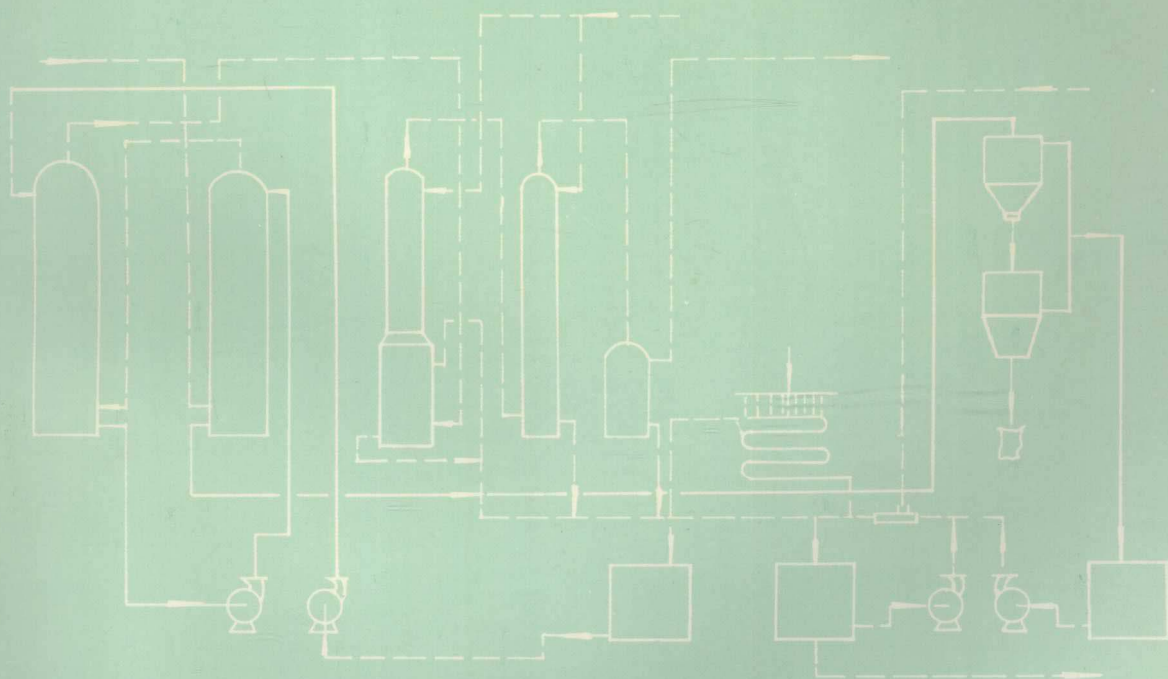


化工工艺学

姚虎卿 刘晓勤 吕效平 编



河海大学出版社

化 工 工 艺 学

姚虎卿
刘晓勤 编
吕效平

河海大学出版社

内 容 提 要

本书论述了基本无机化工和基本有机化工的生产原理和生产方法,介绍了典型的工艺流程和关键设备;并简要介绍了工艺计算方法和技术经济评价方法。

本书可供从事化工生产、设计和管理的技术人员阅读,亦可作为大专院校化工类专业的教材。

化工工艺学

姚虎卿、刘晓勤、吕效平编

出版:河海大学出版社

印刷:南京化工学院印刷厂

开本:787×1092 1/16 字数:416千 印张:16.5

1994年3月第1版 1994年3月第1次印刷

印数:1~4000

书号:ISBN 7-5630-0713-X/0.48 定价:10元

责任编辑:王国仪

特约编辑:丁大锐

封面设计:秋 实

前 言

化工工艺学是运用化工过程的基本原理分析化工产品生产方法的一本专业技术书。虽然化工产品的种类繁多,生产方法各异,但就其生产过程中的每个单元而论,又有许多共性。各种化工产品的工艺过程都是由反应器、分离器、换热器以及机、泵等设备所组成。因此,一本工艺书没有必要将每一个化工产品的加工过程均作论述,而是选择代表性的化工产品,分析其单元过程的筛选及工艺过程的综合方法。

本书的内容是在介绍化学工业概况的基础上,着重论述基本无机化工和基本有机化工产品的生产原理和生产方法。因为这些行业既是化学工业的基础,其工艺过程也具有典型性,掌握基本化工工艺过程,就可以较容易地熟悉其他化工工艺过程。

本书各章虽然是相互独立的,但在每一章均根据其特点侧重介绍了有关基础理论和生产方法,这对其他各章亦有参考作用,且避免了某些基础理论的重复。欲深入掌握化工工艺过程,还需要熟悉工艺计算方法,定量地掌握物料与能量的消耗,以及如何对工艺过程进行优化组合的方法。因限于篇幅,这些内容仅在有关章节作了概括的介绍。

化学工业是一个技术密集的工业,这就要求从事化学工业的工程技术人员不断开发与应用新技术、新工艺、新产品和新设备,以降低生产过程中的原料与能量的消耗,提高经济效益,更好地满足社会的需要。掌握化工工艺学的基本原理和典型的工艺过程,对推动化工过程的技术进步将起到重要的作用。

本书由姚虎卿主编,并编写第一章和第十一章;刘晓勤编写第二~五章;吕效平编写第六~十章。由于化工工艺学涉及的知识面广,加之编者水平有限,时间仓促,书中定有不妥之处,恳请读者指正。

编 者

1993. 12.

目 录

1 概 论	(1)
1.1 化学工业的分类及特征	(1)
1.1.1 化学工业的分类	(1)
1.1.2 化学工业的特征	(1)
1.2 化工原料及产品	(2)
1.2.1 煤及其产品	(2)
1.2.2 石油及其基本产品	(2)
1.2.3 天然气及其产品	(5)
1.2.4 煤、油、气原料的互换性	(5)
1.2.5 化学矿及其产品	(6)
1.3 化工工艺计算	(7)
1.3.1 物料衡算	(7)
1.3.2 热量衡算	(12)
1.4 化工技术经济分析与评价方法	(15)
1.4.1 静态分析法	(15)
1.4.2 动态分析法	(17)
1.4.3 生产成本估算	(17)
2 合成氨	(19)
2.1 原料气的制取	(19)
2.1.1 烃类蒸汽转化	(19)
2.1.2 重油部分氧化	(24)
2.1.3 固体燃料气化	(26)
2.2 原料气的净化	(31)
2.2.1 脱硫	(31)
2.2.2 一氧化碳变换	(33)
2.2.3 二氧化碳的脱除	(37)
2.2.4 少量碳氧化物的清除	(40)
2.2.5 热法与冷法净化流程的比较	(43)
2.3 氨的合成	(44)
2.3.1 氨合成反应的化学平衡	(44)
2.3.2 氨合成反应动力学	(47)
2.3.3 催化剂	(49)
2.3.4 工艺条件的选择	(49)
2.3.5 氨合成工艺流程	(51)

2.3.6	氨合成塔	(53)
3	硫酸	(55)
3.1	二氧化硫炉气的制备	(55)
3.1.1	硫铁矿的焙烧过程	(55)
3.1.2	沸腾焙烧与焙烧炉	(56)
3.1.3	焙烧工艺条件	(57)
3.2	炉气的净化	(57)
3.2.1	炉气净化的方法	(57)
3.2.2	炉气净化的工艺流程	(60)
3.3	二氧化硫的催化氧化	(62)
3.3.1	二氧化硫氧化反应的化学平衡	(62)
3.3.2	二氧化硫氧化反应速度与催化剂	(63)
3.3.3	氧化工艺条件的选择	(65)
3.3.4	二氧化硫转化器	(66)
3.3.5	二氧化硫氧化工艺流程	(68)
3.4	三氧化硫的吸收	(69)
3.4.1	吸收原理	(69)
3.4.2	吸收流程	(70)
3.5	三废治理	(72)
3.5.1	尾气处理	(72)
3.5.2	烧渣的利用	(73)
3.5.3	废液处理	(73)
4	纯碱与烧碱	(75)
4.1	氨碱法制纯碱	(75)
4.1.1	石灰石的煅烧与石灰乳的制备	(75)
4.1.2	盐水的精制与吸氨	(77)
4.1.3	氨盐水的碳酸化	(79)
4.1.4	重碱的煅烧	(83)
4.1.5	氨的回收	(86)
4.1.6	氨碱法制碱生产总流程	(87)
4.2	联合法制取纯碱和氯化铵	(89)
4.2.1	联合制碱法生产原理	(89)
4.2.2	联合制碱法工艺流程	(94)
4.2.3	联合法与氨碱法的比较	(94)
4.3	烧碱	(95)
4.3.1	电解过程的基本原理	(95)
4.3.2	隔膜法电解的工艺流程	(97)
4.3.3	烧碱溶液的蒸发和固碱的生产	(99)
5	化学肥料	(103)

5.1	尿素	(103)
5.1.1	尿素生产的基本原理	(104)
5.1.2	合成过程的适宜条件	(106)
5.1.3	甲铵水溶液循环法生产工艺	(107)
5.1.4	二氧化碳气提法生产工艺	(108)
5.2	碳酸氢铵	(109)
5.2.1	氨水碳化过程原理	(109)
5.2.2	碳化工艺流程	(110)
5.3	过磷酸钙	(111)
5.3.1	过磷酸钙生产原理	(112)
5.3.2	生产工艺条件	(112)
5.3.3	生产工艺流程	(113)
5.4	氯化钾	(114)
5.4.1	溶解结晶法制取氯化钾	(114)
5.4.2	浮选法制取氯化钾	(115)
6	石油炼制	(117)
6.1	原油加工方法及炼油厂类型	(117)
6.1.1	原油加工方法	(117)
6.1.2	炼油厂类型	(117)
6.2	常减压蒸馏	(119)
6.2.1	工艺流程	(119)
6.2.2	工艺操作条件	(120)
6.2.3	常减压蒸馏设备	(121)
6.3	催化裂化	(122)
6.3.1	催化裂化反应	(123)
6.3.2	催化剂	(125)
6.3.3	工艺流程	(126)
6.3.4	工艺参数	(127)
6.3.5	装置型式	(128)
6.4	催化重整	(130)
6.4.1	催化重整反应	(130)
6.4.2	催化剂	(131)
6.4.3	工艺流程	(131)
6.4.4	工艺参数	(133)
6.4.5	重整反应器	(134)
7	烃类裂解及裂解气分离	(135)
7.1	烃类热裂解的理论基础	(135)
7.1.1	烃类裂解反应	(135)
7.1.2	裂解过程的热力学分析	(137)

7.1.3	裂解过程的动力学分析	(138)
7.2	原料性质指标及工艺参数	(140)
7.2.1	原料性质指标及其对裂解过程的影响	(140)
7.2.2	工艺参数	(143)
7.3	裂解工艺过程及设备	(148)
7.3.1	工艺过程	(148)
7.3.2	管式裂解炉	(149)
7.4	裂解气的净化与分离	(153)
7.4.1	裂解气的压缩与净化系统	(154)
7.4.2	精馏分离系统	(158)
8	烷烃系产品	(163)
8.1	甲醇	(163)
8.1.1	合成甲醇的理论基础	(163)
8.1.2	催化剂及其还原条件	(166)
8.1.3	工艺参数	(166)
8.1.4	工艺流程	(167)
8.1.5	联醇法生产甲醇	(169)
8.2	甲醛	(170)
8.2.1	甲醇过量法	(171)
8.2.2	空气过量法	(173)
8.3	醋酸	(175)
8.3.1	甲醇低压碳化法	(175)
8.3.2	乙醛氧化法	(178)
8.4	甲烷氯化物	(180)
8.4.1	甲烷氯化制甲烷氯化物	(181)
8.4.2	三氯乙醛法制三氯甲烷	(183)
9	烯烃系产品	(184)
9.1	乙醇	(184)
9.1.1	硫酸水合法	(184)
9.1.2	直接水合法	(185)
9.2	环氧乙烷和乙二醇	(193)
9.2.1	环氧乙烷	(194)
9.2.2	乙二醇	(200)
9.3	1,2-二氯乙烷和氯乙烯	(201)
9.3.1	1,2-二氯乙烷	(202)
9.3.2	氯乙烯	(208)
9.4	丙烯腈	(213)
9.4.1	丙烯氨氧化反应及工艺参数	(214)
9.4.2	工艺流程	(218)

10 芳烃系产品	(222)
10.1 环丁砜法抽提芳烃	(222)
10.1.1 芳烃抽提过程	(222)
10.1.2 芳烃抽提所用的溶剂	(222)
10.1.3 环丁砜溶剂抽提	(223)
10.2 乙苯和苯乙烯	(225)
10.2.1 乙苯	(225)
10.2.2 苯乙烯	(229)
10.3 苯酚和丙酮	(234)
10.3.1 异丙苯的合成	(235)
10.3.2 异丙苯的氧化反应	(237)
10.3.3 过氧化氢异丙苯的分解	(240)
10.3.4 异丙苯过氧化及 CHP 分解工艺流程	(243)
11 化工工艺过程的分析与综合	(245)
11.1 工艺过程分析	(245)
11.1.1 工艺流程的设置	(245)
11.1.2 反应与分离过程操作参数的关系	(246)
11.1.3 工艺过程中的动力消耗	(246)
11.2 分离方法的选择	(247)
11.2.1 分离方法及其特性	(247)
11.2.2 选择分离方法的经验规则	(247)
11.3 工艺过程中的换热及换热网络	(250)
11.4 工艺过程优化组合方法	(252)
参考文献	(254)

1 概 论

1.1 化学工业的分类及特征

化学工业在国民经济中占有重要的地位,它与许多部门有密切的关系。化学工业既为农业、轻工业、重工业和国防工业等提供生产资料,也为人民生活提供化工产品。化学工业的发展在一定程度上可以反映出一个国家的工业水平和科学技术水平。

1.1.1 化学工业的分类

化学工业是一个范围很广的工业,但有些化工生产,因其经济管理体制和生产的特殊性,已分属其它工业部门,诸如硅酸盐、冶金、纤维素化学和食品化学工业等。

目前,我国化学工业的分类方法主要按产品和原料来分类。

化学工业按产品的物质组成可分为有机化工(碳氢化合物及其衍生物)和无机化工(非碳氢化合物)两大类,而一般是综合考虑产品的性质、用途和生产吨位分为如下几类:

- (1)基本无机化学工业(包括合成氨、无机酸、碱、盐 and 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、酮以及烷烃、烯烃、芳烃系列产品)。
- (3)高分子化学工业(包括合成塑料及树脂、合成纤维、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、医药等)。

化学工业按原料的性质和来源可分为如下几类:

- (1)石油化工 以石油和天然气为原料的化学工业。
- (2)煤化工 通过煤的气化、干馏和生产的电石为原料的化学工业
- (3)生物化工 采用农、林等生物资源以及非生物资源,通过发酵、水解、酶催化而生产的化工产品。
- (4)矿产化工 以化学矿为原料生产的化工产品。
- (5)海洋化工 从海水中提炼化工原料。

在各类化工生产中,基本无机和有机化工产品和其它化工生产的原料,这些产品的吨位较大,其生产工艺过程和单元操作一般也具有典型性。因此,掌握这些工艺过程对熟悉其它化工生产工艺过程具有重要作用。本书重点阐述基本无机和有机化工的工艺过程。

1.1.2 化学工业的特征

现代化学工业一般表现出如下的特征:

- (1)化工工艺方法和设备更新快,产品日新月异,是一个技术密集型的工业。
- (2)多数化学工业,特别是基本化学工业,无论原料和动力,都要消耗能量,是一个能源密集型的工业。
- (3)化工过程往往是易燃、易爆、有毒、有腐蚀的过程,生产条件控制严格,是一个连续性和自动化程度较高的工业。
- (4)为提高经济效益,综合利用资源和能源,基本化学工业均向大型化方向发展。
- (5)化工生产是易产生废气、废水、废渣的过程,为防止污染环境,治理三废是化工生产中

的不可忽视的问题,而治理三废的同时,有时又可得到有价值的副产品。

(6)化工生产是有利于能量综合利用的过程,以节能为主要内容的技术改造,是降低生产能耗,提高经济效益的重要途径。

1.2 化工原料与产品

化学工业最基本的原料是煤、石油、天然气、化学矿以及农林副产物和海洋资源,其中绝大部分基本有机化学工业和部分的基本无机化学工业的原料主要是煤、石油和天然气。目前,世界化学工业主要以石油和天然气为原料,约占 90%以上;而我国的化学工业原料则以煤为主。

由于化工生产有不同的加工深度以及化学反应的可逆性,除最基本的原料(或称起始原料)外,化工原料与产品往往是相对的,有些原料与产品也是可以互换的。

1.2.1 煤及其产品

以煤为原料生产化工产品的历史悠久,我国的煤炭资源极为丰富,目前我国探明的煤炭储量约为 8600 亿吨。因此,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,将是今后重点开发的课题。

煤的品种很多,其结构也很复杂。煤的主要成分是碳、氢和氧,并含有少量的氮、硫、磷等物质,组成有机化合物。各种煤所含的碳、氢、氧元素组成列于表 1-1。

表 1-1 不同煤的主要元素组成

煤的种类	C,m%	H,m%	O,m%
泥 煤	55~70	5~6	25~35
褐 煤	70~80	5~6	15~25
烟 煤	75~90	4~5	5~15
无烟煤	80~95	1~3	2~4

从表中的数据看出,煤中的碳含量由泥煤至无烟煤逐渐增大,而产地不同,各种元素的含量略有不同。作为化工原料,要求煤中的碳含量高,而硫含量低。碳含量为 84m%的煤称为标准煤,各种煤与标准煤可以按碳含量进行折算。

以煤为原料制取化工产品的主要加工方法及其所得的基本产品示于图 1-1。

由图 1-1 看出,以煤为原料,采用不同的加工方法,既可制得无机产品,又可制取烯烃、炔烃和芳烃等有机产品。但是,煤与石油和天然气相比,由于煤中的氢含量太低,生产同一种化工产品时,以煤为原料的成本较高。

1.2.2 石油及其基本产品

石油是重要的化工原料,石油化学工业在国民经济中占有重要地位。在我国,随着大庆、胜利、辽河、华北和中原等油田的相继开发,以及炼油和石油化学工业的发展,使我国化学工业的原料路线和产品结构发生了极大的变化,促进了国民经济的发展。

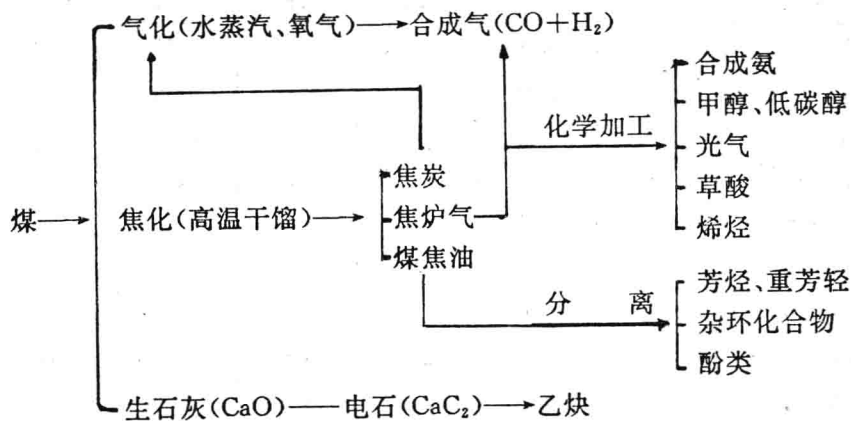


图 1-1 以煤为原料的基本化工产品

从油田开采出来的石油称为原油。原油是一种褐黄色或黑色的粘稠液体，具有特殊气味，原油的化学组成非常复杂，主要是由碳和氢两种元素所组成的各种烃类，并含有少量的氮、氧、硫化物。烃类化合物分为烷烃、环烷烃和芳香烃，原油按其组成大体可分为石蜡基、中间基和环烷基三大类。石蜡基原油含较多的石蜡，烷烃含量超过 50%，密度小，凝固点高，含硫及胶质较少，大庆原油属于此类。环烷基原油含有较多的环烷烃和芳香烃，密度较大，凝固点低，含硫及胶质较多，沥青亦较多，胜利油田单家寺原油为典型的环烷基原油。中间基原油的性质介于前两类之间。表 1-2 列出了我国主要原油的一般性质。

表 1-2 我国主要原油的一般性质

原 油	大庆	胜利	孤岛	辽河	华北	中原	新疆
密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 20℃	0.8554	0.9005	0.9495	0.9042	0.8837	0.8466	0.8538
运动粘度, $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 50℃	20.19	83.36	333.7	37.26	57.1	10.32	18.80
凝点, ℃	30	28	2	21(倾点)	36	33	12
蜡含量, m%	26.2	14.6	4.9	9.9	22.8	19.7	7.2
沥青质, m%	0	<1	2.9	0	<0.1	0	10.6
胶质, m%	8.9	19.0	24.8	13.7	22.0	9.5	10.6
残炭, m%	2.9	6.4	7.4	4.8	6.7	3.8	2.6
灰分, m%	0.0027	0.02	0.096	0.01	0.0097	—	0.014
元素分析, m%							
碳	85.87	86.26	85.12	86.35	—	—	86.13
氢	13.73	12.20	11.61	12.90	—	—	13.30

(续表)

原油	大庆	胜利	孤岛	辽河	华北	中原	新疆
硫	0.10	0.80	2.09	0.18	0.31	0.52	0.05
氮	0.16	0.41	0.43	0.31	0.38	0.17	0.13
馏程							
初馏点, °C	85	95	—	—	85	—	70
馏出率, %							
100°C	2.0	—	—	2.9	—	8.10	2.5
120°C	4.0	2.0	—	3.9	1.0	10.0	3.5
140°C	6.0	2.5	2.4	4.9	3.5	12.5	6.0
160°C	8.5	4.0	3.2	6.3	6.0	14.8	11.0
180°C	10.0	5.5	4.5	7.8	8.5	17.2	13.5
200°C	12.5	7.5	6.1	9.4	10.0	19.4	16.0
220°C	14.0	8.5	7.1	11.4	12.5	22.5	20.3
240°C	16.0	10.5	8.2	13.4	15.0	26.0	23.5
260°C	18.5	12.5	9.9	16.0	18.5	28.5	27.0
280°C	21.0	14.5	12.1	19.1	22.5	31.3	30.5
300°C	24.0	18.0	14.3	22.1	26.0	35.3	34.5
原油分类	低硫、 石蜡基	含硫、 中间基	含硫环烷、 中间基	低硫、 中间基	低硫、 石蜡基	含硫、 石蜡基	低硫、 石蜡中间基

石油的类别不同,采用的加工方法亦不相同。以石油为原料加工出来的产品甚多,按其特性和用途可分为燃料油(汽油、煤油、柴油)、润滑油、石蜡、沥青、石油焦以及基本化工产品六大类。基本化工产品为烯烃(乙烯和丙烯)、芳烃(苯、甲苯、二甲苯)、液化石油气和合成气等。以这些物质为原料进一步加工,可以制得各种各样的化工产品和日用产品。

从石油加工的基本化工产品中,乙烯占有重要的地位。从乙烯出发可以制取许多产品,现将部分的乙烯系统的产品示于图 1-2。

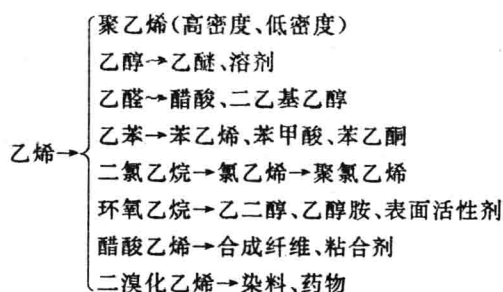


图 1-2 以乙烯为原料的部分产品

1.2.3 天然气及其产品

天然气是埋藏在不同深度地层中的气体,大多数气田的天然气是可燃性的,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。天然气的来源可分为伴生气和非伴生气。伴生气是伴随石油共生,通称为油田气;非伴生气为单独的气田资源,纯气田的天然气主要成分是甲烷。天然气有干气和湿气以及贫气和富气之分。一般每 m^3 气体中 C_5 以上重质烃含量低于 13.5cm^3 (液体)的为干气,高于此值为湿气;含 C_3 以上烃类超过 94cm^3 (液体)的为富气,低于此值为贫气,表 1-3 列出了四川某些气田的天然气组成。

表 1-3 四川省某些气田的天然气组成

产地	组 成, %									
	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	CO_2	H_2S	H_2	N_2	He
庙高寺	96.42	0.73	0.14	0.04			0.69		1.93	0.05
自流井	97.12	0.56	0.07			1.135	0.02	0.002	1.06	0.032
中 坝	82.98	1.69	0.68	0.72	0.76	4.51	6.75	0.05	0.67	
相国寺	97.62	0.92	0.07			0.16	0.01	0.013	1.13	0.076

天然气作为化工原料时,主要是制取合成气,而进一步加工成各种化工产品;湿天然气和油田气中 C_2 以上的组分是用于裂解制取乙烯和丙烯的重要原料。用天然气为原料加工的基本化工产品,其成本一般均较低。

1.2.4 煤、油、气原料的互换性

作为化学工业原料的煤、石油和天然气,在生产化工产品时,是有互换性的,即同一产品可以用不同原料来生产。这体现了化工原料多样化的特点,合成氨生产是其典型的例子。天然气、焦炉气、各类油品以及煤都可以生产出合成气($\text{CO} + \text{H}_2$),而由合成气又可以生产出许多化工产品。

但是,原料不同,生产方法和工艺流程均不相同,过程的能量消耗和技术经济指标也有较大的差别。表 1-4 列出用不同原料生产合成氨的投资、成本和能耗。

表 1-4 不同原料生产合成氨的经济指标

原 料	无烟煤	天然气	石脑油	重 油
建厂投资	100	85~90	85~90	90~95
吨氨成本	100	50~60	70~80	70~80
吨氨能耗	100	70~75	70~80	~90

表 1-4 表明,各项指标均以天然气为最低,而以煤为最高。这说明,用轻质原料可以取得较好的技术经济效果。一般来说,原料中的氢碳比越高,加工过程越简单,成本也越低。因此,天然气和轻质油品是化学工业,特别是基本有机化学工业的理想原料。用石油为原料生产基本有机化工产品,与用煤为原料制取合成气,再进一步加工得到同样产品相比,其成本一般低

25%左右。这就是目前石油化工比煤化工发展快的主要原因。

以煤为原料生产化工产品的成本虽然较高,但采用炼焦产生的焦炉气或其它过程副产的CO和H₂生产化工产品,其经济效益往往优于天然气和石油为原料所得的同样产品。从长远来看,天然气和石油的储藏量逐渐减少,开采的成本将逐渐提高,而煤的蕴藏量丰富,故煤化工必将有较大的发展。

1.2.5 化学矿及其产品

固体化学矿的种类甚多,大多数化学矿是以化合物的形态存在,且含有多种元素。通常把某种元素在矿石中含量的高低分为高品位矿和低品位矿,低品位矿必须通过选矿富集才能作为原料。化学矿主要用于制取金属和无机盐类产品。化学矿的加工方法主要有热化学加工(煅烧、焙烧等)、浸取分离、萃取分离、提取分离和电化学等。除热化学加工外,其它各种加工方法是用水或溶剂把所需的金属化合物提取出来,这些方法通称为湿法冶金。某些化学矿物及其制取的主要化工产品列于表1-5。

表1-5 化学矿物及其产品

矿 类	名 称	主要成分	主要产品
石灰石矿	石灰石	CaCO ₃	碳酸盐、钙盐、石灰
铁 矿	磁铁矿	Fe ₃ O ₄	铁
	黄铁矿	FeS ₂	铁、SO ₂ 、硫酸
	硫铁矿	Fe ₅ S ₈ —Fe ₁₆ S ₁₇	SO ₂ 、硫酸
磷 矿	磷灰石	Ca ₅ F(PO ₄) ₃	磷酸、黄磷、磷肥
	磷块岩	Ca ₅ F(PO ₄) ₃	磷酸、黄磷、磷肥
钾 矿	钾石盐	KCl·NaCl	钾盐
	光卤石	KCl·MgCl ₂ ·6H ₂ O	钾盐
	明矾石	K ₂ SO ₄ ·Al ₂ (SO ₄) ₃ ·4Al(OH) ₃	硫酸钾、硫酸铝、氧化铝
铜矿	黄铜矿	Cu ₂ S·Fe ₂ S ₃	铜
	光铜矿	Cu ₂ S	铜
	斑铜矿	Cu ₅ FeS ₄	铜
	赤铜矿	Cu ₂ O	铜
	黑铜矿	CuO	铜
硫酸盐矿	芒 硝	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	硫化碱、泡花碱
	石 膏	CaSO ₄ ·2H ₂ O	建筑材料
镁 矿	菱镁矿	MgCO ₃	镁盐、耐火材料
	白云石		氧化镁、镁盐
	水镁矿		氧化镁
锰 矿	菱锰矿	MnCO ₃	锰矿、活性二氧化锰
	软锰矿	MnO ₂	锰盐、高锰酸钾
铬 矿	铬铁矿	FeCr ₂ O ₄	铬酸酐、铬酸盐、重铬酸盐

(续表)

硼 矿	纤维硼镁矿 硼镁铁矿	$B_2O_3 \cdot 2MgO \cdot H_2O$ $3MgO \cdot FeO \cdot Fe_2O_3 \cdot B_2O_3$	硼砂、硼酸、 硼、铁
钛 矿	金红石 钛铁矿	TiO_2 $FeTiO_3$	钛白、宝石、钛 钛白、钛酸钡
钼 矿	辉钼矿	MoS_2	硫酸钼、钼酸盐
铝 矿	铝土矿 一水硬铝石 一水软铝石 三水铝石 膨润土 高岭土	$Al_2O_3 \cdot 2H_2O$ $\alpha \cdot Al_2O_3 \cdot H_2O$ $\gamma \cdot Al_2O_3 \cdot H_2O$ $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ $(MgCa)O \cdot Al_2O_3 \cdot 5SiO_2 \cdot nH_2O$ $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$	氧化铝、硫酸铝、氢氧化铝 铝化合物 铝化合物 铝化合物 活性白土、油井泥浆调整剂 明矾、分子筛、硫酸铝
沸石矿	沸 石	硅铝酸盐	吸附剂、添加剂
稀土矿	氟碳铈矿 独居矿 磷钇矿	$REFCO_3$ $(Ce, Tn, U)PO_4$ YPO_4	稀土 稀土 稀土

1.3 化工工艺计算

为了确定化工生产过程中物料和能量消耗的数量,定量地掌握生产中各参数之间的关系,判别不合理的因素,提出改进措施,以获得最好的技术经济效益,必须进行化工工艺计算。

化工工艺计算包括物料衡算、能量衡算以及各种设备的工艺计算。在化工过程中,物料和热量的变化是最基本的,故物料衡算和热量衡算是化工工艺过程最主要的计算。

1.3.1 物料衡算

物料衡算的依据是质量守恒定律。对于一个化工系统或化工设备,进入与排出的物料总是相等的。因此,通过物料衡算,可以由已知的物料量计算出未知的物料量。

在化工生产中有间歇操作和连续操作两类。对于间歇操作的过程,一般按每一批进入与排出的物料进行计算;对于连续操作的过程,由于操作条件不随时间而变,故一般以单位时间进入与排出的物料进行计算。

在进行物料衡算时,必须选择某一种物料的数量作为计算的依据,称为物料衡算的基准。基准的物料可以不同于每小时或每批的实际物料量,而是为计算方便来选定。作为基准的物料,既可以选用原料,也可以选用产品;既可以选用总物料,也可以选用某一个组分,这种组分往往选用不发生变化的惰性物料。基准物料常用的单位为 kg 、 Nm^3 或 $kmol$;对于发生复杂化学反应的过程,最好选用元素的 $kmol$ 数。在一个系统中进行各设备的物料衡算时,应采用同一个基准,以避免发生计算错误。

任何一个工艺过程的总物料衡算均为如下的关系。

输入的总物料量 = 输出的总物料量 + 积累的物料量 + 损失的物料量

对于稳定的连续流动过程,无物料的积累,再若过程中无物料的损失,则输入的总物料量 $\sum G_F$ 等于输出的总物料量,即

$$\sum G_F = \sum G_E \quad (1-1)$$

如果未知的物料量只有一项,将可以由式(1-1)求得。在一般情况下,未知的物料量往往不只一项,这就需要分别列出各组分或各元素的物料衡算式,通过求解物料衡算方程组,以求得各项未知的物料量。对于一个欲进行物料衡算的体系(或设备),需要确定总物料衡算式及其中独立物料衡算式的个数。为此,现按照只发生物理变化的过程与发生化学反应的过程两种情况分别进行讨论。

(1)物理变化过程

当体系只发生物理变化时,除了建立总物料衡算式之外,还可以按每一种组分分别建立该组分的物料衡算式。如图1-3所示,湿气体在冷却塔内冷却冷凝时,该物料可看作由干气和水蒸汽两种组分所组成,故可建立如下三个物料衡算式:

总物料衡算式

$$V_F = V_E + W$$

干气体的物料衡算式

$$V_{gF} = V_{gE}$$

水的物料衡算式

$$V_{wF} = V_{wE} + W$$

因为干气体量与水和水蒸汽量之和等于湿气体总量,故上列三个物料衡算式并不是完全独立的,其中的一个物料衡算式可以从另外两个组合得到。就是说,对于由两种组分组成的体系,衡算式总数为三个,而独立的物料衡算式只有两个。由此可以得出,独立的物料衡算式数与组分数是相等的,物料衡算式的总数比组分数多一个。

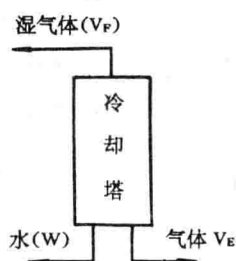


图 1-3 气体冷却冷凝

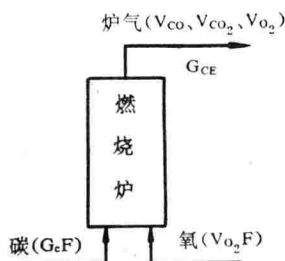


图 1-4 碳与氧燃烧

(2)化学反应过程

对于发生化学反应的过程,建立物料衡算式的方法与物理变化过程有所不同。现以碳与氧燃烧生成一氧化碳和二氧化碳的反应过程为例,说明如何建立物料衡算方程式。如图1-4所示,进入设备的物料为碳和氧,离开设备的物料为碳、氧、一氧化碳和二氧化碳。显然,这个过程不能按照上述物理变化过程那样列出这四种组分的物料衡算式。对于化学反应过程,同一种元素的摩尔数是不变的,故可以按元素的摩尔数列出物料衡算式。

各种元素的物料衡算式如下: