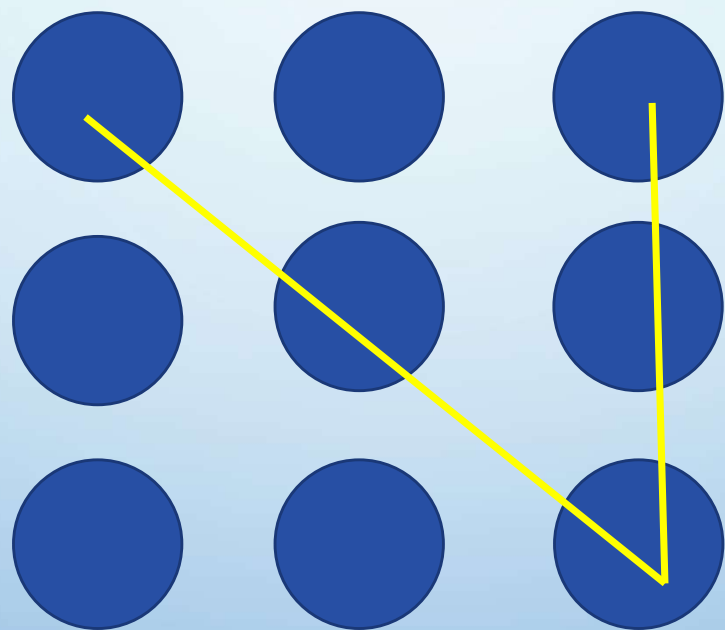


化工原理（下）

精 馏

2022-4-6

请大平台手势扫码



复习

9.4 精馏

精馏段操作方程

$$y_{n+1} = \frac{L}{V} x_n + \frac{D}{V} x_D$$

$$\begin{cases} L = RD \\ V = (R+1)D \end{cases}$$

相平衡方程

$$y_{n+1} = \frac{R}{R+1} x_n + \frac{x_D}{R+1}$$

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

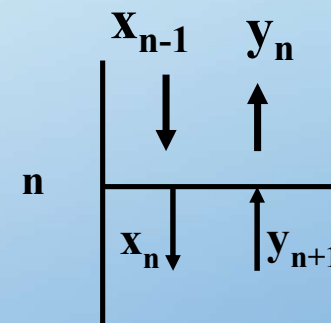
提馏段操作方程

$$y_{n+1} = \frac{\bar{L}}{\bar{V}} x_n + \frac{Dx_D - Fx_F}{\bar{V}}$$

$$\bar{L} = L + qF$$

$$\bar{V} = V - (1 - q)F$$

$$= \frac{RD + qF}{(R+1)D - (1-q)F} x_n - \frac{Wx_W}{(R+1)D - (1-q)F}$$



9.4 精馏

操作线图示

精馏段操作线

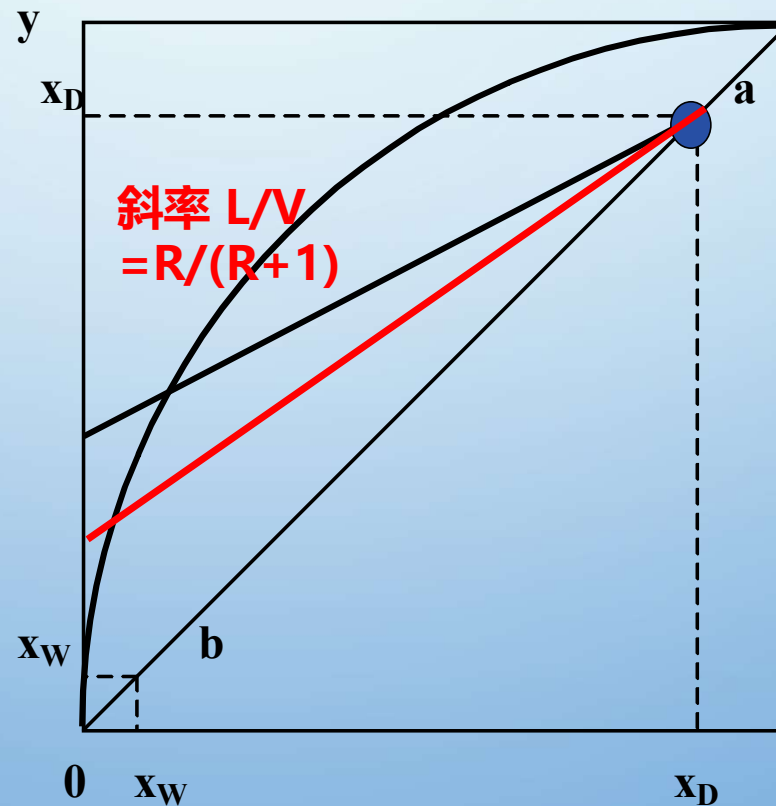
$$y_{n+1} = \frac{R}{R+1} x_n + \frac{x_D}{R+1}$$

$$x_n = x_D \Rightarrow y_{n+1} = x_D$$

a点: (x_D, x_D)

斜率: $\frac{L}{V} = \frac{R}{R+1} \leq 1$

截距: $x_D/(R+1) \geq 0$



问题

增大斜率，分离有利OR不利？

斜率越大，越远离平衡线，精馏段内塔板的分离能力高。

9.4 精馏

操作线图示

提馏段操作线

$$y_{n+1} = \frac{\bar{L}}{\bar{V}} x_n + \frac{Dx_D - Fx_F}{\bar{V}}$$

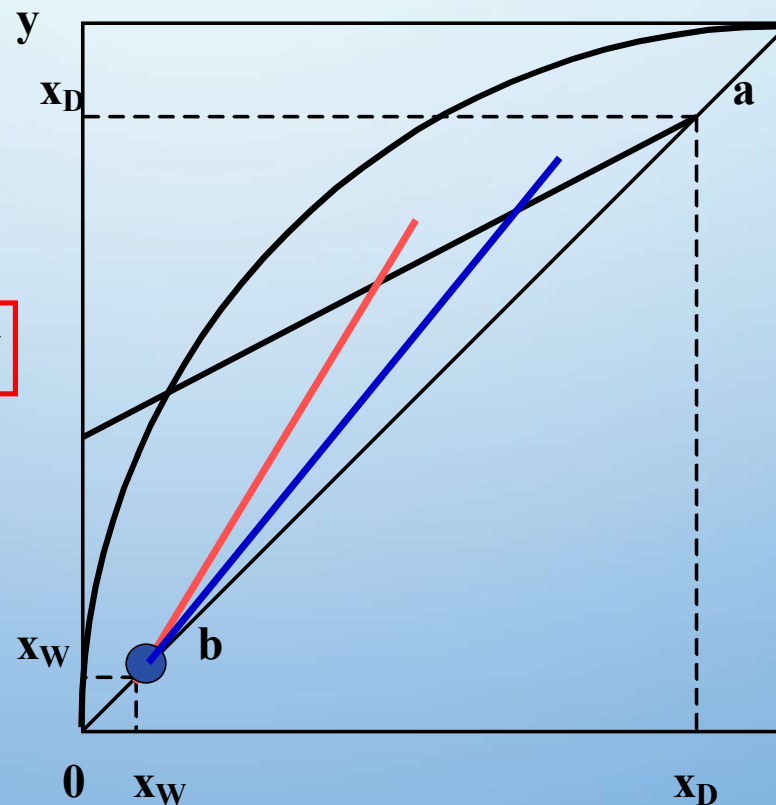
$$y_{n+1} = \frac{\bar{L}}{\bar{V}} x_n - \frac{Wx_W}{\bar{V}}$$

$$\bar{L} = \bar{V} + W$$

$$x_n = x_w \Rightarrow y_{n+1} = x_w$$

b点: (x_w, x_w)

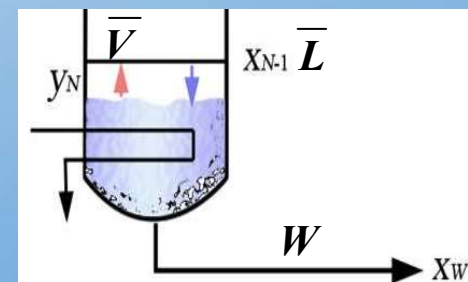
斜率: $\bar{L}/\bar{V} = (\bar{V} + W)/\bar{V} \geq 1$



问题

减小斜率，
分离有利**OR**
不利？

斜率越小，越
远离平衡线，
提馏段内塔板
的分离能力高。



9.4 精馏

q线方程

$$\left. \begin{aligned} Vy_{n+1} &= Lx_n + Dx_D \\ \bar{V}y_{n+1} &= \bar{L}x_n - Wx_W \end{aligned} \right\}$$



$$(\bar{V} - V)y_{n+1} = (\bar{L} - L)x_n - (Dx_D + Wx_W)$$

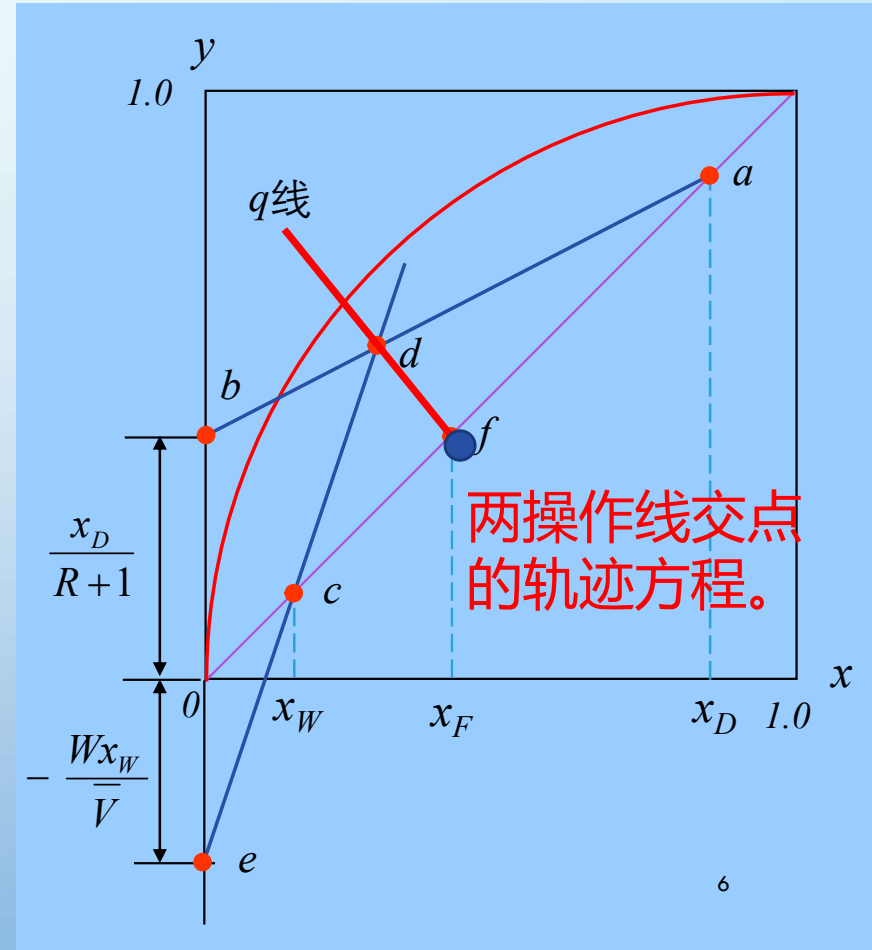
又 $\begin{cases} \bar{L} = L + qF \\ \bar{V} = V - (1 - q)F \end{cases}$, 故

$$y_q = \frac{q}{q-1}x_q - \frac{x_f}{q-1}$$

-----q 线方程

f点: (x_F, x_F)

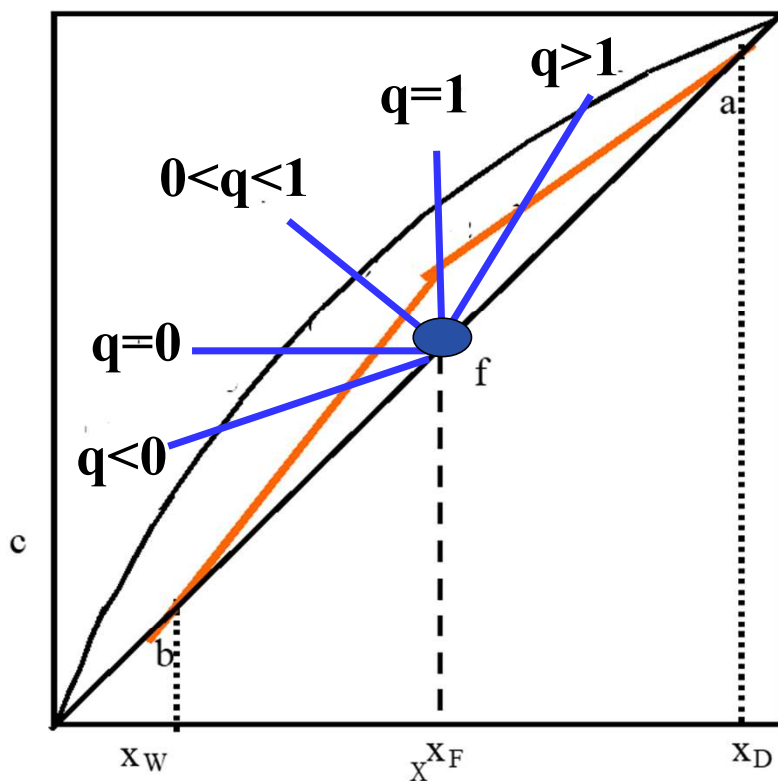
斜率: $\frac{q}{q-1}$



$$y_q = \frac{q}{q-1} x_q - \frac{x_f}{q-1}$$

$$x_q = x_f \Rightarrow y_q = x_f$$

q 线为过点 $f(x_F, x_F)$ 的直线



q 代表进料状态

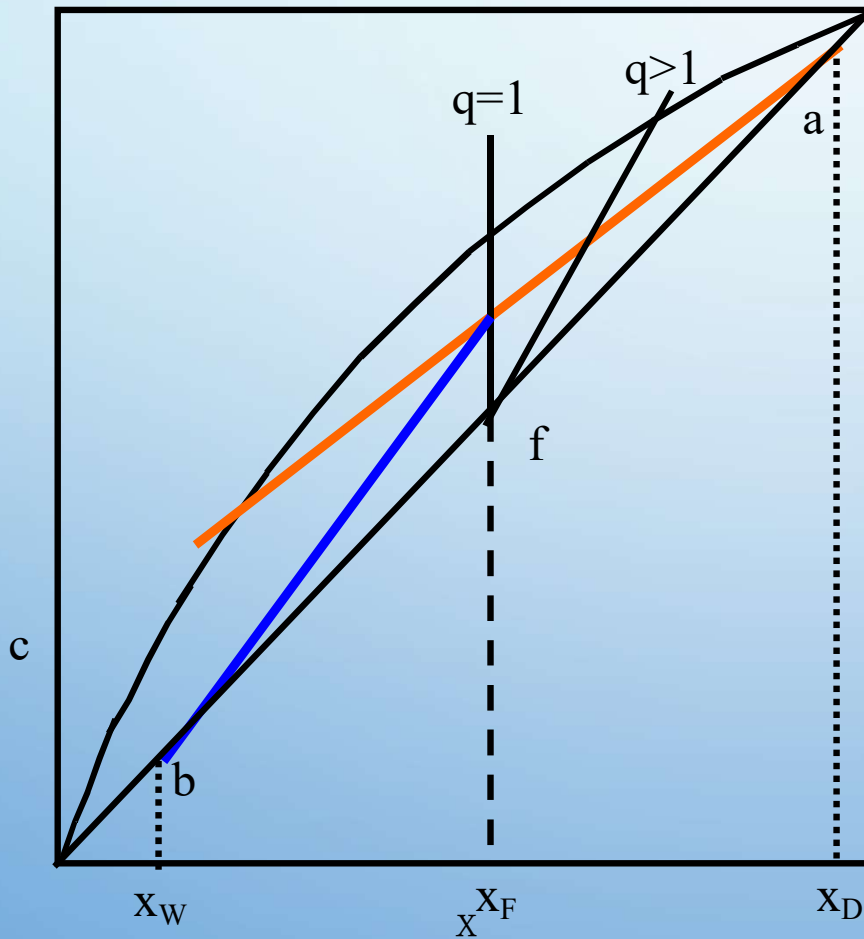
$$q = 1 \Rightarrow$$

$$x_q = x_f, y_q = 0$$

$$q = 0 \Rightarrow$$

$$y_q = x_f, x_q = 0$$

思考



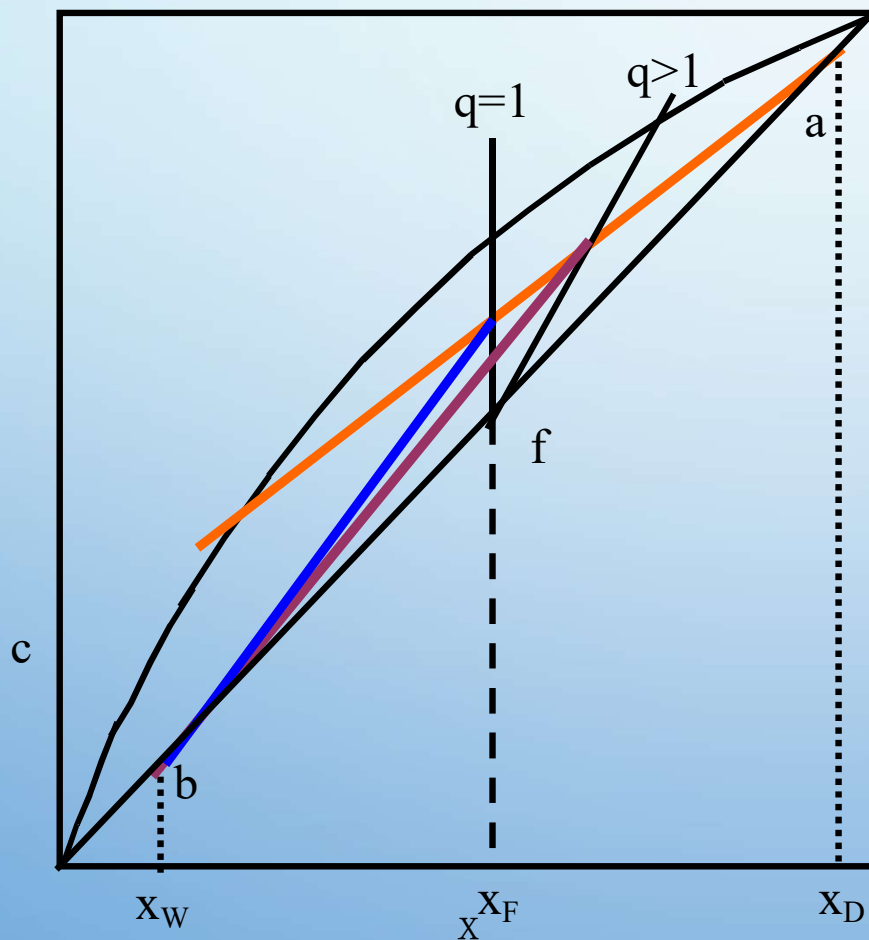
$$y = \frac{q}{q-1}x - \frac{x_F}{q-1}$$

----- q 线方程

$q=1$ 到 $q>1$,图中
哪些线改变?

哪些线没有改变?

q线为两操作线交点的轨迹方程。



$$\mathbf{y} = \frac{q}{q-1} \mathbf{x} - \frac{\mathbf{x}_F}{q-1}$$

-----q线方程

进料状况 q 的影响:

改变q线方程

改变提馏段操作线

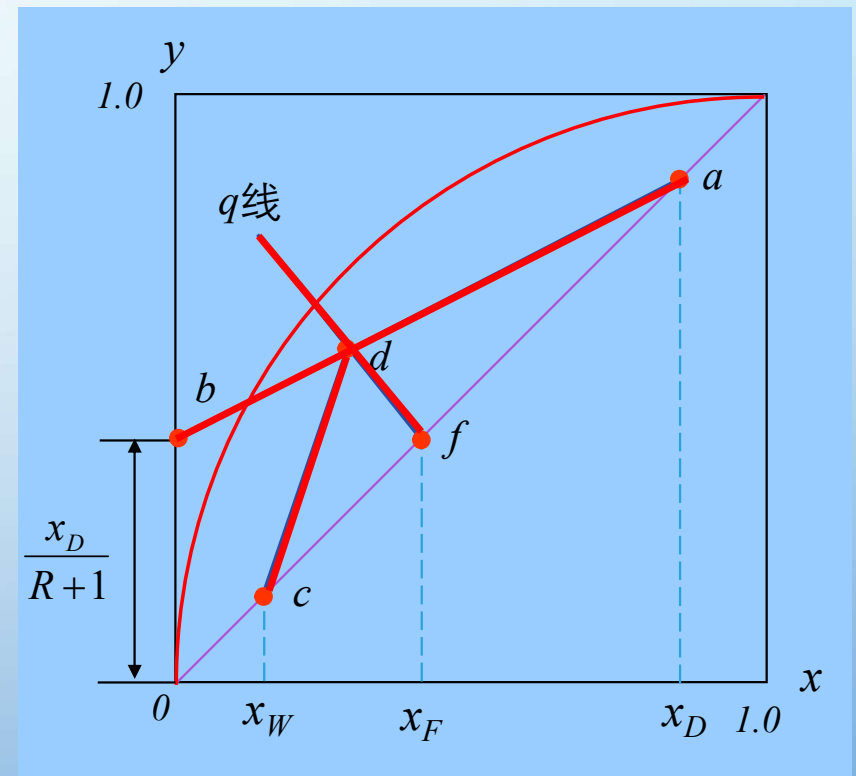
不改变精馏段操作线

不改变平衡线

9.4 精馏

操作线方程的实际作法

- (1) 由 x_D 和 R 确定精馏段操作线;
- (2) 由 x_F 和 q 确定 q 线;
- (3) q 线与精馏段操作线的交点为两操作线的交点 d , 仅需将此点与对角线上的点 $c(x=x_W, y=x_W)$ 联结, 即得提馏段操作线。



练习1

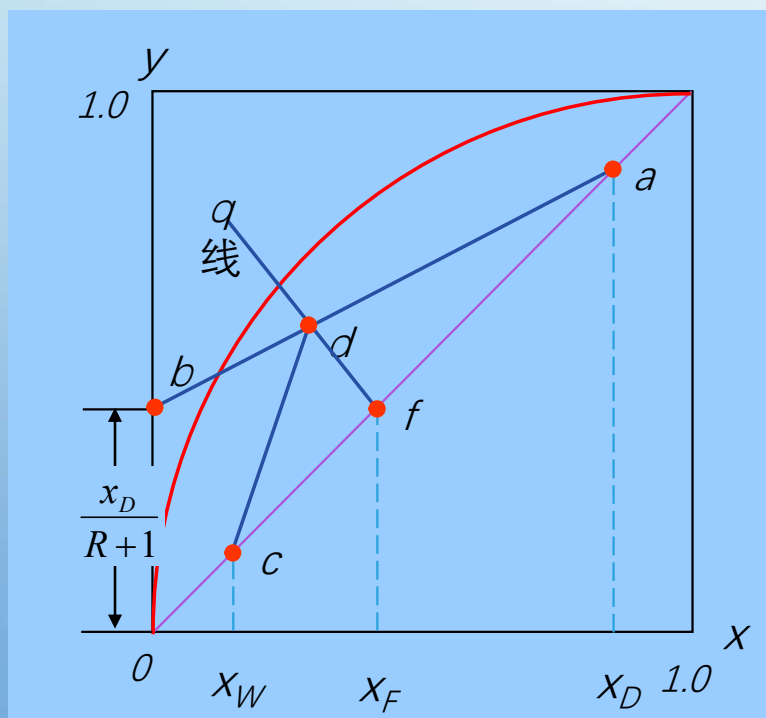
1、某连续精馏塔中，若精馏段操作线方程的截距等于零，则：
 (1) 回流比等于 ____ ； (2) 操作线斜率等于 ____ 。

A 0 B 1 C ∞



$$y_{n+1} = \frac{R}{R+1} x_n + \frac{x_D}{R+1}$$

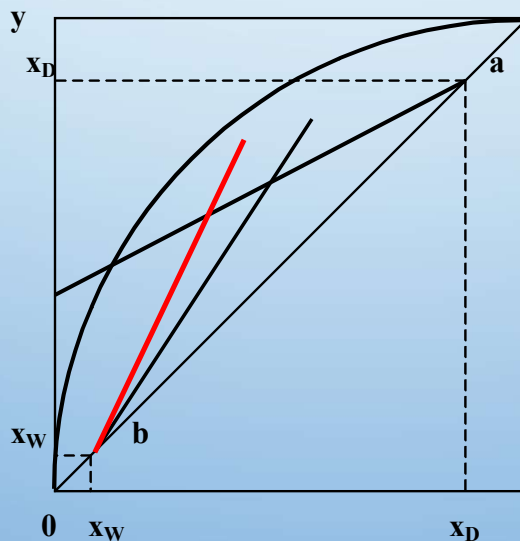
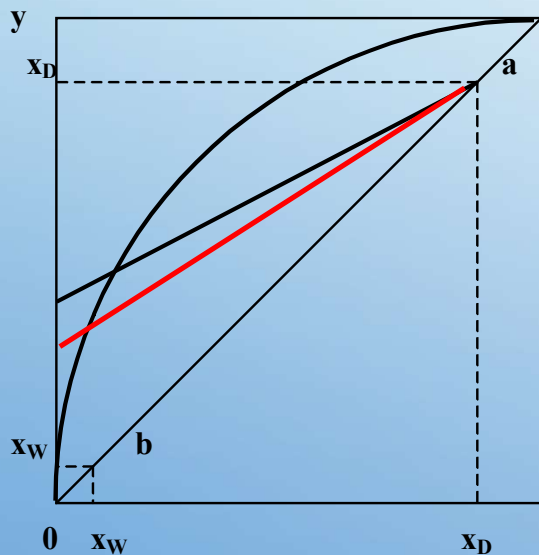
答案：C, B



练习2

2、精馏操作线方程，斜率增大，对分离（ ），提馏操作线方程，斜率增大，对分离（ ）

A 有利， B 不利， C 不确定



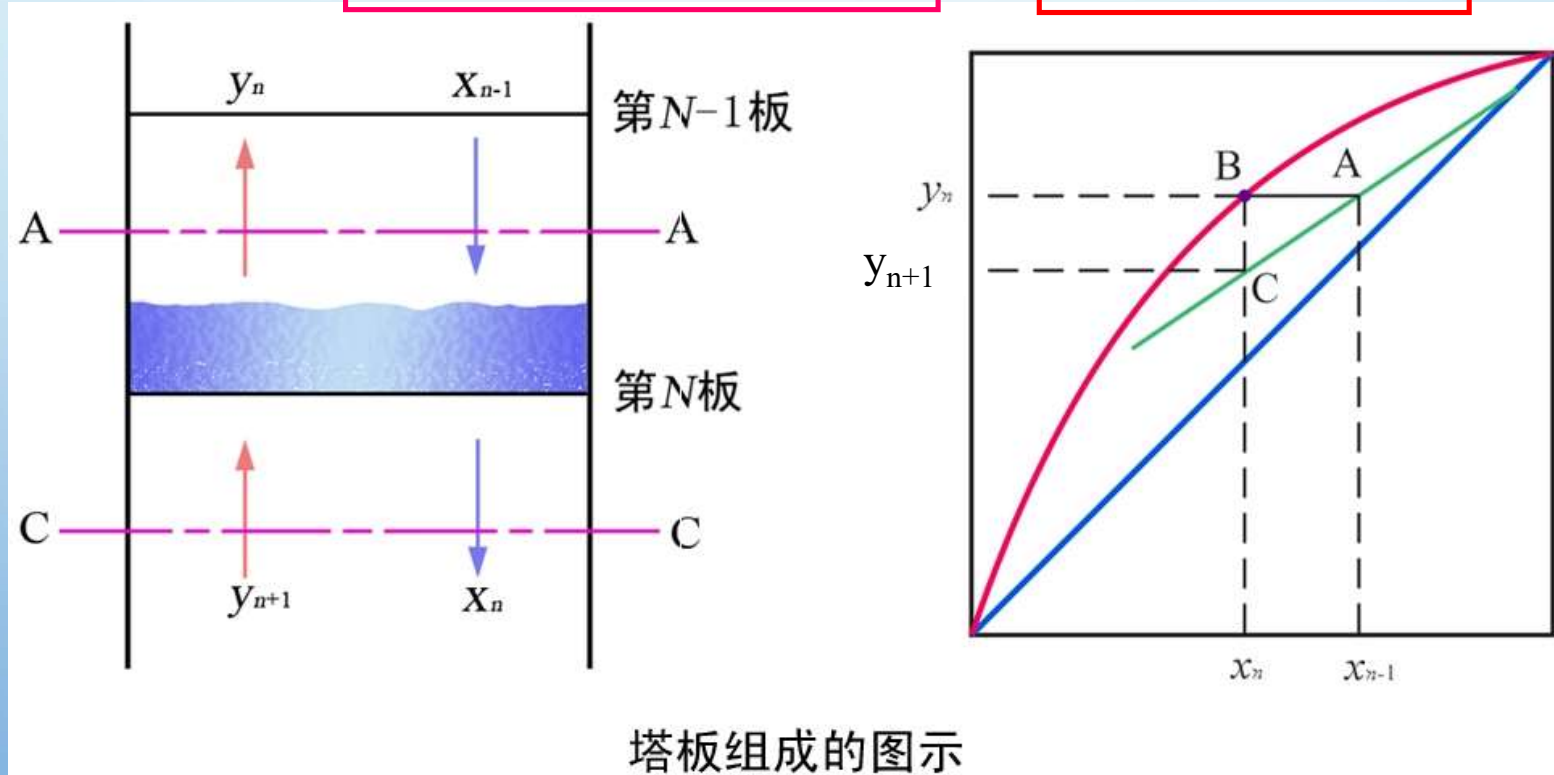
答案: A, B

9.4 精馏

理论板的增浓度

$$y_{n+1} = \frac{R}{R+1} x_n + \frac{x_D}{R+1}$$

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



BC为气相轻组分增浓度，AB为液相重组分增浓度

9.5 双组分精馏的设计型计算

设计型计算的命题

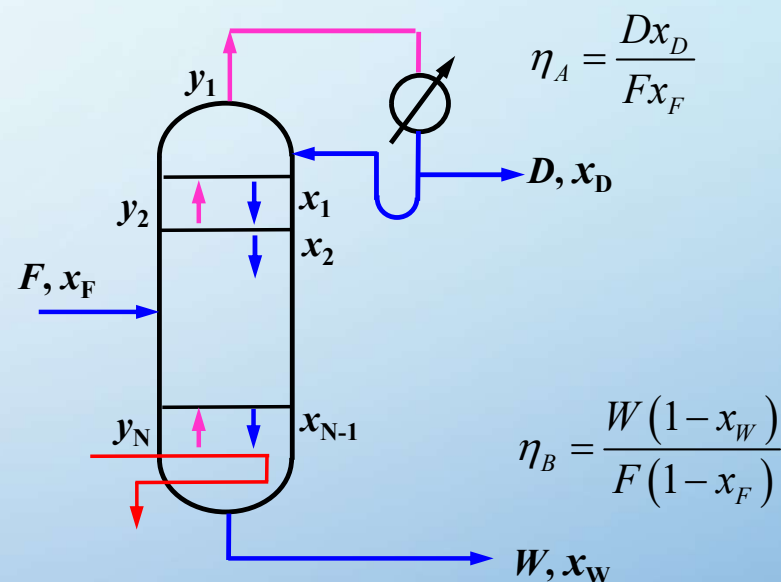
已知: F, x_F

规定: 分离要求 $\left\{ \begin{array}{l} \textcircled{1} D, x_D \quad (W, x_W) \\ \textcircled{2} x_D, x_W \\ \textcircled{3} x_D, \eta_A \quad (x_W, \eta_B) \end{array} \right.$

规定一种, 其余随之而定。

选择条件: 操作压强 p , 加料位置 m , 回流比 R , 进料热状态 q

求取: 理论板数 N_T



9.5 双组分精馏的设计型计算

计算理论板数的方法

- 1) 方程组联立求解法（计算机迭代做）
- 2) 逐板计算法
- 3) 图解法
- 4) 捷算法（估算）（自学）

第五组

介绍一下精馏设计型的逐板计算法

9.5 双组分精馏的设计型计算

1. 逐板计算法

计算方程

总物料衡算方程: $F = D + W$

轻组分衡算方程: $Fx_F = Dx_D + Wx_w$

精馏段操作方程: $y_{n+1} = \frac{L}{V}x_n + \frac{Dx_D}{V} = \frac{R}{R+1}x_n + \frac{x_D}{R+1}$

提馏段操作方程: $y_{n+1} = \frac{\bar{L}}{\bar{V}}x_n - \frac{Wx_w}{\bar{V}} = \frac{RD + qF}{(R+1)D - (1-q)F}x_n - \frac{F-D}{(R+1)D - (1-q)F}x_w$

q 线方程: $y_q = \frac{q}{q-1}x_q - \frac{x_F}{q-1}$

相平衡方程: $y_n = \frac{\alpha x_n}{1 + (\alpha - 1)x_n}$

9.5 双组分精馏的设计型计算

1. 逐板计算法

一般 x_D 已知

以连续精馏，塔顶设全凝器，泡点回流为例：

计算步骤

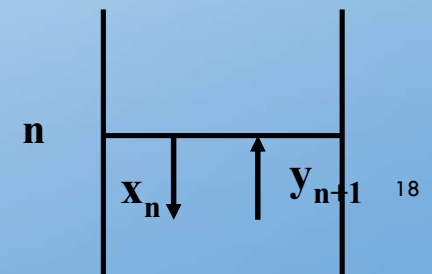
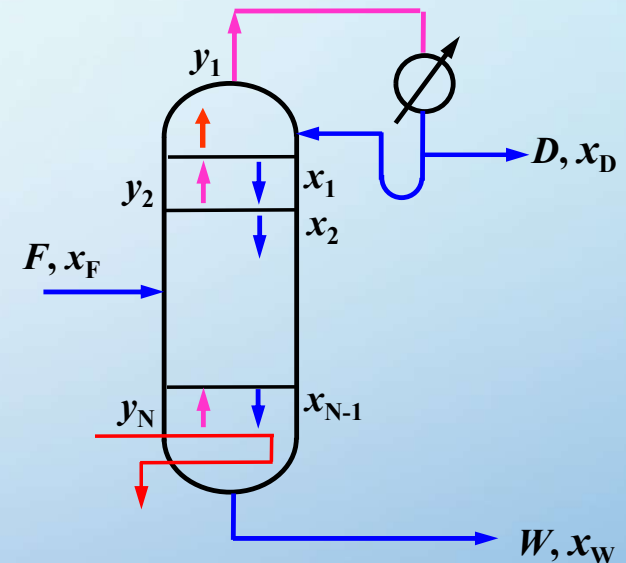
①物料衡算： $y_1 = x_D$

②相平衡方程： $x_1 = \frac{y_1}{1 - (\alpha - 1)y_1}$

③操作线方程： $y_2 = \frac{R}{R + 1}x_1 + \frac{x_D}{R + 1}$

交替使用相平衡方程和操作方程，至 $x_m \leq x_q$ 时，改换提馏段操作方程，至 $x_N \leq x_W$ 止。

理论板数 N 块（包括再沸器），加料板为第 m 块板，精馏段塔板数为 $m-1$ ，提馏段塔板数为 $N-m+1$ 。



逐板计算例题

例 精馏塔塔釜饱和液体状态进料。已知

泡点回流， α 为3, $x_f = 0.52, x_D = 0.8, D/F = 0.5, R = 3$

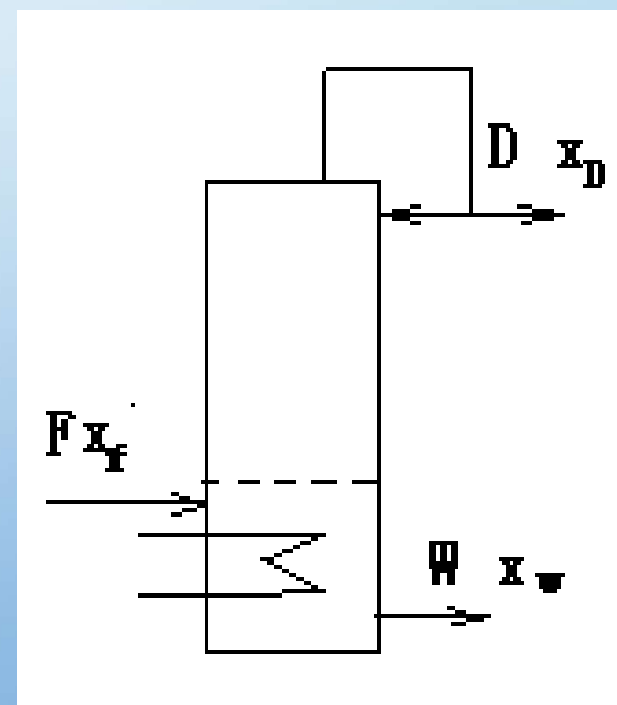
塔顶全凝器。求： N_T 。

解：塔釜加料，只有精馏段。

$$\frac{D}{F} = \frac{x_f - x_w}{x_D - x_w} = 0.5 \quad x_w = 0.24$$

$$y_{n+1} = \frac{R}{R+1} x_n + \frac{x_D}{R+1} = 0.75x_n + 0.2$$

$$x_n = \frac{y_n}{3 - 2y_n}$$



$$\because \text{全凝器} \therefore x_D = y_1 = 0.8 \quad x_1 = \frac{y_1}{3 - 2y_1} = 0.571$$

$$y_2 = 0.75x_1 + 0.2 = 0.628 \quad x_2 = \frac{y_2}{3 - 2y_2} = 0.36$$

$$y_3 = 0.47 \quad x_3 = 0.228 < 0.24$$

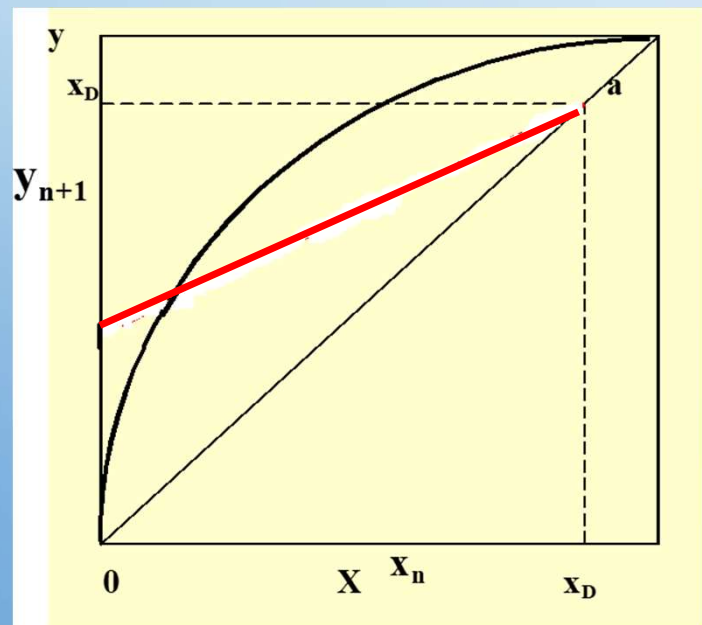
$$N_T = 3$$

9.5 双组分精馏的设计型计算

2. 图解法

$$y_{n+1} = \frac{R}{R+1} x_n + \frac{x_D}{R+1}$$

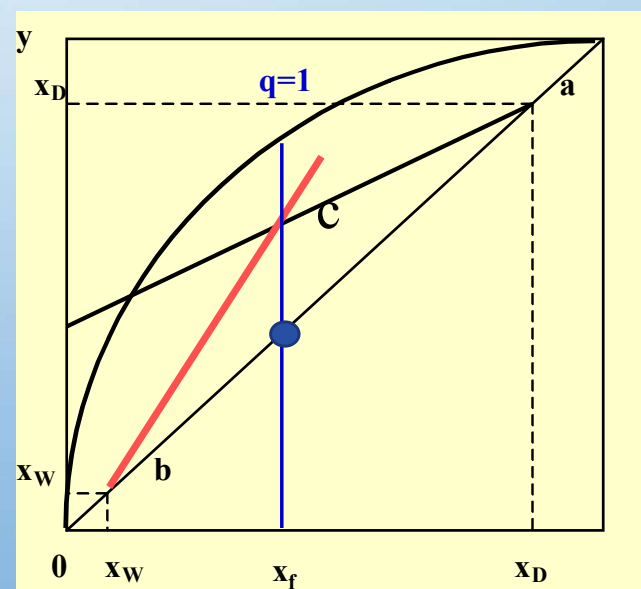
过点a (x_D 、 x_D)、斜率 $R/(R+1)$
的直线——精馏段操作线



$$y_{n+1} = \frac{\bar{L}}{\bar{V}} x_n - \frac{Wx_W}{\bar{V}} \quad q=1$$

得到c点

c点和b点的连线，提馏段操作线

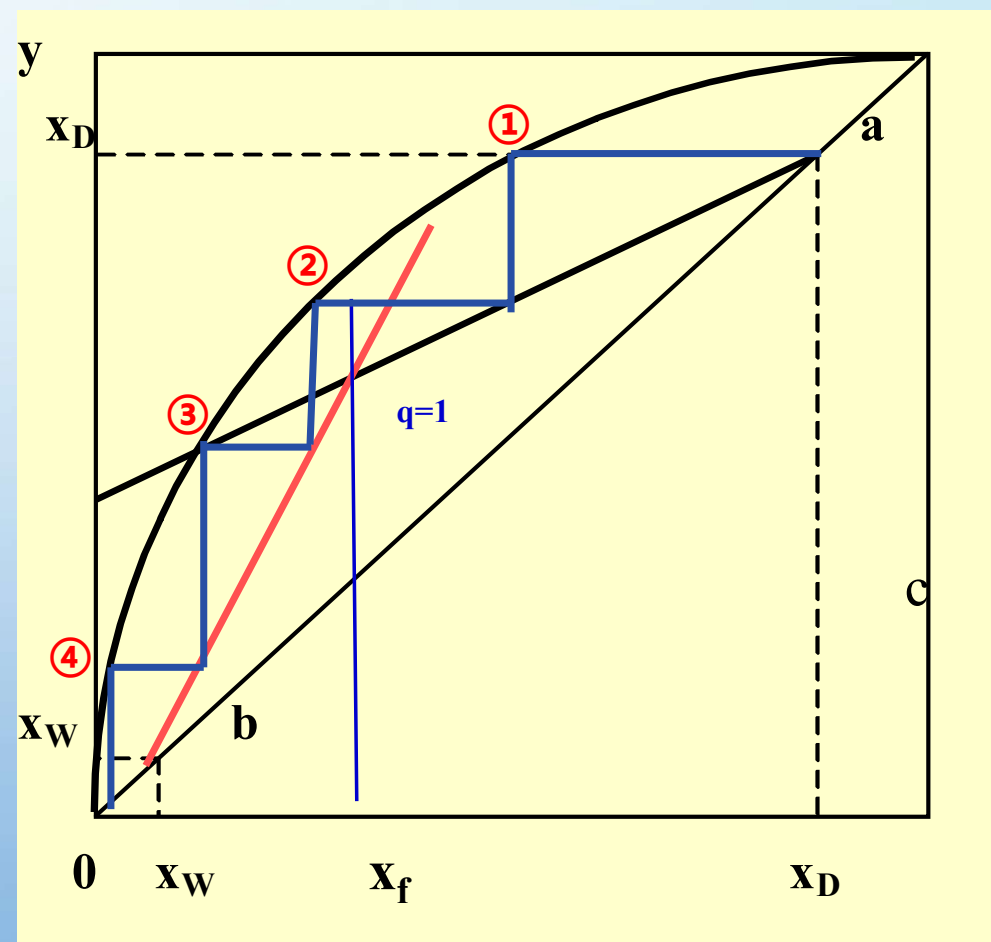
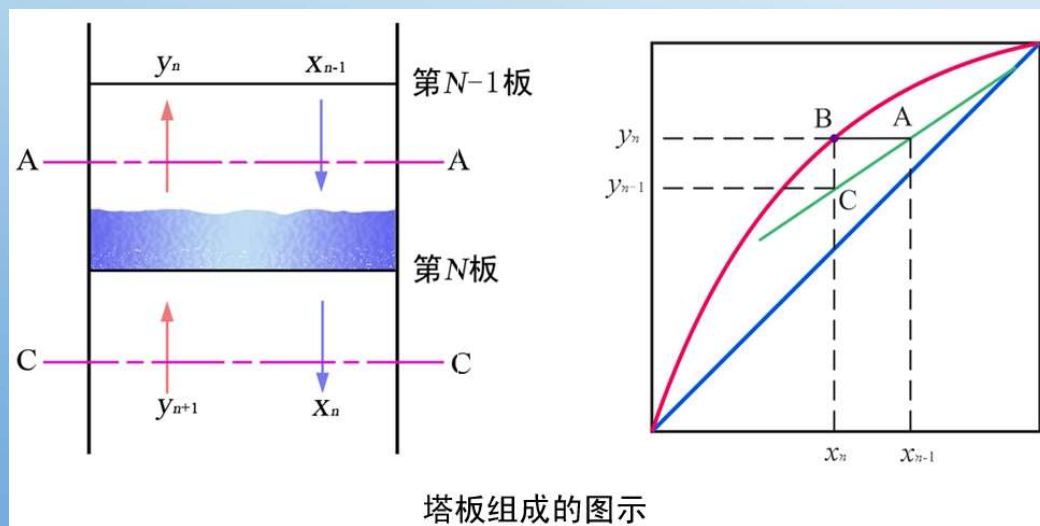


9.5 双组分精馏的设计型计算

图解步骤

$N_T=4$

第二块板加料



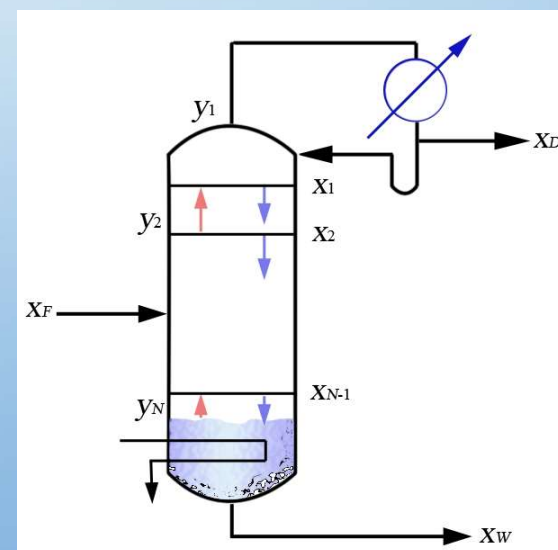
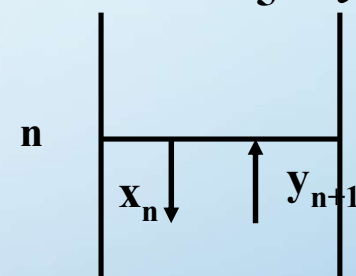
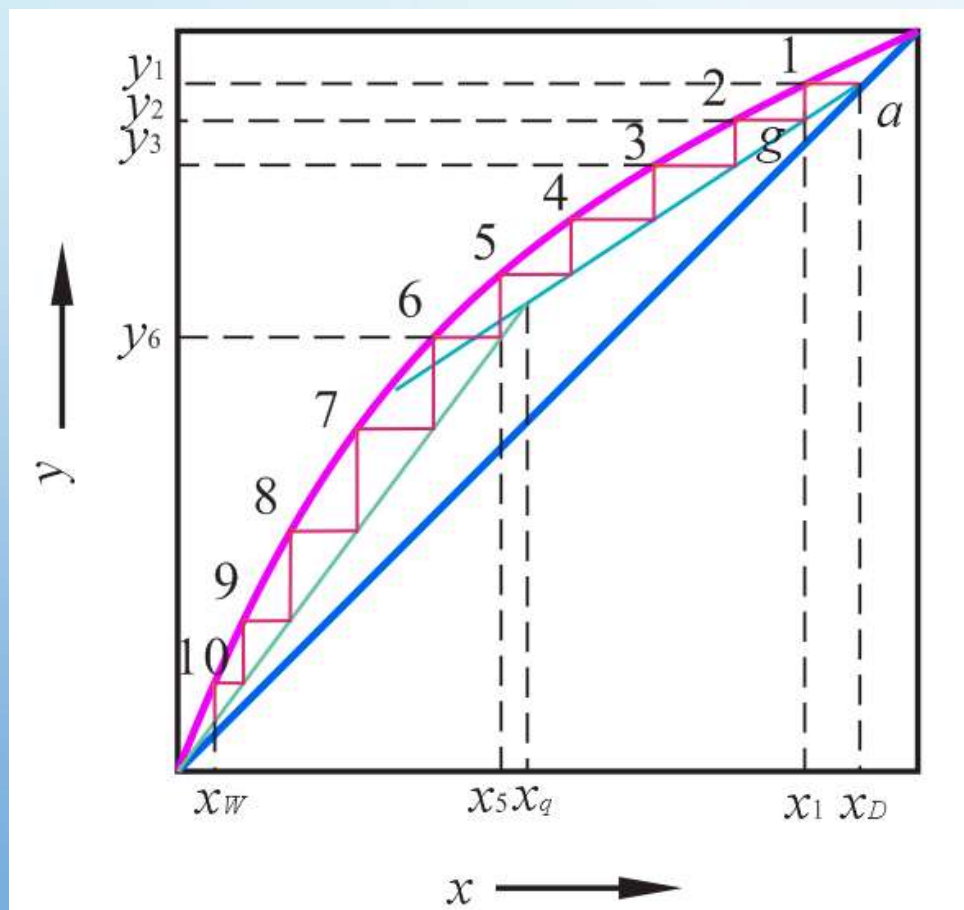
9.5 双组分精馏的设计型计算

最佳进料位置

问题 $N_T = ?$ 第几块加料?

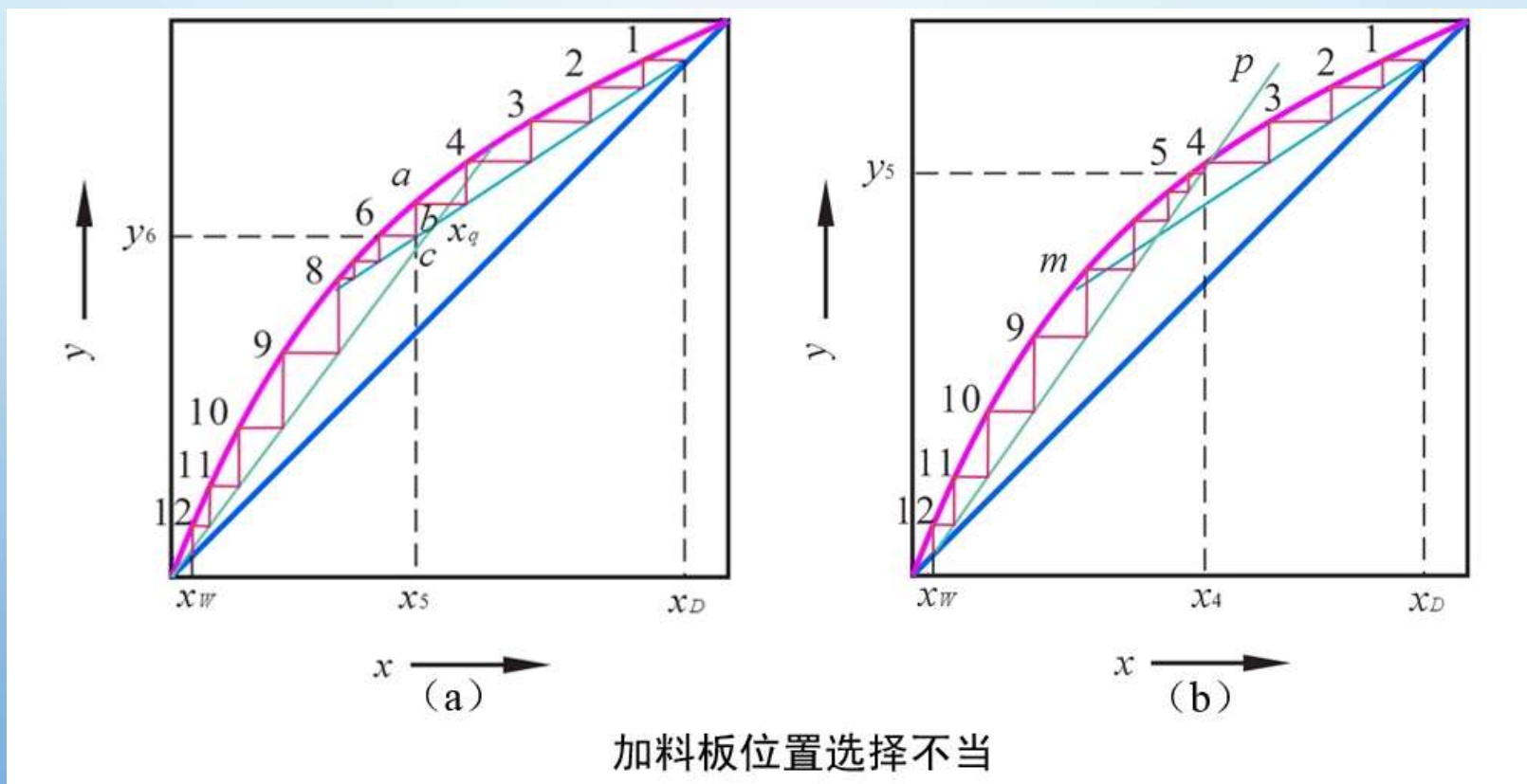
$N_T = 10$, 第5块板加料

用 x_5 求 y_6 时换操作线



非最佳位置进料与最佳进料的比较：

进料口下移或者上移，塔板数增加。



9.5 双组分精馏的设计型计算

3. 回流比

常压精馏，加料组成及进料状态一定，规定 x_D x_W

$R \uparrow$, $\bar{V} \uparrow$, 能耗 \uparrow 。

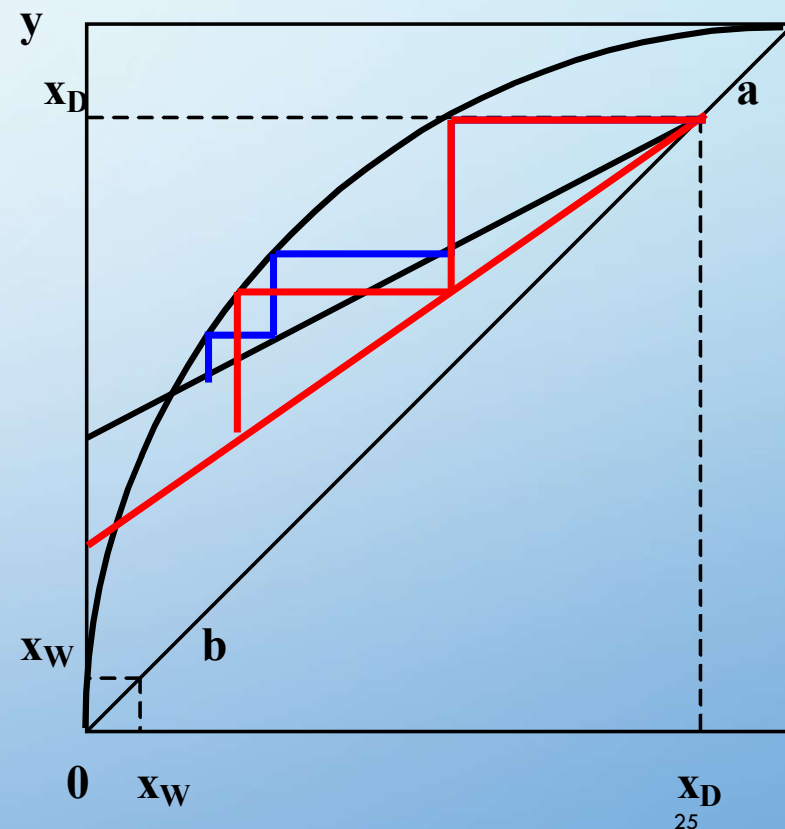
R 增大，则操作线斜率如何变化？

R 增大，塔板数如何变化？

R 增大，精馏操作线斜率增大，塔板数减小。

什么情况下 R 最大？什么情况下 R 最小？

精馏段斜率
$$L/V = R/(R+1)$$
$$= \frac{1}{1+1/R}$$



第六组

什么是全回流？研究全回流有什么意义？

全回流与最少理论板数

常压精馏，分离任务 x_D x_W

什么是全回流? $R = \frac{L}{D} \rightarrow \infty$

特点:

①操作线与对角线重合,

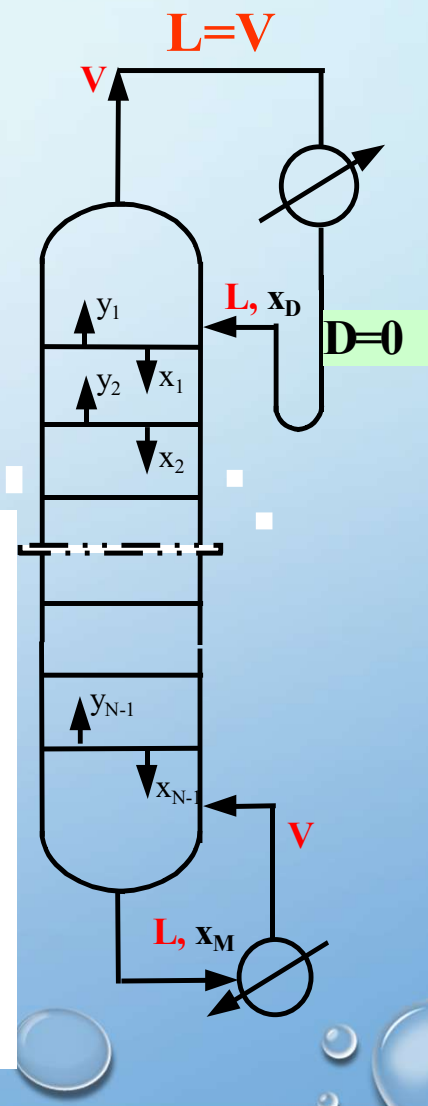
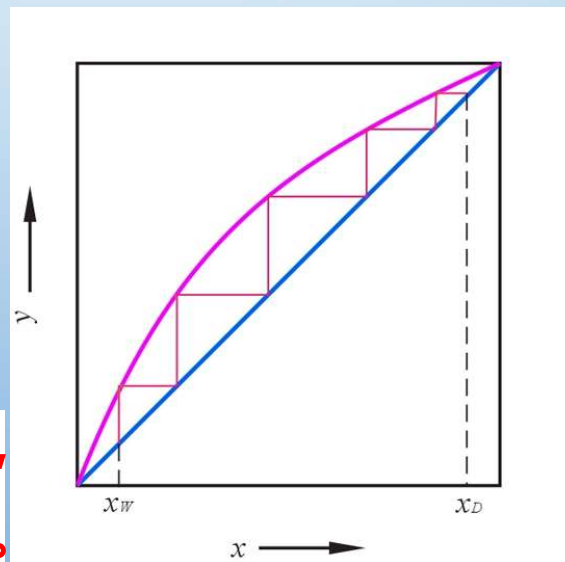
精、提操作线均为: $y_{n+1} = x_n$;

②理论板数最少 N_{\min}

$$y_{n+1} = \frac{L}{V} x_n + \frac{D}{V} x_D = x_n$$

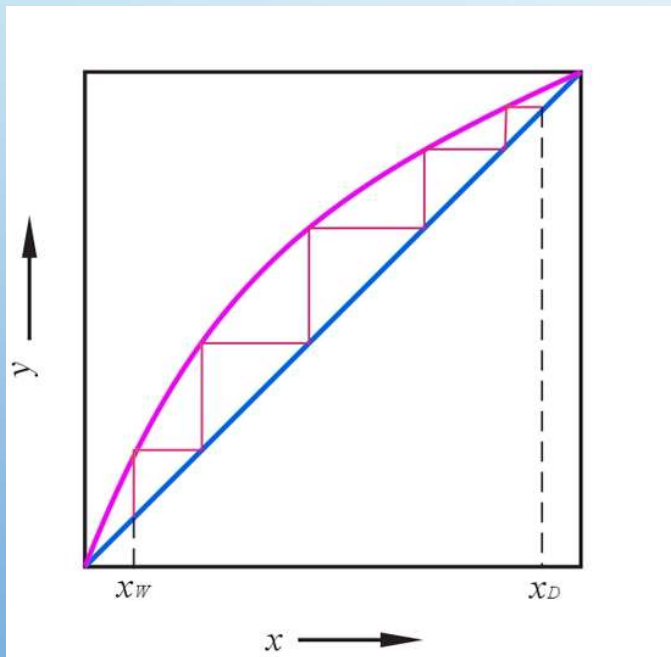
$$y_{m+1} = \frac{\bar{L}}{V} x_m - \frac{W x_W}{V} = x_m$$

**全回流是操作回流比的极限，
只在设备开工、调试时采用。**



练习3

3、全回流时，精馏段操作线方程为 $y_{n+1}=x_n$ (对，错)；提馏段操作线方程为 $y_{n+1}=x_n$ (对，错)。



答案：对，对

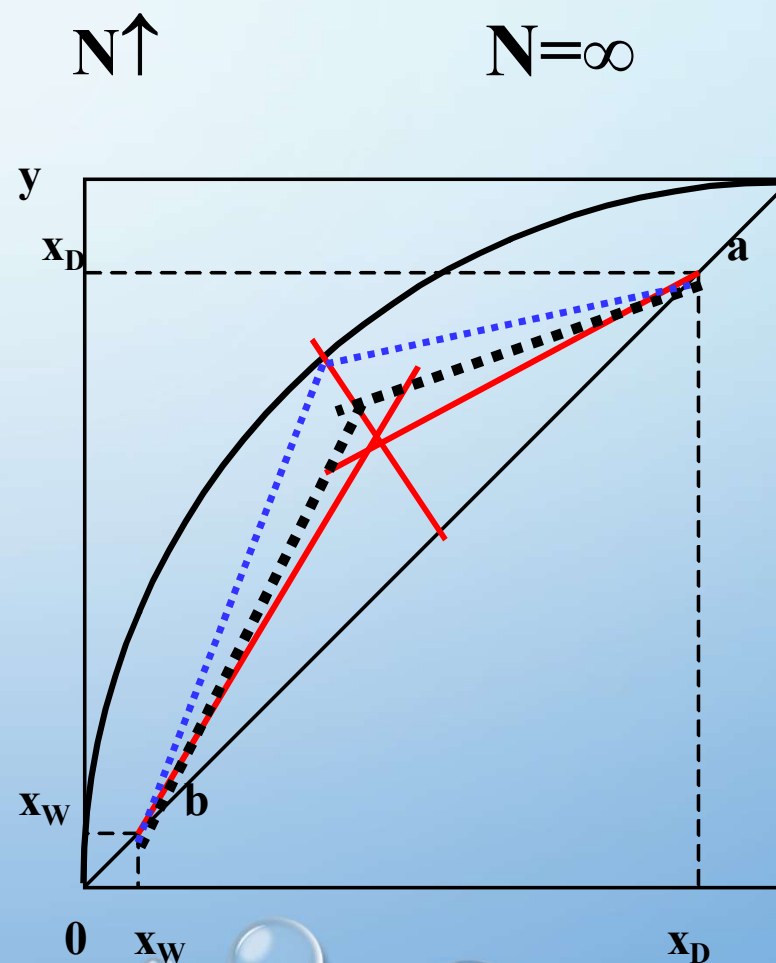
R减小，塔板数如何变？

$$y_{n+1} = \frac{R}{R+1} x_n + \frac{x_D}{R+1}$$

$$R \downarrow \Rightarrow \frac{L}{V} = \frac{R}{R+1} = \frac{1}{1+1/R} \downarrow$$

$$y_{m+1} = \frac{\bar{L}}{\bar{V}} x_m - \frac{Wx_W}{\bar{V}}$$

$$\begin{aligned} \frac{\bar{L}}{\bar{V}} &= \frac{\bar{V} + W}{\bar{V}} = 1 + \frac{W}{\bar{V}} \\ &= 1 + \frac{W}{(R \downarrow + 1)D - (1-q)F} \uparrow \end{aligned}$$



第七组

什么是最小回流比？当操作中选用的回流比比设计时的最小回流比还要小时，塔能否操作？将出现什么现象？

9.5 双组分精馏的设计型计算

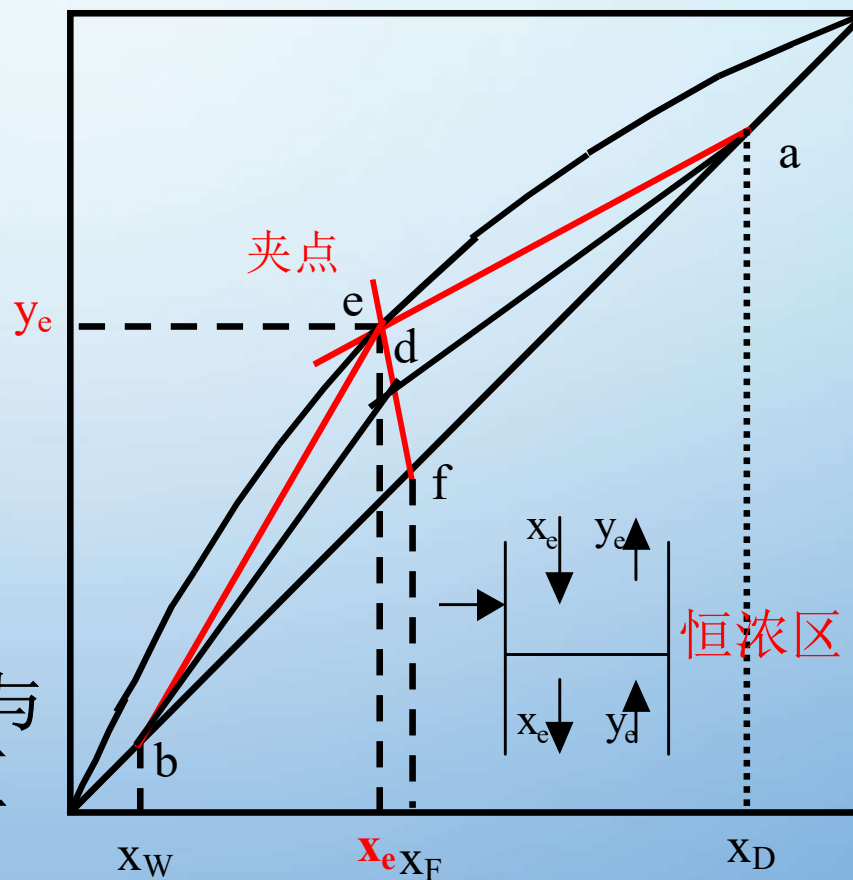
最小回流比 R_{min}

常压精馏，分离任务

x_D x_W 不变

为完成某一分离要求，所需的理论塔板数为无穷多时的回流比称为**最小回流比**。

特点：两条操作线、 q 线与平衡线相交，出现恒浓区



最小回流比操作情况的分析

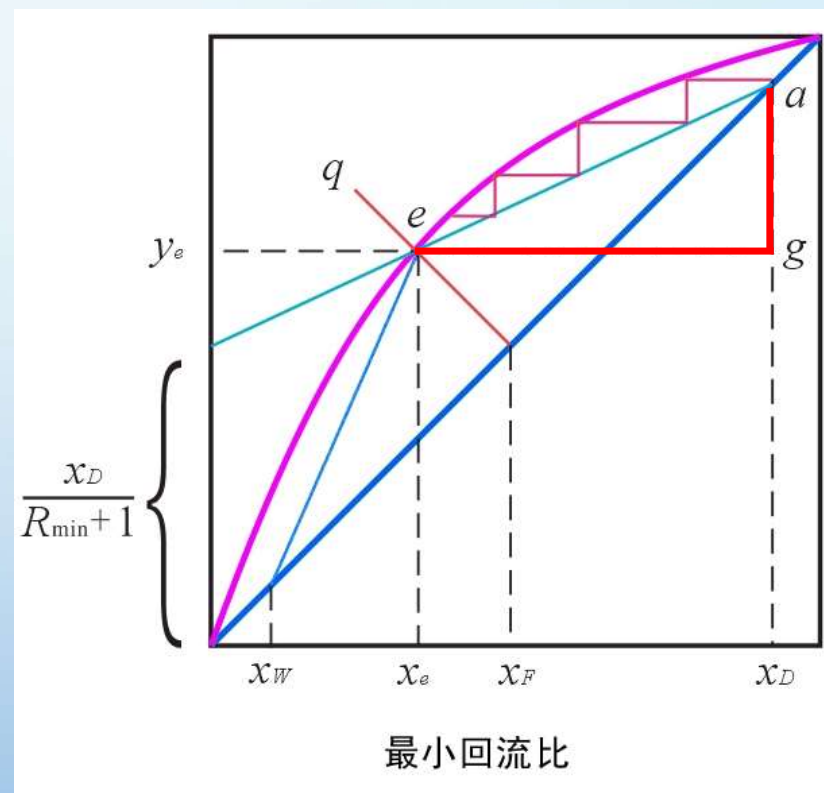
9.5 双组分精馏的设计型计算

最小回流比 R_{\min} 求解

$$\frac{R_{\min}}{R_{\min} + 1} = \frac{x_D - y_e}{x_D - x_e}$$

$$R_{\min} = \frac{x_D - y_e}{y_e - x_e}$$

$$y_e = \frac{\alpha x_e}{1 + (\alpha - 1)x_e}$$



R_{\min} 与相平衡性质 和分离要求有关

讨论

当操作中选用的回流比比设计时的最小回流比还要小时，塔能否操作？将出现什么现象？

$$R_{\min} = \frac{x_D - y_e}{y_e - x_e}$$

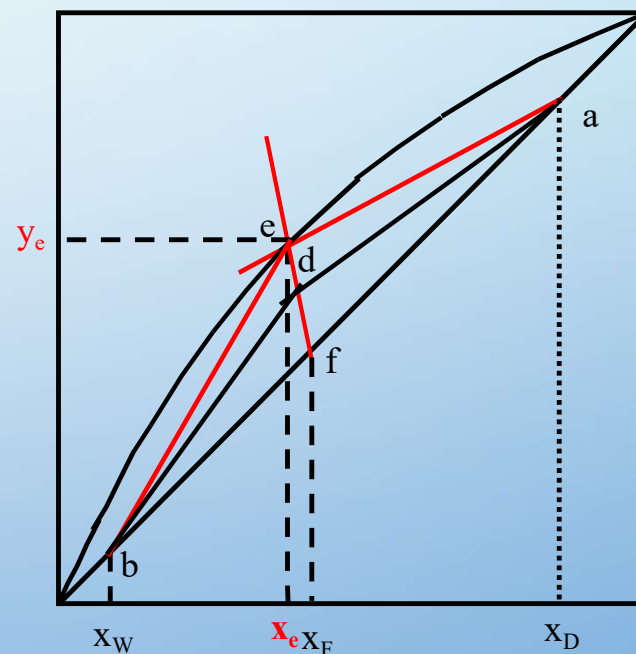
R_m 是设计型问题，与相平衡和分离要求 x_D, x_w 有关。

$R < R_m$ ，则达不到分离要求。

$x_D \downarrow, x_w \uparrow$

x_e, y_e 与 x_q, y_q 的区别？

x_e, y_e 是四线相交， x_q, y_q 三线相交



最小回流比操作情况的分析

R_{\min} 求取

1、用精馏塔分离某水溶液，水为难挥发组分，进料 $F=1\text{kmol/s}$, $x_f=0.2$ (mol%,下同)，以饱和液体状态加入塔中部，塔顶采出量 $D=0.3\text{kmol/s}$, $x_D=0.6$, 系统 $\alpha=3$ 。

试求：最小回流比

解： $\because q=1 \therefore x_e = x_f = 0.2$

$$y_e = \frac{\alpha x_e}{1 + (\alpha - 1)x_e} = \frac{3 \times 0.2}{1 + 2 \times 0.2} = \frac{0.6}{1.4} = 0.429$$

$$\frac{R_{\min}}{R_{\min} + 1} = \frac{y_D - y_e}{x_D - x_e}$$

$$\therefore R_{\min} = \frac{y_D - y_e}{y_e - x_e} = \frac{0.6 - 0.429}{0.429 - 0.2} = 0.747$$

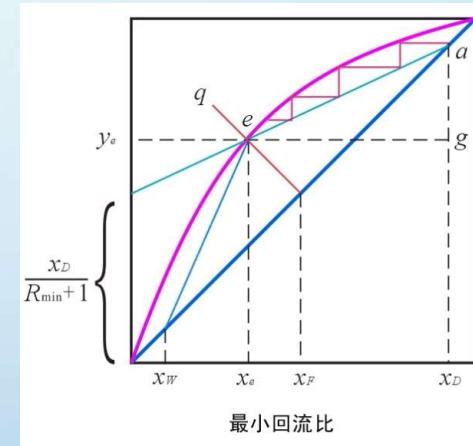
饱和蒸汽
进料如何？

已知 x_f 不同的 q 状态 R_m 的求解

$$\frac{R_m}{R_m + 1} = \frac{x_D - y_e}{x_D - x_e} \quad y_e = \frac{\alpha x_e}{1 + (\alpha - 1)x_e}$$

$$q = 0 \quad y_e = x_f \quad x_e = \frac{y_e}{\alpha - (\alpha - 1)y_e}$$

$$q = 1 \quad x_e = x_f \quad y_e = \frac{\alpha x_e}{1 + (\alpha - 1)x_e}$$



$$0 < q < 1 \quad \text{汽: 液} = 1:4 \quad q = \frac{4}{1+4} = 0.8$$

$$y_e = \frac{q}{q-1} x_e - \frac{x_f}{q-1} \quad \left\{ \begin{array}{l} y = \frac{q}{q-1} x - \frac{x_f}{q-1} \\ y = \frac{\alpha x}{1 + (\alpha - 1)x} \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} x = x_e \\ y = y_e \end{array} \right.$$

2、某精馏塔用于分离苯-甲苯混合液,进料量 $F=30\text{kmol/h}$, 其中苯的摩尔分率 $x_F=0.5$ 。进料为汽液混合物, 汽液比为 **2: 3**, 要求塔顶、塔底产品中苯的摩尔分率分别为 $x_D=0.95$, $x_W=0.10$, 相对挥发度 $\alpha=2.45$ 。

试求: 最小回流比 R_{\min} ;

解: $q = \frac{3}{5} = 0.6$

q线方程: $y = \frac{q}{q-1}x - \frac{x_f}{q-1} = -1.5x + 1.25$

相平衡方程: $y = \frac{\alpha x}{1 + (\alpha - 1)x} = \frac{2.45x}{1 + 1.45x}$

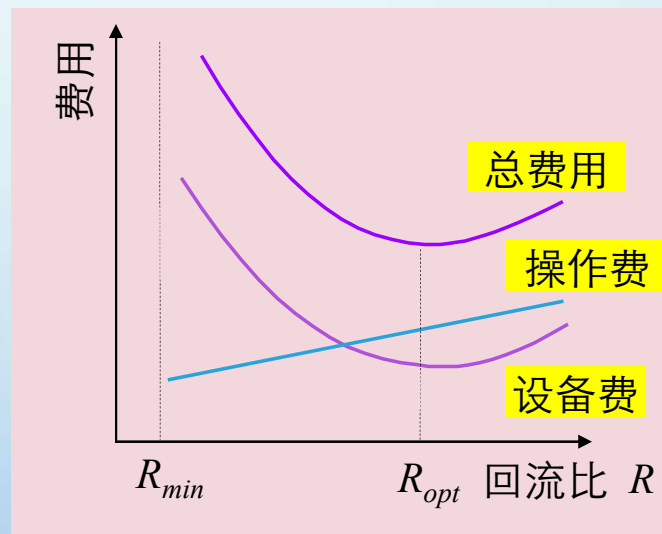
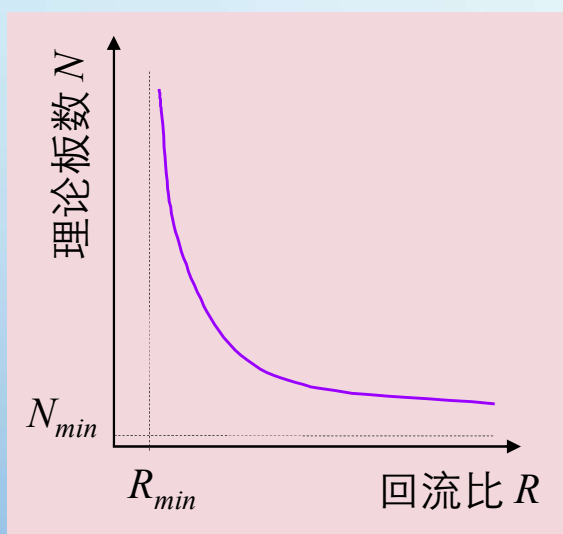
$$x_e = 0.412 \quad y_e = 0.6319$$

$$\frac{R_{\min}}{R_{\min} + 1} = \frac{x_D - y_e}{x_D - x_e} = \frac{0.95 - 0.6319}{0.95 - 0.412} = 0.5913$$

$$R_{\min} = 1.45$$

9.5 双组分精馏的设计型计算

最适宜回流比的选取



一般选取:

$$R_{opt} = (1.2 - 2)R_{min}$$

- $\left\{ \begin{array}{l} R = R_{min}, \quad N_T = \infty, \text{ 设备费过大, 操作费小, 总费用很大。} \\ R = \infty, \quad N_T = N_{min}, \text{ 设备费偏大, 操作费大, 总费用偏大。} \\ R = R_{opt}, \quad N_T \text{ 合适, 设备费、操作费合适, 总费用最小。} \end{array} \right.$

第八组

如何理解工程观点：冷量尽可能塔顶加入，热量尽可能塔釜加入。

9.5 双组分精馏的设计型计算

4、加料热状态选择

(1) R 一定 (冷却量固定)

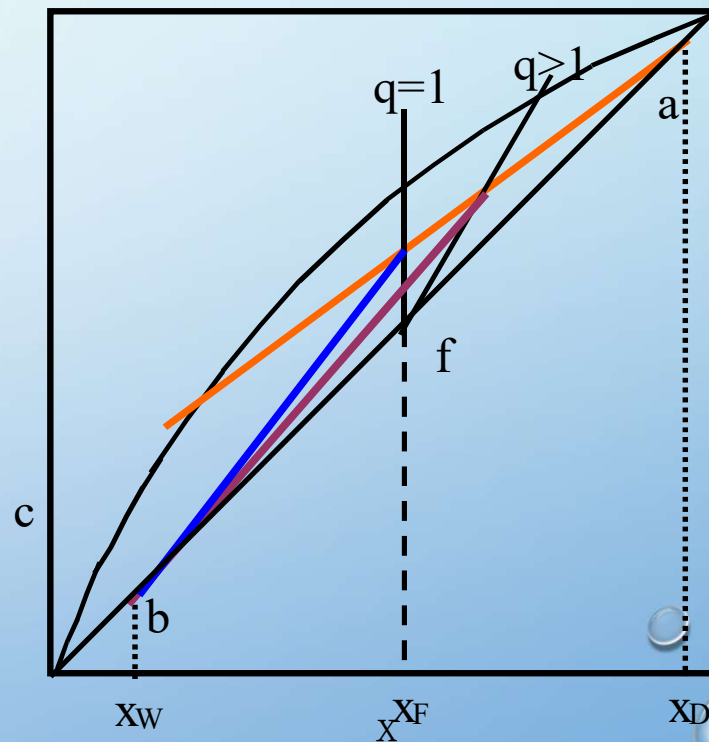
q 值不影响精馏操作线位置，
改变了提馏段操作线的位置。

$q \downarrow$ (预热原料) , $\bar{v} \downarrow, \frac{\bar{L}}{\bar{V}} \uparrow$

提馏操作线靠近平衡线，推动力↓

→ $N_T \uparrow$

热量尽可能施于塔底!!



9.5 双组分精馏的设计型计算

(2) \bar{V} 一定 (塔釜加热量固定)

$q \uparrow$ (预冷原料)

\bar{V} 一定(加热量一定)

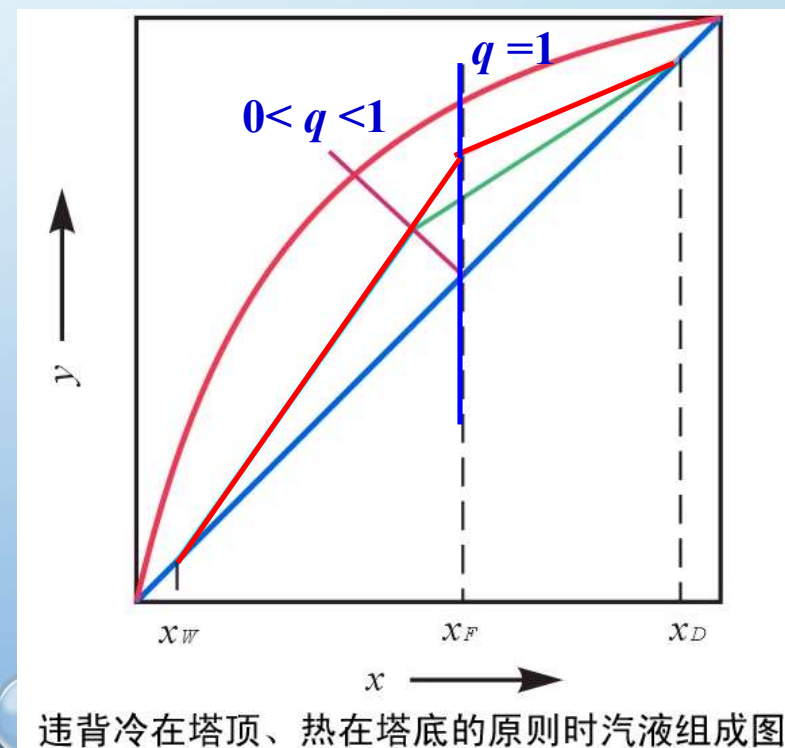
$q \uparrow$ (预冷原料), q 从汽液两相到饱和液体

→ $R \downarrow$ ($\frac{L}{V}$) \downarrow 传质推动力 \downarrow

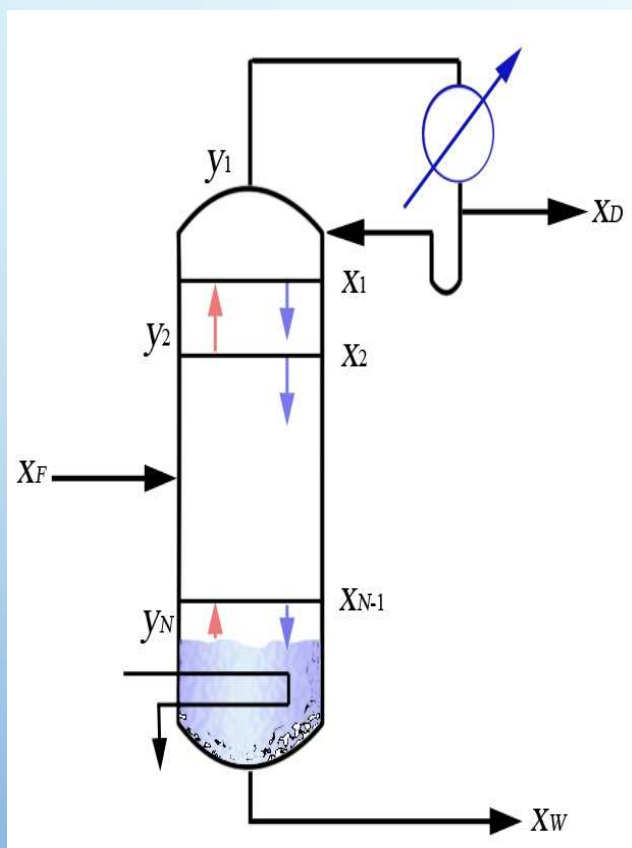
→ $N_T \uparrow$

冷量尽可能施于塔顶!!

$$\frac{L}{V} = \frac{R}{R+1} = \frac{1}{1+1/R} \downarrow$$



违背冷在塔顶、热在塔底的原则时汽液组成图



重要工程观点

精馏塔塔内热量守恒

塔釜提供热量，塔顶提供冷量

塔釜热量恒定时，
冷量尽可能塔顶加入

塔顶冷量恒定时，
热量尽可能塔釜加入

思考

精馏塔设计时，若 F 、 x_F 、 x_D 、 x_w 、 V 均为定值，将进料热状态从 $q=1$ 变为 $q>1$ ，则设计所需理论板数。

(A) 变大

(B) 变小

(C) 不变

(D) 不确定

加料热状态的选择问题

精馏塔设计时，若 F 、 x_F 、 x_D 、 x_W 、 V 均为定值，将进料热状态从 $q=1$ 变为 $q>1$ ，则设计所需理论板数。

(A) 变大

(B) 变小

选 B

(C) 不变

(D) 不确定

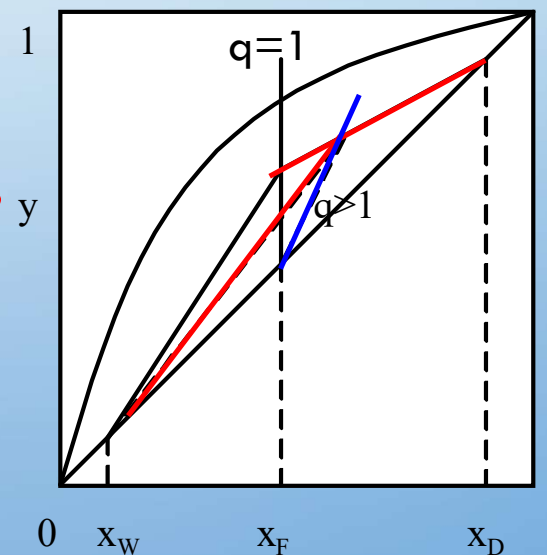
分析： F 、 x_F 、 x_D 、 x_W 不变 $\rightarrow D$ 、 W 一定
$$\begin{cases} F = D + W \\ Fx_F = Dx_D + Wx_W \end{cases}$$

$V=(R+1)D$ ， R 一定，精馏段操作线斜率不变。

$q>1$ (蓝线) 提馏段操作线如红线。

操作线远离平衡线。

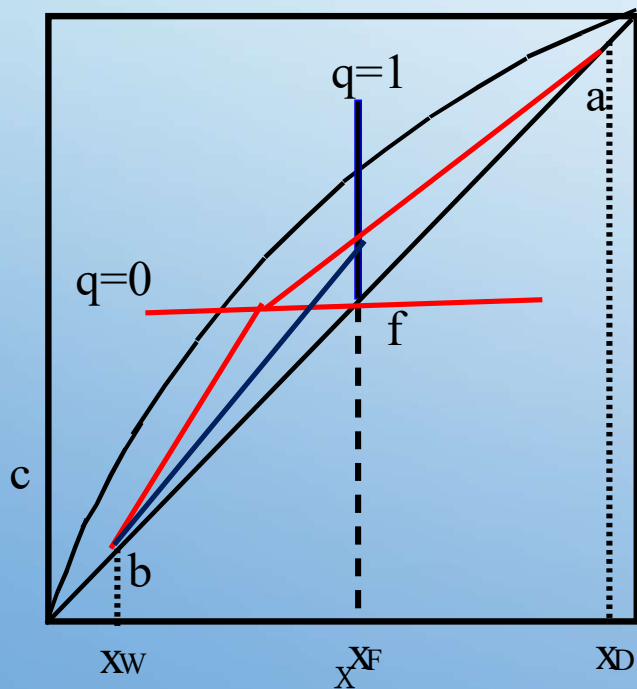
$\Rightarrow N_T \downarrow$



练习4

4、某精馏塔的设计任务为：原料为 F 、 x_f ，塔顶为 x_D ，塔底为 x_W ，若塔釜上升蒸汽量不变，加料热状态由原来的饱和蒸汽改为饱和液体，则所需理论板 N_T ？

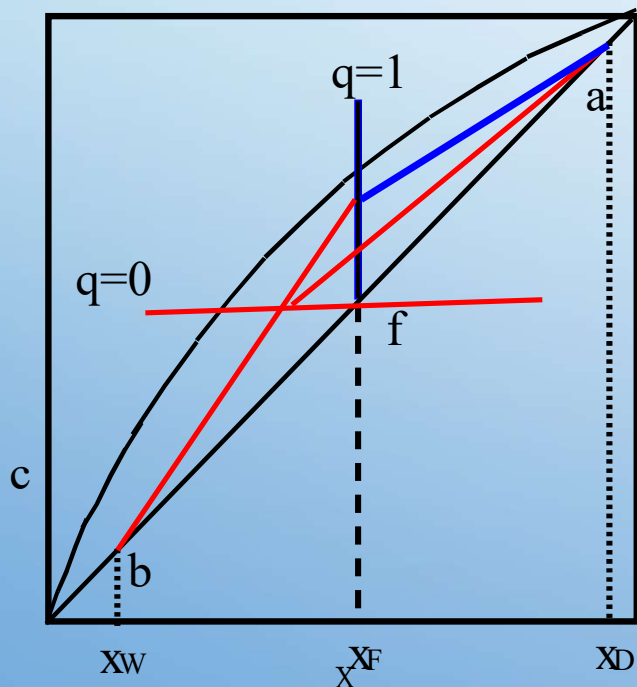
- (1) 增加 (2) 减少 (3) 不变 (4) 不确定



练习4

4、某精馏塔的设计任务为：原料为 F 、 x_f ，塔顶为 x_D ，塔底为 x_W ，若塔釜上升蒸汽量不变，加料热状态由原来的饱和蒸汽改为饱和液体，则所需理论板 N_T ？

- (1) 增加 (2) 减少 (3) 不变 (4) 不确定



答案 (1)

$$V = \bar{V} + (1 - q)F$$

上升蒸汽量不变

$$q \uparrow, V \downarrow$$

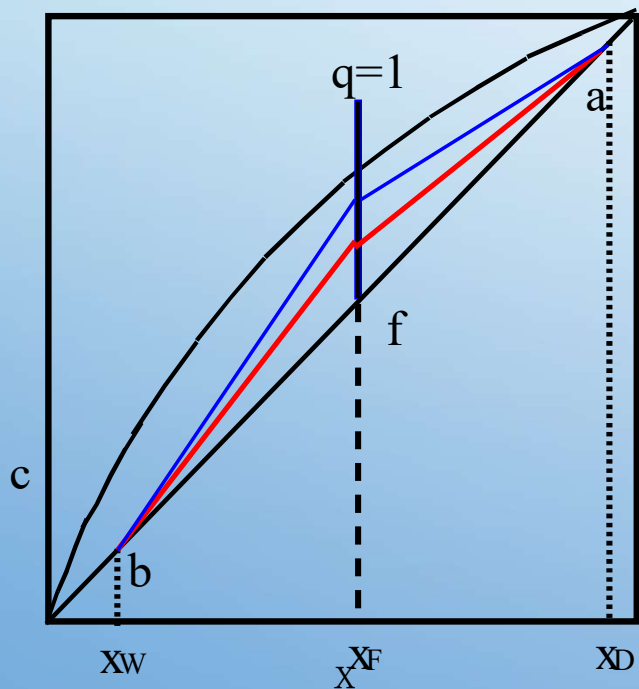
$$\begin{cases} F = D + W \\ Fx_F = Dx_D + Wx_W \end{cases}$$

$$V = (R + 1)D$$

$$V \downarrow, D \text{ 不变}, R \downarrow$$

练习5

5、某精馏的设计任务：原料为 F ， x_f ，要求分离为 x_d 和 x_w ，设计时加料热状态 q 已选定，若**回流比 R 增大**，则板数 N ____，精馏段的 L ____， V ____， L/V ____。（增加，减少，不变，不确定）



**回流比 R 增大，
操作线远离平衡线**

$$L=RD \uparrow$$

$$V=(R+1)D \uparrow$$

$$\left(\frac{L}{V}\right) \uparrow$$

答案 减少，增加，增加，增加。

设计型 例题

例 一连续常压精馏塔用于分离双组分混合物。原料液 $x_F=0.40$ (摩尔分率, 下同), 进料状况为汽液混合物, 其摩尔比为汽/液=3/2, 塔顶 $x_D=0.97$, 塔釜 $x_W=0.02$, 若该物系的相对挥发度 $\alpha=2$, 操作时采用的回流比 $R=1.6R_{\min}$, 试计算:

- (1) 易挥发组分的回收率和难挥发组分回收率;
- (2) 最小回流比 R_{\min} ;
- (3) 提馏段操作线的数值方程;

解: (1) $\frac{D}{F} = \frac{x_f - x_w}{x_D - x_w} = \frac{0.40 - 0.02}{0.97 - 0.02} = 0.4$

$$\eta = \frac{Dx_D}{Fx_f} = 0.4 \times \frac{0.97}{0.40} = 0.97$$

$$\eta_B = \frac{W(1 - x_w)}{F(1 - x_f)} = \left(1 - \frac{D}{F}\right) \left(\frac{1 - 0.02}{1 - 0.4}\right) = 0.6 \times 1.633 = 0.98$$

(2) $q = \frac{2}{3 + 2} = 0.4$

q 线方程 $y = \frac{q}{q-1}x - \frac{x_f}{q-1} = -\frac{2}{3}x + \frac{2}{3}$

平衡线方程 $y = \frac{2x}{1+x}$

两线相交 $\frac{2}{3}(1-x) = \frac{2x}{1+x}$

$$\therefore x^2 + 3x - 1 = 0$$

$$\text{得 } x_e = 0.303, \quad y_e = 0.465$$

$$R_{\min} = \frac{x_D - y_e}{y_e - x_e} = \frac{0.97 - 0.465}{0.465 - 0.303} = 3.12$$

$$(3) \quad R = 1.6R_{\min} = 1.6 \times 3.12 = 5.0$$

$$\text{提馏段 } \bar{L} = RD + qF = 5 \times 0.4F + 0.4F = 2.4F$$

$$\bar{V} = \bar{L} + D - F = (2.4 + 0.4 - 1)F = 1.8F$$

$$y = \frac{\bar{L}}{\bar{V}}x - \frac{Wx_w}{\bar{V}} = \frac{2.4}{1.8}x - \frac{0.6 \times 0.02}{1.8} = 1.33x - 0.0067$$

作业：第九章 **10、12、14, 16**

第九组

介绍一下精馏塔的板效率

第十组

直接蒸气加热和间接蒸气加热的区别？

第一组

混合加料有利还是不利？当多股进料时，如何确定最小回流比？

第二组

回收塔有什么特点？最高馏出液浓度如何求？