

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告
難濾性泥漿之固液分離—子計劃一：高壓縮性軟粒子之特性
及其薄膜分離機構之研究

Solid/Liquid Separation of Soft Particles: Sub-project 1
Characterization and Crossflow Filtration of Highly Compressible Soft Gel Slurries

計劃編號：NSC90-2214-E-002-025

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

主持人：呂維明 教授

博士後研究員：郭修伯

研究生：林育立

執行機構：台灣大學 化學工程學系

一、中文摘要：

本研究以 Lu and Hwang (1993) 提出之濾餅動態解析理論為基礎，延伸 Lu et al. (2001) 之軟粒子恆壓過濾動態解析方法，針對水凝膠粒子 Ca-alginate 泥漿之恆率過濾實驗，進行其局部濾餅性質之分析。由結果可發現，在恆率過濾試驗過程中，由於持續提升操作壓力，使得濾餅整體皆受到影響而壓縮，此與恆壓過濾僅靠近濾材部份受到高度壓縮之現象有所不同。此外，在適當的操作條件下以恆率過濾數據分析，可獲得較恆壓過濾方式更大壓力範圍之濾餅性質。

Abstract

The dynamic analysis of constant rate filtration data proposed by Lu *et al.* in 2001 was modified to analyze formation and compression of the cake during cake filtration of deformable particle slurry. Dynamic analysis results show that the skin layer next to the filter medium observed during a constant pressure filtration process for deformable particle slurry has not been observed in a constant rate filtration. Since the increasing loading of solid compressive pressure at each layer of filter cake during constant rate operation will result in a successive compression throughout the whole filter cake instead of at the first layer only. Furthermore, prediction of the characteristic values of filter cake by a CRF dynamic analysis provides a wider estimating range of operation pressure based on one set of experimental data than that obtained by CPF (constant pressure filtration) dynamic analysis process.

二、緣由與目的

在生醫工程，食品工業以及生物技術開發等產業當中，往往必須處理到含高壓縮性軟粒子成分的產品。由於此類物質具有變形壓縮之特性，因此在進行分離處理時，容易在濾材表面形成一緻密的阻力層或阻塞濾材孔道，導致濾速減少及操作效率降低等問題。

為求減少上述負面的效應影響，以固定濾速的恆率過濾取代固定壓力的恆壓過濾之操作，為較理想之方式。在適當的操作條件(如濾速)下，恆率過濾以逐步增壓的作法，可避免如同在恆壓過濾試驗初期即造成濾材表面嚴重阻塞之現象，並可由於壓力的持續增加而獲得大範圍壓力分佈之濾餅性質。

有鑑於此，本研究針對軟粒子恆率過濾數據進行動態解析，以數學模擬的方式，探討濾餅內部之局部和平均性質，以期瞭解軟粒子在恆率過濾試驗中之行為模式。

三、研究方法

1. 恆率過濾之動態解析方式

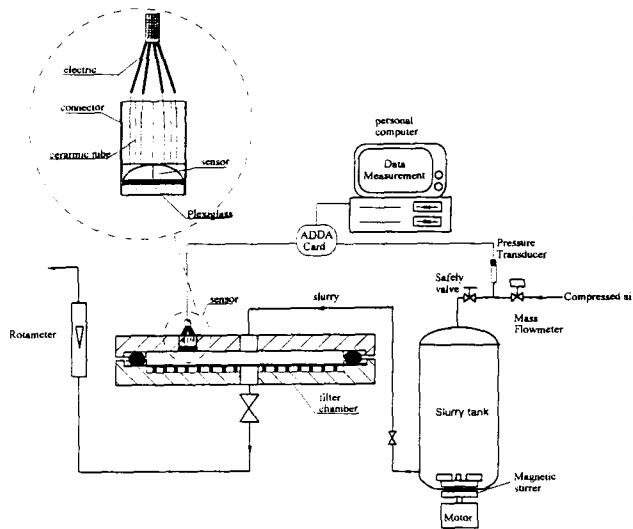
本研究以 Lu 和 Hwang (1993) 提出之濾餅動態解析理論為基礎，延伸 Tung (1998) 之軟粒子恆壓過濾動態解析方法至不可壓縮軟粒子之恆率過濾實驗，進行其局部濾餅性質之分析。關於詳細之數學模式推導，在 Lu et al. (2001) 的文獻當中，有詳盡的說明，在此不多加贅述。

在模擬必須之初始實驗數據方面，恆率過濾數據之動態解析需以實驗壓力 P 對時間 t 之關係、濾餅最終厚度 L_c 及濾餅表面孔隙度 ϵ_i ，作為初始之輸入資料。

2. 實驗裝置及步驟

本實驗之目的為獲得可變形凝膠粒子在恆率過濾實驗當中濾餅之局部性質。實驗之材料為不同強度之 Ca-alginate 粒子泥漿，粒子強度為 0.5 wt% 及 1.0 wt% Na-alginate 含量，平均粒徑約為 $40 \mu\text{m}$ 。實驗裝置圖如圖一所示。

由圖一，不銹鋼槽內盛入所需之泥漿；在高壓空氣進口端裝有一壓力傳送器，其壓力隨時間變化所造成之電壓改變，經由 AD/DA (類比-數位) 轉換器輸入電腦記錄之。在泥漿槽的出口端外接一濾室，濾室內裝有一紅外線感測器 (GP2L22, Sharp Co., Japan)，可即時記錄濾餅厚度變化；而系統壓力則由高壓空氣入口端之控制閥調控。



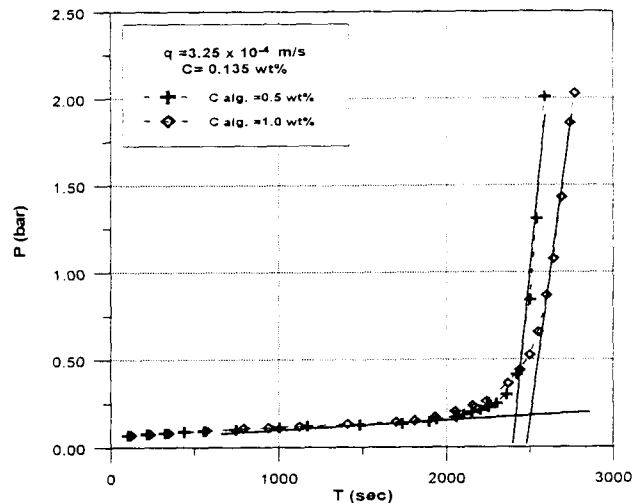
圖一 恆率過濾實驗裝置圖

四、結果與討論

(1) 系統壓力變化

圖二為恆率過濾實驗之系統壓力隨時間變化關係圖。在實驗初期階段，由於濾餅的壓縮現象並不明顯，僅為粒子堆積之行為，因此濾液流動的阻力不大，使得系統的操作壓力增加得相當緩慢。但當時間到達 2100 秒附近時，系統壓力逐步大幅地增加，在相當於整個操作時間的 1/4~1/5 間隔內，兩者增加之系統壓力皆已迅速地攀升至前期平緩階段的近 8~10 倍大小，此現象明顯地是由於濾餅在累積一定的固體壓縮壓力之後，粒子逐漸產生明顯之變形行為，造成濾餅底部壓縮緻密化的現象增加，直接地使濾液通量減少，因而必須快速地提升壓力使濾速保持固定。此外，在圖中

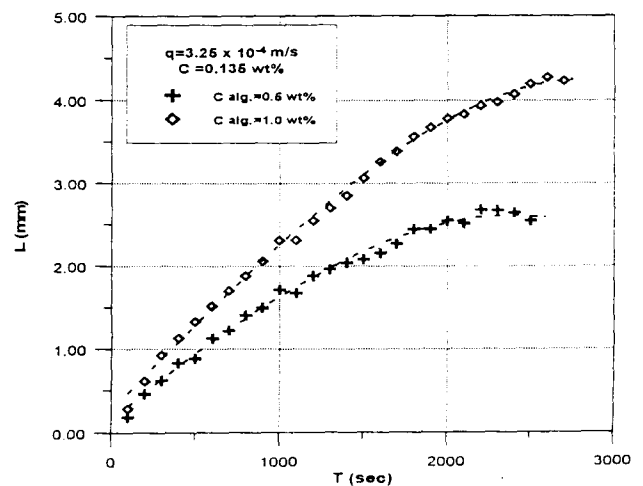
也可發現粒子強度對壓力變化的影響。強度低的 0.5 wt% 粒子濾餅因抗壓性較差，因此壓力陡升現象會比 1.0 wt% 粒子濾餅早發生。此亦可從 2500 秒附近時，0.5 wt% 者之所需系統壓力約為 1.0 wt% 者的三倍瞭解之。



圖二 操作壓力對時間變化關係圖

(2) 濾餅厚度之成長

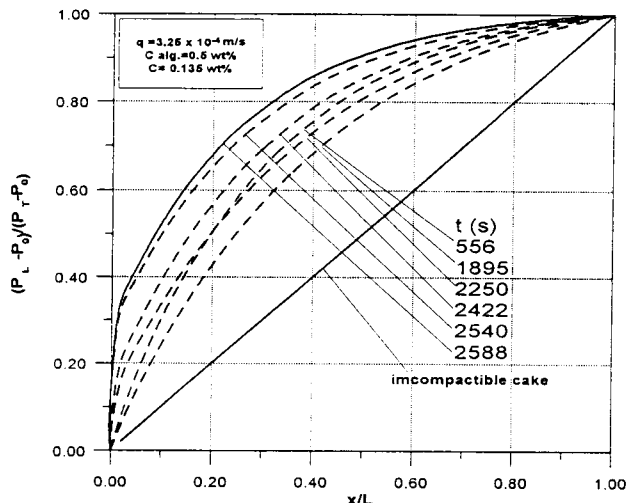
圖三為濾餅厚度隨時間變化之關係圖。隨著時間的增加，壓力隨之增大，因此對濾餅的壓縮壓力便逐漸增加，進而限制濾餅厚度的成長。對於強度較弱之 0.5 wt% 粒子濾餅，由於本身抗壓力較小，因此在 2300 秒附近時，其厚度不增反減，濾餅明顯地產生壓縮行為；而強度較強的 1.0 wt% 粒子濾餅雖抗壓力較大，但其厚度成長速率也隨著壓力的增加而逐漸減緩，甚至在實驗結束前 100 秒左右，亦發生了厚度減少的壓縮現象。



圖三 濾餅厚度與時間關係圖

(3) 濾餅內部水力壓力分佈

利用上述之 $P-t$ 、厚度 L_c 及表面孔隙度 ε_i 值，可進行以下之模擬分析。圖四為 0.5wt% 強度之 Ca-alginate 泥漿在流速 $q = 3.25 \times 10^{-4}$ 條件下，所成濾餅內部之水力壓力 (hydraulic pressure) 分佈圖。圖中之對角線表不可壓密濾餅之壓力分佈。對不可壓密濾餅而言，粒子在形成濾餅後，並無重排、變形或壓縮的現象；然可變形軟粒子在受壓後，會產生上述之種種現象，因此其行為會與不可壓密濾餅者有相當大的差異。此外由圖中可發現，隨著操作壓力的增加，其分佈偏離的現象愈明顯，意即濾餅底部在系統壓力漸增之時，因相對壓縮度較高，造成了水力壓力大幅減低的現象。例如在最終時間點 2588 秒時，底部 20% 濾餅厚度的範圍內，即消耗了整體壓力的 70% 大小。



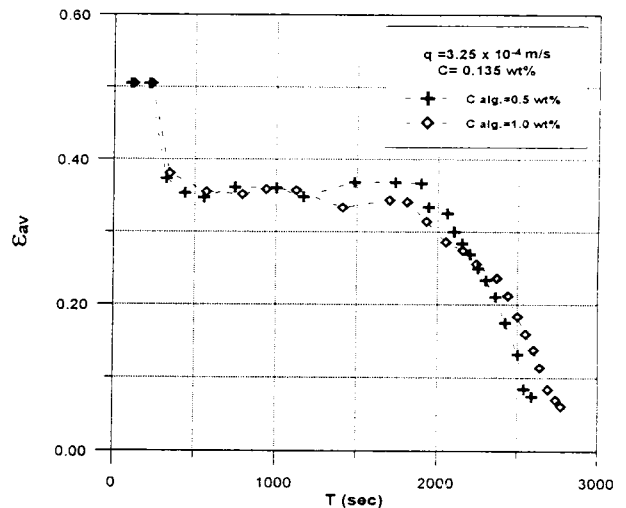
圖四 濾餅內部水力壓力分佈圖

(4) 平均孔隙度與過濾比阻變化

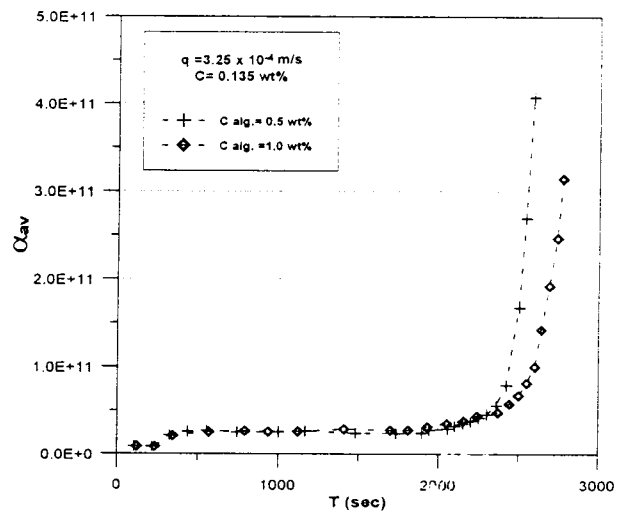
圖五表濾餅之平均孔隙度對時間之變化。在操作時間達 2000 秒附近，意即系統壓力逐漸加速上升的階段時，可發現平均孔隙度減少的趨勢，該行為很明顯地是因壓力的增加，造成濾餅壓縮變形而導致孔隙度減少的現象。此趨勢和 Lu et al.(2001) 之恆壓過濾動態解析結果迥異。相較於平均孔隙度分佈，圖六的平均過濾比阻變化，同樣是上述現象所導致，在壓力逐漸上升的同時，阻力也隨之增大。

在平均孔隙度與過濾比阻劇烈變動的階段之前，兩者分佈皆呈現平緩但有上下震盪之現象。其主要原因為，在前期低壓力的操作過

程中，粒子受壓變形的情况並不明顯，故即使逐漸累積新的濾餅層，在靠近濾材底部的區域並未產生大幅度壓縮變形，而使平均孔隙度下降。因此整體之平均孔隙度在這種不明顯地粒子壓縮、新的較鬆散濾餅層形成之相互作用下，造成平均孔隙度值的震盪情形，此現象必須等到壓力增至可使濾餅開始明顯壓縮之後，單一趨勢才會明顯。同理在平均過濾比阻方面，亦可作如此解釋。



圖五 平均孔隙度對時間變化關係圖



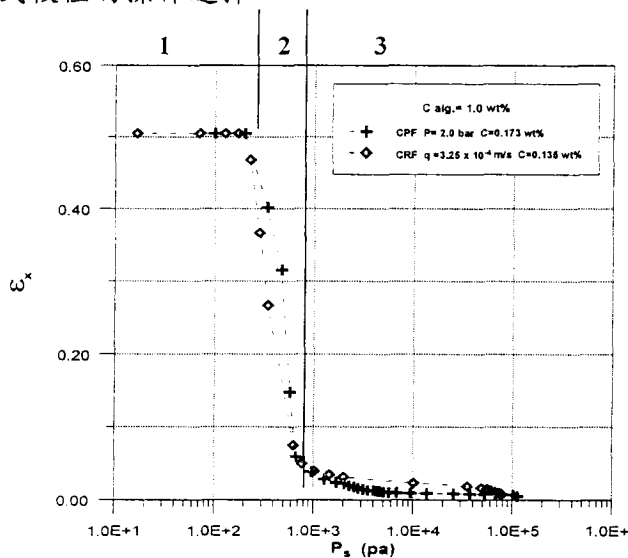
圖六 平均過濾比阻對時間變化關係圖

(5) 局部孔隙度對固體壓縮壓力之關係

對同一成分之濾餅而言，無論採用恆壓 (CPF) 或恆率 (CRF) 試驗方式，其孔隙度對固體壓縮壓力間的關係應為一致，兩者間的比較也可印證此模擬結果的準確性。圖七為利用此兩種試驗方法所得之濾餅內部 $\varepsilon - P_s$ 分佈比較

圖。由圖中可發現兩者間的一致性非常高，並且其趨勢呈現三種階段性變化，第一段為靠近濾餅表面的低壓階段，孔隙度變化甚小；其次在進入濾餅內部時，固體壓縮壓力漸增，也使得孔隙度急遽下降；在第三階段時，高固體壓縮壓力也使得濾餅的局部孔隙度已經壓縮至非常緻密的情況。

由於孔隙度對固體壓縮壓力的關係，為獲得濾餅特性值之方法，故以恆率過濾的操作方式，即可一次取得較廣泛壓力變化範圍之數據。相較於恆壓過濾在一次實驗中僅能取得單一壓力下的濾性值，恆率過濾的效率更高，且在適當的操作條件下，能避免過濾初期濾材嚴重阻塞而導致濾速驟降的現象，因此為恆率模式較佳的操作選擇。



圖七 CPF 與 CRF 之局部孔隙度對固體壓縮壓力關係比較圖

五、結論

本研究延伸 Lu et al.(2001)的軟粒子動態解析方式至恆率過濾試驗。其結果可發現，因系統壓力持續改變，與恆壓過濾的操作模式不同，兩者所成之濾餅性質迥異。在恆壓過濾方面，濾餅受力的影響區域主要是集中在底部靠近濾材的部份；而恆率過濾雖亦如此，但其受壓的整體性更為明顯，意即濾餅各部皆受到操作壓力的作用。此外，使用恆率過濾，可在一次試驗中獲得大範圍的壓力變化而推計出各壓力下之濾性值；而若能選擇適當操作條件，也可避免過濾初期對濾材的嚴重阻塞現象。

六、計畫成果自評

針對具高壓縮性之軟粒子，本研究以動態解析的方式模擬濾餅成長及推計其濾性值，是為相當簡便且可靠的方法。而由於現階段的處理對象僅為不可壓縮軟粒子，故未來將逐步擴展至可壓縮粒子的領域，以更加深其實用的範圍及價值。

七、參考文獻

- Happel, J.; Brenner, H. *Low Reynolds Number Hydrodynamics*, 2nd Ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1965, 395.
- Lu, W. M. and K. J. Hwang, "Mechanism of Cake Formation in Constant Pressure Filtrations," *Separa. Technol.*, 1993, 3, 122~132.
- Lu, W. M.; Huang, Y. P.; Hwang, K. J. *Dynamic Analysis on Constant Rate Filtration*. *J. Chem. Eng. Japan* 1998, 31(6), 969-976.
- Lu, W. M.; Tung, K. L.; Hung, S. M.; Shiau, J. S.; Hwang, K. J. *Constant Pressure Filtration of Mono-dispersed Deformable particle slurries*. *Sep. Sci. Technol.* 2001, 36(11), 2355-2383.
- Lu, W. M.; Tung, K. L.; Hung, S. M.; Shiau, J. S.; Hwang, K. J. *Compression of Deformable Gel Particles*. *Powder Technology* 2001, 116, 1-12.
- Tiller, F. M, "The Role of Porosity in Filtration II: Analysis Equations for Constant Rate Filtration," *Chem. Eng. Progr.* 1955, 53, 280-290.
- Tiller, F. M. *The Role of Porosity in Filtration I: Numerical Methods for Constant Rate and Constant Pressure Filtration Based on Kozeny's Law*. *Chem. Eng. Progr.* 1953, 49(9), 467-479.
- Tung, K. L., S. Wang, W. M. Lu and C. H. Pan, *In Situ Measurement of Cake Thickness Distribution by a Photointerrupt Sensor*. *J. Membrane Sci.*, 2001, 190(1), 57-67