

催化与材料化学研究生教学丛书

# 催化反应工程

上册

阎子峰 陈诵英 徐杰 辛勤 主编

 科学出版社

催化与材料化学研究生教学丛书

# 催化反应工程

(上册)

阎子峰 陈诵英 徐杰 辛勤 主编



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书的创作宗旨是给读者提供比较系统、详尽的催化反应工程专业基础与工业应用知识,从催化反应工程的核心——“三传一反”入手,侧重于催化反应工程的基础内容(上册)和重要的工业催化反应案例(下册),并重点介绍催化反应器设计、催化反应动力学、固体催化剂中的传递过程(质量、能量和动量)规律以及工业催化剂种类及其应用情况等,以期让读者在了解催化基础理论的同时,体会催化反应工程的基本特征,认识催化反应工程在化学工业的地位、作用与本质。

本书既有催化反应工程最基础、最经典的理论与方法解析,又有最新的催化反应器设计和工业催化反应工程、典型工业催化剂案例介绍,适合于化学工程与技术、催化化学、工业催化等相关专业的高年级本科生、研究生、青年教师和从事应用基础研究、工程技术开发的技术人员学习和参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

催化反应工程.上册/阎子峰等主编. —北京:科学出版社,2017.10

(催化与材料化学研究生教学丛书)

ISBN 978-7-03-054628-9

I. ①催… II. ①阎… III. ①催化-化学反应工程-研究生-教材  
IV. ①TQ032

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第240023号

责任编辑:李明楠 李丽娇/责任校对:樊雅琼  
责任印制:张 伟/封面设计:铭轩堂

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017年10月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018年1月第二次印刷 印张:23 3/4

字数:479 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 催化与材料化学研究生教学丛书

总策划：辛勤 徐杰

《现代催化化学》

辛勤 徐杰 主编

《固体催化剂研究方法》

辛勤 主编

《现代催化研究方法（新编）》

辛勤 罗孟飞 徐杰 主编

《催化反应工程（上、下册）》

阎子峰 陈诵英 徐杰 辛勤 主编

《催化史料》

辛勤 徐杰 主编

《中国催化名家（上、下册）》

辛勤 徐杰 主编

## 丛 书 序

受科学出版社之邀，组织编写一套催化和材料领域研究生教学丛书。与一些同仁讨论、考虑再三，这套研究生教学丛书的定位和作用为何？大家一致认为：应当是在催化和材料领域起“路线图”、“地图”、“标志性建筑”的基本入门知识的作用，强调基础，不求最新。在此基础上启发学生会利用概念去判断、推理及运用综合分析方法去解决问题，进而培养及提高其科学思维 and 创新能力。基于此，规划设计了如下教材。

《现代催化化学》，简略给出有关催化的几乎全部主要内容，以期对催化有一大概了解，如催化研究的主要命题、当前科研瓶颈及工业化状况（2016年出版）。

《固体催化剂研究方法》，介绍近 20 种用于催化和材料方面研究入门的物理化学方法，强调这些方法是如何用于催化和材料研究的（2004年初版，2016年第三次印刷）。

《现代催化研究方法（新编）》，给出催化和材料领域的科研人员必须掌握的基本方法手段，在第一版基础上充实、更新部分内容（2018年出版）。

《催化反应工程（上、下册）》，给出从实验室研究成果到工业化应用所必需的基础知识，它包含“三传一反”、反应分离等，并通过范例加以说明。这方面内容弥补了目前研究生教育的短板（2017年出版）。

《催化史料》和《中国催化名家（上、下册）》，其设计背景为，化学工业占人类社会 GDP 的 15%~20%，而化学工业 80% 产值都是由催化剂和催化过程产生。近百年来中国的催化工业从无到有、从小到大，尤其是改革开放至今中国已发展成 GDP 第二的世界大国，也成长为世界催化大国（当然，要成为催化强国还有很长的路要走）。如此辉煌的业绩同几代催化人的奋发努力分不开，作为后人有必要了解这段历史和有必要选择地传承。应中国化学会的邀请，我们收集、撰写了 1932~1982 年（吴学周主编，张大煜、蔡启瑞、闵恩泽等撰写）、1982~2012 年（辛勤、林励吾撰写）逾八十年的中国催化发展史，为便于比较，我们还整理了这一历史

时期的世界催化发展史，以及法国、日本、俄罗斯（含苏联）等国的催化发展史等。与此同时，我们还用逾十年的时间汇集、收集、撰写了百余位催化名家介绍。在做这些介绍时尽可能做到表达准确、客观、全面，不做评议、修改，允许有歧义，只想将这些“砖头”、“瓦块”收集起来留做他人后用（2017年出版）。

上述是我们关于这套丛书的基本想法，能否实现，待观后效！由于知识面和水平受限必有不到之处，敬请斧正！

辛 勤

2016年8月于大连

# 前 言

催化是典型的跨学科综合性交叉科学与技术，这门学科位于基础研究与应用开发的交界处，涉及化学、物理、生物、数学、材料、工程等多个领域。催化作用与绿色化学、可持续发展紧密相关，也是化学工业中最核心的科学技术之一，具有非常广泛的社会经济影响。催化反应是使用催化剂的化学反应，它极大地推动了化学工业乃至人类社会的发展。20世纪初，铁系催化剂与合成氨技术的发明推动了化肥工业的发展，从而使人类第一次从食不果腹的窘境跨越到免于饥饿的状态；20世纪中叶，三大合成材料的工业化极大地促进了服装制造业的发展，从而使人类第一次在真正意义上改变了衣不蔽体、缺衣少穿的困境；第二次世界大战以后，快速发展的石油炼制业使得交通、航天等领域飞速发展，这更是将人类社会带入了高速发展的快车道。据统计，催化直接或间接贡献了世界国民生产总值的20%~30%，在最大宗的50种化工产品中有30种通过催化反应制备，而在所有化工产品中这一比例高达85%。化学工业的竞争力是一个国家综合实力的重要体现，而优质、廉价的催化剂则是化学工业竞争力的核心。化学工业是我国的支柱产业之一，也是资源、能源和环境等事关国家可持续发展的关键所在，因此有关催化的研究一直是我国科研工作者的重要研究方向之一。目前，催化无论在基础研究，还是在应用开发或工程应用方面，均是国内化工工业的主流，也是实现化工工业可持续发展的核心技术。而且，催化技术是解决人类未来所面临的能源与化工可持续发展问题的关键技术。从化石燃料的清洁、高效转化，以及生物质类可再生能源的利用，乃至温室气体减排与二氧化碳的高效利用等方面，催化作用均在其中扮演非常重要的角色。此外，催化技术还促进了绿色催化反应技术的发展、化学工业可持续发展能力的提高，以及应对催化反应复杂性能力的进步。

最初，催化是针对其改变化学反应速率而引入的一个动力学概念。但目前这一概念早已不局限于催化反应的研究者，其应用范围已延伸至社会科学领域，成为一个现代社会广泛采用的多意义综合性概念。德国哲学家黑格尔曾说“熟知非真知”，即我们最熟识的事物并不一定是我们所了解的。这句话在某种程度上表达了目前催化研究的状态——尽管目前人类在应用催化方面已经取得了巨大突破并使得现代社会快速发展，但催化研究仍处于黑箱状态而一直未能进入主流科学领域。这是由于在催化理论、分析手段与检测技术的发展瓶颈限制下，目前的催化研究仅仅停留在经验性、描述性状态，可谓“知其然而不知其所以然”。因此，即

便对于专业的催化研究者来说，有关催化的真正含义及催化的本质等问题仍无法回答。但这并不影响我们利用催化优化化工生产过程，开发新型高效催化剂，并应用这一核心技术为我们服务。而催化的应用，特别是规模化催化技术的应用，将涉及更加复杂的反应容器、工艺流程等工程问题。这些问题正是本书重点介绍的内容。

催化反应是化学工业、石油炼制工业和石油化学工业的支柱和基础，由于这一过程能够降低反应的能耗、副产物的生成及污染物的排放，目前这一技术在精细化学工业包括专用化学品、药品、农药和除草剂等生产中也越来越重要。

传统化学反应工程的主要内容是“三传一反”。“三传”是指质量传递、热量传递和动量传递；“一反”是指化学反应和化学反应器。而对催化反应工程而言，“一反”则是催化反应和催化反应器，这意味着催化反应工程是化学反应工程的重要组成部分。事实上，催化反应工程在内容上占到化学反应工程的70%以上，甚至达到85%。由于工业上使用的催化剂绝大多数是固体催化剂，在反应体系中至少包含两相——反应物的流体相和催化剂的固相。因此，催化反应工程的内容涉及的几乎都是多相催化反应体系，即多相催化反应工程。

催化反应工程的目标是要设计出耗能最少且反应效益最大的用以进行催化反应的容器，从而节能、减排、降耗，并大幅提升经济效益和环境效益，这在当前的社会环境下具有非常重要的意义。催化反应工程主要包括催化反应动力学、多相催化过程中的传递和催化反应器三部分内容，是化学反应工程中最重要、最核心的部分。

一般情况下，研究者需要根据特定催化反应和催化剂设计催化反应器，而不是要求催化剂和催化反应来适应催化反应器。因此，新型催化剂的研究往往会推动不同类型催化反应器的发展，而详细了解催化反应的特点及催化剂使用的特性是选择和设计相关催化反应器的必要条件。例如，合成氨催化剂的研究和发展带动有不同换热装置的固定床催化反应器的发展和完善；分子筛催化裂化催化剂的研究和发展导致移动床、提升管式流化床催化反应器的开发；雷尼镍催化剂的开发促进浆态床反应器的发展；第三代重整催化剂的发展促使移动床催化反应器的发展等。目前，催化技术经过数十年甚至上百年的研究，已经发展出多种经典催化反应器，以适应多种类型催化反应的需求。

催化反应动力学和催化反应器设计是大部分化学品生产工艺过程的核心。催化反应工程师与其他反应工程师的最大区别就在于前者需要同时精通催化反应动力学和催化反应器设计。能否选择一个操作最安全最有效的催化反应体系是一个化工装置，甚至一个化工企业成功与否的关键。催化反应工程就是利用催化反应动力学和催化反应过程中发生传递过程的特征设计出最能发挥催化反应效能的催化反应器，即以最小的能量消耗获得最高的经济效益。因此，催化反应工程的发

展能够促进节能降耗，以及污染物、特别是二氧化碳等温室气体排放量的降低，从而达到环境保护的目的。这也正是当前低碳经济所大力倡导的。

传统上，化学家对催化的研究集中于催化剂的设计与制备、活性与活性相结构与控制、转化频率与选择性、界面反应动力学和潜在毒物等基础研究方面。而化学工程师特别是催化过程工程师主要关心的是如何使反应物与所选用的催化剂的活性位最大限度地有效接触，如何快速提供或移去随反应进行而带来的反应热，如何放大反应器，以及如何能够在大规模的工业装置中重复实验室中得到的催化剂的活性和选择性。从某种意义上来说，催化反应工程作为一种方法学可以定量说明不同规模反应器上的传递现象与催化反应动力学间的相互作用，也可用于不同反应器性能的测量，如生产速率、转化率和选择性，建立定量模型及建立反应器性能和输入、操作条件间的定量联系，正确说明小试研究、中试研究的工作数据以优化生产过程的操作条件。因此，工程师们学习催化反应工程的目的是掌握任何一个化工过程，特别是反应器中质量传递、能量传递、动量传递和催化反应动力学的基本规律，以及它们在催化反应器中的相互作用，以便能够设计出满足催化剂特定要求的、最优（也就是反应物料及能量消耗最少）而有最大产出的催化反应器和相应的化工过程。

催化反应过程在化学工业中有着特别重要和非常特殊的地位，这门学科既具有化学反应工程的一般规律，又具有其特殊性。与化学反应工程类似，催化反应工程的基础也是物料平衡或摩尔平衡、反应速率方程、反应的化学计量式、能量或热量平衡，但是对催化反应工程而言，扩散和接触过程尤为重要。催化反应器的设计正是建立在这些规律及它们之间相互作用的基础上的。

在多相体系的催化加工工艺中，特定催化剂的动力学层次的改进在很大程度上会推动反应器中传输和流动的改进。与催化反应工程相关的催化研究和反应器类型发展已有很长的研发历史，这类改进在石油炼制工业中的作用非常明显，即催化反应工程的微小改进可以在炼油工业中产生很大的经济效益。例如，在石油炼制工业中，油品收率提高一个百分点就可以产生数百亿甚至更大的经济效益。相比之下，在精细化学品生产中，催化反应工程的改进带来的效益则刚刚开始显现。

基于上述背景，本书侧重于催化反应工程的基础内容（上册）和重要的工业催化反应案例（下册），并重点介绍催化反应器设计者所需要的基础知识，如催化反应动力学、固体催化剂中传递过程（质量、能量和动量）的规律和相关的传递参数以及催化反应器设计。具体内容共 15 章，其中催化反应工程基础部分（上册，第 1~6 章）由浙江大学陈诵英教授主笔，工业催化反应案例（下册，第 7~15 章）由国内催化反应工程领域的几位一线顶尖科学家撰写。第 1 章为绪论，第 2 章详细介绍和讨论催化反应动力学方程的建立即非均相催化反应动力学，包括实验室

反应器及其选择、催化反应动力学实验、速率数据的分析、催化剂失活动力学等，并配合内容举例说明如何运用理论知识来解决实际问题。第3章主要介绍和讨论催化反应过程中传递现象的规律及外扩散和内扩散的基础知识，尤其是多孔催化剂中的扩散反应问题、三相催化反应动力学等，并列举大量的实例来说明相关应用。第4章主要介绍和讨论等温催化反应器设计的基本问题，包括设计方程、设计步骤和所需要的参数值的获取方法，并给出实例来说明如何进行等温催化反应器的设计。第5章介绍非等温催化反应器设计，包括催化反应器中涉及能量平衡和反应平衡的问题、稳态和非稳态操作下的非等温CSTR和管式催化反应物的设计及非理想性的校正等，并举例说明非等温催化反应器设计的思路和步骤。第6章介绍重要工业催化反应器，并对气固两相反应器中最广泛使用的固定床反应器和流化床反应器进行较为详细的介绍，而对各种类型的气液固三相催化反应器只做简要的介绍，包括涓流床反应器、填料鼓泡塔反应器、三相流化床反应器、机械搅拌浆态床和鼓泡塔浆态反应器。第7章由华东师范大学路勇教授和赵国锋博士主笔，主要介绍结构催化剂与反应器技术，这一技术以整装多孔结构材料为基体，通过黏附、化学键合、空间束缚等方法，实现纳米催化材料的“宏—微—纳”三维（3D）一体化组装而成的整装催化填料，是一种新形式的催化反应器技术。第8章由清华大学魏飞教授主笔，概述催化裂化反应机理和催化裂化反应动力学，催化裂化催化剂及其失活与再生方法，并重点介绍以提升管流化反应器和再生器为特征的流态化基本原理和反应—再生系统。第9章由中国石化抚顺石油化工研究院方向晨院长和王继锋副总工程师主笔，主要介绍加氢裂化工艺的主要特点和典型反应、加氢裂化工艺和催化剂、加氢裂化反应及其集总动力学模型、加氢裂化反应器、催化反应工程及其工业范例等。第10章由中国石油天然气集团公司石油化工研究院加氢首席专家胡长禄、潘晖华高工、张鹏高工、李知春高工等撰写，主要介绍催化重整反应的类型和作用，催化重整反应机理、反应动力学及其集总动力学模型、催化重整催化剂及其烧焦动力学、催化重整工艺和反应器及其操作特点等。第11章由中国石油大学刘晨光教授撰写，主要介绍石油馏分加氢处理反应（加氢脱硫反应、加氢脱氮反应、加氢脱金属反应、加氢脱氧反应、加氢饱和反应），包括不同加氢处理反应热力学、动力学、反应历程及其影响因素，加氢处理催化剂设计、制备、预硫化、失活与再生及其催化作用机理，加氢处理工艺、反应器及其典型馏分油加氢处理过程等。第12章由中国科学院山西煤炭化学研究所相宏伟、杨勇和李永旺研究员撰写，主要系统地介绍煤炭间接液化的基础研究和工业化，并从催化的角度系统地梳理了费托合成反应机理、反应动力学及其高温浆态床费托合成工艺，介绍费托合成反应铁基催化剂的结构设计与制备、反应器设计与控制、工艺系统集成等，最后以成功的工业案例为线索介绍煤炭间接液化的未来产业化发展趋势。第13章由中国科学院大连化学物理

研究所刘中民院士和叶茂研究员撰写，主要从 SAPO-34 分子筛和甲醇制烯烃 (MTO) 催化剂设计与制备入手，引入流化床微球状催化剂的放大制备技术，并介绍 MTO 反应网络、反应热力学与反应动力学特性和集总反应动力学规律，进而引入 MTO 工艺及其反应器设计，最后介绍以煤或天然气替代石油作原料生产乙烯和丙烯的 DMTO 技术及其工艺。第 14 章由四川大学陈耀强教授主笔，主要介绍机动车尾气污染物的种类与危害及相关的控制法规与净化对策，机动车尾气催化剂的基本组成、结构特性等；然后重点介绍汽油车与摩托车尾气净化催化剂 (器) 技术、压缩天然气汽车尾气净化催化剂 (器) 技术、柴油车尾气净化催化剂 (器) 技术，最后对不同工况下的机动车尾气净化催化剂的评价与匹配进行了系统分析。第 15 章由中国石化石油化工科学研究院宗保宁副总工程师撰写，主要分析己内酰胺的现有工业生产技术的现状及其问题，并介绍石油化工科学研究院历经 20 多年开发成功的己内酰胺绿色生产技术，其中包括钛硅分子筛与浆态床反应器集成用于环己酮肟化制备环己酮肟，纯硅分子筛与移动床反应器集成用于环己酮肟重排制备己内酰胺，以及采用非晶态 Ni 与磁稳定床集成用于己内酰胺精制，最终形成具有自主知识产权的己内酰胺绿色工业生产新技术。为了有利于主讲教师对章节内容的梳理把握和读者对内容的理解贯通，相关作者在本书中均通过引入实例来形象地描述有关内容，并给出一些必要的数学计算方法，以提升其理解的深度。

在本书的编写过程中，各位赐稿专家在非常繁忙的教学、科研和管理任务下，严谨认真，一丝不苟，以科学家的严谨和教育家的耐心，奉献了如此系统、深刻的内容，他们的从业风格和对工作的执著，特别是对科学的献身精神，浸润于本书的每一章节、每一段落和每一个文字。在此向他们表示深深的感谢及敬意！同时，非常感谢阎子峰团队全体成员，特别是博士生们，为了书稿的付梓所做出的编校、梳理及大量图表数据的确认和重新绘制等工作。其中，第 1、2、15 章由王子负责，第 3 章由刘毓翔负责，第 4、5 章由孙书桩负责，第 6、13 章由李学进负责，第 7 章由吴小中负责，第 8 章由彭鹏负责，第 9 章由张震负责，第 10 章由蔡同辉负责，第 11 章由田钰鹏负责，第 12 章由张誉负责，第 14 章由吕玉超负责。在此期间，中国石油大学重质油国家重点实验室、能源催化材料国际联合实验室和化学工程学院为本书的筹备出版提供了全方位的支持。在这里，特别感谢辛勤老先生，正是辛老的不间断鞭策、鼓励和协调，才使得本书能够在不到一年的时间内编写完成并出版。也很荣幸，本书能够纳入辛老主编的催化系列著作中。在此向辛老的真诚付出、全力协调和鼎力提携表示真诚的感谢！同时，也非常感谢科学出版社的李明楠编辑，其严谨的学术态度、一丝不苟的工作作风和周到的服务，确保了本书的顺利出版。

本书是我国催化反应工程领域的第一套专著，主要面向大专院校、科研院所

的师生，也适用于作为高年级本科教材、研究生教材和主要参考书，也适合工业催化剂开发与应用的研发和生产一线的技术人员阅读参考。“雄关漫道真如铁，而今迈步从头越。”尽管在编写过程中，编写专家已经不厌其烦地进行了多次的编校与审核，但由于编写者的学术水平和文字能力有限，加之写作时间的限制，书中不妥之处在所难免，恳请有关专家和读者不吝指正。希望这些不当之处在重印或再版时予以纠正！



2017年8月于中国石油大学青岛校区荟萃苑

# 目 录

丛书序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 多相催化与国民经济	2
1.2 催化步骤过程	3
1.3 催化反应工程的重要性	4
1.4 催化反应工程的主要内容	5
1.5 催化反应器的分类	7
参考文献	9
第 2 章 催化反应动力学基础	11
2.1 化学动力学	11
2.1.1 反应速率定义和概念	11
2.1.2 反应速率方程和反应级数	13
2.1.3 用于反应器设计的速率方程	14
2.2 实验室催化反应器	15
2.2.1 引言	15
2.2.2 实验室催化反应器分类	16
2.2.3 实验室催化反应器选择的要素	21
2.2.4 本征动力学研究催化反应器选择的准则	22
2.2.5 常用实验室催化反应器	23
2.2.6 实验室催化反应器小结	29
2.3 催化反应动力学数据的测量和加工	29
2.3.1 本征动力学数据的测量	32
2.3.2 催化反应动力学实验的设计	33
2.3.3 把 $C-t(W/F)$ 数据转化为 $r-C$ 数据的常用方法	35
2.4 催化反应动力学模型	39
2.4.1 引言	39
2.4.2 速率控制步骤和准稳态假设	41
2.4.3 指数率模型	42

2.4.4	Langmuir-Hinshelwood 模型	42
2.4.5	氧化还原机理和动力学方程	44
2.4.6	复杂催化反应动力学	45
2.4.7	催化反应网络	46
2.4.8	动力学参数的计算	51
2.5	催化反应速率方程建立的实例	59
2.5.1	第一类实例: 用两步机理获得动力学方程	59
2.5.2	第二类实例: 反应级数和速率常数的确定	62
2.5.3	动力学参数计算例子——乙醇脱氢	67
2.5.4	第三类实例: 综合性例子	70
2.6	催化剂失活	83
2.6.1	引言	83
2.6.2	催化剂失活的物理化学	83
2.6.3	催化剂失活动力学	84
2.6.4	温度-时间轨线	92
2.6.5	失活对催化剂性能的影响	93
2.6.6	失活反应级数的确定	94
	参考文献	98
<b>第 3 章</b>	<b>催化反应中的传递过程</b>	<b>99</b>
3.1	传递过程的基本规律	99
3.1.1	基本定律	99
3.1.2	传递参数	100
3.1.3	气体中的扩散系数	106
3.1.4	液体中的扩散系数	108
3.2	多孔催化剂中的扩散	110
3.2.1	大孔中的扩散	110
3.2.2	细孔中的扩散	111
3.2.3	表面扩散	111
3.2.4	微孔中的流动	112
3.2.5	分子筛中的扩散	113
3.2.6	多孔固体中扩散系数的测量	116
3.3	流固间的传质和传热系数的实验关联	116
3.3.1	外扩散阻力	116
3.3.2	传质系数和传热系数	117

3.3.3	流固间的传质和传热关联	119
3.3.4	填料床中的压力降	122
3.3.5	填料床层中的轴向扩散	124
3.3.6	与床层壁间的传热	126
3.4	多孔催化剂中的扩散和反应	126
3.4.1	引言	126
3.4.2	等温球形催化剂颗粒中的扩散和反应	127
3.4.3	等温反应催化剂粒子的效率(有效)因子	128
3.4.4	非等温反应效率因子	130
3.4.5	扩散限制反应的一些特征	131
3.4.6	总效率因子	133
3.4.7	催化剂颗粒中的多稳态现象	134
3.4.8	例子	135
3.5	三相催化反应动力学和反应器效率	142
3.5.1	引言	142
3.5.2	三相体系的催化反应动力学	143
3.5.3	三相反应体系中本征动力学数据的分析	143
3.5.4	总效率因子	148
3.5.5	零级反应	154
3.5.6	可逆反应	157
3.5.7	双反应物限制速率情形的分析	158
3.5.8	反应器效率	162
	参考文献	170
<b>第4章</b>	<b>催化反应器设计 I: 等温情形</b>	<b>172</b>
4.1	引言	172
4.1.1	概述	172
4.1.2	催化反应器设计的一般方法	173
4.1.3	反应器中的物料平衡和设计方程	174
4.2	等温反应器设计	175
4.2.1	等温反应器设计结构	175
4.2.2	间歇反应器的设计	176
4.2.3	管式反应器	185
4.2.4	压力降	188
4.2.5	可逆反应	197

4.2.6	反应器的非稳态操作	200
4.2.7	举例	204
4.2.8	反应分离	210
	参考文献	211
<b>第5章</b>	<b>催化反应器设计Ⅱ：非等温情形</b>	<b>213</b>
5.1	引言	213
5.2	能量平衡	214
5.2.1	热力学第一定律	214
5.2.2	功的计算	215
5.2.3	从稳态摩尔流获得反应热	216
5.2.4	反应焓项	217
5.2.5	$\Delta H_R(T)$ 、 $\Delta H_R^0(T_R)$ 和 $\Delta C_p$ 与温度间的关联	218
5.2.6	恒定热容或平均热容	218
5.2.7	可变热容	219
5.2.8	加进反应器的热量 $\dot{Q}$	220
5.3	稳态下的非等温连续流动反应器	221
5.3.1	应用于 CSTR	221
5.3.2	绝热管式催化反应器	228
5.3.3	有热交换的稳态管式反应器	233
5.4	平衡转化	235
5.4.1	绝热温升和平衡转化	236
5.4.2	吸热反应	238
5.4.3	最佳进料温度	240
5.5	非稳态操作	240
5.5.1	通用方程	240
5.5.2	活塞流反应器的非稳态操作	241
5.5.3	CSTR 非稳态操作	242
5.5.4	间歇反应器	243
5.6	非绝热操作：二氧化硫氧化	247
5.6.1	硫酸的制造	247
5.6.2	催化剂的量	248
5.6.3	反应器构型	248
5.6.4	操作条件	249
5.7	多稳态	256

5.7.1 移热项 $R(T)$ .....	257
5.7.2 “热产生”项 $G(T)$ .....	258
5.7.3 着火-熄火曲线 .....	259
5.7.4 稳态分叉分析 .....	261
5.7.5 稳态的接近 .....	265
5.7.6 非等温反应器设计小结 .....	268
参考文献 .....	270
<b>第 6 章 工业催化反应器介绍</b> .....	<b>271</b>
6.1 引言 .....	271
6.2 绝热固定床催化反应器 .....	272
6.2.1 反应器模型 .....	273
6.2.2 模型参数的无因次化 .....	274
6.2.3 绝热固定床反应器的设计数据 .....	275
6.2.4 多稳态 .....	277
6.2.5 设计参数和判据 .....	277
6.3 自热固定床催化反应器 .....	279
6.4 非等温非绝热管式反应器 .....	281
6.4.1 模型 .....	281
6.4.2 无因次参数 .....	283
6.4.3 设计数据 .....	284
6.5 应用实例 .....	286
6.5.1 参数敏感性和飞温 .....	287
6.5.2 一维、二维模型 .....	288
6.5.3 设计参数 .....	289
6.5.4 固定床反应器的控制 .....	289
6.5.5 小结 .....	289
6.6 气固流化床催化反应器中的气固流动 .....	290
6.6.1 引言 .....	290
6.6.2 固体颗粒在床层中的流动和气固流化中的流区 .....	291
6.6.3 流化床反应器气固流动和传递 .....	295
6.7 气固流化床反应器模型 .....	300
6.7.1 鼓泡流化床反应器模型 .....	301
6.7.2 湍流流化床反应器模型 .....	302
6.7.3 循环流化床反应器模型 .....	302