

工業廢水 離子交換處理



序

防治工業污染，乃當前工業發展重點工作之一。本團自民國七十二年成立以來，即積極展開輔導國內污染性工廠有關防治污染之技術。在輔導工作進行期間，深覺工業污染防治範疇內之技術資料頗為缺乏，且多為英文，其實用性甚難為國內業者普遍接受。

本團有鑑於此，乃自七十三年起，陸續準備各類有關資料，於輔導工廠時提供其參考；由於此等技術性資料深具實用性，的確有助於污染防治之改善，頗為業者所喜愛。七十五年開始，本團更進一步，有系統地將各類處理技術，分門別類，陸續延聘國內知名專家學者撰寫成冊，予以編印，免費提供各界參考，期能加速業界對污染防治技術之普遍提昇，從而達成發展工業兼顧環境保護之目的。

本手冊為曾迪華教授所撰寫，曾教授目前任教於國立中央大學環境工程學研究所，培育英才，原極忙碌，為協助本團推動防治工業污染工作，特抽空就所專精撰寫專文，除敬表欽佩外，並致誠摯的謝忱。

工業污染防治技術服務團 謹識
中華民國八十一年六月

離子交換樹脂法

目 錄

一前 言.....	1
二離子交換的基本原理.....	3
三離子交換樹脂的型式.....	10
四離子交換的操作.....	18
五離子交換的應用.....	27
5 - 1 營養鹽的處理和回收.....	31
5 - 2 高濃度製造廢液的更新與回收.....	33
5 - 3 電鍍業洗滌廢水成份的循環回收再利用.....	43
5 - 4 含金屬廢水的處理與回收.....	49
六離子交換系統的設計.....	70
七結 論.....	82
八參考文獻.....	83
附錄一.....	92
附錄二.....	95
附錄三.....	98

圖 目 錄

圖 2 - 1	陽離子交換樹脂離子交換反應前和反應後的情形	4
圖 3 - 1	陽離子交換樹脂製造之化學反應式	12
圖 4 - 1	離子交換固定柱床和其操作循環	19
圖 4 - 2	固定離子交換階段標準特性	20
圖 4 - 3	各種再生曲線的變化	23
圖 4 - 4	離子在樹脂柱床內分佈的情形	25
圖 4 - 5	混合床的再生步驟	26
圖 5 - 1	硝酸鹽之離子交換處理流程	32
圖 5 - 2	從都市污水中回收營養鹽之處理流程	34
圖 5 - 3	鉻槽廢液更新的處理流程（型式一）	35
圖 5 - 4	鉻槽廢液更新的處理流程（型式二）	37
圖 5 - 5	鉻槽廢液更新的處理流程（型式三）	38
圖 5 - 6	鎂金屬薄板酸洗液更新的處理流程	39
圖 5 - 7	從廢酸洗液中去除鋅離子的處理流程	41
圖 5 - 8	鋁金屬表面處理廢液中回收鎳和錫鹽的處理流程	42
圖 5 - 9	FeSO_4 與 H_2SO_4 分離時離子交換柱床出口濃度變化歷程	44
圖 5 - 10	硫酸與其亞鐵鹽分離的處理流程	44
圖 5 - 11	洗滌廢水成份的循環再利用處理流程	46
圖 5 - 12	含鉻洗滌廢水循環回收再利用處理流程	47
圖 5 - 13	氟化物電鍍洗滌廢水回收水之處理流程	50
圖 5 - 14	電鍍洗滌廢水回收鎳和水之處理流程	55
圖 5 - 15	人造絲工業廢水中回收水、氨和銅之處理流程	57
圖 5 - 16	聚乙烯醇纖維廠廢水中回收鋅之處理流程	59
圖 5 - 17	從含汞廢水中回收汞之處理流程	61
圖 5 - 18	從含金廢水中回收金之處理流程	63
圖 5 - 19	從含銀廢水中回收銀之處理流程	64

圖 5 - 20 從電鍍廢水中回收水之處理流程.....	66
圖 5 - 21 離子交換配合傳統重金屬沉澱處理之流程.....	67
圖 5 - 22 從電鍍廢水中，以離子交換法直接去除重金屬之處理流程.....	68
圖 6 - 1 電鍍廢水回收鉻和水之離子交換處理系統.....	71

表 目 錄

表 2 - 1	陽離子選擇係數（強酸性陽離子交換樹脂）.....	6
表 2 - 2	陰離子選擇係數（強鹼性陰離子交換樹脂）.....	7
表 2 - 3	影響離子交換樹脂對離子選擇性的因素.....	8
表 3 - 1	離子交換樹脂分類表.....	13
表 3 - 2	各型離子樹脂的交換反應和再生劑.....	14
表 3 - 3	典型常用的離子交換樹脂.....	15
表 3 - 4	合成離子交換樹脂之主要製造廠商.....	16
表 3 - 5	鉗合樹脂的主要型式.....	17
表 5 - 1	一般常用鍍槽的成份.....	52
表 5 - 2	對特定離子見有特別選擇性的離子交換樹脂.....	53

一、前言

早在 1850 年，英國人湯普遜 (Thompson) 首先發現離子交換後⁽¹⁾，直到 1905 年，離子交換才成功地應用於水質軟化 (Water softening⁽²⁾)，而其後 30 年間，水質軟化為離子交換法中最主要的應用。在此階段，離子交換所使用材料為天然⁽³⁾或合成⁽⁴⁾無機性矽酸鋁 (inorganic aluminosilicates)，此種離子交換材料僅適用於中性溶液 (neutral solution)，因在 PH 6.5 至 8.5 以外範圍，它們則顯得不穩定。在 1935 年，亞當 (Adams) 和荷西 (Holmes)⁽⁵⁾ 發現能將極性基 (polar groups) 固定在有機聚合體結構 (polymeric matrices) 上，故在而後的 25 年內，合成離子交換樹脂 (Synthetic ion exchange resin) 開始一連串地發展，並能符合各種工業上的需要。例如，在二次世界大戰後，核能工業使用離子交換樹脂回收鈾 (uranium)⁽⁶⁾，處理核能廠廢液⁽⁷⁾和分離核種 (nuclides)⁽⁸⁾。而一般工業，利用離子交換樹脂去除和回收金屬離子，例如從人造絲製造業 (rayon manufacture) 的廢水中回收銅⁽⁹⁾，從冷卻水的排放廢液 (blowdown) 中去除鉻鹽酸 (chromates)⁽¹⁰⁾，從電鍍洗滌廢水中去除金、銅、鎳、鋅、鉻等⁽¹¹⁾。肥料工廠，利用離子交換回收氨 (ammonia) 和硝酸鹽 (nitrate)⁽¹²⁾。

離子交換處理技術發展迄今，在處理含重金屬的工業廢水方面，愈來愈受到重視，主要因傳統的化學沈澱處理，有時不能有效地將金屬離子去除，特別是當廢水成份中含有錯合劑 (complexing agent) 或鉛合劑 (chelating agent) 時，此外沈澱處理會產生大量的重金屬污泥，造成污泥最終處置 (disposal) 的困難。然而離子交換法具有下列優點⁽¹³⁾：

- (1) 對於低濃度重金屬廢水 (小於數百 mg / l 以下)，其單位處理成本較電透析 (electrodialysis)，逆滲透 (reverse osmosis)，蒸發 (evaporation) 等為低。
- (2) 再生廢液所濃縮的離子濃度，常可達到直接利用的程度。
- (3) 再生廢液體積小，若不能回收使用，仍可相對地減少大量的廢水量。

(4)具高選擇性的樹脂 (high selectivity resin)，能從水溶液中僅去除所欲去除的金屬離子，而允許無毒害的離子 (innocuous ions) 通過，或僅有少量被去除，如此，再生時可獲得一純度相當高的金屬離子。

(5)廢水可循環回收使用。

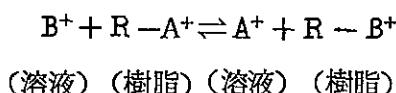
由於離子交換法，不僅具有污染防治的功能，同時亦有回收有用物質和循環廢水再利用的效果，頗值得推廣應用於工業廢水的處理。故本技術手冊，特將離子交換法的基本原理、操作、應用和設計，加以綜合整理，以供各界參考使用。

二、離子交換的基本原理

所謂的離子交換即為在一固體（樹脂）和液體（水溶液）間，進行可逆的相互交換的反應，即不溶解性的固體樹脂顆粒可從電解質水溶液中將正電荷或負電荷的離子去除，同時將等當量的相同電荷之其他離子釋入水溶液中，而此種反應的發生並不會改變樹脂本身的結構。

當在水溶液中的離子快速地擴散進入樹脂的分子網狀結構（molecular network）中時，被交換的離子則經由相同的路徑進入溶液中，此種離子交換的程序直到達成平衡為止。圖 2—1 所示為一陽離子交換樹脂在交換反應發生前和達到平衡後的狀況⁽¹⁴⁾。如圖中所示，樹脂包括一分子網狀結構，其上附著作用離子基（functional ionic groups），而樹脂上此固定的離子基，其電荷為一相反電荷之反離子（counter-ions）所平衡，以保持電性中和。假若樹脂初始時含有一反陽離子 A，當置入一含有陽離子 B 的電解質溶液中時，由於在樹脂上之反離子 A，其與在水溶液中 A 之濃度差，和在水溶液中反離子 B，與其在樹脂上之濃度差，而產生了一驅動力，使得陽離子 A 擴散進入溶液中，而陽離子 B 進入樹脂，此種離子 A 與離子 B 交換的反應，繼續進行直至平衡為止。

若將離子交換樹脂之離子 A 與 B 的交換反應，以簡單的化學計量反應式表達如下：



式中 (R⁻) 代表附著在樹脂上固定的陰離子作用基，根據質量作用定律 (Law of Mass Action)，離子交換樹脂對某一離子的選擇性 (selectivity)，可用下式表達：

1. 以陽離子 B^+ 交換反應前

2. 與陽離子 B^+ 交換反應平衡後

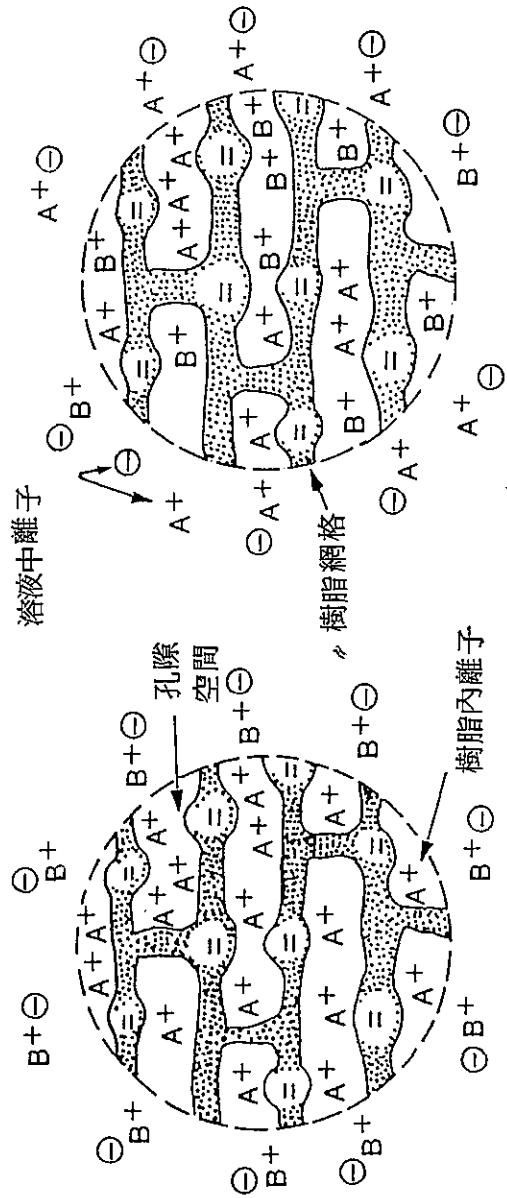


圖 2-1 陽離子交換樹脂離子交換反應前和反應後的情形 (14)

$$K_B^A = \frac{[R-B^+] [A^+]}{[B^+] [R-A^+]}$$

$$= \frac{[\text{樹脂中 } B \text{ 的濃度}]}{[\text{樹脂中 } A \text{ 的濃度}]} \times \frac{[\text{溶液中 } A \text{ 的濃度}]}{[\text{溶液中 } B \text{ 的濃度}]}$$

式中 K_B^A 為選擇係數 (selectivity coefficient)，其表示當交換樹脂為 A 型時，置入一含 B 離子溶液中時，離子相對分佈的情形。然而，此值僅為一估計值，因選擇係數並非一常數值，其依交換樹脂和實驗條件而異。總之一交換樹脂對各離子的選擇係數值，僅能表示各離子對應於樹脂的相對親和力 (affinity)。

表2—1. 和表2—2.⁽¹⁶⁾所示分別為強酸性陽離子交換樹脂和強鹼性陰離子交換樹脂，對一些離子的選擇係數，而其他各型樹脂，對各種離子的選擇性大小次序，另示於附錄一⁽¹⁵⁾。由這些資料，依選擇係數值的大小，能定量地評估離子交換樹脂對各種離子相對的親和力，進而可判斷其產生交換反應的先後次序。

影響離子選擇性的因素列如表 2—3 所示⁽¹⁵⁾，此外樹脂對離子親和力的大小，一般可歸納出如下列的通規⁽¹⁷⁾：

- (1) 通常，高電價的離子其親和力大於低電價的離子，即交換反應的程度隨電價的昇高而增加（例如， $\text{Fe}^{3+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$; $\text{PO}_4^{3-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$ ）。此種傾向亦隨溶液中總離子濃度的減少而增加。
- (2) 對於相同電價的離子，交換反應的程度，隨離子水和半徑 (hydrated radius) 的減少和原子數的增加而增加（例如， $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Be}^{2+}$; $\text{Li}^+ > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ ）。此種結果乃是由於樹脂內膨脹壓力 (Swelling pressure) 的緣故，當離子水和半徑增加時，樹脂內膨脹壓力增加，而減低了樹脂對此離子的親和力。
- (3) 對於一溶液具有高總離子濃度時，交換反應的程度並無一定通則，且常是逆向反應，此種結果為樹脂可逆向再生 (regeneration) 的依據。

(4)樹脂連結(crosslinking)的程度和水和離子大小間的關係，影響交換反應的程度，假如樹脂具有高連結度，則離子可能因太大而無法滲入樹脂的矩構(matrix)中。

表 2-1 陽離子選擇係數(強酸性陽離子交換樹脂)⁽¹⁶⁾

Ion	% Divinylbenzene		
	4	8	12
<i>Monovalent Cations</i>			
H	1.0	1.0	1.0
Li	0.9	0.85	0.81
Na	1.3	1.5	1.7
NH ₄	1.6	1.95	2.3
K	1.75	2.5	3.05
Rb	1.9	2.6	3.1
Cs	2.0	2.7	3.2
Cu	3.2	5.3	9.5
Ag	6.0	7.6	12.0
<i>Divalent Cations</i>			
Mn	2.2	2.35	2.5
Mg	2.4	2.5	2.6
Fe	2.4	2.55	2.7
Zn	2.6	2.7	2.8
Co	2.65	2.8	2.9
Cu	2.7	2.9	3.1
Cd	2.8	2.95	3.3
Ni	2.85	3.0	3.1
Ca	3.4	3.9	4.6
Sr	3.85	4.95	6.25
Hg	5.1	7.2	9.7
Pb	5.4	7.5	10.1
Ba	6.15	8.7	11.6

Note: The constants given in this table are referred to H⁺. To calculate K_{A⁺}^{B⁺ from K_{H⁺}^{A⁺ and K_{H⁺}^{B⁺, use the formula K_{A⁺}^{B⁺ = K_{H⁺}^{B⁺/K_{H⁺}^{A⁺.}}}}}}

表 2 - 2 陰離子選擇係數(強鹼性陰離子交換樹脂)⁽¹⁷⁾

Ion	Relative Affinity	
	Type I*	Type II†
Hydroxide (reference)	1.0	1.0
Benzenesulfonate	500	75
Salicylate	450	65
Citrate	220	23
Iodide	175	17
Phenoxyde	110	27
Bisulfate	85	15
Chlorate	74	12
Nitrate	65	8
Bromide	50	6
Bromate	27	3
Nitrite	24	3
Chloride	22	2.3
Bicarbonate	6.0	1.2
Iodate	5.5	0.5
Formate	4.6	0.5
Acetate	3.2	0.5
Fluoride	1.6	0.3

* Reactive group, $-\text{CH}_2\text{N}^+(\text{CH}_3)_3$.

† Reactive group, $-\text{CH}_2\text{N}^+(\text{CH}_3)_2\text{C}_2\text{H}_4\text{OH}$.

Note: The constants given in this table are referred to OH^- .

To calculate $K_{\text{A}^-}^{\text{B}^-}$ from $K_{\text{OH}^-}^{\text{A}^-}$ and $K_{\text{OH}^-}^{\text{B}^-}$, use the formula $K_{\text{A}^-}^{\text{B}^-} = K_{\text{OH}^-}^{\text{B}^-}/K_{\text{OH}^-}^{\text{A}^-}$.

表 2-3 影響離子交換樹脂對離子選擇性的因素⁽¹⁵⁾

外來因素(External factors)

溫度(Temperature)

壓力(Pressure)

溶液中總離子濃度(Total ionic concentration in solution)

交換樹脂中反離子濃度比(Ratio of concentration of the counter ions of the exchanger)

溶劑介質(Solvent medium)

溶液中存在之其他物質，例如錯合劑(Presence of other substances in solution, e.g., Complexing agents)

反離子型式(Kind of Counterions)

尺寸大小(size)

型狀(Shape)

電荷(Charge)

特別因素，例如電子結構，極性，媒介，錯合能力

(Special factors, e.g., electronic configuration, polarizability, solvation, complexing power)

離子交換樹脂型式(Kind of Ion Exchange)

極基型式(Kind of polar group)

交換容量(Exchange Capacity)

極基分佈(Distribution of polar group)

負荷程度(Degree of loading)

表 2-3 (續)

交連程度 (Degree of cross-linking)

顆粒大小 (Particle size)

孔隙大小和分佈 (Size and Distribution of pores)

矩構中特殊組成 (Special constituents on matrix)

反應時間和預處理 (Reaction Time and Pretreatment)

三、離子交換樹脂的型式

早期離子交換的材料為天然或人工合成的沸石(zeolites)，其為鋁鹽和矽酸鹽混合的礦物質。當此種材料以食鹽水將其轉化成鈉型時，能有效地應用於水質軟化。然而，由於其交換容量低，同時此礦物質會溶解，使處理水中的矽含量增加，因此在1930年代後期，人工合成的樹脂被研究推廣出後，直到今日大部的離子交換樹脂都是採用聚合矩體(polymer matrix)的合成材料。

人工合成離子交換樹脂是由一聚合矩體，通常為聚苯乙稀鏈(Polystyrene chains)藉二乙稀苯連結(divinylbenzene crosslinks)而成，和附著在聚合體鏈上之溶解性離子作用基組合而成。而在樹脂上作用基的總數和型式決定樹脂的交換容量和離子選擇性，聚合矩體則提供為樹脂的不溶解性韌度(toughness)。圖3.—1所示即為一陽離子交換樹脂製造的反應式，其先將苯乙稀聚合化，然後以二乙稀苯連結，則所形成的樹脂再磺酸化，使可離子化的磺酸基附著在樹脂上⁽¹⁸⁾。

離子交換樹脂一般可分為下列幾種型式：

- (1) 陽離子交換樹脂
 - ① 強酸性交換樹脂
 - ② 弱酸性交換樹脂
- (2) 陰離子交換樹脂
 - ① 強鹼性交換樹脂
 - ② 弱鹼性交換樹脂

表3.—1所示為上述分類離子交換樹脂之作用基和解離常數，而其交換反應和所使用的再生劑則示如表3.—2。另，典型常用的離子交換樹脂其操作特性如表3.—3所示，一般強酸和強鹼性樹脂可在所有PH值範圍內操作，但其交換容量較小，而必須經常再生，此外又因再生效率較差，致所需化學藥劑費較高。弱酸和弱鹼性樹脂具有較高的交換容量，再生效率亦高，所需

再生劑量少，但僅能在有限的 PH 值範圍內操作。詳細有關各類型離子交換樹脂的特性，包括樹脂顆粒形狀、體密度、水份含量、交換時之膨脹率、最大操作溫度、操作 PH 範圍、交換容量等，則示於附錄二，以供選擇離子交換樹脂時之參考。但個別有關各離子交換樹脂的規格和特性，在選購時，則可洽詢製造商，提供詳細資料。目前，國內尚無離子交換樹脂的製造商，表 3.—4 所列則為世界上主要的離子交換樹脂製造公司和商品名。

近年來，具有高選擇性的鉗合樹脂 (Chelate resins) 已被發展出來，此種樹脂對某些毒性的重金屬，較其他無毒性的離子，具有相當高的選擇性（如附表 1.—3 和附表 1.—4 所示），例如 Dowex A—1 鉗合樹脂，含有亞胺二乙酸基 (iminodiacetic groups) 附著於其聚合體上，而使得此樹脂對重金屬具有鉗合作用。此種對重金屬具有高親和力的特性，使得鉗合樹脂，已被^{用於}從含高濃度背景其他離子（例如：Ca, Mg, Na 等）的廢水中，直接將毒性的重金屬去除。表 3.—5 所列為目前市面上已有的鉗合樹脂⁽²¹⁾。

此外，離子交換樹脂依其結構與孔隙大小，又可概略分成膠化體 (Gel) 和巨大孔隙 (Macroporous) 兩大類，前者孔隙小於 40 Å，適用於無機離子之交換，而後者除孔隙較大外，其粒子內部尚含有廣大的表面積，故可適用於較大有機離子的交換，但其再生效率不高是為其缺點。

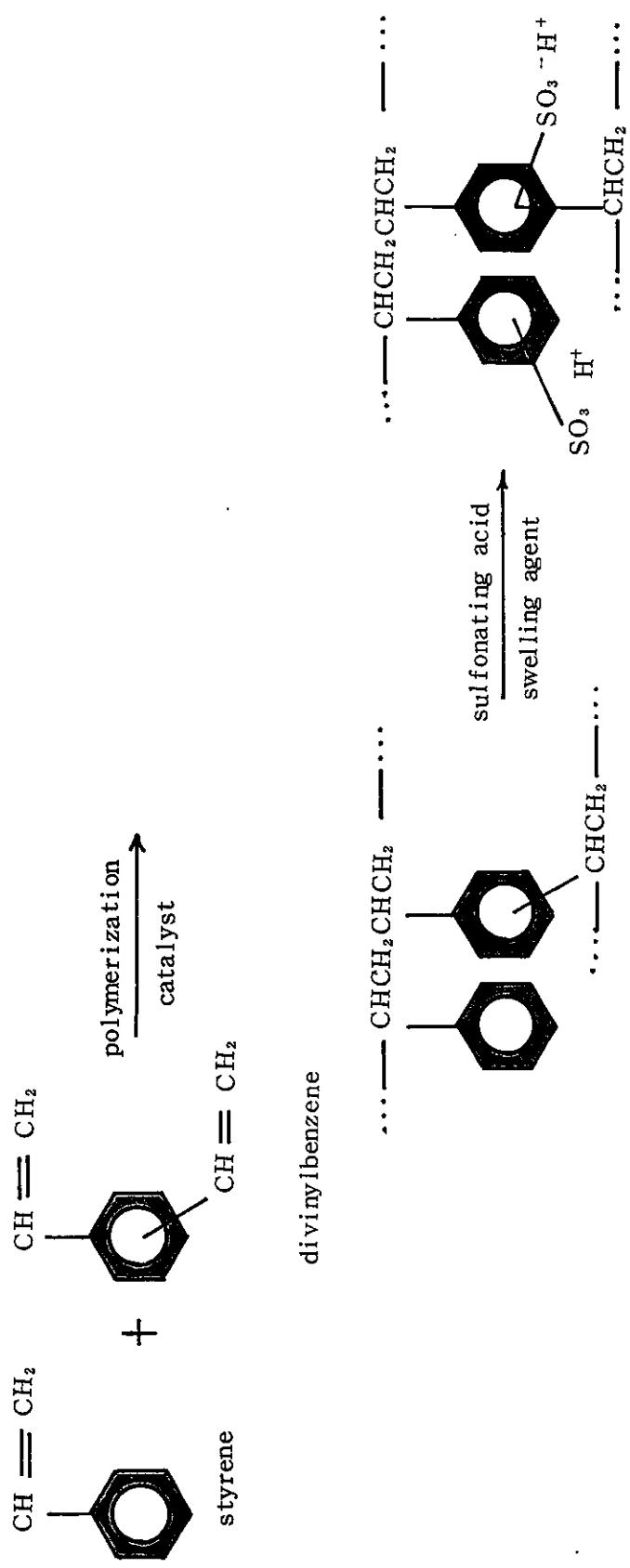


圖 3—1 陽離子交換樹脂製造之化學反應式 (18)

表 3-1 離子交換樹脂分類表⁽¹⁹⁾

分類	交換基	解離常數	典型的結構
<u>陽離子交換樹脂</u>			
強酸性	Sulfonic	1	
	Methylene sulfonic	1	
弱酸性	Carboxylic	4-6	
	Phosphonic	2-3 7-8	
	Phenolic hydroxyl	9-10	
	<u>陰離子交換樹脂</u>		
強鹼性	Quaternary ammonium (type I)	13	
	(type II)		
弱鹼性	Primary amine	6-9	
	Secondary amine	7-9	
	Tertiary amine (aromatic matrix)	9-11	
(aliphatic matrix)			
			

表 3-2 各型離子樹脂的交換反應和再生劑⁽¹⁴⁾

Strongly acidic cation exchangers

a. Hydrogen form, regenerate with HCl or H₂SO₄

$$2R-SO_3H + Ca^{2+} \rightleftharpoons (R-SO_3)_2Ca + 2H^+$$

b. Sodium form, regenerate with NaCl

$$2R-SO_3Na + Ca^{2+} \rightleftharpoons (R-SO_3)_2Ca + 2Na^+$$

Weakly acidic cation exchanger

a. Hydrogen form, regenerate with HCl or H₂SO₄

$$2R-COOH + Ca^{2+} \rightleftharpoons (R-COO)_2Ca + 2H^+$$

b. Sodium form, regenerate with NaOH

$$2R-COONa + Ca^{2+} \rightleftharpoons (R-COO)_2Ca + 2Na^+$$

Strongly basic anion exchanger

a. Hydroxide form, regenerate with NaOH

$$2R-R'NOH + SO_4^{2-} \rightleftharpoons (R-R'N)_2SO_4 + 2OH^-$$

b. Chloride form, regenerate with NaCl or HCl

$$2R-R'NCl + SO_4^{2-} \rightleftharpoons (R-R'N)_2SO_4 + 2Cl^-$$

Weakly basic anion exchanger

a. Free base or hydroxide form, regenerate with NaOH, NH₄OH, or Na₂CO₃

$$2R-NH_3OH + SO_4^{2-} \rightleftharpoons (R-NH_3)_2SO_4 + 2OH^-$$

b. Chloride form, regenerate with HCl

$$2R-NH_3Cl + SO_4^{2-} \rightleftharpoons (R-NH_3)_2SO_4 + 2Cl^-$$

表 3—3 典型常用的離子交換樹脂⁽²⁰⁾

Type Resin	Functional Group	Drained Density			Operating		Maximum Exchange Capacity			Trade Name Example
		lb/ft ³	kg/m ³	pH Range	me/ ml	g/ ml	kgr/3 ft	Regen- eration.		
Strong Acid	-SO ₃ ⁻ H ⁺ Sulfonic acid	49-53	790-850	0-14	4.8	2.0	43.7	Excess strong acid	Duolite C-20 Amberlite 120 Dowex 50	
Weak Acid	-COO ⁻ H ⁺ Carboxylic acid	45	720	7-14	11	4.5	98.3	Weak or strong acid	Duolite C-433 Amberlite IRC-50 Zeo Carb 226	
Strong Base Type I	-CH ₂ N(CH ₃) ₃ + OH ⁻ Quaternary ammonium	45	720	0-14	4.3	1.3	28.4	Excess Strong base	Ambertite IRA-410 Duolite A-101 D	
Strong Base Type II	-CH ₂ N(CH ₃) ₂ CH ₂ OH ⁺ OH ⁻ Modified quaternary ammonium	45	720	0-14	3.4	1.4	30.6	Excess strong base	Ambertite IRA 140 Duolite A-102 D	
Weak Base	-N(CH ₃) ₂ H ⁺ OH ⁻ Tertiary amine	32	510	0-6	9	2.5	54.6	Weak or strong base	Duolite A-7 Amberlite IRA-93	
Interme- diate Base	Mix of above two	43	690	0-14	8.8	2.7	59.0	Strong base	Duolite A-30B	

表 3—4 合成離子交換樹脂之主要製造廠商⁽¹⁸⁾

Company	Country	Tradename(s)
Akzo	Holland	Imac
Bayer	FRG	Lewatit
Chemolimflex	Hungary	Varion
Diamond Shamrock	United States	Duolite
Diaprosim	France	Duolite
Dow	United States	Dowex
Ionac	United States	Ionac
Mitsubishi	Japan	Diaion
Montecatini	Italy	Kastel
Ostion	Czechoslovakia	Ostion
Permutit	UK	Zeocarb, Deacidite, Zerolit
Permutit A.G.	FRG	Orzolith, Permutit
Resindion	Italy	Relite
Rohm & Haas	United States	Amberlite
Wolfen	GDR USSR	Wofatit AW-, AV-, KB-, KU-

* Does not include ion-exchange (resin) membranes.

表 3—5 鍍合樹脂的主要型式 (2)

Manufacturer	Resin Designation	Chelate Complex	Chemical Composition of Active Groups
Akzo Chemie	IMAC GT-73	weakly acidic	$-C(NH_2)-N(OH)-CH_2COONa$
Diamond Shamrock	Duolite ES-346 Duolite ES-466 Duolite ES-467 Dowex A-1	amidoxime iminodiacetic acid amino-phosphonic iminodiacetic acid weakly basic group weakly basic group carbamate	$-CH_2-NH_2-C(=O)-NH-CH_2COONa$ $-CH_2-NH_2-C(=O)-P(=O)(OH)_2-CH_2COONa$ $-CH_2-NH_2-C(=O)-NH-CH_2COONa$ $-CH_2-NH_2-C(=O)-NH-CH_2COONa$ $-NH-C(=S)SH$ $-CH_2-NH_2-C(=O)-NH-CH_2COONa$ $-CH_2-NH-(C_2H_5NH_2)_2H$ $-CH_2-NH_2-C(=O)-NH-CH_2COONa$
Nippon Soda	Dowex XF-4195 Dowex XF-4196 Nissos ALM-525	iminodiacetic acid polyamine ethyleneimine iminodiacetic acid	cyclohexyl-NH_2 $-CH_2-NH_2-C(=O)-NH-CH_2COONa$ $-CH_2-NH_2-C(=O)-NH-CH_2COONa$ $-CH_2-NH_2-C(=O)-NH-CH_2COONa$
Mitsubishi	Diaion CR-10	pyridine type	
Rohm and Haas	Diaion CR-20 Diaion CR-40 Amberlite ICR-718	iminodiacetic acid ethylenimine iminodiacetic acid	
Sumitomo	Sumichelate CR-2	mixture of products of a culture (mycelium)	
Unileca	Unicellex UR-10	iminodiacetic acid	
East Germany	Wofatit UR-10	isothiouronium	
Czechoslovakia	Biosorbent M	isothiouronium	
Bayer	TP-207	phenol-piperazine isothiouronium	
Ayalon	Srafion NMR		
Cairo	Sirorez-Cu		
Ionac	Ionac SR-3		
Sumitomo	Sumichelate Q-10		

四、離子交換的操作

離子交換系統的操作一般有四種方式：回分式（batch），固定柱床式（fixed-bed），流體床式（fluidized-bed）和連續式（continuous），其中以固定柱床式為最普遍採用的方式。典型的固定柱床如圖4—1所示，而其操作循環（operating cycle）包括四個主要的步驟：交換（service），反洗（backwash），再生（regeneration），和洗滌（rinse）。

(1) 交換 (service)

當廢水通過柱床時，交換反應首先發生於柱床上部，所欲去除的特定離子與新鮮樹脂中的反離子產生交換反應。當柱床上部的樹脂與入流廢水中的離子濃度達到平衡時，則柱床上部的樹脂成飽和（exhausted）狀態，此時交換區（exchange zone）向柱床下部逐漸前進，直至交換區貫穿柱床部，或處理水中離子濃度超過所設定之放流水標準值時，則停止操作，如圖4—2所示。

在設計一離子交換處理系統或選擇離子交換樹脂時，樹脂的交換容量（exchange capacity）是一非常重要的因子，因其影響程序的效率和系統的成本。離子交換樹脂的交換容量，有兩種表達的方式，一為總容量（total capacity），或稱為理論容量或最終容量（theoretical or ultimate capacity）；另一為操作容量（operating capacity）或貫穿容量（breakthrough capacity）。總容量是每單位

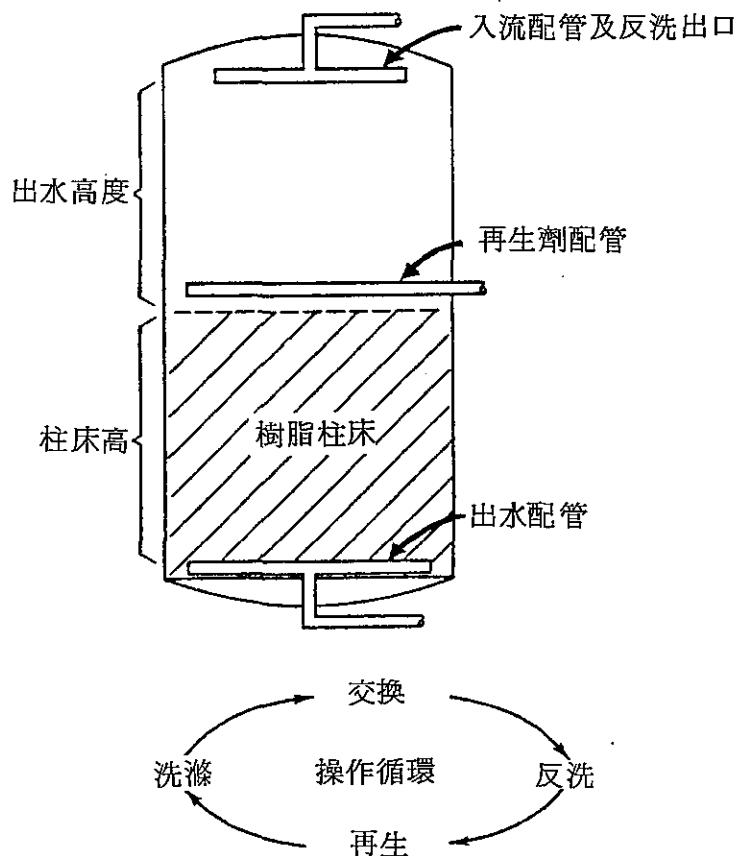


圖 4-1 離子交換固定柱床和其操作循環⁽¹⁸⁾

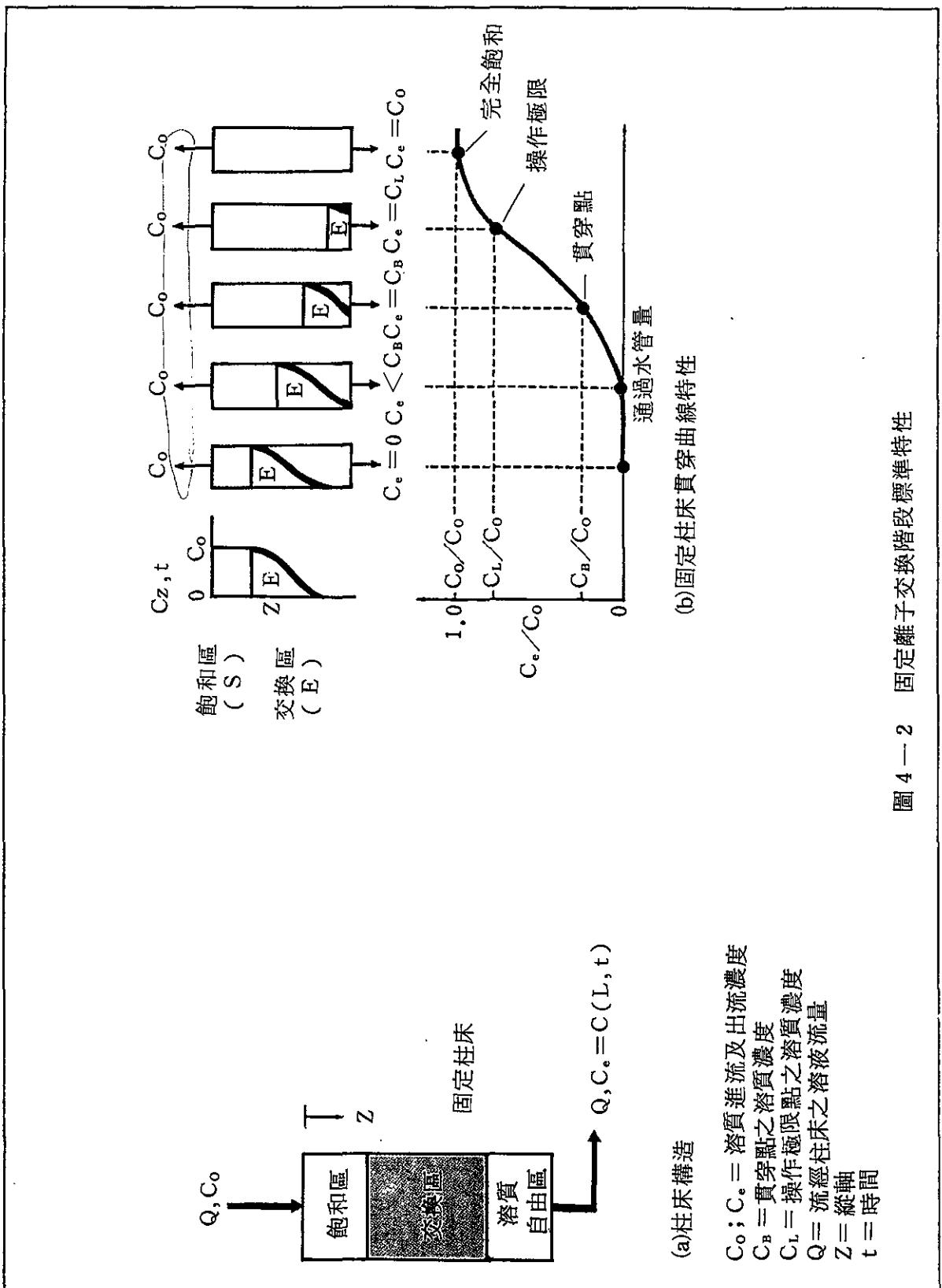


圖 4—2 固定離子交換階段 標準特性

質量或每單位體積樹脂，理論上所能交換的總離子數量，（其表示單位有： meq/L , eq/L , grains as $\text{CaCO}_3/\text{ft}^3$, Kilograins as $\text{CaCO}_3/\text{ft}^3$, meq/g 等）。操作容量是在一特定的操作情況，柱床從一溶液中，所能去除交換的實際離子數量，此亦即當處理水的離子濃度達到所設定的排放標準（貫穿濃度）時，柱床內離子交換樹脂所能去除的離子數量。

上述交換區在柱床中移動的情形，可以用貫穿曲線（如圖 4—2b）來表示。交換區在柱床中下移時，其前側（front）的形狀，對柱床操作時，決定樹脂使用效率（utilization efficiency）是相當重要的。前側形狀愈接近一水平線（貫穿曲線愈接近一垂直線），則樹脂的使用效率愈高，換而言之，樹脂的操作容量愈接近理論容量。

通常影響貫穿容量的因素有：流經柱床的流率，柱床深度，選擇係數，交換離子的尺寸，再生劑的使用量，流入溶質的成份和濃度、溫度、處理水的水質等。Helfferich⁽²²⁾指出下列情形可獲得較高的貫穿容量或較大的柱床使用效率：

- ①樹脂對離子具有高親和力
- ②升高溫度
- ③高體積容量
- ④較小的樹脂顆粒
- ⑤較均勻的樹脂顆粒
- ⑥高孔隙率
- ⑦低流率
- ⑧流入水中含較低的離子濃度
- ⑨較高的柱床深度

(2) 反洗 (backwash)

當離子交換樹脂已達到操作容量後，則以部份處理水反沖洗樹脂柱床，以備樹脂接受再生。反洗的目的有：①打散成團 (clump) 的樹脂，②去除樹脂柱床內因過濾作用而陷入的微細懸浮物質，③消除空氣孔穴，和④再重組樹脂柱床，使成均勻分佈，以避免操作時水流的槽化現象

(channeling)。

(3)再生 (regeneration)

再生是將在交換階段樹脂所交換來的離子洗出，使樹脂，依再生劑的使用量，回復到原有的交換容量或所期望的容量程度，及原有的離子型態 (ionic form) 通常，礦酸被用來再生陽離子樹脂，鹼被用來再生陰離子樹脂。

為了使再生所需時間和再生劑用量為最小，選用之再生劑必須要能提供一最大尖峰洗出液離子濃液 (elute concentration)，並伴隨一最小的洗出液濃度尾巴 (tailing)，如圖 4—3 所示。若交換系統被回復到其初始的交換容量，則再生時從樹脂中被洗出的離子當量數，必等於操作階段時被交換的離子當量數。

再生效率 (regeneration efficiency) 被定義為：再生時從樹脂中移除的總離子當量數和再生劑溶液中所含有的總離子當量數之比值。一般而言，所有可交換的離子，均能從樹脂中洗出，使樹脂回復至原有的總交換容量，然而在許多時候，此須要使用大量的再生劑，而使得操作費用變為昂貴，故此，再生操作通常僅回復部份有效的交換容量 (30~65%) 。

弱離子交換樹脂的再生效率均較強離子交換樹脂的為大，此乃因弱離子交換樹脂對 H^+ 或 OH^- 級子具有較大的親和力，此亦即弱離子樹脂較易再生，而達到相互交換程度所需再生劑量較強離子樹脂為少。

(4)洗滌 (rinse)

在再生階段之後，樹脂柱床回到交換階段之前，必須洗滌，使得柱床內沒有過剩的再生劑。洗滌通常使用處理水，其包括兩個步驟，首先是慢洗 (slow rinse)，其流率與再生操作之流率相同，係將一柱床體積之再生劑溶液洗出，此部份之廢液可和再生廢液一同處置，接著是快洗 (fast rinse)，將過剩的離子洗出，而此部份之廢液經常是被收集貯存起來，以做為配置再生劑之稀釋水。

固定柱床系統，在交換階段可有向下流 (down flow) 或向上流 (up flow) 的兩種操作方式，同樣地在再生階段亦可有向下流或向上流的形式。當交換時之流向與再生時之流向相反，此種形式的操作稱之為反流向。

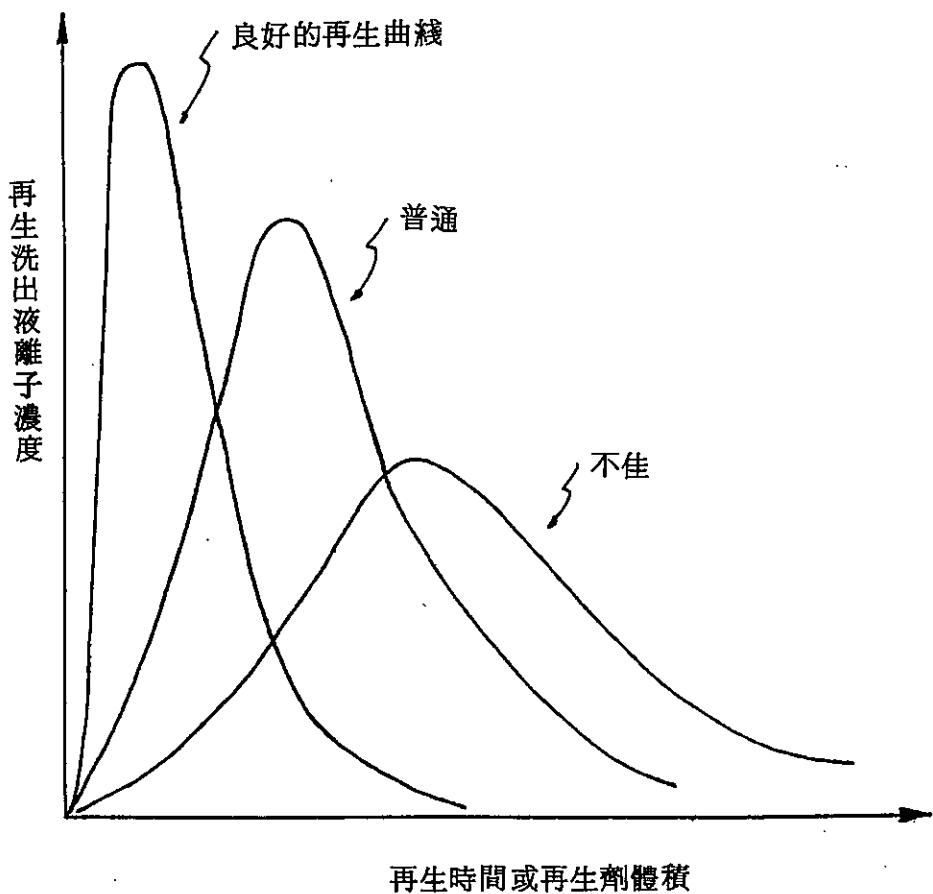


圖 4—3 各種再生曲線的變化

離子交換 (countercurrent ion exchange)，當交換和再生兩階段之流向均相同時，謂為同流向離子交換 (co-current ion exchange)。根據 Abrams⁽²³⁾指出，反流向離子交換較適用於強酸性陽離子或強鹼性陰離子交換樹脂。因為此類樹脂在再生時為非有利的平衡 (unfavorable equilibrium)，即樹脂對被交換的離子具有非常大的親和力，而使得再生時，需相當大超量的再生劑以再生樹脂柱床，然而，即使使用了超量的再生劑，在柱床出水口末端的樹脂仍然無法完全被再生，如此，在下一循環交換階段開始時，若使用同流向操作方式，將會導致嚴重的柱床滲漏現象 (leakage)，上述情形如圖 4.—4 所示。

此外，Abrams⁽²³⁾比較反流向離子交換和同流向離子交換的操作，當應用於強離子樹脂時，反流向離子交換操作有如下的優點：

- ①在交換階段時，離子的滲漏量較少。
- ②再生劑的消耗量較少。
- ③再生廢液的數量減少。
- ④淋洗和反沖洗時所耗水量較少。

當然，必須瞭解的，反流向操作對於弱離子樹脂並無益處。

除了上述反流向操作可以減少離子滲漏外，在祛礦質操作時 (deminer-alization operation)，以 H 型陽離子交換樹脂和 OH 型陰離子交換樹脂的混合柱床 (mixed bed)，亦可避免離子的滲漏。因為當酸生成 (H 級子釋出) 時，立即與陰離子樹脂的 OH⁻ 中和，而生成水，致不會產生內部再生 (internal regeneration) 的現象，而可顯著地減少離子滲漏。

圖 4.—5 所示為一混合樹脂柱床的再生步驟。混合柱床再生時，必須先將陰、陽離子樹脂分開，此並不困難，因陰、陽離子樹脂的密度不同，藉反沖洗即可上下分開。再生後，樹脂必須再混合，一般藉吹入空氣使均勻混合。

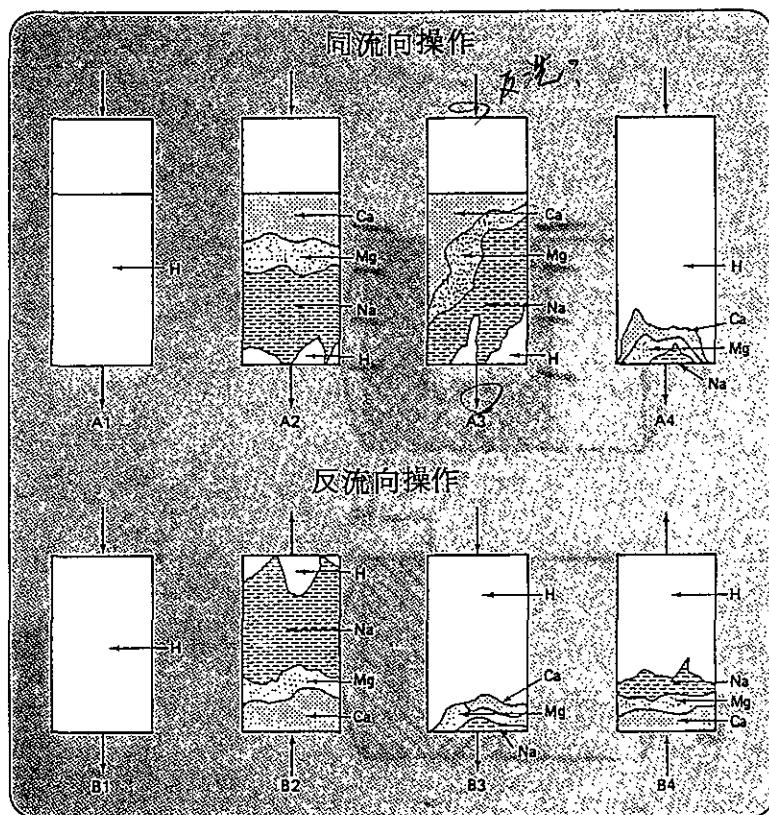


圖 4—4. 離子在樹脂柱床內分佈的情形。(A1)為樹脂完全轉化成H型。(A2)為柱床在向下流交換階段後，Ca,Mg,Na,H等離子分佈的情形。(A3)為經反洗後，樹脂柱床因擴張，使樹脂顆粒自由混後，離子成零亂的分佈。(A4)為向下流再生後，H離子將柱床內之離子取代，僅有柱床底部殘餘有Ca,Mg,Na離子，當下一循環交換反應開始後，柱床上部所釋出之氫離子，將會與底部殘餘的離子產生反應，造成“滲漏現象”，通常滲漏出的離子為Na，因其易與氫離子產生交換反應，若上部所釋出氫離子濃度很高，則Mg，甚至Ca亦可能從柱床中漏出。(B1)為柱床再生後，預備採向上流交換操作，向下流再生的反流向操作。(B2)為交換反應後，離子在柱床內分佈的情形，其與(A2)相似，但方向相反。(B3)為向下流再生後，離子分佈的情形，其與(A4)相似。(B4)為下一循環向上流交換操作時，因所有的交換反應皆發生於柱床入流口，而非出流口，故完全沒有滲漏。

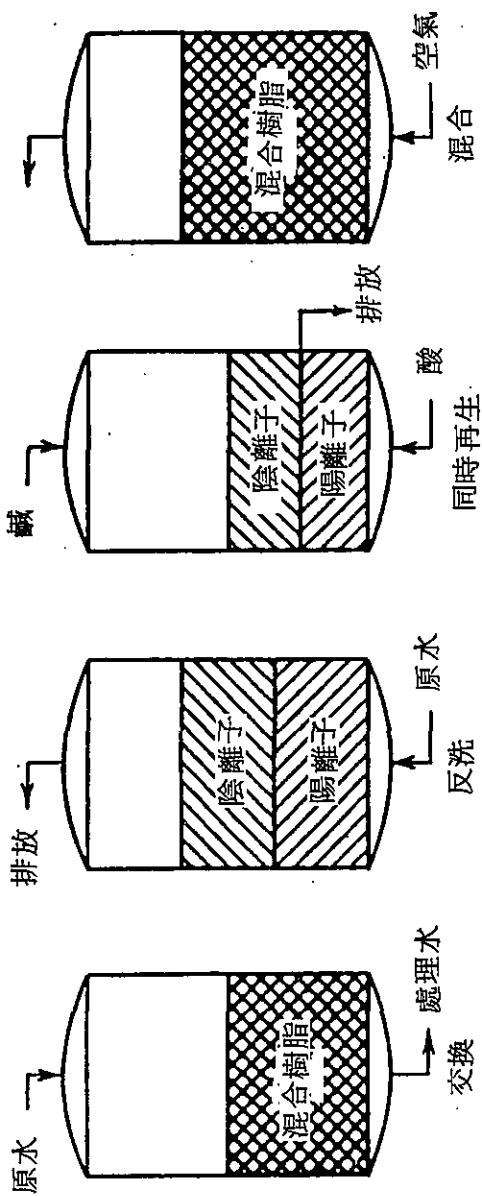


圖 4—5 混合床的再生步驟

五、離子交換的應用

離子交換應用的範圍相當地廣泛，從早期僅是簡單的離子間的交換，至今日應用至複雜的單元程序，例如在生化實驗室用來分離胺基酸 (amino acid)，核磷昔 (nucleotide) 和碳水化合物 (carbohydrate)，或在工業上用來分離稀土 (rare earths) 和放射核種 (radioactive nuclide)。至於離子交換樹脂的一般應用則分述如下⁽¹⁵⁾⁽²⁴⁾：

(1) 藉與無害性的離子 (innocuous ions) 產生交換以去除不喜歡的離子 (undesirable ions)

例 1：水質軟化去除 Ca^{+2} , Mg^{+2} , Fe^{+2} , Mn^{+2}

樹脂 (Exchanger) —— 陽離子交換樹脂，Na 型

再生劑 (Regenerant) —— NaCl

處理水 (Effluent) —— Na^+ 取代二價金屬

再生廢液 (Regenerant effluent) ——

Ca^{+2} , Mg^{+2} , Fe^{+2} , Mn^{+2} 的氯化物和過剩 NaCl

例 2：去除硝酸鹽 (nitrate)

樹脂 —— 陰離子交換樹脂， Cl^- 型

再生劑 —— NaCl

處理水 —— Cl^- 取代 NO_3^-

再生廢液 —— NaNO_3 , NaCl 和某些 Na_2SO_4 (假如 SO_4^{2-} 存在)

(2) 藉濃縮或再生回收有價值的物質

例 1：從洗滌水 (rinse solution) 中回收銅 (原水 Cu^{+2} 含量在 ppm 範圍)。

樹脂 —— 陽離子交換樹脂，H 型

再生劑 —— H_2SO_4 , 10 %

處理水 —— 酸性負離子存在

再生廢液 —— 初始含 CuSO_4 大於 10 %

例 2：從氰化金洗滌水中回收金

樹脂 —— 陰離子交換樹脂，Cl 型，Typel，或 Pyridine 型

處理水—— Cl^- 取代氯離子和氧化金錯合物

再生——樹脂不再生而將其焚化回收金

(3) 將鹽類轉化成酸或另一種型式的鹽類

例：硝酸鈣轉化成硝酸鈉

樹脂——陽離子交換樹脂，Na型。

處理水—— NaNO_3

再生劑—— NaCl

再生廢液—— CaCl_2 和一些 NaCl

(4) 配置溶膠 (Sols)

例：水玻璃 (sodium silicate) 溶液配置或溶膠

樹脂——陽離子交換樹脂，H型

處理水—— H_2SiO_3

再生劑—— H_2SO_4

再生液出口—— Na_2SO_4 和一些 H_2SO_4

(5) 溶液純化 (purification of solutions)

例 1：從濃鹽酸 (HCl) 中去除鐵 (FeCl_4^-)

樹脂——陰離子交換樹脂， Cl^- 型，強鹼性

處理水——HCl 不含 Fe^{+3}

再生劑—— H_2O

再生廢液—— FeCl_3

例 2：從甲醛 (formaldehyde) 中去除甲酸 (formic acid)

樹脂——陰離子交換樹脂。OH型

處理水——甲醛溶液不含甲酸

再生劑—— NaOH

再生液出口——甲酸鈉 (sodium formate)

(6) 部份脫鹽 (Partial desalination)

例：從水中去除次碳酸鹽， $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 或 NaHCO_3

樹脂——弱酸性陽離子交換樹脂，H型

處理水—— $\text{H}_2\text{CO}_3 = \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ (除氣器去除 CO_2 ，其他陰離子不變)

再生液出口—— CaCl_2 和 / 或 NaCl

(7) 脫鹽 (Total desalination)

例：祛礦質製造純水

樹脂——陽離子交換樹脂，H型，後接陰離子交換樹脂，OH⁻型；

或前述兩種樹脂的混合床

處理水—— H_2O 或不含離子的溶液

再生劑—— H_2SO_4 和 NaOH

再生液出口——硫酸鹽和鈉鹽

(8) 分離 (separation)

例 1：分離各種離子成份，如各種銨基酸，各種稀土。

藉變化再生劑或洗出劑 (elutant) 的 PH，濃度或成分，而將各種離子成份以一已知次序從樹脂柱床中分離出。

例 2：從非離子成份中分離離子成份。

a.離子排斥 (ion exclusion) ——若樹脂對溶液中之離子，其親和力較非離子為弱，則當一已知體積量溶液中含有鹽類和丙三醇 (glycerol)，通過一陽離子交換柱床時，離子將通過，而丙三醇為樹脂顆粒截留。最後再藉水流將丙三醇釋出。

b.離子阻滯 (ion retardation) ——在此程序，使用一種特殊的離子交換樹脂，其高分子結構體上具有陽離子和陰離子的交換基。則鹽類能擴散進入交換樹脂，而非離子成份通過樹脂柱床。最後再藉水流將鹽類從樹脂顆粒中釋出。

c.酸阻滯 (acid retardation) ——例如溶液含有 AlPO_4 和 H_3PO_4 ，將此溶液通過一陽離子交換柱床， AlPO_4 鹽類將通過柱床，而 H_3PO_4 為樹脂顆粒截留。當分離容量達到時，再以水流將磷酸釋出。

例 3：離子篩離 (sieving of ions)

假若樹脂孔隙 (Pores) 較離子為小，則此離子將通過柱床，而較小的離子將與樹脂反應。

(9) 過濾 (Filtration)

例：藉粉狀離子交換樹脂去除非常細顆粒。過濾可被用來去除放射核種，然後當水頭損失達到一臨界值時，則將樹脂丟棄。所使用樹脂為一混合 H 型和 OH 型或 NH₄ 型和 OH 型的混合床。此已使用過遭污染的含放射性之顆粒之樹脂，其處置必須符合特別的法規。

(10)輸送介質 (Transport media)

例：放射性銫 (cesium) 藉無機性陽離子樹脂裝運至一特殊目的地點，然在此以一再生劑將銫從樹脂中洗出，已再生的樹脂，則被運回原裝運點，以做為下次輸送的介質。此程序對於裝運高危險性的核種是相當安全的。

(11)溶劑脫水 (Dehydration of solvents)

例：離子交換樹脂對水具有高親和力，所以溶劑能藉乾離子交換樹脂而迅速脫水。

(12)緩慢釋出劑 (slow release agent) —— 用在醫學上

例：從一離子交換顆粒中擴散出一可交換的離子，主要依離子的大小和孔隙率，此種特性已被用來做為緩慢釋出藥劑 (drug) 。

(13)觸媒劑

例：H 型陽離子交換樹脂，可被用來做為固體酸性觸媒劑，其很容易與反應產物分離。

(14)溶解劑

例：固體 ZnS 或 AgCl 能很快地與離子交換樹脂反應，此已被應用在組織學研究上從骨頭中去除石灰質。

(15)非電解質的吸附劑

例：離子交換樹脂能夠吸附許多有機化合物，其然後能被釋出或洗出，如丁醇 (butyl alcohol)，甲醛等。

(16)沈澱劑

例：銀型陽離子交換樹脂被用來從溶液中去除硫酸鹽，因形成的 BaSO₄ 是不溶解性，同時能很快地與樹脂分離。Ag 型離子交換樹脂被用來做海水脫鹽，其藉 AgCl 的沈澱和 Na 與樹脂上 Ag 交換去除。

(17)分析工具 (Analytical tool)

例：在實驗分析上，離子交換樹脂被用來濃縮，分離和純化微量離子。

(18) 選擇性離子的障礙體 (Selective ionic barriers)

例：離子交換薄膜 (ion-exchange membrane) 被用來做為一障礙體，以阻止相反電荷的離子通向反離子。離子交換薄膜亦被用在電透析 (electrodialysis)，因其對可滲透的離子具有高選擇性。

除了上述之外，傳統上離子交換單元在水處理的應用上，主要是軟化硬水和祛礦質製造純水，以供工業用水的使用。有關此方面的應用和操作原理，對本省工業界而言，已是相當熟悉，本文不再贅述，詳細相關的資料，可參考高肇藩教授所著“工業用水”一書⁽²⁵⁾。

此外，在國外離子交換單元應用於污染防治上已是相當普遍，例如：在飲用水方面，用來去除硝酸鹽；在都市廢水方面，用來去除氨氮；在金屬表面處理業和電鍍工業方面，用來(1)回收有用物質，(2)管末重金屬污染物處理，和(3)循環回收廢水。本文以下將分別加以討論敘述。

5.— 1. 營養鹽 (nutrients) 的處理和回收

由於人口集中及過度使用礦物質肥料，使得集水區或水源，因營養鹽的排入，造成優養化現象，進而使得水質惡化。為了要去除這些營養鹽，必須在廢水排放前及水使用前加以處理。離子交換被應用在飲用水的處理上，主要為去除硝酸鹽，以保護健康。有關於硝酸鹽的去除方式，Clifford⁽²⁶⁾指出採用單床，Cl 型強鹼性陰離子交換樹脂，可適用於含總溶解固體 (TDS) 1000mg/l 的給水系統，但當樹脂飽合後，需以 NaCl 為再生液再生，然而由於再生廢液的處理困難，所以又提出另一方式，採用雙床，包括一強酸性陽離子交換柱床，其後跟著一弱鹼性陰離子交換柱床，而以 H_2SO_4 及 NH_4OH 分別再生，其處理流程如圖 5.— 1. 所示，此種處理方式，除了可去除硝酸鹽外，其處理水硬度較低，而再生廢液可回收做為肥料使用。

都市污水廠雖可用生物處理的方法去除生物可氧化分解的氨氮 ($\text{NH}_3^- \text{N}$)，但其處理水中仍含有其他營養鹽，如硝酸鹽和磷酸鹽，故從廢水中去除此類營養鹽，對於保護承受水體仍是相當重要的。而離子交換法用來回收廢

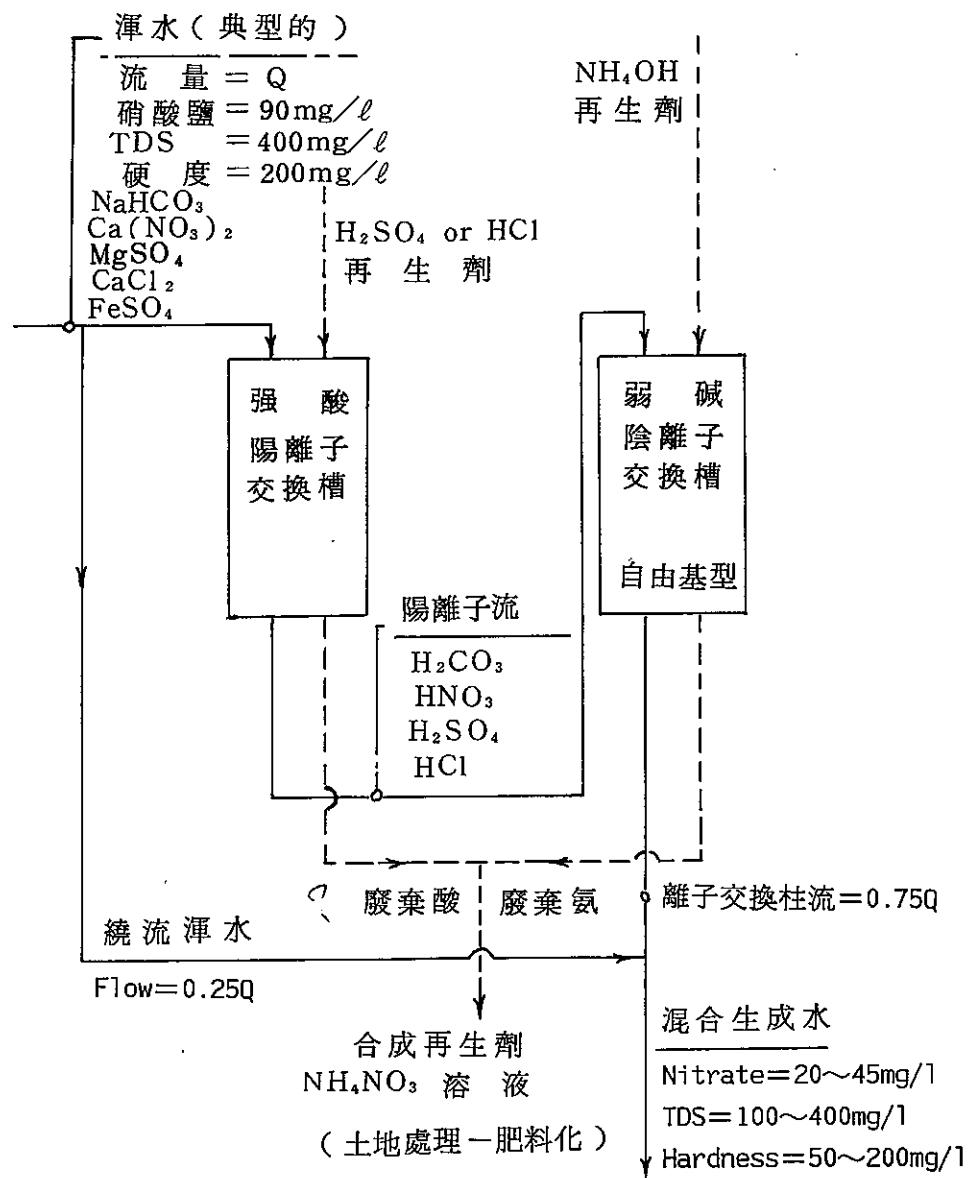


圖 5-1 硝酸鹽之離子交換處理流程

水中之氨離子和磷酸鹽離子，在國外已頗受重視。Liberti⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾以對氨離子具很高選擇的一種天然沸石(zeolite)-Clinoptilolite，吸附氨離子，並以陰離子交換樹脂吸附磷酸鹽，然後從其再生廢液中將 $MgNH_4PO_4$ 沈澱出來，以做為肥料回收使用，上述處理流程如圖 5-2 所示。

5-2 高濃度製造廢液的更新與回收 (Renovation of Exhausted Process Liquors)

高濃度製造廢液主要來自製程中的強溶液，因使用一段時間後，逐漸遭受污染，至某程度，不適合繼續使用而必須廢棄更新，例如電鍍槽廢液(Spent plating bath)。若廢棄的高濃度電鍍槽廢液，未經適當處理，直接排放至下水管線，將於短時間內，造成破壞性的污染。因此，若能將電鍍槽廢液中污染的雜質與必要的鍍槽溶液成份分離，則不但可將淨化後的電鍍槽溶液回收至製程再使用，同時可大量地減少污染物排放至承受水體。應用離子交換方法來更新和回收高濃度製程廢液，可區分為三個目標：(1)去除不要的離子，(2)回收所需化學物質，(3)將酸從鹽中分離，茲分述如下：

1.去除不要的離子 (removal of undesirable ions)

製程溶液中所含的污染離子，大部份來自酸液所溶解的金屬。典型的例子便是鍍槽溶液可能含高達 400 g/l CrO_3 ，而槽內溶液逐漸被污染，是因六價鉻被還原成三價鉻，同時其他金屬，例如鎂、鋁、鋅、銅、鎳和鐵，由所電鍍的金屬零件溶解至槽中溶液。

通常一強酸性陽離子交換柱床，能從鍍槽廢液中將不要的金屬陽離子去除，但因鍍槽廢液濃度高，具強氧化性質，故一般學者⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾建議在廢液與樹脂柱床接觸前，先加以稀釋至 CrO_3 濃度小於 200 g/l ，以避免破壞樹脂。典型的鉻槽(chromic baths)廢液回收處理流程如圖 5-3 所示，此流程是先將鉻槽廢液稀釋至 $< 200\text{ g/l}$ CrO_3 ，然後通過一強酸性陽離子交換樹脂床，去除不要的金屬離子，最後經處理後的廢液再藉蒸發濃縮至鉻槽所需成份濃度，而回至鉻槽回收使用。

上述方法最主要的缺點是需要一蒸發濃縮單元，而增加了投資費用和處理廠的操作複雜性。近來，已發現有些巨網狀樹脂(macroreticular

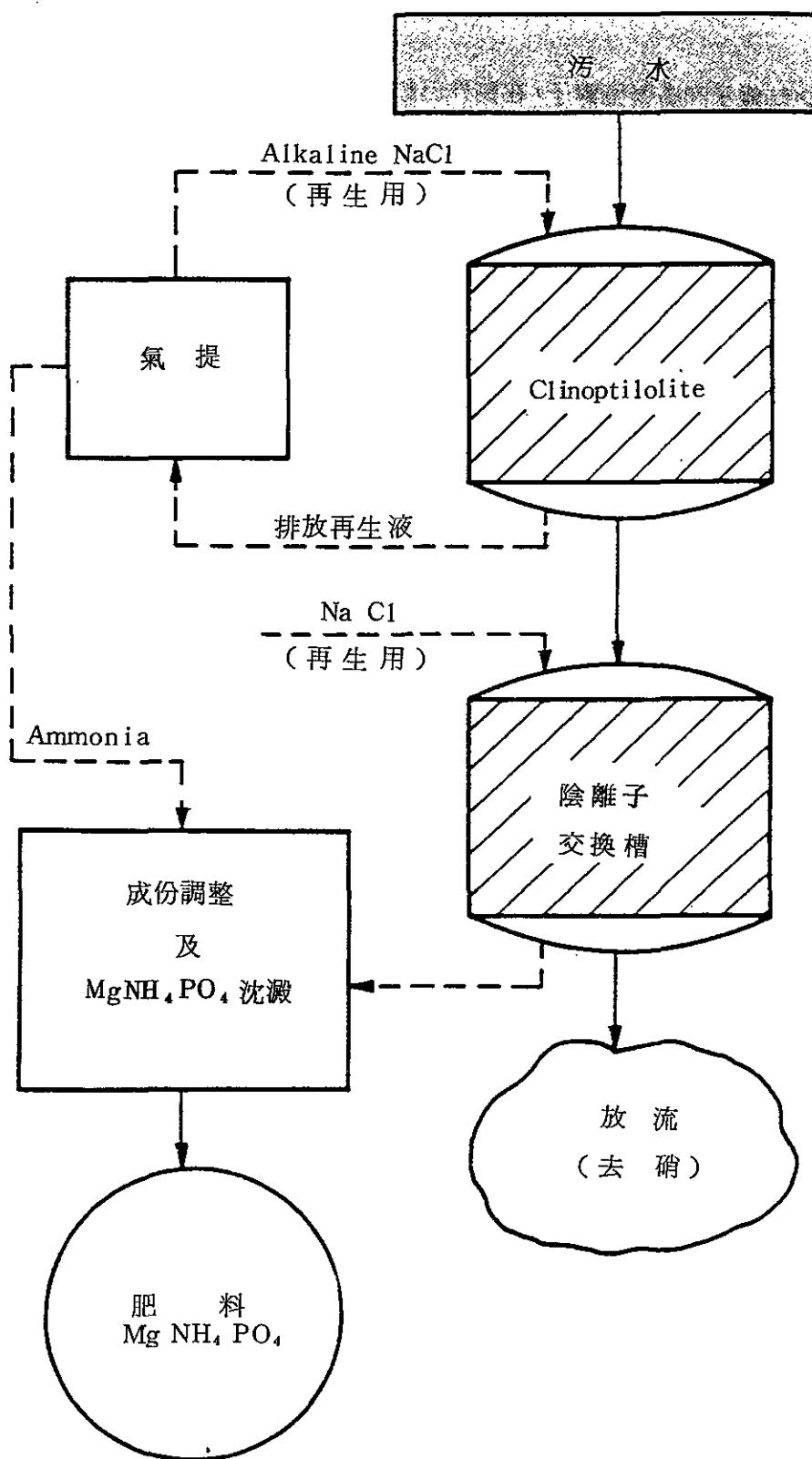


圖 5 - 2 從都市污水中回收營養鹽之處理流程

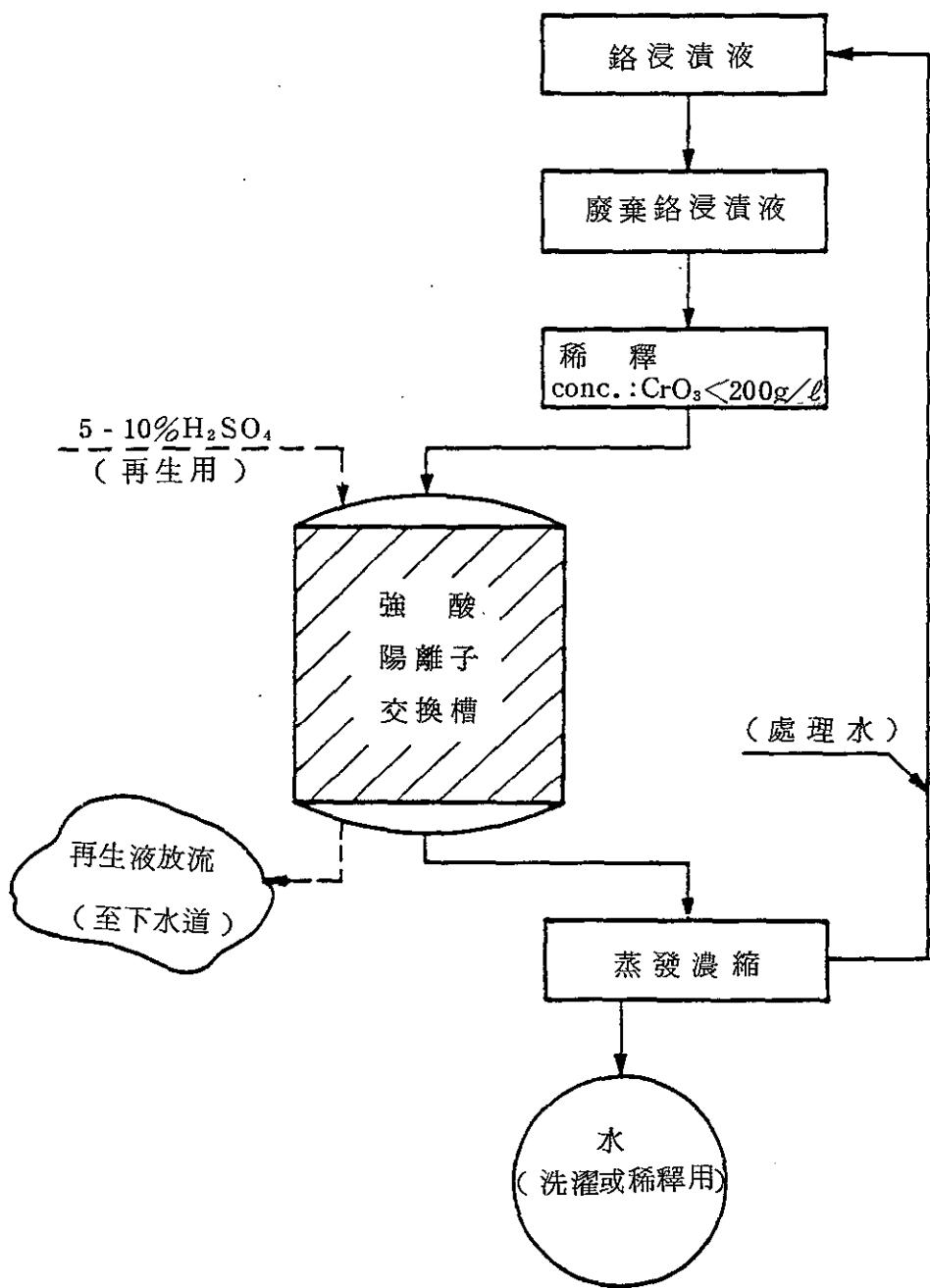


圖 5-3 鉻槽廢液更新的處理流程 (型式一)

resin)，例如Amberlite 200，能忍受鉻槽廢液高達 500 g/l CrO_3 ，而不須要事先稀釋⁽³¹⁾。

圖 5.—4.和圖 5.—5.所示為另外兩種鉻槽廢液回收的處理流程。圖 5.—4.的流程較為簡單，而其特點是部份低濃度的再生廢液被儲存起來，做為下一個循環初始的再生液使用。而圖 5.—5.所示為鍍槽廢液先以 NaOH 中和，沈澱的金屬氫氧化物再過濾分離，然後以強酸性陽離子交換柱床去除陽離子，經處理後之鍍槽溶液所含鈉離子濃度不超過 24 g/l ，而適合回收再使用⁽³²⁾。

上述鉻槽廢液處理的方法，亦適用於更新所有金屬表面處理槽 (metal finishing bath) 的廢液，例如一醋酸 (acetic acid) 和硝酸鈉 (Sodium nitrate) 的混合液，用以酸洗 (pickling) 鎂金屬薄板 (magnesium sheet)。由於酸洗液中鎂含量增加，醋酸濃度減少，使得酸洗速率逐漸減小，金屬表面的性質改變，此時酸洗廢液可藉離子交換的方法處理回收，其流程如圖 5.—6. 所示⁽³³⁾。

另一種金屬表面處理程序，用磷酸 (phosphoric acid) 來酸洗和磷酸化 (phosphating) 鐵和鋼。酸洗槽磷濃度為 $10\sim 15\% \text{ H}_3\text{PO}_4$ ，同時鐵量不可超過 3 g/l 。如同鍍鉻槽廢液回收方法，可用離子交換的方法去除鐵離子，Hesler⁽³⁴⁾指出離子交換可去除 90 % 的鐵離子。

同樣地方法，亦可用來回收鍍銅槽廢液，其中一例為製造印刷電路板的電鍍液，其主要成份為氟硼酸 (fluoboric acid)。在電鍍程序中，當鍍槽內銅含量增加時，則必須更新，研究指出使用 Amberlite 200 強酸性樹脂，可將銅含量從 21 g/l 降至 1 g/l ，使得氟硼酸可循環回至電鍍程序中使用，而樹脂可用 $5\% \text{ H}_2\text{SO}_4$ 再生⁽³⁵⁾。

從廢酸洗液中去除鋅，為另一個去除不要的離子之例子⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾。在有些情況，鹽酸被使用於鋼鐵 (steel) 的酸洗，通常酸洗開始時，酸的濃度為 $16\sim 18\%$ ，而耗盡槽 (exhausted bath) 仍含有大約 $2\% \text{ HCl}$ ，但進一步使用，因反應慢而不經濟。有時部份此種酸洗廢液，被應用在鍍鋅操作 (galvanizing operation)，以將掛鉤 (jigs) 上，因重覆浸在電解質 (galvanizing bath) 內而累積的鋅剝除 (stripping)

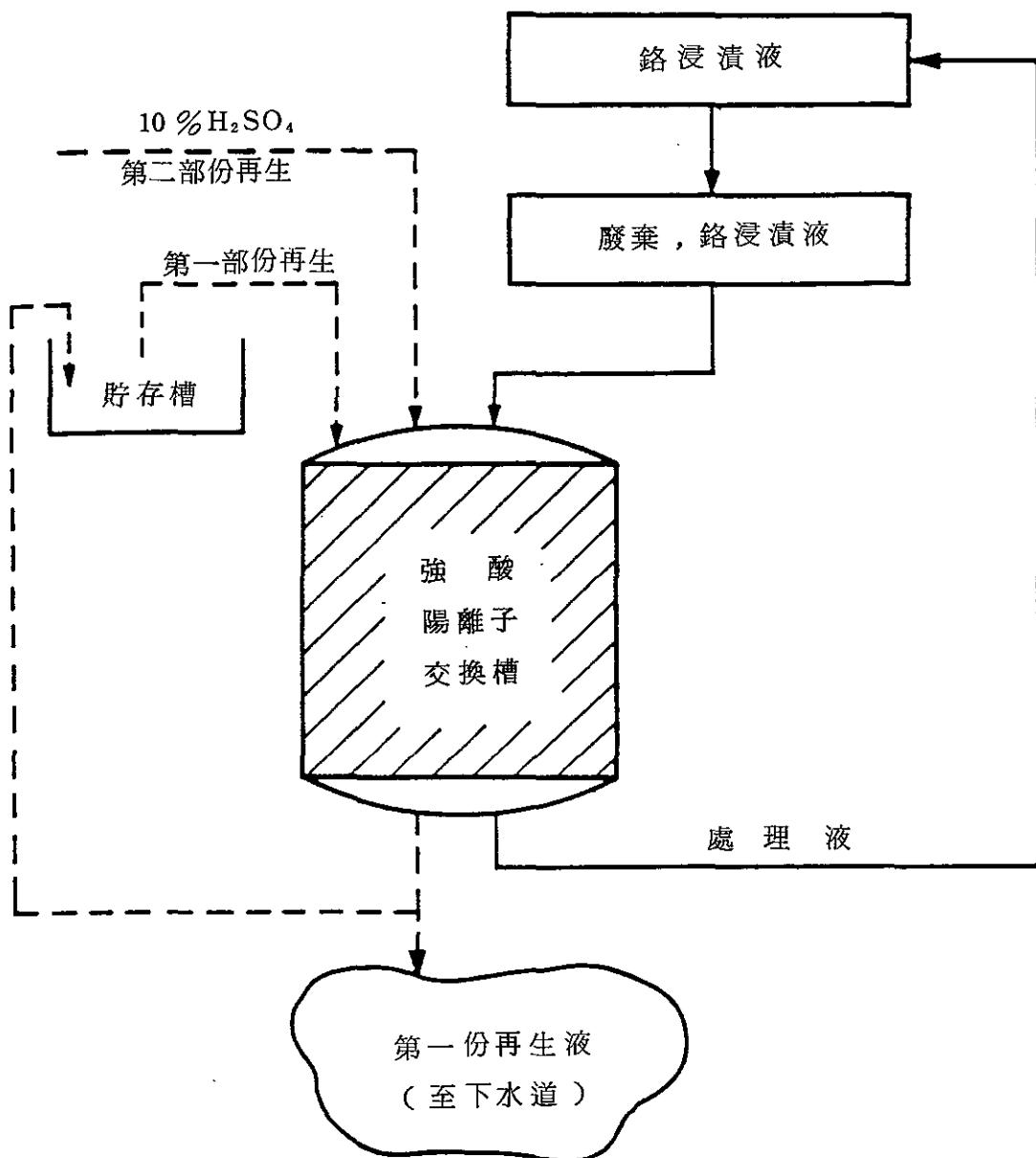


圖 5-4 鉻槽廢液更新的處理流程(型式二)

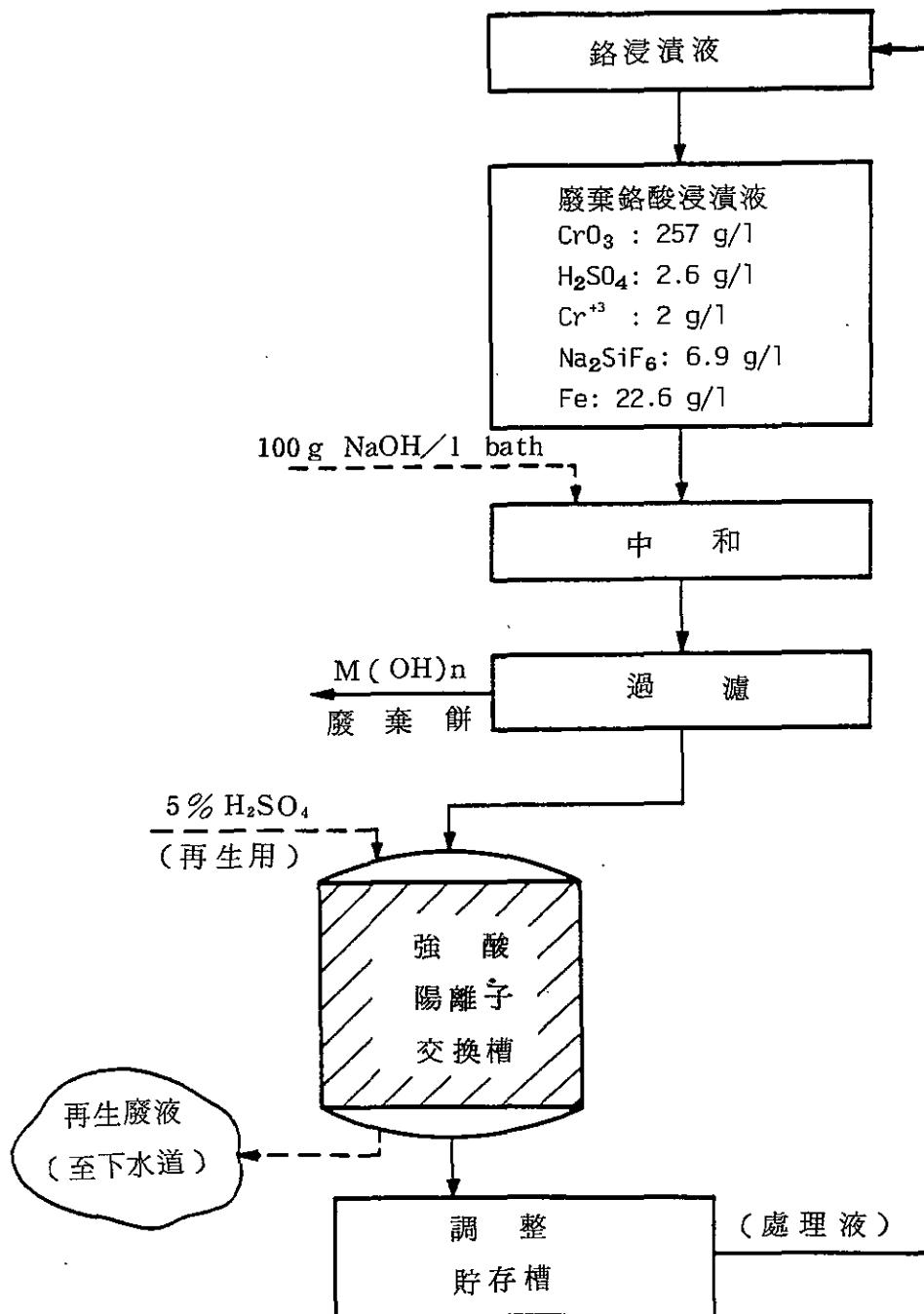


圖 5 - 5 鉻槽廢液更新的處理流程(型式三)

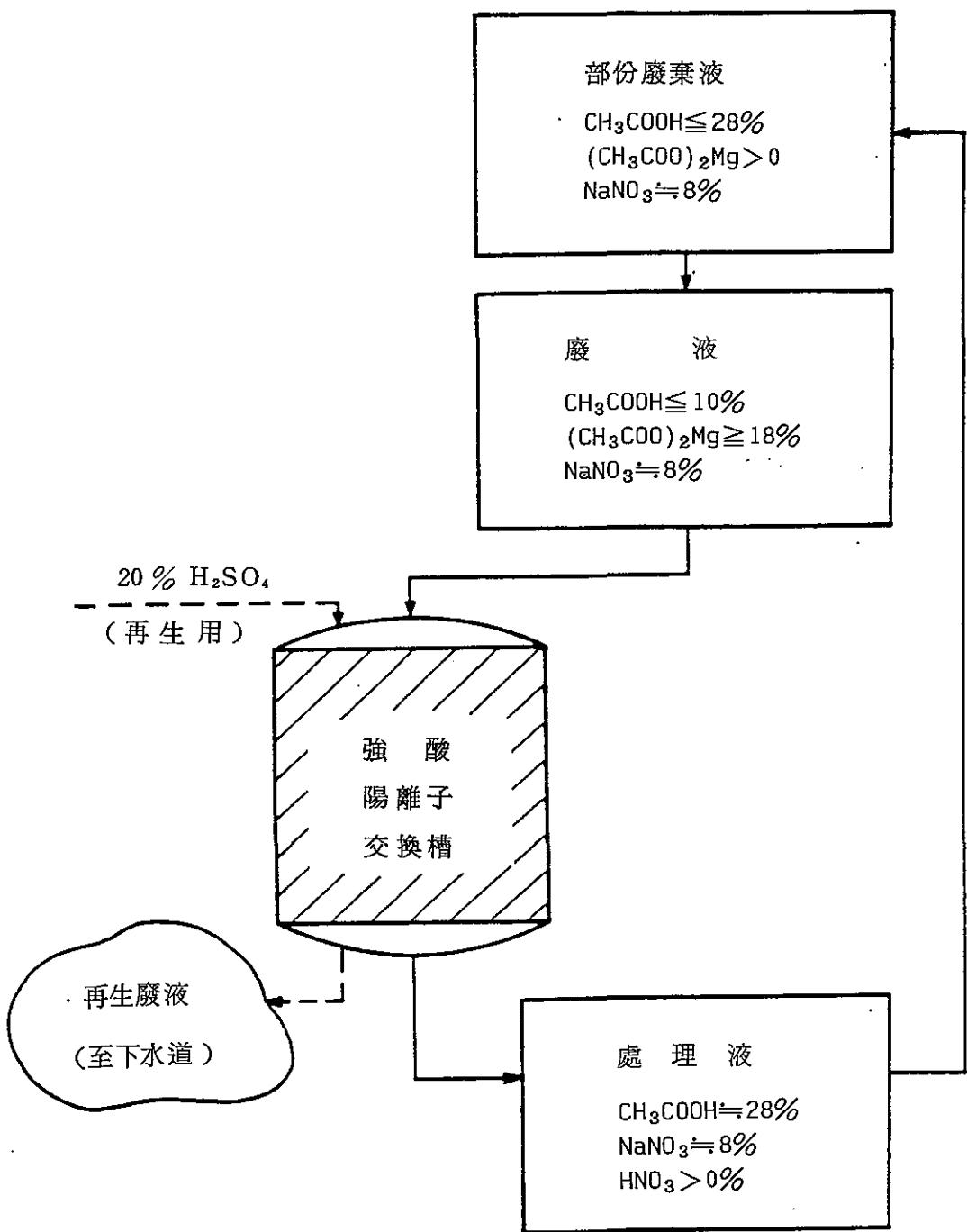


圖 5 - 6 鎂金屬薄板酸洗液更新的處理流程

，但因耗盡的酸洗液內有鋅存在，使得藉噴烤 (spary roasting) 以處理電解槽變為不可能的工作，故此，必須將鋅去除。一般酸洗廢液含有 $100 \sim 130 \text{ g/l}$ Fe^{+2} ， $15 \sim 60 \text{ g/l}$ Zn^{+2} ，和 $20 \sim 30 \text{ g/l}$ HCl ，在此種情況下，鋅形成陰離子錯合物，如 $(\text{ZnCl}_4)^{-2}$ ，而 Cl^- 型的陰離子交換樹脂，對此種二價陰離子具有很高的親合力，可將其去除。當 PH 值增加至中性範圍，很容易將 ZnCl_4^{-2} 錯離子破壞，故可很容易地藉水將此錯離子，從離子交換柱床內洗出，圖 5.—7. 所示即為其處理流程。又因再生廢液所產生的 ZnCl_2 沒有市場，故將其用液—液萃取的方法轉化成 ZnSO_4 ，再售至鋅電解精練廠 (electrolytic zinc refineries)。

2. 回收化學物質 (recovery of chemicals from spent solutions)

圖 5.—8.⁽³⁸⁾ 所示即為從鋁金屬表面處理的鍍槽廢液中回收鎳鹽和錫鹽再使用的例子。首先以對 Sn 具高選擇性的鉗合樹脂 (Dialon CR-10H, limidodiacetic acid-type Resin) 處理鍍槽廢液，經處理後的廢液再以 NaOH 調整 PH 至 4.4，使 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 先行沈澱，再以 NaOH 調整 $\text{PH} \geq 7$ ，使 Ni(OH)_2 沈澱，而樹脂則以 18% H_2SO_4 再生，再生廢液所含 SnSO_4 及 H_2SO_4 與 Ni(OH)_2 沈澱污泥混合後，循環回至鍍槽使用。

3. 從鹽類中分離酸 (Separation of acids from salts)

酸通常用來溶解某些化學物質，其最普遍應用的範圍是酸洗金屬，而在酸洗過程中，酸會被轉化成鹽類型式，當酸的濃度逐漸減少，酸洗的反應速率會緩慢下來，最終，達到某一階段，使得進一步使用酸洗溶液成為不經濟。一般廢棄的酸洗溶液含有 (1 ~ 8%) 酸以及其鹽類，而將酸與鹽分離，對於循環再利用酸，或不能再利用時的處置是相當重要的。

前已論及廢液可藉離子交換去除陽離子雜質而回收使用，但其有一很大的缺點，即是陽離子交換樹脂，於再生時需消耗大量的化學藥劑 (酸)，同時產生再生廢液，而需進一步處理 (如圖 5.—3. ~ 圖 5.—6.)。不過，以陰離子交換樹脂，利用酸阻滯 (acid retardation) 或“位置分享”效應 (“site sharing” effect) 的技術，在某些情況，可以不需使用化學藥劑，而能將酸從鹽類中分離⁽²²⁾⁽³⁹⁾。位置分享效應的造成，是將在

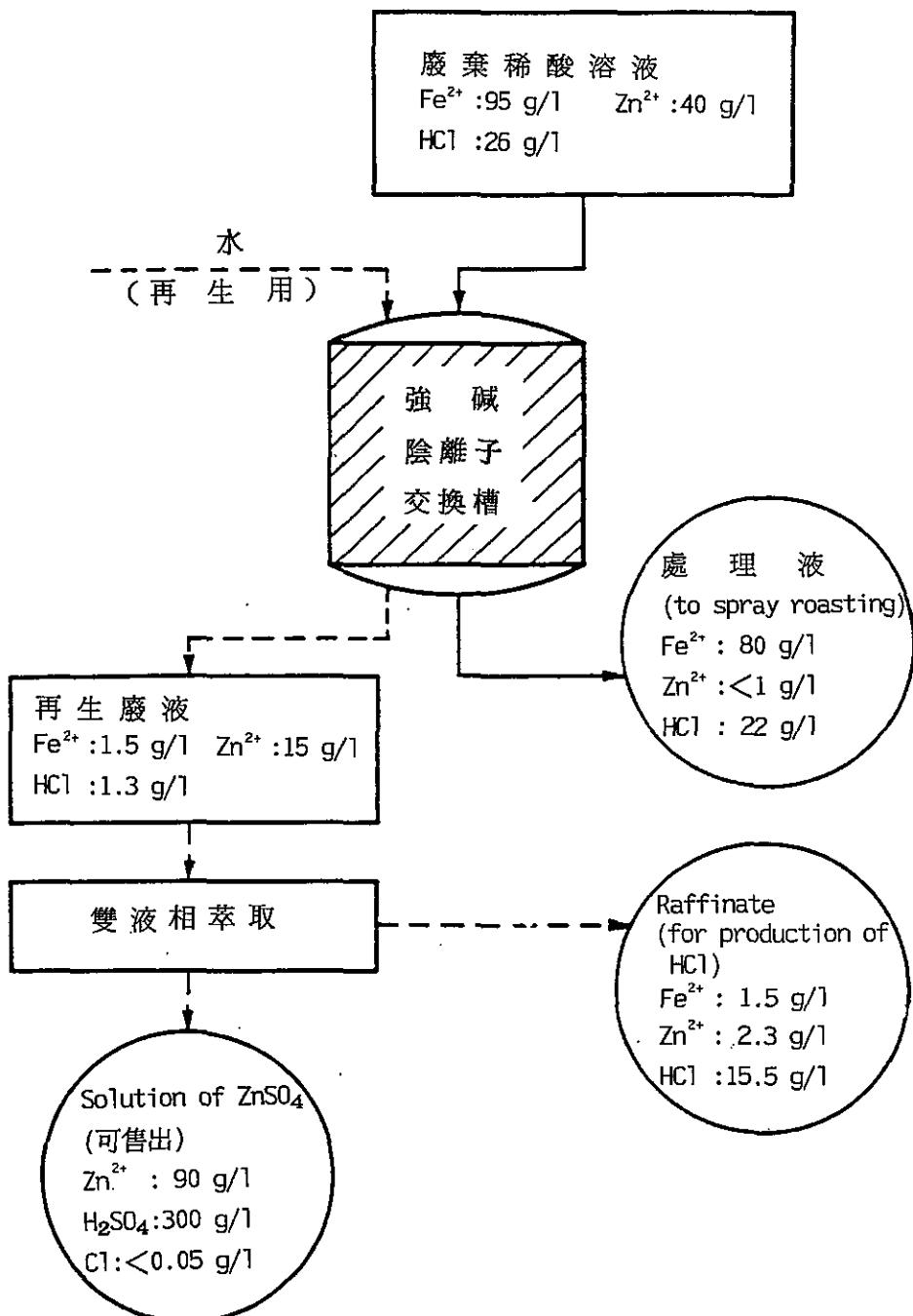


圖 5 — 7 從廢酸洗液中去除鋅離子的處理流程

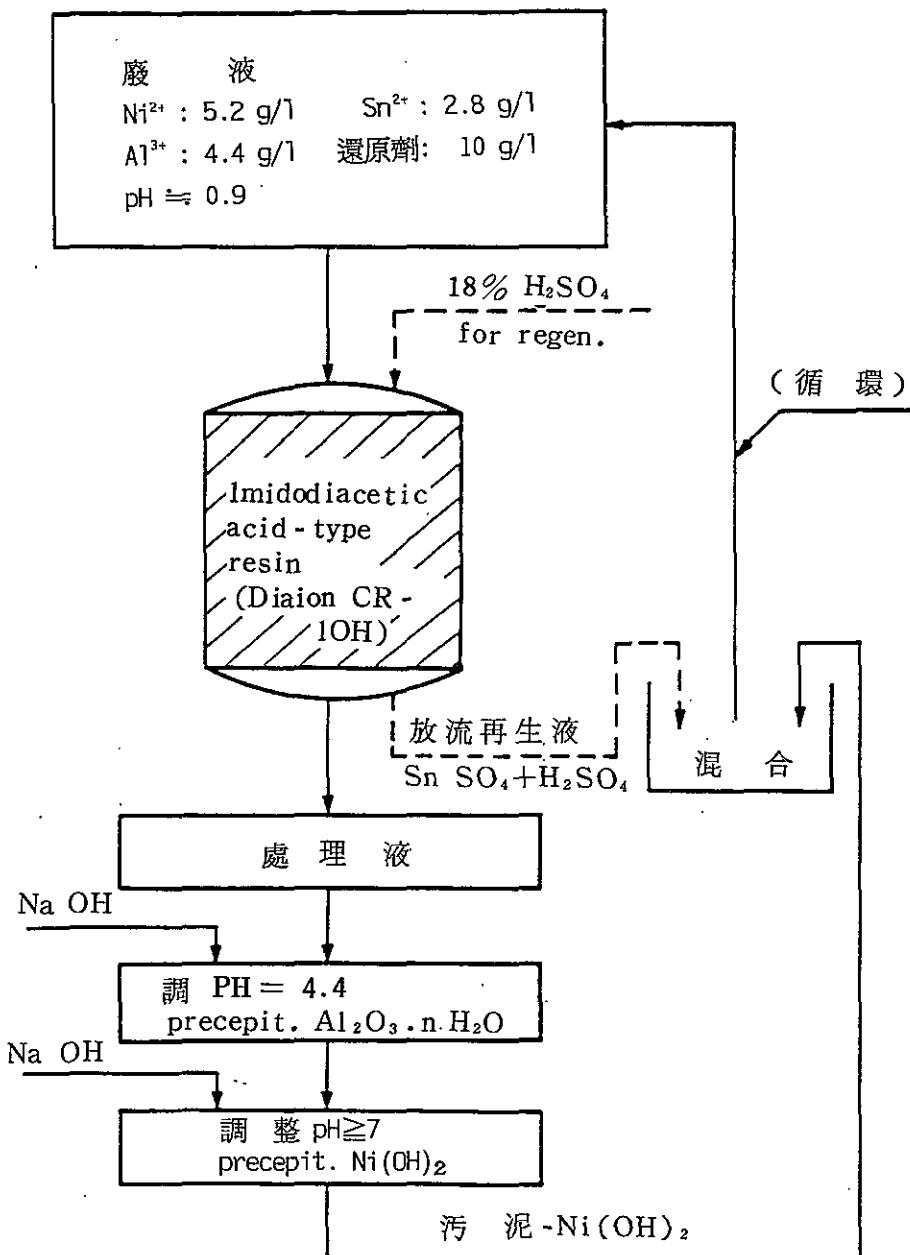
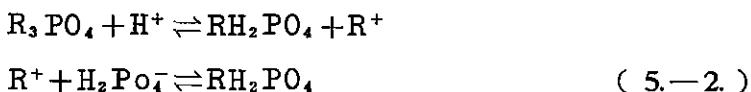
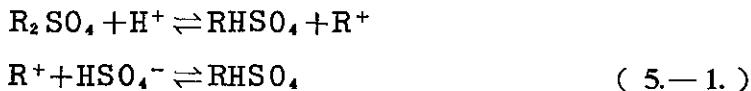
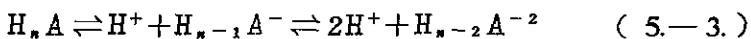


圖 5-8 鋁金屬表面處理廢液中回收鎳和錫塩的處理流程

陰離子交換樹脂上，佔據交換位置的高電價陰離子，例如 PO_4^{3-} 或 SO_4^{2-} ，加以氫化（ protonation ）使其形成較低電價的陰離子，如此可釋放出一些離子位置，以供吸附新的陰離子，其反應如下：



平衡反應式

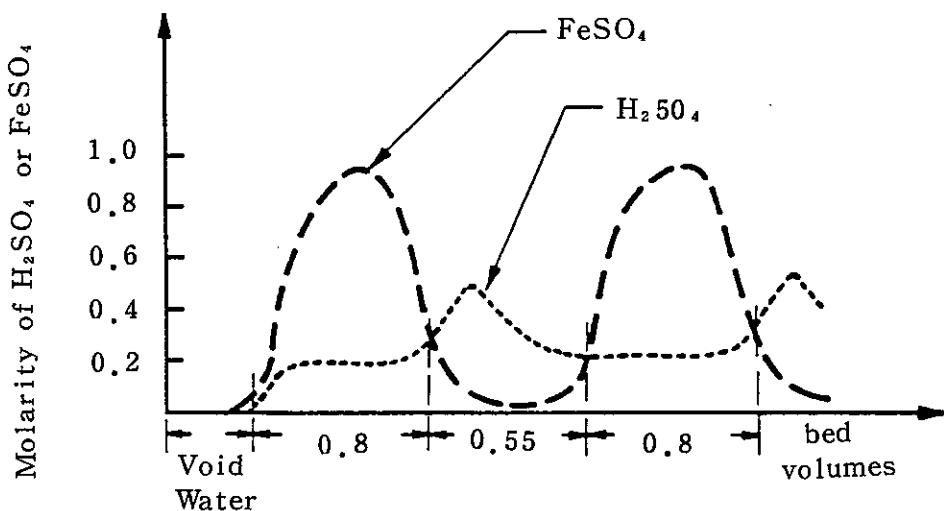


主要依 PH 值改變其方向，當酸通過柱床，將使得 (5-3.) 式反應向左，使得酸被截住，若以水沖洗飽和樹脂，將使得反應式向右，而將酸釋出。

根據上述反應原理，酸（氫離子）能被樹脂截留，而鹽類則不能，所以一混合液，例如 FeSO_4 和 H_2SO_4 ，通過一負載著 SO_4^{2-} 的陰離子交換柱床時，僅有酸能被吸附，如平衡式 (5-1.) 所示，而 FeSO_4 通過柱床不被交換，吸附的酸則能以水洗出。

酸與鹽的分離操作，一般採鼓動流（ Pulse flow ）的方式，即負載後緊跟著以水洗滌，如此柱床出水口得到一鹽—酸—鹽—酸“波狀”的濃度。此種操作程序，以一強鹼性陰離子交換柱床分離硫酸和硫酸亞鐵為例說明如下：一典型的碳鋼浸漬廢液，其含有 14% FeSO_4 和 5.4% H_2SO_4 ，使用 Hatch⁽³⁹⁾ 等的資料（如圖 5-9.），初始出流水為 0.3 至 0.4 床體積（ bed Volume, BV ）的空隙水，接著為 0.8BV 波峰的鹽，後續為 0.55BV 波峰的酸，然後為鹽的波峰，如此循環，可得一處理流程如圖 5-10 所示。因鼓動的時間很短（ 1.7 分鐘飼入， 2.7 分鐘以水洗滌），為確保良好的酸與鹽分離操作，一精確調準的分離收集系統為必需的。

5-3. 電鍍業洗滌廢水成份的循環回收再利用 (recycling of rinse



參 數：容 積—交換床—96 ml
 進 料—50 ml
 (再 生 用 水)—75 ml
 流 量—18.8 BV/hr
 溫 度—65°C

圖 5-9 FeSO₄ 與 H₂SO₄ 分離時離子交換柱床出口濃度變化歷程

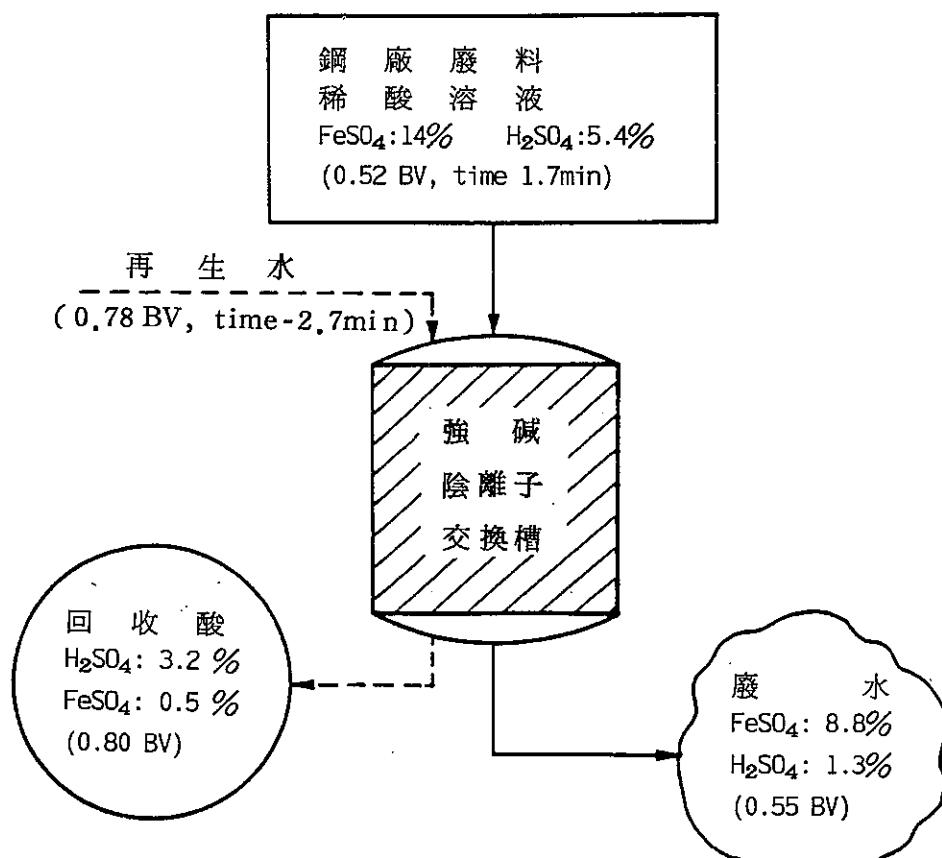


圖 5-10 硫酸與其亞鐵鹽分離的處理流程

water constituents in the metal finishing industry.)

若要使水再循環利用，必須將洗滌廢水淨化至允許在工業上再利用的程度。從一經濟的觀點來看，當水量相當大時，循環再利用水是相當吸引人的，因處理水質至再利用的標準所需處理費用，可被循環再利用水的價值平衡，同時亦能減少廢水排放所需費用。經常地，從洗滌廢水中回收化學物質亦是可行的，而回收化學物質的經濟性，受化學物質本身的價值，在廠內其可再利用的可能性，和其濃度的影響。一般而言，在一工廠僅能循環回收某些其有用的鹽類，因此再生劑的選擇決定於工廠所要再回收利用的鹽類型式，例如，在製氮工業 (nitrogen industry) 回收氮時，必須使用硫酸或硝酸於陽離子交換樹脂的再生，因僅有硝酸氮或硫酸氮，能在製程中再利用。

電鍍工業在洗滌操作時，水流經洗滌槽，將產品上的化學物質洗掉，而遺留在洗滌廢水中。廢水成份的循環再利用，其處理流程示如圖 5.—11.。以下將就一些電鍍廠洗滌廢水的處理情形加以說明。

1. 鍍鉻 (Chrome plating)

常用的鍍鉻洗滌廢水之處理流程如圖 5.—12 所示。首先洗滌廢水進入離子交換單元之前，先將懸浮物和有機物以過濾方式去除，接著以強酸性陽離子交換樹脂去除陽離子。使用強酸性陽離子交換樹脂，主要因洗滌水之 PH (< 2) 很低，不適合以弱酸性樹脂處理。當然樹脂飽和後，則以硫酸或鹽酸再生，使用鹽酸可避免產生 CaSO_4 之沈澱物於柱床內⁽⁴⁰⁾，又由於樹脂對高電價金屬離子具有很強的親和力，所以再生時需使用很高劑量的酸，一般建議每公升樹脂採用 320 g (10% 濃度)⁽²⁹⁾ 至 490 g (7% 濃度)⁽³⁰⁾ 的硫酸，若重金屬在離子交換單元之前已先行用沈澱方法處理過，則再生飽和陽離子交換樹脂時，所需硫酸量可降至每公升樹脂 200 g。再生後之廢液因不具有任何價值，通常以石灰中和沈澱後，排放至下水管線，此再生廢液的量一般不超過洗滌水總體積的 2 ~ 5 %。

在陽離子交換單元之後，緊接著為一去陰離子單元，該單元的操作依是否收回鉻酸 (Chromic acid) 有兩種不同的方式。若洗滌廢水量小，且不考慮回收，則陰離子交換樹脂以 40% NaOH 再生，再生廢液中所含的鉻酸

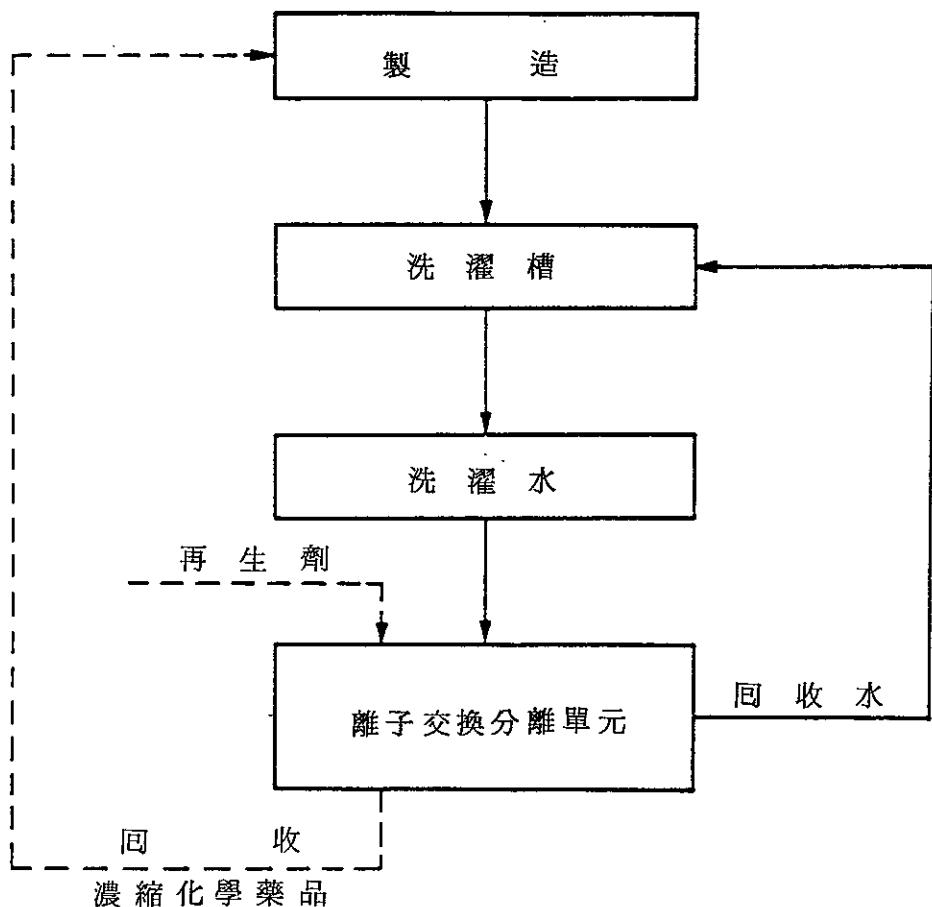


圖 5-11 洗滌廢水成份的循環再利用處理流程

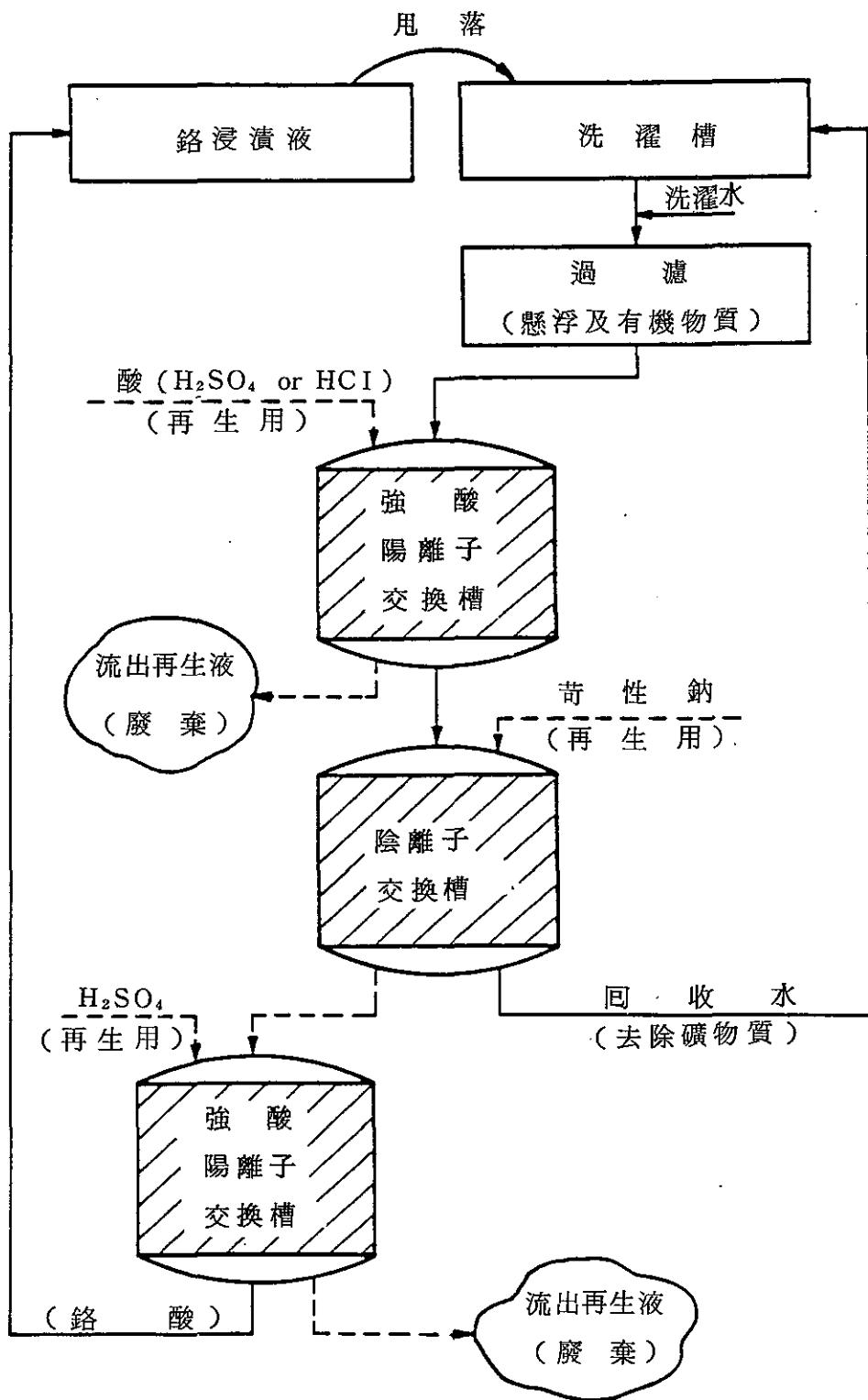


圖 5-12 含鉻洗滌廢水循環回收再利用處理流程

鹽 (Chromate)，還原成三價的鉻離子後，以石灰中和沈澱，再將上層液排至下水管線；若考慮回收鉻酸，陰離子交換樹脂之再生液（為 Na_2CrO_4 和 NaOH 的混合液），必須通過一強酸性陽離子交換柱床，以便將鉻酸鹽轉化成鉻酸。

陰離子交換單元可以使用強鹼性或弱鹼性陰離子交換樹脂，強鹼性樹脂其六價鉻的滲漏濃度較低 ($< 1 \text{ mg/l Cr}^{+6}$)，但因其再生效率低，需要較大量的 NaOH 再生劑，相反地，弱鹼性樹脂，滲漏量大但 NaOH 消耗量小。使用弱鹼性樹脂，對於一循環回收系統 (Closed-loop system) 而言，較具有優點，因其處理水將循環回至洗滌槽，可不必要求 Cr^{+6} 的濃度在排放標準以內。一般金屬零件浸沈在洗滌槽系統中，其洗滌水所含 Cr^{+6} 的濃度保持在 $50 \sim 200 \text{ mg/l}$ ，故當循環水即使含有少量 Cr^{+6} ，亦不會增加洗滌水 Cr^{+6} 太多的濃度。從上，可獲得一結論，在一循環回收系統， Cr^{+6} 滲漏量的程度，並不一定是重要的因素，倒是 NaOH 使用量的減少，對於洗滌廢水處理成本的影響變為更重要。另一重要的因素為再生廢液的濃度，若以一般方式再生強鹼性陰離子樹脂，通常建議採用 4 % 濃度每公升樹脂 $80 \sim 140 \text{ g NaOH}$ 劑量⁽⁴¹⁾，但近來研究指出⁽⁴²⁾，最佳的 NaOH 濃度為 7.5 %，其可獲得再生廢液含 6 g/l Cr^{+6} 。不過，若以高濃度 NaOH 再生弱鹼性陰離子樹脂，再生廢液所含 Cr^{+6} 可能高達 51 g/l ，如此允許再生廢液直接循環至鍍槽再利用，而不必經過蒸發濃縮處理。

2. 含氰化物電鍍 (Cyanide plating)

來自電鍍操作的洗滌水常含有自由氰化物 (free cyanides) 和錯合氰化物如銅、鋅、鐵等錯合氰化物。最早使用離子交換，從廢水中去除氰化物，為一二柱式系統⁽⁴³⁾⁽⁴⁴⁾，頭一柱床使用強酸性陽離子交換樹脂，後接一強鹼性陰離子交換樹脂，處理水氰化物濃度可小於 0.2 mg/l ，而再生廢液氰化物濃度為 $5 \sim 30 \text{ g/l}$ 。兩柱床皆以 10 % NaOH 再生，而陽離子交換樹脂床再以 10 % HCl 轉換成 H 型。若洗滌水含氰化物濃度為 20 mg/l CN^- ，所獲得交換容量為：陽離子交換樹脂 $11.5 \sim 35 \text{ g 金屬/l 樹脂}$ ，陰離子交換樹脂 $12 \sim 16 \text{ g CN}^-/\text{l 樹脂}$ 。但此系統之陰離子交換樹脂的再生困難，因

$[Fe(CN)_6]^{4-}$ 和 $[Cu(CN)_4]^{4-}$ 錯合物很強地附著在陰離子交換樹脂上，為了破壞此類錯合物，則建議可先以硫酸對飽合的陰離子交換樹脂做預先處理，然而，使用硫酸（或強酸）於含氰化物系統，可能會造成 HCN 滲漏危害的問題。

Weiner⁽⁴⁵⁾ 提出一三柱式系統：強酸性陽離子交換柱床，後接一弱鹼性陰離子交換柱床和一強鹼性陰離子交換柱床，而弱鹼性樹脂因能吸附大部份的金屬錯合物，而能保護鹼性樹脂至某一程度。陰離子樹脂的再生，則以 NaOH 採反流向的方式操作。不過，由於錯合物在弱鹼性樹脂的貫穿很難測定，故多少有些進入強鹼性樹脂床，而逐漸影響其再生。

前述二柱式或三柱式系統，皆採用強酸性陽離子交換樹脂於系統的最前端，而使得操作上遭遇到另外的困難，即處理溶液的酸化現象 (acidification) 會使得不溶解性的金屬氰化物產生沈澱，同時形成氫氰酸 (hydrocyanic acid)。

從工業的觀點來看，處理含氰化物電鍍廢水，最佳的方法，其處理流程如圖 5-13 所示⁽⁴⁶⁾，此處採用一含強酸性陽離子和弱鹼性陰離子交換樹脂的混合床，而弱鹼性樹脂可用來吸附氰化物，不過，某些氰化物仍可能會從此系統滲漏，所以後接一強鹼性樹脂。混合床的貫穿點，則以導電度測定之，高導電度的氯離子將會在錯合物之前出現，故當導電度突然上升時，表示錯合物即將貫穿，而可避免錯合物進入強鹼性陰離子交換柱床。理論上，再生廢液的循環回收使用是可能的，但並不被推薦，而僅有當含氰化物的洗滌廢水是被分開單獨處理時，且內中所含金屬為原電鍍槽中所需要時，回收方為實用。

5.-4. 含金屬廢水的處理與回收 (Recycling of heavy metals and water from effluent)

從電鍍工業之鉻和氰化物操作的洗滌水中去除或回收重金屬，已在前節中討論過，但金屬表面處理工業的其他操作，所產生的廢水，仍含有各種的金屬鹽類，由於它們的處理方式與前述不同，而與其他含重金屬廢水的處理方法相同，故於此另外分節討論。

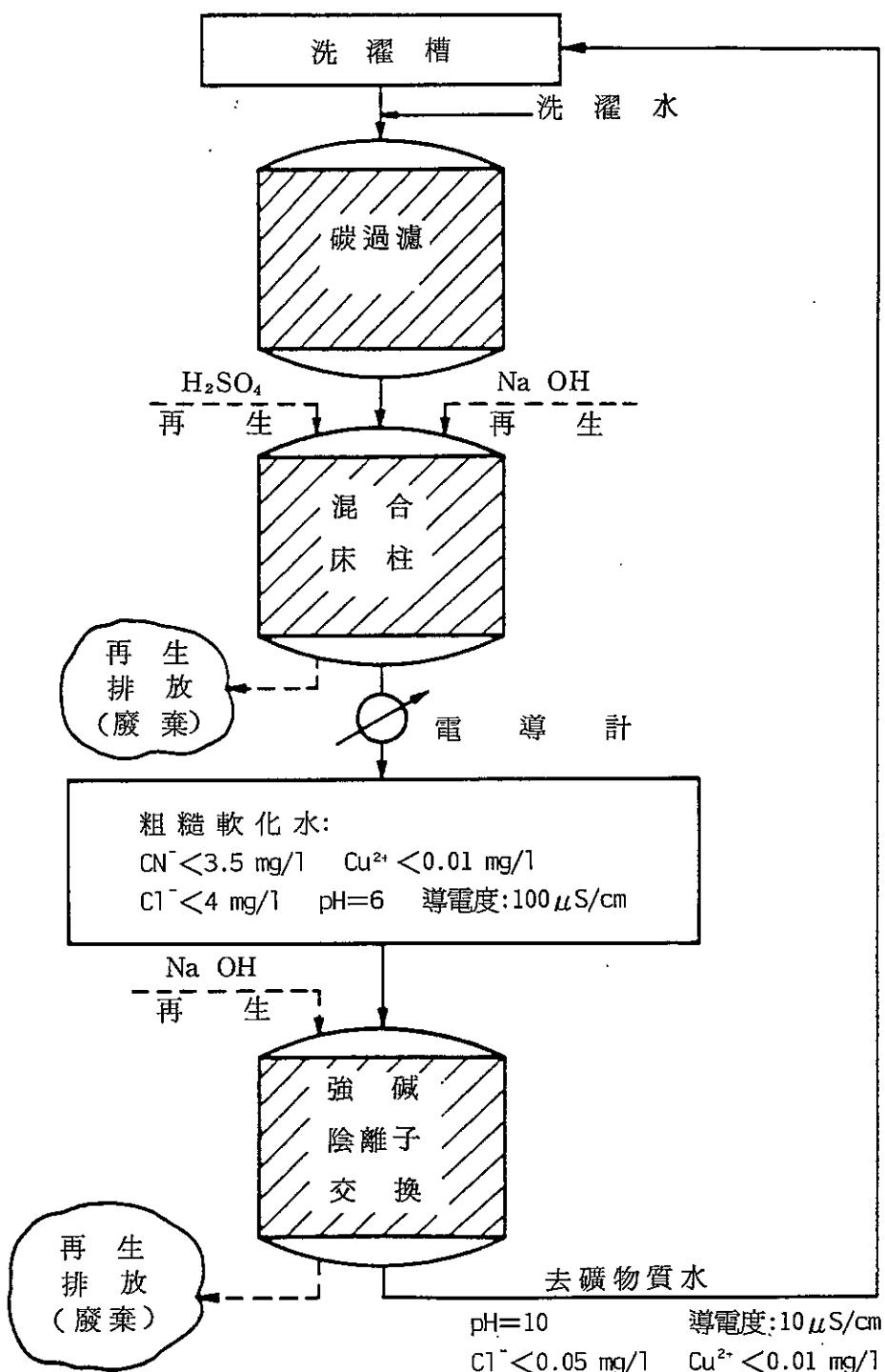


圖 5-13 氯化物電鍍洗滌廢水回收水之處理過程

表 5.— 1. 所示為金屬表面處理工業常用的鍍槽成份，當然同樣組成但濃度較低的成份，將會呈現在其洗滌廢水中，一般範圍在 50 至 5000mg / l 間⁽⁴⁷⁾。典型的離子交換系統，用以處理或回收洗滌廢水中成份，包括一陽離子交換樹脂單元，後接一陰離子交換單元。由於洗滌廢水中混合了各種金屬離子成份，使得離子交換再生廢液濃縮的金屬鹽類，無法直接循環回收使用，一般均將其經中和、沈澱後處理，而僅有的洗滌水可被循環再利用。不過，只要洗滌廢水分流處理，回收重金屬仍是可能的，因如此允許各再生廢液，經適當混合後，能獲得與原鍍槽相同的組成成份，而可回收使用。

另一種處理方法是從混合液中僅分離某些特定的重金屬離子，幸運地，即使是強酸性陽離子交換樹脂，對於從稀溶液中吸取多電價離子，亦具有很高的選擇性，而弱酸性樹脂 (carboxylic) 對於重金屬更具有很高的親和力，如此，即使以一般常用的樹脂，即可能從廢水中選擇性地去除 (selective removal) 重金屬。在使用弱酸性樹脂的情況，以酸再生樹脂非常地容易，因此類樹脂對氫離子有很高的親和力，然而在酸性環境，即洗滌廢水 PH 值偏低時，它們無法有效地吸取金屬離子。

除了表 3.— 5. 所列的鉗合樹脂外，表 5.— 2⁽⁴⁸⁾所示為能選擇性的去除某一特定離子之特殊樹脂，因它們的交換基均為弱酸性，故對 PH 值環境亦很敏感。選擇一鉗合成羧基 (carboxylic) 樹脂，依特殊情況而定，例如，弱酸性樹脂 Amberlite DP-1，對於鋅離子 (Zn⁺²) 的去除效果，此一鉗合樹脂 Amberlite IRC 718 相等，但當以 10% HCl 在流率為 8BV / hr 再生樹脂時，羧基樹脂的結果較佳，且回收溶液的濃度較高。當以同樣的樹脂處理含 Pb⁺² 或 Cd⁺² 廢水時，亦獲得相同的結果，然而，當處理一含銅離子和硫酸銨的廢水時，以鉗合樹脂所得的結果較佳⁽⁴⁹⁾。

本文以下將對若干重金屬的去除和回收方式，分段加以討論說明。

1. 鎳 (Nickel)

鎳造成環境污染，最主要是來自金屬表面處理廠，而鎳的回收，只要將含鎳廢水流與其他廢水流分開處理，即為可能。硫酸鎳為電鍍鎳通常使用的鹽類，故回收鎳必須將其轉化成硫酸鹽形式，此亦即須以硫酸再生離子交換樹脂。

表 5 - 1 一般常用鍍槽的成份(4)

Baths	Composition (g/l)	pH	Temp. °C
COPPER			
— <i>Cyanide</i>	Cu(CN) ₂ : 15-75 NaCN: 23-93 Na ₂ CO ₃ : 15-30* NaOH: 4-30* Rochelle salt: 45* free CN: 6-11		55-70
— <i>sulfuric acid</i>	CuSO ₄ : 195-250 H ₂ SO ₄ : 30-75	—	21-49
— <i>fluoroboric acid</i>	Cu(BF ₄) ₂ : 60-120 HBF ₄ : to adjust pH to 6	0.6-1.7	27-77
CADMIUM			
— <i>Cyanide</i>	CdO: 22.5-41.3 Cd: 19.7-36.2 NaCN: 78-163 NaOH: 14.3-25.8 Na ₂ CO ₃ : 30-75		27-32
— <i>fluoroborate</i>	Cd(BF ₄) ₂ : 242 Cd: 94.5 NH ₄ CN: 60.0 H ₂ BO ₃ : 27.0 Liquorice: 1.0		21-32
NICKEL			
— <i>Watts</i>	NiSO ₄ : 132.6-243.4 NiCl ₂ : 16.4-32.8 H ₂ BO ₃ : 30-45	1.5-5.2	46-71
— <i>sulfamate</i>	NiCl ₂ : 0-16.4 Ni(SO ₃ NH ₂) ₂ : 263-450 H ₂ BO ₃ : 30-45	3.5	38-60
— <i>fluoborate</i>	NiCl ₂ : 8-82 Ni(BF ₄) ₂ : 225-300	2.5-3	38-71
ZINC			
a) plating	Zn(CN) ₂ : 60-90 NaCN: 16-66 NaOH: 75-90 (Na ₂ S) _n : 1.5	—	20-49
b) phosphating	Zn ²⁺ : 0.7% PO ₄ ³⁻ : 1.0% NO ₃ ⁻ : 2.0% (BF ₄) ⁻ : ?	—	54-57
COBALT			
— <i>chloride</i>	CoCl ₂ : 45 H ₂ BO ₃ : 60 HCl to adjust pH	2.5-3.5	49-54
— <i>sulfamate</i>	Ca(SO ₃ NH ₂) ₂ : 450 HCONH ₂ : 30 mL/L	—	20-50
— <i>ammonium</i>	Co(NH ₃) ₆ (SO ₄) ₂ : 50 H ₂ BO ₃ : 23-30	5-5.2	25
SILVER			
(may be modified with addition of some Cu(CN) ₂)	Ag ⁺ : 1-75 CN: 75-90	—	—
GOLD			
	Au: 1-8 KCN: 0.1-30 K ₃ H PO ₄ : 15-30 K ₃ CO ₆ : 0-30	10-11.5	55-70
LEAD			
	Pb ²⁺ : 112-255 HBF ₄ : 20-45 H ₂ BO ₃ : 20-60	—	—
PLATINUM METALS			
— <i>rhodium</i>	Rh: 2-20		
— <i>platinum</i>	Pt: 2.5-10		
TIN			
(Sn + NaOH)	Sn: 40-160 NaOH: 15		

* Present only in some versions of the baths.

表 5-2 對特定離子見有特別選擇性的離子交換樹脂⁽⁴⁸⁾

<i>Ion</i>	<i>Specific exchanger or group</i>
Ammonium	Clinoptilolite (Baroid-Division of NL)
Arsenic	Fluorone
Beryllium	Diallylphosphate
Bismuth	Pyrogallol
Boron	N methylglucamine (Rohm and Haas <i>Amberlite XE-243</i>)
Calcium	Gallic acid, iminodiacetic acid, and diallylphosphate
Cesium	Methylene sulfonic acid <i>Bayer-Lewatit DN</i> and Diamond Shamrock <i>Duolite C-3</i>
Cobalt	8-hydroxyquinoline β-diketone
Copper	Ethylenediaminetetraacetic acid Diphenylthiourea 8-hydroxyquinoline Anthranilic acid β-diketone
Cyanide	Ethylenediaminetetraacetic acid Anion exchanger (Rohm and Haas <i>Amberlite XE-275</i> for ferrocyanide)
Germanium	Fluorone
Gold	Polyhydric phenols
Iron	Polyisothiouronium (Ayalon <i>SRAFION-NMRR</i>) Alginic acid Diallylphosphate Hydroxamic acid N-phenylglycine Thiol (<i>AKZO Chemical Co.</i>) Anthranilic acid
Lead	Pyrogallol (<i>AKZO Chemical Co. - IMACT-73</i>)
Magnesium	Alginic acid Phenyldiaminoacetic acid
Mercury	Thiol (<i>AKZO Chemical Co. - Imac TMR; Diamond Shamrock <i>Duolite ES464</i></i>) Polyisothiouronium (Ayalon <i>SRAFION-NMRR</i>) Pyrogallol
Nickel	Dithiocarbamate (Nippon Soda - <i>NISSO ALM</i>) Dimethylglyoxime Thiol (<i>AZKO Chemical Co.</i>) 8-hydroxyquinoline β-diketone
Nitrate	Ethylenediaminetetraacetic acid
Palladium	Alkylated amidines Aminophenol and nitro groups
Platinum	Guanidine Polyisothiouronium (Ayalon <i>SRAFION-NMRR</i>) Guanidine
Potassium	Polyisothiouronium (Ayalon <i>SRAFION-NMRR</i>) Dipicrylamine
Silver	Thiol Amino-carboxylic
Strontium	Diallylphosphate
Thorium	Arsonic acid
Titanium	Chromotropic acid
Uranyl	Schiff base - dinitrophenol
Zinc	Anthranilic acid Phosphonic acid
Zirconium	Phosphonic acid

典型回收鎳和洗滌水的處理流程如圖 5.—14 所示。鎳由強酸性陽離子交換柱床所去除，再生時需使用 $96 \sim 106\text{g H}_2\text{SO}_4$ / 公升樹脂，而離子交換樹脂的交換容量為 $19 \sim 29\text{g Ni}^{+2}$ / 公升樹脂⁽⁵⁾。又因為再生廢液含有太多硫酸，所以採用兩段式的再生操作，頭一部份的再生廢液含有高濃度的硫酸鎳，可以 NiCO_3 中和，然後循環再利用做為鍍槽的補充液，而第二部份的再生廢液，則加以收集貯存，以做為下一循環第一部份的再生液。經去陽離子的處理水，則再進入一陰離子交換單元，以去除陰離子，所獲得的去離子水，則可循環回收使用。陰離子交換單元的再生廢液可直接排放至下水管線。

Price 等人⁽⁵⁰⁾研究指出，由鎳精製廠廢水 (Nickel refinery waste) 中，去除鎳離子，各種樹脂最佳的交換容量分別為：

——強酸性樹脂

Zerolit 525-48g Ni / l

Amberlite IR 120-31g Ni / l

——鉗合樹脂

Amberlite XE 318-34g Ni / l

——弱酸性(羧基)樹脂

Zerolit 236-108g Ni / l

上述每一種情形，皆是採用一碳酸氨 (ammonium carbonate) 溶液再生。

在一些特殊的應用，去陽離子的交換單元，會有一些的修改，例如，串連的兩柱式系統曾被利用： Na^+ 或 K^+ 型弱酸性樹脂，緊限在 $-\text{H}^+$ 型強酸性樹脂之後，而從去陽離子單元脫除的鎳，可以電極沈積 (electrodeposition) 的方式回收⁽⁵¹⁾。Kalganora⁽⁵²⁾等人採用流體化床 (fluidized bed) 離子交換系統，從廢水 (含 $\text{Ni}:400 \sim 1000$; (a : 18 ; $\text{SO}_4:800$ 和 $\text{Cl}:300\text{ mg/l}$) 中回收鎳和水，當以 20% H_2SO_4 再生陽離子交換柱床時，再生廢液的濃度為： $\text{Ni}:20 \sim 30$ 和 $\text{H}_2\text{SO}_4:100\text{ g/l}$ 。在另外的一個應用實例⁽⁵³⁾當以 10% H_2SO_4 採兩段式再生操作時，可獲得再生廢液含鎳濃度為 $40 \sim 50\text{ g/l}$ 。

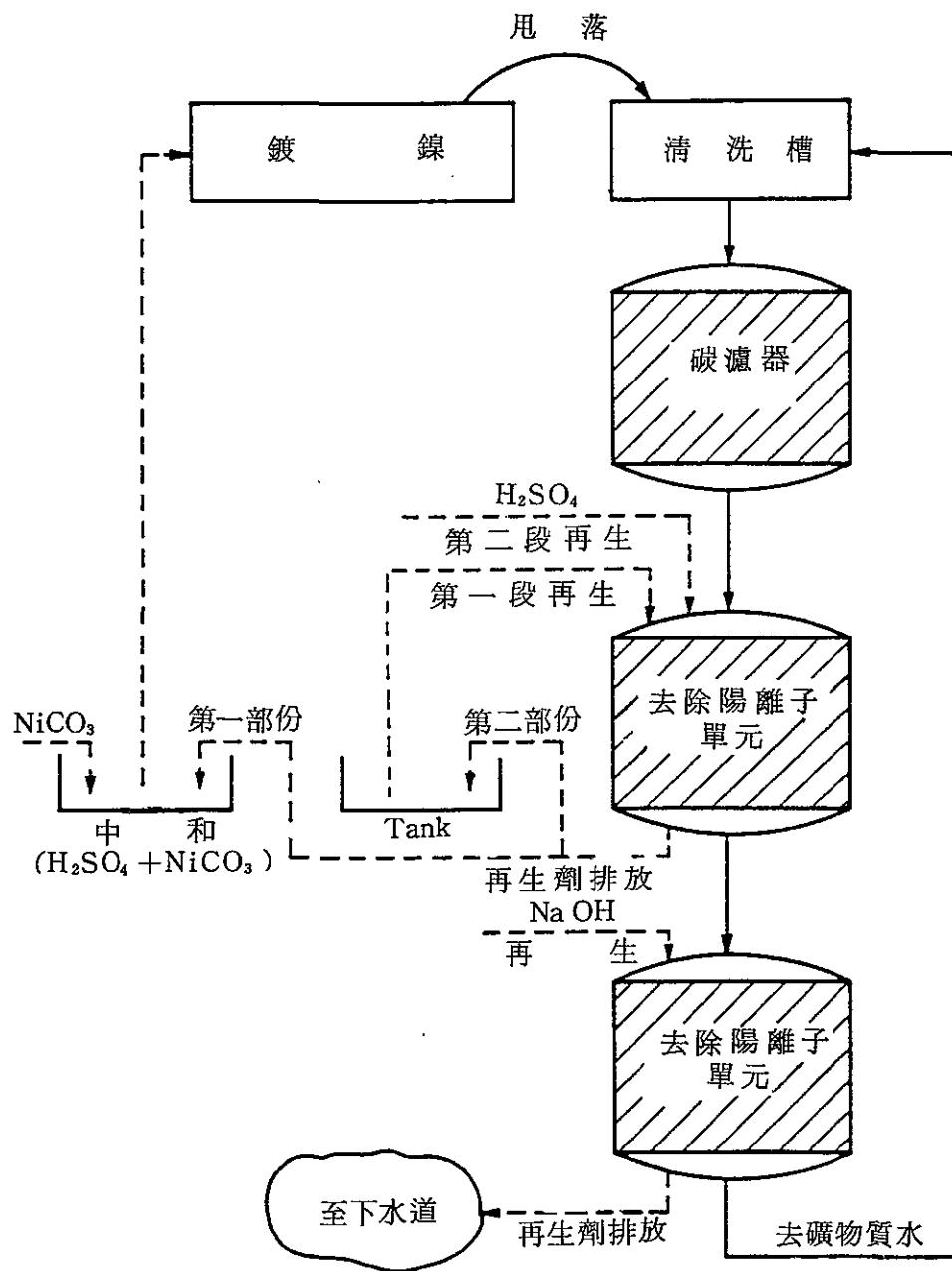


圖 5—14 電鍍洗滌廢水回收鎳和水之處理流程

特殊的樹脂亦被使用於去陽離子單元，以去除 Ni^{+2} 離子，例如：A-mine-P-ampholyte 型樹脂（Russian ANKF 80），曾被用來從 ammonium molybdate 中回收鎳，其交換容量（ $\text{PH} > 2$ ）約為一般型式的 19 倍⁽⁵⁴⁾。Yamashita 等人⁽⁵⁵⁾採用鉗合樹脂處理含 Al^{+3} 和 Ni^{+2} 的廢水，在 PH 調整至 5 ~ 10 之後，鎳離子能被樹脂吸附，再生時採用硫酸，可產生一硫酸鎳溶液。

2. 銅 (Copper)

某些含銅廢水來自氰化物槽，其處理方法已討論於前。另外有些鍍銅廢水，含有硫酸鹽或氯化物，其處理的方式和前節處理含鎳廢水的方法相同。離子交換系統包括去陽離子和去陰離子單元，此外，通常需一碳吸附柱床做為預先處理單元，以去除有機物。

再生樹脂除了使用硫酸和鹽酸外，若電鍍槽含有銅的鉗合錯離子，則可使用鉗合劑做為再生劑，例如，一鍍銅操作的廢水含有 3 mg/l Cu^{+2} ，採用 Dianion PK 214 陽離子樹脂，後接 Dianion PA 414 陰離子樹脂，在 $\text{PH} 2.8$ 時，可將 Cu^{+2} 處理至濃度小於 0.1 mg/l ，而去離子水可回收做為洗滌水，Dianion PK 214 樹脂以 $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6$ （一種 dihydroxy dicarboxylic acid）溶液再生，再生液中含有 4 g/l Cu^{+2} $13.4 \text{ g/l KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6$ ，其可做為鍍銅（copper coating）的補充液⁽⁴⁷⁾。

人造絲工業（rayon industry）採用 Bemberg 或銅銨（cupric ammonium）程序，則可利用離子交換法從其廢水中回收銅，其處理流程如圖 5—15 所示。回收的水，氨和銅氨溶液，可循環使用⁽⁹⁾。另外 Joffe 等人⁽⁵⁶⁾以離子交換法從人造絲工業廢水中將銅離子去除，而處理水含有數 g/l 的硫酸銨，可做為灌溉用水，離子交換再生廢液所濃縮的硫酸銅則循環再利用。

離子交換另一個很重要的應用，是從製銅業（copper production）的浸漬操作（leaching operations）廢水中回收銅。因為一般的鉗合樹脂，在低 PH 值 (< 2) 時，無法吸附銅，故有兩種特殊的樹脂被發展出來，其對於銅離子的親和力較其他離子為大⁽⁵⁷⁾⁽⁵⁸⁾，一為 Dowex XFS

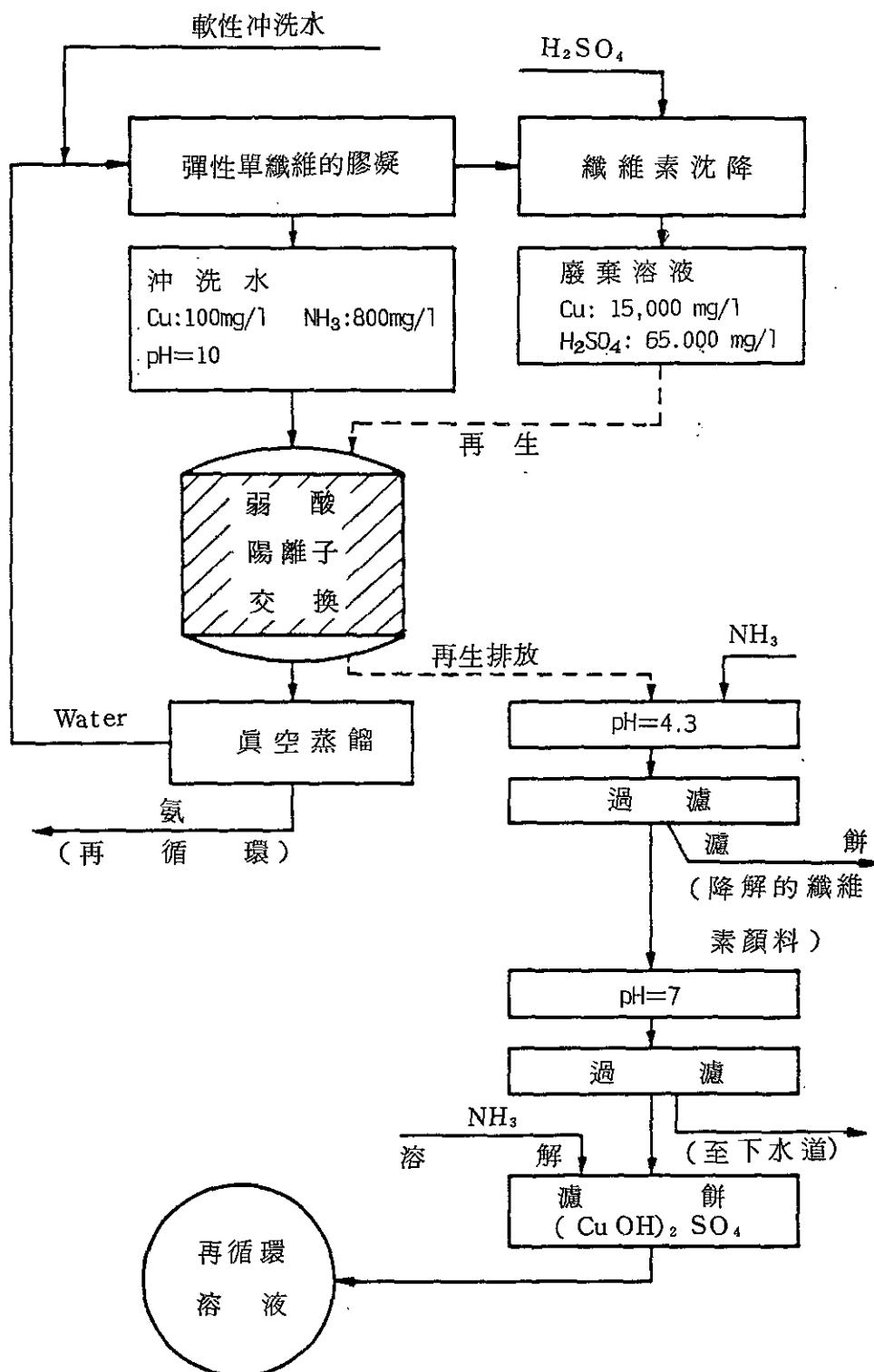


圖 5-15 人造絲工業廢水中回收水，氨和銅之處理流程

-4190，此種樹脂能從3N H₂SO₄溶液中，將銅離子取出，樹脂再生時，需以10N H₂SO₄再生；另一種樹脂為Dowex XFS-4196，其能從酸性較小(PH>1.5)的溶液中將銅取出，再生樹脂時，使用1N H₂SO₄溶液即足夠。一模廠研究指出，使用Dowex XFS-4196樹脂處理瀝濾操作廢水，其含有Cu:2.6；Fe⁺³:7.2；總鐵：8.5；H₂SO₄:1.5~2.5 g/ℓ，樹脂能吸附24 g/ℓ Cu和5g/ℓ Fe，但因再生後廢液含有一定比例的Cu和Fe，而不能再利用，故改用10g H₂SO₄/ℓ溶液，先從樹脂中洗出Fe⁺³(亦含有少量的銅)，再以100g/ℓ H₂SO₄溶液將銅洗出，而回收利用。

3. 鋅(Zinc)

若鋅為氰化物錯離子型式，其處理方法則如前面5.—3.節所述，若鋅為陽離子型式(Zn⁺²)，可以陽離子交換樹脂或鉗合樹脂去除，若為陰離子型式(ZnCl₄)⁻²，則以陰離子交換樹脂去除。使用陽離子交換樹脂處理含鋅廢水，非常類似於處理含鎳廢水(如圖5.—14.)。然而，除了前述之外，亦有一些特別的處理步驟，應用於含鋅廢水的處理。例如，合成纖維廠(Synthetic fiber plants)的廢水含有大約540 mg/ℓ Zn⁺²和多至10,000mg/ℓ Na⁺，假如再生廢液內硫酸鈉含量小於20%，則被回收的硫酸鋅可被循環利用，但是在強酸性陽離子交換樹脂內，鈉離子所佔的比例高於前述，所以兩段式再生離子交換樹脂的操作，則被提出，首先以1% H₂SO₄溶液洗出Na⁺，接著再以10% H₂SO₄再生⁽⁵⁹⁾。另外，為了改變離子交換樹脂床上，所吸附之鋅離子和其他離子的比例，可以鋅鹽(例ZnSO₄)處理飽和柱床，以取代所不想要的離子，然後再以硫酸再生，則可回收硫酸鋅，其處理流程如圖5.—16所示⁽⁴⁷⁾。

鋅以ZnCl₄⁻²陰離子形式存在時，其處理方法已討論於5.—2.節(如圖5.—7.)，應用其觀念，可從一含有混合金屬的離子交換再生廢液中，將鋅分離出來回收。例如，當使用一強酸性陽離子交換樹脂，以處理一混合金屬的電鍍廢水時，在樹脂飽合後，使用超量鹽酸再生混合金屬的飽合樹脂，可得一各種金屬氯化物的混合廢液，將此廢液再進一步以陰離子交換樹脂處理，則因樹脂可選擇性的吸附ZnCl₄⁻²，而使其與其他金屬分離，最後再以水

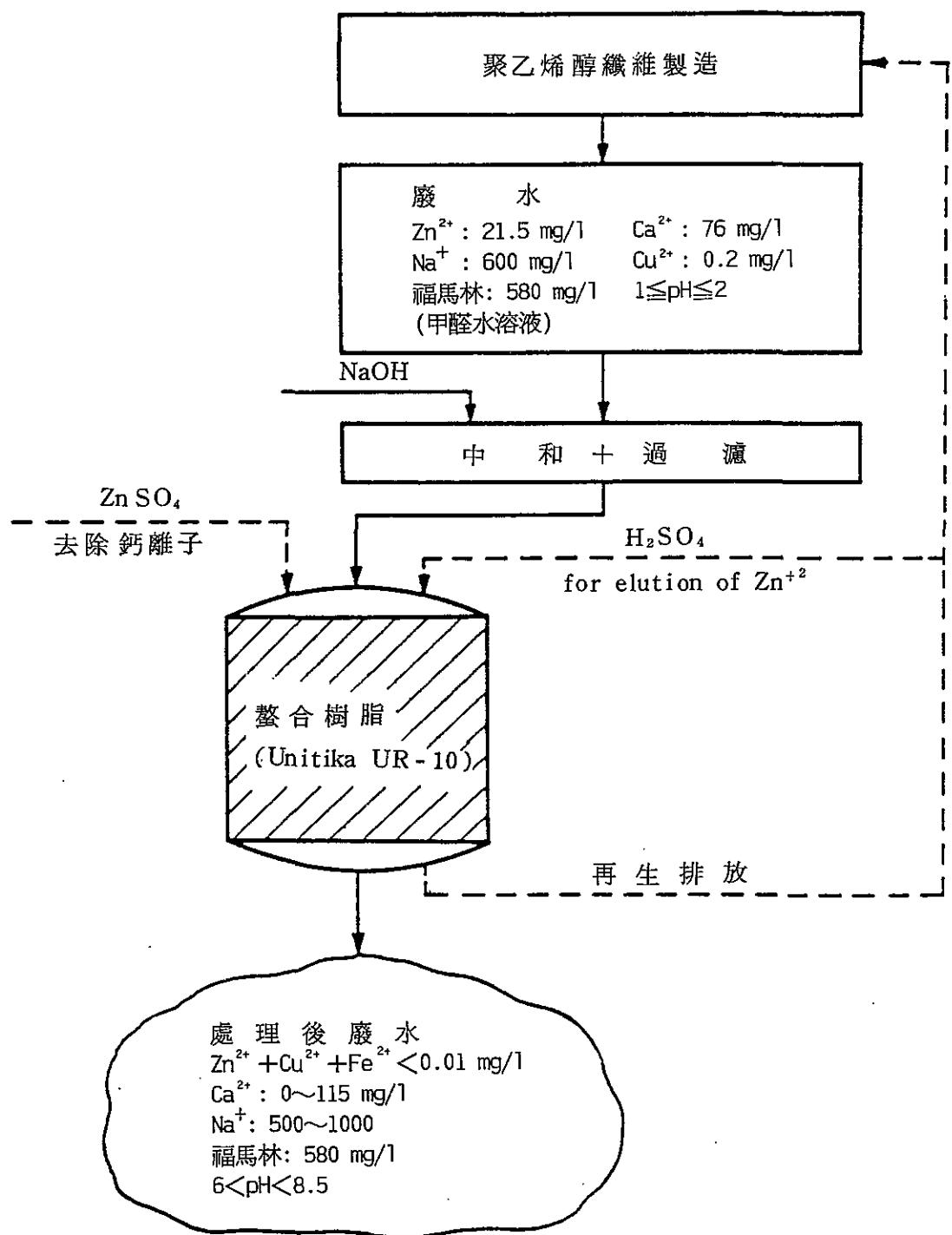


圖 5-16 聚乙烯醇纖維廠廢水中回收鋅之處理流程

洗 $ZnCl_4^{-2}$ 飽和的陰離子交換樹脂，可獲得一純的 $ZnCl_2^{(60)}$ 。

4. 汞 (mercury)

汞為相當具有毒性的污染物質之一，其在日本曾造成水俣病 (minamata disease) 的毒害，而汞最主要的來源為氯和碱製造工廠 (Chlorine and caustic manufacturing plants)。文獻指出，廢水處理後再利用汞，可節省處理費用大約 25%⁽¹⁵⁾。

Imac TMR 樹脂是一種聚合體的硫醇 (polymeric mercaptan)，其具有硫醇 (thiol, =SH) 基，對於 Hg 級子有很高的親和力，總交換容量為 240g Hg / l 樹脂。^(61,62) 在使用離子交換處理含汞廢水之前，必須先將汞轉化成離子形態，通常此預處理步驟是採用氯化 (Chlorination)，接著以活性碳脫氯 (dechlorination)，以避免氯破壞樹脂，圖 5.-17 所示，即為其處理流程。

另一種樹脂 Srafion NMRR，含有 isothiouronium 交換基，亦能用來去除汞，其對氯離子的交換容量為 3.1meq / g 樹脂，對汞為 0.545 g Hg / g 樹脂，再生時可使用 5% 硫脲 (thiourea) 溶液內含 2.2g / l HCl⁽¹⁵⁾。

其他對汞具有選擇性的陰離子交換樹脂，有日本的 Nisso ALM-125 和 AIM-126 和德國的 Lewatit OC 1014⁽¹⁵⁾。當然亦可使用傳統的樹脂以去除汞⁽⁶³⁾，例如將 Hg⁰ 以 NaOCl 在 PH 2.5 ~ 3.5 間氧化成 Hg⁺²，則汞離子能以 $HgCl_4^{-2}$ 錯離子型式，被吸附在強鹼性陰離子交換樹脂上，如 Wofatit SBW 或 Varion AD 樹脂，再生時使用 12N HCl，能將 85% 的汞從離子交換柱床中洗出。

5. 貴重金屬 (Precious metals)

由於貴重金屬具有很高的價值，所以選擇處理程序時，都希望能將其完全全回收，而處理水的回收，反而不具經濟價值，特別是當處理水量小時。

某些電鍍廢水含有金，其以 $Au(CN)_2^{-1}$ 的陰離子錯合物形式存在，故一標準型的強鹼性陰離子交換樹脂或一 quaternized polyvinylpyridine 陰離子交換樹脂，能被用來將其去除，但是樹脂的操作容量低 (55 ~ 110g Au / l)⁽²¹⁾。由於停留在樹脂內的金，其價值遠超過所使用樹脂的價

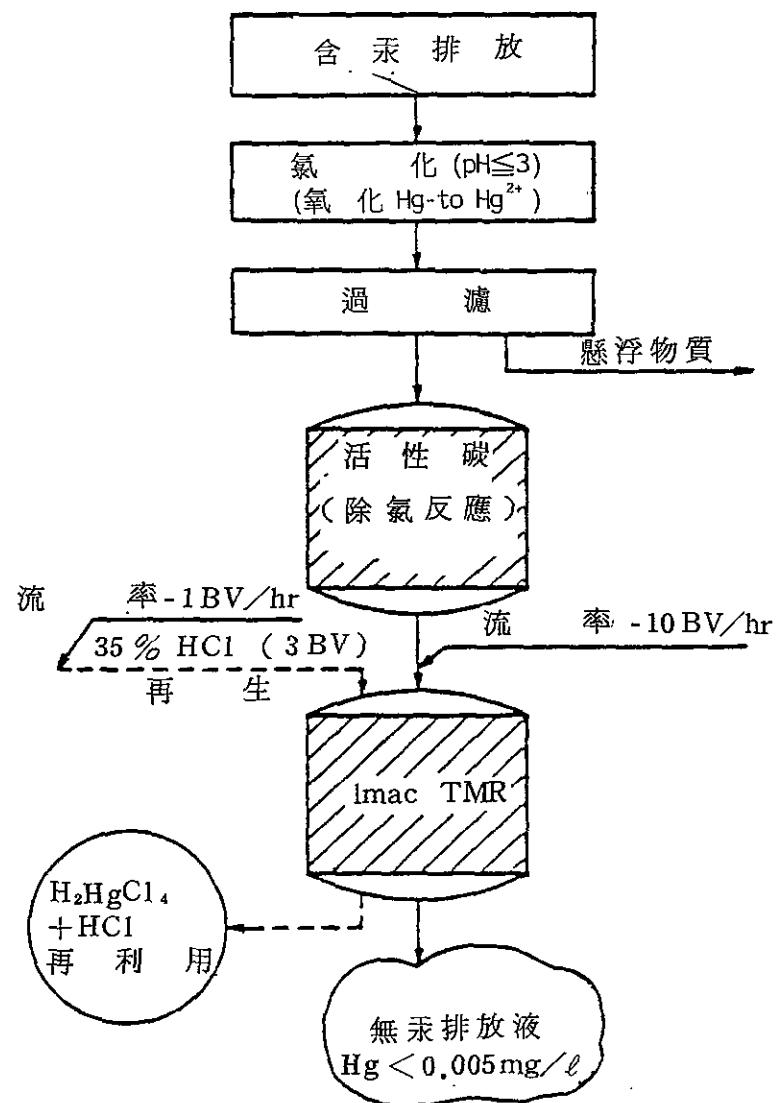


圖 5-17 從含汞廢水中回收汞之處理流程

值，故一般皆將飽和樹脂在 1000 °C 焙化，以回收金。然而，亦有使用再生樹脂的方法，Nagata⁽⁶⁴⁾等人以兩柱式系統處理一含 4 ~ 5 mg / l Au 的電鍍洗滌廢水，頭一柱床為 -H 型弱酸性陽離子交換樹脂 (Diaion wkzo)，先將其他重金屬陽離子去除，和降低 PH，後接一弱鹼性陰離子交換樹脂床 (Lewatit MP 62)，金則被吸附在此陰離子柱床內，再生時，使用 5 % NaOH + 5 % NaCN 溶液，依作者指出可獲得一接近 100 % 的金回收。

Henmi⁽⁶⁵⁾處理一含金，有機酸和其鹽類的電鍍廢水，在 PH ~ 3 時，採用三柱串連之弱鹼性陰離子交換柱床，金被第一柱床吸附，而其餘溶質 (solutes) 則被第二和第三柱床吸附。

從一強酸性溶液中去除金，可使用一 polyisothiouronium 樹脂 (srafion NMRR)，其對金的總交換容量為 340g Au / l 乾樹脂。在酸性介質 (酸濃度高至 2.4 N) 中，金的去除程度可高至 99 %，圖 5.—18 所示為使用 Polyisothiouronium 樹脂處理金的流程圖⁽⁴⁷⁾。

另一個在電鍍 (Plating) 和照相工業 (Photographic industry) 中普遍使用的貴重金屬是銀 (silver)。在電鍍操作中，銀是以氰化物錯離子形式被使用，故其廢水中含有 $\text{Ag}(\text{CN})_2^{-1}$, KCN 和 K_2CO_3 ，Nagata 等人⁽⁶⁶⁾以強鹼性陰離子交換樹脂 (Amberlite IRA-400) 來吸附銀離子，然後以 NH_4Cl 溶液再生。Negata 等人⁽⁶⁷⁾另外採用兩串連離子交換柱床方式，一為陽離子交換柱床，另一為弱鹼性陰離子交換柱床，而在陰離子柱床可得 92.9g Ag / l 樹脂，再生時使用 5 % KCN + 5 % NaOH 溶液，回收效率可達 95 %。

照相業廢水中，銀的形式亦為陰離子， $\text{Ag}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{-3}$ ，故通常使用強鹼性陰離子交換樹脂來回收銀⁽⁶⁸⁾。例如 Duolite A101D 樹脂，可將廢水中銀的濃度從 7 mg / l 減少至 0.05mg / l，而從樹脂中回收銀，則以 NH_4Cl 為再生液，銀在再生廢液中的濃度大約為 0.75 g / l⁽⁶⁹⁾。弱鹼性樹脂，Amberlite IRA 68，亦可被用來從照相業廢水中回收銀，雖然弱鹼性樹脂交換容量較低，但其很容易以鹼性溶液再生，且再生廢液中可獲得一較高的銀濃度，圖 5.—19 所示即為以弱鹼性樹脂回收銀的處理流程，樹脂的交換容量大約在 40 ~ 50 g Ag / l 樹脂，而最終銀的回收，係以電解法 (

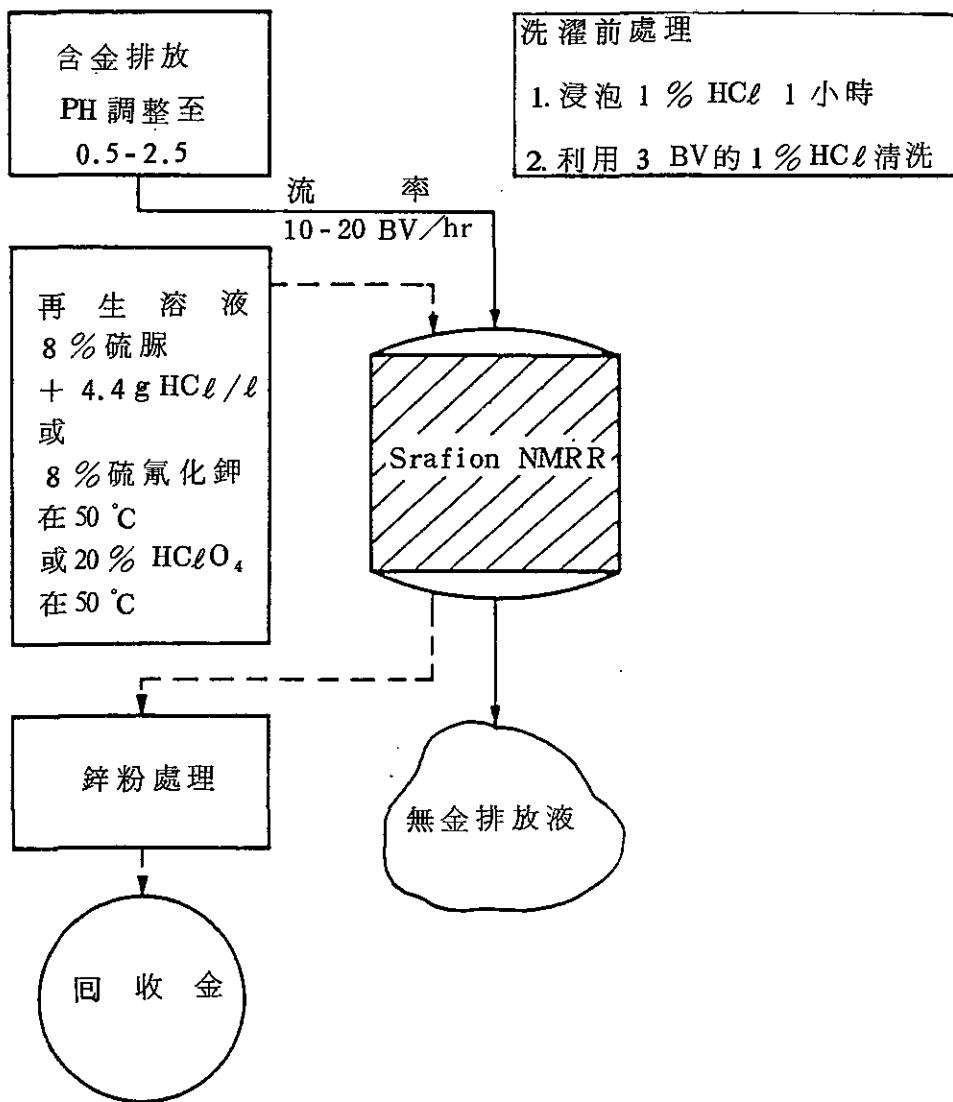


圖 5-18 從含金廢水中回收金之處理流程

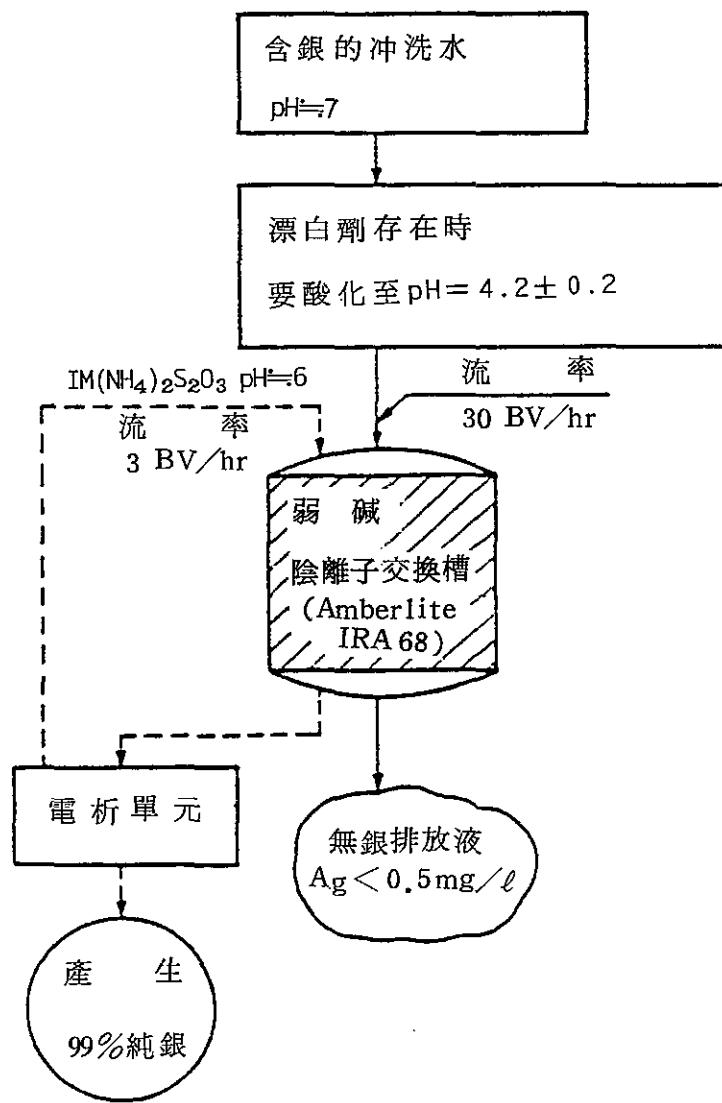


圖 5-19 從含銀廢水中回收銀之處理流程

electrolysis) 從再生廢液中回收^(70,71)。

6. 水的回收 (water recovery) 和管理處理 (end-of-pipe treatment)

前面所討論的，大都把注意力集中在金屬的回收，但有時候，回收水可能較回收重金屬，更吸引人，特別是當廢水中重金屬濃度很低，很容易以離子交換的方法淨化水質；或是當廢水中所含重金屬種類很多，此種情形大都出現在管理不佳，或老舊形式的電鍍廠，無法將其電鍍產生的廢水分流，使一廢水流僅含一種金屬，則離子交換樹脂再生後，所濃縮的金屬為各種金屬的混合體，而沒有回收價值。

圖 5.—20.⁽⁴⁶⁾ 所示為一以離子交換方法，淨化電鍍廢水，回收水使用於洗滌槽的處理流程，明顯地，水的回收，可以大大地減少製程所需用水量，同時亦可以減少廢水產生量，如此，不但可以節省用水所需費用，而且可以降低污染控制所需成本。

離子交換的另一個應用是管末處理，即在廢水排放前，僅將毒性物質 (toxic compounds)，例如重金屬去除，而允許非毒性物質存留在溶液中。離子交換在電鍍廢水的管末處理上，有兩種不同形式的操作：一是於傳統重金屬沈澱處理之後，更進一步以離子交換柱床淨化 (polish) 水質，以降低廢水重金屬濃度，使符合嚴格的廢水排放標準，其處理流程如圖 5.—21. 所示；另一為直接處理廢水，以去除重金屬和金屬氰化物。

目前，離子交換樹脂應用在直接選擇性地去除重金屬和金屬氰化物計有⁽¹¹⁾：(1)以弱酸性陽離子交換樹脂，去除重金屬和二價陽離子，而允許高濃度的鈉離子在其處理水中；(2)以對重金屬具選擇性的弱酸性或鉗合型陽離子交換樹脂，去除重金屬，而允許 Na, Ca, 和 Mg 等通過，如圖 5.—22 所示；(3)以成層狀的柱床 (stratified bed) 內從上至下，依強鹼性陰離子樹脂，弱酸性陽離子樹脂，和強酸性陽離子樹脂之次序成層排列，當廢水進入柱床，先與強鹼性樹脂接觸，其能選擇性地吸附金屬氰化物錯合離子，但允許其他的負價離子通過，然後廢水與鈉型弱酸性陽離子樹脂接觸，此時樹脂對多價的陽離子有很強的吸附力，而樹脂的交換容量依鈣、鎂和金屬陽離子的濃度而定，最後廢水與一氫型強酸性陽離子樹脂接觸，由於氫離子的交換反

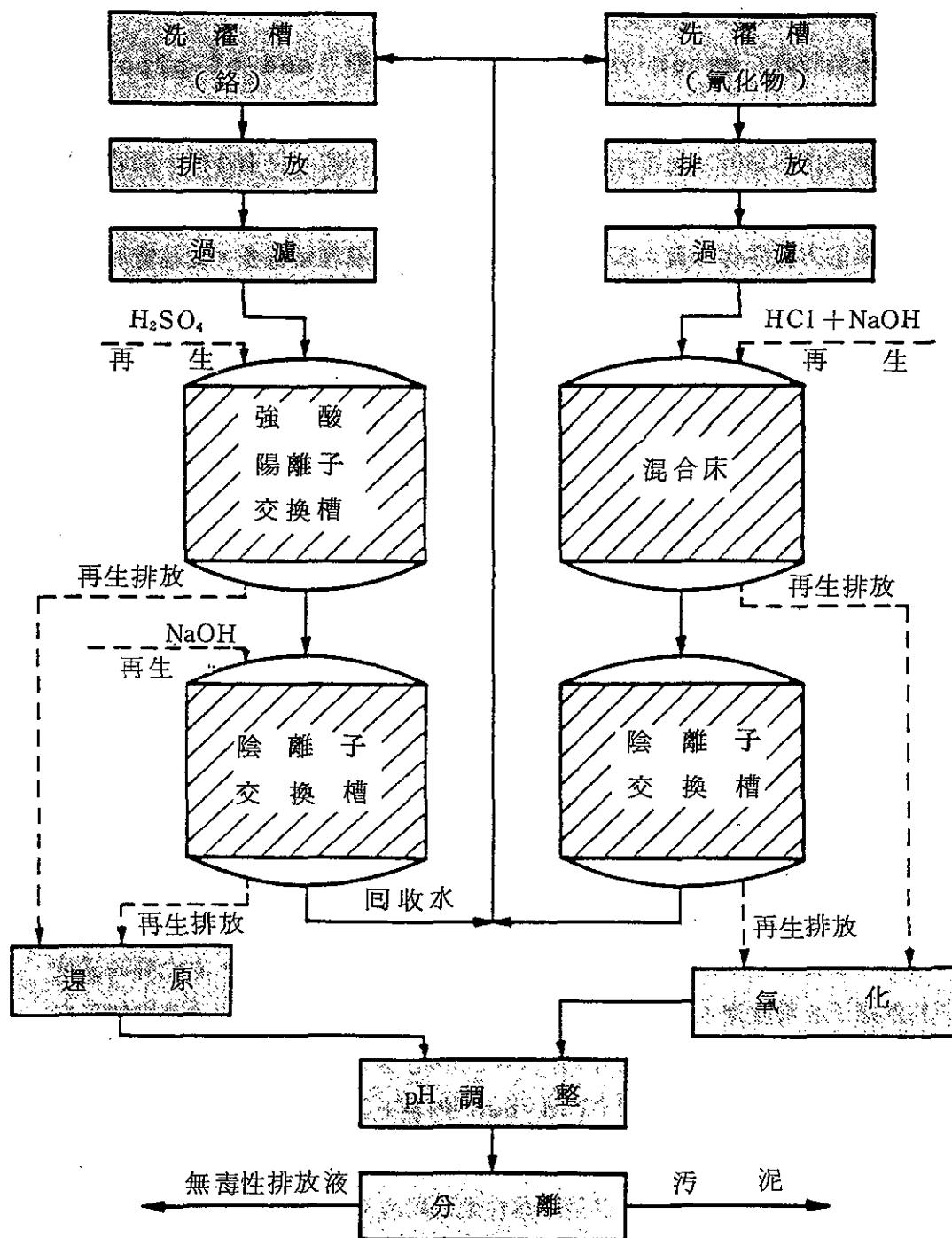
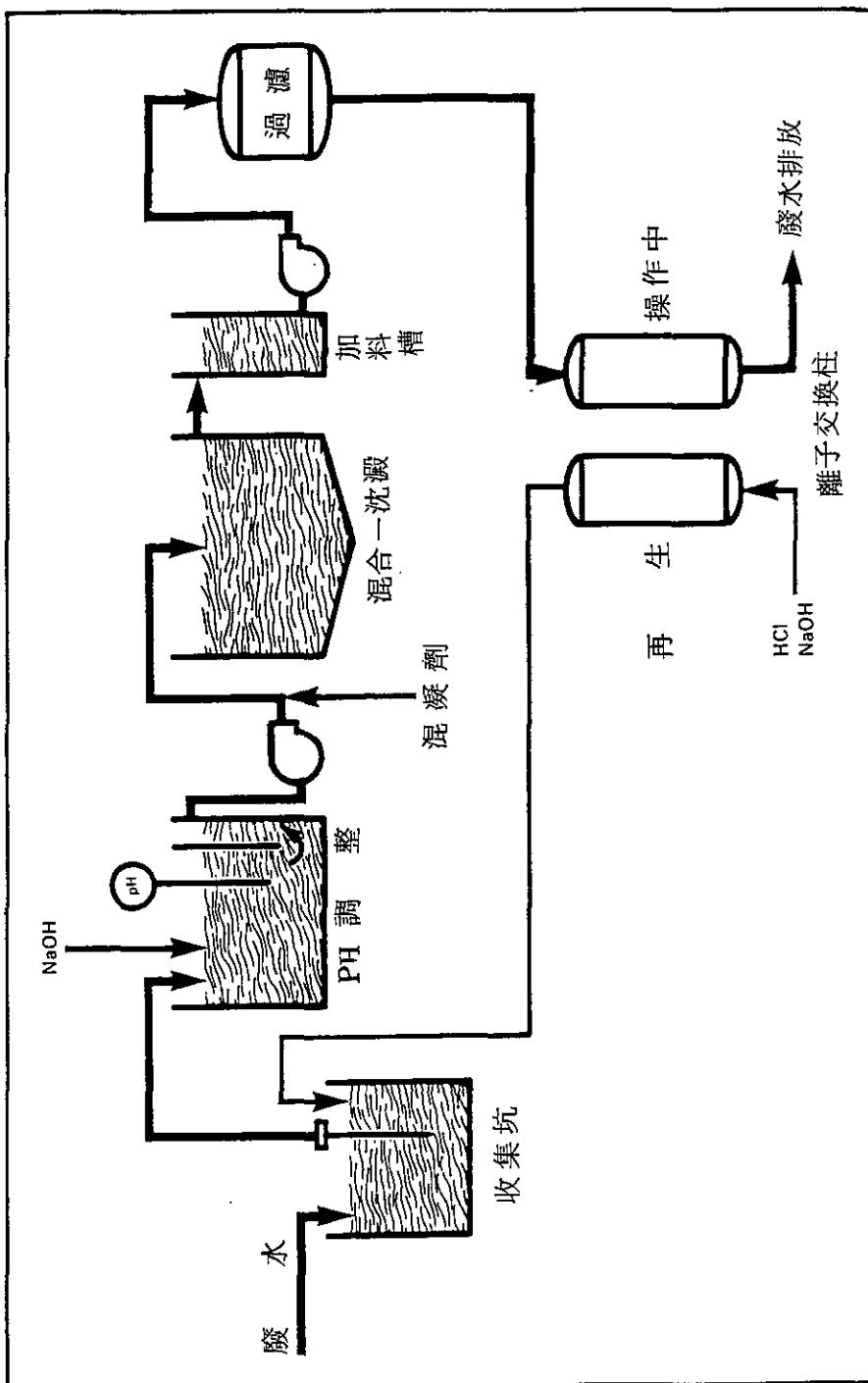


圖 5—20 從電鍍廢水中回收水之處理流程

圖 5—21 離子交換配合傳統重金屬沈澱處理之流程



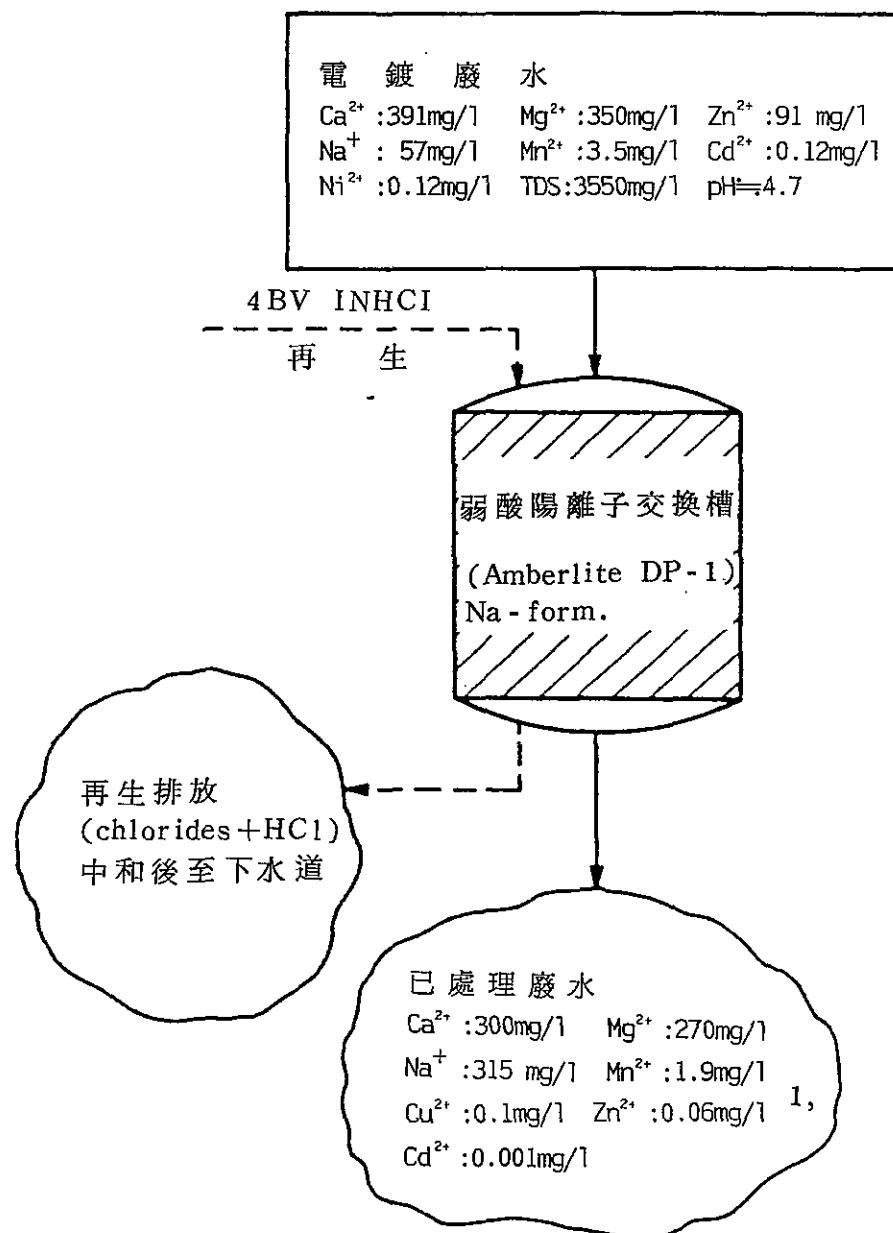


圖 5 - 22 從電鍍廢水中，以離子交換法
直接去除重金屬之處理流程

應，能平衡在操作開始時上升的 PH 值，再生時，則先以 20% HCl 溶液，由上至下同流向再生，此時酸能將陰離子樹脂上的金屬氯化物洗出，並將其轉化成氫型，而同時酸能將弱酸性樹脂上的重金屬和二價陽離子洗出，使其成為氫型，此外強酸性樹脂亦再生成氫型，接著再以 -20% NaOH 溶液淋洗柱床，NaOH 能將陰離子樹脂轉變成氫氧化型，並將酸洗時，所形成的任何金屬氯化物錯離子洗出，同時弱酸性陽離子樹脂被轉變成鈉型，但強酸性樹脂仍保持氫型，因 NaOH 在到達強酸性樹脂時已耗盡。

上述的任何方法，廢水在進入離子交換單元之前，必須做適當的預處理，包括調整 PH 值至適合離子交換操作的範圍，過濾以去除懸浮固體物，避免破壞 (foul) 樹脂。此外，離子交換所去除的污染物，將被濃縮在再生廢液內，故須有一小型回分式處理設備，採用傳統中和沈澱方法，以處理再生廢液。若工廠附近，有集中的工業廢棄物處理中心，亦可將此小體積的再生廢液，送至該地處理，而不須放置額外的處理設備。

六、離子交換系統的設計

在設計一離子交換處理系統時，首先需從樹脂製造商，獲得所選用樹脂的基本資料，然後根據廢水的水質和水量，樹脂的交換容量，操作流率等，計算所需離子交換柱床的尺寸大小，柱床數目，再生劑數量，操作循環時間等。本節以下將以一電鍍廢水，採用離子交換方式回收鉻和處理水之處理系統為例，說明其設計步驟。

設計例⁽¹⁹⁾：

某電鍍廠每日廢水量為 100,000 加侖 (gal)，其廢水水溫為 21 °C，而廢水的主要成份為：

$$\text{CrO}_4^{2-} = 150 \text{ mg/l}$$

$$\text{Fe}^{3+} = 10 \text{ mg/l}$$

$$\text{Cu}^{2+} = 20 \text{ mg/l}$$

$$\text{Zn}^{2+} = 15 \text{ mg/l}$$

$$\text{Ni}^{2+} = 35 \text{ mg/l}$$

$$\text{Na}^+ = 16 \text{ mg/l}$$

茲設計一如圖 6.— 1. 所示之回收重鉻酸和水的處理系統（與圖 5.— 12. 相似），同時各離子交換柱床最大直徑將採用二英呎 (ft)。

設計步驟：

1. 選擇本處理系統所將採用的離子交換樹脂

本設計例所採用的強酸性陽離子交換樹脂為 Diamond Shamrock 公司所出產的 Duolite ES-26 型樹脂，強鹼性陰離子交換樹脂亦為 Diamond shamrock 公司所出產的 Duolite A-101D 型樹脂。有關該兩型樹脂的基本資料示如下：

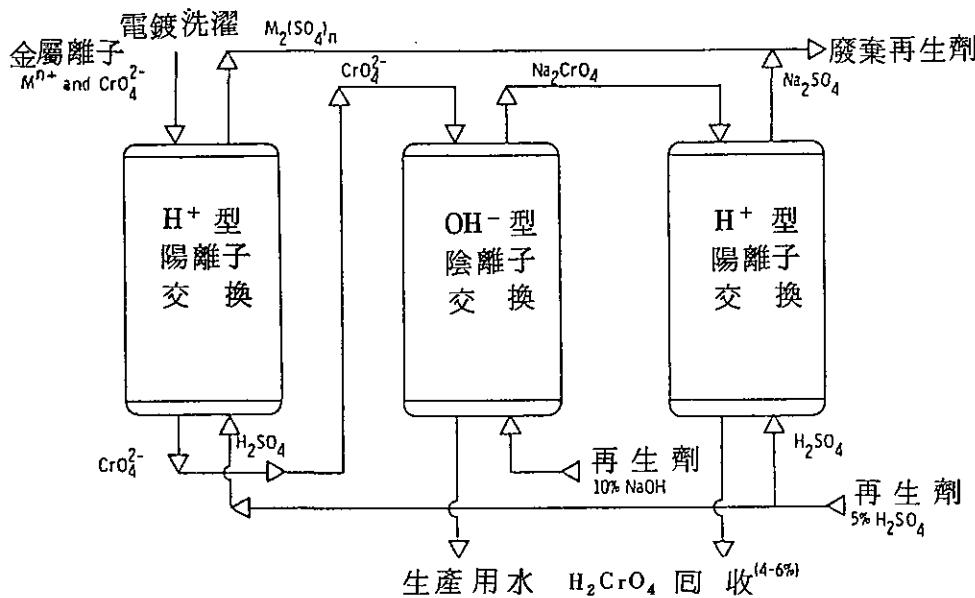


圖 6-1 電鍍廢水回收鉻和水之離子交換處理系統

Duolif Duolite ES-26 型樹脂基本資料

I 洗滌性質

基質：	巨多孔苯乙稀-DVB 共聚物
官能團：	SO_3H
物理型式：	灰色，不透明的小珠
比重：	1.27 (H form)
裝置重量：	50 lb/cu ft, net
粒子大小：	20-50 mesh, U.S. Std Sieve
單一係數：	1.8 maximum
有效粒徑：	0.45-0.62 mm
持水容量：	48-52% (H form)
總容量：	1.9 eq./l (41.6 Kgr/cu ft, as $CaCO_3$)

II 建議操作狀況

最小床深：	30 in.
反冲洗流率：	see figure below
再生劑濃度：	2-10% H_2SO_4
再生劑流率：	5-10% HCl
再生接觸時間：	minimum 40 min
表面積溢流率：	2-5 gpm/cu ft
壓力降：	See figure below
溫度：	Up to 250°F or 120°C (up to 300°F in sodium cycle)

III H_2SO_4 再 生

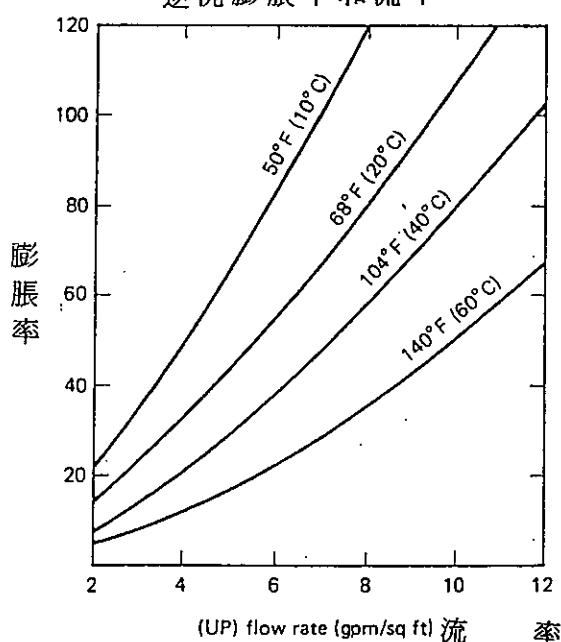
lb/cu ft	容 量 ($Kgr/cu ft.$ as $CaCO_3$)		
	25% Na	50% Na	75% Na
5	18.0	19.3	21.6
8	20.9	22.8	25.3
10	22.4	24.5	26.9
12	23.8	25.8	29.4
15	27.5	29.0	32.9

IV HCl 再 生

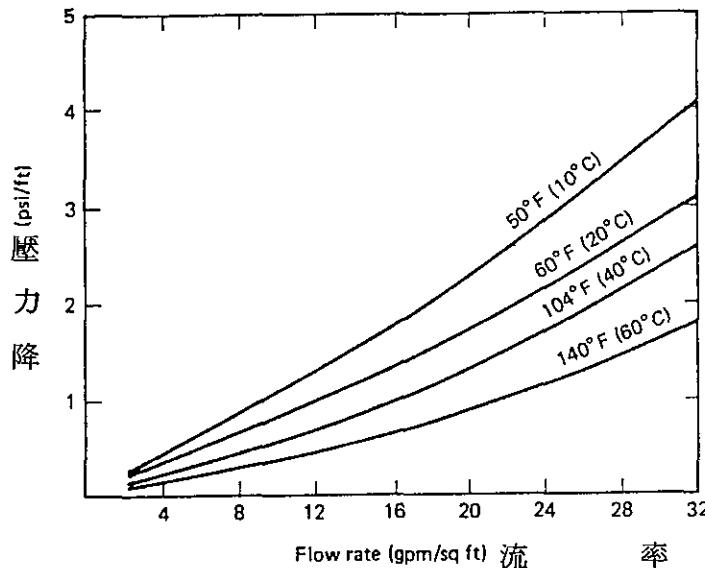
劑 量 (lb/cu ft)	容 量 ($Kgr/cu ft.$ as $CaCO_3$)		
	25% Na	50% Na	75% Na
3	17.3	18.6	19.8
5	23.7	24.7	26.0
8	28.4	28.7	30.5

註：Na 的百分比顯示鈉和總陽離子數成正比

V 逆洗膨脹率和流率



VI 壓力降和流率



VII Duolite A-101 D型樹脂基本資料

基質：	交聯的聚苯乙稀
官能團：	四基氨基塙基 $\text{RC}_6\text{H}_4\text{CH}_2\text{N}(\text{CH}_3)_3\text{Cl}$
物理型式：	弱黃，半透明小珠
比重：	1.10 (Cl form, fully hydrated)
表觀密度：	670-720 g/l (42-45 lb/cu ft) net
空隙體積：	About 34% (2.5 gal/cu ft)
粒子大小範圍：	0.3-1.1 mm (20-50 mesh (U.S. Standard Sieves))
有效粒徑：	0.50-0.55 mm
單一係數：	1.3 to 1.6
持水容量：	48-55% (Cl form)
可逆膨脹性：	20% maximum (Cl to OH form)
PH限制：	None
循環操作時：	60°C (140°F) in OH form
溫度限制：	100°C (212°F) in salt form
耐化學性：	Unaffected by acids, alkalies, and solvents

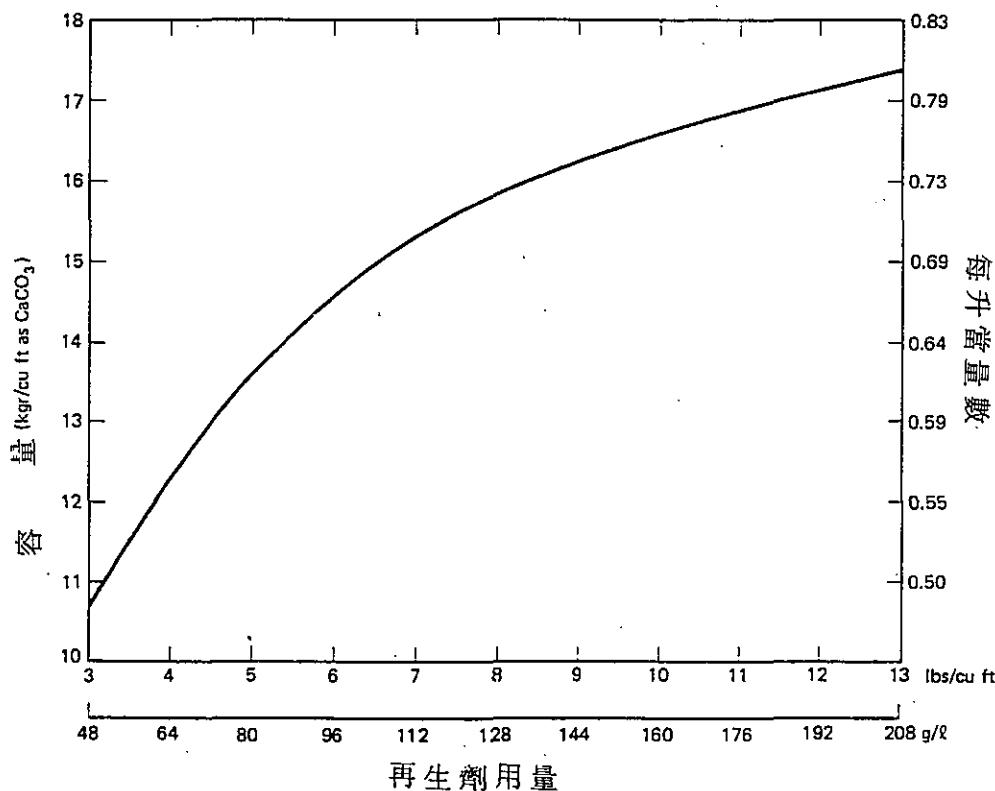
VIII Dualite A-101D 的建議操作狀況和參數

最小床深：	30 in. (75 cm)
逆洗流量：	2-3 gpm/ft ² (5-7 m/h*). See figure below
再生劑濃度：	4% NaOH
再生劑用量：	5-10 lb NaOH/cu ft (80-160 g/l)
再生劑流量：	0.2 to 0.8 gpm/cu ft (1.5-6.5 bv/ht)
再生劑移動量：	0.2 to 0.8 gpm/cu ft
再生接觸時間：	40 to 60 min
洗滌流量：	2 gpm/cu ft (16 bv/h)
洗滌容量：	30-70 gal/cu ft (4-9 bv/h)
表面積溢流率：	Up to 5 gpm/cu ft (40 bv/h)
壓力損失：	See Figure below

* m/h: meters per hour

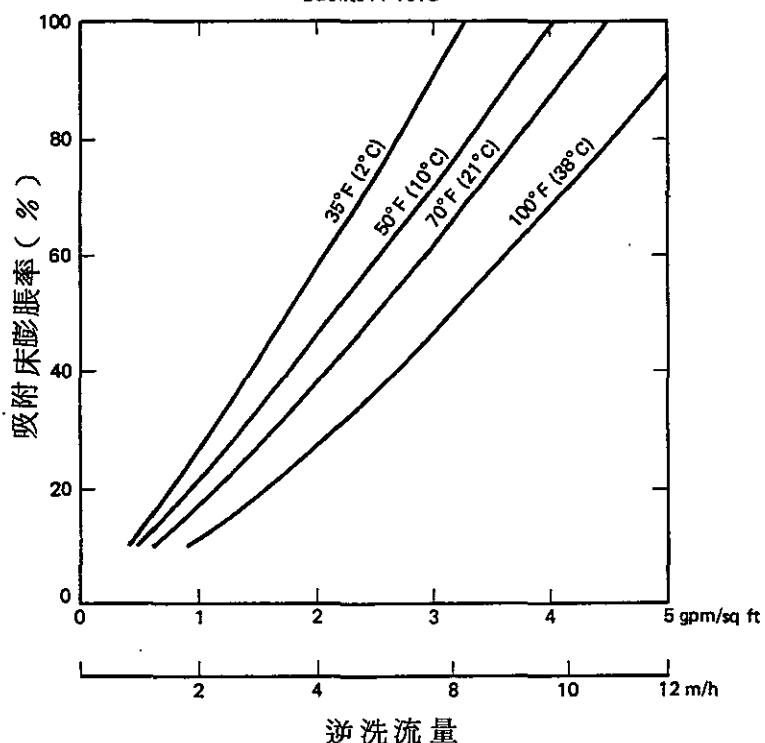
† bv/h: bed volumes per hour

IX 再生劑用量—操作容量圖



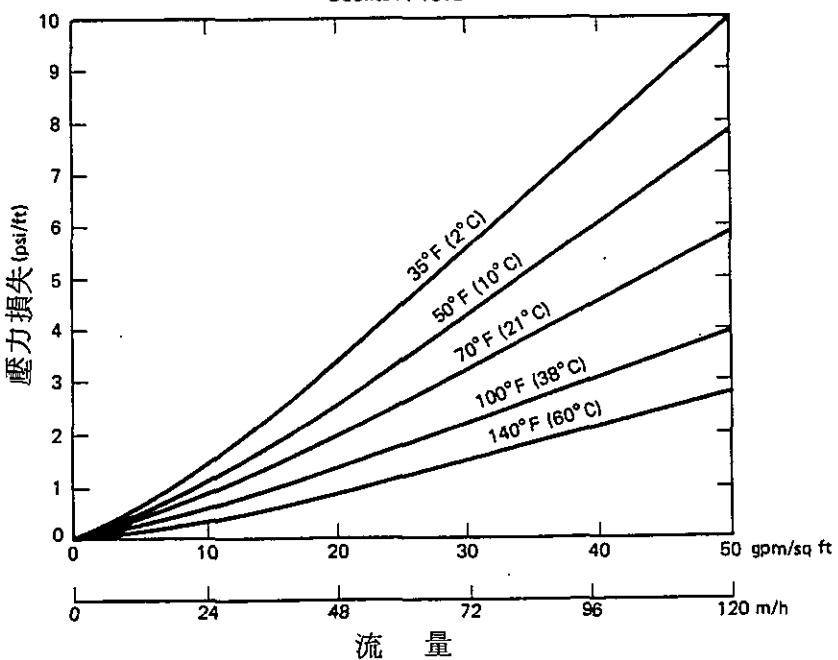
X 吸附床膨脹率逆洗流量圖

Duolite A-101D



XI 壓力損失 - 流量圖

Duolite A-101D



2. 設計第一個陽離子交換單元

(1) 計算每日將去除之金屬離子的總當量數

(a) 將各陽離子的濃度單位轉化成當量濃度，然後計算總陽離子當量濃度

$$\text{eq. Fe}^{3+}/\ell = 10 \frac{\text{mg}}{\ell} \times \frac{1\text{mole}}{55.8\text{g}} \times \frac{1\text{g}}{1000\text{mg}} \times \frac{3\text{eq.}}{1\text{mole}}$$

$$= 0.00054 \frac{\text{eq.}}{\ell}$$

$$\text{eq. Cu}^{2+}/\ell = 20 \frac{\text{mg}}{\ell} \times \frac{1\text{mole}}{63.5\text{g}} \times \frac{1\text{g}}{1000\text{mg}} \times \frac{2\text{eq.}}{1\text{mole}}$$

$$= 0.00063 \frac{\text{eq.}}{\ell}$$

$$\text{eq. Zn}^{2+}/\ell = 15 \frac{\text{mg}}{\ell} \times \frac{1\text{mole}}{65.4\text{g}} \times \frac{1\text{g}}{1000\text{mg}} \times \frac{2\text{eq.}}{1\text{mole}}$$

$$= 0.00046 \frac{\text{eq.}}{\ell}$$

$$\text{eq. Ni}^{2+}/\ell = 35 \frac{\text{mg}}{\ell} \times \frac{1\text{mole}}{58.7\text{g}} \times \frac{1\text{g}}{1000\text{mg}} \times \frac{2\text{eq.}}{1\text{mole}}$$

$$= 0.00119 \frac{\text{eq.}}{\ell}$$

$$\text{eq. Na}^{+}/\ell = 16 \frac{\text{mg}}{\ell} \times \frac{1\text{mole}}{23\text{g}} \times \frac{1\text{g}}{1000\text{mg}} \times \frac{1\text{eq.}}{1\text{mole}}$$

$$= 0.00070 \frac{\text{eq.}}{\ell}$$

$$\text{總陽離子濃度} = 0.00352 \frac{\text{eq.}}{\ell}$$

(b) 計算每日所去除之金屬離子的總當量數

$$\text{金屬離子的去除總量 (eq./日)} = 0.00352 \frac{\text{eq.}}{\ell} \times 3.78 \frac{\ell}{\text{gal}}$$

$$\times 100,000 \frac{\text{gal}}{\text{日}} = 1323 \text{ eq./日}$$

(2) 從樹脂製造商的資料，選擇所欲使用的再生劑量和其可獲得的樹脂交換容量

(a) 計算鈉離子佔總陽離子的百分比：

$$\frac{0.00070}{0.00352} \times 100 = 20\%$$

(b) 假設將使用 $-10\% \text{HCl}$ 溶液為再生劑，資料 IV 顯示 $25\% \text{Na}$ (最接近 20%)，在再生劑量為 $5 \text{lb}/\text{ft}^3$ 樹脂時，可獲得柱床的交換容量為 $23.7 \text{kg r}/\text{ft}^3$ as CaCO_3 。若將非理想的操作情況—並考慮，假設樹脂交換容量將減少 20% ，則設計用的交換容量將為 $19 \text{kg r}/\text{ft}^3$ as CaCO_3 。

(c) 將交換容量的單位轉換成 eq/ℓ 樹脂的單位

$$19 \frac{\text{kg r}}{\text{ft}^3} \times \frac{1\text{g}}{15.43\text{gr}} \times \frac{1000\text{gr}}{1\text{kg r}} \times \frac{1\text{ft}^3}{28.32\ell} \times \frac{1\text{mole}}{100\text{g}}$$

$$\times \frac{2\text{eq.}}{1\text{mole}} = 0.87 \text{ eq.}/\ell$$

(3) 設計交換柱床。假設柱床高度 36 英吋，操作流率為 $3 \text{gpm}/\text{ft}^2$ 。

$$(a) \text{每一柱床斷面積} = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (2)^2}{4} = 3.14 \text{ ft}^2$$

$$(b) \text{每一柱床體積} = (\text{面積})(\text{高度}) = (3.14 \text{ ft}^2) (\frac{36}{12})$$

$$= 9.4 \text{ ft}^3$$

$$(c) \text{所需總體積} = \frac{\text{總流量}}{\text{操作流率}} = \frac{100,000\text{gal/day}}{3 \frac{\text{gal}}{\text{min-ft}^2} \times 1440 \frac{\text{min}}{\text{day}}}$$

$$= 23.1 \text{ ft}^3$$

$$(d) \text{所需柱床數目} = \frac{\text{總體積}}{\text{單一柱床體積}} = \frac{23.1 \text{ ft}^3}{9.4 \text{ ft}^3} = 2.46 \text{, 故使用 3 個柱床。}$$

(4) 計算每一柱床的交換容量

$$\text{柱床交換容量} = (0.87 \frac{\text{eq.}}{\ell}) (9.4 \text{ ft}^3) (28.3 \frac{\ell}{\text{ft}^3}) = 231 \text{ eq.}$$

(5) 計算柱床操作交換階段所需時間 (service time)

$$\begin{aligned} \text{交換操作所需時間} &= \frac{\text{柱床交換容量}}{(\text{每日所去除之金屬離子的總當量}) / (\text{柱床數目})} \\ &= \frac{231 \text{ eq.}}{(1323 \text{ eq./day}) / (3)} = 0.524 \text{ 天} = 12.6 \text{ 小時} \end{aligned}$$

(6) 計算每一柱床所需 10% HCl 再生劑的數量。由附錄三資料，10% HCl 溶液相當於每加侖含有 0.8741 磅 (1b) HCl 。

$$\text{再生劑體積 (gal)} = \frac{1 \text{ gal}}{0.8741 \text{ lb}} \times 5 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \times 9.4 \text{ ft}^3 = 54 \text{ gal}$$

(7) 計算再生階段所需操作時間，再生劑流率選用 0.5 gpm / ft³

$$\text{再生操作所需時間} = \frac{54 \text{ gal}}{\frac{0.5 \text{ gal}}{\text{min} \cdot \text{ft}^3} (9.4 \text{ ft}^3) (60 \frac{\text{min}}{\text{hr}})} = 0.19 \text{ 小時}$$

選用一最小再生操作時間為 30 分鐘或 0.5 小時

(8) 假設反洗時，柱床需擴張 60%，則資料 V 顯示 ES-26 型樹脂所需反洗流率為 6.5 gpm / ft²

(9) 計算總操作循環時間，假設反洗需 15 分鐘，洗滌需 40 分鐘

$$\begin{aligned} \text{總操作循環時間} &= 12.6 \text{ hr} + 0.5 \text{ hr} + \frac{15}{60} + \frac{40}{60} \\ &= 14 \text{ 小時} \end{aligned}$$

3. 設計陰離子交換單元

(1) 計算每日將去除之鉻酸鹽離子的總當量數

(a) 將鉻酸鹽離子濃度單位轉化成當量濃度

$$\begin{aligned} \text{eq. CrO}_4^{2-} / \ell &= 150 \frac{\text{mg}}{\ell} \times \frac{1 \text{ mole}}{116 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \times \frac{2 \text{ eq.}}{1 \text{ mole}} \\ &= 0.0026 \frac{\text{eq.}}{\ell} \end{aligned}$$

(b) 計算每日所去除之鉻酸鹽離子的總當量數

$$\text{總離子去除量 (eq / 日)} = 0.0026 \frac{\text{eq.}}{\ell} \times 3.78 \frac{\ell}{\text{gal}}$$

$$\times 100,000 \frac{\text{gal}}{\text{day}} = 983 \text{ eq/day}$$

(2) 從樹脂製造商的資料，選用所欲使用的再生劑量和其可獲得的樹脂交換容量

(a) 由資料 IX 知，再生劑量為 10 lb/ft^3 樹脂時，柱床所獲得的交換容量為 0.76 eq./ft^3

(3) 設計交換柱床，假設柱床高度為 36 英吋，操作流率為 3 gpm/ft^2

(a) 每一柱床斷面積 = 3.14 ft^2

(b) 每一柱床體積 = 9.4 ft^3

(c) 所需總體積 = 23.1 ft^3

(d) 所需柱床數目 = 3

(4) 計算每一柱床的交換容量

$$\text{柱床交換容量} = (0.76 \frac{\text{eq.}}{\text{ft}^3}) (9.4 \text{ ft}^3) (28.3 \frac{\text{ft}}{\text{ft}^3}) = 202 \text{ eq.}$$

(5) 計算柱床操作交換階段所需時間

$$\begin{aligned} \text{交換操作所需時間} &= \frac{202 \text{ eq.}}{(983 \text{ eq./day}) / (3)} \\ &= 0.616 \text{ 天} = 14.8 \text{ 小時} \end{aligned}$$

(6) 計算每一柱床所需 4% NaOH 再生劑的數量，由附錄三資料，4% NaOH 相當於每加侖含有 0.3481 磅 NaOH。

$$\text{再生劑體積 (gal)} = \frac{1 \text{ gal}}{0.3481 \text{ lb}} \times 10 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \times 9.4 \text{ ft}^3 = 270 \text{ gal}$$

(7) 計算再生階段所需操作時間。再生劑流率選用 0.5 gpm/ft^2

$$\text{再生操作所需時間} = \frac{270 \text{ gal}}{\frac{0.5 \text{ gal}}{\text{min-ft}^2} (9.4 \text{ ft}^3) (60 \frac{\text{min}}{\text{hr}})} = 0.96 \text{ 小時}$$

(8) 假設反洗時，柱床需擴張 0%，則資料 X 顯示 A-101D 型樹脂所需反洗流率為 3 gpm/ft^2 。

(9) 計算總循環操作時間，假設反洗需 15 分鐘，洗滌需 40 分鐘

$$\text{總操作循環時間} = 14.8 \text{ hr} + 0.96 \text{ hr} + \frac{15}{60} + \frac{40}{60} = 16.7 \text{ 小時}$$

4. 設計第二個陽離子交換單元

(1) 計算每一再生循環所將去除的鈉離子當量數。注意，鈉離子所將去除的量，依再生陰離子交換單元時，所使用 NaOH 的數量而定。

鈉離子所將去除量 (eq. / regeneration cycle)

$$= 10 \frac{1\text{b}}{\text{ft}^3} \times \frac{9.4\text{ ft}^3}{1\text{column}} \times 3\text{ columns} \times 454 \frac{\text{g}}{1\text{b}} \times \frac{1\text{eq.}}{40\text{g}}$$

$$= 3201 \text{ eq. / cycle}$$

(2) 計算所將處理的總流量。進入第二個陽離子交換單元的總流量，相當於再生陰離子交換單元所使用的總再生劑流量：

$$\text{總流量} = 270 \frac{\text{gal}}{\text{Column}} \times 3 \text{ columns} = 810 \text{ gal}$$

(3) 從樹脂製造商的資料，選用所欲使用的再生劑量和其可獲得的樹脂交換容量

(a) 鈉離子佔總陽離子的百分比，在本情況大約接近 100 %。

(b) 假設將使用 -10 % HCl 溶液為再生劑，同時再生劑量為 51b / ft³ 樹脂，因資料 IV 中沒有 100 % Na 的資料，所以假設可獲得的交換容量為 26kggr / ft³ as CaCO₃，同時無須修正非理想的操作情況。

(c) 將交換容量的單位轉換成 eq / l 樹脂的單位

$$26 \frac{\text{kggr}}{\text{ft}^3} \times \frac{1\text{g}}{15.43\text{gr}} \times \frac{1000\text{gr}}{1\text{kggr}} \times \frac{1\text{ft}^3}{28.32\text{l}}$$

$$\times \frac{1\text{mole}}{100\text{g}} \times \frac{2\text{eq.}}{1\text{mole}} = 1.19 \text{ eq/l}$$

(4) 設計交換柱床，假設柱床高度為 60 英吋，操作流率為 1gpm / ft³

(a) 每一柱床斷面積 = 3.14 ft²

$$(b) 每一柱床體積 = (\text{面積})(\text{高度}) = (3.14)(\frac{60}{12}) = 15.7\text{ft}^3$$

$$(c) \text{所需總體積} = \frac{\text{總流量}}{\text{操作流率}} = \frac{810\text{gal/cycle} \times \frac{24}{16.7} \frac{\text{cycle}}{\text{day}}}{1 \frac{\text{gal}}{\text{min-ft}^3} \times 1440 \frac{\text{min}}{\text{day}}}$$

$$= 0.81 \text{ ft}^3$$

$$(d) \text{ 所需柱床數} = \frac{\text{總體積}}{\text{單一柱床體積}} = \frac{0.81}{15.7} = 0.05, \text{ 使用一個柱床}$$

(5) 計算每一柱床的交換容量

$$\begin{aligned} \text{柱床交換容量} &= (1.19 \frac{\text{eq.}}{\ell}) (15.7 \text{ ft}^3) (28.3 \frac{\ell}{\text{ft}^3}) \\ &= 528.7 \text{ eq.} \end{aligned}$$

注意：柱床交換容量 528.7 eq. 遠小於每一陰離子樹脂再生循環所產生而需去除的鈉離子當量數 (3201 eq / cycle)。而通常在再生第二個陽離子交換單元之前，必須要其能先將從陰離子交換單元而來的再生液完全處理完畢，故此，為了達到此目的，必須增加第二陽離子交換單元的柱床數目。

(6) 計算在再生第二陽離子交換單元之前，能完整處理來自陰離子交換單元的再生液所需柱床數目

$$\text{柱床數目} = \frac{\text{將被交換的 Na 級子總當量數}}{\text{單一柱床的交換容量}} = \frac{3201}{528.7} = 6.05,$$

使用 7 個柱床。

七、結論

離子交換應用的範圍相當地廣泛，然而因其兼具有污染防治和有用物質回收的功能，所以應用在工業廢水處理時，特別是金屬表面處理業和電鍍業廢水，尤具有使用價值。由本文所整理資料顯示，離子交換處理單元，在歐、美、日等國已受到相當普遍歡迎，頗值得國內業界參考研究採用。

不過，在選用離子交換的處理方式時，有幾點須特別瞭解的，第一：離子交換最主要的操作費用是再生劑的藥品成本，同時再生廢液的處理與處置亦是一大困擾，所以如何提高再生效率和回收循環再利用再生劑，為一值得研究與關心的問題；第二：所選用的離子交換樹脂，必須對所欲處理的廢水，具有相當良好的物理和化學穩定性，一般而言，化學性破壞樹脂的現象有氧化作用，熱破壞(*thermal decomposition*)，和有機物的垢積(*fouling*)，而物理性破壞樹脂的現象有磨損(*attrition*)，和滲透壓(*osmotic pressure*)所造成樹脂顆粒的擴張與收縮，故適當的預處理廢水和操作控制，乃是相當需要的；第三：離子交換單元，依原廢水的性質與污染物濃度，所欲處理水的純度，及有用物質回收的要求等因素，有時需與其他處理單元共同配合，以達到處理目的，而可與離子交換單元組合的處理單元計有，過濾，混凝、吸附、沈澱、逆滲透、電透析、祛氣(*degasification*)、消毒、蒸餾或蒸發，氧化或還原等，有關各單元組合而成的處理流程，在本文第五節已有所述，可供參考。

八、参考文献

1. Thompson, H.S., J.Royal Agr. Soc., 11,68 (1850).
2. Gans, R., Jahrb. Preuss. Geol. Landesanstalt (Berlin), 26, 179 (1905).
3. Bruce, W.H., and R.Riley, U.S. Patent 2,139,299 to Permutit Co. (1938).
4. General Zeolite Co., German Patent 588,740 (1933).
5. Adams, B.A., and E.L. Holmes, J. Soc. Chem. Ind., T54, 1 (1935).
6. Arden, T.V., Water Purification by Ion Exchange, pp. 164-171, Plenum Press, New York (1968).
7. Anon., Env. Sci. Tech., 11,643 (1977).
8. Jordan, D.R., et al., Amer. Power Conf., Chicago, ILL. (Apr., 1976)
9. Gerstner, F., "Recovery of Copper from Wastes," in Ion Exchange Technology, Ed. Nachod, F.C. and Schubert, J., Academic Press, New York, P. 340 (1956).
10. Morrison, W.S., "Chromium Recovery from Plating Solution", in Ion Exchange Technology, Ed. Nachod, F.C. and Schubert, J., Academic Press, New York, p. 321-339 (1956).
11. U.S. EPA, "Control and Treatment Technology for the Metal Finishing Industry: Ion Exchange", Technology Transfer, EPA 625/8-81-007 (1981).
12. Barcicki, J., et al., "Ion Exchange Method for

- Water, Ammonia and Nitrates Recovery from Nitrogen Industry Wastewater", in Physicochemical Methods for Water and Wastewater Treatment , Ed. Pawlowski, L., Pergamon Press, P. 237-241 (1980).
13. Calmon, C., "Trace Heavy Metal Removal by Ion Exchange", in Traces of Heavy Metals in Water Removal Processes and Monitoring, Ed. Sabadell , J.E., US EPA-902/9-74-001 (1974).
 14. Weber, W.J.Jr., physicochemical processes for Water Quality Control, Wiley-Interscience, New York (1972).
 15. Calmon,C., and H.Gold, Ion Exchange for Pollution Control, Vol.I, CRC Press, Inc. (1979)
 16. Abrams, I.M., and L.Benezra", Ion-Exchange Do-lymer", in Encyclopedia of polymer Science and Technology, John-wiley & Sons,Inc., New York(1967) .
 17. Helms,R.F., "Evaluation of Ion Exchange for Demineralization of Wastewater", Master's Thesis, University of Colorado, Boulder, Co.(1973)
 18. Wheaton,R.M., and L.J. Lefevre, "Ion Exchange" in Encyclopedia of chemical Technology, 3rd Ed., Vol.I3, John Wiley & Sons (1981)
 19. Benefield, L.D., et al., Process Chemistry for Water and Wastewater Treatment, Prentice-Hall Inc., N.J. (1982)
 20. Sanks, R.L., "Ion Exchange" in Water Treatment

- Plant Design for the Practicing Engineer, Ed., Sanks, R.L., Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Michigan (1978).
21. Calmon, C., "Specific and Chelate Exchangers: New Functional Polymers for Water and Wastewater Treatment", J. AWWA, Vol. 73, P.652-656 (1981)
 22. Helfferich, F., Ion Exchange, McGraw-Hill, New York (1962).
 23. Abrams, I.M., "Countercurrent Ion Exchange with Fixed Beds", Industrial water Engineering, 18/ (January, 1973).
 24. Gold, H., and C. Calmon, "Ion Exchange: Present Status, Needs and Trends, AICHE Symposium Series, No.192, Vol. 76 (1980)
 25. 高肇藩, 工業用水, 中國土木水利工程學會編印。
 26. Clifford, D., "Multicomponent Ion-Exchange Calculations for Selected Ion Separations", Ind. Eng. chem. Fundam, 21,P.141-153 (1982) .
 27. Liberti, L., et al., "Ammonium Phosphate Recovery from Urban Sewage by Selective Ion Exchange", in Physicochemical Methods for Water and Wastewater Treatment, Ed. Pawlowski, L., Pergamon Press (1980) .
 28. Liberti, L. and R. Passino, "An Ion Exchange Process to Recover Nutrients from Sewage", Resource Recovery and Conservation, 6'P.263-273 (1981) .
 29. Stomquist, D.M. and A.C. Reents, "Removal of Cations from chromic Acid Solutions," Proc. 6th

Ind. Waste Conf., Series 76, Purdue University,
Lafayette, IN. P.289 (1952)

30. Costa,R.L., "Regeneration of Chromic Acid Solutions by Ion Exchange", Ind. Eng. Chem., 42, P. 308-311 (1950).
31. Pawlowski,L. and J. Barcicki," Cation Exchangers as Adsorption Media in Recycling of Concentrated Chromium Plating Baths", Conservation and Recycling, Vol.1,P.289-291 (1977).
32. Hayashi,T. and k. Nojisi, "Regeneration of Chromic Plating Bath", Jap. patent 7930995 (1977).
33. Anderson,R.E., "Ion Exchange for Pitching Magnesium Sheet", Proc. 45th Annual Tech.Meeting, American Electroplaters Society, New Jersey (1958).
34. Hesler,J.C., "Recovery and Treatment of Metal Finishing Wastes by Ion Exchange Processes", Proc. 21st Ann. Water Conference, Eng. Soc. West Pa., Pittsburgh, P .89(1960).
35. Ghossi,P. and A.A. Donatelli, "Recovery of Fluoboric Acid from Waste Copper Fluoborate-Fluoboric Acid Solutions by Ion Exchange", Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop., 19, P.526-530 (1980).
36. Haines,A.k., et al., "The Recovery of Zinc from Pickle Liquors by Ion Exchange", Journal of South Afr. Inst. Mining and Metallurg., 74, P. 149-157 (1973).

37. Tunley,T.H., et.al., "The Metsep Process for the Separation and Recovery of Zinc, Iron and Hydrochloric Acid from Spent Pickle Liguors", Journal of South Afr. Inst. Mining and Metallurg., 76, P.423-427 (1976).
38. Ishigoroko,A.,et.al., "Treatment of Waste Solution Containing Sulfuric Acid, Nickel and Tin from Surface Treatment of Aluminium," Jap. Patent No. 7844440 (1976).
39. Hatch, M.J., and J.A. Dillon, "Acid Retardation" Ind. Eng. Chem. Process Design and Development, 1, P.253-263 (1963) .
40. Schuldt, A.A., and R.R.,Haber, "Chromate and Water Recovery from tin Plating Operation Using Ion Exchange Technologies", Proc. 37th Int. Water Conf., Eng. Soc. West Pa., Pittsburgh, 37, P.29 (1976).
41. Kunin,R., "Ion Exchange for the Metal products finisher", Prod. Finish. (April-June, 1969)
42. Panswad,T. and U. Tan-ooshin, "Chromic Acid Reclamation from an Electroplating Wastewater" , Proc. Int. Symp. Waste Treat. Util., Waterloo, Ontario, P.127-139(1978).
43. Walker,C.A. and W.Zabban, "Disposal of Plating Room Wastes", Plating, 40, 165 and 269(1953)
44. Tallmadge, J.A., "Ion Exchange Treatment of Mixed Electroplating Wastes", Ind.Eng.Chem. Process Des.Dev., 6,P.419-423(1967) .
45. Weiner,R., Effluent Treatment in the Metal Fi-

- nishing Industry, Robert Draper Ltd., Teddington, England, P.157(1963).
- 46. Murai,Y., T.Yamadera, and Y. koike, "An Experience on Reuse of Wastewater Discharging from Metal Plating Shop" , Desalination, 23, P.97-104 (1977).
 - 47. Bolto,B.A. and L.Pawlowski, "Reclamation of Wastewater Constituents by Ion Exchange", Effluent and Water Treatment Journal, (January, 1983).
 - 48. Calmon,C. and H.Gold, Ion Exchange for Pollution Control, Vol.II, CRC Press, Inc. (1979).
 - 49. Waitz,H., "Ion Exchange in Heavy Metals Removal and Recovery", Amber Hi-lites, No.162, philadelphia (1979).
 - 50. Price,N.J., S.Cutfield, and J.G.Reid, "Nickel Recovery from Nickel Refinery Waste Liquor", Proc. Aust. I.M.M. Conference, North Queens-
land, P.355 (1978).
 - 51. Kalganora,O.P., et.al., "Sorptional Extraction of Nickel from Drainage Waters of the 'severo-nickel' Plant", Tsvetn.Met., 2, P.42-3 (1978)
 - 52. Hashimoto,Y., M.Shriraishi, and H.Nakamura, "Wastewater Recycling and Metal Recovery", Jap. Patent No.7809054 (1978).
 - 53. Posprichal, F. and R.Styblo, "Ion Exchange Recovery of Nickel from Wastewater", poorchové Upravy, 19, 24-27(1979).

54. Khomogorov,A.G.,et.al., "Sorbent for the Extraction of Nickel from Solutions", Tsevtn. Met., 2 , P.29-30 (1981)
55. Yamashita, S., Y. Sugihara, T.Miimura, and H. Ueima," Nickel and Recycling from Aluminium Electrolyzed Wastewater," Jap. Patent No.7878944 (1978).
56. Joffe, A.Z., et.al., "Reduction in Environmental Pollution by Wastewater from Cuprammonium Fiber Production", Khim. Volokna, 4, P.50-51(1979).
57. Jones,K.C. and R.R. Grinstead, "Properties and Hydrometallurgical Applications of Two New Chelating Ion Exchange Resins", Chem.and Ind. 637-641(1977).
58. Grinstead, R.R., "Copper-Selective Ion Exchange Resin with Improved Iron Rejection", Journal of Metals, 31, 13-16(1979).
59. Pawlowski, L., et al., "Note on a Continuous Co-untercurrent Ion Exchange with Two Step Regeneration for Zinc Recovery from Synthetic Fiber Plant Wastewater", Water Research, 10, 781-782 (1976).
60. Makita,Z., M.Hayashi, and M.Utsugi, "Recovery of High Purity Zinc", Jap. Patent No. 7761125 (1977).
61. De Jong, G.J. and C.J.N. Rekers", The AKZO Process for the Removal of Mercury from Wastewater , " J.Chromatography, 102, 443-450 (1974).
62. Vis, J.H., "Mercury Recovery from Waste Streams

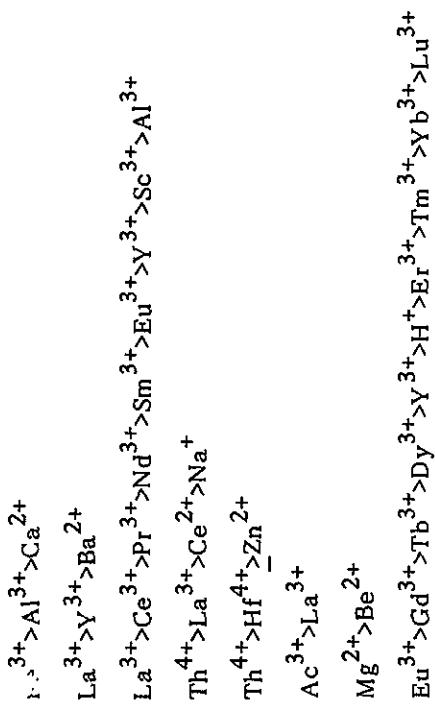
- by Means of the Imac TMR Ion Exchange Process", Chem.Age. India, 31, 481-487 (1980)
63. Gnot,W. and Z.Kociubas", Recovery of Mercury from Wastewater in the Electrolytic Production of Chlorine"; Zesz, Nauk. Politech. Slask. chem., 57-69 (1979).
64. Nagata, M., et al.", Wastewater Treatment in Electronic Parts Plating Plant and Metal Recovery-Gold Recovery from Plating Rinse Waste Water by Ion Exchange", Kenkyu Hokoku-kumamotoken kogyo Shiken jo, 8-13 (1979).
65. Henmi, E., "Recovery of Gold in Washing of Acid Gold-Plating Bath", Jap. Patent No. 7768023 (1977) .
66. Negata, M., et al., "Wastewater Treatment and Recovery of Silver from Wastewater by Ion Exchange, " Kumamotoken kogyo Shikenjo, kenkyu Hokoku, 51, 12-19 (1976) .
67. Negata, M., et al., "Investigations on the Treatment of Effluent from Electronic component Parts Plating plants and the Recovery of Valuables.V. Experiments on the Recovery of Silver from Silver Plating Wastewater", kumamotoken Kogyo Shikenjo, Kenkyu Hokoku, 52, 24-36 (1977).
68. Van Gemert, J.T., "Using and Recovering Silver ", Industrial and Commercial Photography, 42-43 (Aprial/May, 1980) .
69. Degenkolb, D.J. and Scobey, F.J., "Silver Re-

- covery from Photographic Wash Waters by Ion Ex-
change" , SMPTE Journal , 86, 65-68 (1977).
- 70 Mina, R., "Silver Recovery from Photographic
Effluents by Ion Exchange Methods", J.Appl.
Photogr.Eng., 6, 120-125 (1980).
- 71 Cooley, A.C., "Ion Exchange Silver Recovery for
Process EP-2 with Nonregenerated Bleach-fix",
J.Appl.Photogr.Eng., 7, 106-110 (1981).

附錄一 各種樹脂對各種離子相對的選擇性大小

附表 1 — 1

Some Qualitative Affinities of a Sulfonated Copolymer of Styrene and Divinylbenzene



附表 1 — 2

Relative Selectivities of a Carboxylic Acid Exchanger
 $H^+ > Cu^{2+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^{2+} > Na^+$

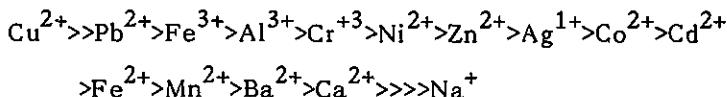
附表 1 — 3

Relative Selectivities of a Chelate Exchanger (Chelex A-Dowex A-1
A-1 (R))

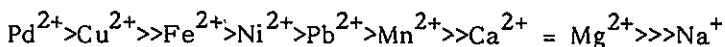
The type of solution is an important factor as some ions form complexes, e.g., Hg^{+2} in a Cl^- solution. The affinity of the chelating resin for various cations compared to Zn^{2+} taken as 1.00 is the following:

Hg^{2+}	1060	Fe^{2+}	0.130
Cu^{2+}	126	Mn^{2+}	0.024
UO_2^{2+}	5.70	Ba^{2+}	0.024
Ni^{2+}	4.40	Ca^{2+}	0.013
Pb^{2+}	3.88	Sr^{2+}	0.013
Zn^{2+}	1.00	Mg^{2+}	0.009
Co^{2+}	0.62	Na^+	10.7
Cd^{2+}	0.39		

The selectivity of the chelating resin depends on the pH, ionic strength and the presence of complexing forming entities in the system in question. The relative order for cations in nitrate or chloride media is



In an acetate buffer



附表 1—4

Order of selectivity of chelate resins

Resin	Order of selectivity*	Comments
IMAC GT-73	$\text{Ag}^{+} > \text{Cu}^{2+} > \text{As} > \text{Sb} > \text{Pb}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Cr}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^{+}$	
Duolite ES-346	$\text{Cu}^{2+} > \text{Au}^{3+} > \text{V}^{3+} > \text{U}^{4+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Ru}^{3+} > \text{Rb}^{+} > \text{Pd}^{2+} > \text{Pt}^{2+}$	very strongly chelated strongly chelated moderately chelated weakly chelated
Duolite ES-486†	$\text{Zn}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Cr}^{3+} > \text{Th}^{4+} > \text{Co}^{3+} > \text{N}^{3-}$	
Duolite ES-487‡	$\text{Ag}^{+} > \text{Si}^{4+} > \text{Sn}^{4+} > \text{Mn}^{2+}$	
Dowex A-1	$\text{Hg}^{2+} > \text{CU}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Mn}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^{+}$ $\text{Pb}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Co}^{2+}$ $\text{Cu}^{2+} > \text{Hg}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Co}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Mn}^{2+} > \text{Ba}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$ $\text{Hg}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{UO}_4^{2-} > \text{Ni}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Co}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Mn}^{2+} > \text{Ba}^{2+}$ $> \text{Ca}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^{+}$ $\text{Cu}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Al}^{3+} > \text{Cr}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Ag}^{+} > \text{Co}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Mn}^{2+} > \text{Ba}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$ $> > \text{Na}^{+}$ $\text{Pd}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Mn}^{2+} > > \text{Ca}^{2+} = \text{Mg}^{2+} > > \text{Na}^{+}$ $\text{Cu}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Co}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Ca}^{2+} = \text{Mg}^{2+} = \text{Al}^{3+}$ $\text{Cr}^{2+} > \text{Ni}^{2+} = \text{Fe}^{2+} > \text{Fe}^{2+} = \text{Al}^{3+} > \text{Cd}^{2+} = \text{Co}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ $\text{Hg}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Ag}^{+} > \text{Cr}^{2+} > \text{Ni}^{2+}$ $\text{Hg}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Co}^{2+} > \text{Mn}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Ba}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > > \text{Na}^{+}$ $\text{Hg}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Co}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Mn}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$	pH 5 pH 2
Dowex XF-4195	$\text{Mo}_{2}\text{O}_7^{4-} > \text{AuCl}_4^- > \text{MnO}_4^- > \text{VO}_4^{3-} > \text{CrO}_4^{2-} > \text{Co}(\text{CN})_4^{3-} > \text{S}_2\text{O}_8^{2-} > \text{BrO}_3^- > \text{IO}_3^-$	at pH 4 in 1000-mg/l. $\text{Ca}^{2+}\text{Cl}_1$, solution chelate for anions
Dowex XF-4196	$\text{Hg}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Al}^{3+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Cr}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Ag}^{+} > \text{Mn}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^{+}$	
Nissco Alm-525	$\text{Hg}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Cr}^{2+} > \text{Ni}^{2+}$	
Diamond CR-10	$\text{Hg}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Co}^{2+} > \text{Mn}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Ba}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > > \text{Na}^{+}$	see Reference 27
Ambertite IRC-718	$\text{Hg}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Co}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Mn}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$	
Sumichelate CR-2	$\text{Mo}_{2}\text{O}_7^{4-} > \text{AuCl}_4^- > \text{MnO}_4^- > \text{VO}_4^{3-} > \text{CrO}_4^{2-} > \text{Co}(\text{CN})_4^{3-} > \text{S}_2\text{O}_8^{2-} > \text{BrO}_3^- > \text{IO}_3^-$	
Unicellex UR-10	$\text{Hg}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Al}^{3+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Cr}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Ag}^{+} > \text{Mn}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^{+}$	
Wofait MC-50	$\text{Cu}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Co}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > \text{Ba}^{2+}$	
Biosorber-M	uptake of U, Ra, Pb, CN, A, O, and other divalent ions; capacity depends on pH	
Lewatit TP-207	$\text{Cu}^{2+} > \text{UO}_4^{2-} > \text{VO} > \text{Pb}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Co}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Mn}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$	
Srafion-MNBR	high capacities for Au, Pt, Rd, Ir, and Rh at low pH	
Sirorez-Cu	pH > 5; Cu, pH > 0, Hg	
Ionac SR-3	high capacities for Au, Pt, Pd, Ir and Rh at low pH	
Sumichelate Q-10	$\text{HgCl}_2 > \text{AuCl}_4^- > \text{Ag} > \text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$	

*From manufacturer's bulletin

†Cd, Zn, and CO at pH 3.5; Al at pH 4; Ba at pH 5.5; pH of maximum capacity: Hg²⁺ 0.5; Cu²⁺ 2; Ni²⁺ 3; Pb²⁺ 2.5; Mn²⁺ 5; Ca²⁺ 5; Mg²⁺ 5.5; Na⁺ 7
‡pH of maximum capacity: Pb²⁺ 2; Cu²⁺ 2.5; Cd²⁺ 3; Ni²⁺ 4.5; Co²⁺ 4.5

附表 1—5

Selectivity Order of a Weak-Base Anion Exchanger
 $\text{OH}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{CrO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{PO}_4^{3-} > \text{MoO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Br}^- > \text{Cr}^- > \text{F}^-$

附錄二 各類型離子交換樹脂的特性

Material	Shape of particles	Bulk wet density (drained), lb./cu. ft.	Moisture content (drained), % by weight	Swelling due to exchange, %	Max. operating temp., °F	Operating pH range	Exchange capacity		Trade designation
							Dry, meq./g.	Wet, meq./ml.	
Strongly acidic									
Sulfonated polystyrene	S	44-50	84-92	1	-250(H), ~300(Na)	0-14	5.0-5.8	0.4	Diason SK1A ^a ; Dowex ^{a,b} 50-50W ^a
Homogeneous resin		45	72-82	12-15			5.5	0.7	Diason SK102; Dowex ^{a,b} 50, 50W ^a ; Permutit (≡ Orzolith) RS-20 ^a
1% cross-linked									Diason SK104; Dowex ^{a,b} 50, 50W ^a ; Duolite CS-20X4; Permutit (≡ Orzolith) RS-40 ^a ; Zeo-Karb (≡ Zero-It) 225 ^{a,b}
2% cross-linked									Diason SK105; SK106; Dowex ^{a,b} 50, 50W ^a ; Duolite C-25D; Permutit (≡ Orzolith) RS-60; Amberlite IR-118, -120, -122, -124; Alfasion CS, CSA ^a ; Cochranex CRB, CRC, CRJ, CRS, CRW, CRZ; Diason SK110; Dowex ^{a,b} 50 (= HCR, HGR), 50W ^a (= HCR-W, HGR-W); Duolite C-20, C-20X10, ES-28; Imac CSP, C12, C14; Lewatit S100; Permutit Q100, Q101 ^a , Q110, Q111 ^a ; Resar P; Zeo-Karb (≡ Zero-It) 225 ^a
4% cross-linked									Cochranex CMV, CRD; Diaion CRD; Dowex ^{a,b} 50, 50W ^a ; Duolite HDR, HDR-W; Duolite C-30; Permutit (≡ Orzolith) RS-120; Zeo-Karb (≡ Zero-It) 225 ^a
5-6% cross-linked									Diason SK114; Permutit Q130 (13% cross-linked); Alfasion CM ^a ; Diaion SK116; Dowex ^{a,b} 50, 50W ^a ; Duolite C204; Imac C16P; Lewatit S115 ^a ; Permutit Q220
8-10% cross-linked									Amberlite 200, 200C, 252; Cochranex CMR, CMS, CRV; Duolite C-21, ES-26; Lewatit SP100; Permutit (≡ Orzolith) RSP-120; Micro-Ionex (not macroporous) CH-H, C-NH4; Per-Res-40 ^b ; Dowex-30 = MX; Kationite KU1; Reser; Zeo-Karb (≡ Zero-It) 215
12% cross-linked									Duolite C-3, C10; Alfasion C; Durant; Permutit (≡ Orzolith) H-62
14% cross-linked									Bio-Rex 70; Diaion WK1; Imac Z5
16% cross-linked									Ambelite IR-C-50, -84; Cochranex CMF, CRM, CRT; Duolite CC-3; Kastel C-100; Permutit (≡ Orzolith) C-65 ^a , -87 ^a ; Zeo-Karb (≡ Zero-It) 226; Volalith CP-300; Permutit Q210
20% cross-linked									Lewatit CNP ^{a,b,c,d}
Macroporous (cross linking not specified)									Cochranex CMG; Duolite CS-100; Reser W; Wofatit CN; Zeo-Karb (≡ Zero-It) 216
Sulfonated phenolic resins									
Resins from phenol methylene sulfonic acid	C	40-60	44-68	7	100(H)-200(Na)	0-14	1.9-2.9	0.6-1.2	(Hydrogen form, 16-50 mesh, ~40% external voids; except where noted)
Sulfonated coal (strong and weak acid groups)	C	43-48	50, 65	7, 12	~170, ~140 ~130-175	1-10 0-14	2.9 1.3-1.7	1.2, 0.6 0.6-1.4	
"Weakly" acidic (carboxylic, except where noted)	C	45-50	45-50	2-15					
Sulfonated "Medium" cross-linked	G	24-30	10-18		160	0-8.5	1.6	0.6	Zeo-Karb-Na, -H
Acrylic or methacrylic									
Homogeneous resin	C, S	~50	51-75	60-90	~250 100-250 ~180-250	4-14 5-14 0-14	10-11 ~10 8-10	3.3-4.5 3.5 ~3-4	
"Weakly" cross-linked	S	45-50	~52	10-90					
5% cross-linked	S	43-50	56	25-65	180-250	4-14	6.5	3.5	
"Medium" cross-linked	S	47	40-50	5-10	~250	0-14	8.0	3.8	
10% cross-linked	S	43-50	56	~50	10-25	0-14	2.5	1.0-1.4	
Macroporous	C	40-50							
Phenolic and related condensation products	C	50	30	15	175	4-14	4.0	1.6	
Polystyrene phosphonic acid	C, S	21	40-50	10	100	0-9	... 3-14	1.4	
Polystyrene iminodiacetate	S	46	68-76	40	~250 167	4-14	6.8 2.9	3.0	
		47		100			2.9	0.7	

Material	Shape of particles	Bulk wet density (drained), lb./cu. ft.	Moisture content (drained), % by weight	Swelling due to exchange, %	Max. operating temp., °F.	Operating pH range	Exchange capacity		Trade designation
							Dry, meq./g.	Wet, meq./ml.	
Inorganic materials									
Greensand	G	~80	1-5	0	140 100	6-8 7-8	~0.14 1.4	~0.18 ~0.5	Cochranex CG, CRH; Zen-Dur Cochranex CSL; Decaisse; Deucil; Permutit (≡ Orzelith) G (Na), T (K), Folin (Na) Diaprosm Z20
Aluminum silicate		40-60			~570	2-10	.....	0.8-1.5	
Zirconium tungstate		70-80			4-10	1	.....	.....
Celluloses		~20			.....	7	~0.7	.....
Phosphoric, low capacity	F				.....	.....	.....	.....
High capacity	F				.....	.....	.....	.....
Methyl carboxylic	P, G				.....	.....	.....	.....
Strongly basic					.....	.....	.....	.....
Polystyrene matrix, trimethyl benzyl ammonium^a									
1% cross-linked	S	44	80-90	1	302	0-14	3.2	0.4	Bio-Rad AGI-X1
2% cross-linked		44	70-78	20	302	.....	3.5	0.8	Bio-Rad AGI-X2
1-2% cross-linked					25	.....	4	0.3	Dowex 1 ^{a,b} , Duolite ES-109X2
2-4% cross-linked		40-44	45-60	25	.....	.....	3	~1	Permutit (≡ Orzelith) EHP; ES-26
4% cross-linked			~42	~60	14	100(OH) _n	~4	~1	Diaion 101, S-111A; Dowex 1 ^{a,d,n} ; Duolite ES-109-X4
8% cross-linked		45	34-56	15-20	200-300(CI)	.....	3.5	1.4	Cochranex AL, AT, ARD; Diaion SA10A; Dowex 1 ^{a,d,n} ≡ SBR; Duolite ES-109; Kastel A-500
10-16% cross-linked ^c		43	34-42	20	150(OH) _n	.....	3	1.5	Ambelite IRA-400, -400C, -401, -401S, 402; Anionite AV-17; Bio-Rad AG21K, Cochranex AC, AM, AV, ARV, ARB; De-Acidite (≡ Zerolit) FF-48
Cross-linkage unspecified ^c		40-45	40-65	3-20	240-300(CI)	.....	3.3-4.2	0.8-1.4	Duolite ES-11; Imac SS-40, -50; Lewatit M-500; Permutit S-100, -101; Resinex HB
Same, porous		~40	38-45	25	100	.....	3.1-3.5	1.4-1.5	Dowex 11
		44	50-64	2-25	120-150(OH) _n	.....	2.6-4.2	~1	Ambelite IRA-900, -904; Cochranex ART; Dowex 21K = SBR M, -P; Duolite A-101D, ES-109; Lewatit M-504; Permutit (≡ Orzelith) EHP-274, ESB-274; Wofait SBW
Polystyrene matrix, dimethyl hydroxyethyl benzyl ammonium^a									
1-4% cross linking	S	49-54	65	1-10	160 ^b	.....	4.0	1.2	Lewatit M-500; Permutit S-200, -201(OH), -208(SO ₃) ^b
6% cross-linked			44	50 ^b	100(OH) _n 200(CI)	.....	3.2	0.8(48% cross-linked)	Diaion SA21A; Dowex 2 ^{a,b} , Kastel A-300
8% cross-linked			45	44-50	~10	.....	2.9-3.3	0.9-1.6	Permutit (≡ Orzelith) ES-26
10-12% cross-linked			45	42	5-15	1-13	3.4	1.4	Cochranex A, AP, AQ; Diaion SA20A; Dowex 2 ^{a,b}
Cross linking not specified			45	45	15	0-14	3.0	1.2-1.5	Ambelite IRA-410; De-Acidite (≡ Zerolit) HI, Imac SS-40; Lewatit M-500; Permutit S-200, -201(OH), -208(SO ₃) ^b
Same, porous		44	40-60	3-10	.....	0-14	2.4-4	0.8-1.4	
Polystyrene matrix, amine^a									
not specified		S	~45	46-61	12	100	0-14	4	
Condensation products with pyridinium quaternary amine		S	50	50	10	100-200	0-14	3.7-4.3	
Trimethyl aminoethyl cellulose (bronide)		F			.....	.....	4-10	1.4	
Diethylhydroxpropylaminomethyl cellulose (bromide)		F			.....	.....	4-10	0.6	
					.....	.....	~0.6	.....
Selected TEAE									
									Selectedel DEHPAE

Material	Shape of partic- cles	Bulk wet density (drained), lb./cu. ft.	Moisture content (drained), % by weight	Swelling due to exchange, %	Max. operating temp., °F	Operating pH range	Dry, inert/g.	Wet, min./ml.	Trade designation
Weakly basic	G, S	40-45	25-45	5-30	180-200	0-9	5.2-6.0	1.9-2.5	(Free-base form, 18-50 mesh, 40% external voids)
Aminopolystyrene	S	42	~50	5-25	~200	0-8	~3	1.3-1.8	Amberlite IRA-45; Bio Rad AG3-X44 ^d (Cl); Cochrane AII(Cl); ARE; Diaion WA20; Dowex 3 = WBR
	S	37-44	46-55	20-30	~210	0-14	4.8-6.0	1.4-2.0	Cochrane AE; Duolite ES-303, A-305; Permitt (≡ Orzolith) EM-13
Aminated acrylic (or other aliphatic) polymers	G	15-19	1-5	.....	100	0-12	5.5	1.8	Amberlite IRA-83; Cochrane AE; Inac A20, A21 (pH 0-8); Lewatit MF62 ^{e,p}
	G	45	50-80	3	140	0-14	8.8	2.8	Bio-Rex 5
	S, G	~60	~10	150	0-14	5-6	1.5-2.0	Amberlite IRA-68; De-Acidite (≡ Zerolit) M	
Mixed aliphatic amine and quaternary ammonium	G	56	54	.....	160	0-14	3.7	1.3	De-Acidite (≡ Zerolit) M ^b
Methacrylic Aminated phenolic condensation products	C	32-40	45-50	10-25	100-150	0-9	6-10	1.6-2.5	De-Acidite (≡ Zerolit); Duolite A-2, ^c 4, ^c 6, ^c 7 ^c
Epoxy-polyamine	S	21	50-62	10	100	0-9	.....	1.4	Resinex (all SO ₄); Resinex Antonite AN-2F; Dowex CCR1; Wofatit MD
	S	43	60	6-25	180	0-10	7-9	~2.5	Antonite AV-16; Duolite A-30, ^c -30B, ^c -43 (30%), ^c -57; Permitt (≡ Orzolith) EP
	S	49	60	15	90	0-8	9.1	2.9	Inac A27, A13T ^c
	S	49	60	2-25	90	0-8	8.3	1.9	Allusion AWH 3
	G	48	50-54	2-25	200	0-7	.....	1.1-1.6	Dowex 44 = WCR
Celluloses	F	~20	.....	.....	.....	1.0	.....	.....	Whitman AEL
Aminoethyl Diethylaminoethyl	P	.....	.....	.....	.....	0.8-1.0	.....	.....	Selectacel DAE; Whitman DE1, DE2, DE22, DE23, DE32, DE32, Whitman ET11
Tertiary amine	P	.....	.....	.....	.....	0.3-0.5	.....	.....	Selected ECTFOLA; Whitman ET11
Intermediate basic Epoxypolyamine (and related structures).	S	49	60	15	95	0-8	8.8	2.7	Antonite EDE-10P; Bio-Rex 5 (Cl); ^c Inac A27; Wofatit L-150
	S	40	40-45	10	170	0-9	.....	1.9-2.0	Cochrane AV-ARV (tert); Duolite A-41, A-43 (30%) ^c
	S, G	20	1-5	.....	160	0-12	5.5	1.6	Permitt S-300, S-310
	S, G	47	55	6	130	0-10	5.5	2.0	Allusion AW2; Duolite A30B (20%) ^c
	S	40-47	~60	10-15	160	0-14	4.8	1.5	Lewatit MP44 ^{a,p}
	S	47	50	35	140	0-8	3.7	1.9	Duolite ES-303, A-305
Amino polystyrene (porous)	C	16-20	2-7	.....	140	0-12	5.5	1.6	Permitt S-350
Aminated phenolic	C	40	45	.....	.....	5	1.7	1.7	(Cochrane AIC)

^a CP grades available.^b Other degrees of cross linking available.

Granular.

^c Finer-mesh sizes available.^d Very fine powder available.^e IR fiber; G, granular; P, powder; S, spherical beads.^f Resistant to oxidizing agents.^g H⁺ form available, or usual.^h Larger-mesh sizes available.ⁱ For H⁺ form converted to Na⁺ form.^a Resistant to mechanical stress.^b For OII⁻ form converted to Cl⁻ form.^c May be unstable to reducing agents containing sulfur.^d Analytical grade available in various size ranges.^e OII⁻ form available.^f Resistant to organic fouling.^g Porous.^h Secondary amines present.ⁱ Tertiary amines present.^j Per cent of strong base, relative to total capacity.

附錄三 各種再生劑溶液的基本資料

A. SULFURIC ACID

% H ₂ SO ₄	Grams H ₂ SO ₄ /Liter	Normality	Specific Gravity	Pounds per U.S. Gallon
1	10.05	0.205	1.0051	0.08388
2	20.24	0.413	1.0118	0.1689
3	30.55	0.623	1.0184	0.2550
4	41.00	0.836	1.0250	0.3422
5	51.59	1.05	1.0317	0.4305
6	62.31	1.27	1.0385	0.5200
8	84.18	1.72	1.0522	0.7025
10	106.6	2.17	1.0661	0.8897
12	129.6	2.64	1.0802	1.082
15	165.3	3.37	1.1020	1.379
20	227.9	4.65	1.1394	1.902
50	697.6	14.2	1.3951	5.821
96	1762.0	35.9	1.8355	14.71
100	1831.0	37.3	1.8305	15.28

B. HYDROCHLORIC ACID

% HCl	Grams HCl/Liter	Normality	Specific Gravity	Pounds per U.S. Gallon
1	10.03	0.275	1.0032	0.08372
2	20.16	0.553	1.0082	0.1683
4	40.72	1.12	1.0181	0.3399
6	61.67	1.69	1.0279	0.5147
8	83.01	2.28	1.0376	0.6927
10	104.7	2.87	1.0474	0.8741
12	126.9	3.48	1.0574	1.059
16	172.4	4.72	1.0776	1.439
20	219.6	6.02	1.0980	1.833
30	344.8	9.46	1.1492	2.877
40	479.2	13.1	1.1980	3.999

C. SODIUM HYDROXIDE

% NaOH	Grams NaOH/Liter	Normality	Specific Gravity	Pounds per U.S. Gallon
1	10.10	0.262	1.0095	0.08425
2	20.41	0.511	1.0207	0.1704
3	30.95	0.774	1.0318	0.2583
4	41.71	1.04	1.0428	0.3481
5	52.69	1.32	1.0538	0.4397
6	63.89	1.60	1.0648	0.5332
8	86.95	2.17	1.0869	0.7256
10	110.9	2.77	1.1089	0.9254
12	135.7	3.39	1.1309	1.333
16	188.0	4.70	1.1751	1.569
20	243.8	6.10	1.2191	2.035
50	762.7	19.1	1.5253	6.365

D. AMMONIA

% NH ₃	Grams NH ₃ /Liter	Normality	Specific Gravity	Pounds per U.S. Gallon
1	9.939	0.583	0.9939	0.08294
2	19.79	1.16	0.9895	0.1652
4	39.24	2.31	0.9811	0.3275
6	58.38	3.43	0.9730	0.4872
8	77.21	4.53	0.9651	0.6443
10	95.75	5.62	0.9575	0.7991
12	114.0	6.70	0.9501	0.9515
16	149.8	8.79	0.9362	1.250
20	184.6	10.8	0.9229	1.540
30	267.6	17.0	0.8920	2.233

E. SODIUM CARBONATE

% Na ₂ CO ₃	Grams Na ₂ CO ₃ /Liter	Normality	Specific Gravity	Pounds per U.S. Gallon
1	10.09	0.190	1.0086	0.08417
2	20.38	0.384	1.0190	0.1701
.4	41.59	0.786	1.0398	0.3471
6	63.64	1.20	1.0606	0.5311
8	86.53	1.63	1.0816	0.7221
10	110.3	2.08	1.1029	0.9204
12	134.9	2.54	1.1244	1.126
14	160.5	3.03	1.1463	1.339

F. SODIUM CHLORIDE

% NaCl	Grams NaCl/Liter	Specific Gravity	Pounds per U.S. Gallon
1	10.05	1.0053	0.08390
2	20.25	1.0125	0.1690
4	41.07	1.0268	0.3428
6	62.48	1.0413	0.5214
8	84.47	1.0559	0.7050
10	107.1	1.0707	0.8935
12	130.3	1.0857	1.087
16	178.6	1.1162	1.490
20	229.6	1.1478	1.916
26	311.3	1.1972	2.598

Source:

Duolite Ion Exchange Manual, Diamond Shamrock Chemical Company,
Redwood City, CA (1969).