



全国高等院校 **过程装备与控制工程** 专业系列规划教材

化工工艺学

主 编 邓建强

副主编 张早校 赵小玲



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

7002
7711

全国高等院校过程装备与控制工程专业系列规划教材

化工工艺学

主 编 邓建强
副主编 张早校 赵小玲
参 编 卢 涛 蒲永平
姚瑞清 赵永志



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书主要阐述几种重要化工领域产品的制备原理、生产特点、工艺过程和关键设备,较系统地介绍了一些重要化工产品、石油和煤炭资源的能源化工生产工艺现状,重点地反映了现代国内外化学工业的发展面貌,特别突出了化学工业的一些新的工业进展,如微反应原理与设备等。

全书共 11 章:第 1 章绪论,第 2 章化工基础知识,第 3 章硫酸工业,第 4 章合成氨工业,第 5 章磷酸盐工业,第 6 章碱工业,第 7 章石油炼制与石油加工,第 8 章煤化工工业,第 9 章硅酸盐工业,第 10 章精细化工,第 11 章微反应工艺。

本书可作为过程装备与控制工程(化工过程机械)等相关专业本科生教材,也可作为化工专业师生的参考书,还可供从事化工生产及相关领域的科研与工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工工艺学/邓建强主编. —北京:北京大学出版社, 2009.6

(全国高等院校过程装备与控制工程专业系列规划教材)

ISBN 978-7-301-15283-6

I. 化… II. 邓… III. 化工过程—生产工艺—高等学校—教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 091394 号

书 名: 化工工艺学

著作责任者: 邓建强 主编

责任编辑: 郭穗娟

标准书号: ISBN 978-7-301-15283-6/TH·0137

出版者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱: pup_6@163.com

印刷者: 北京飞达印刷有限责任公司

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 26.5 印张 630 千字 彩插 4 页

2009 年 6 月第 1 版 2009 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 42.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有 侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

过程工业是指以流程性物料(如气体、液体、粉体)为主要对象,以改变物料的状态和性质为主要目的的工业,它包括化工、石油化工、生物化工、化学、炼油等诸多行业与部门。过程工业所涉及的一些物理、化学过程,主要有传质过程、传热过程、流动过程、反应过程、机械过程、热力学过程等,其生产过程融“过程”、“机械”和“控制”为一体。在当前大力提倡大学生素质教育活动中,如何将“化工过程”有关的知识与“机械”和“信息”等知识融合成多科型、交叉型的知识体系,将对大学生素质的提高起到重要作用。

化学工业是国民经济发展中的重要基础产业,它与人们的衣、食、住、行及社会文化生活等各个方面息息相关。世界化学工业发展很快,新工艺、新技术、新产品和新设备不断涌现,极大地促进了社会的文明与进步。同时,为应对日益紧迫的能源、资源危机和越来越严峻的环境污染问题,世界各国都积极加快发展现代化学工业。绿色化学化工、循环经济与生态工业成为化学工业发展的重要理念,得到人们的广泛认同。

本书主要涵盖了当代以化学工业为主的一些过程工业的生产现状和发展趋势,包括化学工业的主要领域及重要产品的制备原理和生产工艺过程、重要化工原料的加工利用以及一些新化工技术的发展。对于将要从事化学工业等过程工业领域的大学生来说,需要应对各种复杂的局面,因此,除了掌握专业的化学知识以外,还要熟悉生产流程、运行参数、设备结构和环保措施等知识,需要拥有现代过程工业的全局和发展观念,树立思维创新能力,还需要认识资源、能源、环境与化学工业可持续发展的内在联系,奠定坚实的过程生产知识基础,在从事相关专业技术工作中能够联系实际、融会贯通,实现我国过程工业的良性循环发展。

本书重点突出、内容新颖、难易合适、切合实际。各高校同类专业的教学活动可以根据侧重点的需要进行内容的取舍,参考学时数 32~48 学时。在介绍传统化学工业的基础上,突出石油化工和煤化工,重点论述现代化学工业的前沿领域和最新成果,例如煤气化与煤液化、微反应工艺等,具有一定的前瞻性,以适应技术的进步。

本书内容涉及面广,各章均附有教学要求、知识链接、应用案例、特别提示、练习与思考题等内容,有利于读者对本书学习内容的掌握与应用。各章习题答案请登录网站 www.pup6.com 下载。

全书由邓建强担任主编,张早校、赵小玲担任副主编。参加编写的人员有西安交通大学邓建强(第 1、2、4、5 章)、西安科技大学赵小玲(第 3、6 章)、北京化工大学卢涛(第 7 章)、西安交通大学张早校(第 8 章)、陕西科技大学蒲永平(第 9 章)、西北大学姚瑞清(第 10 章)、浙江大学赵永志(第 11 章)。

在本书的编写过程中,得到了兄弟院校相关专业授课教师的大力支持,得到了北京大学出版社编辑的鼎力相助;西安交通大学硕士研究生韦帮远、强科、王懿、张春飞等做了大量资料收集与整理工作,在此一并表示衷心的感谢!

同时也得到了孙建国等许多专家和网友的热情支持,并参考和借鉴了许多国内外公开

出版或发表的文献，在此一并致谢！

由于编者水平有限，加之时间仓促，书中仍然可能存在不妥或疏漏之处，恳请广大读者批评指正，以便再版时修正。

编 者
2009年4月

目 录

第 1 章 绪论	1	第 3 章 硫酸工业	52
1.1 化学工业	2	3.1 概述	53
1.1.1 化学工业及其分类.....	2	3.1.1 硫酸的性质与应用	53
1.1.2 化学工业的地位和作用	3	3.1.2 硫酸工业发展现状	54
1.1.3 化学工业的发展趋势	4	3.1.3 硫酸生产的原料	55
1.1.4 我国化学工业的发展与进步	5	3.1.4 硫酸生产过程简介	56
1.2 绿色化学与清洁生产	6	3.2 接触法生产硫酸	57
1.2.1 绿色化学的原则及内容	6	3.2.1 二氧化硫炉气的制备	57
1.2.2 清洁生产概要	7	3.2.2 炉气的净化与干燥	62
1.3 循环经济与生态工业	9	3.2.3 二氧化硫的催化氧化	71
1.3.1 循环经济	9	3.2.4 三氧化硫的吸收	79
1.3.2 生态工业	10	3.2.5 接触法生产硫酸的全流程	82
本章小结	14	3.3 硫黄制酸	84
练习与思考	15	3.4 硫酸生产中的技术经济问题	86
第 2 章 化工基础知识	16	3.4.1 硫酸生产中的技术经济指标	86
2.1 化学热力学基础	17	3.4.2 硫酸生产中热能的回收利用	87
2.1.1 热力学第一定律	17	3.4.3 硫酸生产的“三废”处理与 综合利用	88
2.1.2 化学反应热的计算	20	本章小结	91
2.2 化学反应速率和化学平衡	23	练习与思考	92
2.2.1 化学反应速率	23	第 4 章 合成氨工业	94
2.2.2 化学平衡	30	4.1 概述	95
2.3 工业催化剂	35	4.1.1 氨的性质和用途	95
2.3.1 概述	35	4.1.2 合成氨工业概况	95
2.3.2 催化剂基本知识	36	4.1.3 合成氨生产方法简介	96
2.3.3 工业催化剂	38	4.2 合成氨原料气的制取	98
2.4 化工生产的基本概念	43	4.2.1 固体燃料气化法	99
2.4.1 基本概念	43	4.2.2 烃类蒸汽转化法	105
2.4.2 化工单元过程与 化工单元操作	45	4.2.3 重油部分氧化法	108
2.4.3 工艺程序结构	46	4.3 合成氨原料气的净化	111
本章小结	49	4.3.1 原料气的脱硫	111
练习与思考	50	4.3.2 一氧化碳的变换	114

4.3.3	二氧化碳的脱除.....	117	5.5.2	氟的回收和利用.....	177
4.3.4	原料气的最终净化.....	118	5.5.3	磷石膏的综合利用.....	178
4.4	氨的合成.....	121	本章小结.....	181	
4.4.1	氨合成反应的化学平衡.....	121	练习与思考.....	182	
4.4.2	氨合成的反应机理和 动力学方程.....	122	第 6 章 碱工业	184	
4.4.3	催化剂及氨合成的 工艺条件.....	123	6.1 概述.....	185	
4.4.4	氨合成工艺流程.....	125	6.1.1 纯碱工业在国民经济中的 重要性及其发展简史.....	185	
4.4.5	氨合成塔.....	127	6.1.2 氯碱工业在国民经济中的 重要性及其发展简史.....	186	
4.5	氮肥.....	131	6.2 氨碱法制纯碱.....	187	
4.5.1	尿素.....	131	6.2.1 氨碱法生产的流程.....	187	
4.5.2	硝酸铵.....	132	6.2.2 石灰石煅烧与石灰乳制备.....	188	
4.5.3	碳酸氢铵.....	133	6.2.3 盐水精制与吸氨.....	189	
4.5.4	硫酸铵.....	134	6.2.4 氨盐水碳酸化.....	192	
本章小结.....	136	6.2.5 重碱过滤与煅烧.....	194		
练习与思考.....	137	6.2.6 氨回收.....	198		
第 5 章 磷酸盐工业	139	6.2.7 氨碱法生产纯碱的特点及 总流程.....	200		
5.1 磷和磷矿资源.....	140	6.3 联合法生产纯碱和氯化铵.....	201		
5.1.1 磷矿资源的开发和利用.....	140	6.3.1 概述.....	201		
5.1.2 元素磷.....	142	6.3.2 联合生产纯碱和氯化铵的 工艺条件.....	203		
5.2 磷酸.....	144	6.3.3 氯化铵的结晶与生产流程.....	205		
5.2.1 磷酸的物理化学性质.....	144	6.4 电解法制烧碱.....	210		
5.2.2 湿法磷酸.....	146	6.4.1 氯碱生产概述.....	210		
5.2.3 热法磷酸.....	154	6.4.2 食盐水溶液电解的 基本原理.....	212		
5.3 磷肥.....	156	6.4.3 氯碱的生产.....	215		
5.3.1 我国磷肥工业的进步和 发展.....	157	6.4.4 盐酸的生产.....	220		
5.3.2 过磷酸钙类肥料.....	157	本章小结.....	225		
5.3.3 磷酸铵类肥料.....	162	练习与思考.....	226		
5.4 磷酸盐.....	167	第 7 章 石油炼制与石油加工	228		
5.4.1 磷酸盐的分类和性质.....	167	7.1 概述.....	229		
5.4.2 磷酸钾盐.....	169	7.1.1 石油的化学组成.....	229		
5.4.3 磷酸钙盐.....	169	7.1.2 原油的分类及性质.....	230		
5.4.4 三聚磷酸钠.....	172	7.1.3 石油产品分类及加工方法.....	230		
5.5 磷酸盐工业中的三废处理与 综合利用.....	175	7.2 石油炼制.....	231		
5.5.1 黄磷生产中的排放处理与 利用.....	175				

7.2.1 概述	231	9.2.1 水泥的定义和分类	331
7.2.2 常减压蒸馏	234	9.2.2 硅酸盐水泥生产技术	332
7.2.3 催化裂化	240	9.3 玻璃工业	342
7.2.4 催化重整	251	9.3.1 玻璃的定义与特性	342
7.3 石油化工	262	9.3.2 玻璃制造	343
7.3.1 概述	262	9.4 硅酸盐工业中三废治理及 综合利用	349
7.3.2 热裂解	262	9.4.1 水泥工业三废治理及 综合利用	349
7.3.3 聚丙烯生产	270	9.4.2 玻璃工业三废治理及 综合利用	350
7.4 三废治理	274	9.4.3 硅酸盐工业的噪声及其 防治	352
7.4.1 废水的治理和综合利用	275	本章小结	353
7.4.2 废气的治理和综合利用	275	练习与思考	354
7.4.3 固体废物的治理和 综合利用	277	第 10 章 精细化工	355
本章小结	279	10.1 概述	356
练习与思考	280	10.2 涂料	360
第 8 章 煤化工工业	283	10.3 粘合剂	365
8.1 概述	284	10.4 表面活性剂	369
8.2 煤炭气化	285	10.5 石油化学品	374
8.2.1 煤炭气化化学机理	285	10.6 塑料助剂	379
8.2.2 煤炭气化分类	286	本章小结	384
8.2.3 气化炉	287	练习与思考	384
8.2.4 德士古水煤浆煤气化法	289	第 11 章 微反应工艺	386
8.2.5 Shell 干粉煤气化法	294	11.1 概述	386
8.2.6 其他煤气化工艺简介	298	11.2 微反应器的制造	391
8.2.7 煤性质对气化的影响	301	11.3 微反应器的应用	396
8.3 煤的间接液化——合成油	304	11.3.1 微混合器	396
8.3.1 费托合成反应	305	11.3.2 微型换热器	401
8.3.2 费托合成的基本工艺	306	11.3.3 微型分离器	403
8.3.3 几种间接液化的典型工艺	309	11.3.4 液相微反应器	405
8.4 煤的直接液化	313	11.3.5 气相微反应器	406
8.4.1 一般工艺	314	11.3.6 气液微反应器	408
8.4.2 典型煤直接液化工艺	318	11.3.7 能源制造微反应器	411
8.5 煤制碳一化工主要产品	322	本章小结	412
本章小结	327	练习与思考	413
练习与思考	327	参考文献	414
第 9 章 硅酸盐工业	329		
9.1 概述	330		
9.2 水泥工业	331		

第 1 章 绪 论

教学目标

通过本章的学习，了解化学工业的分类、化学工业在国民经济中的地位和作用以及发展趋势，了解绿色化学的发展及原理、清洁生产的含义，了解循环经济的基本思想、生态工业园的基本形式。

教学要求

能力目标	知识要点	权重	自测分数
了解化学工业的分类、作用及发展趋势	化学工业分类、作用与发展趋势	40%	
了解绿色化学的发展及原理、清洁生产的含义	绿色化学的原则与清洁生产概要	30%	
了解循环经济的基本思想、循环经济的原则、生态工业园的基本形式	循环经济与生态工业概念、生态工业园的基本形式	30%	

引例

当今全球经济的持续增长背景下，化学工业得到了极大的发展，生产出了许多自然界没有的化学品，从而满足了人类生产、生活和发展等多方面的需要，但是随之也带来了严重的环境污染和生态平衡的破坏，自然资源和能源日渐减少与枯竭。人类生存环境已受到前所未有的威胁，主要表现在：全球气候变暖；臭氧层被破坏；大气污染、酸雨成灾；淡水资源的匮乏和污染；海洋污染；土地资源的退化；森林锐减；生物多样性减少；环境公害；有毒化学品和危险废物。保护生态环境，加强污染治理已成为世界各国人民的共同心声。

现代化学工业，不能像以前那样走先污染再治理的道路，而是应该走可持续发展的道路。如何实现可持续发展的化学工业道路？应该按照什么样的方法进行生产从而做到既能满足人类生存发展的需要又对环境不造成破坏呢？在可持续发展的化工生产中应该遵循哪些原则呢？

1.1 化学工业

科学技术发展史表明：对每一个历史时期的社会、经济具有深远影响的，对生产力的发展具有带动作用的，主要是当时的能源、材料和制造技术。在这三大类技术中，有相当一部分属于过程技术。过程技术是通过一系列物理化学分离和化学反应(包括催化、电化和生化反应)，改变原料的状态、微观结构和(或)化学组成的加工技术。以过程技术为基础组成的工业部门称为过程工业，它包括化工、石油化工、生物化工、化学、炼油、制药、食品、冶金、环保、能源、动力等诸多行业与部门。过程工业中进行的各种化学、物理过程往往在密闭状态下连续进行，它遍及几乎现代所有工业生产领域。

过程工程是指化工、炼油、冶金、能源、建材、医药、日化等多种工艺过程中有共性的工程技术。过程工程的学科理论基础是共同的泛化学工业，是在化学和物理学的基本原理指导下高度交叉发展而形成的产业，它们共同的核心研究内容是：

- (1) 物质流的传递与转化过程；
- (2) 能量流的传递与转化过程；
- (3) 信息流的传递与集成过程。

以上 3 者之间的相互作用促进了过程工程的发展，也进一步说明了在过程工程中技术是相通的和可共享的。

化学工业是最传统、最典型的过程工业，生产过程处理的物料基本上呈流程型，处理过程都包括改变物质状态、结构、性质的生产过程。化学工业是过程工业中的一个十分重要的分支。

1.1.1 化学工业及其分类

化学工业又称化学加工工业，泛指生产过程中化学方法占主要地位的过程工业。化学工业是以煤炭、石油、天然气、矿物、生物等为原料，借助化学反应使原料的组成或结构发生改变，生产农用化学品、有机和无机原料、合成材料、精细与专用化学品等产品的重要产业部门。

化学工业分类的方法很多，不同国家或不同部门，其分类方法不尽相同。例如，按生产原料可分为煤炭化学工业、石油化学工业、农产化学工业；按产品用途可分为医药、农药、肥料、燃料、涂料等。从学科(化学反应类型)来划分化学工业的类型，通常分为无机化工、有机化工、高分子化工、精细化工、生物化工等。在这里要说明的一点是，这种分类不是绝对的，精细化工与有机化工、高分子化工和生物化工之间，并不存在鲜明的界限。

世界上大多数国家按产品的性质用途及其加工过程相似的原则进行分类，总体上化学工业可以分为 19 个分支，如表 1-1 所示。另外需要指出的是，例如硅酸盐等一些工业，其生产过程虽然与化学工业相似，但习惯上已从化学工业中分离出来。

表 1-1 化学工业的主要分支

分 支	说 明
化学肥料工业	包括合成氨、氮肥、磷肥、钾肥、复合肥料、微量元素肥料等
硫酸工业	生产硫酸等
制碱工业	包括烧碱和纯碱等
无机盐工业	包括磷酸盐、铬盐、钡盐、硼盐等各种无机盐，除硫酸、烧碱、纯碱以外的其他无机酸、无机碱等
石油化学工业	石油炼制、烃类的裂解制取三烯(乙烯、丙烯、丁二烯)、三苯(苯、甲苯、二甲苯)等有机化工原料和产品
煤化学工业	煤的气化、干馏、液化及其副产品的加工等
有机原料工业	如有机酸、醇、醛、酮、醚、酯等
合成树脂和塑料工业	包括聚氯乙烯、聚乙烯、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
合成纤维工业	包括聚酯类、聚酰胺类、聚丙烯腈等合成纤维
橡胶工业	包括天然橡胶的加工及产品的制造，合成橡胶的生产及产品的制造
国防化学工业	包括炸药、化学武器，以及为核工业和航空航天工业配套的化工产品，如高能燃料、密封材料、特种涂料、功能复合材料等的生产
医药工业	包括各种天然药物和合成药物的生产
农药工业	包括杀虫剂、杀菌剂、杀螨剂、除草剂、植物生产调节剂以及杀鼠剂等
涂料及颜料工业	包括颜料、油料、填充料、溶剂、油漆、建材涂料、特种涂料等
染料工业	包括轻工、纺织、食品等多种用途的染料
信息材料工业	包括半导体材料、磁记录材料、感光材料、成像材料、光导纤维材料等
高纯物质和化学试剂工业	包括各种特定用途的高纯物质以及各种级别化学试剂的生产
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、粘合剂、香料、皮革化学品、造纸化学品等
化工新型材料工业	包括功能材料和复合材料等

1.1.2 化学工业的地位和作用

化学工业是国民经济发展中一个多品种、多层次、服务面广、配套性强的重要基础产业，同时又是资金密集、能源密集和技术密集的产业。许多经济发达的国家都采取优先发展、优先投资和优先增长的战略，将化学工业摆在国民经济的发展前列。化学工业的发达程度已经成为衡量国家工业化、现代化水平和文明程度的重要标志之一。

化学工业为农业提供肥料、农药、植物生长激素等化学产品，提高了农作物的产量和质量，促进了粮食和蔬菜等农作物的增产，减轻了人口增长对粮食需求的压力。

化学工业为人类生活提供各种化学制品，人类衣食住行无不与化学工业有关。如衣料需要经过化学处理和印染，化学纤维又是人们重要的衣着原料；食品加工需要的各种添加剂和调味品大多是用化学方法从天然产物中提取的；现代建筑用的水泥、涂料、油漆等材

料都是化工产品；各种交通工具需要燃料做动力，需要化学工业为其提供橡胶、塑料等制品；人们用到的药品、洗涤剂、化妆品等也都是化学制剂。

化学工业为其他工业部门提供必需的物质基础，化工产品广泛应用于各类工业部门，特别是通过高分子产品为轻工业、交通部门、服装产业等提供必不可少的原料及产品。化学工业还为国防提供火药和多种具有特殊性能的化学品，如高能燃料、高能电池、高敏胶片以及耐高温、耐辐射材料等。

化学工业对科学技术的进步具有不可忽视的推动作用。例如光学材料、超导材料、超强材料等各种功能材料和新型复合材料的问世与应用，使得科学技术快速发展、日新月异。

1.1.3 化学工业的发展趋势

化学工业从形成到现在已经经历了两百多年的历史，现已经发展成为一个品种繁多、门类齐全的重要工业体系。目前，世界化学工业正在进行结构性的重组与变革，这种结构性的重组与变革是多方面的，而且这种趋势还将继续下去。通过政府导向的国内外多种形式的合作，以及跨国公司内部的合作，将成为国际化战略的重要环节。具有竞争与合作同在、交流与限制并存的特点，当今世界化学工业发展的重要趋势介绍如下。

1. 原料、产品和生产方法多样化

化学工业能充分利用自然资源，用同一原料可以制造出许多不同的产品。例如，石油经过炼制可以得到各种用途的油品，进一步深度加工又可得到石油化工的基本原料如乙烯、丙烯、芳烃等，进而可以合成纤维、塑料、橡胶等多种产品。而且，不同原料采用不同的生产方法也可以制得同一种产品。

2. 生产规模的大型化

生产规模是决定化工过程经济效益的一个重要影响因素，单位年生产能力的投资及生产成本，会随着生产规模的增加而减小。因此，从 20 世纪 50 年代起，化工企业的生产规模显著增大。如乙烯单系列规模从 20 世纪 50 年代的 50k t/a 发展到 70 年代新建的 0.1~0.3M t/a，80 年代新建的乙烯装置最大生产能力达 0.68M t/a，到 21 世纪初已经出现 1M t/a 以上的大型乙烯装置，今后还将继续扩大生产规模。

3. 精细化工将得到快速发展

精细化工产品更新换代快、市场寿命短、技术专利性强、产品的附加值高。一个精细化学品的研究开发，不仅需要多个学科相互交叉配合，而且还需要对大量的化合物进行筛选及优化，再加上各国对环保及产品的毒性控制要求日益严格，因此要获得高质、高效率且性能稳定、有市场竞争能力的精细化工产品，就必须掌握多项先进技术和严格的科学管理。许多世界著名的跨国公司，都把精细化工作为首要的发展方向，其发展规模也越来越大。精细化工在化学工业产值中所占比重大小被认为是一个国家化学工业发达程度的标志之一。

4. 绿色化工将是化学工业可持续发展的必然趋势

绿色化学的核心内容之一是采用“原子经济”反应，要求在化工生产中投入的原料分子中每个原子都能转化为对人类有用的产物，即反应没有废物，做到“零排放”，实现可持续发展的绿色化工。

5. 循环经济和清洁生产是化工生产的新趋势

循环经济就是按照生态规律和经济规律来安排生产活动,使产业链上游的废物变成下游的原料,使资源得到最有效的利用,使经济活动对环境的负面影响降到最低。它是化工行业可持续发展的技术手段,越来越多地得到人们的重视。

清洁生产是实现经济和环境协调发展的最佳选择,它对推动化工企业提高资源和能源的利用效率,减少污染物的排放总量,转变经济增长方式和污染防治方式,实现可持续发展将起到关键的作用,是化工行业发展的必然趋势。

6. 改变能源的结构和组成

氢、甲烷、合成气和甲醇为燃料的燃料电池,以及太阳能发电、制氢和生物质能等新技术,随着催化剂制备技术及化工新材料的发展,将大规模地得到应用,这些能源不仅可用作工厂的动力,还可用来驱动汽车和家庭供电、供热。

7. 化工新材料将得到蓬勃发展

高新技术产业(如航天、汽车、电子、信息、能源)的快速发展需要各种新材料,原有的三大合成材料(塑料、橡胶和合成纤维)在品质、性能和差别化方面都会得到很大的提高。大力开发生产各种新材料,已成为化学工业的战略任务。

8. 生物化工是化学工业发展的新方向

与传统的化学方法相比,生物技术往往以可再生资源为起始原料,具有反应温和、能耗低、效率高、污染少、可利用再生资源、催化剂选择性高等优点。随着现代生物技术的基因重组、细胞融合、酶的固定化技术的发展,已出现一批生物技术工业化成果,不久将会有更多的生物化工产品实现工业化。

9. 化学工业以技术创新为发展动力

化学工业是一个技术密集型的行业,对于技术密集型产业,技术创新是取得优势的关键,是新世纪化学工业发展的动力。新世纪化学工业的技术创新主要包括 3 个方面:①跟踪科学研究的前沿,在技术深度上开辟出新的生长领域;②与相关科学之间的相互交差渗透,在技术的广度上通过与新兴产业的杂交获得新的拓展;③采用新的高科技成果改造传统产业,以获得更完美的生产结果。

10. 化学工业使信息技术的应用越来越广泛

化学工业将更多地借助信息技术进行化工开发、设计,在计算分子科学、计算流体力学、过程模型化的模拟、操作最佳化控制方面均可起到更重要的作用。这些技术的运用使化工产品从反应设计、实验优化放大到生产控制管理的全过程更为科学、可靠、可行,给传统化工的研发方式、生产方式、管理方式带来巨大的变革。

1.1.4 我国化学工业的发展与进步

我国的化学工业经历 1949 年以来 60 年的发展,已经形成了一个门类比较齐全、品种基本配套的工业体系。在化学工业改革开放 30 年的高速发展中,我国创建了很多大型化工

企业，为我国的建设事业发挥了巨大的作用。目前，我国已经有化肥、硫酸、合成纤维等十多种主要的化工产品的产量位居世界前列，如表 1-2 所示。近年来，我国化学工业呈现高速度、高效益增长，已有一批大型有机原料和精细化工装置达到和接近国际先进水平，各项技术经济指标达到历史最高水平。这对进一步推进我国化学工业发展起到重要的作用。

表 1-2 主要工业产品产量

年份	水泥 /Mt	硫酸 /Mt	纯碱 /Mt	烧碱 /Mt	乙烯 /Mt	化纤 /Mt	化肥(100%) /Mt	原煤 /Gt	原油 /Gt
1978	65.24	6.61	1.329	1.64	0.381	0.2846	8.693	0.618	0.104
2002	725	30.50	10.33	5.43	—	9.91	37.91	1.38	0.167
2007	1360	55.00	17.718	17.59	10.477	23.90	57.869	2.536	0.187

注：引自国家统计局数据

1.2 绿色化学与清洁生产

1.2.1 绿色化学的原则及内容

绿色化学(green chemistry)又称环境无害化学(environmentally benign chemistry)、环境友好化学(environmentally friendly chemistry)、清洁化学(clean chemistry)。绿色化学即是利用一系列原理、技术和方法来减少或消灭那些对人类健康、社区安全、生态环境有害的原料、催化剂、溶剂和试剂、产物、副产物等的使用和产生。

1988 年，Anastas 和 Warner 明确了绿色化学的 12 条原则，这些原则带动了化学的各个层次如学术研究、化工实践、化学教育、政府政策、公众的认知等的发展。它标志着绿色化学与技术研究已成为国际化学科学研究的前沿和重要发展方向。这 12 条原则为：

- (1) 预防。防止废物的产生比产生废物后再进行治理好。
- (2) 原子经济性。设计的合成方法应当使反应过程中所用的物质都用到最终的产品中去。
- (3) 无毒或低毒害化学合成。设计的合成方法中所采用的原料与生成的产物对人类与环境都应当无毒或低毒。
- (4) 设计较安全的产品。设计生产的产品性能时要考虑其毒性，要求产品对人类和环境都是安全的。
- (5) 使用安全的溶剂与助剂。如有可能就不用辅助物质(如溶剂、分离试剂)，必须使用时也应该是用无毒的。
- (6) 有节能效益的设计。化工过程的能耗必须节省，并且要考虑其对环境与经济的影响。如有可能，合成方法要在常温、常压下进行。
- (7) 使用再生资源做原料。使用可再生资源作为原料，而不是使用在技术与经济上可耗尽的原料。
- (8) 减少使用衍生物。如有可能，减少或避免使用生成衍生物的步骤，因为这些步骤要用外加试剂并且可能产生废弃物。

(9) 催化反应。催化剂(尽可能是具选择性的)比符合化学计量数的反应物更占优势。

(10) 设计可降解产物。化学产物应当设计成为在使用之后能降解成为无毒害的产物而排到环境之中。

(11) 及时分析以防止污染。要进一步开发分析方法,使其可及时现场分析,并且能够在有害物质生成之前就予以控制。

(12) 采用自身安全、能防止发生意外的化学品。在化学过程中,选用的物质以及该物质使用的形态,都必须能防止或减少隐藏的意外(包括泄漏、爆炸与火灾)事故发生。

绿色化学的核心内容是“原子经济性”,即充分利用反应物中的各个原子,因而既能充分利用资源,又能防止污染。用原子利用率衡量反应的原子经济性,最大限度地利用原料中的每一个分子,使之合成到目标分子中,达到零排放。原子利用率越高,产生的废弃物越少,对环境造成的污染也越少。

绿色化学的核心内容主要体现在5个“R”上:

(1) 减量(Reduction)。减量是从节省资源、少污染角度提出的。减少用量、在保证产量的情况下如何减少用量,有效途径之一是提高转化率、减少损失率。同时应减少“三废”排放量,主要是减少废气、废水及废弃物(副产物)排放量。

(2) 重复使用(Reuse)。化学工业过程中的催化剂、载体等,从一开始就应考虑有重复使用的设计,这是降低成本和减废的需要。

(3) 回收(Recycling)。回收主要包括回收未反应的原料、副产物、助溶剂、催化剂、稳定剂等。可以有效实现“省资源、少污染、减成本”的要求。

(4) 再生(Regeneration)。再生是变废为宝,节省资源、能源,减少污染的有效途径,它要求化工产品生产在工艺设计中应考虑到有关原材料的再生利用。

(5) 拒用(Rejection)。拒用是杜绝污染的最根本办法,它是指对一些无法替代,又无法回收、再生和重复使用的毒副作用、污染作用明显的原料,拒绝在化学过程中使用。

🔑 特别提示

由绿色化学基础上发展的技术称为绿色技术。绿色技术是人类为实现可持续发展而采用的旨在保护环境、维持生态平衡的各种手段的总和。

1.2.2 清洁生产概要

1. 清洁生产的概念

清洁生产(cleaner production),联合国环境规划署在总结了各国开展的污染预防活动,并加以分析研究后,提出了清洁生产的定义:清洁生产是一种新的创造性的思想,该思想将整体预防的环境战略持续应用于生产过程、产品和服务中,以增加生态效率和减少人类及环境的风险。

清洁生产的定义包含了两个全过程控制:生产全过程和产品整个生命周期全过程。对生产全过程而言,清洁生产包括节省原材料和能源,淘汰有毒原材料并在全部排放物和废物离开生产全过程以前最大可能减少它们的数量和毒性;对产品而言,清洁生产策略旨在减少产品在整个生产周期全过程(包括从原材料提炼到产品的最终处置)中对人类和环境的影响。

2. 清洁生产的内容

清洁生产主要包括以下 3 方面的内容:

(1) 清洁及高效的能源和原材料的利用。采用各种方法对常规的能源采取清洁利用的方法,如城市煤气化供气等;对沼气等再生能源的利用;新能源的开发以及各种节能技术的开发利用。

(2) 清洁的生产过程。尽量不用或少用有毒有害的原料;采用无毒、无害的中间产品;选用无废或少废工艺和高效设备;尽量减少生产过程中的各种危险性因素,如高温、高压、低温、低压、易燃、易爆、强噪声、强振动等;采用可靠和简单的生产操作和控制方法;对物料进行内部循环利用;完善生产管理,不断提高科学管理水平。

(3) 清洁的产品。产品设计应考虑节约原材料和能源,少用昂贵和稀缺的原料;产品在使用过程中以及使用后不含危害人体健康和破坏生态环境的因素;产品的包装安全、合理;产品使用后易于回收、重复使用和再生;使用寿命和使用功能合理。

3. 清洁生产的方法

实施清洁生产的主要途径和方法包括合理布局、产品设计、原料选择、工艺改革、节约能源与原材料、资源综合利用、技术进步、加强管理、实施生命周期评估等许多方面。

(1) 合理布局,挑战和优化经济结构和产业产品结构,以解决影响环境的“结构型”污染和资源能源的浪费。

(2) 在产品设计和原料选择时,优先选择无毒、低毒、少污染的原辅材料替代原有毒性较大的原辅材料,以防止原料及产品对人类和环境的危害。

(3) 改革生产工艺,开发新的工艺技术,采用和更新生产设备,淘汰陈旧设备。

(4) 节约能源和原材料,提高资源利用水平,做到物尽其用,通过资源、原材料的节约和合理利用,使原材料中的所有成分通过生产过程尽可能地转化为产品,消除废物的产生,实现清洁生产。

(5) 开展资源综合利用,尽可能多地采用物料循环利用系统,使废弃物资源化、减量化和无害化,减少污染物排放。

(6) 依靠科技进步,提高企业技术创新能力,开发、示范和推广无废、少废的清洁生产技术装备;加快企业技术改造步伐,提高工艺和技术装备水平,通过重点技术进步项目(工程),实施清洁生产方案。

(7) 加强化工企业科学管理,改进操作,主要方法是:落实岗位和目标责任制,杜绝跑冒滴漏,防止生产事故的发生;加强设备管理,提高设备完好率和运行率;开展物料、能量流程审核;科学安排生产进度,改进操作程序;组织安全文明生产,把绿色文明渗透到企业文化之中;推行清洁生产的过程也是加强生产管理的过程,它在很大程度上丰富和完善了工业生产管理的内涵。

(8) 开发、生产对环境无害或低害的清洁产品,从产品抓起,将环保因素预防性注入到产品设计之中,并考虑其整个生命周期对环境的影响。

1.3 循环经济与生态工业

1.3.1 循环经济

1. 循环经济的概念

所谓循环经济(circular economy),就是把上一生产过程产生的废料变为下一生产过程的原料(生产要素),使一系列相互联系的生产过程实现环状式的有机组合,变成几乎无废料的生产。循环经济是物质闭环流动型经济的简称。

传统经济运行方式是以“资源→产品→废弃物→污染物排放”单向流动为基本特征的线性经济发展模式,表现为“两高一低”,即高消耗、低利用、高污染。这意味着创造的财富越多,消耗的资源就越多,产生的废弃物也就越多,这不仅制约了现代经济社会的发展,而且给人类带来深重的灾难,如环境污染和生态破坏等。而循环经济提倡的是一种与环境和谐的经济发展和模式,以实现资源使用的减量化、产品的反复使用和废物的资源化,用“资源→产品→再生资源→再生产品”的环状反馈式循环理念重构经济运行过程,其表现为“两低两高”,即低消耗、低污染、高利用率和循环率,使物质资源得到充分合理的利用,把经济活动对自然环境的影响降低到尽可能小的程度,符合可持续发展原则的经济发展模式。

特别提示

发展循环经济有以下几个积极作用:第一,有助于节约宝贵的资源;第二,有助于减轻环境污染;第三,有助于降低经济成本;第四,有助于增加社会就业;第五,有助于推动社会进步。因此,发展循环经济对于构建和谐社会具有十分重要的积极意义。

2. 循环经济的基本原则

循环经济的基本原则是“减量化(reduce)、再使用(reuse)、再循环(recycle)”,它们构成了一个有机联系的整体。综合运用这些原则,可使循环经济发展达到最优化。

(1) 减量化原则。减量化原则属于输入端控制原则,旨在使用较少原料和能源的投入来达到预定的生产目的和消费目的,在经济活动的源头就注重节约资源和减少污染。减量化不是单纯地减少对资源、能源的使用,而是要求生产和消费尽可能地从使用污染环境的原料和能源转移到可再生利用的材料上来。

(2) 再利用原则。再利用原则属于过程性控制原则,目的是通过延长产品的服务寿命,来减少资源的使用量和污染物的排放量,也就是要求产品在完成其使用功能后尽可能重新变成可以重复利用的资源,而不是有害的垃圾,即“生产—消费—生产”的循环系统。

(3) 再循环原则。再循环原则又称资源化原则或再生利用原则,属于输出端控制原则,是指把废弃物在输出端变成资源,使废弃物转化为再生原材料,重新生产出原产品或次级产品,以减少最终处理量。如果不能被作为原材料重复利用,就应该对其进行热回收,旨在通过把废弃物转变为资源的方法来减少资源的使用量和污染物的排放量。