

Catalyst Engineering

催化剂工程

● 主编 储伟

图书在版编目(CIP)数据
催化剂工程 / 储伟主编. — 成都: 四川大学出版社, 2008.12
ISBN 978-7-309-06855-5
I. ①催... II. ①储... III. ①催化剂—工程—教材 IV. ①TQ02-43
中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第149499号



四川大学出版社

四川大学研究生教材建设基金重点资助项目

Catalyst Engineering

催化 剂工 程

● 主编 储伟



四川大学出版社

责任编辑:王 锋
责任校对:马 娜
封面设计:米茄设计工作室
责任印制:杨丽贤

图书在版编目(CIP)数据

催化剂工程 / 储伟主编. —成都: 四川大学出版社,
2006.6

ISBN 7-5614-3384-0

I. 催... II. 储... III. 催化剂-高等学校-教材
IV. TQ426

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 062483 号

书名 催化剂工程

主 编	储 伟
出 版	四川大学出版社
地 址	成都市一环路南一段 24 号 (610065)
发 行	四川大学出版社
印 刷	郫县犀浦印刷厂
成品尺寸	185 mm×260 mm
印 张	17
字 数	415 千字
版 次	2006 年 9 月第 1 版
印 次	2006 年 9 月第 1 次印刷
印 数	0 001~1 000 册
定 价	30.00 元

版权所有◆侵权必究
此书无本社防伪标识一律不准销售

◆读者邮购本书, 请与本社发行科
联系。电 话: 85408408/85401670/
85408023 邮政编码: 610065
◆本社图书如有印装质量问题, 请
寄回出版社调换。
◆网址: www.scupress.com.cn

储伟

男，四川大学教授，博士生导师。1984年毕业于南京大学，1991年获法国博士学位。1992年至2001年先后在中科院大连化物所和中国科学院成都分院工作，1995年获中科院特批晋升为研究员，1999年获中科院博士生导师资格。1999年至2001年以客座教授身份在法国和日本从事合作研究。2001年作为优秀人才被引进四川大学，任工业催化博士点负责人，入选四川大学“214重点人才计划”二层次；获2004年度四川省科技进步二等奖；2005年被评为四川大学“985工程”学术带头人之一。1992年以来，已主持国家级和省部级等科研攻关项目二十余项，其中国家级6项；发表学术论文140篇，其中SCI收录30篇，EI收录22篇，论文他引100多次。已申请中国发明专利18项（已授权7项）。主编《催化剂工程》一部。已指导毕业16名硕、博士研究生，另有20名在读。被评为四川省学术与技术带头人。任《天然气化工》编委。

**Catalyst
Engineering**

内容简介

本书系统地介绍了目前工业催化剂和科学研究中的催化剂的设计开发、组成结构、制备生产、操作使用等典型案例的剖析和催化学科前沿的研究进展。全书共分9章。前3章概述催化剂和催化作用的基本知识，吸附作用和多相催化以及催化剂制备的常规技术和特种技术。第4章至第8章论述了金属催化剂、金属氧化物催化剂、分子筛催化剂、配合物催化剂、酸碱催化剂；介绍了各种催化剂的组成、结构、典型反应、催化作用机理、大量典型实例和最新研究进展。第9章论述了催化剂的性能评价、结构表征和构效关系。本书部分章节还对催化燃烧、能源化工中的催化和环境催化进行了论述。本书可作为理工科化学、化工专业研究生和本科高年级学生的教材或教学参考书，也可从事环境科学、精细化工和石油化工等方面研究的科技人员提供有效的参考。

序

“年年岁岁花相似,岁岁年年人不同。”在世纪之交,经过高教体制改革,又一次强强合并后的新四川大学已成为我国西部地区规模最大、学科门类最齐全的新型综合性研究型大学。校训“海纳百川,有容乃大;严谨勤奋,求是创新”已成为川大人求知治学的座右铭。

作为新世纪的献礼,我校研究生教材建设基金资助的又一批研究生优秀教材相继正式出版了,在此我表示热烈的祝贺。

众所周知,21 世纪是知识经济的世纪,国际竞争空前激烈。竞争的焦点是科学技术,竞争的核心是创新型人才,竞争的关键是国民教育。对于四川大学这样的国家重点大学而言,必须注意大力发展研究生教育,扩大规模,注重质量,强调创新。

校长、教师、教材是办学的三大要素,而教材是教学改革与师生智慧的重要结晶。正是基于这种思考,我校建设以学科建设为龙头,作为一项重要的措施就是加强研究生的教材建设。我们通过各种渠道,筹集了专项基金,用以资助研究生优秀教材的编写和出版。我们在 1999 年首次资助的是有博士学位授权点的学科专业中涉及面大、使用面宽的研究生学位平台课程的优秀教材。而今,我们扩大了教材基金资助的范围,无论文、理、工、管、医,只要是经过专家评审后认定的优秀教材,都可被列为资助对象。特别是社会需求量大的应用学科、新兴学科、交叉学科及保护学科的优秀教材,更是优先资助出版。

我们推出的研究生教材的基本特点是:符合该学科教学大纲的基本要求,有较强的理论性和系统性。这些教材既反映了该学科发展的新知识、新动向、新成就,也反映了我校教师在该门学科教学与科研中的新成果与新经验。

前人说得好,古今之成大事业、大学问者,都必须经过三种境界:“昨夜西风凋碧树。独上高楼,望尽天涯路。”此第一境界也。“衣带渐宽终不悔,为伊消得

人憔悴。”此第二境界也。“众里寻他千百度。蓦然回首,那人却在,灯火阑珊处。”此第三境界也。研究生优秀教材的建设应该算作一种“大事业”。优秀教材的作者们对于研究生教育的执著追求,令人钦佩;他们的无私奉献精神,值得赞扬;他们所取得的教学科研成果应该积极推广,使其产生应有的社会效益,为百年名校增添光彩。我殷切希望在陆续出版的研究生教材中能出现“传诸后世”的佳作,更希望我校有更多教授、名家动手撰写研究生教材,分门别类,出版系列的研究生教材丛书,为建设国内一流、国际知名的新四川大学做出更大的贡献。

中国科学院院士

四川大学副校长

刘应明 教授

四川大学研究生院院长

前 言

催化剂的研究和开发,是石油炼制和工业现代化学工业的核心技术之一;目前 85% 以上的化工产品借助催化剂生产出来的。《催化剂工程》系统地介绍了目前工业应用催化剂和研究中的催化剂的设计开发、组成结构、制备生产、操作使用等大量典型案例的剖析及催化学科前沿的研究进展。

《催化剂工程》全书分为九章。前三章(第 1~3 章)概述催化剂和催化作用的概念和理论基础,组成与功能,吸附作用以及催化剂制备的特种技术和常规技术等。第 4 章至第 8 章介绍了五大类重要的催化剂及其催化作用,如金属催化剂、金属氧化物催化剂、分子筛催化剂、配合物催化剂、酸碱催化剂等;论述各类催化剂的组成、结构、典型反应、催化作用机理、典型实例和最新研究进展;同时介绍了催化剂的使用、失活和再生等问题。第 9 章概述催化剂的性能评价、结构表征和构效关系;包括催化剂的宏观物性和微观性质的分析和表征,介绍了多种近代物理方法在催化剂表征中的应用和构效关系的研究。附录中还提供了复习思考题。本书部分章节还对催化燃烧、能源化工中的催化和环境催化进行了论述。

《催化剂工程》这门课程是根据全国化工类专业教学指导委员会建议设立的,可作为化工类专业核心课、专业必修课或专业选修课。课程目的在于教会学生掌握催化作用的基本规律,了解催化作用的化学本质,熟悉催化剂的制备、催化剂性能评价及催化反应器等催化核心技术。在此基础上通过安排一定的实验演示课和文献检索以及讲演讨论等,使学生对催化剂和催化作用等有更直观和深入的认识,为从事科研开发和化工生产及其管理奠定扎实的理论基础。

四川大学化学工程学院工业催化教研室开设“催化剂工程”与“催化剂新材料”等化工研究生课程和本科课程已有 10 余年,先后有夏代宽、蒋文伟、梁斌、储伟、罗仕忠等主讲。通过多年教学实践,几经修改补充,在四川大学研究生院的立项支持下出版了这本书。

本书各章节的编写人员为:第1、4章:储伟;第2、8章:罗仕忠、储伟;第3章:储伟、王立楠;第5章:罗仕忠、慈志敏、储伟;第6章:储伟、许俊强;第7章:储伟、童东革;第9章:储伟、士丽敏。

本书可作为高等学校的化学工程和工艺学科及工业催化学科的教学用书,适用于理工科化学化工类专业研究生和高年级学生的教材或教学参考书,对于环境科学、精细化工和石油化工等方面的科研人员、技术人员和研究生提供有效的参考。

本书也凝聚了作者的同事与学生的心血和劳动。特别是梁斌教授、朱家骅教授和张涛教授积极支持我的科研和教学工作;邱发礼教授提供了许多有益的建议和帮助;我的部分研究生对各章节提出了许多好的改进意见,帮助绘制图表,校对全书;四川大学研究生院、化学工程学院和化工系的领导对本书的出版给予了热情的关心、帮助和支持;四川大学出版社则热情、细致地组织了出版工作。我在此对他们表示深切的感谢。

本书在编写过程中参考了大量国内外有关著作和文献,在此向各位作者深表谢意。由于作者水平有限,书中不妥之处恳请各位专家和读者不吝批评指正。

储 伟

http://teacher.scu.edu.cn/ftp_teacher0/chuwei

2006年8月于四川大学望江校区

目 录

前 言

第1章 催化剂与催化作用	1
1.1 催化剂发展的历史及其重要性	1
1.2 催化剂及催化作用的定义与基本特性	3
1.3 催化作用基础	5
1.3.1 催化作用的化学本质	5
1.3.2 热力学基础	6
1.3.3 动力学基础	8
1.4 催化反应和催化剂分类	8
1.4.1 催化反应分类	8
1.4.2 催化剂分类	11
1.5 催化剂的基本组成	12
1.5.1 主(共)催化剂(活性组分)	13
1.5.2 助催化剂(助剂)	13
1.5.3 载体	14
1.6 催化剂的反应性能	15
1.6.1 催化剂的活性	16
1.6.2 催化剂的选择性	16
1.6.3 催化剂的稳定性	17
1.7 工业催化剂开发简述	18
1.7.1 工业催化剂的基本要求	18
1.7.2 工业催化剂的设计方法	19
1.8 重要催化剂简介	20
1.8.1 催化氧化催化剂	20
1.8.2 加氢催化剂	21
1.8.3 脱氢催化剂	22
1.8.4 芳烃转化催化剂	23
1.8.5 石油炼制催化剂	23
1.8.6 化肥工业催化剂	25
1.8.7 聚合反应催化剂	25
1.8.8 环境保护催化剂	26
1.9 催化科学和技术展望	27
参考文献	28

第2章 吸附与催化作用	31
2.1 概论	31
2.2 吸附作用	31
2.2.1 物理吸附与化学吸附	31
2.2.2 化学吸附类型和化学吸附态	32
2.2.3 吸附力	36
2.2.4 吸附速率和脱附速率	36
2.3 吸附平衡和等温方程	37
2.3.1 固体吸附剂的表面模型	37
2.3.2 吸附位能曲线	38
2.3.3 等温吸附线	39
2.3.4 等温吸附方程	40
2.4 催化剂的表面积和孔结构	43
2.4.1 催化剂表面积的测量	44
2.4.2 孔结构	45
2.4.3 催化剂的孔内扩散	48
2.5 吸附和催化反应过程中的溢流现象	48
2.5.1 溢流现象及其定义	48
2.5.2 溢流的相关过程	49
2.5.3 溢流物种及溢流形式	50
2.5.4 溢流产生的催化作用	52
2.5.5 工业催化过程中的溢流现象	52
参考文献	53
第3章 催化剂的制备与应用	55
3.1 浸渍法	55
3.1.1 载体和浸渍液	56
3.1.2 浸渍过程	57
3.1.3 浸渍法分类	57
3.1.4 影响因素	59
3.1.5 浸渍催化剂的热处理	60
3.2 沉淀法	61
3.2.1 沉淀剂的选择	61
3.2.2 沉淀过程	62
3.2.3 沉淀法的分类	63
3.2.4 沉淀法的影响因素	65
3.2.5 沉淀的后处理过程	67
3.3 溶胶-凝胶法	69
3.3.1 溶胶的制备	70

3.3.2	溶胶-凝胶的转化	70
3.3.3	凝胶的干燥	71
3.3.4	后处理	72
3.3.5	溶胶-凝胶法制备催化剂的应用实例	72
3.4	微乳化技术制备催化剂	74
3.4.1	微乳化技术	74
3.4.2	微乳液合成纳米材料的影响因素	75
3.4.3	微乳液的制法	77
3.4.4	非离子表面活性剂微乳体系	78
3.5	等离子体、微波、超声等非常规技术制备催化剂	78
3.5.1	等离子体技术	78
3.5.2	微波技术	81
3.5.3	超声波技术	84
3.6	水热反应合成方法	85
3.6.1	概述	85
3.6.2	实例	86
3.7	其他催化剂制备方法	86
3.7.1	混合法	86
3.7.2	离子交换法	87
3.7.3	熔融法	88
	参考文献	88

第4章	金属催化剂与催化作用	91
4.1	金属催化剂的主要类型及催化反应示例	91
4.2	金属的微观结构	93
4.2.1	金属的晶体结构	93
4.2.2	晶格的缺陷与位错	94
4.3	研究金属催化作用的几种化学键理论	95
4.3.1	能带理论	95
4.3.2	价键模型	96
4.3.3	配位场理论	97
4.4	金属催化剂晶体结构与催化性能的关系	97
4.4.1	金属晶格不规则性与催化性能	97
4.4.2	金属催化活性的经验规则	97
4.5	负载型金属催化剂	99
4.5.1	金属晶粒的分布	99
4.5.2	金属的分散度	100
4.5.3	活性金属与载体的相互作用	100
4.5.4	结构敏感型和非敏感型反应	103

4.6	双金属催化剂	104
4.6.1	双金属的表面组成	104
4.6.2	双金属的催化特征	105
4.6.3	双金属上的催化反应	105
4.7	烧结和迁移性	107
4.8	金属催化剂的中毒	109
4.9	金属催化剂催化作用的典型实例剖析	110
4.9.1	合成氨工业催化剂	110
4.9.2	乙烯环氧化工业催化剂	111
	参考文献	112
第5章	金属氧化物催化剂及其催化作用	115
5.1	金属氧化物催化剂的应用及分类	116
5.1.1	金属氧化物的应用	116
5.1.2	金属氧化物催化剂的结构类型	117
5.2	金属氧化物的性质及结构与催化作用的关系	121
5.2.1	金属氧化物的缺陷和半导体性质	122
5.2.2	金属氧化物的酸碱性	124
5.3	金属氧化物的氧化还原机理	125
5.3.1	过渡金属氧化物表面的 $M=O$ 键与催化作用	125
5.3.2	金属氧化物催化剂的氧化还原 (Redox) 机理	125
5.4	金属氧化物催化剂的典型应用实例	126
5.4.1	C_3 烃氨氧化制丙烯腈复合氧化物催化剂	126
5.4.2	钒系复合氧化物催化剂催化苯选择氧化制顺酐	127
5.4.3	烟气脱硫催化剂及其催化作用	129
5.4.4	NO_x 净化催化剂及应用	131
5.4.5	挥发性有机化合物处理用催化剂及其应用	132
5.4.6	二氧化钛光催化剂的应用	135
	参考文献	138
第6章	分子筛催化剂及其催化作用	141
6.1	分子筛简介	141
6.1.1	分子筛的种类与组成	141
6.1.2	分子筛的结构	147
6.2	分子筛的性质	149
6.2.1	分子筛的物理性质	149
6.2.2	分子筛的离子交换性质	150
6.2.3	分子筛的活性中心理论	150
6.2.4	分子筛酸位的形成理论	150

6.2.5	分子筛阳离子催化性能理论	151
6.2.6	分子筛阴离子骨架催化性能理论	151
6.2.7	分子筛中水的催化性能	154
6.3	微孔分子筛材料催化化学	154
6.3.1	微孔分子筛的合成方法	155
6.3.2	微孔分子筛的催化化学	157
6.4	中孔分子筛材料催化化学	160
6.4.1	中孔分子筛的合成方法	161
6.4.2	中孔材料的应用及研究进展	162
6.4.3	中孔分子筛研究中存在的主要问题和发展方向	165
	参考文献	166
第7章	络合催化剂及其催化作用	170
7.1	络合催化简介	170
7.2	络合催化作用类型	171
7.2.1	配位催化作用	171
7.2.2	电子迁移催化作用	171
7.3	络合催化理论概要	174
7.3.1	原子轨道和络合物晶体场理论模型	174
7.3.2	配位场理论	178
7.4	络合催化在工业上的应用	179
7.4.1	烯烃氢甲酰化反应	179
7.4.2	烃类氧化反应	179
7.4.3	不饱和烃加氢反应	181
7.4.4	甲醇羰基化合成乙酸	182
7.5	均相络合催化剂的固载化	182
7.6	含配体环境的金属纳米粒子胶态溶液的催化反应	183
7.6.1	交联反应中的应用	183
7.6.2	氢化反应和氧化反应中的应用	186
7.7	金属配合物催化剂在不对称催化合成反应中的应用	187
	参考文献	189
第8章	固体酸碱催化剂及其催化作用	191
8.1	固体酸、碱的定义及分类	191
8.2	固体表面酸、碱性的表征	192
8.2.1	酸性表征	193
8.2.2	固体表面碱性的测定	197
8.3	酸碱中心的形成过程	199
8.3.1	氧化物酸中心的形成	199

8.3.2	氢型沸石分子筛的酸中心的形成	200
8.3.3	金属硫酸盐酸中心的形成	202
8.4	固体酸碱催化反应机理	202
8.4.1	酸催化机理——正碳离子机理	202
8.4.2	碱催化反应机理——负碳离子机理	203
8.4.3	固体酸碱的协同催化作用	204
8.5	固体表面酸性与催化活性的关系	204
8.5.1	酸量与催化活性的关系	204
8.5.2	酸强度与催化活性的关系	205
8.5.3	酸性位与催化活性和选择性的关系	206
8.6	典型的固体酸碱催化剂及其催化作用	206
8.6.1	杂多酸化合物	206
8.6.2	$\text{SO}_4^{2-}/\text{M}_x\text{O}_y$ 系列固体超强酸	210
8.6.3	固体碱	212
	参考文献	214
第9章	催化剂性能评价及其结构表征	216
9.1	催化剂活性评价概述	216
9.1.1	活性评价的目的	216
9.1.2	活性评价参数的选择	217
9.1.3	影响活性测试的因素	217
9.2	催化剂的宏观物性与测定	218
9.2.1	催化剂表面积及主要测定方法(BET法)	218
9.2.2	催化剂孔结构表征	219
9.2.3	催化剂的机械强度测定	221
9.3	催化剂的微观结构表征	221
9.3.1	电子显微分析	222
9.3.2	热分析技术	226
9.3.3	X射线衍射分析方法	233
9.3.4	电子能谱分析	239
9.3.5	程序升温分析技术	243
9.3.6	红外光谱方法	247
9.3.7	漫反射紫外-可见光谱方法	251
9.3.8	其他分析方法	253
	参考文献	254
	总习题	257
	储伟教授发表的代表作 20 篇	261

第 1 章 催化剂与催化作用

1.1 催化剂发展的历史及其重要性

催化是一个涉及了物理、化学的十分复杂的现象，最早记载“催化现象”的资料可以追溯到 16 世纪末（1597 年）德国的《炼金术》一书，但当时“催化作用”还没有被作为一个化学概念。直至 1835 年，瑞典化学家 J. J. Berzelius（1779—1848）才在其著名的“二元学说”的基础上，把观察到的零星化学变化归结为是由一种“催化力（catalytic force）”所引起的，并引入了“催化作用（catalysis）”一词。从此，对于催化作用的研究才广泛地开展起来，其进展推动着整个化学工业的发展，特别是对石油化工、煤化工、精细化工等产生了深远影响。

化学工业以生产化工产品为目的，是一个技术含量高、产品复杂的大型产业。据最新统计，化学物质现已达到一千万种左右，其中大部分是近 30 年发现与合成的。在现代的化学工业和石油加工工业、食品工业、燃料工业及其他如精细化工的一些部门生产中，催化过程占化工产业总过程的 85% 以上。从作为工业血脉的石油炼制，到农业生产必备的合成氨工业；从基本有机化工产品甲醇，到无机化工中的“三酸两碱”；从三大合成材料生产的飞跃，到现代高值化的精细化工产品多样化，以及庞大的生物化学行业的建立（涉及医药、农药、食品、能源、冶金等）和日益引起人们重视的环境保护工程，无不与催化技术的不断创新密切相关。表 1-1 列出了 20 世纪建立在催化作用基础上的重要化学工业的创新和进步。可以说，没有催化剂的发现和不断研制开发，就没有近代化学工业的发展。催化剂是化学工业的基石，“催化”科学正是立足于多门学科基础上的活跃的边缘性学科和交叉学科，它的过去和现在，都是在不断汲取大量别的分支学科的有益成就的基础上发展并逐渐丰富起来的。

表 1-1 催化基础上的重要工业化学事例

年代	名称和主要化学反应	所用催化剂的主要组分
1900	油脂加氢制取奶油代替品	Ni
	由合成气制甲烷	Ni
	甲醇氧化制甲醛 $\text{CH}_3\text{OH} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{HCHO} + \text{H}_2\text{O}$	Ag/浮石
1910	合成乙醛 $\text{CH}\equiv\text{CH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{CHO}$	HgSO_4
	合成氨 $\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{NH}_3$	Fe 等
	接触法合成硫酸 $\text{SO}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_3$	V_2O_5
	高压加氢，由煤合成油品	Fe - Mo - S
	接触法氨氧化合成硝酸	Pt - Rh

续表 1-1

年代	名称和主要化学反应	所用催化剂的主要组分
1920	合成甲醇 $\text{CO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$ 由水煤气合成油品	$\text{ZnO} - \text{Cr}_2\text{O}_3$ Fe 、 Co
1930	由乙炔合成氯丁二烯、丁二烯等，合成橡胶 由酒精合成丁二烯，合成橡胶 固定床催化裂化 环氧乙烷生产 $\text{CH}_2=\text{CH}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \begin{array}{c} \text{O} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{CH}_2-\text{CH}_2 \end{array}$ 乙烯聚合制聚氯乙烯、低密度聚乙烯 石油催化裂化制汽油等 氧化合成（OXO 合成）	$\text{CuCl}_2 + \text{NH}_4\text{Cl}$ $\text{MgO} - \text{ZnO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ 硅铝酸 Ag CrO_2 、过氧化物 $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ $\text{Co}(\text{CO})_4$
1940	烯烃烷基化制汽油 苯加氢合成环己烷	HF 、 AlCl_3 、 H_3PO_4 、 H_2SO_4 、 Ni 、 Pt
1950	高密度聚乙烯 乙烯氧化制乙醛 $\text{CH}_2=\text{CH}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{CHO}$ 对二甲苯制对苯二甲酸	$\text{TiCl}_4 - \text{Al}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$ 均相 Pd/Cu 均相 Co/Mn
1960	催化加氢脱硫 丁烯氧化制丁烯二酸酐 丙烯氧化合成丙烯腈、丙烯酸、丙烯醛 丁烯氧化脱氢制丁二烯 丁二烯临氢腈化合成己二腈	$\text{CoO} - \text{MoO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ V 、 P -氧化物 Pt 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ $\text{Pt} - \text{Re}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 分子筛
1970	低压合成甲醇 NO_x 的加氢还原 甲醇羰基合成乙酸 甲醇制汽油	$\text{Cu} - \text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Cr_2O_3) 贵金属 均相 Rh $\text{ZSM} - 5$ 分子筛
1980	甲醇芳构化 氮氧化物加氢还原	$\text{ZSM} - 5$ 分子筛 $\text{V}_2\text{O}_5 - \text{TiO}_2$
1990	催化燃烧 贵金属催化聚合	Pd 、 Pt 、 Rh/SiO_2 茂 ZrCl_2 - 甲基铝氧烷

由此可见，催化化学在国民经济中具有十分重要的作用。实践证明，一个催化剂的改进或性能上的突破，必然会由于转化率、选择性的提高而大幅度提高设备生产能力和产品质量，带来巨大的经济效益。每种新催化剂和新催化工艺的研制成功，都会引起包括化工、石油化工等重大工业在内的生产工艺上的改革，生产成本可以大幅度降低，并为改变人类生活习惯提供一系列新产品和新材料。1996 年，在美国召开的第 11 届国际催化会议上报告指出，在发达国家中，催化技术对于国民生产总值的直接贡献和间接贡献高达 20% ~ 30%。在我国，催化技术同样是石油炼制、石油化工、化肥和环境保护等国民经济