嘉南藥理科技大學專題研究計畫成果報告

水資源回收及處理系統之開發與研究(I)
：複合奈米過濾膜(Composite Nanofiltration Membrane)分離可溶性重金屬廢水之研究

計畫類別：□個別型計畫　　■整合型計畫

計畫編號：CNEE9516

執行期間：95 年 1 月 1 日至 95 年 12 月 31 日

計畫總主持人： 陳世雄

子計畫主持人：張錦松

執行單位：環境科學與工程系

中華民國　96　年　1　月　7　日

嘉南藥理科技大學教師專題研究計畫成果報告

子計劃(4)**:** 複合奈米過濾膜(Composite Nanofiltration Membrane)分離可溶性重金屬廢水之研究

(一)摘要

本研究以重金屬廢水為對象，利用本研究室目前所合成之複合奈米過濾膜(Composite Nanofiltration Membrane, CNF)針對可溶性重金屬廢水之特性，以模型廠處理規模之 NF 模組過濾程序進行試驗，探討對 NF 之去除效率及薄膜去離子效果，對膜組各項操作參數及長期連續運轉之膜組極化現象問題亦將一併進行試驗。實驗中將探討膜組之壓力、溫度及水中 pH 與 TDS 等操作條件變化下,膜組出水率、高濃度之鹽類之去除率之影響程度。

(二)研究動機與研究問題

近年來有機廢液是工業快速發展所產生的問題之一，在工業生產過程中都會排出一些有機廢液，多數對人類健康和環境都有危害，故需加以管制和處理，然而有機廢液中化學物質的分離、濃縮及純化是化學工業的主要製程之一，而且是非常重要的一個環節，因此化學工業對於分離程序的要求持續朝著操作簡便、節約能源、提高分離物品質以及降低化學污染等方面積極發展，然而薄膜分離程序的分離特性正符合上述的發展趨勢；而薄膜分離程序不只是在化學工業上有廣大的功能外，在近幾年來，各種薄膜分離程序已經被成功地在工業程序上被大量應用，像是廢水處理、海水淡化、飲用水製備、食品及水中所含有機物之分離與純化、藥物釋放、氣體/液體的純化、液體混合物的增濃與分餾、製備電子工業所需的超純水，顯示薄膜分離技術更具效率性、迅速性以及經濟性；不僅如此，薄膜分離技術更突破傳統分離技術的瓶頸，進行共沸物、同分異構物、熱敏感性及沸點相近混合物的分離。

薄膜分離程序相較於其他分離程序的特色就是在於它的操作簡單、模組簡單、分離效率高、分離成本低、節省能源、佔地面積小、不會產生二次污染、處理後水質較好、能夠回收有價值之物質等優點，相較於傳統分離程序可回收較高的產量及避免了大量消耗能源的共沸

蒸餾，也因此具有相當高的經濟價值，故已漸成快速成長且競爭力強之水處理技術[1]。本研究主要目的是藉由適量的親水性披覆膜，藉以提升水中金屬離子等溶解性污染物質之去除效率。在實驗過程中，首先求取單一親水性披覆膜或覆膜於基材上探討奈濾膜之出水與去除效率。同時在實驗進行中亦分別改變水中金屬離子濃度、操作條件如濃度與水溫等，來探討薄膜過濾去除之機制。並藉由薄膜孔徑等之變化，來求取實驗之最佳操作條件並提昇膜過濾系統之過濾成效，本研究也於薄膜操作中改變 pH 值，探討填對於水中溶解性污染物質之去除效果，並探討薄膜物質之極化現象與濾程中之沉積於薄膜表面之阻礙效應。

(三)文獻回顧與探討

薄膜處理程序是藉由外力（如：壓力或電力），使水或分子通過半透膜，或予以阻隔，分離水中不純的物質。薄膜的種類可依不同的方式來區分，如以孔徑大小、分離機制、薄膜模組、過濾方式等加以分類，若以孔徑大小做區分，不同孔徑大小的薄膜，對物質的分離的範圍，此處之孔徑係指薄膜表面能篩選阻擋物質通過的部分稱之。若以薄膜的孔徑大小來分類，可分為下列[1-4]：

（1）微過濾膜（Microfiltration，MF）孔徑介於0.1μm至10μm。

（2）超過濾膜（Ultrafiltration，UF）孔徑介於1K Daltons 至500K Daltons。

（3）極微過濾膜（Nanofiltration，NF）孔徑介於100 Daltons 至1000 Daltons。

（4）逆滲透膜（Reverse osmosis，RO）僅可通過水分子大小之分子。

MF 及 UF 薄膜的孔徑較大，只能截留粒徑較大的顆粒，因此常用於取代民生污水或工業廢水處理的前處理部份或二級處理水的再利用方面；NF 薄膜因孔徑較小，僅可供較小的分子量通過，常使用於高級淨水處理；而 RO 的孔徑只容許水分子大小的分子通過，因此所需的壓力較大，操作本較高，常用於海水淡化處理及家庭淨水器飲用水的使用。NF 薄膜不但可去

除水中的有機物、微生物、病毒等物質，還可去除原水中硬度，並且對原水中一些的有機物能夠有效且經濟的控制、消毒副產物，因此常用來做為自來水的高級處理程序。RO 和 NF 薄膜的去除機制相似，但 RO 去除效果優於 NF，而 RO 孔徑大小只可通過水分子，因此 RO 逆滲透通常用來處理海水淡化、製造純水[5-12]。

面對日益嚴格的水質標準，一般採用的取代方式為：改良式混凝、生物處理、臭氧處理、紫外線殺菌、活性碳及薄膜處理等。由於水源的日益污染，加上薄膜材質的研發更新，且薄膜處理技術亦越加成熟，相對使得操作成本降低，因此薄膜技術取代傳統處理的可行性指日可待。

(四)研究方法與步驟

超薄膜之合成

超薄膜之製備以高分子披覆法方式進行為主，將親水性高分子如AA, HEMA等高分子進行表面之披覆。

孔隙性基材膜之製備

孔隙性基材膜是以非溶劑添加法製備，基材膜之材料為目前氣體分離常用之polycarbonate及polysulfone,以polycarbonate或polysulfone溶於二氯甲烷中，配製成8wt%之鑄膜溶液，待鑄膜溶液攪拌均勻時加入5-6ml DMF(N,N dimethyl foramide)再攪拌4小時，所得溶液靜置至無氣泡時於光面玻璃板上鑄膜，以300μm之鑄膜括刀將高分子鑄膜液於玻璃板上成膜。

物性測試

薄膜孔隙之量測

為了瞭解所製備而成之薄膜其孔隙之關係，一般可藉由孔隙之量測來加以瞭解。且由真實密度(True density)之定義可知真實密度是以薄膜總重量除以薄膜中含聚合物體積的密度。而此部份之密度量測，就是利用密度測試計（AccuPyc-1330)量測薄膜的真實密度。其步驟為：實驗時，先將預測量之薄膜經真空抽器處理並剪成碎片，目的是為了方便將測量物放入Cell中，秤取薄膜碎片，記錄其正確重量；將此薄膜碎片放入密度計中利用氦氣及理想氣體方程式，即可測出薄膜之體積，再利用先前介紹之計算方法，將可推算出薄膜中聚合體之密度。並且重複上述之步驟10次，取其平均值。

掃瞄式電子顯微鏡(SEM)

將乾燥之薄膜剪成一小片，以銀膠固定後，真空下蒸鍍一層金(厚約400Å)，使試片成為電導體，然後進行電子顯微鏡的表面掃描觀測複合膜表面與切面之結構。使用國科會台南貴儀中心掃瞄式電子顯微鏡(SEM)。

廣角度x-ray繞射

將薄膜裁成1平方公分之測試片,置於廣角度x-ray繞射儀(waxd),掃描角度5-35度,藉x-ray繞射圖可得高分子之結晶度與晶格長度，使用國科會台南貴儀中心x-ray繞射儀。

金屬離子之去除率

在金屬離子部分，以含水氯化銅等鹽類所調配之水溶液做為人工所配製的水樣。精秤一定量的氯化銅等鹽類溶於經定量瓶所定量的 5 公升去離子水中，經攪拌待其完全溶解，並取適當水樣由火焰式原子吸收光譜(AAS)分析其溶液中 Cu^{2+}濃度，其濃度約為 10 mg/l Cu^{2+}。

將所配製的氯化銅等鹽類溶液，放入過濾裝置儲槽中，同時添加適量的螯合劑。緊接著依所設定之過濾時間啟動過濾裝置過濾 2 小時，並於過濾 5、10、20、30、60、120 分鐘時進行取樣分析濾液中離子殘留量，同時全程以電子天平記錄質量流量並傳入電腦中計算過濾液

的流量變化。每批實驗終了後，變更操作條件，重複上述之操作步驟。

結果與討論

研究中以不同濃度氯磺酸對聚嘧碸高分子做磺酸化反應，並製備成奈米過濾膜(Composite Nanofiltration Membrane)以操作條件壓力 20kg/cm^2、水溫 25℃對金屬離子溶液 Na_2SO_4 1000ppm 進行過濾，以求取聚嘧碸薄膜對金屬離子之去除率與流量之關係。

以 0.15ml 氯磺酸處理對不同聚嘧碸鑄膜液磺酸化之效果

研究中取 0.15ml 之氯磺酸分別對 18.9wt%、20.2wt%、21.4wt%、22.6wt%之聚嘧碸鑄膜液做磺酸化反應，以壓力 20kg/cm^2、水溫 25℃，對金屬離子溶 Na_2SO_4 1000ppm 進行過濾，過濾操作時間為一小時；以求得去除率與透水量之間的關係，其研究結果如圖 1 所示。圖中顯示當聚嘧碸高分子鑄膜溶液濃度由 18.9wt%增加到 21.4wt%，對金屬離子溶液的去除率增加，而透水量減少。此現象乃聚嘧碸高分子濃度增加時，所製備的薄膜具有較緻密的結構；但在聚嘧碸高分子鑄膜溶液濃度增加至 22.6wt%時，因薄膜結構與壓力的關係於測試時間中透水率太低。

相較於 PSF 空白鑄模液，其過濾效果約提升 1~2%；而流量也與之前文獻所提相似，比起 PSF 空白，使用 0.15ml 的氯磺酸做磺酸化反應，流量也有增加的趨勢。

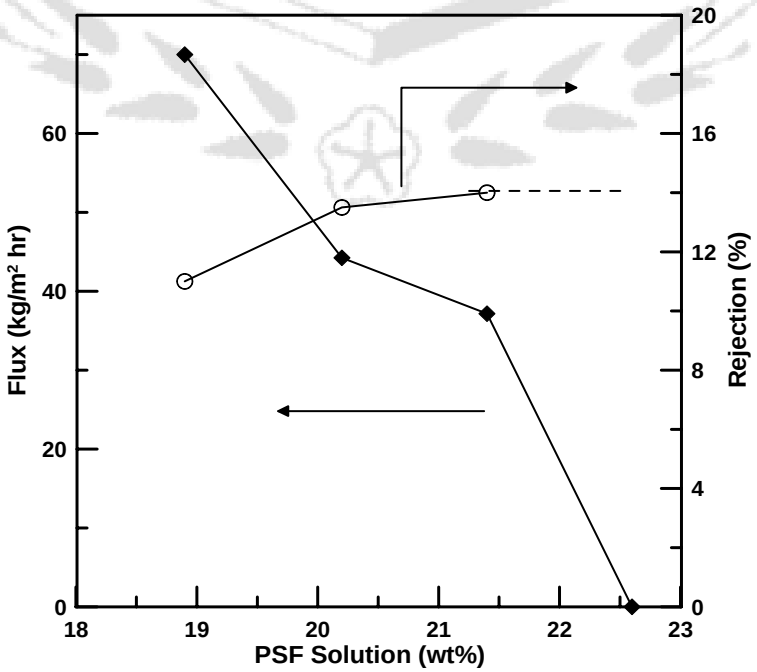

圖 1　0.15ml 氯磺酸處理對不同聚嘧碸鑄膜液磺酸化之流量與過濾效果

以 0.35ml 氯磺酸處理對不同聚嗣砜鑄膜液磺酸化之效果

研究中取 0.35ml 之氯磺酸分別對 18.9wt%、20.2wt%、21.4wt%、22.6wt%之聚嗣砜一鑄膜液做磺酸化反應，以壓力 20kg/cm^2、水溫 25℃，對金屬離子溶液 Na_2SO_4 1000ppm 進行過濾，過濾操作時間為一小時；以求得去除率與透水量之間的關係，其研究結果如圖 2 所示。圖中顯示聚嗣砜高分子鑄膜溶液濃度由 18.9wt%增加到 21.4wt%，對金屬離子溶液的去除率增加，而透水量減少。此現象乃鑄膜溶液中聚嗣砜高分子濃度增加時，因溼式成膜過程中形成的薄膜具有較緻密的結構；但在聚嗣砜高分子鑄膜溶液濃度增加至 22.6wt%時，因緻密層太厚與壓力的關係於測試時間中透水量過低。

相較於取 0.15ml 氯磺酸做磺酸化反應，其過濾效果約提升 3~4%；而流量比起 0.15ml 磺酸化薄膜，使用 0.35ml 的氯磺酸做磺酸化反應，流量也有增加的趨勢。

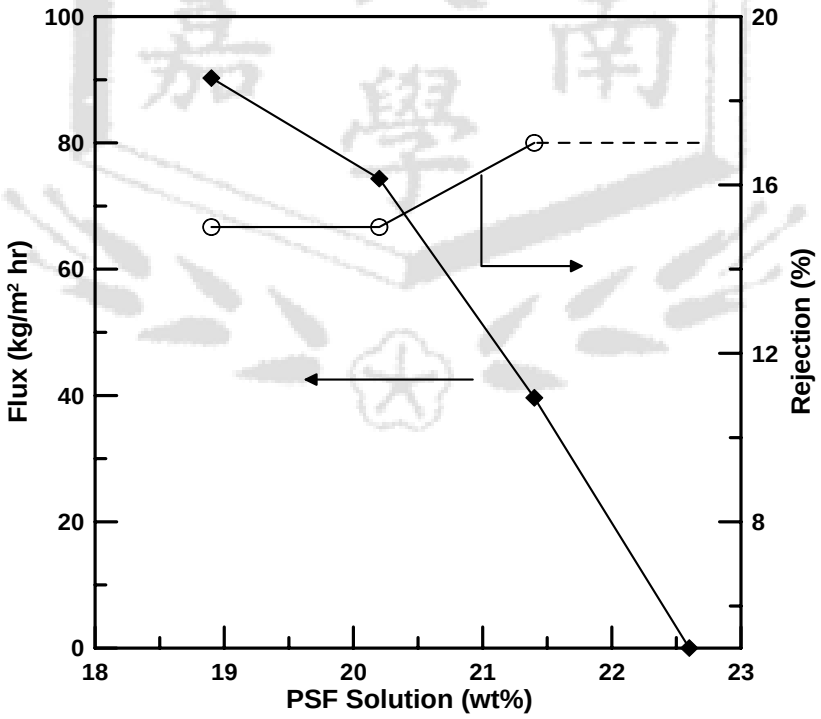

圖 2　0.35ml 氯磺酸處理對不同聚嗣砜鑄膜液磺酸化之流量與過濾效果

以 0.55ml 氯磺酸處理對不同聚嗣砜鑄膜液磺酸化之效果

研究中取 0.55ml 之氯磺酸分別對 18.9wt%、20.2wt%、21.4wt%、22.6wt%之聚嗣砜一鑄膜液做磺酸化反應，以壓力 20kg/cm^2、水溫 25℃，對金屬離子溶液 Na_2SO_4 1000ppm 進行過

濾，過濾操作時間為一小時；以求得去除率與透水量之間的關係，其研究結果如圖 3 所示。圖中顯示聚嘲碸高分子鑄膜溶液濃度由 18.9wt%增加到 21.4wt%，對金屬離子溶液的去除率增加，而透水量減少。此現象乃聚嘲碸高分子濃度增加時，所製備的薄膜具有較緻密的結構；但在聚嘲碸高分子鑄膜溶液濃度增加至 22.6wt%，因緻密層太厚與壓力的關係於測試時間中透水量過低。

相較於取 0.35ml 氯磺酸做磺酸化反應，其過濾效果約提升 3%；而流量比起 0.35ml 磺酸化薄膜，使用 0.55ml 的氯磺酸做磺酸化反應，流量也有增加的趨勢。

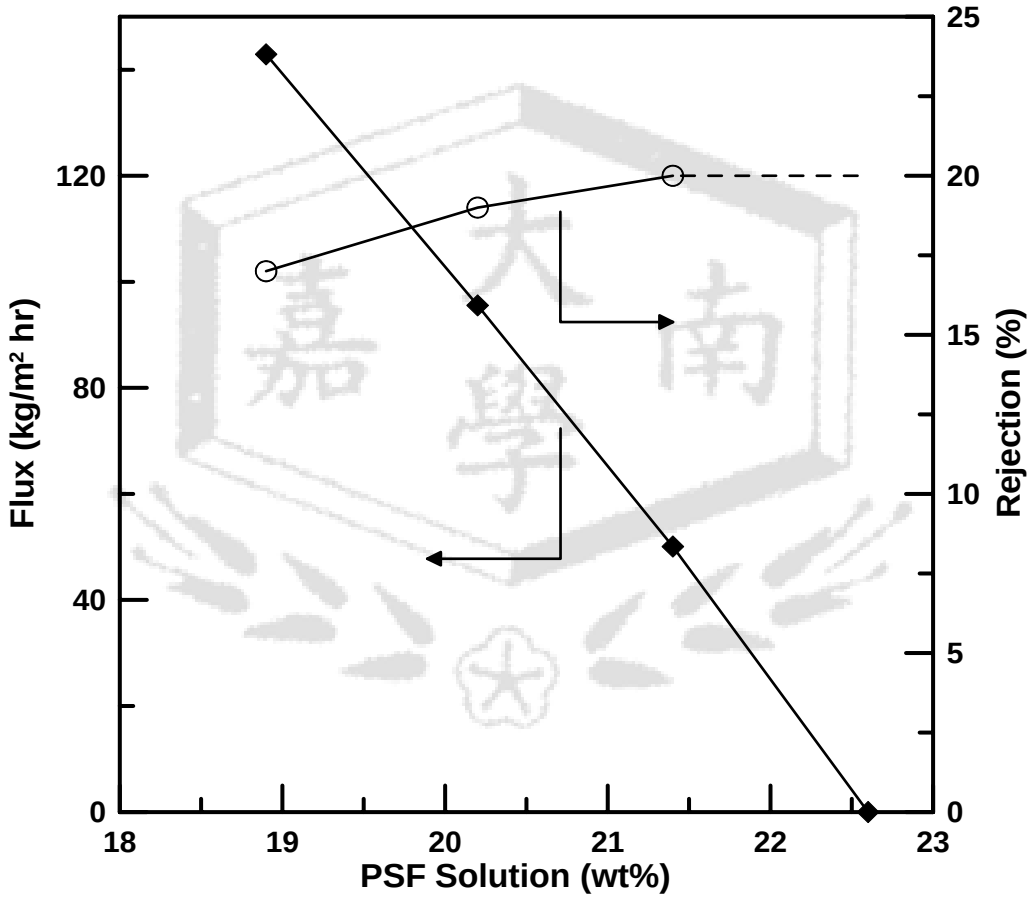

圖 3　0.55ml 氯磺酸處理對不同聚嘲碸鑄膜液磺酸化之流量與過濾效果

以 0.75ml 氯磺酸處理對不同聚嘲碸鑄膜液磺酸化之效果

研究中取 0.75ml 之氯磺酸分別對 18.9wt%、20.2wt%、21.4wt%、22.6wt%之聚嘲碸一鑄膜液做磺酸化反應，以壓力 20kg/cm^2、水溫 25℃，對金屬離子溶液 Na_2SO_4 1000ppm 進行過濾，過濾操作時間為一小時；以求得去除率與透水量之間的關係，其研究結果如圖 4 所示。圖中顯示聚嘲碸高分子鑄膜溶液濃度由 18.9wt%增加 21.4wt%，對金屬離子溶液的去除率增

加，而透水量減少。此現象乃聚嗍碸高分子濃度增加時，所製備的薄膜具有較緻密的結構；但在聚嗍碸高分子鑄膜溶液濃度增加至 22.6wt%，因緻密層太厚與壓力的關係於測試時間中透水量過低。

相較於取 0.55ml 氯磺酸做磺酸化反應，其過濾效果並無法有所提升，而流量比起 0.55ml 磺酸化薄膜，使用 0.75ml 的氯磺酸做磺酸化反應，流量卻是降低的結果，其原因緻密層隨之增厚因而導致透水率降低。

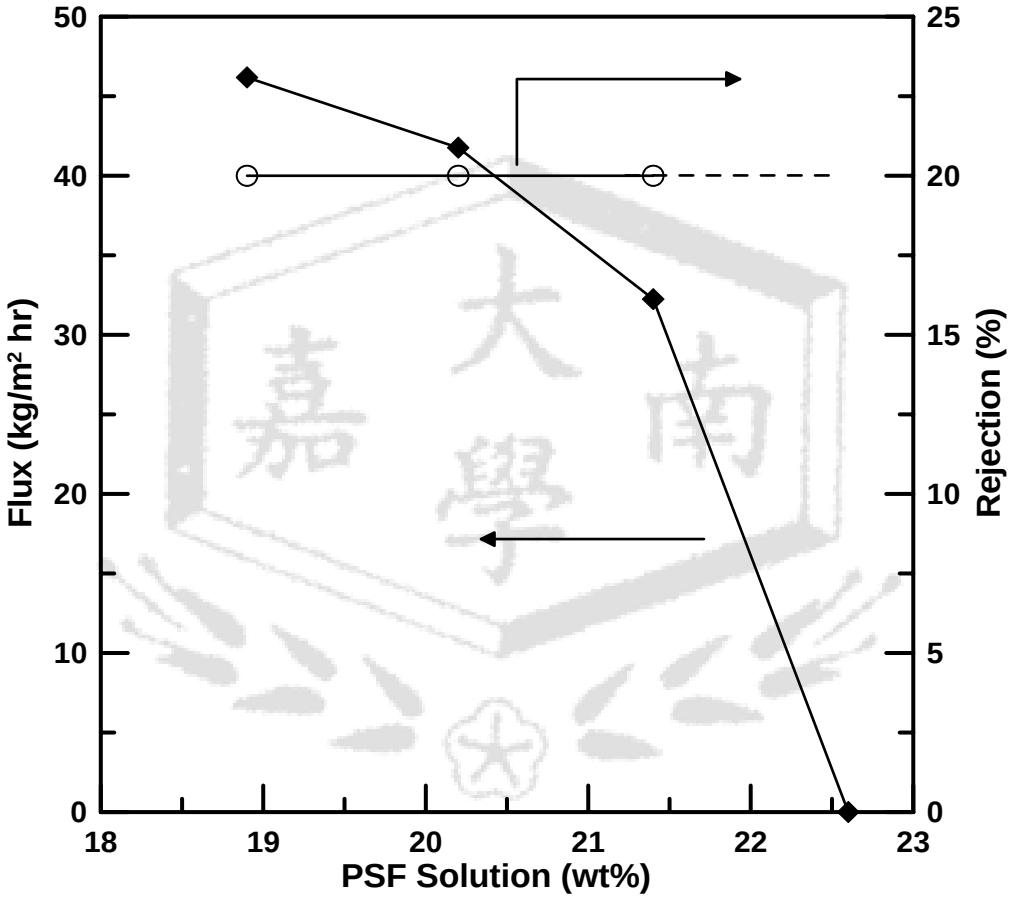

圖 4　0.75ml 氯磺酸處理對不同聚嗍碸鑄膜液磺酸化之流量與過濾效果

綜合以上結果得知，使用21.4wt%的聚嗍碸高分子鑄模液所製成的薄膜，比起使用18.9wt%、20.2wt%等聚嗍碸高分子鑄模液所製成的薄膜，對金屬離子具有較高的去除效果；而對於添加氯磺酸作磺酸化反應的聚嗍碸高分子薄膜則有優於未作磺酸化反應之聚嗍碸薄膜的去除率與透水量。原因為當磺酸化程度越高時， 可以降低薄膜接觸角角度，提高其親水性，增進薄膜膨潤度，可有效提升透水量及去除率。但由於聚嗍碸磺酸化薄膜對金屬離子的去除

效果並不顯著，去除率最多只能到達約20%左右，所以本研究進一步使用丙烯酸化學接枝於聚嘲碸薄膜之選擇層上，作為提升對金屬離子之去除效果。

丙烯酸光化學接枝對於聚嘲碸高分子薄膜奈米過濾性能之影響

研究中分別使用6g、6.5g、7g的聚嘲碸高分子與25ml的NMP混合成鑄膜溶液，製備成薄膜作為丙烯酸化學光接枝之基材膜，探討不同聚合單體丙烯酸(Acrylic Acid，AA)濃度接枝於PSF薄膜的過濾效果與透過量。研究中以不同濃度3%、7%、11%、15%之丙烯酸加入光起始劑(Benzophenone，BP)與交聯劑(Divinyl benzene，DVB) 混合作為光接枝溶液。

UV光照過程中光起始劑分解形成自由基(free radical)，當自由基基於單體溶液中生成時，溶液中單體之自聚合反應與膜表面之接枝反應相互競爭，當光起始劑大量分解形成自由基，則溶液中形成大量聚合反應之進行當自由基消耗完畢時反應亦隨之結束，而聚合反應之時間與接枝高分子鏈之長短及接枝程度有密切之關係。一般接枝或披覆薄膜於接枝表面不易形成適當之交聯結構，所以當接枝層高分子遇見相溶解性較大之溶液時便容易發生溶解現象，而接枝成層便會出現破壞或接枝鍵較被過度膨潤之現象，因此於接枝過程中加入適當量之交聯劑不但可以有效增加接枝效果，亦可以交聯現象固定或限制接枝膜之過度膨潤現象，因此本研究擬以適當之DVB(Divinyl benzene) 作為接枝膜交聯劑，並改變交聯劑量以便控制其膨潤度。

為證實丙烯酸反應確實發生在膜面之上，本研究將不同丙烯酸濃度反應在PSF薄膜基材上進行紅外光譜之測試。圖5為不同丙烯酸濃度接枝薄膜紅外線光譜圖，由圖可知當單體沒有反應於基材膜上時膜面為單純聚嘲碸之基本吸收，而當丙烯酸單體反應於薄膜表面時則可清楚地由光譜圖觀測到1729cm^{-1}及942cm^{-1}有丙烯酸結構之特徵吸收峰出現。

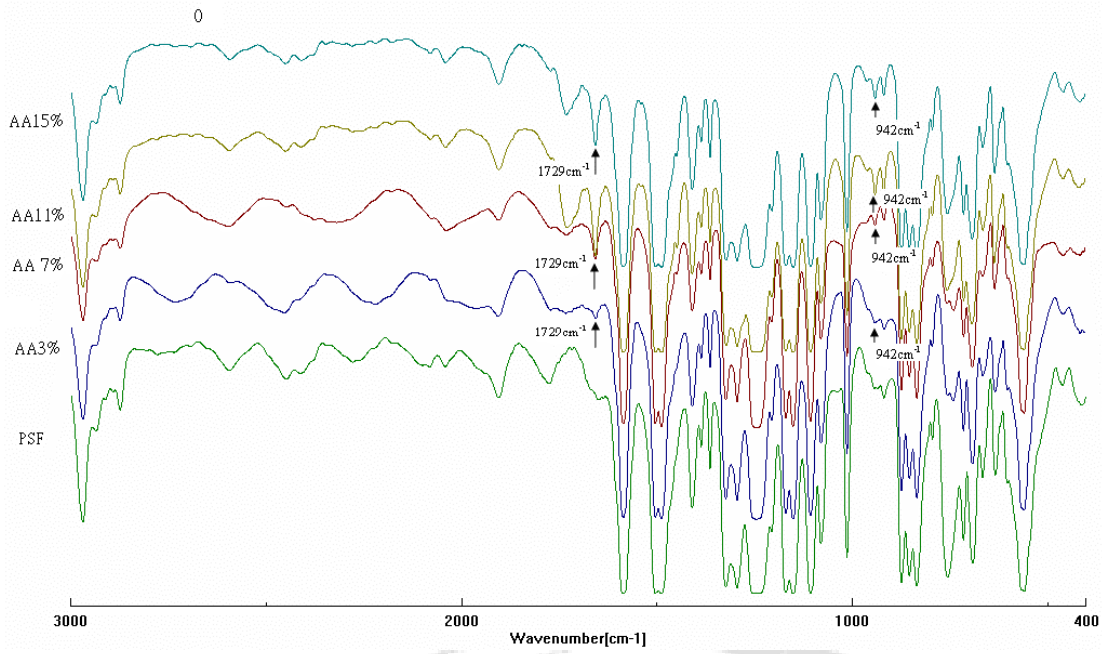

圖 5 不同丙烯酸濃度變化之光接枝聚合膜之紅外線吸收光譜圖

不同濃度之丙烯酸接枝對於 18.9wt%高分子非對稱膜之過濾效果與流量

研究中分別以 3%、7、11%與 15%丙烯酸接枝於 18.9wt%聚嗣碸高分子非對稱薄膜表層，作為過濾金屬離子之薄膜；以壓力 20kg/cm^2、水溫 25℃，對金屬離子溶液 Na_2SO_4 1000ppm 進行過濾，過濾操作時間為一小時；以探討此化學接枝薄膜對鈉離子的去除率與透水量之間的關係。

研究結果如圖 6 所示，在 3%的丙烯酸接枝薄膜時有最大的流量，而過濾效果卻較低；15%的丙烯酸接枝薄膜時流量最小，可是卻有最高的過濾效果。相較於之前所提之 PSF 空白薄膜，其濾除率大約提升了 4%~7%。

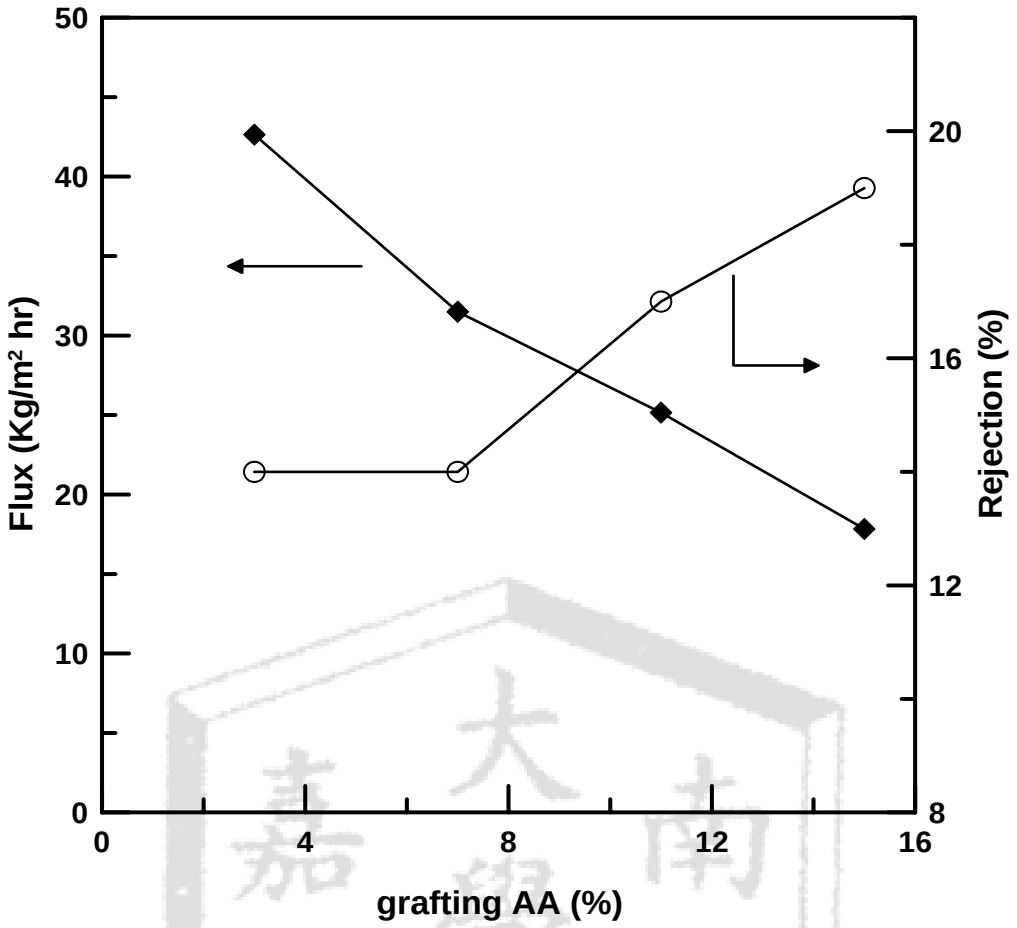

圖 6 不同濃度之丙烯酸接枝對於 18.9wt%高分子非對稱膜之過濾效果與流量

不同濃度之丙烯酸接枝對於 20.2wt%高分子非對稱膜之過濾效果與流量

研究中分別以 3%、7、11%與 15%丙烯酸接枝於 20.2wt%聚嗣碸高分子非對稱薄膜表層，作為過濾金屬離子之薄膜；以壓力 20kg/cm2、水溫 25℃，對金屬離子溶液 Na_2SO_4 1000ppm 進行過濾，過濾操作時間為一小時；以探討此化學接枝薄膜對鈉離子之去除率與透水量之間的關係。

研究結果如圖 7 所示，在 3%的丙烯酸接枝薄膜時有最大的流量，而去除率卻較低；15%的丙烯酸接枝薄膜時流量最小，可是卻有最高的過濾效果。相較於丙烯酸接枝 18.9wt%聚嗣碸高分子非對稱薄膜，其去除率並沒有明顯的提升只有在使用 3%丙烯酸接枝時過濾效果略低於丙烯酸接枝於 18.9wt%聚嗣碸高分子非對稱薄膜，其原因可能在於實驗的誤差；而流量也與 3%丙烯酸接枝於 18.9wt%聚嗣碸高分子非對稱薄膜無明顯的差異。

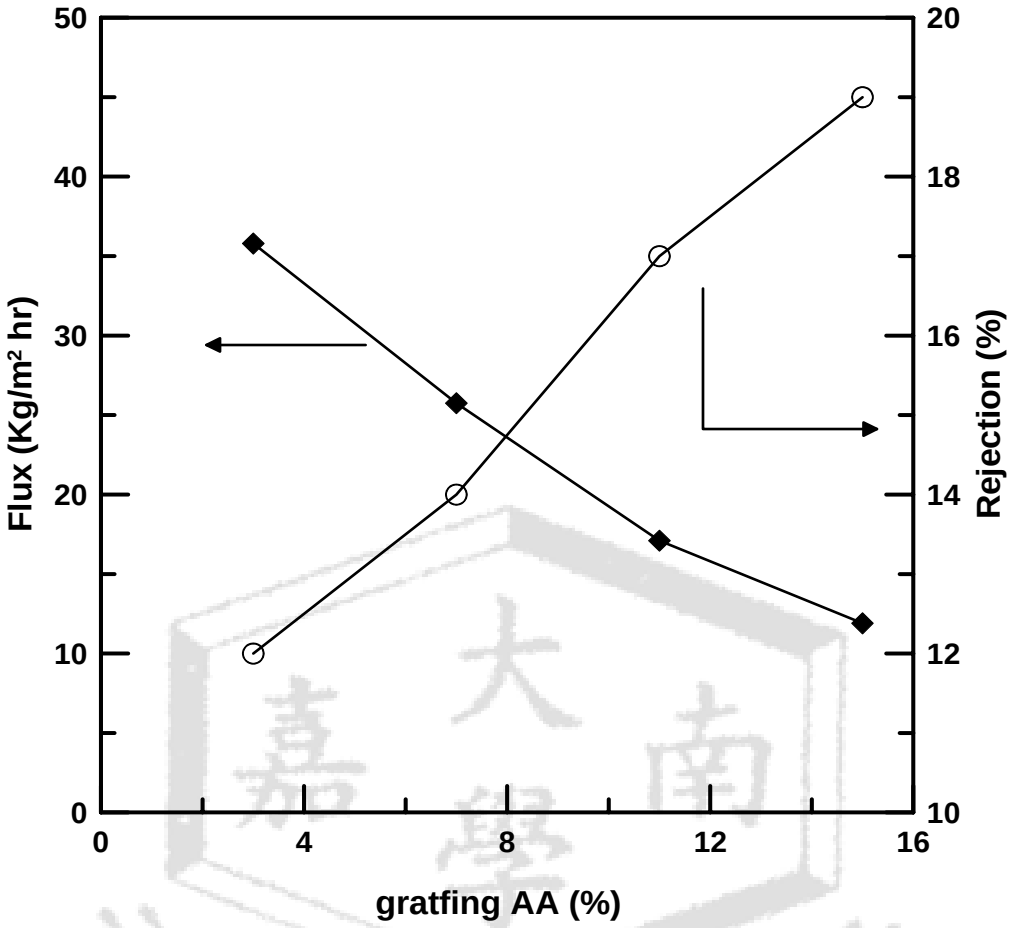

圖 7 不同濃度之丙烯酸接枝對於 20.2wt%高分子非對稱膜之過濾效果與流量

不同濃度之丙烯酸接枝對於 21.4wt%高分子非對稱膜之過濾效果與流量

研究中分別以 3%、7、11%與 15%丙烯酸接枝於 21.4wt%PSF 薄膜表層，作為過濾金屬離子之薄膜；以壓力 20kg/cm2、水溫 25℃，對金屬離子溶液 Na_2SO_4 1000ppm 進行過濾，過濾操作時間為一小時；以探討此化學接枝薄膜對鈉離子去除率與透水量之間的關係。

研究結果如圖 8 所示，在 3%的丙烯酸接枝薄膜時有最大的流量，而去除率卻較低；15%的丙烯酸接枝薄膜時流量最小，但是有最高的過濾效果。相較於丙烯酸接枝於 20.2wt%聚嘲碸高分子非對稱薄膜，其濾除率在 3%、7%、15%皆有提高，去除率約提昇 2~3%，而流量略低。

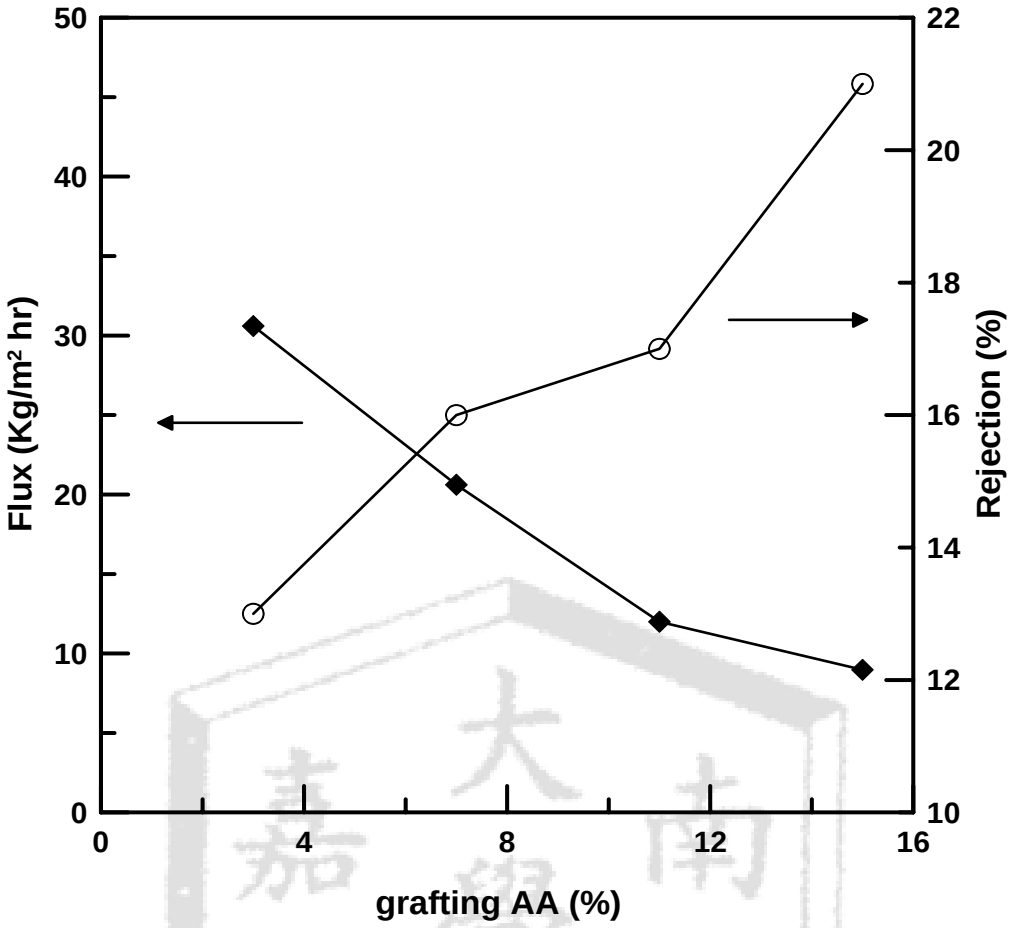

圖 8 不同濃度之丙烯酸接枝對於 21.4wt%高分子非對稱膜之過濾效果與流量

由以上丙烯酸接枝於 PSF 薄膜研究結果得知，使用 21.4wt%聚嗣碸高分子非對稱薄膜為基材膜，再以 15%丙烯酸濃度接枝於基材膜表面，比起使用 18.9wt% 、 20.2wt%與不同丙烯酸濃度 3%、7%、11%、15%等有較好的去除率；對於一價金屬離子，其過濾效果約 21%左右。

結論

本研究針對聚嗣碸高分子所製備之非對稱薄膜進行改質，其中改質包含聚嗣碸磺酸化、丙烯酸接枝於聚嗣碸表層，藉以探討對於金屬離子之去除成效與流量，根據以上各項討論所獲之結論如下:

1. 在使用磺酸化聚嗣碸膜薄膜方面，其最佳的過濾效果是以 0.55ml 氯磺酸對聚嗣碸高分子作磺酸化反應，可得知對鈉離子其去除率為 20%。

2. 使用丙烯酸接枝於 21.4wt%聚嘧碸高分子非對稱薄膜表層，以 AA15%、BP5%、DVB1%為接枝溶液，對鈉離子其去除率最佳約為 20%。
3. 以 15%丙烯酸接枝聚嘧碸薄膜，分別使用 0.1M 及 0.01M 之 NaCl、$MgCl_2$、$AlCl_3$ 含浸，製備各種類型的離子化薄膜，對鈉離子做過濾程序，鈉離子化薄膜其最佳去除率為 28%、鎂離子化薄膜其最佳去除率為 39%、鋁離子化薄膜其最佳去除率為 43%。
4. 溫度對於丙烯酸聚嘧碸薄膜影響甚大，以鋁離子化薄膜來說，改變操作溫度由 20℃升高至 60℃對其去除率之影響約在 5%~17%之間，其原因在於溫度影響薄膜孔隙之關係。溫度提高使得聚嘧碸薄膜高分子的間隙變大，比較容易使金屬離子穿過，造成去除率下降，透過率增加之情形。
5. 不同程度之披覆關係可以歸納出,同一基材膜中披覆比例對奈米過濾分離性能之影響。
6. 披覆薄膜之物性，如親疏水特性及相分離程度、膨潤性質、機械強度、玻璃轉移溫度等強烈受丙烯酸接枝聚合程序度之影響。

參考文獻

1. Qdais, Hani Abu; Moussa, Hassan Removal of heavy metals from wastewater by membrane processes: a comparative study, *Desalination* Volume: 164, Issue: 2, April 1, 2004, pp. 105-110
2. Yoon, Yeomin; Lueptow, Richard M. Reverse osmosis membrane rejection for ersatz space mission wastewaters, *Water Research* Volume: 39, Issue: 14, September, 2005, pp. 3298-3308
3. Wahab Mohammad, A.; Othaman, Rizafizah; Hilal, Nidal Potential use of nanofiltration membranes in treatment of industrial wastewater from Ni-P electroless plating, *Desalination* Volume: 168, Complete, August 15, 2004, pp. 241-252
4. Szoke, Szabolcs; Patzay, Gyorgy; Weiser, Laszlo Characteristics of thin-film nanofiltration membranes at various pH-values, *Desalination* Volume: 151, Issue: 2, January 10, 2003, pp. 123-129
5. WÄÄsik, Ewa; Bohdziewicz, Jolanta; ÄÄwiklak, Katarzyna Ion balance in NF-treated well water for drinking water production, *Desalination* Volume: 186, Issue: 1-3, December 30,

2005, pp. 81-87

6. Ballet, Guy Tiama; Gzara, Lassaad; Hafiane, Amor; Dhahbi, M. Transport coefficients and cadmium salt rejection in nanofiltration membrane, *Desalination* Volume: 167, Complete, August 15, 2004, pp. 369-376
7. Ratanatamskul, C.; Yamamoto, K.; Urase, T.; Ohgaki, S. Effect of operating conditions on rejection of anionic pollutants in the water environment by nanofiltration especially in very low pressure range, *Water Science and Technology* Volume: 34, Issue: 9, 1996, pp. 149-156
8. Ahn, Kyu-Hong; Song, Kyung-Guen; Cha, Ho-Young; Yeom, Ick-Tae Removal of ions in nickel electroplating rinse water using low-pressure nanofiltration, *Desalination* Volume: 122, Issue: 1, May 25, 1999, pp. 77-84
9. Wang, Zhi; Zhao, Yuanyuan; Wang, Jixiao; Wang, Shichang Studies on nanofiltration membrane fouling in the treatment of water solutions containing humic acids, *Desalination* Volume: 178, Issue: 1-3, July 10, 2005, pp. 171-178
10. Karakulski, Krzysztof; Morawski, Antoni W. Treatment of spent emulsion from a cable factory by an integrated UF/NF membrane system, *Desalination* Volume: 149, Issue: 1-3, September 10, 2002, pp. 163-167
11. Yoon, Yeomin; Amy, Gary; Yoon, Jaekyung Effect of pH and conductivity on hindered diffusion of perchlorate ions during transport through negatively charged nanofiltration and ultrafiltration membranes, *Desalination* Volume: 177, Issue: 1-3, June 20, 2005, pp. 217-227
12. Bodzek, Michal; Koter, Stanislaw; Wesolowska, Klaudia Application of membrane techniques in a water softening process, *Desalination* Volume: 145, Issue: 1-3, September 10, 2002, pp. 321-327