

厭氧廢水生物處理程序之探討

林明瑞*

摘要

厭氧生物廢水處理技術具有比傳統好氧處理技術省能源及減少污泥處理費之優點，且可處理高濃度有機廢水，因此高效率之厭氧處理程序為先進國家正積極研究開發之技術；工研院化工所、能資所多年來在廢水厭氧生物處理技術上之開發研究，已有數種技術推廣成效。

化工所之改良型上流式厭氧污泥床反應槽(UASB)處理溶解性有機廢水，可承受 $25\text{kg-COD/m}^3 \cdot \text{day}$ 有機負荷量；如處理含懸浮性固體物高之醣酵廢水，可承受 $3.0\text{kg-COD/m}^3 \cdot \text{day}$ 有機負荷量，為現時工研院發展之廢水技術中，承受有機負荷量最高及消化效率最高者；化工所由基礎設計到技術擴散，累積了相當多之經驗，已推廣至製酒、食品及化工業廢水之實廠處理。

能資所之高溫厭氧柱塞流式醣酵槽及直立式無攪拌醣酵槽用於豬糞尿廢水消化，其中沼氣之發電技術，應用效用良好，惟發電總成本稍高尚待突破；就廢水處理效率而言，高溫厭氧柱塞流式醣酵為一般中溫同型反應槽消化效率之三倍，COD去除率可達85%以上，可處理超高濃度有機廢水及難以生物處理之廢水；直立式無攪拌醣酵槽為簡單型反應槽，槽體積較大，單位槽體積可承受之有機負荷量較低，單段厭氧消化槽COD去除率可達65%以上。能資所最近引進之Bisan三段式厭氧醣酵，是一高效率之厭氧處理技術，適用於含懸浮性固體物稍高廢水，有機負荷量在 $2.5\text{kg-BOD/m}^3 \cdot \text{day}$ 以下廢水處理，處理效率可達90%以上；但結構複雜，如前段固液分離效果不彰時，容易阻塞，可以

*台中師範學院數理教育系副教授
前工研院污防中心計劃經理

加裝反沖洗設備以防止之。化工所最近擬引進之流體化床反應槽，可承受有機負荷量及其處理效率將比上流式厭氧污泥床更高，惟亦較適合於溶解性有機廢水之處理。

各種厭氧反應槽之應用範圍如下：如為溶解性有機廢水，可選用最高效率、最省土地面積之改良型上流式污泥床反應槽及厭氧流體化床反應槽；如果廢水中含懸浮性固體物稍高（ $1000\sim7000\text{mg/l}$ ），則選用 Bisan 三段式厭氧酸酵槽；如果廢水濃度超高（ $>10000\text{mg/l}$ ），或含難以生物分解之有機物質，則選用高溫柱塞流式酸酵槽；如果使用者人力短缺，且有較大之土地可供利用，則可用直立式無攪拌酸酵槽。

由上顯示工研院所開發厭氧生物處理技術已成熟，主要源於基礎及專案研究之落實及應用良好所致，惟均有適用及操作條件，非任何水質及情況皆可應用。另外前後之配合處理單元、施工品質、現場操作人員之訓練及操作維護手冊之編訂亦需加強。

一、前 言

厭氧生物廢水處理技術是在缺氧情況下，利用兼氣性或厭氣性微生物將廢水中之有機物經過水解、酸化及甲烷化過程，產生甲烷、二氧化碳及少量污泥。厭氧生物廢水處理程近年來為各國積極研究發展之原因如下：

1. 好氧處理需要大量曝氣及攪拌所需之能源，厭氧處理則不需要，且可回收沼氣能源。
2. 好氧處理會產生大量污泥處理處置之問題，厭氧處理則污泥較少。
3. 厌氧處理可處理高濃度有機廢水；好氧處理只能處理較低濃度廢水。

自民國70年起如工業技術研究院等研究單位，即投注相當之人力和財力於厭氧生物廢水處理程序之研究開發及技術推廣上，所發展之技術計有傳統直立式無攪拌反應槽、高溫柱塞流式反應槽、上流式厭氧污泥床反應槽及最近自澳洲BISAN 公司引進之三段式反應槽技術。本文之主要目的為探討這些厭氧處理程序之運用現況、推廣成效及建議適當之改進措施，同時亦探討具有發展潛力之厭氧流體化床反應槽及厭氧生物旋轉盤反應槽之技術發展重點及技術適用範圍；同時本文亦對國內現有應用及發展中之技術，作一評估及建議，希望作為工程界廢水處理技術應用之參考。

二、現時發展之主要厭氧生物廢水處理技術及國內應用現況

厭氧生物廢水處理程序基本上分為兩大類：

1. 懸浮生長型反應槽：反應槽中之微生物在無介質附著之情況下懸浮生長，微生物總量較少，反應效率較低，如柱塞流式反應槽、傳統型無攪拌型反應槽及完全混合式反應槽。
2. 生物膜式反應槽：反應槽中填入適當之介質作為微生物附著之擔體，微生物得以大量

生長累積，污泥濃度較高，反應效率較高，如填充式厭氧濾池，上流式厭氧污泥床、厭氧生物旋轉盤(moving bed reactor)及流體化床反應槽。

以下就上述各種厭氧生物廢水處理技術之原理、應用現況及建議事項等分述於後：

2.1 懸浮生長型反應槽

2.1.1 柱塞流式反應槽（覆皮臥式醣酵槽）

此為一長條型橫臥於地表之反應槽，由於進流之基質（或廢水）如柱塞般之由反應槽一端流入，因而稱之柱塞流式反應槽，且經常以紅泥沼氣袋覆蓋，因而又稱為覆皮臥式醣酵槽。此種醣酵槽因長條型之槽體結構，具有槽體分格、菌群分相及充分分解基質之作用，且操作簡易，經常用於一般鄉間豬糞尿廢水之處理；惟此種反應槽橫臥於地面，佔地面積甚大，因此以後發展為直立式醣酵槽。此種反應槽一般為中溫型(35°C)或不控溫度操作（以反應槽自身產生之能量來維持），這種中溫型反應槽之去除效率計有固液分離、沉澱去除、有機分解等，惟固液分離、沉澱分離作用佔相當之比率；而固液分離產生的污泥或固形物亦需作最終處置，因此有人於數年前即進行高溫柱塞流式改良型醣酵槽之研究。

表 1 高溫及中溫柱塞流式豬糞尿醣酵槽消化效率相互比較

場 別	彰化王精和養豬場 (中溫型)	橫山養豬場 (高溫型)
有機負荷量(kg-BOD/m ³ .d)	0.7~0.8	2.6
進流水BOD濃度(mg/l)	7000~8000	~26000
出流水BOD濃度(mg/l)	250~250	4000
水力停留時間(day)	10	10

民國75年於橫山農會養豬場設置一高溫($45^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$)厭氧柱塞流式改良型醣酵槽，用於處理特高濃度豬糞尿廢水(BOD濃度約為26000mg/l)，長條型之柱塞流式反應槽利用隔板分隔為水解室、主醣酵室、生物膜室、及熱回收室四段，如圖1所示。消化效

率主要是在前面三段進行（尤其前二段），就消化效率而言，有機負荷高達 $2.6\text{kg-BOD/m}^3.\text{day}$ ，BOD去除效率可達84.6%，總懸浮固體物去除率為73.3%，和中溫同型反應槽相較，消化效率確實高出很多（見表1）。足見高溫厭氧消化之效率，但由於進流水BOD濃度為 $260,000\text{mg/l}$ ，所以出流水BOD濃度仍高達 $3,000\sim 4,000\text{mg/l}$ ，仍需要規劃一完善後段處理程序來配合。至於沼氣回收利用方面，是均把回收之沼氣用於消化槽之控溫上，不足之能源就由燃油來補充。因此由直立式發酵槽及本案沼氣利用情形來看，厭氧消化產生甲烷能源僅足以維持反應槽溫度於恆定中間溫(35°C)或高溫($50\sim 55^\circ\text{C}$)。另外沼氣發電時，脫硫亦是重要問題，亦值得研究，根據國內其他單位之研究，有用甘油溶液淋洗或以放射菌脫硫者(16)，均有相當成功之範例。此消化系統用於豬毛、雞毛...等數種塊狀有機固體物之消化，根據質量平衡及沉澱累積之固體物量計算，發現對於塊狀有機固體物幾近完全消化。

2.1.2 傳統式無攪拌式發酵槽

此為應用最早最簡單之廢水處理發酵槽，此種反應槽無任何攪拌，僅為簡單之pH值及溫度控制，此反應槽往往會因污泥沉積於下層及浮渣累聚於上層，使得槽中之有效體積減少甚多，且因無攪拌之結果，產生中間代謝產物（揮發性有機酸及還原性物質累積）抑制作用，因此厭氧生物污泥活性甚低，基於上述兩層原因，此種反應槽一般需要較長之水力停留時間及較大之反應槽來進行消化，消化時間經常超過20天。以往經常用於國內之水肥投入廠及活性污泥消化槽。

自民國70起工研院能資所於竹南台糖畜殖場設置一直立式豬糞尿發酵槽之示範場（見圖2）。發酵槽為傳統式無攪拌反應槽，主要目標是處理豬糞尿廢水及回收沼氣以為發電之用，整廠豬糞尿廢水處理程序共計有：

(1) 固液分離(2) 調整池(3) 直立式發酵槽(4) 好氧生物旋轉盤(5) 最終沉澱池等五段。就廢水有機物之去除效率而言（見表2），由於厭氧加好氧接力式之處理效率及初沉池額外之處理效率，使得總BOD去除率可達95.7%，懸浮固體物去除率可達96.2%，可達放流水標準（見表2）；但由於原進入厭氧發酵槽之廢水有機物量不高（TS低於1.0%），且發酵槽BOD之消化效率僅有80%左右，導致利用沼氣發電總成本高達10.74元／度，且發電量亦僅有 $1,661\text{ KWH/天}$ ，如果用於維持發酵槽體於中溫(35°C)下恆常操作是最佳之能源，如果用於其他用途之發電利用，沼氣總產生量，仍嫌少一點。

除了竹南台糖直立式發酵槽外，另外能資所於民國76年受農委會之委託於北部五戶農家設置豬糞尿廢水處理示範廠，所採用之反應槽為直立式無攪拌發酵槽，五個廠中有兩廠試車時BOD去除率在50%以下，另外三個廠則有較佳之消化效率，可達85%以上。BOD去除率低之主因則在(1) 後段曝氣槽無污泥迴流，曝氣量太大，(2) 反應槽設計容積估計過低等。

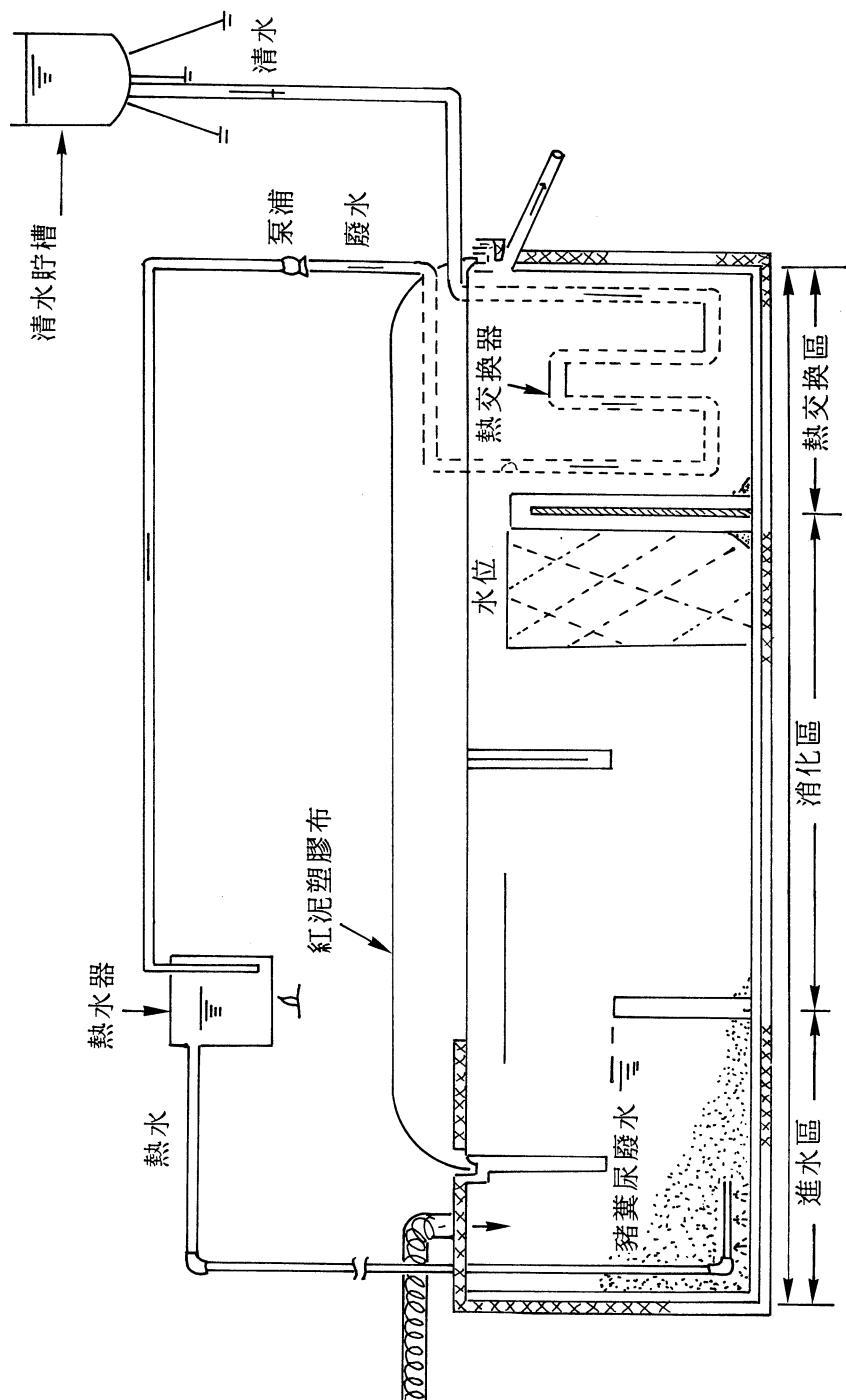


圖 1 高溫柱塞流式酵解之槽體構造圖

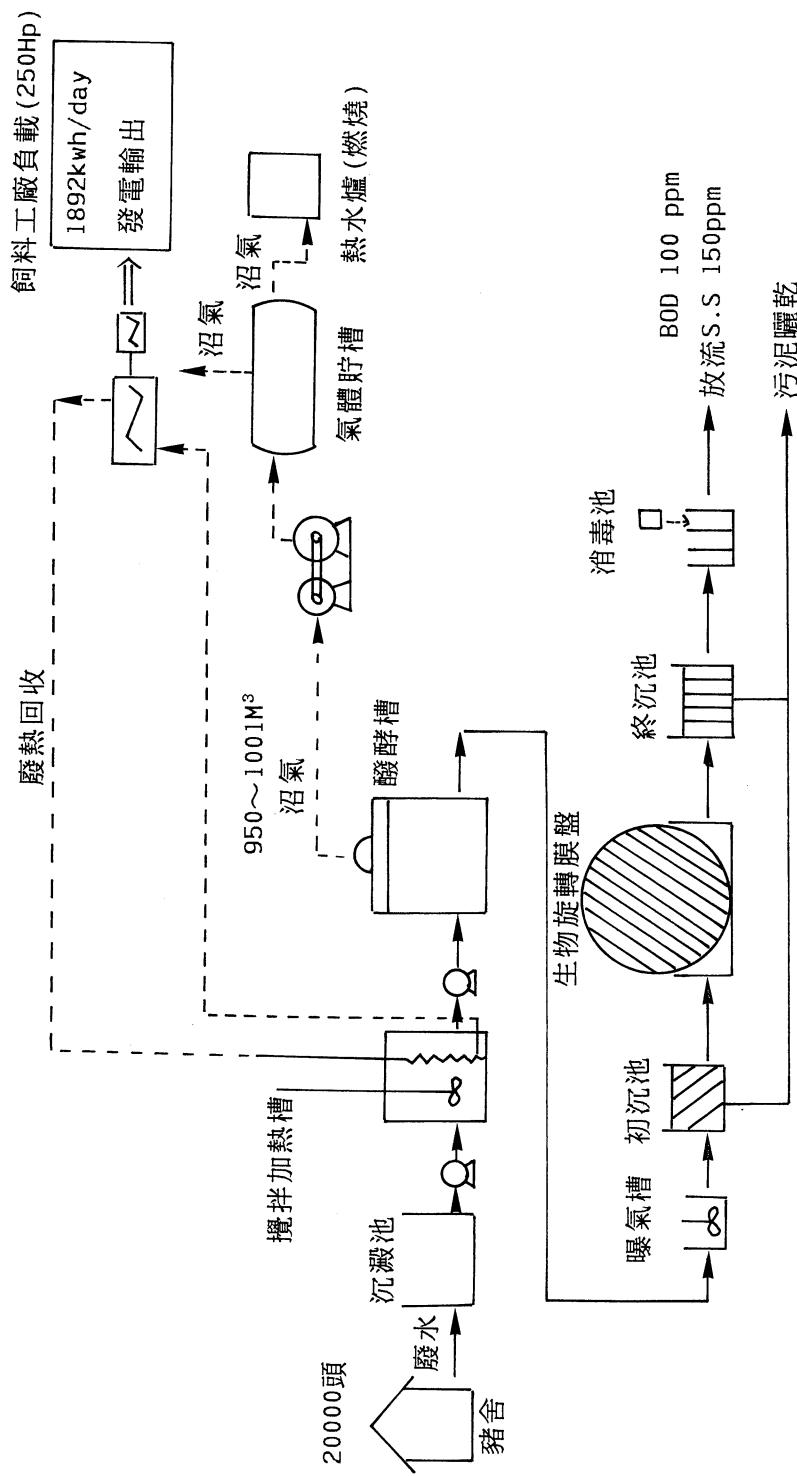


圖 2 竹南直立式醣酵槽與五段式廢水處理程序

表 2 台糖竹南畜殖場廢水處理廠各操作單元之處理效率

1.處理能力	可處理20,000頭豬糞尿 (原設計10,000頭)						
2.處理水量(進料量)	450T (排放水365噸)						
3.日產氣量	950~1,001m ³						
4.發酵槽溫度	25.8°C~26.1°C						
5.水力停留時間	3.75天						
6.進料方式	逐槽連續式進料						
分析項目 分析點	T S (g / l)	V S (#3 #5)	S S (ppm)	COD (ppm)	BOD (ppm)	pH	#5
7.酸酵槽進料	4.40	5.93	3.28	4.52	2,006	3,814	4,675
酸酵槽出料	3.24	3.64	1.99	2.27	1,481	2,047	3,049
R. B. C 進料	1.90	1.78	0.96	0.81	502	531	1,140
水終沉池出料 (排放流水)	1.28	1.12	0.56	0.39	140	133	476
處理 酸酵槽負荷率 (kg/m ³ -day)		0.83	1.32			1.11	2.06
酸酵槽分解率(g/l)		2.09	1.89			1.45	0.77
酸酵槽處理率(%)		38.1	45.5	29.1	43.8	44.3	54.7
情形 初沉池處理率(%)		30.9	33.8	43.7	39.8	29.1	29.2
RBC 及終池物處理率 (%)		12.9	10.6	20.1	12.4	15.7	9.50
總處理率(%)		81.9	89.9	92.9	96.0	89.1	93.4
8.污泥量噸	每日共36噸						

註：處理能力是以養豬場廢水水量計算，廢水濃度不超過TS 1%

表3 各種工業廢水之上流式厭氧汙泥床法處理結果

設設計參數 廢水種類	甜 菜	糖 廉	水	糖 廉	廠 廉 水	酵母及酒精 工業廢水	亞 酸	廠 廉 水	酵素及酒精 工業廢水	酒 酸	廠 廉 水
模型(P)或整廠(F)	P	F	F	P	P	F	P	F	P	F	F
Kg COD 設計容量 day	330	2,800	13,000	45	170	15,000	135	350	180	9,000	
年代	1976	1977	1979	1980	1981	1982	1980	1980	1977	1983	
地點	荷蘭	荷蘭	荷蘭	RFA	比利時	RFA	比利時	比利時	比利時	比利時	
COD(in,out),mg/l, (efficiency)	2,000→740 (63%)	4,200→420 (90%)	3,000→360 (88%)	6,000-600(90%)		32,000-9,000 (72%)	7,500-1,000 (87%)	10,000-2,100 (79%)	10,000-2,100 (79%)	不詳	
BOD(in,out),mg/l, (efficiency)	—	—	—	4,500→315 (93%)		25,600→ 3,000 (88%)	5,500→400 (83%)	6,500→780 (88%)	6,500→780 (88%)		
酸化槽水流停留時間(hr.)	4.4	7.1	4.4	4.8		36	—	—	—	6	
甲烷槽水流停留時間(hr.)				8.5		30	7	7	7	14	
酸化槽負荷,Kg COD M ³ day				30		21.5	—	—	—	40	
甲烷槽負荷,Kg COD M ³ day	11	14	16.25	15		22.6	25	25	25	14	
甲烷反應槽氣體產率, Nm ³ M ³ day	3.0	4.7	6.4	6.8		8	13	13	13	6.6	
污泥負荷,Kg COD Kg VS day	1.3	1.3	—								
設計參數：											
附註	30 M ³ 反應槽 T=30°C	200 M ³ 規模 T=30°C	30 M ³ 規模 T=35°C								

2. 標準型及改良型厭氧上流式污泥床反應槽之比較，由表 3 中發現消化效率高低受到有機負荷量之高低，進流水質特性及操作狀況等之影響，尤其對於含高懸浮性固體物或固形物多之廢水，因反應槽近於完全混合、水力停留時間短，對於較難生物分解之固體物幾無任合滯留及分解作用，所以廢水中懸浮固體物之去除率較差；同時，因此種酸酵槽為氣、固、液三相式反應槽，且氣體作用及水流不斷迴流結果，污泥床體之穩定度較差（操作作時需要較高之技術及精確控制），故化工所專案部門即對上述問題加以改進，融合荷蘭UASB系統之污泥顆粒技術、反應上層過濾裝置及比利UASB系統之分離式傾斜管沉澱迴流污泥技術，於反應槽上層及廢水出口處設置傾斜塑膠浪板，穩定污泥床體及滯留部分污泥顆粒及懸浮固體物，如圖 3 所示。

由三福化工、亞洲化工、公賣局七個製酒廠及平鎮永誠香料廠各廠之UASB 相互比較發現有機負荷量高低、廢水水質特性、反應槽設計是否良好、操作狀況是否良好等，為影響反應槽效率之主要因素。不同之廢水水質、有機負荷量之處理結果，甚難有一公正之評論（見表 4）。大致而言，三福及亞洲化工之UASB技術是完全成功，由實際操作結果亦由表 4 中得到一重要結論，UASB反應槽用於溶解性有機廢水之處理效果特佳，有機負荷量約可承受到 $25\text{kg-COD/m}^3 \cdot \text{day}$ ，（COD去除率在80%以上），如果為含懸浮固體物較多之酸酵廢水（酵母酸酵及製酒酸酵廢水）、則能承受有機負荷量較低（低於 $3.0 \text{ kg-COD/m}^3 \cdot \text{day}$ ），COD去除率為75%。

表 4 國內UASB反應槽之消化效率相互比較結果

廠別 項目	三福	亞洲	公賣局七酒廠	平鎮永誠
有機負荷量 (kg-COD/m ³ ·day)	20-25	1.0-1.3	3.64	3.0
進流水濃度 (mg-COD/l)	2,000~ 3,000	3,000 ~ 4,000	2,000 ~ 16,000	6,000
出流水濃度 (mg-COD/l)	400-600	<100	100 -2500	2000
水力停留時間 (day)	1.125	3.0	0.25	2.0
COD去除率 (%)	80	97.1	84.4-95	66.0

2.1.3 完全混合式反應槽

由於傳統式無攪拌醣酵槽之槽體有效體積及污泥活性甚低，廢水在反應槽中之停留時間過長及反應槽體積過大，為改善上述之缺點，再發展之反應槽則以充分攪拌之方式來進行，是謂完全混合式反應槽，此種槽除了有效體積及污泥活性得以改善外，反應槽中之揮發酸量及還原性物質累積量得以減少。

2.2 固定膜式厭氧生物反應槽

2.2.1 厭氧濾池反應槽（填充式厭氧反應槽）

於反應槽中填充較大型之濾料，如石頭、塑膠顆粒、塑膠浪板、紅木及各種化工填充環等；為節省佔地面積，為垂直流向反應槽或為下流式及上流式反應槽，此種反應槽由於有可供附著之介質，反應污泥濃度高，反應效率快，不過此種反應槽之缺點是反應槽並無清除累積污泥之作用，因此當反應槽啓動操作一段時間往往會因污泥大量累積而阻塞孔隙增加水頭損失或因介質上之厚層污泥膜脫落而影響水質。

2.2.2 厭氧生物旋轉盤(moving bed reactor)

由於厭氧濾池會因污泥大量累積阻塞孔隙而增加水頭損失及水質不穩，為改善這方面之缺點而有旋轉盤式厭氧生物反應槽之發展，此為一串塑膠（或其他材質）圓板，這些圓板可部分或完全浸入水體中，圓板上長滿生物膜層可消化有機基質，此種反應槽因生物污泥濃度較高基質傳送效率亦佳，消化效率較高及揮發性物質累積較少，但此種反應槽在長期之操作後，生物膜脫落會影響出流水質之穩定度。

2.2.3 厭氧上流式污泥床反應槽

工研院化工所多年來研究發展了厭氧上流式污泥床反應槽，曾用於三福、亞洲等化工廠及公賣局七個製酒廠。

1. 厭氧上流式污泥床反應槽(UASB)之結構分析（如圖3）。

標準型“厭氧上流式污泥床反應槽”是厭氧生物反應槽填充或累積大量之生物污泥，經水流迴流作用而膨脹為一污泥床體，具快速消化廢水中有機物之特性，是謂厭氧上流式污泥床反應槽，其具有如下特性：

- (1)生物污泥濃度高、接觸面積大。
- (2)物質傳送效應快。

反應槽中之生物污泥濃度往往高達 $5\sim 10\text{g/l}$ 之間，對各種有機廢水（如製糖廢水、酒精製造廢水、亞麻工業廢水及製酒廢水）之處理效果相當良好，有機負荷在 $11\sim 12\text{kg-COD/m}^3 \cdot \text{day}$ ，去除率在 $63\sim 90\%$ 之間。

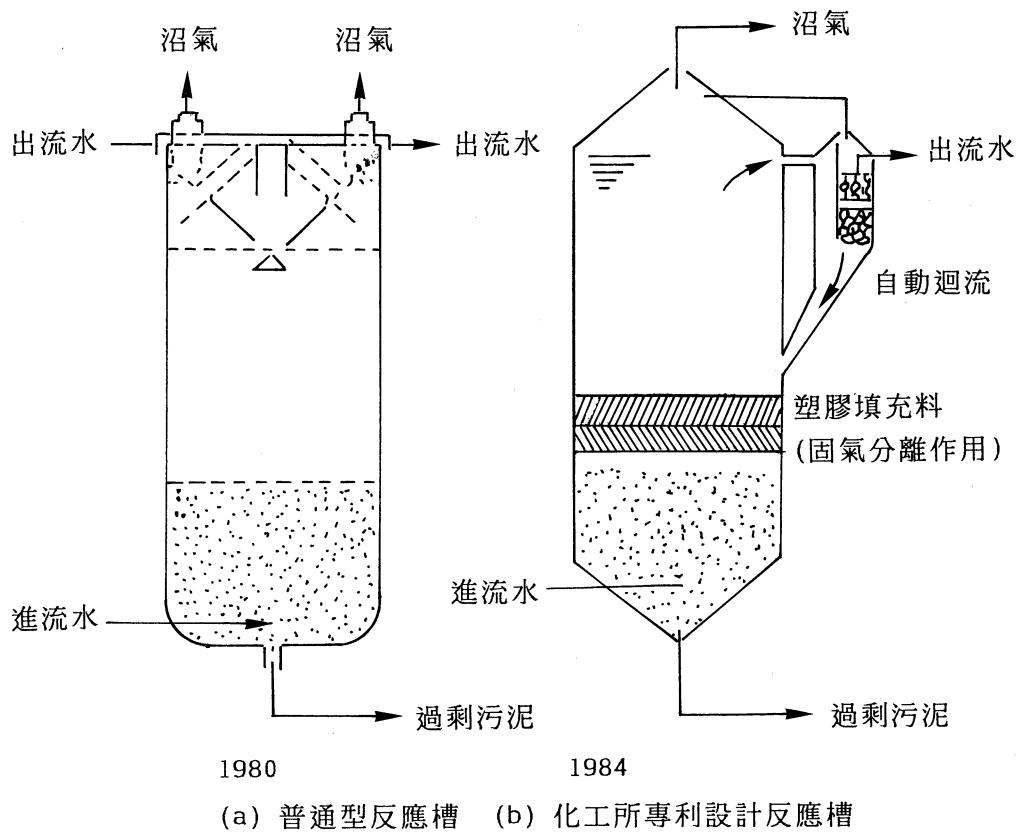


圖3 標準型和改良型上流式污泥反應槽(UASB)槽體結構之比較

2.2.4 流體化床反應槽

工研院化工所79年度進行開發流體化生物處理槽(biological fluidized bed reactor)技術引進項目，此技術主要是包括厭氧及好氧流體化反應槽之串聯處理程序。

(1)生物流體化床反應槽結構及流程分析 (如圖4)

生物流體化床反應槽中填加適當大小之介質，以為微生物附著生長，並利用循環泵浦快速迴流出流水，使得反應槽中污泥顆粒成為浮動狀態，於厭氧或好氧狀況下，藉著大群污泥顆粒床體來消化廢水中的有機物，是謂生物流體化床反應槽。由反應槽中介質作為污泥(微生物)附著之擔體，反應槽中接觸比表面積高，且反應槽之污泥量(微生物量)多，故反應槽之反應效率高(5)。由表5回收此系統與其他反應槽操作參數相比較即可證明。進流水為高濃度有機廢水時，則先以前段厭氧生物流動床反應槽進行消化處理，降低有機負荷量到適當之範圍，再以後段好氧化生物流動床反應槽再行處理，以達放

流水標準，如為中低濃度有機廢水則可以單段厭氧流體化床反應槽進行處理。

由於出流水快速迴流之應效率高之另一主因，處理有機物體積負荷量可高達 $100\text{kg-COD/m}^3 \cdot \text{day}$ 以上，但也因反應槽流體化之結果，對於廢水中之懸浮固體物無任何滯留效果，且水力停留時間短，對於懸浮固體物之消化效率有限。表 5 為厭氧生物流體化床反應槽，上流式厭氧污泥床反應槽、及活性污泥法之比較(5)(6)。

表 5 厭氧生物流體化床反應槽、上流式厭氧污泥床反應槽、及活性污泥法之比較

項目	厭氧生物流體化床 反應槽	上流式厭氧污泥床 反應槽	傳統活性污泥法
有機負荷量	$20\text{-}40\text{kg-COD/m}^3 \cdot \text{day}$	$10\text{-}30\text{kg-COD/m}^3 \cdot \text{day}$	$0.2\text{-}2\text{kg-COD/m}^3 \cdot \text{day}$
土地需求比例	1	2-13	50-1000
供氧動力需求	—	—	$\sim 1\text{kwh/kg-BOD}$
迴流動力需求	$\sim 0.6\text{kwh/kg-BOD}$	$\sim 0.2\text{kwh/kg-BOD}$	$\sim 0.05\text{kwh/kg-BOD}$
污泥產生率	$< 0.1\text{kg-VSS/kg-BOD}$	$< 0.1\text{kg-VSS/kg-BOD}$	$< 0.5\text{kg-VSS/kg-BOD}$
甲烷產生量	$\sim 0.35\text{SL/g-COD}$	$\sim 0.35\text{SL/g-COD}$	—
BOD去除率	80~95	80~95	70~85
污泥濃度(g/l)	0.5~40	0.4~30	0.3~0.5

(2) 國內外生物流體化反應槽之操作及應用(5)

國內外現時應用於廢水處理之生物流體化反應槽大部份為實驗室或模型廠之規模，此種反應槽特性為消化效率高、環境適應性佳，可用於多種用途（例如碳質氧化、去除氮源及臭味）。而現時整廠實際操作為荷蘭Gist Brocades公司及美國Ecolotrol、Dorr-Oliver二家公司，主要用於處理酵母、抗生素發酵廢水及乳酪廢水，處理效率甚佳，亦有實際用於氮源去除者。

(3)串聯式生物廢水處理程序

厭氧及好氧流體化床反應槽串聯處理的主要目之是為處理高濃度有機廢水，由前段厭氧流體化床進流水BOD濃度 $1,000\text{~}15,000\text{mg/l}$ ，BOD去除率如以80~90%計，後段好氧流體化床進流水BOD濃度約為 $200\text{~}1,000\text{ mg/l}$ 之間，經好氧流體化床反應槽70~90%之去除率可達放流水標準。厭氧串聯好氧流體化反應槽可用於氮源去除及臭味之消除，另外如二相（水解產酸相+甲烷產生相）流體化反應槽對於含半固體物及高懸浮固體物之廢水之消化效率特高，而厭氧濾池串聯流體化床反應槽對於懸浮固體物之去除及污泥之滯留有相當良好之效果。

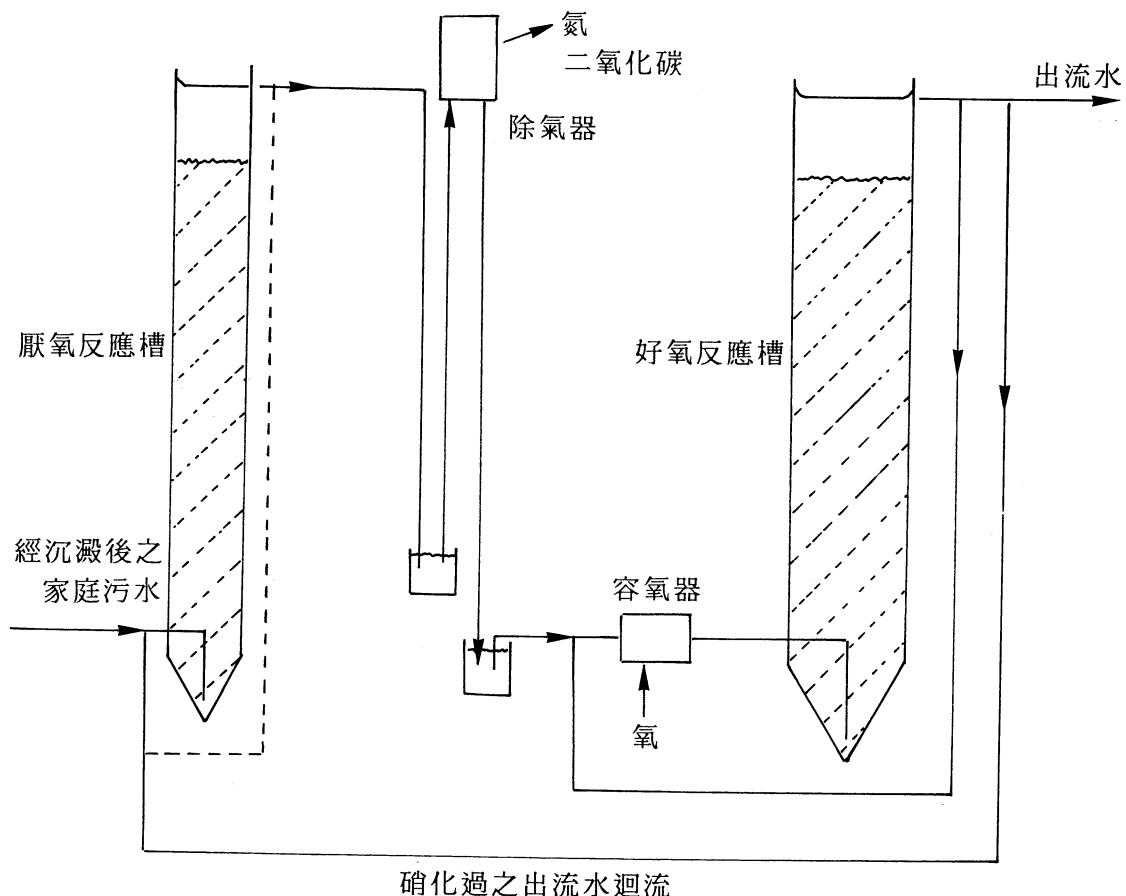


圖 4 厭氧及好氧流體化床二段式反應槽用於家庭污水處理之流程

2.3 組合式厭氧生物廢水處理反應槽

1. 三段式厭氧酸酵槽結構分析

能資所決定由澳洲Bisan 公司引進之三段式厭氧酸酵槽（如圖 5 所示）為一組合式反應槽，第一段為沼氣迴流完全混合式反應槽，第二段為加有增面器之柱塞流式反應槽，第三段為加有濾料之厭氧過濾池，由於此一反應槽同時具有三種反應槽之功能，因此處理效率特高，當有機體積負荷量在 $2.5\text{kg-BOD/m}^3.\text{day}$ 以下，（進流水BOD濃度在 $5,000\text{ mg/l}$ ，水力停留時間為 2.0 天），BOD去除效率可以達 88% 以上，如果判定各種廢水生物處理程序操作效果是否良好，以 70% 以上之 BOD 去除率為認定標準，則 Bisan 之三段式厭氧酸酵槽為一高效率之厭氧生物處理技術，表 6 為現時國內 Bisan 三段式酸酵槽於豬糞尿廢水處理之結果。

由於Bisan三段式厭氧酸酵槽之第一段反應槽是利用部分沼氣迴流混合之完全混合式反應槽（或部分混合式反應槽），並無污泥滯留保存之效果，所以反應槽中可用於進行消化反應之污泥量（微生物量）和完全混合式反應槽之污泥量相當，約為 $4,000\sim 8,000\text{mg/l}$ 之間，由於反應槽中之工作微生物有一定上限，故所能承受之有機負荷量亦有限（約在 $2.5\text{kg-BOD/m}^3 \cdot \text{day}$ 以下），如果超負荷量，則消化效率有明顯降低之趨勢，由表6之彰化合興養豬場之廢水水質分析數據可為證明。因此以Bisan反應槽進行豬糞尿廢水處理，當接近於有機負荷之上限時，必須要有完整之固液分離或延長廢水在反應槽之停留時間。

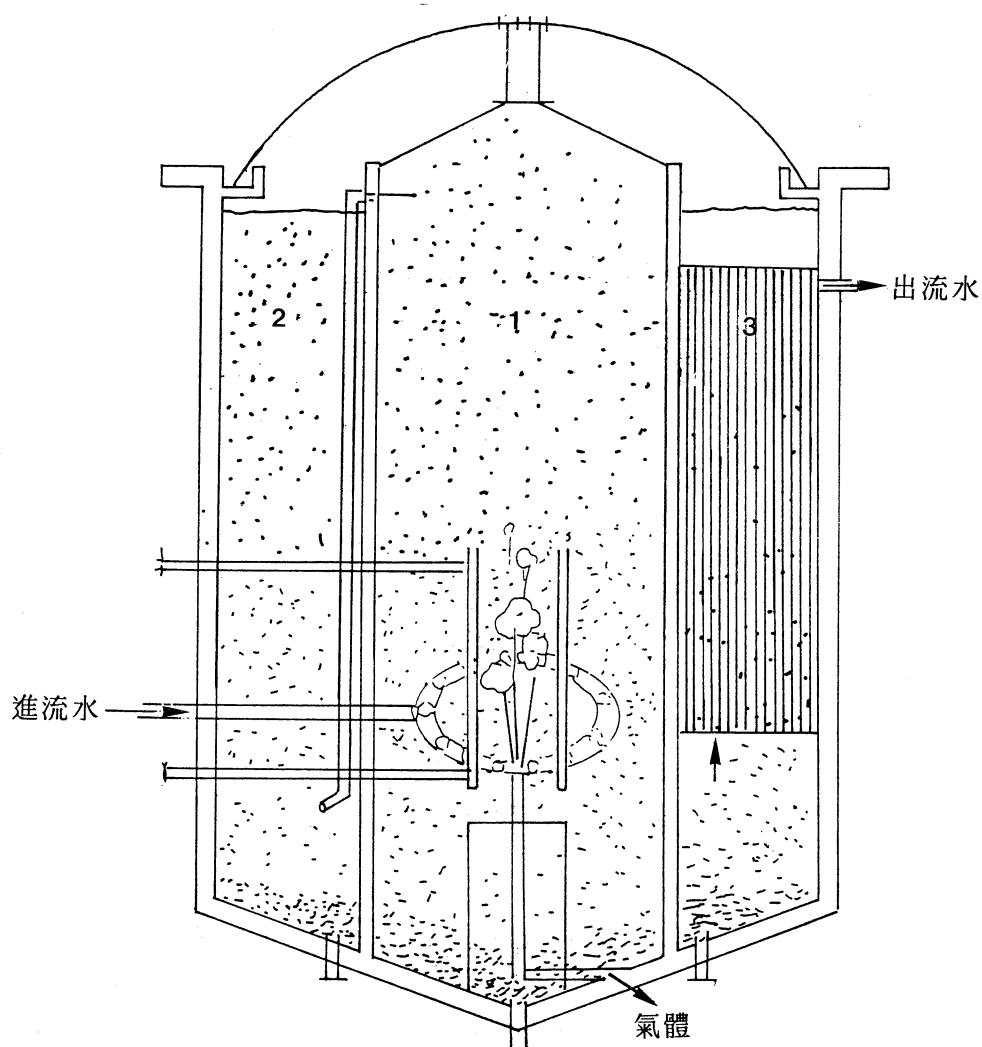


圖5 Bisan三段式厭氧酸酵槽

表 6 台糖月眉畜殖場及彰化合興養豬場豬糞尿廢水之處理結果比較

場 別 項 目	月眉畜殖場	合興養豬場
原進流廢水	3,000~4,000	5,310
BOD濃度(mg/l)		
醣酵後廢水	400~500	437
BOD濃度(mg/l)		
好氧處理後出流水	150~200	189
BOD濃度(mg/l)		
醣酵槽體積	250m ³	17.5m ³
水力停留時間	2.6天	2.4天
總BOD去除率	94.3%	91.8%

2. 技術應用現況

現在Bisan 醣酵槽共計用於大統、合興及五個台糖養豬場，大統及五個台糖畜殖場是經能資所廢水處理部，由澳洲Bisan 公司技術引進及合作承建；大統養豬場已在發包施工中，五個台糖養豬場則接近驗收、結案階段，合興養豬場則是Bisan 公司最先在國內設立之示範廠，操作已接近五年，是海泰工程公司和合興合作承建的。

2.4 二相式厭氧生物廢水處理程序

工研院民國74~76年從事果菜廢棄物處理研究⁽¹⁾，果菜廢棄物經過攪碎過濾，過濾液進入二相上流式厭氧污泥床(UBF) 進行消化，全程處理流程如圖 6 所示，酸化槽以水解產酸為主，BOD去除率僅有20%，甲烷槽是完全處理BOD，去除率為91%，再加上後段好氧處理，最好放流水BOD濃度為45mg/l，BOD總去除率為99.6%，就消化效率而言相當成功。此廠為設置於拖車上之機動性展示處理廠，未來打算以原有之1 m³模型廠為藍本擴建為每日可處理800 公斤之果菜廢棄物。足可說明二相式反應槽之消化效率及耐衝擊力均高於單段式反應槽，因此二相式之任何串聯之消化槽如二相式完全攪拌反應槽、二相式直立型無攪拌反應槽及二相式流體化床反應槽非常值得繼續研究。

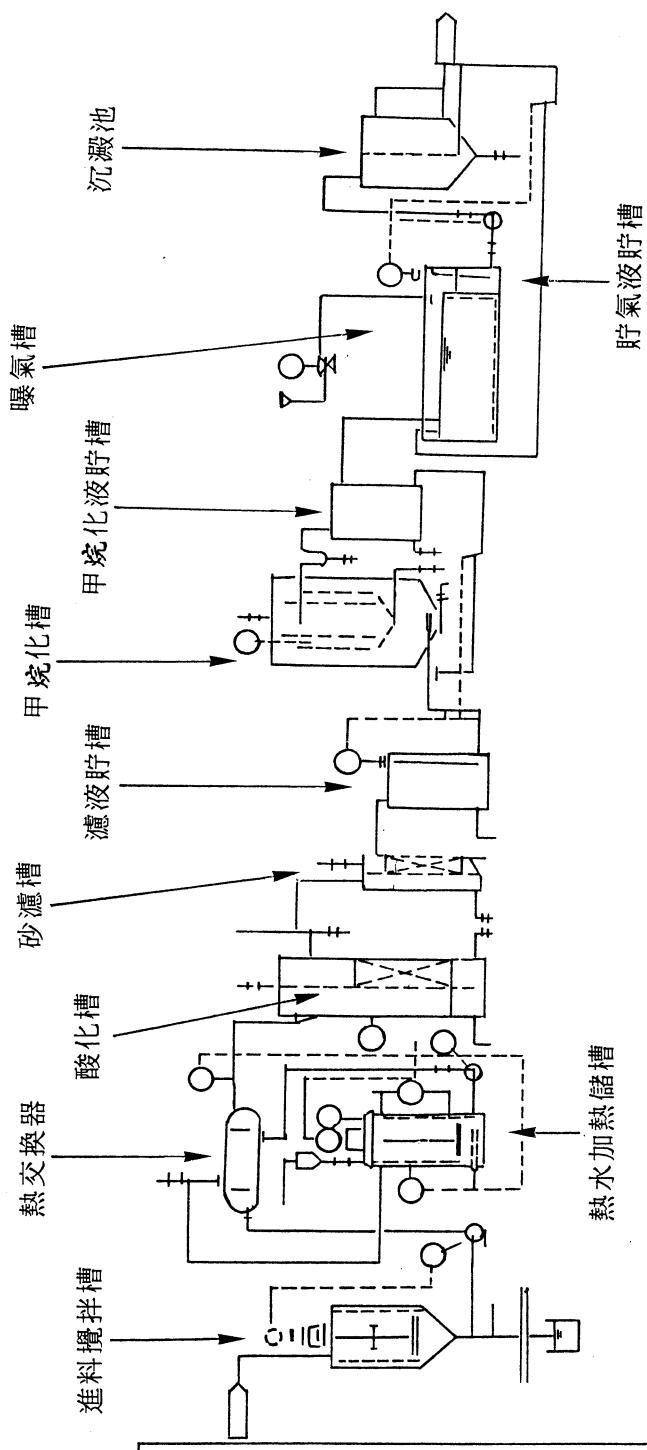


圖 6 可移式二相式上流汚泥床醣酵槽及其全部處理流程

三、厭氧生物廢水處理程序評估

本章係綜合資料蒐集及現場考察之結果，針對實際廢水處理整廠及模型廠中，各種厭氧酸酵槽之操作效率及操作參數之相關性加以評估，並核為優、良、可、劣四等級。表 7 為整合性之評估表，其基本數據詳列於表 8。評估方法如下：

- 1.主要是根據表 9 中各種厭氧酸酵槽消化效率及操作參數作為主要評估之依據。
- 2.有機負荷量以能承受 $>22.5\text{kg-BOD(COD)}/\text{m}^3.\text{day}$ 負荷量之反應槽為優； $2.5\sim 1.5\text{kg-BOD(COD)}/\text{m}^3.\text{day}$ 為良； $1.5\sim 0.8\text{kg-BOD(COD)}/\text{m}^3.\text{day}$ 為可；均小於 $1.0\text{kg-BOD(COD)}/\text{m}^3.\text{day}$ 為劣。
- 3.消化效率高低以BOD或COD之去除率高低來表示。
- 4.出流水質好壞，以放流水中BOD或COD及SS濃度和放流水標準相差之遠近為評估標準。
- 5.以“ A、B、C、D ”分別代表“ 優、良、可、劣 ”作為評比之分類標準。
- 6.“ ● ”為工研院所發展或即將技術引進之厭氧處理程序。

表 8 為各種厭氧生物廢水處理技術資料，表中之各種評估參數評判標準，分別說明如下：

- 1.有機消化效率：有機負荷量($\text{KG-BOD}/\text{m}^3.\text{day}$)或($\text{kg-COD}/\text{m}^3.\text{day}$)，以單位反應槽體積於單位時間內所承受之有機負荷量BOD或COD重量表示，是反應槽消化效率高低之重要指標。
- 2.MLSS(g/l)：為累積於反應槽中之生物污泥（微生物）濃度。
- 3.反應槽體積和水力停留時間成一正比率之關係，當兩者增加時，有機負荷量減少，BOD 及 SS去除率會增加，反之亦同。
- 5.沼氣產生效率主要以每kg進流BOD 產生之氣體量表示；一般當反應槽之效率高、質傳作用好且沒有有機酸及還原性物質累積之現象時，則沼氣產生之效率高。
- 6.處理含高SS及半固體物廢水之可行性：當反應槽具有濾料濾除作用，水力停留時間較長，具沉澱去除效果，或消化溫度較高，具特殊分解能力，前段有水解酸化槽，可提高水解酸化半固體物之功能。
- 7.土地投資費：主要以佔地面積之大小來評斷。
- 8.建造費：主要包括硬體建造費和設備費，以所需反應槽體之大小及設備繁複度來衡量。
- 9.操作費：包括操作人次、所需電費及所需藥品費。
- 10.操作難易度：以是否需要特殊技術或人員特別照顧來評斷。
- 11.起動難易度：以反應槽設置好，填入所需污泥後，到反應槽達到預定消化效率所需

表 7 各種厭氧生物廢水處理技術評估表

厭 氧 參 數	反 應 槽	1. 中溫柱塞流式反應槽	2. 高溫柱塞流式反應槽	3. 傳統型無攪拌反應槽	4. 完全混合式反應槽	5. 厮氣濾池反應槽	6. 污泥(UASB)床反應槽	7. 改良式(UASB十廝氣濾池)	8. 厮氣流體化床反應槽	9. 改良式廝氣流體化床反應槽	10. 厸氣生物旋轉盤(bed)	11. 二相式完全混合反應槽	12. 壓氣流動床法十廝氣濾池	13. 壓氣流動床法十廝氣濾池	14. 三段式高效率+廝氣柱塞流+廝氣槽流+廝氣濾
1. 有機負荷量大小	C	A	D	C	A	A	A	A	A	C	B	C	A	B	
2. 消化效率高低	B	B	C	B	B	B	B	A	A	B	A	B	A	A	
3. 出流水質好壞	C	C	C	C	C	C	B	C	B	C	B	C	B	B	
4. biogas產生量	C	A	C	B	C	A	A	A	A	B	A	C	C	B	
5. 處理含SS高及半固體物質廢水	B	A	C	C	C	C	B	C	B	C	B	B	B	B	
6. 土地投資費	D	D	C	B	B	A	A	A	A	B	B	C	B	A	
7. 建造費	A	A	B	B	C	C	C	C	C	C	B	D	C	C	
8. 操作費	A	A	A	B	B	B	B	C	C	B	B	D	C	A	
9. 操作難易度	A	A	A	B	B	C	C	C	C	C	B	C	C	B	
10. 啓動難易度	A	C	A	B	C	C	C	C	C	C	B	C	C	B	
11. 停車再啓動難易度	A	B	A	B	B	C	C	D	D	C	C	C	D	B	
12. 長期間操作穩定度	A	A	B	A	C	C	B	C	B	C	A	C	C	B	
13. 臭味產生問題	B	B	B	B	C	B	B	A	A	B	C	A	C	B	
14. 對有機突增負荷之敏感度	A	A	C	C	B	C	C	C	C	C	B	B	B	B	
15. 對有毒物質突增負荷之敏感度	B	B	C	C	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	
16. 用於低濃度廢水處理及其他用途	C	C	C	C	C	B	B	A	A	B	C	A	A	B	

表 8 各種厭氧生物廢水處理技術資料表

參 數	厭 氧 反 應 槽	1. 中溫型粒塞 流式反應槽	2. 高溫型粒塞 流式反應槽	3. 傳統型無攪 拌反應槽	4. 完全混合式 反應槽	5. 上流式厭氣 濾池反應槽	6. 標準型UASB	7. 改良型UASB
1. (1) 有機負荷量 (kg-BOD/m ³ .d)	0.7~0.8	2.6	0.316	0.5~1.2	COD 6~6.5	COD 9~16	COD 4,300 -6,800	COD 1.0~25 2,000 -30,000
(2) 進流水BOD或COD濃度(mg/l)	7,000 -8,000	26,000	2,840	5,000 -15,000			4,300 -6,800	2,000 -30,000
(3) 出流水BOD或COD濃度(mg/l)	200 -250	4,000	540					100 -6,000
(4) BOD或COD去除率(%)		84.6	81.0	70~88	73	72~99	66~97.1	
(5) 進流水TS或SS(mg/l)		12,000	5,491					
(6) 出流水TS或SS(mg/l)		3,200	1,763					
(7) SS去除率(%)		73.3	67.9	20~30				
2. MLSS濃度(g/l)		1.0~3.0	1.0~3.0	3.0~5.0			5~10	
3. 反應槽體積(m ³)	300	55	1,350		382~439			
4. 水力停留時間(day)	10	10	9	6~10	2.7~3.1	3.0~7.0	7.25~3.0	
5. biogas產量 (如質作用好 ,沒有有機酸累積效果好)	中 上	中 中	中 上	中 差	中 中	中 中	中 上	中 中
6. 是否適於處理高SS及半固體物 (如豬糞) 廢水	中 上	中 中	中 上	少	少	少	少	少
7. 土地投資費(面積大小)	大	中	中	中	中	中	中	中
8. 建造費(硬體建造及設備費)	便	便	大	中	中	中	中	中

表 8 各種厭氧化物廢水處理技術資料表 (續)

	1	2	3	4	5	6	7
9.操作費(操作人數+電費+藥品費)< 0.5萬/月	0.5人次	1 人次 5-10萬/月	0.5人次 < 0.1萬/月	1人次 7-8萬/月	1人次 7.5-16萬/月	1人次 5-12萬/月	1人次 5-10萬/月
10.操作難易度(是否需要特殊技術或人員特別照顧)	易	中 上	易	中 上	中	中 下	中 下
11.起動難易度(是否當環境條件好時馬上可以操作或不管環境因素就可以操作(pH、酸度、環境、溫度))	簡單	簡單	簡單	簡單 上	中 上	中	中
12.停留再啓動的難易度(停電或不進料一段時間後，再啓動的影響程度)	易	易	易	中 上	易	中	中
13.長期間操作穩定性(是否有生物膜脫落或污泥累積而導致消化槽體積減少或污泥阻塞管線)	中 上	中 下	中 上	中 上	中 下	中	中
14.臭味產生問題(如果有機酸或還原性物質累積臭味較大)	中	下	下	中	下	中 上	中 上
15.對有機突增負荷的敏感度(如 HRT 長或靠近於 plug flow 型的反應槽愈有利)	上	上	中	中 下	中 上	中 下	中 下
16.對毒生物質突增負荷的敏感度(污泥齡愈有利，MSS 愈高 bio-film process 愈佳，HRT 長亦有利)	下	下	下	下	上	中	中 上
17.用於低濃度廢水之處理及其他用途(如脫氮及除臭)	中 下	中 下	中 下	中 下	中 上	中	中

參 數		厭 氧 反 應槽	8. 压氣流體化床反應槽	9. 改良式壓氣流體化床反應槽	10. 移動床壓氣生物旋轉盤	11. 二相式完全全混合式反應槽	12. 壓氣流動床+好氧流床反應槽	13. 壓氣流動床+好氧流床反應槽	14. Bisan 三段式壓氣流體化床反應槽
1.	(1) 有機負荷量(kg-BOD/m ³ .d)	COD 0.2~40	COD 0.2~40	COD 0.7~1.4	COD 0.5~6.0	COD 1.0~40	COD 0.5~15	COD 0.5~15	1.18 -2.75
	(2) 進流水BOD或COD濃度(mg/l)	200 -15,000	200 -15,000	3000 -4,000	1000 -15,000	1000 -20,000	1000 -15,000	1000 -15,000	2765 -6,502
	(3) 出流水(BOD或COD)濃度(mg/l)								303
	(4) BOD或COD去除率(%)	60~98	65~98%	70~85	80~95	84~99	85~92	85~92	-4,450
	(5) 進流水TS或SS(mg/l)								56.6 -95.3
	(6) 出流水TS或SS(mg/l)								3,100 -15,800
	(7) SS去除率(%)	10~30	20~50			15~50	60~80	60~80	-7,300
2.	MSS濃度(g/l)	5~35		5~15	3.0~5.0	5~35			3.0~8.3
3.	反應槽體積(m ³)			39 -1,500					
4.	水力停留時間(day)	0.02~2.0		2.0~8.0		0.04~2.5			2.0~2.5
5.	bilogas產生量(如質傳作用好，沒有機酸累積效果好)	中上	中上	中上	中上	中上	中上	中上	中上
6.	是否適合處理高SS及半固體物(如豬糞)廢水	中下	中	差	中	中	中	中	中
7.	土地投資費(面積大小)	少	少	中	中下	少	少	少	少
8.	建造費(建築建造及設備製造費，以結構要求及設備製造費	中	中	大	中下	中下	中下	中下	中下

表 8 各種厭氧生物廢水處理技術資料表（續）

	8	9	10	11	12	13	14
9.操作費(操作人數x電費+藥品費)	2.0人次	1人次	1.5人次	20人次	3.5人次	3.0人次	1人次 < 1萬/月
10.操作難易度(是否需要特殊技術或人員特別照顧)	難	難	中	中	難	難	中
11.起動難易度(是否當環境條件好時馬上可以操作或不管環境因素就可以操作(pH、酸度、環境、溫度))	困難	困難	中下	中下	困難	困難	容易
12.停留再啓動之難易度(停電或不進料一段時間後，再啓動之影響程度)	難	難	中	難	難	難	中上
13.長期間操作穩定性(是否有生物膜脫落或污泥累積而導致活性槽體積減少或污泥阻塞管線)	中	中	中下	中上	中	中	下
14.臭味產生問題(如果有機酸或還原性物質累積臭味較大)	上	上	上	中下	上	中	中
15.對有機突增負荷之敏感度(如 HRT 長或愈近於 plug flow 型之反應槽愈有利)	中	中	中	中	中上	上	上
16.對毒性物質突增負荷之敏感度(污水斷流長愈有利，MLSS愈高，bio-film process愈佳，HRT長亦有利)	中	中上	上	中	中上	中	中
17.用於低濃度廢水之處理及其它用途(如脫氮及除臭)	上	上	中	中下	上	上	中上

表 9 台灣省產業有機廢水污染量推估表 (76年)

業別	廢水量 (CMD)	污染量 (kg-BOD/day)	污染量 %	BOD (mg/l)	SS (mg/l)	* 適合技術
養豬業	358,790	717,570	29.4	1,000-13,000	3,000-23,000	(A)(B)(C)
造紙業	723,000	489,310	20.2	700-20,000	500-3,300	(B)
工業區	337,500	351,000	14.4			
食品業	196,910	323,940	13.3	600-8,400	640-5,000	B(C)D E
醣酵業	31,660	151,920	6.2	2,200-25,000	500-4,000	B(C)
化工業	270,320	127,340	5.2	400-12000	100-1,000	(C) D E
染整業	139,010	57,080	2.3	1,000-7,400	1,100-32,000	(B)
製粉業	6,020	27,140	1.1	500-3,000	2,000-5,000	B C D E
製革業	22,940	24,410	1.0	2,000-5,000	9,500-17,000	
石化業	23,300	13,450	0.6	400-5,000	0-500	B D E
煉油業	77,500	7,030	0.3	200-5,000	20-800	B
製糖業	4,920	4,130	0.2	1,000-3,000	400-3,000	B C D E
屠宰業	6,080	3,040	0.1	500-1,200	120-640	A B C
其他製造業	319,250	143,920	5.9			
合計	2,517,780	2,440,650	100.0			

* 有括符者表部分可行

A:直立式無攪拌醣酵槽

B:高溫柱塞流式厭氧醣酵槽

C:Bisan 三段式厭氧醣酵槽

D:上流式厭氧污泥床

E:厭氧流體化床

時間之長短做評斷。

- 12.停停再起動之難易度：當消化槽停停或停止進料一段時間後，再啓動之難易度及達到穩定操作所需之時間。
- 13.長期間操作穩定性：是否有生物膜累積阻塞及脫落而影響水質，或污泥大量累積，減少反應槽之有效體積，或污泥阻塞管線之可能性。
- 14.臭味產生問題：臭味產生部分原因是進流廢水含有大量硫源所致，如以反應槽結構而言，當反應槽質傳作用不佳，大量還原性物質累積，則臭味問題嚴重。
- 15.有機突增負荷之敏感度：當水力停留間愈長，反應槽水力特性愈近於柱塞流式反應槽，對於有機突增負荷之適應性愈佳。
- 16.毒性物質突增負荷之敏感度：反應槽中之污泥齡愈長、污泥濃度愈高愈有利，因此固定膜生物處理程序較佳；另外當水力停留時間愈長，亦有相當之緩衝能力。
- 17.低濃度廢水之處理及其他用途：一般厭氧處理程序只用於高濃度有機廢水之處理，而有此處理程序之流體化床反應槽則可用於低濃度有機廢水處理及脫氮、除臭之處理。

根據以上之評表發現有以下之技術可再行開發引進：

- 1.二相式反應槽：包括二相式完全攪拌反應槽、二相式直立型無攪拌反應槽、二相式上流污泥床反應槽、二相式流體化床反應槽。
- 2.高溫型反應槽：高溫型上流式污泥床反應槽、高溫型流體化反應槽。
- 3.厭氧流體化反應槽串聯好氧流體化反應槽。
- 4.厭氧流體化反應槽串聯厭氧濾池反應槽，或反向串聯。

四、結論與建議

- 1.國內已發展之高溫柱塞流式厭氧醣酵槽、上流式厭氧污泥床反應槽及技術引進之澳洲三段式厭氧醣酵槽、厭氧流體化床反應槽在適當之操作條件下，均為高效率之生物厭氧處理程序。各種厭氧反應槽之應用範圍歸納如下：
 - (1)如為溶解性可生物分解之有機廢水，可選用最高效率、最省土地面積之改良型上流式污泥床反應槽（可承受有機負荷達 $25\text{kg-COD/m}^3\cdot\text{day}$ ）及厭氧流體化床反應槽。
 - (2)如廢水中含懸浮性固體物高，則選用Bisan 三段式厭氧醣酵槽，有機負荷量最好低於 $2.5\text{kg-BOD/m}^3\cdot\text{day}$ 。
 - (3)如廢水濃度超高或含難以生物分解之有機物質，則選用高溫柱塞流式醣酵槽，BOD去除率可達85%以上。
 - (4)如使用者人力短缺，且有較大之土地可供利用，可用直立式無攪拌醣酵槽及中溫型柱塞流式反應槽。

各種酸酵槽於國內各種產業適用情形分別詳見表 9。

2. 工研院發展之厭氧反應槽中以直立式無攪拌反應槽、上流式污泥床反應槽兩者技術已經成熟，即將技術轉移，高溫柱塞流式酸酵槽及Bisan 三段厭氧酸酵槽技術尚須分別再作後段串聯好氧處理程序及性能改進，亦可能技術轉移，流體化床反應槽則正在研究及技術引進之中。
3. 廢水處理技術推廣成功與否，除與設計施工有關外，尤其與現場操作人員素質密不可分。因此未來在技術成果推廣時，除加強委託單位操作人員之訓練，且在操作維護手冊之編訂上，應謹慎週密且切合實際狀況，即要有完善之軟體技術轉移計畫，才不致使工研院技術遭受外界質疑或批評。
4. 國內未來對污染防治技術開發之策略，宜朝向低成本、高效率、節省土地之最新技術研發路線，宜由國外引進技術，以及化工所與能資所已有雄厚之專家人力與既有技術之改良及推展，積極主動挖掘國內較具困難度及較嚴重污染之產業廢水，從實驗室模型實驗場至放大工程化，進行逐次階段性之技術開發。

五、參考文獻

- (1) 阮國棟等，“改良型厭氧污泥床法處理工業廢水論文集”，工業技術研究院化工所編，民國77年。
- (2) 張坦卿等，“厭氧系統生物污泥活性之測定”，第九屆廢水處理技術研討會，民國73年 9月，P99～110。
- (3) 張坦卿等，“輔酶F420之測定應用於厭氧生物系統”，第十一屆廢水處理技術研討會，民國75年 9月，P367～376。
- (4) 唐高永等，“光合成硫化菌處理水中硫離子之研究”，第十二屆廢水處理技術研究討論會，民國76年 9月，P187～198。
- (5) Cooper,P.E. & Atkinson,B., "Biological Fluidized Bed Treatment of Water and Wastewater", Ellis Horwood Limited Incorp, England , 1981.
- (6) Tilche, A. & Rozzi, A., "Poster Papers", the Fifth International Symposium on Anaerobic Digestion, Bologna, Italy, 22-26, May, 1988.
- (7) 李明誼、林榮廷，“豬糞尿酸酵液中甲烷產生菌之研究”，能源研究第034 號報告，民國72年 6月。
- (8) 邵 信等，“亞洲化學公司楊梅廠廢水處理工程輔導總報告”，民國78年 1月。
- (9) 能資所簡訊，“酒精酸酵實驗”，EMR0-BB-77-005，民國77年，P5。
- (10) 陳榮耀、陳文卿，“溫度效應與厭氧酸酵”，高溫厭氧酸酵技術研討，民國77年 4月，P31-57。

- (11)李明誼、林榮廷，“甲烷發酵速率改進研究”，能源研究第065 號報告，民國73年 7 月。
- (12)林榮廷等，“食品工業廢棄物處理研究計畫”，能源發展基金會研究報告，EG-7405，民國74年 6月。
- (13)行政院農業委員會等編印，“養豬廢水處理實例示範手冊”，民國77年5月，P28-31。
- (14)Haze,M., "Anaerobic Treatment of Wastewater in Fixed Film Reactors", Proceedings of a Special Seminar of the IAWPRC,Copenhagen,Denmark,16-18,June, 1982,published by Pergamon Press Co., 1983.
- (15)平鎮永誠香料廠實際廠操作成果報告。
- (16)台南新化台灣省畜產試驗所研究成果。
- (17)陳榮耀、張小道，“果菜廢棄物發酵處理研究計劃”，能源研究發展基金研究報告，NO.778K1，民國77年 8月。