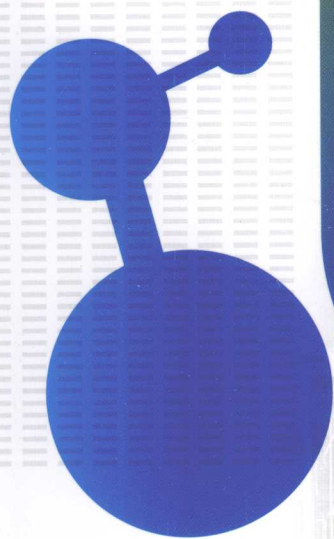




中国石油和化学工业行业规划教材

高职高专化工技术类



# 化工分离技术

HUAGONG FENLI JISHU

潘文群 主编 郝宏强 厉刚 副主编 曹克广 主审

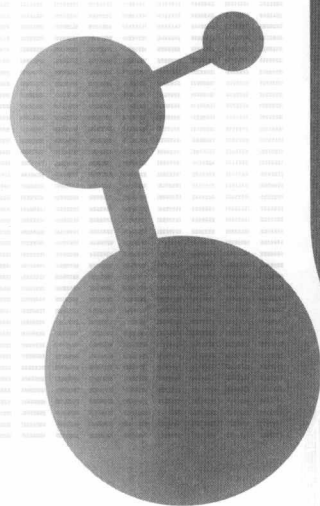


化学工业出版社



中国石油和化学工业行业规划教材

高职高专化工技术类



# 化工分离技术

潘文群 主编 郝宏强 厉刚 副主编 曹克广 主审



化学工业出版社

· 北京 ·

本教材主要介绍化工生产中常用的分离方法,包含这些分离方法的基本原理、工艺计算、主要设备及设备的日常维护、操作及工业应用。整本教材以“过程的认识”、“装备的感知”、“基本理论知识”、“过程的操作”、“安全生产”及“工业应用”等全新的思路组织编写,倡导“能力本位”,更加突出“实用、实际和实践”的高职特色,力求体现对高职学生职业素质及学习能力的培养,同时还增加了其它分离方法。本书内容包括:多组分精馏、特殊精馏、多组分吸收及解吸、膜分离、层析及其它分离方法,其中特殊精馏及其它分离方法作为拓展内容来加以介绍,各学校可以根据具体情况选讲。

本教材适用于化工、生物、制药、环保及其相关专业的高职教材,也可用于其它各类相关专业职业学校参考教材和职工培训教材,还可供化工及其相关专业工程应用型本科学生和其它相关工程技术人员参考阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

化工分离技术/潘文群主编. —北京:化学工业出版社, 2009.9

中国石油和化学工业行业规划教材·高职高专化工技术类

ISBN 978-7-122-06207-9

I. 化… II. 潘… III. 化工过程-分离法(化学)-高等学校:技术学院-教材 IV. TQ028

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 125773 号

---

责任编辑: 窦 臻 提 岩

文字编辑: 李 玥

责任校对: 徐贞珍

装帧设计: 尹琳琳

---

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 刷: 北京市振南印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 16½ 字数 400 千字 2009 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: 30.00 元

版权所有 违者必究

## 中国石油和化学工业行业规划教材 \* 高职高专化工技术类 编审委员会名单

主 任：陈炳和 常州工程职业技术学院

委 员：（按姓氏笔画排列）

丁志平 南京化工职业技术学院

于兰平 天津渤海职业技术学院

王绍良 湖南化工职业技术学院

吉 飞 常州工程职业技术学院

朱东方 河南工业大学化学工业职业学院

任耀生 中国化工教育协会

杨永杰 天津渤海职业技术学院

杨宗伟 四川化工职业技术学院

陈炳和 常州工程职业技术学院

金万祥 徐州工业职业技术学院

洪 霄 常州工业职业技术学院

秦建华 扬州工业职业技术学院

袁红兰 贵州工业职业技术学院

曹克广 承德石油高等专科学校

程桂花 河北化工医药职业技术学院

潘正安 化学工业出版社

# 序

2006年11月教育部颁布了《关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》(教高[2006]16号)文件,文件中明确了课程建设与改革是提高教学质量的核心,也是教学改革的重点和难点。文件要求各高等职业院校应积极与行业企业合作开发课程,根据技术领域和职业岗位(群)的任职要求,参照相关的职业资格标准,改革课程体系和教学内容;要建立突出职业能力培养的课程标准,规范课程教学的基本要求,提高课程教学质量;要改革教学方法和手段,融“教、学、做”为一体,强化学生能力的培养;要加强教材建设,与行业企业共同开发紧密结合生产实际的实训教材,并确保优质教材进课堂。

自文件颁布以来,在我国掀起了新一轮高职高专教育教学改革热潮,以工作过程系统化重构高职高专课程体系,以项目化课程教学法改革传统学科传授教学法,取得了丰硕的成果。学生学习的兴趣、学习动力、自觉性、主动性、自信心、主体性和专业能力、自学能力、创新能力、团队合作能力、与人交流能力、计划策划能力、信息获取与加工能力等都得到明显提高,学生对复杂专业知识的把握情况也显著改善。项目化课程教学改革完全符合教育部的十六号文件精神。项目化课程教学改革遵循的八大原则更是体现了当今先进的高等职业教育观念。这八大原则是:①课程教学应进行整体教学设计;②课程内容是职业活动导向、工作过程导向,而不是学科知识的逻辑推演导向;③课程教学突出能力目标,而不仅仅是突出知识目标;④课程内容的载体主要是项目和任务,而不是语言、文字、图形、公式;⑤能力的训练过程必须精心设计,反复训练,而不是在讲完系统的知识之后,举几个知识的应用例子;⑥学生是课程教学过程中的主体;⑦课程的内容和教学过程应当“做、学、教”一体化,“实践、知识、理论”一体化;⑧注意在课程教学中渗透八大职业核心能力(外语应用能力、与人合作能力、与人交流能力、信息处理能力、数字应用能力、解决问题能力、自我学习和创新革新能力)的培养。

全国化工高等职业教育教学指导委员会(简称全国化工高职教指委)化工技术类专业委员会于2002年组织全国石油与化工各职业院校教师编写了第一套高职高专化工技术类专业规划教材,解决了当时高职院校化工技术类专业无教材的困难。然而,随着科学技术的进步,产业结构的调整,劳动效率的提高,信息技术的应用,劳动密集型生产已向资本密集型和技术密集型转变。特别是近年来的项目化课程教学改革的开展,原来的教材已不适应高等职业教育教学改革的需要。为此,全国化工高职教指委化工技术类专业委员会于2008年9月在常州工程职业技术学院启动了第二轮规划教材编写工作。教指委根据教育部教高[2006]16号文件的精神,吸收了先进的高职高专教育教学改革理念,进行了企业调研、座谈,针对岗位(群),聘请企业职业专家进行工

作任务分析,进而确定典型工作任务,组织课程专家按照职业成长规律和认知规律,用工作过程系统化的开发方法,重构化工技术类专业课程体系,制定课程标准,进行了教学情境设计,聘请企业一线技术专家作为教材编写的顾问和副主审,在全国石油和化工高职高专院校公开征集编写思路,组织高职教育领域的课程专家对应征的编写方案进行答辩,最终在全国范围内选拔出从事石油与化工职业教育的优秀骨干教师编写本套教材。

本套新教材的特点:

1. 体现工学结合的内涵要求;
2. 基本体现化工生产的工作过程;
3. 突出能力目标,重在培养学生的做事能力,强调知识的应用;
4. 便于项目化和任务驱动教学法的实施;
5. 注意培养学生的八大职业核心能力;
6. 反映当今的新技术、新材料、新设备和新工艺。

本轮建设的全套教材能满足化工技术类专业主干课程教学需求,能满足各个化工技术类专业方向课程教学需要,也能满足全国石油与化工高职院校根据地方经济发展和支柱产业需求设置的化工技术类专业选修课程教学要求。

本轮化工技术类专业的教材编写工作得到了许多化工生产一线企业行业专家、高等职业院校的领导和教育教学专家的指导,在此向所有对高等职业教育改革给予热情支持的人士表示衷心的感谢!

我们所做的工作仅是探索和创新的开始,还有许多的课题有待进一步研究,我们期待各界专家和读者提出宝贵意见!

全国化工高等职业教育教学指导委员会

化工技术类专业委员会

2009年6月

# 前言

本教材是在全国化工高等职业教育教学指导委员会化工技术类专业委员会的指导下编写完成的,是化工技术类专业教学改革产物。整本教材以“过程的认识”、“装备的感知”、“基本理论知识”、“过程的操作”、“安全生产”及“工业应用”等全新的思路组织编写,倡导“能力本位”,更加突出“实用、实际和实践”的高职特色,力求体现对学生职业素质及学习能力的培养,同时还增加了其它分离方法。

全书力求强调学生能力、知识、素质培养的有机统一。以“能”做什么、“会”做什么,明确学生的能力目标;以“掌握”、“理解”、“了解”三个层次,明确了学生的知识目标;并从注重学生的学习方法与创新思维的养成,情感价值观、职业操守的培养,安全节能环保意识的树立和团队合作精神等渗透,明确了学生的素质培养目标。

为便于教学和学生对所学习内容的掌握理解,章后列出了复习思考题或习题。

本教材中,除特别指明以外,计量单位统一使用我国的法定计量单位。物理量符号的使用是以在 GB 3100~3102—93 规定的基础上,尊重习惯表示方法为原则,并在每模块开始前列有“本模块主要符号说明”,以供查询。设备与材料的规格、型号尽可能采用最新标准,以利于实际应用。

本教材包括:多组分精馏、特殊精馏、多组分吸收及解吸、膜分离、层析及其它分离方法[本书模块二特殊精馏技术、模块五项目四其它层析分离法、模块六其它分离技术(加星号),作为拓展内容介绍,各学校可以根据具体情况选择讲授]。多组分精馏及特殊精馏中的前三部分内容及绪论和附录由常州工程职业技术学院潘文群编写;特殊精馏中的后两部分及多组分吸收及解吸由贵州科技工程职业学院的厉刚编写;膜分离由河北化工医药职业技术学院郝宏强编写;层析由辽宁石化职业技术学院尤景红编写;其它分离方法由漯河职业技术学院张东军编写。全书由常州工程职业技术学院潘文群统稿。本书由承德石油高等专科学校的曹克广教授主审,中国石化总公司齐鲁分公司的蔡祥军高级工程师参与了审稿。

本书可用作化工、生物、制药、环保及其相关专业的高职教材,也可用作其它各类职业学校参考教材和职工培训教材,还可供化工及其相关专业工程应用型本科学生和其它相关工程技术人员参考阅读。

本书在编写过程中,得到了化学工业出版社及有关单位领导和老师的大力支持与帮助;也参考借鉴了国内各类院校的相关教材和文献资料,参考文献名录列于书后。在此谨向上述各位领导、专家及文献资料的作者们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,加之时间仓促,不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2009年6月

# 目录

## 绪论

1

|                              |   |
|------------------------------|---|
| 一、化工分离技术的发展 .....            | 1 |
| 二、化工分离技术的应用 .....            | 2 |
| 三、化工分离过程的分类 .....            | 3 |
| 四、化工分离过程的选择 .....            | 4 |
| 五、化工分离过程的物料衡算平衡关系和过程速率 ..... | 6 |

## 模块一 多组分精馏

9

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 学习目标 .....            | 9  |
| 本模块主要符号说明 .....       | 9  |
| 项目一 认识多组分精馏 .....     | 10 |
| 一、多组分精馏概述 .....       | 10 |
| 二、多组分精馏的特点 .....      | 11 |
| 三、多组分精馏流程的选择 .....    | 12 |
| 项目二 多组分精馏的知识准备 .....  | 13 |
| 一、多组分溶液的相平衡 .....     | 13 |
| 二、相平衡常数的应用 .....      | 18 |
| 三、多组分精馏的关键组分的确定 ..... | 20 |
| 四、多组分精馏的物料衡算 .....    | 21 |
| 五、多组分精馏的回流比的确定 .....  | 26 |
| 六、多组分精馏的塔板数的确定 .....  | 28 |
| 项目三 精馏操作 .....        | 34 |
| 一、精馏塔的开工准备 .....      | 34 |
| 二、精馏塔的开停车操作 .....     | 38 |
| 三、精馏的操作与调节 .....      | 40 |
| 四、精馏的操作故障及处理 .....    | 42 |
| 五、精馏塔的日常维护和检修 .....   | 43 |
| 六、精馏塔的节能 .....        | 44 |
| 七、精馏操作的安全技术 .....     | 45 |

|                      |    |
|----------------------|----|
| 八、多组分精馏的工业应用实例 ..... | 47 |
| 习题 .....             | 51 |

## \* 模块二 特殊精馏技术

54

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 学习目标 .....              | 54 |
| 本模块主要符号说明 .....         | 54 |
| 项目一 萃取与恒沸精馏 .....       | 55 |
| 一、恒沸精馏 .....            | 55 |
| 二、萃取精馏 .....            | 57 |
| 三、萃取精馏与恒沸精馏的比较 .....    | 59 |
| 项目二 加盐精馏 .....          | 59 |
| 一、加盐精馏原理 .....          | 59 |
| 二、盐类的选择 .....           | 60 |
| 三、加盐精馏过程 .....          | 60 |
| 项目三 反应精馏 .....          | 62 |
| 一、反应精馏概述 .....          | 62 |
| 二、反应精馏的特点 .....         | 62 |
| 三、反应精馏的相平衡与化学平衡 .....   | 63 |
| 四、反应精馏的反应类型 .....       | 64 |
| 五、反应精馏的要求 .....         | 66 |
| 六、反应精馏塔的形式 .....        | 66 |
| 七、催化精馏塔催化剂的装填 .....     | 67 |
| 八、反应精馏的工业应用实例 .....     | 70 |
| 项目四 分子蒸馏 .....          | 71 |
| 一、分子蒸馏概述 .....          | 71 |
| 二、分子蒸馏原理 .....          | 72 |
| 三、分子蒸馏设备的选用 .....       | 74 |
| 四、分子蒸馏的工业应用实例 .....     | 76 |
| 项目五 膜蒸馏及渗透蒸馏 .....      | 78 |
| 一、膜蒸馏及渗透蒸馏概述 .....      | 78 |
| 二、膜蒸馏及渗透蒸馏的原理 .....     | 80 |
| 三、膜蒸馏及渗透蒸馏设备的选用 .....   | 82 |
| 四、膜蒸馏及渗透蒸馏的工业应用实例 ..... | 85 |
| 复习思考题 .....             | 87 |

## 模块三 多组分吸收及解吸

89

|                      |    |
|----------------------|----|
| 学习目标 .....           | 89 |
| 本模块主要符号说明 .....      | 89 |
| 项目一 认识多组分吸收及解吸 ..... | 90 |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 一、吸收及解吸概述 .....         | 90  |
| 二、多组分吸收与解吸概述 .....      | 92  |
| 三、多组分吸收及解吸的特点 .....     | 92  |
| 四、多组分吸收及解吸的应用 .....     | 93  |
| 五、多组分吸收及解吸的流程及选择 .....  | 94  |
| 项目二 多组分吸收及解吸的知识准备 ..... | 95  |
| 一、气-液平衡 .....           | 95  |
| 二、传质机理 .....            | 95  |
| 三、传质速率与吸收系数 .....       | 97  |
| 四、多组分吸收的计算 .....        | 98  |
| 项目三 多组分吸收及解吸操作 .....    | 106 |
| 一、多组分吸收及解吸的开停车 .....    | 106 |
| 二、多组分吸收及解吸的操作与调节 .....  | 107 |
| 三、多组分吸收及解吸的故障与处理 .....  | 108 |
| 四、多组分吸收及解吸的安全生产技术 ..... | 109 |
| 五、多组分吸收及解吸的工业应用实例 ..... | 111 |
| 习题及复习思考题 .....          | 113 |

## 模块四 膜分离

115

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 学习目标 .....          | 115 |
| 本模块主要符号说明 .....     | 115 |
| 项目一 认识膜分离 .....     | 116 |
| 一、膜分离过程 .....       | 116 |
| 二、膜分离特点 .....       | 117 |
| 三、膜的分类 .....        | 118 |
| 四、膜分离的应用和发展方向 ..... | 119 |
| 项目二 膜分离装置及流程 .....  | 120 |
| 一、反渗透和纳滤装置及流程 ..... | 120 |
| 二、超滤装置及流程 .....     | 125 |
| 三、微滤装置及流程 .....     | 126 |
| 四、渗析装置及流程 .....     | 127 |
| 五、电渗析装置及流程 .....    | 128 |
| 六、其它膜分离装置及流程 .....  | 131 |
| 项目三 膜分离的知识准备 .....  | 132 |
| 一、压力特征 .....        | 132 |
| 二、浓差极化 .....        | 133 |
| 三、膜分离理论 .....       | 135 |
| 四、表征膜性能的参数 .....    | 137 |
| 项目四 膜分离操作 .....     | 138 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 一、预处理过程 .....          | 138 |
| 二、膜的选择 .....           | 139 |
| 三、膜的操作 .....           | 140 |
| 四、膜的污染及清洗 .....        | 141 |
| 五、膜的再生 .....           | 144 |
| 六、膜分离操作中的常见故障及处理 ..... | 145 |
| 七、膜分离的安全技术 .....       | 145 |
| 八、膜分离的工业应用实例 .....     | 145 |
| 复习思考题 .....            | 148 |

## 模块五 层析

150

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 学习目标 .....            | 150 |
| 本模块主要符号说明 .....       | 150 |
| 项目一 凝胶过滤层析 .....      | 151 |
| 一、认识凝胶过滤层析 .....      | 151 |
| 二、凝胶过滤层析的知识准备 .....   | 153 |
| 三、凝胶过滤层析设备 .....      | 159 |
| 四、凝胶过滤层析操作 .....      | 162 |
| 五、凝胶过滤层析的工业应用实例 ..... | 165 |
| 项目二 离子交换层析 .....      | 166 |
| 一、认识离子交换层析 .....      | 166 |
| 二、离子交换层析的知识准备 .....   | 167 |
| 三、离子交换层析设备 .....      | 175 |
| 四、离子交换层析操作 .....      | 177 |
| 五、离子交换层析的工业应用实例 ..... | 180 |
| 项目三 吸附层析 .....        | 185 |
| 一、认识吸附层析 .....        | 185 |
| 二、吸附层析的知识准备 .....     | 187 |
| 三、吸附层析设备 .....        | 193 |
| 四、吸附层析操作 .....        | 195 |
| 五、吸附层析的工业应用实例 .....   | 200 |
| * 项目四 其它层析分离法 .....   | 203 |
| 一、分配层析 .....          | 203 |
| 二、亲和层析 .....          | 203 |
| 复习思考题 .....           | 205 |

## \* 模块六 其它分离技术

207

|                 |     |
|-----------------|-----|
| 学习目标 .....      | 207 |
| 本模块主要符号说明 ..... | 207 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 项目一 泡沫分离技术 .....          | 208 |
| 一、泡沫分离技术的概念 .....         | 208 |
| 二、泡沫分离技术原理 .....          | 209 |
| 三、泡沫分离设备 .....            | 210 |
| 四、泡沫分离操作 .....            | 212 |
| 五、泡沫分离的工业应用实例 .....       | 213 |
| 项目二 浸取 .....              | 214 |
| 一、浸取的概念 .....             | 214 |
| 二、浸取过程原理 .....            | 214 |
| 三、常用的浸取过程 .....           | 216 |
| 四、浸取设备 .....              | 218 |
| 五、浸取过程的应用实例 .....         | 220 |
| 项目三 沉淀分离 .....            | 221 |
| 一、沉淀分离的概念 .....           | 221 |
| 二、几种主要的沉淀方法的原理及操作方法 ..... | 221 |
| 三、沉淀技术应用 .....            | 226 |
| 项目四 电泳 .....              | 228 |
| 一、电泳的概念 .....             | 228 |
| 二、电泳分离原理 .....            | 228 |
| 三、电泳分离设备 .....            | 231 |
| 四、电泳分离操作 .....            | 232 |
| 五、电泳的应用 .....             | 236 |
| 复习思考题 .....               | 238 |

## 附录

239

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 附录一 酒精溶液的物理常数 .....           | 239 |
| 附录二 气-液平衡数据 .....             | 240 |
| 附录三 二元共沸物的物理性质 .....          | 241 |
| 附录四 有机物的蒸气压 .....             | 242 |
| 附录五 一些气体-水体系的亨利系数 $E$ 值 ..... | 243 |
| 附录六 气体的溶解度及平衡关系 .....         | 244 |
| 附录七 常用气体的主要理化数据 .....         | 246 |
| 附录八 某些液体的重要物理性质 .....         | 247 |
| 附录九 干空气的物理性质 (101.3kPa) ..... | 248 |
| 附录十 水的物理性质 .....              | 249 |

## 参考文献

250

化工分离技术是现代化工生产中的重要环节之一，它不仅在化学工业，同时在石油炼制、矿物资源的利用、海洋资源的利用、医药工业、食品工业、生物化工、环境工程等中得到了广泛的应用。随着现代工业的发展，人们对分离技术提出了越来越高的要求。例如高纯产品的提取、各类物质的深加工、各种资源的综合利用，全球对环境保护的严格要求等对分离提出了更新更高的要求。

## 一、化工分离技术的发展

地球上的物质绝大多数是以混合物的状态存在的，要得到纯净的物质，就要将混合物进行分离和提纯。例如将金属从矿物中提纯出来、放射性铀的同位素的分离、净化水和空气等为科学发展和生产技术提供了广阔的发展空间，也促使了分离技术的发展。

化工分离技术是随着化学工业的发展而逐渐形成和发展的。化学工业具有悠久的历史，现代化学工业开始于 18 世纪产业革命的欧洲，当时纯碱、硫酸等无机化学工业成为现代化学工业的开端。19 世纪以煤为重要原料的有机化工在欧洲也发展起来，主要是苯、甲苯、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、干燥等操作。到了 19 世纪末 20 世纪初，人类发现了石油，开始了大规模的石油化工、石油炼制，促进了化工分离技术的成熟与完善。到了 20 世纪 30 年代美国出版了《化学工程原理》一书，这也是第一部反映化学工业生产的图书。然而，化工产品的种类之多、工艺之复杂，且性质各异，要一一去了解是比较困难的。但归纳起来，各个产品的生产工艺都遵循相同的规律，都是由分离过程的基本操作和化学反应过程所组成。图 0-1 列出了化工产品的生产工艺流程。

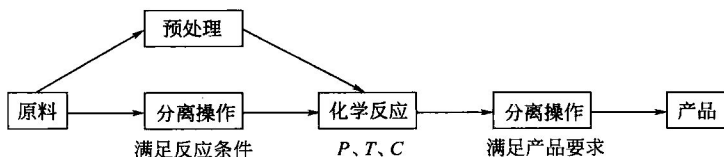


图 0-1 化工产品的生产工艺流程

除特定的化学反应过程外，分离操作过程或预处理过程所包含的物理过程并不是很多，而且有相似性。例如，流体输送不论用来输送何种物料，其目的都是将流体从一个设备输送至另一个设备；加热或冷却的目的均是为了得到需要的工作温度；分离提纯的目的均是为了得到指定浓度的物质等。把包含在不同化工产品生产过程中，采用相似的设备、具有相同的功能、遵循相同的物理学规律的基本操作，称为单元操作。对于原料的预处理过程或分离操作实际是对原料进行一定的处理。原料中有生产过程中需要的物质，也有生产过程中不需要

的物质,一些不需要的物质可能会影响化学反应或反应器、催化剂等使化学反应无法进行,所以预处理过程是必不可少的,例如合成氨中的氢气和氮气都要进行预处理;而反应后的产物也需要分离操作,主要是对它们进行分离和提纯以及未反应物的回收利用,例如石油是碳氢化合物组成的混合液体,经过分离操作得到乙烯、丙烯等高纯度的单体。

20 世纪 50 年代中期,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。质量传递是工业生产中普遍存在的,例如水向空气中蒸发、盐的溶解、用活性炭来吸附某些物质、从茶叶中提取茶多酚等都是质量传递过程。在流体力学和传热学中都涉及到了动量和热量的传递过程。

到了 20 世纪 70 年代,化工分离技术与其它科学技术交叉渗透产生了一些边缘分离技术,例如,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、超临界萃取技术等。近几年来,科技人员在分离技术方面做了许多工作,也取得了一些成果。例如对板式塔的研究已深入到塔内气、液两相流动的动量传递及质量传递的本质,在填料塔的研究方面已开发了新型填料和复合塔,为火箭提供具有极大推动力的高能燃料,海水的淡化等;在萃取、离子交换、吸附、膜分离等领域已都做出了有意义的研究和开发工作。通过这些成果的工业应用,改进和强化了现有的生产设备,在降低能耗、提高效率等方面发挥了巨大的作用,促进了化学工业的进一步发展。

到了 21 世纪,化工分离技术一方面对传统的分离过程加以变革,如基于萃取的超临界流体萃取、液膜萃取以及基于吸附的色谱分离等;另一方面科学的发展而出现的新型分离技术,如反渗透、超滤等膜分离技术,与膜结合的膜吸收、膜萃取、膜蒸馏等分离技术。分离技术如何更好地在化工、医药、能源、环境、农业、食品、交通等领域的应用,这将是化工分离技术将面临的更新的挑战。

中国是世界文明古国之一,中国古代的劳动人民在长期的生产实践中,在科学技术和化学化工等方面也有不少的发明和创造。如陶瓷、冶金、火药、燃料、酿酒、染色、造纸和无机盐等生产技术,都走在世界的前列。现代许多化工生产都是在古代化学工艺的基础上发展起来的。

## 二、化工分离技术的应用

大多数的化工生产过程中都会涉及到分离技术,包括无机化工、有机化工、石油化工、精细化工等。事实上,无论是在基础建设阶段,还是在正常生产过程中,尽管反应器是至关重要的设备,但分离设备和过程的成本往往占据化工生产过程的主要部分。

### (一) 分离

将混合物中各组分完全分开,得到各个纯组分或若干个产品。例如原油的分离,地下原油依据其沸点的不同,通过蒸馏等方式得到汽油、煤油、柴油、润滑油和乙烯、丙烯等基础化工产品;从空气中分离出氧气、氮气和各种稀有气体。

### (二) 提取和回收

从混合物中提取出某种或某几种有用组分。例如从矿石中提取金、银、铜、镍、钴、铀及稀土金属等;从天然油料和植物籽中浸取豆油、花生油等各种植物油;从甜菜中提取糖

等；从放射性废水中回收钴、镅、铈、铯等金属物质。

### （三）纯化

除去混合物中所含的少量杂质。例如合成氨生产中除去原料气中的少量二氧化碳和一氧化碳等有害气体，以制取纯净的氮气和氢气。

### （四）浓缩

将含有有用组分很少的稀溶液浓缩，提高产品中有用组分的含量。例如一些果汁、乳品的浓缩，利用吸附等工艺除去物料的水分。

随着现代化工工业的发展，分离技术除了化工生产中得到广泛的应用外，在冶金、食品、生化、环境等工业中也广泛应用分离技术，如矿物中提取金属，食品的脱水，抗生素的净制，病毒的分离，同位素的分离，废气、废水、废渣的分离与综合利用等。由于能源的紧张，对分离过程的要求及能耗的要求也越高，分离技术的应用要求越来越得到人们的重视。

## 三、化工分离过程的分类

化工分离过程可以分为机械分离和传质分离两大类。

### （一）机械分离过程

机械分离过程是指被分离的混合物是一个非均相混合物，用机械的方法将混合物中两种物质相互分离的过程，分离时两相中无物质传递发生。其力可以是重力、离心力、压差等。例如前面课程中所介绍的过滤、沉降等。表 0-1 列出几种典型的机械分离过程。

表 0-1 几种典型的机械分离过程

| 名称   | 原料相态   | 力(分离剂) | 产物相态   | 分离原理      | 应用实例     |
|------|--------|--------|--------|-----------|----------|
| 过滤   | 液-固    | 压力     | 液+固    | 粒径>过滤介质孔径 | 浆状颗粒的回收  |
| 沉降   | 液-固    | 重力     | 液+固    | 密度差       | 浑浊液澄清    |
| 离心分离 | 液-固    | 离心力    | 液+固    | 固-液相颗粒尺寸  | 结晶物分离    |
| 旋风分离 | 气-固(液) | 惯性力    | 气+固(液) | 密度差       | 催化剂微粒收集  |
| 电除尘  | 气-固    | 电场力    | 气+固    | 微粒的带电性    | 合成氨原料气除尘 |

### （二）传质分离过程

传质分离过程主要针对均相混合物，在分离过程中有物质传递过程，即依靠物质的分子移动来实现混合物中各组分的分离。例如湿固体物料中的水分汽化传递到气相中实现了物料的干燥，水分也从固相转移到了气相；矿物中的有用组分溶解到溶剂中，从而从矿石中分离出来等，这些都属于传质分离过程。根据其分离机理，又可分为平衡分离过程和速率分离过程。

#### 1. 平衡分离过程

平衡分离过程是依据混合物中各组分在两相间的平衡分配不同来实现混合物的分离的过程。如蒸馏、吸收、萃取、吸附等。表 0-2 列出几种典型的平衡分离过程。

表 0-2 几种典型的平衡分离过程

| 名称   | 原料相态 | 力(分离剂) | 产物相态 | 分离原理  | 应用实例   |
|------|------|--------|------|-------|--------|
| 蒸馏   | 液或气  | 热      | 液+气  | 相对挥发度 | 酒精增浓   |
| 吸收   | 气    | 液体吸收剂  | 液+气  | 溶解度   | 盐酸的制取  |
| 萃取   | 液    | 不互溶萃取剂 | 二液相  | 溶解度   | 芳烃抽提   |
| 吸附   | 气或液  | 固体吸附剂  | 液或气  | 吸附平衡  | 活性炭吸附苯 |
| 离子交换 | 液    | 树脂吸附剂  | 液体   | 吸附平衡  | 水的软化   |
| 蒸发   | 液    | 热      | 液+气  | 物质的沸点 | 稀溶液浓缩  |
| 结晶   | 液    | 热      | 液+固  |       | 糖液脱水   |

## 2. 速率分离过程

速率分离过程是依据混合物中各组分在某种力场作用下扩散速率不同的性质来实现分离的过程。可以利用溶液中分子、离子等粒子的迁移速率、扩散速率等的不同来进行分离。在固-液相或固-气相系统中,当固体颗粒较小、两相密度相近时,颗粒上浮或下沉速率会很低,借助于离心力或通过渗透膜强化其速率差来实现分离,如膜分离、电泳等。表 0-3 列出几种典型的速率控制分离过程。

表 0-3 几种典型的速率控制分离过程

| 名称   | 原料相态 | 分离方式 | 产物相态 | 分离原理   | 应用实例     |
|------|------|------|------|--------|----------|
| 气体渗透 | 气    | 压力、膜 | 气    | 浓度差、压差 | 富氧、富氮    |
| 反渗透  | 液    | 压力、膜 | 液    | 渗透压    | 海水淡化     |
| 渗析   | 液    | 多孔膜  | 液    | 浓度差    | 血液透析     |
| 泡沫分离 | 液    | 表面能  | 液    | 界面浓度差  | 矿物浮选     |
| 色谱分析 | 气或液  | 固相载体 | 液或气  | 吸附浓度差  | 难分离体系的分离 |
| 电渗析  | 液    | 电场、膜 | 液或气  | 电位差    | 氨基酸脱盐    |
| 电解   | 液    | 膜电场  | 液    | 电位差    | 液碱生产     |

这在其它课程的“双组分的精馏和吸收”部分有所介绍。本书主要介绍是传质分离过程。

## 四、化工分离过程的选择

一个化工生产过程不是一个化工分离过程即可完成的,而往往是由若干分离操作联合使用而实现的,在此过程中,如何选择分离操作是至关重要的。分离过程的选择也受到许多因素的制约。归纳起来,可以从以下几个方面来进行考虑。

### (一) 可行性

分离过程在给定条件下的可行性分析能筛选掉一些显然不合适的分离方法。若分离丙酮和乙醚二元混合物,由于它们是非离子型有机化合物,因此可以断定用离子交换、电渗析和电泳等方法是不合适的。同时也需考虑分离过程所使用的工艺条件,在常温常压下操作的分离过程,相对于要求很高或很低的压力和温度要求的过程,应优先考虑。

对大多数分离过程,按分子性质及其宏观性质的差异来选择分离过程是十分有用的。例如对吸收和萃取而言,主要是溶解度的差异;精馏反映为蒸气压,表现为分子间力的强弱;结晶反映各种分子聚在一起的能力,其分子的大小和形状等几何因素很重要。根据需分离物质的性质来选择分离方法是十分可行的,例如若混合物各组分的挥发度相差较大,可采用精