

第一章 化学工业与化学工程

化学工业是综合运用化学和物理方法将原料加工成化学产品的加工工业。我国的化学工业主要包括生产化学肥料、化学农药、三酸两碱（硫酸、硝酸、盐酸、烧碱和纯碱）无机盐、染料、涂料、化学试剂、助剂、感光材料、磁性记录材料、有机化工原料、合成橡胶、塑料和化学纤维等的企业和部门。化工产品的应用十分广泛，几乎渗透到国民经济的各个领域和人类衣、食、住、行的各个方面。如合成橡胶、塑料和合成纤维现已取代许多传统的天然材料；而大量的化肥、农药等农用化学品使农业丰收有了保障；各种合成新药已为人类的健康发挥了重要作用；而许许多多微电子工业专用的化工产品又是当今信息社会发展的支柱。因此，化学工业在国民经济中的地位和作用将会愈来愈显著。

§ 1 化学工业概述

1-1 化学工业发展概况

化工生产走出作坊，发展成为具有一定规模的化学工业始于 18 世纪生产酸、碱和盐的无机化学工业。当时在英国发生了以机械行业为先导的世界第一次产业革命，推动了纺织工业和化学工业的迅速发展。1746 年，英国人罗巴克 (Robuck J) 首创铅室法制取硫酸，被称为世界上第一个典型化工厂。1791 年法国人路布兰 (Leblanc N) 提出用食盐、石灰石、硫酸和煤炭为原料的制碱方法获得专利并投入生产，带动了玻璃和肥皂等工业的发展，成为近代化学工业发展的重要里程碑。路布兰法的缺点是，固相反应原料利用率低，不易实现连续化生产，且产品的纯度较低。1861 年，比利时人索尔维 (Solvay E) 用食盐和石灰石为原料，并以氨作媒介，合成了纯碱，成为近百年来最普遍采用的制碱方法——氨碱法。氨碱法虽然比路布兰法优越得多，但该法使过半的原料生成了用途有限的氯化钙废渣，影响了氨碱法的制碱成本。我国化工先驱侯德榜，1941 年发明了侯氏制碱法（现称联碱法），他将纯碱与合成氨的生产结合起来，利用氨和副产物二氧化碳与氯化钠作用，制成碳酸钠和氯化铵，使食盐的利用率提高到 95% 以上。因此侯氏制碱法很快被不少国家所采用。

1905年，德国化学家哈伯（Haber F）发现在高温高压下用铁催化剂可以使氢气和氮气反应生成氨，并获得专利。德国巴斯夫公司（BASF）充分估计到了合成氨的巨大经济效益，立即购买了哈伯的专利，并协助哈伯研制了价廉易得的铁催化剂，于1913年正式投产。该工艺技术的成功，被看成是现代化学工业的起点。

在无机化学工业发展的同时，只能从天然资源中提取有机化合物的局限终于被突破。1828年，从氰酸铵合成尿素获得成功，标志着人工合成有机化合物的开始。从19世纪中叶到20世纪初，人工生产醋酸和糖精的技术都有了一定进展。在这一时期内，生产有机物的原料均以煤和农副产品为主，如用煤焦油为原料生产了染料、医药、农药和香料，用农副产品为原料生产了酒精、丙酮和醋酸等。进入20世纪30年代，随着石油和天然气的开发，极大地丰富了有机化学工业的原料来源，从而使有机化学工业进入了蓬勃发展的新阶段。

有机合成化学的发展，又推动了人工合成高分子材料的兴起，1909年，美国人贝克兰（Baekeland L）取得了第一个热固性高分子材料——酚醛树脂（又称电木）的专利权，次年在柏林投产。20世纪30年代又先后合成了丁钠橡胶和尼龙，从此，各种合成橡胶、合成纤维和塑料如雨后春笋般地发展起来，形成了近代化学工业发展的新格局。从19世纪中叶到20世纪中叶一些重要的化工产品开发和化工技术发明见表1-1。

表 1-1 化学工业发展概况

年 代	主 要 发 明
1809年	法国布萊 P 用硫酸使乙醇脱水制取了乙醚，迄今仍被采用
1839年	固特异 (Goodyear C) 首创用硫磺硫化天然橡胶，解决橡胶制品的定型和发粘问题
1842年	英国建成世界上第一个过磷酸钙磷肥厂
1845年	舍恩拜因 C F 制得纤维素硝酸酯
1849年	曼斯菲尔德 C 从煤焦油中分离出苯
1856年	珀金 (Perkin W I) 合成了第一个合成染料——苯胺紫
1862年	瑞典诺贝尔 I 及其子诺贝尔 A B 建厂生产炸药——硝化甘油
1869年	美国海厄特 J W 以樟脑作增塑剂，由硝酸纤维素制得最早的塑料赛璐珞，1872年投产
1890年	德国建成了世界上第一个电解食盐水溶液工厂制取氯气和氢氧化钠
1895年	第一座电石厂在美国投产
1912年	德国克拉特 F 等发明第一个热塑性树脂——聚醋酸乙烯酯
1929年	英国弗莱明 A 发现青霉素
1930—1931年	德国法本公司分别用本体和乳液法生产了聚苯乙烯和聚氯乙烯
1934年	英国福西特 E W 等制成高压聚乙烯
1935年	德国发明了第一个磺胺药物，随后几年又合成了多种同类药物
1939年	杜邦公司 (美国) 成功地将尼龙 66 工业化，这是最早工业化生产的合成纤维
1941年	我国科学家侯德榜发明了联合制碱法，当时称为侯氏制碱法
1942—1946年	先后合成了农药 DDT、六六六、2,4-滴 (除草剂)、有机硫和有机磷杀虫剂等

年 代	主 要 发 明
1949年	美国谢克特 M S合成了拟除虫菊酯——丙烯菊酯
1950年	美国杜邦公司首先使仿毛型聚丙烯腈纤维工业化
1957年	美国杜邦公司生产出最早的特种纤维——聚四氟乙烯纤维
1965年	中国完成了牛胰岛素的全合成工作
1968年	黎念之最先研究乳化液膜的形成方法和渗透机理，为液膜分离技术奠定了基础

从化学工业的发展历程看，其高速发展阶段是在 20 世纪 30 年代后从石油化工发展开始的，在短短的 60 多年里，其生产技术、产品种类和生产规模都已远远超过了前 100 多年的发展速度，而且，化学工业的发展速度和对国民经济的影响与其他工业相比都处于前列，已成为世界各国经济发展的支柱产业之一（见表 1-2）。

表 1-2 化学工业年均增长率（%）

国 别	1950—1960		1960—1970		1970—1980		1980—1990	
	Z*	H**	Z	H	Z	H	Z	H
中 国	25.3	39.5	3.9	8.0	9.45	9.70	12.6	7.4
美 国	3.9	7.9	5.0	7.9	3.1	5.6	2.81	4.2
日 本	16.5	17.9	13.5	14.6	4.6	5.2	4.3	5.1
英 国	3.0	6.2	2.7	6.2	0.8	2.9	1.66	3.60
法 国	6.6	12.1	6.0	10.4	2.8	4.4	1.58	3.3

Z 表示整个工业年均增长率；** H 表示化学工业年均增长率。

1-2 我国化学工业的发展和现状

我国是化学技术发展最早的国家之一，早在纪元前已经有了酿酒、冶铜、漂染和发酵等生产技术。但是由于我国封建社会的时间过长，阻碍了化学工业的发展。在 1949 年以前，我国化学工业已处于十分落后的状态，如农药、基本有机合成产品和石油化工产品等几乎为空白，而仅有的少数染料，制药和涂料生产厂家也大多是采用进口原料进行生产或半成品的加工，而发展比较早并已形成一定生产能力的三酸两碱工业也处于设备陈旧、技术落后，产量和质量都不能与发达国家相比的局面。表 1-3 列出了 1949 年以前我国化学工业的概况，由表可见，我国第一座铅室法硫酸厂比国外晚了 100 多年。

新中国成立以后，我国化学工业的发展取得了辉煌的成就，不仅化工生产所需要的原料已经做到了基本自给，而且基本无机化工产品、基本有机化工产品、化肥、农药、医药、涂料、染料、塑料、合成橡胶和合成纤维等产品也已基本配套齐全，除了满足国内需求外，许多产品还可以出口创汇，成为我国出口贸易的支柱产业之一。1998 年我国已有多种主要化工产品产量跃居世界前列，见表 1-4。

我国人口众多，可耕地面积少，解决食、衣、住、行是党和政府制定政策的出发点。解放后我国的化学工业始终把发展支农化工产品放在首位，支农化工产品的投资额约占化工总投资的 53%。1998 年我国化肥产量为 2 955 万吨（以有效成分计），居世界第一位，现在每亩耕地平均可以施肥 23.11 kg（不含进口化肥）是 1952 年的 77.1 倍。

表 1-3 1949 年以前的我国化学工业

年 份	兴建的化工厂和投产的化工产品
1876 年	我国第一座铅室法硫酸厂在天津投产，日产 2 吨
1889 年	第一座水泥厂在唐山建成（即今启新水泥厂）
1895 年	第一座无烟火药厂在上海投产
1905 年	建立我国第一座石油开采和炼制企业
1915 年	开林油漆厂在上海投产，广州建成我国第一个橡胶制品厂
1918 年	硫化黑染料在大连投产
1921 年	赛璐珞在上海胜德化工厂投产
1924 年	永利碱厂在天津落成
1925 年	石家庄焦化厂投产（汉冶萍铁厂的配套厂）
1937 年	我国第一座合成氨厂在南京投产
1944 年	DDT 在重庆药械制造实验厂批量生产

表 1-4 1998 年我国居世界前列的几种主要化工产品

产 品 名 称	产量(万吨)	世界排名顺序
化肥(折纯)	2955	1
染料	23.8	1
农药(折纯)	38.2	2
合成橡胶*	60	4
乙烯	383.48	5

为 1997 年的产量

近年来，我国还积极研究开发了一些高效、低毒和低残留量的有机磷和拟除虫菊酯类农药，停止了高残留量农药“六六六”、“DDD”等品种的生产。这些高效农药的开发和生产为农业丰收和粮食的安全生产提供了保障。随着石油化工的发展，我国合成材料的产量也有了大幅度的增长，并迅速跃居世界前列。

1-3 化学工业的特点和发展趋势

从工业发展速度看，化学工业之所以能够迅速发展，是因为它的产品已直接应用到国民经济的各个部门和人民生活的各个方面，如石油、电力、冶金、交通运

输、邮电通信、机械电子、汽车、建筑、航天航空、能源和环保等都与化学工业息息相关。甚至在国民经济建设中一些需要解决的重大技术领域，也几乎都与化学工业的发展有关。例如，信息和微电子技术、生化技术、新材料技术和新能源技术等都要求化学工业为它们提供新产品，而这些新产品的研究、开发和生产又迫使化学工业应用现代科学技术进行技术更新和技术改造，因此，又推动了化学工业的进一步发展。

化学工业的特点

从化工产品的应用和化工技术的发展看，化学工业具有以下特点：

1. 化学工业与人类的生存和发展息息相关

当前，世界正面临着人口增长、环境污染和能源短缺三大挑战。据联合国人口基金会统计^①，1804年全世界人口只有10亿，1927年增加至20亿，1960年为30亿，此后人口迅速增长，1974年达40亿，1987年达50亿，1999年10月达到60亿，最近增长的10亿仅用了12年时间。而且全世界每年还以7800万的速度增长，预计到2050年将达80亿，而耕地面积却日益减少。“民以食为天”，解决人类赖以生存的粮食问题就成为当今世界为之奋斗的重要目标之一。随着人口的增长和工业的发展，大气和水质已受到越来越大的污染，每年流入海洋的石油达1000多万吨，重金属几百万吨。每年排入大气层中的二氧化碳约为230亿吨，而森林和植被破坏造成的水土流失每年多达240亿吨。此外，业已探明的世界能源储量，按照目前能量消耗速度估计，储量丰富的煤也不过几百年。因此，人类将很快面临严重的能源短缺。现在，化学工业已担负起了迎接三大挑战的重任，例如化学工业可提供充足的化肥和农药、化学纤维、合成医药以及各种新型合成材料等，以满足人口增长带来的衣、食、住、行的需要；在化工生产中合理利用现有能源和研究开发新能源，可解决愈来愈紧张的能源供应问题；除了加强化工生产中本身的“三废”治理外，提供环境治理新技术以改善人类生存的环境质量等等，其作用都是其他工业不能替代的。

2. 原料路线、工艺路线和产品品种的多样性

在化工生产中，同一产品，有时可以用不同的原料加工而成；同一种原料，经过不同的加工，又可以得到不同的产品。即使采用同一种原料和相同的工艺过程，而工艺条件不同，也可以得到不同的产品。这是其他工业少见的。原料路线、工艺路线和产品品种的多样性，为化学工业的发展开辟了广阔的前景。

3. 化学工业属于技术密集型和能源密集型产业

在化工生产中，从原料预处理、化学反应、产物分离提纯到获得合格产品，其工艺流程一般均较复杂，技术的含量也较高。例如氢和氮反应合成氨，不仅需要

在高温高压下催化合成，而且合成后的反应混合物还需要冷却、冷凝液化分出产物后，再将原料氨、氢等循环使用，技术含量高，能源消耗也较大。由于其工艺技术在生产上实现有较大难度，所以该工艺从研制到实现大规模工业化生产，经历了较长时间。又如，信息和微电子工业用的超纯试剂和超纯气体，其纯度要求达到 ppb 级（即杂质含量为十亿分之几）生产这类超纯物质必须采用高新技术和特殊设备。随着现代工业的不断发展，当前对化学工业产品的品种和质量要求也越来越高，生产技术也应不断地更新和发展才能适应需要，所以随着化学工业的发展其技术密集程度也将愈来愈大。

此外，化工生产能源消耗量与其他工业相比也较大，据统计，1994 年我国化学工业部系统能源消耗总量为 1.05 亿吨标准煤，其中能耗最大的是大宗产品，如合成氨的能耗约占全行业能耗的 40%，而单位产值的能耗高出全行业近一倍，可见化学工业也是能源密集型产业。

当前，在各化工生产企业中，都大力提倡采用新工艺和新设备，提高管理水平和加强物料的综合利用，以降低能量消耗和生产成本，提高产品的市场竞争能力。

化学工业的发展趋势

20 世纪 70 年代兴起的新技术革命浪潮是以高新技术的发展为中心的，它们是：信息和微电子技术、生物技术、新材料技术、新能源技术、航天航空技术和海洋开发技术等等，这些新技术都与化学工业有着密切的关系。今后化学工业的发展趋势主要有以下几个方面：

1. 产品精细化

由于高新技术的发展，迫切需要化学工业提供各种各样能满足特殊用途的化学品。这些产品的共同特点是专用性强，纯度或性能指标要求高，对每一种用途的化学品需求量虽不大，但需要的品种繁多，附加值较高。以信息和微电子工业中应用的专用化学品为例，其品种已多达 16 250 种，如光致抗蚀剂及其配套试剂、清洗剂和溶剂、超纯试剂、超纯气体和金属有机化合物、掺杂剂、液晶、高纯金属、超纯水等，此外，用几种化学品按特殊要求复配，达到某种特殊功能的复配化学品也愈来愈受到人们的青睐。如现代微电子工业整机焊装用的助焊剂就是一种由松香、溶剂及表面活性剂等化学品组成的复配专用化学品。用这种助焊剂在印刷版上涂复一薄层后，所有焊点在数秒钟内即可一次焊接完成，而对电子元件无腐蚀作用。用复配法生产专用化学品，要比合成新的具有特定功能的化合物相对容易得多。总之，发展具有特殊性能的精细化工产品是化学工业发展的方向之一。

2. 化学工业和生物技术结合

采用生物技术生产化工产品早已为人类所熟知。例如，用粮食发酵生产乙

醇、丙酮和乙酸。后来，这些产品的生产原料又被廉价的石油化工原料所取代。但随着生物技术，尤其是 DNA 重组技术的发展和环境保护意识的增强，使发酵法生产乙醇技术又得到了进一步地完善和发展。据报道，将淀粉酶基因克隆到酵母菌中后，代替酵母菌用于淀粉发酵生产乙醇，已经取得了很好的效果，使发酵时间缩短了十分之九，能量消耗减少了 60%。又如，丙烯腈水合制备丙烯酰胺，若改用酶催化水合技术，不仅收率高、无污染，而且投资和成本可减少 50%，能量消耗可减少 40%。日本已于 1985 年建成年产 4 000 吨的工业装置，1993 年其生产能力已达 2 万吨/年。因此，化学工业和生物技术结合，将给化学工业的发展带来新的生机和活力。

3. 发展煤化工

20 世纪 30 年代以后发展起来的石油化工曾给化学工业带来了勃勃生机，各种各样的石油化工产品极大地满足了人类的物质生活需要，提高了人类生活质量。然而，石油和天然气储量日渐枯竭，而煤的储量则相对丰富，所以发展以煤为基础的新型煤化工，则是化学工业今后发展的方向之一，例如将城市煤气、发电和供热、液体燃料与一碳化学产品生产结合起来就是一种新型的煤化工技术。目前，我国和许多西方国家都开展了洁净煤技术的研究和开发工作。当石油和天然气资源枯竭时，煤炭将再次成为人类生存的主要能源和化学工业的基本原料。

4. 研究和开发新型材料

新型材料是现代科学技术的三大支柱（材料、能源和信息）之一。各种各样的新型材料对当今科学技术的发展已起着不可估量的作用，这些材料包括：

1) 高分子功能材料

高分子功能材料是指具有某种特殊功能和作用的高分子合成材料，对它们的研究和开发已成为高分子材料发展的重要方向。例如，用作催化剂的高分子材料，已开发的有高分子金属胶体催化剂、高分子络合物催化剂和固定化酶等。其中金属胶体催化剂已成功地用于氢氧燃料电池。还有用于分离操作的高分子分离膜，它是膜分离技术中的主要部件，现已应用的主要有气体分离膜、渗析膜、超过滤膜和反渗透膜等。此外，医用高分子材料和电磁高分子材料等也有广泛的应用。

2) 高分子结构材料

高分子结构材料是指能承受一定载荷，具有较高强度的高分子材料。主要包括工程塑料和复合材料（由高强度纤维、织物、颗粒等增强剂与塑料、金属、陶瓷和碳等基体复合而成）。对这些材料的共同要求是密度小、强度高、抗蚀和耐高温性能好。例如，用工程塑料聚芳酰胺树脂做成的直径与钢琴钢丝相同的细丝，其强度比钢琴钢丝大 5 倍多；碳纤维在 2 000℃ 高温下强度几乎没有变化，密度

也小；用碳化硅颗粒增强的铝合金已用于飞行器、飞机和汽车等的制造。此外，由于高分子材料耐腐蚀性能好，在化工生产中已广泛用来制作管道、阀门、泵和容器等。

3) 无机非金属材料

无机非金属材料包括特种陶瓷、人工晶体和新玻璃材料等。特种陶瓷是指具有耐高温、耐腐蚀、硬度大、强度高的结构陶瓷如制作刀具、模具的陶瓷和具有特定功能的功能陶瓷（如电容器陶瓷），已被广泛地应用。人工晶体种类很多，有用于固体激光光源的激光晶体、扩展激光波段的非线性光学晶体、对激光进行调制和偏转的调制晶体以及压电晶体和闪烁晶体等。人工晶体不仅硬度高，不易磨损而且能实现电、光、声、热、磁力等不同能量形成的相互作用和转换在激光技术、电子技术、超导技术、高能技术和医疗技术上都有广泛应用。新玻璃材料是指采用高纯或新型原料和新工艺制作的具有特殊功能的玻璃或无机非晶态材料，如光导纤维玻璃、激光玻璃、半导体玻璃和生物玻璃等，它也是高新技术领域不可缺少的材料。

4) 其他新型材料

富勒碳、纳米材料和超导体都是具有广阔应用前景的新型材料。例如，富勒碳是碳的同素异形体。 C_{60} 是它的第一个成员由60个碳原子组成，富勒碳具有许多独特的物理、化学和机械性能，应用广泛，科学家们正在探索将其用来制作电子器件、超导体、半导体、光学器件、贮氢材料和化学传感器等；纳米材料是一种颗粒大小介于1~10纳米（1纳米=10⁻⁹米）之间的超微颗粒材料，能够将太阳能高效地转变为热能和电能，用来制作高密度磁记录材料等。

1-4 化学工业分类

化学工业部门繁多，既有生产资料产品，又有生活资料产品，故其分类方法也有多种。如按产品用途划分有农药、化肥、合成材料、染料和化学试剂等产品类别，按原料来源划分有煤化工、石油化工及农副产品化工等工业类别。我国的化学工业有两种分类方法，一是按行业划分，即将我国原化学工业部管辖的那部分行业和企业划分为20大类（表1-5），这种分类方法的缺点是随着管理体制的变更，其分类的范围也随之而变。另一种是将所有化工产品分成19大类（表1-5），其优点是不受现行管理体制的约束，分类比较稳定，也便于与国外化学工业分类比较。由于各国国情不同，世界各国的分类方法多有差别。例如，日本通产省近年发布的统计资料，将日本化学工业分为42个行业。为了比较方便，现将它们的分类列于表1-6。比较表1-5和表1-6可知，我国和日本的分类方法差别较大，日本的分类较细，范围也比我国宽得多。

表 1-5 我国化学工业分类

序号	按行业划分	按产品划分
1	化学矿	化学矿
2	无机盐	无机化工原料
3	有机化工原料	有机化工原料
4	化学肥料	化学肥料
5	化工农药	农药
6	合成纤维单体	高分子聚合物
7	涂料、颜料	涂料及无机颜料
8	染料和中间体	染料及有机颜料
9	感光 and 磁性材料	信息用化学品
10	化学试剂	化学试剂
11	石油化工	食品和饲料添加剂
12	化学医药	合成药品
13	合成树脂和塑料	日用化学品
14	酸、碱	胶粘剂
15	合成橡胶	橡胶制品
16	催化剂、试剂和助剂	催化剂及各种化学助剂
17	煤化工	火工产品(炸药等)
18	橡胶制品	其他化学产品(林产和煤炭化学品)
19	化工机械	化工机械
20	化工新型材料	……

表 1-6 日本化学工业分类

序号	行业名称	序号	行业名称
1	氮肥、磷肥制造业	22	脂肪酸、硬化油、甘油
2	复合肥料工业	23	肥皂、合成洗涤剂
3	其他化学肥料	24	表面活性剂
4	制碱工业	25	涂料制造业
5	电解工业	26	印刷油墨制造业
6	压缩气及液化气	27	洗净剂
7	无机颜料	28	蜡烛
8	制盐工业	29	原料药制造业
9	其他无机化学	30	医药制造业
10	石油化学基础产品制造	31	生物化学试剂
11	脂肪族系中间体制造	32	生物制造业
12	甲烷衍生物制造	33	兽药
13	发酵	34	火药
14	煤焦油产品制造	35	武器用火药
15	有机颜料及染料制造	36	农药工业
16	塑料工业	37	香料
17	合成橡胶工业	38	化妆品
18	合成纤维工业	39	明胶、粘结剂
19	人造丝工业	40	感光材料
20	醋酸酯类	41	天然树脂制品
21	其他有机化学工业	42	木材化学制品、其他

§ 2 化工生产过程

2-1 化工生产工艺及流程

将一种或几种物质经过物理和化学方法加工处理后，制成一种或几种化工产品的生产过程，称为化学工业的生产过程，简称化工生产过程。凡化工生产过程都有使物质的结构、组成或性质发生变革的化学反应参加，故化学反应是这一过程的核心，围绕核心，在化学反应前一般要对参加化学反应的原料进行前处理，以满足化学对原料提出的要求。在反应后，对反应产物还必须作后处理，通常是采用分离提纯操作，使产品达到要求的质量标准，它不改变物质的化学性质。常见的物理操作有：固体和流体物料输送，物料的加热和冷却，非均相混合物的分离，液体混合物的蒸发、蒸馏和萃取，气体物料的吸收以及物料的干燥和冷冻等，人们将这些物理操作统称为单元操作。单元操作的结果只改变物料的物理性质。尽管各种化工产品的生产过程各不相同，但都是由若干单元操作和反应过程组成的，只是不同的化工过程所包括的单元操作和反应过程的类型、数目及其组合方式不同罢了。描述从原料开始，经过一系列按一定顺序并相互衔接的单元操作和反应过程，生产合格产品的生产工艺过程称为化工工艺流程。用图表示的化工工艺流程称为化工工艺流程图。化工工艺流程图的形式因表达的内容重点和繁简程度不同而有多种。例如，有用方框和文字表示生产过程中工艺步骤和物料流向的工艺流程框图；有用设备示意图形表示生产装置中各设备的配置和联接，以及各种物料在设备之间的运行方向的装置流程图；有以表示管线布局为主并表明物料运行方向和设备连接顺序的管线图以及描述控制测量位置及仪表安装要求的带控制点的工艺流程图等。通常，在流程图内应表明物料的流向和分配关系，设备的型式和组合方式，管路的连接和分布以及物料的种类等内容。图中各种设备均可按一定比例和规范用代号和示意图画出，并用线条将各设备之间的连接关系和次序表示出来。有时还可以把各主要设备的设计参数和操作参数标注在图上，形成一份详实而直观的技术资料。用方框和文字表示的工艺流程框图是最简单的工艺流程图，画这种流程图时，一般是从左向右，按原料转化为产品的工艺步骤顺序展开，方框之间用带箭头的线段连接，表示工艺步骤或设备之间的连接关系及物料流向，设备或工艺步骤名称可标注在方框内或方框近旁。如图 1-1 所示的尿素生产工艺流程框图。

尿素是用氨和二氧化碳在高温高压下直接合成的一种含氮量很高的中性速效肥料。反应分两步进行：

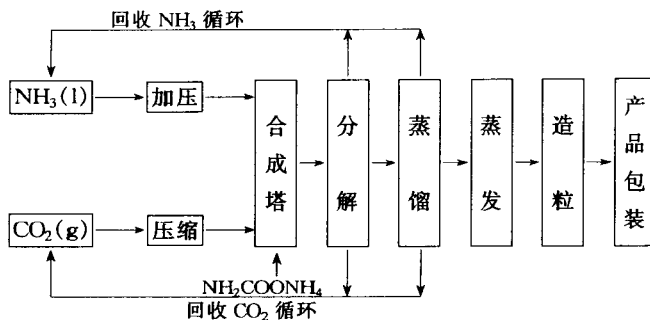
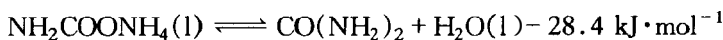
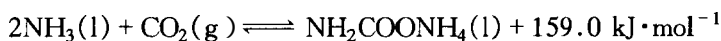


图 1-1 尿素生产工艺流程框图



第一步为可逆放热反应，原料过量，反应几乎在瞬间完成，且转化率较高。第二步氨基甲酸铵脱水为可逆吸热反应，反应速率较慢，转化率一般为 50% ~ 70%，所以，第二步为反应速率控制步骤。两步反应都在合成塔中完成。合成尿素的工艺方案有多种，我国普遍采用水溶液全循环法流程。该流程包括二氧化碳压缩和液氨加压输送、尿素合成、未转化为尿素的氨基甲酸铵分解，分解后氨和二氧化碳的循环使用及尿素溶液的蒸发浓缩和造粒等。图 1-2 是以水为吸收剂回收氨和二氧化碳生产尿素的工艺流程简图。

液氨经加压泵 1 加压到 20 MPa 并经液氨预热器预热到 45~55 后进入合成塔 4 二氧化碳经压缩机 3 压缩到 20 MPa 温度约 125 后也送入合成塔 4，进入合成塔 4 的还有循环使用的氨基甲酸铵溶液。物料在合成塔内先反应生成氨基甲酸铵，然后脱水生成尿素。二氧化碳的转化率为 62% ~ 64%。从合成塔顶部排出的物料含有尿素、未转化成尿素的氨基甲酸铵、氨和水等，经减压后依次进入预分解器 5 中压及低压分解塔 6, 7 通过加热和降压使溶液中溶解的氨和二氧化碳以及氨基甲酸铵分解产生的氨及二氧化碳与溶液分离后，自预分解器、中压及低压分解塔顶部排出送入回收系统回收。由低压分解塔底部排出的尿素水溶液被送入闪蒸槽 8，在负压下分离出少量的氨、二氧化碳和水蒸气后再经过两段蒸发脱水浓缩，得质量分数为 99.7% 的尿素，最后将熔融状态的尿素送入造粒塔 14 造粒，即得粒状尿素产品。

由图 1-1 和图 1-2 可见，尿素生产工艺流程是由反应过程和单元操作过程组合而成的。其中，反应过程有尿素合成、氨基甲酸铵脱水分解；而单元操作则包括了物料输送、传热、蒸发和蒸馏等过程。

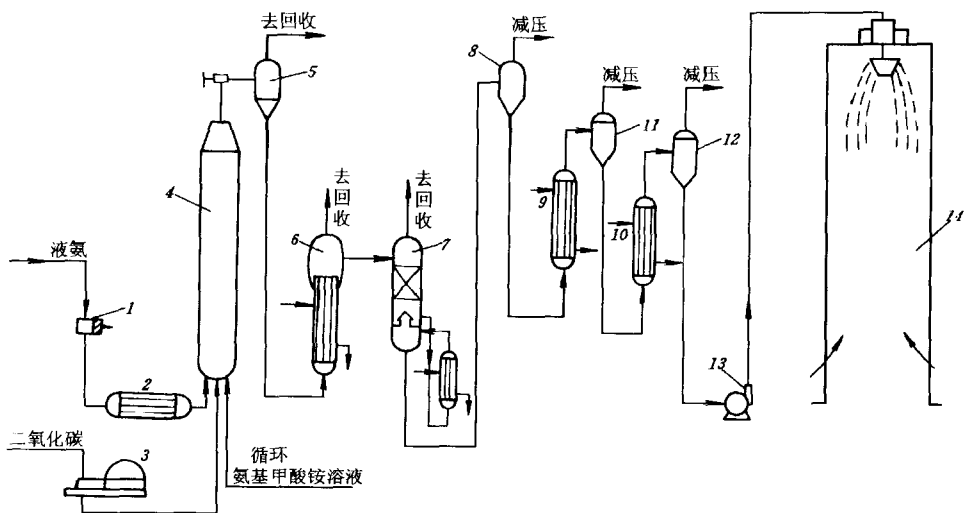


图 1-2 尿素生产流程简图

1—液氨加压机; 2—液氨预热器; 3—二氧化碳压缩机; 4—合成塔; 5—预分解器; 6, 7—中压、低压分解塔; 8—闪蒸槽; 9, 10—一、二段蒸发加热器; 11, 12—一、二段蒸发分离器; 13—熔融尿素泵; 14—造粒塔

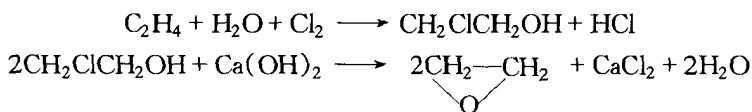
2-2 三废治理和环境保护

化学工业是环境污染大户，我国化学工业每年排放的废渣、废水和废气分别占全国工业“三废”排放总量的 8%~10%、20%~30% 和 5%~7% 居第九位、第二位和第三位，而排放的汞、氟、砷、铬和酚等污染物则居全国各工业部门之首。化学工业对环境造成的污染已成为制约其发展的重要因素，因此，应将发展化学工业和解决自身污染同时并举。

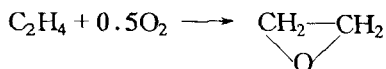
化学工业排放的废渣主要来自两个方面，一是生产化学品时的固体排泄物，二是社会消费后废弃的塑料、化纤等制品。例如，用硫铁矿作原料生产 1 吨硫酸要排放出 500 kg 废渣（主要成分为氧化铁）生产 1 吨磷酸要排放 5 吨磷石膏（主要成分为硫酸钙）；以煤为原料制备氮、氢混合气合成氨时，1 吨合成氨要排放出 750 kg 煤渣等等。从环境保护出发对这些废渣必须进行处理。事实上许多废渣都是可以利用的。如硫铁矿废渣可以制成氧化铁红颜料；磷石膏和煤渣可以用来生产建筑材料。至于废弃的塑料制品则可以加工成液体燃料和涂料等加以利用。

水对化学工业是十分重要的，被广泛地用来作为反应物、溶剂、洗涤剂 and 冷却剂等。化学工业生产排放的废水多数都含有有害物质。例如，电镀及生产颜

料和催化剂的工业废水常含有六价铬；炼油厂的工业废水含有酚、硫化物及油污。这些有害物质对人体和自然生态的危害都很大，必须加以治理。治理废水的措施首先是采用排污量少的生产工艺。例如生产环氧乙烷有氯乙醇法：



和直接氧化法：



前者对原料纯度要求不高，但废水和废渣多，且 HCl 和 Cl₂ 对设备腐蚀严重；后者可以显著减少废水排放量。从保护环境考虑，在选择生产工艺路线时，应选择后者而不是前者。其次，在化工生产中应对废水进行净化，其方法有物理净化、化学净化、生物净化和化学物理净化等。在净化水过程中，多数情况是根据废水的性质，数量以及要求达到的排放标准选用几种方法进行综合处理。

废水净化标准分为一级、二级和三级。一级净化主要采用中和、沉淀、过滤，浮选和除油等措施除去悬浮油类、固体悬浮物和胶体物质等。二级净化采用生物方法除去可分解或可氧化的有机物质和有机胶质悬浮物。通常经过两级处理后即可排放。若排放标准要求较高，可进行三级净化，三级净化所采用的方法是用活性炭吸附、离子交换、反渗透和化学氧化法等处理难于分解的有机物和溶液中的无机物。

化工生产中排放的各种废气对空气必然产生一定程度的污染，例如，丙烯氨氧化生产丙烯腈时，排放的气体中含有乙腈、氢氰酸、乙醛和二氧化碳等，燃烧煤、石油和天然气则产生大量二氧化碳、二氧化硫和氮氧化物等。大气中二氧化硫和氮氧化物含量增加已形成了对自然生态产生严重影响的酸雨。我国的酸雨主要分布在黄河以南，尤其以四川、贵州和广西等地最为严重，影响了农作物生长和人民生活。

关于废气的治理，首先是回收利用，例如，二氧化碳可以用来生产尿素。其次是净化，常用的方法有化学法，吸附和吸收法等，如用碱液除去气体中的氮氧化物，用活性炭、分子筛吸附气体中的碳氢化合物等。

总之，化学工业虽然是环境污染大户，但只要在生产过程中将废渣、废水和废气加以治理，使之成为有用产品或消除毒害达到无毒排放标准，就不会对环境造成危害。

§ 3 化学工程学科

化学工程学是研究化学工业生产中有关化学过程和物理过程规律的一门工

程学科是20世纪形成和发展起来的。1901年英国戴维斯 G E 首次提出了单元操作的概念,随后,化学工程学科迅速发展,各二级学科先后诞生,并与生物、材料、资源和环境学科紧密结合,产生了一些新的交叉学科,形成了今天化学工程学科蓬勃发展的新局面。

3-1 化学工程学的內容

化学工程学包括以下內容:

1. 单元操作

单元操作是指化工生产过程中进行的固体和流体物料输送,非均一系分离,加热和冷却、蒸发、吸收、蒸馏、萃取以及干燥等基本操作的总称,是化学工程中形成最早的学科分支。各种化工产品的生产过程虽然各不相同,但反应过程的前后处理都是由上述一些单元操作组合的,其中混合物料的分离在化工生产中占有重要的地位。

单元操作需阐明的內容包括:每一种操作的基本原理、设备的结构和特性、工程计算方法、强化生产的措施以及发展方向等。

2. 传递过程

在化工单元操作的形成和发展中,人们发现,不同的化工单元操作分别遵循着动量传递、热量传递和质量传递的基本规律(见表1-7)传递过程是它们的

表 1-7 单元操作及其分类

基本规律	过程	单元操作	在化工生产中的应用
流体动力学规律	流体流动 (或动量传递)	流体输送	流体输送,增压和减压
		搅拌	物料的混合和分散
		沉降 过滤 离心分离	非均一系分离
		固体流态化	粒状固体物料的输送和混合等
与流体流动有关的传热学规律	传热过程	传热	加热、冷却、保温和热交换
		蒸发	挥发性溶剂和不挥发溶质的分离
与流体流动和传热有关的物质相际扩散	传质过程	结晶	溶剂和固体溶质的分离
		吸收	气体混合物分离
		吸附	气体和液体混合物分离
		蒸馏	液体和液化气体混合物分离
		萃取、浸取	液体和固体混合物分离
		干燥	去湿

总称,是 20 世纪 50 年代形成的一个新的学科分支。它将众多单元操作归纳为三种传递过程来加以研究,有利于揭示化工过程之间的内在联系和基本规律,提高对化工过程基本规律的认识,从而为各种单元操作的工程计算、过程放大、设备结构改进提供合理方法和理论依据。

在单元操作中,还有固体物料的粉碎和筛析,由于不属于三种传递过程,故未列入表 1-7,但在化工生产中它们也都是常见的操作。

3. 化学反应工程

化工生产过程的核心是化学反应过程。长期以来对工业化学反应过程的研究,都是按不同产品的生产工艺过程分别进行的,这就是“化学工艺学”和“工业化学”的研究方法。随着石油化工的发展和生产的大型化,在 20 世纪 30 年代,人们开始将动量传递、热量传递以及质量传递原理和化学动力学规律相结合,研究工业反应器内各种传递因素对化学反应过程的影响,并从复杂的现象中抽象出了理想型反应器内进行化学反应的一些共同规律,作为反应器选型、设计计算和过程优化的基础。这就是 1957 年正式定名的“化学反应工程学”。化学反应工程学在化学工程的分支学科中,虽然形成较晚,但发展较快,在短短的数十年之内已经取得了许多研究成果,这些成果为该学科的发展奠定了基础。

4. 化工热力学

化工热力学是化学热力学基本原理应用于化学工程领域而形成的一门学科。主要研究化工过程中各种形式能量之间的相互转换规律和过程趋于平衡的极限条件,如探讨化工生产中的相平衡和化学平衡过程,以及等温过程和绝热过程,流体压缩和膨胀过程,等容和等压过程,等热力学过程为能量的有效利用提供理论依据。此外还包括各种化工热力学数据的测定和计算。

5. 化工系统工程

化工系统工程是将系统工程的理论和方法应用于化学工程领域而形成的一门学科,它以化工生产系统作为研究对象,从系统的整体目标出发,确定该系统在规划、设计、操作、控制和管理等方面的最优决策。

以上五个学科分支,在化工院校都是重要的基础课程。但对于理科化学专业,根据教学基本要求,只介绍几种典型的单元操作过程以及化学反应工程基本原理,其他分支学科的详细内容,请读者参考有关书籍。

3-2 几个常用基本概念

物料衡算、能量衡算和过程速率是化学工程学中最常应用的几个基本概念,在今后学习中将会经常遇到,有必要提前作一简单介绍。关于物料衡算和能量衡算比较容易理解,作衡算时,应先确定衡算对象和范围,其衡算范围可以针对一个设备进行,也可以针对由若干设备组成的部分流程或全流程进行;而衡算对

象可以是物料中的关键组分，也可以是物料的全部组分。若参与衡算的物料和能量随时间而变化，在衡算时则应考虑时间变化对衡算的影响。

物料衡算 物料衡算的依据是质量守恒定律。在任何化工系统中，进入系统的物料量必等于排出系统的物料量与系统中累积的物料量之和，即

$$\text{输入物料量} = \text{输出物料量} + \text{累积物料量}$$

对于定常态操作 无物料积累 则

$$\text{输入物料量} = \text{输出物料量}$$

物料衡算在化学工程学研究 and 化工计算中都十分重要。例如，依据物料衡算可以建立数学模型，确定设备容积大小，判断原料的利用率，计算生产成本，拟定物料综合利用方案和生产工艺流程等。因此，物料衡算是化工工艺和化学工程计算的基础。

能量衡算 能量衡算的依据是能量守恒定律。其衡算关系为：

$$\text{输入能量} = \text{输出能量} + \text{系统中累积的能量}$$

对于伴有反应热效应的反应系统，则为：

$$\text{输入能量} + \text{反应放出正值或吸收负值的能量} = \text{输出能量} + \text{系统中累积的能量}$$

对于定常态操作系统，上述两式中累积项为零。能量衡算也用于建立数学模型，确定设备的传热面积和功率消耗，拟定能量综合利用方案以及确定能量输入或输出的途径和方式（如加热、冷却、增压或减压）等。因此，能量衡算也是化工工艺和化学工程计算的基础。

过程速率 过程速率表示化工过程进行的快慢，是化学工程计算的重要参数。它决定装置和设备的生产能力，其通式为：

$$\text{速率} \propto \frac{\text{过程推动力}}{\text{过程阻力}}$$

不同过程的推动力其内容和形式都不一样。如传热的推动力是温度差，传质的推动力是浓度差，流体流动的推动力是压力差等等。要提高过程速率，除了增加推动力外，也可以减小阻力。例如，加强搅拌可以减小传热阻力提高传热速率。

§ 4 实验室研究与化工生产的差别

从现代化学工业的发展看，无论是大规模的化工原料生产，还是批量小、品种多的精细化学品生产，其工艺技术都是首先从化学实验研究开始，然后经过逐步放大才达到生产规模的，也就是说，实验室研究成果都必须经过一段较长时间而又复杂的开发过程才能实现工业化生产。所以，实验室研究和工业化生产既

有紧密联系又有明显差别。

4-1 化学实验室研究与化工生产的差别

由于化学实验室研究与化工生产两者处理的物料质量相差悬殊，不可避免地形成了许多差异，这些差异都是实验室研究完成之后在技术开发过程中所必须着重研究的问题。

1. 设备大小、结构和材质的差异

实验研究设备的结构与工业生产有较大差别。例如，实验室的反应器体积小，搅拌器速度高，容易使反应器内物料浓度和温度均匀一致。工业反应器体积大，搅拌转速受工艺条件的限制，一般比实验室低得多，而且为了搅拌均匀，强化传热和进出料方便等原因，往往需要在反应器内安装传热盘管、挡板和进、出料管等内部构件。

从设备的材质看，实验室反应器的材质多采用玻璃，透明耐蚀，便于观察，但易碎，温度和压力的可调范围也受到限制。工业反应器则多用金属制造，强度高，但不透明，给观察和计量带来了不便。故常在设备上安装视镜和液面计等部件以便观察。对于处理腐蚀性物料，还需在钢铁壳体内壁搪玻璃、衬钛、衬塑料或衬橡胶，用以增加设备的抗蚀能力。

2. 热量和质量传递过程的差异

在化学反应过程中及时供给和移出热量是保证反应正常进行的必要条件之一。对于实验室用小型反应器，由于反应产生的热效应很小，通过器壁与外界进行热交换，一般都可以满足反应过程对于热交换的要求。当放大反应器的容积时，其器壁面积并不能以相同倍数放大。例如，由直径为 d 、高度为 h 的实验室反应器放大到直径为 D 、高度为 H 的工业反应器时，若 $d/D = h/H = 1/10$ 则工业反应器容积扩大了 1 000 倍，而传热器壁面积却只扩大了 100 倍若不采取强化传热措施 必将引起反应热积聚(放热反应)或供热不足(吸热反应)从而影响反应的正常进行。

此外，工业生产必须考虑物料和能量的综合利用措施，以节约能源和降低成本。在实验室则因物料量少和可利用的热能甚微往往不予考虑。

就物质传递而言，实验室小型反应器内的物料混合较好，浓度比较均匀；而工业反应器内通常都安装了内部构件，且搅拌速度较小，器内某些局部区域的物料流动阻力较大而形成死角，造成反应器内物料浓度和温度不均匀，影响总反应速率。由此导致了实验研究结果与工业生产结果的差别。这就是反应器放大后容易产生放大效应的原因。

3. 操作手段和条件的差异

实验室研究所用的物料量少，一般都是试剂，其纯度较高，工艺条件的控制