

高等学校教材

主编 杨荣榛 董文生

化工基础

高等教育出版社

高等学校教材

化工基础

主编 杨荣榛 董文生



高等教育出版社·北京

内容提要

本书集编者多年教学经验编写而成,包括流体流动过程及输送设备、传热过程及传热设备、气体吸收及设备、精馏及设备、化学反应工程及反应器、硫酸生产及硫酸铵、氨合成及尿素的生产、石油炼制与石油化工、化学工业的发展与环境保护和附录等内容。全书计算类习题答案以二维码形式附在每章末。

本书可供化学类、材料类、化工与制药类、食品科学与工程类和环境科学与工程类专业学生学习使用,也可作为相关专业学生和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

化工基础/杨荣榛,董文生主编.--北京:高等教育出版社,2018.7

ISBN 978-7-04-049905-6

I. ①化… II. ①杨… ②董… III. ①化学工程-高等学校-教材 IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 120632 号

HUAGONG JICHU

策划编辑 曹 瑛	责任编辑 曹 瑛	特约编辑 曹 瑛	封面设计 王 鹏
版式设计 杜微言	插图绘制 邓 超	责任校对 刘娟娟	责任印制 尤 静

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 廊坊十环印刷有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 20.75
字 数 510 千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址	http://www.hep.edu.cn http://www.hep.com.cn
网上订购	http://www.hepmall.com.cn http://www.hepmall.com http://www.hepmall.cn
版 次	2018 年 7 月第 1 版
印 次	2018 年 7 月第 1 次印刷
定 价	38.80 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 49905-00

前言

化学工业的飞速发展,不仅为人类提供了大量的生产生活用品、丰富了人类的物质文化生活,也极大地促进了国民经济的发展和社会的文明与进步。在技术经济快速发展的今天,为满足人类的发展需要,世界各国都在加速发展现代化学工业,新工艺、新技术、新产品和新设备层出不穷。对当代大学生而言,无论是从事高新技术的开发,还是从事化学工业生产或相关行业的管理,都必须了解当代化学工业的发展概貌和态势,熟悉化学工业主要领域,掌握传递中的单元操作,典型产品的制备原理、生产方法和工艺过程,了解资源、能源、环境与化学工业可持续发展状况。为方便学习,强化学生工程意识和理论联系实际能力,特编写本书。

本书从化工基本原理介绍入手,以如何实现化学反应工业化为主线,结合单元操作、化学反应工程、工艺过程和优化、技术经济分析、环境保护、“三废”处理及化学工业的发展等内容,系统分析了具有代表性的化工产品生产工艺,将理论与生产过程有机地联系起来,保证内容的系统性和完整性。在重点介绍三传一反一工艺有关理论基础上,选取与生产实际结合紧密的例题,更好地方便学生学习。对书中涉及的化工生产工艺部分,从原料和工艺路线的选择、反应原理、影响因素、工艺条件、主要设备的结构特点等进行介绍。同时,对技术经济指标、能量回收利用、副产品的回收利用和废物处理,以及近年来现代化学工业前沿领域的最新成果,如绿色化工、新型功能材料等的新工艺、新技术和新方法作了简要介绍。

本书由杨荣榛、董文生担任主编,参加编写工作的有陕西师范大学杨荣榛(绪论、第4章部分、第5章、第8章和附录)、彭军霞(第1章和第9章)、张国防(第3章)、段兴潮(第4章部分)、董文生(第6章),西南大学王明(第2章)及渭南师范学院吴海真(第7章),全书由杨荣榛、董文生统稿。本书兼顾非化工类专业学生特点,着力体现时代特色,知识涵盖面广,取材新颖,循序渐进,深入浅出,具有较强的前瞻性。鉴于各校开设本课程学时不同,可有针对性地选择相关内容进行讲授,带星号内容供学生自学或参考。

在本书编写过程中,得到陕西师范大学教务处的大力支持与资助,高等教育出版社的编辑和武汉大学罗运柏先生对全书进行了详细的审阅及校订,在此一并致以衷心的感谢,同时对书中所引用文献资料的中外作者致以最诚挚的谢意。

由于编者学识有限,书中内容涉及面广、庞杂,在内容取舍和文字编排方面仍难以尽善尽美,不妥乃至错误之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

2018年5月于陕西师范大学

第0章 绪论	1
第1节 化学工业的发展	1
1. 化学工业发展史	1
2. 化学工业在国民经济中的地位与作用	2
3. 化学工业发展趋势	2
第2节 化工生产过程分析	3
1. 化工生产的特点	3
2. 化学工业的分类	4
3. 化学工业中的原料、原料选择原则及原料加工方法	5
第3节 化工过程开发	6
1. 化工过程分析	6
2. 化工过程研究方法	7
3. 化工过程的技术经济分析	9
4. 化工生产过程的优化	10
第4节 化工基础课程内容及学习目的	10
1. 课程内容	10
2. 学习目的	11
第1章 流体流动过程及输送设备	13
第1节 流体的基本性质	13
1. 基本性质	13
2. 流量和流速	14
3. 黏度	15
4. 定态流动和非定态流动	16
5. 连续性方程	16
6. 伯努利方程	17
7. 流体流动规律应用举例	19
第2节 流体压力和流量的测量	21
1. 流体压力的测量	21

2. 流体流量的测量	22
第3节 流体在管内的流动阻力	26
1. 牛顿型流体和非牛顿型流体	26
2. 流体流动形态与雷诺数	27
3. 流体流动边界层	29
4. 管、管件及阀门	30
5. 管内流动阻力计算	31
第4节 流体输送设备	38
1. 离心泵	39
2. 往复泵	42
3. 气体输送设备	44
4. 喷射泵	45
思考题	45
习题	46
第2章 传热过程及传热设备	49
第1节 概述	49
1. 化工生产中的传热	49
2. 传热的基本方式	49
3. 生产中的传热方式	50
4. 热负荷	51
第2节 传导传热	52
1. 热传导基本方程——傅里叶定律	52
2. 单层平面壁稳态热传导	53
3. 多层平面壁稳态热传导	54
4. 单层圆筒壁稳态热传导	55
5. 多层圆筒壁稳态热传导	57
第3节 对流传热	58
1. 对流传热机理	58
2. 对流传热系数的影响因素	59
3. 对流传热系数的求取	60
*第4节 辐射传热	62
1. 基本概念	63

2. 物体辐射能力与斯蒂芬-玻耳兹曼定律	63	3. 气液平衡相图	115
3. 两固体间的辐射传热	65	第2节 简单蒸馏和精馏	116
4. 设备热损失计算	67	1. 简单蒸馏	116
第5节 传热过程计算	68	2. 精馏	118
1. 总传热方程	68	第3节 双组分连续精馏计算	119
2. 平均温度差计算	69	1. 理论板及恒摩尔流假定	119
3. 总传热系数 K	72	2. 物料衡算与操作线方程	120
第6节 换热设备与传热过程的强化	74	3. 进料热状态的影响	123
1. 间壁式换热器	74	4. q 线方程	125
2. 列管换热器的选用	78	第4节 理论塔板数的求法	127
3. 传热过程的强化	79	1. 逐板算法	127
思考题	80	2. 图解法	129
习题	81	3. 回流比的影响及其选择	131
第3章 气体吸收	83	4. 简捷法	134
第1节 概述	83	5. 塔高和塔径计算	135
1. 质量传递过程简介	83	第5节 板式塔	137
2. 气体吸收过程与流程	84	1. 塔板类型及性能	137
第2节 气体吸收的相平衡	87	2. 流体力学性能和操作特性	140
1. 气体的溶解度	87	3. 填料塔与板式塔比较	143
2. 亨利定律	87	4. 板式塔的节能	143
第3节 气体吸收速率	89	思考题	143
1. 吸收理论	89	习题	144
2. 费克定律	90	第5章 化学反应工程及反应器	146
3. 吸收速率方程	92	第1节 概述	146
4. 填料塔的计算	96	1. 化学反应工程简介	146
第4节 填料塔	105	2. 反应器分类	147
1. 填料塔	105	3. 反应器的基本计算	148
2. 填料塔的流体力学性能	107	第2节 典型理想反应器及计算	148
思考题	108	1. 间歇釜式反应器	148
习题	108	2. 平推流反应器	151
第4章 精馏	111	3. 全混流反应器	154
第1节 双组分物系的气液平衡	111	4. 多釜串联反应器	156
1. 双组分理想物系的气液平衡	111	第3节 理想反应器的比较与选择	159
2. 挥发度与相对挥发度	113	1. 理想反应器的比较	159
		2. 理想反应器的选择	162

第4节 非理想流动及实际反应器 计算	167	4. 二氧化硫转化器及工艺流程	208
1. 非理想流动对理想流动偏离的 原因	167	第5节 三氧化硫吸收、生产全流程及 应用	212
2. 停留时间分布的表示方法	168	1. 三氧化硫的吸收原理	212
3. 停留时间分布的测定方法	169	2. 三氧化硫的吸收流程	212
4. 停留时间分布的数字特征	170	3. 硫酸生产全流程	213
5. 理想反应器的停留时间分布	172	4. 硫酸铵的生产	214
6. 非理想流动模型及计算	174	第6节 三废处理与能量利用	215
第5节 气固相催化反应及反 应器	179	1. 三废的产生及处理	215
1. 催化剂及其组成	179	2. 能量利用	216
2. 气固相催化反应过程	179	思考题	217
3. 气固相催化反应动力学表达式	181	习题	217
4. 工业反应器	183	第7章 氨合成及尿素的生产	218
思考题	187	第1节 概述	218
习题	188	1. 合成氨的重要性	218
第6章 硫酸生产及硫酸铵	190	2. 合成氨原则流程	218
第1节 概述	190	第2节 氨合成理论基础	219
1. 硫酸的性质和用途	190	1. 氨合成反应的热效应	219
2. 生产原料	191	2. 氨合成反应的平衡常数	220
3. 硫酸生产方法简介	191	3. 影响平衡氨浓度的因素	221
4. 硫酸工业的特点	192	4. 氨合成反应动力学	222
第2节 二氧化硫炉气的制造	193	5. 催化剂	223
1. 二氧化硫炉气的生产	193	第3节 氨合成和分离	223
2. 沸腾焙烧和焙烧炉	195	1. 氨合成工艺条件	223
3. 焙烧工艺条件及特点	196	2. 氨的分离	225
第3节 炉气净化与干燥	196	第4节 原料气制造和净化	226
1. 炉气净化的原则及指标	196	1. 原料	226
2. 炉气除尘及设备	197	2. 原料气制造	226
3. 炉气中杂质清除	198	3. 原料气净化	229
4. 净化流程	200	第5节 氨合成塔与合成氨全 流程	232
5. 炉气干燥	202	1. 氨合成塔	232
第4节 二氧化硫的催化氧化	203	2. 合成氨全流程	233
1. 催化氧化原理	203	3. 合成氨生产的发展	234
2. 反应动力学和催化剂	205	4. 技术经济分析	235
3. 催化氧化工艺条件	205	第6节 尿素的生产	236
		1. 尿素合成理论	236

2. 工艺条件	236	5. 转化设备	278
3. 工艺流程	238	思考题	278
4. 分离和回收	240	习题	278
思考题	241		
习题	241		
第 8 章 石油炼制与石油化工	242	第 9 章 化学工业的发展与环境保护	280
第 1 节 石油的性质及加工方法	242	第 1 节 化学工业的发展趋势	280
1. 石油的组成分类	242	1. 行业结构、产品结构向“精细化” 发展	280
2. 石油产品分类及加工方法	243	2. 原料结构的多样化	281
第 2 节 常减压蒸馏	245	3. 化学工业发展中的环境保护	281
1. 工艺流程	245	4. 化学工业的可持续发展战略	282
2. 工艺条件	246	第 2 节 新兴化学工业的发展	283
3. 常减压蒸馏设备	247	1. 精细化学工业	283
第 3 节 催化裂化	247	2. 生物化学工业	285
1. 催化裂化及反应	247	3. 煤化学工业	286
2. 工艺流程	249	4. 其他	288
3. 工艺参数	250	第 3 节 新型传质分离技术简介	288
4. 催化裂化装置	252	1. 超临界流体萃取	288
第 4 节 催化重整	253	2. 膜分离	290
1. 催化重整反应	253	3. 反应精馏	292
2. 催化剂	254	4. 冷冻干燥	293
3. 催化重整工艺流程	255	5. 超重力传质技术	294
4. 重整反应器	258	第 4 节 能源利用、环境保护和 安全生产	295
第 5 节 烃类裂解及裂解气分离	259	1. 热能的利用	295
1. 烃类裂解	259	2. 水资源的利用	295
2. 裂解过程动力学分析	260	3. 再生资源的利用	296
3. 原料性质及工艺参数	261	4. 化工污染的特点	297
4. 裂解工艺及设备	263	5. 环境保护	297
5. 裂解气净化与分离	266	6. 化工生产中的安全	298
第 6 节 乙烯的应用	271	思考题	299
1. 环氧乙烷和乙二醇	271	习题	299
2. 聚乙烯	272		
* 第 7 节 天然气的转化	274	附录	300
1. 天然气脱硫	274	附表 1 符号说明	300
2. 甲烷转化原理	275	附表 2 常用单位换算	303
3. 转化工艺条件	275	附表 3 某些气体的物理性质	304
4. 转化工艺流程	276	附表 4 某些液体的物理性质	305

附表 5	水的物理性质	307	附表 10	一些气体水体系的亨利 系数 E 值	316
附表 6	饱和水蒸气表(按温度 排序)	308	附表 11	一些气体在水中的溶解度 (气体组分及水蒸气总压力 为 0.1 MPa)	316
附表 7	某些材料的导热系数	309	参考文献		317
附表 8	常用固体材料的密度和 比定压热容	312			
附表 9	单级单吸离心泵规格 性能表	312			

第1节 化学工业的发展

1. 化学工业发展史

化学工业的历史十分悠久,可追溯到远古时期,人类用天然资源和简陋器具凭借经验加工制作生产生活必需品,如冶炼、酿造、制造陶器、漂染、鞣革、制漆及制造医药、火药和肥皂等。早在我国的仰韶文化时期,已有陶器;春秋战国时期,已经开始使用冶炼的青铜、铁制武器、耕具、炊具、乐器和货币等;造纸工艺在东汉时已相当完善;唐代已有黑火药混炼法的记载。在15世纪的欧洲,炼金术逐渐转变为制药,后又制得化学品硫酸、硝酸、盐酸和有机酸。18世纪中期,以食盐和硫酸为原料制纯碱的吕布兰制碱法的出现,带动了硫酸工业的发展。19世纪末出现了电解食盐的氯碱工业,此后钢铁工业的发展又促进了炼焦工业,化学家把炼焦工业副产品煤焦油分离为苯、甲苯、二甲苯、萘和蒽等物质,生产染料、医药、香料和炸药等产品,形成了以煤焦油为基础的有机合成工业。20世纪初,合成氨技术问世,此后石油的大规模开采及加工技术的发展,促进了炼油技术的发展,标志着化学工业发展到了一个新阶段。

19世纪中期,美国固特异轮胎橡胶公司用硫黄及橡胶助剂加热天然橡胶,使其交联成弹性体,应用于轮胎及其他橡胶制品,这是高分子化工的萌芽时期。同期,英国合成出苯胺紫染料,此后医药工业、香料工业也相继合成出能与天然产物相媲美的化学品。美国用樟脑增塑硝酸纤维素制成赛璐珞塑料,法国建成硝酸纤维素人造丝厂等。上述基础有机化学品和高分子材料的生产,都是在建立起石油化工产业以后获得了很大的发展。

20世纪是化学工业大规模发展的主要时期。美国用丙烯为原料生产异丙醇,这是石油化工大规模发展的开端。此后,高分子化工、精细化工也相继兴起。20世纪40年代,美国标准石油公司开发了催化重整过程,成为芳烃的重要来源。后来又建成第一套以炼厂气为原料的管式裂解制乙烯装置。20世纪60年代,高性能合成材料已开始出现,如聚酰胺、聚缩醛类、聚碳酸酯,以及ABS树脂等,这些材料具有强度高、耐冲击、耐磨、抗化学腐蚀、耐热性好、电性能优良、自重轻和易成型等特点,广泛用于汽车、电器、建筑材料等方面。此后出现的聚酰亚胺、聚苯并咪唑耐高温树脂,以及纤维增强树脂高分子复合材料等,具有密度小、强度高和韧性好等特点,广泛用于制造航天、航空及其他交通运输工具的结构件,替代金属。美国制成醋酸纤维素膜,用于淡化海水、处理工业污水;还有芳香族聚酰胺反渗透膜、电渗析和超过滤用膜,以及聚砜中空纤维气体分离膜等,用于工业生产中的气体分离等方面。有机硅树脂和含氟材料也得到迅速发展,广泛用于电子与电器工业、原子能工业和航天工业。涂料工业摆脱了传统的天然油漆,改用合成树脂,如醇酸树脂、环氧树脂和丙烯酸树脂等,其成膜性好、易固化,被广泛应用。

自20世纪80年代以后,新产品、新工艺、新技术层出不穷,90%以上的有机化工产品来自石

油化工工业,这极大地推动了化工生产技术的发展,无论是装置规模还是产品产量都增长得非常迅速。2011年,我国化肥产量6 027万吨,其中氮肥产量4 178.99万吨,磷肥产量1 462.4万吨,钾肥产量385.61万吨。2013年,我国化肥产量(折纯)7 570万吨,其中氮肥产量5 290万吨,磷肥产量1 680万吨,钾肥产量600万吨。2013年,我国硫酸产量约为8 500万吨。2015年,我国的聚乙烯产量为1 220.8万吨,聚丙烯的产量约为1 530万吨。

与此同时,专用化学品也得到进一步发展,它以很少的用量,增强或赋予产品特定功能,获得很高的使用价值。新技术的不断出现,再加上对反应过程的深入研究,推动了化学工业的技术进步,现代化学工业的生产装置也日趋大型化。随着社会的发展和人民生活水平的提高,化工产品多样化、功能化、精细化成为化学工业的发展方向。

2. 化学工业在国民经济中的地位与作用

化学工业的飞速发展表明了人类对化工产品的需求日趋增加,它在人类社会生活中的作用越来越重要。化学工业在国民经济中的地位举足轻重,与许多部门密切相关,它的发展水平一定程度上反映了一个国家的工业水平和科学技术水平。化学工业为机械工业提供焊接或切割材料用的乙炔、模型浇铸用的成型剂、黏合剂及酸洗液、电镀液、切削液等;为汽车工业提供合成纤维、合成树脂、合成橡胶、涂料、石棉和玻璃等;为冶金工业提供酸和碱、金属表面活性剂、化学试剂及各种橡胶制品等;为电子工业提供焊接剂、超高纯试剂、特种气体、封装材料及高分子凝聚剂等;为国防工业提供同位素、推进剂、密封材料、特种涂料和高性能复合材料等;为建筑业提供轻质建材,如塑料门窗、聚氯乙烯管道及塑料制品等;在农业方面,合成材料如合成橡胶、合成纤维等,弥补了天然物质的不足并替代天然物质,节省了大量耕地,为农业提供农用地膜及灌溉用管材、化肥、土壤改良剂、农药,以及人工降雨、农副产品深加工的添加剂等。

化工产品渗透到人类社会生活的各个角落。从化纤服装到塑料制品,从性能各异食品添加剂、果蔬保鲜剂到用途广泛的卫生用品及医用高分子材料;从家用商品到各种交通工具使用的轮胎、板材、管类等橡胶制品,都是由化学工业提供的原料生产的。

3. 化学工业发展趋势

化学工业经历多年的发展,已成为一个品种繁多、门类齐全的重要工业部门,尤其是近半个世纪以来,国内外化学工业发展迅猛,新工艺、新技术、新产品和新设备不断涌现,成为国民经济的重要支柱产业。从国内外化学工业的发展态势看,现代化学工业的发展趋势主要表现如下:

(1) 生产规模大型化 对现代化学工业而言,生产规模大型化、机械化,自动化程度不断提高。因为生产规模是决定化工过程经济效益的一个重要因素,单位生产能力的投资及生产成本是随着生产规模的增加而减小的。

(2) 原料和生产方法的多样化 化学工业能充分利用自然资源,用同一原料可以生产许多不同产品。如石油经过炼制可以得到各种用途的油品,深度加工又可得到石油化工的基本原料乙烯、丙烯和芳烃等,进一步可以合成合成纤维、塑料、合成橡胶等多种产品。而且,用不同原料采用不同的生产方法也可以制得同一产品,如用煤和天然气也可以经过不同的生产工艺方法制得烯烃等产物。

(3) 产品的精细化和专用化 化学工业属于技术密集型工业,由于市场、环境和资源的导

向,世界各国都十分重视科研工作,新的功能材料不断出现,加强技术开发和应用研究,不断开拓新用途和新市场。化工产品结构和布局的调整,产品的精细化、功能化和专用化已成为化学工业发展的主要方向。

(4) 副产物的综合利用和三废治理绿色化 化工生产中会产生大量的三废,这些物质不少是有害的,不仅污染环境、危害生态平衡,也影响人民健康。因此,世界各国都十分重视对化工产生的三废治理。由于传统的以大量消耗资源、粗放经营为特征的发展模式,加之产业结构不合理、生产工艺技术和管理水平较为落后,我国的生态环境和资源受到严重污染和破坏,且近年来呈现恶化之势。从科学观点看,绿色化学是对传统化学思维的创新和发展;从环境观点看,它是从源头消除污染、保护生态环境的新科学和新技术;从经济观点看,它是合理利用资源和能源、实现可持续发展的必由之路。

第2节 化工生产过程分析

1. 化工生产的特点

(1) 化学工业是独特的、不可取代的工业部门 化学工业以化学加工为主,是创造新物质的工业。生产过程中除了必需的生产装置外,还需要设置专用的供水、供电、动力、储存和运输等工程设施,涉及面广。

(2) 化工产品品种繁多,生产工艺复杂 产品繁多导致了生产工艺过程的多样性,同一原料可生产多种产品,同一产品又可用多种原料生产。生产过程中使用的原料有易燃、易爆、有毒和有腐蚀性的特点,对设备要求高、技术难度大,生产条件控制严格。因而选择合适的原料、工艺路线和合理的资源配置是生产中面临的首要问题。

(3) 化学工业具有规模效应 化学工业是一个装置型、连续性和自动化程度高的工业,生产中的主要设备大多是塔、罐、槽、压缩机、泵、反应器及管道等,这需要生产工艺设备和操作连续化和自动化,由此带来设备结构和操作方法的改变,使工业装置中的热量和质量传递过程十分显著,影响着化学反应的最终结果。装置规模越大,单位生产能力的投资越少,成本越低,同时有利于实现副产品和能源的综合利用。化学工业中基本生产设备购置费和总投资费用之比近似常数(兰格因子),即生产能力与容积(即其线性尺寸的三次方)成正比,制造费与容器表面积(即其线性尺寸的二次方)成正比,装置投资费用与生产能力的 $2/3$ 次方成正比。

(4) 化学工业是资金密集、技术密集的行业 化学工业的资金和技术密集主要表现在化工研究和开发的投入上,工艺的复杂性和装置的大型化决定了它的这一特征。由于工艺技术的发展及产品更新换代快,研发费用增多。技术密集表现在从原料到产品,涉及化学、机械、电子和仪表等诸多领域,有很高的知识密集度和很强的技术综合性。再加上生产工艺流程长,生产中处理的原料使用前要进行各种预处理;需对产品做专门的分离与精制,并要进行检测、分析等过程,需要大量的资金投入和新工艺技术。

(5) 化学工业是能耗大户 化学工业是以煤、石油和天然气等为原料,也可以以其为燃料为生产装置提供动力和能源。大多数化工企业在原料和动力上,都要消耗大量的能量,是一个能源密集型的工业部门。以煤造气为例,所需能源中约 40% 作为生产原料,约 60% 作为动力和燃料而

消耗掉,原料消耗费占产品成本的 60%~70%。

(6) 化学工业是易污染、重污染的行业 化工产品大多是易燃、易爆、有毒的,生产中会产生大量的废气、废水、废渣,它们会污染环境,给大气、水、土壤带来危害;在储存、运输及使用过程中如果发生泄漏,也会污染环境,严重危害人类的健康。相应的治理污染、解决废弃物的处理和资源利用,也离不开化工过程。

(7) 化工生产涉及经济问题 原料的供应、设备的投资、能源的消耗、产品的销售、工时的投入及生产的管理等都涉及经济问题。化工生产经济效益的好坏是评价化工生产过程能否实施的重要指标。生产中的能量综合利用,以节能为主要内容的技术改造,也是降低能耗、提高经济效益的重要途径。

2. 化学工业的分类

由于化工产品种类繁多,性质和用途差异甚大,化学工业的分类方法很多,不同国家有不同的分类方法,按产物的物质组成可分为无机化学工业和有机化学工业两大类,按原料的性质和来源可分为石油化工、煤化工、生物化工、矿产化工和海洋化工。

我国综合考虑产品的性质、用途和产量,分为如下 5 类:

- ① 无机化学工业,包括合成氨、无机酸、碱、盐和无机化学肥料;
- ② 基本有机化学工业,包括合成醇、有机酸、醛、酯、酮及烷烃、烯烃、芳烃系列产品;
- ③ 高分子化学工业,包括塑料及树脂、合成纤维和合成橡胶;
- ④ 精细化学工业,包括试剂、催化剂、助剂、添加剂、活性剂、染料、颜料、香料、涂料、农药和医药等;

⑤ 生物化学工业,包括有机酸、生物农药、饲料蛋白、抗生素、维生素和疫苗等。

世界上大多数国家按产品性质、用途及加工过程相似的原则分类,共分 19 类:

- ① 化学肥料工业,包括合成氨、氮肥、磷肥、钾肥、复合肥料和微量元素肥料等;
- ② 硫酸工业;
- ③ 制碱工业,包括烧碱和纯碱等;
- ④ 无机盐工业,包括磷酸盐、铬盐、硼盐、钡盐等各种无机盐,除硫酸、烧碱、纯碱以外的其他无机酸、无机碱等;
- ⑤ 石油化学工业,包括石油炼制,烃类的裂解制取三烯、三苯等有机化工原料和产品;
- ⑥ 煤化学工业,包括煤的气化、干馏、液化及其副产品的加工等;
- ⑦ 有机原料工业,如有机酸、醇、醛、酮、醚和酯等;
- ⑧ 合成树脂和塑料工业,包括聚氯乙烯、聚乙烯和聚苯乙烯等各种高分子聚合物,各种日用和工程塑料制品,离子交换树脂等;
- ⑨ 合成纤维工业,包括聚酯类、聚酰胺类和聚丙烯腈等合成纤维;
- ⑩ 橡胶工业,包括天然橡胶的加工及产品的制造,以及合成橡胶的生产及产品的制造;
- ⑪ 国防化学工业,包括炸药、化学武器及为核工业和航天航空工业配套的化工产品,如高能燃料、密封材料、特种涂料和功能复合材料等的生产;
- ⑫ 医药工业,包括各种天然药物和合成药物的生产;
- ⑬ 农药工业,其产品包括杀虫剂、杀菌剂、杀螨剂、除草剂、植物生长调节剂及杀鼠剂等;

- ⑭ 涂料及颜料工业,包括颜料、油料、填充料、溶剂、油漆、建材涂料和特种涂料等;
- ⑮ 染料工业,包括轻工、纺织和食品等多种用途的染料;
- ⑯ 信息材料,包括半导体材料、磁记录材料、感光材料、成像材料和光导纤维材料等;
- ⑰ 高纯物质和化学试剂工业,包括各种特定用途的高纯物质及各种级别化学试剂的生产;
- ⑱ 专用化学品工业,包括催化剂、添加剂、工业助剂、表面活性剂、水处理剂、黏合剂、香料、皮革化学品和造纸化学品等;
- ⑲ 化工新型材料,包括功能材料和复合材料等。

这里需要指出的是冶金(包括钢铁、有色金属及稀有金属的冶炼)、硅酸盐(包括玻璃、陶瓷、水泥和耐火材料)、造纸及制糖等工业,其生产过程虽然与化学工业相似,但由于其工业自身的特点,产品产量大,产值也比较高,在国民经济中同样具有重要性,因此,习惯上已从化学工业中分离出来,分为冶金工业和轻工业。

3. 化学工业中的原料、原料选择原则及原料加工方法

(1) 化工生产中的原料 化工生产中的产品种类繁多,需要不同的原料来满足生产要求,生产这些产品的原料,分为无机化工原料和有机化工原料两大类。

① 无机化工原料。无机化工原料有空气、水和化学矿物。空气经液化和分离可提供氧气和氮气等。氧气与诸多化工原料反应生成含氧产品;氮气既可作为原料,也可用于洗涤、分离气体混合物。水是化工生产必需的物质,它既可作为原料,又可作为溶剂,还可用来作冷却剂,亦能生产水蒸气作热源或动力。重要的化学矿物很多,如制硫酸的黄铁矿和硫黄,制磷酸盐的磷灰石等。

② 有机化工原料。有机化工原料包含煤、石油、天然气和生物质等。煤气化后获得的合成气进一步催化转化可得到液态或气态烃和甲醇;煤热分解,除了生成焦炭外,还可得到各种芳烃。煤化工投资大、能耗高、污染控制难度大,大多数煤化工产品的生产技术还有待进一步开发。石油和天然气组分稳定、氢碳比高,而且几乎全部的有效成分可转化为化工产品。石油经蒸馏、热裂解、催化裂化等工艺可得到各种烯烃、芳烃及烷烃等,经加工可得到醇、醛、酸、酯、醚、酚等产物,进一步合成可得到塑料、合成纤维、合成橡胶及医药、农药、炸药、涂料、染料和香料等。以石油和天然气为原料生产化工产品一般比从煤获得该产品的投资少、能耗小,有很大的优越性。

生物质如油料作物、药用作物、纤维作物、橡胶作物和染料作物等亦可作为化工原料,其主要成分为单糖、多糖、淀粉、油脂、蛋白质、纤维素和木质素等,其最大特点是可再生,是取之不尽、用之不竭的天然原料。据统计,每年获取的生物质可达2 000亿吨以上,相当于750亿吨石油,由此可见生物质的用量是非常大的,为人类提供了源源不断的资源。可以通过物理方法直接提取生物质中固有的化学成分,或利用化学或生物化学方法,如化学水解、酶水解、微生物水解等,将生物质分解为基础化学品,再进一步加工制得化工产品。

(2) 原料选择原则 选择原料时,生产同一产品可选择用不同的原料,原料不同,技术路线自然不同,因而会导致产品的技术经济指标有明显差别。选用高品位原料的价格自然高,产生的三废相对较少;选用低品位原料,原料费虽然低,但生产中净化任务重,产品收率低,三废排放量大,总体上未必经济。因此选择原料和技术路线时,应当全面权衡技术、经济、社会和环保等因素,从综合利用原料的角度考察原料,兼顾联合生产、副产品回收及三废处理等,提高原料利

用率。

(3) 原料加工方法

① 化学矿物及加工。化学矿物种类繁多,大多数以化合物的形态存在,且含有多种元素,主要用于生产无机化合物和冶炼金属,如岩盐、海盐或湖盐等用来制造纯碱、烧碱、盐酸和氯乙烯等;硫黄、硫铁矿等用于生产硫酸;氟磷灰石、氯磷灰石用于生产磷肥、磷酸和磷酸盐等。化学矿物的加工方法主要有热化学加工(煅烧)、浸取分离、萃取、提取分离和电化学方法等。

② 石油及加工工艺。从油田开采出来的石油称为原油,组成非常复杂。石油组成不同,采用的加工方法亦不同。石油的加工产品甚多,分为燃料油、润滑油、沥青、石油焦及烯烃、芳烃、液化石油气和合成气等。以产品为原料可进一步加工,制得更多化工产品和日用品。

③ 天然气及加工工艺。天然气是埋藏在不同深度地层中的气体,主要成分是气态烃类,还含有少量的二氧化碳、氮气和硫化物等杂质。天然气作为化工原料时,主要制取合成气,进一步可加工成甲醇、乙烯和丙烯等各种化工产品。天然气是一种高热值、低污染的清洁能源,以天然气为原料加工的基本有机化工产品,成本较低。

④ 煤及加工工艺。煤的品种很多,其结构也很复杂,主要成分是碳、氢和氧,并含有少量的氮、硫、磷等物质。煤加工过程主要有干馏、气化、液化等。以煤焦化后的焦化气为原料可制取芳烃、稠环化合物和杂环化合物等,要比石油方便。世界上由煤得到的苯约占苯总产量的25%,萘约占总产量的85%以上,炭黑占其总产量的25%。以煤为原料生产化工产品的历史悠久,发展以煤为原料的基本化学工业具有重要的意义,特别是煤的综合利用,将是我国今后重点研发的课题。

第3节 化工过程开发

1. 化工过程分析

在各种化工产品生产中,化学工业通过大规模地改变物料的化学组成及物理性质而获得有用的产品。无论是生产无机化工产品,还是生产有机化工产品,其流程千差万别,仔细分析其生产过程均有共同之处,生产工艺过程和操作一般也具有典型性。因此,掌握这些工艺对熟悉其他化工生产工艺过程具有重要作用。通常从工业原料经过化学反应获得目的产物的任一化工生产过程都可概括为原料预处理、化学反应和产物分离三部分。

原料预处理是化学反应前的准备工作。原料预处理是依据化学反应要求对原料进行处理,大多为物理过程,当使用气体(或液体)原料时,预处理包括原料气的制备、净化和配制,要求制得的原料具有一定的组成、浓度和纯度,尽量少含杂质(特别是有害杂质)。当使用矿物原料时,预处理包括选矿、配矿、粉碎、筛分,有时还需干燥或燃烧。原料矿粉应具备一定的组成(或品位)及一定的细度,以利于化学反应。

化学反应是化学工业过程的核心。经预处理后达到要求的反应物在一定条件下,在反应器中进行反应。为使反应进行得迅速、完全,需要维持一定的温度、压力和流量等操作条件,多数情况下还要使用催化剂。因此在化学反应过程中要创造良好的传热、传质和流体流动条件,以保证化学反应的顺利进行。此外,由于化学反应的不完全及某些反应物的过量、副反应的存在,生产

过程的反应产物为未反应物、副产品和产品的混合物。

要得到合格的产品,需要对产物进行分离和精制,这一步主要是物理过程。产品的后加工主要是指对产品的分离和提纯及对未反应物的回收利用。最常见的分离方法有冷冻、冷凝、精馏分离和结晶分离等。对未反应物的回收利用常采取循环方式与新鲜原料混合。此外,固体产品的造粒成型、干燥和包装也是产品后加工不可缺少的内容。

生产中,原料预处理和产物分离,缺一不可,化学反应是整个化工生产过程的核心,起着主导作用,它决定着原料预处理的程度和产物分离的任务,对其他两部分的设备投资和操作费用有很大影响。

化工生产可视为物理过程和化学过程两类过程的组合。考虑被加工物料的不同相态、过程原理和采用方法的差异,可将物理过程进一步细分为一系列遵循不同物理定律、具有某种功用的基本操作过程,称之为单元操作。每一种单元操作都概括了化工生产过程中一类具有共性的操作,如硫酸生产中 SO_2 炉气杂质的净化、 SO_3 的吸收,合成氨中半水煤气的湿法脱硫及水洗脱 CO_2 等,都是分离气体混合物的单元操作,共同遵循吸收原理,使用同类型的设备。化学反应亦类似于单元操作,按其反应的特点,寻求共性,在进行化学反应的同时,伴随着反应物料的混合、反应组分的传递和大量反应热的吸收与放出等物理过程。工业规模下的化学反应过程具有设备大型化、生产连续化、处理物料量大的特点。这些过程与反应器的尺寸和形状有关,影响反应物系的浓度和温度。

任何化工生产过程,无论其规模大小,都可以用一系列称为单元操作的技术来解决。只有将纷杂的化工生产过程分解为构成它们的单元操作来进行研究,才能使化学工程学具有广泛的适应能力。

2. 化工过程研究方法

(1) 化工过程研究方法 化学工程学作为一门工程技术学科,面临着实际的、复杂的化工生产过程——特定的物料在特定设备中进行特定的反应过程。对实际化工生产过程,探求合理的研究方法是化学工程学的重要内容。

在化学工程学的发展中,逐渐形成了两种基本的研究方法。一种是经验归纳法,即对一些化工过程通过大量实验归纳影响过程的各变量之间的关系,借助了物理学的相似论和因次分析法的指导。例如,热交换过程中的传热系数,不是从基础理论出发来寻求各有关因素之间的数学关系,再经过数学方程的运算而求解,而是通过实验测定归纳成量纲为1的相似特征数的关系式予以确定。另一种是数学模型法,它是将复杂的研究对象合理地简化为某个模型,利用该简化模型,对其进行数学描述,即将过程中各变量间关系用数学语言表达,所得到的数学关系式便是原过程的一个近似而等效的数学模型,然后通过求解或进行数值运算研究原过程的特性。数学模型法的核心是对复杂对象的简化,实质是使复杂的工程问题简化或分解为一个或若干个单纯的问题。

数学模型法应用于解决化工生产过程的实际问题,推动了化学反应工程的迅速发展,摆脱了单纯从实验数据归纳过程规律的传统做法。例如,过滤亦可使用数学模型法,将滤饼中的不规则网状通道简化成若干个平行的圆形细管,由此引入的一些修正系数则由实验测定,从而建立起过滤过程的数学模型。

工业生产中化工过程的广泛性、多样性和复杂性,给工业化工过程的研究增加了一定的困难,但在千差万别的工业化生产加工方法中,仍然有其基本的规律和共性,抓住这些共性,就能掌握工业生产过程的要领。

(2) 化工产品开发过程 任何一种新化工产品的生产开发过程,都是从最初的概念形成或设想开始,经过实验室研究、中间试验、工业化试验、放大设计和技术经济评价等诸多环节,最后建成工业生产装置,实现规模生产的整个过程。这种过程不但涉及化学反应的理论和规律,而且还涉及从实验室到工厂的整个化学问题、化学工艺和工程技术等实际问题,这是一种相当复杂的综合过程。

过程研究的重要任务是开发新产品、新技术和新工艺。把一个化学产品或一个化工过程从实验室研究开始过渡到工业装置生产为止的全过程称为过程开发。过程开发一般是根据实验室的基础研究成果和有关的工程技术资料,按照科学的方法,寻求技术可靠、经济合理的途径制取产品或实现化学加工过程,然后进行扩大试验,评价和设计工业装置,组织工业生产,制得化工产品。这种研究一般分为两个阶段:第一阶段为基础研究,即在实验室条件下进行原料、反应和产品的物理化学研究和化学工艺研究,着重从热力学和动力学的角度考察反应的进行情况、催化剂和反应条件,从大量的基础研究中挑选出最有希望的方案,供后续阶段研究采用。第二阶段为过程开发,这一阶段是根据实验室基础研究(也称“小试”)的成果,扩大试验规模,经过中间试验(也称“中试”),逐级放大、评价和改进,最后设计工业装置,组织工业生产。

一般来说小试结果只说明开发一个新产品或实现一种新工艺的可能性,只是对工业实施的一种原则性设想,不能用来设计工业装置和组织生产。过程开发的任务就是把这种设想付诸实施,把小试的成果转变为工业生产装置而实现工业化。只有包括这两个阶段的内容,才算圆满地完成了开发工作。

对新产品工艺过程的开发,是一项综合性很强的工程技术,这个过程包括对小试结果的评价及预设计,中试及评价,工业装置设计及评价,施工、开车及试生产,以及投产后的调优和技术总结等。与小试相比,过程开发是一项十分庞大的工程,它涉及化学工艺、化学工程、机械制造、仪表及控制、材料及防腐、生产安全、环境保护和技术经济等众多领域,包括试验研究、设计计算、技术经济评价、建设施工和组织生产等多个环节。

完成一项开发工作所需要的时间称开发周期。这个周期的长短与被开发过程本身的特性、小试的深度及成熟程度、数据资料的完整性、中试的层次及放大倍数和放大方法等有关。随着化学工程特别是化学反应工程理论的发展,以及计算技术的运用,在一些开发过程中应用数学模拟放大法,可大大缩短开发周期。

把小试结果放大的方法大致可归纳为四类:经验放大法、相似模拟放大法、部分经验与部分解析放大法和数学模拟放大法。经验放大法比较可靠,但因缺乏理论指导,故放大倍数一般较小,开发周期较长。相似模拟放大法应用相似理论和因次分析法,通过试验确定相关关系,进行工程放大,这种方法已经成功用于传热和传质等物理过程,但不适用于化学反应过程。部分经验与部分解析放大法是把经验与理论解析相结合,吸取两种方法的长处,缩短开发周期,提高放大质量。数学模拟放大法依据充分的基础试验和深入的理论分析,建立描述过程特性的数学模型,经过验证和完善后用于工程放大。由于这种方法具有坚实的理论基础,借助先进的计算技术,能够实现高倍数放大,所以是比较好的一种放大方法。