

化工过程放大

——从实验室试验到成功的工业规模设计

〔美〕A.比索 R.L.卡贝尔 编著



化学工业出版社

化工过程放大

——从实验室试验到成功的工业规模设计

〔美〕A.比索, R.L.卡贝尔 编著

邓彤 毛卓雄 方兆珩 范忠良 译

陈家镛 审校

化学工业出版社

(京)新登字 039 号

内 容 简 介

过程放大是将实验室中的构想和成果转变为生产实践的关键环节。编者以新颖的结构，从主要问题、基础理论、操作预测、理想化假设、经验规则、不确定因素等几方面，详尽介绍了化工过程放大。本书从工业实际出发，内容先进，是一本不可多得的专著。

本书最适用于工业企业的工程师，亦可供化工设计人员以及大专院校有关专业师生参考。

Attilio Bisio, Robert L. Kabel

Scaleup of Chemical Processes

——Conversion from Laboratory Scale Tests to
Successful Commercial Size Design

John Wiley & Sons

New York, 1985

化 工 过 程 放 大

——从实验室试验到成功的工业规模设计

邓 彤 毛卓雄 方兆珩 范忠良 译

陈家镛 审校

责任编辑：刘小薇

封面设计：季玉芳

化学工业出版社出版发行

(北京和平里七区十六号楼)

北京市东华印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

开本787×1092 1/16 印张26 1/4 字数658千字

1992年3月第1版 1992年3月北京第1次印刷

印 数 1—4,000

ISBN 7-5025-0919-4/TQ·536

定 价 24.30 元

译 者 序

过程放大是实验室中的构想和成果能否顺利投入生产的关键环节。过程放大知识对新过程新产品的开发以及现有过程的改进或进一步扩大都不可缺少。然而，全面应用当代科研成果，从实际出发，系统而详尽地介绍化工过程放大的专著，国内外目前尚属鲜见。本书的翻译出版，意在应此急需。它可为大专院校师生、研究设计人员及现场科技人员提供各种化工过程放大的系统知识，包括从过程原理到设备性能预测、经验法则、具体放大步骤及过程工业化的不确定性等。

原书分别由17位来自研究、过程开发、生产及放大等方面的知名专家执笔。撰稿人均兼有基础研究和实际工厂工作背景。书的两位编者，分别来自美国工业界和学术界，而又均具有两方面工作的经验。这些保证了本书的学术价值和实用价值，赋予本书理论密切结合实际的鲜明特点。

本书的翻译工作是在陈家镛教授直接指导下进行的。参加翻译的有毛卓雄（前言、5、10—13章）、邓彤（14—18章）、方兆珩（1—4章）和范忠良（6—9章）等四位博士。全部书稿经陈先生亲自审阅、校订。由于译者水平有限，错误之处望各方面人士批评指正。

译者 1988年10月北京·中关村

前 言

放大存在于一切工业实践活动之中。只有在与未来工业应用条件有所不同的情况下进行必要的计算、研究和试验，才有可能建设一座工厂或制造一种产品。放大是通过计算、研究和试验从而成功地转化成工业化装置的实践过程。

因此，放大包括工业实践的许多方面。广义地讲，它包括诸如推销，产品设计，产品测试，工厂设计和工厂建设等活动。不过本书重点集中在对于工业化装置设计和投入运转至关重要的技术因素方面。显然，将技术因素与其它因素区别开来多少有些人为因素，但是这样做既能使问题的处理方便些，又是十分必要的。

化学家和工程师要进行新过程开发或要将现有过程扩大生产，就必须时时关心放大问题。按照第一章对于放大所作的定义，放大需回答的技术问题是“规模大了一切将会如何？”在间歇过程曾经占统治地位的时代（目前在某些工业中仍采用间歇过程），放大不过是照葫芦画瓢，只是把反应剂的体积加大而已。随着连续过程的效率变得明显起来，放大常常是指将间歇过程转变成连续过程。目前对药物和特种化学物质的需求，又使工业化间歇生产过程得以复苏。况且许多最终将会连续化操作的过程仍需以间歇的方式进行开发。现在还需针对最佳操作进行工作，例如从能量的观点优化或从原料利用的观点进行优化。

放大是紧迫的：工厂越早投产，意味着工厂的使用寿命越长，得到的经济效益也越大。因此有一种奖金是为从实验室结果直接放大而设的。这样做把进行放大的“基础理论”法和传统的“逐级放大”法对立起来。尽管多数作者支持“基础理论”法，但是两种方法的优点，本书均将加以说明并探讨。

当今许多技术手段（理论，模型，实验方法和计算机软件）都很容易获得。但是就是使用这些手段，我们依然需要作出一个重要的决断：要进行多少计算、多少试验以及装置需要多大才能有充分的把握？放大离不开进行放大的机构，离不开由于管理或市场对该机构的制约。在同一工业中，面临类似技术问题的两个机构，常常会用完全不同的方法来处理几乎完全相同的放大问题。

就我们所知，只有少数几本书和极少课程是专门讨论过程放大这个广泛课题的。的确近年来技术手段的迅速发展，可能使人们看轻了放大作为一种独特的定量技术的重要性。真正使我们对放大引起兴趣的原因是我们中的一个 (AB)* 当时被专业培训中心 (Center for professional Advancement) 请去主持一个放大方面的短期课程，却又找不到合适的课本。这就是本书的由来。但是我们必须肯定 R.E. Johnstone 和 M.W. Thring 在 1957 年所写的第一本教科书《化工中的中间工厂、模型和放大方法》的功绩。同样，他们也是把他们的成果归功于更早的讨论放大的著作，即 1901 年 G.E. Davis 所著的《化学工程手册》。

我们认为当今任何个人不可能成为放大所有方面的专家，哪怕是许多方面的专家。除了很小的公司或一些简单问题之外，放大是由为着同一目标工作的一支队伍来完成的。这种互

* 作者 Attilio Bisio. ——译注

相协作的特点也在本书的编写过程中得到体现。编者中的一位来自工业界，另一位来自大学，而且对相互的领域都有相当多的经验。与此类似，其他的作者也都体现了有学术界和工业界双方面的背景，重要的是他们都在研究、过程开发、生产和放大方面有相当多的经验。本书的目的是要把他们的经验传授给读者。

本书对象是学生、大学教师、研究人员和实际工作者。学校中开设有化工计算、热力学、动力学、传递现象、单元操作、过程控制、以及其它专业课程，常把这些内容综合成一门课即过程设计。这些课程是从过程设计和经济评价的角度讲授的，而不是从工厂的建设和操作角度设置的。放大这本书则是为着工厂的建设和最终运转而设计的。

因此，学校中几乎没有哪门课程涉及到当今放大的现实。我们希望这本书的一些思想能被有效地带进课堂内。另一方面，对于研究人员来说，书中部分内容应对他们工作的某些实际方面提供有价值的观点。在本书的组织上，确实考虑到不会有多少读者会一口气将本书看一遍（当然愿意这样做的读者会得益良多），我们希望读者首先阅读第一章，然后去阅读与所遇到的问题有关的章节。

工业界的读者可能是在资源众多、世界知名、专家云集的大公司中工作，也可能是受聘于只有几名工程师的小公司。因为放大包括许多的方面，并且限于作者本身的经历，本书可能仅能代表大公司的观点。尽管大公司是大多数放大方面专门知识的发祥地，并且因此而受益非浅，但是这些专门知识对于较小公司取得成功的潜在作用也同样重要。我们在新泽西州索莫维勒的专业培训中心所讲授（以及许多本书撰写者参讲）的一周放大课程时，就有来自小公司的参加人员，他们所表达的希望和要求在概念和本书的准备中都得到了密切的关注。

由许多作者共同来完成一部综合性的教科书是个艰巨的任务。为了解决好这个问题，本书以平行结构的方式组织成三个水平：

- 每一单独章；
- 有关化学反应器放大的第3—7章；
- 全书。

读者了解到这种平行结构，就可以大大地提高使用本书的效率。下面所列的第一列是这种结构的各种要素：

结 构 要 素

要 素	反应器章节	全 书
主要问题	3	1
基础理论	3	2—3
操作预测	4—6	4—14
理想化和假设	4—6	4—14
经验规则	7	15—17
不确定因素		18

在每一章内部，在有关反应器的那几章内，以及在全书内，我们都按着这些要素从问题的定义，现有的手段到尚无法解决的遗留问题来叙述。在反应器放大部分没有专列关于不确定因素这一章（见表中那一行），这并不意味着没有不确定因素，而是在第3章至第7章的每章内都谈到了这个问题。将上表的最后一列与本书的目录比较，全书的总体结构就十分清楚了。

按平行结构的要素在每一章内部逐渐展开是很重要的。各位作者均要求按此撰写。当然，如果有一种更好的组织方式，他们可以不受此限制。本书所用的术语都是人们熟悉的；但是由于讨论的问题是多种多样的，就只能按章来统一符号，而不是将全书的符号统一。

就绝大部分而言，书中所提的基本原理和方法都是作者认为目前能找到的最优秀的东西。但是在流体-流体-固体反应器（第6章）和气体吸收（第12和13章）中叙述了两种处理

传质的方法，第6章中所用的方法基于传递现象，这在欧洲用得比美国普遍，而在第12章和第13章中用的方法基于单元操作。总括这三章，表明了该领域的发展变化过程。

传热和反应器设计在全书中的地位十分突出，这是因为它们对放大有着深刻的影响。但是像热交换器的设计，在进行设计计算时在一定程度上成为例行公事，所以在此未予考虑。本书略去的其它论题有防火、防爆和毒理学，只是在第15章环境问题和第16章腐蚀中给出了处理这些重要的边缘课题的途径。

从定义就知道放大是面向实际的，书中有的部分能为任何一个技术员所理解，而有些部分对大多数有经验的实际工作人员来说也是很难的。实际工作者最好按照前面所建议的，在阅读感兴趣的个别章节之前，先阅读一下第1章和最后一章，以便取得概括的了解。虽然有些问题是从一章到另一章都进行论述的，但是每一章本身有一定的独立性。阅读全书会对当前的放大情况了如指掌，并将产生意想不到的“智慧之花”，这将属于透彻理解全书内容的读者。

这本书与其说是一个课本，不如说是共享作者所有的经验。尽管如此，它还是可以作为通常大学中工厂设计课程的补充教材。它还可用作以工厂建设为设计主要目的的高级课程的主要教材。这种课程的内容显然在很大程度上是由教师的兴趣和背景决定的。可以想象，这样一门课程会有各种各样的课题（就象实际情况那样），有些方面需要深入细致的研究，有些则可一带而过。在本书各章内也有同样的情况。书中许多章节给出了详细的例子，这给详细推敲提供了充分的机会。通过有关参考文献给出了较全面的评述。

编者之一（RLK*）感谢宾夕法尼亚大学所给予的学术休假机会，使得大部分写作得以完成。同时还感谢学校中各位教师的宝贵建议和秘书的协助。尤其要感谢Karin Miller夫人和Maryann MacRitchie小姐为本书打字、及时的配合和提醒编者完成工作。此外还要感谢专业培训中心短期课程的参加者，他们使我们在放大方面受益非浅，远远超过我们教授给他们的。

ATTILIO BISIO
ROBERT L. KABEL

Annandale, New Jersey
University Park, Pennsylvania
1985年4月

* 作者Robert L. Kabel, ——译注

目 录

第一章 绪论 1	D. 频率域中的模型31
I. 放大的基本问题..... 1	1. 传递函数33
A. 放大率 3	2. 经验传递函数33
B. 有关放大的偏见和误解 6	E. 经验模型35
C. 放大的一个实例 7	II. 因次分析36
II. 放大方法 8	A. 变因次方程为无因次方程37
A. 相似原理 9	B. 获得无因次数群的快捷方法 (观察 法).....40
B. 模型10	C. 实验数据的关联41
C. 用什么方法、在什么时间进行反应 器研究10	D. 放大41
III. 过程系统的描述方法.....11	IV. 建立模型中的具体问题42
A. 工艺系统的形成过程14	A. 模型的验证42
B. 过程文件15	B. 建立模型时的注意事项43
IV. 均衡解决不确定性问题17	符号表44
附录: 工艺设计范畴.....18	参考文献.....46
参考文献.....20	第三章 反应动力学47
第二章 数学模型化21	I. 化学反应器放大的主要研究内容.....47
I. 模型化的主要研究内容.....21	II. 基本原理47
A. 如何建立模型22	A. 速率概念47
1. 问题的归纳和阐述时期22	1. 变化速率和过程速率47
2. 初步设计阶段22	2. 反应速率的推导48
3. 详细设计阶段23	3. 变化速率的测量49
4. 评定阶段23	B. 热力学51
B. 模型化过程中的一般问题23	1. 作用和局限性51
1. 模型的简化23	2. 热效应51
2. 模型的证明24	3. 最高转化率52
3. 计算机程序的证明24	4. 在建立速率方程式中的作用56
4. 模型参数估算24	C. 物理数据56
5. 过程变量的随机性24	1. 相行为56
II. 建立数学模型的基本原理25	2. 溶解度57
A. 引言25	3. 热特性57
1. 线性和非线性25	4. 危险因素57
2. 稳态和非稳态25	D. 分析、综合和数据处理57
3. 分布参数与集总参数26	III. 速率信息的关联57
4. 连续变量和离散变量26	A. 信息交流和数据采集57
B. 以传递原理为基础的模型27	B. 速率方程式58
C. 根据方程解法进行模型分类31	1. 定义、来源和目的58

2. 均相反应	59
3. 多相反应	60
4. Arrhenius方程	65
5. 热力学一致性	65
IV. 不确定性	66
A. 反应体系的确定	66
B. 放大的数据基础	67
1. 数据基础的广度	67
2. 数据基础的质量	67
C. 出现的新因素	67
符号表	67
参考文献	68
第四章 均相反应体系	70
I. 均相反应中的主要问题	70
II. 质量平衡	71
A. 一般衡算方程式	71
B. 各类反应器的分析	71
1. 间歇式	71
2. 管式活塞流	74
3. 管式层流	76
4. 连续操作搅拌釜	78
5. 半间歇操作	79
III. 能量平衡	80
A. 平衡的性质	80
1. 等温过程	80
2. 绝热过程	80
3. 其它	81
B. 各类反应器分析	81
1. 间歇式反应器	81
2. 管式反应器	82
3. 连续操作搅拌釜	83
4. 半间歇式反应器	85
IV. 均相反应器放大的一个实例	85
A. 动力学	85
B. 质量平衡和等温操作	89
C. 能量平衡和热效应	94
D. 容积、形状和运行条件	97
V. 不确定性	98
A. 非理想流动	98
B. 传热和传质效应	99
C. 竞争反应和杂质	99
D. 反应器的不稳定性	99
符号表	99

参考文献	100
------	-----

第五章 固体催化的流体相反 应器

I. 固定床反应器设计中的主要问题	102
A. 单相流体	102
1. 温度变化的控制	102
2. 压降的限制	104
3. 催化剂失活	104
B. 多相流体	104
1. 逆流流动和并流流动	104
II. 直接实验模拟	105
A. 相似性	105
B. 模型 (mockup)	107
III. 数学模型	108
A. 单相流体	108
1. 一维模型	109
2. 二维模型	113
3. 关于单元模型 (Cell Model) 的 说明	114
B. 多相流体	114
1. 基本原理	114
2. 工业模型	115
IV. 存在问题的领域	116
A. 复杂原料的动力学模型	116
B. 催化剂失活	117
C. 流体的不均匀分布	118
符号表	119
参考文献	120

第六章 流体-流体反应器

I. 主要问题	123
A. 实例	124
II. 放大	124
A. 存在问题的领域	125
B. 速率控制步骤的确定	126
C. 填充床吸收器	128
D. 鼓泡塔	131
1. 放大中非可调参数的变化	131
III. 各种模型对放大的适用性	138
A. 非等温操作	139
B. 反应器性能的变化	140
1. 快反应区	140
2. 慢反应区	142
C. 模型的简化及其实例	142

1. 固体的作用	147	D. 特殊分布函数	172
IV. 不确定因素	149	■. 直接的应用	172
A. 返混系数	149	A. 波动的阻抑	172
B. 气体滞存率和比界面面积	149	B. 一级反应	173
C. 流区	150	C. 其它简单反应	174
D. 动力学数据	150	D. 复杂反应	175
E. 传热和稳定性	150	IV. 测量技术	176
符号表	150	A. 封闭系统	176
参考文献	151	B. 敞开系统	177
第七章 反应器类型的选择	155	V. 解析的分布函数	178
I. 反应器选择的主要问题	155	A. 活塞流与理想混合	178
II. 反应器类型	156	B. 多级串联搅拌釜	179
A. 容器和流动	156	C. 层流流动模型	180
1. 间歇反应器	156	D. 轴向分散	181
2. 半间歇反应器	157	VI. 放大	183
3. 连续搅拌釜反应器 (CSTRs)	157	A. 拟Delta分布	183
4. 多级串联 CSTRs	157	B. 层流流动系统	184
5. 管式反应器	157	C. 准指数分布	185
6. 循环反应器	157	VII. 复杂情况与推广	187
B. 按反应器中存在的相分类	158	A. 中间分布	187
C. 反应器选择一例	158	B. 未混合进料	187
III. 选择的目 的	160	C. 非等温或非均相反应	188
A. 反应器的操作弹性	161	符号表	189
B. 成本最低	161	参考文献	190
C. 产品的选择性	161	第九章 混合过程	191
D. 温度的控制	162	I. 搅拌器混合流体	191
E. 反应器类型的比较	163	A. 基本知识	191
1. 固体催化的汽-液反应	163	B. 搅拌器流体力学基础	192
2. 带反应的溶液中的吸收	164	C. 流体剪切速率	193
IV. 反应器选择的总结	165	1. 动力相似	194
V. 一些实际问题	165	2. 剪切速率关系	196
A. 操作方式	165	II. 放大关系	199
B. 难以预测的现象及安全问题	166	A. 放大参数	199
C. 缩小	167	B. 最大和平均剪切速率	199
D. 经验的作用	167	C. 中试研究的必要性	200
参考文献	168	D. 放大手段	201
第八章 流型与停留时间分布	169	E. 功率测量	203
I. 引言	169	F. 粘度	203
II. 停留时间分布	170	■. 基本放大指南	204
A. 分布函数	170	A. 一般规律	204
B. 分布函数的矩	171	B. 针对某一化工产品的间歇过程	204
C. 正归化分布	171	一例	204
		C. 聚合反应一例	205

D. 多级连续气-液浆态过程一例	207	C. 层流热交换器	249
E. 液-液乳化过程一例	208	D. 伴随反应的流动	250
IV. 用户-承包商-卖主的关系	209	■. 静态混合器	250
符号表	210	A. 掺合上的应用	251
参考文献	211	B. 传热上的应用	252
第十章 流化床	212	C. 反应方面的应用	253
I. 流态化放大中的主要问题	212	IV. 移动壁装置	254
II. 基本概念	214	A. 空腔流动	254
A. 最小流化速度	214	B. 挤压机	256
B. 气泡特性	215	C. 搅拌槽	257
1. 单气泡上升速度	215	V. 小结	258
2. 连续流化时的气泡速度	216	符号表	258
3. 床层膨胀	216	参考文献	259
4. 通过气泡的气体流动	217	第十二章 多级传质过程	260
C. 终端速度和夹带	218	I. 主要问题	260
D. 反应和气-固接触	219	II. 基本考虑	260
E. 传热	221	■. 汽-液系统——蒸馏	262
F. 气塞流的重要性	223	A. 主要问题	262
■. 预测大型设备中的操作	224	B. 相平衡	262
A. 气泡尺寸	224	1. 扩散系数	264
B. 混合速率	227	2. 其它物性数据	264
C. 分布板设计	228	C. 操作性能估算	264
D. 夹带	230	1. 级计算	264
E. 旋风分离器	230	2. 设备水力学——板式塔	265
IV. 实际工业经验	232	3. 传质效率	270
A. 流化焦化	232	4. 塔板上的液体混合	273
B. 流化临氢重整	234	5. 塔板上的夹带	275
C. 壳牌公司制氮过程 (SCP)	236	D. 实验室放大	276
V. 放大存在的问题	239	1. 分离性能示范	276
A. 颗粒粒度平衡	239	2. 效率预测	276
1. 反应的影响	239	E. 理想化和假定	276
2. 粉碎	239	F. 结论	277
3. 团聚作用	239	IV. 气-液系统——吸收和解吸	277
B. 磨蚀	240	A. 主要问题	277
C. 反应器模型和模型参数的选择	240	B. 操作性能估计	278
D. 操作中的不可靠性	242	1. 相平衡	278
符号表	242	2. 级计算	278
参考文献	243	3. 设备水力学——板式塔	281
第十一章 层流过程	245	V. 液-液系统——萃取	281
I. 放大的主要问题	245	A. 主要问题	281
II. 管内无扰动的流动	247	B. 萃取的符号表示	282
A. 衡算方程	247	C. 相平衡	283
B. 等温流动	248	D. 操作性能估算	284

1. 级计算	284	A. 固液分离的效率	326
2. 溶剂选择	285	B. 滤饼洗涤	327
3. 萃取装置	287	C. 脱水	328
4. 传质关系	291	D. 固-固分离	328
5. 筛板萃取器的传质效率	292	E. 悬油液的预处理	328
E. 为放大进行的实验室研究	293	II. 基本考虑	329
VI. 能量问题	294	A. 颗粒的描述	329
符号表	295	1. 适宜特征粒径的选择	329
参考文献	297	2. 粒度分布的描述及平均粒度	329
第十三章 连续传质过程	300	3. 颗粒形状与密度	330
I. 主要问题	300	4. 颗粒的其它性质	330
II. 基本考虑	300	B. 聚并与絮凝	330
A. 相平衡和相际扩散	300	1. 异向絮凝	330
B. 逆流传质	300	2. 同向絮凝	330
C. 相接触的力学	305	C. 颗粒与流体间的相互作用	331
III. 汽-液体系——蒸馏	307	1. 低浓度下的重力沉降	331
A. 主要问题	307	2. 高浓度下的干涉沉降	331
B. 操作性能估算	308	3. 低浓度下的离心沉降	332
C. 液体分布	308	4. 高浓度下的离心沉降	333
D. 压降	308	D. 通过填充床的流动	333
E. 最大蒸汽流量	310	1. Carman-Kozeny方程的局限性	333
F. 传质效率	310	2. 基本滤饼过滤方程——Darcy	
G. 传递单元和理论级	313	定律	334
H. 放大程序	313	3. 深床分离	334
I. 总结	314	III. 固-液分离设备	335
IV. 气-液体系——吸收和解吸	314	A. 重力沉降槽和浓密机	335
A. 主要问题	314	B. 离心机和水力旋流器	335
B. 操作性能估算	315	C. 浮选	336
C. 传质效率	315	D. 表面过滤机——滤饼过滤	337
D. 放大方法	316	E. 深床过滤机	338
E. 总结	316	IV. 为设备设计与选择进行的小型	
V. 液-液体系——萃取	317	研究	339
A. 主要问题	317	A. 重力沉降槽和浓密机	339
B. 逆流萃取的符号表示	317	B. 离心机和水力旋流器	339
C. 操作性能估算	317	C. 浮选	340
D. 相的分布	318	D. 滤饼过滤机与脱水筛	340
E. 最大生产能力(液泛)	319	E. 深床过滤机	340
F. 传质效率	319	V. 放大技术	341
G. 放大方法	322	A. 重力沉降槽与浓密机	341
H. 总结	323	B. 水力旋流器	342
符号表	323	1. 低固体浓度下的因次分析	342
参考文献	325	2. 高固体浓度下的因次分析	344
第十四章 固-液分离过程	326	3. 级效率曲线	345
I. 固-液分离过程中的主要问题	326		

C. 沉降离心机	345
D. 浮选	347
E. 滤饼过滤机与脱水筛	348
F. 深床过滤机	349
VI. 不确定因素	349
A. 絮凝的状态与预处理	349
B. 设备的湍效应	349
C. 颗粒沉降对Stokes定律的 偏差	350
D. 滤饼的可压缩性	350
E. 回带	350
符号表	350
参考文献	351

第十五章 放大中的环境问题

I. 主要环境问题的评价	352
A. 环境问题	352
B. 三大环境污染对象	352
C. 条例	353
1. 开发与条例的相互影响	353
2. 机构的职权范围	353
3. 申请环境许可的支持工作	354
4. 联邦法规与条例	354
a. 向空气的排放	355
b. 向水中的排放	356
c. 向土地排放固体/有害废料	358
II. 废料的控制和减少	361
A. 中间工厂产生的有害废料	361
B. 化学工业为受约束的工业	362
C. 满足环境规定	362
D. 减少环境忧虑	362
III. 环境考虑与放大	363
A. 环境数据的收集	364
B. 环境影响——过程评价的一 部分	364
C. 排放的取代方案	364
D. 新产品的难题	365
E. 了解权	365
IV. 环境的挑战	366
参考文献	366

第十六章 用中间工厂腐蚀试验对结 构材料进行评价

I. 进行小型腐蚀试验的主要问题	367
II. 小型腐蚀试验的原则	368

A. 目标和目的	368
B. 设计腐蚀试验的考虑	368
C. 材料选择判据	369
1. 影响材料选择的因素	369
2. 常用结构材料	369
3. 腐蚀剂的实质	370
D. 腐蚀预测与防止指南	371
1. 均匀腐蚀	371
2. 点腐蚀	372
3. 原电池腐蚀	372
4. 裂隙(浓差电池)腐蚀	373
5. 晶间腐蚀	373
6. 应力腐蚀	373
7. 失锌现象	374
8. 腐蚀疲劳	374
9. 冲蚀/腐蚀	374
10. 氢损伤	374
II. 在中间工厂进行腐蚀试验	375
A. 选择试验材料	376
B. 试验样件的选择	376
C. 表面预处理、测定与称量	376
D. 暴露技术及试验时间	379
E. 暴露后样件的检验和清洗	379
F. 非金属材料的评价	380
IV. 补充中间工厂数据的特种试验室 试验	381
A. 可能的实验室试验	381
B. 快速腐蚀试验设备	381
V. 中间工厂腐蚀试验的不确定性	383
参考文献	384

第十七章 通过中间工厂和示范装置

取得经验	386
I. 中间工厂研究的主要问题	386
A. 由不确定性引起的风险因素	386
B. 中间工厂装置的费用	386
C. 时机选择	387
D. 基础数据还是经验数据	387
E. 为市场调研生产产品	388
F. 循环流的研究	388
G. 安全问题	388
II. 中间工厂项目的基本考虑	390
A. 项目的目的	390
B. 卖方试验	391

C. 代表管	392	I. 放大是否有捷径?	399
D. 联动中间工厂	392	II. 实验	401
E. 示范厂	392	III. 模型化	402
III. 预测生产厂的运行	395	IV. 本构方程中的有因次参数	404
IV. 中间工厂的经验法则	396	V. 放大回顾	406
V. 中间工厂的较新发展	397	参考文献	406
参考文献	397		
第十八章 放大：综述、结束语及注			
意事项	399		

第一章 绪 论

A. BISIO

I. 放大的基本问题

当把一个全新的化学过程,或一个经部分改变过的化学过程,从实验室过渡到工业生产实践,往往会遇到一些未曾预料的问题。这些问题可能属于化学方面,或物理方面,或兼有两方面。现以放大一个化工过程可能遇到的困难,说明放大面临的问题的实质。先考虑以下三个例子即:作为杂质存在的水,爆炸限值的确定,以及不稳定物料的存贮。

生产操作遇到的最严重问题之一,是工业过程中存在某些杂质,但却没有在小型试验或半工业试验中考察和研究过。有些杂质可能使催化剂失去活性,或增加过程产品的产率,从而完全改变催化过程的特征。此外,一旦工业设施安装完成而没有充分考虑去除杂质问题,将会要花费很大的力气和代价来进行改造。

水是碳氢化合物工业物流中常见的杂质。大规模生产过程中,有许多可能的途径使水“进入”到各个生产设备中。原则上水能从过程流中用传统的生产方法及机械部件除去。但这样做将使成本增加;而机械部件还需在工厂的建设期间装备好,否则,热交换器中小股蒸汽渗漏,将使一定量的水进入过程物流,导致碳氢氯化物水解,催化剂完全失去活性,或显著改变催化剂的性能。因此,设计工业生产厂之前,必需搞清水和其它类似杂质如果进入系统的后果。

与此相似,小型实验室设备中测定的碳氢化合物-氧-氮混合物的爆炸极限,比工业生产规模设备中的测定值窄一些,因而实验室试验结果表示较为安全,更易于使用。这种表面上较窄的爆炸极限,归因于小型设备具有较高传热速率,特别是通过设备器壁和表面的传导和辐射作用。较高的传热速率降低了温度随时间上升的危险性,达到形成爆炸的条件。再者,小型设备给燃烧热提供更大的受热器;能量的吸收也减缓了温度的上升。

按给定的规程,小规模地贮存和安全处置易燃物料并不困难。在生产工厂中存贮这些材料时,必须从临界质量观点出发进行严格考虑,确保所用设施的散热能力明显地大于潜在的放热速率。一些利用空气氧化过程的工厂中,以及贮存硝酸铵、木屑或煤粉的工厂中,由于没有认识到小规模存贮易燃材料所取数据的局限性,已发生一系列损失惨重的爆炸和失火事故。

所有上面这些实例,都暗含着一个放大的概念。本书中,放大的定义为:

放大是指工业生产装置的成功开车和运转。而该生产装置的设计和操作方法是部分地依据小型装置的试验和示范。

所谓成功,应包括按设计能力和计划生产成本进行生产,质量达到要求的标准。成本一词的含义,不仅包括诸如原材料的购入价格、产品的产量和投资回扣等项明显的因素,而且包括工厂职工和公众的总体安全,以及环境不被污染等。许多实例表明,投产的时间也是一

个关键因素，当投产晚于计划要求的时间时，其放大是不成功的。

为了使化学过程的放大得以成功，要求利用多方面的技术技能，透彻理解研究对象。放大步骤中不仅仅包括作出技术决策和综合权衡利弊，一个已选定的方案总包含经济方面的问题，因为不可能精确地确定工业过程应该是什么样。用于一个发展项目（放大仅为其中一部分）的时间和资金总是限定的，因此，第一个“工业生产厂”的设计、建设和开车，都将不得不包含“有意进行的冒险”。冒险程度以及由此带来的投资风险，必须考虑为进一步了解该生产过程所需的额外费用来加以权衡。

在确定反应器的几何形状和经济上有益的操作模式的决策过程中，可以清楚地看到化学工程和基础科学间的交叉影响。为使反应器达到某一水平（最佳水平），既可根据某种工程方法，也可通过互相影响的物理和化学的速率因素的综合分析，选定某种符合化学动力学要求的特定反应器类型。如图 1-1 所示，在反应器选择和设计的每一阶段，都存在程度不等的基础理论和工程原理间的交互影响。完成开发的最佳路线，往往不是简单直接以理论为基础的路线，或者以经验为基础的路线，而是两种路线以某种程度相结合的路线。

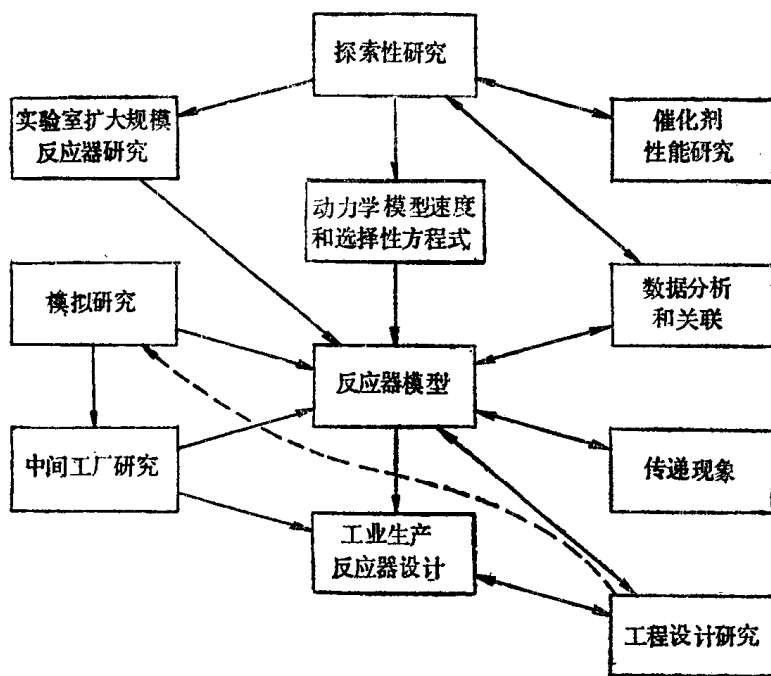


图 1-1 反应器设计过程的绪构

遵循直接路线，从实验室数据到工业设计，需要具有实际上却常常不能得到的大量信息，或者理论和工程上的判断超越了正常认为可能或必要的限度。然而，如果一个过程能在不同的几个规模上进行运转试验，取得可观的实验经验，并表明过程仅需考虑微小的改变，则直接路线可能既实际可行，又很理想。

反应器设计的第一步是根据实验室数据推导速率和选择性表达式。如果仅仅进行探索性实验室研究，仅仅在原则上确定反应流程的实际可行性，未必能从数据中引出一个简化的可用模型。最低要求也应从实验室扩大规模试验的反应研究中得到一个勉强可用的动力学模型。

然后，从动力学模型进展到反应器设计阶段，此时应已透彻理解扩散、速度分布这样一些物理现象，能充分估量物理因素对转化率和选择性的影响。实际情况却往往不是如此。例

如，对于一个多相反应，并不是所有要研究的现象都程度相同地受设备几何因素的影响。

表1-1 (Levenspiel, 1979) 列出了多相反应器主要几何因素对化学反应、传质和传热的影响的定性说明。由于实验室反应器有较大的表面积和容积比，不能充分显示（甚至不能暴露）热传递问题的影响。因此，为确保由实验室研究开拓的反应器模型能与工业反应器的设计和运转关联，必须进行中间工厂的研究。

小型试验常允许用来发展和证实在设计一个模型时用到的一些基本假设，但应该持谨慎态度。按放大研究的原则向前推进时，要注意证明由初期实验引伸的假设仍然正确。例如，管式连续反应器中的柱塞流假设，须在小型和生产规模上同时进行验证。如果不进行生产规模模型的验证，转化率和选择性的实验室数据到了工业生产时，则可能得不到。人们往往用模拟法（即没有化学反应的流动）研究模型，观察体系的流体力学行为，以证实小型试验推导的基本构想，并由此建立工业规模的操作条件。

近几年有大量的实验涉及通过催化床的气-液两相流动。然而，从工业生产的观点出发，在这一领域仍然有许多方面有待深入研究。不少实例中，甚至连压力降这样一个简单的参数，也不能计算到令人满意的精度，产生 $\pm 100\%$ 的偏差并不罕见。小口径管中关于压力降的实验研究，需要补充进行有关催化床整个横截面上液-气相分布的模拟研究，从而确信液相和气相分布基本均匀，达到良好催化效率和最小反应器容积的最低要求。

表 1-1 反应器几何尺寸对化学反应，传质和传热的影响

现象	反应器容积	高度和直径比	表面积和体积比
化学反应	有明显和决定性影响	较小并间接影响	只有间接影响
传质	只有间接影响	明显的影响	间接影响
传热	较小并间接影响	明显的影响	明显和直接影响

模拟研究有助于确定反应器中控制每相流动状态的各个参数。半工业试验用的小内径（往往小于 5cm）反应器中，即使两种流体的线速度大大低于工业设备中的速度，仍然可获得气-液的均匀分布。低线速可能对气-液的传质和传热产生显著影响。在加氢裂解这类消耗大量氢气的反应过程中，影响尤为明显。如果未曾在流体线速接近工业设备的条件下进行中间工厂试验，则工业设备中催化剂的活性和稳定性可能高于中间工厂的结果。

A. 放 大 率

我们讨论放大时，都隐含着—个放大率的概念，即工业设备的设计大小与采集数据用的最大试验设备大小间的比例关系：

$$\text{放大率} = \frac{\text{工业生产速率}}{\text{中间工厂生产速率}}$$

显然，中间工厂和实验室设备间也可定义一个类似的放大率。

由 Ohsol (1973) 开发的一些典型过程体系的放大率列于表1-2。从实验室设备到中间工厂，放大率为500—1000，从中间工厂到工业生产，放大率为200—500并不罕见。然而，反应剂为液、固态，产品为非气体的过程，放大率要降低。

只有当放大的关联式已经非常清楚（换句话说，已有相当大量的实际经验），或在从基础工程科学和化学的角度去研究是可能的情况下，才能在冒合理的风险情况下，取较大放大率。但40年代中期用气体扩散法制取 U-235 时，从实验室试验直接放大到工厂生产，放大率超过 10^6 。显然，风险很大，但获得的利益也很明显。此外，在这一项目中投入了庞大的