

第8章 气体吸收

8.1 概述

8.1.1 吸收的目的和依据

目的：（1）回收有用物质；
（2）脱除有害成分。

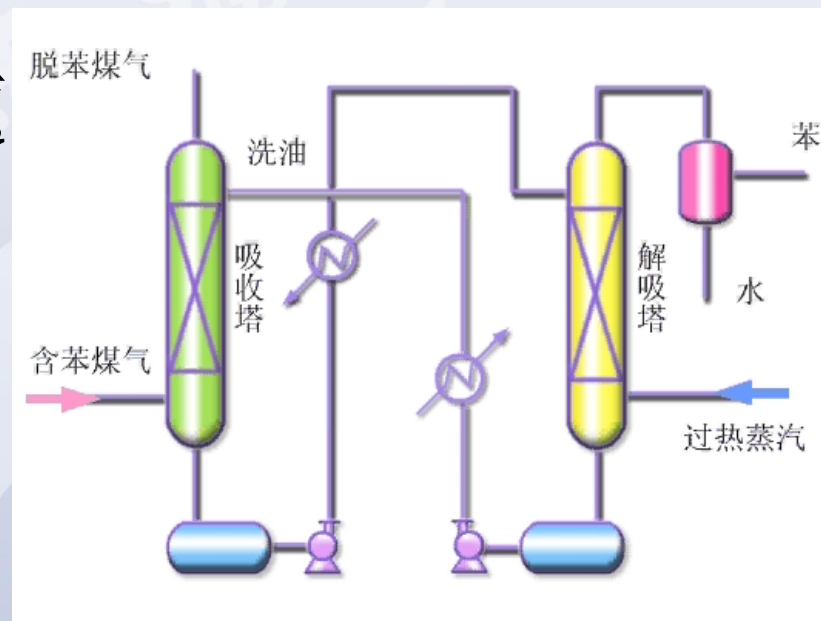
依据：混合气体中各组份在某种溶剂中溶解度的差异。



8.1.2 工业吸收过程

实施吸收操作须解决的问题

- (1) 选择合适的吸收剂;
- (2) 提供适当的设备;
- (3) 溶剂再生。



吸收与解吸流程

8.1.3 溶剂的选择

技术要求：

溶解度大；选择性高；对温度的敏感性强，易解吸。

经济及安全要求：

蒸汽压要低，不易挥发；较好的化学稳定性；黏度小；价廉，易得，无毒，不易燃易爆。

8.1.4 气体吸收的分类

物理吸收：气体各组分因在溶剂中溶解度的不同而被分离的吸收操作。

化学吸收：利用化学反应而实现吸收的操作。化学吸收应满足的条件：

- (1) 反应的可逆性；
- (2) 较高的反应速率。

8.1.5 吸收操作的经济特性

吸收的操作费用：

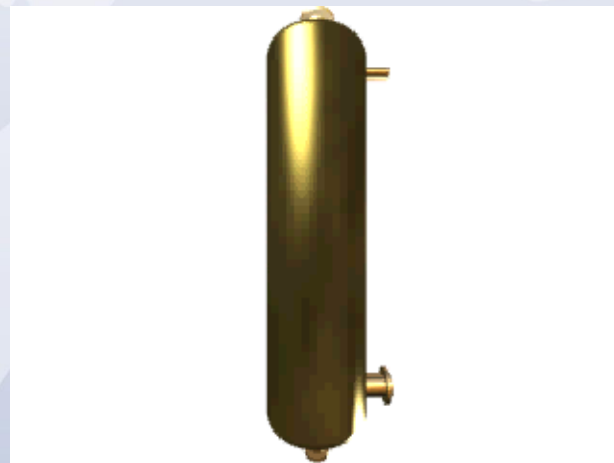
- (1) 流动能耗；
- (2) 溶剂能耗；
- (3) 解吸操作费用（此项费用最大）。

常用的解吸方法：升温、减压、吹气，
升温和吹气通常同时进行。

8.1.6 气液两相的接触方式



级式接触



微分接触



8.2 吸收和气液相平衡关系

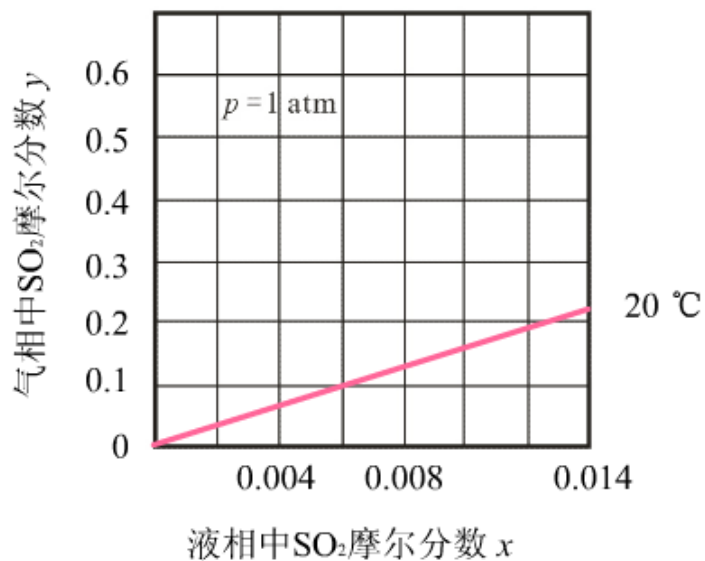
吸收与传热的比较

过 程	传递对象	推动力	极 限
传 热	热 量	温 差	温度相等
吸 收	物 质	不是浓 度差	不是两相浓度 相等

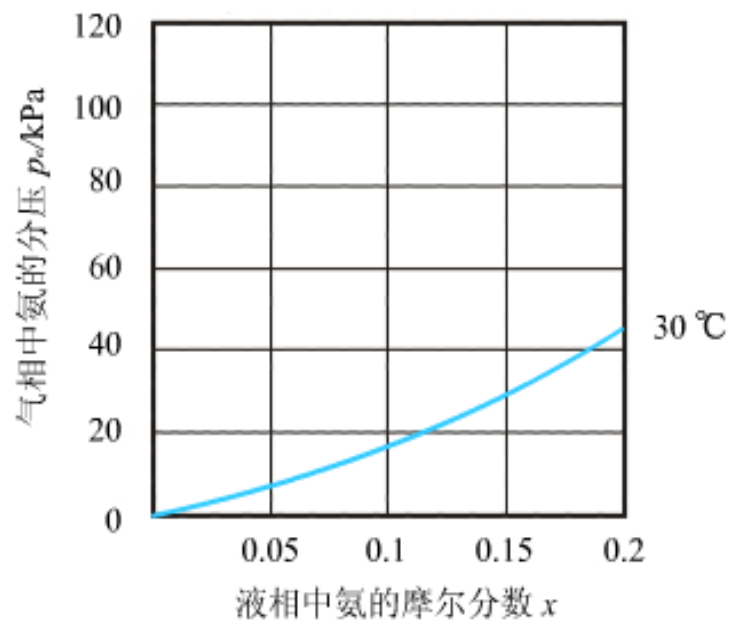
原因：气液相平衡不同于冷热流体之间的热平衡。

8.2.1 平衡溶解度

8.2.1.1 溶解度曲线



1atm下 SO_2 在水中的溶解度



氨在水中的平衡溶解度

8.2.1.2 亨利定律

$$p_e = Ex$$

$$p_e = Hc$$

$$y_e = mx$$

亨利常数之间的关系

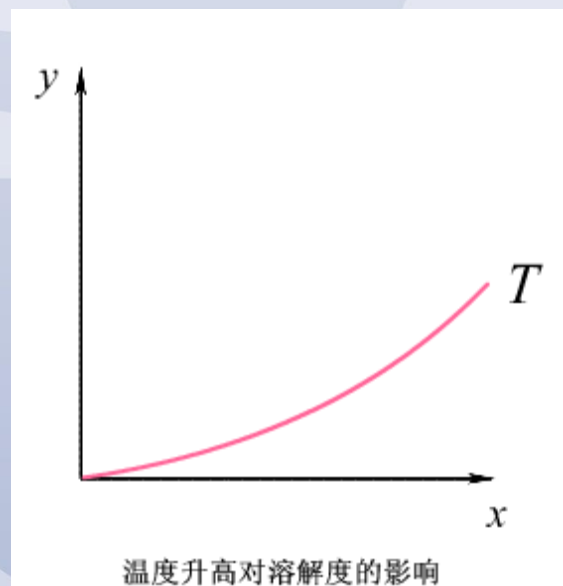
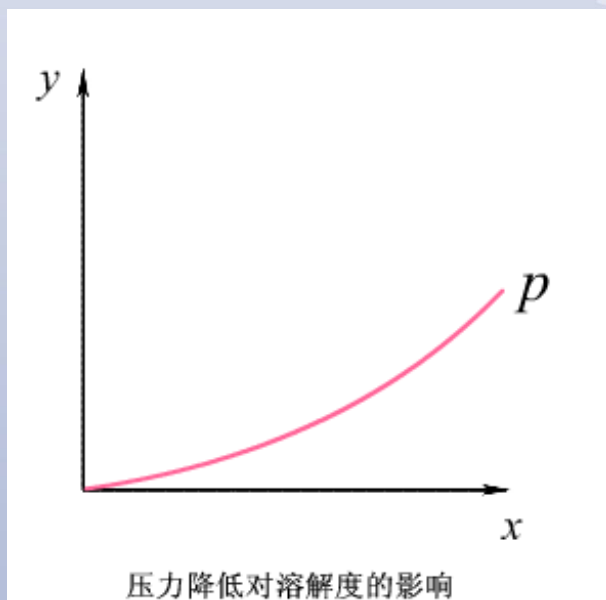
$$m = \frac{E}{p}, \quad E = Hc_M, \quad c = c_M x,$$

$$c_M = \frac{\rho_m}{M_m} \approx \frac{\rho_s}{M_s}, \quad E \approx \frac{H\rho_s}{M_s}。$$

讨论：（1） $p < 5 \text{ atm}$ ， H ， E 与压力无关；

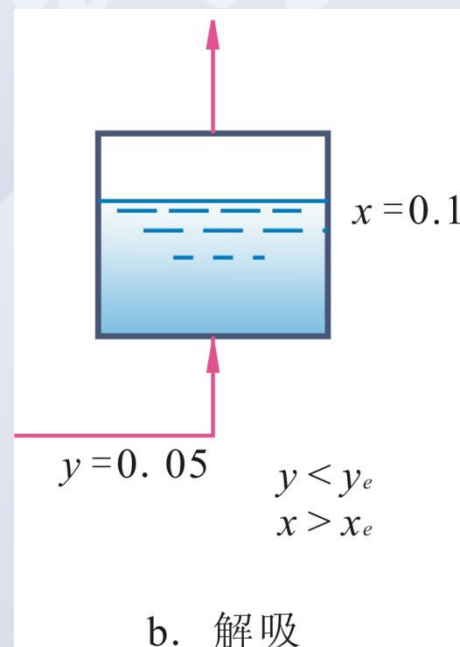
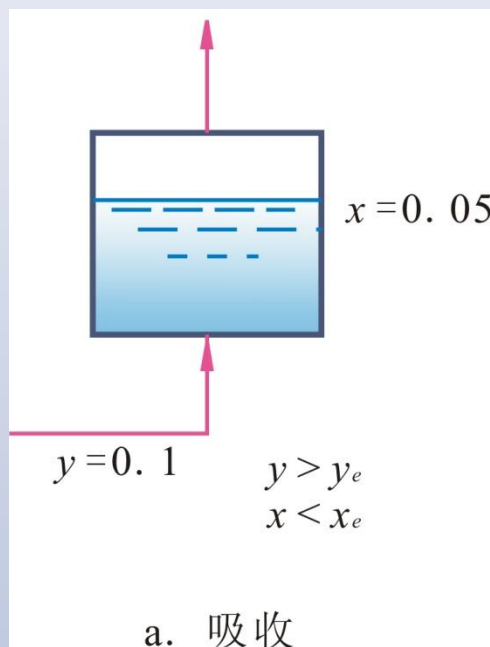
$p \uparrow$ ， $m \downarrow$ ，溶解度 \uparrow 。

（2） $t \uparrow$ ， $E \uparrow$ ， $H \uparrow$ ， $m \uparrow$ ，溶解度 \downarrow 。



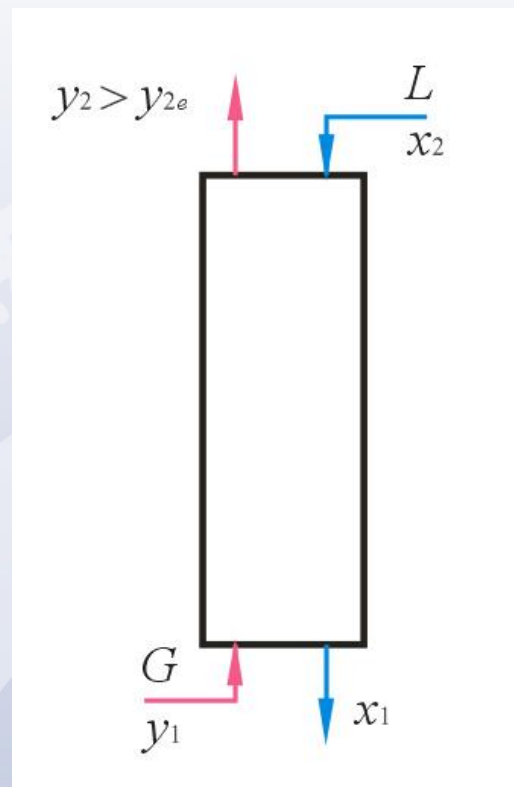
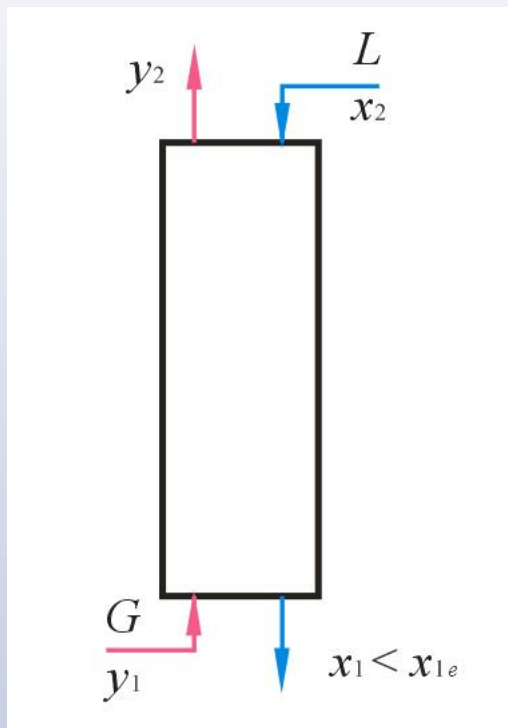
8.2.2 相平衡与吸收过程的关系

8.2.2.1 判别过程的方向



判别过程的方向

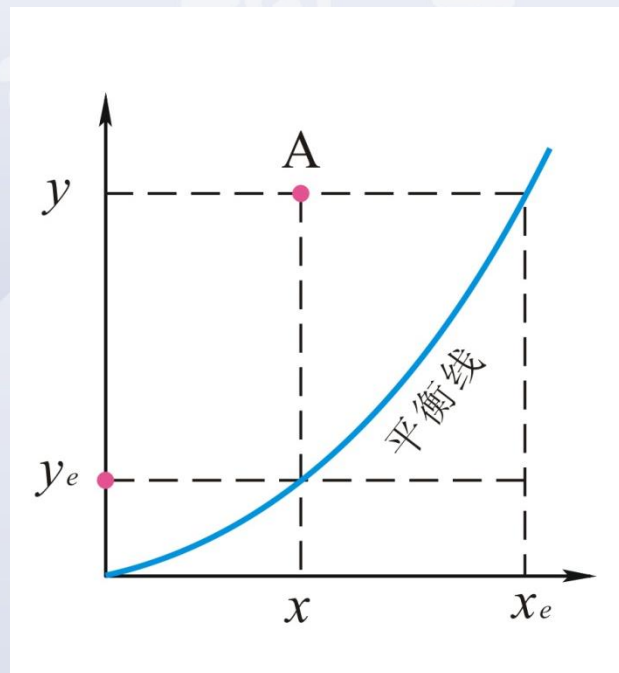
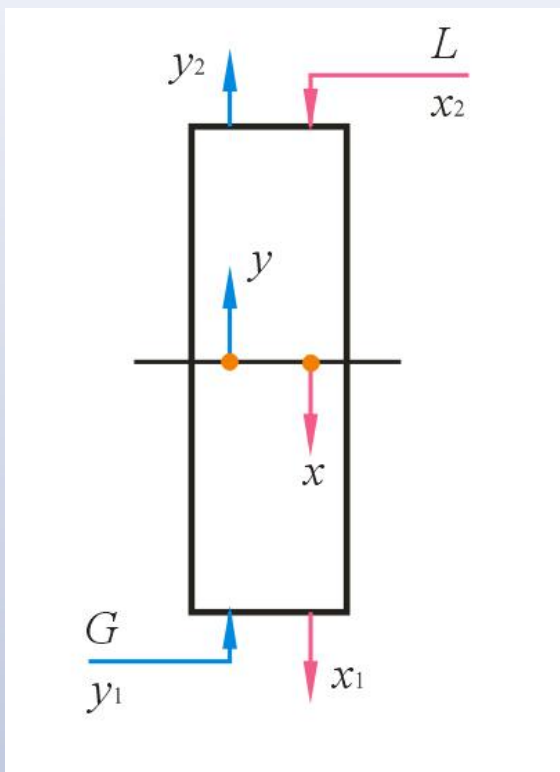
8.2.2.2 指明过程的极限



吸收过程的极限

$$H \rightarrow \infty, L \ll G, x_{1,\max} = x_{1e} = y_1 / m$$
$$L \gg G, y_{2,\min} = y_{2e} = mx_2$$

8.2.2.3 计算过程的推动力



吸收推动力

推动力：实际浓度与平衡浓度的偏离程度。

吸收推动力

$$\begin{cases} \Delta y = y - y_e \quad (\Delta p = p - p_e) \\ \Delta x = x_e - x \quad (\Delta c = c_e - c) \end{cases}$$

解吸推动力

$$\begin{cases} \Delta y = y_e - y \quad (\Delta p = p_e - p) \\ \Delta x = x - x_e \quad (\Delta c = c - c_e) \end{cases}$$

8.3 扩散和单相传质

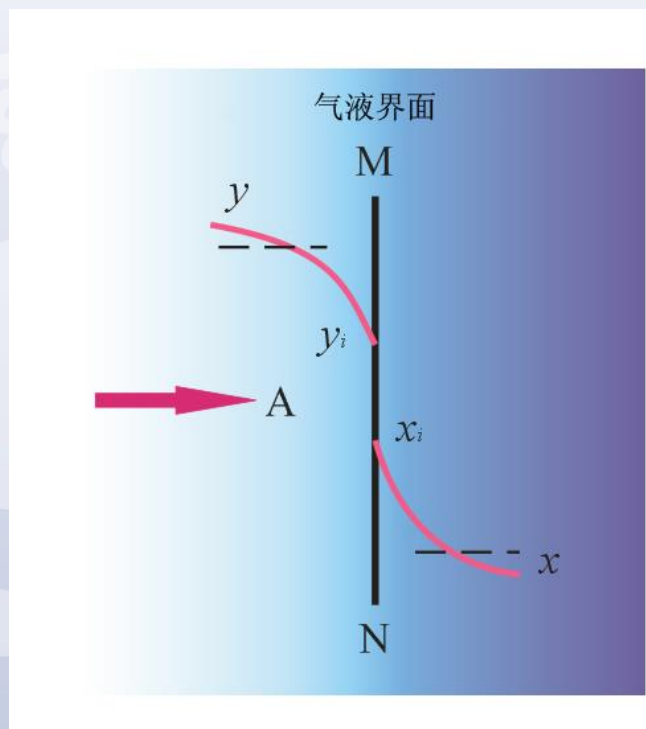
1 相际物质传递的步骤（吸收）

(1) 溶质由气相主体传递至两相界面；

(2) 溶质在界面上的溶解；

(3) 溶质自界面传递至液相主体。

总过程速率取决于单相传质速率。



气液传质的步骤

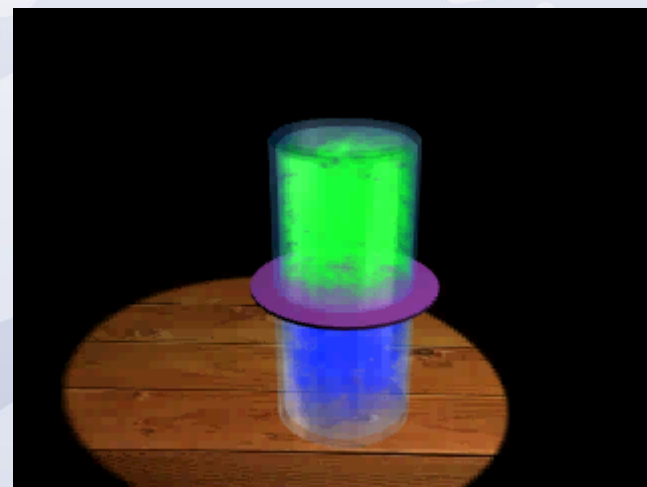
8.3.1 物质传递的两种方式

分子扩散和对流传质

1 费克定律

恒温恒压下的一维定态扩散

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



分子扩散

对B组分有类似关系式，**表明B扩散流与A扩散流大小相等、方向相反！**

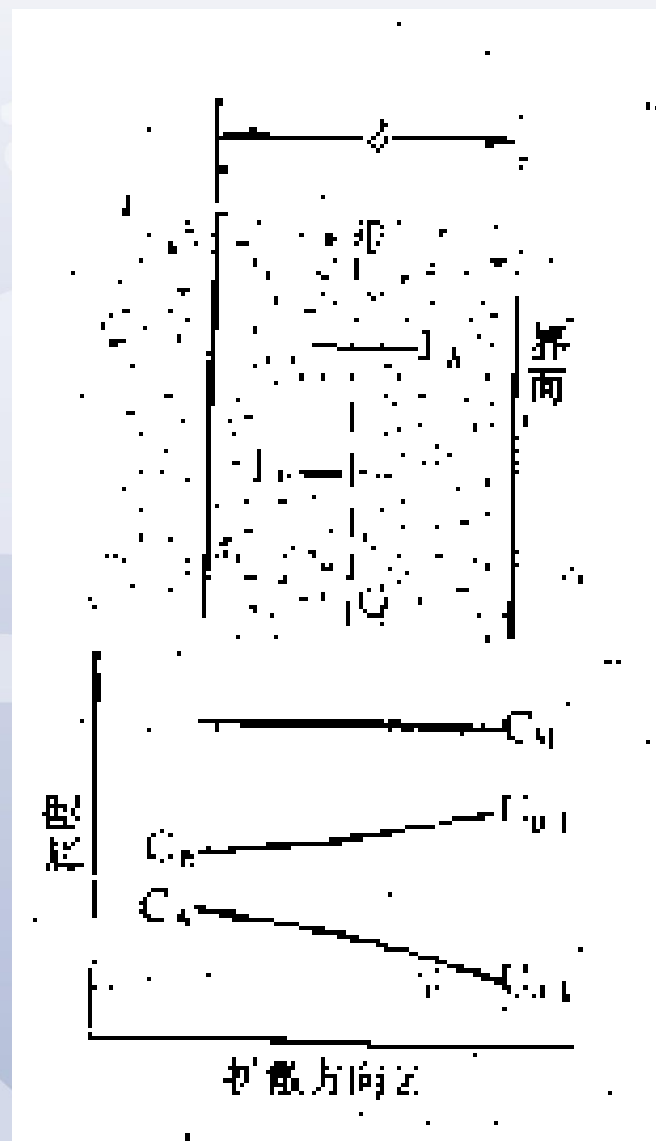
2. 分子扩散与主体流动

组分A: C_{Ai} 和 C_A

组分B:

$$C_{Bi} = C_M - C_{Ai}, \quad C_B = C_M - C_A$$

$C_{Ai} < C_A$ 时，发生A分子扩散；
当B以相同速率向界面扩散时，
称为**等分子反向扩散**。

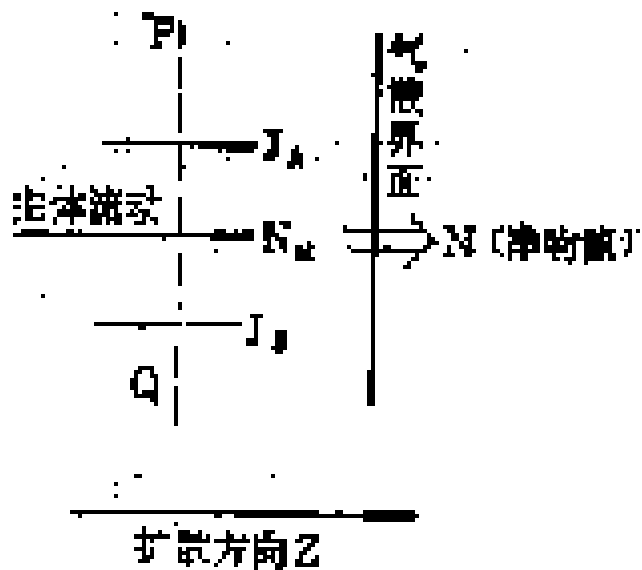


实际过程是A的吸收时，液相不能提供B组分，故吸收过程为A的单向扩散。

吸收时，A吸收而B反向扩散，导致界面上气相总压降低，气相主体和界面之间产生压差，此压差促使气体向界面流动，称主体流动。

3.分子扩散速率方程

A组分扩散和主体流动造成的传递速率可由物料衡算及Fick定律得到



$$N = N_M + J_A + J_B = N_M$$

A组分
$$N_A = J_A + N_M \frac{C_A}{C_M}$$

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

$$N = N_A + N_B$$

$$N_A = J_A + (N_A + N_B) \frac{C_A}{C_M} \quad (\text{基本式})$$

4. 分子扩散速率的积分式 (定态)

1) 等分子反向扩散, $N=0$,

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

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

2) 单向扩散 ($N_B=0$)

$$N_A \left(1 - \frac{C_A}{C_M}\right) = -D \frac{dC_A}{dz}$$

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

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

8.3.2 扩散系数

扩散系数是物质的一种传递性质，其值受温度，压强和混合物中组分浓度的影响。

1 组分在气体中的扩散系数

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

D_0 为 T_0 ， p_0 状态下扩散系数，可查手册。

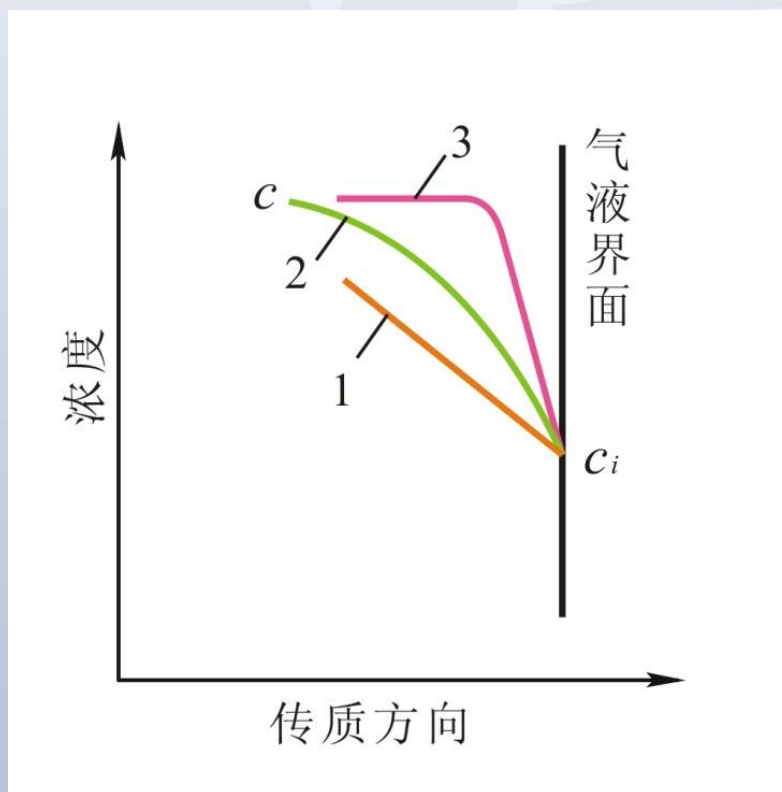
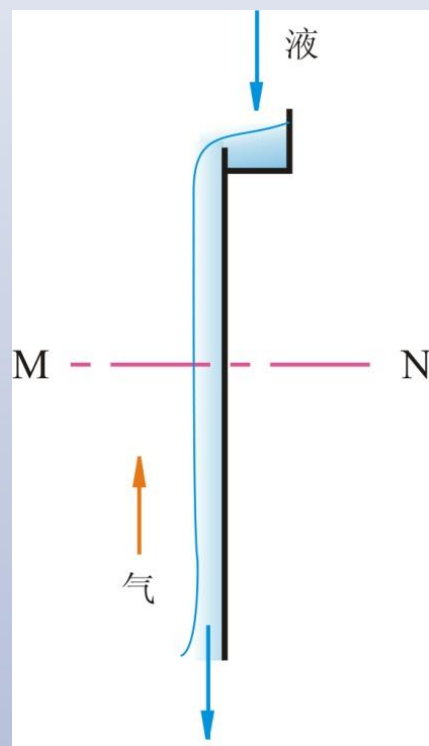
2 组分在液体中的扩散系数

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

8.3.3 对流传质

1 对流传质的贡献

对流传质： 流动流体与相界面之间的物质传递。



- 1—静止流
体；
- 2—滞流；
- 3—湍流

组分的浓度分布

(1) 流体作层流流动

$$N_A = -D \left(\frac{dc_A}{dz} \right)_w, \quad \left(\frac{dc_A}{dz} \right)_w \uparrow, \quad N_A \uparrow。$$

(2) 流体作湍流流动

$$N_A = -D \left(\frac{dc_A}{dz} \right)_w, \quad \left(\frac{dc_A}{dz} \right)_w \uparrow\uparrow, \quad N_A \uparrow\uparrow。$$

流动对传质的强化作用与对流传热类似。

2 对流传质速率

气相与界面的传质 $N_A = k_G(p - p_i)$

液相与界面的传质 $N_A = k_L(c_i - c)$

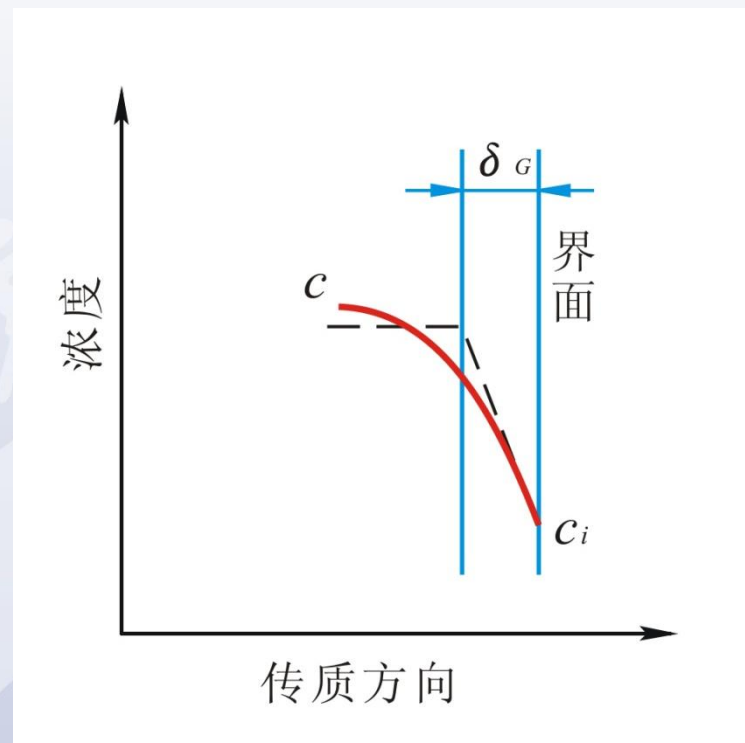
方程有多种形式，传质系数要和推动力一一对应！

8.3.4 对流传质理论

1 有效膜理论

$$k_G = \frac{D_G}{RT\delta_G} \left(\frac{p}{p_{Bm}} \right)$$

$$k_L = \frac{D_L}{\delta_L} \left(\frac{c_M}{c_{Bm}} \right)$$



有效膜理论

膜理论预示 $k \propto D$ ，但实际表明 $k \propto D^{0.67}$ ， δ_G ， δ_L 不是实际存在的有效膜厚度，而成为虚拟的当量膜厚。

2 溶质渗透理论

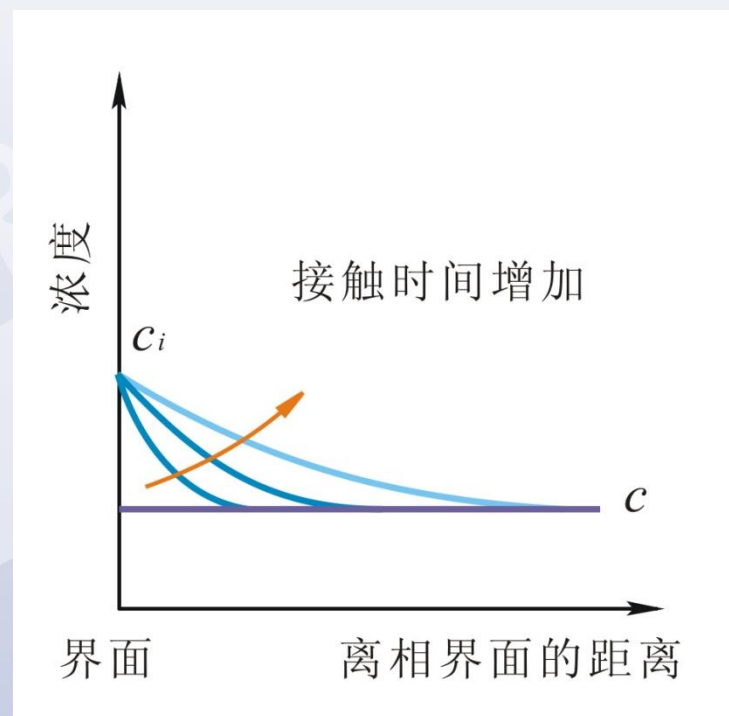
$$k_L = 2\sqrt{\frac{D}{\pi\tau_0}}$$

周期性发生。

3 表面更新理论

$$k_L = \sqrt{DS}$$

表面更新随时进行。



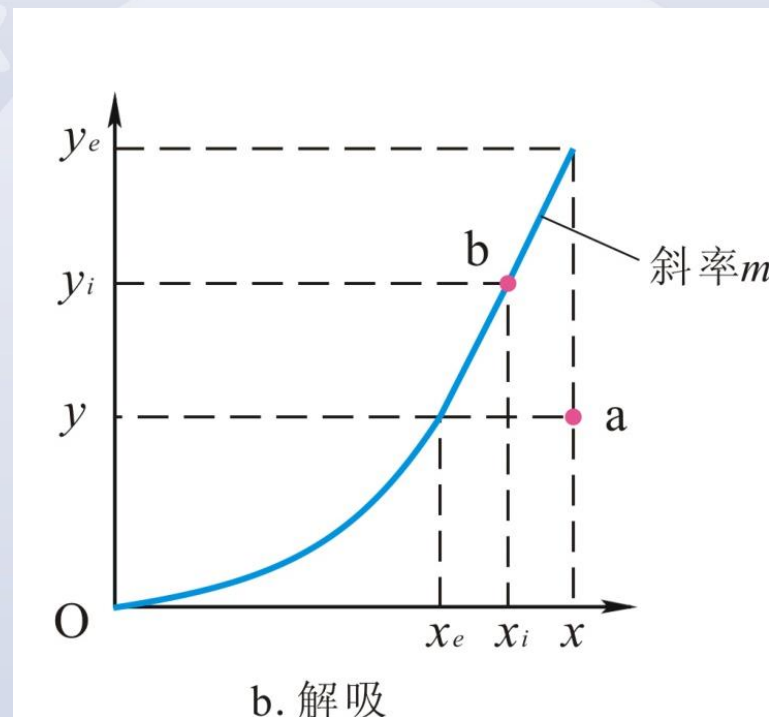
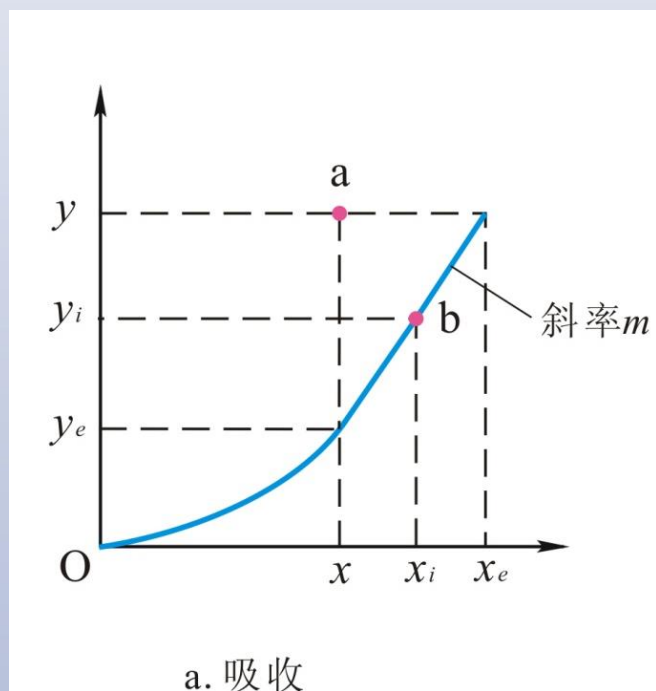
溶质在液相中的浓度分布

8.4 相际传质

8.4.1 相际传质速率

8.4.1.1 传质速率方程

$$N_A = k_y(y - y_i) \quad N_A = k_x(x_i - x) \quad y_i = f(x_i) \quad (y_i = mx_i)$$



主体浓度与界面浓度的图示

$$N_A = \frac{y - y_i}{\frac{1}{k_y}} = \frac{x_i - x}{\frac{1}{k_x}}$$

$$N_A = \frac{y - y_i + (x_i - x)m}{\frac{1}{k_y} + \frac{m}{k_x}} = \frac{y - y_e}{\frac{1}{k_y} + \frac{m}{k_x}}$$

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

$$K_y = \frac{1}{\frac{1}{k_y} + \frac{m}{k_x}}, \text{ kmol/s} \cdot \text{m}^2$$

$$N_A = \frac{(y - y_i)/m + (x_i - x)}{\frac{1}{k_y m} + \frac{1}{k_x}} = \frac{x_e - x}{\frac{1}{k_y m} + \frac{1}{k_x}}$$

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

$$K_x = \frac{1}{\frac{1}{k_y m} + \frac{1}{k_x}}, \quad \text{kmol/s} \cdot \text{m}^2$$

$$mK_y = K_x$$

解吸速率方程

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

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

8.4.1.2 传质速率方程的各种表达形式



相平衡方程	$y = mx + a$	$p = Hc + b$	
吸收传质速率方程	$N_A = k_y(y - y_i)$ $= k_x(x_i - x)$ $= K_y(y - y_e)$ $= K_x(x_e - x)$	$N_A = k_G(p - p_i)$ $= k_L(c_i - c)$ $= K_G(p - p_e)$ $= K_L(c_e - c)$	$k_y = pk_G$ $k_x = c_M k_L$ $K_y = pK_G$ $K_x = c_M K_L$
吸收或解吸的总传质系数	$K_y = \frac{1}{\frac{1}{k_y} + \frac{m}{k_x}}$ $K_x = \frac{1}{\frac{1}{k_y \cdot m} + \frac{1}{k_x}}$ $K_y m = K_x$	$K_G = \frac{1}{\frac{1}{k_G} + \frac{H}{k_L}}$ $K_L = \frac{1}{\frac{1}{k_G \cdot H} + \frac{1}{k_L}}$ $K_G H = K_L$	

8.4.2 界面浓度与传质阻力的控制步骤

8.4.2.1 界面浓度的求取

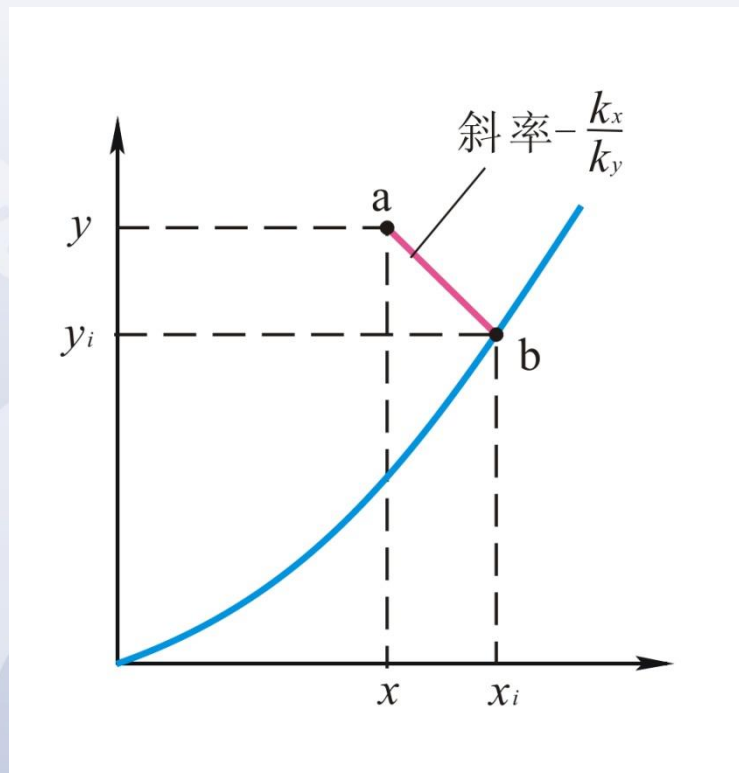
$$\frac{y - y_i}{x_i - x} = \frac{k_x}{k_y}$$

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

(1) 图解法

(2) 解析法

$y_i = f(x_i)$ 与上式联立求解。



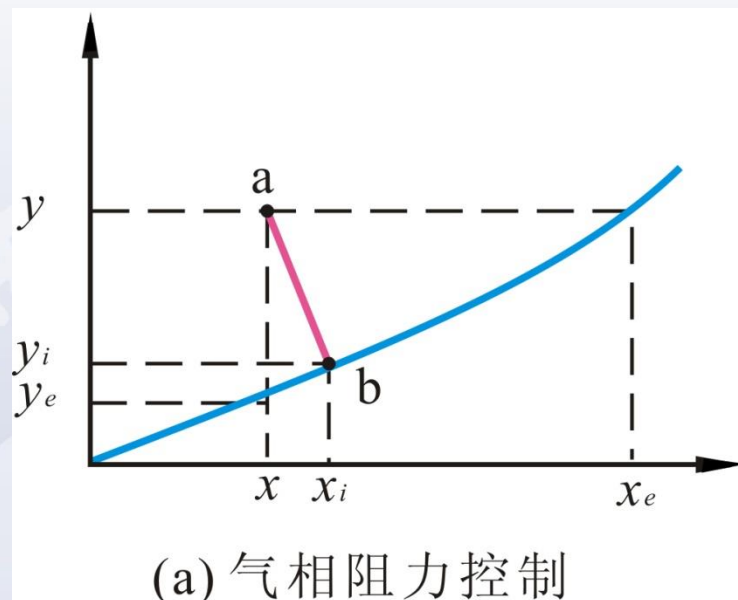
界面浓度的求取

8.4.2.2 吸收过程的阻力分析

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

(1) 气相阻力控制

$$\frac{1}{k_y} \gg \frac{m}{k_x}, \quad K_y \approx k_y$$



传质阻力在两相中的分配

条件: $k_y \ll k_x$ 或 $\left| \frac{k_x}{k_y} \right| \gg 1$

m 很小 (溶解度很大); 易溶气体: 水
吸收 NH_3 , HCl 。 $G \uparrow$, $K_y \uparrow$ 。

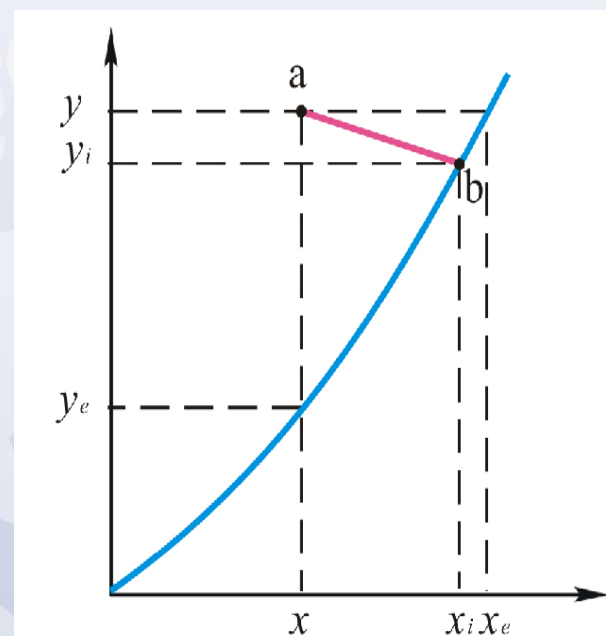
(2) 液相阻力控制

$$\frac{1}{mk_y} \ll \frac{1}{k_x}, \quad K_x \approx k_x$$

条件: $k_y \gg k_x$ 或 $\left| \frac{k_x}{k_y} \right| \ll 1$

m 很大 (溶解度很小);
 难溶气体: 水吸收 CO_2 , O_2 等。

$L \uparrow, K_x \uparrow$ 。



(b) 液相阻力控制

传质阻力

在两相中的分配

8.5 低含量气体吸收

8.5.1 低含量气体吸收的特点

- (1) G , L 为常量; (2) 等温;
(3) 传质系数为常量。

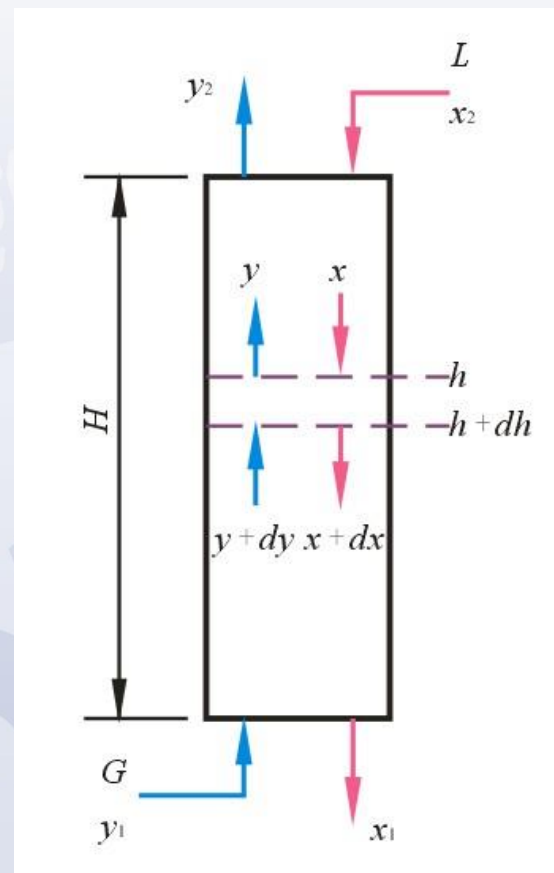
8.5.2 过程数学描述

8.5.2.1 物料衡算微分式

$$Gdy = N_A adh$$

$$Ldx = N_A adh$$

衡算条件：忽略控制体两端面轴向的分子扩散。



流经微元塔段
两相浓度变化

8.5.2.2 传质速率积分式

$$Gdy = N_A adh = K_y a \left(y - y_e \right) dh$$

$$Ldx = N_A adh = K_x a \left(x_e - x \right) dh$$

$$H = \frac{G}{K_y a} \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{y - y_e} = H_{OG} \cdot N_{OG}$$

$$H = \frac{L}{K_x a} \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{x_e - x} = H_{OL} \cdot N_{OL}$$

$K_y a, K_x a$ —— 容积传质系数, $\text{kmol/s} \cdot \text{m}^3$

8.5.2.3 传质单元数与传质单元高度

$$\begin{aligned} H &= H_{OG} \cdot N_{OG} = H_{OL} \cdot N_{OL} \\ &= \text{传质单元高度} \times \text{传质单元数} \end{aligned}$$

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

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

传质单元数与传质单元高度

塔高计算式	传质单元高度	传质单元数	
$H = H_{OG} \cdot N_{OG}$	$H_{OG} = \frac{G}{K_y a}$	$N_{OG} = \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{y - y_e}$	$H_{OG} = H_G + \frac{mG}{L} H_L$
$H = H_{OL} \cdot N_{OL}$	$H_{OL} = \frac{L}{K_x a}$	$N_{OL} = \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{x_e - x}$	$H_{OL} = \frac{L}{mG} H_G + H_L$
$H = H_G \cdot N_G$	$H_G = \frac{G}{k_y a}$	$N_G = \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{y - y_i}$	$H_{OG} \frac{L}{mG} = H_{OL}$
$H = H_L \cdot N_L$	$H_L = \frac{L}{k_x a}$	$N_L = \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{x_i - x}$	

8.5.2.4 操作线与推动力的变化规律

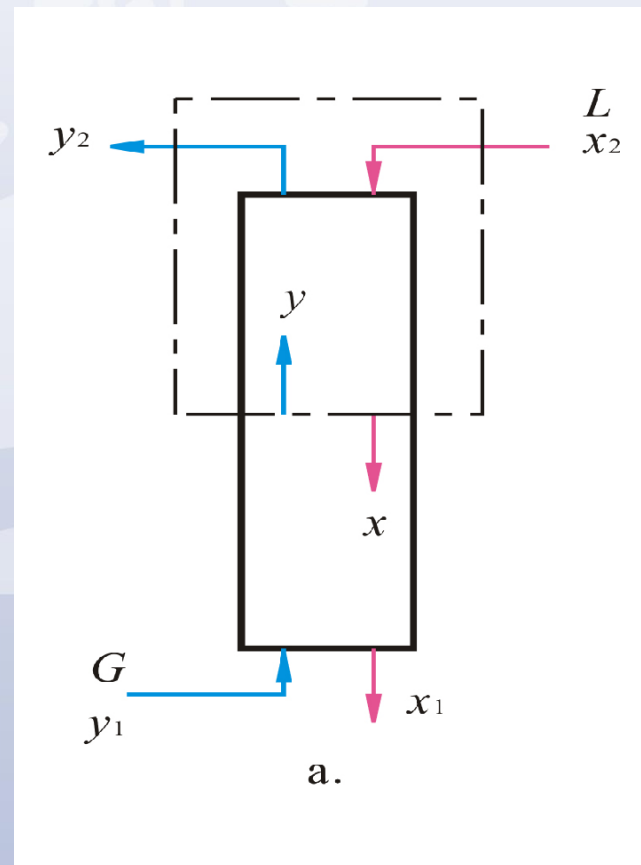
两相逆流接触，如图

对控制体作物料衡算：

$$Gy + Lx_2 = Gy_2 + Lx$$

操作线：

$$y = \frac{L}{G}(x - x_2) + y_2$$



逆流吸收的操作

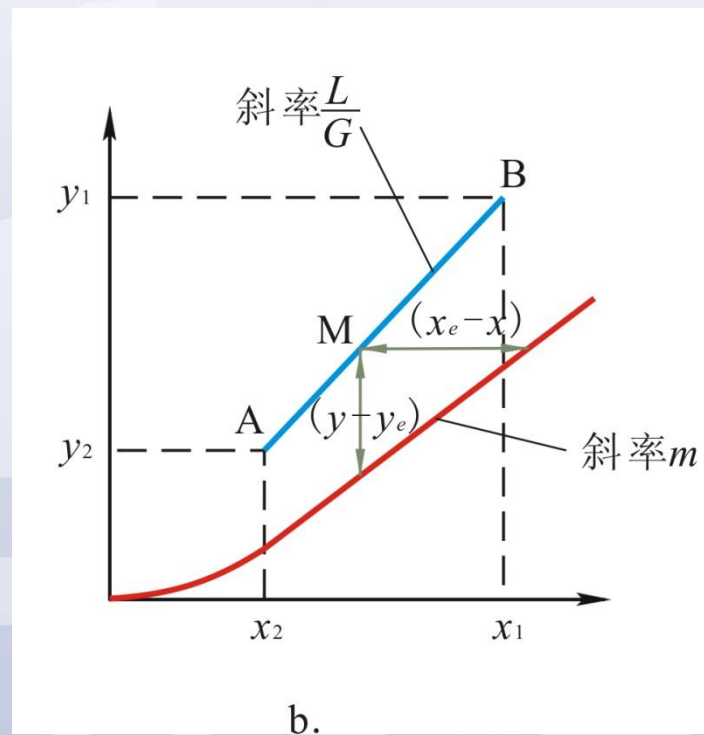
如平衡线在操作范围内可视为直线，则：

$$\frac{d(\Delta y)}{dy} = \frac{(y - y_e)_1 - (y - y_e)_2}{y_1 - y_2}$$

$$= \frac{\Delta y_1 - \Delta y_2}{y_1 - y_2}$$

$$\frac{d(\Delta x)}{dx} = \frac{(x_e - x)_1 - (x_e - x)_2}{x_1 - x_2}$$

$$= \frac{\Delta x_1 - \Delta x_2}{x_1 - x_2}$$



逆流吸收操作线

8.5.3 传质单元数的计算方法

8.5.3.1 平衡线为直线时的对数平均推动力法

$$\begin{aligned} H &= \frac{G}{K_y a} \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{y - y_e} = \frac{G}{K_y a} \cdot \frac{y_1 - y_2}{\Delta y_1 - \Delta y_2} \int_{\Delta y_2}^{\Delta y_1} \frac{d(\Delta y)}{\Delta y} \\ &= \frac{G}{K_y a} \cdot \frac{y_1 - y_2}{\frac{\Delta y_1 - \Delta y_2}{\ln \frac{\Delta y_1}{\Delta y_2}}} = \frac{G}{K_y a} \cdot \frac{y_1 - y_2}{\Delta y_m} \end{aligned}$$

$$\Delta y_m = \frac{\Delta y_1 - \Delta y_2}{\ln \frac{\Delta y_1}{\Delta y_2}}$$

$$N_{OG} = \frac{y_1 - y_2}{\Delta y_m}$$

同理：

$$H = \frac{L}{K_x a} \cdot \frac{x_1 - x_2}{\frac{\Delta x_1 - \Delta x_2}{\ln \frac{\Delta x_1}{\Delta x_2}}} = \frac{L}{K_x a} \cdot \frac{x_1 - x_2}{\Delta x_m}$$

$$\Delta x_m = \frac{\Delta x_1 - \Delta x_2}{\ln \frac{\Delta x_1}{\Delta x_2}}$$

$$N_{OL} = \frac{x_1 - x_2}{\Delta x_m}$$

8.5.3.2 吸收因数法

$$N_{OG} = \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{y - y_e}, \quad y_e = mx, \quad x = \frac{G}{L}(y - y_2) + x_2$$

$$N_{OG} = \frac{1}{1 - \frac{1}{A}} \ln \left[\left(1 - \frac{1}{A} \right) \frac{y_1 - mx_2}{y_2 - mx_2} + \frac{1}{A} \right]$$

$$\frac{1}{A} = \frac{mG}{L} \quad \text{——解吸因数, } A \text{——吸收因数}$$

$$N_{OL} = \frac{1}{1 - A} \ln \left[(1 - A) \frac{y_1 - mx_2}{y_1 - mx_1} + A \right]$$

8.5.4 吸收塔的塔高计算

8.5.4.1 计算方程

全塔物料衡算式 $G(y_1 - y_2) = L(x_1 - x_2)$

相平衡方程式 $y_e = f(x)$

吸收过程基本方程式

$$H = H_{OG} \cdot N_{OG} = \frac{G}{K_y a} \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{y - y_e}$$

$$H = H_{OL} \cdot N_{OL} = \frac{L}{K_x a} \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{x_e - x}$$

8.5.4.2 塔高计算的命题

计算要求：求达到指定分离要求所需的塔高。

给定条件： y_1 ， G ，相平衡关系，
分离要求(y_2 或 η)。

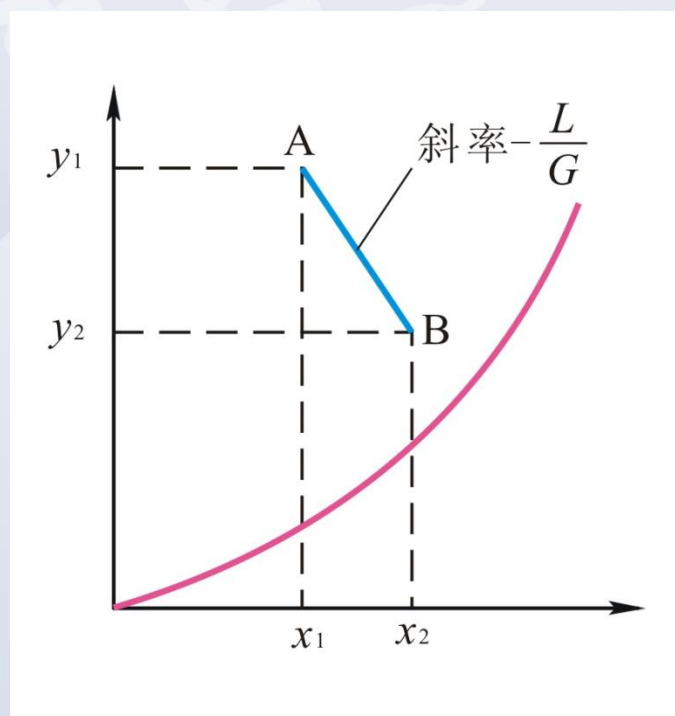
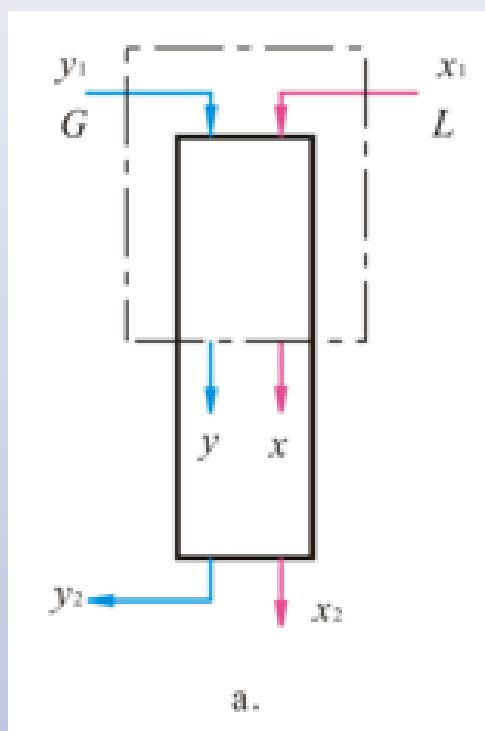
回收率：

$$\eta = \frac{\text{被吸收的溶质量}}{\text{气体进塔的溶质量}}$$
$$= \frac{G_1 y_1 - G_2 y_2}{G_1 y_1} = 1 - \frac{y_2}{y_1}$$

尚须作计算条件选择。

8.5.4.3 流向选择

一般选逆流， Δy_m 较大。在特殊情况下，可考虑用并流。



并流吸收的操作线

$$y = y_1 - \frac{L}{G}(x - x_1)$$

8.5.4.4 吸收剂进口浓度的选择

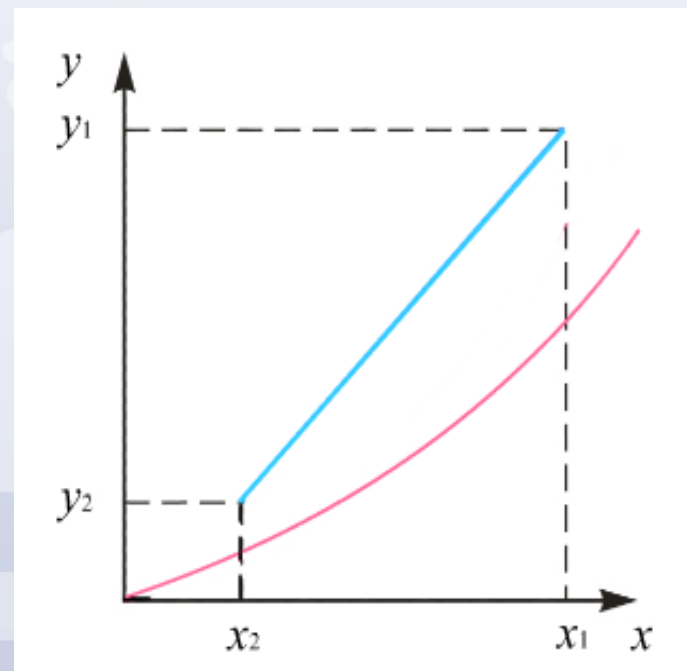
技术上: $x_2 \downarrow$, $\Delta y_m \uparrow$,

$H \downarrow$

(最高允许浓度: $x_2 = x_{2m}$,

$\Delta y_m = 0$, $H \rightarrow \infty$)

经济上: $x_2 \downarrow$, $H \downarrow$, 设备费 \downarrow , 但解吸操作费 \uparrow , 须优化选择。

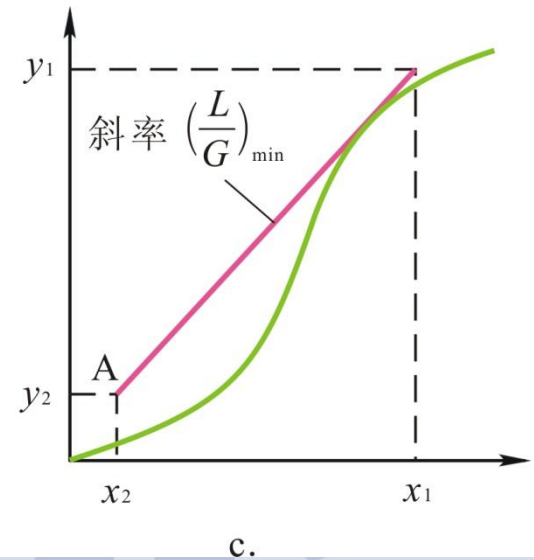
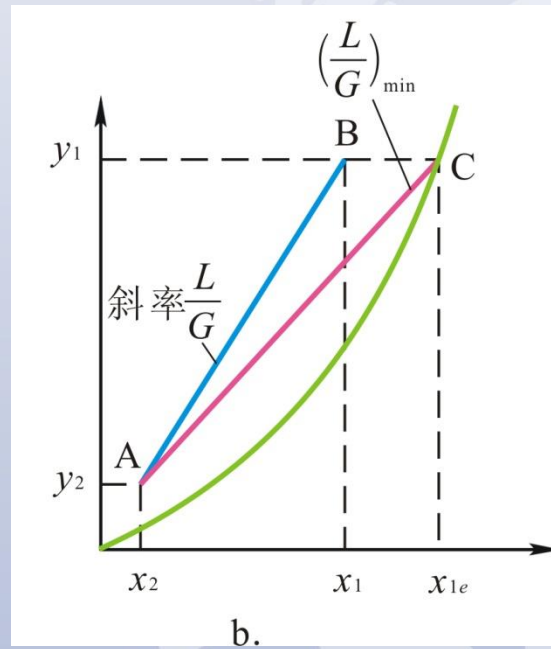
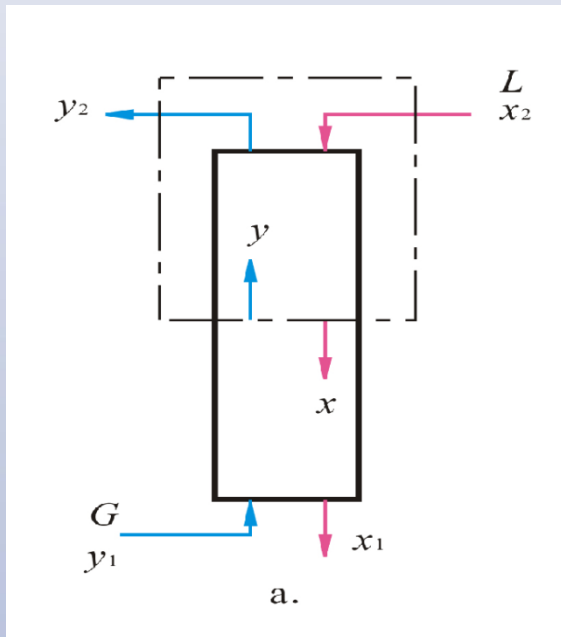


吸收剂进口浓度上限

8.5.4.5 吸收剂用量的选择及最小液气比

$$x_1 = x_2 + \frac{G}{L} (y_1 - y_2) \quad G, y_1, y_2, x_2 \text{ 给定下}$$

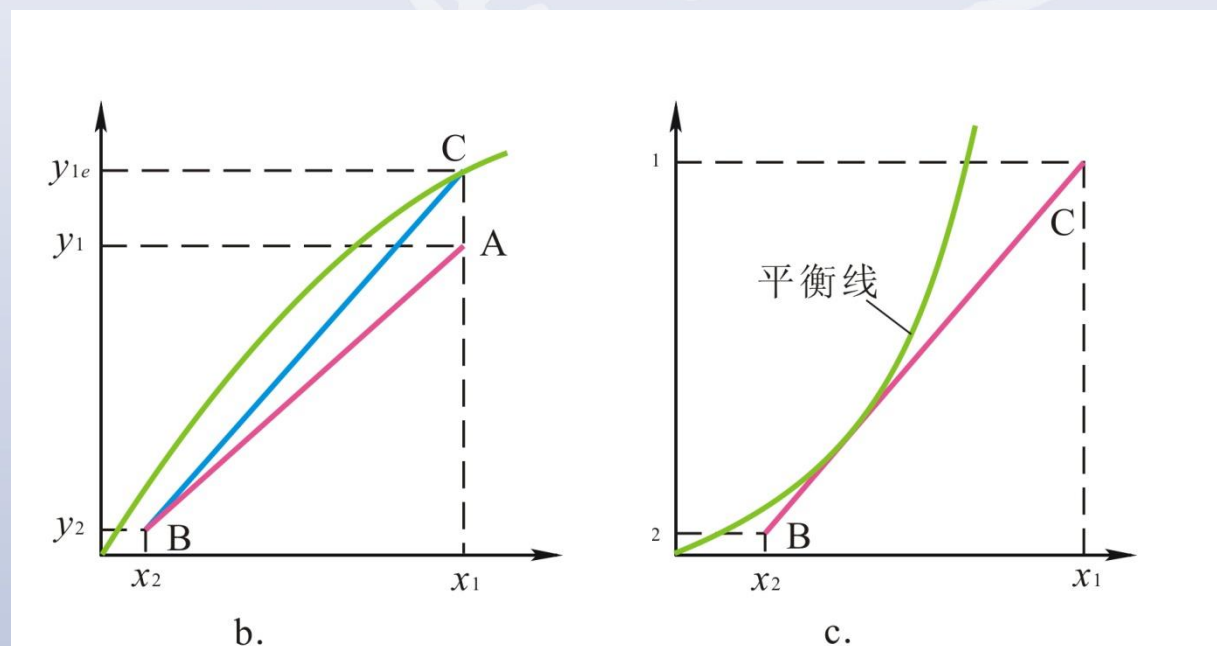
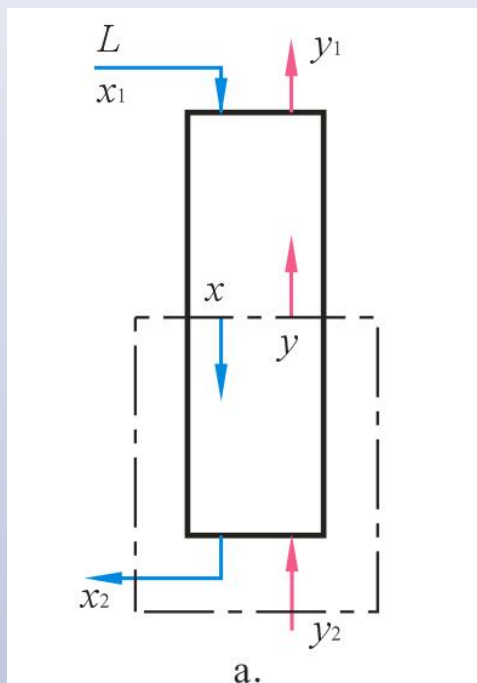
$$\left(\frac{L}{G}\right)_{\min} = \frac{y_1 - y_2}{x_{1e} - x_2}, \quad \Delta y_1 = 0, \quad H \rightarrow \infty。$$



最小液气比

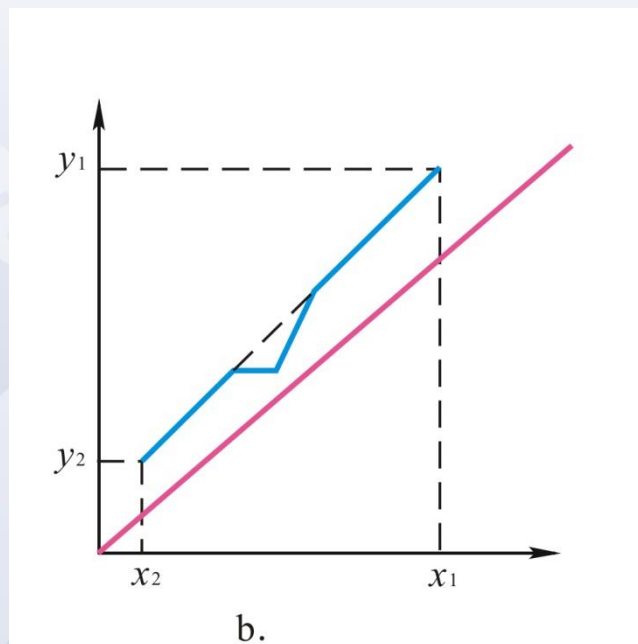
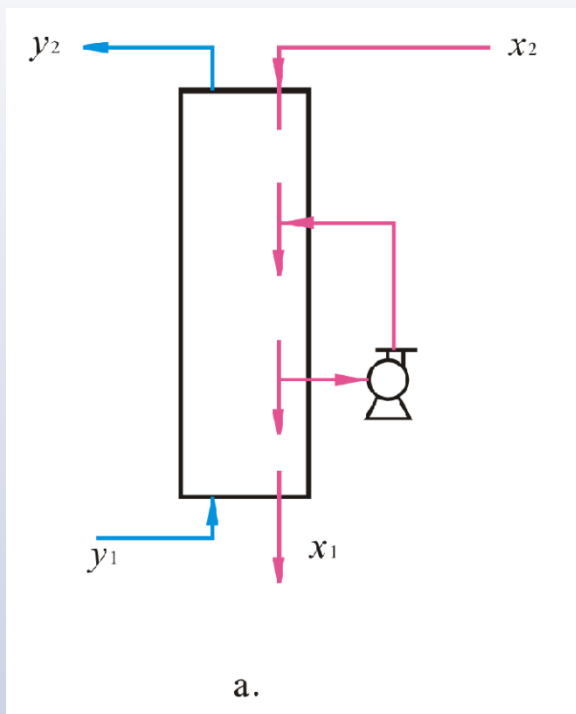
8.5.4.6 解吸塔的最小气液比

$$\left(\frac{G}{L}\right)_{\min} = \frac{x_1 - x_2}{y_{1e} - y_2}$$



解吸操作线和最小液气比

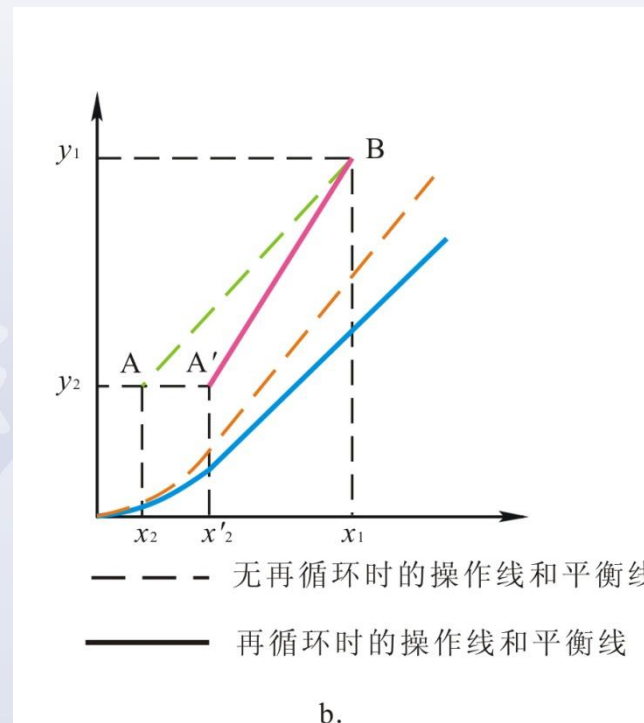
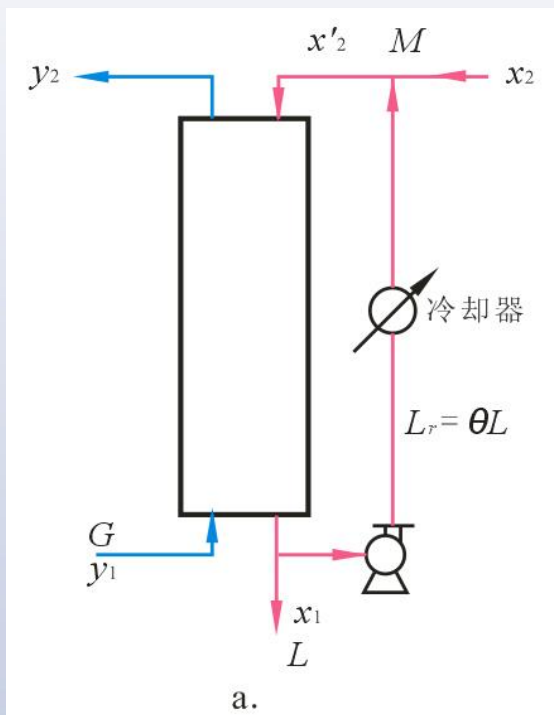
8.5.4.7 塔内返混的影响



轴向返混降低推动力

返混：少量流体自身由下游返回至上游。
返混破坏逆流操作条件，使推动力下降，
对传质不利。

8.5.4.8 吸收剂再循环（返混）



吸收剂再循环的操作线

入塔吸收剂浓度:
$$x'_2 = \frac{\theta x_1 + x_2}{1 + \theta}$$

8.5.5 吸收塔的操作型计算

8.5.5.1 操作型计算的命题

(1) 第一类命题

(求吸收结果)

给定条件:

H (及其他有关尺寸), L , G , x_2 , y_1 ,
 $y = f(x)$, 流动方式, $K_y a$ 或 $K_x a$ 。

计算目的:

$y_2(\eta)$, x_1 。

(2) 第二类命题

(求吸收条件或吸收液吸收结果)

给定条件:

H (及其他有关尺寸), G , y_1 , y_2 ,
 x_2 , $y = f(x)$, 流动方式, $K_y a$ 或 $K_x a$ 。

计算目的:

L , x_1 。

8.5.5.2 计算方法

联立4.5.4.1节所列方程。一般，由于相平衡方程式及吸收过程方程式的非线性，须试差或迭代。

当平衡线在操作范围内可视为直线时，第一类命题可将基本方程线性化。

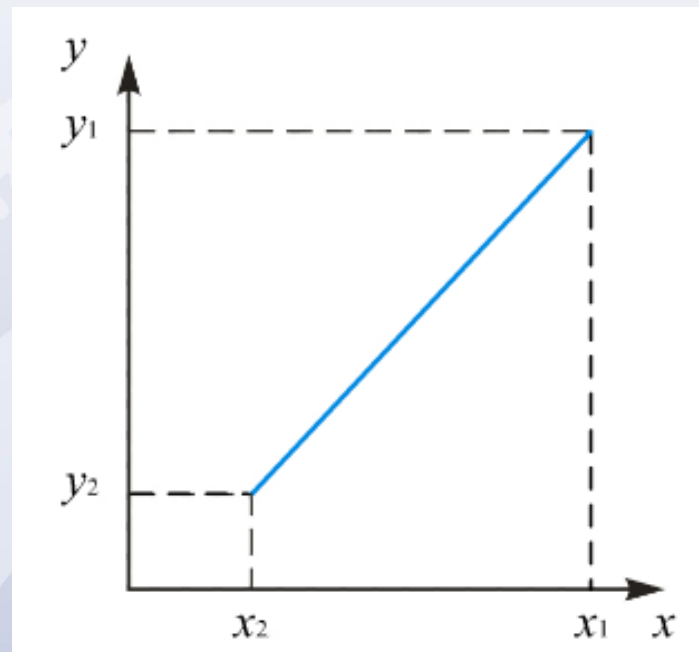
但第二类命题仍须试差。

8.5.5.3 吸收塔的操作和调节

调节方法：改变吸收剂的入口条件。

(1) L 的调节

$$L \uparrow, N_A \uparrow, y_2 \downarrow, \\ x_1 \downarrow, \eta \uparrow, K_y a \uparrow。$$



L 增大对操作结果的影响

吸收剂用量调节的限度

$$H \rightarrow \infty$$

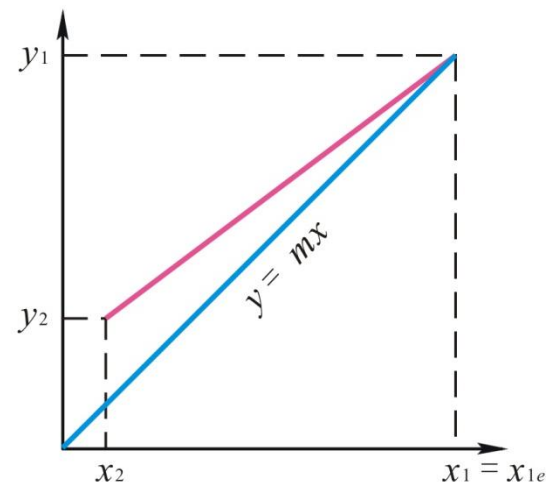
$L/G < m$, 气液两相在塔底平衡

$$x_{1\max} = y_1 / m$$

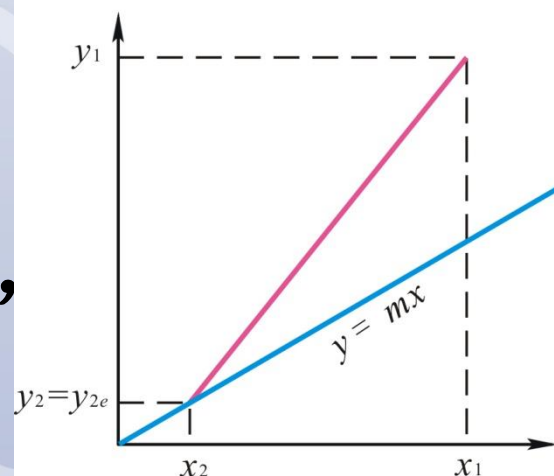
$$y_{2\max} = y_1 - L/G (x_{1\max} - x_2)$$

$L/G > m$, 气液两相在塔顶平衡,

$$y_{2\max} = mx_2$$



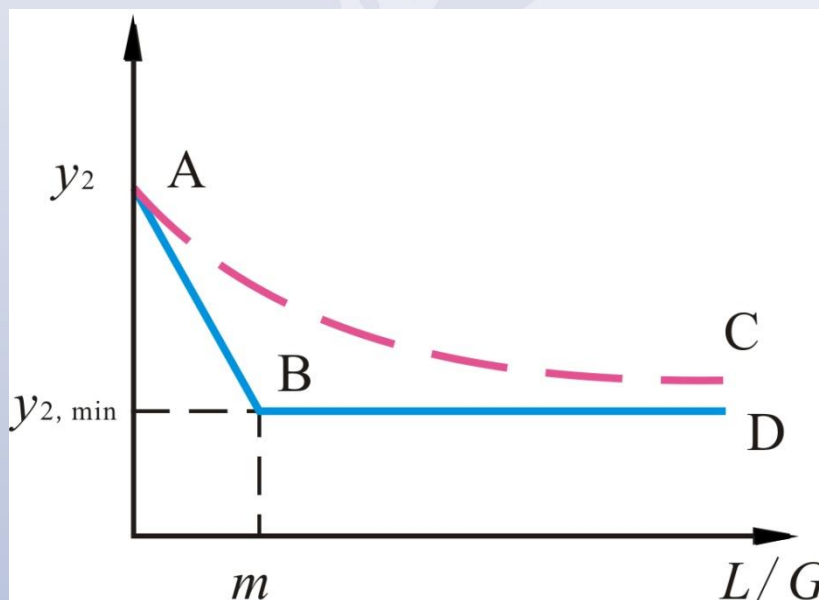
a. $A = \frac{L}{mG} < 1$



b. $A = \frac{L}{mG} > 1$

有限塔高

$L/G < m$, $L \uparrow$, $y_2 \downarrow$; $L/G > m$, $L \uparrow$,
 y_2 下降不明显, 此时操作调节应改变
 x_2 或 t 。

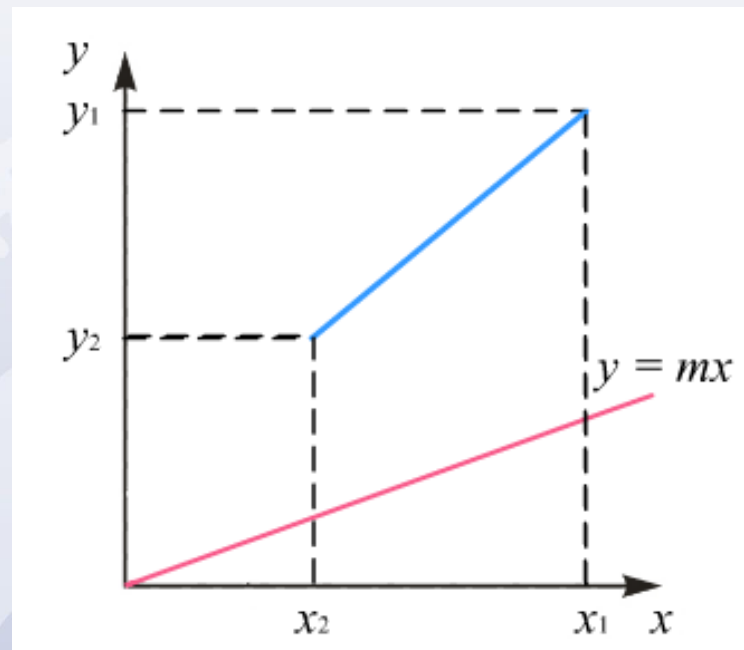


吸收操作中 L/G 的调节作用

(2) x_2 的調節

$x_2 \downarrow$, $\Delta y_m \uparrow$, $N_A \uparrow$,
 $y_2 \downarrow$, $\eta \uparrow$, $x_1 \downarrow$ 。

x_2 的調節主要受解吸
 過程的限制。



x_2 降低對操作結果的影響

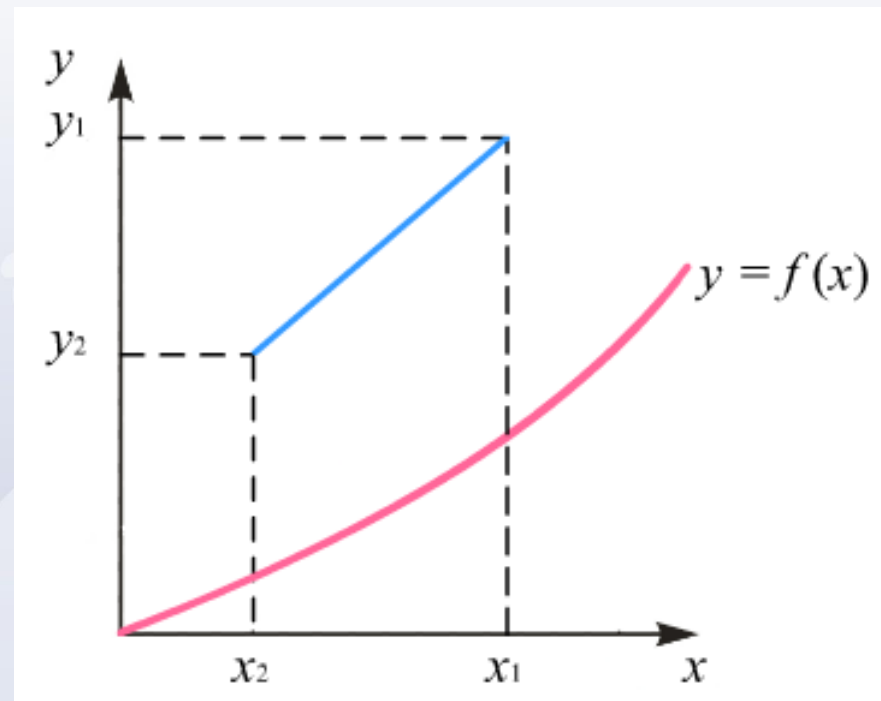
(3) t 的调节

$t_2 \downarrow$, 气体溶解度增大;

$m \downarrow$, $N_A \uparrow$;

$y_2 \downarrow$, $\eta \uparrow$, $x_1 \uparrow$ 。

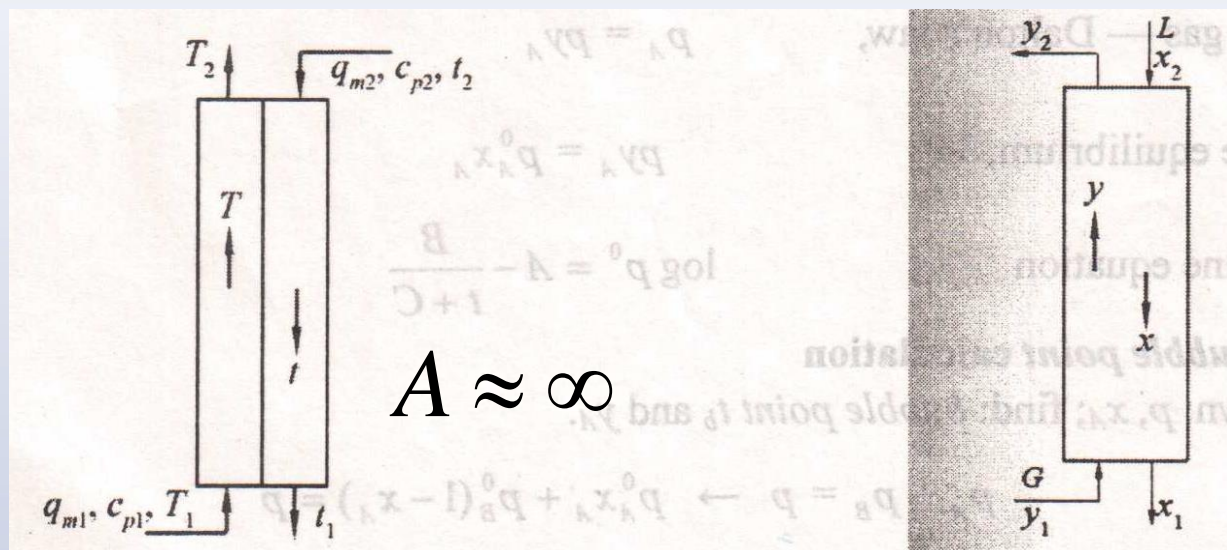
温度调节在技术上受冷却器能力的限制; 在经济上受能耗的优化约束。



T 降低对操作结果的影响

质量传递和热量传递的对比

传热 传质



$$q_{m2}c_{p2} \ll q_{m1}c_{p1}$$

$$t_{1\max} = T_1$$

$$q_{m2}c_{p2} \gg q_{m1}c_{p1}$$

$$t_2 \approx t_1$$

$$G(y_1 - y_2) = L(x_1 - x_2)$$

y1、y2固定，溶剂流量很小时

$$x_{1\max} = y_1/m$$

$$T_{2 \min} = t_2$$

$$q_{m1}c_{p1}(T_1 - t_2) = q_{m2}c_{p2}(t_{1 \max} - t_2)$$

$t_{1 \max}$ 由热量衡算得到

平衡 $T = t$

推动力 $T - t$

$$\frac{q}{A} \propto (T - t)$$

溶剂流量 很小时

$$x_{1 \max} = y_1 / m$$

$$y_{2 \min} = y_{2e} = mx_2$$

$x_{1 \max}$ 由物料衡算得到

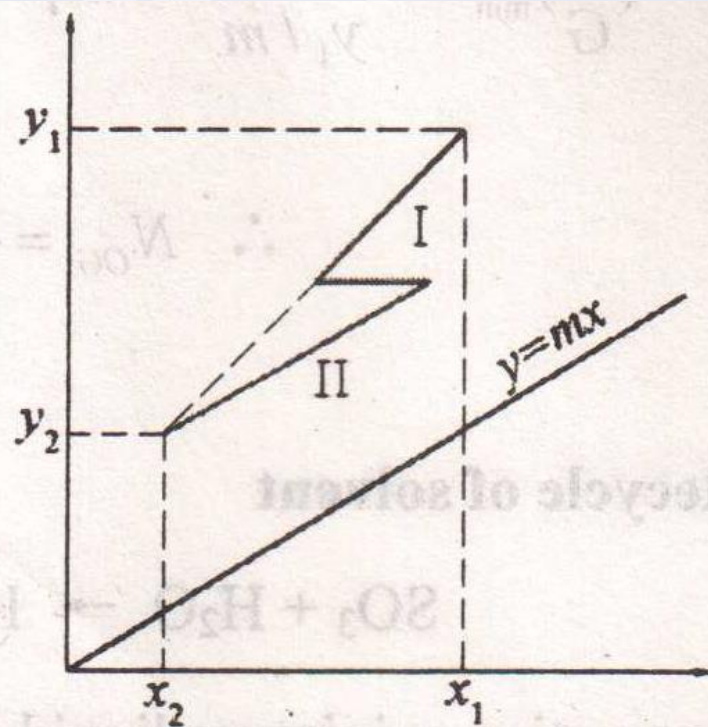
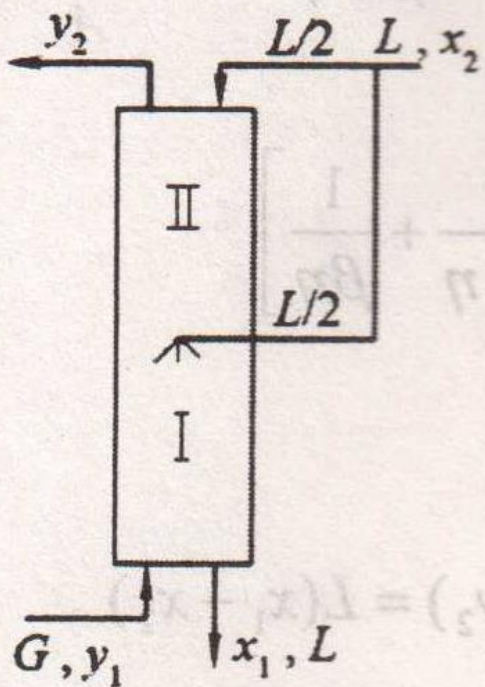
$$y_e = mx$$

$$y - y_e \quad x_e - x$$

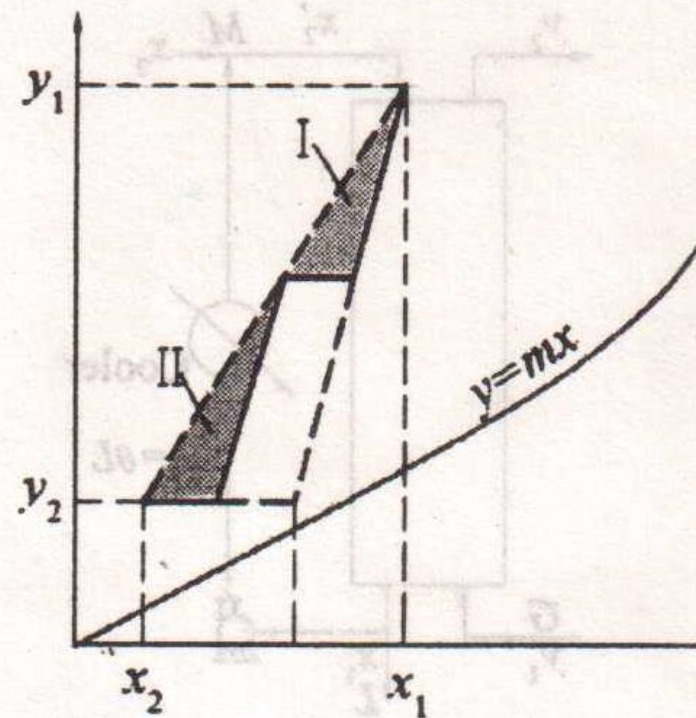
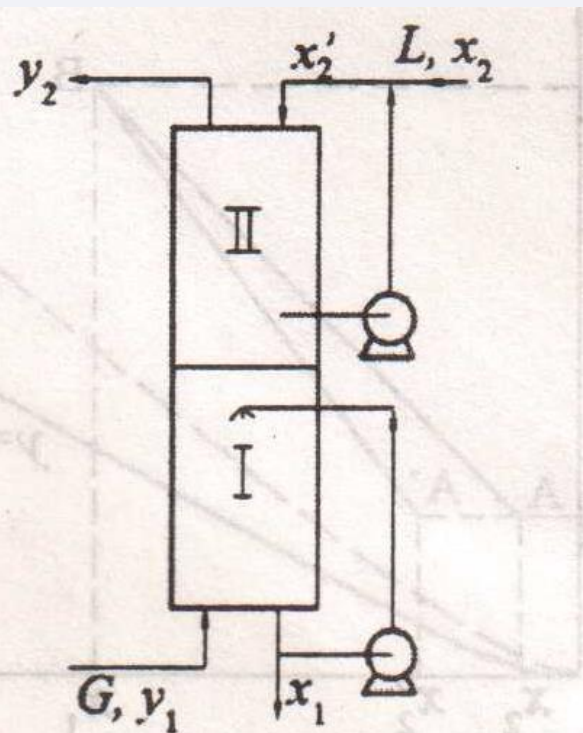
$$N_A \propto (y - y_e)$$

$$N_A \propto (x_e - x)$$

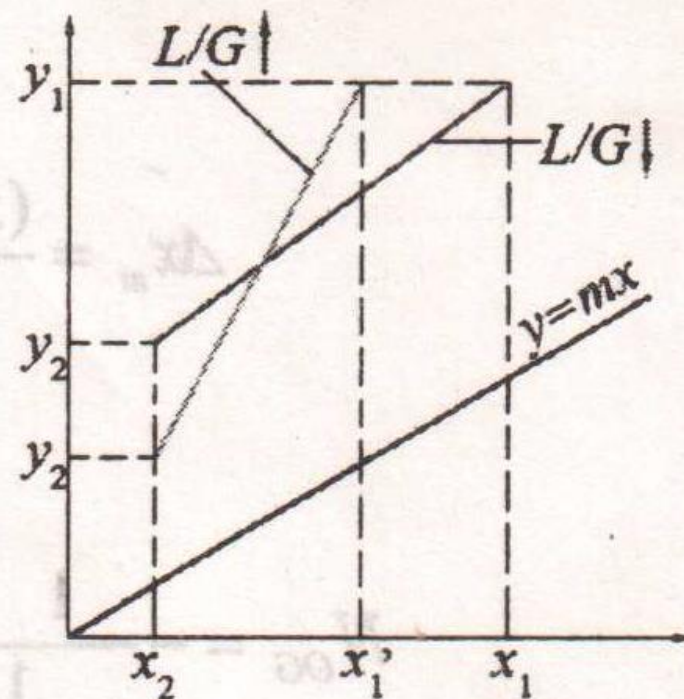
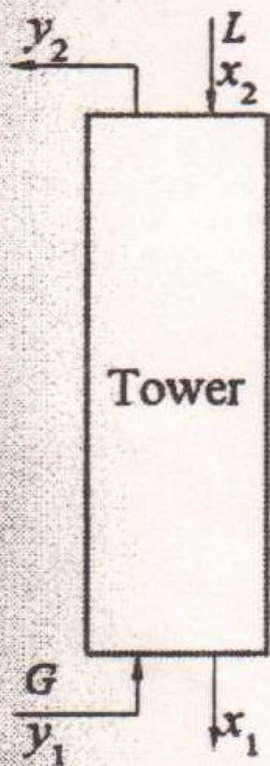
吸收溶剂多股进料



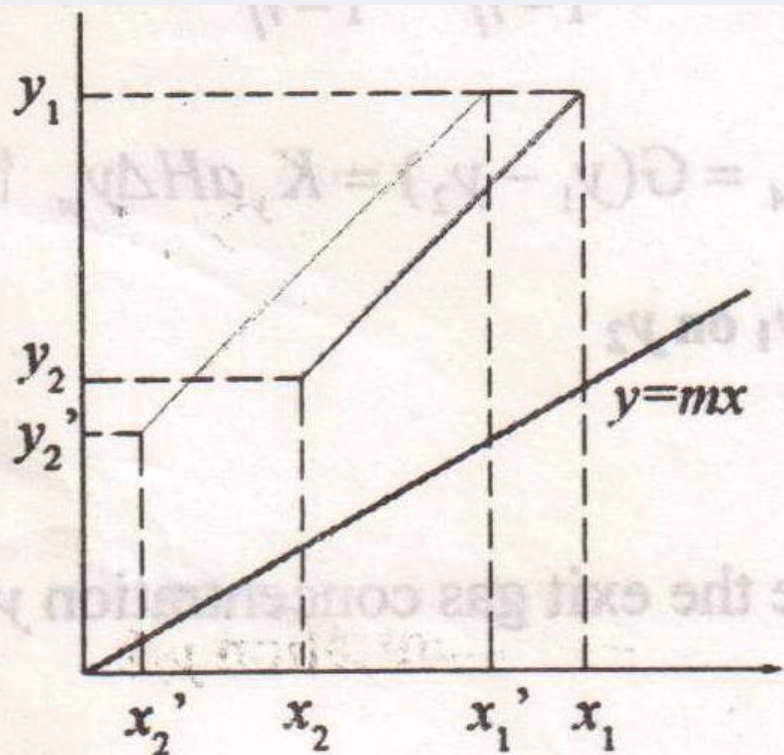
多股溶剂再循环



液气比增加对 y_2 的影响 (x_2 、 t 恒定)



x_2 对 y_2 的影响 (L 、 t 恒定)



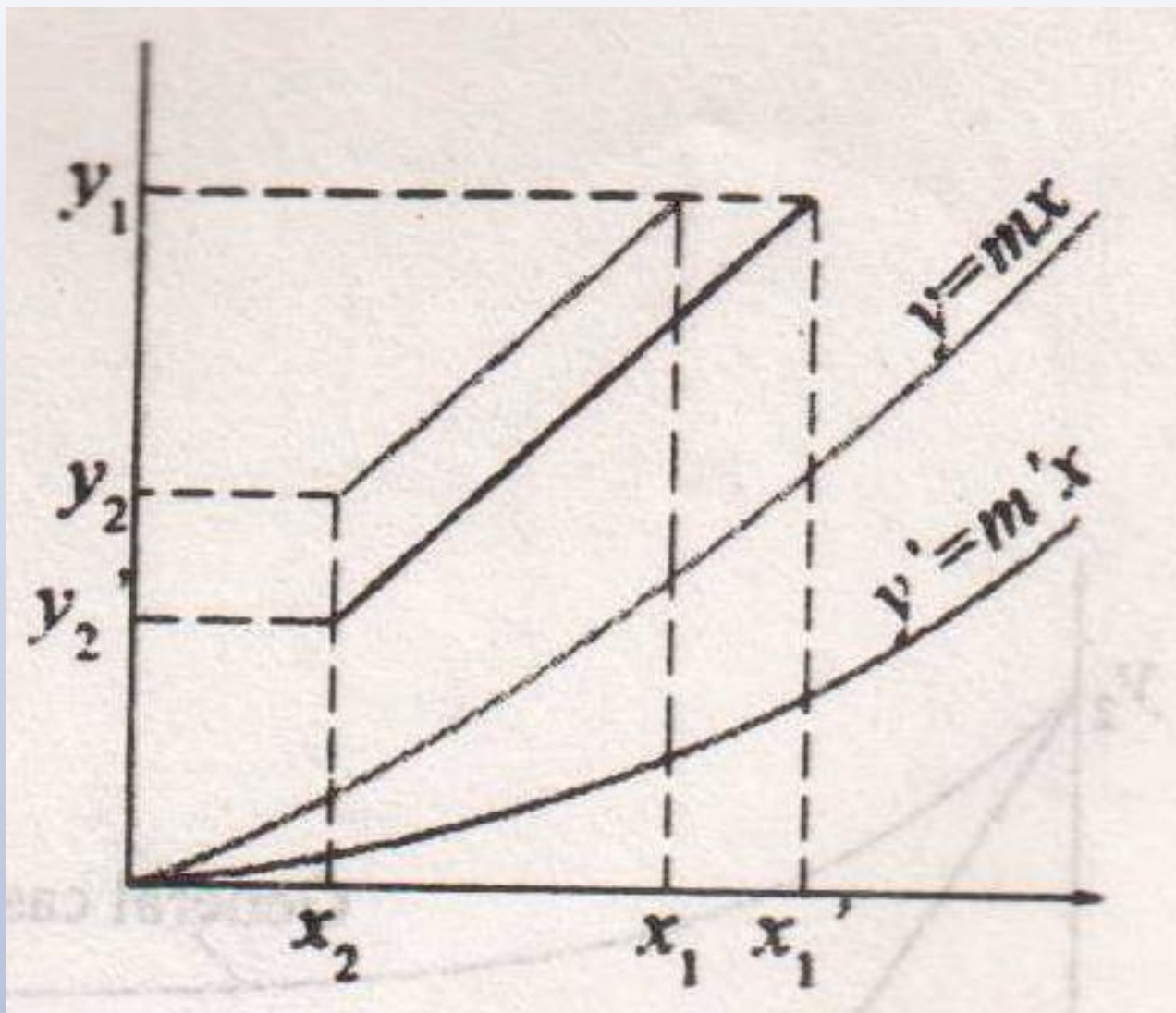
$$x_2 \downarrow, y_2 \downarrow, x_1 \downarrow, \eta \uparrow$$

$$H = \frac{G}{K_y a} \frac{y_1 - y_2}{\Delta y_m}$$

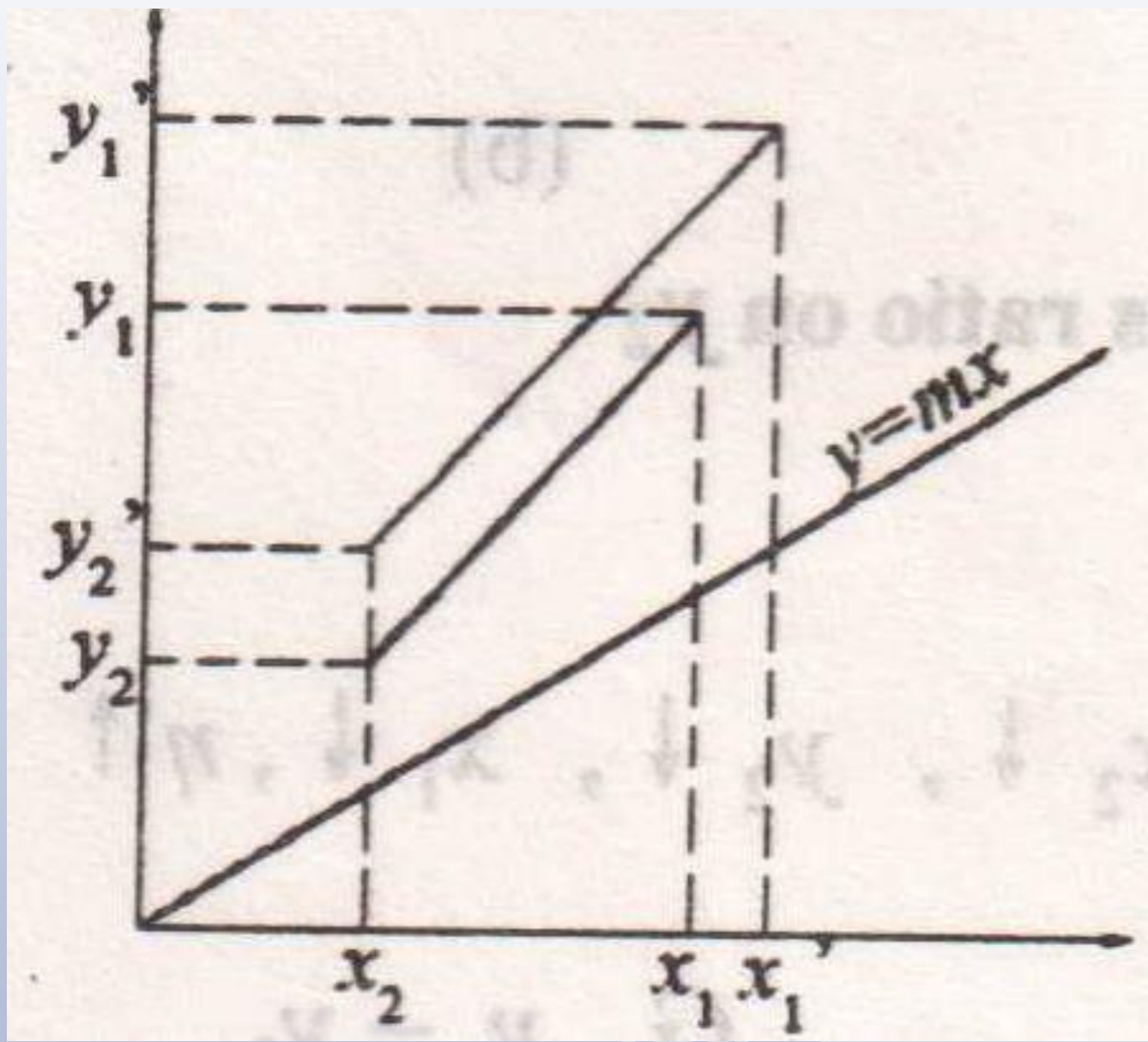
$$x_2 \downarrow, K_y a = \text{const.},$$

$$(y_1 - y_2) \uparrow, \Delta y_m \uparrow$$

温度对 y_2 的影响 (L 、 x_2 恒定)



y1对y2的影响 (**L**、**x2**、**t**恒定)



例题

用填料塔以水作溶剂从氨气-空气混合物中回收氨气。进口气中氨气体积分率为5%，回收率为95%。出口液体中氨气摩尔分率为0.05。操作条件下的相平衡关系为 $y_e = 0.95x$ ， y_e 是与液相中溶质浓度 x 对应的气相摩尔分率。

(1) 若气相总体积传质系数为 $0.02 \text{ kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ，气体流率为 $0.02 \text{ kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，则逆流吸收时所需填料高度为多少？

(2) 若实际操作中部分吸收剂循环进入塔内，新鲜吸收剂和循环吸收剂的比率 L/L_R 为20，则氨气的回收率为多少？

(3) 若部分吸收剂循环进入塔中，新鲜吸收剂和循环吸收剂的比率 L/L_R 为20，氨气的回收率仍为95%，则所需填料高度为多少？

解:

$$(1) \quad y_2 = (1-\eta)y_1 = (1-0.95) \times 0.05 = 0.0025$$

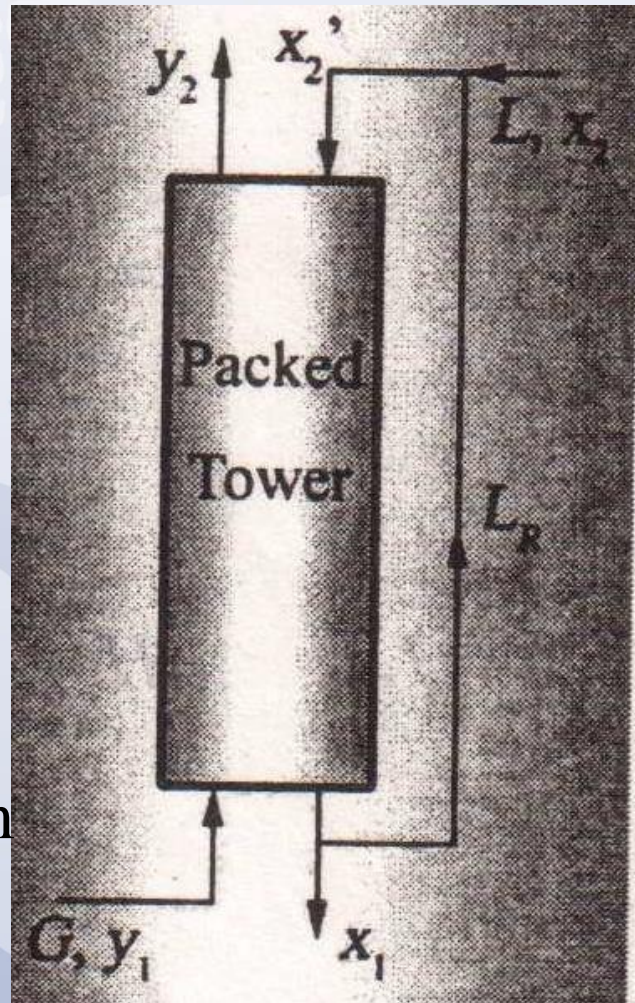
液气比:

$$\frac{L}{G} = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} = \frac{0.05 - 0.0025}{0.05 - 0} = 0.95 = m$$

$$\Delta y_m = \Delta y_2 = y_2 = 0.0025$$

填料塔高度

$$H = \frac{G}{K_y a} \cdot \frac{y_1 - y_2}{\Delta y_m} = \frac{0.02}{0.02} \times \frac{0.05 - 0.0025}{0.0025} = 19 \text{ m}$$



(2) 用水吸收氨气是气膜控制过程, L 增大, $K_y a$ 不变。

$H_{OG} = 1 \text{ m}$, $N_{OG} = 19$, L 增大, H_{OG} 、 N_{OG} 不变

$$\frac{mG}{L'} = \frac{mG}{L + L_R} = \frac{mG}{L + \frac{L}{20}} = \frac{mG}{1.05L} = \frac{0.95}{1.05 \times 0.95} = 0.9524$$

$$N_{OG} = \frac{1}{1 - \frac{mG}{L'}} \ln \left[\left(1 - \frac{mG}{L'} \right) \frac{y_1' - mx_2'}{y_2' - mx_2'} + \frac{mG}{L'} \right] = 19$$

$$\frac{1}{1 - 0.9524} \ln \left[(1 - 0.9524) \frac{0.05 - 0.95x_2'}{y_2' - 0.95x_2'} + 0.9524 \right] = 19$$

$$\frac{0.05 - 0.95x_2'}{y_2' - 0.95x_2'} = 31.9106$$

$$G(y_1 - y_2') = L'(x_1' - x_2')$$

$$L'x_2' = Lx_2 + L_Rx_1'$$

$$\frac{L'}{G} = \frac{1.05L}{G} = 1.05 \times 0.95 = 0.9975 \quad x_2 = 0$$

$$L' = L + L_R = 21L_R$$

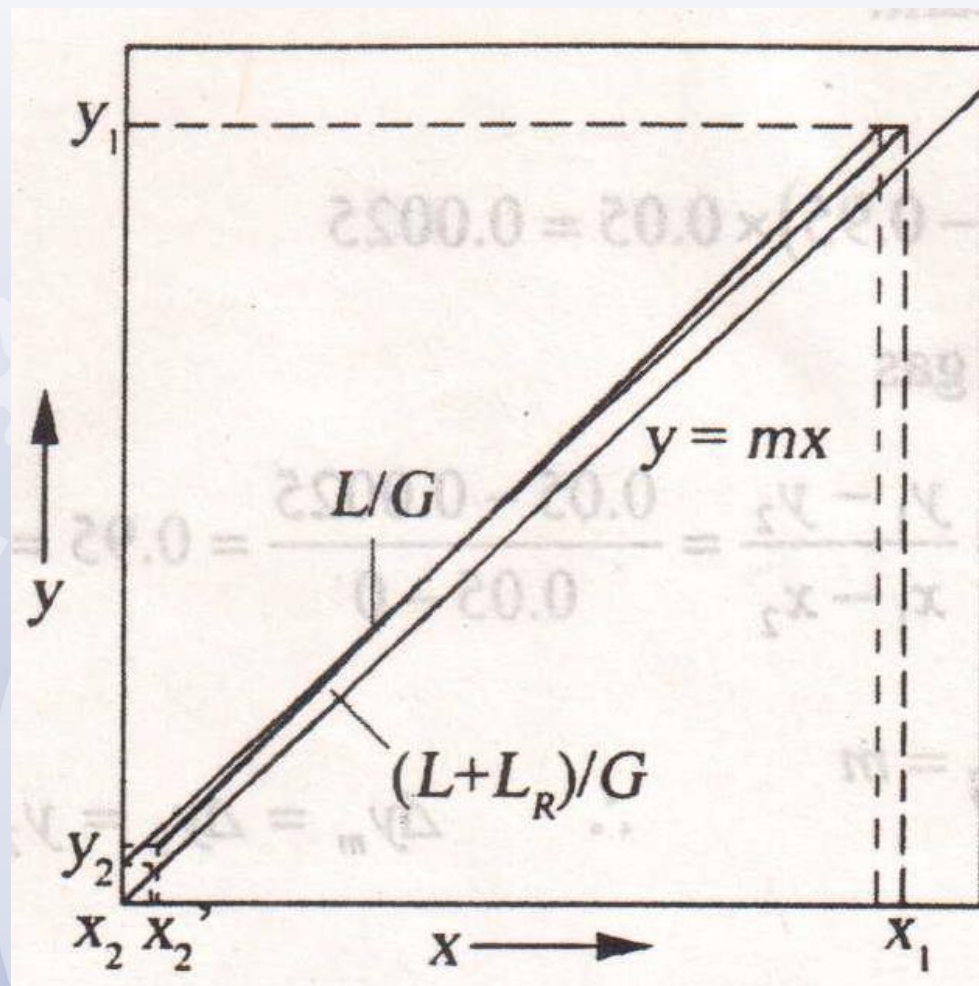
$$0.05 - 0.95x_2' = 31.9106(y_2' - 0.95x_2') \quad (1)$$

$$0.05 - y_2' = 0.9975(x_1' - x_2') \quad (2)$$

$$21x_2' = x_1' \quad (3)$$

解得： $x_2' = 0.00232$ $x_1' = 0.04873$ $y_2' = 0.00370$

$$\eta' = 1 - \frac{y_2'}{y_1} = 1 - \frac{0.0037}{0.05} = 92.6\%$$

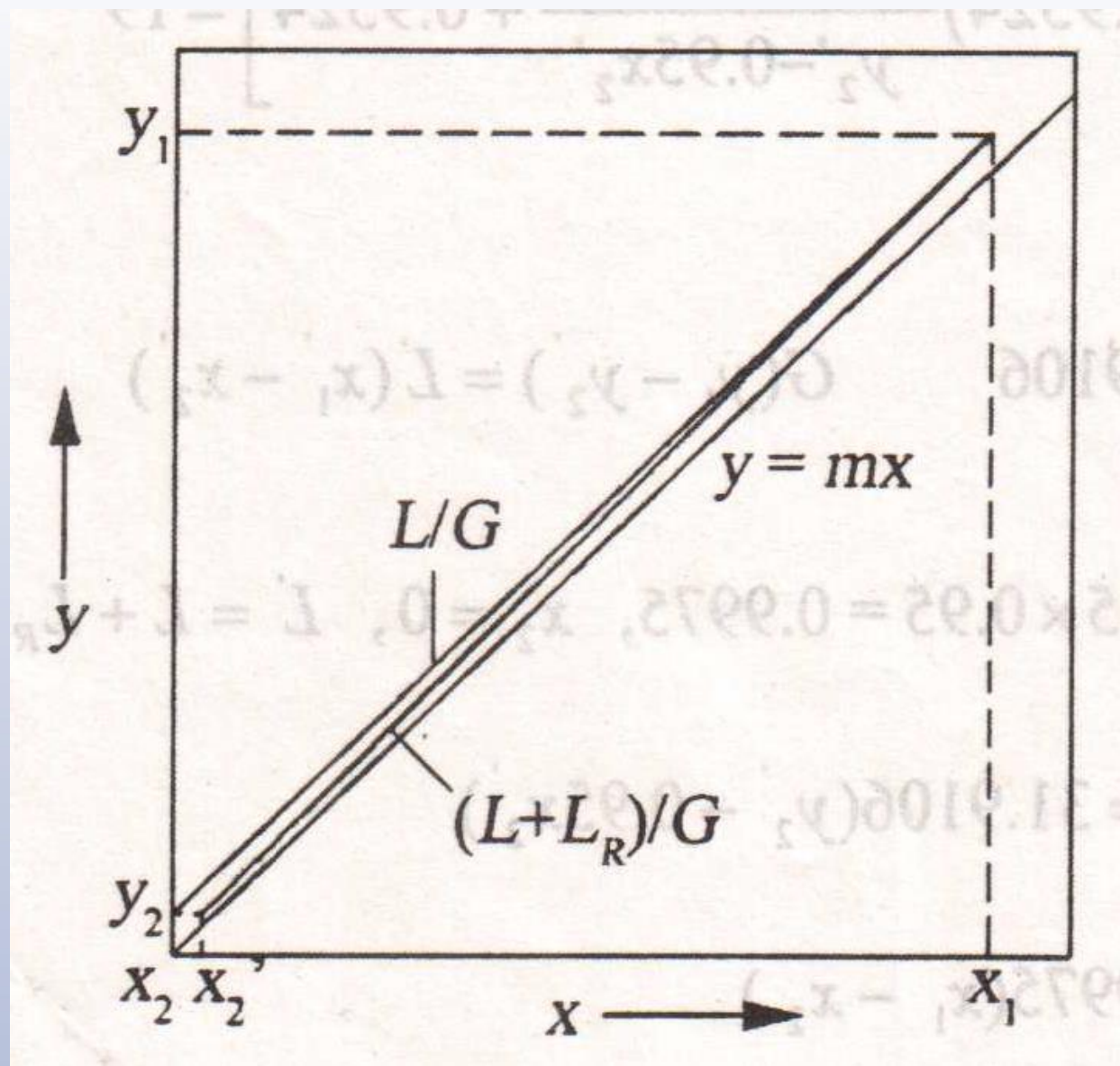


(3) 进口液体浓度

$$x_2' = \frac{L_R x_1}{L + L_R} = \frac{x_1}{L/L_R + 1} = \frac{0.05}{1 + 20} = 0.00238$$

$$\begin{aligned}\Delta y_m &= \frac{(y_1 - mx_1) - (y_2 - mx_2')}{\ln \frac{y_1 - mx_1}{y_2 - mx_2'}} \\ &= \frac{(0.05 - 0.95 \times 0.05) - (0.0025 - 0.95 \times 0.00238)}{\ln \left(\frac{0.05 - 0.95 \times 0.05}{0.0025 - 0.95 \times 0.00238} \right)} = 0.000963\end{aligned}$$

$$H = \frac{G}{K_y a} \cdot \frac{y_1 - y_2}{\Delta y_m} = \frac{0.02}{0.02} \times \frac{0.05 - 0.0025}{0.000963} = 49.3 \text{ m}$$



8.6高含量气体吸收

8.6.1高含量气体吸收特点

三个特点

8.6.2高含量气体吸收过程的数学描述

微元体：物料衡算、热量衡算、传质与
传热速率方程

物料衡算

$$d(Gy) = N_A adh$$

$$d(Lx) = N_A adh$$

$$d(Gy) = d(Lx)$$

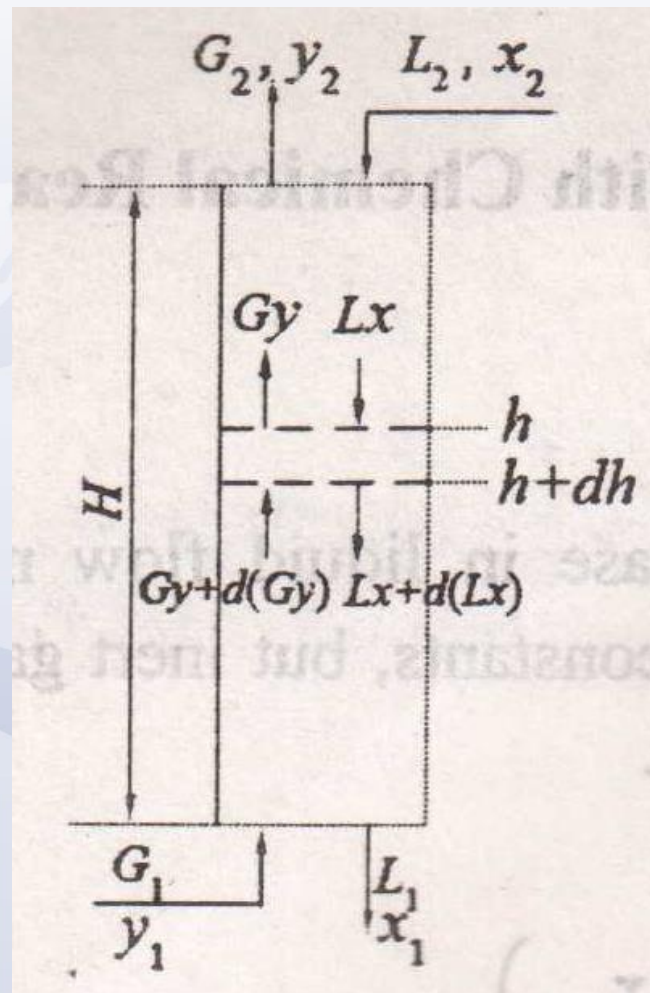
热量衡算（引入微分溶解热）

$$\phi Ldx + \phi x dL = c_L Ldt + c_L t dL$$

速率方程

$$N_A = k_y (y - y_i) = k'_y \frac{y - y_i}{(1 - y)_m}$$

$$N_A = k_x (x_i - x) = k'_x \frac{x_i - x}{(1 - x)_m} \approx k'_x (x_i - x)$$



$$dh = -\frac{d(Gy)}{k_y a(y - y_i)} = -\frac{(1-y)_m d(Gy)}{k'_y a(y - y_i)}$$

界面浓度计算

$$y_i = f(x_i, t_i) \quad N_A = k_y a(y - y_i) = k_x a(x_i - x)$$

塔高计算过程

(1) 温度变化与平衡线

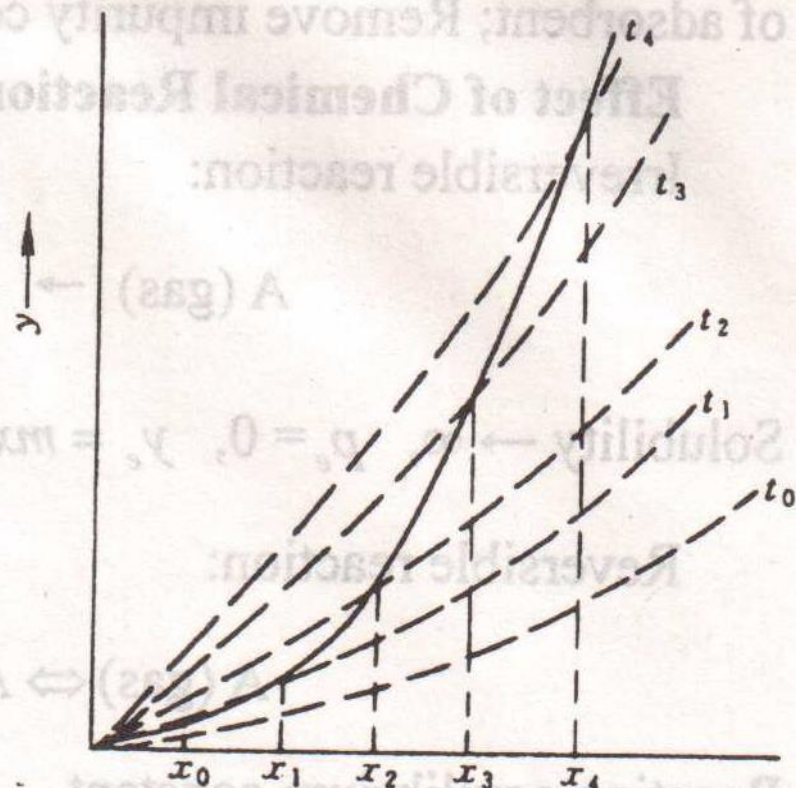
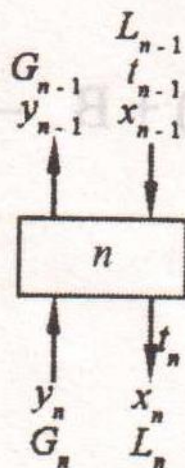
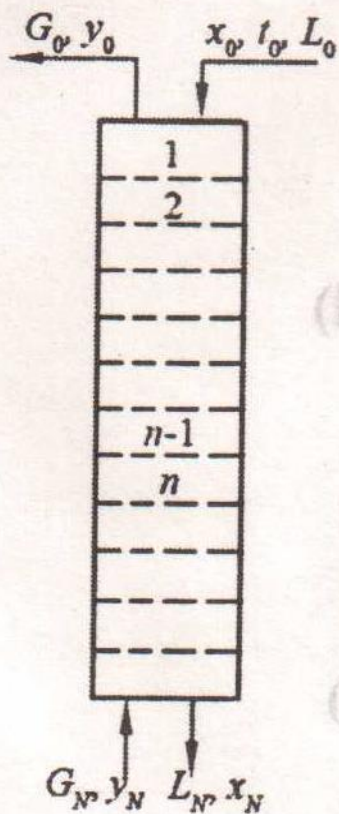
$$\phi(x_n - x_{n-1}) = c_L(t_n - t_{n-1})$$

$$t_n = t_{n-1} + \frac{\phi}{c_L} \Delta x$$

(2) 逐段计算

$$(Gy)_n - (Gy)_{n-1} = (Lx)_n - (Lx)_{n-1}$$

$$\Delta h_n = \frac{(1-y)_m}{k'_y a (y - y_i)_n} [(Gy)_n - (Gy)_{n-1}]$$



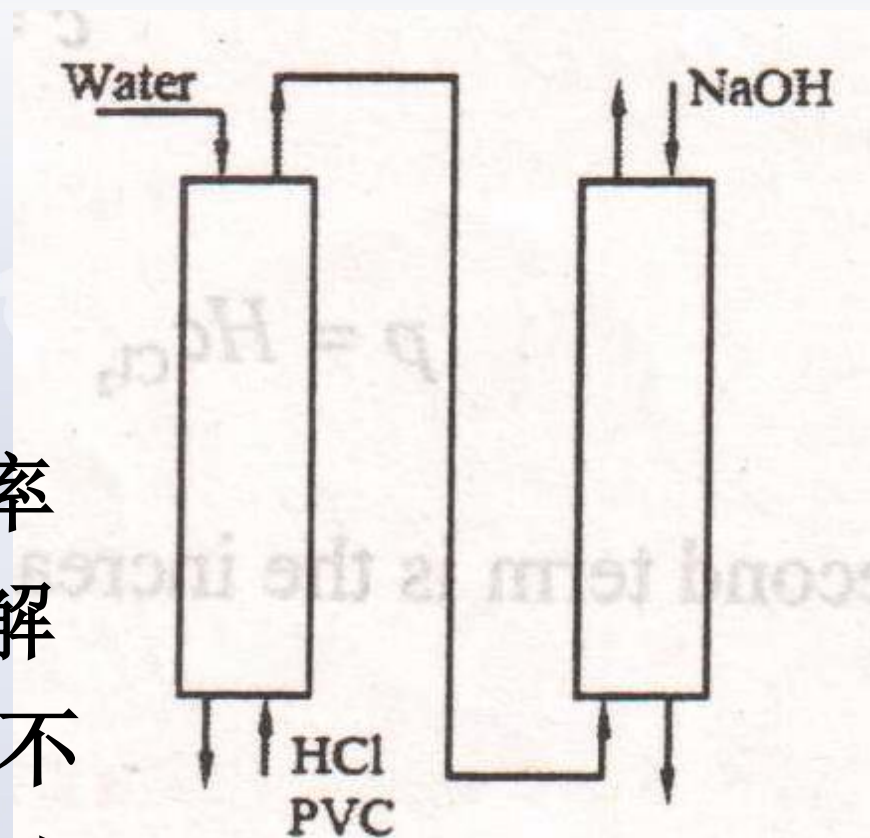
例题参见教材例8-9、例8-10.

8.7 化学吸收

实例

化学吸收的优点：

提高选择性；加快吸收速率（减小平衡分压；增加溶解度；增加传质系数）， k_y 不变， K_y 增加；液相阻力减小，气相阻力不变。吸收剂用量可减少；可彻底除去杂质。



化学反应对相平衡的影响；（P41）

化学反应对吸收速率的影响；（P.43）

增强因子定义：化学吸收速率与物理吸收速率之比！

化学反应



氯分子总浓度

$$c = c_{\text{Cl}_2} + \frac{1}{2} c_{\text{HOCl}} + \frac{1}{2} c_{\text{Cl}^-} = c_{\text{Cl}_2} + c_{\text{HOCl}}$$

平衡常数

$$K_e = \frac{c_{\text{HOCl}} \cdot c_{\text{Cl}^-} \cdot c_{\text{H}^+}}{c_{\text{Cl}_2}} \quad \text{因 } c_{\text{HOCl}} = c_{\text{H}^+} = c_{\text{Cl}^-}$$

故

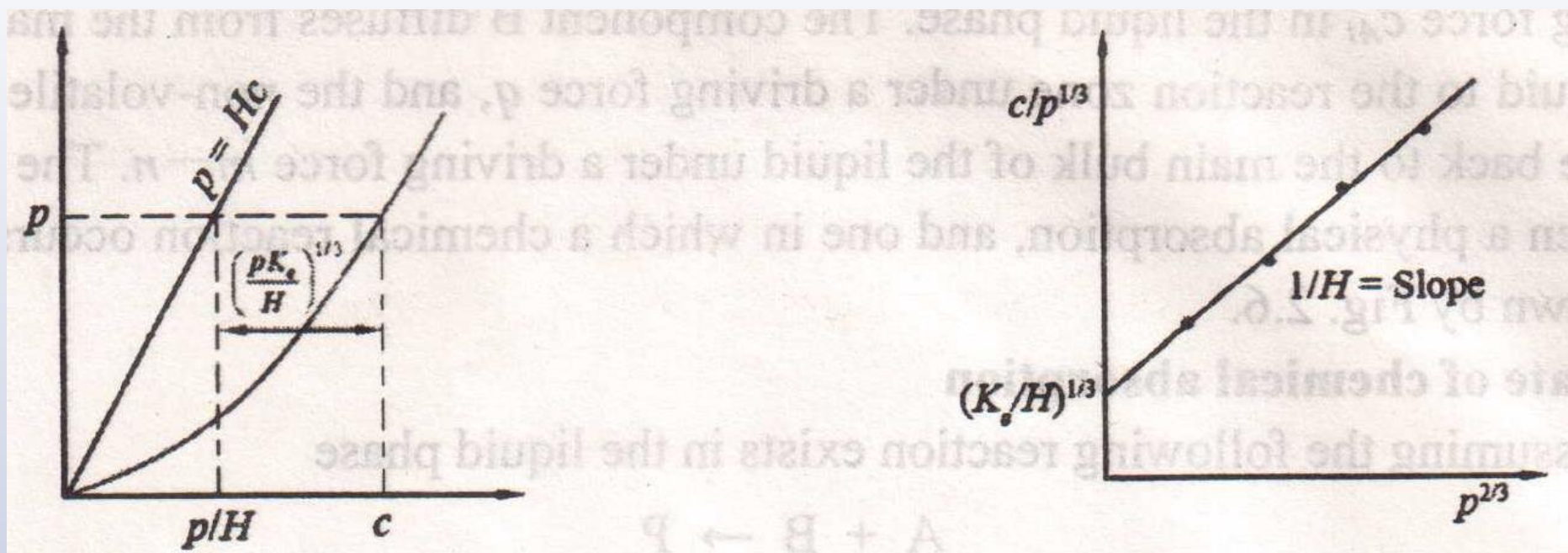
$$K_e = \frac{c_{\text{HOCl}}^3}{c_{\text{Cl}_2}}$$

$$c = c_{\text{Cl}_2} + (K_e c_{\text{Cl}_2})^{1/3}$$

$$p = H c_{\text{Cl}_2}$$

$$c = \frac{p}{H} + \left(\frac{p}{H} K_e\right)^{1/3}$$

$$\frac{c}{p^{1/3}} = \frac{p^{2/3}}{H} + \left(\frac{K_e}{H}\right)^{1/3}$$



请认真复习本章学习内容！！