

節水善其事 必先利其器

朱昱學/財團法人中技社 綠色技術發展中心

一、前言

電路板製造業是用水需求極高的產業，由於國內水資源日益匱乏，電路板工廠已面臨供水短缺的問題。目前在夏季或冬季缺水時期，因部分地區自來水供應不足，迫使許多電路板工廠花費昂貴費用僱用槽車運送自來水，以舒緩製程缺水的困境。然而以槽車運送自來水不僅杯水車薪且代價高昂，更是無法長期用來解決缺水問題的。因此，對於此等缺水的工廠而言，如何開發水源與回收製程排水再利用，已成為工廠必需面臨的重要課題。

現在國內的各電路板工廠，大多採用傳統之化學混凝沉澱法（如圖 1），來進行重金屬廢水之處理。在處理過程中必須投加大量的鹼劑、酸鹼、混凝劑、助凝劑甚至重金屬捕集劑等化學藥劑，不但耗費藥劑成本並且衍生出大量的有害性重金屬污泥，極不符合環保經濟原則。再者，因處理過程添加多量的藥劑，使得處理後放流水中的總固體物（TDS）及鹽類濃度更形增高，造成大量放流水無法回收再利用，而須直接排放至承受水體，造成水資源的浪費，殊為可惜。

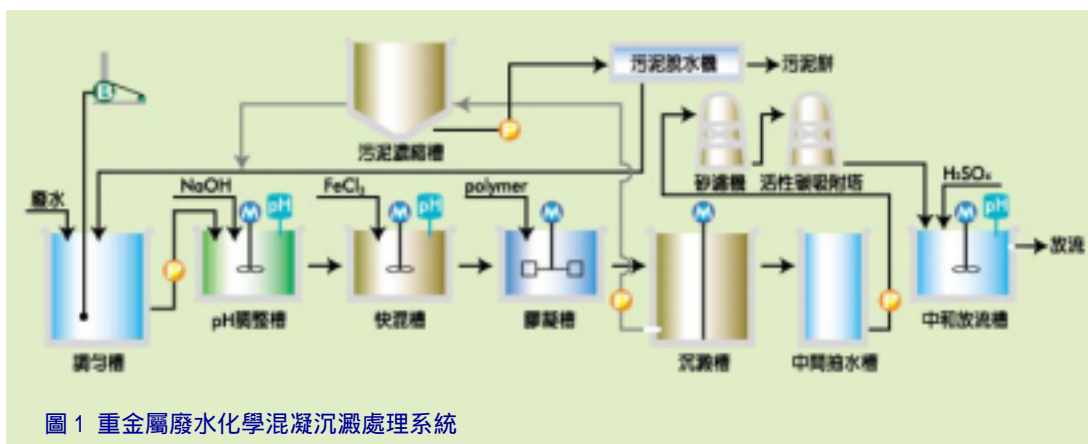


圖 1 重金屬廢水化學混凝沉澱處理系統

本文將介紹電路板工廠重金屬廢水回收處理技術 - 「離子交換及電解回收法」。此一回收處理技術可以取代傳統化學混凝沉澱法，將廢水中的銅離子轉換成金屬銅回收再利用，減少 98% 以上的重金屬污泥，另外並可回收 90% 以上的

製程清洗水至廠內製程循環使用，大幅降低工廠用水及廢水污染防治成本。文中將說明「離子交換及電解回收法」之處理流程並進行一案例評估，使讀者明瞭應用此一回收處理技術可獲得之具體效益。

二、流程說明

一般電路板工廠蝕刻、微蝕、電鍍銅及電鍍銅剝掛架等製程單元之用水量極大，約佔全廠用水量的 40~60%，此等製程單元所排出之清洗廢水水質單純，僅含有硫酸鹽、氯鹽、銅離子及微量的 COD 等污染物，可使用離子交換及電解回收法，將此等清洗廢水進行處理回收。

離子交換及電解回收系統之流程所示(圖 2)，電路板工廠蝕刻、微蝕、電鍍銅及電鍍銅剝掛架等製程單元所排放之含銅離子清洗廢水，於集中收集後，先經由過濾、活性炭吸附去除雜質及 COD 後，再流入陽離子樹脂床，經由陽離子樹脂之吸附交換作用，將廢水中之陽離子（包含銅離子、鈣離子、鎂離子等）吸附於樹脂中，而出流水中殘留之陰離子，則再經由陰離子樹脂床吸附去除，處理後之出流水導電度可降至 $2\ \mu\text{s}$ 以下，TDS 則在 2mg/L 以下，此水質極為良好，幾乎為無離子之純水，可全數回收供應作為製程清洗用水使用。

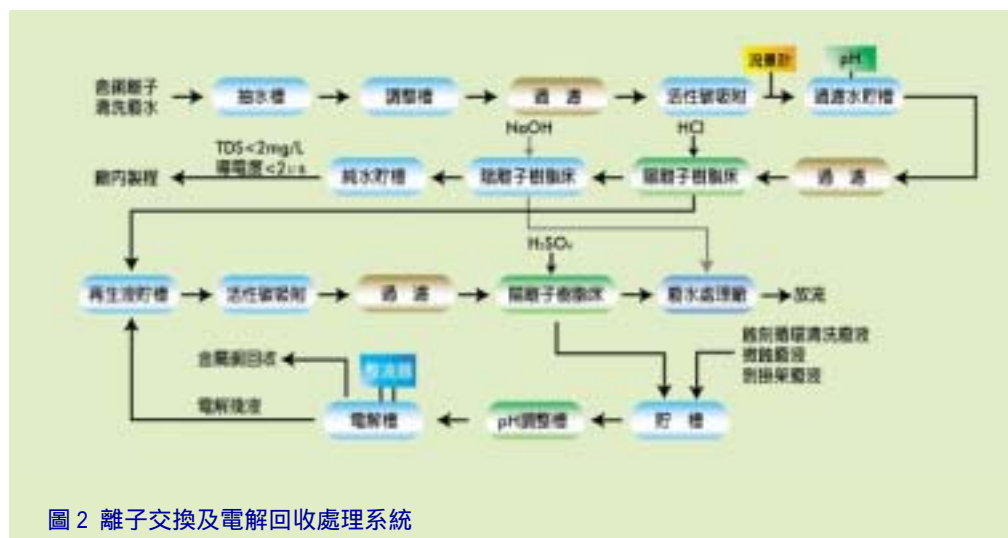


圖 2 離子交換及電解回收處理系統

回收處理系統中之活性炭，在吸附飽和後必需定期更新，以確保後續之樹脂床不受污染。至於陽離子樹脂及陰離子樹脂在吸附交換達飽和後，則分別以 HCl 及 NaOH 藥液再生。陰床之再生液，含有高量之硫酸根及氯鹽等，故無回收價值，可納入廢水處理場處理；而陽床之再生液因富含銅離子，極具回收價值，須單獨收集後利用活性炭吸附及過濾處理，再流入螯合性陽離子樹脂床進行銅離子之吸附濃縮，經螯合性陽離子樹脂吸附處理後之殘液，則排入廢水處理場處

理，至於吸附飽和後之螯合性陽離子樹脂則使用硫酸再生，此部份之再生液為高濃度的硫酸銅溶液，可與廠內其他含高濃度銅離子之廢液(如蝕刻循環水洗廢液、微蝕廢液、電鍍銅剝掛架廢液等)合併進行電解處理，以回收金屬銅。由於回收之金屬銅純度達 99.5% 以上，純度頗高，可販售給金屬銅回收業者，賺取一部份利潤。

應用離子交換及電解回收系統(圖 2)，不但可從製程所排放之高濃度銅離子廢液及低濃度清洗廢水中，回收金屬銅資源再利用，並可將 90% 以上的低濃度含銅清洗廢水處理淨化成純水，全量回收至製程，轉供為清洗用水使用，如此不但可克服缺水的問題外，回收之純水由於不含鈣鎂硬度、鹽類及金屬離子，更可有效提升製程清洗效率，確保產品品質。對工廠而言，不但可解決廢水污染這棘手問題、降低廢水污染防治成本，更可以極低的成本代價創造出品質良好的純水水資源，循環於製程中作為清洗用途，此一回收處理系統徹底改變了傳統廢水處理的模式，將原本耗費成本的管末處理設施，轉變成為賺錢的生產利器。電路板工廠若能妥善地設置及應用此一回收處理系統，相信必可大大地增加生產產值，提升產業之競爭力。

三、案例評估

預設有一多層電路板工廠，產能約 60 萬 ft²/月，每日製程約排放出 4,000m³ 廢水量(包含各類高濃度廢液及低濃度清洗廢水)。其中含高濃度銅離子廢液部份，包括內外層蝕刻循環水洗廢液、微蝕廢液、電鍍銅剝掛架廢液等，平均每日約排放出 20m³ 廢液，平均銅離子濃度約 23,500 mg/L，合計每日排出銅離子量約 470 kg，廢液污染質量分析如(表 1)所示。至於含低濃度銅離子清洗廢水部份，合計平均每日約排放出廢水量 2,000m³，平均銅離子濃度約 92.5 mg/L，總計每日排出銅離子量約 185 kg，含低濃度銅離子清洗廢水之污染質量分析如(表 2)所示。

製程單元	步驟	槽液成份	日平均處理量(m ³ /日)	pH	Cu ²⁺ (mg/L)	Cu ²⁺ 污染量(g/日)
內層板前處理	蝕蝕	H ₂ SO ₄ 、H ₂ O ₂	8.0	<1	30,000	240,000
內層蝕刻	循環水洗	CuCl ₂ 、HCl、H ₂ O ₂	4.0	<2	20,000	80,000
黑棕氧化	蝕蝕	H ₂ SO ₄ 、H ₂ O ₂	1.0	<1	30,000	30,000
PTH鍍通孔	蝕蝕	H ₂ SO ₄ 、H ₂ O ₂	0.5	<1	20,000	10,000
全板鍍銅	酸洗	H ₂ SO ₄	1.0	<1	20,000	20,000
	剝掛架	H ₂ SO ₄ 、H ₂ O ₂	0.1	<1	60,000	6,000
外層板前處理	蝕蝕	H ₂ SO ₄ 、H ₂ O ₂	1.0	<1	20,000	20,000
外層蝕刻	循環水洗	NH ₄ OH、NH ₄ Cl	2.0	>8	20,000	40,000
鍍鍍金	蝕蝕	H ₂ SO ₄ 、H ₂ O ₂	2.4	<1	10,000	24,000
合計			20.0	-	-	470,000
平均銅離子濃度(mg/L)			23.500			

表 1 含高濃度銅離子廢液質量分析表

項目	化學混凝沉澱系統	離子交換及電解回收系統
初設成本(元)	30,000,000	67,800,000
設備折舊費(元/年)*CRF=0.163	4,890,000	11,051,400
操作維護費用(元/年)		
包含電費、維修費、藥品及耗材費、人事費及污泥餅清理費	48,170,000	20,950,000
消耗費用(元/年)	53,060,000	32,001,400
賺取費用(元/年)		
包含金屬銅及純水回收價值	0	23,175,000
淨成本支出(元/年)	53,060,000	8,826,400
重金屬污泥餅產生量(噸/年)	2,947.5	45
回收金屬銅量(噸/年)	0	193.5
回收純水量(噸/年)	0	540,000
管末廢水排放量(m ³ /日)	4,000	2,200

[註]* CRF(設備投資還原因子) $=i(1+i)^n/((1+i)^n-1)$ ，i(年利率)=7%，n(設備使用年限)=10年

▲ 表 2 含低濃度銅離子清洗廢水質量分析表

案例工廠若採用化學混凝沉澱系統(圖 1)，進行廠內含高濃度銅離子廢液及含低濃度銅離子清洗廢水處理，其成本效益評估如(表 3)所示，估計每年工廠必須付出 5,306 萬元的處理成本，重金屬污泥餅(含水率 75%)產生量高達 2,947.5 噸/年。

項目	說明		費用
初設成本	設備建造成本	15,000元/CMD × 2,000 CMD = 30,000,000元	30,000,000元
每年操作維護費用	電費	4,000元/日 × 25日/月 × 12月/年 = 1,200,000元/年	1,200,000元
	維修費	年維修費佔初設成本的5%	2,000,000元
	藥品費	10元/m ³ × 2000 m ³ /日 × 25日/月 × 12月/年 = 6,000,000元/年	6,000,000元
	人事費	600,000元/人年 × 6人	3,600,000元
	污泥餅清理費	污泥產生量 = 1.35Kg-Cu(OH) ₂ /Kg-Cu(D.S.) 設脫水後污泥餅含水率 = 75% 污泥餅量 = 1.35Kg ÷ 0.25 = 6.125Kg/Kg-Cu 設添加凝劑助凝劑後污泥量 = 15Kg/Kg-Cu 污泥餅清理費 = 655kg-Cu/日 × 15Kg-污泥/Kg-Cu × 25日/月 × 12月/年 × 12元/kg-污泥 = 35,370,000元/年	35,370,000元
	合計		48,170,000元
每年消耗費用	設備折舊費*CRF = 0.163		4,890,000元
	年總操作維護費用		48,170,000元
	合計		53,060,000元
每年賺取費用	純水回收價值	—	0元
	銅回收價值	—	0元
	合計		0元
年付成本	53,060,000元 - 0元 = 53,060,000元		53,060,000元

[註] * CRF(設備投資還原因子) = $i(1+i)^n / ((1+i)^n - 1)$, i (年利率) = 7%, n (設備使用年限) = 10年。

表 3 化學混凝沉澱系統之成本效益評估

若本案例工廠採行離子交換及電解回收系統(圖 2), 其可獲得之效益將極高, 相關成本效益評估結果彙整如(表 4)所示, 每年除了可回收 193.5 噸之金屬銅外, 附帶每年可回收產製約 54 萬噸純水, 可供應製程使用, 總計每年可獲取 2,317.5 萬元之回收利潤, 扣除獲取之利潤後, 估計工廠每年廢水處理成本支出僅約 882.64 萬元, 與前述之化學混凝沉澱系統比較, 每年約可節省 4,423.36 萬元處理成本, 成本降幅高達 83.4%; 另外在重金屬污泥餅減量方面, 減量幅度更高達 98.47%, 幾乎可完全克服重金屬污泥餅清除處理困難之困境。

項目	說明	費用	
初設成本	離子交換設備	20,000元/CMD × 2,000 CMD = 40,000,000元	40,000,000元
	電解回收設備	40,000元/Kg-Cu/日 × (655 - 10) Kg-Cu/日 = 25,800,000元	25,800,000元
	廢水處理設備	10,000元/CMD × 200 CMD = 2,000,000元	2,000,000元
	合計	67,800,000元	
每年操作維護費用	電費	7,000元/日 × 25日/月 × 12月/年 = 2,100,000元/年	2,100,000元
	維修費	年維修費佔初設成本的5 %	3,310,000元
	藥品及耗材費	38,000元/日 × 25日/月 × 12月/年 = 11,400,000元/年	11,400,000元
	人事費	600,000元/人年 × 6人 = 3,600,000元	3,600,000元
	污泥餅清理費	0.05kg-Cu/m ³ × 200 m ³ /日 × 15 Kg-污泥/Kg-Cu × 25日/月 × 12月/年 × 12元/kg-污泥 = 540,000元/年	540,000元
	合計	20,950,000元	
每年消耗費用	設備折舊費*CRF = 0.163	11,051,400元	
	年總操作維護費用	20,950,000元	
	合計	32,001,400元	
每年賺取費用	純水回收價值	25元/m ³ × [2,000 - 200]m ³ /日 × 300日/年 = 13,500,000元/年	13,500,000元
	銅回收價值	645 Kg-Cu/日 × 50元/Kg-Cu × 300日/年 = 9,675,000元/年	9,675,000元
	合計	23,175,000元	
年付成本	32,001,400元/年 - 23,175,000元/年 = 8,826,400元/年	8,826,400元	

[註] * CRF(設備投資還原因子) = $i(1+i)^n / [(1+i)^n - 1]$, i (年利率) = 7%, n (設備使用年限) = 10年。

表 4 離子交換及電解回收系統之成本效益評估

項目	化學混凝沉澱系統	離子交換及電解回收系統
初設成本 (元)	30,000,000	67,800,000
設備折舊費 (元/年) *CRF = 0.163	4,890,000	11,051,400
操作維護費用 (元/年)		
包含電費、維修費、藥品及耗材費、人事費及污泥餅清理費	48,170,000	20,950,000
消耗費用 (元/年)	53,060,000	32,001,400
賺取費用 (元/年)		
包含金屬銅及純水回收價值	0	23,175,000
淨成本支出 (元/年)	53,060,000	8,826,400
重金屬污泥餅產生量 (噸/年)	2,947.5	45
回收金屬銅量 (噸/年)	0	193.5
回收純水量 (噸/年)	0	540,000
管末廢水排放量 (m ³ /日)	4,000	2,200

[註] * CRF(設備投資還原因子) = $i(1+i)^n / [(1+i)^n - 1]$, i (年利率) = 7%, n (設備使用年限) = 10年

▲ 表 5 含重金屬銅離子廢水回收處理系統之成本效益比較分析

案例工廠採行圖 1 或圖 2 兩種不同型式之流程設計，其處理成本效益彙整比較分析如(表 5)所示，由該表列之數值可看出，以化學混凝沉澱法的廢水處理方式極不符合環保經濟原則；而採行離子交換及電解回收系統的廢水處理方式，年支付成本極低，且每年可回收 54 萬噸的純水供應製程使用，不但可解決缺水問題，更可因此提升製程清洗用水品質，增進生產效率。

由於圖 2 之離子交換及電解回收系統，可將 90% 以上之含銅離子清洗廢水淨化處理成純水，再回收至製程循環使用，因此管末廢水排放量將由 4,000 m³/日降至 2,200 m³/日，由於廢水排放量的減少將衍生下列 2 項問題：

1. 納入管末廢水處理場處理之廢水，其總鹽類及總固體物（TDS）濃度將較未回收處理前增高 1 倍以上。

2. 因水回收之故，納入管末廢水處理場處理之低濃度清洗廢水水量減少，稀釋效果減低，將造成廢水平均 COD 濃度增高近 1 倍，增加 COD 處理的困難度。

目前我國環保法規尚未對水中鹽類（如氯鹽、硫酸鹽等）及 TDS 濃度加以管制，因此第 1 項問題的影響並不大；但第 2 項 COD 濃度增高的問題，將十分不利於位於工業區外，直接受到國家放流水標準管制的電路板工廠。由於國家放流水標準 COD 管限制值為 120mg/L，相當嚴格，此等位於工業區外的工廠如欲採用離子交換及電解回收系統，首先須克服廢水 COD 污染問題，相關之廢水 COD 處理對策，包含先進之廢水 COD 處理技術及新發展的製程廢水 COD 污染減量回收技術，筆者將於日後另行撰文介紹。

對於位於工業區內被納管處理的電路板工廠而言，由於納管 COD 限值（500 700 mg/L）較寬鬆，因此，即使回收清洗水循環使用，造成廢水 COD 濃度增高，初步研判，廢水經廠內廢水處理場妥善處理後，應仍能符合納管 COD 限值，故工廠可無顧慮，應可直接採行圖 2 之處理模式。由於工廠採行離子交換及電解回收之處理模式，排放廢水量將大幅降低，連帶可減少繳納至工業區污水廠之處理費用，其經濟效益將更為提高。

四、結語

目前國內電路板工廠近乎 9 成以上，採用化學混凝沉澱法處理製程排出之含重金屬離子廢液及廢水，處理後所產生的大量有害性重金屬污泥餅，不但清除

處理困難、易產生二次公害，且因清除處理收費昂貴，造成整體廢水處理成本偏高，極不經濟。

如果工廠應用離子交換及電解回收系統進行廢水處理系統改善，替代既有的化學混凝沉澱處理系統，不但可從製程所排放之含銅離子廢液及清洗廢水中回收金屬銅資源再利用，使重金屬污泥餅減量達 98% 以上，並可將 90% 以上的含銅離子清洗廢水處理淨化成純水，全量回收至製程使用，徹底解決缺水問題。又與工廠原有的化學混凝沉澱系統比較，估計每年處理成本降幅將高達 83.4%，工廠所投資的改善成本將可於 1.53 年左右回收。

由本文評估探討之結果總結：以電路板工廠設置離子交換及電解回收系統進行廠內含銅離子廢液及廢水之處理，不僅極具環保經濟價值、另可將原本耗費成本的管末處理設施轉變成賺錢的生產利器，更能做到用水回收有效解決缺水問題，故工廠如妥善地應用此一製程用水回收處理系統，必能增加生產產值，提升競爭力，進而達到開源節流的雙重效益。