

## 外環電場輔助水質處理效應

林哲仁\*

### 摘要

傳統性的廢水處理過程中，凡採過濾(filtration)處理，不論是深池處理(depth filtration)，或是淺池處理(shadow filtration)，均以濾材為首要之考量因素，其原因为濾材之種類及大小將會影響整體濾床穿透時間、接觸面積、進而改變所謂的濾材吸附能量(absorption capacity)及吸附效果。本文所要介紹的濾材乃為信手可得之纖維(fibre)；利用纖維表面所帶有之正、負電荷來吸附過濾水流中之懸浮粒子，並進一步探討相關之影響因素；最後提出幾點結論與建議，以供國內產、官、學、商及工程界人士參考指正。

#### 【關鍵詞】

- ①外環電場輔助過濾(electrokinetically-enhanced depth filtration)
- ②凡得瓦爾力(van der Waals attraction)
- ③纖維過濾床體(fibre filtration bed)
- ④電場強度(純水處理)(electric field strength for purification water treatment)
- ⑤濾材吸附效能(filter media absorption capacity)

### 一、纖維濾床、懸浮液及電解液之介紹

一般市面上所見之纖維，通常為整體加工擠壓而成的塊狀物。本文中所提之纖維乃利用上述纖維重新撕碎(tear up)，而後以緩衝溶液(buffer solution)浸泡數小時。

利用物質分子間凡得瓦爾力之作用原理，使表面帶有正或負電荷之纖維吸附水流中懸浮粒子。纖維Fiban A-1為一帶表面正電荷之纖維濾材，其過濾吸附之特性經實驗證明數據示於表1；纖維Fiban A-1亦為一陰離子交換樹脂，由芬蘭Finex OY PL所提供之纖維半徑經由電子顯微鏡掃瞄偵測為 $23.0 \mu\text{m}$ 。

\*聯勤203廠

表 1 Fiban A-1 纖維濾材之吸附過濾實驗效能結果

伏特 (V)	電流 (mA)	濁度 (NTU)	吸附效能	無次元電場 單位數量	過濾吸附效能 (%)
		19.6			
25	22	4.1	0.043	0.139	79.08163265
50	54	2.6	0.052	0.278	86.73469388
75	81	1.6	0.065	0.417	91.83673469
100	132	1.03	0.076	0.556	94.74489796
-25	26	4.4	0.0385	-0.139	77.55102041
-50	71	3.4	0.0452	-0.278	82.65306122
-75	270	3.1	0.0476	-0.417	84.18367347
-100				-0.556	
0	0	14.4	0.00795	0	26.53061224
無次元電場單位數量 ( $N_E$ )			吸附效能 = $3.14 \times \text{纖維半徑}$		$0 \sim 1 \mu\text{m silica:} 40\text{ppm}$
$N_E = (U_E \times V) / (L \times Q/A)$			$[-\ln(C_{out}/C_{in})]/(2 \times \text{濾床內纖維碎片體積} \times \text{纖維濾床深度})$		
移動性 $U_E = 5.01 \times 10^{-2} \text{ mm}^2/\text{Vs}$			纖維半徑 = $11.5 \mu\text{m} = 0.0115\text{mm}$		
纖維濾床深度 $L = 20\text{mm}$					
流率 $Q = 164\text{cm}^3/\text{min}$ $= 2740\text{mm}^3/\text{s}$			濾床中纖維體積比率 = 3.51%		
濾床接觸面積 $A = 6080\text{mm}^2$					
			零電場過濾吸附效能 = $(19.6 - 14.4)/19.6 \times 100\% = 26.53\%$		
Fiban 纖維 (4.6g)			電導度 : $5.7 \mu\text{s/cm}$		

配合濾材實驗所使用的懸浮液為矽粒子 (silica particle)，經驗證其具有表面負電荷；本文中所提矽粒子係由Derby 公司提供，該粒子之粉塵半徑範圍透過電子顯微鏡測試並假設為圓球狀之情形下，為  $0 \sim 1 \mu\text{m}$ 。選擇此細小粉塵半徑的理由乃為降低因半徑過大之粒子，其體積與重量皆相對增大，致使在實驗過程中產生不良之沉澱效果所併發之誤差機率。

不同的電解液 (緩衝溶液) 將會嚴重影響實驗中溶液之電導度 (conductivity)，而致使電極附近產生氣泡 (gassing)。本次實驗所引用之電解液乃由Tris-hydroxylmethyl methylamine與hydrochloric acid依2:1之莫耳濃度比例混合而成之緩衝溶液。

## 二、實驗流程與裝置

「外環電場輔助水質處理效應」的實驗流程與裝置乃與原理相配合，利用已驗證帶有表面負電荷的矽粒子，以緩慢的流速 ( $164 \text{ cm}^3/\text{min}$ )，並控制緩衝溶液的電導度值在  $2.7 \sim 44.7 \mu\text{s}/\text{cm}$  之間，電場強度則設定為  $0 \sim 100 \text{ V/cm}$  之間，促使其流通過受外環電場感應的纖維濾床，檢測此 Fiban A-1 濾材於不同條件下的吸附過濾能力。

實驗中所用的濾床如圖 1，其設計由六個完全相同的透明壓克力環 (perspex tube 高  $20\text{mm}$ , 直徑  $87\text{mm}$ ) 組合而成的圓柱固定管，並輔以水流重力沖積而成。透過變換此六個完全相同的透明環相關位置，即可控制此實驗的觀察要項之一：濾床深度 (bed depth)。圖 2 所示為本次實驗的概略流程，從刻意調配過之含懸浮矽粒子進流水 (inflow source) 至濾床部份，先後經由水流控制閥、泵浦、流量計、細微控制器來調節進流水量。進流水透過濾床的吸附過濾後，終端乃以濁度計 (turbidimeter) 顯示此懸浮矽粒子經濾床吸收後之存留量。為便利實驗之操作進行，本次實驗乃以濁度計來量測懸浮矽粒子之濃度，另配合濃度與濁度之校正曲線換算，於圖 2 中，實驗之進流水亦須經頻繁之抽樣檢測進流水濁度 (濃度)，以利實驗前後之比對。

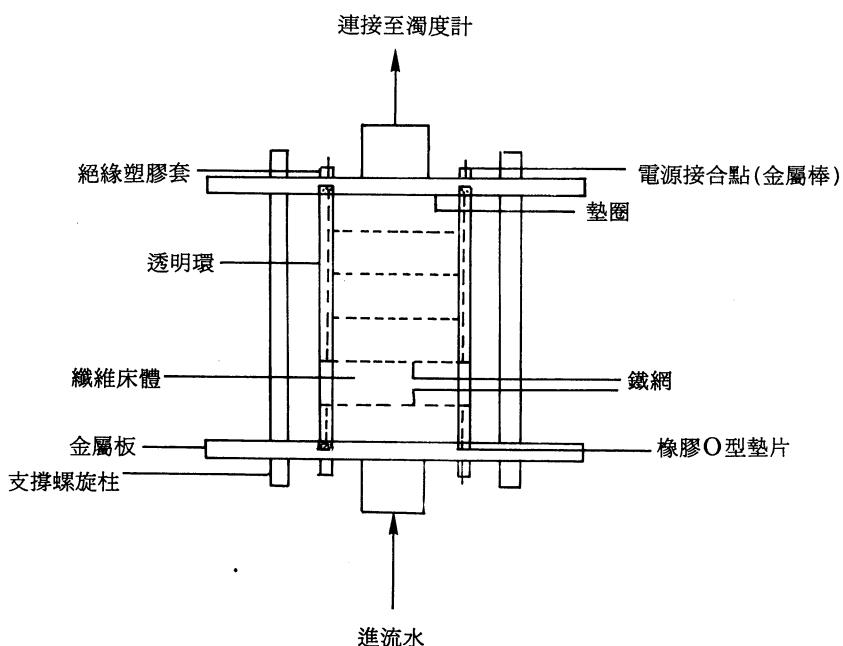


圖 1 吸附過濾實驗裝置

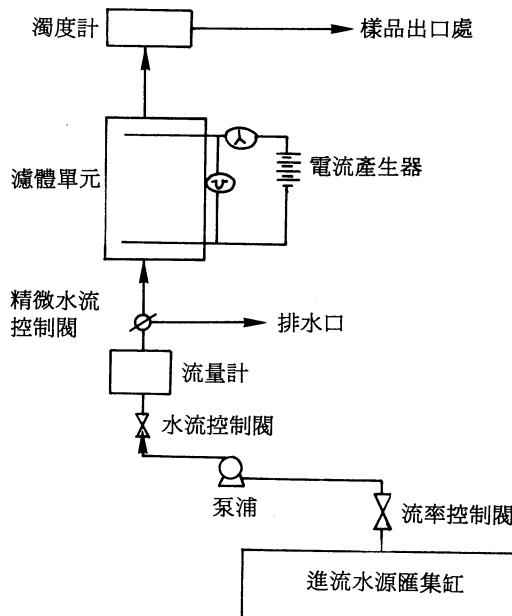


圖 2 吸附過濾實驗流程圖

### 三、結果與討論

- 藉由外環電場之效應，來影響濾材及懸浮粒子本身之表面電荷密度或強度，將有助於促使進流水質吸附過濾效果趨向更佳。如表 2 所示，乃一透過改變進水流率之實驗數據，其電場強度之欄位，明顯地反映出施予強度的電場必可增進整體過濾效能。惟實驗中得知，過量的電場強度將使電極附近產生氣泡現象，進而干擾濾床的吸附效用，而減損實驗效能。
- 改變進水流率乃傳統式過濾法及新進之濾床效益所不可或缺之重要因素。本次實驗中，變換水流速度由流率( $Q$ ) $2,740\text{mm}^3/\text{s}$ 增至 $5,475\text{mm}^3/\text{s}$ 的狀況下，如圖 3；濾床的吸附效能明顯地因水流速率增加而降弱，此可歸因於水流速度之加快，懸浮粒子停留於濾材表面的滯留時間(retention time)連帶地減少，且較快的水流速亦容易造成有限空間內之迴流。因此，穩定且適度控制水流速率是必要且須充分考慮之因素。
- 實驗中之濾床深度，藉著調整六個完全相同的透明壓克力環，其深度(L)之差距可由 $20\text{mm}$ 變換至 $60\text{mm}$ 。在此不同濾床深度情形觀測下，懸浮矽粒子通過濾床後之過濾吸附效能，將隨濾床的深度增加而減少，如圖 4。當進流水（如實驗流程圖所示）以向上流方式穿過濾床時，水中大部分懸浮矽粒子皆被本身表面帶有正電荷的濾床表面所吸附，此乃因較短濾床深度可造成單位密度較強的感應電場，造成較優勢之吸附能力。當然，剩餘之懸浮矽粒子則將陸續為濾床本身所過濾。

表 2 變換進流水流率之實驗數據表

伏特 (V)	電流 (mA)	濁度 (NTU)	吸附效能	無次元電場 單位數量	過濾吸附效能 (%)
		19.6			
25	22	4.1	0.0404	0.139	79.08163265
50	54	2.6	0.052	0.278	86.73469388
75	81	1.6	0.0646	0.417	91.83673469
100	132	1.03	0.076	0.556	94.74489796
0	0	14.4	0.00795	0	26.53061224
無次元電場單位數量 ( $N_E$ )		吸附效能 = $3.14 \times \text{纖維半徑}$			
$N_E = (U_E \times V) (L \times Q/A)$		$[-\ln(C_{out}/C_{in})]/(2 \times \text{濾床內纖維碎片體積} \times \text{纖維濾床深度})$			
移動性 $U_E = 5.01 \times 10^{-2} \text{ mm}^2/\text{Vs}$		纖維半徑 = $11.5 \mu\text{m} = 0.0115\text{mm}$			
纖維濾床深度 $L = 20\text{mm}$		濾床中纖維體積比率 = 3.51%			
流率 $Q = 164\text{cm}^3/\text{min}$		零電場過濾吸附效能 = $(19.6 - 14.4)/19.6 \times 100\% = 26.53\%$			
$= 2740\text{mm}^3/\text{s}$					
濾床接觸面積 $A = 6080\text{mm}^2$					
Fiban 纖維 (4.6g)		電導度 : $5.7 \mu\text{S/cm}$			
伏特 (V)	電流 (mA)	濁度 (NTU)	吸附效能	無次元電場 單位數量	過濾吸附效能 (%)
		19.9			
25	25.5	7.6	0.0248	0.0924	61.80904523
50	70	5.7	0.0322	0.1848	71.35678392
75	120	4.2	0.0401	0.2772	78.89447236
100	220	3.1	0.048	0.3696	84.42211055
0	0	15.8	0.006	0	20.60301508
無次元電場單位數量 ( $N_E$ )		吸附效能 = $3.14 \times \text{纖維半徑}$			
$N_E = (U_E \times V) (L \times Q/A)$		$[-\ln(C_{out}/C_{in})]/(2 \times \text{濾床內纖維碎片體積} \times \text{纖維濾床深度})$			
移動性 $U_E = 5.07 \times 10^{-2} \text{ mm}^2/\text{Vs}$		纖維半徑 = $11.5 \mu\text{m} = 0.0115\text{mm}$			
纖維濾床深度 $L = 20\text{mm}$		濾床中纖維體積比率 = 3.51%			
流率 $Q = 250\text{cm}^3/\text{min}$		零電場過濾吸附效能 = $(19.9 - 15.8)/19.9 \times 100\% = 20.63\%$			
$= 4170\text{mm}^3/\text{s}$					
濾床接觸面積 $A = 6080\text{mm}^2$					
Fiban 纖維 (4.6g)		電導度 : $5.8 \mu\text{S/cm}$			

續表 2

伏特 (V)	電流 (mA)	濁度 (NTU)	吸附效能	無次元電場 單位數量	過濾吸附效能(%)
		19.8			
25	17	10.8	0.0156	0.0695	45.45454545
50	45	7.3	0.0257	0.139	63.13131313
75	86	5.6	0.0326	0.209	71.71717172
100	140	4.1	0.0406	0.278	79.29292929
0	0	18	0.00246	0	9.090909091
無次元電場單位數量 ( $N_E$ )		吸附效能 = $3.14 \times \text{纖維半徑}$			
$N_E = (U_E \times V) (L \times Q/A)$		$0-1\mu\text{m Silica : } 40\text{ppm}$			
移動性 $U_E = 5.01 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{Vs}$		$[-\ln(C_{out}/C_{in})]/(2 \times \text{濾床內纖維碎片體積} \times \text{纖維濾床深度})$			
纖維濾床深度 $L = 20\text{mm}$		纖維半徑 = $11.5\mu\text{m} = 0.0115\text{mm}$			
流率 $Q = 330\text{cm}^3/\text{min}$		濾床中纖維體積比率 = 3.51%			
$= 5475\text{mm}^3/\text{s}$		零電場過濾吸附效能 = $(19.8 - 18.0)/19.8 \times 100\% = 9.09\%$			
濾床接觸面積 $A = 6080\text{mm}^2$					
Fiban 纖維(4.6g)		電導度 : $5.9\mu\text{S/cm}$			

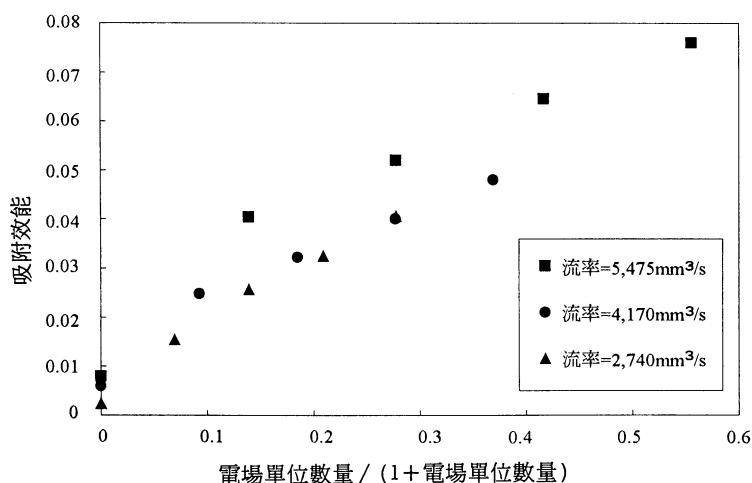


圖 3 變換進水流率之濾材吸附效能比較圖

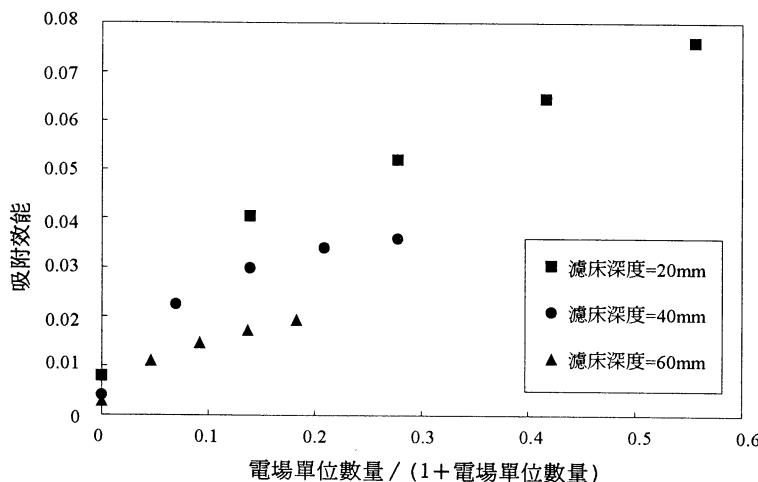


圖 4 變換濾床深度之濾床吸附效能比較圖

在此項以濾床深度為控制因素的實驗中，比照傳統之過濾床體因較長而可增進其留滯時間，來提高過濾之效果；本實驗結果反而因外環電場之參與而略有改變。  
4. 懸浮矽粒子之濃度將影響濾床之吸附效能，本實驗因為矽粒子本身凡得瓦爾力的彼此牽引作用，易使其凝聚結成較大粒子，如此將極易經由濾床所過濾，且復因外環電場感應之正、負電荷相吸引，吸附過濾之效果相當顯著，如圖 5。

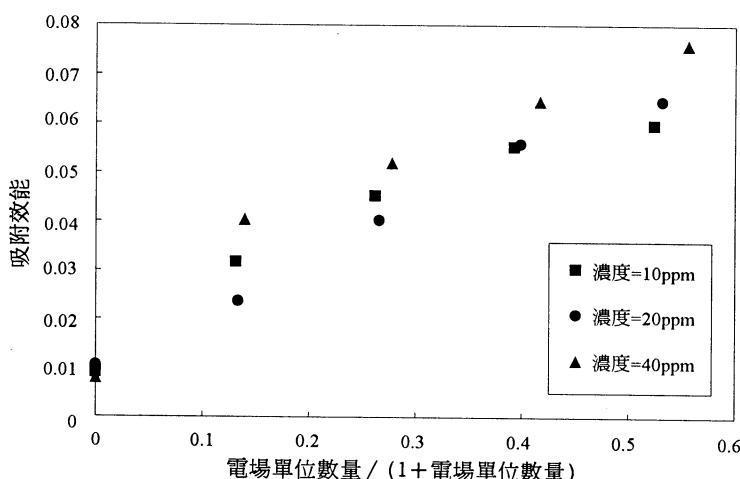


圖 5 變換懸浮粒子濃度之濾床吸附效能比較圖

5. 濾床本身之壓擠密度 (packing density) 亦是一相當重要之考慮因素。於此實驗中，懸浮砂粒子受濾床之吸附過濾效能將因濾床壓擠密度之增加而增加；傳統之過濾方法中，亦須重視濾層媒介之空隙，以作為留滯過濾懸浮物之時間考量。而當使用纖維為媒介時，因其具有相對高度之重疊網結構，進流水中之懸浮砂粒子極易被濾床所捕濾，如圖 6。

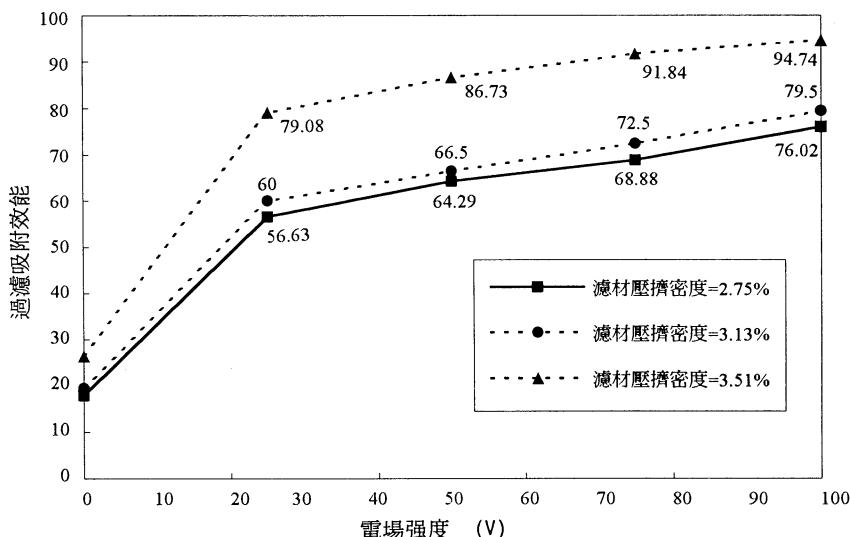


圖 6 同電場強度下，變換壓擠密度之濾床吸附效能比較圖

6. Fiban A-1 纖維濾床的吸附效能偵測乃於調整各參數於適度之數據範圍內完成實驗；例如：濾床深度：20mm；電場強度：50V；懸浮砂粒子濃度：160 NTU；濾床擠壓密度：2.75%；進流水流率： $2,740 \text{ mm}^3/\text{s}$ 。由上述的參數綜合進行5小時的吸附過濾實驗，Fiban A-1 纖維濾床之吸附能力可由圖 7 及圖 8 顯示其被吸附濃度與時間的關係，相關之吸附能力則可由下列實驗公式概略估得：

$$C_f = Q \times C \times t \times (1 - X)$$

$C_f$ ：纖維濾床吸附能力 (mg)

$Q$ ：流率 ( $\text{mm}^3/\text{s}$ )

$C$ ：懸浮砂粒子濃度 ( $\text{mg/L}$ )

$t$ ：時間 (min)

$X$ ：圖 8 之陰影面積

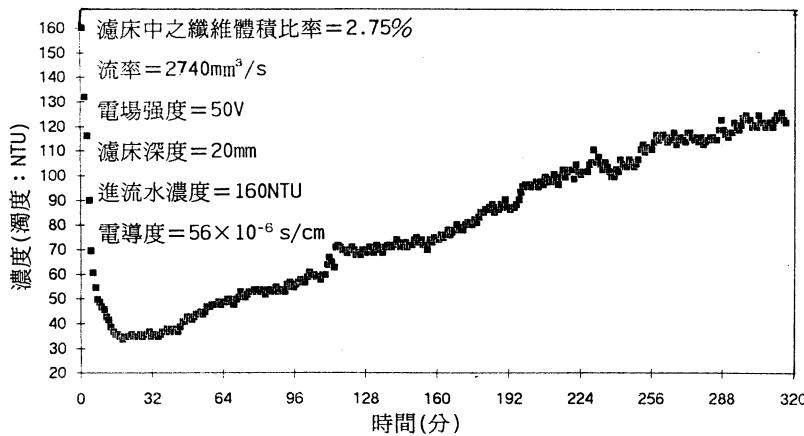


圖 7 濾材吸附能量之實驗結果

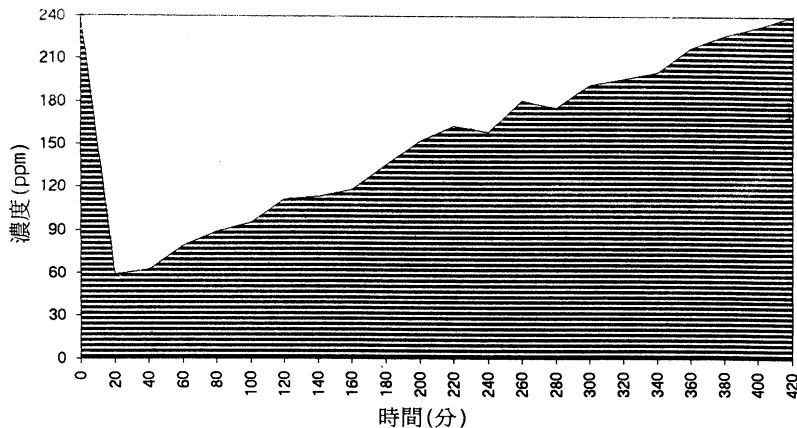


圖 8 濾材吸附能量之實驗結果積分圖

經換算結果，使用每1公克之Fiban A-1纖維濾床，將可吸附相當於4.78公克的懸浮砂粒子。

## 四、應用

以外環電場來促使帶有正表面電荷的纖維濾材吸附過濾帶有負表面電荷的水中懸浮粒子，乃屬針對純水處理範疇領域的一新進發展技術，譬如製藥廠中之混藥過程，所必需使用的純水或去離子水，即是可引用此新進技術的工作點。此過濾之效果概可比擬薄膜處理方法或利用逆滲透理論及一般高度過濾法來過濾細小之病菌及病毒，因病菌及病毒本身即可視為帶表面正或負電荷之懸浮體，透過外環電場輔助帶有正或負表面電荷之纖維來吸附過濾病毒、病菌之程度極高。

利用纖維作為濾床來處理高純水之需求，其潛在市場可建議運用發揮於核子發電場中的鍋爐用水及冷卻水循環系統中；於核能電場中，為避免發電用之鍋爐葉片受水質中之矽粒子（視為表面負電荷粒子）或三氧化二鐵（視為表面正電荷粒子）之侵蝕而產生重心失衡之外意外事故，使用具表面正或負電荷的纖維濾床，輔以外環電場來增加吸附過濾懸浮粒子的方法，實值得推廣應用，因其成本遠低於目前一般核能電場純水處理場所使用之碎樹脂離子交換處理床（powdered ion-exchange resin bed）。

## 五、結論

過濾法及吸附法在水質處理的歷史中，一直是扮演著舉足輕重的角色。過濾法必須著重在濾材的選定、濾池深度、水流速率、留滯時間及濾材接觸面積等相關參數之考量；吸附法則是憑藉物理吸附（physical adsorption）或化學吸附（chemical adsorption）的方法，利用溶液中所含溶質與吸附劑間的吸引力大於溶質與溶劑間的吸引力，來迫使溶質被吸附分離於吸附劑表面。

然而以外環電場效應輔助纖維濾床的吸附過濾方法，其本身所考量的要項參數與一般過濾法並無甚大差異，惟其成本效益及媒介濾床之反沖洗操作（backwash operation），皆較傳統之過濾法或吸附法經濟便利，因此不失為一值得推薦嘗試的試驗。

## 六、參考文獻

1. Adamczyk Z., Van de ven. T.G.M., Deposition of Brownian Particles onto Cylindrical Collectors. 2. 497 p.84, 1981
2. BS 2486, Recommendations for Treatment of Water for Land Boilers. British Standards Institution, 1978.
3. Czarnecki, J., Van Der Waals Attraction Energy Between Sphere and Half-space. J. Colloid Interface Sci. 2 361 p.72, 1979.
4. Fairbrother, F. & Mastin, H., Studies in Electro-Endosmosis. J. Chem, Soc. 2319 p.75, 1924.

5. Garay, P.N. & Cohn, F.M, High-Quality Industrial Water Management Manual. First Edition, Fairmont Press, 1992.
6. Hamaker H.c., "The London-van der Waals attraction between spherical particles" physica 1058 p.4, 1937.
7. Hunter, R.J., Zeta Potential in Colloid Science. First Edition. Kelmscott Press, 1981.
8. Judd, S.J. and Solt, G.S., Colloids and Surfaces, 191, p.39, 1989.
9. Judd, S.J., Ph.D. Thesis, The Influence of An Electric Field on The Filtration of Aqueous Suspensions Through Fibrous Media. 1989.
- 10 Lorch, W., Handbook of Water Purification. Second Edition. Halstead Press, 1987.
- 11 Overbeek, J.Th.G. and Wiersema, P.H., In Electrophoresis Academic Press, New York and London, 1967.
- 12 Solt, G.S. & Shirley C.B., An Engineer's Guide to Water Treatment. First Edition, Avebury Technical Academic Publishing Group, 1991.
- 13 Wiersema, P.H., PH.D. Thesis, University of Utrecht. 1964.
- 14 Zebel, G., Deposition of Aerosol Flowing Past a Cylindrical Fibre in a Uniform Electric Field. J. Colloid Interface Sci. 22 p.25, 1965.
- 15 Eric, Lin. Msc Thesis, Electrokinetically-Enhanced Depth Filtration, 1993.

