

電鍍工廠執行清潔生產之探討

鄭智和*

摘要

有感於電鍍業過去幾十年來力求發展的結果，的確協助臺灣造就相當雄厚的經濟實力，但同時在無形中也對環境產生無情地迫害與污染。如再深一層探究，在電鍍加工過程中之所以會產生不利於環境的結果，主要是由於未能充分合理使用資源與能源所致。

依據目前國際間的環保潮流加以推論，未來「清潔生產」必與電鍍業的發展有密不可分之關係。如以觀念之角度來探討，亦即鍍件在電鍍加工過程中，必需強調其具有清潔生產之過程、善用清潔之能源、產出清潔之產品等重要性；如以執行之角度來探討，亦即如何改良電鍍加工程序來符合環境之適用性與合理性。

另外，談及清潔生產之可行性探討，可舉出三個方向來說明，即「原物料採用與改善」、「製程內改善」、「製程外配合」等。這對於利用電鍍加工程序從事生產的業者與致力於相關設備與藥品之專業研發工作人員而言，也就更顯得重要。換言之，也是希望當隨著經濟發展而進行技術／產品更新之同時，能朝向更"環境"的目標來努力。

【關鍵字】

- 1.清潔生產(cleaner production)
- 2.減廢(waste minimization)
- 3.電鍍(electroplating)

*工業技術研究院化學工業研究所工程師兼室主任

一、前　　言

經濟、社會結構快速演變至今，電鍍業正面臨著產業升級與轉型之陣痛期，勞動成本升高、勞工短缺、環保壓力、東南亞國家與中國大陸投資環境之優勢等諸多問題接踵而至，已嚴重威脅到電鍍業之生存。若要使電鍍業能繼續生存於台灣，除了業界要致力於產業升級的努力（如提高附加價值、降低生產成本、改進管理……等），及時調整產業本質，以朝向低污染及低能量消耗之產業為目標外，實無二途。

有感於電鍍業過去幾十年來力求發展的結果，的確協助臺灣造就了相當雄厚的經濟實力，但同時在無形中也對環境產生了無情地迫害與污染。如再深一層來探究，在電鍍加工過程中之所以會產生不利於環境的結果，主要是由於未能充分合理使用資源與能源所致。

依據目前國際間的環保潮流來加以推論，未來「清潔生產」必與電鍍業的發展有密不可分之關係。如以觀念之角度來探討，亦即鍍件在電鍍加工過程中，必需強調其具有清潔生產之過程、善用清潔之能源、產出清潔之產品等重要性；如以執行之角度來探討，亦即如何改良電鍍加工程序來符合環境之適用性與合理性。

二、『清潔生產』意義與觀念

『清潔生產』是指持續應用整合性污染防治理念，提升生態效率，儘可能減少製程、產品與服務對人類及環境造成有害的影響。其精神主要就是在強調三個重點：

- 1.清潔能源— 能源合理使用；儘量利用可再生的能源；新能源的開發；各種節能技術的開發等。
- 2.清潔生產過程— 儘量少用、不用毒性原料／中間產品；減少生產過程中具高風險性因素的加入；如高溫、高壓、易燃、易爆、噪音等；採用高效率設備；改善操作步驟；回收再利用原物料／中間產品；改善工廠管理等。
- 3.清潔產品— 節約原物料與能源；少用貴重／稀有原料；產品製造過程中以及使用後，以不危害人體健康／環境生態為主要考量因素；易於回收再利用；減少不必要的功能；強調使用壽命等。

總之，「清潔生產」的概念是相對性的，是與現行之技術／產品比較的。因此，對企業或環境永續發展而言，隨著經濟發展與技術更新，推行「清潔生產」，其本身即是一個不斷力求完善的過程！

三、電鍍工廠製程與特性

本節將依電鍍工廠現況及規模、生產型態與製程流程、產業關聯性等章節來說明與分析。

3.1 電鍍工廠現況及規模

根據過去資料收集、電話訪談、現場查訪等經驗來確認台灣地區究竟有多少家電鍍工廠，結果顯示說法各異。究其原因，可歸納為兩點：一是實際從事電鍍工作業者，並非全部辦理工廠登記；二是電鍍工廠的定義未能嚴格界定；換言之，從事電鍍工作，可能是工廠的某一特定部門或程序，也可能是獨立專門專業工廠。因此，截至目前為止，尚無法加以查證。

另外，根據台灣省政府建設廳民國76年曾就台灣省各縣市境內電鍍工廠，加以調查，結果總計為1,687家電鍍工廠(包括已登記及未登記者)。民國78年初，台灣區電鍍工業同業公會也曾公佈當時台灣地區電鍍工廠，總計為2,392家。至於民國78年6月，由經濟部工業局委託財團法人台灣產業服務基金會執行之“電鍍工業廠內改善措施執行成效調查研究”，於總報告中也提及電鍍工廠家數，總計為3,314家。同年財團法人工業技術研究院化學工業研究所也曾為電鍍濃厚廢液處理示範中心一案，針對台中地區工廠調查，結果發現共計920家。

總之，電鍍工廠家數確切數字實難查證，但是經過近年來心得彙整，發現現有合法工廠絕不會多於600家，而且總家數應在2,000家之譜，其中以台北縣、彰化縣、台中縣地區約佔6成以上，而彰化地區已從700多家減少到400家左右。至於工廠規模大小，台灣區電鍍工廠規模不一，大者投資超過億元以上，員工數十名以上；小者僅家庭式操作，尚談不上經營規模。

3.2 生產型態與製程流程

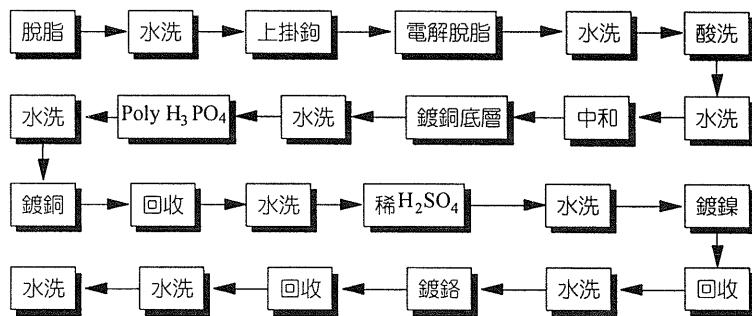
電鍍程序乃是將製品(鍍件)，浸於含有欲鍍上金屬的離子溶液，接通陰極，另一端置適當的陽極(可溶性或不溶性)，通以直流電流後，鍍件的表面即析出一層金屬皮膜。而在一般電鍍工程為了使鍍件具有完美的皮膜，往往需要前處理等步驟，

大致而言，電鍍作業的工程順序，依次為研磨、前處理、電鍍、後處理、乾燥等工程所構成，一般為了去除鍍件表面的油脂、氧化膜、污染等，使金屬皮膜能密著於鍍件表面，最常見的前處理工程有脫脂、酸洗等。而為了上一電鍍作業不影響到下一個電鍍作業，因此常有水洗工程置於兩個電鍍作業之間，所以電鍍工程的一般流程如下：

研磨→脫脂→水洗→酸洗→水洗→電鍍→水洗→乾燥→整修

電鍍程序因鍍件種類及產品不同而異，圖1為一般電鍍流程，而表1則是電鍍種類與其不同鍍浴之分類表。另外，可依電鍍機能性再區分為工業性、裝飾性、電子性與塑膠性電鍍四種。

(一) 鍍銅、鎳、鉻



(二) 鍍鋅

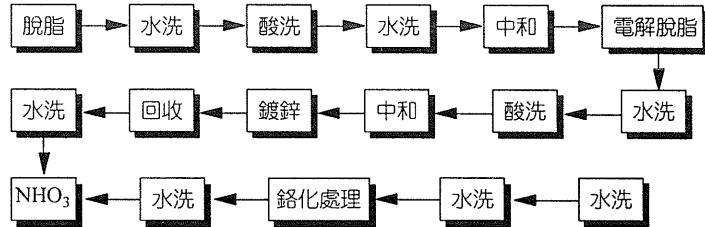


圖1 鍍銅、鎳、鉻、鋅之流程

3.3 產業關聯性

一般而言，電鍍業與其他產業之關聯性，可依產品製造流程，分為上、中、下游之架構來作說明與分析，亦即上游相關產業有電鍍設備製造業、原料製造／供應商；下游相關產業就是一般與五金零件、手工具、飾件、電子零件、機械零件等產品有關之製造業。至於其關聯性如圖2所示。

表1 電鍍種類與其不同鍍浴之分類表

| 種類 | 方 法 |
|-----|---------------------------------------------|
| 鍍銅 | 氰化亞銅浴、硫酸銅浴、焦磷酸銅浴、氟硼酸銅浴 |
| 鍍鎳 | 普通鍍鎳浴、光澤鍍鎳浴、二重鎳、三重鎳、緞光鎳(複合鎳)、黑色鎳、氨基磺酸鎳浴、伍氏浴 |
| 鍍鉻 | 沙氏浴、自動調整高速浴、三價鉻鍍浴、黑色鉻浴 |
| 鍍鋅 | 氰化鋅鍍浴、鹼性鋅酸鹽浴、銨系中性浴、鉀系酸性浴、鈉系酸性浴、氟硼酸鋅浴、焦磷酸鋅浴 |
| 鍍鎘 | 氰化鎘鍍浴、氟硼酸浴 |
| 鍍錫 | 鹼性浴硫酸亞錫浴、氟硼酸亞錫浴 |
| 鍍銀 | 氰化銀浴硫酸浴 |
| 鍍黃金 | 鹼性浴、酸性浴、中性浴 |
| 鍍鉑 | — |
| 鍍銠 | — |
| 鍍鈀 | — |
| 鍍釤 | — |
| 鍍鋐 | — |
| 黃銅 | 氰系鍍浴、非氰浴鍍浴 |
| 青銅 | 氰系鍍浴、非氰浴鍍浴 |
| 銅錫 | 氰系鍍浴、非氰浴鍍浴 |
| 錫鎳 | — |

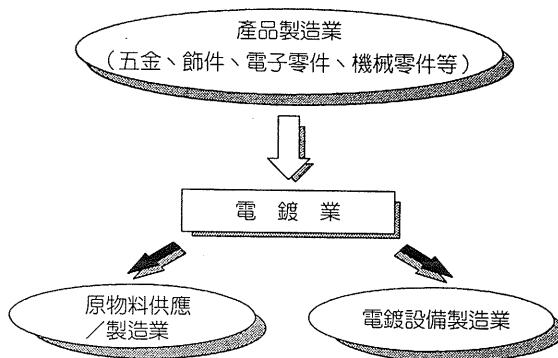


圖2 電鍍業與其相關產業關聯圖

由於電鍍加工服務特性很強，要說明電鍍業發展情形如何，直接影響因素在於其主要客戶下游產品製造業的盛衰。基於下游產品種類達1,500種以上，甚難一一說明。因此，僅就過去民國83年間查訪心得，舉例說明電鍍業與其客戶之關係：

以下特以捲尺製造業發展情形對相關電鍍業者的影響作實例說明：

1. 該工廠是目前唯一加工電鍍捲尺零件廠商，民國83年營業額為1,800萬/年，民國85年再減少至1,200萬/年，主要原因在於上游製造廠外移之故。過去台灣捲尺產量約300萬組/月，約佔全世界一半以上。目前已減少至200萬組/月的產量，另外100萬組/月產量是在大陸生產，換言之，是台灣廠家外移至大陸生產。
2. 由於電鍍工廠的經營是決定於下游製造業的興衰，因此，就台灣只有5家工廠在從事捲尺製造的情況來分析，就不難看出，此類電鍍工廠的未來走向：
 - 第1家工廠生產40萬組/年，民國81年前部份外移大陸，民國83年已於大陸工廠生產60萬組/年。
 - 第2家工廠50%大陸生產、50%台灣生產，該工廠民國82年外移大陸部份資金；
 - 第3家工廠80%大陸生產、20%台灣生產，民國82年開始於大陸設廠；
 - 第4家工廠於大陸投資4億、是投資最大、將採一貫作業；
 - 第5家工廠已著手規劃外移中。

總之，電鍍工廠遭遇發展的難題，是普遍存在的，亦即是下游製造廠營運情況，是主要影響因素。

接著剖析電鍍業之上游相關產業將會因電鍍業發展情況好壞而受何種程序的衝擊。首先討論對電鍍設備製造業影響，依業者指出，依民國83年資料電鍍設備的產製，有95%皆外銷，國內產售情況極差，究其原因在於國內電鍍廠家減少，外移廠家增加之故，可見其影響程度；至於原料製造／供應商方面，由於電鍍業所採用的原物料與加工品質良窳關係很大，因此，其是極重要的一環。一般而言，電鍍程序中所用的原物料主要是電解用化學品及各種電鍍金屬。另外，就是為了改善電鍍效果及電鍍前後處理用的化學品。其中以金屬用量居多，如金鹽、鎳、鋅、銅等，而其消耗金額與化學原料、添加劑的耗用量等值，民國83年年消耗總金額約266億新台幣，依業者指出過去約450億新台幣左右。可見萎縮約4成，影響不少。

四、清潔生產之可行性探討

在電鍍工廠中從事清潔生產之可行性探討，可從三個角度來說明，即原料投入(input)、生產過程(input-output)、產品產出(output)等三個階段來探討其相關可行性之程序，現將對應上述三個階段舉出三個方向來說明，即「原物料(input)採用與改善」、「製程內(on-line)改善」、「製程外(off-line)配合」等。

4.1 「原物料(input)採用與改善」

根據過去相關資料顯示，電鍍工廠所採用之原物料組成，常因電鍍技術變化演進而有所差異。因此，為了應付工業上之複雜需求，電鍍加工程序上所應採用的原物料組成，也就由簡單而變為複雜，進而也增加管理上的困擾。

一般來說，電鍍工廠所採用之原物料中，主要項目且會影響加工品質最大的是指電鍍所用的電鍍液，其組成與功能如表2所示。

表2 一般電鍍液組成與其功能說明

| 電鍍液組成項目 | 功 能 說 明 |
|---------|--------------------------------------------------|
| 金屬鹽 | 金屬離子的來源，影響析出效率很大。 |
| 導電鹽 | 增加電解液的導電度，影響作業的範圍。 |
| 光澤劑 | 調整析出金屬顆粒的排列，增加鍍膜的光澤。 |
| 平滑劑 | 改善沉積金屬的微細分佈，達到鍍膜的平滑效果。 |
| 緩衝劑 | 穩定電解液之pH值，使作業條件安定。 |
| 濕潤劑 | 減少電解液之表面張力，減少析出皮膜之缺陷，如針孔、凹洞等。 |
| 錯化劑 | 使析出金屬顆粒細緻化，改善覆蓋力。 |
| 其他添加劑 | 如為消除不純物，所添加的化合物與金屬離子同時析出的複合材料，為消除應力等等特殊功能而添加的物質。 |

如前所述，電鍍液的研究開發，已成為電鍍工廠執行清潔生產活動中一項重要項目。以近年來研發獲得相當多成果的脈波電鍍為例，其可以簡化電鍍液的組成。此外，從短程執行面來說，亦可以將「原物料採用及改善」工作納為優先考量項目，其又可分為「原料純化」及「原料替代」兩方面來進行；其重點工作包括：

1. 原料純化：

選用純度高之原物料、定期進行純化或去除電鍍液中之雜質，使用去離子水（俗稱純水）來配製或補充電鍍槽液等。

2. 原料替代：

使用無氰化物電鍍液、採用三價鉻電鍍液、選用低污染性脫脂劑。

4.2 「製程內(on-line)改善」

「製程內(On-line)改善」是針對污染產生源來進行減量的工作方式，因此於實行「製程內改善」工作之前，對於原有生產程序的影響，宜先做好評估，才能得到預期效果，以免造成不必要困擾或更大問題。依目前現況來說，電鍍工廠較常採用「製程內改善」方式，計有「減少鍍件帶出液量」、「減少加溫槽蒸發量」、「改善水洗方式」等，依序分別說明如下：

4.2.1 「減少鍍件帶出液量」

鍍件帶出液與電鍍液組成、操作條件、鍍件吊掛方式、鍍件形狀等因素有關。基本上來說，當電鍍液粘度大時，附著於鍍件的薄膜層就厚，也就是鍍件帶出液量會增加。但從另一角度來說，電鍍液的黏度也隨其濃度增加而增加，或隨其溫度升高而降低，所以如採用較低濃度電鍍液比採用較高濃度電鍍液，其鍍件帶出液量少，而加溫者常較常溫者，其鍍件帶出液量少。以上所述這兩個因素，仍與電鍍液的組成與電鍍操作程序有相當關連，如考慮採用低鉻鍍鉻，低氰電鍍等新開發電鍍技術，均有相當大的空間可解決減少鍍件帶出液的問題。

此外，鍍件移出電鍍槽之速度的快慢，也是影響因素之一，依實際了解，鍍件移出電鍍槽速度為1.5~20公分／秒間之實例最多。如果再從流體輸送現象來模擬鍍件從電鍍槽帶出時，其表面將形成一層由電鍍液形成的薄膜，其厚度可由下式來表示。

$$L = K \sqrt{\frac{H_\mu}{td}} = K \sqrt{\frac{\nu H}{d}}$$

式中：L = 鍍件帶出電鍍液之薄膜厚度(cm)

ν = 鍍件移出電鍍槽速度(cm/sec)

μ = 鍍件動力粘度(Pa-sec)

d = 電鍍液密度(g/cm³)

H = 鍍件垂直方向長度(cm)

t = 鍍件移出電鍍槽時間(sec)

K = 實驗值(—)

從上式中也可看出鍍件移出電鍍槽速度與鍍件之垂直長度有關係。一般鍍件離開電鍍槽後停留於電鍍槽上的時間，根據實際分析，最多耗時10秒左右即可，因為再長時間似乎無更大效果。總括來說，較複雜鍍件其停留時間應設定於7~10sec，而簡單鍍件3~5秒即可。

以鍍件帶出之電鍍液所形成的一層薄膜現象來分析，由於會產生所謂的「表面張力」，因此如果有必要，也可再添加表面活性劑來解決。再者，鍍件掛吊方式，也是主要因素之一。由於鍍件種類繁多，形狀不一，為了減少鍍件帶出液量，應該設計或考慮適當的配置，其基本原則如下所述，可供參考。

1.要避免鍍件的廣面水平的配置(如圖3所示)

2.盡量縮短鍍液積存下邊長度(如圖4所示)

依據實際經驗分析，當要設計鍍件帶出液指標時，常會發現其是一個複雜的問題，實不可能有一簡單的計算公式可應用。因此，依鍍件形狀不同及電鍍加工條件不同並無法找到一般性的數值。然而，依經驗法則預估合理數值，作為參考之用，大致仍可行，即如自動方式電鍍者其鍍件帶出液量約介於0.5~3ml/dm²；而手動方式者則介於0.5~5ml/dm²。

總之，如能從電鍍液的粘度、濃度、密度、溫度、鍍件吊掛方式以及使用表面活性劑等因素來考量，對於「減少鍍件帶出液量」的問題，相信可以迎刃而解。

4.2.2 「減少加溫槽液蒸發量」

在電鍍加工程序中，有部份電鍍槽液需要加溫，例如鍍鎳、鍍鉻、氰化鍍銅等，一般加溫範圍約在40~65°C。而談及影響加溫槽蒸發量的因素，主要有加溫槽溫度、鍍槽蒸發面積與外界水蒸氣飽和程度等，其中以加溫槽溫度影響最大。另外，操作條件也與其有關係，例如電鍍槽內使用之抑霧劑、電鍍工作時間、溫度升降速度、鍍槽通風系統之風速、風量等。

如依實際執行面來分析，要估算加溫槽液蒸發量是一項經驗累積的工作，所要考量因素眾多。例如，在亞熱帶地區，其相對濕度在70~90%之間，加溫槽於40~65°C之條件下，其加溫槽液蒸發量之估算值應該介於5~8(L/m²:槽面單位面積蒸發量)。總之，以上所估算之值僅供參考，至於在實際應用時，仍需依現況作適當的調適。

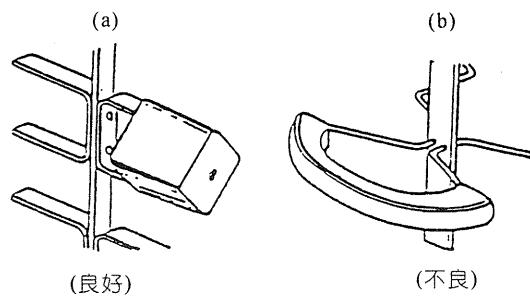


圖3 要避免鍍件廣面水平的配置

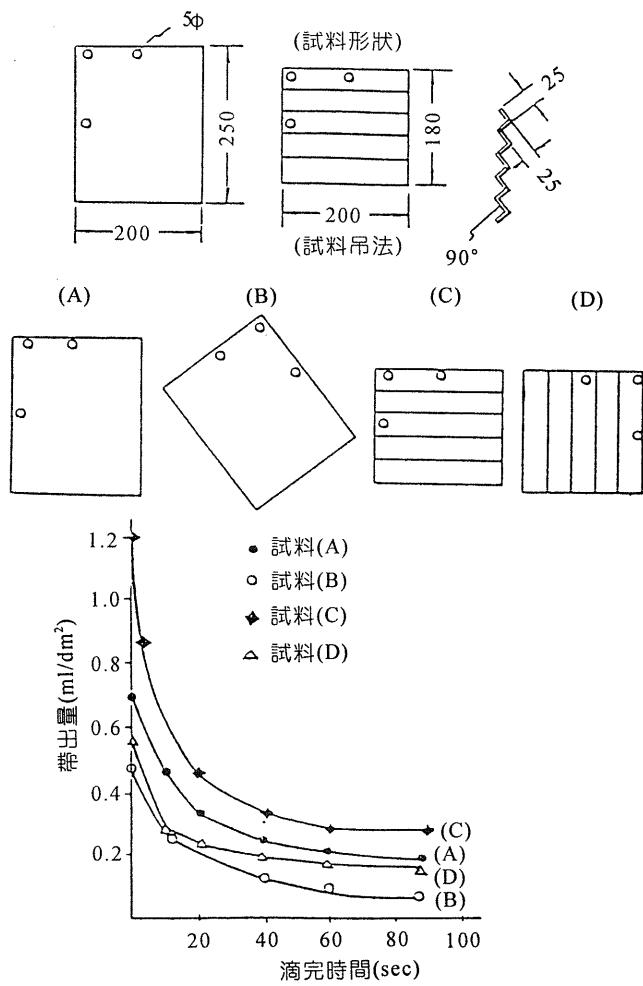


圖4 盡量縮短鍍液積存下邊長度(實驗資料)

4.2.3 「改善水洗方式」

在電鍍加工過程中，清洗鍍件是一項極重要且不可或缺的工作，而且也是電鍍工廠廢水來源。唯有改善水洗方式，才能提高清洗效率，減少廢水量進而降低處理成本。總之，為了讓大家全面性了解電鍍加工程序中水洗的重要性，本文將依「水洗程序種類」、「水洗量的估算」等層面來敘述。

1. 「水洗程序種類」

綜合過去國內外實務上應用的水洗程序，大致可歸納如下，以供設計參考：

(1) 直流清洗法

直流清洗係指直接用自來水清洗鍍件的方法，其清洗後的清洗水直接排放。如再細分大致可為「單槽直流清洗法」、「多槽並聯式直流清洗法」、「多槽串聯式直流清洗法」等三類。

- 「單槽直流清洗法」(如圖5所示)

過去小型電鍍工廠常使用這種方法，用水量很大，雖說廢水含污染物濃度較低，但對於管末廢水處理較不利，目前已較少被採用。

- 「多槽並聯式直流清洗法」(如圖6所示)

採用多槽並聯式而組合成的水洗程序，雖可大量減少用水，但對於各槽產生之不同廢水濃度，在考慮節水再利用的前提下，似乎其執行困難度頗高。

- 「多槽串聯式直流清洗法」(如圖7所示)

此法較適用於電鍍加工前之酸、鹼清洗程序中，是一種一水多用的方法，其最後一槽進水後，逐槽再利用後於第一槽中排放，可節省用水量。

(2) 逆流清洗法

所謂逆流清洗是指由多個清洗槽串聯組合而成，其進水口設計於整個串聯系統之最後一槽，其水流方向與鍍件清洗方向相反。評析其方法的特點，大概具有用水量少、清洗效率高，且由於排放出廢水濃度較高，較有再利用之可行性。此外，此逆流清洗法大致可再細分為「連續逆流清洗法」、「間歇逆流清洗法」等兩類。

- 「連續逆流清洗法」(如圖8所示)

根據實廠經驗，一般中型電鍍工廠規模，大致要設置3~5個清洗槽，再藉由各槽之間的液位差逐槽向前溢流，並從第一槽排水，至於進水口則設置於第一槽。

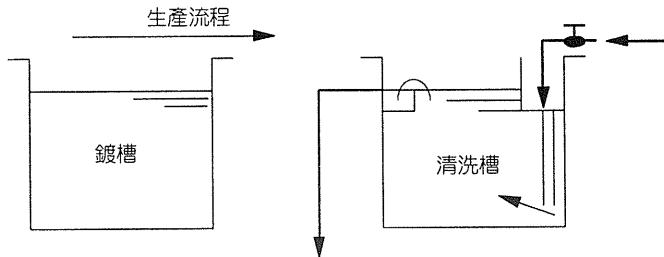


圖5 單槽直流清洗流程

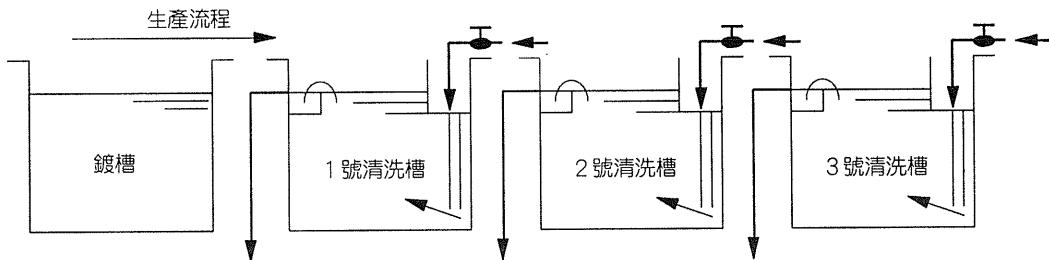


圖6 多槽並聯直流清洗流程

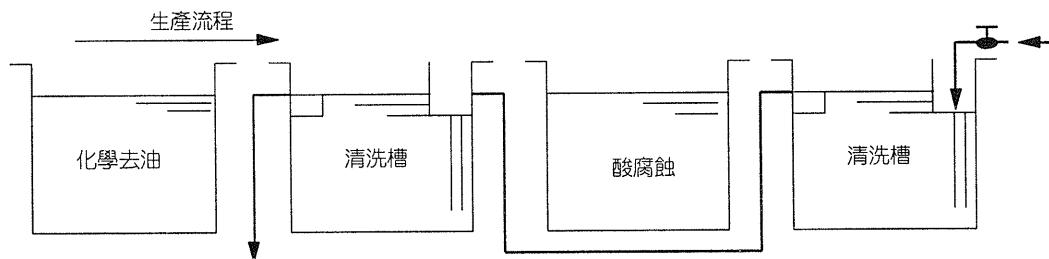


圖7 多槽串聯直流清洗流程

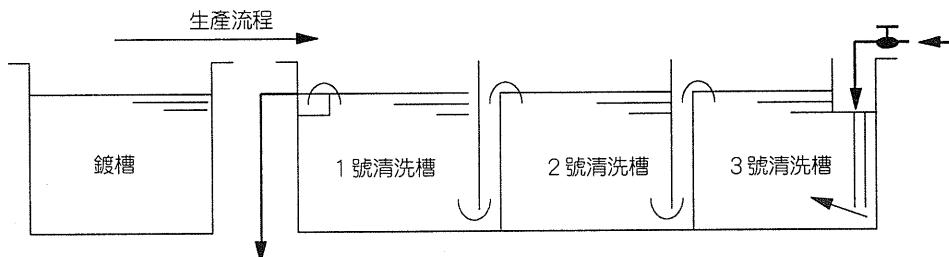
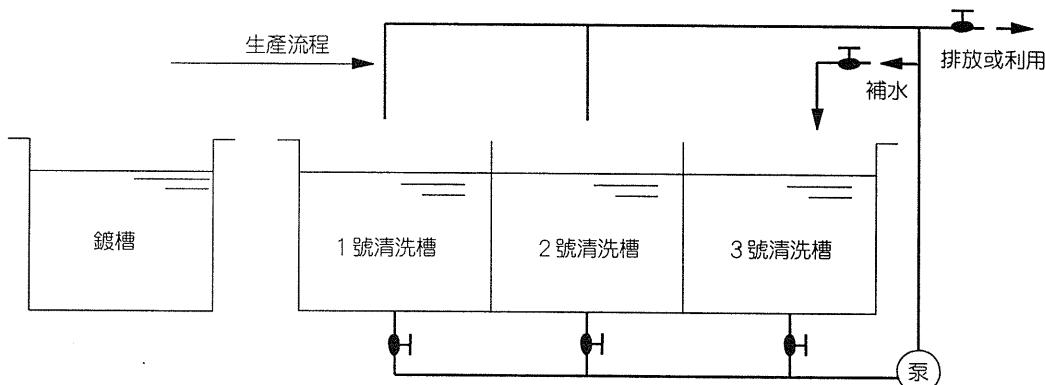


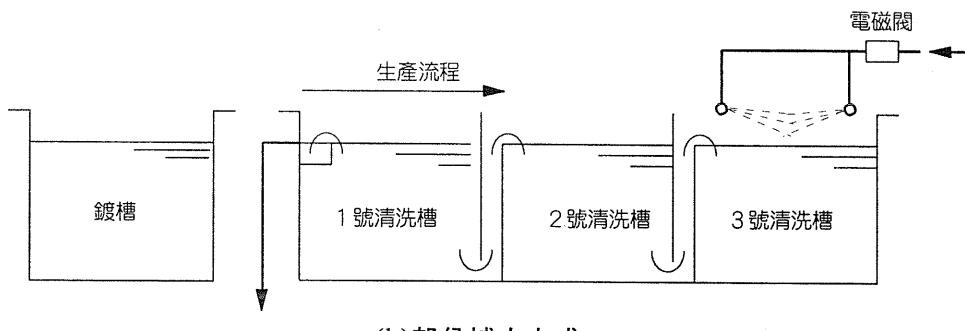
圖8 連續逆洗清洗流程

• 「間歇逆流清洗法」(如圖9所示)

此法與「連續逆流清洗法」不同之處在於進水方式不是連續式而是間歇式。另外，也可按照進水情況不同分為「整槽補水方式」及「部份補水方式」兩種。其中「部份補水方式」又可概分兩種，一種是當鍍件從最後一槽移出後完全停留於槽面時，為了使鍍件清洗完全，即再做一次噴淋動作，且也可達補水目的；另外一種是根據上述電鍍槽蒸發情況或檢視最後一槽濃度，再從第一槽排出部份清洗水作為電鍍槽之補充水，然後逐槽逆向補足同量水量。



(a) 整槽補水方式



(b) 部份補水方式

圖9 整槽及部份間歇逆流清洗流程

(3)回收清洗法

其設計要點在於電鍍槽後設置1~2個靜止水回水槽，讓鍍件在靜水中浸洗，俟一段時間靜止水回收槽中之濃度達到一定值後，則將其送回電鍍槽再使用。

(4) 噴淋清洗法

此方式是近年來自動化或半自動化電鍍工廠常用之清洗程序，其優點在於能以更少量水來做更高的清洗效率。其設計方式大致有下列幾點原則：

- 鍍槽上的噴淋設計：此種方式可應用於加溫鍍槽，其目的在於達到同時清洗與補水之雙重效果。
- 設置空槽噴淋設計：此種方式可應用複雜鍍件之清洗。
- 設置回收槽(或清洗槽)噴淋設計：此種方式大致上與上述設計構想一樣，其主要不同在於空槽換為回收槽(或清洗槽)。

(5) 噴霧清洗法

其設計在於應用噴霧器原理，利用其壓力來沖洗鍍件，在實務使用上較適合孔隙多之鍍件。但為了防止水霧擴散，建議必要時加防護措施(如槽加蓋或通風設施等)。

(6) 升溫或攪拌清洗法

其設計著眼於電鍍液的黏度或幾何形狀過於複雜者。

以上介紹在於提供各種清洗方式的特點與設計原則，由於其各有優缺點或適用範圍，因此唯有藉由實務測試，才能達到最佳或最適應用效果。

2. 「水洗量的估算」

鍍件清洗水量估算值事實上與實際產生值有不少的差距。所以，必須在管理上或設計上作充份的考量，使其差距能儘量減少。因此，本節將從清洗的基本設計原理來探討合理水洗量的估算模式，以作為應用上之依據。

實際上，清洗有兩種現象，即是「完全混合均勻狀態下進行」及「不完全混合均勻狀態下進行」。由於後者是在於沒有充分考量所有變化因素產生情況，因此，如作好充分的準備工作，相信可使一切的清洗工作是在接近「完全混合均勻狀態下進行」情況來進行。

如前所述，在此建議並提出幾項假設前提，以作為在建立合理水洗量估算模式時之必要條件，分述如下(請參見圖10)：

- 清洗槽內鍍液濃度是均勻的(建議可藉充分攪拌等方式為之)。
- 電鍍槽液濃度是一定值。
- 電鍍槽與清洗槽之帶出液量是相等的。
- 每次鍍件帶出液量與清洗槽中液量相比，其量極小。

- 做好槽液蒸發、滴漏等防護設施(如電鍍槽或清洗槽之設計考量)。

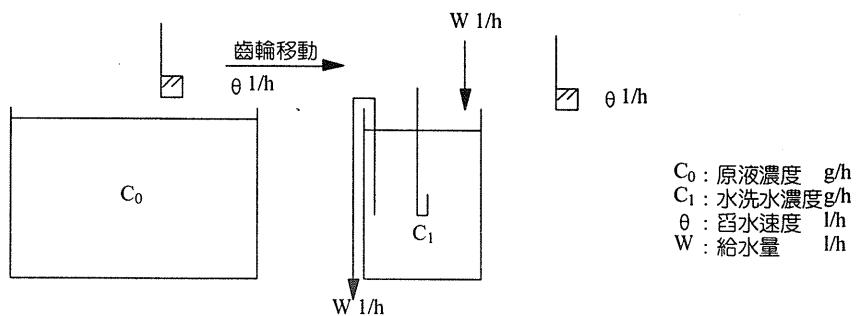


圖10 一次水洗

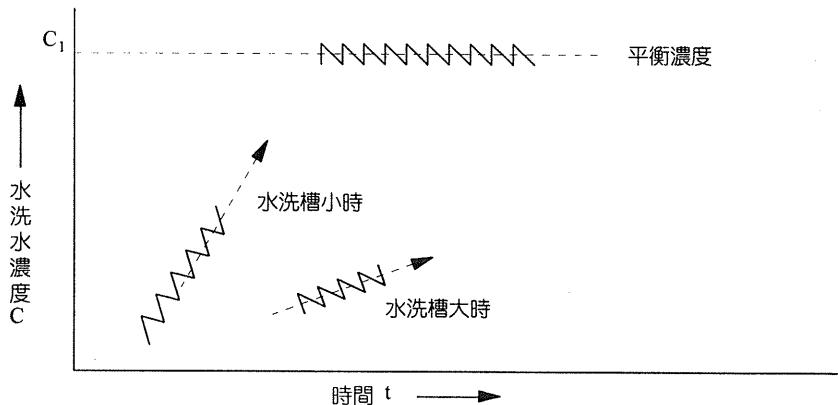


圖11 水洗水濃度的經時變化

如圖11所示，並在以上假設前提下可以看出清洗槽內濃度變化情形，由圖11中得知鋸齒形(ZIGZAG)間隔表示鍍件進入清洗槽清洗時間的間隔，其振幅大則表示鍍件帶入清洗槽之液量多，反之則少。另外，清洗槽容量愈大則要達到平衡濃度(C_1)的時間就愈長。

◎1次水洗時

根據圖10中所示，於平衡狀態下，對清洗槽原液成份作物質質量平衡考量時，單位時間內帶進清洗槽的原液成份(例如nickel ion鎳離子)的絕對量為 $Co\theta$ g/h與從清洗槽出來的成份之絕對量為 $C_1(\theta + W)g/h$ 相等。

經運算爲

設 $C_o/C_1 = B$ ，定義為水洗效果(此數字愈大表示水洗愈完好)

(通常n次反覆作水洗時 $C_o/C_n = B$)

另設 $W/\theta = A$ ，定義為稀釋比時，(2)式就成為如下簡單式。

又此式在後述的(9)或(15)式時，就相當於 $n = 1$ 時。

◎n次並聯水洗

如圖12的清洗槽排列及給水方式作重覆水洗稱為n次並聯水洗。此時對各槽的給水量 $W(l/h)$ 為互相等量，其總和給水量就是這些的總合。

在圖12假定爲所有的水洗水濃度達到平衡濃度者，可由(2)、(3)式來成立如下式原液槽與第1清洗槽之間的關係

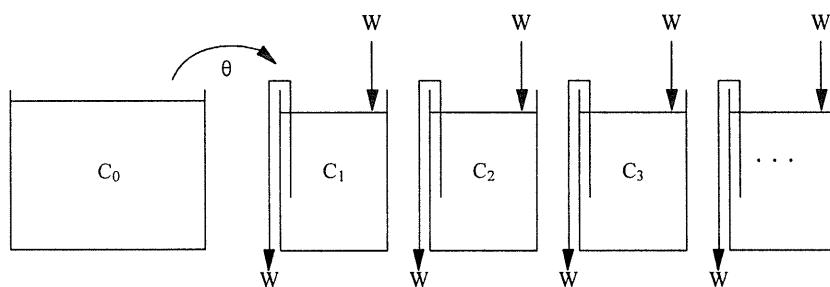


圖12 n次並聯水洗

再者 C_1 和 C_2 的關係可同樣依下列方式表示。

由(5)、(6)式可得

$$\frac{C_0}{C_1} \times \frac{C_1}{C_2} = \frac{C_0}{C_2} = (1+A)^2 \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

作相同反覆可得

$$\frac{C_0}{C_3} = (1 + A)^3$$

通常作爲

從(c)式與水洗效果定義為n次為 $B = C_0/C_n$ 得知

n 次並聯水洗的一般式(h)，可改寫為

◎ n次串聯水洗

如圖13的清洗槽排列與給水方式作反覆水洗稱為n次串聯水洗。首先將最簡單的2次串聯水洗作例子來說，在平衡狀態下的第1清洗槽以及第2清洗槽的有關原液成份的物質質量平衡，可依次照下式表示(左邊為進入量，右邊則表示排出量)。

$$\text{第1清洗槽: } C_0 \theta + C_2 W = C_1 \theta + C_1 W \quad (10)$$

$$\text{第2清洗槽 : } C_1 \theta = C_2 \theta + C_2 W \quad (11)$$

在此如用 $W/\theta = A$ 關係時，(10), (11) 式可變成如下。

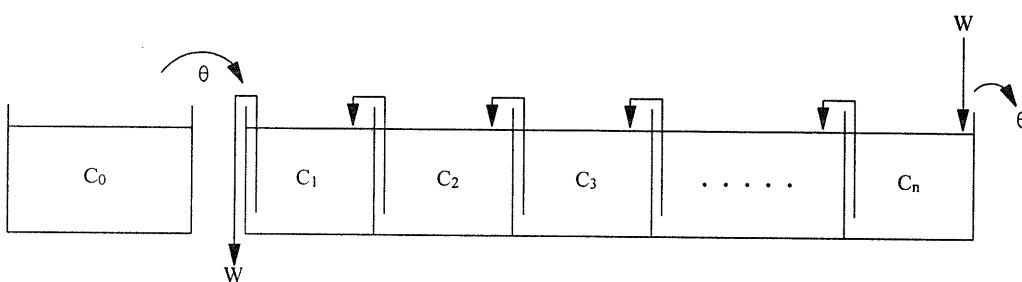


圖13 n次串聯水洗

把(13)代入(12)式作整理時，可得如下。

$$C_0 = C_2(1 + A + A^2)$$

通常n次串聯水洗時，

$$C_0 = C_n(1 + A + A^2 + \dots + A^n) \quad \dots \dots \dots \quad (14)$$

因 $B = C_o/C_n$ 之故，

再者，如n次串聯水洗時，途中的第k清洗槽的濃度C_k究竟如何表示才好，
(n次並聯水洗中的第k清洗槽的濃度C_k，可直接適用一般式)

首先思考第n槽和(n-1)槽有關原液成份的物質質量平衡時，

$$\text{第n槽: } C_{n-1} \theta = C_n(\theta + A) \dots \dots \dots \quad (16)$$

$$\text{第}(n-1)\text{槽} : C_{n-2}\theta + C_n W = C_{n-1}(\theta + W) \dots \quad (17)$$

如使用 $A = W/\theta$ 關係時，(16), (17)式作如下改變。

$$C_{n+1} = C_n(1 + A) \quad \dots \dots \dots \quad (18)$$

把(18)式代入(19)式則得，

$$C_{n-2} = C_n(1 + A + A^2 + A^3)$$

總之，就前述推演，此處可作結果的總整理，即

$B = C_0/C_n$ ，設 $A = W/\theta$ 時

a. n次並聯水洗時 (9)

$B = (1 + A)^n$ 此實驗的總給水量 = nW

b.n次串聯水洗時

$$B = 1 + A + A^2 + \dots + A^n \quad \dots \dots \dots \quad (15)$$

此時途中的第k水槽濃度 C_k 為

$$C_k = C_n(1 + A + A^2 + \dots + A^{n-k}) \quad \dots \dots \dots \quad (20)$$

c. 1次水洗時

在(9)、(15)式時相當於 $n=1$

$$B = 1 + A \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

d. 近似式

給水量W比拖出速度相當大時，因 $A > 1$ 故(i)、(o)各於下式爲近似。

$$B = A^n \quad \dots \dots \dots \quad (21)$$

為了便於計算建議建立有關各n之AB圖表，因為於(9)或(15)式中可知，從n及A求B很簡單，但從n及B求A就比較難。所以於(9)或(15)式上代入實際數值並作計算，即可得對數圖表(分別以 $\log A$ 與 $\log B$ 為X與Y座標，稱之為AB計算圖)。

4.3 「製程外 (off-line) 配合」

基本上來說，電鍍工廠製造過程中產生之污染物可分為廢水、固體廢棄物、廢氣等三類，其主要產生單元與污染物種類大略如表3所示，其中大宗污染物主要來自廢水、廢液以及衍生之含重金屬電鍍污泥。因此，本文將採摘要式來評析解決廢水及污泥問題之相關措施與做法。

表3 電鍍工廠污染源及種類

| 項目 | 產生單元 | 污染物種類 |
|---------|---------|------------------------|
| 水污染 | 清洗程序 | COD、SS、pH、重金屬 (Cu、Ni等) |
| 固體廢棄物污染 | 廢水處理、電鍍 | 污泥、濃厚廢液 |
| 空氣污染 | 酸洗、電鍍 | 鹽酸、硝酸 |

4.3.1 傳統電鍍廢水處理法

電鍍廢水中，有許多重金屬及氰化物，其中六價鉻及氰化物需分別還原及氧化之，因為六價鉻還原為三價鉻之後，三價鉻之毒性較低（約六價鉻之5/1,000）而且可以用化學沉澱方法除去；而氰化物則會被氧化劑氧化為毒性較低之 CNO^- ，或進一步氧化為氮氣與二氧化碳。

經過上述氧化、還原處理之後，電鍍廢水中仍可溶一些重金屬離子，仍不能直接排放，而這些重金屬離子可與氫氧化物結合成形不易溶解之重金屬氫氧化物沉澱，故必須再加入氫氧化鈉或氫氧化鈣等中和劑，以提高其酸鹼值(pH)，各種重金屬之最佳沉澱pH值不盡相同。形成沉澱之後，設法將沉澱物取出，澄清液經過pH值調整後即可排放。

至於廢水中六價鉻完全還原所需之加藥量，可用氧化還原電位(ORP)來控制，以免加藥量不足或過多。重金屬離子可藉著提高廢水pH值，使其與氫氧離子作用產生沉澱而除去，在實際操作處理時，則可用pH控制器，加以控制石灰或氫氧化鈉之

加藥量。氰化物廢水可用含有效氯之次氯酸納(NaOCl)和漂白粉(CaOCl_2)等氧化劑氧化之，其加藥量亦可由氧化還原電位(ORP)及酸鹼值(pH)控制器加以控制。

雖說傳統處理法的操作與控制較為簡單，國內外均普遍採用，然而傳統處理法有其缺點，諸如：對某些較安定的錯化合物處理效果不佳、污泥的處理問題、所需設備佔地面積較大等。至於為了確保處理後的水質達到排放標準，可以在排放之前再通過離子交換樹脂塔，將重金屬含量再進一步降低，惟在國內似乎尚未被採用。另外，對於傳統處理法所衍生出之難以處理的重金屬污泥，仍是一個嚴重的問題。臺灣地區每年產生大量的電鍍污泥，這些有害事業廢棄物目前較被認可的處理方式為固化處理，但由於其成本高及固化後產生之固化體體積龐大，因此遭遇無掩埋場肯接受之窘境。兼具處理與資源化雙重功能之鐵氧磁化方式來加以解決電鍍污泥處理問題，則是另一選擇。

以鐵氧磁化方式處理含重金屬廢水構想之重點即在於廢水中加入適量兩價鐵鹽，在特定條件下通入空氣氧化，即可形成安定性高之鐵氧磁體，且可通過毒性溶出試驗。另外，由於其具有磁性，所獲得之鐵氧磁體有可能當磁性材料再加以利用。

據了解國內在此方面之技術已具實廠化能力，其特點或優點可分兩方面來說明：

- 1.重金屬離子廢水經鐵氧磁化處理過程中，除了減少現有管末處理系統之化學藥品使用成本外，也可簡化處理程序與場地空間。另外，處理後之廢水也可再循環利用。
- 2.重金屬離子廢水經鐵氧磁化處理過程後，產生磁性污泥，此磁性污泥因具有穩定的尖晶石結構而具有磁性，所以此種鐵氧磁體污泥之資源化，可朝磁性應用之方向開發。

一般而言，廢水產生之污泥，含水率大約到60%~80%間，因此，此種鐵氧磁體污泥在資源化時，應先經過去水過程，然後，再進行無機方式處理，使之成為陶瓷磁性材料之鐵氧磁體，而在使用其磁性效應時，應在其居里溫度(curie temperature)下使用。又因每一工廠廢水產生的污泥量，並非達到經濟規模，故此種去水後的鐵氧磁體污泥，也可添加於其他相關的磁性材料體內燒結製造。由於此種陶瓷磁性材料之鐵氧磁體，對電磁之傳導率低，故利用其介電性及磁化飽和沒有磁性材料高，可應用於許多高科技的高頻率作業電子元件應用，諸如接受微弱訊號的電子元件、記憶磁心、遠距視聽器材及照相錄影磁頭、偏向磁軛、反鎖變壓器及電視

的聚焦線圈等等。目前被使用的鐵氧磁體($MO\cdot Fe_2O_3$)材料中，較被看好的金屬離子(M)，有鐵、鋇、錳、鈷、鎳、銅、鋅。例如， $36\% NiO\cdot Fe_2O_3$ ， $64\% ZnO\cdot Fe_2O_3$ 鐵氧磁體材料，已廣被商業化使用。另外， $BaO\cdot 6Fe_2O_3$ 也被荷蘭飛利浦公司應用者。

4.3.2 廢水回收再利用技術

國內最近幾年應用的技術，正逐漸朝向清洗水與重金屬的回收再利用技術為主，對於工業廢水或廢棄物減量方面也正積極推動中。現就相關技術或裝置作摘要評析。

1.大氣蒸發濃縮裝置：

大氣蒸發濃縮裝置較適合於鍍浴溫度高者，而且為了提高濃縮效果，一般尚須使用蒸氣加熱，並與去除離質金屬之電解設備併用，以避免雜質累積。目前大氣濃縮設備大多用以回收鍍鉻帶出液(drag-out)，不但能將鉻酸帶出液加以濃縮，送回鍍槽再使用，亦可節省不少的鉻酸廢水處理費用，因而若能有效地操作，一般在三年之內回收投資設備的成本是沒有問題的。以圖14所示可知，濃縮隔膜電解回收裝置的蒸發量可由回收槽補充。補充方法除以被鍍物提出時，以次槽的水噴洗(此時亦可減少由被鍍物帶出的水量，而每個回收槽的噴洗量不能超過前槽的噴洗量)外，其不足的補充量再以逆流水洗水補充之。

近年來，有不少電鍍業者使用沒有附帶電解設備的大氣濃縮裝置，而且濃縮裝置本身也沒有加熱設備，因為鍍鉻液溫度不夠高，使得蒸發速率大打折扣，應該是使用效果不佳的主要原因。但是，也有電鍍廠採用完整的全套大氣蒸濃縮設備，操作時間已有十幾年，雖然高濃度鉻酸液極具侵蝕性，但是貯槽、管線、風扇、幫浦等，並無嚴重侵蝕的情形，據業者稱：因為裝置了大氣濃縮裝置，每個月可以節省鉻酸費用約2~3萬元。因此，此一設備費用在三年之內即予以回收，目前則每個月有節省鉻酸用量的固定利益。(該廠原來就以蒸氣加熱鍍浴，故鉻酸濃縮用之熱源沒有問題，如果用電加熱，則啓動濃縮裝置後，鉻酸溶液的溫度無法維持，濃縮效果大為降低)。

2.離子交換樹脂法

電鍍過程中須使用大量的清洗水來洗淨鍍件上殘留的鍍液，無形中增加了廢水的體積，因此簡單的離子交換樹脂應用不但可將污染量減少外，更可使大部份的水回收再循環至清洗槽利用。為避免樹脂經常再生，在水洗過程中設置一逆流式清洗槽循環槽可增加樹脂的使用效率，降低操作成本，如圖15所所示。

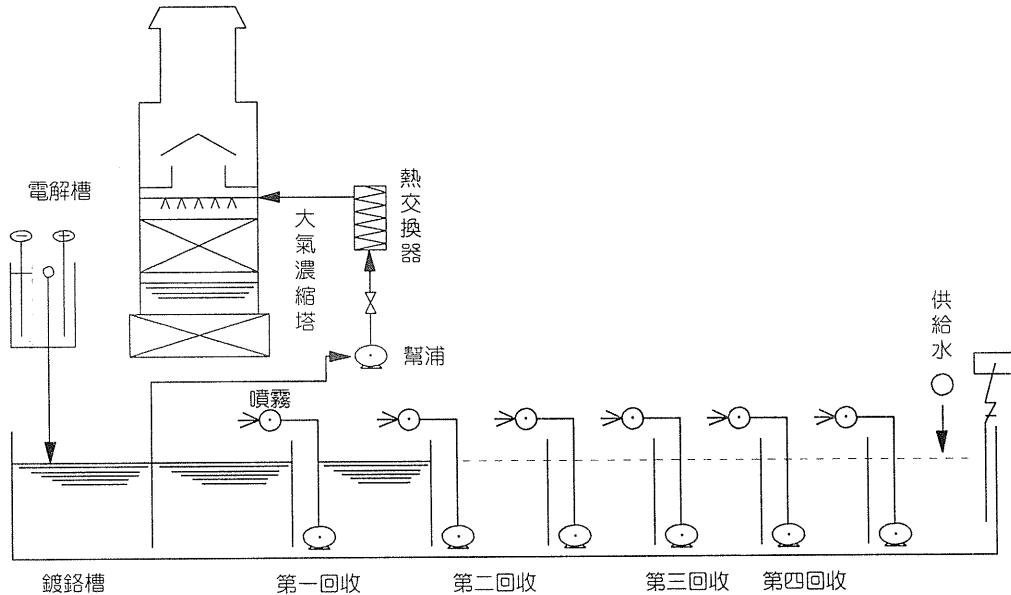


圖14 大氣蒸發濃縮裝置於電鍍程序上應用

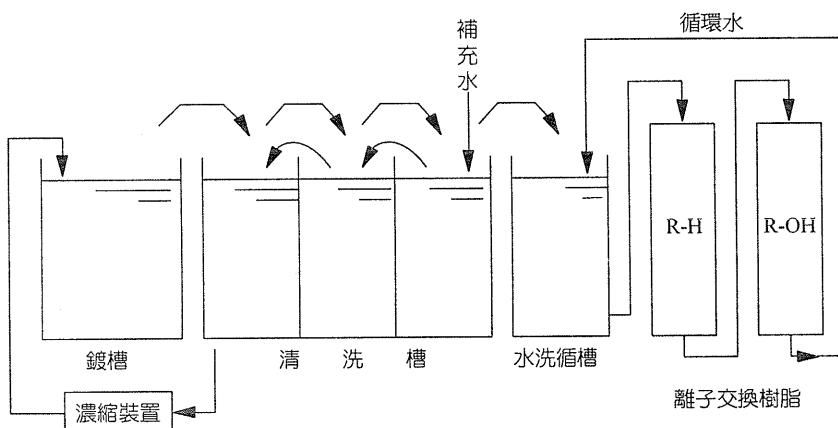


圖15 電鍍清洗水循環使用程序

目前國內水處理廠商正大力推薦電鍍業者使用離子交換樹脂處理其清洗廢水，因此已有多家電鍍廠採用，但是裝置運轉後，經常發現樹脂在使用數天之後，即達到飽和，必須再生，再生頻率太高，操作費用相當可觀，不是一般電鍍廠所能負擔。究其原因，可能是裝置離子交換設備之初，未能對各工廠之水洗工

程進行適當之配合改善措施(如：採用多槽式逆流水洗方式、減少電鍍液帶出量、建立節約用水的觀念等)；對各廠之清洗水用量及其成份濃度未先行調查分析，以計算、設計離子交換樹脂之容量；而樹脂之再生效率也不佳，使其交換容量大幅減少；再者，若所有清洗廢水全部通過離子交換樹脂塔，其負荷過大，自然再生頻率很高。為了延長樹脂的使用時間，其實離子交換樹脂的使用，應該配合濃縮裝置一起使用(如圖15所示)，如此不但可以將濃縮的鍍液送回鍍槽再用，離子交換樹脂的負荷也大為降低，就不需經常再生了。

3.未來發展趨勢

展望未來，在「製程外配合」措施方面，也逐漸走向回收再利用與無污泥產生的清潔生產技術，現將之歸納以下四類並簡述之。

(1)鉻酸回收技術與設備

由於鉻酸具有極高的污染性，最好的方式，即回收使用，既可節省原料成本，更能降低廢水處理的負擔。目前回收設備，包括大氣濃縮、真空濃縮、隔膜電解、離子交換樹脂等，可將低濃度的鉻酸濃縮成高濃度者，並去除其中的雜質，不僅可回收鉻酸再利用，也減少了廢水處理成本。

(2)重金屬回收技術與設備

重金屬污染物是無法消滅的物質，若能儘量回收使用，不僅可減少污染，更能使資源充分利用。目前被引進的重金屬回收設備，以離子交換樹脂配合電解回收裝置最受重視，有部份業者已嘗試添購設備進行回收。

(3)氰離子分解技術與設備

以電解法破壞電鍍廢水中的氰離子，不僅成本低，且可同時回收重金屬，唯一的限制是在低濃度時，電解效率較低。因此，利用高表面積電極提高電解效率的設備，已被引進國內，並進行推廣中。

(4)水回收技術與設備

清洗水的回收，其經濟價值在目前雖然不是很高，但卻是釜底抽薪的污染防治技術，因為清洗水回收得越多，則排出的廢水越少，其最終目標即是建立零排放之密閉系統。目前國內引進的水回收技術與設備，以逆滲透與離子交換樹脂最常見，此外，也有電透析技術。由於水回收技術，須有較多的配合條件，故其發展屬起步階段。

五、結論

綜觀國際間現況，除了聯合國積極推動「清潔生產」工作外，世界各國也均藉著公約／協議、法規／政策、經濟、社會責任等因素來激勵國內企業推動「清潔生產」工作，當然我國也不例外。展望未來的發展趨勢，必然是更上一層樓，這是勿庸置疑的！

如再從日漸嚴格的環保法規趨勢來看，以往採用管末處理以求符合環保法規的方式不僅耗費金錢及人力，並且在某些情況下並不適用。因此，未來唯有力求在源頭上，避免或儘可能減少廢棄物的產生，才是最經濟有效的方法。

此外，所謂「清潔生產」的涵意，在於強調其相對性、持續性的本質，這對於利用電鍍加工程序從事生產的業者與致力於相關設備與藥品之專業研發工作人員而言，也就更顯得重要。換言之，也是希望隨著經濟發展而進行技術／產品更新之同時，能朝向更"環境"的目標來努力。

六、參考資料

- 1.林作砥，21世紀工業界所面臨的環境挑戰，經濟部／環保署—工業減廢聯合輔導小組,簡報資料，1993。
- 2.Allan , J. ,Clean technology, CRC Press ,Inc. ,U.S. Florida, 1992.
- 3.USEPA, Waste Minimization Opportunity Assessment Manual, EPA /625/7-88/003, 1988.
- 4.Sawyer ,D.T. and Martell , A.E. ,Industrial Environmental Chemistry, Plenum Press ,New York, pp 3-44 1992.
- 5.鄭智和，讀者信箱，清潔生產資訊雙月刊，第15期，第1-2頁，工業局，民國86年。
- 6.李公哲，台灣省電鍍廢水低成本處理法之研究，台灣省水污染防治所，民國65年。
- 7.馮續華，電鍍廢水處理方法之研究，台北市政府研究發展考核委員會，民國71年。

8. 電鍍工廠廢水污染防治技術手冊，工業局污染防治技術服務團，民國75年。
9. 楊漢明，電鍍廢水處理實務，重金屬廢水處理研討會，民國78年3月。
10. 楊岳軍，離子交換樹脂在重金屬廢水處理之應用，重金屬廢水處理研討會，民國78年3月。
11. 中華民國企業環境保護協會，產業污染及能源消耗量之調查與評估—電鍍業，工業局，民國83年6月。
12. 涂錦葆，電鍍廢水治理手冊，第34-65頁，機械工業出版社，中國大陸，民國78年12月。
13. 宋宏凱、蔡敏行，電鍍廢水鐵氧磁體化及其安定性之研究，成功大學碩士論文，民國83年7月。
14. *Electrochemistry of Cleaner Environments*, ed. J. O'M. Bockris, Plenum Press, New York, London, 1992.
15. S. Stucki, R. Lotz, B. Garcer and W. Suter, *J. Appl. Electrochem.*, p21, p99. 1991.
16. D. Simonsson, *J. Appl. Electrochem.*, 14, 595. 1984.
17. J. Winnick, in *Advances in Electrochemical Science and Engineering*, ed. H. Gerischer and C. W. Tobias. VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, vol.4(4). p26. 1990.
18. B. E. Conway, *J. Electrochem. Soc.*, p.138, p.1539. 1991.
19. D. Pletcher and F. C. Walsh, *Industrial Electrochemistry*, Chapman and Hall, London, p.619. 1990.