

快混操作影響原水中顆粒聚集及沈澱之研究

甘其銓¹ 黃志彬² 袁如馨² 邱顯盛³

摘要

快混為淨水廠中重要的流程之一，本研究即探討快混操作對原水中的顆粒聚集以及沈澱去除的影響，除了利用濁度量測觀察顆粒去除的情形，也利用顆粒計數器分析殘餘濁度中特定粒徑大小(0.2~2, 2~15 μm)的顆粒。在顆粒聚集方面，則利用光纖膠羽偵測儀觀察顆粒聚集的狀態，而針對混凝形成的膠羽則進行特性分析。結果顯示在足夠的快混攪拌強度操作下，顆粒去除效果好，殘餘濁度中微小顆粒數目較少，顆粒的聚集則呈現聚集體與聚集體的結合，但形成較鬆散的膠羽，沈降速度較慢；而在不足夠的快混攪拌強度操作下，顆粒去除效果差，殘餘濁度中微小顆粒數目較多，顆粒的聚集則呈現顆粒與聚集體的結合，但形成較結實的膠羽，沈降速度極快。透過以上試驗的結果，我們嘗試建立一套模式來完整描述不同快混操作對後續顆粒聚集以及膠羽沈降的影響。

一、前言

環保署已公告的飲用水管制條例中，對飲用水水質作更清楚與嚴格的規定，淨水場清水濁度限值由 4 NTU 降至 2 NTU，面對此一規定，台灣省自來水事業於各地的淨水場勢必提升其淨水效能以符合法規要求。然而國內淨水場內混凝膠凝單元經淨水場操作效能評估後發現此程序操作參數不良^(1, 2)，因而影響後續處理單元的操作效率，因此提昇此單元的操作效率實為當務之急。

混凝/膠凝為淨水程序中廣泛運用於去除水中微粒的物化程序，此程序可概分為三個階段，混凝劑加入水中首先進行一連串的化學反應之後形成有作用性的混凝作用基，接下來混凝劑作用基與水中穩定的微粒結合，並進行膠體去穩定的作用，最後的階段為已經去穩定的膠體微粒進行有效碰撞之後，形成粒徑較大的聚集體，稱之為膠羽(floc)，形成膠羽則可在後續沈澱與過濾處理單元之中被去除，因此沈澱池與過濾池的運作成效受之前混凝/膠凝程序的影響極大。

-
1. 國立交通大學環境工程研究所博士候選人
 2. 國立交通大學環境工程研究所教授
 3. 國立交通大學環境工程研究所碩士班研究生

由於混凝/膠凝包含了一連串的化學及物理的反應，在淨水處理中，我們可以利用操作的定義與目的將此一程序概分成快混及慢混兩階段不同的操作。在淨水程序中，混凝劑於快混階段加入，在同時並有外加的能量輸入進行混合，如機械槳葉快混、水躍快混、隔板快混，主要的目的乃是使微粒與混凝劑作用基經由快混之後結合，進而改變水中微粒的表面特性，降低微粒之間的排斥能量，其作用機制主要為吸附及電性中和、沈澱網除與架橋等作用。在後續的慢混階段中，主要的目的則是提供已經去穩定的微粒進行有效碰撞，形成可在沈澱池與過濾池之中被移除的膠羽。

從 60 年代開始，快混操作影響後續單元淨水處理效果的研究逐漸受到重視^(3, 4)，所評估的快混操作參數則包含了化性的因子：混凝劑量、混凝劑種類、原水水質以及有機物或氧化物的存在等；而物性因子則有：攪拌器種類、攪拌槽的形式、混凝劑注入點、攪拌強度及攪拌時間等⁽¹³⁾。早期的研究是以沈澱池與過濾池出流水殘餘濁度來評估快混的操作，以最低的殘餘濁度決定出最佳的快混操作方式，透過回饋控制的觀點，此類的研究所採用的評估方式至今仍常被實場淨水操作人員所採用。相關快混攪拌影響後續顆粒聚集，最早見於 Vrale 以及 Jordan 所進行的研究⁽⁵⁾，其中並定義了 "外在聚集速度" (apparent aggregation rate, Kapp) 以作為評估的項目。在其他的類似研究之中^(6, 7)，也發現到快混操作會直接影響膠凝階段的外在聚集速度。

上述的研究中，快混操作的因子對後續濁度去除以及顆粒聚集的影響雖然已有評估，但是研究最終的結論皆建議操作人員應以本身的個案研究為主要的參考依據，此類的研究難以歸納出通用的結論，主要原因為後續淨水單元的操作方式或處理能力差異很大。有鑑於此，本研究主要目的在建立一完整概念，探討不同的快混攪拌強度對膠凝階段中微粒聚集情況的影響、聚集體沉降特性的影響，以及在沈澱程序中濁度顆粒去除的影響。研究之中，水中微粒去除的評估，除了採用傳統的濁度量測作為評估項目外，也將採用顆粒計數技術分析上層液中不同大小顆粒之數目。顆粒聚集的動力分析，則利用光纖技術進行觀察。形成膠羽則以沉降特性以及膠羽碎形維度⁽¹⁴⁾特性作為評估。

二、實驗設備及方法

實驗材料及設備

1. 混凝劑—多元氯化鋁(PACl)

本研究使用的混凝劑為多元氯化鋁，為目前淨水工程中最常被使用的混凝劑種類。使用日本 Showa 公司所提供的實驗室級多元氯化鋁溶液，濃度為 10% as Al_2O_3 (100,000 mg/l)。於實驗之前再以蒸餾水將濃度稀釋為 1,000 mg/l as Al。

2. 原水水樣製備

本研究中使用之原水以球土 (Ball clay, 顆粒密度為 2.54 g/cm^3) 所配製的實驗水樣, 在本研究之中球土溶液的濃度為 250 mg/L , 濁度為 180 NTU , 顆粒的平均粒徑為 $4.5 \mu\text{m}$ 。人工原水以 RO 水稀釋, RO 水質特性為濁度 0.1 NTU 以下, pH 值 6.5 左右, 鹼度 20 以下 (mg/l as CaCO_3), TOC (NPDOC) 0.4 mg/l 以下, 顆粒數 70cnt/ml ($2\sim 15 \mu\text{m}$) 以下, 比導電度在 50 以下, 鹼度則利用 NaHCO_3 調整至 $100 \text{ mg/l as CaCO}_3$, pH 值以 $\text{NaOH}_{(\text{aq})}$ 或 $\text{HNO}_{3(\text{aq})}$ 調整至 7.5 。

3. 瓶杯試驗機 (Jar Tester)

使用美國 Phipps&Bird (PB-700 Jar tester) 所製造, 最大轉速為 400 rpm , 最小轉速為 10 rpm , 可以同時操作六個攪拌槽搭配寬葉攪拌器 (Square Gator Jar and Paddle Impeller), 攪拌用的混凝槽為邊長 11.5 公分、高 21 公分的方形, 槽內可容納 2 公升的水樣, 攪拌器為長 7.6 公分、寬 2.8 公分之片狀槳葉, 其攪拌器轉數與剪力值呈函數關係⁽⁸⁾。

4. 界達電位儀 (Zeta-Meter)

美國 ZETA-METER Inc. 生產型號之 Zeta-Meter System 3.0。具有數字顯示幕及自動運算功能, 可測量水樣的比導電度, 水中顆粒的電泳值及界達電位值。水中顆粒在混凝劑加入快混的終了階段或慢混初期被取以進行界達電位量測。

5. 濁度計

使用 HACH 型號 RATIO/XR。有 4 個 channel 可適用於 $0.2 \text{ NTU}\sim 2000 \text{ NTU}$ 濁度範圍的量測。

6. 顆粒計數器

本研究之中共採用 2 台顆粒計數器, 粒徑偵測範圍可由 0.2 至 $15 \mu\text{m}$ 。 2 至 $15 \mu\text{m}$ 的顆粒偵測, 所採用的儀器是 Met One 公司 (USA) 生產的微粒計數器, 型號為 WGS267, 包含採樣器、內建蠕動幫浦, 感應器、LED 顯示螢幕及分析軟體。 0.22 至 $2 \mu\text{m}$ 的顆粒偵測, 所採用的儀器是 Rion 公司 (Japan) 生產的微粒計數器, 型號為 KE-28B, 包含 KS-28B 感應器、數位顯示螢幕及分析軟體, 但須外加蠕動幫浦 (EYELA 公司, MP-3N)。

7. 光纖膠羽偵測儀

光纖膠羽偵測儀 (PDA2000), 最早是用來監測流動性的懸浮固體溶液顆粒的聚集狀態, PDA 的 Ratio 值可作為懸浮液中顆粒聚集的指標, 詳細的儀器介紹可

參考其他文獻^(9,10)。

8. 攝影機

使用Panasonic，型號NV-LC1的攝影機。具有ZOOM 放大20倍可調式的攝影鏡頭，在自由沈降試驗中用來拍攝膠羽沈降的過程。

9. 錄放影機

使用 TOSHIBA，型號 M-650 之錄放影機。可進行三十分之一秒格放，用來量測膠羽之粒徑與沈降速度。

10. 自由沈降槽

壓克力材質製高75公分，直徑7公分之圓型槽。將槽中注滿水，再把Jar test後產生的膠羽從上方投入使其進行自由沈降。

實驗方法

1. 瓶杯試驗（混凝劑量決定）

瓶杯試驗主要用來評估 PACl 混凝劑量，在混凝劑注入瓶杯之後，提供 1 分鐘快混，攪拌速度 200 rpm (350 s^{-1})，接下來提供 20 分鐘慢混，攪拌速度 30 rpm (25 s^{-1})，慢混結束後靜置瓶杯沈降 10 分鐘，取其上層液量測殘餘濁度。在快混之後，隨即擷取混合槽中的懸浮微粒，利用界達電位儀量測微粒的界達電位。

2. 混凝批次試驗（殘餘濁度量測與顆粒計數）

試驗的進行主要來評估快混攪拌強度對後續顆粒聚集以及濁度去除的影響，批次實驗採取的不同的快混攪拌 G 值 (25、80、200、350、600 s^{-1})，接下來的慢混與瓶杯實驗相同，也是提供 20 分鐘慢混，攪拌速度 30 rpm (25 s^{-1})，慢混結束後靜置瓶杯沈降，但分別在沈降 5、10、20 分鐘後，取其上層液量測殘餘濁度。對於沈降 10 分鐘的上層液也進行顆粒數目的量測，粒徑範圍包含 0.2~2 μm 以及 2~15 μm 。顆粒膠凝的狀態則利用 PDA 進行監測，於底下詳述。

3. 膠凝狀態監測（光纖膠羽偵測）

實驗首先讓 PDA 熱機半個小時以上使其性能穩定後，將純水以重力流方式流入內徑為 3 mm- ϕ 的層流管並通過 PDA，將此時 PDA 所對應之 dc 輸出值調整到 10 volts。2 升已快混的水樣置於反應槽中，以每分鐘 30 rpm 的速度 (G 值為 25 s^{-1}) 攪拌之，之後置入層流管以重力流方式使水樣在管中的流量維持在 25 ml/min，並以水樣調 PDA 之 Ratio 輸出值為 0.5，水樣流經層流管產生膠凝作用並通過 PDA 的光纖監測器；為了使水不在 cell 中累積，需使用蠕動幫浦將水樣抽回反應槽之中，以維持反應槽中水位高低固定。每 10

秒記錄下 PDA 的 Ratio 值至膠凝 20 分鐘結束，此為 PDA 批次實驗針對某一快混攪拌強度的膠凝狀態監測的完整步驟，接下來改變快混攪拌強度，重複以上步驟。

4. 膠羽特性分析（自由沈降試驗與 Stoke's 公式計算）

將批次沈澱的膠羽移作自由沈降試驗，以分析不同加藥量下所產生膠羽的粒徑以及沈降速度，再代入 Stoke's 公式，可計算出膠羽之密度。Stoke's 公式如以下所示，

$$w = \frac{g(\rho_f - \rho_w)d^2}{18\mu} \quad (\text{式 2.1})$$

w 為沈降速度，g 為重力加速度， ρ_f 為膠羽密度， ρ_w 為水密度，d 為膠羽粒徑， μ 為水的黏滯係數。膠羽維度的分析則利用沈降試驗觀察所得到的沈降速度以及膠羽粒徑大小，透過計算可得，其關係如下式表示：

$$V \propto D^{df-1} \quad (\text{式 2.2})$$

式中 V 為沈降速度，D 為膠羽大小，df 為膠羽的碎形維度。在已知沈降速度以及膠羽大小的情況下，透過雙對數的運算，可以求得碎形維度⁽¹⁰⁾。此外，研究之中也利用顯微照相技術將已沈澱之聚集體的型態記錄下來。

三、結果與討論

3.1 混凝劑量決定

實驗之中首先利用 Zeta-Meter 量測原水中濁度顆粒表面的界達電位為 -20 mV，為一穩定的膠體系統。因此採用了 7 種 0.5~10 mg/l 的 PACl 加藥量進行混凝，在各加藥量下，所得到的顆粒界達電位值與進行 Jar-Test 之後的殘餘濁度如圖 1 所示。在 0.5 mg/l PACl 加藥量下，顆粒的界達電位達到 -16.3 mV，在 1.5 mg/l 以及 2 mg/l 的 PACl 加藥量下，顆粒的界達電位達到 -2.5 mV 及 2.1 mV，已經達到去穩定的狀態，因此在沈澱 10 分鐘之後，即可得到 4.8 及最低的 2.8 NTU 的殘餘濁度。

混凝劑增加至 3 mg/l，水中顆粒的界達電位轉為正值為 5.1 mV，上層液的殘餘濁度 3.0 NTU。至 10 mg/l 的混凝加藥量時，雖然此時利用界達電位儀的量測，發現顆粒已有電性逆轉的情況，然而殘餘濁度並沒有很明顯的升高趨勢，上層液的殘餘濁度即維持在 3.0 NTU 左右。這是由於 PACl 的聚集物具有相當高的表面積體積比，所以能更有效地以電性中和的方式吸附於帶負電的顆粒上。因此當 PACl 吸附於顆粒時，顆粒表面電性雖由負電性轉為正電性，但顆粒表面仍有可以供多核鋁錯合物吸附的區位，使顆粒能夠繼續成長，而這膠羽成長的現象將

持續到其吸附達到飽和為止，所以在過量加藥的情形下，瓶杯試驗所測得的殘餘濁度並不會有明顯上昇的趨勢。

由圖1透過殘餘濁度以及界達電位的量測，可以判定2 mg/l的混凝劑加藥量為一適當加藥，但在以下的實驗之中，為凸顯快混攪拌對後續顆粒凝集以及膠羽沉降的影響，研究之中則採用稍微不足的混凝劑量，1.5 mg/l as Al，為後續的實驗所採用。

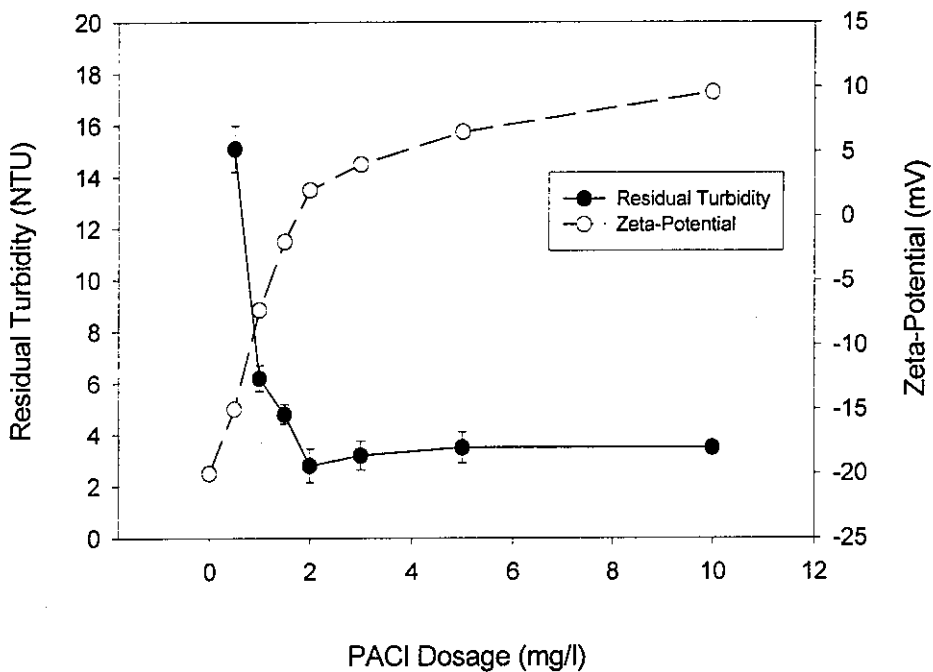


圖 1 瓶杯試驗殘餘濁度與顆粒界達電位於不同 PACI 加藥量下的變化

3.2 快混攪拌對濁度及顆粒去除的影響

批次混凝實驗採取的不同的快混攪拌 G 值，並皆提供相同慢混操作（20 分鐘，30 rpm），沉降 5、10、20 分鐘後，取其上層液量測殘餘濁度，其結果如圖 2 所示，兩個明顯的趨勢在此被提出討論。首先是對應不同的快混 G 值所得到的上層液殘餘濁度，在經過相同慢混攪拌與沈澱之後，以沉降 10 分鐘的殘餘濁度為例，快混 G 值 25 s^{-1} 的殘餘濁度最高為 12.8 NTU，隨著快混攪拌 G 值的升高殘餘濁度越低，

在 G 值 350 s^{-1} 的濁度最低為 3.0 NTU ，但在快混 G 值 600 s^{-1} 得到的濁度則稍微上升至 3.2 NTU ，由以上的結果可得知快混攪拌對濁度去除的影響極大，而且存在一最佳操作的範圍。

由圖 2 也顯示出，不同的快混 G 值後即使接續相同慢混與沈澱，所得到的沈降曲線有明顯不同的趨勢變化，以快混 G 值 25 以及 350 s^{-1} 的沈降曲線為例，快混 G 值 25 s^{-1} 的沈降曲線趨勢變化相當穩定，沈降 5 分鐘與 20 分鐘所得到的殘餘濁度相差不到 1 NTU 。由快混 G 值 350 s^{-1} 所得的結果，從沈降 5 分鐘所得到的 4.5 NTU 到沈降 20 分鐘的 2.3 NTU ，沈降曲線變化則有明顯下降的趨勢。由以上的結果判斷快混 G 值 25 以及 350 s^{-1} 的沈降膠羽以及上層液的特性有所不同，推論快混 G 值 25 s^{-1} 的膠羽沈降在開始沈澱之後的 5 分鐘之內已完成，上層液之中則存在穩定且難以沈降的顆粒；而快混 G 值 350 s^{-1} 的膠羽沈降在開始沈澱 20 分鐘之內依舊持續發生，上層液中則是存在具沈降性的顆粒。

對於沈降 10 分鐘的上層液進行 $0.2\sim 15\text{ }\mu\text{m}$ 顆粒數目的量測，其結果如圖 3 所示。可以發現在快混 G 值 25 s^{-1} 情況下，其 $2\sim 15\text{ }\mu\text{m}$ 的顆粒數目在 $1,250\text{ cnt/ml}$ ， $0.2\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ 的顆粒數目在 $2.9\times 10^7\text{ cnt/ml}$ ；隨著快混攪拌 G 值的升高可得越少的顆粒數目，在快混 G 值 350 s^{-1} 得到的最少顆粒數目， $2\sim 15\text{ }\mu\text{m}$ 的顆粒數目在 570 cnt/ml ， $0.2\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ 的顆粒數目在 $0.75\times 10^7\text{ cnt/ml}$ 。在快混 G 值 600 s^{-1} 得到的 $2\sim 15\text{ }\mu\text{m}$ 顆粒數目則稍微上升至 720 cnt/ml ， $0.2\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ 的顆粒數目則接近於快混 G 值 350 s^{-1} 所得。由顆粒數目量測的結果發現，有兩個值得注意的地方，首先發現顆粒計數與殘餘濁度的結果，出現相當吻合的趨勢變化。此外，由圖 2 結果可知最高與最低的殘餘濁度分別出現在 G 值 25 與 350 s^{-1} ，比較在粒徑範圍 $2\sim 15\text{ }\mu\text{m}$ 的顆粒數目，G 值 25 s^{-1} 為 350 s^{-1} 的 2 倍 ($1250:570$)，在粒徑範圍 $0.2\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ 的顆粒數目，G 值 25 s^{-1} 為 350 s^{-1} 的 4 倍 ($2.9\times 10^7:0.75\times 10^7$)。由以上的比較可知，兩者殘餘濁度的差距主要由 $0.2\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ 的顆粒所造成，也因為 G 值 25 s^{-1} 的上層液之中存在大量 $0.2\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ 的顆粒，較 $2\sim 15\text{ }\mu\text{m}$ 的顆粒更細微、難以沈澱，因此沈降曲線的表現並無太大的變化(如圖 1 所討論)，很不幸的是，此粒徑大小的顆粒在淨水過濾流程中是最難被移除的⁽¹²⁾。在底下的實驗中，基於突顯實驗數據差異的考量，因此將觀察的對象固定為快混 G 值 25 以及 350 s^{-1} 的操作情況。

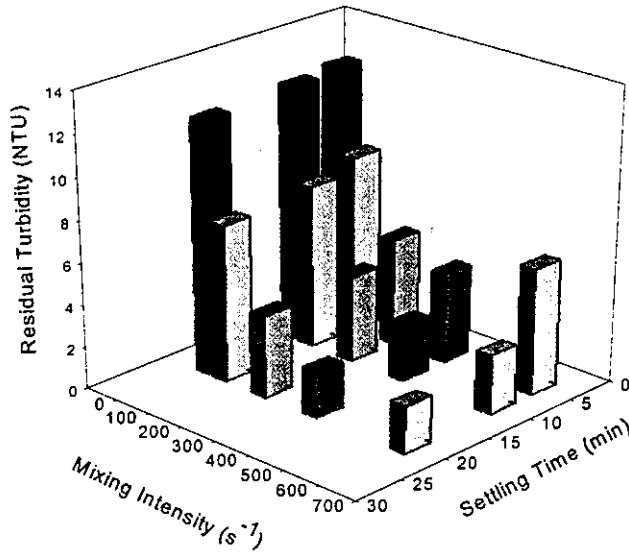


圖 2 混凝批次試驗中不同快混攪拌下，殘餘濁度隨沉降時間的變化 (快混 1 分鐘後接續慢混 20 分鐘、G 值 $25 s^{-1}$ ，PACl 加藥量 $1.5 mg/l$)

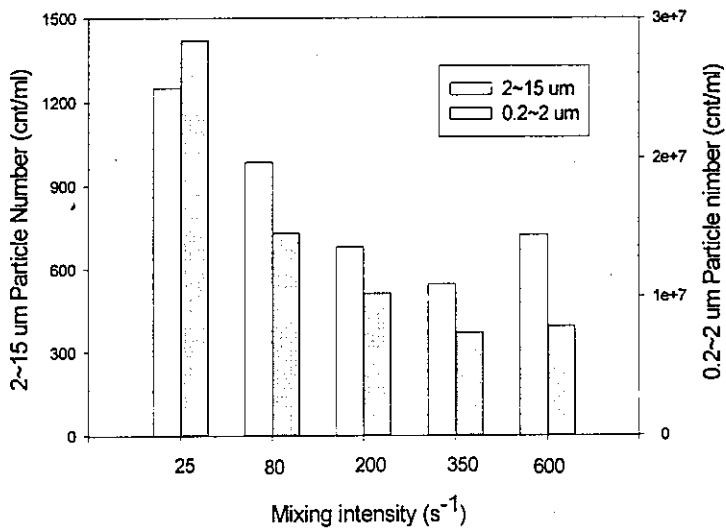


圖 3 混凝批次試驗中，上層液中 $0.2\sim 2$ and $2\sim 15\mu m$ 顆粒數目與快混攪拌強度之關係 (快混 1 分鐘後接續慢混 20 分鐘、G 值 $25 s^{-1}$ ，PACl 加藥量 $1.5 mg/l$)

3.3 膠凝狀態偵測

光學膠羽偵測儀，可用來監測流動性的懸浮固體溶液顆粒的聚集狀態，PDA 的 Ratio 輸出值可作為懸浮液中顆粒聚集的指標並可進行顆粒膠凝動力分析。利用 PDA 進行膠凝的動力分析，結果如圖 4 所示，在快混 G 值 25 s^{-1} 後，於慢混階段（20 分鐘、30 rpm）進行 PDA 偵測，結果 PDA 的 Ratio 輸出值在膠凝開始後 "緩慢" 上昇，到 8 分鐘達到最大 Ratio 輸出值 3.8，之後 Ratio 輸出值急速下降。而在快混 G 值 350 s^{-1} 後，於慢混階段（20 分鐘、30 rpm）進行 PDA 偵測，結果 PDA 的 Ratio 輸出值在膠凝開始後 "急速" 上昇，到 2.5 分鐘達到最大 Ratio 輸出值 4.7，之後 Ratio 輸出值呈現 "緩慢" 下降的趨勢。

於膠凝的階段中，水中微小顆粒聚集成膠體顆粒時，Ratio 輸出值會逐漸變大，由文獻指出 PDA 的 Ratio 輸出達最大值時為膠凝聚集達穩定平衡，之後 Ratio 值則會因聚集膠羽的沈降或膠羽破壞而下降。利用 PDA 對慢混階段顆粒的聚集情形進行分析，由以上的定義可以發現，於快混 G 值 350 s^{-1} 之後，於慢混階段 2.5 分鐘時顆粒聚集可達平衡，於快混 G 值 25 s^{-1} 之後，於膠凝 8 分鐘時顆粒聚集可達平衡，顯示出在膠凝階段之中，快混 G 值 350 s^{-1} 可導引出較 G 值 25 s^{-1} 更快速的顆粒聚集速度。

當微粒間的吸引力大於排斥力時，顆粒與顆粒才會有碰撞的機會，進而形成聚集體，在慢混的過程中，Smoluchowski 在 1917 年所提出顆粒碰撞公式：

$$-\frac{dn_T}{dt} = \frac{1}{6} G (d_1 + d_2)^3 n_1 n_2 \quad (\text{式 3.1})$$

式中 n_T 為顆粒的總數目， n_1 為粒徑 d_1 顆粒的數目， n_2 為粒徑 d_2 顆粒的數目， dn_T/dt 為顆粒的減少速率（即凝聚速度）， G 為水流剪力值。所以凝聚速度與水溫有關，也與顆粒數目的平方成正比，因此高濁度的原水，如果所有的顆粒可完全去穩，那麼在凝聚的過程中，由於水中顆粒濃度高，凝聚速度也會極快，所以慢混階段所需的時間也可縮短。但在本研究之中，快混 G 值 350 與 25 s^{-1} 的批次實驗條件中，皆控制相同的溫度以及顆粒數目，卻顯示出差距極大的顆粒聚集速度，相關此一部份的研究，於 3.5 節之中有更詳細的討論。

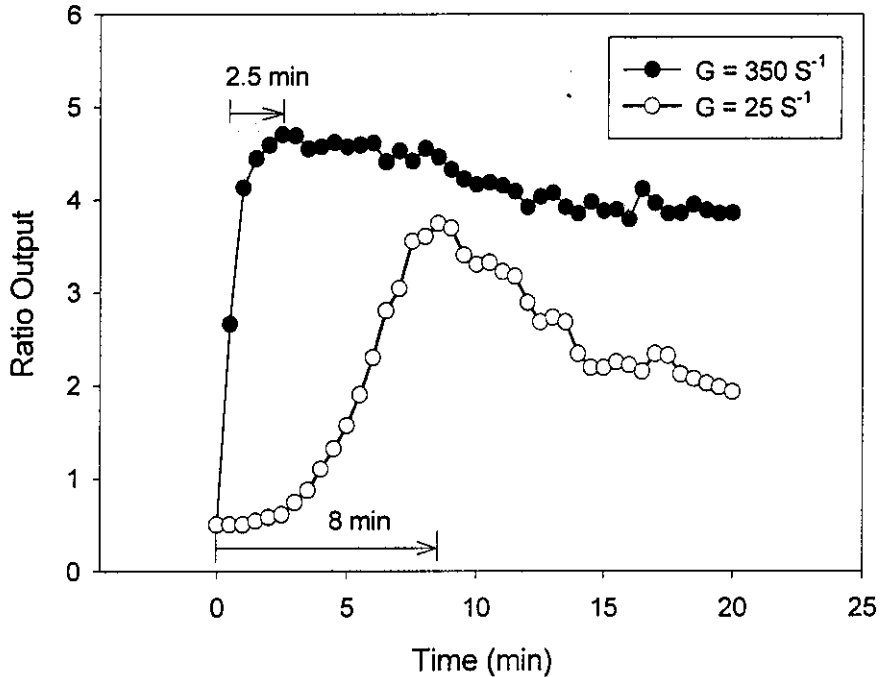


圖 4 快混 G 值 350 s^{-1} 及 25 s^{-1} 後，PDA Ratio 輸出值於慢混階段隨時間之變化
 (快混 1 分鐘接續慢混 20 分鐘、30 rpm，PACl 加藥量 1.5 mg/l)

3.4 膠羽特性分析

為了瞭解在不同快混條件下，生成膠羽特性的差異，研究之中對混凝批次試驗所沈澱的膠羽進行採樣，以自由沈降法觀察膠羽的粒徑與沈降速度，再利用 Stoke's 公式(式 2.1) 計算生成膠羽的密度。在快混 G 值 25 s^{-1} 的條件下，生成膠羽的平均粒徑 0.42 mm ，平均沈降速度為 7.8 mm/sec ，經公式計算後可得到膠羽密度為 1013.78 kg/m^3 。在快混 G 值 350 s^{-1} 的條件下，生成膠羽的平均粒徑 0.39 mm ，平均沈降速度為 4.8 mm/sec ，計算後可得到膠羽密度為 1009.84 kg/m^3 。

比較在兩種快混攪拌條件所得的形成膠羽的特性，可以發現形成平均粒徑差不多，

但 G 值 350 s^{-1} 所形成膠羽的密度較小，因此沈降速度較慢，而根據 1997 年 Yasuhisa 觀察高嶺土凝膠羽的沈降過程，發現膠羽粒徑與沈降速度呈現一指數關係⁽¹¹⁾，如式 2.2 所示。所以將膠羽樣本的粒徑與沈降速度取對數分析，可以計算其斜率而求出膠羽的碎形維度。根據自由沈降試驗所觀察到的膠羽樣本，在快混 G 值 25 s^{-1} 的條件下，粒徑與沈降速度的對數分析如圖 5 所示，可以計算斜率為 1.15，而在快混 G 值 350 s^{-1} 的條件下，對數分析如圖 6 所示，斜率為 0.8，因此生成膠羽的維度分別為 2.15 以及 1.80，此一數據與上述沈降實驗之中，觀察到快混 G 值 25 s^{-1} 的生成膠羽的密度大於 G 值 350 s^{-1} 的膠羽，其結論相互吻合。此一結論再透過顯微照相後，可得到更進一步的支持，圖 7 為快混 G 值 25 s^{-1} 的生成膠羽，顯示出一密實的膠羽結構型態，圖 8 為快混 G 值 350 s^{-1} 的生成膠羽，則是一較鬆散的膠羽結構。

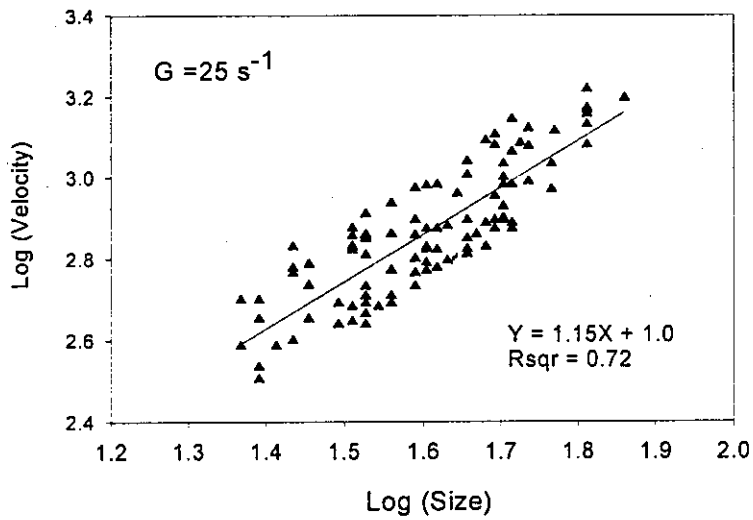


圖 5 膠羽粒徑與沈降速度對數關係圖
 (快混 1 分鐘、 G 值 25 s^{-1} ，慢混 20 分鐘、30 rpm，PACl 加藥量 1.5 mg/l)

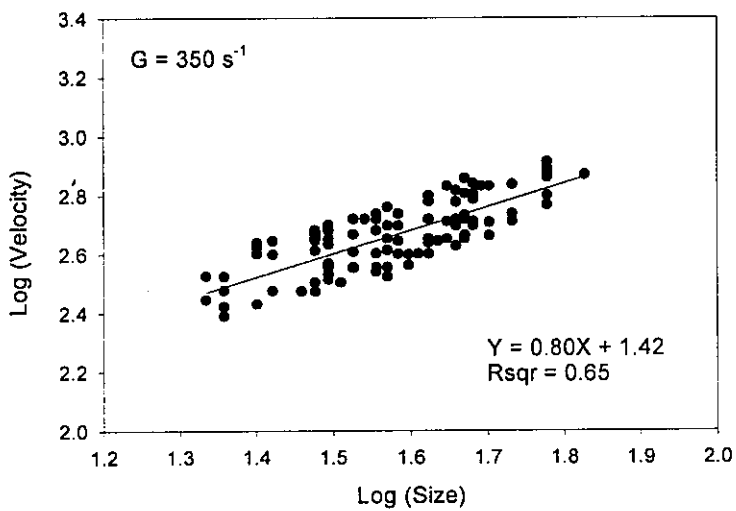


圖 6 膠羽粒徑與沈降速度對數關係圖
 (快混 1 分鐘、 G 值 350 s^{-1} ，慢混 20 分鐘、30 rpm，PACl 加藥量 1.5 mg/l)

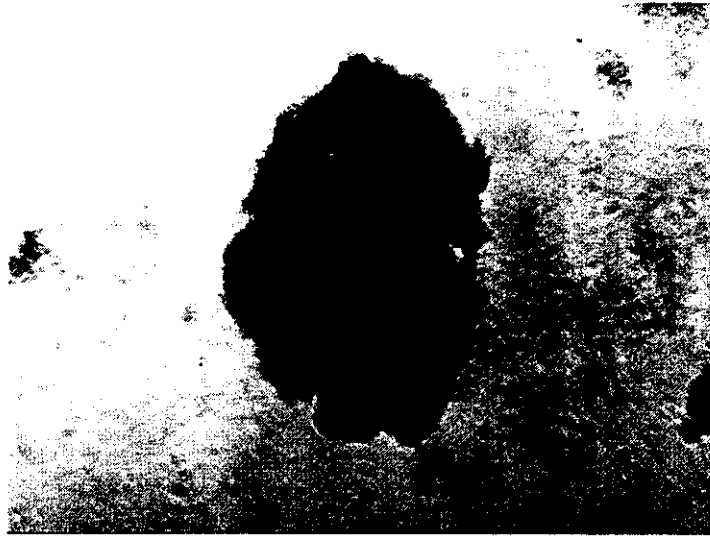


圖 7 膠羽顯微照片
(快混 1 分鐘、G 值 25 s^{-1} ，慢混 20 分鐘、30 rpm，PACl 加藥量 1.5 mg/l)

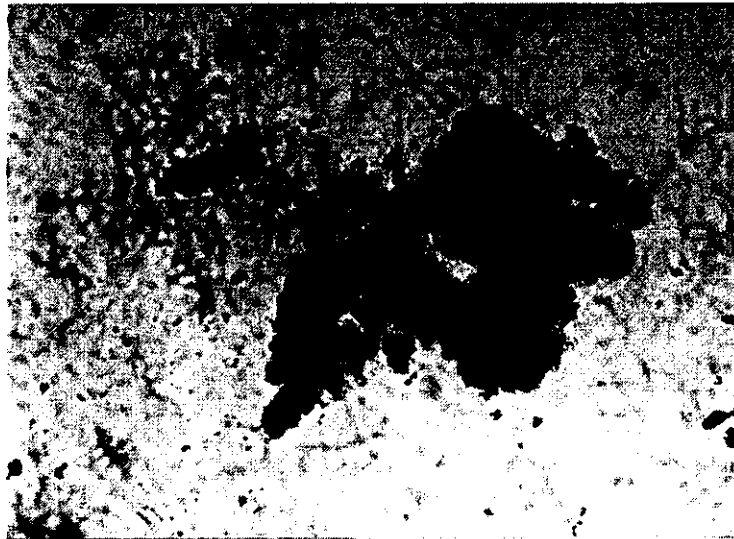


圖 8 膠羽顯微照片
(快混 1 分鐘、G 值 350 s^{-1} ，慢混 20 分鐘、30 rpm，PACl 加藥量 1.5 mg/l)

3.5 模式建立

透過以上實驗的觀察可發現，不同的快混操作的確影響了後續顆粒聚集以及膠羽的沉降，研究之中，我們嘗試建立一模式來完整描述此一現象，如圖 9 所示。首先先將快混操作的情況分類成兩大類，分別稱之為"不均勻"及"均勻"的快混攪拌，第一種"不均勻"的快混攪拌如同上述快混 G 值 25 s^{-1} 所得到的情況，在快混階段混凝劑注入的階段，並沒有得到激烈、快速的攪拌，因此混凝劑在快混階段並沒有達到均勻擴散的地步，在此情況之下，PACl 會過量吸附在少數的膠體顆粒上，而產生過量加藥的情形導致局部顆粒電性逆轉而帶正電，大部分的膠體顆粒只有少許或沒有混凝劑對其進行混凝去穩的作用，因此仍舊維持負電荷並呈現穩定的狀態。"均勻"的快混攪拌則如同快混 G 值 350 s^{-1} 所得到的情況，在快混階段混凝劑注入的階段，透過激烈、快速的攪拌，混凝劑可在混合槽中達到均勻擴散，在此情況之下，混凝劑會吸附在大多數的膠體顆粒上，大部分的膠體顆粒透過 PACl 的電性中和作用而達到去穩定的狀態。

在後續的慢混階段中，顆粒聚集的速度可簡單以數學式來評估，如式 3.1 所示，在此研究之中我們重新定義其數學運算因子，由於水樣的初始濁度皆相同，顆粒總數可視為 n_T ，在"不均勻"的快混攪拌後，帶正電的顆粒視為 n_{1U} ，而帶負電的膠體粒子視為 n_{2U} ，兩者之間可進行有效的碰撞進而形成聚集體，並且由以上討論可知 n_{2U} 遠大於 n_{1U} ，其關係可用下列數學式表示之。

$$n_{1U} + n_{2U} = n_T \quad (\text{式 3.2})$$

$$n_{2U} \gg n_{1U} \quad (\text{式 3.3})$$

$$\left(\frac{dn_T}{dt} \right)_U \propto n_{1U} \times n_{2U} \quad (\text{式 3.4})$$

式中 $(dn_T/dt)_U$ 代表在"不均勻"的快混攪拌後，顆粒凝集的速度。

而在"均勻"的快混攪拌後，大部分的顆粒將其視為已電性中和，將 n_1 與 n_2 定義為 n_{1H} 以及 n_{2H} ，其數量可視為 $n_T/2$ ，其關係可用下列數學式表示之，式中 $(dn_T/dt)_H$ 代表在"均勻"的快混攪拌後，顆粒凝集的速度。

$$n_{1H} + n_{2H} = n_T \quad (\text{式 3.5})$$

$$n_{2H} \cong n_{1H} \cong \frac{n_T}{2} \quad (\text{式 3.6})$$

$$\left(\frac{dn_T}{dt} \right)_H \propto n_{1H} \times n_{2H} \quad (\text{式 3.7})$$

比較運算式 3.4 以及式 3.7 可以發現到 $(dn_T/dt)_H$ 會大於 $(dn_T/dt)_U$ ，此一推導也驗證了利用 PDA 觀察膠體顆粒聚集速度所得的結果，如 3.3 節所述。

而在顆粒聚集時另一重要的考量因子，碰撞效率，也由於快混操作的影響而有所不同，在"不均勻"的快混攪拌後，由於大部分的顆粒仍保持穩定，因此有效的碰撞並不多，而在"均勻"的快混攪拌後，大部分的顆粒已經去穩，因此可進行大量的有效碰撞。根據 Wiesner 及 Klute⁽¹²⁾的研究之中指出，低碰撞效率會導致顆粒與聚集體的聚集型態 (Cluster-Particle Aggregation)，而高碰撞效率會導致聚集體與聚集體的聚集型態 (Cluster-Cluster Aggregation)。兩種型態的聚集可形成不同碎形維度特性的膠羽，顆粒與聚集體的聚集形成膠羽的碎形維度在 2~2.5 之間，而聚集體與聚集體的聚集形成膠羽的碎形維度在 1.5~2.0 之間，與本研究利用自由沈降法求得的膠羽維度值相當吻合 (如 3.4 節所述)。

在"不均勻"的快混攪拌後，反而形成了較密實的膠羽，因此在慢混攪拌的階段，便發生顆粒沈降的情況，也導致了未去穩的膠體顆粒無法與膠羽碰撞而沈降，在沈澱的過程中也保持著穩定的狀態，因此沈降曲線下降的趨勢並不明顯，透過顆粒計數可以發現上層液之中是存在著大量細微的濁度顆粒。在"均勻"的快混攪拌後，形成了較鬆散的膠羽，因此在慢混攪拌的階段，顆粒沈降的情況較少，在沈澱的過程中顆粒持續沈降，因此沈降曲線下降的趨勢較為明顯，如 3.1 節利用濁度量測以及顆粒計數所觀察到的結果。

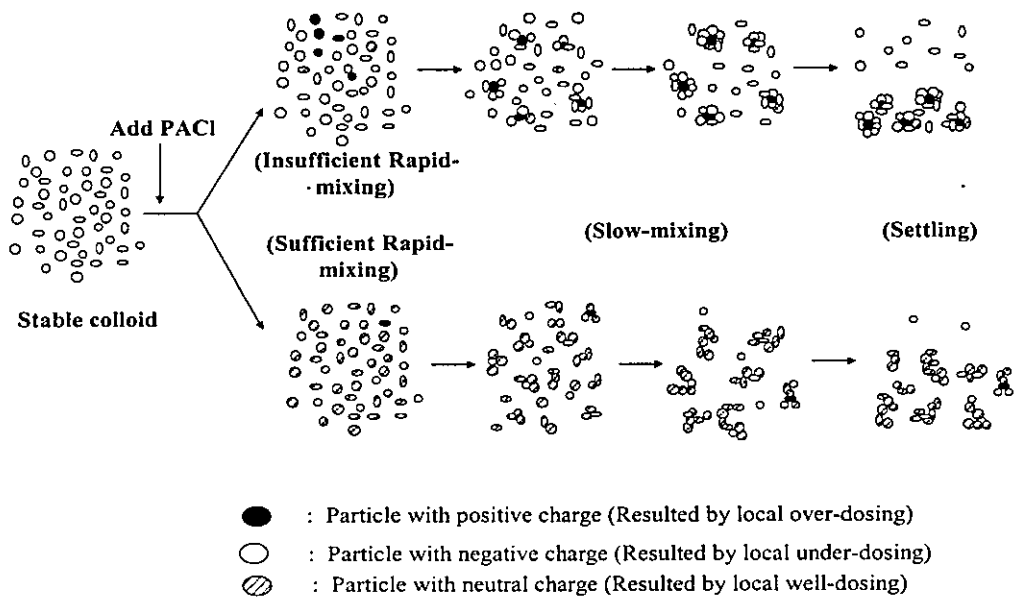


圖 9 顆粒聚集及膠羽沉降假設模式

四、結論與建議

快混操作的確對後續顆粒的聚集以及膠羽的沉降影響極大，最主要的因子取決於顆粒去穩的情況。均勻的快混攪拌，可使大部分的顆粒去穩，在膠凝的過程中會引起聚集體與聚集體的聚集型態，因而形成較鬆散且沉降性較差的膠羽。不均勻的快混攪拌，會導致顆粒與聚集體的聚集型態，形成密實且沉降性較佳的膠羽，但是上層液中會存在大量的細微顆粒，值得注意的是，此粒徑大小的顆粒在後續的過濾流程中仍是令人頭痛的問題。

由以上研究結果，本研究群認為淨水廠在面臨高濁度原水進入的情況下，快混單元的混凝劑分散效率勢必不高，因此會產生局部過量加藥之情況，面對此一情形，除了過量加入混凝劑之外，本研究群提供一些操作概念以因應之，如在快混操作方面增加混凝劑的注入管道、快混池分次加藥以提高混凝劑分散效率。而在慢混操作方面，可提高其攪拌速度，除了避免膠羽顆粒於膠凝池中發生沈澱的情況，亦可讓水中的微小顆粒繼續碰撞膠羽而結合，以利後續沈澱與過濾的處理。

誌謝

本研究承蒙國科會 NSC-89-2211-E-009-050 經費補助，得以順利進行，謹此致謝。

參考文獻

1. 甘其銓 "淨水廠濁度去除效能評估及混凝監測之研究—以豐原淨水廠為例" 交通大學環境工程研究所碩士論文，民國八十六年。
2. 李丁來、甘其銓、黃志彬、劉廷政、李乾華、林慶春 "淨水場去除濁度功能自我評鑑之初步研究" 第十六屆自來水研究發表會，台北，民國八十八年十一月。
3. Camp T. R. (1968) Floc volume concentration. *J. AWWA.*, **60**, 656-673.
4. ASCE, AWWA and CSSE (1969) *Water Treatment Plant Design*. American Water Work Association Press: New York.
5. Vrale, L. and Jorden, R. M. (1971) Rapid mixing in water treatment. *J. AWWA.*, **63**, 52-58.
6. Kalinkov, P. and Mnzo, J. L. (1996) Technological aspects of advanced processes of coagulation and flocculation in water treatment. In *NATO ASI series, Partnership Sub-series, 2. Env. – Vol. 5. Water supply systems—New technologies*. Maksimovic, C.; Calomino, F. and Snoxell, J., Ed.
7. Mhaisalkar, V. A.; Paramasivam, R. and Bhole, A. G. (1991) Optimizing physical parameters of rapid mix design for coagulation-flocculation of turbid waters. *Wat. Res.*, **25**, 43-52.
8. AWWA (1992) Jar testing. In *Operational control of coagulation and filtration process*. AWWA Research Foundation Press: Denver, Chapter 1.
9. Huang, C. P. and Chen, G. S. (1996) Use of the fiber-optical monitor in evaluating the state of flocculation. *Wat. Res.*, **30**, 2723-2727.
10. Kan, C. C. and Huang, C. P. (1998) Coagulation monitoring in surface water treatment facilities. *Wat. Sci. Tech.*, **38**, 237-244.

11. Yasuhisa, A. and Yoshikazu, T. (1997) Settling velocity of an aluminium-kaolinite floc. *Wat. Res.*, **31**, 449-454.
12. Wiesner, M. R. and Klute R. (1998) Properties and Measurements of Particulate Contaminants in Water. *Treatment Process Selection for Particle Removal*. Edited by Mcewen, J. B., AWWA Research Foundation Press: Denver, Chapter 4.
13. Kan, C. C., Huang, C. P. and Pan, J. R. Coagulation of high turbidity water-The effects of rapid-mixing. *AQUA*. (In press)
14. 甘其銓、黃志彬 "碎形維度於淨水處理上之應用" 自來水會刊，**18(3)**，17-25，民國八十八年九月。