

FENLI GONGCHENG  
XUEXI ZHIDAO YU XITIJ



# 分离工程 学习指导与习题集

叶庆国 刘名礼 曾涛 编



化学工业出版社

# 分离工程学习指导与习题集

叶庆国 刘名礼 曾 涛 编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书与分离工程课程紧密结合,内容包括:教学目的与要求,重点、难点及对学生的要求,例题详解,练习题及其答案。题型有填空题、选择题、简答题和计算题四种类型。部分计算题提供多种解体思路及解题过程,为学生的课堂以及课后学习提供指导。通过例题解答过程的示范和选作有关练习题,可帮助读者加深对分离工程基本概念的理解,培养和增强工程观念和计算能力,提高分析和解决实际工程问题的能力。

本书可作为高等院校化学工程与工艺专业本科生的教学指导书,亦可供从事化学工程、石油加工及气体分离、制药工程等专业的技术人员参考。

#### 图书在版编目(CIP)数据

分离工程学习指导与习题集/叶庆国,刘名礼,曾涛  
编. —北京:化学工业出版社,2009.2  
ISBN 978-7-122-04362-7

I. 分… II. ①叶…②刘…③曾… III. 分离-化工  
过程-高等学校-教学参考资料 IV. TQ028

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 200207 号

---

责任编辑:徐雅妮

文字编辑:林媛

责任校对:宋玮

装帧设计:史利平

---

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:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市前程装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张14½ 字数384千字 2009年3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:29.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

分离工程课程利用物理化学、化工原理、化工热力学、传递过程原理等基础知识中有关相平衡热力学、动力学、分子及共聚集状态的微观机理, 传热、传质和动量传递理论研究化工生产实际中复杂物系分离和提纯技术。因此, 该课程作为化工类专业的一门骨干专业课程, 具有应用性、实践性较强, 内容涉猎面广、跨度大、知识点多的特点。要想真正学好这门课程, 必须熟练运用相关基本概念, 进行工程分析和解决实际问题。目前, 全国各高校化学工程与工艺专业使用的教材一般均为由化学工程与工艺专业委员会组织编写的分离过程(刘家琪主编, 化学工业出版社), 其他类似的教材已出版了十余部。这些教材有些还未配习题, 即便有习题, 也无参考答案, 即至今没有一本与该课程相关的例题与习题集的出版。为此, 我们根据多年积累的教学经验, 并以叶庆国主编的《分离工程》所列章节为主线, 编写了这本《分离工程学习指导与习题集》。每章列出教学目的与要求, 重点、难点及对学生的要求, 例题详解与练习题。

《分离工程学习指导与习题集》与课程内容紧密结合, 题型有填空题、选择题、简答题和计算题四种类型。例题和习题贯穿相关教材, 有解题过程和答案, 部分题目提供多种解题思路及解题过程, 为学生的课堂以及课后学习提供了有力指导。通过例题解答过程的示范和选作有关练习题, 可帮助读者加深对分离工程基本概念的理解, 培养和增强工程观念和计算能力, 掌握和应用分离工程的基本原理, 进而提高分析和解决实际工程问题的能力。

本书由青岛科技大学叶庆国、山东师范大学刘名礼和烟台大学曾涛编写。全书由叶庆国审稿。

尽管编者倾注了大量精力, 但因水平所限, 不足之处在所难免, 衷心希望读者指正。

编者  
2008 年 10 月

# 目 录

|                        |    |                        |    |
|------------------------|----|------------------------|----|
| 第一章 绪论 .....           | 1  |                        |    |
| 一、内容说明 .....           | 1  | (三) 简答题 .....          | 2  |
| (一) 教学目的与要求 .....      | 1  | 三、练习题 .....            | 3  |
| (二) 重点、难点及对学生的要求 ..... | 1  | (一) 填空题 .....          | 3  |
| 二、例题详解 .....           | 1  | (二) 选择题 .....          | 3  |
| (一) 填空题 .....          | 1  | (三) 简答题 .....          | 4  |
| (二) 选择题 .....          | 2  |                        |    |
| 第二章 多组分分离基础 .....      | 5  |                        |    |
| 一、内容说明 .....           | 5  | (四) 计算题 .....          | 8  |
| (一) 教学目的与要求 .....      | 5  | 三、练习题 .....            | 16 |
| (二) 重点、难点及对学生的要求 ..... | 5  | (一) 填空题 .....          | 16 |
| 二、例题详解 .....           | 6  | (二) 选择题 .....          | 17 |
| (一) 填空题 .....          | 6  | (三) 简答题 .....          | 18 |
| (二) 选择题 .....          | 6  | (四) 计算题 .....          | 18 |
| (三) 简答题 .....          | 7  |                        |    |
| 第三章 精馏 .....           | 26 |                        |    |
| 一、内容说明 .....           | 26 | (四) 计算题 .....          | 29 |
| (一) 教学目的与要求 .....      | 26 | 三、练习题 .....            | 36 |
| (二) 重点、难点及对学生的要求 ..... | 26 | (一) 填空题 .....          | 36 |
| 二、例题详解 .....           | 27 | (二) 选择题 .....          | 37 |
| (一) 填空题 .....          | 27 | (三) 简答题 .....          | 39 |
| (二) 选择题 .....          | 27 | (四) 计算题 .....          | 39 |
| (三) 简答题 .....          | 28 |                        |    |
| 第四章 气体吸收和解吸 .....      | 47 |                        |    |
| 一、内容说明 .....           | 47 | (四) 计算题 .....          | 50 |
| (一) 教学目的与要求 .....      | 47 | 三、练习题 .....            | 56 |
| (二) 重点、难点及对学生的要求 ..... | 47 | (一) 填空题 .....          | 56 |
| 二、例题详解 .....           | 48 | (二) 选择题 .....          | 57 |
| (一) 填空题 .....          | 48 | (三) 简答题 .....          | 58 |
| (二) 选择题 .....          | 48 | (四) 计算题 .....          | 58 |
| (三) 简答题 .....          | 48 |                        |    |
| 第五章 多组分多级分离的严格计算 ..... | 62 |                        |    |
| 一、内容说明 .....           | 62 | (二) 重点、难点及对学生的要求 ..... | 62 |
| (一) 教学目的与要求 .....      | 62 | 二、例题详解 .....           | 63 |

|               |    |               |    |
|---------------|----|---------------|----|
| (一) 填空题 ..... | 63 | (一) 填空题 ..... | 69 |
| (二) 选择题 ..... | 63 | (二) 选择题 ..... | 70 |
| (三) 简答题 ..... | 64 | (三) 简答题 ..... | 71 |
| (四) 计算题 ..... | 66 | (四) 计算题 ..... | 71 |
| 三、练习题 .....   | 69 |               |    |

## 第六章 分离过程及设备的效率与节能 .....

|                        |    |               |    |
|------------------------|----|---------------|----|
| 一、内容说明 .....           | 75 | (四) 计算题 ..... | 78 |
| (一) 教学目的与要求 .....      | 75 | 三、练习题 .....   | 80 |
| (二) 重点、难点及对学生的要求 ..... | 75 | (一) 填空题 ..... | 80 |
| 二、例题详解 .....           | 76 | (二) 选择题 ..... | 81 |
| (一) 填空题 .....          | 76 | (三) 简答题 ..... | 82 |
| (二) 选择题 .....          | 76 | (四) 计算题 ..... | 84 |
| (三) 简答题 .....          | 76 |               |    |

## 第七章 其它分离方法 .....

|                        |    |               |    |
|------------------------|----|---------------|----|
| 一、内容说明 .....           | 89 | (三) 简答题 ..... | 91 |
| (一) 教学目的与要求 .....      | 89 | 三、练习题 .....   | 92 |
| (二) 重点、难点及对学生的要求 ..... | 89 | (一) 填空题 ..... | 92 |
| 二、例题详解 .....           | 90 | (二) 选择题 ..... | 93 |
| (一) 填空题 .....          | 90 | (三) 简答题 ..... | 94 |
| (二) 选择题 .....          | 90 | (四) 计算题 ..... | 94 |

## 答案 .....

|               |     |               |     |
|---------------|-----|---------------|-----|
| 第一章 .....     | 96  | (三) 简答题 ..... | 161 |
| (一) 填空题 ..... | 96  | (四) 计算题 ..... | 163 |
| (二) 选择题 ..... | 96  | 第五章 .....     | 180 |
| (三) 简答题 ..... | 96  | (一) 填空题 ..... | 180 |
| 第二章 .....     | 97  | (二) 选择题 ..... | 180 |
| (一) 填空题 ..... | 97  | (三) 简答题 ..... | 180 |
| (二) 选择题 ..... | 98  | (四) 计算题 ..... | 182 |
| (三) 简答题 ..... | 98  | 第六章 .....     | 201 |
| (四) 计算题 ..... | 99  | (一) 填空题 ..... | 201 |
| 第三章 .....     | 124 | (二) 选择题 ..... | 201 |
| (一) 填空题 ..... | 124 | (三) 简答题 ..... | 201 |
| (二) 选择题 ..... | 124 | (四) 计算题 ..... | 205 |
| (三) 简答题 ..... | 124 | 第七章 .....     | 217 |
| (四) 计算题 ..... | 127 | (一) 填空题 ..... | 217 |
| 第四章 .....     | 160 | (二) 选择题 ..... | 217 |
| (一) 填空题 ..... | 160 | (三) 简答题 ..... | 217 |
| (二) 选择题 ..... | 161 | (四) 计算题 ..... | 220 |

## 参考文献 .....

225

# 第一章 绪 论

## 一、内 容 说 明

### (一) 教学目的与要求

了解分离工程在工业生产中的重要性，分离过程的分类以及常用的化工分离操作过程。理解工业上常用的分离单元操作的基本原理，了解一些典型应用实例。

- (1) 了解本课程的任务和内容，与其它课程的相互关系。
- (2) 理解分离操作理论的形成和特性，分离过程的开发方法和发展趋势。
- (3) 掌握分离因子的定义和应用，分离因子与级效率之间的关系，了解传质分离过程的分类和特征。
- (4) 识记分离剂的类型，区分分离因子和固有分离因子，分离过程的选择方法。

### (二) 重点、难点及对学生的要求

重点讲解分离过程的特征，区分分离因子和固有分离因子，讲解用其判断一个分离过程分离的难易程度。讲解平衡分离的原理和处理的手段。

**重点：**掌握分离过程的特征，分离因子和固有分离因子的区别，平衡分离和速率分离的原理。工业上常用的基于平衡分离过程的分离单元操作及其基本原理；分离媒介；典型应用实例。

**难点：**用分离因子判断一个分离过程进行的难易程度，分离因子与级效率之间的关系。

## 二、例 题 详 解

### (一) 填空题

1. 分离作用是由于加入（分离剂）而引起的，因为分离过程是（熵减过程）。
2. 衡量分离过程的难易程度用（分离因子）表示，处于相平衡状态的分离程度是（固有分离因子）。
3. 分离因子表示任一分离过程所达到的（分离程度），其定义为 $\left(\alpha_{ij}^s = \frac{x_{i1}/x_{j1}}{x_{i2}/x_{j2}}\right)$ 。
4. 速率分离可分为（膜分离）和（场分离）两大类。
5. 分离过程中按有无物质传递现象发生来划分，分离过程可分为（机械分离）和（传质分离）。
6. 分离剂可以是（能量分离剂）或（物质分离剂），有时也可两种同时应用。

7. 固有分离因子是根据（汽液相平衡）来计算的。它与实际分离因子的差别用（级效率）来表示。

8. 分离工程研究分离过程中分离设备的（共性规律）。

## （二）选择题

1. 分离过程的特征是该过程是（c）。  
a. 熵增过程；b. 熵不变化过程；c. 熵减少过程；d. 自发过程。
2. 下列哪一个不是机械分离过程（d）。  
a. 重力沉降分离过程；b. 过滤；c. 离心分离；d. 吸收。
3. 下列哪一个是速率分离过程（b）。  
a. 蒸馏；b. 膜分离；c. 离心分离；d. 吸收。
4. 下列分离过程中属于平衡分离过程的是（b）。  
a. 重力沉降分离过程；b. 吸收；c. 膜分离；d. 离心分离。
5. 当分离因子为（b）表示组分  $i$  及  $j$  之间并没有被分离。  
a.  $\alpha_{ij}^s > 1$ ；b.  $\alpha_{ij}^s = 1$ ；c.  $\alpha_{ij}^s > 0$ ；d.  $\alpha_{ij}^s < 1$ 。
6. 实际分离因子与理想分离因子之间的关系为（c）。  
a.  $\alpha_{ij}^s < \alpha_{ij}$ ；b.  $\alpha_{ij}^s = \alpha_{ij}$ ；c.  $\alpha_{ij}^s > \alpha_{ij}$ 。

## （三）简答题

1. 列出 5 种使用能量分离剂（ESA）和 5 种使用物质分离剂（MSA）的分离操作。

答：属于 ESA 分离操作的有等温闪蒸、部分冷凝、蒸馏、精馏、萃取精馏、恒沸精馏。属于 MSA 分离操作的有萃取精馏、液-液萃取、恒沸精馏、吸收、吸附。

2. 比较使用 ESA 与 MSA 分离方法的优缺点。

答：当被分离组分间相对挥发度很小，必须采用具有大量塔级数的精馏塔才能分离时，就要考虑采用萃取精馏（MSA），但萃取精馏需要加入大量萃取剂，萃取剂的分离比较困难，需要消耗较多能量，因此，分离混合物优先选择能量媒介（ESA）方法。

3. 气体分离与渗透蒸发这两种膜分离过程有何区别？

答：气体分离与渗透蒸发是两种正在开发应用中的膜技术。气体分离更成熟些，渗透蒸发是有相变的膜分离过程，利用混合液体中不同组分在膜中溶解与扩散性能的差别而实现分离。

4. 怎样用分离因子判断分离过程进行的难易程度？

答：分离因子的定义为

$$\alpha_{ij}^s = \frac{x_{i1}/x_{j1}}{x_{i2}/x_{j2}} \quad \text{根据实际产品组成}$$

用分离因子判断分离过程进行的难易程度，即分离因子与 1 相差越远，则可达到有效的分离。

$\alpha_{ij}^s = 1$ ，则表示组分  $i$  及  $j$  之间并没有被分离；

$\alpha_{ij}^s > 1$ ，组分  $i$  富集于 1 相，而组分  $j$  富集于 2 相；

$\alpha_{ij}^s < 1$ ，组分  $i$  富集于 2 相，而组分  $j$  富集于 1 相。

5. 根据两相状态不同，平衡分离过程可分成几类？

答：平衡分离过程可分成以下几类。

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。

### 三、练习题

#### (一) 填空题

1. 分离技术的特性表现为其( )、( )和( )。
2. 分离过程是( )的逆过程,因此需加入( )来达到分离目的。
3. 分离过程分为( )和( )两大类。
4. 分离剂可以是( )或( ),有时也可两种同时应用。
5. 若分离过程使组分 $i$ 及 $j$ 之间并没有被分离,则( )。
6. 可利用分离因子与1的偏离程度,确定不同分离过程分离的( )。
7. 平衡分离的分离基础是利用两相平衡( )的原理,常采用( )作为处理手段,并把其它影响归纳于( )中。
8. 传质分离过程分为( )和( )两类。
9. 速率分离的机理是利用溶液中不同组分在某种( )作用下经过某种介质时的( )差异而实现分离。
10. 分离过程是将一混合物转变为组成( )的两种或几种产品的那些操作。
11. 工业上常用( )表示特定物系的分离程度,汽液相物系的最大分离程度又称为( )。
12. 速率分离的机理是利用传质速率差异,其传质速率的形式为( )、( )和( )。
13. 绿色分离工程是指分离过程( )实现。
14. 常用于分离过程的开发方法有( )、( )。

#### (二) 选择题

1. 分离过程是一个( )。  
a. 熵减少的过程; b. 熵增加的过程; c. 熵不变化的过程; d. 自发过程。
2. 组分 $i$ 、 $j$ 之间不能分离的条件是( )。  
a. 分离因子大于1; b. 分离因子小于1; c. 分离因子等于1。
3. 平衡分离的分离基础是利用两相平衡时( )实现分离。  
a. 组成不等; b. 速率不等; c. 温度不等。
4. 当分离因子( )表示组分 $i$ 及 $j$ 之间能实现一定程度的分离。  
a.  $\alpha_{ij}=1$ ; b.  $\alpha_{ij}^s=1$ ; c.  $\alpha_{ij}^s<1$ 。
5. 下述操作中,不属于平衡传质分离过程的是( )。  
a. 结晶; b. 吸收; c. 加热; d. 浸取。
6. 下列分离过程中属机械分离过程的是( )。  
a. 蒸馏; b. 吸收; c. 膜分离; d. 离心分离。
7. 当分离过程规模比较大,且可以利用热能时,通常在以下条件选择精馏法( )。  
a. 相对挥发度 $<1.05$ ; b. 相对挥发度 $>1.05$ ; c. 相对挥发度 $<1.5$ ; d. 相对挥发度 $>1.5$ 。

8. 以下分离方法中技术成熟度和应用成熟度最高的是 ( )。

a. 超临界萃取; b. 吸收; c. 精馏; d. 结晶。

9. 工业上为提高分离或反应效果, 常把不同的过程进行组合, 以下不属于反应过程与分离过程的耦合的是 ( ):

a. 化学吸收; b. 在精馏塔里进行的由甲醇和醋酸制备醋酸甲酯的过程;

c. 分离沸点相近的混合物的萃取结晶过程; d. 催化精馏过程。

### (三) 简答题

1. 何为分离过程? 分离过程的特征是什么?

2. 什么是分离因子? 它与固有分离因子有何不同?

3. 分离过程按有无物质传递现象发生分成几类?

4. 按所依据的物理化学原理不同, 传质分离过程可分为哪两类?

5. 说明分离过程的特征和与分离工程的区别?

6. 说明什么是逐级经验放大法。

7. 什么是绿色分离工程, 谈谈你的理解。

8. 分离方法的选择要考虑哪几方面的因素?

9. 指出下表中两种使用能量分离剂和物质分离剂的操作过程。

| 组 成                            | 乙烷裂解 | 丙烷裂解 | 石脑油  | 粗柴油  |
|--------------------------------|------|------|------|------|
| H <sub>2</sub>                 | 35.2 | 12.7 | 14.6 | 15.6 |
| CH <sub>4</sub>                | 3.6  | 32.4 | 29.5 | 29.6 |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>  | 0.2  | 0.1  | 0.6  | 0.2  |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>  | 33.1 | 25.7 | 32.4 | 32.4 |
| C <sub>3</sub> H <sub>4</sub>  | 26.7 | 7.9  | 5.7  | 2.9  |
| C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>  | 0.6  | 8.7  | 10.5 | 11.3 |
| C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  |      | 9.7  | 0.7  | 0.6  |
| C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>  |      |      | 2.5  | 3.8  |
| C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>  | 0.3  | 0.9  | 4.3  | 3.4  |
| C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> |      |      | 0.2  | 0.2  |
| C <sub>5</sub> <sup>=</sup>    | 0.3  | 1.9  |      |      |
| Σ                              | 100  | 100  | 100  | 100  |

10. 指出生成下列产品所使用的分离方法:

(1) 丙烯腈; (2) 氨; (3) 环己烷; (4) 乙烯; (5) 乙酸乙烯酯; (6) 乙苯; (7) 氯代甲烷; (8) 聚苯乙烯; (9) 苯乙烯; (10) 丙烯酸酯

11. 合成橡胶生产中, 在反应液中产生一种低相对分子质量的蜡状副产物, 其挥发性很小, 可以忽略不计, 试指出下面三种分离操作对回收溶液是可行的。说明原因。并指出其他方法不适用的原因。

(1) 精馏; (2) 蒸发; (3) 过滤。

12. 试说明精馏、萃取精馏、恒沸精馏及吸收蒸出的异同点。

## 第二章 多组分分离基础

### 一、内容说明

#### (一) 教学目的与要求

在“化工热力学”课程有关相平衡理论的基础上,较为全面地了解化工过程中经常遇到的多组分物系的汽液平衡,即各种单级平衡过程的计算问题。

##### (1) 设计变量

- ① 掌握确定系统的独立变量数、约束关系数和设计变量数。
- ② 理解由单元设计变量确定装置设计变量的方法。
- ③ 识记单相物流和相平衡设计变量的计算方法。

##### (2) 相平衡关系的计算

- ① 掌握多组分非理想体系平衡常数计算方法。
- ② 理解计算活度系数和逸度系数的方法和汽液平衡的分类,会查阅  $p$ - $T$ - $K$  列线图,求算烃类物质的  $K$  值。
- ③ 识记汽液相平衡关系常用的两种形式,会用相平衡常数和相对挥发度表示相平衡关系。

##### (3) 多组分物系的泡点和露点计算

- ① 熟练掌握多组分物系的泡点和露点计算。
- ② 理解平衡常数与组成有关的泡、露点计算,计算机计算方法。
- ③ 识记多组分物系的泡点和露点计算过程中温度的调整方法,泡点和露点压力的简化计算方法。

##### (4) 单级平衡分离过程计算

- ① 掌握混合物的相态的确定和闪蒸计算类型。
- ② 理解绝热闪蒸过程的序贯迭代法,正割收敛法。
- ③ 识记等温闪蒸过程的计算,等温闪蒸过程和绝热闪蒸过程的区别。

#### (二) 重点、难点及对学生的要求

熟练掌握确定系统的独立变量数、约束关系数和设计变量数、多组分非理想体系平衡常数计算方法;重点讲解汽液相平衡关系常用的两种形式;会用相平衡常数和相对挥发度表示相平衡关系;至少会一种求算活度系数和逸度系数的方法;会查阅  $p$ - $T$ - $K$  列线图,求算烃类物质的  $K$  值,掌握泡、露点的计算方法;了解平衡常数与组成有关的泡、露点计算。了解等温闪蒸和部分冷凝过程的计算,了解绝热闪蒸过程的计算。

**重点:**多组分物系的相平衡条件;平衡常数;分离因子。多组分物系的泡点方程、露点方程;计算方法。等温闪蒸过程和部分冷凝过程。闪蒸方程;闪蒸过程的计算。

**难点：**多组分非理想体系平衡常数计算。多组分物系的泡点温度和泡点压力、露点温度和露点压力的计算。等温闪蒸过程和部分冷凝过程的计算。

## 二、例题详解

### (一) 填空题

1. 对单相物流的独立变量数为  $(c+2)$ ，对相平衡物流的独立变量数为  $(c+2)$ 。
2. 在设计变量中，分为（固定设计变量）和（可调设计变量）。
3. 汽液相平衡是处理（汽液传质分离）过程的基础。相平衡的条件是汽液两相中温度压力相等，每一组分的（化学位相等）。
4. 完全理想系的相平衡关系为  $(py_i = p_i^0 x_i)$ 。
5. 泡点压力是指一定（温度）下降低系统（压力），当液体混合物开始汽化产生第一个气泡时的（压力）。
6. 一定压力下冷却气体混合物，当气体混合物开始冷凝产生第一个液滴时的温度叫（露点温度）。
7. 根据泡、露点的概念，精馏塔塔顶温度即为对应塔顶汽相组成的（露点），塔釜温度即为对应塔釜液相组成的（泡点）。
8. 用于露点计算的调整公式为  $(K_{Gm} = (K_G \sum \frac{y_i}{K_i})_{m-1})$ 。
9. 平衡常数与组成有关的泡点计算，需迭代泡点温度或压力外，还需对  $(\hat{\phi}_i^V)$  进行试差。
10. 计算泡点压力时若  $\sum K_i x_i > 1$ ，压力应调（高再试差计算）。
11. 当混合物在一定的温度、压力下，满足  $(T_D > T > T_B)$  或  $\sum (z_i / K_i) > 1$  和  $\sum K_i z_i > 1$  同时成立）条件即处于两相区，可通过（物料平衡、相平衡和摩尔分率加和式）计算求出其平衡汽液相组成。
12. 若组成为  $z_i$  的物系， $\sum z_i / K_i < 1$  时其相态为（过热蒸汽）。

### (二) 选择题

1. 设计变量数就是（d）。
  - a. 设计时所涉及的变量数；b. 约束数；c. 独立变量数与约束数的和；
  - d. 独立变量数与约束数的差。
2. 常规精馏过程，可调设计变量数为（a）。
  - a. 5个；b. 4个；c. 1个；d. 2个。
3. 汽液两相均可视为理想溶液时，其汽液相平衡关系为（b）。
  - a.  $\phi_i^V py_i = p_i^0 f_i^{0L} x_i$ ；b.  $\phi_i^V py_i = \phi_i^0 p_i^0 x_i$ ；c.  $\phi_i^V py_i = p_i^0 x_i$ ；d.  $py_i = \phi_i^0 p_i^0 x_i$ 。
4. 当把一个液体溶液在恒压下加热时，开始产生气泡的点叫作（c）。
  - a. 露点；b. 临界点；c. 泡点；d. 熔点。
5. 计算溶液露点时，若  $\sum_{i=1} y_i / K_i - 1 < 0$ ，则说明（c）。
  - a. 温度偏低；b. 正好泡点；c. 温度偏高；d. 正好露点。
6. 系统温度大于露点时，体系处于（b）。

- a. 饱和液相; b. 过热汽相; c. 饱和汽相; d. 汽液两相。
7. 当物系处于泡、露点之间时, 体系处于 (d)。
- a. 饱和液相; b. 过热蒸汽; c. 饱和蒸汽; d. 汽液两相。
8. 进行等温闪蒸时, 对满足 (a) 条件时系统处于两相区。
- a.  $\sum K_i z_i > 1$  且  $\sum z_i / K_i > 1$ ; b.  $\sum K_i z_i > 1$  且  $\sum z_i / K_i < 1$ ;  
c.  $\sum K_i z_i < 1$  且  $\sum z_i / K_i > 1$ ; d.  $\sum K_i z_i < 1$  且  $\sum z_i / K_i < 1$ 。
9. 闪蒸过程成立的条件是闪蒸温度  $T$  (d)。
- a. 大于闪蒸条件下物料的泡点温度; b. 小于闪蒸条件下物料的泡点温度;  
c. 大于闪蒸条件下物料的露点温度;  
d. 大于闪蒸条件下物料的泡点温度, 且小于闪蒸条件下物料的露点温度。

### (三) 简答题

1. 普通精馏塔的可调设计变量是几个? 试按设计型和操作型指定设计变量。

答: 普通精馏塔有 5 个可调设计变量。

按设计型: 两个关键组分的分离要求、回流比、回流状态、出塔某一产品的流率。

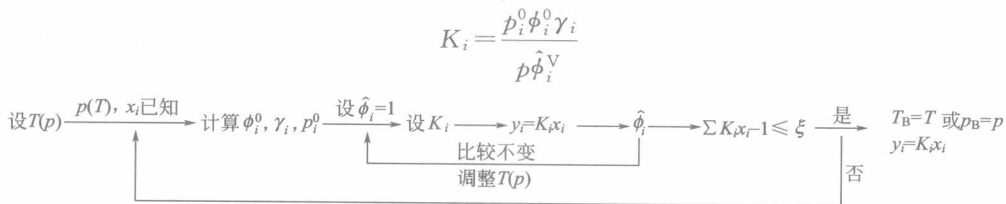
按操作型: 全塔理论级数、精馏段理论级数、回流比、回流状态、塔顶产品的流量。

2. 什么叫露点? 如何求取精馏塔顶温度?

答: 露点温度 (压力) 是在恒压 (温) 下冷却气体混合物, 当气体混合物开始冷凝出现第一个液滴时的温度 (压力), 简称露点。精馏塔塔顶温度即为对应塔顶汽相组成的露点。

3. 怎样做平衡常数与组成有关的泡点计算?

答: 对平衡常数与组成有关的泡点和露点计算, 由于  $K_i = f(T, p, x_i, y_i)$ , 用于系统非理想性较强时, 需计算混合物中  $i$  组分逸度系数或活度系数, 而  $\hat{\phi}_i^V$  是  $y_i$  的函数,  $\gamma_i$  是  $x_i$  的函数, 在  $y_i$  或  $x_i$  未求得之前无法求得  $\hat{\phi}_i^V$  或  $\gamma_i$  值, 于是计算时还需对  $\hat{\phi}_i^V$ ,  $\gamma_i$  进行试差。对泡点计算, 由于已知  $x_i$ , 除需迭代泡点温度或压力外, 还需对  $\hat{\phi}_i^V$  进行试差。



4. 怎样判断在一个化工设备中的物料所处的相态, 若为两相区应采用什么方法计算其平衡组成。

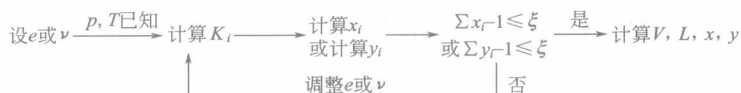
答: 首先通过分析确定进入该化工设备中的进料组成  $z_i$ , 然后测定其温度和压力, 根据  $K_i = f(T, p, z_i)$  计算  $K_i$  后, 对进料作如下检验。

$$\sum K_i z_i \begin{cases} = 1 & T = T_B & \text{进料处于泡点, } \nu = 0 \\ > 1 & T > T_B & \text{可能为汽液两相区} \\ < 1 & T < T_B & \text{进料为过冷液体} \end{cases}$$

$$\sum z_i / K_i \begin{cases} = 1 & T = T_D & \text{进料处于露点, } \nu = 1 \\ > 1 & T < T_D & \text{可能为汽液两相区} \\ < 1 & T > T_D & \text{进料为过热蒸汽} \end{cases}$$

当  $\sum K_i z_i < 1$  时, 进料为过冷液体;  $\sum z_i / K_i < 1$  时, 进料为过热蒸汽。只有  $\sum z_i / K_i > 1$  和  $\sum K_i x_i > 1$  时, 混合物始处于汽液两相区 ( $0 < \nu < 1$ ), 采用等温闪蒸的计算确定其平衡组成。

思路:



5. 简述绝热闪蒸过程的特点。

答: 绝热闪蒸过程是等焓过程, 节流后压力降低, 所以会有汽化现象发生, 汽化要吸收热量, 由于是绝热过程, 只能吸收本身的热量, 因此, 体系的温度降低。

6. 简述图解法计算绝热闪蒸的方法。

答: 思路: 先假设一个  $T_2$  ( $T_2$  应在  $T_D$  与  $T_B$  之间), 这样可按闪蒸来计算产生的汽液两相组成和量, 即得出  $T$ - $\nu$  关系, 称为闪蒸曲线, 然后再由进出口料热焓相等的原则来校核  $T_2$ , 即等焓平衡线, 交点为  $T_2, \nu$  (见图 2-1)。

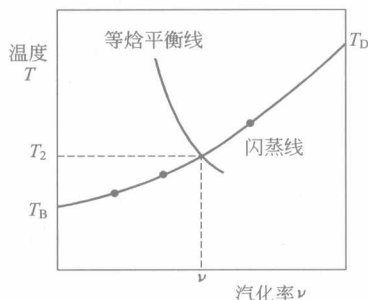


图 2-1 简答题 6 附图

(1) 闪蒸曲线 ( $T$ - $\nu$  曲线)

① 试差求  $p_2$  下的  $T_D, T_B$ ; ② 在  $T_D, T_B$  之间设  $T_2', T_2'' \dots$ , 试差求  $\nu_1, \nu_2 \dots$ 。

(2) 等焓平衡线

① 在上述  $T_D, T_B$  之间所设  $T_2', T_2'' \dots$  下, 由求出的  $x_i, y_i$  并根据  $p_2, T_2$ , 查出  $H_{iV}, H_{iL}$ , 求出  $H_V, H_L, \nu_1^* = \frac{H_1 - H_L}{H_V - H_L}$ ; ② 作  $T_2 - \nu^*$  等焓平衡线, 交点即为  $T_2, \nu$ , 由此求出  $V, L, x_i, y_i$ 。

#### (四) 计算题

1. 假定有一绝热平衡闪蒸过程, 所有变量表示在所附简图 (图 2-2) 中。求: (1) 总变量数  $N_v$ ; (2) 有关变量的独立方程数  $N_c$ ; (3) 设计变量数  $N_i$ ; (4) 固定和可调设计变量数  $N_x, N_a$ ; (5) 对典型的绝热闪蒸过程, 你将推荐规定哪些变量?

解: 思路 1:

3 股物流均视为单相物流

总变量数  $N_v = 3(c+2) = 3c+6$

独立方程数  $N_c$

物料衡算式  $c$

热量衡算式  $1$

相平衡组成关系式  $c$

平衡温度等式  $1$

平衡压力等式  $1$

合计  $2c+3$

故设计变量  $N_i = N_v - N_c = 3c+6 - (2c+3) = c+3$

固定设计变量: 一个进料,  $N_x = c+2$ , 加上节流后的压力, 共  $c+3$  个

可调设计变量  $N_a^e = N_i^e - N_x^e = c+3 - (c+3) = 0$  个

思路 2:

输出的两股物流看成是相平衡物流, 所以总变量数  $N_v = 2(c+2)$

独立方程数  $N_c$ : 物料衡算式  $c$  个, 热量衡算式  $1$  个, 共  $c+1$  个

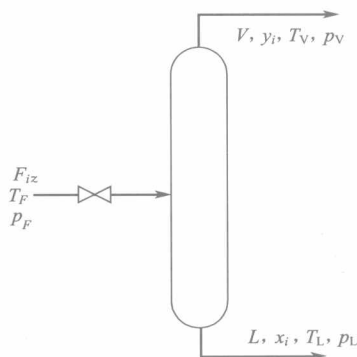


图 2-2 计算题 1 附图

设计变量数  $N_i = N_v - N_c = 2c + 4 - (c + 1) = c + 3$

固定设计变量  $N_x$ : 有  $c + 2$  个加上节流后的压力共  $c + 3$  个

可调设计变量  $N_a$ : 为 0

对于该绝热闪蒸过程, 规定设计变量: 进料流率、组成 ( $c - 1$ ), 闪蒸器压力 1 个。

2. 满足下列要求而设计再沸汽提塔见附图 (图 2-3), 求:

(1) 设计变量数是多少?

(2) 如果有, 请指出哪些附加变量需要规定?

解: (1) 若各级压力不同时

$$N_x^u = c + 2 + 9 = 7 + 2 + 9 = 18 \text{ 个}$$

$$N_a^u = \text{串级数} + \text{传热单元数} = 1 + 1 = 2 \text{ 个}$$

但因  $N$  已定所以要减去 1。

$$N_i^u = N_x^u + N_a^u = 18 + 1 = 19 \text{ 个}$$

若忽略各级压降时

$$N_x^u = c + 2 + 1 = 7 + 2 + 1 = 10 \text{ 个}$$

$$N_i^u = N_x^u + N_a^u = 10 + 1 = 11 \text{ 个}$$

(2) 需规定的附加变量

由于  $N_x^u$  已定, 进料组成 (6 个)、流量、温度、压力, 即各级压力 (9 个) 计 18 个。

需确定的附加变量只有  $N_a^u = 2$  个, 可推荐:

- ① 轻关键组分的回收率 (或轻关键组分在塔顶或塔釜中的组成);
- ② 重关键组分的回收率 (或重关键组分在塔顶或塔釜中的组成);
- ③ 再沸器的热负荷或上升汽量。

3. 附图 (图 2-4) 为热耦合精馏系统, 进料为三组分混合物, 采出三个产品。确定该系统: (1) 设计变量数; (2) 指定一组合理的设计变量。

解: (1)  $N_x^u$

|         |     |                         |
|---------|-----|-------------------------|
|         | 压力  | $N + M + 1 + 1$         |
|         | 进料  | $c + 2$                 |
|         | 合计  | $N + M + c + 4 (c = 3)$ |
| $N_a^u$ | 串级  | 6                       |
|         | 分配器 | 1                       |
|         | 侧线  | 1                       |
|         | 传热  | 2                       |
|         |     | 10                      |

$$N_i^u = N + M + c + 4 + 10 = N + M + c + 14$$

(2) 设计变量

固定设计变量选择: 原料流率、 $T$ 、 $p$  和组成 ( $c - 1 = 2$  个); 各理论级及全凝器、冷却器、分配器的压力。

可调设计变量选择: 回流比、回流状态、6 个串级的平衡级数、 $D$  和侧线流率。

也可选其他变量作为可调设计变量。如回流比、回流状态、4 个串级的平衡级数、产品 1 和产品 2 的组成、产品 3 的温度。

4. 利用如附图 (图 2-5) 所示的系统将某混合物分离成三个产品。试确定: (1) 固定设计变量数和可调设计变量数; (2) 指定一组合理的设计变量

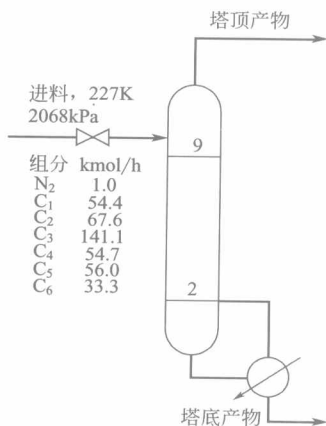


图 2-3 计算题 2 附图

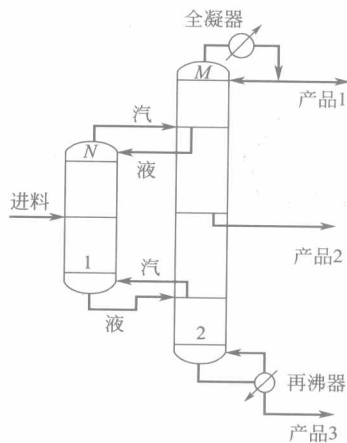


图 2-4 计算题 3 附图

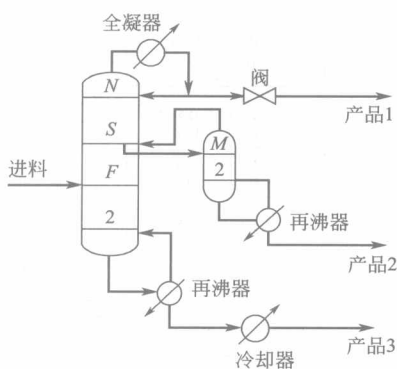


图 2-5 计算题 4 附图

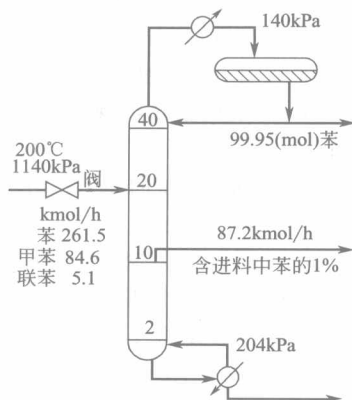


图 2-6 计算题 5 附图

解: (1)  $N_x^u$

|    |             |
|----|-------------|
| 进料 | $c+2$       |
| 压力 | $N+M+1+1+1$ |
|    | $c+N+M+5$   |

$N_a^u$

|    |   |
|----|---|
| 串级 | 4 |
| 分配 | 1 |
| 侧线 | 0 |
| 传热 | 4 |
|    | 9 |

(2) 设计变量

固定设计变量: 进料的温度、压力、总流率和各组分的浓度, 各平衡级的压力, 全凝器、分配器和冷却器的压力。

可调设计变量: 4 个串级的平衡级数, 回流比, 回流状态, 产品 3 的温度, 产品 1 中某组分的浓度, 产品 2 中某组分的浓度 (可调设计变量也可选其它变量)。

5. 采用单个精馏塔分离一个三组分混合物为三个产品 (见图 2-6), 试问图中所注设计变量能否使问题有唯一解? 如果不, 你认为还应规定哪个 (些) 设计变量?

解:  $N_x^u$

|    |           |
|----|-----------|
| 进料 | $c+2$     |
| 压力 | $40+1+1$  |
|    | $c+44=47$ |

$N_a^u$

|  |             |
|--|-------------|
|  | $3+1+1+2=7$ |
|--|-------------|

$$N_v^u=54$$

设计变量: 题目已给出了进料的所有条件, 塔顶及塔釜压力给定, 可认为所有压力级数的值均确定, 即固定设计变量的值均已确定。而可调设计变量数为 7, 已确定了 6 个, 分别为三个串级的理论级数, 馏出液中苯的浓度, 侧线采出的流率, 侧线采出物料中苯的流率。这样只要再确定一个可调设计变量的值即可使问题有唯一解。可确定回流比, 或釜液中某一组分的浓度, 或馏出液流率。

6. 一液体混合物的组成为: 苯 (1) 0.50; 甲苯 (2) 0.25; 对二甲苯 (3) 0.25 (摩尔分数)。分别用平衡常数法和相对挥发度法计算该物系在 100kPa 时的平衡温度和汽相组成。假设为完全理想系。

安托尼公式为:

$$\text{苯} \quad \ln p_1^0 = 20.7936 - 2788.51/(T - 52.36);$$

$$\text{甲苯} \quad \ln p_2^0 = 20.9065 - 3096.52/(T - 53.67);$$

$$\text{对二甲苯} \quad \ln p_3^0 = 20.9891 - 3346.65/(T - 57.84); (p^0: \text{Pa}; T: \text{K})$$

解: (1) 平衡常数法。假设为完全理想系。设  $T = (95 + 273.15) \text{K}$

$$\text{苯:} \quad \ln p_1^0 = 20.7936 - 2788.5/(95 + 273.15 - 52.36) = 11.96;$$

$$p_1^0 = 1.569 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$\text{甲苯:} \quad \ln p_2^0 = 20.9065 - 3096.52/(95 + 273.15 - 53.67) = 11.06;$$

$$p_2^0 = 6.358 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$\text{对二甲苯:} \quad \ln p_3^0 = 20.9891 - 3346.65/(95 + 273.15 - 57.84) = 10.204;$$

$$p_3^0 = 2.702 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$K_1 = \frac{p_1^0}{p} = \frac{1.569 \times 10^5}{10^5} = 1.569; K_2 = \frac{p_2^0}{p} = 0.6358$$

$$K_3 = \frac{p_3^0}{p} = 0.2702$$

$$\sum K_i x_i = 1.569 \times 0.5 + 0.6358 \times 0.25 + 0.2702 \times 0.25 = 1.011$$

$$\text{选苯为参考组分: } K_{12} = \frac{1.569}{1.011} = 1.552; \text{解得 } T_2 = 94.61^\circ \text{C}$$

$$\ln p_2^0 = 11.05; p_2^0 = 6.281 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$\ln p_3^0 = 10.19; p_3^0 = 2.6654 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$K_2 = 0.6281; K_3 = 0.2665$$

$$\sum K_i x_i = 1.552 \times 0.5 + 0.6281 \times 0.25 + 0.2665 \times 0.25 = 0.9997 \approx 1$$

故泡点温度为  $94.61^\circ \text{C}$ , 且  $y_1 = 1.552 \times 0.5 = 0.776$ ;  $y_2 = 0.6281 \times 0.25 = 0.157$ ;  $y_3 = 0.2665 \times 0.25 = 0.067$

(2) 相对挥发度法

设  $T = 95^\circ \text{C}$ , 同上求得  $K_1 = 1.569$ ,  $K_2 = 0.6358$ ,  $K_3 = 0.2702$

$$\alpha_{13} = 5.807, \alpha_{23} = 2.353, \alpha_{33} = 1$$

$$\sum \alpha_i x_i = 5.807 \times 0.5 + 2.353 \times 0.25 + 1 \times 0.25 = 3.74$$

$$\sum y_i = \sum \frac{\alpha_i x_i}{\sum \alpha_i x_i} = \frac{5.807 \times 0.5}{3.74} + \frac{2.353 \times 0.25}{3.74} + \frac{1 \times 0.25}{3.74} = 1.0$$

故泡点温度为  $95^\circ \text{C}$ , 且  $y_1 = \frac{5.807 \times 0.5}{3.74} = 0.776$ ;  $y_2 = \frac{2.353 \times 0.25}{3.74} = 0.157$ ;  $y_3 = \frac{1 \times 0.25}{3.74} = 0.067$

7. 一烃类混合物含甲烷 5% (摩尔分数), 乙烷 10%, 丙烷 30% 及异丁烷 55%, 试求混合物在  $25^\circ \text{C}$  时的泡点压力和露点压力。

解: 因为各组分都是烷烃, 所以汽、液相均可以看成理想溶液,  $K_i$  值只取决于温度和压力。可使用烃类的  $p$ - $T$ - $K$  图。

(1) 泡点压力的计算

假设  $p = 2.0 \text{ MPa}$ , 因  $T = 25^\circ \text{C}$ , 查图求  $K_i$

| 组分 $i$          | 甲烷(1) | 乙烷(2) | 丙烷(3) | 异丁烷(4) | $\Sigma$ |
|-----------------|-------|-------|-------|--------|----------|
| $x_i$           | 0.05  | 0.10  | 0.30  | 0.55   | 1.00     |
| $K_i$           | 8.5   | 1.8   | 0.57  | 0.26   |          |
| $y_i = K_i x_i$ | 0.425 | 0.18  | 0.171 | 0.143  | 0.919    |