

生物處理法在工業廢水處理之應用

陳秋陽 * 林景行 **

一、前 言

過去幾年來，生物處理法已經被發展成為一種極具經濟效益的廢水處理方法，而用以解決變化多端的工業廢水問題。在實際應用上，必須考慮到工業廢水中所含污染物是否能被生物分解，或者能夠轉變為生物可利用的物質。由於可被生物處理的廢水成分已經可由許多研究成果中加以確定，因此，最適當的生物處理程序就可以加以選擇和決定。不同的生物處理法在細節上有許多不同，例如電子接受者的特性（好氧、無氧或厭氧）、生物基質的型態（懸浮生長或附著生長）、水力特性（栓塞流或完全混合流）等等。在選擇不同的處理程序時，主要是基於廢水的特性和處理的目標而決定。

二、影響處理程序選擇的因素

影響生物處理程序選擇的主要因子是原廢水的特性與廢水處理所欲達到的目的或目標，其他如氣候狀況，處理廠位置、土地限制等條件也會影響處理程序的選擇，但在本文中並不加以討論。

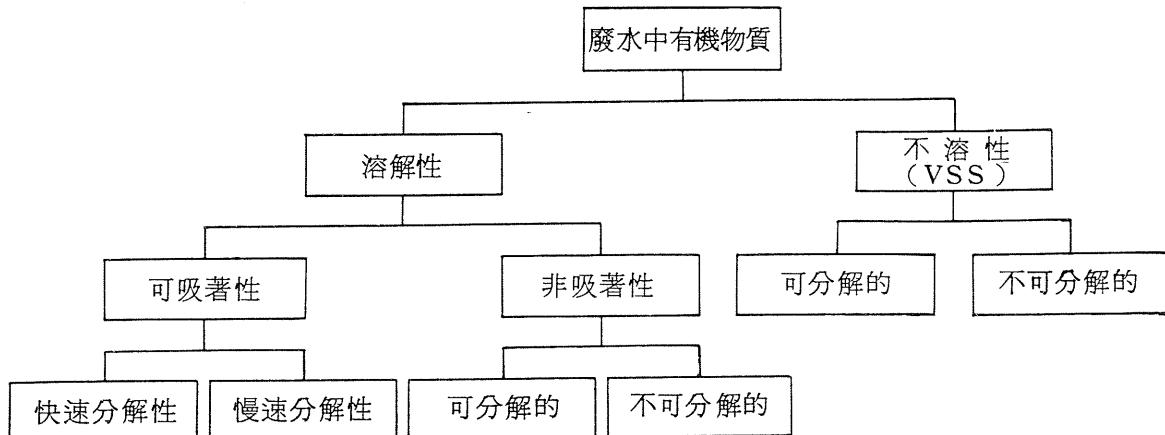
(一)廢水的特性

為了便於不同處理程序的選擇，首先將有機物質根據生物處理的難易分成幾個不同的部分，一個可行的有機物質分類法如圖1所示。

不溶性有機物質在生物處理的過程中較容易被去除，因為它們易被生物基質網除，而經由生物分解或者物理方式由廢水中分離出來。溶解性有機物質一般較不容易被去除，因為這部分的有機物質有些並不能很快的被生物所利用。雖然如此，儘管有部分溶解性有機物質的生物分解速率很慢，但是却能被生物基質所吸著而去除，因此相對的仍屬容易被去除的有機物質。不能被吸著的溶解性有機物質，其中有部分可以靠細胞外酵素的活性作用而分解，其他不能被生物分解的部分，將會隨著放流水排出。

*國立中興大學環境工程學系教授

**國立中興大學土木工程研究所研究生



圖一 廢水中有機物質組成之特性分類

其他的廢水特性，諸如有機物的濃度、營養物質的含量、毒性物質、或者抑制性物質等，均與程序的選擇有關。

(二)處理的目的

廢水處理的目的在處理程序選擇上，亦扮演非常重要的角色。生物處理系統主要的處理目的乃在去除廢水中可被生物分解的有機物質，以達環保單位對放流水管制的要求程度，不同的處理程序對有機物質的去除可以達到不同的要求標準。其他的處理目的尚包括營養物質的去除、廢水毒性的減低、及非分解性有機物質的去除。

三、可行的生物處理程序

生物處理的基本原理在利用有機污染物質提供做為微生物生長和維持生命所需來源，可用下列簡單的式子來表示：

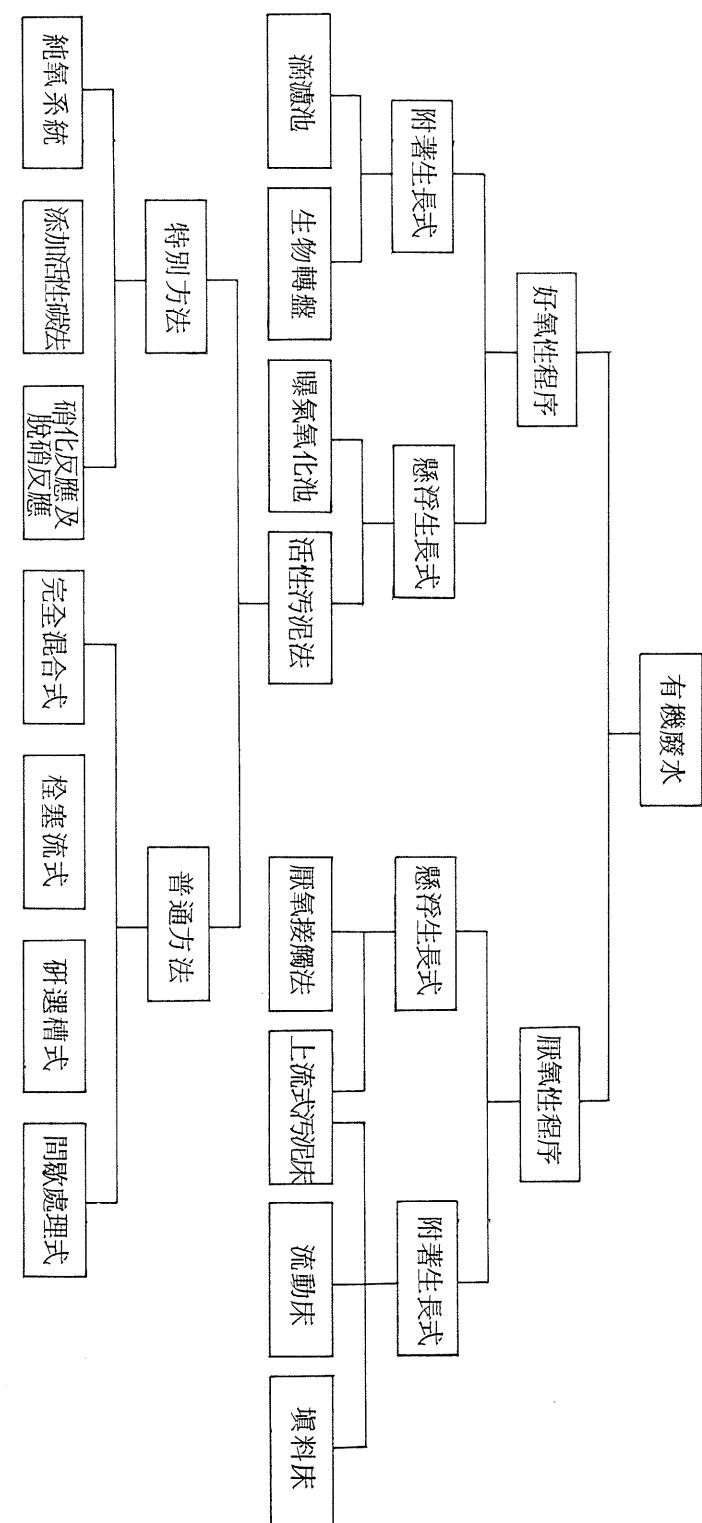
生物基質

有機物質 + 營養物質 + 電子接受者 → 新的生物基質 + 最終產物 + 能量

生物處理程序可依電子接受者的特性與系統的輪廓而加以分類，如圖二所示。

根據電子接受者的特性不同，所有的生物處理系統可以一般化的分類為好氧或厭氧兩部分，前者必須要有分子氧的存在作為電子接受者，後者則沒有分子氧的存在，而以碳或硫的某些型態當作電子接受者，至於無氧系統則利用氧化態的氮作為電子接受者，並將其轉變成氮氣。

好氧與厭氧兩種處理系統皆可以進一步的分類為附著生長系統與懸浮生長系統，常見的好氧附著生長系統如滴濾池和生物轉盤(RBC)，好氧懸浮生長系統如曝氣氧化池和活性污泥法。活性污泥法因不同的水力操作方式，可再分為栓塞流式、完全混合式、間歇處理式、或研選槽式，至於較特殊者如純氧系統、添加粉末活性碳法(PACT)、或者硝化反應／脫



圖二 生物處理程序之主要分類

硝反應系統。

厭氧處理亦可分為附著生長系統與懸浮生長系統，如圖二所示。懸浮生長系統有厭氧接觸法，類似於活性污泥法，只是系統內不用氧化氣。厭氧附著生長系統包括流動床與填料床，而上流式厭氧污泥床 (UASB) 則利用附著生長與懸浮生長混合系統的方式。

圖二表示一般可行的生物處理程序的主要型式，其他相關的如某些不同的附加程序、修正或程序的組合，均可考慮加以採用。程序組合的應用例如兩段式厭氧／好氧處理系統，而滴濾池／固體物接觸系統乃結合滴濾池與活性污泥法之操作方式。

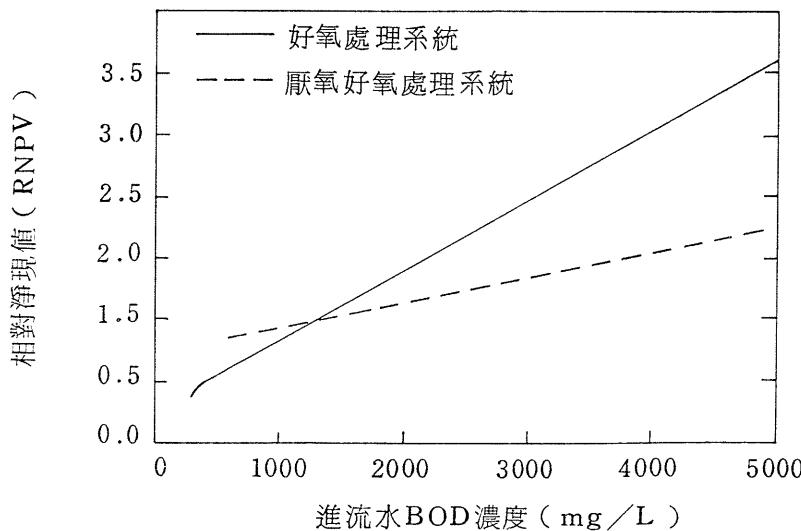
四、程序選擇基本考慮

當廢水特性和處理目的確立以後，工程師即可繼續進行處理程序的選擇工作，以下分別說明此步驟的基本考慮項目。

(一) 好氧處理與厭氧處理

表一為好氧與厭氧處理程序的一般性比較，此兩程序主要的差異是由於微生物所使用的最終電子接受者不同。在好氧程序中，氧化氣作為電子接受者，生長過程較有效率，雖然它會產生較多的污泥和能量需求，但是較不會產生臭味。厭氧程序對環境條件 (pH 值、溫度、毒性物質之衝擊) 較為敏感，並且需要較長的起動運轉時間。

厭氣程序尚有一個限制，即不能有效的達到很好的處理標準，例如環保單位所要求的放流水標準 (BOD 為 30 mg/L) 或處理效率 (去除 90% BOD)。不過假設將厭氣程序當作是一個好氧程序的前處理步驟，用來處理高濃度的工業廢水，則非常具有經濟效益，圖三中的處理費用曲線說明了這個觀點。圖中以相對淨現值 (RNPV) 的方式，比較完全使用好氧處理系統與一個增加厭氣前處理的好氧程序來處理一模擬的高濃度廢水，其所需要費用之差異性。結果非常明顯，厭氣／好氧組合的系統具有較大的經濟效益，且與原始廢水的強度有關。



圖三 好氧處理系統與厭氣好氧處理系統之費用比較

由圖三中的例子可以看出，組合系統的經濟效益在進流水BOD濃度為 $1,000\text{mg/l}$ 以上時開始增加，濃度愈高其差異性愈大，即組合系統愈有益，然濃度太低時，則單純以好氧系統處理較為有益。至於不同特性的工業廢水，其趨勢應與圖三相近，僅轉變點的基本濃度或有不同而已。

(二)懸浮生長與固定床反應槽

生物反應槽可分為懸浮生長和固定床兩種型式。在懸浮生長的反應槽中，生物分解反應乃由懸浮在反應槽液態中的生物基質所完成，在固定床反應槽中，生物基質則附著在反應槽內的固定介質上。

固定床反應槽與懸浮生長反應槽比較起來，其主要的優點是簡單且易於操作，所以對於偏遠或流量小的工業廢水處理非常理想。再者由於有高濃度的生物基質附著在固定介質的表面，使反應槽可以應付較高的單位容積負荷。所以假如有土地限制問題時，固定床型式是一個很好的選擇。此外由介質表面剝落的濃縮生物膜所產生的污泥非常穩定，可以很快的經由沈澱去除，尤其當採用懸浮生長反應槽而可能導致的污泥沈降問題（污泥鬆化）時，這一特點更顯得重要。實際操作結果亦顯示，固定床反應槽比懸浮生長反應槽較不易受突增負荷的影響。

固定床反應槽和懸浮生長反應槽比較起來，其主要缺點在操作上缺少彈性，不容易獲得更高的去除效率，並且對寒冷氣候狀況的敏感性頗高。固定床其他重要的缺點乃由於人們對該系統仍缺乏完全了解，因此在模擬和程序設計過程中不能如懸浮生長系統般的獲得肯定和精進。這個缺點有兩個重要的含意，第一，在很多例子中固定床反應槽常會設計不當，造成了過度或不足的設計。第二，它很難由一個桌上型實驗結果去估計原型廠的操作效果，尤其是當廢水的性質無法由採樣得知時，此一缺點乃成為其主要弱點。

由於固定床系統要獲得更高的去除效率是非常不合經濟的，所以這種系統通常被當作懸浮生長系統之前的一個初步處理過程。

(三)好氧懸浮生長系統

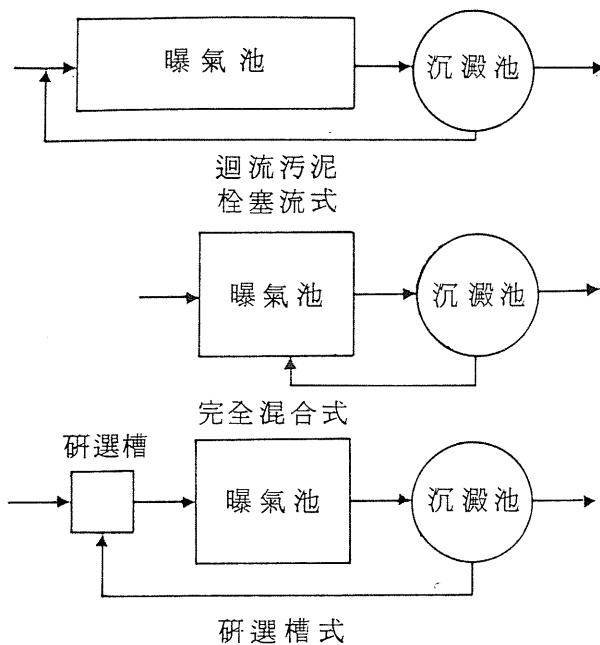
這是最常見的工業廢水生物處理系統，可依下列之廢水特性和處理需要分為三個部份加以討論：

1. 可分解且無抑制性廢水
2. 部分非分解性或抑制性廢水。
3. 需要去氮的廢水。

1. 可分解且非抑制性廢水

若水中包含可分解有機物而沒有生物抑制性物質，可以採用各種活性污泥程序加以處理，其流程如圖四所示。不同活性污泥程序之選擇依據，乃由微生物分解溶解性有機物的速率與程度來決定，因為溶解性與快速分解的有機物質常是絲狀菌的主要食物來源，自食品加工業、蒸餾業、製紙業，及某些合成纖維製造業等所排出的廢水均屬於這一類。

絲狀菌繁殖造成污泥鬆化現象的原因，是由於絲狀菌與膠羽菌微生物的不同生長速率所



圖四 活性汙泥法處理工業廢水之基本型式

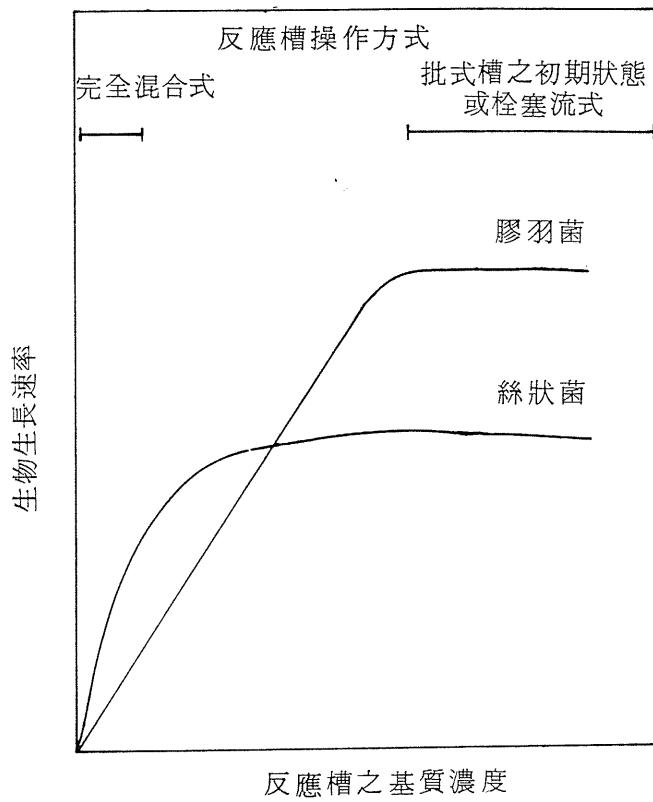
致，生長曲線如圖五所示。圖中顯示在低基質濃度時，絲狀菌會比膠羽菌生長更快，但在高濃度時則發生相反的現象。因此在一個完全混合的系統中，反應槽內基質濃度低時（應相當於放流水濃度），絲狀菌的生長佔優勢。為了克服這個問題，處理系統必須設法使原廢水在較適合膠羽菌生長的狀態下與生物基質接觸，也就是說在較高的基質濃度環境中。這種狀態可以利用栓塞流的入口區域，或者批式處理之初期操作狀況來達成。在這種系統中，膠羽菌將成為優勢的微生物，即使最終基質濃度已降低至絲狀菌較喜好的濃度範圍，但是大部分的基質均已被膠羽菌所耗盡。

要獲得偏好的微生物種類分布，可以採用研選槽處理方式。在研選槽中，可分解性的有機物質被膠羽菌快速吸著，因此阻斷絲狀菌的食物來源。當各類不同廢水之組成特性資料不十分充分時，對一個相當平衡的微生物生長培養環境，即膠羽菌與絲狀菌之相互關係，可吸着性有機物的去除率約須維持40—70%。圖六顯示可吸著性有機物與膠體負荷(mg 可吸著性 BOD/g VSS)的關係，圖中提供研選槽設計的基礎。一般研選槽設計在15分鐘的停留時間下操作，在大部分的實例中，此停留時間足以使吸著作用接近完全。

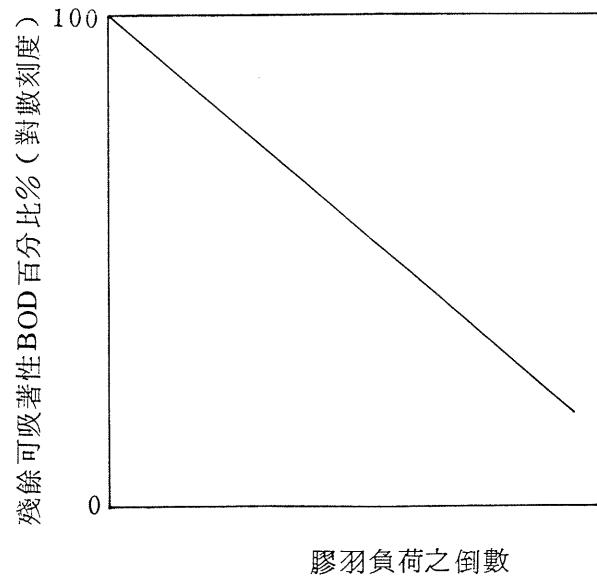
2. 部分非分解性或抑制性廢水

廢水中若含有生物不能分解的部分或者對生物處理呈現抑制性物質時，可以利用物理吸附與生物處理方式結合操作。在過去十年中在活性汙泥反應槽中添加粉狀活性碳，使反應槽成為PACT系統已經做過甚多研究，不論是小型試驗或全廠操作。這些研究顯示，PACT反應槽比傳統的系統具有更多的優點。

PACT系統比起傳統式的活性汙泥反應槽，其主要優點之一就是它具有降低放流水中不可被生物分解有機質負荷的能力，典型實例如表2所示。一個完全模擬實廠操作的控制槽



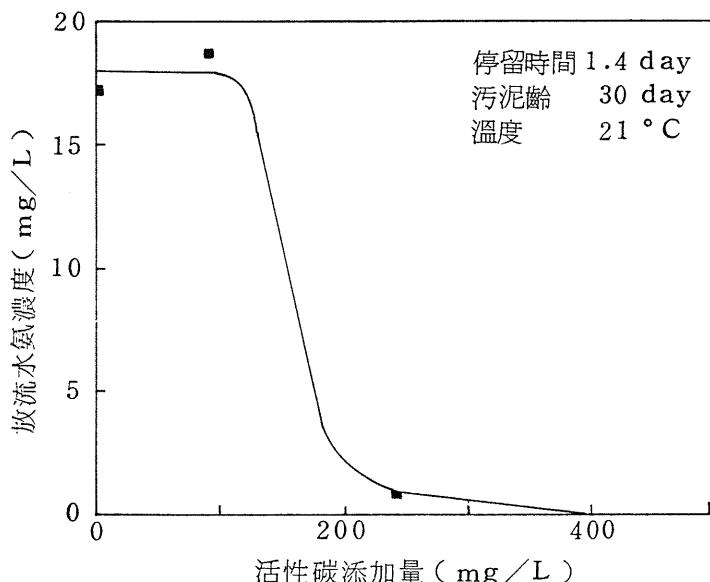
圖五 生物生長速率與基質濃度及反應槽型式之關係



圖六 溶解性可分解廢水之生物吸著關係

，用來處理製藥廢水，廢水平均BOD濃度為 $5,734 \text{ mg/L}$ ，平均COD濃度為 $10,207 \text{ mg/L}$ 。處理之後，BOD濃度降為 57 mg/L ，COD濃度降為 $1,992 \text{ mg/L}$ 。另一個完全相同的反應槽加入 $1,500 \text{ mg/L}$ 粉狀活性碳作為比較，可以將進流水的BOD濃度降低到相同的程度(43 mg/L)，而將COD濃度降低至 $1,000 \text{ mg/L}$ 以下，所增加的COD去除部分是由於非分解性有機物被吸附去除。表二中強調PACT反應槽的另一項優點，乃是增進污泥的沈降性。如表中所示，在完全相同的操作條件下，控制反應槽的污泥容積指數(SVI)為 157 mL/g ，而PACT反應槽的SVI值為 65 mL/g 。

PACT處理程序另一重要的特點為具有吸附某些工業廢水中存在的生物抑制物質之能力，因此可減輕生物抑制作用的影響。舉例來說，硝化菌甚易受到不同工業廢水中有機物質的抑制，即使在甚低濃度下亦會受到影響。然在PACT處理系統中，活性碳的吸附作用可以消除這種抑制作用，因此可以促進硝化作用之進行。為了說明這個觀點，五個完全相同的活性污泥反應槽加入不同劑量的活性碳，其放流水的氨氮濃度如圖七所示。反應槽操作的條件使得抑制作用不會發生，且所有反應槽均能產生硝化作用。然而，正如圖中顯示，僅在活性碳添加量超過 200 mg/L 的反應槽才能獲得完全的硝化作用。



圖七 活性碳添加量與放流水氨濃度之關係

若是必須去除廢水中的特定污染物(Priority Pollutants)，則PACT處理系統亦非常有效。如圖三中所示，PACT反應槽顯示對特定污染物去除比活性污泥法更佳，PACT系統最顯著的優點乃可去除如二硝基甲苯(dinitrotoluene)、二硝基酚(dinitrophenol)、硝基酚(nitrophenol)、與二氯酚(dichlorophenol)等物質。

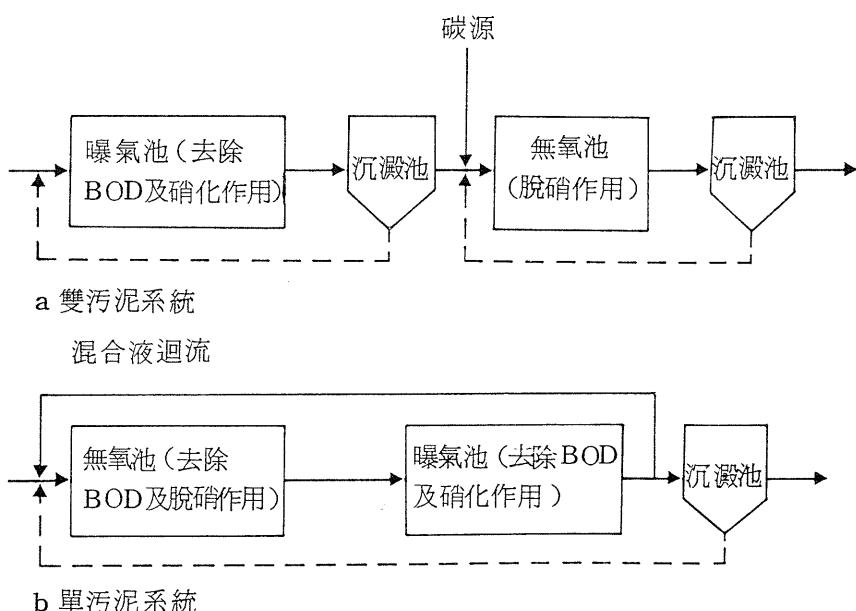
3.需要去氮的廢水

廢水中若有含氮的物質，在系統設計上有時必須考慮加以去除。大部分的實例中，原廢水中的氮常以有機氮或氨氮型態存在，而放流水的管制則可能限制氨氮或總氮的排放濃度。

首先，生物處理系統可以以設計來達到硝化反應，使所有的氮化合物轉變成硝酸鹽(NO_3^-)的型式。一般來說，只要固體物停留時間(SRT)能超過某一臨界值，任何型式的活性污泥系統均可達成硝化作用。所謂臨界值與廢水的特性與操作的溫度有關。

利用兩段式系統去除BOD及進行硝化反應可應用於某些工業廢水處理廠，這種系統的主要優點在防止硝化菌遭受在第一段BOD去除反應槽中所可能發生的突增負荷、毒性物質、或生物抑制性物質的影響。

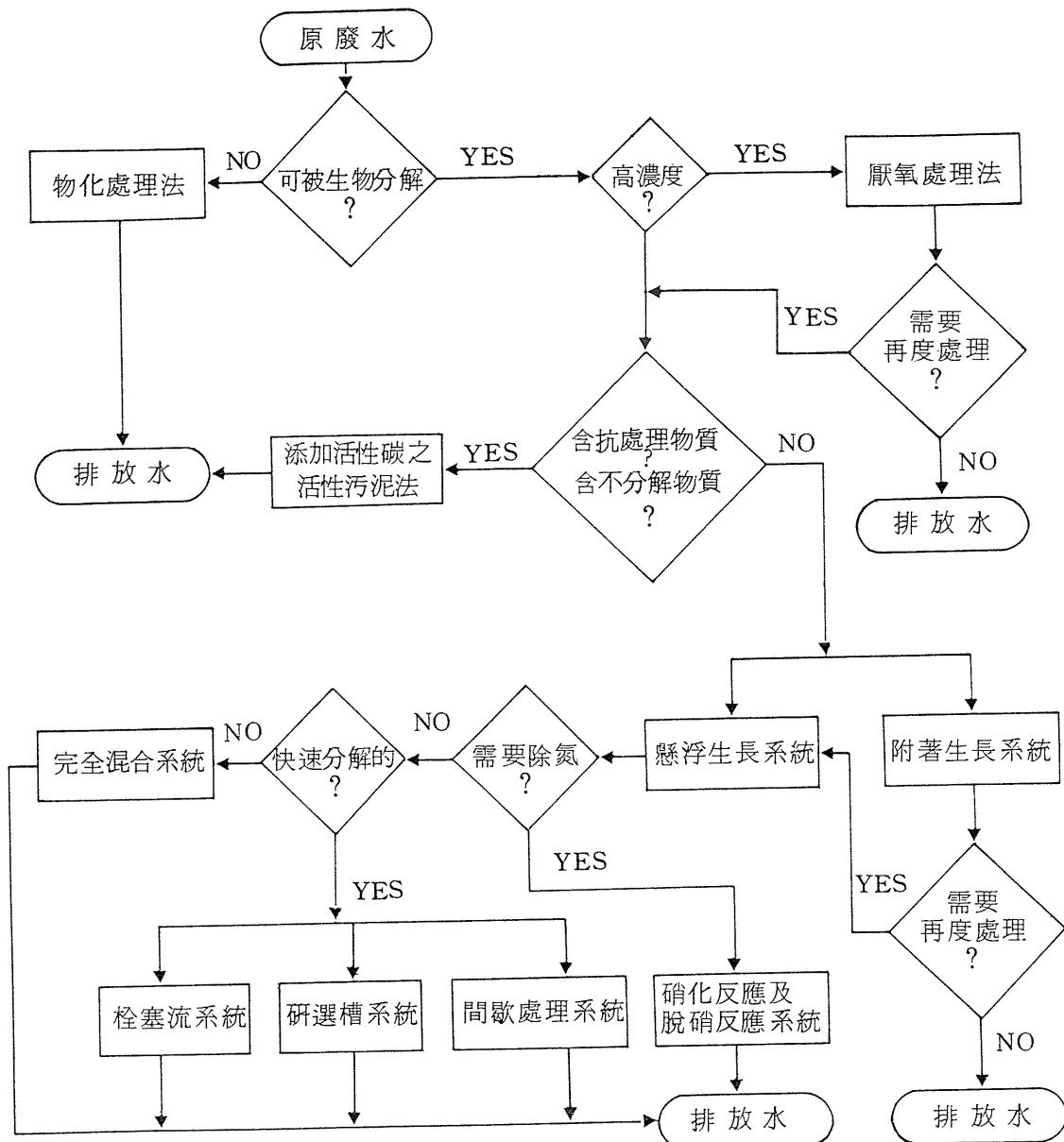
將已硝化的廢水藉由脫硝作用，可完全將氮加以去除，對工業廢水的處理可採用下列兩個基本型式中之任一個，如圖八a 所示的雙污泥系統，或者如圖八b 所示的單污泥系統，後者包括有混合液的迴流系統，目前已有許多此系統的修正型式發展出來。單污泥系統比雙污泥系統具有更多的經濟效益，因為它僅使用一個沈澱池，無需外添碳源、降低中和所需的化學藥劑、及減低溶氧需要量等。



圖八 總氮去除系統之可行方式

五、結語

本文詳細討論選擇生物方法處理工業廢水時需要加以考慮的各項條件，研選步驟的簡化流程如圖九所示。當然，實際應用時情況可能要更為複雜，然而本文確已提供基本原則，可以協助工程師獲得較為合理化的設計選擇，以處理複雜多變化的工業廢水，並達成各種不同處理目標的要求。



圖九 研選生物處理系統之簡化流程

註：本文譯自 "Process Selection Criteria for the Biological Treatment of Industrial Wastewater"

作者為 W.W. Eckenfelder, Y. Argaman, 與 E. Miller,
原文刊於 Environmental Progress, Vol. 8, No. 1, pp 40—45
(Fed., 1989)

表一 廢氣處理與好氣處理之比較

處理參數	厭氣處理	好氣處理
能量消耗	低	高
處理程度	中等 (60—90%)	高 (95%以上)
污泥產量	低	高
程序穩定度 (對毒物與負荷改變之忍受能力)	低至中等	中等至高
起動運轉時間	2—4 月	2—4 週
營養劑之需求	低	對某些工業廢水頗高
臭味	可能有臭味問題	較少臭味問題
鹼度之需求	對某些工業廢水頗高	低
氣體產量	有 (可供反應槽加溫之用)	無

表二 添加粉狀活性碳對活性污泥系統操作之影響

操 作 參 數	進 流 水	控 制 槽	PACT 槽
活性碳添加量 (mg/L)	0	1,500	
水力停留時間 (day)	16.7	16.8	
污泥停留時間 (day)	50	50	
生物量MLSS (mg/L)	2,430	6070	
生物量MLVSS (mg/L)	2,054	5,388	
碳 MLSS (mg/L)	—	3,196	
COD 濃度 (mg/L)	10,207	1,992	920
COD 去除率 (%)		80	91
BOD 濃度 (mg/L)	5,734	57	43
BOD 去除率 (%)		99	99
TOC 濃度 (mg/L)	3,281	565	192
TOC 去除率 (%)		83	94
污泥容積指數 SVI (mL/g)		157	65

表三 PACT系統與活性污泥系統對特定污染物去除之比較

特 定 污 染 物	進流水濃度 (mg/L)	去除率 (%)	
		活性污泥系統	PACT系統
苯 (Benzene)	81	98.5	99.6
氯苯 (Chlorobenzene)	3,660	99.1	99.8
氯乙烷 (Chloroethane)	667	99.8	>99.9
三氯甲烷 (Chloroform)	72	96.7	96.9
氯甲烷 (Methyl Chloride)	138	98.5	>99.7
四氯乙烯 (Tetrachloroethylene)	33	>99.5	>99.5
二氯苯 (1,2) (1,2-Dichlorobenzene)	18	90.6	>99
二硝基甲苯 (2,4) (2,4-Dinitrotoluene)	1,000	31	90
二硝基甲苯 (2,6) (2,6-Dinitrotoluene)	1,100	14	95
硝基苯 (Nitrobenzene)	330	94.5	>99.9
三氯苯 (1,2,4) (1,2,4-Trichlorobenzene)	210	99.9	>99.9
二氯酚 (2,4) (2,4-Dichlorophenol)	19	0	93
二硝基酚 (2,4) (2,4-Dinitrophenol)	140	39	>99
硝基酚 (4) (4-Nitrophenol)	1,100	25	97