的设计	185
8.4.1 生化与制药反应器的数学模型	185
8.4.2 发酵罐的设计计算	186
8.4.3 搅拌功率的计算	197
8.4.4 发酵罐的放大	203
参考文献	207
习题	207

9.1	概述	209
9.2	撞击流反应器	209
9.2.1	撞击流反应器的原理、特性与分类	209
9.2.2	撞击流反应器的应用	219
9.3	旋转填充床反应器	221
9.3.1	旋转填充床反应器的结构与原理	221
9.3.2	旋转填充床反应器的应用	223
9.4	超临界反应器	225
9.4.1	超临界流体的性质	225
9.4.2	超临界反应器的应用	226
9.5	微波反应器	227
9.5.1	微波反应器的基本原理	228
9.5.2	微波反应器的应用	229
9.6	磁流化床反应器	230
9.6.1	磁流化床的结构和特点	230
9.6.2	磁流化床反应器的应用	231
9.7	微反应器	232
9.7.1	微反应器的几何特性	233
9.7.2	微反应器内流体的传递特性和宏观流动特性	233
9.7.3	微反应器的优点	234
9.7.4	微反应器的应用潜力	235
	参考文献	236

第 1 章

绪 论

化学工业是利用物理和化学手段改变物质结构、成分、形态等，从而将原料加工成具有新性质的化学产品的过程工业。其包括以化石能源等基础原材料为加工对象的延伸化工、煤化工、盐化工、生物化工及精细化工等领域。在对原料进行大规模加工的过程中，可概括为三个组成部分：①原料的预处理；②进行化学反应；③反应产物的分离与提纯。原料的预处理和产物的分离这两步是化学反应的要求和结果。显然，化学反应过程是化工生产过程的核心，它是化学反应工程学研究的主要内容。本章将主要介绍化学反应工程学科的发展过程、研究内容、研究方法和基本概念，以使读者对本课程的概貌有所了解。

1.1 化学反应工程的发展、研究内容与方法

1.1.1 化学反应工程的发展

从开始认识火和利用火，有了第一个化学发现以来，人类与化学便建立起了紧密的联系，不断利用化学知识来认识自然和改造自然，并应用化学反应来造福人类。例如，陶器的制作、金属的冶炼、炼丹、火药的使用和造纸等。17 世纪前的古代化学时期，人类的化学知识来自于生产和生活实践，这时的化学具有实用和经验的特点。人类积累的化学知识是经验性的和零散的，没有形成完整的理论体系，更没有将其与工程问题结合起来加以认识。

直到第二次世界大战前，化工生产中的单元操作理论有了长足的进展，主要致力于对动量、热量及质量传递过程中具有共性的基本操作过程——单元操作的研究。人们对化学反应过程提出了氧化、氯化、磺化、硝化等单元操作过程。这种分类实质上是从化学的角度来认识化学反应过程的。但一个真实的化学反应过程，总是既包括化学过程，也包括物理过程。要完整地反映真实情况，必须把化学过程与物理过程结合起来加以研究。1937 年，德国科学家达姆科勒 (Damköhler) 在“Der Chemie Ingenieur”第三卷中谈到了扩散、流动与传递对化学反应收率的影响问题，该书成为化学反应工程的先导。1947 年，前苏联学者弗兰克-卡明涅斯基在所著的《化学动力学中的扩散和传热》一书中就流动、扩散和热现象对化学反应的影响作了重要的论述。同年，霍根 (Hougen) 与华森 (Watson) 将化学反应工程有关内容作为专门章节编入高等院校教科书中，引起了化工界的广泛重视，为化学反应工程学科的建立奠定了理论基础。20 世纪 50 年代后，原子能工业与石油化工的发展提出了生产规模大型化的要求，化学反应过程的开发与反应器放大设计成为石油化工发展的关键。正是

在工业发展的推动下，化学工程师们开始对工业反应器中反应动力学特性和流体传递特性同时起作用时的反应机制进行深入研究。1957年，在荷兰阿姆斯特丹举行的第一次欧洲反应工程会议上确认了“化学反应工程”这一学科名称，标志着化学反应工程成为化学工程的一个重要分支学科。会上提出的返混与停留时间分布、反应体系相内和相间的传质传热、反应器的稳定性、微观混合效应等观点标志着化学反应工程已形成了较为完整的学科体系。

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，全面地、系统地论述反应工程学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的研究领域，使化学反应工程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。

1.1.2 化学反应工程的研究内容和研究方法

化学反应工程作为化工类本科教育的一门专业课程，是研究如何在工业规模上实现有经济价值的化学反应的一门应用技术科学，其主要内容包括：反应动力学，反应过程中的传质与传热，各类反应器的放大、设计、优化与控制等。

反应动力学是反应工程学的基础理论之一，主要研究化学反应过程的反应速率及其影响因素。反应过程动力学主要包括两个方面的内容，即本征动力学和宏观动力学。把定量表达化学反应速率与反应温度、浓度之间关系的数学式称为化学反应动力学方程式或反应速率方程式。描述化学反应本身规律的动力学方程式称为本征动力学方程式，而考虑了物理传递因素影响的动力学方程式则称为宏观动力学方程式或总反应速率方程式。不同反应体系的本征动力学关系式是不同的。到现在为止，还不能准确预测任意化学反应的本征反应速率。尽管如此，根据对化学动力学的研究所积累的知识，化学工程师已经可以有把握地利用可靠的经验数据结合经验数学关系式，以求得特定化学反应速率的本征反应速率方程式。然而，对于化学工程师来说，更有实际意义的是能用于反应器设计的宏观动力学方程式。由于宏观动力学方程中考虑了传递过程的影响，其研究方法与化学动力学也有所区别，一般称为化工动力学或工程动力学。

工业反应设备中总是同时存在物理与化学两种过程。虽然化学反应的程度与反应结果本质上由反应动力学规律所支配，但是在工业反应器中由于物理传递过程的影响，使化学反应在不同的动力学条件下进行可能会产生较大的差异，因而反应过程还受到传递规律的制约。

工程动力学与化学动力学在研究方法上的另一个重要区别在于工程动力学首要考虑的是实用性，因而更多地依靠经验与实验数据。对于工程动力学的研究是反应工程的一项重要内容。化学反应是在特定的工业反应器中进行的，反应的进行除了受到动力学因素影响外，还与反应器中热量与质量的传递有关；传递过程则受到反应器规模、结构、几何形状等因素的影响。研究不同类型的反应器中传递过程规律是反应工程的另一项重要内容。

反应工程所要解决的实际问题包括反应技术开发、反应器设计与反应过程操作解析。这三方面的工作也是反应工程的重要研究内容。

化学工程中传统的研究方法是以相似论和量纲分析法为基础的经验归纳法，这种研究问题的方法已经不能满足现代工程研究的需要，因此近年来模型化的研究方法得到了广泛应用。

工业化学过程是一个既包括化学反应过程又包括物理传递过程，且二者相互影响的复杂过程。对于这种多变量的复杂系统，只有采用模型化方法才能有效地解决问题。化学反应工程中使用得最多的是物理-数学模型法，即首先根据系统本身特点和变化规律归纳出能反映系统中各物理量之间相互联系的物理模型，对物理模型进行适当简化并进行定量的数学描述，进而利用数学模型预测过程发展趋势的一种模型化方法。

1.2 化学反应器的工程分类

反应器是化工生产过程的核心设备，被誉为化工厂的“心脏”。工业生产上使用的反应器类型多种多样，分类方法也有多种。可以按反应器的形状分类，也可以按操作方式分类，可以按反应器传热方式分，也可按其反应物相态分类。

1.2.1 反应装置的类型

在工业上涉及化学反应过程的门类繁多，每一产品都有各自的反应过程及其反应设备。反应装置的结构型式大致可分为管式、塔式、釜式、固定床、移动床和流化床等各种类型，每一类型之中又有不同的具体结构。表 1-1 和图 1-1 中列举了一般反应器的类型与特点，以及它们的优缺点和若干应用实例。选择并确定工业反应器的类型和操作方式，一方面要掌握工业反应过程的基本特征及其反应要求，充分应用反应工程的原理作为选择的依据，对该过程作出合理的反应器类型选择；另一方面，要熟悉和掌握各种反应器的类型及其基本特征，如它的基本流型、反应器内的混合状态、传热和传质的特征等基本传递特性。

表 1-1 反应器的类型与特点

反应器类型	示意图 (图 1-1)	反应物相态	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	
塔式反应器	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,醋酸乙烯溶液聚合等
	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,二甲苯氧化等
	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
	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) (i)	气-固(催化或非催化)相,液-固(催化剂)相	可连续操作,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;底物利用率高和固定化生物催化剂不易磨损	甲醇氧化制甲醛,合成氨,乙烯法制醋酸乙烯,细胞培养、酶的催化反应等	

反应器类型	示意图 (图 1-1)	反应物相态	特 点	举 例
流化床反应器	(j)	气-固(催化或非催化)相, 气-液-固(催化剂)相	固体返混小, 固气比可变性大, 粒子传送较易, 床内温差大, 调节困难; 催化剂带出少, 分离易, 气-液分布要求均匀, 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, 丁炔二醇加氢等
移动床反应器	(k)	气-固(催化或非催化)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
浆态床反应器	(m)	气-液-固	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
撞击流反应器	(n)	液-液(固)相	可强化传质、传热, 微观混合效果好	液-液相反应
气升式生化反应器	(o)	气-液相	可强化传质、传热和混合	细胞培养、酶的催化反应
液体喷射循环型生化反应器	(p)	气-液相	气-液间接触面积大, 混合均匀, 传质、传热效果好	细胞培养、酶的催化反应
膜反应器	(q)	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

