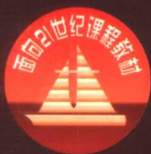




普通高等教育“十一五”国家级规划教材



面向21世纪课程教材

化学反应工程

(第四版)

朱炳辰 主编



化学工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
面向 21 世纪课程教材

化学反应工程

(第四版)

朱炳辰 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

化学反应工程/朱炳辰主编. —4 版. —北京: 化学工业出版社, 2006. 12

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

面向 21 世纪课程教材

ISBN 978-7-5025-9765-8

I. 化… II. 朱… III. 化学反应工程-高等学校-教材 IV. TQ03

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 151153 号

责任编辑: 赵玉清

文字编辑: 向东

责任校对: 陶燕华

装帧设计: 史利平

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: 北京市彩桥印刷有限责任公司

装订: 三河市延风装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 24 $\frac{3}{4}$ 字数 637 千字 2007 年 1 月北京第 4 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: 40.00 元

版权所有 违者必究

序

《化工类专业人才培养方案及教学内容体系改革的研究与实践》为教育部（原国家教委）《高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划》的 03-31 项目，于 1996 年 6 月立项进行。本项目牵头单位为天津大学，主持单位为华东理工大学、浙江大学、北京化工大学，参加单位为大连理工大学、四川大学、华南理工大学。

项目组以邓小平同志提出的“教育要面向现代化，面向世界，面向未来”为宗旨，认真学习国家关于教育工作的各项方针、政策，在广泛调查研究的基础上，分析了国内外化工高等教育的现状、存在问题和未来发展。四年多来项目组共召开了由 7 校化工学院、系领导亲自参加的 10 次全体会议进行交流，形成了一个化工专业教育改革的总体方案，主要包括：

- 制定《高等教育面向 21 世纪“化学工程与工艺”专业人才培养方案》；
- 组织编写高等教育面向 21 世纪化工专业课与选修课系列教材；
- 建设化工专业实验、设计、实习样板基地；
- 开发与使用现代化教学手段。

《高等教育面向 21 世纪“化学工程与工艺”专业人才培养方案》从转变传统教育思想出发，拓宽专业范围，包括了过去的各类化工专业，以培养学生的素质、知识与能力为目标，重组课程体系，在加强基础理论与实践环节的同时，增加人文社科课和选修课的比例，适当削减专业课分量，并强调采取启发性教学与使用现代化教学手段，因而可以较大幅度地减少授课时数，以增加学生自学与自由探讨的时间，这就有利于逐步树立学生勇于思考与勇于创新的品质。项目组所在各校对培养方案进行了初步试行与教学试点，结果表明是可行的，并收到了良好效果。

化学工程与工艺专业教育改革总体方案的另一主要内容是组织编写高等教育面向 21 世纪课程教材。高质量的教材是培养高素质人才的重要基础。项目组要求教材作者以教改精神为指导，力求新教材从认识规律出发，阐述本门课程的基本理论与应用及其现代进展，并采用现代化教学手段，做到新体系、厚基础、重实践、易自学、引思考。每门教材采取自由申请及择优选定的原则。项目组拟定了比较严格的项目申请书，包括对本门课程目前国内外教材的评述、拟编写教材的特点、配套的现代化教学手段（例如提供教师在课堂上使用的多媒体教学课件，配合教材的辅助学生自学用的光盘等）、教材编写大纲以及交稿日期。申请书在项目组各校评审，经项目组会议择优选取立项，并及时对样章在各校同行中进行评议。全书编写完成后，经专家审定是否符合高等教育面向 21 世纪课程教材的要求。项目组、教学指导委员会、出版社签署意见后，报教育部审批批准方可正式出版。

项目组按此程序组织编写了一套化学工程与工艺专业高等教育面向 21 世纪课程教材，共计 25 种，将陆续推荐出版，其中包括专业课教材、选修课教材、实验课教材、设计课教材以及计算机仿真实验与仿真学习教材等。本教材是其中的一种。

按教育部要求，本套教材在内容和体系上体现创新精神、注重拓宽基础、强调能力培养，力求适应高等教育面向 21 世纪人才培养的需要，但由于受到我们目前对教学改革的研究深度和认识水平所限，仍然会有不妥之处，尚请广大读者予以指正。

化学工程与工艺专业的教学改革是一项长期的任务，本项目的全部工作仅仅是一个开端。作为项目组的总负责人，我衷心地对多年来给予本项目大力支持的各校和为本项目贡献力量的人们表示最诚挚的敬意！

中国科学院院士、天津大学教授

余国琮

2000年4月于天津

第一版前言

本书是根据1989年12月化学工业部在天津召开的化工工艺类专业教学指导委员会会议讨论通过的高等学校本科《化学反应工程》(化工工艺类适用)课程教学基本要求编写的。

本书的主要内容是以无机化工、有机化工、煤化工和石油加工生产中的化学加工过程为背景,按化学反应与动量、热量、质量传递交互作用的共性归纳综合的宏观反应过程。化学反应工程属工程科学,用自然科学的原理考察、解释和处理工程实践问题。研究方法是应用理论推演和实验研究工业反应过程的规律而建立的数学模拟方法;结合工程实践的经验应用于工程设计和放大。本书强调工程观点,提倡理论与实际的结合,对学生进行定量计算和设计能力的训练;提高学生分析问题和解决问题的能力。

本书主要讨论各类反应过程的共性和基本内容,并介绍一些我国学者在化学反应工程方面的成就。本书各章均列有较丰富的参考文献,以便读者进一步学习和研究。

本书由华东化工学院朱炳辰主编。各章编写人为:绪论、化学动力学、气-固相催化反应宏观动力学、气-固相催化反应器、流-固相非催化反应及反应器、气-液-固三相反应及反应器和实验室反应器(部分)——朱炳辰;理想流动与非理想流动反应器——房鼎业;气-液反应及反应器和实验室反应器(部分)——张成芳。姚佩芳,应卫勇,孙启文和杜智美参加了资料整理和部分例题的编写、运算工作。

本书由浙江大学陈甘棠主审,编者对主审提出的许多宝贵的意见和积极的建议,帮助编写人提高了书稿质量,表示衷心的感谢。对于书中存在的问题及缺点;殷切地希望广大读者批评指正。

编者

1991年8月

第二版前言

本书第一版由化学工业出版社于1993年出版，其主要内容是以无机化工、有机化工、煤化工和石油加工生产中的化学加工过程为背景，按化学反应与质量、热量传递交互作用的共性归纳综合的宏观反应过程，强调工程观点，提倡理论联系实际，实例丰富。印刷了3次，共23000册，获得使用者的好评，被评为1996年化工部优秀教材。

本书第二版按照化学工程与工艺专业的主要课程“化学反应工程”的要求修订，并被确定为上海普通高等学校“九五”重点教材。

本书第二版主线清晰，便于学习，主要内容是以石油化工和石油加工、无机化工、基本有机化工、煤化工、精细化工、高分子化工和工业催化等生产中的化学加工过程为背景，按化学反应与质量、热量传递交互作用的共性归纳综合的宏观反应过程，着重讲述反应工程的研究方法，便于读者深入钻研。本书所讲述的化学反应工程属工程科学，用自然科学的原理考察、解释和处理工程实际问题。化学反应工程的研究方法是应用理论推演和实验研究工业反应过程的规律而建立的数学模拟方法，结合工程实践的经验，应用于工程设计，强调工程观点，提倡理论与实际的结合。对学生进行定量计算和设计能力的训练，提高学生分析问题和解决问题的能力。为了深化读者对化学反应工程的理解，第二版比第一版较多地增加了我国学者在反应工程方面的部分成就和实例，反映我国学者的研究水平，激发读者钻研精神。

本书由我国化学反应工程学科的著名学者浙江大学陈甘棠教授审稿，陈教授对书稿严格把关，精心润色，提高了书稿的质量，作者深表感谢。

本书由华东理工大学朱炳辰主编。各章执笔人为：绪论，第一章化学动力学，第三章气-固相催化反应宏观动力学，第四章气-固相催化反应器，第五章流-固相非催化反应及反应器，第七章气-液-固三相反应及反应器和第八章实验室反应器（部分）——朱炳辰；第二章理想流动与非理想流动反应器——房鼎业；第六章气-液反应及反应器和第八章实验室反应器（部分）——张成芳。

宋维端、孙文粹、骆赞椿、朱子彬、钦淑钧、潘银珍、丁百全、王弘轼、姚佩芳、应卫勇、孙启文、王艳薇、徐国文、杜智美、陈闵松、娄伟中、秦惠芳、薛从军、李涛、何文军、刘殿华、甘霖、王元顺、柳巧越、王应虎参加了资料整理和部分例题的编写、运算工作。

主编 朱炳辰
1998年3月

第三版前言

《化学反应工程》第三版经教育部化工类专业人才培养及课程内容体系改革的研究与实践项目组批准立项，按照1998年4月《面向21世纪“化学工程与工艺”专业培养方案》编写，力求培养基础厚、专业宽、能力强、素质高，具有创新精神的化工专业人才，加强实践环节，强调教学手段现代化和教学方法改革。其主要内容由面向化学工程、石油化工、石油炼制、基本有机化工、无机化工、精细化工、工业催化及化工冶金中的化学加工过程扩充到面向高分子化工、生物化工及电化学工业中的化学加工过程。

全书的主线是化学反应与质量、热量传递交互作用的共性归纳综合的宏观反应过程，着重讲述反应工程的研究方法，便于读者深入钻研。本书所讲述的化学反应工程属工程学科，用自然科学的原理考察、解释和处理工程实际问题。化学反应工程的研究方法是应用理论推演和实验研究工业反应工程的规律而建立的数学模拟方法，结合工程实践的经验，应用于工程设计，强调工程观念，提倡理论与实际的结合。对学生进行定量计算和设计能力的训练，提高学生分析问题和解决问题的能力及创新精神。本书反映了我国学者在化学反应工程方面的研究工作。

本书共十二章：绪论，第一章气-固相催化反应本征动力学，第二章气-固相催化反应宏观动力学，第三章理想流动反应器，第四章反应器中的混合及对反应的影响，第五章气-固相催化反应工程，第六章气-液反应及反应器，第七章气-液-固三相反应工程，第八章流-固相非催化反应，第九章聚合反应工程，第十章生物反应工程，第十一章电化学反应工程，第十二章实验室反应器。前八章针对化学工程和石油加工、基本有机化工、无机化工、精细化工、工业催化及化工冶金的工业生产，讨论工业生产中宏观反应过程的普遍规律，其后第九、十和十一章则针对高分子化工、生物化工及电化学工业生产，讨论运用化学反应工程的普遍规律解决特殊工艺背景的反应工程问题，第十二章则按化学反应工程的要求，阐述如何建立多种类型的实验室反应器及数据处理的基本内容，以指导读者进行研究工作。

本书第一版由化学工业出版社于1993年出版，获1996年全国高等学校化工类优秀教材二等奖和1998年化工科技进步三等奖；第二版由化工出版社于1998年出版，为上海普通高等学校“九五”重点教材，获1999年上海普通高等学校优秀教材一等奖。

本书由我国化学工程学科著名学者浙江大学陈甘棠教授和化学工艺学科著名学者华南理工大学黄仲涛教授审稿，两位教授对书稿严格把关，精心润色，提高了书稿的质量，作者深表感谢。

本书由华东理工大学朱炳辰教授主编。各章执笔人为：绪论，第一章，第二章，第五章，第七章和第十二章（部分）——朱炳辰；第三章及第四章——张濂；第六章及第十二章（部分）——张成芳；第八章——房鼎业；第九章——曹贵平；第十章——张元兴、许学书；第十一章——张新胜。

徐懋生、潘银珍、王弘轼、丁百全、姚佩芳、应卫勇、王挹薇、徐志刚、曹发海、陈闵松、高崇、李涛、刘殿华、张海涛、甘霖、王元顺、王存文、周飞、樊蓉蓉、范兆馨、倪燕惠等参加了资料的整理和部分例题的编写及运算工作。

主编 朱炳辰
2000年7月1日

第四版前言

《化学反应工程》第四版是面向 21 世纪课程教材《化学反应工程》第三版的修订版，第三版于 2001 年 1 月发行，已累计印刷了 32000 册。第四版是在第三版的编写、出版及经兄弟学校教学使用五年的基础上，吸收了一些现代关于化学反应工程发展方向的论著，并结合科学发展观和我国经济建设情况而修订的。第四版被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

《化学反应工程》第三版经教育部化工类专业人才培养及课程内容体系改革的研究与实践项目组批准立项，被评为教育部面向 21 世纪课程教材，按照 1998 年 4 月《面向 21 世纪“化学工程与工艺”专业培养方案》编写，力求培养基础厚、专业宽、能力强、素质高，具有创新精神的化工专业人才，加强实践环节，强调教学手段现代化和教学方法改革。

全书的主线是化学反应与动量、质量、热量传递交互作用的共性归纳综合的宏观反应过程，以及反应装置的工程分析和设计。本书所讲述的化学反应工程属工程学科，用自然科学的原理考察、解释和处理工程实际问题。化学反应工程的研究方法是应用理论推演和实验研究工业反应过程的规律而建立的数学模拟方法，结合工程实践的经验，应用于工程分析和设计，强调工程观念，提倡理论与实际的结合。对学生定量计算和设计能力的训练，培养学生分析问题和解决问题的能力 and 创新精神。

本书共分十二章：绪论，第一章应用化学反应动力学及反应器设计基础，第二章气-固相催化反应本征及宏观动力学，第三章釜式及均相管式反应器，第四章反应器中的混合及对反应的影响，第五章固定床气-固相催化反应工程，第六章气-液反应工程，第七章流-固相非催化反应，第八章流化床反应工程，第九章气-液-固三相反应工程，第十章聚合反应工程基础，第十一章生物反应工程基础，第十二章电化学反应工程基础。

第一章在回顾物理化学、化工热力学等学科有关内容的基础上，讨论与化学反应工程有关的加压下非理想气体的反应热、化学平衡，并强调化学反应器的设计要以化学特性和生产工艺为基础；第二~九章以石油加工、石油化工、煤化工、非金属矿与金属矿的化学加工，化肥、基本无机及有机化工、精细化工等工业生产为背景，讨论工业生产中宏观反应过程的普遍规律；第十~十二章则面向高分子化工、生物化工及电化学工业生产，讨论运用化学反应工程的普遍规律解决特殊工艺背景的反应工程问题。

本书第一~九章均增列一节“讨论与分析”，阐述本章执笔人的编写意图及重点内容，帮助学生更好地领会。

本书将有关热力学等方面的符号改为与现今物理化学教材相同，并将无因次数改为量纲为 1。

本书引用了较多经典的及与本书阐述内容有关的参考期刊及教材、专著，便于读者深入钻研和参考。

本书按照“化学工程与工艺”的厚基础、宽专业的要求编写，涉及了多个生产领域的化学反应工程内容，各兄弟学校使用本书时，可根据课程学时及学校特点将一些章、节或例题作为选修，或指导学生自学。

本书第一版由化学工业出版社于 1993 年出版，获 1996 年全国高等学校化工类优秀教材二等奖和 1998 年化工科技进步三等奖。第二版由化学工业出版社于 1998 年出版，为上海普

通高等学校“九五”重点教材，获1999年上海普通高等学校优秀教材一等奖。第三版由化学工业出版社于2001年出版，获2003年上海普通高等学校优秀教材一等奖。

本书由我国化学工程与工艺学科著名学者浙江大学陈甘棠教授和华南理工大学黄仲涛教授审稿，两位教授对书稿严格把关，精心润色，提高了书稿的质量，作者深表感谢。华东理工大学顾其威教授，河北工业大学反应工程教研室的授课教授及郑州大学的宋怀俊教授对本书初稿提出许多宝贵建议，作者深表感谢。

本书由华东理工大学朱炳辰主编。各章执笔人：绪论，第一章，第二章，第三章（部分），第五章，第八章和第九章——朱炳辰；第三章（部分）及第四章——张濂；第六章张成芳；第七章——房鼎业；第十章——曹贵平；第十一章——张元兴、许学书；第十二章——张新胜。

朱子彬、王辅臣提供了有关高温煤气化的研究资料；徐懋生、潘银珍、王弘轼、丁百全、姚佩芳、应卫勇、徐志刚、曹发海、陈闵松、何文军、高崇、李涛、甘霖、王存文、樊蓉蓉、倪燕惠等参加了资料的整理和部分例题的编写及运算工作。第四版的书稿打印工作由周海燕和吴建民完成。

主编 朱炳辰
2006年9月

目 录

绪论	1	习题	33
一、物质转化过程工业中的化学加工	1	第二章 气-固相催化反应本征及宏观动力学	35
二、化学反应工程与多尺度及多学科的联系	2	第一节 催化及固体催化剂	35
三、数学模拟方法	2	一、催化反应	35
四、工程放大与优化	3	二、固体催化剂	36
参考文献	5	第二节 化学吸附与气-固相催化反应本征动力学模型	37
第一章 应用化学反应动力学及反应器设计基础	6	一、吸附等温方程	38
第一节 化学反应和工业反应器的分类	6	二、均匀表面吸附动力学模型	40
一、化学反应的分类	6	三、不均匀表面吸附动力学模型	41
二、工业反应器的分类	7	第三节 气-固相催化反应宏观过程与催化剂颗粒内气体的扩散	43
第二节 化学计量学	10	一、气-固相催化反应宏观过程	43
一、化学计量式	10	二、固体催化剂颗粒内气体的扩散与曲折因子	47
二、反应进度、转化率及化学膨胀因子	10	第四节 内扩散有效因子	51
三、多重反应系统中独立反应数的确定	11	一、等温催化剂单一反应内扩散有效因子	51
四、多重反应的收率及选择率	12	二、等温内扩散对多重反应选择率的影响	58
五、气相反应的物料衡算	13	三、非等温催化剂内扩散有效因子	58
第三节 加压下气相反应的反应焓和化学平衡常数	14	第五节 气-固相间热、质传递过程对总体速率的影响	62
一、理想气体和实际气体的状态方程	14	一、外扩散有效因子	62
二、气体的摩尔定压热容和气相反应的摩尔反应焓	16	二、工业催化反应器中气流主体与催化剂外表面间的浓度差和温度差	63
三、实际气体的化学反应平衡常数	17	第六节 固体颗粒催化剂的工程设计	63
第四节 化学反应速率及动力学方程	20	一、异形催化剂	63
一、间歇系统及连续系统的化学反应速率	20	二、活性组分不均匀分布催化剂	64
二、动力学方程	23	三、颗粒催化剂的孔径分布及内表面积设计	65
三、温度对反应速率常数影响的异常现象	23	第七节 气-固相催化反应宏观动力学模型	65
第五节 温度对反应速率的影响及最佳反应温度	25	一、工业颗粒催化剂总体速率的实验测定	65
一、温度对单一反应速率的影响及最佳温度曲线	25	二、宏观与本征反应动力学模型	66
二、温度对平行和连串反应速率的影响	27	第八节 固体催化剂的失活	68
第六节 反应器设计基础及基本设计方程	29	一、固体催化剂失活的原因	68
一、反应器设计基础	29	二、催化剂失活动力学	68
二、反应器设计的基本方程	31	三、甲醇合成铜基催化剂硫中毒失活研	
第七节 讨论与分析	32		
参考文献	33		

究案例	69	三、停留时间分布的数字特征	119
第九节 讨论与分析	71	四、理想流型反应器的停留时间分布	121
参考文献	72	五、停留时间分布曲线的应用	123
习题	74	第三节 非理想流动模型	124
第三章 釜式及均相管式反应器	77	一、数学模型方法	124
第一节 间歇釜式反应器	77	二、轴向混合模型	125
一、釜式反应器的特征	77	三、多级串联全混流模型	127
二、间歇釜式反应器的数学模型	78	第四节 混合程度及对反应结果的影响	129
三、间歇釜式反应器的工程放大及操作优化	81	一、停留时间分布对固相加工反应结果的影响	129
第二节 连续流动均相管式反应器	83	二、固相加工反应过程的计算	130
一、均相管式反应器的特征	83	三、微观混合及对反应结果的影响	131
二、平推流均相管式反应器的数学模型	84	第五节 非理想流动反应器的计算	133
第三节 连续流动釜式反应器	90	一、轴向混合反应器的转化率	133
一、连续流动釜式反应器的特征及数学模型	90	二、多级串联全混流反应器的转化率	134
二、多级全混釜的串联及优化	91	第六节 讨论与分析	135
三、全混流反应器的热稳定性	95	参考文献	136
第四节 理想流动反应器的组合和比较	100	习题	136
一、理想流动反应器的组合	100	第五章 固定床气-固相催化反应工程	138
二、理想流动反应器的体积比较	101	第一节 固定床气-固相催化反应器的基本类型和数学模型	138
第五节 多重反应的选择率	102	一、固定床气-固相催化反应器的基本类型	138
一、平行反应	102	二、固定床催化反应器的数学模型	141
二、连串反应	103	第二节 固定床流体力学	142
第六节 半间歇釜式反应器	106	一、固定床的物理特性	142
一、半间歇釜式反应器的特征	106	二、单相流体在固定床颗粒层中的流动及压力降	144
二、半间歇釜式反应器的数学模型	106	三、径向流动反应器中流体的分布	147
第七节 釜式反应器中进行的多相反应	108	四、固定床流体的径向及轴向混合	151
一、釜式反应器中进行的液-液非均相反应	108	第三节 固定床热量与质量传递过程	152
二、釜式反应器中进行的液-固非均相反应	109	一、固定床径向传热过程分析	152
三、釜式反应器中进行的气-液相络合催化反应	109	二、固定床对壁的给热系数	153
第八节 讨论与分析	110	三、固定床径向有效导热系数和壁给热系数	154
参考文献	111	四、固定床径向及轴向传热的偏微分方程	155
习题	111	五、固定床中流体与颗粒外表面间的传热与传质	156
第四章 反应器中的混合及对反应的影响	114	第四节 绝热式固定床催化反应器	156
第一节 连续反应器中物料混合状态分析	114	一、绝热温升及绝热温降	157
一、混合现象的分类	114	二、绝热催化床及乙苯催化脱氢制苯乙烯反应器	158
二、连续反应过程的考察方法	115	三、多段换热式催化反应器	160
第二节 停留时间分布	116	第五节 连续换热内冷自热式催化反应器	163
一、停留时间分布的定义	116		
二、停留时间分布的实验测定	117		

一、内冷自热式催化反应器的一维平推流数学模型	163	四、二级不可逆反应	197
二、内冷自热式氨合成反应器的热稳定性	165	五、可逆反应	198
第六节 连续换热外冷及外热管式催化反应器	166	六、平行反应	200
一、连续换热外冷管式催化床的数学模型	166	第四节 气-液反应器概述	201
二、连续换热外冷管式催化反应器的飞温及参数敏感性	166	一、工业生产对气-液反应器的要求	201
三、强放热多重反应管式反应器的设计	170	二、气-液反应器的形式和特点	202
四、管式反应器的床层宏观反应动力学和环氧乙烷合成反应器的活性校正系数案例	171	第五节 鼓泡反应器	203
五、连续换热外热管式催化反应器	173	一、鼓泡反应器的操作状态	204
第七节 薄床层催化反应器	173	二、鼓泡反应器的流体力学特征	205
一、薄床层催化反应器轴向返混模型	173	三、鼓泡反应器的轴向混合	206
二、薄床层氨氧化催化反应器的一维轴向弥散数学模型	174	四、鼓泡反应器的传质、传热特性	207
第八节 催化反应过程进展	176	五、鼓泡反应器的简化反应模型	208
一、强制振荡非定态周期操作催化反应过程	176	六、搅拌鼓泡反应器	211
二、催化-吸收耦联	176	七、鼓泡反应器的热稳定性	211
三、催化-吸附耦联	177	第六节 填料反应器	212
四、催化-催化耦联	177	一、填料特性和两相流动特征	213
五、催化-蒸馏	177	二、填料的润湿表面和传质系数	214
六、膜催化	178	三、填料反应器的轴向混合	214
七、超临界化学反应	178	四、气-液接触有效表面	215
八、均相催化多相化	180	五、填料反应器有效高度的计算	215
九、微化工技术	180	第七节 讨论与分析	218
第九节 讨论与分析	180	一、气-液反应的特征	218
参考文献	182	二、气-液反应器的适应性	219
习题	185	参考文献	219
第六章 气-液反应工程	187	习题	221
第一节 气-液反应平衡	187	第七章 流-固相非催化反应	223
一、气-液相平衡	187	第一节 流-固相非催化反应的分类及特点	223
二、溶液中气体溶解度的估算	188	一、流-固相非催化反应的分类	223
三、带化学反应的气-液相平衡	189	二、流-固相非催化反应的特点	225
第二节 气-液反应历程	191	三、流-固相非催化反应的研究方法	226
一、气-液相间物质传递	191	第二节 流-固相非催化反应模型	226
二、化学反应在相间传递中的作用	191	一、收缩未反应芯模型	226
第三节 气-液反应动力学特征	193	二、整体反应模型	227
一、伴有化学反应的液相扩散过程	193	三、有限厚度反应区模型	228
二、一级不可逆反应	194	四、其他模型	228
三、不可逆瞬间反应	196	第三节 粒径不变时缩芯模型的总体速率及控制	229
		一、总体速率	229
		二、流体滞流膜扩散控制	231
		三、固体产物层内扩散控制	232
		四、化学反应控制	232
		第四节 颗粒缩小时缩芯模型的总体速率	234
		一、流体滞流膜扩散控制	234
		二、化学反应控制	235

三、宏观反应过程与控制阶段的判别	237
第五节 流-固相非催化反应器及其计算	240
一、流-固相非催化反应器	240
二、固体颗粒呈平推流流动	241
三、固体颗粒呈全混流流动	242
第六节 讨论与分析	245
参考文献	246
习题	247
第八章 流化床反应工程	249
第一节 固体流态化的基本特征及工业应用	249
一、流态化现象	249
二、流化床反应器的流型、流型转变及基本特征	250
三、流态化技术的基本问题及与其他流固接触技术的比较	254
四、流态化技术的工业应用	255
第二节 流化床的特征速度	256
一、临界流化速度及起始鼓泡速度	256
二、起始湍动流化速度、快速流态化及密相气力输送的转变速度	259
三、颗粒的终端速度	260
第三节 气-固密相流化床	261
一、气-固密相流化床的基本结构	261
二、气-固鼓泡流化床	264
三、鼓泡流化床反应器的数学模型	269
四、湍动流化床	270
五、气-固密相流化床的工业应用	271
第四节 循环流化床	273
一、流型转变	273
二、循环流化床的工业应用	275
第五节 讨论与分析	280
参考文献	281
习题	282
第九章 气-液-固三相反应工程	283
第一节 气-液-固三相反应器的类型及宏观反应动力学	283
一、气-液-固三相反应器的类型	283
二、气-液-固三相反应的宏观反应动力学	286
第二节 三相滴流床反应器	288
一、气、液并流向下通过固定床的流体力学	288
二、滴流床三相反应器中的传递过程	290
三、滴流床三相催化反应过程开发研究	291
四、石油加工中催化加氢裂化的加压滴流床三相反应器	291
第三节 机械搅拌鼓泡悬浮式三相反应器	292
一、机械搅拌鼓泡悬浮式三相反应器的特征	292
二、机械搅拌反应器中三相床甲醇合成和一步法二甲醚合成案例	293
第四节 鼓泡淤浆床反应器	295
一、鼓泡淤浆床反应器的流体力学	295
二、鼓泡淤浆反应器中的传递过程	299
第五节 气-液并流向上三相流化床反应器	301
一、煤的直接液化三相流化床反应器	301
二、气-液并流向上三相流化床的流体力学	301
三、气-液并流向上三相流化床中的传递过程	303
第六节 三相悬浮床中的相混合	304
一、三相流化床中的相混合	304
二、三相鼓泡淤浆床的液相和气相混合	305
第七节 压力对三相悬浮床反应器操作性能的影响	306
一、对气含率、气泡直径及气-液相界面积的影响	306
二、对流型转变的影响	307
三、压力及气体密度对气-液传质系数的影响	307
四、压力对气-液鼓泡床液相轴向混合的影响	307
第八节 气-液-固三相悬浮床反应器的数学模型	308
一、三相悬浮床反应器的数学模型	308
二、鼓泡三相淤浆床甲醇合成的数学模型和试验验证	308
三、三相床 F-T 合成	311
第九节 讨论与分析	313
参考文献	314
习题	317
第十章 聚合反应工程基础	318
第一节 概述	318
一、聚合反应工程发展简述	318
二、聚合反应工程的研究内容	319
第二节 聚合过程中的工艺和设备基础	321
一、聚合反应的分类	321

二、聚合实施方法	327	一、机械搅拌式反应器	351
第三节 聚合反应动力学	329	二、气升式反应器	355
一、自由基聚合基元反应及速率方程	329	三、其他形式的生物反应器	356
二、自由基聚合分子量及分布	331	参考文献	359
参考文献	335	第十二章 电化学反应工程基础	360
习题	336	第一节 电化学反应过程的原理及动	
第十一章 生物反应工程基础	337	力学	360
第一节 酶催化反应动力学	337	一、电化学反应过程的原理	361
一、简单酶反应动力学	337	二、电极过程动力学	362
二、竞争性和非竞争性抑制	341	三、电化学反应工程中的常用术语	366
三、pH 值和温度的作用	343	第二节 常用的电化学反应器	368
第二节 细胞生长和产物生成的动力学	344	一、电化学反应器的特点	368
一、细胞的生长和维持	345	二、电化学反应器的构成	368
二、产物生成	347	三、常用结构的电化学反应器	369
三、底物利用	348	四、电化学反应器的组装、连接与组合	376
四、温度和 pH 值的影响	349	参考文献	377
五、重组微生物的稳定性	349	主要符号一览表	379
第三节 常用的生物反应器	351		

绪 论

一、物质转化过程工业中的化学加工

工业行业可以分为两大类：一类以物质转化为核心，从事物质的化学转化，生产新的物质产品，生产环节具有一定的不可分性，形成生产流程并多数连续操作，如石油加工、石油化工、煤化工、非金属矿与金属矿的化学加工、化肥、基本无机及有机化工、精细化工等，可以统称为过程工业；另一类以物件的加工和组装为核心，不改变物质的内在形态，多属非连续操作，可以统称为装备与产品制造工业。

过程工业中包含有进行物理转化和化学转化两类过程。进行物理转化的过程，如流体输送、液体搅拌、固体的破碎、过滤、结晶、换热、蒸发、干燥、吸收、精馏、萃取、吸附、增湿、减湿及膜分离等单元操作。进行化学转化的过程，如按参与反应物质的相的类别来区分，可分为均相和多相（又称为非均相）反应，均相反应含气相反应和液相反应，而多相反应含液-液相反应、气-液相反应、液-固相反应、气-固相反应、固-固相反应和气-液-固三相反应。进行化学转化的过程，即化学反应过程，是生产的关键过程。在进行化学反应过程的装置或化学反应器中进行反应时，必然伴有放热或吸热的热效应。对于多相反应，必然存在处于不同相的物质间的质量传递。在反应装置中必然存在着流体流动或固体颗粒的流动，不同结构的反应器中，又存在着不同的流动形式。例如，进行气-固相的反应，有多种形式的反应器。①固定床反应器，在操作期间，固体颗粒以固定的形态放置在反应器中，气体反应混合物通过颗粒层运动。②移动床反应器，固体颗粒逐渐自上而下流动，流出反应器外，并且同时补充固体。当固定床与移动床反应器中气体混合物沿着反应器的轴向流动时，称为轴向流动反应器；当反应气体沿反应器径向横穿过颗粒层时，称为径向流动反应器。显然，二者的流体流动形式有所区别，必然引起反应器有不同的结构设计。③流化床反应器，流化床反应器的特征是流体自下而上使颗粒在反应器中浮起而运动，流体和颗粒的物性不同，通过床层的流体流速不同，流化床可以在处于不同的流化状态下操作，对产物的产量和质量造成重大影响。

另外，气-固相催化反应中反应组分必须扩散到催化剂外表面，再扩散进入催化剂颗粒内部，方能与分布在催化剂内表面上的活性组分接触发生催化反应，催化剂颗粒的粒度及孔结构，必然影响反应组分在催化剂孔道中同时扩散与反应的反应速率。反应热由颗粒内部传至催化剂颗粒外表面，再与气相主体发生热量传递，气相与热、质量传递过程速率必然与气体的流动状况有关。

综合上述，化学反应过程是一个综合化学反应与动量、质量、热量传递交互作用的宏观反应过程，这也就是 20 世纪初期国际化学学术界确立的“三传一反”的概念。

在书籍方面，1937 年 Damköhler^[1]在“Der Chemie Ingenieur”第三卷中写了扩散、流动与传热对化学反应收率影响的专章。1947 年 Франк—Каменецкий^[2]发表了论述化学动力学中扩散与传热的专著。1947 年 Hougen 及 Watson^[3]所著《化学过程原理》第三卷专门讲述动力学与催化过程。上述著作都是早期讲述化学反应工程的开拓性学术专著。

1957 年第一次欧洲化学反应工程会议系统地总结并论述了上述有关宏观反应动力学及反应过程工程分析的若干基本问题，确定了“化学反应工程学”的名称。50 年来，化学反应工程学有了很大的发展，成为“化学工程学”的重要学科分支，尤其是随着电子计算技术

的应用，数值计算方法和现代测试技术的发展，化学反应工程的基础理论和实际应用都有了很大的飞跃。化学反应工程学广泛地应用了化学动力学、化工热力学、计算数学、现代测试技术、流体力学、传热、传质以及生产工艺、环境保护与安全、经济学等各方面的理论知识和经验，综合应用于工业反应器的结构和操作参数的设计和优化。图1概括地表达了化学反应工程学与有关学科间的关系。其中化学反应器，尤其是单系列大型及超大型高压反应器与机械工程中的金属材料、高压容器的设计和制造，甚至于超大型设备的运输等各方面存在着密切的依赖关系。

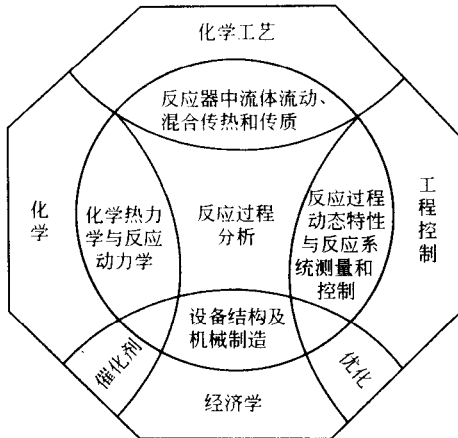


图1 化学反应工程学与有关学科间的关系

近年来，国内外学术界倡导物质转化过程中的时空多尺度（Multi-scale）效应^[4]，归纳其要点如下：化工过程同时发生在很宽的时间尺度和空间尺度，即以分子振动的纳秒至污染物消失所需长达世纪的时间尺度。其中①纳尺度，即分子化学键振动的纳秒尺度及纳米尺度；②微尺度，即流体力学和传递中的滴、粒、泡、旋涡运动的微尺度；③介尺度，即反应器、换热器、分离器、泵等反应和单元操作的装置；④宏尺度，即生产单元和工厂；⑤宇尺度，即环境、大气、海洋、土壤。

以管式催化反应器中气-固相催化反应为例，反应物与催化剂的载体上所负载的活性组分间的分子反应属于纳秒及纳米尺度；反应组分在催化剂颗粒孔道内的扩散属于微尺度；反应组分连续流过长达数米的反应管的停留时间一般为 $10\sim 10^3$ s，属于介尺度；反应器及有关原料制备和产物分离的装备组合成的生产单元和工厂属于宏尺度；而生产过程的污染物经历长时间才能消除属于宇尺度。

三、数学模拟方法

早期研究进行物理变化的化工单元操作的传统方法是经验归纳法，将实验数据用量纲分析和相似方法整理而获得经验关联式。这种方法在研究管道内单向流体流动的压力降、对流给热及不带化学反应的气-液两相间的传质等方面都得到了广泛的应用。由于化学反应工程涉及多种影响参数及参数之间相互作用的复杂关系，如化学反应与流体流动、传质、传热过程的相互交织，连续流动反应器中流体流动状况影响到同一截面反应物的转化率和选择率的不均匀性，化学反应速率与温度的非线性关系等，传统的量纲分析和相似方法已不能反映化学反应工程的基本规律。反映和描述工业反应器中各参数之间的关系，称为物理概念模型，表达物理概念模型的数学式称为数学模型，用数学方法来模拟反应过程的模拟方法称为数学模拟方法。用数学模拟方法来研究化学反应工程，进行反应器的放大与优化，比传统的经验方法能更好地反映其本质。

数学模型按处理问题的性质可分为化学动力学模型、流动模型、传递模型、宏观反应动力学模型。工业反应器中宏观反应动力学模型是化学动力学模型、流动模型及传递模型的综合，是本书所要讨论的核心内容。

例如气-固相催化反应过程，有三个层次的数学模型。①化学动力学模型，即反应组分在催化剂颗粒内表面上进行的催化反应动力学的模型，或称为本征动力学模型，其中有关分子振动的纳尺度内容，是一般化学反应工程科技工作者没有条件也不必要进行研究的。但是，催化反应的本征动力学模型是最基础的模型，缺少时，应由反应工程工作者对所采用的