

## 廢水物理化學處理功能診斷及案例

曾迪華\*

### 摘要

本文針對常用的化學混凝和化學沈降處理程序，分別就其處理目的、操作原理、常用藥劑、處理流程和影響操作成效的因素，加以介紹和探討，並進一步就常用的功能診斷方法，包括瓶杯試驗、追蹤劑試驗、中和曲線試驗和溶解度曲線試驗，舉出各種案例予以討論。

#### 【關鍵字】

- 1.化學混凝(chemical coagulation)
- 2.化學沈降(chemical precipitation)
- 3.功能診斷(performance evaluation)
- 4.瓶杯試驗(jar test)
- 5.追蹤劑試驗(tracer test)
- 6.中和曲線試驗(neutralization curve test)
- 7.溶解度曲線試驗(solubility curve test)

---

\*國立中央大學環境工程研究所教授

## 一、前　　言

台灣地區工業廢水最常採用的物理化學處理程序為化學混凝/膠凝/沈澱程序 (chemical coagulation/flocculation/sedimentation process)和化學沈降程序 (chemical precipitation process)，前者常使用於染整、造紙、製革等工業廢水的處理，主要為去除水中的膠體顆粒，藉以達到降低廢水中懸浮固體、有機固體物(BOD和COD)、色度等的濃度，並提升排放水之透視度的目的；後者常使用於電鍍、印刷電路板、金屬表面處理、化學品等工業廢水的處理，主要為去除溶解於水中的無機和有機離子，藉以達到降低廢水中各種重金屬離子、營養鹽物質(例如磷酸鹽)，及溶解性有機離子(溶解性COD)等的濃度。

基本上，上述兩種物理化學處理程序，由於所欲去除的污染物質，其性質有異，因此其處理原理亦有所不同。化學混凝原理乃是藉加入化學混凝劑，改變水中膠體顆粒的穩定性，藉壓縮電雙層、吸附及電價中和、沈澱物掃洩作用，和吸附及架橋作用等反應機制，破壞膠體顆粒的穩定性，使帶靜電荷的顆粒，傾向凝結成較大的顆粒物質，而容易沈澱去除；化學沈降原理乃是藉加入適當的化學藥劑(中和藥劑、化學沈降劑)，改變物質在水中的溶解度，使溶解性的物質，轉化成非溶解性的固體沈降物，而易於藉沈澱操作加以分離。由於前述兩者最終均需藉沈澱操作達到固液分離的目的，因此在操作原理上似有相同之處，故其處理程序(流程)亦大致相同，一般而言，均包括快混、慢混及沈澱等處理單元，致在實務設計及操作上，往往對此兩種程序並未做明顯的區分。不過，如欲診斷此兩種物理化學處理程序的功能，必須先瞭解其基本操作原理的不同，此點是不能忽略的。

事實上，不論是化學混凝程序或是化學沈降程序，其處理功能的達成，受影響最大且最具關鍵的乃是沈澱池(單元)的設計與操作，但沈澱作用的好壞，又受進入沈澱池之廢水中所生成的膠羽特性影響，因此欲提昇此處理程序的功能，必須就影響膠羽生成的因素，及各處理單元(包括快混、慢混及沈澱)的物理化學條件加以評估和診斷，方得改善之效。

基於上述且又受限於篇幅，本文所述之廢水物理化學處理功能診斷，將侷限於目前最普遍採用的化學混凝和化學沈降程序，並分別就其操作原理、影響

處理功能的因素，及常用的功能診斷方法與案例，依文獻資料和筆者的經驗加以探討評析，期望藉由本文的拋磚引玉，提供實務界相關的參考資料，並引發學界更深入的研究，以提昇該程序實際應用的處理功能。

## 二、化學混凝程序之操作原理

### 2.1 化學混凝目的

去除廢水中膠體顆粒，降低廢水BOD、COD、懸浮固體、色度等的濃度，並提高廢水透視度。

### 2.2 化學混凝原理

廢水中膠體顆粒，一般粒徑範圍介於 $10\text{nm}$ 至 $10\mu\text{m}$ ，通常帶負電荷，表面界達電位(zeta potential)約為 $-15\text{mv}$ 至 $-20\text{mv}$ <sup>(1)</sup>，由於顆粒細小，又帶相同電荷，具有相當高的穩定性，在水中不易沈降，因此藉加入適當的混凝劑，利用下列作用機制，以破壞顆粒表面穩定性，減低彼此間相互的排斥力，傾向易於凝結成較大顆粒，而易於沈降去除之<sup>(1, 2)</sup>：

- 1.壓縮電雙層：廢水中添加高濃度陽離子電解質，例如硫酸鋁，降低顆粒表面界達電位，使凡得瓦爾吸引力(van der Waals attractive force)大於排斥力，導致顆粒傾向於凝結。
- 2.吸附及電價中和：藉添加陽離子電解質與鹼劑，以形成各種帶正電荷之水合金屬氧化物(charged hydrous oxides)，使其吸附及電價中和帶負電荷之膠體顆粒並將其包覆。
- 3.沈澱物掃洩作用：當水中添加過飽和金屬鹽類，以形成大量金屬氫氧化物膠羽(例如 $\text{Al(OH)}_3$ 、 $\text{Fe(OH)}_3$ )時，在此大量膠羽沈降的過程中，將細小膠體顆粒一併沈降掃洩去除。
- 4.吸附及架橋作用：(1)當水中添加足夠的陽離子聚電解質以降低界達電位至 $0\text{mv}$ 時，則高分子聚合物將產生吸附力並完成架橋作用，通常聚合物鏈長愈長，架橋作用愈有效；(2)水中陰離子與陽離子聚電解質產生相互混凝的作用

(mutual coagulation)；(3)負電荷膠體顆粒和陰離子或中性聚電解質產生架橋凝聚作用。

### 2.3 常用混凝劑

表1所示<sup>(3)</sup>為化學混凝程序常用的混凝劑，其一般添加劑量範圍、最適操作pH，和適用條件亦示如表1。

混凝劑	劑量範圍, mg/L	pH	適用情況
石 灰	150~500	9.0~11.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 混凝膠體顆粒和磷(P)的去除</li> <li>• 低鹼度廢水，高且變化量大含P廢水</li> <li>• 基本反應</li> </ul> $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \rightarrow 2\text{CaCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$ $\text{MgCO}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{Mg}(\text{OH})_2 + \text{CaCO}_3$
明 磬	75~250	4.5~7.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 混凝膠體顆粒和磷的去除</li> <li>• 高鹼度廢水，低和穩定磷含量廢水</li> <li>• 基本反應</li> </ul> $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{H}_2\text{SO}_4$
$\text{FeCl}_3$ , $\text{FeCl}_2$	35~150	4.0~7.0	• 混凝膠體顆粒和磷的去除
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	70~200	4.0~7.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 高鹼度廢水，低和穩定磷含量廢水</li> <li>• 排放水允許鐵的放流或可被控制</li> <li>• 含鐵浸漬廢液(如煉鋼廠)的來源經濟且可資利用</li> <li>• 基本反應</li> </ul> $\text{FeCl}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{HCl}$
陽離子高分子	2~5	不受影響	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 混凝膠體顆粒，幫助金屬沈澱</li> <li>• 需避免水中累積離子物質</li> </ul>
陰離子和某些 中性高分子	0.25~1.0	不受影響	• 做為助凝劑，以加速膠凝和沈澱作用，並增強膠羽以利過濾
增重劑和黏土	3~20	不受影響	• 適用於非常低濃度膠羽顆粒懸浮液

## 2.4 化學混凝處理流程

前述混凝的作用機制，包括膠體顆粒表面穩定性的破壞，膠體的凝聚成長，和膠羽的固液分離，需藉助快混、慢混和沈澱三個處理單元來完成，圖1所示即為典型化學混凝程序的處理流程和各單元機制<sup>(3)</sup>。

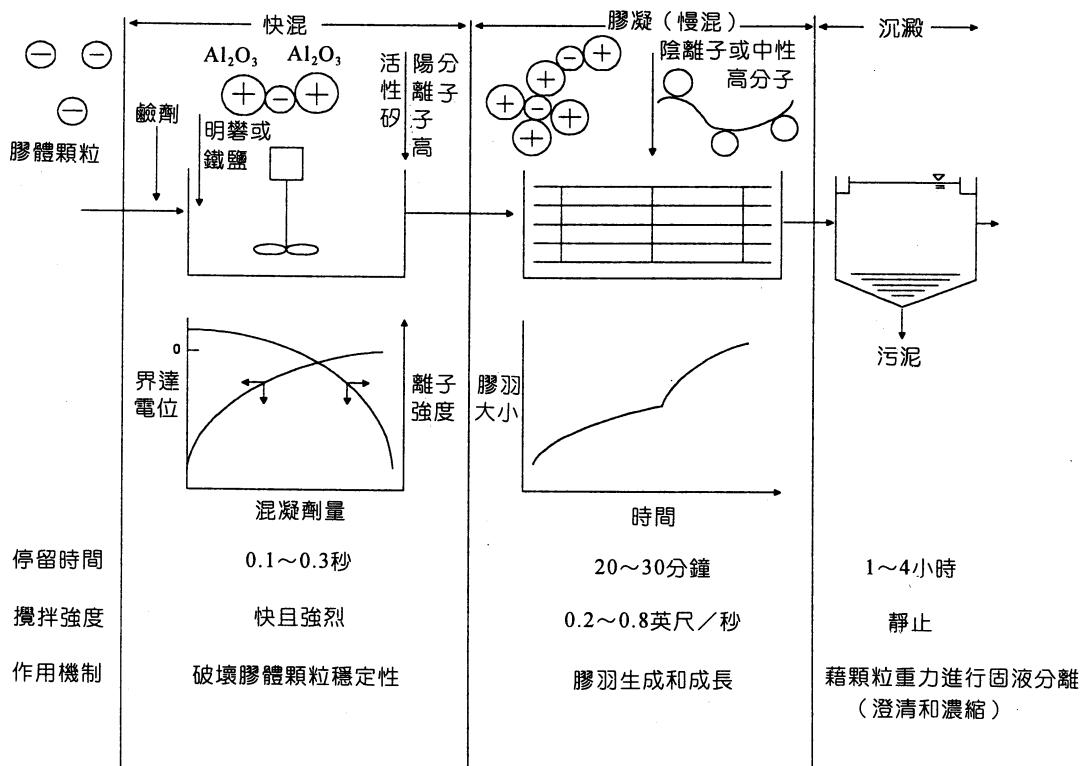


圖1 化學混凝程序之典型處理流程和作用機制<sup>(3)</sup>

## 2.5 影響化學混凝操作成效的因素

影響化學混凝之操作成效的因素，包括設計和操作之各項物理和化學因子，項目繁多且各因子間亦有相互之影響，茲依各處理單元的特性，列舉出常見之影響因素如下：

### 1. 快混單元

(1)廢水特性，包括膠體數量多寡、pH和鹼度、溫度。

(2)混凝劑種類。

(3)混凝劑劑量(dosage)和藥液強度(strength)。

(4)快混時間和攪拌強度。

(5)藥劑注入點和方式。

(6)快混池之幾何形狀。

## 2.慢混(膠凝)單元

(1)高分子凝聚劑的種類和添加劑量。

(2)高分子凝聚劑的注入點和方式。

(3)慢混時間和攪拌強度。

(4)慢混池之幾何形狀。

## 3.沈澱單元

(1)表面負荷率。

(2)水力停留時間。

(3)堰負荷率。

(4)膠羽濃度、顆粒大小和密度。

(5)溫度所造成之異重流(density-current)現象。

(6)氣泡(溫度迅速升高水中釋出溶解氣體，影響顆粒沈降性)。

(7)沈澱池幾何形狀和附屬設施。

# 三、化學沈降程序之操作原理

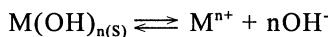
## 3.1 化學沈降目的

化學沈降的目的主要為去除水中溶解性無機和有機離子，藉以降低工業廢水中各種重金屬離子(例如Cu、Zn、Ni、Cr、Cd、Pb、As、Hg、Fe、Mn等)、無機性離子(例如氟化物、磷酸鹽等)和溶解性COD(例如酸化沈降處理紙漿業之浸漬廢液和洗漿廢水、印刷電路板業之蝕刻廢液、造紙業之去墨廢液等)的濃度。

### 3.2 化學沈降原理

化學沈降原理乃藉加入中和藥劑，以改變水溶液pH值，使溶解性離子轉化成不溶解性固體膠羽；或藉加入混凝劑，使形成氧化物膠羽，以吸附水中溶解性離子。上述兩種不同性質之膠羽，均可再藉膠凝作用(othokinetic flocculation)，凝聚成更大的顆粒，使易於沈澱去除之。

以重金屬離子為例，當廢水加入鹼劑，提升pH值，則溶解性金屬離子將轉化成金屬氫氧化物膠羽，其反應如下：



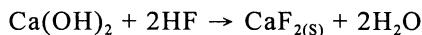
$$K_{sp} = [M^{n+}][OH^-]^n$$

亦即水中 $[OH^-]$ 濃度增加， $[M^{n+}][OH^-]^n$ 的乘積大於溶解度積 $K_{sp}$ 時，水中金屬離子呈過飽和現象，結晶成長為 $M(OH)_n$ 固體膠羽，而易於沈降。

此外，鋁鹽或鐵鹽混凝劑加入水中，可能生成 $Al_2O_3$ 或 $Fe_2O_3$ 的金屬氧化物膠羽，其可吸附水中的金屬離子，例如氧化鐵可吸附水中砷離子，達到處理含砷廢水的目的，不過本反應主要機制應與前節所述化學混凝的現象相同。

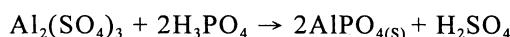
除了上述藉加入鹼劑提升pH值，以化學沈降重金屬離子外，常用的化學混凝劑亦可改變水中許多無機鹽的溶解度，使形成不溶解性的膠羽，例如：

1.含氟廢水可加入石灰，形成氟化鈣沈澱物去除<sup>(4)</sup>：

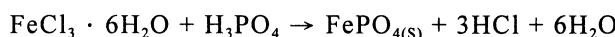


$$CaF_{2(s)} \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2F^- \quad K_{sp} = 10^{-10.3}$$

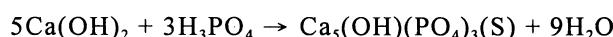
2.含磷廢水可分別藉加入鋁鹽、鐵鹽或石灰，形成磷酸鋁、磷酸鐵或磷酸鈣的沈澱物<sup>(4, 5)</sup>：



$$AlPO_{4(s)} \rightleftharpoons Al^{3+} + PO_4^{3-} \quad K_{sp} = 10^{-21}$$



$$FePO_{4(s)} \rightleftharpoons Fe^{3+} + PO_4^{3-} \quad K_{sp} = 10^{-21.9}$$



$$Ca(OH)(PO_4)_{3(s)} \rightleftharpoons 5Ca^{2+} + 3PO_4^{3-} + OH^- \quad K_{sp} = 10^{-55.9}$$

### 3.3 常用沈降劑

根據前面3.2節所述化學沈降原理可知，化學沈降常用的化學藥劑，除了一般化學混凝劑外(已述於2.3節)，則以酸鹼中和調整pH所需的藥劑為主，表2所示<sup>(6)</sup>即為pH調整常用的藥劑種類與特性，其中苛性鈉與石灰常用來產生金屬氫氧化物沈澱物，而碳酸鈉則適用於生成金屬碳酸鹽沈澱物，至於酸劑則適用於酸性沈降以產生有機沈澱物。此外，為提高廢水中重金屬的去除率，硫化鈉( $\text{Na}_2\text{S}$ )、硫化氫鈉( $\text{NaHS}$ )及硫化亞鐵( $\text{FeS}$ )，常做為金屬硫化物沈澱法之沈降藥劑使用<sup>(7)</sup>，此外，目前市面上亦有使用所謂「金屬捕集劑」，利用其螯合作用與金屬離子結合，形成不溶性且顆粒較大的膠羽，而能加速沈澱分離<sup>(6)</sup>。

表2 pH調整常用的藥劑種類及特性<sup>(6)</sup>

種類	名稱	化學式	一般使用濃度(%)	特    性
酸劑	硫酸	$\text{H}_2\text{SO}_4$	10~20	溶解度及反應速率大；液態，控制容易，但較危險。
	鹽酸	HCl	10~15	溶解度及反應速率大；液態，控制容易，但較危險。
鹼劑	苛性鈉	NaOH	15~20	溶解度及反應速率大，加藥容易。
	碳酸鈉	$\text{Na}_2\text{CO}_3$	5~10	溶解度及反應速率大，加藥容易。
	生石灰	CaO	10~20	溶解度及反應速率小；以泥漿狀供藥，須設有攪拌設備。
	消石灰	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	10~15	溶解度及反應速率小；以泥漿狀供藥，須設有攪拌設備。

### 3.4 化學沈降處理流程

基於化學沈降處理的操作原理，大致上與化學混凝相似，因此在處理流程的單元配置上，亦大致相同，包括快混、膠凝和沈澱三個主要單元，如圖2所示<sup>(1)</sup>。其中與化學混凝程序唯一的差異是，快混池的目的為調整pH或藉混凝劑以形成不溶性的膠羽顆粒。又由於化學沈降大多是藉離子的過飽和度為驅動力，以形成核種、結晶、成長的均質核化(homogeneous nucleation)過程，所需

藥劑量大，且在低濃度原廢水的情況下，產生膠羽數量少，不易碰撞凝聚，沈澱效果不佳，常發生膠羽輕，易流失的現象。為減低加藥量，形成數量多且密重的膠羽，可迴流沈澱池已生成的污泥膠羽，做為快混池中外來核種的來源，並藉異質核化作用(heterogeneous nucleation)，降低藉過飽和度形成結晶所需的驅動力<sup>(8, 9, 10)</sup>。

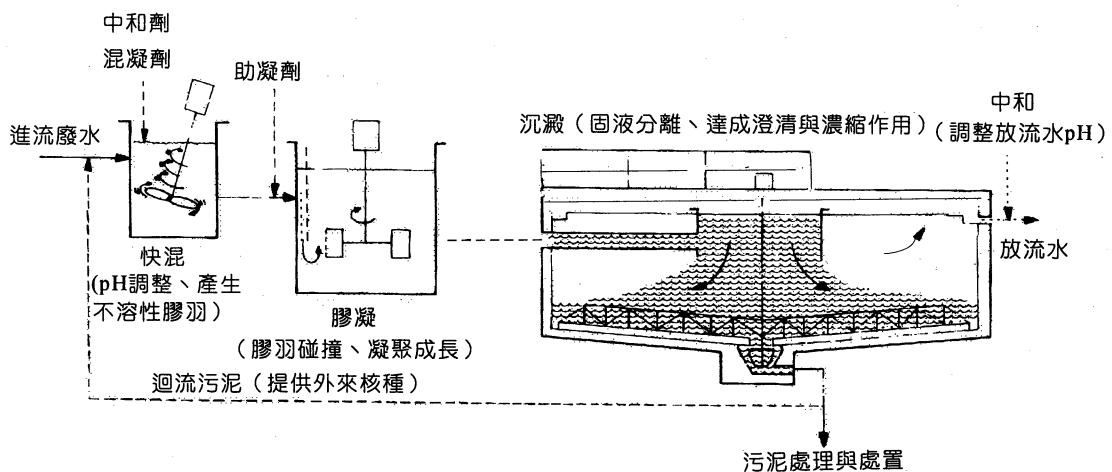


圖2 化學沈降程序之處理流程與單元配置<sup>(1)</sup>

### 3.5 影響化學沈降操作成效的因素

由於化學沈降程序的處理流程大致上與化學混凝程序相同，因此前面2.5節所述影響化學混凝操作成效的因子，亦適用於化學沈降程序的各處理單元。此外，在化學沈降程序中，尚有以下幾項影響因素，尚需特別加以注意<sup>(7)</sup>：

1. 廢水成份及濃度。
2. 金屬離子之溶解度。
3. 化學反應時間(受化學平衡與反應動力快慢影響)。
4. 廢水中是否有氨、氰鹽、檸檬酸鹽(citrate)、乙二胺四錯酸鹽(EDTA)及三乙酸基氨鹽(NTA)等錯合劑或螯合劑的存在。

## 四、功能診斷常用的方法與案例

由前述2.5和3.5節所述可知，影響化學混凝和化學沈降處理功能或成效的因素甚多，而欲改善或提升處理功能，則必須藉助適當的功能診斷方法，評估出在設計和操作上影響處理成效的原因，並研擬合適的問題對策，以達到改善之目的，本節以下將就常用的功能診斷方法加以介紹，並舉出案例以供參考。

### 4.1 瓶杯試驗(jar test)

瓶杯試驗為目前最普遍用於診斷化學混凝和化學沈降功能的方法，若使用恰當，可協助工程師用於設計新的處理廠或改善既有處理設施，亦可幫助操作人員獲得最適的混凝、膠凝和沈澱單元的操作條件，換句話說，前述各種影響化學混凝程序的操作因素，大多可藉瓶杯試驗方法加以評估和診斷，以獲得正確的設計和操作條件。

事實上，傳統瓶杯試驗的設備和操作步驟，已普遍的說明於各種教材中<sup>(1)</sup><sup>(11)</sup>，且為大多數的工程師和操作人員所熟悉，本文在此不在贅述。但要利用瓶杯試驗，以獲得有意義的診斷資料，則必須注意試驗時所需控制的條件，以能模擬實廠的實際操作情況。通常，瓶杯試驗中需特別加以控制的變數如下<sup>(12)</sup>：

- 1.瓶杯的溫度。
- 2.混凝劑藥液的強度。
- 3.混凝劑的劑量。
- 4.pH。
- 5.混凝劑的注入方式。
- 6.助凝劑的劑量。
- 7.助凝劑的注入方式。
- 8.藥劑注入的次序與時間。
- 9.快混的時間和攪拌強度。
- 10.膠凝的時間和攪拌強度。
- 11.採樣的方式。
- 12.試驗所使用的設備。
- 13.實驗室分析項目的要求。

習慣上，瓶杯試驗的操作，大多採用圓形玻璃燒杯，而藥劑的注入，係將藥液直接加於燒杯液面，採樣時係以滴管(pipette)直接任意抽取水樣，此種操作方式，往往無法正確模擬現場的情形，此點須特別加以注意。為了改善此缺點，Hudson建議採用如圖3所示的瓶杯<sup>(12)</sup>，其藥液注入於一固定點，位於接近攪拌葉片的正下方，沈澱後水樣的採取點亦位於一固定點，同時在圓形燒杯中置入固定片(stators)，以防止攪拌時水流產生渦流，而降低速度坡降值(velocity gradient)，G；同時亦可減輕在停止攪拌沈降初期時，水流仍然有轉動的現象。圖4所示<sup>(12)</sup>為瓶杯中有固定片和無定片，在相同攪拌葉片轉速，於各種不同水溫情況下，G值的比較，明顯的，在一定轉速情況下，有固定片可獲得較大的G值。不過，Hudson的瓶杯在操作時仍有不方便之處，另一種型式以壓克力玻璃製作的方形燒杯，如圖5所示<sup>(12)</sup>，其採樣較為方便，且瓶杯內不需置入固定片，亦非常適用於模擬實廠混凝、膠凝、沈澱的操作。

瓶杯試驗可根據混凝處理前後，水質分析的結果及沈澱階段膠羽沈降的情形，以評估診斷系統的處理功能，並獲得最適的操作條件，例如快混和膠凝的速度坡降值和攪拌時間、pH、混凝劑量和藥劑強度等，以下舉出一些案例加以說明：

#### 4.1.1 沈降速度(表面負荷率)與固體物去除效果的關係

因由處理廠的操作記錄，很難獲得沈澱池的沈降速度分佈曲線圖(settling velocity distribution curve)，但以瓶杯實驗可輕易的解決此問題。今以方形瓶杯進行實驗，快混和膠凝的實驗條件與現場操作完全相同，但在瓶杯停止攪拌沈降時，分別於1、2、4、8和16分鐘，在距瓶杯液面下10公分採樣口處，各採取30ml水樣，並分析其殘餘濁度或懸浮固體物濃度。於上述各時間採取的水樣分別相當於沈降速度為10、5、2.5、1.25和0.625cm/min。水樣分析的結果除以原廢水中濁度或懸浮固體物的濃度，得到在該相對沈降速度時，水中殘餘濁度或懸浮固體物的百分率，再將其繪入一對數機率座標圖中，即可獲得一沈降速度分佈曲線圖，如圖6所示<sup>(12)</sup>。

在圖6中的沈降速度可換算為表面負荷率(surface loading rate)，例如沈降速度為4.0 cm/min約等於表面負荷率為 $57.6 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ 。根據一般的經驗，濁度殘餘百分率對應沈降速度繪於一對數機率座標圖上，通常為一直線，而由此直線可推估在其他任何表面負荷率時，處理水所預期的濁度濃度。

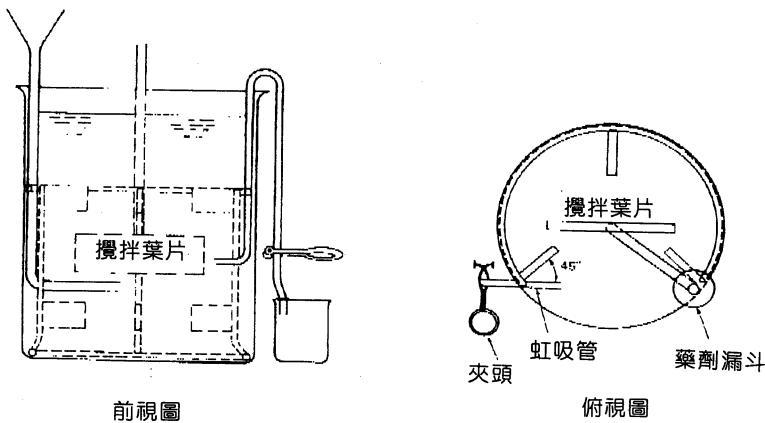


圖3 Hudson瓶試驗裝置<sup>(12)</sup>

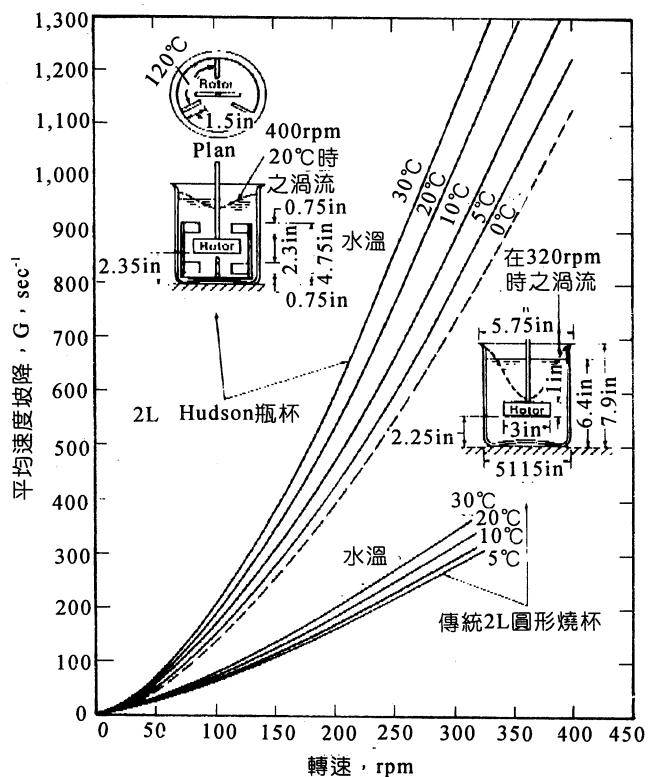
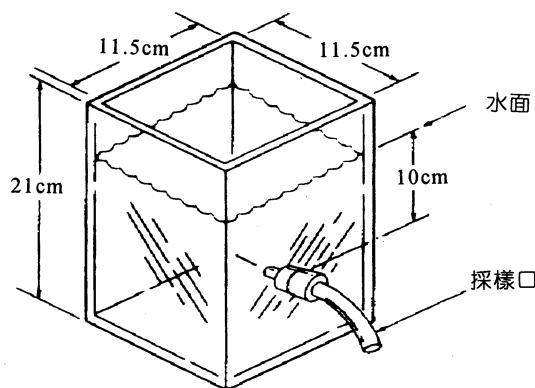
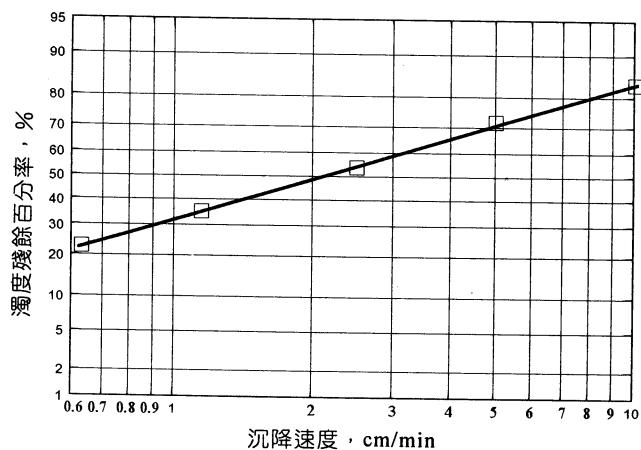


圖4 Hudson瓶與圓形燒杯之平均速度坡降值之比較<sup>(12)</sup>

圖5 方形燒杯<sup>(12)</sup>圖6 典型沉降速度分佈圖<sup>(12)</sup>

#### 4.1.2 速度坡降值的決定

速度坡降的G值，常用以表示快混和膠凝時攪拌的強度，同時亦可以用以評估膠凝池至沈澱池間，其輸水管路的擾動程度。一般而言，快混池的攪拌強度愈強，愈有利於藥劑的擴散和反應；膠凝池中攪拌的強度，則需大至足以促使膠羽產生有效的碰撞和凝聚，且需小至防止膠羽因過大的剪力而破碎；另在膠凝池出口至沈澱池入口間的輸水管路中，亦需防止G值過大，以避免已形成欲沈澱的膠羽顆粒被破碎，而影響其沈澱效果。

攪拌時所產生的速度坡降與攪拌動力和攪拌水量有關，其關係式為：

$$G = \sqrt{\frac{P}{V}}$$

式中 G：速度坡降， $\text{sec}^{-1}$

P：攪拌動力， $\text{ft-lb/sec}$

V：水量體積， $\text{ft}^3$

$\mu$ ：動黏滯係數(dynamic viscosity)， $\text{lb-sec/ft}^2$

根據上式，只要知道攪拌時所輸入的動力大小，即可計算其所對應的 G 值；反之，欲得一合理的 G 值，亦可由上式決定其所應輸入的攪拌動力。

Camp 提供下列三式，分別可用以計算機械攪拌(mechanical agitation)、管路(conduits)和阻板隔槽(baffled chambers)的 G 值大小<sup>(12)</sup>：

機械攪拌： $G = 425(\text{HPw}/t)^{1/2}$

管路： $G = 172(f/D)^{1/2} v^{3/2}$

阻板隔槽： $G = 178(H/t)^{1/2}$

式中 HPw：單位流量之馬力，HP/MGD

t：理論停留時間，min

D：管徑，ft

v：流速， $\text{ft/sec}$

H：水頭損失，ft

f：Darcy-Weisbach摩擦因子

Hudson 根據上列三式，以  $f=0.00085\text{ft}$  及  $4^\circ\text{C}$  時水的黏滯度  $= 3.273 \times 10^{-5}\text{lb-sec/ft}^2$ ，分別計算繪出快混和膠凝之速度坡降值與停留時間，攪拌動力或阻板隔槽水頭損失間的關係，如圖 7 和 圖 8 所示<sup>(12)</sup>。而管路中之速度坡降值與流量、流速和管徑間的關係，如圖 9 所示<sup>(12)</sup>。至於在其他水溫時之速度坡降值和攪拌動力，可分別根據圖 7 至 圖 9 之  $4^\circ\text{C}$  時的結果，乘以表 3 中的修正因子獲得<sup>(12)</sup>。

利用圖 7 至 圖 9 和 表 3 的資料，可用以診斷實際設計或操作值是否在合理的範圍。例如一膠凝池在已知的攪拌動力和停留時間的情況下，由圖 8 可獲得其應有的 G 值，但當處理流量變動時，膠凝池的停留時間亦將改變，此時欲維持原有的 G 值，相對的可由圖 8 決定其應調整的攪拌動力。

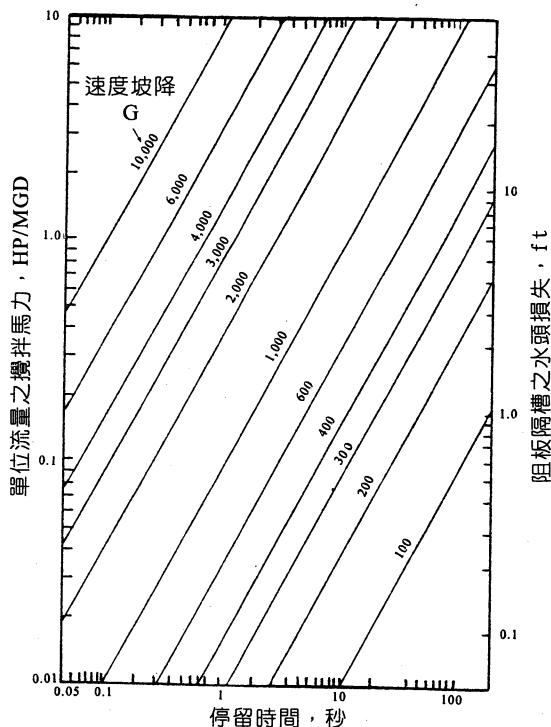


圖7 快混所需攪拌動力(在4°C時)<sup>(12)</sup>

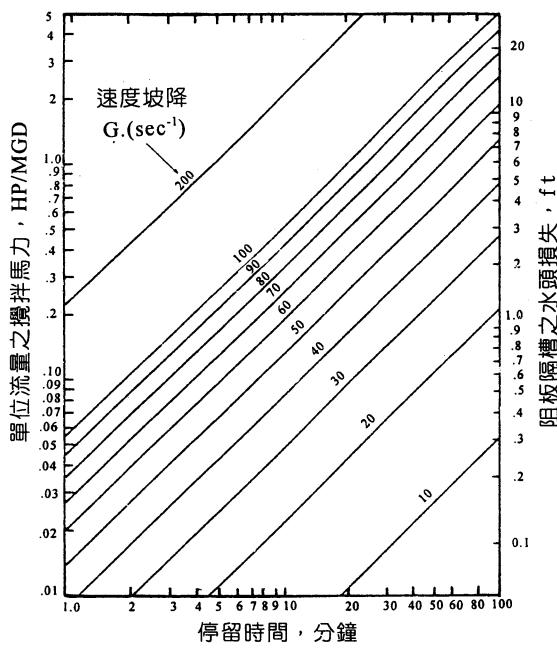
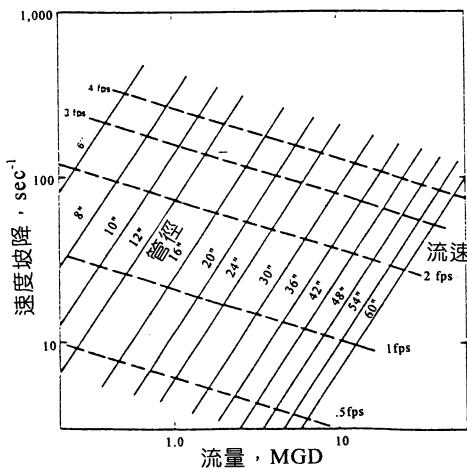


圖8 膠凝所需攪拌動力(在4°C時)<sup>(12)</sup>

圖9 大型圓形輸水管之速度坡降(在4°C時)<sup>(12)</sup>表3 溫度修正因子<sup>(12)</sup>

水溫°C	溫度修正因子	
	HP per mgd	G(sec⁻¹)
0	1.14	0.937
1	1.11	0.948
2	1.07	0.966
3	1.03	0.985
4	1.00	1.00
5	0.971	1.02
6	0.940	1.03
7	0.914	1.05
8	0.889	1.06
9	0.863	1.08
10	0.838	1.09
11	0.811	1.11
12	0.794	1.12
13	0.774	1.14
14	0.748	1.16
15	0.729	1.17
16	0.716	1.18
17	0.696	1.20
18	0.678	1.21
19	0.669	1.22
20	0.646	1.24
21	0.629	1.26
22	0.615	1.28
23	0.600	1.29
24	0.586	1.31
25	0.572	1.32
26	0.559	1.34
27	0.547	1.35
28	0.535	1.37
29	0.523	1.39
30	0.512	1.40

此外，如果已知現場快混和膠凝應有的G值，但欲以瓶杯試驗診斷在此G值情況下，膠羽顆粒是否成長凝聚良好，則瓶杯試驗之快混和慢混操作的葉片轉速，需依瓶杯試驗裝置和攪拌器的不同而異。圖10所示<sup>(13)</sup>即為四種不同裝置之速度坡降值與攪拌器葉片轉速的關係，其可用以決定瓶杯實驗應有的葉片轉速。例如，一快混池以軸流渦輪式(axial flow turbine)攪拌器在21rpm的轉速下攪拌，葉片直徑為0.6m，池體直徑為1.8m，池內水量體積為4.6m<sup>3</sup>，根據計算獲知其G值為35.5sec<sup>-1</sup>，此時如採用方形瓶杯，以平面槳片(flat paddle)為攪拌器(非最佳的模擬)，則由圖10(c)知，其葉片轉速應為42rpm，如以推進器(marine propeller)為攪拌器(可獲得較佳模擬)，由圖10(d)知，葉片轉速應為120rpm<sup>(13)</sup>。

#### 4.1.3 模擬及評估現場操作

瓶杯試驗可用以模擬現場的操作情況和重要的變動參數，藉以改善現場的操作程序或評估改變操作參數對處理效果的影響。以下茲舉一例說明瓶杯試驗模擬現場操作的應用。

有一物理化學處理廠，其處理程序如圖11所示<sup>(12)</sup>。此廠係利用明礬混凝法以去除原廢水中懸浮性雜質，但是目前的操作情況發現，有過多的膠羽從沈澱池溢流出來，現欲以瓶杯試驗分析，來尋找改善策略。當然，可能有許多變動因素的組合，為造成此種操作功能不佳的原因，可是因受限於有限的測試時間，瓶杯試驗必須要有很好的規劃，藉以利用最少量的實驗室工作，獲取最大量的資訊。

假設，混凝操作最適的pH和混凝劑量已被建立，其次重要的變數可能有：1.快混的時間和攪拌強度；2.化學藥劑的加入點；3.注入藥液的強度；和4.膠凝的時間和攪拌強度。在進行瓶杯試驗之前，現有處理廠的操作條件必須被確立和被加以模擬：

1.快混的時間和攪拌強度：現場阻板隔槽(快混池)的水力停留時間( $t = V/Q$ )，可做為瓶杯中快混的時間，至於攪拌強度，可利用前面圖7的資料，決定出其G值，再利用圖10的關係，決定瓶杯試驗中攪拌葉片應有的轉速。

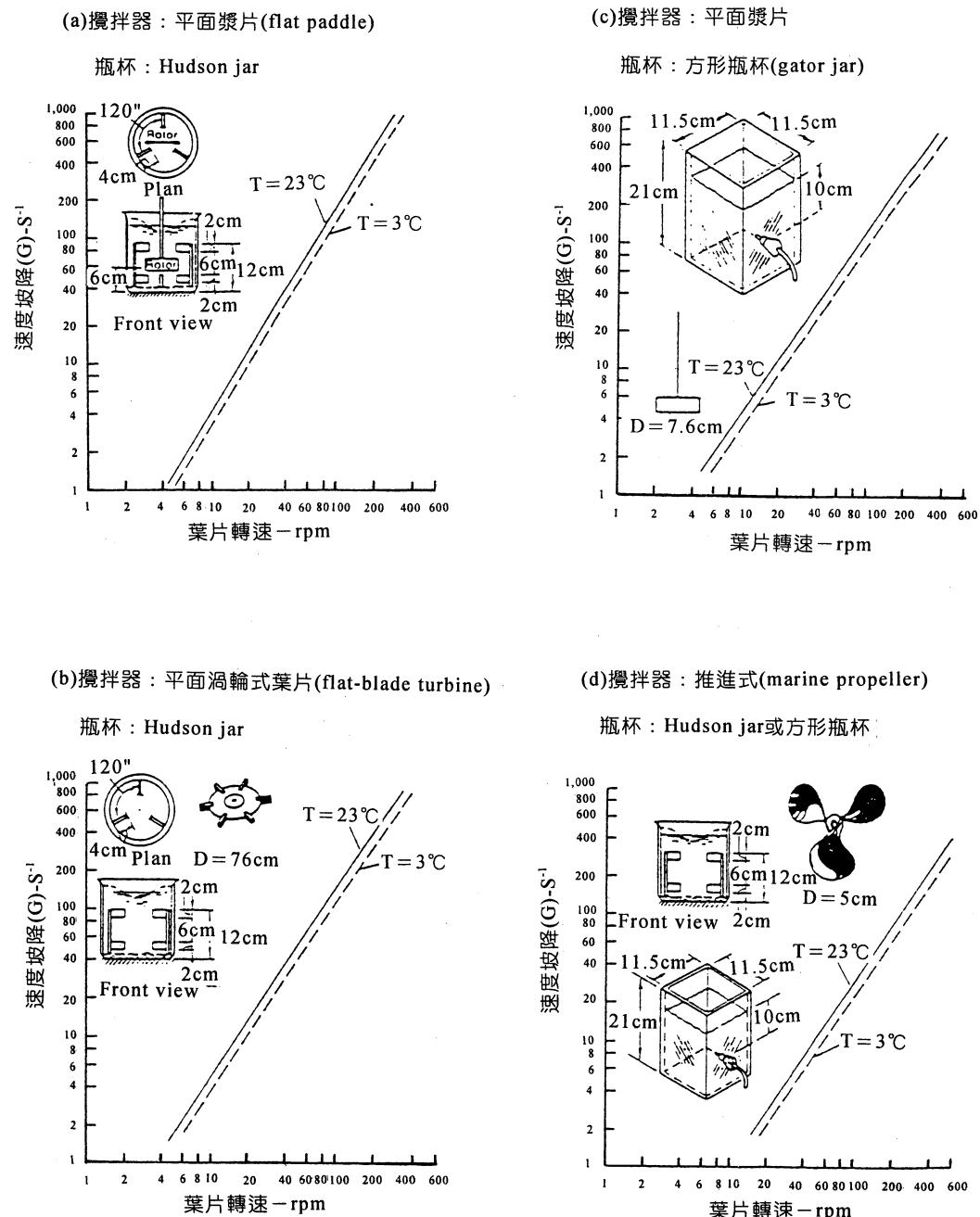
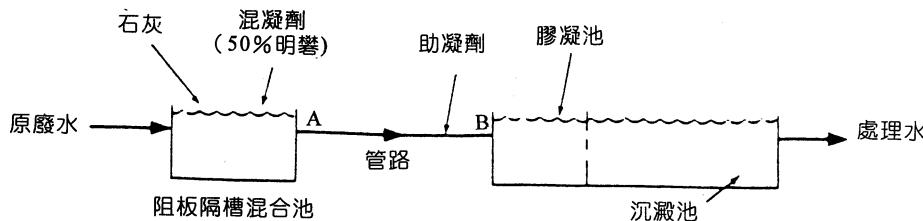


圖10 速度坡降值與攪拌器葉片轉速之關係<sup>(13)</sup>

圖11 模擬廠之處理流程<sup>(12)</sup>

- 2.化學藥劑的加入點：在圖11中的處理廠，其化學藥劑的加入點，主要大多在相同位置，即在快混池的液面，因此，為了獲得可模擬現有廠的基準資料，實廠所加入的三種藥劑，石灰、混凝劑和助凝劑，均須在快混時，同時加入瓶杯的液面(此步驟可能須三人同時來協助完成)。
- 3.注入藥液的強度：藥劑濃度的強度是一重要的變數，因其會影響在混合時藥劑擴散的速率。為了模擬實廠所加入50%的明礬，最好使用1ml刻度的滴管，將藥劑加入2公升的瓶杯中。在此要注意的，事先規劃選用適當大小的滴管或量筒，對量測藥劑或漿體(slurry)是相當重要的。
- 4.膠凝的時間和攪拌強度：瓶杯試驗中膠凝(慢混)所需時間和攪拌強度的決定，如前第1點之快混所述。另外，圖11中所示，膠凝作用亦可能發生於，界於快混池和膠凝池A與B兩點間的管路，假如此兩點間的水力停留時間很短，僅有數秒，且其相對於膠凝池中的膠凝時間甚小，則在瓶杯模擬中可忽略不計此段膠凝時間，然而如果廢水流經管路的時間很長，則管路中的G值必須求出(利用圖9)，且當其與膠凝池中的G值有很大差異時，瓶杯試驗應加入此段膠凝作用的模擬。

在上述一些基本操作條件已建立後，可變化其他的操作參數，但通常一瓶杯僅能改變一參數，以下即為假設實例的說明<sup>(12)</sup>：

- 1.圖11之處理廠，其目前操作條件如下：

- (1)明礬加藥量=60mg/L
- (2)明礬藥劑強度=50%

- (3)pH範圍=5.5~6.0
- (4)助凝劑(高分子)加藥量=0.8mg/L
- (5)快混時間=2min
- (6)快混G值=70sec<sup>-1</sup>
- (7)膠凝時間=30min
- (8)膠凝G值=30sec<sup>-1</sup>
- (9)沈澱池表面負荷率=4cm/min

### 2.瓶杯試驗 I

- (1)目的：建立基本操作條件和找出明礬加藥量及藥液強度的影響。

瓶杯編號	1	2	3	4	5	6
明礬劑量	50	60	70	50	60	70
藥液強度	50%	50%	50%	1%	1%	1%

- (2)結果：編號5之瓶杯獲致最佳效果，且編號4與編號6較編號1、2和3的效果為佳，而編號2又較編號1和3為佳。

- (3)解說：較低強度的明礬劑量，其擴散較為迅速，導致反應較完全且同時可改善膠羽的沈降性；最適的明礬劑量為60mg/L。

### 3.瓶杯試驗 II

- (1)目的：決定藥劑加入點的影響。

瓶杯編號1：同時在液面加入石灰、明礬和助凝劑。

瓶杯編號2：同時在液面下最大擾動區加入石灰、明礬和助凝劑。

瓶杯試驗3：在液面下先加入石灰混合，再同時加入明礬和助凝劑。

瓶杯試驗4：在快混開始時先加入明礬混合，接著在快混結束前幾秒再加入石灰和助凝劑。

- (2)結果：瓶杯編號2較編號1顯著好很多，但編號4的膠羽沈降性最佳。

- (3)解說：當藥劑加入位於槽體中最大的擾動區，可獲得較佳的混合狀況，此外，當藥劑依序分開加入和擴散，可獲得較佳的膠凝作用。最適的加藥次序，在本組瓶杯試驗中尚無法獲得證實，但如時間許可，需做進一步的測試，不過，在編號4中的加藥次序，已獲得可被接受的較佳效果。

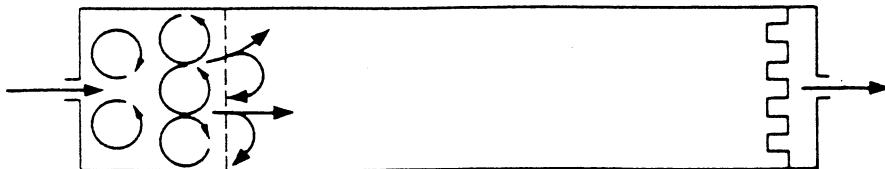
除了上述實例之外，相似的瓶杯試驗操作，可分別以較大的G值混合，以較短的快混時間，或變化不同的膠凝時間等，探討其影響。而每一獨立變數對膠羽沈降性改善的程度，可藉量測比較在一已知表面負荷率或沈降速度時，新操作條件與舊有操作情況，其處理水中懸浮顆粒濃度的差異而獲得。又根據瓶杯試驗的結果，欲對處理廠的操作進行改善，需取決於其預期改善的程度是否符合經濟成本，通常一些簡單的操作修正或增添簡易設備是符合期望的。此外，如可能最好將所有欲改變的操作參數，整合在一起，再做最後一次確認的瓶杯試驗，因可能有一些參數個別顯示有很好的改善效果，但整合在一起時，不見得有最佳的操作效果，此點亦需加以注意。

#### 4.2 追蹤劑試驗(tracer test)

由於槽體的幾何形狀和水力特性，會影響水流的分佈，例如，在一沈澱池接近槽體進口處，無法避免的會有某些程度的擾動和混合作用發生，進而導致池體內部份的空間，將成為一混合流區；異重流(density-current)的影響亦會破壞正常水流的情況；池底大量污泥體積的存在，經常會減小沈澱池有效的水力停留時間；進流口設計不良，常會造成短流(short-circuiting)和回流(backflow)等現象。上述情形均會嚴重影響沈澱池的處理功能。此外，沈澱池進流口設計不良所產生的死角(dead space)，會使得水流無法利用部份有效的體積，同時亦會在此產生污泥累積的現象，在膠凝池，通常死角的產生，是由於不足夠的攪拌強度而造成；另在某些情況下，膠凝池出流口的設計可能會造成部份水流流出池體後又再回流，在此情況下，膠凝池幾乎沒有死角，且從後面沈澱池借用了部份膠凝作用的空間，如圖12所示<sup>(12)</sup>，但相對的，沈澱池的死角將因被借用的空間增加而增加。

上述各種情況對於本文所述的物理化學處理程序而言，均會影響其處理功能，但一般而言，實際廠的水流情況如何，除用肉眼觀察外，最理想的診斷方法乃是利用追蹤劑試驗，藉以評估處理單元的水力特性。

通常追蹤劑試驗特別有助於量測在平行兩槽之間的水流分配；評估槽體進流口和池體幾何形狀的水力效率；亦可評估比較槽體改善前後之影響程度；更可應用於快混、膠凝、沈澱單元，或其他程序單元，評估或控制其所需的停留時間。

圖12 膠凝池與沈澱池間之回流現象<sup>(12)</sup>

常用的追蹤劑種類很多，包括氯化鈉、螢光劑(rhodamine和rhodamine WT)、氟化物、鑭鹽(lanthanum salts)、鋰鹽(lithium salts)、鐵-59(iron-59) 和石松芽孢(lycopodium spores)等，其中以螢光劑最常使用於廢水處理單元的評估，因其具有很強螢光量，在很低的濃度，如 $1\text{ }\mu\text{g/L}$ ，亦可被螢光儀檢測出。

在進行追蹤劑試驗時，通常在槽體進流口處加入追蹤劑，然後隨一定時間間隔，在出流口處採取水樣，並分析水樣中追蹤劑的濃度。一般追蹤劑加入的方式有兩種：1.瞬間式(slug dose)，即將所有追蹤劑一次加入；2.階段式(step dose)，即初始突然將追蹤劑加入，然後連續以一定加入速率維持一段時間後再停止加入。圖13和圖14所示<sup>(2)</sup>，分別為此兩種不同追蹤劑加入方式，其出流口濃度隨時間的變化。圖中  $\frac{D_d}{V \times L}$  為槽體的擴散數(dispersion number)，表示槽體對追蹤劑的反應，當其數值為0時代表水流為柱栓流(plug flow)，當其為無限值( $\infty$ )時，水流為完全混合(complete mix)。

Fiedler和Fitch<sup>(14)</sup>利用追蹤劑試驗，並假設沈澱池中顆粒的膠凝速率為二階反應，推導出下列的方程式，用以評鑑沈澱池的操作功能：

$$1.\text{標準停留時間(standard detention)} = \frac{\sum(D - \frac{1}{2}\Delta D)\Delta t}{\sum \frac{(D - \frac{1}{2}\Delta D)\Delta t}{t - \frac{1}{2}\Delta t}} = \frac{\sum Y}{\sum Z}$$

$$2.\text{平均停留時間(average detention)} = \frac{\sum(D - \frac{1}{2}\Delta D)(t - \frac{1}{2}\Delta t)\Delta t}{\sum(D - \frac{1}{2}\Delta D)\Delta t} = \frac{\sum W}{\sum Y}$$

$$3.\text{理論停留時間(nominal detention)} = \frac{\text{體積}}{\text{流量}}$$

$$4.\text{標準停留效率(standard detention efficiency)} = \frac{\text{標準停留時間}}{\text{理論停留時間}}$$

5.槽中死角體積百分率(fraction dead volume in tank)

$$= \frac{(\text{理論停留時間}) - (\text{平均停留時間})}{\text{理論停留時間}}$$

茲舉一例說明上列各式的應用。在表4<sup>(14)</sup>中第一欄為槽體進流口加入追蹤劑後經過的時間，在此所對應的時間於出流口採取水樣，分析其追蹤劑(染料，D)的濃度，直至出流口追蹤劑濃度為零或無法偵測出為止，結果如第三欄所示。在第二欄為時間增加量， $\Delta t$ ，其為現在時間與前面一個時間的差；在第四欄則列出現在濃度與前一個濃度的差， $\Delta D$ ，但需注意，當 $\Delta D$ 為負值時，表示現在濃度較前一個濃度減少。在第五欄所列為Y函數值， $(D - \frac{1}{2}\Delta D)$ ，的計算；第六欄所列為Z函數值， $\frac{Y}{t - \frac{1}{2}\Delta t}$ ，的計算；第七欄所列為W函數值， $(t - \frac{1}{2}\Delta t)$ ，的計算。

若已知理論停留時間為30分鐘，並將表4的結果，代入上列各式計算得：

$$\text{標準停留時間} = \frac{\sum Y}{\sum Z} = \frac{26.05}{1.239} = 21.0$$

$$\text{平均停留時間} = \frac{\sum W}{\sum Y} = \frac{715.57}{26.05} = 27.5$$

$$\text{標準停留效率} = \frac{21.0}{27.5} \times 100 = 70\%$$

$$\text{死角體積百分比} = \frac{30 - 27.5}{30} \times 100 = 8.3\%$$

根據上述的結果顯示，該槽體並非在理想的狀況下操作，其標準停留效率僅70%，死角體積佔8.3%，有必要加以改善。

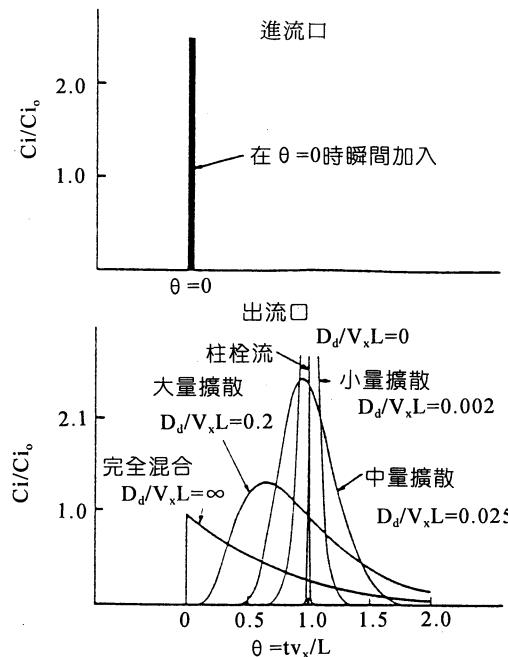


圖13 瞬間式加入追蹤劑其出流口之各種反應情形<sup>(2)</sup>

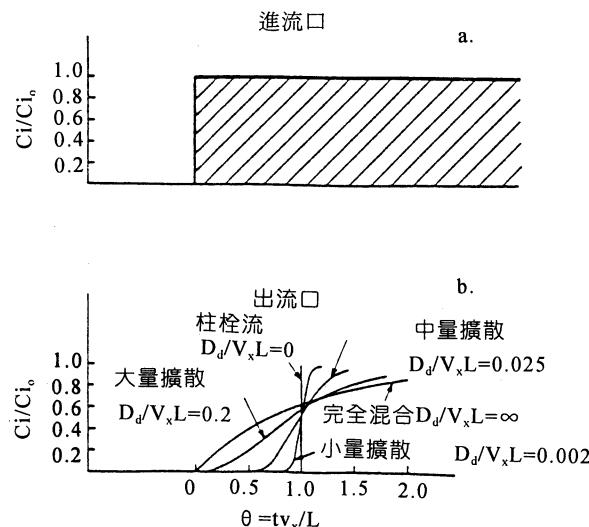


圖14 階段式加入追蹤劑其出流口之各種反應情形<sup>(2)</sup>

### 4.3 中和曲線試驗(neutralization curve test)

影響化學混凝或化學沈降等物理化學處理功能的重要因子之一為廢水的pH值，亦即欲達到理想的處理效果，必須將原廢水的pH值調整並控制在適當的範圍，才能達到其處理目的。例如，一般化學混凝需將廢水pH值調整至中性範圍(pH=6~8)；化學沈降處理重金屬廢水，需將pH調整至鹼性(pH=8~10)；氧化處理含氰化物廢水，pH值需調整至鹼性(pH=9~11)；還原處理含六價鉻廢水，pH值需調整至酸性(pH=2~3)。因此pH調整與控制(又稱中和程序，neutralization process)為廢水物化處理程序中一重要的單元。

由於pH值相差1單位，水中氫離子濃度相差10倍，若相差2單位，濃度則相差100倍，因此pH控制的靈敏度相差極大。根據實際操作經驗顯示，影響pH控制的因素可能包括<sup>(15)</sup>：

1. 廢水流率(量)。
2. 廢水酸度與鹼度。
3. 廢水的緩衝能力(buffering capacity)。
4. 中和酸性或鹼性廢水之藥劑的形式和藥液強度。
5. 中和藥劑的添加方式。
6. pH控制精確度的要求。
7. 中和槽的幾何形狀與佈置。
8. pH監控系統之可信度與靈敏度。

目前，大多數的pH調整，均採用pH自動監控加藥的操作方式，甚為方便，但若未經常注意pH電極的保養、清洗和校正，將產生誤差而影響甚大。此外當廢水水質變動大影響pH的調整效率，或欲改變中和藥劑型式，及調整自動監控設備之設定條件時，仍需採取適當的診斷評估方法，以為因應。

根據定義，廢水的酸度與鹼度，分別代表廢水中和酸與中和鹼能力的大小，因此，量測水中酸度與鹼度的滴定方法，為評估中和程序最簡易的診斷方法。基本上，只要採取適量的廢水水樣，量測其初始pH值，再依實際pH調整需求，以一定濃度或強度的酸或鹼滴定水樣，再將滴定量與廢水pH的變化關係，繪成圖形，即可獲得該廢水的中和曲線(滴定曲線)，並可進一步由所獲得的中和曲線，決定所需中和劑型式、劑量及控制系統的特性。

152 廢水物理化學處理功能診斷及案例

表4 標準停留時間之計算實例<sup>(14)</sup>

$t$ , 時間 (min)	$\Delta t$ , 時 間增加量 (min)	D, 染料 濃度(mg/L)	$\Delta D$ , 染料 濃度增加量 (mg/L)	$Y$ 函數值 $\frac{1}{(D - \frac{\Delta D}{2})\Delta t}$	$Z$ 函數值 $\frac{Y}{\frac{t - \Delta t}{2}}$	$W$ 函數值 $\frac{-1}{(t - \Delta t)}Y$
6	-	0.00	-	-	-	-
7	1	0.01	0.01	0.01	0.002	0.06
8	1	0.07	0.06	0.04	0.005	0.30
9	1	0.27	0.20	0.17	0.020	1.45
10	1	0.72	0.45	0.49	0.051	4.66
11	1	1.03	0.31	0.87	0.083	9.14
12	1	1.12	0.09	1.07	0.093	12.31
13	1	1.25	0.13	1.18	0.094	14.75
14	1	1.07	-0.18	1.16	0.086	15.66
15	1	0.96	-0.11	1.02	0.070	14.79
16	1	0.88	-0.08	0.92	0.059	14.26
17	1	0.81	-0.07	0.85	0.052	14.03
18	1	0.81	0.00	0.81	0.046	14.18
19	1	0.80	-0.01	0.81	0.044	14.99
20	1	0.79	-0.01	0.80	0.041	15.60
21	1	0.78	-0.01	0.79	0.039	16.20
22	1	0.76	-0.02	0.77	0.036	16.56
23	1	0.75	-0.01	0.76	0.034	17.10
24	1	0.67	-0.08	0.71	0.030	16.69
26	2	0.57	-0.10	1.24	0.050	31.00
28	2	0.55	-0.02	1.12	0.041	30.24
30	2	0.52	-0.03	1.08	0.037	31.32
32	2	0.48	-0.04	1.00	0.032	31.00
34	2	0.45	-0.03	0.94	0.028	31.02
36	2	0.43	-0.02	0.88	0.025	30.80
38	2	0.39	-0.04	0.82	0.022	30.34
40	2	0.35	-0.04	0.74	0.019	28.86
45	5	0.30	-0.05	1.65	0.039	70.13
50	5	0.19	-0.11	1.25	0.026	59.38
55	5	0.11	-0.08	0.75	0.014	39.38
60	5	0.07	-0.04	0.45	0.008	25.87
70	10	0.03	-0.04	0.50	0.008	32.50
80	10	0.02	-0.01	0.30	0.004	22.50
90	10	0.00	-0.02	0.10	0.001	8.50
				$\Sigma Y=26.05$	$\Sigma Z=1.239$	$\Sigma W=715.57$

中和曲線亦可表示添加單位中和劑量其pH的改變量，而中和曲線的形狀受下列變數的影響<sup>(15)</sup>：

- 1.廢水中所存在酸或鹼的性質(例如，強酸、強鹼或弱酸、弱鹼)。
- 2.酸或鹼的濃度。
- 3.其他緩衝劑的存在。
- 4.pH調整所使用藥劑的型式和濃度。

圖15所示<sup>(15)</sup>為強酸廢水以強鹼(NaOH)滴定所獲得的典型中和曲線，其當量點(equivalence point)，溶液中存在著等當量的酸與鹼)或轉折點(inflexion point)，發生在單位添加劑量pH改變量最大的位置上，即pH=7；在此pH值附近，只要少量添加強鹼，就會使得pH發生顯著的變化，因此，要控制pH值在此範圍內，將是非常困難的。另外，圖16所示<sup>(15)</sup>為強酸廢水以弱鹼(NaHCO<sub>3</sub>)滴定所得的中和曲線，其當量點pH小於7，且在此點，其單位弱鹼添加量的pH改變量，並不似強酸/強鹼系統那樣尖銳的變化，此主要是由於強酸與弱鹼反應(反之，強鹼與弱酸反應)將產生足夠提供緩衝能力的鹽類，也正因為如此，強酸與弱鹼的中和，一般較易控制pH值在適當的範圍。

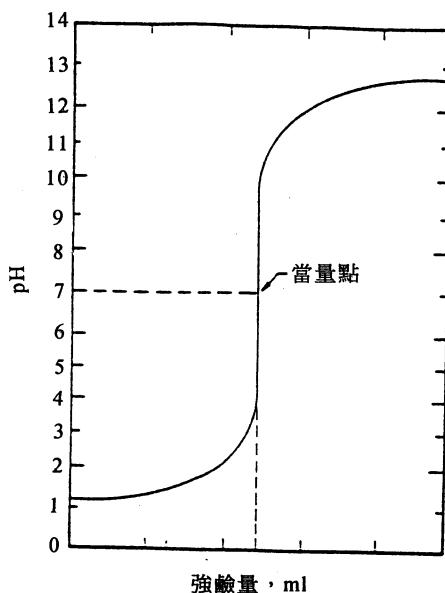
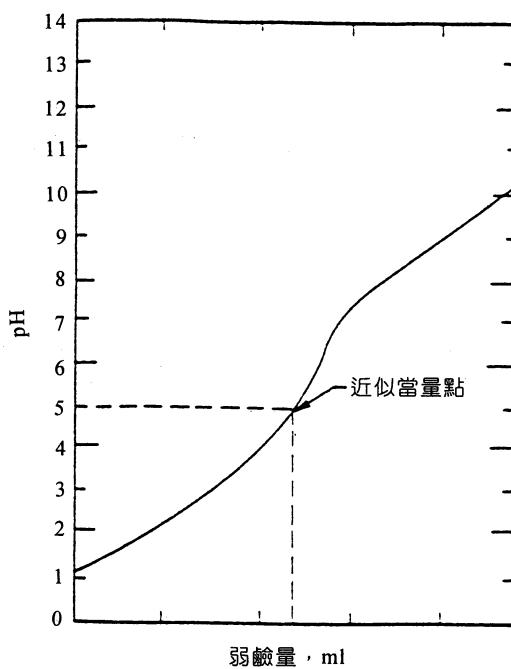


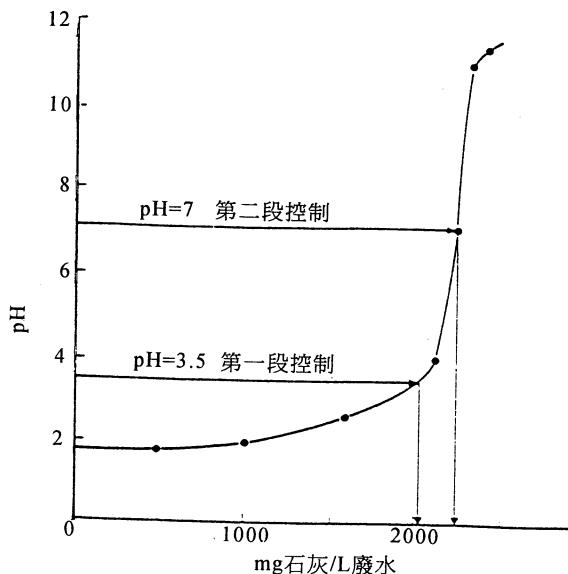
圖15 典型強酸以強鹼滴定之中和曲線<sup>(15)</sup>

圖16 典型強酸以弱鹼滴定之中和曲線<sup>(15)</sup>

一廢水如果經滴定試驗所獲得的中和曲線形狀與前面圖15所示的相類似，表示廢水具強酸性，若以強鹼做中和藥劑，欲將此廢水pH調整至中性範圍，即使以自動控制加藥系統操作，亦不易獲得最適的操作效果，此時若不改用弱鹼做中和藥劑，可改採多段式pH調整，如圖17所示<sup>(3)</sup>，第一段以較大劑量做初調整，將廢水pH值先調整並控制至3.5，第二段再以較小劑量，將pH值細調至7，此時第二段可選用較小容量的加藥泵操作，結果將不會產生因加藥量過大，導致pH劇烈變動不易控制的現象。

#### 4.4 溶解度曲線試驗(solubility curve test)

由前述化學沈降的操作原理可知，溶解性離子可藉改變其溶解度達到去除的目的，而理論上，以化學平衡計算的方法，可求得反應平衡時之最小溶解度的pH值範圍或最適的沈降劑添加量，但由於化學沈降處理程序，受以下現象的影響，廢水處理操作結果的實際溶解度濃度，常常與理論計算值不同<sup>(4)</sup>：

圖17 強酸廢水以石灰中和之兩段控制方法<sup>(3)</sup>

- 1.有些異質平衡反應很慢地才達成。
- 2.熱力學所推估的穩定固體態與實際所形成的不同。
- 3.溶解度決定於結晶的程度和固體顆粒的大小。
- 4.超飽和現象可能存在。
- 5.固體物溶解所生成的離子，可能進行更進一步的反應(例如，錯合反應、螯合反應等)。
- 6.異質平衡常數(例如，溶解度積常數)在文獻中常有不同的數據。

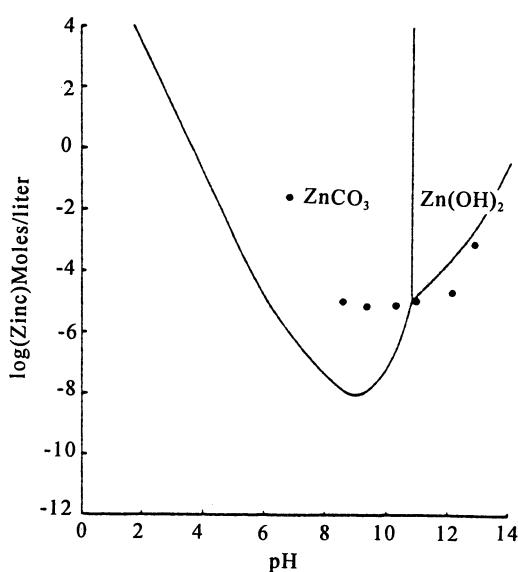
因此，在評估實際廢水的最適操作條件，應進行溶解度曲線試驗，以獲得正確的診斷資料。基本上，溶解度曲線試驗的操作步驟，與前述瓶杯試驗大致相同，通常將一定水量實際廢水置入不同瓶杯中，再改變各瓶杯的pH值或沈降劑添加量，經快混、慢混、沈降等階段後，採取水樣分析其上澄液殘留離子濃度，最後將殘留離子濃度對應於pH或沈降劑添加量繪圖，即可獲得該離子之實際溶解度曲線。

Patterson等人<sup>(16)</sup>曾探討以碳酸鹽系統處理重金屬廢水，其結果顯示實際重金屬之溶解度與理論值有明顯的差異，其中一例如圖18所示。此外，Patter-

son更總結其研究結果指出，處理含Zn、Ni、Cd和Pb等廢水之最適處理系統和pH值範圍及其預期可達到的最小溶解度，分別如表5所示<sup>(16)</sup>。

表5 重金屬廢水較適的處理系統及最適的pH<sup>(16)</sup>

金屬種類	處理系統	最適pH	觀測濃度，mg/L
鋅	氫氧化物	9.5	0.25
鎳	氫氧化物	11	0.30
鎘	氫氧化物	10.4	0.20
	碳酸鹽( $10^{-2.7}$ )	10.7	0.35
	碳酸鹽( $10^{-1.2}$ )	10.0	0.25
鉛	氫氧化物	10.5	0.60
	碳酸鹽( $10^{-2.7}$ )	10.1	0.60
	碳酸鹽( $10^{-1.1}$ )	7.5	1.00

圖18 實際碳酸鋅的溶解度與理論溶解度曲線的比較( $C_T=10^{-1.3}$  mole/L)<sup>(16)</sup>

Yost和Scarfi<sup>(17, 18)</sup>曾研究實際電鍍廢水，在各種不同廢水成份組成的情況下，其對Zn和Cu溶解度的影響因子。研究結果發現，原廢水中初始金屬濃度，其他金屬及錯合劑的存在，均會影響該金屬溶解度曲線的形狀，如圖19所示<sup>(17)</sup>為其中一例，其最適的pH和最小溶解度均發生在不同位置。

至於含磷廢水的溶解度曲線，由Ferguson和King<sup>(19)</sup>的研究指出，磷酸鹽的最小溶解度，受pH和明礬添加劑量的影響，如圖20所示。此外，Ferguson和King更進一步指出，在Al:P的摩爾比為1.4:1的明礬劑量，及最終pH為5.2至6.9的範圍內，磷酸鹽的殘留濃度可降至1mg/L左右，而在超量添加明礬(理論計算+60mg/L超量)及最終pH為5.2至6.0的情況下，磷酸鹽的殘留濃度更可低至0.03mg/L。

由上述各案例的結果顯示，各種不同廢水的組成，因其廢水性質差異極大，必需個別建立其實際的溶解度曲線，才能提供相關資訊，以做為評估診斷該化學沈降處理功能的依據。

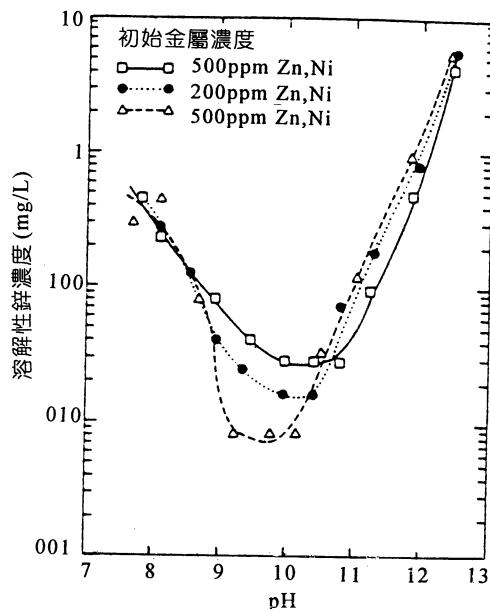
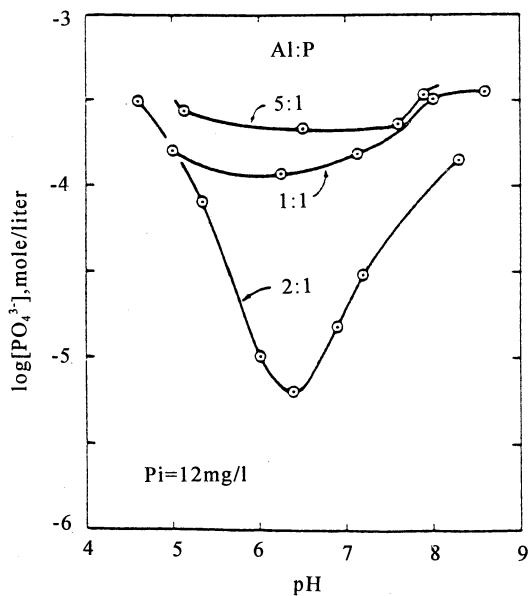


圖19 含氯化鋅電鍍廢水與鍍鎳廢水混合處理時鋅離子的溶解度曲線<sup>(17)</sup>

圖20 三種不同明礬劑量時之磷酸鹽的溶解曲線<sup>(19)</sup>

## 五、結論

欲對廢水處理程序進行功能診斷，必須事前瞭解該處理程序的操作原理及可能影響設計和操作的變數，進而規劃適當的功能評估診斷試驗方法，並針對問題，選擇適當的參數，進行實驗操作，探討最適的操作條件，以為改善的依據。

當然，影響廢水物理化學處理功能的原因很多，並非完全可由試驗結果加以診斷，設計工程師和現場操作人員應當累積其實務經驗，並藉由目視觀察現場各項設施運轉及操作的情況，例如：水流混合和分佈的情形；膠羽生長和沈降的情形；加藥設備、攪拌器等機械設施運轉的狀況；各處理單元進流口和出流口設施的配置情形；各自動監控設備運轉的情形等，以協助充分掌握造成問題的原因。

事實上，除本文初步所提供的資料以外，工程師和操作人員，仍應加強學理的訓練，案例經驗的累積，方足以勝任各項功能診斷的工作，此尤如有經驗的醫師，必須要有很好的養成教育及住院醫師的實習經驗，並經常研讀各種案例，再配合各項檢驗報告結果，做為研判依據，以便對症下藥，達到藥到病除的果效。否則，就容易像蒙古大夫，隨意診斷，無法立即獲致改善成效，將影響處理功能甚劇。綜合而言，除功能診斷改善之外，廢水處理程序要發揮其預期的成效，仍須配合良好的管理、設計及操作維護制度，方能達到事半功倍，處理功能運轉正常的操作條件。

## 六、致謝

本文承歐陽嶠暉教授的邀稿，本人碩士班研究生郭家倫先生在圖表整理和文字繕打上的協助，得以順利完成，特此致謝。

## 七、參考文獻

1. Eckenfelder, W. W., *Principles of Water Quality Management*, CBI Publishing, pp. 461-491, 1980.
2. Weber, W. J., *Physicochemical Process for Water Quality Control*, Wiley-Interscience, pp. 1-138, 1972.
3. Eckenfelder, W. W., *Industrial Water Pollution Control*, 2nd Ed., McGraw-Hill Book Co., pp. 84-110, 1989.
4. Snoeyink, V. L. and D. Jenkins, *Water Chemistry*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 243-315, 1980.
5. 曾迪華，廢水處理常用化學藥劑，工業污染防治技術手冊，工業污染防治技術服務團編印，pp. 27-40，1988。
6. 林坤讓等，廢水處理常用化學藥劑手冊，工業污染防治系列叢書，工業污染防治技術服務團編印，pp. 3-21，1994。

- 7.曾迪華，電鍍廢水化學沈降處理法之比較，工業污染防治，第六卷，第四期，pp. 70-84，1987。
- 8.曾迪華、林金德，迴流污泥操作改善重金屬廢水處理所產生污泥特性之研究，第十四屆廢水處理技術研討會論文集，pp. 301-311，1989。
- 9.林金德，曾迪華，連續迴流污泥操作對重金屬廢水化學沈降處理所產生污泥性質影響之研究，第十六屆廢水處理技術研討會論文集，pp. 843-855，1991。
- 10.Tseng, D. H. and S. H. Pan, Improving of Neutralization Process for Treating Iron-Contaminated Wastewater, Proc. of World Congress III on Engineering and Environment, Vol. 1, pp. 301-308, 1993.
- 11.行政院環保署，乙級事業廢水管理訓練教材，環保通訊雜誌社，pp. 6.18-6.19，1991。
- 12.Hudson, H. E., Water Clarification Processes:Practical Design and Evaluation, Van Nostrand Reinhold Co., pp. 40-159, 1981.
- 13.Cornwell, D. A. and M. M. Bishop, Determining Velocity Gradients in Laboratory and Full-scale Systems, J. AWWA, Vol. 75, No. 8, pp. 470-475, 1983.
- 14.Fiedler, R. A. and E. B. Fitch, Appraising Basin Performance from Dye Test Results, Sewage and Industrial Wastes, Vol. 31, No. 9, pp. 1016-1021, 1959.
- 15.Water Environment Federation, Pretreatment of Industrial Wastes, Manual of Practice No. FD-3, pp. 123-152, 1994.
- 16.Patterson, J. W., H. E. Allen and J. J. Scala, Carbonate Precipitation for Heavy Metals Pollutants, J. WPCF, Vol. 49, No. 12, pp. 2397-2410, 1977.
- 17.Yost, K. J. and A. Scarfi, Factors Affecting Zinc Solubility in Electroplating Waste, J. WPCF, Vol. 51, No. 7, pp. 1878-1886, 1979.
- 18.Yost, K. J. and A. Scarfi, Factors Affecting Copper Solubility in Electroplating Waste, J. WPCF, Vol. 51, No. 7, pp. 1887-1896, 1979.
- 19.Ferguson, J. F. and T. King, A Model for Aluminum Phosphate Precipitation, J. WPCF, Vol. 49, No. 4, pp. 646-658, 1977.