



普通高等教育“十二五”规划教材

精品课程教材

化学工艺学

张秀玲 邱玉娥 主编

UAXUE
ONGYIXUE



化学工业出版社

普通高等教育“十二五”规划教材
精品课程教材

化学工艺学

张秀玲 邱玉娥 主编



化学工业出版社

·北京·

本书在系统阐述化学工艺学研究范畴及化学工艺共性知识的基础上,重点以基本有机化工和基本无机化工典型产品的生产工艺为主线,着重介绍化学反应原理、工业生产方法、工艺影响因素及工艺条件的确定、工艺流程的组织及评价等,对化工产品的技术经济指标、副产物的回收利用及安全技术、节能减排技术,近年来的新工艺、新技术和新方法等也进行了简要的分析和论述,还介绍了不同类型反应过程中典型设备的结构特点和选型计算等。

本书可作为普通高等学校化工类专业教材,尤其适用于新建地方本科院校化学工程与工艺专业的教学,同时可供从事化工生产、管理、科研和设计的工程技术人员参阅,也可作为师范类院校师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

化学工艺学/张秀玲,邱玉娥主编. —北京:化学工业出版社,2012.6

普通高等教育“十二五”规划教材 精品课程教材
ISBN 978-7-122-14111-8

I. 化… II. ①张…②邱… III. 化工过程-工艺学-高等学校-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第078617号

责任编辑:赵玉清

装帧设计:尹琳琳

责任校对:陶燕华

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20½ 字数534千字 2012年8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:38.00元

版权所有 违者必究

本书编写人员

主 编	张秀玲	邱玉娥			
副主编	王福明	商书波	刘爱珍	范晋勇	郭 锋
编写人员	张秀玲	邱玉娥	王福明	商书波	刘爱珍
	范晋勇	郭 锋	张亚丽		

前 言

《化学工艺学》是根据化学工程与工艺专业的培养目标，遵循化学工程与工艺专业教学指导分委员会普通高等学校“化学工程与工艺专业规范”要求，在全面总结近十年我国“教学型”普通本科院校《化学工艺学》课程建设和教学体系改革成果的基础上，深入细致地研究和比较国内外优秀《化学工艺学》教材及相关参考书，充分吸纳其精华，博采众长，并结合我国某些大型化工企业的发展特点及产品种类，系统地搜集化学工业各分支学科及交叉学科的进展后编写的。本书在系统阐述化学工艺学研究范畴及化学工艺共性知识的基础上，重点以基本有机化工和基本无机化工典型产品的生产工艺为主线，着重介绍化学反应原理、工业生产方法、工艺影响因素及工艺条件的确定、工艺流程的组织及评价、各类典型反应设备的结构特点和选型计算等，同时还对化工产品的技术经济指标、副产物的回收利用及安全技术、节能减排技术，近年来的新工艺、新技术和新方法等也进行了简要的分析和论述，使教材内容更具有工程特色，也更适应现代化工类人才知识、能力和素质结构的要求，力求成为一本知识结构合理、内容新颖、语言精练、图表清晰，适合我国化工高等院校尤其是新建地方本科院校化学工程与工艺专业的教学，突出工程特色，注重能力培养的工科教材。

本书由德州学院化学系化工教研室教师编写。其中，第1章由范晋勇、邱玉娥编写，第2章由张秀玲、商书波编写，第3章由邱玉娥编写，第4、5章由郭锋编写，第6、9章由刘爱珍编写，第7章由王福明编写，第8章由范晋勇编写。教材中的插图主要由商书波绘制完成，张亚丽绘制了第3章的部分工艺流程图。张秀玲教授/博士、邱玉娥教授担任本书主编，并统稿定稿。

教材主编张秀玲是中国高校化工教育协会理事、青岛科技大学兼职硕士生导师、山东省高等学校配位化学与功能材料重点实验室主任、德州学院重点学科带头人；邱玉娥是中国高校化工教育协会会员、山东省禁止化学武器公约履约工作专家、德州学院教学名师、《化学工艺学》校级精品课程建设负责人。本教材是编写者在总结近几年来主持研究全国高教研究中心“十一五”研究课题（FIB070335-A4-03）、山东省教育科学规划办公室“十二五”研究课题（2010GZ081）、山东省教育科学规划办公室“十一五”研究课题（2008GG112）、山东省教育厅课题“德州市化学工业发展状况与人才需求研究”研究成果的基础上，针对地方本科院校的教学特点，从化工生产实际出发，以培养学生专业技能为主线编写而成的。

由于编者水平有限，书中可能存在不足之处，敬请读者指正。

编 者

于德州学院（山东德州）

2012年3月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.1.1 化学工艺学的研究范畴和任务	1
1.1.2 化学工业的历史、现状及其在国民经济中的作用	2
1.1.3 现代化学工业的特点和发展方向	5
1.2 化学工业的原料资源和主要产品	10
1.2.1 化学工业的原料资源	10
1.2.2 化学工业的主要产品	10
1.3 化工厂基本知识	15
1.3.1 化工厂的定义及组织结构	15
1.3.2 化工厂内的技术专业及从业人员的任务	16
参考文献	17
第 2 章 化学工艺基础	18
2.1 化学工业原料资源及其加工利用	18
2.1.1 无机化学矿及其加工	18
2.1.2 煤、石油、天然气及其加工利用	19
2.1.3 生物质及其加工利用	28
2.1.4 再生资源的开发利用	30
2.1.5 空气和水	30
2.2 化工生产过程及流程	31
2.2.1 化工生产过程	31
2.2.2 化工生产工艺流程	31
2.3 化工过程的主要效率指标	34
2.3.1 生产能力和生产强度	34
2.3.2 转化率、选择性和收率	34
2.3.3 平衡转化率和平衡产率	36
2.4 工艺技术经济指标	36
2.4.1 原料消耗定额	36
2.4.2 公用工程消耗定额	37
2.5 化工生产中几种常用的产品质量标准	37
2.5.1 各级标准的含义	38
2.5.2 化工产品质量标准的内容	38
2.5.3 化工产品质量标准中的常见指标项目	38
2.6 反应条件对化学平衡和化学反应速率的影响	39
2.6.1 温度的影响	39
2.6.2 浓度的影响	41
2.6.3 压力的影响	41
2.7 催化剂的性能及使用	41
2.7.1 催化剂的基本特征	43
2.7.2 催化剂的分类	43
2.7.3 工业催化剂使用中的有关问题	44
2.8 反应过程的物料衡算和热量衡算	46
2.8.1 反应过程的物料衡算	46
2.8.2 反应过程的热量衡算	50
参考文献	52
第 3 章 合成氨	53
3.1 概述	53
3.1.1 氨的性质及用途	53
3.1.2 合成氨工业发展概况	54
3.1.3 合成氨生产方法简介	54
3.1.4 合成氨生产的基本过程	56
3.2 合成氨原料气的制备	56
3.2.1 固体燃料气化制备合成氨原料气	56
3.2.2 烃类气化制备合成氨原料气	72
3.3 合成氨原料气的净化	80
3.3.1 原料气的脱硫	80
3.3.2 一氧化碳变换	87
3.3.3 原料气中二氧化碳的脱除	95
3.3.4 合成氨原料气的精制	105
3.4 氨合成	118
3.4.1 氨合成原理	118
3.4.2 氨合成催化剂	120
3.4.3 氨合成工艺条件选择	122

3.4.4 氨合成工艺流程	123
3.4.5 氨合成塔	127

3.5 合成氨生产的发展趋势	130
参考文献	133

第4章 烃类热裂解

134

4.1 热裂解过程的化学反应与反应机理	134
4.1.1 烃类热裂解的一次反应	135
4.1.2 烃类热裂解的二次反应	137
4.1.3 各族烃类热裂解的反应规律	138
4.1.4 烃类裂解反应机理	139
4.1.5 烃类裂解反应动力学	139
4.2 热裂解原料与工艺条件	140
4.2.1 裂解原料与特性参数	140
4.2.2 裂解过程的几个常用指标	143
4.2.3 烃类热裂解工艺条件	145
4.3 烃类管式炉裂解工艺	148
4.3.1 烃类管式裂解炉	149

4.3.2 裂解气的急冷、急冷换热器及清焦	152
4.3.3 裂解气的预分馏与裂解工艺流程	154
4.4 裂解气的净化与分离	157
4.4.1 裂解气的组成及分离方法	157
4.4.2 裂解气的净化	159
4.4.3 裂解气的压缩与制冷系统	165
4.4.4 裂解气的深冷分离流程	169
4.5 乙烯工业的发展趋势	176
4.5.1 乙烯建设规模继续向大型化发展	176
4.5.2 生产新技术的研究开发	176
参考文献	177

第5章 芳烃转化过程

178

5.1 概述	178
5.1.1 芳烃的来源与生产技术	178
5.1.2 芳烃馏分的分离	182
5.1.3 芳烃的转化	184
5.2 芳烃的转化	185
5.2.1 芳烃的脱烷基化	185
5.2.2 芳烃歧化与烷基转移	188

5.2.3 C ₈ 芳烃的异构化	192
5.2.4 芳烃的烷基化	196
5.3 C ₈ 芳烃的分离	201
5.3.1 C ₈ 芳烃的组成与性质	201
5.3.2 C ₈ 芳烃单体的分离	202
5.4 芳烃生产技术发展方向	207
参考文献	207

第6章 催化加氢与脱氢

209

6.1 催化加氢	209
6.1.1 催化加氢反应类型及工业应用	209
6.1.2 催化加氢反应的一般规律	210
6.1.3 一氧化碳加氢合成甲醇	213
6.2 催化脱氢	219
6.2.1 催化脱氢反应类型及工业应用	219

6.2.2 催化脱氢反应的一般规律	220
6.2.3 乙苯催化脱氢合成苯乙烯	222
6.3 氧化脱氢	230
6.3.1 氧化脱氢反应类型及工业应用	231
6.3.2 正丁烯氧化脱氢生产丁二烯	231
参考文献	236

第7章 烃类选择性氧化

237

7.1 概述	237
7.1.1 烃类选择性氧化及其在化学工业中的应用	237
7.1.2 氧化过程的特点和氧化剂的选择	237
7.1.3 烃类选择性氧化反应的分类	239
7.2 均相催化氧化和非均相催化氧化	239
7.2.1 均相催化氧化	239
7.2.2 非均相催化氧化	256

7.3 乙烯环氧化制备环氧乙烷	262
7.3.1 环氧乙烷的性质与用途	262
7.3.2 环氧乙烷生产方法简介	262
7.3.3 乙烯直接环氧化制备环氧乙烷	263
7.4 丙烯氨氧化制备丙烯腈	271
7.4.1 丙烯腈的性质与用途	271
7.4.2 丙烯腈生产方法简介	271
7.4.3 丙烯氨氧化制备丙烯腈	272
参考文献	280

第 8 章 羰基合成

281

8.1 概述	281	8.2.2 甲醇低压羰基化合成醋酸	285
8.1.1 羰基合成反应类型	281	8.3 丙烯羰基化合成丁辛醇	288
8.1.2 羰基合成反应催化剂	283	8.3.1 丁辛醇生产方法简介	288
8.2 甲醇低压羰基化合成醋酸	284	8.3.2 丙烯羰基化合成丁辛醇	289
8.2.1 醋酸生产方法简介	284	参考文献	295

第 9 章 氯化

296

9.1 氯代烃的主要生产方法	296	9.3.3 乙炔法生产氯乙烯工艺流程及 反应器	302
9.1.1 取代氯化	296	9.4 平衡氧氯化法生产氯乙烯	303
9.1.2 加成氯化	298	9.4.1 平衡氧氯化法生产氯乙烯反应 原理、催化剂及工艺条件	303
9.1.3 氧氯化	298	9.4.2 平衡氧氯化法生产氯乙烯工艺 流程及反应器	308
9.1.4 氯化物裂解	298	9.5 氯乙烯生产工艺研究进展	313
9.2 氯乙烯	299	9.5.1 电石乙炔法路线的工艺改进	313
9.2.1 氯乙烯的性质及用途	299	9.5.2 平衡氧氯化法生产工艺研究进展	314
9.2.2 氯乙烯生产方法简介	300	参考文献	318
9.3 乙炔法生产氯乙烯	301		
9.3.1 乙炔法生产氯乙烯反应原理	301		
9.3.2 乙炔法生产氯乙烯工艺条件	301		

第 1 章 绪 论

1.1 概述

1.1.1 化学工艺学的研究范畴和任务

化学工业 (chemical industry) 泛指生产过程中化学方法占主要地位的过程工业, 又称化学加工工业, 可以详细表述为运用化学工艺、化学工程及设备, 通过各种化工单元操作, 高效、节能、经济、环保和安全地将原料生产成化工产品的特定生产部门。

化学工业根据化学特性可以粗略地分为无机化学工业和有机化学工业。无机化学工业是以无机物为原料生产化工产品的化学工业, 主要包括基本无机工业、硅酸盐工业、无机精细化学品等。有机化学工业是以有机物为原料生产化工产品的化学工业, 又可分为石油炼制、石油化学工业、基本有机化学工业、高分子化学工业、有机精细化学品工业、生物化学制品工业、油脂工业等。

化学工艺 (chemical technology) 即化工生产技术, 是指将各种原料主要经过化学反应转变为产品的方法和过程, 包括实现这种转变的全部化学的和物理的措施。为适应化学工艺的需要, 以化学、物理、数学为基础, 结合化学工业和其他过程工业生产中的共同规律, 用以指导化工装置的放大、设计和生产操作的工程学科, 称为化学工程 (chemical engineering)。

化学工业、化学工艺、化学工程都简称为“化工”, 它们出现于不同历史时期, 各有不同涵义, 却又关系密切、相互渗透, 具有连续性, 并在其发展过程中被赋予新的内容。

在早期, 人类进行化工生产仅处于感性认识的水平。随着生产规模的发展、各种经验的积累, 特别是许多化学定律的发现和各种科学原理的提出, 人们从感性认识提升到理性认识的水平, 利用这些定律和原理研究和指导化工生产, 从而产生了化学工艺学这门学科。

化学工艺学是根据化学、物理和其他科学的成就, 研究综合利用各种原料生产化学产品的方法原理、操作条件、流程和设备, 以创立技术上先进、经济上合理、生产上安全的化工生产工艺的学科。

化学工艺具有过程工业的特点, 即生产不同的化学产品要采用不同的化学工艺, 即使生产相同产品但原料路线不同时也要采用不同的化学工艺。尽管如此, 化学工艺学所涉及的内容是相同的, 一般包括原料的选择和预处理, 生产方法的选择及方法原理, 设备 (反应器、换热器等其他设备) 的作用和结构、操作原理和选型计算, 催化剂的选择和使用, 其他物料的影响, 操作条件的影响和选定, 流程组织, 生产控制, 产品规格和副产物的分离与利用, 能量的回收和利用, 对不同工艺路线和流程的技术经济评价等问题。

化学工艺学与化学工程学都是化学工业的基础学科, 这两门学科的发展可为化学工业的发展提供坚强的支撑。化学工艺学主要研究化工生产工艺, 其任务一是解决生产具体化工产品的工艺流程的组织、优化, 二是将各单个化工单元操作在以产品为目标的前提下集成并合理匹配、链接, 三是在确保产品质量的前提下实现全系统的能量、物料及安全环保诸因素的最优化。化学工程学主要研究化学工业和其他过程工业生产中所进行的化学过程和物理过程的共同规律, 它的一个重要任务就是研究有关工程因素对过程和装置的效应, 特别是放大中的效应。化学工艺与化学工程相配合, 可以解决化工过程开发、装置设计、流程组织、操作

原理及方法等方面的问题；此外，解决化工生产实际中的问题也需要这两门学科的理论指导。化学工业的发展促进了这两门学科不断发展和完善，它们反过来也能更加促进化学工业迅速发展和提高。

1.1.2 化学工业的历史、现状及其在国民经济中的作用

1.1.2.1 化学工业的历史和现状

化学工业是应人类生活和生产的需要发展起来的，化工生产的发展也推动了社会的发展。

(1) 世界化学工业的发展历史和现状 有史以来，化学工业一直是同发展生产力、保障人类社会生活必需品和应付战争等过程密不可分的。为了满足这些方面的需要，最初是对天然物质进行简单加工以生产化学品，后来是进行深度加工和仿制，以致它创造出自然界根本没有的产品。化学工业对于历史上的产业革命和当代的新技术革命等起着重要作用，在国民经济发展中占有重要地位。

化学加工在形成工业之前的历史可以从 18 世纪中叶追溯到远古时期，从那时起人类就能运用化学加工方法制作一些生活必需品，如制陶、酿造、染色、冶炼、制漆、造纸以及制造医药、火药和肥皂。

从 18 世纪中叶至 20 世纪初是化学工业的初级阶段。在这一阶段无机化工初具规模，有机化工正在形成，高分子化工处于萌芽时期。

第一个典型的化工厂是 18 世纪 40 年代在英国建立的铅室法硫酸厂。该厂先以硫黄为原料，后以黄铁矿为原料，其产品主要用于制造硝酸、盐酸及药物，当时产量不大。在产业革命时期，纺织工业发展迅速，它和玻璃、肥皂等工业都大量用碱，而植物碱和天然碱供不应求。1791 年 N. 吕布兰以食盐为原料建厂，制得纯碱，并且带动硫酸工业的发展；生产中产生的氯化氢用以制备产业界急需的盐酸、氯气、漂白粉，纯碱又可苛化为烧碱，把原料和副产品都充分利用起来，这是当时化工企业的创举；用于吸收氯化氢的填充装置、煅烧原料和半成品的旋转炉，以及浓缩、结晶、过滤等设备，逐渐运用于其他化工企业，为化工单元操作打下了基础。吕布兰法于 20 世纪初逐步被索尔维法取代。19 世纪末叶出现了电解食盐的氯碱工业，至此整个化学工业的基础——酸、碱的生产已初具规模。

1895 年建立以煤与石灰石为原料、用电热法生产电石（即碳化钙）的第一个工厂，电石再经水解发生乙炔，以此为起点生产乙醛、醋酸等一系列基本有机原料，制药工业、香料工业也相继合成与天然产物相同的化学品，至此有机化学工业初步形成。1839 年美国 C. 固特异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。1891 年法国建成第一个硝酸纤维素人造丝厂，这是高分子化工的萌芽时期。这些萌芽产品在品种、产量、质量等方面都远不能满足社会的要求，所以上述基础有机化学品的生产和高分子材料生产在建立起石油化工以后都获得了很大发展。

从 20 世纪初至战后的 60~70 年代，是化学工业真正大规模生产的阶段，一些主要领域都是在这一时期形成的。合成氨和石油化工得到了发展，高分子化工进行了开发，精细化工逐渐兴起。单元操作概念的提出，奠定了化学工程的基础。

20 世纪初期，用物理化学的反应平衡理论提出氮气和氢气直接合成氨的催化方法以及原料气与产品分离后经补充再循环的设想，进一步解决了设备问题，因而德国能在第一次世界大战时建立第一个合成氨生产工厂以应战争之需。合成氨开始以焦炭作原料，40 年代以后改为石油或天然气，使化学工业与石油工业两大部门更密切地联系起来，原料和能量利用也更加合理。

石油化工的发展与石油炼制工业、以煤为基本原料生产化工产品和三大合成材料的发展

有关。石油炼制起源于19世纪20年代。20世纪20年代汽车工业飞速发展,带动了汽油生产,为扩大汽油产量,以生产汽油为目的的热裂化工艺开发成功,随后40年代催化裂化工艺开发成功,加上其他加工工艺的开发,形成了现代石油炼制工艺。20世纪50年代,在裂化技术基础上开发了以制取乙烯为主要目的的烃类水蒸气高温裂解(简称裂解)技术,裂解工艺的发展为发展石油化工提供了大量原料。同时,一些原来以煤为基本原料(通过电石、煤焦油)生产的产品陆续改由石油为基本原料,如氯乙烯等。

20世纪30年代,高分子合成材料大量问世。按工业生产时间排序为:1931年为氯丁橡胶和聚氯乙烯;1933年为高压法聚乙烯;1935年为丁腈橡胶和聚苯乙烯;1937年为丁苯橡胶;1939年为尼龙66。第二次世界大战后石油化工技术继续快速发展,1950年开发了腈纶,1953年开发了涤纶,1957年开发了聚丙烯。

20世纪60~70年代以来,化学工业各企业间竞争激烈,随着对反应机理的深入了解,一些传统的基本化工产品的生产装置日趋大型化。同时,由于新技术革命的兴起,对化学工业提出了新的要求,推动了化学工业的技术进步,发展了精细化工、超纯物质、新型结构材料和功能材料。化学工程与生物技术相结合,形成了具有广阔发展前景的生物化工产业,给化学工业增添了新的活力。80年代以来,随着社会的发展、生产工艺技术的改进,化工产品出现多样化、功能化、精细化的特点,也由此成为化学工业的新起点,使化学工业由发展基础化工转向重点发展精细化工,化学工业发展达到了一个新的历史时期。

近年来,世界各国都高度重视发展新技术、新工艺,开发新产品,增加高附加值产品的品种和产量,而且新材料的开发与生产成为推动科技进步、培植经济新增长点的一个重要领域,重点发展复合材料、信息材料、纳米材料以及高温超导体材料等,这些材料的设计和制备的许多技术必须运用化工技术和工艺。由此可见,不断创新的化工技术在新材料的制造中发挥了关键作用。同时,化学工程与生物技术相结合引起世界各国的广泛重视,已经形成具有宽广发展前景的生物化工产业,给化学工业增添了新的活力。

(2) 我国的化学工业 我国的化学工业在1949年以前基础非常薄弱,只在上海、南京、天津、青岛、大连等沿海城市有少量的化工厂和一些手工作坊,而且只能生产为数不多的硫酸、纯碱、化肥、橡胶制品和医药制剂,基本没有有机化学工业。中华人民共和国建立以后,化学工业发展很快,逐步形成了由石油化工、煤化工、基本有机合成、无机化工、精细化工、高分子材料化工、生物化工、微电子化工、能源与资源化工、环境化工等组成的产品门类比较齐全、品种大体配套、具有相当规模的化学工业体系。进入90年代后,我国化学工业的增长速度年平均约为9%,近年来达到了13%左右。上海、南京、青岛、北京、天津、大连、沈阳、吉林、兰州,化学工业产值约占全国化学工业总产值的30%以上。20世纪末,我国有10余种化工产品的产量居世界前列:化肥、合成氨、染料居世界第一;硫酸、纯碱、制药占世界第二;硫铁矿、磷矿、磷肥、烧碱、醋酸、涂料、轮胎、乙烯、合成材料等也在较前位次。尤其是近20年来,我国化学工业的发展速度远远超过发达国家。20世纪90年代,石油化工是我国优先发展的支柱产业之一,精细化工和农用化学品也是化工发展重点。21世纪,石油化工、新型合成材料、精细化工、生物化工、微电子化工、纳米材料、橡胶加工业、化工环保业将是我国化学工业的主要增长点。化学工业必将在我国国民经济建设和提高人民物质文化生活水平中发挥越来越重要的作用。

与发达国家相比,我国的化学工业结构还不近合理,生产技术相对落后,产品成本较高,环境污染较严重。所以,我国化学工业的发展还面临着艰巨的任务,需要进一步优化产业结构,建立现代企业制度,培养大批技术人才,积极引进新技术和新装备,开发新工艺和新产品,努力提高产品质量,节能降耗,降低生产成本,搞好环境保护,赶超世界先进水平。

1.1.2.2 化学工业在国民经济中的作用

化学工业是国民经济基础产业之一，与国民经济各个领域及人民生活密切相关。

(1) 发展农业的支柱 长期以来，人类的食物和衣着主要依靠农业。而农业自远古的刀耕火种开始，一直依靠大量人力劳作，受各种自然条件制约，发展十分缓慢。19世纪农业机械的运用逐步改善了劳动状况。然而，在农业生产中单位面积产量的真正提高则是施用化肥、农药以后的事。实践证明，农业的各项增产措施中化肥的作用达40%~65%。在石油化工蓬勃发展的基础上，合成氨和尿素生产大型化，使化肥的产量在化工产品中占据很大的比重。1985年世界化肥总产量约达140Mt，成为大宗化工产品之一。近年来，氮、磷、钾复合肥料和微量元素肥料的开发进一步满足了不同土壤结构、不同作物的需求。

早期，人类采用天然动植物及矿物来防治农作物病虫害。直到19世纪末，近代化学工业形成以后，采用巴黎绿（砷制剂）杀马铃薯甲虫、波尔多液防治葡萄霜霉病，农业才开始了化学防治的新时期。20世纪40年代开始生产有机氯、有机磷、苯氧乙酸类等杀虫剂和除草剂，广泛用于农业、林业、畜牧业和公共卫生。但这代农药中有些因高残留、高毒，造成生态污染，已被许多国家禁用。近年来开发了一些高效、低残留、低毒的新农药，其中拟除虫菊酯（除虫菊是具有除虫作用的植物）是一种仿生农药，每亩用量只几克，不污染环境，已经投入农业生产中。此外，生物农药目前在农药研究中最活跃的一个领域。

现代农业应用塑料薄膜（如高压聚乙烯、线型低密度聚乙烯等）作为地膜覆盖或温室育苗，可明显地提高作物产量，正在进行大面积推广。

(2) 工业革命的助手 化学工业从其形成之时起，就为各工业部门提供必需的基础物质。作为各个时期工业革命的助手，正是化学工业所担负的历史使命。18~19世纪的产业革命时期，手工业生产转变为机器生产，发明了蒸汽机，开始了社会化大生产，近代化学工业开始形成。面临产业革命的急需，吕布兰法制纯碱等技术应运而生，这使已有的铅室法制硫酸也得到发展，解决了纺织、玻璃、肥皂等工业对酸、碱的需要。同时，随着炼铁、炼焦工业的兴起，以煤焦油分离出的芳烃和以电石生产乙炔为基础的有机化工也得到发展。合成染料、化学合成药物、合成香料等相继问世，橡胶轮胎、赛璐珞和硝酸纤维素等也投入生产。这样，早期的化学工业就为纺织工业、交通运输业、电力工业和机器制造业提供了必需的原材料和辅助品，促成了产业革命的成功。

20世纪经过两次世界大战，一方面石油炼制工业中的催化裂化、催化重整等技术先后出现，使汽油、煤油、柴油和润滑油的生产有了大幅度增长，特别是丙烯水合制异丙醇工业化以后，烃类裂解制取乙烯和丙烯等工艺相继开发成功，使基本有机化工生产建立在石油化工雄厚的技术基础之上，从而得以为各工业部门提供大量有机原料、溶剂、助剂等。从此，人们常以烃类裂解生产乙烯的能力作为一个国家石油化工生产力发展的标志。另一方面，哈伯-博施法合成氨高压高温技术在工业上实现，硝酸投入生产，使大量的硝化物质出现，尤其是使火炸药工业从黑火药发展到奥克托今（环四亚甲基四硝胺），炸药的能量提高了十几倍，这不仅解决了战争之急需，更重要的是在矿山、铁路、桥梁等民用爆破工程上得到了应用。此外，对于核工程中同位素分离和航天事业中火箭推进剂的应用，化学工业都做出了关键性的贡献。

(3) 战胜疾病的武器 医用化学和药物化学是化学工业的重要组成部分，也一直是人类努力探求的领域。古代人们使用天然植物和矿物治疗疾病，在我国最早的药学著作《神农本草经》（公元1世纪前后编著）中就记载了365种药物的性能、制备和配伍。明代李时珍的《本草纲目》中所载药物已达1892种。这些药采自天然矿物或动植物，多数须经炮制处理，突出药性或消除毒性后才能使用。19世纪末至20世纪初，生产出解热镇痛药阿司匹林、抗

梅毒药606(砷制剂)、抗疟药阿的平等,这些化学合成药成本低、纯度高、不受自然条件影响,表现出明显的疗效。30年代,人们用化学剖析方法鉴定了水果和米糠中维生素的结构,用人工合成方法生产出维生素C和维生素B₁等,解决了从天然物质中提取维生素产量不够、质量不稳的问题。1935年磺胺药投产以后,拯救了数以万计的产褥热患者。青霉素的发现和投产,在第二次世界大战中救治伤病员,收到了惊人效果。链霉素以及对氨基水杨酸钠、雷米封等战胜了结核菌,结束了一个历史时期这种蔓延性疾病对人类的威胁。天花、鼠疫、伤寒等直到19世纪一直是人类无法控制的灾害,抗病毒疫苗投入工业生产以后才基本上消灭了这些传染病。现在疫苗仍是人类与病毒性疾病斗争的有力武器。另外,各种临床化学试剂和各种新药物剂型不断涌现,使医疗事业大为改观,人类的健康有了更加可靠的保证。

(4) 改善人类生活的手段 化学工业为人类提供的产品丰富多彩,除了生产大量材料用于制成各种制品为人类使用以外,还有用量很少但效果十分明显的产品,使人们的生活得到不断改善,例如用于食品防腐、调味、强化营养的各种食品添加剂,提高蔬菜、水果产量和保持新鲜程度的植物生长调节剂和保鲜剂,促使肉、蛋丰产的饲料添加剂,生产化妆品和香料、香精的基础原料和助剂,房屋、家具和各种工具、器具装饰用的涂料,各种印刷油墨用的颜料以及洗涤用品用的表面活性剂等,不胜枚举。另外如电影胶片(感光材料)、录音(像)磁带(磁记录材料)以及激光电视唱片(光盘)等,利用这些传播声像的手段可加强通信联络,再现历史场景,表演精湛艺术。借助于信息记录材料,人们的视野扩展到宇宙空间、海底深处或深入脏腑内部,甚至于解剖原子结构,为提高人类的精神文明、揭开自然界的奥秘提供了条件。

综上所述,发展化学工业,对于改进工业生产工艺(如以化学工艺代替繁重的机械工艺)、发展农业生产、扩大工业原料、巩固国防、发展尖端科学技术、改善人民生活以及开展综合利用都有很大的促进作用。

1.1.3 现代化学工业的特点和发展方向

1.1.3.1 现代化学工业的特点

(1) 原料、生产工艺和产品的多样性与复杂性 化学工业是一个多行业、多品种的生产部门,既包括生产资料的生产,又包括生活资料的生产,由此决定了化学工业具有多样性与复杂性的显著特点。

化学工业的多样性主要表现在化工生产过程中可采用同一种原料制造多种不同的化工产品,同一种产品也可采用不同原料或不同生产方法和工艺路线生产,例如以乙烯为原料可以制备高压聚乙烯、低压聚乙烯、苯乙烯和环氧乙烷等多种化工产品,工业上制备乙炔既可采用电石法又可采用天然气部分氧化法,由对二甲苯制备对苯二甲酸二甲酯既可以采用老的四步法又可以采用新的两步法。另外,一个产品可以有不同用途、不同产品可能有相同用途也是化学工业多样性的一个重要表现。由于这些多样性,化学工业能够为人类提供越来越多的新物质、新材料和新能源。同时,多数化工产品的生产过程是多步骤的,有的步骤很复杂,其影响因素也是多种多样的。也正是由于化工生产技术的这些多样性与复杂性,决定了任何一个大型化工企业的生产过程要能维持正常运行就需要多种技术综合运用。

(2) 多学科合作、生产技术密集 化学工业装备复杂、技术密集,属于高度自动化和机械化的生产部门,并进一步朝着智能化发展。现代化学工业的持续发展越来越多地依靠采用高新技术和迅速将科研成果转化为生产力。如生物与化工、微电子与化学、材料与化工等不同学科的相互结合,可创造出更多优良的新物质和新材料;计算机技术的高水平发展,已经使化工生产实现了远程自动化控制,也将给化学品的合成提供强有力的智能化工具;将组合

化学、计算化学与计算机方法结合,可以准确地进行新分子、新材料的设计与合成,节省大量实验时间和人力。

近年来,化学工业在新型材料等方面的研究中不断取得新成果,反应器的设计和制造日臻完善,越来越多地利用高温、高压、催化等技术以强化生产。例如压力可自高度真空至几十兆帕,温度范围可从零下几十、几百摄氏度至零上数百、数千摄氏度。在现代化工生产中,催化剂的品种越来越多,其作用有些是广谱的,有些是非常专一的。例如合成氨厂里不仅有气体的制备、净化、压缩和反应等过程,而且要用高温、高压设备(许多设备由蒸汽透平驱动),主要设备必须大容量、成系列,要求长周期稳定操作。又如石油化学工业,加工深度不断发展,生产方法、单元过程、分离技术和催化剂日新月异,加工产品种类呈现多样化,化工设备的结构日趋复杂,对化工材料的要求也日益提高。因此化学工业的发展需要高水平、有创造性和开拓能力的多种学科不同专业的技术专家,以及受过良好教育及训练、懂得生产技术操作和具备现代化管理知识的化工技术人才。

(3) 高能耗、高风险、高投入、高利润 化工生产是由原料主要经化学反应转化为产品的过程,同时伴随有能量的传递和转换,必须消耗能量。化工生产部门是耗能大户,合理用能和节能显得尤为重要,许多生产过程的先进性体现在采用低能耗工艺或节能工艺。例如以天然气为原料的合成氨生产过程,近年来出现了许多低能耗工艺、设备和流程,也开发出一些节能型催化剂,并将每生产 1t 液氨的能耗由 35870MJ 降低至 28040MJ。耗能大的方法或工艺已经或即将淘汰。例如聚氯乙烯单体的生产,过去用乙炔与氯化氢合成氯乙烯,而乙炔由耗电量很大的电石法获得并产生大量废渣,这种工艺已逐渐由能耗和成本均较低的乙烯氧氯化法取代。同样,食盐水溶液电解制烧碱和氯气的石棉隔膜法也因耗能高且生产效率低,已被先进的离子膜法取代。其他一些诸如膜分离、膜反应、等离子体化学、生物催化、光催化和电化学合成等具有提高生产效率和节约能源前景的新方法、新过程的开发和应用均受到高度重视。

化工生产具有易燃易爆、有毒、高温高压、低温负压、腐蚀性强等特点,工艺过程多变,不安全因素很多,不严格按工艺规程生产就容易发生事故,由此可以看出化学工业属于一个高风险行业,因此安全生产非常重要。化工生产过程中虽然存在着一些危险因素,但只要采用安全的生产工艺,有可靠的安全技术保障、严格的规章制度及监督机构,事故是可以避免的。尤其是连续性的大型化工装置,要想发挥现代化生产的优越性,保证高效、经济地生产,就必须高度重视安全,确保装置长期、连续地安全运行。

现代化学工业的工艺复杂性和装置大型化决定了其高投入的特征。如年产值 30 万吨合成氨、45 万吨尿素的化肥厂,投资达到 40 亿~50 亿元;年产 30 万吨的乙烯厂,需投资 60 亿~80 亿元。化学工业的高投入还表现在化工研究和开发投入大。由于工业技术发展加快、化工产品更新换代快以及化学工业产业结构的调整,研发费用占工业总支出的 1/6,仅次于电子和通讯业。以新医药和农药为例,开发成功率约为万分之一,完成一个新品种研制在美国需 10 年左右时间,耗资 6000 万美元。2003 年德国 BASF 公司投入研究费用 11.05 亿欧元,占销售额的 3.3%,其中 38%用于新产品开发、20%用于改进产品、31%用于新工艺、11%用于新方法(分析、计算和测试)。

化工技术更新速度快,化工厂设备的寿命一般不超过 15 年。然而化工产品产值较高,成本低,利润高,一旦工厂建成投产,可很快收回投资并获利。化学工业的产值是国民经济总产值指标的重要组成部分。

(4) 生产过程综合化、装置规模大型化、化工产品精细化 化工生产存在着不同形式的纵向和横向联系。生产过程的综合化既可以使资源和能源得到充分、合理的利用,就地将副

产物和“废料”转化成有用产品，做到没有废物排放或排放最少，又可以表现为不同化工厂的联合及与其他产业部门的有机联合。例如，在核电站附近建化工厂，就可以利用反应堆的尾热使煤转变成合成气（ $\text{CO} + \text{H}_2$ ），进而用于生产汽油、柴油、甲醇以及许多 C_1 化工产品。

装置规模增大，其单位容积、单位时间的产出率随之显著增大，有利于降低产品成本和能量综合利用。例如，在 20 世纪 50 年代中期，乙烯生产规模仅有年产乙烯 5 万吨，而且成本很高，经济效益很低；到 70 年代初扩大为年产 20 万吨，成本降低了 40%，利润也有所提高；而 70 年代以后，工业发达国家新建的乙烯装置年产乙烯均在 30 万吨以上，许多国家是年产 50~100 万吨乙烯的大型厂。当然，考虑到设计、仓储、运输、安装、维修和安全等诸多因素的制约，装置规模的增大也应有度。

精细化不仅指生产小批量的化工产品，更主要的是指生产技术含量高、附加产值高的具有优异性能或功能并能适应快速变化的市场需求的产品。化学工艺和化学工程也更精细化，人们已能在原子水平上进行化学品的合成，使化工生产更加高效、节能和绿色化。

1.1.3.2 现代化学工业的发展方向

高科技的发展对现代化学工业提出了更高更新的要求，也促进了化工科技的进步，同时化学工业提供的物质技术基础又为高新技术的发展创造了条件。21 世纪，化学工业的发展趋势是：产品结构精细化和功能化；生产装置微型化和柔性化；生产过程绿色化和高科技化；市场经营国际化、信息化。

(1) 产品结构的精细化和功能化

① “精细化”是化学工业、化学工艺和化学工程的发展方向 高新技术精细化工是当今化学工业中最具活力的新兴领域之一，也是当今世界化学工业激烈竞争的焦点。精细化工产品具有性能或功能优异、技术知识密集度高、附加价值高、品种多、批量小、使用周期短的特点。化工产品的精细化是以化学工艺和化学工程的精细化为基础的，随着对产品性能和功能要求的不断提高，对化学工艺和化学工程也提出了更高的要求。早期的精细化强调的是技术本身的深化与密集，为竭力满足消费者的需求，对精细化工产品功能或性能上均有较全面的要求。而现代精细化发展趋势则表现为在环境友好、生态相容的前提下追求技术的高效、专一，同时对产品的要求是对环境、生态、使用对象作用上的高度和谐统一。准确地说，精细化工技术目前正经历着由“人与技术”概念向“人与技术及生态环境”概念转变的过程。精细化工产品的分子设计由完全依赖经验进行随机合成筛选的定性阶段发展到由经验性随机筛选与定量构效关系相结合的半定量阶段，未来将是三维定量构效关系为基础进行合理分子设计的定量阶段。构效关系是分子设计的基础，它强调的是结构与应用性能间的关系，并在此基础上借助量子力学、分子力学探索基于生物应用性能、物理应用性能及化学应用性能的合理的分子设计。

② 产品结构的精细化和功能化 近几年，随着社会生产水平和人们生活水平的提高，面对新技术的挑战，工业发达国家化工产品的结构已发生明显的变化，主要趋势是减少大宗、通用产品的生产，从提高产品性能、增加产品附加值、适应市场要求出发，由大宗化工产品向精细化工产品发展，由通用产品向专用产品发展，由单一组分向多组分复合与复配产品发展，由合成向处方转变。

(i) 产品精细化、专用化和多样化 为了适应市场变化的要求，满足不同用户的需要，提高市场份额的占有率，化工产品的精细化、专用化和多样化成了一种世界趋势。例如洗涤剂或表面活性剂属于精细化工产品，只有制成专用于洗发的洗发剂、各种特殊用途的清洗剂，即考虑到专一的消费群体的需求，生产具有特定功能的产品，才是专用化工品。当然，大宗化工产品也能转化为专用化工产品，如普通氮肥（尿素、硝酸铵等）、磷肥（磷酸铵、

硝酸磷肥等)、钾肥(如氯化钾、硫酸钾等)是大宗产品,但若针对具体土壤和作物的性质和需要,将这几种化肥按一定比例掺混或再加上某些其他有机肥料、营养素、微量元素及化肥增效剂,配制出具有特定用途的复合肥料,成为专用化工产品,则更具意义。再比如精细化工产品中的表面活性剂,我国过去品种很单调,只有肥皂和十二烷基苯磺酸钠合成洗涤剂等几种大路货,性能较差,不能满足不同用户的需要。实际上表面活性剂或合成洗涤剂并不是仅用于洗涤,其用途较广,如作为发泡剂、消泡剂、乳化剂、破乳剂、润湿剂、分散剂、柔软剂、渗透剂、抗静电剂等,需不断开发新品种,即使现有品种,其商品也是针对不同用途甚至用户的需要,因此,可将一种或几种表面活性剂与各类助剂如增白剂、着色剂等混配起来,商品形态也应有块状、粒状、片状、膏状和液体。

同样,大宗化工产品的品种、规格、牌号的多样化也是大势所趋。例如,聚乙烯是石油化工、高分子材料的主要大宗产品,世界产量几千万吨,用途极为广泛,既可用于来生产薄膜,也可用来制造容器,还可用来制造纤维、管道、电线电缆、高频绝缘材料和日用品等。薄膜既可以用来作为绝缘材料,又可作为包装材料;包装材料有的要求强度高,有的要求透明度好,有的要防潮,有的却要保鲜等。用户要求如此繁多,绝不是一两个通用品种所能适应的,因此,如何通过不同的生产方法,采用不同的工艺条件或配方,以及通过化学改性、物性共混等生产出尽可能多的具有特定性能和用途的聚乙烯商品,已是当务之急。

总之,只有不断创新,增加品种,保持特色和优势,才能在市场竞争中立于不败之地。

(ii) 产品功能化和高附加值化 产品专用化的基础是具有特定的性能或功能,一是用量小但效果十分显著,二是能满足高新技术或其他用途苛刻的要求。例如,染料属于精细化工之列,品种繁多,颜色各异,用途广泛,但不一定是高性能产品。高性能功能化染料一是指着色效果好、用量小、耐洗耐磨的高档品种,二是指用于高新技术或特殊领域的品种,如用于液晶显示、热敏或压敏及其他特殊用途的高精类染料等。高性能和功能化产品用途特殊、技术含量高、生产难度大,因而其附加值和利润率也高。

(iii) 产品复合化和处方化 过去化工产品多为单一组分,其他成分被视为杂质。目前的趋势是从单一组分向多组分复合和复配产品发展,这是由市场对化工产品性能和功能的要求越来越多和越来越高决定的。它是从协同效应的角度出发,将几种已有化合物复配起来,不仅可以发挥各个组分自身的特长,又有协同增效的效果,即复合物的有关性能高于所含各组分各自性能的平均值。因为研制一种全新的、由单一组分构成的、具有所要求的特定功能的全新化合物是十分困难的。

由于复合产品的效果非常突出,配方研究也正从盲目的经验筛选向有理论指导的科学方法过渡。今后开发新产品的重点将不仅是合成新的化合物,更多的是按用户的要求,根据产品结构性能的关系给不同对象开出不同处方,即从合成向处方转变。即使合成,也是根据需求和特殊用途从分子和原子水平出发设计产品。

(2) 生产装置微型化和柔性化 20世纪上半叶,化工工艺经历了从间歇生产向连续生产、从小规模生产向大规模生产的历史性转变,大型化和连续化成为20世纪一个重要特征。现在,人们又看到小型化、间歇化和柔性化将重放光彩,它是在高新技术基础上的新的高水平重现。

① 生产装置的微型化 微化学工程包括微型单元操作设备、微型传感技术以及微化学工艺体系,其中微反应技术代表了新的化学加工途径。现代化工生产由于受规模经济性的驱动,以及对化工产品特别是石油化工产品的巨大需求,导致20世纪中叶石油化工装置大型化的潮流。如今,随着产品向精细化、专用化、多品种化和高性能化方向发展,一种产品的市场需求量将变得较小且会经常波动,因此,若仍然采用大规模生产装置,一旦市场需求波

动,就会被迫在低负荷下运行,成本将显著上升,而且传统化工厂的生产、工作条件较差,环境恶劣。这种形象虽然在提高自动化程度后的新型石化厂有很大改变,但仍未根本改观。从建设投资分析来看,用于大型装置及其建设的投资一般占总数的80%左右,如果装置微型化、流程密集化、生产过程精细化,就能重组化工生产。同时传统化工生产属于资源、能源消耗型,与环境、生态和持续发展不相容,其根源也在于这种生产实践本身。

21世纪的高新技术,如分子生物学,材料学的分子设计、分子剪裁,环境科学要求的“零排放”、原子经济性等,都要求化工生产在分子水平的基础上操作。尤其是纳米材料和纳米科技属于21世纪的战略材料与新技术,这种技术的最终目标是实现微型化,与之配合并为其服务的化工技术也必须走微型化的道路,同时当代高新技术的发展也为生产装置小型化创造了条件。

② 生产工艺间歇化和柔性化 连续生产工艺因生产能力大、产品质量均一,早已在大多数化工生产中取代了间歇法工艺。但随着市场经济的发展,间歇工艺对市场的应变能力等一些优点又重新为人们所认识,例如间歇操作设备可以很容易地改变配方,甚至改变品种,在一套设备中就可以实现多品种、小批量生产,从而对多变的市场需求做出灵活及时的反应。装置在产量、品种上灵活多变,就是工艺装置的柔性化。

(3) 发展绿色化工 绿色化工就是用先进的化工技术和方法减少或消除对人类健康、社区安全、生态环境有害的各种物质的一种技术手段。它是人类和化工行业可持续发展的客观要求,是控制化工污染的最有效手段,是化工行业可持续发展的必然选择。

发展绿色化工,主要包括:采用无毒、无害的原料、溶剂和催化剂;应用反应选择性高的工艺和催化剂;将副产物或废物转化为有用的物质;采用原子经济性反应,提高原料中原子的利用率,实现零排放;淘汰污染环境和破坏生态平衡的产品,开发和生产环境友好产品等。

目前,化工行业的环保措施主要还是采用末端治理的方法,末端治理是在生产过程的末端即在污染物排入环境前增加的治理污染环节,它只是为防治污染采取的一种补救措施,确实能对环境质量的改善起到非常大的作用。但是化工污染物主要产生于生产过程,而末端治理却偏重于污染物产生后的处理上,忽视全过程控制,治标而不治本,而且治理投资和运行费用高,企业负担重,甚至难以承受,资源、能源得不到有效利用,企业缺乏应有的积极性,环境质量难以得到根本的改善,以致化工污染成为阻碍社会、经济共同发展的制约因素。这就要求人们必须采取绿色化工的有效方法彻底控制化工污染,从根本上缓解经济发展与环境保护之间的矛盾,有效地改善生存环境,保证人类和化工行业持续、稳定、健康地发展。

绿色化工强调通过技术革新使物料得到有效利用,将污染物消灭在生产过程中,从源头上减少或消除污染,使废物不再产生,不再有废物处理问题,彻底改变过去被动滞后的污染物末端治理手段,是化工污染控制过程由末端控制向生产全过程控制转变的最佳途径。这样不仅环境效益高,而且有明显的经济效益,可实现环境效益与经济效益同步增长,能在环境资金投入不多和较短的时间内显著地削减污染物,彻底缓解化工行业经济发展与环境保护之间的矛盾,是控制化工污染的有效手段。发展绿色化工,改进工艺技术和设备,最大限度地提高资源、能源的利用率,将环境保护与合理利用资源、降低物耗、提高经济效益有机地结合起来,有利于化工企业走内部挖潜的道路,有利于提高化工企业的管理水平和技术水平,达到节能降耗、减少污染物的产生量和排放量的目的,有效地促进化工行业经济增长方式由粗放型向集约型转变,从而实现经济、社会与环境保护之间的协调发展。

21世纪绿色化工技术将会全面取代传统化工,使化学工业真正走上可持续发展之路。