

● 于遵宏等 编著

化工过程开发

Development
of Chemical
Technological Process



华东理工大学出版社

化工过程开发

于遵宏 等 编著

华东理工大学出版社

内 容 提 要

本书讲述化工过程开发方法,含概论、化工前沿、开发方法、小型工艺试验、大型冷模试验、中间试验、过程分析与合成、经济评价、概念设计与基础设计内容共九章。

本书可作为化工工艺类与相关专业教材,也可供从事化工过程研究与开发工作的工程技术人员参考。

(沪)新登字 208 号

化工过程开发

于遵宏 等 编著

华东理工大学出版社出版发行

上海市梅陇路 130 号

邮政编码 200237 电话 64104306

新华书店上海发行所发行经销

上海展望印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 13.75 字数 368 千字

1996 年 12 月第 1 版 1997 年 6 月第 1 次印刷

印数 1 - 4 000 册

ISBN 7 - 5628 - 0752 - 3/TQ · 59 软精装定价 20.00 元

前 言

化工过程开发是指由实验室研究成果(新工艺、新产品等)到实现工业化的科学技术活动。按照化工部新技术开发条例,其研究内容主要包括过程研究(含小型工艺试验、大型冷模试验、中间试验)与工程研究(含概念设计、经济评价、基础设计)共六个环节。化工过程开发的主要理论基础是化学工程与科学方法论,它是工艺、工程、设备、控制、经济、环保等多种学科与技术的交汇点。

化学工业具有原料、产品、工艺、技术多方案性的基本特征,即不同原料经过不同的加工工艺可以得到相同产品;同一原料经过不同加工工艺可以得到不同产品;同一原料经过不同加工工艺可以得到相同产品。这种多方案性源于科学技术,深刻地蕴含着经济的盈亏、社会效益的大小与环境保护的优劣,从而使化学工业成为国民经济中最为活跃、竞争性最强的部门之一。因而研究与开发是技术进步的源泉与必由之路,是化学工业昌盛之本。

国内外化工界积累了诸多化工过程开发方法,有代表性的是逐级经验放大方法,例如本世纪初德国哈柏(Haber)、波施(Bosch)开发合成氨技术采用的方法;数学模型方法,例如60年代美国福年轮胎与橡胶(Good year Tire & Rubber)公司加尔梦(Garmon)、莫路(Morrow)和安豪恩(Anhorn)开发丙烯二聚,未经中试直接放大17 000倍;1981年化工部科技局制订科技开发条例时,吴金城提出了化工过程开发工作框图;华东理工大学陈敏恒、袁渭康倡导的在反应工程理论与科学方法论指导下进行工业反应过程开发方法等等。

为了提高学生综合质量,培养其运用知识的能力,掌握方法论的基本内容,华东理工大学自1987年起在化工工艺类及相关专业中开设《化工过程分析与开发》课程,作为必修、限选、选修内容之一。本书就是在此基础上写成的,参加编写工作的还有龚欣、于建国、王辅臣、吴韬、于广锁、潘天舒、曹恩洪。由于水平所限,时间仓促,错误和片面性在所难免,敬请读者批评指正。

于遵宏

目 录

1 概 论	
1.1 相关术语概念	(1)
1.1.1 科学与技术	(1)
1.1.2 科学研究的概念	(1)
1.1.3 化工	(3)
1.2 化工在人类社会中的地位	(4)
1.2.1 化工在国民经济中的地位	(4)
1.2.2 化工与衣食住行	(7)
1.3 化学工业的资源路线	(11)
1.3.1 我国能源概况	(12)
1.3.2 石油为原料的主要产品网络	(13)
1.3.3 煤为原料的主要产品网络	(14)
1.3.4 天然气为原料的主要产品网络	(16)
1.3.5 主要有机化工原料的下游产品网络	(17)
1.4 化学工业原料、工艺与产品的多方案性	(21)
1.4.1 同一种原料制取不同产品	(21)
1.4.2 不同原料生产相同产品	(28)
1.4.3 相同原料经过不同的加工路线生产相同的产品	(29)
1.5 研究与开发在化学工业中的地位	(33)
1.5.1 开发案例	(34)
1.5.2 投入、选题与成功率	(40)
参考文献	(43)
2 化学工程前沿	(45)
2.1 生物技术	(45)
2.1.1 概 述	(45)
2.1.2 生物反应器	(50)
2.1.3 生物物质分离与纯化	(60)
2.2 微电子化工	(62)
2.2.1 概 述	(62)

2.2.2	信息技术材料的化学工艺与工程	(63)
2.2.3	微电子化工前沿	(73)
2.3	能源与能量资源加工	(80)
2.3.1	概 述	(80)
2.3.2	开发能源技术	(81)
	参考文献	(90)
3	化工过程研究与开发方法	(91)
3.1	科学技术方法论概述	(91)
3.1.1	科学研究方法论框图	(92)
3.1.2	搜集事实材料的直接方法	(94)
3.1.3	科学认识的思维加工方法	(110)
3.1.4	工程研究的一般方法	(122)
3.2	化工过程研究与开发基本方法	(130)
3.2.1	两种开发方法	(130)
3.2.2	开发工作框图	(135)
3.2.3	正交试验设计	(138)
3.2.4	数学模型	(154)
	参考文献	(169)
4	小型工艺试验及其阶段任务	(171)
4.1	小型工艺试验的序贯分类	(172)
4.1.1	预实验	(172)
4.1.2	系统实验	(194)
4.2	参数估计	(201)
4.2.1	一元线性回归	(202)
4.2.2	代数模型的参数估计	(213)
4.2.3	常微分模型的参数估计	(225)
4.3	工艺条件与反应器选择	(232)
4.3.1	工艺条件选择	(232)
4.3.2	反应器型式选择	(237)
	参考文献	(244)
5	大型冷模试验	(245)

5.1	概 述	(245)
5.2	大型冷模试验的理论基础	(248)
5.2.1	相似原理	(248)
5.2.2	相似准数的导出	(255)
5.2.3	相似分析	(263)
5.3	冷模试验实例	(265)
5.3.1	受限射流流场结构	(265)
5.3.2	液体雾化	(275)
5.3.3	固体颗粒在气流中运动	(283)
	参考文献	(289)
6	过程分析与合成	(290)
6.1	原料制备与产品分离的主要单元方法	(291)
6.1.1	增加表面积与介质混合的典型方法	(292)
6.1.2	气固相分离方法	(294)
6.1.3	液固相分离方法	(295)
6.1.4	液相分离方法	(296)
6.1.5	气相分离方法	(297)
6.1.6	气液相分离方法	(298)
6.2	过程分析与合成	(299)
6.2.1	推论分析	(299)
6.2.2	功能分析	(304)
6.2.3	形态分析	(306)
6.2.4	调优过程合成	(311)
6.3	过程分析与合成案例	(317)
6.3.1	氯乙烯生产过程	(317)
6.3.2	烃类裂解制乙烯过程	(323)
	参考文献	(339)
7	经济评价	(340)
7.1	经济评价工作框图	(340)
7.1.1	工作框图	(340)
7.1.2	资金来源	(342)

7.2	项目建设总投资组成	(345)
7.2.1	设备费计算	(346)
7.2.2	工程费用估算	(359)
7.2.3	工程建设等其他费用的估算	(364)
7.2.4	不可预见费	(365)
7.2.5	流动资金	(365)
7.3	成本估算	(366)
7.3.1	成本组成	(366)
7.3.2	成本估算	(367)
7.4	经济评价标准	(368)
7.4.1	金钱的时间价值	(369)
7.4.2	评价标准	(371)
	参考文献	(375)
8	中间试验	(376)
8.1	中试装置尺度(规模)	(377)
8.1.1	决定中试装置规模的基本原则	(377)
8.1.2	中试实例	(378)
8.2	中试装置的完整性	(387)
8.2.1	工业侧线试验	(388)
8.2.2	柔性装置	(389)
8.2.3	模拟火焰加热	(390)
8.3	运行周期与测试深度	(391)
8.3.1	运行周期	(391)
8.3.2	测试深度	(391)
	参考文献	(392)
9	概念设计与基础设计	(393)
9.1	化工设计概述	(393)
9.1.1	设计程式	(394)
9.1.2	可行性研究与设计任务书内容	(395)
9.1.3	设计内容	(397)
9.2	概念设计与基础设计内容	(400)

9.2.1	概念设计	(400)
9.2.2	基础设计	(401)
9.3	流程图规范要点	(402)
9.3.1	工艺流程图	(402)
9.3.2	带控制点管道流程图	(404)
	参考文献	(406)
附录	(407)

1 概 论

为了阐明研究与开发在人类认识客观世界过程中和在积累的知识体系中的位置,也为了说明化工过程研究与开发在化工中的地位,本章着重叙述科学与技术、研究与开发以及有关化工的基本概念、化工在国民经济中的地位、资源的化学加工、化学工业的基本特征等,从而衬托出研究与开发在化工中的必要性和重要性。

1.1 相关术语概念

1.1.1 科学与技术^[1]

科学迄今尚无公认的定义,基本概念是人对客观世界的认识,是反映客观世界和规律的知识 and 知识体系,是一项与上述内容相关活动的事业。

技术迄今也无公认的定义,其基本内涵也是一种知识体系,包含硬件(工具、设备等)和软件(工艺、方法、规则、制度等)两个方面,并通过社会协作完成既定的目标。

科学与技术是辩证的统一体,科学中有技术,科学又产生技术,同样,技术也产生科学。科学回答“是什么?”,“为什么?”;技术回答“做什么?”,“怎么做?”。科学提供物化的可能,技术提供物化的现实;科学是发现,技术是发明;科学是创造知识的研究,技术是综合利用知识于需要的研究,科学是认识、改造世界的原动力,技术是改造世界的手段。

1.1.2 科学研究的概念

科学研究的英文是“Research”,含义是“反复探索”;开发的英

文是“Development”，含义是“出现、发展”。世界各国习惯于用研究与开发(R & D)表示科学研究的概念；日本直接用研究开发(RD)表示科学研究。科学研究的基本概念是创造和应用知识的探索工作。

按过程科学研究分为：基础研究、应用研究和技术开发研究。

A 基础研究(BR 或 FR)^[2]

没有特定的商业目的，以创新探索知识为目标的研究，称为基础研究。其核心是在高水平上创新。如果有特定目标，运用基础研究的方法进行的基础研究，称为应用基础研究或目标基础研究。

在化工领域中，我国目前鼓励研究的领域有：

(1) 化工热力学：化工基础数据的估算及新实验方法的开发，热力学性质和传递性质的计算机模拟，分子热力学理论模型的研究，热力学在生物、材料、能源、环境科学中的应用。

(2) 界面现象和传递过程：流体表面、界面现象和微观的研究，多组分多相流的流型、机理和流动规律的研究，高粘度和非牛顿流体的流变行为和传递性，在外“场”作用下流体流动性能和传递过程，多孔介质的传热、传质研究，浆体动力学，采用先进测试手段从微观的角度研究传递过程的机理。

(3) 颗粒技术：颗粒表征，界面现象，超细粉体的制备技术、气溶胶研究，带有磁性、电性的胶体和悬浮体的研究。

(4) 分离与纯化过程：高纯材料的制备技术，膜分离。

(5) 化工动力学和反应工程：催化剂工程，反应与分离过程结合。

(6) 过程系统工程：过程优化与控制理论，人工智能技术。

(7) 生物化工和食品化工：发酵动力学与酶动力学，生物物质的新分离纯化技术，可再生资源利用的基础工程研究，新的食品资源的开发和利用的基础性研究。

(8) 替代能源和潜在能源的化工基础研究：新型高效燃料电池的研究。

(9) 环境化工：环境友好(绿色)技术基础研究。

B 应用研究(AR)

运用基础研究成果和相关知识,为创造新产品、新方法、新技术、新材料的技术基础所进行的研究。例如新型反应器,反应过程强化,反应器的模拟和放大,节能型分离技术,新型节能技术,废气、废水和废渣的处理新技术等。

C 技术开发研究(D)

应用基础研究与应用研究成果和相关知识,为创造新产品、新方法、新技术、新材料以生产产品或完成工程任务为目的而进行的技术研究活动。其中过程研究包括:小型工艺试验、模试、冷模试验、中试,工程研究包括:概念设计、经济评价、基础设计。

基础研究的成果往往孕育了新发现、新理论、新规律与定律,其表现形式是学术论文或学术著作的推出;应用研究的成果是发明,表现形式是专利、论文、著作;开发研究的成果是将实验室的研究成果转化为第一套工业装置,表现形式是研究报告、论文、图纸以及装置、设备、产品等。

1.1.3 化工^[3]

化工是化学工艺、化学工业与化学工程的简称。是一门研究物质和能量的传递和转化的技术科学。

A 化学工艺

凡以化学方法为主,以改变物质组成与物质结构合成新物质为目的的生产过程和技术称为化学工艺。例如以氢和氮为原料生产合成氨的工艺,主要化学反应是 $3\text{H}_2 + \text{N}_2 \rightleftharpoons 2\text{NH}_3$; 以氯化钠和石灰石为原料生产纯碱的工艺,化学计量方程是 $2\text{NaCl} + \text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CaCl}_2$; 以甲醇和一氧化碳为原料生产醋酸的工艺,主要化学反应是 $\text{CH}_3\text{OH} + \text{CO} \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{COOH}$; 以乙烷为原料生产乙烯的工艺,主要化学反应是 $\text{C}_2\text{H}_6 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}_2$ 。

B 化学工业

化学工业是化学加工工业的简称,是运用化学工艺生产化学品的工厂企业形成的产业部类。我国的化学工业包括:化学肥料、

化学农药、三酸(硫酸、硝酸、盐酸)、两碱(烧碱、纯碱)、无机盐、染料、涂料、化学试剂、助剂、感光材料、磁性记录材料、石油化工、合成橡胶、塑料、化学纤维等的制造。

C 化学工程

化学工程是研究化学工业生产过程中的共同规律,用来指导化工装置的放大、设计和生产操作的科学。迄今包括:传递过程(特别是流体力学)、化工热力学、化学反应工程、过程工程和过程系统工程五个分支,其基础是单元操作。

D 化工过程

在化工生产中,从原料到产品,物流经过了一系列物理和化学加工处理步骤,人们称这一系列加工处理步骤为化工过程,或化工系统。

化工过程是围绕核心(主要)反应器组织的,其上游为原料(反应物)的前处理,以满足主要化学反应工艺条件为目标;下游为产品(生成物)的后处理,通过分离、纯化等手段,以达到产品标准为目标。除主要化学反应器外,化工过程主要由进行物理过程的单元操作(输送、加热、冷却、分离等)和进行化学过程的单元过程(化学法净化、氧化、加氢、硝化、磺化等)组成,有时也将生化处理引入化工过程,例如脱硫或废水处理。

1.2 化工在人类社会中的地位

化工几乎涉及国民经济、国防建设、资源开发和人类衣食住行的各个方面,对解决人类社会所面临的人口、资源、能源和环境等可持续发展重大问题,也将起到十分重要的作用。

1.2.1 化工在国民经济中的地位

化工是国民经济的支柱产业之一,是发展最迅速、经济效益显著、推动社会进步极富活力的领域。

A 世界第三次生产力高潮——化工技术革命

“现代科学技术基础知识”一书^[4]对世界生产力的高潮进行了概括。第一次生产力高潮发生在中国,以农业为中心,始于公元前3世纪(中国的秦汉时代),止于公元12世纪(中国的元朝);第二次生产力高潮发生在英国,中心是以机械为先导的第一次产业革命,始于17世纪,止于19世纪30年代;第四次生产力高潮发生在美国,以电力技术为中心,以电力、钢铁、化工三大技术为特征,习称第二次产业革命,1879年到1930年;第五次生产力高潮发生在日本,以技术综合创新的高技术为特征,80年代初人均产值超过欧洲,1988年超过美国。

第三次生产力高潮则发生在德国,自1851年到1900年。以化工技术革命为中心。1830年,英国产业革命已达到高潮,德国还是落后的农业国,较有基础的产业是农业和矿业。随着德国经济的发展,特别是李比希(1803~1873)首创了肥料工业和煤化学工业,霍夫曼(1818~1892)进行了染料、香料、医药合成的广泛研究,这些成果的应用给德国带来了巨大效益。1865年,化工厂已经达到几千人的规模。1871年,德国煤化学工业技术已占世界首位;1873年德国染料工业的产量、质量都超过盛极一时的英国;1913年,德国生产染料已占世界染料产量的80%。“阴丹士林”成为世界名牌货,合成染料工业带动了纺织工业(合成纤维)、制药工业(阿斯匹林等)、油漆工业和合成橡胶工业,很多天然制品被化学制品取代,人类进入“化学合成的时代”、人工制品的新世界。由于经济繁荣,德国用了40年的时间(1860~1900),完成了英国需要100多年进行的事业,实现了工业化。

B 近年来世界化学工业生产概况^[5,6]

1994年美国化工产品产量比1993年增加4.2%,销售额高达3425亿美元,比上年增加9%,投资总额为234亿美元,比1993年增加7.2%;1994年西欧化工生产增加6%,比其他工业高出2%。德国赫司特、巴斯夫、拜耳三大化工公司1994年销售额分别为303亿、244亿、227亿美元;净利润分别为8.4亿、7.9亿、12.4亿

美元。世界主要国家和地区合成材料产量见表 1-1。

表 1-1 世界主要国家和地区合成材料产量(万 t)

合成材料 及原料	美国	日本	德国	俄国	韩国	中国台 湾地区	中国
乙 烯	2 203	613	404		367	89	219
塑 料	3 280	1 304	1 098	280	630	385	397
合成纤维	302	137	76		158	202	165
合成橡胶	239	135	64	63	33	22	43

注:其中合成纤维为 1993 年产量,其余均为 1994 年产量。

1994 年与 1995 年我国几种主要化工产品产量列于表 1-2
及表 1-3。

表 1-2 1994 年中国几种主要化工产品产量(万 t)

产品名称	产 量	年增长率, %	产品名称	产 量	年增长率, %
烧 碱	428.81	10	冰 醋 酸	41.53	1.1
纯 碱	577.65	9.2	染 料	18.96	9.5
电 石	286.95	11.5	油 漆	112.53	6.1
纯 苯	89.2	5.2	轮胎(万条)	9 299.32	44.7
精甲醇	125.53	35.5	聚氯乙炔	119.40	17.4

表 1-3 1995 年中国几种主要化工产品产量(万 t)^[7]

产品名称	产 量	产品名称	产 量
硫铁矿(S 35%,生产量)	1 306.2	(小型装置)	1 619.4
硫铁矿(S 35%,运出量)	1 271.6	化肥(折标)	11 473.6
磷矿(P ₂ O ₅ 30%,生产量)	1 931.1	氮 肥	8 842.5
磷矿(P ₂ O ₅ 30%,运出量)	1 894.3	磷 肥	2 582.2
合成氨	2 760.9	硫 酸	1 684.6
(大型装置)	619.7	浓硝酸	51.3
(中型装置)	521.8	农 药	28.4

统计表明,化学工业的增长速度均高于整个工业的增长速度,见表 1-4^[8]。

表 1-4 发达国家增长速度统计

国家	1951~1960 年		1961~1970 年		1971~1980 年		1981~1990 年	
	整个工业	化学工业	整个工业	化学工业	整个工业	化学工业	整个工业	化学工业
美国	3.9	7.9	5.0	7.9	3.1	5.6	5.7	6.0
前苏联	11.8	14.8	8.6	12.4	5.8	8.0	6.3	9.4
日本	16.5	17.9	13.5	14.6	4.6	5.2	3.6	5.1
原联邦德国	9.5	12.0	5.7	10.4	2.0	3.5	3.5	7.3

1.2.2 化工与衣食住行

直接有关的是三大合成材料(化纤、塑料、橡胶)、化肥与农药、合成药物、能源与环境等。

A 化学纤维

按原料聚合物特性,化学纤维可细分为人造纤维和合成纤维。人造纤维是由天然高分子化合物(由纤维素和蛋白质取得)化学加工制取的纤维;合成纤维是由合成高分子化合物制取的。按照大分子结构的区别,合成纤维又分成碳链纤维和杂链纤维。后者是合成纤维的主要类型,其中又以聚酰胺和聚酯最为重要。碳链纤维中以聚丙烯腈为主要类型。化学纤维分类示意于图 1-1。

作为三大合成材料之一,化学纤维广泛用于日常生活、工业、农业与国防,现举例如下:涤纶用于生产滤布、绳索、软管、轮胎帘线、工业帆布、布带、纺织品,聚酰胺纤维用于制造纺织品、毛皮、地毯、帘子线等,腈纶广泛作为羊毛代用品,生产针织外衣与纺织品。总之,每吨合成纤维作为衣着使用,相当于 20~40 亩棉田产的棉花,这对于人口多、耕地少的中国来说,具有特殊意义。

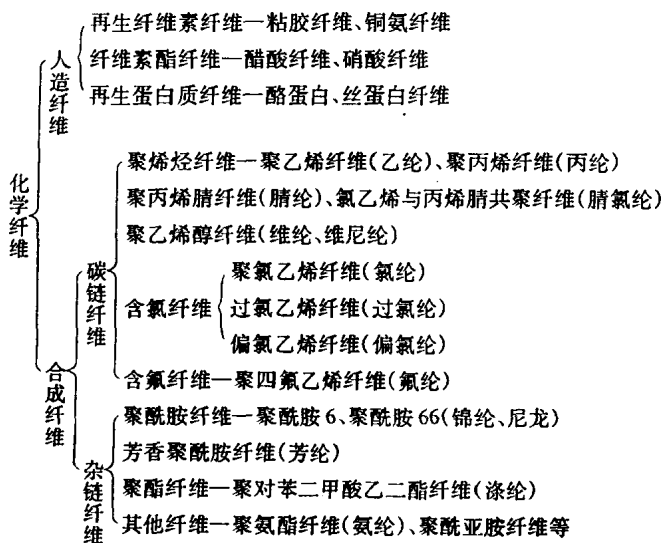


图 1-1 化纤分类示意图

B 塑料

合成树脂 (Synthetic Resin) 即未加工的原始聚合物 (Polymers) 在一定温度、压力和添加剂作用下, 固化成型得到塑料 (Plastics)。主要国家 1994 年塑料产量见表 1-1。按用途塑料可细分为: 通用塑料 (聚乙烯 (PE)、聚丙烯 (PP)、聚氯乙烯 (PVC) 等)、工程塑料 (聚酰胺、聚碳酸酯、ABS 树脂等)、功能塑料 (聚苯硫醚、聚噻吩、聚乙烯醇月桂酸酯等)。

聚乙烯制管材具有高耐腐蚀性、生理学无害的特点, 多用于输送水、盐溶液、糖汁、葡萄酒、啤酒等的管材件。聚乙烯薄膜广泛用于农业以及日常生活的包装袋以及乳制品包装等。聚乙烯还可制成软质和硬质泡沫塑料; 作为高频绝缘材料用于雷达、无线电和电视机的部件上。

ABS 塑料为丙烯腈-丁二烯-苯乙烯的共聚物, 广泛用于家用电器、汽车、仪表、计算机壳体和部件; 功能塑料中的医用高分子材料可用于制造人体器官和体外装置。