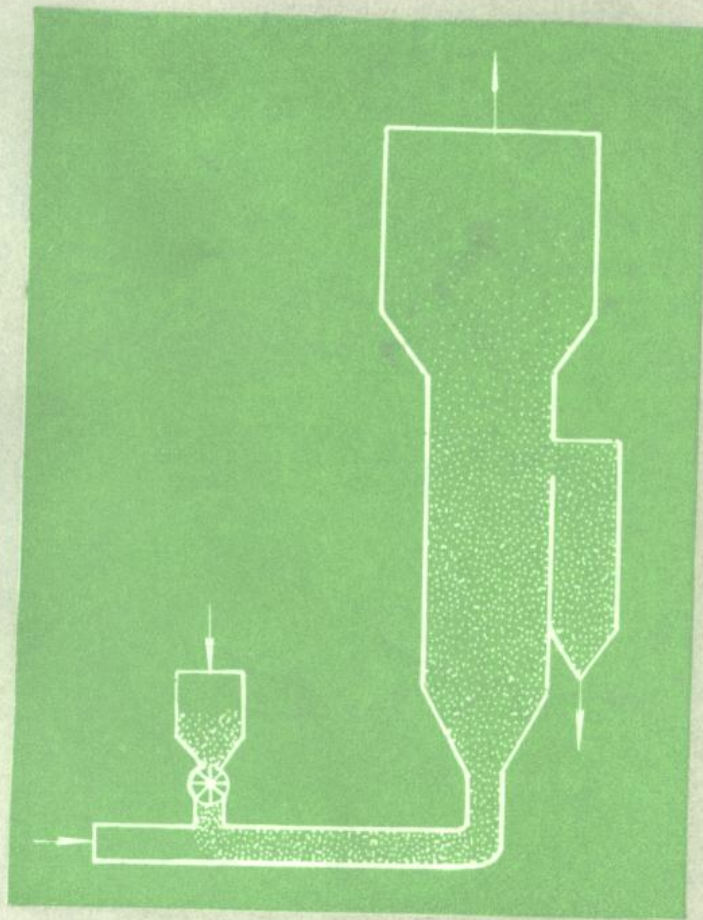


高等学校教材

化学工程基础

王定锦 编



HUAXUE GONGCHENG JICHU

高等教育出版社

TQ02

W16

高等学校教材

化学工程基础

王定锦 编

五
十
五
日

高等教育出版社

(京) 112 号

内 容 简 介

本书根据高等学校“化工基础”教学的基本要求而编写的。全书共分十三章，在阐明化工过程开发步骤和方法，以及化学工程学的基本观点和方法之后，分为四个部分：第一部分为流体流动过程基本原理及其应用；第二部分为热量传递过程基本原理及其应用；第三部分为质量传递过程基本原理及其应用；第四部分为化学反应过程基本原理及其应用。

本书可作为高等学校理科化学和应用化学专业、师范化学专业以及工科院校有关专业的“化工基础”课程的教材，亦可供从事化学应用研究人员和生产技术人员参考。

01659/103

高等学校教材
化学工程基础
王定锦 编

高等教育出版社 出版
新华书店总店科技发行所发行
河北省香河县印刷厂印装

开本 787×1092 1/16 印张 25.25 字数 590 000

1992年10月第1版 1992年10月第1次印刷

印数 0001—1 730

ISBN 7-04-003934-6/O·1146

定价 7.90 元

前 言

本书是在原有讲义和多年教学实践基础上编写而成的，旨在为完善化学教育的知识结构和提高学生应用化学理论和知识解决实际问题，特别是生产实际问题的能力，提供一本化学工程学的基础性教材。

根据高等学校的“化学工程基础”和“化工基础”课程的教学基本要求，本书先在总论中概括阐述化工过程开发步骤和方法，以及化学工程学的基本观点和方法，然后按序论述流体流动过程、热量传递过程、质量传递过程和化学反应过程的基本原理及其应用。

在编写本书过程中，编者考虑到为适应理科化学专业培养目标的需要，在不失化学工程学科特征的前提下，在内容的广度、深度和侧重点上，力求适应培养目标的需要。既要防止强调理科特点而偏离工程学本身的特征，又要防止追求工程学的系统性和完整性而忽视理科教学的实际需要和可能。在教材内容选择上，既要反映出学科发展的内容又要符合基础教学和初学者的认识规律，尽量使两者统一起来。

本书作为化学专业的基础课教材，着眼于理解化学工程学的基本观点、基本原理和处理工程问题的方法方面，而不以培养工程设计能力为宗旨，因此书中不过多地涉及工程技术细节和设计技术问题。但化学工程学毕竟是应用基础科学，不通过实际的应用计算，难以真正理解其基本原理和方法。为此，编者精心设计了各章的例题和习题，试图通过适量的例、习题达到正确理解基本原理和方法，以及提高实际应用能力之目的。

现代科学技术需要有一套严密的术语、符号和单位的规定，这对科技著作，尤其是教科书更为必要，但化学工程学涉及多种科学和技术领域，统一术语和符号尤为困难。本书根据国家标准，全书采用统一的术语、符号和单位。

在本书编写过程中，我的同事们曾为此做了不少工作，书中图表主要由刘喆和田梦庐设计绘制。武汉大学的曹正修和郑洁修教授，为本书的修改提出不少宝贵意见，并给予热情的帮助，特此致谢。

欢迎大家批评指正。

编 者

1991.12. 北京

目 录

第一章 总论	1
一、化学与化工生产	1
1. 从化学实验室研究到工业化生产	1
2. 化工过程开发程序和步骤	3
二、化学工程学与化工生产	4
1. 化学工程学的形成与发展	4
2. 化学工程学的研究范围及其重要性	5
三、化学工程学与化工数据	6
1. 化工数据	6
2. 计量单位	7
3. 因次与无因次准数	9
4. 化工基础数据的单位换算	10
四、化学工程学中的过程放大与最优化	15
1. 化工过程放大	15
2. 化工过程最优化	16
主要参考书目	17
习题	18

流 体 流 动

第二章 流体流动过程基本原理	20
一、流体流动现象	21
1. 流动型态	21
2. 流动边界层	23
3. 动量传递基本定律	26
4. 流速分布	27
5. 平均流速	30
二、流体流动系统的质量衡算	31
1. 流率和流速	31
2. 质量衡算基本方程	33
3. 定常流动系统的质量衡算方程—— 连续性方程	33
三、流体流动系统的能量衡算	35
1. 总能量衡算	35
2. 机械能衡算	38
习题	45

第三章 流体测量	46
一、流体压强测量	46
1. 流体压强测量原理	46
2. 液柱压强计	46
二、流体流量测定	49
1. 孔板流量计	49
2. 文丘里(Venturi)流量计	53
3. 转子流量计	54
4. 毕托管(Pitot tube)流速计	57
5. 流量计的选择和使用	58
习题	59
第四章 流体输送	61
一、流体输送管道的管径选择	61
1. 管径计算式	61
2. 管径的优化选择	62
二、流体在管路系统中流动时的阻力	63
1. 直管阻力(沿程阻力)	63
2. 局部阻力	68
3. 流体输送系统中总的机械能损失	72
三、流体输送所需的功率	72
四、流体输送机械	73
1. 离心泵	73
2. 往复式压缩机	80
3. 旋转式流体输送机械	84
4. 喷射式流体输送机械	85
5. 流体输送机械综述	86
习题	90

热 量 传 递

第五章 传热过程基本原理	92
一、热能衡算	93
二、固体壁内的热量传递——导热	95
1. 热传导过程基本定律	95
2. 导热系数	96
3. 固体平壁导热	96

4. 圆筒壁导热	98
三、流体与固体壁之间的热量传递——给热	100
1. 给热过程分析	101
2. 给热速率基本方程	102
3. 传热膜系数	102
四、两种流体通过间壁的热量传递——传热	105
1. 传热过程分析	105
2. 传热速率基本方程	105
3. 总传热系数	107
4. 传热面积	109
5. 传热温度差	109
习题	115
第六章 热交换	116
一、载热体	116
1. 载热体的选择	116
2. 载热体耗用量的计算	116
二、热交换计算	117
三、操作条件的优化	121
1. 流向选择	121
2. 载热体温度的选择	122
3. 流体流速的选择	122
四、热交换器	123
1. 热交换器的评价指标与优化目标	123
2. 典型间壁式热交换器	123
3. 热交换器综述	128
习题	130

质量传递

第七章 传质过程基本原理	131
一、传质过程及其单元操作	131
二、相际平衡	132
1. 均相混合物组成的表示方法	132
2. 相律	134
3. 相平衡关系	135
三、传质过程的物料衡算基本方程	136
四、传质过程的机理及传质速率方程	137
1. 传质速率和传质速度	137
2. 传质过程的历程	137
3. 单相物系内物质的扩散过程	137
4. 对流传质过程	139
5. 相际传质过程	142

五、传质设备	146
习题	149
第八章 气体的吸收	150
一、气体与液体的相平衡关系	150
1. 平衡体系的自由度	150
2. 气液相平衡关系	151
3. 气液相平衡关系对吸收操作的意义	155
二、连续吸收装置原理及其流程	157
1. 吸收装置原理	157
2. 吸收装置流程	159
三、物料衡算和操作方程	159
1. 全塔物料衡算	159
2. 操作方程及操作线	160
四、吸收速率基本方程	164
1. 吸收过程分析	164
2. 吸收速率基本方程	164
3. 吸收系数	166
4. 吸收过程的推动力	167
5. 吸收过程的两相接触面积	168
五、填料塔	168
1. 填料塔的构造	168
2. 填料	168
3. 塔径的确定	169
4. 填料层高度计算	170
5. 填料塔操作条件的选择	176
6. 填料塔的研究	181
习题	184
第九章 液体的精馏	186
一、蒸气-液体的相平衡关系	186
1. 平衡体系的自由度	186
2. 相间平衡关系	186
二、精馏装置原理及其流程	193
1. 精馏装置原理	193
2. 连续精馏装置及其流程	197
三、双组分连续精馏过程的物料衡算和操作方程	197
1. 全塔物料衡算	197
2. 精馏段的物料衡算和操作方程	199
3. 提馏段的物料衡算和操作方程	201
4. 加料板操作方程和加料操作线	202
5. 进料状态对操作线的影响	205

第十三章 气-固相催化反应过程	328	I-10. 下标	375
一、气-固相催化反应动力学	328	I-11. 上标	376
1. 气-固相催化反应过程的历程	328	II. 计量单位换算	376
2. 表面反应过程	329	表 II-1. 化学工程中常用的单位换算系数表	376
3. 外扩散过程对气-固相催化反应过程的影响	331	表 II-2. 几种常用温标间的换算关系	377
4. 内扩散过程对气-固相催化反应过程的影响	335	III. 常用积分公式与数值计算方法	378
5. 气-固相催化反应动力学的实验研究	340	III-1. 常用积分公式	378
二、工业催化反应器的床层型式与流态化	347	III-2. 积分数值计算方法	378
1. 工业催化反应器的床层型式	347	IV. 某些基本物理常数	381
2. 流体通过颗粒层的流动现象与流态化	347	V. 常用化工基本数据	383
3. 固定床与流化床催化反应器的比较	351	表 V-1. 水的物性数据	383
三、操作温度的最优化与工业反应器的		表 V-2. 饱和水蒸气表	393
换热方式	352	表 V-3. 干空气物性数据	384
1. 操作温度的最优化	352	表 V-4. 某些气体的物性数据	385
2. 可逆放热反应的最优操作温度	353	表 V-5. 某些液体的物性数据	386
3. 最优操作温度的实施与工业反应器的		表 V-6. 某些固体材料的导热系数	387
换热方式	357	表 V-7. 某些常用绝热材料的导热系数	387
四、固定床催化反应器的计算	362	VI. 某些材料和定型设备规格	388
1. 等温反应过程	363	表 VI-1. 低压流体输送用焊接钢管规格	388
2. 绝热反应过程	366	表 VI-2. 金属管常用规格、材料及适用温度	389
习题	369	表 VI-3. LZB 型玻璃转子流量计主要	
附录		技术参数	390
I. 本书所采用的术语、符号与计量单位	372	表 VI-4. B 型离心水泵主要特性参数	391
I-1. 空间、数量和浓度	372	表 VI-5. 列管式固定管板换热器系列的	
I-2. 时间、速率和速度	372	基本参数	392
I-3. 物性和热力学参数	373	表 VI-6. 瓷质拉西环填料(乱堆)的特性数据	393
I-4. 流体流动过程	373	表 VI-7. 瓷质拉西环填料(整砌)的特性数据	393
I-5. 热量传递过程	374	表 VI-8. 鲍尔环填料(乱堆)的特性数据	393
I-6. 质量传递过程	374	表 VI-9. 阶梯环填料(乱堆)的特性数据	394
I-7. 化学反应过程	374	表 VI-10. 矩鞍形填料(乱堆)的特性数据	394
I-8. 无因次准数	375	表 VI-11. 金属压延板波纹填料的特性数据	394
I-9. 常用缩写符号	375		

第一章 总 论

一、化学与化工生产

化学工程学是以化工生产过程为主要研究对象的学科；化工生产过程是以化学变化和化学处理为主的工业制造过程。因此，化工生产过程与化学有着密切的关系。

化学科学研究一般划分为基础研究，或称纯化学研究和应用化学研究两大类。这两类研究的任务、对象和希望达到的目标是不相同的。化学基础研究主要是发现前人所未发现的物质及其性质、结构和化学变化规律，或者研究新方法、合成新物质；应用化学研究则主要是应用化学的理论和方去解决国计民生的种种实际问题。本世纪以来，随着应用化学研究的发展，许多同化学密切相关的学科分支相继形成，例如，将化学理论和方法应用于解决医药方面的问题而形成了药物化学，应用于农业和环境保护问题就形成了农业化学和环境化学等等学科。但不言而喻，化学理论和方法应用最为广阔的领域，则仍然是化学工业生产。

1. 从化学实验室研究到工业化生产

在化学工业过程的研究中，无论是研制新的产品、探索新的生产方法或新的工艺过程，或是开辟新的原料来源，改造原有的生产方法和工艺过程等，都是在化学理论研究和应用研究基础上从化学实验室研究开始的。由化学实验室研究取得成果，到该成果在工业化生产中付诸实现的全部研究过程，为化工开发过程。

从化学实验室研究到实现工业化生产，不仅有量的变化，而且有着质的飞跃。以新产品开发为例，要将实验室研制的新产品实现工业化生产，至少要研究和解决如下一些问题：

原料路线 在现代化的化工厂中，原料消耗费用往往要占产品成本的 60~85%，所以，选择何种起始原料来实现工业化生产，有着十分重要的意义。举例来说，用哈伯法合成氨，即在固体催化剂作用下，用氢和氮合成氨的方法，在化学实验室里，可以采用纯净的氮和氢作为起始原料。但用这种方法实现工业生产，就要考虑选择何种起始原料以获得所需的氮和氢。目前合成氨工业大多采用燃料转化路线获取氢和氮，其中又有三种原料可供选择，即固体燃料、天然气和石油。60年代以来，已逐渐由以固体燃料为主的原料路线，转变为以天然气和石油为主，使成本显著降低。又如有机合成工业过去曾以农副产品和煤为主要原料，近年来，大都以天然气和石油为原料。选择原料路线不仅要考虑技术经济方面的可靠性和合理性，而且还要考虑国家的资源情况。化学实验室的研究，若不事先考虑原料来源，往往会使研究结果无法实现工业化生产，因而也就失去了实用价值。

工艺流程 所谓工艺流程，就是既定生产方法的操作程序、物料走向以及各种机械设备的组合关系。举例来说，在实验室用氯化钾和硝酸钠制备硝酸钾时，只要按一定配比将两种原料和水倒入烧杯中加热搅匀，反应后滤去氯化钠即可。但是，即使将这样简单的过程实现于工业化生产，也必须考虑到原料的贮存和输送，母液的循环使用，加热和混匀的方式，精制的方法和步骤，

以及设备之间的相对位置等等,也就是说,也必须设计一个合理的工艺流程。

一般说来,化工产品的生产,往往不是直接由原料一步制得产品,而是由原料经过一系列的加工处理,使之适合于反应要求的状态;反应后的产物也需要经过一系列的加工处理,使之成为合乎规格的产品。与此同时,在生产过程中往往还会产生若干副产物,而有些副产物还需要经过若干步骤,才能加工成合乎要求的副产品。此外,都必需周密考虑原料的循环使用、热量的回收利用,废气、废水和废渣的处理等等,使得工艺流程更为复杂。

应当指出的是,即使用同一种生产方式生产同一种产品,也可能有各种不同的工艺流程。由于工艺流程不同,产品的质量和成本等也可能相差悬殊。

操作方式 当生产方法和工艺路线确定之后,在设计工艺流程的同时,需要选择采用何种操作方式,即采用连续操作还是间歇操作。

间歇操作,或称分批操作,是将原料一次投入设备,并在设备中进行某种化学或物理过程,然后将产品或半成品一次卸出,再投入另一批原料,并重复上述操作。例如高分子材料生产中的聚合反应,一般都以间歇操作方式在称为聚合釜的釜式反应器内进行。间歇操作的特征是,在设备的某一定部位上,上述物理或化学过程的不同步骤,是分别在不同的时间进行的。因此设备内物料的组成、浓度、压强,以及反应速率和物系性质等过程参数,都随时间而变化,必要时应随时加以调节和控制。显然,在间歇操作过程中,设备内物料的组成、状态、温度和压强等过程参数都随时间而变化。

连续操作是将物料连续不断地加入设备进行某种化学或物理过程,同时又不断将完成该项过程的物料从设备中排出。例如工业上氨的合成,就是将原料气连续不断地送入合成塔,同时,使反应后的气体从合成塔连续不断地流出。可见,连续操作的特征是过程的不同步骤,在同一时间内在设备的不同部位进行,而任一部位的过程参数可不随时间而改变。

一般说来,连续操作较之间歇操作具有生产能力大,产品质量稳定,操作条件便于控制,且易于自动化等优点。但究竟采用何种操作方式为宜,则须视具体过程的情况而定。在近代大规模化学工业中的生产过程,大都采用连续化、自动化操作。当部分过程不得不采用间歇操作时,通常都要设置缓冲罐和中间储槽等设备加以衔接,以保证整个生产过程的连续。

化工设备与机械 当生产方法、工艺路线和工艺流程确定之后,化工设备和化工机械的选型和设计,往往成为化学工业开发过程中关键的一环。有时实验室实验取得了良好的结果,而放大成工业装置后,或者效率明显地下降,或者无法正常操作。这就是所谓放大效应。化学实验装置放大到工业规模装置,初看起来好象只是几何尺寸的变化,实际上却是一个很复杂的问题。

为了能使实验室实验结果迅速而成功地放大成大型工业装置,就必须具备这样一些条件:

① 要有足够的基础数据; ② 对化学工艺过程的规律性有一个深入的了解; ③ 要有可靠的设计计算方法。

对化工生产来讲,设备和机械的选用和设计,还有一个很重要的问题需要考虑,这就是材料的耐腐蚀性能问题。

技术经济评价 实验室研究成果能否实现工业化生产,还必须通过技术经济评价来决定,也就是必须根据技术、经济和安全等三个方面的考察结果进行评价。

技术方面主要考察该项成果在技术上是否可靠、是否达到了先进水平、将其实现工业化是否适合我国资源情况和国情特点,也就是考察其技术上的先进性、实用性和可靠性。

经济方面主要考察作为研究成果的新技术或新产品的市场需求情况,及其与同类技术或产品的竞争能力,以及该成果在实现工业化之后可能取得的经济效益。当然,在进行经济评价时,社会效益也是不容忽视的。

安全方面主要考察实现工业化后对操作人员和环境可能产生的危害,是否有切实可靠的安全措施,以及对废气、废水和废渣的可靠处理方法。

以上这三个方面,尤其是后两个方面往往被从事化学研究的人们所忽视,因而影响研究成果的工业化进程,甚至使成果无法实现工业化。

2. 化工过程开发程序和步骤

由以上的介绍可见,化学实验室研究成果实现工业化,需要经过长期而艰巨的开发过程,通常需要耗费大量的资金、人力和较长的开发时间(或称为开发周期),因此,各国都在研究制订关于开发程序和步骤的法规性文件。我国化工部也制定了《化工新技术开发管理条例》。一般说来,从化学实验室研究取得成果,到实现工业化生产,需要经历开发研究、工程设计与建设,以及工业装置的试生产等三个阶段。化工生产的开发研究大致可分为开发基础研究、过程研究、工程研究和技术经济评价等四个方面。化工开发过程的程序和步骤,可粗略地标绘成如图 1-1 所示的框图。

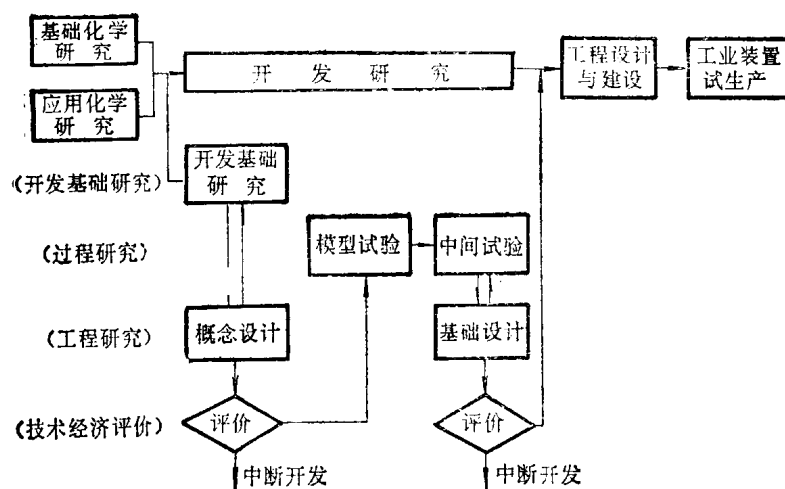


图 1-1 化工开发过程的程序和步骤

开发基础研究 以开发为目的而进行的实验室研究称为开发基础研究,通常也称为实验室小试。这种研究工作是根据化学科学的基础研究和应用研究提供的信息,确认其研究成果有工业化的可能性之后,以化学实验室规模进行的、从原料开始直到制成产品的实验室研究,其目的在于确定原料路线、工艺过程和基本的工艺条件,以及寻求原料、中间产物和产品等各种物料

的分析测试方法等。

过程研究 过程研究是通过模型试验和中间试验,提供设计工业装置所必需的数据和数学模型,以解决工业化过程中必需解决的一系列工程技术问题,并对技术经济指标作进一步考核。模型试验是在实验室中利用模型化的设备,寻求生产所需各种化工操作和设备的设计数据和数学模型。中间试验是指小型工厂规模的试验。根据不同情况,中间试验装置可以包括与大型工业装置完全类似的全部流程和设备,也可以只是其中部分流程和设备。中间试验是开发过程中最为耗费人力、物力和时间的步骤,有时甚至还需要经过多次逐级放大试验。因此,为了节省开发费用和缩短开发周期,应尽量设法减少中间试验的级数和缩小试验规模。近来,有不通过中间试验,直接由实验室小试放大到工业规模装置的报导,但成功的实例还为数不多。

工程研究 工程研究主要包括概念设计和基础设计。概念设计是在实验室小试的基础上,对预定规模的工业生产装置进行预设计,其目的是检验实验室的小试成果的完整性和可靠性。一般说来,概念设计的内容应包括生产规模、原料和产品的规格,设想的工艺流程图,初步的物料衡算和能量衡算,主要设备型式、规格和材质的初步考虑,主要技术经济指标,三废处理方案,以及对进一步开发研究的建议等。基础设计是在过程研究的基础上,为建立第一套生产装置所作的初步设计,是开发研究成果的主要表现形式。无论是概念设计或是基础设计都还是属于工程研究范畴,不属于一般常规的工程设计。

技术经济评价 技术经济评价是判断开发研究各阶段结果的有效程度,和决定中止或继续开发的依据。通常,在确定开发项目后,(亦即所谓“立项”之前),除应对该项目的可行性进行初步评价之外。在立项之后的整个开发过程中,还必须进行多次技术经济评价,以决定继续或中断开发。

当然,以上所述主要是生产规模较大、生产过程和技术都较复杂的开发项目,所必须经过的开发程序和步骤;对于市场需求量不大、生产过程与技术又不太复杂的精细化工产品,如标记化合物、化学试剂等可以在实验室或中试装置中进行生产的项目,不一定都要经过上述所有的开发程序和步骤,但技术经济评价仍是绝对不容忽视的。

二、化学工程学与化工生产

化学工程学是以化学工业生产过程为主要研究对象,研究这类过程的基本规律和工程技术,为有效地实现工业生产提供可靠的基础理论和技术。这些基础理论和技术也是实施各种化工类型工业生产和工程,如冶金工业、轻工业、医药工业、核能工程和环境工程等的基本依据。

1. 化学工程学的形成与发展

恩格斯在《自然辩证法》一书中给出了科学的论断:“科学的发生和发展一开始就是由生产决定的”。这一论断在化学工程学的形成和发展过程中体现得尤为明显。

起初,人们对于化学生产的研究只局限于某种或某类产品的生产方法、工艺过程和设备。这些研究逐渐形成了一门独立学科,即化学工艺学(或称工业化学),随后又按不同的化工产品品种或行业发展形成了各自的工艺学,如硫酸工艺学、合成氨工艺学、无机盐工艺学、基本有机合成工艺学等等。

随着化工生产的不断发展,化工产品的品种和化学工业的门类日益增多。这些繁多的化工产品,所用的原材料、制造方法、工艺流程、操作条件以及化工设备和机械都各不相同。但是对这些看来似乎毫无联系的工业生产过程进一步深入研究就可发现,各有特点的这些化学工艺过程却存在共同的规律性。化学工艺固然是以进行化学反应为主要特征,但在化学反应前的原料准备和处理,以及反应后产物的分离和精制等后处理,却大量应用了各种物理操作过程。若将生产各种化学产品的化学工艺过程加以比较、分析和归纳,则可从中发现若干具有共同原理和特点的基本物理操作过程。例如,酒精生产和石油加工都需要采用蒸馏操作,其操作原理是相同的;又如,硝酸钾等无机盐,以及硫酸和纯碱等的生产,都需要将反应后的固液混合物过滤分离,分离出来的固体产品又都需要进行干燥。不同产品生产过程中过滤操作或干燥操作,虽然应用场合不同,但却具有共同的操作目的和原理。这些具有共同操作目的和基本原理的物理操作称为单元操作。化工生产中的单元操作有很多种,其中最为主要的有流体输送、液体搅拌、非均相物系的分离(如过滤、沉降等)、热交换、蒸发、结晶、干燥、吸收、吸附、离子交换、蒸馏、萃取、固体破碎与筛分等等。对这些单元操作的原理、方法和设备进行系统的研究,始于本世纪20年代。自此,化工单元操作(或称化工原理)作为一门独立的学科得到了发展。化工单元操作的形成和发展促使各种化工类型工业的生产技术得以互相沟通,互相借鉴,有力地推动了整个化学工业和其他相关工业的迅速发展,同时,也为化学工程学的发展奠定了基础。

随着近代化学工业,尤其是石油化学工业的发展,人们在深入研究单元操作的基础上,进一步认识到众多的单元操作分别遵循若干共同的主导规律。根据这些规律可以进一步将各种单元操作归纳为动量传递、热量传递和质量传递三大传递过程,并进而发掘出三种传递过程的内在联系。由此逐渐形成了化工传递工程学。这样使化学工程科学又取得了很大的进展。

近几十年来化学工程学科的另一重大进展是对化学工艺过程中各类化学反应过程共同规律的研究有了突破性的进展,因而在本世纪50年代后期,形成了一门崭新的学科分支——化学反应工程学。这门学科主要是将化学动力学与传递过程结合起来对工业反应器中化学反应过程的共同规律进行研究。这样,化工生产中的各种化学反应过程也得以同物理过程(单元操作)一样,可以在理论和技术上互相沟通,从而大大促进了化工过程开发的进程。更值得注意的是,近年来由于化学工业日益大型化、综合化和自动化,仅仅孤立研究和设计各种化工过程,已不能完全满足需要,而不得不将化学工艺过程中的各种装置联系起来研究,并用数学模拟方法寻求最优的化工系统。这就是新近发展起来的化工系统工程学。

2. 化学工程学的研究范围及其重要性

近代化学工程学的研究范围日益广泛,研究内容也日益丰富,其中某些部分已经发展成为独立的学科分支,如化工热力学、化工传递工程学、化学反应工程学和化工系统工程学等等。包括这些分支学科在内的化学工程学同化学工艺学和化工机械工程学,已经成为近代化学工业发展的三大支柱。

一种化学产品或一项化工技术的开发,在从化学实验室的开发基础研究开始,到实现工业化生产规模为止的整个开发过程中,化学、化学工艺学、化学工程学和化工机械工程学都在起着作用。但是在不同的开发阶段由于主要矛盾的转化,起主导作用的学科也随之变化。这种变化曾

有人形象地用图来表示,如图 1-2 所示^①。

就化学产品开发而言,在实验室小试阶段,主要是研究决定原料路线和工艺路线,并寻求合适的工艺条件等等。这时,化学和化学工艺学在研究中起着主导作用。当实验室小试取得了理想的成果,而要使之以工业规模付诸实现时,就必须根据化学工程学的知识寻求技术上最先进、经济上最合理和操作上最安全的工业化方案。这时,化学工程学将起主导作用。最后,当开发过程进入工程建设和生产阶段,化工机械设备问题就突出出来了。不言而喻,在开发的任何阶段,都需要多种学科知识和技术的紧密结合,只是各个阶段对于不同学科知识和技术的需求各有侧重而已。但是,图 1-2 清楚地表明,化学工

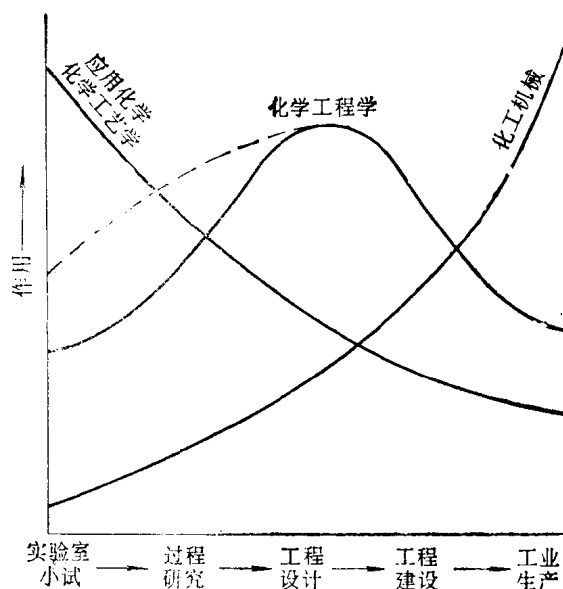


图 1-2 化学工程学在化工过程开发各阶段中的作用

程学的知识和技术在过程开发各阶段上的作用都是十分明显的。无数事实也充分说明,若将化学工程学的基本观点、理论和方法,提前介入实验室研究(如图中虚线所示),也就是在化学实验研究阶段就让化学工程学提前发挥作用,则对加速开发项目的工业化进程,必将大为有利。

如前所述,化学工程学不仅对应用化学的研究和化工类型工业生产的有着重要的作用,而且对环境工程、生物工程、医学工程以及核能工程也有着重要意义。

三、化学工程学与化工数据

在化学工程学研究和应用中,不可避免地要涉及各种数据。常用的化工数据,大多已经收集汇编成各种手册备查;有些数据可以从有关书刊查得;有些数据则须通过研究或实地测量得到。因此,在讨论化学工程学的具体内容之前,首先学习掌握化工数据的类别和有关术语,以及符号、单位和单位换算方法等基本知识,显然是十分必要的。

1. 化工数据

化学工程学中涉及的常用化工数据,大致可以划分为如下几类:

化工基础数据 这是一类与物料本身的物理与化学性质及其状态有关的数据,如相对密度、粘度、热容、焓、自由能、平衡常数等等。因此,这类数据有时又被称为物性数据。

过程参数 这是一类与所进行的过程和操作条件有关的数据,如流量、流速、温度、压力等等,有时也被称作操作参数。

结构参数 这是一类表征设备结构特征的参数,如直径、高度等几何尺寸。

无因次准数 这是一类由各种变量和参数组合而成的数群,它是没有因次的纯粹数值。

^① E. O. Oshol and M. P. Freeman, "Trends in Chemical Engineering Research", *Chem. Eng. Prog.* 67.2, (1971)。

2. 计量单位

上述各类化工数据,除无因次准数外,都是由两部分组成的物理量:一是计量单位,即度量物理量的标准;二是数值,即度量该物理量的标准单位数。因此,

$$\text{物理量} = \text{数值} \times \text{单位}$$

例如对于一个描述设备长度的物理量,可表示为:

$$L = 5\text{m}$$

式中 L 为物理量,“长度”的符号; m 为计量单位,“米”的符号;5 为一个纯数值。也就是说,这里选用米(m)作为测量标准(计量单位),而数值 5 表示该设备需用 5 个米单位来表示其长度的大小。

化学工程学中常常遇到很小或很大的数值,为了简洁明了,并避免由于有效数字不明确而产生误差,应尽量采用科学记数法来表达,即在第一位有效数字的后面加上小数点,而小数点的真正位置则由 10 的方次数确定。例如,0.000283 可写为 2.83×10^{-4} ;而 28300 可写作 2.83×10^4 。显然,在数值运算过程中,应遵守有效数字运算规则。

由于历史的原因,用以度量物理量的单位,有各种不同的单位制,如英制和公制(米制)。米制又有 CGS 制、MKS 制和工程制之分。近年来又推广使用一种国际单位制。

CGS 制又称物理单位制或绝对单位制。它以长度、质量和时间为基本物理量,并以厘米(cm)、克(g)和秒(s)为基本单位。

MKS 制又称绝对实用单位制。它也以长度、质量和时间为基本物理量,但以米(m)、千克(kg)和秒(s)作为基本单位。

工程单位制是以长度、力(重量)和时间为基本物理量,并以米(m)、公斤力(kgf)和秒(s)作为基本单位。在工程单位制中,力的单位公斤力为基本单位,而质量单位[公斤力·秒²·米⁻¹]为导出单位。

国际单位制是以 MKS 制为基础制定的,并经 1960 年第十一届国际计量大会通过,其国际符号为 SI。它具有科学、合理、精确、实用、简明等优点。因此,有不少国家为此颁布了法令或国家标准,国际性科技组织也都宣布采用这一科学的单位制。

在我国,国际单位制推行委员会于 1979 年成立,并于 1981 年颁布了《中华人民共和国计量单位名称和符号(试行)》;1982 年国家标准局颁布了有关量和单位的一系列国家标准;1984 年国务院发布了《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》。自此,我国国际单位制的推广工作跨入了一个新的阶段。

我国的法定计量单位——中华人民共和国法定计量单位,简称法定单位,是以国际制单位为基础,同时选用一些非国际单位制单位构成的,包括以下几个方面:

国际单位制的基本单位和辅助单位

国际单位制规定了七个基本单位和两个辅助单位。现将基本单位的名称和符号,录于表 1-1。两个辅助单位是平面角和立体角的单位。平面角单位名称为弧度,符号为 rad;立体角单位名称为球面度,符号为 sr。

国际单位制中具有专门名称的导出单位

表 1-1 SI基本单位

量的名称	单位名称		单位符号
长度	米	metre	m
质量	千克, (公斤)	kilogram	kg
时间	秒	second	s
热力学温度	开[尔文]	Kelvin	K
物质的量	摩[尔]	mole	mol
电流	安[培]	Ampere	A
发光强度	坎[德拉]	candela	cd

单位的中文名称去掉方括号,即为单位的全称;去掉方括号和其中的字,即为单位的简称。

国际单位制规定,任何一个物理量的导出单位都是通过选定的定义式,按一贯性原则由基本单位导出来的。一贯性原则就是将用来确定导出单位的定义式中的比例系数永远取为1,由基本单位相乘或相除求得导出单位。这种一贯导出单位,避免了多种单位制和单位的并存和混淆。

例如:速度的导出单位,可按定义式

$$u = k \frac{S}{t} \quad (1-1)$$

来确定。根据一贯性原则,应先令系数 $k=1$,并以国际制的基本单位米(m)和秒(s)分别为距离 S 和时间 t 的单位,则可导出速度单位为

$$[u] = \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

而利用米的分数单位——厘米导出的速度单位 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$,则不是国际制一贯单位,因为以这样的速度单位代入定义式中,所得比例系数不是1,而是0.01。

若导出单位均用基本单位来表示,则会使不少单位使用起来不很方便,因此,国际单位制中规定了若干具有专门名称的导出单位。

例如,在国际单位制中,力为导出单位。力的单位可按牛顿运动定律

$$F = ma = \frac{mu}{t} = \frac{mS}{t^2} \quad (1-2)$$

导出。式中 F 为力, m 为质量, a 为加速度, u 为速度, t 为时间, S 为距离。因此,按一贯性原则,力的导出单位为

$$[F] = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \quad (\text{用SI基本单位表示的表达式})$$

国际单位制规定该导出单位的专门名称为牛顿(N)。这样,不仅单独使用方便,而且更便于用来导出其他导出单位。

现将化学工程学中常用的部分具有专门名称的导出单位,摘录于表 1-2。

国家选定的非国际单位制单位

我国法定计量单位中,还选定了十五个非国际单位制单位,并规定这些单位可与 SI 单位并用。现将化学工程学中常用的这类单位摘录于表 1-3。

表 1-2 一些具有专门名称的国际单位制导出单位
(摘录化学工程学中常用部分)

量的名称	单位名称		单位符号	用其他SI单位表示式	用SI基本单位表示式
力, 重力	牛[顿]	Newton	N		$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
压力, 压强, 应力	帕[斯卡]	Pascal	Pa	$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
能, 功, 热量	焦[耳]	Joule	J	$\text{N} \cdot \text{m}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
功率	瓦[特]	Watt	W	$\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$
频率	赫[兹]	Hertz	Hz		s^{-1}
电荷量	库[仑]	Coulomb	C		$\text{A} \cdot \text{s}$
电位, 电压, 电动势	伏[特]	Volt	V	$\text{W} \cdot \text{A}^{-1}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$
电容	法[拉]	Farad	F	$\text{C} \cdot \text{V}^{-1}$	$\text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$
电阻	欧[姆]	Ohm	Ω	$\text{V} \cdot \text{A}^{-1}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-2}$
电导	西[门子]	Semens	S	$\text{A} \cdot \text{V}^{-1}$	$\text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3 \cdot \text{A}^2$

表 1-3 国家选定的非国际单位制单位
(摘录化学工程学中常用部分)

量的名称	单位名称	单位符号	定义或与SI单位的关系
质量	吨	t	$1\text{t} = 10^3\text{kg}$
体积	升	L, (l)	$1\text{L} = 1\text{dm}^3 = 10^{-3}\text{m}^3$
时间	分	min	$1\text{min} = 60\text{s}$
	[小]时	h	$1\text{h} = 60\text{min} = 3600\text{s}$
	日, 天	d	$1\text{d} = 24\text{h} = 86400\text{s}$
旋转速度	转/每分	$\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	$1\text{r} \cdot \text{min}^{-1} = (1/60)\text{r} \cdot \text{s}^{-1}$
[平面]角	度	$^\circ$	$1^\circ = 60' = (\pi/180)\text{rad}$
	[角]分	'	$1' = 60'' = (\pi/10800)\text{rad}$
	[角]秒	"	$1'' = (\pi/648000)\text{rad}$

用于构成十进倍数和分数单位的词头

法定单位制规定的用于构成十进倍数和分数单位的词头同国际单位制一样共有十六个。现将其常用的部分词头名称和符号摘录于表 1-4。

3. 因次与无因次准数

因次 如上所述,任何一种物理量均可由规定的基本物理量,通过基本的物理关系式导出。也就是说,任何导出物理量均可以一定的形式,用基本物理量来表达。如某一物理量 Q 与基本量长度、质量和时间之间的关系式为

$$[Q] = M^\alpha \cdot L^\beta \cdot T^\gamma \quad (1-3)$$

式中 L 、 M 、 T 为基本量的因次(量纲);

α 、 β 、 γ 为任意的有理数。

上述表达式(1-3)称为该物理量的因次式(量纲式),或者简称为该物理量的因次(量纲)。例如,力 F 的因次式或力的因次(量纲)为