

呼吸儀在廢水生物處理系統的 監控原理與應用

■ 江舟峰、吳勇興、洪瑞敏

呼吸儀 (respirometer) 是一種可以用來監測生物系統反應的設備，於好氧分解時監測其攝氧率 (oxygen uptake rate, OUR)，於厭氧分解時監測其產氣率。呼吸儀自二十世紀初問世以來，經過一個世紀的研發已有相當顯著的發展，特別是在理論基礎、測定的信賴性及程控軟體等，使得呼吸儀已逐漸成為廢水生物處理系統中不可或缺的監控設備。本文撰寫的目的為探討呼吸儀測定的基本原理及各種不同的應用方法，除進行國內外文獻剖析外，本文彙整本研究團隊過去六年來進行國科會專題計畫的研究成果，探討各類呼吸儀的監控原理與類型，說明演算法 (algorithm) 在呼吸儀監測的重要性，最後再說明呼吸儀的各種應用及操作技巧。

關鍵字：內生呼吸、外生呼吸、電解式呼吸儀、氣泡式呼吸儀、呼吸圖譜

呼吸作用與攝氧原理

呼吸作用 (respiration) 是生物體為獲取能量，而於細胞內進行的一系列氧化還原反應的程序，如圖 1 所示，基質 (substrate) 為生物體的能量來源，於生物分解時釋出電子，電子通過細胞內的「電子傳遞鏈」(electron transport chain，簡稱 ETC)，若以分子態氧為終端電子接受者，稱為好氧呼吸作用；若終端電子接受者為結合態氧，如 CO_2 、 SO_4^{2-} 及 NO_3^- 等，稱為厭氧或無氧呼吸 (McKinney, 1962; Chiang,

1988)。典型的呼吸圖譜 (respirogram) 均以累積攝氧量或產氣量為 Y 軸，反應時間為 X 軸，如圖 2 所示，其為一好氧呼吸儀圖譜，以攝氧量为 Y 軸，其各點的斜率即為攝氧率，是生物系統的一項重要動力特徵，可做為監控的依據。

從生物能量學 (bioenergetics) 的觀點而言，呼吸作用可分為外呼吸作用 (exogenous respiration) 與內呼吸作用 (endogenous respiration)，外呼吸作用是指基質分解後，釋放的電子通過 ETC 時，將能量貯存於高能磷酸鍵 (ATP) 或高

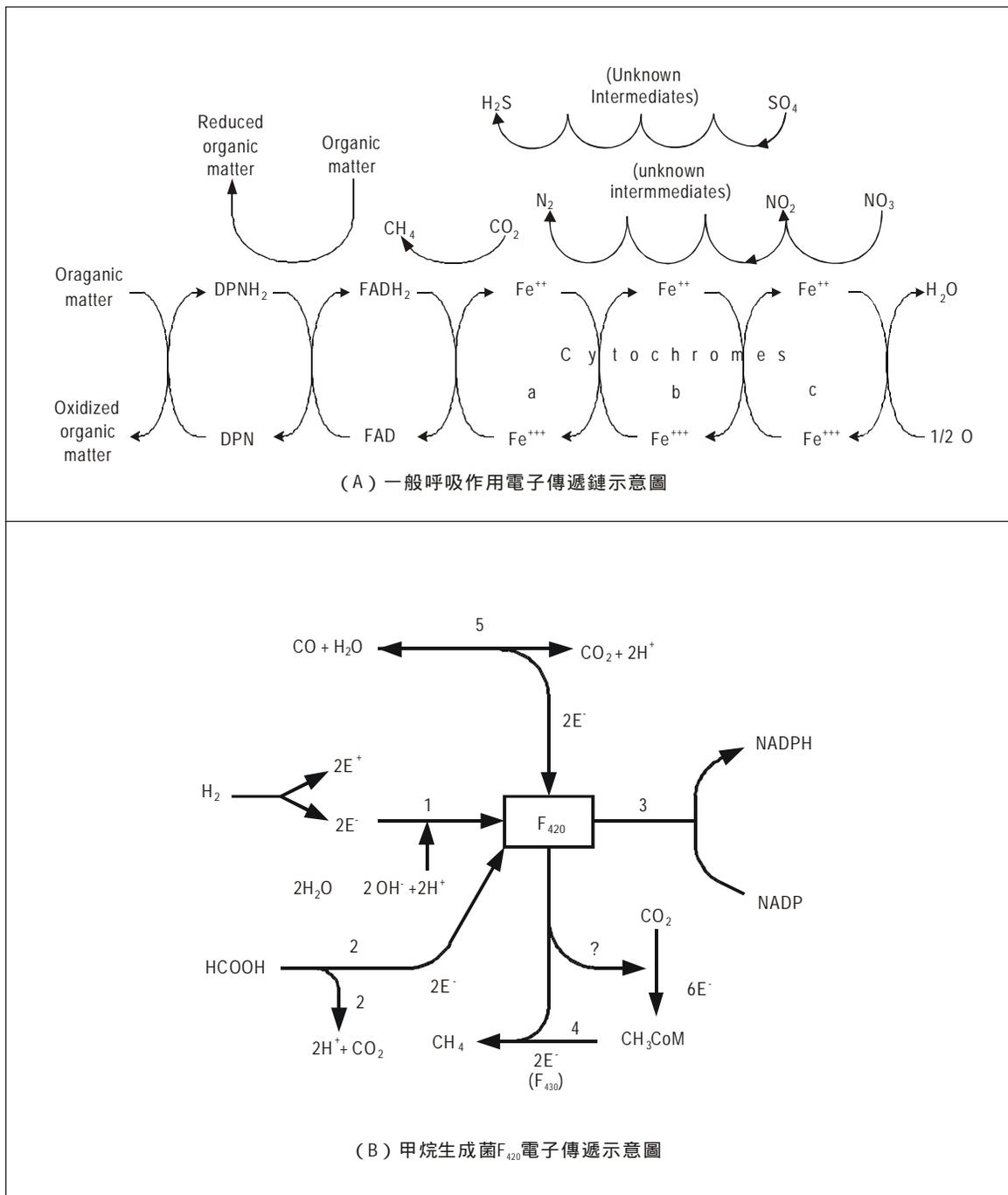


圖 1 (A) 一般呼吸作用電子傳遞鏈示意圖，在好氧反應時會耗用氧氣 (McKinney, 1962)；(B) 甲烷生成菌 F₄₂₀ 電子傳遞鏈示意圖，此為厭氧反應會產生 CO₂ 及 CH₄ (Chiang, 1988)。

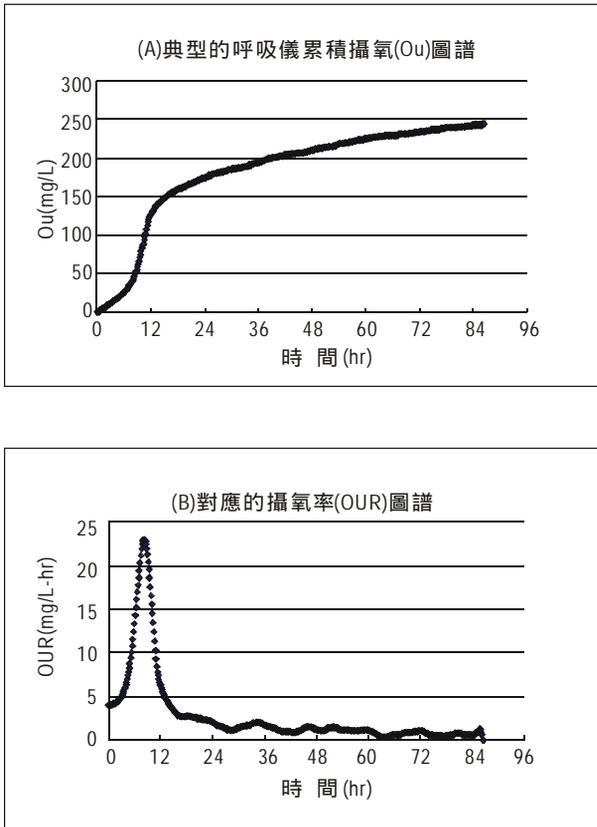


圖 2 (A) 典型的呼吸儀累積攝氧 (O_u) 圖譜；(B) 對應的攝氧率 (OUR) 圖譜。

能氫鍵 (NADPH)，而以自由態氧或結合態氧為電子終端接受者的反應，當系統的基質濃度較高時，外呼吸作用較為明顯，是生物系統獲得能量的主要方式。理論上每 mole 的 ATP 可貯存 7,000 cal 的能量，McCarty (1969) 研究各種微生物系統的生物能量，推估微生物經由呼吸作用，其獲得能量的效率可達 40~60%，可以推論經由 ETC 的呼吸作用有良好的能量轉換效率。

內呼吸作用則為當生物系統處於基質空乏的情況時，細胞質會自行耗用分解，此時系統

的生物質量 (biomass) 會減少，故內呼吸作用又稱為生物衰減 (decay)，有些學者在研究生物動力學時，將生物死亡 (death) 與衰減進一步區隔 (Grady and Lim, 1980)，生物死亡只是喪失活度，但生物質量並未減少。一般而言，若非經特殊的實驗設計，呼吸儀只能測定外呼吸與內呼吸的總合。

Wu *et al.* (2001) 對生物能量與呼吸作用關係進行系統研究，將文獻理論整理成四種攝氧平衡模式，如圖 3 所示，其中 McCarty (1969) 模式及 Wu *et al.*, (2001) 模式為雙路徑模式，而 Rittmann *et al.*, (1987) 及 Grady *et al.*, (1989) 為三路徑模式，值得注意的是若將基質 (S) 能量分配至細胞合成或中間產物的路徑，均不會直接引起呼吸作用而導致攝氧，只有分配至 ETC 能量儲存的路徑，才會導致外呼吸攝氧，而生物質量 (X) 的衰減會導致內呼吸攝氧。一般而言，若非針對中間產物的研究，三路徑模式會因系統參數較多，而增加系統分析的複雜度。以雙路徑模式為例，系統的攝氧平衡模式微分方程式可以

寫成：

$$dO_u/dt = (-dS/dt) + (-dX/dt) \quad (1)$$

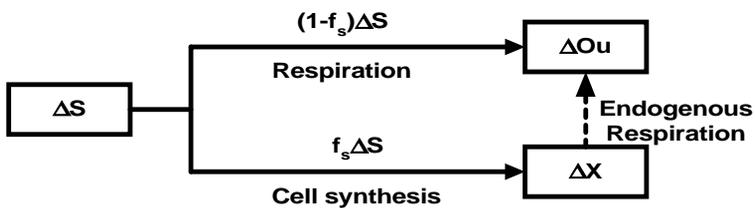
其中，

$$dX/dt = -Y_g(dS/dt) - k_d X \quad (2)$$

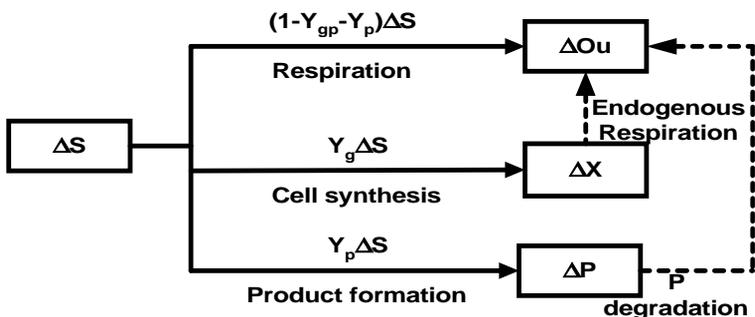
將公式 (2) 代入 (1) 可得：

$$dO_u/dt = [-(1 - Y_g) dS/dt] + k_d X \quad (3)$$

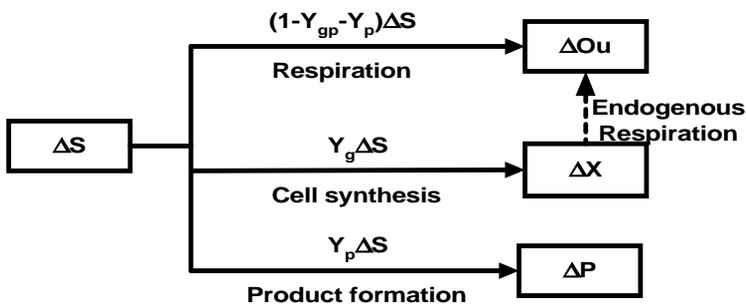
其中，基質 (S) 及生物質量 (X)， k_d 則為生物的衰減常數均以需氧量表示。上式攝氧平衡公式可解釋為：系統的總攝氧率 (dO_u/dt)，為基質的降解率扣除其分配至細胞合成率者 $[-(1 - Y_g) dS/dt]$ 加上生物質量的衰減率 ($k_d X$)，



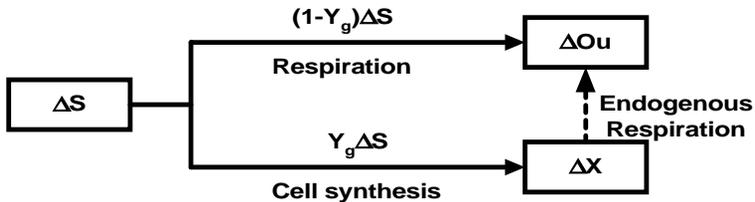
(a) Electron balance (adopted by McCarty (1969))



(b) COD balance with biodegradable product (adopted by Rittmann *et al.* (1987))



(c) COD balance with non-biodegradable product (adopted by Grady *et al.* (1989))



(d) BOD or COD balance (proposed by this study).

圖 3 生物能量與呼吸作用關係的四種攝氧平衡模式 (Wu *et al.*, 2001)



前者為外呼吸率，後者為內呼吸率。

國際水協會(International Water Association, IWA) 探討生物系統新陳代謝與攝氧的關係 (Vanrolleghem, 2002), 建議一種新的模式, 稱為死亡再生 (death-regeneration) 模式, 如圖 4 (B)所示, 其攝氧僅由基質降解所貢獻, 生物質量衰減並不貢獻攝氧, 但衰減後的生物質量一

部分形成惰性產物 (X_p), 另一部分會形成可緩慢水解的固形物 (X_s), 前者會於系統累積, 而後者會再進入水解的循環, 成為易於分解的基質 (S_s), 從系統結構模式觀點, IWA 模式屬於單路徑模式, 並不明確區隔外呼吸與內呼吸攝氧, 但透過 IWA 模式, 亦可完整詮釋傳統內生呼吸攝氧的實驗現象, 其優點是可以明確

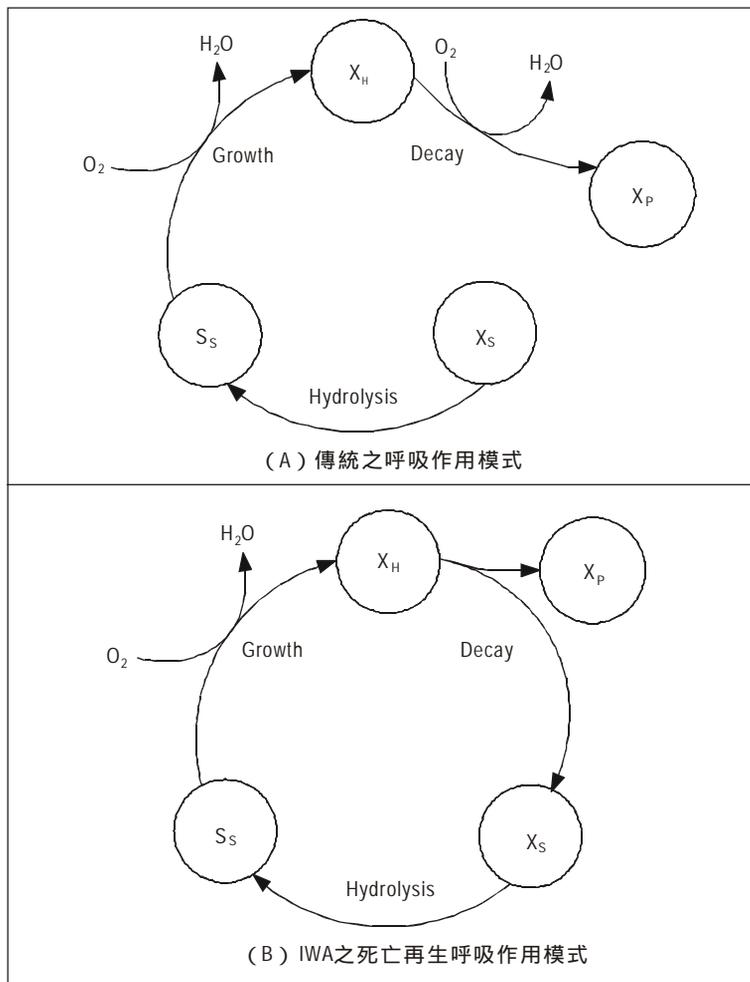


圖 4 (A) 傳統的呼吸作用模式, 顯示生物衰減會引起攝氧; (B) IWA 的死亡再生呼吸作用模式, 顯示生物衰減並不會引起攝氧 (Vanrolleghem, 2002)。

將固形物區分為具有活性的生物質量與不具活性的惰性物質，但缺點是不易利用傳統的揮發性懸浮固形物檢測方法區別惰性與活性固形物，所以必須在模式中增加一活度係數，用以定義活性生物質量佔 VSS 的比例。Young (1981) 亦採用此一定義探討活性污泥的攝氧率，其模式假設典型的活度係數為 0.80，但理論上此一係數與廢水特性有關，至於針對同一廢水而言，是否為一常數，尚待進一步以實驗方式確認。值得注意的是，當使用不同模式進行攝氧的系統分析時，因系統參數的定義不同，例如生長係數 (Y_g) 在 Wu *et al.*, (2001) 模式中即與 IWA、Rittmann、Grady 三種模式中的定義均不相同，使用時應審慎評比，以免誤導。

呼吸儀分類與監控原理

目前世界各種品牌呼吸儀產品已相當多，如何正確選用、使用與詮釋攝氧圖譜，已成為

表 1 呼吸儀重要發展沿革表 (江舟峰, 2001)

年 代	發展說明
1908	SIERP 設備問世
1930s	Warburg and Barcroft 壓力式呼吸儀問世
1948	Cadwell and Langelier 提議以呼吸儀取代稀釋法測定 BOD
1951	Gelman and Heukelekian 深入探討影響 BOD 試驗的條件
1954	Lee and Oswald 比較 Warburg 及稀釋法
1955	10 th Standard Methods 首度納入壓力式呼吸儀 BOD 試驗法
1960s	Clark and Young 研發電解釋呼吸儀；Arthur 研發大體積壓差式呼吸儀
1973	Robert Shaw 研發線上呼吸儀
1985	N-CON 呼吸儀問世
1990	CES 研發氣泡式呼吸儀
1991	Spanger and Klapwijk 提出 BODst 的名詞
1995	19 th Standard Methods 首度納入累積式呼吸儀 BOD 測定法
2000	江舟峰及吳勇興研發生物潛熱呼吸儀並申請專利
2001	江舟峰及吳勇興研發瞬間動力呼吸儀並申請專利
2002	江舟峰、吳勇興及洪瑞敏研發垂直整合型呼吸儀並申請專利

一種專門的技術領域，表 1 為呼吸儀重要發展沿革，表 2 收錄 19 種世界主要產品，並加以分類以歸納出共通的操作原理，協助讀者正確了解與選用呼吸儀。就功能而言，一部完整的呼吸儀應包含下列 7 項系統單元，如圖 5 所示為本研究團隊在國內建立的氣溫控制氣泡式呼吸儀系統，其組成單元包含：

1. 樣品前處理 (pretreatment unit)；
2. 反應容器 (reaction vessel)；
3. 攪拌單元 (mixing device)；
4. 溫度控制 (temperature control)；
5. 供氧單元 (oxygen supply)；
6. 訊號偵測設備 (sensing device)；
7. 訊號接收及處理 (data processing)。

簡易的呼吸儀可能不包括前處理單元及供氧單元，如以 BOD 瓶及溶氧測量活性污泥攝氧，則只有反應容器、監測及訊號接收，並無供氧單元及訊號處理單元。另亦可依較為實用的操作原理分類，為本章後續各節所探討的重點，呼吸儀亦可進一步依操作方式分類為批次或連續式，前者應用於實驗室研究，後者應用於實廠的監控。

(一) IWA 分類方法

國際水協會 (Spanjers *et al.*, 1996) 就量測的相位、氣相與液相進流條件以相當學理的方法將呼吸儀進行系統分類，如圖 6 所示，每一種呼吸儀可以三個英文字母表示，分別說明如下：

第一個字母：代表攝氧量測的相態，氣相 G，液相 L。

第二個字母：代表氣相進流條件，進流 F (flow)，不進流

表 2 世界各國主要呼吸儀類別、操作原理及特色說明

項次	型號	操作型式	分類			特色說明
			IWA	JCY	Chiang	
P1	美國 Warburg	批次	GSS	Mano.	壓差式	壓力計，人工校正 預先曝氣，0.5-L 單槽 CO ₂ scrubber
P2	美國 Arthur	半連續	GFF	Mano.	壓差式	壓力感測器，人工校正 預先曝氣，4-L 單槽 CO ₂ scrubber
DO1	美國 Strathkelvin	批次	LSS	DO dep.	溶氧差式	單一 DO 測棒，人工校正 1 組 50 µL- 3.0 mL 6-channel microcathode meter
DO2	韓國 Yukong Q-BOD	批次	LSS	DO dep.	溶氧差式	單一 DO 測棒，人工校正 預先曝氣，1 組 300-mL
DO3	荷蘭 Manotherm RA-1000	半連續	LSF	DO dep.	溶氧差式	單一 DO 測棒，自動校正 預先曝氣，1 組 1-L
DO4	英國 Minworth	半連續	LFS	DO dep.	溶氧差式	單一 DO 測棒，自動校正 預先曝氣，1 組 10-L
DO5	比利時 ROD TOX	半連續	LSF	DO dep.	溶氧差式	單一 DO 測棒，自動校正 預先曝氣，1 組 10-L
DO6	德國 LAR	半連續	LSF	DO dep.	溶氧差式	單一 DO 測棒，自動校正 2 組 4 個 250-mL，內生及水樣
AC1	美國 Columbus ER-10	批次	GFS	O ₂ dep.	累積式	Triggering O ₂ 測棒，自動校正 連續定量曝氣，10 組 0.5-10 L
AC2	美國 Bioscience	批次	GFS	O ₂ rep.	累積式	Triggering 壓力計 電解式供氧，人工校正 8 組 1-L 反應槽，CO ₂ scrubber
AC3	德國 Sapromat	批次	GFS	O ₂ rep.	累積式	Triggering 壓力計 電解式供氧，人工校正 8 組 1-L 反應槽，CO ₂ scrubber
AC4	美國 CES AER-200	批次	GFS	O ₂ rep.	累積式	Triggering 壓力計 好氧及厭氧氣泡計數，人工校正 8 組 1-L 反應槽，CO ₂ scrubber
AC5	美國 CES OLR-300	半連續	GFF	O ₂ rep.	累積式	Triggering 氣相 O ₂ sensor 針閥供氧開數，人工校正 1 組 1-L 反應槽，CO ₂ scrubber
AC6	台灣 CYUT VD-001	批次	GSF	O ₂ rep.	累積式	Triggering 壓力計 氣泡速度差，內鍵函數校正 24 組 250-mL 反應槽，CO ₂ scrubber 動力及潛熱演算
BF1	美國 Columbus Inst. On-line	半連續	GFS	O ₂ rep.	累積式	Triggering 氣相 O ₂ sensor 生物膜 1 L 反應槽 連續定量曝氣，自動校正
BF2	美國 Bioscan N-CON	半連續	LSF	DO rep.	氧差式	生物膜 1 L 反應槽 壓力感測控制閥，自動校正
BF3	日本 CKC BOD-2000	半連續	LSF	DO dep.	氧差式	Yeast culture 生物膜 Microbe BODs (JIS K 3602) 10 mL 反應槽
BF4	美國 COSA BIOX 1000	半連續	LSF	DO dep.	氧差式	塑膠環生物膜 2 根 DO 測棒，液體循環幫浦

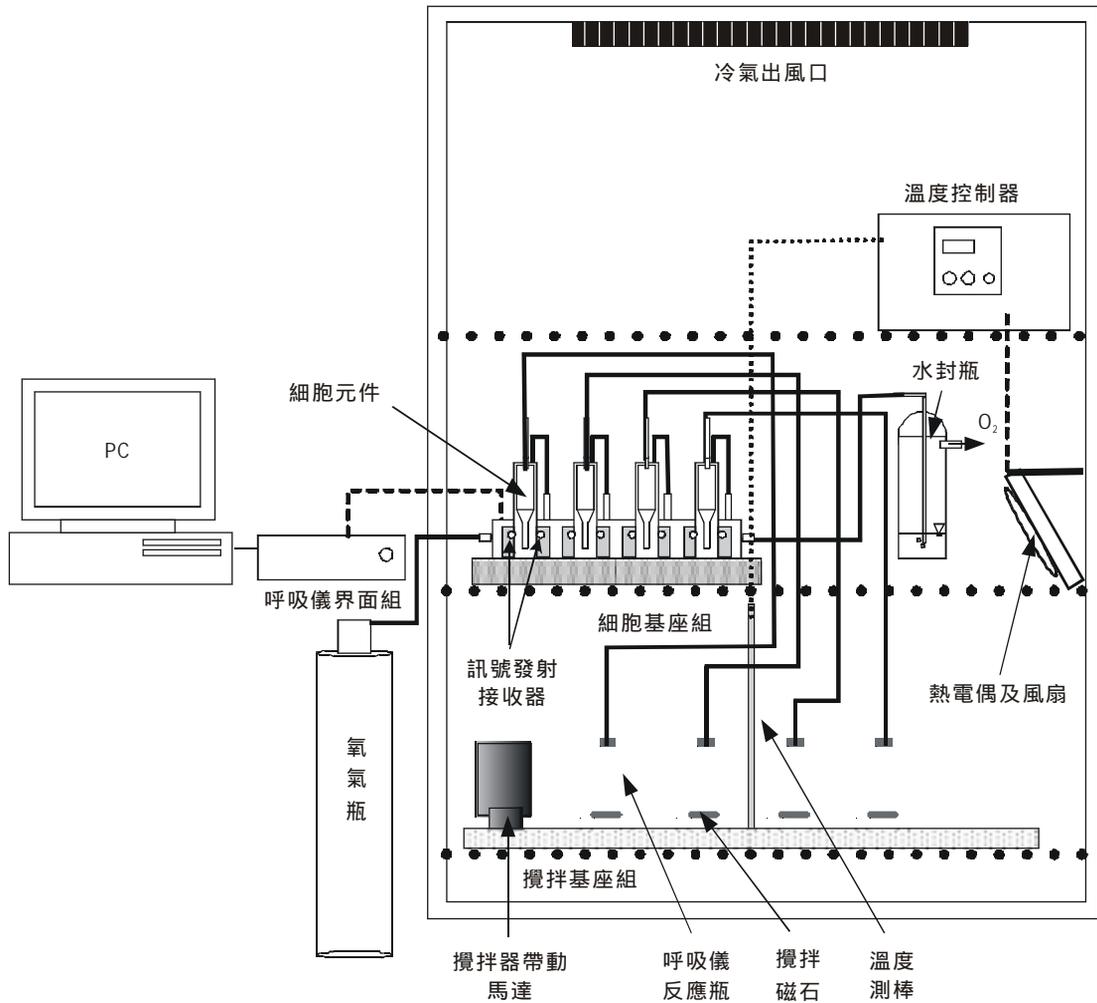


圖 5 氣泡式呼吸儀及氣控式恆溫系統主要單元配置示意圖 (洪瑞敏, 2003)

S (static)。

第三個字母：代表液相進流條件，進流 F (flow)，不進流 S (static)。

例如以 BOD 瓶及溶氧測棒量測活性污泥的比攝氧率 (SOUR)，因屬液相量測，且為批次操作，氣液相均不進流，可分類為 LSS。又如

Arthur 是美國污水處理廠用來進行多點監測的線上呼吸儀，屬半連續操作，以壓力計 (manometer) 量測攝氧量，故為氣相量測，操作時每隔 15~30 min 進出水一次，氣相不進流，可分類為 GSF；美國 CES 的氣泡式呼吸儀於氣相量測攝氧，藉氣相供氧，但為批次操作，可分類為

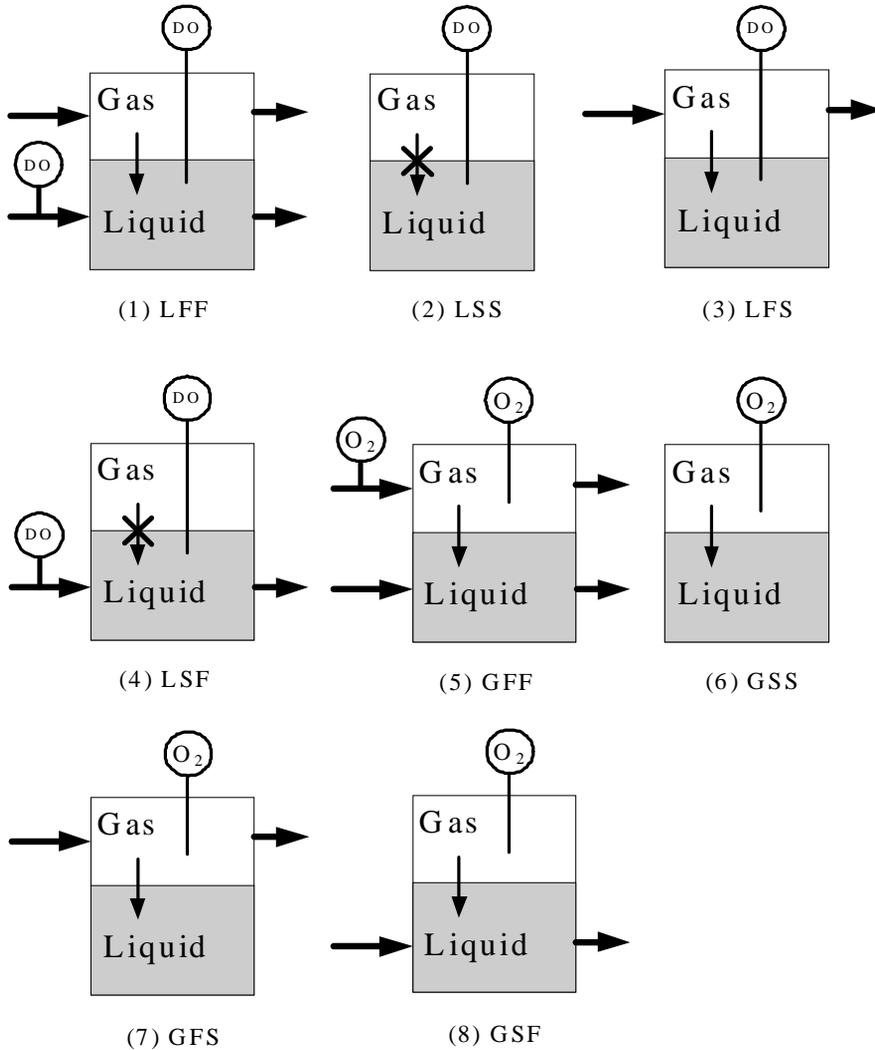


圖 6 IWA 的八種呼吸儀系統分類示意圖，任何系統可以用三個字母表達：第一字母為監測相，第二為氣相進流狀態，第三為液相進流狀態。G 表示氣相，L 表示液相，F 表示進流，S 表示不進流（Vanrolleghem, 2002）。

GFS。其他各種呼吸儀的 IWA 類別請參考表 2，在 19 種呼吸儀中，氣相量測佔 9 種，液相量測佔 10 種，有些呼吸儀反應瓶為水樣完全填滿，並無氣相，如 Manotherm、Yukon、CKC BOD-2000 等。IWA 的分類方法較不易了解其操作原理，但優點是可以系統方式推導質

量平衡方程式，量測相為液相時，DO 平衡方程式為：

$$d(V_L S_o) / dt = Q_{in} S_{o,in} - Q_{out} S_o + V_L K_L a (S_o^* - S_o) - V_L r_o \quad (4)$$

其中 S_o 為液相的溶氧濃度， S_o^* 為飽和 S_o ， $S_{o,in}$ 為進流水溶氧濃度， $K_L a$ 為氣傳係數， Q_{in} 為

進流量， Q_{out} 為出流量， r_o 為呼吸率， V_L 為液體體積；量測相為氣時， O_2 平衡方程式為：

$$d(V_G C_o) / dt = F_{in} C_{o,in} - F_{out} C_o + V_L K_L a (S_o^* - S_o) \quad (5)$$

其中 C_o 為氣相的氧氣濃度， C_o^* 為飽和 C_o ， $C_{o,in}$ 為進流水溶氧濃度， $K_L a$ 為氧傳係數， F_{in} 為進流氣體流量， F_{out} 為出流氣體流量， r_o 為呼吸率， V_G 為氣相體積。

(二) Young 分類方法

Young (1996) 將呼吸儀依操作原理分為三類：壓力計式、耗氧式及氧置換式 (oxygen replacement)。江舟峰 (2001) 將此分類改稱為：壓差式、氧差式及累積式，以便於討論其操作原理，表 2 的排列即依此原則，顯示於 19 種呼吸儀中，壓差式佔 2 種，氧差式佔 10 種，累積式佔 7 種。

1. 壓差式呼吸儀

Warburg 最古老的壓差式呼吸儀，其操作原理相當簡單，如圖 7 所示，當密閉反應容器中的基質進行好氧分解時，會產生 CO_2 ，為懸掛於反應瓶內的鹼液 (KOH) 吸收後形成負壓，造成壓力計上的壓力差 (P)，壓差越大，耗氧 (O_u) 程度越大，為直接正比關係：

$$O_u = K_p (P)$$

其中 K_p 為校正係數，單位為每單位壓差的氧氣量 (如 $mg O_2/mmaq$)。壓差式雖然相當簡易，但容易受到大氣壓力及溫度的變化干擾，Barcraft 改善了此一缺點，於壓力計出口端接上一個控制瓶，做為反應瓶的參考壓力。Arthur 是少數使用壓差式的可程控線上呼吸儀，在早期相當受歡迎，但缺點為在進行攝氧時，為避免反應過程中溶氧不足，必須將水樣預先曝

氣，如此可能造成揮發性有機物外逸，亦可能因水質特性或曝氣過度而產生氣泡干擾壓力計的讀數。

2. 氧差式呼吸儀

氧差式的操作原理如圖 8 所示，最簡單者由一反應瓶及一溶氧測棒組成，於不同反應時間讀取 DO 值，其累積攝氧量與氧差值 (DO) 成正比。

$$O_u = K_o (DO)$$

其中 K_o 為校正係數，為反應瓶有效容積。Strathkelvin 及 Yukong 均屬簡單氧差式，僅能以批次操作，其最大缺點為缺少供氧機制，僅能短時間維持好氧反應。半連續操作的氧差式呼吸儀則可改善此一缺失，於每一次進流前預先曝氣，俟溶氧降至預先設定值 ($1 mg/L$) 或達一定反應時間 ($15 \sim 30 min$) 後，即將反應容器排空再進流，如 Manotherm、Minworth、ROD TOX、LAR 均屬半連續氧差式，此類呼吸儀必須提供可信賴的溶氧測棒自動校正機制，否則測棒容易受到附著的垢膜所干擾。同時預先曝氣易產生泡沫干擾溶氧測棒，特別是含表面活性劑的工業廢水。荷蘭品牌的 Manotherm 較具特色，具有四組可自動切換針閥，每 1 分鐘切換進流及出流方向，可使用單一測棒測得進出流 DO，計算短時間的攝氧率 (r)，可藉以量測短暫 BOD 或評估毒性 (Spanjers and Klapwijk, 1991; Lukasee *et al.*, 1997)。

為於短時間內造成足夠攝氧，多種先進的呼吸儀使用各種固定生物膜 (immobilized culture)，如 Columbus on-line、Bioscan N-CON、CKC BOD-2000、COSA BIOX 1000、AMTOX 等。其中日本 CKC 用以測定短暫生化需氧量 (BOD_{st})，乃根據日本 JIS K 3602 的測定標準。AMOTX 呼吸儀則利用 *Nitrosomonas*

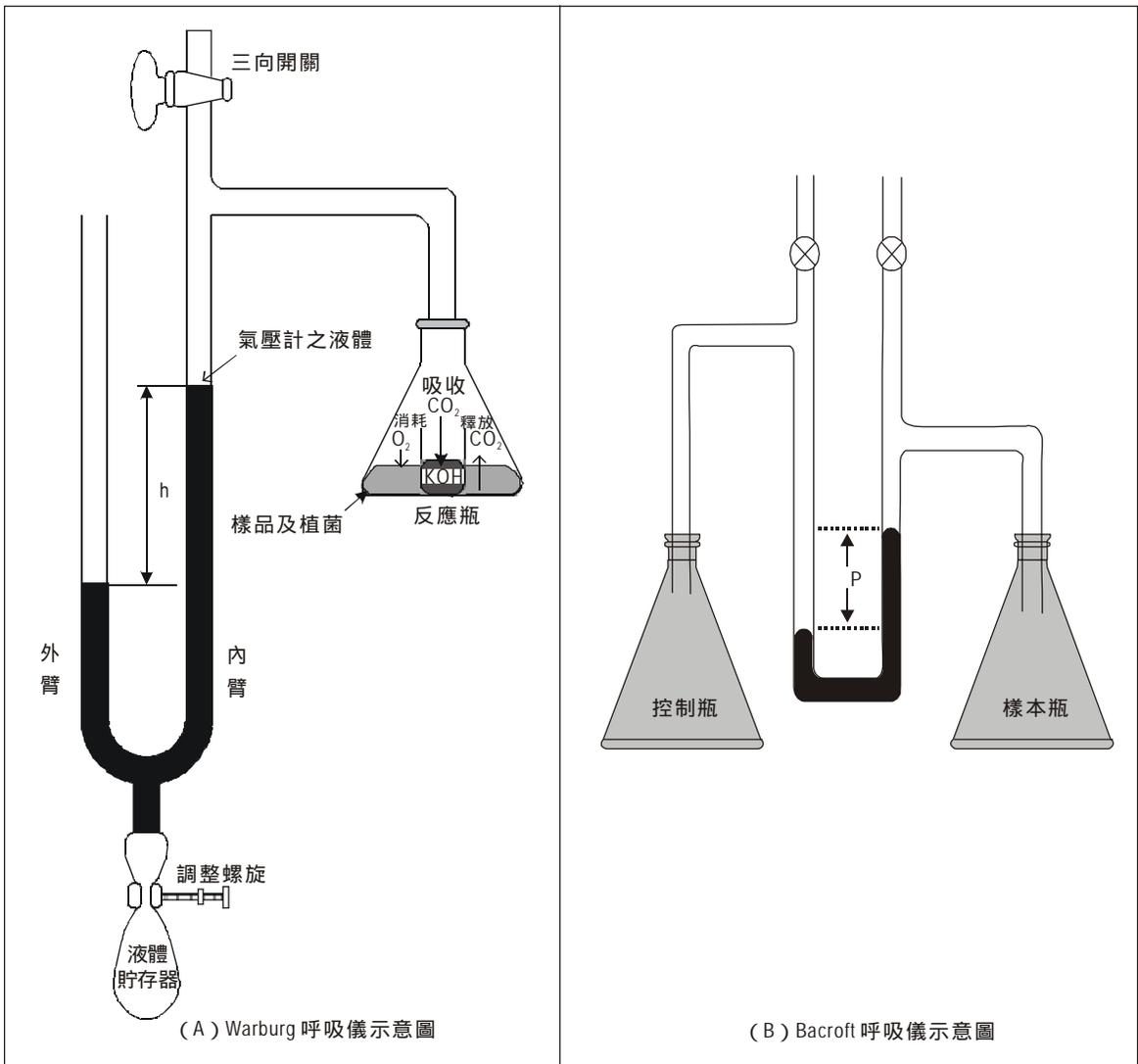


圖 7 壓差式呼吸儀示意圖：(A) Warburg；(B) Barcroft。

生物膜，量測廢水對硝化作用的抑制性。

3. 累積式呼吸儀

氧差式測定攝氧率為將溶氧濃度差 (DO)，除以反應時間 ($r = DO/T$)，而累積式呼吸儀則是量測一段時間累積需氧質量 (M)，再除以反應時間與水樣容積 ($r = M/T/V$)，其優點是可以避免溶氧測棒的測定誤差。累積式呼

吸儀最大特色是必須提供一種可以信賴的參考點，做為決定供氧的啟動機制。以電解式及氣泡式呼吸儀說明如下，如圖 9 所示，基質於反應瓶進行好氧分解，產生的 CO_2 為鹼液吸收，反應瓶內形成負壓，電解槽內的電解液下降，當液面與切換電極脫離接觸時，即開始電解供氧，直到電解液液面回升與切換電極接觸時，

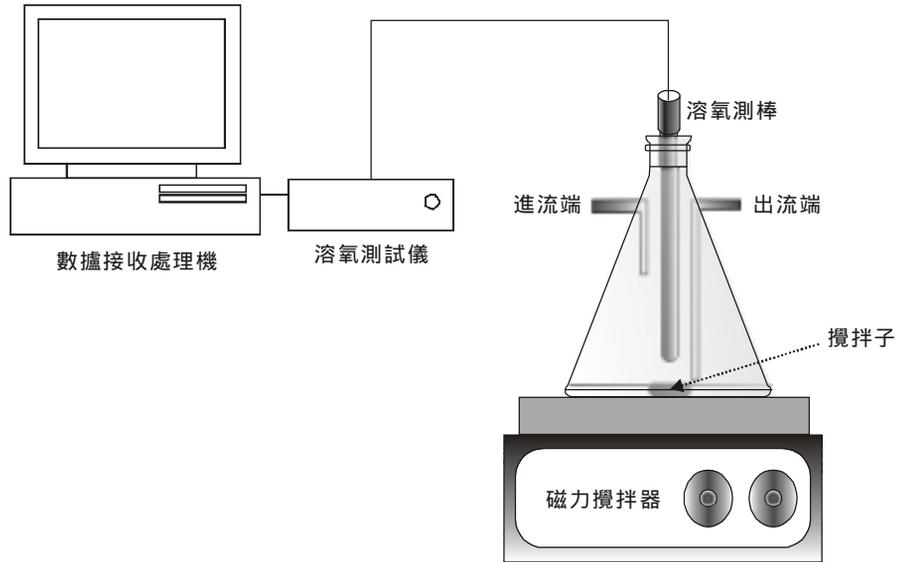


圖 8 溶氧差式呼吸儀示意圖，於批次操作時，當開始進流時，可測得初使溶氧，反應一段時間後，可測得殘餘溶氧。

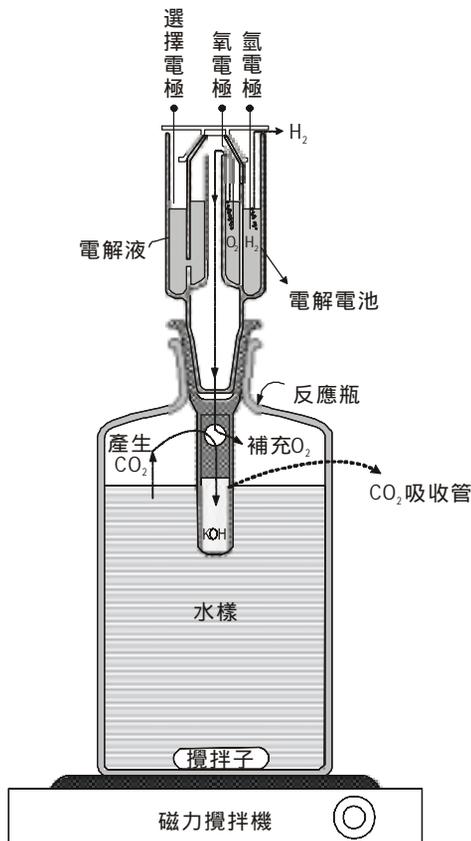


圖 9 電解式呼吸儀示意圖，注意電解槽左方之液面差如同一壓力計。



即斷電停止電解供氧，若電流量固定，供氧率為一常數（ k ），攝氧量與累積電解時間（on-time）成正比： $O_u = k \times (\text{on-time})$ 電解式呼吸儀是目前學術界評價最好的批次呼吸儀，可自動校正供氧率，如 Bioscience 及 Sapromat 等。電解式呼吸儀因使用電解槽內的壓差為供氧啟動機制，亦受溫度及大氣壓變化干擾，且操作時會產生微量氫氣，應注意通風，另電解式呼吸儀無法應用於厭氧分解。

氣泡式呼吸儀是較晚期研發成功的產品，也是一種累積式，其供氧啟動機制相當特殊，如圖 10(A) 所示，當反應瓶呈負壓時且其壓差超過一定值時，氧氣流經氣泡發生器的油性液體，在通過氣泡斷裂點時形成固定體積的氧氣泡，同時可由氣泡產生器上的光感應器偵測計數，經由校正可得每一氣泡內含有的氧氣量。氣泡式呼吸儀是目前僅知亦能測定厭氧反應的可程控呼吸儀，使用時氣泡產生器與反應瓶的接管與好氧反應時相反，如圖 10(B) 所示。氣泡式呼吸儀與電解式呼吸儀相同，使用氣壓差為供氧啟動機制，亦容易受溫度與大氣壓變動影響，但優點是可監測厭氧反應的呼吸作用，氣泡產生器的構造較電解槽簡單，操作原理亦相當簡單，價格較低，唯較不易進行校正。

呼吸儀各種監測應用

呼吸儀測定結果，可以獲得批次或半連續的攝氧及攝氧率數據，視實驗設計及目的，可亦將這些攝氧數據透過演算法，發展成各種不同的應用；最常見的實廠應用為進出流水的生化需氧量監測、活性污泥的活度監測、進流水對活性污泥的毒性等，較常採用線上監測；亦可監測工業廢水經前處理後，排入大型廢水處

理廠的相容性，或探討工業廢水的生物可分解性，做為處理單元設計的依據；學術上生物反應動力探討，多採用呼吸儀進行瞬間動力（transient kinetics）研究，以替代傳統上較為繁瑣的穩態系統（chemostat）方法；本研究團隊過去在國科會資助下，亦開發生物潛熱測定儀或稱生物熱卡計（Wu *et al.*, 2002；江舟峰及吳勇興，2002a）；Young（2000）認為 OUR vs. t 的圖譜可描述基質的降解特性，而提議一種新的呼吸儀測定應用，稱為生物指紋研究。以下要討論一些實廠較常見的應用，特別著重本研究團隊的本土研究成果。

（一）BOD 呼吸儀測定法（RBOD）

生化需氧量的標準測定方法為稀釋法，但待測樣品經稀釋後，可能稀釋廢水中的毒性物質，而影響 BOD 測值；稀釋法的測定程序相當繁瑣，且品管基準（QC criteria）相當複雜（江舟峰等人，2002b），最小偵測極限為 2 mg/L，變異係數高達 15~50%，不易進行測定，且須長達 5 天的培養期，所以呼吸儀初期的研發動機就是希望能克服這些困難，特別是將檢測時間縮短至 12~24 hrs。第 20 版美國 Standard Methods（APHA *et al.*, 1998）呼吸儀生化需氧量（RBOD）測定法（Method 5210D）僅為建議方法，尚未經廣泛驗證，建議的品管基準如下：

樣品前處理：預先曝氣 1 hr、溫度穩定至 20。

植菌攝氧比（ r_s ）：佔總攝氧量 10%。

遲滯期（lag period）：6 hr。。

反應溫度：20 ± 1.0。

GGA 標準：260 ± 30 mg/L（ $C_v = 11.5\%$, $n = 25$ 三重複）。

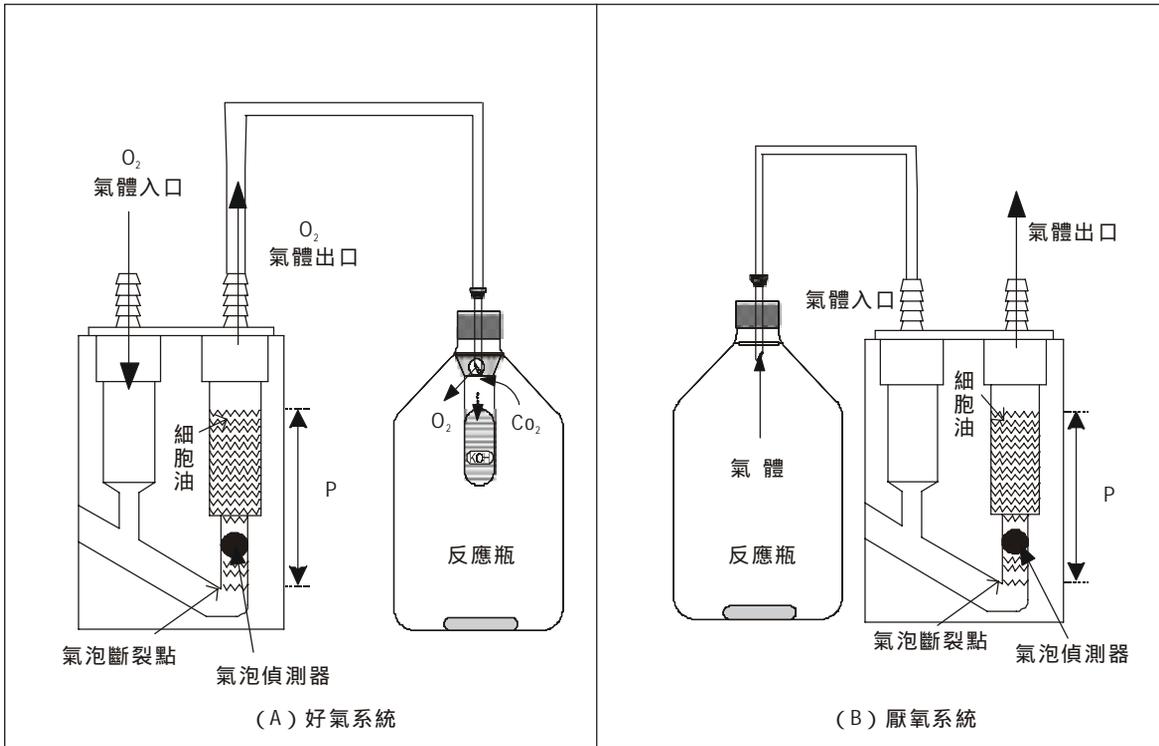


圖 10 氣泡式呼吸儀示意圖；(A) 好氧反應時反應瓶與氣泡發生器出氣端連接；(B) 厭氧反應時反應瓶與氣泡發生器進氣端連接。

待測樣品複現性： $C_v = 3\sim 5\%$ 。

但文獻中尚未能有系統闡述上述品管基準訂定的合理性，本研究團隊乃探討影響呼吸儀 BOD 測定的因素，特別是植菌方法及其校正方法(陳俊宏, 2003; 江舟峰等人, 2003a)。研究中使用 CES 氣泡式呼吸儀，結果顯示，以液體置換法 (liquid displacement method) 校正氣泡產生元件時，當置換速率為 $1.0\sim 5.0\text{ mL/min}$ 時，與利用 Bioscience 電解瓶所得的校正係數 (f 值) 相近， f 值均為 $0.0656\sim 0.0698\text{ mg-O}_2/\text{bubble}$ (20)，變異係數 C_v 為 1.13% ($n = 16$ 細胞元件 $\times 6$ 重複)，圖 11 為電解瓶校正法與液體置換法的設備示意圖。

以葡萄糖及麩胺酸 (GGA) 標準液進行 6

重複實驗，結果顯示系統啟動後 11 hr 內 RBOD 變異係數 (C_v) 高達 $10\sim 30\%$ ，主要原因可能為植菌量或活度不足或不均勻。但菌種馴化完成後，RBOD 變異即漸趨緩，直至 72 hr， C_v 值皆小於 6% 。72 hr 後可能因微生物進入內生呼吸， C_v 值上升至 10% ，至 108 hr 後降回 $6\sim 7\%$ 。顯示只要將經馴化過後的菌種做為系統的植菌來源，即可顯著改善系統的變異性。植菌校正後 $RBOD_5$ 平均值為 308 mg/L ($n = 6$)，變異係數為 6.1% ，與 Method 5210 D 的 $260 \pm 30\text{ mg/L}$ 比較，高出 18.6% ，可能與該研究 f 值比原廠建議值 ($0.050\sim 0.055\text{ mg/bubble}$) 較高有關，但該研究的測定值仍可落於 Method 5210D 建議的 95% 信賴區間 ($201\sim 319\text{ mg/L}$)。

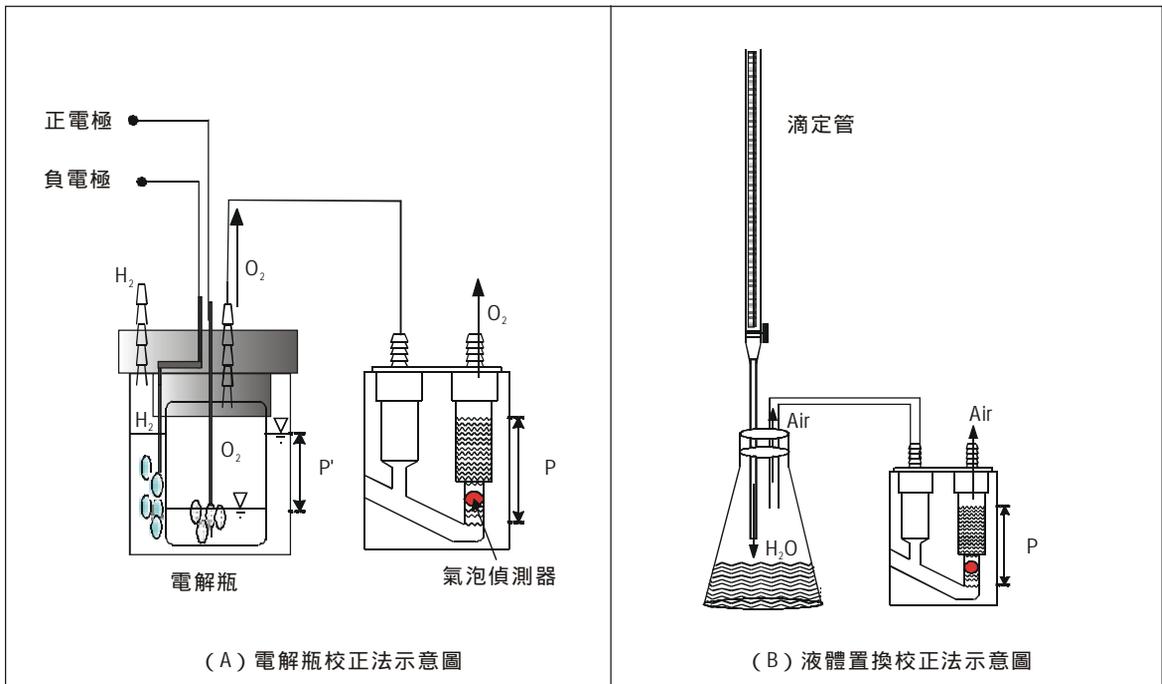


圖 11 氣泡發生器校正設備示意圖：(A) 電解瓶校正法；(B) 液體置換校正法（陳俊宏，2003）。

非生物性攝氧結果顯示 40 分鐘的累積攝氧平均為 7.8 mg/L，本研究建議應將稀釋水及植菌水於 20 ± 1.0 預先曝氣，亦可藉此穩定溫度。另為獲得變異較小的攝氧，建議植菌控制組五天累積攝氧應高於 80 mg/L，以確保反應初期即有足夠的優勢菌種，並可縮短遲滯期，同時亦可降低非生物性攝氧的正向干擾，避免過度修正樣品 RBOD₅ 低估樣品 RBOD₅。

(二) 短暫 BOD (BOD_{st})

短暫 BOD (short-term BOD) 是為了因應快速的需求而發展出來，Young and Clark (1965) 曾以提高反應溫度至 35 將試驗時間縮短至 2.5 days，或以 COD 或 TOC 來推估 BOD₅，Young (1984) 利用電解式呼吸儀測定多種生

活污水及工業廢水五天生化需氧量，稱為 EBOD (electrolytic BOD)，並與稀釋法 BOD₅ 進行線性迴歸，迴歸相關係數 (R^2) 雖達 0.83~0.98，但 EBOD 試驗仍需 5 天，無法達到快速測定的目的，且與複現性較差的稀釋法 ($C_v = 15\sim 20\%$) 迴歸並不適當。

Grady *et al.*, (1996) 建議於量測系統動力參數時，應有較高的初始基質濃度 ($S_0/X_0 > 20/1$, COD basis and $S_0 > K_s$)，才可獲得菌種對受測基質的「本質動力特性」(intrinsic kinetics)，即基質濃度要夠高，才能避免仍表現原菌源的「尚存動力特性」(extant kinetics)，並將此條件稱為「低率」(low rate)，low rate 即為 low biomass，筆者認為這個名詞容易誤導，且 20/1 的比值尚待確認其合理性。但為縮短 BOD_{st} 試

驗時間，最有效的方法是提高試驗的菌量濃度，即系統必須操作在 high rate，即要有低 S_o/X_o ，Young *et al.*, (2003) 建議進行 BOD_{st} 時應注意下列條件：

使用對受測基質完全馴化的菌種並添加足夠營養物質。

使用足夠植菌量，建議 $S_o/X_o < 0.01 \sim 0.5$ (g COD/g VSS)。

試驗時間不超過 6~10 hrs，避免植菌產生衰減攝氧。

以 OUR vs. t 圖譜確認攝氧率已降至內生呼吸率 (差值約 10%)。

若以一般活性污泥曝氣槽的操作條件推估 S_o/X_o 約為 0.05 (100/2000)，故 high rate 較符合實廠條件。本研究群認為 BOD_{st} 的研究相當重要，但前人研究結論較根據經驗值，建議以二相動力模式為基礎，推導嚴謹的理論公式，並以多種廢污水進行試驗以確認合適的操作條件。

(三) 動力分析

利用呼吸儀探討瞬間動力 (transient kinetics) 是近年來生物降解的核心研究主題 (Young, 1981; Grady *et al.*, 1989; Smets *et al.*, 1996)，目的為求解生物系統的四個 Monod 動力參數，即最大比生長速率 (μ_m , 1/d)、半速係數 (K_s , mg/L)、生長係數 (Y_g)、比衰減速率 (k_d , 1/d)，與傳統 Chemostat 穩態動力比較，呼吸儀測定法較為快速精確，無須繁瑣的採樣分析，但演算法較為複雜，目前欠缺易於操作的商業軟體，故推廣不易。

鑒於過去 Grady 研究團隊所開發的為試誤數值演算法，較為繁瑣且僅能獲得局部最佳解，本研究團隊乃自行開發全盤最佳解析演算法 (globally optimized analytical solution)，

並申請專利技術 (Wu *et al.*, 2001; 吳勇興, 2004)。本法稱為二相移動隔點演算法 (two-phase separating point-moving algorithm)，如圖 12 所示，利用呼吸儀量測得 OUR vs. O_u 二相圖譜後，先假設右邊起第 5 個點為二相分隔點 (SP)，利用本研究推導的 2 條聯立方程式求解一組動力參數，再由右至左移動 SP 計算動力參數，直至 O_u 預測與實測差值平方和的平均值 (ARE) 為最小時，即為求解的 SP 與動力參數。以葡萄糖人工水樣於 55 進行高溫菌實證，於污泥齡 10 d 批次操作時，分析其動力參數結果如下： $\mu_m = 6.37$ 1/d、 $Y_g = 0.84$ mg BOD of biomass/mg BOD of substrate、 $K_s = 82.3$ mg/L、 $k_d = 0.44$ 1/d，足以說明高溫好氧處理的高分解速率及低污泥量等特性 (吳勇興等人, 2001)。本研究團隊鑒於本演算法較為複雜，不易推廣應用至實廠，乃利用此演算法再開發動力圖解法，可以利用二相圖譜讀取 5 個特徵點 (characteristic point)，如圖 12，據以計算系統的最佳動力參數，因限於篇幅無法詳盡說明，請參閱 Wu *et al.*, (2004)。

(四) 生物潛熱

自發性高溫好氧處理 (ATAT) 是指高濃度廢水進行好氧分解時，因反應過程釋放生物熱，而不需外加其他熱能，可將系統溫度維持於 55~65。文獻指出 ATAT 的優點為過剩污泥極少，反應速率較高 (Chiang *et al.*, 2001)。本研究團隊結合可控呼吸儀及熱監控技術，嘗試自行設計生物熱卡計，於 ATAT 程序下，進行比生物潛熱 (h_b , cal/g BODr) 評估，以利工程設計的參考。本設計可分為五大部分：反應槽 (2 L)，磁力攪拌系統 (最大 1000 rpm)，氧氣測定及供氧系統 (最大 900 mg/hr)、溫度

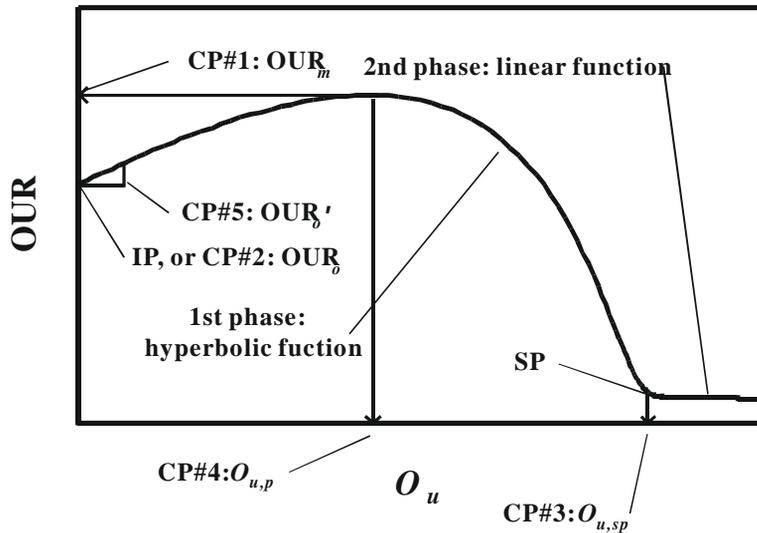


圖 12 兩相動力圖譜及圖解法，CP#1~5 表示圖譜特徵點 (Wu *et al.*, 2004)。

測棒及補溫系統 (最大 100 J/s) 及電腦數據接受系統 (最短時距 1 min)，本研究並利用熱平衡模式開發生物潛熱演算法，考量三種熱能及熱通量：補熱 (H_c, J_c)，傳導熱損 (H_r, J_r) 及生物潛熱 (H_b, J_b)，並已提出專利申請。首先進行空白實驗探討反應槽熱傳通量 (J_t)，再以葡萄糖為基質，於 55 °C 馴化高溫菌，再植入呼吸儀反應槽進行生物潛熱測定，操作條件為：容積負荷 10.0 g COD/L 及污泥齡 (SRT) 10 天。

實驗結果顯示，在 8 天試驗中，攝氧曲線呈現典型的外呼吸及內呼吸特徵，平均而言，24 hr 後 COD 去除率約達 90%，傳導熱損 (H_r) 及熱通量 (J_t) 分別為 -720 Kcal 及 -550 cal/min，生物潛熱及通量分為 4.2 Kcal 及 5.8 cal/min。但由於反應槽絕熱不佳，補溫比 (r) 高達 99.6%，比潛熱 (H_b) 測定結果為 46 Kcal/g，與理論值的 3.5 Kcal/g 高出甚多。後續研究將改善反

應槽傳導熱損，降低補熱比為 60%，使熱損降至 10.5 Kcal，此外補熱通量應降低至 10~30 J/s，以將其補熱精確度提高至 1~5 J/s (江舟峰及吳勇興，2002a)。

(五) 毒性閾值

工業廢水有時含有高濃度抑制生物分解的物質，或其分解的中間產物具有毒性，呼吸儀可以提供一種簡單有效的試驗方法，測定處理系統的背景毒性閾值，或篩檢進流水是否含過量的毒性物質，做為日常操作的重要參考。Lukasee *et al.* (1997) 提出一種適合程序控制的線上毒性評估方法，但相當複雜且成本高，不適合我國實廠日常操作監控。江舟峰等人 (2003b) 以煉焦廢水的硫氰化物 (thiocyanate) 為例，研發一種簡易的相對突增毒性閾值 (threshold limit, THL) 評估程序，其特點是利用本研究自

行開發的馴化槽餵食頻率模式：

$$S_o = S_f / f_w + S_w (1 - 1/f_w) \quad (3)$$

其中， S_f 為批次餵食基質濃度，此與實廠的進流水濃度 (S_i) 相當； S_w 為餵食前馴化槽混合液的基質濃度，此與實廠的放流水濃度 (S_e) 相當； $f_w = \text{SRT} \times f_w'$ ，其中 f_w' 為每天餵食的頻率 (#/day)。此法可獲得近乎實廠基質暴露 (S_o) 濃度及污泥齡 (SRT) 的菌種。試驗時將菌種植入呼吸儀反應瓶後，加入基質、營養液、及一定濃度的待測毒性物質，進行批次及半連續操作突增毒性試驗。使用的基質為 glucose/phenol/thiocynate：COD 濃度 1,600 mg/L、SRT 20 days、thiocynate 初始暴露濃度批次操作 12~1,800 mg/L、半連續操作 4~600 mg/L、餵食頻率 3 #/day、MLSS 3,200 mg/L。

本研究建議操作條件：(1) 需有穩定且具實廠代表性的植菌來源；(2) 採批次操作；(3) 在待測毒性濃度範圍內，使用 6 個不同濃度的測試組，其中 1 組為背景控制，其餘濃度以等比級數分布，如 0、20、40、80、160、320 mg/L；(4) 試驗延時為 4~8 hr；(5) 應具有適度的攪拌；(6) 以樣品組與對照組攝氧量的比值 (RBOD/RBODb) 為毒性效應參數，決定突增毒性閾值。結果顯示反應初期 (3hr) 對系統無明顯抑制，反應時間達 6 hr 時，抑制程度突增，12 hr 時攝氧比為 85%，此時 THL 為 250 mg/L as SCN⁻，與南部某煉焦廢水實場監測值一致 (洪瑞敏，2003)，說明本研究使用自行開發的馴化槽餵食頻率模式，可獲得與實場活性污泥毒性物質暴露濃度較接近的菌種，較可正確評估實場的毒性閾值。若採用傳統的批次餵食方式，所馴化菌種將暴露在變異較大的毒性濃度，而於毒性試驗時會低估毒性 (即高估 THL)，即本研究建議的餵食方式可提供較敏

感的菌種。

(六) 生物指紋

如上所述，呼吸儀圖譜可以展現生物系統的瞬間動力特性，其動力分析技術經過數十年研究，也日臻成熟 (Young, 1981；Grady *et al.*, 1989；Wu *et al.*, 2001)。在這個基礎上，Young and Kim (2000) 進一步提出可以利用 OUR vs. t 圖譜，作為研判系統中基質成分生物指紋特性的依據，可以評估基質的特性或了解系統的處理成效。以製藥廢水及造紙廢水為例，探討該製藥廢水 MCB 化合物是否會抑制其他基質的生物降解，實驗時將原廢水及加入不同 MCB 濃度 (10~50 mg/L) 的樣品，植入適當比例的迴流污泥 (RAS) 後，進行批次呼吸儀實驗，結果顯示即便 MCR 濃度不同，所有曲線約於 1 hr 後出現第一個共同峰點，其 OUR 約為 500 mg/L-hr；接著於 2~3 hr 時出現第二個共同峰點，OUR 降至 350~400 mg/L-hr，這兩組峰點的共同相對位置，即可做為辨識 MCR 在試驗條件下的特性指紋，亦可以說明，在試驗的 MCR 濃度範圍內，MCR 是不具抑制毒性且易於分解的。

進一步以造紙廢水探討食微比 (F/M) 對 OUR 圖譜的影響，實驗溫度為 35℃，實驗的 F/M 為 0.5~1.5，以 F/M 等於 0.5 的 OUR 圖譜稱為基礎指紋，顯現較高的 F/M 有助於分離特定化合物的峰點，避免重疊而不可辨識，但缺點是需要較長的時間才能將 OUR 降至內生呼吸的範圍 (5 mg/L-hr)。本研究群認為呼吸儀指紋圖譜正如同色層分析圖譜 (chromatogram)，於一特定時間會出現化合物的特徵峰點，而曲線下的面積與理論需氧量 (ThOD) 成正比，但影響指紋圖譜的因素，如基質濃度、F/M、 S_o/K_s 、



毒性物質、加成作用、動力參數等，均值得進一步研究才能達實用的程度。

呼吸儀選用與實驗設計

(一) 選用要點

目前商業化的呼吸儀種類相當多，選用時除價格的考量外，建議考量：

1. 依測定原理，評比各種呼吸儀的信賴度，特別是校正方法與可能的干擾，一般而言，累積式優於氧差式或壓差式，而累積式應考量供氧啟動機制的精確度，例如若採用溶氧測棒為啟動參考，可能會受到廢水中泡沫的干擾，特別是供氧方式為預曝氣者。
2. 目前大部分的呼吸儀大多為程式監控，應慎選數據接收及圖形軟體，最好是可即時監控者，即於實驗進行時可即時觀察各項累積攝氧數據圖譜者。
3. 選用軟體前應充分了解數據處理的演算法，但一般而言，供應商並非原設計者，未能正確提供此一服務，常見的問題為：儀器校正程序與攝氧率計算的演算法。

(二) 實驗設計

為確保進行呼吸儀實驗時達到一定的精確性及準確性，實驗設計時應多參考相關文獻，本研究群根據過去操作心得，提供下列注意事項：

1. 依實驗目的，實驗時應包含一組或多組管制樣品：標準組 (standard control)、植菌控制組 (seed control)、試劑空白 (reagent blank) 等，並視實際需要設計不同組合的樣品組，亦可包括重複樣品，以了解實驗的複現性。樣品組可操作於不同 SRT，操作模式可為批次或半連續式。

2. 在好氧分解時可使用乙醇 (ethanol) 為標準基質，濃度 0.183 mL/L (300 mg/L COD)，或“Standard Methods”BOD₅稀釋法的GGA。厭氧分解時可使用乙醇，濃度為 0.61 mL/L (1,000 mg/L COD) 或適當的濃度。
3. 植菌須經初步馴化 (primary acclimation) 才可能產生穩定的生化反應，但若實驗的目的是了解馴化過程則另當別論。植菌的量需適當，一般約為樣品容積 5~10%，或為總攝氧量 10~20%，以免過度干擾待測樣品。
4. 基質的初始濃度應考量實驗目的，一般而言，可使用的操作參數為：食微比 (F/M)、容積負荷 (VLR)、污泥齡、初始基質與植菌濃度比 (S_0/X_0)、初始基質與半速常數比 (S_0/K_s)。
5. 一般傳統 BOD 試驗所使用的稀釋水，在進行呼吸儀時應減少用量，只要需氧速率或氣體產生速率小於呼吸儀的最大極限即可，以免過度稀釋樣品中可能的毒性抑制因子，稀釋水主要的目的為提供營養物質。
6. 實驗最好是在添加營養物質下進行，因一般而言，實驗的目的為測得在營養物質為非限制因子時之最大可能好氧或厭氧分解速率或程度，此為呼吸儀實驗時所稱的潛能試驗 (potential test)。
7. 在某種情況下，特別是試驗污泥的好氧消化時，應避免反應受限於供氧的質傳，例如加強攪拌或勿使用太濃的污泥。另實驗時最好使用氣控式溫控設備，以利目視觀察攪拌是否正常。
8. 使用氣泡式呼吸儀時，反應瓶的溫度最好與氣泡發生器的溫度一致，否則在好氧實驗中可能因為反應瓶溫度較高而產生正壓，阻礙供氧機制；或可能造成氣體在通過氣泡產生

器時冷凝成液體，而影響實驗的準確性。

9. 使用氣泡式呼吸儀時，反應槽內的頂空最好至少於 50 mL，切勿大於 100 mL，以減少大氣壓力變化對校正係數的影響，一般而言，氣壓變化並非整體實驗誤差最重要來源。只要氣泡產生器液面控制於定點（孔口變大的切面），且出口壓力穩定，校正係數應可維持穩定，建議每 3 個月校正一次。但若攝氧率小於 10 mg/d，校正係數如下：
$$= 1.43 (v)(1 - P_i/P_o)(273/T_i)$$
， v 為頂空體積， P_i 及 T_i 為操作壓力及溫度， P_o 為 1 atm。
10. 在實驗期間，若攝氧或產氣曲線有不正常的波動（spikes），可能的原因為於低攝氧量時因溫度變化所引起，一般而言，溫度變化 2 即可能引起明顯的 spikes，但若減少反應瓶頂空，可減少此一干擾。

結論與建議

1. 以攝氧率為指標的呼吸儀，為一有效的廢水生物處理系統監測工具，值得推廣。
2. 呼吸圖譜（respirogram）的詮釋，必須以生物能量學為基礎，才有意義。
3. 依據測定原理，呼吸儀可分為三種：壓差式、氧差式、累積注入式。
4. 呼吸儀的應用可分為十種：可行性研究、活度測定、相容性測定、毒性實驗、呼吸儀 BOD（RBOD）、短暫 BOD（ BOD_{st} ）、動力研究、生物潛熱、生物指紋、線上監控等。
5. 使用呼吸儀時，應根據實驗目的，審慎進行實驗設計，設定品管基準，並事先以標準基質測試系統的精確性及準確性，已提高其信賴度。
6. 雖然呼吸儀在實驗室的應用已相當成熟，但

實廠的監測技術仍不普及，主要原因為：設備價格較貴、欠缺系統整合（system integration）、欠缺標準操作程序、欠缺數據處理演算法等。■

謝

感謝國科會自 1999 年迄今資助本研究計畫，對於國內開發呼吸儀演算法並與國際接軌有重大助益；感謝 Prof. James Young (University of Arkansas) 長期指導並多次來台演講。感謝工研院環安衛中心與朝陽科技大學於 2002 年 10 月 22~23 日共同舉辦呼吸儀國際研討會，並邀請多位國際間呼吸儀專家來台交流。

參考資料

- APHA, AWWA, WEF, "Standard Methods for the examination of water and wastewater," Method 5210D: Respirometric Method, 5-9~5-12 (1998).
- Chiang C. F., "Effects of Reactor Configuration on The Performance of Static-Bed Submerged Media Anaerobic Reactors," doctoral dissertation, Iowa State University, Ames, Iowa, USA (1988).
- Chiang C. F., Lu C. J., Sung L. K., and Wu Y. S., "Full-Scale Evaluation of Heat Balance for Autothermal Thermophilic Aerobic Treatment of Food Processing Wastewater," *Water Science and Technology*, 43, 251~258 (2001).
- Grady C. L. P., Jr. and Lim H. C., "Biological Wastewater Treatment Theory and Applications," Marcel Dekker, Inc. New York (1980).
- Grady C. P. L. Jr., Dang J. S., Harvey D. M., Jobbagy



- A., and Wang X. L., " Determination of Biodegradation Kinetics Through Use of Electrolytic Respirometry, " *Water Science and Technology*, 21, 957~968 (1989).
- Grady C. P. L. Jr., Smets B. F., and Barbeau D. S., " Variability in Kinetic Parameter Estimates: A Review of Possible Causes and A Proposed Terminology, " *Water Research*, 30, 742~748 (1996).
- LeBlanc P. J., " Review of Rapid BOD Test Methods, " *Journal of Water Pollution Control Fed.*, 46, 2202 (1974).
- Lukassee L. J. S., Keesman K. J., and van Straten G., " Estimation of BODst Respiration Rate and Kinetics of Activated Sludges, " *Water Research*, 31, 2278 (1997).
- McCarty P. L., " Energetics and Bacterial Growth, " Presented at the 5th Rudolf Research Conference, Rutgers-the State University, New Brunswick, New Brunswick, New Jersey (1969).
- McKinney R. E., " Microbiology for Sanitary Engineers, " McGraw-Hill, New York (1962).
- Rittmann B. E., Bae W., Namkung E. and Lu, C. J., " A Critical Evaluation of Microbial Product Formation in Biological Process, " *Water Science and Technology*, 19, 517~528 (1987).
- Smets B. F., Jobbagy A., Cowan R. M., and Grady, C. P. L., Jr., " Evaluation of Respirometric Data: Identification of Features That Preclude Data Fitting with Existing Kinetic Expressions, " *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 33, 88~99 (1996).
- Spanjers H. and Klapwijk A., " Continuous Estimation of Short-Term Oxygen Demand from Respiration on Measurements, " *Water Science and Technology*, 24, 29 (1991).
- Spanjers H., Vanrolleghem P., Olsson G., and Dold P., " Respirometry in Control of The Activated Sludge Processes, " *Water Science and Technology*, 34, 117~126 (1996).
- Vanrolleghem P. A., " Principles of Respirometry in Activated Sludge Wastewater Treatment, " Presented at the Workshop of Recent Development in Respirometry for Wastewater Treatment Plant Monitoring and Control, Taiwan (2002).
- Wu Y. S., Chiang C. F., and Lu C. J., " Development of A Novel Algorithm of Kinetic Model for Microbial Systems, " 2nd World Water Congress, International Water Association, Berlin, Germany (2001).
- Wu Y. S., Chiang C. F., Lu C. J., and Hong J. M., " Error Analysis in Determining the Biological Heat Potential of an ATAT System, " Presented at the 27th Wastewater Treatment Technology Conference, Chinese Environmental Engineering Institute, Taipei (2002).
- Wu Y. S., Chiang C. F. and Lu C. J., " Respirometric Evaluation by Graphical Analysis for Microbial Systems, " *Environmental Monitoring and Assessment*, 92, 137~152 (2004).
- Young J. C., " Specific Oxygen Demand as an Operating Parameter for Activated Sludge Process, " *Water Science and Technology*, 13, 397~403(1981).
- Young J. C., " Waste Strength and Water Pollution

Parameters," in Water Analysis, Vo. III, Academic Press (1984).

Young J. C., " Fundamentals of Respirometry: Instrument Types and Basis of Operation, "51st Purdue Industrial Waste Conference Proceedings, 441~451(1996).

Young J. C. and Kim I. S., " Using Oxygen Uptake Rate to Fingerprint Activated Sludge Processes, " Presented at Kwangju Institute of Science and Technology, Kwangju, Korea (2000).

Young J. C., Chiang C. F., and Kim I. S., " Evaluation of Short-Term BOD Methods, " Presented at WEFTC 2003, Los Angeles (2003).

江舟峰, 「呼吸儀在廢水監控技術的理論與應用」, 簡報資料, 朝陽科技大學環境工程與管理系, 台中縣 (2001)。

江舟峰、吳勇興, 「呼吸儀在生物潛熱分析上的應用」, 廢水處理程序監控技術研討會, 經濟部技術處及工研院環安衛中心, 台北 (2002a)。

江舟峰、吳勇興、紀子文, 「以稀釋法測定生化需氧量的品管基準及最新發展趨勢」, 朝陽學報, 第七期, 247~259 (2002b)。

江舟峰、陳俊宏、洪瑞敏、吳勇興, 「五天生化需氧量 (RBOD₅) 呼吸儀測定方法研究」, 2003 年環境分析化學研討會, 中華民國環境分析化學學會, 中壢 (2003a)。

江舟峰、洪瑞敏、陳俊宏、吳勇興, 「建立煉焦廢水活性污泥系統之實廠突增毒性閾值」, 2003 產業環保工程實務研討會, 354~371, 經濟部工業局, 台北 (2003b)。

吳勇興、江舟峰、盧至人, 「呼吸儀於反應動力學的應用 - 以高溫好氧廢水處理為例」, 第 26 屆廢水處理技術研討會, 中華

民國環境工程學會 (2001)。

吳勇興, 「自發性高溫好氧處理程序之研究: 系統參數測定演算法之開發」, 博士論文, 國立中興大學環境工程系, 台中市 (2004)。

洪瑞敏, 「活性污泥之呼吸儀毒性試驗研究」, 碩士論文, 朝陽科技大學環境與管理系, 台中縣 (2003)。

陳俊宏, 「生化需氧量呼吸儀測訂法的研究」, 碩士論文, 朝陽科技大學環境工程與管理系, 台中縣 (2003)。

【作者簡介】

江舟峰

現職: 中國醫藥大學風險管理學系副教授兼主任

學歷: 美國 Iowa State University 環境工程博士

經歷: 朝陽科技大學環境工程與管理系副教授兼主任、億德環保科技公司總經理

專長: 環境規劃與管理、環境系統分析、環境風險控制

吳勇興

現職: 財團法人中興工程顧問社環境工程研究中心

學歷: 淡江大學化學工程研究所碩士、國立中興大學環境工程研究所博士

經歷: 財團法人製藥技術開發中心中藥研究組助理研究員

專長: 系統分析、系統診斷、生物處理程序、薄膜分離程序

洪瑞敏

現職: 中興大學環境工程學系暨研究所博士班

學歷: 朝陽科技大學環境管理系學士、朝陽科技大學環工管理與工程系碩士

專長: 廢水生物處理、廢棄物資源化處理