

厭氧生物處理操作技術之研究 STUDY OF OPERATION TECHNOLOGY FOR ANAEROBIC PROCESS

易隆毅，賴逸嵩
L. Y. Yee and Y. S. Lai

原著載於工業污染防治雜誌，第52期
1994年10月，107-122頁

*Reprinted from Journal of Industrial Pollution Control No. 52
October 1994, pp. 107-122*

厭氧生物處理操作技術之研究

易隆毅* 賴逸嵩**

摘 要

配合政府的環保政策，環保署已民國80年公佈較嚴格的87年的放流水標準。爲了符合87年的排放水標準，諸多業者已紛紛著手擴建或設置污水處理廠的計畫，其中具高有機污水的廠家有採行厭氧生物處理搭配好氧生物處理的趨勢。由於操作的適當與否關係處理的成敗；基於此緣故，乃提出厭氧生物處理操作技術的研究。文中將針對厭氧生物處理的反應機制、環境因子做一簡明介紹，並舉UASB及AF兩種不同接觸質型態的厭氧生物處理爲例，逐一說明其操作因子及防治對策；最後列舉美國釀酒業採行UASB作爲好氧生物處理之前處理的成功案例，介以提供吾人爾後在進行類似的污水處理的參考。

【關鍵詞】

1. 抑制物(inhibitor)
2. 緩衝槽(buffer tank)
3. 面積／容積比(surface to volume ratio)

ABSTRACT

To enforce environmental protection policy, the Republic of China EPA has promulgated the "1998 Waste Water Effluent Standards", a sterner edition than the pre one, in 1991. To meet this new standard, many factory owned waste water treatment plants will need be upgraded. Among upgrading the plant, there is a tendency to incorporate anaerobic process with aerobic process as parts of treatment units, especially when the waste water contains large amount of organic components. Because the proper operation is closely related to the success of whole treatment process, we are eager to propose the study of anaerobic operation techniques. The reaction mechanism and environment factors of the anaerobic process will be discussed in this article and the operational guidelines and trouble shooting of different contact media, e.g. UASB and AF, will also be covered. Finally, a case study for the treatment of waste water from brewery industry by using UASB as a pre treatment of aerobic process will be discussed. The successful story of application of UASB in brewery industry can be used as a reference while conducting similar waste water treatment.

*亞新工程顧問有限公司環保部副理

**亞新工程顧問有限公司環保部工程師

一、前言

厭氧生物處理由於具備能處理高強度有機化合物、占地使用面積小、污泥產生量低、無需供給氧氣、操作維護費用低以及可以產出甲烷氣的副產物等優點，而為歐美工業界所樂於採用作為高有機濃度工業污水的前處理。近年來國內學術界在厭氧處理技術方面投下不少心力，已使得此項技術益臻成熟。目前國內以厭氧處理技術應用於工業界者¹以釀酒業、養豬業以及垃圾滲出水為大宗，由於台灣地小人稠，電力資源容量又受到限制，未來以厭氧處理搭配喜氧生物處理進行高強度有機污水的處理將是可以預期的。

厭氧生物處理的型式有十多種²，係隨著污泥是否有接觸介質，入流水的方向型式等而有所不同；目前較廣泛運用於工業界的厭氧處理程序，有上流式厭氧污泥氈法(upflow anaerobic sludge blanket,UASB)，及厭氧濾床法(anaerobic filter,AF)等。本文茲以此二者為例，簡介其操作原理及在操作上所應考量的因子，冀以供業者在進行厭氧生物處理時之參考。

二、厭氧生物處理的反應機制

厭氧生物處理係將污水中之有機化合物在厭氧的環境下，藉由生物菌分解、轉化成二氧化碳及甲烷的一種程序。厭氧程序的反應機制一般可以分成三個階段：

第一階段為酸性水化期：複雜的有機物在水化菌的醱酵作用(fermentation)下，分解轉化為可溶性的有機分子，如：脂肪酸、胺基酸、甘油等，此些分子可為生物菌之能量來源。

第二階段為去氫期：酸化菌將第一階段的可溶性有機分子再轉化成更低分子量的中間產物。

第三階段為醱酵期：甲烷菌將第二階段的中間產物轉化成 CO_2 及 CH_4 之最終產物。相關反應機制圖如圖 1 所示。

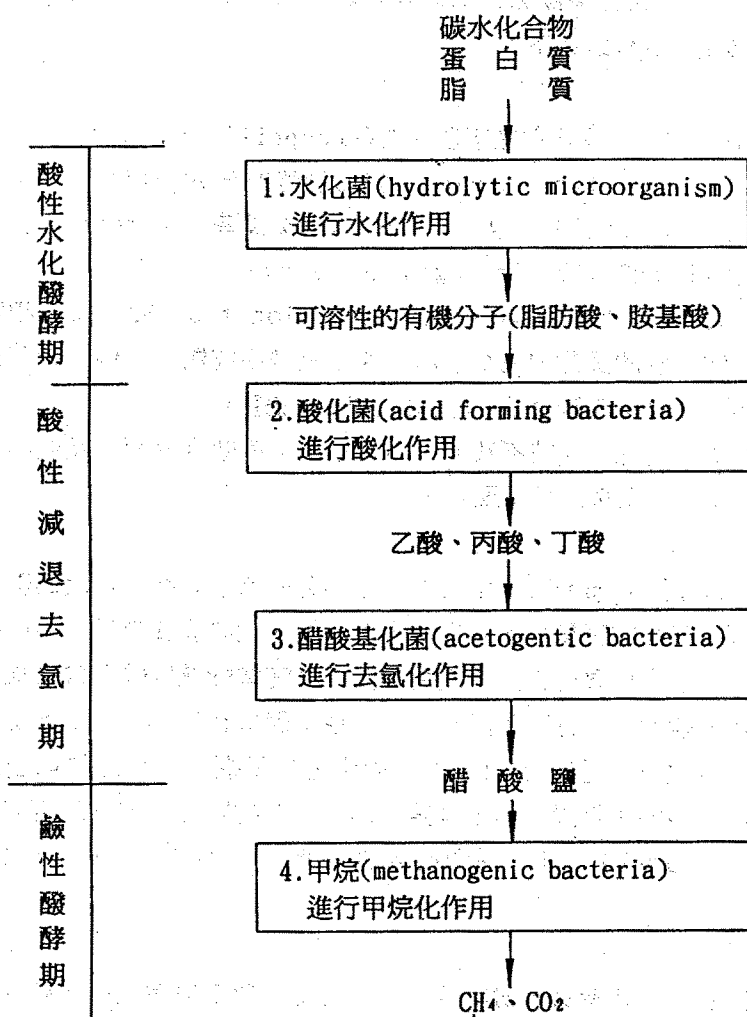


圖 1 厭氧生物處理之反應機制

三、厭氧生物處理的環境因子

影響厭氧生物菌最佳分解動力行為的重要環境因子有：溫度、pH值、營養劑及毒性物質等4項，茲分述如下：

1. 溫度

據W. Wesley³厭氧生物處理在嗜溫範圍(mesophilic range)29~38°C以及嗜熱範圍(thermophilic range)49~57°C皆能有效的作用；然而在高溫下，卻有潛在的困擾存在，如：低微生物成長率(bacteria growth yield)以及相當高的內吸呼率(endogenous rate)。

溫度因子又與生物停留時間(solid retention time, SRT)息息相關。一般要使可生物分解的固體物完全水解，通常是經由控制污泥停留時間來達成；溫度越高，水化越容易達成，污泥停留時間較短。

台灣地區溫暖潮溼，溫差不致太明顯，是故溫度效應反而不及歐美等四季分明的大陸型氣候國家來得明顯及重要。

2. pH值

入流污水的酸鹼度(pH值)，對於厭氧生物菌的活性有相當程度的影響。事實上，不論是喜氣或厭氧生物處理，水質太酸或太鹼皆會影響生物菌的代謝作用。此外，在進行酸化作用所產生的揮發性有機酸或碳酸皆會增加污水的酸度，而這些酸度卻十分不利厭氧菌的活性；因為在低pH值下，部份有機性或無機性抑制物，皆會增加對厭氧菌的毒性或干擾。是故適當地控制pH值，對於厭氧程序的正常操作是十分重要的；一般建議在生物反應槽前設置緩衝槽(buffer tank)，以提供調整入流污水之pH值在6.5~7.5的範圍內。

3. 營養劑

為了提供生物細胞新陳代謝所需，通常生物處理都須添加氮、磷等之主營養劑(macro nutrients)，以及少量的鉀、鈣、鎂、鐵、鋅、硫化物等次要營養劑(micro nutrients)。營養劑的添加量通常隨著污水的組成性質、強度以及處理系統的污泥齡而須做適當的調整；營養劑的調整一般也在緩衝槽中完成。

由於厭氧生物的細胞殖生率(cell yield)遠較喜氣生物為低，是故對氮、磷的需求也就不若喜氣生物為多⁴。典型的厭氧生物處理營養劑的調整比

率為COD:N:P=100:1:0.2。

4. 毒性物質

如同喜氣生物處理一般，厭氧生物處理容易受到超量的重金屬、氨氮、硫酸鹽、酚類、有機氯化物等的干擾而產生毒害(toxicity)；雖然厭氧生物菌群可以經由延長停留時間，適當的培養、同化而對抑制物(inhibitor)進行生物還原的去毒效應(detoxifying effect)，但對於高濃度的毒性物質仍建議先經預處理後才進行厭氧處理。Malina⁴ 提出對厭氧菌群產生抑制作用的相關抑制物濃度，如表 1、2 所示。

表 1 厭氧菌群之無機性抑制物種類及其濃度⁴

抑制物	濃 度(mg/L)	
	適當抑制	強烈抑制
鈉	3,500~5,500	8,000
鉀	2,500~4,500	12,000
鈣	2,500~4,500	8,000
鎂	1,000~1,500	3,000
氨-氮	2,500~3,000	3,000
硫	200	200
銅(總)	—	50~70
六價鉻(總)	—	200~600
三價鉻(總)	—	180~420
鎳(總)	—	30
鋅(溶解性)	—	1.0

表 2 厭氧菌群之有機性抑制物種類及其濃度⁴

抑 制 物 種 類	產生50%抑制效應之抑制物濃度(mg/L)
乙醛(acetaldehyde)	440
丙烯醛(acrolein) C_2H_3CHO	10
Bacitracin抗生素	20
溴乙烷磺磺酸(bromoethane sulfonate)	20
氯仿(chloroform)	15
Creolin (雜酚油、酚及樹脂之混合物)	1
二硝基酚(dinitrophenene) $C_6H_3OH(NO_2)_2$	40
Dettol (間位氯二甲酚、麝品醇及異丙醇之混合物)	10
乙苯(ethyl benzene) $C_6H_5C_2H$	340
氟氯化碳(CCl_3F, CCl_2F_2)	1
甲醛(formaldehyde) $HCHO$	70
長鏈脂肪酸	500
Monensin	2
硝基苯(nitrobenzene) $C_6H_5NO_2$	10
丹寧(tannins) $C_{14}H_{10}O_9$	700
Virginiamycin	10

四、UASB之操作技術研究

4.1 UASB之構造型式

上流式厭氧污泥氈法的構造係利用厭氧污泥具有良好的沉降性，其中顆粒狀的污泥(granular sludge)沉降在反應槽底部形成污泥床(sludge bed)，上層由膠羽狀污泥(flocculent sludge)形成污泥氈。污水由底部的分配系統(distribution system)以一定的流速(0.5~2 m/hr)向上流入反應槽，使污水與污泥能充分接觸。

隨著入流水的注入，污泥床亦同時被擾散；為避免污泥有被沖出的顧慮，通常在反應槽的頂部皆置有固氣分離的擋板裝置；此裝置隨著各公司的設計理念不同而有不同的設置。圖 2 為典型的UASB的設計流程圖。

為了提供適量的營養劑、調整pH值及稀釋體積負荷，以形成一個適合厭氧菌生活的環境，緩衝槽的設置成為UASB系統不可或缺的要件。一般在本池進行調理的水力停留時間為4~6小時。

4.2 UASB之操作模式

在操作UASB系統時Lettinga⁵建議，有幾項原則，要特別注意者：

1. 在起動初期(start up)應稀釋COD進流濃度至5,000mg/L以下；對於高強度污水亦需迴流部分處理水以稀釋控制進流污水COD濃度在15,000mg/L以下。
2. 必須控制醋酸鹽(acetate)濃度在1,000mg/L以下。
3. 被沖出之擾動污泥不得再回到反應槽。
4. 增加有機負荷應採取逐步增加的操作型式，必須確保可為生物分解的COD達80%去除率後方能再增加有機負荷。

4.3 影響UASB之操作因子

厭氧生物菌很容易受到環境因子的影響而降低其活性及操作能力。除了對pH值、溫度及營養劑必須調整至適合生物菌群生活的環境外，對於抑制性干擾物的存在，要特別注意其影響程度，茲將常見的干擾物分析如下：

1. 大量懸浮固體物SS之影響

對於UASB系統而言，由膠羽狀污泥轉變為顆粒化污泥是十分重要的過程。然而入流水若含大量之SS(>6,000mg/L)，尤其是具有膠凝性的懸浮固體物時，不論是膠羽狀污泥或顆粒化污泥皆容易附在這些SS上，然後隨著處理水而沖出。

倘若SS成分大都為不可生物分解者，當累積在污泥床時，甲烷菌的活性會因此而降低，使得顆粒化污泥的生成緩慢，甚或使其污泥強度變小。

再者，懸浮固體若含有諸如：蛋白質、脂質等具上浮性的基質時⁶，容易在反應槽上表面形成浮渣層，並將膠羽性及顆粒化污泥帶出而造成污泥的流失。

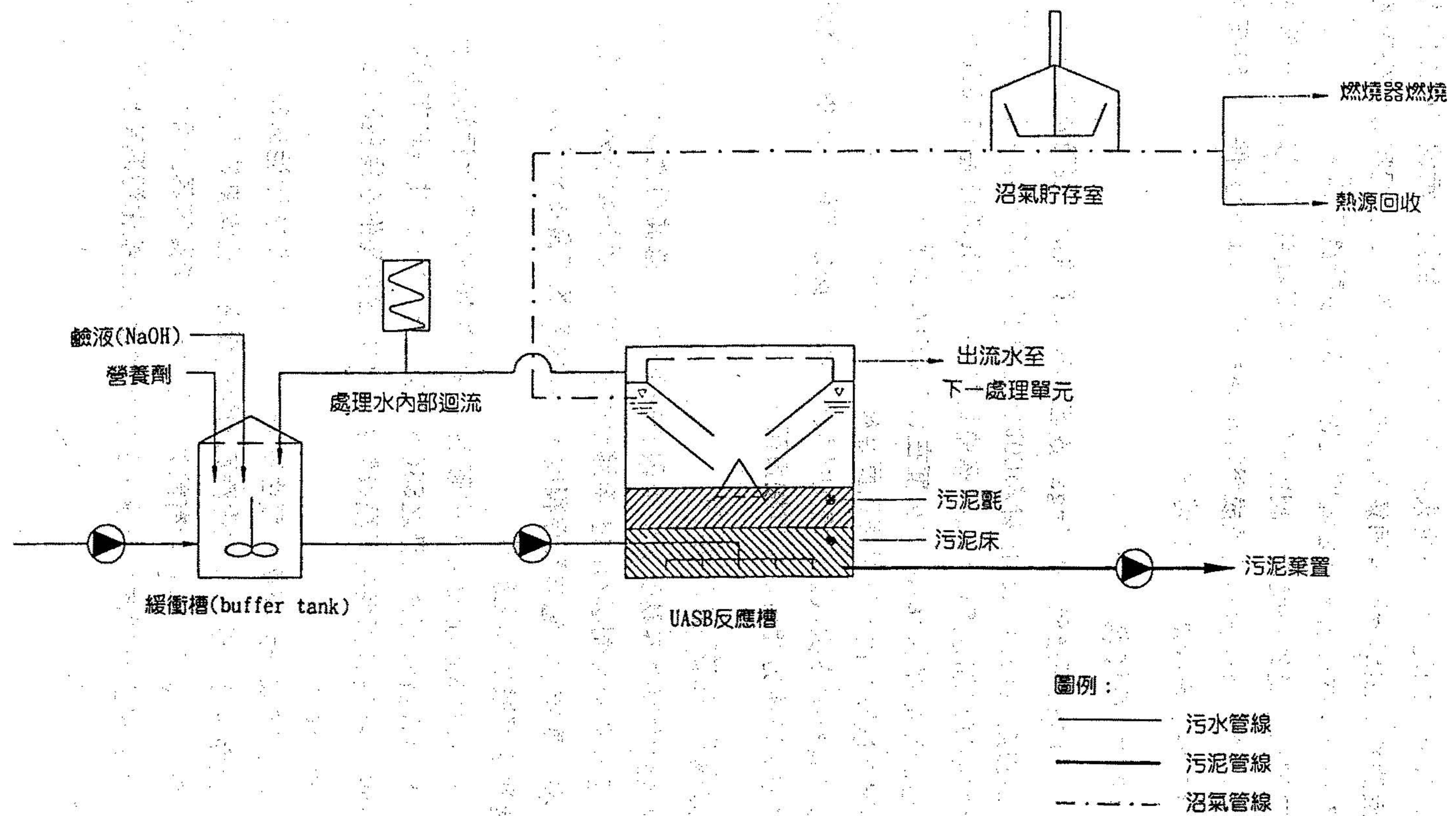


圖2 典型上流式厭氧污泥氈(UASB)污水處理流程圖(biothane技術)

對於含有高濃度懸浮固體物的污水，一般建議合併處理其它干擾物而設置混凝沉澱的前處理，以去除大部份之SS，避免干擾厭氧生物菌的代謝作用。

2. 硫酸鹽之干擾

當污水含硫酸鹽的濃度高時，在硫酸鹽還原成硫化氫後，便直接對甲烷菌產生很大的毒害。基本上，硫酸鹽對厭氧菌並無毒害，只是硫酸鹽還原菌在進行還原階段時與甲烷菌同時競爭能消化的有機物質而間接地抑制甲烷菌的活性。

至於 H_2S 的濃度對甲烷菌產生毒害的界限尚無定論，Malina建議以 COD/SO_4^{2-} 之比值來評估硫酸鹽的干擾度⁶；當 COD/SO_4^{2-} 比值低於7.5時，厭氧菌便會受到相當程度的抑制。對於富含硫酸鹽的污水，建議在進入厭氧生物處理前先行進行預處理的程序，一般常採用的預處理法⁷有：

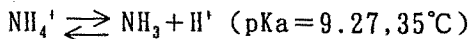
- 蒸氣氣提法(air stripping)
- 稀釋COD濃度，並提高pH值以減少 H_2S 濃度。
- 配合混凝、沉澱的預處理單元，於單元中加入二價或三價的鐵鹽以去除硫酸鹽。
- 濕式洗滌法(wet scrubbing)

3. 高濃度氨氮之干擾

富含有機氮化物的污水在進行厭氧處理時會產生大量的氨氮；在適度的鹼性環境下， NH_4^+ 會轉換成游離的自由氨，而對厭氧菌產生相當程度的抑制作用。

一般工業污水含大量有機氮的情形並不多，但卻常見於台灣的垃圾滲出水及醱酵業污水。以垃圾滲出水為例，依據楊萬發教授⁸對福德坑垃圾滲出水的調查，發覺氨氮成分曾高達3,332mg/L；這可能與國人飲食及棄置垃圾的習慣有關，以致垃圾組成中含有不少量的動物性蛋白質的廚餘。

對於如此高的氨氮，仍建議先行預處理以去除大部分的抑制物。同時，適當地調整pH值，控制自由氨的釋出，並適當馴養厭氧菌，當能減低氨氮的抑制作用。 NH_3 -N平衡反應式如下所示：



除上述UASB在運轉操作上常見的困擾外，荷蘭學者Lettinga以其對UASB的多年研究心得，提出如表3之操作問題及防治對策，頗值得吾人爾後在進行UASB操作時之參考。

表 3 典型UASB之操作問題及防治對策⁵

現 象	原 因	防 治 對 策
1. 大量生物膜附在顆粒化污泥土	廢水中含大量之碳氫化合物	調整入流水pH值並修正污泥負載
2. 顆粒化污泥上浮	污水中含蛋白質、胺基酸、脂肪等致產生微好氧(micro aerophilic)條件	預膠凝及預沉澱並排除入流水之空氣，對污泥負載做適當之修正。
3. 新顆粒化污泥之成長不充足	缺乏足夠之營養劑	調整適當之營養劑
4. 顆粒化污泥磨損	任何污水	調整水力負荷、氣體負荷或培養強度較大之顆粒化污泥
5. 顆粒化污泥活性降低	污水中含抑制性或毒性成分	去除污水中之毒性或採取稀釋的對策；或在少量毒性之條件下讓污泥逐漸適應
6. 化學沉澱物累積在顆粒化污泥表面	如富含Ca ²⁺ 離子之污水	經由預沉澱來降低Ca ²⁺ 離子濃度

五、厭氧濾材(anaerobic filter,AF)之操作技術研究

5.1 AF之構造型式

厭氧濾材生物處理程序係於反應槽內裝設有多孔隙的介質(medium)，以提供生物菌附著在表面，形成生物膜(biofilm)進行分解代謝的作用。由於在構造上有利生物菌的生存較不易流失；因而在AF反應槽中污泥的濃度通常都較高且生物停留時間也較長；對於突然的負荷(shock loading)AF也較能穩定操作。

如同UASB的環境操作因子一般，AF亦要設置緩衝槽以提供pH、溫度、營養劑的調整，以及提供迴流稀釋高濃度有機負荷的作用。隨著入流水上、下位置的不同，而在濾材的不同位置設有散水裝置(flow distribution system)。

AF隨著入流水的位置可分成上流式(upflow anaerobic filter, UAF)及下流式(downflow anaerobic filter, DAF)；介質型式目前常見者為筒狀直立形或傾斜形的摺皺板(corrugated plates)，其材質大多為PVC。

5.2 AF之設計操作考量因子

就質能傳遞方面考量，為了使厭氧生物處理能成功的操作，通常要使基質與生物菌儘可能的接觸；如此，生物顆粒的表面積就扮演著十分重要的因子。惟AF並不像UASB系統有很小的生物顆粒以提供相當大的面積／容積比(surface to volume ratio, S/V)；這是由於AF為了避免濾材的阻塞，通常都採較大的孔隙比，使得S/V的比值都較低的緣故，一般AF的S/V值約為 $100\text{m}^2/\text{m}^3$ 。

此外，當附著在介質表面的生物膜厚度到達相當厚度時，也會影響有機基質的穿透生物膜，相對的質能傳遞的效果也會較差。

如同上述所言，AF在操作上常見的困擾就是濾材發生阻塞的現象。當過多的生物累積在濾材上，嚴重時可能造成短流或死角的累積。雖然可經由設計優良的散水裝置合併引入的甲烷氣攪拌效果來避免濾材阻塞，但是定期的反洗濾材則是必要的。典型的厭氧濾材法的處理流程如圖3所示，相關的設計資料，如表4所示。

AF在操作上另需考量的因子就是迴流的問題。一般迴流對於厭氧處理具有下列之功能：稀釋有機物濃度，維持一定的水力情況防止短流，且可提供額外的攪拌。但對AF而言，迴流應儘可能小以避免沖刷掉已附著的生物，一般AF採取迴流以維持COD濃度在 $8,000\text{mg/L}$ 至 $12,000\text{mg/L}$ 為基準。

表4 典型厭氧處理設計資料⁹

厭氧反應型式	典型COD負載率 $\text{kg}/\text{m}^3\text{-d}$	HRT(hr)	SRT
UASB	5~10	2~8*	—
UAF	1~10	12~96**	13~43**
DAF	5~15	12~96**	10~40**

*由參考資料7推估而得

**由參考資料4推估而得

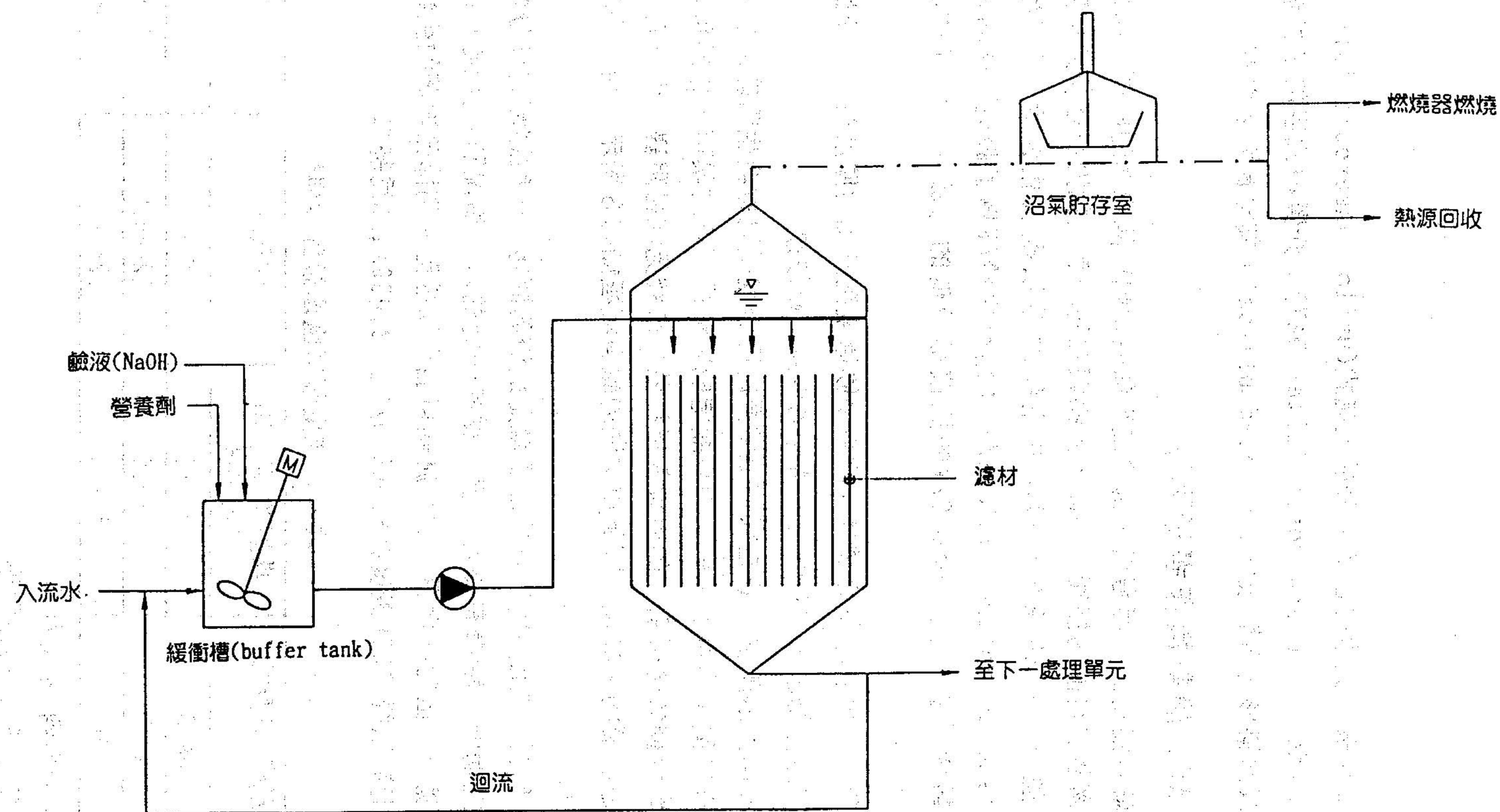


圖 3 典型下游式厭氧濾材(DAF)污水處理流程圖

六、案例研究

茲以美國的啤酒業採行UASB作為喜氣生物處理之前處理為例。其中在Wisconsin州的G.H.B.酒廠自1982年起成功的運轉；1990年後，也在Florida州的Jacksonville、New York州的Baldwinsville及Georgia州的Cartersville三大酒廠成功的運轉UASB系統。由於啤酒廠的蒸餾廢液含有多量的濾渣，為保護厭氧生物處理程序，因而採取篩濾(static screen)及沉澱的預處理步驟後方將污水引入UASB系統。典型的啤酒濾液厭氧生物處理程序如圖4所示；由此四廠的操作結果顯示，COD的去除率皆可達到85%以上，相關的操作結果如表5所示。此外，G.H.B.酒廠化學藥品調理的資料如表6所示。

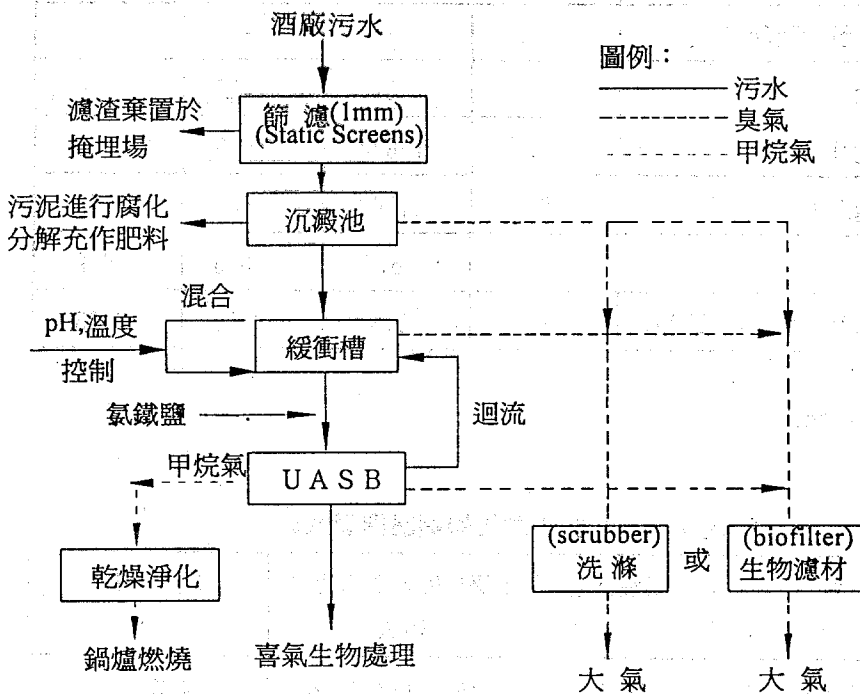


圖4 典型酒廠厭氧生物處理流程圖

表5 以UASB處理啤酒濾液的操作結果資料

參 數		廠 名	G.H.B.	Jackson- ville	Baldwin- sville	Carter- sville
入 流	流量CMD		8,656	9,123	10,826	7,949
	BOD(mg/L)		—	4,730	3,350	—
	COD(mg/L)		2,386*	7,926	4,419	3,133
	TSS(mg/L)		438	768	432	510
	體積負荷(kg COD/m ³ -d)		9.9	7.42	7.49	7.7
	水力停留時間(hr)		5.8	—	—	—
出 流	BOD(mg/L)		—	615	503	—
	COD(mg/L)		267*	1,823	663	564
	TSS(mg/L)		258	1,200	544	275
	pH		—	6.7	6.9	6.9
	甲烷氣產率(m ³ /kg SCOD)		—	0.31	0.35	0.33

*：表SCOD

資料來源：Biothane

表6 G.H.B.酒廠化學藥品調理數據

項 目	每日注入量	每100kg SCOD所需 注入量	功 能
NaOH(50%)	450 l	16.2 kg(100%)	調整pH值
粉狀尿素	25 kg	0.6 kg(N)	主營養劑
磷	0	0	主營養劑
氯化鐵鹽	250 l	2 kg(Fe)	次營養劑

資料來源：Biothane

七、結 語

厭氧處理在處理高有機負荷、占地面積小及節省能源等方面的確有凌駕其它處理的趨勢，但厭氧處理絕對不是萬靈丹，它仍然有使用的限制及缺點：

- 甲烷菌的生長率十分緩慢，因而初期起動期或是再起動期長，通常需植種以縮短其操作時間。
- 厭氧生物菌容易受到毒害物質干擾而產生抑制作用，如高濃度之重金屬、SS、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 H_2S 等；一般皆採取適當的預處理以減除干擾。
- 當BOD/COD比值低於0.4時，厭氧處理效果會大打折扣，表示可為厭氧菌分解消化的物質已不多。

UASB與AF在操作功能上各有其優劣點，端視設計者對污水性質的充分了解及其個人的豐富專業經驗，適時地採用合適的處理程序。本文承吉時洋行公司提供相關的資料，在此一併表達對其熱心參與的謝意。

參考資料

1. 賴敏中，厭氧生物處理技術於台灣地區之應用現況，工業污染防治，PP93~113, 82年7月。
2. Metcalf & Eddy Inc., Wastewater Engineering, Treatment, Disposal, Reuse, Mc Graw-Hill Inc, 3rd ed. PP.420~429, 1991.
3. W.Wesley Eckenfelder, Jr., Industrial Water Pollution Control, Mc Graw-Hill Inc., PP245~258, 1989.
4. Joseph F. Malina, Jr. & Fredenck G. Pohland, Design of Anaerobic Processes For The Treatment of Industrial And Municipal Wastes, Technomic Publishing Company, Inc., 1992.
5. Gatze Lettinga, L.W. Hulshoff Pol, Application of Modern High Rate Anaerobic Treatment Processes For Wasterwater Treatment, Kluwer Academic Pubishers, 1991.
6. Gatze Lettinga, L.W. Hulshoff Pol, Design of UASB-Reactor, Kluwer Academic Publishers, 1991.

7. 徐瑞堂，含硫酸鹽廢水之厭氧處理，工業污染防治，PP51~58，82年7月。
8. 楊萬發，台灣地區垃圾處理廠操作情況之調查（第二年），環境保護署，79年4月。
9. Robert A. Corbitt, Standard Handbook of Environmental Engineering, Mc Graw-Hill Inc. PP6.125~6.134, 1990.