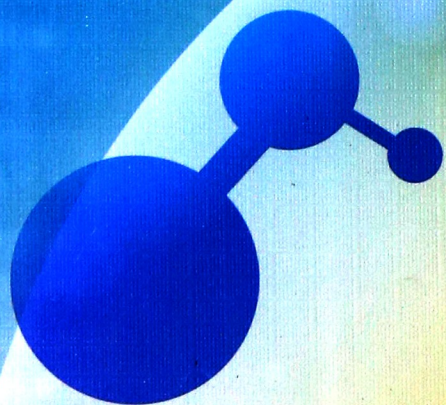




“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

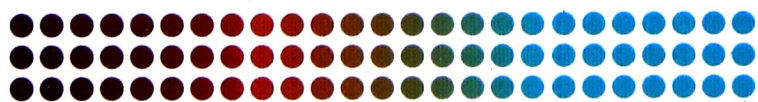
高职高专教材

中国石油和化学工业优秀出版物奖（教材类）一等奖



HUAGONG
FANYING
YUANLI
JICHU
SHEBEI

化工反应原理与设备



第二版

○ 杨西萍 李倩 主编



化学工业出版社



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

高职高专教材

中国石油和化学工业优秀出版物奖（教材奖）一等奖

化工反应原理与设备

（第二版）

杨西萍 李 倩 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书是根据石油化工示范性专业建设中的课程建设要求编写的,旨在体现基于工作过程的课程体系,以加强工学结合,提高学生反应器的操作技能。在各反应器模块中强化了反应器的实际操作和仿真操作的内容。

全书共分为七个模块。介绍了化学反应器的基础知识,釜式反应器、管式反应器、固定床反应器、流化床反应器、气液相反应器的特点、结构、工业应用、设计选型以及日常运行和操作,对其他反应器也做了简要介绍。各模块后均附有知识点归纳和自测练习。

本书可作为高等职业院校石油化工类及其辐射专业(应用化工生产技术、无机化工生产技术、精细化工生产技术、煤化工生产技术等专业)的教材使用。也可为生产一线的技术工人及化工反应总控工提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工反应原理与设备/杨西萍,李倩主编.—2版.—北京:
化学工业出版社,2015.8

“十二五”职业教育国家规划教材.中国石油和化学
工业优秀出版物奖(教材奖)一等奖

ISBN 978-7-122-24417-8

I. ①化… II. ①杨…②李… III. ①化学反应工程-高等
职业教育-教材②化学反应工程-化工设备-高等职业教育-教材
IV. ①TQ03②TQ052

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 138938 号

责任编辑: 窦 臻

文字编辑: 丁建华

责任校对: 边 涛

装帧设计: 刘剑宁

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: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 16½ 字数 402 千字 2015 年 9 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: 33.00 元

版权所有 违者必究

第二版前言

《化工反应原理与设备》(第一版)是国家示范性高职院校建设规划教材。是根据化工、石油化工生产所需的高技能人才培养方案教学计划的要求而编写。书中主要介绍了化工生产过程中常用的各类反应器特点、结构、工业应用、设计选型以及反应器的日常运行和操作。该教材自2009年7月出版后,经过各中高职院校的使用后,获得好评,荣获第十届中国石油和化学工业优秀出版物奖(教材奖)一等奖。本教材第二版被教育部评定为“十二五”职业教育国家规划教材。

一本教材最大的读者是学生,教材的编写,要从学生的角度出发,用心体验学生对问题的理解能力,以学生为本。因此,根据该教材出版后的使用过程中出现的问题及各院校提出的要求,同时为了更好地体现职业教育特色,符合工学结合人才培养要求,同时突出产教结合的开发要求,我们在第一版的基础上,对该教材进行修订。修订的主要内容如下。

1. 新增加了石油化工生产过程中最新的反应器作为教学案例。通过对实际生产案例的阐述,使学生更好地掌握主要反应器的基本理论和简单工艺计算方法,以及设备操作与维护的基本技能,并学会分析和排除主要生产故障,使学生能够初步地了解工作过程的特点,为今后从事操作工作打下较为扎实的基础。

2. 进行部分整合,基本概念力求清晰,突出课程的重点和难点,增加部分习题及例题,便于学生学习。如:原教材模块一基础知识中,介绍了化工反应过程中所用到的所有的动力学基本知识,在教学中发现,由于内容太多,又比较抽象,学生理解起来非常难,导致学生丧失了学习兴趣。因此,在这次修订中,模块一中只介绍基本的动力学方程,使学生对动力学有简单的概念,其他的动力学内容放在与之对应的反应器模块中介绍。这样循序渐进,既可以提高学生的兴趣,又不至于使学生知难而退。

3. 本书的最后增加了附录,在附录中给出了本教材中用到的基本的高等数学公式,以便学生在学习时查阅。这主要是为了尽量消除学生在学习过程中由于数学能力的问题,导致对该课程的理解及计算中遇到的困难。

此次修订,主要由兰州石化职业技术学院的杨西萍和李倩完成,其中模块一、模块二、模块六和模块七由杨西萍修订;模块三、模块四、模块五由李倩修订;各反应器模块中的项目四技能训练由兰州石化乙烯厂谈存伟高工进行修订把关。在此次修订过程中,兰州石化职业技术学院的何小荣、魏刚、展宗瑞等老师也提供了大量的帮助。同时在修订过程中还得到了化学工业出版社、东方仿真公司及编者所在地石化企业的大力支持。在此一并表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限,教材中难免会出现很多问题。恳请广大师生和读者批评指正,并深表感谢。

编 者
2015年5月

第一版前言

随着我国高等职业教育的迅速发展,教育部、财政部制定了《关于实施国家示范性高等职业院校建设计划,加快高等职业教育改革与发展的意见》,同时确定了“国家示范性高等职业院校建设”方案。兰州石油化工职业技术学院石油化工专业入选了全国第一批高职高专示范性专业建设。根据高职高专示范性专业建设的要求,由专业教师和企业技术专家共同研究提出了石油化工生产技术专业高技能人才培养方案,按照石油化工生产流程,重构了课程体系,制订出了基于石油化工生产过程为主导的高技能人才培养专业教学计划。根据专业教学计划,在新的课程体系建设中,提出了按照石油化工流程设置能力课程体系框架的设想,并按照化工职业标准能力的构成,进行了专业课程体系设置。化工反应原理与设备这门课程就是在此基础上将原化学反应工程、化工设备基础等课程的核心知识点进行重组整合,构建更加符合化工反应工艺操作技能和相关设备维护技能训练要求的一门实用型课程。

根据石油化工生产高技能人才培养专业教学计划的要求,在本书中,我们把化工生产过程中所用到的反应器的内容进行整合。首先介绍反应器计算过程中的理论知识,以“简单、够用”为原则,对基本概念的阐述较为详细,简化繁杂的数学运算;然后以反应器的结构为主线,分别介绍各类反应器的基本结构、特点、工业应用、简单工艺计算及设备维护等内容。为了突出实践技能的培养,在各反应器模块的介绍中,增加了反应器的日常运行操作特点、反应器的仿真实训和反应器的实际操作等内容。进一步体现了工学结合的教学特点。同时,在每个模块前设有学习目标要求,模块后设有本模块知识点归纳和自测练习,以使學生能够更好地理解各模块的知识点,掌握各模块的基本内容。由于各院校的专业不同,教学目标和教学课时不同、毕业生的去向不同,各院校可根据自己的实际情况对教材的内容进行取舍。为方便教学,本书配有电子课件,使用本教材的学校可以与化学工业出版社联系(cipedu@163.com),免费索取。

本书由兰州石油化工职业技术学院的杨西萍主编,辽宁石油化工职业技术学院的周波主审。其中模块一、模块二、模块六由杨西萍编写;模块三和模块七由天津渤海职业技术学院的孙玉春编写;模块四由辽宁石油化工职业技术学院的雷振友编写;模块五由南京化工职业技术学院的刘健编写。兰州石油化工职业技术学院的何小荣、魏刚、袁科道等对本书的编写提供了大量的帮助。同时在编写过程中还得到了化学工业出版社、东方仿真公司及各编者所在学院的大力支持。在此一并表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限,教材中难免会出现一些问题。希望使用本书的院校及广大读者给予批评指正。

编者
2009年4月

目 录

绪论	1
模块一 基础知识	3
项目一 化学反应器的类型	3
一、化学反应的类型	3
二、反应器的操作方式	4
三、反应器的类型	5
项目二 反应器设计的基本方程	7
一、物料衡算式	7
二、热量衡算式	7
三、动力学方程式	8
四、反应器计算中常用的几个物理量	11
项目三 流体流动	15
一、流体流动的描述	16
二、反应器内流体的理想流动模型	19
三、反应器内流体的非理想流动模型	21
知识点归纳	23
自测练习	24
主要符号	26
模块二 釜式反应器	27
项目一 釜式反应器的结构	27
一、釜式反应器的基本结构	27
二、釜式反应器的搅拌装置	28
三、釜式反应器的传热装置	30
四、釜式反应器的传动装置及密封装置	32
项目二 理想间歇操作釜式反应器的计算	33
一、基本方程	33
二、反应时间的计算	34
三、反应体积的计算	36
项目三 理想连续操作釜式反应器的计算	37
一、基本方程	38
二、单一连续操作釜式反应器	38
三、多个理想连续釜式反应器的串联 (n -CSTR)	40

四、连续操作釜式反应器的热稳定性	44
项目四 釜式反应器的技能训练	46
一、釜式反应器的生产案例	46
二、釜式反应器的实训操作	48
三、釜式反应器的仿真操作	51
分析与思考	55
知识点归纳	56
自测练习	57
主要符号	59
模块三 管式反应器	61
项目一 管式反应器的结构及传热方式	61
一、管式反应器的结构	61
二、管式反应器的传热方式	62
项目二 管式反应器的计算	63
一、基础计算方程式	63
二、等温管式反应器的计算	64
三、变温管式反应器的计算	67
项目三 反应器的选型及优化	69
一、反应器生产能力的比较	70
二、复杂反应选择性的比较	72
项目四 管式反应器的技能训练	76
一、管式反应器的生产案例	76
二、管式反应器的实训操作	80
三、管式反应器的仿真操作	84
分析与思考	92
知识点归纳	92
自测练习	93
主要符号	96
模块四 固定床反应器	97
项目一 固定床反应器的结构	97
一、绝热式固定床反应器	97
二、列管式固定床反应器	99
三、自热式固定床反应器	100
四、径向固定床催化反应器	100
项目二 固定床反应器的工作原理	101
一、固体催化剂的基本特性	101
二、催化剂床层特性	108
三、流体在固定床中的流动特性	111
四、固定床反应器中的传质与传热	113
项目三 固定床反应器的计算	116

一、经验法	116
二、数学模型法	119
三、固定床反应器参数敏感性	136
项目四 固定床反应器的技能训练	138
一、固定床反应器的生产案例	138
二、固定床反应器的实训操作	142
三、固定床反应器的仿真操作	147
分析与思考	152
知识点归纳	152
自测练习	155
主要符号	157
模块五 流化床反应器	159
项目一 流化床反应器的结构	159
一、流化床反应器的基本结构	160
二、气体分布板	163
三、旋风分离器	165
四、内过滤器	166
项目二 流化床反应器的工作原理	166
一、流态化现象	166
二、流化床反应器中的传质	174
三、流化床反应器中的传热	176
项目三 流化床反应器的计算	180
一、流化床反应器结构尺寸的计算	180
二、流化床反应器内部构件的计算	183
三、流化床反应器的数学模型	189
项目四 流化床反应器的技能训练	190
一、流化床反应器的生产案例	190
二、流化床反应器的实训操作	194
三、流化床反应器的仿真操作	195
分析与思考	200
知识点归纳	200
自测练习	201
主要符号	203
模块六 气液相反应器	205
项目一 气液相反应器的结构	205
一、鼓泡塔反应器	205
二、鼓泡管反应器	207
三、搅拌釜式反应器	207
四、膜式反应器	208
项目二 鼓泡塔反应器的生产原理	210

一、鼓泡塔反应器中的流体流动	210
二、鼓泡塔反应器中的传质	213
三、鼓泡塔反应器中的传热	214
项目三 鼓泡塔反应器的计算	215
一、经验法	215
二、数学模型法	217
项目四 气液相反应器的技能训练	222
一、气液相反应器的生产案例	222
二、气液相反应器的实训操作	224
三、气液相反应器的仿真操作	228
分析与思考	234
知识点归纳	234
自测练习	236
主要符号	237
模块七 其他反应器简介	238
项目一 气液固三相反应器	238
一、气液固三相反应器的类型	238
二、滴流床三相反应器	240
三、淤浆鼓泡反应器	241
项目二 生化反应器	242
一、生化反应器的类型	242
二、机械搅拌式反应器	243
三、气升式反应器	243
四、其他型式的生化反应器	243
项目三 电化学反应器	244
一、电化学反应器的特点及分类	244
二、常用结构的电化学反应器	246
项目四 聚合反应器	247
一、聚合反应器的类型	247
二、常用聚合反应器	247
三、特殊型式聚合反应器	248
知识点归纳	248
自测练习	249
附录 高等数学常用微积分公式	250
参考文献	251

绪 论

化学工业产品种类繁多，生产工艺千差万别。但化工产品的生产工艺过程一般可以概括为以下三部分：原料的预处理、化学反应过程以及反应产物的分离与提纯过程。其中原料的预处理和反应产物的分离与提纯过程主要是物理过程，属于分离过程所研究的问题。而化学反应过程是整个化工产品生产的核心部分，实现化学反应过程的设备是反应器。而化工反应原理与设备这门课的主要目的就是研究如何选择一个合适的工业反应器来高效完成产品生产的化学反应过程。简单地说就是选择一个适宜的反应器结构型式、操作方式和工艺条件，使得在该反应器内进行化学反应过程时能够得到最大的经济效益。

在工业反应器中完成产品的生产过程包括两方面：化学反应和反应器。化学反应是反应过程的主体，反应本身的特性即反应动力学方程是代表反应过程的本质因素，而反应器是实现这种反应的客观环境。在工业反应器内进行的化学反应过程既有物理过程又有化学过程。物理过程和化学过程相互渗透、相互影响，导致化学反应特性和反应结果不同，使反应过程复杂化。反应器中对反应结果产生影响的主要物理过程是流体流动过程和传质传热过程。物理过程虽然不能改变化学反应的动力学规律，但是它可以改变反应器内操作条件如温度和浓度的变化规律，最终导致反应效果发生变化，影响反应结果。因此，不仅要研究化学反应的原理、动力学方程式，还要研究如何在工业上实现这些反应过程。即反应的工程问题。

化工反应原理与设备主要包括以下几方面的内容。

化学反应动力学特性 化学反应动力学是指反应过程中，操作条件如反应的温度、反应物的浓度、反应压力、催化剂等对反应速率的影响规律。这些规律一般是在实验室内，通过对小型反应器内的化学反应进行研究得到的，它不包括传递过程的影响。通常得到的是用简单的物理量所描述的影响反应速率的动力学方程式。它是对反应器进行设计、计算和分析的基础。

物理过程对反应的影响 工业反应器内的物理过程主要是指流体流动、传质和传热过程。这些过程会影响到反应器内的浓度和温度在时间和空间上的分布，使得反应的结果最终发生变化。因此，只有对这些物理过程进行分析，找出它们对反应过程的影响规律，定量描述，才能准确分析反应过程，对反应器进行设计和放大。

反应器的设计和优化 将反应动力学特性和反应过程中的传递特性结合起来，建立数学模型，利用计算机对化学反应过程进行分析、设计，并对反应进行最优生产条件的选择以及控制。

反应器的操作 反应器的计算包括设计计算和校核计算。而反应器的校核计算在化工生产装置中是必不可少的。校核计算和生产过程中反应器的操作有很大的关系。因此如何进行各类不同反应器的操作也是化工反应原理与设备的重要内容。

而上述这些内容的研究，并不是独立的，它需要和其他学科紧密联系。化工反应原理与设备和其他学科如物理化学、化学工艺、化学热力学、传递工程等课程存在着一定的关系。

在化学热力学中，主要分析反应的可能性、反应条件和可能达到的反应程度等，如计算反应的平衡常数和平衡转化率。而在化工反应原理与设备中，则需要对这些在热力学上具有一定的反应能动性的化学反应通过反应动力学研究，选择适宜的操作条件及反应器结构型式、确定反应器尺寸等来完成该反应，使其达到较好的反应效果。例如合成氨反应，该反应在热力学上有很大的能动性，化学平衡常数较大，但反应速率却很慢，如何实现工业化呢？通过动力学的研究，在体系中加入催化剂后，反应速率得到大幅提高。并且在工业上选择了自热式固定床反应器，确定了合适的工艺条件，使其达到很好的反应效果。在传递工程中主要是讨论反应过程中的动量传递、热量传递和质量传递过程的基本规律。这些规律在化工反应原理与设备中直接影响到工业反应器内的流体流动与混合、温度与浓度的分布，使得反应效果发生改变。因此，化工反应原理与设备的研究和其他学科的研究是密不可分的。需要吸取其他学科的知识来不断地充实和完善自己，同时也为其他学科服务。它们是相互依存、相互促进的。

化工反应原理与设备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学科。是通过对反应过程本身及所用设备的研究开发来达到有效地大规模生产化工产品的目的。既以化学反应作为对象，掌握这些化学反应的特性；同时又以工程问题为对象，熟悉装置的特性，并把这两者结合起来形成学科体系。它的基本研究方法是数学模型法。数学模型法的核心就是数学模型的建立。它是通过对客观实体人为地作出某些假设，设想一个简化的物理模型，并用数学的方法对其进行描述，通过修正各物理参数，对该过程进行数学运算，并用模型方程解讨论反应特性规律。

数学模型法的基本过程是：首先进行实验室规模的实验，主要进行催化剂的开发和反应动力学的研究，着重研究核心反应规律；同时进行小试，仍在实验室进行，只是采用与工业规模相类似的金属装置作实验，主要研究物理过程对化学反应的影响；在此基础上，进行大型冷模实验，摸索传递过程规律，研究传递过程对化学反应过程的影响；然后即可进行中间试验，简称中试。中试时所用的设备不仅仅是规模上的扩大，而且和生产车间的工艺流程及反应器的型式十分接近。此时主要是对数学模型的检验与修正，寻找优化条件。在这些过程中，需要利用计算机或其他手段对各步试验结果进行综合分析，预测大型反应器性能。

化工反应原理与设备这门课的主要任务就是如何设计一个合适的工业反应器，使其能够高效完成化工产品生产的化学反应过程，并且分析该工业反应器的操作性能。而反应器设计一般包含三项内容：反应器选型、反应器结构设计和结构参数的确定、反应器工艺参数的确定以及反应器的优化操作。本教材在内容编排上，把各类反应器设计计算时所需要的基本理论知识进行整合，在模块一内讲解。然后分门别类，在不同的模块内分别介绍不同类型反应器的结构、计算、性能、选择和操作。

模块一 基础知识



目标要求

- 掌握反应过程中的基本概念和常用物理量的计算。
- 理解动力学基本概念、常见动力学方程的表示方法和工程应用。
- 能分析反应活化能和反应温度间的关系，具备控制反应温度的技能。
- 掌握反应器内理想流动和非理想流动的特征。

化工反应原理与设备主要包括两部分内容：反应过程及反应过程所使用的反应器。由于在化工生产过程中会发生各种类型反应，导致为完成反应所使用的反应设备也不同。因此化工反应原理与设备的主要任务就是如何选择合适的反应器使反应过程所能达到的效率为最大。为完成这个任务，首先就要了解化学反应过程效率最大的判断指标。这个指标主要是指反应速率，即通过反应的动力学来进行判定。因此，反应的动力学方程是化工生产过程中最大化生产的一个重要指标。

项目一 化学反应器的类型

化工生产过程中用来进行化学反应的设备称为反应器。不同的化学反应由于具有不同的反应性质，所需要的反应器的型式也不同。因此，化学反应的类型对反应器的选择有一定的影响。

一、化学反应的类型

由于化工生产过程中发生的化学反应种类繁多，为了研究化工反应系统原理及设备的共同规律，有必要将化学反应进行分类。分类方法很多，可根据不同的要求进行分类。常见的有以下几种。

（一）反应特性分类

在化工生产过程中反应的特性有很多方面，主要是指反应机理、反应的可逆性、反应分子数、反应级数等。

按反应机理可把反应分为：简单反应（只发生一个化学反应）、复杂反应（不只发生一个反应，如平行反应、连串反应、自催化反应）。

按反应级数可把反应分为：零级反应、一级反应、二级反应、分数级反应等。不同级数的反应，反应浓度对反应速率的贡献不同。

按反应分子数可把反应分为：单分子反应、双分子反应、三分子反应等。

按反应的可逆性可把反应分为：可逆反应、不可逆反应。

按反应的热效应可把反应分为：吸热反应、放热反应。

(二) 反应系统中相的类别与数目

根据反应过程中所涉及的物料的相态可把反应分为均相反应和非均相反应。

均相反应：指反应过程中只存在一个相态。如气相反应、液相反应、固相反应。

非均相反应：反应过程中不只存在一个相态。如气-液相反应、液-固相反应、气-液-固三相反应、气-固相反应。

需要注意的是：在反应过程中，催化剂的相态若和反应物料的相态一致则为均相反应，若不一致则为非均相反应。

(三) 反应过程进行的条件

反应过程进行的条件包括操作温度、操作压力和操作方式等各个方面。某些典型的分类方法如下：

操作温度：等温反应、变温反应。

操作压力：常压反应、加压反应、减压反应。

操作方式：间歇式、连续式、半连续式。

换热方式：自热式、对外换热式、绝热式。

以上只是根据化学反应过程的某一方面的特征来分类的。事实上，工业反应过程是综合了几个方面的结果。

二、反应器的操作方式

工业反应器在生产过程中有三种操作方式：间歇操作、连续操作、半连续操作。

(一) 间歇操作

间歇操作是指在反应过程中将进行反应所需的原料一次性装入反应器内，然后在其中进行化学反应，经一定时间后，达到所要求的反应程度时卸出全部物料，其中主要是反应产物以及少量未被转化的原料。接着是清洗反应器，继而进行下一批原料的装入、反应和卸料。因此，间歇反应器又称为分批反应器。

间歇反应过程是一个非定态过程，反应器内物系的组成随时间而变，这是间歇过程的基本特征。间歇反应器在反应过程中既没有物料的输入，也没有物料的输输出，即不存在物料的流动，整个反应过程都是在恒容下进行的。反应物系若为气体，则必充满整个反应器空间；若为液体，虽不充满整个反应器空间，但由于压力的变化而引起液体体积的改变通常可以忽略，因此按恒容处理也足够准确。

采用间歇操作的反应器几乎都是釜式反应器，其余类型则工业上极为罕见。间歇反应器主要适用于反应速率较慢的化学反应，对于产量小的化学品生产过程也很适用。尤其是那些批量少而产品的品种又多的企业尤为适宜。例如医药洗涤剂等精细化工产品生产往往就属于这类情况。

(二) 连续操作

连续操作是指在反应过程中连续地将进行反应所需的原料通入反应器，反应产物也连续地从反应器流出。采用连续操作的反应器叫做连续反应器或流动反应器。一般情况下，各种结构类型的反应器都可采用连续操作。对于工业生产中某些类型的反应器，连续操作是唯一可采用的操作方式。

连续操作的反应器多属于定常态操作过程，即反应器内任何部位的物系参数，如浓度及反应温度等均不随时间而改变，只随位置而变。大规模工业生产的反应器绝大部分

都是采用连续操作，因为它具有产品质量稳定，劳动生产率高，便于实现机械化和自动化等优点。这些都是间歇操作无法与之相比的。然而连续操作系统一旦建立，想要改变产品品种是十分困难的，有时甚至要较大幅度地改变产品产量也不易办到，但间歇操作系统则较为灵活。

（三）半连续（半间歇）操作

原料与产物只要其中的一种为连续输入或输出而其余则为分批加入或卸出的操作，均属半连续操作，相应的反应器称为半连续反应器或半间歇反应器。由此可见，半连续操作具有连续操作和间歇操作的某些特征：有连续流动的物料，这点与连续操作相似；也有分批加入或卸出的物料，因而生产是间歇的，这反映了间歇操作的特点。由于这些原因，半连续反应器的反应物系组成必然既随时间而改变，也随反应器内的位置而改变。管式、釜式、塔式以及固定床反应器都可采用半连续操作方式。

三、反应器的类型

化学反应器是用于化学反应的设备。是生产过程中关键性的设备。通常，化学反应需要适宜的反应操作条件，例如温度、压力（对气相反应）、原料组成等。操作条件不同，会导致反应效果不同。尤其是温度的变化更是对反应过程有不可控制的影响。由于任何化学反应过程均是伴随着热效应，欲维持合适的反应温度，必须采取有效的换热措施。为了提高反应速率，缩短反应时间，增加反应设备生产能力，常需要选择活性高的催化剂，同时提高扩散速率，改善流体流动状况等。因此，只有综合考虑化学反应动力学、流体流动、传热、传质等因素的影响，才能做得正确选择、合理设计、有效放大反应器和实现反应器的最佳控制。为了选择合适的反应器，下面介绍几种常用反应器的类型。

（一）釜式反应器

又叫槽式反应器。该反应器高度和直径之比大约 1~2.5。反应器内装有搅拌器，热效应不大时是在反应器外装夹套进行换热。也可根据不同的情况在反应器内装换热装置或在反应器外进行强制换热。釜式反应器的操作条件比较缓和，操作方式即可采用连续式，也可采用间歇式。一般情况该类反应器适用于液相均相反应。也可用于多相反应如气液反应、液固反应等。例如：聚合反应、酯化反应、硝化反应等。

（二）管式反应器

管式反应器的结构，一般管长与管径之比大于 100。通常管内不设任何内部构件。适用于热效应比较大的均相反应。也可用于高压反应。烃类裂解生产乙烯即是典型的应用管式反应器的反应。高压聚乙烯反应也属此类。

（三）固定床反应器

固定床反应器是指反应器内装有固定不动的固体颗粒的反应器。反应时，流体通过这些颗粒所形成的床层进行反应，固体颗粒可参加反应也可不参加反应。根据反应过程中是否和外界进行热交换又可分为绝热式固定床和换热式固定床。根据换热方式的不同换热式固定床又分为自热式和外热式。该反应器适用于气固相催化和非催化反应。工业上许多反应都是应用该类反应器。例如：乙苯脱氢生产苯乙烯、乙烯氧化生产环氧乙烷等。

（四）流化床反应器

流化床反应器是利用固体流态化技术进行气固相反应的装置。将大量的固体颗粒悬浮于

运动的流体从而使颗粒具有类似流体的某些宏观表现特性。与固定床不同的是反应器内固体颗粒处于运动状态，根据运动方式不同，可分为循环流化床（即固体颗粒被流体带出，经分离后固体颗粒循环使用）和沸腾床反应器。沸腾床反应器是指固体在反应器内运动，流体与固体所构成的床层犹如沸腾的液体。流化床反应器主要用于固体的物理加工、颗粒输送、催化和非催化化学反应。例如丙烯氨氧化生产丙烯腈、丁烯氧化脱氢生产丁二烯、催化裂化反应装置等。

（五）鼓泡塔反应器

鼓泡塔反应器是指气体以鼓泡形式通过催化剂液层进行反应，反应器内不设任何内部构件。反应器的高度一般是直径的数倍。这类反应器若设有增加两相接触的内部构件还有板式塔、填料塔。若液体呈雾滴状分散于气体中（即喷雾塔）也属于该类反应器。一般情况下，这类反应器主要适用于气液相反应器。

以上是几种典型的反应器。实际生产中所用的反应器还有很多，不可能一一列举。反应器的型式各种各样，不同型式的反应器具有不同的流体流动特征和传质传热的方式。因此反应器的类型不同，对动力学方程的影响也不同。这样，就导致即使同样的反应过程在不同的反应器中进行，反应效果也是不同的。

表 1-1 反应器的分类

分 类 方 法	类 型		本 质
相 态	均相——气相、液相		动力学特性
	非均相——气固、气液、液固等		
结构型式	管式		流体流动和传递特性
	釜式		
	塔式		
操作方式	连续操作		是否稳态
	间歇操作		
	半连续(半间歇)操作		
温度和传热方式	温度	等温	热量衡算
		非等温	
	传热方式	绝热式	
		自热式	
		换热式	

反应器的分类方法有很多种，不同的分类方法所针对的目标也不同。常见的反应器分类见表 1-1。同一个反应器在不同的分类中处于不同的类型。如乙苯脱氢生产苯乙烯的反应器：按相态分，它属于非均相气固相反应器，催化剂是固相的，反应物料是气相的；按反应器的结构型式分，它属于固定床反应器，反应器的高径比大约为 10：1；按操作方式分，它属于连续式反应器，反应过程属于稳态操作；按传热方式分，该反应器是两段式绝热反应器，反应过程中与外界没有热交换，反应过程所吸收的热量靠通入的稀释剂水蒸气来提供；按温度分，它属于变温反应器。

项目二 反应器设计的基本方程

反应器的工艺设计应包括两方面的内容。一是反应器的设计计算,即根据生产任务计算完成该任务所需要的反应器的结构尺寸;二是反应器的校核计算,即根据已知的反应器尺寸计算该反应器能否完成一定质量要求下的生产任务。设计计算主要包括选择合适的反应类型、确定最佳的工艺条件、计算所需反应器的体积;校核计算主要是用来对运行一定时间后的反应器进行标定。

反应器计算的基本方程包括:描述浓度变化的物料衡算式;描述温度变化的热量衡算式;描述压力变化的动量衡算式;描述反应速率变化的动力学方程式。

一、物料衡算式

(一) 基本方程

物料衡算式是在所选的衡算范围内,根据质量守恒定律对系统内某一关键组分进行衡算。是计算反应器体积的基本方程。它给出反应物浓度或转化率随反应器位置或反应时间变化的函数关系。对任何型式的反应器,关键组分既可以是反应组分也可以是产物。而衡算范围的选择原则是把反应速率视为定值的最大空间范围。若不知其传递特性,则可认为在反应器的微元体积内参数是均一的,即在微元时间内取微元体积建立衡算式:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{微元时间内} \\ \text{进入微元体积} \\ \text{关键组分量} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{微元时间内} \\ \text{离开微元体积} \\ \text{关键组分量} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{微元时间微元} \\ \text{体积内变化的} \\ \text{关键组分量} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{微元时间微} \\ \text{元体积内} \\ \text{关键组分的累积量} \end{array} \right\} \quad (1-1)$$

(二) 注意事项

式(1-1)是物料衡算式的普遍式,对任何系统都适用,但不同情况下可作相应简化。对于间歇反应器,由于是分批加料、卸料,在反应过程中无加料卸料,因此微元时间内进入和离开微元体积的关键组分为零;而对于连续操作反应器则微元时间内在微元体积内关键组分量的累计量为零。若关键组分是反应物,则微元时间微元体积内变化的关键组分量前应为“-”。若关键组分是生成物,则微元时间微元体积内变化的关键组分量前应为“+”。只有对不稳定过程中的半连续半间歇操作的反应器才需要同时考虑上述四项。

二、热量衡算式

(一) 基本方程

热量衡算式是在所选的衡算范围内,根据能量守恒与转换定律对系统内整个反应混合物进行衡算。它给出了温度随反应器位置或反应时间变化的函数关系,反映换热条件对过程的影响。计算时应注意在同一衡算式中各热量计算项取同一个基准温度。微元时间对微元体积所作的热量衡算如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{微元时间内进入} \\ \text{微元体积的物料} \\ \text{带入的热量} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{微元时间内离开} \\ \text{微元体积的物料} \\ \text{带出的热量} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{微元时间微元} \\ \text{体积内反应过程} \\ \text{的热效应} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{微元时间微元} \\ \text{体积内和外界} \\ \text{的热交换量} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{微元时间微元} \\ \text{体积内热量的} \\ \text{累积量} \end{array} \right\} \quad (1-2)$$

(二) 注意事项

式(1-2)是热量衡算式的普遍式,对任何系统都适用,但不同情况下可作相应简化。对

于间歇反应器，由于是分批加料、卸料，在反应过程中无加料卸料，因此微元时间内进入和离开微元体积的物料所带的热量为零；而对于连续操作反应器则微元时间内在微元体积内累积的热量为零。对于等温过程微元时间内进入和离开微元体积的物料所带的热量相等，此时热量衡算式的目的只是为了计算为维持等温操作所需要的热量及换热面积，并不是为了计算温度随反应器位置或反应时间变化的关系；对于绝热过程，微元时间微元体积内和外界的热交换量为零。计算时应注意对于放热反应，热效应为负值，则微元时间微元体积内和外界的热交换量项前为“-”；吸热反应，热效应为正值，微元时间微元体积内和外界的热交换量项前为“+”。

(三) 动量衡算式

动量衡算式以动量守恒与转化定律为基础，计算反应器的压力变化。当气相流动反应器的进出口压差很大，以致影响到反应组分浓度时，就要考虑流体的动量衡算。一般情况下，反应器计算可以不考虑此项。

三、动力学方程式

动力学方程式是指反应速率与影响反应速率的影响因素之间的函数表达式。对于均相反应，需要有本征动力学方程；对于非均相反应，则需要得到包括相际传递过程在内的宏观动力学方程。

(一) 反应速率

任何化学反应都是以一定的速率进行。通常在反应系统中，以某一物质在单位时间、单位反应体系内的变化量来表示该反应的速率。

$$\text{反应速率} = \frac{\text{变化量}}{\text{反应时间} \times \text{反应体系}} \quad (1-3)$$

反应速率中某一物质的变化量一般用物质的量 (mol) 来表示，也可用物质的质量或分压等表示。反应速率是针对反应体系中某一物质而言的，这种物质可以是反应物，也可以是生成物。如果是反应物，由于其量总是随反应进行而减少，为保持反应速率值总为正，在反应速率前赋予负号，即：

$$(-r_A) = -\frac{1}{V} \frac{dn_A}{dt}$$

如果是产物，其量则随反应进行而增加，反应速率取正号，如 r_R 表示产物 R 的生成速率。

$$r_R = \frac{1}{V} \frac{dn_R}{dt}$$

因此，在一般情况下，对于同一个反应若按不同物质计算的反应速率在数值上常常是不相等的。对于多组分单一反应系统，各个组分的反应速率受化学计量关系的约束，存在一定比例关系。因此，对于反应 $\alpha_A A + \alpha_B B \longrightarrow \alpha_R R + \alpha_S S$ 则各组分的反应速率必然有如下关系：

$$\frac{(-r_A)}{\alpha_A} = \frac{(-r_B)}{\alpha_B} = \frac{r_R}{\alpha_R} = \frac{r_S}{\alpha_S}$$

式中 $\alpha_A, \alpha_B, \alpha_R, \alpha_S$ ——各组分的化学计量系数；

$(-r_A), (-r_B)$ ——组分 A、B 的消耗速率；

r_R, r_S ——组分 R、S 的生成速率。