

四川理工学院课程实施大纲

课程名称：化工原理（下）

授课班级：生技 2015 专

任课教师：杨秦欢

工作部门：化学工程学院

联系方式：Tel: 15196019583 (V 网：62110)

E-mail: yqhyqhyqh1@126.com

四川理工学院 制

2017 年 2 月

《化工原理》课程实施大纲

基本信息

课程代码：b0308038

课程名称：化工原理（下）

学 分：3

总 学 时：52

学 期：2016-2017 年第二学期

上课时间：第 1-13 周，周二第 3、4 节，周四第 1、2 节

上课地点：周二 N1-220，周四 N1-518

答疑时间和方式：随时：电话及邮箱；课间：当面；预约：当面

答疑地点：上课教室；第二实验楼 215

授课班级：生技 15 专

任课教师：杨秦欢

学 院：化学工程学院

邮 箱：yqhyqyh1@126.com

联系电话：15196019583（V 网：62110）

目录

1. 教学理念.....	1
2. 课程介绍.....	1
2.1. 课程的性质.....	1
2.2. 课程在学科专业结构中的地位、作用.....	1
2.3. 学习本课程的必要性.....	2
3. 教师简介.....	2
3.1. 教师的职称、学历.....	2
3.2. 教育背景.....	2
3.3. 研究方向.....	2
4. 先修课程.....	2
5. 课程目标.....	2
6. 课程内容.....	3
7. 课程实施.....	4
7.1. 教学单元一.....	5
7.1.1. 教学目标.....	错误!未定义书签。
7.1.2. 教学内容.....	错误!未定义书签。
7.1.3. 教学过程及方法.....	6
7.1.4. 教学方法.....	7
7.1.5. 作业安排.....	错误!未定义书签。
7.2. 教学单元二.....	8
7.2.1. 教学目标:	8
7.2.2. 教学内容(含重点、难点):	8
7.2.3. 教学过程:	8
7.2.4. 教学方法:	7
7.2.5. 作业安排.....	7
7.3. 教学单元三.....	8
7.3.1. 教学目标:	8
7.3.2. 教学内容(含重点、难点):	8
7.3.3. 教学过程:	10
7.3.4. 教学方法:	9
7.3.5. 作业安排.....	9
7.4. 教学单元四.....	9
7.4.1. 教学目标:	9
7.4.2. 教学内容(含重点、难点):	9
7.4.3. 教学过程:	10
7.4.4. 教学方法:	10
7.4.5. 作业安排.....	11
7.5. 教学单元五.....	11
7.5.1. 教学目标:	11
7.5.2. 教学内容(含重点、难点):	11

7.5.3. 教学过程:	11
7.5.4. 教学方法:	12
7.5.5. 作业安排	12
7.6. 教学单元六	13
7.6.1. 教学目标:	13
7.6.2. 教学内容 (含重点、难点):	13
7.6.3. 教学过程:	13
7.6.4. 教学方法:	16
7.6.5. 作业安排	16
7.7. 教学单元七	17
7.7.1. 教学目标:	17
7.7.2. 教学内容 (含重点、难点):	17
7.7.3. 教学过程:	17
7.7.4. 教学方法:	19
7.7.5. 作业安排	19
7.8. 教学单元八	19
7.8.1. 教学目标:	19
7.8.2. 教学内容 (含重点、难点):	19
7.8.3. 教学过程:	19
7.8.4. 教学方法:	19
7.8.5. 作业安排	19
7.9. 教学单元九	19
7.9.1. 教学目标:	19
7.9.2. 教学内容 (含重点、难点):	19
7.9.3. 教学过程:	20
7.9.4. 教学方法:	20
7.9.5. 作业安排	20
7.10. 教学单元十	20
7.10.1. 教学目标:	20
7.10.2. 教学内容 (含重点、难点):	20
7.10.3. 教学方法:	21
7.11. 教学单元十一	39
7.11.1. 教学目标:	39
7.11.2. 教学内容 (含重点、难点):	39
7.11.3. 教学过程:	39
7.11.4. 教学方法:	40
7.11.5. 作业安排	41
7.12. 教学单元十二	41
7.12.1. 教学目标:	41
7.12.2. 教学内容 (含重点、难点):	41
7.12.3. 教学过程:	41
7.12.4. 教学方法:	43
7.12.5. 作业安排	43

7.13. 教学单元十三.....	25
7.13.1. 教学目标:	25
7.13.2. 教学内容 (含重点、难点):	25
7.13.3. 教学过程:	25
7.13.4. 教学方法:	26
7.13.5. 作业安排.....	26
7.14. 教学单元十四.....	26
7.14.1. 教学目标:	26
7.14.2. 教学内容 (含重点、难点):	26
7.14.3. 教学过程:	26
7.14.4. 教学方法:	28
7.14.5. 作业安排.....	28
7.15. 教学单元十五.....	28
7.15.1. 教学目标.....	28
7.15.2. 教学内容 (含重点、难点):	28
7.15.3. 教学过程:	28
7.15.4. 教学方法:	52
7.15.5. 作业安排.....	31
7.16. 教学单元十六.....	50
7.16.1. 教学目标.....	50
7.16.2. 教学内容 (含重点、难点):	50
7.16.3. 教学过程:	50
7.16.4. 教学方法:	52
7.16.5. 作业安排.....	33
7.17. 教学单元十七.....	50
7.17.1. 教学目标.....	50
7.17.2. 教学内容 (含重点、难点):	50
7.17.3. 教学过程:	50
7.17.4. 教学方法:	52
7.17.5. 作业安排.....	34
7.18. 教学单元十八.....	50
7.18.1. 教学目标.....	50
7.18.2. 教学内容 (含重点、难点):	50
7.18.3. 教学过程:	50
7.18.4. 教学方法:	52
7.18.5. 作业安排.....	36
7.19. 教学单元十九.....	50
7.19.1. 教学目标.....	50
7.19.2. 教学内容 (含重点、难点):	50
7.19.3. 教学过程:	50
7.19.4. 教学方法:	52
7.20. 教学单元二十.....	50
7.20.1. 教学目标.....	50

7.20.2. 教学内容 (含重点、难点):	50
7.20.3. 教学方法:	52
7.21. 教学单元二十一	50
7.21.1. 教学目标.....	50
7.21.2. 教学内容 (含重点、难点):	50
7.21.3. 教学过程:	50
7.21.4. 教学方法:	40
7.21.5. 作业安排.....	41
7.22. 教学单元二十二.....	41
7.22.1. 教学目标.....	41
7.22.2. 教学内容 (含重点、难点):	41
7.22.3. 教学过程:	41
7.22.4. 教学方法:	43
7.22.5. 作业安排.....	43
7.23. 教学单元二十三.....	43
7.23.1. 教学目标.....	43
7.23.2. 教学内容 (含重点、难点):	43
7.23.3. 教学过程:	50
7.23.4. 教学方法:	46
7.23.5. 作业安排.....	46
7.24. 教学单元二十四.....	46
7.24.1. 教学目标.....	46
7.24.2. 教学内容 (含重点、难点):	46
7.24.3. 教学过程:	46
7.24.4. 教学方法:	50
7.24.5. 作业安排.....	50
7.25. 教学单元二十五.....	50
7.25.1. 教学目标.....	50
7.25.2. 教学内容 (含重点、难点):	50
7.25.3. 教学方法:	50
7.26. 教学单元二十六.....	50
7.26.1. 教学目标.....	50
7.26.2. 教学内容 (含重点、难点):	50
7.26.3. 教学过程:	50
7.26.4. 教学方法:	52
8. 课程要求.....	52
9. 课程考核.....	52
9.1. 成绩的构成与评分规则说明.....	52
9.2. 出勤要求.....	53
9.3. 作业要求.....	53
9.4. 测验要求.....	53
10. 学术诚信.....	53
11. 课堂规范.....	54

11.1. 教师课堂教学规范.....	54
11.2. 学生课堂行为规范.....	54
12. 课程资源.....	54
12.1. 教材与参考书.....	54
12.2. 专业学术著作.....	55
12.3. 专业刊物.....	55
12.4. 网络课程资源.....	55
13. 教学合约.....	55

1. 教学理念

“教师的责任不在教，而在引导，教会学生学”，“教师走进课堂的任务不是去讲，而是组织学生学”，“学生能不能成才，不是老师教出来的，是学生自己学出来的”这三句话的核心是学生是自己学出来的，人人都能学好，也是教学理念的具体阐述。

在教学方法上，大力提倡“学生参与”，采取分组讨论、案例分析等多样的教学方式，努力调动学生的积极性，培养学习兴趣，激发学习热情，使学生充分地参与到整个学习活动中。本着“教学相长”的理念，对于学生提出的问题与质疑，认真对待，耐心解答。

化工原理是我校化工、高分子、环境、应用化学、食品、酿酒、生物工程、生物技术、轻化工程等专业的专业基础课。它突破了学科体系模式，打破了原来各学科体系的框架，以不同单元操作为载体，将相关的管理技术、设备维护、工艺操作和工艺评价合理整合。本课程主要介绍化工类型生产过程中各种单元操作的基本原理和与其相关的过程设备，它需综合运用数学、物理、化学、机械、计算机等基础知识，具有应用面广、实用性强、注重理论与实践相结合的特点，它能帮助学生树立牢固的工程观念，培养解决工程实际问题的综合能力，在创新人才培养中，承担着工程学科与工程技术的双重教学任务。本课程以职业实践活动为主线，因而它是跨学科的，且理论与实践一体化，体现职业教育“以就业为导向，以能力为本位”的培养理念。

2. 课程介绍

2.1. 课程的性质

本课程是适用于化学工程、过程控制、生物工程、轻化工程、酿酒工程、食品质量与安全等专业的技术基础课之一，是具体体现和实现各专业人才培养目标的重要课程。通过本课程的学习，使学生掌握化工单元操作的相关知识，具备生产一线工艺设备管理和维护保养的初步能力，进一步提升学生的职业岗位综合能力和职业素养。

2.2. 课程在学科专业结构中的地位、作用

本课程是化工类及其相关专业的一门重要的技术基础课。对于过程控制专业来说，本课程是一门重要的专业基础课程。在过程控制学科的课程体系中，化工原理课程处在

自然科学基础课和工程科学专业课之间，起着由理及工，承前启后的作用。

2.3. 学习本课程的必要性

根据教育部颁布的《关于普通高等院校修订本科生专业教学计划的原则和意见》，我校明确了化工原理课程作为化学工程、过程控制、生物工程、轻化工程、酿酒工程、食品质量与安全等专业的专业基础课的主导地位，也是研究生学位课的基础。学好化工原理这门课，对于化学工程、过程控制、生物工程、轻化工程、酿酒工程、食品质量与安全等专业的每位同学来说，其重要性和必要性是不言而喻的。

3. 教师简介

3.1. 教师的职称、学历

任课教师：杨秦欢；职称：副教授；最高学历：博士。

3.2. 教育背景

2007.09~2010.12	四川大学	博士研究生
2004.09~2007.07	四川大学	硕士研究生
1998.09~2002.07	四川大学	本科

3.3. 研究方向

精细化工材料的制备、表征与应用研究

4. 先修课程

学习《化工原理》课程之前，需先修的课程有高等数学、普通物理、物理化学、化工原理（上）等基础课程。

5. 课程目标

本课程的目标是使学生初步掌握化工过程的基本原理，以三种传递原理为主线，以物料衡算、能量衡算、平衡关系、传递速率等基本概念为理论依据，使学生掌握典型单元操作通用的学习方法和分析问题的思路，培养理论联系实际的观点，进行典型单元操作设备的设计、操作及选型的计算，并进行基本实验技能和设计能力的训练，为学生今后学习相关的专业课程打好工程技术理论基础，以培养学生工程技术观点及独立分析

和解决工程实际问题的能力。

6. 课程内容

6.1 课程的内容概要和学时安排

本课程的主要内容包括三部分，分别为：精馏、吸收、干燥。本课程总学时数为 52，每周 4 学时。各章内容概要和学时安排如下：

1、精馏（20 学时）：拉乌尔定律，平衡蒸馏和简单蒸馏，精馏原理和流程，两组分连续精馏的计算，间歇精馏，其他精馏过程概述。

2、吸收(20 学时)：气—液平衡，气体的溶解度，传质机理与吸收速率，分子扩散与菲克定律，吸收过程的机理，吸收速率方程，吸收塔物料衡算与操作线方程，吸收剂用量的决定，填料层高度计算，吸收系数，脱吸。

3、干燥（12 学时）：湿空气的性质和湿焓图，干燥过程的物料衡算和热量衡算，固体物料在干燥过程中的平衡关系与速率关系；干燥设备。

6.2 各章教学重点和难点

1、精馏（20 学时）：平衡蒸馏和简单蒸馏的计算，理论板的概念及恒摩尔流假定，物料衡算和操作线方程，进料热状况的影响，理论板层数的计算，回流比的影响及其选择，简捷法求理论板数，几种特殊情况下理论板层数的求法，塔高和塔径的计算。

2、吸收(20 学时)：传质速率方程，低浓吸收填料层高度的计算，单向扩散，吸收速率方程，吸收塔物料衡算与操作线方程，操作型问题定性分析，填料层高度计算，吸收系数，脱吸。

3、干燥（12 学时）：湿空气的性质和湿焓图，干燥过程的物料衡算和热量衡算，固体物料在干燥过程中的平衡关系与速率关系。

7. 课程实施

课次	教学日期	教学内容	课后作业
1	2017-2-28	第一章 蒸馏 传质机理、蒸馏概述、相平衡原理	课本 p73, 习题 1
2	2017-3-2	第一章 蒸馏 相平衡原理、简单蒸馏	P73, 习题 2, 3, 4
3	2017-3-7	第一章 蒸馏 精馏原理和流程	
4	2017-3-9	第一章 蒸馏 理论板的概念及恒摩尔流假定 物料衡算和操作线方程	课本 P73, 习题 5
5	2017-3-14	第一章 蒸馏 进料热状况的影响 逐板计算法和图解法求理论板数	课本 P74, 习题 8, 9
6	2017-3-16	第一章 蒸馏 回流比的影响及其选择 简捷法求理论板数	课本 p74, 习题 11
7	2017-3-21	第一章 蒸馏 几种特殊情况下理论板数的求法 塔高和塔径的计算	课本 p74, 习题 12
8	2017-3-23	第一章 蒸馏 连续精馏装置的热量衡算和节能 精馏塔的操作和调节	课本 p75, 习题 15
9	2017-3-28	第一章 蒸馏 间歇精馏 恒沸精馏和萃取精馏	
10	2017-3-30	本章总结和测验一	
11	2017-4-6	第二章 吸收 亨利定律表达式、相平衡与吸收、解吸的关系。	课本 p148, 习题 1, 2
12	2017-4-11	第二章 吸收 分子扩散的速率、费克 (Fick) 定律内容	课本 p148, 习题 3
13	2017-4-13	第二章 吸收 气相中的稳态分子扩散、扩散系数	课本 p148, 习题 4
14	2017-4-18	第二章 吸收 涡流扩散、对流传质、双膜理论 (双阻力理论)	课本 p149, 习题 7

15	2017-4-20	第二章 吸收 吸收塔的类型塔内气、液两相的流动方式、吸收操作线方程、吸收剂用量的确定	课本 p149, 习题 9
16	2017-4-25	第三章 吸收 塔径的计算、填料层高度的计算、确定填料层高度有两种方法	课本 p149, 习题 11、14
17	2017-4-27	第二章 吸收 数值积分法求传质单元数、梯级图解法	课本 p150, 习题 15
18	2017-5-2	第二章 吸收 理论板层数的计算、梯级图解法求理论板层数、解析法求理论板层数、吸收系数的测定	课本 p150, 习题 16
19	2017-5-4	第二章 吸收 吸收系数的经验公式、吸收系数的准数关联式、计算液膜吸收系数的准数关联式、气相及液相传质单元高度的计算	
20	2017-5-9	复习吸收一章和检测 2	
21	2017-5-11	第三章 干燥 湿空气的性质及湿焓图	课本 p296-297, 习题 1, 2
22	2017-5-16	第三章 干燥 干燥过程的物料衡算与热量衡算	课本 p297, 习题 3, 5
23	2017-5-18	第三章 干燥 固体物料在干燥过程中的平衡关系与速率关系	课本 p298, 习题 9, 12
24	2017-5-23	第三章 干燥 干燥设备	
25	2017-5-25	复习干燥一章和检测三	
26	2017-6-6	本学期重点难点习题讲评	

7.1. 教学单元一

7.1.1. 教学目标:

1. 了解稀溶液和亨利定律;
2. 了解蒸馏在化工生产上有那些应用;
3. 掌握蒸馏的基本概念;

4. 掌握二元理想溶液的汽液平衡。

7.1.2. 教学内容（含重点、难点）：

内容：对流传质；稀溶液和亨利定律；理想溶液和拉乌尔定律，二元理想溶液的 t-x-y 相图和 x-y 相图

重点：双膜理论；拉乌尔定律，二元理想溶液的汽液平衡关系

难点：双膜理论；二元理想溶液的汽液平衡和 t-x-y 相图、x-y 相图，结合图讲解

7.1.3. 教学过程：

一. 对流传质

通常传质设备中的流体都是流动的，流动流体与相界面之间的物质传递称为对流传质（如前述溶质由气相主体传到相界面及由相界面传到液相主体）。流体的流动加快了相内的物质传递，分析层流及湍流两种流动加快传质的原因。

二. 三传（质量、动量、热量传递）类比

三传之间彼此有些类似的规律可进行类比研究

三. 相际传质

不同的研究者对过程的理解不同从而导出不同的模型，下面简要介绍三个重要的产值模型。（1）双膜理论（惠特曼 Whitman, 1923 年）；（2）溶质渗透理论（希格比 Higbie, 1935 年）；（3）表面更新理论（丹克沃茨 Danckwerts, 1951 年）

四. 传质设备简介

传质设备的分类：板式塔与填料塔的基本构造

五. 相平衡关系

1. 吸收过程的相平衡关系-亨利定律（了解）

2. 蒸馏过程的相平衡关系

(1) 蒸馏过程概述

蒸馏分离的依据是，根据溶液中各组分挥发度（或沸点）的差异，使各组分得以分离。

① 蒸馏过程在化工中的应用

② 蒸馏分离的特点

③ 蒸馏过程的分类

工业上，蒸馏操作可按以下方法分类：

按操作方式，可分为简单蒸馏、平衡蒸馏（闪蒸），精馏和特殊精馏等。

按蒸馏操作流程，可分为间歇蒸馏和连续蒸馏。

按物系中组分的数目，可分为两组分蒸馏和多组分蒸馏。

按操作压力，可分为加压、常压和减压蒸馏。

本章重点讨论两组分物系连续精馏的原理及计算方法。

(2) 蒸馏过程的汽液平衡关系

① 两组分理想物系的汽液平衡—拉乌尔定律

所谓理想物系是指液相和汽相应符合以下条件：(1) 液相为理想溶液，遵循拉乌尔定律。(2) 汽相为理想气体，遵循道尔顿分压定律。

1. 汽液平衡相图

(1) 温度—组成($t-x-y$)图

(2) 汽—液相组成图($x-y$ 图)

2. 汽液平衡的关系式

(1) 拉乌尔定律

$$x_A = \frac{P - p_B^0}{p_A^0 - p_B^0}$$

(2) 以平衡常数表示的汽液平衡方程

$$y_A = \frac{p_A^0}{P} \frac{P - p_B^0}{p_A^0 - p_B^0}$$

7.1.4. 教学方法：

结合生活中的例子引出平衡关系的存在，以多媒体课件和板书相结合的方法讲解稀溶液与亨利定律及理想溶液与拉乌尔定律。

7.1.5. 作业安排

课本 p73，习题 1

7.2. 教学单元二

7.2.1. 教学目标：

1. 熟悉非理想溶液的最低恒沸点及相应的最高蒸汽压和最高恒沸点及相应的最低蒸汽压
2. 掌握理想溶液及非理想溶液的挥发度和相对挥发度的定义,理想溶液的相对挥发度随温度增加而略有减小
3. 掌握简单蒸馏的计算

7.2.2. 教学内容（含重点、难点）：

内容：纯组分和溶液中各组分的挥发度，理想溶液和非理想溶液中两组分的相对挥发度，非理想溶液的相图，最高恒沸点和最低恒沸点，简单蒸馏的总物料衡算和微分物料衡算。

重点：理想溶液和非理想溶液相对挥发度的计算，简单蒸馏的总物料衡算和微分物料衡算。

难点：非理想溶液的最高恒沸点和最低恒沸点

7.2.3. 教学过程：

一. 蒸馏过程的相平衡关系

① 两组分理想物系的汽液平衡—拉乌尔定律

(3) 以相对挥发度表示的汽液平衡方程

$$y = \frac{\alpha x}{1 + (\alpha - 1)x}$$

② 两组分非理想物系的汽液平衡

实际生产中所遇到的大多数物系为非理想物系。非理想物系可能有如下三种情况：

- (1) 液相为非理想溶液，汽相为理想气体；
- (2) 液相为理想溶液，汽相为非理想气体；
- (3) 液相为非理想溶液，汽相为非理想气体。

1. 汽液平衡相图

正偏差系

负偏差系

2. 汽液平衡方程

二. 平衡蒸馏与简单蒸馏

1. 平衡蒸馏

1. 平衡蒸馏装置与流程

2. 平衡蒸馏过程计算

总物料衡算

$$F = D + W$$

易挥发组分衡算

$$Fx_F = Dy + Wx$$

$$y = \frac{q}{q-1}x - \frac{x_F}{q-1}$$

2. 简单蒸馏

1. 简单蒸馏装置与流程

2. 简单蒸馏的计算

$$\ln \frac{F}{W} = \frac{1}{\alpha-1} \left[\ln \frac{x_F}{x_2} + \alpha \ln \frac{1-x_2}{1-x_F} \right]$$

7.2.4. 教学方法:

以多媒体课件和板书相结合的方法进行课堂教学，课堂讲解为主。

7.2.5. 作业安排

P73，习题 2，3，4

思考：非理想溶液的最高恒沸点和最低恒沸点的意义？

7.3. 教学单元三

7.3.1. 教学目标:

掌握平衡蒸馏的计算，液相分率对汽液相组成的影响，比较平衡蒸馏和简单蒸馏的分离效果，理解平衡级蒸馏，精馏的设备条件、回流条件和理论板假设、恒摩尔流假设

7.3.2. 教学内容（含重点、难点）:

内容：平衡蒸馏，平衡蒸馏与简单蒸馏的比较，平衡级蒸馏，精馏的设备条件、回流条件和理论板假设、恒摩尔流假设

重点：精馏的设备条件、回流条件和理论板假设、恒摩尔流假设

难点：简单蒸馏与平衡蒸馏的分离效果比较，用例题讲解；为什么简单蒸馏的分离效果好，结合 $t-x-y$ 相图讲解。

7.3.3. 教学过程：

一. 平衡蒸馏与简单蒸馏的比较

例题 1-2

二. 精馏过程原理

1. 多次部分汽化和多次部分冷凝
2. 精馏塔模型

三. 精馏塔模型与精馏塔简介

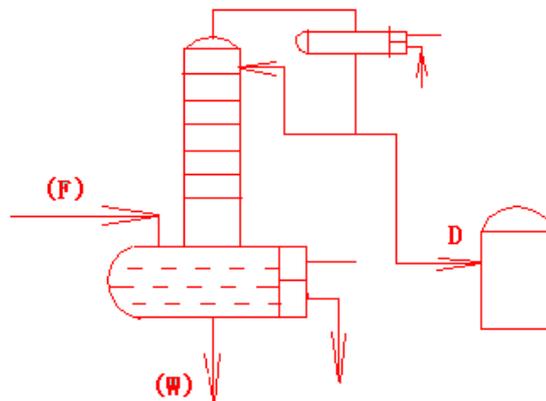
四. 精馏操作流程

1. 连续精馏操作流程
2. 间歇精馏操作流程

间歇精馏与连续精馏相比，有如下特点：

1. 间歇精馏为非定态过程，它有两种操作方式；即恒回流比操作和恒馏出液组成操作。

2. 间歇精馏只有精馏段。



7.3.4. 教学方法：

结合图 1-9 讲解精馏的原理和流程；以多媒体课件和板书相结合的方法进行课堂教学。

7.3.5. 作业安排

思考：平衡蒸馏与平衡级蒸馏的区别是什么？

7.4. 教学单元四

7.4.1. 教学目标：

掌握回流比是精馏设计中的核心因素，理论板假定与恒摩尔流假设，二元连续精馏的全塔物料衡算，精馏段操作线方程

7.4.2. 教学内容（含重点、难点）：

内容：全塔物料衡算，回流比，精馏段操作线方程

重点：全塔物料衡算，精馏段操作线方程，精馏段操作线和理论板的图解

难点：理论板图解方法的理论依据

7.4.3. 教学过程：

一. 全塔物料衡算

1. 物料衡算：连续稳定操作，进料流量=出料流量

$$\begin{cases} F = W + D \\ Fx_F = Wx_W + Dx_D \end{cases}$$

x_F ——原料中易挥发组分的摩尔分率

x_D ——馏出液中易挥发组分的摩尔分率

x_W ——釜液中易挥发组份的摩尔分率

应用时要注意 F 与 x_F 的关系， F 若用质量表示，则 x_F 要用质量分率表示，统一

例题

2. 精馏过程所要求的分离表示法

1. 用产品的组成表示 ($x_D=95\%$)

2. 用回收率表示

回收率：指回收了原料中易挥发（或难挥发）组分百分数

如：塔顶易挥发组分的回收率 η

$\eta_{易} = \text{馏出液中易挥发组份} / \text{原料液中易挥发组份} = Dx_D / Fx_F \times 100\%$

$\eta_{难} = W(1 - x_W) / F(1 - x_F) \times 100\%$

二. 精馏的分析及其图解法

1. 几个概念

1、理论塔板 (theoretical plate): 离开该塔板的汽、液组成达到相平衡的塔板。

注: 理论板并不存在, 但它可以作为衡量实际塔板分离效果的最高标准。在设计中, 求理论数后, 则实际板数=理论板数×校正系数

2、操作关系: 任意板下降液体组成 X_n 与下一板上升蒸汽组成 y_{n+1} 之间的关系。由物料衡算决定。

2. 恒摩尔流的假定

1. 恒摩尔汽化

精馏段内, 由每层塔板上升的蒸汽摩尔流量皆相等; 提馏段内也是一样

2. 恒摩尔溢流

精馏段内, 由每层塔板溢流的液体摩尔流量相等; 提馏段内也是一样。

L ——精馏段下流的液体摩尔流量 kmol/h

L' ——提馏段下流的液体摩尔流量 kmol/h

$L_1=L_2=L_3=\dots=L_n=\text{定值}=L$

$L'_1=L'_2=L'_3=\dots=L_n=\text{定值}$

两段下降流体摩尔流量不一定相等

总称为恒摩尔流假设

如①各组分的摩尔潜热相等; ②汽液接触时, 因温度不同而变换的显热可以忽略;

③保温良好, 塔的热损失可以忽略不计, 则恒摩尔流的假定才能成立。

三. 精馏段操作线方程的推导

1. 精馏段操作线方程

2. 提馏段操作线方程

7.4.4. 教学方法:

以多媒体课件和板书相结合的方法进行课堂教学, 结合图讲解, 课堂讲解为主。

7.4.5. 作业安排

课本 P73, 习题 5

思考: 精馏操作的两个基本假设是什么?

7.5. 教学单元五

7.5.1. 教学目标：

1. 掌握进料的五种热状况及其对应的 q ，提馏段的操作线方程，加料板的物料衡算；
2. 掌握逐板计算法和图解法求解理论板数， q 线方程。

7.5.2. 教学内容（含重点、难点）：

内容：五种热状况及其对应的 q 值，提馏段的操作线方程，加料板的物料衡算， q 线方程，逐板计算法和图解法求解理论塔板数，

重点：进料热状况对操作线方程的影响，逐板计算法和图解法求理论塔板数

难点：进料的热状况 q 对于理论板数的影响，逐板计算法和图解法的对应关系，结合图解讲解

7.5.3. 教学过程：

一. 进料状况的影响

在提馏段操作线中，液、气流量 L' 及 V' 尚需根据精馏段的液、汽流量 L 、 V 和进料物流量及其受热状况来决定。

进料共有五种可能的热状况

- ①过冷液体 ($t_F < t_s$)
- ②饱和液体（泡点液体进料） $t_F = t_s$
- ③饱和液汽的混合物 ($t_s < t < t_d$)
- ④饱和蒸汽 ($t = t_d$)
- ⑤过热蒸汽 ($t > t_d$)

$$(q-1)Fy = qFz - Fx_F$$

(q 线方程，利用 q 线作提馏段操作线)

二. 进料热状况参数

例：第 3 种情况 $t_s < t_F < t_d$ (汽、液混合)

1) 设进料中液相所占的分率为 q ，则汽相为 $(1-q)$

加料板上物料衡算： $L' = L + qF$

汽相： $V' + (1-q)F = V$ $V' = V - (1-q)F$

2) 进料液相分率 q 与热状况有一定的关系。令进料液、饱和液体、饱和蒸汽焓分别为 i_F, i_L, i_V (kJ/kmol)

进料带入的总焓=汽、液两相各自带入的焓之和，即：

$$Fi_F = (qF)i_L + (1-q)Fiv$$

对 1mol 进料，则 $i_F = qi_L + (1-q)iv$

$$q = \frac{iv - i_F}{iv - i_L} = \frac{\text{每千克进料从进料状况化为饱和蒸气所需热}}{\text{进料的千摩汽化潜热}}$$

对于饱和汽、液混合进料这情况， $t_s < t_F < t_d$ ， $i_L < i_F < i_V$

则 $i_V - i_L > i_V - i_F > 0$ ， $\therefore 0 < q < 1$

因此，

1) 过冷液体进料：原料进塔与蒸汽接触后应升至平衡温度（泡点），这就需要将提馏段上升的一部分蒸汽冷凝下来，用冷凝放出的潜热 Q 供进料升温用。 $V' > V$

$\therefore i_F < i_L$ ， $\therefore i_V - i_F > i_V - i_L$ ，即 $q > 1$ （图 b，P405）

2) 泡点液体进料（饱和液体进料）： $t_s = t_F, i_F = i_L$ ， $\therefore q = 1$

3) 汽液混合进料： $i_L < i_F < i_V, 0 < q < 1$

4) 饱和蒸汽进料： $t = t_d$ 即 $i_F = i_V$ ， $\therefore q = 0, V = F + V', L = L'$

5) 过热蒸汽进料： $t > t_d$ 即 $i_F > i_V$ ， $\therefore q < 0$

进料不仅全部与提馏段上升蒸汽 V' 汇合进入精馏段，还将释放出显热，使精馏段的回流液额外汽化一部分，结果 $V > V' + F, L' < L$

三. 进料热状况对操作线方程的影响

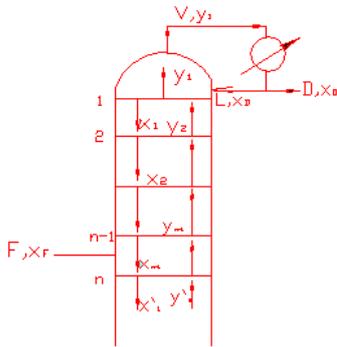
提馏段

四. 理论板数的确定

求理论塔板数，必须利用：（1）汽液两相的平衡关系（平衡曲线 $X—Y$ ），（2）相邻两板间汽液两相组成的操作关系（操作线方程）

求解方法：逐板法和图解法

1. 逐板计算法



$$y_1 (= x_d)$$

$$\xrightarrow{\text{平衡关系}} x_1$$

$$\xrightarrow{\text{精馏段操作关系}} y_2$$

$$\xrightarrow{\text{平衡关系}} x_2$$

$$\xrightarrow{\text{精馏段操作关系}} y_3 \dots x_n \leq x_q$$

$$\xrightarrow{\text{提馏段操作关系}} y'_2 \xrightarrow{\text{平衡关系}} x'_2 \dots x'_m \leq x_w$$

2. 图解法（笔记）X—Y 图解法

1. 操作线的绘制

(1) 精馏段操作线

精馏段操作线方程：
$$y_{n+1} = \frac{R}{R+1} x_n + \frac{x_D}{R+1}$$

对角线方程：
$$y = x$$

精馏段操作线与对角线交点 $a(x_d, x_d)$, 与纵轴交点 $b(0, x_d/(R+1))$;

则, ab 即为精馏段操作线。(2) 提馏段操作线

提馏段操作线方程：
$$y'_{m+1} = \frac{L'}{L'-W} x'_m - \frac{W}{L'-W} x_w$$

提馏段操作线与对角线交点： $c(x_w, x_w)$;

提馏段操作线与精馏段操作线的交点：

精馏段操作线方程: $Vy=Lx+Dx_D$

提馏段操作线方程: $V'y' = L'x' - Wx_w$

联立两个方程并整理得:

$$y = \frac{q}{q-1}x - \frac{x_f}{q-1} \quad (1-38)$$

式(1-38)称为q线方程或进料方程,是描述两个操作线交点轨迹的方程。

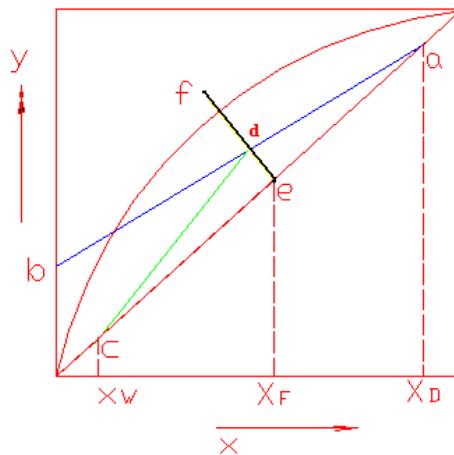
q线的绘制:

q线与对角线交点为e(x_f,x_f)、其斜率为q/(q-1);据此做直线ef即为q线。

q线与精馏段操作线交点d;则连db即得提馏段操作线

2. 图解求理论塔板数

过a依次在两个操作线与平衡线之间画梯级,即可求得理论塔板数。(一个梯级代表一块理论塔板)



7.5.4. 教学方法:

以多媒体课件和板书相结合的方法进行课堂教学。

7.5.5. 作业安排

课本 P74, 习题 8, 9

思考 1: 五种进料状况所对应的 q 值各是多少? 物理意义是什么?

思考 2: 图解理论板的要点是什么?

7.6. 教学单元六

7.6.1. 教学目标：

1. 掌握最小回流比的概念和计算，全回流和操作线方程；
2. 掌握适宜回流比的选择；
3. 熟悉捷算法求解理论板数。

7.6.2. 教学内容（含重点、难点）：

内容：最小回流比，全回流，捷算法求理论板数，最少理论板数 N_{min} ，芬斯克方程，吉利兰关联图

重点：最小回流比的概念和计算，全回流的概念和操作线方程，

7.6.3. 教学过程：

一. 全回流和最少理论板数

二. 最小回流比的计算

1. 作图法；
2. 解析法

三. 回流比的影响及其选择

1. 回流比 $R=L/D$ 的改变对精馏操作的影响

(1) $R\uparrow$ ，精馏段操作线向对角线靠近， $N\downarrow$ ，但 $L\uparrow$ ，即冷凝器的负荷加大。

(2) $R\downarrow$ ，精馏段远离对角线， $N\uparrow$ ，当 R, q 线 \rightarrow 与平衡线相交，则 $N\rightarrow\infty$ ，此时 R 称为 R_{min} ，全回流。

2. 回流比 $R=L/D$ 的改变对提馏段操作线的影响

(1) $R\uparrow$ ， q 点下降，提馏段接近对角线，板数减少，但再沸器负荷加大，纯度 \uparrow

(2) $R\downarrow$ ，提馏段与操作线相距越远，当与平衡线相交 (q 线)， $N\uparrow$ 。

3. 回流比的选择

1. $R_{min}<R<R_{\infty}$

2. N_{min} : $R\rightarrow\infty$ ，此时两操作线与对角线重合，称为全回流。只有在特定条件下才用它：如精馏塔的启动阶段，或操作中因意外而产品纯度低于要求时，进行一定时间的全回流，使能较快地达到操作正常。

4. 正确选择 R_{opt}

(1) 操作费：①加热蒸汽和冷却水②设备折旧，维修

(2) 设备费（塔板数）

注意几点：①设计的角度看，在给定任务下，必须考虑设备费与操作费来选择 R ；②对于投产中的精馏塔，则只能从调节操作状态来考虑回流比影响。如当蒸气流量 V 和进料流量、组成、热状况不变，若 $R\uparrow$ ，其影响为：(1) $D=V/R+1$ ，则塔顶产量 $D\downarrow$ 。(2) 由于达成原分离要求所需的板数减少，现板数不变，就可超过原来的分离要求，即 $X_D\uparrow$ 。

四. 简捷法求理论板层数程序：

- (1) 计算 R_{min} 、确定 R ，计算横坐标；
- (2) 查图得横坐标；
- (3) 计算 N_{min} 和，根据横坐标值和 N_{min} 的值计算 N 。

7.6.4. 教学方法：

结合图讲解，以多媒体课件和板书相结合的方法进行课堂教学。

7.6.5. 作业安排

课本 p74，习题 11

思考题：全回流操作的适用场合？

7.7. 教学单元七

7.7.1. 教学目标：

1. 掌握几种特殊情况下理论板层数的求法；
2. 掌握塔高和塔径的计算方法。
3. 了解影响塔板效率的因素

7.7.2. 教学内容（含重点、难点）：

内容：塔顶采用分凝器；塔顶冷液回流；直接蒸汽加热；多侧线的精馏塔；提馏塔的理论板数的求法，塔高的计算，默弗里板效率，总板效率，塔径的计算。

重点：几种特殊情况下的理论板层数的求法；已知总板效率和理论板数求解实际板数。

7.7.3. 教学过程：

一. 几种特殊情况下的理论板数的求法

1. 塔顶采用分凝器

分凝器相当于一块理论板

2. 塔顶冷液回流

3. 直接蒸汽加热

讨论简介蒸汽加热与直接蒸汽加热的能耗与理论板数

4. 多侧线的精馏塔

5. 提馏塔

二. 塔高和塔径的计算

1. 板式塔有效高度的计算

2. 塔板总效率和默弗里板效率

3. 塔径的计算

7.7.4. 教学方法：

结合图讲解，以多媒体课件和板书相结合的方法进行课堂教学。

7.7.5. 作业安排

课本 p74，习题 12

7.8. 教学单元八

7.8.1. 教学目标：

1. 熟悉回流比对精馏费用的影响

2. 了解连续精馏装置的热量衡算和节能

7.8.2. 教学内容（含重点、难点）：

内容：精馏塔热负荷的计算，节能方法，精馏塔的操作和调节，精馏塔的操作型计算

重点：回流比对精馏费用的影响

难点：操作中如何调节回流比保证产品质量

7.8.3. 教学过程：

一. 连续精馏装置的热量衡算和节能

1. 冷凝器的热负荷；
2. 再沸器的热负荷
3. 精馏过程的节能

热泵精馏；多效精馏；设置中间再沸器和中间冷凝器

二. 精馏塔的操作和调节

1. 物料平衡的影响和制约
2. 回流比的影响
3. 进料组成和进料热状况的影响

三. 精馏塔的产品质量控制和调节

四. 精馏塔的操作型计算

7.8.4. 教学方法：

结合化工原理上册传热的内容和相关图讲解，以多媒体课件和板书相结合的方法进行课堂教学。

7.8.5. 作业安排

1. 课本 p75，习题 15
2. 复习传质机理和精馏两章，重点复习两组分理想物系精馏的计算，准备下次课第二节课的测验（测验一）。

7.9. 教学单元九

7.9.1. 教学目标：

了解间歇蒸馏、恒沸蒸馏和萃取蒸馏

7.9.2. 教学内容（含重点、难点）：

内容：间歇精馏、恒沸蒸馏和萃取蒸馏

重点：间歇精馏

7.9.3. 教学过程:

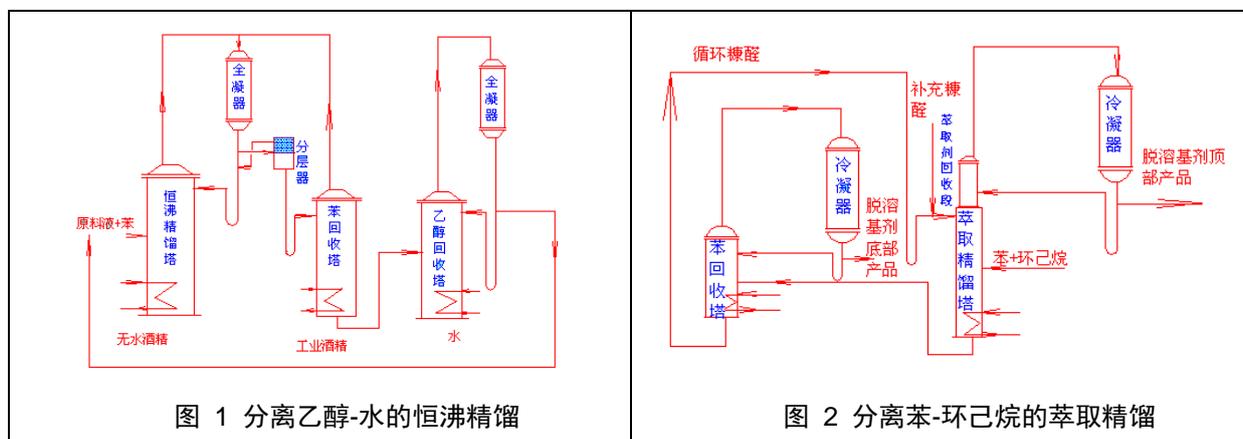
一. 间歇精馏（第一节课）

1. 回流比恒定时的间歇精馏计算
2. 馏出液组成恒定时的间歇精馏计算

二. 恒沸精馏和萃取精馏（第一节课）

恒沸精馏和萃取精馏的共同特点是在混合物中加入第三组分。两者都属多组分非理想物系的分离过程。恒沸精馏中加入的第三组分能与原料中的一个或两个组分形成新的最低恒沸物，从塔顶蒸出。萃取精馏加入的第三组分不与原料中的组分形成恒沸物，只改变原料中组分的相对挥发度，其沸点高，第三组分从塔底馏出。

例：分离乙醇-水的恒沸精馏和分离苯-环己烷的萃取精馏的流程示意图。



三. 测验一（第二节课）

7.9.4. 教学方法:

以多媒体课件和板书相结合的方法进行课堂教学。

7.9.5. 作业安排

无水乙醇制备方法需要用到几种蒸馏方法？

7.10. 教学单元十

7.10.1. 教学目标:

复习本章基本知识点和课堂小测验

7.10.2. 教学内容（含重点、难点）:

针对学生在学习中出现的问题和课后作业出错多的习题讲解和复习

7.10.3. 教学方法：

讲解

7.11. 教学单元十一

7.11.1. 教学目标：

气体的溶解度 溶解度曲线

7.11.2 教学内容（含重点、难点）：

[气体吸收](#)及分类：

吸收在化工生产中的应用

气体的溶解度 溶解度曲线

7.11.3 教学过程：

① [气体吸收](#)及分类：

定义：利用混合气体各组分在溶剂溶解度差异而分离气体混合物的操作——吸收，溶质：气相 \Rightarrow 液相

解吸（脱吸）——与吸收相反的操作，溶质：液相 \Rightarrow 气相

分类：

- 1) 物理吸收、化学吸收
- 2) 单组分吸收、多组分吸收
- 3) 等温吸收、非等温吸收
- 4) 低浓度吸收、高浓度吸收

② 吸收在化工生产中的应用

- 1) . 制造成品：例如：生产三酸（盐酸，硝酸，硫酸）
- 2) . 原料气净化：例如：合成氨原料气：氮气+氢气+二氧化碳（水或碱液）
- 3) . 环境保护：例如：三废处理。废气：SO₂、NO₂
- 4) . 回收有用物质：用硫酸处理焦炉气（氨、苯、甲苯、二甲苯等），回收氨；用洗油处理焦炉气，回收芳烃（苯、甲苯、二甲苯等）。

③ 气体的溶解度

溶解度：气体在液体中的溶解度，就是指气体在液体中的饱和组成。

溶解度的表示方法:

- a. 单位质量的液体中所含溶质的质量
- b. 单位体积的液体中所含溶质的质量

④ 溶解度曲线

定义: 气体在液体中的溶解度可通过实验测定, 由实验结果绘成的曲线称为溶解度曲线。通过溶解度曲线, 可以看出:

1) 在同一溶剂中, 相同的温度和溶质分压下, 不同气体的溶解度差别很大。由上图可知, 其中氨在水中的溶解度最大, 氧在水中的溶解度最小。这表明氨易溶于水, 氧难溶于水, 而二氧化硫则居中。

2) 对同一溶质, 在相同的气相分压下, 溶解度随温度的升高而减小。

3) 对同一溶质, 在相同的温度下, 溶解度随气相分压的升高而增大。

4) 对于同样组成的溶液, 易溶气体溶液上方的分压小, 而难溶气体溶液上方的分压大。

由溶解度曲线所显示的上述规律性可看出, 加压和降温有利于吸收操作, 因为加压和降温可提高气体溶质的溶解度。反之, 减压和升温则有利于解吸操作。

7.11.4 教学方法:

以多媒体课件和板书相结合的方法进行课堂教学。

7.11.5 作业安排

课本 p148, 习题 1, 2

7.12. 教学单元十二

7.12.1. 教学目标:

亨利定律

吸收剂的选择

分子扩散速率方程——费克 (Fick) 定律

7.12.2 教学内容 (含重点、难点):

亨利定律和费克 (Fick) 定律的内容和适用条件 亨利系数的值决定于物系的特性
吸收剂的选择方法 过程方向判断与过程的推动力

7.12.3 教学过程:

① 亨利定律

亨利定律表达了当总压不很高(通常不超过 500kPa)时,在恒定的温度下,稀溶液上方的气体溶质平衡分压与该溶质在液相中的组成间的关系。

$$\text{数学表达式(四种形式): } P_A^* = EX_A \quad P_A^* = CA/H$$
$$y_A^* = mX_A \quad Y_A^* = mX_A$$

亨利系数 E 的值决定于物系的特性及体系的温度。通常,随温度升高而增大。溶质或溶液不同,体系不同, E 也就不同。E 的大小反映了气相组分在该溶剂中溶解度的大小。在同一溶剂中, E 越大,溶解度越小。

H 与 E 相反, H 愈大,溶解度愈大,且随温度 T 的升高 H 而降低

m 与 E 类似, m 愈大,溶解度愈小,且随温度 T 升高而 m 升高。

② 过程方向判断与过程的推动力

过程方向:

a) $y_a = mx_i$, V-L 平衡,

b) $y_1 > mx_1$, $y_1 > y_1^*$, 吸收

c) $y_1 < mx_1$, $y_1 < y_1^*$, 解吸

推动力:

$(y_1 - y_1^*)$ ——气相组成浓度差表示的吸收推动力

$(x_1^* - x_1)$ ——液相组成浓度差表示的吸收推动力

两者 Δ 越大,过程速率也就越快

③ 吸收剂的选择

溶解度:吸收剂对于溶质应具有较大的溶解度,从而减少吸收剂的用量。

选择性:对溶质有较大的溶解度,而对混合气体中的气体组分却基本不溶解。

挥发性:操作温度下的饱和蒸汽压要低。

粘性:尽可能的小。

化学稳定性、毒性、易燃性、发泡性、冰点、价格、来源

④ 分子扩散速率方程——费克(Fick)定律

1) 分子扩散的速率:由分子扩散引起的在单位时间内通过单位面积所传递的物

质量，以 J 表示， $mol/m^2 \cdot s$ 。

2) 费克 (Fick) 定律内容

对于两组分物系，某种组分的扩散通量 (J_A)，与该组分方向上的浓度梯度成正比，此关系在 1855 年由费克 (Fick) 在实验的基础上提出，称为费克定律。

7.12.4 教学方法：

结合生活中的例子引出平衡关系的存在，以多媒体课件和板书相结合的方法讲解稀溶液与亨利定律及理想溶液与拉乌尔定律。

7.12.5 作业安排

课本 P148 习题 3

7.13. 教学单元十三

7.13.1. 教学目标：

气相中的稳态分子扩散

扩散系数

7.13.2 教学内容 (含重点、难点)：

气相中的稳态分子扩散的适用条件

扩散系数主要取决于气体组分的性质和温度 T 、压力 P 。

7.13.3 教学过程：

① 气相中的稳态分子扩散

等分子反向扩散：

$$N_A = \frac{D}{RTz} (p_{A1} - p_{A2})$$

一组分通过另一停滞组分的扩散：
$$N_A = \frac{D}{RTz} \frac{P}{p_{Bm}} (p_{A1} - p_{A2})$$

② 扩散系数

定义：扩散系数是物质很重要的传递特性，它表示物质分子扩散速度的大小，扩散系数大，表示分子扩散快。

影响因素：扩散系数主要取决于气体组分的性质和温度 T 、压力 P 。 $T \uparrow, D \uparrow$ ； $P \uparrow, D \downarrow$ 。扩散系数基本上与物质在气体中的浓度无关。

对液相：P 的影响可忽略，浓度的影响不可忽略。

③ 例题讲解。

7.13.4 教学方法：

以多媒体课件和板书相结合的方法进行课堂教学。

7.13.5 作业安排

课本 P148 习题 4

7.14. 教学单元十四

7.14.1. 教学目标：

涡流扩散

对流传质

吸收过程的机理

7.14.2 教学内容（含重点、难点）：

涡流扩散 对流传质

吸收过程的机理（双膜理论 溶质渗透模型表面更新模型）。

吸收过程包括步骤：气体内单相对流传质——相界面的溶解——液相内的单相传质。一般认为：溶解阻力可略，界面气液处于相平衡状态（并由气相转入液相）；单相对流传质——溶质自气液界面转移（扩散）至液相主体（液相一侧）。

7.14.3 教学过程：

① 涡流扩散

定义：有浓度差时，凭借流体质点的湍动和旋涡来使物质从高浓度向低浓度方向进行传递的现象称为涡流扩散。

原因：流体质点的脉动和旋涡引起流体质点的碰撞与混合。

与分子扩散的比较：物质传递现象；分子扩散——热运动、速率较慢，涡流扩散——质点的碰撞混合，速率快。

② 对流传质

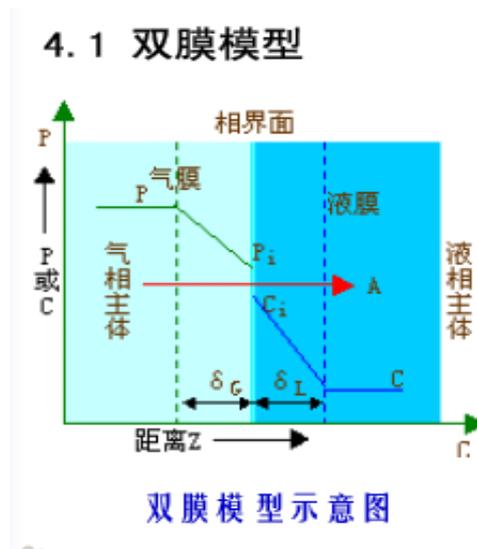
定义：湍流主体与相界面之间的分子扩散和涡流扩散两种传质作用之和。

③ 吸收过程的机理

吸收过程包括步骤：气体内单相对流传质——相界面的溶解——液相内的单相传质。一般认为：溶解阻力可略，界面气液处于相平衡状态（并由气相转入液相）；单相对流传质——溶质自气液界面转移(扩散)至液相主体（液相一侧）。

（一）双膜理论（双阻力理论）

1. 气液两相间存在稳定的相界面，界面两侧各有一个很薄的停滞膜，溶质以分子扩散的方式通过此二膜层由气相主体进入液相主体。
2. 在相界面处，气液两相达到平衡。
3. 在气液两相主体中，溶质浓度均匀。



（二）溶质渗透模型

HiVbie(希格比)于 1935 年提出溶质渗透模型：i) 液体界面有无数微小的液体单元所构成；ii) 暴露在表面的每个液体单元都与气相接触某一短暂时间（暴露时间）后被来自于液相主体的新单元取代，其自身返回液相主体；iii) 溶质在界面的溶解无阻力存在。

（三）表面更新模型

Danckwerts (丹克沃兹)于 1951 年提出的，认为 i) 液体表面是由具有不同暴露时间（或年龄）的液体微元体构成；ii) 各种年龄的微元体被置换下去的几率与它们的年龄无关，而与液体表面上该年龄的微元体数成正比；

④ 吸收速率方程

吸收速率：单位相际传质面积上单位时间内吸收溶质的量 (N_A : $\text{kmol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)，是吸

收计算的重要参数。吸收速率=推动力（浓度差）/阻力=吸收系数×推动力，吸收系数=1/阻力。

1) 用气膜或液膜表示的分吸收速率方程

$$N_A = k_G(p - p_i) = k_L(c_i - c) = k_y(y - y_i) = k_x(x_i - x)$$

2) 总吸收速率方程:

$$N_A = K_G(p - p^*) = K_L(c^* - c) = K_y(y - y^*) = K_x(x^* - x)$$
$$K_Y(Y - Y^*) = K_X(X^* - X)$$

对于易溶气体，H 值很大，传质阻力大都存在于气膜之中，液膜阻力可以忽略，称为“气膜控制”。此时， $K_G \approx k_G$

对于难溶气体，H 值很小，此时传质阻力大都存在于液膜之中，气膜阻力可以忽略，称为“液膜控制”。 $K_L \approx k_L$

7.14.4 教学方法:

结合图，以多媒体课件和生活实际相结合的方法进行课堂教学。

7.14.5 作业安排

课本 P149 习题 7

7.15. 教学单元十五

7.15.1. 教学目标:

物料衡算

吸收操作线方程 吸收剂用量的确定

7.15.2 教学内容（含重点、难点）:

吸收塔的类型 塔内气、液两相的流动方式

逆流的优点物料衡算 吸收操作线方程 吸收剂用量的确定

最小溶剂用量：完成该吸收任务的填料层高度恰好为无穷高时的溶剂用量

7.15.3 教学过程:

1) 吸收塔的类型

工业生产中，吸收操作多采用塔式设备，设备主要有两类：

填料塔：在[填料塔](#)内气、液接触是连续进行的。

板式塔：在板式塔内气、液接触逐级进行的。

2) 塔内气、液两相的流动方式

塔内气、液两相的流动方式主要有两种：(1) 并流；(2) 逆流，通常采用逆流。

3) 在相同条件下，逆流能获得更大的推动力，从而提高传质速率；能提高吸收的出口浓度，减小吸收剂的用量，或降低尾气浓度，提高溶质的吸收率。

4) 逆流的优点：

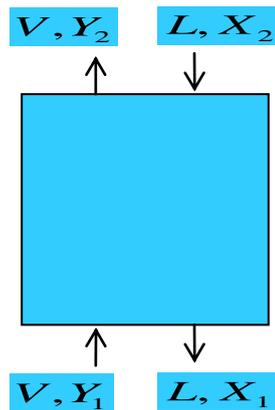
a 逆流可获得较大的平均推动力，能提高速率。

b 塔底的液体恰与刚刚进塔混合气体接触—提高吸收液的组成；减少吸收剂的耗用量。

c 塔顶的气体恰与刚刚进塔的吸收剂接触—降低出塔气体的组成；提高溶质的吸收率。

d 吸收面积小

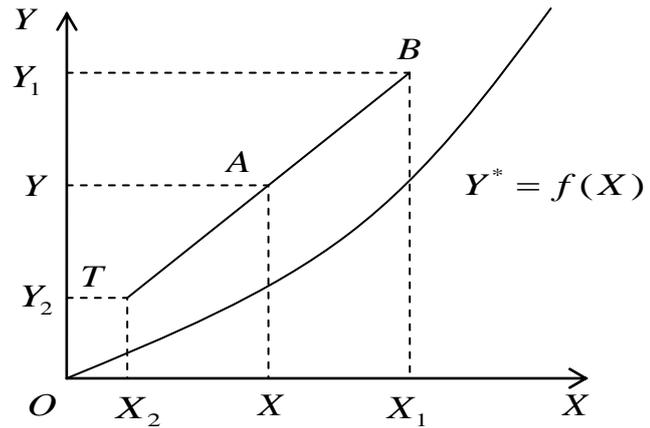
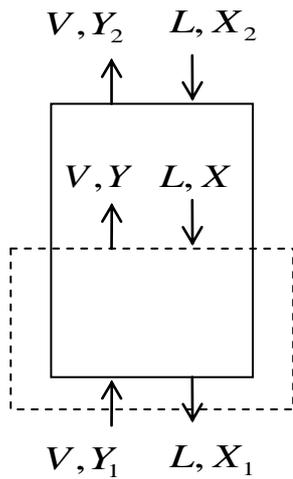
5) 物料衡算：



$$VY_1 + LX_2 = VY_2 + LX_1$$

$$Y_2 = Y_1(1 - \phi_A)$$

6) 吸收操作线方程



逆流吸收操作线方程

$$Y = \frac{L}{V} X + Y_1 - \frac{L}{V} X_1$$

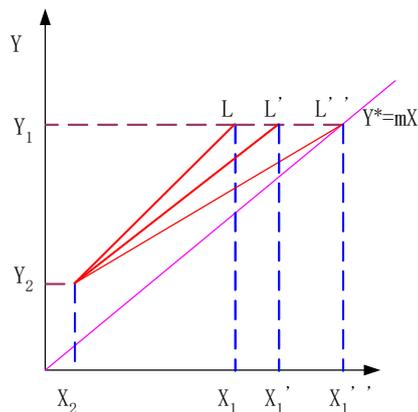
或

$$Y = \frac{L}{V} X + Y_2 - \frac{L}{V} X_2$$

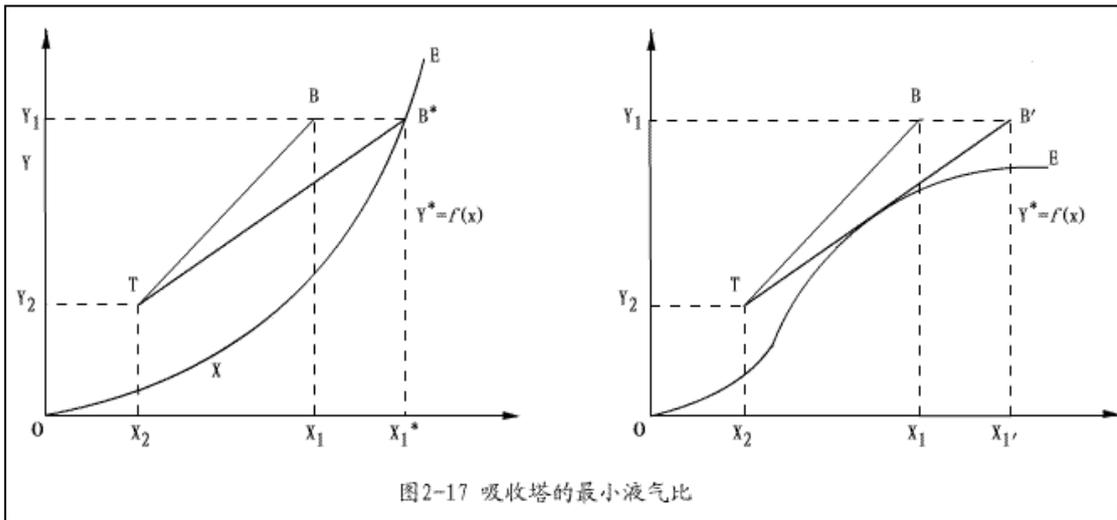
7) 吸收剂用量的确定

最小溶剂用量：完成该吸收任务的填料层高度恰好为无穷高时的溶剂用量，此时的 (L/V) —— 最小液气比 $(L/V)_{min}$ 。

$$\text{对 } Y^* = mX; \text{ 则 } (L/V)_{min} = (Y_1 - Y_2) / (X_1^* - X_2) = (Y_1 - Y_2) / ((Y_1/m) - X_2)$$



当平衡曲线不为直线时



吸收剂的用量：吸收剂最小用量的 1.1~2.0 倍是比较适宜的。即：

$$(L/V) = (1.1 \sim 2.0) (L/V)_{\min} \text{ 或: } L = (1.1 \sim 2.0) L_{\min}$$

8) 例题讲解。

7.15.4 教学方法：

结合图，以板书和多媒体课件相结合的方法进行课堂教学。

7.15.5 作业安排

课本 P149 习题 9

7.16. 教学单元十六

7.16.1. 教学目标：

塔径的计算 填料层高度的计算

7.16.2 教学内容（含重点、难点）：

塔径的计算 填料层高度的计算

7.16.3 教学过程：

1) 塔径的计算

$$D = \left(\frac{4V_s}{\pi u} \right)^{0.5}$$

V_s : 操作条件下混合气体的体积流量 (m^3/s);

D : 塔径(m);

u: 选择的操作流速 (m/s)。

2) 填料层高度的计算

确定填料层高度有两种方法:

传质速率模型法

根据吸收速率方程, 求填料层高度 Z 。此法按最终导出的关系式, 常称为: 传质单元数和传质单元高度法。着重讨论该法, 如何应用吸收速率方程求解连续逆流操作的填料层高度 Z 。

理论级模型法:

理论板 (级) 与等板高度 (物系的物性、操作条件及填料的结构参数)。由达到分离要求所需的理论板数 NT , 求出填料层高度: $Z = HETP \times NT$

式中: HETP 影响因素较多, 可由实际吸收装置的实测数据求取, 一般取 $0.5 \sim 1.0$ m。

1) 推导填料层高度的计算式:

$$Z = \frac{V}{K_Y a \Omega} \int_{Y_2}^{Y_1} \frac{dY}{Y - Y^*} \text{ 和 } Z = \frac{L}{K_X a \Omega} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{X^* - X}$$

2) 推导传质单元数的求法

解析法

脱吸因数法: 平衡关系为 $Y^* = mx + b$, 推导结果为:

$$N_{OG} = \frac{1}{1-S} \ln \left[(1-S) \frac{Y_1 - mX_2}{Y_2 - mX_2} + S \right] = \frac{1}{1-S} \ln \left[(1-S) \frac{Y_1 - Y_2^*}{Y_2 - Y_2^*} + S \right]$$

$$N_{OL} = \frac{1}{1-A} \ln \left[(1-A) \frac{Y_1 - Y_2^*}{Y_1 - Y_1^*} + A \right] = \frac{1}{1-A} \ln \left[(1-A) \frac{Y_1 - Y_2^*}{Y_1 - Y_1^*} + A \right]$$

对数平均推动力法, 推导结果为:

$$N_{OG} = \frac{Y_1 - Y_2}{\Delta Y_m} \quad \Delta Y_m = \frac{\Delta Y_1 - \Delta Y_2}{\ln \frac{\Delta Y_1}{\Delta Y_2}}$$

$$N_{OL} = \frac{X_1 - X_2}{\Delta X_m} \quad \Delta X_m = \frac{\Delta X_1 - \Delta X_2}{\ln \frac{\Delta X_1}{\Delta X_2}}$$

7.16.4 教学方法：

以多媒体课件和板书相结合的方法进行课堂教学。

7.16.5 作业安排

课本 P149 习题 11, 14

7.17. 教学单元十七

7.17.1. 教学目标：

数值积分法求传质单元数

梯级图解法

7.17.2 教学内容（含重点、难点）：

数值积分法求传质单元数适用范围

梯级图解法（平衡线为直线或弯曲程度不大时）

7.17.3 教学过程：

① 复习上节内容.

② 数值积分法求传质单元数

适用范围：当平衡线 $Y^* = f(X)$ 为曲线. 可用辛普森法.

③ 梯级图解法（贝克法）

当平衡线为直线或弯曲程度不大时，可用梯级图解法求总传质单元数。步骤如下：

a 建立平面直角坐标系 XOY。

b 画出平衡线 OE 和操作线 TB。

c 将操作线和平衡线之间垂直线中点连线 NM。

d 从点 T 出发，作水平线交 NM 于点 F，延长 TF 至点 F'，使 $FF' = TF$ ，过点 F' 作垂直线交于 TB 于点 A。再从点 A 类推作梯级，直至达到或超过点 B。

e 每个梯级代表一个气相总传质单元。

相平衡关系。（传热阻力和传质阻力均为 0）

填料塔： $Z=NT \times HETP$ ；

填料塔塔高 = 理论板层数 \times 等板高度

板式塔：

$H=(NT/ET-1) \times HT$ 。

板式塔塔高 = （理论板层数 / 全塔效率） \times 板间距

② 梯级图解法求理论板层数

对平衡曲线的形状无任何限制。

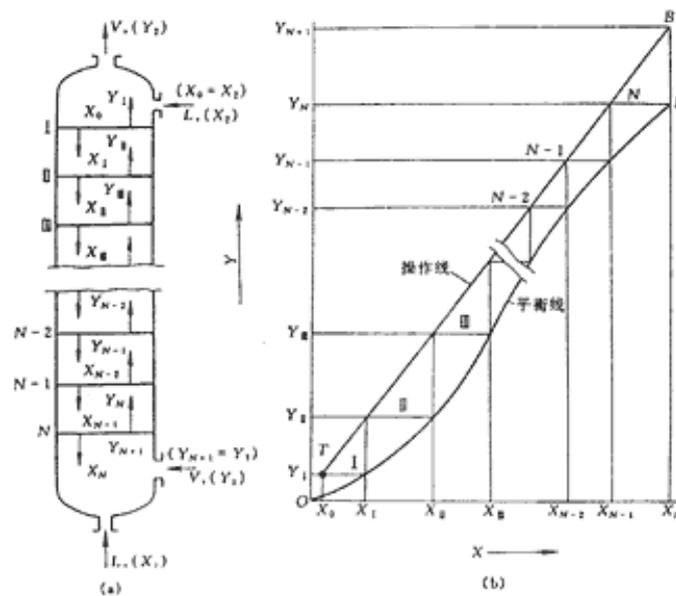


图 2-22 吸收塔的理论板数

③ 解析法求理论板层数

对于低浓度气体吸收, 当 $Y^*=m X + b$ 时, 可用克列姆塞尔方程解析求解。

推导克列姆塞尔方程, 其结果为:

$$\text{可整理为 } N_T = \frac{1}{\ln A} \ln \left[\left(1 - \frac{1}{A}\right) \frac{Y_1 - Y_2^*}{Y_2 - Y_2^*} + \frac{1}{A} \right]$$

④ 吸收系数的测定:

$$\text{总吸收系数: } Z=(V(Y_1-Y_2))/(K_y a \Delta \Omega Y m) \rightarrow K_y a=(V(Y_1-Y_2))/(Z \Delta \Omega Y m)$$

GA (吸收负荷): 单位时间内塔内吸收的溶质量 (kmol/s); $VP=Z\Omega$: 填料层体积 (m³); ΔY_m : 塔内平均气相总推动力。

膜吸收系数: 设法在另一相的阻力可以忽略不计或可以推算出来的条件下来进行。如测量用水吸收低浓度的氨的气膜体积吸收系数:

$$\frac{1}{k_G a} = \frac{1}{K_G a} - \frac{1}{k_L a} \Rightarrow (k_L a)_{NH_3} = (k_L a)_{O_2} \left(\frac{D_{NH_3}}{D_{O_2}} \right)^{0.5}$$

氧气在水中的溶解度很小, 当用水吸收氧气时, 气膜的阻力可以忽略, 可以得到: $K_L a = k_L a$ 。

⑤ 例题讲解。

7.18.4 教学方法:

结合举例, 以多媒体课件和板书相结合的方法进行课堂教学, 课堂讲解为主。

7.18.5 作业安排

课本 P150 习题 16

7.19. 教学单元十九

7.19.1. 教学目标:

吸收系数的经验公式

气相及液相传质单元高度的计算

脱吸及其他条件下的吸收

7.19.2 教学内容 (含重点、难点):

吸收系数的经验公式及其准数关联式

计算气膜吸收系数的准数关联式 计算液膜吸收系数的准数关联式

气相及液相传质单元高度的计算 脱吸及其他条件下的吸收

7.19.3 教学过程:

① 吸收系数的经验公式

用水吸收氨: $k_G a = 6.07 \times 10^{-4} G^{0.9} W^{0.39}$

$k_G a$: 气膜体积吸收系数 (kmol/(m³·h·kPa)); G : 气相空塔质量流速 (kg/m²·h);

W : 液相空塔质量流速 (kg/m²·h)。

条件：1) 在填料塔中用水吸收氨；2) 直径为 12.5mm 的陶瓷环形填料。

常压下用水吸收二氧化碳： $k_L a = 2.57 U^{0.96}$

$k_L a$ ：液膜体积吸收系数 $\text{kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{h} \cdot \text{kmol}/\text{m}^3)$ ；U：喷淋密度（单位时间内喷淋在单位塔截面积上的液体体积 $(\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h}))$ ）。

条件：1) 常压下填料塔中用水吸收二氧化碳；2) 直径 10~32mm 的陶瓷环；3) $U=3\sim 20\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ；4) $G=130\sim 580\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ；5) $21\sim 27^\circ\text{C}$ 。

用水吸收二氧化碳

$$k_G a = 9.81 \times 10^{-4} G^{0.7} W^{0.25} \quad (\text{kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa}))$$

$$k_L a = \alpha W^{0.82} \quad (1/\text{h})$$

$$G=320\sim 4150\text{kg}$$

条件：1) $G=320\sim 4150\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ；2) $W=4400\sim 58500\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ；3) 直径 25mm 的环形填料。

② 吸收系数的准数关联式

施伍德 (Sherwood) 准数

$$\text{气相: } Sh_G = \frac{k_G}{(DP/(RTp_{bm}))}; \quad \text{液相: } Sh_L = \frac{k_L}{(D'C/(lc_{sm}))}$$

L：特征尺寸，可以是填料直径或塔径（湿壁塔）等，依据不同关联式而定 (m)。

施密特 (Schmidt) 准数

$$\text{气相: } Sc_G = \frac{\mu_G}{\rho_G D}; \quad \text{液相: } Sc_L = \frac{\mu_L}{\rho_L D}$$

雷诺准数

$$\text{气相: } Re_G = \frac{d_e u_0 \rho}{\mu} = \frac{4\varepsilon(u/\varepsilon)\rho}{\delta\mu} = \frac{4G}{\delta\mu}$$

$$\text{液相: } Re_L = \frac{4W}{\delta\mu_L}$$

伽利略准数 (Gallilio)

伽利略准数 G_a 反映液体受重力作用而沿填料表面向下流动时，所受重力与粘滞力之比的相对关系。

$$G_a = \frac{gl^3 \rho^2}{\mu_L^2}$$

③计算气膜吸收系数的准数关联式：

$$Sh = \alpha(\text{Re}_G)^\beta (\text{Sc}_G)^\gamma \xrightarrow{\text{或}} k_G = \alpha \frac{DP}{RTp_{Bm}l} (\text{Re}_G)^\beta (\text{Sc}_G)^\gamma$$

条件：湿壁塔， $\text{Re}_G=2 \times 10^3 \sim 3.5 \times 10^4$ ； $\text{Sc}_G=0.6 \sim 2.5$ ； $P=10.1 \sim 303\text{kPa}$ （绝压）。式中： $\alpha = 0.066$ ； $\beta=0.83$ ； $\gamma=0.44$ ； l ：特征尺寸，湿壁塔的塔径。当用于拉西环的填料塔时： $\alpha = 0.066$ ； $\beta=0.8$ ； $\gamma=0.33$ ； l 为拉西环的外径。

④ 计算液膜吸收系数的准数关联式

$$Sh_L = 0.00595(\text{Re}_L)^{0.67} (\text{Sc}_L)^{0.33} (\text{Ga})^{0.33}$$

$$\text{或：} k_L = 0.00595 \frac{DC}{c_{sm}l} (\text{Re}_L)^{0.67} (\text{Sc}_L)^{0.33} (\text{Ga})^{0.33}$$

特征尺寸 l 为填料直径 (m)。

⑤ 气相及液相传质单元高度的计算

$$\text{气相传质单元高度}(m): H_G = \frac{V}{k_y a \Omega}$$

$$\text{液相传质单元高度}(m): H_L = \frac{L}{k_x a \Omega}$$

在有些资料中可以查到气相及液相传质单元高度的计算式。如：

$$H_G = \alpha G^\beta W^\gamma (\text{Sc}_G)^{0.5}; H_L = \alpha_1 \left(\frac{W}{\mu_L}\right)^{\beta_1} (\text{Sc}_L)^{0.5}$$

α 、 β 、 γ ：可从 P135 页表 2-8 及相关手册中查取； α_1 、 β_1 ：可从 P128 页表 2-8 及相关手册中查取。

相同操作条件下，对不同溶质时的液相传质单元高度换算：

$$\frac{(H_L)'_A}{(H_L)_A} = \left[\frac{(\text{Sc}_L)'_A}{(\text{Sc}_L)_A} \right]^{0.5} \Rightarrow (H_L)'_A = (H_L)_A \left[\frac{(\text{Sc}_L)'_A}{(\text{Sc}_L)_A} \right]^{0.5}$$

⑥ 脱吸及其他条件下的吸收

介绍脱吸的方法、高组成气体吸收、非等温吸收、多组分吸收、化学吸收。

7.19.4 教学方法：

以多媒体课件和板书相结合的方法进行课堂教学。

7.20. 教学单元二十

7.20.1. 教学目标:

复习本章基本知识点和课堂小测验

7.20.2. 教学内容 (含重点、难点):

针对学生在学习中出现的问题和课后作业出错多的习题讲解和复习

7.20.3. 教学方法:

讲解

7.21 教学单元二十一

7.21.1 教学目标:

1. 了解几种干燥方式和干燥在化工生产中的应用
2. 掌握湿空气的各个参数的计算方法
3. 熟悉空气湿度图的绘制方法
4. 掌握空气湿度图的使用法

7.21.2 教学内容 (含重点、难点):

内容: 干燥概念和分类、空气中的水蒸气分压、空气的湿含量、相对湿度、湿空气的焓和湿质量热容、湿比容、干球温度、湿球温度、空气湿度图的绘制、空气湿度图的使用法

重点: 湿空气的各个参数的计算方法、空气湿度图的使用法

难点: 空气的湿球温度、空气湿度图的绘制和某些用法

7.21.3 教学过程:

一. 干燥概述

1. 干燥定义
2. 干燥分类

根据供热方式不同, 干燥可分为对流干燥、传导干燥、辐射干燥、介电加热干燥。

3. 干燥目的与实例（结合自己专业）

二. 湿空气的性质

1. 水分含量

1. 湿度（湿含量） H

2. 水汽分压 P_w

3. 相对湿度 φ

2. 焓和热容

湿比热（湿热） c_H [kJ/kg 干气·°C] $c_H = c_a + c_w H = 1.01 + 1.88H = f(H)$

焓（热含量） I [kJ/kg 干气]

3. 湿空气的比容（湿比容） v_H [m³湿空气/kg 干气] $v_H = v_a + v_w H$

4. 温度类性质

干球温度 t

湿球温度 t_w

绝热饱和温度 t_{as}

4. 露点温度 t_d

三. 空气的湿度图及其应用

相律: $F = C - \Phi + 2 = 3 - 2 = 1$; 知道 2 个量可求其他量。

t-H 图五条线:

1. 等 H 线; 2. 等 t 线; 3. 等 φ 线; (*) 4. 等 $t_{as}(t_w)$ (**) 5. c_H 线。

例: 在总压为 101.3kpa 下, 空气的温度为 20°C, 湿度为 0.01 kg 水/kg 干气。试求:

1. φ 、 t_d 、 t_w ;
 2. 总压 P 与湿度 H 不变, 将空气温度提高至 50°C 时的 φ ;
 3. 温度 t 与湿度 H 不变, 将空气总压提高至 120kPa 时的 φ ;
- 结合湿度图, 请同学们在课堂上讨论此题。

7.21.4 教学方法:

讲解、实物演示、照片、动画、练习

7.21.5 作业安排

课本 p296-297, 习题 1, 2

7.22 教学单元二十二

7.22.1 教学目标:

1. 熟悉空气干燥器的物料衡算与热量衡算和干燥过程的图示
2. 掌握空气干燥器的热效率和等焓干燥过程的计算

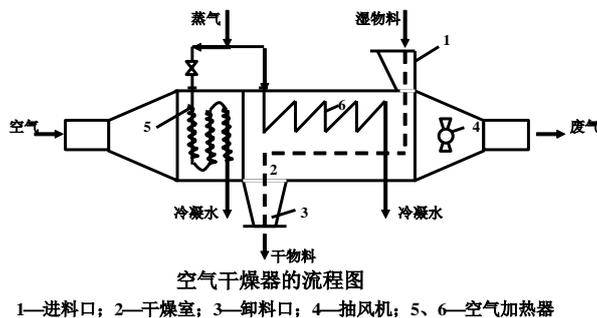
7.22.2 教学内容 (含重点、难点):

内容: 空气干燥器的物料、热量衡算、热效率、理想干燥、非理想干燥、干燥过程的图示

重点: 等焓干燥过程的热量衡算和空气出口状态的确定

难点: 热量衡算的能量去向, 采用图示解决此难点。

7.22.3 教学过程:



四. 湿物料的性质

1. 湿基含水率

$$\omega = \frac{\text{水分质量}}{\text{湿物料的总质量}} \times 100\%$$

2. 干基含水率

$$X = \frac{\text{水分质量}}{\text{湿物料中绝干物料的质量}} \times 100\%$$

两种含水率之间的换算关系:

$$\omega = \frac{X}{1+X}, \quad X = \frac{\omega}{1-\omega}$$

3. 湿物料的比热容 c_m

4. 湿物料的焓 I'

五. 物料衡算

求解：干燥介质用量，蒸发的水分量等

蒸发的水分量：

$$\begin{aligned} W &= G_1 - G_2 \\ &= G_C(X_1 - X_2), \quad G_C = G_1(1 - \omega_1) = G_2(1 - \omega_2) \\ &= L(H_2 - H_0) \end{aligned}$$

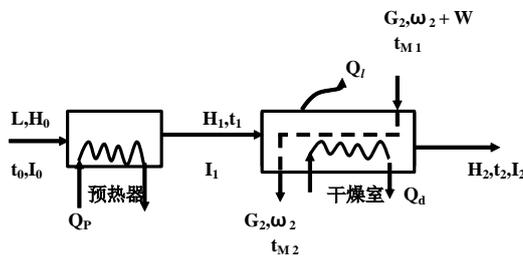
绝干空气用量：

$$L = \frac{W}{H_2 - H_0}$$

比干空气用量：

$$l = \frac{1}{H_2 - H_0}$$

六. 热量衡算



加入干燥系统的全部能量有四个用途：加热空气、蒸发水分、加热物料和热损失。

七. 干燥设备的热效率

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\text{蒸发水分所需的热量 } Q_{\text{气化}}}{\text{输入干燥设备的总热量 } Q} \times 100\% \\ &= \frac{W[(2492 + 1.88t_2) - c_l t_{M1}]}{Q_p + Q_d} \times 100\% \end{aligned}$$

思考：一般， $\eta=30\sim60\%$ ；那么，损失到哪里去了？如何减小损失，提高热效率？

影响热效率的因素：

H_2 提高、 t_2 提高、 Q_i 降低，则 η 提高。此外，尽量利用废气中的热量，例如用废气预热冷空气或湿物料，或将废气循环使用，也将有助于热效率的提高。

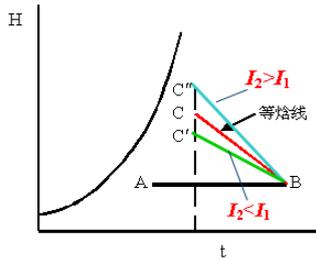
八. 理想干燥过程和实际干燥过程

1. 理想干燥过程（又称等焓干燥过程）

$$LI_1 + G_1 c_{M_1} t_{M_1} + Q_d = LI_2 + G_2 c_{M_2} t_{M_2} + Q_l$$

$$\text{若 } G_1 c_{M_1} t_{M_1} + Q_d = G_2 c_{M_2} t_{M_2} + Q_l$$

通常 $Q_d = 0$ 、 $Q_l = 0$ 、物料带进、带出的热量均可忽略不计。故有 $I_1 = I_2$



2. 实际干燥过程

$$(1) I_2 > I_1 \quad (2) I_2 < I_1$$

7.22.4 教学方法：

结合图，以多媒体课件和板书相结合的方法进行课堂教学。

7.22.5 作业安排

课本 p297，习题 3，5

7.23 教学单元二十三

7.23.1 教学目标：

掌握水分在空气与物料间的平衡关系，恒定干燥条件下干燥速度曲线，恒速阶段与降速阶段的特征，恒定干燥条件下恒速阶段和降速阶段干燥时间的计算

7.23.2 教学内容（含重点、难点）：

内容：平衡水分、自由水分、结合水分、非结合水分、恒定干燥条件、干燥速度曲线、恒速阶段、降速阶段、临界水分、恒定干燥条件下恒速阶段和降速阶段干燥时间的计算、各种形式的干燥器

重点：平衡水分、自由水分、结合水分、非结合水分的划分；恒定干燥条件下的干燥速度曲线；恒速阶段与降速阶段的特征和干燥时间的计算

7.23.3 教学过程:

九. 水分在空气与物料间的平衡关系

1. 平衡水分与自由水分

平衡水分 (X^*) —— 不能用干燥方法除去的水分。

$$X^* = f(\text{物料种类、空气性质})$$

不吸水物料的 X^* 小; $\varphi \uparrow \rightarrow X^* \uparrow$

自由水分 ($X - X^*$) —— 可用干燥方法除去的那部分水分。 $X - X^*$

2. 结合水分与非结合水分

结合水分——水与物料结合力强, $p_w < p_s$ 。

非结合水分——水与物料结合力弱, $p_w = p_s$ 。

结合水分与非结合水分只与物料的性质有关, 而与空气的状态无关, 这是与平衡水分的主要区别。平衡水分一定是结合水分。

十. 恒定干燥条件下的干燥速度

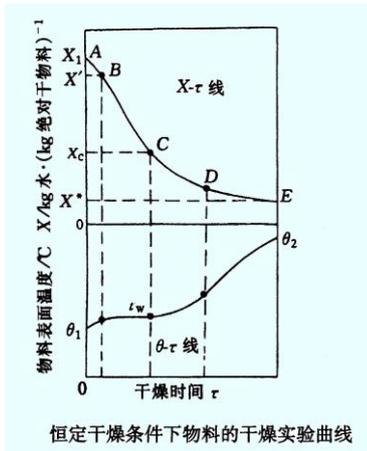
恒定干燥条件: 空气的温度、湿度、流速及与物料接触方式不变 (大量空气, 少量物料)

干燥速度: 单位时间、单位干燥面积汽化水分量

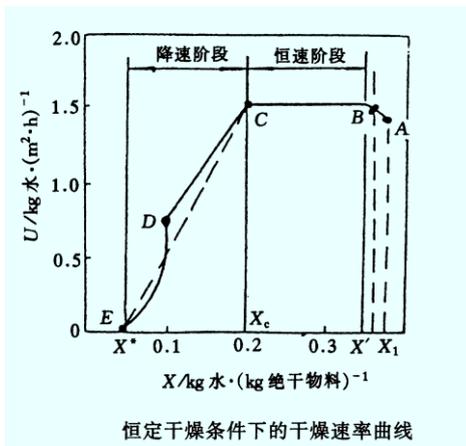
$$U = \frac{dW}{Ad\theta}, \quad \text{即} \quad U = -\frac{G_c dX}{Ad\theta} \quad [\text{kg 水}/\text{m}^2 \cdot \text{s}]$$

1. 干燥曲线及干燥速度曲线

干燥曲线——用于描述物料含水量 X 、干燥时间 θ 及物料表面温度 t 之间的关系曲线。



干燥速度曲线----干燥速度与物料含水量的关系



ABC 段：恒速干燥阶段； AB 段：预热段； BC 段：恒速段； CDE 段：降速干燥阶段； C 点：临界点； X_c ：临界含水量； E 点：平衡点； X^* ：平衡水分

十一. 恒定干燥条件下恒速阶段干燥时间 t_c

$$\text{由干燥速率定义式: } U = -\frac{G_c dX}{A d\theta}$$

$$d\theta = -\frac{G_c dX}{AU}$$

$$\int_0^{\theta_1} d\theta = \int_{X_1}^{X_c} -\frac{G_c}{AU} dX$$

对于恒速干燥: $U = U_c = \text{const.}$

$$\theta_1 = \frac{G_c}{AU_c} (X_1 - X_c)$$

十二. 恒定干燥条件下降速阶段干燥时间

当 $X < X_c$ 时, 进入降速干燥阶段

$$\int_0^{\tau_2} d\theta = \int_{x_c}^{x_2} -\frac{G_c}{AU} dX$$

$$\theta_2 = \int_{x_2}^{x_c} \frac{G_c}{AU} dX$$

1. 图解积分法(了解)
2. 近似计算法(重点)

$$U(X) = U_c \frac{X - X^*}{X_c - X^*}, \quad \theta_2 = \int_{x_2}^{x_c} \frac{G_c}{AU(X)} dX$$

$$\theta_2 = \frac{G_c (X_c - X^*)}{AU_c} \ln \frac{X_c - X^*}{X_2 - X^*}$$

7.23.4 教学方法:

结合图或动画, 以多媒体课件和板书相结合的方法进行课堂教学。

7.23.5 作业安排

课本 p298, 习题 9, 12

复习干燥一章, 准备下次第二节课的测验二。

思考 1: 影响恒速阶段干燥速率的因素有那些?

思考 2: 恒速阶段除去的是什么水分?

思考 3: 降速阶段除去的是什么水分?

思考 4: 影响临界含水量大小的因素有那些?

7.24 教学单元二十四

7.24.1 教学目标:

熟悉常用干燥设备

7.24.2 教学内容 (含重点、难点):

内容: 常用干燥器的结构、适用场合、优缺点

7.24.3 教学过程:

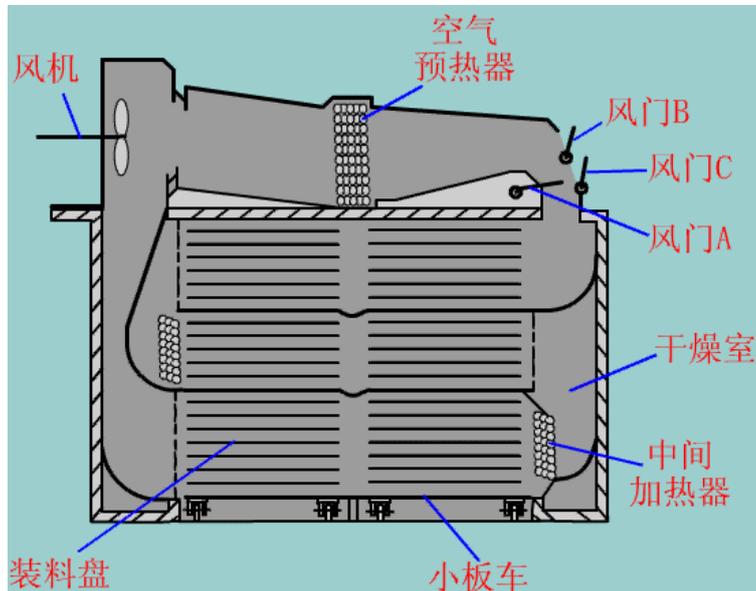
十三. 干燥器概述

干燥设备所处理固体物料 (相对于液/气体物料) 的多样性: 形状多样: 块、粒、粉、丝、片; 性质多样: 多孔/无孔, 粘结与否, 收缩与否, 变形/龟裂与否, 变质 (腐败)

与否，……等等。固体物料的上述多样性，直接决定了干燥设备的多样性。

十四. 干燥设备

1. 盘架式干燥器



适用场合：任何形状的物料。

优点：对物料的适应性强。

缺点：物料得不到分散，干燥速率低，热利用率较差、且产品质量不均匀。产量不大。

注：间歇操作。

2. 洞道式干燥器



适用场合：处理量大、干燥时间长的物料

优、缺点：同厢式干燥器

注：连续或半连续

3. 转筒干燥机

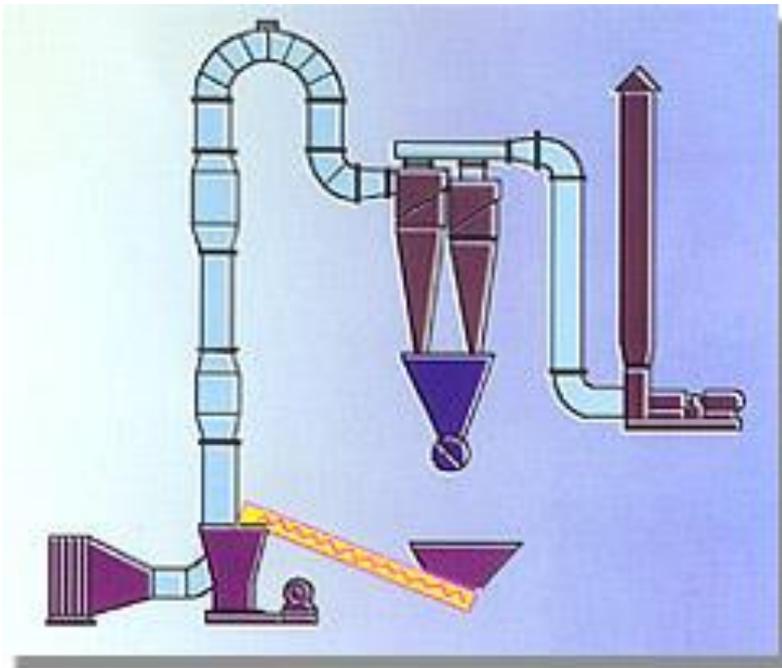


适用范围：可干燥粉状物料、颗粒物料、块状物料等等。

优点：生产能力大，物料适应性强，可连续操作，操作机械化，操作弹性大。

缺点：笨重。

4. 气流干燥器



适用范围：小颗粒物料、特别是热敏性小颗粒物料。

优点：干燥时间短，干燥效率高。

缺点：系统的流动阻力大，要求的厂房高，对除尘设备要求严。

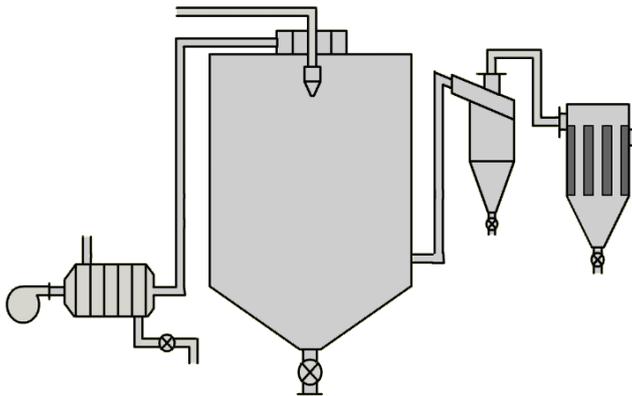
5. 沸腾床干燥器（又常称流化床干燥器）



适用范围：主要用于干燥晶体和小颗粒物料

优点：气、固接触良好，传热传质速度快，床内温度均匀，固体可“流动”（容易连续化）。

6. 喷雾干燥器



适用范围：热敏料液。

优点：

雾低小、因而干燥面积大，因此干燥快、适合热敏物料的干燥。

可由液体直接获得粉装固体产品---省去蒸发、结晶、粉碎等操作。

避免干燥过程中粉尘飞扬现象。实现连续化、自动化。

缺点：体积大、耗热多。

十五. 干燥一章总结（第一节课）及测验二（第二节课，内容仅包括干燥一章）

7.24.4 教学方法：

学生对实际设备了解不多，可结合图形、动画，有条件可参观有关实验设备来讲解。

7.24.5 作业安排

学生自己课后复习本章

7.25 教学单元二十五

7.25.1 教学目标：

复习本章基本知识点和课堂小测验

7.25.2 教学内容（含重点、难点）：

针对学生在学习中出现的问题和课后作业出错多的习题讲解和复习

7.25.3 教学方法：

讲解

7.26 教学单元二十六

7.26.1 教学目标

精馏、吸收、干燥总复习

7.26.2 教学内容（含重点、难点）：

内容：精馏、吸收、干燥总结回顾。

7.26.3 教学过程：

精馏总复习

1. 双组分溶液的汽液平衡

双组分理想溶液的拉乌尔定律（泡点方程，露点方程，相对挥发度表示的汽液平衡关系及 t - y - x 图， y - x 图）

了解双组分非理想溶液的汽液平衡关系

2. 了解板式塔的结构和力学状况

3. 蒸馏与精馏

理解精馏原理及过程

掌握平衡蒸馏和简单蒸馏的计算

双组分连续精馏塔的计算

全塔物料衡算

操作线方程

进料热状况和回流比

逐板计算法和图解法求理论板数

简捷算法求理论板数

吸收总复习

4. 气—液平衡

气体的溶解度

亨利定律

吸收剂的选择

5. 传质机理与吸收速率

分子扩散与菲克定律

气相中的定态分子扩散

液相中的定态分子扩散

扩散系数

对流传质

吸收过程的机理

吸收速率方程

6. 吸收塔的计算

吸收塔物料衡算与操作线方程

吸收剂用量的决定

塔径的计算

填料层高度计算

理论板层数的计算

吸收系数

7. 吸收系数的测定

吸收系数的经验公式

吸收系数的准数关联式

8. 脱吸及其他条件下的吸收

脱吸

非等温吸收

高浓度吸收

干燥总复习回顾

湿空气的性质参数及湿度图

干燥过程的物料衡算与热量衡算

固体物料中所含水分的性质

干燥速率与干燥时间

7.26.4 教学方法：

以多媒体课件和板书相结合的方法进行课堂教学。

8. 课程要求

通过本课程的学习，学生应达到以下要求：

- 1、能正确理解各单元操作的基本原理；了解典型设备的构造、性能和操作原理，并具有设备选型及较核的基本知识。
- 2、熟悉主要单元操作过程及设备的基本计算方法；掌握基本计算公式的物理意义、应用方法和适用范围；具有查阅和使用常用工程计算图表、手册、资料的能力。
- 3、熟悉常见化工单元操作要领。
- 4、具有选择适宜操作条件、探索强化过程途径和提高设备效能的初步能力；具有运用工程技术观点分析和解决化工单元操作中一般问题的初步能力。

9. 课程考核

9.1. 成绩的构成与评分规则说明

本门课程的总成绩由平时成绩 1 和平时成绩 2 两部分构成，

即：总成绩 = 平时成绩 1 ×(40%~50%) + 平时成绩 2 ×(50%~60%)。

平时成绩 1 由出勤和作业成绩构成，各占 50%；平时成绩 2 由三次测验成绩构成，比例为测验一 25%，测验二 25%，测验三 50%。

9.2. 出勤要求

1. 本课程授课过程中采用不定时点名和抽点；
2. 出勤总分为 100 分，每旷课一次扣 10 分，每请假一次扣 5 分，迟到或早退一次扣 5 分。
3. 缺勤三次以上，本门课程成绩为不及格。

9.3. 作业要求

1. 本课程作业统一提交作业本，不接受活页纸；
2. 作业必须独立完成，用中性笔或圆珠笔按一定规格书写，字迹清楚；
3. 作业提交时间为每周一上课铃响之前；
4. 教师每次至少批改总人数的三分之一，按“A”(90-100 分)、“B”(80-89 分)、“C”(70-79)、“D”(60-69 分)、“E”(60 分以下)五级记分每次登记作业情况，期末取平均计算作业成绩。每次作业批改完取适当时间及时进行习题课，对作业中普遍存在的问题进行评讲。
5. 作业缺交次数超过 1/3，本门课程成绩为不及格。

9.4. 测验要求

1. 测验要求独立完成，不得交头接耳；
2. 测验一内容包括传质机理和精馏两章；测验二内容包括干燥一章；测验三内容包括传质机理、精馏和干燥三章；
3. 每次测验成绩为 100 分，期末时按照测验一 25%，测验二 25%，测验三 50%的比例进行折算平时成绩 2。
4. 三次测验完成后，教师须及时批改、反馈和提交成绩。

10. 学术诚信

独立完成一定量作业是学好本课程的重要手段，每章节均给学生布置一定量的作业。学生之间作业抄袭、剽窃，考试作弊，一经发现，所有当事人的成绩均为 0 分，并

按学校有关规定给与处罚。作业必须在规定的时间内提交作业，迟交的作业将被扣分。

教师应本着严谨严格、认真负责、一视同仁的态度，通过同一种考核标准对每位学生的能力表现进行考核。

11. 课堂规范

11.1. 教师课堂教学规范

1、教师在进行教学设计时，要严格执行课程实施大纲反映出来的教学目标、教学任务、教学要求和教学原则。严格按课程实施大纲施教，杜绝课堂教学的随意性。

2、教师要体现教学内容的教学目标、认知层次，突出重点和难点，选择适宜的教学组织形式和教授方法。

3、教师在课堂教学中的行为要符合教师的职业道德，要按学校有关规定对学生进行教学管理，注重自身的教学礼仪，上课时不能接听手机，手机应调到静音或关机。板书应设计合理，书写工整。

4、准时上课，按时下课，不迟到，不早退，不无故缺课，不允许私自调课、停课。教师因病或因事不能按时到校上课者，应提前办理书面请假手续，并通知学生补课时间。

11.2. 学生课堂行为规范

1、不迟到、不早退、不旷课、有事课前请假。因故迟到应敲门，向老师致歉，经老师同意后方可进入，课后应说明原因。

2、上课将手机调到静音或关机状态。

3、遵守课堂纪律，课堂上不睡觉，不吃东西、喝水，不窃窃私语，不做与课堂教学无关的事。

4、衣着整洁，举止端庄。不穿背心、拖鞋进入课堂。

12. 课程资源

12.1. 教材与参考书

教材：夏青、陈常贵编著，化工原理（上册），天津大学出版社，2005年

参考书：1、谭天恩、丁惠华等编著，化工原理，化学工业出版社，2000年；

2、赵汝溥、管国锋编著，化工原理，化学工业出版社，1999年；

3、陈敏恒、丛德滋等编著，化工原理，化学工业出版社，2001年；

4、赵文、王晓红等编著，化工原理，石油大学出版社，2001年。

12.2. 专业学术著作

Unit Operations of Chemical Engineering, 6th ed. New York, W. L. McCabe, J. C. Smith., McGraw. Hill Inc., 2001.

12.3. 专业刊物

相关中文核心期刊有化工学报、石油化工、应用化学、化学工程、化工进展、精细化工、高校化学工程学报、过程工程学报等

12.4. 网络课程资源

本课程学习过程中可查阅网络课程资源如精品课程、化工原理及实验视频，还可加入化工类相关网络论坛，如小木虫等。

13. 教学合约

本课程实施大纲是该课程学习的大纲，是教师在开课前必须向学生提供的一种基本的教学文件。本课程实施大纲规范了在本课程实施过程中教师与学生的职责，规定了教学必须达到的标准，成为学生学习的工具、师生沟通的桥梁和教学质量保障的工具。教师和学生均应详细认真阅读本课程的课程实施大纲，并深刻理解其内容，如学生同意遵守课程实施大纲中阐述的规定、标准和目标，须在下方签字，使此教学合约生效。

学 生（签字）:

年 月 日