



教育部 高职高专规划教材

传质与分离技术

● 周立雪 周波 主编



化学工业出版社
教材出版中心

教育部高职高专规划教材

传质与分离技术

周立雪 周波 主编

化学工业出版社
教材出版中心
·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

传质与分离技术/周立雪, 周波主编. —北京: 化学工业出版社, 2002.5
教育部高职高专规划教材
ISBN 7-5025-3659-0

I. 传… II. ①周…②周… III. ①传质-化工过程-高等学校: 技术学校-教材②分离-化工过程-高等学校: 技术学校-教材 IV. TQ021.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 012775 号

教育部高职高专规划教材

传质与分离技术

周立雪 周波 主编

责任编辑: 何 丽

责任校对: 陶燕华

封面设计: 郑小红

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

化学工业出版社印刷厂印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 18 字数 442 千字

2002 年 5 月第 1 版 2002 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3659-0/G·1000

定 价: 27.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

全国高等职业教育化工专业教材编审委员会

主 任：赵杰民

副 主 任：张鸿福 李顺汀 田 兴 黄永刚 任耀生

基础化学组：李居参 赵文廉 宋长生
苏 静 胡伟光 初玉霞 丁敬敏 王建梅 张法庆
徐少华

数理基础组：于宗保 王绍良 王爱广
金长义 陈 泓 朱芳鸣 高 松 刘玉梅 杨 凌
董振珂 李元文 丛文龙 傅 伟

化工基础组：唐小恒 周立雪 秦建华
王小宝 张柏钦 张洪流 邢鼎生 张国铭 徐建良
周 健

化工专业组：刘德铮 陈炳和 杨宗伟
王文选 文建光 田铁牛 李贵贤 梁凤凯 卞进发
杨西萍 舒均杰 郑广俭

人文社科组：曹克广 霍献育 徐沛林
刘明远 曾悟声 马 涛 侯文顺 曲富军 高玉萍
史高锋 赵治军

工程基础组：丁志平 刘景良 姜敏夫
魏振枢 律国辉 过维义 吴英绵 章建民 张 平
许 宁 贺召平

内 容 提 要

本书是与《流体流动与传热》配套教材,本教材以传质基本理论为主线,工程实例为框架,以操作技术为主要内容,阐述了各种传质分离过程的共性和工程应用技术。内容包括:概论、蒸馏与精馏技术、特殊精馏、吸收、气液传质设备、结晶、膜分离技术、其他分离技术和分离过程、固体物料干燥等8章,每章编入学习目标、例题、复习与思考、习题、本章小结。本书某些章节各校可根据专业需要选择讲授。

本教材力求论述严谨、层次清晰,重点突出、简繁适当、理论联系实际。强调工程操作、技术分析和训练。注意启迪思维,引导创新,便于自学。

本书可作为高等职业教育化工类及相关专业(化工、石油、生物、制药、轻纺、食品、环保、冶金、材料等)教材。适用于从事化工专业的科研、生产管理的科技人员参考。

出版说明

高职高专教材建设工作是整个高职高专教学工作中的重要组成部分。改革开放以来,在各级教育行政部门、有关学校和出版社的共同努力下,各地先后出版了一些高职高专教育教材。但从整体上看,具有高职高专教育特色的教材极其匮乏,不少院校尚在借用本科或中专教材,教材建设落后于高职高专教育的发展需要。为此,1999年教育部组织制定了《高职高专教育专门课课程基本要求》(以下简称《基本要求》)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(以下简称《培养规格》),通过推荐、招标及遴选,组织了一批学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师,成立了“教育部高职高专规划教材”编写队伍,并在有关出版社的积极配合下,推出一批“教育部高职高专规划教材”。

“教育部高职高专规划教材”计划出版500种,用5年左右时间完成。这500种教材中,专门课(专业基础课、专业理论与专业能力课)教材将占很高的比例。专门课教材建设在很大程度上影响着高职高专教学质量。专门课教材是按照《培养规格》的要求,在对有关专业的人才培养模式和教学内容体系改革进行充分调查研究和论证的基础上,充分吸取高职、高专和成人高等学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验和教学成果编写而成的。这套教材充分体现了高等职业教育的应用特色和能力本位,调整了新世纪人才必须具备的文化基础和技术基础,突出了人才的创新素质和创新能力的培养。在有关课程开发委员会组织下,专门课教材建设得到了举办高职高专教育的广大院校的积极支持。我们计划先用2~3年的时间,在继承原有高职高专和成人高等学校教材建设成果的基础上,充分汲取近几年来各类学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验,解决新形势下高职高专教育教材的有无问题;然后再用2~3年的时间,在《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,通过研究、改革和建设,推出一大批教育部高职高专规划教材,从而形成优化配套的高职高专教育教材体系。

本套教材适用于各级各类举办高职高专教育的院校使用。希望各用书学校积极选用这批经过系统论证、严格审查、正式出版的规划教材,并组织本校教师以对事业的责任感对教材教学开展研究工作,不断推动规划教材建设工作的发展与提高。

教育部高等教育司

2001年4月3日

前 言

随着高等职业教育迅猛发展, 高职高专教材建设迫在眉睫。由于工业技术的发展, 行业的交叉渗透, 生物化工、医药化工、新材料化工、电子化工等新领域的出现, 特别是技术密集型的化工生产技术专业教育的教材严重缺乏。本书是根据教育部《关于加强高职高专教育人才培养工作的意见》以及教材建设的精神, 以应用为目的, 够用为度, 具有更强的针对性、实践性、实用性和先进性的原则, 以培养生产、服务、管理一线的高级应用性技术人才为目标, 由全国高职高专化工工艺专业教材编审委员会组织, 按化工工艺专业的课程基本要求而编写。

本教材注重以工程观点揭示传质与分离过程的本质及其变化规律。加强了传质原理的阐述, 把传质过程的原理、实例、操作分析融会贯通, 具有更强的理论性和实践性。教材的编写手法上, 改变传统的由原理阐述到计算设计为实例分析开篇, 而是从实际单元过程叙述到问题分析, 由操作分析提升到理论, 遵循认知规律。教材内容上突出强化传质操作技术, 如操作参数的选择; 设备的选型; 故障的排除; 分离方法的选择等内容。教材还通过大量的工程实例分析强化工程观念。简化了数学模型推理和设计计算。删去陈旧的操作技术和设备, 特别是对传统的单元操作内容做了精简, 体现少而精。介绍新型分离方法, 除传统的传质单元操作外, 增加了结晶、吸附与离子交换、萃取精馏、膜分离、超临界萃取、吸附、离子交换等内容, 反映了化工分离过程近代发展的新成果和新技术, 突出大量工程实例。在编写形式上教材中编入了学习目标、学习小结, 小结中指出学习重点、难点及学习方法等, 便于读者学习掌握。

本教材作为化工类及相关专业(化工、石油、生物工程、制药、冶金、环保、食品等)的高等职业教育教材, 也可供有关部门的科研及生产一线技术人员阅读参考。

本教材由周立雪、周波主编。概论, 第一章, 第二章由周波编写; 第三章, 第四章, 第八章由周立雪编写; 第五章, 第六章, 第七章由杨丽萍编写。本书由张柏钦主审。参加本教材审定工作的有: 冷士良, 陈洪潮, 张洪流, 易卫国, 兰海凤等, 本书编写过程中冷士良给予很多支持和帮助。在此致以诚挚的谢意。

由于水平有限, 书中不完善之处敬请同仁和读者指正, 以使本教材日臻完善。

编 者
2002 年元月

目 录

概论	1
学习目标	1
一、化工分离技术的发展和应	1
二、传质与分离过程的分类和	
特征	3
三、本课程的内容与任务	6
第一章 蒸馏与精馏技术	9
学习目标	9
第一节 概述	9
一、蒸馏定义及特点	9
二、蒸馏操作的分类	10
三、精馏操作流程	10
第二节 简单蒸馏和平衡蒸馏	11
一、装置流程	11
二、简单蒸馏及平衡蒸馏原理	12
第三节 双组分精馏	13
一、精馏原理	13
二、全塔物料衡算	15
三、理论塔板数	23
四、塔高与塔径的计算	27
五、回流比的影响及选择	28
六、间歇精馏	31
七、精馏装置的热量衡算	34
第四节 多组分精馏	35
一、多组分精馏的特点及流程方	
案选择	35
二、多组分精馏的计算	37
三、复杂精馏简介	46
第五节 蒸馏与精馏操作	49
一、双组分精馏的操作型计算	49
二、影响精馏操作的主要因素	50
三、间歇精馏新型操作方式	
简介	54
四、蒸馏技术的发展方向	56
本章小结	58

复习与思考	58
习题	59
本章符号说明	62
主要参考文献	63
第二章 特殊精馏	64
学习目标	64
第一节 概述	64
一、非理想物系的恒沸物	64
二、理想三组分系统在三角图上的	
表示方法	66
第二节 恒沸精馏	67
一、恒沸精馏原理	67
二、恒沸精馏夹带剂的选择	68
三、恒沸精馏流程及应用	68
四、恒沸精馏计算	69
第三节 萃取精馏	70
一、萃取精馏基本原理	71
二、萃取精馏中萃取剂的选择	71
三、萃取精馏流程及应用	72
四、萃取精馏计算	73
五、萃取精馏的注意事项	75
第四节 其他特殊精馏操作及	
应用	76
一、盐效应精馏及应用	76
二、分子蒸馏及应用	77
三、几种特殊精馏方法的比较	79
第五节 精馏的节能优化技术	80
一、精馏过程的热力学不可	
逆性	80
二、多效精馏	81
三、低温精馏的热泵	82
四、设置中间冷凝器和中间再沸器	
的精馏	85
本章小结	86
复习与思考	86

本章符号说明	87	学习目标	122
主要参考文献	87	第一节 概述	122
第三章 吸收	88	第二节 板式塔	123
学习目标	88	一、板式塔的结构	123
第一节 概述	88	二、板式塔的流体力学性能与操作弹性	123
一、工业吸收过程	88	三、塔板的类型及性能评价	129
二、吸收剂的选择	89	四、板式塔的设计原则	133
三、物理吸收和化学吸收	89	第三节 填料塔	134
四、气体吸收工业应用	90	一、填料塔的结构	134
五、吸收操作的经济性	90	二、气液两相在填料层内的流动	138
六、吸收与蒸馏操作的区别	90	三、填料的类型及性能评价	140
七、吸收塔设备类型	91	四、填料塔的特点	143
第二节 吸收平衡及吸收推动力	91	五、填料塔的操作范围	144
一、吸收平衡	91	六、填料塔的设计原则	144
二、相平衡与吸收过程的关系	92	第四节 气液传质设备应用分析	146
第三节 吸收传质机理	93	一、气液传质设备的处理能力	146
一、质量传递机理	93	二、气液传质设备的效率及其影响因素	147
二、对流传质理论	94	三、气液传质设备技术的进展	148
第四节 传质速率方程	95	本章小结	149
一、对流传质速率方程	95	复习与思考	149
二、传质阻力的控制	97	本章符号说明	149
第五节 吸收(解吸)计算	98	主要参考文献	150
一、物料衡算与操作线方程	98	第五章 结晶	151
二、吸收剂用量的确定	100	学习目标	151
三、解吸	104	第一节 结晶过程及类型	151
四、塔径的计算	106	一、结晶过程	151
五、吸收塔高的计算	106	二、结晶的类型	151
第六节 其他吸收	110	第二节 结晶的基本原理	152
一、多组分吸收	110	一、基本概念	152
二、化学吸收	111	二、结晶过程的相平衡	153
三、高组成气体吸收	111	三、结晶过程的速率	155
第七节 吸收操作实例分析	112	第三节 影响结晶操作的因素	156
一、逆流与并流操作比较	112	第四节 结晶器	157
二、吸收剂用量、温度等对吸收过程的影响	114	一、不移除溶剂的结晶器	157
本章小结	119	二、移除部分溶剂的结晶器	158
习题	119	第五节 结晶过程的产量计算	159
本章符号说明	120	一、结晶过程的物料衡算	159
主要参考文献	121		
第四章 气液传质设备	122		

二、物料衡算式的应用.....	160	二、应用上的发展趋势.....	191
第六节 其他结晶方法简介.....	161	本章小结.....	192
一、熔融结晶.....	161	复习与思考.....	193
二、沉淀结晶.....	161	本章符号说明.....	193
三、升华结晶.....	162	主要参考文献.....	193
本章小结.....	162	第七章 其他分离技术和分离过程	195
复习与思考.....	163	学习目标.....	195
习题.....	163	第一节 液-液萃取技术	195
本章符号说明.....	163	一、萃取流程.....	195
主要参考文献.....	163	二、两相接触方式.....	196
第六章 膜分离技术	164	三、三角相图的应用.....	197
学习目标.....	164	四、单级萃取过程的图解计算.....	199
第一节 概述.....	164	五、萃取的应用.....	201
一、几种主要的膜分离过程.....	164	六、超临界流体萃取.....	208
二、膜分离设备.....	165	第二节 吸附分离技术.....	210
三、膜分离操作参数.....	167	一、吸附原理和吸附剂.....	210
第二节 反渗透.....	167	二、吸附平衡和吸附速率.....	212
一、反渗透原理.....	167	三、吸附分离工艺简介.....	214
二、影响反渗透因素—浓差极化	167	四、吸附分离的工业应用.....	217
三、反渗过程工艺流程.....	168	第三节 离子交换分离技术.....	218
四、反渗透技术的应用.....	169	一、离子交换基本原理.....	218
第三节 超滤.....	172	二、离子交换设备.....	221
一、超滤原理.....	172	三、离子交换分离技术的应用.....	222
二、超滤过程的工艺流程.....	173	第四节 生物分离技术.....	223
三、超滤技术的应用.....	174	一、新型生物分离工艺.....	224
第四节 电渗析.....	176	二、生物分离技术的应用.....	229
一、电渗析原理.....	176	第五节 分离过程的选择.....	230
二、电渗析的流程.....	179	一、技术上的可行性.....	230
三、电渗析技术的应用.....	180	二、分离过程类型的选择.....	231
第五节 气体膜分离.....	181	三、根据生产能力确定分离方法	232
一、气体膜分离原理.....	182	四、设计的可靠性.....	232
二、气体膜分离流程及设备.....	183	五、分离过程的独立操作性.....	233
三、气体膜分离技术应用.....	184	本章小结.....	234
第六节 液膜分离技术.....	186	复习与思考.....	235
一、液膜分离原理.....	186	习题.....	236
二、液膜分离流程.....	188	本章符号说明.....	237
三、液膜分离技术应用.....	188	主要参考文献.....	237
第七节 膜分离技术的发展趋势.....	190	第八章 固体物料干燥	238
一、技术上的发展趋势.....	190	学习目标.....	238

第一节 概述.....	238	第五节 干燥操作条件的确定.....	257
第二节 对流干燥的物料与干燥 介质.....	239	第六节 干燥器.....	259
一、物料的湿分表示.....	240	一、干燥器的基本要求.....	259
二、空气的状态参数.....	240	二、干燥器的主要形式.....	259
三、干燥介质空气的条件.....	245	三、干燥器操作条件确定及设计 原则.....	264
四、湿物料中湿分的性质.....	245	第七节 干燥技术的应用.....	266
第三节 干燥过程的物料衡算与热量 衡算.....	247	一、增湿器.....	266
一、物料衡算.....	247	二、减湿器.....	267
二、干燥系统的热量衡算.....	248	三、水冷却塔.....	267
第四节 干燥时间的计算.....	251	本章小结.....	267
一、恒定干燥条件下干燥时间的 确定.....	252	复习与思考.....	267
二、变动干燥条件下干燥时间的 讨论.....	256	习题.....	268
		本章符号说明.....	268
		主要参考文献.....	269
		附录.....	270

概 论

学习目标

- 了解传质与分离技术的发展及本课程学习的内容。
- 了解分离过程的分类及工业应用。
- 理解平衡分离过程、速率分离过程、工程观念等概念。

一、化工分离技术的发展和應用

(一) 化工分离技术发展简述

化学工业是国民经济的重要基础产业，化工产品渗透到人们的衣、食、住、行等各个领域。化工产值是衡量一个国家国民经济发展水平的重要标志之一。用化学方法将原料加工成产品的生产过程统称为化工生产过程。其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，各个产品的生产工艺都是遵循相同的规律：原料预处理—化学反应—产品精制。通常所说的“三传一反”即概括了化工生产过程的全部特征。“三传”为动量传递、热量传递和质量传递（化工单元操作），“一反”为化学反应过程。

质量传递是自然界和工程技术领域普遍存在的现象。敞口水杯中的水向空气中蒸发；糖块在水中溶解；用吸收方法脱除烟气中的二氧化硫；从植物中提取药物；催化反应中反应物向催化剂迁移等都是常见的质量传递过程。在近代化学工业的发展中，传质分离过程起到了特别重要的作用。几乎没有一个化工生产过程中，不包含对原料或反应产物的分离提纯操作，从原油中分离出各种燃料油、润滑油和石油化工原料到有机、无机、精细化学品的合成，都离不开对混合物的分离。

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，而现代化学工业是开始于 18 世纪产业革命以后的欧洲。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。当时的煤化学工业按其规模尚不十分巨大，主要着眼于苯、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。19 世纪末，20 世纪初大规模的石油炼制业促进了化工分离技术的成熟与完善。到 20 世纪 30 年代在美国出版了第一部《化学工程原理》一书，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、热量和质量传递以及三者之间的联系。进入 20 世纪 70 年代以后，化工分离技术向更加高级化、应用更加广泛。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、超临界流体萃取技术等等。展望 21 世纪，化工分离技术将面临着一系列新的挑战，其中最主要的是来自能源、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，城市交通和建设以及保健方面做出贡献。

中国是世界文明古国之一，古代劳动人民在长期的生产实践中，在科学技术和化学工艺方面有不少的发明创造，对于中国社会的发展和世界文明曾做出卓越的贡献。如陶瓷、冶金、火药、燃料、酿酒、染色、造纸和无机盐等的生产技术，一直到西方出现资本主义以

前，都走在世界前列。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。

近年来，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，作了大量的工作，取得了一批成果。对板式塔的研究已深入到板式塔内气、液两相流动的动量传递及质量传递的本质研究，开发了新型填料和复合塔；在萃取、蒸发、离子交换、吸附、膜分离等过程，也作了有意义的研究和开发工作。通过这些研究成果的工业应用，改进和强化了现有生产过程和设备，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的作用，同时也促进了化学

工业的进一步发展。

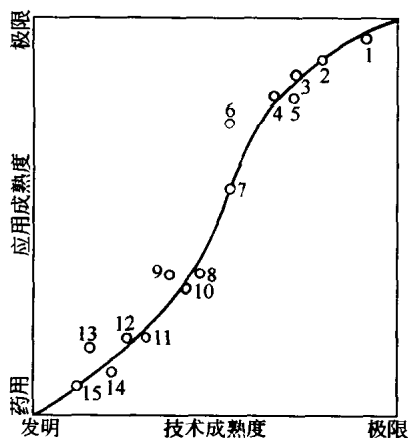


图 0-1 分离过程发展现状

- 1—精馏；2—吸收；3—结晶；4—萃取；
5—共沸（或萃取）精馏；6—离子交换；
7—吸附（气体进料）；8—吸附（液体进料）；
9—膜（液体进料）；10—膜（气体进料）；
11—色层分离；12—超临界萃取；13—液
膜；14—场感应分离；15—亲和分离

不同分离过程的技术成熟程度和应用程度存在着差异，F. J. Zuiderweg 用图 0-1 概括了各分离过程的现状。精馏已有 150 年历史，它的位置在图的右上角附近，正在起步的过程在左下方。这 S 形曲线说明了为什么目前研究对象集中于曲线的中下段，因为曲线在该段的斜率是最大的。

需要说明的是，传质与分离技术不仅仅应用于化学工业。生产实践证明，将地球上的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。由于发明了冶炼术，把金属从矿石中分离出来，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，迎来了原子能时代，原子能的和平利用使人们生活水平大大提高了一步。将水和空气中微量杂质除去的分离技术，大幅度提高了超大规模集成电路元件的成品合格率，使它得以实现商品化生产。深冷分离技术可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、膜分离等分离技术，使人们能从取之不尽的大海中提取淡水，从工、农业污水中回收干净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。人类生活水平的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。

（二）化工分离技术的应用

化学工业涉及的范围非常广泛，以石油、天然气为原料的化学工业包括石油加工、基本有机化工、无机化工、高分子合成、精细化学品合成等。而任何一个化工生产过程，都包含分离技术的应用。事实上，无论在基础建设阶段，还是在正常生产过程中，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。

现以石油化工为例。以地下原油为原料生产汽、煤、柴油、润滑油和基础化工产品。从原油的初馏、催化裂化、加氢裂化、催化重整到润滑油的生产，所有工艺过程都离不开分离操作。如常压塔、减压塔、吸收塔、汽提塔、抽提塔、芳香烃蒸馏塔等都是典型的分离过程。以直馏汽油为原料，生产各种轻质芳香烃为目的的催化重整装置示意，如图 0-2 所示。

装置包括原油的预处理（预分馏和预加氢）、催化重整、溶剂油抽提和芳香烃精馏四个

部分。此生产过程除催化重整属化学反应外，原油的预处理（预分馏和预加氢）、溶剂油抽提和芳香烃精馏均属于化工分离过程。实际上，现代炼油厂中的前、后处理工序占有着企业的大部分设备投资和操作费用。由此足以见得，分离技术在提高生产过程的经济效益和产品质量中起着举足轻重的作用。对大型的石油工业和以化学反应为核心的化工生产过程，分离装置的费用占总投资的 50%~60%。

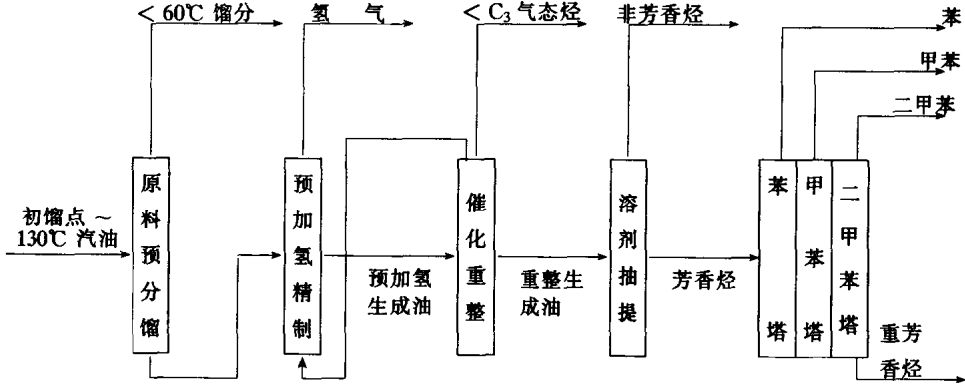


图 0-2 催化重整装置的组成

在某些化工生产装置中，分离操作就是整个过程的主体部分。如，石油裂解气的深冷分离，碳四馏分分离生产丁二烯，和上述的芳烃分离等过程。在无机化工和有机化工中，品种繁多，但是所有生产工艺过程仍然离不开“三传一反”。也就离不开分离过程。

在冶金、食品、生化和原子能等工业也都广泛地应用到分离过程。例如，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要采用分离技术。

随着现代工业趋向大型化生产，所产生的大量废气、废水、废渣更加集中排放，对它们的处理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、氧化氮等都需妥善处理。近年来，由于能源紧张，石油提价，对分离过程的能耗要求越来越苛刻。随之对设备性能要求也越来越高。分离技术的应用越来越得到人们的高度重视。

上述种种原因都促使对常规分离过程如精馏、吸收、吸附、萃取、结晶、蒸发等不断改进和发展；同时新的分离技术与方法，如固膜与液膜分离、热扩散、色层分离等也不断出现和得到工业化应用。

二、传质与分离过程的分类和特征

分离过程可分为机械分离和传质分离两大类。机械分离过程的分离对象是由两相以上所组成的混合物。其目的只是简单地将各相加以分离。例如，过滤、沉降、离心分离、旋风分离和静电除尘等。这类过程在工业上是重要的，但不是本课程要讨论的内容。传质分离过程用于各种均相混合物的分离，其特点是有质量传递现象发生。按所依据的物理化学原理不同，工业上常用的传质分离过程又可分为两大类，即平衡分离过程和速率分离过程。

（一）平衡分离过程

平衡分离过程系借助分离媒介（如热能、溶剂、吸附剂等）使均相混合物系统变为两相体系，再以混合物中各组分在处于平衡的两相中分配关系的差异为依据而实现分离。

分离媒介可以是能量媒介 (ESA) 或物质媒介 (MSA), 有时也可两种同时应用。ESA 是指传入系统或传出系统的热; 还有输入或输出的功。MSA 可以只与混合物中的一个或几个组成部分互溶。此时, MSA 常是某一相中浓度最高的组分。例如, 吸收过程中的吸收剂, 萃取过程中的萃取剂等等。MSA 也可以和混合物完全互溶。当 MSA 与 ESA 共同使用时, 还可选择性地改变组分的相对挥发度, 使某些组分彼此达到完全分离, 例如萃取精馏。

根据两相状态不同, 平衡分离过程可分为如下几类。

气液传质过程: 如吸收、气体的增湿和减湿。

汽液传质过程: 如液体的蒸馏和精馏。

液液传质过程: 如萃取。

液固传质过程: 如结晶、浸取、吸附、离子交换、色层分离、参数泵分离等。

气固传质过程: 如固体干燥、吸附等。

上述的固体干燥、气体的增湿与减湿、结晶等操作同时遵循热量传递和质量传递的规律, 一般列入传质单元操作。表 0-1 列出了工业常用的基于平衡分离过程的分离单元操作。

表 0-1 平衡分离过程的分离单元操作

序号	名 称	原料相态	分离媒介	产生相态或 MSA 的相态	分离原理	工业应用实例
1	闪蒸	液体	减压	气体	挥发度(蒸气压)有较大差别	由海水淡化生产纯水
2	部分冷凝	气体	热量(ESA)	液体	挥发度(蒸气压)有较大差别	由氨中回收氢气和氮气
3	精馏	气、液或气液混合物	热量(ESA)有时用机械功	气体或液体	挥发度(蒸气压)有差别	石油裂解气的深冷分离
4	萃取精馏	气、液或气液混合物	液体溶剂(MSA)和塔釜加热	气体或液体	溶剂改变原溶液组分的相对挥发度	以苯酚作溶剂由沸点相近的非芳烃中分离甲苯
5	共沸精馏	气、液或气液混合物	液体共沸剂(MSA)和热量(ESA)	汽体和液体	共沸剂改变原溶液组分的相对挥发度	以醋酸丁酯作共沸剂从稀溶液中分离醋酸
6	吸收	气体	液体吸收剂(MSA)	液体	溶解度不同	用乙醇胺类吸收以除去天然气中的 CO_2 和 H_2S
7	液-液萃取	液体	液体萃取剂(MSA)	液体	不同组分在两液相中的溶解度不同	以丙烷作萃取剂从重渣油中脱出沥青
8	干燥	液体, 更常见是固体	气体(MSA); 热量(ESA)	气体	水分蒸发	用热空气脱除聚氯乙烯中的水分
9	蒸发	液体	热量	气体	蒸气压不同	由氢氧化钠的水溶液中蒸出水分
10	结晶	液体	冷量或热量	固体	利用过饱和度	用二甲苯混合物中结晶分离对二甲苯
11	吸附	气体或液体	固体吸附剂	固体	吸附作用的差别	通过分子筛吸附空气中的水分
12	离子交换	液体	固体树脂	固体	质量作用定义	水的软化
13	泡沫分离	液体	表面活性剂与鼓泡	液体(两种)	气泡的气液界面吸附	清除废水中的洗涤剂; 矿石浮选
14	区域冶炼	固体	热量	液体	凝固趋势的差别	金属的超提纯

(二) 速率分离过程

速率分离过程是指借助某种推动力，如浓度差、压力差、温度差、电位差等的作用，某些情况下在选择性透过膜的配合下，利用各组分扩散速度的差异而实现混合物的分离操作。这类过程的特点是所处理的物料和产品通常属于同一相态，仅有组成的差别。

速率分离可分为膜分离和场分离两大类。

1. 膜分离

膜分离是利用流体中各组分对膜的渗透速率的差别而实现组分分离的单元操作。膜可以是固态或液态，所处理的流体可以是气体或液体、过程的推动力可以是压力差、浓度差或电位差。

表 0-2 对几种主要的膜分离过程作了简单描述。

表 0-2 几种主要的膜分离过程

名称	分离原理	推动力	膜类型	应用
超滤	按粒径选择分离溶液中所含的微粒和大分子	压力差	非对称性膜	溶液过滤和澄清,以及大分子溶质的分级
反渗透	对膜一侧的料液施加压力,当压力超过它的渗透压时,溶剂就会逆着自然渗透的方向作反向渗透	压力差	非对称性膜或复合膜	海水和苦咸水淡化、废水处理、乳品和果汁的浓缩以及生化和生物制剂的分离和浓缩等
渗析	利用膜对溶质的选择透过性,实现不同性质溶质的分离	浓度差	非对称性膜 离子交换膜	人工肾、废酸回收、溶液脱酸和碱液精制等方面
电渗析	利用离子交换膜的选择透过性,从溶液中脱除或富集电解质	电位差	离子交换膜	海水经过电渗析,得到的淡化液是脱盐水,浓缩液是卤水
气体渗析分离	利用各组分渗透速率的差别,分离气体混合物	分压差	均匀膜、复合膜、 非对称性膜	合成氨弛放气或从其他气体中回收氨
液膜分离	以液膜为分离介质分割两个液相	浓度差	液膜	烃类分离、废水处理、金属离子的提取和回收等

此外，属于新的膜分离技术的尚有渗透蒸发、膜蒸馏等，不再一一介绍。

2. 场分离

场分离包括电泳、热扩散、高梯度磁力分离等。

热扩散属场分离的一种，以温度梯度为推动力，在均匀的气体或液体混合物中出现分子量较小的分子（或离子）向热端漂移的现象，建立起浓度梯度，以达到组分分离的目的。该技术用于分离同位素、高粘度的润滑油，并预计在精细化工和药物生产中可得到应用。

传质分离过程的能量消耗，常构成单位产品成本的主要因素之一，因此降低传质分离过程的能耗，受到全球性普遍重视。膜分离和场分离是一类新型的分离操作，由于其具有节约能耗，不破坏物料，不污染产品和环境等突出优点，在稀溶液、生化产品及其他热敏性物料分离方面，有着广阔的应用前景。研究和开发新的分离方法和传质设备，优化传统传质分离设备的设计和操作，不同分离方法的集成化，化学反应和分离过程的有机结合，都是值得重视的发展方向。

(三) 传质设备

应用于平衡分离过程的设备，其功能是提供两相密切接触的条件，进行相际传质，从而

达到组分分离的目的。性能优良的传质设备，一般应满足以下要求：

(1) 单位体积中，两相的接触面积应尽可能大，两相分布均匀，避免或抑制短路及返混；

(2) 流体的通量大，单位设备体积的处理量大；

(3) 流动阻力小，运转时动力消耗低；

(4) 操作弹性大，对物料的适应性强；

(5) 结构简单，造价低廉，操作调节方便，运行可靠安全。

传质设备种类繁多，而且不断有新型设备问世，可按照不同方法进行分类。

按所处理物系的相态可分为：气（汽）液传质设备（用于蒸馏及吸收等），液液传质设备（用于萃取等），气固传质设备（用于干燥、吸附），液固传质设备（用于吸附、浸取、离子交换等）。

按两相的接触方式可分为：分级接触设备（如各种板式塔，多级混合-澄清槽、多级流化床吸附等）和微分接触设备（如填料塔、膜式塔、喷淋塔、移动床吸附柱等）。在级式接触设备中，两相组成呈阶梯式变化，而在微分接触设备中，两相组成沿设备高度连续变化。

按促使两相混合和实现两相密切接触的动力可分为两类：一类是依靠流体自身所具有的能量分散到另一相中去的设备，如大多数的板式塔、填料塔、流化床、移动床等；另一类是依靠外加能量促使两相密切接触的设备，如搅拌式混合-澄清槽、转盘塔、脉冲填料塔、往复复式筛板塔等。

此外，对于气固和液固传质设备，还可按固体的运动状态分为固定床、移动床、流化床和搅拌槽等。其中流化床传质设备采用流态化技术，将固体颗粒悬浮在流体中，使两相均匀接触，以实现强化传热、传质和化学反应的目的。

传质设备在石油、化工、轻工、冶金、食品、医药、环保等工业部门的整个生产设备中占很大比例。因此，合理选择设备，完善设备设计，优化设备操作，对于节省投资，减少能耗，降低成本，提高经济效益，有着十分重要的意义。

三、本课程的内容与任务

本课程是高等职业教育化工类各专业的一门专业技术基础课。是在数学、物理化学、化工制图和计算技术等基础知识上必修的技术基础课。也是从事化工生产、建设、管理、服务第一线需要的具有创新精神和较强实践能力的应用性专门人才知识结构中的重要组成部分。

1. 内容

传质与分离技术课的主要学习内容是化工生产中以物理加工过程为背景，按操作原理的共性归纳成的传质分离单元操作。传质与分离技术属于工程技术技能的范畴，它用自然科学的规律来考虑、解释和处理工程实际问题。以技术应用能力为主线，突出“实际、实用、实践”的基本原则，强调工程技术观点和实践技能训练；注重理论与实际相结合；突出实用性；着重培养学生分析和解决问题的能力，初步树立创新意识、安全生产意识、质量意识和环境保护意识，并了解新型分离技术在化工生产中的应用。学生将从这门课程开始进入化工专业领域的学习。

2. 任务

本课程的主要任务是使学生获得传质与分离化工单元操作过程及设备的基础知识、基本理论和基本应用能力，并受到必要的基本操作技能训练。为学生学习后续专业课程和将来从