

# 薄膜生物反應技術於工業廢水處理概述

陳俊宇\*

## 前 言

目前全球水資源匱乏，加以因應日趨嚴格的環保法規，各國相關單位積極研發水資源回收再利用技術。而薄膜生物反應器(Membrane bioreactor, MBR)結合了活性污泥程序與薄膜分離科技，成為工業廢水處理和回收用水方面極具吸引力和競爭力的選擇，並被視為最佳可行技術之一，為國內近年新興的廢水處理及回收技術。本文主要彙整現階段薄膜技術於工業廢水處理的研究及應用方向，概述薄膜在工業廢水處理之操作要點，以期薄膜生物反應技術在逐漸成為主流技術的情形下，提供工業廢水處理之案例參考。

\*財團法人台灣產業服務基金會 工程師

## 一、薄膜生物反應技術原理

薄膜生物反應器(Membrane Bio-Reactor, MBR)是近 20 年來歐美國家快速發展及應用於廢(污)水回收再利用之重要技術，係以薄膜單元結合傳統活性污泥處理所發展出之薄膜生物反應系統，使用微過濾(Microfiltration, MF)或超過濾(Ultrafiltration, UF) 薄膜進行過濾，圖 1 為 MBR 與傳統生物處理的處理程序比較示意圖。

MBR 主要運用透膜壓力作為驅動力，將活性污泥混合液透過壓力過濾機制讓水分子，透過薄膜過濾而得到出流水，如此可保持污泥為懸浮狀態，延長污泥停留時間並提高生物處理單元之 MLSS 濃度，具有佔地面積小、承受污染負荷高、污泥廢棄量低及可取代二次沉澱池等特性，不僅保留傳統生物處理程序對水中有機物去除之優點，亦結合薄膜分離單元之固液分離特性，提升傳統生物處理程序之處理效能，更彌補了傳統生物處理程序之缺點，尤其生長速率緩慢的微生物得以滯留與增殖，有利於特殊或難分解污染物的去除。理論上只要掌握薄膜過濾及傳統活性污泥處理的觀念，即可得到良好的處理效果。

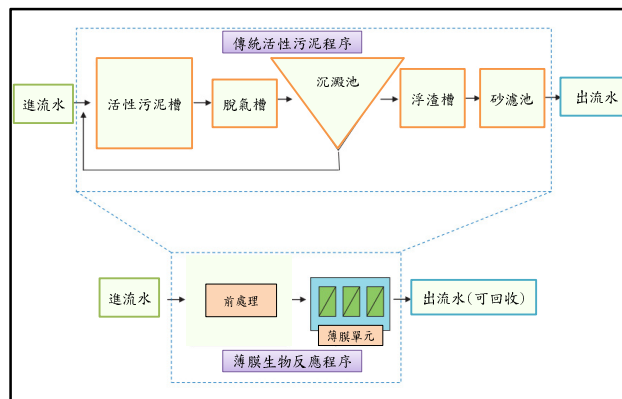


圖 1 MBR 與傳統生物處理的處理程序比較示意圖

## 二、薄膜生物反應器的分類與薄膜材質特性

MBR 依薄膜的位置可區分成旁流式與沉浸式 2 類，旁流式 MBR 需外置幫浦用以將反應槽混合液泵送至薄膜單元，再將濾液排放，而濃縮液則迴流至反應槽。沉浸式 MBR 之薄膜在真空下或在滲透液中創造負壓的環境下操作，其濃縮污泥可保留在反應槽內，並無迴流的必要。旁流式 MBR 的通量及積垢速率較高，需要頻繁的反沖洗或化學劑清洗，沉浸式 MBR 的滲透液通量相對較低，通量可長時間維持，清洗頻率約每年 2 次，而由於不必設置高流量的循環幫浦，動力成本也較低，因此逐漸受到重視。

一般 MBR 使用的薄膜模組孔隙約 0.1~0.4 $\mu\text{m}$ ，依結構可區分為管式(Tube)、卷式(Spiral wound)、中空纖維(Hollow Fiber)及板框式 (Plate & Frame)，其中又以中空纖維膜的應用最普遍。隨著薄膜製程技術進步，現今已研發出材質強度更佳及價格低廉的薄膜型式，可延長薄膜使用年限並降低設置成本。MBR 若選用薄膜型式不當，或是廢水性質影響微生物特性造成胞外聚合物大量增生，則可能形成嚴重的薄膜積垢阻塞，必須於薄膜表面提供足夠的剪力擾流以去除積垢以提升膜通量。但是足夠的膜表面剪力，可能耗損薄膜使用壽命，亦需耗費較高的動力能源，因此優化薄膜模組構造及因應廢水來源選用適當曝氣系統為影響 MBR 效能之關鍵因素。表 1 為商業化薄膜生物反應器之材質及類型比較，因厭氧性環境中薄膜阻塞較嚴重，推廣不佳，目前以浸沒式好氧薄膜生物反應器最為常見，而中空纖維膜具有佔地面積小、成本低的優點；平板膜強度較高、耐久度佳，相對而言其建置成本亦較高。

**表 1 商業化 MBR 規格以及不同薄膜材質通量比較表**

公司	好氧/缺氧	反應器類型	薄膜型式	材質	薄膜出水通量 (L/M <sup>2</sup> h)
Kubota	好氧	浸沒式	平板式	聚氯乙稀	25
Mitsubishi Rayon	好氧	浸沒式	中空纖維	聚乙烯	15
Zenon	好氧	浸沒式	毛細管式	聚偏氯乙稀	30
US Filter	好氧	浸沒式	毛細管式	聚偏氯乙稀	40
Orelis	好氧	外置式	平板式	丙烯腈聚合物	100
Asahi Kasei	好氧	浸沒式	中空纖維	聚偏氯乙稀	120

### 三、薄膜生物反應器於工業廢水處理之應用

過去 20 年來，浸沒式 MBR 已普遍使用於處理都市廢水，但工業廢水由於水質毒性較高、且含有高濃度難分解有機物，目前仍以物化處理較具經濟性。隨著環保署於民國 103 年針對科技、石化與化工業放流水標準增定氨氮管制項目與限值，提高除氮技術以降低高含氮製程廢水之氨氮濃度實已不可避免。而目前國內

較成熟之工業廢水氮處理方式，包括生物性之污泥硝化脫硝處理、化學性之化學沉澱法與流體化床結晶法，以及物理性之氣提脫除法等。其中，以生物處理對環境所造成之二次污染較低。

MBR 系統改良傳統缺/好氧生物處理之除氮技術已成功應用於都市生活廢水處理，由於 MBR 能夠有效攔截污泥使硝化菌不易流失，且在穩定態下較傳統活性污泥有更佳之抗衝擊負荷能力，以曝氣薄膜單元取代好氧硝化階段之活性污泥槽可達到高效率的硝化效果，以轉化大多數氮成為硝酸氮，圖 2 為常見之 MBR 除氮系統流程。但因缺氧區之脫氮反應較不易進行控制，因此如何有效結合硝化與脫氮徹底脫除有機氮成為重要課題；主要影響脫硝效能有缺氧池設計參數  $f_{AO}$  值(缺氧區容積與總池槽容積之比值)，與操作參數污泥迴流比 2 項。

污泥迴流比影響好氧區和缺氧區之間的相互作用，過高的迴流比會破壞缺氧區的溶氧濃度與菌種分布，而適當的迴流比可達到稀釋作用使菌種間相互作用達到平衡。 $f_{AO}$  值設計上的目的，在於提供足夠的脫氮菌對應從薄膜曝氣單元的硝化作用所產生的硝酸氮，將其還原為氮氣，達到硝化與脫氮相互抵銷的最佳點，那麼缺氧區的硝酸氮將可徹底被消耗。由圖 3 顯示，在迴流比 2~4 之下可得到  $f_{AO}$  值的最佳範圍。

因脫硝作用需分解有機碳以獲得能量將硝酸氮還原為氮氣，廢水本身的碳氮比(COD/T-N)在脫硝效率上影響甚大，理論上 1 毫克的硝酸鹽氮會消耗 2.47 毫克的甲醇，相當於 3.7 毫克 COD，同時產生 0.45 毫克的新細胞和 3.57 毫克的鹼度，因此若碳源不足會降低脫氮菌的活性。目前多以外加碳源(如甲醇)提高碳氮比至 4.5 以上較適宜脫氮異營菌生長，以維持良好的脫氮效率。

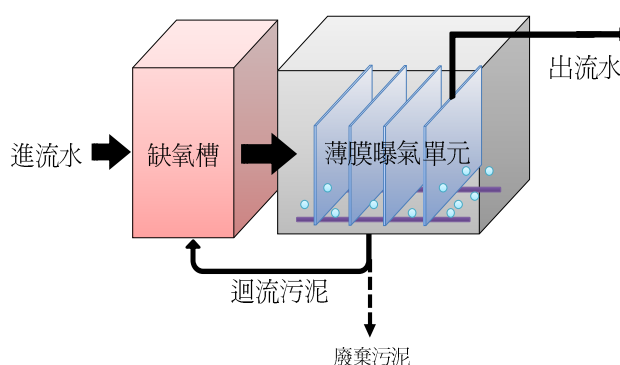


圖 2 薄膜曝氣單元改良傳統生物除氮好氧單元示意圖

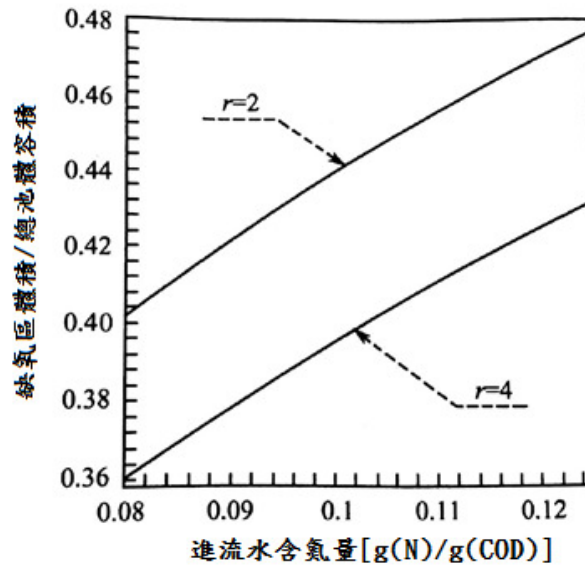


圖 3 進水含氮量、迴流比與工程參數  $f_{AO}$  設計值關係圖

#### 四、處理案例

[案例一]

除了氨氮的去除，MBR 在難分解有機物與 TOC 等去除方面也有不錯的效果。某電子公司建置缺/好氧薄膜生物反應器處理 TFT-LCD 面板廠產生的有機廢水、酸鹼廢水及生活污水，其廢水特性為含有高濃度的 TOC 與有機氮或氨氮，主要來自於為 TFT 製程中剝離、濕蝕刻區產生之廢水，系統處理設計水量約 6,000 CMD，採用 2 段式的缺/好氧生物處理程序處理，並於最後段的好氧槽設置 UF 中空管狀薄膜進行固液分離回收濾液，出流水再經 RO 與活性炭處理後則回收至純水系統使用。經過 MBR 生物系統後其產水 TOC 平均去除效率可達 90% 以上，最高 MLSS 濃度可達 10,000 mg/L，效能良好。

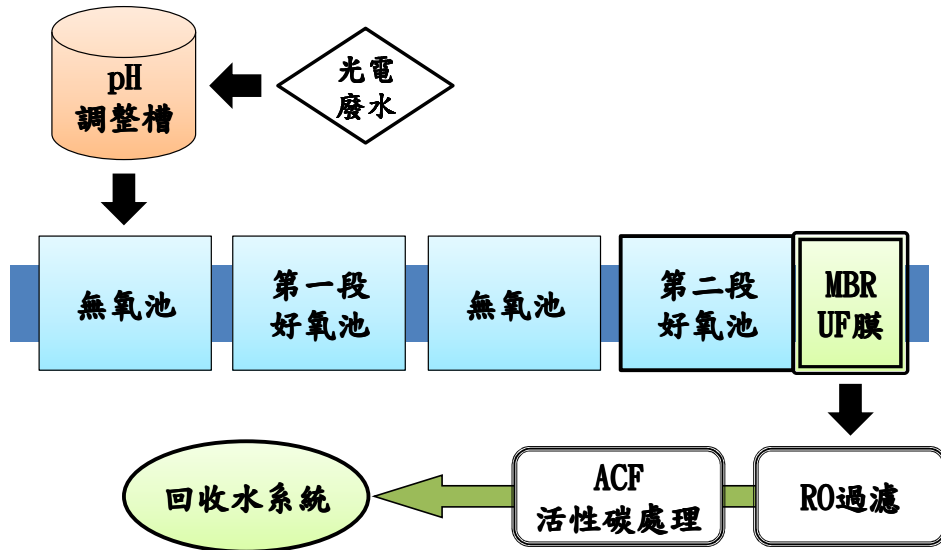


圖 4 某電子公司處理光電廢水之 MBR 程序

[案例二]

案例二為某工程公司分別針對工業綜合廢水、製革廢水以缺/好氧薄膜生物反應系統進行模組試驗，主要處理程序為厭氧 UASB 槽、無氧槽以及好氧 MBR 槽。廢水特性以及處理結果如表 2。以下歸納幾點運轉期間在操作方面之困難與建議：

1. 製革廢水

- (1)由於製程中增加生皮脫毛程序，故大量使用硫酸溶液，導致廢水  $\text{Ca}^{2+}$  及元素硫濃度偏高。
- (2)操作 1 個月左右阻塞嚴重，膜壓差急速升高導致中空纖維膜部分斷裂，使得出流 SS 濃度突增。
- (3)針對具有高鹽類易導致薄膜形成無機結垢特性的廢水，將生物處理池與薄膜池分離應可減緩無機結垢的形成。

2. 工業綜合廢水

- (1)工業區之廢水中含有石油系 9 碳以上之不飽和碳氫化合物，油味重且生物分解性低。
- (2)原廢水中之 TDS 為 4,710 - 15,060 mg/L，濃度變化極大，但並未對生物處理性能或 MBR 的薄膜操作有不良影響。
- (3)加入混凝劑 PAC 時，可有效降低 COD 色度，添加量為 0.2kg PAC/kgCOD.day，每 2 週添加 1 次。

表 2 工業廢水試驗特性與處理結果

項目	工業綜合廢水	製革廢水
廢水成份	COD：800 mg/L BOD：600 mg/L SS：600 mg/L	COD：10,000 mg/L BOD：5,000 mg/L SS：2,000 mg/L 六價鉻：0.5 mg/L 油脂：100 mg/L 真色色度：550
薄膜型式	中空纖維膜	中空纖維膜
薄膜材質	PTFE	PVDF
薄膜孔隙	0.2 $\mu$ m	0.04~0.08 $\mu$ m
處理效率	COD：30~50 mg/L SS<13 mg/L	COD<100mg/L SS<10mg/L
操作參數	HRT：1.22~2.16 hr 操作通量：16 LMH	F/M 值約 0.2kgCOD/kgMLSS.day 操作通量：8.5 LMH

## 五、結論

MBR 利用置於活性污泥槽中的薄膜做為固液分離之操作，可取代傳統廢水生物處理系統中的沉澱池及污泥濃縮池等設置，達到縮小廢水處理設施佔地面積之目的並獲得更佳的處理水質。因薄膜製造技術的改良等因素，使其設置及操作成本有機會降低，可增加 MBR 的市場競爭力。惟實務上仍需確實評估工業廢水水質是否適於用於生物處理，且須採用良好的設計參數進行規劃，並且根據廢水特性進行操作參數調整才能使 MBR 達到最高處理效率。

## 參考文獻

- 林志高，外加碳源對生物薄膜反應器處理低碳氮比高科技業廢水之影響，國立交通大學環境工程研究所，2011。
- 曾一鳴，膜生物反應器技術，國防工業出版社，北京，2007。
- 蔣世安、林高洲，工業廢水除氮處理方式探討及經驗分享，中華技術，第 96 期，2012。
- 蔡財源、楊昌義，奇美電子 MBR 系統應用於水回收再利用，工業污染防治第 119 期，民國 100 年。

5. 范姜仁茂、莊連春，薄膜生物反應器(MBR)於廢水處理之技術評析，工業污染防治第 109 期，民國 98 年。
6. 中鼎工程股份有限公司，套裝化薄膜生物反應器(MBR)在工業廢水處理系統的應用，中技社通訊，第 83 期，2009。