

# 目录

## 第八章 传质过程导论

### 第一节 概述

- 一、化工生产中的传质过程
- 二、相平衡
- 三、相组成的表示方法
- 四、传质方式

### 第二节 分子扩散

- 一、费克定律
- 二、费克定律的另一种常用形式
- 三、双组分、一维稳态分子扩散举例

# 目录

## 第三节 对流传质

- 一、对流传质机理分析
- 二、膜模型
- 三、传质模型简介
- 四、对流传质方程
- 五、对流传质系数经验式

## 第八章 小结

# 第八章 传质过程导论

分离过程在全厂的设备投资费和操作费上占很大比重。对一典型的化工厂，分离设备的投资占60-70%，分离过程的能耗约占30%。

三传 { 动量传递  
热量传递  
质量传递 ✓

-----在浓度差、温度差、压力差等推动力作用下，从一处向另一处的转移过程。包括相内传质和相际传质两类。

分离 { 均相混合物  
非均相混合物

利用某种性质 [转下页](#)

方法 { 加入另外一种物质作为分离剂  
加入能量  
加场，如浓度场、温度场、电场、磁场等

3/36

转第5页

# 可被利用于分离的性质

## 物理

### 力学性质

密度、表面张力、尺寸、质量等  
如重力沉降、过滤

### 热力学性质

熔点、沸点、临界点、转变点、蒸汽压、  
溶解度、分配系数等。如吸收、精馏

### 电、磁性质

电导率、介电常数、迁移率、  
电荷、淌度、磁化率等

### 输送性质

扩散系数、分子飞行速度

## 化学

### 反应速度性质

反应速度常数

### 热力学性质

反应平衡常数、化学吸附平衡常数、  
离解常数、电离电位

## 生物学

生物学亲和力、生物学吸附平衡、生物学反应速度常数

返回上页

/36

## 一、化工生产中的常规分离方法



干燥



# 第一节 概述

## 二、相平衡——相际间传质的最终状态

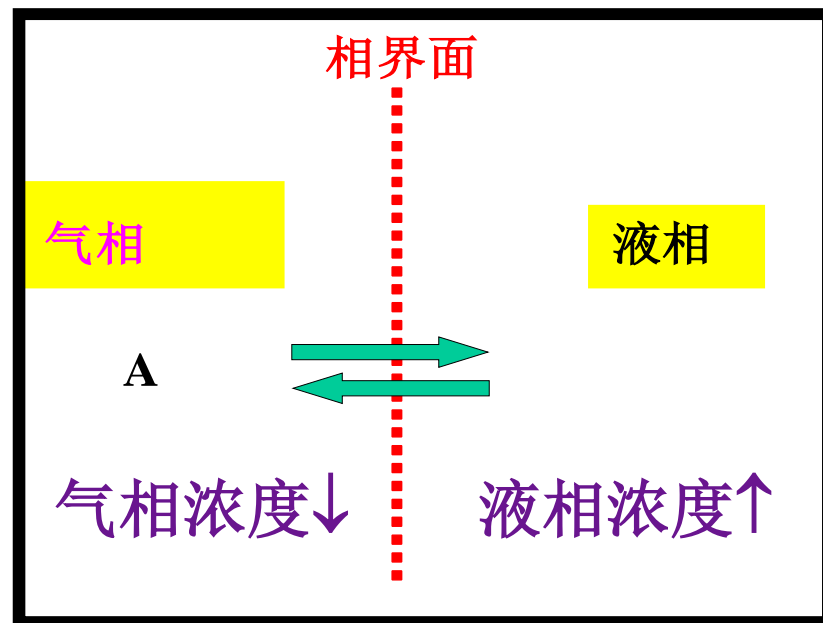
两相浓度不变了，达到了平衡，净传质量为零了。

与热平衡不同之处：

▲达到相平衡时，一般两相浓度不相等。

▲相平衡属动态平衡

达到相平衡时，传质过程仍在进行。



# 第一节 概述

## 三、相组成的表示方法

摩尔分数  $x_A$  (或  $y_A$ ) =  $\frac{n_A}{n}$

质量分数  $w_A = \frac{m_A}{m}$

摩尔比  $X_A$  (或  $Y_A$ ) =  $\frac{n_A}{n_B}$

质量比  $\bar{w}_A = \frac{m_A}{m_B}$

物质的量浓度  $c_A = \frac{n_A}{V}$ , kmol/m<sup>3</sup>

质量浓度  $\rho_A = \frac{m_A}{V}$ , kg/m<sup>3</sup>

混合物总摩尔浓度  $c = \frac{n}{V}$

混合物总质量浓度  $\rho = \frac{m}{V}$

对气体, 还可以用  $p_A$  表示浓度

转下页

1150

**思考1:** 双组分均相物系 (A、B) 的摩尔分数之和等于多少? 质量分数之和呢?

$$x_A + x_B = 1$$

$$w_A + w_B = 1$$

**思考2:**  $x_A$  与  $w_A$  的关系?

$$x_A = \frac{w_A / M_A}{w_A / M_A + w_B / M_B + \dots} \quad w_A = \frac{x_A M_A}{x_A M_A + x_B M_B + \dots}$$

**思考3:** 双组分均相物系中,  $x$  与  $X$  的关系?  $w$  与的  $\bar{w}$  关系?

$$x = \frac{X}{1 + X} \quad X = \frac{x}{1 - x} \quad w = \frac{\bar{w}}{1 + \bar{w}} \quad \bar{w} = \frac{w}{1 - w}$$

**思考4:**  $x_A$  与  $c_A$  的关系?  $w_A$  与  $\rho_A$  的关系?

$$c_A = x_A c$$

$$\rho_A = w_A \rho$$

返回上页

8/36



思考5:  $c_A$  与  $\rho_A$  的关系?

$$c_A = \frac{\rho_A}{M_A}$$

思考6: 对理想气体,  $c$  与  $p$  的关系?  $y$  与  $p$ ?  $\rho$  与  $p$ ?

$$c_A = \frac{n_A}{V} = \frac{p_A}{RT}$$

$$y_A = \frac{n_A}{n} = \frac{p_A}{P}$$

$$c = \frac{n}{V} = \frac{P}{RT}$$

$$\rho_A = \frac{m_A}{V} = \frac{M_A n_A}{V} = \frac{p_A M_A}{RT}$$

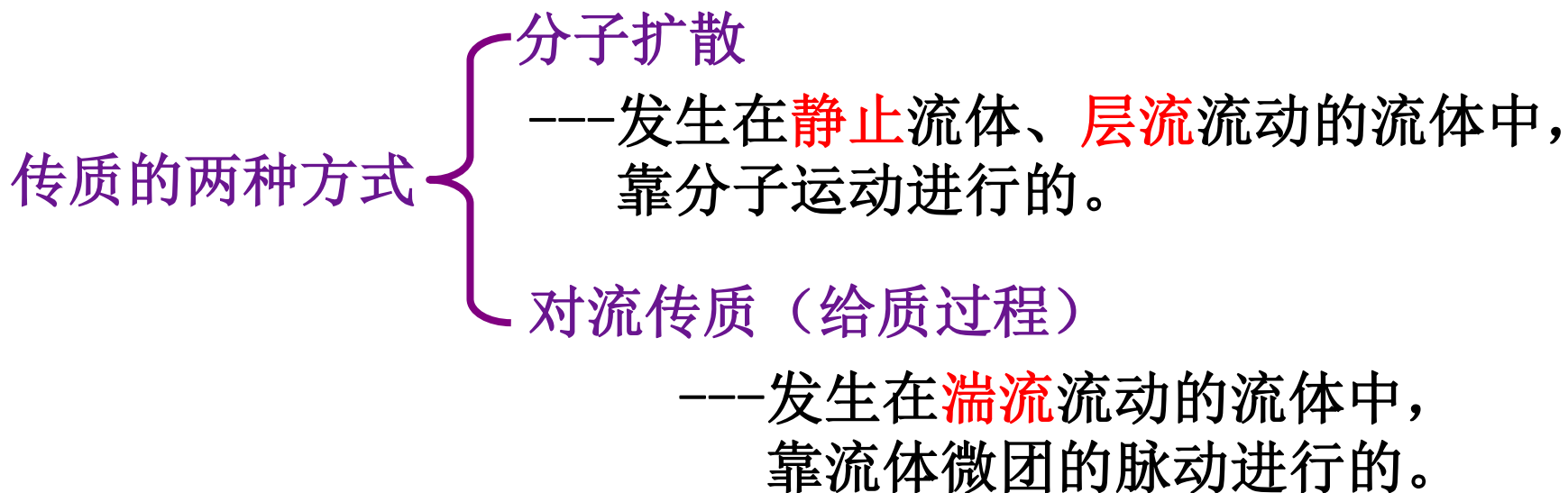
通用气体常数  $R = 8314 \text{ J} / \text{kmol} \cdot \text{K}$

返回第7页

9/36

# 第一节 概述

## 四. 传质方式



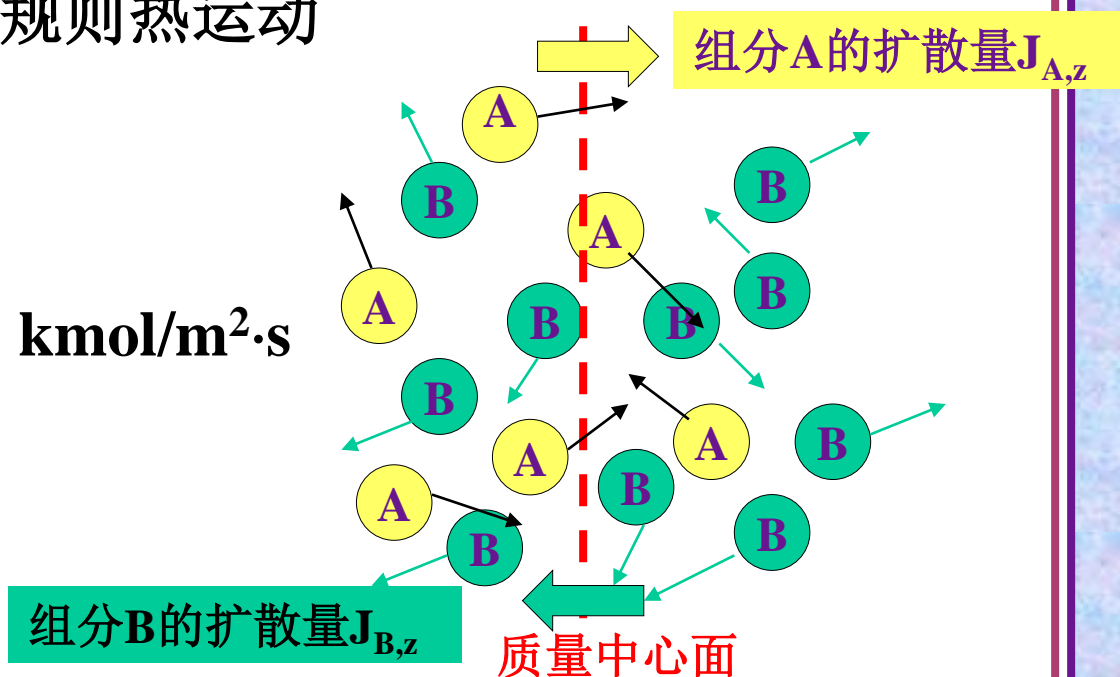
[返回目录](#)

## 第二节 分子扩散

### 一、分子扩散机理：

靠分子或原子的无规则热运动

$J_{A,z}$ -----相对扩散通量,  $\text{kmol/m}^2\cdot\text{s}$



## 第二节 分子扩散

1855年Fick用与傅立叶定律类比的方法而不是用实验方法提出的。

### 二. 菲克定律

表示扩散方向与浓度梯度方向相反

$$J_{A,z} = -D_{AB} \frac{dc_A}{dz}$$

----- 又称菲克第一定律，适用于双组分体系。

A 在 B 中的扩散系数  $\text{m}^2/\text{s}$

扩散通量,  $\text{kmol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$

$$J_{B,z} = -D_{BA} \frac{dc_B}{dz}$$

B 在 A 中的扩散系数  $\text{m}^2/\text{s}$

对二元体系  $D_{A,B} = D_{B,A} = D$

对照：  
牛顿粘性定律：

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

傅立叶定律：

$$\vec{q} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial \vec{n}}$$

## 第二节 分子扩散

菲克定律的其它表达形式：

$$J_{A,z} = -cD_{AB} \frac{dx_A}{dz} = -\frac{D_{AB}}{RT} \frac{dp_A}{dz}$$

$$J_{A,z} = -D_{AB} \frac{dc_A}{dz}$$



## 一. 菲克定律

说明:

(1)  $J_{A,z}$ 、 $J_{B,z}$ 是相对扩散通量（绝对扩散通量用 $N_{A,z}$ 表示）

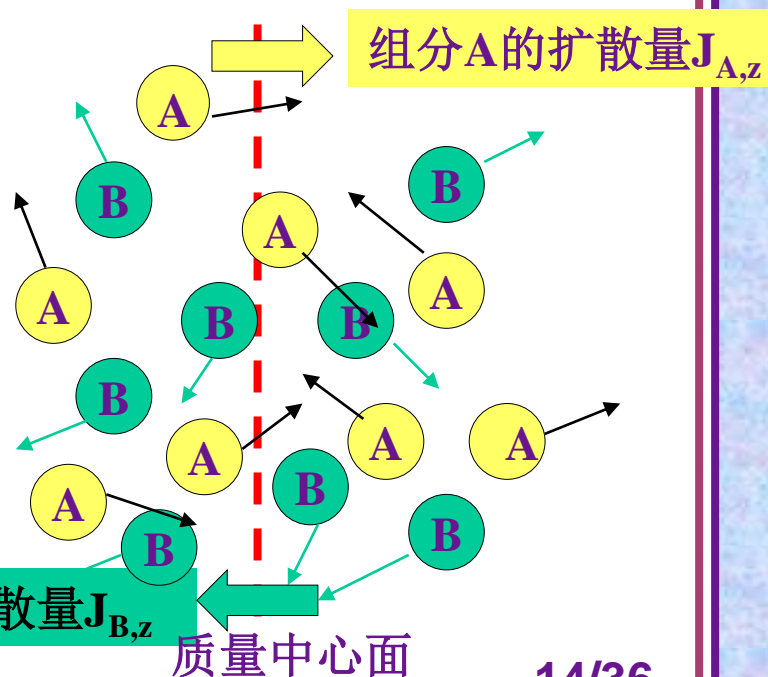
组分A移走后，出现空位，其他分子（可能是A也可能是B）将会补位，若A、B分子量不等，那么质量中心会局部发生漂移。 $J_{A,z}$ 、 $J_{B,z}$ 是为了使 $J_{A,z} + J_{B,z} = 0$ 而定义的，即 $J_{A,z}$ 、 $J_{B,z}$ 是相对于一个移动的扩散面而定义的扩散通量。

$$(2) J_{A,z} = -J_{B,z}$$

由 $J_{A,z} + J_{B,z} = 0$ 可证得。

组分B的扩散量 $J_{B,z}$

质量中心面



# 一. 菲克定律

说明:

(3)  $D_{A,B}$  是物性。

$$D_{A,B} = f(P, T, x) \quad \text{转下页}$$

$$D_{A,B} \text{ (气)} \sim 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$D_{A,B} \text{ (液)} \sim 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$D_{A,B} \text{ (固)} \sim < 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$$

每 $\text{cm}^3$ 所具有的分子个数:

氧气:  $2.5 \times 10^{19}$

水:  $3.3 \times 10^{22}$

铜:  $7.3 \times 10^{22}$

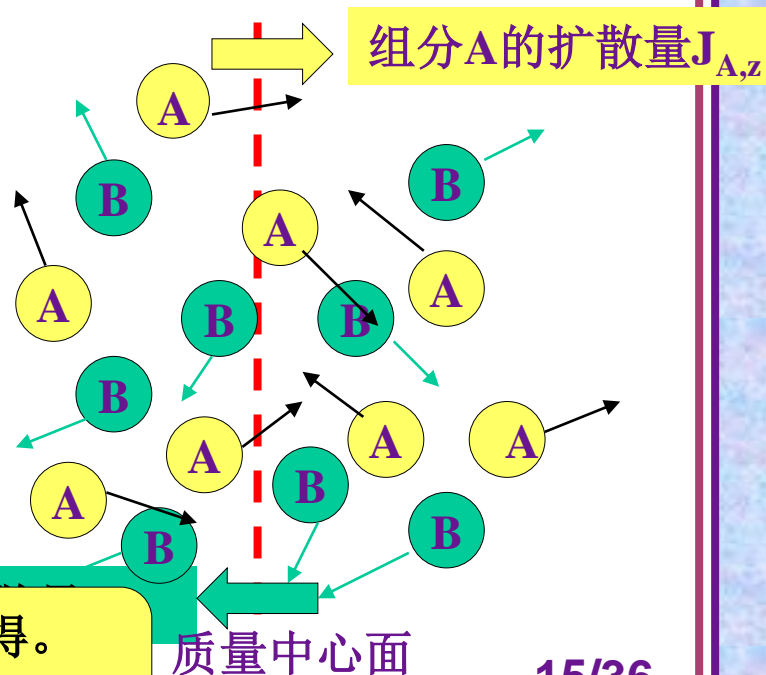
(4) 对二元体系, 扩散系数的下标可去掉。即

对气体体系有:  $D_{A,B} = D_{B,A}$

对液体体系有:  $D_{A,B} \approx D_{B,A}$

对气体体系由  $J_{A,z} = -J_{B,z}$  可证得。

对液体体系当  $\rho = \text{常数}$  时可证得。



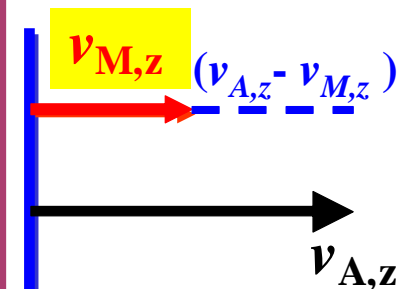
## 菲克定律的另一种常用形式----- $N_{A,z}$ 与 $J_{A,z}$ 的关系式

绝对扩散通量  $N_A$ 、 $N_B$ 、 $N$ -----相对于静止面的摩尔传质速率， $\text{kmol/m}^2\text{s}$

$$N_{A,z} = C_A v_{A,z} \quad N_{B,z} = C_B v_{B,z} \quad N_z = C v_{M,z} = N_{A,z} + N_{B,z}$$

相对扩散通量  $J_A$ 、 $J_B$

-----相对于移动面（以  $v_{M,z}$  大小在运动）的摩尔传质速率， $\text{kmol/m}^2\text{s}$



静止面

$v_{A,z}$ -----A的摩尔速度  
 $v_{B,z}$ -----B的摩尔速度  
 $v_{M,z}$ -----摩尔平均速度

$$J_{A,z} = C_A (v_{A,z} - v_{M,z})$$

$$J_{A,z} = N_{A,z} - C_A v_{M,z}$$

$$= N_{A,z} - \frac{C_A}{C} C v_{M,z}$$

$$= N_{A,z} - x_A N_z$$

$$= N_{A,z} - x_A (N_{A,z} + N_{B,z})$$

$$J_{B,z} = C_B (v_{B,z} - v_{M,z})$$

$$J_{B,z} = N_{B,z} - x_B (N_{A,z} + N_{B,z})$$

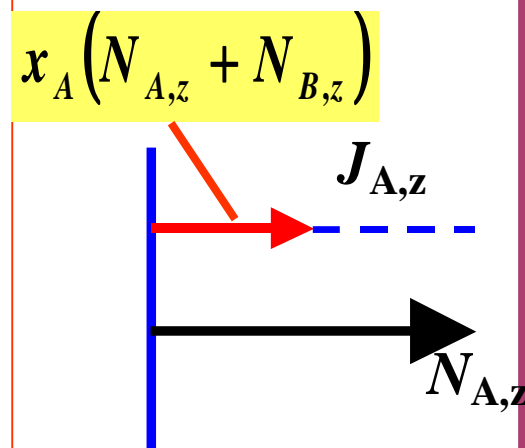
## 菲克定律的另一种常用形式----- $N_{A,z}$ 与 $J_{A,z}$ 的关系式

于是：

$$N_{A,z} = J_{A,z} + x_A (N_{A,z} + N_{B,z})$$

$$= -D_{AB} \frac{dc_A}{dz} + x_A (N_{A,z} + N_{B,z})$$

$$N_{B,z} = J_{B,z} + x_B (N_{A,z} + N_{B,z})$$



静止面

绝对扩散通量 = 相对扩散通量 + 总体扩散通量  
 (相对于静止坐标)      (相对于平均速度)      相对于静止坐标

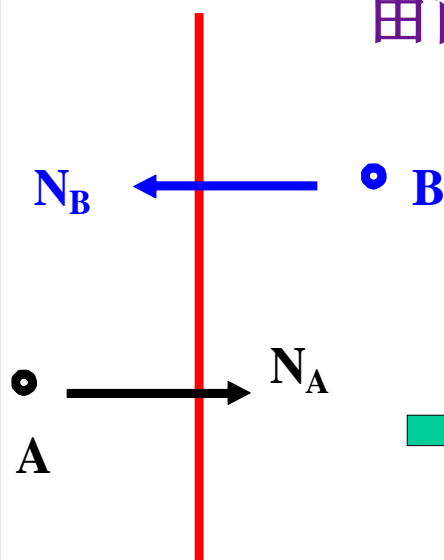
$$J_{A,z} = -D_{AB} \frac{dc_A}{dz} \text{ --- 不常用}$$

## 二. 双组分、一维稳态分子扩散举例

### 1. 等摩尔相互扩散

特点:  $N_{A,z} = -N_{B,z} = \text{常数} \rightarrow N_z = 0$

由前面的介绍可知, 还有  $J_{A,z} = -J_{B,z} = \text{常数}$



$$N_{A,z} = J_{A,z} + x_A(N_{A,z} + N_{B,z})$$

$$N_{B,z} = J_{B,z} + x_B(N_{A,z} + N_{B,z})$$

$$\rightarrow N_{A,z} = J_{A,z} = -D \frac{dc_A}{dz}$$

边界条件:

$$z = z_1, \quad c_A = c_{A1}$$

$$z = z_2, \quad c_A = c_{A2}$$

等摩尔相互扩散



# 1. 等摩尔相互扩散

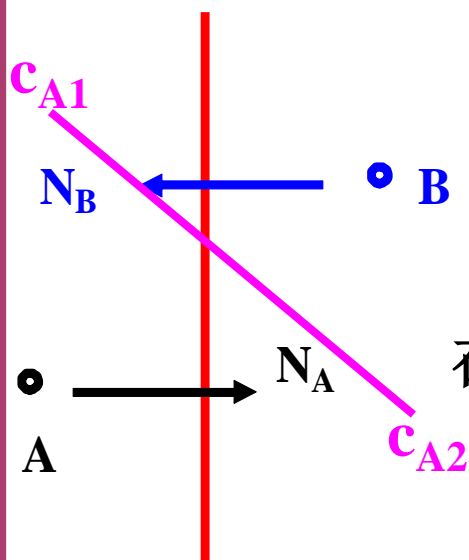
$$N_{A,z} \int_{z_1}^{z_2} dz = -D \int_{c_{A_1}}^{c_{A_2}} dc_A$$

$$\Rightarrow N_{A,z} = \frac{D}{z_2 - z_1} (c_{A_1} - c_{A_2}) = \frac{c_{A_1} - c_{A_2}}{\Delta z / D} = \frac{\text{推动力}}{\text{阻力}}$$

$$= \frac{cD}{z_2 - z_1} (y_{A_1} - y_{A_2}) = \frac{D}{RT(z_2 - z_1)} (p_{A_1} - p_{A_2})$$

在  $(z_1, c_{A_1})$ ,  $(z, c_A)$  范围内积分得:

$$N_{A,z} = \frac{D}{z - z_1} (c_{A_1} - c_A) = \frac{D}{RT(z - z_1)} (p_{A_1} - p_A)$$



相界面

等摩尔相互扩散

----- $c_A$  (或 $p_A$ ) 随 $z$ 呈线性变化

## 2. 单向扩散

所谓单向扩散是指组分A通过停滞（或不扩散）组分B的分子扩散。

特点： $N_{B,z} = 0$

由前面的介绍可知，还有

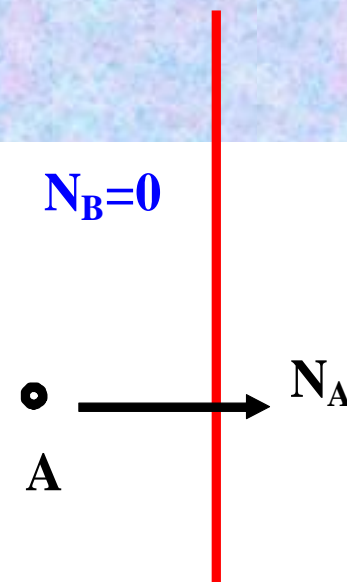
$$J_{A,z} = -J_{B,z} = \text{常数}$$

$$N_{A,z} = J_{A,z} + x_A (N_{A,z} + N_{B,z}) \rightarrow N_{A,z} = J_{A,z} + x_A N_{A,z} \quad \text{单向扩散}$$

$$N_{B,z} = J_{B,z} + x_B (N_{A,z} + N_{B,z})$$

$$N_{A,z} (1 - x_A) = J_{A,z}$$

$$= -D \frac{dc_A}{dz}$$



## 2. 单向扩散

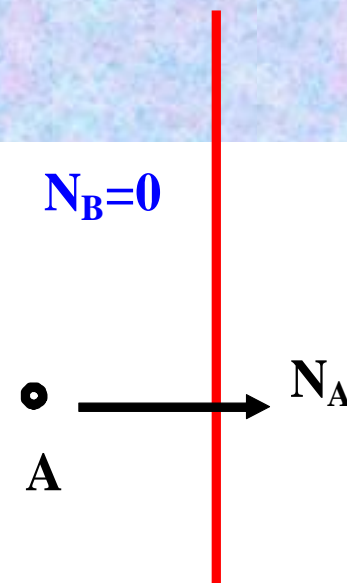
在  $(z_1, c_{A_1})$ ,  $(z_2, c_{A_2})$  范围内积分得:

$$N_{A,z} \int_{z_1}^{z_2} dz = -cD \int_{c_{A_1}}^{c_{A_2}} \frac{dc_A}{c - c_A}$$

$$\rightarrow N_{A,z} = \frac{cD}{z_2 - z_1} \ln \frac{c - c_{A_2}}{c - c_{A_1}} = \frac{cD}{z_2 - z_1} \ln \frac{c_{B_2}}{c_{B_1}}$$

引入截面 1、2 上  $C_B$  的对数平均值  $c_{B_m} = \frac{c_{B_2} - c_{B_1}}{\ln \frac{c_{B_2}}{c_{B_1}}}$ , 得:

$$N_{A,z} = \frac{D}{z_2 - z_1} \frac{c}{c_{B_m}} (c_{B_2} - c_{B_1}) = \frac{c_{A_1} - c_{A_2}}{\Delta z c_{B_m} / cD} = \frac{\text{推动力}}{\text{阻力}}$$



单向扩散

## 2. 单向扩散

$$N_{A,z} = \frac{D}{z_2 - z_1} \frac{c}{c_{B_m}} (c_{B_2} - c_{B_1}) = \frac{D}{z_2 - z_1} \frac{c}{c_{B_m}} (c_{A_1} - c_{A_2})$$

或写成

$$N_{A,z} = \frac{cD}{z_2 - z_1} \frac{1}{y_{B_m}} (y_{A_1} - y_{A_2})$$

漂流因数 (均>1)

代表总体流动的影响

$$N_{A,z} = \frac{D}{RT(z_2 - z_1)} \cdot \frac{P}{p_{B_m}} (p_{A_1} - p_{A_2})$$

式中

$$y_{B_m} = \frac{y_{B_2} - y_{B_1}}{\ln(y_{B_2} / y_{B_1})}, \quad p_{B_m} = \frac{p_{B_2} - p_{B_1}}{\ln(p_{B_2} / p_{B_1})}$$

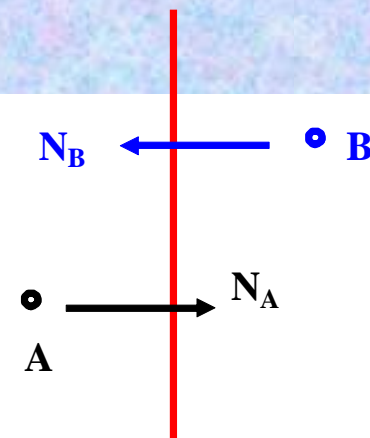
对照：等摩尔相互扩散

$$N_{A,z} = \frac{D}{z_2 - z_1} (c_{A_1} - c_{A_2})$$

**思考：**为什么单向扩散比等摩尔相互扩散多一个大于1的漂流因数？

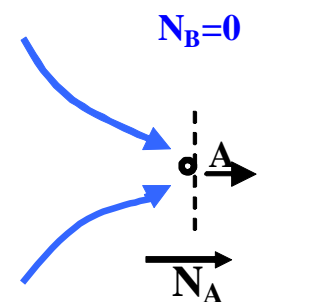
在等分子相互扩散中，组分A移走后，出现的空位会由组分B补位，故 $N_z=0$ ，即无总体流动。

在单向扩散中，组分A移走后，出现的空位会由周围混合物（A+B）补位，故 $N_z \neq 0$ ，即有总体流动。考虑到这部分由总体流动引起的组分A的扩散通量，因而单向扩散的扩散通量要比等分子相互扩散的大。



相界面

等摩尔相互扩散



相界面

单向扩散

$$c_A \uparrow, \text{ 则 } c_B \downarrow, \text{ 故 } c_{B_m} = \frac{c_{B_2} - c_{B_1}}{\ln \frac{c_{B_2}}{c_{B_1}}} \downarrow, \therefore \text{漂流因数 } \frac{c}{c_{B_m}} \uparrow$$



## 2. 单向扩散

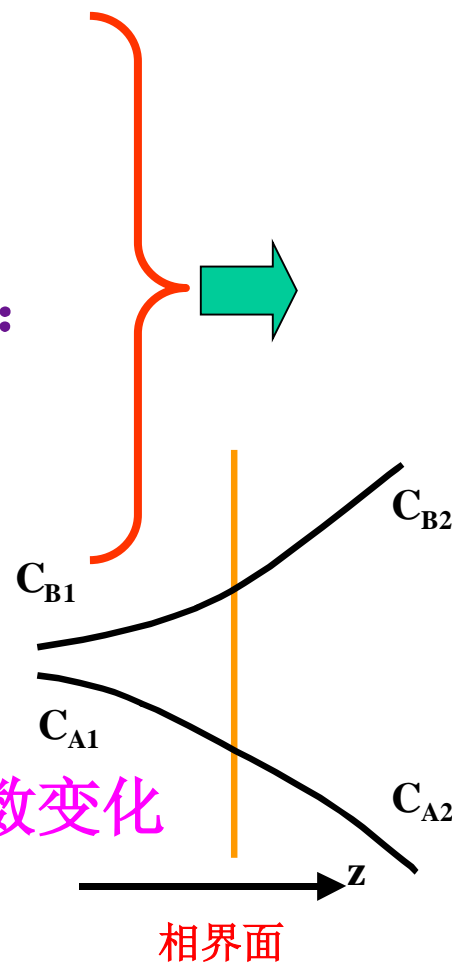
前面已推得：

$$N_{A,z} = \frac{cD}{z_2 - z_1} \ln \frac{c - c_{A_2}}{c - c_{A_1}} = \frac{cD}{z_2 - z_1} \ln \frac{c_{B_2}}{c_{B_1}}$$

若将式中带有下标2的各项的下标去掉，可得：

$$N_{A,z} = \frac{cD}{z - z_1} \ln \frac{c - c_A}{c - c_{A_1}} = \frac{cD}{z - z_1} \ln \frac{c_B}{c_{B_1}}$$

$$\frac{\ln \frac{c_B}{c_{B_1}}}{\ln \frac{c_{B_2}}{c_{B_1}}} = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1} \text{-----} c_B \text{（或} c_A \text{）随} z \text{呈对数函数变化}$$



作业：

[返回目录](#)

24/36

### 3 扩散系数

- ❖ Fick定律下的扩散系数D代表单位浓度梯度 ( $\text{kmol}\cdot\text{m}^{-4}$ ) 下的扩散通量 ( $\text{kmol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ )，表达某个组分在介质中扩散的快慢，是物质的一种传递属性。
- ❖ 它至少涉及两种物质，因此会有多种多样的配合方式（例如气-液，气-固，气-气等等）
- ❖ 随温度变化较大，同时还与总压（气体）或总浓度（液体）有关。

## 气体中的扩散系数经验估算式:

对于二元气体扩散系数的估算, 通常用较简单的由福勒(Fuller) 等提出的公式:

$$D = \frac{1.013 \times 10^{-5} T^{1.75} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}}{P \left[ (\sum V_A)^{1/3} + (\sum V_B)^{1/3} \right]^2} \quad \Rightarrow \quad D \propto T^{1.75} / P$$

(低压, 室温)

式中:

D为A、B二元气体的扩散系数,  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ; P为气体总压, kPa;  
T为气体的温度, K;  $M_A$ 、 $M_B$ 为组分A、B的摩尔质量,  
 $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ;  $\sum V_A$ ,  $\sum V_B$ 为组分A、B的分子扩散体积,  $\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

注: 一般有机化合物是按化学分子式由表8-3中查原子扩散体积相加得到, 某些简单物质则在表8-3中直接列出。

## 液体中的扩散系数经验估算式：

对于很稀的非电解质溶液（溶质A+溶剂B），其扩散系数常用Wilke-Chang公式估算：

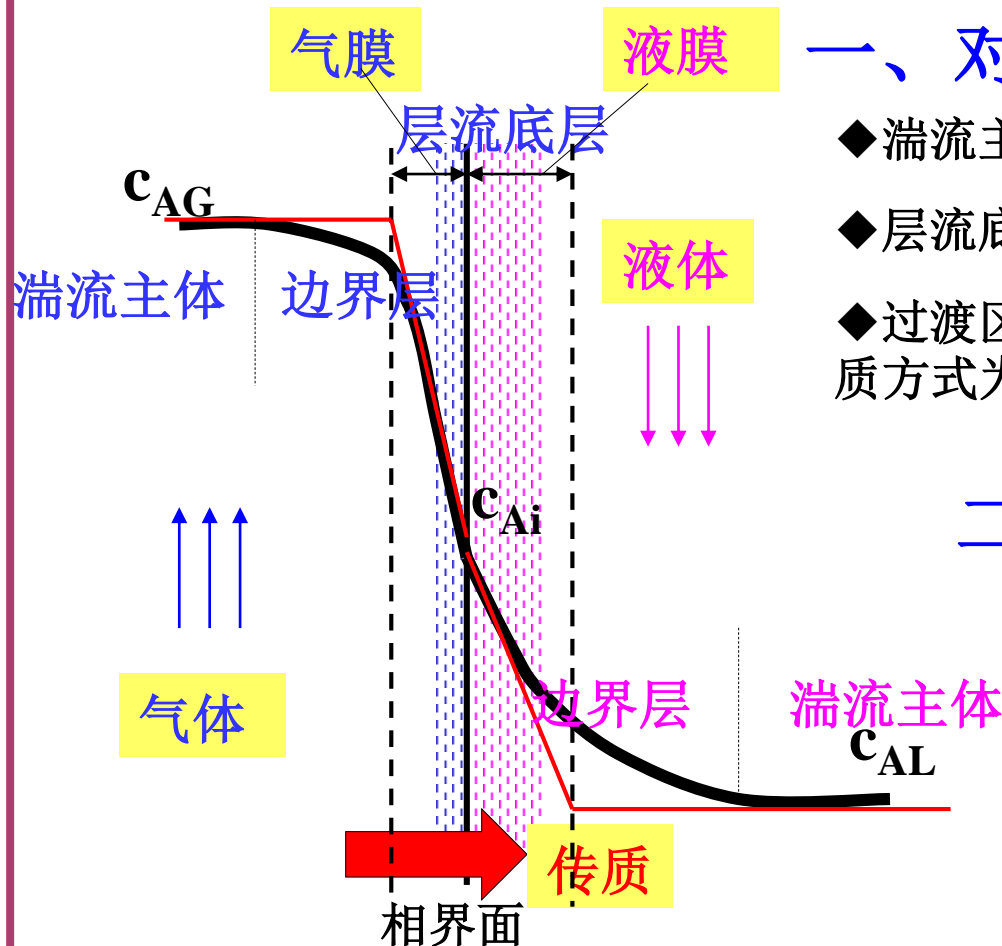
$$D_{AB} = 7.4 \times 10^{-15} \frac{(\alpha M_B)^{1/2} T}{\mu V_A^{0.6}} \longrightarrow T \uparrow, \mu \downarrow, D \uparrow$$

固体中的扩散系数需靠实验确定。

27/36

## 第三节 对流传质

**回忆：**对流传质---发生在湍流流动的流体中，  
靠流体微团的脉动进行的。



### 一、对流传质机理分析：

- ◆ 湍流主体因浓度均一无传质阻力；
- ◆ 层流底层传质方式为分子扩散，阻力最大；
- ◆ 过渡区（湍流主体与层流底层之间）传质方式为分子扩散和对流传质（脉动）。

### 二、膜模型：

如图，得到假想的气膜和液膜，并认为在气（液）膜中传质方式均为分子扩散。

于是对流传质的阻力就都集中在假想的气膜和液膜中。

28/36



## 第三节 对流传质

### 三、传质模型简介（详见教材第九章P65）

{ 双膜模型——即膜模型  
溶质渗透模型  
表面更新模型

## 第三节 对流传质

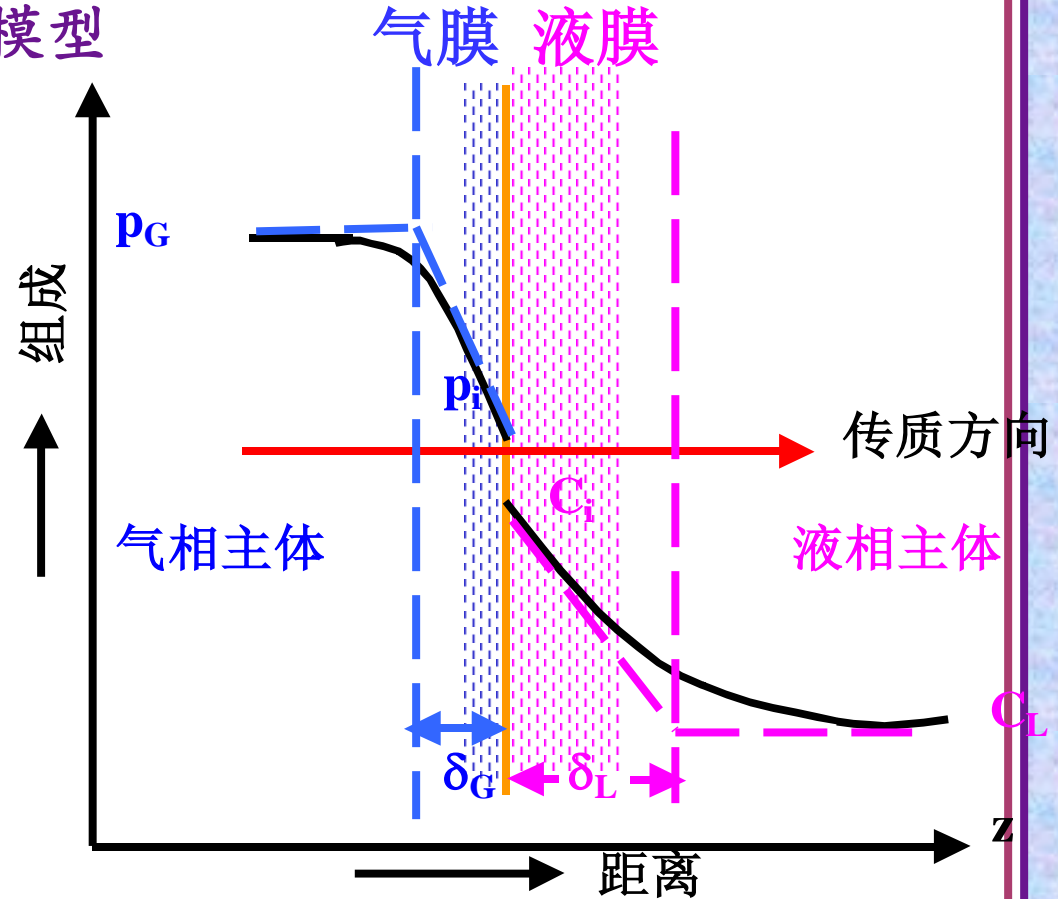
### 1、双膜模型

回忆：膜模型

要点：

(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。



双膜模型

### 第三节 对流传质

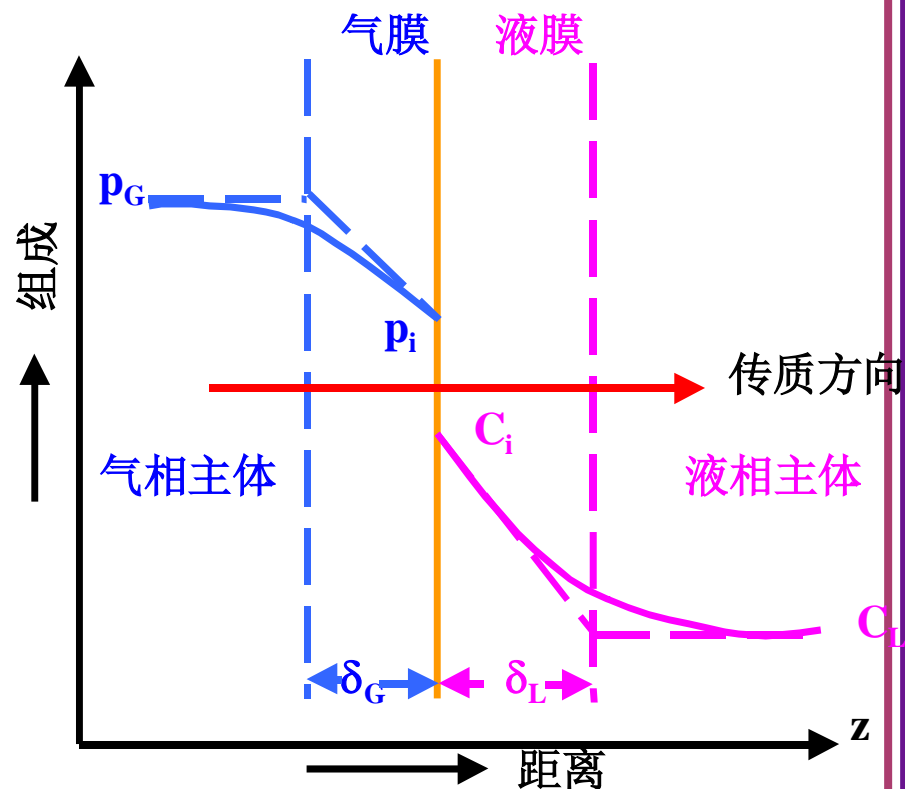
若为单向扩散，在液相中有：

$$N_A = \frac{D_L}{\delta_L} \cdot \frac{c}{c_{Bm}} \cdot (c_{A_1} - c_{A_2})$$

对照对流传质方程，可知：

$$k_L = \frac{D_L}{\delta_L} \cdot \frac{c}{c_{Bm}}$$

可见， $k_L \propto D_L$



双膜模型

对流传质方程：

$$N_A = k_L(c_1 - c_2) = k_G(p_1 - p_2)$$

## 第三节 对流传质

### 双膜模型缺陷：

- ①只适用与有固定相界面的情形；
- ②  $k_L \propto D_L$  ，与实际不符；
- ③界面阻力不计，这是一个尚有争议的问题。

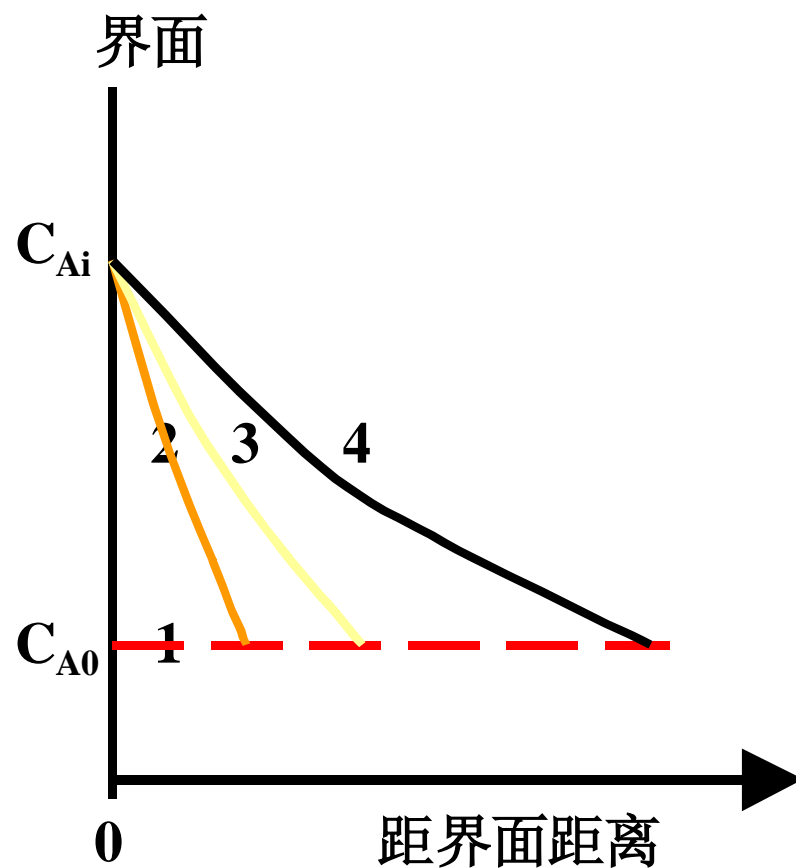
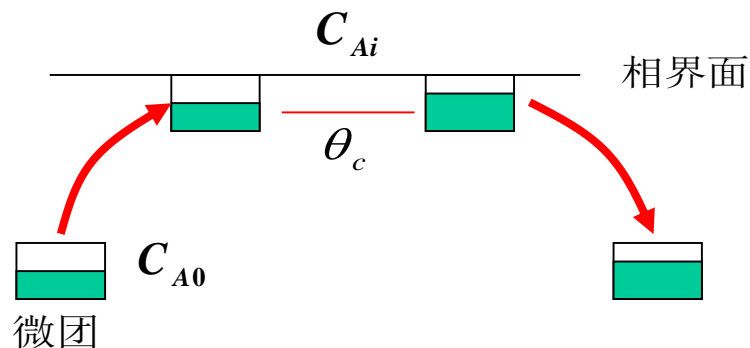
### 第三节 对流传质

#### 2、溶质渗透模型：希格比（Higbie）1935年提出

特点：强调形成稳定浓度梯度的过渡阶段

缺陷：认为各批旋涡与气相接触的时间相同

经推导，得  $k_L \propto \sqrt{D_L}$ ，  
与实验结果相吻合。



## 第三节 对流传质

### 3、表面更新模型

由丹克沃茨（**Danckwerts**）1951年提出，是溶质渗透模型的修正。

总之，由于传质的复杂性，目前尚没有一个完善的传质理论可用。



### 第三节 对流传质

#### 四、对流传质方程

$$N_A = k_L(c_1 - c_2) = k_G(p_1 - p_2)$$

影响对流传质系数  $k$  的因素：

- ◆ 流动状况
- ◆ 物性
- ◆ 操作温度和压力
- ◆ 传质面几何特性等。

传质系数

注意，与 $\alpha$ 类似，不是物性

# 小结

## 一. 重要概念

分子扩散、对流传质、扩散通量、绝对扩散通量、总体流动通量、漂流因数、膜模型要点、对流传质机理、影响对流传质的因素。

## 二. 公式

菲克定律: 
$$J_{A,z} = -D_{AB} \frac{dc_A}{dz}$$

$$N_{A,z} = J_{A,z} + x_A (N_{A,z} + N_{B,z})$$

对流传质方程: 
$$N_A = k_L (c_1 - c_2) = k_G (p_1 - p_2)$$

# 小结

## 三. 双组分、一维稳态分子扩散举例

等分子相互扩散

单向扩散

} 特点

# 选学内容

- ❖ 第四节 质量、热量、动量传递之间的关系
  - 三种传递间的类比
- ❖ 第五节 传质设备简介
  - 填料塔、板式塔