




# 《分离工程》

## 第1讲 概述

漆志文

德国马普学会过程强化技术伙伴研究团队  
化学工程联合国家重点实验室  
华东理工大学  
zwqi@ecust.edu.cn



# 教学进度安排

第一讲: 概 论

第二讲: 精 馏 — 汽液相平衡

第三讲: 单级气液平衡计算 — 泡露点、等温闪蒸计算


第四讲: 精馏塔的数学模型及计算

第五讲: 精馏塔的简捷计算

第六讲: 精馏操作 — 压力的选择、精馏分离流程的选择

第七讲: 特殊精馏 — 萃取精馏

第八讲: 特殊精馏 — 恒沸精馏



第九讲: 板效率

第十讲: 吸收概述 — 应用、气液相平衡、传质速率

第十一讲: 化学吸收传质速率 — 不可逆一级反应


第十二讲: 化学吸收传质速率 — 不可逆瞬时反应和二级反应

第十三讲: 吸收过程简捷计算 & 传质单元法

第十四讲: 液液萃取

第十五讲: 膜分离技术

第十六讲: 复 习



# 成绩评定

- 平时 30% (作业, 课堂练习, 提问)
- 考试 70% (闭卷)




# 教材和参考书

(概念 - 原理 - 方法 - 应用)

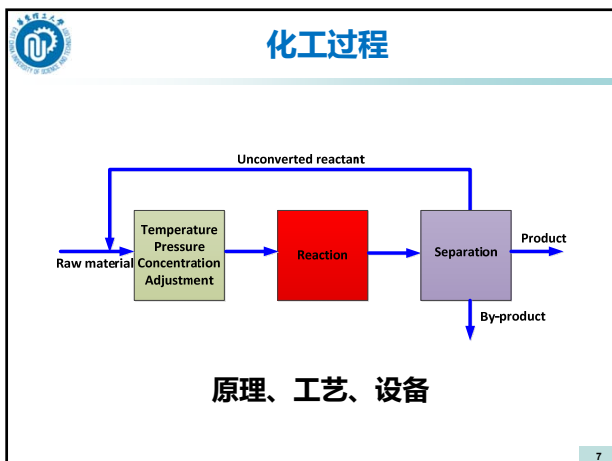






# 第一章 概述

- 化工分离工程内涵
- 分离因子
- 过程开发及方法
- 分离方法的选择
- 分离过程的集成



## 1.1 化工分离工程及其研究内容

### 什么是分离工程?

- 化学工程学科的重要组成部分
- 研究化工及其它相关过程中物质的分离和纯化方法的一门技术科学
- 与环保、生物、材料等领域交叉结合

- ## 分离的应用领域
- ❖ **化学** - 炼油、化工原料的精制；产品分离
  - ❖ **材料** - 高纯试剂、材料颗粒
  - ❖ **食品** - 食用油、咖啡豆脱咖啡因
  - ❖ **医药** - 中成药提取、化学制药产品分离
  - ❖ **生化** - 抗生素纯化、DNA检测
  - ❖ **环保** - 生活、工业污水治理
  - ❖ **核能** - 同位素 $U^{238}$ 和 $U^{235}$ 的分离
  - .....

## 分离的分类 – 按照过程规模

**分析级分离**

- 规模很小
- 定量分析

例: 色谱分离

**制备级分离**

- 规模小
- 研究用材料

例: 离心分离

**工业级分离**

- 规模大
- 经济

例: 精馏分离

化工厂中  
分离**设备投资**约占总投资的**50 ~ 90%**  
分离过程**耗能**约占全厂**70 ~ 80%**

- ## 常规的分单元操作
- 精馏（特殊精馏）、吸收、吸附、萃取、结晶、浸取
  - 蒸发、干燥、过滤
  - 膜分离（透析、反渗透、电渗析、超滤、微滤、纳滤、渗透蒸发、气体膜分离等）

## 常规的分单元操作

分离单元操作	目的	原理（过程推动力）
液体精馏	均相混合物分离	各组分间挥发度的不同
气体吸收	均相混合物分离	各组分在溶剂中溶解度的不同
萃 取	均相混合物分离	各组分在溶剂中溶解度的不同
吸 附	均相混合物分离	各组分在吸附剂中的吸附能力不同
蒸 发	溶剂与不挥发性溶质的分离	供热以汽化溶剂
干 燥	去湿	供热汽化

## 分离剂与推动力

各种场或梯度都可以用于分离过程：

**常规推动力：** C、T、P

**外场推动力：** U、G、M

原料  
气、液、固

分离剂（物质或能量）

分离设备

产品I  
产品II

极限 → 热力学  
速率 → 动力学

13

## 分离过程的实现

### 机械分离

——多用于非均相体系分离

根据**密度或颗粒大小**的不同对混合物进行分离，**相间无质量传递**，如：  
过滤、筛分、离心沉降、旋风分离...

### 传质分离

——用于均相、非均相体系分离

**平衡控制分离：**根据体系处于相平衡时，组分在**不同相态中浓度**不同而实现分离，如萃取、蒸馏、吸附、吸收、层析等

**速率控制分离：**根据物质分子在**外力（场）作用下迁移速率**不同而实现分离，如膜分离、电渗析、透析等

14

## 举例：蒸馏——分离液体混合物的主要方法之一

对液体混合物加热时，沸点较低（或挥发度较大）的组分更容易汽化，因此汽相中低沸点组分含量较高，将其冷凝，就得到低沸点组分含量较高的液体，从而实现了高低沸点组分的部分分离。

要实现蒸馏分离，必须是部分蒸发，而不能完全蒸干

15

## 高效蒸馏 → 精馏

简单的一级蒸馏往往只能实现液体混合物的部分分离。

要提高分离的效果，可以多次重复上述部分蒸发-冷凝过程，即采用多级蒸馏。

一般来说，只要有足够的级数，就能达到所希望分离效果。

**精馏塔：带回流的直立多级蒸馏设备**

16

## 1.2 分离因子

通用表达形式：

$$\alpha_{ij}^s = \frac{x_{i1}/x_{j1}}{x_{i2}/x_{j2}} = \frac{x_{i1}/x_{i2}}{x_{j1}/x_{j2}}$$

$x_{i1}$	$x_{j1}$	产品1
$x_{i2}$	$x_{j2}$	产品2

$\alpha_{ij}^s = f(\text{平衡组成, 传质速率, 设备条件, 操作条件...})$

$\alpha_{ij}^s = 1$   $i, j$  无法分离

$\alpha_{ij}^s > 1$  或  $< 1$  可以分离，**偏离1越远**，越容易分离

17

## 理想分离因子

□ 只考虑**平衡及传递机理**

$$\alpha_{i,j} = \frac{x_{i,1}/x_{j,1}}{x_{i,2}/x_{j,2}}$$

□ 分离因子**低**就需要**更多的分离级数**

18

**理想分离因子举例**

**精馏: V-L-E**

**相对挥发度**

$$\alpha_{A,B} = \frac{y_A / y_B}{x_A / x_B} = \frac{y_A / x_A}{y_B / x_B} = \frac{K_A}{K_B}$$

**液液萃取: L-L-E**

**选择性**

$$\beta_{i,j} = \frac{x_i / x_j}{x'_i / x'_j} = \frac{x_i / x'_i}{x_j / x'_j} = \frac{D_i}{D_j} = \frac{\gamma'_i / \gamma_i}{\gamma'_j / \gamma_j}$$

19

**1.3 分离过程开发方法**

化学实验室的过程与化工过程的区别是什么?

**1. 工程问题**

- ✎ 分离方法的选择
- ✎ 分离流程及操作条件的确定
- ✎ 设备设计

20

**2. 过程开发及方法**

**(1) 经验放大**

小试 → 小规模的中试 → 生产规模工业装置

**目的:** 1. 确定操作形式和设备形式  
2. 确定尺度效应和放大规律

**(2) 数学模型**

物理模型 → 建立数学模型 → 建立模型方程  
实验 → 求模型参数 → 计算机模拟 → 中试验证

**特点:** 节省成本, 缩短开发步骤和周期

21

**1.4 分离方法的选择**

**1. 可行性**

根据**体系的物性/热力学**和**分离单元操作原理**选择分离方法 (匹配度)

- ✎ **物性:** 挥发度, 溶解度, 凝固点, 分子极性, 分子大小及形状, 热敏性等。
- ✎ **操作原理:**

精馏	挥发度差异
吸收	溶解度
泡沫	表面性质
固膜	分子, 离子极性 & 大小

22

**2. 经济性**

市场可得性, 产品的价格,  
操作费用, 投资费用 (设备, 开发设计)

**3. 安全与环保**

- 某些物质和氧气混合后极易发生爆炸, 应避免真空操作 (保持正压);
- 尽量减少三废, 考虑三废对生态环境的影响;

例如: 制药行业/印刷行业溶剂回收;  
乙苯脱氢制苯乙烯的废水经过汽提后循环使用。

23

**案例: 乙苯脱氢反应液的分离**

**主:** c1ccccc1CC >> c1ccccc1C=C + H2

**副:** c1ccccc1CC + H2 >> c1ccccc1C + CH4

c1ccccc1CC >> c1ccccc1 + C2H4

液相 - 苯乙烯, 乙苯, 甲苯, 苯

气相 -  $H_2, CH_4, C_2H_4$

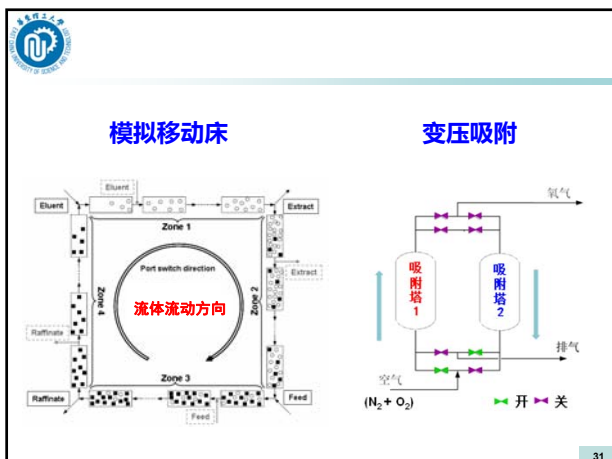
**反应液的分离方案**

**1. 分离方法**

苯乙烯 145°C; 乙苯 130°C;  
甲苯 110°C; 苯 80°C

24





31

### 思考题

- 下列情况中哪类将不引起分子扩散？  
(1) 密度差 (2) 电场 (3) 温差  
(4) 磁场 (5) 浓度 (6) 压差
- 何谓分离因子？以气液相平衡和液液相平衡来说明如何判别分离的难易程度。
- 试对下列过程各举三例。  
(1) 机械分离  
(2) 平衡级分离  
(3) 速率控制分离

32

本讲结束

33

### 参考书

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

Chemical Process Intensification  
Methods and Technologies

## 化工过程强化

方法与技术

刘有强 等编著

PI

化学工业出版社