

# 流體中的最佳守門員—— 微過濾與超過濾

■莊清榮 游勝傑

微過濾與超過濾操作已普遍應用在醫藥或  
生物工業的除菌過濾上，在水處理方面，  
微過濾除了用來去除懸浮微粒外，  
近年來發展的重點是直接把微過濾膜  
浸入活性污泥池中，  
結合生物反應及膜過濾程序進行廢水處理。

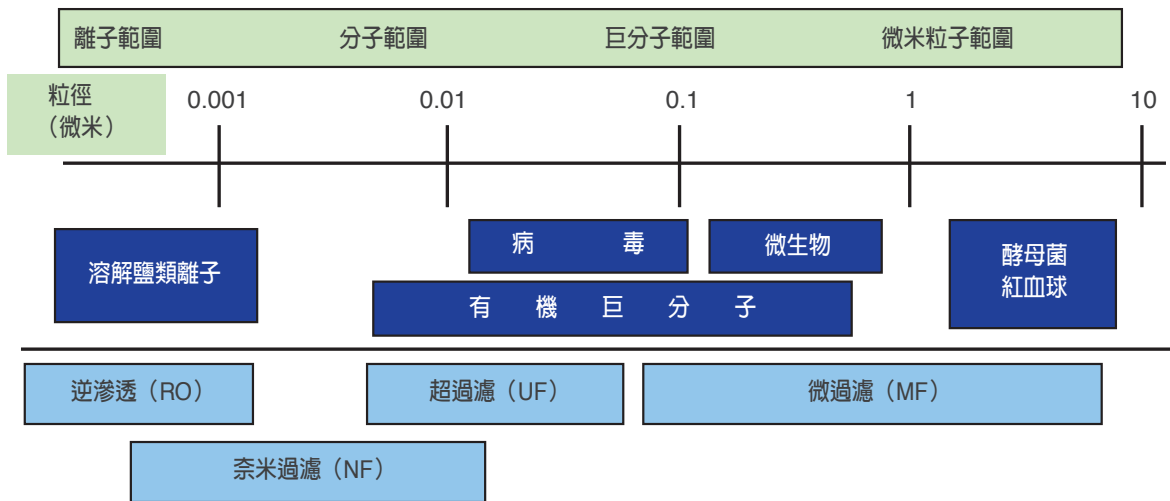
## 大塊頭免進

微過濾（microfiltration，簡稱MF）與超過濾（ultrafiltration，簡稱UF）是薄膜處理中運用最廣的技術，其分離機制是利用膜孔大小來篩選可通過的粒子與分子，比薄膜孔徑大的顆粒便會被阻擋於膜面。

MF膜依其孔徑大小，可用來阻擋粒徑在0.05～10微米間的粒子，通常操作壓力在0.5～2大氣壓就可獲得有效濾速。UF膜則用來分離粒徑較小的巨分子或所謂的膠體（colloids），其膜孔大約在5～100奈米，因可去除較大的有機分子，常以能阻擋粒子的分子量（molecular weight cut off，MWCO）來表示其分離能力。超過濾膜通常可攔截的分子，分子量約在0.5～50萬之間，施加的操作壓力則在1～10大氣壓之間。

假如比較膜過濾與離心分離，MF可分離的粒子約需5,000～10,000g的離心方能去除，而UF分離的粒子更小，要10,000～100,000g的超高速離心機才能替代。由於較高速離心設備的規模不易放大且能源耗損成本高，膜過濾有其工程應用上的優勢。

MF是最早出現的膜過濾程序，德國在1920年代就開始利用MF濾除水中細菌，但至1960年代才應用在工業程序中。在MF發展的同時，UF膜也開始興起，但在工業應用上，UF膜卻遠落後於MF膜，主要

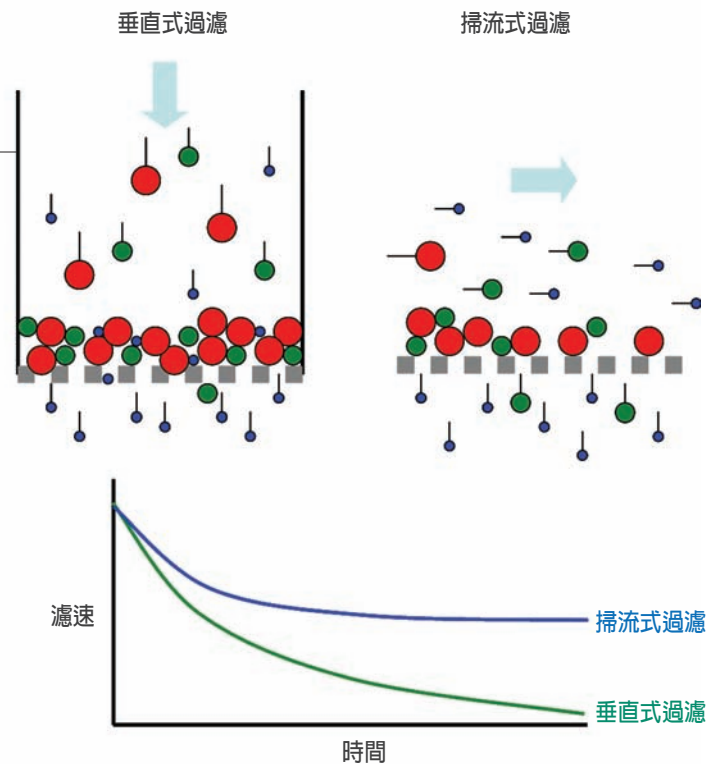


各種過濾技術適用的粒子大小範圍

原因是UF的濾速很低，無法配合工業上大量生產的需求。後來經由非對稱UF膜的製備並配合模組的開發，於1970年代已有大規模的UF處理系統回收汽車工業廢水中的塗料。膜過濾的應用範圍相當廣，在傳統的食品、醫藥、化工與環工等相關產業，到生醫、生物、電子等所謂高科技產業中都扮演重要的角色。

雖然依產業的不同，MF與UF有不同的程序設計與操作，但依分離的目的，這些程序可大略歸類為濃縮、回收、澄清化、純化等操作。濃縮是指由一產物中脫除溶劑；回收是指從廢液或副產物中回收有價值成分進一步再處理利用；澄清化是由進料中濾除顆粒雜質以獲取澄清濾液；若於濃縮操作中設計濾除進料的小分子雜質，以獲取較高純度的濃縮液，或澄清化操作中濾除可溶性的大分子不純物，以獲取較高純度的濾液，則可歸為純化操作。

膜過濾操作可分為垂直式 (dead-end) 與掃流式 (crossflow) 兩種。前者操作時，施加壓力於進料後，流體及伴隨粒子的運動方向與膜面垂直，被阻擋的粒子滯留於膜面，其餘通過濾膜成為濾液。隨著膜面粒子附著層的成長，流體流動阻力增加會導致固定壓力



垂直式過濾與掃流式過濾的示意圖，以及在兩者操作中濾速與時間的關係。

下操作濾速明顯下降。而在掃流過濾中，進料流動方向平行於膜面，部分通過濾膜成為濾液，另一部分則流出過濾室而濃度提高，因此稱為濃縮液。

由於掃流所誘發的濾面切線剪應力作用會掃除部分傳輸至膜面的粒子，因此當粒子附著層成長至一定厚度時，就停止再成長，濾速也就不再明顯降低，可

在臨床醫療上，血液透析就是利用超過濾膜，使血清中高濃度的毒素透過濾膜到低濃度的透析溶液中，紅血球及蛋白質大分子則回流至病人體內。



新加坡水再生廠利用薄膜技術把污水處理成瓶裝水出售

維持在高濾速下連續長時間操作。在MF及UF程序中，如果是大規模的操作，大部分採用掃流過濾方式，但當濾速不是主要考量因素或粒子附著量不嚴重時，可考量使用簡單的垂直式操作。

例如在醫藥或生物工業的除菌過濾、甚稀粒子溶液的過濾、實驗室小規模的過濾等，常採垂直式操作。在水處理方面，MF除常用來去除懸浮微粒以做為後續NF或RO的前處理外，近年來發展的重點是直接把MF膜浸入活性污泥池中，結合生物反應及膜過濾程序進行廢水處理，稱為沉浸式薄膜生物反應器（submerged membrane bioreactor, SMBR）。

### 為程序與產品品質把關

在醫用純水及注射針劑用水的製備中，大多以MF膜濾除水中微粒及細菌，一般細菌大小是0.4~0.6微米，常以0.2微米的MF膜濾除菌體。在血液處理方面，也常應用MF進行血液血球和血漿的分離，有時也可用來進行臨床醫療，如有些疾病與血液中的異常血球或蛋白質有關，可以利用MF膜移除血液中的異常成分。除了液體的MF之外，

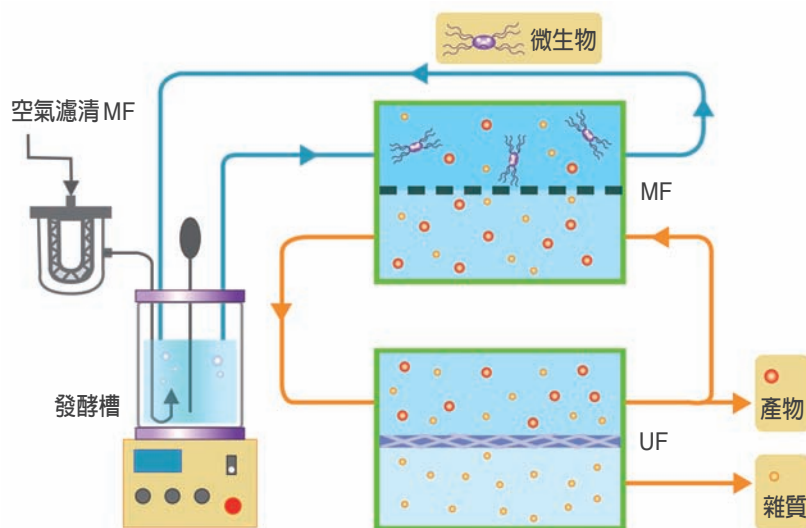
在醫藥工業上也用MF膜濾除空氣中的微粒及細菌，以維持空氣的清淨或提供無菌室、消毒設備所用的空氣。

在生技產業方面，MF及UF大量使用在發酵程序中。MF膜常用來濾除進料液體及空氣內的菌體，而不需採用高溫高壓殺菌法。至於發酵液中的生物細胞及其所產生的蛋白質，也常以掃流薄膜過濾進行分離，而不會破壞細胞及蛋白質的活性，濃縮液則回流至發酵槽，以維持槽內高密度的生物細胞，可有效提高發酵速率。另一方面對於藉由破碎細胞以回收蛋白質的程序，也多以MF或UF膜過濾進行大規模且連續的固液分離，這種方法已用來製造抗生素、疫苗等。

在生化程序上，無熱源（pyrogen-free）水的取得，以及酵素或蛋白質的分離純化，多採用UF。在臨床醫療上，血液透析（hemodialysis）就是利用UF膜，使血清中高濃度的毒素透過濾膜到低濃度的透析溶液中，紅血球及蛋白質大分子則回流至病人體內。

### 保留飲料營養好風味

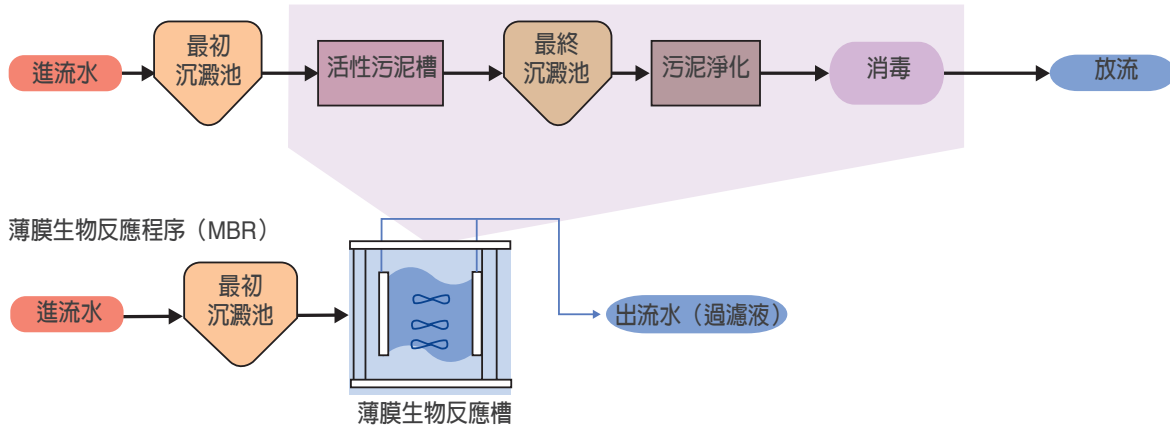
MF與UF用於飲料工業，主要是為了獲取高產率



MF及UF在生技產業中的應用

從 1960 年代就開始有人以微過濾進行啤酒的安定化，在啤酒包裝前通過薄膜過濾，使產品擁有生啤酒的營養及風味，並且具長時間存放的方便性，後來也應用於其他酒類以避免酒精的酸發酵。

傳統活性污泥程序



傳統活性污泥程序與薄膜生物反應程序的比較

且有價值的濾液。MF 常用於生物安定化、除菌等，以低溫「膜除菌」技術可省去傳統以巴斯德加熱殺菌的步驟。例如從 1960 年代就開始有人以 MF 進行啤酒的安定化，在啤酒包裝前通過薄膜過濾，使產品擁有生啤酒的營養及風味，並且具長時間存放的方便性，後來也應用於其他酒類以避免酒精的酸發酵。台灣菸酒公司生產的玉泉生清酒就通過薄膜過濾，保留人體必需的維生素及生酒的甘醇風味，並且具長時間保存性。

很多人都知道乳製品與果汁很難保持新鮮，而加熱殺菌會造成牛奶與果汁的風味流失，若利用薄膜除菌，不但可以保留原料的生鮮風味與機能性成分，還能濾除產品中的微生物，讓產品的冷藏保存期大幅延長。例如在蘋果汁製程中，傳統上經榨汁後以凝集沉降及濾餅過濾分離固體懸浮微粒，為利於過濾操作及獲致澄清果汁，常以添加凝集劑、助濾劑等做為過濾前處理，雖可獲得低濁度的濾液，但產率僅 85~90%。且當進料液中部分決定果汁風味的分子也被濾除時，會明顯影響產品的口味。

若以 UF 澄清榨汁，單一膜過濾操作就可替代傳統程序中的諸多步驟，獲得濾液濁度低於傳統製程，不須添加其他藥劑，產程從傳統的 20 小時縮短為 2 小時，產率則提高 5~8%。由於 UF 可完全去除細菌及微生物，產品不需經加熱殺菌，可降低風味成分揮發

或避免其他功能性被破壞。

國內某食品公司近年也推出以攝氏 72 度低溫殺菌，配合薄膜微過濾除菌技術生產鮮乳，取代常用的攝氏 130 度高溫殺菌，除可保留較完整的生乳機能營養，如免疫球蛋白和乳鐵蛋白的活性外，並可有效降低生菌量。另一方面，如西瓜牛乳的製程也應用膜過濾技術，不但可去除原料中的細菌，也可保留西瓜汁原來新鮮風味及混濁外觀，並保留了維生素 C 等熱敏感成分，在冷藏溫度下約可保存 3 周以上。

另外一個大量使用 UF 膜的產業是乳品的製造，在製造乳酪的過程中會伴隨產生大量的乳漿，只要把乳漿濃縮至含蛋白質濃度 35% 以上，就可製成其他乳製品，UF 膜已大量用於這項乳漿濃縮程序。

## 讓河川活起來

根據統計，直到 2007 年底，台灣下水道普及率是 15%，遠低於先進國家 90% 以上的普及率，甚至連東南亞國家如馬來西亞、菲律賓等 40% 的普及率都不如。如此低的下水道普及率，使得台灣重要河川未受污染、輕度污染、中度污染及嚴重污染的河段比率，分別是 59.5、13.4、11.3 及 15.8%。也就是說，台灣約有 4 成重要河川的河段受到不同等級的污染。

若再加上台灣地區每年 11 月到隔年 4 月枯水期



乳製品與果汁很難保持新鮮，而加熱殺菌會造成牛奶與果汁的風味流失，若利用薄膜除菌，不但可以保留原料的生鮮風味與機能性成分，還能濾除產品中的微生物，讓產品的冷藏保存期大幅延長。



把薄膜放在上方的4個曝氣池中，可取代傳統大型圓形沉澱池，有效節省土地成本。

傳統的污水處理系統是把日常生活產生的污水，經由管線收集到水再生處理廠，使污水與處理廠中的活性污泥（含有一些混合品種的微生物）進行混合並提供空氣後，讓這些微生物把污水中的污染物質分解成二氧化碳及合成新的微生物細胞，使污水變乾淨而成為再生水。之後就可以把這些再生水排

時，河川天然流量降低甚至斷流，使得整條河川裡流動的水都是日常生活排放且未經過適當處理的污水，最後導致河川發臭，甚至水棲動物大量死亡。由於河川污染的日趨惡化，目前各級政府對於都市地區下水道系統建設的落後已有所警惕，也逐年編列預算把提升污水系統的普及率列為各級政府的施政重點。

放到河川中，以提高河川的流量。

但是這種污水處理系統處理水的成本很高，甚至比處理自來水的成本還高。如果可以把處理後的再生水當成一種新開發的水源，做為農業用水或工業用水，對於每人每年平均可利用水量僅約世界平均值15%的台灣而言，是非常具有吸引力的。

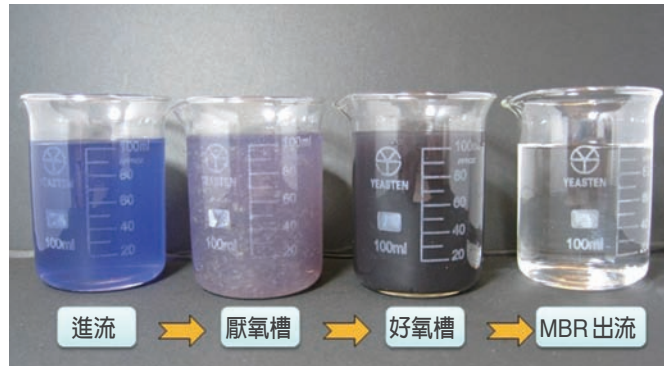


地下化的薄膜生物反應槽



把處理後的再生水當成一種新開發的水源，  
 做為農業用水或工業用水，是非常具有吸引力的。  
 而什麼樣的水再生技術可以把污水變成可再利用的水呢？答案就是薄膜技術。

什麼樣的水再生技術可以把污水變成可再利用的水呢？答案就是薄膜技術。若把薄膜與傳統的污水處理廠的活性污泥反應槽結合，就成為薄膜生物反應槽（membrane bioreactor，簡稱MBR），藉由薄膜



用薄膜生物反應槽處理染料廢水，可使有顏色的水變成透明的水。

可把污染物、活性污泥等阻隔在反應槽中，使得純淨的水可以流出反應槽。因此薄膜主要扮演分離的角色，可取代傳統廢水處理廠中的終沉池，節省下原本終沉池所占的土地成本。此外，由於薄膜孔隙甚小，出流水質也較一般傳統的活性污泥程序為佳。

MBR 程序在發展初期大多放置在反應槽後，以類似活性污泥法最終沉澱池的方式操作，稱為外掛式（external）MBR，薄膜扮演著分離懸浮性固體物與放流水的角色。為了節省操作動力花費及土地成本，可把薄膜放置在傳統的活性污泥反應槽中，成為沉浸式 MBR 系統。系統中的薄膜可取代並取消傳統廢水生物處理程序中的終沉池，且由於活性污泥會累積在薄膜的表面並形成一層生物膜，使得沉浸式 MBR（SMBR）系統可同時具有活性污泥及生物膜兩種反應特性，使出流水質更加優良，因此 SMBR 程序更加受到重視。

由於 SMBR 程序可節省終沉池占地面積與土地成本，對於地小人稠的地區如台灣或日本而言，具有相當的競爭力。目前已有超過 500 個的 MBR 程序在世界各地運作，日本占了大多數，約為全世界總數的 66%，其餘 MBR 程序多利用於北美及歐洲。

這些 MBR 程序超過 98% 是結合好氧槽與薄膜技術，只有不到 2% 是結合厭氧槽及薄膜技術。2002 年，日本已有 311 個工廠在運作或設計中，每天的總處理量約為 70 萬人的廢水。由於過去受限於薄膜的製造技術，這些 MBR 處理廠中有 71% 每天處理量小於

1,700 人的廢水，16% 介於 1,700 到 3,500 人之間，僅有 13% 的處理廠每天可處理大於 3,500 人的廢水。但由於薄膜技術的進步，日本東京已開始建造每天可處理 10 萬人廢水的 MBR 廠，而日本其他都

市如橫濱、福岡等，也開始設計處理量達到每天 35 萬人的 MBR 反應槽。

MBR 程序最主要的兩個缺點是設置成本高及會阻塞。由於薄膜本身價格已偏高，且隨著反應槽體積增大，薄膜的價格會提高很多，這點恰與一般活性污泥系統相反，也使得 MBR 實廠應用的大小受到限制。而由於 MBR 程序中微生物濃度相當高，且為了降低阻塞速度，MBR 程序的曝氣量較一般活性污泥法大，使得薄膜表面也有被侵蝕的現象，減低了薄膜的使用年限，導致操作成本大為增加。

此外，由於水中不同的物質會經由吸附或沉澱的方式停留在薄膜表面上，或者吸附在膜孔內部的表面上，造成膜孔阻塞、阻力增加，使得處理水量大為降低。因此薄膜系統須定期進行反沖洗，這點也造成薄膜程序在操作上的不方便。

然而隨著薄膜技術的發展，目前已有包括中原大學薄膜中心研發的 PTFE（鐵氟龍），以及幾家日本公司發展出的許多較便宜且耐侵蝕的薄膜產品，因此高成本的問題在未來會獲得有效的控制。而利用薄膜技術讓河川活起來，使得台灣回到可在河溪抓魚的年代也指日可待。 □

莊清榮

中原大學化工系 / 中原大學薄膜技術研究發展中心

游勝傑

中原大學環境系 / 中原大學薄膜技術研究發展中心