

## 廢水厭氧處理功能診斷—UASB案例

邱創汎\* 游惠宋\* 彭明鏡\*

### 摘要

厭氧程序，尤其是UASB已廣泛應用於工業廢水處理。在操作實廠厭氧系統時，常會遇到系統異常，導致功能下降；或是工廠產能擴增，需要評估現有系統處理能力能否提昇的情況。本報告將UASB的功能分成：(1)正常情況下的功能，以及(2)系統對突增負荷的承受能力，二個層面來考量。分別介紹如何應用不同的指標，來診斷UASB是否正常運作，並以案例說明指標的應用情形。

#### 【關鍵字】

1. 厭氧處理(anaerobic treatment)
2. 可行性評估(treatability study)
3. 上流式厭氣污泥床處理槽(UASB)
4. 生物處理(biological treatment)

---

\*工業技術研究院化學工業研究所環境科技研究組研究員

## 一、前　　言

厭氧處理程序近幾年在學術界、工業界及研究單位的努力推動下，在國內的應用已逐漸普及。目前國內工廠採用的厭氧系統，包括上流式厭氧污泥處理槽(upflow anaerobic sludge bed, UASB)、厭氧接觸槽(anaerobic contactor)、厭氧流體化床處理槽(anaerobic fluidized bed bioreactor, AFB)等不同設計的反應槽，但仍以UASB最為普遍。工業技術研究院化學工業研究所(化工所)自民國七十四年設計建造國內第一座UASB處理槽之後，隨後在經濟部科技專案的支持下，不斷進行技術改進，至今已將技術移轉國內七家環保公司，並已建造大小處理槽達33座，累積處理槽總體積達12,500立方米。在十餘年的操作過程中，雖然過程尚稱順利，但也曾經歷許多處理槽功能異常的情形，留下許多寶貴的經驗。俗語說三折其肱而成良醫，化工所也經由這些異常現象的處置過程，開發出一套UASB功能診斷方法及邏輯，這些診斷實驗方法，平時可以用來研判一個實廠UASB的體質優劣，在異常現象發生時，也可以用來找出異常現象造成的原因，並加以解決，非常具有實用價值。本文主要目的就是介紹這套UASB功能診斷的方法，除可提供UASB使用者參考之外，由於所有厭氧系統都有其相通之處，所以其它型式的厭氧處理槽也可參考應用。

## 二、UASB功能項目

UASB的主要功能是去除廢水中溶解性的有機物。根據經驗，要診斷一個UASB功能是否良好，可以分成：(1)正常情況下的功能，以及(2)系統對突增負荷的承受能力，二個層面來考量。對於每個層面，有不同的指標可以來進行診斷及研判。

在正常情況下，UASB對溶解性有機物(COD)的去除能力優劣與否，可以由處理槽的體積負荷、COD去除率及出流水COD三項指標加以衡量。由於工廠廢水性質及水量並非終年如一，而是經常會有水量或濃度的上下起伏，所以一

一個設計良好的UASB必需有足夠的能力應付現場的變動，UASB對突增負荷應變能力可以由處理槽出流水揮發酸濃度、甲烷菌活性、污泥顆粒化程度等三項指標來衡量。在處理槽發生異常現象時，系統必需有能力迅速恢復，此項能力的完善與否可以由硬體設計的考量是否週全？週邊配合措施是否足夠？等方面加以評比。

### 三、正常功能診斷

原則上，若評比處理同一種廢水的UASB功能的優劣，當然是體積負荷越高，COD去除率越高的系統是功能比較好的系統。但是要比較處理不同廢水的UASB處理槽性能，則單憑體積負荷、COD去除率、出流水COD等外觀指標，是無法判定的。舉例而言，膠帶廠的廢水中主要成份是醋酸，是厭氧微生物非常容易分解的基質；反之，有些廢水如高分子合成廠的廢水或是垃圾滲出水，其中含有許多厭氧微生物無法去除的污染物。所以若以UASB處理這兩種廢水，即使前者已達到80%的COD去除率，功能仍有改善的空間；而後者可能去除率只有50%，卻可以說是功能良好了。所以直接的外觀指標，並無法作為研判UASB性能的唯一依據，必需配合其它廢水特性指標，才能作出正確的判斷。在定性或定量描述廢水特性方面，有生化甲烷產能(Biochemical Methane Potential，簡稱BMP)及厭氧毒性測試(Anaerobic Toxicity Assay，簡稱ATA)兩個常用的實驗方法可以應用。BMP的意義類似喜氣處理的BOD<sub>u</sub>，其數值代表廢水中COD有多少比例是可厭氧分解的，ATA實驗則是測試廢水中是否含有抑制厭氧微生物的物質，兩者都是設計及操作UASB的重要資料。

#### 3.1 BMP及ATA實驗方法

目前普遍採用的BMP的實驗方法是Owen<sup>(1)</sup>所設計，國內則是鄭氏最早引進<sup>(2)</sup>，並應用於許多學術研究中。學術研究用的實驗步驟複雜但較為可靠，目前化工所使用的BMP實驗方法是經過簡化改良，供應用於實際狀況的研判。BMP實驗的原理如圖1所示，是在反應瓶中加入等量且活性良好的厭氧污泥，

除保留一瓶作為空白組之外，在其餘各瓶中（實驗組）加入不等量的廢水，最後再以清水補充使各瓶中的液體體積一致，所以在實驗組中就會因為加入的廢水量不同而有不同的COD值。將調配好的反應瓶，以氮氣去除液體中的溶氧，之後將瓶口密閉，放入恆溫水浴，並視情形加以震盪或攪拌，隨後即固定時間收集並記錄每一個反應瓶中甲烷的產生量。若以葡萄糖為例，由理論推算，在30 °C的環境下，每去除一克COD可產生390mL的甲烷氣。所以經由各反應瓶中甲烷的產生量，可以估算各反應瓶的COD去除率，並由氣體產生的速率，可以計算微生物分解廢水中污染物的快慢，判定廢水分解的難易程度。ATA實驗的方法與BMP類似(如圖2所示)，也是在反應瓶中加入等量且活性良好的厭氧污泥，除保留一瓶作為空白組之外，在其餘各瓶中加入等量的醋酸或葡萄糖等容易分解的基質，之後再留下一瓶作為對照組，在其餘各瓶中(實驗組)加入不等量的廢水，最後再以清水補充使各瓶中的液體體積一致，其它的實驗步驟與BMP完全相同。由於實驗組與對照組中都加入容易分解的基質，所以若是工業廢水中沒有抑制微生物的成份，則實驗初期各組產氣速率應該會一致；若是廢水中含有抑制微生物生長的成份，則抑制程度會隨著廢水濃度增加而加強，所以初期產氣速率就會隨廢水添加量增多而減緩。

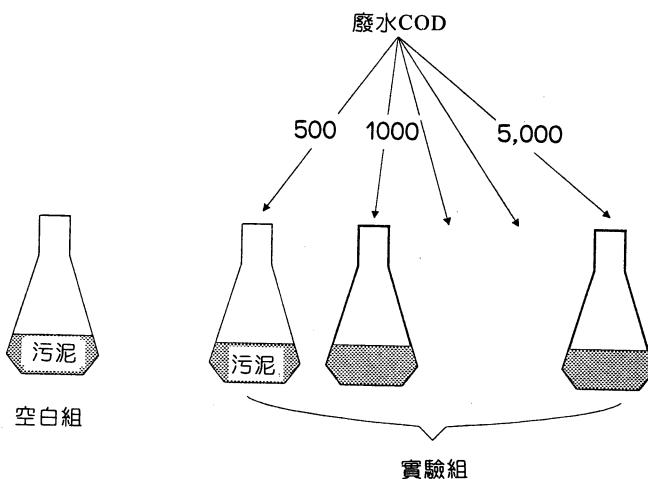


圖1 生化甲烷產能實驗(BMP)示意圖

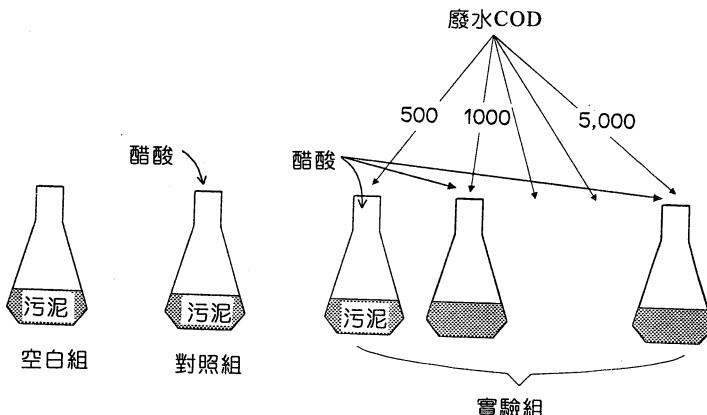


圖2 厭氧毒性實驗(ATA)示意圖

### 3.2 BMP及ATA的應用案例

某聚酯工廠，使用UASB處理其廢水，廢水平均濃度為 $5,000\text{ mg/L}$ ，經試車後其體積負荷 $5\text{ kg COD/m}^3/\text{day}$ 時，去除率可達90%。但是經一段時間操作後，其UASB性能卻突然降低，甚至失去效果。隨後在異常現象發生時，採水樣進行BMP及ATA實驗。其結果如圖3所示，發現該廢水在低濃度情況下，產氣正常，但是廢水COD濃度一旦超過 $5,000\text{ mg/L}$ ，產氣速率就開始減緩，到COD濃度為 $12,500\text{ mg/L}$ 時，產氣已完全停止，顯示微生物受到強烈抑制。同一廢水的ATA實驗結果(如圖4所示)也證實該廢水對甲烷菌分解醋酸具有抑制作用。經過與工廠討論，發現該公司廢水有兩個主要來源，其中一股水量大但濃度低，另有一股濃度高達COD  $40,000\sim 50,000\text{ mg/L}$ ，兩者混合之後進入UASB，進流水濃度約為COD  $4,000\sim 4,500\text{ mg/L}$ 。但是高濃度廢水中含有醛類，且其醛類濃度每次排放變化很大。雖然醛類是可以被厭氧分解的，但是若其濃度太高，且微生物無法及時分解進流醛類，則槽內醛類濃度會累積，更增加其對厭氧微生物的抑制作用，若情況繼續惡化，最後甚至會引起微生物死亡。所以當UASB進流水中醛類濃度在微生物可以忍受的範圍時，處理槽就可

以發揮正常功能，但是若進流水中醛類濃度太高，並造成處理槽內醛類累積，微生物受到抑制，功能自然會下降。為了避免異常情形一再發生，已建議該廠將UASB進流水中醛類濃度列為管制項目，在醛類濃度太高時，適量迴流放流水加以稀釋，再進入UASB系統。

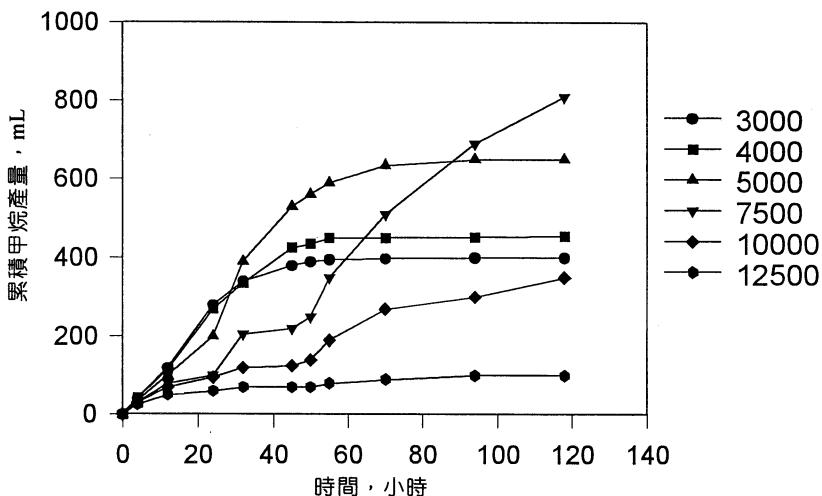


圖3 聚酯廠廢水BNP實驗結果

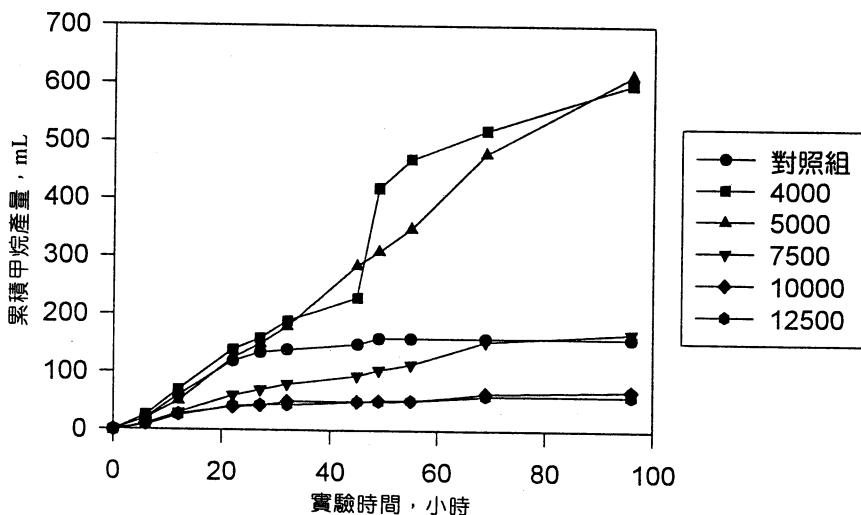


圖4 聚酯廠廢水A T A實驗結果

第二個案例是發生在某特用化學品生產工廠，該工廠UASB系統去除率常在40%~80%的範圍內徘徊，由於系統一切正常，因此懷疑是廢水水質本身有問題，於是經多次採樣進行廢水BMP實驗，發現BMP結果也有很大變化，後經深入探討，發現該工廠使用同一套設備，採用兩種不同的起始原料進行聚合成性質相近的兩種產品。兩種原料非常類似，但其中之一為七個碳的有機物，另外一個原料為八個碳的有機物，經過BMP實驗發現，厭氧能有效分解含八個碳的那種原料，但卻無法處理含七個碳的原料，所以當廢水主要來自含八個碳為原料的製程時，因為其中厭氧可分解的成份高，所以UASB去除率也就高，反之，廢水來自七個碳為原料的製程時，厭氧可分解的比例低，UASB去除率也就低。因此若以厭氧可分解的COD來評估該UASB的功能，該UASB的去除率都已達到90%以上，可以說是功能良好了。

以上兩個案例只是簡單介紹BMP及ATA的用途，事實上若經由巧妙的實驗設計及仔細的數據分析，此兩項實驗在UASB的功能診斷上是非常有用的技術。

#### 四、突增負荷承受能力診斷

UASB，或是更廣泛的說，厭氧系統中，有機物的分解是靠三種以上的微生物以接力方式完成有機物的分解。以醣類或脂肪酸類為例，首先由兼氣或絕對厭氧的酸化菌或水解菌(hydrolytic bacteria)將高分子有機物水解及轉化成丁酸、丙酸等有機酸，再由醋酸生成菌(heteroacetogenic bacteria)將低分子有機酸轉化成醋酸(事實上酸化菌只是一個通稱，其中包括各式各樣的菌種，有些菌種可以直接產生醋酸，有些菌種可以將高分子有機物轉化成乳酸、甲酸等)，再由甲烷菌將醋酸轉化成甲烷及二氧化碳。除了以上三種微生物之外，另外有一類甲烷菌是利用氫及二氧化碳合成甲烷。這四類微生物的數量，關係著厭氧系統在遇到突增負荷時，是否能維持穩定。

若是工廠製程發生異常，導致進入UASB的有機物突然增加為原先的150%，由於酸化菌的倍數增殖時間(doubling time，微生物量增殖一倍所需要的最短時間)約為2-3小時<sup>(3)</sup>，也就是酸化菌約只需要12小時就可以增殖到足以應付此一突增負荷所需要的微生物量。但是其它厭氧的微生物的倍數增殖時間卻遠長於酸化菌，以甲烷菌Methanothrix而言，約為24小時。有些醋酸生成菌如Synthrophomonas wolffii及Syntrophobacter wolinii倍數增殖時間更長達三天及七天<sup>(4)</sup>，所以最少需要二至三天以上才可能增殖到所需要的數量。所以當突增負荷來臨時，酸化菌立即增殖，所以有機物很快的轉化成丁酸、丙酸及醋酸(這些低分子有機酸統稱為揮發酸，volatile acid，簡稱VA)，但是其它微生物卻來不及增加，所以就會造成揮發酸累積，揮發酸累積首先會造成處理槽內pH值下降，由於甲烷菌在低pH的環境下會受到抑制，反應速率減緩，更加劇揮發酸的累積。此外，由於酸化菌分解有機物成揮發酸時，同時產生氫氣，所以酸化菌的快速增加，會造成處理槽中氫氣分壓上升，醋酸生成菌只有在水中氫氣分壓低於 $10^{-4}$  atm之下才能將丙酸、丁酸分解成醋酸，氫氣分壓上升，也抑制了醋酸生成菌的作用。整個連鎖作用的結果就是處理槽出流水COD上升，且具有酸臭味。

若要避免以上情形發生，在平時就必需保持槽中厭氧污泥中有高活性的甲烷菌，也就是在突增負荷還沒來之前，處理槽內已儲備有足夠的甲烷菌及醋酸生成菌，並形成相互平衡的共生生態，所以一旦突增負荷來臨時，系統有足夠的能力應付。

#### 4.1 突增負荷承受能力評估方法

要診斷UASB系統體質是否健康，首先可以從其出流水的揮發酸濃度研判，體質良好的UASB其出流水VA約維持在100 ~ 300mg HAc/L之間，一般的UASB應該在1,000mg/L以下(處理槽起動期間因菌相仍未平衡，VA介1,000~1,500mg/L之間仍屬正常)，出流水COD及VA越低，表示污染物不但被分解且甲烷化情況良好，系統也就更有本錢應付突增負荷。

此外槽內甲烷菌的總活性也是一個重要的指標。目前化工所用來量測甲烷菌活性的實驗方法稱為最大甲烷產氣率，簡稱Qmax，是改良自Valck and

## 122 廢水厭氧處理功能診斷-UASB案例

Verstraete建立的方法，其實驗方法是在反應瓶中加入定量污泥及濃度0.2～100mM的醋酸，然後紀錄在24小時內甲烷的產生量。活性非常好的污泥，Q<sub>max</sub>可以高達1,000ml CH<sub>4</sub>/g-Vss/day以上，但實廠UASB Q<sub>max</sub>到500ml CH<sub>4</sub>/g-Vss/day就屬於活性良好的污泥了。由Q<sub>max</sub>再乘上槽內的總污泥量，就可以估計處理槽能承受的最高負荷了。

另一項重要指標就是污泥顆粒化程度。UASB最大的特色就是污泥會形成顆粒。對低負荷的UASB，污泥是否顆粒化並不重要，但是對於高負荷UASB而言，污泥顆粒化是確保系統穩定的要件，所以從外觀上觀察污泥是否顆粒化也是UASB功能診斷的項目。污泥顆粒化也代表著系統內有健康的微生物相。原則上污泥顆粒只要在0.2 mm以上就算是顆粒化，達1 mm以上就算是顆粒化良好了。

### 4.2 評估指標應用案例

UASB起動期間是UASB操作過程最困難的一環。因為在起動初期，不但微生物相尚未適應廢水，而且微生物量也遠低於達到設計負荷的需要量。根據經驗，起動期間的操作要領是控制進入處理槽的污染量，必需等於或略高於處理槽內微生物的處理能力，在這種情況下，微生物可以將有機物分解而且有增殖的機會，但不至於造成處理槽異常。所以一般起動的程序是，植入污泥後，先以低負荷開始進水，然後密切評估處理槽的去除能力，隨著微生物活性及總量逐漸增加，不斷增加處理槽負荷直到達到設計基準。換句話說，起動期就是一連串的突增負荷組成的，所以在此過程，先前提到的三項指標就成了主要的操作依據。

底下以化工所進行釀酒廠UASB起動的經驗為例，介紹如何應用以上的指標進行起動期的控制。該酒廠廢水經離心去除懸浮固體物之後，水量為290CMD，COD濃度約為28,000～30,000mg/L，SS濃度約1,000mg/L。採用二段串聯式UASB處理，厭氧槽總體積是635 m<sup>3</sup>，系統平均負荷為15 kgCOD/m<sup>3</sup>/day，

但第一段負荷高達21 kgCOD/m<sup>3</sup>/day，在實廠UASB是比較少見的設計。

UASB的起動總共持續120天。該期間的污泥活性及污泥濃度的變化情形，如圖5.A及圖5.B所示。根據污泥活性及濃度計算出來的處理槽COD去除能力以

及實際進入處理槽的污染量(處理量)則如圖5.C所示。UASB起動前植入養豬場厭氧塘取得的污泥約5,400 kg VSS，其Q<sub>max</sub>經測定為110 mLCH<sub>4</sub>/gVSS/day，若以每去除1 g COD產生390 mL甲烷氣為基準，可以推算出這些污泥的COD分解能力約為0.28 gCOD/gVSS/day，以此數值，乘上總污泥量，即可得到處理槽的處理能力約為1,500 kgCOD/day。所以初期以COD負荷1~2 kgCOD/m<sup>3</sup>/day開始進水。經30天後，再度採樣測污泥量及Q<sub>max</sub>，發現厭氧塘污泥因沉降性不佳，污泥有部份流失，處理槽總污泥量剩約3,500 kg，污泥的活性Q<sub>max</sub>則變化不大，但是由出流水VA只有200 mg/L左右，研判微生物分解能力仍足以應付更多的有機物，所以將負荷提昇至約3~4 kgCOD/m<sup>3</sup>/day。至60天時再進行

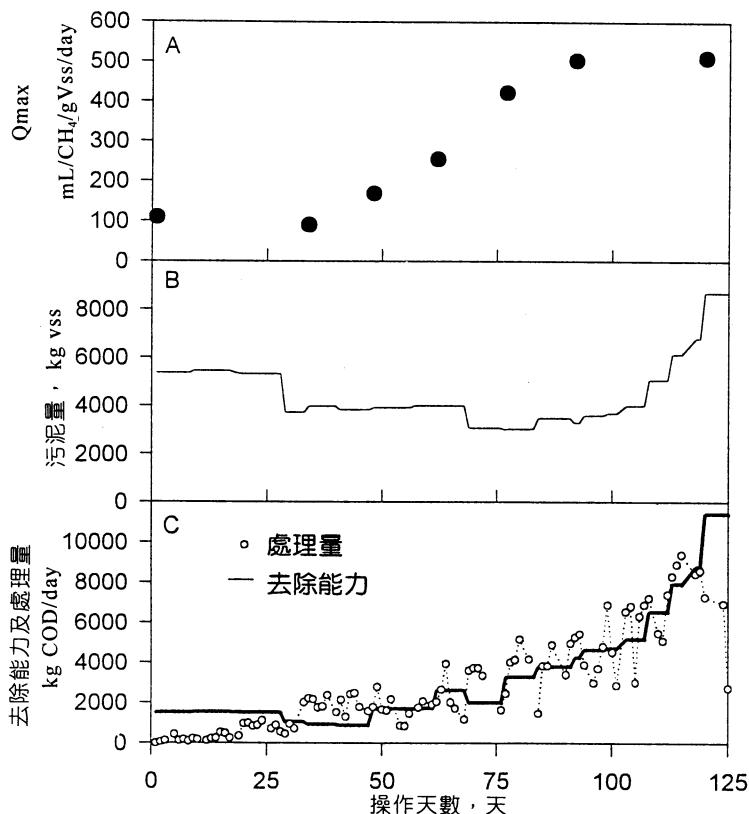


圖5 起動期間UASB處理能力及處理污染量變化圖

A:污泥活性(Q<sub>max</sub>)，B：污泥濃度，C：處理能力及實際進流污染量

污泥量及Qmax測定，發現污泥量只剩3,000 kg VSS，但Qmax已增加至250 mL CH<sub>4</sub>/gVSS/day，且污泥已有顆粒化形成，出流水COD及VA皆顯示處理槽有能力處理更多有機物，所以再次提高負荷。經由類似的程序，處理槽在四個月內，達到15 kgCOD/m<sup>3</sup>/day的設計目標，第一段UASB負荷值更曾高達24 kgCOD/m<sup>3</sup>/day，是一次相當成功的起動操作。圖6是起動期間污泥顆粒粒徑的增長情形，顯示在75天之後，污泥顆粒已形成而且粒徑迅速增長。圖7是起動期間及隨後一年期間處理槽進、出流水COD，進、出流水VA，處理槽體積負荷及COD去除率的變化情形，顯示該系統非常穩定，COD去除率都在90%以上，平均去除率約為94%。

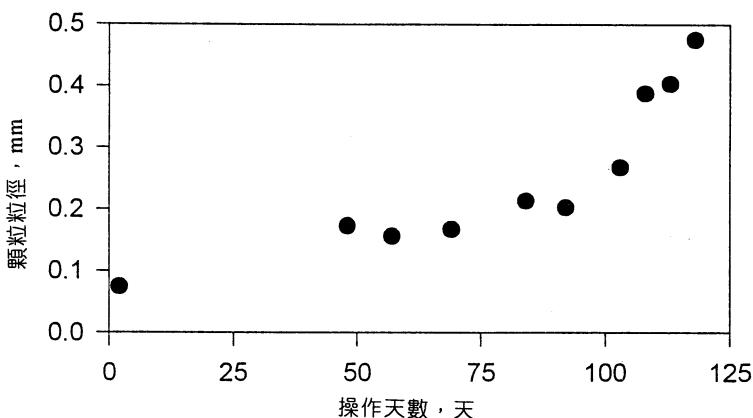


圖6 起動期間UASB槽內污泥顆粒化粒徑變化情形

## 五、結論

厭氧程序由於具有省能源、高負荷、低廢棄污泥等優點，已普遍應用於工業廢水處理。早期，因為厭氧程序技術尚未成熟，所以許多實廠的處理槽並未充份發揮應有的功能。目前對於厭氧程序，無論是在其生化反應、處理槽設計理論、各類廢水的適用性資訊、實廠操作經驗等方面都已有很大進展，並已建

立各項具體指標，可以用來診斷厭氧系統是否已發揮其最大功能，或用以找出影響功能的因素，作為改善的依據。本報告介紹BMP、ATA、Qmax等幾種常用的厭氧實驗方法，並以案例說明這些方法在厭氧程序功能診斷方面的應用情形。雖然報告是以UASB處理槽為例，但仍可供其它型式反應槽參考。

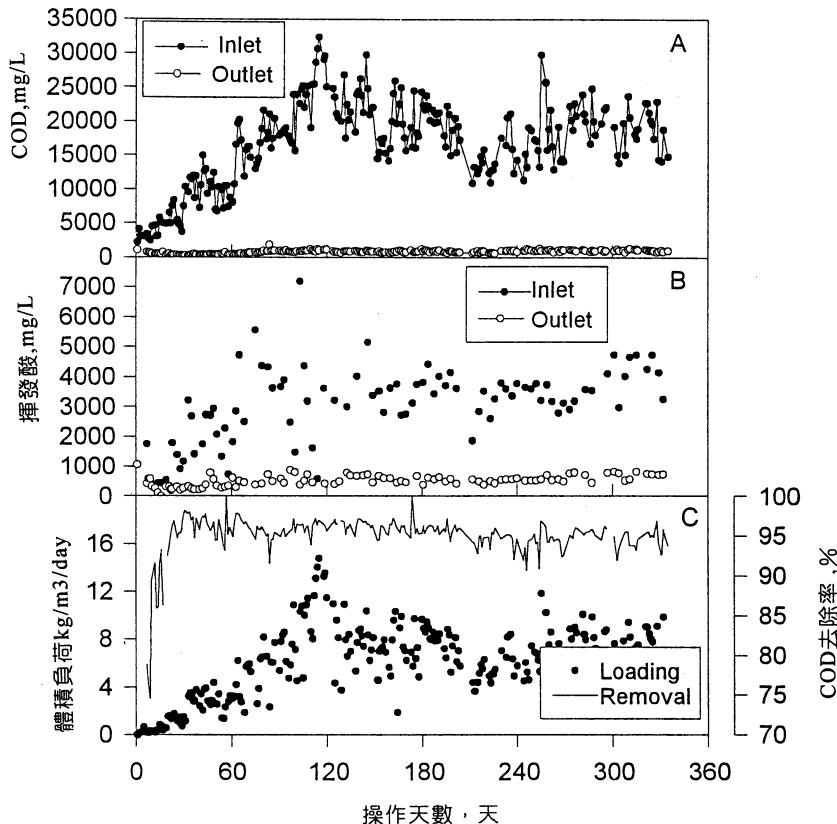


圖7 UASB處理槽性能隨時間變化圖

A：進出流COD，B：進出流VA，C：體積負荷及去除率。

## 參考資料

1. Owen, W.F. et. al., "Bioassay for Monitoring Biochemical Methane Potential and Anaerobic Toxicity", Water Research, Vol. 13, pp. 485-492, 1979.
2. 黃平志、鄭幸雄、賴俊吉， “以生化甲烷產能試驗探討苯環化合物之厭氧分解機構” ，第十三屆廢水處理技術研討會論文集，pp. 378-390, 1988.
3. Barnes, D. and Fitzgerald, P.A., "Anaerobic Wasterwater Treatment Process", Chapter 2 of Environmental Biotechnology, Ed. by Forster, C.F., Wase, D.A.J., Ellis Horwood Ltd., p.64, 1987.
4. Pohland, F.G., "Anaerobic Treatment: Fundamental Concepts, Applications, and New Horizons", Chapter 1 of Design of Anaerobic Processes for the Treatment of Industrial and Municipal Wastes, Technomic Publishing Company, Inc., Pennsylvania, U.S.A., pp. 1-40, 1992.