

# 化工过程

HUAGONG GUOCHENG  
KAIFA SHEJI

# 开发设计

徐宝东 主编 李思凡 主审



化学工业出版社

本书可作为高等院校化工专业及相关专业的教材，也可供从事化工设计工作的工程技术人员参考。

# 化工过程 开发设计

徐宝东 主编 李思凡 主审

第1版 (CIP) 目次表

化工过程开发设计

2011年

封面设计：李思凡

设计：李思凡

封面设计：李思凡

设计：李思凡

（CIP）数据：徐宝东 李思凡 主编 李思凡 主审 化学工业出版社 北京 2011年

ISBN 978-7-122-10000-0 定价：45.00元

化学工业出版社 北京 2011年



化学工业出版社

北京 2011年

· 北京 ·

元 00.80 价 定

本书介绍了有关化工开发设计的方法,包括化工概念设计、设计基础数据、物料流程设计、反应部分设计、分离部分设计、换热部分设计、工艺系统设计和设备布置设计等资料,其中也包括设计计算及设备选型的资料。

本书可供化工、石化、医药等行业从事研究开发设计的工程技术人员编制工艺软件包使用,是化工原始创新的源泉,也可供其他行业和有关院校师生参考。

# 化工工业

## 设计设计

主编 凡恩李 副主编 袁定舜

### 图书在版编目(CIP)数据

化工过程开发设计/徐宝东主编. —北京:化学工业出版社, 2014.4

ISBN 978-7-122-19798-6

I. ①化… II. ①徐… III. ①化工过程-生产工艺-工艺设计 IV. ①TQ02

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第027797号

责任编辑:左晨燕

责任校对:陶燕华

文字编辑:汲永臻

装帧设计:关时飞



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:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张24 $\frac{3}{4}$  字数636千字 2014年11月北京第1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:98.00元

版权所有 违者必究

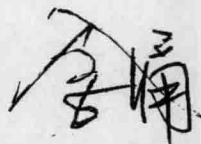
# 序

化学工业是国民经济的重要行业，特别是石油化工是国民经济的支柱产业。各行各业的发展都离不开化学工业。因此，不断开发化工新技术、新设备、新工艺、新产品，加快化学工业的现代化步伐，对于促进国民经济的快速发展有重要意义。在经济全球化、竞争国际化的今天，创新显得尤为重要。我国化学工业只有通过自主创新，建立自己的“技术优势”和“品牌优势”，才能在激烈的市场竞争中立于不败之地。

化工过程开发设计是化工原始创新的源泉。徐宝东所主编的《化工过程开发设计》一书，包括化工概念设计、设计基础数据、物料流程设计、反应部分设计、分离部分设计、换热部分设计、工艺系统设计和设备布置设计等内容，以及按化工的习惯进行物质性质收集估算、物料衡算、热量衡算和设备选型计算等方法。该作者长期从事新工艺开发工作，编制多项有机氟化合物的工艺软件包，并在生产一线从事过化工实际操作，有丰富的实践经验，因此书中涉及的内容力求从使用者的方便出发，有较强的实用性。目前关于化工设计方面的书的版本很多。有综合性的《石油化工设计手册》和《化工工艺设计手册》，还有工艺设计、设备设计、管道设计等专项手册。本书与这些同类型的设计手册相比，其内容更全、叙述更细、要求更具体。不但包括了化工工艺、设备、管道设计的各项内容，而且从概念设计开始一直到设备管道的布置，都有详细叙述；不仅有数据计算方法、设备选型要求，而且还有设计深度、绘图要求。本书是化工技术开发人员很实用的工具书。

化工过程开发是指从一个有关新的化学产品、新技术或新工艺的概念形成，从研究、设计、建厂等过程，从实验室研究过渡到工业规模生产装置，付诸实施的全部过程。化工过程开发涉及化学工艺、化学工程、化工设备、仪表自控、材料防腐、技术经济等各个领域，同时还包括实验、设计和试生产等各个环节，因此它是范围极广的一门综合性工程技术。化工过程开发是在利用基础研究、应用研究和有关工程资料的基础上，开展新技术的工艺条件、技术规范及工程放大等方面的研究，对过程进行技术经济评价，取得化工生产装置设计、制造、建设、操作及销售所需的数据与资料，实现工业化生产的全过程。生产过程从原料到产品，是围绕核心反应器组织的，其上游为原料的前处理，以满足工艺条件为目标；下游为产品的后处理，通过分离、纯化等手段，以达到产品标准为目标。《化工过程开发设计》就是对这一过程的详细阐述。相信对化工、石化、医药等行业从事研究开发设计的工程技术人员编制工艺软件包均有所帮助。

清华大学化工系教授  
中国工程院院士



2013年11月12日于清华园

# 前 言

《化工过程开发设计》是化工开发设计人员的实用工具书，具有实用性强的特点，着重考虑使用者的方便，包括化工概念设计、设计基础数据、物料流程设计、反应部分设计、分离部分设计、换热部分设计、工艺系统设计和设备布置设计等资料，以及按化工的习惯进行物质性质收集估算、物料衡算、热量衡算和设备选型计算。编辑人员本着科学严谨、不断进步的精神，完成了相关的编辑工作，希望对化工、石化、医药等行业从事研究开发设计的工程技术人员编制工艺软件包有所帮助。

各行各业的发展都离不开化学工业，不断开发化工新技术、新设备、新工艺、新产品，加快化学工业的现代化步伐，对于促进国民经济的快速发展有重要意义。化工过程开发设计是化工原始创新的源泉。目前关于化工设计方面的书的版本很多，有工艺设计、设备设计、管道设计等专项手册。本书不但包括了化工工艺、设备、管道设计的各项内容，而且从概念设计开始一直到设备管道的布置，不仅有数据计算方法、设备选型要求，而且还有设计深度和绘图要求，是化工技术开发人员很实用的工具书。

本书由徐宝东主编，李思凡主审，第1章化工概念设计由徐宝东编写，第2章设计基础数据由王澎涛编写，第3章物料流程设计由刘富婷编写，第4章反应部分设计由徐宝东编写，第5章分离部分设计由周晓猛编写，第6章换热部分设计由程治方编写，第7章工艺系统设计由李思凡编写，第8章设备布置设计由李思凡编写，附录由呼辽辽编写。参与本书编写和给予支持的还有赵志、李淑华、董万森、刘程、杨晓燕、邹鸿岷、窦一文、杨会娥、毕永军、伍明、杜涵雯、王亚慧、孙佳利、尹晔东、李薇、刘旭辉、林永利、姜果宇、吕文昱、徐振海、张德生、吕凤翔、闫振利、刘明、刘新、蔺向阳、张效峰、宋炯亮、谭茜等，在此表示感谢！

编者

2013年10月30日

# 目 录

<b>1 化工概念设计</b> .....	1	<b>3 物料流程设计</b> .....	112
1.1 化工开发 .....	1	3.1 物料流程 .....	112
1.1.1 化工过程的开发 .....	1	3.1.1 设计要求 .....	112
1.1.2 化工开发的特点 .....	2	3.1.2 过程衡算 .....	113
1.1.3 过程开发的意义 .....	4	3.1.3 图纸要求 .....	114
1.2 概念设计 .....	5	3.1.4 流程图例 .....	123
1.2.1 概念设计的思想 .....	5	3.2 物料衡算 .....	124
1.2.2 概念设计的方法 .....	6	3.2.1 过程分析计算 .....	124
1.2.3 间歇与连续反应 .....	8	3.2.2 衡算基本参数 .....	125
1.2.4 过程设计的决策 .....	10	3.2.3 物理过程衡算 .....	127
1.2.5 开发设计的要求 .....	12	3.2.4 反应过程衡算 .....	129
1.3 过程优化 .....	13	3.3 热量衡算 .....	131
1.3.1 化工过程的改造 .....	13	3.3.1 热量衡算方法 .....	132
1.3.2 过程设计的优化 .....	15	3.3.2 衡算基本参数 .....	133
1.3.3 过程优化的因素 .....	18	3.3.3 衡算计算过程 .....	135
1.3.4 过程要素的影响 .....	20	3.4 计算示例 .....	136
<b>2 设计基础数据</b> .....	22	3.4.1 吸收过程计算 .....	136
2.1 基础数据 .....	22	3.4.2 脱硫系统计算 .....	140
2.1.1 化工基础数据 .....	22	3.5 设计优化 .....	148
2.1.2 基础数据收集 .....	23	3.5.1 工艺优化案例 .....	148
2.1.3 基础数据示例 .....	24	3.5.2 设备优化案例 .....	152
2.2 常用数据 .....	26	<b>4 反应部分设计</b> .....	154
2.2.1 基础物性数据 .....	26	4.1 反应工程学 .....	154
2.2.2 水与空气数据 .....	46	4.1.1 反应器的类型 .....	155
2.2.3 蒸气压的数据 .....	50	4.1.2 反应器的设计 .....	158
2.2.4 热化学的数据 .....	57	4.1.3 反应器的控制 .....	160
2.2.5 溶液性质数据 .....	88	4.2 反应动力学 .....	161
2.3 数据估算 .....	96	4.2.1 本征反应动力学 .....	161
2.3.1 沸点和熔点的估算 .....	97	4.2.2 表观反应动力学 .....	165
2.3.2 临界参数值的估算 .....	101	4.2.3 停留时间和返混 .....	171
2.3.3 潜热与比热容的估算 .....	105	4.2.4 反应的流动模型 .....	172
2.3.4 蒸汽压和密度估算 .....	109	4.2.5 反应动力学方程 .....	174

4.3 均相化学反应 .....	177
4.3.1 间歇式反应器 .....	177
4.3.2 平推流反应器 .....	178
4.3.3 全混釜反应器 .....	183
4.3.4 循环反应器 .....	184
4.3.5 组合反应器 .....	185
4.3.6 非等温能量衡算 .....	187
4.4 反应器的开发 .....	190
4.4.1 反应器 .....	190
4.4.2 预实验 .....	191
4.4.3 敏感分析 .....	191
4.4.4 过程工作 .....	192
4.4.5 放大判据 .....	192
4.4.6 冷模试验 .....	192
4.4.7 开发试验 .....	193
<b>5 分离部分设计</b> .....	194
5.1 分离系统设计 .....	194
5.1.1 分离系统结构 .....	194
5.1.2 液体分离系统 .....	197
5.1.3 共沸蒸馏系统 .....	200
5.2 分离塔器计算 .....	202
5.2.1 蒸馏设备设计 .....	202
5.2.2 分离塔的设计 .....	204
5.2.3 间歇精馏设计示例 .....	206
5.2.4 连续精馏设计示例 .....	209
5.3 分离序列优化 .....	215
5.3.1 分离的序列 .....	215
5.3.2 分离的能耗 .....	218
5.3.3 优化的规则 .....	219
<b>6 换热部分设计</b> .....	222
6.1 热量传递过程 .....	222
6.1.1 热量传递方式 .....	222
6.1.2 换热器的分类 .....	226
6.1.3 传热设备应用 .....	227
6.2 换热设备计算 .....	228
6.2.1 传热过程计算 .....	228
6.2.2 换热器的系列 .....	238
6.2.3 换热器的选型 .....	240
6.3 换热网络优化 .....	242
6.3.1 优化的进展 .....	242
6.3.2 优化的目标 .....	243

6.3.3 优化的方法 .....	245
<b>7 工艺系统设计</b> .....	249
7.1 设计流程 .....	249
7.1.1 设计要求 .....	249
7.1.2 图纸要求 .....	251
7.1.3 流程图例 .....	257
7.2 内容深度 .....	259
7.2.1 设备的绘制要求 .....	259
7.2.2 管路的绘制要求 .....	260
7.2.3 仪表的绘制要求 .....	261
7.2.4 其他的绘制要求 .....	261
7.2.5 辅助及公用系统 .....	263
7.3 管道设备 .....	267
7.3.1 管道标注 .....	267
7.3.2 管道等级 .....	268
7.3.3 管路表格 .....	269
7.3.4 管道数据 .....	272
7.3.5 设备位号 .....	281
7.3.6 设备表格 .....	281
7.4 系统设计 .....	284
7.4.1 系统设计压力和设计温度 .....	284
7.4.2 安全阀的设置与选用 .....	286
7.4.3 爆破片的设置与选用 .....	287
7.4.4 管径选择 .....	288
7.4.5 限流孔板的设置 .....	291
7.4.6 阻火器的设置 .....	291
7.4.7 静态混合器的设置 .....	292
7.4.8 疏水阀的设置 .....	293
7.4.9 管道过滤器的设置 .....	294
7.5 控制方案 .....	295
7.5.1 输送设备 .....	295
7.5.2 反应设备 .....	297
7.5.3 精馏设备 .....	300
7.5.4 传热设备 .....	302
<b>8 设备布置设计</b> .....	305
8.1 设备布置 .....	305
8.1.1 设计要求 .....	305
8.1.2 图纸要求 .....	306
8.1.3 布置图例 .....	307
8.2 内容深度 .....	311
8.2.1 绘制的要求 .....	311

8.2.2	内容与标注	311
8.2.3	其他要求	314
8.2.4	安装材料表	318
8.3	布置设计	318
8.3.1	布置的要点	318
8.3.2	净距与净空	319
8.3.3	平台与梯子	321
8.3.4	其他要求	323
8.4	布置规定	326
8.4.1	泵的布置	326
8.4.2	塔的布置	328
8.4.3	换热器的布置	329
8.4.4	空冷器的布置	330
8.4.5	卧式容器的布置	332
8.4.6	立式容器和反应器的布置	332
8.4.7	加热炉的布置	333
8.4.8	离心式压缩机的布置	334
8.4.9	往复式压缩机的布置	336
8.4.10	装置内管廊的布置	336
8.4.11	外管架的布置	337
8.4.12	回转窑的布置	339
8.4.13	罐区的布置	340
8.4.14	汽车槽车和铁路槽车装卸站的	

	布置	341
8.4.15	灌装站的布置	342
8.4.16	火炬、烟囱的布置	343
8.4.17	装置布置设计规定	343
8.4.18	设备地脚螺栓设计规定	345
8.4.19	设备运输和吊装设计规定	345
8.4.20	噪声控制设计规定	347
8.4.21	静电接地设计规定	348

**附录** ..... 350

1.	部分计量单位换算	350
2.	几何图形计算公式	350
3.	金属的防腐蚀性能	357
4.	工程勘察设计收费标准	362
5.	设计基础资料收集提纲	364
6.	《化工工艺设计施工图内容和深度统一规定 第1部分：一般要求》(HG 20519.1— 2009) (摘录)	378
7.	《石油化工装置工艺设计包》内容 规定 (SHSG 052—2003) (摘录)	381

**参考文献** ..... 387

101	.....	387
102	.....	387
103	.....	387
104	.....	387
105	.....	387
106	.....	387
107	.....	387
108	.....	387
109	.....	387
110	.....	387
111	.....	387
112	.....	387
113	.....	387
114	.....	387
115	.....	387
116	.....	387
117	.....	387
118	.....	387
119	.....	387
120	.....	387
121	.....	387
122	.....	387
123	.....	387
124	.....	387
125	.....	387
126	.....	387
127	.....	387
128	.....	387
129	.....	387
130	.....	387
131	.....	387
132	.....	387
133	.....	387
134	.....	387
135	.....	387
136	.....	387
137	.....	387
138	.....	387
139	.....	387
140	.....	387
141	.....	387
142	.....	387
143	.....	387
144	.....	387
145	.....	387
146	.....	387
147	.....	387
148	.....	387
149	.....	387
150	.....	387



# 1

# 化工概念设计

## 1.1 化工开发

### 1.1.1 化工过程的开发

#### 1.1.1.1 过程开发

化工过程开发是指从一个有关新的化学产品、新技术或新工艺的概念形成,从研究、设计、建厂等过程,从实验室研究过渡到工业规模生产装置,付诸实施的全部过程。

科学研究分为基础研究、应用研究和技术开发研究,化工过程开发属于技术开发研究的范畴。化工过程开发涉及化学工艺、化学工程、化工设备、仪表自控、材料防腐、技术经济等各个领域,同时还包括实验、设计和试生产等各个环节,因此它是范围极广的一门综合性工程技术。

#### 1.1.1.2 开发内容

生产过程从原料到产品,是围绕核心反应器组织的,其上游为原料的前处理,以满足工艺条件为目标;下游为产品的后处理,通过分离、纯化等手段,以达到产品标准为目标;物料经过了一系列物理和化学加工处理步骤,所以化工过程主要由物理过程的单元操作和化学过程的单元过程组成。

一般地说基础研究和应用研究不属于化工开发研究,或者说化工开发研究不包括“基础研究和应用研究”。化工过程开发属于工程技术研究阶段,化工过程开发是在利用基础研究、应用研究和有关工程资料的基础上,开展新技术的工艺条件、技术规范及工程放大等方面的研究,对过程进行技术经济评价,取得化工生产装置设计、制造、建设、操作及销售所需的数据与资料,实现工业化生产的全过程。

我国的石油加工技术一直到 20 世纪 50 年代还是比较落后的,尤其在催化加工方面几乎是空白,仅兰州炼油厂有一套 200kt/a 处理能力的移动床催化裂化装置,且工艺技术也算不

上先进。60年代大庆原油加工工艺的开发,炼油工业的流化床催化裂化、微球硅酸铝催化剂、铂重整、延迟焦化、尿素脱蜡等装置与试剂相继开发投产,使炼油技术产生了一次飞跃。此后,提升管催化裂化、多金属重整催化剂的研制和径向反应器设计、分子筛脱蜡等技术方面的突破,都是过程开发的结果。

改革开放以来,石油加工技术进入了一个崭新的发展阶段,干式减压蒸馏、催化裂化催化剂的高效再生、高辛烷值催化剂的研制、重油深度加工、气体综合利用、甲基叔丁基本炼油工艺等相继开发应用,使我国石油加工技术基本达到80年代的世界水平,个别领域形成自己的特色技术,已经开始向国外输出。这些更是过程开发的结果。

### 1.1.1.3 化工工艺

化工工艺包括生产的原料路线、生产方法、操作流程以及相关单元操作的组合。化工工艺是在自然科学和工程科学的基础上,使化学反应达到工业化应用水平。所以化工工艺决策对能否进行正常生产,以及能否取得效益至关重要。

化工工艺是化工过程的精髓,开发一个化工过程,也就是化工工艺的形成过程。通过以化工工艺设计为主异的系统工作,确定新开发的化工过程的原料路线、生产方法、工艺流程,从方案上解决具体的工程技术问题,最终实现新开发的化工过程。

### 1.1.1.4 开发目的

- ① 开发新产品,满足国民经济发展需要;
- ② 开发工艺过程,开发已有产品的新生产工艺和适用于新产品的新工艺;
- ③ 改进工艺过程,对现有设备进行改造,达到提高产品质量、节约能耗、减少环境污染的目的;
- ④ 应用技术开发,为现有产品寻找新的用途,延长产品寿命,使其持续赢利。

## 1.1.2 化工开发的特点

### 1.1.2.1 生产与研究的区别

化工过程开发的成果首先是在实验室完成的,但是这种实验室的研究结果,只能说明该方案的可能性,还不能直接用于工业设计,原因在于实验室研究与工业生产有许多不同之处。

(1) 原料来源的不同 在实验室研究中,常常采用化学纯(chemically pure)、分析纯(analysis reagent)试剂为原料,杂质受到较严格的控制。工业生产中,工业级原料混入的微量杂质可能造成催化剂中毒、催化副反应、造成结晶形状、性质等的改变。

在开发研究的深入阶段,必须采用廉价的工业原料进行重复实验,以考察过程的可靠性和技术经济性。为考察原料中杂质带来的影响及影响的程度,可采用向试剂级原料中逐项添加杂质的方法进行系统的研究。当杂质的影响显著时,要研究可靠的净化工艺。

(2) 杂质的积累 化学实验常采用玻璃仪器进行,腐蚀较少。工业生产在金属或非金属材料中进行,材料腐蚀对过程产生影响。在连续生产中,杂质积累到一定程度,就会产生质的变化。过程开发中要考虑杂质的分离方法,并采取措施减少杂质积累的影响。

(3) 传递规律不同 实验设备规模较小,物料流动状态接近于理想状态。设备规模放大后,流动状态变化导致过程传递规律的变化,对单元操作设备和化学反应器的影响都是巨大的。如反应器中传热现象,实验室小型设备具有较大的比表面积,即使是放热反应,热量容

易通过表面传导或辐射等形式导出，常需外加热量来维持反应所需的温度。设备放大后，反应热不能只靠反应器表面导出。小试中还需加热的放热反应，到中试和工业生产时，可能需移去热量。如果热量不能及时移出，会产生“飞温”使反应失控，甚至有发生爆炸的危险。

过程开发的任务是将实验室的研究成果变为工业生产的现实。实验室研究和过程开发是相互衔接的，进行放大试验所需的模型装置或中试装置的设计、安装和开车均应包括在过程开发阶段中。

### 1.1.2.2 过程开发的特点

(1) 过程复杂 从不同的原料出发制造同一产品，用同一原料制造不同产品，同一原料采用不同的生产路线制造同一产品。一个产品有不同的用途，而不同产品有时却可有同一用途；一种产品往往又是生产别种产品的原料、辅助材料或中间体。完成同一反应可使用的反应器形式有多种，同一催化剂可催化不同的反应。杂质脱除、分离纯化都有许多种方法可供选择，各种单元操作组合时的位置也灵活可变。所以，因原料来源、技术、设备和市场等方面的变化，化工过程开发中多方案性既要互相适应，又有很大的选择余地。例如：煤、石油、天然气都可作为合成氨的原料；以苯为原料，通过磺化可制成苯磺酸，通过硝化可制成硝基苯，通过氯化可制成氯苯；以苯磺酸、硝基苯、氯苯作为中间体，又可制造出大量的化学品。

(2) 节约能源 化学反应伴随着能量的变化，在生产过程中或是吸热反应或是放热反应。化工生产耗能较多，因而节能潜力大。例如，换热器的设计，过去曾强调减少传热面积以减少投资，现在为了有效利用能源，即使增加投资，也要尽可能地提高能量利用效率。

(3) 节约资源 化学工业的资源包括矿物原料（煤、石油、天然气、各种金属矿等）、生物原料（粮食、玉米秆、麦秆类农业废料、林业中木材加工副产物、相关生物质等）、水（含海水、盐湖水等）和空气。矿物原料是消耗性资源，地球上煤、石油的储量是有限的，能源危机是实实在在的威胁。由于光合作用，许多生物原料属于可再生资源；显然，可再生资源的开发利用将是未来化工发展的重要方向。

(4) 安全环保 环境污染影响了人民健康，危害了生态平衡，化工过程常含有易燃、易爆和有毒物质，安全问题要特别重视。对原料贮运，生产过程中废气、废液、废渣，以及对跑、冒、滴、漏现象的处理，产品的包装和储运，制定严格的技术标准。现代化工生产要求把副产品，甚至废弃物都进行利用，近几年绿色化工就是为了解决这个问题。

(5) 技术经济 没有经济效益的项目是没有开发价值的，技术上先进必须在经济效益中体现出来。经济观点是重要的，但也不是唯一的判据，因为其他因素是难以用经济来表示的。例如：

- ① 产品对资源的利用程度如何，能否采用可再生资源代替消耗性资源；
- ② 产品使用性能是否优于其他方法生产的产品，在使用功能终结时是否对环境无害；
- ③ 装置的噪声、热量的扩散、过程中“三废”的排放等对周围环境有无破坏作用；
- ④ 生产过程危险性如何（包括爆炸、火灾、危险品泄漏等），对操作人员的健康有无危害。

因此，在过程开发时必须同时对技术、经济、环境、安全、资源等一系列问题作综合的考虑，必须考虑社会效益。

### 1.1.2.3 过程放大的难点

从实验室研究成果到建立工业规模生产装置，是靠放大来实现的，所以开发的关键是放

大。只有通过放大以后，该产品才能走向市场和应用。放大包括从实验室走向工业化，也包括从小规模生产过渡到大规模生产。放大研究是在新的条件下，引入工程特征后进行的研究，分析和考察许多在实验室规模无法考察的问题。放大研究就是原基础上进行实验，确定新开发技术的可靠性，以及解决原料来源、物料储存和运输、循环使用、加热和冷却、产品精制、热量回收、三废处理等一系列问题。

化工生产的特点之一是装置的规模和产量不断增大。产品生产规模的增大，可以更好地利用高新技术，充分合理利用原材料和能源，达到降低成本，取得经济效益的目的。为了加快工业化，要求尽可能地减少中间试验的级数，因此也就增大了放大倍数。

化工过程开发是研究概念的形成，并涉及从实验室研究成果过渡到大规模生产的一门工程技术科学，它着重解决开发、放大、设计等工程技术问题。化工过程开发涉及化学基本原理、化学工程理论、化工机械与设备、自动控制、材料与防腐、技术经济等多个领域，包括选题、实验、放大、设计和试生产等各部门环节，是范围极广的一门综合技术。

化工过程开发是一项难度相当高的研究，开发的成功率低，风险高。开发者首先要具有深刻洞察力和创造力，能提出一个好的新设想。为实现这一设想，要对科学（化学、热力学、动力学等）、技术（工艺、设备）和经济（成本市场）上的可能性和合理性进行考核和实验。

市场竞争日益激烈，世界各大化工公司、企业都设有研究和开发部，用于新技术、新产品研究开发的费用非常高。我国由于经济原因，研究开发费用投入不够，加大了化工开发的难度。

### 1.1.3 过程开发的意义

(1) 化工产品和工艺更新换代，需要不断开发新技术 化学工业是产品更新换代最快、工艺更新最迅速的工业，因而，需要不断进行开发，开展技术革新，降低生产成本，产品才能具有更强的竞争力。

(2) 科技成果转化率低，技术开发滞后 合成新化合物的数量，目前正在呈指数级速度增加。但是具有应用价值的并不多，真正形成工业产品的则更少。目前科技成果转化率低有两方面的原因：一是技术不成熟，直接可以拿来应用的技术不多；二是科学研究及技术开发与市场需求脱节，实验室成果到工业规模生产之间的桥梁并没有畅通。显然，这座桥梁就是过程开发研究。

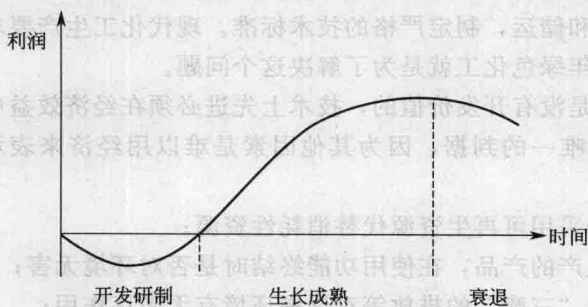


图 1-1 典型产品的市场生命周期

(3) 产品和生产工艺的生命周期 任何一种产品都要经历从产生、发展到

淘汰的过程，由于市场竞争日益激烈，产品的市场生命周期普遍有缩短的趋势。产品的生命周期如图 1-1 所示。包括实验室研究和开发的婴儿期；市场对产品需求极高，迅速增长的幼年期；对产品需要继续增加，速度放慢的青年期；需要相对稳定和产品成熟的壮年期；市场对该产品需求减弱的老年期；产品过时被淘汰，不再生产的死亡期。

上述曲线可以看出，技术进步周期呈现 S 曲线。一项技术通过漫长的开发期后，解决技

术的难题，实现技术突破，取得渐进式的快速发展，然后在技术经济指标上达到极限，进入技术成熟期，发展进入缓慢或停滞阶段，完成一个连续性的技术进展周期。

## 1.2 概念设计

### 1.2.1 概念设计的思想

#### 1.2.1.1 概念设计综述

概念设计是由分析用户需求到生成概念产品的一系列有序的、可组织的、有目标的设计活动，它表现为一个由粗到精、由模糊到清晰、由抽象到具体的不断进化的过程。概念设计即是利用设计概念并以其为主线贯穿全部设计过程的设计方法。概念设计是完整而全面的设计过程，它通过设计概念将设计者繁复的感性和瞬间思维上升到统一的理性思维从而完成整个设计。

概念设计的目标是寻找最佳工艺流程（即选择过程单元以及这些单元之间的相互连接）和估算最佳设计条件。这个问题的困难在于可以考虑的工艺方案非常多，经验指出新设计的设想中真正产业化了的从来都不到1%。所以我们采用成本分析来初步筛选，以去除那些无利可图的设计构想。如果某一过程显得有利可图，则必须再考虑其他因素，包括安全、环境限制、可控制性等。

#### 1.2.1.2 案例分析

概念设计是依据开发性基础研究的结果、文献的数据、现有类似装置的操作数据和工程经验，按照所开发的新技术工业化规模，而做的预想设计用以指导过程研究，及提出开发性基础研究进一步试验的要求。所以它是基础研究与过程研究的指南，是整个开发研究过程中十分关键的一个步骤。

研究其他案例的目的是帮助设计人员了解各种过程之间的相似点与不同点，如单一反应对产品分布问题、气体循环费用控制问题、液体分离费用控制问题、循环或移去可逆反应副产物两者之间的选择，采用气体循环与弛放气之间的经济权衡等。

#### 1.2.1.3 过程分析

设计问题与其他工程问题的主要区别在于缺乏明确的定义，例如，一位研究人员发现了能生产某种现有产品的新化学反应，或者发明了现有工业化反应的某种新催化剂，而我们的任务是把这些发现转化成新的过程，于是，就从这位研究人员那里得到的关于化学反应条件的少许知识，以及从市场部门得到的有关原料与产品的某些信息，最后就要由设计人员来定义一个设计问题所必需的其他一切信息。

为了提供这些空缺的信息，我们必须做出一系列假设。应该采用哪几种过程单元？这些过程单元应如何连接？需要什么温度、压力和过程流率？这就是PFD的编制工作。编制工作的困难在于可以提出大量的方法来完成同一目标。所以设计问题是无止境的。

正常情况下要找出费用最低的方案，但是也必须确保此过程是安全的，能满足环境保护的要求，易于开工和操作等。在某些情况下，可以采用经验法则去掉一些方案；但是在多数情况下，则需要进行各种不同方案的设计，然后比较其成本。有经验的设计人员在进行这类评价时可以节省大部分工作量，因为他们借助于和其他工程的类比，常常能够猜测出某一特定装置，或某组装置的费用，然而，对于初学设计者来说，往往必须设计和评估较多的方

案，才能找出最佳方案。

当有经验的设计人员考虑新型的设计问题时，由于缺乏经验并且找不到类似的过程可资参考，就尽量采用简捷的设计方法作为方案比较的基础。这些简捷计算仅用于方案筛选，如果发现该过程似乎有利可图，就将采用更严格的设计计算，以开发出一个或几个最佳方案的最终设计。

#### 1.2.1.4 重要作用

概念设计不同于工程设计，因而不能作为施工的依据。但是，成功的概念设计不但可以大量节省宝贵的人力和物力，而且可以加快新技术开发的速度，提高开发的水平与实用价值。概念设计的成功不仅需要开发人员富有创造性的构想，更需要扎实的基本概念和渊博的专业技能，还有敏锐的革新胆略和严谨的思维作风。

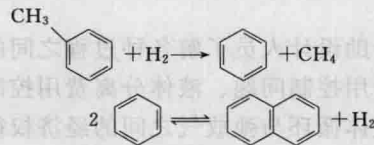
即使一个很普通的单一产品的生产过程，也可能有多个可供选择的替换方案，必须有可靠的、高效的方法，从技术和经济的角度进行筛选，尽可能及早删去那些无利可图的方案，同时又无遗漏地把那些大有希望的方案辨认出来，作为强化研究开发工作的方向。这是一个系统化的分级决策过程，也是概念设计的真谛。

### 1.2.2 概念设计的方法

为了研究如何在过程设计中解决问题，现以一个典型的石油化工工艺流程（甲苯加氢）为例，先设法剔除各层细节，只留下我们感兴趣的最简单的问题。对不同类型的过程多次用过这种方法以后，或许可以认识到一种通式用作编制新过程的基础。

#### 1.2.2.1 甲苯加氢

本例是甲苯的加氢脱烷基化制苯（HAD）过程，有关的化学反应是：



这些均相反应在从 1150°F<sup>①</sup>（低于此温度时反应速度太慢）到 1300°F（高于此温度时会产生大量的加氢裂化）的范围内进行，绝对压强约为 500psia（1psia=6.895kPa）。需要用过量的氢（比值为 5/1）来防止结焦，而且反应后的气体必须迅速淬冷至 1150°F，以免反应器后续的换热器内结焦。

图 1-2 给出该过程的一种流程方案。甲苯和氢两股原料物流加热后，与循环来的甲苯和氢物流混合送入反应器。反应器出来的产品物流中包含氢、甲烷、苯、甲苯和多余的联苯。我们试图用一台分凝器来冷凝芳烃，再闪蒸出轻组分气体，以从芳烃中分离出绝大部分氢与甲烷。闪蒸罐出来的液体用于淬冷反应器出来的热气体（该流程图中并未示出）。

闪蒸汽中的氢气需要循环使用，而甲烷则是氢气进料物流中的杂质，也是反应的副产物，将积累在气体循环回路内。所以，需要一股放空物流，从过程中排除进料与产品中的甲烷，并没有经验准则可用来估算气体循环回路内允许积累的最佳甲烷浓度。并非所有的氢和甲烷都可以在闪蒸罐里与芳烃分离，还要用一个蒸馏塔（稳定塔）来去除大部分残余量，以

①  $^{\circ}\text{F} = (5/9)^{\circ}\text{C} + 32$ ，下同。

免污染苯产品。然后由第二个蒸馏塔顶回收苯，最后是循环甲苯与多余的联苯分离。

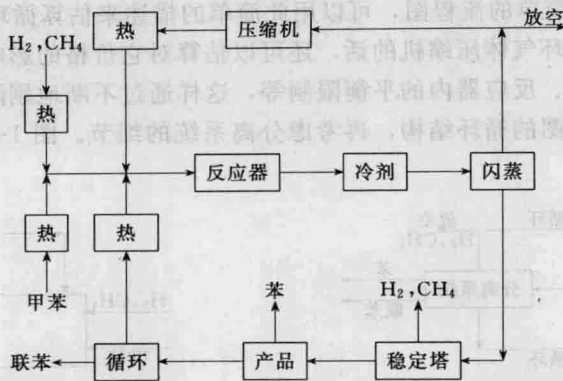


图 1-2 HAD 过程

[引自 J. M. Douglas, AIDhE J, 33: 353 (1985)]

### 1.2.2.2 分离系统

现在来考虑图 1-2 所示的蒸馏塔组。由于多余的联苯是由可逆反应式生成的，可以让它随甲苯一起循环，并且让它达到平衡的量级。这种方案虽然增大了通过反应器的流率，却可以省去一个蒸馏塔。如果决定如图 1-2 所示回收联苯，则很容易进行甲苯与联苯的分割。或许可以用一个侧线塔来完成苯-甲苯-联苯的分割。也就是说，可以在塔顶回收苯，在进料板下面侧线采出甲苯，而且从塔底得到联苯（蒸馏塔组替换方案一见图 1-3）。

图 1-3 中如果从进料板下面侧线采出甲苯，仍然可以从塔顶得到纯的苯。但是，与塔顶得产品相比，侧线回收的循环甲苯的纯度将会下降。由于循环甲苯并无一定的规格要求，其纯度或许不大重要，而这种方案的节约额可能是值得的。同样，稳定塔内甲烷与苯的分割也容易进行。这样，在一个氢和甲烷-苯-甲苯与联苯的分离塔内（蒸馏塔组替换方案二见图 1-4），侧线回收苯或许比原流程图所示的方案更便宜些。

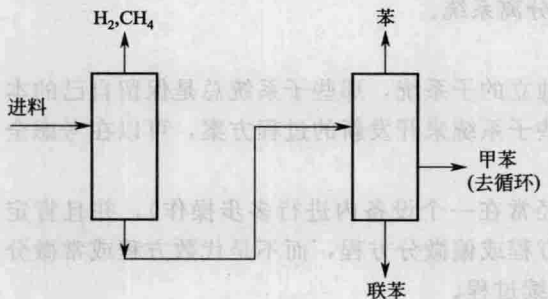


图 1-3 蒸馏塔组替换方案一

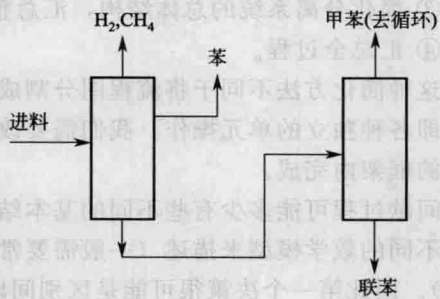


图 1-4 蒸馏塔组替换方案二

这些分离系统的启示准则需要知道进入蒸馏塔组各物流的进料组成，所以要先考虑蒸馏塔组的设计，然后再考虑热交换网络的设计。我们的目标是寻找一种简化流程图的方法，最后才做能量集成的工作。只要把蒸汽和液体分离系统叠合在一个单独的方框内，就可以进一步简化该流程图（见图 1-5）。这样在考虑蒸汽或液体回收系统的要求之前，要先考虑分离系统总体的结构。

### 1.2.2.3 简化流程

图 1-5 是一个非常简单的流程图，可以用此简单的描述来估算循环流以及它们对反应器费用的影响，如果有循环气体压缩机的话，还可以估算对它价格的影响。此外，还可以充分了解反应器内的热效应、反应器内的平衡限制等，这样通过不断地剔除分层次的细节，可以看到我们要先研究流程图的循环结构，再考虑分离系统的细节。图 1-6 提供一个比图 1-5 更简单的流程图。

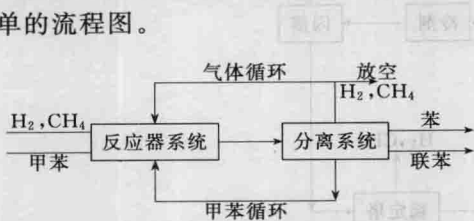


图 1-5 甲苯加氢简化流程

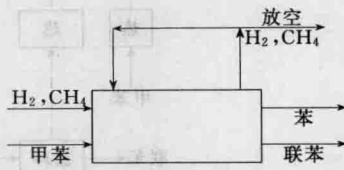


图 1-6 甲苯加氢简单流程图

图 1-6 用于考虑获得一个更简单的表示法的可能性，初看图 1-6 似乎过于简单，但是它可以帮助我们了解影响总物料平衡的那些设计变量，而不会带来其他复杂因素。由于原料费用通常要占产品总成本的 35%~85%，总的物料衡算是设计中的一个决定性因素。通过不断地简化流程图，可以用于解决设计问题的一种通用方法。

用不同的工艺路线来生产相同的产品，每条工艺路线又可以有许多不同的流程方案。因此，快速估算转化率、反应物的摩尔比等的范围，使之接近于各种路线的经济最佳值，将有助于研究人员去收集那些可能获取最大效益操作范围内的数据，并且终止掉那些在有效益操作范围之外的实验。

### 1.2.2.4 简化方法

了解开发该过程中所作的决策，或系统地提出各种过程替代方案。建议的简化步骤如下：

- ① 去掉所有的热交换器、罐和贮槽。
- ② 集合所有的蒸馏塔（液体分离系统方框）。
- ③ 简化分离系统的总体结构，汇总整个的分离系统。
- ④ 汇总全过程。

这种简化方法不同于将流程图分割成一些独立的子系统，那些子系统总是保留自己的本性，即各种独立的单元操作。我们需要改进这些子系统来开发新的过程方案，可以在考虑全装置的框架内完成。

间歇过程可能多少有些不同的基本结构（经常在一个设备内进行多步操作），并且肯定要用不同的数学模型来描述（一般需要常微分方程或偏微分方程，而不是代数方程或常微分方程）。因此第一个决策很可能是区别间歇和连续过程。

## 1.2.3 间歇与连续反应

### 1.2.3.1 过程特征

连续过程是设计的装置可以每天操作 24 小时，每周 7 天，几乎全年都在基本不变的条件下运行，直至为了检修而停车为止；当然有时设备坏了或者其他原因会导致意外的停车。与此相反，间歇过程一般包括几套装置（有时是所有装置）都设计成经常地开车和停车。在



一个正常的间歇操作循环中,各种设备充注了物料,在规定的周期内完成它们各自预期的功能,然后停车、放料、清理,直到重复开始下一个周期。

许多间歇过程含有一台或多台连续操作的设备。例如,经常把几台间歇反应器的产物暂时贮存起来,再作为中间产物送入一组连续操作的蒸馏塔内。同样会把各种少量生成的副产物不断积累起来,达到足够量后再用一台间歇式蒸馏塔来分离产品。

间歇和连续过程之间的区别有时是“模糊”的。也就是说,当大型连续装置的催化剂失活时,可以一年左右停一次车,以便再生或更换该催化剂。同样,大型连续装置可能包括间歇操作的吸附设备。如果大型装置内只有几台间歇操作,其余都是连续操作,通常仍把这种装置视作连续过程。

### 1.2.3.2 间歇过程

有几条粗略的经验可以协助选择间歇过程何时优于连续过程,现归纳如下。

(1) 生产能力 生产能力大于 5000t/a 的装置一般都是连续运转的,而能力小于 1000t/a 的装置一般是间歇式的。大型装置值得进行更为详尽的开发计划,间歇装置一般是简单和灵活的,即使在设计时具有较多的不确定性,仍然可以得到满意的产品。同时,由于间歇装置的灵活性较大,最常用于在基本相同的加工设备中,生产出许多品种的产品(例如涂料)。

(2) 市场前景 许多产品是季节性的,例如肥料只在初春时销售约一个月。如果整年生产肥料,则需要很大的贮存费用,以等待可以出售的月份。如果间歇装置可以在一个月左右把肥料生产出来,其他时间里还可以生产其他产品,则可大幅减少贮存的费用。所以,间歇装置优先适用于对产品的需求季节性强的产品。

建设连续过程一般需要两三年时间,而某些产品的平均生存期只有二年(某些有机染料)。间歇装置由于有较大的灵活性,往往优先被采用于生存期较短的产品。

(3) 操作问题 某些反应太慢,只能采用间歇反应器才合理。同样,很低的速度泵送泥浆,很难避免悬浮的固体沉淀下来堵塞设备,采用连续过程来处理少量的浆料是十分不利的。同样,某些物料很容易在设备上结垢,以至常常不得不停下来清理。间歇操作对于处理这些物料是比较理想的,因为设备可以周期性地开和停,而且一般是每加工完一批即行清理。

### 1.2.3.3 多项操作

间歇过程常常可以在单一容器内完成几项操作,而连续装置内每项操作需要单独容器。例如在连续装置内反应物加热后,送入装有催化剂的反应器内,然后将产品送入蒸馏塔(见图 1-7)。



图 1-7 连续过程示意

在间歇过程可用间歇蒸馏塔的再沸器来加热并进行反应,以及随后的分离(见图 1-8),可见一台设备可以用来替代三台设备。

当在同一容器内进行多项操作时,一般该容器必须大于进行每次操作时所需的容器尺寸。当然采用较大的容器,常常可以达到经济的规模,把加工步骤合并到一台容器内往往可以带来显著的经济利益。