

本期專題：厭氧處理技術

厭氧生物處理之技術內涵及發展現況

阮國棟*

摘要

厭氧生物處理技術在國內歷經二十多年的研究開發，已蔚然成為環境工程中主要的應用技術之一，本文除回顧厭氧生物程序之應用範疇、應用特性外，並建構厭氧生物程序之技術內涵，包括：微生物(菌株分離、代謝途徑及能量、族群動態、環境及營養條件之影響、附著及顆粒化)、基質(污染物)生物轉換、毒性及抑制性、反應動力及模式、操作及控制、新程序或程序改善及應用、測試及方法、工程安全問題、氣體利用問題、阻塞問題等，每一技術內涵之分項均有很多最新的進展報告散見國內外知名期刊，此一架構內容自待不斷補充精實，本文僅就微生物、基質生物轉換、工程問題等項略述其中一小部分。厭氧生物處理技術理論及應用之間落差原因亦在文中加以探討，隨著工程實績之快速成長，實務經驗之快速累積，今後應用潛力將無可限量。

【關鍵字】

- 1.微生物(microbiology)
- 2.基質生物轉換(biotransformation)
- 3.厭氧生物處理(anaerobic treatment)

*行政院環保署水質保護處處長

一、前　　言

厭氧生物程序應用在家庭化糞池、廢棄物處理、廢水處理及醣醇工程，已有百年之歷史，可以說與人類生活息息相關。任何一項能被持續開發、精進應用的技術，均須走過相同的艱辛旅程，亦即從觀念啓蒙、起始研究(emerging tech)到創新技術(innovative tech)、商業化技術(available tech)，層層篩選，步步改進的基本內涵不外乎反應特性及工程經驗。因此，係觀厭氧生物程序的技術內涵，亦不外乎與反應特性有關的微生物特性、污染物基質特性、反應動力、反應槽設計、與工程經驗有關的操作控制、檢驗測試、安全規格、工程問題等，本文以此為架構，例舉其中一部分資訊，以饗讀者。

二、厭氧生物程序之應用範疇

厭氧生物程序應用在污泥、廢污水之處理，包括：

- 1.消化(digestion)，指將高分子物質分解為低分子物質。
- 2.醣酵(fermentation)，指一般基質能源轉換為細胞的生化連鎖反應，代謝產物可以是甲烷、乳酸或酒精。最近更廣泛的定義包括喜氣醣酵、厭氧醣酵及固態醣酵。
- 3.脫硝等系統(anoxic system)，指系統中無空氣、氧氣存在，但微生物在分子氧的存在下(例如 NO_3^- , SO_4^{2-})作用。

使用厭氧醣酵(anaerobic fermentation)一詞，可以概括上述的 anaerobic digestion 及 anoxic system，為廣意的厭氧系統。實際應用上，依其設計功能的不同，厭氧系統有各種明顯的區分，分類如下：

- 1.污泥消化型(sludge reduction mode)，即傳統厭氧消化系統，主要在減少污泥體積並使之穩定化，氣體的利用則為次要目的，最大特徵為系統中的揮發性物質逐日減少。
- 2.污染控制型(pollution control mode)，做為一般廢水處理的前階段處理，以降低負荷量，通常也將加熱反應槽以後多餘的氣體排放，最大特徵為系統中的揮發固體逐日增加，形成新的生物污泥，必須排除。
- 3.能源產生型(energy generation mode)，特徵在強調能源的回收，反應槽本身可能有很厚的絕熱保溫層，周邊設備變為主要系統，例如氣體貯存、純化及利用等。

另外，尚有以生產化學品為主，如液體燃料的厭氧生物轉化系統；或以固態生質能源回收為主，如垃圾掩埋場之厭氧氣體回收系統等。

以資源利用為目的的厭氧消化系統，為提高效率，克服傳統消化槽缺點，應從以下三點著手：

- 發展低費用之進料前處理或殘留物後處理技術，以提升進料生物可分解性和轉換率。
- 應用更有效和先進的反應槽設計及操作模式。
- 外加藥劑或活化劑或將前兩者適當合併使用。

垃圾消化前處理、生質消化系統、以及消化系統氣體和殘渣系統，均為資源利用體系中之案例。

三、厭氧生物程序之應用特性

1.無論從能源或資源利用觀點來評估厭氧系統，其優越性均十分突出，若從演進歷史及新技術開發觀點來評估厭氧系統，其潛在發展能力與應用範圍亦無可限量，茲說明其顯著優點如下：

- (1)低的生物污泥產率：僅及喜氣方法的五分之一，減少大量污泥再處理費用。
- (2)低的營養需求：廢水中氮磷營養份缺乏需額外添加，厭氧系統由於生物增殖量低，故營養需求亦僅及好氧系統的五分之一至十分之一，減輕藥品費用。
- (3)不需曝氣動力：好氧系統中每去除1公斤生化需氧量(BOD)，至少需1公斤以上之氧氣，以普通輸氧效率估計，至少需1度的電費，故廢水中BOD負荷量越大，選擇厭氧系統越有利。
- (4)產生可利用之甲烷氣，每去除1公斤BOD可產生0.2公斤的甲烷。標準狀況下，每公斤甲烷的低位發熱量約8570卡，可做為燃料使用。
- (5)低的水力停留時間：污泥消化型的厭氧系統通常需要十數天至數十天的水力停留時間，所需處理槽體積龐大，但以溶解性基質為主的廢水處理厭氧系統，由於處理槽設計的更新，水力停留時間約在數小時至十數小時，已經可以與好氧系統相競爭，某些厭氧脫硝系統(denitrification)更在數十分鐘內完成，尤具效益。
- (6)高的體積負荷及生物負荷量：厭氧系統設計之負荷量大約為10~30kg COD/m³day或0.5~1.5kg COD/kg VSS.day，比好氧系統高出5~10倍。

64 厥氧生物處理之技術內涵及發展現況

- (7)厥氧系統生物污泥的活性可以較長時間的保存，對於工廠季節性停工、不穩定操作等因素，較能適應。
- (8)適用溫度範圍廣：厥氧系統雖然有最佳操作溫度（中溫35°C，高溫55°C），但由於固定生物膜的處理槽設計，在最佳溫度以外的溫度(例如15°C ~ 30°C)操作，均屬經濟可行，處理效率並不不受太大影響。
- (9)某些在喜氣系統生物無法分解之污染組成，在厥氧系統中能經由馴養而予分解(或分解為喜氣生物可以進一步分解的中間產物)。
- (10)適用濃度範圍廣：厥氧系統能處理極高濃度的廢水(~30,000mg/l COD)，也能處理低濃度廢水(~1,000mg/l COD)。喜氣系統在高濃度情況受限於氧的傳送，一般需要稀釋。

2. 對於提升厥氧系統功能之眾多方案中，由新反應槽設計(如流體化床，厥氧濾床等等)與新培養方式(如完整細胞固定化)所構成的新程序之開發應屬最有潛力者。

(1)利用固定化生物或遺傳工程方法改變微生物型態。正在開發中的固定化生物系統可能的好處為：

- 產氫菌和甲烷菌被固定在洋菜膠或其他載體上，產生的氫有效地供固定的甲烷菌利用。

所以根據下列甲烷生成路徑，固定化系統所產生之甲烷總量高於游離細胞者。

- (a) $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
- (b) $\text{HCOOH} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
- (c) $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$
- (d) (a)+(c) $\text{CH}_3\text{COOH} + 4\text{H}_2 \rightarrow 2\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

- 洋菜膠載體防止 O_2 和高分子量酸對甲烷菌的傷害。

(2)選擇反應槽：

在選擇任何厥氧系統前，均應先做實驗室可處理性研究和模型場試驗。意義在於應由程序去配合廢水性質，而不是廢水去配合預先選擇之程序。

反應槽演進至今，主要在設法提高SRT(Sludge Retention Time)而減少HRT(Hydraulic Retention Time)，並且增加活性污泥的數量，高濃度廢液或高熱值廢物，可利用高溫消化(thermophilic, 55°C)，提高反應速率。有支鏈等複雜基質存在，甲烷生成為速率限制因素時，分相分段反應可得較佳控制條件。

另一方面，設法利用基因工程及固定化細胞(immobilized microbial cell)，改變微生物型態，再配合反應槽之設計，可以提高反應速率，節省投資費用。

(3)應用範圍的推廣：

建立正確的厭氧生物系統的特性觀念，認清其具備的優越特性，可進一步推廣於稀薄廢水、有害廢棄物等處理的領域。

四、厭氧生物程序之技術內涵

1. 厭氧生物程序應探討之技術內涵，其架構如下：

(1) 微生物(microbiology)

菌株分離(strain isolation)

代謝途徑及能量(pathways and energetics)

族群動態(population dynamics)

環境及營養條件之影響(effect of environmental and nutritional conditions)

附著及顆粒化(adhesion and granulation)

(2) 基質(污染物)生物轉換(biotransformation)：

有機酸、環狀化合物、氯化環狀化合物、氮化環狀化合物、表面活性劑、其他有機化合物、無機物等。

(3) 毒性及抑制性。

(4) 反應動力及模式。

(5) 操作及控制。

(6) 新程序、程序改善及應用。

(7) 測試及方法。

(8) 工程安全問題、阻塞問題、氣體利用問題。

其中每一項技術因素，在研發及應用上均有很多文獻報導，不斷精益求精，造就成功一個整體性的厭氧生物程序，以下僅就其中部分項目，做重點引述。

2. 微生物

有機物經甲烷醣酵後生成氣體產物，只有極少部分的能量用來產生新的細胞體及維持活動所需的能，大約有90% 以上的基質能量均保存在甲烷上，所以甲烷醣酵在生質能源轉換上深具潛力。

除細菌外，一些厭氧酸酵性原生動物(protoza)、厭氧性黴菌(fungi)及其他微生物等在許多生態系統中的厭氧酸酵均非常重要。某種(species)微生物的生長及代謝途徑往往受其他類微生物的相互作用的影響，例如在動物消化系統中的某些部位---牛的瘤胃及人的大腸，有機物僅有一部分轉換為氣體產物，其他則被吸收利用；自然界中如木質素、石臘等不易被微生物分解的物質，形成酸酵後殘渣，或稱為化石燃料，故自然界中的甲烷酸酵是碳及氮循環中重要的過程。

為了更容易解釋甲烷酸酵程序的微生物學、化學及反應動力學，通常將代謝作用不同的細菌群分開說明，而有各種段式的說法，雖然為說明方便起見可以如此分段，但細菌群的生理及代謝與其他族群息息相關，實際上是不可分的。

所謂甲烷酸酵的三段式理論，第一段包括酸酵性細菌群，第二段稱為強制性產氫乙酸菌(obligate H₂-producing acetogenic bacteria)，分解丙酸及長鏈脂肪酸、乙醇、環狀酸等為乙酸、CO₂及H₂。最後一段(群)為甲烷菌群，利用其他細菌生成的H₂，還原CO₂為CH₄，以及某些甲烷菌直接分解乙酸為CO₂及CH₄。另外，有時第4種菌群存在，能利用H₂及CO₂產生乙酸及其他酸。

將基質的熱含量經三段式甲烷酸酵中，各段的能量流百分率標示出來，一般而言，約72% 經由乙酸至甲烷，另28% 為氫與CO₂生成甲烷。

在動物消化道中，即使有時候也存在利用H₂，CO₂，產生乙酸的菌(稱為homacetogenic bacteria)，但大部分為酸酵菌，所以乙酸及較長鏈的脂肪酸不會大量分解，這些化合物累積而被吸收做為動物體的能源。如圖1所示，(a)為完全多段式的厭氧系統，(b)為消化道中部分分解的情形，大部分為利用氫的甲烷菌，(c)為地球中由氫產生甲烷的途徑。百分比率代表有機物及無機物生成甲烷的電子流或能量流的百分比。上述(b)稱為部分甲烷酸酵。

3.基質(污染物)生物轉換：

利用厭氧生物技術處理工業廢水，隨著厭氧生物法之逐漸成熟，實際應用已日漸普遍。然而，工業廢水中有機污染物之種類相當繁多，例如石化工業及化學工業廢水中，即常含有複雜的苯環類化合物，至今仍考驗著厭氧生物處理技術。目前苯環類化合物之生物處理方式，不外喜氣及厭氧二種，喜氣微生物雖較厭氧微生物容易分解苯環類化合物，但其無法承受高的有機負荷，亦無法不經稀釋而直接處理較高濃度的進流廢水，厭氧系統雖然能承受高負荷及高濃度，但對"裂環"(ring cleavage)步驟，頗有困難。然而最近幾年的研究顯示，大多數煤炭氣

化、石油煉製、焦炭製造等工業所排放的一些環狀化合物，在厭氧情況下，可生物分解而生成甲烷及二氧化碳。有三個因素促使微生物處理這些外來物質(xenobiotics)，包括：微生物遺傳的適應性，各種不同的微生物種，以及某些消化酵素明顯的專一性。利用這些因素，研究人員已證實微生物可消化TCDDs、PCBs、及大部分之農藥。微生物之消化作用並不一定與生長有關，例如有機物在氮限制之情形下可被轉化成微生物儲存的醣類而不是被礦化成CO₂。對消化異質機制控制之研究在探討生物處理能力及限制時非常重要。其中之一個異質生物性消化之要素為某些微生物酵素明顯的專一性。可允許酵素之催化反應發生而不需提供能量或碳給細胞複製。此現象可分為兩種：一為偶發的代謝作用(*fortuitous metabolism*)，其生長所需之共同基質(co-substrate)為非強制性的；另一種為共同代謝(*cometabolism*)，其生長之共同基質為強制性的。

偶發的共同代謝的生物消化可證實在環境異質之去除佔了相當大的份量。許多關於共同代謝活性之例子是以純基質之方式敘述，在混合培養系統中，因某種微生物之代謝產物可能會被另一種微生物所消化，因此共同代謝很難以混合培養的方式證實之。為了促進共同代謝，廢水中首先就必須含有共同基質以便於生物處理。例如廢水中經常有脂肪酸產生所以符合此生物處理之要求。

假如以單一種之微生物應用於工業廢水之處理，則不能期望該微生物之酵素機構足以消化廢水中所有之化合物。此外，單一種微生物之適應性有限，且突變之速度太慢以致於單一微生物種無法適應實際狀況。為了增加消化酵素之種類，通常是採用混合之微生物族群，即如一個微生物團體或混合培養。混合培養在消化複合基質時比純種培養多了兩個優點。第一、由某一種微生物消化而產生之不完全礦化產物，例如由共同代謝轉化之產物，可以當作其他種微生物之基質。第二、在微生物種間基因密碼之傳送可促進培養之消化能力。目前已證實了DDT可被一種微生物共同代謝成PCPA，而PCPA又可被另一種微生物礦化。合併此兩種微生物之培養就可使DDT被完全礦化。現已有分離出可消化異質之混合培養微生物群，此微生物群在消化基質時比各單一微生物種為佳。

發展一有效的苯環化合物廢水生物處理程序，其關鍵在於：微生物培養之選擇與發展；基質的修正；以及程序之選擇與控制。因為工業廢水很複雜且性質不明確，因此這些因子在每一個案均必須予以評估。例如垃圾滲出水生物消化適應性之重要，滲出水中某些可能會抗拒生物消化之化學物種在給予適當的適應期後(馴養)可能可以被生物消化。適應之主要機制為：大分子之修正，族群之選擇及遺

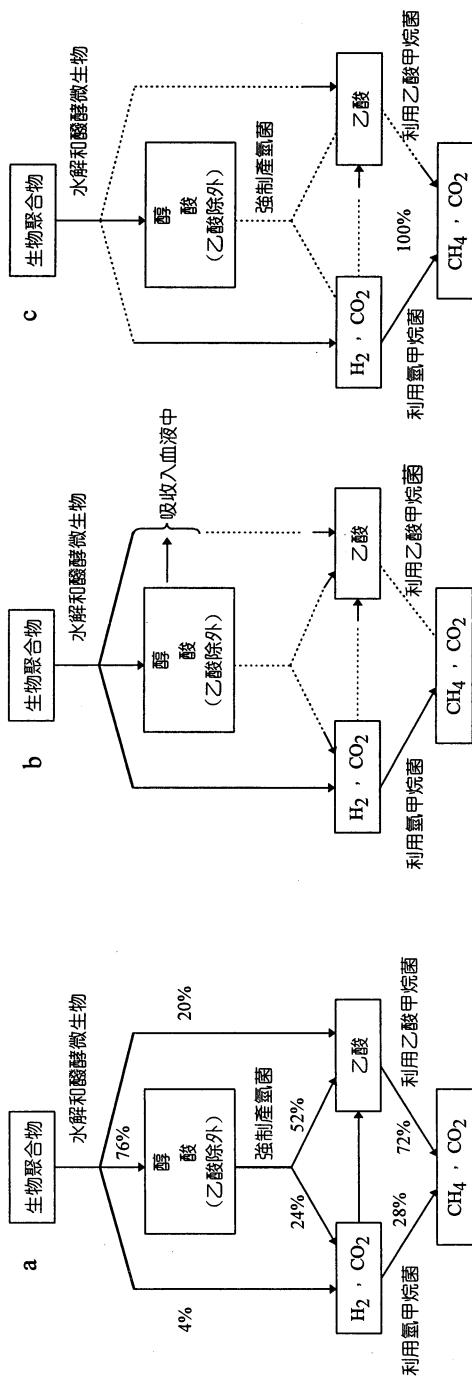


圖1 甲烷嚴氧系統之基質流向，(a)完全多段式之甲烷礦化，例如嚴氧消化槽分解廢棄有機物，
(b)部分甲烷礦化，例如在動物瘤胃及腸道系統，(c)由氫產生甲烷，例如地熱溫泉等。

傳因子之轉移等。細胞組成分之修正，例如酵素之誘導或提高細胞膜之可滲透性等都將發生於當基質會與細胞之分子相互作用時。對這種作用之時隔從數分鐘至小時。因為某些種族或在某一種族之突變種中可能對新環境有較佳的適應性而取代了原先之種族，因此而發生了族群之選擇，其時間週期依生長之速率而定。微生物之選擇，可以在碳限制之狀況下連續的植入取自各種不同來源之微生物種去適應環境。連續植種之目的在使微生物種類有最大之多樣化。一個可以消化某毒性基質被破壞後之產物但不是該毒性基質之初級分解者的微生物是無法存活於該培養基中，除非該毒性物質之初級分解者在該培養基中已有良好之建立。植種微生物之選擇非常重要，例如一活性污泥植入高鹽類濃度之滲出水中於無法存活狀況下會促進酵素之誘導，將族群置於經選擇之壓力下以消化頑強之基質會比連續的代謝一混合之碳源更有利於適應。碳限制之狀況可藉連續培養(穩定狀態)或經由一次加料之批式反應來達到。

苯環類化合物在厭氧狀態下，分解之機制約可歸納為四種型態，即光合代謝(簡稱P)、硝酸鹽依附型(簡稱N)、硫酸鹽依附型(簡稱S)，甲烷醣酵(簡稱M)，以上P、N、S、M四型均可能發生在各種環狀化合物厭氧分解。茲分別說明如下：

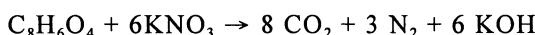
(1)光合代謝(photometabolism)

一些光合成菌，*Rhodospirillaceae*，purple non-sulphur bacteria，能在厭氧及有光的條件下，以苯環類化合物當做碳源。苯環酸之光合代謝途徑為苯環酸先被還原成cyclohexanecarboxylate，再經 COA酵素及 β -oxidation生化步驟，將環狀物在C₁ - C₂之結合鍵處，將其裂環，然後再進入一般之厭氧分解路徑，代謝成終產物 CO₂ 及 CH₄。

(2)硝酸鹽依附型(nitrate -dependent)

土壤中分離的一種細菌*Pseudomonas* strain PN1，能在其還原 NO₃⁻為 N₂的過程中(脫氮反應)，將苯環類化合物分解，因此脫氮反應可視為芳香族分解時氮之供應者，亦即將硝酸鹽當作非有機性之氧化劑。

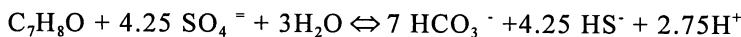
在一厭氧系統中，混合菌種比純種分離之菌種更容易分解苯環類，phthalic acid之分解方程式，可表示如下：



增加硝酸鹽濃度，可提高鄰苯二甲酸之分解率。

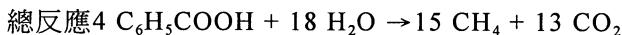
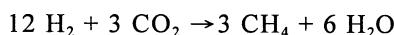
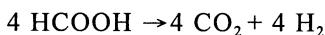
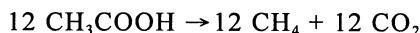
(3)硫酸鹽依附型(sulphate - dependent)

曾有研究報導在硫酸鹽還原過程中(脫硫反應)，*Desulfovibrio* sp. 可分解 phthalic acid 作為碳源，或 *Desulfoceccus*，*Desulfonema* 及 *Desulfosarcina* 三種脫硫菌能在 SO_4^{2-} 及微量鉬元素存在下分解苯環酸。甲基酚 (P - cresol) 於嚴氧下被硫酸還原菌分解之方程式為：



(4) 甲烷醣酵 (methanogenic fermentation)

苯酸被代謝成甲烷及二氧化碳之反應步驟如下：



苯環酸先還原至 cyclohexanecarboxylate，再從 $\text{C}_1 - \text{C}_2$ 結合鍵斷鏈成 heptanoate，然後再經 β - oxidation 分解成較短之揮發酸，如戊酸、丙酸、乙酸等，再由甲烷生成菌代謝產生 CH_4 及 CO_2 等。

關於環狀化合物之甲烷醣酵，已知苯甲酸、苯乙酸等八種苯環衍生物、木質素分解後之 11 種苯環衍生物、石化廢水中有機污染物等均可經由甲烷菌嚴氧醣酵分解。

絕對嚴氧性之甲烷醣酵法對於大多數之石化廢水有機物均有很高之分解效率，至於醣酵之培養條件，進料濃度之多寡以及操作時間之長短，端看吾人所欲分解之對象為何，化合物之毒性及結構效應，對於適應特性及分解速率之影響關係可歸納如下：

- 化合物之毒性會對菌體之適應性及其自身基質之分解效率有所影響。
- 氣體生產之適應期愈長者，其分解效果愈好。
- 具有氯基、胺基及羧基之化合物，其適應性及分解效率均較差。
- 官能基的位置對延遲時間，利用率及分解速率有很大之影響。
- 碳數之奇偶，與延遲時間無關，但與利用率及分解速率有關。
- 碳鏈長度相同時，具有雙羧酸官能基之化合物與僅含單一羧酸基之化合物相比，其延遲時間較短，且分解速率較高。
- 一般不含鹵化物之環狀培養基，若其結構相似，則可同時被甲烷菌所分解。
- 一般之鹵基苯甲酸以間位之分解效率最高。

4.工程安全問題、氣體利用問題、阻塞問題

(1) 設計不良引起之問題

• 浮渣(scum)

攪拌設計不良，引起輕質污物形成浮渣的問題。浮渣若久不清除，乾燥硬化終致不可收拾。浮渣阻擋氣體的排出，造成排氣管線的高壓，有爆炸之危險。浮渣問題應預防重於治療，因為一旦形成，則難以去除，結塊的乾燥浮渣即使予以打破使其重返消化液中，但因不易吸水，在極短的時間內又重返上層。清除設備有 scum breaker、screw elevators 等，均已商品化。氣體出口位置的選擇也很重要。

• 爆炸

大約含 70% 甲烷的醣酵氣，爆炸的可能性有二：

(a)超壓：設計不良時，排氣受到阻塞，造成超壓。其他消化槽出口管線也可能因泵浦的損壞，操作員疏失關錯閥等，造成阻塞，而進流泵浦仍然連續操作時，即會造成高壓，在機械設計上均要非常小心。

(b)著火：1份醣酵氣與 7 ~ 19 份空氣混合即可點燃爆炸，氣體泵浦及攪拌軸封設計不良有漏縫時，即易發生危險。在排氣管線上須設有火焰捕捉器，欲收集氣體時則須用防火馬達，適當的通風及早期氣體警報器均可防止漏氣。

• 進料

進料及洩料泵浦的不當選擇，會引起嚴重之問題。最常見的是固體顆粒及破布等的阻塞及磨損。必須正確的監測任何進料系統因阻塞、固體沈降或其他降低流量的不良影響而引起的流率改變。

• 經濟評估

缺乏設計經驗或疏失細節考慮時，經常會高估醣酵槽的經濟效益，認為有免費的多餘氣體能源，但事實上仍然是入不敷出。例如以三分之一氣體回流加熱或高估消化後之污泥充當肥料，而不計及加工及運送成本等即是。

• 加熱系統

熱交換器有多種不同設計，依其本質特性而有不同的問題發生。採用回流水槽外鍋爐加熱，然後經槽內線圈交換(internal coil)的方式，其表面溫度需維持在 50°C 以下，以免微生物遭到傷害，由於溫度不能太高，所以加熱表面積就要很大，而且表面上黏附的生質(或微生物)，使熱傳效率大為減

低。這些均使得在計算鍋爐容量及管徑等發生困難。管線材料必需是碳鋼、不銹鋼或其他對微生物沒有毒性的金屬材料。採用水為加熱介質的好處是管徑及泵浦的容量較小，若採用污泥循環加熱方式，則需很大的管徑及泵浦，才能夠輸送。迴流污泥在槽內不必裝置任何東西，減少維護工作。

2.一般性的問題

(1)常見的問題

污泥表面到蓋頂排氣孔的距離，若太短而無法避免水滴或粒狀物進入排氣管，則應設置濺泥回流箱（splash return box）或其他過濾設備，同時注意保養，儘可能設在槽外。觀測窗（inspection window）的設置可以觀察攪拌，浮渣形成、液位及其他情況，是非常需要的。輸送污泥的管線，與彎管等應越大越好，進出口管線須直線。排氣管應設凝結瓣（condensation trap）。體積大到不必經常排除，因氣體中水含量很高。氣體流量計乾式及濕式均可，濕式較貴但較理想，室內用的流量計無法用在消化槽，在寒冷地帶尚須注意勿使水汽等在氣體流量計的止封地方（seal）結凍。

(2)腐蝕

避免排水不良之設計，圓拱型槽頂比平頂要更能避免水份及灰塵的累積，減少腐蝕。閥的凸緣（flange）焊接，亦應避免液體的累積。

小槽可以使用玻璃纖維為材料，大型槽則須使用鋼材，再塗以適當的Epoxy樹脂。

(3)無法預測之失敗

最好的設計及工程設備，尚須輔以有計畫的維護及正常的檢修操作，才能使不可預測之失敗減至最低。使操作費用降低的最重要事項是主要零件部分均能很容易的卸下維修而不影響整廠的操作。嚴氧系統不宜輕言全廠停工待修，因為要恢復到原有的效率需時甚長，而且在此期間進料不斷。所以設備供應商應能提供主要零件的快速檢修替換的服務，而不影響到連續操作。有計畫的維修路徑是減低費用及避免不可期失敗的方法，維修可分為：

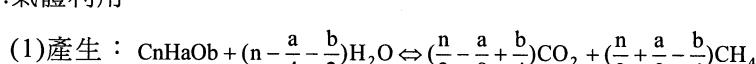
- (a)緊急維修：備料及備件準備充分很重要。
- (b)矯正維修：修理或更換部分零件，可以有計畫實施。
- (c)預防維修：有計畫的定期檢視，減少緊急修護之次數。

3.安全問題

(1)消化槽中操作壓力在150~200mm (H₂O)。

- (2)管線中最適氣體流速為3.5m/s。
- (3)安全閥壓力通常150~200mm (H₂O)。
- (4)廢氣燃燒和消化槽最小距離為15m。
- (5)氣體貯存槽設計壓力為1.4~7kg/cm²，平均實際值為1.4~2.8kg/cm²。
- (6)含水氣體利用水分捕捉器 (drip traps) 做部份之乾燥。
- (7)管線之壓力常用於輸送氣體由消化槽至貯存槽。壓縮機必須用不銹鋼製造或用鐵弗龍塗佈。
- (8)污泥產氣中之H₂S濃度高於1.1 ppm時具高腐蝕性。
- (9)因H₂S和 CO₂比空氣重，故應避免使其累積於低處。(具毒性能造成窒息)。
- (10)甲烷氣為高可燃性，與空氣 (5~15% CH₄) 或氧混合會引起爆炸。
- (11)安全設備
包括氣體進出口之火焰捕捉器 (flame trap)，脫水系統 (水分捕捉器)，脫硫劑，安全釋壓閥等。
- (12)場區內所有電氣設備必須是防爆型，在硬頂場合下安全距離為5公尺，在軟頂情況則需10公尺。

4. 氣體利用



例如葡萄糖厭氧消化： $C_6H_{12}O_6 \Leftrightarrow 3CH_4 + 3CO_2 + H_2O$

(2)熱量：單位重量(或標準狀況下之氣體單位體積)之燃料在理論上完全燃燒時，所產生之熱能，稱為該燃料的發熱量。發熱量有高位與低位之區別，高位發熱量即總發熱量，係燃料燃燒時所產生之總熱量，為Calorimeter所測定之數值，低位發熱量亦稱眞熱量，係自高位發熱量減去水分之蒸發熱之值，即實際可有效利用之熱量。

在標準狀況下，每立方公尺甲烷之高位發熱量為9530仟卡，低位發熱量為8570卡，若甲烷含量70%，則此消化氣體低位發熱量為6000仟卡，比天然氣之低位發熱量 (≥8000仟卡)低，但比煉焦爐煤氣、水煤氣等之低位發熱量高出甚多，故可利用做為燃料。

(3)貯存：產氣中之組成份差異可以抵銷。

高壓槽：200~300 bar，不適用於農場，屬高技術，可做曳引機燃料。

中壓槽：10~20 bar，尺寸小，使用前壓力須減至10~15 bar。

例如：在24 bars一個 $3.7\text{ m}\phi \times 61\text{ m}$ 長的槽，可貯存 $21,000\text{m}^3$ 氣體。

低壓氣體槽：100~600 mm H₂O

貯存體積小於 30000 m^3 時較適用。

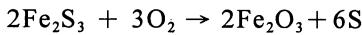
水封：100~300 mm H₂O

(4) 純化

- 純化之目的在去除酸氣：CO₂及H₂S，此二氣體之容許濃度通常在1~15 ppm (Vol.)。在小規模及低濃度時，H₂S可以用加熱的鐵屑吸收，CO₂可以通過氫氧化鈣溶液形成酸鈣沉淀去除，但大規模時則須裝置滌氣設備(scrubber)。
 - MEA (mono ethanolamine)—Girbotol process，係利用bubble column來去除CO₂ 及H₂S。目前中國石油公司之CO₂脫除程序為MEA process與Benfield process二種。MEA process較適合處理含低濃度 CO₂，而且需較多的再生熱，溶劑損失大，H₂S的吸收差，又有顯著腐蝕現象，最近國外對MEA process加以改良，在MEA溶液中加入腐蝕抑制劑，可使MEA之限制濃度提高，而不致有顯著腐蝕現象，其吸收能力亦大增，故此改良之MEA process可用來處理高濃度CO₂氣體。
 - BINAX Process產生以管線輸送的優質甲烷氣或供做汽車燃料。系統的主要部分包括：
 - (a)氣體壓縮機：壓到 $7 \sim 35\text{kg/cm}^2$ 以適於用水滌洗。
 - (b)水洗塔：為壓力槽，使CO₂及H₂S吸附到水中。
 - (c)水再生塔：非壓力槽，H₂S及CO₂自水中吹出。
 - (d)水泵浦(turbine)：循環二塔之間的水。
 - (e)氣體乾燥機：乾燥處理後氣體，以符要求。
 - Membrane process：原理為各組成相對穿透率不同。
 - H₂S的去除：
 - (a)乾式脫硫：利用氧化鐵粉 (Fe₂O₃ • 3H₂O) 做為脫硫與木刨屑混合 (按重量比約 2 : 1 或體積比 1 : 5 ~ 1 : 10)：
- $$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + 3\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{Fe}_2\text{S}_3 + 6\text{H}_2\text{O}$$



此法 H_2S 去除率可達 80 ~ 98% ，脫硫劑用盡後，取出放在空氣中，利用空氣中的氧，再生：



此種脫硫劑在使用之前，須先將氣體中的水份除去，操作溫度在 20 ~ 40°C 最佳。

(b) 濕式脫硫：利用 2 ~ 3 % Na_2CO_3

經沉澱分離 NaHS 後，於再生塔中曝氣，使碳酸鈉溶液再生。

(5) 利用

例題：15 萬人口的污水處理廠，污泥經中溫消化，每天約產生 5400 m^3 的氣體，如何予以利用。

(a) 最簡單的方法為用在鍋爐燃燒，效率在 85% ~ 90% ，即每 1000 kcal 熱量須用 0.23 m^3 氣體，若此污水廠程序熱量需要為 9800×10^3 kcal/day，則相當於：

$$9800 \times 10^3 \div 1000 \times 0.23 = 2250 \text{ m}^3/\text{day}$$

尚剩餘 $5400 - 2250 = 3150 \text{ m}^3/\text{day}$ 必須燒掉 (vent)

(b) 最有效率的方法為轉換成機械能，亦即做為氣體引擎的燃料。譬如在污水廠中，曝氣系統需要送風機，或其電源。良好情況的發電機約有 92 ~ 96% 的效率，平均為 94%，所以轉換為機械能或電能的總效率如下：

從氣體熱能轉換為機械能（在引擎的 coupling 上）約 35%，發電機平均效率 約 94% 所以總效率 = $0.35 \times 0.94 = 0.33\%$ 轉換為電能。

氣體較大部份的熱能由引擎的冷水或經熱交換器或冷卻燃燒氣到 200 °C 左右而回收的熱，約為原氣體熱能的 45% ，故發電的總效率 = 35% + 45% = 80%

所以 $5400 \text{ m}^3/\text{day}$ 的氣體，總熱含量約

$$5400 \text{ m}^3/\text{day} \times 5200 \text{ kcal/m}^3 = 2810 \times 10^4 \text{ kcal/day}$$

約可產生 11400 kwh/day 的電，其中約有 4000 kwh 用在曝氣，熱回收有 12650×10^3 kcal，用在程序加熱上 (9800×10^3 kcal / d) 尚有剩餘，故顯示此廠自給有餘。若污泥須進一步處理，例如機械脫水、乾燥等，可以利用此多餘電及熱源。

5. 阻塞問題

磷酸銨鎂 ($MgNH_4PO_{4(s)}$) 沉積在嚴氧污泥消化上澄液回流的管線上，尤其在彎肘地方及泵浦吸取面 (suction side) 是經常遇到的操作問題。這些發生沈積的地方均為壓力減低， CO_2 溢出，使得消化上澄液的pH上升，相對的，即為 $[Mg^{2+}]$ $[NH_4^+]$ $[PO_4^{3-}]$ 乘積超出其溶解度積 K_{so} 值。

在加州洛杉磯城的 Hyperion 污水處理廠會發生由於 $MgNH_4PO_4$ 沉積，使有 356mm 直徑的污泥消化槽上澄液放流管減少到直徑小於 100mm，消化污泥排入海洋前經過的欄柵也發生阻塞，該廠因為將二級放流水及已消化之污泥均做海洋排放處置，故解決此一沉積問題的方法為利用二級放流水來稀釋已消化之污泥 (體積比為 放流水 : 污泥 = 3 : 1)。因為 pH 值增加將減少 NH_4^+ 濃度，而增加 PO_4^{3-} 濃度，所以一定存在一 pH 值使 $MgNH_4PO_{4(s)}$ 溶解度最小，亦即此 pH 值使得 $[Mg^{2+}]$ $[NH_4^+]$ $[PO_4^{3-}]$ 乘積為最小，經水質化學之計算，可知此 pH 約為 7.5。三倍體積比的稀釋足可適當地防止 $MgNH_4PO_4$ 的沉積發生，為一有效的方法。若二級放流水沒有足夠流量用來稀釋消化污泥或消化污泥之上澄液時，就得考慮其他方法。維持上澄液的 CO_2 量，不使 pH 降低的方法並不實際可行。在加州 Oakland 城 East Bay 的城市區域處理廠中遇到 $MgNH_4PO_4$ 積垢問題，使用添加劑的方法。使用的結晶抑制劑為美國氰胺公司出品的 Cyanamer P-70 一種 polyacrylamide，用量在 10~20 mg/l。雖然此法不太安全可靠，但在沒有其他方法使用之前，也只好使用之。

五、嚴氧生物程序之發展現況

1. 嚴氧反應槽自 1885 年迄今，已有百多年的歷史，歷經各種不同型態的演變，但可歸納出三種型態之反應槽，即：懸浮生長、固定膜生長及混合二者生長情況者。

目前可將嚴氧處理的方法，依反應槽設計的不同，分成五種；第一種是傳統的嚴氧消化槽 (conventional anaerobic digester)，主要用於固形物多的廢水，如化糞池及廢水處理廠中多餘污泥的消化與穩定，需很長的停留時間，不適用於水量大，溶解性有機物多的工業廢水。第二種是嚴氧接觸法 (anaerobic contact process) 亦稱為嚴氧活性污泥法，因其操作理論和好氧的活性污泥法相似，均由連續式培養觀念發展而來。這種方法可用於固形物多的工業廢水，然而由於需要不斷的攪拌，以及污泥迴流等操作，因此設備較複雜，操作成本亦高。第三種是嚴氧

過濾法 (anaerobic filter) , 在處理槽加裝濾材，以防止污泥的流失，增加污泥的停留時間，以提高廢水處理的效率，是一種極適合溶解性多而水量大的工業廢水處理法。第四種是上流式厭氧污泥床法 (upflow anaerobic sludge bed process)。由於甲烷菌的作用是整個厭氧處理過程中的瓶頸步驟，而甲烷菌會放出氣體，細胞壁外缺乏膠質，因此不易聚集成大群落，也不易固著於固體表面，於是荷蘭 Lettinga 等人在上流式反應器中，不放置濾材，直接裝填污泥，污泥在這種反應槽中，必須形成粒狀，才能不被水流帶出，這種處理方法不但可處理高濃度的有機廢水，還可以處理低濃度的都市廢水，具有相當的潛力。第五種為介乎固定膜生物及懸浮生長生物之間的反應槽設計，例如厭氧化流體床 (anaerobic fluidized bed process) ，亦適合於低濃度工業廢水之處理。事實上，上述之厭氧化處理程序，只可分為二大類，一為厭氧化接觸程序，包括所謂厭氧化活性污泥法及上流式厭氧化污泥床法。一為浸沒式介質程序 (submerged media process) ，包括所謂的厭氧化池及流體床等。

2. "能" 已經在廢水處理上扮演著一種決定性的因素。污染防治是一種耗費能源的技術 (energy intensive tech) ，大部分的能源均用在有機物的穩定或分離程序上。故能量平衡 (energy balance) 與質量平衡 (mass balance) 同為評估及使廢水系統設計最適化所不可缺少的步驟。

利用傳統的分析，即可進行廢水處理系統總能量的平衡分析。

(1) 比能量 (specific energy) 例如Btu/gal, kcal/kg COD等，此單位之目的在個別單元可以相加，不同替代方案可以比較，不同形式的能源如機械能化學能等單價均不相同可以獨立表示互相比較。

(2) 化學潛能 (CEP, Chemical Energy Potential) ，為有機物完全氧化為 CO_2 釋出的潛能，可以直接測定(利用Bomb Calorimeter) 或利用Dulong's公式計算而得。
1kg COD的CEP約等於3,000kcal。

(3) 生化潛能 (BEP, Biochemical Energy Potential) ，為經由生物氧化生物可分解物質為 CO_2 及 H_2O 所釋出的潛能，可以用來估計好氧或厭氧系統中的能量流。
1kg最終BOD (BOD_L) 的BEP約等於3,000kcal。

(a) BEP的總體觀：生物可分解性的定義與分解速率及其他環境條件因素等有很大關係，例如堆肥 (composting) 不能分解者在掩埋場 (landfill) 則可能分解，主要在時間上的區別。當污泥齡增加，留在細胞內的BEP減少，即：

$$\text{BEP}_{\text{org}} = \text{CEP}_{\text{cells}} + \text{CEP}_{\text{end}} + \text{product} + \text{熱} + \text{功}$$

(b)好氧系統的 BEP：例如活性污泥等好氧呼吸系統的終產物 CO_2 ，為穩定化合物，沒有 CEP，所以有機物的 BEP 在好氧系統中僅留在細胞內或以熱及功的形式釋出(做為運動及離子、溶質等輸送所須的能量，maintenance energy CEP 熱+功 = 6000 (CODin-CODout)

好氧系統使用的總能量通常以氧的消耗量表示，而氧的消耗量則與釋放出的熱與功成正比，在此情況下，可以系統能量流出來表示能量消耗 (energy consumption in terms of system energy flow)，此種技術可供不同處理方法之間相對能量消耗及潛在資源回收做有效的評估。

(c)厭氧系統的 BEP：厭氧系統產物之一的甲烷，每 kg 甲烷相當於 0.25kg 的 COD，通常代謝作用的 80~90% 的 BEP 留在甲烷上，僅 10~20% 轉成細胞、熱及功。與好氧系統相同，釋放在熱與功的量為系統的函數，但此一部分很小，所以實用上，厭氧甲烷系統可以用 COD 平衡或 BEP 平衡來估計甲烷產生的能量。相反地，甲烷產量可以用來估計被穩定的 BEP 量。實用上，好氧生物可分解的有機物，厭氧也能分解，對好氧為 refractory 的物質，對厭氧而言卻未必竟然。一般以穩定化的 BEP 的 85% 做為轉換成 CH_4 來估計，則相當精確。

(d)無機物傳送的 BEP：有些微生物也做為無機能量傳送的催化劑，稱為自營反應，例如硝化。由於 CEP 及 BEP 均定義為有機物的能量，而氮在標準 COD 分析中並不測定出來，所以在計算硝化系統的總 BEP 時，硝化的 BEP 必須與碳的 BEP 分別計算相加而得。

(4)一貫性廢水處理廠 (integrated treatment process) 能量之比較：(有機物、氮、磷的去除)

能量分析，在一個處理系統中，可以分為二部分，一為廠內的能量來源及需求 (inplant sources and demand)，一為包括進流水與單元程序能量消耗之間總體的能量流 (energy flux) 詳盡的評估。除了直接能源需求外，消耗性材料、藥品、運輸、服務等均為間接能源。

厭氧系統與喜氣系統之比較，除了比較喜氣曝氣槽及厭氧消化槽之能量外，尚應考慮其他單元，例如營養劑量的添加，污泥產率及污泥安定性等，對系統的整體評估關係也很密切。

使用於廢水有機物去除的厭氧系統，目前公認為以厭氧過濾、上流式厭氧污泥床、厭氧流體床或膨脹床等形式的反應槽較具實用。固定膜生物的脫氮作用（包括喜氣硝化與厭氧脫硝）較懸浮生物脫氮為佳，利用生物濃縮的方法濃縮磷，再以化學品沉澱，亦為較經濟的辦法。

3. 資源之利用：生質及廢棄物經生化路徑到回收能源及化學品之資源利用整體架構如圖2所示，顯示甲烷酵解在資源利用之發展全貌。

4. 應用在廢水處理的歷程：

厭氧酵解程序能應用在很多方面，這些應用也有不同的發展階段，從已商業化技術到開發中的技術，應用在城市及工業廢水的處理則介於此二階段之間，亦即已開發但未全面被印證，至於其中無法全面推廣執行的障礙，包括：

(1) 許多應用領域相當古老，有很多操作經驗，例如污泥消化及現址處理，有些領域則相當新，少有操作經驗，例如有害廢棄物處理。

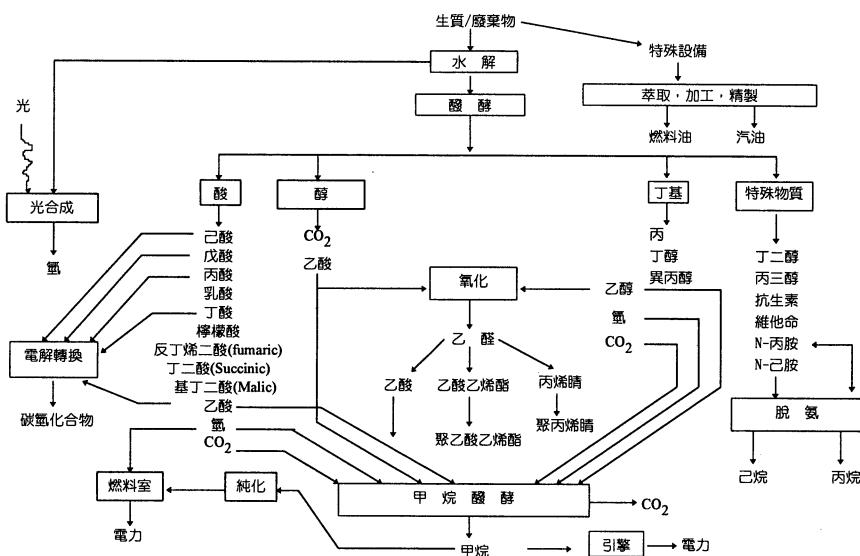


圖2 生質(biomass)及廢棄物經由生化路徑至回收能源及化學物質之資源利用過程

(2) 不同技術成熟度的技術，當然具有某程度的風險，創新技術可以界定為已開發但未全面被印證，但成功的機率很高。

從另一角度言，厭氧消化有一合理的基礎（科學及工程）及充實的操作經驗，可以被視為一項成熟的技術。目前主要的 500 個厭氧處理廠是廢水處理，很少是污水處理，所以大部分經驗也是工業廢水的操作，污水厭氧處理尤其在熱帶地區很有潛力，也有幾座全規模處理廠運轉，但設計方法並未完整發展。

- (3)過去25年雖然建造超過500座處理廠，但還是不如學者及專家的預期。
- (4)許多研究發展工作待進行，包括：適當的營養份，導致顆粒化的反應槽起動。
- (5)能源降價：1970年代能源危機，預期價格上漲，但後來頗為平穩，減少生物氣體利用的利益，以及低耗能成本的優點，嚴氧比好氧的優點就相對減少。
- (6)長期經濟蕭條：

過去5年許多國家經濟蕭條，延緩工業界對執行更新廢棄物管理技術，以及減緩執法之速度。

- (7)嚴氧處理不是最經濟之問題解決方法，某些案例，當有土地且並不太貴，廢水穩定塘是最經濟方法，此時工業界將不會去投資回收年限長的技術。

- (8)嚴氧處理的適宜角色：

嚴氧處理可以被考慮為許多廢水處理方法之一，設計工程師可單獨使用或整合在其他單元之中，例如好氧處理，薄膜處理等。如同任何方法，嚴氧處理有其限制，也受特定條件之影響。沒有一種方法是適合於任何廢水任何情況。對於廢水的可應用性、處理目標及副產品利用等，嚴氧處理的適當角色一直不是很清楚。

- (9)必須前處理及後處理。

- (10)以前已投資了好氧程序。

- (11)早期的失敗經驗：UASB早期放大問題、缺少模廠研究、材質選用錯誤等等。

- (12)臭味問題。

- (13)信用問題：系統穩定度。

以上主要為缺少經驗，只有更多的設計及操作經驗，嚴氧技術的適當角色才會更清楚；前處理、後處理的需要性要了解更清楚；許多問題例如臭味控制，建材選擇及系統起動，均要解決，以凸顯嚴氧系統的好處，例如：較低的污泥產生，污泥處置問題及費用、環境衝擊較低。

六、結語

回顧環境工程的系列發展歷史，可見工程實務通常須要有基礎科學，在技術執行與合理設計步驟之間有長的差距時間。例如活性污泥的發明與該方法合理設計步驟之間相差約50年。即使到今天，活性污泥仍然有一些操作上的問題，例如慢性膨化，也尚待了解。

嚴氧生物程序經歷百年之研發應用歷程，由於其先天優越的特性，當實務經驗快速累積之後，亦將是其發展應用快速成長之時，吾人且拭目以待。