

# 吸收习题讨论课

By 黄卫东

2020.03

常用公式:

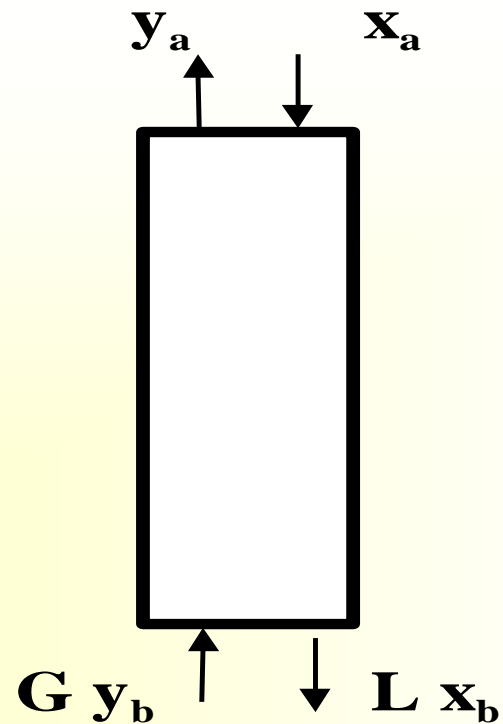
$$y_b = \frac{L}{G}(x_b - x_a) + y_a$$

$$\frac{L}{G} = (1.2 \sim 2.0) \left( \frac{L}{G} \right)_{\min}$$

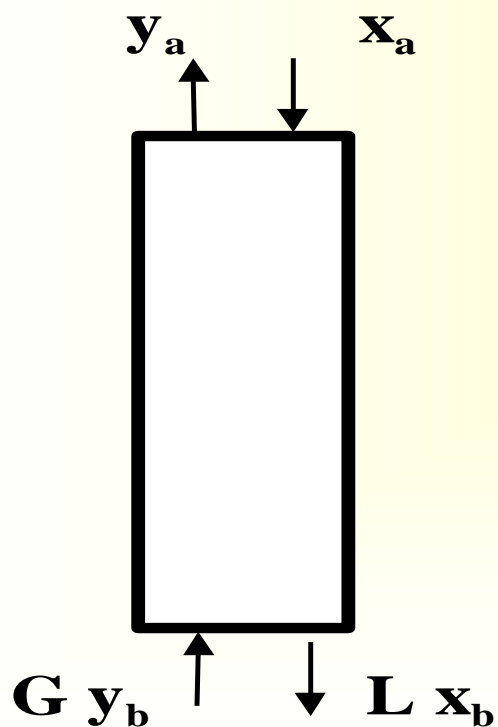
$$H = H_{OG} \cdot N_{OG}$$

$$H_{OG} = \frac{G}{K_y a}$$

$$N_{OG} = \frac{y_b - y_a}{\Delta y_m} \quad \text{或} \quad N_{OG} = \frac{1}{1 - 1/A} \ln \left[ \left( 1 - 1/A \right) \frac{y_b - y_a^*}{y_a - y_a^*} + 1/A \right]$$



{ 设计型  $\longrightarrow$  指吸收任务给定，求塔径、塔高等。  
{ 操作型  $\longrightarrow$  指吸收设备和流程已给定，考察操作条件的变化对吸收效果的影响



操作条件：  
气液流量、  
气液进口浓度、  
操作温度、压力等

## 设计型举例

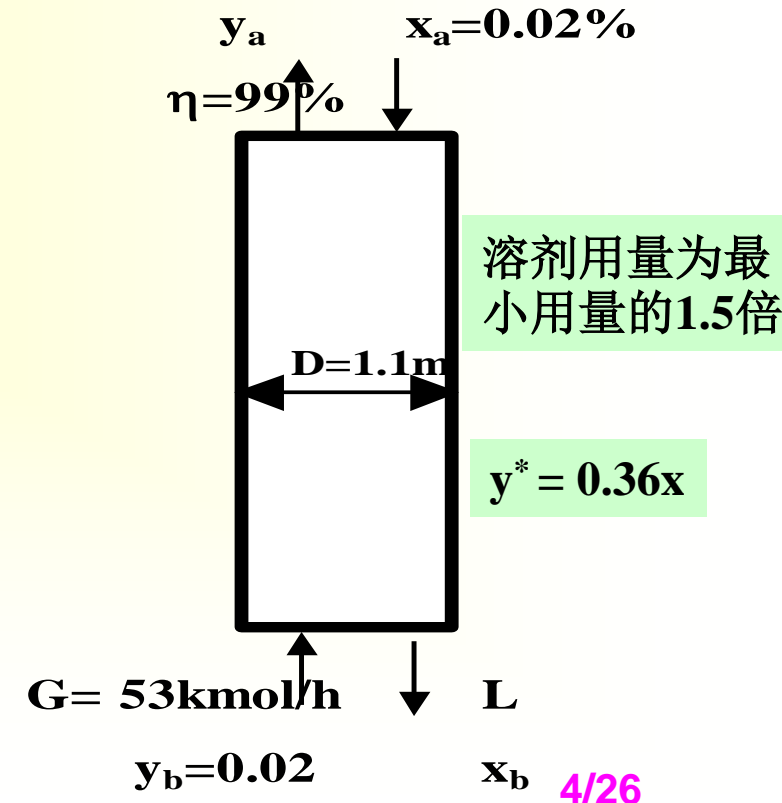
$$H = H_{OG} \cdot N_{OG}$$

**例1** 常压下，用煤油从苯蒸汽和空气混合物中吸收苯，吸收率为99%，混合气量为53kmol/h。入塔气中含苯2%（体积 %），入塔煤油中含苯0.02%（摩尔分率）。溶剂用量为最小用量的1.5倍，在操作温度50℃下，相平衡关系为 $y^* = 0.36x$ ，总传质系数 $K_y a = 0.015 \text{ kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ，塔径为1.1米。试求所需填料层高度。

解 属于低浓气体吸收

$$H_{OG} = \frac{G / \left( \frac{1}{4} \pi D^2 \times 3600 \right)}{K_y a}$$

$$= \frac{53 / \left( \frac{1}{4} \pi \times 1.1^2 \times 3600 \right)}{0.015} = 1.03 \text{ m}$$



## 设计型举例

$$\eta = 1 - \frac{y_a}{y_b} \Rightarrow y_a = y_b(1 - \eta) = 0.02 \times (1 - 99\%) = 0.0002$$

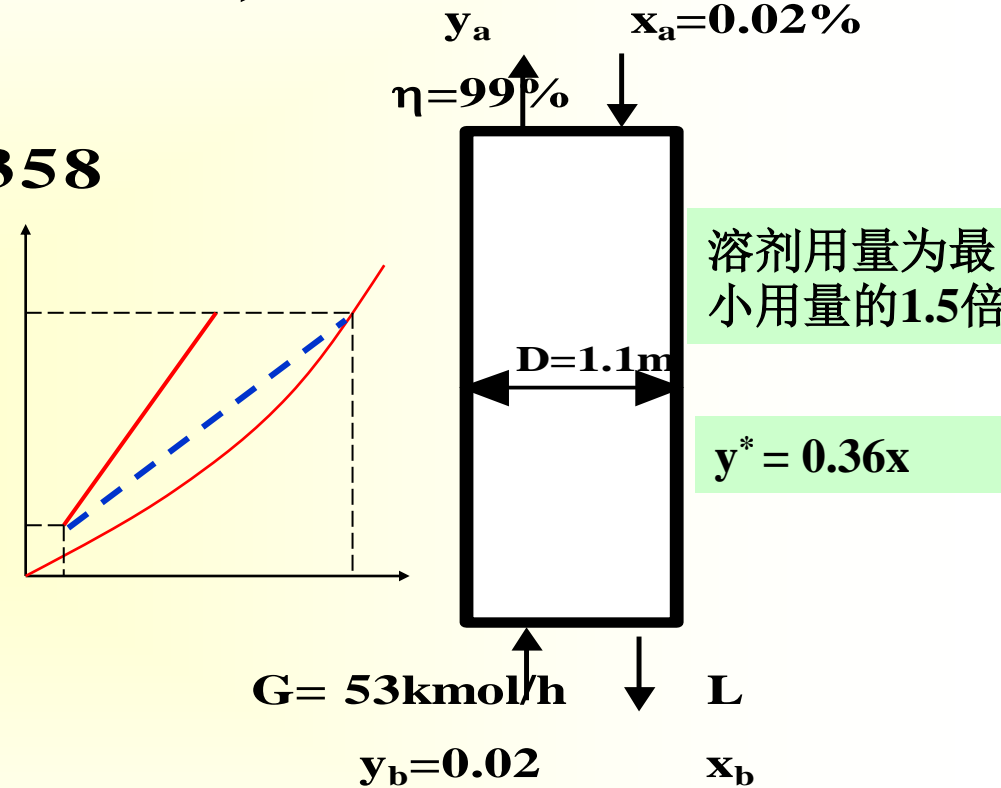
$$\left(\frac{L}{G}\right)_{\min} = \frac{y_b - y_a}{\frac{y_b}{m} - x_a} = \frac{0.02 - 0.0002}{\frac{0.02}{0.36} - 0.0002} = 0.358$$

$$\Rightarrow \frac{L}{G} = 1.5 \left(\frac{L}{G}\right)_{\min} = 1.5 \times 0.358 = 0.537$$

$$\Rightarrow S = \frac{m}{L/G} = \frac{0.36}{0.537} = 0.67$$

$$N_{OG} = \frac{1}{1 - S} \ln \left[ (1 - S) \frac{y_b - mx_a}{y_a - mx_a} + S \right]$$

$$= \frac{1}{1 - 0.67} \ln \left[ (1 - 0.67) \frac{0.02 - 0.36 \times 0.0002}{0.0002 - 0.36 \times 0.0002} + 0.67 \right] = 11.98$$



## 设计型举例

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_{OG} \cdot \mathbf{N}_{OG} = \mathbf{1.03} \times \mathbf{11.98} = \mathbf{12.4m}$$

至于用“平均推动力法”请自行解算。

## 操作型定性分析举例

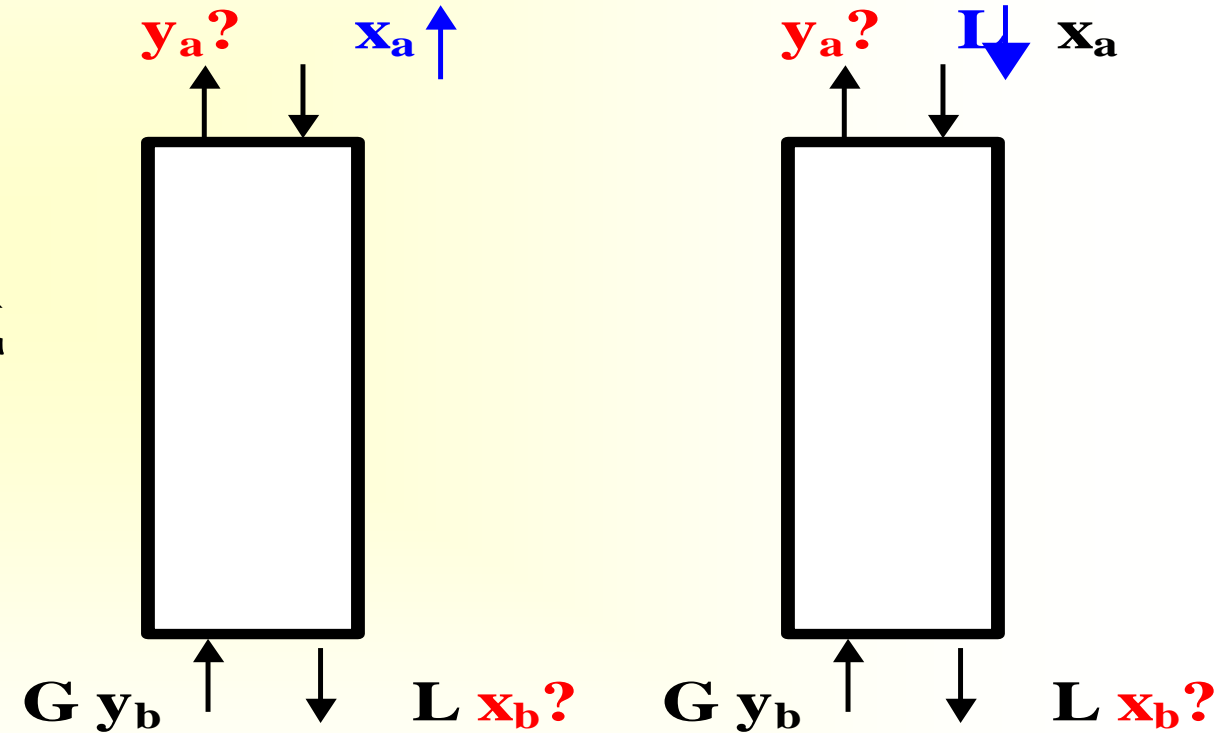
快速分析  
作图+排除法  
吸收因数法

**例2** 在逆流操作的填料吸收塔中，对某一低浓气体中的溶质组分进行吸收，现因故

(1)吸收剂入塔浓度变大，

(2)吸收剂用量变小，

而其它操作条件均不变，试分析出塔气体、液体浓度如何变化？



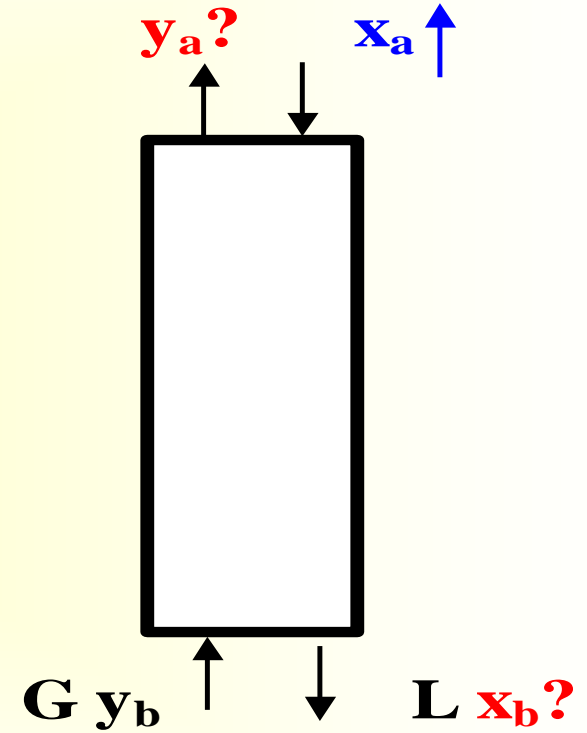
## 操作型定性分析举例

快速分析  
作图+排除法  
吸收因数法

### (1) 吸收剂入塔浓度变大

#### 解法一：快速分析

$x_a$  变大时，将使传质推动力变小，故不利于吸收，因此， $y_a$  变大，





# 操作型定性分析举例

快速分析  
作图+排除法  
吸收因数法

(1)当吸收剂入塔浓度 $x_a$ 变大时

解法二：作图+排除法

a. 假设  $y_a$  不变

$L/G$  不变       $y_b$  不变、 $x_a$  变大

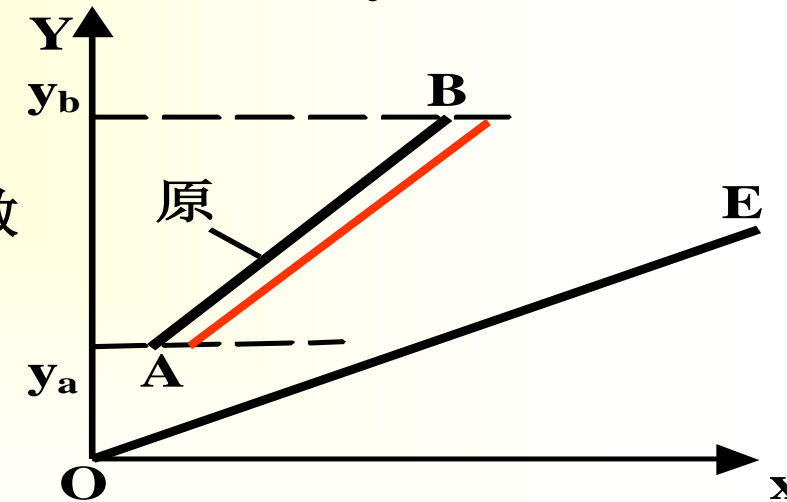
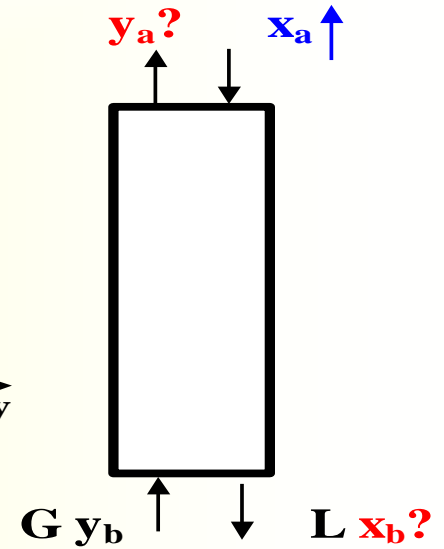
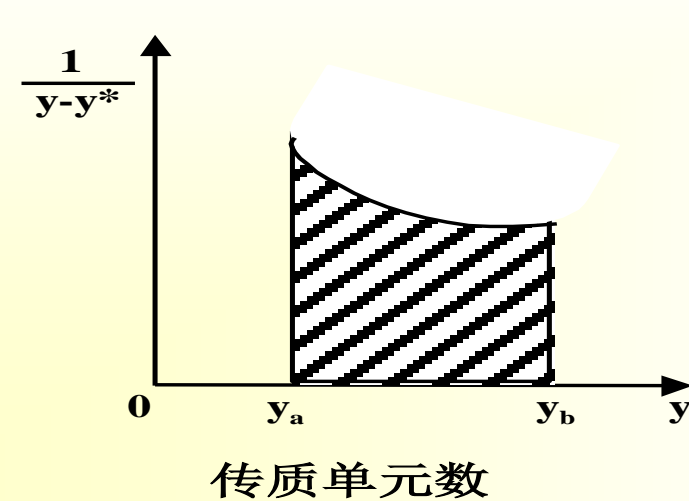
作图知,  $N_{OG} \uparrow$

$K_y a$  不变,  $H_{OG} = \frac{G}{K_y a}$  不变。

影响因素：流动状况、物系、  
填料特性和操作条件

$H \uparrow$

与  $H$  不变相矛盾, 故  
假设不成立



当  $x_a$  变大时, 原、新状况下操作线

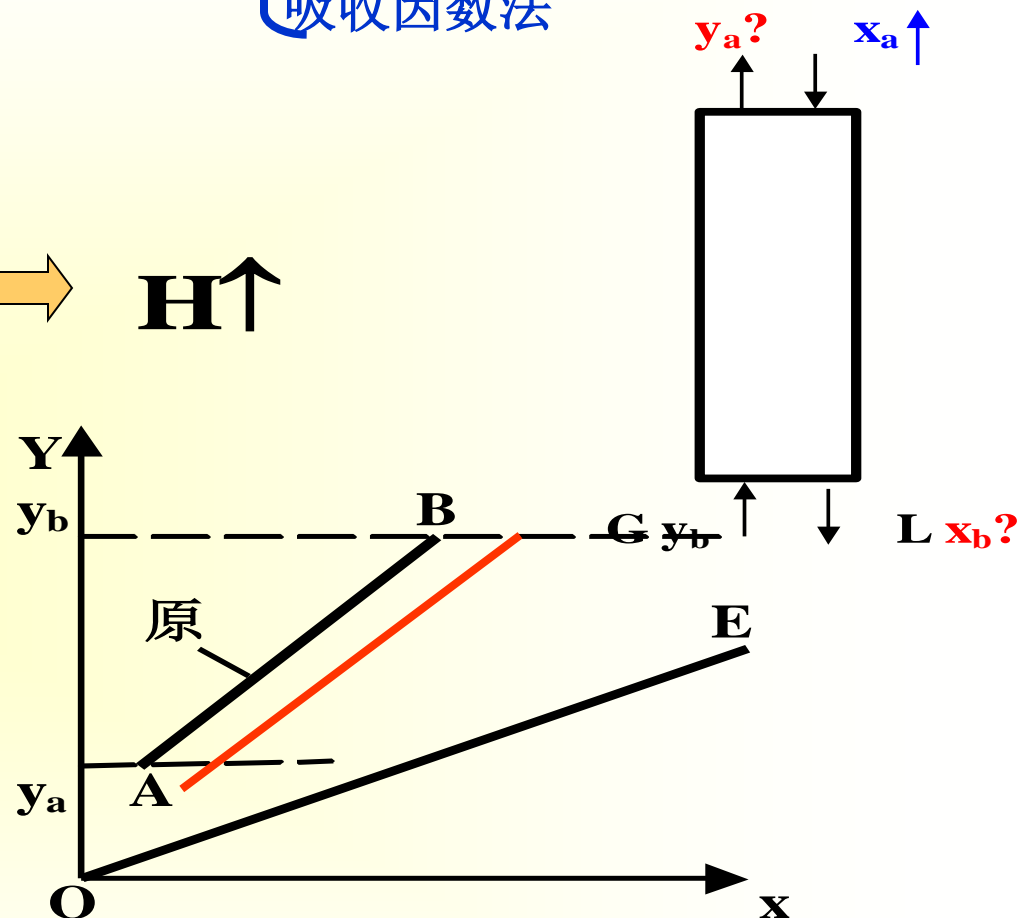
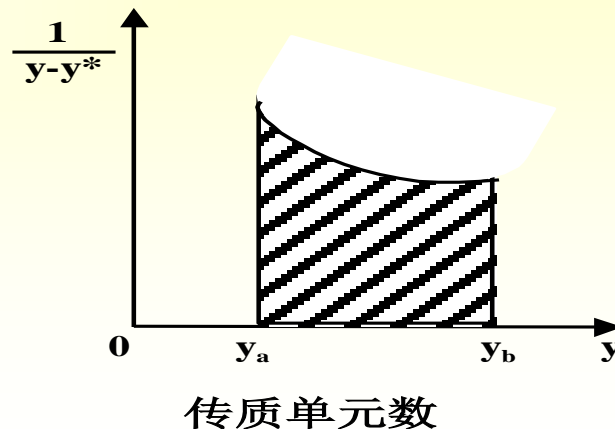
快速分析  
作图+排除法  
吸收因数法

作图知,  $N_{OG} \uparrow$

**$K_y a$  不变,  $H_{OG} = \frac{G}{K_y a}$  不变。**  **H↑**

与H不变相矛盾，故假设不成立

因此,  $y_a$  只能↑



### 当 $x_a$ 变大时，原、新状况下操作线

快速分析  
作图+排除法  
吸收因数法

假设 $x_b$ 不变、变小，作图可知 $N_{OG}$ 将变小，故 $H$ 将变小，与 $H$ 一定相矛盾，因此

[illegible]

11/26

## 操作型定性分析举例

快速分析  
作图+排除法  
吸收因数法

(1)当吸收剂入塔浓度 $x_a$ 变大时

解法三：吸收因数法

由题意可知：

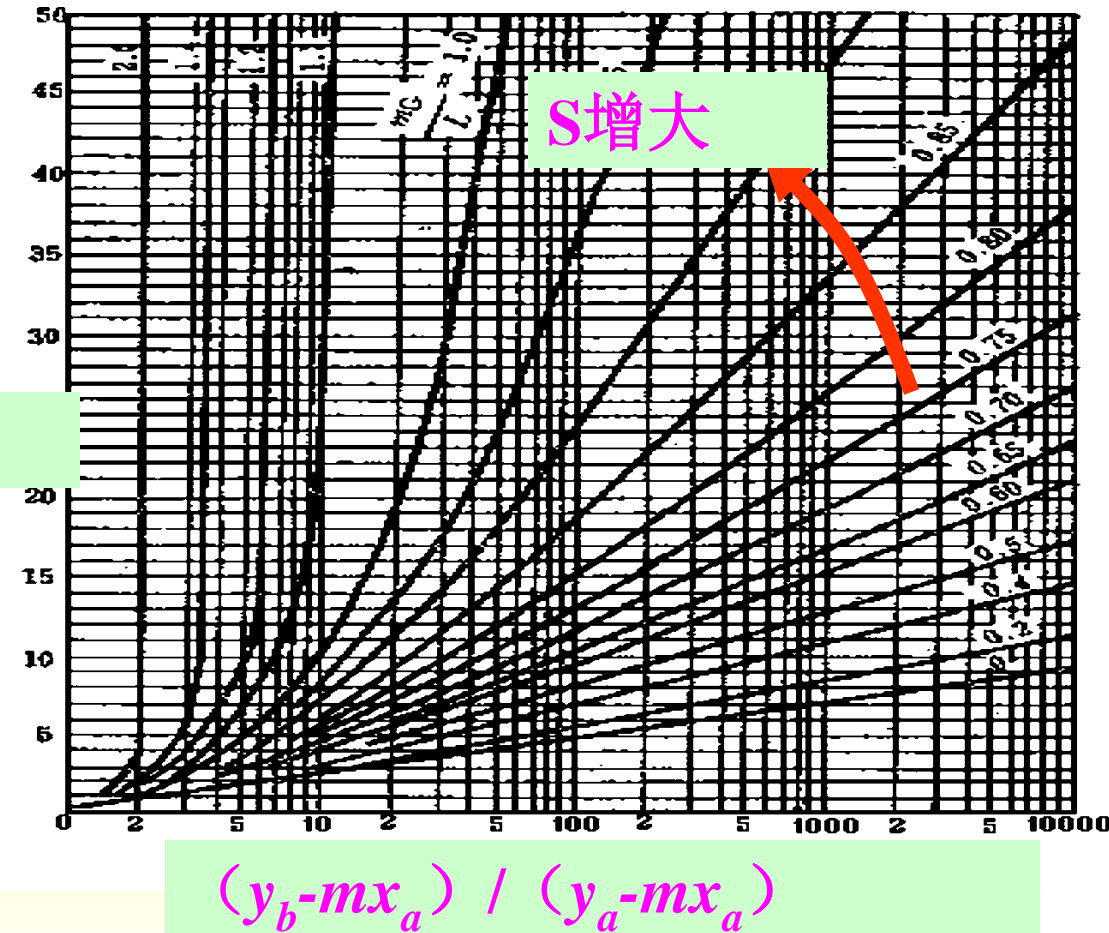
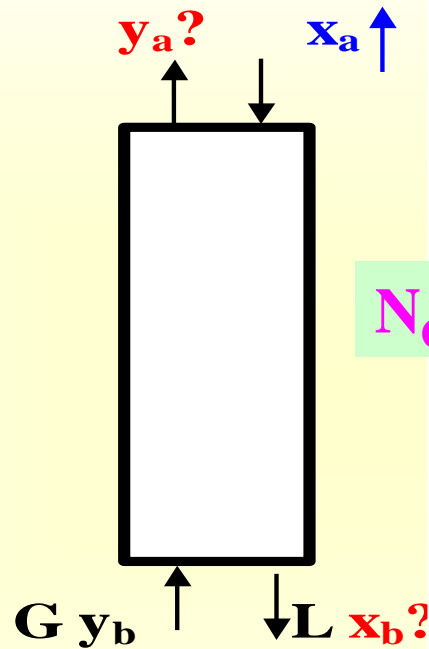
$$S = \frac{mG}{L} \text{ 不变}$$

$$H_{OG} = \frac{G}{K_y a} \text{ 不变} \Rightarrow$$

$$N_{OG} = H/H_{OG} \text{ 不变}$$

由右图可知， $\frac{y_b - mx_a}{y_a - mx_a}$  不变

又 $x_a$ 变大，故 $y_a$ 变大



$N_{OG}$  与  $(y_b - mx_a) / (y_a - mx_a)$  关系曲线

## 操作型定性分析举例

{ 快速分析  
作图+排除法  
吸收因数法

至于 $x_b$ :

仍需用排除法判定，略。

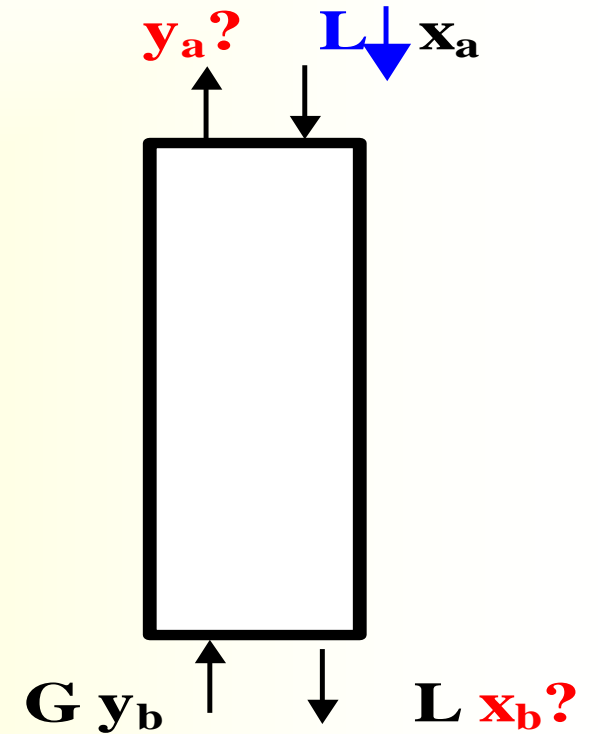
## 操作型定性分析举例

快速分析  
作图+排除法  
吸收因数法

(2)当吸收剂用量变小时

解法一：快速分析

吸收剂用量变小时，不利于吸收，因此， $y_a$ 变大。



## 操作型定性分析举例

快速分析  
作图+排除法  
吸收因数法

(2) 当吸收剂用量变小时

解法二：作图+排除法

$L/G \downarrow$   $G$ 、 $y_b$ 、 $x_a$  不变

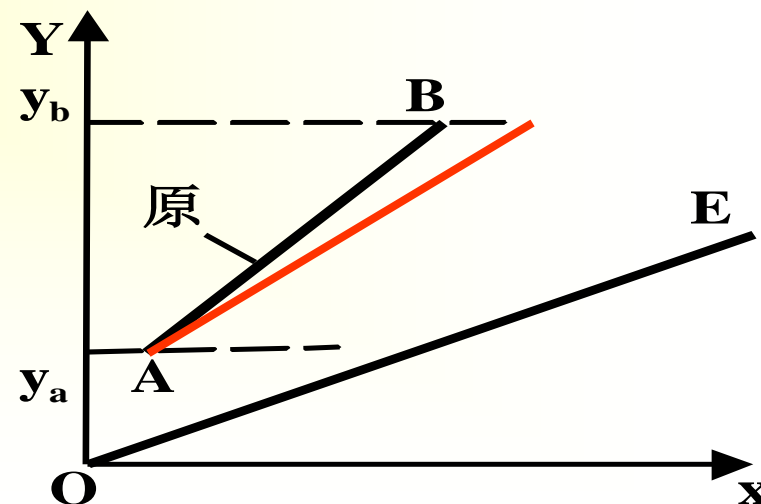
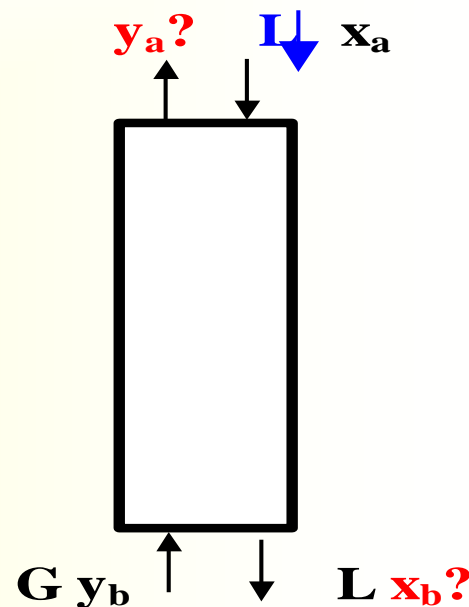
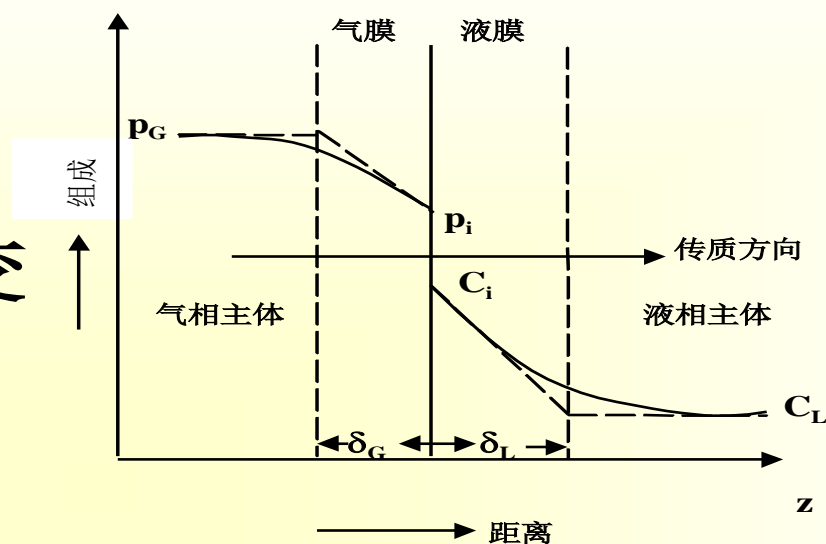
a. 假设  $y_a$  不变

作图知,  $N_{OG} \uparrow$

$L$  变小,  $Re_L$  变小, 液膜变厚, 故  $\frac{1}{K_y a}$  变大或

不变 (气膜控制),  $H_{OG} = \frac{G}{K_y a} \uparrow$  或不变

→  $H \uparrow$  → 与  $H$  不变相矛盾, 故假设不成立



## 操作型定性分析举例

快速分析  
作图+排除法  
吸收因数法

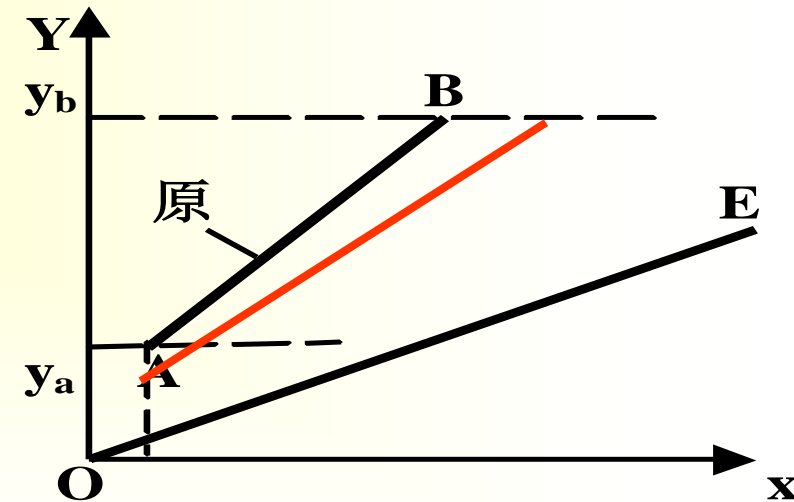
b. 假设  $y_a$  变小

作图知,  $N_{OG} \uparrow$

$$\frac{1}{K_y a} \text{ 变大或不变, } H_{OG} = \frac{G}{K_y a} \uparrow \text{ 或不变}$$

→  $H \uparrow$  → 与  $H$  不变相矛盾,  
故假设不成立

因此,  $y_a$  只能变大。





## 操作型定性分析举例

快速分析  
作图+排除法  
吸收因数法

a. 假设 $x_b$ 不变

作图知,  $N_{OG} \downarrow$ ,  $N_{OL} \downarrow$

$L$  变小,  $H_{OL} = \frac{L}{K_x a} \propto L^m \downarrow$  ( $0 < m < 1$ )

→  $H = H_{OL} \cdot N_{OL} \downarrow$

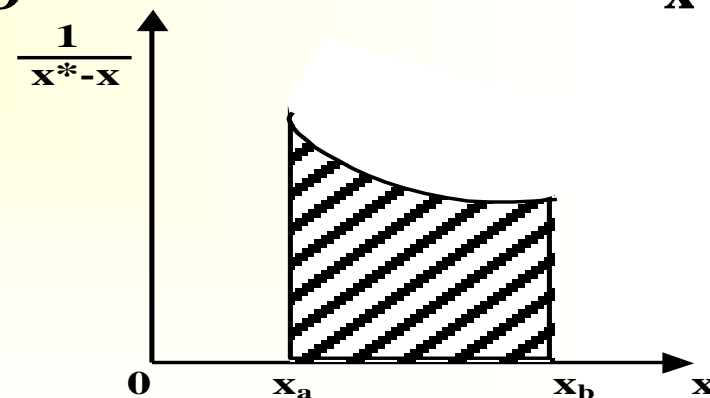
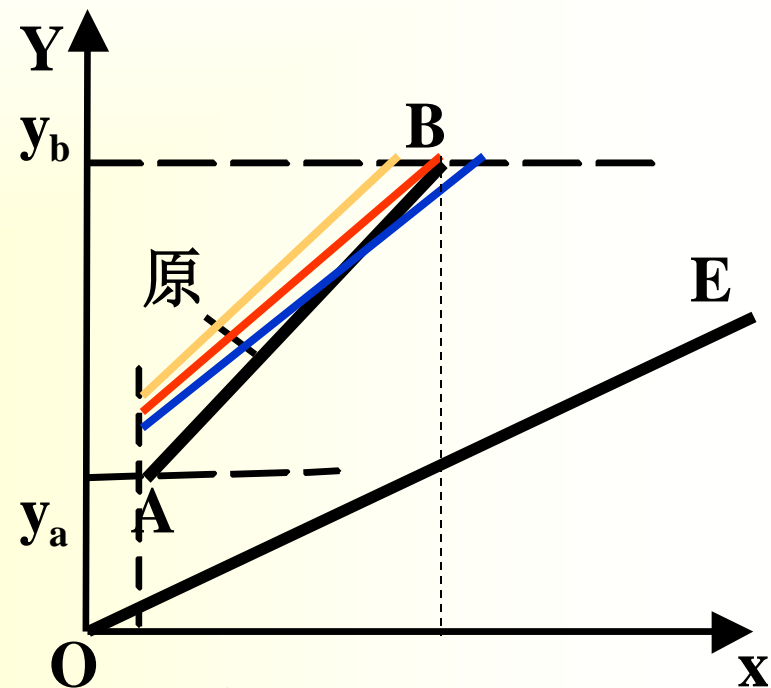
→ 与  $H$  不变相矛盾, 故假设不成立

b. 假设 $x_b$ 变小

作图知,  $N_{OG} \downarrow$ ,  $N_{OL} \downarrow$  →  $H = H_{OL} \cdot N_{OL} \downarrow$

→ 与  $H$  不变相矛盾, 故假设不成立

因此,  $x_b$  只能变大。



传质单元数

## 操作型定性分析举例

快速分析  
作图+排除法  
吸收因数法

(2)当吸收剂用量变小时

解法三：吸收因数法

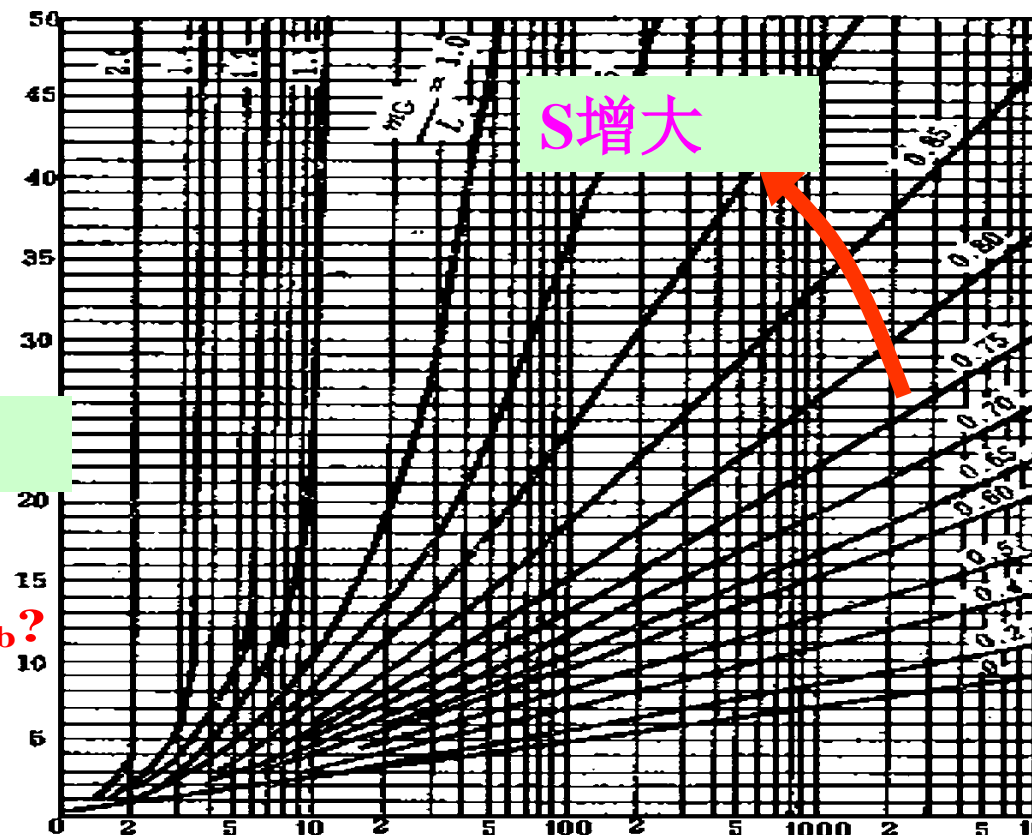
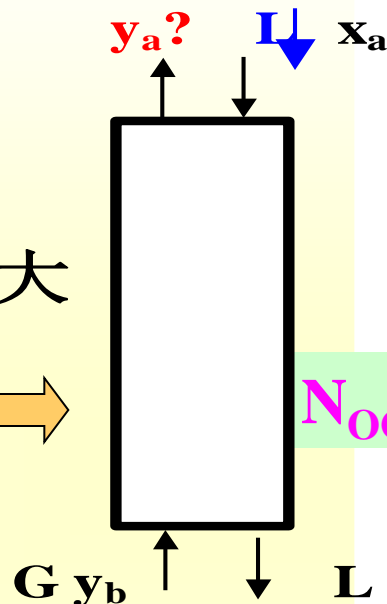
由题意可知： $S = \frac{mG}{L}$  变大

$H_{OG} = \frac{G}{K_y a}$  变大或不变  $\Rightarrow$

$N_{OG} = H/H_{OG}$  变小或不变

由右图可知， $\frac{y_b - mx_a}{y_a - mx_a}$  变小

故 $y_a$ 变大



$(y_b - mx_a) / (y_a - mx_a)$

$N_{OG}$  与  $(y_b - mx_a) / (y_a - mx_a)$  关系曲线

## 操作型定性分析举例

{ 快速分析  
作图+排除法  
吸收因数法

至于 $x_b$ :

仍需用排除法判定，略。

## 操作型定性分析练习

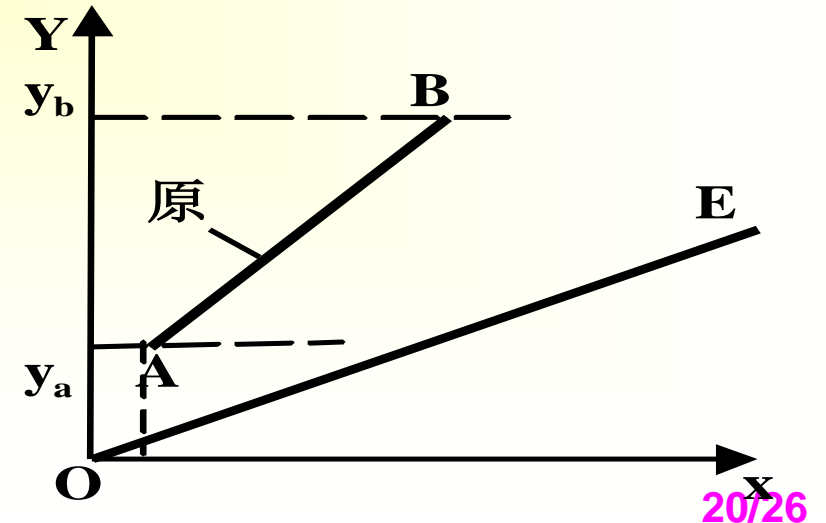
### 练习

在逆流操作的填料吸收塔中，对某一低浓气体中的溶质组分进行吸收，现因故

(1) 气体入塔浓度  $y_b$  变小，

(2)  $G$  变小，

而其它操作条件均不变，试分析出塔气体、液体浓度如何变化？



## 操作型定性分析

(1) 气体入塔浓度  $y_b$  变小

解法一：快速分析

$y_b$  变小,  $y_a$  必变小。

解法二：作图+排除法

$L/G$  不变  $x_a$  不变、 $y_b$  变小

a. 假设  $y_a$  不变

b. 假设  $y_a \uparrow$

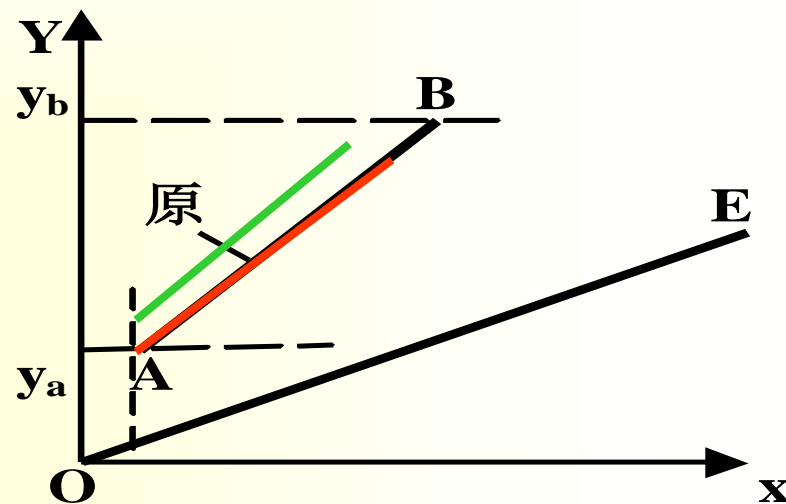
作图知,  $N_{OG} \downarrow$

$K_y a$  不变,  $H_{OG} = \frac{G}{K_y a}$  不变。

$H \downarrow$

与  $H$  不变相矛盾, 故假设不成立

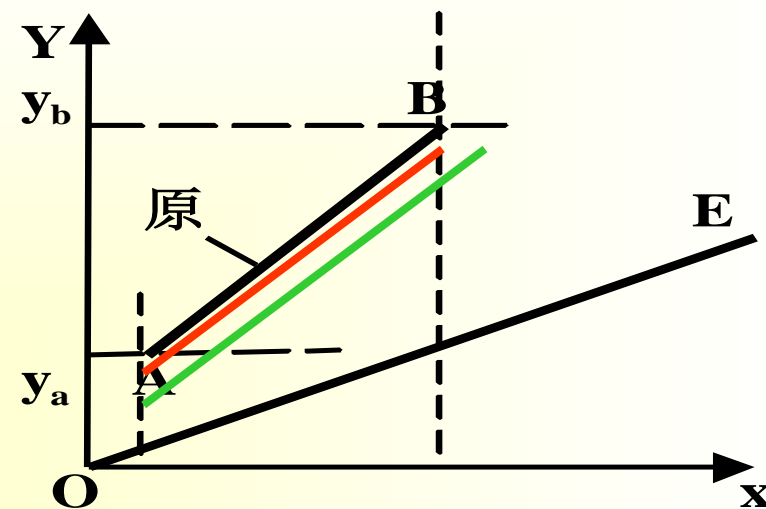
因此,  $y_a$  只能变小。



## 操作型定性分析

### 关于 $x_b$ : 排除法

假设 $x_b$ 不变、变大, 作图可知  
 $N_{OG}$ 将变大, 故 $H$ 将变大, 与 $H$ 一定  
相矛盾, 因此,  $x_b$ 将变小。



### 解法三: 吸收因数法

$$\begin{aligned} K_y a \text{ 不变, } H_{OG} = \frac{G}{K_y a} \text{ 不变} &\implies N_{OG} = \frac{H}{H_{OG}} \text{ 不变} \\ \left. \begin{array}{l} L/G \text{ 不变} \\ m \text{ 不变} \end{array} \right\} &\implies S \text{ 不变} \end{aligned} \implies$$

$$\text{查图可知: } \frac{y_b - y_a^*}{y_a - y_a^*} \text{ 不变} \implies y_a \downarrow$$

至于 $x_b$ 的变化仍需用作图与排除法

## 操作型定性分析

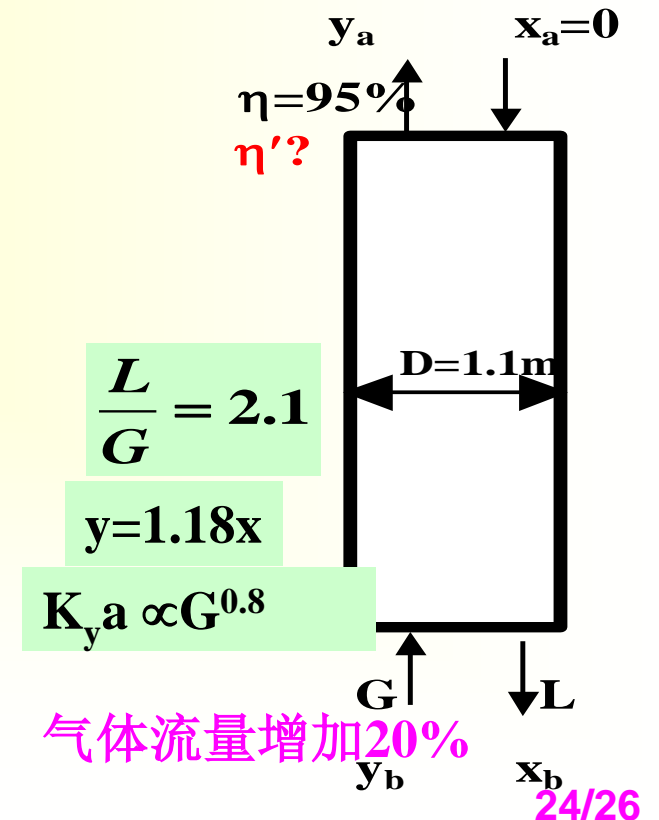
(2)G变小时

$$y_a \uparrow, x_b \uparrow$$

## 操作型计算举例

**例2** 某吸收塔在101.3kPa、293K下用清水逆流吸收丙酮—空气混合气体（可视为低浓气体）中的丙酮。当操作液气比为2.1时，丙酮回收率可达95%。已知物系平衡关系为 $y=1.18x$ ，吸收过程大致为气膜控制，气相总传质系数 $K_y a \propto G^{0.8}$ 。今气体流量增加20%，而液量及气液进口浓度不变，试求：

- (1)回收率变为多少？
- (2)单位时间内被吸收的丙酮量增加多少倍？





## 操作型计算举例

$$H = H_{OG} \cdot N_{OG} \quad H_{OG} = \frac{G}{K_y a}$$

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

解：(1)回收率变为多少？

原工况下：

$$S = \frac{m}{L/G} = \frac{1.18}{2.1} = 0.56$$

$$\begin{aligned} N_{OG} &= \frac{1}{1-S} \ln \left[ (1-S) \frac{1}{1-\eta} + S \right] \\ &= \frac{1}{1-0.56} \ln \left[ (1-0.56) \frac{1}{1-0.95} + 0.56 \right] \\ &= 5.1 \end{aligned}$$

$$S' = \frac{m}{L/G'} = \frac{1.2m}{L/G} = 1.2 \times 0.56 = 0.672$$

$$N'_{OG} = \frac{1}{1-S'} \ln \left[ (1-S') \frac{1}{1-\eta'} + S' \right] = 4.9$$

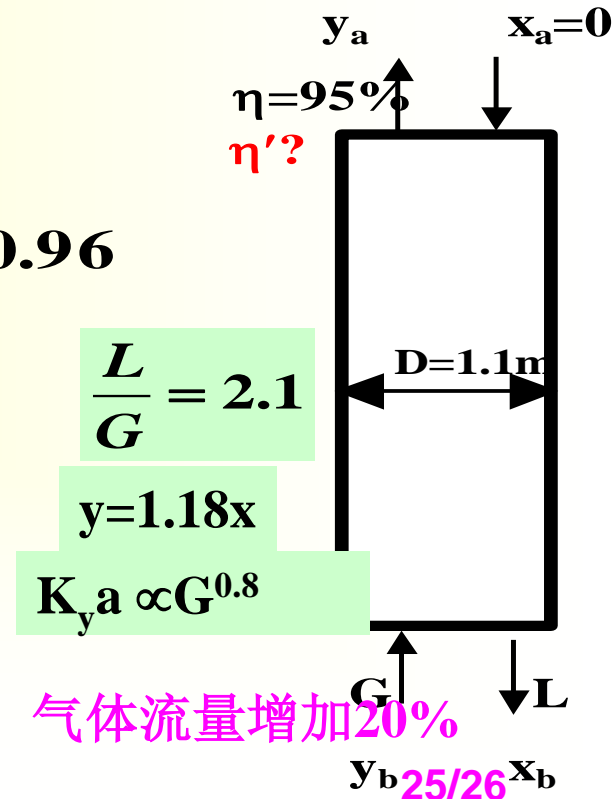
$$\eta' = 1 - \frac{y'_a}{y_b} = 92.4\%$$

新工况下：

$$\frac{H'_{OG}}{H_{OG}} = \left( \frac{G'}{G} \right)^{0.2} = 1.2^{0.2} = 1.04$$

$$\begin{aligned} \frac{N'_{OG}}{N_{OG}} &= \frac{H_{OG}}{H'_{OG}} \\ &= \frac{1}{1.04} = 0.96 \end{aligned}$$

$$\therefore N'_{OG} = 4.9$$

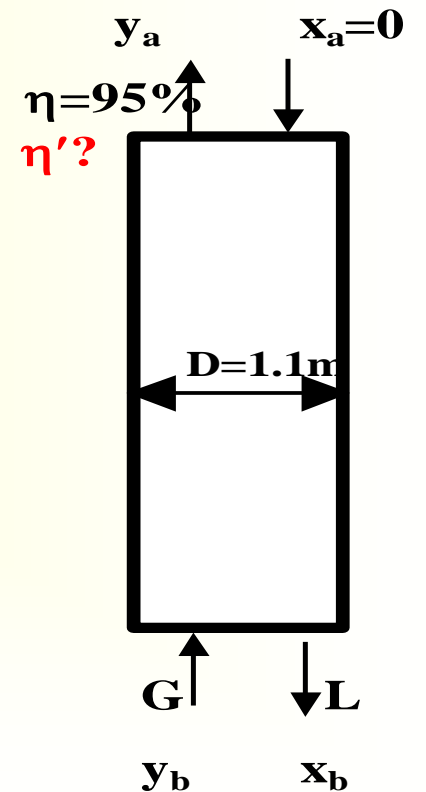


气体流量增加20%

## 操作型计算举例

(2)单位时间内被吸收的丙酮量增加多少倍？

$$\frac{G'(y_b - y'_a)}{G(y_b - y_a)} = \frac{1.2\eta'}{\eta} = 1.2 \times \frac{0.924}{0.95} = 1.17(\text{倍})$$

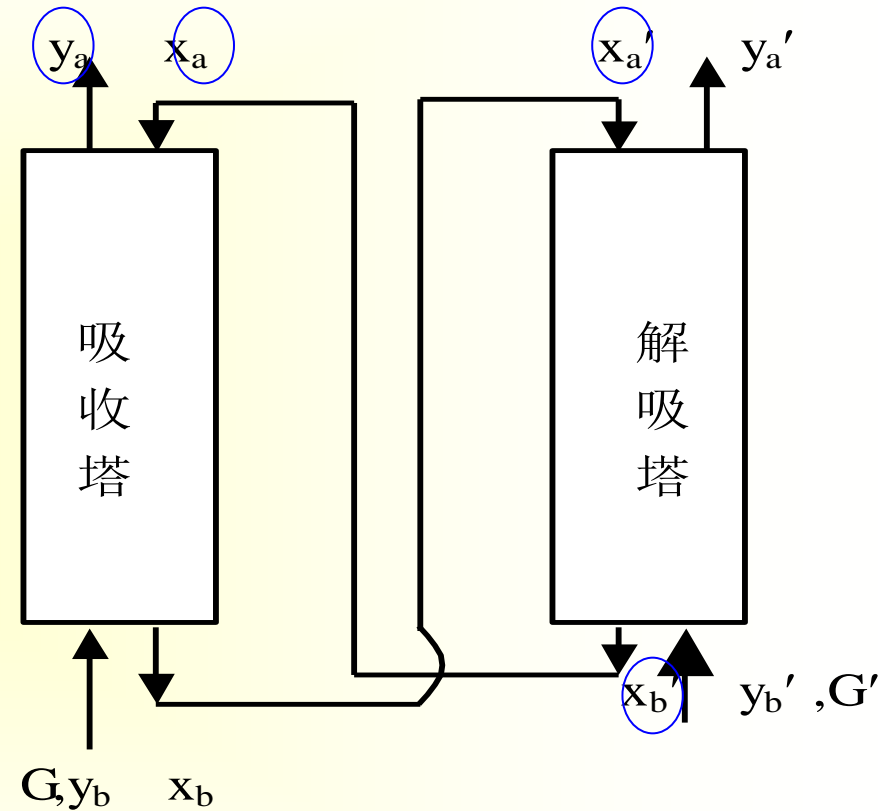


## 解吸（脱吸）举例

**例** 吸收—解吸联合操作系统如图所示。两塔填料层高度均为 7m， $G=1000\text{kmol/h}$ ， $L=150\text{kmol/h}$ ，解吸气量  $G'=300\text{kmol/h}$ ，组分浓度为： $y_b=0.015$ ， $y'_a=0.045$ ， $y'_b=0$ ， $x_b=0.095$ （均为摩尔分率），且知：吸收系统相平衡关系为  $y = 0.15x$ ，解吸系统相平衡关系为  $y = 0.6x$ 。

试求：

- (1) 吸收塔气体出口浓度  $y_a$ ，传质单元数  $N_{OG}$ ；
- (2) 解吸塔传质单元数  $N'_{OG}$ ；



## 解吸（脱吸）举例

(3) 若解吸气体流量减少为250kmol/h，则吸收塔气体出口浓度 $y_a$ 又为多少？（其余操作条件均不变，且气体流量变化时，解吸塔 $H'_{OG}$ 基本不变）

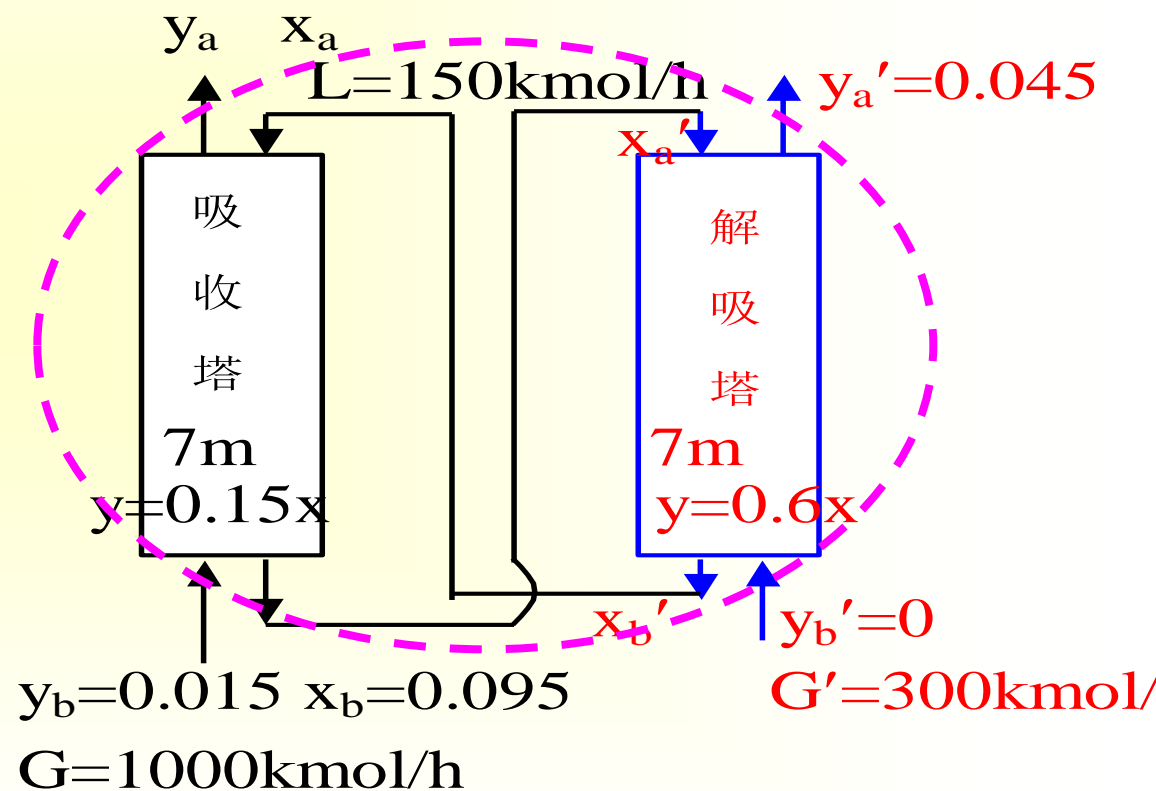
解：(1)

$$S = \frac{mG}{L} = \frac{0.15 \times 1000}{150} = 1$$

$$\therefore N_{OG} = \frac{y_b - y_a}{\Delta y_a} = \frac{y_b - y_a}{y_a - mx_a}$$

对整个流程（包括两塔）作物料衡算：

$$G(y_b - y_a) = G'(y'_a - y'_b)$$



## 解吸（脱吸）举例

$$\begin{aligned}\therefore y_a &= y_b - \frac{G'}{G}(y'_a - y'_b) \\ &= 0.015 - \frac{300}{1000}(0.045 - 0) \\ &= 0.0015\end{aligned}$$

对吸收塔：

$$\begin{aligned}x_a &= x_b - \frac{y_b - y_a}{L/G} \\ &= 0.095 - \frac{0.015 - 0.0015}{150/1000} \\ &= 0.005\end{aligned}$$

$$\therefore N_{\text{OG}} = \frac{y_b - y_a}{y_a - mx_a} = 18$$

## 解吸（脱吸）举例

(2)

$$A' = \frac{L}{m'G'} = \frac{150}{0.6 \times 300} = \frac{5}{6}$$

$$\begin{aligned} N'_{OL} &= \frac{1}{1-A'} \ln \left[ (1-A') \frac{x'_a - x_b^*}{x'_b - x_b^*} + A' \right] \\ &= \frac{1}{1-A'} \ln \left[ (1-A') \frac{x'_a}{x'_b} + A' \right] \\ &= \frac{1}{1-A'} \ln \left[ (1-A') \frac{x'_a}{x'_a - \frac{G'}{L} y'_b} + A' \right] \end{aligned}$$

## 解吸（脱吸）举例

$$N'_{OG} = \frac{A'}{1-A'} \ln \left[ (1-A') \frac{x'_a}{x'_a - \frac{G'}{L} y'_b} + A' \right] = 6.93$$

(3) 对整个流程（包括两塔）作物料衡算：

$$\begin{aligned} G(y_b - y_a) &= G'(y'_a - y'_b) \\ \therefore y_a &= y_b - \frac{G'}{G} (y'_a - y'_b) \end{aligned} \quad (1)$$

再对解吸塔作物料衡算得：

$$x_b = x_a + \frac{y'_a - y'_b}{L/G'} = x_a + 1.667 y'_a \quad (2)$$

## 解吸（脱吸）举例

解吸塔：因 $H'_{OG}$ 不变，故 $N'_{OG}$ 不变

$$S' = \frac{m'G'}{L'} = \frac{0.6 \times 250}{150} = 1$$

$$\therefore N'_{OG} = N'_{OL} = \frac{x'_a - x'_b}{x'_b - \frac{y'_b}{m}} = \frac{x'_a - x'_b}{x'_b} = \frac{x_b - x_a}{x_a} = 6.93$$

$$\longrightarrow x_b = 7.93x_a \quad (3)$$

吸收塔：

L、G不变，所以 $H_{OG}$ 不变， $S=1$ 不变， $N_{OG}$ 也不变，

$$N_{OG} = \frac{y_b - y_a}{y_a - mx_a} = 18$$



## 解吸（脱吸）举例

$$\longrightarrow \mathbf{19y_a = 0.015 + 2.7x_a} \quad (4)$$

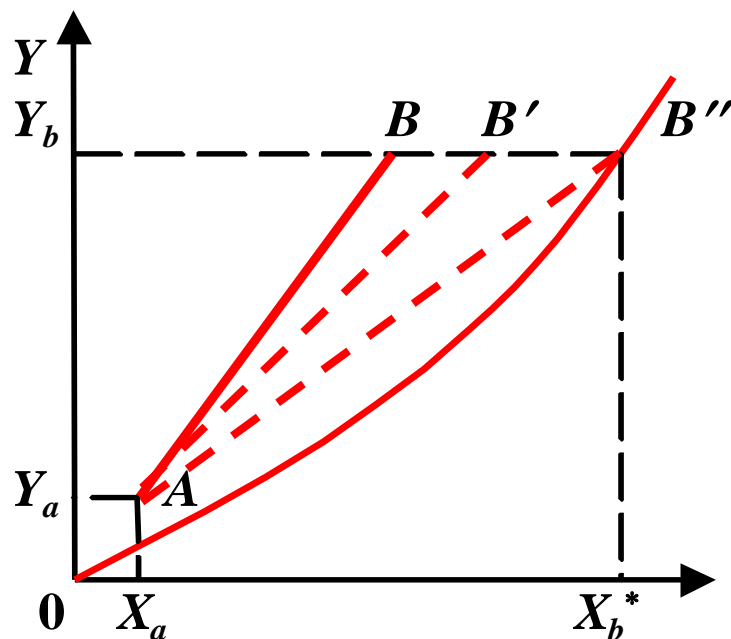
联立求解式 (1) ~ (4)

解得:  $y_a = 0.0025$        $y'_a = 0.05$

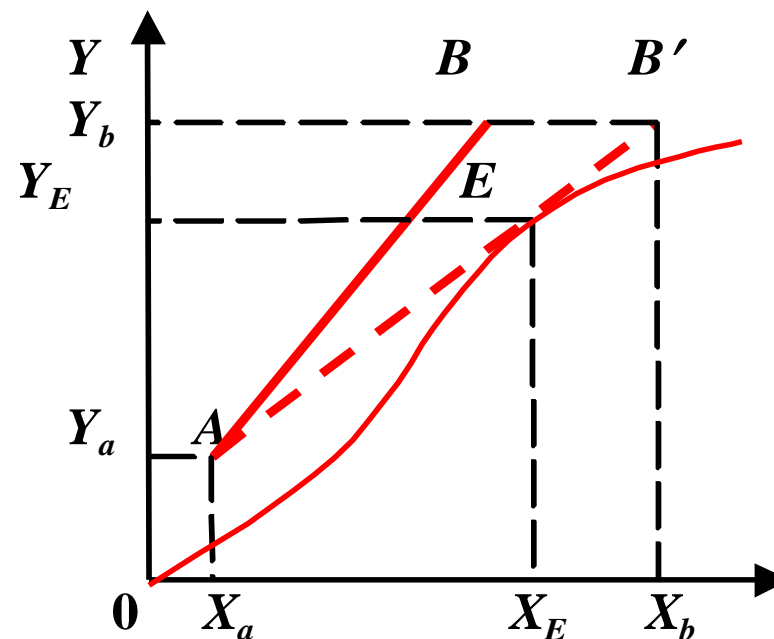
# 吸收最大回收率

最小液气比的计算:

$$\left( \frac{L_S}{G_B} \right)_{\min} = \frac{Y_b - Y_a}{X_b^* - X_a}$$



$$\left( \frac{L_S}{G_B} \right)_{\min} = \frac{Y_E - Y_a}{X_E - X_a}$$



前提:  $G_B$ 、 $Y_b$ 、 $Y_a$ 及 $X_a$ 不变

# 最大回收率

最小液气比只对设计型问题有意义。

回收率 $\eta$ 为: 
$$\eta = \frac{Y_b - Y_a}{Y_b} = 1 - \frac{Y_a}{Y_b} \approx 1 - \frac{y_a}{y_b}$$

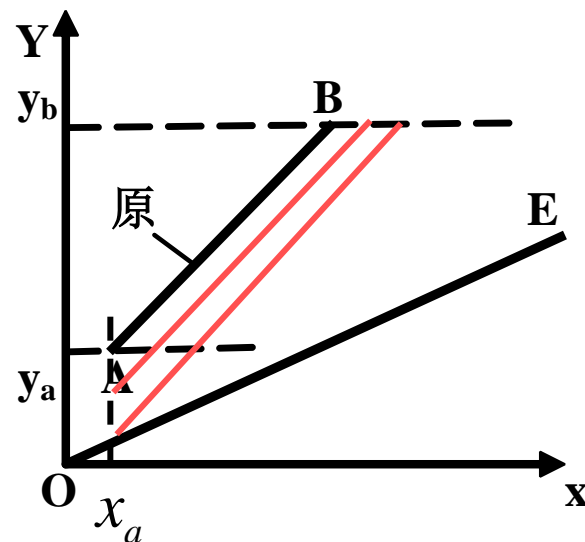
$Y_b$ 已知, 求最大回收率实际上求最小尾气组成 $Y_{amin}$

液气比一定, 增加填料层高度

若 $A > 1$ , 即  $L/G > m$

随着 $h_0$ 增加, 操作线平行  
下移, 直至与平衡线交于  
塔顶

$$y_{a \min} = mx_a$$



# 最大回收率

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{mx_a}{y_b}$$

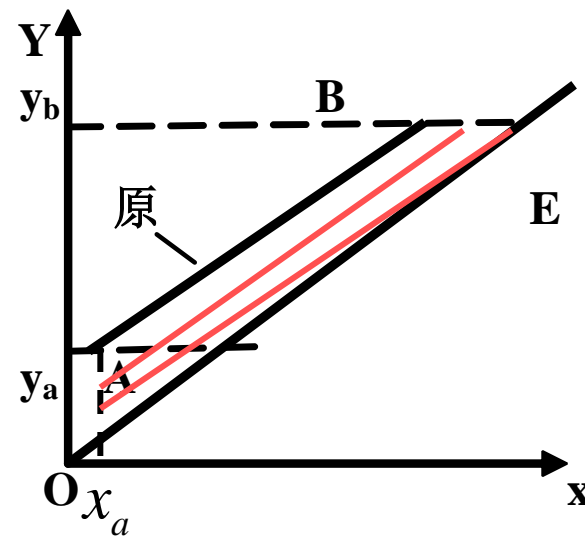
若用清水吸收,  $\eta_{\max} = 1$

若  $A < 1$ , 即  $L/G < m$

随着  $h_0$  增加, 操作线平行下移, 直至与平衡线交于塔底

$$x_{b\min} = \frac{y_b}{m}$$

$$\text{又} \quad \frac{L}{G} = \frac{y_b - y_{a\min}}{x_{b\max} - x_a}$$



# 最大回收率

∴

$$\begin{aligned}\eta_{\max} &= \frac{y_b - y_{a \min}}{y_b} = \frac{L}{G} \frac{x_{b \max} - x_a}{y_b} \\ &= \frac{L}{G} \frac{\frac{y_b}{m} - x_a}{y_b} = A - \frac{L}{G} \frac{x_a}{y_b}\end{aligned}$$

若用清水吸收,  $\eta_{\max} = A$

若  $A=1$ , 即  $L/G = m$

随着  $h_0$  增加, 操作线平行下移, 直至与平衡线重合

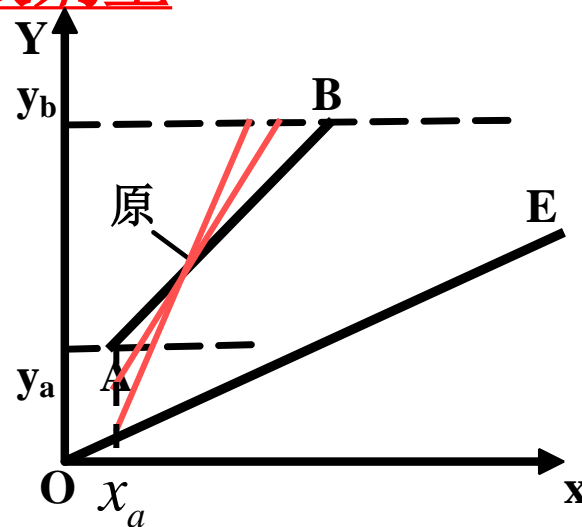
$$\eta_{\max} = 1 - \frac{mx_a}{y_b}$$

若用清水吸收,  $\eta_{\max} = 1$

# 最大回收率

填料层高度一定，增加吸收剂量

随着L增大，操作线斜率增大，但 $N_{OG}$ 不变，直至与平衡线交于塔顶



$$y_{a \min} = mx_a$$

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{mx_a}{y_b}$$

若用清水吸收， $\eta_{\max} = 1$

# 最大回收率

例：

1. 如果逆流气体吸收塔的填料层高度可无限增加，则当吸收因子 $A > 1$ 时，在塔 顶 端 气 相组成趋向极限组成  $mx_a$ ；当吸收因子 $A < 1$ 时，在塔 底 端 液 相组成趋向极限组成  $y_b/m$
2. 最大吸收率 $\eta_{\max}$ 与 D 无关

A 液气比

B 液体入塔浓度 $x_a$

C 相平衡常数

D 吸收塔型式