

排氣中揮發性有機物之生物洗滌處理法

周明顯(0935-424-807)

國立中山大學環境工程研究所教授

(2002/6/17)

摘要

本文介紹含揮發性有機物(VOC)排氣生物洗滌塔法及活性污泥池注入法之設計原理及實務。

結果顯示，常用 VOC 中，水溶性高之甲醇、乙醇、異丙醇(IPA)、環己醇、甲醛、乙醛、丙酮、丁酮(MEK)、戊酮(MIBK)、環己酮、乙酸甲酯、乙酸乙酯、甲基丙烯酸甲酯(MMA)、丙烯晴、單乙醇胺等適以生物洗滌塔吸收法及活性污泥池注入法處理；水溶性較低之苯、甲苯、二甲苯、乙苯、二氯甲烷、苯乙烯、醋酸乙烯等則僅適用活性污泥池注入法處理。

本文另舉五個研究及實場處理案例，以輔證上述設計原理。

一、前言

經濟考量為含揮發性有機物(VOC)排氣處理方法選擇中之最重要者。一般而言，低濃度排氣($<10-20 \text{ mg C/m}^3$)適合以活性炭吸附處理，中高濃度廢氣($500-5,000 \text{ mg C/m}^3$)則以觸媒焚化或蓄熱焚化較經濟，高濃度廢氣($>5,000-10,000 \text{ mg C/m}^3$)則可以火焰焚化、冷凝或活性炭吸附回收處理。生物法適合處理中低濃度廢氣(約 1000 mg C/m^3)，且其相對處理費用較其他方法為低。

一般生物處理方式均是藉質傳作用，將氣相中所含之有機物質傳輸至液相或固相生物膜，並由微生物吸收後，利用微生物之生長代謝，將有機污染物作為所需之碳源與能源，並將其氧化分解為二氧化碳、水等最終產物及生物質量。一般而言，在生物處理系統中，微生物族群是由某些特殊菌種或許多共生菌種所構成，並在平衡狀態下分工。

在以往生物處理系統中，由許多成功經驗可歸納出，低分子量及簡單結構之高水溶性有機物質較具生物分解性，而具複雜結構之有機物則較不具生物分解性。例如在有機物方面，醇類、醛類、酮類及部份較簡單之芳香族類等，已經確認具良好之生物分解性；在無機物方面，硫化氫、氨類亦容易被生物分解。但一些物質如酚類、含氯碳氫化合物、多環芳香族碳氫化合物及其他含多鹵素碳氫化合物等之生物分解性則較低；另對人工合成物質言，因一般微生物缺乏適當之分解酵素，故並不適合採用生物處理。

適用生物處理之排氣中揮發性有機物，依分解性由易至難排列略如表

1.1 所示。一般工業製程所排出之空氣污染物，適合以生物處理之行業別，如表 1.2 所示。

生物處理可分為三法，即生物洗滌法(bioscrubbing)、生物滴濾法(biotrickling)及生物濾床法(biofiltering)，此等方法之反應機制均類似，均為有機物由氣相質傳至液相後，並由微生物代謝分解為二氧化碳、水、等最終產物及生物質量。三者間主要差別在微生物相態與液體之狀態。

生物滴濾及生物濾床法之應用較普遍，國人亦較熟悉。生物洗滌法則於最近五年較有發展及應用例，亦較其他二法經濟有效，特以本文詳加介紹[1]。

表 1.1：適用生物處理之排氣中揮發性有機物質[1]

難易程度	分類	物 種
易	含氧烴	醇、醛、酮、醚、有機酸
	芳香烴	苯、甲苯、二甲苯、異丙苯、乙苯、苯乙烯
中	酚	酚、甲酚
	含氮氧烴	丙烯醯胺、丙烯、乙醯胺、二甲基甲醯胺
難	烯烴	丁二烯
	含氮、氯烴	1,2-二氯乙烷、氯乙烯、苯胺

表 1.2：含 VOC 排氣適合以生物處理之工業製程[2]

黏著劑製造	食品製造	石油工業
畜產業	香料工業	印刷業
化學藥品製造	傢具製造業	紙漿及造紙業
化學藥品儲存	非鐵金屬鑄造業	油脂精煉
表面處理	鑄鐵業	廢污水處理
堆肥	掩埋場沼氣	土壤氣體處理
垃圾焚化場	石化製造業	木製品製造業

二、生物洗滌法介紹

生物洗滌法是一項結合傳統空氣污染控制及廢水處理的技術，廢氣中污染物先行傳輸至液相，再由活性污泥將液相中的污染物質分解。

生物洗滌法有數種(圖 2.1)，視氣體量及活性污泥系統配合情況而異。廢氣量為數十 CMM 時，可以中壓或高壓活性污泥曝氣鼓風機配合曝氣管，將廢氣直接注入 1.0-1.5 或 4.0-5.0 m 深之活性污泥混合液中；廢氣量 >100 CMM 時，可以填充式或板層式洗滌塔，以活性污泥處理後澄清廢水或活性污泥混合液吸收排氣中 VOC 或臭味成分，再利用活性污泥池將該等污染物氧化去除。

概言之，生物洗滌排氣處理系統可分為：(1)直接注入法、(2)鼓風機注入法、(3)上澄水洗滌法、(4)污泥洗滌法，以下分別說明這四種方法。

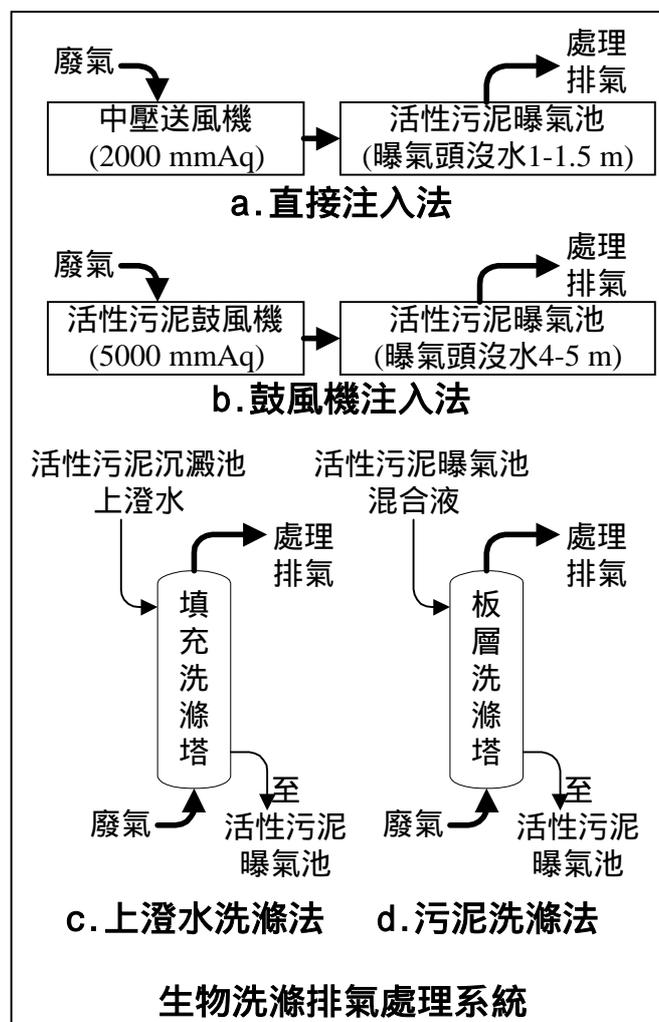


圖 2.1：生物洗滌法處理系統[1]

(1)直接注入法

廢氣由中壓送風機(2000 mmAq)直接注入活性污泥曝氣池 1-1.5 m 液深中進行生物分解。

(2)鼓風機注入法

廢氣由活性污泥鼓風機(5000 mmAq)經由原設活性污泥曝氣頭，直接注入活性污泥曝氣池 4-5 m 液深中進行生物分解。

(3)上澄水洗滌法

設洗滌塔，利用活性污泥沉澱池之上澄液由上向下噴灑，廢氣由下向上流動，此時廢氣中的污染物會溶入液相中，再流至活性污泥曝氣池進行生物分解。

(4)活性污泥洗滌法

設板層洗滌塔，利用活性污泥曝氣池混合液由上向下噴灑，廢氣由下向上流動，此時廢氣中的污染物會溶入液相中，再流至活性污泥曝氣池進行生物分解。

三、生物洗滌塔法

3.1 吸收塔的填充高度及液/氣流量比

參考圖 3.1，在洗滌塔填充層中，流量 G 、內含 VOC 濃度 y_1 的廢氣，流量 L 、內含 VOC 濃度 x_2 的經循環液吸收後，廢氣由塔頂流出，其濃度降為 y_2 ，循環液中 VOC 濃度則增為 x_b 。設若廢氣及循環液中 VOC 濃度極低(例如 $y_1 < 1,000-5,000 \text{ mg/m}^3$)，則吸收塔氣液中之 VOC 平衡曲線為一直線：

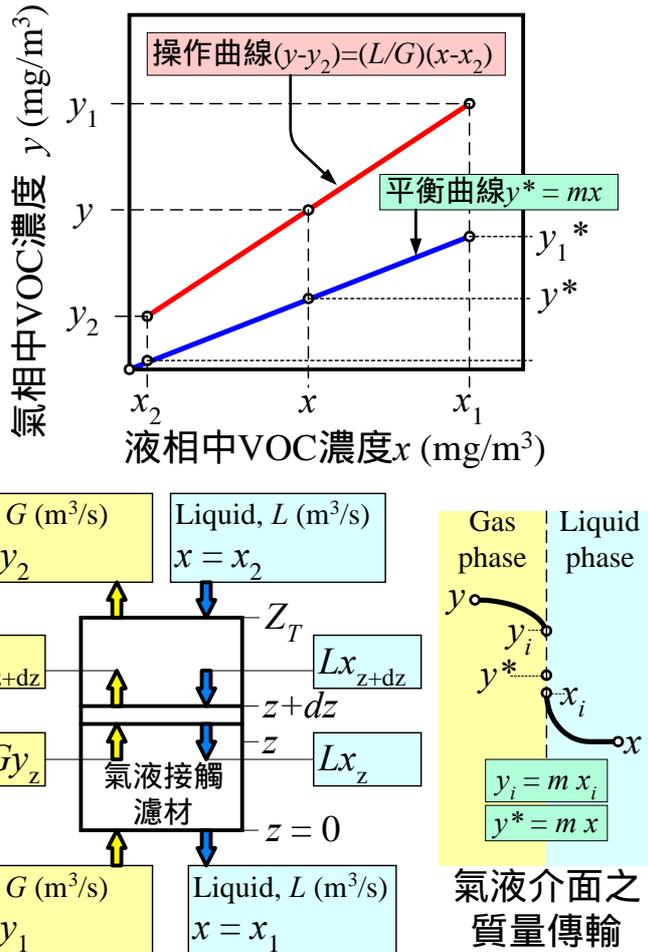
$$y - y_2 = (L/G)(x - x_2) \quad (1)$$

另外，VOC 在氣液界面之平衡可以亨利定律表示：

$$y^* = mx^* \quad (2)$$

式(1)及(2)中：

- y = 氣體中 VOC 濃度(mg/m^3)
- y_2 = 由吸收塔頂部排出氣體中 VOC 濃度(mg/m^3)
- x = 吸收液中 VOC 濃度(mg/m^3)
- x_2 = 進入吸收頂底部液體中 VOC 濃度(mg/m^3)
- G = 氣體通過吸收塔之流量(m^3/s)
- L = 液體通過吸收塔之流量(m^3/s)
- m = 亨利常數 = y^*/x^* = 平衡氣相中 VOC 濃度(mg/m^3 氣體)/
平衡液相中 VOC 濃度(mg/m^3 液體)



在接觸濾材內之氣液質量傳輸

圖 3.1：洗滌塔填充層中之 VOC 吸收操作曲線及氣液平衡曲線(上)；VOC 在洗滌塔填充層之質傳及氣液界面質量傳輸(下)

參考圖 3.1，在洗滌塔填充層 z 及 $z + dz$ 中，對氣體之 VOC 作質量平衡得：

$$-Gdy = K_{OG}a(y - y^*)Adz \quad (3)$$

$$dz = [(G/A)/(K_{OG}a)][1/(y - y^*)]dy \quad (4)$$

$$\begin{aligned} Z_T &= [(G/A)/(K_{OG}a)] \int_{y_2}^{y_1} \frac{1}{(y - y^*)} dy \\ &= H_{OG} \times N_{OG} \end{aligned} \quad (5)$$

其中：

- Z_T = 吸收塔填充高度(m)
 $K_{OG}a$ = 基於氣膜總阻力之體積質傳係數, volumetric mass-transfer coefficient based on the overall gas-film resistance (1/s)
 a = 單位填充床體積之氣液接觸表面積, specific gas-liquid interfacial area (m^2/m^3)
 A = 填充床截面積(m^2)
 G/A = 氣體空塔流速, superficial gas velocity (m/s)
 H_{OG} = $[(G/A)/(K_{OG}a)]$ = 基於氣膜總阻力之傳輸單位高度, height of a transfer unit based on the overall gas-film resistance (m)
 N_{OG} = $\int_{y_2}^{y_1} \frac{1}{(y - y^*)} dy$ = 基於氣膜總阻力之傳輸單位數, number of transfer units based on the overall gas-film resistance
 y_1 = 進入吸收塔底部氣體中 VOC 濃度(mg/m^3)
 y_2 = 由吸收塔頂部排出氣體中 VOC 濃度(mg/m^3)

如操作曲線及平衡曲線均為直線, (5)式中 H_{OG} 、 N_{OG} 、及 Z_T 可分別表示如下[3]：

$$H_{OG} = H_{ETP} \times (mG/L - 1) / [\ln(mG/L)] \quad (6)$$

$$N_{OG} = [1/(1 - mG/L)] \times \ln[(1 - mG/L) \times (y_1 - mx_2) / (y_2 - mx_2) + mG/L] \quad (7)$$

$$Z_T = H_{ETP} \times \ln[(1 - mG/L) \times (y_1 - mx_2) / (y_2 - mx_2) + mG/L] \div [-\ln(mG/L)] \quad (8)$$

其中：

$$H_{ETP} = \text{相當於一傳輸板之傳輸單位高度, height equivalence to a theoretical plate (m)}$$

一般填充濾料之 H_{ETP} 如表 3.1 所示；一些化學物質在水中之亨利常數值如表 3.2 所示，亨利常數愈低，水溶性愈佳。

表 3.1：一般填充濾料之 H_{ETP} [3]

濾料規格 mm (inch)	H_{ETP} (m)
25 (1.0)	0.4-0.5
38 (1.5)	0.5-0.7
50 (2.0)	0.7-0.9
75 (3.0)	0.9-1.0

表 3.2：一些化學物質在 25 水中之亨利常數 m 值及擴散係數 D_{VOC} [4]

VOC	m (m ³ 液體/ m ³ 氣體)	D_{VOC} (10 ⁻⁹ m ² /s)
Acetaldehyde 乙醛	0.0039	1.41
Acetic acid 醋酸	2.57	1.20
Acetone 丙酮	0.00103	1.14
Acrylic acid 丙烯酸	0.0000041	1.06
Acrylonitrile 丙烯晴	0.00361	1.34
Ammonia 氨	0.0134	6.93
Benzene 苯	0.23	0.98
Cyclohexane 環己烷	0.562	0.91
Cyclohexanol 環己醇	0.000183	0.83
Cyclohexanone 環己酮	0.000169	0.86
1,1-dichloroethane 1,1-二氯乙烷	0.227	1.05
1,2-dichloroethane 1,2-二氯乙烷	0.0492	0.99
1,2-dichloroethene 1,2-二氯乙烯	1.31	1.10
Ethanol 乙醇	0.00124	1.30
Ethanol amine 單乙醇胺	0.0000132	1.14
Ethyl acrylate 丙烯酸乙酯	0.0144	0.86
Ethyl acetate 乙酸乙酯	0.00525	0.97
Ethyl benzene 乙苯	0.264	0.78
Formaldehyde 甲醛	0.00236	1.98
Furan 呋喃	0.219	1.22
Furfural 呋喃醛	0.00333	1.04
Hexanol 己醇	0.000746	0.75
Methanol 甲醇	0.000111	1.64
Methyl acetate 乙酸甲酯	0.0048	1.00
Methyl chloride 一氯甲烷	0.334	0.65
Methyl ethyl ketone 丁酮	0.00178	0.98
Methyl isobutyl ketone 戊酮	0.00203	0.78

接下頁

表 3.2：一些化學物質在 25 °C 水中之亨利常數 m 值及擴散係數 D_{VOC} [4](續上頁)

VOC		m (m^3 液體/ m^3 氣體)	$D_{\text{VOC}}(10^{-9} \text{ m}^2/\text{s})$
Methyl methacrylate	甲基丙烯酸甲酯	0.00271	0.86
Methylene chloride	二氯甲烷	0.131	1.17
Oxygen	氧		2.11 [5]
Phenol	酚	0.0000186	0.91
Propanol (iso)	異丙醇	0.00615	1.04
Styrene	苯乙烯	0.107	0.80
Tetrachloroethane (1,1,1,2)	四氯乙烷	0.082	0.79
Tetrachloroethane (1,1,2,2)	四氯乙烷	0.0156	0.79
Tetrachloroethene	四氯乙烯	1.19	0.82
Toluene	甲苯	0.273	0.62
Trichloroethane (1,1,2)	三氯乙烷	0.0304	0.88
Trichloroethene	三氯乙烯	0.373	0.91
Vinyl acetate	醋酸乙烯	0.0254	0.92
Vinyl chloride	氯乙烯	3.53	1.23
Vinylidene chloride	二氯乙烯	0.615	1.04
Xylene (m)	間二甲苯	0.22	0.78
Xylene (o)	鄰二甲苯	0.22	1.00

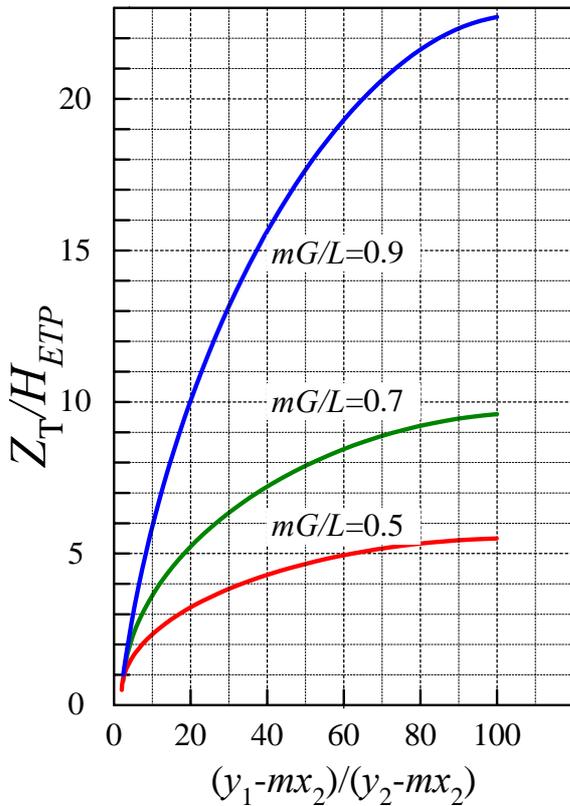


圖 3.3：洗滌塔 Z_T/H_{ETP} 與 $(y_1 - mx_2)/(y_2 - mx_2)$ 之關係

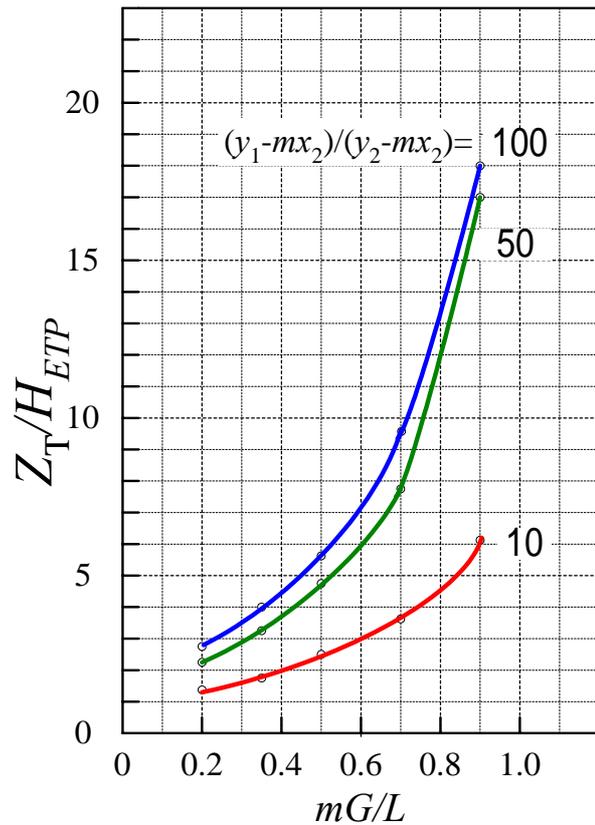


圖 3.4：洗滌塔 Z_T/H_{ETP} 與 mG/L 之關係

依(8)式計算，洗滌塔 Z_T/H_{ETP} 與 $(y_1 - mx_2)/(y_2 - mx_2)$ 及 mG/L 之關係如圖 3.3 及 3.4 所示，顯示 Z_T/H_{ETP} 隨 $(y_1 - mx_2)/(y_2 - mx_2)$ 及 mG/L 之增加而增加。此顯示在定 mG/L 下，欲達高 VOC 去除率 ($\eta = [1 - (y_2/y_1)] \times 100\%$) 時，需較高的填充高度 Z_T ；或在定填充高度 Z_T 時，欲達提高 VOC 去除率，需使用較低之 mG/L 值。

茲舉二計算例，說明 m 值對生物洗滌塔吸收法處理適用性的影響：

[計算例一]—含苯 $1,000 \text{ mg/m}^3$ 之排氣欲以生物洗滌塔吸收處理至 $<50 \text{ mg/m}^3$ (去除 95%)。已知進入洗滌塔之活性污泥混合液中含苯 0.10 mg/L ，試估算適當之 G/L 比及填充高度 Z_T 。

[解]

$$\begin{aligned}
 y_1 &= 1,000 \text{ mg/m}^3 \\
 y_2 &= 50 \text{ mg/m}^3 \\
 x_2 &= 0.10 \text{ mg/L} = 100 \text{ mg/m}^3 \\
 m &= 0.23
 \end{aligned}$$

$$(y_1 - mx_2)/(y_2 - mx_2) = (1,000 - 23)/(50 - 23) = 35.8$$

設 $mG/L = 0.50$, 使用 50 mm 尺寸濾料($H_{EPT} = 0.9 \text{ m}$) , 故 :

$$\begin{aligned}
 Z_T &= H_{EPT} \times \ln[(1 - mG/L) \times (y_1 - mx_2)/(y_2 - mx_2) + mG/L] \\
 &\div \\
 &[- \ln(mG/L)] \\
 &= 0.90 \times \ln[0.5 \times 35.8 + 0.5] \div [- \ln(0.5)] \\
 &= 0.90 \times 2.91 \div 0.693 \\
 &= 3.78 \text{ m} \\
 G/L &= 0.50/0.23 = 2.17 \\
 L/G &= 0.46 \text{ (m}^3 \text{ 液體/m}^3 \text{ 氣體)}
 \end{aligned}$$

以上計算顯示每 m^3 廢氣需用 0.46 m^3 循環活性污泥洗滌 , 其液體循環量遠大於一般洗滌之 $L/G = 0.001 - 0.003 \text{ (m}^3 \text{ 液體/m}^3 \text{ 氣體)}$ 。排氣中苯以生物吸收塔去除之方式恐不適用。

[計算例二] 一含丙酮 $1,000 \text{ mg/m}^3$ 之排氣欲以生物洗滌塔吸收處理至 $< 50 \text{ mg/m}^3$ (去除 95%)。已知進入洗滌塔之活性污泥混合液中含丙酮 0.10 mg/L , 試估算適當之 G/L 比及填充高度 Z_T 。

[解]

$$\begin{aligned}
 y_1 &= 1,000 \text{ mg/m}^3 \\
 y_2 &= 50 \text{ mg/m}^3 \\
 x_2 &= 0.10 \text{ mg/L} = 100 \text{ mg/m}^3 \\
 m &= 0.00103
 \end{aligned}$$

$$(y_1 - mx_2)/(y_2 - mx_2) = (1,000 - 0.103)/(50 - 0.103) = 20$$

設 $mG/L = 0.50$, 使用 50 mm 尺寸濾料($H_{EPT} = 0.9 \text{ m}$) , 故 :

$$\begin{aligned}
 Z_T &= H_{EPT} \times \ln[(1 - mG/L) \times (y_1 - mx_2)/(y_2 - mx_2) + mG/L] \\
 &\div \\
 &[- \ln(mG/L)]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 0.90 \times \ln[0.5 \times 20 + 0.5] \div [-\ln(0.5)] \\
&= 3.05 \text{ m} \\
G/L &= 0.50 / 0.00103 = 485 \\
L/G &= 0.00206 \text{ (m}^3 \text{ 液體/m}^3 \text{ 氣體)}
\end{aligned}$$

以上計算顯示每 m³ 廢氣需用 0.00206 m³ 循環活性污泥洗滌，其液體循環量已在一般洗滌之 L/G = 0.001-0.003 (m³ 液體/m³ 氣體) 範圍內，排氣中丙酮以生物吸收塔去除之方式應屬適用。

由上計算知，一般適當的 mG/L 如設定為 0.5-0.7，如 L/G 值欲在 0.010 (m³Liquid/m³ Gas) 以下，則 VOC 之 m 值需小於 0.005-0.007。參考表 3.1，甲醇、乙醇、異丙醇(IPA)、環己醇、甲醛、乙醛、丙酮、丁酮(MEK)、戊酮(MIBK)、環己酮、乙酸甲酯、乙酸乙酯、甲基丙烯酸甲酯(MMA)、丙烯晴、單乙醇胺等常用 VOC 適以生物洗滌塔吸收法處理；苯、甲苯、二甲苯、乙苯、二氯甲烷、苯乙烯、醋酸乙烯等則不適用生物洗滌塔吸收法處理。

3.2 洗滌塔氣體空塔流速

為避免太大的氣體阻力及循環水為空氣吹出，一般洗滌塔填充層之氣體質量負荷為 0.14-2.8 kg/m².s，以空氣密度為 1.18 kg/m³ 計，其氣體空塔流速(G/A)為 0.12-2.4 m/s。建議實用上以 G/A < 2.0 m/s 為宜。

3.3 營養鹽

微生物在發揮正常的有機物代謝功能時，需要微量的無機元素與氮、磷等。在活性污泥混合液中，必需的無機元素是足夠的，但是氮、磷則經常不足，如這兩種元素是作為微生物生命基礎的細胞核組成元素。若不能連續補充這些營養物質，微生物增殖即行中止，並失去對有機物降解功能，所以為了維持微生物分解有機物的功能則必須加入足夠的氮、磷，以供微生物利用。

一般將氣相中污染物質流量換算成 COD 或 BOD 質流量，再以 COD : N : P = 150 : 5 : 1 或 BOD : N : P = 100 : 5 : 1 之比例添加 N 及 P，例如：

氣體流量	G = 100 m ³ /min
污染物濃度	C = 100 mg COD/m ³
COD 質流量	F = G × C = 100 m ³ /min × 100 mg COD/m ³ × 1,440 min/day × 10 ⁻⁶ kg/mg = 14.4 kg COD/day
系統中需添加	N = 14.4 kg COD/day × (1/30) kg N/kg COD = 0.48 kg N/day

$$P = 14.4 \text{ kg COD/day} \times (1/150) \text{ kg P/kg COD} = 0096 \text{ kg P/day}$$

3.4 活性污泥池及終沉池

活性污泥曝氣池體積可依一般廢水處理系統原理及實務經驗設定，其負荷範圍為 $F/V = 1-2 \text{ kg COD/m}^3 \cdot \text{day}$ ，供氧量為 $= 1-2 \text{ kg O}_2/\text{kg COD}$ 。例如上節之氣相 COD 質流量 $F = 14.4 \text{ kg COD/day}$ ，則曝氣池體積 $V = F/(F/V) = 14.4 \text{ kg COD/day} \div 1 \text{ kg COD/m}^3 \cdot \text{day} = 14.4 \text{ m}^3$ 。需注意此為負荷氣體中有機物所需增加之曝氣池體積，若原廢水處理用活性污泥池足可負荷，則不需增加此部份槽積。

污泥濃度(MLSS)方面，洗滌槽內生物污泥濃度愈高，於相同條件下，可達到較高去除率；但以平衡模式計算，處理高水溶性污染物時，微生物濃度(MLSS)超過 5,000 mg/L，增加微生物濃度對去除率的提升效果有限。一般 MLSS 通常控制在 2000-3000 mg/L 之間，也可依食微比來決定其 MLSS 的範圍，其中活性污泥中的食微比通常為 0.2-0.5 kg COD/kg MLSS.day。

利用活性污泥沉澱池上澄水吸收廢氣中 VOC 時，應考慮二沉池之額外表面負荷，不應超過 $1.0-1.5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 。

四、活性污泥池注入法

圖 2.1(a)及(b)所述之直接注入法即為活性污泥池注入法，以下討論排氣注入深度、曝氣強度等與 VOC 去除率之關係。

圖 4.1 為活性污泥池注入法之 VOC 去除模式及系統示意，依該圖及文獻(Bielefeldt and Stensel, 1999)，廢氣中 VOC 濃度 y 與其他參數之關係如下 [6]：

$$-Gdy = K_L a_{\text{VOC}}(y/m - x)Adz \quad (9)$$

其中：

$$K_L a_{\text{VOC}} = \text{在活性污泥混合液中之 } K_L a_{\text{VOC}} / (\text{在清水中之 } K_L a_{\text{VOC}})$$

$$K_L a_{\text{VOC}} = \text{基於液膜總阻力之 VOC 體積質傳係數, volumetric mass-transfer coefficient of the target VOC based on the overall liquid-film resistance (1/s)}$$

$$x = \text{活性污泥混合液中 VOC 濃度}(\text{mg/m}^3)$$

其他符號之意義與第三節相同。參考圖 4.1 之符號，將(9)式積分得：

$$(y_2 - mx) = (y_1 - mx) \times \exp[-K_L a_{\text{VOC}} Z_T / (mG/A)] \quad (10)$$

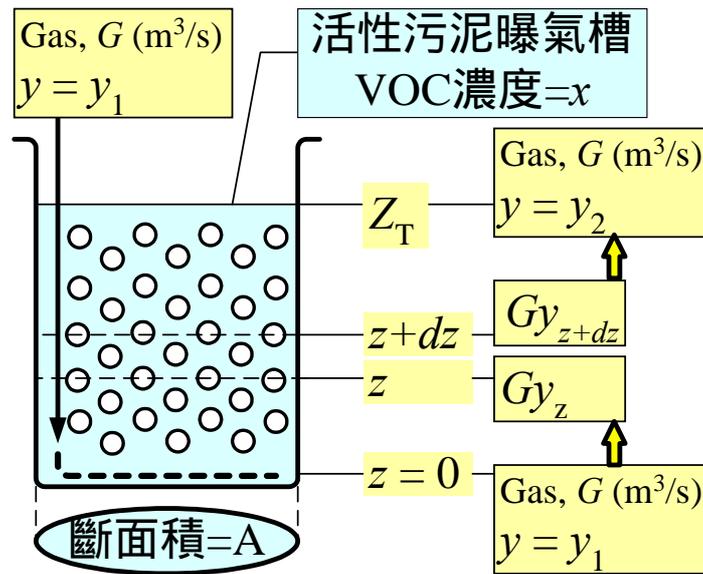


圖 4.1：活性污泥池注入法之 VOC 去除模式及系統示意。G：廢氣注入流量，y：廢氣中 VOC 濃度，x：活性污泥混合液中中 VOC 濃度，Z_T：廢氣注入深度

(10)式顯示 VOC 去除率($\eta = [1-(y_2/y_1)] \times 100\%$)與排氣注入深度(Z_T)、曝氣強度($G/(AZ_T)$)、活性污泥混合液中 VOC 濃度(x)、及亨利常數(m)間之關係。

一般而言， $\eta < 1$ ；另外， $K_{La_{VOC}}$ 與氧氣在水中之體積質傳係數 $K_{La_{O_2}}$ 可用下式估算[6]：

$$K_{La_{VOC}} = K_{La_{O_2}}(D_{VOC}/D_{O_2})^n \quad (11)$$

其中：

- D_{VOC} = VOC 在水中之分子擴散係數(m^2/s)
- D_{O_2} = 氧分子在水中之分子擴散係數(m^2/s)
- n = 常數，一般取 0.5

表 3.2 液顯示一些化學物質在水中之分子擴散係數值。

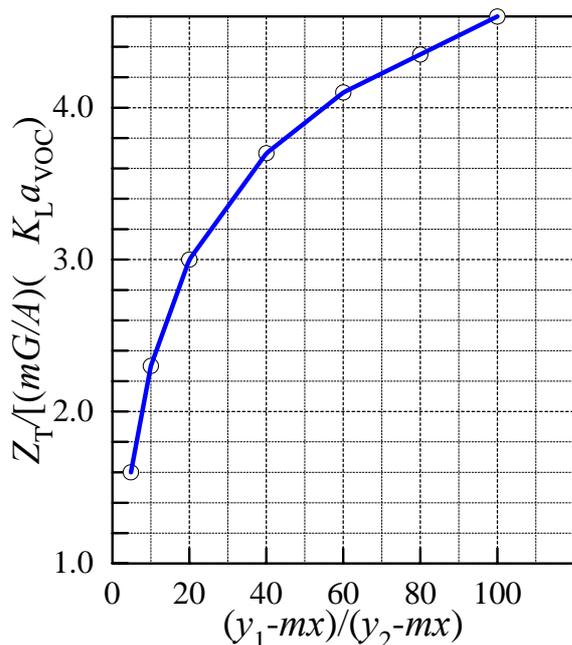


圖 4.2：活性污泥注入法 Z_T 與 $(y_1 - mx)/(y_2 - mx)$ 之關係

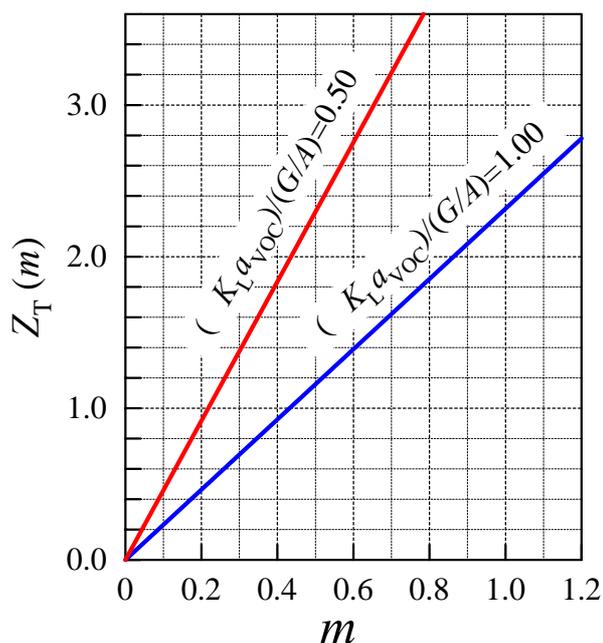


圖 4.3：VOC 去除率為 90% 時 ($y_1/y_2 = 10$)，活性污泥注入法所需曝氣深度 Z_T 與 m 之關係 ($x = 0$)

依(10)式計算，活性污泥注入法 Z_T 與 $(y_1 - mx)/(y_2 - mx)$ 之關係如圖 4.2 所示，顯示 Z_T 隨 $(y_1 - mx)/(y_2 - mx)$ 之增加而增加。另圖 4.3 顯示在定 $K_L a_{VOC}/(G/A)$ 下，且污泥中無殘存 VOC 時 ($x = 0$)，欲達 90% 之 VOC 去除率 ($\eta = [1 - (y_2/y_1)] \times 100\% = 90\%$) 時，所需曝氣深度 Z_T 與 m 成正比，及水溶性較大之 VOC (m 較小) 所須之曝氣深度較小。

茲舉二計算例，說明 Z_T 的估算：

[計算例一]—含苯 $1,000 \text{ mg/m}^3$ 之排氣欲以活性污泥注入法處理至 $<50 \text{ mg/m}^3$ (去除 95%)。已知活性污泥混合液中含苯 0.10 mg/L ，試估算適當之曝氣深度 Z_T 。(已知： $K_L a_{O_2} = 15 \text{ hr}^{-1}$ ， $G/A = 20 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)

[解]

$$\begin{aligned}
y_1 &= 1,000 \text{ mg/m}^3 \\
y_2 &= 50 \text{ mg/m}^3 \\
x &= 0.10 \text{ mg/L} = 100 \text{ mg/m}^3 \\
m &= 0.23 \\
(y_1 - mx)/(y_2 - mx) &= (1,000 - 23)/(50 - 23) = 35.8 \\
K_L a_{\text{VOC}} &= K_L a_{\text{O}_2} (D_{\text{VOC}}/D_{\text{O}_2})^n \\
&= 15 \times (0.98/2.11)^{0.5} = 10.22 \text{ hr}^{-1} \\
Z_T &= [(mG/A)/K_L a_{\text{VOC}}] \times \ln[(y_1 - mx)/(y_2 - mx)] \\
&= [0.23 \times 20/10.22] \times 3.58 \\
&= 1.61 \text{ m}
\end{aligned}$$

以上計算顯示曝氣深度 Z_T 為合理可行之數值。排氣中苯以活性污泥注入法處理之方式可行。

[註]以 $K_L a_{\text{O}_2} = 20 \text{ hr}^{-1}$ 可驗算活性污泥池之輸氧能力 dy_{O_2}/dt 如下：

$$\begin{aligned}
dy_{\text{O}_2}/dt &= K_L a_{\text{O}_2} (y^*_{\text{O}_2} - y_{\text{O}_2}) \\
&= 15 \times (0.9 \times 8,240 - 2,000) \text{ mg O}_2/\text{m}^3 \cdot \text{hr} \\
&= 81.23 \text{ g O}_2/\text{m}^3 \cdot \text{hr} \\
&= 1.95 \text{ kg O}_2/\text{m}^3 \cdot \text{day}
\end{aligned}$$

其中 $y^*_{\text{O}_2}$ = (在活性污泥混合液中之飽和溶氧值)/ (在清水中之飽和溶氧值), y_{O_2} = 活性污泥混合液中之溶氧值。輸氧能力 $1.95 \text{ kg O}_2/\text{m}^3 \cdot \text{day}$ 為合理之數值($1-2 \text{ kg O}_2/\text{m}^3 \cdot \text{day}$)。

[計算例二]一含丙酮 $1,000 \text{ mg/m}^3$ 之排氣欲以活性污泥注入法處理至 $<50 \text{ mg/m}^3$ (去除 95%)。已知活性污泥混合液中含丙酮 0.10 mg/L , 試估算適當之曝氣深度 Z_T 。(已知： $K_L a_{\text{O}_2} = 15 \text{ hr}^{-1}$, $G/A = 20 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)

[解]

$$\begin{aligned}
y_1 &= 1,000 \text{ mg/m}^3 \\
y_2 &= 50 \text{ mg/m}^3 \\
x &= 0.10 \text{ mg/L} = 100 \text{ mg/m}^3 \\
m &= 0.00103 \\
(y_1 - mx)/(y_2 - mx) &= (1,000 - 0.103)/(50 - 0.103) = 20 \\
K_L a_{\text{VOC}} &= K_L a_{\text{O}_2} (D_{\text{VOC}}/D_{\text{O}_2})^n \\
&= 15 \times (1.14/2.11)^{0.5} = 11.03 \text{ hr}^{-1} \\
Z_T &= [(mG/A)/K_L a_{\text{VOC}}] \times \ln[(y_1 - mx)/(y_2 - mx)] \\
&= [0.00103 \times 20 / 11.03] \times 3.58 \\
&= 0.0067 \text{ m}
\end{aligned}$$

以上計算顯示曝氣深度 Z_T 僅 0.0067 m 即可達 95% 之丙酮去除率，活性污泥注入法處理高水溶性 VOCs 僅需極小之曝氣深度。

在本法，活性污泥曝氣池體積與上節之洗滌塔吸收法相同，仍需注意負荷氣體中有機物所需增加之曝氣池體積；與上澄水洗滌塔吸收法不同者為不需考慮終沉池之表面負荷。

五、生物洗滌法案例

5.1 案例一：以篩孔板活性污泥洗滌塔去除丙酮[7]

本研究案例以一 15 cm 直徑之三層篩孔板洗滌塔(圖 5.1，篩孔直徑 5 mm，50% 開孔率)，通入含 50 ppm 丙酮的空氣，並以活性污泥洗滌，以探討其對丙酮之去除率。試驗條件為：氣體空塔流速 $G/A = 0.71 \text{ m/s}$ ，洗滌液空塔流速 $L/A = 0.00095 \sim 0.0019 \text{ m/s}$ ，液/氣比 $L/G = 0.00134 \sim 0.00267 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ，活性污泥濃度 $\text{MLSS} = 1,440\text{-}1,590 \text{ mg/L}$ 。

結果如表 5.1 所示，顯示在液/氣比 $0.00267 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 時有較佳之處理效果，以營養源液吸收之效果與以活性污泥吸收者相似，於活性污泥中加入 2% 粉狀活性碳可增加丙酮吸收率至 95%。

表 5.1：生物洗滌法 - 含丙酮排氣處理

洗滌液	丙酮去除率(%)			
	液/氣比 0.00134 m ³ /m ³		液/氣比 0.00267 m ³ /m ³	
	第一板 排氣	第三板 排氣	第一板 排氣	第三板 排氣
營養源液	58	82	73	90
活性污泥			75	89
活性污泥 + 2% 活性碳粉			91	95

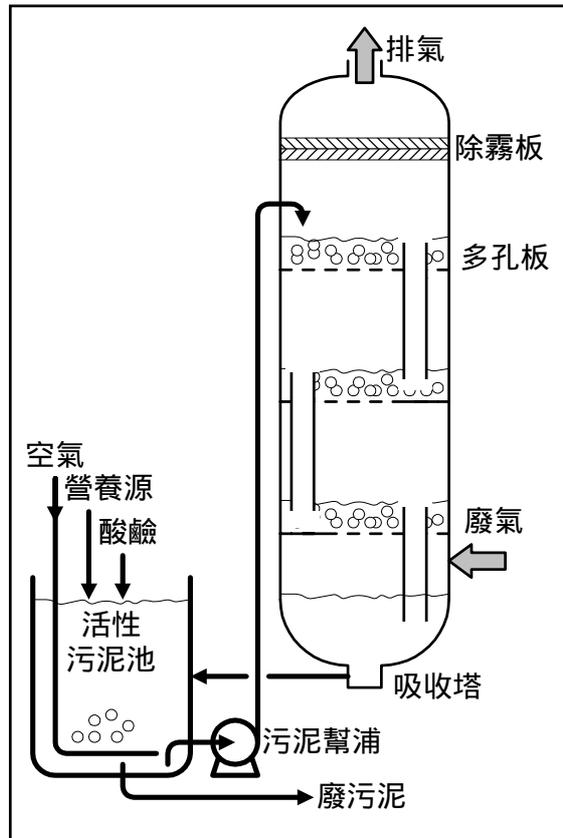


圖 5.1：15 cm 直徑三層篩孔板生物洗滌塔(篩孔直徑 5 mm，50%開孔率)

5.2 案例二：以填充式活性污泥洗滌塔去除乙醇[8]

本案例主要使用單段式生物洗滌塔，進行釀酒廢水處理場排氣中乙醇的處理操作性能試驗。

處理用生物洗滌塔填充物為聚丙烯球(Jaeger spherical polypropylene)，頂端有五個進水口以迴流活性污泥進行噴灑，出流污泥則以一 946 L 的聚乙烯槽作為迴流中繼站，迴流量為 94.6 L/min。營養鹽與緩衝液置於第二槽，約 120 L，其添加時機依據平均 VOC 負荷及生物轉換量(1mg biomass/2.5 mg carbon)而定，尿素為一般氮源，並以磷酸緩衝液控制 pH 為 7.2。循環水中生物污泥濃度最大為 500 mg/L，每天約廢棄 120 L 的循環生物污泥，並

以新鮮水取代，單段生物洗滌塔總水量之消耗約 6%。

進氣量為 $G = 445 \text{ SCFM}$ ($12.6 \text{ Nm}^3/\text{min}$)，洗滌用循環污泥流量為 $L = 25 \text{ gal/min}$ ($0.0946 \text{ m}^3/\text{min}$)， $L/G = 0.0075 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ，最大乙醇處理能力為 $0.71\text{-}0.75 \text{ lb/h}$ ，平均處理量 0.12 lb/h 。

結果顯示處理系統內若無生物群，其處理效率形同一水洗塔。有生物群時，非甲烷 VOC 的平均去除率為 85.3%，甲烷之平均逸散量則為 3.1 ppmv。

5.3 案例三：以活性污泥曝氣池洗滌法去除排氣中之甲苯、二甲苯、二氯甲烷[9]

為探討以活性污泥曝氣池洗滌法各種操作參數對甲苯、二甲苯、二氯甲烷去除率和污泥沉降性的影響，本案例以一 3 m 深、 $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ 斷面積的活性污泥池(圖 5.2)，在四個不同的液位高度($Z_T = 0.50、1.10、1.75、2.25 \text{ m}$)下，分別通入含甲苯 $y_1 = 1,033\text{-}4,130 \text{ mg/m}^3$ 、二甲苯 $y_1 = 1,623\text{-}6,490 \text{ mg/m}^3$ 、二氯甲烷 $y_1 = 853\text{-}5565 \text{ mg/m}^3$ 的空氣，以探討各參數對三種 VOC 去除率的影響。

結果如圖 5.3 至 5.5 所示，顯示在 $Z_T > 1.1 \text{ m}$ ，各 VOC 去除率均大於 90%。

整個實驗範圍為：曝氣強度(G/V) = $0.028\text{-}0.375 \text{ m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{min}$ ， $\text{pH} = 6.83\text{-}7.57$ ， $\text{MLSS} = 2000\text{-}2500 \text{ mg/L}$ ，污泥沉降性良好(甲苯、二甲苯： $\text{SVI}_{30} = 50\text{-}150 \text{ mL/L.g}$ ，二氯甲烷： $\text{SVI}_{30} = 140\text{-}340 \text{ mL/L.g}$)。

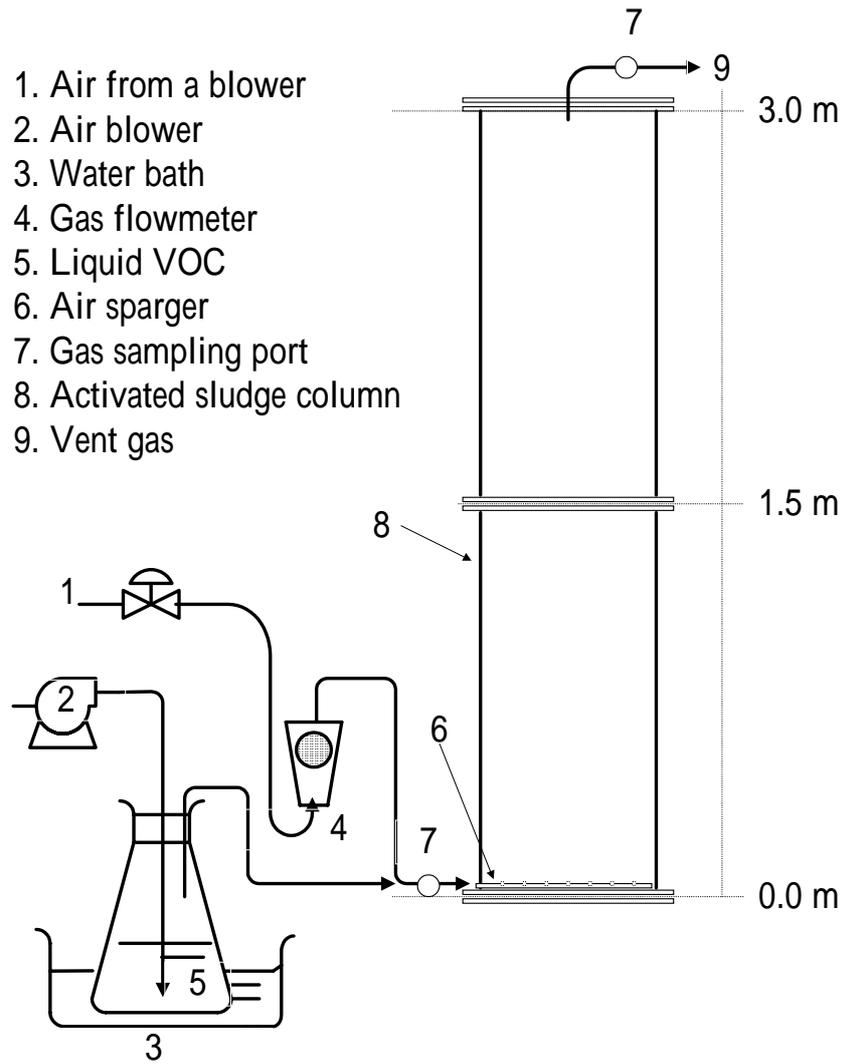


圖 5.2 : 氣體供應系統及活性污泥槽(0.4 m× 0.4 m× 3.0 m H)示意

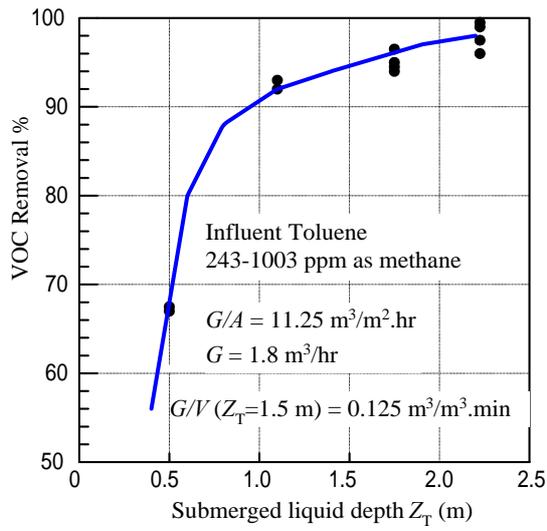


圖 5.3：活性污泥池注入法處理排氣中甲苯

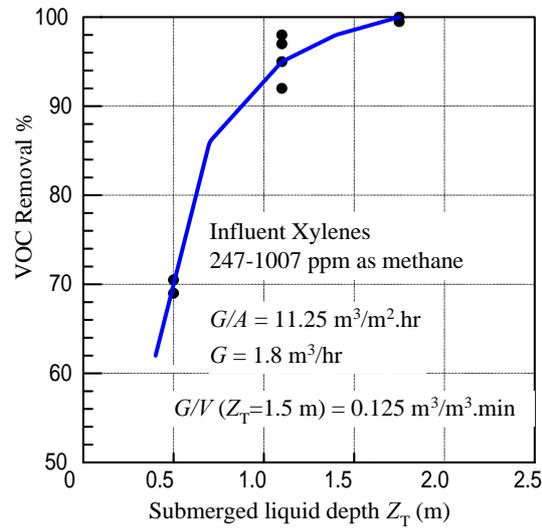


圖 5.4：活性污泥池注入法處理排氣中二甲苯

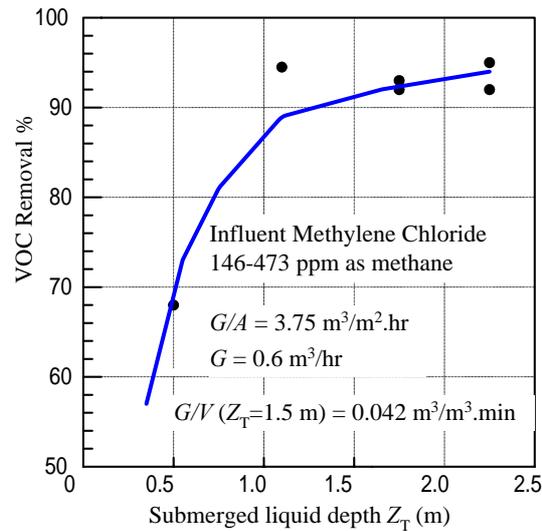


圖 5.5：活性污泥池注入法處理排氣中二氯甲烷

5.4 案例四：以活性污泥曝氣池洗滌法去除石化二次加工廢水場調和池中之 VOCs [10]

某塑膠工業股份有限公司廢水場每日處理製程總廢水量約 4,000 立方公尺，以調整、活性污泥、終沉、污泥濃縮及脫水等程序處理，由於製程使用丙酮、二甲基甲醯胺(DMF)、麩酸干、馬來干、丙二醇、乙二醇、二丙二醇、二乙二醇、苯乙烯、對苯二甲酸二甲酯(DMT)、丁二醇、四溴化丙二酚環氧乙基醇(TBA-4EO)、甲醇、矽烷、甲苯、二甲苯、乙醚等為原料，致殘餘有機物由廢水中逸出，造成處理場區臭味。

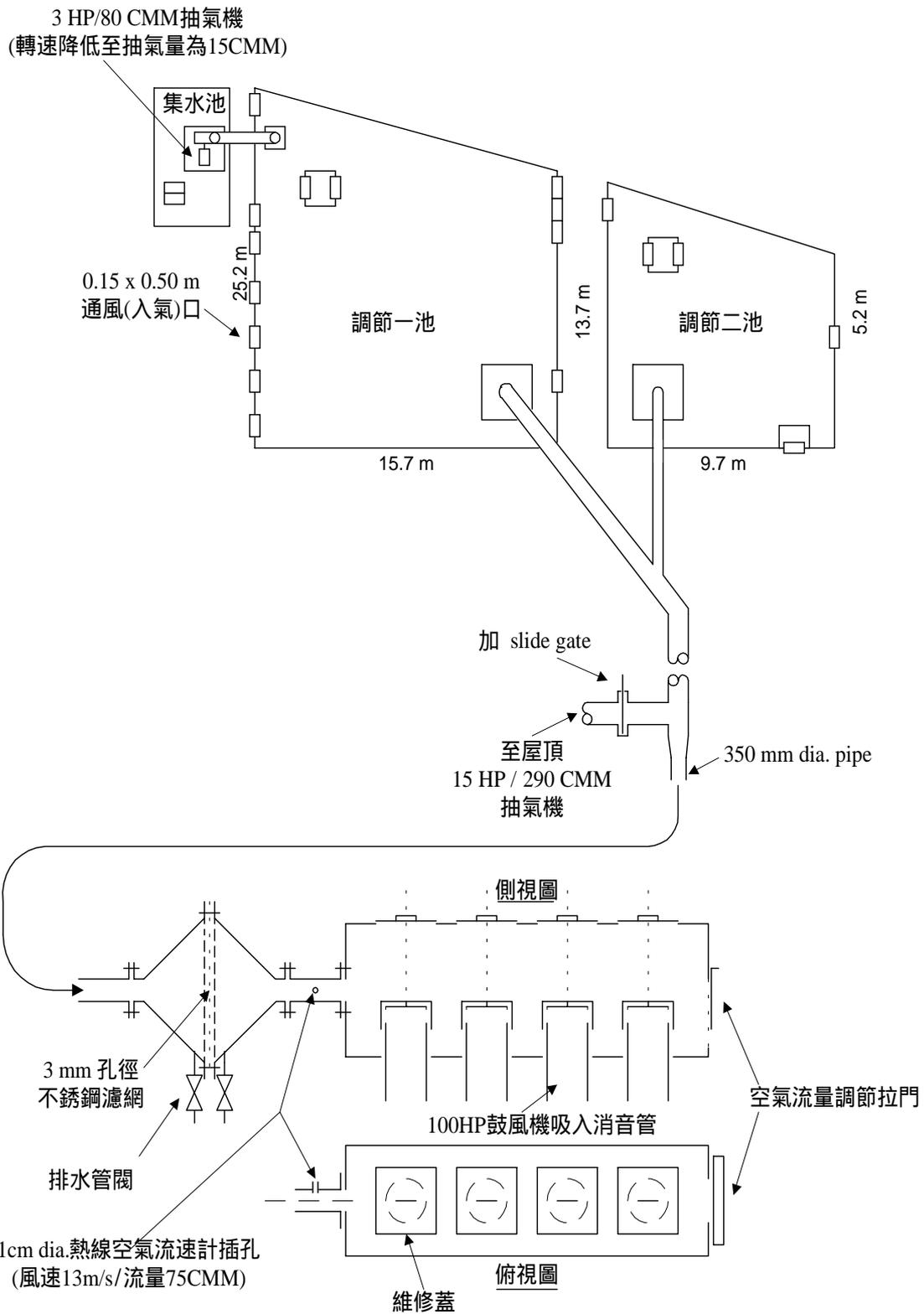
主要臭味源為集水池、調節一池、調節二池(圖 5.6)，該三池均加蓋，排氣主要臭味成分為烴(甲苯、二甲苯、苯乙烯)、醇(甲醇、1-丙醇、1-丁醇、異辛醇、酚)、醚(tetrahydrofuran、1,4-dioxane)、醛(乙醛、丙醛、丁烯醛 $\text{CH}_3\text{CH}:\text{CHCHO}$ 、苯甲醛 benzaldehyde)、酮(丙酮、丁酮 MEK、己酮 MIBK、己烯酮 $(\text{CH}_3)_2\text{C}:\text{CHCOCH}_3$)、二甲基甲醯胺(DMF)、及九碳胺等。

由於本廢水場採活性污泥法作二級處理，且氣體臭味成分均可溶於水，現將臭味源排氣(45 NCMM)經不銹鋼網過濾後，集中於現有 4 部曝氣鼓風機(100 HP× 40 CMM× 5,000 mmAq，3 部同時運轉)之吸入口消音器，送入活性污泥曝氣混合液中處理。

該法之管線及抽氣罩蓋設置費用為 NT\$ 130 萬，無需額外操作費用。依檢測報告(表 5.2)，該法之 VOC 質量去除率為 92%。

表 5.2：廢水場 VOC 檢測報告

一、採樣時間：	中華民國 90 年 11 月 02 日 14:50-15:30						
二、分析方法：	火焰離子化檢出器(FID) Photovac						
三、分析結果：							
設備名稱	測定點	加蓋 /未加蓋	開口截 面積(m^2)	風速 (m/s)	風量 (m^3/s)	VOC (ppm as CH_4)	VOC 逸散量 (kg/year)
調節池一	排放管	加蓋	0.13	2.13	0.28	371	1954
調節池二	排放管	加蓋	0.0707	2.13	0.152	227	649
活性污泥曝氣槽一	液面 10cm	未加蓋	曝氣量：66 (m^3/min)			4.1	84.8
活性污泥曝氣槽二	液面 10cm	未加蓋	曝氣量：96(m^3/min)			4.1	123
四、VOC 去除率：	$[(1954 + 649) - (84.8 + 123)] \div (1954 + 649) \times 100\% = 92\%$						



某廠廢水廠臭味改善方案示意圖

(M.S.Chou, 12/14/1997, sunco/p.6)

圖 5.6：廢水調節池 VOC 改善方案圖

5.5 案例五：以活性污泥池上澄水洗滌法脫除沼氣中硫化氫之操作性能研究[11]

本研究藉二串聯之吸收塔，內徑 0.6 m，填充 4"K 6 Heilex-Type 或 2.5" Crown-Biopacks 塑膠填料，堆填高度 Z_T 分別計 5 m 及 3.65 m，各通入廢水生物處理廠放流水，以吸收由 UASB (上流式厭氣污泥床)所排出的沼氣中之硫化氫，再將吸收硫化氫後之循環水排入活性污泥槽中藉由其中之微生物將液相中之硫化氫氧化。

於為期 20 週之現場實測結果顯示，在液體及氣體空塔流速分別為 $L/A = 13.2-28.1$ 及 $G/A = 304-644$ m/h，吸收塔可將硫化氫由 378-18,923 ppm 去除至 1-2,100 ppm，平均去除率 >96%，出口硫化氫濃度在 300 ppm 以下。結果另顯示，當循環水 pH 值由 7.7 提高至 8.8 時，吸收塔之整體去除效率由 86% 提高至 98%。硫化氫經由循環水吸收後，約有 1/3 之總硫以硫酸鹽(SO_4^{2-})或硫氧化物(S^{2-})之型態在出硫水被檢測出，其餘推測是於水中被氧化後以固體硫磺型態附著於濾料表面，此為吸收塔操作時壓降日增之主要原因。

經由本研究之氣-液平衡公式，可得知循環水 pH 值、氣體流量、循環水流量、及濾料填充高度等與去除率間的關係；經由計算得知，在系統溫度 30℃，循環水 pH = 8.0 時，最小氣液比為 $(L/G)_{min} = 0.043 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ；循環水 pH = 8.5 時， $(L/G)_{min} = 0.014 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。經將試驗數據代入模式計算知，在單位面積氣體及液體空塔流速分別為 $G/A = 304-644 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ 及 $L/A = 15.1-28.1 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ，循環水 pH = 7.7-8.6 時，硫化氫傳入循環吸收液之總氣相質傳係數 $K_{OG}a = 1.15 \times 10^{17} \times (G/A)^{0.94} \times (L/A)^{-3.03} \text{ hr}^{-1}$ 。 $K_{OG}a$ 隨 L/A 增加而降低之原因主要因為 L/A 增大使氣-液接觸表面積 a 減小而不利於硫化氫的吸收。沼氣進入吸收塔後，其濃度隨填料高度及循環水 pH 值之變化情形，可以由模式計算出。

六、結語

近十年來，以生物法處理排氣中 VOC 或臭味逐漸使用於產業界，較諸熱破壞法，其優點為設置費用中低、操作費用低、無二次污染，缺點為污染物去除率一般僅達 90%、佔地大、操作維護技術層次高等。

生物洗滌法較諸生物滴濾塔或生物濾床法，有去除率高(>90%)、設置費用低、操作維護技術層次低之優點。常用 VOC 中，水溶性高之甲醇、乙醇、異丙醇(IPA)、環己醇、甲醛、乙醛、丙酮、丁酮(MEK)、戊酮(MIBK)、環己酮、乙酸甲酯、乙酸乙酯、甲基丙烯酸甲酯(MMA)、丙烯晴、單乙醇胺等適以生物洗滌塔吸收法及活性污泥池注入法處理；水溶性較低之苯、甲苯、二甲苯、乙苯、二氯甲烷、苯乙烯、醋酸乙烯等則僅適用活性污泥池注入法處理。

七、參考資料

1. 行政院環境保護署，揮發性有機廢氣生物處理系統建立及評估，中華民國八十九年十二月。
2. Devinny, J. S., Deshusses, M. A., and Webster, T. S. (1999): Biofiltration for air pollution control, *Lewis Publishers*, USA, 1999.
3. Perry, R. H. and Green, D. (1984): Perry's Chemical Engineers' Handbook, 6th ed., *McGraw-Hill, Inc.*, New York, USA, 1984.
4. Eastem Research Group (1997): Final Report: Preferred and Alternative Methods for Estimating Air Emissions from Wastewater Collection and Treatment, *Eastem Research Group*, Morrisville, North Carolina, USA, 1997.
5. Metcalf & Eddy (1991): Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse, 3rd ed., *McGraw-Hill, Inc.*, New York, USA., 1991.
6. Bielefeldt, A. R. and Stensel, D. D. (1999): Treating VOC-Contaminated Gases in Activated Sludge: Mechanistic Model to Evaluate Design and Performance, *Environ. Sci. Technol.*, 33, 3234-3240.
7. Hammervold R. E., Overcamp, T. J., Grady, C. P. L. Jr., and Smets, B. F. (2000): A Sorptive Slurry Bioscrubber for the Control of Acetone, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 50, 954-960.
8. Croonenberghs, J. and Varani, F. (1994): Use of Bioscrubber to Control Ethanol Emissions, *Proc. 87th Annual Meeting & Exhibition, Air & Waste Manage. Assoc.*, Cincinnati, Ohio, June 19-24.
9. 張筱瑜(2001)：以活性污泥池注入法處理排氣中甲苯之操作性能研究，國立中山大學環境工程研究所碩士論文。
10. 行政院環境保護署，廢水處理廠揮發性有機物排放量推估及防制技術評估，中華民國九十年十二月。
11. 洪國騰(2001)：以活性污泥池上澄水洗滌法脫除沼氣中硫化氫之操作性能研究，國立中山大學環境工程研究所碩士論文。