

# 生物技術工程在工業污染防治上的應用

邱應志・陳秋楊

## 前言

由於化學工業製造技術的進步，大量生產方式促成了現代的物質文明，却也同時將製造過程所產生的廢水、廢氣、廢物等大量排入自然界中，以致形成今日嚴重的環境污染問題。利用生物原理處理廢棄污染物本是大自然自淨作用中之一環，相較於物理或化學處理方法有其經濟上的優勢，因此被廣泛地應用於工業污染防治上。生物處理與應用微生物工業並不完全相同，因其不使用單一純化菌種的微生物，而是對存於自然界中的混合菌種加以繁殖利用。以好氧性生物處理法為例，細菌、真菌、原生動物、藻類、袋形動物及節肢動物等皆參與淨化作用（吳錦等，1992）。有關生物處理法的原理、環境控制因子及其在工業污染防治上的應用，將分別介紹於下列各節，希能提供利用為愈來愈嚴格的环境品質要求所需之重要技術。

## 生物處理法的原理

生物處理原理主要是利用微生物將污染物中的有機質加以分解代謝，而達到減毒與淨化的目的。由污染物與微生物基質利用關係，生物處理法的原理可分成下列各項重要反應。

### (一)初級利用(primary utilization)

污染物中的有機質在此作為微生物的初級基質，提供微生物生長代謝所需的養分和能量。圖1為微生物好氧性代謝和厭氧性代謝過程的比較。有機

物經微生物好氧性代謝後，部分變成二氧化碳、水、氨（或硝酸鹽）等最終產物，部分則合成微生物新菌體。有機物若經微生物厭氧性代謝，部分有機物先轉換成乙醇、有機酸後再進一步生物分解成二氧化碳、水、硫化氫、氮、甲烷等最終產物，而部分有機物則用於合成微生物新菌體（陳國誠，1992）。有機物在厭氧代謝中合成微生物菌體的比率約為在好氧代謝中的五分之一，微生物初級利用途徑為生物處理法最主要的反應機制。

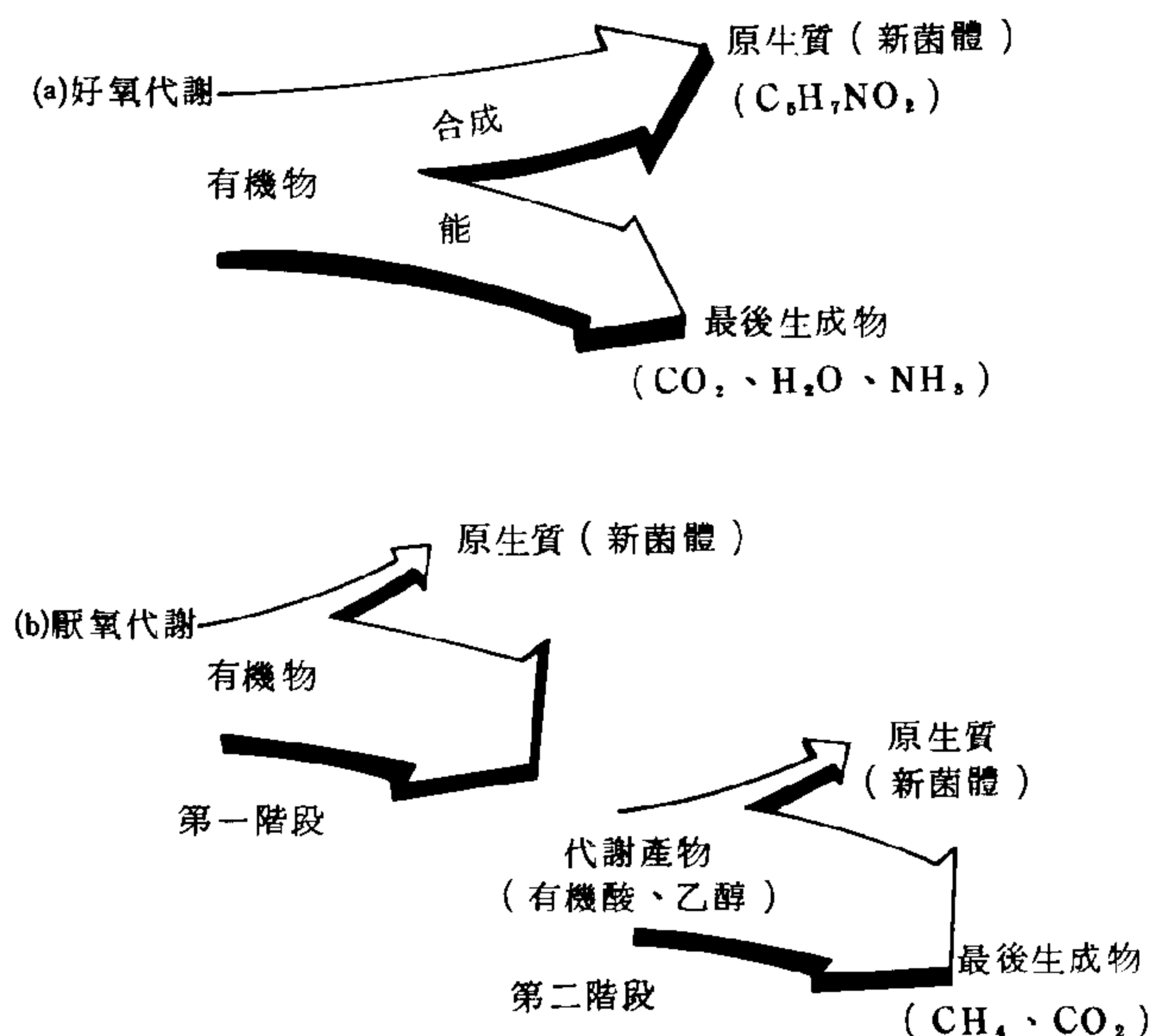


圖1 微生物代謝過程示意



## (二)次級利用(secondary utilization)

污染物中某些有機質的濃度有時甚低而不足以提供為微生物生長代謝所需的初級基質，在此情況下，若有其他有機物可作為微生物的初級基質，至於低濃度的有機質則可以次級基質亦被微生物代謝分解，此一方式即稱為次級利用。次級基質並不必須與初級基質具有相同的酵素反應途徑，但必須同為微生物能將其生物轉化的物質 (Bouwer, 1992)。

## (三)共同代謝(cometabolism)

某些有機性污染物雖能被生物轉化，但並沒有特定微生物能將其利用為能源或碳源。此時，若微生物代謝某一初級基質所產生的酵素能與其反應而

帶動其轉化，此過程稱之為共同代謝 (Bouwer, 1992)。圖2顯示共同代謝的一個例子，甲烷氧化菌在氧化甲烷過程中所產生的甲烷單氧化酶 (methane monooxygenase, MMO) 即可同時分解芳香族化合物、環脂化合物與雜環化合物等非生長性基質化合物，圖中所示為對三氯乙烯 (trichloroethylene, TCE) 之分解過程 (McFarland, et al., 1992)。

實際上，分辨代謝反應的方式是困難的，且並非極端重要，重要的是瞭解到當微生物不能從有機污染物轉化過程中獲得足夠能源或碳源時，添加一適當的初級基質於生物處理系統，則可維持微生物族群良好的生長和代謝污染物的作用，這一現象目前已逐漸被實用工程師所認同而應用於工業污染防治實務。

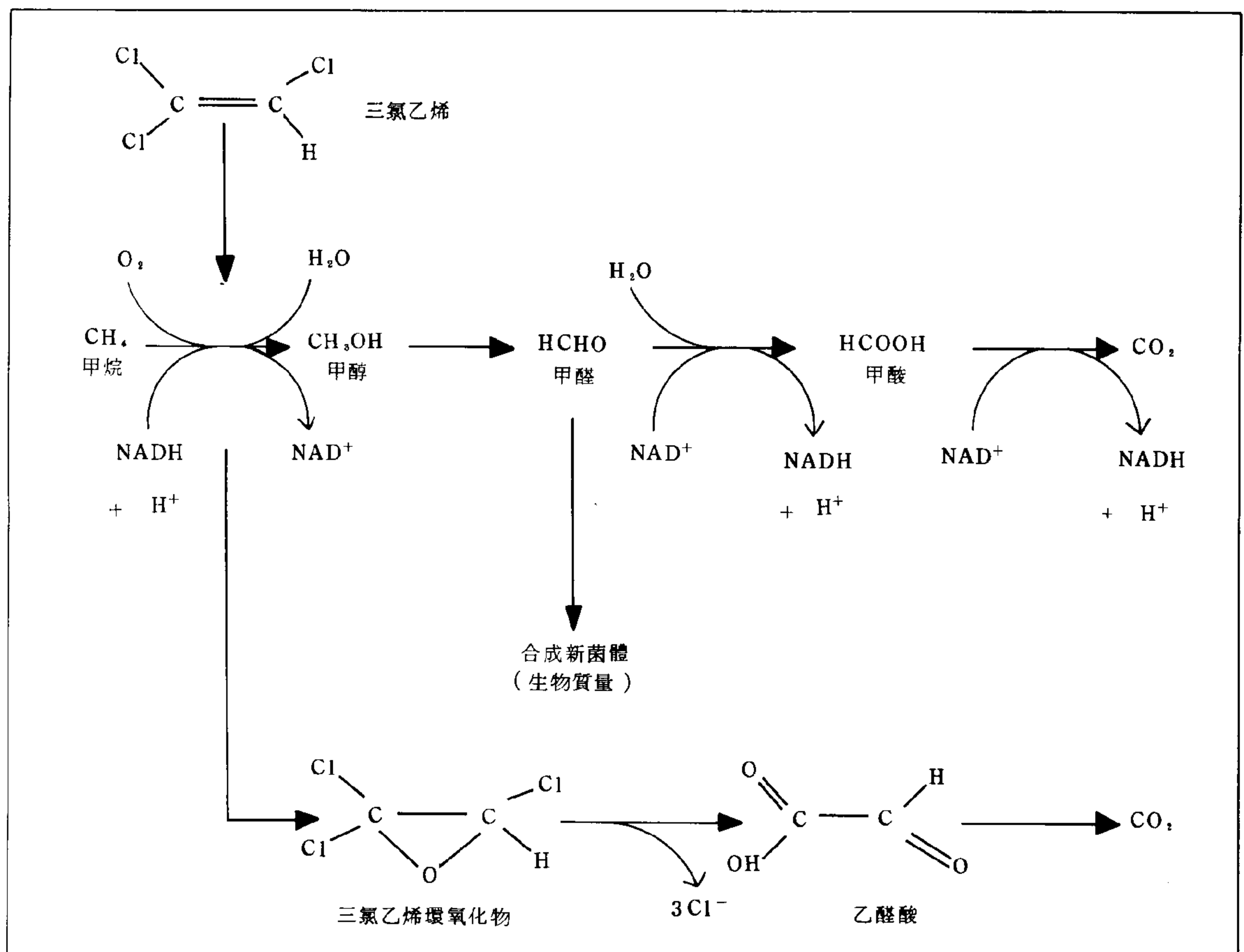


圖2 甲烷氧化菌與三氯乙烯共同代謝過程



## 生物處理環境的控制

生物處理技術應用的成功與否，環境因子的控制是不可或缺的。微生物只有處於最佳的環境條件下，才能有最佳的處理效率。下面將就基質、微量營養物、溫度、酸鹼度、馴化程度等對生物處理效果的影響作一分析。

### (一)基質

基質是維持微生物生長代謝所必須的物質，當其量不足時，對微生物族群生物質量的維持立刻產生不利的影響。微生物本身亦會老化、代謝、分解，若生長的速率小於分解代謝的速率時，生物質量將因洗出作用（washout）而逐漸減少，生物活性亦隨之降低，最後導致處理效率低落、甚至整個生物處理系統的失效。因此，良好的微生物生長必須維持處理系統內適當的有機物負荷。

### (二)微量營養物

一完整的代謝過程除了需要足夠的基質外，微量營養物亦不可或缺。氮和磷常是生物處理系統中不足的重要元素，故必須外加調整。而以往對鈷、鐵和鎳等微量金屬的忽略，使得厭氧處理法的應用至少延後了十年以上（Speece, 1983）。這些微量營養物在低濃度時能激起微生物的活性，但在高濃度時則可能對微生物產生毒性。表1列出不同微

量營養物濃度對厭氧菌可能產生的影響，包括最低生長濃度、激起活性濃度、中度抑制濃度和強烈抑制濃度等。

### (三)溫度

溫度的變化直接影響微生物新陳代謝的速率。每一種微生物都有其最適生長的溫度，藉此可分成嗜冷性（psychrophilic,  $< 20^{\circ}\text{C}$ ）、嗜溫性（mesophilic,  $20 \sim 45^{\circ}\text{C}$ ）和嗜熱性（thermophilic,  $> 45^{\circ}\text{C}$ ）（Gaudy & Gaudy, 1980）反應系統的溫度對溶氧的濃度和毒性物質的分解速率亦會產生顯著的變化，而間接影響微生物的生長和活性。

### (四)酸鹼度(pH)

反應系統的酸鹼度對微生物的生長和活性均有影響。一般 pH 範圍若在 5.0 ~ 9.0 之間，不會對微生物有直接而明顯的影響。另一方面，pH 與許多毒性物質的解離度有關，因而對微生物產生重要的影響。

### (五)馴化和毒性

不同物質對生物處理系統的毒性不祇取決於該物質濃度的高低，更決定於此一處理系統對該物質的馴化程度。同一濃度的化合物最初或對某生物族群具有毒性，但經過一段時間的馴化後，可能變成

表1 微量營養物濃度對生物生長之影響

| 化合物                                   | 最低生長濃度<br>(mg / L) | 激起活性濃度<br>(mg / L) | 中度抑制濃度<br>(mg / L) | 強烈抑制濃度<br>(mg / L) |
|---------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 鈉 ( $\text{Na}^+$ )                   | -                  | 100 - 200          | 3500-5500          | 8,000              |
| 鉀 ( $\text{K}^+$ )                    | -                  | 200 - 400          | 2500-4500          | 12,000             |
| 鈣 ( $\text{Ca}^{+2}$ )                | 30                 | 100 - 200          | 2500-4500          | 8,000              |
| 鎂 ( $\text{Mg}^{+2}$ )                | 3                  | 75 - 150           | 1000-1500          | 3,000              |
| 氨氮 ( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ )     | 70                 | 50 - 200           | 1500-3000          | $> 3,000$          |
| 磷酸塩 ( $\text{PO}_4^{+3} - \text{P}$ ) | 0.1                | -                  | -                  | -                  |
| 鐵 ( $\text{Fe}$ )                     | 0.5                | -                  | -                  | -                  |
| 鈷 ( $\text{Co}$ )                     | 0.05               | -                  | -                  | -                  |
| 鎳 ( $\text{Ni}^{+2}$ )                | $< 0.01$           | -                  | -                  | 250                |
| 硫 ( $\text{S}^{-2}$ )                 | 4                  | -                  | -                  | 600                |



為該族群可接受的濃度。據實驗顯示，氯仿濃度  $0.5 \text{ mg/L}$  時能抑制一未經馴化的甲烷生成菌，但該族群經馴化後能忍受氯仿濃度高至  $15 \text{ mg/L}$  (Young & Speece, 1986)，由此可見微生物對污染物質馴化程度的重要。

## (六)其他因子

影響生物處理法的因子還有反應系統內的濁度、鹽度、流體動性等，微生物只有在最適合的環境條件下才能在處理系統中維持足量的濃度，以有效率地淨化污染物質。

## 工業污染防治應用

### (一)工業廢水處理

一般工業廢水中含有多量的有機物，因此非常適合提供為微生物的生長基質。廢水中的有機物經生物處理法後，部分轉變成氣體（如  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ ）逸散至大氣中，部分則轉化為污泥自廢水中分離以待進一步處置。有些製造業如纖維、製革、紙漿、電子等，因在製程中大量使用化學藥品、人工合成添加劑等，以致廢水中含有許多重金屬或難以生物分解的有機物。這些廢水因對一般生物處理系統中的微生物具有毒性，所以並不適宜直接排入生物處理系統，而必須採用其他物化處理方法加以前處理，或將微生物加以馴化後再進行工業廢水處理（陳秋楊，1990）。

### (二)工業廢水毒性檢定

為避免毒性物質進入環境水域或生物處理系統後可能造成難以挽救的傷害，有必要先行檢定工業廢水的毒性。依照不同的目的而有不同的生物檢定方法，目前最常用於工業廢水的毒性檢定有發光細菌毒性（Microtox）和厭氧毒性檢定（anaerobic toxicity assay, ATA）兩種方法。

Microtox 法是由 Beckman Instruments, Inc. 所發展的一種標準檢定方法，用於測定污染物質的微生物毒性。其檢測原理乃是觀察在某特定時段內，發光細菌的螢光強度減少 50% 時毒性物質的相對濃度（Blum, 1989）。

ATA 法是由生化甲烷產能試驗（biochem-

ical methane potential, BMP）改良而來，乃用於測定某化合物在厭氧狀況下對未馴化甲烷生成菌的可能毒性，其毒性表示則以產氣率減少 50% 時毒性物質的相對濃度。但亦可採用馴化過的甲烷生成菌，以作為高濃度毒性物質的處理可行性研究（Chiu, 1993）。

### (三)工業廢水毒性減除

廢水中所含毒性物質對已馴化過的微生物將不再具有不能忍受的毒性，因而毒性物質成為微生物可分解代謝的物質。即以常見的電子工業所使用溶劑三氯乙烯（TCE）為例，厭氧菌若經長時間的馴化後，在添加乙酸或丙酸為初級基質的情況下，其去除 TCE 效率可分別達到 26 和  $11 \text{ mg/gVSS-day}$ （邱應志，1993）。毒性物質減除毒性的難易取決於微生物的種類及其所處的環境條件，以鹵化有機物而言，含鹵素較多（三個以上）的化合物很容易在厭氧環境下進行脫鹵作用；但含兩個鹵素以下的化合物則在好氧環境下較易分解。因此，為避免含高鹵素化合物在厭氧生物處理後造成低鹵素化合物的累積，而造成生物處理系統的失效，新發展的厭氧/好氧系列式操作（sequential anaerobic/aerobic operation）已在積極實驗研究階段（Bouwer, 1992）。

### (四)工業污染場地整治

工業原料或產品在運輸或貯存的過程中，常因意外洩漏而造成嚴重的環境污染。一九八九年二月發生的阿拉斯加運油船漏油案即是顯著實例，其他如地下貯槽破裂或油罐車翻覆所造成土壤和地下水的污染亦時有所聞，必須進行現場復育整治工作。生物復育整治的基本原理與工業廢水的生物處理並無不同，僅是應用技術的改變而已。以阿拉斯加漏油案為例，海岸油污的清除即是以洒佈高養分肥料以加速自然存在現地的微生物對油污的分解能力，而使海岸在二年後大約回復至原來的景觀（Nichols, 1992）。至於地下水污染的復育整治，則將遭受污染的地下水抽出而加以就地處理或運送至附近的污水處理廠加以處理。此外，亦可將適合菌種加壓灌入地下含水層並添加微生物所需的基質和微量營養物，直接在地下含水層內將污染地下水加以淨化（Bouwer, 1992）。



## 結語

微生物的生長與繁殖需要適宜的環境條件，因此，若能控制對微生物有利的環境條件，則對於減除工業廢棄物中的毒性或去除其所含有害環境的污

染物質，生物技術將可提供為經濟可行的應用。近年，在生物技術的積極發展，使得生物處理系統發揮更大的處理功能，另一方面生物工程在生化反應器上的知識與經驗，也可作為生物處理系統的改進與操作控制上的應用，以提升其處理效率。 ■

## 參考資料

1. 吳錦、劉洪岐、吳淑岱，「環境微生物」，科技圖書，第3～5頁（1992）。
2. 邱應志，「厭氧處理氯化脂肪族化合物之可行性分析」，第十八屆廢水處理技術研討會論文集，第13～23頁（1993）。
3. 陳秋楊，「生物處理法在工業廢水處理之應用」，工業污染防治，第34期，第87～99頁（1990）。
4. 陳國誠，「廢水生物處理學」，茂昌圖書，第121～168頁（1992）。
5. Blum, D. J. W., "Chemical Toxicity to Environmental Bacteria: Quantitative Structure Activity Relationships and Interspecies Correlation and Comparisons", Ph.D. Dissertation, Drexel University, Pennsylvania, Mar. 1989.
6. Bouwer, E. J., "Bioremediation of Organic Contaminants in the Subsurface", in Environmental Microbiology, R. Mitchell, Wiley-Liss Inc., 287-318, 1992.
7. Chiu, Ying-Chih, "The Fate of Chlorinated Aliphatics in Anaerobic Treatment Under Transient Loading Conditions", Ph.D. Dissertation, Department of Environmental and Water Resource Engineering, Vanderbilt University, Tennessee (1993).
8. Gaudy, A.F. and Gaudy, E.F., "Microbiology for Environmental Scientists and Engineers", McGraw Hill Inc., 1980.
9. McFarland, M. J., Vogel, C.M., and Spain, J.C., "Methanotrophic Cometabolism of Trichloroethylene (TCE) in a Two Stage Bioreactor System", Water Res., 26, 2, 259-265, 1992.
10. Nichols, A.B., "Bioremediation: Potentials and Pitfalls", Water Environ. Technol., 4, 2, 52-56, 1992.
11. Speece, R.E., "Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewater Treatment." Environ. Sci. Technol., 17, 9, 416A - 427A, 1983.
12. Yang, J. and Speece, R.E., "The Effects of Chloroform Toxicity on Methane Fermentation.", Wat. Res., 20, 10, 1273-1279, 1986.

（邱先生現任國立宜蘭農工專校環境工程科副教授）

（陳先生現任國立中興大學環境工程學系教授）