

### 第三节 扩散和单相传质

吸收过程涉及到两相间的物质传递。其物质传递的步骤：

- ①可溶组分由气相主体传递到两相界面，即气相内的物质传递；
- ②溶质在相界面上的溶解，由气相传入液相，即界面上的溶解；
- ③溶质自界面被传递至液相主体，即物质在液相内的传递。

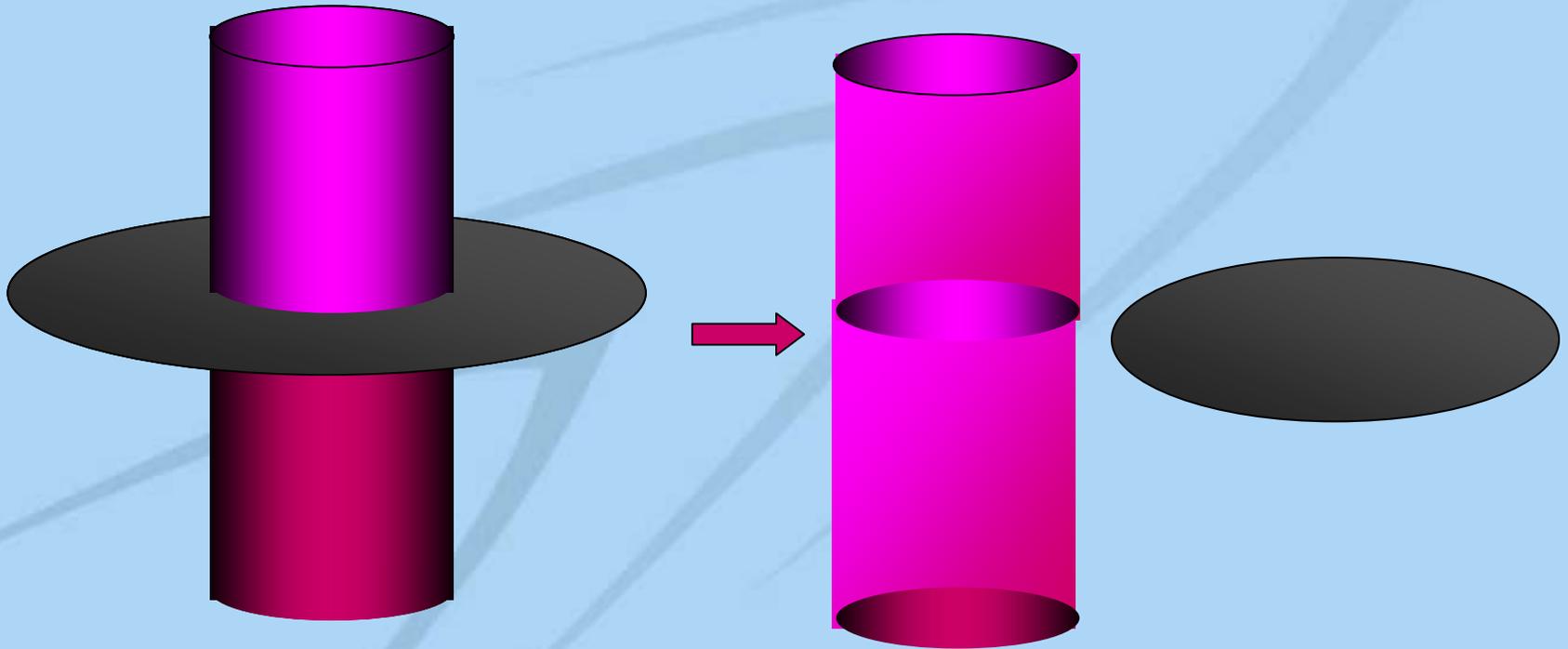
一般来说，溶质的界面溶解速度比其相内传递速度快得多。总的过程速率决定于溶质在气液两个单相内的传质速率。

## 传质的方式:

(1)、分子扩散—在静止或滞流流体内部，若某一组分存在浓度差，则因分子无规则的热运动使该组分由浓度较高处传递至浓度较低处，这种现象称为分子扩散。

(2)、对流传质—气（液）相流体的宏观流动造成的溶质分子的相内传递。（对流传质）

分子扩散现象：



## 一、双组分混合物中的分子扩散

双组分 A(被吸收)+B(惰性组分) 也称单组分吸收

### 1、费克定律

**扩散通量**：单位时间内通过垂直于扩散方向的单位截面积扩散的物质质量， $J$ 表示 $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

**费克定律**：温度、总压一定，组分A在扩散方向上任一点处的扩散通量与该处A的浓度梯度成正比。

$$J_A = -D_{AB} \frac{dc_A}{dz}$$

式中  $C_A$ ——A组分的浓度 $\text{kmol}/\text{m}^3$

$J_A$ ——组分A的扩散通量。亦叫扩散速率 $\text{kmol}/\text{s} \cdot \text{m}^2$

$D_{AB}$ ——组分A在组分B中的扩散系数 $\text{m}^2/\text{s}$

负号：表示扩散方向与浓度梯度方向相反；扩散沿着浓度降低的方向进行

理想气体 
$$c_A = \frac{p_A}{RT}$$

$$\frac{dc_A}{dz} = \frac{1}{RT} \frac{dp_A}{dz}$$

$$J_A = -\frac{D_{AB}}{RT} \frac{dp_A}{dz}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{动量传递: } \tau = -\mu \frac{du}{dy} \dots\dots\dots \mu \\ \text{热量传递: } \dots\dots\dots q = -\lambda \frac{dT}{dn} \dots\dots\dots \lambda \end{array} \right\} \text{物性参数,}$$

$D_{AB}$ 也是物性参数,  $D_{AB}$ 要有实验测定。

讨论问题的前提: ①双组分、②定态、③总压或总浓度定值, 温度一定。

$$C_M = C_A + C_B = \text{常数(但并不意味 } C_A、C_B \text{ 为定值)}$$

$$\frac{dC_A}{dz} + \frac{dC_B}{dz} = 0$$

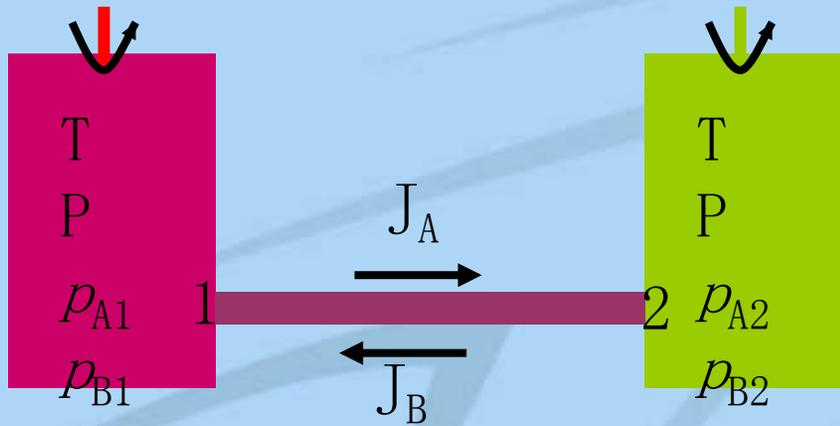
对双组分混合物

$$D_{AB} = D_{BA}$$

$$J_A = -J_B$$

## 2、分子扩散与主体流动

### ① 等分子反向扩散



气相内各处总压相等，即， $C_M = C_A + C_B = \text{常数}$   
因为气相主体与界面间存在浓度差，所以组分A将以 $J_A$ 的速率由气相主体向界面扩散。由于是定态过程，界面处没有总物质的积累，也就是说组分A必在界面上以同样的速率溶解并传递到液相中去，所以液相A组分浓度升高，而 $C_M$ 不变，所以 $C_B$ 必下降。组分B将以同样的速率 $J_B$ 由界面向气相主体扩散，则通过气层任一截面PQ仅存在着两个扩散流 $J_A$ 和 $J_B$ ，即 $J_A = -J_B$ 或 $J_A + J_B = 0$ 。

**结论：**扩散方向上没有流体的宏观流动，通过断面PQ的净物质质量为零，这种现象称为等分子反向扩散→下章的精馏。

## ②单向扩散

实际过程严格的等分子反向扩散是不多见的，比如在气体吸收中，液相中不存在组分B，不可能向界面提供组分B，因此吸收过程所发生的是组分A的单向扩散，而不是等分子反向扩散。

对吸收过程： $C_A$ 扩散到相界面上被溶解吸收到液相中去，组分B被滞留在相界面上，则B的浓度 $C_{Bi} > C_A$ 。

$\therefore$  B反向扩散，在界面上A溶解，B扩散。 $\therefore C_{mi}$ 下降，

即界面上气体总压降低，由于  $P_{\text{主}} - P_{Mi} = \Delta P$

的存在，必定使混合气体向界面流动，这种流动为主体流动。

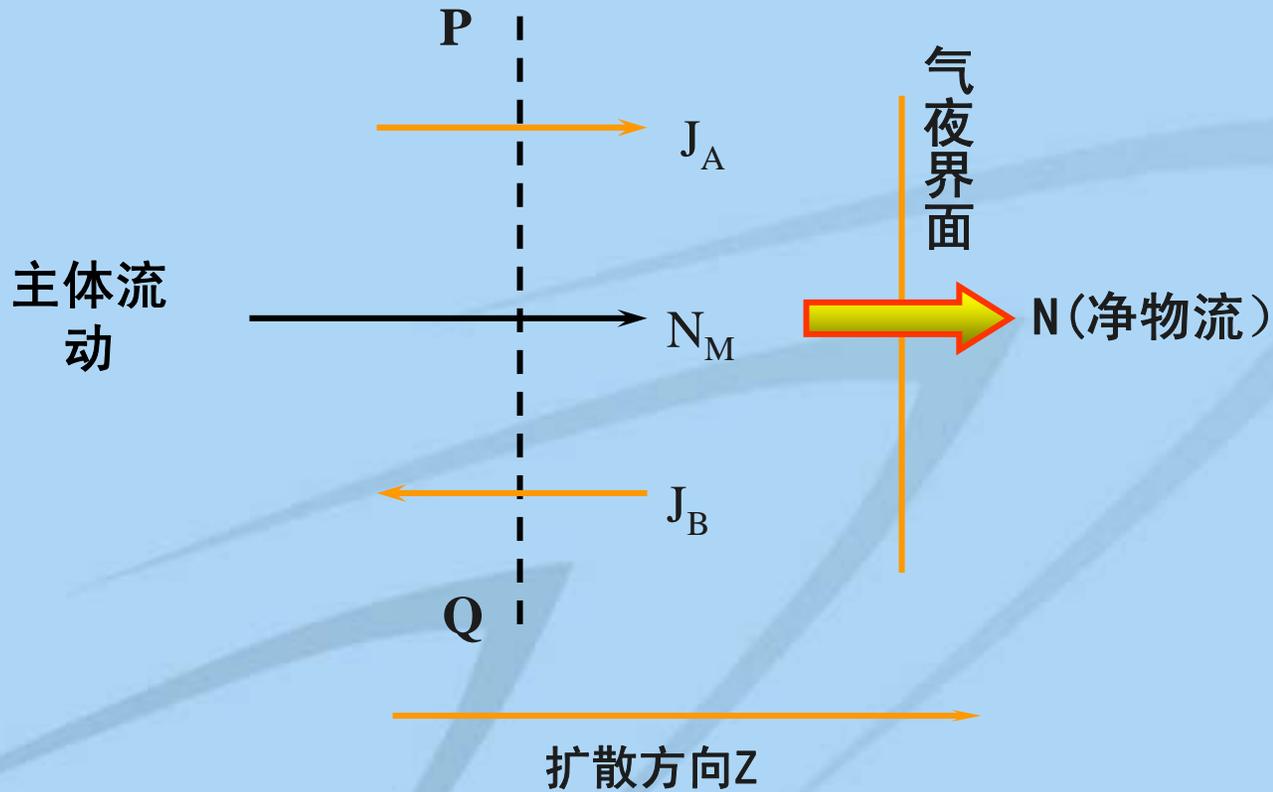


图 8-10 主体流动与扩散流

### ③ 扩散流与主体流动的区别

**扩散流**：分子微观运动的宏观结果，传递的是纯组分A或纯组分B。

**主体流动**：指宏观运动，同时携带组分A与B流向界面。主体流动所带组分B的量必定恰好等于组分B的反向扩散，这样 $C_{Bi}$ 保持定态。

#### 主体流动的特点：

- 1) 因分子本身扩散引起的宏观流动。
- 2) A、B在总体流动中方向相同，流动速度正比于摩尔分率。

$$N_{MA} = N_M \frac{c_A}{c} \qquad N_{MB} = N_M \frac{c_B}{c}$$

### 3、分子扩散的速率方程

对平面PQ做总物料衡算，可的通过平面PQ的净物流

$$N = N_M + J_A + J_B$$

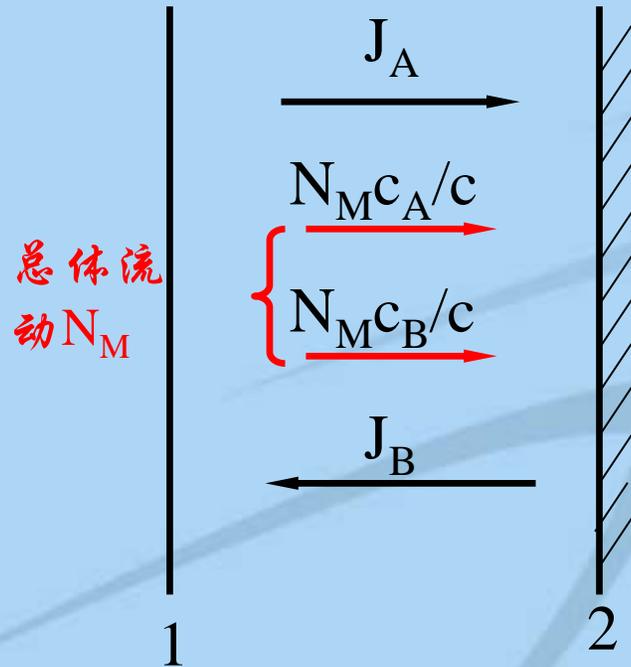
$$\because J_A = -J_B \qquad \therefore N = N_M$$

结论：主体流动的速率等于净物流速率，等分子反向扩散时，无净物流，也无主体流动。

对组分A做物料衡算得

$$N_A = J_A + N_M \frac{C_A}{C_M} \dots\dots\dots (N_A = J_A + N_{x1} \cdot x_A)$$

双组分物系  $N(\text{净物流}) = N_A + N_B$



$$N_A = J_A + (N_A + N_B) \frac{C_A}{C_M}$$

组分A的分子扩散速率方程

#### 4、静止流体中分子扩散速率的积分式：

①等分子反向扩散时，没有净物流，即 $N=0 \rightarrow N_A = -N_B$

$$N_A = J_A = -D \frac{dC_A}{dz}$$

定态扩散

$\therefore N_A = \text{常数}$

$$N_A = \frac{D}{\delta} (C_{A1} - C_{A2})$$

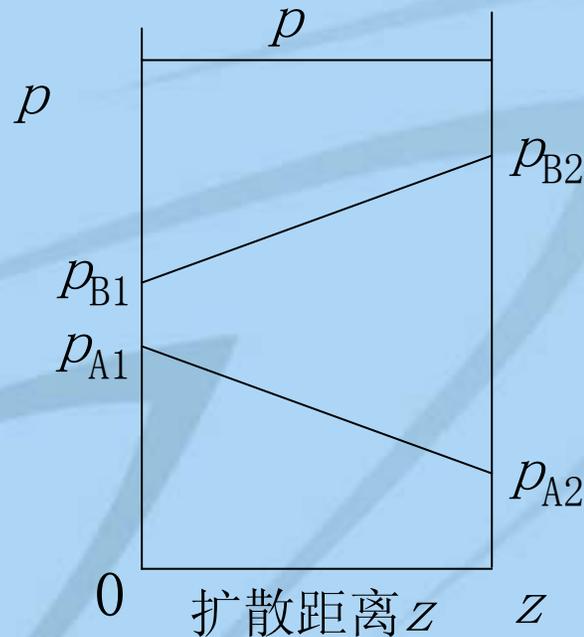
对于理想气体

$$P_A V = n_A RT \quad C_A = \frac{n_A}{V} = \frac{P_A}{RT}$$

$$N_A = \frac{D}{\delta RT} (P_{A1} - P_{A2})$$

讨论： 1)  $N_A \propto p_{A1} - p_{A2}$

2) 组分的浓度与扩散距离  $z$  成直线关系。



3) 等分子反方向扩散发生在蒸馏过程中

## ②单向扩散

例如吸收过程，惰性组分B的净传递速率 $N_B=0$

$$N_A = J_A + N_A \frac{C_A}{C_M}$$

$$N_A \left(1 - \frac{C_A}{C_M}\right) = -D \frac{dC_A}{dz} \dots\dots\dots N_A \text{为常数(定态条件)}$$

$$N_A = -DC_M / \delta \int_{C_{A1}}^{C_{A2}} \frac{dC_A}{C_M - C_A}$$

$$N_A = \frac{D}{\delta} C_M \int_{C_{A2}}^{C_{A1}} \frac{dC_A}{C_M - C_A} = \frac{D}{\delta} C_M \ln \frac{C_M - C_{A2}}{C_M - C_{A1}}$$

$$N_A = \frac{D}{\delta} C_M \frac{C_{A1} - C_{A2}}{\frac{(C_M - C_{A2}) - (C_M - C_{A1})}{\ln \frac{C_M - C_{A2}}{C_M - C_{A1}}}}$$

$$N_A = \frac{D}{\delta} \frac{C_M}{C_{BM}} (C_{A1} - C_{A2})$$

$$C_{BM} = \frac{(C_M - C_{A2}) - (C_M - C_{A1})}{\ln \frac{C_M - C_{A2}}{C_M - C_{A1}}} = \frac{C_{B2} - C_{B1}}{\ln \frac{C_{B2}}{C_{B1}}}$$

在气相扩散

$$c_A = \frac{p_A}{RT} \quad c = \frac{p}{RT}$$

$$N_A = - \frac{Dp}{RT(p - p_A)} \frac{dp_A}{dz}$$

$$\int_0^z N_A dz = \int_{p_{A1}}^{p_{A2}} - \frac{Dp}{RT} \frac{dp_A}{(p - p_A)}$$

$$N_A = \frac{Dp}{RTz} \ln \frac{p - p_{A2}}{p - p_{A1}}$$

$$N_A = \frac{Dp}{RTz} \ln \frac{p_{B2}}{p_{B1}}$$

——积分式

$$p = p_{A1} + p_{B1} = p_{A2} + p_{B2}$$

$$\begin{aligned} N_A &= \frac{Dp}{RTz} \ln \frac{p_{B2}}{p_{B1}} \times \left( \frac{p_{B2} - p_{B1}}{p_{B2} - p_{B1}} \right) \\ &= \frac{Dp}{RTz} \frac{p_{A1} - p_{A2}}{\frac{p_{B2} - p_{B1}}{\ln(p_{B2}/p_{B1})}} \end{aligned}$$

$$p_{Bm} = \frac{p_{B2} - p_{B1}}{\ln \frac{p_{B2}}{p_{B1}}}$$

$$N_A = \frac{Dp}{RTz p_{Bm}} (p_{A1} - p_{A2})$$

## 讨论

1) 组分A的浓度与扩散距离 $z$ 为指数关系

2)  $\frac{P}{P_{BM}}, \frac{C_M}{C_{BM}}$  —— 漂流因数，无因次

**漂流因数意义**：其大小反映了总体流动对传质速率的影响程度，其值为总体流动使传质速率较单纯分子扩散增大的倍数。

$$\frac{P}{P_{BM}} > 1 \quad \frac{C_M}{C_{BM}} > 1$$

**漂流因数的影响因素**：

浓度高，漂流因数大，总体流动的影响大。

低浓度时，漂流因数近似等于1，总体流动的影响小。

3) 单向扩散体现在吸收过程中。

### 3. 扩散系数

扩散系数的意义：单位浓度梯度下的扩散通量，反映某组分在一定介质中的扩散能力，是物质特性常数之一； $D$ ， $\text{m}^2/\text{s}$ 。

$D$ 的影响因素：A、B、T、P、浓度

$D$ 的来源：查手册；半经验公式；测定

## (1) 气相中的D

范围： $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$

经验公式

$$D = f(T, p) \quad D \propto \frac{T^{1.75}}{p} \quad T \uparrow \Rightarrow D \uparrow \quad p \uparrow \Rightarrow D \downarrow$$

## (2) 液相中的D

范围： $10^{-10} \sim 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$

$$D = f(T, \mu) \quad D \propto \frac{T}{\mu} \quad T \uparrow \Rightarrow D \uparrow \quad \mu \uparrow \Rightarrow D \downarrow$$