

催化与材料化学研究生教学丛书

催化反应工程

下册

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

(下册)

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、工程技术开发的专业技术人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

催化反应工程.下册/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 978-7-03-054629-6

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240021号

责任编辑:李明楠 李丽娇/责任校对:孙婷婷
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: B5(720×1000)

2017年10月第一次印刷 印张: 25 1/2

字数: 514 000

定价: 108.00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所选择地传承。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学科学研究所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，并介绍石油化学科学研究所历经 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 7 章 结构催化剂与反应器：新结构、新策略和新进展	1
7.1 基于原电池置换反应的 foam/fiber 结构催化功能化及其应用探索	3
7.1.1 草酸二甲酯加氢制乙二醇	3
7.1.2 煤层甲烷脱氧	4
7.1.3 气相醇选择氧化	4
7.2 foam/fiber 结构的湿式化学刻蚀催化功能化及其应用探索	5
7.2.1 合成天然气	5
7.2.2 高通量甲烷部分氧化制合成气	6
7.3 fiber 结构上原位晶化生长 MFI 分子筛及其应用探索	6
7.3.1 甲醇制丙烯	6
7.3.2 催化精馏	7
7.4 Al-fiber 结构的水蒸气氧化功能化及其应用探索	8
7.4.1 合成气制 DMO	8
7.4.2 费托合成制低碳烯烃	8
7.5 Ni-foam 结构的水热处理功能化及其 deNO _x 催化性能	9
7.6 偶联剂辅助的 NPs@Oxides 纳米核-壳催化剂的整装结构化及其应用	10
7.7 烧结 fiber 包结细颗粒催化剂及其应用	11
7.7.1 制氢与纯化	11
7.7.2 空气净化	14
7.7.3 移动费托合成	15
7.8 电化学储能材料	16
7.9 结论与展望	17
参考文献	17
第 8 章 催化裂化	22
8.1 概述	22
8.2 石油烃类的催化裂化反应	25
8.2.1 烃类催化裂化反应的机理	25

8.2.2	石油馏分的催化裂化反应	26
8.2.3	催化裂化反应的热力学	28
8.2.4	催化裂化反应动力学	28
8.3	催化裂化催化剂	35
8.3.1	天然白土催化剂	36
8.3.2	全合成硅酸盐裂化催化剂	36
8.3.3	沸石分子筛裂化催化剂	38
8.4	裂化催化剂的失活与再生	40
8.4.1	水热失活	40
8.4.2	结焦失活	41
8.4.3	重金属毒物引起的失活	42
8.4.4	裂化催化剂的再生	43
8.5	流态化基本原理	44
8.5.1	流态化域	44
8.5.2	流态化的特点	46
8.5.3	颗粒的循环与压力平衡	47
8.6	反应-再生系统	49
8.6.1	提升管反应器	49
8.6.2	再生器	51
8.7	结论与展望	54
	参考文献	55
第9章	加氢裂化技术	57
9.1	引言	57
9.1.1	加氢裂化简介	57
9.1.2	加氢裂化的特点及意义	57
9.1.3	加氢裂化过程中的主要反应	58
9.1.4	加氢裂化与催化反应工程的关系	58
9.2	加氢裂化工艺与催化剂概要	59
9.2.1	加氢裂化工艺及催化剂	59
9.2.2	加氢裂化反应过程	60
9.3	加氢裂化反应动力学	63
9.3.1	加氢裂化反应的关联模型	63
9.3.2	加氢裂化各种集总动力学模型	66
9.3.3	二维加氢裂化集总动力学模型	69

9.3.4 其他复杂反应动力学模型简介	71
9.4 加氢裂化的反应工程描述	72
9.4.1 氢对加氢裂化反应过程的影响	72
9.4.2 竞争吸附、中毒对 HC 反应的影响	74
9.4.3 滴流床反应器的传质与传热	76
9.5 应用催化反应工程理论指导加氢裂化过程开发实例	80
9.5.1 加氢裂化催化剂级配技术	81
9.5.2 FDTG 技术	83
9.5.3 液相循环加氢技术	84
9.5.4 沸腾床技术	85
参考文献	86
第 10 章 催化重整反应工程	89
10.1 催化重整概述	89
10.1.1 催化重整的发展	89
10.1.2 催化重整的类型	90
10.1.3 催化重整的作用	91
10.2 催化重整原料油	93
10.2.1 重整原料油馏程要求	94
10.2.2 重整原料杂质含量指标	95
10.2.3 重整原料表征	101
10.3 催化重整化学反应	102
10.3.1 六元环烷烃脱氢反应	103
10.3.2 五元环烷烃脱氢异构化反应	103
10.3.3 链烷烃脱氢环化反应	104
10.3.4 链烷烃异构化反应	104
10.3.5 烷烃的氢解和加氢裂化反应	104
10.3.6 芳烃的脱烷基反应	105
10.3.7 积炭反应	105
10.4 催化重整反应热力学和动力学	105
10.4.1 重整反应热力学	106
10.4.2 重整反应动力学	109
10.5 催化重整反应动力学模型	114
10.5.1 国外催化重整集总动力学模型	114
10.5.2 国内典型的催化重整集总动力学模型	117

10.6 催化重整操作参数	122
10.6.1 反应压力	123
10.6.2 反应温度	124
10.6.3 体积空速	125
10.6.4 氢烃比	127
10.6.5 操作参数与原料油性质的关系	128
10.6.6 操作参数与产品性质的关系	129
10.7 催化重整催化剂	132
10.7.1 活性氧化铝载体	132
10.7.2 金属组元	135
10.7.3 催化剂的制备	140
10.7.4 半再生重整催化剂的发展	142
10.7.5 连续重整催化剂的发展	143
10.8 催化重整工艺	148
10.8.1 原料预处理	148
10.8.2 重整反应	149
10.8.3 催化剂再生	151
10.9 催化重整催化剂烧焦动力学模型	153
10.9.1 刘耀芳等的铂锡重整催化剂烧焦动力学方程	154
10.9.2 潘国庆等的铂锡重整催化剂烧焦动力学方程	156
参考文献	156
第 11 章 石油馏分加氢处理	159
11.1 加氢处理的化学反应	159
11.1.1 概述	159
11.1.2 加氢处理反应	161
11.1.3 加氢处理的影响因素	178
11.2 加氢处理催化剂	182
11.2.1 加氢处理催化剂的组成	182
11.2.2 加氢处理催化剂的制备方法	185
11.2.3 加氢处理催化剂的预硫化	188
11.2.4 加氢处理催化剂的失活及再生	190
11.2.5 加氢处理催化剂的催化作用机理	191
11.3 加氢处理工艺	204
11.3.1 概述	204

11.3.2 汽油馏分加氢处理	206
11.3.3 柴油加氢处理	223
11.3.4 重馏分油加氢处理	238
11.3.5 重油加氢处理	242
参考文献	249
第 12 章 煤炭间接液化：从基础到工业化	253
12.1 引言	253
12.2 国内外煤炭间接液化技术发展	254
12.2.1 国外煤炭间接液化技术发展	254
12.2.2 国内煤炭间接液化技术发展	256
12.3 催化与工程技术基础	257
12.3.1 高温浆态床费托合成工艺	257
12.3.2 费托合成反应机理和详细机理动力学	258
12.3.3 费托合成铁基催化剂的结构设计和制备	260
12.3.4 浆态床合成反应器设计与控制	265
12.3.5 油品加工	266
12.3.6 工艺系统集成	266
12.4 工业示范和产业化推广	267
12.4.1 合成油示范装置	267
12.4.2 百万吨级合成油商业厂建设	269
12.5 展望	269
参考文献	270
第 13 章 甲醇制烯烃工艺	276
13.1 甲醇制烯烃催化剂	276
13.1.1 SAPO-34 分子筛的合成	277
13.1.2 流化床微球催化剂的放大制备	278
13.2 甲醇制烯烃反应热力学	280
13.2.1 反应网络确定	280
13.2.2 反应热力学常数	281
13.3 甲醇制烯烃反应动力学	282
13.3.1 微观反应动力学	283
13.3.2 集总反应动力学	287
13.4 甲醇制烯烃反应研究	291
13.4.1 影响因素	291