

廢棄物類

廢棄保麗龍再生為離子交換材料可行性 探討

何志軒*、陳俊成**、楊禎祿***

摘 要

本研究係以四氫呋喃(THF)和二甲基甲醯胺(DMF)的等比例混合液做為溶劑，用以溶解聚苯乙烯與廢棄保麗龍等樣品。並利用靜電紡絲技術，在 50g/L 溶液濃度、電壓 15k 及流率 1.0ml/hr 實驗條件下，可將聚苯乙烯及廢棄保麗龍再製為纖維離子交換材料，所產製纖維直徑約 90~1,200nm，平均尺寸約 300nm。

另由 FT-IR 鑑定在圖譜波數 $1,030\text{cm}^{-1}$ 有明顯的鍵結吸收峰出現，表示磺酸化已能成功將磺酸根基鍵結附接於苯環碳鍵。其次，透過離子交換能力測試，磺酸化後聚苯乙烯纖維與廢棄保麗龍纖維最大離子交換能力為 32.91mmol/g 與 27.65mmol/g。至於磺酸化廢棄保麗龍纖維的最大重金屬去除量則為 157.09mg Cu^{2+} /g，大於聚苯乙烯纖維之 28.22mg Cu^{2+} /g。綜合上述試驗結果可知，利用靜電紡絲程序與磺酸化程序，可將廢棄保麗龍再生做為離子交換材料使用。

【關鍵字】 廢棄保麗龍、靜電紡絲、離子交換能力、磺酸化、重金屬去除能力

*大漢技術學院土木工程與環境資源管理系

助理教授

**淡江大學水資源及環境工程學系

副教授

***美國麻州大學達特茅斯分校先進科技研究中心

研究員及兼任教授

一、前言

發泡聚苯乙烯 (Expanded Polystyrene, EPS) 俗稱保麗龍，係由聚苯乙烯 (Polystyrene, PS) 加入發泡劑後再加熱發泡製成一種較輕的材質。因其成本低、耐熱效果佳、防水性及重量輕等特性，故多做為包覆及緩衝材料使用；再者，聚苯乙烯乃是由細小顆粒組成，其分子量大多介於 160,000~260,000g/mol 且含 4~7% 的介面活性劑，因此大多數工廠使用保麗龍的原因，多考量其多功能特性、尺寸穩定性及低成本^[1]。

根據 2012 美國商業調查 (U.S Post-Consumer) 保麗龍收集回收資料顯示，2012 年美國境內保麗龍產出量為 1.3×10^7 磅，但僅有 3.7×10^6 磅被回收，整體回收率僅 30%^[2]。另，據台灣 103 年度回收資料統計，發泡保麗龍僅占總回收廢塑膠容器中的 1%，大多數的保麗龍被棄置^[3]。廢棄保麗龍無法經由自然界中微生物分解而永遠存在於環境中^[4]，勢將造成垃圾掩埋場無法消化，導致用地不足促使垃圾滲出水中的有機物分解而產生甲烷、二氧化碳等造成溫室效應氣體及硫化氫等有害氣體，並產生高 BOD 的滲漏而水污染地下水^[5]，引發嚴重環境污染問題。

廢棄保麗龍最終處理與處置方式，大多採用掩埋或焚化等廉價方式，但這 2 種做法亦會造成嚴重環境問題，並可能危害人體健康^[6]。如何有效回收廢棄保麗龍值得深入探討。目前廢棄保麗龍回收方法包括化學、材料及熱回收處理方法等。另因保麗龍內含有空氣，其回收製品體積較大而致運輸成本增加，如採取傳統保麗龍回收程序則須消耗較多的能源。

爰此，本研究探討保麗龍回收再利用之可行性及其回收後再製產品之經濟價值。藉由添加溶劑將回收保麗龍溶解為液體，並以靜電紡絲程序將其再製為奈米纖維，此係考量纖維已被廣泛用於離子交換的製備，高表面積接觸效率、物理強度要求和尺寸穩定性等優點^[7-8]。磺酸化程序則是改變廢棄保麗龍的化學性質的處理方法，取代反應促使 $-SO_3H$ 官能基能有效附接在有機化合物的化學碳分子結構，所鏈結 $-SO_3H$ 官能基則具有離子交換能力^[9-10]。藉由上述程序，除可維持原有保麗龍特

性，更能提升產物的品質，印證回收保麗龍再製為具有可離子交換能力的奈米纖維實為可行的技術，對於環境保護極具助益。

二、實驗材料和方法

2.1 廢棄保麗龍溶液製備

本研究所使用的實驗材料，分別為聚苯乙烯(Virgin Polystyrene, VPS)和廢棄保麗龍杯(Waste Expanded Polystyrene, EPS)(如圖 1 所示)，其中聚苯乙烯結構式為 $C_2H_3-C_6H_5$ ，分子量(MW)為 210,000g/mol，化學結構式之重複單元為 2000，購自美國 Scientific Polymer Inc.(New York, USA)，至於廢棄保麗龍杯則購自大型超市。等比例(V/V)的四氫呋喃(Tetrahydrofuran, THF)和二甲基醯胺(Dimethylformamide, DMF)的混合液則為此次實驗溶劑，用以不同濃度(W/V)比例溶解聚苯乙烯或保麗龍，在室溫下不斷攪拌至其溶解並儲存為實驗用材料。

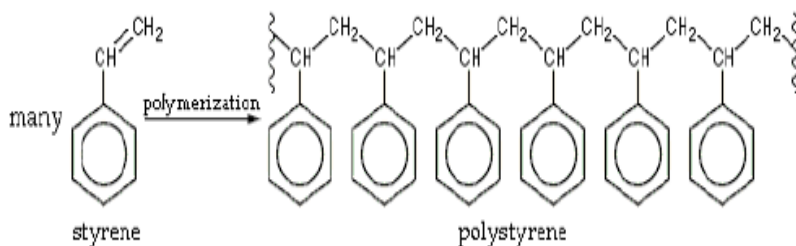


圖 1 (發泡)聚苯乙烯化學結構式

2.2 聚合物之靜電紡絲程序

將溶解聚苯乙烯聚合物溶液或廢棄保麗龍溶液裝入注射針筒內，並放置於注射泵浦，分別於不鏽鋼針頭(正極)及接地收集端(負極)連接高電壓直流電源供應器，設定注射速率與開啟電源即可製作靜電紡絲纖維。使用設備包括 10ml 的塑膠注射器(內徑 1.0mm，美國 TERUMO 公司 10cc/ml 針筒)、注射泵浦(syringe pump, KD Scientific Co, KDS-100)、DC 高電壓直流電源供應器(美國 GAMMA HIGH VOLTAGE RESEARCH INC.公司生產 ES-50)和鋁盤作為收集電極(內徑 8.5 公分)。

82 廢棄保麗龍再生為離子交換材料可行性探討

靜電紡絲裝置設備如圖 2 所示，實驗過程均維持通風櫃溫度 25°C 及相對濕度 30%，應用 DC 電壓為 10~25kV 及流速 0.2~1.5ml/hr。

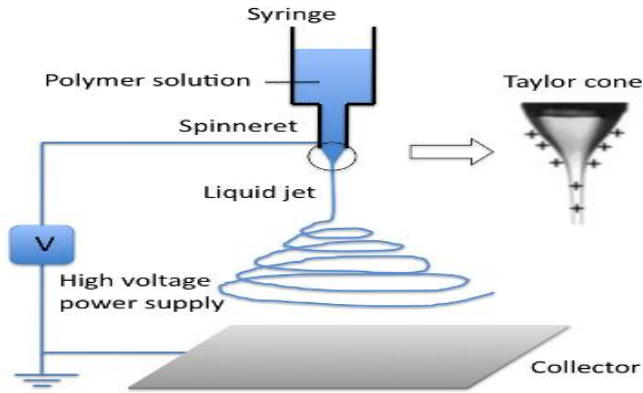


圖 2 靜電紡絲裝置示意圖^[11]

2.3 磺酸化程序(Sulfonation)

由上述程序所製成非編織性纖維(聚苯乙烯纖維)，必須採用化學法使其活化且具離子交換能力^[12]，因此利用浸泡硫酸溶液，將磺酸根添加於聚苯乙烯纖維內，形成硫化聚苯乙烯纖維離子交換體，此方法乃改良多孔性濾膜中直接的聚苯乙烯薄膜磺酸化。首先在燒杯中加入 98% 的濃硫酸溶液，並添加硫酸銀做為催化劑，靜電紡絲聚苯乙烯纖維樣品則裁切成為直徑 4.8 公分後予以稱量。其後將混合液放置在室溫下，並分別以 5、10、20、50 及 100 分鐘等不同時間浸泡靜電紡絲聚苯乙烯纖維，最終具有磺酸化官能基之靜電紡絲聚苯乙烯纖維，則逐步以不同濃度(70%、50%、25% 及 5%)硫酸稀釋洗滌，處理後再以去離子蒸餾水(DI water)浸泡漂洗^[13]。而磺酸化程序結果則利用傅立葉紅外線光譜儀(FT-IR)進行鑑定，當磺酸基(-SO₃H)成功附接於聚苯乙烯苯環上時，其光譜圖譜在波數 1,030cm⁻¹ 會有明顯的鍵結吸收峰出現，因此可藉由此項結果來判定再製之纖維樣品是否具有離子交換能力。

2.4 靜電紡絲聚苯乙烯纖維特性與張力特性

靜電紡絲產生的聚苯乙烯纖維表面纖維型態以及磺酸化後纖維型態，皆採用掃描式電子顯微鏡觀察(日本 JEOL 公司，型號 JSM-5610)，進行量測纖維的尺寸與

分布特性。並利用 ImageJ 軟體測量至少 50 條纖維的直徑以求平均尺寸。至於磺酸化紡絲纖維的拉伸性能，則以美國 Shimadzu 公司 AGS-X 拉力測試機器，在室溫下以 10mm/min 的速度，測試矩形樣品。所有受測纖維薄膜的厚度約為 0.1mm、長度則為 3cm，放置在樣品架上(3 公分標準規格)並以 0.01/秒的變形率進行測試，以求磺酸化後纖維的應力與應變。

2.5 離子交換能力(IEC)與重金屬去除能力(Heavy Metal Removal)測試

利用酸鹼滴定法量測離子交換容量能力(Ion Exchange Capacity, IEC)，離子交換能力主要量測單位質量的材料可取代的 H^+ 數量。纖維樣品先以純水浸泡 1 天後再浸泡於 1N HCl 溶液中，以確保磺酸根基能飽和鍵結 H^+ 的薄膜，並於纖維薄膜中洗去過量鹽酸溶液，最後則將具飽和 SO_3H 官能基纖維浸泡於 1N NaOH 溶液中，以酸鹼滴定法測定經離子交換後 NaOH 溶液實際濃度，據以推算磺酸化纖維之離子交換能力。重金屬去除能力主要以原子吸收光譜儀(Atomic Absorption Spectroscopy, Perkin Elmer 300, USA)測定，將已知濃度銅離子溶液製備，以磺酸化後纖維浸泡後取出，並計算前後濃度間變化，以判定磺酸化纖維之重金屬去除效果。

三、結果與討論

3.1 靜電紡絲纖維直徑的特性

因保麗龍製造過程中會添加發泡劑與膠結劑以達到產品需求，但此類物質卻增加後續實驗與研究的複雜性，因此在探討靜電紡絲最佳實驗條件以原始聚苯乙烯材料(VPS)為主。本研究將等比例四氫呋喃(THF)和二甲基甲醯胺(DMF)混合做為聚苯乙烯的溶劑，探討不同濃度(W/V)所溶解之聚苯乙烯溶液，利用靜電紡絲程序所產生的纖維尺寸變化，如圖 3 即是分別以 25~400g/L 不同濃度的聚苯乙烯溶液，藉由靜電紡絲(條件：電壓 15kV、流速 0.5m/hr 及間距 4cm)所產製之纖維尺寸顯微結構圖。由圖 3(a)纖維呈現球珠狀(Bead)結構，表示在此低濃度條件(25g/L)尚無法形成纖維結構。但當聚苯乙烯聚合物濃度增加至 50、100 和 400g/L 時(如圖 3(b)~3(d))

84 廢棄保麗龍再生為離子交換材料可行性探討

所示)所產製樣品以大都可呈現纖維尺寸，反映足夠濃度的溶液乃是靜電紡絲產生纖維必要的條件，此結果與國外相關研究結論相同^[14]。

另依圖 3(b)~3(d)結果，當增加聚苯乙烯聚合物濃度時，所產製纖維尺寸亦同時增加。而當濃度達 400g/L(圖 3(d))時，所產生纖維的平均尺寸大幅則增加到 7~10 μ m，顯示未來在討論不同商業化需要之製纖維尺寸時，可藉由變化保麗龍聚合物濃度方式，變化再製的纖維尺寸。本次研究旨在探討再生為離子交換材料可行性，因此纖維尺寸設定在次微米及奈米範圍內，為求最佳離子交換結果，後續研究聚苯乙烯或保麗龍聚合物濃度則設定為 50g/L 與 100g/L 的濃度條件。

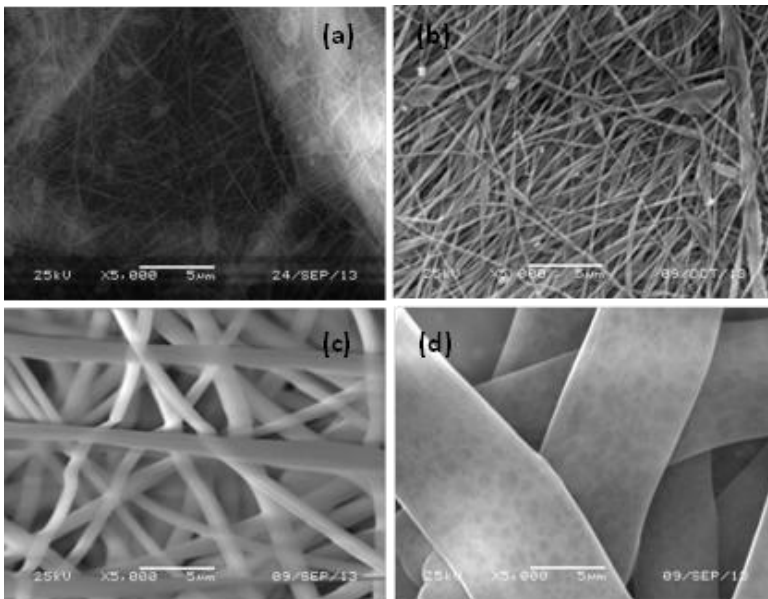


圖 3 不同濃度聚苯乙烯之靜電紡絲纖維尺寸
(a)25g/L (b) 50g/L (c)100g/L (d)400g/L

確認聚苯乙烯溶液溶度後，靜電紡絲實驗之電壓(Voltage)、流率(Flow rate)以及針頭與收集板間距(Gap Distance)等條件，均會影響靜電紡絲所產生纖維尺寸之條件。當減少針頭與收集板間距，可縮短纖維的飛行時間與溶劑揮發時間。另鑒於增加直流電壓強度與減少針頭收集電極間距的效果幾乎類似，因此於此實驗尋求最佳條件時，則採固定間距(4cm)，僅探討電壓與流率變化結果。

圖 4 與圖 5 為不同電壓(5、10、15、20 及 25kV)和不同流率(0.2、0.5、1、1.5、2 及 2.5ml/hr)，所產製纖維平均尺寸之變化，靜電紡絲所產生纖維尺寸的平均直徑介於 300~1,200nm 之間。由圖 4 可知，50g/L 聚苯乙烯溶液所產生纖維尺寸，明顯小於 100g/L 聚苯乙烯溶液所產生者。另由不同電壓變化，如 50g/L 聚苯乙烯溶液電壓 15kV 時，所產製纖維平均尺寸約在 300~400nm 之間；而流率 1ml/h 時，電壓分別為 5kV 和 10kV 條件，產生纖維幾乎為串珠珠粒，如同圖 3(a)結果。

圖 5 則顯示，當電壓在 20kV 以上、流率增加至 1ml/hr，因注射針頭射出溶液的飛行時間，無法使溶液藉由高電壓拉力形成纖維，於收集平板上大多形成為串珠(Bead)。而當降低電壓在 15kV 以下，提高流率在 1.5ml/hr 以上時，往往因流率增加造成揮發性溶劑(THF/DMF)無法在飛行時間內汽化，導致收集板上殘留溶劑將產製之纖維溶解形成膠膜(film)。因此當電壓在 10~15kV 間，流率在 1ml/hr，所產生纖維平均尺寸約在 300nm。

綜合上述結果，藉由靜電紡絲程序，所產生纖維尺寸之最佳條件為 50g/L 聚苯乙烯溶液、注射射出流率為 1ml/hr 及電壓為 12kV 時，產生纖維直徑平均值明顯小於其它條件。後續則依靜電紡絲條件，探討產製纖維的磺酸化變化條件、離子交換能力與與重金屬去除效果。

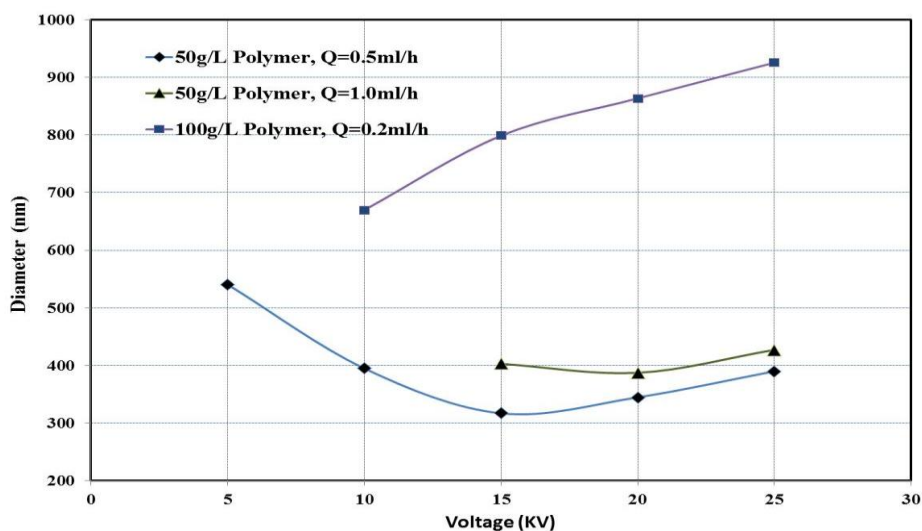


圖 4 不同濃度聚苯乙烯溶液在不同電壓與不同流率纖維尺寸變化關係

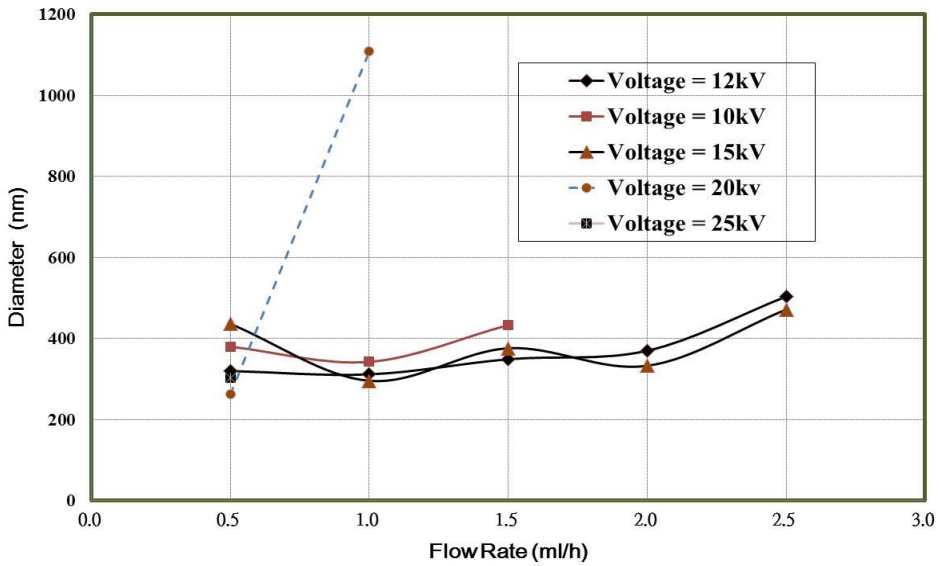
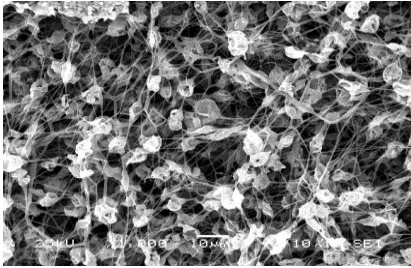


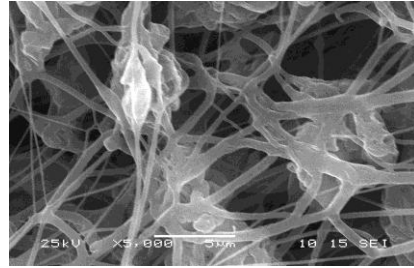
圖 5 不同流率製備與不同靜電紡絲電壓的纖維尺寸變化(50g/L 聚苯乙烯)

3.2 靜電紡絲聚苯乙烯纖維的磺酸化變化

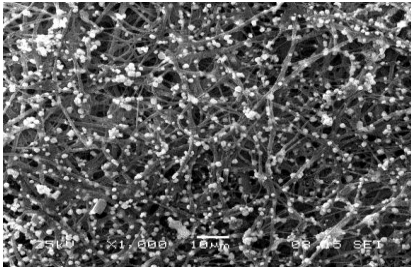
以最佳製作靜電紡絲纖維條件(聚合物溶液濃度 50g/L、供電電壓 12kV、進料速率 1ml/h 及間隙距離 4cm)製作靜電紡絲纖維，並比較其磺酸前後纖維特性。以掃描式電子顯微鏡(SEM)檢視發現，靜電紡絲纖維經浸泡 98% 硫酸後，纖維上會產生許多結狀構造，難以量測具代表性的纖維直徑，不同磺酸化纖維的顯微結構如圖 6，除可見其磺酸化前後的纖維大小差異，亦可知磺酸化時間愈久，纖維形狀愈呈細碎化狀態，惟纖維直徑大小並非與磺酸化時間成正比。



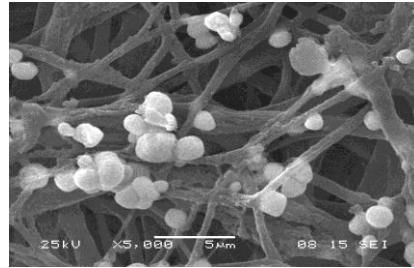
(A)磺酸化時間:5min(倍率 1000)



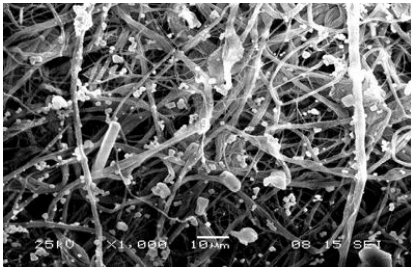
(B)磺酸化時間:5min(倍率 5000)



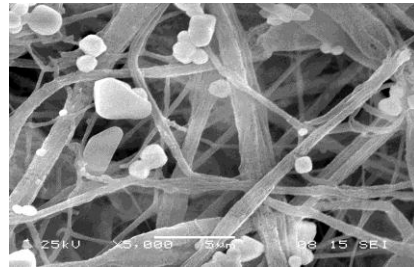
(C)磺酸化時間:10min(倍率 1000)



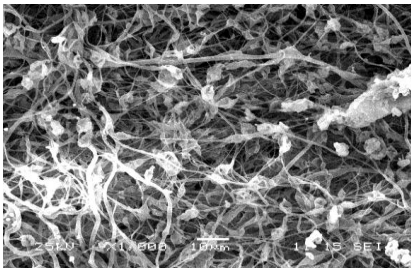
(D)磺酸化時間:10min(倍率 5000)



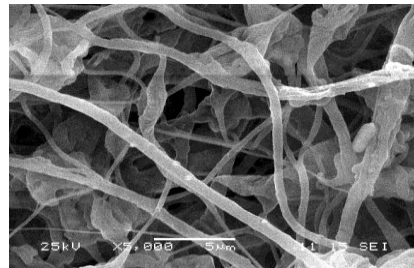
(E)磺酸化時間:20min(倍率 1000)



(F)磺酸化時間:20min(倍率 5000)



(G)磺酸化時間:40min(倍率 1000)



(H)磺酸化時間:40min(倍率 5000)

圖 6 磺酸化後聚苯乙烯纖維結構圖

88 廢棄保麗龍再生為離子交換材料可行性探討

廢棄保麗龍溶液藉靜電紡絲程序產生之纖維，由磺酸化浸泡 98% 硫酸後，以電子顯微鏡 SEM 分別查看不同磺酸化時間之樣品特性，結果如圖 7。圖 7(a)為原始未經磺酸化之纖維結構，圖 7(b)~7(d) 分別為歷經 25、50 和 100 分鐘的磺酸化浸泡時間之纖維結構，明顯可見纖維除新增 $-\text{SO}_3\text{H}$ 官能基外，亦受 98% 硫酸腐蝕影響而產生結構變化。

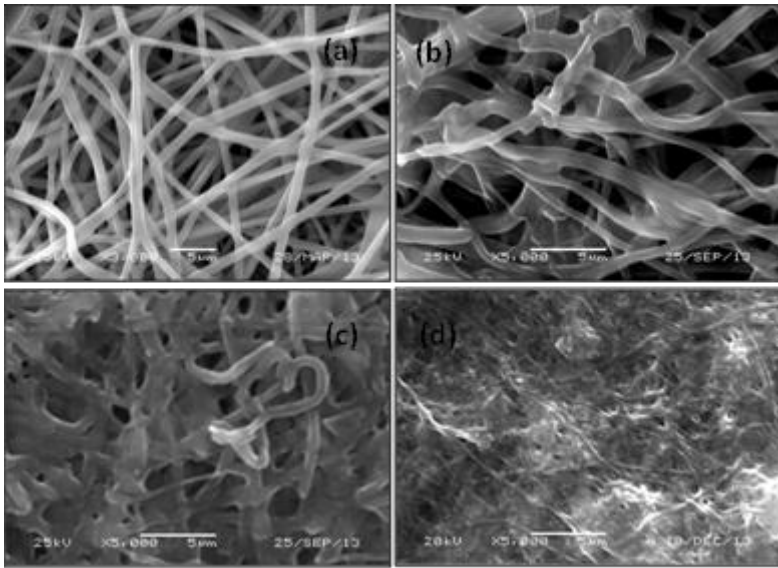


圖 7 不同磺酸化時間廢棄保麗龍纖維顯微結構變化
(a)0min、(b)25mins、(c)50mins、(d)100mins

為確認磺酸化程序能否有效將 $(-\text{SO}_3\text{H})$ 官能基添加在纖維結構上，利用 FTIR 鑑定其官能基圖譜位置，其結果如圖 8 所示。不同磺酸化時間之聚苯乙烯纖維(VPS)與廢棄保麗龍纖維(EPS)在波數 $1,150\sim 1,250\text{cm}^{-1}$ 有明顯的磺酸基團吸收波段，它在 $1,030\sim 1,060\text{cm}^{-1}$ 被歸於 S-O 的伸縮震動，表示為對稱的特徵波峰(O-S-O)，磺酸基團被成功鍵結乙炔苯環之碳鍵上，所產生磺酸化反應。另由圖可知，當磺酸化時間越久，吸收峰之吸收值越大，表示所能鍵結之官能基數量越多。但採用硫酸浸泡之磺酸化方式，除能將官能基鍵結加入，同時會造成纖維的腐蝕損毀，因此須再進一步探討其離子交換能力與重金屬去除效果，以判斷最佳磺酸化時間。

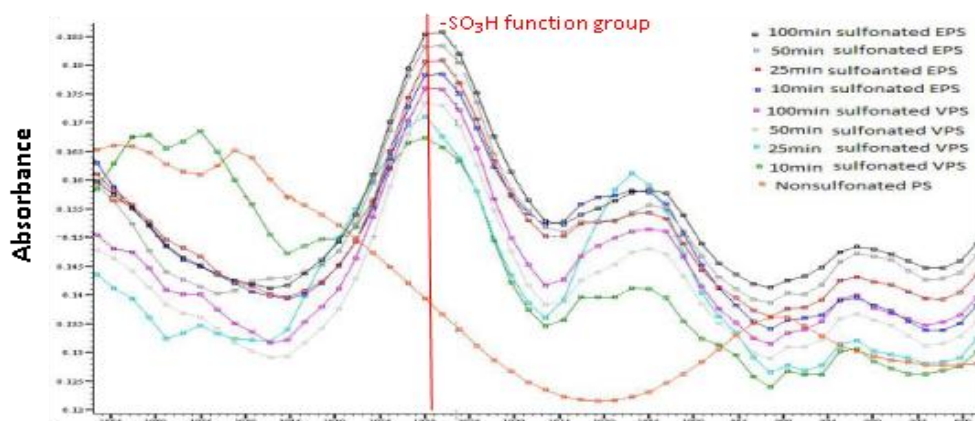


圖 8 不同磺酸化時間聚苯乙烯纖維與廢棄保麗龍纖維之 FTIR 變化

3.3 磺酸化後廢棄保麗龍纖維拉力特性

藉由靜電紡絲程序再製纖維薄膜，考量做為離子交換材料或濾材時，須探討其材料本身之拉力與應變特性。若非編織性聚苯乙烯纖維形成後，因內部分子或微觀結構中原子被轉移到新的平衡位置，如此分子流動性的可塑性機制，而使材料具有延展性。若缺少此可移動性而受內部微觀結構阻礙錯位運動，將使材料特性形成為脆性，因此脆性材料的應力-應變曲線，在其整個應變範圍內通常是線性的，且在最後斷裂點沒有相當的塑性流動。可塑性材料當出現應變率降低到極限拉力強度 (Ultimate Tensile Strength, UTS)，當超過該點時，材料出現應變軟化現象，並伴隨增加額外之微小的應力^[15]。

圖 9 顯示未經磺酸化處理之廢棄保麗龍纖維呈現最大之拉力斷裂點，產生最大拉力強度為 0.8MPa 和應變為 8.96%。惟伴隨纖維磺酸化的時間增加，纖維拉力與應變則減少。當磺酸化時間 100 分鐘時，拉力強度降低為 0.18MPa，應變為 3%，意謂纖維受磺酸化影響後，樣品已相較其他條件產生較高的脆性，故當磺酸化時間在 100 分鐘時，纖維將降低應變力 66.7% 及 77.5% 的拉伸強度。

90 廢棄保麗龍再生為離子交換材料可行性探討

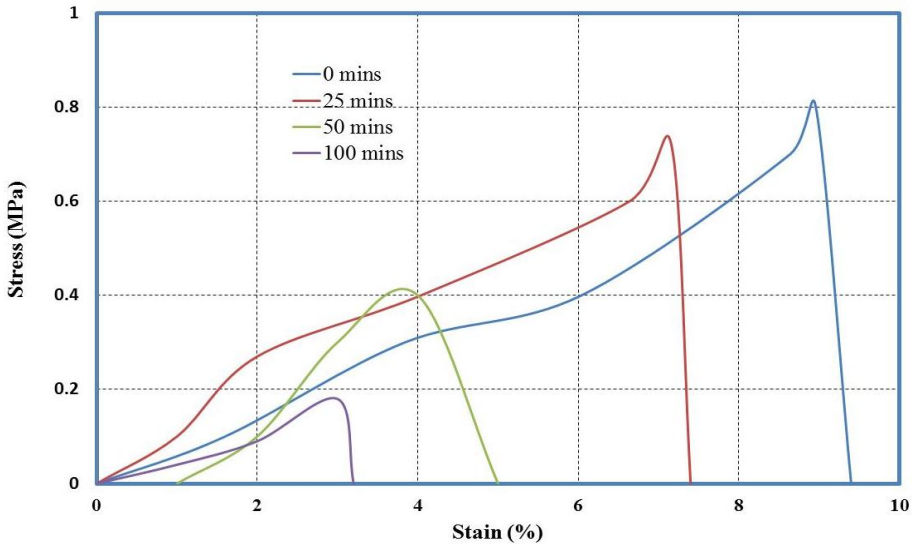


圖 9 廢棄保麗龍纖維之應力應變曲線圖

3.4 磺酸化纖維離子交換能力特性(Ion Exchange Capacity)

圖 10 實驗結果顯示，聚苯乙烯纖維在磺酸化時間 10 分鐘前，離子交換能力隨著磺酸化時間上升，當磺酸化時間為 10 分鐘時達最大離子交換能力 32.91mmol/g，此時磺酸根基接附於纖維已接近飽和，故磺酸化時間超過 10 分鐘以後，離子交換能力隨著磺酸化時間增加而下降；在 20 分鐘時，因已超過飽和點，離子交換能力稍微下降，但當磺酸化時間延長達 40~80 分鐘時，可能纖維在硫酸中浸泡過久，浸泡時間越長造成纖維腐蝕破裂，而導致離子交換能力明顯下降，其離子交換能力降為 8~10mmol/g。

至於廢棄保麗龍為材料所製的纖維，在磺酸化時間 10 分鐘時離子交換能力為 27.65mmol/g；磺酸化時間為 20 分鐘，離子交換能力則為 26.78mmol/g，而於磺酸化時間 40 與 80 分鐘的離子交換能力亦相類似，約為 20mmol/g。此或因保麗龍在製造時添加發泡劑與膠結劑等外加物質，間接影響 SO_3H 與 Na^+ 離子的交換，故以保麗龍所製的纖維，其離子交換能力相當接近，此結果與聚苯乙烯纖維不同。若要選擇離子交換濾材，可以選擇保麗龍為材料，因其離子交換能力在不同磺酸化時間，與聚苯乙烯靜電紡絲纖維薄膜結果差異度不大，因此可將保麗龍回收再利用為離子交換材料。

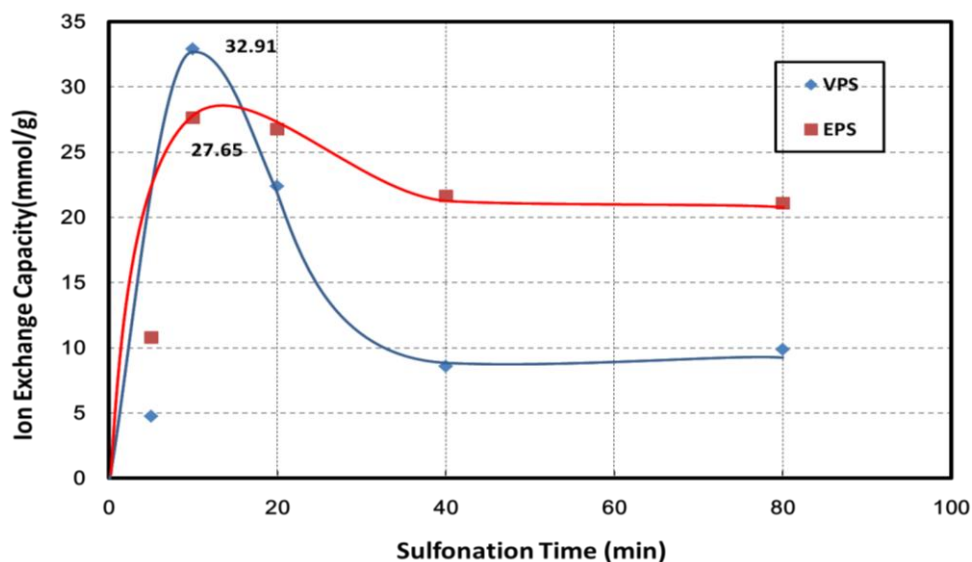


圖 10 聚苯乙烯纖維及廢棄保麗龍纖維之磺酸化後離子交換能力

3.5 磺酸化纖維重金屬的去除能力

由圖 11 實驗結果得知，當磺酸化時間 20 分鐘時，聚苯乙烯(VPS)所製得的纖維去除重金屬能力(Cu^{2+})已接近飽和，約在 $18.17\text{mg Cu}^{2+}/\text{g}$ ，隨著磺酸化時間逐漸增長，其重金屬去除能力並無明顯增加(約在 $20\sim 30\text{mg Cu}^{2+}/\text{g}$)。廢棄保麗龍所製之纖維重金屬去除能力，在磺酸化時間 10 分鐘時趨於飽和最大值，達 $157.09\text{mg Cu}^{2+}/\text{g}$ ；而當磺酸化時間超過 20 分鐘，重金屬去除能力依磺酸化時間增加而降到 $90\text{mg Cu}^{2+}/\text{g}$ 。

由圖 10 與圖 11 比較離子交換能力與重金屬去除能力之實驗結果發現，廢棄保麗龍纖維的磺酸化時間所呈現的趨勢兩者雷同，即於 10 分鐘時達最大值。但進一步比較聚苯乙烯纖維與保麗龍纖維卻發現，保麗龍纖維重金屬去除能力大於聚苯乙烯纖維，此結果恰與離子交換能力相反。初步研判可能原因，在於保麗龍製造前加入發泡劑、膠結劑或表面印刷塗料等添加物，惟其對於重金屬去除能力之影響，尚待更深入之研究以確認。不論添加物的影響為何，由圖 11 可知，無論聚苯乙烯纖維或廢棄保麗龍纖維皆可藉由磺酸化程序產生重金屬去除能力。當延長磺酸化的時間，對於重金屬去除能力已趨於飽和，此結果亦與離子交換能力實驗相同。綜上所述，利用磺酸化程序可將保麗龍回收再生利用，做為重金屬去除材料使用。

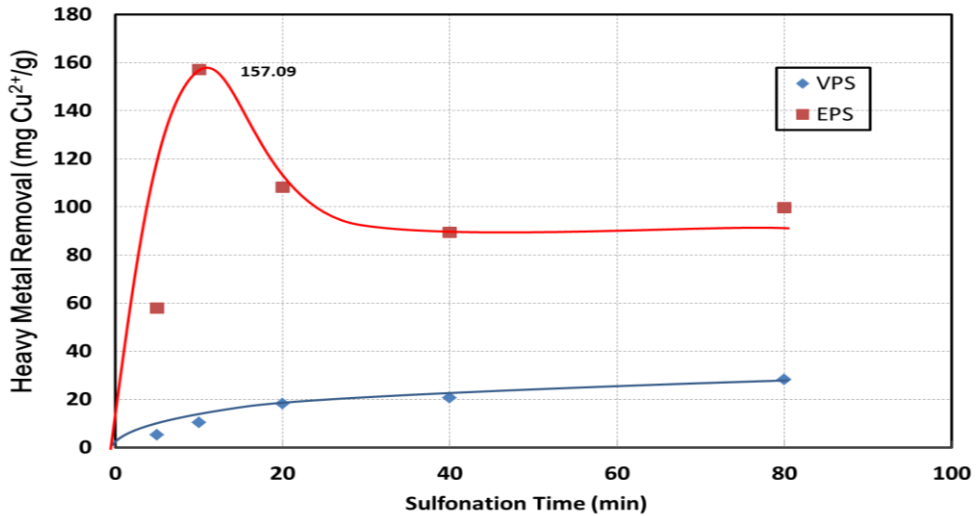


圖 11 聚苯乙烯纖維及廢棄保麗龍纖維磺酸化之重金屬去除能力

四、結論

藉由上述實驗成果大致可獲得下列結論：

1. 利用靜電紡絲技術，在 50g/L 溶液濃度、電壓 15k 及流率 1.0ml/hr 實驗條件下，可將聚苯乙烯及廢棄保麗龍再製為纖維離子交換材料，所產製纖維直徑約 90~1,200nm，平均尺寸約 300nm。
2. 利用硫酸磺酸化程序再製之纖維材料，透過傅立葉紅外光譜儀(FTIR)圖譜在波數 $1,030\text{cm}^{-1}$ 所呈現之吸收峰，可確認磺酸化程序已成功將 $-\text{SO}_3\text{H}$ 官能基鍵結在苯環碳鍵上。
3. 在 10 分鐘的磺酸化時間下，聚苯乙烯纖維與廢棄保麗龍纖維的最大離子交換能力分別為 32.91mmol/g 和 27.65mmol/g 。
4. 廢棄保麗龍纖維的重金屬去除能力，在 10 分鐘磺酸化時間，可達 $157.09\text{mg Cu}^{2+}/\text{g}$ ，而磺酸化後之聚苯乙烯纖維，僅可去除約 $20\sim 30\text{mg Cu}^{2+}/\text{g}$ 之重金屬。
5. 綜上可知，利用靜電紡絲程序與磺酸化程序，可將廢棄保麗龍再生做為離子交換材料使用。

五、參考文獻

1. Shin, C, G G Chase, and D H Reneker. "Recycled expanded polystyrene nanofibers applied in filter media." *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 262, 2005: 211-215.
2. 2010 EPS Recycling Rate Report. Crofton: Alliance of Foam Packaging Recyclers, 2010.
3. 行政院環境保護署，資源回收管理基金管理委員會, <http://recycle.epa.gov.tw/Recycle/index2.aspx>. 2015。
4. Rahul K. Balakrishnan, Chandan Guria, "Thermal degradation of polystyrene in the presence of hydrogen by catalyst in solution", *Polymer Degradation and Stability* 92, 2007, 1583~1591.
5. 中華民國保麗龍回收再生協會，食品用保麗龍常識篇, <http://www.ctepsra.org.tw/index.php/organize/54-2008-11-10-04-53-12>，2015。
6. Balakrishnan, R. K., & Guria, C. (2007). Thermal degradation of polystyrene in the presence of hydrogen by catalyst in solution. *Polymer Degradation and Stability*, 92(8), 1583-1591.
7. T.H. Eom, C. H. Lee, J. H. Kim.v and CH Lee "Development of an ion exchange system for plating wastewater treatment." *Desalination* 180, 2005: 163-172.
8. G. Chase and C. Shin, "Nanofibers from recycle waste expanded polystyrene using natural solvent," *Polymer Bulletin*, 2005, 55, 209-215.
9. W. W. Sułkowski, K. Nowak, A. Sulkowska, A. Wolińska, W. M. Bajdur, D. Pentak and B. Mikula, "Study of the sulfonation of expanded polystyrene waste and of properties of the products obtained," *Pure Appl. Chem.* 2009, 81, 2417–2424.
10. Kucera, F, and J Jancfi. "Homogeneous and Heterogeneous Sulfonation of Polymers: A Review." *Polymer Engineering and Science* 38, 5, 1998- 783.
11. Li, F., Zhao, Y., and Song, Y. Core-shell nanofibers: Nano channel and capsule by coaxial electrospinning, 2010

94 廢棄保麗龍再生為離子交換材料可行性探討

12. Choi, Yong-Jin, Moon-Sung Kang, and Seung-Hyeon Moon. "A new preparation method for cation-exchange membrane using monomer sorption into reinforcing materials." *Desalination* 146 , 2002: 287-291
13. H. An, C. Shin, and G.G. Chase, "Ion Exchanger using electrospun polystyrene nanofibers", *Journal of membrane science* 283, 2006, 84-87.
14. Andradý, Anthony L. *Science and Technology of Polymer Nanofibers*. Hoboken, New Jersey: A John Wiley & Sons, Inc. Publication, 2008.
15. Roylance, David, *STRESS-STRAIN CURVES*. Cambridge, MA, USA, 2001.