

研究生教学用书
教育部研究生工作办公室推荐

高等反应工程 (第三版)

Advanced Reaction Engineering

朱炳辰 翁惠新 朱子彬 编著
应卫勇 江洪波 朱学栋 修订



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

高等反应工程

(第三版)

Advanced Reaction Engineering

朱炳辰 翁惠新 朱子彬 编著
应卫勇 江洪波 朱学栋 修订

常州大学图书馆
藏书章

中国石化出版社

内 容 提 要

本书以石油加工、基本有机化工、合成氨生产中的催化反应过程为背景,重点讨论石油加工过程中的多重反应体系动力学,催化剂失活反应动力学,催化反应器设计概论,气-固相多段绝热和连续换热式反应器,径向及轴径向二维流动反应器,气-液-固三相反应及反应器,并介绍催化反应过程的进展。

本书根据化学工程与技术学科的化学工艺和工业催化的硕士研究生学位课程“高等反应工程”的教学大纲编写,是学位课程的教材,同时也是学术专著,可供科研单位、设计院所、企业的工程技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

高等反应工程/朱炳辰,翁惠新,朱子彬编著.—3版.
—北京:中国石化出版社,2019.8
ISBN 978-7-5114-5389-1

I. 高… II. ①朱… ②翁… ③朱… III. 化学反应工程-教材 IV. TQ03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 175246 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市朝阳区吉市口路9号
邮编:100020 电话:(010)59964500
发行部电话:(010)59964526
<http://www.sinopec-press.com>
E-mail:press@sinopec.com
北京柏力行彩印有限公司印刷
全国各地新华书店经销

*

710×1000 毫米 16 开本 32 印张 531 千字
2019 年 8 月第 3 版 2019 年 8 月第 1 次印刷
定价:78.00 元

第三版序

朱炳辰、翁惠新、朱子彬编著的《催化反应工程》(第一版),中国石化出版社于2000年2月出版;修订版于2010年7月出版。

华东理工大学化工学院为了加强化学工程与技术学科硕士研究生的培养,出版硕士研究生教学的系列教材,提升硕士研究生的教学质量,要求开展《催化反应工程》教材的修订工作。化学工程与技术学科硕士研究生的学位课程为“高等反应工程”,为适应教学需求,《催化反应工程》改名为《高等反应工程》。

本书根据化学工程与技术学科的化学工艺和工业催化的硕士研究生学位课程“高等反应工程”的教学大纲编写,是学位课程的教材,同时也是学术专著,可供科研单位、设计院所、企业的工程技术人员使用。

本书的主要内容是以石油加工、基本有机化工、合成氨生产中的催化反应过程为背景,重点讨论石油加工过程中的多重反应体系动力学,催化剂失活反应动力学,催化反应器设计概论,气-固相多段绝热和连续换热式反应器,径向及轴径向二维流动反应器,气-液-固三相反应及反应器,并介绍催化反应过程的进展。

本书对《催化反应工程(修订版)》的主要修改内容如下:

第一章“多重反应体系动力学”,对部分内容作了适当精简,其中“五、催化裂化十一集总动力学模型的开发与应用”删减了模型的建立、产率预测计算、模型的工业验证、模型的工业应用等内容,仅保留装置因素的设置与求取,并与“四、催化裂化十集总动力学模型”内容相合并;对第七节“多重反应体系动力学的研究进展”作了精简,以单事件动力学模型作为例子进行详细介绍,其余模型仅列出相关参考文献;更新了《大气污染防治法》和汽车尾气排放标准等相关信息;删除了利用正交关系计算第三特征向量和矩阵 X 求逆等内容;修改了速率常数 k_j 的下标表示方法、可逆单分子系统图、丁烯的异构化反应图、实例的图。

第三章“催化反应器设计概论”，修改了 Topsøe 型径向氨合成塔以及结构参数表中的流体流动方向；对于反应物 A，反应速率 r_A 为： $r_A = -\frac{dN_A}{dV_R}$ ，或 $r_A = -\frac{dN_A}{dw}$ ，或 $r_A = -\frac{dN_A}{dS}$ ；修改了单系列大型化催化反应器中关于大型化甲醇合成反应器的内容。

第四章“多段绝热式催化反应器”，关于龙格-库塔法求解常微分方程，修改了自变量、常微分方程、数值解的表示方法；对于绝热催化床平推流一维拟均相模型，以例 4-1 中温变换反应器的求解为例子，补充了中温变换反应器催化床一维拟均相模型、基础数据、求解结果；对于绝热催化床一维非均相模型，以多段球形催化床甲醇合成反应器的非均相数学模型为例，补充了催化剂的内扩散有效因子的计算式。

第五章“连续换热式催化反应器”，修改了单管逆流式、双套管并流式、三套管并流式、单管并流式催化床及温度分布示意图；修改了三套管催化床温度及浓度分布计算框图、三套管氨合成塔反应器示意图；精简了连续换热式催化床的一维模型的内容，在反应及传热的数学模型中，以三套管并流式氨合成反应器催化床为例，建立平推流一维拟均相模型；修改了环氧乙烷合成反应系统物料衡算表及计算式；修改了乙烯氧化合成环氧乙烷管式反应器催化床的二维非均相数学模型以及失活速率方程。

第六章“径向反应器和轴径向二维流动反应器”，修改了集流管流速与管长关系图、集流流道静压分布图、合流穿孔阻力系数与速比的关系图、径向反应器流体流动分布示意图，补充了轴径向反应器大型冷模实验装置示意图。

第七章“气-液-固三相反应及反应器”，修改了气液并流向上、液体为连续相的气-液-固体系操作流型图，修改了总体速率 $r_{A,g}$ 的计算式；将第三节的“三、机械搅拌反应器中三相床甲醇合成”替换为“三、机械搅拌反应器中三相床费托合成”，将例 7-2 的“机械搅拌鼓泡悬浮式反应器中三相床甲醇合成”替换为“机械搅拌釜反应器中活性炭负载钴基催化剂上的 CO 消耗宏观动力学”；增加了第八节的“三、鼓泡淤浆床费托合成”以及“例 7-7 鼓泡淤浆床费托合成反应器数学模拟”。

华东理工大学曹发海教授审阅了本书，提出了宝贵的意见和积极的建议，提高了书稿的质量，作者深表感谢。

各章的修订人为:绪论,第二章催化剂失活反应动力学中例 2-3,第三章催化反应器设计概论,第四章多段绝热式催化反应器,第五章连续换热式催化反应器,第七章气-液-固三相反应及反应器和第八章催化反应过程进展——应卫勇;第一章多重反应体系动力学和第二章催化剂失活反应动力学——江洪波;第六章径向反应器及轴径向二维流动反应器——朱学栋。

马宏方、钱炜鑫、李瑞江、周靖宇、盛海兵、黄宇轩、徐志强、韩忠昊、吴贤参加了资料整理和例题编写、运算工作。

由于修订人的水平有限,书中存在错误和疏漏之处,敬请读者批评指正。

应卫勇 江洪波 朱学栋

2019 年 7 月

目 录

绪论	(1)
第一章 多重反应体系动力学	(5)
第一节 可逆单分子系统多重反应体系动力学	(6)
一、三组元可逆单分子系统	(6)
二、特征方向法	(9)
三、丁烯异构化反应动力学实例	(17)
第二节 含有不可逆反应步骤的单分子系统多重反应体系动力学	(21)
一、与可逆系统的比较	(21)
二、用虚拟直线反应轨迹求特征向量	(23)
三、用正交关系求特征向量	(24)
四、特征根比 λ_i/λ_j 的求取	(25)
五、含有不可逆反应步骤单分子系统实例	(25)
第三节 等时间法测定速率常数	(31)
一、等时间法的理论基础	(32)
二、等时间法的可行性	(35)
三、己烷异构化反应网络动力学模型的建立	(38)
第四节 催化裂化动力学模型	(39)
一、催化裂化的化学反应	(40)
二、催化裂化反应的热力学和动力学特征	(43)
三、催化裂化三集总动力学模型	(47)
四、催化裂化十集总动力学模型	(57)
第五节 多重反应体系的集总理论和原则	(73)
一、集总理论分析	(73)
二、实际集总的一般原则	(83)
第六节 多重反应体系动力学研究进展	(84)
参考文献	(89)

主要符号	(93)
第二章 催化剂失活反应动力学	(94)
第一节 催化剂失活原因	(96)
一、中毒引起的失活	(96)
二、结焦和堵塞引起的失活	(99)
三、烧结和热失活(固态变换)	(100)
第二节 失活动力学方程和不同失活机理的动力学方程	(101)
一、催化剂失活动力学方程	(102)
二、不同机理的失活表达式	(106)
三、分离失活动力学表达式	(108)
第三节 各种催化剂活性曲线和活性关联式	(111)
一、各种催化剂活性曲线	(111)
二、各种活性关联式	(118)
第四节 实验设计和失活动力学方程的求取	(119)
一、实验设计及步骤	(119)
二、实验装置及失活动力学方程的求取	(121)
第五节 内扩散效应对催化剂失活的影响	(128)
一、多孔催化剂中的内扩散和反应	(129)
二、内扩散效应对催化剂失活的影响	(136)
三、强内扩散存在时的催化剂失活速率	(137)
第六节 典型过程——催化裂化过程失活分析	(143)
第七节 毒物化学吸附在催化剂表层上的失活过程分析	(154)
参考文献	(166)
主要符号	(170)
第三章 催化反应器设计概论	(172)
第一节 催化反应器的基本类型及基本设计原则	(172)
一、催化反应器的基本类型	(172)
二、合成氨工业中的催化反应器	(173)
三、炼油工业中的催化反应器	(186)
四、基本有机化学工业中的催化反应器	(198)
第二节 催化反应器的基础数学模型和基本计算方法	(203)

一、基本设计原则	(203)
二、基础数学模型	(205)
三、基本计算方程	(206)
第三节 催化反应器的操作参数	(209)
一、气-固相催化反应的最佳反应温度	(209)
二、温度对多重反应收率及选择率的影响	(219)
三、其他最佳操作参数	(222)
四、催化剂的形状和尺寸设计	(232)
第四节 讨论和分析	(234)
一、催化剂的工程设计	(234)
二、催化反应器的部件设计	(235)
三、单系列大型化催化反应器	(235)
参考文献	(236)
主要符号	(238)
第四章 多段绝热式催化反应器	(240)
第一节 绝热催化床反应体积的计算	(240)
一、绝热温升	(240)
二、催化剂的相对活性校正系数	(242)
三、绝热催化床平推流一维拟均相模型	(243)
四、单段绝热催化床的最佳进口温度	(244)
第二节 多段绝热式催化反应器及其优化	(248)
一、多段绝热式催化反应器的特征	(248)
二、多段间接换热式各段始末温度及转化率的优化设计	(254)
三、多段冷激式各段始末温度及转化率和段间冷激气量的优化设计	(263)
四、多段球形催化床甲醇合成反应器的非均相数学模型及优化设计	(267)
五、吸热反应的多段绝热催化反应器	(278)
第三节 讨论和分析	(282)
一、多段绝热式催化反应器的适用条件	(282)
二、催化剂的活性校正系数	(283)
三、工业颗粒催化剂的宏观反应动力学方程	(284)
四、易失活催化剂的多段绝热反应器	(285)

参考文献	(286)
主要符号	(288)
第五章 连续换热式催化反应器	(290)
第一节 管式催化床的流体力学及传热	(290)
一、管式催化床的流体力学	(290)
二、管式催化床的传热	(293)
第二节 自热式连续换热催化反应器	(300)
一、自热式连续换热管间催化床的冷管结构及传热能力分析	(300)
二、连续换热催化床的一维模型	(303)
三、连续换热式氨合成反应器的自热平衡	(316)
第三节 管式连续换热催化反应器	(321)
一、管式催化反应器的特征	(321)
二、管式催化床的一维模型	(323)
三、管式反应器的工程分析	(323)
第四节 连续换热式催化床的二维模型	(331)
一、管式催化床的二维模型	(331)
二、管间催化床的二维模型	(348)
第五节 管式反应器的操作和设计中的若干问题	(349)
一、管式反应器中烃类氧化强放热多重反应催化剂的失活和温度控制	(349)
二、管内催化床的适宜管径	(360)
第六节 讨论和分析	(361)
一、管式催化床的设计及操作优化	(361)
二、催化剂的工程设计	(363)
参考文献	(363)
主要符号	(366)
第六章 径向反应器和轴径向二维流动反应器	(369)
第一节 径向反应器的流体均布	(369)
一、流体径向流动的流体力学问题	(369)
二、径向流体分布的形式和分布器的开孔设计	(377)
第二节 轴径向反应器的流体二维流动	(387)
一、轴径向床中的流体二维流动	(388)

二、轴径向床中流体二维流流动模型·····	(393)
第三节 讨论和分析·····	(402)
参考文献·····	(408)
主要符号·····	(410)
第七章 气-液-固三相反应及反应器·····	(411)
第一节 气-液-固三相反应器的类型及宏观动力学·····	(411)
一、气-液-固三相反应器的类型·····	(411)
二、气-液-固三相反应器的应用·····	(415)
三、气-液-固三相反应的宏观动力学·····	(417)
第二节 滴流床三相反应器·····	(420)
一、气、液体并流向下通过固定床的流体力学·····	(420)
二、滴流床三相反应器中的传递过程·····	(422)
三、滴流床三相催化反应过程开发研究·····	(424)
第三节 机械搅拌鼓泡悬浮式三相反应器·····	(429)
一、机械搅拌鼓泡悬浮式三相反应器的主要形式·····	(429)
二、反应器中固体的悬浮·····	(430)
三、机械搅拌釜中三相床费托合成·····	(430)
第四节 鼓泡淤浆床反应器·····	(435)
一、鼓泡淤浆床反应器的流体力学·····	(436)
二、鼓泡淤浆反应器中的传递过程·····	(446)
第五节 气-液相并流向上三相流化床反应器·····	(451)
一、气-液相并流向上三相流化床的流体力学·····	(451)
二、气-液相并流向上三相流化床中的传递过程·····	(453)
第六节 三相悬浮床中的相混合·····	(454)
一、三相流化床中的相混合·····	(455)
二、三相鼓泡淤浆床和携带床及二相气-液相鼓泡床的液相和气相混合·····	(457)
第七节 压力对三相悬浮床反应器操作性能的影响·····	(458)
一、压力及气体密度对气-液相鼓泡床流体力学的影响·····	(459)
二、压力及气体密度对气-液相传质系数的影响·····	(460)
三、压力对气-液相鼓泡床液相轴向混合的影响·····	(460)
第八节 气-液-固三相悬浮床反应器的数学模型·····	(461)

一、三相反应器的数学模型	(461)
二、鼓泡淤浆床环氧乙烷合成和甲醇合成	(462)
三、鼓泡淤浆床费托合成	(469)
第九节 讨论和分析	(473)
一、悬浮床气-液-固三相反应器在强放热催化反应中的应用展望	(473)
二、悬浮床气-液-固三相反应器所用的液相载热体	(473)
三、加压搅拌反应釜作为三相反应器的应用	(474)
四、鼓泡淤浆三相反应器的气体分布器设计	(474)
五、加压、加温下鼓泡淤浆三相反应器中的传递过程及相混合研究	(474)
参考文献	(475)
主要符号	(481)
第八章 催化反应过程进展	(484)
第一节 强制振荡非定态周期操作催化反应过程	(484)
一、强制周期操作	(484)
二、流向周期变换操作	(484)
三、循环流化床反应器	(485)
第二节 催化-吸收偶联	(487)
第三节 催化-吸附偶联	(488)
第四节 催化-催化偶联	(488)
第五节 催化-蒸馏	(489)
第六节 膜催化	(491)
一、烃类脱氢反应	(492)
二、烃类加氢反应	(493)
三、烃类氧化反应	(493)
四、CO 水蒸气变换反应	(493)
第七节 超临界化学反应	(494)
一、超临界流体作为反应介质所具有的优良特性	(494)
二、在超临界流体中化学反应的特点	(495)
参考文献	(497)

绪 论

石油加工、基本有机化工和合成氨是我国的重要工业，其中的核心过程是催化反应过程，绝大多数使用固体催化剂和气-固相催化反应器。中华人民共和国建立 70 年来，我国与上述工业有关的广大科技工作者在老一辈科学家领导下，经过多年的艰辛奋斗、发展和创新，自力更生，在关键催化剂开发方面，获得丰硕成果，如催化裂化、加氢裂化、催化重整、丙烯腈合成、环氧乙烷合成、乙苯脱氢、甲醇合成和合成氨装置的成套催化剂的研究成果，已基本达到国际同步水平，关键的工业催化剂，全部使用国产产品；同时相应地研究了有关的催化反应动力学和传递过程，对工业多相反应器的操作条件进行了与工业催化剂相适应的修改，改进了工业催化反应器的设计，自行开发了新型催化反应器，如径向流动丁烯催化氧化脱氢和负压操作的轴径向流动乙苯脱氢催化反应器等正在研究三相淤浆床甲醇合成和环氧乙烷合成反应器等。

催化反应动力学和催化反应器的研究组成了催化反应工程，而催化反应工程是化学反应工程的最主要内容。在多相催化反应器中进行的多相反应除了反应分子在催化剂表面上的反应外，还必须包括相际和催化剂颗粒内的质量、热量和动量的传递过程。研究反应分子间的反应机理和反应速率的化学反应动力学称为本征动力学；研究工业规模化学反应器中化学反应过程与质量、热量、动量传递过程同时进行的化学反应与物理变化过程综合的过程动力学称为宏观动力学。以宏观动力学为基础，还要进一步对工业反应装置的结构设计、最佳操作条件的确定及控制、模拟放大等进行研究，以期应用于生产实践，获得良好的技术经济效果。

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动力学及反应过程的工程分析的若干基本问题，确定了“化学反应工程学”的名称。40 多年来，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 20 世纪 60 年代电子计算机技术的应用，数值计算方法和现代测试技术的发展，能够洞察许多反应相内的物理与化学现象，使得许多表征宏观反应过程的联立代数方

程、非线性常微分及偏微分方程能求得数值解，化学反应工程的基础理论和实际应用都有了很大的飞跃。化学反应工程及其中的催化反应工程广泛地应用了化学、化工热力学、流体力学、传热、传质以及生产工艺、经济学等方面的理论知识和经验，是这些理论知识和经验在工业反应器设计和最佳化方面的综合。

早期研究化工单元操作的传统方法是经验归纳法，将实验数据用因次分析和相似方法整理而获得经验的关联式。这种方法在管道内单相流体流动的压力降、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的相互作用的复杂关系，例如化学反应与传质、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的不均匀性，化学反应速率与温度的非线性关系等，传统的因次分析和相似方法已不能反映化学反应工程的基本规律，而必须用数学方法来描述工业反应器中各参数之间的关系。这种数学表达式称为数学模型。有了数学模型，才可能用数学方法来模拟反应过程，这种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，比传统的经验方法能更好地反映其本质。

数学模拟方法的基础是数学模型，数学模型的基础是对过程多种影响因素的分析或称为物理模型。数学模型按照处理问题的性质可以分为：化学动力学模型、流动模型、传递模型及宏观动力学模型。

工业反应器中宏观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。如果气-固相催化反应着重讨论单颗粒的宏观反应动力学，则宏观动力学模型是化学动力学模型与传递过程模型的综合。如果讨论的是整个反应器，那么宏观动力学模型还应将流动模型包括在内。

各种工业反应过程的实际情况是复杂的，尤其是流动反应器内流体和固体的运动状况和多孔固相催化剂内的宏观反应过程和固相催化剂由于某种原因而失活，一方面由于对过程还不能全部地观测和了解；另一方面由于数学知识和计算手段的限制，用数学模型来完整地、定量地反映事物全貌目前还是不现实的。因此，将宏观反应过程的规律加以去粗取精的加工，根据主要的矛盾和矛盾的主要方面提出一定的模型，并在一定的条件下将过程加以合理简化，是十分必要的。简化是数学模拟方法的重要环节。合理简化模型要能达到下列四方面的要求：(1)不失真；(2)能满足应用的要求；(3)能适应当前实验条件，以便进行模型

鉴别和参数估值；(4)能适应现有计算机的能力。

数学模型的建立是以来源于实验研究对于客观事物规律性的认识而在一定的条件下加以合理简化的工作，在不同的条件下其简化内容也是不相同的。各种简化模型是否失真，要通过不同规模的科学实验和生产实践去检验和考核，对原有的模型进行修正，使之更为合理。物理化学中的理想气体定律，化工单元操作中吸收过程的双膜论，都是在一定条件下建立的行之有效的合理的简化模型。

将小型实验获得的科研成果应用于工业装置，并综合各方面的有关因素提出最佳化设计和操作方案，这就是“工程放大”和“最佳化”。一般来说，化工产品生产的单元操作设备，如换热设备，由于影响因素比较少，放大及最佳化还比较易于收效，而催化反应器由于其中所进行的过程涉及化学反应、流动状况、传热及传质等错综复杂、相互关联的多参数，它的工程放大和最佳化的难度比进行物理过程的单元操作设备要大得多，成为整个生产系统的工程放大和最佳化的关键。

以往要把小型实验的研究成果推广到工业生产中使用，需要经历一系列的中间试验，通过中间试验来考核不同规模的生产装置能否达到小型实验所预期的效果。中间试验不仅耗费大量的人力、物力和财力，并且试验的周期相当长，一般要三五年甚至更长一些，这就会延误大型装置的建设。如果没有掌握反应过程的规律，未能从分析反应器结构和各种参数对反应过程的影响中找到关键所在，即使小型试验成功，而较大规模的生产试验往往也会失败。因此，要求尽可能地掌握反应过程的基本规律，掌握各种工业反应器中有关结构参数和操作参数对反应器操作性能的影响，以求尽可能地减少中试的层次和增大放大的倍数。人们在实践中提出了各种化工生产的工程放大方法，主要有相似放大法、经验放大法和数学模拟放大法。

生产装置以模型装置的某些参数按比例放大，即按相同准数对应的原则放大，称为相似放大法。例如，按照设备的几何尺寸比例放大，称为几何相似放大；按照因次分析得出的准数来比拟，如按照表征流体流动的雷诺准数相同，称为准数相似放大。由于工业反应器中化学反应过程与流体流动过程、热量及质量传递过程交织在一起，而它们之间的函数关系又是非线性的，用单一的相似放大法往往是片面的，会顾此失彼而失败。

某些催化反应器的反应体积往往采用经验计算或定额计算的方法来放大，也就是根据催化剂的时空产率(单位体积催化床在单位时间内获

得的产品量)或空间速度来放大,称为经验放大。这种方法往往在某些复杂的过程,特别是多相流动过程,对其流动掌握甚少,或者某些多重反应网络,其动力学模型不明,很难奏效。采用经验放大法一般只适用于相同或相近似的条件下进行小倍数的工程放大。

经验放大法的局限性很大,只可以在相近似的条件下使用,如果希望通过改变反应过程的操作条件和反应器的结构来改进反应器的设计,或者进一步确定反应器的最佳设计方案或操作方案,经验放大法是不适用的,应该用数学模拟放大法。数学模拟放大方法由于掌握了工业反应过程的内在规律,可以增大放大倍数,缩短放大周期,可以用来评比各类反应器的结构及操作参数,寻求反应器的最佳设计。还可以用数学模型来研究反应过程中操作参数改变时反应装置的行为,从而达到操作最佳化。因此,数学模拟方法既是进行工程放大和最佳化设计的基础,也是制订最佳操作和控制方案的基础。

我国在充分开展有关催化反应过程的化学特征、热力学、催化剂的组成和制备方法和催化剂工程设计、反应动力学及流体力学研究的基础上,通过实践及理论分析,运用数学模拟方法,成功地开发了多种具有我国特色的催化反应器,如流化催化裂化工业装置,固定床径向及轴径向氨合成、甲醇合成、丁烯氧化脱氢、乙苯脱氢等催化反应器,固定床轴向内冷自热式及绝热-管式复合型大型甲醇合成反应器,丙烯腈流化床反应器,流化床萘氧化制苯酐反应器等。应予强调的是,流体力学和流场结构的研究是许多新型反应器如径向及轴径向固定床反应器开发的基础,流化床和气-液-固三相床的流体力学、传热、传质及气体分布和分离构件又是各种新型流化床和三相床反应器的基础。工程与工艺相互结合与渗透,必将推进催化反应过程、装备和生产工艺的不断创新、发展和深化。

第一章 多重反应体系动力学

在化学反应工程课程中，已经对不可逆反应、可逆反应、平行反应和串联反应等基本多重反应(multiple reaction)动力学行为进行过讨论。通过对某一化学反应过程的动力学分析，可以了解到：

- (1) 产品的产率和性质；
- (2) 最优化的生产条件；
- (3) 对反应器进行选型和设计。

所以，人们对于化学反应动力学非常重视，如原化学工业部明确规定：开发一个新催化剂必须有完整的化学动力学数据。

但是，在石油加工和基本有机化工等过程中，长期缺少对过程的动力学研究。主要原因在于：

(1) 这些过程尤其像炼油过程中的原料或产物组成复杂。例如铂重整原料中有 280 多种单体烃，而催化裂化原料和产物有近万种单体化合物。由于体系中组分复杂，往往使研究工作无从着手。

(2) 每种单体又可进行形形色色的反应，使反应过程异常复杂。

所以，长期以来炼油过程的开发和设计都是采用小型→中型→半工业化→大型工业化一步步逐级放大过程。如果开发一个新催化剂，往往需要 8~10 年才能在工业上应用。要找出最佳操作条件，也只能在大型装置上摸索和试验。

组分较多的反应体系称为复杂反应体系。研究复杂反应体系的动力学规律时，将面临二个方面的困难^[1]：

(1) 反应体系各组分间的强偶联。例如二甲苯异构化反应(见图1-1)，体系中三个组分互相影响，每个组分的浓度变化均受其他二个组分影响。

(2) 参与反应的组分数可能多至成千上万，难以处理每种化合物的反应。

本章将介绍在工程实践中是如何处理这类多重反应动力学问题的，其中第一、二、三节着重介绍如何解决面临的第一个困难问题，即用学过的线性代数知识，对多重反应体系进行数学处理，把各组分高度偶联