

分离工程

吴俊生·邓修·陈同芸·编著

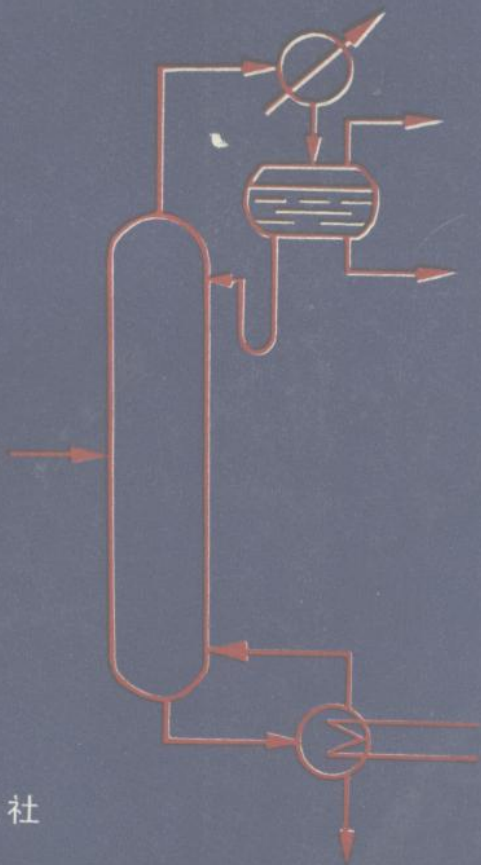
FENGLI GONGCHENG

WUJUNSHENG·DENGXIU

CHENGTONGYUN·BIANZHU

HUADONG HUAGONG XUEYUAN

CHUBANSHE



28
3

• 华东化工学院出版社

TQ 028

W 83

分 离 工 程

吴俊生 邓 修 陈同芸 编著

华东化工学院出版社

(沪)新登字 208 号

分 离 工 程

Fenli Gongchen

吴俊生 邓 修 陈同芸 编著

华东化工学院出版社出版

(上海市梅陇路 130 号)

新华书店上海发行所发行

江苏句容排印厂排版

上海长鹰印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 13.5 插页 2 字数 357 千字

1992 年 8 月第 1 版 1992 年 8 月第 1 次印刷

印数 1-3000 册

ISBN 7-5628-0218 -1/TQ·31

定价 4.40 元

0.037/02

内 容 提 要

分离工程是化学工程的一个重要分支。本书以分离过程开发为主线论述有关的工程问题,如分离方法的选择、分离流程的安排和节能、分离操作和设备的设计计算、分离设备的传质特性和强化以及分离操作的实验研究方法等。本书包括概论、精馏、吸收、萃取、新分离方法简介以及分离过程的节能和流程安排等共六章。编写中力求阐明原理简明扼要、深入浅出,论述的内容密切结合工程实际,具有较强的实用性。

本书可作为高等院校化学工程、工业化学等专业的教材,也可供其它专业和工程技术人员参考。

本书第1、2、6章由吴俊生编写,第3、5章由邓修编写,第4章由陈同芸编写。

序

分离工程是化学工程学科的重要分支。自1901年戴维斯(Davis)所著的化学工程师手册问世以来,化学工程学科有了很大进步。它试图揭示化工过程的本质及其变化规律,使化工过程与设备设计、放大与操作诸方面得以优化。

宇宙间一切天然物质以及人工合成物质,其极大部分是混合物,分离工程就是将混合物分离与提纯的工程科学,它既是化学工程学科的分支,又与化学工艺相联系。

近年来,我国高等院校化工专业都将“分离工程”作为一门重要的课程来开设。

本书的作者长期从事传质与分离方面的科学研究工作。多年来开设本课程,积累了丰富的教学经验。作者试图以分离工程的开发为指导思想,兼顾分离方法的选择、节能、工艺设置原则,综合论述各单元操作及其效率。

全书说理严谨,层次分明,所选实例大都来自实际课题,可以作为高等院校化工专业教材或企业化工工程技术人员的自学参考书。特此推荐。

施亚钧

目 录

| | |
|--|----|
| 1 概论 | 1 |
| 1.1 概述 | 1 |
| 1.1.1 分离操作在化工生产中的地位 | 1 |
| 1.1.2 传质分离操作的分类 | 3 |
| 1.1.3 开发方法 | 7 |
| 参考文献 | 12 |
| 2 精馏 | 13 |
| 2.1 概述 | 13 |
| 2.1.1 精馏操作的处理方法 | 14 |
| 2.1.2 精馏操作的开发步骤 | 16 |
| 2.2 汽液相平衡 | 17 |
| 2.2.1 求取相平衡常数的两条途径 | 18 |
| 2.2.2 汽、液相平衡系统的分类 | 19 |
| 2.2.3 逸度、逸度系数和焓的基本关系式 | 20 |
| 2.2.4 真实气体理想溶液的逸度 | 22 |
| 2.2.5 从状态方程计算逸度 f_i 和逸度系数 ϕ_i | 25 |
| 2.2.6 纯液体逸度的计算 | 27 |
| 2.2.7 过剩自由焓与活度系数的关系 | 29 |
| 2.2.8 沃尔(Wohl)型方程 | 31 |
| 2.2.9 应用局部组成概念的模型——威尔逊、NRTL和 UNIQUAC 模型 | 33 |
| 2.2.10 烃类系统相平衡常数的估计 | 37 |
| 2.2.11 从实测的汽液平衡数据求取活度系数方程中的 参数 | 38 |
| 2.2.12 多组分系统的泡点和露点计算 | 39 |
| 2.2.13 闪蒸过程的计算 | 47 |
| 2.3 精馏计算 | 52 |

| | | |
|--------|----------------------------------|-----|
| 2.3.1 | 精馏的数学模型 | 53 |
| 2.3.2 | 精馏操作型的严格计算 | 54 |
| 2.3.3 | 精馏的设计型计算 | 66 |
| 2.3.4 | 多组分精馏塔内的浓度、温度和流率分布 | 83 |
| 2.3.5 | 精馏操作压力的选择 | 86 |
| 2.4 | 特殊精馏 | 87 |
| 2.4.1 | 萃取精馏 | 88 |
| 2.4.2 | 恒沸精馏 | 103 |
| 2.4.3 | 恒沸精馏与萃取精馏的比较 | 112 |
| 2.5 | 板效率 | 112 |
| 2.5.1 | 效率的四种表示方法 | 113 |
| 2.5.2 | 点效率与传质间的关系 | 114 |
| 2.5.3 | 塔板上液体混合情况对板效率的影响 | 115 |
| 2.5.4 | 液体经塔板的非理想流动 | 119 |
| 2.5.5 | 汽体在板间的不完全混合和通过塔板的不均匀 流动 | 122 |
| 2.5.6 | 雾沫夹带的影响 | 123 |
| 2.5.7 | 塔效率和板效率的关系 | 126 |
| 2.5.8 | 系统物性对板效率的影响 | 129 |
| 2.5.9 | 效率的估算 | 131 |
| 2.5.10 | 多组分系统的效率 | 133 |
| 2.5.11 | 板效率的其它表示法 | 134 |
| 2.5.12 | 填料精馏塔的理论板当量高度(HETP) | 136 |
| | 参考文献 | 137 |
| 3 | 吸收过程开发 | 140 |
| 3.1 | 吸收过程在化学工业中的应用 | 142 |
| 3.1.1 | 吸收装置的工业流程 | 142 |
| 3.1.2 | 吸收过程的应用 | 148 |
| 3.2 | 吸收过程的设计变量和对工艺生产的适应性 | 149 |
| 3.2.1 | 设计关键参数分析 | 151 |

| | | |
|-------|--------------------------------|-----|
| 3.2.2 | 吸收过程对工艺生产的适应性 | 152 |
| 3.3 | 气液相平衡 | 153 |
| 3.3.1 | 物理溶解时的相平衡 | 154 |
| 3.3.2 | 伴有化学反应的吸收相平衡 | 160 |
| 3.3.3 | 相平衡曲线及其比较 | 164 |
| 3.3.4 | 工业应用实例 | 165 |
| 3.4 | 传质理论及界面阻力 | 169 |
| 3.4.1 | 传质理论 | 169 |
| 3.4.2 | 相界面阻力 | 174 |
| 3.4.3 | 表面湍动 | 176 |
| 3.5 | 传质速率与传质系数 | 182 |
| 3.5.1 | 物理吸收传质速率 | 182 |
| 3.5.2 | 化学吸收传质速率与增强因子 | 185 |
| 3.5.3 | 传质系数的关联式 | 191 |
| 3.6 | 化学吸收与增强因子 | 193 |
| 3.6.1 | 化学吸收的分类及其判别 | 193 |
| 3.6.2 | 以不同传质理论处理化学一级不可逆反应 | 199 |
| 3.6.3 | 不可逆瞬时化学反应 | 212 |
| 3.6.4 | 不可逆二级反应 | 216 |
| 3.6.5 | 可逆反应 | 219 |
| 3.7 | 塔径 | 224 |
| 3.8 | 塔高 | 227 |
| 3.8.1 | 低浓度气体吸收时的填料高度 | 228 |
| 3.8.2 | 高浓度气体吸收时的填料高度 | 228 |
| 3.8.3 | 多组分逆流吸收塔的填料高度——吸收 因子法 | 234 |
| 3.8.4 | 伴有化学反应时的吸收塔的填料高度 | 248 |
| | 参考文献 | 253 |
| 4 | 液液萃取 | 255 |
| 4.1 | 概述 | 255 |

| | | |
|----------|-------------------------|------------|
| 4.1.1 | 萃取过程的处理及其特殊性 | 255 |
| 4.1.2 | 萃取过程的开发研究方法及其主要内容 | 256 |
| 4.2 | 液液相平衡 | 257 |
| 4.2.1 | 溶剂与原溶剂完全不互溶情况的相平衡 | 257 |
| 4.2.2 | 溶剂与原溶剂部分互溶情况的相平衡 | 258 |
| 4.2.3 | 液液平衡数据的预测 | 265 |
| 4.3 | 平衡级的确定 | 265 |
| 4.3.1 | 实验模型法测定平衡级 | 265 |
| 4.3.2 | 多级逆流萃取平衡级模型及其计算 | 270 |
| 4.4 | 传质单元数的计算 | 277 |
| 4.5 | 液液萃取设备 | 279 |
| 4.5.1 | 液液萃取设备的分类 | 279 |
| 4.5.2 | 液液萃取设备的选择 | 280 |
| 4.5.3 | 萃取设备的设计放大和中试 | 282 |
| 4.5.4 | 萃取设备中液液两相的流动和传质特性 | 284 |
| 4.5.5 | 轴向混和 | 292 |
| 4.5.6 | 典型萃取设备的设计和放大 | 297 |
| | 参考文献 | 305 |
| 5 | 新分离方法 | 307 |
| 5.1 | 泡沫吸附分离技术 | 307 |
| 5.1.1 | 泡沫吸附分离技术的分类 | 308 |
| 5.1.2 | 泡沫分离流程设置及操作 | 310 |
| 5.1.3 | 泡沫分离基本原理 | 312 |
| 5.1.4 | 特点与应用 | 325 |
| 5.2 | 超临界萃取 | 326 |
| 5.2.1 | 超临界萃取的基本原理 | 327 |
| 5.2.2 | 超临界萃取的原则流程 | 329 |
| 5.2.3 | 超临界萃取在工业中的应用 | 331 |
| 5.2.4 | 超临界萃取的特点 | 334 |
| 5.3 | 固膜分离技术 | 335 |

| | | |
|----------|----------------------------|------------|
| 5.3.1 | 概述 | 336 |
| 5.3.2 | 基本工作原理 | 338 |
| 5.3.3 | 膜的特性及制备 | 346 |
| 5.3.4 | 工业应用 | 350 |
| 5.3.5 | 电渗析简介 | 355 |
| 5.4 | 热扩散简介 | 364 |
| 5.4.1 | 基本原理及其机理 | 364 |
| 5.4.2 | 热扩散的应用实例 | 367 |
| 5.5 | 分离方法的选择 | 370 |
| | 参考文献 | 375 |
| 6 | 节能和化工流程模拟系统简介 | 378 |
| 6.1 | 分离过程的节能 | 378 |
| 6.1.1 | 有效能(焓)衡算 | 378 |
| 6.1.2 | 分离最小功 | 380 |
| 6.1.3 | 热力学效率 | 382 |
| 6.1.4 | 分离过程中有效能损失的主要形式 | 382 |
| 6.1.5 | 节省精馏过程能耗的一些措施 | 384 |
| 6.2 | 多组分物料精馏分离流程 | 392 |
| 6.2.1 | 多组分精馏流程方案数 | 392 |
| 6.2.2 | 安排分离流程的一些经验规则 | 393 |
| 6.2.3 | 三组分物料精馏分离流程 | 396 |
| 6.3 | 化工过程模拟程序系统简介 | 403 |
| 6.3.1 | 引论 | 403 |
| 6.3.2 | 序贯模块通用模拟系统的结构 | 405 |
| 6.3.3 | 输入数据 | 407 |
| 6.3.4 | 方程联列求解和联列模块结构 | 408 |
| 6.3.5 | 数据库 | 409 |
| 6.3.6 | 化工定态模拟系统的应用 | 412 |
| | 参考文献 | 414 |

1 概 论

1.1 概 述

1.1.1 分离操作在化工生产中的地位

化工生产过程的设备一般由反应器、分离设备和机、泵、换热器等构成。反应器虽然其投资往往只占总投资的小部分，但对产品的质量 and 产量，以及原材料的利用率起决定性的影响，是生产过程的核心设备。分离操作是生产过程的重要组成部分，分离设备的投资往往占总投资的不小部分，对原料、中间产物和产品起着分离和提纯的作用。分离一方面为反应提供适宜的反应物配比，清除对反应或催化剂有害的杂质，保证反应的顺利进行；另一方面分离对反应产物起着分离提纯的作用，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过程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中起重要作用。

图 1-1 所示为乙烯水合生产乙醇的示意流程图。过程的核心是固定床催化反应器，在约 300℃ 和 6.5MPa 下进行反应： $C_2H_4 + H_2O \rightleftharpoons C_2H_5OH$ 。因为热力学平衡的限制，乙烯的单程转化率仅 5%。为提高原料气乙烯的利用率，大量未反应的乙烯必须循环利用。图中在高压下操作的分凝器和水吸收塔就是用来回收未反应乙烯的。由于原料气中含有杂质以及反应器中发生副反应，粗乙醇水溶液中含有乙醚、乙醛、异丙醇等杂质或副产物。在粗馏塔中，乙醇及乙醚、乙醛等从塔顶馏出，呈气态进入催化加氢反应器，乙醛转化为乙醇。加氢产物进入轻馏分蒸出塔从塔顶蒸出乙

醚，塔底产物进入产品精馏塔精制。由该精制塔顶部侧线抽出组成接近乙醇水恒沸物的产品，拔顶轻馏分则回入加氢反应器。除图 1-1 所示的设备外，可能还需要原料气乙烯的提纯设备和清除其中对催化剂有毒性组分的设备。

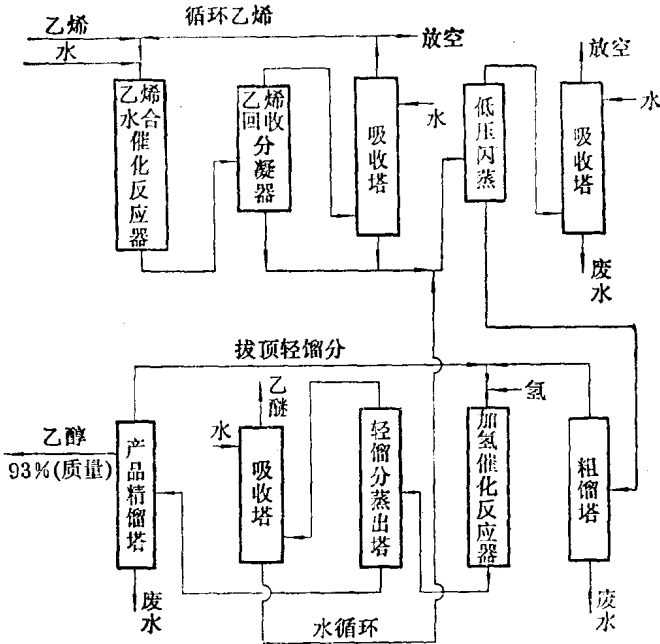


图 1-1 乙烯水合制乙醇的示意流程

上述典型的石油化工生产流程清楚地表明了分离过程的作用及其重要性。分离操作包括机械分离(如沉降、过滤)和传质分离(如蒸馏、吸收、萃取、膜分离)两类。前者用来分离非均相物料,后者则用来分离均相混合物。本书的分离工程,是以传质分离操作为研究对象的。它应用物理化学、化工热力学、传递原理和化工原理中研究的基本原理和知识,研究和处理传质分离过程的开发和设计中遇到的工程问题,包括适宜分离方法的选择,分离流程和操作条件的确定和优化,传质分离设备的传质特性、选型和强化,传

质操作和设备的设计计算,以及分离操作的实验研究方法等,以实现分离过程的高产、优质、低消耗,达到优良的经济效益。本书主要讨论工业上应用最广的精馏、吸收和萃取操作,对已获得工业应用并有良好应用前景的膜分离操作、超临界萃取和泡沫吸附分离等新分离方法也作了简要介绍。

1.1.2 传质分离操作的分类^{[1][2][3]}

传质分离操作主要用来分离均相混合物,在分离过程中,原料中的某个(或某些)组分依赖扩散作用从原料流向产品流进行传递。大多数传质分离操作的分离基础是原料中各组分在相平衡时两个相中的不同分配。这类分离操作通称为平衡分离过程。工业上应用最广的蒸馏、吸收和萃取操作均属此列。此外,还有一些传质分离操作依靠原料中不同组分在某种推动力(例如压差、浓度差、电位差)作用下经过某种介质(如半透膜)时的传质速率差异而实现分离。这类分离操作称为速率分离过程,各种膜分离操作、热扩散和气体扩散属于此列。

表 1-1 列举了一些应用较广的属平衡分离过程的分离操作。图例中以符号 L 和 V 分别表示物流的液态和汽(气)态, S 表示溶剂。

为实现平衡分离过程,必须在设备中产生两个进行接触传质的相,为此必须应用适当的分离媒质。有的操作中应用热能为分离媒质,如精馏,有的则靠加入溶剂(如吸收和萃取);还有些操作中兼有两者(如萃取精馏和恒沸精馏)。原料中的待分离组分在平衡两相中的不同分配,即分离的基础受热力学规律控制,两相平衡的达到则受相际传质速率控制。

分离操作一直是十分活跃的领域。随着对充分利用资源和降低能耗要求的提高,以及生物工程、高分子材料等的发展和环境保护的需要,不仅促使已有分离方法技术更加完善,而且不断提出新的分离方法,以适应不同原料和各种分离要求。或许可以说,各种各样的物理和化学现象都可能被用作为分离操作的基础。膜分离

操作是获得广泛研究并得到工业应用的新分离方法，由于它们操

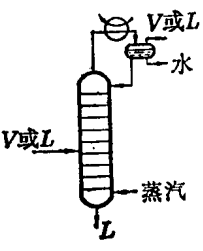
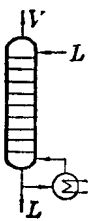
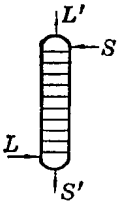
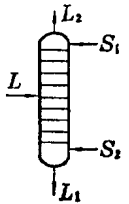
表 1-1 平衡分离操作

| 名称 | 图 例 | 原料相态 | 第二相相态 | 分离媒质 | 工业应用举例 |
|------------|-----|-----------|-------|-----------|---------------------------|
| 闪蒸 | | 液 | 汽 | 降 压 | 由海水制取淡水 |
| 分凝 | | 汽 | 液 相 | 热 能 | 从氨合成弛放气中回收氢和氮 |
| 蒸 馏 | | 汽、液或汽液混合物 | 汽相和液相 | 热能、有时用机械功 | 石油裂解气的深冷分离 |
| 萃 取 精 馏 | | 汽、液或汽液混合物 | 汽相和液相 | 液体溶剂和热能 | 用酚作溶剂，从沸点与甲苯相近的非芳烃溶液中分离甲苯 |

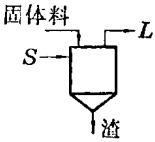

(续表)

| 名称 | 图例 | 原料相态 | 第二相相态 | 分离媒质 | 工业应用举例 |
|------|----|-----------|-------|---------|--------------------------------|
| 恒沸精馏 | | 汽、液或汽液混合物 | 汽相和液相 | 液体溶剂和热能 | 以醋酸丁酯作溶剂从稀水溶液中分离醋酸 |
| 吸收 | | 汽(气) | 液 | 溶剂 | 以乙醇胺为溶剂从烟道气中分离二氧化碳 |
| 重沸吸收 | | 汽、液或汽液混合物 | 汽相和液相 | 溶剂和热能 | 从催化裂化过程的主要分馏塔的馏出液中脱除乙烷和比乙烷轻的组分 |
| 脱吸 | | 液 | 汽 | 脱吸蒸汽 | 原油塔的侧线抽出的石脑油、煤油和粗柴油馏分的汽提 |

(续表)

| 名称 | 图例 | 原料相态 | 第二相相态 | 分离媒质 | 工业应用举例 |
|-----------------|---|-------------------|-----------|-------------|--|
| 回流脱吸 (水蒸气蒸馏) |  | 汽、液或 汽液混合 物 | 汽相和液 相 | 脱吸蒸汽 和热能 | 原油减压 蒸馏用水 蒸气作脱 吸介质 |
| 重沸 脱吸 |  | 液 | 汽 | 热 能 | 从石脑油 馏分中脱 除轻组分 |
| 液液 萃取 |  | 液 | 液 | 溶 剂 | 以丙烷为 溶剂、从 重渣油中 脱除沥青 |
| 双溶 剂萃 取 |  | 液 | 液 | 两种溶剂 | 以丙烷、 甲酚为双 溶剂，从 芳烃和环 烷烃中分 离链烷烃 |

(续表)

| 名称 | 图 例 | 原料相态 | 第二相相态 | 分离媒质 | 工业应用举例 |
|----|---|------|-------|-------|------------------------|
| 浸取 |  | 固 | 液 | 溶 剂 | 用水从甜菜中提取糖 |
| 吸附 |  | 汽或液 | 固 | 固体吸附剂 | 用分子筛为吸附剂, 从空气中分离氧氮制取富氧 |

作简单, 能耗低, 适合于常温或接近常温操作, 对热敏性物料的分
离特别适合, 有着广阔的应用前景。表 1-2 列举了一些重要的膜
分离操作。

1.1.3 开发方法^[4]

传质分离操作的开发是研究适宜分离方法的工业化途径的, 以期经济合理地实现规定的分离任务。分离操作的开发一般需要解决: 1) 适宜分离方法、流程和操作条件的选择; 2) 分离设备的合理选型; 3) 分离设备几何尺寸的确定。

如果能够从最基本的规律出发, 应用数学分析工具建立起传质分离操作中各有关变量的解析式, 那么传质分离操作的开发将是十分经济有效的。但是, 因为传质分离操作十分复杂, 处理物料的性质又千差万别, 描述操作需要很多变量, 而且设备结构相当复杂, 难以建立起适当的边界条件方程, 因此难以应用数学分析方法直接解决开发问题。众所周知, 工程上有两种典型的开发方法, 即逐级经验放大和数学模型方法, 现分别简要讨论于下: