
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：工 艺 20223-5 班

任课教师：赵晨

工作部门：化学工程学院

联系方式：15895875001

四川轻化工大学 制

2022 年 01 月

分离工程课程实施大纲

基本信息

课程代码：

课程名称：分离工程

学 分：2

总 学 时：32

学 期：2024-2025-2

上课时间：周 2第 9/10 节；周4第 1/2 节

上课地点：N1-224

答疑时间和方式：课前、课间或考前集中答疑；课前、课间答疑，
电话答疑，邮件答疑、办公室答疑

答疑地点：授课教室或第一实验楼 232

授课班级：工 艺 20223-5 班

任课教师：赵晨

学 院：化学工程学院

邮 箱：chenzhao@suse.edu.cn

联系电话：15895875001

目 录

1. 教学理念	1
2. 课程描述	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 课程的前沿及发展趋势	4
2.4 学习本课程的必要性	5
3. 教师简介	8
3.1 教师的职称、学历	8
3.2 教育背景	8
3.3 研究方向（兴趣）	8
4. 先修课程	8
5. 课程目标	8
6. 课程内容	9
6.1 教学要求、重点和难点	9
6.2 学时安排	10
7. 课程教学实施	13
7.1 教学单元一	13
7.2 教学单元二	错误!未定义书签。
7.3 教学单元三	错误!未定义书签。
7.4 教学单元四	错误!未定义书签。
7.5 教学单元五	错误!未定义书签。
7.6 教学单元六	错误!未定义书签。
7.7 教学单元七	错误!未定义书签。
7.8 教学单元八	错误!未定义书签。
7.9 教学单元九	错误!未定义书签。
7.10 教学单元十	错误!未定义书签。
7.11 教学单元十一	错误!未定义书签。
7.12 教学单元十二	错误!未定义书签。

7.13 教学单元十三	错误!未定义书签。
7.14 教学单元十四	错误!未定义书签。
7.15 教学单元十五	错误!未定义书签。
7.16 教学单元十六	错误!未定义书签。
7.17 教学单元十七	错误!未定义书签。
7.18 教学单元十八	错误!未定义书签。
7.19 教学单元十九	错误!未定义书签。
7.20 教学单元二十	错误!未定义书签。
8. 课程学习要求	79
9. 课程考核	80
9.1 出勤（迟到、早退等）、作业、报告等的要求	80
9.2 成绩的构成与评分规则说明	80
9.3 考试形式及说明	80
10. 学术诚信	81
10.1 考试违规与作弊处理	81
11. 课堂规范	81
12. 课程资源	82
12.1 教材与参考书	82
12.2 专业刊物	82
12.3 网络课程资源	82
13. 教学合约	82
14. 其他说明	84

1. 教学理念

高等院校教师必须形成以学生为本的现代教育理念，做到尊重、理解、重视和爱护学生，把“以学生为本、以培养目标为导向、持续改进”的新工科教学理念融入教学的全过程，重视课程设置、教学过程、教学评价等教学环节，做到持续改进整个教学过程。把现代教育理念和高校教学观真正地融为一体，在教育实践中逐渐形成系统化、可操作性强的教学观，完成由纯粹的理念体系向具体实践的转型。

《分离工程》是化学工程与工艺专业本科生的一门专业基础课，是物理化学、化工热力学及化工原理等理论课的后续课程。该课程涉及物理化学、化工热力学、传递过程及原理等知识领域，主要讨论化学工业和化学工程领域常见的分离过程，主要任务是使学生掌握分离过程的共性问题，学习传质分离过程的基本原理、基础知识及设计计算方法，并学习新型分离技术。在教学过程中，强调理论联系实际，加强设计和分析能力的训练，以提高解决实际问题的能力。通过本课程的学习，为后续的石油炼制工程、有机化工工艺学、化工设计等专业课程的学习打下理论基础。按照四川理工学院的教学计划，课时设置为 32 学时。要让学生系统掌握该课程的内容，并运用于实践中，必须在教学手段和方法上进行改革，把分离工程的基本要点和有关基础知识与工业生产中实际的分离过程紧密结合起来，并运用工程思维、工程分析的方法来学习分离工程的重要概念，使学生形成完整的分离工程观点。教学过程中主要采用讲授法、归纳总结法、知识脉络法、提问法、对比法、归纳法、演示法、练习法以及案例分析法等多种教学方法，同时结合教师自身的科研研究工作，以基于研究的学习亦作为教学方法的重要方面，使学生充分掌握分离工程分析的内容和方法手段，提升分析和解决实际工程问题的能力。

从如何有效地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。

本课程教学将坚守以下原则：

2 （1）坚持以现代教育理念为先导，以科学的教学观念武装自己的头脑，实现“学生中心、教师主体”的大学教育观，不断的持续改进。同时要注意以发展的眼光来看待大学教学，看待学生，包容和理解学生，切不可自身的教学经历直接映射到当代的大

学生身上。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。

（2）做课程改革的实验者，而不是旁观者。课程改革要求在教学过程中持续改进，根据教学过程中学生存在的问题进行不断的调整。同时自身也要保持一颗不断学习的心态给学生传递知识。要在教学过程中改进自身的教学方式方法以及与学生沟通的方式方法。

（3）积极引导主动学习。知识只有自己主动获取才来得深刻，才能够融会贯通。因此在教学过程中我会引导学生主动学习，通过提前预习、课后习题以及课后答疑的方式使得学生主动参与学习过程中，同时我会结合我自身的科研经历，给学生讲解一些有趣的分离工程应用案例，启发大家对知识点的应用；另外我也会给学生介绍一些关于分离技术的最新研究成果，开拓学生的眼界和知识面，激发学生的求知欲。

2. 课程描述

2.1 课程的性质

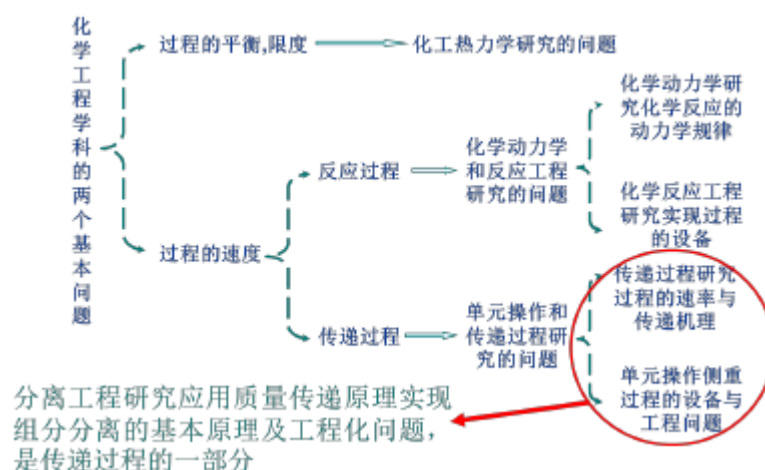
分离工程是化学工程与工艺及相近化工类专业教学中一门专业课程，是建立在物理化学、化工原理、化工热力学、传递课程原理等技术基础课程知识之上的一门必修课程。分离工程是研究分离过程中分离设备的共性规律，研究化工及其它相关过程中物质的分离和纯化方法的一门技术科学；是以分离过程（主要是传质分离过程）作为研究对象，应用物理化学、化工热力学、传递原理和化工原理中研究的基本原理和知识，研究和处理分离过程的开发和设计中遇到的工程问题。包括：适宜分离方法的选择，分离流程和操作条件的确定和优化，传质分离设备的传质特性、选型和强化，传质操作和设备的设计计算，分离操作的实验研究方法等。主要掌握常用分离过程(精馏，特殊精馏，吸收等)的基本理论、操作特点，简捷和严格的计算方法和强化改进操作的途径；了解一些新的分离技术有一定的了解。

通过分离工程学科的学习，可以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；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；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；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；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。

2.2 课程在学科专业结构中的地位、作用

《分离工程》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，在整个化工专业学生的知识体系中占据重要地位，是一门不可或缺的核心课程。从下图的知识体系图中也可知，分离工程研究应用质量传递原理实现组分分离的基本原理及工程化问

题，是传递过程的一部分。



2.3 课程的历史与文化传统

分离技术是随着化学工业的发展而逐渐形成和发展的，生产实践是分离工程形成与发展的源泉。早期的化学工厂是由化学家根据实验室研究结果直接建立的。生产实践发现，生产用的大装置中的化学或物理过程与实验室玻璃器皿中的现象有很大的不同。在不同产品的生产过程中，却有许多过程遵循相似的原理。由此提出的单元操作原理奠定了化学工程学科最初的理论基础。随着大量的工业实践，人们逐渐认识到，各种化工生产工艺，除了其中的核心即反应过程外，大都是由为数不多的一些基本操作组成的。这些基本操作的知识对于化工过程的正确开发和化工流程、装置的正常运行及经济性有重要的作用。在二十世纪初提出的单元操作的概念指出：任何化工生产过程不论规模如何，皆可分解为一系列名为单元操作的过程，例如粉碎、混合、加热、吸收、冷凝、浸取、沉降、结晶、过滤等。单元操作的概念包含了流体动力过程、传热过程、传质分离过程、热力过程、粉体工程等许多化工生产过程中常见的操作和过程，传质分离过程是其重要组成部分。

单元操作概念的建立对化学工程的发展起了重大的作用。它对用于不同的化学工艺中的同样的操作，以单元操作的概念抽象出来，对其共同规律进行研究。通过对其基础研究、单元操作所用设备的结构、操作特性、设计计算方法及应用开发等多方面的研究，为分离过程在化工工艺开发、化工过程放大、化工装置设计和在化工生产中的正确应用提供了较为完整的理论体系和经济高效的分离设备，对促进化学工业的发展起到了重要的作用。同时，以此为基础发展起来了以因次分析和相似论为基础的实验研究方法和以

数学模型方法为基本的理论结合实际的研究方法，也对化学工程本身的发展作出了很大的贡献。

自二十世纪五十年代以来，通过对化学工程的深入研究，提出了三传一反（动量传递、热量传递、质量传递、化学反应工程）的概念。使分离工程建立在更基本的质量传递的基础上，从界面的分子现象和基本流体力学现象进行分离工程中各单元操作的基础研究，并用定量的数学模型描述分离过程，用于分析已有的分离设备，并用于设计新的过程和设备。

由于计算机技术的飞速发展，使得从较基础的理论角度出发对分离过程和设备进行研究成为可能，减少了误差和失真。对一些复杂的数学模型的开发并用于分离过程的优化，使化工过程更趋成熟和完善。

2.4 课程的前沿及发展趋势

二十世纪下半叶掀起的新技术革命浪潮在人类文明和社会发展上将具有重大的意义。在现代生物技术、环境科学、资源与能源科学、信息技术与材料科学等高新科技的发展对分离工程提出了新的、更高的要求，有许多是传统分离技术所无能为力的，分离工程发展与高新科技的结合是现实的迫切需求，也是分离工程面临的新的机遇和挑战。

比如现代生物技术产品的商品化在很大程度上取决于能否将具有生物活性的产品从组成复杂的、具有许多性质相似的杂质的稀溶液中经济有效地加以分离纯化。此外，信息工业、生物技术和医药工业、材料工业的飞速发展向分离工程提出了前所未有的纯度要求和分离精度要求；由于石油和天然气资源的逐渐枯竭，能源结构在未来几十年内将面临重大的变化。新能源的发展要求分离工程提供新的、经济有效的大规模分离方法；资源的开发向贫矿的利用转化以及海洋资源的开发利用需要更经济有效的分离技术；环境保护对分离技术提出了持续的、不断提高的需求；为了节约能源、降低设备投资和分离操作成本，对传统分离过程的改造或以新分离方法取代。

分离技术的发展呈现出以下若干特点：(1)竞争促进了分离过程的强化，新技术的应用，剧烈的竞争加速了分离技术发展，促进了分离过程的强化；(2)耦合分离技术引起重视，耦合分离技术因具有简化流程、提高收率和降低消耗的优点引起人们的日益重视，耦合分离技术（化学吸收、化学萃取、反应精馏、膜反应器、药物的控制释放等）在化工、生物工程、制药和新材料等高新技术领域成功应用获得了良好的效益；(3)信息技术

推动了分离技术的发展；(4)根据国情，加速分离科学和技术的发展，发展趋势：①传统分离技术改造，如精馏筛板塔改造为效率更高的填料塔；②新型分离过程开发，如分子蒸馏、新型萃取分离、反胶团萃取、超临界萃取、新型生物膜法、膜分离等新型分离技术等。③分离与反应耦合以及分离过程之间的耦合。

2.5 课程与经济社会发展的关系

《分离工程》是一门有关工程问题的学科，是解决如何将常见的化工分离技术应用到工业生产过程中，是为选择一种经济可行的分离技术所服务的。因此经济性是在选择分离技术时所必须要考虑的问题。另外，随着社会经济的快速发展，人们对日益丰富的物质文化提出更加的要求。需要开发出更加环保、安全、绿色化的化工产品；而这些产品的生产开发离不开绿色健康的分离技术的开发，所以说分离技术的发展与经济社会发展密切相关。因此在《分离工程》的教学过程中不仅需要给学生传递基本的分离理论和常见的分离技术，同时还需要与时俱进、紧跟社会技术进步、将课程涉及新技术引入课程教学，尤其是针对一些新技术的应用、社会发展热点问题，在课堂上开展讨论，引导学生思考解决问题的方法，也能让学生切身体会所学知识并非空洞无物，而是能解决生活中实际问题的有用技能，激发学生的学习热情。

2.6 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。化工学科研究领域十分广泛，与日常生活有着紧密联系，因此课程教学中应注意伦理和道德教育。

《分离工程》作为本科主干基础学科，对未来培养国家后备工程人才起到关键性的作用，而在此课程学习基础上，化学工程类科学研究才可能成为现实。其中科学研究是运用严密的科学方法，从事有目的、有计划、有系统的认识客观世界，探索客观真理的活动过程，是对研究变量或指标的共同的本质的概括。而当代“伦理”概念蕴含着西方文化的理性、科学、公共意志等属性，“道德”概念蕴含着更多的东方文化的情性、人文、个人修养等色彩。我们所讲的科学研究中的伦理与道德，是科学研究者应当秉持的研究规则 and 行为规范，使伦理道德规范运用到涉及科技活动现实的具体问题的规范问题。科学研究的基本任务是探索、认识未知。理想的科学研究被描述为一个科学家求真、至善、至美的过程。在这个过程中，科学家揭示着自然界的客观规律，开发应用有利于人类利益的技术，去追求人类社会的持续、和谐的发展。但是，理想状态只能是一个无限接近

到无法到达的状态，科学和现实社会可能会产生各种各样的冲突和矛盾，科学研究中的伦理道德就成为一个为人们关注的焦点。我们讲科学研究中的伦理与道德，并不是指科技成果本身有什么伦理道德，而是指科学研究、技术探索过程中的伦理道德，更是指科学研究应用到政治、经济、文化、军事领域之中产生的伦理道德问题。而《分离工程》正是作为科学研究的基础知识学科，必须考虑“伦理”和相关的“道德”问题。

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，激发学生思考如何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。技术层面的伦理问题，主要引导学生从技术上思考原料、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对人体和环境有毒害物质；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。

2.7 学习本课程的必要性

《分离工程》是化学工程学科的重要组成部分，是化学工程与工艺专业的一门专业必修课。通过本课程的学习，可以正确理解分离工程的有关基本概念和理论；理解各概念之间的联系和应用；掌握分离工程的基本计算方法；能够理论联系实际，灵活分析和解决实际化工生产和设计中的有关问题。

其教学内容是以化工生产中的分离过程为研究对象，分离过程贯穿于整个化工生产过程中，有着不可替代的作用，同时分离技术有着多样性和复杂性。因此，本课程在学习分离过程基本理论、原理和方法的基础上，思考如何将精馏、蒸发、结晶、萃取等常见分离过程应用于化工过程中，学习如何针对不同混合物开发出合适的分离技术，了解现代分离技术发展的动态，关注针对目前严峻的能源问题、环境问题、资源问题分离技术所起的作用。因此学习好《分离工程》这门课程对化工专业学生有着极其重要的必要性和实用性，是其在今后的化工工作中能够独立发现问题、解决问题必然所在。

3. 教师简介

3.1 教师的职称、学历

任课教师：赵晨；职称：讲师；最终学历/学位：博士研究生/工学博士

3.2 教育背景

2019.09-2022.06 南京工业大学 化学工程专业工学博士。

2017.09-2019.06 南京工业大学 化学工程专业工学硕士；

2013.09-2017.06 江苏海洋大学 化学工程专业工学学士。

3.3 研究方向（兴趣）

（1）膜材料制备；（2）膜分离过程。

4. 先修课程

本课程的先修课程有：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

本课程教育目标如下：（1）培养学生将物理化学、化工原理、化工热力学等学科知识用于化学反应工程学科的综合能力；（2）通过本课程的学习，使学生了解化学反应工程学科前沿，理解该学科理论体系，掌握研究方法；（3）通过本课程的学习，使学生初步具有实现反应过程最优化的能力以及分析、改进、开发设计反应器的能力。

6. 课程内容

6.1 课程的教学大纲

第 1 章 绪论 （2 学时）

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 多组分分离基础 （12 学时）

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。

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，了解绝热闪蒸过程的计算。

第 3 章 精馏 （6 学时）

3.1 掌握的内容：多组分精馏的基本原理、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：恒沸精馏、萃取精馏和加盐精馏等特殊精馏过程原理及其简捷计算方法。

第 4 章 吸收 （6 学时）

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 多组分多级分离的严格计算（4 学时）

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。

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。了解精馏计算的同时校正法和非平衡级模型。

第 7 章 其他分离过程 （2 学时）

7.1 掌握的内容：各种新型分离技术的发展、研究及应用基本情况。

7.2 了解的内容：了解部分已经工业化的新型分离技术的基本原理、主要特点。新发展的技术及耦合技术的理论研究状况。

6.2 教学重难点

第一章 绪论 重点：分离过程基本概念、分类；平衡分离过程和速率分离过程。

难点：平衡分离过程基本原理

第二章 多组分分离基础 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。

难点：平衡常数的计算；泡露点计算问题、闪蒸过程分析

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。

难点：精馏过程分析及相关计算

第四章 吸收 重点：多组分吸收和解吸过程分析、简捷算法。

难点：过程分析和计算分析

第五章 多组分多级分离的严格计算 重点：托玛斯法解三对角矩阵方程；精馏问题的求解。

难点：严格计算

6.3 学时安排

第一章 绪论 主要知识点：分离过程的基本概念、分离、特性；分离过程在化工生产中的重要性；常用的化工分离操作过程；分离工程理论的发展；分离过程研究和技术的现状和未来。 学时安排（参考）：2 学时

第二章 多组分分离基础 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体系的气液平衡，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（活度系数法、状态方程法等）；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。 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

第五章 多组分多级分离的严格计算 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）：4 学时

第七章 其他分离方法 主要知识点：学习吸附、离子交换、萃取和膜分离等其他的分离技术，了解这些技术的基本原理、应用范围等等。 学时安排（参考）：2 学时

6.4 教学日历

课 程 名 称	分 离 工 程			时 间 分 配	上课周数	8 周
学 院	化工学院	专业	化学工程与工艺		学时数	32 学时
班 级	化学工程与工艺 20194-6 班				讲课时数	32 学时
学 院		专业			习题课及课堂讨论	学时
班 级					实验	学时
学 院		专业			实习	学时
班 级					每周上课时数	4 学时

上 课 次 数	教 学 、 作 业 类 别 及 内 容							
	讲 课 （ 教 学 大 纲 分 章 和 题 目 的 名 称 ）	讲 课 学 时	自 学 学 时	习 题 课、 课 堂 讨 论、 验 明 目	实 习 名 称 （ 写 明 题 目、 数 量 ）	课 堂 作 业 数	课 外 作 业 数	作 图、 课 程 设 计 的 名 称、 数 量 等
1	绪论	2	2					
2	第二章 多组分分离基础 2.2.1 相平衡关系	2	2				1	
3	2.2.1 气液平衡的分类与计算	2	2					

4	多组分物系的泡点与露点计算	2	2				1	
5	单级平衡分离过程计算	2	2					
6	设计变量分析	2	2				1	
7	装置设计变量+例题讲解	2	2					
8	第三章 精馏 多组分精馏过程分析	2	2				1	
9	多组分精馏的简捷（FUG）算法	2	2					
10	共沸精馏+吸收	2	2				1	
11	第四章 气体吸收与解析—吸收和解吸过程流程	2	2					
12	多组分吸收和解吸过程分析	2	2					
13	多组分吸收和解吸过程简捷计算	2	2				1	
14	第五章 多组分多级分离的严格计算 平衡级的理论模型+复杂精馏塔物理模型	2	2					
15	模拟计算方法+三对角矩阵法	2	2				2	
16	泡点法+例题讲解+课程答疑	2	2					
	各章节具体内容及要求见教学规范							

7. 课程教学实施

7.1 教学单元一

课程名称	分离工程	章节名称	第一章 绪论	课次/ 学时	1/2
教学目标					
1. 了解《分离工程》研究主要内容及目标； 2. 掌握化工分离过程的基本概念、分类和常见分离过程； 3. 了解分离工程理论的形成与发展；了解最新分离技术的发展动态					
主要内容					
主要知识点：分离过程的基本概念、分离工程的特性，分离过程的分类；分离过程在化工生产中的重要性；常用化工分离操作过程；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平衡分离过程，分离因子					
难点：平衡分离过程的理解与分析					
教学过程及方法					
<p>概念讲解</p> <p>分离过程：是指借助一定的分离剂，将混合物分成组成互不相同的两种或几种产品的操作。</p> <div data-bbox="472 1704 1139 1926"> <pre> graph LR A[混合物 (气、液、固)] --> B[分离设备] B --> C[产品1] B --> D[产品2] B --> E[产品n] F[能量分离剂 物质分离剂] --> B </pre> </div> <p>能量分离剂 ESA：指传入或传出系统的热及输入或输出系统的功。闪蒸、冷凝、</p>					

精馏等。物质分离剂 MSA: 指分离过程中所借助的物质, 如吸收过程的吸收剂、萃取过程的萃取剂及吸附过程的吸附剂。

分离因子:

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

可以判定这两个组分在两种产品中的分离程度, 与 1 相差越远, 就越能达到有效的分离

固有分离因子:

$$\alpha_{ij} = \frac{y_i / y_j}{x_i / x_j}$$

分离技术的特性

1. 分离技术的重要性(广泛性)

- 原料净化
- 中间产物分离
- 产品提纯
- 污染物处理

2. 分离技术的多样性

由于化工分离技术的应用领域十分广泛, 决定了分离技术的多样性。按机理划分, 大致可分成 5 类, 它们的特点和设计方法有所不同: ① 生成新相以进行分离(如蒸馏、结晶); ② 加入新相进行分离(如萃取、吸收); ③ 用隔离物进行分离(如膜分离); ④ 用固体试剂进行分离(如吸附、离子交换); ⑤ 用外力场和梯度进行分离(如离心萃取分离和电泳等)。

3. 分离技术的复杂性

缺乏基础物性数据 (尤其是对于复杂条件下的物性数据, 比如高温、高压、超临界、多组分等)

缺乏大型塔器的可靠设计方法

化工分离过程分类

一类：机械分离过程

对象：非均相混合物

特点：用机械法将非均相物系分离，而相间并无物质传递发生

比如：过滤、沉降、离心分离、旋风除尘...



二类：传质分离过程

对象：均相混合物

特点：涉及物质从原料向一股产品流的扩散，过程遵循物质传递原理

平衡分离过程（精馏、吸收、萃取、结晶、吸附等）

速率分离过程（微滤、超滤、反渗透、电渗析等）

1. 平衡分离过程

借助分离媒介（能量、物质、压力等），使均相混合物系统形成新的相界面的方法，常使用不互溶的两个相界面上的平衡关系进行分离。其分离基础是混合物中各组分在相平衡时两相中的不同等的分配。

按照两相的不同可以分为以下几类

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、色层分离等

气固传质过程：如固体干燥、吸附等

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

2. 速率分离过程

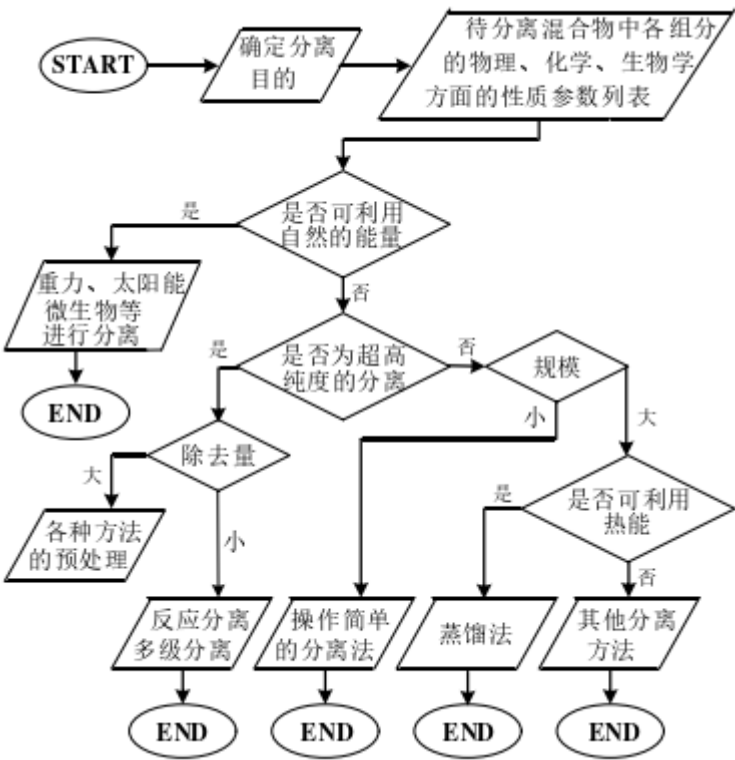
利用溶液中不同组分在某种推动力（如压差、浓度差、电位差）作用下经过某种介质（如

半透膜)时的传质速率(透过率、迁移率、扩散速率)差异而实现分离

特点: 所处理的物料和产品属于同一相态, 仅有组成的差别

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

分离方法的选择



分离过程开发的方法

传质分离过程开发是研究适宜分离方法的工业化途径, 以期经济合理地实现规定的分离任务。

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。

放大技术的常用方法:

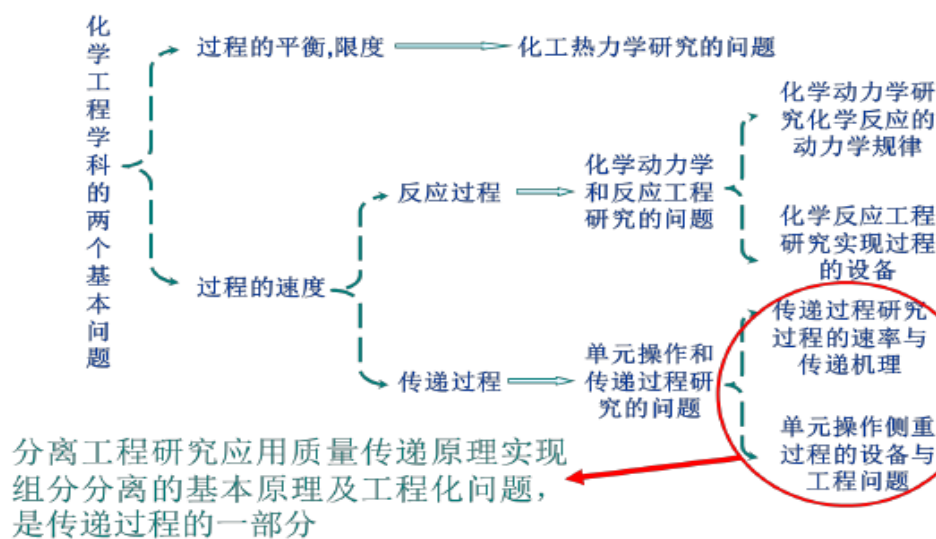
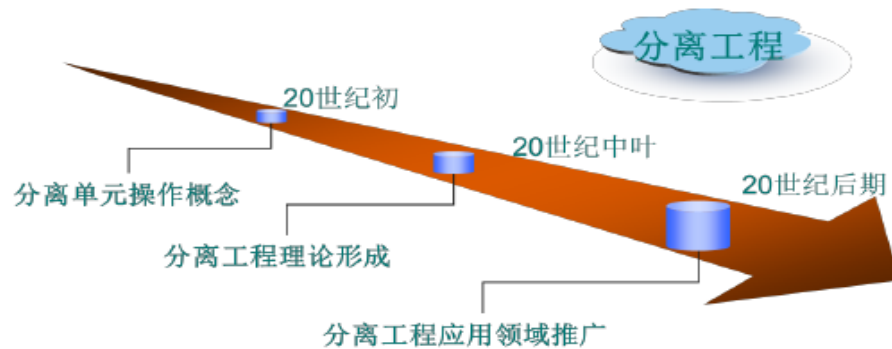
过程放大的方法有逐级经验放大法、数学模型法、工程理论法和参照法四种，对于一个缺乏参照系统的新的传质分离操作来说，前两种方法更为常用。

1) 逐级经验放大法 以小试→扩大试验→中试→工业化试验的程序，通过逐级试验获取参数来达到目的。稳妥，但耗费大。 步骤： 进行小试，确定操作条件和设备形式。确定的依据是最终产品质量、产量和成本，并不考虑过程的机理；小试之后进行规模稍大的中试，以确定设备尺寸放大后的影响（放大效应）；然后才能放大到工业规模的大型装置，在处理物料复杂或对选用的分离方法缺少经验时，放大把握不大，则上述每级试验放大倍数就小，往往需多级中间试验，耗资大，开发周期长。

2) 数学模型法 根据过程的内在规律，建立准确描述过程的数学模型，通过合理的简化后，利用计算机求解得到相关的参数。①将复杂过程分解为多个较简单的子过程，再根据研究的目的进行合理的简化，得出物理模型；②应用物理基本规律及过程本身的特征方程对物理模型进行数学描述，得数学模型；③对数学模型进行分析解或数值解得到设计计算方法，通过试验确定方程中的模型参数；④应用计算机进行复杂过程的综合研究和寻优，得到最优结果，最后需进行中间试验，检验结果的可靠性。 数学模型法尽管在方法的逻辑上合理，从方法论上说也很科学,与逐级经验放大方法相比，可以节省试验费用，缩短开发周期，结果比较可靠，但在化工中的实际应用至今仍然有限。主要原因在于化工过程太复杂，可靠又合理简化的数学模型难以建立。

分离工程理论的形成与完善

分离技术是随着化学工业的发展而逐渐形成和发展的，生产实践是分离工程形成与发展的源泉。



分离过程的发展动态

绿色分离工程：指分离过程绿色化的工程实现。

分离过程绿色化的途径有两种：

对传统分离过程进行改进、优化，使过程对环境的影响最小甚至没有 开发及使用新型的分离技术，如膜分离技术、分步结晶技术、超临界萃取技术等。

本章小结

学习了分离过程的基本概念、分离过程的分类以及常用的化工分离操作

了解了分离过程在化工过程中的重要性

学习了分离工程研究的主要内容及其理论形成的历程

掌握分离因子、固有分离因子两个重要概念

学习了分离过程的发展动态以及其开发方法

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。

7.2 教学单元二（2.2 相平衡关系）

7.2.1 教学日期

课程安排：2021-2022 学年第二学期；第 1 周星期二，1-2 节

7.2.2 教学目标

掌握相平衡关系以及相平衡常数的确定方法 难点：多组分非理想体系相平衡常数的计算。

7.2.3 教学内容

掌握相平衡关系以及相平衡常数的确定方法

难点：多组分非理想体系相平衡常数的计算。

7.2.4 教学过程

概念讲解

相平衡关系：若有两个或两个以上的均相，虽然它们互相紧密接触，但它们各自的性质并不随时间而改变，就用相平衡来表示这一状态。“平衡”的意思是说：在宏观上系统的性质随时间而改变的趋势已达到零。

相平衡条件：各相的温度相等、压力相等，每个组分的逸度相等。

$$T' = T'' = T''' = \dots$$

$$P' = P'' = P''' = \dots$$

$$\mu_i' = \mu_i'' = \mu_i''' = \dots$$

$$\hat{f}_i' = \hat{f}_i'' = \hat{f}_i''' = \dots$$

相平衡基本关系式

$$\hat{\phi}_i^V = \hat{f}_i^V / y_i p$$

$$\hat{\phi}_i^L = \hat{f}_i^L / x_i p$$

$$\hat{\phi}_i^V y_i p = \hat{\phi}_i^L x_i p$$

$$\gamma_i^L = \hat{f}_i^L / x_i f_i^{OL}$$

$$\gamma_i^V = \hat{f}_i^V / x_i f_i^{OV}$$

$$\hat{\phi}_i^V y_i p = \gamma_i x_i f_i^{OL}$$

相平衡常数

$$K_i = y_i / x_i \quad or \quad y_i = K_i x_i$$

表示了 i 组分在平衡的汽液两相中的分配情况，俗称分配系数

相对挥发度 α_{ij}

$$\alpha_{ij} = \frac{k_i}{k_j} = \frac{y_i/x_i}{y_j/x_j} = \frac{y_i/y_j}{x_i/x_j}$$

若 $\alpha_{ij} = 1$ ，表示汽液两相中 i、j 两组分的浓度之比相等，因此不能用一般的精馏来分离

气液相平衡常数的计算

实验实测法

气液达到平衡的时候分别测定气相的组分组成和液相组份组成，由气液两相的平衡组成就可以计算相平衡常数

不足： 实验条件的限制（价格、易燃易爆限制） 要达到充分的平衡所需时间长
状态方程法

从状态方程出发计算逸度和逸度系数，进而计算相平衡常数的方法。

$$\hat{f}_i^V = \hat{f}_i^L \longrightarrow \hat{\phi}_i^V y_i p = \hat{\phi}_i^L x_i p$$

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{\hat{\phi}_i^L}{\hat{\phi}_i^V}$$

只要给出组分 i 的汽液两相的逸度系数, 即可求出 K_i , 而已知 K_i 则可由 x_i (y_i) 求与之相平衡的 y_i (x_i)。逸度系数均可用状态方程来计算, 但该状态方程必须同时适用于汽液两相, 常见的有 SRK、PR 和 BWR 方程。此法适用于中压下, 液相非理想性不是很强的烃类系统。

常见的状态方程:

理想气体状态方程	$pV = RT$
范德瓦耳斯方程	$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2}$
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	$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{V(V+b)+c(V-b)}$
Virial 方程	$Z = \frac{pV}{RT} = 1 + \frac{B}{V} + \frac{C}{V^2} + \frac{D}{V^3} + \dots$ 或 $Z = 1 + B'p + C'p^2 + \dots$
M-H 方程	$p = \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_i(T)}{(V-b)^i} \right)$, 式中 $f(T) = A_i + B_i T + C_i \exp\left(\frac{-5.475T}{T_c}\right)$
BWR 方程	$p = RT\rho + (B_0 RT - A_0 - \frac{C_0}{T^2})\rho^2 + (bRT - a)\rho^3 + a\rho^6 + \frac{C}{T^2}\rho^3(1+\gamma\rho^2)\exp(\gamma\rho^2)$

活度系数法

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{\gamma_i f_i^{OL}}{\hat{\phi}_i^V P}$$

利用状态方程计算气相逸度系数, 如维里方程, RK 方程, 用活度系数求解实际溶液的逸度

系数。该法用于压力不高，液相非理想性强的系统。

7.2.5 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 教学单元三（活度系数法计算相平衡关系）

7.3.1 教学日期 课程安排：第二学期

7.3.2 教学目标 利用活度系数法计算相平衡关系

7.3.3 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。 7.3.4 教学过程
活度系数法

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{\gamma_i f_i^{OL}}{\hat{\phi}_i^V P}$$

求取基准态逸度、液相活度系数和汽相逸度系数。

基准态逸度 f_i^{OL}

在体系温度、压力下，溶液中各组分的纯物质聚集态相同，并且组分之间可以无限制混合时，各组分都以Lewis-Randall定则为基础规定标准态。

在体系温度、压力下，溶液中各组分的纯物质聚集态不同，或者，组分之间不能无限制混合时，溶剂以Lewis-Randall定则为基础规定标准态，溶质以Henry定律为基础规定标准态。

• **可凝组分基准态**

(1) **可凝组分基准态逸度**:

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

基准态规定: $x_i = 1$ 时, $\gamma_i = 1$

$$f_i^{OL} = f_i^L$$

得出 f_i^{OL} 为在系统 T 、 P 下液相中**纯组分 i** 的逸度

$$\gamma_i^L = \hat{f}_i^L / (x_i f_i^L)$$

? 如何求取纯组分 i 的逸度 f_i^L

$$\ln \frac{f_i^L}{P} = \frac{1}{RT} \left[\int_0^{P_i^s} \left(v_i - \frac{RT}{P} \right) dP + \int_{P_i^s}^P \left(v_i - \frac{RT}{P} \right) dP \right]$$

$$= \ln \phi_i^s + \frac{v_i^L (P - P_i^s)}{RT} - \ln \frac{P}{P_i^s}$$

纯组分 i 在一定温度的**饱和蒸汽压**下的逸度系数。

纯液体组分 i 在系统温度下的**摩尔体积**, 与压力无关。

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

校正饱和蒸汽压下的蒸汽对理想气体的偏离。

普瓦廷因子, 校正压力对饱和蒸汽压的偏离。

• 不可凝组分基准态

取基准态: $x_i \rightarrow 0, \gamma_i^* \rightarrow 1$ $\longrightarrow \gamma_i = \frac{\hat{f}_i^L}{x_i f_i^{0L}}$ \longrightarrow

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

该基准态下组分*i*的逸度 f_i^{0L} 为在系统温度和压力下的亨利常数。

亨利系数可以通过查图查手册得到

当T、P一定, $x_i \rightarrow 0$ 时:

$$\hat{f}_i^L = Hx_i$$

Henry's law

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。

对于由一个溶质（不凝性组分）和一个溶剂（可凝性组分）构成的两组分溶液, 通常,

溶剂的活度系数基准态定义为:

$$x_i \rightarrow 1, \gamma_i \rightarrow 1 \quad f_i^{0L} = f_i^L$$

溶质的活度系数基准态定义为:

$$x_i \rightarrow 0, \gamma_i^* \rightarrow 1 \quad f_i^{0L} = H$$

不对称型
标准化方法

液相活度系数 γ_i

活度系数方程:

过剩自由焓 G^E 与活度系数 γ_i 关系:

$$nG^E = \sum_{i=1}^C (n_i RT \ln \gamma_i) \quad G^E$$

$$\left(\frac{\partial (nG^E)}{\partial n_i} \right)_{T,P,n_j} = RT \ln \gamma_i \quad (2-27)$$

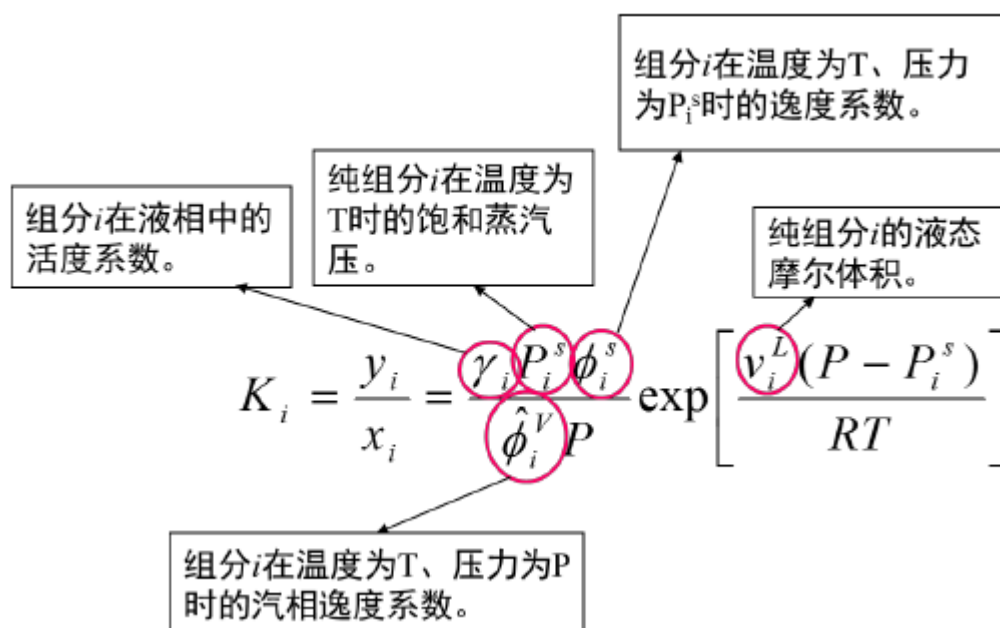
$$\therefore \ln \gamma_i = \left(\frac{\partial (n \frac{G^E}{RT})}{\partial n_i} \right)_{T,P,n_j}$$

常用的数学模型	特征	适用
1. Van Laar(范拉尔)方程	二元汽液平衡	非理想性强的二元混合物, 部分互溶体系。
2. Margules(马古斯)方程	同上	同上
3. Scatchard-Hildebrand (SH) 方程	对于正规溶液, 多元。溶解度参数法, 是 Van Laar 方程一种特例	纯物质, 烃类混合物接近正规溶液的假设
4. Wilson	二元→多元 (局部组成概念-局部体积分数)	二元、多元, 水系统. 烃类、醛、醇、酮、醚、腈、酯、有机酸、硝基物、及含水、S、卤化物互溶系统。不适合部分互溶或液液物系。
5. NRTL (Non Random Two Liquid) 模型	二元→多元 (局部组成概念-局部 mol 分率)	适合部分互溶。① 同上——; ② 能适应液-液平衡; ③ 水系统—精度好
6. UNIQUAC (Universal Quasi-Chemical Model) 模型 (通用拟化学模型)	只需回归 2 个可调参数。能够很好表达二元及多元系。 (局部组成概念-局部 mol 分率)	① 同 Wilson; ② 液-液平衡; ③ 大分子聚合物溶液
7. UNIFAC (Universal Quasi-Chemical Functional Group Activity Coefficient) 模型 (通用拟化学官能团模型)	由各组分的分子结构和有关的官能团计算活度系数 (基团贡献法)	汽-液、液-液; 预测非电解质。

气相逸度系数

选用适宜的状态方程求取汽相逸度系数。

活度系数法计算相平衡常数的通式



活度系数法计算相平衡常数的简化形式

汽相 \ 液相	理想气体的混合物	理想的气体混合物	真实气体混合物
	$\hat{\phi}_i^V = 1, \phi_i^S = 1$	$\hat{\phi}_i^V = \phi_i^V$	
理想溶液 $\gamma_i = 1$	$py_i = P_i^S x_i$ $k_i = \frac{P_i^S}{P} = f(T, P)$	$Py_i \phi_i^V = P_i^S \phi_i^S \gamma_i x_i$ $k_i = \frac{P_i^S \phi_i^S}{P \phi_i^V} = f(T, P)$	$Py_i \phi_i^V = P_i^S \phi_i^S x_i$ $k_i = \frac{P_i^S \phi_i^S}{P \hat{\phi}_i^V} = f(T, P, y_i)$
非理想溶液	$py_i = \gamma_i P_i^S x_i$ $k_i = \frac{P_i^S \gamma_i}{P} = f(T, P, x_i)$	$Py_i \hat{\phi}_i = P_i^S \phi_i^S \gamma_i x_i$ $k_i = \frac{P_i^S \phi_i^S \gamma_i}{P \hat{\phi}_i^V} = f(T, P, x_i)$	$Py_i \hat{\phi}_i^V = P_i^S \phi_i^S x_i$ $k_i = \frac{P_i^S \phi_i^S \gamma_i}{P \hat{\phi}_i^V} = f(T, P, x_i, y_i)$

汽液平衡系统分类及汽液平衡常数的计算（忽略普瓦廷因子）

P-T-K 图计算相平衡常数

烃类系统的列线图法

相平衡常数是温度、压力和汽液组成的函数，无论用状态方程还是用活度系数模型，其计算工作量都很大，必须借助于计算机辅助计算。

烃类物系在化工中十分重要，其行为接近理想情况，可仅考虑 P 、 T 对 K_i 的影响，迪普里斯特（Depriester）以 BWR 方程为基础，经广泛的实验和理论推算，作出了轻烃类的 PTK 列线图，见 P34 图 2-5，这些图虽然没有假设理想溶液这个条件，但在图上所示的有限的压力范围内，组成对 K 值的影响很小，仍然把 K 看成是 T 、 P 的函数，平均误差为 8-15%。适用于 0.8-1 Mpa（绝对压）以下的较低压区域。

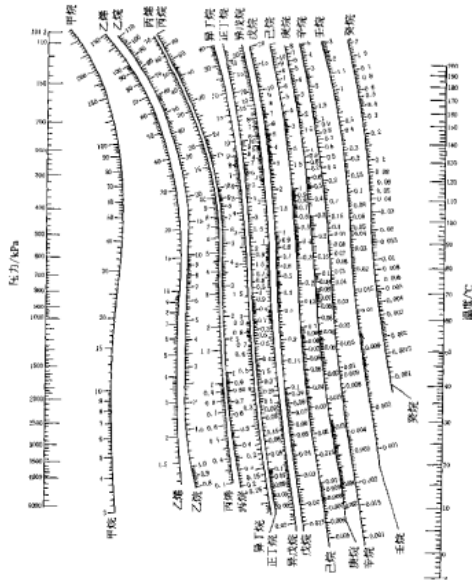


图 2-1(a) 轻烃的 K 图(高压段)^[9]

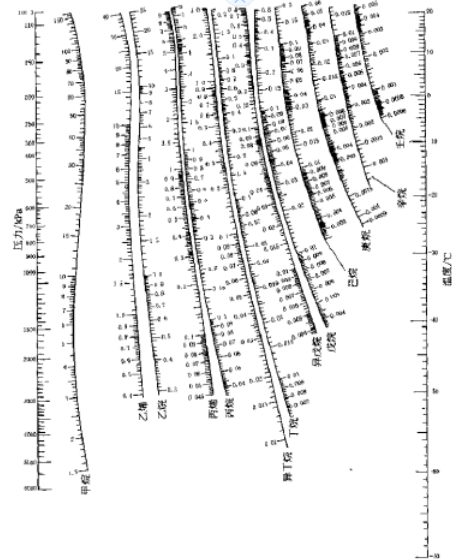


图 2-1(b) 轻烃的 K 图(低压段)^[9]

➤ 相平衡常数经验式

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

$$\ln K_i = B_{1,i} - \frac{B_{2,i}}{T + B_{3,i}}$$

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

A_{ji} 、 B_{ji} 、 C_{ji} 为各经验式的系数，由实验数据直接回归得到，或由各种计算相平衡常数的方法计算值回归得到。

7.3.5 教学方法

理论推导+例题讲解

7.3.6 作业安排 课后作业: p65, 第 4 题;

7.4 教学单元四 (泡点和露点计算)

7.4.1 教学日期 课程安排: 2021-2022 学年第二学期;

7.4.2 教学目标 掌握泡点压力和泡点温度计算 了解露点压力和露点温度计算

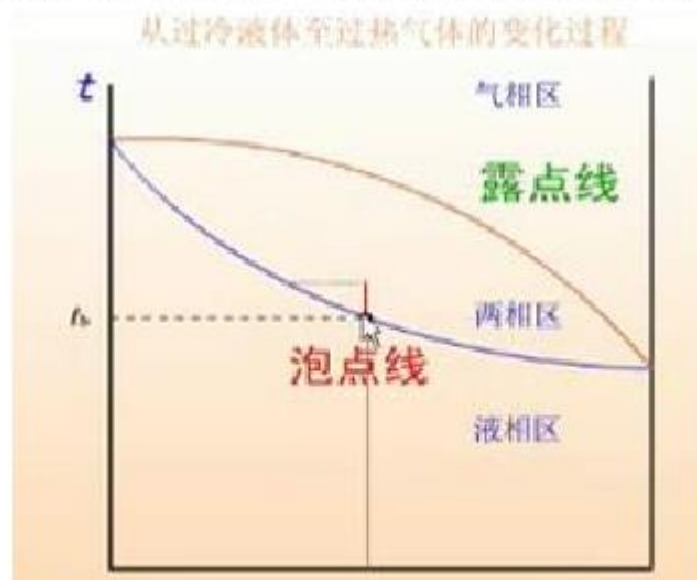
7.4.3 教学内容 泡点压力和泡点温度计算 露点压力和露点温度计算

7.4.4 教学过程

➤ 基本概念

泡点温度(压力):在恒压(温)下加热液体混合物,当液体混合物开始气化出现第一个气泡时的温度(压力), 简称泡点, 该气泡的产生并不改变液相的组成。

露点温度(压力):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, 该液滴的产生并不改变气相的组成。



➤ 计算类型

计算类型	规定量 (C个)	求解量
泡点温度	$P, x_1, x_2 \cdots x_{c-1}$	$T, y_1, y_2 \cdots y_c$
泡点压力	$T, x_1, x_2 \cdots x_{c-1}$	$P, y_1, y_2 \cdots y_c$
露点温度	$P, y_1, y_2 \cdots y_{c-1}$	$T, x_1, x_2 \cdots x_c$
露点压力	$T, y_1, y_2 \cdots y_{c-1}$	$P, x_1, x_2 \cdots x_c$

➤ 计算方程

计算出发点：

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。

(1) 相平衡方程： C 个

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

(2) 摩尔分率加和方程： 2 个

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

(3) 汽液平衡常数关联式： C 个

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

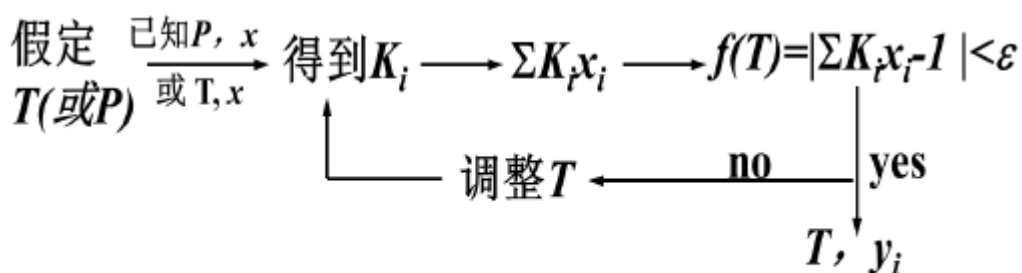
$2C + 2$

➤ 平衡常数与组成无关的泡点计算

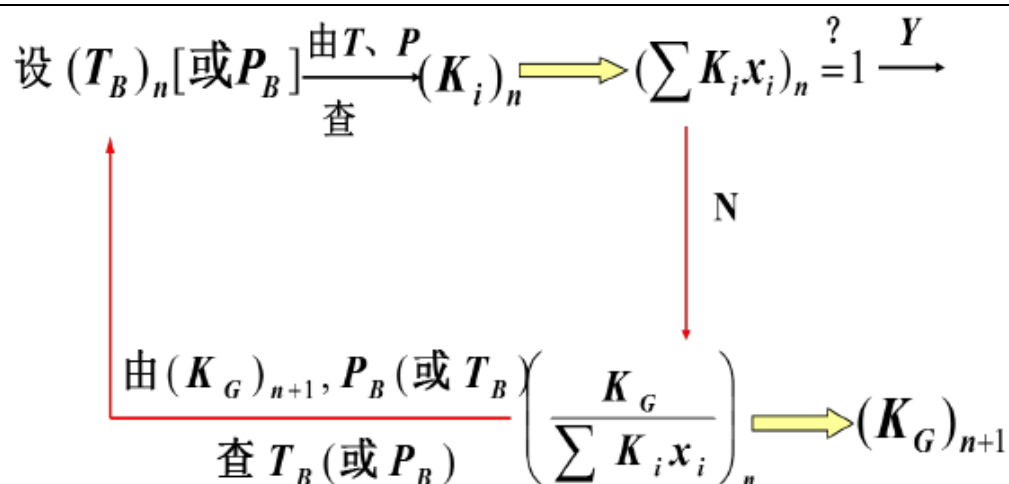
✓ 手算

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

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



ε 为试差的允许偏差一般取 $0.01 \sim 0.001$



求泡点温度	求泡点压力
$F(T) = \sum_{i=1}^c K_i x_i - 1 = 0$ <p>常用的简化形式:</p> $F(T) = \sum_{i=1}^c \frac{p_i^0}{P} x_i - 1 = 0$ <p>— 完全理想系, 试差计算</p> $F(T) = \sum_{i=1}^c \frac{p_i^0 \gamma_i}{P} x_i - 1 = 0$ <p>— 理气、非理液, 试差</p>	$F(P) = \sum_{i=1}^c K_i x_i - 1 = 0$ <p>常用的简化形式:</p> $P_B = \sum_{i=1}^c p_i^0 x_i$ <p>— 完全理想系, 不用试差</p> $P_B = \sum_{i=1}^c \gamma_i p_i^0 x_i$ <p>— 理气、非理液, 不试差</p>

✓ 计算机计算

牛顿迭代法

$$T^{k+1} = T^k - \frac{f(T^k)}{f'(T^k)}$$

Richmond 迭代法

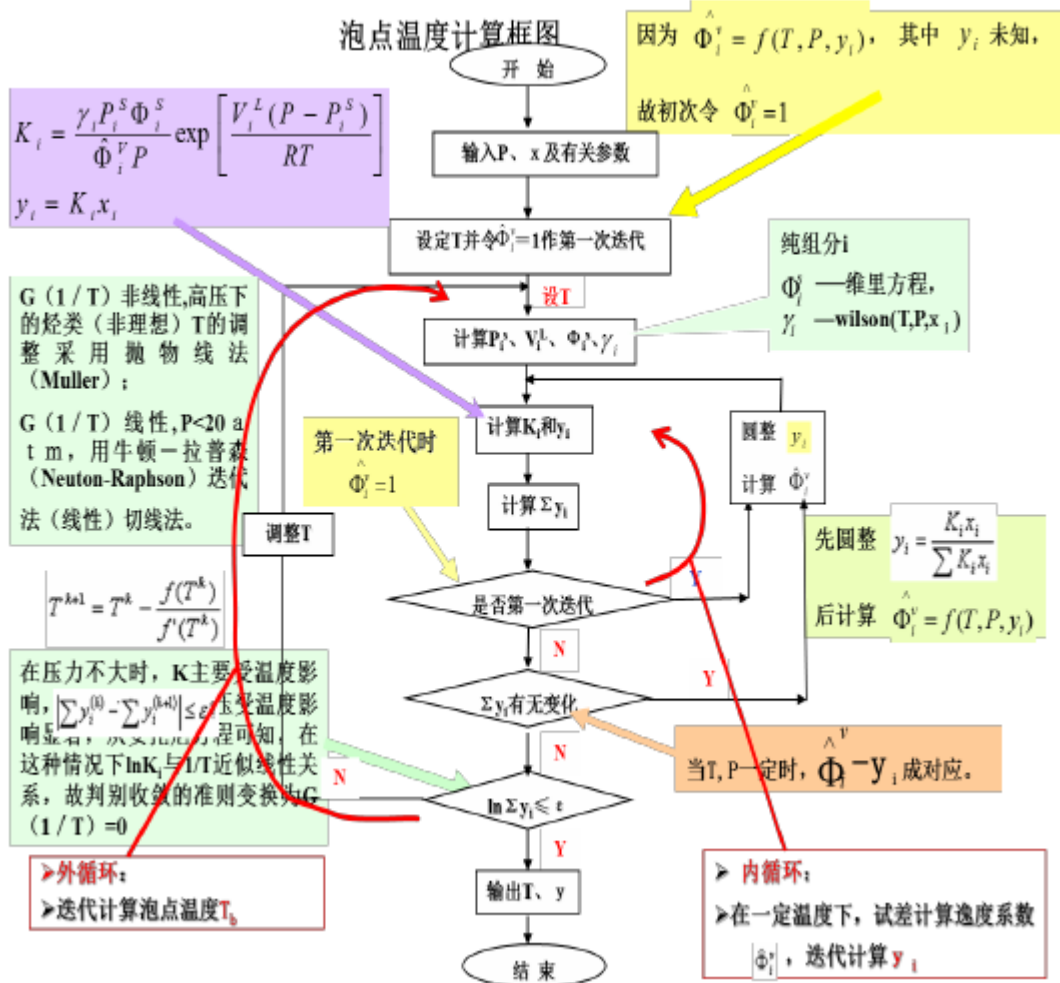
$$t^{(k+1)} = t^{(k)} - \frac{2}{\frac{2f'(t^{(k)})}{f(t^{(k)})} - \frac{f''(t^{(k)})}{f'(t^{(k)})}}$$

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

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

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{\gamma_i P_i^s \phi_i^s}{\hat{\phi}_i^V P} \exp \left[\frac{v_i^L (P - P_i^s)}{RT} \right]$$

$$K_i \begin{cases} P_i^s, \phi_i^s, v_i^s & \text{—— } T, P \quad \text{一般受 } P \text{ 的影响较小} \\ \hat{\phi}_i^V & \text{—— } T, P, y_i \quad \begin{array}{l} \text{计算 } \hat{\phi}_i^V \text{ 或 } y_i \text{ 时需迭代 (因 } T \text{ 未知)。} \\ \text{当 } P \text{ 不太高时, } P \text{ 的影响不太大, 收敛较快。} \end{array} \\ \gamma_i & \text{—— } T, P, x_i \quad \text{一般受压力的影响较小} \end{cases}$$



7.4.5 教学方法 理论推导+例题讲解

7.4.6 作业安排 课后作业: p 67, 第 13/15 题

7.5 教学单元五 (露点计算+闪蒸计算)

7.5.1 教学日期 课程安排: 2021-2022 学年第二学期;

7.5.2 教学目标 了解露点计算 掌握等温闪蒸和绝热闪蒸问题计算

7.5.3 教学内容 等温闪蒸、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

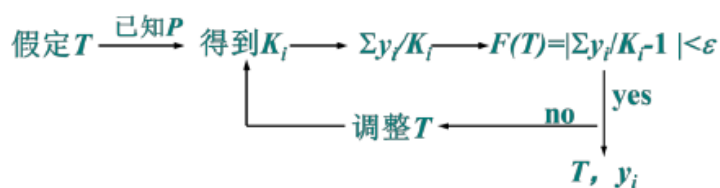
7.5.4 教学过程

➤ 露点温度 (压力) 计算

露点方程:

$$F(T_D) = \sum_{i=1}^c (y_i / K_i) - 1.0 = 0$$

(1) 手算 计算思路



(2) 计算机计算 计算思路

$$F(T) = \sum \frac{y_i}{K_i} - 1 = 0$$

$$F'(T) = - \sum \left(\frac{y_i}{K_i^2} \frac{dK_i}{dT} \right)$$

$$T_{m+1} = T_m - \frac{F(T_m)}{F'(T_m)}$$

➤ 单级平衡分离过程的计算

✓ 基本概念

单级平衡:

原料经过分离设备后, 直接成为互为平衡的两相, 由于平衡两相组成不同而实现分离的过程, 其分离效果相当于一块理论级。

闪蒸:

又称平衡蒸馏, 是连续、稳态的单级蒸馏过程, 该过程使进料混合物经加

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,即一个平衡级过程

✓ 混合物的相态

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

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

$$T_D > T > T_B$$

混合物处于汽液两相区,即闪蒸问题成立

$\sum K_i x_i$	<1	=1	>1	>1	>1
$\sum (y_i / K_i)$	>1	>1	>1	=1	<1
相状态	过冷液体	饱和液体	汽液混合	饱和蒸汽	过热蒸汽

混合物处于汽液两相区,即闪蒸问题成立

$\sum K_i x_i$	<1	=1	>1	>1	>1
$\sum (y_i / K_i)$	>1	>1	>1	=1	<1
相状态	过冷液体	饱和液体	汽液混合	饱和蒸汽	过热蒸汽

✓ 闪蒸过程的计算方程

$$\left. \begin{array}{l} \text{(1) 物料衡算—M方程: } C \text{ 个} \\ Fz_i = Lx_i + Vy_i \quad i=1,2,\dots,C \\ \text{(2) 相平衡—E方程: } C \text{ 个} \\ y_i = K_i x_i \quad i=1,2,\dots,C \\ \text{(3) 摩尔分率加和式—S方程: } 2 \text{ 个} \\ \sum_{i=1}^C x_i = 1 \quad \sum_{i=1}^C y_i = 1 \\ \text{(4) 热量平衡式—H方程: } 1 \text{ 个} \\ FH_F + Q = VH_V + LH_L \end{array} \right\} 2C+3$$

✓ 闪蒸过程计算类型

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

✓ 闪蒸过程计算公式

(1) 汽液平衡常数与组成无关

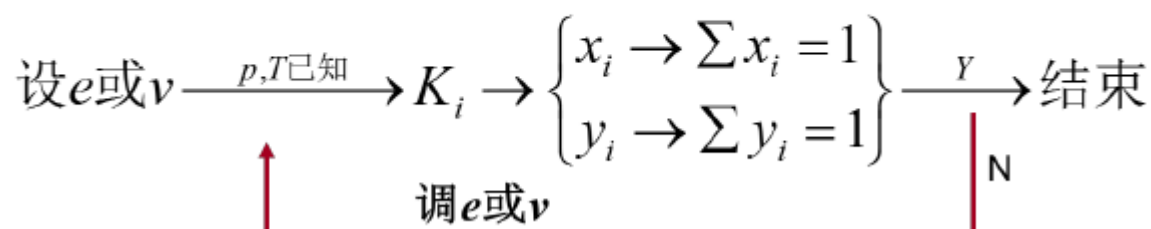
$$K_i = f(T, P)$$

$$x_i = \frac{z_i}{(1-e)k_i + e} = \frac{z_i}{vk_i + (1-v)}$$

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

两类计算:

(2) 已知: F, z_i, P, T ; 计算: Q, V, L, y_i, x_i



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

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

$$v_{k+1} = v_k - \frac{F(v)}{F'(v)}$$

(3) 已知: $F, z_i, P(T), n(e)$; 计算: $T(P), V(L), y_i, x_i, Q$

思路: 设 $T \xrightarrow{p \text{ 已知}} K_i \xrightarrow{v \text{ 已知}} \begin{cases} x_i \rightarrow \sum x_i = 1 \\ y_i \rightarrow \sum y_i = 1 \end{cases} \xrightarrow{y} \text{结束}$

↑
调 T

估计 T :
$$K_G(T_{k+1}) = \frac{K_G(T_k)}{1 + d \cdot F(T_k)}$$

d 为阻尼因子 $d \leq 1.0$

(4) 热量衡算

热量衡算方程: $FH_F + Q = VH_V + LH_L$

对于理想溶液:

$$\begin{aligned} H_F &= \sum_i z_i H_{F,i} = H_F^o \\ H_V &= \sum_i y_i H_{V,i} = H_V^o \\ H_L &= \sum_i x_i H_{L,i} = H_L^o \end{aligned}$$

H_i 为纯物质 i 的摩尔热焓

对于非理想溶液: $H_V = H_V^o + \Delta H_V$

超额焓

(5) 汽液平衡常数与组成有关的闪蒸计算

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

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

需先初估 x_i , y_i 求 K_i , $y_i = K_i x_i \quad i = 1, 2, \dots, C$

然后迭代求 v 至收敛, $F(v) = \sum (y_i - x_i) = \sum \frac{z_i(K_i - 1)}{1 + v(K_i - 1)} = 0$

用收敛的 v 再估算新的一组 x 和 y ,

$$x_i = \frac{z_i}{(1 - e)k_i + e} = \frac{z_i}{vk_i + (1 - v)}$$

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

并计算 K , 重新迭代 v , 直至 x 和 y 没有变化为止。

7.5.5 教学方法 理论推导+例题讲解

7.5.6 作业安排 课后作业: p 68, 第 25/28 题

7.6 教学单元六 (绝热闪蒸计算+第二章总结)

7.6.1 教学日期 课程安排: 2021-2022 学年第二学期;

7.6.2 教学目标 了解绝热闪蒸的计算 掌握第二章知识体系

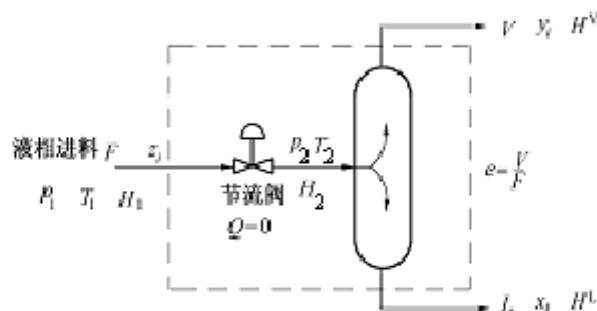
7.6.3 教学内容 绝热闪蒸的计算 第二章知识脉络梳理

7.6.4 教学过程

绝热闪蒸

流量为 F , 组成为 z_i 的液相进料于压力 P_1 , 温度 T_1 下经节流阀在绝热情况下减压至 P_2 , 在节流过程中部分液体依靠进料本身携带的热量汽化, 而系统温度降至 T_2 , 由于上述节流过程是在绝热情况下进行的 ($Q=0$), 因而节流前后混合物的焓

$$H_1 = H_2$$



绝热闪蒸的计算内容

已知 F, Z_i, p_1, T_1, p_2

求: T_2, V, L, x_i, y_i

绝热闪蒸的计算内容

已知 F, Z_i, p_1, T_1, p_2

求: T_2, V, L, x_i, y_i

绝热闪蒸的计算公式

组分的物料衡算式: $F = V + L, Fz_i = Vy_i + Lx_i$

相平衡关系式: $y_i = K_i x_i$

浓度总和式: $\sum x_i = 1, \sum y_i = 1$

焓平衡 方程: $H_1 = H_2$ $H_V = \sum y_i H_i$ $H_L = \sum x_i h_i$ $H_1 = \sum z_i H_i$

$$FH_2 = VH_V + LH_L, \therefore H_2 = vH_V + (1-v)H_L$$

焓平衡方程:
$$v = \frac{H_2 - H_L}{H_V - H_L} = \frac{H_1 - H_L}{H_V - H_L}$$

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

绝热闪蒸的计算方法

①作图法

(1)闪蒸曲线 ($T \sim v$ 曲线)

试差求 p_2 下的 T_D 、 T_B , 在 T_D 、 T_B 之间设 $T_2 \dots$

试差求 v_1 、 v_2

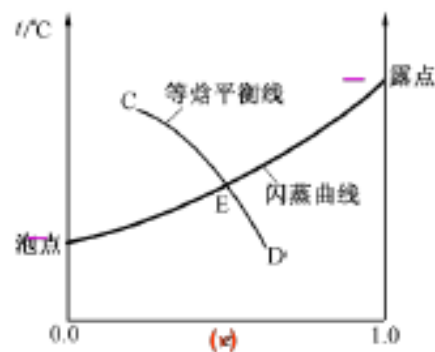
(2)等焓平衡线

由求出的 x_i, y_i

$$\xrightarrow{p_2, T_2} H_V, H_L$$

$$\rightarrow H_V, H_L$$

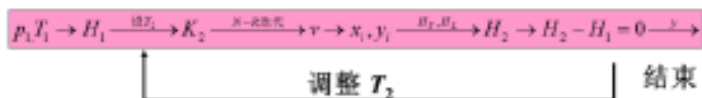
$$v_1^* = \frac{H_1 - H_L}{H_V - H_L}$$



②手算或计算机计算

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

思路:



内层为 v 循环, 用Newton-Raphson迭代
求解汽化分率 v , 收敛精度 $|F(v)| < 0.005$

外层则为 T_2 循环, 用正割法调整节流后的温度

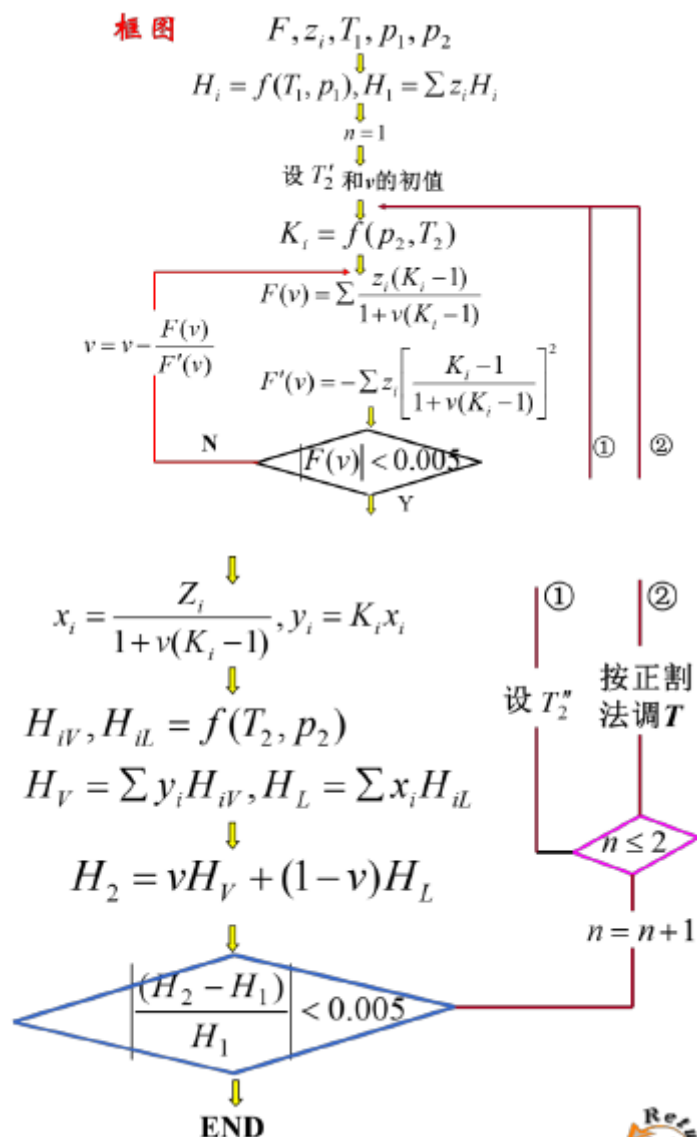
$$T_2'' = \frac{T_2' F(T_2'') - T_2'' F(T_2')}{F(T_2'') - F(T_2')}$$

$$F(T_2) = H_2 - H_1 = 0$$

收敛精度

$$\left| \frac{(H_2 - H_1)}{H_1} \right| < 0.005$$

框图



Ref

7.6.5 教学方法 理论推导+例题讲解+知识梳理

7.6.6 作业安排 描述气液平衡的重要性

7.7 教学单元七（单元设计变量）

7.7.1 教学日期 课程安排：2021-2022 学年第二学期；

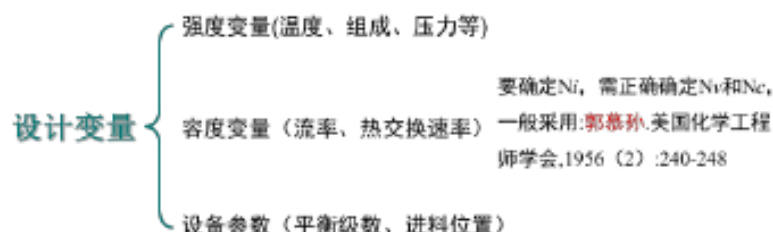
7.7.2 教学目标 掌握设计变量基本概念和单元设计变量的计算方法

7.7.3 教学内容 设计变量的理解 设计变量的计算

7.7.4 教学过程

➤设计变量

设计变量——在计算前规定了数值的物理量，使未知变量的数目正好等于独立方程数



$$N_i = N_v - N_c$$

N_i : 设计变量数 N_v : 系统的总变量数 N_c : 变量之间的约束关系数

N_i $\begin{cases} N_s: \text{固定设计变量} \\ N_i: \text{可调设计变量} \end{cases}$

总独立变量数 N_v

$$N_i = N_v - N_c$$

$$N_v = \text{物流变量数} + \text{能量交换数(热、功)} \quad N_v = f + R$$

(1) 物流变量数

任一物流的自由度:

$$f = c - \pi + 2$$

组分数 相数

✓ 对于单相流股: $\pi = 1$ $f = c + 1$

完全描述一个流动流股还应加上该流股的流率。

因此对于任一单相流股独立变量数: $N_v = (c + 1) + 1 = c + 2$

✓ 对于由平衡两相构成的物流而言 $\pi = 2$ $f = c$

完全描述一个流动流股还应加上两相的流率

$$N_v = c + 2 = c + 2$$

(2) 能量交换数

系统与环境间能量交换数的确定: 有一股热量交换, 增加一个变量数。既有一股热量交换, 又有一股功交换时, 应增加两个变量数。

约束（条件）数 N_c

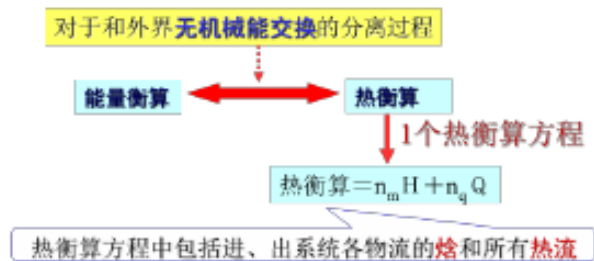
$$N_i = N_v - N_c$$

(1) 物料平衡约束

c个组分有c个（独立组分:c-1,总物:1）

(2) 能量平衡约束

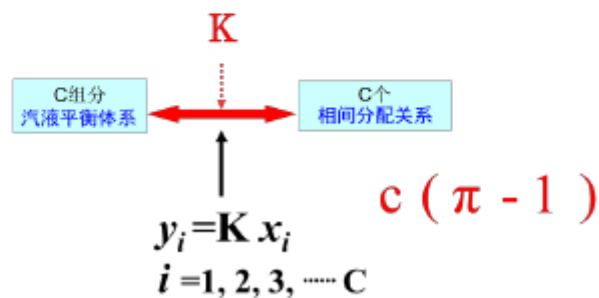
一个系统一个，不能对每个组分分别写



约束（条件）数 N_c

(3) 相间分配关系的约束

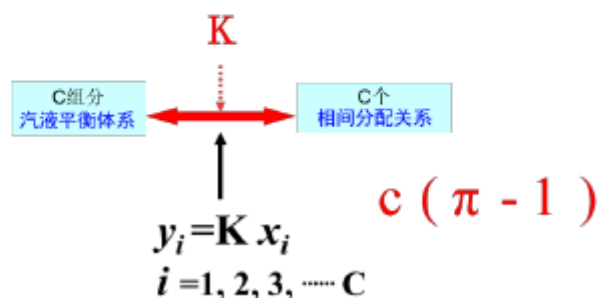
当两相呈平衡时，各组分按一定的规律在两相中分配。



约束（条件）数 N_c

(3) 相间分配关系的约束

当两相呈平衡时，各组分按一定的规律在两相中分配。



单元的设计变量

• 分离过程中的单元可分为两大类：

1、单元中无浓度变化

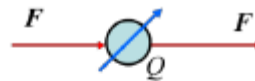
- 是辅助单元。
- 如：分配器、换热器(包括：加热器、冷却器、全凝器、全蒸发器)泵等。

2、单元中有浓度变化

- 如：混合器、分离器、理论板、部分蒸发器、部分冷凝器、全凝器（凝液为两相）等。

1、单元中无浓度变化

(1) 加热器



$$N_v^e = 2(C+2)+1 = 2C+5$$

✓ 约束数：物料平衡式 C个

能量平衡式 1个

$$\therefore N_c^e = C+1 \quad N_f^e = N_v^e - N_c^e = C+4$$

其中： $N_x^e = C+3$ （进料C+2个，压力1个）

- $N_a^e = 1$ ，为系统换热量或出换热器的温度。
- 对冷却器、泵等无浓度变化的单元情况类似。

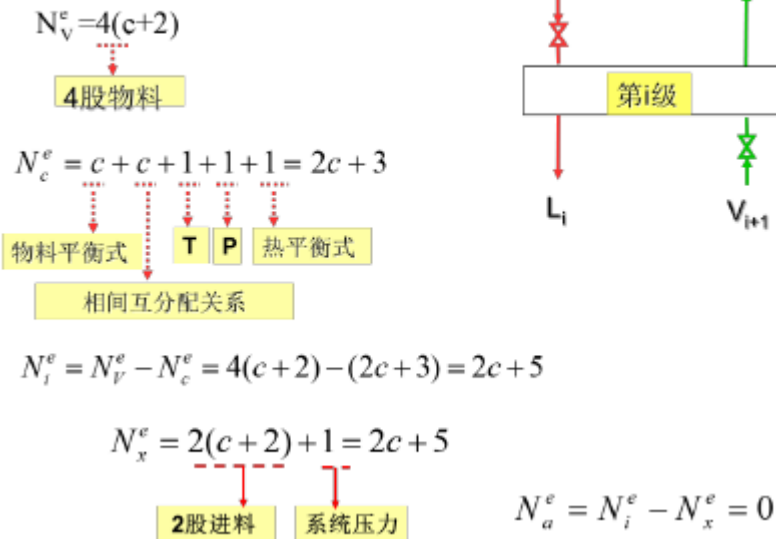
2、有浓度变化的单元

◆ 在这类单元中描述一个单相物料的独立变量数及一个两相（互成平衡）物料的独立变量数都是 **C+2**。

◆ 对于互成平衡的两股物流可列出 **C+2** 个等式（压力、温度、C个组分的化学位相等），与作为一个两相物流时的设计变量 N_f 是一样的。

◆ 每一组分都可写出一个物衡算式，各单元的物衡算式都是C个，其它同辅助单元。

(2) 简单平衡级（绝热操作）



7.7.5 教学方法 理论推导+例题讲解

7.7.6 作业安排 推导表 2-1 中各种单元的设计变量、固定设计变量和可调设计变量

7.8 教学单元八（装置设计变量+期中考试）

7.8.1 教学日期 课程安排：2021-2022 学年第二学期

7.8.2 教学目标 掌握装置设计变量和流程设计变量的简捷计算

7.8.3 教学内容 装置设计变量的计算和期中考试

7.8.4 教学过程

装置的设计变量

$$N_i^u = N_v^u - N_c^u$$

• 1、装置的设计变量总数 N_i^u

$$N_i^u = \sum N_i^e + N_r - N_c^u$$

串级单元数（重复设计变量数）

- ✓ 若在装置中某一单元以串联的形式被重复使用时（如精馏塔），则还应增加一个变量数以区别于这种单元与其它单元相联结的情况；
- ✓ 各个单元是依靠单元之间的物流而联结成一个装置，因此必须从总变量中减去那些多余的相互关联的物流变量数，或者是每一单元间物流附加 $(C+2)$ 个等式， n ：单元间物流的数目

$$\therefore N_i^u = \sum N_v^e - \sum N_c^e + N_r - n(C+2)$$

装置的设计变量总数 N_i^u

$$N_i^u = \sum N_i^e + N_r - n(c+2) = \sum N_x^e - n(c+2) + \sum N_a^e + N_r$$

$$N_i^u = N_x^u + N_a^u \quad N_x^u = \sum N_x^e - n(c+2)$$

$$N_x^u = \text{装置的进料变量数} + \text{压力等级数}$$

因为装置的 N_x^u 固定，是指进入该装置各进料物流（而不是装置内各单元的进料物流）的变量数以及装置中不同压力的等级数，因此它应比 $\sum N_x^e$ 少 $n(c+2)$

$$N_a^u = N_r + \sum N_a^e$$

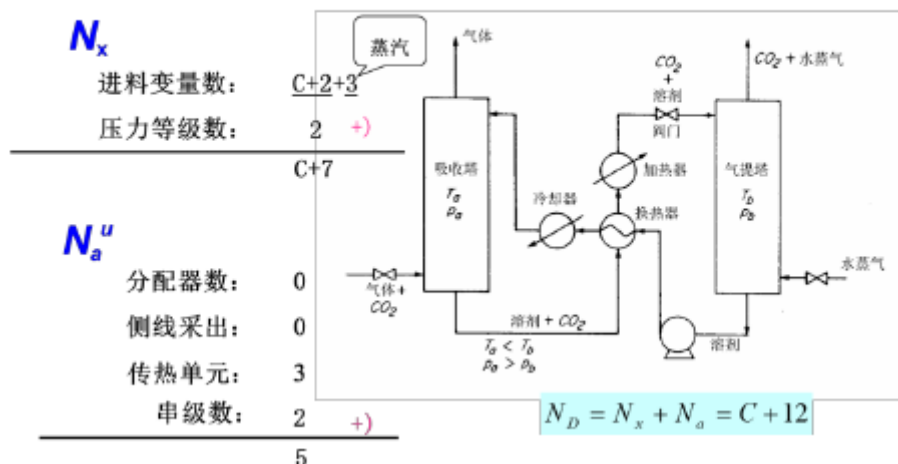
N_i^u 简便计算方法

$$N_a^u = N_r + \sum N_a^e \longrightarrow \text{列出 } N_a^e = 1 \text{ 的单元}$$

- ①——分配器的数目
- ②——侧线采出单元的数目
- ③——传热单元的数目
- ④——部分冷凝器的数目
- ⑤——再沸器的数目

$$N_a^u = N_r + ① + ② + ③ + ④ + ⑤$$

例1. 吸收-解吸流程



期中考试

一、选择题

- 1、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
- 2、下列哪一个是速率分离过程（ ）。
A.蒸馏 B.吸收 C.膜分离 D.离心分离
- 3、等焓节流之后（ ）。
A、温度提高 B、压力提高
C、压力降低，温度也降低 D、有汽化现象发生，压力提高
- 4、当汽相为理想气体混合物，液相为非理想溶液时，其汽液相平衡关系为（ ）。
A、 $py_i = p_i^0 x_i$ B、 $\phi_i^V py_i = \phi_i^0 p_i^0 x_i$ C、 $py_i = \gamma_i p_i^0 x_i$ D、 $p\hat{\phi}_i^V y_i = p\hat{\phi}_i^L x_i$
- 5、计算溶液露点时，若见 $\sum(y_i/K_i) - 1 > 0$ 则说明（ ）。
A、温度偏低 B、正好泡点 C、温度偏高 D、正好露点
- 6、进行等温闪蒸时，对满足（ ）条件时系统处于两相区。
A、 $T_B < T$ B、 $T_D > T$ C、 $T_D > T > T_B$ D、 $T_B = T$

28

期中考试

一、选择题

- 7、等焓节流之后（ ）。
A、温度提高 B、压力提高
C、压力降低，温度也降低 D、有汽化现象发生，压力提高
- 8、在一定温度和压力下，由物料组成计算出的 $\sum_{i=1}^C K_i X_i - 1 > 0$ 且 $\sum_{i=1}^C Z_i / K_i < 1$ 该进料状态为（ ）。
A.过冷液体 B.过热气体 C.汽液混合物
- 9、约束变量数就是（ ）。
A.过程所涉及的变量的数目；
B.固定设计变量的数目
C.独立变量数与设计变量数的和；
D.变量之间可以建立的方程数和给定的条件.
- 10、绝热操作的简单平衡级设计变量数为（ ）。
A、 $2C+3$ 个 B、 $2C+4$ 个 C、 $C+5$ 个 D、 $2C+5$ 个

期中考试

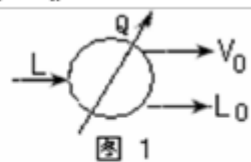
二、填空题

- 1、分离过程分为（ ）和（ ）两大类。
- 2、露点方程的表达式为()，泡点方程的表达式为()
- 3、泡点压力计算时若 $\sum K_i x_i > 1$ ，压力应调（ ）
- 4、设计变量分为（ ）与（ ）。
- 5、写出R-R闪蒸方程的表达式（ ）
- 6、写出装置可调设计变量与单元可调设计变量之间的关系式（ ）

三、简答题

对再沸器（图1）进行变量分析，得出： N_v, N_c, N_i, N_x, N_a

回答对可调设计变量如何指定。



期中考试

四、计算题

1、以烃类蒸汽混合物含有甲烷A.5%，乙烷B.10%，丙烷C.30%及异丁烷D.55%。试求混合物在25℃时的露点压力与泡点压力，并确定在 $t=25\text{℃}$ ， $p=1\text{ MPa}$ 大气压时的气相分率。

2、某混合物含丙烷A.0.451（摩尔分数），异丁烷B.0.183，正丁烷C.0.366，在 $t=94\text{℃}$ 和 $p=2.41\text{ Mpa}$ 下进行闪蒸，试估算平衡时混合物的气化分率及气相和液相组成。已知 $K_1=1.42$ ， $K_2=0.86$ ， $K_3=0.72$ 。

7.8.5 教学方法 理论推导+例题讲解

7.8.6 作业安排 无作业安排

7.9 教学单元九（期中考试讲解+多组分精馏）

7.9.1 教学日期 课程安排：2021-2022 学年第二学期；

7.9.2 教学目标 掌握多组分精馏的基本概念 掌握多组分精馏的特点 理解期中考试重要知识点

7.9.3 教学内容 期中考试讲解 多组分精馏过程讲解

7.9.4 教学过程

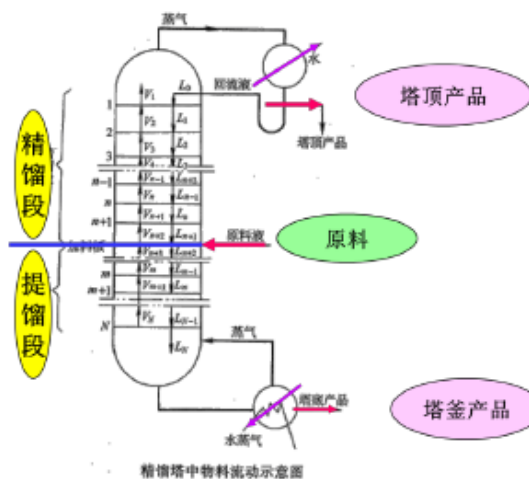
§ 3-1 多组分精馏 Multicomponent distillation

➤ 精馏

利用混合物中各组分的**相对挥发度**不同，采用液体**多次部分汽化**，蒸汽**多次部分冷凝**等汽液间的传质过程，使汽液相间浓度发生变化，并结合应用**回流手段**，使各组分分离。

✓ 典型单元操作，物理分离过程

精馏操作流程



3.1.1 多组分精馏过程分析

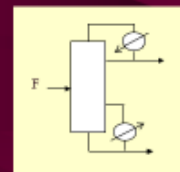
一、可调设计变量分析

$$N_s = \text{串级数}(2) + \text{分配器}(1) + \text{侧线采出}(0) + \text{传热单元}(2)$$

$$= 5$$

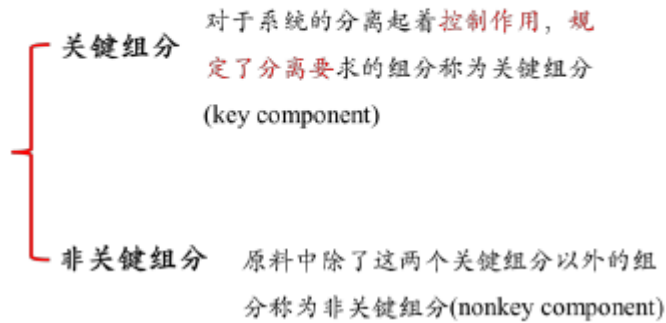
对于设计型计算，需指定的可调变量为：

- 回流比(1)
- 全凝器出口温度(1)
- 再沸器出口温度(1)
- 分离要求(2)

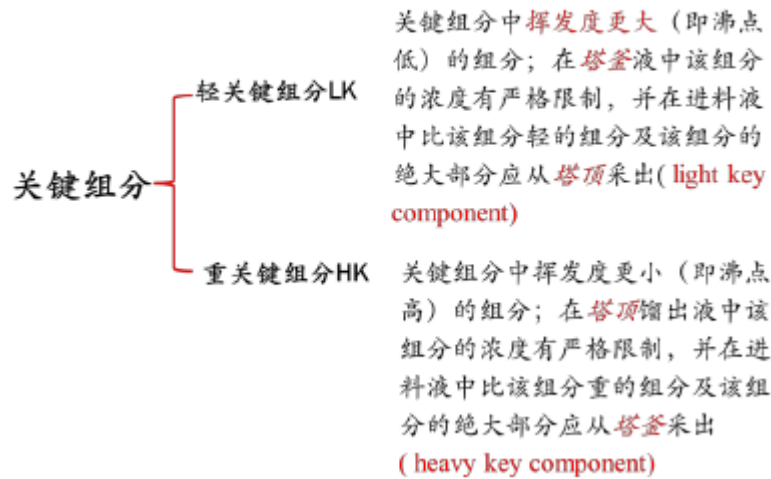


二、组分分析

✓ 关键组分与非关键组份



✓ 轻关键组分与重关键组分



✓ 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。

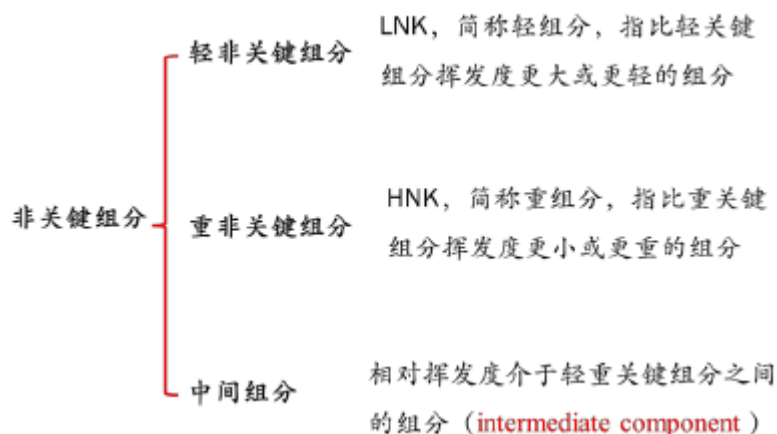
LK在**塔顶**回收率：

$$\varphi_{LK,D} = \frac{D g_{LK,D}}{F g_{LK}} \times 100\%$$

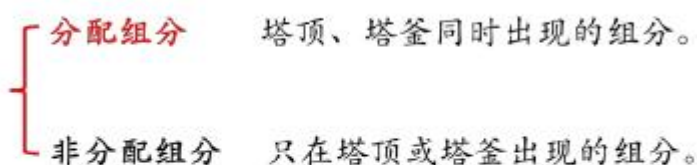
HK在**塔釜**回收率：

$$\varphi_{HK,W} = \frac{W g_{HK,W}}{F g_{HK}} \times 100\%$$

✓ 轻非关键组分和重非关键组分

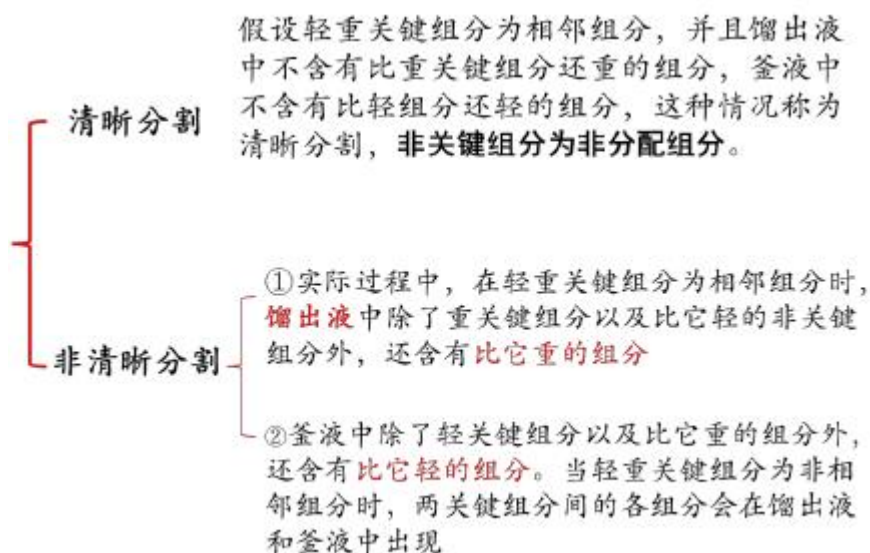


✓分配组分与非分配组分



✓ 关键组分和中间组分一定是关键组分

✓清晰分割与非清晰分割



➤ 多组分精馏过程的复杂性

- ✓ 复杂性相对于二组分精馏而言，体现在求解方法、温度、流率和组分的分布上
- ✓ 主要考虑是沿塔高方向的温度、流率和组分分布，认为径向是不存在温度、流率和组分分布

7.9.5 教学方法 理论推导+例题讲解

7.9.6 作业安排 描述多组分精馏与二组分精馏的特点

7.10 教学单元十（多组分精馏简捷计算）

7.10.1 教学日期 课程安排：2021-2022 学年第二学期；

7.10.2 教学目标 掌握多组分精馏简捷计算的基本原理 掌握最小回流比、最少理论板数的计算 掌握简捷计算的基本流程

7.10.3 教学内容 FUG 法进行多组分精馏的简捷计算

7.10.4 教学过程

➤ 最小回流比 R_m

$R \rightarrow R_m$ 时， $N \rightarrow \infty$ 塔中出现恒浓区

恒浓区——精馏塔中全部浓度不变的区域下

二元精馏：最小回流比下，进料板上下出现恒浓区或

➤ 最小回流比 R_m 计算

采用Underwood（恩德伍德）法计算：

- 该法假设：
- 1.塔内汽液相流率为恒摩尔流
 - 2.各组分相对挥发度是常数

Underwood公式

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

$$\sum \frac{\alpha_i x_{i,F}}{\alpha_i - \theta} = 1 - q$$

➤ 最小回流比 R_m 计算

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

$$\sum \frac{\alpha_i x_{i,F}}{\alpha_i - \theta} = 1 - q$$

得到的 R_m 偏小

α_i —组分 i 的挥发度;

q —进料热状态参数(即进料液相分率);

$x_{i,F}$ —进料中组分 i 的摩尔分数;

$(x_{i,D})_m$ —最小回流比下馏出液中组分 i 的摩尔分数;

θ —方程(b)的根 取 $\alpha_{LK} > \theta > \alpha_{HK}$ 的根

以全回流下的 x_D 代替

误差较小

➤ 操作回流比 R 计算

$$R_{op} = 1.05 \sim 1.1 R_m$$

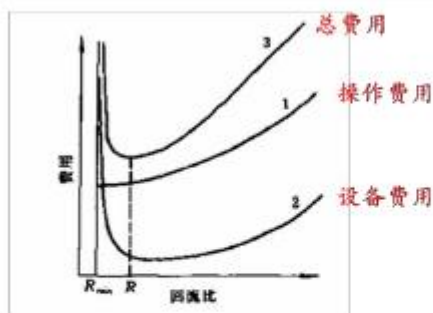
➤ $R < R_{op}$

Total expenses **sharply increase** with the decrease of R

➤ $R > R_{op}$

Total expenses **slowly increase** with the increase of R

In practice, $R = 1.2 \sim 1.5 R_m$



➤ 最少理论板数

全回流对应最少理论板数, 但全回流下无产品采出, 因此正常生产中不会采用全回流。

$$R \rightarrow \infty \text{ 时, } N \rightarrow N_m$$

- 1、开车时, 先全回流, 待操作稳定后出料。
- 2、在实验室设备中, 研究传质影响因素。
- 3、工程设计中, 可以作为精馏操作计算的初值来进行计算。

采用Fenske方程求最少理论板数：

$$N_m = \frac{\lg \left[\left(\frac{x_A}{x_B} \right)_D / \left(\frac{x_A}{x_B} \right)_W \right]}{\lg \alpha_{AB}}$$

$$\alpha_{AB} = (\alpha_1 \alpha_2 \cdots \alpha_{N-1} \alpha_N)^{1/N}$$

几点说明：

- ✓ 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。

Fenske方程的其他形式：

$$N_m = \frac{\lg \left[\left(\frac{d}{w} \right)_{LK} \left(\frac{w}{d} \right)_{HK} \right]}{\lg \alpha_{LK-HK}} \quad \text{d/w 称为分配比}$$

流率表示

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

回收率表示

采用Fenske方程求最少理论板数：

几点说明：

- ✓ 对多组分精馏，用一对关键组分来求 N_m ，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
- ✓ N_m 只与分离要求有关，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
- ✓ 随分离要求的提高，组分分配比增加， N_m 增加

采用Fenske方程求最少理论板数：

几点说明：

✓ 可以求进料板位置，精馏段、提馏段理论板数

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

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

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

$$(N_R)_m + (N_S)_m = N_m$$

清晰分割的物料衡算

清晰分割，轻组分在塔釜不出现，即：

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

同理，重组分在馏出液不出现，即：

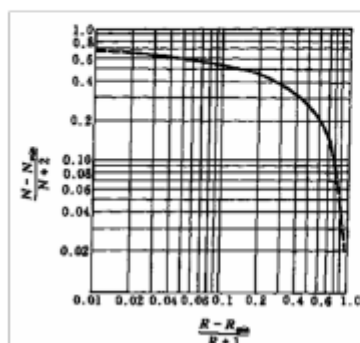
$$d_i = 0, w_i = f_i, \quad HK+1 \leq i \leq c \quad (3-4)$$

清晰分割假定比较适用的情况：

○ 轻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。

实际理论板数

1. Gilliland图（最常用）



$$Y = 1 - \exp \left[\frac{(1 + 54.4X)(X - 1)}{(11 + 117.2X)\sqrt{X}} \right]$$

$$X = \frac{R - R_m}{R + 1} \quad Y = \frac{N - N_m}{N + 1}$$

(3-48)

Eduljee的回归方程式

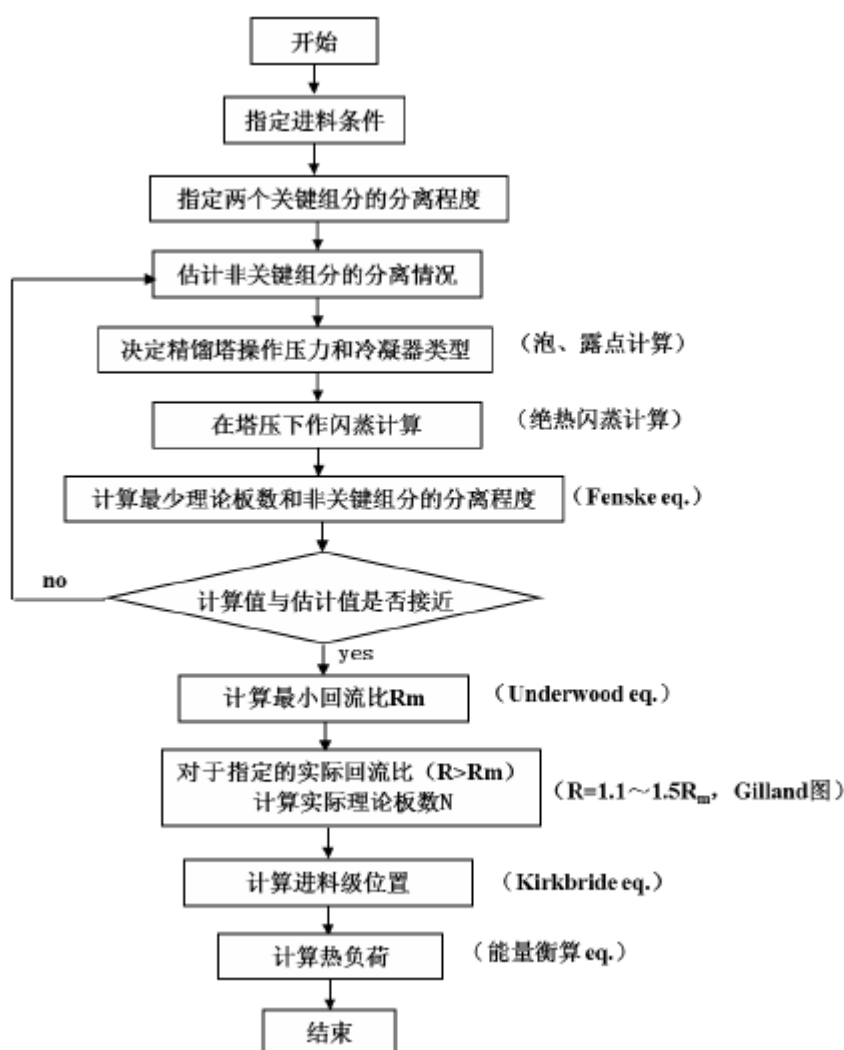
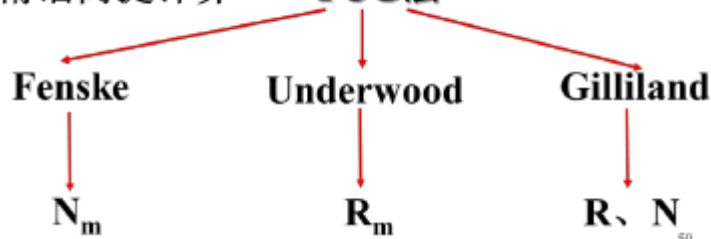
$$Y = 0.75 - 0.75X^{0.5668} \quad (3-49)$$

总结

多组分精馏的简捷计算方法

- 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。

精馏简捷计算——FUG法



多组分精馏的简捷计算方法

7.10.5 教学方法 理论推导+例题讲解

7.10.6 作业安排 简述 FUG 法流程

7.11 教学单元十一（共沸精馏+本章小结）

7.11.1 教学日期 课程安排：2021-2022 学年第二学期；

7.11.2 教学目标 掌握特殊精馏中的共沸精馏基本特点

7.11.3 教学内容 共沸精馏的原理与共沸组成计算

7.11.4 教学过程

特殊精馏

➤定义：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的不同作用，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**。

恒沸精馏

➤ 定义

恒沸精馏（共沸精馏）是在原溶液中添加**恒沸剂S**使其与溶液中至少一个组分形成**最低（最高）恒沸物**，以增大原组分间相对挥发度差的非理想溶液的多元精馏。

形成的恒沸物**从塔顶（塔釜）采出**，塔釜（塔顶）引出较纯产品，最后将恒沸剂与组分分离

恒沸精馏

➤ 基本概念

✓ 恒沸物（共沸物）：

定压下，加热溶液使之蒸发，从始到终 x 、 y 、 T 不变的溶液，是溶液与理想溶液出现偏差的结构

当物系不仅与拉乌尔定律存在偏差，且两个组分的沸点接近，而化学结构不相似时，则易形成共沸物。实践证明，沸点相差大于30K的两个组分很难形成共沸物。

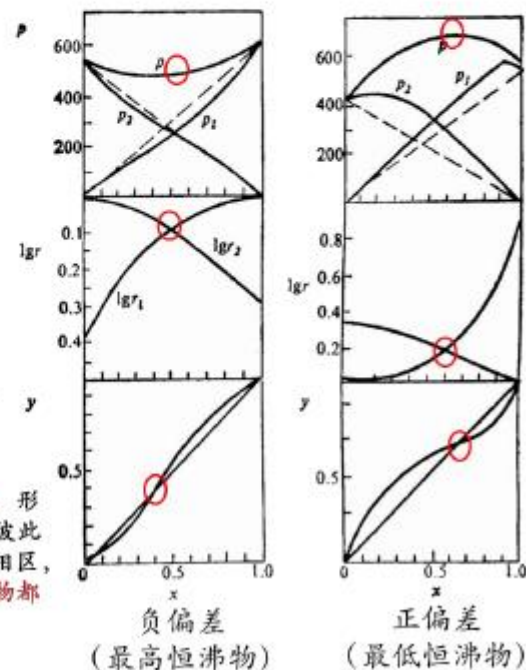
共沸物的特点：

- 1) 当 P 不变时，共沸组成（共沸点）一定， $T_b=T_d$ ，汽化过程中温度 T 不变；
- 2) 在泡点线和露点线交点，汽化时组成不变， $\alpha=1$ ；
- 3) 共沸物体系特殊在共沸点，用普通精馏的方法不能通过共沸点，但在共沸点两侧仍有分离作用。

恒沸物

- 均相恒沸物
- 非均相恒沸物

正偏差很大，导致互溶性降低，形成最低共沸物的组分在液相中彼此不能完全互溶，液相中出现两相区，为非均相共沸物。非均相共沸物都具有最低共沸点。



共沸物组成计算

二元均相恒沸物

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{\gamma_i P_i^0 \phi_i^L}{\phi_i^V P} \exp \left[\frac{v_i^L (P - P_i^0)}{RT} \right]$$

系统压力不高时，汽相视为理想气体：

$$\alpha_{12} = \frac{K_1}{K_2} = \frac{\gamma_1 P_1^0 / P}{\gamma_2 P_2^0 / P} = \frac{\gamma_1 P_1^0}{\gamma_2 P_2^0}$$

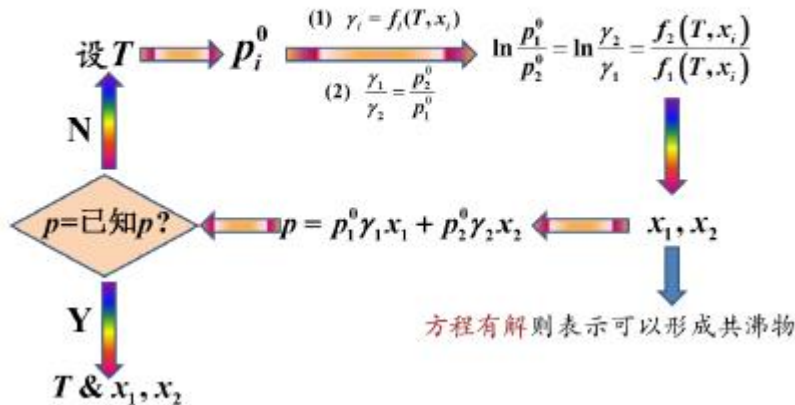
$$K_i = \frac{\gamma_i P_i^0}{P} = f(T, P, x_i)$$

共沸点处： $\alpha_{12} = 1$

$$\begin{cases} \frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{P_2^0}{P_1^0} & \text{计算方程} \\ p = p_1 + p_2 = P_1^0 \gamma_1 x_1 + P_2^0 \gamma_2 x_2 & \text{校核方程} \end{cases}$$

组成计算流程

已知 $p(T) \rightarrow$ 求 $T(p)$ & x_i



共沸剂的选择

共沸剂的选择

(1) 显著影响关键组分的汽液平衡关系；

最好是形成一个最低共沸物，
从而有较低的操作温度

(2) 共沸剂容易分离和回收；

回收有价值的共沸物组分，
回收共沸剂，
环保要求

(3) 用量少，汽化潜热低；

共沸剂的沸点一般比原料沸点
低10-40℃，便于分离

(4) 与进料组分互溶，不生成两相，不与进料

中组分起化学反应；

共沸剂与待分离组分应完全互溶，
避免液相分层而破坏塔的正常操作。

(5) 无腐蚀、无毒；

(6) 价廉易得。

恒沸精馏流程

恒沸精馏的流程包括**共沸精馏塔**和**共沸剂回收系统**两部分

➤ 馏出液为非均相共沸物

✓ 二元非均相恒沸物的精馏

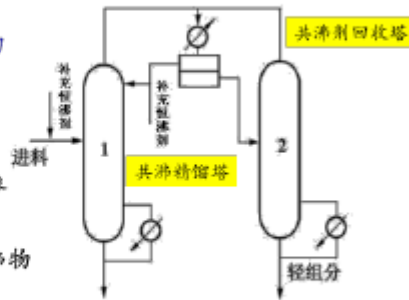
不加恒沸剂

利用温度降低后恒沸物出现相分离现象

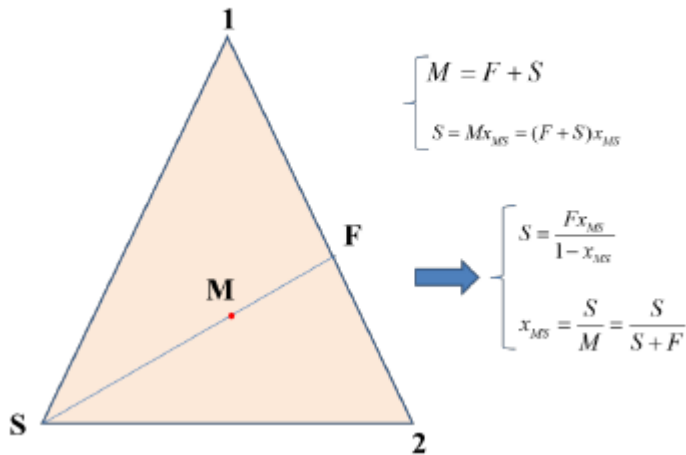
✓ 分离有恒沸剂的非均相恒沸物

➤ 馏出液为均相共沸物

➤ 馏出液为三元共沸物



a. 恒沸剂用量的确定



- 恒沸剂的加入量不是任意选取的，适宜的恒沸剂用量应该是**恒沸剂不混入塔釜液**，同时被分离的恒沸组分完全和恒沸剂形成恒沸物从塔顶蒸出。
- 因此，**塔釜液W几乎是纯组分2**，馏出液**D**的组成几乎**等于或接近于恒沸组成**。

- 恒沸剂的加入量不是任意选取的，适宜的

恒沸剂用量应该是**恒沸剂不混入塔釜液**，

同时被分离的恒沸组分完全和恒沸剂形成

恒沸物从塔顶蒸出。

- 因此，**塔釜液W几乎是纯组分2**，馏出液**D**

的组成几乎**等于或接近于**恒沸组成。

本章小结

➤ 多组分精馏

✓ **基本概念**（关键组分、非关键组分、分配组分、非分配组分、清晰分割、回收率

✓ 温度、流率和组成的分布特点

✓ 简捷计算（FUG法）（**重点**）**例题3-7** ★

✓ 清晰分割的物料衡算

➤ 共沸精馏

✓ **基本概念**（共沸物、共沸物分类、共沸物特点、共沸物判断）

✓ 共沸物组成计算（**二元均相共沸物**、二元非均相共沸物、三元系等）

✓ 共沸物的选择与回收

✓ 共沸精馏过程及计算（**适宜共沸剂加量的计算**）

7.11.5 教学方法 理论推导+例题讲解

7.11.6 作业安排 P 156 12 7.12 教学单元十二（多组分吸收与解吸）

7.12.1 教学日期 课程安排：2021-2022 学年第二学期；

7.12.2 教学目标 了解多组分吸收的特点

7.12.3 教学内容 多组分特点

7.12.4 教学过程

吸收和解吸过程

➤ 基本概念

✓ 吸收

- 利用液体处理气体混合物，根据气体混合物中各组分在液体中**溶解度的不同**，气体混合物中一种或多种组分从气相转移到液相达到分离目的传质过程
- 分离的介质是某一种液体溶剂称之为**吸收剂**，被吸收的气体混合物称为**吸收质**；吸收了吸收质的液体溶剂称为**吸收液**，被吸收剂处理后的气体称为**尾气**。

✓ 解吸

- 吸收过程的逆过程，溶质从液相中分离出来转移到气相的过程

吸收和解吸过程

➤ 多组分吸收和解吸的工业应用

- ✓ 制取产品和中间体: 盐酸、硝酸的制备
- ✓ 分离气体混合物: 天然气脱硫
- ✓ 从气体中回收有用的组分: 焦炉煤气回收芳烃
- ✓ 气体净化和生化工程: 烟气脱硫

吸收和解吸过程

➤ 吸收过程的分类

(1) 按组分的相对溶解度的大小

①单组分吸收

只有一个组分在吸收剂中具有显著的溶解度，其它组分的溶解度均小到可以忽略不计

②多组分吸收

气体混合物中具有显著溶解度的组分不止一个；吸收目的产物的同时也吸收了其他组分

(2) 吸收过程有无化学反应

①物理吸收 ②化学吸收(可逆吸收、不可逆吸收)

(3) 吸收过程温度变化是否显著

①等温吸收 ②非等温吸收——吸收过程温度变化明显

(4)按吸收量的多少

①贫气吸收——吸收量不大、恒摩尔流、恒温操作

②富气吸收——吸收量大的情况

吸收和解吸过程

➤ 吸收过程的流程

吸收流程可分为两类：

(I) 吸收质不需解吸，吸收剂不需再生和循环；

多用于获得产品、中间产物过程

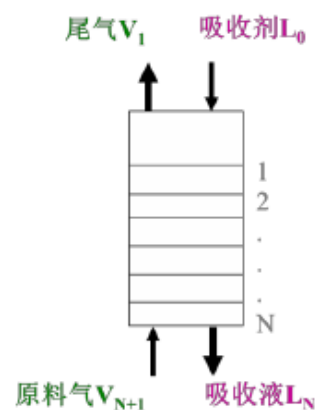
(II) 吸收质需要解吸，吸收剂需要再生和循环。

多用于获得气体净化过程

吸收和解吸过程

➤ 吸收过程的流程

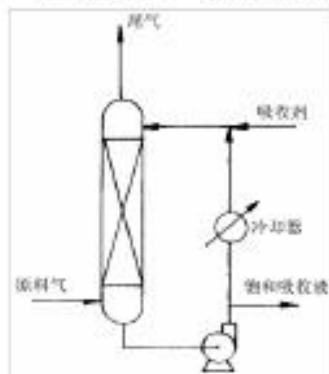
(I) 吸收质不需解吸，吸收剂不需再生；



吸收和解吸过程

➤ 吸收过程的流程

(I) 吸收质不需解吸，吸收剂不需再生；



适用于：

(1) **热效应显著**的吸收过程，部分吸收液再循环可**降低吸收塔内温度**，当平衡关系变化的幅度比操作关系**变化幅度大**时，吸收液的循环不但不减少反而可能提高传质平均推动力，有利于吸收操作。

带吸收剂再循环的吸收流程

吸收和解吸过程

➤ 吸收过程的流程

(II) 吸收质需要解吸，吸收剂需要再生和循环

解吸过程必要条件：溶液中溶质*i*组分的平衡分压**大于**与溶液接触的气相中*i*组分的分压。

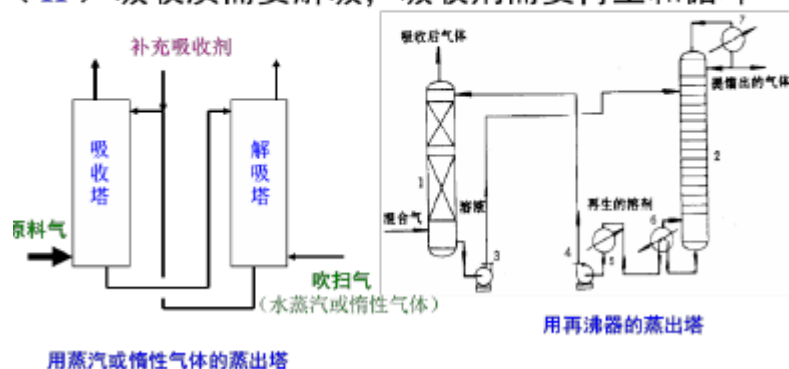
解吸方法：

1. 加热：➡ 提高溶质的平衡分压，减少溶质的溶解度
2. 减压闪蒸：➡ 降低气相中溶质的分压，提高推动力
3. 精馏解吸：➡ 采用精馏塔的方式使得溶质与吸收剂分离
4. 用解吸剂解吸 ➡ 常用解吸剂包括惰性气体、水蒸气、溶剂等

吸收和解吸过程

➤ 吸收过程的流程

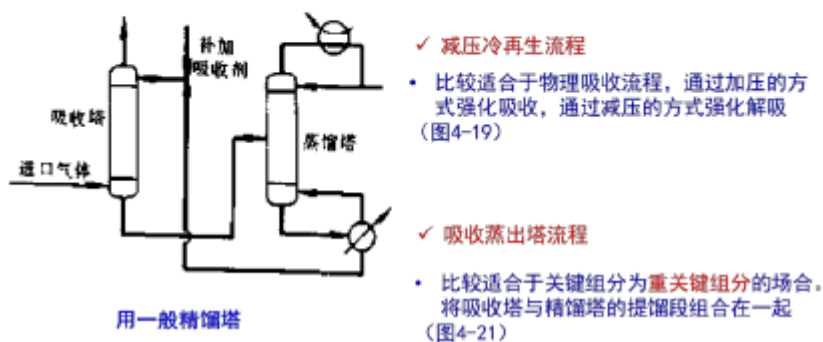
(II) 吸收质需要解吸，吸收剂需要再生和循环



吸收和解吸过程

➤ 吸收过程的流程

(II) 吸收质需要解吸，吸收剂需要再生和循环



7.12.5 教学方法 理论推导+流程推演

7.12.6 作业安排 无

7.13 教学单元十三 (多组分吸收与解吸)

7.13.1 教学日期 课程安排: 2021-2022 学年第二学期;

7.13.2 教学目标 掌握多组分吸收的组分、温度、流量特点

7.13.3 教学内容 介绍多组分吸收的组分、温度、流率特点

7.13.4 教学过程

多组分吸收和解吸过程分析

➤ 物理吸收过程的相平衡

- ✓ 物理吸收的热力学基础是气体混合物中的各个组分在某液体吸收剂中的溶解度不同，根据**溶解度差异**实现分离。吸收推动力是气相中溶质的实际分压与溶液中溶质的平衡蒸汽压力之差。

吸收过程气液平衡关系：

物理吸收：相平衡——亨利定律

化学吸收：相平衡——亨利定律；

化学平衡——化学平衡关系式

多组分吸收和解吸过程分析

➤ 物理吸收过程的相平衡

1) 低压下 (low pressure)

气体在液体中的溶解度用Henry定律表示：

$$x_2 = p_2 / H \quad \text{或} \quad p_2 = Hx_2$$

——溶质在液相中的溶解度（摩尔分数）

——溶质在气相中的分压

——Henry系数，由溶质和溶剂的性质及温度决定。

* Henry定律适用范围：溶质气体的分压为常压；溶质溶于溶剂时不发生解离、缔合或化学反应；稀溶液。

多组分吸收和解吸过程分析

➤ 设计变量和关键组分

固定设计变量：

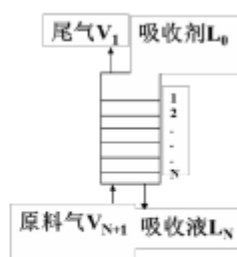
$$N_x = (C + 2) + (C' + 2) + N$$

原料气 吸收剂 压力等级

可调设计变量：

$$N_a = 0 + 0 + 0 + 1 = 1$$

分配器 侧采 传热单元 串级



► 设计变量和关键组分

固定设计变量:

原料气、吸收剂的温度、压力、组成、流率及操作压力。

可调设计变量:

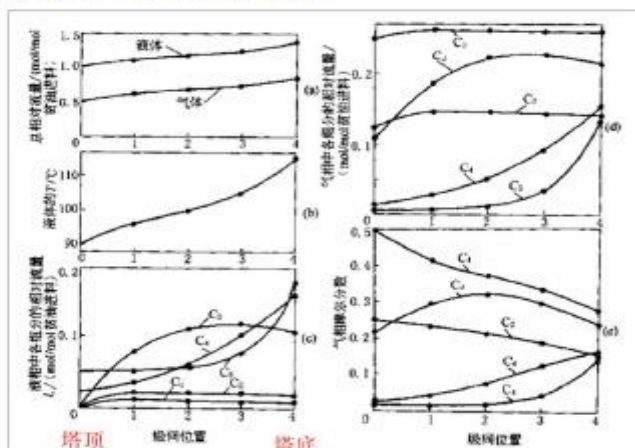
理论板数—分离程度（操作型）

分离程度—理论板数（设计型）

吸收过程的可调设计变量数为1，因此只能规定一个关键组分的分离程度，其余各组分由于是在同一塔内进行吸收，塔板数相同，液气比相同，其吸收量由各自的相平衡关系决定。

多组分吸收和解吸过程分析

► 吸收塔内组成分布



多组分吸收和解吸过程分析

► 吸收塔内组成分布

从物系挥发度看

C_1 、 C_2 最大，进塔几乎不被吸收，塔顶稍有变化。

C_5 、 C_4 最小，进塔立即被吸收，上部几乎不变。

C_3 适中，上段吸收快，在塔某板出现最大值。

多组分吸收过程组分浓度分布特点:

- 1、难容组分，即轻组分（LNK），通常只在靠近塔顶的几级被吸收而在其余级变化很小
- 2、易容组分，即重组分（HNK），主要在塔底附近若干级被吸收；
3. 关键组分在全塔范围均被吸收。

多组分吸收和解吸过程分析

► 吸收解吸过程热效应

吸收放热使液体温度升高，相平衡常数 ($K=f(T, P, x)$) 增大，过程的推动力减小；
吸收放热使气体和液体产生温差，在相间传质的同时发生相间传热。

- 由于吸收过程热效应的影响，吸收塔内温度分布变得复杂。

Summary

多组分吸收的特点：

- 至少有两股进料
- 只能规定一个组分的吸收率
- 不能按恒摩尔流处理
- 温度分布复杂

7.13.5 教学方法 理论推导+流程推演

7.13.6 作业安排 简述多组分吸收的特点

7.14 教学单元十四（平均吸收因子法）

7.14.1 教学日期 课程安排：2021-2022 学年第二学期；第 7 周星期三，1-2 节

7.14.2 教学目标 掌握平均吸收因子法的一般流程

7.14.3 教学内容 课程回顾+平均吸收因子法

7.14.4 教学过程

多组分吸收和解吸过程简捷计算

➤ 吸收过程工艺计算的基本概念

✓ 吸收、解吸作用发生的条件

○ 吸收：溶质由气相溶于液相

$$p_i > p_i^* \quad y_i > y_i^*$$

○ 解吸：溶质由液相转入气相

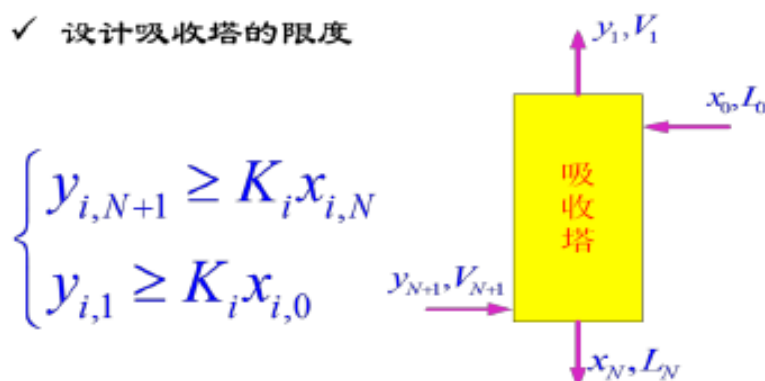
$$p_i < p_i^* \quad y_i < y_i^*$$

相平衡时： $p_i = p_i^* = E_i x_i$; $y_i = y_i^* = K_i x_i$

多组分吸收和解吸过程简捷计算

➤ 吸收过程工艺计算的基本概念

✓ 设计吸收塔的限制



多组分吸收和解吸过程简捷计算

➤ 吸收过程工艺计算的基本概念

✓ 吸收过程的平衡级度

离开n板的气体混合物与离开n板的吸收液达到相平衡，即 $y_i = K_i x_i$

✓ 计算内容

可调设计变量为1

操作型计算：指定为理论级数

设计型计算：指定为关键组分的吸收率

已知： $V_{N+1}, y_{N+1}, T_{N+1}, x_0, T_0, p$

和关键组分的分离要求

求： $V_1, y_1, L_N, x_N, L_0, N$

多组分吸收和解吸过程简捷计算

➤ 吸收因子法

i 组分的吸收因子

$$A_i = \frac{L}{VK_i}$$

(1)吸收因子因组分而异

(2) A 值的大小可以说明在某一具体的吸收塔中过程进行的难易程度

分离要求一定： $A \uparrow \rightarrow N \downarrow$ ；

N 一定： $A \uparrow \rightarrow$ 吸收程度 \uparrow

(3)吸收因子与操作条件有关

$$T \downarrow \rightarrow K_i \downarrow \rightarrow A_i \uparrow \quad p \uparrow \rightarrow K_i \downarrow \rightarrow A_i \uparrow$$

(4)解吸过程 $S = \frac{1}{A} = KV/L$

多组分吸收和解吸过程简捷计算

➤ 吸收因子法的基本方程

1、相平衡关系方程

$$y_{i,n} = K_{i,n} \times x_{i,n} \quad \text{或} \quad y_n = K_n \times x_n$$

$$\frac{v_n}{V_n} = K_n \frac{l_n}{L_n} \quad \therefore l_n = \frac{L_n}{V_n K_n} v_n = A_n v_n$$

$$l = Av$$

同理，解吸过程： $v = S \times l$

多组分吸收和解吸过程简捷计算

➤ 吸收因子法的基本方程

2、物料平衡方程

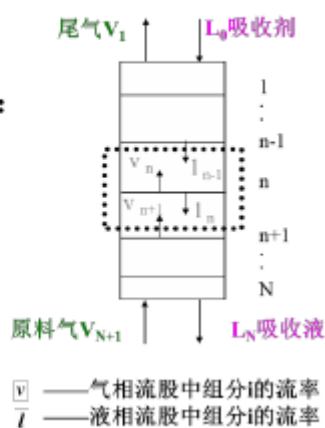
对*i*组分作全塔物料平衡：

$$V_{N+1}y_{N+1} + L_0x_0 = V_1y_1 + L_Nx_N$$

$$v_{N+1} + l_0 = v_1 + l_N$$

$$v_{N+1} + l_0 = v_1 + v_N A_N$$

$$\therefore v_N = \frac{v_{N+1} + l_0 - v_1}{A_N}$$



多组分吸收和解吸过程简捷计算

➤ 吸收因子法的基本方程

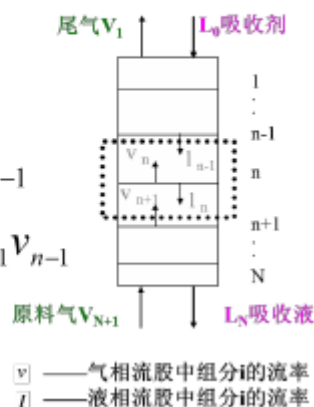
2、物料平衡方程

对*n*级*i*组分作物料衡算：

$$v_n + l_n = v_{n+1} + l_{n-1}$$

$$v_n + A_n v_n = v_{n+1} + A_{n-1} v_{n-1}$$

$$\therefore v_n = \frac{v_{n+1} + A_{n-1} v_{n-1}}{A_n + 1}$$



多组分吸收和解吸过程简捷计算

➤ 吸收因子法的基本方程

2、物料平衡方程

$$n=1 \quad v_1 = \frac{v_2 + A_1 v_0}{A_1 + 1} = \frac{v_2 + I_0}{A_1 + 1}$$

$$\therefore v_n = \frac{v_{n+1} + A_{n-1} v_{n-1}}{A_n + 1}$$

$$n=2 \quad v_2 = \frac{v_3 + A_2 v_1}{A_2 + 1} = \frac{v_3 + A_2 \frac{v_2 + I_0}{A_1 + 1}}{A_2 + 1} \quad \therefore v_2 = \frac{(A_1 + 1)v_3 + A_1 I_0}{A_1 A_2 + A_2 + 1}$$

$$n=3 \quad v_3 = \frac{v_4 + A_3 v_2}{A_3 + 1} = \frac{v_4 + A_3 \frac{(A_1 + 1)v_3 + A_1 I_0}{A_1 A_2 + A_2 + 1}}{A_3 + 1}$$

$$\therefore v_3 = \frac{(A_1 A_2 + A_2 + 1)v_4 + A_1 A_2 I_0}{A_1 A_2 A_3 + A_2 A_3 + A_3 + 1}$$

多组分吸收和解吸过程简捷计算

➤ 吸收因子法的基本方程

2、物料平衡方程

$$\therefore v_n = \frac{v_{n+1} + A_{n-1} v_{n-1}}{A_n + 1}$$

$$n = N$$

$$v_N = \frac{(A_1 A_2 \cdots A_{N-1} + A_2 \cdots A_{N-1} + \cdots + A_{N-1} + 1)v_{N+1} + A_1 A_2 \cdots A_{N-1} I_0}{A_1 \cdots A_N + A_2 \cdots A_N + \cdots + A_N + 1}$$

$$v_N = \frac{v_{N+1} + I_0 - v_1}{A_N}$$

$$\frac{v_{N+1} - v_1}{v_{N+1}} = \frac{A_1 \cdots A_N + A_2 \cdots A_N + \cdots + A_N}{A_1 \cdots A_N + A_2 \cdots A_N + \cdots + A_N + 1} \cdot \frac{I_0}{v_{N+1}} \left(\frac{A_2 \cdots A_N + A_3 \cdots A_N + \cdots + A_N + 1}{A_1 \cdots A_N + A_2 \cdots A_N + \cdots + A_N + 1} \right)$$

吸收因子法的基本方程，哈顿—富兰格林(Horton-Franklin) 方程

多组分吸收和解吸过程简捷计算

➤ 吸收因子法的基本方程

3、Horton-Franklin方程讨论

$$\frac{v_{N+1} - v_1}{v_{N+1}} = \frac{A_1 \cdots A_N + A_2 \cdots A_N + \cdots + A_N}{A_1 \cdots A_N + A_2 \cdots A_N + \cdots + A_N + 1} \cdot \frac{I_0}{v_{N+1}} \left(\frac{A_2 \cdots A_N + A_3 \cdots A_N + \cdots + A_N + 1}{A_1 \cdots A_N + A_2 \cdots A_N + \cdots + A_N + 1} \right)$$

1. 计算吸收率的普遍式；

2. 式中K= f (T、P、组成)，而组成不知。

——计算难

3. 采用如下简化形式作简捷计算。

多组分吸收和解吸过程简捷计算

➤ 平均吸收因子法

假设 $A_1=A_2=A_3=\dots=A_N$ ，Horton-Franklin方程变为：

$$\frac{v_{N+1}-v_1}{v_{N+1}} = \frac{A^N + A^{N-1} + \dots + A}{A^N + A^{N-1} + \dots + A + 1} - \frac{l_0}{Av_{N+1}} \left(\frac{A^N + A^{N-1} + \dots + A}{A^N + A^{N-1} + \dots + A + 1} \right)$$

进一步推导得：

$$\varphi_i = \frac{v_{N+1}-v_1}{v_{N+1}-v_0} = \frac{A^{N+1}-A}{A^{N+1}-1} \quad (4-22)$$

相对吸收率

——克雷姆塞尔方程

多组分吸收和解吸过程简捷计算

➤ 平均吸收因子法

$$\varphi_i = \frac{v_{N+1}-v_1}{v_{N+1}-v_0} = \frac{A^{N+1}-A}{A^{N+1}-1}$$

$$N = \frac{\lg \left(\frac{A-\varphi}{1-\varphi} \right)}{\lg A} - 1$$

分子($v_{N+1}-v_1$)表示气体中某组分通过吸收塔后被吸收的量；

分母($v_{N+1}-v_0$)表示根据平衡关系计算的最大可能吸收量。

当吸收剂中不含溶质时，相对吸收率等于吸收率。

表达了相对吸收率、平均吸收因子和理论板数之间的关系。

讨 论

1. 公式几点假设：

- ① 溶液是理想溶液或接近理想溶液
- ② 全塔温度变化不大，可近似取 K 平均值，视为常数；
- ③ 气相、液相的流量变化不大，均可取平均值，视为常数。

2. 最大吸收量：出口达到平衡

当吸收剂本身不挥发，且不含溶质时

$$l_0 = 0, v_0 = \frac{l_0}{A} = 0 \Rightarrow \varphi_i = \frac{v_{N+1}-v_1}{v_{N+1}-v_0} = \frac{v_{N+1}-v_1}{v_{N+1}} = \alpha_i$$

3. 当 A 一定时, 即 $\frac{L}{V}$ 一定时, 则 $N \uparrow \Rightarrow \alpha \uparrow$
但增加的越来越慢, 特别是 N 超过10级以后

- 理论板数增加, 各组分吸收率增加。
- 但在不同板数范围, 吸收率增加的幅度不同。
- 当板数较少时, 增加一块板对提高吸收率的影响比较明显, 而当理论板为十多块时, 再增加板数, 吸收率的增加幅度很小。

4. 吸收过程一般给出**关键组分**的吸收率 $\varphi_{\text{关}}$
所以可以根据 $A_{\text{关}} \rightarrow N \rightarrow \varphi_{\text{非关}}$

$$N = \frac{\lg\left(\frac{A-\varphi}{1-\varphi}\right)}{\lg A} - 1 \Rightarrow A_{\text{关}} = \frac{L}{VK_{\text{关}}} \Rightarrow \frac{L}{V} \Rightarrow \left(\frac{L}{V}\right)_{\min}$$

已知关键组分的吸收率, 再求出关键组分的吸收因子,
则可由上式直接计算理论板数。

$\left(\frac{L}{V}\right)_{\min}$ 在无穷多塔级的条件下, 达到规定分离要求时,
1kmol气体进料所需吸收剂的物质的量 (kmol)

$\left(\frac{L}{V}\right)_{\min}$ 当 $N \rightarrow \infty$ 时:

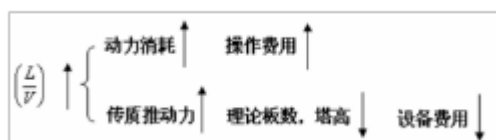
$$\begin{cases} \lim_{N \rightarrow \infty} \varphi_i = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{A^{N+1} - A}{A^{N+1} - 1} = \frac{-A}{-1} = A & (0 \leq A \leq 1) \\ \lim_{N \rightarrow \infty} \varphi_i = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{A^{N+1} - A}{A^{N+1} - 1} = 1 & (A > 1) \end{cases}$$

当 $N = \infty$ $A_{\min} = \alpha = \left(\frac{L}{V}\right)_{\min} \frac{1}{K}$

$$\varphi \leq 1, \quad \left(\frac{L}{V}\right)_{\min} = K_{\text{关}} A_{\text{关}} = K_{\text{关}} \varphi_{\text{关}}$$

▮ 液气比对吸收操作的影响与回流比对精馏操作的影响相似。

增大液气比将使各**组分吸收因子增加**。但随着液气比的增大,
相应要增大吸收剂的循环量和回收吸收剂的费用。



■ 一般取液气比为最小液气比的1.2~2.0倍。

$$\text{一般取 } \left(\frac{L}{V}\right) = (1.2 \sim 2) \left(\frac{L}{V}\right)_{\min}$$

34

计算步骤

已知: $V_{N+1}, y_{N+1}, p, T, x_0, \varphi_{\text{关}}$

求: $N, V_1, y_{1,1}, L_0, L_N, x_{i,N}$

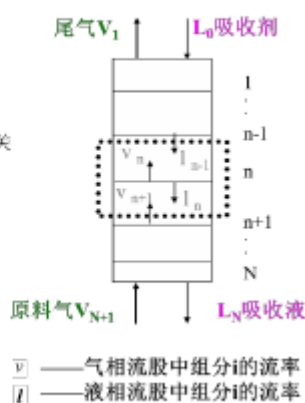
(1) 确定关键组分的吸收率 $\varphi_{\text{关}}$

(2) 由 $\varphi_{\text{关}}$ 求 N

1) 由 $\varphi_{\text{关}}$ 确定 $\left(\frac{L}{V}\right)_{\min}$

$$N = \infty \quad A_{\text{关}, \min} = \left(\frac{L}{V}\right)_{\min} \left(\frac{1}{K_{\text{关}}}\right) = \varphi_{\text{关}}$$

$$\therefore \left(\frac{L}{V}\right)_{\min} = \varphi_{\text{关}} \cdot K_{\text{关}}$$



计算步骤

$$2) \quad \frac{L}{V} = (1.2 \sim 2) \left(\frac{L}{V}\right)_{\min} \quad A_{\text{关}} = \frac{L}{VK_{\text{关}}}$$

3) 由 $A_{\text{关}}, \varphi_{\text{关}}$ 查图或用公式计算 N

$$N = \frac{\lg \frac{\varphi - A}{\varphi - 1}}{\lg A} - 1$$

(3) 其它组分吸收率的确定

$$A_i = \frac{A_{\text{关}} K_{\text{关}}}{K_i} = \frac{L}{VK_i} \quad \varphi_i = \frac{A_i^{N+1} - A_i}{A_i^{N+1} - 1}$$

计算步骤

(4)求尾气的组成及量

$$\text{当 } l_{0,i} = 0 \text{ 时, } \varphi_i = \alpha_i = \frac{v_{i,N+1} - v_{i,1}}{v_{i,N+1}}$$

$$v_{i,1} = v_{i,N+1} - \alpha_i v_{i,N+1} = (1 - \alpha_i) v_{i,N+1}$$

$$V_1 = \sum v_{i,1} \quad y_{i,1} = \frac{v_{i,1}}{V_1}$$

计算步骤

(5)吸收液的量及组成以及应加入的吸收剂量

$$L_N = L_0 + (V_{N+1} - V_1) \quad \text{A}$$

$$x_N = \frac{v_{N+1} - v_1 + l_0}{L_N}$$

$$V_{\text{均}} = \frac{1}{2}(V_{N+1} + V_1) \quad L_{\text{均}} = \frac{1}{2}(L_0 + L_N) = \left(\frac{L}{V}\right)_{\text{均}} V_{\text{均}} \quad \text{B}$$

$$\left(\frac{L}{V}\right)_{\text{均}} = \frac{(L/V)_N - (L/V)_1}{\ln \frac{(L/V)_N}{(L/V)_1}}$$

求解思路:

$$V_{\text{均}} \rightarrow L_{\text{均}} \xrightarrow{A \text{ 代 B 联立}} L_0 \xrightarrow{A} L_N \rightarrow x_N$$

7.14.5 教学方法 理论推导+流程推演+例题讲解

7.14.6 作业安排

7.15 教学单元十五（三对角矩阵法）

7.15.1 教学日期 课程安排：2021-2022 学年第二学期；

7.15.2 教学目标 掌握严格计算的物理模型和数学模型 了解严格计算的方法

7.15.3 教学内容 物理模型和数学模型介绍 严格计算方法的介绍

7.15.4 教学过程

严格计算的必要性

1. 简捷算法中引入的假设“恒摩尔流和相对挥发度为常数”在高压及塔顶、塔釜温差很大的情况下，**偏差太大**。
2. 简捷计算不能给出各塔板上的**浓度、温度**等信息，也难以处理具有多股进料，多股侧采及有侧线换热等复杂分离过程。
3. 多组分精馏、特殊精馏、多组分吸收等过程以采用严格计算为宜。

- ❖ 简单情况
- ❖ 初步设计阶段

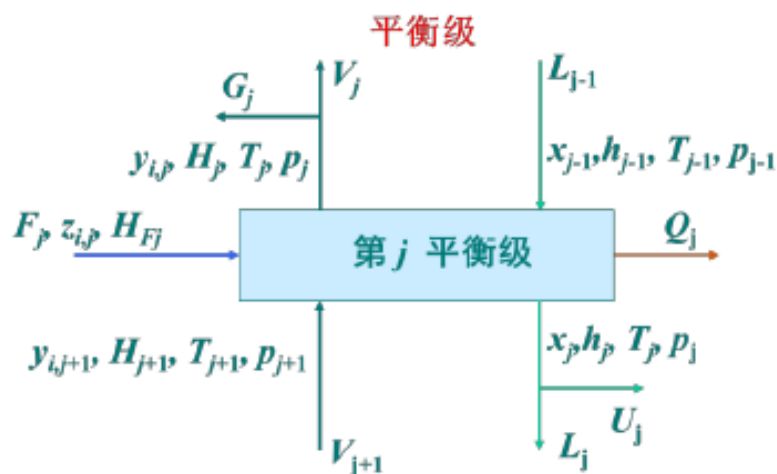
➤ 严格计算解决的问题

- ❖ 确定各板上的温度、压力、流率、气液相组成、传热速率等工艺设计所必需的参数
- ❖ 考察和改进设备的操作状况，优化工艺参数
- ❖ 适用于多组分（特殊）精馏，
多组分吸收（物理和化学），
多组分萃取（物理和化学）

❖ 严格计算的核心：

- (1) 建立描述多组分传质分离过程的物理模型：

联立求解物料衡算，热量衡算及相平衡计算



5.1.2 平衡级的理论模型

平衡级：

1. 每一分离级上的每一相流体都是完全混合的，其温度、压力和组成在分离级各处都一致，且与离开分离级的该相流体相同；
2. 离开分离级的两相流体之间成相平衡且无化学反应。
3. 忽略雾沫夹带

对每一级，如j级，共有 $(2c+3)$ 个方程

物料平衡方程，简称**M**方程 (c 个)

$$L_{j-1}x_{i,j-1} - (V_j + G_j)y_{i,j} - (L_j + U_j)x_{i,j} + V_{j+1}y_{i,j+1} = -F_jz_{i,j}$$

相平衡关系，简称**E**方程 (c 个)

$$y_{i,j} = K_{i,j}x_{i,j}$$

摩尔分数加和式，简称**S**方程 (2个)

$$\sum_{i=1}^c x_{i,j} = 1 \quad \text{或} \quad \sum_{i=1}^c y_{i,j} = 1$$

热量平衡方程，简称**H**方程 (1个)

$$L_{j-1}h_{j-1} - (V_j + G_j)H_j - (L_j + U_j)h_j + V_{j+1}H_{j+1} = -F_jH_j + Q_j$$

计算类型

1. 设计型问题:

规定: 关键组分的回收率(或浓度)及有关参数(如精馏: 塔操作压力, 回流比)

计算理论级数 N , 最佳进料位置, 侧线采出位置

2. 操作型问题:

已知: 平衡级数, 进料位置及有关参数(如精馏: R , 回流状态, 适宜进料位置等)

确定: 设备能达到的分离程度

5.2 三对角矩阵法

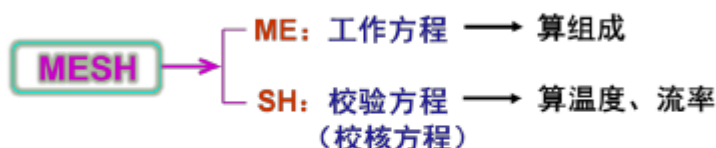
- ❖ 此法以方程解离法为基础, 按方程类型分块的多级分离过程的计算方法, 将MESH分成三组, 即
(1) 修正的ME方程; (2) S方程; (3) H方程, 然后分别求解。

- ❖ 适合于分离过程的操作型计算, 具有容易程序化, 计算速度快和占内存少等优点。

主要包括: 泡点法(BP法): 适用于窄沸程混合物;
2) 露点法(DP法): 适用于含氢混合物;
3) 流量加和法(SR法): 适用于吸收、解吸和萃取塔;
4) 矩阵求逆法;
5) 同时校正法(SC法)

➤ 方程的解离方法及求解步骤

一、方程的解离



二、方程组的求解

- (1) 用工作方程计算得到液相组成 x_{ij} , 汽相组成 y_{ij} ;
- (2) 用校验方程计算级温度 T_j , 各级流率 V_j 或 L_j 。

二、严格模拟计算步骤

二、严格模拟计算步骤

(1) 假定 T_j 和 V_j ; (核心步骤)

(2) 计算相平衡常数 K_{ij} , 得到线性化的ME方程; (核心步骤)

(3) 解线性化的ME方程 (三对角矩阵) 得到液相组成;

$$x_{i,j}, i=1, \dots, j, \dots, C; j=1, \dots, j, \dots, N$$

(数学解方程)

(4) 由液相组成计算得到气相组成;

$$y_{i,j}, i=1, \dots, j, \dots, C; j=1, \dots, j, \dots, N$$

(5) 用S-eq.和H-eq.作为收敛的校验方程, 算出新的 T_j 和 V_j ; (核心步骤)

(6) 以算出的新的 T_j 和 V_j 为迭代值, 返回步骤(1), 直到满足收敛条件。

7.15.5 教学方法 理论推导+流程推演

7.15.6 作业安排 无作业安排

7.16 教学单元十六 (总复习+习题讲解)

7.16.1 教学日期 课程安排: 2021-2022 学年第二学期;

7.16.2 教学目标 熟悉泡点法一般流程 掌握分离工程重要知识点

7.16.3 教学内容 泡点法一般流程、总复习+习题讲解

7.16.4 教学过程

5.2.2 泡点法 (Bubble-point Method, BP法)

BP法适于窄沸程精馏过程的计算

对普通精馏系统, 各平衡级上的传质过程主要依赖于两相流体的部分汽化和部分冷凝, 平衡级温度就是泡点温度或露点温度。它们主要取决于两相组成, 所以用组分的摩尔分数加和式, 即S-方程来检验平衡级温度 T_j 是否正确。

精馏系统内的热量传递主要由潜热的变化引起, 由此也引起两相流率的变化, 所以用热量衡算方程, 即H-方程来检验流率 V_j 是否正确。

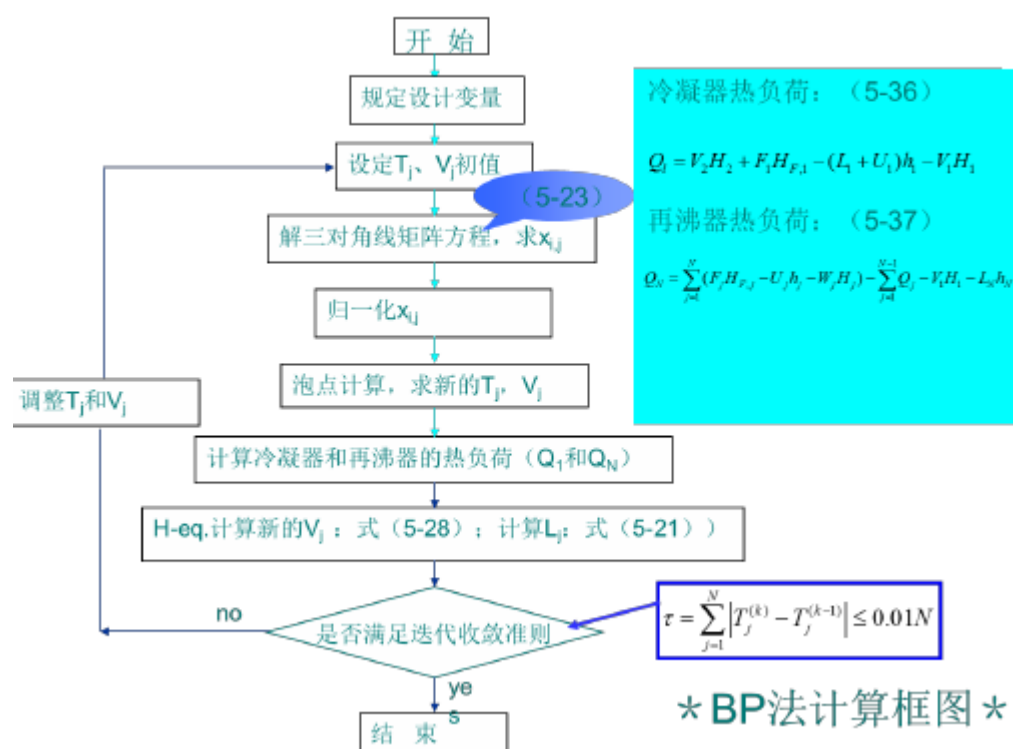
修正的ME方程——液相组成 $x_{i,j}$,

内层循环-S方程——温度 T_j ,

外层循环-H方程——汽液流量 V_j

➤ 计算步骤

- ❖ 确定基础数据和必要条件；
- ❖ 塔顶、塔釜的温度假定线性分布，初值 T_j ，按恒摩尔流假定初始气液负荷；
- ❖ 根据 T_j 计算 $K_{i,j}$ ，然后计算ME方程；
- ❖ 高斯法得到 $x_{i,j}$ ，并强制归一，圆整；
- ❖ S方程，用 $x_{i,j}$ 得到新的温度 T_j' 和 $y_{i,j}$ ；
- ❖ 由 $x_{i,j}, y_{i,j}, T_j'$ 计算 H_j 和 h_j ；
- ❖ 用式（5-27），（5-29）判断收敛。



7.16.5 教学方法 理论推导+流程推演

7.16.6 作业安排 无作业安排

8. 课程学习要求

(1) 预习

预习可以是自己能快速有效的跟上老师的教学思路，事先完成对教科书及其他相关资料的阅读，才能更好的理解老师所讲所做，才能在课堂中提出问题并有效解决问题。

(2) 课堂学习

上课时做好笔记，以备后续复习查阅们注意重点记下教科书中未出现而老师却一再强调的内容及知识点，积极参与课堂提问及课堂讨论，这是对所学知识加深理解的重要途径。

(3) 课后复习

遗忘在学习之后立即开始，而且遗忘的进程并不是均匀的。最初遗忘速度很快，以后逐渐缓慢。可见若不及时巩固，在学习后 1 小时遗忘率可高达 55.8%，因此课后及时复习是很有必要的，这不仅可以巩固所学知识，还可以加深对所学知识的理解以及很好的锻炼自己对知识的概括和总结能力。

(4) 问题

遇到问题时，多问几个为什么，尽量依靠自己的能力解决这些问题。在解决问题的过程中会学到包括查阅文献资料、利用各种软件在内的各种知识。同时也可在保持自己意见的情况下与同学进行讨论。学会使用集体的力量解决问题，当然，也可以及时与老师讨论解决问题。

(5) 课堂及课后作业

认真对待课堂及课后作业，每次作业都是对所学知识的检验，不仅检验了运用知识的能力，更在很大程度上强化记忆，让自己能对所学知识有系统的认识。

(6) 课外阅读

课后根据自己的兴趣适当的阅读与本课程相关的书籍、论著以及资料等。这不仅能激发学习兴趣，还可以拓展知识面。

9. 课程考核

9.1 出勤（迟到、早退等）、作业、报告等的要求

出勤：本课程的学习中，选课同学应该主动遵守四川理工学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 次平均平时成绩扣 5 分，直至扣完。此外，请假的同学务必在上课前出示假条，后补假条无效。

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

作业：每缺交一次作业平均平时成绩扣扣 5 分。

9.2 成绩的构成与评分规则说明

根据《化工原理》课程教学大纲要求，总评成绩 = 30~40% 平时成绩 + 70~60% 卷面成绩。平时成绩主要由出勤、课堂发言和课后作业组成。出勤不加分，仅扣分，具体扣分细节详见 9.1 节出勤作业考核方式；课堂发言随机抽点同学的方式，也可主动回答，教师根据题目的难易程度以及抽点同学回答情况给出等级分数，等级分数与百分制分数换算如下：A+:95，A:90，B+:85，B:80，以此类推。

9.3 考试形式及说明

《分离工程》是专业核心课程，开卷考试，题型一般包括填空、选择、简答、判断和计算。具体考试要求按四川理工学院教务处规定执行。如果该课程总评成绩不及格（即该课程总评成绩<60 分），将有且仅有一次补考机会，如果补考仍不及格，则需要重修本课程。

10. 学术诚信

10.1 考试违规与作弊处理

考试违规与作弊处理依据《四川理工学院学生考试违纪和作弊处理办法》执行

11. 课堂规范

教学过程中应遵守必要的道德礼仪规范，请同学尽量做到以下几点：

- (1) 上课期间不玩手机，请关闭手机，或将手机调至振动模式；
- (2) 请注意服装礼仪，无故穿拖鞋、背心的同学请不要进入教室；
- (3) 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；
- (4) 迟到的同学请安静地找座位坐下，并认真听讲；
- (5) 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；
- (6) 课堂讲授过程中若需表达自己的观点前，请举手示意，得到允许后发言；
- (7) 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；
- (8) 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。

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（第二版）[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 专业刊物

化工学报、化工进展、Journal of Chemical Engineering

12.3 网络课程资源

(1) <http://emuch.net/bbs> 小木虫论坛

(2) <http://bbs.hcbbs.com> 海川化工论坛

(3) 学校图书馆的超星数字图书

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》；为了进一步明确授课教师对师德师风建设应负的责任，努力提高授课教师师德师风建设的整体水平，特向全社会作出公开承诺，全校教职工应在以下十方面履行职责，承担教育责任。

1、实行师德师风建设目标管理责任制，授课教师都应严格执行学校关于加强师德师风建设的各项规定，以德立身。

2、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。

3、切实提高依法执教的法制意识，全校教职工都要自觉学法、知法、守法，用《教师法》、《教育法》、等有关政策法规规范自己的教学工作。

4、坚持开展以德立身，教学为本，情感育人的师德自律教育，铸师魂，修师德，练师能，内强素质，外树形象。

5、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。

6、模范遵守社会公德。为人师表，衣着整洁得体，语言规范健康，举止文明礼貌，以自身的良好形象教育引导学生。

7、尊重、爱护和信任学生，爱心育人，尊重学生人格，对学生不讽刺，不挖苦，不辱骂，杜绝体罚和变相体罚行为。

8、注重提高教育教学效果。爱生敬业，勤奋工作，备好每一篇教案，上好每一堂课，批好每一次作业，与学生谈好每一次话，以自己辛勤的劳动换取每一位学生的成功。

9、严格执行有关教育法规。不搞有偿家教，不向家长索要或暗示馈赠钱物，不参与黄、赌、毒及一切封建迷信活动，教师不得请学生代批作业、试卷，代写学生成绩册和评语等。

10、自觉抓好自查自纠，围绕师德师风建设问题，定期进行自我对照，自我检查，自我整改，主动听取接受学生家长、学校行风监督员等各方面的批评与建议，自觉置于社会的监督之下。

以上十条，特向学校和上课学生作出公开承诺，如有违法违纪，授课教师将接受学校处罚，同时敬请学生、学校、行风监督员积极配合、支持，共同落实以上承诺。

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、师资基本情况、教学方法及其他与本课程相关的内容说明。本课程实施大纲主要是面向学生，以学习为中心，确保课程的每一个方面都能为学生的学习提供最为有效的支持。上课同学应该认真阅读本课程实施大纲，明确本大纲具体的教学以及规范内容，同时遵守课程实施大纲当中所确定的责任与义务。

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。