

第一章 總論

一、單元操作與單元程序

1. 單元操作：化學工業製造程序中涉及的物理操作
2. 單元程序：化學工業製造程序中涉及的化學操作

二、化工裝置的內容

大類	相關裝置
流體輸送	管路、管件等流體輸送裝置，壓力計，流體流量計
熱量輸送	熱交換器，蒸發裝置
質量輸送	蒸餾裝置，吸收裝置，萃取裝置，結晶裝置，溼度控制裝置，乾燥裝置
固體處理	固體的減積裝置，固體的輸送裝置，機械分離裝置，混合裝置

三、單位

1. 單位系統

- (1) 絕對系統：如 C.G.S 制；SI 制。常用的基本量有：長度、質量、時間。
- (2) 工程系統：如 M.K.S 制；英制。常用的基本量有：長度、質量、時間跟力。

2. 基本單位、導出單位

- (1) 基本單位：各種單位系統選定的一些物理量。如：長度、質量、時間、溫度
- (2) 導出單位：藉由物理性質推衍出的單位。如：力、功、功率、壓力

$$\text{力} = \text{質量} \times \text{重力加速度} \quad F = m \times g$$

$$\text{功} = \text{力} \times \text{位移} \quad W = F \times S$$

$$\text{功率} = \frac{\text{功}}{\text{時間}} \quad P = \frac{W}{\theta}$$

$$\text{壓力} = \frac{\text{力}}{\text{面積}} \quad P = \frac{F}{A}$$

3. 因次：工程上以特定的符號來代表物理量

		CGS 制	SI 制	MKS 制	英制
質量 M		g	kg	kg	lb_m
長度 L		cm	m	m	ft
時間 θ		sec	sec	sec	sec
力	F	dyne	N	-	-
	$ML\theta^{-2}$	-	-	kg_f	lb_f
功(能)	FL	dyne-cm=erg	N-m=J	-	-
	$ML^2\theta^{-2}$	-	-	$kg_f - m$	$lb_f - ft$

功率	FL θ^{-1}	erg/s	J/s=W	-	-
	ML ² θ^{-3}	-	-	$\frac{kg_f \cdot m}{s}$	$\frac{lb_f \cdot ft}{s}$
$g_c \equiv \frac{mg}{F}$		$1 \frac{g \cdot cm}{dynes^2}$	$1 \frac{kg \cdot m}{N \cdot s^2}$	$9.8 \frac{kg \cdot m}{kg_f \cdot s^2}$	$32.2 \frac{lb_m \cdot ft}{lb_f \cdot s^2}$

4. 單位換算

(1) 長度：

$$1m=100cm=1000mm \quad 1km=1000m$$

$$1ft=0.3048m=12in \quad 1in=2.54cm$$

(2) 質量：

$$1kg=1000g=2.2lb \quad 1lb=454g$$

(3) 時間：

$$1day=24h=1440min=86400sec$$

$$1h=60min; 1min=60sec$$

(4) 溫度：

$${}^{\circ}C = \frac{5}{9}({}^{\circ}F - 32) \quad 1{}^{\circ}C \approx 1K$$

$${}^{\circ}F = \frac{9}{5}{}^{\circ}C + 32 \quad 1{}^{\circ}F \approx 1{}^{\circ}R$$

$$K = {}^{\circ}C + 273 \quad 1{}^{\circ}C \approx \frac{9}{5}{}^{\circ}F$$

$${}^{\circ}R = {}^{\circ}F + 460 \quad 1K \approx \frac{9}{5}{}^{\circ}R$$

(5) 壓力：

$$1atm=101325Pa(N/m^2)=101.3kPa=14.7psi(lb_f/in^2)=76cmHg$$

$$=760torr=10.336mH_2O=1.0336kg_f/cm^2=1013mbar$$

(6) 力：1N=10⁵ dyne；1kgf=9.8N(7) 功(能)：1Btu=252cal=778lb_f-ft；1cal=4.18J(8) 功率：1hp=760W=550lb_f-ft/s

四、質能均衡

1. 質量平衡：依據質量守衡原則

表示法：輸入量－輸出量＋產生量＝累積量

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} + \dot{m}_{rxn} = \dot{m}_{acc}$$

(1) 沒有化學反應時：產生量為零 $\dot{m}_{rxn} = 0$

$$\text{表示法：} \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = \dot{m}_{acc}$$

(2) 沒有化學反應且達穩定狀態時：累積量為零 $\dot{m}_{acc} = 0$

表示法： $\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = 0$

2. 能量平衡：依據能量守衡原則：能量之間可以互換但不可消失，總能量不變；能量的形式有：內能、動能、機械能、化學能
- (1) 表示法：輸入能量－輸出能量＋反應生成的能量－反應消失的能量＝累積量
- (2) 沒有化學反應時：反應生成的能量－反應消失的能量＝0
表示法：輸入能量－輸出能量＝累積量
- (3) 沒有化學反應且達穩定狀態時：
表示法：輸入能量－輸出能量＝0

~生命是長久持續不斷努力的歷程~

第二章 流體輸送原理

一、壓力的表示法

1. 流體的壓力

(1) 巴斯卡原理：同一水平面流體所受來自四面八方的壓力都一樣

(2) 連通管原理：不管容器的形狀為何，達平衡時各液面的液體高度都一樣

(3) 壓力的定義：單位面積所受的力 $P \equiv \frac{F}{A} = \frac{mg}{A} = \frac{V\rho g}{A} = \frac{Ah\rho g}{A} = h\rho g$

(4) 流體的壓力： $P = h\rho \frac{g}{g_c}$

2. 壓力的表示法：

$$1\text{atm} = 101325\text{Pa} (N/m^2) = 101.3\text{kPa} = 14.7\text{psi} (lb_f/in^2) = 76\text{cmHg}$$

$$= 760\text{torr} = 10.336\text{mH}_2\text{O} = 1.0336\text{kg}_f/cm^2 = 1013\text{mbar}$$

3. 壓力的基準

(1) 絕對壓力(ABS) = 大氣壓力(atm) + 計示壓力(表壓力)(G)

(2) 絕對壓力(ABS) = 大氣壓力(atm) - 真空度(VAc)

二、流體的靜壓力

1. 流體靜力學

(1) 靜壓力：

① 流體靜止時：單位面積上所承受各方向的力

② 流體流動時：單位面積上作用在流體流動平行方向上的力

(2) 衝擊壓力：流體流動時：單位面積上作用在流體流動垂直方向上的力

(3) 流體靜力學：研究流體靜止時，在重力場所受重力與壓力的平衡關係式

① 表示法： $P_2 = P_1 + (h_2 - h_1)\rho \frac{g}{g_c}$

② 靜止流體的能量平衡為 $\frac{P_2}{\rho} + \frac{g}{g_c}h_2 = \frac{P_1}{\rho} + \frac{g}{g_c}h_1$

2. 液柱壓力計：依據流體靜力學所設計

(1) U形壓力計： $-\Delta P = P_1 - P_2 = h(\rho_s - \rho) \frac{g}{g_c}$

(2) 斜管壓力計： $-\Delta P = P_1 - P_2 = h(\rho_s - \rho) \frac{g}{g_c} = h_s \cdot \sin \alpha (\rho_s - \rho) \frac{g}{g_c}$

註：兩點的壓差很小時，壓力計的讀數變化量太小為提高精確度

(3) 反向壓力計： $-\Delta P = P_1 - P_2 = h(\rho - \rho_{air}) \frac{g}{g_c} = h\rho \frac{g}{g_c}$

註：常使用空氣當指示計以降低誤差

$$(4) \text{ 微分液柱壓力計： } -\Delta P = P_1 - P_2 = h(\rho - \rho_{air}) \frac{g}{g_c} = h\rho \frac{g}{g_c}$$

註：測量微小壓力差及適用管路流體與測量流體互溶

三、流體的流動性質、流動狀態

1. 流體的種類：

(1) 密度：單位體積流體所具有的質量

$$\textcircled{1} \text{ 混合流體的密度： } \frac{1}{\rho_m} = \frac{w_1}{\rho_1} + \frac{w_2}{\rho_2} + \dots \quad \text{註： } w_n \text{ 為質量分率}$$

$$\textcircled{2} \text{ 氣體的密度： } PM_w = \rho RT$$

(2) 流體：包含液體跟氣體

① 可壓縮流體：氣體

② 不可壓縮流體：液體

(3) 牛頓流體：剪應力與速度梯度成正比；氣體及大部分液體 $\tau_{yx} = -\mu \frac{du_x}{dy}$

① 剪應力：流體流動時相互作用的力

② 速度梯度：流體流動作用力使流體兩液層間產生相對速度差並和平板距離成正比

(4) 非牛頓流體：

$$\textcircled{1} \text{ 賓漢塑性流體：泥漿、黏土、軟膏 } \tau_{yx} = \tau_0 + -\mu \frac{du_x}{dy}$$

$$\textcircled{2} \text{ 擬塑性流體：紙漿、水泥、乳膠 } \tau_{yx} = K \left(\frac{du_x}{dy} \right)^n, n < 1$$

$$\textcircled{3} \text{ 膨脹性流體：沙、澱粉等懸浮性固體 } \tau_{yx} = K \left(\frac{du_x}{dy} \right)^n, n > 1$$

2. 黏度：流體流動時剪應力與速度梯度的比值，表示流體的流動物理性

(1) 單位：

$$1cp = 10^{-2} p (= g/cm \cdot s) = 10^{-3} Pa \cdot s (SI) = 10^{-3} kg/m \cdot s (MKS) \\ = 6.72 \times 10^{-4} lb/ft \cdot s (\text{英制}) = 10^{-2} dyne/cm \cdot s (CGS)$$

(2) 因次：工程系統： $FL^{-2}\theta$ ；絕對系統： $ML^{-1}\theta$

(3) 性質：

① 同溫同壓下，液體黏度 > 氣體黏度

② 黏度與溫度的關係：

i. 液體：溫度增加，液體的黏度降低

ii. 氣體：溫度增加，氣體的黏度增加

④ 動黏度：流體黏度與流體密度的比，動黏度 $\nu = \frac{\text{黏度 } \mu}{\text{密度 } \rho}$

$$\text{單位： } stoke = \frac{cm^2}{s}, \quad \text{因次： } L^2/\theta$$

⑤ 比黏度：流體黏度與參考黏度的比，為一無因次

3. 流量的種類

- (1) 質量流率 \dot{m} ：單位時間流體流經管線的質量
- (2) 體積流率 \dot{V} ：單位時間流體流經管線的體積
- (3) 質量速度(質量流通量) G ：單位時間單位面積流體流經管線的質量
- (4) 相互關係： $\dot{m} = \bar{u} \times A \times \rho = \dot{V} \times \rho = G \times S$

四、流體的質量均衡

1. 連續方程式：

- (1) 穩定的流動系統中，任一截面積的流體質量流率不變，即

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} \Rightarrow \bar{u}_1 A_1 \rho_1 = \bar{u}_2 A_2 \rho_2$$

- (2) 對不可壓縮流體，流體的密度是常數，所以

$$\dot{V}_{in} = \dot{V}_{out} \Rightarrow \bar{u}_1 A_1 = \bar{u}_2 A_2 \Rightarrow \bar{u}_2 = \bar{u}_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2$$

2. 流體流動的形式：

- (1) 層流：流體流動的質點作直線運動，彼此不互相碰撞或混合
- (2) 亂流：流體流動的質點作不規則運動，並互相碰撞或混合而產生漩渦

$$3. \text{ 雷諾數： } Re = \frac{D_e \bar{u} \rho}{\mu} = \frac{D_e \bar{u}}{\nu} = \frac{4\dot{m}}{\pi D_e \mu} = \frac{4\dot{V} \rho}{\pi D_e \mu}$$

- (1) $Re < 2100$ ：層流
- (2) $Re > 4000$ ：亂流
- (3) Re 在 2100~4000 間是不穩定區
- (4) 相當管徑 D_e ： $D_e = 4r_H$

$$(5) \text{ 水力半徑 } r_H : r_H = \frac{\text{流體流過截面積 } A}{\text{流體沾濕周長 } l}$$

$$\textcircled{1} \text{ 圓管： } D_e = 4r_H = 4 \frac{\frac{\pi D^2}{4}}{\pi D} = D$$

$$\textcircled{2} \text{ 正方形管： } D_e = 4r_H = 4 \frac{D^2}{4D} = D$$

$$\textcircled{3} \text{ 長方形管： } D_e = 4r_H = 4 \frac{LW}{2(L+W)} = \frac{2LW}{L+W}$$

$$\textcircled{4} \text{ 正三角形管： } D_e = 4r_H = 4 \frac{\frac{1}{2} \cdot a \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} a}{3a} = \frac{\sqrt{3}}{3} a$$

$$\textcircled{5} \text{ 雙套管： } D_e = 4r_H = 4 \frac{\pi(D_1^2 - D_2^2)}{\pi(D_1 + D_2)} = D_1 - D_2$$

4. 流體在圓管中的速度分佈：

(1) 層流時的速度分佈：為一拋物線分佈，管中心的速度最大；管壁的速度為零

$$(2) \text{ 速度分佈的通式： } u_x = \frac{(P_0 - P_L)R^2 g_c}{4\mu L} \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right] = u_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right]$$

$$(3) \text{ 層流時， } \bar{u} = \frac{1}{2} u_{\max}$$

$$(4) \text{ 亂流時， } \bar{u} = 0.82 u_{\max}$$

五、流體的摩擦損失

1. 流體的摩擦：流體與固體表面間因為黏滯力或壓力而造成的摩擦

(1) 表面摩擦：流體與固體間有黏滯力，兩者因速度不同造成能量的損失

(2) 型態摩擦：流體流經一個管徑突然改變結構，造成壓力分布不平均產生漩渦而造成能量損失

2. 流體的表面摩擦：

$$(1) \text{ 流體流經管子時，壓力損失=磨擦損耗，即 } -\Delta P_f \cdot \frac{\pi}{4} D^2 = \tau_w \cdot \pi DL$$

$$(2) \text{ 泛寧摩擦係數： } f = \frac{\text{剪應力}}{\text{動能}} = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho u^2}$$

$$(3) \text{ 泛寧摩擦方程式： } -\Delta P_f = 4f \times \frac{\rho \bar{u}^2}{2g_c} \times \frac{L}{D}$$

(4) 摩擦係數 f：與雷諾數(Re)及相對粗糙度($\frac{\epsilon}{D}$)有關，可由莫第圖得到

(5) 莫第圖：是縱軸為 $\log f$ ，橫軸為 $\log Re$ 的全對數作圖

$$(6) \text{ 流體層流時， } f = \frac{16}{Re}$$

$$(7) \text{ 哈根卜瓦醉方程式： } -\Delta P_f = \frac{32\mu\bar{u}L}{g_c D^2}$$

3. 流體的形態摩擦：

$$(1) \text{ 損失係數法： } -\Delta P_f = K_f \times \frac{\rho \bar{u}^2}{2g_c}$$

$$(2) \text{ 相當管長法： } -\Delta P_f = 4f \times \frac{\rho \bar{u}^2}{2g_c} \times \frac{L_e}{D}$$

相當管長：流體流過某一管件時，所造成的摩擦相當流體流經同直徑多少長

度所造成的摩擦損失

4. 管路中流體的總損耗

$$(1) -\Delta P_f = 4f \times \frac{\rho u^{-2}}{2g_c} \times \frac{L}{D} + K_f \times \frac{\rho u^{-2}}{2g_c} = (4f \frac{L}{D} + \sum K_f) \times \frac{\rho u^{-2}}{2g_c}$$

$$(2) -\Delta P_f = 4f \times \frac{\rho u^{-2}}{2g_c} \times \frac{L}{D} + 4f \times \frac{\rho u^{-2}}{2g_c} \times \frac{L_e}{D} = 4f \times \frac{\rho u^{-2}}{2g_c} \times \frac{L+L_e}{D}$$

六、流體的能量均衡

1. 機械能平衡

$$\frac{u_2^{-2} - u_1^{-2}}{2g_c} + \frac{(z_2 - z_1)g}{g_c} + \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \sum lw_f = -W_s$$

(1) 單位：[J/kg] 因次：[L²θ⁻²]

(2) 各項說明：

$$\frac{u_2^{-2} - u_1^{-2}}{2g_c} : \text{速度勢能} ; \quad \frac{(z_2 - z_1)g}{g_c} : \text{位置勢能} ; \quad \frac{P_2 - P_1}{\rho} : \text{壓力勢能}$$

$\sum lw_f$: 摩擦勢能, 包含形態摩擦與表面摩擦

$$\sum lw_f = \frac{-\Delta P_f}{\rho} = (4f \frac{L}{D} + \sum K_f) \frac{u^{-2}}{2g_c} = 4f \frac{L + \sum L_e}{D} \times \frac{u^{-2}}{2g_c}$$

$-W_s$: 軸功

(3) 軸功

① 流體功率(理論功率) P_f :

i 泵對流體所作的功率，流體從泵上獲得的功率 $P_f = \dot{m} \times (-W_s)$

ii 流體作用於渦輪的功率

② 制動功率(實際功率) P_B : 外加到泵的功率

③ 渦輪功率 P_t : 渦輪產生的功率

④ 泵效率： $\eta_p = \frac{P_f}{P_B} \times 100\%$

⑤ 渦輪效率： $\eta_t = \frac{P_t}{P_f} \times 100\%$

⑥ 泵： $\frac{u_2^{-2} - u_1^{-2}}{2g_c} + \frac{(z_2 - z_1)g}{g_c} + \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \sum lw_f = \frac{P_B \times \eta_p}{\dot{m}}$

$$\textcircled{7} \text{ 渦輪: } \frac{\bar{u}_2^2 - \bar{u}_1^2}{2g_c} + \frac{(z_2 - z_1)g}{g_c} + \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \sum lw_f = \frac{P_t}{m \times \eta_t}$$

2. 柏努力方程式

流體無壓縮性，流動過程無摩擦

$$\frac{\bar{u}_2^2 - \bar{u}_1^2}{2g_c} + \frac{(z_2 - z_1)g}{g_c} + \frac{P_2 - P_1}{\rho} = 0$$

3. 托里切利定律：一開口儲槽，槽底有一小的排水孔， $\bar{u}_2 = \sqrt{2gh}$

~知識與智慧的差別就在是否入『心』~

第三章流體輸送裝置

一、管路

1. 依製造方法分類

- (1) 管：管徑較大，管壁較厚，用在輸送流體；如鑄造管、鋼管。
- (2) 抽製管：管徑較小，管壁較薄，用在熱交換裝置；如銅管、玻璃管、鋁管。
- (3) 軟管：用在特殊用途；橡皮管，塑膠管。

2. 依材料分類

- (1) 鋼管：含碳成份低，俗稱黑鐵管，表面鍍鋅增加耐腐蝕性
- (2) 鑄鐵管：又稱生鐵管，耐腐蝕性佳，不易加工，用於供水排水系統
- (3) 不銹鋼管：俗稱白鐵管，用於食品工業
- (4) 矽鐵管：耐硫酸及硝酸，用於輸送酸工業
- (5) 熟鐵管：又稱低碳管，用於熱水管及地下排水管
- (6) 銅管：耐腐蝕，延展性強，用於化學工業
 - ①紅銅管：又稱純銅管，傳熱良好，用於製造熱交換器，儀表管線
 - ②黃銅管：銅鋅合金，質硬鑄造性良好，用於製造熱交換器及管件
 - ③青銅管：銅錫合金，耐腐蝕性良好，用於製造閥及管件
- (7) 鋁管：質輕價廉，對氧化劑如濃硝酸、過氧化氫的輸送
- (8) 鉛管：質軟易變形，用來輸送硫酸
- (9) 鎳管：耐強鹼，用來輸送熱且濃的氫氧化鈉溶液
- (10) 陶瓷管：耐酸性佳，不耐鹼，易脆
- (11) 水泥管：價廉用於污水排放
- (12) 玻璃管：除氫氟酸外各種酸都可以抵抗，易脆不易加工
- (13) 橡皮管：不耐溫對酸及化學藥品具抵抗性，對醚及芳香烴抵抗性差
- (14) 塑膠管：耐酸鹼性良好，耐熱性差
- (15) 石英管：耐酸耐高溫，不耐鹼，價昂，易脆
- (16) 卡帛管：主成分是石墨，耐酸性強，傳熱性良好

3. 管子規格

(1) 管

- ①管長：標準為 6 公尺
- ②管徑：公稱管徑 Sch. NO 表示，公稱管徑不等於內徑也不等於外徑，但公稱管徑相同的圓管，管號不同其外管徑相同。
- ③管號：分十等分；標準管是 40 號，80 號為加強管。管號越大管壁越厚，耐壓性越高，內徑越小。
- ④大小：1/8~30in

(2) 抽製管

- ①管長：沒有一定
- ②管徑：依據伯明罕線規 BWG，公稱管徑就是實際外徑。

③管號：24 號到 7 號；管號越大，管壁越薄，管子越輕。

④管號越少越耐壓；管號越大傳熱效果較佳。

4. 管子接合

- (1) 螺旋接合：又稱絲口接合，用偶合接頭連接兩管，連接前可纏鐵氟龍增加緊密度，用在 3 吋以下的管。
- (2) 焊接接合：連接之後管子不易拆卸，適合含毒性放射性物質。
- (3) 凸緣接合：用在 2 吋以上的管子連接，為增加緊密度可加墊片。
- (4) 插承接合：用於質脆材料。

5. 管件

功能	種類
連接管子	管接頭、管套節(連接時不需轉動管子)、偶合接頭、內接頭
改變方向	街頭肘管、彎管、90 ⁰ 肘管、45 ⁰ 肘管
增加支路	十字接頭、T 接頭、Y 接頭
改變管徑	異徑接頭、漸縮管
終止管路	管帽、管塞

6. 閥

(1) 種類：

- ①阻塞閥：操作時全開或全關，以通過或阻斷流體的閥，其摩損失較小；如閘閥、旋塞閥。
- ②節流閥：用以精確調節流量大小的閥，摩擦損失較大，如球閥、針閥及蝶形閥。
- ③單向閥(止回閥)：用以控制流體單一方向流動，防止逆流。安裝時須注意方向。
- ④安全閥：容器壓力升高至某一範圍時自動打開閥門，排除高壓，防止爆炸。

(2) 常用的閥：

①閘閥：

- i. 用於較大管路的開關，不易精確控制流量，摩擦損失較小
- ii. 安裝時無方向性

②球閥：

- i. 可精確控制流量，摩擦損失較大
- ii. 容易阻塞，不適合含固體的流體，適用小管路或輸氣管。
- iii. 安裝時有方向性

③針閥：與球閥原理相似，適合用在高壓或微量氣體的調節。

④蝶形閥：適合低壓氣體或是流體中含有懸浮性固體的流體流量調節，大量氣體與液體上使用少。

⑤旋塞閥：流體壓力損失小，廣用於水管及氣管；不易控制流量且因摩擦而

使操作不方便。

二、泵：

1. 分類：

- (1) 正位移泵：以機械直接推動流體，使液體產生較大的壓力。有往復泵及旋轉泵。
- (2) 離心泵：藉旋轉葉輪對流體造成離心力以獲得能量，再將動能轉為壓力能以輸出流體。
- (3) 特殊泵：以空氣壓力代替機械對流體作功。

2. 離心泵：揚程：單位質量流體可以升舉的高度，與流體的密度無關。

(1) 離心泵的特性曲線包含：

- ① 流體勢能：泵輸送率：泵輸送的體積流率。
- ② 制動功率：外加於泵的功率，泵因有摩擦、渦流、滲漏等現象，所以制動功率大於實際的流體功率。
- ③ 泵效率：流體勢能與制動功率的比值。

(2) 氣縛現象：離心泵內有空氣，因空氣密度小於液體密度，以至於產生的離心力很小不足以推動出口側的液體，使得泵空轉而無法排出液體。消除方法：啟動前，需將氣體排出閥打開灌入液體驅逐空氣，在關閉排除閥，這動作稱為**引動**。

(3) 離心泵的優點：構造簡單，維護費低，可長時間運轉，壓力均勻，無升沉現象，可輸送含固體的流體。

(4) 離心泵的缺點：有氣縛現象，低揚程但可藉由串聯來改善，不適合高黏度或含氣體流體的輸送。

(5) 離心泵的操作方式：啟動馬達時須先關閉泵的出口閥，啟動後再慢慢開起出口閥。關機時，須先關閉出口閥，再關閉泵。

3. 往復泵：

(1) 工作原理：活塞自左向右移動泵缸內產生負壓，儲槽內液體經吸入閥進入泵缸內，當活塞自右往左移動時，缸內液體受擠壓，壓力增大液體由排出閥排出。

(2) 單動泵：活塞往復一次各吸入和排出一次液體。

(3) 雙動泵：活塞往復一次各吸入和排出二次液體。

(4) 衝程：活塞由一端移至另一端。

(5) 種類：

- ① 盤塞泵：壓力可達 50atm
- ② 柱塞泵：壓力可達 1500atm，但泵送量較小
- ③ 隔膜泵：對腐蝕性液體有用。

(6) 往復泵的優點：揚程大，無氣縛現象，可輸送高壓、小流量、高黏度流體。

(7) 往復泵的缺點：摩擦損失大，效率低，有**脈動**現象，不可輸送腐蝕性或有固體的懸浮流體。

(8) 去除脈動現象的方法：增加空氣室或雙動泵。

(9) 往復泵的操作方式：啟動時泵的出入口閥均需打開。

(10) 往復泵的效率：為容積效率與壓力效率的乘積，一般往復泵的效率在 70% 以上。

①容積效率： $\text{憶體實際排送量} / \text{液缸活塞面積} \times \text{活塞滑動速率}$ 。

②壓力效率：實際上作用於活塞的力/蒸汽壓力與活塞面積的乘積。

4. 旋轉泵：

(1) 特性：構造簡單體積小，沒有脈動現象，適合高壓高黏度流體，但泵送量小。

(2) 種類：

①齒輪泵：流量小，揚程高，適合輸送黏度大流體，但不適合含固體的懸浮液體。

②螺旋泵：適合高壓的黏性流體也適合含固體顆粒的流體，效率高無噪音。

5. 流體動力作用式：

(1) 酸蛋：利用壓縮空氣使液體升舉，多用於運輸車的裝卸料輸送。優點：適合高腐蝕性流體，輸送壓力大。缺點：不能連續操作，容量不大。

(2) 氣升泵：構造簡單適用於高腐蝕性液體輸送，用於鍋爐及蒸發緝中憶體的循環。

三、氣體輸送裝置

1. 風扇：產生氣體量多，但壓力小於 0.1atm

2. 鼓風機：產生氣體壓力在 2atm 以下，壓縮比小於 3，不需考慮冷卻裝置。

3. 壓縮機：產生氣體量小，壓力高達數千 atm 以上，壓縮比大於 3，需有冷卻裝置。

四、真空泵：原理與壓縮機相同，但密閉性及冷卻系統需更佳。常見的為蒸汽噴射器，包含擴散部、喉口及漸縮部三部份，入口處可抽真空，構造簡單，不易故障，價格便宜。

~讀好書別無他法一步步踏實~

第四章 流體流量測量裝置

一、流量計的種類：

1. 差壓式流量計：流體通過一個窄口，測量壓力差，根據伯努力定律推算出流量。
2. 面積式流量計：流體通過面積式流量計時，因壓力差不變，而流量大小與通過面積成正比，來推算出流量。
3. 排量式流量計：藉由流量計元件的旋轉來推動流體，每旋轉一圈可算出定體積的流量，由旋轉圈數即可得總流量。
4. 電磁式流量計：利用流體受電磁感應所產生的變化量來推算流量。

二、差壓式流量計：

1. 原理：由柏努力方程式得

$$\bar{u}_2 = C \sqrt{\frac{2g_c(-\Delta P)}{\rho(1-\beta^4)}} = C \sqrt{\frac{2gh(\rho_s - \rho)}{\rho(1-\beta^4)}}, \beta \equiv \frac{D_2}{D_1}$$

$$\dot{V} = \frac{\pi}{4} D_2^2 \times C \sqrt{\frac{2g_c(-\Delta P)}{\rho(1-\beta^4)}} = \frac{\pi}{4} D_2^2 \times C \sqrt{\frac{2gh(\rho_s - \rho)}{\rho(1-\beta^4)}}$$

$$\text{同一流量計不同流體：} \frac{\bar{u}_2}{u_1} = \frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} = \sqrt{\frac{-\Delta P_2}{-\Delta P_1}} = \sqrt{\frac{h_2(\rho_s - \rho_2)\rho_1}{h_1\rho_2(\rho_s - \rho_1)}}$$

2. 孔口流量計：

- (1) 構造：孔口的銳緣在流體的下游。
- (2) 放洩係數：孔口的放洩係數會隨雷諾數的增加而先增後減；當 $Re > 50000$ 時，放洩係數 $C=0.61$
- (3) 優點：構造簡單，安裝容易，測量範圍寬，佔地小，價格便宜。
- (4) 缺點：動力損失大，不適合含固體的流體。

3. 細腰流量計：

- (1) 構造：有漸縮部、喉口及發散部。漸縮部是為了產生壓差，其角度不超過 25° ，發散部是為了減少摩擦，其角度不得大於 7° ，
- (2) 放洩係數：孔口的放洩係數會隨雷諾數的增加而增加；當 $Re > 10000$ 時，放洩係數 $C=0.98$
- (3) 優點：精確度高，動力損失小，對泥漿及含固體的液體都適合。
- (4) 缺點：價格貴，佔空間，安裝較難。

4. 皮托管：

- (1) 構造：兩同心套管，內管截面積與流體方向垂直，用以測量流體的停滯壓力；外管管端密接內管，管面鑽小孔與流體流向平行，用以測量流體的靜壓力。

$$u_b = C \sqrt{\frac{2g_c(-\Delta P)}{\rho}} = C \sqrt{\frac{2gh(\rho_s - \rho)}{\rho}}$$

$$\text{測量氣體流速時：} u_b \cong C \sqrt{\frac{2gh\rho_s}{\rho}}$$

- (2) 特性：測量**點速度**。因流體的動力損失小，其放洩係數約為 1。
- (3) 優點：精確度高（比孔口及細腰流量計都高），動力損失小，安裝方便不佔地方，適合做高速氣體的流量測量。
- (4) 缺點：不適合含固體的流體。測量點上、下游的值管長度最好要大於 50 倍的管徑。
5. 噴嘴：以漸縮管代替孔口板。放洩係數約為 0.99，廣用於蒸汽與髒流體的測量，亦可測量高流速的流體流量。
6. 堰：

(1) 矩形堰： $\dot{V} = \frac{2}{3} \cdot C_w \cdot \sqrt{2g} \cdot b \cdot h^{\frac{3}{2}}$ ，h：流體在堰的高度 b：堰的寬度

(2) 三角堰： $\dot{V} = \frac{8}{15} \cdot C_w \cdot \sqrt{2g} \cdot \tan\theta \cdot h^{\frac{5}{2}}$

三、面積式流量計：

1. 浮子流量計：

- (1) 結構：由倒錐玻璃管與管內的浮子所組成；流體由底部進入，頂部流出，流體使浮子升舉的位置就是流體的流量的大小。
- (2) 原理：力平衡 $F_g = F_B + F_d$

$$u = C \sqrt{\frac{2gV_f(\rho_f - \rho)}{A_f \cdot \rho_f}} \quad ; \quad \dot{V} = \frac{\pi}{4} (D - D_f)^2 C \sqrt{\frac{2gV_f(\rho_f - \rho)}{A_f \cdot \rho_f}}$$

(3) 特性：

- ① 放洩係數 C 與浮子的形狀有關，可查圖得；若 $Re > 10^5$ 時，C 和 Re 無關。
- ② 浮子流量由浮子所在位置的最大截面積部分的上緣。
- ③ 浮子流量計安裝時需垂直安裝
- ④ 浮子位置相同時，流體的密度越大，表示流量越小。
- ⑤ 流量相同時，流體的密度越大，浮子的位置越高。
- ⑥ 浮子流量計的體積流率與流體的密度、黏度有關，使用前需先校正。

2. 活塞式流量計：

- (1) 構造：垂直於管中的套管，活塞在套管中上下移動而測量流體。
- (2) 原理：與浮子流量計相同
- (3) 特性：適用於高黏度流體。

四、排量式流量計(正位移流量計)：

1. 原理：將進入流體藉由旋轉元件來推動，每旋轉圈數推算出運送體積。
2. 種類：
 - (1) 擺動活塞式流量計：適用於不含固體及懸浮物流體。
 - (2) 搖盤式流量計：用於含微量雜質液體，且不受密度或黏度影響，家用水表即是。
 - (3) 斗式流量計：主要用來測氣體，是藉由浮力使葉輪旋轉而排出氣體。
 - (4) 隔膜式氣體流量計：用於測量腐蝕性氣體流量。

五、流速計：

1. 原理：利用流體通過的作用力來推動作用機構。對流量計而言，作用機構停止時流動也停止；但流速計的作用機構停止時，則流體繼續流動。
2. 種類：
 - (1) 螺旋槳式流速計：準確性高可當流速計的校正，可測量含固體小顆粒的氣體。
 - (2) 杯式流速計：用在氣象台測量風速。。
 - (3) 熱導式（熱線）氣流計：空氣流動會使電熱散失，由熱量散失大小來判斷流速大小。

～縱然努力不一定會成功

但所有成功者都是努力的～

第五章 熱量輸送裝置

一、熱傳的基本概念

1. 熱傳導：熱量經由分子的振動或自由電子的傳遞而將熱量傳給低溫。其介質部會流動。
2. 熱對流：因為流體的流動使得熱量傳送。
 - (1) 自然對流：流體受熱後因密度變化產生上浮下沉的流動。
 - (2) 強制對流：流體因外力產生熱量的變化。
3. 熱輻射：為一種電磁波傳遞能量，任何物質只要溫度大於零都會有熱輻射的產生。不需要介質。

二、熱傳導

1. 傅立葉定律：單位時間內傳導的熱量與溫度梯度及垂直於熱流方向的截面積成正比。

$$(1) \text{ 公式： } q = -KA \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{-\Delta T}{\frac{\Delta x}{KA}} = \frac{-\Delta T}{R_H}$$

- (2) 熱傳導係數 K ：代表物質傳熱能力，一般來說：金屬 > 非金屬 > 液體 > 氣體；單位為 $\frac{W}{m \cdot K}$, $\frac{Kcal}{hr \cdot m \cdot ^\circ C}$

$$2. \text{ 平板的熱傳導：單層平板： } q = -KA \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{-\Delta T}{\frac{\Delta x}{KA}} = \frac{-\Delta T}{R_H}$$

$$(4) \text{ 多層平板： } q = \frac{-\Delta T}{\sum R_H} = \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2 + \dots}{R_{H_1} + R_{H_2} + \dots} = \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2 + \dots}{\frac{\Delta x_1}{K_1 A} + \frac{\Delta x_2}{K_2 A} + \dots}$$

$$3. \text{ 圓管的熱傳導： } q = -KA_{in} \frac{\Delta T}{\Delta x} = K \times 2\pi L \times \frac{r_2 - r_1}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \times \frac{-\Delta T}{r_2 - r_1} = 2\pi L K \frac{T_h - T_c}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

$$4. \text{ 球殼的熱傳導： } q = -KA_{gm} \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{4\pi_0 r_i K \Delta T}{r_0 - r_i}$$

5. 串聯熱阻：穩定狀態下，各層的熱傳送速率相同， $q = q_1 = q_2 = \dots$
總平均溫差為各層溫差之和， $\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \dots$

則 $q = q_1 = q_2 = \dots$

$$\text{即 } \frac{T_h - T_c}{\sum R} = \frac{T_h - T_1}{R_1} = \frac{T_1 - T_2}{R_2} = \dots$$

6. 並聯熱阻：

穩定狀態下，並聯兩側的溫度差相同， $\Delta T = \Delta T_1 = \Delta T_2 = \dots$

總熱傳速率为各層熱傳導速率之和， $q = q_1 + q_2 + \dots$

$$\text{則 } \frac{\Delta T}{\sum R} = \frac{\Delta T_1}{R_1} + \frac{\Delta T_2}{R_2} + \dots, \text{ 故 } \frac{1}{\sum R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$$

三、熱對流

1. 牛頓冷卻定律： $q = hA(T_w - T_f)$ ，熱阻： $R = \frac{1}{hA}$
2. 對流熱傳係數 h ： $\frac{kcal}{hr \cdot m^2 \cdot ^\circ C}$ 或 $\frac{W}{m^2 \cdot K}$
3. 對流涉及的無因次群
 - (1) $Nu = \frac{hD}{K}$ ，水滴在靜止的空氣中蒸發或樟腦丸的昇華其 $Nu = 2$
 - (2) $Re = \frac{Du\rho}{\mu}$
 - (3) $Pr = \frac{C_p\mu}{K}$
4. 總包熱傳係數 U ： $q = UA\Delta T$
 熱流體與冷流體透過管子進行對流熱傳遞，
 總熱阻=管內對流熱阻+管壁傳導熱阻+管外對流熱阻
 則 $\frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\Delta x}{KA} + \frac{1}{h_o A_o}$

四、熱輻射

1. 輻射名詞
 - (1) 吸收率 α ：被介質吸收的輻射量/照射到介質上的總輻射量。
 - (2) 反射率 ρ ：被介質反射的輻射量/照射到介質上的總輻射量。
 - (3) 透過率 τ ：穿透介質的輻射量/照射到介質上的總輻射量。
 - (4) 放射率 ε ：物體的放射強度/同溫下黑體的放射強度。
 - (5) 輻射強度 E ：輻射體單位時間經單位面積所放射出的能量稱之。
 - (6) 黑體：能完全吸收照射到該物體上的總輻射量物質。對黑體而言，
 $\alpha = \varepsilon = 1$ 。
 - (7) 灰體：吸收率等於放射率且為定值不隨溫度而變。
 - (8) 暗體：輻射無法穿透的物質，及穿透率為零的物質。
 - (9) 對任何介質而言， $\alpha + \rho + \tau = 1$ ；黑體的 $\alpha = 1$ ，灰體的 $\alpha < 1$ ，暗體 $\tau = 0$ 。
2. 史蒂芬—波茲曼定律：定溫下，黑體的輻射強度與絕對溫度的四次方成正比。
 $E = \frac{q}{A} = \sigma T^4$ ， σ 為史蒂芬—波茲曼常數 $= 5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$
3. 克希荷夫定律：兩物體達熱平衡時，任一物體的放熱速率等於吸熱速率。即
 $\frac{E_1}{\alpha_1} = \frac{E_2}{\alpha_2}$ ，也就是說吸收率等於放射率。
4. 懷恩位移定律：特定溫度下，輻射體的最大輻射濃度的波長與輻射體的絕對溫度成反比。 $\lambda_{\max} T = 2890 \mu m - K$

第六章 熱量輸送裝置

一、熱交換器的熱傳速率

1. 熱交換器的熱負荷計算：

$$(1) \text{ 無相變化時： } q = \dot{m}_h C_{p_h} (T_{hi} - T_{ho}) = \dot{m}_c C_{p_c} (T_{co} - T_{ci})$$

$$(2) \text{ 有相變化時： } q = \dot{m}_s \lambda_s = \dot{m}_c C_{p_c} (T_{co} - T_{ci}) \quad , \quad \lambda_s = \text{為液化或汽化時的潛熱}$$

$$2. \text{ 熱傳速率計算： } q = \dot{m}_h C_{p_h} (T_{hi} - T_{ho}) = \dot{m}_c C_{p_c} (T_{co} - T_{ci}) = UA\Delta T_{ln}$$

3. 對數平均溫度差計算：流體在熱交換器內流動時各點的溫度變化情形有恆溫熱傳及變溫熱傳兩種；變溫熱傳又分為單側流體變溫及兩側流體變溫。

(1) 恆溫熱傳：進行熱交換的兩流體，各點溫度不發生變化，如一側流體沸騰，另一側流體為飽和蒸氣冷凝，其溫差為 $\Delta T_{ln} = T_h - T_c$

$$(2) \text{ 變溫熱傳：流動方式主要有順流及逆流兩類。 } \Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

4. 殼管是熱交換器的計算： $q = UA\Delta T_{ln} F$ ， F ：修正因子與冷熱流體的溫度變化有關

二、套管熱交換器

1. 構造：兩種直徑不同的管子組裝成同心套管。
2. 優點：構造簡單，耐高壓，製造方便，傳熱面積易增減。
3. 缺點：佔地大，適用於需傳熱面不大及高壓場合。

三、殼管熱交換器

1. 構造：主要有殼體，殼內有管束，封頭等。
2. 流動狀態：
 - (1) 管內流體每通過一次管束稱一管程。如需傳熱面積較大時，需要管子數目較多。管程多有利提高對流熱傳係數，能量損失增加，傳熱溫差減小。
 - (2) 流體流過一次殼體稱一般程。為提高殼程流體流速，可在殼內加裝檔板來提高流體流速，使其殼程流體的對流熱傳係數增加。
3. 種類：
 - (1) 浮頭式熱交換器：兩端管板有一邊可以自由浮動，管束可在殼內自由伸縮，消除熱應力，清洗時可將整個管束從殼內拆出，構造複雜，價格高。
 - (2) 固定板式熱交換器：由補償圈來補償因溫度差產生的熱漲冷縮，適用於管殼溫差較小的熱交換器。
 - (3) U形管式熱交換器：每個管子都可以伸縮來解決熱補償，構造簡單，質量輕，但彎管讓管板的利用率較差，管程不易清洗，適用在高溫、高壓。
4. 管子規格與管子的排列：
 - (1) 熱傳面積一定時，管徑較小，則單位面積設備熱傳面積越大，則熱交換器體

幾可減少，但管束不易清洗。

(2) 管子排列有三角形及正方形排列。三角形排列管子排列緊密，傳熱效果佳，但不易清洗。正方形排列清洗方便，但對流熱傳係數較小。

5. 擋板功能：增加殼側流速，提高熱流率；支撐管子。

6. 2-4 殼管式熱交換器代表：2 殼程 4 管程的熱交換器。管程增加，流體在管內流速也會增加，熱流率也隨之增大，且有管壁不易結垢的優點，但摩擦損失會增加的缺點，所以不可太多管程；；殼程增加時，會提高熱流率。

四、鰭管熱交換器

1. 鰭管可增加傳熱面積。

2. 優點：總傳熱係數高，適用於低溫或超低溫場所。

3. 缺點：熱流通道小，易阻塞，清洗困難。

五、板式熱交換器

1. 優點：總傳熱係數高，操作靈活性高。

2. 缺點：操作允許壓力小，容易滲漏，操作溫度不能太高。

六、夾層與盤管熱交換器：化工廠的反應器均需配備冷卻系統，有效控制加熱物的溫度，一般都是裝設夾層或盤管熱交換器。

1. 夾層熱交換器在反應器壁外加以夾層，作為加熱蒸汽或冷卻用水的器室。

2. 盤管熱交換器是置於反應器中。

七、螺旋板熱交換器：熱輸送速率大，佔地小，不易清除積垢，耐壓較低，適合污垢少腐蝕性的流體。

～你定的價值在那，你的成就就在那～

第七章 蒸發裝置

一、蒸發的原理

1. 蒸發定義：利用加熱方式將含有不揮發性溶質的溶液加熱至沸騰，使部分溶劑汽化被移除，進而提高溶劑中溶質的濃度。
2. 蒸發操作的要素
 - (3) 熱能的供給：利用輻射供給熱能，如曬鹽。藉由表面傳送熱量：如蒸發罐。
 - (4) 蒸汽的移除：擴散及冷凝。
3. 進料溶液的性質：
 - (3) 溶液濃度升高而使沸點上升：遵循杜林法則
杜林法則：不同壓力下，溶液沸點與溶劑沸點，在各濃度下成直線關係。
 - (4) 產生泡沫：泡沫的產生會影響氣液分離，且泡沫隨蒸汽的排出會損失溶質的成分。防止方法：蒸發罐中加檔板或加霧沫分離器，也可以在溶液中加消泡劑。
 - (5) 溫度敏感性：有些物質（牛奶、果汁及藥物等）在高溫或長時間加熱會產生熱分解。
避免方法：①減少蒸發溫度：用真空蒸發。②減少蒸發時間：用瞬間蒸發。
 - (6) 結垢：溶液因加熱蒸發而使固體沈積在加熱面上，而降低總熱傳係數。去除方法：機械法及加溶劑溶解。
 - (7) 鹽析：溶液中可溶性固體因蒸發而結晶析出。防止方法：將溶液控制成非飽和溶液，濃溶液不要在蒸發器內太久。
4. 蒸發在工業上的應用：
 - (5) 提高溶液中溶質的濃度：如製鹽、製糖工業。
 - (6) 濃縮溶液和回收溶劑：有機磷農藥苯溶液的濃縮脫苯。
 - (7) 獲得純淨的溶劑：海水淡化。

二、蒸發裝置

1. 自然循環式蒸發器：因溶液受熱不同而產生密度差，而引起溶液的循環。
 - (3) 橫管式蒸發器：加熱蒸汽在內管，溶液在外管被加熱。不適用會結垢溶液或是會產生氣泡的溶液。
 - (4) 垂直短管式蒸發器：加熱蒸汽在外管，溶液在內管被加熱。其優點為蒸發罐花費不大且清洗容易，適合易結垢溶液的蒸發，為熱傳係數隨液體的黏度增加而增加，熱傳面積不大。
 - (5) 垂直長管式蒸發器：有上升流直立長管蒸發罐和下降膜式垂直長管蒸發罐兩種。
2. 強制循環式蒸發器：主要有加熱器、氣-液分離室及回流泵三部分。溶液利用循環泵來輸送，總熱傳係數加大。動力設備增加，能量消耗大。適用於熱敏感性液體。
3. 液膜式蒸發器：溶液在蒸發器中只加熱一次，不做循環流動及排出。

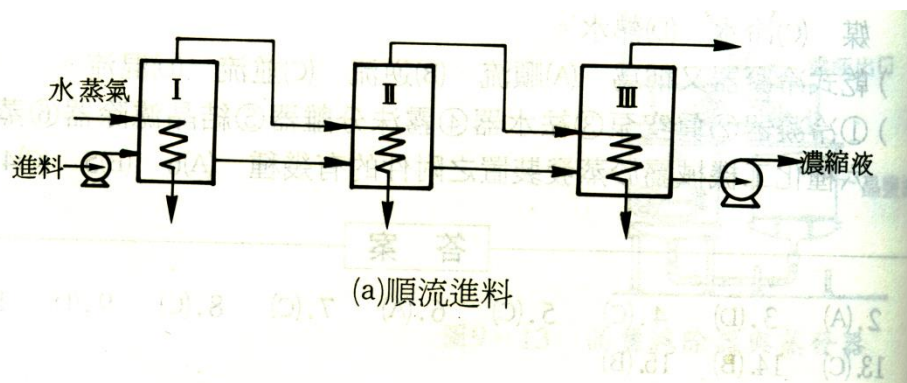
- (1) 升膜式蒸發器：適合處理蒸發量大，熱敏感性和黏度不大的溶液。不適合濃度及黏度高且易結晶結垢的溶液。
- (2) 降膜式蒸發器：溶液在蒸發器中停留時間更短，對熱敏感性溶液更適宜，不適合易結晶、結垢的溶液。
- (3) 套層式蒸發器：適用於高黏度易結晶結垢的溶液，缺點在動力消耗大，處理量少。

三、蒸發裝置的附件

1. 冷凝器：將蒸發器離開的蒸汽冷凝的裝置。
 - (1) 表面冷凝器：蒸汽和冷凝水未接觸，就像李必式冷凝管，是用在貴重溶劑的回收。
 - (2) 接觸冷凝器：蒸汽和冷凝水接觸而傳熱。
 - ① 乾式冷凝器(逆流冷凝器)：蒸汽和冷凝水逆流接觸，為了要讓冷水排出需加裝 11 公尺以上的大氣腳來抵銷壓差。
 - ② 濕式冷凝器(順流冷凝器)：蒸汽和冷凝水順流接觸。
2. 卻水器：功用在於排除冷凝水，防止蒸汽的散失。
3. 霧沫分離器：去除霧沫為其功用。
4. 晶鹽濾除器：避免蒸發器產生結晶。
5. 真空泵抽真空來降低器內壓力。

四、多效蒸發裝置：將數個蒸氣器串聯起來。目的在減少加熱蒸汽的使用量。

1. 特性：
 - (1) 蒸發壓力： $P_1 > P_2 > P_3$
 - (2) 蒸發溫度： $T_1 > T_2 > T_3$
2. 進料方式：請注意圖中泵所需的數量跟位置
 - (1) 順流進料：進料與蒸汽流動方向平行，溶液的濃度隨效數的增加而增加。
 - (2) 逆流進料：進料與蒸汽流動方向相反，各效間用泵來輸送，溶液的濃度隨效數的增加而減少，對濃稠性溶液有效，經濟效益高。
 - (3) 混合進料：加料方法藉在順流及逆流之間，較節省泵。
 - (4) 平行進料：各效自行進料和卸料，液體不在蒸發器間輸送。適用接近飽和的濃溶液。



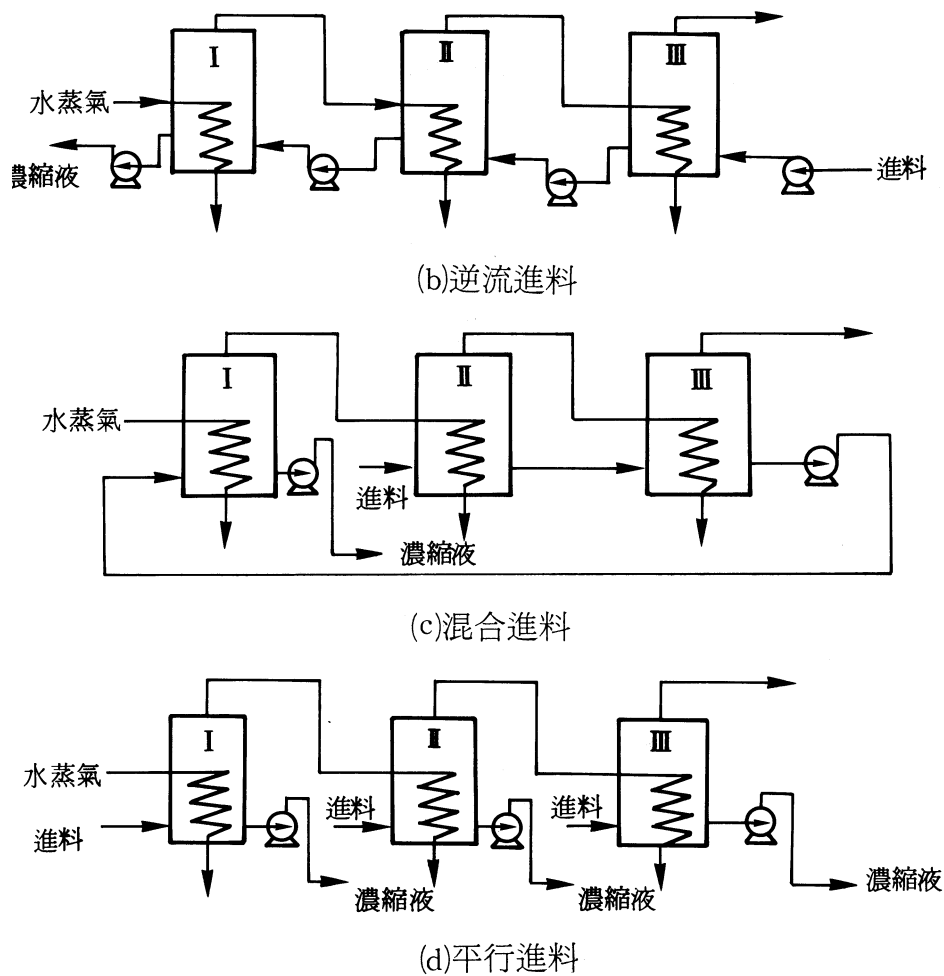


圖9-14 多效蒸發器的進料方法

3. 蒸發能力：單位時間能去除的溶劑重，稱之。一般來說在進入第一效的蒸汽相同時蒸發罐的蒸發能力越大者越好。

4. 經濟效率 η ：單位質量的進料蒸汽所能去除的溶劑重。
$$\eta = \frac{\sum \dot{m}_v}{\dot{m}_s}$$

(1) 單效蒸發的經濟效率不會大於 1。

(2) 多效蒸發時效數越多，經濟效益愈大，但蒸發能力降低。(原因：效數越多，熱損失越大。每一效溶液都會有沸點上升，效數愈多上升效應越嚴重，造成蒸汽與溶液的溫差越小，蒸發能力就降低)。

~任何事情沒有學不會，只有不想會的~

第八章 結晶裝置

一、結晶的原理

1. 結晶的功用：與溶劑分離，去除雜質，提高產品品質。
2. 晶體的種類：
 - (8) 金屬晶體：由陽離子所產生靜電、，使正電的原子結合在一起，自由電子在晶格中自由活動，導電性佳。
 - (9) 離子晶體：陰電性差大的正負離子，依庫倫力結合，熔點高。
 - (10) 分子晶體：分子間由凡得瓦力結合成晶格，熔點低，質軟且脆。
 - (11) 半導體：矽、鍺等元素，當含微量雜質時，導致晶格懸空，電子分佈不均勻。

3. 晶系

晶系	晶軸	面角	例子
立方晶系	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	NaCl, KCl, ZnS, 鑽石
四方晶系	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	TiO ₂ , SnO ₂
六方晶系	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ \quad \gamma = 120^\circ$	ZnO ₂ , PbI ₂ , Mg
三方晶系	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	As, Al ₂ O ₃ , Bi
斜方晶系	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	KNO ₃ , K ₂ SO ₄ , BaSO ₄
單斜晶系	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ \quad \beta \neq 90^\circ$	NaSO ₄ ·10H ₂ O, CuSO ₄ ·2H ₂ O
三斜晶系	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	CuSO ₄ ·5H ₂ O, K ₂ Cr ₂ O ₇ , H ₃ BO ₃

4. 邁耶理論：溫度-濃度圖可區分三個區域

- (1) 安定區：溶解曲線以下，溶液中溶質未飽和，能安定存在，不產生也不成長結晶。
- (2) 準安定區：在過溶解曲線下溶解曲線以上，此區只能使結晶長大，而不產生新晶體。
- (3) 不安定區：過溶解曲線以上，超過微小晶粒溶解度，溶液不安定，有許多微小晶粒析出，但結晶不會長大。
- (4) 結晶操作宜先控制再不安定區產生結晶顆粒，再到準安定區讓晶體長大。

5. 影響結晶的因素：

- (1) 溫度：結晶溫度決定溶質的飽和濃度，並和產生的結晶水有關。
- (2) 雜質：溶液有雜質時，會有不同的晶形析出。
- (3) 晶種：若溶液控制在不安定區，結晶速率不易控制，一般操作在可控制在準安定區，在添加晶種，則可得到較大顆粒的結晶。
- (4) 攪拌：攪拌會使結晶有促進作用。

6. 晶癖：結晶生長時受外界干擾，形成不同外形的結晶。其影響因素有：溶劑的種類，溶液的 pH 值，溶液的過飽和度，溶液的溫度，攪拌速率，磁場強度，不純

物的存在。

二、結晶裝置

1. 冷卻法：

(1) 特性：適用於溶質溶解度隨溫度變化很大時，如一般無機鹽的結晶。將溶液冷卻達過飽和狀態而析出結晶。

(2) 裝置：

①桶式結晶器：自然冷卻產生晶體，產生晶粒大，時間長，佔空間，容量小，品質低。

②攪拌分批式結晶器：用冷卻盤管及攪拌器操作，構造簡單，設備費低，用於少量結晶操作。

③史文生-華克連續式結晶器：用套層來冷卻，內附螺旋攪拌器，為連續操作。

2. 溶劑蒸發法：

(1) 特性：溶質的溶解度隨溫度變化很小時，如氯化鈉的結晶。將部分溶劑蒸發，以提高溶質濃度，使呈過飽和狀態。

(2) 裝置：Krysta 蒸發結晶器：將溶液經加熱器加熱到沸點以上，再以泵送至蒸汽櫃，使溶劑部分蒸發，而過飽和溶液在結晶裝置中結晶。

3. 絕熱蒸發法：

(1) 特性：適用於溶解度大的物質，如氯化鈣、硝酸鈉等，其溶解度對溫度變化很大，但溶解度很大，先在絕熱下蒸發，在做結晶操作。使熱溶液在真空室中驟然揮發，使部分溶劑蒸發，且溶液本身的溫度因絕熱蒸發而降低，以達飽和狀態。

(2) 裝置：循環真空結晶器：包含蒸發桶和真空泵兩部分，以真空泵保持蒸發桶內低壓，使溶液沸騰，而將溶劑蒸發及析出晶體。

4. 鹽析法：適用於溶質的溶解度隨溫度過高而降低的溶液，在溶液中加入第三物質，使此加入的物質與溶液中的原溶劑混合，來降低溶質的溶解度，而產生過飽和狀態，析出結晶。

15~40 歲是人生最精華的歲月，你拿來做什麼？

第九章 蒸餾裝置

一、蒸餾的原理

1. 拉午耳定律：平衡時，溶液的蒸氣壓與溶液組成的莫耳分率成正比。

$$P_A = P_A^0 \times x_A \quad P_B = P_B^0 \times x_B$$

2. 道爾吞分壓定律：混合氣體中的單成分氣體分壓與其組成成正比。

$$P_A = P_i \times y_A \quad P_B = P_i \times y_B$$

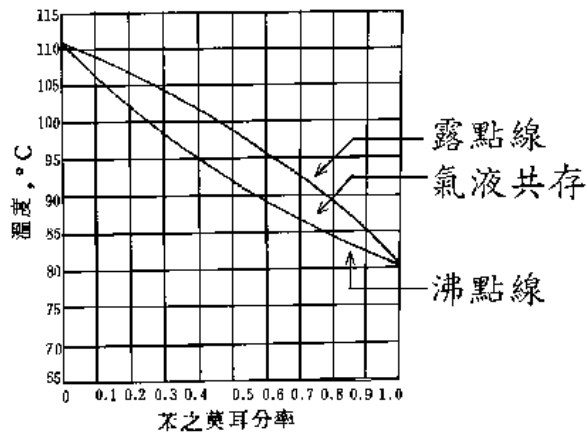
3. 揮發度錯誤! 物件無法用編輯功能變數代碼來建立。：氣相中某一組成的蒸氣壓與平衡液相中莫耳分率的比。

$$v_A = \frac{P_A}{x_A} \quad v_B = \frac{P_B}{x_B}$$

4. 相對揮發度：混合液體中兩組成的揮發度的比。

$$\alpha_{AB} = \frac{v_A}{v_B} = \frac{\frac{P_A}{x_A}}{\frac{P_B}{x_B}} = \frac{P_A^0}{P_B^0} = \frac{\frac{y_A}{x_A}}{\frac{y_B}{x_B}} \quad y_A = \frac{\alpha_{AB} \cdot x_A}{1 + (\alpha_{AB} - 1)x_A}$$

5. 氣液平衡圖：



- (1) 溫度-組成圖：

- (2) x-y 圖獲得方法：有 T-X 圖、P-X(Y)圖及相對揮發度 $y_A = \frac{\alpha_{AB} x_A}{1 + (\alpha_{AB} - 1)x_A}$

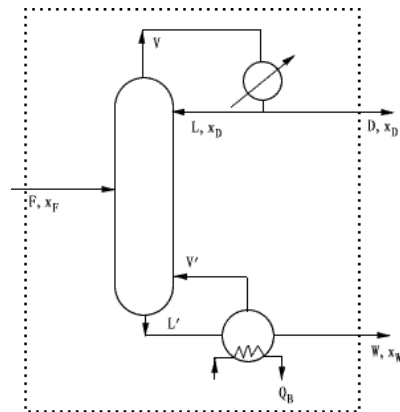
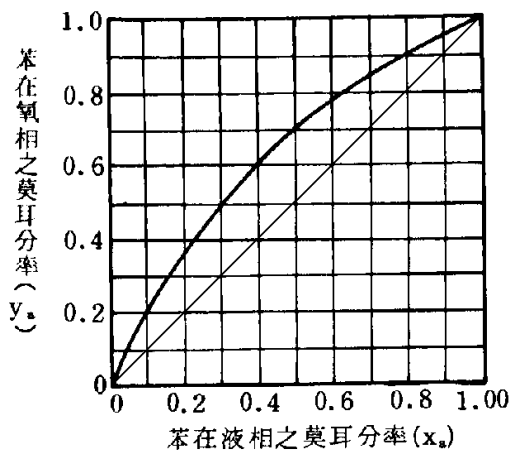


图 1-14 精餾塔的物料衡算

二、蒸餾的方法

1. 微分蒸餾(簡單蒸餾)：由蒸餾瓶及冷凝器組成，蒸餾時氣體逸出，容器中的液體組成會隨之變化。則蒸餾過程中汽相與液相的各組成隨時成微分變化。用於沸點差異較大者，分離成品要求不高，去除不揮發性成分的雜質。
2. 平衡蒸餾(急驟蒸餾、突沸蒸餾)：溶液加熱後在汽化室中突沸而產生汽體與液體成平衡的汽液分離操作。進料為連續單級方式。
3. 萃取蒸餾：加入高沸點的第三成份來提高相對揮發度，分離較容易，產品在塔頂獲得。
4. 共沸蒸餾：在共沸混合液中加入第三成份來破壞共沸組成，產品由塔底獲得。
5. 水蒸氣蒸餾：高沸點的揮發性物質藉由水蒸氣的通入使揮發性物質隨汽流中排出，再經由冷卻的方式分離成分。

三、精餾的原理

1. 原理：利用混合物中各成分的沸點(蒸氣壓、揮發性)不同，進行分離操作。
2. 精餾裝置：主要包含精餾塔、重沸器及冷凝器。
 - (1) 加入進料的板稱為進料板。
 - (2) 進料板以上到塔頂稱為增濃段。
 - (3) 進料板以下到塔底稱為汽提段。
 - (4) 進料之後液體沿塔中下降，高沸點成分濃度增加；體沿塔上升，低沸點成分的濃度增強。

3. 質量平衡：全部量做平衡： $F = D + W$

$$\text{某一成分做平衡：} Fx_F = Dx_D + Wx_W$$

麥泰法：假設恆莫耳溢流，即塔中每一板的莫耳流量都相等

- (1) 增濃段操作線方程式： $y = \frac{R}{R+1}x + \frac{1}{R+1}x_D$

- (2) 汽提段操作方程式： $y = \frac{L}{V}x - \frac{W}{V}x_W$

- (3) 進料段操作方程式： $y = \frac{f-1}{f}x + \frac{1}{f}x_F$ 或 $y = \frac{q}{q-1}x - \frac{1}{q-1}x_F$

- (4) 進料的五種狀態：

進料狀態值 q = 進料在氣提段內所形成液體流量的莫耳數 / 進料的總莫耳數

① 進料為冷液體： $f < 0$ 或 $q > 1$

② 進料為飽和液體： $f = 0$ 或 $q = 1$

③ 進料為氣-液體混合液： $0 < f < 1$ 或 $0 < q < 1$

④ 進料為飽和氣體： $f = 1$ 或 $q = 0$

⑤ 進料為過熱蒸汽： $f > 1$ 或 $q < 0$

4. 回流比：經冷凝器冷凝蒸汽回流到塔內的流量 L_0 與塔頂產品 D 的比值。

$R \equiv \frac{L_0}{D}$ 。回流筆越大，所需的板數越小；當實際板數固定時，則塔頂產品越

純。

- (1) 全回流($R=\infty$)：塔頂蒸汽經冷凝後全部進入塔頂做回流，塔頂產品為零。此時增濃段的操作線斜率為 1，截距為 0。此時所需的理論板數最小。
- (2) 最小回流(R_{\min})比：最小回流比時，進料線與增濃段及氣提段之操作線，三條線共同相交於平衡曲線上，此時需要的理論板數為無限多。在最小回流比的操作條件時，塔頂的回流量最小，所以重沸器及冷凝器的熱負荷最小。
- (3) 最適回流比 R_{opt} ：回流比與設備費及操作費有關，一般採用

$$R_{opt} = 1.2 \sim 2.0R_{\min}$$

5. 板效率：

(1) 全塔板效率：理論板數與實際板數的比。 $\eta_t = \frac{\text{理論板數 (不含重沸器)}}{\text{實際板數}}$

(2) 莫飛效率(單板效率)： $\eta_M = \frac{\text{氣相組成在實際板數的變化}}{\text{氣相組成在理論板的變化}} = \frac{y_n - y_{n+1}}{y_n^* - y_{n+1}}$

四、批式精餾裝置：批式蒸餾是將混合液體注入加熱器中，加熱使其沸騰而汽化來進行蒸餾。與微分蒸餾不同的是餾出汽體不直接進入冷凝器，而是經由回流裝置再次汽液接觸，來提高蒸餾液中揮發性較高成分的濃度。

五、連續式精餾裝置與操作

1. 板塔：多級接觸，有泡罩板、篩孔板及閘板

(1) 泡罩板：

- ①優點：不易發生滲漏，操作彈性大
- ②缺點：結構複雜，壓力降大，氣液流速小，生產能力小。

(2) 篩孔板：

- ①優點：構造簡單，造價低，壓降小，生產能力大，效率高。
- ②缺點：操作數據少。

(3) 閘板：

- ①優點：生產能力與篩孔板接近，操作彈性大，氣液接觸良好，安裝容易。
- ②缺點：操作數據少。

第十章 吸收與吸附裝置

一、吸收的原理：物質藉氣體與液體接觸，使器相中氣體溶質轉移到液相中，以達到分離操作。

1. 氣體在液體中的溶解度：
 - (1) 氣體溶解度：一定溫度與壓力下，氣體溶於液體中達飽和時，液體中溶質濃度稱之。
 - (2) 總壓不高時，氣體的溶解度與該氣體的分壓有關，與總壓無關。
 - (3) 氣體的分壓一定時，氣體的溶解度隨溫度的增加而降低。所以吸收操作適合在高壓低溫下操作。
2. 亨利定律：總壓不大時，一定溫度下稀溶液上方溶質的平衡分壓與液相中的莫耳分率成正比。
3. 亨利定律與拉午耳定律比較：拉午耳定律適用於理想溶液；亨利定律則適用於理想溶液與非理想溶液。

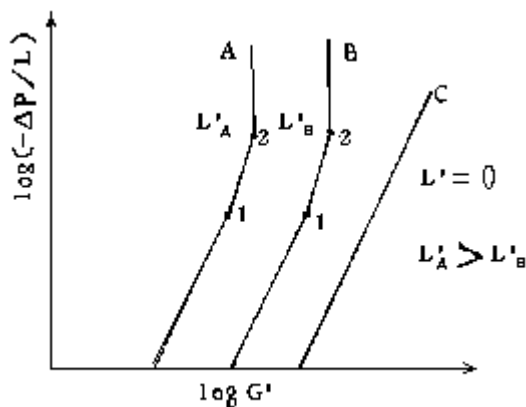
二、吸收裝置

1. 填充塔的結構：操作時，氣體從塔底進入，由下而上通過填充料空隙，再與由上而下沿填料表面流下的液體成逆流接觸，進行質傳。
2. 填料的性質：常用的填料：拉西環。
 - (1) 比表面積：單位體積填料所具有的表面積。比表面積越大吸收效果越好。
 - (2) 空隙度：空隙度越大，流體流過的阻力越小，所以要選擇空隙度大的填料，有利吸收操作。
 - (3) 填料大小：一般吸收塔中的填料不應大於塔徑的 $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{8}$ 。
 - ① 填料太小，堆積量多，氣體阻力大。
 - ② 填料太大，近管壁處的空隙大，氣體在塔的截面積分佈不均勻，容易形成渠流現象。
 - (4) 堆積密度：在允許機械強度下，填料稀薄，可減少堆積密度，降低成本。
 - (5) 機械強度：強度大，底層填料不易被壓碎。
 - (6) 化學安定性：不與氣體或液體起化學作用。
3. 填料的堆積：
 - (1) 隨意堆積：造成的壓力降較大，適用於小型填充塔。
 - (2) 整齊堆積：造成的壓力降較小，但液體易產生渠流現象，而造成氣液接觸不佳，適用於大型的填充塔。
4. 吸收劑的選擇
 - (1) 溶解度：吸收劑對分離的成分有大溶解度，可提高吸收速率。
 - (2) 選擇性：選擇性良好的吸收劑對分離成分有的溶解能力。
 - (3) 再生性：再生性大可降低操作成本。
 - (4) 揮發性：揮發性小，可減少吸收劑的損失，降低操作費用。
 - (5) 吸收劑的黏度要低、腐蝕性要小、無毒，具化學穩定性。

(6) 價廉易取得，所以水是最優先考慮者。

三、填充塔的計算

1. 渠流現象：填充塔中液體由塔頂經填料而往下流，會沿著阻力最小或空隙最大的途徑流動，此現象稱之。
2. 氣體通過填充塔的壓力降：填充塔的質量表面速度 G ：單位面積的質量流率。其中 G_x ：液相的質量表面速度； G_x ：液相的質量表面速度。
 - (1) 乾塔（沒有液體流下）時，壓力降與質量表面速度成一直線關係，其斜率代表壓力降與氣體流量的幾次方成正比關係。
 - (2) 濕塔時，在圖中 1 點表示流動所造成的壓力降開始阻礙塔內液體往下流，填料間開始有液體堆積現象，此點稱負載點。
 - (3) 圖中 2 點表示過了負載點之後，氣體流率繼續增加，此時塔內的液體的累積增多，壓力降比負載點之前增加的更快，而使得液體無法流下繼續累積而溢出塔外，此點稱為泛溢點，此時的速度稱為泛溢速度。
 - (4) 當氣體流速固定時，液體的質量速度越大，所造成的壓力降越大。
 - (5) 通常填充塔內最適當的氣體質量流速為泛溢速度的 50~75%。



填充塔的壓力降落

～天助自助者，是不變的道理～

第十一章 萃取與瀝取裝置

一、萃取的原理：利用混合液體中各成分的溶解度不同，來達到各成分提純的操作。

1. 萃取包含混合和分離兩部分。

(1) 混合的目的是使原料與溶劑充分接觸，利用溶質由溶劑中轉移到萃取劑中。

(2) 分離的目的是使質傳後的兩相分離，以便從萃取相與萃餘相中除去溶劑來得到產品。

2. 影響因素：分配係數、溶劑的選擇以及溫度。

(1) 分配係數：在一定溫度下達平衡時，溶質在兩相中組成的比。分配係數是表示溶劑選擇性好壞的參數。

(2) 溶劑的選擇

① 溶劑的選擇性：溶劑的選擇性越大，混合物的分離能力越強。

② 溶劑與稀釋劑的互溶性越小越好。

③ 溶劑與混合物的密度差較大，可提高質傳速率，增加設備生產能力。

④ 溶劑的表面張力：表面張力大，不易分散，但分離容易；所以操作時要選擇表面張力大的溶劑。

⑤ 溶劑的黏度：黏度低，不利質傳，但有利於混合與分離。

⑥ 溶劑的回收性：利用蒸餾與蒸發

i. 用蒸餾回收者：希望相對揮發度大，不形成共沸混合物且含量低的組成易揮發，以便節省能源。

ii. 用蒸發回收者：希望溶劑蒸發潛熱小，以節省能源。

(3) 溫度：溫度低分離效率好，但溫度太低使液體的黏度變大，增加質傳阻力。

3. 萃取的種類：

(1) 固-液萃取：花生中提取花生油；魚肝中提取魚肝油；氧化銅中用硫酸提出銅；水將砂中的 NaCl 提出。

(2) 液-液萃取：用四氯化碳萃取水中的碘；植物油中不飽和物的分離。

(3) 萃取操作的應用：分離沸點相近的成分，分離熱敏感性的混合物，回收稀溶液中的溶質，分離高沸點有機物。

二、液-液萃取裝置

1. 混合沉降萃取器：為逐批機械攪動萃取器，萃取物與溶劑送入桶內，經攪拌萃取後在沈降器內依密度大小不同而分層。

2. 攪和萃取器：攪和萃取塔為連續操作萃取器，重輕兩液由塔的上下部送入，以逆流流動，在塔內經攪拌器的攪拌。

3. 噴灑萃取器：塔內無填充料，接觸不良，容易發生逆混合，萃取效率很低。

4. 填充塔萃取器：因塔內的大量填料，使液液接觸面積增加，減少逆混合，而提高萃取效率，工業界常用。

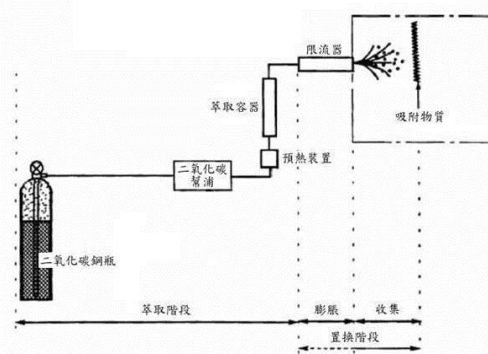
三、固-液萃取裝置

1. 固定床萃取器：為滲提器中最簡單的裝置，適用於粒徑較大，易萃取的萃取物。

2. 運動床萃取器：為連續操作的滲提器，適用於粒徑大的萃取物。
3. 分散萃取器：固體萃取常先減積成細小顆粒均勻分散於液體中，以增加萃取面積，促進萃取的完成。但粒徑變小，分散容易分離難，需採用沈澱器或過濾機做萃取後的分離。其種類很多：粗顆粒固體不易懸浮於液體者可採用斜耙離析器。固體顆粒很細，可用攪拌器或是稠化器。

四、超臨界萃取

1. 超臨界流體的性質：超臨界流體的物理性質是介於氣、液相之間的。例如，黏度接近於氣體，密度接近於液體，因密度高，可輸送較氣體更多的超臨界流體，因黏度低，輸送時所須的功率則較液體為低。擴散係數比液體高很多，亦即質量傳遞阻力遠較液體為小，因之在質量傳遞上較液體為快。此外，超臨界流體有如氣體幾無表面張力，因此很容易滲入到多孔性組織中。簡言之，超臨界流體兼具有如氣體般的低黏度、高擴張係數、低表面張力，有如液體般的高密度、溶解能力，和對物質的溶解能力可隨溫度及壓力改變等性質。
2. 二氧化碳在氣體狀態下不具萃取能力，但當進入超臨界狀態後，二氧化碳變成親有機性，因而具有溶解有機物的能力，此溶解能力會隨溫度及壓力而有所不同。
3. 以咖啡去除咖啡因的為例：製程分為三個階段，
 - (1) 第一階段是利用乾燥的超臨界二氧化碳，萃取經焙炒過的咖啡豆中的香味成分，再經減壓後放置於一特定區域。此階段可看出乾燥的二氧化碳具選擇性，不會萃取咖啡豆中的咖啡因，經減壓後的二氧化碳，對香味成分的溶解度會大幅降低，由此可看出壓力對溶解度的影響。
 - (2) 第二階段為將減壓的二氧化碳，經壓縮並使其中帶有定量水分後，再通入裝有咖啡豆的槽中，此時因二氧化碳含有水，而水具有極性，可萃取出咖啡因，離開萃取槽後經減壓，將咖啡因與二氧化碳分離。
 - (3) 第三階段是利用超臨界二氧化碳流體溶解放置於特定區域中的香味成分，再送回萃取槽，將香味成分放回咖啡豆中。此三階段皆顯示超臨界二氧化碳具高滲透力，可深入咖啡豆內部組織，此乃因低表面張力之故。另亦顯示改變二氧化碳的物理及化學性質，以及壓力和溫度是可影響溶解能力及對溶質的選擇性。



典型之超臨界流體萃取系統概要圖

第十二章 濕度與空氣調節

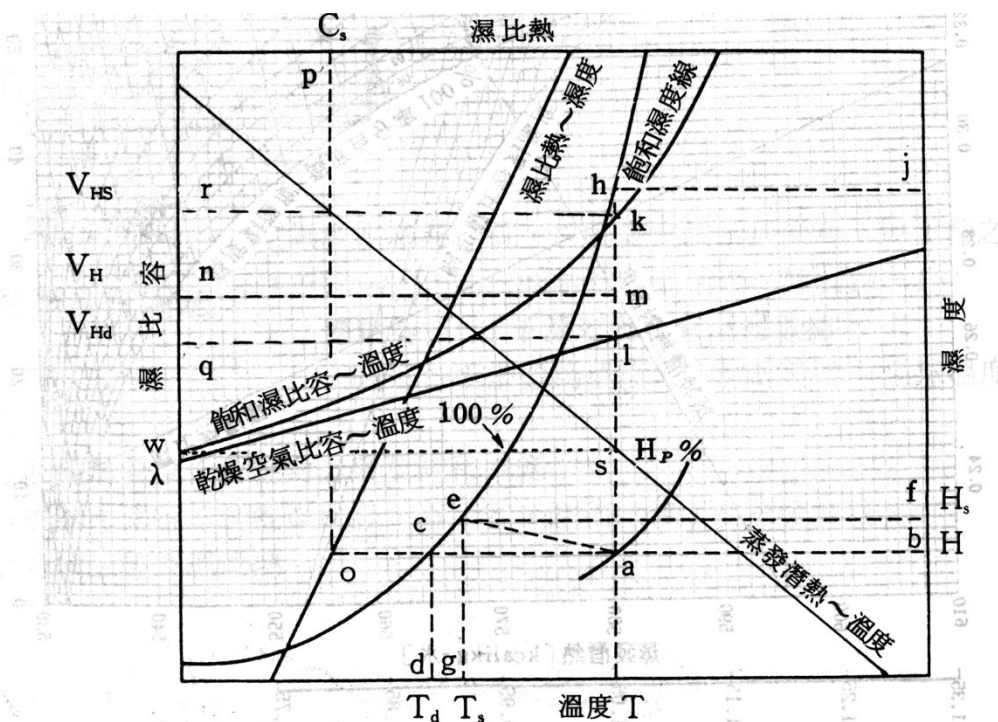
一、溼度與濕空氣的性質

1. 絕對濕度 Y ：單位質量乾空氣中所含水蒸氣的量。
$$Y = \frac{18P_{H_2O}}{29(P_T - P_{H_2O})}$$
2. 飽和濕度 Y_s ：單位質量乾空氣中所含飽和水蒸氣的量。
$$Y_s = \frac{18P_{H_2O}^0}{29(P_T - P_{H_2O}^0)}$$
3. 相對濕度 Y_R ：某一溫度下，混合氣體中，水蒸氣分壓與同溫下飽和水蒸氣分壓的比。
$$Y_R = \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2O}^0} \times 100\%$$
4. 百分濕度：某一溫度下，空氣濕度與飽和濕度的比。
$$Y_p = \frac{Y}{Y_s} \times 100\% = Y_R \times \frac{P_t - P_{H_2O}^0}{P_t - P_{H_2O}}$$
5. 濕比熱 C_s ：單位質量乾空氣與其所含水蒸氣，讓溫度每升高 1°C 所需的熱量。
$$C_s = 0.24 + 0.45Y$$
6. 濕比容 V_H ：單位質量空氣與其所含水蒸氣所佔有的體積。
$$V_H = (0.082t(^{\circ}\text{C}) + 22.4) \left(\frac{1}{29} + \frac{Y}{18} \right)$$
7. 露點 T_d ：使混和氣體的溫度下降至混合氣體中水蒸氣凝結出來的溫度。
8. 乾球溫度 T ：普通溫度計所測空氣溫度。
9. 濕球溫度 T_w ：溫度計以濕布包覆，置於流動氣流中所測得的溫度。
10. 絕熱飽和溫度 T_s ：在絕熱狀態下，使不飽和空氣增濕成飽和空氣時的溫度。

二、濕度圖：

1. 橫座標：下方為溫度（包含乾球溫度、濕球溫度及露點）；上方為濕比熱。
2. 右方縱座標：濕度（包含絕對濕度及飽和濕度）。
3. 左方縱座標：比容（包含乾比容、濕比容及飽和比容）及蒸發潛熱。
4. 已知空氣的乾球溫度 T 及濕度百分率 H_p 定出圖上的 a 點，由 a 點向右看得到此條件下的濕度 b 點。
5. 由 a 點向左看和 $H_p=100\%$ 的線相交於 c 點往下看得到 d 點為露點。
6. 由 a 點沿著絕熱冷卻線到 $H_p=100\%$ 的線相交的 e 點，由 e 點往下看得到 g 點為濕球溫度； e 點往右看得到 f 點為飽和濕度。
7. 由 a 點往左看與濕比熱-濕度線相交於 o 點，往上看得到 p 點為濕比熱。

8. 由 a 點往上與濕度於百分率為 100% 的線相交於 h 點往右看得到 j 點為增濕的最大極限。
9. 由 a 點往上與乾空氣比容-溫度的線相交 l 點，往左看得到 q 點為乾燥比容。
10. 由 a 點往上與濕度線（即 b 點的值）相交於 m 點，向左看到 n 點為濕比容。
11. 由 a 點往上與飽和濕度線相交於 k 點，往左看到 r 點為飽和比容。
12. 由 a 點往上與蒸發潛熱-溫度線相交於 s 點，往左對到 w 點為蒸發潛熱。



三、濕度計

1. 乾濕球溫度計：兩支溫度計其中一支包覆潤濕紗布，平衡時測得乾濕球溫度在利用濕度圖查出濕度。
2. 露點溫度計：將光亮金屬鏡置於空氣中，慢慢降低金屬鏡的溫度，直到金屬鏡表面有露珠析出的溫度(露點)，再與乾球溫度由濕度圖查濕度。
3. 毛髮濕度計：利用毛髮木材纖維塑膠等會隨濕度變化而伸縮的原理設計。
4. 電阻性濕度計：塗有氯化鋰薄膜導體，其電阻的變化與氯化鋰的平衡含水率有關。

四、空氣調節裝置

1. 增濕的方法：加入水蒸氣，加入冷水揮發，氣流與水接觸。
2. 減濕的方法：
 - (1) 冷卻法：濕空氣與冷面接觸。
 - (2) 吸收法：利用吸收劑(CaCl_2 、 P_2O_5 、 NaOH 、 CaO)來吸收氣流中水分，其中以 P_2O_5 最好。
 - (3) 吸附法：利用矽膠、活性炭、氧化鋁來吸附濕氣流中的水蒸氣。
 - (4) 壓縮法：將濕空氣在一定溫度下壓縮，使空氣中水蒸氣凝結出來。
3. 空氣調節：提高舒適生活或工作環境及適當的生產條件。一般溫度控制在 $19\sim 24^\circ\text{C}$ ，濕度在 $50\sim 60\%$ 。

五、涼水塔：使溫度變涼的裝置

1. 原理：將溫水與未飽和的冷空氣接觸，水帶走熱量並使空氣增濕。
2. 種類：①自然對流式：是用氣候乾燥及寒帶地區。②強制對流式：用風扇來強制送風。

第十三章 乾燥裝置

一、乾燥的原理

1. 物料含水率：在某一溫度及濕度下，物料原重為 m_t ，經無限長時間乾燥達平衡時重為 m ，在經強熱後去除物料中全部水分的重為 m_s

$$(1) \text{ 物料總含水率 } X_t : X_t = \frac{m_t - m_s}{m_s}$$

$$(2) \text{ 物料自由含水率 } X_f : \text{為物料乾燥過程中可去除的水分, } X_f = \frac{m_t - m}{m_s}$$

$$(3) \text{ 物料平衡含水率 } X_e : \text{為物料乾燥過程中無法去除的水分, } X_e = \frac{m - m_s}{m_s}$$

2. 乾燥速率曲線

- (1) 乾燥速率：單位時間單位面積乾燥去除的水分。

$$R(\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}) = \frac{-\Delta m}{A \cdot t} = -\frac{1}{A} \frac{dm}{dt} = -\frac{m_s}{A} \frac{dX}{dt}$$

- (2) 乾燥速率曲線：乾燥速率與含水率作圖。

①起始期：在某一乾燥條件下，物料溫度和乾燥速率會有所增減，以便短時間內達到穩定狀態，達穩定之前稱之。

②恆速期：水分蒸發為表面蒸發，其水分是由內部迅速補充，乾燥速率一定。

i 乾燥速率與自由含水率無關。

ii 物料表面溫度等於空氣的濕球溫度。

③減速第一期：物料表面蒸發速率大於物料內部供給速率。

④減速第二期：物料內蒸發，此時物料表面溫度等於乾球溫度。

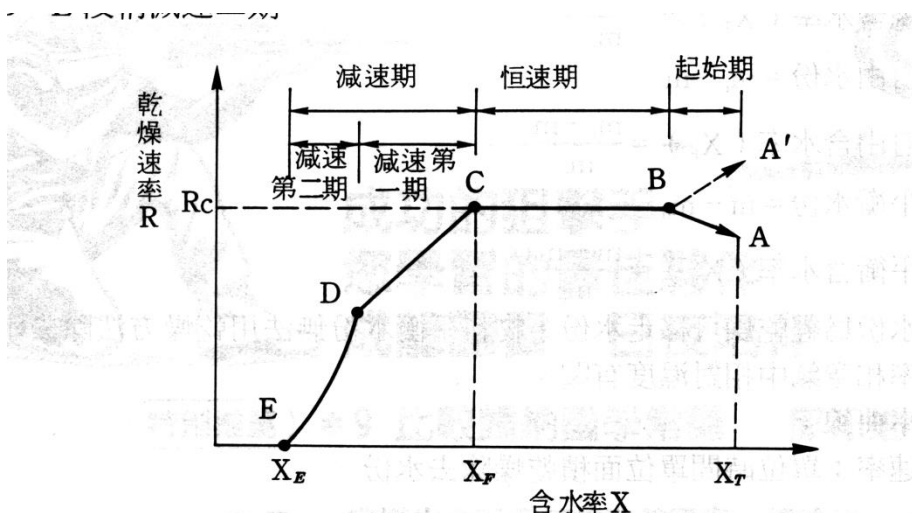


圖 15-2 乾燥特性曲線

(3) 影響恆速期乾燥速率的因素

- ① 氣流溫度：溫度高，乾燥速率快。
- ② 氣流濕度：濕度小，乾燥速率大。
- ③ 氣流速率：速度大，乾燥速率大。
- ④ 氣流方向：正面通過，乾燥速率大。
- ⑤ 收縮與表面硬化：乾燥速率太大，物料表面收縮與硬化，使固體表面擴散速率降低，乾燥速率會便慢。

(4) 乾燥速率

$$\textcircled{1} \text{ 恆速期乾燥時間 } t_c = \frac{m_s}{AR_c} (X_1 - X_2)$$

$$\textcircled{2} \text{ 減速期乾燥時間: } t_f = \frac{m_s X_2}{AR_c} \ln \frac{X_2}{X_f}$$

$$\textcircled{3} \text{ 乾燥全期時間: } t = t_c + t_f = \frac{m_s}{AR_c} [(X_1 - X_2) + X_2 \ln \frac{X_2}{X_f}]$$

二、乾燥裝置

1. 塊狀、片狀及粗顆粒物料：形狀較大，有空隙的顆粒物料
 - (1) 盤式乾燥機：適用於昂貴、產量少的物料；如染料、藥物等。
 - (2) 隧式乾燥機：適用於需乾燥物料較多，產量大，設備簡單。
2. 輸送帶式乾燥機：連續式操作，效率高，設備費用及操作費中等。
 - (1) 疏鬆物料：穀物、水泥、晶體的乾燥。
 - (2) 迴轉式乾燥機：可連續操作，如水泥工廠。
 - (3) 流體化乾燥機：適用於蔗糖、食鹽晶體乾燥，不會變小且保持晶體形狀。
3. 連續織物或薄膜物料：用在紙張或布匹的連續之物或薄膜的乾燥。
 - (1) 洞道乾燥機：用於紙張加工或各種表面處理。
 - (2) 筒式乾燥機：適用在布匹或紙張乾燥。
4. 黏着顆粒物料：顆粒含水分較多，呈黏著性。
 - (1) 螺旋運送乾燥機：適用黏著性物料乾燥。

- (2) 輪機式乾燥機：利用風扇使熱空氣對流，對黏著性顆粒有效。
5. 溶液或漿狀物料：牛奶、清潔劑產品。
- (1) 鼓式乾燥機：用於濃液或漿狀物料，可獲得片狀或粉狀產品，不適用低濃度或易沈澱的研磨性漿狀物料。
- (2) 噴淋乾燥機：適用於奶粉、果汁、清潔劑等微粒產品。
6. 氣體乾燥：
- (1) 乾燥劑法：
- ① 氯化鈣：乾燥能力佳，但不是用高溫氣體乾燥。
- ② 濃硫酸：吸水能力強，可適用在高溫，使用後可回收。
- ③ 生石灰：產量多，使用方便。
- ④ 五氧化二磷：乾燥效率最高，但價格昂貴。
- (2) 加壓法：氣流中飽和濕度隨壓力而改變性質。利用高壓操作，所需動力多、費用高。
- (3) 冷卻法：利用潮濕空氣冷卻到露點以下，使水分凝結而達乾燥效果，冷卻時水蒸氣凝結成冰，會阻塞管子。
- (4) 吸附法：將吸附劑置於潮濕空氣中吸附水分，可回收再生使用。

第十四章 固體的性質、輸送與減積裝置

一、固體的一般性質

1. 密度：單位體積中所具有的質量

(1) 整體密度 ρ_b ：固體的單位體積中所具有的固體質量。 $\rho_b = \frac{w_b}{V_b}$

(2) 粒子密度 ρ_p ：物料單一顆粒的密度。 $\rho_p = \frac{w_p}{V_p}$

(3) 空隙度 ε ：單位體積中所含的空隙體積。

$$\varepsilon = \frac{\text{空隙體積}}{\text{整體體積}} = \frac{V_b - V_p}{V_b} = \frac{\frac{1}{\rho_b} - \frac{1}{\rho_p}}{\frac{1}{\rho_b}} = \frac{\rho_p - \rho_b}{\rho_p}$$

2. 硬度：物料堅硬的程度

(1) 一般礦石都用莫氏指標表示，由軟至硬分十級 (1~10)，最軟的是滑石，最硬的是金鋼石。

(2) 通常將物料依其硬度分三級：軟質(1~3)、中等質(4~6)、硬質(7~10)

3. 固體粒子的幾何性質

(1) 比表面積 S_p ：單位質量粒子的表面積。 $S_p = \frac{S}{m_p} = \frac{S}{V\rho_p}$

$$\textcircled{1} \text{圓球：} S_p = \frac{S}{V\rho_p} = \frac{\pi D_p^2}{\frac{\pi}{6} D_p^3 \times \rho_p} = \frac{6}{D_p \times \rho_p}$$

$$\textcircled{2} \text{正立方體(邊常為 } a) : S_p = \frac{S}{V\rho_p} = \frac{6a^2}{a^3 \times \rho_p} = \frac{6}{a \times \rho_p}$$

二、粒徑分析

1. 原理：

- (1) 顯微鏡法：利用顯微鏡直接測量粒徑，測定範圍：0.8~150 μm 。
- (2) 篩析法：利用標準篩測定粉體的過篩，測定範圍：38 μm 以上。
- (3) 沈積法：利用粉體在流體中的沈降速度來推算粒徑，測定範圍：0.1~50 μm 。
- (4) 吸附法：利用粉體對液體中色素的吸附量來推算粉體物料的比表面積。

2. 操作方法：操作時先將篩盤依序由小網目（粗篩孔）而大網目（細篩孔）的從上而下排列，最底部為底盤。

3. 標準篩：

- (1) 篩孔（網目 mesh）：篩網上每吋邊長所含孔數。
- (2) 網目數越高，表示孔數越多，孔徑越小。
- (3) 常用者為泰勒標準篩；其中以 200 網目為基準，表示篩網每吋長有 200 孔，線徑為 0.0021 吋金屬編成，其孔徑為 0.0029 吋。
- (4) 篩網號碼差一級（上下相鄰兩篩號）的孔徑比為 $\sqrt{2}:1$ 。
- (5) 如需更精密篩網，其上下相鄰兩篩網的孔徑比為 $\sqrt[4]{2}:1$ 。
- (6) 篩析結果的表示：例如粉體通過 80mesh 而不通過 100mesh 的表示為 80+100mesh 或 80/100mesh。

三、固體的輸送裝置

1. 固體輸送機械的選擇要素：物料的數量，物料的形狀、大小，物料的性质，輸送方向，輸送成本。

2. 固體物料輸送裝置

(1) 輸送車輛：叉舉車、動力鏟、貨車。

(2) 機械式輸送裝置：

① 帶式輸送器：

- i 組成：運輸帶、推動輪、支撐器、鬆緊器。
- ii 靜止角：固體物料堆放成小山後，坡面與地面的夾角，靜止角越小，物料越具流動性。
- iii 優點：維護費低，功率消耗小，載運距離長，輸送物料範圍廣。
- iv 缺點：爬升角度小。

② 鏈式(刮板)輸送器：

- i 組成：運輸槽、鍊條、刮板。
- ii 優點：設備費低，輸送量大，可做陡坡度的輸送，將輸送槽改密閉式後可做垂直式輸送。
- iii 缺點：動力消耗大，維護費高，不適合做長距離輸送。

③ 斗式升降器：用於垂直或很陡的物料輸送。

- i 離心卸料式：適用於穀物、灰爐的輕物料。

- ii 完全卸料式：適用於粉狀及黏滯性物料。
- iii 連續卸料式：適用於較重及具磨損性物料。

④螺旋運送器：

i 組成：螺旋桿與輸送槽。

ii 螺旋桿形狀：

- ◇ 標準型：適用於一般物料。
- ◇ 絲帶型：適用於黏性大物料。
- ◇ 缺口型：適用於需混合物料。

iii 優點：流量可精確控制，體積小重量輕，容易裝設，可在外套進行加熱或冷卻。

iv 缺點：動力消耗大，輸送量小，輸送距離短，粒徑不可太大。

(3) 空氣輸送裝置：空氣吹入使固體產生流體化運動，如吸塵器。

①吸入式空氣輸送裝置：空氣原機械置於管路末端，利用真空原理將物料吸入，並使其流體化，而隨氣流流至管路末端。

②加壓式空氣輸送裝置：空氣壓縮機為空氣源，從管路吹入空氣及物料，使物料流體化而運送。適用於大量輕質物料，如穀物、羊毛、煤及肥料的運送。

四、減積的原理

1. 定義：藉外力將固體的體積減小至所需固體粒徑。
2. 減積的目的：增加表面積來提高反應速率，有利於不同成分的分離，提高產品的價值。
3. 減積的程度
 - (1) 壓碎：減積成數厘米粒徑大小。
 - (2) 粉碎：減積成數毫米粒徑大小。
 - (3) 研磨：減積成數十微米粒徑大小。
 - (4) 超細研磨：減積成微米粒徑大小。
4. 減積的方法
 - (1) 壓縮：利用上下（或左右）的鋼板壓縮力量，使物料破裂；適用於質硬的大塊物料減積。
 - (2) 撞擊：利用物料與磨球或器壁的碰撞力量，將物料粉碎。
 - (3) 摩擦：將物料加壓於粗糙面上摩擦而減積；適用於質軟不耐磨的物料。
 - (4) 剪切：利用刀面將物料切細；適用於塑膠、橡膠或纖維質等韌性物料。
5. 減積定律
 - (1) 丁力格定律：減積所需的動力與物料新增的表面積成正比。

$$\frac{P}{T} = K_R \left(\frac{1}{D_{p_2}} - \frac{1}{D_{p_1}} \right)$$

- (2) 龐德定律：減積所消耗動力與新增加的比表面積的平方根成正比。

$$\frac{P}{T} = 0.804W_i \left(\frac{1}{\sqrt{D_{p_2}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{p_1}}} \right)$$

*工作指數(W_i):每噸粗物料減積達 80%，出料可通過 100 μ m 篩網所需能量。

五、固體的減積裝置

1. 減積裝置的分類

- (1) 壓碎機：以壓縮方式減積的裝置。①粗碎機：將 150~10cm 的物料壓碎成 10~1cm。②粉碎機：將 10~1cm 的物料壓碎成數毫米者。
- (2) 研磨機：以撞擊或摩擦方法減積的裝置，可將數公分以下物料研磨達數十微米。
- (3) 超細研磨機：利用特殊方法使數毫米的物料檢積成數微米。
- (4) 切削機：以剪切方法減積。

2. 壓碎機

- (1) 顎式壓碎機：適用於硬且碎物料的壓碎。

① 布雷克壓碎機：

優點：工作量大，節省動力，設備費低，出口不堵塞。

缺點：出口成分大小不均。

② 道奇壓碎機：

優點：出口寬度一定，成品大小均勻。

缺點：出口容易堵塞，而產生過細粉末，浪費動力。

- (2) 偏旋壓碎機：適用硬且碎物料。

①優點：連續式操作，物料處理速率快，產品細且均一，振動噪音小，動力消耗低。

②缺點：設備費高，不適用少量物料操作。

- (3) 平輓壓碎機：優點：構造簡單，價格低。缺點：減積比小用途不廣。

3. 研磨機

- (1) 迴轉磨機：有球磨機、管磨機及棒磨機。

①優點：裝置費及所需動力小，磨球便宜，適合任何硬度物料

②影響迴轉磨機產品大小因素：進料速率越快，磨球越輕直徑越大，圓筒直徑越小，磨機坡度越大及磨機轉動速度越慢時產品越粗。

- (2) 錘磨機：適用於耐磨且易碎物料，可調節篩調空隙於轉動速度來控制產品大小。

(3) 輓磨機：不佔地方，噪音小，產品粒徑均一。

(4) 碾磨機：適用於穀類及豆類的研磨。

4. 超細研磨機：可研磨到粒徑為 1~20 μ m 的微細粉末。

5. 切削機：適用於塑膠、橡膠、木材、紙張、皮革及紡織品的切削。

第十五章 機械分離裝置

一、分離的種類：

1. 擴散分離：利用濃度的不同產生質量傳送，而將成分分離，主要用於均勻混合溶液；如：蒸餾、蒸發、吸收、萃取等。
2. 機械分離：利用成分間不同粒徑、形狀或比重差異，藉機械將成分分離，適用於不均勻混合物。

二、機械分離的種類：

1. 固體與固體的分離：篩分、類析、浮選、磁分。
2. 固體與液體的分離：過濾、沈積。
3. 固體與氣體的分離：集塵、洗淨。
4. 液體與液體的分離：沈降、離心。
5. 液體與氣體的分離：集塵、洗淨。
6. 氣體與氣體的分離：吸附、吸收。

三、固—固分離裝置

1. 篩分：利用篩網將**粒徑不同**的固體分離。
 - (1) 柵篩：粗糙但牢固，用於礦石分離。
 - (2) 偏旋篩：用於較粗大顆粒的篩分。
 - (3) 擺動篩：
 - (4) 振動篩：由電磁振動器讓篩網上下振動，篩分效果佳。
 - (5) 轉筒篩：
2. 類析：利用不同粒徑、比重的物料，在流體中有**不同的沈降速度**，將不同物料分離。
 - (1) 類析的方法：①水篩：物料密度相同，粒徑不同。②水選：物料粒徑相似，密度不同。
 - (2) 沈降桶：
 - (3) 道耳類析器：
 - (4) 雙錐類析器：
3. 浮選：利用**表面張力**不同將物料分離，用於冶金工業的礦物分離。
4. 磁分：利用物料**感磁性**的不同將物料分離。

四、固—液分離裝置

1. 過濾：用在不易下沉或下沉速度慢的固體。
2. 沉積：使懸浮在液體中的微小粒子，因重力或離心力沈降成濃稠泥漿，並使上層澄清的操作，亦稱稠化。
 - (1) 沈積桶：
 - (2) 道耳稠化器：處理量大，可連續操作。

五、液—液分離裝置

1. 液—液分離的原理

- (1) 乳化液：液相之一的顆粒小到 $1\sim 1.5\mu\text{m}$ ，分散在另一液體中的溶液，可安定存在，分離較困難。
 - (2) 懸浮液：顆粒小於 $1\mu\text{m}$ 或更大者，因不易安定存在，較易分離。
 - (3) 重力：僅適用懸浮液分離。
 - (4) 離心力：適用於懸浮液體與乳化液體。
 2. 重力沉降桶：因重力的差異，輕液上浮，重液下沉。
 3. 盤式離心機：高速旋轉，混合液流入，重液流向壁，輕液流向中心軸而分離。
 4. 管式離心機：受離心力作用，重液穿透液層達內壁，輕液在管中心而分離。
- 六、固—氣分離裝置
1. 名詞說明：
 - (1) 霧：氣流中的液體微滴。粒徑在 $1\sim 50\mu\text{m}$ 之間
 - (2) 塵：氣流中的固體微粒。粒徑大於 $1\mu\text{m}$ 。
 2. 旋風分離器：利用粒子在氣流中旋轉，其離心力較大，而與氣體分離。
 3. 袋濾機：利用壓力差使氣體透過布袋排出，灰塵被阻擋在布袋內。
 4. 濕洗淨器：含塵氣體用抽風機吸入，在洗淨室內噴灑水霧洗淨灰塵，再用霧沫檔板去除水霧後排出。
 5. 靜電集塵器：利用氣流使空氣離子化，使懸浮於氣體中粒子附著離子，因離子的電性與電極吸引而分離。

第十六章 過濾

一、定義：在一推動力作用之下，使懸浮液中液體通過多孔性介質將固體顆粒留住，讓液體通過者。過濾與沈積不同之處在於沈積不需要過濾介質。

二、過濾原理：

1. 過濾名詞：

- (1) 濾漿：過濾前的懸浮物。
- (2) 濾液：通過過濾介質上的液體。
- (3) 濾餅：留在過濾介質上的固體顆粒。

2. 過濾方式：

- (1) 濾餅過濾：懸浮液中的固體顆粒沈積在過濾介質表面，形成濾餅層，濾液穿過濾餅層中，空隙的過濾過程稱之。過濾時間越長，濾餅越厚，過濾的阻力也越大。
- (2) 沈清過濾：固體顆粒不形成濾餅，而是沈積在過濾介質內部。過濾過程中阻力不變。

3. 過濾介質：使濾液通過，將固體顆粒留住，多為多孔性、耐腐蝕及機械強度的物質。

4. 過濾的方程式：

- (1) 恆壓過濾：過濾操作的推動力恆定，隨時間增加，濾餅層會變厚，過濾阻力變大，過濾速率會降低。
- (2) 恆速過濾：過濾的速率維持一定，隨著過濾時間增加，濾餅層厚度增厚，過濾阻力變大，過濾壓力不斷升高。

(3) 過濾週期 t_c ：過濾週期是指過濾時間→洗滌時間→拆卸濾餅時間→裝置時

間； $t_c = t_f(\text{過濾}) + t_w(\text{洗滌}) + t_d(\text{拆卸清洗及組合})$

(4) 過濾能力： $C = \frac{\text{濾液量 } V_f}{\text{過濾週期 } t_c}$

三、過濾裝置：

1. 重力式過濾器：

(1) 結構：

- ① 水的淨化用金屬為槽體，介質為砂或石礫。
- ② 污水處理時用混凝土為槽體，介質用碎石或粗礫。
- ③ 硫酸液的過濾用包鉛的槽體，介質用碎焦炭。
- ④ 鹼性溶液用石灰石當介質。
- ⑤ 有機溶液用木炭當介質。

(2) 特性：

- ① 開放式重力濾機：為最古老最簡單的過濾機，廣用於處理大量而僅含少量

固體的液體，如水的淨化。

②密閉式重力濾機：利用密閉中加壓使過濾速率加快，且有倒洗設備，用於自來水淨化作業。

2. 板框壓濾機：

(1) 構造：板與框的排列：如果不洗板為 1，框為 2，洗板為 3 時，其排列方式為 123212321…

(2) 特性：

①為最常見且用途最廣的壓濾機。

②構造簡單，保養費低，濾餅可洗滌，適用於含貴重泥漿物料的過濾與水洗。

③為間歇式操作，人工成本高，濾布損耗高。

④廂式壓濾機的濾餅厚度一定，適用於大顆粒固體的濾漿過濾。

⑤閉流式：適用於揮發性液體或有毒物質。開流式：濾布有破裂時不影響濾程。

3. 葉濾機：

(1) 構造：不同種類的濾葉結合，在儲槽中利用真空力吸入而過濾。過濾時濾漿在濾液周圍，若濾液抽真空時，液體進入濾液經濾液管排出，濾餅堆積在濾葉外。

(2) 特性：用於泥漿中含固體成分較高者，以節省人工，但設備費較高。

(3) 種類：

①凱來式：優點為濾葉數量少且大小不一，濾布容易安裝，較經濟。缺點為濾餅會上厚下薄。

②斯魏脫蘭式：濾餅厚度可控制，適用於濾餅阻力很高的情況，濾餅可洗滌。

③伐來茲式：生成厚度均勻的濾餅，適用於易沈澱的液體且操作時仍不停轉動。

④尼加拉葉式：適用於大量液體含微量固體且小批的作業。

4. 連續式旋轉真空濾機：

(1) 構造：為工業上應用較廣泛的過濾機，包含過濾、洗滌、乾燥及卸餅四個區域。過濾時抽真空使濾液通過濾布進入筒內，每一循環為自動化操作。

(2) 特性：連續式操作，生產能力大。適合處理量較大，過濾壓力不需很高及固體顆粒較多的懸浮液體。最有名的是奧立佛濾機，他的優點是適合處理大量固體泥漿及人工昂貴的地方。缺點是泥漿易沈澱，過濾效果會下降。

5. 離心濾機：離心過濾速率快，時間短，濾餅含濾液較少。有下列兩種：

(1) 間歇式：結構簡單，製造方便，適應性強。缺點是卸料耗費人力，生產量低，用於小批量物料處理。

(2) 連續式：過濾濾餅厚度一定時，洗滌乾燥卸料洗網完成一週期。特點是操作簡便，生產能力大，勞力較省，適用於大規模操作的連續生產。

第十七章 混合裝置

一、混合的原理

1. 定義：將兩種或兩種以上物料，藉外力作用以達到均勻分散的操作。
2. 混合的目的：
 - (5) 溶解(2)分散(3)乳化(3)散熱均勻(4)反應完全
3. 混合的種類：
 - (1) 摻和：兩種或兩種以上的固體物料混合。
 - (2) 捏和：大量固體物料及少量液體混合。
 - (3) 攪和：大量液體與少量固體物料混和。
4. 影響混合的因素：
 - (1) 黏度：黏度大，易混合。
 - (2) 比重：比重大，較消耗動力；混合物各成分的比重差異越大，越消耗動力。
 - (3) 潤濕性：混合物料表面具潤濕性者，易混合。
 - (4) 顆粒大小：物料顆粒越小，越易混合；顆粒差異小者，易混合。
 - (5) 表面張力：表面張力大，易混合。
 - (6) 成分比：成分比越適當，越易混合。
 - (7) 混合順序：依需要決定順序。
5. 攪合的特性：
 - (1) 漩渦迴轉現象：圓桶內液體被攪拌器快速攪動時，發生規則性的圓周運動，以致混和效果降低。
 - (2) 改善漩渦迴轉現象的方法：旋轉軸側伸，旋轉軸偏心，加檔板，加導管。

二、混合裝置

1. 摻合裝置：
 - (1) 雙錐摻和器：用於醫藥、顏料、染料、肥料、飼料、塑膠料等工業。
 - (2) V 型摻和器：用於任何鬆疏粉粒混合，其混合效果較雙錐摻和器佳。
 - (3) 內螺旋摻和器：用於自由流動的輕質物料，如穀物。
2. 捏合裝置：
 - (1) 絲帶混合器：欲於稀薄糊狀物和不易流動粉末。
 - (2) 轉輪混合器：適合濕物料及黏稠性物料。
 - (3) 雙臂捏和器：亦稱腕形捏和器，適用於黏滯性固體物料混合。
 - (4) 搗泥機：消耗動力大，用於陶瓷工業黏土的混合。
3. 攪合裝置：
 - (1) 葉輪轉動時流體被掃出方向有：
 - ① 徑流式：流體順著葉輪直徑方向流動。
 - ② 軸流式：流體順著旋轉軸方向流動。
 - (2) 螺槳攪和器：適用於低黏度流體。

- (3) 槳葉攪和器：大直徑轉速慢徑流式攪拌裝置，用於濃稠而黏度不大的液體混合，不適用懸浮性溶液的攪和。
- (4) 渦輪攪和器：為高速攪拌裝置，適合高黏度流體的攪和，不易產生漩渦迴轉現象。