

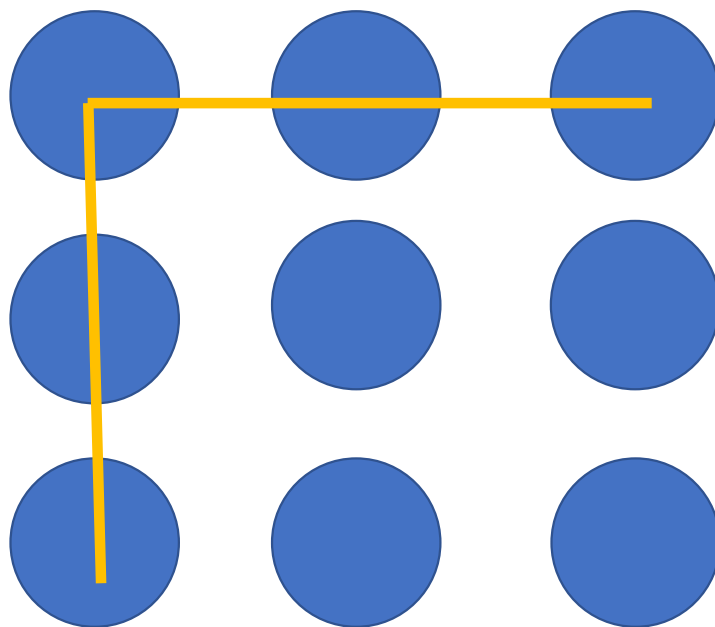
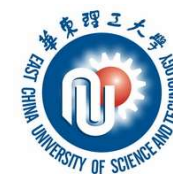


# 化工原理下

## 精 馏



# 签到-超星平台

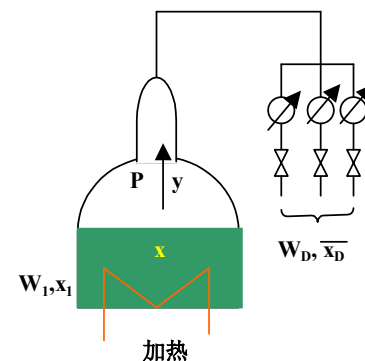


## 复习

① 对一定组成的二元体系，精馏压力越大，则**相对挥发度** 越小，塔操作温度 越高，对分离 不利。

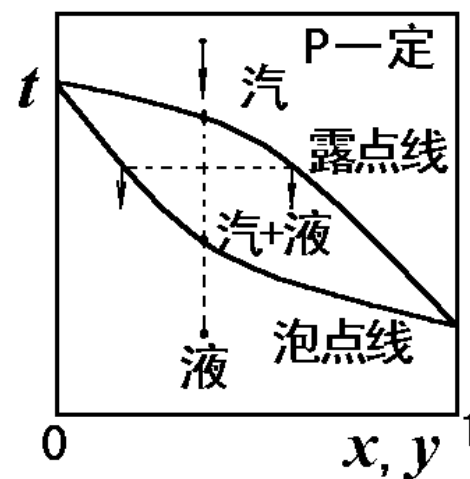
$$\alpha = P_A^0 / P_B^0$$

② 简单蒸馏过程中，釜内易挥发组分浓度逐渐 减小，其沸点则逐渐 升高。



③ 对于某理想溶液的平衡蒸馏，若现在维持进料  $F$ 、 $x_F$  和蒸发室压强  $P$  不变，而使物料温度  $t_F$  上升，则  $x_W$  \_\_\_\_\_， $D$  \_\_\_\_\_。

- (1) 上升      (2) 不变      (3) 下降      (4) 不确定



**解：** 对于某理想溶液的平衡蒸馏，若现在维持进料 $F$ 、 $x_F$  和蒸发室压强 $P$ 不变，而使物料温度 $t_f$ 上升，则

$x_W$ \_\_\_\_\_，  $D$ \_\_\_\_\_。

- (1) 上升      (2) 不变  
(3) 下降      (4) 不确定

分析：  $P$ 不变、 $T$ 上升时， $x'_W < x_W$ ，  $x'_D < x_D$

又由物料衡算可知

$$\frac{D}{W} = \frac{x_F - x_W}{x_D - x_F}$$

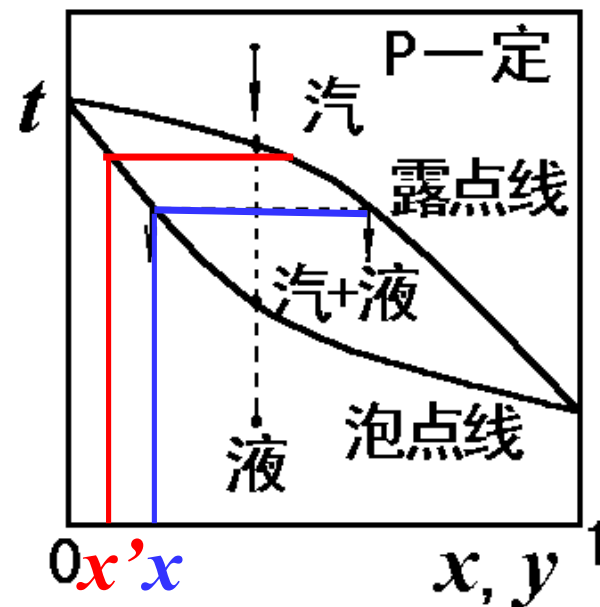
$\because x_F$  不变，  $x_D \downarrow$ ，  $x_W \downarrow$

$\therefore \frac{D}{W} \uparrow$

又  $D + W = F$  为常数

$\therefore D \uparrow$

**答： (3) ， (1)**



## 问题-平台

1、“蒸馏操作依据是组分间沸点差异”（ ）

A 对      B 错

2、两组份的相对挥发度越小，则表示分离该物系越（ ）

A 容易      B 困难      C 完全      D 不完全

## 答案

1、“蒸馏操作依据是组分间沸点差异”（ ）

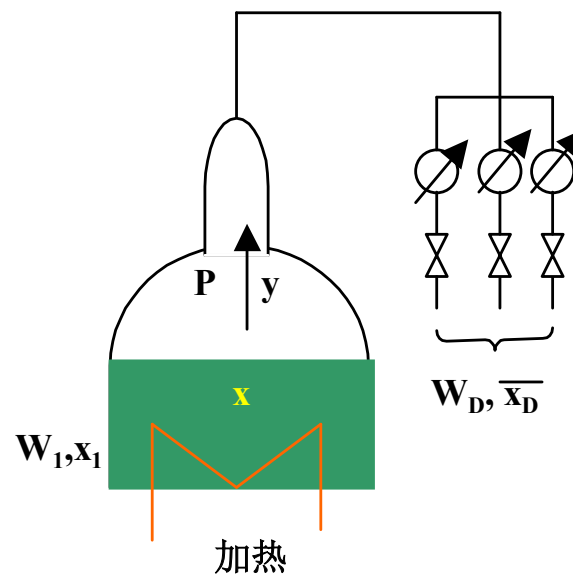
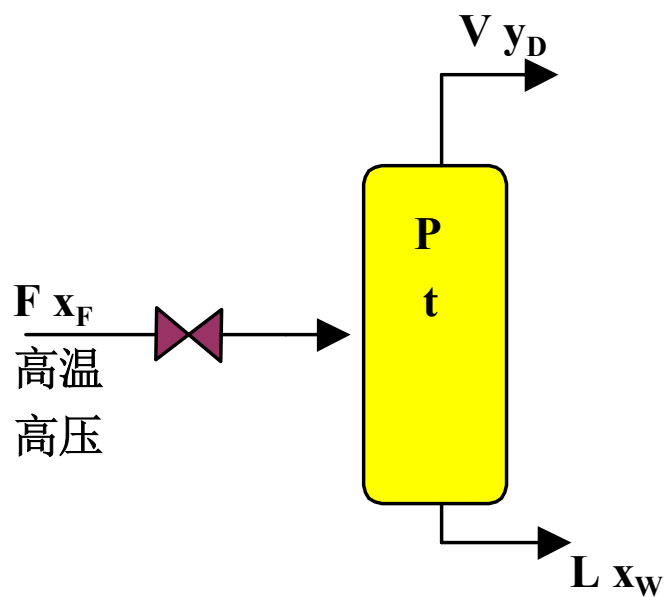
A 对      ☒ B 错

2、两组份的相对挥发度越小，则表示分离该物系越（ ）

A 容易      ☒ B 困难      C 完全      D 不完全

## 第六组

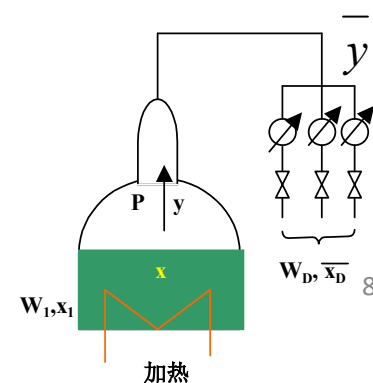
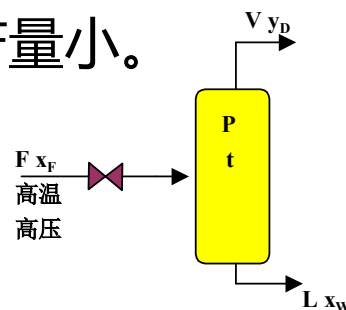
### 平衡蒸馏与简单蒸馏的比较



## 9.3 平衡蒸馏与简单蒸馏

### 平衡蒸馏与简单蒸馏的比较

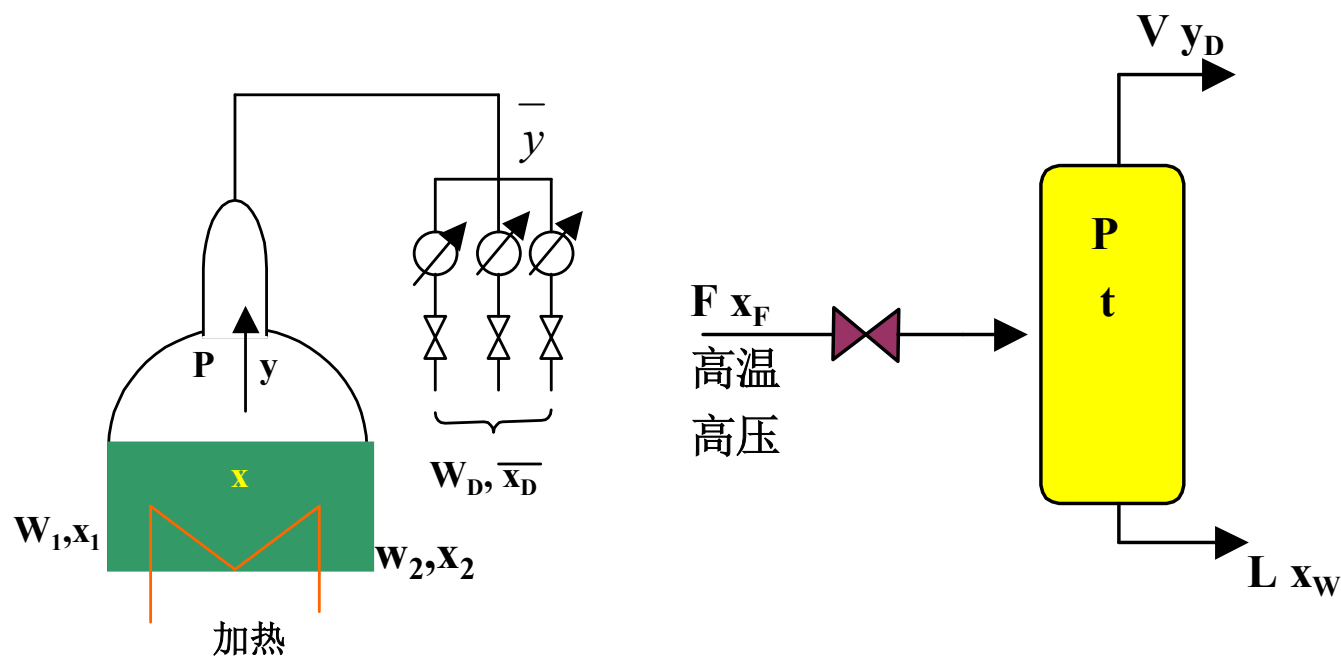
- ① 平衡蒸馏和简单蒸馏都是一级平衡，都不能实现混合物的高纯度分离；
- ② 平衡蒸馏为连续、定态过程，且 $y$ 与 $x$ 平衡；
- ③ 简单蒸馏为间歇、非定态过程， $\bar{y}$ 与 $x$ 不平衡，但任何瞬间 $y$ 与 $x$ 平衡。当 $x$ 相等时， $\bar{y}$ 比 $y$ 大；
- ④ 相同的汽化率下简单蒸馏的效果优于平衡蒸馏。
- ⑤ 最终 $t$ 相同时，简单蒸馏分离效果好，产量小。



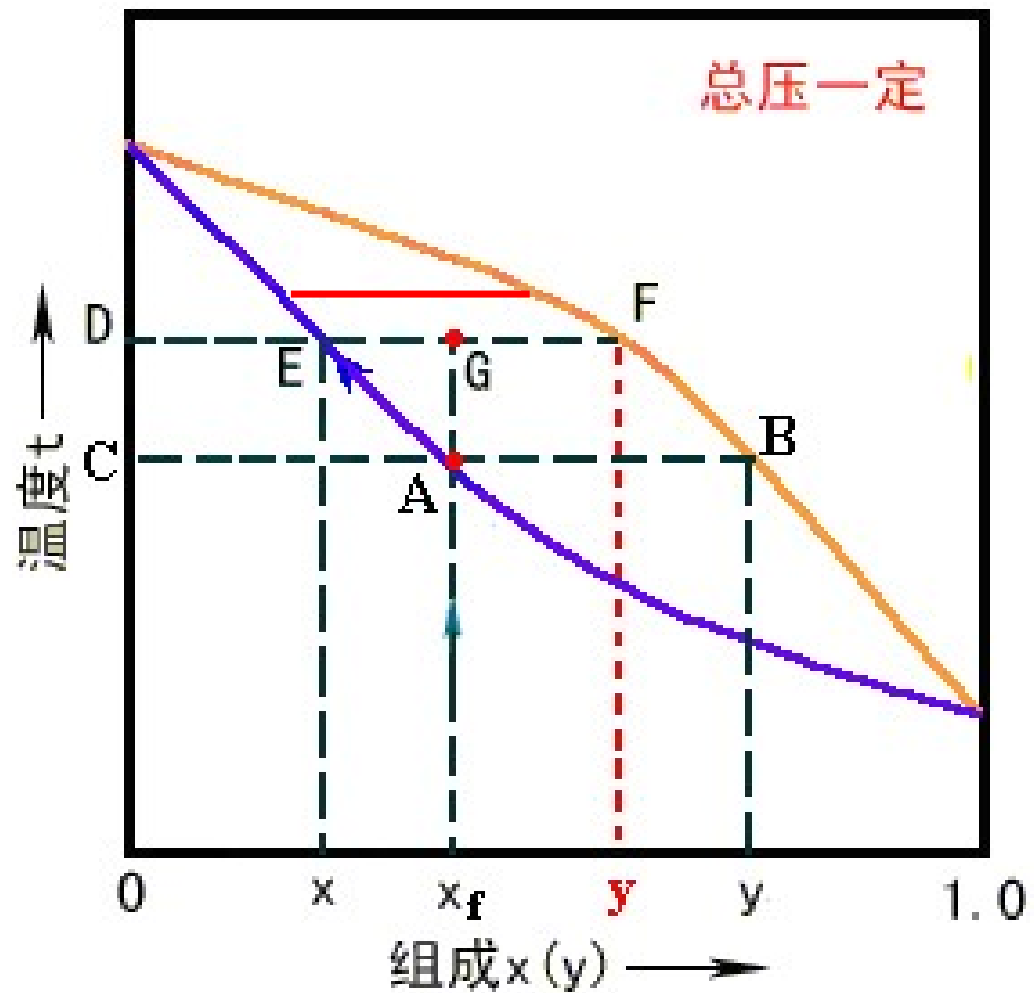


## 讨论

在操作压力、原料相同的条件下( $x_1 = x_F$ ), 若平衡蒸馏的操作温度与简单蒸馏的最终温度相同, 则简单蒸馏与平衡蒸馏相比: 分离效果哪个好? 产品量孰大?



**t一定，  
x、y也一定**



解：在操作压力、原料相同的条件下( $x_1=x_F$ )，若平衡蒸馏的操作温度与简单蒸馏的最终温度相同，则简单蒸馏与平衡蒸馏相比：

$t$  相同则  $x$ 、 $y$  相同 (1个自由度)

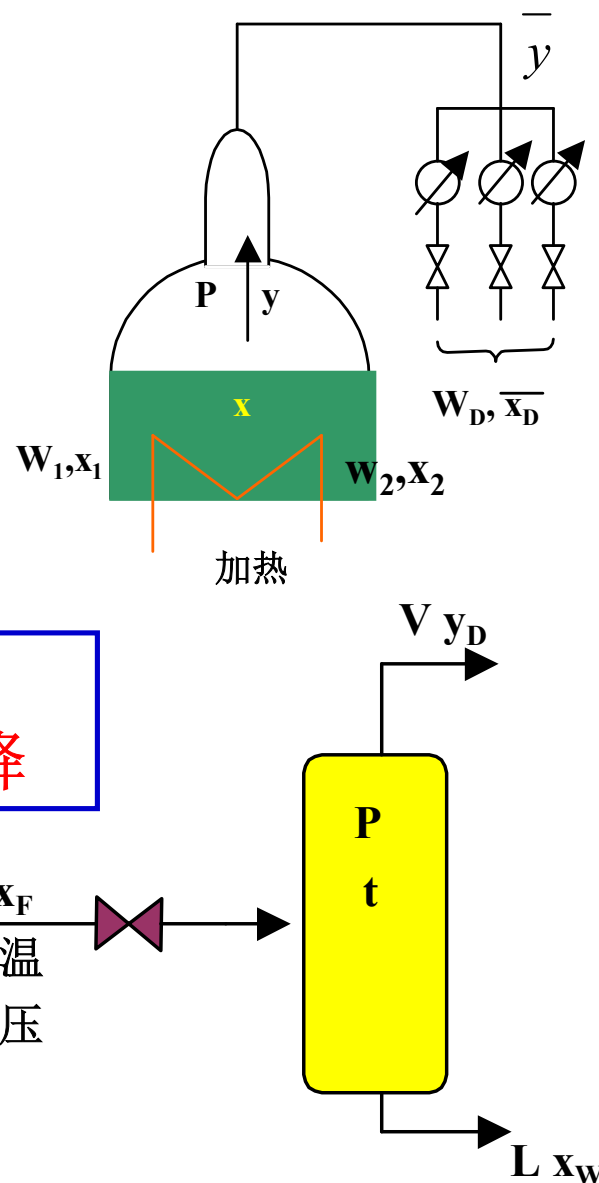
平衡蒸馏  $x_w$  = 简单蒸馏的  $x_2$

平衡蒸馏  $y_D$  = 简单蒸馏最终的  $y$

平衡蒸馏的  $y_D$  为常数，  
简单蒸馏的  $y$  随蒸馏时间延长而下降

最终的  $y$  为最小值  $\therefore y_D < \bar{y}$

简单蒸馏分离效果好



最终t相同时，简单蒸馏分离效果好，产量小。

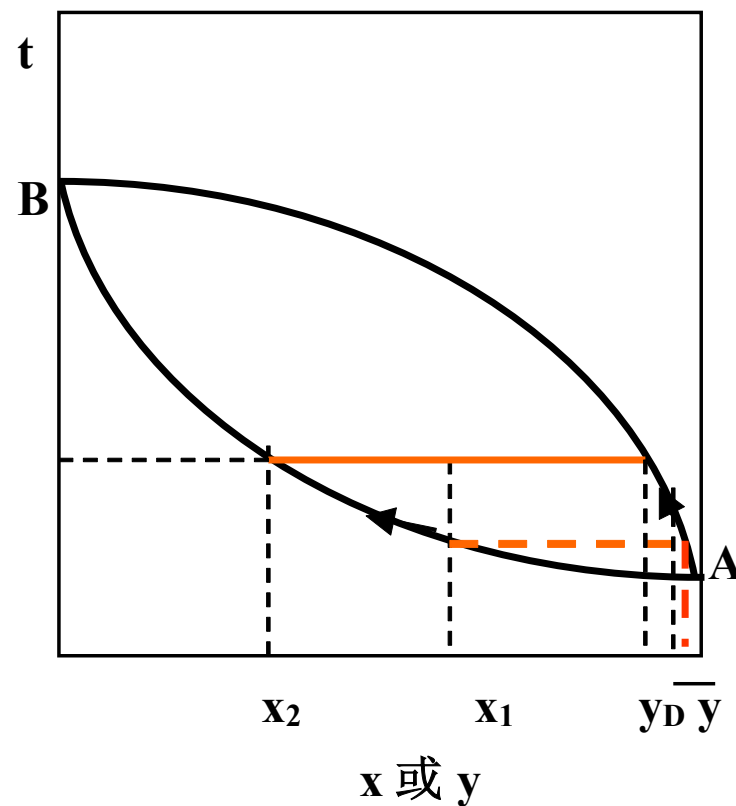
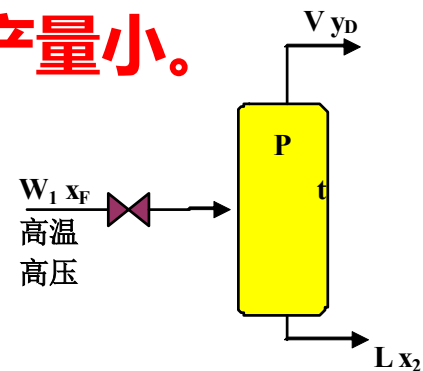
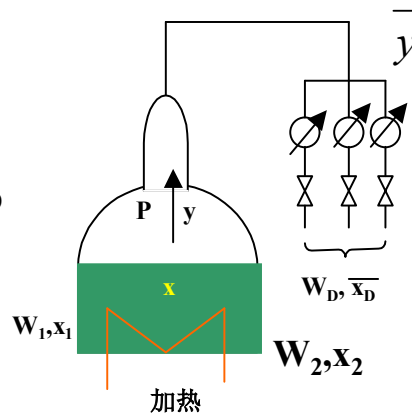
$$\text{简: } \begin{cases} W_1 = W_2 + W_D \\ W_1 x_1 = W_2 x_2 + W_D \bar{x}_D \end{cases}$$

$$\bar{x}_D = \bar{y}$$

$$\rightarrow W_D = \frac{W_1(x_1 - x_2)}{\bar{y} - x_2}$$

$$\text{平: } \begin{cases} W_1 = L + V \\ W_1 x_f = L x_2 + V y_D \end{cases} \quad \left. \begin{array}{l} y_D < \bar{y} \\ \Rightarrow W_D < V \end{array} \right\}$$

$$\rightarrow V = \frac{W_1(x_f - x_2)}{y_D - x_2}$$



## 问题

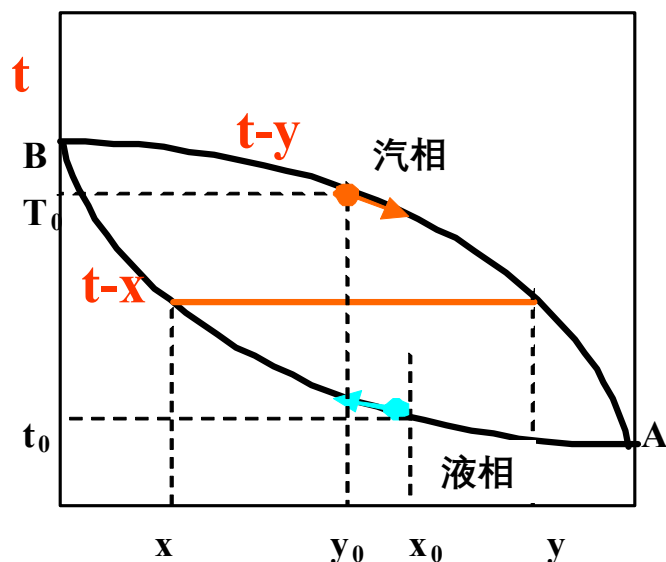
- ✓ 简单蒸馏/平衡蒸馏只能组分的部分增浓，如何实现高纯度分离？
- ✓ 蒸馏和精馏的区别？

## 9.4 精馏

### 平衡级概念

问题：简单蒸馏/平衡蒸馏只能组分的部分增浓，如何实现高纯度分离？

不平衡汽液两相经过足够长时间充分接触，汽相中重组分向液相传递，液相中轻组分向汽相传递，离开时，汽液两相达到了平衡，这个过程称为平衡级。

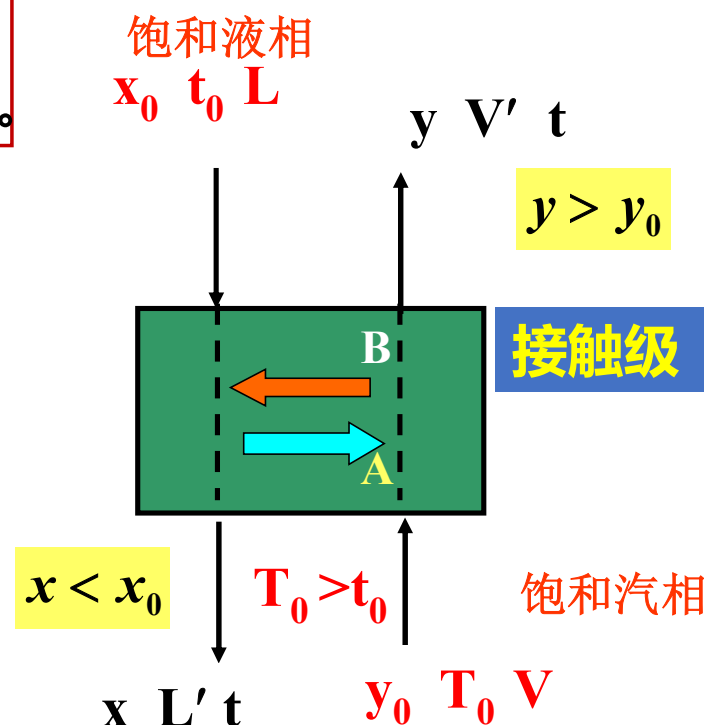


A为轻组分，  
B为重组分  
组成以轻组分A表示

$y$ 和 $x$ 的关系？

$$y_n = \frac{\alpha x_n}{1 + (\alpha - 1)x_n}$$

上升蒸气轻组分增加  
下降液体轻组分减少



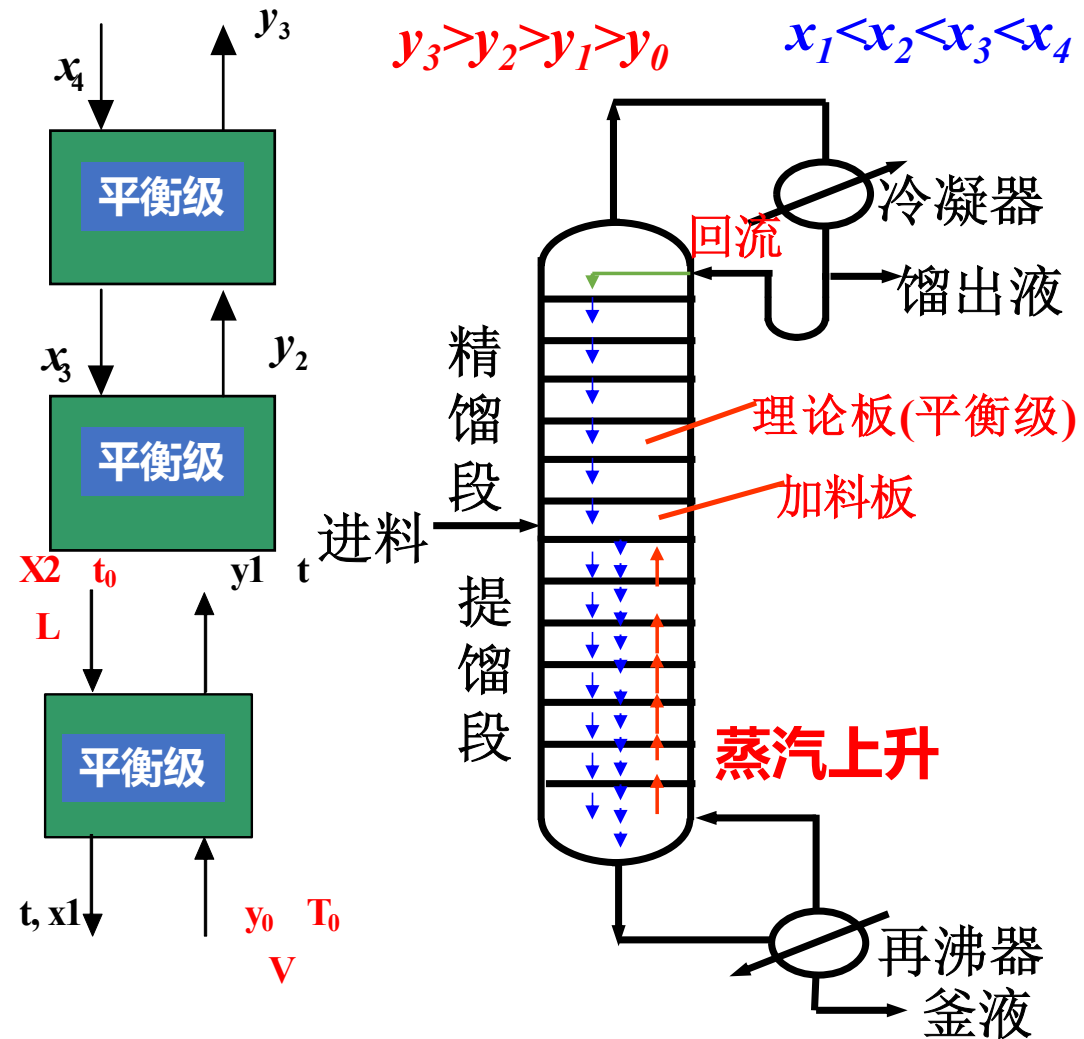
## 9.4 精馏

### 精馏原理

- ✓ 精馏是利用回流手段、经过多次平衡级过程，使物系实现高纯度分离的操作。

**理论板** 离开塔板汽液两相达到相平衡

- ✓ **理论板定义**  
汽液两相充分传质和传热过程阻力为零的理想化塔板。



## 9.4 精馏

### 1、精馏和蒸馏的区别

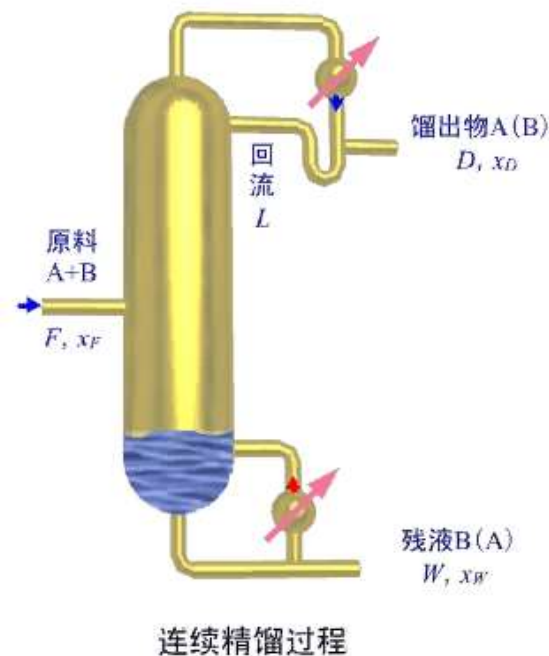
精馏有回流，蒸馏无回流。回流提供了气液两相接触的必要条件。

### 2、精馏段作用

吸收重组分，使得  $y \uparrow$

### 3、提馏段作用

脱除轻组分，使得  $x_W \downarrow$



理论上只要塔板数目足够多，精馏塔塔顶获得高纯度产品；塔底得到轻组分很低的产品。



## 问题-平台

精馏中引入回流，下降的液相与上升的汽相发生传质使上升的汽相易挥发组分浓度提高，最恰当的说法是（ ）。

- （A）液相中易挥发组分进入汽相；
- （B）汽相中难挥发组分进入液相；
- （C）液相中易挥发组分和难挥发组分同时进入汽相，但其中易挥发组分较多；
- （D）液相中易挥发组分进入汽相和汽相中难挥发组分进入液相的现象同时发生。

## 答案

精馏中引入回流，下降的液相与上升的汽相发生传质使上升的汽相易挥发组分浓度提高，最恰当的说法是（ ）。

- （A）液相中易挥发组分进入汽相；
- （B）汽相中难挥发组分进入液相；
- （C）液相中易挥发组分和难挥发组分同时进入汽相，但其中易挥发组分较多；
- ✓（D）液相中易挥发组分进入汽相和汽相中难挥发组分进入液相的现象同时发生。

## 9.4 精馏

### 精馏塔

进料量和组成  $F, x_F$

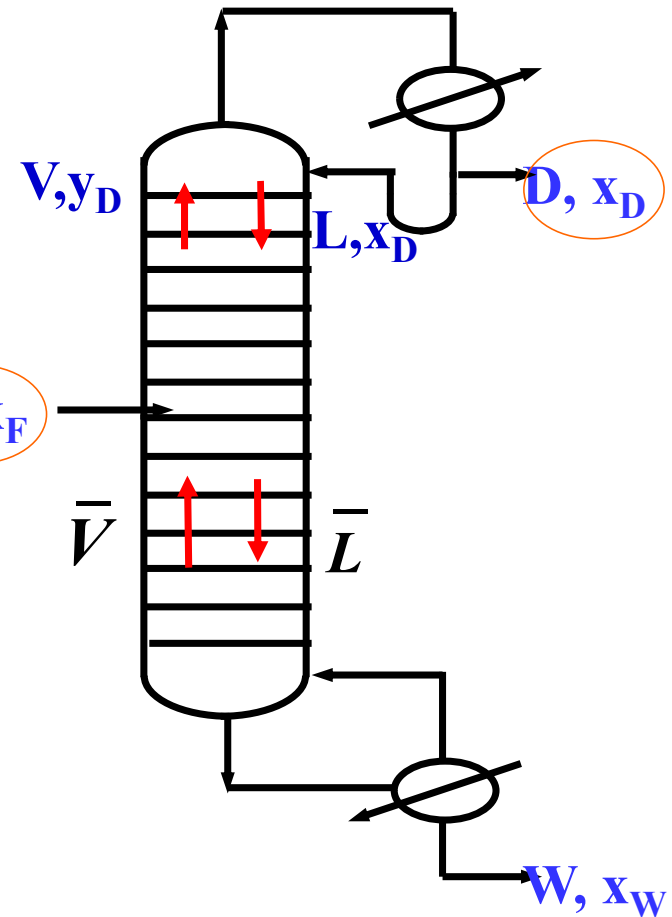
塔顶馏出液产量和浓度  $D, x_D$

塔底釜液产量和浓度  $W, x_W$

塔内流量  $L, V, \bar{L}, \bar{V}$

回流量  $L$

塔板数  $n$

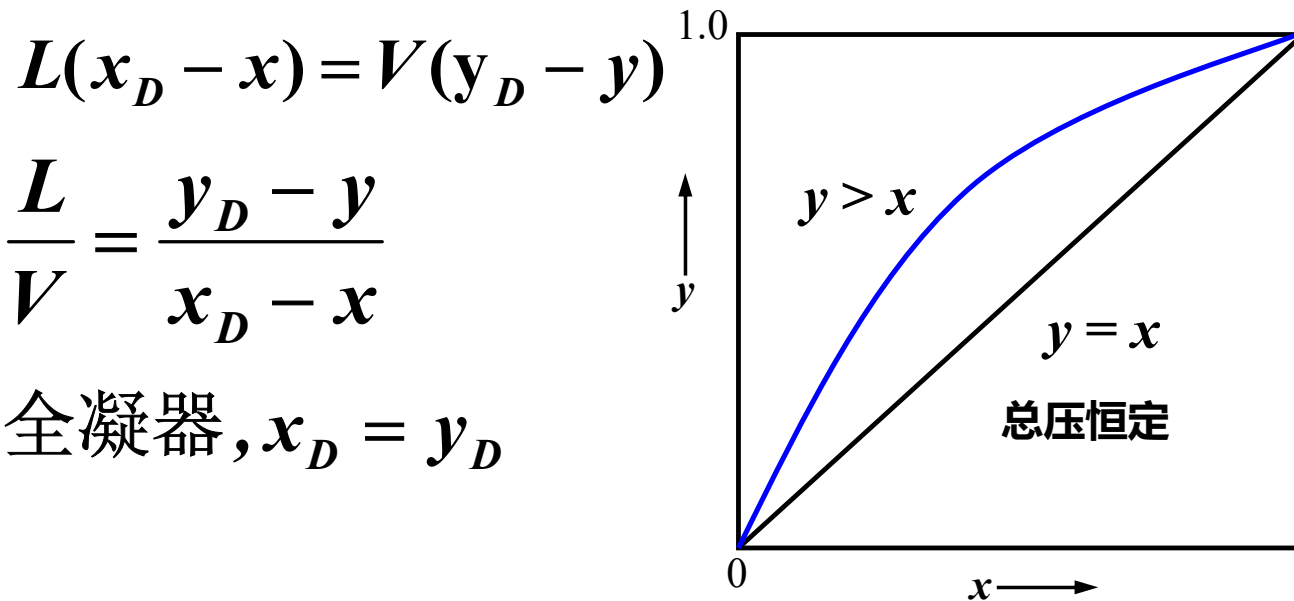


## 第七组

为了保证良好的气液接触，是否需要全部回流？即回流 $L$ 与 $V$ 的关系 ( $>$ ,  $=$ ,  $<$ )。回流比 $R$ 的增加，是否意味着出料 $D$ 的减少？

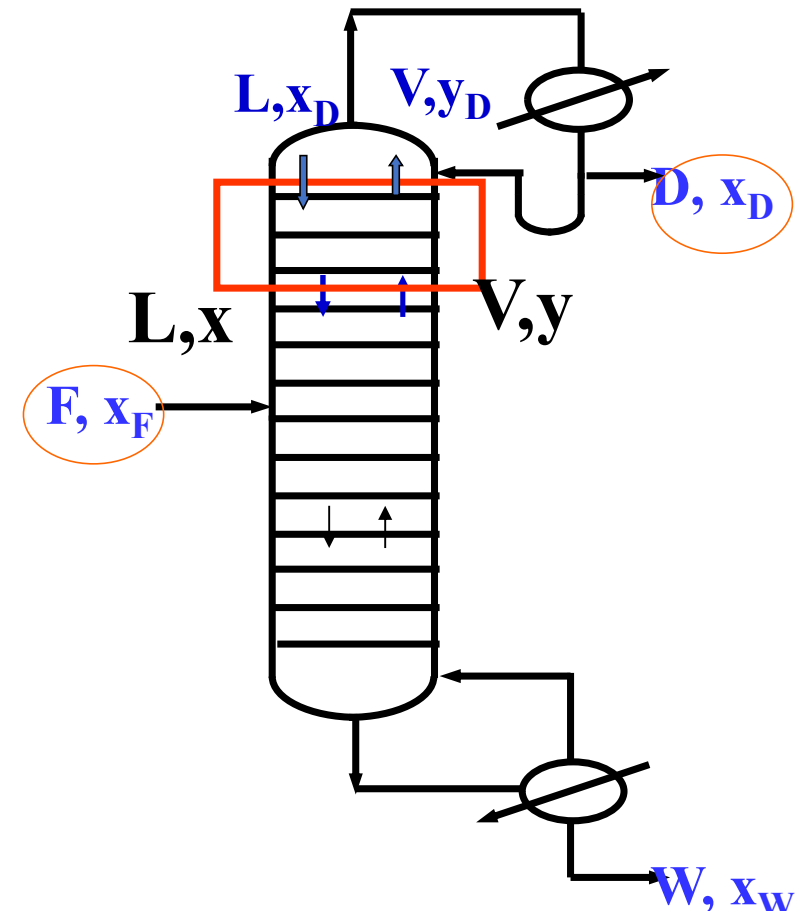
## 9.4 精馏

回流量 $L$ 是产品的一部分，为了满足气液传质， $L$ 的回流量？



$\because y > x, \therefore L < V$ , 只要部分回流

**相平衡条件  $y > x$  保证了只需部分回流**



## 9.4 精馏

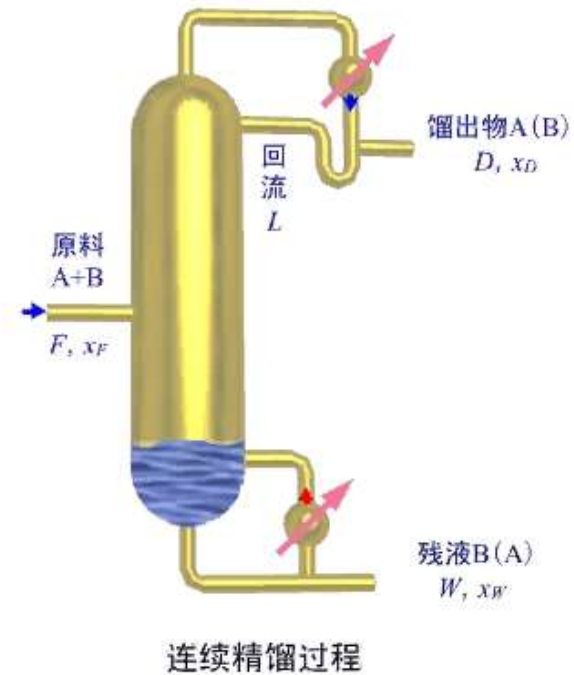
### 回流比和能耗

**定义** 回流比:  $R = \frac{L}{D}$  ,  $L = RD$

### 问题

回流比  $R \uparrow$ ,

A)  $D \downarrow$  B)  $D \uparrow$  C)  $D$ 不变



## 9.4 精馏

### 回流比和能耗

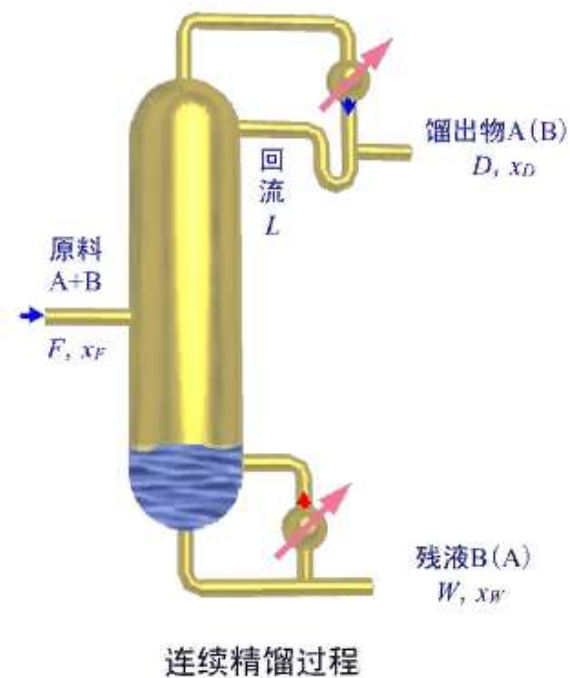
**定义** 回流比:  $R = \frac{L}{D}$  ,  $L = RD$

回流比  $R \uparrow$ ,  $D$  并不意味着减少。

$V \uparrow$ , 加热速率  $\uparrow$ ,

冷凝量  $\uparrow$ , 能耗  $\uparrow$ 。

**回流比  $R$  增加, 能耗增加**



## 9.4 精馏

### 全塔物料衡算

$$\begin{cases} F = D + W & \leftarrow \text{轻组分} \\ Fx_F = Dx_D + Wx_W \end{cases}$$

采出率

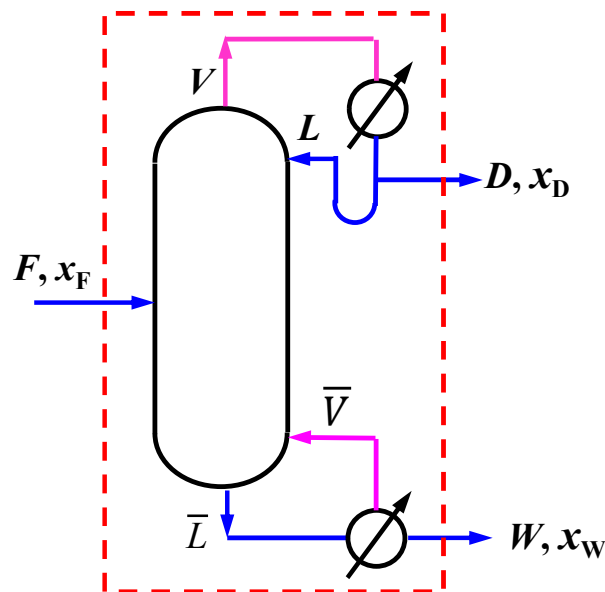
$$\frac{D}{F} = \frac{x_f - x_w}{x_D - x_w} \quad \frac{W}{F} = 1 - \frac{D}{F}$$

易挥发组分回收率:

$$\eta_1 = \frac{Dx_D}{Fx_F} \times 100\%$$

难挥发组分回收率:

$$\eta_2 = \frac{W(1 - x_W)}{F(1 - x_F)} \times 100\%$$



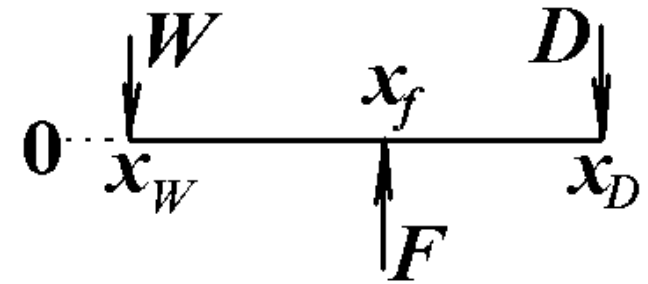
精馏塔的全塔物料衡算



## 物料衡算几种表现形式

$$F=D+W$$

$$Fx_f=Dx_D+Wx_W$$



①已知  $x_f, x_D, x_W$ , 求  $\frac{D}{F}, \frac{W}{F}$

以  $x_W$  为支点,  $\frac{D}{F} = \frac{x_f - x_W}{x_D - x_W}, \quad \frac{W}{F} = 1 - \frac{D}{F}$

②已知  $x_f, x_D, \frac{D}{F}$  (塔顶采出率), 求:  $x_W, \frac{W}{F}$

$$\frac{W}{F} = 1 - \frac{D}{F} \quad x_W = \frac{Fx_f - Dx_D}{W} = \frac{x_f - x_D D / F}{W / F}$$

③已知 $x_f, x_D$ , 轻组分回收率  $\eta_A (= \frac{Dx_D}{Fx_f})$ ,

求:  $x_W, \frac{W}{F}$

$$\frac{D}{F} = \eta_A \frac{x_f}{x_D} \quad \frac{W}{F} = 1 - \frac{D}{F}$$

$$\therefore \frac{Wx_W}{Fx_f} = 1 - \eta_A$$

$$\therefore x_W = \frac{(1 - \eta_A)x_f}{W / F}$$

④已知:  $x_f$ , 轻组分回收率 $\eta_A$ , 重组分回收率 $\eta_B$

求:  $\frac{W}{F}, \frac{D}{F}, x_W, x_D$

$$\eta_A = \frac{Dx_D}{Fx_f} \quad \eta_B = \frac{W(1-x_W)}{F(1-x_f)}$$

塔顶产物A和B:  $\eta_A Fx_f + (1-\eta_B)F(1-x_f)$

塔釜产物A和B:  $(1-\eta_A)Fx_f + \eta_B F(1-x_f)$

$$\therefore x_D = \frac{\eta_A x_f}{\eta_A x_f + (1-\eta_B)(1-x_f)} \quad x_W = \frac{(1-\eta_A)x_f}{(1-\eta_A)x_f + \eta_B(1-x_f)}$$

$$\frac{D}{F} = \eta_A \frac{x_f}{x_D}, \quad \frac{W}{F} = 1 - \frac{D}{F}$$

## 9.4 精馏

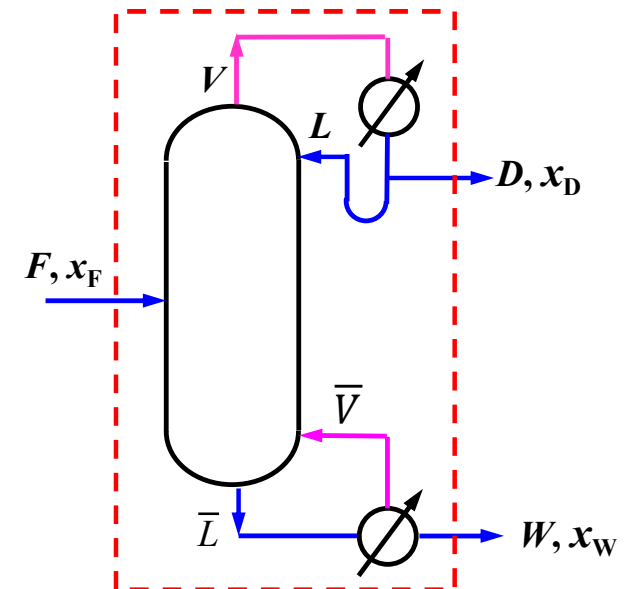
问题

$x_D$ 最大为多少?

$$\frac{D}{F} = \frac{x_F - x_W}{x_D - x_W}$$

当塔釜不出料时,  $x_D$ 最大

$$x_D \leq \frac{Fx_F}{D}$$



精馏塔的全塔物料衡算

## 9.4 精馏

---

### 问题-平台

某二元混合物，进料量为 $100\text{kmol/h}$ ， $x_F=0.6$ ，要求得到塔顶 $x_D$ 不小于 $0.9$ ，若塔高不受限制，则塔顶最大产量为\_\_\_\_\_。

- (A)  $60\text{kmol/h}$       (B)  $66.7\text{kmol/h}$   
(C)  $90\text{kmol/h}$       (D) 不确定

## 9.4 精馏

### 答案

某二元混合物，进料量为100kmol/h， $x_F=0.6$ ，要求得到塔顶 $x_D$ 不小于0.9，若塔高不受限制，则塔顶最大产量为\_\_2\_\_。

(1) 60kmol/h    (2) 66.7kmol/h    (3) 90kmol/h    (4) 不确定

$$\frac{D}{F} = \frac{x_F - x_W}{x_D - x_W} \quad x_W=0 \text{ 时, } D/F \text{ 最大。}$$

$$D_{\max} = \frac{Fx_F}{x_D} = \frac{100 \times 0.6}{0.9} = 66.7 \text{ kmol/h}$$

## 第八组

什么是恒摩尔流假定？恒摩尔流假定的条件是什么？

## 9.4 精馏

### 单块塔板的物料衡算和热量衡算

#### ① 总物料衡算

$$V_{n+1} + L_{n-1} = V_n + L_n$$

#### ② 轻组分衡算

$$V_{n+1}y_{n+1} + L_{n-1}x_{n-1} = V_n y_n + L_n x_n$$

#### ③ 热量衡算 (忽略热损失)

$$V_{n+1}I_{n+1} + L_{n-1}i_{n-1} = V_n I_n + L_n i_n$$

饱和蒸汽:  $I = i + \gamma$

$$V_{n+1}(\gamma_{n+1} + i_{n+1}) + L_{n-1}i_{n-1} = V_n (\gamma_n + i_n) + L_n i_n$$

#### ④ 恒摩尔流假定与热量衡算的简化 前提——汽化潜热相等

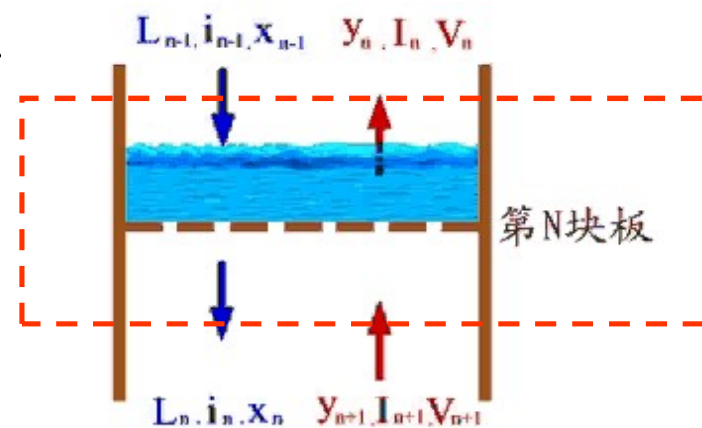
假设  $\begin{cases} \gamma_{n+1} = \gamma_n = \gamma \\ i_{n+1} = i_{n-1} = i_n = i \end{cases}$



联立总物料衡算得:

$$V_{n+1} = V_n, \quad L_n = L_{n-1}$$

**恒摩尔流假定**





## 9.4 精馏

**恒摩尔流假定：**无加料和出料的任一塔段中，各板上升的蒸汽量均相等，各板下降的液体量也均相等。

精馏段：用 $V$ 、 $L$ 表示汽液流量

提馏段：用 $\bar{V}$ 、 $\bar{L}$ 表示汽液流量

**恒摩尔流假定条件：**

- a. 忽略温度、组成对焓的影响；
- b. **两组分的摩尔汽化潜热相等；**
- c. 设备保温良好，热损失可忽略。

提馏段：用 $\bar{V}$ 、 $\bar{L}$ 表示汽液流量

## 9.4 精馏

### 加料板过程分析

**理论加料板：**不论进入加料板各物流的组成、热状态及接触方式如何，离开加料板的汽液两相温度相等，组成互为平衡。

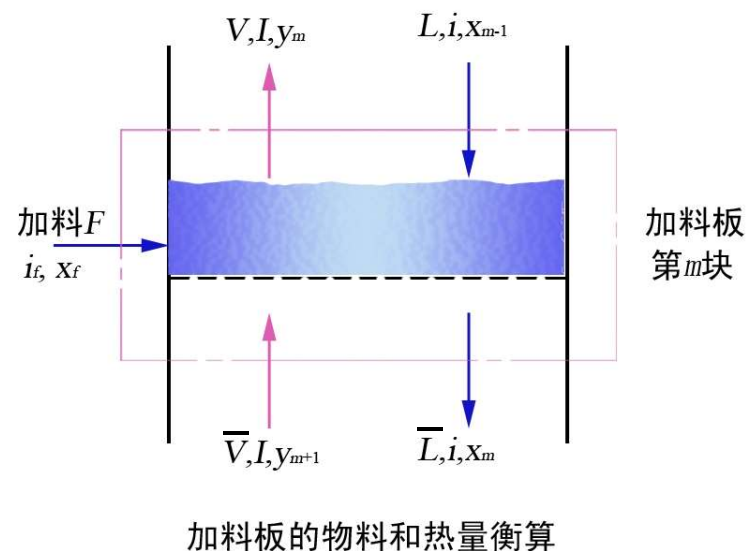
### 物料衡算式

$$\text{总: } F + L + \bar{V} = \bar{L} + V$$

$$\text{轻: } Fx_F + \bar{V}y_{m+1} + Lx_{m-1} = Vy_m + \bar{L}x_m$$

### 相平衡方程

$$y_m = \frac{\alpha x_m}{1 + (\alpha - 1)x_m}$$




## 问题-平台

苯和甲苯溶液，其中含苯**0.5**（摩尔分率，下同），以每小时**1000kmol**流量进入一精馏，用到了下列什么内容（ ）？

- (A) 理论板假定
- (B) 理想物系
- (C) 塔顶泡点回流
- (D) 恒摩尔流假定

## 答案

苯和甲苯溶液，其中含苯**0.5**（摩尔分率，下同），以每小时**1000kmol**流量进入一精馏，用到了下列什么内容（ ）？

- (1) 理论板假定      (2) 理想物系  
(3) 塔顶泡点回流     (4) 恒摩尔流假定

## 9.4 精馏

### 精馏段与提馏段两相流量的关系

$$\begin{cases} \text{总: } F + L + \bar{V} = \bar{L} + V \\ \text{焓: } Fi_F + Li + \bar{V}I = \bar{L}i + VI \end{cases}$$

联立得:  $\frac{\bar{L} - L}{F} = \frac{I - i_F}{I - i}$

定义:  $q = \frac{\bar{L} - L}{F}$   $q$ : 加料热状态参数, 数值等于进料中液相分率。

$$\rightarrow \begin{cases} \bar{L} = L + qF \\ \bar{V} = V - (1 - q)F \end{cases}$$

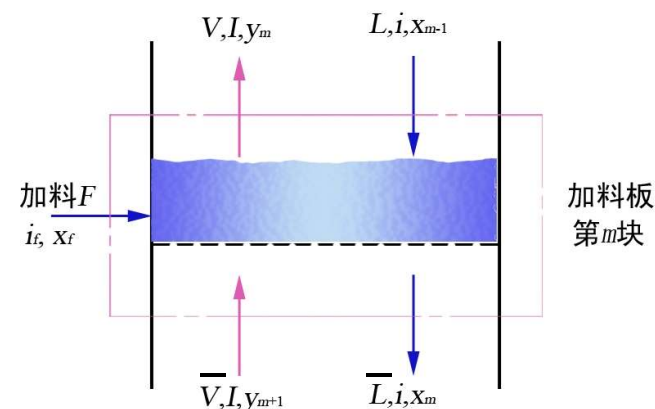
$$F = qF + (1 - q)F$$

液相部分    汽相部分

### 加料热状态参数 $q$

$$q = \frac{\bar{L} - L}{F} = \frac{I - i_F}{I - i} = \frac{\gamma + c_p(t - t_F)}{\gamma}$$

=  $\frac{1 \text{ kmol原料变成饱和蒸汽所需的热量}}{\text{原料的摩尔汽化热}}$



加料板的物料和热量衡算

## 9.4 精馏

加料的热状态（共5种）

(1)  $q < 0$  过热蒸汽进料。

使加料板上一部分液体被汽化

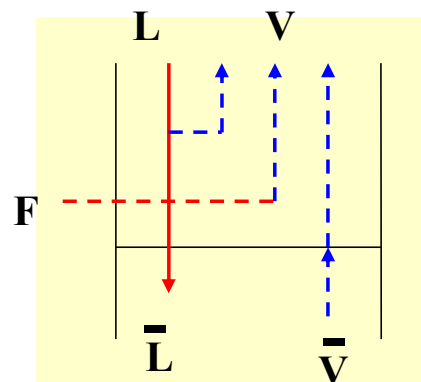
(2)  $q = 0$  饱和蒸汽进料；

(3)  $0 < q < 1$  汽液混合物进料；

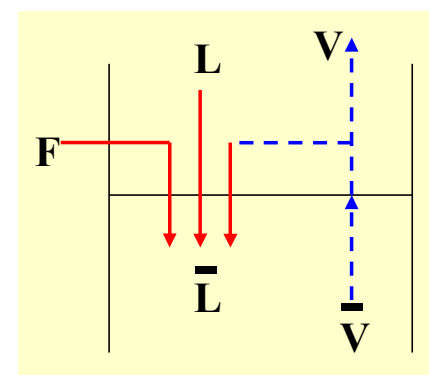
(4)  $q = 1$  泡点进料；

(5)  $q > 1$  冷液进料；

$t > t_f$  料液被加热至饱和，蒸汽一部分被冷凝



$q < 0$



$q > 1$

$$q = \frac{\gamma + c_p(t - t_F)}{\gamma}$$

加料板温度为 $t_f$

$$= \frac{1 \text{ kmol原料变成饱和蒸汽所需的热量}}{\text{原料的摩尔汽化热}}$$

$q$ : 加料热状态参数，数值等于进料中液相分率。

## 9.4 精馏

---

### 问题-平台

1、已知 $q=1.2$ ，则加料中液体量与总加料量的比是\_\_\_\_\_。

A 1:1.2    B 1.2:1    C 1:1    D 1:2

2、 $q=0.6$ ，进料中汽体与液体的摩尔比=？

A 3:5    B 5:3    C 2:3    D 3:2

## 9.4 精馏

---

### 答案

1、已知 $q=1.2$ ，则加料中液体量与总加料量的比是\_\_\_\_\_。

**1:1**     冷液加料，全部为液体

2、 $q=0.6$ ，进料中汽体与液体的摩尔比=？

$$q = \frac{\text{液}}{\text{液} + \text{汽}} = 0.6 = \frac{3}{5}$$

汽体与液体的摩尔比= 2:3



- **作业：第九章 6、7、8、9**