



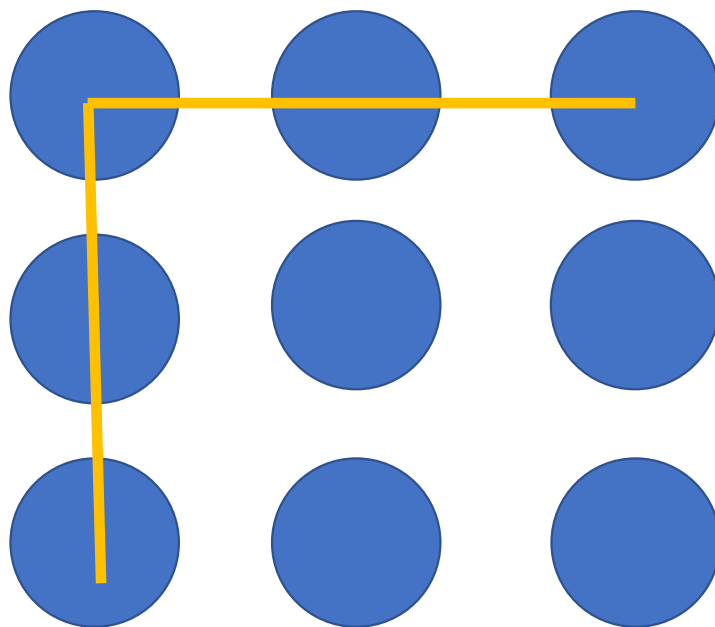
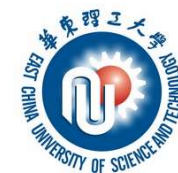
# 化工原理下

华东理工大学 化工学院

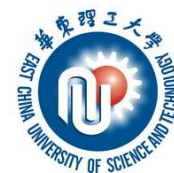
黄婕 教授



# 签到-超星平台



# 分组要求



教学班82人，分十个组，每组8人左右

微信群中告知分组结果，每次同学按照组别上台讲解

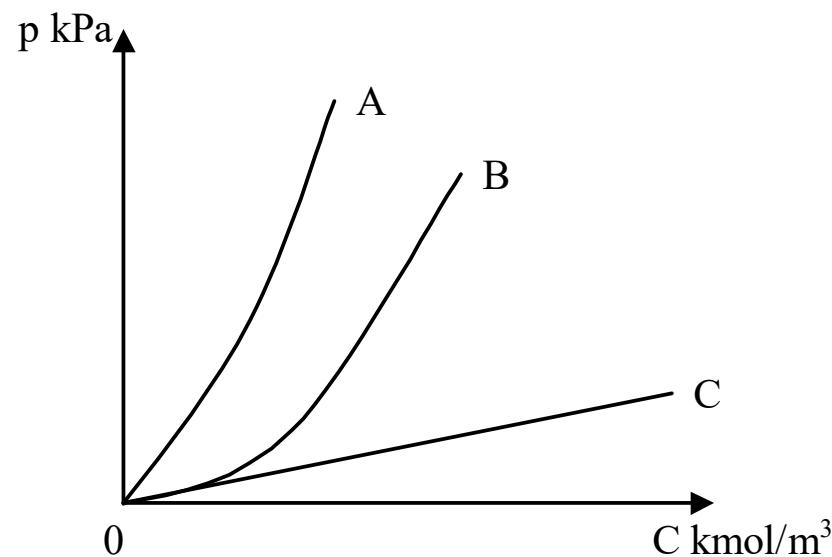
## 小练习答案

①  $\text{SO}_2$ 水溶液在三种温度 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 下的亨利系数分别为  
 $E_1 = 0.354\text{kPa}$ ,  $E_2 = 1.11\text{kPa}$ ,  $E_3 = 0.660\text{kPa}$ , 则\_\_\_\_\_

A)  $t_1 > t_2$ ; B)  $t_3 > t_2$ ; C)  $t_1 > t_3$ ; D)  $t_3 > t_1$  **D 温度高, E大**

② 如图所示为同一温度下A、B、C三种气体在水中的溶解度曲线。由图可知, 它们溶解度大小的次序是\_\_\_\_\_。

**C)  $C > B > A$**



③ 是非题

亨利定律的表达式之一为 $p = Ex$ ,若某气体在水中的亨利系数 $E$ 值很大,说明该气体为易溶气体。( 否 ) 还需要考虑 $m$

④ 对低浓度吸收物系, 若总压减少, 则 ( C )

A  $m$ 上升,  $H$ 上升

B  $m$ 不变,  $E$ 不变

C  $E$ 、 $H$ 均不变

D  $m$ 上升,  $E$ 上升

$$m = E/P$$

⑤ 当操作总压 $P$ 上升时, 吸收相平衡常数 $m$ 有何变化?

B, 溶解度 A

A) 增大, B) 减小, C) 不变

## 第三节 扩散与单相传质

物质传递的两种形式：**分子扩散和对流扩散**

### 单相传质的机理

(1) **分子扩散**：因分子的微观运动使该组分由高浓度处传递至低浓度处。

(2) **对流传质**：流体的宏观流动导致的物质传递。

## ● 分子扩散用什么方程描述

### 费克定律

恒温恒压下的一维定态扩散 (条件)

表达式和公式意义  $J_A = -D_{AB} \frac{dc_A}{dz}$

“-” 表示物质沿浓度降低方向传递。

$J_A$  —— 扩散速率,  $\text{kmol/m}^2 \cdot \text{s}$

$\frac{dc_A}{dz}$  —— 浓度梯度,  $\text{kmol/m}^4$

$D_{AB}$  —— 扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$

## ● 温度压力对扩散系数的影响

### ① 组分在气体中的扩散系数

$$D = D_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^{1.81} \left( \frac{p_0}{p} \right)$$

$T \uparrow, D \uparrow;$   
 $p \uparrow D \downarrow。$

### ② 组分在液体中的扩散系数

$$D = D_0 \frac{T}{T_0} \times \frac{\mu_0}{\mu}$$

$T \uparrow, D \uparrow; \mu \uparrow, D \downarrow$



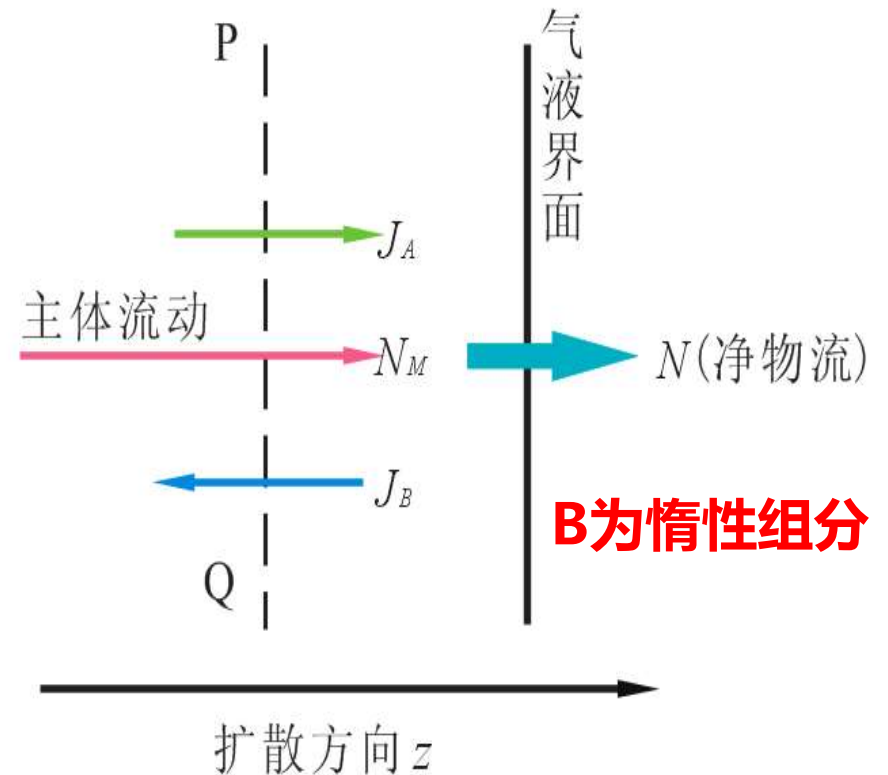
## ● 扩散流 $J$ 和主体流动 $N_M$

### 扩散流 $J$

分子微观运动，传递**纯 A 或纯 B**。

### 主体流动 $N_M$

宏观运动，**同时携带 A 与 B** 至界面。**组分 B** 又以分子扩散形式返回气相主体。数值上等于  $N$ （净物流）



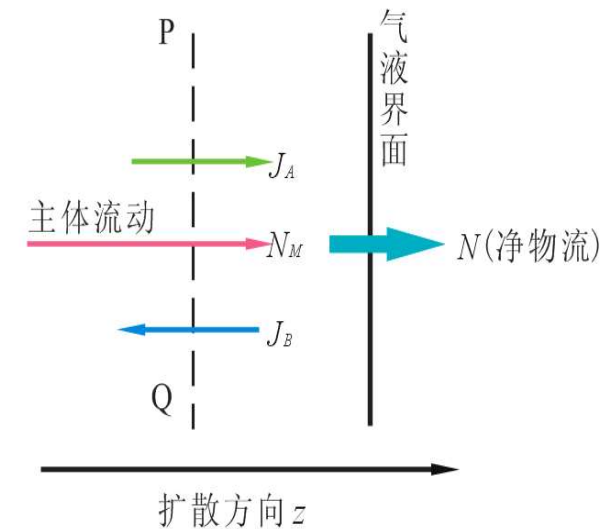
**主体流动是因分子扩散而引起的一种伴生流动**

# ● 分子扩散速率方程

## A分子的扩散速率方程（一般式）

$$N_A = J_A + N_M \frac{c_A}{c_M}$$

$$= J_A + N \frac{c_A}{c_M} = J_A + (N_A + N_B) \frac{c_A}{c_M}$$



(1) 等分子反向扩散  $N_A = \frac{D}{\delta} (c_{A1} - c_{A2})$   $N_A = -N_B$

(2) 单向扩散  $N_A = \frac{D}{\delta} \frac{c_M}{c_{BM}} (c_{A1} - c_{A2})$   $N_B = 0$

## ● 漂流因子

$$\frac{c_M}{c_{BM}} \text{ 或 } \frac{p}{p_{BM}}, \quad c_{BM} = \frac{c_{B2} - c_{B1}}{\ln \frac{c_{B2}}{c_{B1}}}, \quad p_{BM} = \frac{p_{B2} - p_{B1}}{\ln \frac{p_{B2}}{p_{B1}}}$$

**定义：单向扩散时因存在主体流动而使  $N_A$  为  $J_A$  的某一倍数。**

- ① 漂流因子恒大于 1。
- ② 当  $c_A$  很低,  $c_{BM} = c_M$  时漂流因子接近于 1。
- ③ 等分子反向扩散时, 漂流因子=1。

# ● 对流传质三个理论

## 1、有效膜理论      特点：表面静止

界面两侧膜**静止**，传质阻力在膜上；膜中传质为**定态**分子扩散。

## 2、溶质渗透理论      特点：表面更新周期性发生

间隔一定**时间**  $\tau_0$ ，发生一次完全混合；**非定态**的扩散。

## 3、表面更新理论      特点：表面更新随时进行

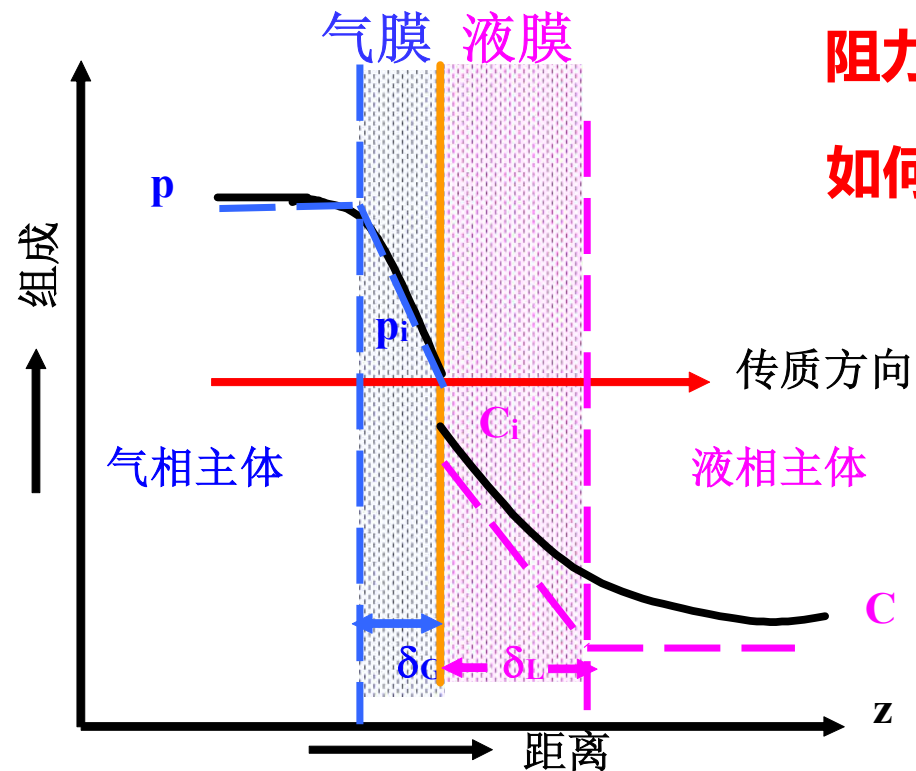
流体表面不断更新，过程强化。 **$S$** 为更新频率。

# ● 有效膜理论/双膜理论

## 双膜理论模型(另称)

(1) 相界面两侧流体的对流**传质阻力全部集中**在界面两侧的两个停滞膜内, 膜内传质方式为分子扩散。

(2) 相界面上没有传质阻力, 即可认为所需的传质推动力为零, 或气液两相在相界面处达到平衡。



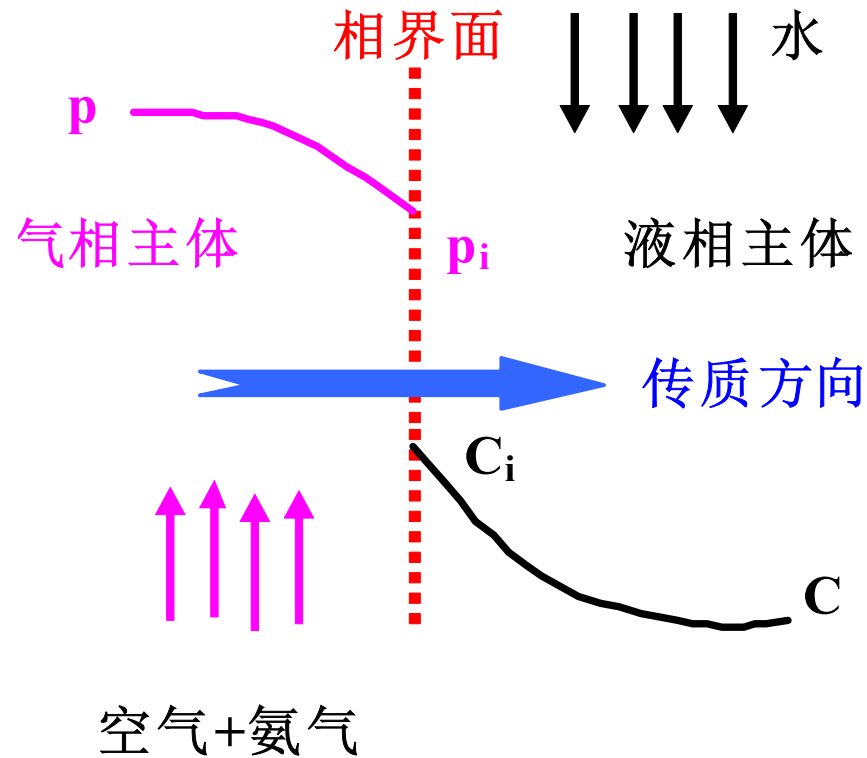
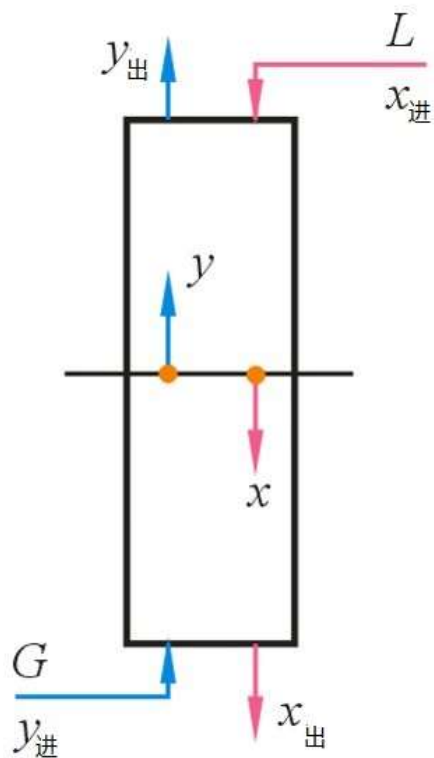
阻力在哪里?

如何减小阻力?

双膜模型

## 第四节 相际传质

### 对流传质过程



吸收

有效膜理论

$p, p_i$  —— A 的气相主体分压与界面处的分压,  $\text{kN/m}^2$ ;  
 $c_i, c$  —— A 的界面浓度与液相主体浓度,  $\text{kmol/m}^3$ 。

## 第四节 相际传质

### 相际物质传递的步骤

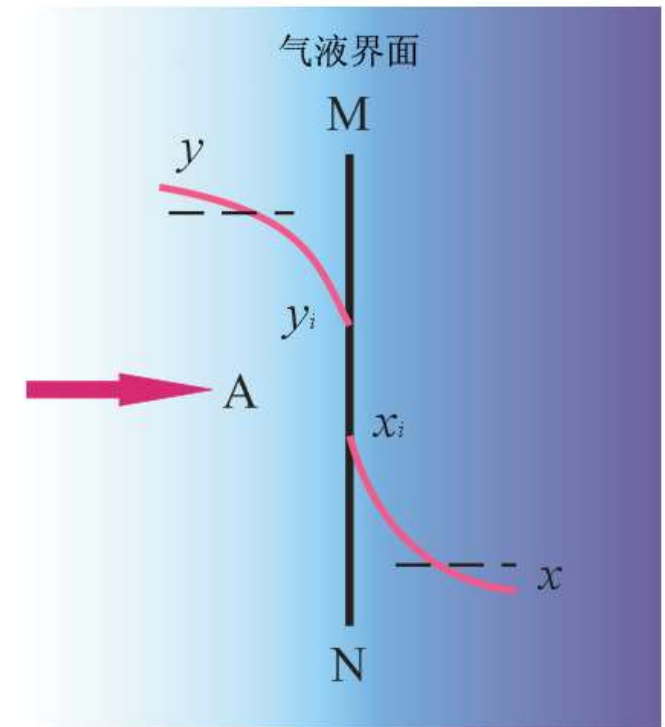
#### 三个串联步骤

- (1) 溶质由气相主体扩散至两相界面;
- (2) 溶质在界面上的溶解;
- (3) 溶质自界面扩散至液相主体。

### 总过程速率取决于

#### 单相传质速率

哪个速度最快?

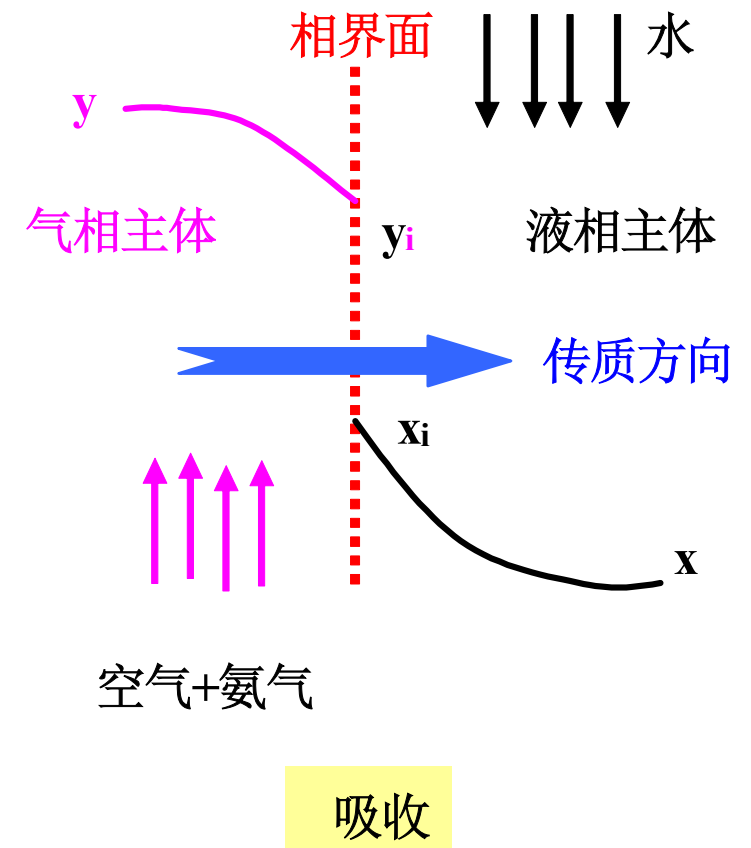


气液传质的步骤

## 第四节 相际传质

### 问题-1 三个串联过程用公式表示

请同学上台讲解





## 第四节 相际传质

### 问题-1 三个串联过程用公式表示

**气相**传质速率  $N_A = k_y(y - y_i)$

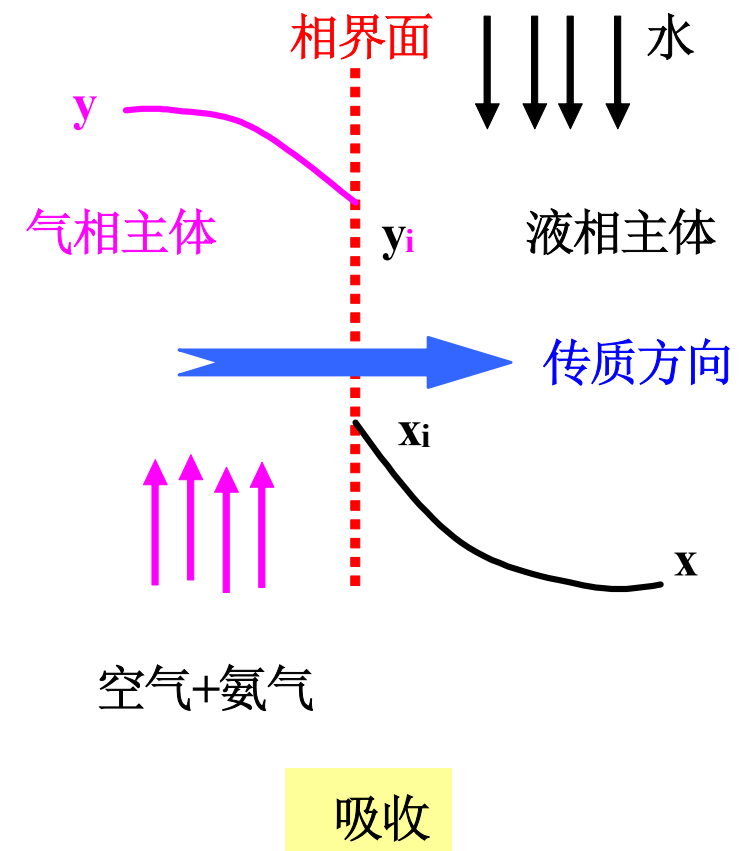
**界面**上气液两相服从相平衡方程  $y_i = f(x_i)$

对稀溶液，物系服从亨利定律  $y_i = mx_i$

**液相**传质速率  $N_A = k_x(x_i - x)$

**定态传质  
速率方程**

$$N_A = k_y(y - y_i) = k_x(x_i - x)$$



## 第四节 相际传质

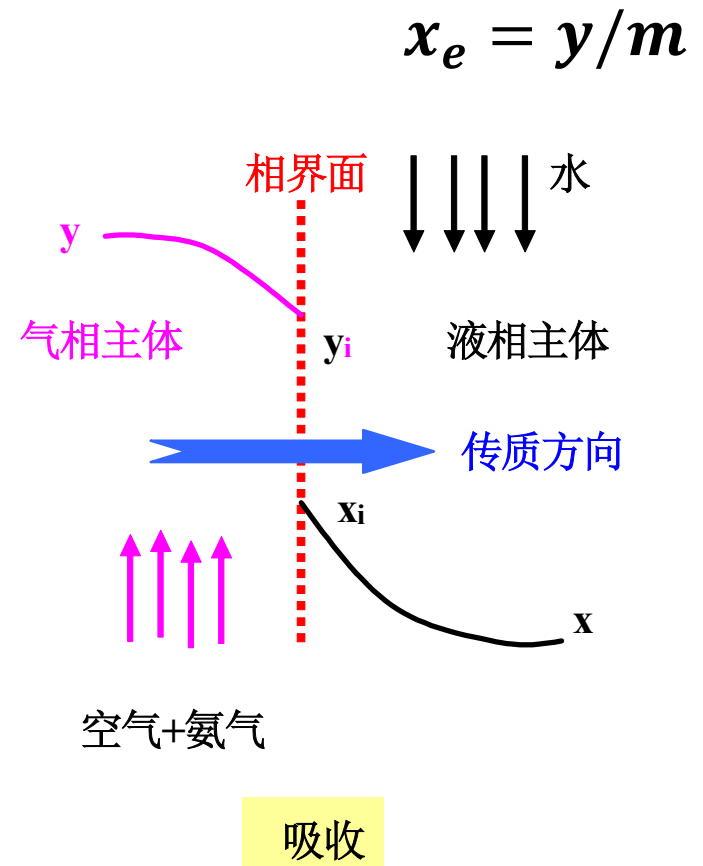
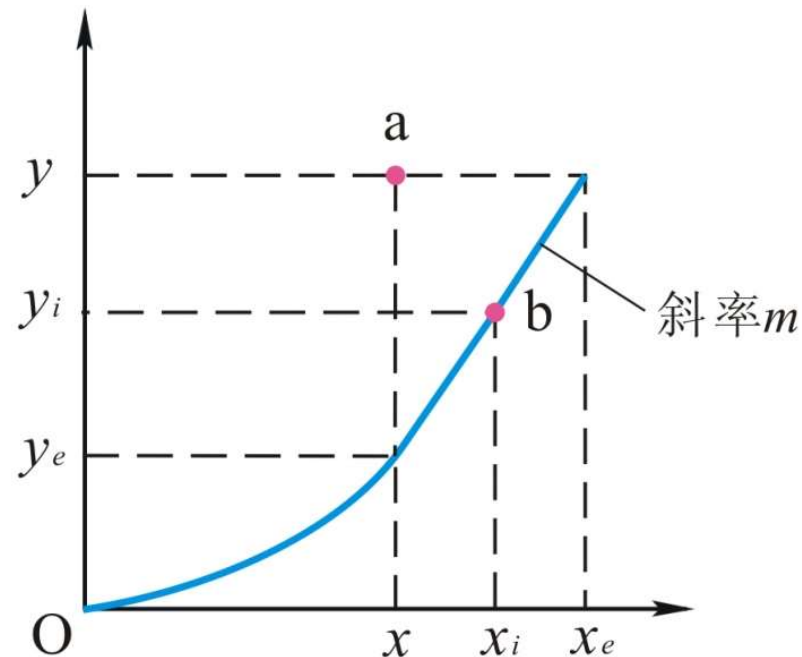
### 问题2-辨析下列公式——含义和关系

$$N_A = k_y(y - y_i)$$

$$N_A = K_y(y - y_e)$$

$$N_A = k_x(x_i - x)$$

$$N_A = K_x(x_e - x)$$



## 第四节 相际传质

### 问题2-辨析下列公式——含义和关系

$$N_A = k_y(y - y_i)$$

以  $(y - y_i)$  为推动力的气相吸收速率方程,  $k_y$  为气相分传质系数

$$N_A = K_y(y - y_e)$$

以  $(y - y_e)$  为推动力的气相吸收速率方程,  $K_y$  为气相总传质系数

$$N_A = k_x(x_i - x)$$

以  $(x_i - x)$  为推动力的液相吸收速率方程,  $k_x$  为液相分传质系数

$$N_A = K_x(x_e - x)$$

以  $(x_e - x)$  为推动力的液相吸收速率方程,  $K_x$  为液相总传质系数

它们相等吗?

定态下相等

## 第四节 相际传质

**问题3-吸收、解吸速率方程如何表达， $K_x$ 和 $K_y$ 关系如何？**

**吸收速率方程**

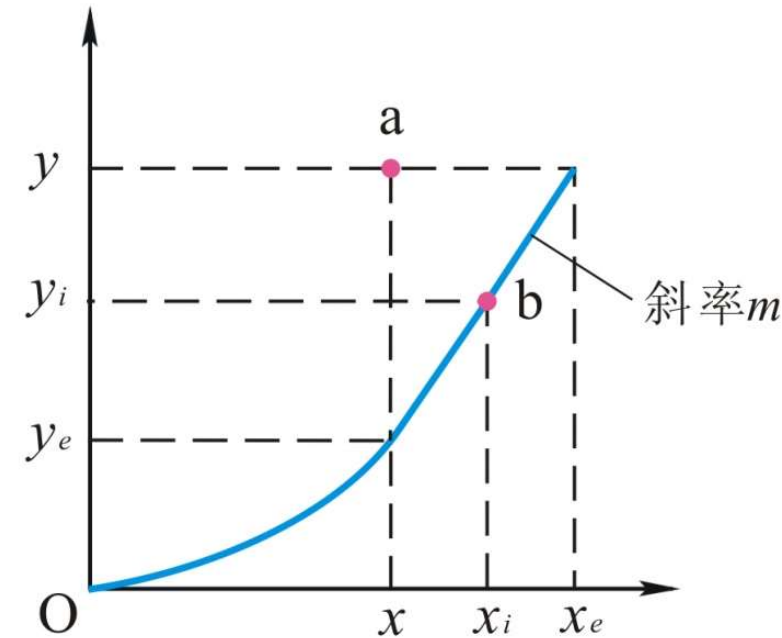
$$N_A = K_y(y - y_e) \quad N_A = K_x(x_e - x)$$

$$K_y = \frac{1}{\frac{1}{k_y} + \frac{m}{k_x}}$$

$$K_x = \frac{1}{\frac{1}{k_y m} + \frac{1}{k_x}}$$

$$mK_y = K_x$$

**推导看视频**



## 第四节 相际传质

**问题3-吸收、解吸速率方程如何表达， $K_x$ 和 $K_y$ 关系如何？**

**解吸速率方程**

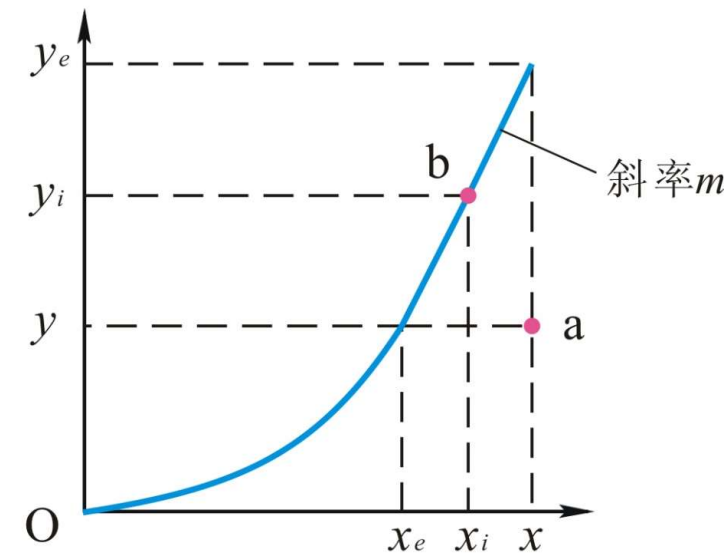
**推导看视频**

$$N_A = K_x(x - x_e) \quad N_A = K_y(y_e - y)$$

$$K_y = \frac{1}{\frac{1}{k_y} + \frac{m}{k_x}}$$

$$K_x = \frac{1}{\frac{1}{k_y m} + \frac{1}{k_x}}$$

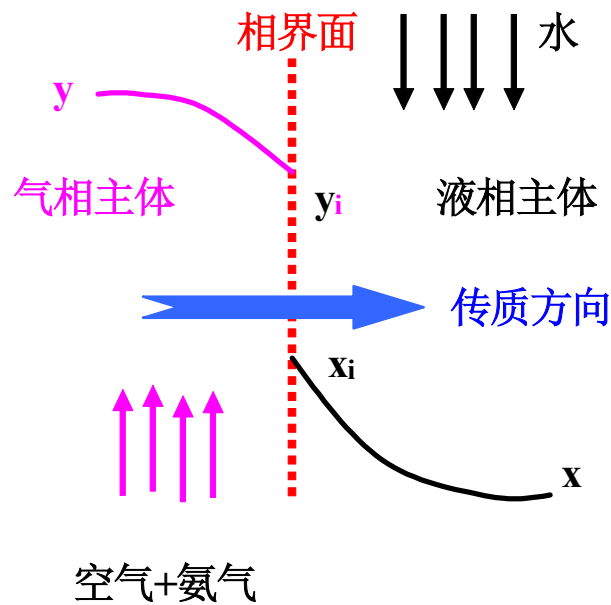
$$mK_y = K_x$$



b. 解吸

## 第四节 相际传质

### 问题-4 界面浓度的求取



#### (1) 解析法

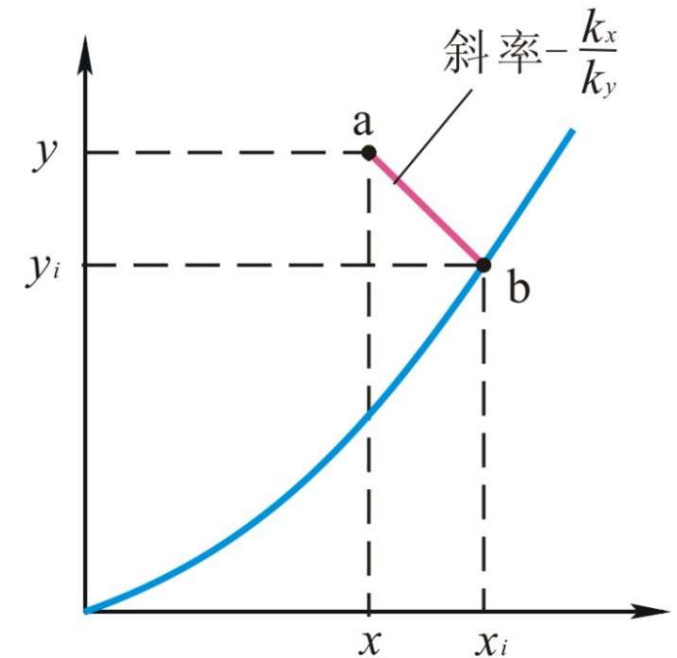
$$N_A = k_y(y - y_i) = k_x(x_i - x)$$

$$y_i = mx_i$$

$$\frac{y - y_i}{x_i - x} = \frac{k_x}{k_y}$$

$$\frac{y - y_i}{x - x_i} = -\frac{k_x}{k_y}$$

#### (2) 图解法



## 第四节 相际传质

### 判断题

在吸收塔某处，气相主体浓度 $y = 0.025$ ，液相主体浓度 $x = 0.01$ ，气相传质分系数 $k_y = 2 \text{ kmol.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ ，气相总传质系数 $K_y = 1.5 \text{ kmol.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ ，则该处气液界面上气相浓度 $y_i$ 应为\_\_\_\_\_，平衡关系 $y = 0.5x$

A. 0.02    B. 0.01    C. 0.015    D. 0.005

$$y_e = 0.5 \times 0.01 = 0.005$$

$$N_A = K_y (y - y_e) = k_y (y - y_i) \quad 1.5 (0.025 - 0.005) = 2 (0.025 - y_i)$$

$$\therefore y_i = 0.01 \text{ 选B}$$

## 第四节 相际传质

### \*问题-5 推动力和阻力

$$N_A = K_y(y - y_e) \quad \text{速率} = \text{推动力} / \text{阻力}$$

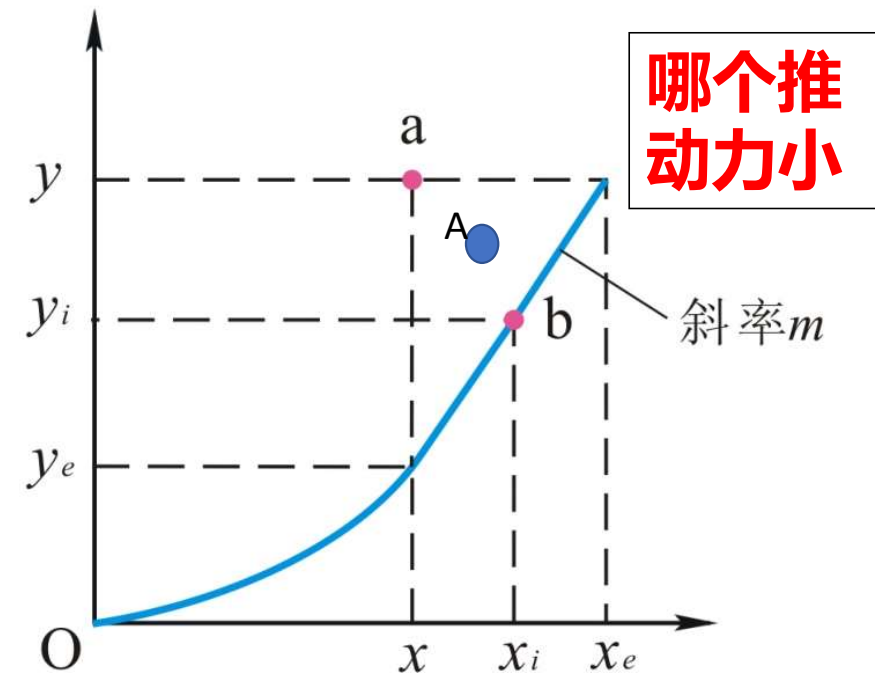
$$N_A = \frac{y - y_e}{\frac{1}{k_y} + \frac{m}{k_x}} = \frac{\text{推动力}}{\text{阻力}}$$

$$\text{总推动力} \quad \Delta y = y - y_e$$

$$\text{总阻力} \quad \frac{1}{K_y} = \frac{1}{k_y} + \frac{m}{k_x}$$

推动力大,  
阻力大

操作点 A 离平衡线越近,  
则总推动力就越小





## 第四节 相际传质

### \*问题-6 气相阻力控制条件

$$N_A = K_y(y - y_e)$$

$$N_A = k_y(y - y_i)$$

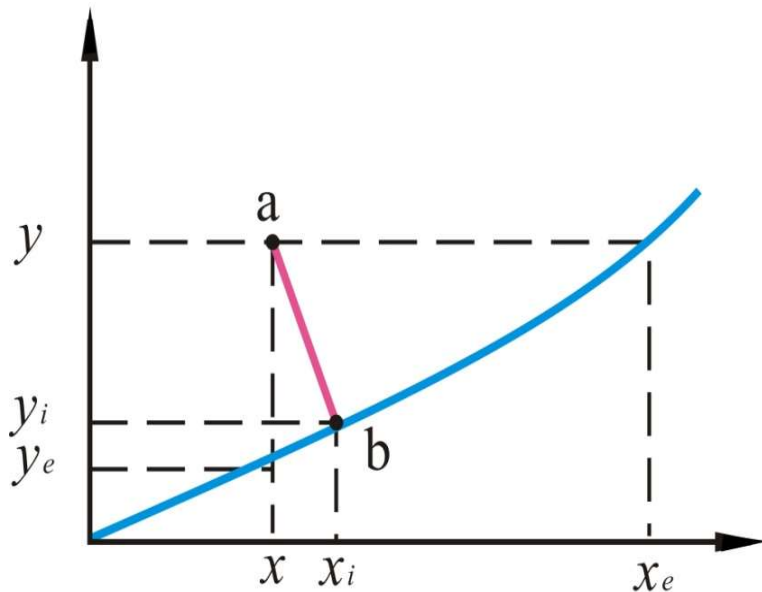
$$\frac{1}{K_y} = \frac{1}{k_y} + \frac{m}{k_x}$$

$$K_y \approx k_y$$

$$1、k_y \ll k_x \text{ 或 } \left| \frac{k_x}{k_y} \right| \gg 1$$

2、 $m$ 小（溶解度很大）；

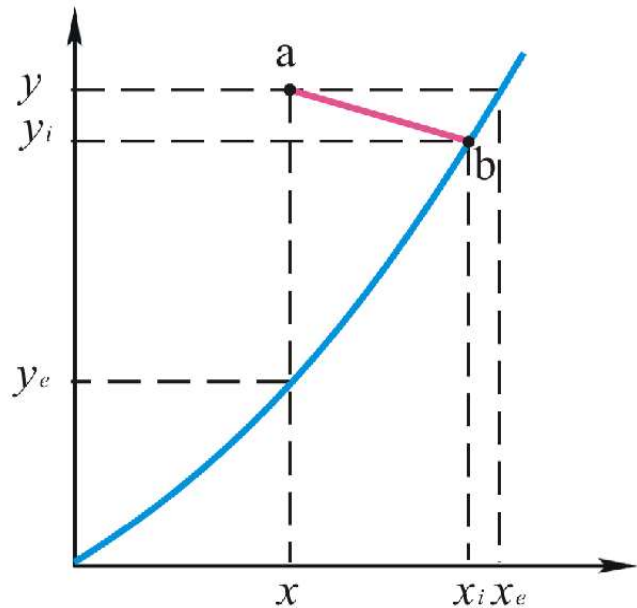
例子：易溶气体：水吸收 $\text{NH}_3$ ， $\text{HCl}$ 。



气相分传质推动力  
 $\geq$ 液相分传质推动力  
 $y - y_i \approx y - y_e$

## 第四节 相际传质

### \*问题7- 液相阻力控制条件



液相分传质推动力  
 $\geq$  气相分传质推动力  
 $x_i - x \approx x_e - x$

$$N_A = K_x (x_e - x)$$

$$N_A = k_x (x_i - x)$$

$$\frac{1}{K_x} = \frac{1}{k_y \cdot m} + \frac{1}{k_x}$$

$$K_x \approx k_x$$

$$1、 k_y \gg k_x \text{ 或 } \left| \frac{k_x}{k_y} \right| \ll 1$$

2、  $m$  很大（溶解度很小）；

例子：难溶气体，水吸收  $\text{CO}_2$ ， $\text{O}_2$  等。

## 第四节 相际传质

### 总结

- ✓ 易溶气体溶解度大，其吸收过程通常为**气相**阻力控制。
- ✓ 难溶气体溶解度小，其吸收过程通常为**液相**阻力控制。

## 第四节 相际传质

### 判断题

对某吸收系统，如果 $1/k_y \gg 1/k_x$ ，则为气膜控制；  
 $1/k_y \ll 1/k_x$ ，则为液膜控制。此说法是\_\_\_\_\_的。

(正确/错误)

**错,没有考虑 $m$ 的影响**

## 第四节 相际传质

### 讨论

1、用气相浓度 $\Delta y$ 为推动力的传质速率方程有两种，以传质分系数表达的速率方程为\_\_\_\_①\_\_\_\_，以传质总系数表达的速率方程为\_\_\_\_③\_\_\_\_。

$$N_A = k_y(y - y_i)$$

①

$$N_A = k_x(x_i - x)$$

②

$$N_A = K_y(y - y_e)$$

③

$$N_A = K_x(x_e - x)$$

④

2、由双膜论可知吸收速度取决于\_\_\_\_，因此，要提高气-液两流体相对运动速率，可以\_\_\_\_来增大吸收速率。

双膜的扩散速率

减少气膜、液膜厚度

## 第四节 相际传质

3、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{HCl}$ 等易溶气体的吸收过程通常为\_\_\_\_控制； $\text{O}_2$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{H}_2$ 等难溶气体的吸收过程通常为\_\_\_\_控制。当液相阻力控制时， $K_y \approx$  (与 $k_x$ 关系)

气相阻力    液相阻力     $K_y \approx 1/m * \underline{k_x}$     液相  $K_x \approx k_x$ ,  $mK_y = K_x$

4、 $k_y a = 2 \times 10^{-4} \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{s}$ ,  $k_x a = 2 \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{s}$ ,  $m = 1$ 。则该过程为\_\_\_\_膜阻力控制。气膜阻力占总阻力的百分数为\_\_\_\_, 该气体为\_\_\_\_溶气体。举例\_\_\_\_吸收属于上述过程。

气膜, 100%, 易, 氨 ( $\text{HCl}$ ) 溶于水

## 第四节 相际传质



### 相际传质 小练习

时间：8min



## 第五节低浓度气体吸收

### 问题8- 低含量气体吸收的特点

- (1)  $G, L$  为常量
- (2) 过程等温
- (3) 传质系数为常量

$G$  ——混合气体流率,  $\text{kmol/m}^3\text{s}$   
 $L$  ——液体流率,  $\text{kmol/m}^3\text{s}$

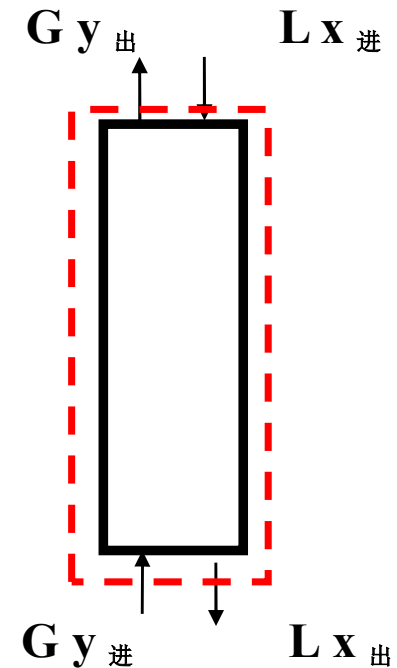
### 全塔物料衡算

$$G (y_{\text{进}} - y_{\text{出}}) = L (x_{\text{出}} - x_{\text{进}})$$

### 定义回收率 $\eta$

$$\eta = \frac{y_{\text{进}} - y_{\text{出}}}{y_{\text{进}}} = 1 - \frac{y_{\text{出}}}{y_{\text{进}}}$$

$$y_{\text{出}} = (1 - \eta) y_{\text{进}}$$

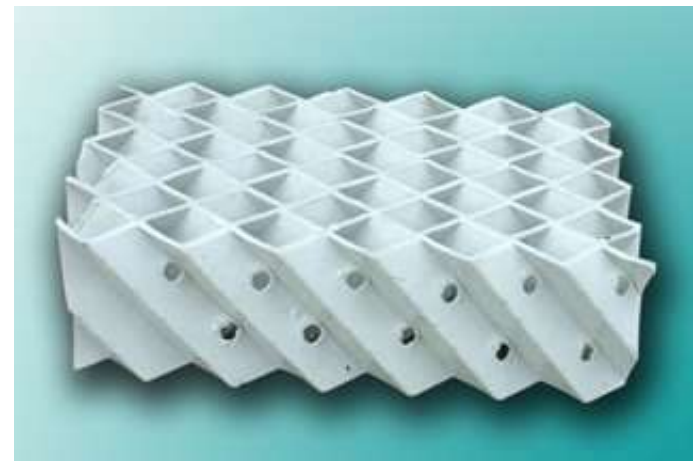
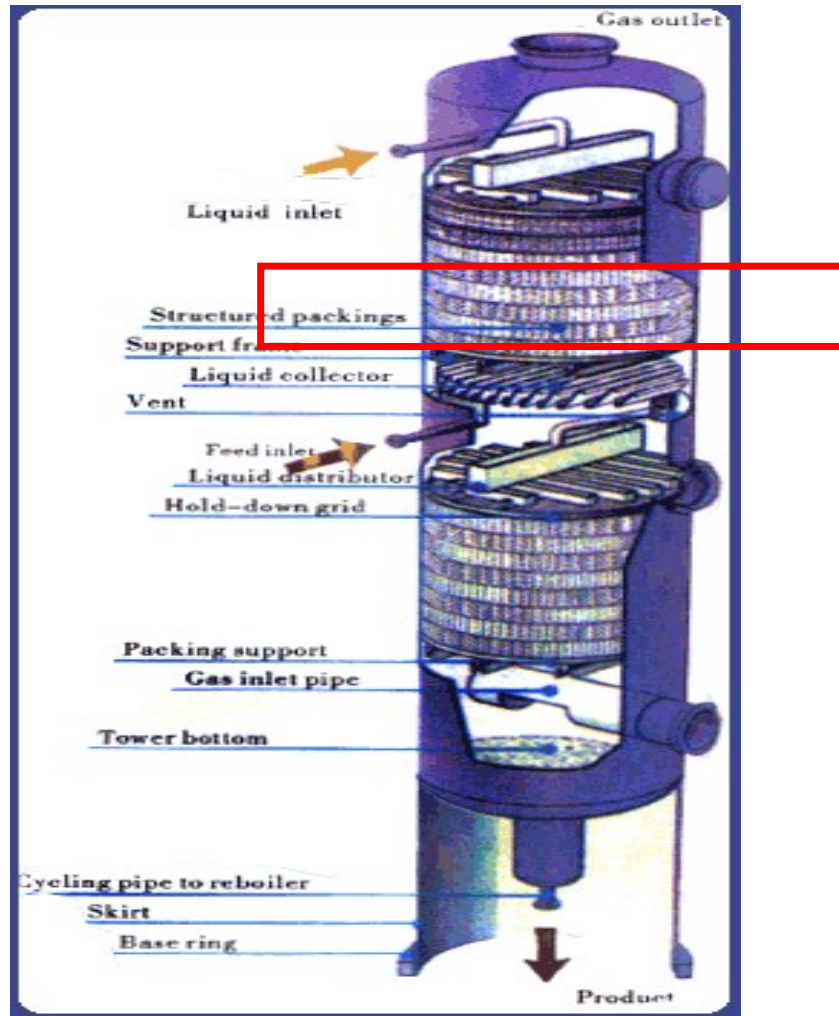


逆流吸收塔的物料衡算



## 塔如何计算？

### 填料塔



## 第五节低浓度气体吸收

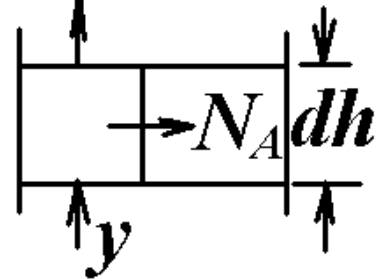
### 问题-9 物料衡算微分式

塔截面积  $A$  ( $=\frac{\pi}{4}D^2$ )

单位体积内的有效吸收表面  $a$   $\text{m}^2/\text{m}^3$

微元段  $dh$ , 则有效传质面积为  $aA dh$

传质量为  $N_A a A dh$

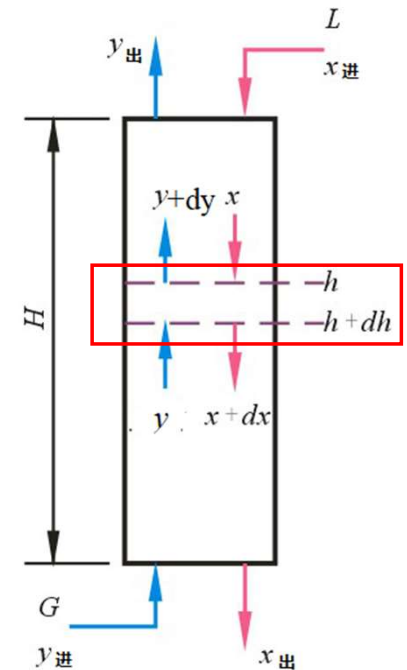


定态条件下:  $\Sigma \text{进} = \Sigma \text{出}$

$$GAy = GA(y+dy) + N_A a A dh$$

物料衡算微分式得  $-Gdy = N_A a dh$

同理, 液相有  $Ldx = N_A a dh$   $-Gdy = Ldx$



$$N_A = K_y (y - y_e)$$

## 第五节低浓度气体吸收

### 问题-10 如何求塔高?

传质速率积分式

$$N_A = K_x (x_e - x)$$

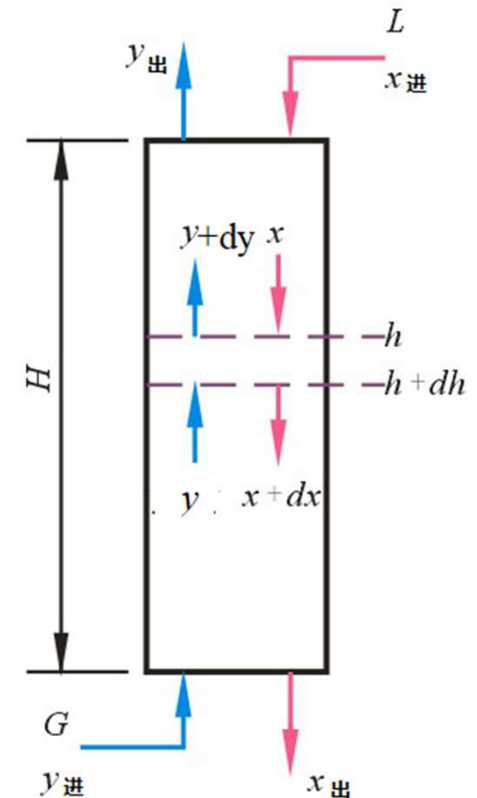
$$N_A = K_y (y - y_e)$$

$$G dy = \underline{N_A} a dh = \underline{K_y a} (y - y_e) dh$$

$$L dx = \underline{N_A} a dh = \underline{K_x a} (x_e - x) dh$$

$$H = \int_0^h dh = \frac{G}{K_y a} \int_{y_{\text{出}}}^{y_{\text{进}}} \frac{dy}{y - y_e}$$

$$H = \int_0^h dh = \frac{L}{K_x a} \int_{x_{\text{进}}}^{x_{\text{出}}} \frac{dx}{x_e - x}$$



引出塔高计算

## 第五节低浓度气体吸收

### 问题-11 为何分传质单元数与传质单元高度?

$$H = \frac{G}{K_y a} \int_{y_{\text{出}}}^{y_{\text{进}}} \frac{dy}{y - y_e}$$

分离变量

$$\text{令 } H_{OG} = \frac{G}{K_y a} \quad N_{OG} = \int_{y_{\text{出}}}^{y_{\text{进}}} \frac{dy}{y - y_e}$$

$$\therefore H = H_{OG} \times N_{OG}$$

$$H = \frac{L}{K_x a} \int_{x_{\text{进}}}^{x_{\text{出}}} \frac{dx}{x_e - x}$$

$$\text{令 } H_{OL} = \frac{L}{K_x a} \quad N_{OL} = \int_{x_{\text{进}}}^{x_{\text{出}}} \frac{dx}{x_e - x}$$

$$\therefore H = H_{OL} \times N_{OL}$$

## 第五节低浓度气体吸收

### ① 传质单元数

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

$$N_{OG} = \int_{y_{\text{出}}}^{y_{\text{进}}} \frac{dy}{y - y_e} \quad N_{OL} = \int_{x_{\text{进}}}^{x_{\text{出}}} \frac{dx}{x_e - x}$$

传质单元数 $N_{OG}$ 、 $N_{OL}$ 与相平衡及塔的进出口浓度条件有关，反映了分离任务的难易。

若 $N_{OG}$ 、 $N_{OL}$ 太大，  
则表明吸收剂性能差，或者分离要求太高。

## 第五节低浓度气体吸收

### ② 传质单元高度

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

$$H_{OG} = \frac{G}{K_y a}, \quad H_{OL} = \frac{L}{K_x a}$$

传质单元高度为完成一个传质单元所需的塔高，与设备形式、操作条件有关，反映设备性能高低。

常用吸收设备的 $H_{OG}$ 约为0.15~1.5m

$$K_y a (K_x a) \propto G^m L^n \quad 0 \leq m \leq 1, \quad 0 \leq n \leq 1$$

## 第五节低浓度气体吸收

### 判断题

1、对一定操作条件下的填料吸收塔，如将填料层增高些，则塔的 $H_{OG}$ 将不变。（对/错）

1、对

2、对一定操作条件下的填料吸收塔，如将填料层增高些，则塔的 $N_{OG}$ 将不变。（对/错）

2、错

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

## 第五节低浓度气体吸收

### 讨论

已知 $K_y a \propto G^{0.7}$ , 当 $G$ 和 $L$ 分别增大一倍时,  $K_y a$ 和 $H_{OG}$ 的变化情况。

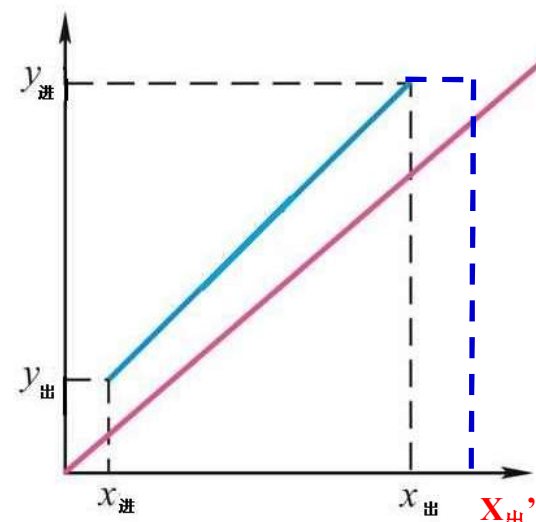
已知 $K_y a \propto G^{0.7}$ , 当 $L$ 增大一倍时, 讨论 $K_x a$ 和 $H_{OL}$ 的变化情况。





## 第五节低浓度气体吸收

含低浓度溶质的气体在逆流吸收塔中进行吸收操作，若其它操作条件不变，而入口气体量增加，则对于气膜控制系统， $N_{OG}$ 、出口气体组成 $y_{出}$ 将\_\_\_\_\_（增大，减小，不变，不确定）



**1、传质单元数 $N_{OG}$ 的求解方法是什么？**

**2、什么是设计型问题？解决问题的基本方程式是哪些？设计型计算是如何命题的？**

**3、设计型可以选择什么内容？详细说明如何选？**

**4、进口的吸收剂浓度最高和最低可分别到达多少？如何求？**

**5、吸收过程中的液气比 $L/G$ （或者吸收剂用量 $L$ ）是如何定的？**

**6、什么是返混？既然塔内返混降低推动力，对吸收不利，为何工业上会有吸收剂循环？**