

以逆滲透法處理酸性電鍍廢水

— 各項操作變數之研究 —

李文智* 李俊德**

一、前言

臺灣地區大小電鍍工廠林立⁽¹⁾，其電鍍過程中所排放之廢水主要含酸、鹼、有毒之重金屬（如鎘、鉻、銅、鋅、鎳等）及劇毒之氯化物，不僅破壞水域環境，且將危及國民健康。

現存國內許多電鍍工廠所設置之處理設備，其處理方法仍以傳統處理法⁽¹⁾——即鉻還原法、氯化物氧化法及化學沉降法為主。上述處理法必須加入大量之化學藥品，產生之汙泥含有重金屬，因其具有毒性，大大地增加汙泥處理之困擾。這些重金屬汙泥多為氫氧化物，若以掩埋處置，遇酸性水則重金屬立即溶出而造成二次污染。因具有上述缺點，電鍍廢水傳統式處理法，有待進一步研究其他方法予以取代。

以逆滲透法 (Reverse Osmosis, 簡稱 RO) 處理電鍍廢水有四項優點：(一)減少電鍍過程之用水量，回收有用之重金屬物質，並減少重金屬之污染。(二)所需人工費用甚少。(三)所需空間較少。(四)去除率高。

本研究按下列影響逆滲透膜功能之因素進行試驗：

1. 探討進流溶液 pH 值對 RO 處理效率之影響。
2. 探討不同操作壓力之影響。
3. 探討不同進流溶液濃度之影響。
4. 探討不同材質之逆滲透膜對處理效率之影響。

二、實驗設備及方法

(一) 實驗設備

本研究主要之設備為一套日本 Moritani 公司出品之 RO 處理系統，其主要單元、各式儀表及水閥開關，如圖2-1所示。逆滲透膜單元 (RO Module) 三組，各組之材質、尺寸和操作條件見表 2-1。

* 逢甲大學環境科學系講師

** 國立成功大學環境工程研究所教授兼所長

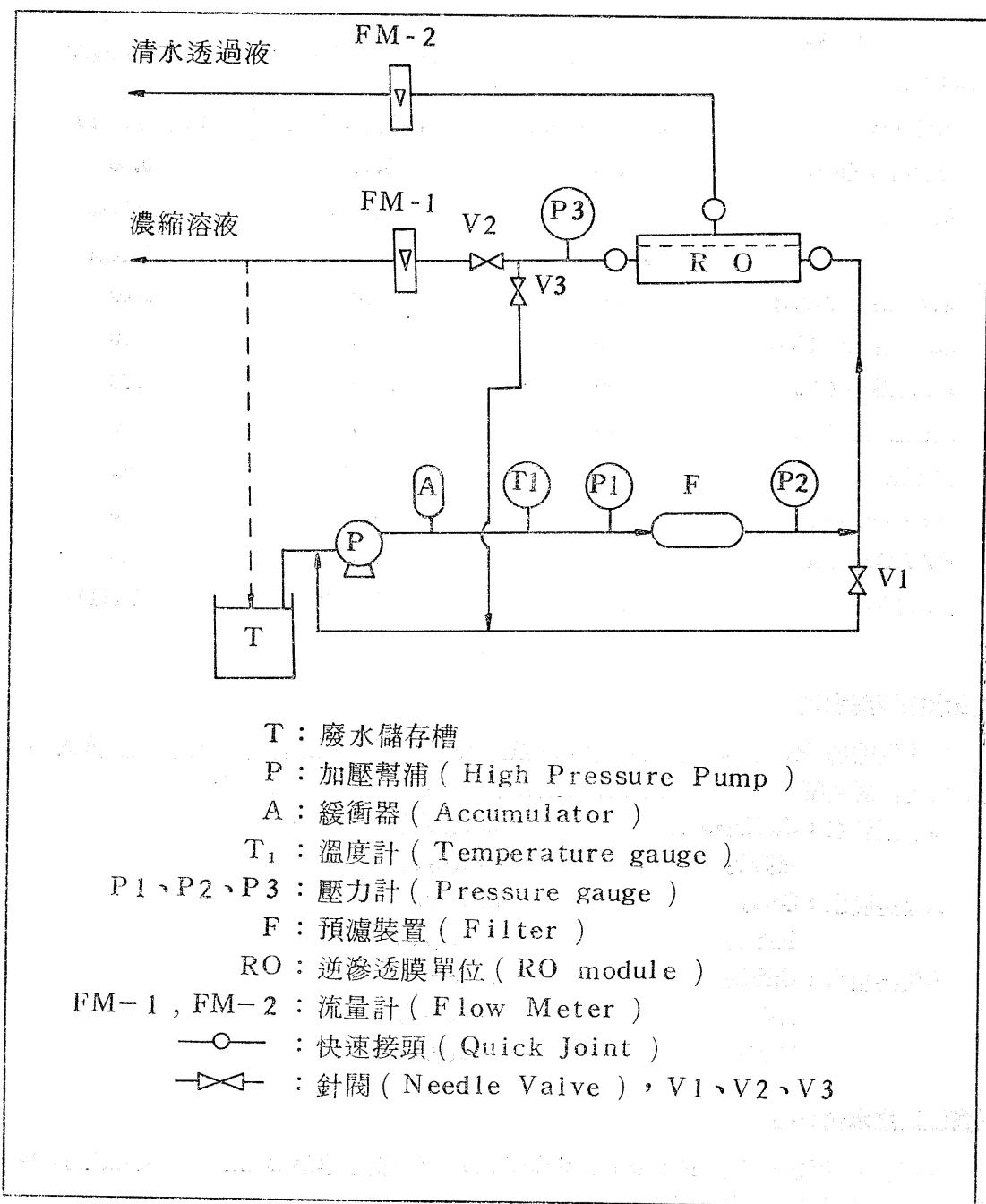


圖 2-1 RO 處理系統流程圖

表 2-1 逆滲透膜之材質、尺寸及操作條件

編 號 操作條件	SW-30-2514	BW-30-2514	SW-60-PAT
尺寸 (mm)	57.2直徑×380長	57.2直徑×380長	45直徑×380長
有效面積 (m^2)	0.58	0.58	0.30
型 式	螺旋捲式	螺旋捲式	螺旋捲式
材 質	聚醯胺類	聚醯胺類	聚醯胺類
最大操作壓力 (psig)	900	600	1000
最高操作溫度 (°C)	50	50	40
最大進流率 (ℓ/hr)	1360	1360	180
最小進流率 (ℓ/hr)	340	340	60
pH值範圍	3~11	3~11	1~12
Cl ₂ 容忍度 (mg/ ℓ)	0.1	0.1	0
M.W Cut Off	<500	<500	<500
進流水濁度	<1 NTU	<1 NTU	<1 NTU

(二)廢水來源與水質

爲先期瞭解 RO 系統之操作特性，均以人工合成電鍍廢水進行各操作變數之實驗。本研究共計探討鍍銅、鍍鉻和鍍鎘三種人工合成電鍍廢水，其配方如下⁽²⁾⁽³⁾：

1. 鍍銅廢水 : CuSO ₄ •5H ₂ O	235(g/ ℓ)
H ₂ SO ₄	40(g/ ℓ)
2. 鍍鉻廢水 : CrO ₃	398(g/ ℓ)
H ₂ SO ₄	4(g/ ℓ)
3. 鍍鎘廢水 : CdSO ₄	208(g/ ℓ)
H ₃ BO ₃	30(g/ ℓ)
NaCl	6(g/ ℓ)

(三)實驗時之水流流程

本實驗之清水透過液 (Permeate Solution) 與濃縮液 (Concentrate Solution) 均分別排掉，並不迴流至廢水儲存槽。

(四)實驗之控制因表

1. pH 值

pH 值會影響膜之水解作用和膜對溶質及水分子選擇能力之差異，且可能改變溶質在水中之存在形式。本研究為探討不同 pH 值在 RO 系統中對重金屬去除率之影響，均將進流溶液重金屬濃度控制於 $50\text{mg}/\ell$ 。以表 2-1 中之三種逆滲透膜進行試驗，各種不同人工合成電鍍廢水之 pH 試驗範圍如表 2-2 所示。

表 2-2 pH 對重金屬去除率影響之實驗條件

廢水種類	逆滲透膜種類	操作壓力 (psig)	pH 值
鍍銅廢水	SW-30-2514	300,500,700	3.5,4.5,5.5,6.2
	BW-30-2514	300,500	
	SW-60-PAT	400,600,800	
鍍鉻廢水	SW-30-2514	300,500,700	3.5,4.5,5.5,6.5,7.5
	BW-30-2514	300,500	
	SW-60-PAT	400,600,800	
鍍鎘廢水	SW-30-2514	300,500,700	3.5,4.5,5.5,6.5
	BW-30-2514	300,500	
	SW-60-PAT	400,600,800	

2. 操作壓力

本研究為瞭解操作壓力對重金屬去除率和清水透過率之影響均將 pH 值控制於 5.0，於不同重金屬濃度下，依薄膜之特性改變不同之操作壓力，如表 2-3 所示。

表 2-3 RO 系統之操作條件

廢水種類	逆滲透膜種類	操作壓力 (psig)	重金屬濃度 (mg/ℓ)
鍍銅廢水	SW-30-2514	300,400,500,600,700,800	5,20,50,100,200,300
	BW-30-2514	300,400,500,570	
	SW-60-PAT	400,500,600,700,800	
鍍鉻廢水	SW-30-2514	300,400,500,600,700	5,20,50,100,200,350
	BW-30-2514	300,400,500,570	
	SW-60-PAT	400,500,600,700,800	
鍍鎘廢水	SW-30-2514	300,400,500,600,700	5,20,50,100
	BW-30-2514	300,400,500,570	
	SW-60-PAT	400,500,600,700,800	

3. 進流溶液之重金屬濃度

改變進流溶液重金屬之濃度以瞭解其對 RO 系統操作之影響，分高、低兩種濃度進行試驗：

(1)低濃度：其濃度變化之範圍如表 2-3 所示，換言之，將表 2-3 之所有試驗做完後可獲得操作壓力影響之結果，亦可瞭解該濃度範圍內各種不同進流濃度下清水透過液中殘留重金屬濃度之大小。

(2)高濃度：為連續濃縮減容研究之準備試驗。所有 pH 值均控制於 4.0，操作壓力 400 psig，分成四種濃度 (1,000、4,000、7,000、10,000 mg/ℓ) 探討不同進流濃度對重金屬去除及清水透過率之影響。採用去除率較佳之 SW-30-2514 和 BW-30-2514 等兩種逆滲透膜進行試驗。

4. 清水回收比

一般 RO 系統設備固定後，其所能改變之清水回收比範圍非常有限。本實驗之 RO 系統其清水回收比介於 10% ~ 15% 之間。實驗進行時，為了充分利用 RO 系統之操作功能，將系統中針閥 V3 予以關閉，僅以 V1 與 V2 調節操作壓力之大小，操作壓力增大時清水回收比亦隨之增加。

5. 逆滲透膜之種類

逆滲透膜之種類不同，對各離子之選擇性、親水性亦不一樣，本實驗所使用之逆滲透膜，計有編號 SW-30-2514、BW-30-2514 及 SW-60-PAT 三種，其有關資料詳列於表 2-1、表 2-2 及表 2-3。

6. 操作時間

各操作變數試驗時，每個試程之操作時間約須一小時左右，期使得所有試驗之清水透過液水質達到穩定狀態。

7. 溫度

T. S. Govindan (1966)⁽⁴⁾ 認為：在稀薄溶液中溫度對溶質之去除率並無影響。本實驗 RO 系統之水溫，從廢水儲存槽至逆滲透膜單元，隨著操作壓力之不同約上升 1~2°C。本研究之所有試驗，經逆滲透膜單元之水溫介於 27°C ~ 32°C 之間。

8. 廢水成分及溶質分子量大小

水中溶質之成分不同時，即使相同之逆滲透膜其選擇性亦不一樣。而且，分子量截留數 (Molecular Weight Cut Off) 係各製造商用來判斷逆滲透膜去除水中溶質特性之指標，表示溶質之分子量在某一大小以上可被去除。本研究採用之電鍍廢水種類有三，即鍍銅、鍍鉻及鍍鎘廢水，其主要成分如(二)廢水來源及水質所示，實驗結果可以了解銅、鉻、鎘等三種重金屬以 RO 系統處理之去除效果。

三、RO 系統處理效率之表示法

(一)重金屬去除率 F_M (%)

$$F_M (\%) = \frac{C_f - C_p}{C_f} ; \quad C_f : \text{進流溶液重金屬之濃度 (mg/ℓ)} \\ C_p : \text{清水透過液重金屬之濃度 (mg/ℓ)}$$

(二)清水透過率 P_r (ℓ/m²·hr)

P_r 為每單位時間 (hr)、每單位逆滲透膜面積 (m²) 下通過逆滲透膜之清水透過液體積

(l)。

(3) 清水回收比 r (%)

$$r (\%) = \frac{q_p}{q_p + q_c}; \quad q_p: \text{清水透過液之流量} (\ell/\text{min}) \\ q_c: \text{濃縮溶液之流量} (\ell/\text{min})$$

四、實驗結果與討論

(4) pH 值之影響

1. 鍍銅廢水

pH 值之實驗範圍原定在 3.5~7.5 之間，不料當 pH 值調至 6.5，卻使 RO 系統之預濾裝置（濾心）很快地阻塞，必須立即更換才能繼續操作。濾心取出後，見其表面和內部孔隙內附有許多淺藍色之泥狀物，推斷其為硫酸銅和氫氧化銅之混合物。因此，將實驗之最高 pH 值降為 6.2，以 3.5、4.5、5.5 和 6.2 四種 pH 值進行試驗，其結果如圖 4-1 所示。

在圖 4-1 中，當 pH 值介於 3.5~5.5，pH 值升高時，清水透過液之 Cu 濃度亦隨著增加；亦即 Cu 之去除率隨 pH 值增加而減少。B. A. Winfield (1977)⁽⁵⁾ 所作之實驗與上述結果相似。當進流溶液 pH 降低時，H⁺離子濃度增加，因 H⁺化學勢能 (chemical potential) 增大之原故，使得 H⁺ 藉著擴散作用穿過逆滲透膜之機率大大地提高。由於逆滲透膜中 H⁺ 正電荷之作用，將增加與 H⁺離子配對之負電荷離子通過逆滲透膜之機會，但卻減少清水透過液中正電荷金屬離子之濃度，此種現象稱為多納排斥理論 (Donnan exclusion theory)⁽⁶⁾。Cu²⁺ 為正電荷離子，其清水透過液 Cu 濃度隨 pH 降低而減少之現象與多納排斥理論吻合。

當 pH 值從 5.5 升高至 6.2，清水透過液之 Cu 濃度大幅下降，可知 pH 值 6.2 時，有部份之 Cu²⁺離子轉變為 Cu(OH)₂ 之不溶性膠羽物質。當其通過濾心時，因篩除作用，使得進入逆滲透膜單元之 Cu 濃度大幅降低，妨礙其穿過薄膜而使殘留於清水透過液之 Cu 濃度減少。取出濾心後見其上附有不溶性之 Cu(OH)₂。金屬離子形成不溶性膠羽被篩除之現象，降低了逆滲透膜對溶解狀態類選擇性 (Selectivity) 之功能，因此，廢水 pH 提高，降低 Cu²⁺ 之溶解度，使得 RO 系統對 Cu²⁺離子去除率提高之現象，非吾人樂意見到之事。

進流溶液之 pH 值降低時，其 H⁺透過薄膜之機會增大，因此清水透過液之 pH 值亦會降低如圖 4-2 所示，當進流溶液之 pH 從 6.2 降至 3.5 時，其清水透過液之 pH 亦從 5.5 降至 4.7，以 300、500 及 700 psig 三種不同操作壓力所作實驗其結果相同。操作壓力不同其清水透過液中 H⁺之濃度雖會改變但因改變量甚微，pH 測定計根本無法分辨 H⁺離子濃度之明顯差異，因此看不出操作壓力對清水透過液 pH 值有何影響。

鍍銅廢水另以 BW-30-2514 和 SW-60-PAT 兩種逆滲透膜試驗，其結果與圖 4-1 之現象相似，因此不再重覆說明。

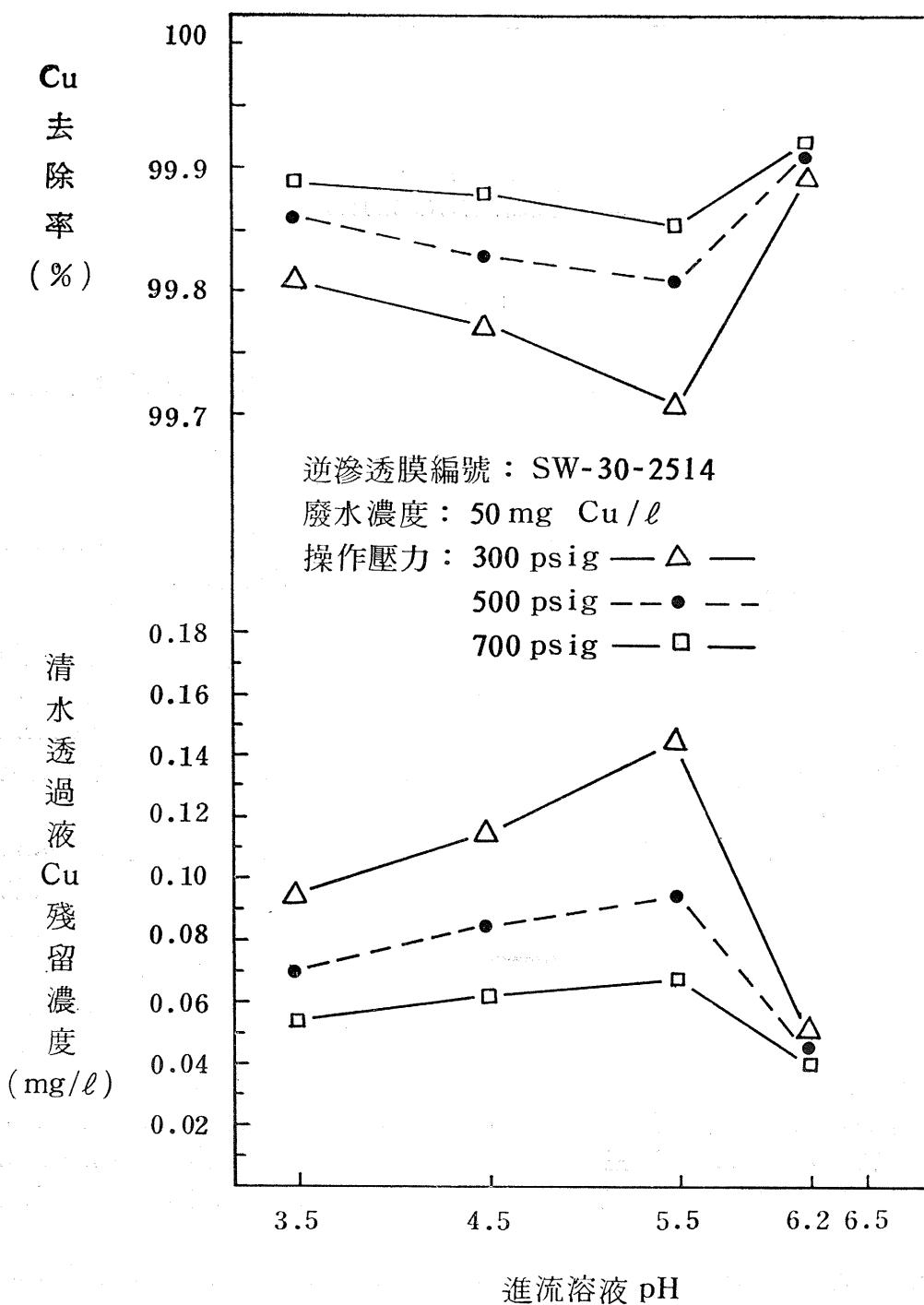


圖4-1 進流溶液 pH 值對 Cu 去除率及清水透過液 Cu 殘留濃度之影響

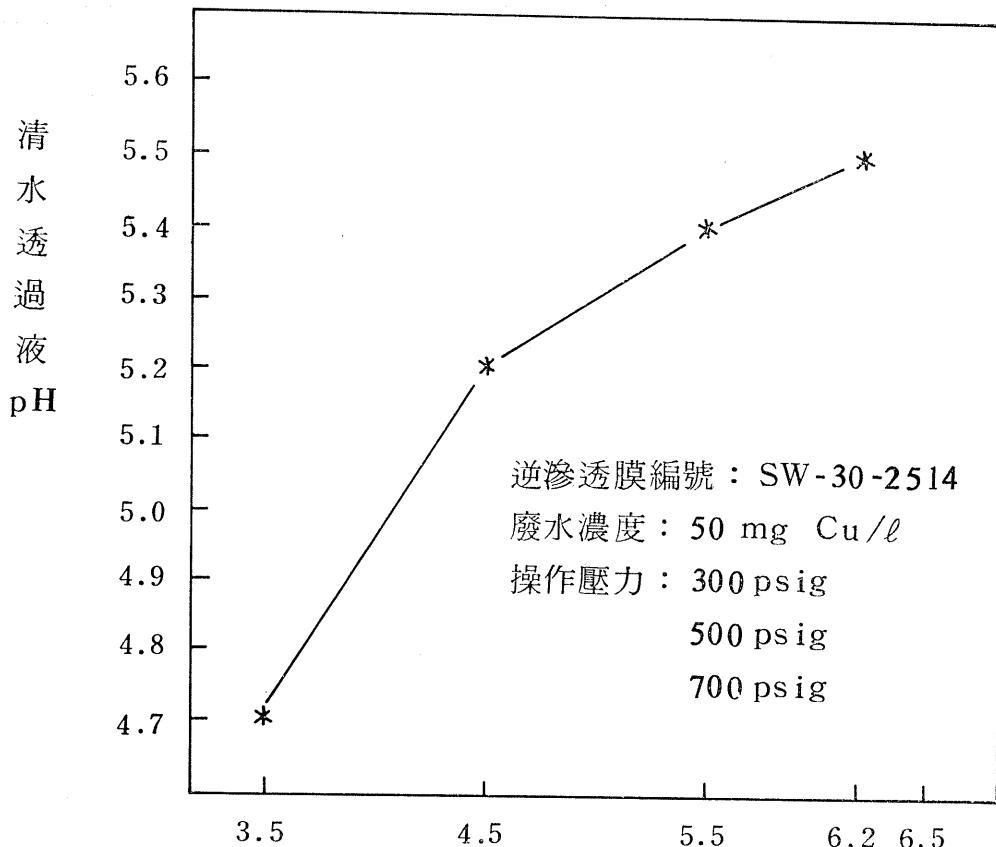


圖 4-2 進流溶液 pH 值對清水透過液 pH 之影響

2. 鍍鉻廢水

此廢水以 3.5, 4.5, 5.5, 6.5 及 7.5 等五種 pH 值進行試驗。以 SW-60-PAT 之逆滲透膜為例，見圖 4-3 所示，透過液中 Cr 濃度隨 pH 值增加而減少。H. Cohen⁽¹⁾以鉻酸所作實驗與上述結果相同。因 pH 值增加，鉻酸在水中之溶解度減少，使得溶質對薄膜之擴散能力變差，因而提高去除率。此亦可引用多納排斥理論加以解釋。本實驗鍍鉻廢水中 Cr 之來源為 CrO_3 ，其在水溶液中會形成 H_2CrO_4 和 $\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 兩種化合物⁽²⁾，不論是 CrO_4^{2-} 或 $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ，Cr 皆存在於帶負電荷之原子團中，因此，本實驗結果符合多納排斥理論。

另兩種逆滲透膜之試驗，其結果與上述 S W-60-PAT 之現象類似，不再贅述。

3. 鍍鎘廢水

仍以相同之三種逆滲透膜進行試驗，試驗之 pH 有 3.5, 4.5, 5.5 及 6.5 等四種。將 BW-30-2514 逆滲透膜之試驗結果繪成圖 4-4，其現象與鍍銅廢水近似，解釋之理論亦同，故不再覆述。

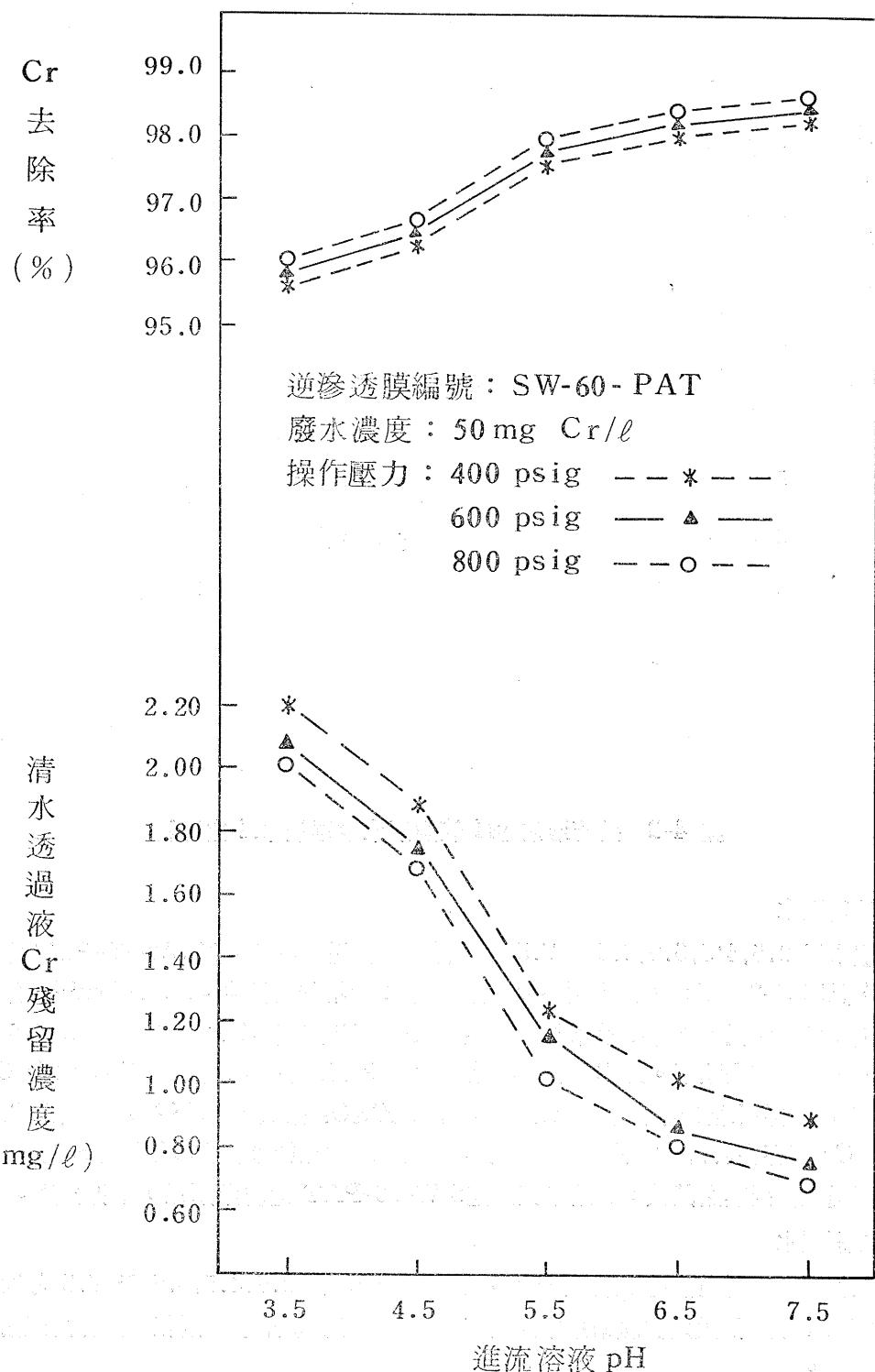


圖 4-3 進流溶液 pH 對 Cr 去除率及清水透過液 Cr 殘留濃度之影響

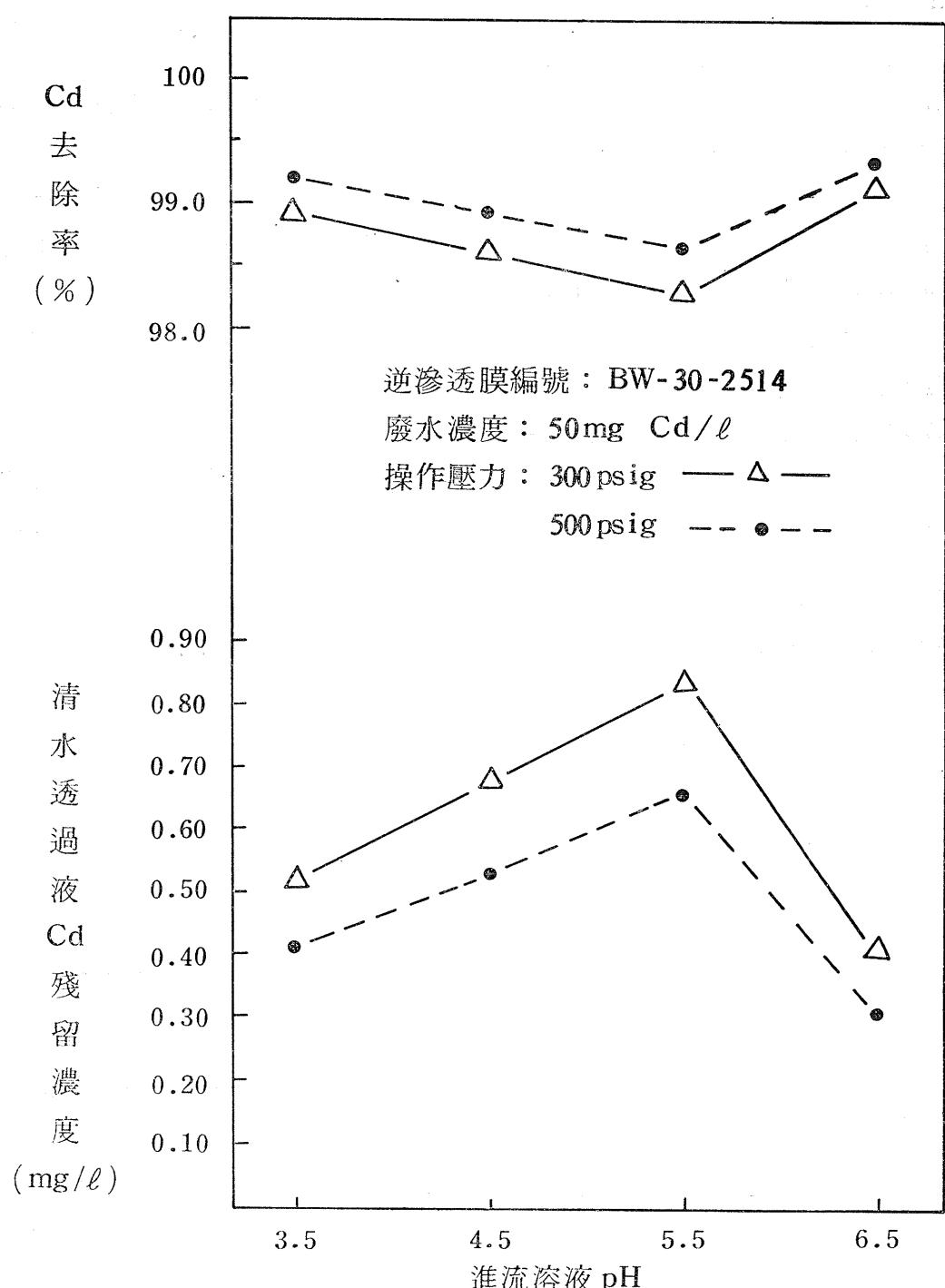


圖 4-4 進流溶液 pH 對 Cd 去除率及清水透過液 Cd 殘留濃度之影響

(二)操作壓力之影響

1. 操作壓力對清透過率之影響

若 RO 系統之有效驅動壓力 (atm) 為 ΔP ，操作壓力 (atm) 為 P ，滲透壓差 (atm) 為 $\Delta\pi$ ，則三者之關係如下：

$$\Delta P = P - \Delta\pi \quad (4-1)$$

由 (4-1) 式可知，在滲透壓差 $\Delta\pi$ 固定時，操作壓力 P 增加，有效驅動壓力 ΔP 亦隨之增加，而水之透過率 J_w 與 ΔP 之關係如下：

$$J_w = A \Delta P \quad (4-2)$$

J_w ：水之透過率 ($\text{mole}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$)

A ：純水穿透常數 ($\text{mole H}_2\text{O}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{atm}$)

由 (4-2) 式可知，水之透過率 J_w 與 ΔP 成正比，因此，操作壓力 P 增加，清水透過率會有明顯地增加，本實驗之結果與此推論符合。以三種不同之逆滲透膜處理鍍銅、鍍鉻、鍍鎘三種廢水之結果如圖 4-5、4-6 和 4-7 所示，隨著操作壓力之增加其清水透過率顯著地增加。以圖 4-6 為例，當進流溶液 Cr 濃度 200 mg/l ，操作壓力從 300 psig 提高至 700 psig ，清水透過率亦從 $42.3 \text{ l/m}^2 \cdot \text{hr}$ 增加至 $86.5 \text{ l/m}^2 \cdot \text{hr}$ ，增加率為 104.5% 。

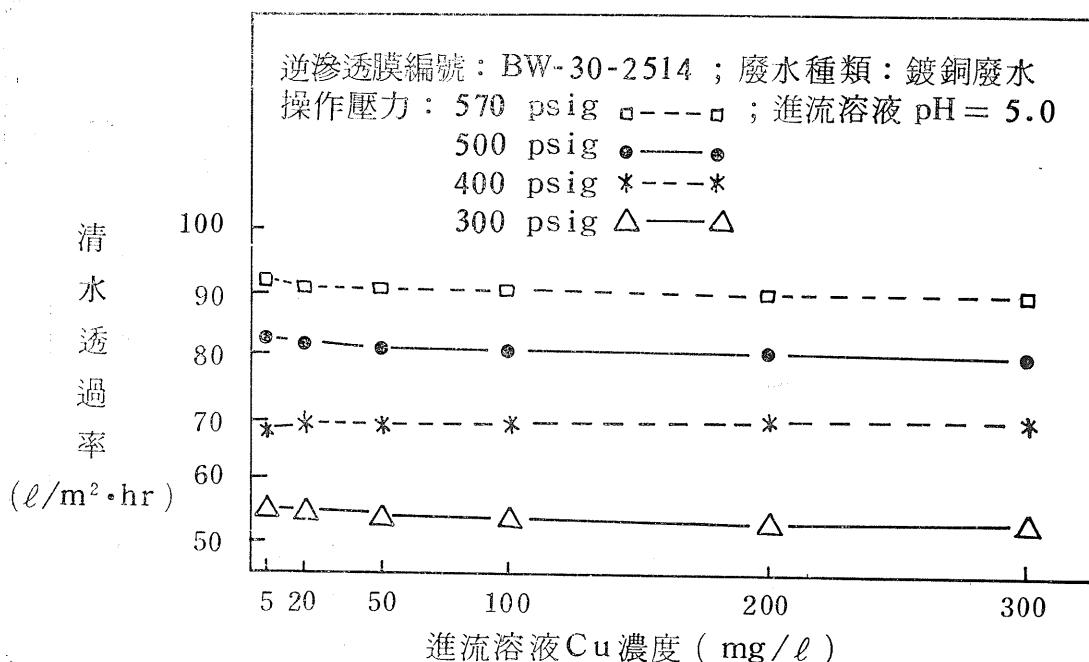


圖 4-5 進流溶液 Cu 濃度與清水透過率之關係

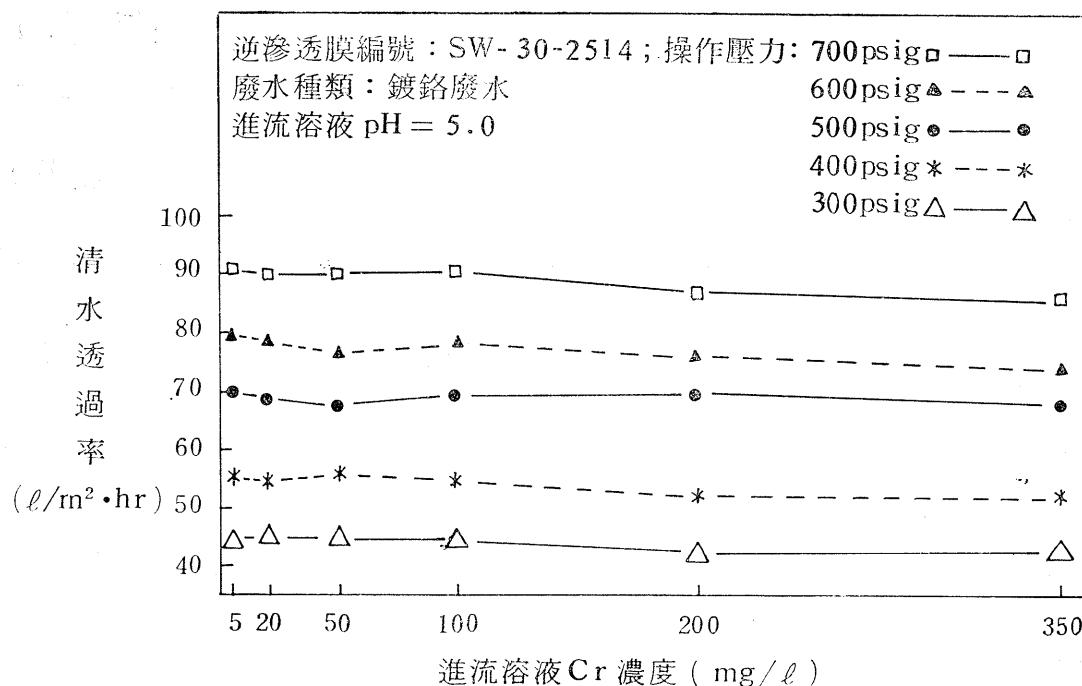


圖 4-6 進流溶液 Cr 濃度與清水透過率之關係

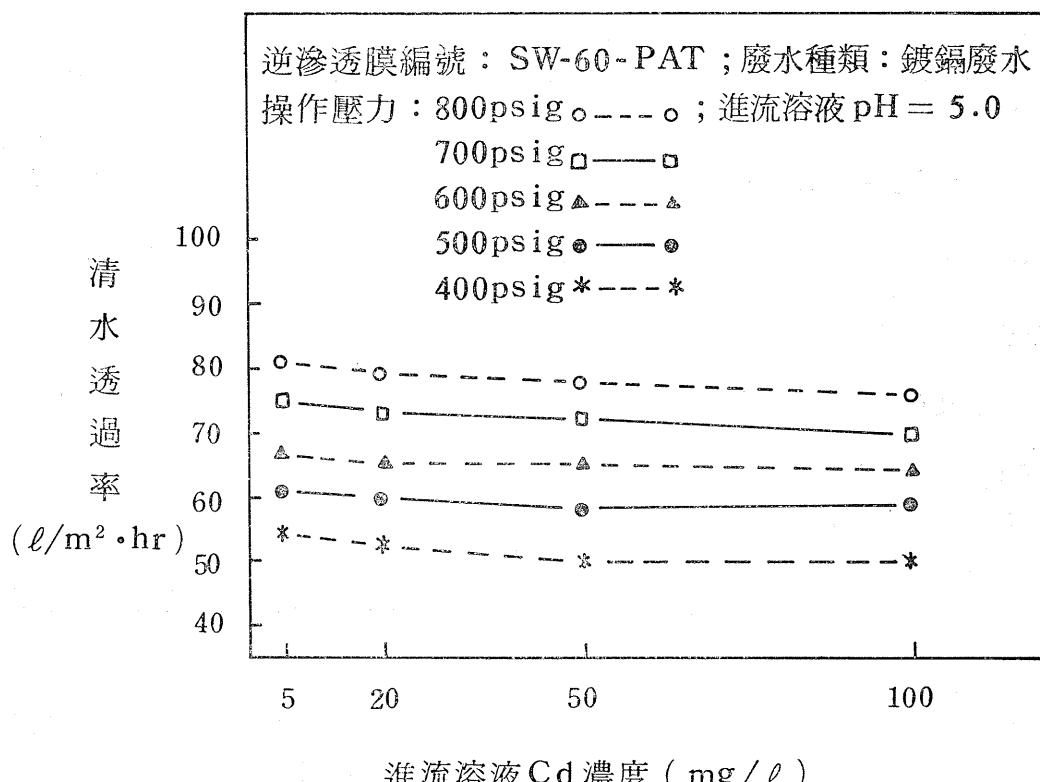


圖 4-7 進流溶液 Cd 濃度與清水透過率之關係

2. 操作壓力對重金屬去除率之影響

Souriragan (1967)⁽⁸⁾曾導出下式：

$$\text{去除率}(f) = \frac{aP}{bP+1} \quad (4-3)$$

由上式可知，系統之操作壓力 P 增加， $\frac{aP}{bP+1}$ 項之分子與分母大小會愈來愈接近，亦即去除率愈來愈高。

本實驗之結果可由圖 4-8、4-9、4-10 中看出，操作壓力愈高，清水透過液中重金屬濃度愈低，去除效果愈佳。由逆滲透膜之擴散模式⁽⁹⁾可知，溶質對薄膜之擴散速度要比水慢許多。同時薄膜中充滿鍵結水後，大大降低孔隙產生之機會，更阻止溶質之擴散，此現象當操作壓力增加時更加明顯。

操作壓力增加，通過逆滲透膜之水分子數目增加。膜中鍵結水以排成一線 (alignment) 方式沿著氫鍵之一端移動至另一端時，佔滿膜中孔隙之現象更為顯著，使得溶質更難通過薄膜之障礙。縱使少部份之溶質能殘留於清水透過液中，因水分子大量增加，產生稀釋作用而使得溶質之濃度減少。

(三) 進流溶液重金屬濃度之影響

1. 進流溶液重金屬濃度對清水透過率之影響

當 RO 系統對溶質具有高去除率時，水之透過率 J_w 與進流溶液之滲透壓 $\pi(X_{s2})$ 之關係如下⁽⁹⁾：

$$J_w = A[P - \pi(X_{s2})] \quad (4-4)$$

$\pi(X_{s2})$ ：RO 系統操作時，濃縮界面層溶液中溶質之莫耳分數為 X_{s2} 時，所引起之滲透壓。

而 Van't Hoff 方程式如下：

$$\pi = C'RT \quad (4-5)$$

C' ：進流溶液中溶質之濃度 (mole/l)

R：氣體常數 = 0.082 l·atm/mole·°K

由 (4-5) 式知：滲透壓與進流溶液中溶質之濃度成正比，因此，進流溶液之溶質濃度愈大，其清水透過率愈小。本項實驗分兩種濃度進行，如本文二、四 3. 進流溶液之重金屬濃度所示。

(1) 低濃度

如圖 4-5、4-6、4-7 所示，進流溶液濃度增加，清水透過率會有稍許減少，但其減少量並不顯著。由此可知，在該濃度範圍內，逆滲透膜表面之濃度極化現象並不明顯，溶液之滲透壓 $\pi(X_{s2})$ 與操作壓力 P 比較之下顯得微不足道，因此，對清水透過率幾乎不產生影響。

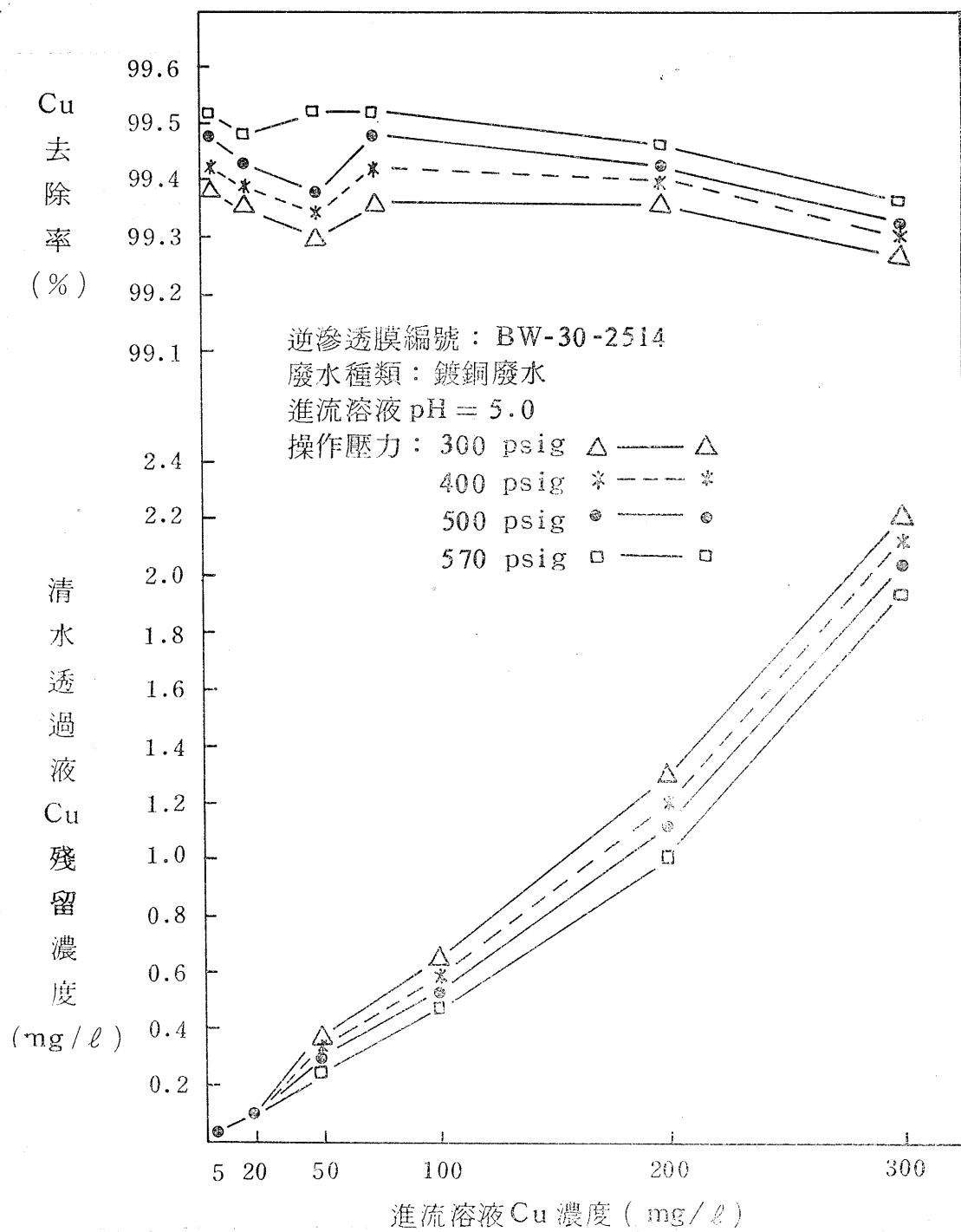


圖 4-8 進流溶液 Cu 濃度對 Cu 去除率及清水透過液 Cu 殘留濃度之影響

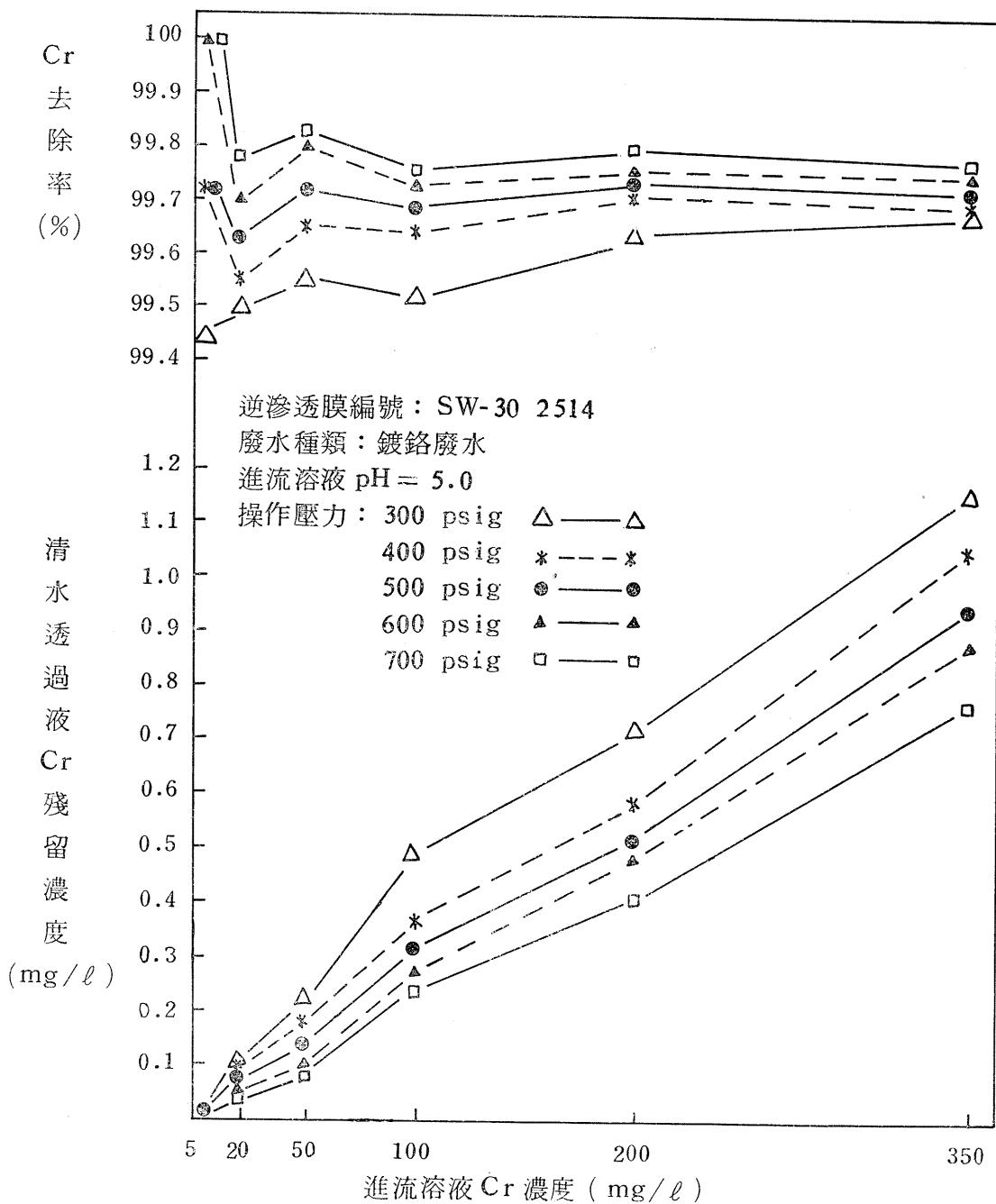


圖 4-9 進流溶液 Cr 濃度對 Cr 去除率及清水透過液 Cr 殘留濃度之影響

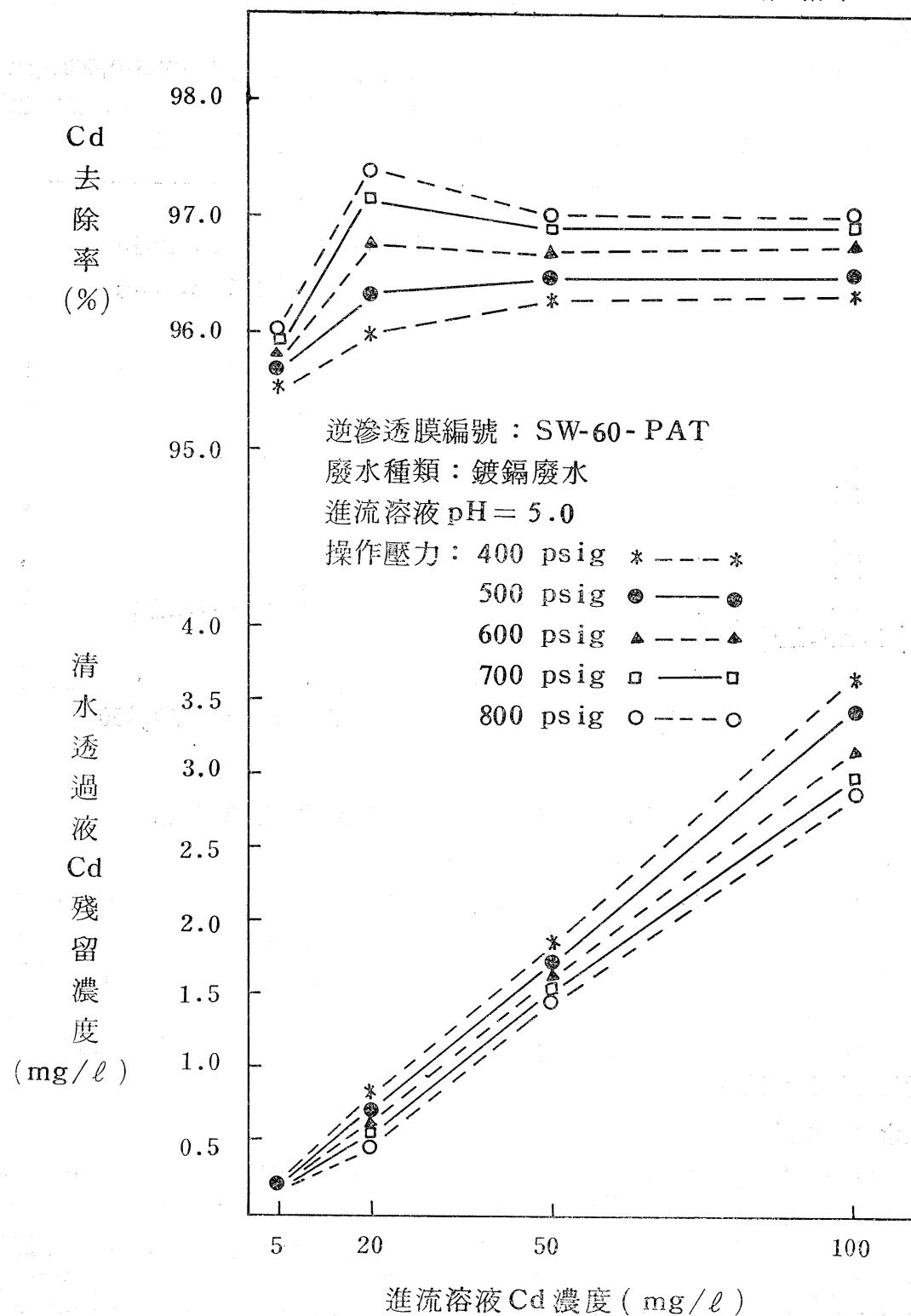


圖 4-10 進流溶液 Cd 濃度對 Cd 去除率及清水透過液 Cd 殘留濃度之影響

(2)高濃度

如圖 4-11，以鍍銅廢水為例，將進流溶液中 Cu 濃度從 $1,000 \text{ mg/l}$ 提高至 $10,000 \text{ mg/l}$ 時，清水透過率由 $45.5 \text{ l/m}^2 \cdot \text{hr}$ 降為 $34.0 \text{ l/m}^2 \cdot \text{hr}$ ，降幅為 25.3%。當 Cu 濃度達到 $10,000 \text{ mg/l}$ 時，濃度極化現象造成滲透壓增加和清水透過率之降低非常明顯。

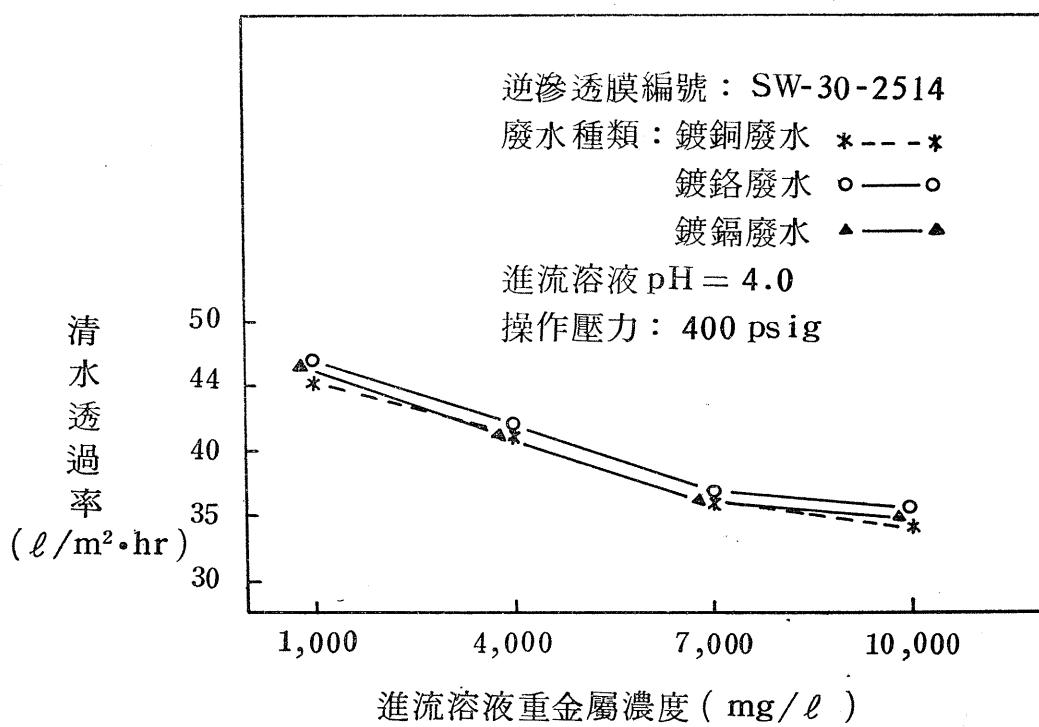


圖 4-11 進流溶液重金屬濃度與清水透過率之關係

2. 進流溶液重金屬濃度對重金屬去除率之影響

Gorindan (1966)⁽¹⁰⁾ 曾指出，進流溶液之濃度對溶質去除率之影響，很難加以預測。本試驗之結果如圖 4-8、4-9、4-10 及 4-12 所示，亦甚難看出重金屬進流濃度對其去除率有何影響。此現象可能係因本試驗所使用之逆滲透膜型式為螺旋捲式，進流水方向與薄膜之方向平行但與穿透薄膜之水流方向垂直所致；因此，當溶質附於膜之表面，且有穿透膜之傾向時，因水流之沖刷作用，又將溶質帶回濃縮溶液中，所以，重金屬去除率並不隨進流濃度之增加而有降低現象。

(四) 廢水種類之影響

雖使用相同之逆滲透膜，但因水中溶質成分不同，由於選擇性之差異，去除率也就不一樣。如圖 4-12 以編號 SW-30-2514 之逆滲透膜對鍍銅、鍍鉻和鍍鎘三種廢水進行實驗。可明顯地看出，在相同進流濃度下，清水透過液中重金屬濃度以鉻最高，而鎘最低，其中銅與鎘之濃度差距甚小。根據多納排斥理論⁽¹⁰⁾當 pH 值降低時，清水透過液中與 H^+ 禹子配對之負電荷禹子之濃度會增加，而正電荷金屬禹子之濃度將減少。鍍銅、鍍鉻、鍍鎘廢水中之重

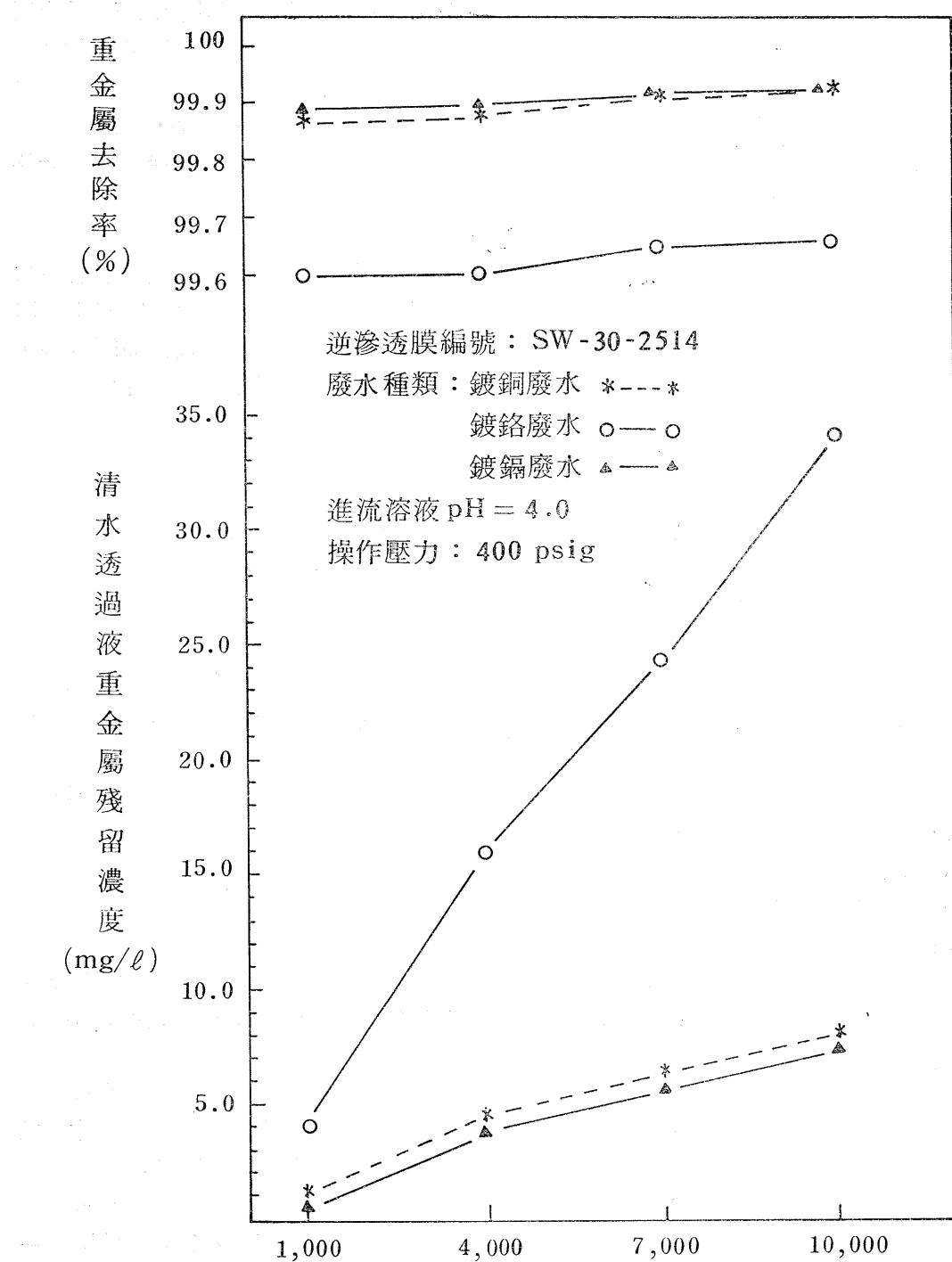


圖 4-12 進流溶液重金屬濃度對重金屬去除率及清水透過液重金屬殘留濃度之影響

金屬主要存在型態分別為 CuSO_4 、 H_2CrO_4 及 CdSO_4 。可看出 Cu 與 Cd 同以正電荷金屬離子之形式存在，而 Cr 則在 CrO_4^- 之負價原子團中。圖 4-12 之實驗 pH 值均控制於 4.0，係在 H^+ 較 OH^- 佔優勢之狀況， Cu 與 Cd 之去除率當然要比 Cr 高。此外，吾人從分子量截留數 (Molecular Weight Cut Off) 之觀點來看， CdSO_4 、 CuSO_4 、 H_2CrO_4 之分子量分別為 208.4、159.5 及 118，依逆滲透膜之去除特性，分子量較大者去除率較佳，由圖 4-12 顯示，去除率順序依次為 $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Cr}$ ，亦相當合理。

5. 逆滲透膜材質之影響

不同材質之逆滲透膜，對溶質之滲出選擇性也不一樣。如圖 4-13 所示，在相同操作壓力下，三種逆滲透膜中以 SW-30-2514 對 Cu 之去除率最佳，而清水透過率則以 BW-30-2514 最高。SW-60-PAT 則無論在重金屬去除率或清水透過率皆較前述兩種逆滲透膜相差甚多，由此可知，逆滲透膜之正確選擇，係決定 RO 處理系統成功與否非常重要之因素。

五、清水透過率估算公式之推導

清水透過率係 RO 系統設計之重要參數，由實驗所得之清水透過率可計算在特定操作條件下，所需之逆滲透膜面積。現選取本實驗清水透過率最佳之逆滲透膜 BW-30-2514 進行估算公式之推導，其推導步驟如下：

(一) 基本構想

本研究所使用 BW-30-2514 逆滲透膜之實驗結果如圖 4-9、4-10、4-11 所示，重金屬之去除率均非常高 (98% 以上)，因此，由 (4-4) 式之觀念，清水透過率 P_r 可以表示如下：

$$P_r = a(P - bC_f^n) \quad (5-1)$$

P_r ：清水透過率 ($\ell/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)

a、b、n：常數

P：操作壓力 (psig)

C_f ：進流溶液重金屬濃度 (mg/ℓ)

(二) 將所有實驗之數據輸入電腦假設 $n=1$ ，由任兩組數據，解出 (5-1) 式中之常數 a 與 b，去除異常值 (大於 0.2 小於 0.1)，並求出 a 之算術平均值 $a=0.169$ ，以 a 代入 (5-1) 式可得下式：

$$P_r = 0.169(P - bC_f^n) \quad (5-2)$$

(三) 以試誤法 (try and error method) 將表 2-3 之所有實驗數據代入 (5-2) 式中，並求出 b 與 n 之值得低進流濃度下 ($C_f < 350 \text{ mg}/\ell$)，清水透過率之數學式如下：

$$P_r = 0.169(P - 5.2 C_f^{0.12}) \quad (5-3)$$

(5-3) 式之操作壓力介於 300~570 psig 之間，進流溶液重金屬濃度 $C_f < 350 \text{ mg}/\ell$, pH=5.0，最大誤差 10.4%，平均誤差 4.2%；而當操作壓力在 400~500 psig 間，其最大誤差為 4.6%，平均誤差 2.0%。

(四) 同樣以試誤法將逆滲透膜 BW-30-2514 於高進流濃度之實驗數據代入 (5-2) 式得：

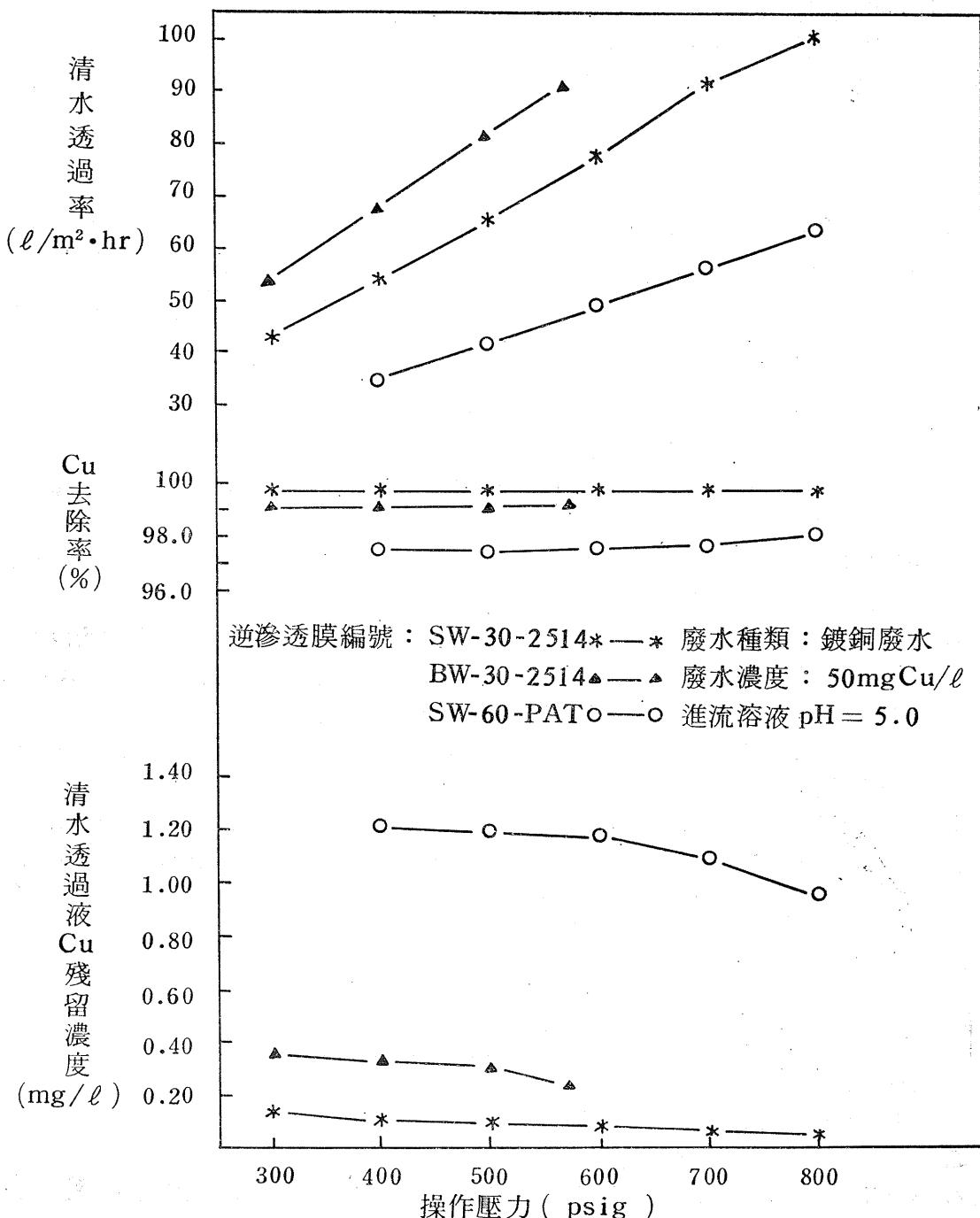


圖 4-13 逆滲透膜材質對 Cu 去除率和清水透過率之影響

$$P_r = 0.169(P - 52.3C_f^{0.12}) \quad (5-4)$$

P : 400 psig

C_f : 重金屬濃度 1,000~10,000 mg/l

(5-4) 式之最大誤差 4.6%，平均誤差為 2.0%，為一具實用價值之公式。

六、結論

1. 電鍍廢水 pH 值介於 3.5~5.5 時，RO 對 Cu 與 Cd 之去除率隨 pH 值之增加而降低，但 pH 值由 5.5 升至 6.2 時，因 Cu⁺⁺ 與 Cd⁺⁺ 分別於水中形成不溶性氫氧化物，去除率大幅提高。當鍍鉻廢水之 pH 介於 3.5~7.5 時，Cr 之去除率隨 pH 值之增加而提高。
2. 處理酸性電鍍廢水時，為減緩逆滲透膜之水解速率，並避免水中重金屬形成不溶性膠羽，進流溶液之 pH 值應控制在 4.0~5.0。
3. 增大 RO 操作壓力可提高清水透過率，並增加重金屬去除率。但是，為了避免因操作壓力過大，造成薄膜之壓密 (Compaction) 現象，使得逆滲透膜之壽命減短，應視薄膜之特性擬定適當之操作壓力。
4. 進流溶液重金屬濃度對重金屬去除率並無顯著影響，但當重金屬濃度超過 1,000 mg/l，清水透過率隨進流溶液重金屬濃度增加而明顯地降低。
5. 當電鍍廢水之重金屬濃在 1,000~10,000 mg/l、pH=4.0、操作壓力 400 psig，以逆滲透膜 SW-30-2514 所作實驗顯示，銅、鉻、鎘之平均去除率分別為 99.90%、99.63 及 99.91%，清水透過液之重金屬濃度以鉻最高，銅與鎘則非常接近。
6. 所用三種逆滲透膜中，重金屬去除率以 SW-30-2514 最佳，而清水透過率則以 BW-30-2514 最高。
7. 逆滲透膜 BW-30-2514 在低進流濃度 ($C_f < 350 \text{ mg/l}$) 下，清水透過率 $P_r = 0.169(P - 5.2C_f^{0.12})$ ；在高進流濃度 ($C_f = 1,000 \sim 10,000 \text{ mg/l}$) 下， $P_r = 0.169(P - 52.3C_f^{0.12})$ 。其中 P 為操作壓力 (Psig)， C_f 為進流溶液重金屬濃度 (mg/l)。

參考文獻

1. 李公哲「電鍍廢水之水污染防治」，近代工程技術討論會論文集，民國69年，PP423-439。
2. 王大倫「實用電鍍學」，徐氏基金會出版。
3. 「工業污染的防治」，經濟部工業局編印。
4. Govindan T. S. and Sourirajan. S. "Reverse Osmosis Separation of Some inorganic Salts in Aqueous Solution Using Porous Cellulose Acetate Membranes" Ind. Eng. Chem. Process Design and Develop, Vol.5, No.4, pp. 422-429, (1966)

5. B. A. Winfield "The Treatment of Sewage Effluents By Reverse Osmosis-pH Based studies of the Fouling Layer and its Removal" Journal of Water Research, Vol.13, pp. 561-564, (1979).
6. Donnan, F. G., and E. A. Guggenheim, Z. physik. Chem A162, 346, (1932)
7. H. Cohen, "Membrane Process Combine with More Conventional Separation Techniques pilot Treatment of Industrial Effluents in Isreal" Negev Institute for Arid Zone Research, Beersheva, Isral.
8. Sourirajan S., "Reverse Osmosis Separation and Concentration of Sucrose in Aqueous Solution Using Porous Cellulose Acetate Membranes", Ind. & Eng. Chem. Process Design & Development, Vol.6, No. 1, pp. 154-160,(1967).
9. 李文智「以逆滲透法處理電鍍廢水之研究」，國立成功大學環境工程研究所碩士論文，民國74年6月。
10. Govindan T. S., and Sourirajan. S., "Reverse Osmosis Separation of Some inorganic Salts in Aqueous Solution Using Porous Cellulose Acetate Membranes", Ind. Eng. Chem. Process Design and Develop, Vol. 5, No. 4, pp. 422-429, (1966).

Acidic electroplating Wastewater treatment by Reverse Osmosis-A study on the Operational Parameters

Wen-Jhy Lee*, and Chun-Teh Li**

Abstract

The principal objectives of this study were to investigate the operational parameters and treatment efficiency of Acidic electroplating wastewater by Reverse Osmosis Process. Based on the results of this study the following conclusions can be made:

1. The Optimum pH range of feed solution for acidic electroplating wastewater was found between 4.0 and 5.0.
2. Making the operational pressure more can increase the permeate flux and heavy metal rejection rate.
3. In order to prevent the membrane from occurring the phenomenon of irreversible fouling and resulting to permeate flux decreasing, the heavy metal concentration of feed solution should not excess 10,000 mg/l.
4. Ranking average rejection rate of Cu, Cr and Cd to RO system, Cr was the lowest, however Cu and Cd were very closed.
5. In the lower feed concentration ($C_f < 350 \text{ mg/l}$ as heavy metal) the equation of permeate flux (P_r) of membrane BW-30-2514 was: $P_r = 0.169(P - 5.2C_f^{0.12})$. On the other hand, in the higher feed concentration ($C_f = 1,000 \sim 10,000 \text{ mg/l}$), the equation was: $P_r = 0.169(P - 52.3C_f^{0.12})$ Where P and C_f represent operational pressure (psig) and heavy metal concentration (mg/l) of feed solution respectively.

* Wen-Jhy Lee, Lecturer, Environmental Science Department, Feng Chia University.

**Chun-Teh Li, Professor & Chairman, Graduate Institute of Environmental Engineering, National Cheng Kung University.