



# 四川轻化工大学课程实施 大纲

课程名称：分离工程

---

授课班级：应化 2017 级 1-5 班(专业核心选修)

---

任课教师：田海洋

---

工作部门：化学工程学院

---

联系方式：18280190068（短号 67115）

---

四川轻化工大学 制

2020 年 8 月

# 《分离工程》课程实施大纲

## 基本信息

课程代码：16353003

课程名称：分离工程

学 分：2

总 学 时：32

学 期：2020-2021-1

上课时间：10-17 周

上课地点：星期一：N1-104；星期日：N1-106

答疑时间和方式：课前，课间和课后，考前集中

答疑地点：上课教室，第一实验楼 228

授课班级：应化 2017 级 1-5 班（专业核心选修）

任课教师：田海洋

学 院：化学工程学院

邮 箱：279827759@qq.com

联系电话：18280190068（短号 67115）

# 目 录

1. 教学理念 .....	- 1 -
2. 课程介绍 .....	- 3 -
2.1 课程的性质 .....	- 3 -
2.2 课程在学科专业结构中的地位、作用 .....	- 3 -
2.3 课程的历史与传统文化 .....	- 4 -
2.4 课程的前沿及发展趋势 .....	- 4 -
2.5 课程内容可能涉及到的伦理与道德问题 .....	- 4 -
2.6 学习本课程的必要性 .....	- 5 -
3. 教师简介 .....	- 7 -
3.1 教师的职称、学历 .....	- 7 -
3.2 教育背景 .....	- 7 -
3.3 研究兴趣（方向） .....	- 7 -
4. 先修课程 .....	- 8 -
5. 课程目标 .....	- 9 -
6. 课程内容 .....	- 11 -
6.1 课程的内容概要 .....	- 11 -
6.2 教学重点、难点 .....	- 12 -
6.3 学时安排 .....	- 12 -
7. 课程实施 .....	- 14 -
7.1 教学单元一（绪论） .....	- 14 -
7.2 教学单元二（2.1 设计变量的确定） .....	- 21 -
7.3 教学单元三（2.2 相平衡关系的计算） .....	- 28 -
7.4 教学单元四（活度系数法计算相平衡常数） .....	- 33 -
7.5 教学单元五（2.3 泡点和露点计算） .....	- 40 -
7.6 教学单元六（单级平衡分离过程，等温闪蒸） .....	- 48 -
7.7 教学单元七（绝热闪蒸） .....	- 54 -
7.8 教学单元八（多组分精馏-I） .....	- 58 -
7.9 教学单元九（多组分精馏-II） .....	- 65 -
7.10 教学单元十（FUG 举例及特殊精馏） .....	- 69 -
7.11 教学单元十一（气体吸收和解吸） .....	- 73 -
7.12 教学单元十二（吸收和解吸：设计变量） .....	- 74 -
7.13 教学单元十三（多组分吸收简捷算法） .....	- 75 -
7.14 教学单元十四（第五章 多组分分离的严格计算） .....	- 77 -
7.15 教学单元十五（多级平衡分离数学模型：MESH 方程） .....	- 78 -
7.16 教学单元十六（总复习） .....	- 79 -
8. 课程要求 .....	- 81 -
8.1 学生自学要求 .....	- 81 -
8.2 课外阅读要求 .....	- 81 -
8.3 课堂讨论要求 .....	- 81 -
8.4 课程实践要求 .....	- 81 -
9. 课程考核 .....	- 82 -
9.1 出勤（迟到、早退等）、作业等的要求 .....	- 82 -
9.2 成绩的构成与评分规则说明 .....	- 82 -

<b>10. 学术诚信</b> .....	- 83 -
10.1 考试违规与作弊处理.....	- 83 -
10.2 杜撰数据、信息处理等.....	- 83 -
10.3 学术剽窃处理等.....	- 83 -
<b>11. 课堂规范</b> .....	- 84 -
11.1 课堂纪律.....	- 84 -
11.2 课堂礼仪.....	- 84 -
<b>12. 课程资源</b> .....	- 85 -
12.1 教材与参考书.....	- 85 -
12.2 专业学术著作.....	- 85 -
12.3 专业刊物.....	- 85 -
12.4 网络课程资源.....	- 85 -
<b>13. 教学合约</b> .....	- 86 -
13.1 教师作出师德师风承诺.....	- 86 -
13.2 阅读课程实施大纲，理解其内容.....	- 87 -
13.3 同意遵守课程实施大纲中阐述的标准和期望.....	- 87 -
<b>14. 其他说明</b> .....	- 88 -

# 1. 教学理念

本课程实施大纲结合化学工程与工艺国家级特色专业建设以及工程教育专业认证标准，针对化学工程与工艺专业的培养目标，以化学工程与工艺专业普通高等学校本科工程教育认证为指导，按照“宽口径、重理论、强能力”的总体思路，培养和训练学生的工程意识、创新意识和专业应用能力来制定课程实施大纲，以期对培养具有较宽厚的基础理论和专门知识，能在化工、炼油、冶金、能源、轻工、医药、环保和军工等部门从事工程设计、技术开发、生产技术管理和科学研究等方面工作的应用型工程技术人才的目标作最大贡献。

## 1、培养学生的综合素质

本课程不仅要培养本专业技术技能人才，还要培养学生“平等、民主、自由”的人文社会科学素养；培养学生创新意识、社会责任感、工程职业道德、节能意识，掌握文献资料查询及运用现代信息技术获取相关信息的基本方法，了解与本专业相关的职业和行业的生产、设计、研究与开发、环境保护和可持续发展等方面的方针、政策和法律、法规，能正确认识工程对于客观世界和社会的影响。

## 2、坚持以现代教育理念为先导，实现“学生中心、教师主体”的大学教育观

为了最大程度的帮助学生学习，教学过程中师生之间必须形成平等、民主、和谐的情感关系，师生在心理上能够互相包容，在心灵上能够互相接纳，能营造民主、和谐的课堂气氛，与学生一起平等、互动地参与课堂教学，激发学生学习兴趣和求知欲，通过教学讲授和工厂实例分析，让学生体会分离工程的理论和应用价值，从而深刻意识该课程对化工及相近专业的重要性。尊重学生的个性，理解学生的情感，包容学生的缺点和不足，善于发现每一个学生的长处和闪光点，让所有学生都成长为有用之才。教与学的相互作用，就是教师与学生的心灵沟通和碰撞。这种碰撞是点燃学生心灵的火苗，它能让学生在浓厚的学术氛围之中成长，无论学生今后选择什么样的职业，所受的教育都会赐予他们无穷的力量，这种力量会促进学生的发展，让学生的潜能浮出水面、个性得到张扬，为他们未来更有成效的生活奠定坚实的保障。

## 3、明确学生主体，改革传统授课模式

授课的目的是帮助学生真正理解掌握并应用相关知识。改变传统教学模式，内容包括：计划的理论教学、解答学生自学存在的问题、课堂提问、课堂讨论等；安排课外阅读，并鼓励学生参加与课程相关的各种竞赛、大学生创新项目和聆听与专业相关的学术报告；考核方式也多种多样，可以更科学合理的考查学生的能力。多元化的教学模式，旨在调动学生的学习兴趣，培养学生查阅文献能力、工程运用能力和创新能力等。

4、课程内容及时更新，始终注意把教改教研成果或学科最新发展成果引入教学

作为教师，不仅必须精心准备课程内容，还应领会本课程应培养学生的哪些能力和素质，以便设计课程。了解学生的前修课程，帮助学生理解问题，解决问题，并鼓励学生自主学习，相互讨论，合作学习。同时要积极地调动学生的学习兴趣 and 热情，启迪学生，通过对学生的引导和督促，变被动学习为主动学习。同时，要紧跟社会形势的发展变化，及时更新教学内容，将新知识、新理论和新技术以及科学研究的成果充实到教学内容中，补充工厂实际案例，提高学生学习兴趣，为学生提供符合时代需要的课程体系和教学内容。

## 2. 课程介绍

分离工程是化工类及其相关专业的重要专业技术课，目前面向我校 3 个专业开课，每年承担近 300 人的教学任务，其中化学工程与工艺专业为必修课，应用化学和能源化学工程为选修课。

分离工程课程始建于 1965 年，目前建成反应精馏等专业实验室，在此基础上，瞄准国内外大学一流水平，按时代要求对课程进行了建设。目前实现了教学多媒体化、实验综合化、科研前沿化的新格局。

课程组拥有一支结构合理、高学历、高职称的师资队伍。在教学过程中实现了理论教学多媒体化，坚持教研与教学紧密结合，达到理论与实践、基础与提高、传承与创新、素质教育与技术训练的统一。

实验内容形成了验证性、综合性、设计性、创新性的交叉与融合的特点。科研成果与自主研发的实验装置相结合。

课程设计的教学方式形成了以学生课外自学为主，指导教师课外辅导相结合的设计模式。强调综合能力与创新能力、工程观和经济观的统一。

### 2.1 课程的性质

分离工程课程是化工及相近专业的专业技术课，它在基础课和专业基础课的基础上，强调理论和实际相结合，强调工程观点，它是综合运用数学、物理、化学等基础知识分析和解决化工过程中各种单元操作问题的工程学科。

通过本课程的学习，学生掌握化工分离操作的基础理论、典型设备构造、设计方法，具备工程操作以及设计、组织实施工程实验等的基本能力，提高学生综合应用知识进行识别、表达、分析化工实际问题的能力。

### 2.2 课程在学科专业结构中的地位、作用

分离工程课程是化工及相近专业的专业技术课，它是在基础课和专业基础课的基础上，强调理论和实际相结合，强调工程观点，它是综合运用数学、物理、化学等基础知识分析和解决化工过程中分离单元操作问题的工程学科。

## 2.3 课程的历史与传统文化

分离工程课程是化学工业技术和化学工程科学发展的必然产物。十九世纪九十年代国外高等学校相继设置化学工程系，开出的课程大都是针对不同化工行业编写各自的生产工艺学，直到二十世纪初才明确认识到各行各业通用的分离操作的共性，并于二十年代出版了第一部分离过程教科书— Separation Engineering，我国于上世纪二十年代创办化学工程系，并开设分离工程课程。

分离工程是一门关于化工分离过程的专业技术课，它为过程工业（包括化工、轻工、医药、食品、环境、材料、冶金等工业部门）提供科学基础，对化工及相近学科的发展起支撑作用。分离工程课程主要研究化工生产中分离单元操作的基本原理及其设备的设计、操作与调节，以传递过程原理和研究方法论为主线，研究分离过程的基本规律，典型分离过程的设计方法，过程的操作和调节原理。

## 2.4 课程的前沿及发展趋势

以传递过程和研究方法论为主线来组织教学内容，建立“分离工程”课程教学内容新体系；适当融入本领域中一些最新技术、方法和发展动向，拓宽教学内容。

建立以学生为本，启发-讨论-总结式的教学方法，实现在教师指导下以学生为中心的学与教的互动过程，并不断归纳、思考以寻求出适合本专业学生特点的更能有效发挥学生学习过程的主动性、积极性、创造性为目标的教学方法。

突出实践性、应用性、双向互动、集基础理论、实践为一体的立体教学新理念。

灵活运用多种先进的教学方法，如采用提问式切入方法，双向互动、精讲多练方法，归纳法总结的教学方法来促进学生学习。

使用现代教育技术手段，黑板、展台和多媒体大屏幕交替使用。利用化工过程单元操作录像片、动画库、分离工程多媒体教学课件，把过去很难描述清楚的设备结构用三维立体动画和录像的形式清晰形象地展现在学生面前，使教学内容实感性增强，授课信息量加大，给学生印象深刻，激发学习兴趣，提高教学效果。

## 2.5 课程内容可能涉及到的伦理与道德问题

随着技术的进步和人民生活水平的提高，目前科学技术中存在的伦理与道德



问题已经引起了人们的极大关注。化工学科研究的领域十分广泛，与日常生活有着紧密联系，因此课程教学过程中应注意伦理和道德教育。

科学研究的诸多领域都涉及伦理及道德问题，如核武器与生化武器伦理、计算机与网络伦理、生命与医学伦理、生态与环境伦理、工程理论和宇宙伦理等。本课程是化工及相关学科的专业技术课，属于工程技术领域，因此主要涉及生态与环境、工程伦理两大伦理。

1、生态与环境伦理：目前，我国面临严峻的环境问题，以环境为代价换取经济效益的事件时有发生，因此，在教学过程中要注意正确引导学生理性看待这些环境问题，激发学生的学习热情去处理目前面临的这些问题，而不是抱怨。同时，作为工程技术人才，在技术设计和研究过程中，要严格按照国家有关法律、标准和规范操作，尤其是涉及环境问题，如三废的处理等，要全面考虑问题。

2、工程伦理：随着工程技术不断发展，工程技术的负面效应也日渐突出。环境污染、能源危机等一系列问题的出现，使得与工程技术联系最为密切的工程伦理问题成为工程界、哲学界和社会广泛关注的问题。工程师必须遵守工程伦理准则，在工程活动中具有社会责任感，正确的价值观、利益观和强烈的伦理道德意识，才能自觉担负起维护人类共同利益的伦理责任。工程伦理主要包括工程中的风险、安全与责任、工程价值、工程与环境等问题。作为将来的工程技术人员，要引导学生注重考虑：1) 技术层面的伦理问题；2) 非技术层面的伦理问题。

技术层面的伦理问题，主要引导学生从技术上思考从原料、过程到产品及产品残值涉及的伦理问题。如原料尽量少用或不采用对人体和环境有毒有害的物质；工艺过程尽量考虑节能、节水和减少原料消耗；产品残值的处理尽量简单可行等等。

## 2.6 学习本课程的必要性

分离工程是化工类及其相关专业的一门主干专业技术课。它是综合运用所学数学、物理、化学、物理化学、计算机基础知识，分析和解决化工生产中各种物理过程问题的工程基础学科。

其教学内容是以化工生产中的分离过程为背景，教学内容主要为涉及液液和液固多相系统中的传质分离过程。对主要分离单元操作和传质基本理论的教学，讲授本科专业学习中涉及较少或未涉及的、但十分重要的溶剂萃取和固液浸取为

主，结合多相传质基本理论为主要授课内容。同时，结合我校在分离工程研究中取得的大量成果，提供过程实例分析和模型计算指导。

新分离技术是分离工程领域研究的热点和发展的前沿方向。在本课程中，吸附和新型层析技术、膜分离(反渗透、超滤、气体渗透、渗透汽化)、超临界流体分离技术（超临界萃取、超临界沉析）、工业结晶等新分离技术是主要的教学内容。并适当提供部分工业应用和研究开发案例分析。

## 3. 教师简介

### 3.1 教师的职称、学历

田海洋，讲师，工学博士。

### 3.2 教育背景

起止时间	学校名称	专业	学位
2014.09-2019.12	西南石油大学	化学工程与技术	工学博士
2010.09-2014.06	四川理工学院	化学工程与工艺	工学学士

### 3.3 研究兴趣（方向）

主要从事油气田化学品和工作液开发与应用方面的研究。

## 4. 先修课程

高等数学、大学物理、物理化学、化工原理和化工热力学。

## 5. 课程目标

《分离工程》是高等学校化学工程学科的一个重要分支，是化学工程与工艺类专业的专业课之一，是化工过程研究、开发和设计的理论基础，在科研和生产领域具有不可缺少的地位。本课程的教学目标是：

1.培养学生分离过程基本概念，为分离过程的选择、特性分析和计算奠定基础；

2.培养学生初步的工程观念，通过对典型化工分离过程的学习，了解各种分离方法的特征，掌握研究工程问题的方法论；

3.培养学生的工程技术经济观，通过对具体分离过程的设计和优化，掌握典型分离过程的选择、设备的设计选型计算；

4.培养学生利用已学的物理化学、化工原理、化工热力学、传递过程等课程中有关系相平衡热力学、动力学、分子及共聚状态的微观机理，传热、传质和动量传递理论来研究化工生产实际中复杂物系的分离和提纯技术；

5.培养学生了解化工过程基本原理和数学表达方法，并与流程模拟软件相结合，理解软件计算原理和思路，并应用流程模拟软件进行辅助设计和优化。

通过本课程学习，培养学生的自学能力和独立工作能力，能根据所处理问题的需要，寻找、阅读有关手册、参考书、文献资料并理解其内容。

为达到此目标：

### 1、教师素质要求

任课教师具有足够的教学能力、专业水平、工程经验、沟通能力、职业发展能力，并且能够开展工程实践问题研究，参与学术交流。教师的教育背景和工程背景都能满足专业教学的要求；教师有足够时间和精力投入到本科教学和学生指导中，并积极参与教学研究与改革；教师能为学生提供指导、咨询、服务，并对学生职业生涯规划、职业从业教育有足够的指导。任课教师明确在教学质量提升过程中的责任，并能不断改进工作，满足培养目标要求。教师有强烈的教学责任意识和对教学的投入；拥有积极的教学态度；丰富的教学知识；能认真组织每一

教学单元的教学。丰富的教学内容，并配以行之有效的教学方法，最大限度达到预期教学目标，让学生获得良好的发展。

## 2、更新教学观念，改革教学模式，提升教学效果

本课程的教学完全遵照课程实施大纲的要求进行，并注重课前准备和授课的针对性，让学生带着问题听课，课后能解决问题，并充分利用学校资源，注重培养学生主动的工程实践能力，强调理论与实践的结合。加强课前预习、课堂讨论和课后思考，培养学生的自学能力、文献检索能力，掌握资料查询及运用现代信息技术获取相关信息的基本方法。改革考核方式。将平时成绩在总成绩中的比例提高到 40%。平时自学、预习情况的考察、课堂讨论表现、出勤情况、作业情况等作为平时成绩的考核重点。在激发学生在学习热情的同时，也培养了学生的自学能力和创新能力。加大课后辅导答疑的时间和方式。每周至少 1 次教研室答疑，同时，还鼓励学生电话答疑和电子邮件答疑等多种形式，以期最快解决学生在学习过程中遇到的问题。

# 6. 课程内容

## 6.1 课程的内容概要

### 第 1 章 绪论

1.1 掌握的内容：分离过程在化工生产中的重要性；分类过程的分类；常用的化工分离操作过程；分离过程研究和技术开发的历史、现状和未来。

1.2 了解的内容：平衡分离过程和速率分离过程；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。

### 第 2 章 传质分离过程的热力学基础

2.1 掌握的内容：在“化工热力学”课程有关相平衡理论的基础上，掌握多组分或复杂物系设计变量的确定方法，较为全面的了解化工过程中经常遇到的多组分物系的气液平衡，即各种单级平衡过程的计算问题。熟练掌握多组分非理想体系相平衡常数计算方法；泡点和露点计算；等温闪蒸和部分冷凝过程的计算，绝热闪蒸过程的计算。

2.2 了解的内容：常用化工生产操作单元、装置和过程的设计变量的确定；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。

### 第 3 章 精馏

3.1 掌握的内容：多组分精馏、共沸精馏、萃取精馏、加盐精馏等过程的基本原理、流程及其简捷算法，以及塔内的流率、浓度和温度分布特点。

3.2 了解的内容：多组分精馏过程分析和简捷计算方法。共沸精馏和萃取精馏的过程、流程及其简捷计算方法。

### 第 4 章 吸收

4.1 掌握的内容：多组分吸收和解吸过程的基本原理、流程及其简捷算法，以及塔内的流率、浓度和温度分布特点。

4.2 了解的内容：多组分吸收和解吸过程分析、简捷计算方法。

### 第 5 章 传质分离过程的严格模拟计算

5.1 掌握的内容：掌握建立平衡级理论模型的基本方法，三对角线矩阵方程的托玛斯解法，精馏过程计算的泡点法和流率加和法。精馏计算的同时校正法和非平衡级模型。

5.2 了解的内容：托玛斯法解三对角矩阵方程；精馏问题的求解。三对角矩阵方程托玛斯解法计算精馏过程的泡点温度。

## 6.2 教学重点、难点

### 第一章 绪论

重点：平衡分离过程和速率分离过程。

### 第二章 传质分离过程的热力学基础

重点：常用化工生产操作单元、装置和过程的设计变量的确定。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。

### 第三章 精馏

重点：多组分精馏过程分析和简捷计算方法。特殊精馏过程、流程，及其简捷计算方法。

### 第四章 吸收

重点：多组分吸收和解吸过程分析、简捷算法。

### 第五章. 传质分离过程的严格模拟计算

重点：托玛斯法解三对角矩阵方程；精馏问题的求解。

## 6.3 学时安排

### 第一章 绪论

主要知识点：分离过程在化工生产中的重要性；分类过程的分类；常用的化工分离操作过程；分离过程研究和技术开发的现状和未来。

学时安排（参考）：2 学时

### 第二章 传质分离过程的热力学基础

主要知识点：多组分或复杂物系设计变量的确定方法；在“化工热力学”课程有关相平衡理论的基础上，较为全面的了解化工过程中经常遇到的多组分外系的气液平衡，即各种单级平衡过程的计算问题。熟练掌握多组分非理想体系平衡常数



计算方法；泡点和露点计算；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。

3. 学时安排（参考）：12 学时

### 第三章. 精馏

主要知识点：多组分精馏、共沸精馏、萃取精馏、的基本原理、流程，及其简捷计算方法，以及塔内的流率、浓度和温度分布特点。

学时安排：6 学时

### 第四章 吸收

主要知识点：多组分吸收和解析过程的基本原理、流程，及其简捷算法，以及塔内的流率、浓度和温度分布特点。

学时安排：6 学时

### 第五章. 传质分离过程的严格模拟计算

主要知识点：建立平衡级理论模型的基本方法，三对角线矩阵方程的托玛斯解法，精馏过程计算的泡点法和流率加和法。了解精馏计算的同时校正法和非平衡级模型。

学时安排（参考）：6 学时

# 7.课程实施

## 7.1 教学单元一（绪论）

### 7.1.1 教学日期

课次/学时：1/2。

### 7.1.2 教学目标

1. 了解分离工程课程目标及其对毕业要求的支撑；
2. 掌握化工分离过程分类方法及原理；
3. 了解分离工程课程的目的、任务、化学工程的发展简史。

### 7.1.3 教学内容（含重点、难点）

**主要知识点：**分离过程在化工生产中的重要性；分类过程的分类；常用的化工分离操作过程；分离过程研究和技术开发的现状和未来。

**重点：**平衡分离过程和速率分离过程。

### 7.1.4 教学过程

#### 课程的性质、地位和目标

本课程是化学工程与工艺及相近化工类专业教学中一门专业课程，是建立在物理化学、化工原理、化工热力学、传递课程原理等技术基础课程知识之上的一门必修课程。

化工分离过程是实现化工生产过程的必不可少的重要步骤。它在化工生产中的地位和作用，决定了本课程在化学工程及相近化工类专业人才培养中的地位和作用。因此，化工分离过程的知识和理论在化学工程及相近化工类专业人才的知识构成中占有相当重要的分量。

#### 任务

运用化工单元操作的基本知识、溶液相平衡理论、动量、热量和质量传递的原理来研究化工生产实际中复杂的物系的分离和提纯技术、分析和解决在化工生

产、设计和科研中常用的分离过程的理论和实际问题；讨论分离设备的处理能力和效率，分离过程的节能技术和分离流量的选择；简要介绍膜分离、吸附、反应精馏等其它分离技术、分离过程的选择。

### **课程目标**

1.培养学生分离过程基本概念，为分离过程的选择、特性分析和计算奠定基础；

2.培养学生初步的工程观念，通过对典型化工分离过程的学习，了解各种分离方法的特征，掌握研究工程问题的方法论；

3.培养学生的工程技术经济观，通过对具体分离过程的设计和优化，掌握典型分离过程的选择、设备的设计选型计算；

4.培养学生利用已学的物理化学、化工原理、化工热力学、传递过程等课程中有关系相平衡热力学、动力学、分子及共聚状态的微观机理，传热、传质和动量传递理论来研究化工生产实际中复杂物系的分离和提纯技术；

5.培养学生了解化工过程基本原理和数学表达方法，并与流程模拟软件相结合，理解软件计算原理和思路，并应用流程模拟软件进行辅助设计和优化。

### **课程内容的重点**

- 1) 分离操作在化工生产中重要性及分离过程的分类；
- 2) 多组分物系泡点和露点温度的计算及等温闪蒸和部分冷凝过程的计算；
- 3) 分离系统变量分析、设计变量的确定方法；
- 4) 多组分多级分离过程分析及简捷算法；
- 5) 多组分多级分离过程的严格计算（泡点法）；
- 6) 影响汽液传质设备处理能力和级效率的因素，强化分离操作的途径；
- 7) 提高精馏热力学效率的途径；
- 8) 分离顺序和分离过程选择。

### **课程内容的难点**

- 1) 非理想体系相平衡常数计算；
- 2) 精馏过程泡点算法；
- 3) 分离系统的变量分析及其应用；

- 4) 多组分多级分离过程的严格计算法;
- 5) 汽液传质设备级效率影响因素分析。

**分离工程课程基础:** 任何知识都需要其相关的知识来解读。

### 教材及参考书

教材: 叶庆国等主编, 分离工程 (第二版), 化学工业出版社, 2017.6.

参考书: 刘家祺主编, 分离工程, 化学工业出版社;

邓修, 吴俊生主编, 分离工程 (第二版), 科学出版社。

### 日常生活中的分离过程

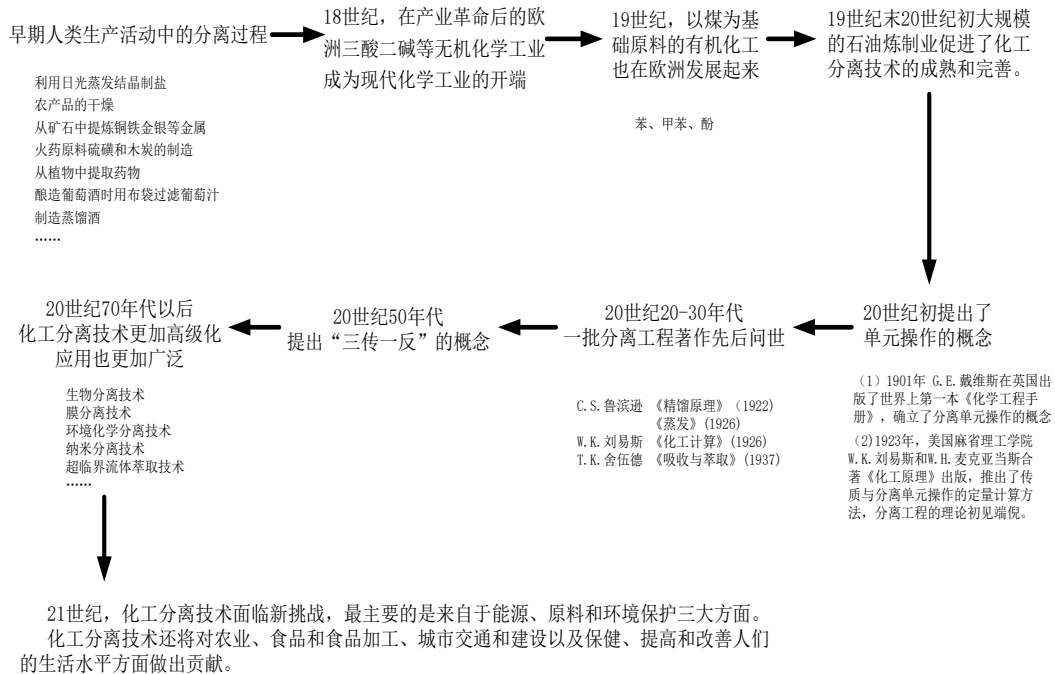
**衣:** 从植物中提取染料(胡萝卜素类、蒽醌类、萘醌类、类黄酮类、姜黄素类、靛蓝类、叶绿素类共 7 类 )

**食:** 蒸发海水获取盐; 蒸馏制酒精饮料; 自来水净化

**住:** 从矿物中萃取金属, 如贵金属, 炼铁等;

**行:** 汽车用的汽油来源于石油馏分; 汽车尾气三元催化剂, 使燃烧更充分;

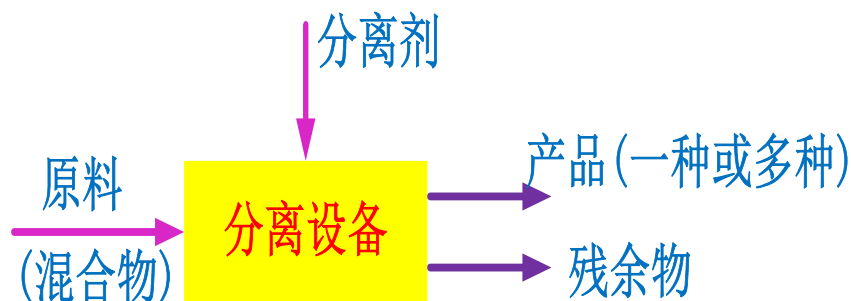
### 1.1 分离工程形成和特征



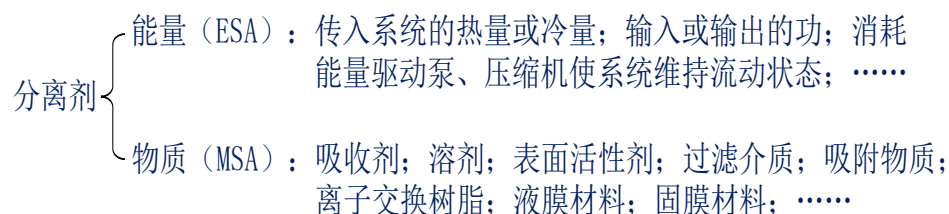
### 1.2 分离过程的特征与分类

**分离过程:** 借助一定的分离剂, 实现混合物中的组分分级 (fractionalization)、

浓缩(concentration)、富集(enrichment)、纯化(purification)、精制(refining)与隔离(isolation)等的过程。因此分离过程是将一混合物转变为组成互不相同的两种或几种产品的那些操作。

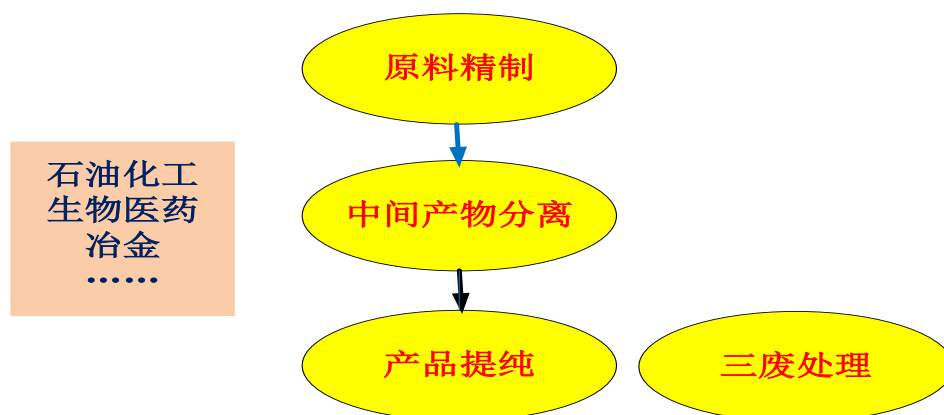


分离剂可以是能量(ESA)或物质(MSA)，有时也可两种同时使用。



**分离工程：**研究分离过程中分离设备的共性规律，分离与提纯的科学。

### 1.2 工业生产中的分离过程



工业生产实例：二甲苯生产流程

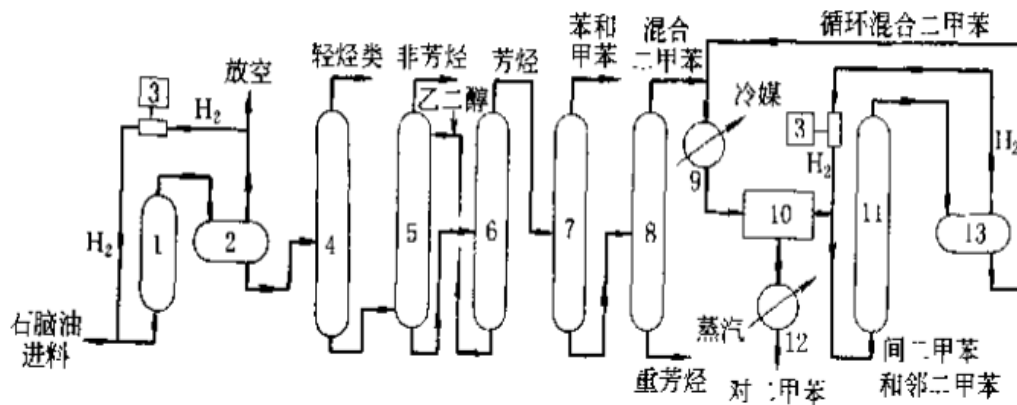


图 1-2 二甲苯生产流程

1—重整反应器；2、13—汽液分离器；3—压缩机；4—脱丁烷塔；5—萃取塔；6—再生塔；  
7—甲苯塔；8—二甲苯回收塔；9—冷却器；10—结晶器；11—异构化反应器；12—熔融器

### 1.3 分离技术的重要性

分离技术贯穿于化工过程的各个阶段：原料处理；反应物分离循环和产品净化等。

### 1.4 分离技术的分类

根据分离机理划分：生成新相以分离、加入新相分离、用隔离物分离等；

根据分离过程划分：机械分离（适用于存在相界面）和传质分离（均相）。

平衡分离（equilibrium separation）的定义

借助于分离媒介，使均相混和物转变为两相系统，再以混合物中各组分在处于相平衡的两相中不等同的分配为依据而实现分离。如蒸发、蒸馏和精馏、吸收、结晶、干燥等过程均属于平衡分离过程。

提问：为什么干燥过程属于平衡分离过程？？

平衡分离过程 {

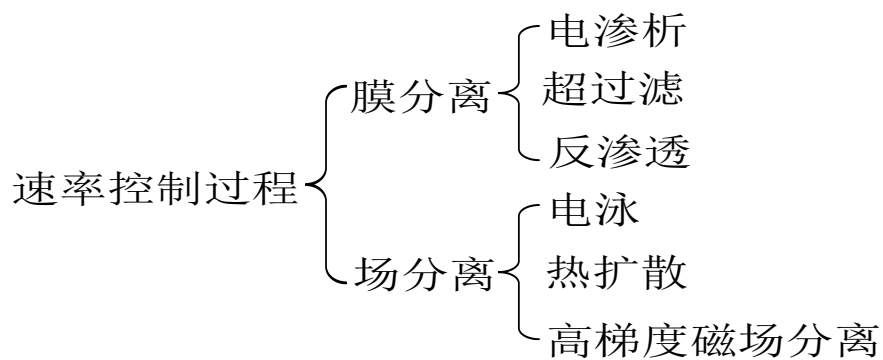
- 气液传质：吸收、气体的增湿和减湿等
- 汽液传质：蒸发、蒸馏和精馏
- 液液传质：萃取
- 液固传质：结晶、浸取、吸附、离子交换、色层分离、参数泵分离等
- 气固传质：吸附、固体干燥等

部分平衡分离过程

过程名称	原料	分离剂	产品	分离原理
------	----	-----	----	------

蒸发	液体	热	液体+蒸汽	蒸汽压不同
蒸馏	液体	热	液体+蒸汽	蒸汽压不同
吸收	气体	不挥发性液体	液体+气体	溶解度不同
萃取	液体	不互溶液体	液体+液体	溶解度不同
结晶	液体	冷或热	液体+固体	过饱和
吸附	气体或液体	固体吸附剂	固体+液体或气体	吸附力不同
干燥	湿物料	热	固体+蒸汽	湿组分蒸发
浸取	固体	溶剂	固体+液体	溶解度不同
离子交换	液体	固体树脂	液体+固体	离子的可交换性

**速率分离的定义：**在某种推动力（浓度差、压力差、温度差、电位差等）的作用下，有时在选择性透过膜的配合下，利用各组分扩散速率的差别来实现组分的分离。



部分速率分离过程

过程名称	原 料	分离剂	产 品	分离原理
气体扩散	气体	压力梯度和膜	气体	多孔膜中扩散的速率差异
热扩散	气体或液体	湿度梯度	气体或液体	热扩散速率差异
电渗析	液体	电场和膜	液体	膜对不同离子的选择性渗透
电泳	液体	电场	液体	胶质在电场下的迁移速率差异
反渗透	液体	压力梯度和膜	液体+液体	溶质溶解度与溶剂在膜中的扩散速率
超过滤	液体	压力梯度和膜	液体+液体	分子大小差异

### 1.5 分离方法的选择

- 1.可行性（技术）：物性、实现条件、线路
- 2.分离过程类别的选择：平衡、速率？
- 3.经济因素：工程设计、开发，产品价格，设备投资、操作费
- 4.安全环保
- 5.经验

例：分离丙酮和乙醚的混合物

首先提问：要求学生选择适用于丙酮和乙醚混合物分离的方法，并给出选择理由。

	丙酮	乙醚
物理性质	溶于水、乙醇、乙醚及大多数油类	溶于乙醇、苯、氯仿及石油醚，微溶于水
比重	0.788 (25/25)	0.7134 (20/4℃)
熔点	-94 ℃	-116.3 ℃
沸点	56.5 ℃	34.6 ℃
闪点	-20 ℃	-49 ℃

### 1.6 分离方法的现状与发展趋势

- 1、传统分离技术改造
- 2、新型分离过程开发
- 3、分离与反应耦合以及分离过程之间的耦合

总趋势：多样化、精细化、洁净化（环境友好）

### 1.7 分离工程的研究内容

- 分离静力学——平衡的研究、计算（热力学为基础），即过程能否进行！？
- 分离动力学——过程速率、效率（传递过程为基础），即过程进行的速度和快慢。
- 分离的能量交换——研究过程节能（热力学为基础），即过程能耗、物耗。

### 1.8 分离工程的研究方法

分离过程开发的目的

- 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。

### 7.1.5 教学方法

1、举例法：以典型化工生产过程为例，引出化工过程包含的内容和环节，进而得出分离操作对化工过程的重要性：分离单元操作。

2、提问法：给出一化工过程，请学生思考并回答其包含的典型分离单元过程，老师结合学生回答讲解；

3、对化工过程发展历史，以教师讲解为主。

### 7.1.6 作业安排及课后反思

课后作业：

P21，第4、5题。

1、给出日常生活中常见的一种分离技术，并说明其分离原理；

2、给出一种你所知道的仍未解决的分离关键技术，并结合所学知识，给出你的解决方案或思路。

课后思考：

1、在先修课程中那些是自己的薄弱环节？如何弥补？

2、本课程在化学工业过程中处于什么环节，对以后的学习和职业生涯有何帮助？

### 7.1.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

1.了解化工过程的划分依据，如换热过程，反应过程和分离过程等；

2.了解物性及计算对工业生产过程的重要性；

3.了解分离技术在不同领域的应用。

### 7.1.8 参考资料（具体到哪一章节或页码）

教材 p1-20，另参阅邓敏、吴天章主编《分离工程》，绪论部分。

## 7.2 教学单元二（2.1 设计变量的确定）

### 7.2.1 教学日期

课次/学时：2/2。

## 7.2.2 教学目标

1、掌握分离过程的变量分析及设计变量的确定。

## 7.2.3 教学内容 (含重点、难点)

2.1 单元设计变量  $\Rightarrow$  2.2 设备的设计变量  $\Rightarrow$  2.3 流程的设计变量

**难点：**设计变量的确定。

## 7.2.4 教学过程

提问让学生思考：什么是设计变量？

设计分离装置就是要求确定各个物理量的数值，如进料流率、浓度、压力、温度、热负荷、机械功的输入（或输出）量、传热面大小以及理论塔板数等。这些物理量都是互相关联、互相制约的，因此，设计者只能规定其中若干个变量的数值，这些变量称设计变量。

**强调：**完整而唯一地描述一个过程所必须的变量数。

### 2.1.1 设计变量

完整而唯一地描述一个过程所必须的变量数。

#### 2.1.1.1 定义

设计分离装置时，不管什么情况，解题过程总是包括：

规定必需的过程变量的数目；

列出热焓和质量衡算关系式；

通过分离因子关联诸产品组成，或者，对偏离平衡(即理想性)的情况，用经校正的平衡(即理想)比数据关联之；

解所得方程式以求得未知量的值。

也就是说，包括传热和传质的各种物理分离过程的设计中，通常第一步就是涉及过程条件或设计（或独立）变量的规定。

设计多元、多相、多级的分离问题，必须用联立或迭代法严格地解数以百计的方程。这意味着必须规定足够多的设计变量使得未知变量的数目(需要计算的

结果)正好等于(独立)方程数。

按照这样做,分离过程的条件或者变量才能完全正确地被确定。如果选择的设计变量数不正确,对全部所要求的各个量就可能会出现多解,或是不合理的解,或者无解。

通常,在解大量非线性方程组的计算中,困难在于恰当地选择设计变量,反复修改设计目标。但实际上设计者为了计算方便对选择设计变量不是随心所欲的。

一般所遇到的情况是固定原料组成,级数,或确定产品规格,然后相应地安排方程组,就可以解出所需要的未知量。

求独立设计变量数  $N_D$  (或是自由度,或为过程变量)的方法首先是列举出过程有关的全部变量  $N_V$ ,然后再减去与各变量有关的独立方程总数  $N_C$ 。即:

$$N_D = N_V - N_C$$

计算  $N_D$  的方法常用的有郭慕孙方法和 Hanson 法两种。郭慕孙方法的适用条件:

1) 连续稳定流动过程; 2) 过程中无化学反应; 3) 流体的动能和位能可忽略; 4) 与外界交换的机械能只能是轴功; 5) 平衡级是串联的。

分离过程的变量有**强度变量**、**容度变量**和**设备变量**之分:

**强度变量:** 组成、温度、压力等;

**容度变量:** 物料流率、传热速率等;

**设备参数:** 平衡级数、进料位置等。

相律:  $f=c-\pi+2$

**注意:** 相律所指的自由度是指**强度性质**的变量,要完整地描述物流除强度性质变量外必须加上描述物流数量的容度变量,即对任一单相物流,其独立变量数为:

$$N_V=f+1=c+2$$

系统与环境有能量交换时,增加相应变量。

系统约束关系包括：

- 1) 物料平衡式：c
- 2) 能量平衡式：1
- 3) 相平衡关系式：c (π-1)
- 4) 与设备结构有关的关系式；
- 5) 内在关系式。

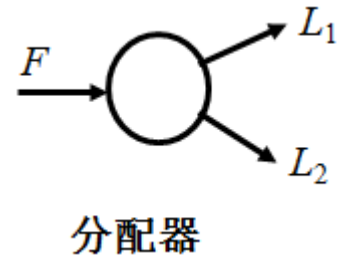
### 2.1.2 单元的设计变量

简单过程 → 单元设备 → 化工流程

#### 分配器

单元约束关系：

方程	方程数
物料平衡式： $Fx_{i,F} = L_1x_{i,L_1} + L_2x_{i,L_2}$	c
能量平衡式： $Fh_F = L_1h_{L_1} + L_2h_{L_2}$	1
$p_{L_1} = p_{L_2}$	1
内在关系式： $T_{L_1} = T_{L_2}$	1
$x_{i,L_1} = x_{i,L_2}$	c-1
$N_C^e$	$2c+2$



每股物流（单相、相平衡）变量数：c+2

单元总变量数  $N_V^e$ （三股物流）：3 (c+2)

分配器设计变量为：  $N_D^e = N_V^e - N_C^e = (3c+6) - (2c+2) = c+4$

设计变量  $N_D$  包括固定设计变量  $N_f$  和可调设计变量  $N_a$

**固定设计变量：** 描述物料流的变量（进料组成和流量等）以及系统的压力。

一般由单元在装置中的地位或者在流程中所处位置决定，事实已被给定或常被给定的变量。

**可调设计变量：** 由设计者决定的变量，如对分配器来说，其固定设计变量和可调设计变量分别为：

$N_x^e$ : 进料  $c+2$

压力 1

---

合计  $c+3$

$$N_a^e = N_D^e - N_x^e = c+4 - (c+3) = 1$$

如: 分配比,  $L_1=?$  或  $L_2=?$

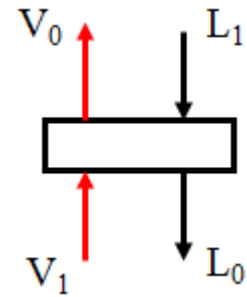
### 绝热操作的简单平衡级

单元有两股进料和两股出料, 并与环境无能量交换, 故变量数为:

$$N_V^e = 4(c+2) = 4c+8$$

单元约束关系数为:

方 程	方程数
物料平衡式: $V_1 y_{i,1} + L_1 x_{i,1} = V_0 y_{i,0} + L_0 x_{i,0}$	$c$
能量平衡: $V_1 h_{V,1} + L_1 h_{L,1} = V_0 h_{V,0} + L_0 h_{L,0}$	1
相平衡关系: $y_{i,0} = K_i x_{i,0}$	$c$
平衡压力等式: $p_{V_0} = p_{L_0}$	1
平衡温度等式: $T_{V_0} = T_{L_0}$	1
$N_C^e$	$2c+3$



绝热操作的简单平衡级单元设计变量为:

$$N_D^e = N_V^e - N_C^e = (4c+8) - (2c+3) = 2c+5$$

其中  $N_x^e$ :

进料  $2(c+2)$

压力 1

---

合计  $2c+5$

所以, 可调设计变量为:  $N_a^e = N_D^e - N_x^e = 0$

一些常见的单元设计变量: 见 p26, 表 2-1.

### 2.1.3 装置的设计变量

一个分离设备由若干个单元组成, 各个单元依靠单元间的物流连接成完整的设备。所以, 设备的设计变量总数  $N_D^u$  为构成设备的各个单元的设计变量之和,

即  $\sum N_D^e$ 。

需增加一个表示单元重复使用的变量  $N_r$

每一连接两个单元之间的单相物流产生  $(c+2)$  个等式，则连接单元间物流产生的新约束为  $N_c^u = N(c+2)$

设备设计变量为：
$$N_D^u = \sum N_D^e + N_r - N_c^u$$

### 简单吸收塔

由  $N$  个绝热操作的简单平衡级串联组成，因此， $N_D^e = 2c+5, N_r = 1$ ，在串级内有中间物流  $2(N-1)$  个，所以有  $2(N-1)(c+2)$  个新约束条件，故设备设计变量数为：

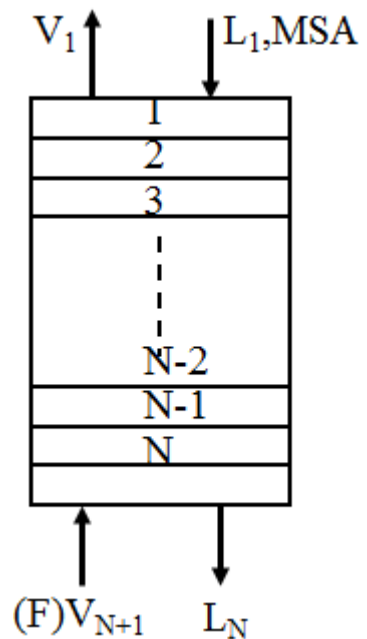
$$\begin{aligned} N_D^u &= \sum N_D^e + N_r - N_c^u \\ &= N(2c+5) + 1 - 2(N-1)(c+2) \\ &= 2c + N + 5 \end{aligned}$$

固定设计变量  $N_x^u$ ：

两股进料	$2(c+2)$
每级压力	$N$
合计	$2c+N+4$

所以， $N_a^u = N_D^u - N_x^u = 2c + N + 5 - (2c + N + 4) = 1$

即理论级数：1



### 精馏塔的设计变量

该塔有一个进料口，全凝器和再沸器。图中虚线表示可将全塔划分为  $6$  个单元（包括两个串级单元）。

单元	$\sum N_D^e$
全凝器	$c+4$
回流分配器	$c+4$
进料级	$3c+7$
再沸器	$c+4$
$N-(M+1)$ 板的平衡串级	$2c+(N-M-1)+5$

利用吸收塔  
的结论

M-1 板的平衡串级  $2c+(M-1)+5$

合 计  $10c+N+27$

由于单元间流股共有 9 股，所以： $N_c'' = 9(c+2) = 9c+18$

装置的设计变量为：

$$N_i'' = (10c + N + 27) - (9c + 18) = c + N + 9$$

其中固定变量为： 压力等级

$$N_X'' = (c+2) + N + 2 = c + N + 4$$

冷凝器和分配器压力

可调变量为  $N_a'' = N_i'' - N_X'' = 5$  (若规定全凝

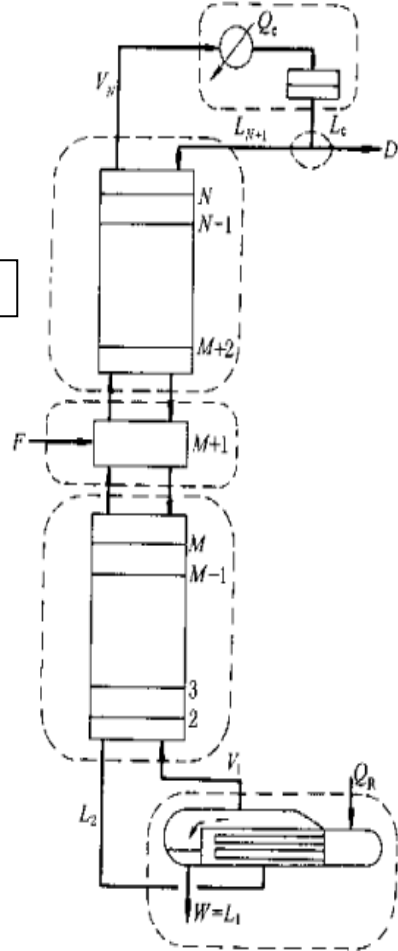
器出口为泡点温度，尚剩余 4 个可调设计变量)。

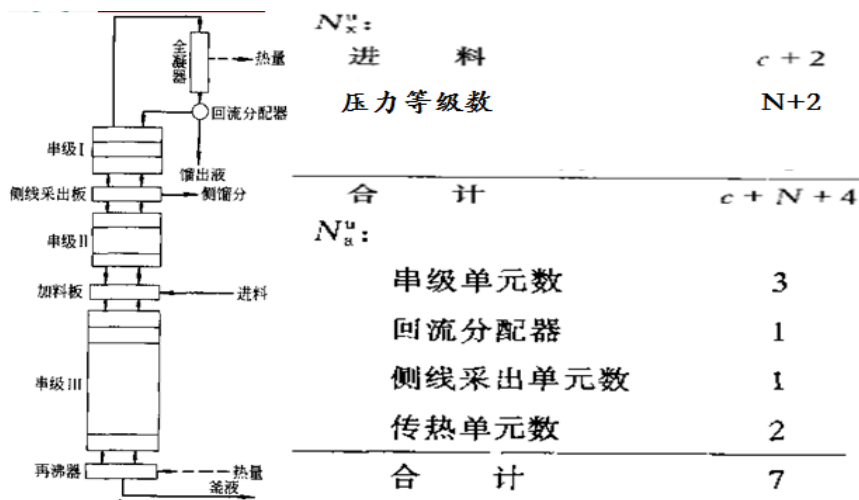
对于操作型精馏塔，设计变量规定一般为：

- 回流为泡点温度      1
- 总理论级数 N      1
- 进料位置 M+1      1
- 馏出液流率 (D/F)    1
- 回流比 ( $I_{N+1}/D$ )    1

**确定设备设计变量的方法：**

- 1) 按每一单相物流有 (c+2) 个变量，计算由进料物流所确定的固定设计变量；
- 2) 确定设备中具有不同**压力等级**的数目；
- 3) 上述两项之和即为固定设计变量数  $N_X''$ ；
- 4) 将串级单元的数目，分配器的数目，侧线采出的数目以及传热单元的数目相加，便是整个设备的可调设计变量数  $N_a''$ 。





将确定设备设计变量的方法用于有侧线采出的精馏塔分析（如图）。

### 7.2.5 教学方法

本单元内容属于基本概念性内容，内容多、范围广与中学物理知识联系紧密，主要通过教师课前组织大量的典型素材、举例和制作的 PPT 课件，通过现代多媒体教学技术进行演示，教师课堂教学，通过讲授法、提问法和案例分析，让学生对本专业和课程有一定的了解。本单元的教学方法以教师讲解+课堂提问的方法完成。

### 7.2.6 作业安排及课后反思

课后作业：p65，第 2 题。

课后思考：工艺流程设计变量的确定。

### 7.2.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

教师：认真备课，提前做好 PPT；携带教案、平时成绩册、教材和其它教辅资料等。尤其是针对重点和难点，能结合工程实例讲解。

学生：课前预习，做好问题记录，准备教材，笔记本，带着问题进课堂。

### 7.2.8 参考资料（具体到哪一章节或页码）

教材 p23-28，另参阅邓敏、吴天章主编《分离工程》，第 2 章部分。

## 7.3 教学单元三（2.2 相平衡关系的计算）

### 7.3.1 教学日期

课次/学时：3/2。



### 7.3.2 教学目标

1. 多组分物系的相平衡条件；
2. 相平衡常数的计算：状态方程法。

### 7.3.3 教学内容（含重点、难点）

#### 教学内容

1. 相平衡关系；
2. 气液相平衡常数计算：状态方程法。

#### 难点：

1. 多组分非理想体系相平衡常数的计算。

### 7.3.4 教学过程

#### 2.2.1 相平衡关系

化工生产中的许多单元操作都是涉及相变化或者相之间相互作用的过程，这些过程的基础是相平衡，相平衡也是阐述混合物分离原理和传质推动力的基础。

**相平衡定义：**混合物所形成的若干相保持物理平衡而共存的状态。

热力学——物系自由能处于最小

动力学——相间表观传递速度为零

稳定系统：1) 温度 T 相等： $T_1=T_2=T_3=\dots$

2) 压力 P 相等： $P_1=P_2=P_3=\dots$

3) 化学位  $\mu$  相等： $f_1 = f_2 = f_3 = \dots$

相平衡表示方法：

1) 相平衡常数： $K_i = y_i / x_i$

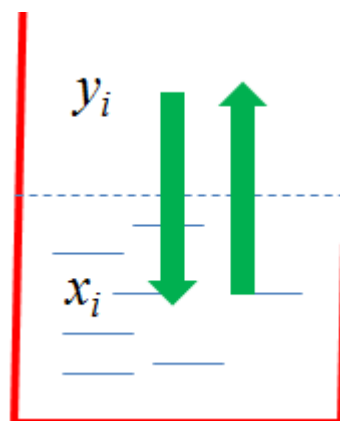
2) 相图

分离因子：

$$\text{表示组分间分离的难易程度 } \alpha_{ij} = \frac{y_i / x_i}{y_j / x_j} = \frac{K_i}{K_j}$$

分离因子与 1 的偏离程度表示组分之间分离的难易程度。

精馏中，分离因子又称为相对挥发度，它相对于汽液平衡常数而言，对温度



和压力的变化不敏感，可近似看作常数，使计算简化。

### 1) 气液平衡关系

气液平衡时，组分  $i$  在气液相的逸度相等，即： $f_i^V = f_i^L$  (1)

为把逸度和实测压力、温度、组成等物理量联系起来，引入逸度系数和活度系数。

逸度系数，定义，气相： $\Phi_i^V = \frac{f_i^V}{y_i P}$

液相： $\Phi_i^L = \frac{f_i^L}{x_i P}$ ，液相一般称为活度系数  $\gamma_i$ ， $\gamma_i = \frac{f_i^L}{x_i f_i^{0L}}$

$f_i^{0L}$  为基准态下组分  $i$  的逸度，通常取纯组分  $i$  的液体在相同温度和压力下的逸度

以上定义分别代入式 (1)，得：

$$\Phi_i^V y_i P = \Phi_i^L x_i P \text{ —— 状态方程法}$$

$$\Phi_i^V y_i P = \gamma_i x_i f_i^{0L} \text{ —— 活度系数法}$$

### 气液平衡常数 $K_i$

#### 一、状态方程法计算平衡常数

$$\left. \begin{aligned} K_i &= y_i / x_i \\ \Phi_i^V y_i P &= \Phi_i^L x_i P \end{aligned} \right\} \rightarrow K_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{\Phi_i^L}{\Phi_i^V} \quad (2-18)$$

应用状态方程分别计算汽、液两相的逸度系数。

以  $V$ 、 $T$  为独立变量的状态方程表达式：

$$\ln \Phi_i = \frac{1}{RT} \int_V^\infty \left[ \left( \frac{\partial P}{\partial n_i} \right)_{T,V,n_j} - \left( \frac{RT}{V_i} \right) \right] dV_i - \ln Z_m$$

以  $p$ 、 $T$  为独立变量的状态方程表达式：

$$\ln \Phi_i = \frac{1}{RT} \int_0^P \left[ \left( \frac{\partial V_i}{\partial n_i} \right)_{T,P,n_j} - \left( \frac{RT}{P} \right) \right] dP$$

常见的状态方程：

理想气体状态方程	$pV = RT$
----------	-----------

方 型 状 态 方 程	范德 华方 程	$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2}$
	R-K方 程	$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{T^{0.5}V(V+b)}$
	S-R-K 方程	$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{V(V+b)}$
	P-R方 程	$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{V(V+b)+b(V-b)}$
	P-T方 程	$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{V(V+b)+c(V-b)}$
常 数 状 态 方 程	Virial 方程	$Z = \frac{pV}{RT} = 1 + \frac{B}{V} + \frac{C}{V^2} + \frac{D}{V^3} + \dots \text{或} Z = 1 + B'p + C'p^2 + \dots$
	M-H 方程	$p = \sum_{i=1}^s \left( \frac{f_i(T)}{(V-b)^i} \right), \text{式中} f(T) = A_i + B_i T + C_i \exp\left(\frac{-5.475T}{T_c}\right)$
	BWR 方程	$p = RT\rho + (B_0RT - A_0 - \frac{C_0}{T^2})\rho^2 + (bRT - \alpha)\rho^3 + a\alpha\rho^6 + \frac{C}{T^2}\rho^2(1 + \gamma\rho^2)\exp(\gamma\rho^2)$

例 1: 已知: 系统压力  $p$ , 温度  $T$ , 平衡液相和汽相组成  $x_i, y_i$ ,

基础数据  $p_{c,i}, T_{c,i}$ 。用 van der Waals 方程求:  $K_i$

求解步骤:

① 计算纯物质的参数:  $a_i, b_i$  【 $a_i = 27R^2T_c^2 / 64P_c, b_i = RT_c / 8P_c$ 】

计算汽相混合物的参数:  $a, b$  【 $a = (\sum y_i \sqrt{a_i})^2, b = \sum y_i b_i$ 】

② 计算混合物的摩尔体积  $V_{m,t}$  【 $V_{m,t}^3 - (b + \frac{RT}{p})V_{m,t}^2 + \frac{a}{p}V_{m,t} - \frac{ab}{p} = 0$ 】

③ 算  $Z_m$  【 $Z_m = \frac{pV_{m,t}}{RT} = \frac{V_{m,t}}{V_{m,t} - b} - \frac{a}{RTV_{m,t}}$ 】

④ 计算汽相逸度系数: 【 $\ln \phi_i^V = \frac{b}{V_{m,t} - b} - \ln[Z_m(1 - \frac{b}{V_{m,t}})] - \frac{2\sqrt{aa_i}}{RTV_{m,t}}$ 】

⑤ 计算液相逸度系数  $\phi_i^L$ : (重复② ~ ④步,  $x_i$ )

⑥ 计算相平衡常数：
$$K_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{\phi_i^L}{\phi_i^V}$$

**例 2:** 已知：系统压力  $p$ ，温度  $T$ ，平衡液相和汽相组成  $x_i$ ， $y_i$ ，

基础数据  $p_{c,i}$ ， $T_{c,i}$ 。用 SRK 方程求： $K_i$

求解步骤：

① 计算纯物质的参数： $a_i$ ， $b_i$  【 $a_i = 27R^2T_c^2 / 64P_c$ ， $b_i = RT_c / 8P_c$ 】

计算汽相混合物的参数： $a$ ， $b$  【 $a = (\sum y_i \sqrt{a_i})^2$ ， $b = \sum y_i b_i$ 】

② 计算混合物的参数  $A$ ， $B$  【 $A = \frac{ap}{R^2T^2}$ ， $B = \frac{bT}{RT}$ 】

③ 算  $Z_m$  【 $Z_m^3 - Z_m^2 + (A - B - B^2)Z_m - AB = 0$ 】

④ 计算汽相逸度系数：

$$\left[ \ln \phi_i^V = \frac{b_i}{b} (Z_m - 1) - \ln(Z_m - B) - \frac{A}{B} \left( 2\sqrt{\frac{a_i}{a} - \frac{b_i}{b}} \right) \ln \left( 1 + \frac{B}{Z_m} \right) \right]$$

计算液相逸度系数  $\phi_i^L$ ：（重复② ~ ④步， $x_i$ ）

⑤ 计算相平衡常数：
$$K_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{\phi_i^L}{\phi_i^V}$$

**适用：**气、液两相。

**不适合：**含有  $H_2$ ，和  $H_2S$  的体系，可用 BWRS 方程。

### 7.3.5 教学方法

- 1、举例：实际生活中的相平衡，如水汽化、晾衣服等；
- 2、理论推导：相平衡常数的定义及计算推导。

### 7.3.6 作业安排及课后反思

课后作业：p65，第 4 题；

课后思考：用状态方程计算相平衡常数的实例。

### 7.3.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

教师：认真备课，提前做好 PPT；携带教案、平时成绩册、教材和其它教辅资料等。尤其是针对重点和难点，能结合工程实例讲解，做到浅显易懂。

学生：课前预习，做好问题记录，准备教材，笔记本，带着问题进课堂。

### 7.3.8 参考资料（具体到哪一章节或页码）

教材 p29-36，另参阅邓敏、吴天章主编《分离工程》，第 2 章部分。

## 7.4 教学单元四（活度系数法计算相平衡常数）

### 7.4.1 教学日期

课次/学时：4/2。

### 7.4.2 教学目标

1. 多组分物系的相平衡条件；
2. 相平衡常数的计算：活度系数法。

### 7.4.3 教学内容（含重点、难点）

#### 教学内容

1. 活度系数法计算相平衡常数的步骤；
2. 基准态逸度的选择；
3. 液相和气相活度系数；
4. P-T-K 列线图法计算相平衡常数；
5. 经验公式法计算相平衡常数。

#### 难点

1. 活度系数法计算相平衡常数。

### 7.4.4 教学过程

#### 二、活度系数法计算相平衡常数

气液平衡关系： $\hat{f}_i^V = \hat{f}_i^L$

气相： $\hat{f}_i^V = \Phi_i^V y_i P$

液相： $\hat{f}_i^L = \gamma_i x_i f_i^{0L}$

相平衡常数： $K_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{\gamma_i f_i^{0L}}{\Phi_i^V P}$  (2-19)

? 求取基准态逸度、液相活度系数和汽相逸度系数。

### (1) 基准态逸度 $f_i^{0L}$

提问学生思考：什么是基准态？？【基准态，即活度系数为 1 的状态】

#### 1) 可凝性组分的基准态逸度

基准态： $x_i \rightarrow 1$  时， $\gamma_i \rightarrow 1$ 。

代入活度系数的定义式，得： $\hat{f}_i^L = \gamma_i x_i f_i^{0L}$  或  $\gamma_i = \hat{f}_i^L / x_i f_i^{0L}$

$f_i^{0L}$  ——在系统  $T$ 、 $P$  下液相中纯组分  $i$  的逸度。

即基准态是与系统具有相同  $T$ 、 $P$  和同一相态的纯  $i$  组分。

? 如何求取纯组分  $i$  的逸度。

纯组分  $i$  的逸度：

将以  $p$ 、 $T$  为独立变量的状态方程式： $\ln \Phi_i = \frac{1}{RT} \int_0^P \left[ \left( \frac{\partial V_i}{\partial n_i} \right)_{T,P,n_j} - \left( \frac{RT}{P} \right) \right] dP$

用于计算纯组分  $i$  的逸度： $\ln \frac{f_i}{P} = \frac{1}{RT} \int_0^P \left( V_i - \frac{RT}{P} \right) dP$

对气、液、固组分均适用

纯液体组分  $i$  的逸度：

$$\begin{aligned} \ln \frac{f_i^L}{P} &= \frac{1}{RT} \left[ \int_0^{P_i^s} \left( V_i - \frac{RT}{P} \right) dP + \int_{P_i^s}^P \left( V_i - \frac{RT}{P} \right) dP \right] \\ &= \ln \Phi_i^s + \frac{V_i^L (P - P_i^s)}{RT} - \ln \frac{P}{P_i^s} \end{aligned}$$

$V_i^L$  ——纯液体组分  $i$  在系统温度下的摩尔体积，与压力无关

$\ln \Phi_i^s$  ——纯组分  $i$  在一定温度的饱和蒸汽压下的逸度系数

$$f_i^L = P_i^s \Phi_i^s \exp \left[ V_i^L (P - P_i^s) / RT \right]$$

$\Phi_i^s$  ——校正饱和蒸汽压下的蒸汽对理想气体的偏离

$\exp \left[ V_i^L (P - P_i^s) / RT \right]$  ——Poynting 因子，校正压力对饱和蒸汽压的偏离

#### 2) 不凝性组分的基准态逸度

基准态： $x_i \rightarrow 0$  时， $\gamma_i^* \rightarrow 1$ 。

代入  $\hat{f}_i^L = \gamma_i x_i f_i^{0L}$

$$f_i^{0L} = H \equiv \lim_{x_i \rightarrow 0} \frac{\hat{f}_i^L}{x_i}$$

或者： $\hat{f}_i^L = Hx_i$  (T、P 一定,  $x_i \rightarrow 0$ )

一般来说, 亨利常数 H 不仅与溶剂、溶质的性质和系统温度有关, 而且还与系统压力有关。然而在低压下, 溶质组分的逸度近似等于它在气相中的分压, 亨利常数不随压力而改变。

### 小结:

对于由一种溶质 (不凝性组分) 和一种溶剂 (可凝性组分) 构成的两组分溶液, 通常:

溶剂的活度系数按  $x_i \rightarrow 1, \gamma_i \rightarrow 1$  定义基准态;

溶质的活度系数按  $x_i \rightarrow 0, \gamma_i^* \rightarrow 1$  定义基准态。

由于两组分的基准态不同, 称为**不对称型标准化方法**。

### (2) 液相活度系数

活度系数  $\gamma_i$  由过剩自由能  $G^E$  推导得出:

$$G^E = f(\gamma_i) = \sum_{i=1}^c (n_i RT \ln \gamma_i)$$

$$\left( \frac{\partial G^E}{\partial n_i} \right)_{T, P, n_{j \neq i}} = RT \ln \gamma_i$$

所以, 如有适当的  $G^E$  的数学模型, 则可求  $\gamma_i$  的表达式。

思考: 对常用的活度系数方程: Vanlaar 方程、Margules 方程、Wilson 方程、NRTL 方程、UNIQUAC 方程、UNIFAC 方程的优缺点和应用范围进行比较。

### (3) 气相活度系数

选用适宜的状态方程求取汽相逸度系数。如采用**维里方程**可得到逸度系数的

$$\text{表达式: } \ln \Phi_i = \left( 2 \sum_{j=1}^c y_j B_{ij} - B \right) \frac{P}{RT}$$

$$\text{或 } \ln \Phi_i = \frac{2}{V} \sum_{j=1}^c y_j B_{ij} - \ln Z$$

### (4) 气液平衡常数的计算

将可凝组分基准态逸度表达式:  $f_i^L = P_i^s \Phi_i^s \exp \left[ \frac{V_i^L (P - P_i^s)}{RT} \right]$

代入相平衡常数表达式： $K_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{\gamma_i f_i^{OL}}{\Phi_i^V P}$

得到活度系数法计算相平衡常数的通式：

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{\gamma_i P_i^s \Phi_i^s}{\Phi_i^V P} \exp \left[ \frac{V_i^L (P - P_i^s)}{RT} \right]$$

$\gamma_i$ ——组分  $i$  在液相中的活度系数；

$P_i^s$ ——纯组分  $i$  在温度为  $T$  时的饱和蒸汽压；

$\Phi_i^s$ ——组分  $i$  在温度为  $T$ 、压力为  $P_i^s$  时的逸度系数；

$\Phi_i^V$ ——组分  $i$  在温度为  $T$ 、压力为  $P_i^s$  时的逸度系数；

$V_i^L$ ——纯组分  $i$  的液态摩尔体积。

该式为活度系数法计算气液平衡常数的通式。它适用于气、液相均为非理想溶液的情况。对于一个具体的分离过程，可采用不同的简化形式。

### 常用的活度系数计算公式

正规溶液	Wohl 方程, Scatchard-Hamer 方程, Van Laar 方程, Margules 方程
无热溶液	Wilson 方程, NRTL 方程, UNIQUAC 方程
基团贡献模型	UNIFAC 模型

### 二元系活度系数计算方程

例如：Van Laar 方程

$$\ln \gamma_1 = \frac{A_{12}}{\left(1 + \frac{A_{12} x_1}{A_{21} x_2}\right)^2}, \quad \ln \gamma_2 = \frac{A_{21}}{\left(1 + \frac{A_{21} x_2}{A_{12} x_1}\right)^2}$$

$A_{12}$ ,  $A_{21}$  为系统端值常数。

①  $A$  的物理意义： $A_{12} = \lim_{x_1 \rightarrow 0} \ln \gamma_1 = \ln \gamma_1^\infty$ ,  $A_{21} = \lim_{x_2 \rightarrow 0} \ln \gamma_2 = \ln \gamma_2^\infty$

② 由  $\ln \gamma_i$  计算  $A_{12}$  和  $A_{21}$ ： $A_{12} = \ln \gamma_1 \left(1 + \frac{x_2 \ln \gamma_2}{x_1 \ln \gamma_1}\right)^2$ ,  $A_{21} = \ln \gamma_2 \left(1 + \frac{x_1 \ln \gamma_1}{x_2 \ln \gamma_2}\right)^2$

③ 当  $A_{12}=A_{21}=A$  时，对称性系统： $\ln \gamma_1 = A_{12} x_2^2 = A x_2^2$ ,  $\ln \gamma_2 = A_{21} x_1^2 = A x_1^2$

④  $A$  可以判别实际溶液与理想溶液的偏离度：当  $A_{12}=A_{21}=0$  时， $\gamma_i=1$ ，理想体系；



当  $A_{12} < 0$ ,  $A_{21} < 0$  时,  $\gamma_i < 1$ , 负偏差非理想体系;

当  $A_{12} > 0$ ,  $A_{21} > 0$  时,  $\gamma_i > 1$ , 正偏差非理想体系。

⑤ Van Laar 方程的局限: 当  $A_{12} = -A_{21} = 0$ , 且  $x_1/x_2 = |A_{21}|/|A_{12}|$  时, 式中的分母为零, 不能求解。

### 气液平衡分类

#### 1) 气相为理想气体, 液相为理想溶液

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{\gamma_i P_i^s \Phi_i^s}{\Phi_i^v P} \exp \left[ \frac{V_i^L (P - P_i^s)}{RT} \right]$$

所以, 化简为:  $K_i = \frac{P_i^s}{P}$

气液平衡关系为:  $y_i = \frac{P_i^s}{P} x_i$

以上表明: 气液平衡常数仅与系统的温度和压力有关, 与溶液组成无关。这类物质一般气相服从道尔顿定律, 液相服从拉乌尔定律。

#### 2) 气相为理想气体, 液相为非理想溶液

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{\gamma_i P_i^s \Phi_i^s}{\Phi_i^v P} \exp \left[ \frac{V_i^L (P - P_i^s)}{RT} \right]$$

$$\Phi_i^s = \Phi_i^v = 1, \exp \left[ \frac{V_i^L (P - P_i^s)}{RT} \right] = 1$$

化简得:  $K_i = \frac{\gamma_i P_i^s}{P}$

低压下的大部分物质, 如醇、醛、酮与水形成的溶液属于这类物质,  $K_i$  值不仅与  $T$ 、 $P$  有关, 还与  $x$  有关。  $\gamma_i > 1$  为正偏差溶液;  $\gamma_i < 1$  为负偏差溶液。

#### 3) 气相为理想溶液, 液相为理想溶液

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{\gamma_i P_i^s \Phi_i^s}{\Phi_i^v P} \exp \left[ \frac{V_i^L (P - P_i^s)}{RT} \right]$$

$$\gamma_i = 1, \Phi_i^v = \Phi_i^s$$

$$\text{化简得: } K_i = \frac{P_i^s \Phi_i^s}{\Phi_i^v P} \exp \left[ \frac{V_i^L (P - P_i^s)}{RT} \right]$$

$$\text{即 } K_i = f_i^L / f_i^V$$

$K_i$  等于组分  $i$  在  $T$ 、 $P$  下液相逸度和气相逸度之比。可见其仅与  $T$ 、 $P$  有关，而与组成无关。

$$\left. \begin{array}{l} \gamma_i = f_i^L / x_i f_i^L \\ \gamma_i = 1 \end{array} \right\} \rightarrow f_i^L = x_i f_i^L \quad \text{即路易士—兰德规则（逸度规则）}$$

$f_i^L$  —— 纯液态组分  $i$  在混合物  $T$ 、 $P$  下的逸度

#### 4) 气相为理想溶液，液相为非理想溶液

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{\gamma_i P_i^s \Phi_i^s}{\Phi_i^v P} \exp \left[ \frac{V_i^L (P - P_i^s)}{RT} \right]$$

$$\Phi_i^v = \Phi_i^v$$

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{\gamma_i P_i^s \Phi_i^s}{\Phi_i^v P} \exp \left[ \frac{V_i^L (P - P_i^s)}{RT} \right]$$

此时， $K_i$  不仅与  $T$ 、 $P$  有关，也是液相组成的函数，但与气相组成无关。

气液平衡系统分类及气液平衡常数的计算汇总

气相 \ 液相	液相	
	理想溶液	实际溶液
理想气体	$K_i = \frac{P_i^s}{P}$	$K_i = \frac{\gamma_i P_i^s}{P}$
理想溶液	$K_i = \frac{f_i^{0L}}{f_i^V}$	$K_i = \frac{\gamma_i f_i^{0L}}{f_i^V}$
实际气体	不存在	$K_i = \frac{\gamma_i f_i^{0L}}{\Phi_i^v P}$

状态方程法和活度系数法的比较

方法	优点	缺点
状态	1. 不需要基准态	1. 没有一个状态方程能完全适用于所

<p>方程法</p>	<p>2.只需要 P-V-T 数据，原则上不需有相平衡数据</p> <p>3.可以应用对比状态理论</p> <p>4.可以用在临界区</p>	<p>有的密度范围</p> <p>2.受混合规则的影响很大</p> <p>3.对于极性物质、大分子化合物和电解质系统很难应用</p>
<p>活度系数法</p>	<p>1.简单的液体混合物的模型已能满足要求</p> <p>2.温度的影响主要表现在 <math>f_i^L</math> 上而不在 <math>\gamma_i</math> 上</p> <p>3.对许多类型的混合物，包括聚合物、电解质系统都能应用</p>	<p>1.需用其他的方法获得液体的偏摩尔体积（在计算高压汽液平衡时需要此数据）</p> <p>2.对含有超临界组分的系统应用不够方便，必须引入亨利定律</p> <p>3.难以在临界区内应用</p>

### p-T-K 列线图法

来源：根据 BWR 方程计算结果绘制，忽略组成对  $K_i$  的影响。

适用：0.8~1.0MPa 较低压力范围。

误差：平均误差 8%~15%。

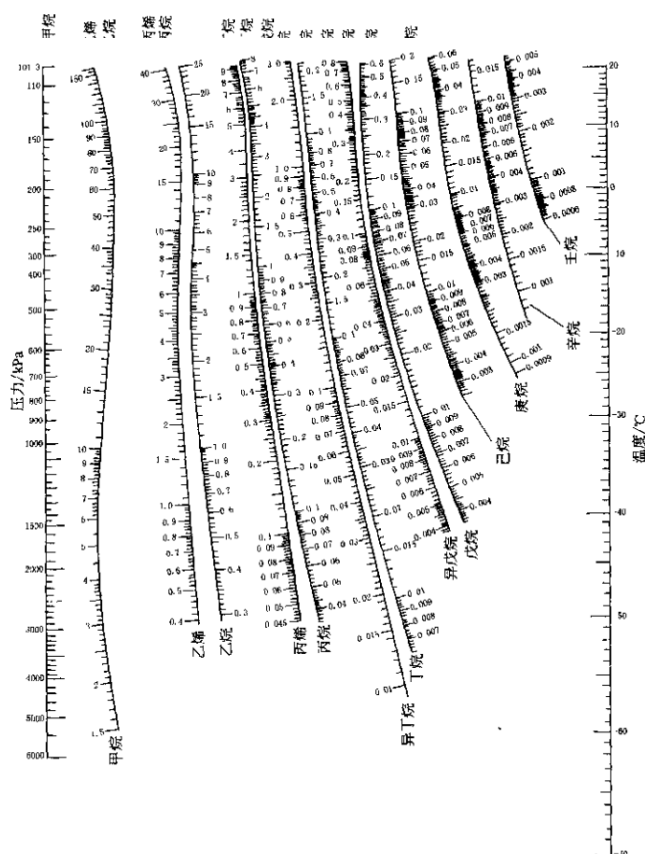


图 2-1(b) 轻烃的 K 图(低温段)<sup>[9]</sup>

### 相平衡常数经验式

1) 组成影响不大时, 相平衡常数表示为温度和压力的函数:

$$\ln K_i = a_i + \frac{b_i}{T} + c_i \ln p$$

2) 当压力变化不大时, 可以将相平衡常数只表示为温度的函数:

$$K_i = A_{0,i} + A_{1,i}T + A_{2,i}T^2 + A_{3,i}T^3 + \dots$$

$$\sqrt[3]{\frac{K_i}{T}} = C_{0,i} + C_{1,i}T + C_{2,i}T^2 + C_{3,i}T^3 + \dots$$

#### 7.4.5 教学方法

1、理论推导与分析: 本单元内容以理论推导为主, 主要涉及不同相平衡常数计算的方程。

#### 7.4.6 作业安排及课后反思

课后作业: p79, 第 3, 4, 6 题;

课后思考: 典型活度系数法计算相平衡常数。

#### 7.4.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

教师: 认真备课, 提前做好 PPT, 尤其是重要方程的推导; 携带教案、平时成绩册、教材和其它教辅资料等。尤其是针对重点和难点, 能结合工程实例讲解。

学生: 课前预习, 做好问题记录, 准备教材, 笔记本, 带着问题进课堂。

#### 7.4.8 参考资料 (具体到哪一章节或页码)

教材 p36-43, 另参阅邓敏、吴天章主编《分离工程》, 第 2 章部分。

### 7.5 教学单元五 (2.3 泡点和露点计算)

#### 7.5.1 教学日期

课次/学时: 5/2。

#### 7.5.2 教学目标

- 1、掌握多组分泡点和泡点压力的计算;
- 2、多组分露点和露点压力的计算。

#### 7.5.3 教学内容 (含重点、难点)

主要内容

## 泡点、露点计算

(1) 泡点计算：在一定  $P$ （或  $T$ ）下，已知  $x_i$ ，确定  $T_b$ （或  $P_b$ ）和  $y_i$ 。

(2) 露点计算。

重点难点：泡点和露点计算。

### 7.5.4 教学过程

#### 2.5.1 泡点温度和压力的计算

**泡点 (Bubble point)：** 温度 (压力) 是在恒压 (温) 下加热液体混合物，当液体混合物开始汽化出现第一个气泡时的温度 (压力)，简称泡点。

**露点 (dew point)：** 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。

泡点：与一定压力和液相组成相对应的汽液两相平衡时的温度。

如图 2.1a 所示。

露点：与一定压力和汽相组成相对应的汽液两相平衡时的温度。

如图 2.1b 所示。

总的来看，泡点和露点就是在定压下，汽液平衡的温度。

对液相而言为泡点，

对汽相而言为露点。

规定液相组成  $x$  和压力  $p$ （或温度  $T$ ），计算汽相组成  $y$  和温度  $T$ （或压力  $p$ ）。

单级汽液平衡系统，汽液相具有相同的温度  $T$  和压力  $p$ ，组分的液相组成与汽相组成成平衡关系。

计算方程：

(1) 相平衡方程：  $c$  个

$$(y_i = K_i x_i \quad i = 1, 2, \dots, C)$$

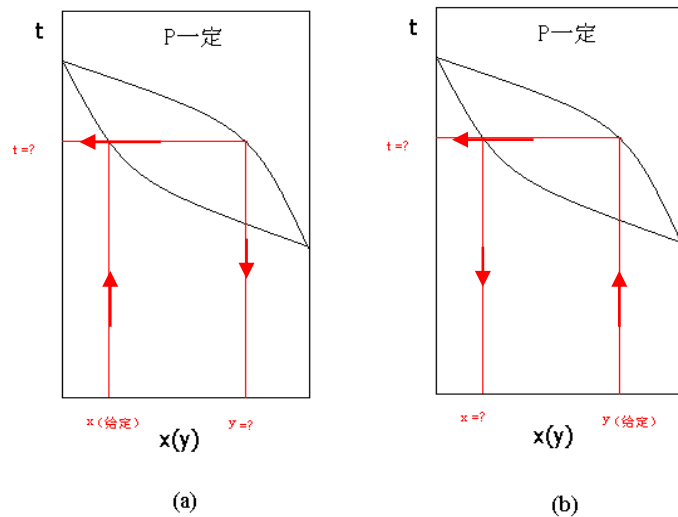


图2.1 泡点和露点示意图

(2) 摩尔分率加和方程/浓度总和式: 2 个

$$\sum_{i=1}^c x_i = 1.0, \quad \sum_{i=1}^c y_i = 1.0$$

2c+2

(3) 汽液平衡常数关联式: c 个

$$K_i = f(T, P, \underline{x}, \underline{y}) \quad i = 1, 2, \dots, C$$

变量数: 3C+2 个 ( $y_i, x_i, K_i, T, P$ )

已知变量数: c 个 (可任意指定, 从而得到不同计算类型)

未知变量数: 2c+2 个

方程总数: 2c+2 个



计算复杂程度取决于  $K_i$ 。由于  $K_i$  是  $T, P, x, y$  的函数, 所以一般需要试差求解。

### 一、泡点温度的计算

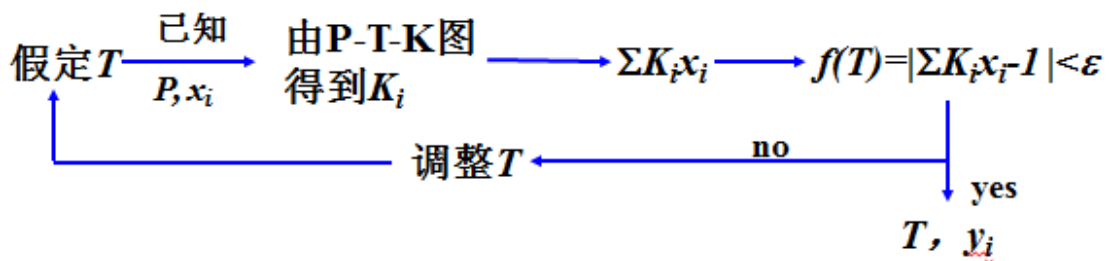
泡点计算就是根据平衡的液相组成, 利用相平衡关系去确定平衡温度 (或平衡压力) 和平衡汽相的组成。

1.  $K_i$  与组成无关 (组分的逸度系数和活度系数均为 1) 的泡点温度计算:

$$K_i = f(T, P)$$

相平衡关系代入浓度总和方程, 得到泡点方程:

$$f(T) = \sum_{i=1}^c K_i x_i - 1 = 0$$



泡点计算注意的问题:

- (1) 温度  $T$  初值的选定: 取纯物质的沸点作为温度的迭代初值。
- (2)  $K_i$  值的获得

1)  $p$ - $T$ - $K$  图 (烃类物系)

2) 简化表达式:  $K_i = \frac{P_i^s}{P} = \frac{1}{P} \left( A_i - \frac{B_i}{T + C_i} \right)$

3) 经验关系式:  $\ln K_i = a_i + \frac{b_i}{T} + c_i \ln p$

(3) 温度 T 的调整

$$\sum K_i x_i > 1 \quad T \text{ 设高了, 降低 } T.$$

$$\sum K_i x_i < 1 \quad T \text{ 设低了, 提高 } T.$$

T 的调整幅度可采用牛顿-拉普森法:

$$T^{(k+1)} = T^{(k)} - \frac{f(T^{(k)})}{f'(T^{(k)})}, \quad f(T) = \sum K_i x_i - 1$$

(4) 圆整  $y_i$ :

$$y_i^{new} = y_i^{old} / \sum y_i^{old}$$

参见 p45, 例 [\[2-6\]](#)

## 二.采用计算机计算

(1) Newton-Raphson 迭代法

泡点方程:

$$F(T) = \sum K_i x_i - 1 = 0$$

$$F'(T) = \sum x_i \frac{dK_i}{dT}$$

$$T_{n+1} = T_n - \frac{F(T_n)}{F'(T_n)}$$

例: 对于完全理想系

$$K_i = \frac{p_i^0}{p} = \frac{1}{p} \exp \left[ p_i - \frac{B_i}{T + C_i} \right]$$

$$F(T) = \sum K_i x_i - 1 = \sum \left[ \frac{x_i}{p} \exp \left( A_i - \frac{B_i}{T + C_i} \right) \right] - 1$$

$$F'(T) = \sum \frac{x_i}{p} \exp \left[ \left( A_i - \frac{B_i}{T + C_i} \right) \right] \frac{B_i}{(T + C_i)^2} = \sum \left[ K_i x_i \frac{B_i}{(T + C_i)^2} \right]$$

因此, 迭代公式为:

$$T_{n+1} = T_n - \frac{F(T_n)}{F'(T_n)} = T_n - \frac{\sum K_i x_i - 1}{\sum [K_i x_i \frac{B_i}{T_n + C_i}]}$$

(2) Richmond 迭代法

$$T_{n+1} = T_n - \frac{2}{\frac{2F'(T_n)}{F(T_n)} - \frac{F''(T_n)}{F'(T_n)}}$$

对上例来说

$$F''(T_n) = \sum [K_i x_i \frac{B_i [B_i - 2(T - C_i)]}{(T + C_i)^4}]$$

2.  $K_i$  与组成有关

$$K_i = f(T, P, \bar{x}, \bar{y})$$

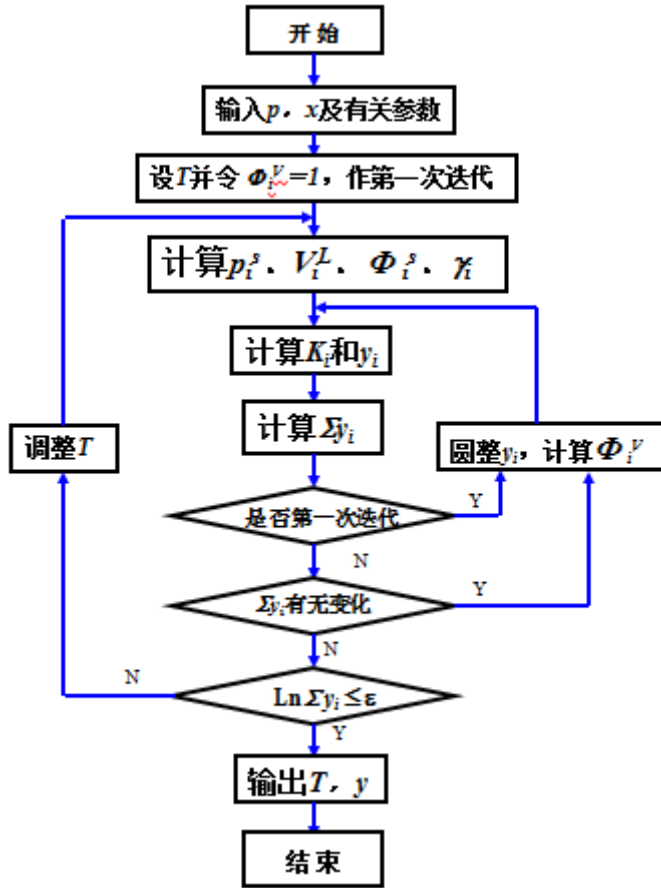
由状态方程法或活度系数法求取  $K_i$  :

$$K_i = \frac{\Phi_i^L}{\Phi_i^V}$$

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{\gamma_i P_i^s \Phi_i^s}{\Phi_i^V P} \exp \left[ \frac{V_i^L (P - P_i^s)}{RT} \right]$$

活度系数法计算泡点温度的框图





几点说明:

(1) 内、外循环的安排: 当压力不大时 (2MPa 以下),  $K_i$  对  $y_i$  不敏感, 而对温度较为敏感, 因此将  $y_i$  放在内层循环。

(2) 圆整  $y_i$ : 
$$y_i^{(new)} = \frac{y_i^{(old)}}{\sum y_i^{(old)}}$$

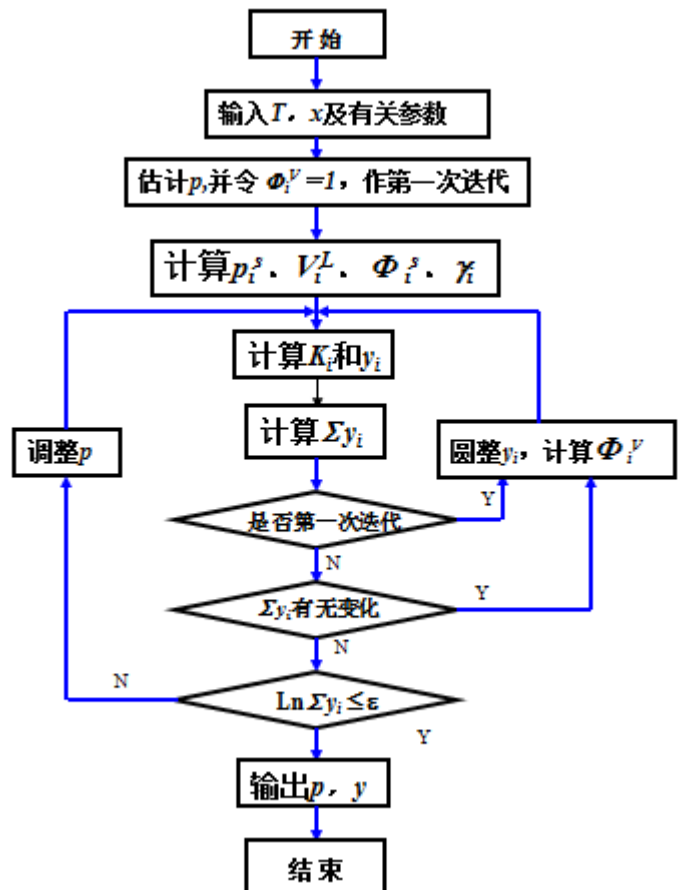
(3) 判断收敛的准则或者是温度的调节方案直接关系到收敛速度和稳定性。

## 二、泡点压力的计算

仍然依据的是泡点方程:

$$f(p) = \sum_{i=1}^C K_i x_i - 1 = 0$$

当汽相为理想气体, 液相为理想溶液时:



$$K_i = p_i^s / p \longrightarrow p_b = \sum_{i=1}^c p_i^s x_i$$

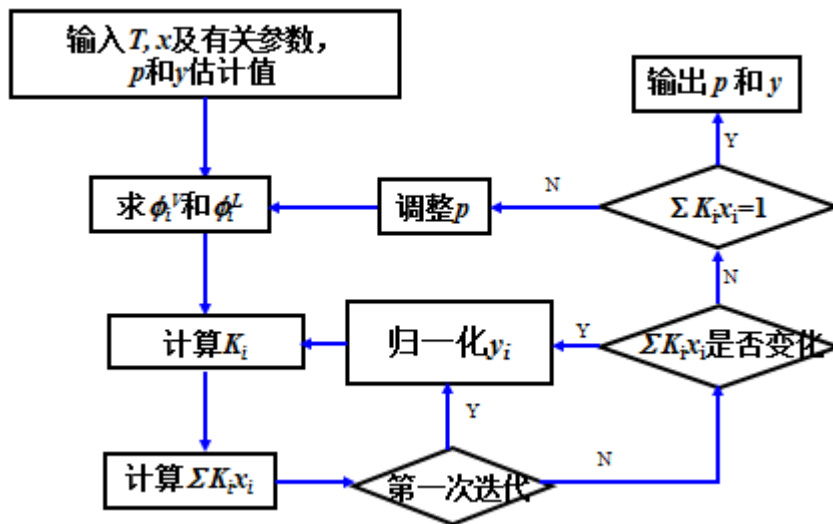
当汽相为理想气体，液相为非理想溶液时：

$$K_i = \gamma_i p_i^s / p \longrightarrow p_b = \sum_{i=1}^c \gamma_i p_i^s x_i$$

当  $K_i=f(T,p,x,y)$  时，用活度系数法（压力不太高）或状态方程法（压力较高）计算泡点压力。

活度系数法计算泡点压力的框图

状态方程法计算泡点压力框图



泡点温度与泡点压力计算的难易比较

由于系统设计变量指定的不同，泡点温度与泡点压力的计算在解法上的难易也就有所区别。这是因为不同的变量对系统状态及其物性参数所产生的影响不同所至。

泡点计算的设计变量为  $c$  个，除  $(c-1)$  组成已知外，还需给定温度或压力。 $T$ 、 $P$  这两个变量对共同变量中的物性参数  $K_i$ （或  $\gamma_i$  和  $P_i$  等）影响最大，而且，其中有些参数本身的关联式就很复杂。

当  $T$ 、 $P$  两个参数未预先赋值的话，相应的解法就比较复杂，尤其是当  $T$  为未知时，其解法最难。因为温度与压力相比， $T$  对物性参数及平衡状态的影响要强得多，特别是在常压条件下更是如此。也就是说，泡点温度的计算要比泡点压力的计算复杂。

### 2.3.2 露点温度和压力的计算

与泡点计算一样，露点计算也有露点温度和露点压力计算两种。

但无论哪种计算都依赖露点方程。

规定汽相组成  $y$  和压力  $p$  (或温度  $T$ )，计算液相组成  $x$  和温度  $T$  (或压力  $p$ )。

已知：  $y$ 、 $p$  }  
 计算：  $x$ 、 $T$  } → 露点温度计算

已知：  $y$ 、 $T$  }  
 计算：  $x$ 、 $p$  } → 露点压力计算

露点方程：

$$\text{露点温度方程： } f(T) = \sum_{i=1}^c (y_i / K_i) - 1.0 = 0$$

$$\text{露点压力方程： } f(p) = \sum_{i=1}^c (y_i / K_i) - 1.0 = 0$$

从以上可知，无论是何种露点计算都是试差求解过程。露点的求解与泡点计算类似。

**例：**某精馏塔顶产品在 1.313MPa 和 2.626MPa 下以  $C_2^=$  为对比组分，各组分的相对挥发度如下表所示，当塔顶产品是汽相出料时，求与其相平衡的回流液组成。

组分 $i$	$c_1^0$	$c_2^=$	$c_2^0$	$c_3^=$
$y_{i,D}$	0.0039	0.8651	0.1284	0.0026
$a_{i,D}$	4.3925	1.0000	0.6729	0.1963

**解：**

$$x_i = \frac{y_i / \alpha_{ij}}{\sum y_i / \alpha_{ij}}$$

组分 $i$	$y_{i,D}$	$\alpha_{ij}$	$y_{i,D} / \alpha_{ij}$	$x_{i,D}$
$c_1^0$	0.0039	4.3925	0.00089	0.00083
$c_2^=$	0.8651	1.0000	0.86510	0.80846
$c_2^0$	0.1284	0.6729	0.19082	0.17833
$c_3^=$	0.0026	0.1963	0.01325	0.01238
$\Sigma$	1.0000		1.07006	1.0000

### 7.5.5 教学方法

- 1、举例：露点计算过程及方法。
- 2、理论推导与分析：泡点和露点计算方程。

### 7.5.6 作业安排及课后反思

课后思考：露点和泡点计算的现实意义。

课后作业：P55, 13 题。

### 7.5.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

教师：认真备课，提前做好 PPT；携带教案、平时成绩册、教材和其它教辅资料等。尤其是针对重点和难点，能结合工程实例讲解。

学生：课前预习，做好问题记录，准备教材，笔记本，带着问题进课堂。

### 7.5.8 参考资料（具体到哪一章节或页码）

教材 p43-50，另参阅邓敏、吴天章主编《分离工程》，第 2 章部分。

## 7.6 教学单元六（单级平衡分离过程，等温闪蒸）

### 7.6.1 教学日期

课次/学时：6/2。

## 7.6.2 教学目标

- 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，同时收敛法；
- 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。

## 7.6.3 教学内容（含重点、难点）

教学内容：

绝热闪蒸。

**重点：**闪蒸方程，闪蒸过程的计算，等温闪蒸过程和部分冷凝过程

**难点：**等温闪蒸过程和部分冷凝过程。

## 7.6.4 教学过程

### 2.4.1 混合物相态的确定和闪蒸计算的类型

单级平衡分离：

指两相经一次紧密接触达到平衡后随即分离的过程，由于平衡两相的组成不同，因而可起到一个平衡级的分离作用。

#### 1. 平衡蒸馏定义

又称闪蒸，是连续、稳态的单级蒸馏过程。

#### 2. 平衡蒸馏作用

使进料混合物经加热、冷却或降压，部分汽化或冷凝得到含易挥发组分较多的蒸汽和含难挥发组分较多的液体，即一个平衡过程。

1、假设闪蒸温度为进料的泡点温度，则 $\sum K_i z_i = 1$ ，若 $\sum K_i z_i > 1$ ，说明  $T > T_B$ ；

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

2、假设闪蒸温度为进料的露点温度，则 $\sum (z_i / K_i) = 1$ ，若 $\sum (z_i / K_i) > 1$ ，说明  $T < T_D$ ；

$$\sum \left( \frac{z_i}{K_i} \right) \begin{cases} = 1, & T = T_D & \text{进料处于露点, } \nu = 1 \\ > 1, & T < T_D & \text{可能为汽液两相区, } \nu < 1 \\ < 1, & T > T_D & \text{进料为过热液体} \end{cases}$$

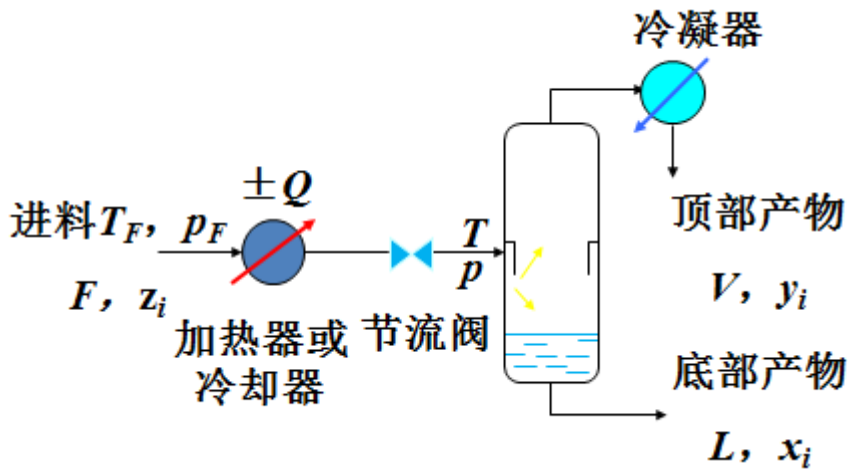
方法一:

1. 计算  $\sum K_i z_i$  和  $\sum (z_i / K_i)$
2. 若  $\sum K_i z_i > 1$ , 且  $\sum (z_i / K_i) > 1$ , 则闪蒸成立。

方法二:

1. 分别用泡、露点方程计算闪蒸压力下的泡、露点温度;
2. 若  $T_B < T < T_D$ , 则闪蒸成立。

1.1 与闪蒸相关的概念:



汽化率:  $v = \frac{V}{F}$       液化率:  $e = \frac{L}{F}$

$e + v = 1$

闪蒸过程的计算方程 (MESH 方程)

物料衡算—M 方程 (c 个):  $Fz_i = Vy_i + Lx_i$  :

相平衡—E 方程 (c 个):  $y_i = K_i x_i$  :

摩尔分数加和式—S 方程 (2 个):  $\sum_{i=1}^c y_i = 1, \sum_{i=1}^c x_i = 1$

热量平衡式—H 方程 (1 个):  $Q = VH_V + LH_L - FH_F$

总变量数                    3c+8 个: (F, T<sub>F</sub>, p<sub>F</sub>, T, p, V, L, Q, z<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>, x<sub>i</sub>)

总方程数                    2c+3 个

需规定变量数              c+5 个

已知变量数  $c+3$  个( $F, T_F, p_F, z_i$ )

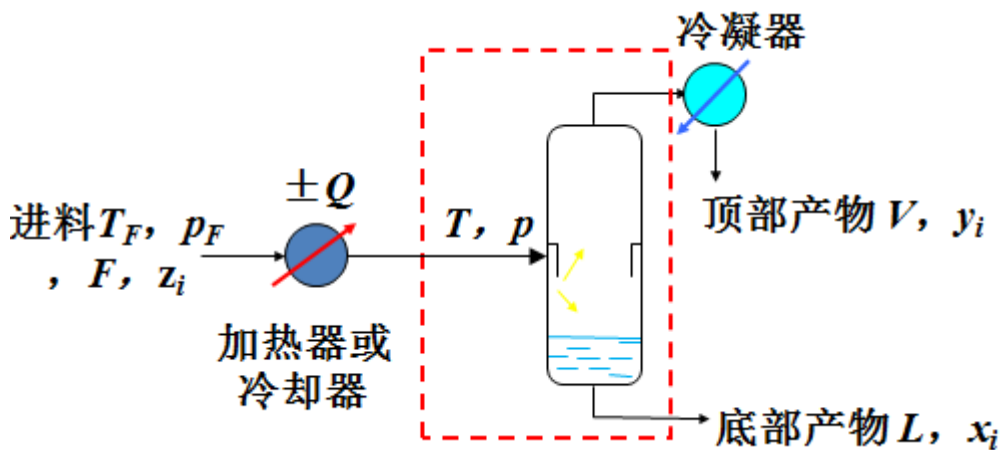
未知变量数 2 个

### 闪蒸计算类型

规定变量	闪蒸形式	输出变量
$p, T$	等温	$Q, V, L, y_i, x_i$
$p, Q=0$	绝热	$T, V, L, y_i, x_i$
$p, Q \neq 0$	非绝热	$T, V, L, y_i, x_i$
$p, L(\text{或 } e)$	部分冷凝	$Q, T, V, y_i, x_i$
$p(\text{或 } T), V(\text{或 } v)$	部分汽化	$Q, T(\text{或 } p), L, y_i, x_i$

### 2.4.2 等温闪蒸

#### 2.4.2.1 等温闪蒸过程



#### 等温闪蒸的计算类型

	已知条件	求解参数
(1)	$F, z_i, T, p$	$L, V, x_i, y_i, Q$
(2)	$F, z_i, p, v(e)$	$T, L(V), x_i, y_i, Q$

#### 2.4.2.2 等温闪蒸的基本计算公式

1. 物料衡算——M 方程 ( $c$  个) :  $Fz_i = Vy_i + Lx_i$

2. 相平衡——E 方程 ( $c$  个) :  $y_i = K_i x_i$

3. 摩尔分数加和式——S 方程 (2 个) :  $\sum_{i=1}^c y_i = 1, \sum_{i=1}^c x_i = 1$

4. 热量平衡式——H 方程 (1 个) :  $Q = VH_V + LH_L - FH_F$

5. 相平衡常数关联式:  $K_i = f(T, p, x_i, y_i)$

6. 由 ME 方程得到  $x_i$ 、 $y_i$  与  $z_i$ 、 $K_i$  的关系:

$$x_i = \frac{z_i}{(1-e)K_i + e} = \frac{z_i}{vK_i + (1-v)} \quad (2-80)$$

$$y_i = \frac{K_i z_i}{(1-e)K_i + e} = \frac{K_i z_i}{1+v(K_i - 1)} \quad (2-81)$$

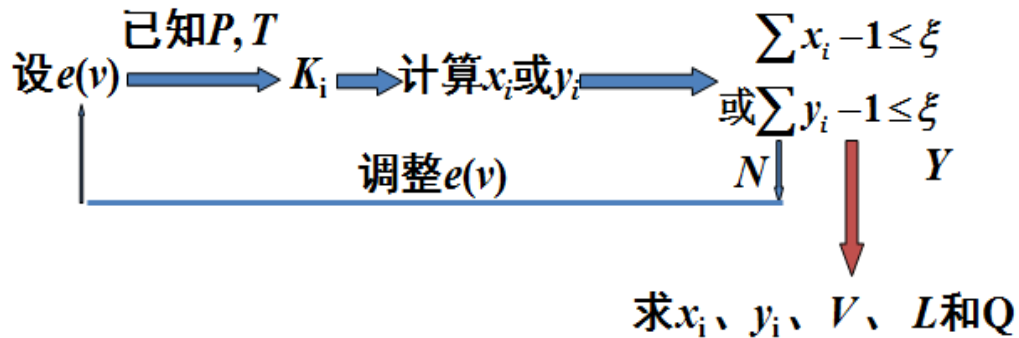
闪蒸方程

$$F(v) = \sum x_i - 1 = \sum \frac{z_i}{1+v(K_i - 1)} - 1 \quad (2-83)$$

$$F(v) = \sum y_i - 1 = \sum \frac{K_i z_i}{1+v(K_i - 1)} - 1 \quad (2-84)$$

### 1. 汽液平衡常数 $K_i$ 与组成无关的计算

(1) 已知温度和压力, 求液化率或汽化率



使用 Newton-Raphson 方法进行迭代:  $v_{n+1} = v_n - \frac{F(v_n)}{F'(v_n)}$

闪蒸方程:

$$F(v) = \sum x_i - 1 = \sum \frac{z_i}{1+v(K_i - 1)} - 1$$

$$F'(v) = -\sum \frac{z_i(K_i - 1)}{[1+v(K_i - 1)]^2}$$

$$F(v) = \sum y_i - 1 = \sum \frac{K_i z_i}{1+v(K_i - 1)} - 1$$



$$F'(v) = -\sum \frac{K_i z_i (K_i - 1)}{[1 + v(K_i - 1)]^2}$$

Rachford-Rice 方程:

$$F(v) = \sum (y_i - x_i) = \sum \frac{z_i (K_i - 1)}{[1 + v(K_i - 1)]} = 0$$

$$F'(v) = \sum \frac{z_i (K_i - 1)^2}{[1 + v(K_i - 1)]^2}$$

$v=0.5$  开始迭代,  $|F(v)| < 0.0001$  时终止

$v$  值确定后,  $x_i, y_i$  可求:

$$x_i = \frac{z_i}{(1-e)K_i + e} = \frac{z_i}{vK_i + (1-v)}, \quad y_i = \frac{K_i z_i}{(1-e)K_i + e} = \frac{K_i z_i}{1 + v(K_i - 1)}$$

$L$  和  $V$  可求:  $F=L+V, v=V/F$

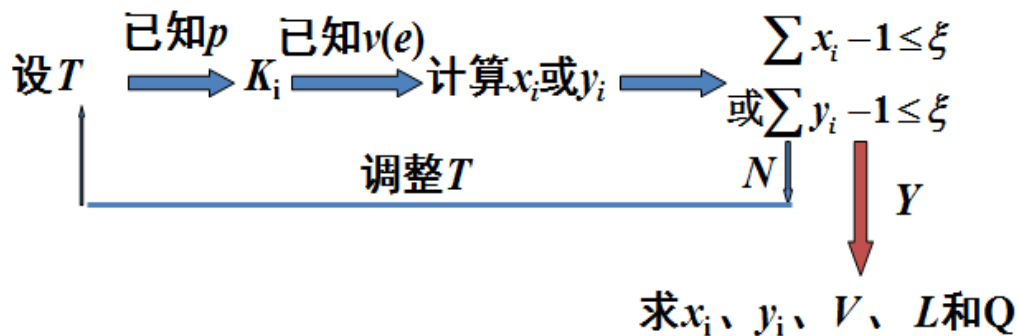
$Q$  可求: 计算焓值  $H_F, H_L, H_V$

$$Q = VH_V + LH_L - FH_F$$

对理想溶液, 有:  $H_F = \sum z_i H_{Fi}, H_V = \sum y_i H_{Vi}, H_L = \sum x_i H_{Li}$

对非理想溶液, 还需混合热数据。

(2) 已知压强  $P$ , 求闪蒸温度  $T$



$T$  的调整:

(1) Rachford-Rice 方程:

$$F(v) = \sum (y_i - x_i) = \sum \frac{z_i (K_i - 1)}{[1 + v(K_i - 1)]} = 0, \quad F'(v) = \sum \frac{z_i (K_i - 1)^2}{[1 + v(K_i - 1)]^2}$$

(2) 估计 T:

$$K_G(T_{n+1}) = \frac{K_G(T_n)}{1 + dF(T_n)} \quad (2-87)$$

$d \leq 1.0$ , 为阻尼因子

## 2. 汽液平衡常数 $K_i$ 与组成有关的计算

$$K_i = f(T, p, x_i, y_i)$$

$$x_i = \frac{z_i}{(1-e)K_i + e} = \frac{z_i}{vK_i + (1-v)}, \quad y_i = \frac{K_i z_i}{(1-e)K_i + e} = \frac{K_i z_i}{1 + v(K_i - 1)}$$

**计算思路:** 由于  $K_i$  不仅是温度的函数, 也是组成的函数, 因此先按  $K_i = f(T, p)$  初估  $x_i$  和  $y_i$ , 迭代求  $v$  至收敛, 再估算新的一组  $x_i$  和  $y_i$ , 并计算  $K_i$ , 重新迭代  $v$ , 直至  $x_i$  和  $y_i$  没有变化为止。

### 7.6.5 教学方法

1、理论推导与分析: 各种计算方程的推导。

### 7.6.6 作业安排及课后反思

课后思考: 闪蒸方程的应用。

### 7.6.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

教师: 认真备课, 提前做好 PPT, 尤其是要做到理论方程与实际的结合; 携带教案、平时成绩册、教材和其它教辅资料等。尤其是针对重点和难点, 能结合工程实例讲解。

学生: 课前预习, 做好问题记录, 准备教材, 笔记本, 带着问题进课堂。

### 7.6.8 参考资料 (具体到哪一章节或页码)

教材 p52-56, 另参阅邓敏、吴天章主编《分离工程》, 第 2 章部分。

## 7.7 教学单元七 (绝热闪蒸)

### 7.7.1 教学日期

课次/学时: 7/2。

## 7.7.2 教学目标

- 1、掌握绝热闪蒸的计算。

## 7.7.3 教学内容 (含重点、难点)

内容

- 1、绝热闪蒸过程及计算。

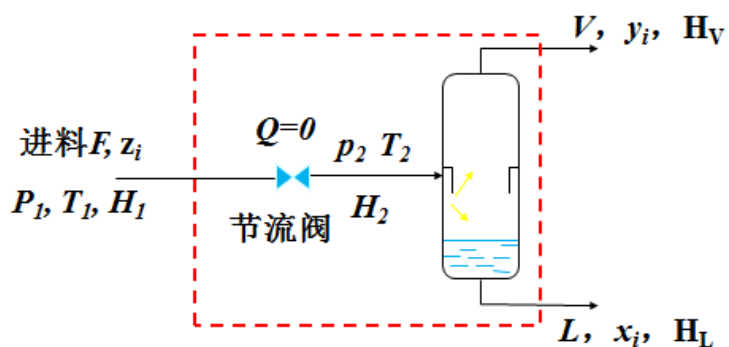
难点

- 1、计算过程迭代。

## 7.7.4 教学过程

### 2.4.3 绝热闪蒸过程

绝热闪蒸的计算类型



已知:  $F, z_i, p_1, T_1$  和  $p_2$

计算:  $T, V, L, y_i, x_i$

计算方程:

1. 物料衡算——M 方程 (c 个):  $Fz_i = Vy_i + Lx_i$
2. 相平衡——E 方程 (c 个):  $y_i = K_i x_i$
3. 摩尔分数加和式——S 方程 (2 个):  $\sum_{i=1}^c y_i = 1, \sum_{i=1}^c x_i = 1$
4. 热量平衡式——H 方程 (1 个):  $Q = VH_V + LH_L - FH_F$
5. 相平衡常数关联式:  $K_i = f(T, p, x_i, y_i)$
6. 由 ME 方程得到  $x_i, y_i$  与  $z_i, K_i$  的关系:

$$x_i = \frac{z_i}{(1-e)K_i + e} = \frac{z_i}{vK_i + (1-v)} \quad (2-80)$$

$$y_i = \frac{K_i z_i}{(1-e)K_i + e} = \frac{K_i z_i}{1+v(K_i-1)} \quad (2-81)$$

另外,

$H_1=H_2$  (绝热=等焓过程)

$$Q = VH_V + LH_L - FH_F = 0$$

$$FH_2 = VH_V + LH_L$$

$$H_2 = vH_V + (1-v)H_L$$

$$v^* = \frac{H_2 - H_L}{H_V - H_L} = \frac{H_1 - H_L}{H_V - H_L}$$

工程计算中, 迭代变量:  $T$ 、 $v$

迭代收敛判据: 闪蒸方程或热量衡算方程

按  $T$  和  $v$  是分步迭代还是同时迭代

分为序贯迭代法和同时收敛法。

一、序贯迭代法

(1) 宽沸程物系:  $\psi$  对  $T$  不敏感

用热量衡算方程迭代  $T$  (外层循环); 用闪蒸方程迭代  $\psi$  (内层循环):

(2) 窄沸程物系:  $\psi$  对  $T$  敏感

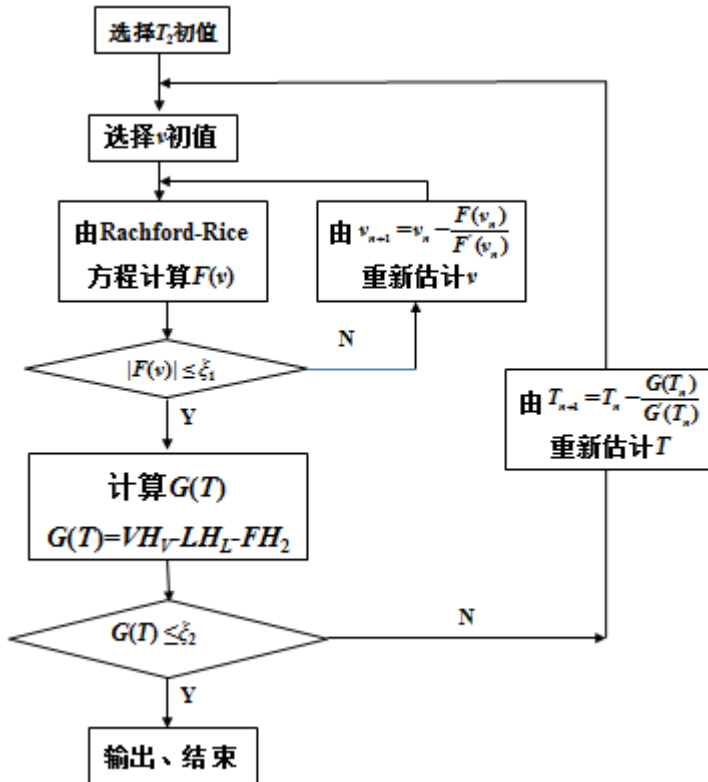
用热量衡算方程迭代  $\psi$  (外层循环); 用闪蒸方程迭代  $T$  (内层循环):

序贯迭代法

(1) 宽沸程混合物闪蒸的序贯迭代法

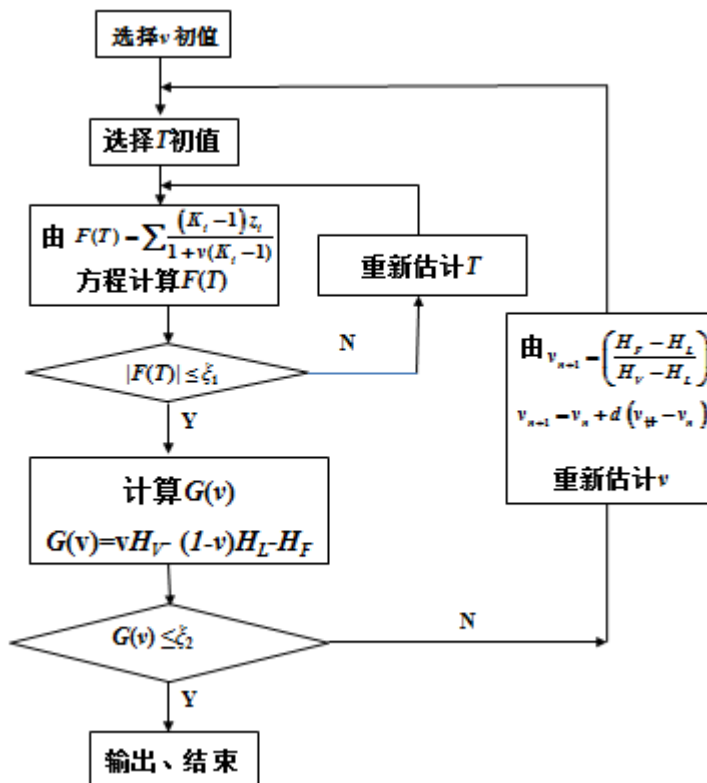
$$G(T) = VH_V + LH_L - FH_F$$

$$\text{或 } G(T) = vH_V + (1-v)H_L - H_F$$



(2) 窄沸程混合物闪蒸的序贯迭代法

$$G(v) = vH_V + (1-v)H_L - H_F$$



### 7.7.5 教学方法

理论推导：绝热闪蒸过程 MESH 方程推导。

### 7.7.6 作业安排及课后反思

课后作业：p68，第 25 题。

### 7.7.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

教师：认真备课，提前做好 PPT；携带教案、平时成绩册、教材和其它教辅资料等。尤其是针对重点和难点，能结合工程实例讲解。

学生：课前预习，做好问题记录，准备教材，笔记本，带着问题进课堂。

### 7.7.8 参考资料（具体到哪一章节或页码）

教材 p56-64，另参阅邓敏、吴天章主编《分离工程》，第 2 章部分。

## 7.8 教学单元八（多组分精馏-I）

### 7.8.1 教学日期

课次/学时：8/2。

### 7.8.2 教学目标

- 1、掌握多组分精馏流程及原理；
- 2、掌握多组分精馏简捷计算；
- 3、了解多组分精馏浓度分布特征；
- 4、掌握清晰分割物料衡算；。

### 7.8.3 教学内容（含重点、难点）

教学内容

- 1 多组分精馏过程分析；
- 2 多组分精馏的相关概念；
- 3 多组分精馏的特点；
- 4 清晰分割物料衡算；。

重点和难点

1. 多组分精馏浓度分布的特点；

2. 清晰分割物料衡算。

## 7.8.4 教学过程

### 3.1.1 多组分精馏过程分析

精馏 (distillation)

利用组分挥发度差异, 借助“回流”技术实现混合液高纯度分离的多级分离操作, 即同时进行多次部分汽化和部分冷凝的过程。

可调设计变量数  $N_a=5$

被指定的可调变量:

- (1) 进料位置;
- (2) 回流比;
- (3) 回流状态

剩余可调设计变量: 2 个

往往用来指定组分在馏出液 ( $x_D$ ) 和釜液 ( $x_W$ ) 中的浓度。

### 1.2 多组分精馏的相关概念

#### 1.2.1 关键组分与非关键组份

**关键组分:** 由设计者指定浓度或提出分离要求的两个组分。包括轻关键组分 LK 和重关键组分 HK。

**非关键组分:** 原料中除了这两个关键组分以外的组分称为非关键组分。包括轻非关键组分 (轻组分, LNK) 和重非关键组分 (重组分, HNK)

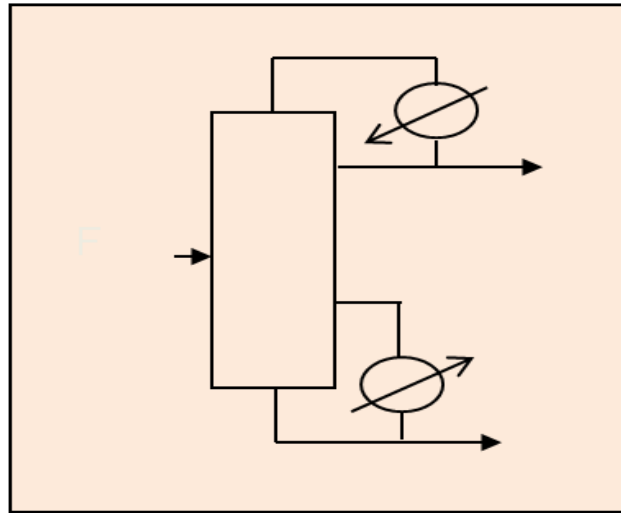
#### (1) 轻关键组分与重关键组分

**轻关键组分 LK:** 关键组分中挥发度更大 (即沸点低) 的组分; 在塔釜液中该组分的浓度有严格限制, 并在进料液中比该组分轻的组分及该组分的绝大部分应从塔顶采出。

**重关键组分 HK:** 关键组分中挥发度更小 (即沸点高) 的组分; 在塔顶馏出液中该组分的浓度有严格限制, 并在进料液中比该组分重的组分及该组分的绝大部分应从塔釜采出。

#### (2) 轻非关键组分和重非关键组分

**轻非关键组分:** LNK, 简称轻组分, 指比轻关键组分挥发度更大或更轻的组分



**重非关键组分：**HNK，简称重组分，指比重关键组分挥发度更小或更重的组分

### 1.2.2 轻重关键组分的回收率

回收率：也称分离度，指轻（重）关键组分在塔顶（釜）产品中的量占进料量的百分数。

$$\text{LK 在塔顶回收率: } \varphi_{LK,D} = \frac{D \cdot x_{LK,D}}{F \cdot z_{LK}} \times 100\%$$

$$\text{HK 在塔釜回收率: } \varphi_{HK,W} = \frac{W \cdot x_{HK,W}}{F \cdot z_{HK}} \times 100\%$$

### 1.2.3 分配组分与非分配组分

分配组分：塔顶、塔釜**同时出现**的组分

非分配组分：只在塔顶或塔釜出现的组分

### 1.2.4 清晰分割与非清晰分割

#### 清晰分割

假设轻重关键组分为相邻组分，并且馏出液中不含有比重关键组分还重的组分，釜液中不含有比轻组分还轻的组分，这种情况称为清晰分割。

#### 非清晰分割

①实际过程中，在轻重关键组分为相邻组分时，馏出液中除了重关键组分以及比它轻的非关键组分外，还含有比它重的组分

②釜液中除了轻关键组分以及比它重的组分外，还含有比它轻的组分。

当轻重关键组分为非相邻组分时，两关键组分间的各组分会在馏出液和釜液中出现

### 1.3 多组分精馏的特性

1.求解方法; 2.摩尔流率; 3.温度分布; 4.组成分布

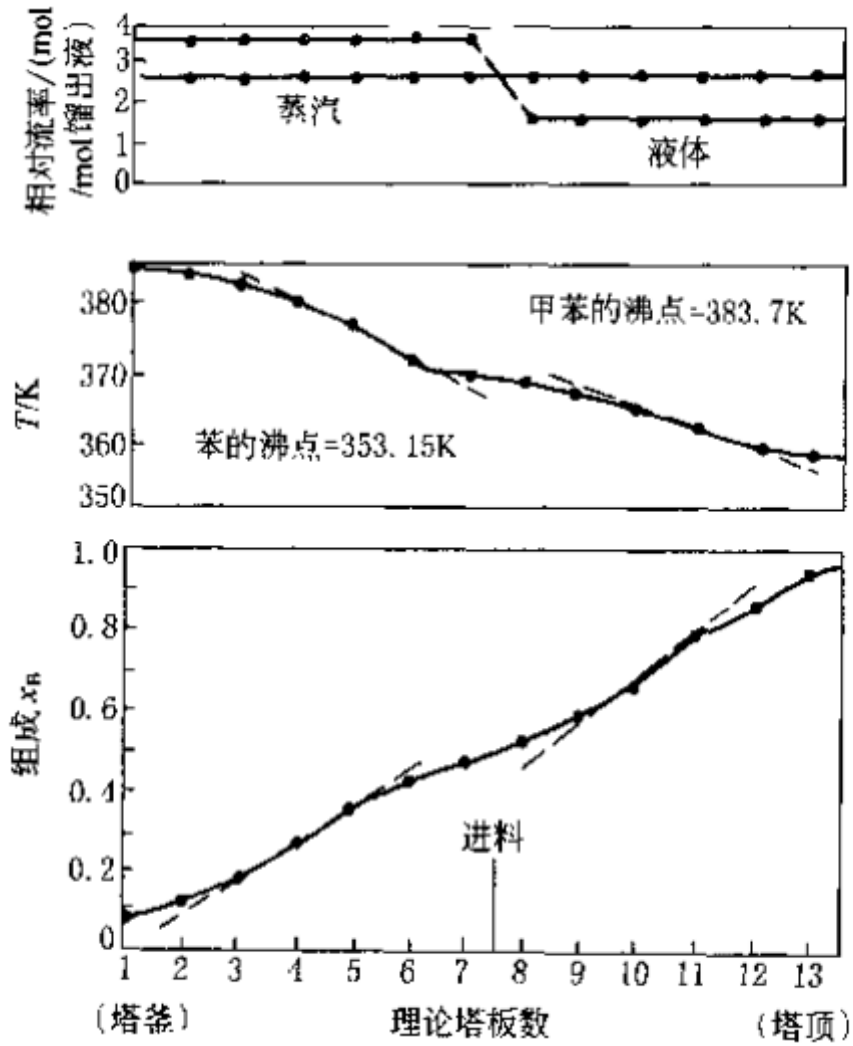
对于二组分精馏，设计变量被确定后，可从任一端出发，作逐板计算，无需试差。

对于多组分精馏（**可调设计变量也为2**），由于不能指定全部组成，所以需先假设一端的组成，再通过反复试差求解。

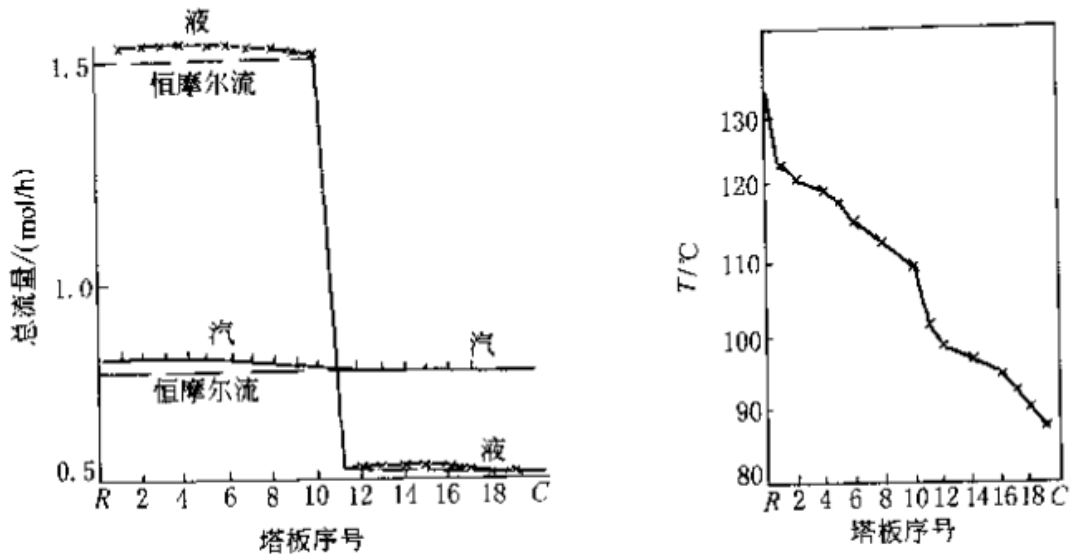
下面通过实例分别对二组分精馏和多组分精馏过程分析进行比较：从双组



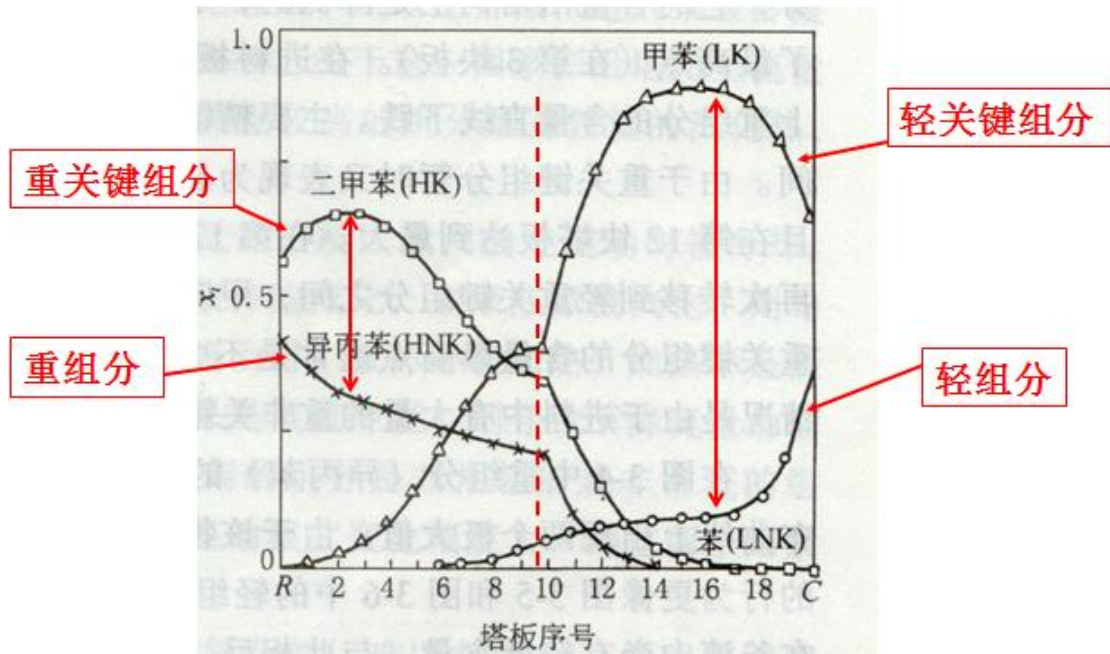
分，三组分到四个组分。



苯-甲苯二组分精馏流率、温度、浓度分布



苯—甲苯—异丙苯精馏塔内汽液流量和温度分布



四组分精馏实例：苯—甲苯(LK)—二甲苯(HK)-异丙苯

多组分精馏与二组分精馏在浓度分布上的区别：

- (1) 关键组分浓度分布存在极大值；
- (2) 非关键组分通常是非分配的：即重组分通常仅出现在釜液中，轻组分仅出现在馏出液中；
- (3) 重、轻非关键组分分别在进料板下、上形成几乎恒浓的区域；
- (4) 全部组分均存在于进料板上，但进料板浓度不等于进料浓度。

精馏塔中：

- 1) 温度分布主要反映物流的组成；
- 2) 总的级间流量分布则主要反映热量衡算的限制

如何理解这句话，以及恒摩尔流假设的实际意义？

#### 1.4.1 清晰分割的物料衡算

对精馏过程而言，其变量分析如下表：

总变量数	$N_v=2c+5$	$F, D, W$ $z_i, x_{i,D}, x_{i,W}$
总方程数	$N_e=c+3$	$Fz_i=Dx_{i,D}+x_{i,W}$ $\sum z_i=1, \sum x_{i,D}=1, \sum x_{i,W}=1$
设计变量	$N_i=c+2$	

各物料符号表示

	轻关键组分	重关键组分	轻组分	重组分
进料	$f_{LK}$	$f_{HK}$	$f_{LNK}$	$f_{HNK}$
馏出液	$d_{LK}$	$d_{HK}$	$d_{LNK}$	$d_{HNK}$
釜液	$w_{LK}$	$w_{HK}$	$w_{LNK}$	$w_{HNK}$

清晰分割，轻组分在塔釜不出现，即：

$$w_i=0, d_i=f_i, 1 \leq i \leq LK-1 \quad (3-3)$$

同理，重组分在馏出液不出现，即：

$$d_i=0, w_i=f_i, HK+1 \leq i \leq c \quad (3-4)$$

各物流的总流率为其中各组分的流率之和。

馏出液流率：

$$D = \sum_{i=1}^{LK-1} d_i + d_{LK} + d_{HK} = \sum_{i=1}^{LK-1} f_i + d_{LK} + d_{HK}$$

釜液流率：

$$W = \sum_{i=LK+1}^c w_i + w_{LK} + w_{HK} = \sum_{i=LK+1}^c f_i + w_{LK} + w_{HK}$$

摩尔分数	馏出液	釜液
LK	$x_{LK,D} = \frac{Fz_{LK} - Wx_{LK,W}}{D} = \frac{f_{LK} - w_{LK}}{D}$	$x_{LK,W} = \frac{Fz_{LK} - Dx_{LK,D}}{W} = \frac{f_{LK} - d_{LK}}{W}$
HK	$x_{HK,D} = \frac{Fz_{HK} - Wx_{HK,W}}{D} = \frac{f_{HK} - w_{HK}}{D}$	$x_{HK,W} = \frac{Fz_{HK} - Dx_{HK,D}}{W} = \frac{f_{HK} - d_{HK}}{W}$
LNK	$x_{LNK} = \frac{Fz_{LNK}}{D} = \frac{f_{LNK}}{D}$	0
HNK	0	$x_{HNK} = \frac{Fz_{HNK}}{W} = \frac{f_{HNK}}{W}$

根据恒摩尔流假定，精馏段操作方程

$$y_{i,n} = \frac{L}{L+D} x_{i,n+1} + \frac{D}{L+D} x_{i,D} = \frac{R}{R+1} x_{i,n+1} + \frac{1}{R+1} x_{i,D}$$

提馏段操作方程

$$y_{i,m} = \frac{\bar{L}}{\bar{L}-W} x_{i,m+1} + \frac{W}{\bar{L}-W} x_{i,W} = \frac{L+qF}{L+qF-W} x_{i,m+1} + \frac{W}{L+qF-W} x_{i,W}$$

$$q = \frac{\text{饱和蒸气的焓-进料的焓}}{\text{饱和蒸气的焓-饱和液体的焓}} = \frac{H - h_F}{H - h}$$

1. 已知馏出液中轻关键组分 LK 摩尔分数  $x_{LK,D}$  和釜液中重关键组分 HK 的摩尔分数  $x_{HK,W}$  轻, 重组分物料衡算:

$$d_{LK} = D \cdot x_{LK,D}$$

$$d_{HK} = f_{HK} - W \cdot x_{HK,W}$$

$$w_{LK} = f_{LK} - D \cdot x_{LK,D}$$

$$w_{HK} = W \cdot x_{HK,W}$$

全塔物料衡算:  $F = D + W$

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{LK-1} f_i + f_{HK} - F \cdot x_{HK,W}}{1 - x_{LK,D} - x_{HK,W}}, \quad W = \frac{\sum_{i=HK+1}^c f_i + f_{LK} - F \cdot x_{LK,D}}{1 - x_{LK,D} - x_{HK,W}}$$

设进料中组分  $i$  的摩尔分数为  $z_i$ , 则:  $f_i = F \cdot z_i$

$$D = F \cdot \frac{\sum_{i=1}^{LK-1} z_i + z_{HK} - x_{HK,W}}{1 - x_{LK,D} - x_{HK,W}}, \quad W = F \cdot \frac{\sum_{i=HK+1}^c z_i + z_{LK} - x_{LK,D}}{1 - x_{LK,D} - x_{HK,W}}$$

2. 已知馏出液中重关键组分摩尔分数  $x_{HK,D}$  和釜液中轻关键组分的摩尔分数  $x_{LK,W}$

$$D = F \cdot \frac{\sum_{i=1}^{LK} z_i - x_{LK,W}}{1 - x_{HK,D} - x_{LK,W}}, \quad W = F \cdot \frac{\sum_{i=HK}^c z_i - x_{HK,D}}{1 - x_{HK,D} - x_{LK,W}}$$

3. 已知馏出液和釜液中轻关键组分摩尔分数  $x_{LK,D}$  和  $x_{LK,W}$

$$D = F \cdot \frac{z_{LK} - x_{LK,W}}{x_{LK,D} - x_{LK,W}}, \quad W = F \cdot \frac{x_{LK,D} - z_{LK}}{x_{LK,D} - x_{LK,W}}$$

4. 已知馏出液中轻关键组分摩尔分数  $x_{LK,D}$  和轻关键组分回收率  $\phi_{LK}$  根据回收率的定义:

$$\phi_{LK} = \frac{D \cdot x_{LK,D}}{F \cdot z_{LK}} \times 100\% = \frac{d_{LK}}{f_{LK}} \times 100\%$$

$$D = F \cdot \frac{z_{LK}}{x_{LK,D}} \phi_{LK}, \quad W = F - D$$

例: 3-1

### 7.8.5 教学方法

概念讲解：多组分精馏为首次涉及内容，同时涉及许多基本概念，这些概念采用讲解结合实例的方式。

对比：多组分精馏与双组分对比，得出特点。

### 7.8.6 作业安排及课后反思

课后作业：p155，第1题。

### 7.8.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

教师：认真备课，提前做好PPT；携带教案、平时成绩册、教材和其它教辅资料等。尤其是针对重点和难点，能结合工程实例讲解。

学生：课前预习，做好问题记录，准备教材，笔记本，带着问题进课堂。

### 7.8.8 参考资料（具体到哪一章节或页码）

教材 p72-86，另参阅邓敏、吴天章主编《分离工程》，第3章部分。

## 7.9 教学单元九（多组分精馏-II）

### 7.9.1 教学日期

课次/学时：9/2。

### 7.9.2 教学目标

- 1、掌握多组分精馏简捷计算；
- 2、进料位置确定的方法。

### 7.9.3 教学内容（含重点、难点）

教学内容

- 1、Fenske 方程计算  $N_m$ ；
- 2、Underwood 方程计算  $R_m$ ；
- 3、Gilliland 图求平衡级数。

重点难点：FUG 算法。

### 7.9.4 教学过程

1.4 多组分精馏的简捷算法

计算基础：双组分精馏的结论

$$R \rightarrow \infty, N \rightarrow N_m$$

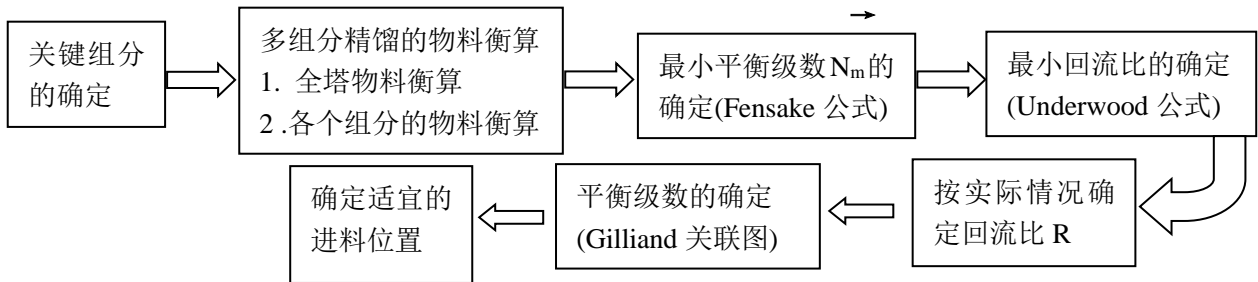
$$R \rightarrow R_m, N \rightarrow \infty$$

简捷算法对过程的简化：

1. 将多组分溶液简化为一对关键组分的分离
2. 物料衡算按清晰分割计算

简捷算法解决的问题：1) 平衡级数的计算；2) 进料与产品组成间的关系

简捷算法的计算步骤



#### 1.4.2 芬斯克法计算最少平衡级数 $N_m$

- 芬斯克公式是基于全回流所需平衡级数最少的概念，交替使用操作线方程和相平衡方程推导出来的。

$$N_m = \frac{\lg \left[ \left( \frac{x_{i,D}}{x_{i,W}} \right) \left( \frac{x_{j,W}}{x_{j,D}} \right) \right]}{\lg \alpha_{ij}} = \frac{\lg \left[ \left( \frac{x_i}{x_j} \right)_D \left( \frac{x_j}{x_i} \right)_W \right]}{\lg \alpha_{ij}}$$

$$N_m = \frac{\lg \left[ \left( \frac{x_{LK,D}}{x_{LK,W}} \right) \left( \frac{x_{HK,W}}{x_{HK,D}} \right) \right]}{\lg \alpha_{LK-HK}} = \frac{\lg \left[ \left( \frac{x_{LK}}{x_{HK}} \right)_D \left( \frac{x_{HK}}{x_{LK}} \right)_W \right]}{\lg \alpha_{LK-HK}}$$

$$N_m = \frac{\lg \left[ \left( \frac{d}{w} \right)_{LK} \left( \frac{w}{d} \right)_{HK} \right]}{\lg \alpha_{LK-HK}}$$

$$N_{\min} = \frac{\lg \left[ \left( \frac{\phi_{LK,D} \phi_{HK,W}}{(1-\phi_{LK,D})(1-\phi_{HK,W})} \right) \right]}{\lg \alpha_{LK-HK}}$$

方程的几点说明：

- 1、以上是对 LK、HK 推导的结果，既能用于双组分，也能用于多组分精馏。对多组分精馏，用一对关键组分来求，其它组分对分离的影响，反映在挥发度上。

关键组分选择不同， $N_m$  不同。

2、 $N_m$  与进料组成和状态无关，也与组成的表示方式无关，方程既能用于全塔，也能用于某一段塔。

3、随分离要求的提高，组分分配比增加， $N_m$  增加；

4、相对挥发度：（1）方程的精度取决于相对挥发度数据的可靠性。

（2） $\alpha_{AB}$  的近似处理： $\alpha_{AB} = \sqrt{\alpha_{AB,D}\alpha_{AB,W}}$ ，

$$\alpha_{AB} = \sqrt[3]{\alpha_{AB,D}\alpha_{AB,W}\alpha_{AB,F}}$$

全回流下的物料分布：

1、计算法

（a）根据 Fenske 公式  $\left(\frac{d_i}{w_i}\right) = (\alpha_{i,r})^{N_m} \left(\frac{d_r}{w_r}\right)$  与  $f_i = d_i + w_i$  联立得到各组分在塔顶、

塔釜的分配情况

$$d_i = \frac{f_i \left(\frac{d_{HK}}{w_{HK}}\right) (\alpha_{i-HK})^{N_m}}{1 + \left(\frac{d_{HK}}{w_{HK}}\right) (\alpha_{i-HK})^{N_m}}, \quad w_i = \frac{f_i}{1 + \left(\frac{d_{HK}}{w_{HK}}\right) (\alpha_{i-HK})^{N_m}}$$

2、作图法

清晰分割假定比较适用的情况：

轻重关键组分的分离程度较高，轻组分的挥发度比 LK 的挥发度大得多，而重组分的挥发度比 HK 的挥发度小得多。

对于无中间组分的体系：

如 A(LNK)、B(LK)、C(HK)、D(HNK)组成的体系，

先假定清晰分割，计算理论板数，再校验是否清晰分割。

对于有中间组分的体系：

如 A(LNK)、B(LK)、C(中间组分)、D(HK)、E(HNK) 组成的体系，则根据 C 的相对挥发度是靠近 B 还是靠近 D 来假定 C 在塔顶和塔釜的分配。

### 1.4.3 $R_m$ —Underwood 公式

对最小回流比下有上下两个恒浓区的多组分精馏，Underwood 根据物料平衡和相平衡关系，利用两个恒浓区的概念，并且假定：

1. 在两个恒浓区之间区域各组分的相对挥发度为常数；

2. 在进料级到精馏段恒浓区和进料级到提馏段恒浓区的两区域均为恒摩尔流。

$$\sum \frac{\alpha_i x_{i,F}}{\alpha_i - \theta} = 1 - q \quad \sum \frac{\alpha_i (x_{i,D})_m}{\alpha_i - \theta} = R_m + 1$$

Underwood 公式几点说明

1. 组分  $i$  理论上可任意选取，但一般建议选取 HK 或挥发度最小的组分为参考组分。也可按平均温度计算相对挥发度。

2.  $\theta$  为方程的根，一般取  $\alpha_{HK} \cong \theta \cong \alpha_{LK}$ 。若 LK 和 HK 不是相对挥发度相邻的组分时，可得两个或两个以上的  $R_m$ ，此时，取其平均值。

3.  $(x_{i,D})_m$  的确切值难以求得，以全回流时的塔顶组分计算。

### 例题：3-5

#### 1.4.4 平衡级数 $N$ 的确定

##### 1. Gilliland 图

##### 2. 公式计算

$$Y = 1 - \exp \left[ \frac{(1 + 54.4X)(X - 1)}{(11 + 117.2X)\sqrt{X}} \right], \quad X = \frac{R - R_m}{R + 1}, \quad Y = \frac{N - N_m}{N + 1}$$

Eduljec 的回归方程式： $Y = 0.75 - 0.75X^{0.5668}$

#### 1.4.5 进料级位置的确定

1. Fenske 公式：理论基础，将 Fenske 方程分别用于精馏和提馏段，则所得理论板数之比，即为实际塔板精馏段与提馏段之比。

$$\text{精馏段: } (N_R)_m = \frac{\lg \left[ \left( \frac{x_{LK}}{x_{HK}} \right)_D \left( \frac{x_{HK}}{x_{LK}} \right)_F \right]}{\lg \alpha_{LK-HK}}$$

$$\text{提馏段: } (N_S)_m = \frac{\lg \left[ \left( \frac{x_{LK}}{x_{HK}} \right)_F \left( \frac{x_{HK}}{x_{LK}} \right)_W \right]}{\lg \alpha_{LK-HK}}$$

$$\frac{(N_R)_m}{(N_S)_m} = \frac{\lg \left[ \left( \frac{x_{LK}}{x_{HK}} \right)_D \left( \frac{x_{HK}}{x_{LK}} \right)_F \right]}{\lg \left[ \left( \frac{x_{LK}}{x_{HK}} \right)_F \left( \frac{x_{HK}}{x_{LK}} \right)_W \right]}, \quad (N_R)_m + (N_S)_m = N_m$$



## 2.Kirkbride 经验式

$$\frac{N_R}{N_S} = \left[ \left( \frac{Z_{HK,F}}{Z_{LK,F}} \right) \left( \frac{x_{LK,W}}{x_{HK,D}} \right)^2 \left( \frac{W}{D} \right) \right]^{0.206} \quad \text{适用条件：泡点进料}$$

小结

多组分精馏的简捷计算方法，FUG 算法

- ① 用 Fenske 公式估算最少理论板数和组分分配；
- ② 用 Underwood 公式估算最小回流比；
- ③ 用 Gilliland 或 Erbar-Maddox 图或相应的关系式估算实际回流比下的理论板数。

### 7.9.5 教学方法

理论推导：FUG 算法涉及公式的推导。

查图：Gilliland 图的应用。

### 7.9.6 作业安排及课后反思

课后作业：p155，第 6 题；

### 7.9.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

教师：认真备课，提前做好 PPT，尤其是 FUG 公式的推导和实际意义；携带教案、平时成绩册、教材和其它教辅资料等。尤其是针对重点和难点，能结合工程实例讲解。

学生：课前预习，做好问题记录，准备教材，笔记本，带着问题进课堂。

### 7.9.8 参考资料（具体到哪一章节或页码）

教材 p87-98，另参阅邓敏、吴天章主编《分离工程》，第 3 章部分。

## 7.10 教学单元十（FUG 举例及特殊精馏）

### 7.10.1 教学日期

课次/学时：10/2。

### 7.10.2 教学目标

- 1、掌握 FUG 算法的应用；
- 2、了解特殊精馏的应用。

### 7.10.3 教学内容 (含重点、难点)

教学内容

- 1、多组分精馏举例；
- 2、特殊精馏定义及应用。

难点：多组分精馏计算。

### 7.10.4 教学过程

复习多组分精馏简捷算法：FUG 算法。

**简捷计算举例：**设计一个脱乙烷塔，从含有 6 个轻烃的混合物中回收乙烷，进料为泡点进料，进料组成、各组分的相对挥发度见下表，要求馏出液丙烯的含量  $\leq 2.5\%$ ，釜液中乙烷的含量  $\leq 5.0\%$ （均为摩尔分数）。试求此过程所需最少平衡级数及全回流下的馏出液和釜液的组成。若  $R=1.25R_{min}$ ，试计算平衡级数及进料位置。

**进料和各组分条件**

编号	进料组分	摩尔分数	$\alpha$
1	甲烷	0.05	7.536
2	乙烷	0.35	2.091
3	丙烯	0.15	1.000
4	丙烷	0.20	0.901
5	异丁烷	0.10	0.507
6	正丁烷	0.15	0.408
总计		1.00	

### 特殊精馏

当待分离组分之间形成共沸物或相对挥发度接近 1 时，用普通精馏是无法实现分离或是经济上不合理的。此时，向体系中加入一种适当的新组分，通过与原体系中各组分不同作用，改变组分之间的相对挥发度，使系统变得易于分离，这类既加入能量分离剂又加入质量分离剂的精馏称为特殊精馏或称增强精馏。

(1) 恒沸精馏 (Peotropic Distillation)：加入的质量分离剂与被分离系统中的一个或几个组分形成恒沸物，从塔顶蒸出。加入的质量分离剂称为恒沸剂。

(2) 萃取精馏 (Extractive Distillation): 加入的质量分离剂不与被分离系统中的任何组分形成共沸物, 而其沸点又较原有的任一组分高, 从塔釜离开。加入的质量分离剂称为溶剂。

(3) 加盐精馏: 加盐, 利用盐溶和盐析效应使两组分溶解行为发生变化。

(4) 反应精馏; (5) 吸附精馏; (6) 膜精馏:

## 第 2 节 恒沸精馏

**恒沸物:** 在一定压力下, 汽液相组成与沸腾温度始终不变的这一类溶液。分均相和非均相恒沸物。

恒沸物的特点

1.  $T_B = T_D$
2.  $\alpha = 1$
3.  $y \& x$
4. 恒沸组成随压力不同而异。

恒沸物的组成计算

(1) 二元均相恒沸物

$$\alpha_{12} = \frac{\gamma_1 f_1^0}{\gamma_2 f_2^0} = \frac{\gamma_1 p_1^0}{\gamma_2 p_2^0} = 1$$

恒沸点

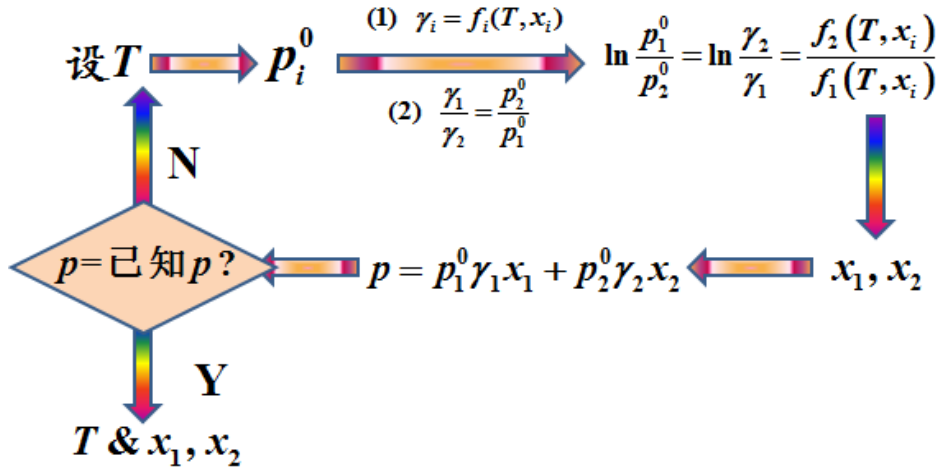
$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{p_2^0}{p_1^0}, \quad p = p_1 + p_2 = p_1^0 \gamma_1 x_1 + p_2^0 \gamma_2 x_2$$

若已知:  $p_i^0 = f(T), \gamma_i = f(T, x_i)$ , 则计算可恒沸组成

(1) 已知  $T \& p \rightarrow x_i$  下的恒沸组成。

$$T \xrightarrow{\quad} p_i^0 \xrightarrow{\begin{matrix} (1) \gamma_i = f_i(T, x_i) \\ (2) \frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{p_2^0}{p_1^0} \end{matrix}} \ln \frac{p_1^0}{p_2^0} = \ln \frac{\gamma_2}{\gamma_1} = \frac{f_2(T, x_i)}{f_1(T, x_i)} \downarrow x_1, x_2$$

(2) 已知  $p(T) \rightarrow$  求  $T(p) \& x_i$



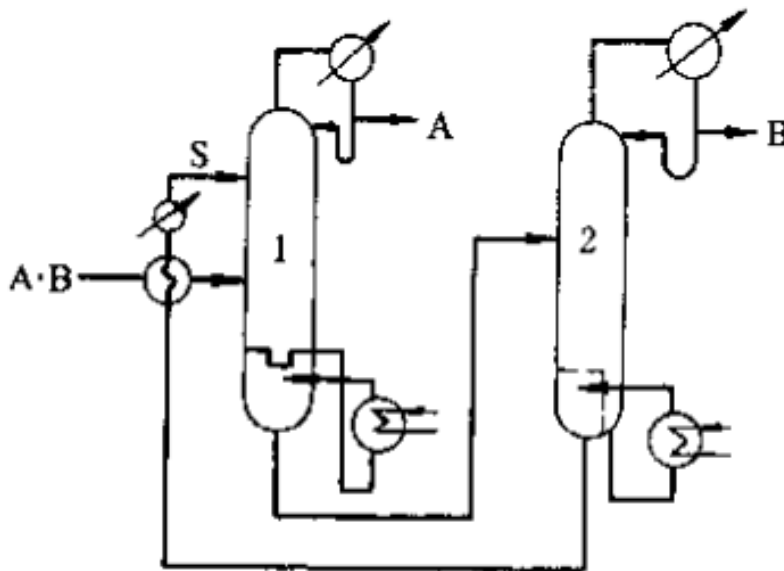
例 1: 试求总压力  $p=86.70\text{kPa}$  时, 氯仿(1)-乙醇(2)恒沸组成与恒沸温度。已知:

$$\begin{cases} \ln \gamma_1 = x_2^2 (0.59 + 1.66x_1) \\ \ln \gamma_2 = x_1^2 (1.42 - 1.66x_2) \end{cases}, \begin{cases} \lg p_1^0 = 6.02818 - \frac{1163.0}{227 + t} \\ \lg p_2^0 = 7.33827 - \frac{1652.05}{231.48 + t} \end{cases}$$

### 3. 恒沸剂的选择与回收

#### 第 3 节 萃取精馏

基本原理: 加入萃取剂后, 改变了原溶液中关键组分间的相对挥发度, 即改变了原溶液组分分子间的相互作用力, 构成一个新的非理想溶液。



#### 7.10.5 教学方法

1、举例: 特殊精馏有共沸精馏、萃取精馏等; 多组分精馏简捷计算举例。

### 7.10.6 作业安排及课后反思

课后作业：p157，第12题；

课后思考：特殊精馏计算与多组分精馏的异同。

### 7.10.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

教师：认真备课，提前做好PPT，找好合适的例题，既要有代表性，又利于学生理解和掌握；携带教案、平时成绩册、教材和其它教辅资料等。尤其是针对重点和难点，能结合工程实例讲解。

学生：课前预习，做好问题记录，准备教材，笔记本，带着问题进课堂。

### 7.10.8 参考资料（具体到哪一章节或页码）

教材 p98-126，另参阅邓敏、吴天章主编《分离工程》，第3章部分。

## 7.11 教学单元十一（气体吸收和解吸）

### 7.11.1 教学日期

课次/学时：11/2。

### 7.11.2 教学目标

- 1、掌握多组分吸收和解吸过程的基本原理、流程及其简捷算法，以及塔内的流率、浓度和温度分布特点；
- 2、熟悉多组分吸收和解吸过程分析、简捷计算方法。

### 7.11.3 教学内容（含重点、难点）

教学内容：

1. 深化气液平衡知识；
2. 分析吸收过程的特点
3. 论述多组分吸收和解吸过程的简捷算法：  
——平均吸收因子法和平均解吸因子法
4. 化学吸收的基本原理。

重点难点

- 1、多组分吸收和解吸过程的简捷算法。

#### 7.11.4 教学过程

首先在化工原理课程吸收内容的基础上，对比介绍多组分吸收的特点；接着讲解吸收过程的相平衡，得出具有实际应用价值的亨利定律：低浓度气体吸收。

化学吸收：化学反应对吸收的促进、原理，从相平衡的角度理解化学反应对吸收的促进作用，并定量表达。

介绍吸收和解吸流程：吸收和解吸一般一同使用。解吸原理。

#### 7.11.5 教学方法

- 1、对比：多组分吸收与双组分吸收相比较；
- 2、举例：化学反应对吸收的促进。

#### 7.11.6 作业安排及课后反思

课后作业：p193，第1题；

课后思考：吸收与解析进行的条件是什么？

#### 7.11.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

教师：认真备课，提前做好PPT；携带教案、平时成绩册、教材和其它教辅资料等。尤其是针对重点和难点，能结合工程实例讲解。

学生：课前预习，做好问题记录，准备教材，笔记本，带着问题进课堂。

#### 7.11.8 参考资料（具体到哪一章节或页码）

教材 p164-180，另参阅邓敏、吴天章主编《分离工程》，第4章吸收部分。

### 7.12 教学单元十二（吸收和解吸：设计变量）

#### 7.12.1 教学日期

课次/学时：12/2。

#### 7.12.2 教学目标

- 1、掌握多组分吸收和解吸过程设计变量计算。

#### 7.12.3 教学内容（含重点、难点）

教学内容

1. 多组分吸收过程分析；

2. 多组分吸收和解吸设计变量。

难点

1. 吸收和解吸设计变量的确定。

#### 7.12.4 教学过程

1. 设计变量的确定：吸收塔和解吸塔；
2. 设计分类：设计型和操作型；
3. 吸收和精馏传质比较及温度、浓度分布。

#### 7.12.5 教学方法

本单元内容属于基本概念性内容，内容多、范围广与中学物理知识联系紧密，主要通过教师课前组织大量的典型素材、举例和制作的 PPT 课件，通过现代多媒体教学技术进行演示，教师课堂教学，通过讲授法、提问法和案例分析，让学生对本专业和课程有一定的了解。本单元的教学方法以教师讲解+课堂提问的方法完成。

#### 7.12.6 作业安排及课后反思

课后作业：p193，第 3 题；

课后思考：吸收与精馏有何异同？

#### 7.12.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

教师：认真备课，提前做好 PPT；携带教案、平时成绩册、教材和其它教辅资料等。尤其是针对重点和难点，能结合工程实例讲解。

学生：课前预习，做好问题记录，准备教材，笔记本，带着问题进课堂。

#### 7.12.8 参考资料（具体到哪一章节或页码）

教材 p176-180，另参阅邓敏、吴天章主编《分离工程》，第 4 章吸收部分。

### 7.13 教学单元十三（多组分吸收简捷算法）

#### 7.13.1 教学日期

课次/学时：13/2。

#### 7.13.2 教学目标

- 1、掌握多组分吸收简捷算法。

### 7.13.3 教学内容 (含重点、难点)

教学内容

4.3.1 吸收过程工艺计算的基本概念

4.3.2 吸收因子法

4.3.3 解吸因子法

难点：吸收因子法和解吸因子法。

### 7.13.4 教学过程

吸收过程分析：理论上解释吸收进行的条件和限度；

吸收因子法基本方程：Horton-Franklin 方程的推导；

Horton-Franklin 方程的讨论及化简的 Horton-Franklin 方程。

平均吸收因子法：即吸收因子法的吸收因子采用平均值——克雷姆塞尔方程。

克雷姆塞尔方程的讨论。

### 7.13.5 教学方法

本节内容涉及的理论较多，因此理论推导是主要采用的教学方法。其中 Horton-Franklin 方程和克雷姆塞尔方程采用比较的方法，利于学生掌握和理解。

理论结合实例：在方程推导的基础上，举例说明方程的应用，强化理解。

### 7.13.6 作业安排及课后反思

课后思考：多组分吸收简捷算法与精馏简捷算法的异同！

### 7.13.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

教师：认真备课，提前做好 PPT，尤其是吸收过程简捷算法的推导和讨论；携带教案、平时成绩册、教材和其它教辅资料等。尤其是针对重点和难点，能结合工程实例讲解。

学生：课前预习，做好问题记录，准备教材，笔记本，带着问题进课堂。

### 7.13.8 参考资料 (具体到哪一章节或页码)

教材 p180-190，另参阅邓敏、吴天章主编《分离工程》，第 4 章吸收部分。



## 7.14 教学单元十四（第五章 多组分分离的严格计算）

### 7.14.1 教学日期

课次/学时：14/2。

### 7.14.2 教学目标

- 1、掌握多组分分离严格计算的方法；
- 2、了解多组分分离严格计算的意义。

### 7.14.3 教学内容（含重点、难点）

教学内容

第1节 平衡级的理论模型；

第2节 三对角矩阵法。

重点：多组分平衡理论模型；

难点：三对角矩阵算法。

### 7.14.4 教学过程

首先介绍严格计算的必要性：恒摩尔流假设、物性为常数等与实际不符；这同时也是简捷计算的不足；

严格计算的核心：物、热联立计算，即考虑热量对物性的影响；

复杂精馏塔物理模型：多股进料、有侧线采出或冷凝器等，并对实际过程进行简化，得出物理模型。

### 7.14.5 教学方法

1、举例：举例说明简捷计算的结果与实际不一致，说明严格计算的必要性；

物理模型讲解：从实际复杂精馏推导得出物理模型。

2、理论讲解与推导：一般平衡级采用理论推导。

### 7.14.6 作业安排及课后反思

课后思考：严格计算如何实现？与简捷计算的关系。

### 7.14.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

教师：认真备课，提前做好PPT；携带教案、平时成绩册、教材和其它教辅

资料等。尤其是针对重点和难点，能结合工程实例讲解。

学生：课前预习，做好问题记录，准备教材，笔记本，带着问题进课堂。

#### **7.14.8 参考资料（具体到哪一章节或页码）**

教材 p199-204，另参阅邓敏、吴天章主编《分离工程》，第 5 章部分。

### **7.15 教学单元十五（多级平衡分离数学模型：MESH 方程）**

#### **7.15.1 教学日期**

课次/学时：15/2。

#### **7.15.2 教学目标**

- 1、掌握多级平衡分离的数学模型；
- 2、掌握 MESH 方程的一般应用。

#### **7.15.3 教学内容（含重点、难点）**

教学内容

- 1、复杂精馏塔物理模型；
- 2、平衡级理论模型；
- 3、计算方法和原理。

难点：平衡级理论模型。

#### **7.15.4 教学过程**

- 1.从 MESH 的含义入手，通过实际过程分析建立四类方程关联；
- 2.采用设计变量确定的方法，将 MESH 方程用于复杂精馏过程分析，得出复杂精馏的方程数和设计变量数；
- 3.计算类型：设计型和操作型。

#### **7.15.5 教学方法**

- 1、理论分析与推导：采用设计变量确定的方法分析复杂精馏过程；
- 2、举例：设计型和操作型计算类型，举例说明，加深理解；
- 3、对比：设计型和操作性计算的对比。

#### **7.15.6 作业安排及课后反思**

课后思考：MESH 方程不同用途时的含义，即为通用性方程。

### 7.15.7 课前准备情况及其他相关特殊要求

教师：认真备课，提前做好 PPT；携带教案、平时成绩册、教材和其它教辅资料等。尤其是针对重点和难点，能结合工程实例讲解。

学生：课前预习，做好问题记录，准备教材，笔记本，带着问题进课堂。

### 7.15.8 参考资料（具体到哪一章节或页码）

教材 p204-214，另参阅邓敏、吴天章主编《分离工程》，第 5 章部分。

## 7.16 教学单元十六（总复习）

### 7.16.1 教学日期

课次/学时：16/2。

### 7.16.2 教学目标

- 1、掌握课程重点、难点。
- 2、系统掌握课程内容。

### 7.16.3 教学内容（含重点、难点）

内容

第二章 多组分分离基础；

第三章 精馏；

第四章 气体吸收和解吸。

重点难点

第一章 设计变量的确定和相平衡常数的计算方法，简单实际体系相平衡常数计算；

第二章 多组分精馏简捷计算和多组分精馏浓度分布的特点；

第三章 多组分吸收过程简捷计算。

### 7.16.4 教学过程

第二章 多组分分离基础

1.设计变量的确定；

2.相平衡常数的计算；

第三章 精馏

1.多组分精馏过程分析及特点；

2.多组分精馏简捷计算；

#### 第四章 气体吸收和解吸

1.吸收过程分析：进行的条件和限度；

2.吸收过程相平衡；

3.吸收过程简捷计算。

#### **7.16.5 教学方法**

本单元主要复习课程主要内容，主要采用依据线索，将知识融会贯通，以便学生理解和掌握。

#### **7.16.6 作业安排及课后反思**

课后思考：找到知识线索，将其融会贯通。

#### **7.16.7 课前准备情况及其他相关特殊要求**

教师：认真备课，提前做好 PPT；携带教案、平时成绩册、教材和其它教辅资料等。尤其是针对重点和难点，注重方法的讲解。

学生：课前预习，做好问题记录，准备教材，笔记本，带着问题进课堂。

#### **7.16.8 参考资料（具体到哪一章节或页码）**

《分离工程》教材，另参阅邓敏、吴天章主编《分离工程》，相应章节部分。

## 8. 课程要求

### 8.1 学生自学要求

课前预习：对课程内容有个初步了解，针对重点和难点，结合生产和生活实际提出问题，带着问题进课堂。

课中：认真听讲，加深理解，尤其是针对重点难点和不容易理解掌握的知识点，提问、讨论。

课后：认真阅读教材或参考教材，将知识点串联起来，找出内在联系，并通过习题巩固。

### 8.2 课外阅读要求

阅读教材之外至少一本参考书，尤其是对知识点的不同论述和推导，进一步加深、扩展知识面。

### 8.3 课堂讨论要求

针对重点和难点知识设置讨论或典型例题。讨论一般以分组的方式进行，要求每组要有自己的结论，小组成员必须发言。

### 8.4 课程实践要求

本课程实验与理论课同步开展，要求学生掌握实验的理论基础，掌握实验要点，并能对实验提出改进。实验包括验证性实验、综合性实验和设计性实验，验证性实验以验证典型结论为主，要求能对所得结果进行分析，尤其是误差分析；综合性实验需综合考虑实验间的相互影响和实验顺序等多种因素，学会用工程的观点看待实验；设计性实验考察学生的知识应用能力和动手能力，并综合考虑实验条件和操作等具体因素。

## 9. 课程考核

### 9.1 出勤（迟到、早退等）、作业等的要求

出勤：本课程的学习中，选课同学应该主动遵守四川理工院学生管理条例中关于出勤的相关政策规定。本课程将采用倒扣分的形式，即对无故缺席的同学，每缺席 1 次平时成绩扣 5 分，直至扣完。此外，请假的同学务必在上课前出示假条，后补无效。

迟到与早退：上课铃后进入教室的同学算迟到，下课前擅自离开室的同学算早退。迟到和早退一次扣 2 分。

作业：每缺交一次作业平时成绩扣 5 分。

### 9.2 成绩的构成与评分规则说明

课程为考查性质，课程成绩包括平时成绩和期末结课作业成绩。平时成绩 50%，期末结课作业成绩 50%。平时成绩主要由出勤、课堂发言表现和课后作业组成。出勤不加分，仅扣分，具体扣分细节详见出勤作业考核方式；主动课堂发言者给与平时成绩适当加分，平时成绩累计加分不高于 10 分。作业分数与百分制分数换算如下：A+:95，A:90，B+:85，B:80，以此类推。

## 10. 学术诚信

### 10.1 考试违规与作弊处理

考试违规与作弊按《四川理工学院学生考试违纪和作弊处理办法》处理。

### 10.2 杜撰数据、信息处理等

杜撰数据和信息处理，对于涉及的实验数据和处理，一经查实，该实验计零分。

### 10.3 学术剽窃处理等

实验报告和作业等，若有学术剽窃行为被查实，本次作业或报告计零分，并勒令重做。

# 11. 课堂规范

## 11.1 课堂纪律

教学过程中应遵守必要的课堂纪律，请同学尽量做到以下几点：

(1) 按时上课下课，不得迟到早退。上课期间禁止使用手机，迟到的同学应从后门进入教室并不得影响其他同学。

(2) 上课时学生衣着要整齐得体，专心听讲，认真做笔记，禁止随意交谈或阅读与上课无关的报纸或书籍。

(3) 上课期间不玩手机，请关闭手机，或将手机调至振动模式；

(4) 上课期间请不要说话或大声喧哗，干扰其他同学听课与思考；

(5) 迟到的同学请安静地找座位坐下，并认真听讲；

(6) 若在课堂期间有私事需要处理，请安静离开，到教室外解决后安静地回到座位上。

## 11.2 课堂礼仪

(1) 请注意服装礼仪，无故穿拖鞋、背心的同学请不要进入教室；

(2) 课堂讲授过程中若需表达自己的观点前，请举手示意，得到允许后用普通话发言，同学发言时认真听，不得嘲笑发言的同学；

(3) 课堂提问过程中请不要随意提醒或帮答，若想阐述自己的观点，需在答题同学言毕后，举手示意，得到允许后发言；

(4) 课堂讨论过程中请注意聆听别人的观点，发表自己观点时不许涉及人身攻击。

(5) 不私下讲话，不做小动作，不能在课堂上吃东西、嚼口香糖、喝水或扇扇子。



## 12. 课程资源

### 12.1 教材与参考书

教材：叶庆国，陶旭梅，徐东彦. 分离工程（第2版）[M]. 北京：化学工业出版社, 2017.

参考书：

- [1] 刘家祺. 分离过程[M]. 北京：化学工业出版社, 2011..
- [2] 邓修，吴俊生. 分离工程[M]. 北京：科学出版社, 2000.
- [3] 宋华，陈颖. 分离工程[M]. 哈尔滨工业大学出版社, 2003
- [4] 叶庆国. 分离工程[M].北京：化学工业出版社, 2009.

### 12.2 专业学术著作

除指定的参考书外，本专业学术著作众多，同学们可在网上广泛阅读。

- (1) <http://emuch.net/bbs> 小木虫论坛
- (2) <http://bbs.hcbbs.com> 海川化工论坛
- (3) 四川理工学院图书馆的超星数字图书

### 12.3 专业刊物

化工学报，化学工程，高校化学工程学报，化工进展和现代化工等。

### 12.4 网络课程资源

分离工程精品课程（青岛科技大学：<http://flgc.qust.edu.cn>，国家精品课程网：）。

## 13. 教学合约

### 13.1 教师作出师德师风承诺

作为一名光荣的人民教师,担负着教书育人的重任,为了认真履行教师职责,严格遵守《高等学校教师职业道德规范》,形成自己良好的师德师风,争做一名师德高尚的教育工作者,为了提高自身的思想道德素质,做学生健康成长的引路人,以高尚的情操感染人,以渊博的知识教育人,以科学的方法引导人,以良好的形象影响人。我以捍卫教师尊严为己任,向学校、家长和社会郑重承诺:

一、爱国守法。热爱祖国,热爱人民,拥护中国共产党领导,拥护中国特色社会主义制度。遵守宪法和法律法规,贯彻党和国家教育方针,依法履行教师职责,维护社会稳定和校园和谐。不得有损害国家利益和不利于学生健康成长的言行。

二、敬业爱生。忠诚人民教育事业,树立崇高职业理想,以人才培养、科学研究、社会服务和文化传承创新为己任。恪尽职守,甘于奉献。终身学习,刻苦钻研。真心关爱学生,严格要求学生,公正对待学生,做学生良师益友。不得损害学生和学校的合法权益。

三、教书育人。坚持育人为本,立德树人。遵循教育规律,实施素质教育。注重学思结合,知行合一,因材施教,不断提高教育质量。严慈相济,教学相长,诲人不倦。尊重学生个性,促进学生全面发展。不拒绝学生的合理要求。不得从事影响教育教学工作的兼职。

四、严谨治学。弘扬科学精神,勇于探索,追求真理,修正错误,精益求精。实事求是,发扬民主,团结合作,协同创新。秉持学术良知,恪守学术规范。尊重他人劳动和学术成果,维护学术自由和学术尊严。诚实守信,力戒浮躁。坚决抵制学术失范和学术不端行为。

五、服务社会。勇担社会责任,为国家富强、民族振兴和人类进步服务。传播优秀文化,普及科学知识。热心公益,服务大众。主动参与社会实践,自觉承担社会义务,积极提供专业服务。坚决反对滥用学术资源和学术影响。

六、为人师表。学为人师，行为示范。淡泊名利，志存高远。树立优良学风教风，以高尚师德、人格魅力和学识风范教育感染学生。模范遵守社会公德，维护社会正义，引领社会风尚。言行雅正，举止文明。自尊自律，清廉从教，以身作则。自觉抵制有损教师职业声誉的行为。

以上各条，特向全校师生和社会作出公开承诺，如有违反，本人愿接受学校的批评、警告以及主管部门处分等处罚措施，欢迎学生、家长、学校和社会等各方面积极配合，共同监督。

### **13.2 阅读课程实施大纲，理解其内容**

本课程实施大纲是对课程的教学内容、教学实施方案、师资情况、教学方法及其他与本课程相关的内容说明。请各位同学务必在课前认真阅读本大纲，并做好课前准备。

### **13.3 同意遵守课程实施大纲中阐述的标准和期望**

本课程实施大纲由任课老师指定，教师对大纲中阐述的标准和期望能很好地理解和执行。同时，希望上课同学也能将本大纲的要求贯穿本课程。

## 14. 其他说明

如果同学们对本课程实施有意见和建议，欢迎大家提出，我会在今后的教学过程中不断的完善课程实施大纲，以便更进一步的提高教育质量。

进度安排可能会根据实际授课情况有所调整。