



化工原理下

精 馏



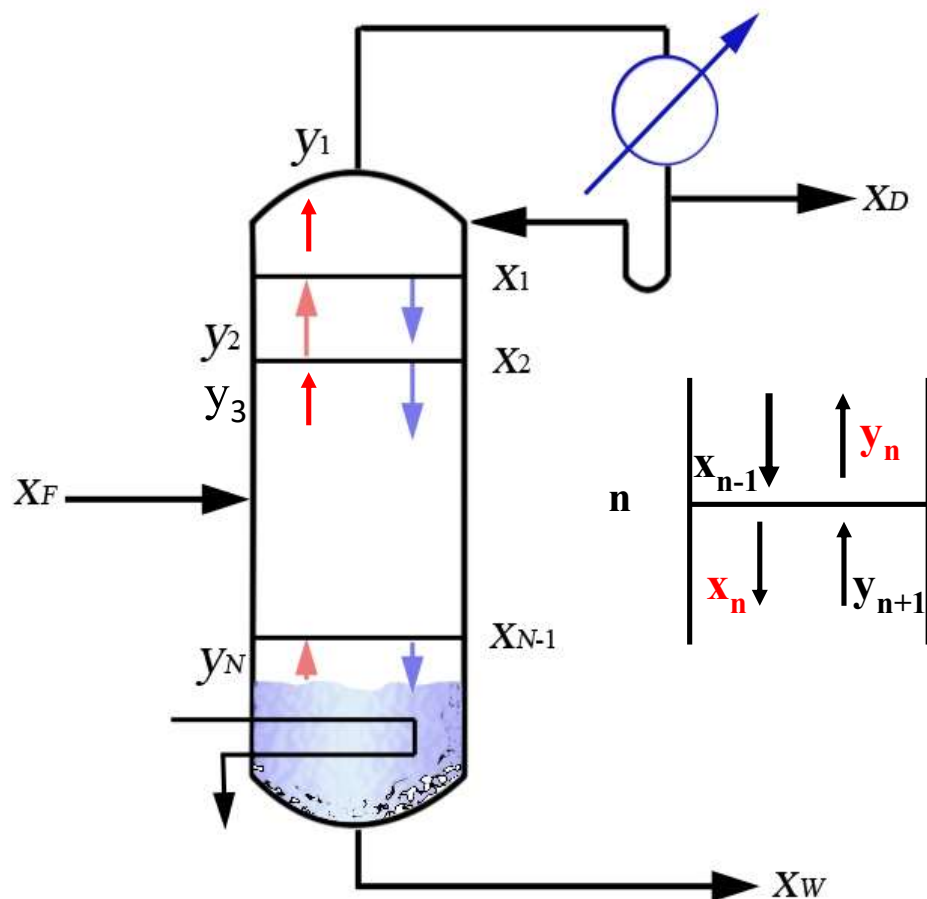
问题

离开第一块板组成 () , 进入第二块板组成 ()

A y_1 , **B** y_2 , **C** y_3 , **D** x_1 , **E** x_2 , **F** x_3

知识点

每块理论板上的组成和关系



离开第一块板组成
 (y_1, x_1)

离开第N块板组成
 (y_n, x_n)

进入第二块板组成
 (y_3, x_1)

根据相平衡方程

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

根据精馏操作线方程

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

9.4 精馏

答案

离开第一块板组成 () , 进入第二块板组成 ()

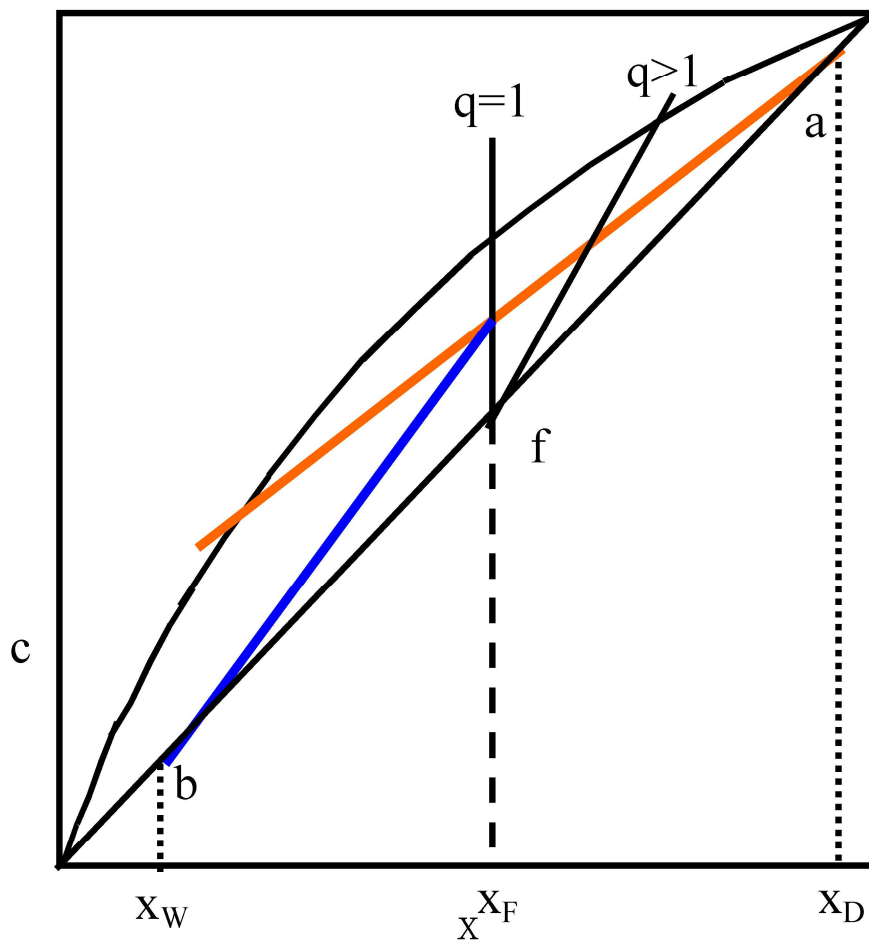
A y_1 , B y_2 , C y_3 , D x_1 , E x_2 , F x_3

AD,CD

(y_1, x_1) , (y_3, x_1)

9.4 精馏

问题



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

----- q 线方程

$q=1$ 到 $q>1$,图中
哪些线改变?

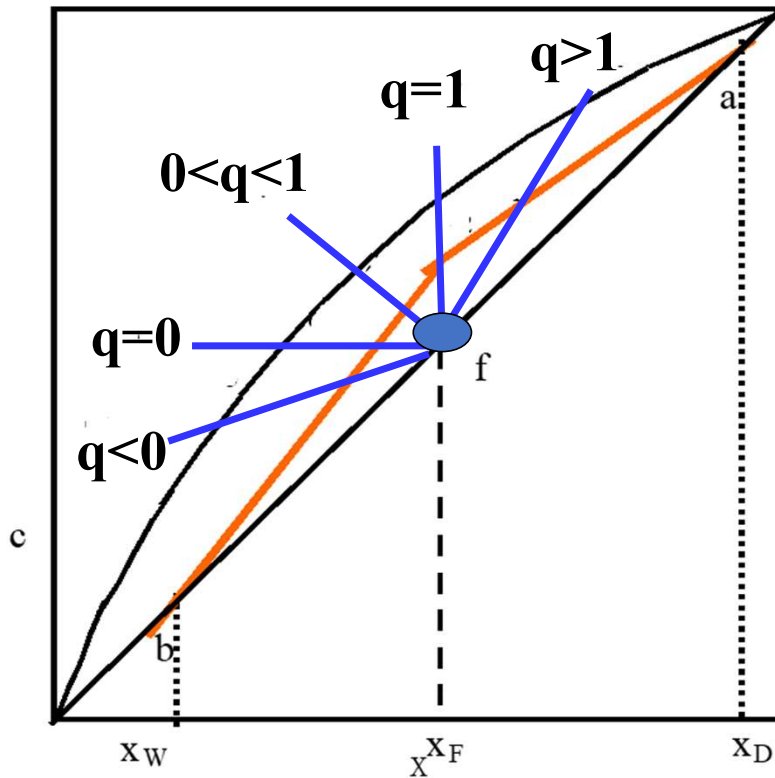
哪些线没有改变?

知识点

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

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

q 线为过点 $f(x_F, x_F)$ 的直线



q 代表进料状态

$$q = 1 \Rightarrow$$

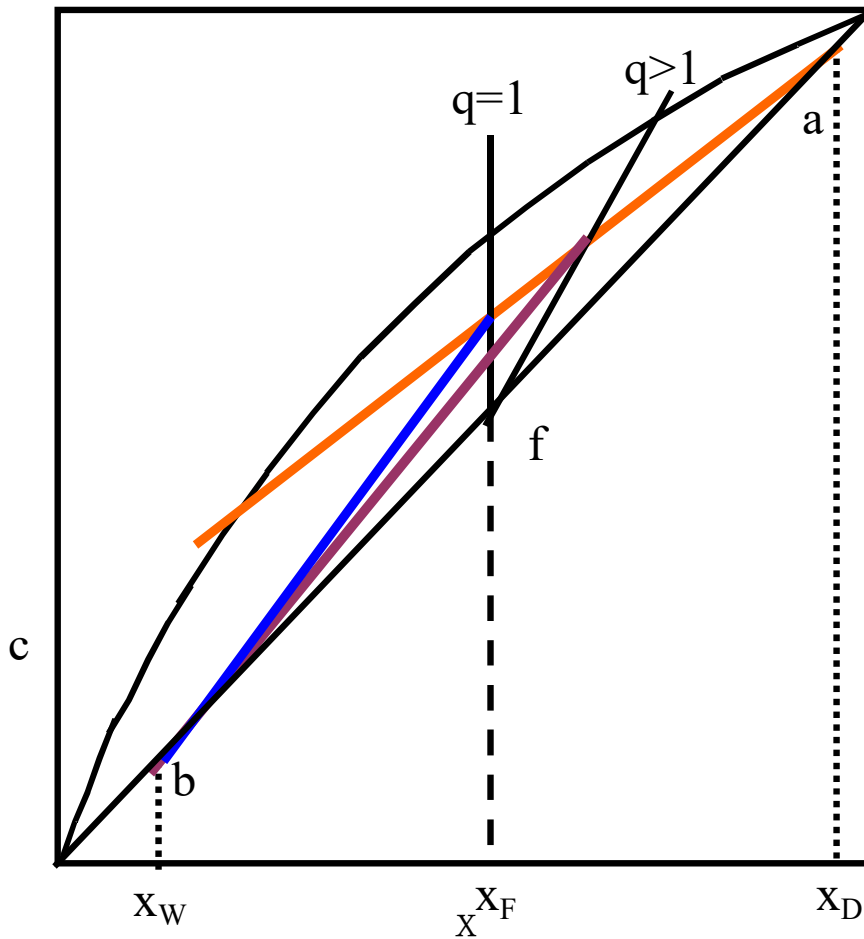
$$x_q = x_f, y_q = 0$$

$$q = 0 \Rightarrow$$

$$y_q = x_f, x_q = 0$$

解答

q 线为两操作线交点的轨迹方程。



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

----- 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

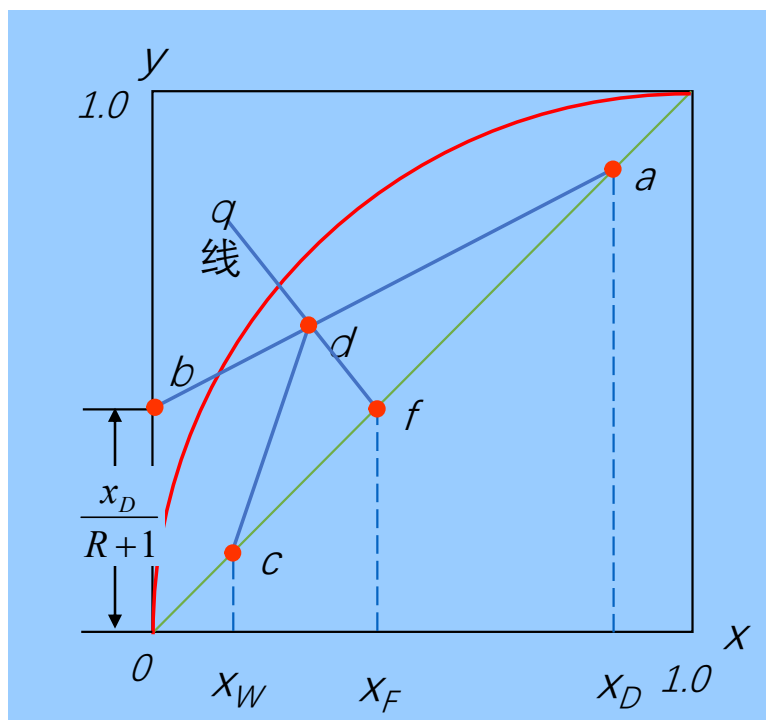
不改变精馏段操作线

不改变平衡线

问题

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

知识点

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

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

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

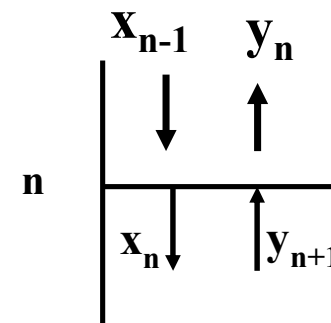
提馏段操作方程

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

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

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

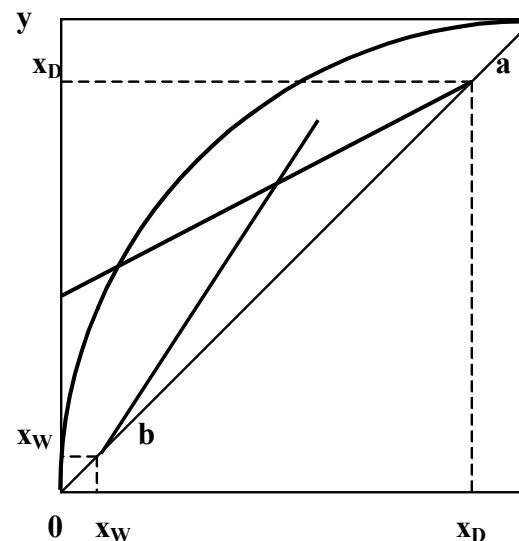
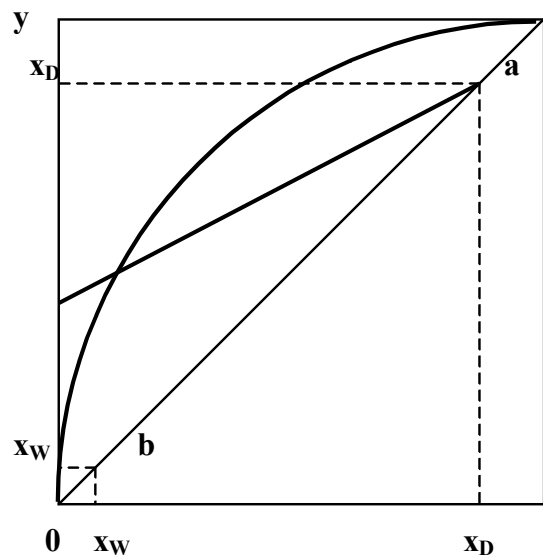
$$= \frac{RD + qF}{(R+1)D - (1-q)F} x_n - \frac{Wx_W}{(R+1)D - (1-q)F}$$



问题

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



知识点

操作线图示

精馏段操作线

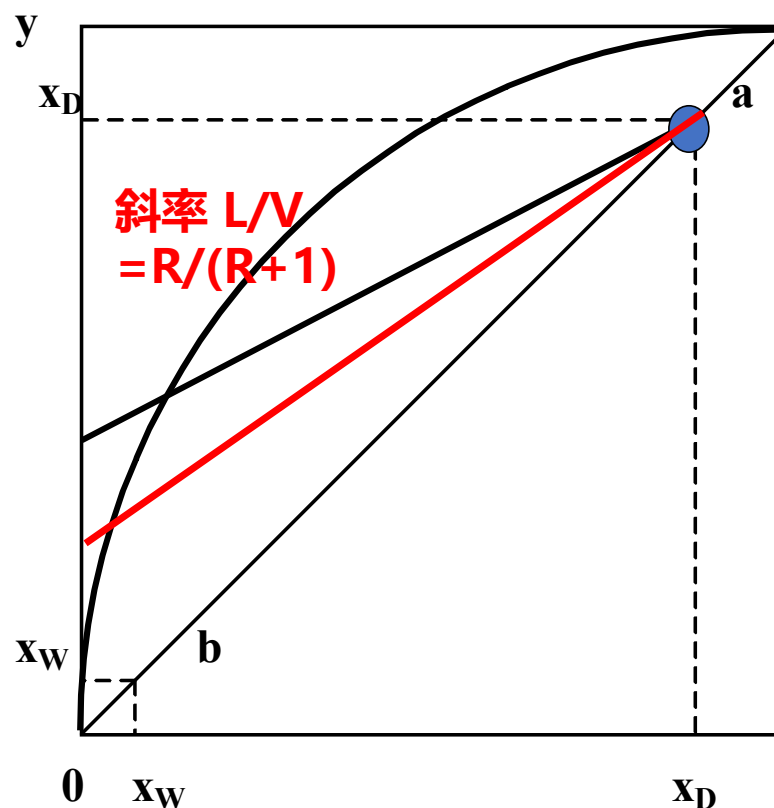
$$y_{n+1} = \frac{R}{R+1} x_n + \frac{x_D}{R+1}$$

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

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。

知识点

操作线图示

提馏段操作线

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

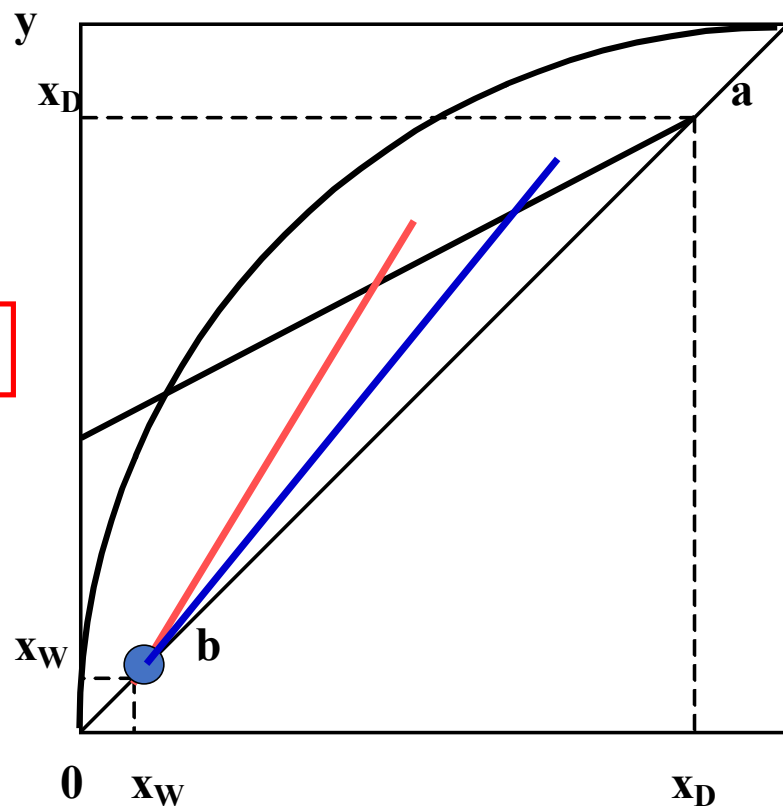
$$y_{n+1} = \frac{\bar{L}}{\bar{V}} x_n - \frac{Wx_W}{\bar{V}}$$

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

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

b点: (x_w, x_w)

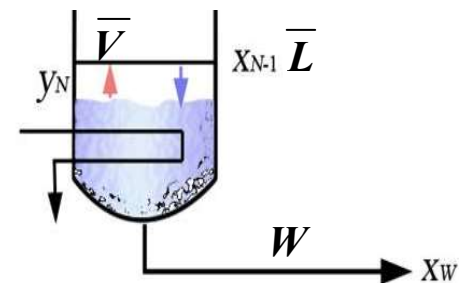
斜率: $\bar{L}/\bar{V} = (\bar{V} + W)/\bar{V} \geq 1$



问题

减小斜率，
分离有利**OR**
不利？

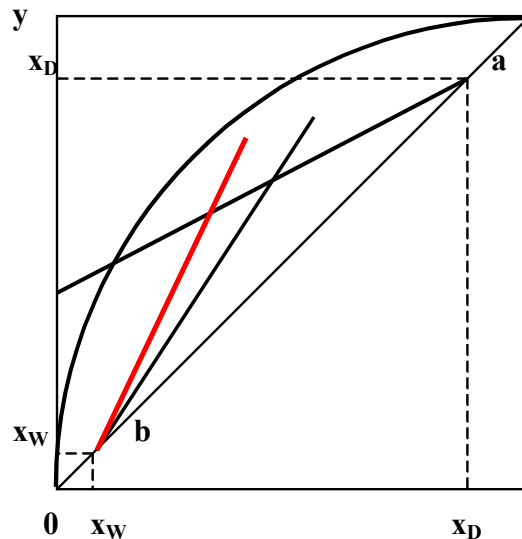
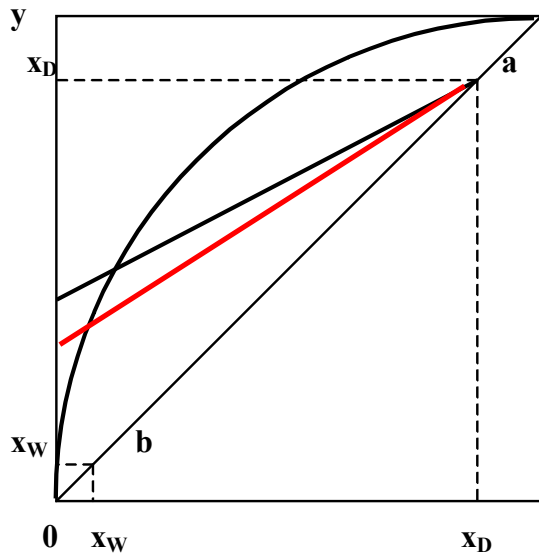
斜率越小，越
远离平衡线，
提馏段内塔板
的分离能力高。



解答

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（ ）

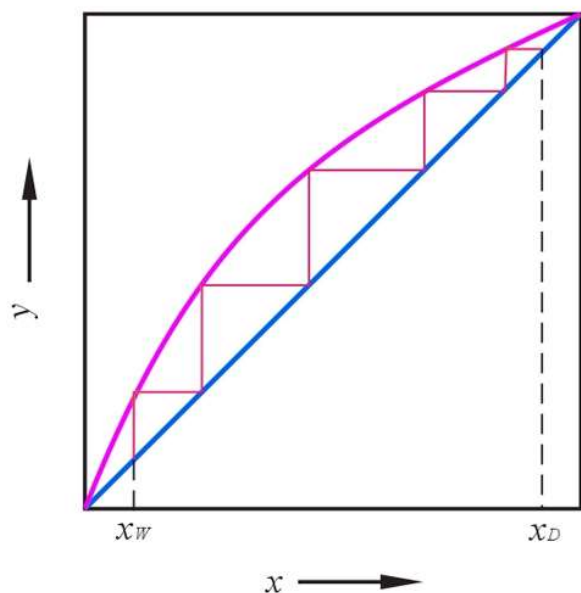
A 有利， B 不利， C 不确定



答案： A, B

问题

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)。



知识点

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,

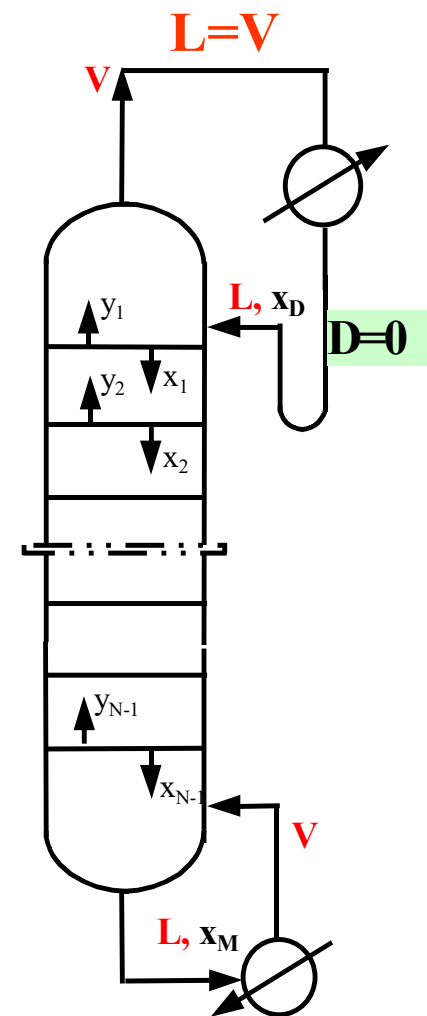
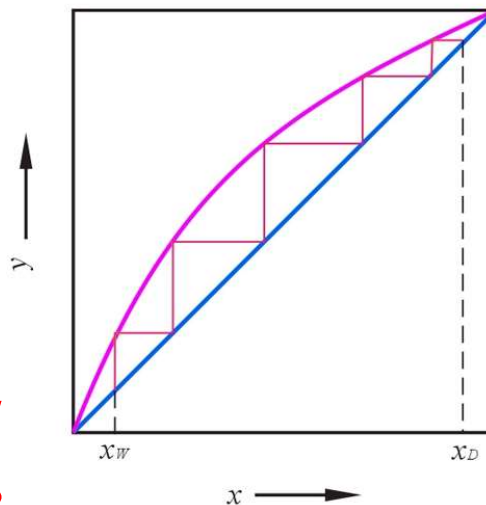
精、提操作线均为: $y_{n+1} = x_n$;

② 理论板数最少 N_{\min}

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

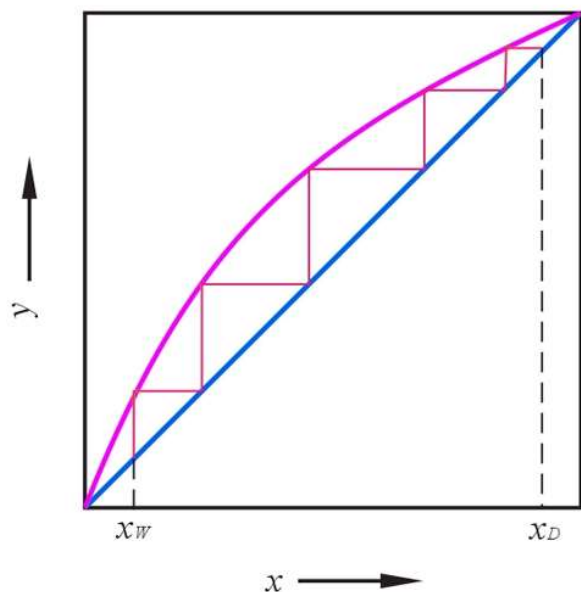
$$y_{m+1} = \frac{\bar{L}}{V} x_m - \frac{Wx_W}{V} = x_m$$

**全回流是操作回流比的极限，
只在设备开工、调试时采用。**



答案

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

复习

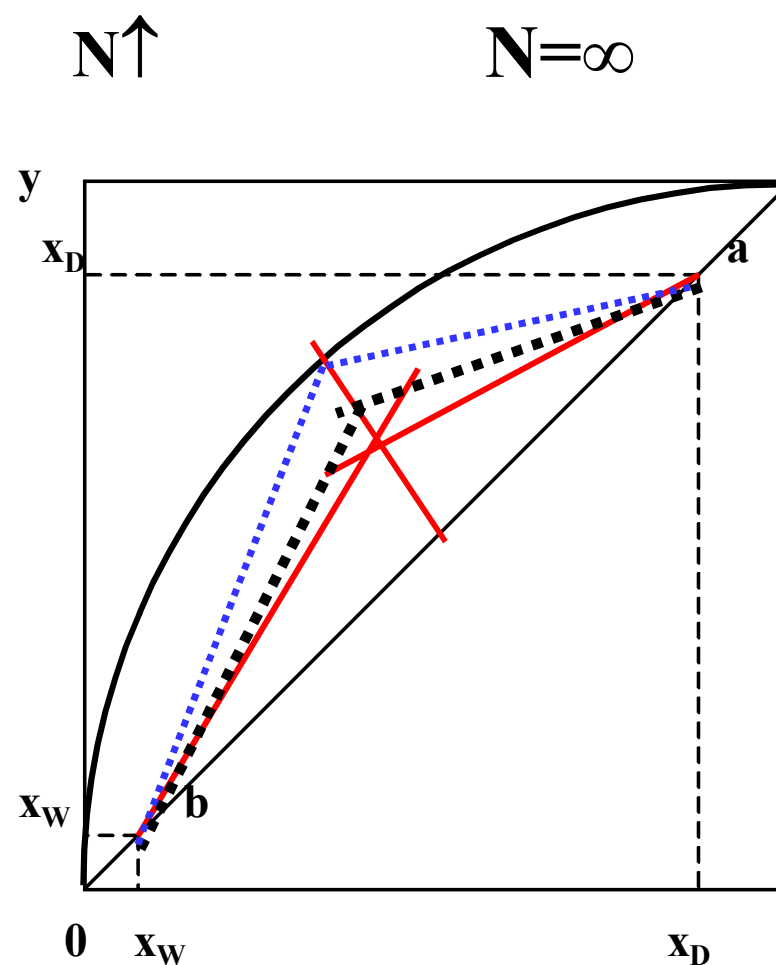
R减小，塔板数如何变？

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

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

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

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



问题

- ✓ 当操作中选用的回流比 R 比设计时的最小回流比 R_{\min} 还要小时，塔能否操作？将出现什么现象？

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

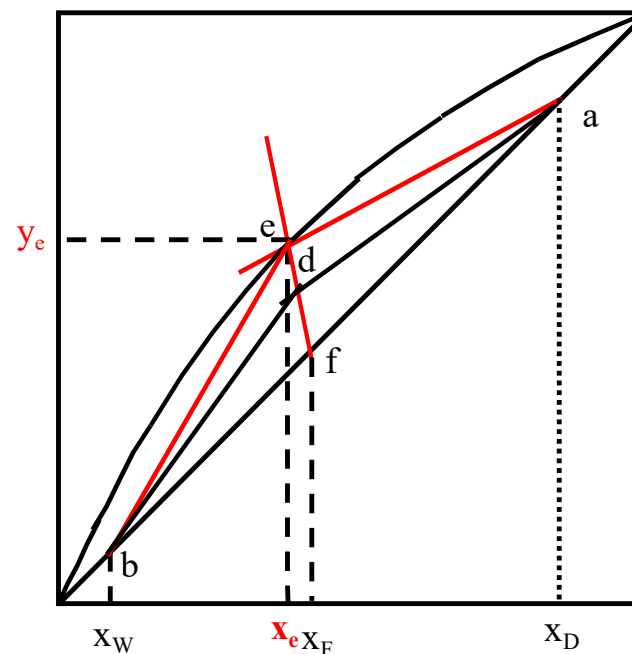
R_m 是设计型问题，与相平衡和分离要求 x_D, x_w 有关。

$R < R_m$ ，则达不到分离要求。

$x_D \downarrow, x_w \uparrow$ **转为操作型问题**

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

知识点

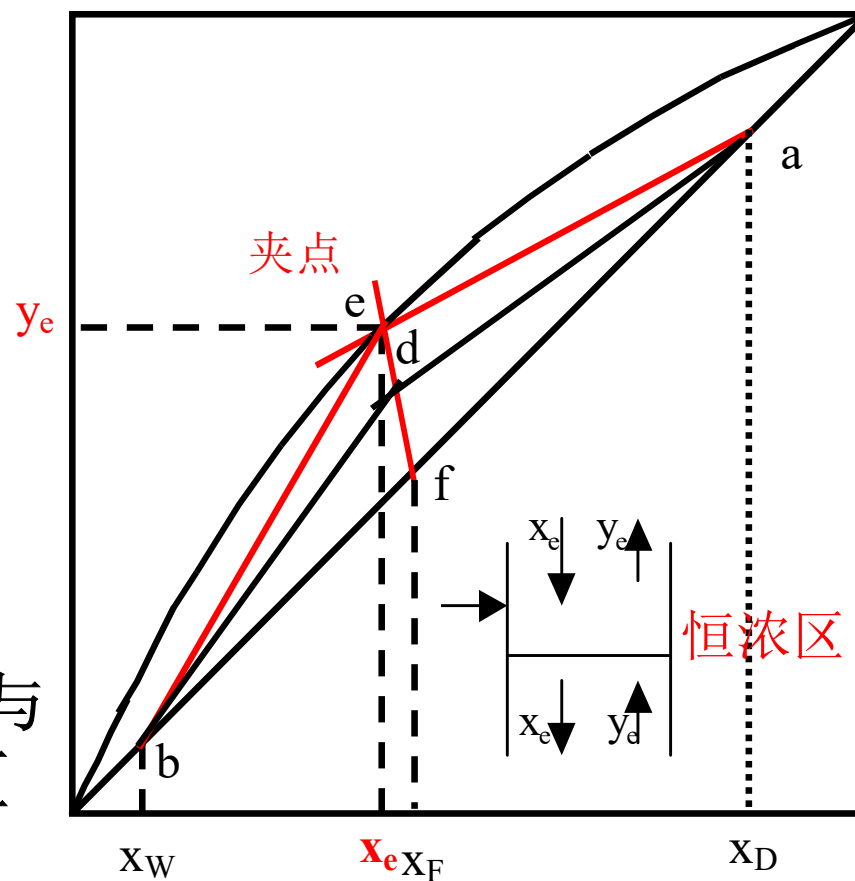
最小回流比 R_{min}

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

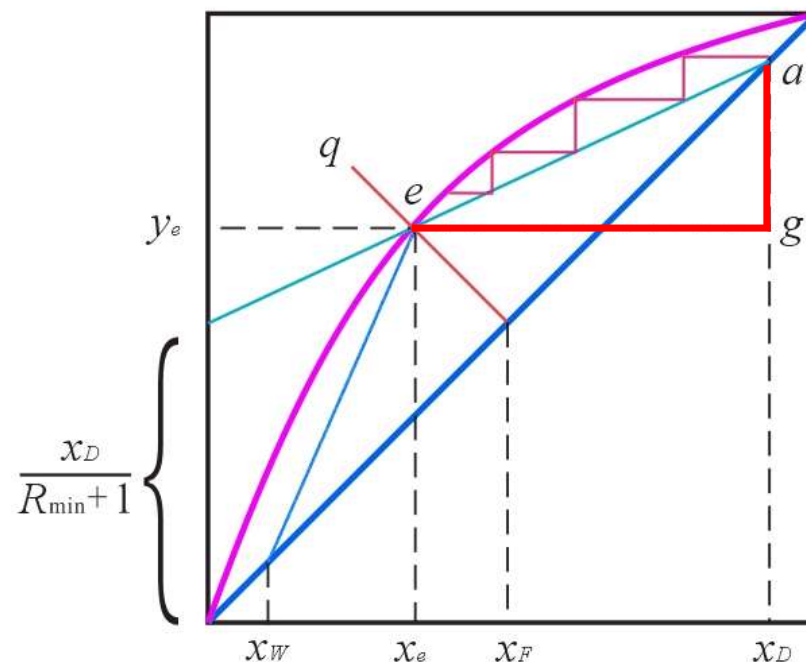
知识点

最小回流比 R_{\min} 求解

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

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

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

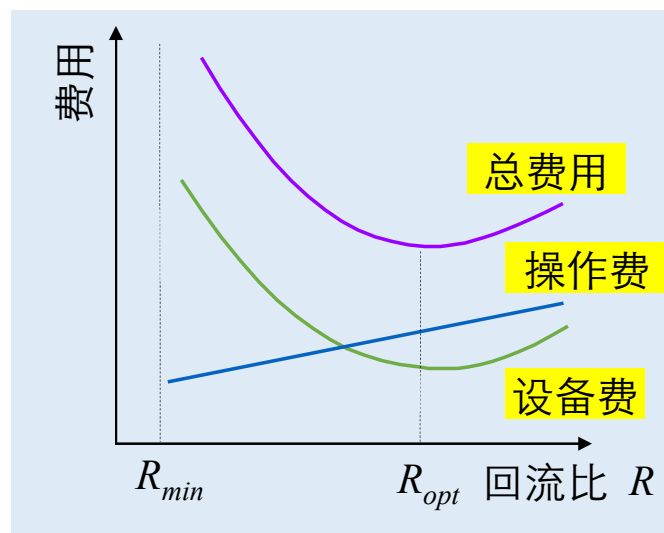
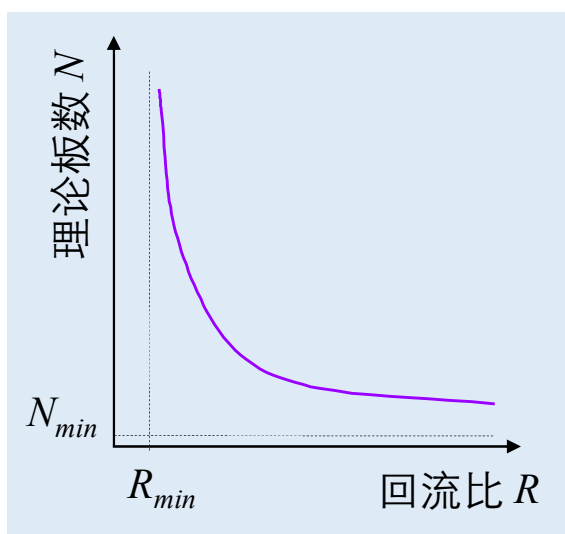


最小回流比

R_{\min} 与相平衡性质
和分离要求有关

复习

最适宜回流比的选取



一般选取:

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

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

问题

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

(C) 不变

(D) 不确定

解答

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

选 B

分析： F 、 x_F 、 x_D 、 x_W 不变 $\rightarrow D$ 、 W 一定

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

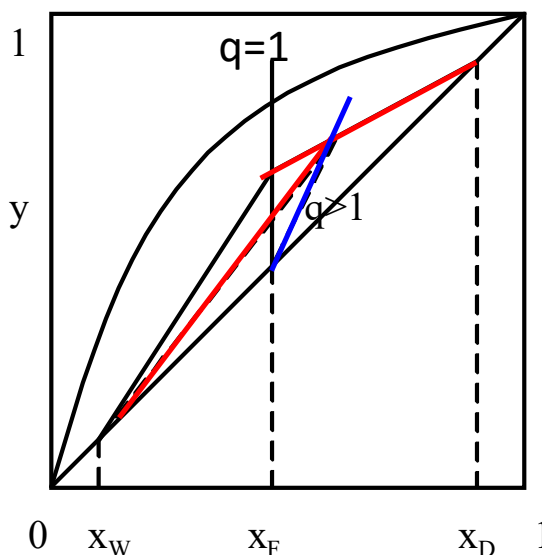
$V=(R+1)D$ ， V 、 D 一定，则 R 不变，

精馏段操作线 $R/(R+1)$ 斜率也不变。

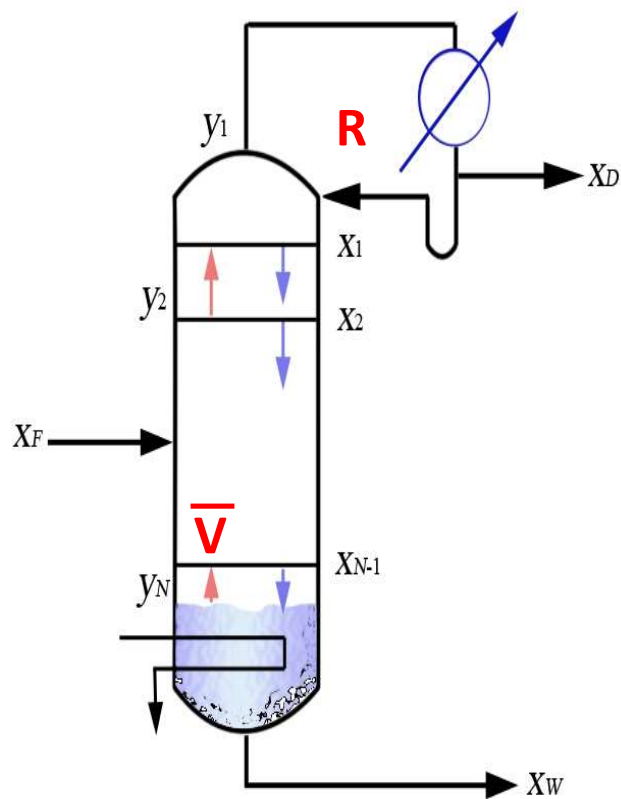
$q>1$ (蓝线) 提馏段操作线如红线。

操作线远离平衡线。

$\rightarrow N_T \downarrow$



分析



精馏塔塔内热量守恒

塔釜提供热量 \bar{V} ,

塔顶提供冷量 R

重要知识点

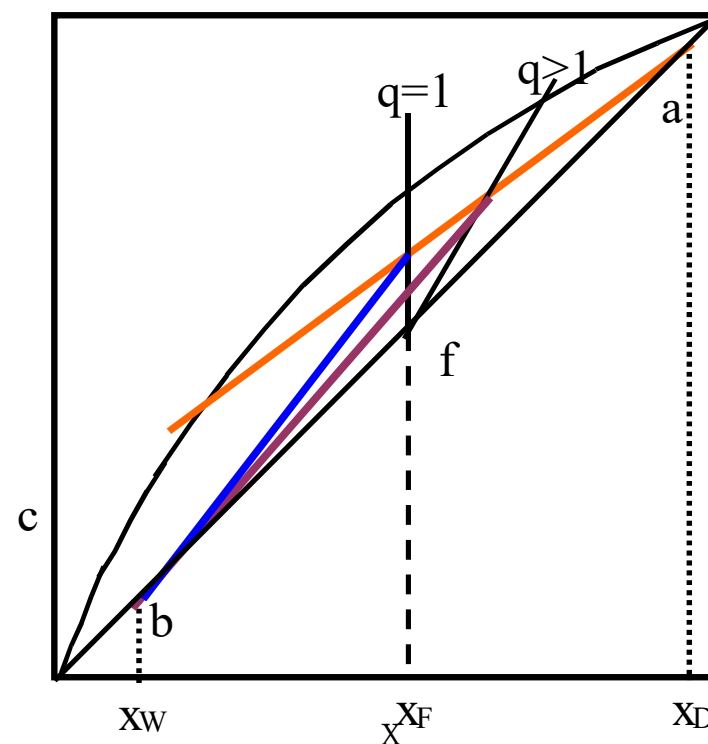
加料热状态选择

(1) R 一定（冷却量固定）， q 减小

q 值不影响精馏操作线位置，
改变了提馏段操作线的位置。

$q \downarrow$ ($q > 1$ 变为 $q = 1$), 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 $\downarrow \rightarrow N_T \uparrow$ (不利)

热量尽可能施于塔底!!



重要知识点

(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)

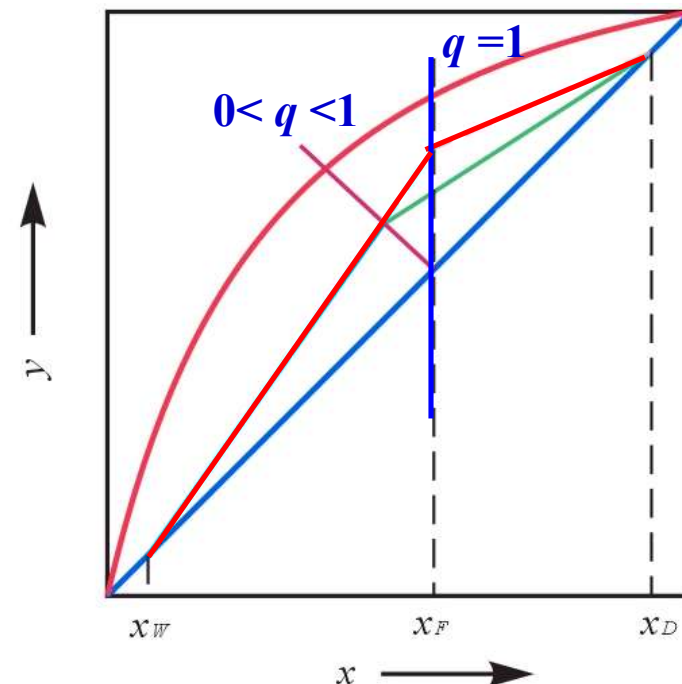
$q \uparrow$ (预冷原料), q 从汽液两相到饱和液体

$R \downarrow \rightarrow \left(\frac{L}{V}\right) \downarrow$ 传质推动力 \downarrow

$\rightarrow N_T \uparrow$ (不利)

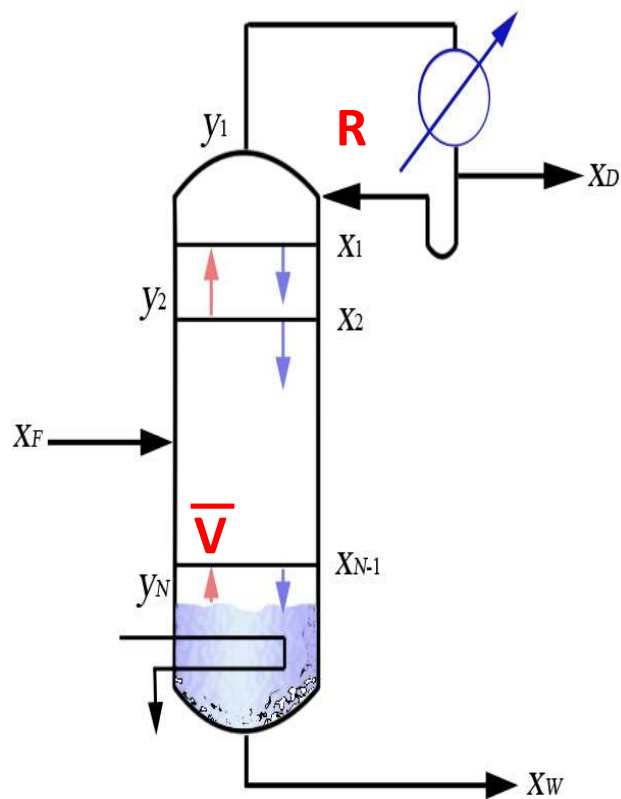
冷量尽可能施于塔顶!!

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



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 \bar{V} ,

塔顶提供冷量 R

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

塔顶冷液回流

思考：

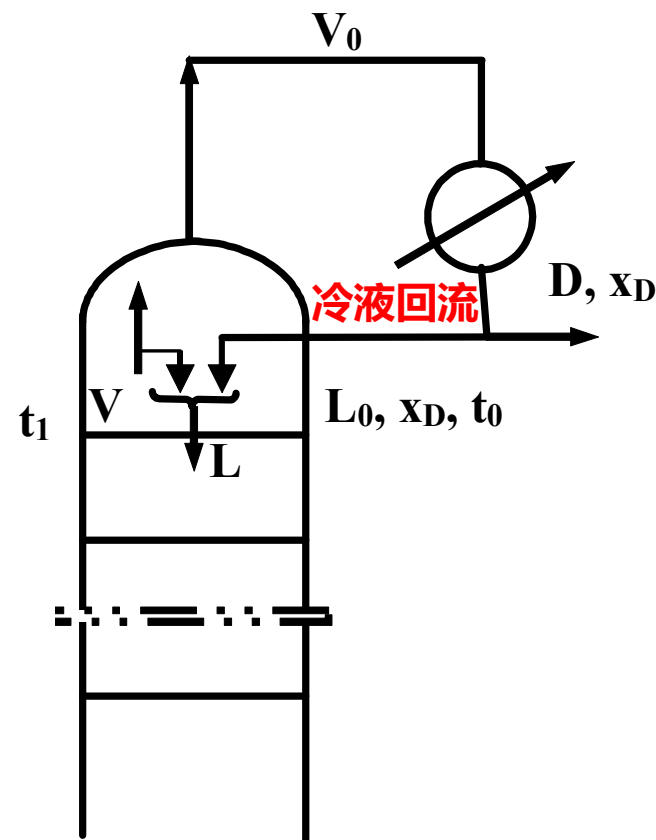
冷液回流与泡点回流相比，实际 R 有变化吗？哪个有利？

冷回流实际 R 增大对精馏过程是有利的，

设计型： N 可以减小

操作型： x_D 可以增大

但冷回流操作塔顶移取的热量多，相应地需要再沸器提供的热量 \bar{V} 也多。



双组分精馏的设计型计算

冷液回流计算 内回流量 $L >$ 外回流量 L_0

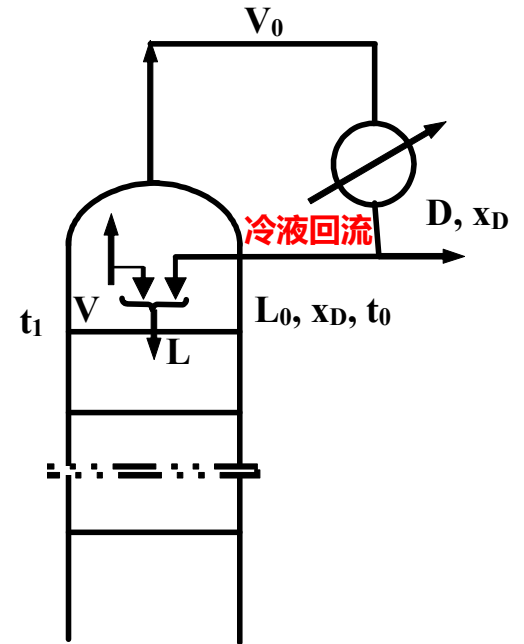
据物料、热量衡算知： $(L - L_0)r = L_0 c_p (t_1 - t_0)$

$$\Rightarrow L = \left[1 + \frac{c_p (t_1 - t_0)}{r} \right] L_0$$

$$\Rightarrow R = \left[1 + \frac{c_p (t_1 - t_0)}{r} \right] R_0$$

内回流比 L/D

外回流比 L_0/D



计算时采用内回流比R，计算过程不变

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

问题

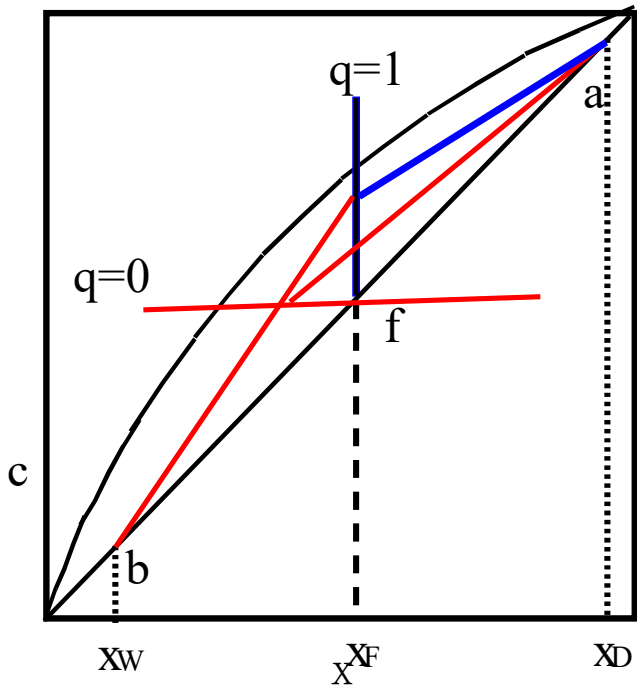
4、某精馏塔的设计任务为：原料为 F 、 x_f ，塔顶为 x_D ，塔底为 x_W ，若塔釜上升蒸汽量不变，加料热状态由原来的饱和蒸汽改为饱和液体，则所需理论板 N_T ？

- (1) 增加 (2) 减少 (3) 不变 (4) 不确定

解答

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



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

上升蒸汽量不变

$q \uparrow, v \downarrow$

$$\begin{cases} \mathbf{F} = \mathbf{D} + \mathbf{W} \\ \mathbf{F}\mathbf{x}_F = \mathbf{D}\mathbf{x}_D + \mathbf{W}\mathbf{x}_W \end{cases}$$

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

V ↓, D 不变, R ↓, N ↑

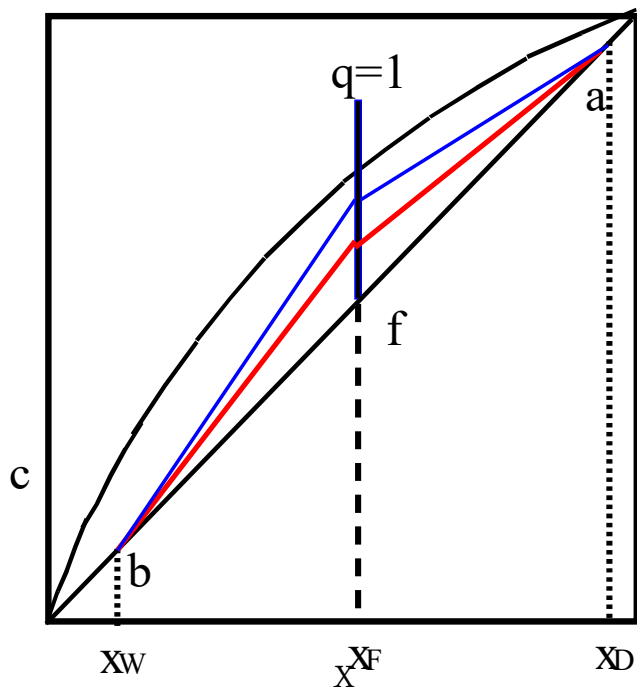
答案 (1)

问题

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)

解答

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, $N \downarrow$

$$L = RD \uparrow \quad V = (R+1)D \uparrow$$

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

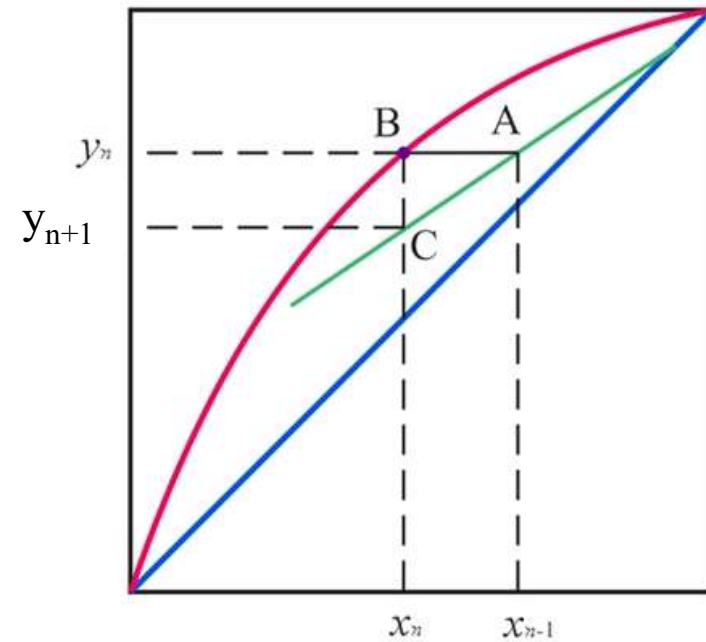
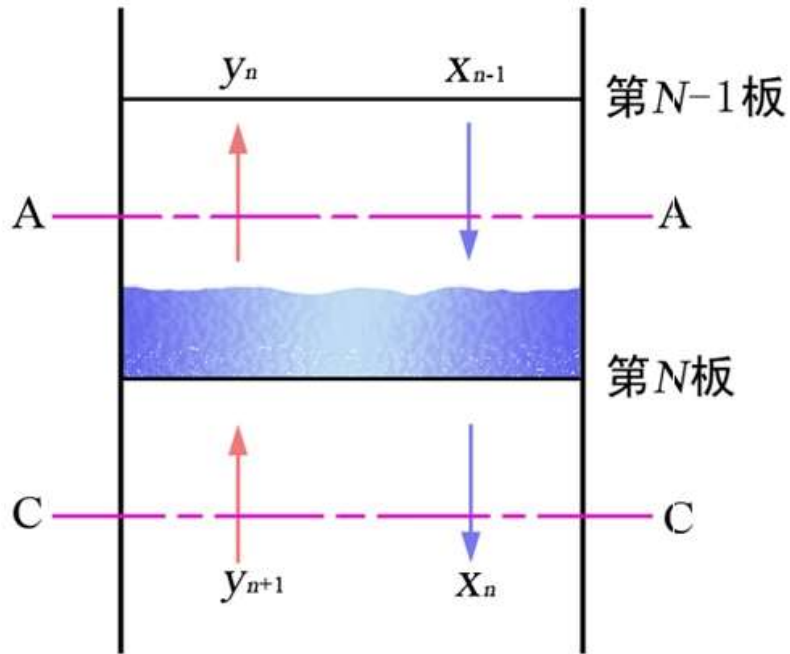
答案 减少，增加，增加，增加。

9.4 精馏

理论板的增浓度

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

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



塔板组成的图示

BC为气相轻组分增浓度，AB为液相重组分增浓度

9.4 精馏

板效率

表达实际塔板与理论板的差异。

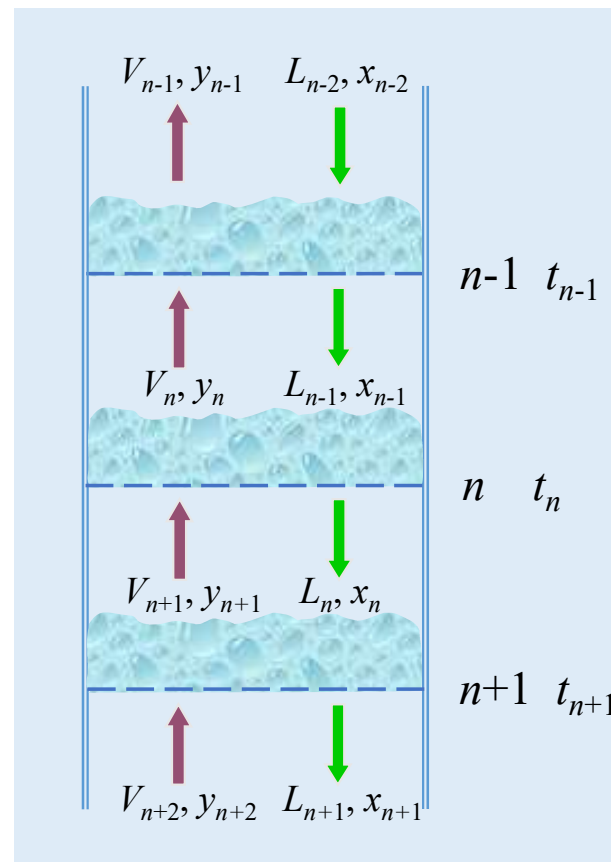
a. 汽相默弗里板效率

$$E_{mV} = \frac{y_n - y_{n+1}}{y_n^* - y_{n+1}} \quad y_n^* = f(x_n)$$

b. 液相默弗里板效率

$$E_{mL} = \frac{x_{n-1} - x_n}{x_{n-1} - x_n^*} \quad x_n^* = \phi(y_n)$$

优点：对**复杂的精馏**问题分步解决，先求理论板数，再确定板效率，最后求实际板数。



实际板： $t_n \neq \phi(x_n), y_n \neq f(x_n)$

9.4 精馏

塔板默弗里效率

例题

一精馏塔，原料液组成为0.5（摩尔分率），饱和蒸气进料。已知塔顶气相组成为0.9，精馏段操作线方程为 $y=0.833x+0.15$ 。塔釜用间接蒸气加热，塔顶全凝器，泡点回流。全塔平均 $\alpha=3.0$ ，塔顶第一块塔板默弗里效率 $E_{ml}=0.6$ ，求离开塔顶第二块塔板的气相组成。

解：对于全凝器

$$x_D = y_1 = \frac{\alpha x_1^*}{1 + (\alpha - 1)x_1^*} = 0.9$$

$$x_1^* = \frac{y_1}{\alpha - (\alpha - 1)y_1} = \frac{0.9}{3 - 2 \times 0.9} = 0.75$$

液相默弗里效率

$$E_{mL} = \frac{x_{n-1} - x_n}{x_{n-1} - x_n^*}$$

$$\frac{0.9 - x_1}{0.9 - 0.75} = 0.6$$

第1块板塔板液相默弗里效率

$$E_{mL_1} = \frac{x_D - x_1}{x_D - x_1^*} = 0.6$$

$$x_1 = 0.81 \quad y_2 = 0.833x_1 + 0.15$$

$$y_2 = 0.833 \times 0.81 + 0.15 = 0.825$$

在一常压精馏塔内分离苯和甲苯混合物，塔顶为全凝器，塔釜间接蒸汽加热，平均相对挥发度为2.47，饱和蒸汽进料。若全回流操作时，塔顶第一块塔板的气相默弗里板效率为0.6，全凝器液相组成为0.98，求由塔顶第二块板上升的气相组成。

解：塔板默弗里效率 $E_{mV_1} = \frac{y_1 - y_2}{y_1^* - y_2}$

全回流 $y_2 = x_1$ $y_1^* = \frac{\alpha x_1}{1 + (\alpha - 1)x_1} = \frac{2.47 y_2}{1 + 1.47 y_2}$

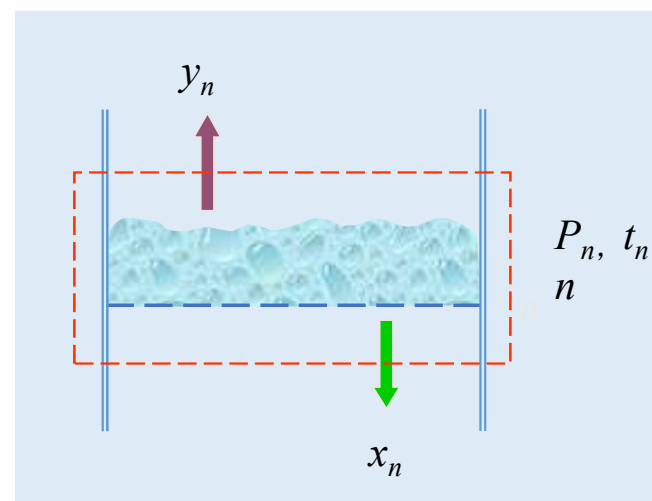
已知 $y_1 = 0.98$ $\frac{0.98 - y_2}{y_1^* - y_2} = 0.6 \Rightarrow y_2 = 0.9693$

9.6 双组分精馏的操作型计算

1、精馏塔的温度分布和灵敏板

精馏塔的温度分布

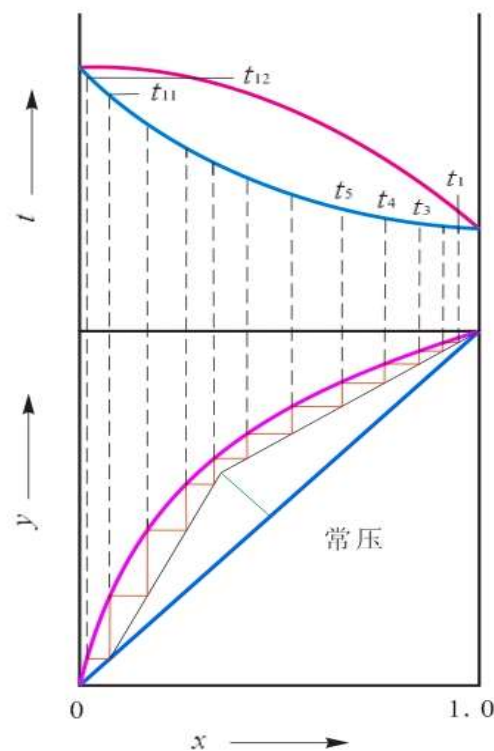
温度分布原因：溶液的泡点与总压及组成有关。精馏塔内各块塔板上物料的组成及总压并不相同，因而从塔顶至塔底形成某种温度分布。



9.6 双组分精馏的操作型计算

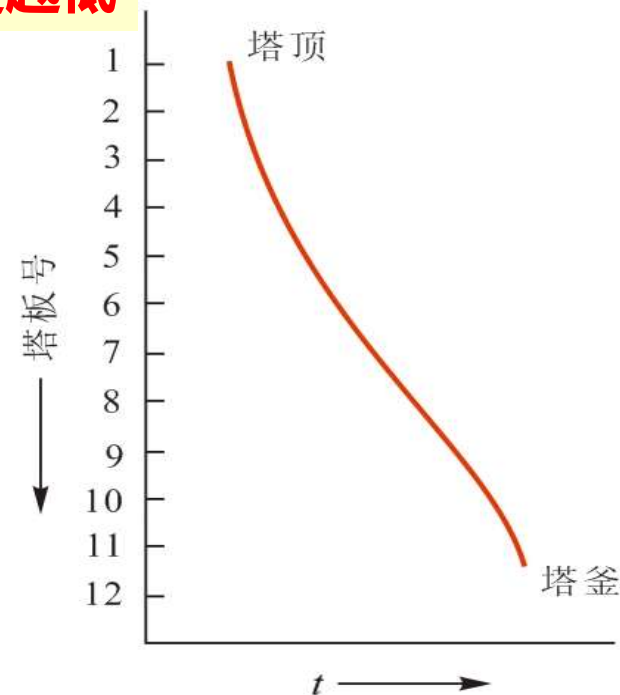
精馏塔的温度分布

温度分布曲线：图a为各板组成与温度的对应关系；将各板的温度标绘在图 (b)中，即得全塔温度分布曲线。操作中通过监测**塔顶**和**塔底温度**来反映**馏出液组成**和**釜残液组成**。



(a)

组成越高
温度越低



(b)

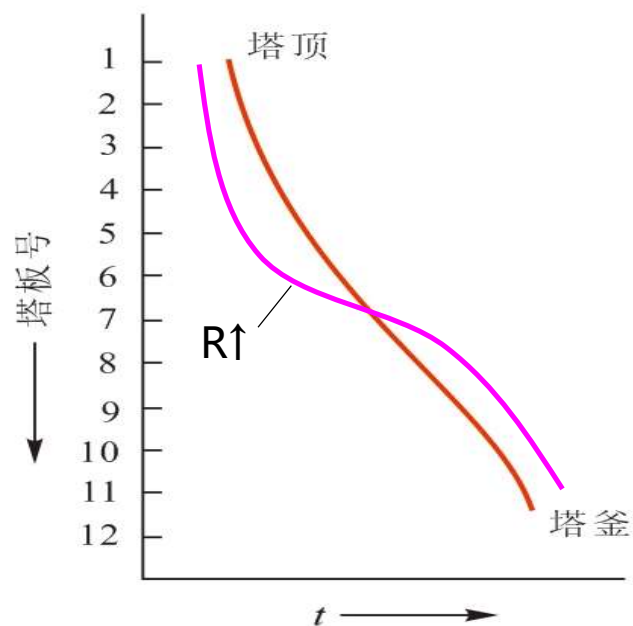
精馏塔的温度分布

9.6 双组分精馏的操作型计算

Principles of Chemical Engineering

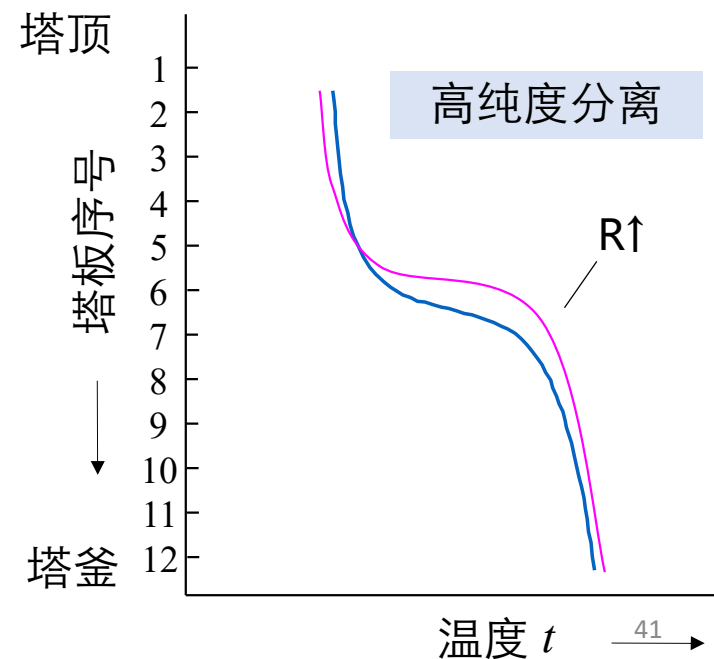
精馏塔的温度分布

精馏塔内温度分布特点：温度由塔顶至塔底逐渐升高。温度在塔顶及塔底相当一段塔板范围内变化较小。



灵敏板

灵敏板：温度改变最显著的塔板，灵敏板通常**靠近进料口**。

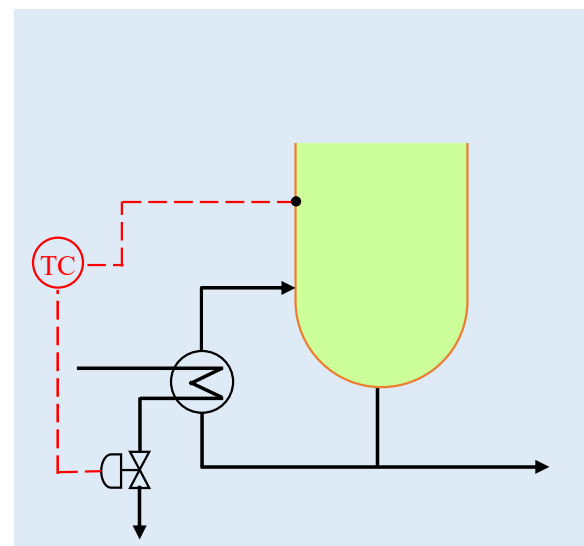
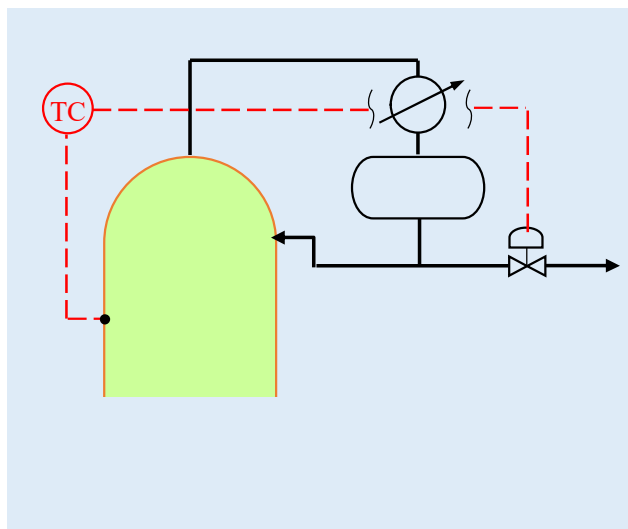


9.6 双组分精馏的操作型计算

灵敏板

测量灵敏板温度的方法预示塔内组成尤其是塔顶馏出液组成的变化。

工程应用：常常将灵敏板温度和塔釜蒸汽加热量或塔顶回流量进行联锁，保证塔顶和塔底产品达标，生产连续稳定运行。

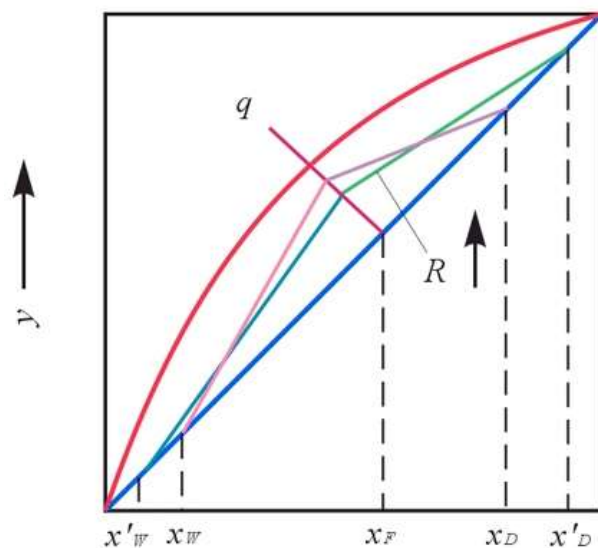


9.6 双组分精馏的操作型计算

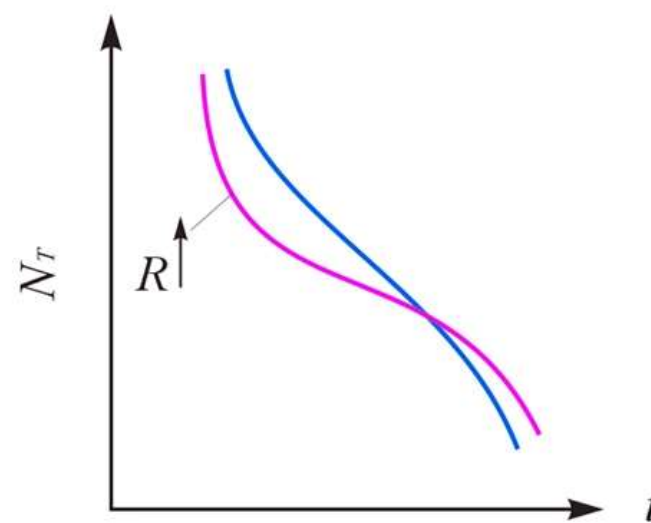
回流比的影响

$$R \uparrow \rightarrow x_D \uparrow, t_D \downarrow, x_W \downarrow, t_W \uparrow$$

温度的影响



R 增加对 x_D 、 x_W 的影响



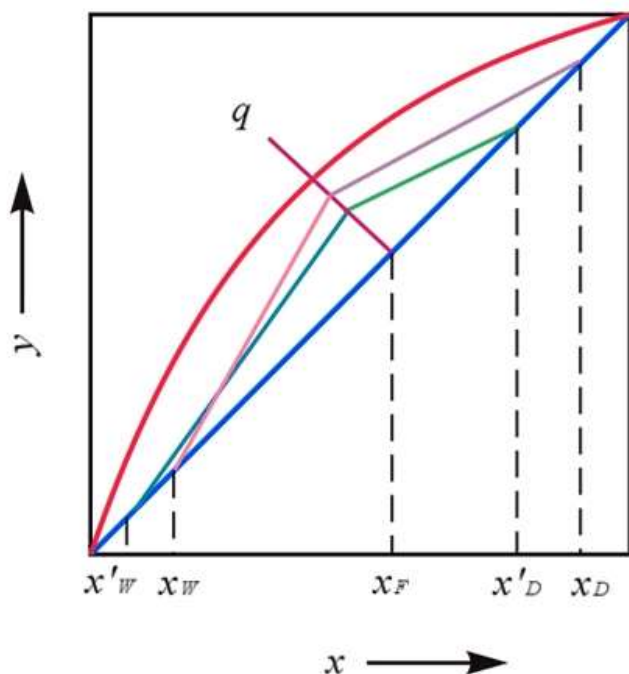
两种 R 时的温度分布

9.6 双组分精馏的操作型计算

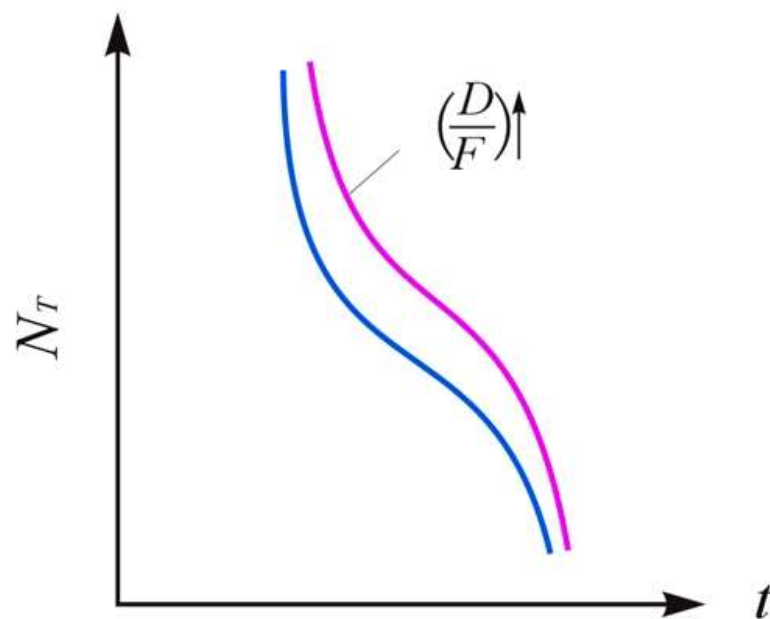
采出率的影响

$$D/F \uparrow \rightarrow x_D \downarrow, t_D \uparrow, x_W \downarrow, t_W \uparrow$$

温度的影响



D/F 增加对 x_D 、 x_W 的影响



两种 D/F 时的温度分布

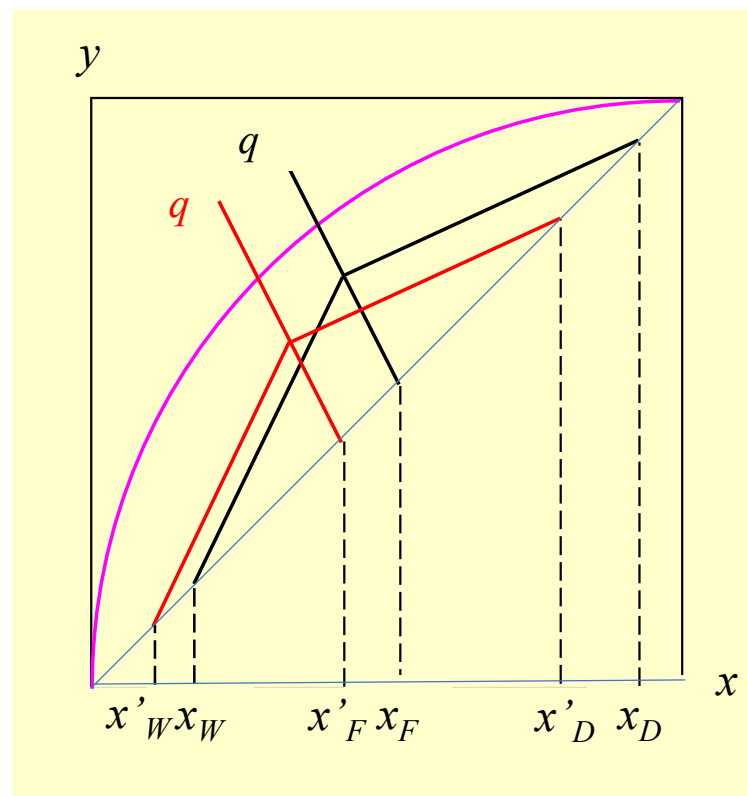
9.6 双组分精馏的操作型计算

进料组成的影响

x_F 下降, 其他均不变, 操作线斜率也不变

如图线段平移: $x_W \downarrow, x_D \downarrow$

$x_D \downarrow, t_D \uparrow, x_W \downarrow, t_W \uparrow$



操作型定性分析举例

例 一操作中的常压连续精馏塔分离某混合液。现保持回流液量和进料状况 (F 、 x_F 、 q) 不变，而减小塔釜加热蒸汽量，试分析 x_D 、 x_W 如何变化？

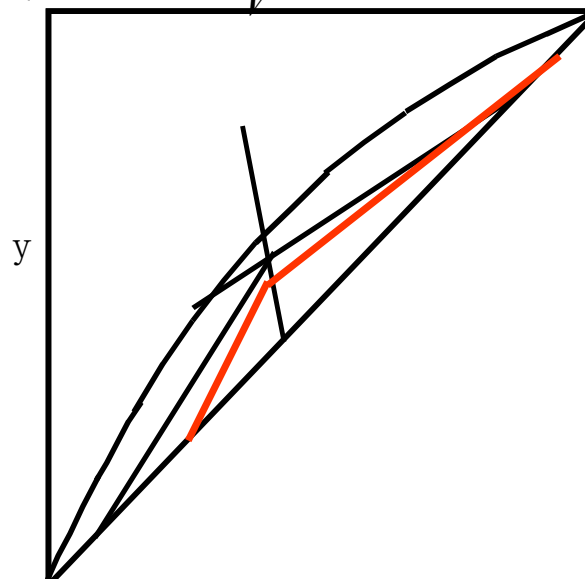
解

$\bar{V} = V - (1-q)F$ ， F 、 q 不变 $\Rightarrow V \downarrow$ 而 L 不变 $\Rightarrow \frac{L}{\bar{V}} \uparrow \Rightarrow x_D$ 变大
 $\bar{L} = L + qF$ ， F 、 q 、 L 不变， $\Rightarrow \bar{L}$ 不变，而 $\bar{V} \downarrow \Rightarrow \frac{\bar{L}}{\bar{V}} \uparrow \Rightarrow x_W$ 变大

假设 x_D 不变、假设 x_D 变小

$N \downarrow$ ，与 N 不变这个前提相矛盾。
故假设不成立。

故 x_D 只能变大



讨论

操作中精馏塔，保持 F ， x_F ， q ， \bar{V} 不变，减少 D ，则塔顶易挥发组分回收率 η 变化为

(A) 变大

(B) 变小

(C) 不变

(D) 不确定

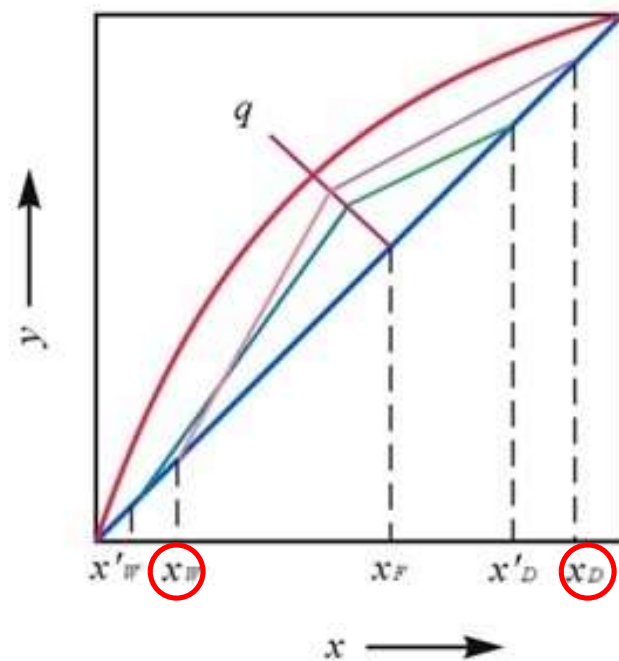
分析：

$$\bar{V} = V - (1-q)F = (R+1)D - (1-q)F, \quad F = D + W$$

\bar{V} 不变， $D \downarrow$ ， $R \uparrow$ ， $W \uparrow$

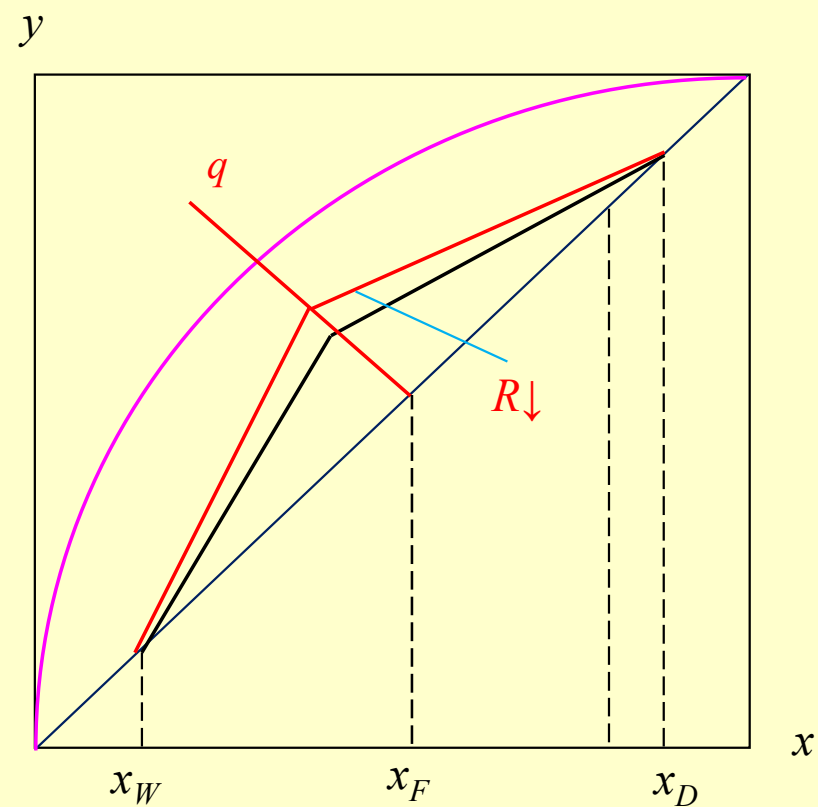
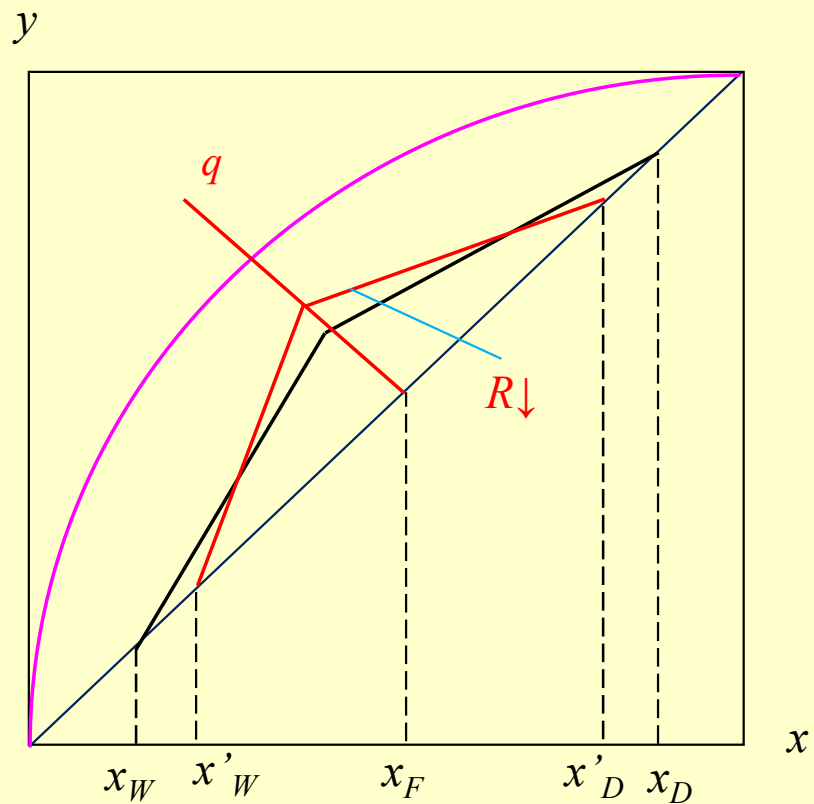
精馏段 $R \uparrow$ ，塔板分离能力 \uparrow ， $x_D \uparrow$

$$\frac{\bar{L}}{\bar{V}} = \frac{\bar{V} + W}{\bar{V}} = 1 + \frac{W}{\bar{V}} \uparrow, \quad x_w \uparrow$$



$$W \uparrow, \quad x_w \uparrow \quad \eta = \frac{Dx_D}{Fx_F} = 1 - \frac{Wx_w}{Fx_F} \downarrow \quad \text{选 B}$$

哪个是设计型、哪个是操作型？辨析 R 减小，下列二个图的意义



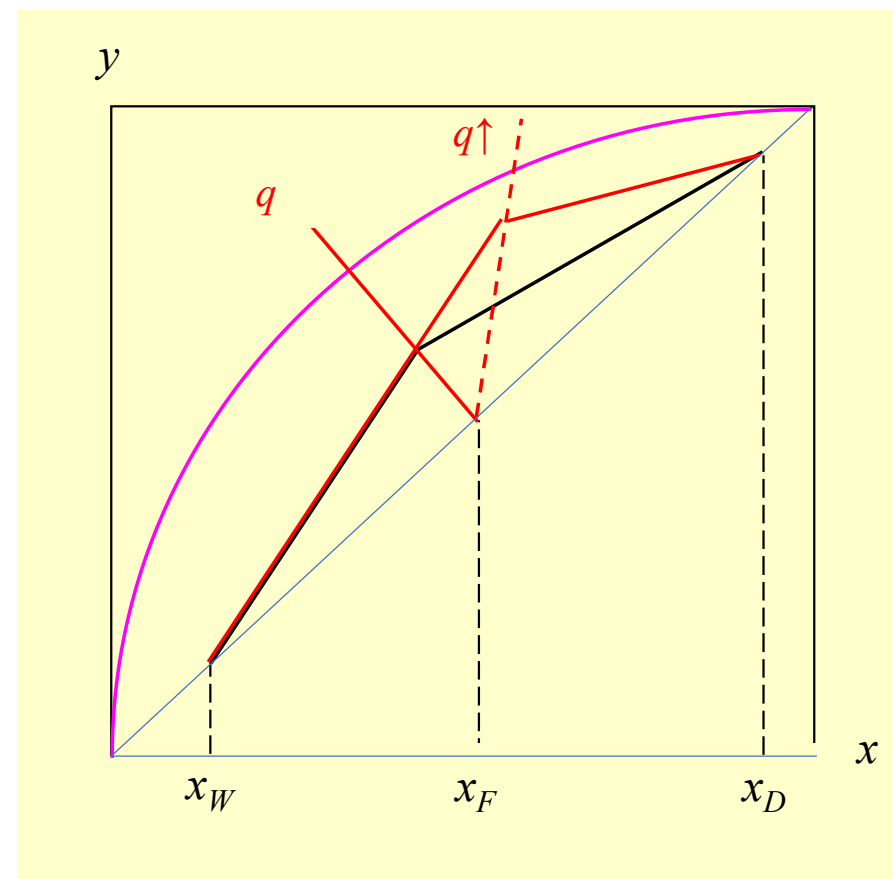
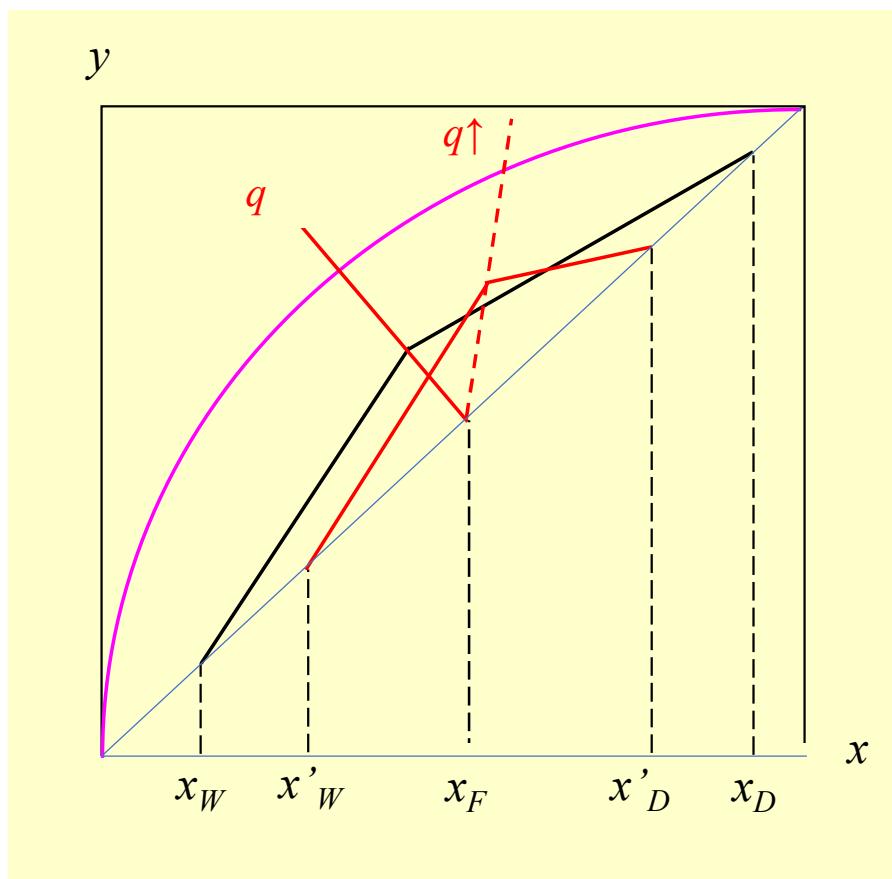
回流比变化

R减小，不利于精馏。 →

对操作型分离结果不好，操作型 x_D 减小，由于塔板数不变， x_w 增大。

对设计型塔板数增加。（原因：操作线靠近平衡线，推动力减小）

哪个是设计型、哪个是操作型？辨析 加热状态变化，下列二个图的意义



加料热状态变化

\bar{V} 一定 (塔釜加热量固定)

$q \uparrow$ (预冷原料)

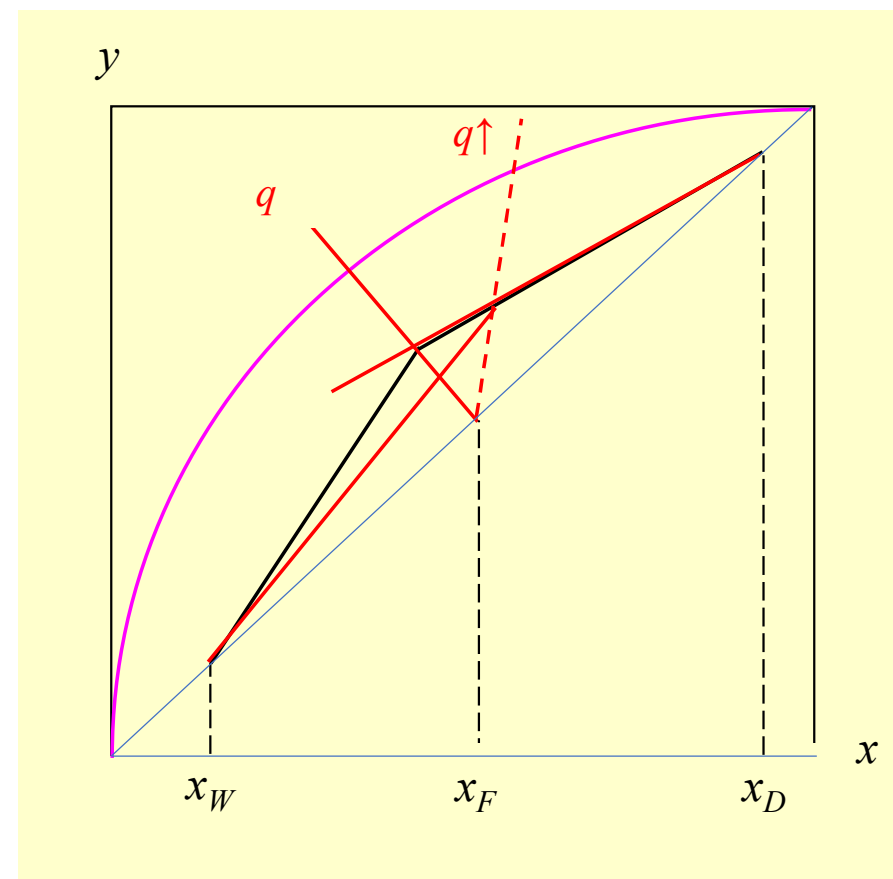
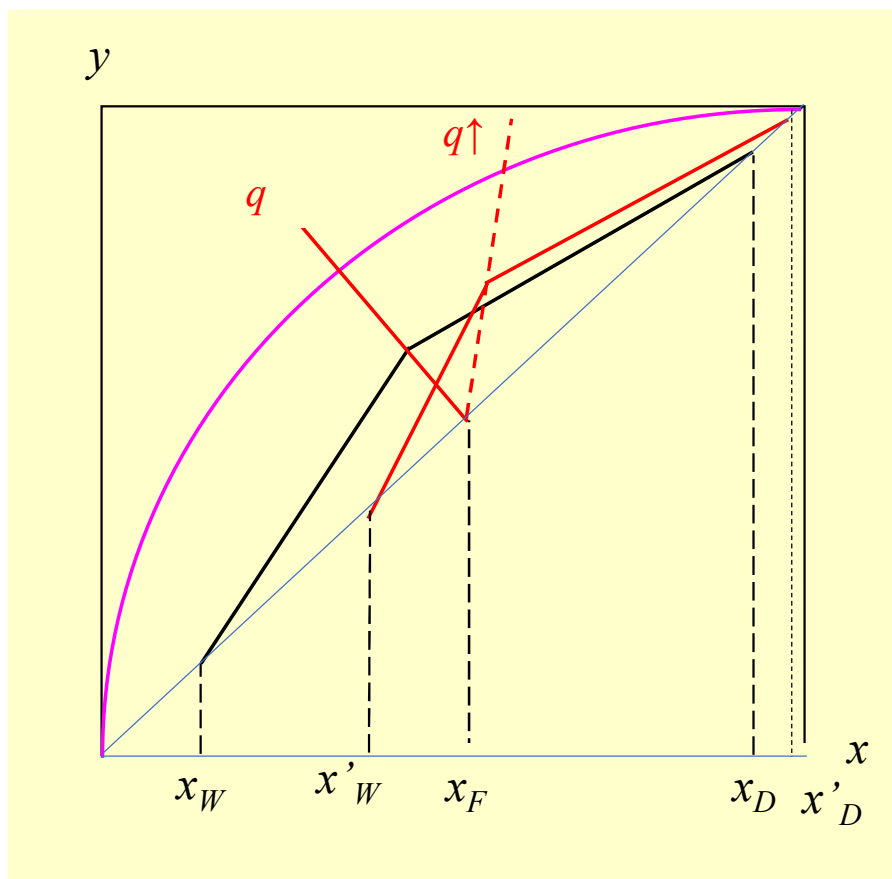
\bar{V} 一定(加热量一定)

$q \uparrow$ (预冷原料), q 从汽液两相到饱和液体, 加料中分掉了一部分冷量

$$R \downarrow \quad \frac{L}{V} = \frac{R}{R+1} = \frac{1}{1+1/R} \downarrow \quad \left(\frac{L}{V}\right) \downarrow$$

R 减小, 不利于精馏。 ➡ 对操作型分离结果不好, 对设计型塔板数增加。

哪个是设计型、哪个是操作型？辨析 加热状态变化，下列二个图的意义



加料热状态变化

R 一定（塔顶冷量不变）

精馏段的斜率不变，

$q \uparrow$ （原料中冷量增加），根据精馏塔内热量平衡原则，

塔的加热蒸气 $\bar{V} \uparrow$ ，有利于精馏。

表现在：操作型 x_D 增大，由于塔板数不变， x_w 只能增加，

设计型理论板数 N 减小。