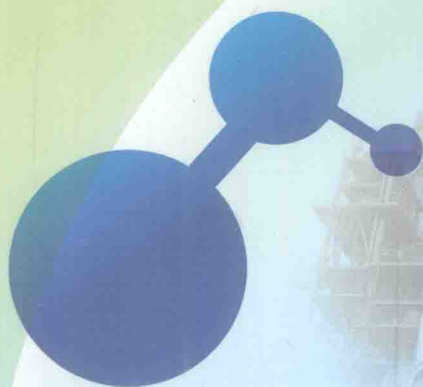




“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定



HUAGONG
DANYUAN
GUOCHENG
JI SHEBEI
DE XUANZE
YU CAOZUO

化工单元过程及设备的 选择与操作



下

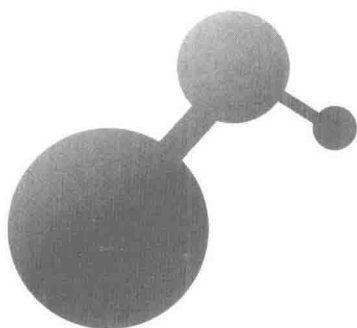
◎ 徐忠娟 主编 ◎ 张 睿 王宇飞 副主编



化学工业出版社



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定



HUAGONG
DANYUAN
GUOCHENG
JI SHEBEI
DE XUANZE
YU CAOZUO

化工单元过程及设备的 选择与操作

下

○ 徐忠娟 主编 ○ 张 睿 王宇飞 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本教材是基于工作过程系统化的理念,按项目导向、任务驱动的原则编写。全书分上、下两册,共设置了八个学习情境,每个学习情境均以来自企业的真实工程任务为载体,重点介绍化工常用单元操作过程或反应过程的工作原理、设备结构及相关的操作与维护技术。

下册内容包括:蒸馏过程及设备、吸收过程及设备、干燥过程及设备和反应过程及设备。全书内容循序渐进、深入浅出,每个情境均适度配置有思考题、例题及课后实践与练习题。

本书可作为高等职业院校应用化工技术、石油化工生产技术及精细化工生产技术等化工及相关专业的以培养化工生产岗位基本操作技能为目标的课程教材,也可供化工、医药、食品、环保等相关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工单元过程及设备的选择与操作(上、下册)/徐忠娟
主编. —北京:化学工业出版社,2015.3
“十二五”职业教育国家规划教材
ISBN 978-7-122-22595-5

I. ①化… II. ①徐… III. ①化工单元操作-高等职业
教育-教材②化工设备-高等职业教育-教材 IV.
①TQ02 ②TQ05

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第300619号

责任编辑: 窦 臻 刘心怡
责任校对: 吴 静

装帧设计: 刘剑宁

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 装: 三河市廷风印装有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张15½ 字数382千字 2015年7月北京第1版第1次印刷

购书咨询: 010-64518888(传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 75.00元(全二册)

版权所有 违者必究

前 言

“化工单元过程及设备的选择与操作”是应用化工技术、石油化工生产技术、精细化学品生产技术等化工类专业的一门重要的专业核心课程。通过本课程学习后，学生可运用各单元过程的基本理论来分析和解决化工生产中的一些简单的工程问题，凭借所掌握的基本操作技能，胜任有关装置的操作与管理工作的。

本教材是在应用化工技术专业、石油化工生产技术专业、精细化学品生产技术专业三个专业教学改革的基础上，以基于工作过程系统化的理念编写的。经全国职业教育教材审定委员会审定，确定为“十二五”职业教育国家规划教材。教材编写遵循学生的认知规律，力求紧密结合生产实际。在吸取同类教材优点的基础上，本教材编写过程中进行了以下尝试。

(1) 校企合作，选择学习载体，以项目导向、任务驱动的思路编写

深入学生就业企业、学校合作企业，收集可用于教学的工程任务或工作案例，在企业专家的帮助下，筛选典型工程任务作为学习载体，设计了八个学习情境。每个学习情境都是以一到二个真实的工程任务为载体，按照学生的认知规律和完成实际工程任务的程序，把项目分解成一个个具体的工作任务，引导学生在完成具体工作任务的过程中，学习化工生产中的单元操作过程与单元反应过程的原理、设备和操作方面的知识 with 技能。

(2) 注重对学生进行工程观念及分析与解决问题的能力培养

各学习情境均采用实际生产中工程任务引入，同时辅之以典型生产案例帮助分析，努力培养学生的工程观念。例题的选取和有关问题的分析案例皆来自于生产实际，许多直接源自于参编院校的合作企业、实习基地。学生通过对企业案例的分析过程，掌握有关原理、概念、公式等在实际生产中的应用，做到学以致用。

(3) 注重对学生自主学习的能力的培养

每个情境的教学内容都是围绕解决问题的需要而展开，引导学生有目的地自主探究知识。整个内容是按理实一体化的理念编写的，部分内容是让学生先观察、动手做，然后再探究解释原理现象等；适时设置一些需要学生查找资料或实地调查才能解决的习题，以提高自主学习的意识，培养学生解决实际问题的能力。

(4) 注重实践操作知识学习和操作技能培训

根据高职教育的“以就业为导向，以能力为本位”的办学指导思想，结合化工专业职业技能鉴定的要求，注重实践操作知识和操作技能培训。

(5) 图文并茂，直观主动

便于学生的理解，教材中插有丰富的设备外观图和设备内部结构示意图，增强直观性和趣味性。

全书由扬州工业职业技术学院徐忠娟、河南中州大学王宇飞、扬州职业大学张睿三位老师统稿。扬州石化有限责任公司姚日远总工程师，江苏扬农化工集团有限公司唐巧虹高级工程师担任本教材的主审。本书绪论、学习情境一、附录部分由徐忠娟编写，学习情境二由封娜编写，学习情境三由谢伟、王宇飞编写，学习情境四由王雪源、王宇飞编写，学习情境五

由周寅飞、张睿编写，学习情境六由杜彬、诺昌武编写，学习情境七由张睿、张伟编写，学习情境八由王卫霞编写。

在此对中石化扬子石化、江苏油田、江苏扬农化工集团有限公司等单位有关工程技术专家提供的珍贵技术资料，对本书中的参考文献作者，对教育部十二五规划教材评审专家提出的修改意见，特表感谢。

本教材是基于工作过程系统化的理念初步尝试，因编者水平有限，不当之处在所难免，请大家多多指正，不胜感谢！

编者
2015年1月

目 录

学习情境五 蒸馏过程及设备的选择与操作	1
教学目标	1
引言	1
工程项目 由 92%粗甲醇水溶液制备 99%精甲醇	1
项目任务分析	2
一、蒸馏分离依据	2
二、挥发度与相对挥发度	2
实践与练习 0	4
任务一 蒸馏方式选择	4
一、简单蒸馏	4
二、平衡蒸馏	5
三、精馏	6
任务解决 1	8
实践与练习 1	8
任务二 精馏装置的流程确定	9
一、精馏装置的流程认识	9
二、精馏塔内传质过程分析	11
任务解决 2	12
实践与练习 2	12
任务三 精馏塔设备的确定	14
一、精馏塔类型选择	14
任务解决 3	18
二、精馏塔物料衡算	18
三、精馏塔塔高的确定	29
四、塔径的确定与塔板结构的设计	41
任务解决 4	45
实践与练习 3	48
任务四 精馏操作技能训练	52
一、影响精馏操作效果的因素	52
二、精馏操作技能训练要求	55
三、精馏操作技能训练方案	56

实践与练习 4	59
任务五 特殊精馏方式的认识	60
一、恒沸精馏	60
二、萃取精馏	61
实践与练习 5	62
本情境符号意义	62
学习情境六 吸收过程及设备的选择与操作	64
教学目标	64
引言	64
工程项目 某合成氨厂原料气脱二氧化碳方案的制订和实施	64
项目任务分析	65
任务一 气体混合物分离方法的认识	65
任务解决 1	66
实践与练习 1	66
任务二 吸收工作过程的认识	67
一、吸收方法的分类	67
二、物理吸收过程机理的认识	68
三、吸收解吸方案的认识	70
任务解决 2	72
四、吸收法分离气体混合物需要解决的问题	73
实践与练习 2	73
任务三 吸收剂的选择与吸收剂用量的确定	74
一、吸收剂的选择	74
任务解决 3	75
二、气体、液体流向的选择	75
任务解决 4	75
三、吸收过程操作条件的确定	75
任务解决 5	81
四、吸收剂用量的确定	81
任务解决 6	84
实践与练习 3	85
任务四 吸收设备的确定	87
一、吸收设备类型的确定	87
任务解决 7	88
任务解决 8	93
二、填料塔尺寸的确定	93
任务解决 9	96
任务解决 10	105
三、吸收操作流程的确定	106
任务解决 11	108

实践与练习 4	108
任务五 吸收操作技能训练	110
一、吸收操作温度、液气比等工艺条件的控制方法	110
二、吸收与解吸装置的基本操作技能	113
三、吸收与解吸技能训练方案	115
实践与练习 5	118
本情境符号意义	119
学习情境七 干燥过程及设备的选择与操作	121
教学目标	121
引言	121
工程任务 工程任务聚氯乙烯颗粒干燥方案的拟订	121
项目任务分析	122
任务一 除湿方法的认识	122
一、观察与思考	122
二、工业常用的去湿方法	123
任务解决 1	125
实践与练习 1	125
任务二 对流干燥流程与干燥设备的确定	126
一、固体物料对流干燥流程的认识	126
二、常见的对流干燥设备的认识	128
三、干燥器的选择	133
任务解决 2	134
实践与练习 2	135
任务三 对流干燥过程操作条件的确定	135
一、干燥介质的选择	135
任务解决 3	136
二、干燥介质——空气用量的确定	136
任务解决 4	152
实践与练习 3	153
任务四 干燥操作技能训练	155
一、影响干燥操作的因素	155
二、干燥过程强化的途径	156
三、喷雾干燥装置的基本操作要点	159
四、干燥操作技能训练方案	161
实践与练习 4	165
本情境符号意义	166
学习情境八 反应过程及设备的选择与操作	167
教学目标	167
引言	167

工程项目 乙酸正丁酯合成反应器的选择与操作·····	168
项目任务分析·····	168
任务一 反应器类型的选择·····	168
一、反应器类型的认识·····	168
二、反应器类型的选择原则·····	172
任务解决 1·····	172
三、均相反应器特点及反应器容积的确定·····	173
任务解决 2·····	184
实践与练习 1·····	186
任务二 釜式反应器的结构确定·····	188
一、釜式反应器的工业应用·····	188
二、釜式反应器的基本结构认识·····	188
三、釜式反应器温度检测与控制方法认识·····	195
任务解决 3·····	196
实践与练习 2·····	196
任务三 间歇釜式反应器的操作·····	197
一、釜式反应器操作效果的影响因素分析·····	197
二、间歇釜式反应器操作规程·····	198
三、釜式反应器日常检查与维护保养·····	198
四、间歇釜式反应器操作技能训练·····	199
实践与练习 3·····	200
任务四 固定床反应器的认识及其操作·····	200
一、固定床反应器认识·····	200
二、固定床反应器生产能力分析、催化剂用量的确定·····	204
三、固定床反应器型式选择原则·····	209
四、固定床反应器操作、故障处理及维护·····	209
实践与练习 4·····	215
任务五 流化床反应器的认识及其操作·····	217
一、流态化现象认识·····	217
二、流化床反应器认识·····	217
三、流化床反应器的操作及故障分析与维护案例·····	225
实践与练习 5·····	230
本情境符号意义·····	231
附录 ·····	232
参考文献 ·····	239

学习情境五

蒸馏过程及设备的选择与操作

教学目标

知识目标:

1. 理解蒸馏方法分离液体混合物的适用条件,了解蒸馏特别是精馏操作在化工生产中的重要应用,明确完成蒸馏分离任务所需解决的问题。
2. 熟悉工程上常见的各种蒸馏方式,理解各种蒸馏方式的特点。
3. 掌握蒸馏过程的基本原理,理解影响蒸馏操作效果的因素。
4. 熟悉各种类型蒸馏设备的结构及其性能。
5. 掌握蒸馏装置操作的要点及注意事项。

能力目标:

1. 能够根据均相液体混合物的特点、分离要求及分离任务的大小,选择合理的分离方法。
2. 能根据工程项目的具体情况,确定合适的蒸馏方案,其中包括蒸馏操作方式的选择、装置流程及操作条件的确定。
3. 能结合蒸馏的操作方式,正确选择蒸馏过程的设备。
4. 能正确识读蒸馏操作实训现场装置流程并绘制工艺流程图。
5. 能熟练操作实训用蒸馏装置,完整规范地记录运行数据,对操作运行效果能进行正确分析;能根据实际生产的要求在适当范围内对参数进行控制与调节。
6. 会正确使用蒸馏装置中的安全与环境保护设施,对操作中的不正常现象能进行分析和处理。

引 言

工程项目

由 92%粗甲醇水溶液制备 99%精甲醇

甲醇是一种用途广泛的有机化工产品,也是性能优良的洁净能源与车用燃料。世界上对甲醇的生产量和需求量大幅度增加。甲醇的生产方法有多种,可以由煤(焦炭)、天然气和石油制甲醇,也可与合成氨联合生产甲醇简称联醇。联醇法生产甲醇是一种合成气的净化工艺,以替代我国不少合成氨生产用铜氨液脱除微量碳化物而开发的一种工艺。无论哪种生产工艺,合成后的粗甲醇都需要经过分离后才能得到精甲醇。

某联醇厂年产 50000t 甲醇,其中粗甲醇的分离分两个阶段,先在预塔中脱除二甲醚等轻组分;然后将此甲醇水溶液送入主分离塔,就可以制得纯度在 99% 以上的精甲醇。已知主分离塔的进料流量为 220m³/h,其进料组成为:甲醇 92%,水 8%,要求得到纯度在 99.8% 以上的精甲醇,分离

后残余水溶液中甲醇不得高于 0.5%。请根据分离要求拟定出分离方案并实施该分离方案。

项目任务分析

要将甲醇含量 92% 的甲醇水混合溶液提纯到含量在 99% 以上, 显然这是一个典型的均相液体混合物的分离任务。

前面已经知道萃取、蒸发可用于均相液体混合物的分离, 其中蒸发是浓缩溶液的操作, 用于不挥发性的溶质组分与挥发性的溶剂组分之间进行部分分离的; 萃取则是用于混合液中各组分挥发性相差很小、混合液中待分离组分浓度很稀(稀溶液)、高温下混合物液中组分易分解的液体混合物物系的分离。对于溶液中各组分均具挥发性且挥发性相差较大, 分离任务量大且各组分的含量相差不大的混合液; 如果不需要很高的温度就能使各组分汽化且加热后组分不会分解、化学性质不变, 那么这类均相液体混合物的分离一般采用蒸馏的方法。

对于甲醇水溶液而言, 由于甲醇和水均具有挥发性, 而且甲醇比水更容易挥发, 所以不可能使用蒸发的方法; 由于原料液中甲醇占绝大多数, 如果用萃取的方法分离甲醇和水, 则很难找到合适的萃取剂。现考虑到甲醇与水的挥发性相差较大, 沸点相差较大且沸点都不是很高(甲醇 64.5°C , 水沸点 100°C), 因此, 应该使用蒸馏方法来分离。由于蒸馏有多种方式, 每一种方式又有不同的装置或流程及不同的设备。下面是我们要解决的问题:

- ① 什么是蒸馏? 蒸馏分离的依据? 蒸馏方式有哪些? 本任务应该选用什么样的操作方式?
- ② 当蒸馏方式定下后, 又该采用什么样的蒸馏装置?
- ③ 装置中设备尺寸如何来确定?
- ④ 装置该怎样操作以及怎样操作更好?

一、蒸馏分离依据

蒸馏是根据均相液体混合物中各组分挥发度的不同, 用部分汽化、部分冷凝的方法分离液态混合物的一种操作过程。

蒸馏操作应用广泛, 历史悠久, 如: 炼油企业将原油通过蒸馏分离为汽油、煤油、轻柴油等; 将空气液化后, 利用蒸馏的方法分离出纯氧和纯氮; 从粮食发酵的醪液中提纯酒精。

在液体混合物中, 饱和蒸气压高、沸点低的组分习惯上称为易挥发组分, 或轻组分; 而饱和蒸气压低, 沸点高的组分则称为难挥发组分或重组分。如乙醇和水混合液, 在 1atm 下乙醇沸点是 78.5°C , 水的沸点是 100°C , 因此, 乙醇是易挥发组分、轻组分, 水是难挥发组分或重组分。

蒸馏的依据是液体混合物中各组分之间挥发性的差异。将液体混合物加热至泡点以上使部分汽化必然产生气液两相系统, 则在它的气相中易挥发组分含量 y_A 必然大于剩余液体中易挥发组分的含量 x_A , 即 $y_A > x_A$, 如果此时将气相的蒸气冷凝下来, 则所得的冷凝液中易挥发组分的含量必高于原料液中易挥发组分的含量即 $y_A > x_F$, 剩余液中易挥发组分的含量必低于原料液中易挥发组分的含量即 $x_A < x_F$, 这样就实现了混合物的部分分离。

二、挥发度与相对挥发度

液体混合物中组分之间挥发性的差异可用挥发度或相对挥发度来表示。

1. 挥发度

在一定温度下, 液相中某组分的挥发度与该组分的饱和蒸气压及液相中该组分的含量有

关。液相中各组分的挥发度是指气液平衡时某一组分在气相中的平衡分压与其在液相中摩尔分率的比值，通常用 ν 表示。

$$\nu_A = \frac{p_A}{x_A} \quad \nu_B = \frac{p_B}{x_B} \quad (5-1)$$

(1) 对于纯组分液体，由于 $x_A = 1$ ，气相中只有 p_A 没有 p_B ，且 $p_A = p_A^0$ ，所以 $\nu_A = p_A^0$

结论 1:

纯组分液体的挥发度等于该组分液体在一定温度下的饱和蒸气压。

(2) 对于理想溶液，因遵循拉乌尔定律，则 $p_A = p_A^0 x_A$ ； $p_B = p_B^0 x_B$

所以有：

$$\nu_A = \frac{p_A}{x_A} = \frac{p_A^0 x_A}{x_A} = p_A^0 \quad \nu_B = \frac{p_B}{x_B} = \frac{p_B^0 x_B}{x_B} = p_B^0$$

结论 2:

理想溶液中某一组分挥发度 ν 等于气液平衡时，该组分在平衡温度下的饱和蒸气压。显然对于理想溶液某组分的饱和蒸气压越大，说明该组分的挥发度越高。

注意：

对于非理想溶液由于不服从拉乌尔定律， $p \neq p_A^0 x_A$ ； $p_B \neq p_B^0 x_B$ 故其相对挥发度只能用实验测定后再用式 (5-1) 计算。

2. 相对挥发度

挥发度可说明组分挥发性的大小，但必须通过具体数值的比较后才能说明溶液中各组分间挥发性的差异，而相对挥发度能直接反映溶液中各组分之间挥发性的差异，利用相对挥发度可直接判断物系分离的可能性及分离的难易程度。

相对挥发度的广义定义为：溶液中两组分的挥发度之比，通常用溶液中易挥发组分的挥发度对难挥发组分的挥发度之比，以 α_{AB} 或 α 表示，则： $\alpha_{AB} = \frac{\nu_A}{\nu_B} = \frac{p_A/x_A}{p_B/x_B}$

若操作压强不高，气相遵循道尔顿分压定律，故上式可改为：

$$\alpha_{AB} = \frac{p y_A / x_A}{p y_B / x_B} = \frac{y_A x_B}{y_B x_A} \quad (5-2)$$

式 (5-2) 即为相对挥发度的一般定义式，通过测定某一温度下平衡时的气液两相组成，可计算出该温度下物系的相对挥发度数值。

(1) 对理想溶液，由于 $p_A = p_A^0 x_A$ ； $p_B = p_B^0 x_B$

所以：
$$\alpha_{AB} = \frac{\nu_A}{\nu_B} = \frac{p_A/x_A}{p_B/x_B} = \frac{p_A^0}{p_B^0}$$

上式表明，理想溶液中各组分的相对挥发度等于同温度下，两纯组分的饱和蒸气压之比。由于 p_A^0 及 p_B^0 均随温度沿相同方向而变化，因而两者的比值变化不大，故一般可将 α_{AB} 视为常数，计算时可取平均值。

(2) 对于两组分溶液：由 (5-2) 得

$$\frac{y_A}{y_B} = \alpha_{AB} \frac{x_A}{x_B} \quad \text{或} \quad \frac{y_A}{1-y_A} = \alpha_{AB} \frac{x_A}{1-x_A} \quad (5-2a)$$

① 若 $\alpha_{AB} > 1$ ，则 $\frac{y_A}{y_B} > \frac{x_A}{x_B}$ ($\alpha = \frac{\nu_A}{\nu_B} = \frac{p_A^0}{p_B^0}$) 或 $p_A^0 > p_B^0$ 表示组分 A 较 B 易挥发。且 α_{AB}

越大,平衡时 y_A 与 x_A 的差距越大,说明物系越容易分离。

② 若 $\alpha_{AB}=1$, 则 $y_A=x_A$ 说明溶液受热汽化后的气相组成与原溶液组成相同,因此,不能用普通蒸馏方法分离该混合液。

由此可见,利用相对挥发度可判断物系能否用蒸馏方法分离及分离的难易程度。

当 α_{AB} 已知时,由式 (5-2a) 解出 y_A , 可得:

$$y_A = \frac{\alpha_{AB} x_A}{1 + (\alpha_{AB} - 1)x_A} \quad (5-3)$$

式 (5-3) 即为用相对挥发度表示的气液平衡关系。也称为蒸馏的气液相平衡方程。

当 α_{AB} 为已知时,利用上式可求出气液两相平衡时相组成,并可绘制相应的相平衡曲线。

蒸馏的气液相平衡关系有多种表示方法,常见的还有相图表示。如: $p-x-y$ 图 (蒸气压组成图)、 $t-x-y$ 图 (沸点组成图)、 $y-x$ 图 (相平衡图),这些图在基础化学中已经介绍。

实践与练习0

一、选择题

1. 蒸馏是利用各组分 () 不同的特性实现分离的目的。
A. 溶解度 B. 等规度 C. 挥发度 D. 调和度
2. 溶液能否用蒸馏方法分离,主要取决于 ()。
A. 各组分溶解度的差异 B. 各组分间相对挥发度的大小
C. 是否遵循拉乌尔定律 D. 以上答案都不对
3. 在二元混合液中,沸点低的组分称为 () 组分。
A. 可挥发 B. 不挥发 C. 易挥发 D. 难挥发
4. 两组分物系的相对挥发度越接近于 1,则表示用蒸馏的方法分离该物系就越 ()。
A. 完全 B. 不完全 C. 容易 D. 困难

二、简答题

1. 何谓挥发度、相对挥发度?如何求取?
2. 简要说明相对挥发度对均相液体混合分离的影响。

任务一 蒸馏方式选择

在引言的任务分析中我们已经明确甲醇的提纯必须采用蒸馏的方法,但蒸馏有简单蒸馏、平衡蒸馏、精馏等不同的方式,那么到底选择何种方式呢?为此我们就需要了解各种蒸馏方式的特点、分离效果及适用场合,才能最终选择一种方式。

一、简单蒸馏

简单蒸馏又称微分蒸馏,是一种单级蒸馏操作,常以间歇方式进行,如图 5-1。图 5-1 (a) 为实验室简单蒸馏装置,图 5-1 (b) 是工业生产中的简单蒸馏装置流程图,其工作过程如下:将一批料液一次加入蒸馏釜 1 中,在外压恒定下加热到沸腾,生成的蒸气及时引入到冷凝器 2 中冷凝后,冷凝液作为顶部产品,其中易挥发组分相对富集。在蒸馏过程中釜内液体的易挥发组分浓度不断下降,蒸气中易挥发组分浓度也相应降低,因此顶部产品是分批进入馏出液贮槽 3A、

3B 和 3C 中，最终将釜内残液一次排出。馏出液贮槽中产品的组成可由图 5-1 (c) 分析得出。

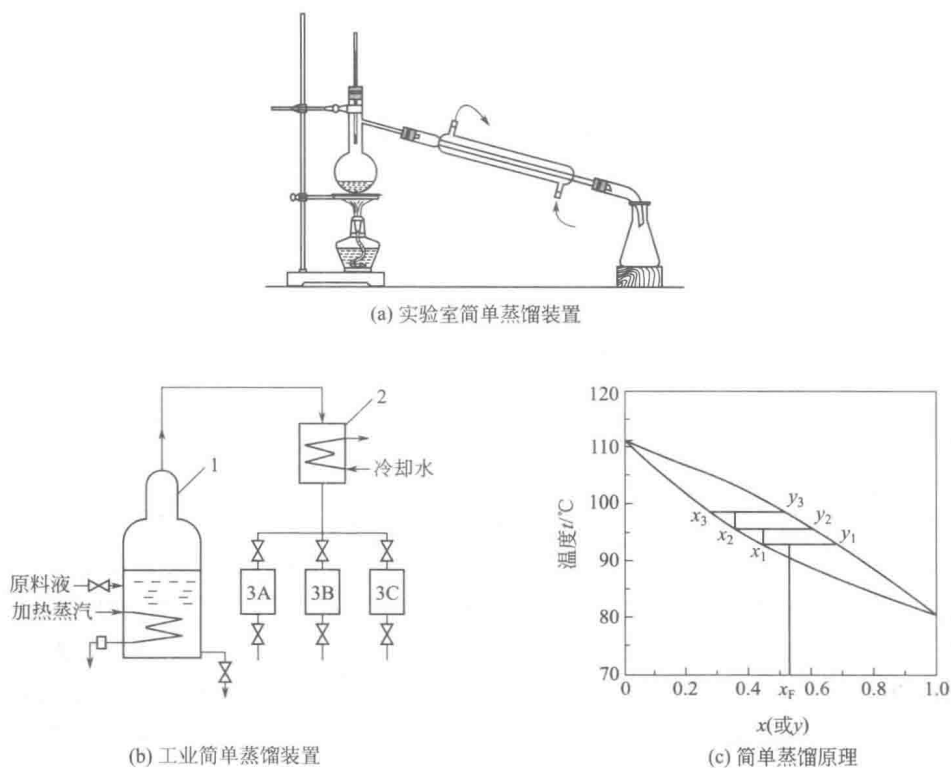


图 5-1 简单蒸馏装置与简单蒸馏原理

1—蒸馏釜；2—冷凝器；3A, 3B, 3C—产品受液槽

对混合液进行加热使之部分汽化能使混合液分离，同理若对混合蒸气进行部分冷凝也能实现部分分离目的。

思考题

- (1) 比较工业简单蒸馏装置与实验室简单蒸馏装置，找出其中设备的对应关系。
- (2) 工业简单蒸馏装置中产品受液槽中馏出液的最大浓度是多少？受液槽中产品的组成范围？能否得到纯组分？

二、平衡蒸馏

平衡蒸馏又称闪蒸，是一种单级连续的蒸馏操作，其流程如图 5-2 所示。原料经泵加压后连续地进入加热器在加热器 1 内被加热升温至高于分离器压力下的沸点，然后经节流阀 2 减压至预定压强。由于压强的突然降低，液体成为过热液体，其高于沸点的显热随即转变为潜热发生自蒸发，液体部分汽化。气、液两相在分离器 3 中分开，顶部气相混合物经冷凝后就得到了含易挥发组分较多的馏出液产品，分离器下部液体中难挥发组分则获得了增浓。

思考题

- (1) 在图 5-2 中 y 的最大值是多少？ x_w 的最小值是多少？用 $t-x-y$ 图说明。
- (2) 能否得到纯组分？那么怎样才能获得获得高纯度的产品？

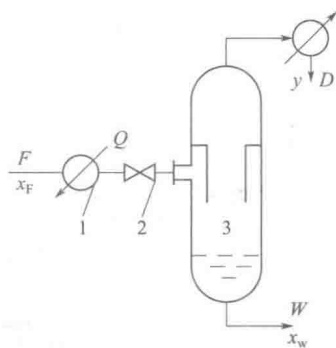


图 5-2 平衡蒸馏装置

1—加热器；2—节流阀；3—分离器

讨论

简单蒸馏与平衡蒸馏的异同点？

相同点：①都是单级蒸馏（一次部分汽化和部分冷凝）。②不能实现高纯度的分离。因为平衡蒸馏只经过一次部分汽化，简单蒸馏为间歇过程，顶部蒸气组成随釜液组成的降低而降低，得不到高纯度的顶部产品，虽然可得到高纯度的底部产品，但其量很小。

不同点：①过程方式不同，前者常以间歇式方式进行，后者既可间歇又可连续。②加热温度不同，前者边受热边汽化，沸点不断变化升高，后者加热到沸点后汽化，对于连续操作沸点恒定。③前者部分汽化（然后将部分气液冷凝下来）不强调气液平衡；后者部分汽化后气相与液相处于互相平衡状态。

三、精馏

由前分析可知，简单蒸馏和平衡蒸馏的一次部分汽化或一次部分冷凝只能使混合物得到部分分离，不能实现完全的分离，若要使混合物完全分离，以获得接近纯组分的物质，则需要对液体进行多次部分汽化和对蒸气进行多次部分冷凝操作才可能实现，也就是工业上的精馏操作。

精馏是一种使用回流手段使均相液体混合物得到高纯度分离的蒸馏方法，是工业上目前应用最广的液体混合物分离操作，广泛用于石油、化工、轻工、食品、冶金等部门。精馏操作可按不同方法进行分类。根据操作方式，可分为连续精馏和间歇精馏；根据混合物的组分数，可分为二元精馏和多元精馏；根据是否在混合物中加入影响气液平衡的添加剂，可分为普通精馏和特殊精馏（包括萃取精馏、恒沸精馏和加盐精馏）。若精馏过程伴有化学反应，则称为反应精馏。

1. 精馏原理

精馏过程原理可用 $t-x-y$ 图来说明，如图 5-3 所示。将组成为 x_F 、温度为 t_F 的某二组分混合液加热至泡点以上，则该混合物被部分汽化，产生气液两相，其组成分别为 y_1 和 x_1 ，此时 $y_1 > x_F > x_1$ 。将气液两相分离，并将组成为 y_1 的气相混合物进行部分冷凝，则可得到组成为 y_2 的气相和组成为 x_2 的液相。继续将组成为 y_2 的气相进行部分冷凝，又可得到组成为 y_3 的气相和组成为 x_3 的液相，显然 $y_3 > y_2 > y_1$ 。如此进行下去，最终的气相经全部冷凝后，即可获得高纯度的易挥发组分产品。同时，将组成为 x_1 的液相进行部分汽化，则可得到组成为 y_2' 的气相和组成为 x_2' 的液相，继续将组成为 x_2' 的液相部分汽化，又可得到组成为 y_3' 的气相和组成为 x_3' 的液相，显然 $x_3' < x_2' < x_1'$ 。如此进行下去，最终的液相即为高纯度的难挥发组分产品。

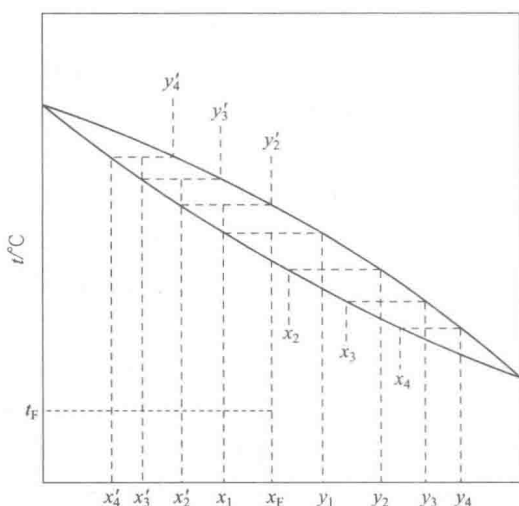


图 5-3 精馏原理

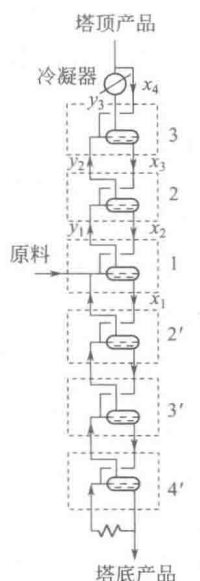


图 5-4 精馏塔模型

由此可见，液体混合物经多次部分汽化和冷凝后，便可得到几乎完全的分离，这就是精馏过程的基本原理。

2. 精馏塔模型

在图 5-3 中，液体多次部分汽化后虽然可获得接近纯的难挥发组分，但其量很少，且每一次汽化的过程都有副产物——蒸气产生，在液体的每一次汽化的过程中需要有加热剂；气体经过多次部分冷凝后虽然可得到接近纯的易挥发组分，但其量也很少，且每一次冷凝过程中都有副产物——冷凝液产生，在气体的每一次部分冷凝过程中则需要有冷却剂。如果将上述部分汽化和部分冷凝单独进行，显然是不经济不合理的。

因此，要达到精馏的目的，就必须设法将汽化和冷凝过程中副产物充分利用起来，同时要尽量降低汽化和冷凝过程中的能量消耗。

如果将含难挥发组分较多、温度较高且需要部分冷凝的蒸气与含难挥发组分较少、温度较低且需要进一步部分汽化的液体进行混合接触，这样不但进行了液体的部分汽化、蒸气的部分冷凝，回收了中间产物，还节省了操作费用。

图 5-4 所示就是基于上述理念设计的精馏塔模型，图中的 1、2、3 及 2'、3'、4' 容器内同时进行着液体的部分汽化和蒸气的部分冷凝过程，且无需加热剂和冷却剂。

工业上的精馏是在本情境任务二中图 5-5 所示的精馏装置中进行的，在这个装置中核心设备是精馏塔，但只有精馏塔还不能完成精馏操作，必须同时有塔底再沸器和塔顶冷凝器。再沸器的作用是将塔底含难挥发组分较多的溶液加热后再次沸腾，以提供塔内所需的上升蒸气流，此上升蒸气流是塔中液体多次部分汽化的热源；冷凝器的作用是将塔顶上升的蒸气全部冷凝后，除获得塔顶液相产品外，还要保证有适量的液相回流，此液相回流是塔内液体多次部分冷凝的冷源，这样才能保证精馏操作连续稳定的进行。

与简单蒸馏和平衡蒸馏相比，精馏分离还具有如下特点。

- ① 通过精馏分离可以直接获得所需要的产品，产品纯度高。
- ② 精馏分离的适用范围广，它不仅分离液体混合物，而且可用于气态或固态混合

物的分离。气态混合物可通过压缩冷凝成液体混合物后再用精馏方法分离，如空气的分离，裂解气的分离。固态混合物可加热熔化成液态混合物后再分离，例如脂肪酸的固态混合物，可先加热使其熔化，并在减压下建立气液两相系统，用蒸馏方法进行分离。

③ 精馏过程适用于各种组成混合物的分离。可分离双组分混合物，也可分离多组分混合物。

④ 由于精馏操作是通过对混合液加热建立气液两相体系，所得到的气相还需要再冷凝液化。因此，精馏操作耗能较大。

总之，精馏就是将挥发度不同的组分所构成的均相混合液在精馏塔中多次而且同时进行部分汽化和部分冷凝，以获得几乎纯净的易挥发组分和几乎纯净的难挥发组分的过程，其中塔顶产品的部分回流和塔底液体的再次沸腾汽化是精馏操作得以连续稳定进行的两个必不可少条件，所以精馏装置必须包括冷凝器与再沸器。

精馏之所以能使液体混合物得到较完全的分离，关键在于回流的应用。回流包括塔顶高浓度易挥发组分液体和塔底高浓度难挥发组分蒸气两者返回塔中。气液回流形成了逆流接触的气液两相，从而在塔的两端分别得到相当纯净的单组分产品。塔顶回流入塔的液体量与塔顶产品量之比，称为回流比，它是精馏操作的一个重要控制参数，它的变化影响精馏操作的分离效果和能耗。

任务解决1

蒸馏方案的选择

根据简单蒸馏、平衡蒸馏和精馏的特点，简单蒸馏、平衡蒸馏无法获得高浓度的甲醇。由于本任务要求分离后甲醇的纯度高达99%以上，因此只能选择精馏方式才有可能完成任务。

实践与练习1

一、选择题

1. 某二元混合物，其中A为易挥发组分，液相组成 $x_A=0.5$ 时相应的泡点为 t_1 ，气相组成 $y_A=0.3$ 时相应的露点为 t_2 ，则()。

- A. $t_1=t_2$ B. $t_1<t_2$ C. $t_1>t_2$ D. 不能判断

2. 某二元混合物，其中A为易挥发组分。液相组成 $x_A=0.5$ 时泡点为 t_1 ，与之相平衡的气相组成 $y_A=0.75$ 时，相应的露点为 t_2 ，则()。

- A. $t_1=t_2$ B. $t_1<t_2$ C. $t_1>t_2$ D. 不能判断

3. 区别精馏与普通蒸馏的必要条件是()。

- A. 相对挥发度大于1 B. 操作压力小于饱和蒸气压
C. 操作温度大于泡点温度 D. 回流

4. ()是保证精馏过程连续稳定操作的必不可少的条件之一。

- A. 液相回流 B. 进料 C. 侧线抽出 D. 产品提纯

5. 在()中溶液部分汽化而产生上升蒸气，是精馏得以连续稳定操作的一个必不可少条件之一。

- A. 冷凝器 B. 蒸发器 C. 再沸器 D. 换热器

二、填空题

1. 蒸馏是分离_____的单元操作，利用各组分_____的不同实现分离，是传质传热_____发生的过程，并且是_____向传质。

2. 蒸馏按操作方式分类可分为_____、_____和_____。

3. 精馏是一种使用_____手段使均相液体混合物得到_____纯度分离的蒸馏方法，