

空氣污染防治(三)

鄭 福 田*

參、有毒氣體污染之控制—吸附(上)

一、緒 言

氣體性污染物，可廣泛的區分為兩種，即天然造成者與人為者，天然造成者，如火山爆發之氣體，閃電形成之臭氧，臭氧層，森林火災之氣體，及自然界有機物分解產生之氣體與臭味。此類污染物來源乃構成背景濃度(Background concentration)，空氣污染管制之措施，對此種污染之效果極微，不加以探討。人為之污染，如來自於燃料燃燒和工業程序，乃構成城市(或社區)空氣污染之主要原因，此類污染物，可分為有機及無機污染物。

(一)無機性污染物

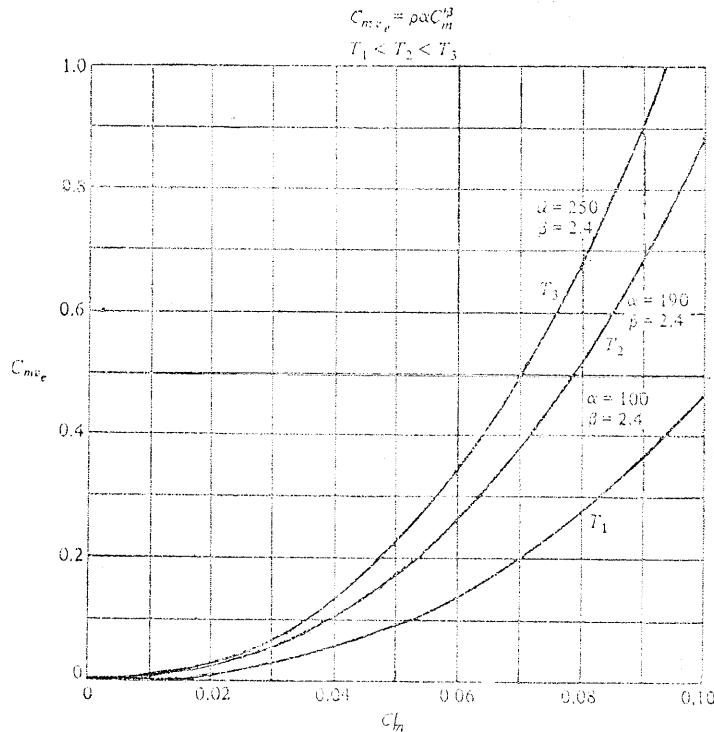
- 1.含硫氣體：二氧化硫，三氧化硫及硫化氫。
- 2.碳之氧化物：一氧化碳，二氧化碳。
- 3.氮之氧化物：一氧化二氮，一氧化氮，二氧化氮及其他氮氧化物。
- 4.鹵族元素與鹵化物：氟化氫，氯化氫，氯，氟，四氟化矽。
- 5.光化學煙霧：臭氧，高氧化物
- 6.氟化物：氟化氫
- 7.銨化合物：氨

(二)有機性污染物

- 1.碳氫化合物
 - (1)烷類：甲烷，乙烷，辛烷。
 - (2)乙炔
 - (3)鏈狀烯類：乙烯，丁二烯。
 - (4)芳香族：苯，甲苯。
- 2.脂族氧化物
 - (1)醛：甲醛
 - (2)酮：丙酮
- (3)有機酸
- (4)酒精

* 本小組委員

臺大環境工程研究所副教授



圖一 汚染物—吸附劑平衡曲線

理論 (kinetic theory) , 分子撞擊單位面積之速率和壓力成正比，即 $K_1(1-\theta)P$ ，其中 K_1 為比例常數。而蒸發速率為 $K_2\theta$ ，其中 K_2 為分子之蒸發速率常數，

$$\therefore K_1(1-\theta)P = K_2\theta$$

$$\theta = \frac{bP}{1+bP}, b = K_1/K_2$$

如令 Y 為單位面積或單位質量吸附劑吸附氣體之量，

$$\text{則 } Y = K\theta = \frac{KbP}{1+bP} = \frac{aP}{1+bP} \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{即 } \frac{P}{Y} = \frac{1}{a} + \frac{b}{a} P \quad \dots \dots \dots (4)$$

方程式(3)稱為 Langmuir equation，不同之 Y 與 P 藉方程式(4)可解得 a 與 b 。Langmuir equation 僅就吸附單層分子來討論，對於吸附多層者，則由 Brunaner, Emmett 及 Teller 導衍此現象而成方程式(5)

$$\frac{P}{V(P^0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \left(\frac{C-1}{V_m C}\right) \frac{P}{P^0} \quad \dots \dots \dots (5)$$

V ：在壓力 P ，溫度 T 下被吸附氣體在標準狀況下之體積

P^0 ：在 T 時，吸附質之標準蒸汽壓

V_m ：吸附劑表面僅吸附一層時之吸附質（氣體）體積（標準狀況）

C ：在某溫度之常數，其近似值為

$$C = c(E_i - E_L)/RT \quad \dots\dots\dots (6)$$

E_i ：第一吸附層之吸附熱

E_L ：氣體之液化熱

(二) 吸附動力學

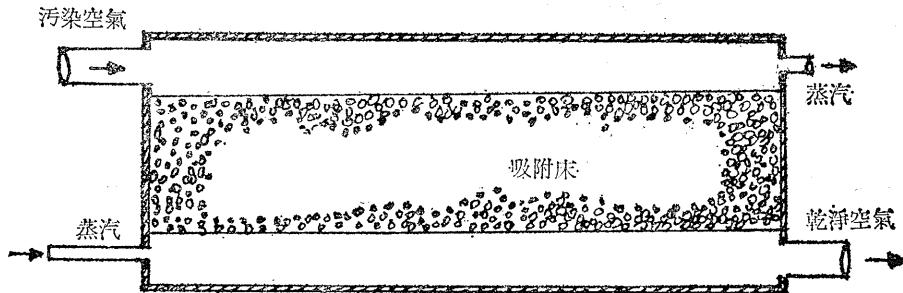
從含有污染物之廢氣中，把污染物傳輸到吸附劑之速度可用來決定吸附床之厚度，污染物從溶解於氣體之狀態變成被吸附之狀態，其轉變速度比例於氣體濃度和平衡濃度之差，其關係如下：

$$\dot{m}_p = K\bar{v}(C_{mv} - C_{mve}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

如上式可見污染物轉移速率和吸附體積 (\bar{v}) 成比例，係數 K 隨固、氣體間之有效接觸面積及氣體之薄膜抵抗力 (film resistance) 而變化，可由實驗求得，一般可假設其值為 20 S^{-1} 。

(三) 固定床式吸附器

固定牀吸附器通常是在平衡的情況下操作，直至無法達到所欲處理時停止再生。固定牀式吸附器可以一個、兩個或更多牀，圖二乃最簡單之單牀式吸附器，欲處理之廢氣由吸附牀之上方進入，向下流動，由底下流出。

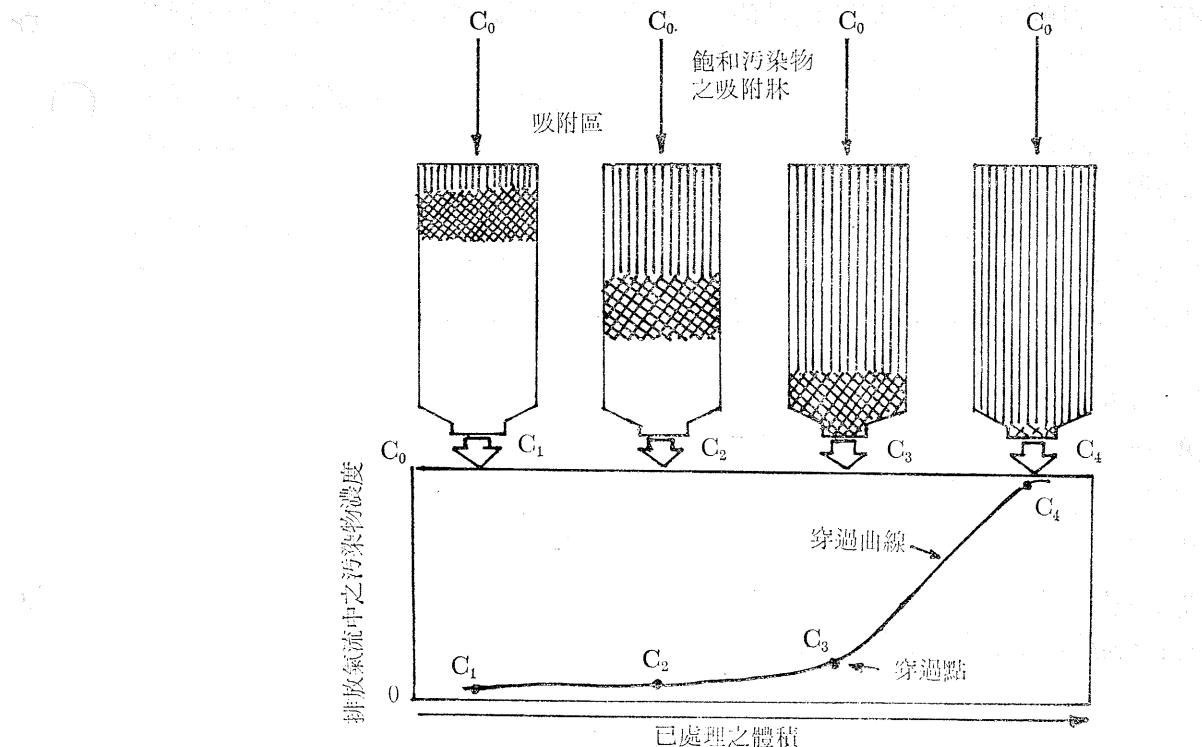


圖二 單牀式吸附器

單牀式吸附器可連續操作至相當時間，而後排放之氣流中污染物濃度逐漸增加，直至進出氣之污染物濃度完全相同為止，其情況如圖三，污染物在放流氣體中之濃度開始增加之時刻，稱為穿過點 (Break through point)，進出氣濃度相同之點稱為疲竭點 (exhaustion point)。

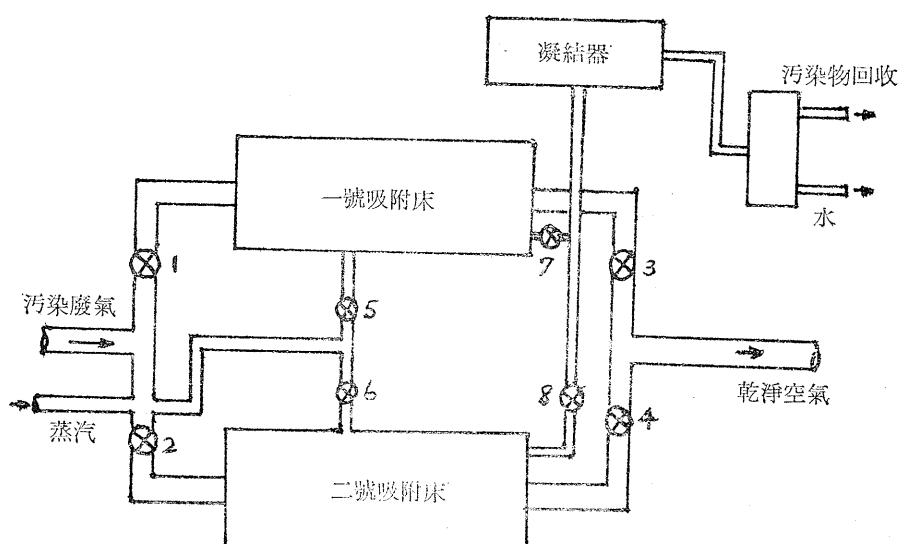
單牀式吸附器操作至穿過點時即須停止操作，再生吸附劑，但如果採用兩個或更多之吸附牀，則可連續操作。圖四為二牀式吸附器，一牀用於吸附，另一牀用於再生、冷卻或備用。其操作最重要者乃凡爾 (valve) 之開與關，如圖四，一號吸附牀作吸附操作，二號吸附牀再生時，則 1, 3, 6, 8 號凡爾打開而 2, 4, 5, 7 號凡爾關閉，如果 2 號吸附牀再生完成，處於冷卻或備用情況時，則 6, 8 號凡爾關閉。一號與二號吸附牀交替使用，循環操作。

使用單牀或雙牀式吸附器，操作至穿過點時即不能再使用，但由前之討論，可知此吸附器還可吸附污染物，因此可考慮使用三牀式吸附器，其操作次序為含污染物之空氣最初先進入達穿過點但尚未達疲竭點之吸附牀，而後使其再經過剛再生完畢始啓用之吸附牀，以除去剩餘之污染物



圖三 鮑和污染物之吸附床

，此時第三牀正在再生，冷卻或備用狀態。當第二牀操作至穿過點時，則操作次序由 1—2—3 變成 2—3—1。如果使用四牀，則二牀用於吸附，一牀再生，一牀冷卻。



圖四 雙床式吸附器

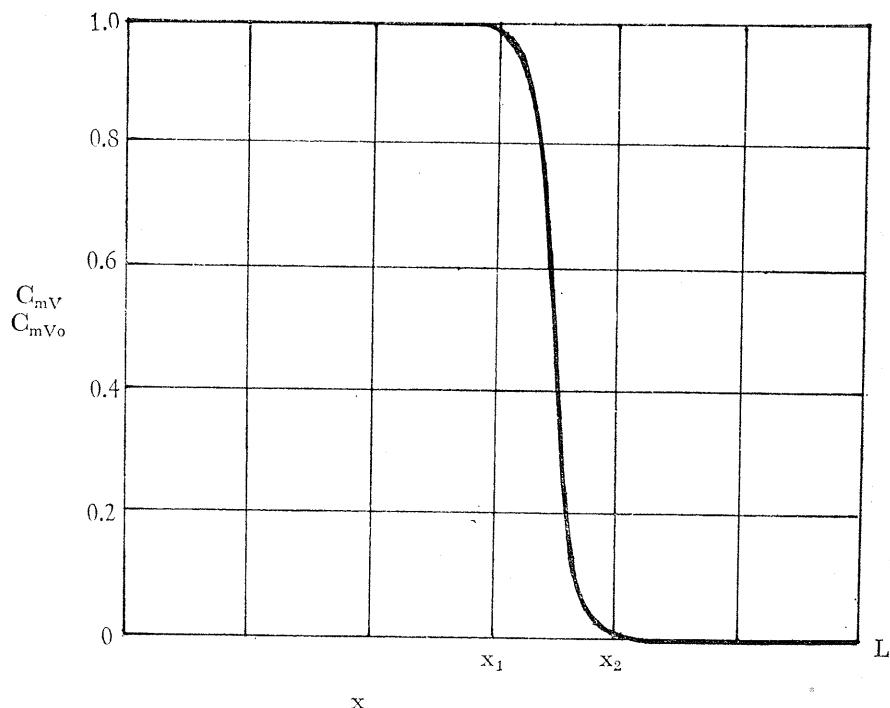
C_{mv0} , C_{mv} : 污染物在 $x=0$ 及 x 時之濃度

K , α , β : 常數，如前之定義

A : 吸附牀斷面積

δ : 吸附層厚度

\dot{m}_a : 污染物之質量流率



圖六 污染物在吸附床內之濃度變化

所謂穿過時間 t_B 即吸附層以 v' 之速度下移，當其最下端到達吸附牀底部所需要之時間，即為穿過時間，其近似公式為：

$$t_B = \frac{L - \delta}{v'} \quad \dots \dots \dots \quad (11)$$

疲竭點發生時間 t_E 是在吸附層頂到達吸附牀底部時所需要者。

$$t_E = \frac{L}{v'} \quad \dots \dots \dots \quad (12)$$

如今 $x=L$, $x_1=v't$, 則公式(10)可寫成下式之穿過曲線 (breakthrough curve)

$$\begin{aligned} & \ell n \frac{C_{mv0}}{C_{mvL}} + \frac{1}{\beta-1} \ell n [1 - (\frac{C_{mvL}}{C_{mv0}})^{\beta-1}] \\ & = \frac{\rho K A}{\dot{m}_a} (L - v't) - \ell n 0.99 + \frac{1}{\beta-1} \ell n (1 - 0.99^{-1}) \end{aligned} \quad \dots \dots \dots \quad (13)$$

圖三 之穿過曲線即可由公式(13)定義之。

(四) 吸附牀之再生

再生即一種脫附作用 (desorption)，因此適用之公式和前提公式(7)～(13)者相若，以 R 表示再生之情況，則可得下列諸方程式：

$$v_R' = \frac{1}{\rho_R \rho' CA} (\alpha_R \rho_R)^{\beta_R} C_{mvL}^{\beta_R - 1} \quad \dots \dots \dots \dots (14)$$

v_R' ：脫附層向上或向下移動之速度。

$$t_R = \frac{L}{v_R'} \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots (15)$$

t_R ：再生時間

$$C_{mvL} = \alpha_R \rho_R C_{mL}^{\beta_R} = \alpha_R \rho_R \left(\frac{C_{mvo}}{\alpha \rho} \right)^{\beta_R / \beta} \quad \dots \dots \dots \dots (16)$$

C_{mvL} ：再生流體之濃度

$$\text{公式(16)代入(14)可得 } v_R' = \frac{\dot{m}_R}{\rho' CA} \alpha_R \left(\frac{C_{mvo}}{\alpha \rho} \right)^{\frac{\beta_R - 1}{\beta}} \quad \dots \dots \dots \dots (17)$$

$$\text{公式(17)代入(15) } t_R = \frac{\rho' CAL}{\dot{m}_R \alpha_R} \left(\frac{\alpha \rho}{C_{mvo}} \right)^{\frac{\beta_R - 1}{\beta}} \quad \dots \dots \dots \dots (18)$$

(五) 經過吸附牀之壓力降

經過吸附牀之壓力降 Δp 公式如下：

$$\Delta p = \frac{2f\rho Q^2 LC^{3-n}}{A^2 D' \phi^{3-n} (1 - C)^3} \quad \dots \dots \dots \dots (19)$$

f ：摩擦係數 A ：吸附牀截面積

C ：填充密度 Q ：流體之流率

L ：吸附床厚度

ϕ ：和顆粒形狀有關之係數，其定義為和此顆粒相同體積之圓顆粒表面積對該顆粒真正表面積之比值

$$\phi = 4.836 \frac{\bar{V}'^{1/2/3}}{a} \quad \dots \dots \dots \dots (20)$$

\bar{V}' ：該吸附劑顆粒本身連同內部空隙之體積

D' ：吸附顆粒之平均直徑，即為相同體積圓形顆粒之直徑

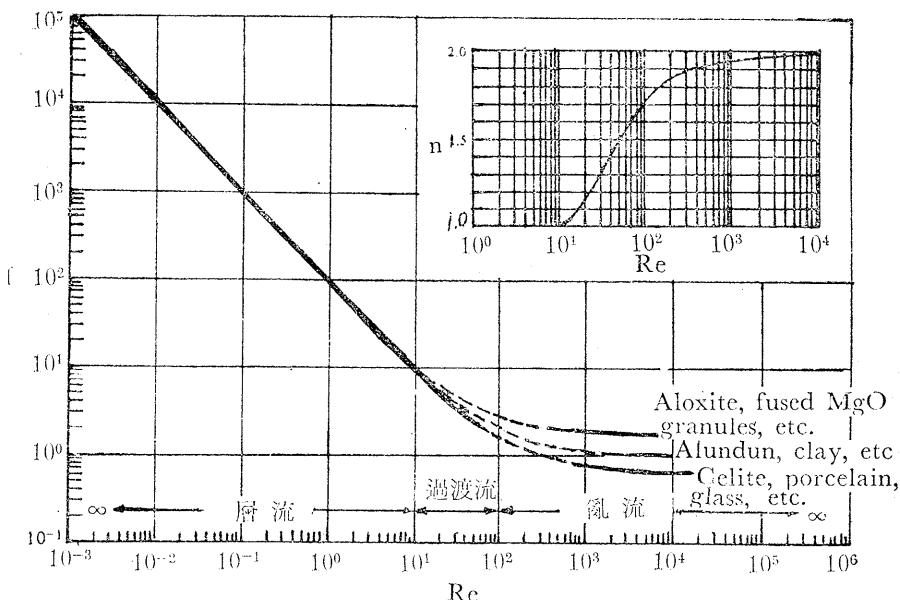
a ：粒子之表面積

n ：指數常數，受雷諾數 Re (Reynolds number) 影響

f, n 與 Re 之關係如圖七

如 $Re < 10$ ，流體之流動為層流現象 (Laminar flow)，

$$\text{則 } \Delta p = \frac{200 \mu Q L C^2}{AD' \phi^2 (1 - C)^3} \quad \dots \dots \dots \dots (21)$$



圖七 f , n 與雷諾數之關係

以上僅就理論上探討吸附床（固定式）各個重要之操作參數，有關吸附劑之選擇，應用性與設計實例，下期繼續介紹。

參考資料

- (1) A. J. Buonicore, L. Theodore: Industrial Control Equipment for Gaseous Pollutants, volume 1 CRC PRESS (1975)
- (2) Martin Crawford: Air pollution control theory, McGraw-Hill (1976)
- (3) U. S. HEW: Air Pollution Engineering Manual.