



高等院校化学化工类专业系列教材

Separation Engineering

# 分离工程

■ 主编 赵德明



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS  
浙江大学出版社

Chem

高等院校化学化工类专业系列教材

Separation Engineering

# 分离工程

■ 主编 赵德明



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS  
浙江大学出版社

## 内 容 提 要

本教材从分离过程的特征、分类、研究内容及方法出发,详细地介绍了多组分分离基础、多组分精馏的简捷计算和严格计算、多组分气体吸收和解吸、特殊精馏(包括恒沸精馏、萃取精馏、加盐精馏和反应精馏等)、萃取技术、结晶、其他新型分离方法(吸附、离子交换、膜分离、薄层色谱、柱色谱、纸色谱等)和分离过程及设备的效率与节能等内容。各章均附例题和习题,以利于读者对本书内容的理解和运用。

本书具有“强化基础、拓宽专业、联系实际、信息丰富、启发思维、引导创新和便于自学”等特点,可作为高等院校化学工程与工艺及相关专业本科生的教材,亦可供化工领域从事科研、设计和生产的科技人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

分离工程/赵德明主编. —杭州:浙江大学出版社,  
2011.1

ISBN 978-7-308-08380-5

I. ①分… II. ①赵… III. ①分离—化工过程—高等  
学校:技术学校—教材 IV. ①TQ028

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 013596 号

## 分离工程

赵德明 主编

---

丛书策划 樊晓燕 季 峥

责任编辑 季 峥(really@zju.edu.cn)

封面设计 刘依群

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州大漠照排印刷有限公司

印 刷 杭州印校印务有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 19.5

字 数 512 千

版 次 2011 年 2 月第 1 版 2011 年 2 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-08380-5

定 价 39.00 元

---

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话(0571) 88925591

# 前 言

分离工程是研究化工及其他相关过程中物质的分离和纯化方法的一门技术科学。研究对象是化工及其相关过程中基本的分离单元操作过程。在相当多的生产过程中,它对生产成本、产品质量和对环境的污染程度等起到了关键甚至决定性的作用。它为石化工业、无机和有机化学工业、石油加工、资源和能源工业、材料工业、聚合物加工、生化工业、制药工业、环境保护、核工业等许多国民经济重要工业领域的成长和技术进步作出了极其重要的贡献。随着现代科学技术的发展,尤其是以新能源、新材料、电子和信息技术、现代生物技术、环境保护技术、可再生资源利用技术等为代表的高新科技的兴起和发展向分离技术提出了新的艰巨挑战,这使得分离工程成为近半个世纪以来发展最为迅速的化学工程技术之一。因此,分离工程在提高化工生产过程的经济效益和社会效益上起着举足轻重的作用。

分离工程作为化工专业及其相关专业的一门骨干课程,具有应用性和实践性较强,内容涉猎面广、跨度大、知识点多等特点。它在化工生产实际中,在化工类及相关专业的人才培养中有着重要的地位和作用。分离工程课程是在学习化工热力学、物理化学、化工原理、化学反应工程等专业课基础上的提升。本教材注意与先修专业基础课的衔接,在内容上突出传质分离过程的基础理论,并注重培养学生理论联系实际的能力,拓宽其在分离工程领域的知识面,以适应多种专业化方向和化工企业对人才培养的需要。

根据化工类专业的培养目标和培养方向,我们编写了《分离工程》,以适应培养新世纪高水平专业技术人才的需要。本教材定位为应用型本科教材,使用对象为教学研究型与教学型学校的学生,面向化工生产实际,面向就业,突出应用性;编写原则是强化基础、拓宽专业、联系实际、信息丰富、启发思维、引导创新和便于自学。学生通过本课程的学习,应掌握传质过程和分离工程的基本理论,了解重要的分离单元操作及其设计、计算、应用基础,重视现代分离技术及其前沿发展,有利于培养扎实的理论基础、活跃的创新意识、分析和解决实际问题能力以及利用先进的研究手段从事相关领域研究的能力。

本书包括分离过程介绍、多组分分离基础、多组分精馏的简捷计算和严格计算、多组分气体吸收和解吸、特殊精馏(包括恒沸精馏、萃取精馏、加盐精馏和反应精馏等)、萃取技术、结晶过程、其他新型分离方法(包括吸附、离子交换、膜分离、薄层色谱、柱色谱和纸色谱等)和分离过程及设备的效率与节能等内容。它以分离工程设计为主线,注重理论联系实际,密

切结合工程实际问题,内容由浅入深、循序渐进,力求概念清晰、层次分明,便于自学。本书可作为高等院校化学工程与工艺及相关专业本科生的教材,亦可供化工领域从事科研、设计和生产的科技人员参考。

本书由浙江工业大学赵德明主编,其中第1、3、6~9章由赵德明编写,第5章由浙江工业大学金鑫丽编写,第2章和第4章由赵德明和金鑫丽共同编写。最后,感谢李敏和竺三奇等同学在文字输入、插图的绘制和书稿校验等方面给予的帮助,特别是对李敏同学付出的大量辛勤劳动表示感谢。

分离过程种类繁多,而且新的分离过程不断出现,限于编写人员水平有限,书中不妥之处在所难免,衷心希望广大读者和有关专家学者予以批评指正。

编者

2010年10月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 分离过程的重要性 .....	1
1.1.1 分离技术的发展历程 .....	1
1.1.2 分离过程在工业生产中的地位和作用 .....	2
1.2 分离过程的特征及分类 .....	5
1.2.1 分离过程的定义 .....	5
1.2.2 分离过程的特征 .....	6
1.2.3 分离过程的分类 .....	6
1.2.4 分离过程的研究特点 .....	7
1.3 分离工程实例 .....	8
<b>第 2 章 多组分分离基础</b> .....	11
2.1 多元物系的气液相平衡及其计算 .....	11
2.1.1 气液相平衡的物系分类 .....	11
2.1.2 非理想溶液的相平衡关系与活度系数的计算 .....	12
2.1.3 多组分物系泡点与露点的计算 .....	18
2.2 多组分单级平衡分离 .....	27
2.2.1 部分气化和冷凝 .....	27
2.2.2 等温闪蒸 .....	31
2.2.3 绝热闪蒸 .....	32
<b>第 3 章 多组分精馏</b> .....	41
3.1 多组分简单精馏塔 .....	41
3.1.1 精馏过程分析 .....	41
3.1.2 设计变量的确定 .....	44
3.1.3 简捷算法 .....	46
3.1.4 逐板算法 .....	61
3.2 多组分复杂精馏塔 .....	64
3.2.1 精馏塔流程 .....	64
3.2.2 简捷算法 .....	65
3.2.3 严格逐板算法 .....	72
<b>第 4 章 特殊精馏</b> .....	80
4.1 恒沸精馏 .....	80

4.1.1	恒沸物的形成与特性	81
4.1.2	恒沸剂选择和恒沸精馏流程	84
4.1.3	恒沸精馏过程的计算	89
4.2	萃取精馏	107
4.2.1	萃取精馏的基本原理	107
4.2.2	萃取剂的选择	109
4.2.3	萃取精馏流程	112
4.2.4	萃取精馏的计算	113
4.2.5	萃取精馏与恒沸精馏的比较	122
4.3	加盐萃取精馏	122
4.3.1	盐效应及其对气液相平衡的影响	122
4.3.2	溶盐精馏	124
4.3.3	加盐萃取精馏	125
4.4	反应精馏	126
4.4.1	反应精馏的应用	126
4.4.2	反应精馏过程	129
<b>第 5 章</b>	<b>多组分吸收和解吸</b>	<b>140</b>
5.1	吸收分离概述	140
5.1.1	吸收过程的分类及应用	140
5.1.2	吸收过程的基本原理	142
5.1.3	吸收过程流程	145
5.1.4	多组分吸收过程的特点	147
5.2	多组分吸收过程的计算	147
5.2.1	吸收塔的简捷算法	148
5.2.2	吸收塔的逐板算法	159
5.3	吸收过程操作条件及因素分析	166
5.3.1	吸收过程的必要条件和限度	166
5.3.2	吸收过程的操作因素	167
5.3.3	吸收剂的选择	168
5.4	吸收塔的热量平衡	169
5.4.1	吸收过程的热效应	169
5.4.2	吸收塔的热平衡方法及其应用	169
5.5	多组分吸收液的解吸	172
5.5.1	解吸的方法	172
5.5.2	解吸过程的计算	173
5.6	吸收蒸出塔	174
5.6.1	吸收蒸出塔的物质平衡	175
5.6.2	吸收蒸出塔的工艺计算	176
<b>第 6 章</b>	<b>萃取技术</b>	<b>182</b>
6.1	液液萃取	182

6.1.1 液液萃取的基本概念和理论 .....	182
6.1.2 萃取过程与萃取剂 .....	186
6.1.3 液液萃取过程的计算 .....	188
6.1.4 液液萃取设备 .....	196
6.2 双水相萃取 .....	199
6.2.1 双水相体系 .....	199
6.2.2 双水相体系的成相条件 .....	199
6.2.3 双水相萃取的特点 .....	200
6.2.4 影响双水相体系的因素 .....	200
6.2.5 双水相萃取的应用 .....	201
6.3 反胶团萃取 .....	201
6.3.1 反胶团形成过程及其特性 .....	201
6.3.2 反胶团萃取溶解作用 .....	202
6.3.3 反胶团萃取过程及其应用 .....	203
6.4 超临界流体萃取 .....	205
6.4.1 超临界流体及其性质 .....	205
6.4.2 超临界流体萃取热力学和动力学 .....	207
6.4.3 超临界流体萃取的基本原理及流程 .....	207
6.4.4 超临界流体萃取过程的影响因素 .....	208
6.4.5 超临界流体萃取的应用 .....	209
<b>第7章 结晶 .....</b>	<b>211</b>
7.1 结晶过程概述 .....	211
7.1.1 结晶的基本概念 .....	211
7.1.2 结晶过程 .....	213
7.2 溶液结晶基础 .....	213
7.2.1 溶解度 .....	213
7.2.2 结晶机理和动力学 .....	217
7.2.3 结晶的粒数衡算和粒度分布 .....	222
7.2.4 收率的计算 .....	226
7.3 熔融结晶基础 .....	228
7.3.1 固液相平衡 .....	229
7.3.2 熔融结晶动力学分析 .....	230
7.4 结晶过程与设备 .....	233
7.4.1 溶液结晶类型和设备 .....	233
7.4.2 熔融结晶过程和设备 .....	236
<b>第8章 新型分离方法 .....</b>	<b>241</b>
8.1 吸附 .....	241
8.1.1 吸附现象与吸附剂 .....	241
8.1.2 吸附平衡与速率 .....	246



8.1.3	固定床吸附过程 .....	252
8.1.4	变压吸附过程 .....	258
8.2	离子交换 .....	260
8.2.1	离子交换过程 .....	261
8.2.2	离子交换树脂 .....	262
8.2.3	离子交换的基本原理 .....	263
8.2.4	离子交换树脂的选用 .....	264
8.2.5	离子交换过程设备与操作 .....	265
8.2.6	离子交换过程的计算 .....	266
8.3	膜分离过程 .....	270
8.3.1	反渗透 .....	270
8.3.2	纳滤 .....	273
8.3.4	微滤和超滤 .....	274
8.3.5	电渗析 .....	277
8.3.6	气体膜分离 .....	278
8.3.7	液膜分离 .....	281
8.4	色谱法 .....	284
8.4.1	薄层色谱法 .....	284
8.4.2	纸色谱法 .....	287
8.4.3	柱色谱法 .....	288
<b>第9章</b>	<b>分离过程的节能 .....</b>	<b>291</b>
9.1	分离过程节能的基本概念及热力学分析 .....	291
9.1.1	有效能(熵)衡算 .....	291
9.1.2	等温分离最小功 .....	292
9.1.3	非等温分离最小功 .....	293
9.1.4	净功耗 .....	294
9.1.5	热力学效率 .....	294
9.2	精馏节能技术 .....	294
9.2.1	设置中间冷凝器和中间再沸器的精馏 .....	295
9.2.2	多效精馏 .....	295
9.2.3	热泵精馏 .....	297
9.3	有关分离操作的节能经验规则 .....	297
9.4	分离过程系统合成 .....	298
9.4.1	分离序列数 .....	298
9.4.2	分离序列的合成方法 .....	300
9.4.3	复杂塔的分离序列 .....	302

# 第 1 章

## 绪 论

基本有机化工生产的产品种类繁多,生产方法各异,但都有原料预处理、化学反应和加工精制等过程。原料预处理之所以必要,是因为存在于自然界的原料多数是不纯的。例如,石油是由多种碳氢化合物组成的液体混合物,煤也是复杂的多组分固体混合物,其中有我们需要的物质,也有我们不需要的甚至有害的物质。如果直接采用这样的原料去进行化学反应,让那些与反应无关的多余组分一起通过反应器,轻则影响反应器的处理能力,使生成的产物组成复杂化,重则损坏催化剂和设备,使反应无法顺利进行。因此,反应前的分离操作往往是必不可少的。

至于反应器出来的中间产物或粗产品需要分离,其理由也是十分明显。这是因为,绝大多数有机化学反应都不是百分之百地完成,而且除主反应外尚有副反应发生,出反应器的产物往往是由目的产物、副产物和未反应的原料组成的,要得到产品,必须进行分离。

在实际产品的生产中,尽管反应器是至关重要的设备,但我们往往发现在整个流程中,分离设备在数量上远远超过反应设备,在投资上也不在反应设备以下,而消耗于分离的能量和操作费用在产品成本中也占极大的比重。因此,对分离过程必须予以极大的重视。

### 1.1 分离过程的重要性

#### 1.1.1 分离技术的发展历程

在化学工业的发展过程中,人们最初以具体产品为对象,分别进行各种产品的生产过程和设备的研究。随着化工生产的发展,人们逐渐认识到,其生产过程显著特点是所用原料广泛,生产工艺不同,产品品种繁杂,性质各异。但归纳起来,各个生产工艺都遵循相同的规律,即都可以由分离过程的基本操作和化学反应过程所组成,如图 1-1 所示。

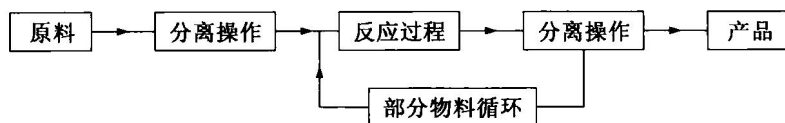


图 1-1 一般情况下产品的生产过程

化工分离技术是伴随着化学工业的发展而逐渐形成和发展的。现代化学工业出现于 18 世纪产业革命以后的欧洲,当时,纯碱和硫酸的制备及应用等无机化学工业成为现代化学工业的开端。19 世纪,以煤为基础原料的有机化工在欧洲也发展起来,当时的煤化学工业主要着眼于苯、甲苯和酚等各种化学产品的开发,在这些化工生产中应用了吸收、蒸馏、过滤和干燥等操作。19 世纪末 20 世纪初,大规模的石油炼制促进了化工分离技术的成熟与完善。20 世纪 30 年代,美国出版了第一部《化学工程原理》。50 年代中期提出传递过程原理,把单元操作进一步解析成三种基本传递过程,即动量传递、热量传递和质量传递。进入 20 世纪 70 年代以后,化工分离技术向高级化、应用广泛化发展。与此同时,化学分离技术与其他科学技术相互交叉渗透,产生了一些更新的边缘分离技术,如生物分离技术、膜分离技术、环境化学分离技术、纳米分离技术和超临界流体萃取等技术。展望 21 世纪,化工分离技术将面临一系列新的挑战,其中最主要的来自能源、原料和环境保护三大方面。此外,化工分离技术还将对农业、食品和食品加工、城市交通和建设等作出贡献。

近几年来,科技人员在分离过程及设备的强化和提高效率、分离技术研究和过程模拟、分离新技术开发几个主要方面做了大量的工作,取得了一定的成果。通过这些研究成果在工业上的应用,强化了现有的生产过程和设备,在降低能耗、提高效率、开发新技术和设备、实现生产控制和工业设计最优化等方面发挥了巨大作用,同时也促进了化学工业的进一步发展。

需要说明的是,分离技术不仅仅可应用于化学工业。生产实践证明将地球上各种各样混合物进行分离和提纯是提高和改善生活水平的一种重要途径。例如,冶炼术的发明使人类从石器时代进入铜器时代,开始向文明社会进步。放射性铀的同位素分离成功,使人类迎来了原子能时代。将水和空气中的微量杂质除去的分离技术,大幅度提高了超大规模集成电器元件的成品合格率,使它得以实现商业化生产。深冷分离技术可以从混合气体中分离出纯氧、纯氮和纯氢,获得了接近绝对零度的低温,为科学研究和生产技术提供了极为宽广的发展基础,为火箭提供了具有极大推动力的高能燃料。从水中除去盐和有毒物质的蒸馏、吸附、萃取和膜分离等分离技术,使人们能从海水中提取淡水,从污水中回收干净的水和其他有用的东西。当代工业的三大支柱是材料、能源和信息,这三大产业的发展都离不开新的分离技术。人类生活水平进一步提高也有赖于新的分离技术。在 21 世纪,分离技术必将日新月异,再创辉煌。

## 1.1.2 分离过程在工业生产中的地位和作用

### 1. 分离过程在化工生产中的重要性

分离过程是将混合物分成组成互不相同的两种或几种产品的操作。一个典型的化工生产装置通常是由一个反应器(有时多于一个)和具有提纯原料、中间产物和产品的多个分离设备以及泵、换热器等构成。分离操作一方面为化学反应提供符合质量要求的原料,清除对反应或催化剂有害的杂质,减少副反应和提高收率,另一方面对反应产物进行分离提纯,以得到合格的产品,并使未反应的反应物得以循环利用。此外,分离操作在环境保护和充分利用资源方面起着特别重要的作用。因此,分离操作在化工生产中占有十分重要的地位,在提高生产过程的经济效益和产品质量上起举足轻重的作用。对大型的石油工业和以化学反应为中心的石油化工生产过程,分离装置的费用占总投资的 50%~90%。

图 1-2 为乙烯连续水合生产乙醇的工艺流程简图。其核心设备是固定床催化反应器，操作温度约为 300℃，压力为 6.5MPa，反应器中进行的主反应为  $C_2H_4 + H_2O \rightarrow C_2H_5OH$ ，此外乙烯还会发生若干副反应，生成乙醚、异丙醇、乙醛等副产物。由于热力学平衡的限制，乙烯的单程转化率一般仅为 5%，因此必须有较大的循环比。通常，反应产物先经分凝器及水吸收塔与未反应的乙烯分离，后者返回反应系统。反应产物则需经进一步处理以获得合格产品。反应产物从吸收塔出来先送入闪蒸塔，由该塔出来的闪蒸气用水吸收，以防止乙醇损失。反应产物进入粗馏塔，由塔顶蒸出含有乙醚及乙醛的浓缩乙醇，再经气相催化加氢将其中的乙醛转化成乙醇。乙醚在脱轻组分塔蒸出，并送入水吸收塔回收其中夹带的乙醇。最终产品是在产品塔中得到的，在距产品塔顶数块板处引出浓度为 93% 的含水乙醇产品，塔顶引出的轻组分送至催化加氢反应器，废水由塔釜排出。此外尚有一些设备用来浓缩原料乙烯，除去对催化剂有害的杂质以及回收废水中有价值的组分等。由上述流程可以看出。这一生产中所涉及的分离操作很多，有分凝吸收、闪蒸和精馏等。

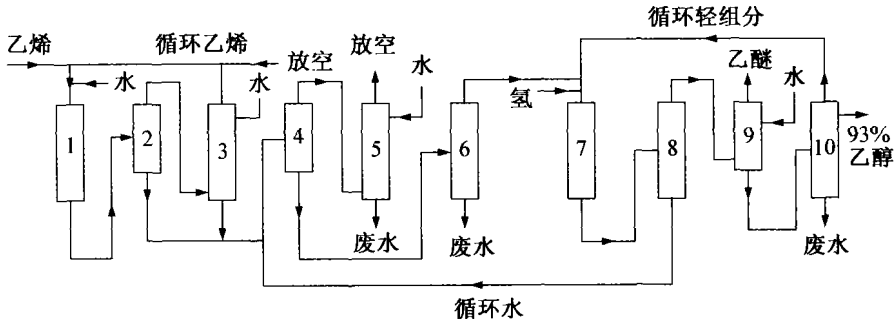


图 1-2 乙烯水合生产乙醇的工艺流程

- 1—固定床催化反应器；2—分凝器；3, 5, 9—吸收塔；4—闪蒸塔；  
6—粗馏塔；7—催化加氢反应器；8—脱轻组分塔；10—产品塔

在某些化工生产中，分离操作就是整个过程的主体部分。例如，石油裂解气的深冷分离、碳四馏分分离生产丁二烯、芳烃分离等过程。图 1-3 为对二甲苯生产流程简图。对二

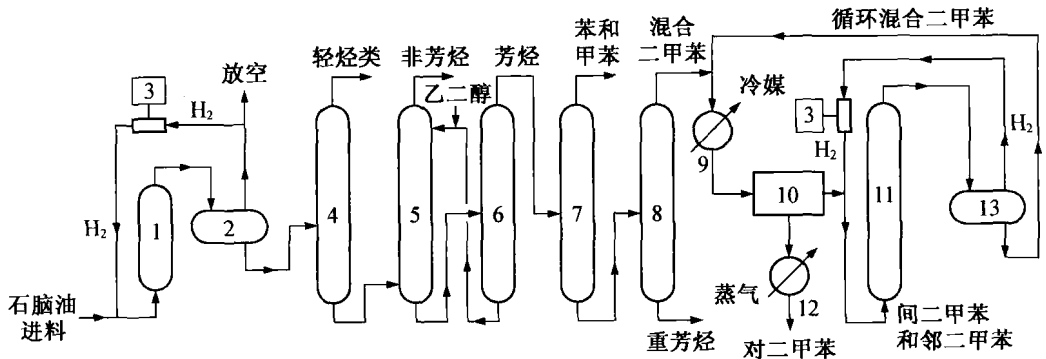


图 1-3 二甲苯生产流程

- 1—重整反应器；2, 13—气液分离器；3—压缩机；4—脱丁烷塔；5—萃取塔；6—再生塔；  
7—甲苯塔；8—二甲苯回收塔；9—冷却器；10—结晶器；11—异构化反应器；12—熔融器

甲苯是一种重要的石油化工产品,主要用于制造对苯二甲酸。将沸程在 120~230K 的石脑油送入重整反应器,使烷烃转化为苯、甲苯、二甲苯和高级芳烃的混合物。该混合烃首先经脱丁烷塔以除去丁烷和轻组分。塔底出料进入液液萃取塔。在此,烃类与不互溶的溶剂(如乙二醇)相接触。芳烃选择性地溶解于溶剂中,而烷烃和环烷烃则不溶。含芳烃的溶剂被送入再生塔中,在此将芳烃从溶剂中分离,溶剂则循环回萃取塔。在流程中,继萃取之后还有两个精馏塔。第一塔用以从二甲苯和重芳烃中脱除苯和甲苯,第二塔是将混合二甲苯中的重芳烃除去。

从二甲苯回收塔塔顶馏出的混合二甲苯经冷却后在结晶器中生成对二甲苯的晶体。通过离心分离或过滤分出晶体,所得的对二甲苯晶体经融化后便是产品。滤液则被送至异构化反应器,在此得到三种二甲苯异构体的平衡混合物,可再循环送去结晶。用这种方法几乎可将二甲苯馏分全部转化为对二甲苯。

上述两例说明了分离过程在石油和化学工业中的重要性。事实上,在医药、材料、冶金、食品、生化、原子能和环保等领域也都广泛地用到分离过程。例如,药物的精制和提纯,从矿产中提取和精选金属,食品的脱水、除去有毒或有害组分,抗菌素的净制和病毒的分离,同位素的分离和重水的制备等,都离不开分离过程。而且这些领域对产品的纯度要求越来越高,对分离、净化、精制等分离技术提出了更多、更高的要求。

随着现代工业趋向大型化生产,所产生的大量废气、废水和废渣等更需集中处理和排放。对各种形式的流出废物进行末端治理,使其达到有关的排放标准,不但涉及物料的综合利用,而且还关系到环境污染和生态平衡。如原子能废水中微量同位素物质,很多工业废气中的硫化氢、二氧化硫和氧化氮等都需妥善处理。

## 2. 分离过程在清洁生产工艺中的地位 and 作用

清洁生产工艺也称少废无废技术。它是面向 21 世纪社会和经济可持续发展的重大课题,也是当今世界科学技术进步的主要内容之一。所谓清洁生产工艺,即将生产工艺和防治污染有机地结合起来,在工艺过程中减少或消灭污染物,从根本上解决工业污染问题。开发和采用清洁生产工艺,既符合“预防优于治理的方针”,同时又降低了原材料和能源的消耗,提高企业的经济效益,是保护生态环境和经济建设协调发展的最佳途径。故清洁生产工艺是一种节能、低耗、高效、安全、无污染的工艺技术。就化学工业而言,清洁生产工艺的本质是合理利用资源,减少甚至消除废料的产生。化学工业是工业污染的大户。化工生产所造成的污染来源于:① 未回收的原料;② 未回收的产品;③ 有用和无用的副产品;④ 原料中的杂质;⑤ 工艺的物料损耗。

化工清洁生产工艺应综合考虑原料的选择、反应路径的洁净化、物料分离技术的选择以及流程和工艺参数的确定等。因为化学反应是化工生产过程的核心,所以废物最小化问题必须首先考虑催化剂、反应工艺及设备,并与分离、再循环系统,换热器网络和公用工程等有机结合起来,作为整个系统予以解决。

化工清洁生产工艺包括的内容很多,其中与化工分离过程密切相关的有:① 低原材料和能源的消耗,提高有效利用率、回收利用率和循环利用率;② 开发和采用新技术、新工艺,改善生产操作条件,以控制和消除污染;③ 采用生产工艺装置系统的闭路循环技术;④ 处理生产中的副产物和废物,减少或消除对环境的危害;⑤ 研究、开发和采用低物耗、低能耗、高效率的“三废”治理技术。因此,清洁生产工艺的开发和采用离不开传统分离技术的改进,新分离技术的研究、开发和工业应用,以及分离过程之间、反应和分离过程

之间的集成化。

闭路循环系统是清洁工艺的重要方面,其核心是将过程中所产生的废物最大限度地回收和循环使用,减少生产过程中排出废物的数量。生产工艺过程的闭路循环见图 1-4。

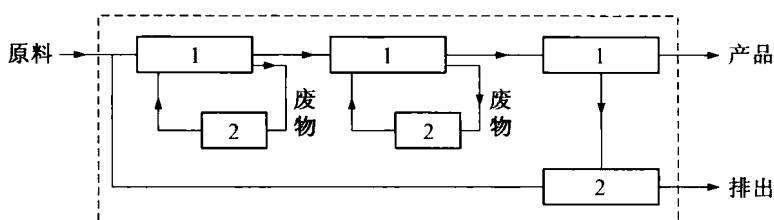


图 1-4 生产工艺过程的闭路循环示意图

1—单元过程;2—处理

如果工艺中的分离系统能够有效地进行分离和再循环,那么该工艺产生的废物就少。实现分离与再循环系统使废物最小化的方法有以下几种:

① 废物直接再循环。在大多数情况下,能直接再循环的废物流常常是废水,虽然它已被污染,但仍然能代替部分新鲜水作为进料使用。

② 进料提纯。如果进料中的杂质参加反应,那么就会使部分原料或产品转变为废物。避免这类废物的产生的最直接方法是净化或提纯进料。如果原料中有用成分浓度不高,则需提浓,例如许多氧化反应首选空气为氧气来源,而用富氧代替空气可提高反应转化率,减少再循环量,在这种情况下可选用气体膜分离法制造富氧空气。

③ 除去分离过程中加入的附加物质。例如在恒沸精馏和萃取精馏中需加入恒沸剂和溶剂,如果这些附加物质能够有效地循环利用,则不会产生太多废物,否则应采取措施降低废物的产生。

④ 附加分离与再循环系统。废物流一旦被丢弃,它含有的任何有用物质也将变为废物。在这种情况下,需要认真确定废物流中有用物质回收率的大小和对环境构成的污染程度,或许增加分离有用物质的设备、将有用物质再循环是比较经济的办法。

上述分析表明,清洁生产工艺除应避免在工艺过程中生成污染物,即从源头减少“三废”之外,生成废物的分离、再循环利用和废物的后处理也是极其重要的,而这后半部分任务大多是由化工分离操作承担和完成的。

上述种种原因都促使传统分离过程(如蒸发、精馏、吸收、吸附、萃取和结晶等)不断改进和发展;同时,新的分离方法(如固膜与液膜分离、热扩散及色层分离等)也不断出现,实现工业化应用。

## 1.2 分离过程的特征及分类

### 1.2.1 分离过程的定义

分离过程定义为,将一混合物转变为组成互不相同的两种或者两种以上产物的操作。

混合是自发过程,分离则是非自发过程。下面通过简单的例子来对分离过程的定义

和特点进行一下解释。例如,水和盐的混合是一个自发的过程,但是从海水中提取盐的分离是非自发的,需要的条件有:① 供给热量,使水沸腾、气化,然后在较低温度下使其冷凝;② 供给冷量,使纯水凝固出来,然后在较高温度下使其融化;③ 将盐水加压,通过特殊的固体膜将水与盐分离。

### 1.2.2 分离过程的特征

在上面的例子中,通过加热等方法实现盐的分离,也就是说通过加入能量实现了分离。下面就分离过程中使用分离剂的情况做一简要介绍。图 1-5 是一个简单的分离过程示意图。

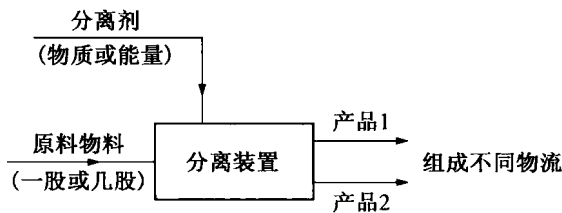


图 1-5 一般分离过程示意图

一股或者几股物流的原料进入分离装置,加入分离剂起分离作用,最后得到至少两股不同组成的产品。通常分离所需输入的能量由分离剂供给,分离剂又常常引起第二相物质的生成。分离剂的分类为:

- ① 能量(热量、冷量或者功)作为分离剂,称为能量分离剂;
- ② 物质(或者另一种原料)作为分离剂,称为质量分离剂;
- ③ 其他分离方法,如某种强制力(压力梯度、温度梯度、电、磁场力)及特殊膜等。

分离过程的特征往往由加入分离剂的性质决定。

### 1.2.3 分离过程的分类

分离过程可分为机械分离过程和传质分离过程两大类。

#### 1. 机械分离过程

机械分离过程在“化工原理”这门课中一些单元操作过程已经讲过,如萃取、过滤、沉降、固液分离和气液分离器等都属于这一类。

#### 2. 传质分离过程

传质分离过程除了机械地将不同相加以分离外,相间还发生物质的传递。当两相平衡时,具有不同的组成,叫平衡分离过程,也可称为相平衡分离,主要根据相平衡实现分离。

依据所加分离剂的不同,分离过程可以分为:

##### (1) 能量分离剂的平衡过程

简单冷凝、简单蒸发、部分冷凝、部分蒸发、节流和减压精馏等均属这类过程,这些过程的共同点是所加分离剂均为能量(热量、冷量、减压等)。

### (2) 质量分离剂的平衡过程

吸收(以不挥发性液体作分离剂)、气提(以不凝性气体作分离剂)、吸附和离子交换(分别以固体吸附剂和树脂作分离剂)及萃取(以不互溶液体作分离剂)等均属这类过程。

### (3) 使用一个以上分离剂的平衡过程

如萃取精馏和恒沸精馏过程就是同时使用能量和质量分离剂(加入热量和适当液体)。

### (4) 速率控制过程

有些过程通过某种介质,在压力、温度、组成、电势或其他梯度所造成的强制力的推动下,依靠传递速率的差别而操作,叫速率控制过程。如电渗析、反渗透和膜分离等均属这类过程。

## 1.2.4 分离工程的研究特点

本课程主要是在物理化学、化工热力学及化工原理等课程的基础上对常用能量分离剂和质量分离剂的平衡过程进行研究,重点讨论多组分多级分离过程,主要包括:① 平衡过程分离过程基本原理及计算;② 分离方法选择;③ 分离过程的节能及优化;④ 分离系统的组织。

在分离过程的热力学计算中,掌握以下几个特点是十分重要的,这也是从事多组分多级分离研究的重要方法。

### 1. 多组分混合物的热物性数据

当对多组分混合物的单个分离过程或整个分离装置进行计算时,即要对各个分离设备的物料与热量进行衡算,又要进行整个分离装置的物料与热量平衡计算。为了进行这些计算,必须有被分离混合物及各个组分的热物性数据。在多数情况下,纯物质的热物性数据可以查到,但对于混合物,由于组成千变万化,在量上没有固定关系,没有现成的数据可供利用。因此,根据纯组分的热物性数据得到混合物的热物性数据是多组分混合物分离计算要解决的首要问题。

### 2. 实际体系的相平衡常数

对由理想气体、理想溶液组成的体系的相平衡常数,可以容易地进行计算;但对于实际体系的相平衡常数的计算则比较困难。平衡常数  $K$  最可靠的数据是通过实验来求得;计算平衡常数则需要用活度系数、逸度系数等对理想体系进行修正。平衡常数的计算是多组分混合物分离过程计算中反复使用的基本运算之一。因此,解决实际体系相平衡常数计算尤为重要。

### 3. 急态的变化

在多组分混合物分离过程中,往往伴随着急态的变化,即出现新的相——液相或气相。因此,计算时需要确定可能出现新相的参数( $T$  或  $p$ )、气体或液体的量及它们的组成,这也是多组分分离过程要解决的基本问题。

### 4. 需用电子计算机作为运算工具

由于多组分混合物分离过程的计算往往需要反复试差、迭代,或需要联立求解线性或非线性方程组,计算工作量大,手工计算很难完成任务,需借助于电子计算机。



### 1.3 分离工程实例

蔗糖的原料是甘蔗或甜菜。通常需要两个阶段的加工,即初加工和精制。初加工一般在原料产地就地加工,得到粗糖。精制是对粗糖进一步加工提纯。

现以甘蔗制糖为例,介绍分离过程在工业上的应用。

#### 1. 初加工(图 1-6)

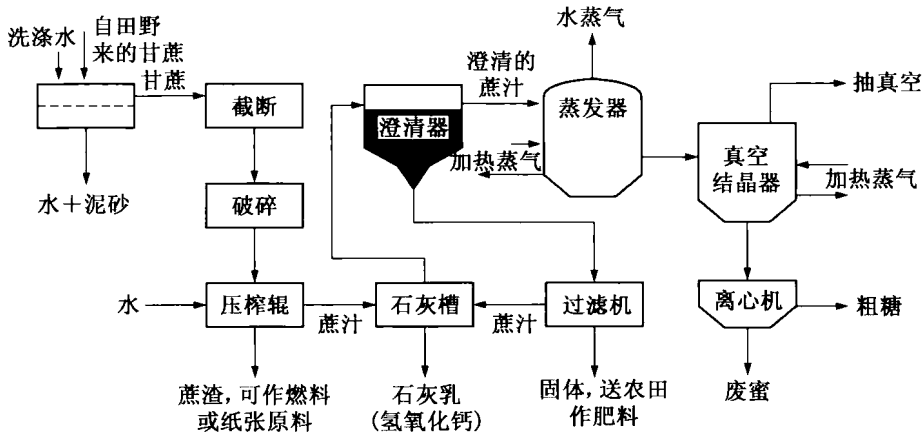


图 1-6 分离工程典型实例——蔗糖的初加工

以甘蔗为原料生产粗糖,即粗糖粗加工的主要过程如下:

- ① 洗涤。原料甘蔗上的泥砂等杂质用喷水的方法洗去。
- ② 压榨。甘蔗-糖汁是一个液固混合物系统,通常在将甘蔗切成细丝后,用压榨机榨出糖汁,蔗渣加水以浸出残留糖分。最终的蔗渣作为副产品可用作燃料或制造绝缘纤维板。
- ③ 糖汁澄清。在糖汁中加入石灰乳( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ),加热,凝聚的胶体物料和不溶的钙盐就沉降出来。沉渣需经过滤以回收残存的糖汁。
- ④ 蒸发、结晶。澄清的糖汁经蒸发器,蒸发出大量的水分,得到约含蔗糖 65%(质量分数,下同)的棕黑色溶液,再至真空锅中煮沸,除去足够的水分,使糖汁成过饱和液而发生蔗糖结晶。
- ⑤ 晶粒离心分离。用离心机将结晶与液体分离,得到含糖量约为 97%的粗糖和废母液——废蜜。

#### 2. 精制(图 1-7)

- ① 混合。将循环糖浆与粗糖混合,软化吸附于晶粒上的糖蜜。
- ② 糖晶粒与糖浆分离。用离心机去除糖浆,得到含糖量为 99%的糖晶粒。糖浆的一部分继续循环使用,其余的经进一步处理回收残存的糖分。
- ③ 糖晶粒用热水溶解以后用氢氧化钙和磷酸处理,使糖中的杂质生成不溶性化合物而沉淀。
- ④ 过滤。用硅藻土过滤去除不溶性化合物。
- ⑤ 炭滤(吸附)。使色素和其他杂质吸附于炭粒表面而被除去。