

吸收塔的计算

设计型计算是按给定的生产任务及条件

(待分离气体的处理量、组成、分离要求)

设计或选择能完成分离任务的吸收塔

设计计算的主要内容与步骤

- ① 吸收剂的选择及用量的计算；
- ② 设备类型的选择；
- ③ 塔径计算；
- ④ 填料层高度或塔板数的计算；
- ⑤ 确定塔的高度；
- ⑥ 塔的流体力学计算及校核；
- ⑦ 塔的附件设计。

计算依据：物系的相平衡关系和传质速率方程

物料衡算与吸收操作线方程

物料衡算： 计算给定吸收任务下所需的吸收剂用量 L 或吸收剂出口浓度 X_1 。

以逆流填料塔为例：

V —惰性气体B的摩尔流率kmol/s

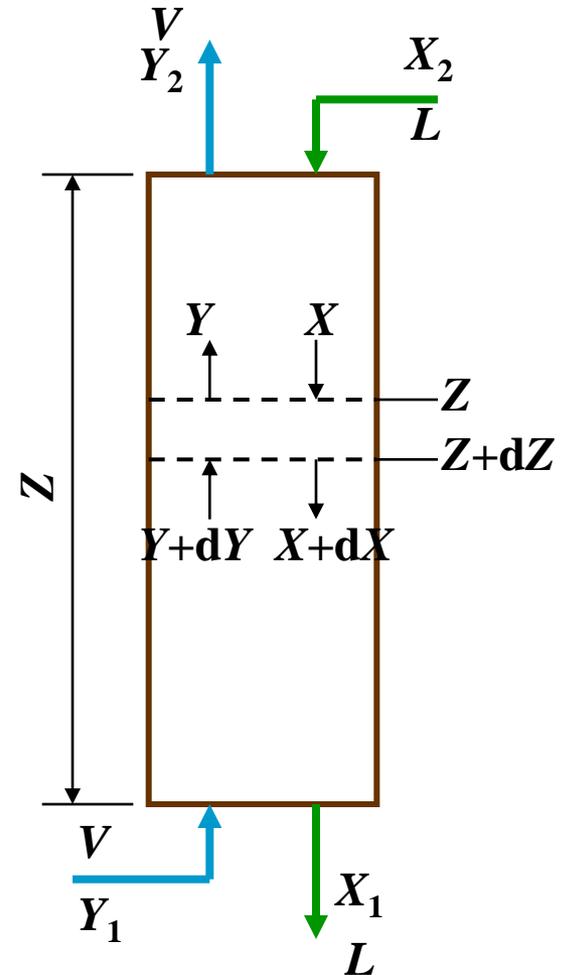
L —吸收剂S的摩尔流率kmol/s

Y —溶质A在气相中的比摩尔分数

X —溶质A在液相中的比摩尔分数

对稳定吸收过程，单位时间内气相在塔内被吸收的溶质 A 的量必等于液相吸收A的量。全塔物料衡算为：

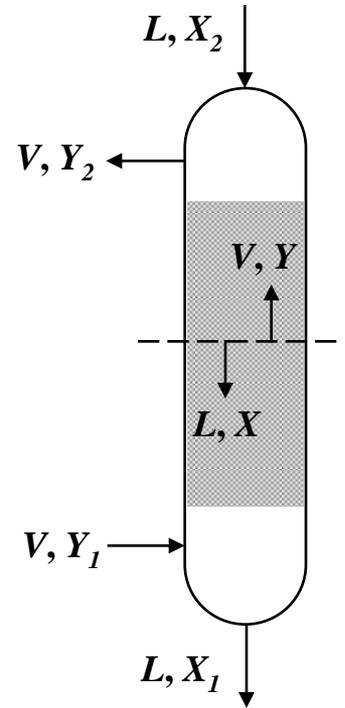
$$VY_1 + LX_2 = VY_2 + LX_1$$



任务规定：进塔气量 V 和组成 Y_1
工艺确定：进塔吸收剂温度和组成 X_2
由吸收率 η 求出：出塔气体组成 Y_2

$$Y_2 = Y_1(1 - \eta)$$

填料吸收塔内，气、液组成沿塔高连续变化；
塔的任何一截面处，气、液两相组成是相互制约的；



全塔物料衡算式：表示 L 、 V 一定，塔底为最高气、液浓度的截面“1”（浓端）与塔顶具有最低气、液浓度的截面“2”（稀端）的气、液浓度关系。

操作线方程与操作线

取填料层任一截面与塔底端面之间的填料层为物料衡算的控制体，则溶质 A 的物料衡算式为

$$VY + LX_1 = VY_1 + LX$$

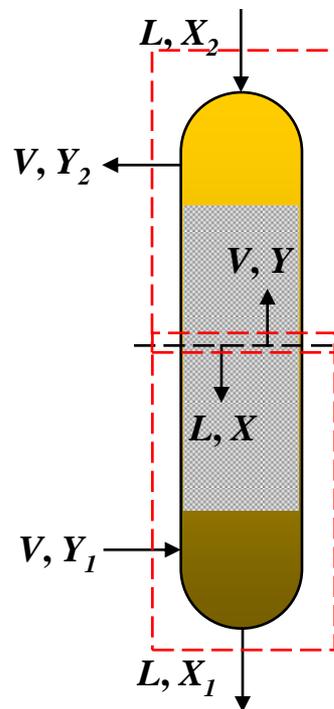
$$Y = \frac{L}{V} X + \left(Y_1 - \frac{L}{V} X_1 \right)$$

同理，若在任一截面与塔顶端面间作溶质 A 的物料衡算，则

$$Y = \frac{L}{V} X + \left(Y_2 - \frac{L}{V} X_2 \right)$$

上两式均称为吸收操作线方程，代表逆流操作时塔内任一截面上的气、液两相组成 Y 和 X 之间的关系。

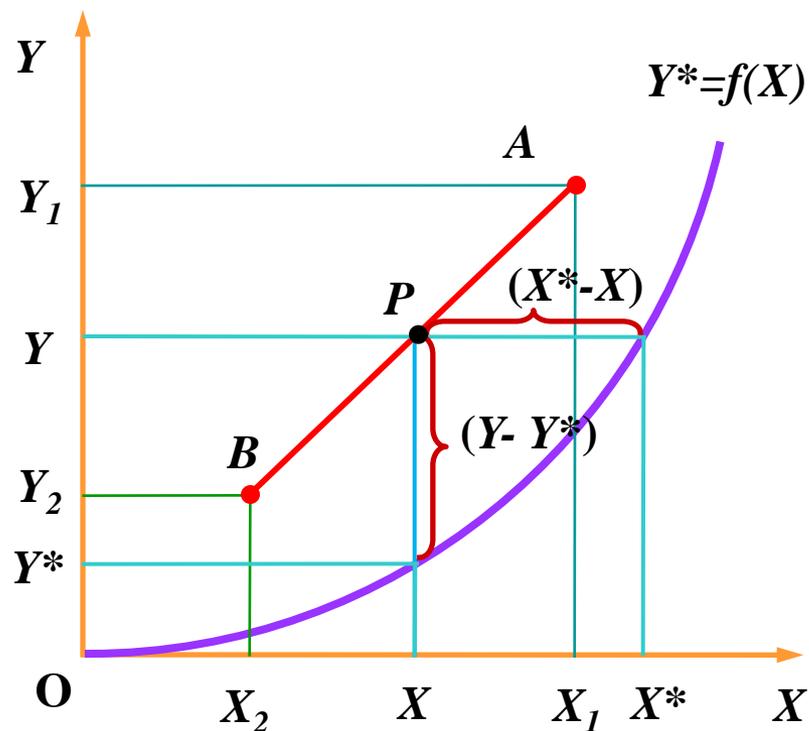
(L/V) 称为吸收塔操作的液气比。



操作线方程与操作线

当 L/V 一定，在 X - Y 图上以液气比 L/V 为斜率，过塔端面液、气两相组成 (X_1, Y_1) 和 (X_2, Y_2) 的直线，为吸收操作线

线上任一点的坐标 (X, Y) 代表了塔内该截面上液、气两相的组成。



操作线上任一点 P 与平衡线间的垂直距离 $(Y - Y^*)$ 为塔内该截面上以气相为基准的吸收传质推动力；与平衡线的水平距离 $(X^* - X)$ 为该截面上以液相为基准的吸收传质推动力。

两线间垂直距离 $(Y - Y^*)$ 或水平距离 $(X^* - X)$ 的变化显示了吸收过程推动力沿塔高的变化规律。

吸收塔内流向的选择

- 两相**逆流**时沿塔高均能保持较大的传质推动力，而两相**并流**时从塔顶到塔底沿塔高传质推动力逐渐减小，进、出塔两截面推动力相差较大。
- 在气、液两相进、出塔浓度相同的情况下，逆流操作的平均推动力大于并流，从提高吸收传质速率出发，逆流优于并流。（请对比间壁式对流传热的并流与逆流流向选择结果）
- 与**并流**相比，**逆流**操作时上升的气体将对向下流动的液体产生曳力，阻碍液体向下流动，限制了吸收塔所允许的液体流率和气体流率。
- 工业吸收一般多采用逆流，本章后面的讨论中如无特殊说明，均为逆流吸收。

吸收剂用量与最小液气比

设计中，气体处理量 V ，进、出塔组成 Y_1 和 Y_2 由设计任务给定，吸收剂入塔组成 X_2 由工艺条件决定或人为选定。

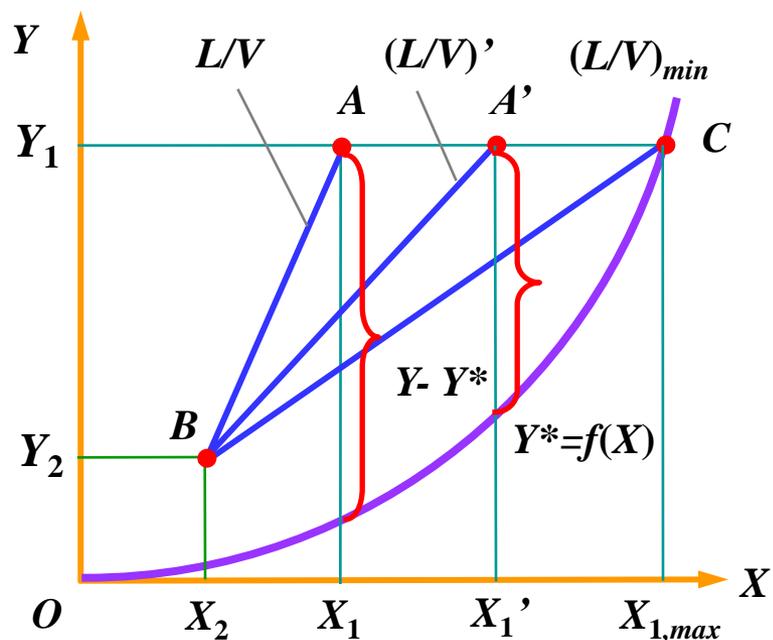
由全塔物料衡算式
$$X_1 = \frac{V}{L}(Y_1 - Y_2) + X_2$$

可知吸收剂用量 L 与吸收剂出塔浓度 X_1 是待求量，并且是相互制约的。

- 选取的 $L/V \uparrow$ ，操作线斜率 \uparrow ，操作线与平衡线的距离 \uparrow ，塔内传质推动力 \uparrow ，完成一定分离任务所需塔高 \downarrow ；
- $L/V \uparrow$ ，吸收剂用量 \uparrow ，吸收剂出塔浓度 $X_1 \downarrow$ ，循环和再生费用 \uparrow ；
- 若 $L/V \downarrow$ ，吸收剂出塔浓度 $X_1 \uparrow$ ，塔内传质推动力 \downarrow ，完成相同任务所需塔高 \uparrow ，设备费用 \uparrow 。

不同 L/V 下的操作:

$L/V \uparrow \rightarrow$ 斜率 $\uparrow \rightarrow$ 推动力 $\uparrow \rightarrow$ 塔高 \downarrow ;
 $L/V \uparrow \rightarrow L \uparrow \rightarrow X_1 \downarrow \rightarrow$ 循环和再生费用 \uparrow ;
 $L/V \downarrow \rightarrow X_1 \uparrow \rightarrow$ 推动力 $\downarrow \rightarrow$ 塔高 $\uparrow \rightarrow$ 费用 \uparrow



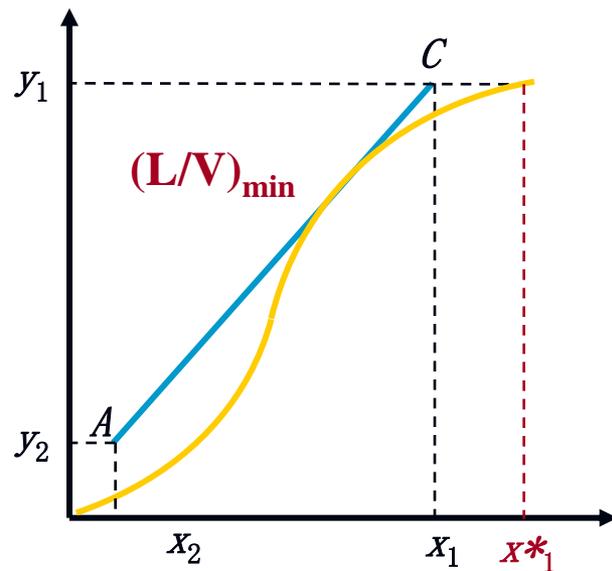
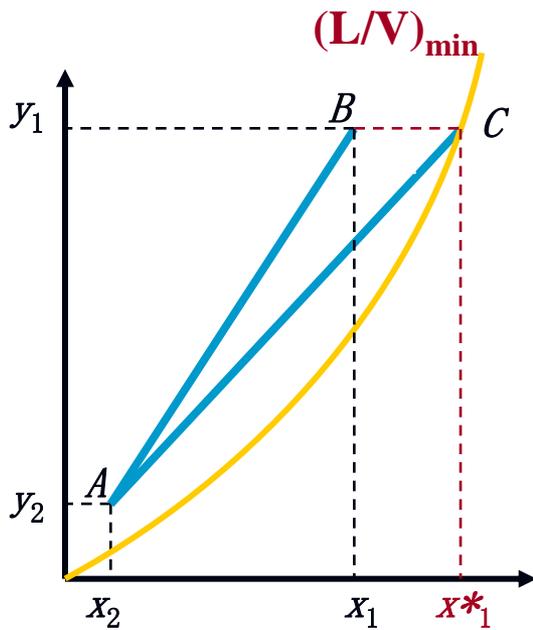
最小液气比 $(L/V)_{min}$

要达到规定的分离要求，或完成必需的传质负荷量 $G_A = V(Y_1 - Y_2)$ ， L/V 的减小是有限的:

当 $L/V \downarrow$ 到某一值时，操作线将与平衡线相交或者相切，此时对应的 L/V 称为最小液气比， $(L/V)_{min}$ ，对应的 $X_1 = X_{1,max}$

最小液气比 $(L/V)_{min}$

随 L/V 的减小，操作线与平衡线是相交还是相切取决于平衡线的形状。



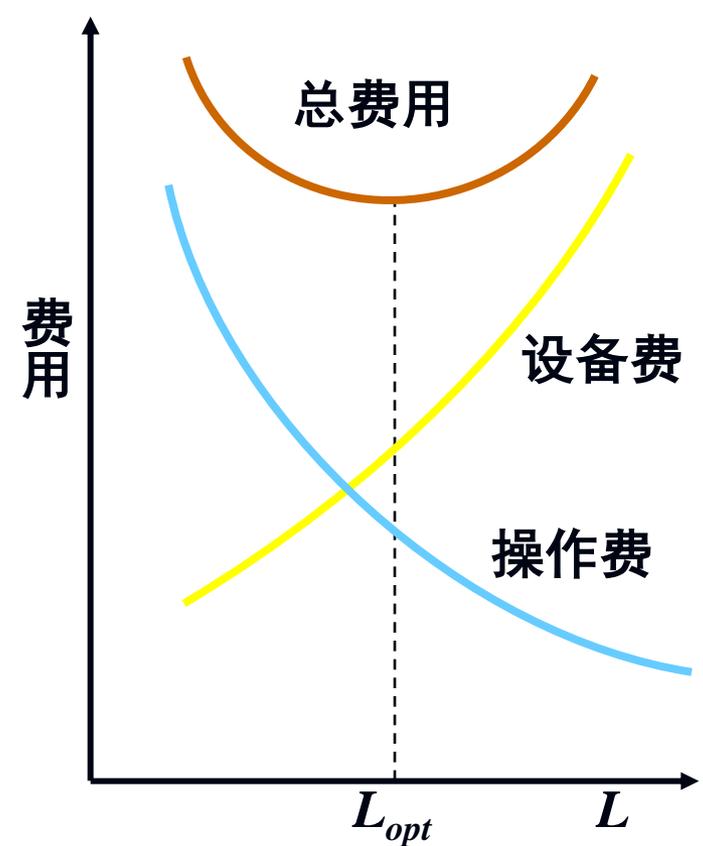
两线在 Y_1 处相交时， $X_{1,max} = X^*_1$ ；

两线在中间某个浓度处相切时， $X_{1,max} < X^*_1$ 。

最小液气比：
$$\left(\frac{L}{V}\right)_{min} = \frac{Y_1 - Y_2}{X_{1,max} - X_2}$$

实际吸收剂用量的确定

- 在最小液气比下操作时，在塔的某截面上（塔底或塔内）气、液两相达平衡，传质推动力为零，完成规定传质任务所需的塔高为无穷大。对一定高度的塔而言，在最小液气比下操作则不能达到分离要求。



$(L/V)_{实际} > (L/V)_{min}$; 总费用最低原则。

- 根据生产实践经验，一般取

$$\frac{L}{V} = (1.1 \sim 2.0) \left(\frac{L}{V} \right)_{min}$$

低浓度气体吸收填料层高度的计算

特点：低浓度气体吸收 ($y_1 < 10\%$) 因吸收量小，由此引起的塔内温度和流动状况的改变相应也小，吸收过程可视为等温过程，传质系数 k_Y 、 k_X 、 K_Y 、 K_X 沿塔高变化小，可取塔顶和塔底条件下的平均值。填料层高度 z 的计算式：

$$z = \frac{V}{K_Y a \Omega} \int_{Y_2}^{Y_1} \frac{dY}{Y - Y^*} \quad z = \frac{L}{K_X a \Omega} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{X^* - X}$$

体积传质系数：实际应用中，将传质系数与比表面积 a 的乘积 ($K_Y a$ 及 $K_X a$) 作为一个物理量，称为体积传质系数或体积吸收系数，单位为 $\text{kmol}/(\text{s} \cdot \text{m}^3)$ 。

传质单元数与传质单元高度

气相总传质系数和推动力:

$$z = \frac{V}{K_Y a \Omega} \int_{Y_2}^{Y_1} \frac{dY}{Y - Y^*}$$

$$\text{令 } H_{OG} = \frac{V}{K_Y a \Omega} \quad N_{OG} = \int_{Y_2}^{Y_1} \frac{dY}{Y - Y^*} \quad \rightarrow \quad z = H_{OG} \cdot N_{OG}$$

H_{OG} —— 气相总传质单元高度, m;

N_{OG} —— 气相总传质单元数, 无因次。

液相总传质系数和推动力:

$$z = \frac{L}{K_X a \Omega} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{X^* - X}$$

$$\text{令 } H_{OL} = \frac{L}{K_X a \Omega} \quad N_{OL} = \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{X^* - X} \quad \rightarrow \quad z = H_{OL} \cdot N_{OL}$$

H_{OL} —— 液相总传质单元高度, m;

N_{OL} —— 液相总传质单元数, 无因次。

传质单元数

$$N_{OG} = \int_{Y_2}^{Y_1} \frac{dY}{Y - Y^*} \quad N_{OL} = \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{X - X^*}$$

传质单元数 N_{OG} 或 N_{OL} 反映吸收过程的难易程度，其大小取决于分离任务和整个填料层平均推动力大小。

N_{OG} 与气相或液相进、出塔的浓度，液气比以及物系的平衡关系有关，而与设备形式和设备中气、液两相的流动状况等因素无关。

在设备选型前可先计算出过程所需的 N_{OG} 或 N_{OL} 。

➤ N_{OG} 或 N_{OL} 值大，表明分离任务艰巨，为避免塔过高应选用传质性能优良的填料。

➤ N_{OG} 或 N_{OL} 值过大，应重新选择溶剂或液气比 L/V 。

传质单元高度

$$H_{OG} = \frac{V}{K_Y a \Omega} \qquad H_{OL} = \frac{L}{K_X a \Omega}$$

总传质单元高度 H_{OG} 或 H_{OL} 表示完成一个传质单元分离任务所需的填料层高度，代表了吸收塔传质性能的高低，主要与填料的性能和塔中气、液两相的流动状况有关。

H_{OG} 或 H_{OL} 值小，表示设备的性能高，完成相同传质单元数的吸收任务所需塔的高度小。

用 H_{OG} 、 H_{OL} 或 $K_Y a$ 、 $K_X a$ 表征设备的传质性能其实质是相同的。随气、液流率改变 $K_Y a$ 或 $K_X a$ 的值变化较大，一般流率增加， $K_Y a$ （或 $K_X a$ ）增大。但 H_{OG} 或 H_{OL} 因分子分母同向变化的缘故，其变化幅度就较小。

一般吸收设备的传质单元高度在 0.15~1.5m 范围内。

平衡线为直线时传质单元数的计算

若平衡线为直线或在所涉及的浓度范围内为直线段，直接积分就可得 N_{OG} 或 N_{OL} 的解析式，主要有**对数平均推动力法**和**吸收因子法**。以求解 N_{OG} 为例。

对数平均推动力法

$$N_{OG} = \int_{Y_2}^{Y_1} \frac{dY}{Y - Y^*} = \frac{Y_1 - Y_2}{(Y_1 - Y_1^*) - (Y_2 - Y_2^*)} \ln \frac{Y_1 - Y_1^*}{Y_2 - Y_2^*} = \frac{Y_1 - Y_2}{\Delta Y_m}$$

$$\Delta Y_m = \frac{(Y_1 - Y_1^*) - (Y_2 - Y_2^*)}{\ln \frac{Y_1 - Y_1^*}{Y_2 - Y_2^*}}$$

N_{OG} 的含意：对低浓度气体吸收是以全塔的对数平均推动力 ΔY_m 作为一个度量单位，衡量完成分离任务 $(Y_1 - Y_2)$ 所需的传质单元高度的数目。若分离程度 $(Y_1 - Y_2)$ 大或平均推动力 ΔY_m 小， N_{OG} 值就大，所需的填料层就高。

吸收因子法

将操作线方程写为 $X = \frac{V}{L}(Y - Y_2) + X_2$

联立相平衡方程 $Y^* = M \left[\frac{V}{L}(Y - Y_2) + X_2 \right] + B = \frac{MV}{L}Y - \frac{MV}{L}Y_2 + Y_2^*$

代入 N_{OG} 并积分 $N_{OG} = \int_{Y_2}^{Y_1} \frac{dY}{Y - Y^*} = \int_{Y_2}^{Y_1} \frac{dY}{\left(1 - \frac{MV}{L}\right)Y + \frac{MV}{L}Y_2 - Y_2^*}$

吸收因子:

$$A = L/(MV)$$

操作线斜率与

平衡线斜率的比值

$$= \frac{1}{1 - \frac{MV}{L}} \ln \left[\left(1 - \frac{MV}{L}\right) \frac{Y_1 - Y_2^*}{Y_2 - Y_2^*} + \frac{MV}{L} \right]$$

$$= \frac{1}{1 - \frac{1}{A}} \ln \left[\left(1 - \frac{1}{A}\right) \frac{Y_1 - Y_2^*}{Y_2 - Y_2^*} + \frac{1}{A} \right]$$

吸收因子法

N_{OG} 取决于两个无因次数群:

$$N_{OG} = \frac{1}{1 - \frac{1}{A}} \ln \left[\left(1 - \frac{1}{A} \right) \frac{Y_1 - Y_2^*}{Y_2 - Y_2^*} + \frac{1}{A} \right]$$

为了计算方便，将此式绘制成以 $1/A$ 为参数的曲线图

A 值越大，两线相距越远，传质推动力越大，越有利于吸收过程，所需 N_{OG} 越小。

A 的倒数 $(MV)/L$ 称为**解吸因子**，其值越大，对吸收越不利，由图可知， N_{OG} 越大。

与对数平均推动力法相比，吸收因子法不涉及 X_1 ，解决吸收操作型问题较为方便。

