

教育部高等学校

化工类专业教学指导委员会推荐教材

催化剂工程导论

(第三版)

王尚弟 孙俊全 王正宝 编著



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

催化剂工程导论

(第三版)

王尚弟 孙俊全 王正宝 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是将工业催化剂的制备生产、评价测试、设计开发、操作使用等重要工程问题的探讨与该学科前沿的研究进展融合编著而成。本书特色在于：催化理论与化工实践并重，体系新颖独特；既有相当的知识广度，又有适中的学术深度；特别注重实际工程案例的分析评述，以期有助于读者提高分析解决催化剂工程问题的能力。

全书共分 10 章：工业催化剂概述，工业催化剂的制造方法，催化剂性能的评价、测试和表征，工业催化剂的开发，工业催化剂的制备设计，工业催化剂的操作设计，工业聚烯烃催化剂，纳米催化材料，分子筛催化材料，若干催化剂的新进展。

本书可作为化学工程与工艺及相近专业的教材或教学参考书，亦可供有关工程技术人员阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

催化剂工程导论/王尚弟, 孙俊全, 王正宝编著.

3 版. —北京: 化学工业出版社, 2015. 7

教育部高等学校化工类专业教学指导委员会推荐教材

ISBN 978-7-122-23668-5

I. ①催… II. ①王…②孙…③王… III. ①催化剂-
高等学校-教材 IV. ①TQ426

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 079206 号

责任编辑: 何 丽 徐雅妮

责任校对: 边 涛

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 装: 高教社 (天津) 印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 21 字数 510 千字 2015 年 9 月北京第 3 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: 45.00 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 谢在库 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要领域。化学工业在世界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经济发展的重要力量。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“教育部高等学校化工类专业教学指导委员会推荐教材”（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

第三版前言

本书出版至今，已逾 15 年。其间曾重印 9 次，累计共印约 10000 册。作为一本新编的专业课本，能得到编辑和读者的认可，以及市场的接纳，我深感荣幸，也觉侥幸。

这次改写第三版，内容作了一些修改增删。但初版的定位不变。本书是一本化工催化方面的“入门教科书”，最适于化工专业本科生，以及感兴趣和可接受性相当的其他读者。基于这种最初的设想本次修订还删减了部分偏深的内容。

本次修订比第二版又新增了一章，前后已增写两章。这是因为，“催化剂工程”这门新学科，正是在这 15 年间，在纳米催化材料和新型分子筛这两个新领域，已取得了更大更新的进展，值得我们从事教学和研究的师生，以及其他读者，密切关注。

这两个方向的新进展预示着：(1) 如果传统固体催化剂活性组分的初级颗粒，进一步细化到纳米级，那么这种纳米催化剂的活性或将呈现指数级的增长。我国近 10 年内已开发出多种纳米粉体材料。中国工业纳米催化剂的问世，已为期不远；(2) 有序结构的介孔新型分子筛材料，或许是取代氧化硅、氧化铝、活性炭等传统催化剂载体的最佳替代品。它不仅有望适用于固体催化剂，也有望适用于均相或酶催化剂，成为新的“万能载体”。固体非均相催化剂、均相催化剂、酶催化剂，或将通过这种“万能载体”的平台，实现优势互补的高质量融合，并进而促进均相催化剂“负载化”、“锚定化”等难题的破解，以及无机膜催化剂、相转移催化剂等的创新与发明，从而实现工业催化剂又一场革命化的变革。我们大家都有理由期待！

执笔编写本书第三版的是：浙江大学联合化学反应工程研究所孙俊全（第七章）、王正宝（第三章）和王尚弟（其余各章）。

王尚弟

2015 年 4 月

于浙江大学玉泉校区

第一版前言

20 世纪特别是其下半叶以来, 由于催化科学和技术的飞速进步, 使得数以百计的工业催化剂开发成功, 而数量更多的催化剂, 在深刻认识的基础上, 得以更新换代。新型催化剂正日益广泛和深入地渗透于石油炼制工业、化学工业、高分子材料工业、生物化学工业、食品工业、医药工业以及环境保护等产业的绝大部分工艺过程中, 起着举足轻重的作用。

人们常把化学工艺的核心知识简明概括为“三传一反”, 即传热、传质、传动和化学反应。“三传一反”, “反”是核心。工业的化学反应通常在反应器中进行, 而这些反应器中, 绝大部分都必须装有工业催化剂。事实上, 催化技术现已成为调控化学反应速度与方向的核心技术。

经典的催化科学, 涵盖面广。然而, 应用于化工生产的催化科学, 还应当有“化工催化”的限定, 而且更适于将其研究领域划分为“工业催化剂”和“催化剂工程”这两个不同层次的子领域。前者偏重于工艺, 后者偏重于工程; 前者偏重于普及, 后者偏重于提高。“化工催化”的教学内容, 不应是纯科学的、或者“学院式”的, 而应是以重要的化学工艺过程为背景并为之服务的, 富有工程特色的。强调这一特色十分必要。众所周知, 在 20 世纪中晚期, 前苏联科学家在催化科学中的成就是卓越的, 世界公认的; 然而, 前苏联的许多重要工业催化剂, 却又一直颇为落后, 在世界上默默无闻。这个矛盾的历史事实, 是发人深省的。

催化剂工程仍然是一门前沿新学科。关于其研究对象和领域, 至今尚未见到明确而权威的界定, 并且国内外至今也尚无有关的专著, 特别是教材的问世。但据我们理解, 催化剂工程, 是以工业催化剂的制造生产、评价测试、设计开发、操作使用等工程问题为其研究对象的一门科学。它有理由成为 21 世纪化工行业专门人才所必备的基本知识之一。

新学科催化剂工程立足于经典的催化科学和化学动力学、化学反应工程学、计算机应用化学以及表面物理化学等多学科的交界面上, 是数理化基础科学互相渗透、互为补充而又有机融合的新产物。

“催化剂工程”与“化学反应工程”既有联系, 又有区别。后者以研究工业反应器为主, 而前者以研究反应器中运转的催化剂为主。而若将两者有机地结合起来研究, 将会产生出更多更好的研究成果来。例如, 一旦定型的工业反应器, 其结构往往相对稳定, 更新较慢。然而其中的催化剂定型生产后, 换代开发却相当频繁, 目前已缩短至每 3~5 年更换一个牌号。世界上催化剂的创新 (特别是专利创新) 从未停顿过, 随之而来的装置扩容、挖潜、节能、增效等成果也就源源而来, 日新月异, 并以此推动着化学工艺过程更加多快好省地实现。

现代物理手段的介入, 以及电子计算机运用于化工催化, 已经大大帮助了人们认清催化现象背后的物理化学本质, 从而充实了催化理论的准确性及预见性, 并且

大大提高了工业催化剂设计开发的速度、质量和效益，同时使之由长期以来的盲目定性试探，向精确的定量计算转化，进而由技艺型向科学型转化。在世纪之交的近几年里，已看到化工催化这一革命性转变的前兆。

本教材以与催化剂有关的工程问题为主线，保留了工业催化剂的精粹部分，以期使之具备作为教科书的广泛可接受性。它既适于本专业本科生学习，也适于某些非化工专业（如石油炼制、环境化工）的学生和科技人员参考，也可作为化学工艺类专业硕士研究生的前修课参考书。由于编者立意于扩大知识覆盖面且便于学生自学，本书篇幅略长。用书教师对教学内容可灵活取舍。例如，本科生可不讲授第七章和第八章，研究生可不讲授第一章和第二章，而分别令其自学，教师答疑并主持讨论。

在素材选择方面，本书更重视最常见而且最典型的工业催化剂，尤其是国内业已广泛应用的催化剂，以引导读者举一反三并学以致用。除常见的多相、无机材质的催化剂而外，还新增了有机金属配合物催化剂、工业酶催化剂等内容，同时又强化了工业催化剂开发设计的成功案例分析。所选催化剂的案例力求具有典型性、重要性和新颖性，突出我国相关的科技成果，尤其是专利创新成果。这是因为工程科学研究的目的，主要并不在于发现，而是发明；主要并不在于沿袭，而是创新。当前，国外各学科的科技创新成果多集中记载于专利文献中，而公开发表并被承认和推广。化工催化领域是发达国家的专利高产区之一。透过这一领域可以看到，在目前世界经济一体化的大背景下，科学技术商品化、产业化、国际化的发展总趋势。本书还用较大篇幅增加了与工业催化剂操作和使用有关问题的讨论，并列为重点之一。这是由于工业催化剂本身与其他任何化工产品一样，也应该从其制备、性能和使用这三个侧面及其结合上来研究开发和设计等问题，才是全面的、恰当的。更何况，绝大多数工科学生，今天在大学里学习和研究催化剂，并不只是专门为了日后研究或生产制造催化剂，而主要是为了更好地使用好各种催化剂。

本书的编著出版是当前高校教学改革的一项成果，得到教改项目组和相关院校的大力支持，尤其是浙江大学化工学院及联合化学反应工程研究所，对编者给予了许多关心指导和经费资助。对此一并表示诚挚的谢意。

执笔编写本书的是浙大联合化学反应工程研究所孙俊全（第七章）和王尚弟（其余各章）。本书由华东理工大学化工学院徐佩若、四川大学化工学院党洁修和梁斌主审。

由于编者水平有限，加之编著时间仓促，本书错误在所难免，敬请专家学者及其他读者不吝指教，我们将甚感荣幸。

编 者

2001年4月

于浙江大学求是村

第二版前言

本书自 2001 年 8 月出版以来，先后重印过三次。读者的关注和市场的接纳，感染了我们，在出版社编辑的要求下，着手修订再版。

有关催化的著述已经相当浩繁。当年之所以要写这本书，无非是希望为整合后的“化学工程与工艺”专业，量身定制一本工业催化的入门教科书，并且主要突出工科教材的实用性，以及它的可接受性。

从本书初版后读者的反响看，我们当初的希望没有落空。有几位从事化工生产的民营企业企业家，买书看过之后，辗转找到我们，为的是面对面地讨论一下本书，以及他们的难题。

一些学生，从学长们那里听到过对催化课题的议论：“研究就是研制，研制就是制备，制备就是全凭经验盲目地筛选配方。”当这些学生自己也进入毕业前的课题研究，再翻翻上课时无暇顾及的这本催化教材时，其中有的人也许就会想到“原来催化剂是可以这样来研究的”。

不错，国内外前沿的催化剂研究方法就是这样地在变化着，发展着。如今，许多工业催化剂配方已经可以在进行必要而精炼的若干“样本试验”之后，借助电脑，预先粗略地设计出来。信息技术与合成化学的完美结合，正改变着 21 世纪的化工，也发展着 21 世纪的工业催化。目前，有关各种“聚合物分子设计”之类的专用软件信息，人们已经不难从期刊、互联网上找到。

本次修订与初版的间隔时间不长，因而，除删节一些过时的内容，订正若干初版的谬误，以及润色部分欠妥的文字之外，篇章结构等主要内容变更不多，仅增写了篇幅有限的“纳米催化材料”一章。近十年来，纳米材料的高新科技异军突起，激活了以往相对较为沉寂的无机精细化工（与有机精细化工和功能高分子相比），这其中也包括了某些固体催化剂。这种新形势发展下去，其影响之所及，我们大家在数年之后就会更加明显地感觉到。

王尚弟

2006 年 3 月

于浙江大学玉泉校区

目录

第1章 工业催化剂概述 / 1

1.1 催化剂在国计民生中的作用	1
1.1.1 催化剂——化学工业的基石	1
1.1.2 合成氨及合成甲醇催化剂	4
1.1.3 催化剂与石油炼制及合成燃料工业	6
1.1.4 基础无机化学工业用催化剂	7
1.1.5 基本有机合成工业用催化剂	7
1.1.6 三大合成材料工业用催化剂	9
1.1.7 精细化工及专用化学品中的催化	10
1.1.8 催化剂在生物化工中的应用	11
1.1.9 催化剂在环境化工中的应用	11
1.2 催化术语和基本概念	14
1.2.1 催化剂和催化作用	14
1.2.2 催化剂的基本特性	15
1.2.3 催化剂的分类	17
1.2.4 催化剂的化学组成和物理结构	19
1.2.5 多相、均相和酶催化剂的功能特点	26
1.2.6 多相、均相和酶催化剂的同一性	27
1.2.7 新型催化剂展望	29
参考文献	30

第2章 工业催化剂的制造方法 / 32

2.1 沉淀法	33
2.1.1 沉淀法的分类	33
2.1.2 沉淀操作的原理和技术要点	35
2.1.3 沉淀法催化剂制备实例	41
2.2 浸渍法	42
2.2.1 各类浸渍法的原理及操作	43
2.2.2 浸渍法催化剂制备实例	45
2.3 混合法	47
2.3.1 固体磷酸催化剂的制备（湿混法）	47
2.3.2 转化吸收型锌锰系脱硫剂的制备（干混法）	47

2.4	热熔融法	48
2.4.1	用于合成氨的熔铁催化剂	48
2.4.2	骨架镍催化剂	48
2.4.3	粉体骨架钴催化剂	49
2.4.4	骨架铜催化剂	49
2.5	离子交换法	49
2.5.1	由无机离子交换剂制备催化剂	50
2.5.2	由离子交换树脂制备催化剂	54
2.6	催化剂的成型	55
2.6.1	成型与成型工艺概述	55
2.6.2	几种重要的成型方法	58
2.7	典型工业催化剂制备方法实例	61
例 2-1	工业合成氨铁系催化剂的制备	62
例 2-2	新型合成甲醇铜系催化剂及其制备方法	63
例 2-3	一种作催化剂载体用氧化铝的制备方法	64
例 2-4	丙烯氨氧化生产丙烯腈流化床催化剂	65
例 2-5	铂铈重整催化剂的制备方法	65
例 2-6	高活性钯/碳催化剂的制备布法	67
	参考文献	68

第 3 章 催化剂性能的评价、测试和表征 / 70

3.1	概述	70
3.2	活性评价和动力学研究	71
3.2.1	活性的测定与表示方法	71
3.2.2	动力学研究的意义和作用	73
3.2.3	实验室反应器	74
3.2.4	评价与动力学试验的流程和方法	80
3.2.5	催化剂评价和动力学研究典型实例	83
例 3-1	净化汽车尾气用蜂窝状催化剂活性评价	83
例 3-2	在 Pt-Sn/Al ₂ O ₃ 催化剂上丙烷脱氢反应动力学	83
3.3	催化剂的宏观物理性质测定	87
3.3.1	颗粒直径及粒径分布	87
3.3.2	机械强度测定	91
3.3.3	催化剂的抗毒稳定性及其测定	93
3.3.4	比表面积测定与孔结构表征	93
3.4	催化剂微观(本体)性质的测定和表征	101
3.4.1	电子显微镜在催化剂研究中的应用	101
3.4.2	X 射线结构分析在催化剂研究中的应用	103
3.4.3	热分析技术在催化剂研究中的应用	106

3.4.4	催化剂表面性质和活性位性质的研究	110
3.5	若干近代物理方法在催化剂表征中的应用	115
3.5.1	电子探针分析	115
3.5.2	X 射线光电子能谱 (XPS)	116
3.5.3	俄歇 (Auger) 电子能谱 (AES)	116
3.5.4	穆斯堡尔 (Mössbauer) 谱	116
3.5.5	磁性分析及顺磁共振	116
3.5.6	红外光谱	117
3.5.7	各种近代物理手段与微型催化色 (质) 谱技术的联用	117
3.5.8	中试装置-表面分析系统的联用	118
	参考文献	118

第 4 章 工业催化剂的开发 / 120

4.1	概述	120
4.2	实验室工作	122
4.2.1	资料准备	122
4.2.2	催化剂参考样品的剖析	122
	例 4-1 ICI 46-1/46-4 催化剂的剖析	123
4.2.3	配方筛选	129
4.2.4	催化剂开发典型小试实例	130
	例 4-2 国产轻油水蒸气转化镍系催化剂小试结果	130
	例 4-3 国产新型耐硫 CO 变换催化剂的稳定性试验	133
	例 4-4 丙烯氧化制丙酮四元催化剂的工艺条件试验	135
	例 4-5 丁烯氧化脱氢制丁二烯七组分催化剂的非正常操作 条件试验	137
4.3	扩大试验	137
4.3.1	中型制备试验	137
4.3.2	中型评价试验	139
	例 4-6 英国 ICI 公司的石脑油转化催化剂中型试验	140
	例 4-7 国产茂金属催化剂 APE-1 气相法聚乙烯中试研究	142
	例 4-8 国产轻油水蒸气转化催化剂中型试验	145
	例 4-9 CO 选择氧化催化剂侧流试验	147
4.4	新型催化剂的工业生产、试用和换代开发	148
	例 4-10 轻油水蒸气转化催化剂装管试验	149
	例 4-11 国产耐硫变换催化剂的工业试用和换代开发	150
	例 4-12 国产环氧乙烷生产用 YS 系列银催化剂的应用和换代 开发	153
	参考文献	154

第 5 章 工业催化剂的制备设计 / 155

5.1 组分设计与验证性筛选	155
例 5-1 加氢催化剂的筛选	156
5.2 催化剂原材料的选择	157
5.2.1 可供选择的催化剂材料	157
5.2.2 主催化剂的选择	159
5.2.3 助催化剂的选择	166
5.2.4 载体的选择	169
参考文献	175

第 6 章 工业催化剂的操作设计 / 176

6.1 操作设计概念	176
6.2 一般操作经验	177
6.2.1 催化剂的运输和装卸	177
例 6-1 天然气一段蒸汽转化催化剂的装填	179
6.2.2 催化剂的活化、钝化和其他预处理	179
例 6-2 国产铁-铬系 CO 中温变换催化剂的活化	182
6.2.3 催化剂的失活与中毒	183
例 6-3 国产甲烷化催化剂硫中毒试验	184
例 6-4 天然气水蒸气转化催化剂的中毒及再生	185
6.2.4 积碳与烧碳	185
6.2.5 催化剂的寿命和判废	187
6.2.6 催化剂衰退的一般对策	188
6.3 使用技术中的若干选择与优化问题	189
6.3.1 催化剂类型和牌号的选择	189
6.3.2 催化剂形状尺寸的选择和优化	190
6.3.3 催化剂组合装填与串联反应器	194
6.3.4 催化反应器的人为非定态操作	197
6.4 电子计算机辅助催化剂操作设计	198
6.4.1 物理化学基础	199
6.4.2 数学模型与数学模拟方法	201
6.4.3 催化剂操作设计案例	203
例 6-5 乙烯环氧化制环氧乙烷催化反应模拟	203
例 6-6 乙苯脱氢反应器的人工神经网络模型及其工况模拟与 优化	206
参考文献	207

第7章 工业聚烯烃催化剂 / 208

7.1 引言	208
7.2 配位聚合机理及其催化剂制备	210
7.2.1 概述	210
7.2.2 极性单体的配位聚合	211
例 7-1 正丁基锂催化剂的制备	212
7.2.3 π -烯丙基化合物引发聚合	212
例 7-2 双(π -烯丙基)镍($C_6H_{10}Ni$)催化剂的制备	214
例 7-3 双- μ -溴二(烯丙基)二镍($C_6H_{10}NiBr_2$)催化剂的 制备	214
7.3 Ziegler-Natta 催化剂	214
7.3.1 Ziegler 催化剂和 Natta 催化剂概述	214
7.3.2 Ziegler-Natta 催化剂的主要化学组分	215
7.3.3 $TiCl_3-AlEt_3$ 催化丙烯聚合速率方程	223
7.3.4 丙烯配位聚合反应机理	225
7.3.5 高效催化剂	227
7.3.6 聚合物的立构规整性	230
7.4 铬系催化剂	231
7.4.1 催化反应原理	232
7.4.2 聚合实例	235
实例 1 美国菲利普公司淤浆法(即新 Phillips 法)	235
实例 2 美国联合碳化物公司(UCC)气相法	235
7.5 茂金属催化剂	235
7.5.1 茂金属及其特点	235
7.5.2 甲基铝氧烷(MAO)	236
7.5.3 茂金属催化剂的分类及特点	237
7.6 后过渡金属非茂催化剂	247
7.6.1 $Ni(II)$ 和 $Pd(II)$ 及其后过渡金属催化剂的结构与 活化反应	248
7.6.2 后过渡金属催化的烯烃聚合反应	248
7.6.3 后过渡金属催化乙烯与CO共聚反应	250
7.6.4 后过渡金属催化剂的特点	251
参考文献	251

第8章 纳米催化材料 / 253

8.1 概述	253
8.2 纳米催化材料的制备方法	256
8.2.1 化学气相沉积法 CVD	256

8.2.2	溶胶-凝胶 (Sol-Gel) 法	258
8.2.3	水热合成法	259
8.2.4	微乳液法	259
8.2.5	介孔膜催化材料的制法	261
8.2.6	碳纳米管的性能和制法	262
8.2.7	其他	263
8.3	测试表征要点	264
8.4	研发案例述评	266
例 8-1	TiCl_4 水解制纳米氧化钛粉体	266
例 8-2	用四氯化钛醇解法制备 TiO_2 纳米粉体	266
例 8-3	纳米 TiO_2 微球的制备及光催化性能研究	267
例 8-4	纳米 TiO_2 薄膜光催化降解苯胺	268
例 8-5	在纳米 Cu-ZnO 上仲丁醇的催化脱氢	269
例 8-6	含纳米粉体的乙苯脱氢制苯乙烯催化剂	272
例 8-7	胶体沉淀法制备纳米 Fe_2O_3	273
例 8-8	粒径和紫外吸收波长可控的氧化锌纳米晶制法	274
例 8-9	采用微乳液法生产透明氧化铁颜料的方法	276
参考文献		277

第 9 章 分子筛催化材料 / 279

9.1	新型分子筛催化材料的应用	279
9.1.1	ZSM-5 和择形分子筛	279
9.1.2	分子筛的酸性	283
9.1.3	分子筛的同形替代材料	283
9.1.4	金属掺杂分子筛	285
9.1.5	分子筛催化剂的应用	286
9.2	新型分子筛催化剂的设计、开发及应用	288
例 9-1	一种高硅铝比小晶粒 NaY 分子筛的制备方法	289
例 9-2	一种高硅铝比的小晶粒 ZSM-5 沸石分子筛的合成方法	291
例 9-3	纳米尺寸丝光沸石的合成方法	292
例 9-4	ZSM-5 分子筛的新合成方法	293
例 9-5	SAPO-11 分子筛催化丁烯异构化反应的研究	294
例 9-6	由甲醇生产低碳烯烃的方法及其催化剂	298
参考文献		301

第 10 章 若干催化剂的新进展 / 302

10.1	均相配合物催化剂的应用	302
10.1.1	羰基化反应及其催化剂	303
例 10-1	以丙烯为原料的 OXO 合成	304

例 10-2 甲醇羰基合成制醋酸	306
例 10-3 Wacker 法乙烯选择氧化制乙醛.....	306
10. 1. 2 不对称加氢: Monsanto L-多巴过程	307
10. 1. 3 SHOP 法乙烯低聚	309
10. 2 环境保护用催化剂.....	310
10. 3 前沿的催化过程和催化剂开发趋向.....	314
10. 3. 1 均相催化	314
10. 3. 2 多相催化	315
10. 3. 3 相转移催化	317
10. 3. 4 酶催化在化工中的应用	318
参考文献.....	320