



首都师范大学学术文库

HUAGONGGUOCHENG
KAIFAGAILUN

化工过程开发概论

张钟宪 编著



首都师范大学出版社
CAPITAL NORMAL UNIVERSITY PRESS

ZZX

2

TQ02

首都师范大学学术文库

化工过程开发概论

张钟宪 编著

首都师范大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

化工过程开发概论/张钟宪编著. —北京:首都师范大学出版社, 2005
ISBN 7-81064-758-X

I. 化… II. 张… III. 化工过程—技术开发—概论 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 013834 号

HUAGONG GUOCHENG KAIFA GAILUN

化工过程开发概论

首都师范大学出版社

(北京西三环北路 105 号 邮政编码 100037)

北京嘉实印刷有限公司印刷 全国新华书店经销

2005 年 5 月第 1 版 2005 年 5 月第 1 次印刷

开本 890mm×1240mm 1/32 印张 8.5

字数 220 千 定价 17.00 元

摘 要

化工过程是以化学工程的基本原理和方法为依据，借助若干相互关联的化工单元操作，利用相关设备组成一个完整的体系，完成大规模化学品的生产过程。

化工过程开发 (Chemical Engineering Process Development) 是指从一个新化学品、新技术或新工艺的概念的形成，到实验室研究成功再到第一套工业规模生产装置的设计建设，直到生产付诸实施的全部过程。

《化工过程开发概论》对化学工业、化学工程的历史沿革与现状、化学工业在科学-技术-社会中的地位作了扼要的介绍；对新的化学品、新技术或新工艺从实验室走向化工厂的途径、方法、程序作了论述；对无机化学品、有机化学品的开发放大作出了示例说明；对绿色化学工艺的设计与实施也作了简要说明。本书最后还介绍了高新技术与化工的关系；介绍了进入 21 世纪以后，化学工业、化学工程、化工过程开发的发展原则和发展前景。

前 言

本书是为我校开设“化工过程开发概论”而编写的。

化学学科的学生不仅应该具有扎实的化学理论知识，还应该具有为化工生产服务的基本知识和能力。实验室的研究与工业规模的生产差异是什么？如何将实验室的研究成果推广应用，如何实现工业规模的生产，在以往的化学学科的学生的知识构成中，缺乏这方面的理论与实践。不少从事化学教育的工作者都敏锐地看到了这一点，并着手解决问题；本文作者也作了一些探讨并编写了教材《化工过程开发概论》。

化工过程的实质是借助若干相互关联的化工单元操作以及所用设备组成的一个整体以完成大规模化学品的生产过程。化工过程内在的科学规律是客观存在的，只是在开发之前尚未被人们认识。任何一个新的化工过程都是具有创造性的工作。

化工过程开发 (Chemical Engineering Process Development) 是指从一个新的有关化学品、新技术或新工艺的概念的形成，到科研、设计、建设工厂，从实验室研究成功到第一套工业规模生产装置的设计建设，直到生产付诸实施的全部过程。化工过程开发的任务是：开发满足国民经济需要的新产品，对涉及国计民生的老产品的生产工艺和设备进行改造，推动化学工业的可持续发展。进入 20 世纪 90 年代中期以后，绿色化学的理论和原则开始指导化工过程的开发。

一项新的化学品、新技术或新工艺的开发放大有一定的程序，根据实验室开发研究的成果，必须按照科学的方法，寻求技术可靠、经济合理、保护环境的途径制备化学品；然后进行放大试验研究、评价过程的可行性、设计工业装置，组织生产。

在化工过程中的化学工艺是指系统地应用知识和经验，利用各

种恰当的设备进行工业规模的生产，将原材料和半成品加工成产品的技术和方法。化工工艺是关于化学品生产方法的技术科学。它包括生产的原料路线、生产方法、生产技术、操作程序、物料走向以及相关单元操作和设备的组合。化工工艺是在掌握自然科学和工程科学规律的基础上，使化学反应达到工业应用水平。它的决策正确与否，对能否进行正常生产以及能否取得效益极为重要。对于同一种化学品的生产，可能出现按不同原料、不同合成路线、不同反应条件、不同分离方法安排生产的生产工艺，不同工艺带来的经济效益、环保效益、社会效益可能有很大的差异。在工程设计中，设备的问题是局部的，而工艺的问题是全局的。化工工艺是一门工业艺术，是化工过程的精髓。开发一个化工过程，也就是一项化工工艺的形成过程，依照化工工艺设计为主导的系统开展工作，确定所开发的化工过程的原料路线、生产方法、物料经过的单元操作和设备的次序、物料的流向，解决具体的工程技术问题，直至化工过程开发成功。

绪论中对化学工业、化学工程的历史沿革与现状作了扼要的介绍；

第一章介绍了实验室成果走向化工生产的途径与方法和化工过程的开发放大的工作程序；

第二章介绍了化工过程开发的放大方法；

第三章介绍了化工过程开发放大过程中试验程序的制定、试验的设计、开展实验研究；

第四章和第五章介绍了基本反应器的规律、反应器放大的原则；

第六章介绍了化工过程开发放大过程中收集技术经济资料的重要性和技术经济资料的主要内容；

第七章和第八章主要介绍了化工产品的应用、原料的来源、新资源的利用、新工艺的开发以及化工产品的开发示例。

第九章介绍了高新技术与化工的关系，在 21 世纪之初化学工业、化学工程、化工过程开发的发展原则和发展前景。

由于本人在化工过程开发方面的理论修养与实践经验不足，教材中可能会出现错误和欠妥之处，敬请批评指正。教材编写过程中参考了大量的文献资料，谨向这些作者表示衷心的感谢。

编 者

目 录

绪论	1
0.1 什么是化工和化工过程开发	1
0.1.1 什么是化工	1
0.1.2 什么是化工过程开发	5
0.2 化学工业在当今科学-技术-社会中 (T-S-T) 的地位	5
0.3 化学工业发展简史	9
0.3.1 古代的化学加工	9
0.3.2 近代化学工业的发展	10
0.3.3 现代化学工业	11
0.3.4 石油化学工业的发展	15
0.4 我国化工和石油化工的发展	17
0.4.1 我国近代化学工业初创时期	17
0.4.2 化工先驱者	18
0.4.3 新中国的化学工业成绩斐然	19
0.4.4 差距与问题	20
0.5 化学工程的发展历史沿革	23
第一章 从化学实验室走向化工厂	26
1.1 选题和立题报告	27
1.1.1 课题的性质和来源	27
1.1.2 信息调研	28
1.1.3 选题方案的拟订和优化	29
1.1.4 开题报告和专家审议	32
1.2 化工过程开发步骤	33
1.2.1 基础研究	33
1.2.2 收集技术经济资料	34
1.2.3 概念设计	34
1.2.4 技术经济评价	35

1.2.5	模型试验	36
1.2.6	中试	37
1.2.7	基础设计	37
1.2.8	工程设计	38
1.2.9	建立生产装置	38
1.3	过程研究和工程研究的关系	38
1.3.1	小试与概念设计的关系	39
1.3.2	模型试验与技术经济评价的关系	40
1.3.3	中试和基础设计的关系	40
1.4	放大程度和开发周期	41
1.4.1	放大程度	42
1.4.2	放大效应	42
1.4.3	开发周期	43
第二章 化工过程开发放大方法		44
2.1	逐级经验放大法	45
2.1.1	研究方法	45
2.1.2	特征	46
2.2	数学模拟法	50
2.2.1	数学模型	50
2.2.2	研究方法	51
2.2.3	数学模型法的特征	53
2.3	部分解析法	61
2.3.1	研究方法	62
2.3.2	研究步骤	64
2.3.3	部分解析法的特征	65
2.4	相似放大法	72
2.4.1	相似概念	72
2.4.2	相似定理	72
2.4.3	研究方法	73
2.4.4	特征	78
2.4.5	数量放大法和比例放大法	79
第三章 试验		81
3.1	试验工作程序	81

3.1.1	试验计划的拟订	81
3.1.2	进行试验	82
3.1.3	试验报告	82
3.2	开发过程的预试验和系统试验	83
3.2.1	开发过程的预试验	83
3.2.2	系统试验	85
3.3	模型试验	86
3.3.1	物理模型试验	86
3.3.2	数学模型试验	87
3.4	中试	87
3.4.1	中试可弥和实验室研究与工厂生产的差异	88
3.4.2	中试的目的和任务	90
3.4.3	中试的装置	90
3.5	生产性试验	93
3.5.1	问题应暴露在生产性试验之前	93
3.5.2	进行生产性试验以前必须进行人员培训	94
3.5.3	生产性试验之前技术指标应该完备	94
3.5.4	生产性试验是完整的工业规模试验	94
3.6	试验方案的设计	94
3.6.1	黄金分割法	94
3.6.2	正交设计法	96
第四章	基本反应器	101
4.1	化学反应器的类型	102
4.1.1	按物料的相态分类	102
4.1.2	按结构形式分类	103
4.1.3	按操作方式分类	104
4.1.4	基本反应器	104
4.1.5	理想流动和理想反应器	105
4.2	化学动力学基本方程式	106
4.2.1	化学反应速率方程	106
4.2.2	均相、定容过程的化学动力学方程式	107
4.3	间歇釜式反应器	109
4.3.1	物料衡算	109

4.3.2	反应器有效容积的计算	109
4.4	平推流式反应器 (PFR)	112
4.4.1	物料衡算	112
4.2.2	PFR 基本方程式	113
4.5	全混流式反应器 (CSTR)	114
4.5.1	物料衡算	114
4.5.2	CSTR 基本方程	115
4.6	全混流式多釜串联操作反应器 (n -CSTR)	117
4.6.1	n -CSTR 的物料衡算	117
4.6.2	代数法	118
4.6.3	图解法	120
4.7	反应器型式与操作方法的选择	121
4.7.1	反应器生产能力的比较	122
4.7.2	收率与反应器选型、操作方法的关系	122
4.8	温度对复杂反应的影响	127
4.8.1	温度对平行反应的影响	128
4.8.2	温度对连串反应的影响	128
4.8.3	温度对可逆反应的影响	129
第五章	化学反应器及其放大	137
5.1	基本反应器放大时应注意的问题	137
5.1.1	间歇釜式反应器	137
5.1.2	管式反应器	139
5.1.3	连续操作搅拌釜	139
5.2	其他类型的反应器	140
5.2.1	循环式反应器	140
5.2.2	多段进料的平推流式反应器	140
5.2.3	半间歇式鼓泡式反应器	140
5.2.4	多段进料串联釜式反应器	140
5.2.5	连续操作鼓泡式反应器	141
5.2.6	逆流填料塔式反应器	141
5.2.7	逆流板式塔反应器	141
5.2.8	固定床催化反应器	142
5.2.9	流化床催化反应器	142

5.3	选择反应器	143
5.3.1	根据物料相态选择反应器型式	143
5.3.2	根据传热要求选择反应器型式	143
5.3.3	根据相际传质要求选择反应器型式	145
5.3.4	根据转化率和选择性要求选择反应器型式	146
5.4	反应器材料	147
5.4.1	材料的腐蚀	148
5.4.2	碳素钢、合金钢等黑色金属材料	150
5.4.3	铅、铝、钛等有色金属材料	151
5.4.4	耐酸搪瓷等无机耐腐蚀材料	151
5.4.5	塑料、橡胶和玻璃纤维增强塑料	152
第六章 技术经济资料		155
6.1	技术经济研究工作的方法	155
6.1.1	国外技术经济研究工作的几个阶段	155
6.1.2	国内技术经济研究工作的几个阶段	157
6.2	技术经济资料	158
6.2.1	原料方面的资料	158
6.2.2	产品方面的资料	159
6.2.3	副产品方面的资料	160
6.2.4	能源和动力方面的资料	160
6.2.5	厂址选择方面的资料	160
6.3	技术经济研究的宏观性	161
第七章 无机化学品的开发		163
7.1	无机化工产品的用途	163
7.1.1	化肥工业中的应用	163
7.1.2	农药工业中的应用	164
7.1.3	纺织印染工业中的应用	164
7.1.4	在冶金工业中的应用	164
7.1.5	在机械工业中无机化工产品的应用示例	165
7.1.6	在玻璃、搪瓷及陶瓷工业中的应用	165
7.1.7	在橡胶工业中的应用	165
7.1.8	在医药工业中的应用	166
7.1.9	在电子工业中的应用	166

7.1.10	在日常生活中的应用	166
7.1.11	在国防工业中的应用	166
7.2	无机化工原料的主要来源	167
7.2.1	矿物及其加工	167
7.2.2	从水溶液中提取无机化工产品	169
7.2.3	从天然气、油田气、炼厂气、石油和煤中提取无机产品	170
7.2.4	从农林牧副渔产品废弃物中提取无机化工产品	170
7.2.5	从工业“三废”中提取无机化工产品	171
7.2.6	从无机盐合成其他产品	173
7.3	拟订生产工艺的示例	173
7.3.1	一般研究工作的主要程序	173
7.3.2	无机化工产品的开发示例	174
7.4	无机化工产品开发的一般研究方向简介	178
7.4.1	新资源的开发	178
7.4.2	提高产量、降低成本	179
7.4.3	质量的提高	179
7.4.4	生产技术的改进	179
7.4.5	开发新品种	179
7.4.6	“三废”治理与综合利用	179
7.5	化工生产的经济性	180
7.5.1	研究和开发费用	180
7.5.2	厂房和设备费用	180
7.5.3	生产成本	181
第八章	有机化学品的开发	182
8.1	有机化合物	182
8.2	有机化学工业	183
8.2.1	有机化学工业发展的概述	183
8.2.2	有机化学的分工	184
8.2.3	有机化学的原料	185
8.3	有机化工过程开发示例	188
8.3.1	有机化学工业的一般特点	188
8.3.2	有机化学品工艺开发工作的一般程序	189
8.4	有机化学工艺开发过程的示例	189

8.4.1	从胆汁中提取胆红素	189
8.4.2	碳酸二甲酯 (Dimethyl Carbonate, 简称 DMC) 的绿色 合成工艺	192
第九章	化工发展前景	199
9.1	高技术与化工	199
9.1.1	信息技术	200
9.1.2	生物技术	201
9.1.3	新能源——贮氢技术	204
9.1.4	新材料	205
9.2	产品精细化、专用化, 工艺高技术化、柔性化, 经营信息化、 国际化	208
9.2.1	化工产品的“精细化”和专用化	208
9.2.2	工艺高技术化、柔性化	213
9.2.3	经营信息化、国际化	214
9.3	化工生产的绿色化	215
9.3.1	化工过程及工艺的绿色化	216
9.3.2	开发可再生资源及废弃资源的综合利用	226
9.3.3	新兴的纳米科技与微化工技术	227
9.4	化工过程强化与集成	228
9.4.1	设备强化	228
9.4.2	物理场辅助化工过程	229
9.4.3	化工耦合技术	230
9.4.4	化工集成	231
9.5	化学工程的发展趋势	234
9.5.1	化学工程与化学工艺的研究更加紧密结合	234
9.5.2	采用“过程工业”和“过程工程”的概念开发化学工程技术	235
9.5.3	生物化学工程技术的高速发展	235
9.5.4	21 世纪之初化学工程技术的研究开发热点	236
附录	239

绪 论

0.1 什么是化工和化工过程开发

0.1.1 什么是化工

在我国，化学工业、化学工程、化学工艺都简称为化工。这三者关系密切但有所不同。

1. 化学工业

化学工业(chemical industry)是指生产过程以化学方法为主的工业制造业，它以天然物质或合成物质为原料，利用这些物质的结构变化、形态变化或组合，生产对国计民生有价值的化学产品的一种工业。在这种工业中，以化学反应过程为核心。化学工业是国民经济的一个重要产业部门，化学工业中行业多、品种繁，对农业、轻工业、重工业、交通运输业、国防工业、文化教育、科学技术等有关国计民生的诸多方面均有重要作用。近十几年来，从发达国家的发展趋势来看，化学工业的增长速度远远高于工业部门整体的增长速度。化学工业现已成为各国国民经济的极其重要的支柱。化学产品涉及的范围是相当广泛的，按照美国标准工业分类手册(Standard Industrial Classification, SIC)确定的分类法，化学及有关产业的工业是较大的一类。它包括生产基本化工产品的企业和以化学方法为主进行产品加工的企业。它们一般生产三类产品：基本化工产品，进一步加工用产品以及提供最终消费的化工产品。而在我国，目前化工产品大致分为：基本化学工业、化肥工业、石油化学工业以及其他与化工行业相关的部门也归入其内。主要化工行业及其产品如表0.1所示。

表 0.1 主要化工行业及其相关产品

化工行业	主要产品或用途
化学矿山	磷矿、硫矿、硼矿、矾矿和石灰石矿等
酸、碱	硫酸、烧碱、纯碱
无机盐	磷酸及磷酸盐、碳酸钾、小苏打、无水硫酸钠、氰化钠、氯化锌、轻质碳酸钙、过氧化氢、沉淀硫酸钡
化 肥	氮肥(硫酸氨、硝酸铵、尿素、碳酸氢铵等)、磷肥(普通过磷酸钙、钙镁磷肥等)、钾肥
化学农药	敌百虫、乐果、甲胺磷、杀虫双、草甘磷、多菌灵等
电 石	可作为生产聚氯乙烯、聚乙烯醇、氯丁橡胶、乙醛、乙炔黑、双氰胺、硫脲等工业的原料
热固性塑料和工程塑料	酚醛塑料、氨基塑料、环氧树脂、不饱和聚酯树脂、聚碳酸酯、聚甲醛、ABS树脂、尼龙 1010
合成橡胶	顺丁橡胶、丁苯橡胶、氯丁橡胶、丁腈橡胶
染 料	硫化染料、直接染料、酸性染料、活性染料、碱性染料、还原染料、分散染料、冰染染料
涂 料	天然树脂漆、酚醛树脂漆、醇酸树脂漆、氨基树脂漆、过氧乙烯漆、聚酯漆、硝基漆
增塑剂	邻苯二甲酸酯、对苯二甲酸二辛酯、己二酸二辛酯、氯化石蜡、磷酸酯等
橡胶加工助剂	防老剂、促进剂
工业表面活性剂	阳离子型、阴离子型、非离子型、两性型等
造纸化学品	脱黑剂、助留剂、助滤液剂、表面处理剂、浆内施胶剂、纸张增强剂、涂布胶黏剂、分散剂等
感光材料	电影胶片、照相胶片、特种胶片、彩色相纸
磁性记录材料	磁带、磁盘等
橡胶加工	轮胎、运输带、胶管、胶鞋、炭黑等

进入 21 世纪，化学工业将会由传统工业过渡到以新材料、精细化学品和专用化学品、生物技术为主体的技术密集型产业。

2. 化学工程

化学工程(Chemical Engineering)是一门专门的科学技术,它研究的是化学工业生产中的共同规律,解决规模放大、过程和工艺设计以及操作等科学技术问题;主要包括传递过程、化工热力学、化学反应、过程工程和过程系统工程等五个分支。

作为一门科学,化学工程的理论基础是化学、物理学和数学的原理。物理化学定律和物理定律控制着化学工程运行的可行性和效率,数学则是实现最佳化和模式化的基本工具。化学工程的基础研究是运用这些原理进行新化合物、新化学反应、新的合成方式等高水平的理论创新,其成果是以论文或专著等形式发表的新发现、新理论、新规律与定律等。

化学工程的工程技术研究则是将理论的和实验的成果转化为工业规模的生产方法,建立工业装置。20世纪全世界新合成的化合物累计达2000万种,这种数字正在以指数级的速度增加。但这2000万种左右的化合物中已找到其应用价值的仅占1%,真正形成工业产品的则更少。可以看出,化学工程的技术研究有着多么广阔的天地。

3. 化工过程与单元操作

所谓化工过程,是指将原料进行若干化学和物理过程加工、处理,生产出预期产品或中间产品,并获得一定附加值的生产过程。化工过程的主要组成过程为:

(1) 原料在反应前经过若干工序的预处理,其主要由机械加工、精制提纯和加热、冷却等过程组成,使原料达到符合化学反应所要求的工艺条件;

(2) 进行化学反应,伴随着热量的释放和吸收过程;

(3) 反应后的产物经过均相或非均相分离,以及过滤、蒸馏等操作,最终获得产品。

化工生产过程的核心是化学反应,并且要涉及到特定的化学反应器。上述生产过程除了化学反应外,大多数是物理过程,它又可以分为各种基本过程,通常称为化工单元操作。因此,化工生产过