

膠凝系統混合效應之探討

薛少俊*

壹、前言

膠凝 (Flocculation) 在廢水處理程序中之所有單元操作裏佔有一極重要的地位，一般包括膠凝的單元操作有沉降 (Sedimentation)、浮選 (Flotation)、過濾 (Filtration)、氧化還原、中和 (Neutralization)。大多數廢水處理污染物成份如臭味、濁度 (Turbidity)、色度、懸浮固體、PH 值、金屬、有機物及油類等均係在混合槽中進行，同時藉着膠凝的重要單元——機械攪拌——來加速運送操作。對於這些污染物成份的處置，如不能適當地選擇和設計混合系統相配合，將導致膠凝區域非常匱乏，而造成膠凝器 (Flocculator) 內不同區域之性質的差別⁴⁽¹¹⁻¹⁴⁾。雖然膠凝器 (Flocculator) 具有機械性的本質，也無法達到操作自如的目標。

有關膠凝槽的設計分成兩方面，即濁度 (Turbidity) 和沉降速率 (Settling rate)。沉降速率特別着重於決定稠厚器和澄清器的容量，且必須緊密控制來達成最適化操作條件。對於決定沉降速率的直接方法，是在混合槽中測定膠凝混合時間 (Flocculation mixing time)，而濁度則提供了膠凝程序整個效率的指針。另外影響膠凝作用的因素有很多，除了與廢水性質——PH 值、溫度有關外，常依膠凝劑種類和加入量、水中粒子、攪拌方法與膠凝時間，及攪拌器和混凝槽的相關幾何性等而定；要將上述因素從理論解析得一理論模式 (Empirical model) 很難，多由實驗數據中推算一實驗模式來作為膠凝槽設計放大之依據。

本文綜合學者^(5.7.8.)先導工廠研究的成果，提供一系列有關變數及效應，以作為膠凝槽設計放大之參考。

貳、理論解析與討論

混凝速率 dN/dt 可由單位時間內膠羽 (floc) 粒子接觸數而定⁽⁵⁾，表之如下

$$dN/dt = \xi (1/6) N_1 N_2 G (d_1 + d_2)^3 \quad (1)$$

其中 dN/dt ：每單位時間體積內碰撞數。

N_1, N_2 ：數量密度。

G ：曝露於流體內粒子速度梯度或剪切速率。

ξ ：碰撞效率。

若流動型態不受混合條件影響，平均速度梯度 G 與單位體積功率消耗 (P_v)、流體黏度 (μ) 有關，可取代 G ⁽⁷⁾

$$G \alpha \bar{G} = (P_v / \mu)^{1/2} \quad (2)$$

* 聯勤二〇二廠化學工程師

而 $d_1 < d_2$ 及濁度只受小粒子影響，碰撞速率化為

$$dN/dt = -dN_1/dt = \xi(N_2/6) G d_2^3 N_1 \quad (3)$$

式(3)最初條件為

$$N_1 = N_{10}, t = 0 \text{ 時}$$

如 G 、 N_2 及 d_2 與 N_1 、 t 無關，式(3)積分之

$$N_1/N_{10} = \exp(-\xi G t c / \pi) \quad (4)$$

其中 C ：膠羽體積濃度， $\pi d_2^3 N_2 / 6$

由於膠羽濃度可假設直接與較小粒子數 N_1 成正比，可得

$$C_1/C_0 = \frac{N_1}{N_{10}} = \exp(-\xi t G c / \pi) \quad (5)$$

其中體積濃度 C 可依混合情形而定，即 G 和 $t^{(7)}$

另外膠凝作用亦受剪切應力的影響⁽⁸⁾，由於剪切速率凝聚後，具有破壞羽粒子的本質。剪切應力與 G 有不同的關係式

$$\text{剪切應力} = \sqrt{(P/V)(\mu)} \quad (6)$$

Oldshue et. al.⁽⁸⁾指出，在混合槽中剪切速率的分佈，有一巨視規模之剪切速率操作於分開粒子間平均速度上，而且微視規模速率因湍流突變，與突變剪切速率有關。在混合槽中有四個區域必須考慮巨視規模和微視規模剪切速率：(1)攪拌器最大剪切速率區域，(2)攪拌器平均剪切速率區域，(3)混合槽平均剪切速率區域，和(4)混合槽最小剪切速率區域。巨視規模發生於影響比 200μ 稍大的粒子，微視規模似乎影響比 100μ 小的粒子。

為了瞭解膠凝混合，在於決定工廠操作的最適化條件，及可依賴和重現性的發展。基於膠凝劑添加方法、混合時間、超混合效應、膠凝劑初濃度、膠凝劑量、攪拌強度，對濁度和沉降速率的影響，分別討論如下。

一、膠凝劑添加法之影響

Keys et. al.⁽⁵⁾以 PAA(Polyacrylamide) 為膠凝劑，於標準攪拌槽膠凝含黏土之廢水，在固定混合時間和最終膠凝劑量下，測得快速添加數愈大時，除濁效果愈佳，沉降速率愈高，如圖一所示。

二、混合時間之影響

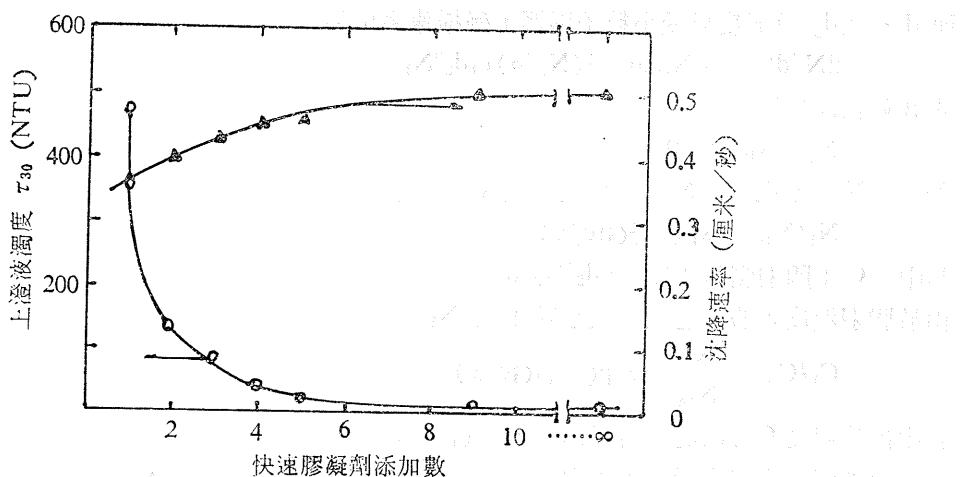
混合時間對膠凝作用亦有影響⁽⁵⁾，見圖二。在極短混合時間內，除濁效果較差，沉降速率較佳。而混合時間較長時，除濁效果改進，欲降低了沉降速率。由此可知，連續添加膠凝劑至完全混合時，濁度有漸近平衡的趨勢，即使延長連續混合時間，仍維持常數。

三、超混合之影響

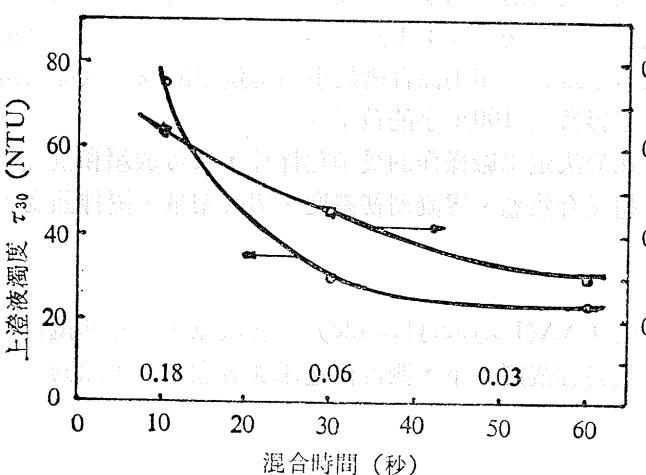
對於增加混合，是隨着膠凝劑添加影響到沉降速率和最終濁度⁽⁵⁾。由圖三可知，膠凝作用並不因更深入的攪拌有所改進。在超混合階段中，沉降速率隨着攪拌級 (Degree of agitation) 而減少。事實上，就是破壞現有膠羽的影響。

四、最初膠凝劑濃度之影響

為了求得再生性及最佳膠凝作用，對於添加稀釋的膠凝劑溶液於懸浮物中是必須的。在固定最終膠凝劑量和幾乎維持固定的沉降速率下，濁度有明顯的降低⁽⁵⁾，見圖四。



圖一 快速膠凝劑添加數與上澄液濁度的關係(400毫升標準槽中膠凝黏土，攪拌器轉速 1500rpm，膠凝劑量4毫克/升，混合時間100秒)

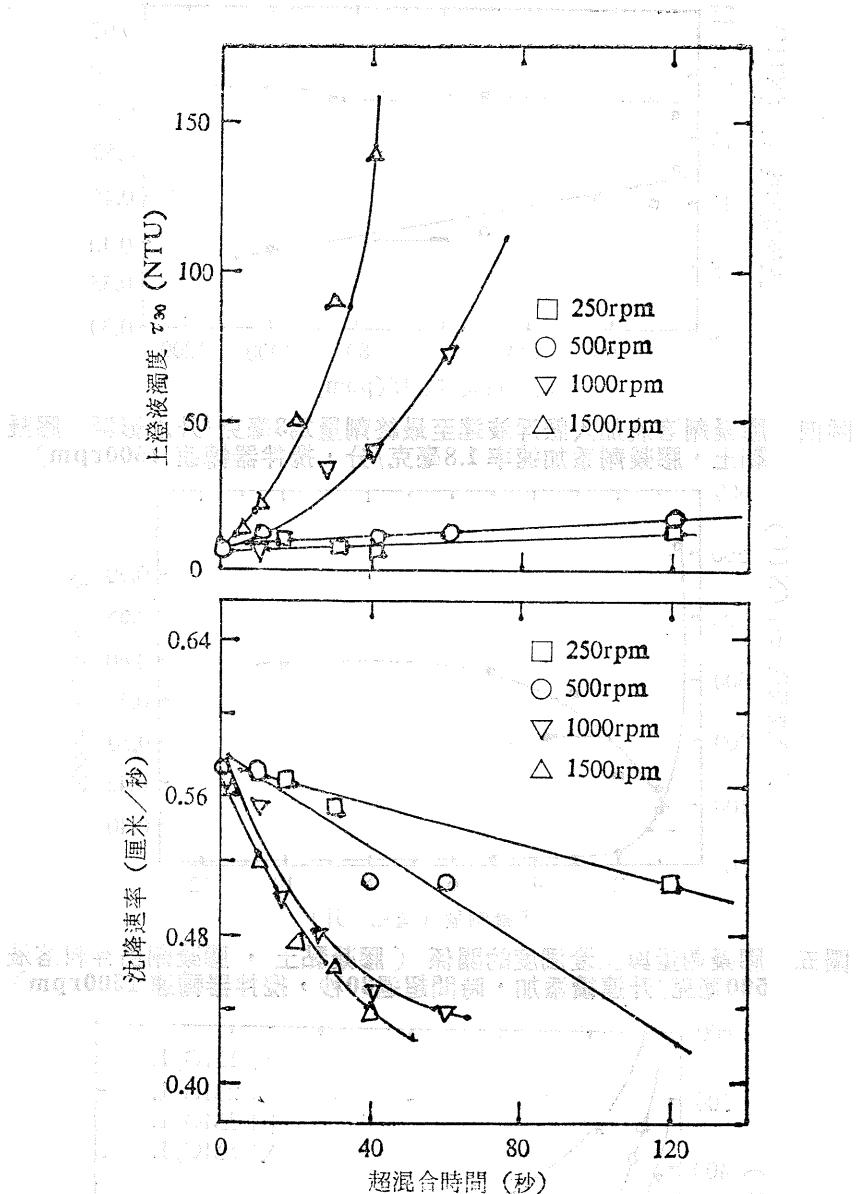


圖二 混合時間與上澄液濁度的關係(膠凝黏土，攪拌器轉速 1500rpm，膠凝劑量3毫克/升。)

五、膠凝劑量之影響

欲使懸浮物產生膠凝作用，其所需添加膠凝劑量是相當重要的⁽⁵⁾。以黏土為例，膠凝劑量由 0.5 至 2 毫克/升，上澄液濁度由超過 500NTU 降至 25NTU 以下，沉降速率增加大約百分之十五。在達至 5 毫克/升，濁度和沉降速率不受添加膠凝劑量所改變，如圖五所示。至於石英，膠凝劑量增加，沉降速率和最終濁度隨着改變，到 2 毫克/升趨於平衡，超過此點，則不受增加膠凝劑量影響，見圖六。

六、攪拌強度之影響

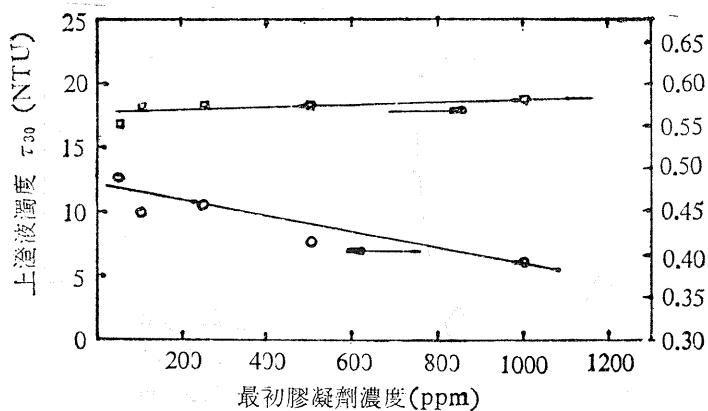


圖三 膠凝劑添加後，增加混合之影響（膠凝黏土，在轉速
1500rpm，時間30秒，實施膠凝劑添加）

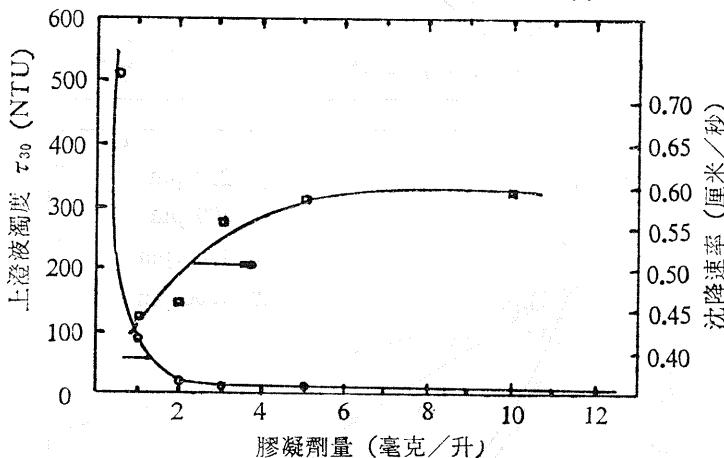
為了研究攪拌強度之變化對批式膠凝系統的影響，Oldshue et. al.⁸以數種不同攪拌器（見圖七）探討膠凝槽內濁度及G因子之變化情形，茲將各種幾何性因素對膠凝作用的關係敘述如下：

(-)翼片幾何性 (T/D) :

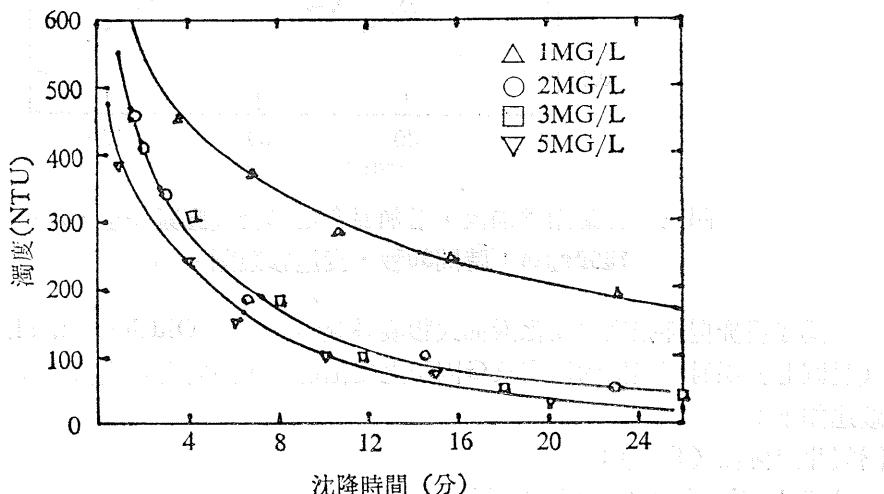
以 3-Inclined flat blade turbine 為例，圖八、九、十、十二及表一可知，翼片直徑愈大，膠凝效果愈差，由於剪切速率 (G因子) 增大，所需功率消耗 (Power consumption) 更



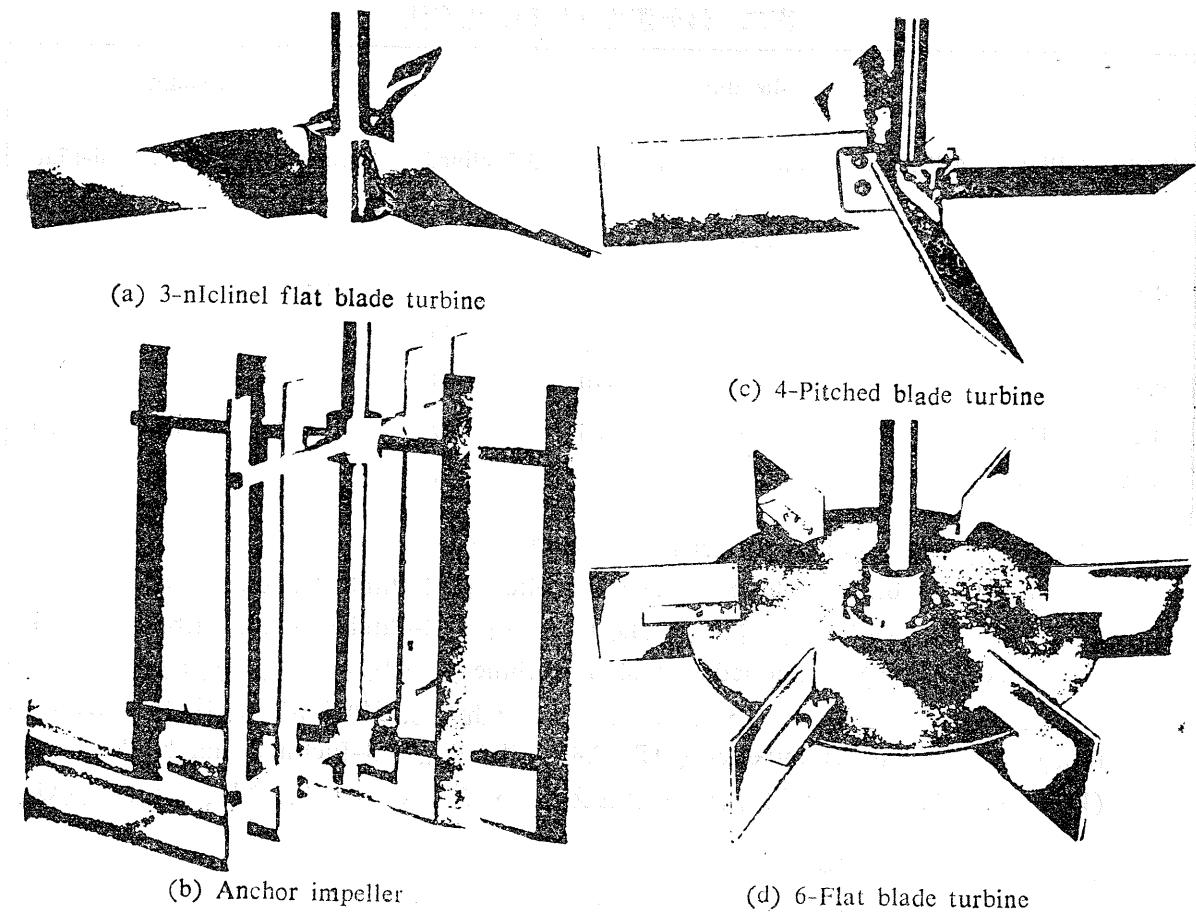
圖四 膠凝劑溶液加入懸浮液達至最終劑量為3毫克/升之影響（膠凝黏土，膠凝劑添加速率1.8毫克/分，攪拌器轉速1500rpm）



圖五 膠凝劑量與上澄濁度的關係（膠凝黏土，膠凝劑由存料溶液500毫克/升連續添加，時間超過30秒，攪拌器轉速1500rpm）



圖六 膠凝劑量之影響（膠凝石英，膠凝劑由存料溶液500毫克/升連續添加，時間超過30秒，攪拌器轉速1000rpm）



圖七攪拌翼片的幾何形狀

高，見表二，這些結果適合於 $0.13 < D/T < 0.4$ 。

表一 不同D/T之最低濁度值

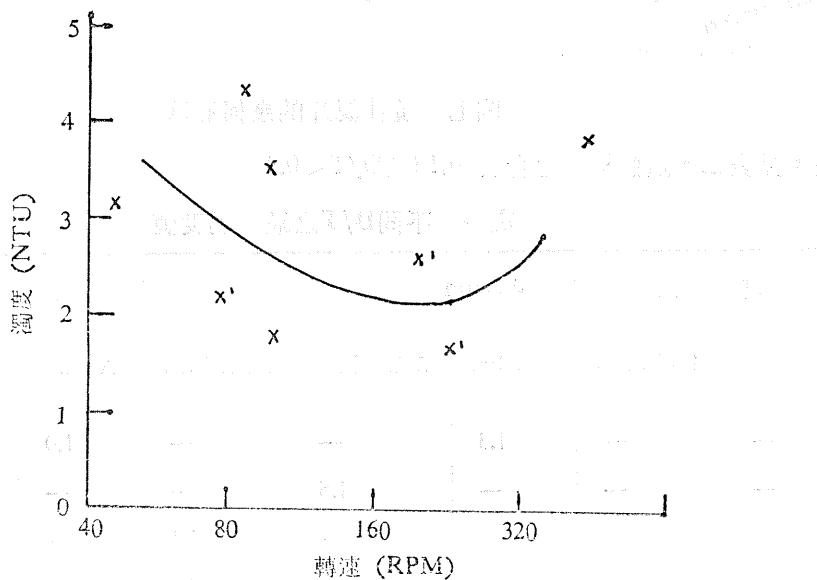
槽直徑 460mm					槽直徑 760mm				
D/T	6-Flat	4-Pitched	Anchor	3-Inclined	3-Inclined	Anchor	4-Pitched	6-Flat	
0.8	—	—	1.3	—	—	1.0	—	—	
0.5	—	—	—	1.5	—	—	—	—	
0.4	—	—	—	—	1.1	—	—	—	
0.3	—	—	—	2.5	2.6	—	—	—	
0.2	2.5	3.0	—	2.0	2.4	—	4.0	3.0	
0.13	—	—	—	—	2.3	—	—	—	

表二 最低濁度 (1/秒) 之 G 值

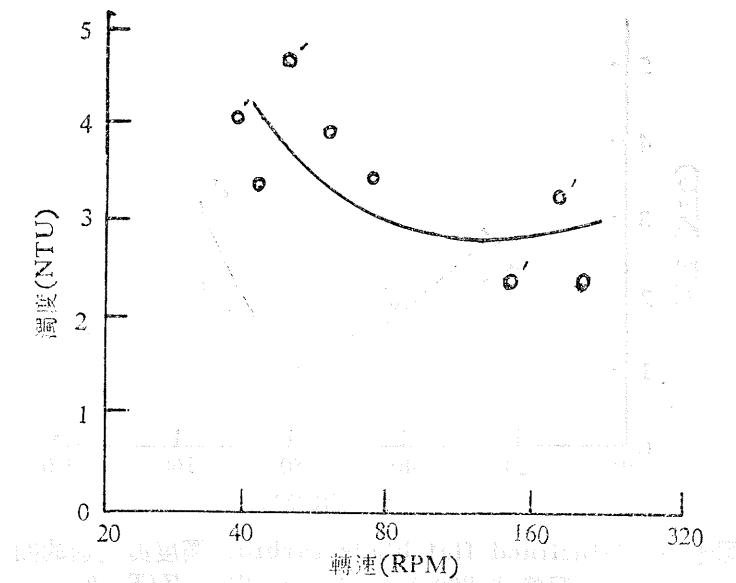
槽 直 徑 460mm					槽 直 徑 760mm				
D/T	6-Plat	4-Pitched	Anchor	3-Inclined	3-Inclined	Anchor	4-Pitched	6-Fiat	
0.8	88	—	148	—	—	112	—	—	
0.5	—	—	—	92	—	—	—	—	
0.4	—	—	—	—	106	—	—	—	
0.3	—	—	—	110	34	—	—	—	
0.2	116	77	—	58	27	—	60	59	
0.13	—	—	—	—	31	—	—	—	

(二) 翼片旋轉的流動型 (Flow pattern) 態和翼片形狀：

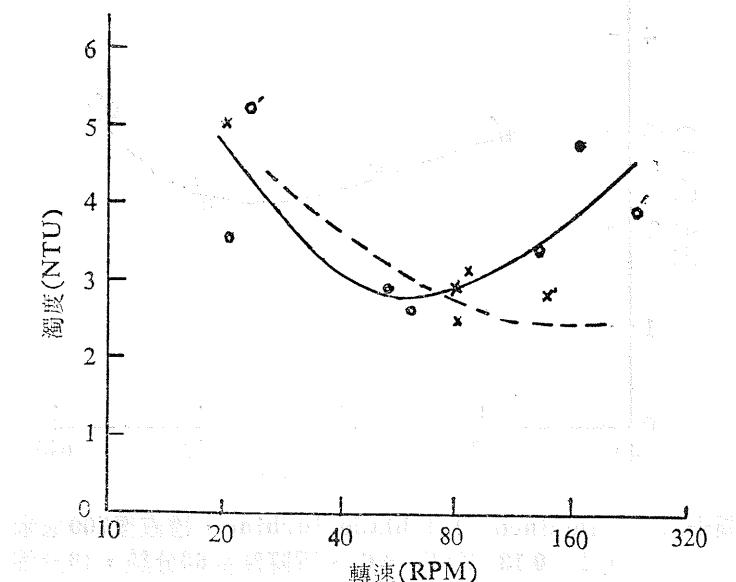
3-Inclined flat blade turbine, Anchor impeller 和 4-Pitched blade turbine，其旋轉之流動型態為軸流⁽⁹⁾。在相同幾何性($D/T=0.2$)下，4-Pitched blade turbine 之膠凝效果比 (Axial flow) 3-Inclined flat blade turbine 差，且功率消耗較高，此對資本及操作費用均不利，見圖八、九、十四及表一、二，此現象可加裝循環管圈⁽¹¹⁻¹⁴⁾ (Draught tube) 來改良。Ancher impeller ($DT=0.8$)的膠凝效果與 3-Inclined flat blade turbine ($D/T=0.4\sim0.5$) 相近，如圖十一、十三及表一、二所示。但在相同膠凝性能下，其 G 因



圖八 3-Inclined flat blade turbine 濁度與轉速的關係
(槽直徑460毫米， $D/T=0.2$ ， $Z/T=0.6$ 沉降時間60
分鐘) Z：槽液深

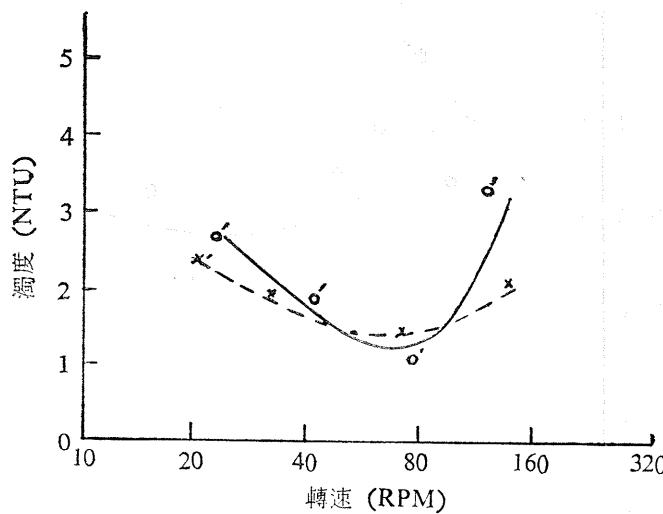


圖九 3-Inclined flat blade turbine 濁度與轉速的關係
(槽直徑 760 毫米， $D/T=0.2$, $Z/T=0.6$ 沉降時間60分鐘)

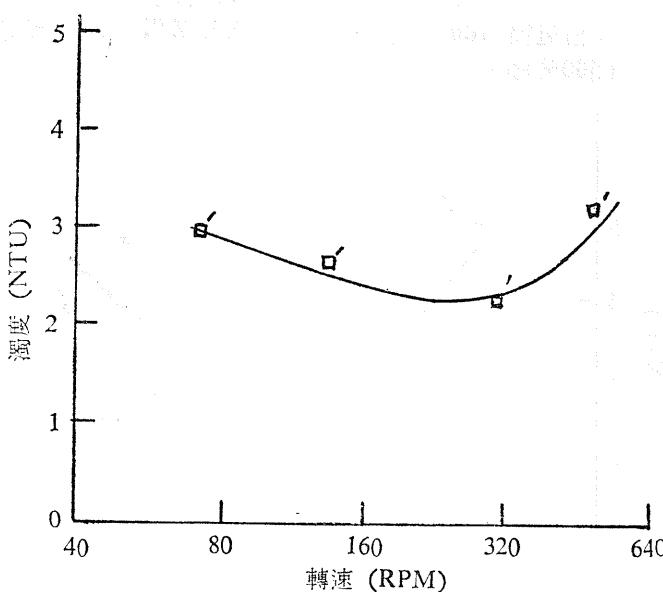


圖十 3-Inclined flat blade turbine 濁度與轉速的關係
(槽直徑 $D = 760$ 毫米, $X = 460$ 毫米, $D/T=0.3$,
 $Z/T=0.6$ 沉降時間60分鐘)

子較高，所需功率消耗較大，可作為設計之參考。6-Flat blade turbine 其旋轉之流動型態為輻流⁽⁹⁾(Radial flow)，膠凝性能見圖十五。在最適化處，不能給予較佳絕對膠凝性能，即不可引為有利用價值的膠凝設備。



圖十一 3-Inclined flat blade turbine 濁度與轉速的關係
(沉降時間60分鐘，10分鐘膠凝， $Z/T=0.6$)

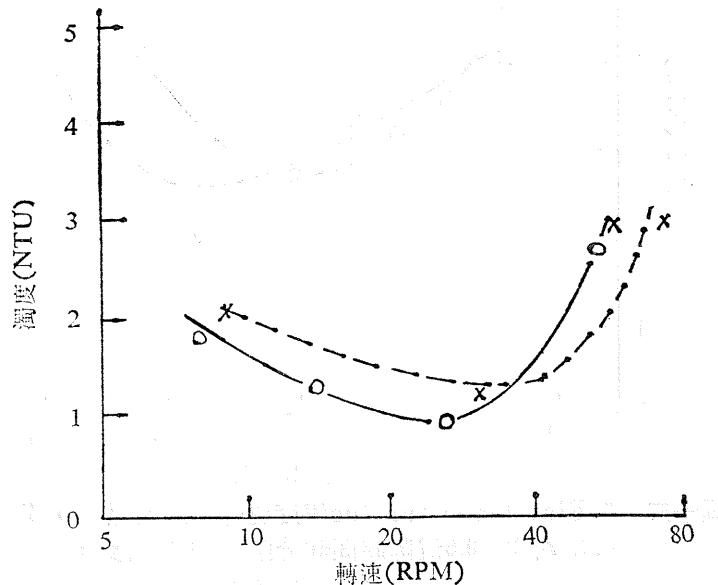


圖十二 3-Inclined flat blade turbine，槽直徑760毫米
 $D/T=0.13$, $Z/T=0.6$ ，沉降時間60分鐘，10分鐘
膠凝)

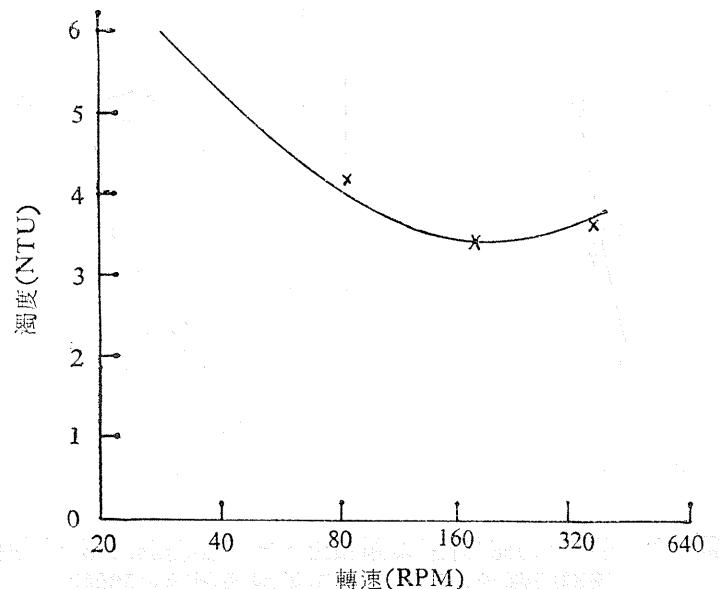
七、攪拌器轉速及沉降速率對濁度去除之影響

以連續膠凝劑添加，是需求高度的攪拌級⁽⁵⁾。雖濁度隨增快攪拌器速度而逐漸降低，仍無法定義出最適化攪拌器速度，如圖十六所示。同時沉降速率遞減，與延長混合時間或膠凝劑添加後之超混合現象類似。另外由圖十七可知，即使沉降速率很高，低攪拌器轉速不充分混合會造成較差的最終濁度。可見攪拌級和混合時間的關係是可以預測的，所以在低轉速須

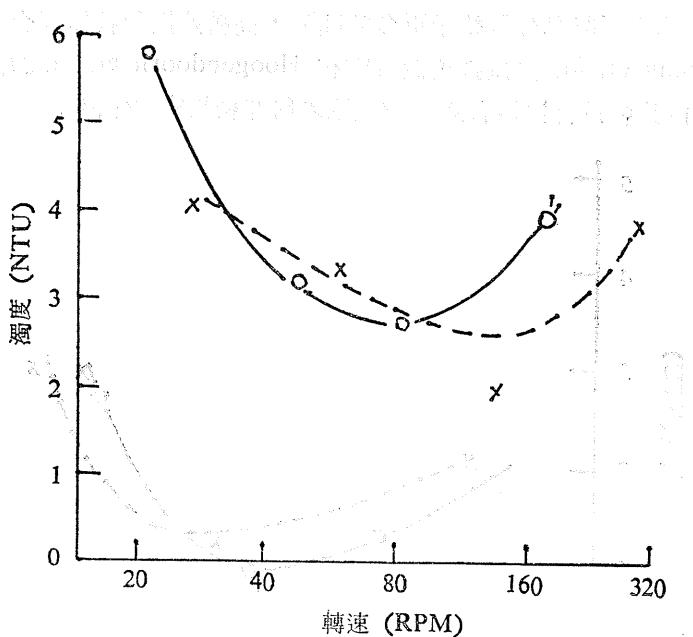
較長混合時間（為了膠凝劑分散給予更多時間），高轉速則須較短混合時間（為了減少膠羽遞減），與 Khang et. al. 之攪拌槽設計⁽⁶⁾和 Hoogendoorn et. al. 的混合器模式研究⁽⁸⁾、Havas et. al. 的比較攪拌器混合效率⁽¹⁾與筆者研究結果⁽¹⁻¹⁴⁾相吻合。



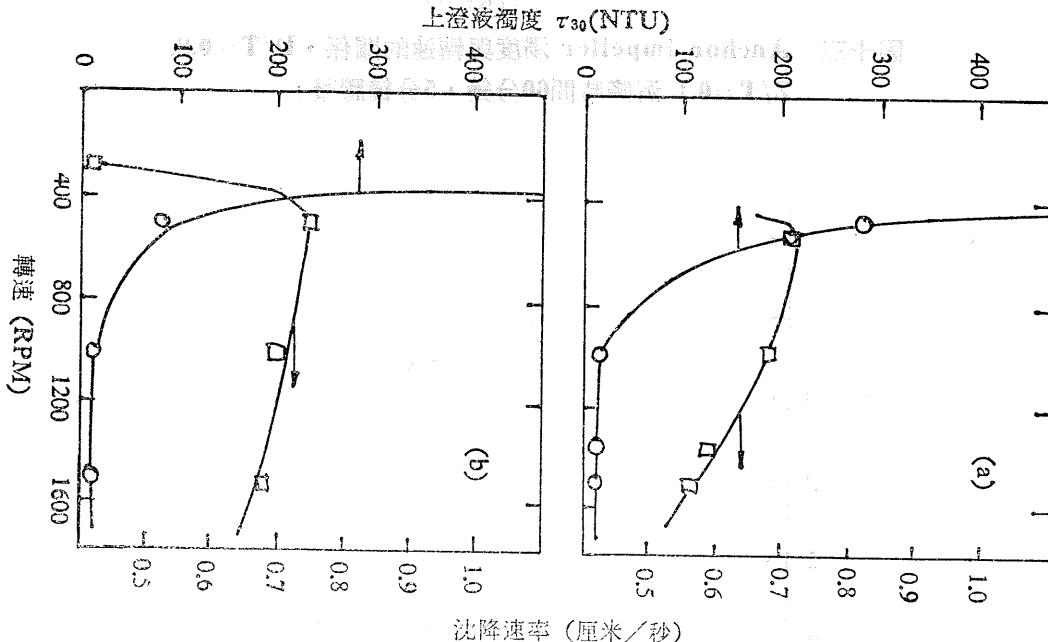
圖十三 Anchor impeller 濁度與轉速的關係， $D/T=0.8$,
 $Z/T=0.1$ 沉降時間60分鐘，5分鐘膠凝)



圖十四 4-Pitched blade turbine 濁度與轉速的關係 (槽直徑460毫米， $D/T=0.2$, $Z/T=0.6$ 沉降時間60分鐘)



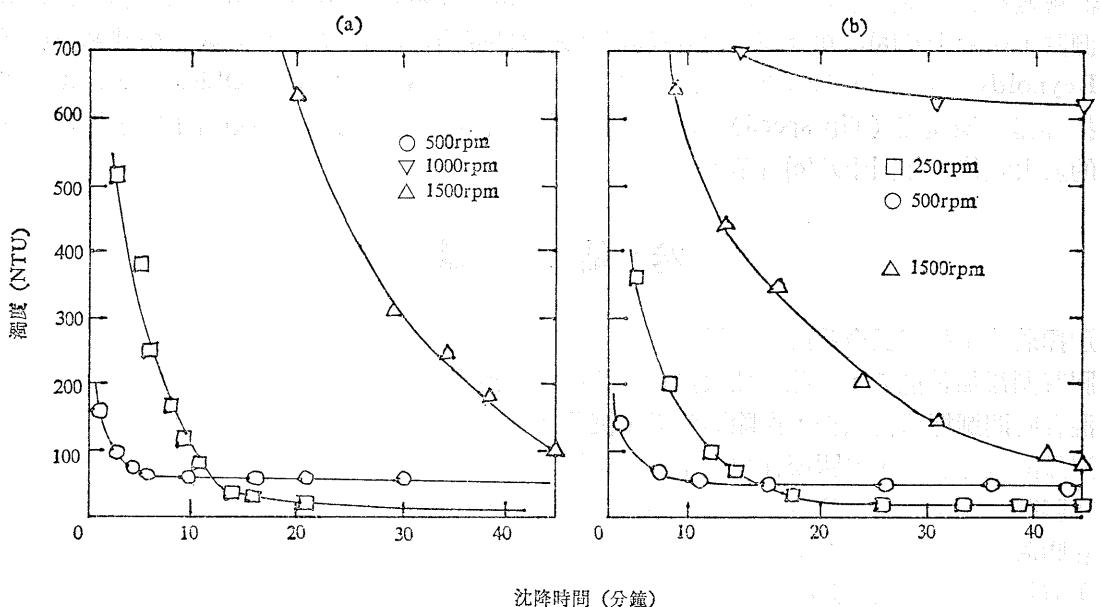
圖十五 6-Flat blade turbine濁度與轉速的關係 ($D/T = 0.2$, $Z/T = 0.6$ 沉降時間60分鐘，10分鐘膠凝)



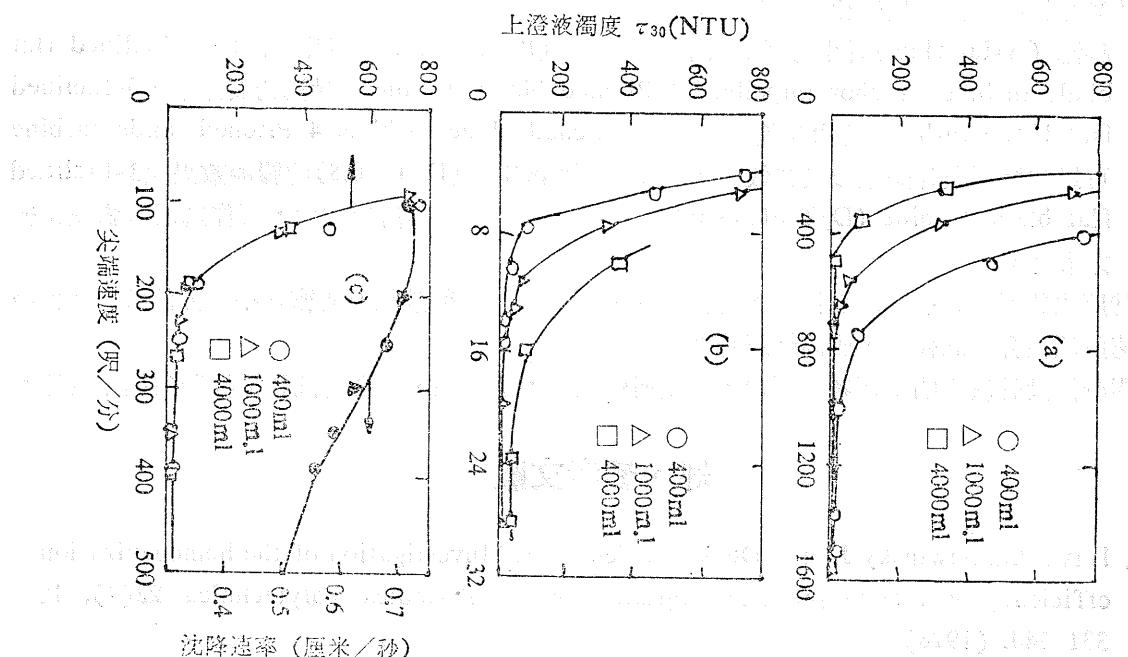
圖十六 使用3毫克/升膠凝劑黏土，攪拌器轉速之影響(a)連續膠凝劑添加30秒，(b)連續膠凝劑添加500轉

八、膠凝槽之放大 (Scale-up)

膠凝槽放大之重要抉擇，在於將先導工廠 (Bench scale) 之實驗結果應用到放大單元上。影響膠凝槽設計放大之因素很多，最主要依幾何性相似 (Geometrical similarity)、攪拌



圖十七 使用3毫克/升膠凝劑膠凝石英。攪拌器轉速之影響
(a)連續膠凝劑添加30秒，(b)連續膠凝劑添加500轉



圖十八 膠凝黏土之放大標準，總膠凝劑量3毫克/升，使用
時間：35秒（槽容積400毫升），50秒（槽容積
1000毫升）及70秒（槽容積4000毫升）

器轉速和混合時間等而定。Keys et. al.⁽⁴⁾ 以 400、1000 和 4000 毫升幾何性相似槽作放大測試，由圖十八(a)可知，濁度和攪拌器轉速之關係有關相同趨勢，在較大槽其轉速較低。Reynolds 數不能給予正確的膠凝放大因素，見圖十八(b)。另外比多 Oldshue et. al.⁽⁷⁾考慮攪拌器尖端速度 (Tip speed)，在尖端速度愈高下，濁度和沉降速率隨着下降，提供了適當的放大定律，如圖十八(c)所示。

參、結論

選擇最適化膠凝混合系統，應以

- 一、膠凝劑添加數愈大，其除濁效果愈佳，沉降速率愈高。
- 二、混合時間選擇適當與否，與除濁效果、沉降速率有極大的關係。
- 三、過量的攪拌混合，對膠凝作用有不良的影響。
- 四、在膠凝系統中，必須注意膠凝劑添加量的平衡點，以節省能源。
- 五、在膠凝系統中，其膠凝效果會受幾何性的影響如下：

1. 翼片幾何性 (T/D) :

以 3-Inclined flat blade turbine 為膠凝器，不同翼片直徑為參數 ($0.13 < D/T < 0.4$)，而 D/T 最大時，其所需功率消耗最高，亦即膠凝效果最低。其中 D 為攪拌器直徑， T 為膠凝槽直徑。

2. 翼片旋轉的流動型態和翼片形狀：

軸流 (Axial flow) 翼片的膠凝效果優於輻流 (Radial flow) 翼片。而以 3-Inclined flat blade turbine, Anchor impeller 和 4-Pitched blade turbine 為軸流的翼片中，3-Inclined flat blade turbine 的膠凝效率優於 4-Pitched blade turbine, 4-Pitched blade turbine 可以加裝循環管圈來改良其效果。Anchor impeller ($D/T=0.8$) 的膠凝效果與 3-Inclined flat blade turbine ($D/T=0.4 \sim 0.5$) 相近，但所需功率消耗稍大，可作為設計膠凝系統之參考。

- 六、就廢水膠凝系統裝置設計而論，攪拌級、混合時間與膠凝效果有着密切不可分的關係。低轉速所須混合時間較長，而高轉速時則較短。
- 七、膠凝槽設計放大的重要考慮因素，為幾何性相似，攪拌級、混合時間和攪拌器尖端速度等。

肆、參考文獻

1. Havas G., Sawinsky J., and Deak-A., Fekete A. "Investigation of the homogenization efficiency of various propeller agitator types" Periodica polytechnica 22(4), P. 331-344, (1978).
2. Holland F. A., and Chapman F. S. "Liquid mixing and Processing in Stirred tanks" New York (1966).
3. Hoogendoorn C. J., and Den Hartog A. P. "Model studies on mixers in the viscous

- flow region" Chemical Engineering Science 22, P. 1689-1699, (1967).
4. Thaveri A. S. "Mixing of high viscosity Newtonian and Non-Newtonian materials" Chemical Industry Development 6, P. 13-19, (1972).
 5. Keys R. O., and Hogg R. "Mixing problems in polymer flocculation" AIChE Symposium Series Vol. 75, No. 190, P. 63-72, (1978).
 6. Khang S. J., and Levenspiel Octave "New scale-up and design method for stirred agitated batch mixing vessels" Chemical Engineering Science 31, P. 569-577, (1976).
 7. Miyanami K., Yokota M., Fujiwara Y., and Aratani T. "Effect of mixing on flocculation" Industrial and Engineering Chemistry Fundamental 21, P. 132-135, (1982).
 8. Oldshue J. Y., and Mady O. B. "Flocculation performance of mixing impellers" Chemical Engineering Progress 74(8), P. 103-108, (1978).
 9. Rushton J. H., Costich E. W., and Everett H. J. "Power characteristics of mixing impellers. Part I, II" Chemical Engineering Progress 46(8), P. 395-401, 46(9), P. 467-476, (1950).
 10. Saffman, P. G., and Turner, J. S. "On the collision of drops in turbulent clouds" Journal of Fluid mechanics 1, P. 16-30, (1956).
 11. 薛少俊，中正理工學院碩士論文（民國七十年）。
 12. 薛少俊，輸送現象與其應用專題研討會專輯（1981），P. 217-232。
 13. 薛少俊，國立臺北工專化工年刊二十六期，P. 89-102。
 14. 薛少俊，華岡化工十二期，P. 63-75。

參考書籍 (10)

1. 金澤一郎著，流體混合，日本農業出版社，1978年。
2. 金澤一郎著，流體混合工學，日本農業出版社，1978年。
3. 金澤一郎著，流體混合工學，日本農業出版社，1978年。
4. 金澤一郎著，流體混合工學，日本農業出版社，1978年。
5. 金澤一郎著，流體混合工學，日本農業出版社，1978年。
6. 金澤一郎著，流體混合工學，日本農業出版社，1978年。
7. 金澤一郎著，流體混合工學，日本農業出版社，1978年。
8. 金澤一郎著，流體混合工學，日本農業出版社，1978年。
9. 金澤一郎著，流體混合工學，日本農業出版社，1978年。
10. 金澤一郎著，流體混合工學，日本農業出版社，1978年。