中原學報第廿九卷第一期／民國九十年三月／第21-30頁

電場濾餅過濾機構之分析

莊 清 榮　　曾 盈 崇

中原大學化工系
台灣省中壢市普仁22號

(Received: November 8, 2000; Accepted: March 29, 2001)

摘 要

電場過濾迄今未被工業界重視的原因之一是對其過濾機構瞭解仍很有限。爲究明電泳與電滲透於該過濾中所扮演的角色，本研究先進行恆機械壓差過濾實驗，分析電場強度對濾速、過濾比阻及孔隙度等的影響，並建立電場過濾方程式，其所預估之濾速在定量上接近於實驗結果。

除由實驗量測填充床與濾餅之電滲透壓外，本文亦建立填充床電滲透之理論模式，其預估之電滲透速率與實驗結果甚一致。經由濾餅內電滲透模擬，顯示在濾餅表層處電滲透壓甚小，而在接近濾材處（堆積最密）則約隨距離呈線性增加。經比較濾餅與填充床之電滲透結果，發現濾餅之電滲透速率控制於近濾材最爲緻密濾餅層之電滲透作用。

關鍵詞：濾餅過濾，電場，電泳，電滲透。

壹、緒 論

在化工、食品及環工等程序中，懸浮液之稠化及泥漿之過濾或脫水等固液分離操作常是無法避免的，特別是近年來生物技術、材料科學及半導體工業等的蓬勃發展，更突顯了細微顆粒固液分離技術之重要性。在整體固液分離程序中，過濾是最常被應用的單元操作，對熱或化學敏感的物質而言，過濾更是不可或缺的分離方法。

由於懸浮微粒常帶有電荷，在過濾操作中若外加電場作用，如圖1所示，則除了粒子因電泳(electrophoresis)遠離濾面而減少濾餅成長外，同時濾餅及濾材內之電滲透(electroosmosis)亦常可促進孔道內流體流動，此兩作用相加成可有效提高濾速，當過濾操作至粒子填滿濾室，此時完全以電滲透爲主，又稱電滲透脫水(electroosmotic dewatering)。美國Dorr-Oliver公司有商業化之電場過濾器，進行高嶺土泥漿及PVC粒子懸浮液等之固液分離[1, 3]，結果指出，不僅不需添加化學混凝劑，且最終固體含量可達78~82%，其能量損耗僅爲以熱處理去除水份的3~10%，故相當適用於細微粒子及熱敏感物質之分離。

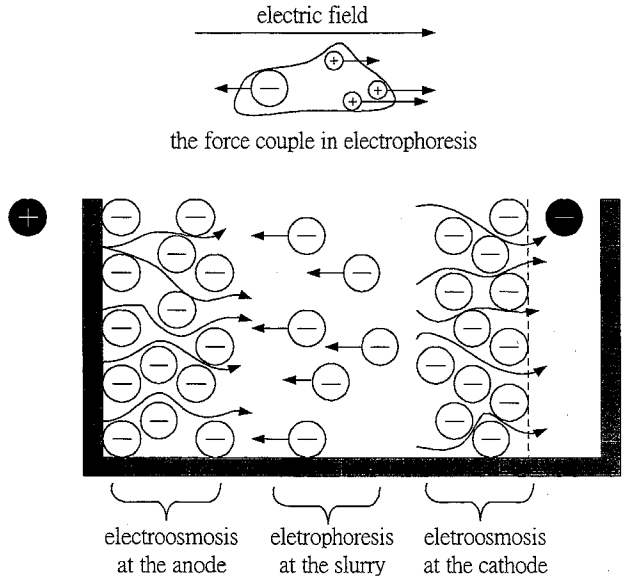


圖1　電場過濾之電動現象

以電場促進固液分離之研究與應用沿起於1970年代，但至今卻一直未被工業界廣泛重視，原因除

了電力成本的考量及工程應用實例數據缺乏外，對其分離機構之了解有限亦是主因之一。近年來，隨著微細粒子精密分離的日越重要，及環保要求的提高，難濾污泥之過濾脫水問題急需解決，以電場作用促進固液分離之研究主題再度被重視。

關於以電場促進濾餅過濾之研究，早期Moulik等[1967、1971]曾以電場濾餅過濾來分離皂土(bentonite)懸浮液，說明了電場作用確可有效提高濾速，當電場提高至使粒子電泳速度與過濾初始濾速(僅濾材阻力作用)相等時，則將無濾餅形成，此電場強度稱之爲臨界電場(critical electric field)，他們以傳統恆壓過濾方程式爲基礎，假設過濾過程中濾餅及濾材的電滲透流率皆各爲定值，然後對濾液量及濾材阻力作修正，而得電場作用下之過濾方程式。

對於電場濾餅過濾，Yukawa等[1976, 1980]有較完整之理論及實驗探討，他們考慮電泳對濾餅成長的影響，同時將濾餅及濾材的電滲透壓併入傳統恆壓過濾之總有效壓差中，以修正Ruth's之批式恆壓過濾方程式，在他們分析中，於電場強度固定的條件下，假設每單位體積濾液所附著之粒子量維持定值，但這與實際情況是不合的；另一方面，他們也進行電場濾餅過濾實驗，其結果顯示，總有效壓差隨著電場強度增加而提高，且大部份之濾餅平均過濾比阻有隨電場增加而下降的趨勢。

後來，Iritani等[1992]類似前述Yukawa等之處理方法，利用外加電場之垂直向超過濾(dead-end electro-ultrafiltration)進行牛血清蛋白(BSA)溶液之分離，他們除了實驗探討蛋白濃度、溶液pH值及所施加的壓差等對電場過濾所造成的影響外，同時亦考慮電泳及電滲透的影響，而提出一理論模式來描述其過濾行爲，結果指出，穩定濾速與電場強度成正比關係。爲節省能量消耗，Bowen和Ahmad(1997)則以間歇性供給電壓方式進行電場濾餅過濾，說明電場強度及供給時間間隔等對濾速的影響。最近，Heikkinen等[2000]實驗探討電場與超音波結合之固液分離操作，他們先以電場促進二氧化鈦懸浮粒子之過濾，接著以超音波促進該濾餅脫水，指出此操作對傳統過濾不易處理之含微細粒子懸浮液的分離特別有潛力。

綜合上述文獻可知，有關電場濾餅過濾之探討，至目前大多爲工程應用之實驗研究，或以粒子電泳速度及濾餅電滲透壓等兩因素引入傳統過濾理論中，再經由實驗定性說明其濾性變化，較少由學理上定量說明濾餅內電滲透及電場作用下之濾速變化，而這些現象之究明除可進一步了解電場濾餅過濾外，對電滲透脫水機構之了解亦將有甚大助益。有鑑於此，本研究首先建立電場濾餅過濾方程式，並進行恆機械壓差電場過濾實驗，量測濾速變化，估算過濾比阻及平均孔隙度，並分析總過濾壓差中電滲透壓所佔之比例；另一方面，亦進行均一孔隙度之粒子床及有孔隙度變化之濾餅內的電滲透理論與實驗分析，以了解濾餅電滲透行爲。

貳、理論背景

一、過濾方程式

爲抑制粒子附著於濾材，電場過濾之電極皆依迫使粒子電泳偏離濾面方式而排列，亦即濾液流動與粒子電泳互爲相反方向。若濾室內粒子之重力沉降效應可忽略（對膠體粒子可適用），稀濃度懸浮液之濾餅成長速率可表示爲

$$\frac{dw_c}{dt} = (q - v_e)C_o \tag{1}$$

其中q爲濾速，C_o爲懸浮粒子重量濃度。此式僅適於低於臨界電場之條件，因超過臨界電場即無粒子附著。由於電泳速度正比於電場強度，E，亦即$v_e=k_eE$，其中k_e爲粒子電泳移動度(electrophoretic mobility)，配合$q=dV/Adt$之定義（其中V爲濾液體積，A爲過濾面積），積分上式可得

$$w_c = C_o(\frac{V}{A} - k_eEt) \tag{2}$$

在以往文獻中，常將濾餅與濾材之電滲透流所對應之電滲透壓，P_e，併入傳統恆壓過濾之總有效壓差，ΔP，中，亦即

$$\Delta P=\Delta P_h+P_e \tag{3}$$

其中ΔP_h(hydraulic pressure drop)爲外界所提供之機械壓差。將上列兩式代入過濾基本式($\Delta P=\mu q(\alpha_{av}w_c+R_m)$)，經整理可得

$$\frac{dt}{dV} = K_1 V + K_2 - K_3 t \tag{4}$$

其中$K_1 = \frac{\mu \alpha_{av} C_o}{A^2 \Delta P}$，$K_2 = \frac{\mu R_m}{A \Delta P}$，$K_3 = \frac{\mu \alpha_{av} C_o k_e E}{A \Delta P}$。上式中，常數$K_1$及$K_2$與一般濾餅過濾基本式完全相同，分別爲濾餅與濾材阻力項，而K_3則是考量電泳減少濾餅成長所引入之係數。

在電場強度固定的條件下，濾餅之電滲透壓會約隨濾餅量而線性增大，但實驗數據顯示，除非在甚低機械壓差或濾餅較厚的條件下，濾餅之電滲透壓均僅佔總壓差之甚小比率，故在恆機械壓差下，總有效壓差常可以定值視之，積分上式可得操作時間與濾液收集量之關係爲

$$t = \frac{K_1}{K_3} V + \left(\frac{K_2}{K_3} - \frac{K_1}{K_3^2} \right) (1 - e^{-K_3 V}) \tag{5}$$

當常數K_3甚小時，把上式中之$e^{-K_3 V}$項藉由Taylor系列展開，其結果與傳統過濾方程($t=(K_1/2)V^2+K_2 V$)相同。

二、電滲透方程式

粒子床內流體流動常由延伸毛細管之流動模式來分析，當毛細管內電雙層(electric double layer)厚度不可忽略時，在$ez\zeta/kT<<1$條件下（其中e爲基本電荷，z爲溶液中離子價數，ζ爲壁面之界達電位(zeta potential)，k爲波茲曼常數(Boltzmann constant)，T爲絕對溫度），把電場作用力引入牛頓流體運動方程式中，Kobayashi等[1979a]曾依據Rice等[1965]之分析，提出毛細管內之平均流速爲

$$\overline{v}_z = \frac{D\zeta E_z}{\mu} \left[\frac{1}{\alpha\left(\frac{d}{2} - \delta\right)/2} \times \frac{I_1\left[\alpha\left(\frac{d}{2} - \delta\right)\right]}{I_o\left[\alpha\left(\frac{d}{2} - \delta\right)\right]} - 1 \right] + \frac{(d-2\delta)^2}{32\mu}\left(-\frac{dP}{dz}\right) \tag{6}$$

此處D爲溶液電容率，E_z爲軸向之電場強度，d爲管徑，δ爲固定層厚度(thickness of Stern layer)，$d/2-\delta$爲流體流動半徑，$\alpha = \sqrt{\frac{2\overline{n}}{DkT}} eZ$，$\overline{n}$爲離子平均濃度，$I_o$和$I_1$分別爲第一類之零階與一階之修正貝索函數(zero-order and first order modified Bessel function of first kind)。因δ之數量級約僅爲1nm，可視爲遠小於管徑d，故在下列之分析中皆忽略δ對流體流動半徑之影響。上式中右邊第二項是來自機械壓差之流速，當壓力梯度$\frac{dP}{dz}=0$時，所得之流速即爲電滲透流速。反之，當施一反向壓力差使管內之淨流率爲零時，該壓力差稱之電滲透壓(electroosmotic pressure)，P_e。

粒子床內流體流動孔道之相當直徑常以4倍的水力半徑來表示，若顆粒粒徑爲D_p，球型度(sphericity)爲Φ_S，填充床孔隙度爲ε，則相當直徑$d = \frac{2}{3}\left(\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}\right)\Phi_S D_P$，類似Kobayashi等[1979b]考慮流動孔道形狀及彎曲度，本文中引入Happle與Brenner[1965]所解析之Kozeny常數，延伸(6)式可得粒子床之電滲透流速與電滲透壓的關係式分別爲：

$$q_e = \frac{D\zeta E_z}{K_p \mu}(\beta - 1) \tag{7}$$

$$\frac{dp_e}{dz} = \frac{32 D\zeta E_z}{d^2}(\beta - 1) \tag{8}$$

其中$\beta = \frac{4}{\alpha d}\frac{I_1(\alpha d/2)}{I_o(\alpha d/2)}$，

$$K_p = \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)\left[\ln\left(\frac{1}{1-\varepsilon}\right) - \frac{1-(1-\varepsilon)^2}{1+(1-\varepsilon)^2}\right]}$$

對孔隙度均一之填充粒子床，電場強度亦均一，故$dp_e/dz=p_e/L$。濾餅之異於一般填充床，在於前者內部常有明顯的孔隙度分佈，將導致局部電阻差異，於濾餅兩端施加電壓時，濾餅內將呈非均一電場分佈。電場作用下，通過毛細管之電流爲來自溶液及管壁面兩電導之和[6]，後者於甚小孔徑時方有明顯作用且甚難決定，爲簡化分析，本文中忽略壁面電導作用，則電場強度與電流I之關係爲

$$E_z = \frac{dV'}{dz} = \frac{1}{k_b \varepsilon_z} \tag{9}$$

此處V'爲電壓，k_b爲溶液之電導，ε_z爲局部孔隙度。關於濾餅孔隙度分佈，本文中以下式表示[13]：

$$\varepsilon_z = \varepsilon_o\left(1 - \frac{z}{L}\right)^n, \quad 0 \le z \le z' \tag{10}$$

$$\varepsilon_z=\varepsilon_i,\ z'\le z\le L; \tag{11}$$

其中 L 爲濾餅厚度，z 爲以濾餅底部爲起點之軸向座標，ε_o爲濾餅底部(粒子堆積最密處)之孔隙度。上式意謂於濾餅上層處($z\ge z'$)，粒子間之壓縮壓力小於某一極值時，孔隙度爲定值；$\varepsilon_z=\varepsilon_i$。將此$\varepsilon_z$分佈代入(9)式中，經積分可得局部電場強度與平均電場強度及局部孔隙度等之關係爲

$$E_z=\frac{1}{k_b\varepsilon_z}=\frac{(V_o-V_L)/L}{\left(\frac{1}{\varepsilon_o(1-n)}-\frac{n}{1-n}\frac{1}{\varepsilon_i}\left(1-\frac{z'}{L}\right)\right)\varepsilon_z} \tag{12}$$

其中V_o–V_L爲濾餅兩端點之電壓降，$(V_o–V_L)/L$即爲通過濾餅之平均電場強度。把(10)~(12)式之孔隙度與電場分佈代入(8)式中，即可解得濾餅內電滲透壓。

參、實驗設備及步驟

爲了解電場作用對濾餅過濾之影響及探討濾餅內之電滲透壓，本研究之實驗分爲兩大部分：(一)恆機械壓差電場過濾實驗，量測濾速變化，決定過濾比阻及平均孔隙度；（二）類似壓縮透過槽（compression permeability cell；簡稱C.P.Cell）操作，以形成某特定孔隙度之粒子床，接著進行其電滲透量測。

一、恆壓過濾系統

本實驗所設計之過濾系統如圖2所示，過濾器主體由上下兩段壓克力圓管所組成，上壓克力管（內徑=49mm）構成濾室，而下壓克力管內則有負電極室(electrode cell)及濾液排出口，在該處抽眞空以維持過濾壓差，於眞空泵處裝有水銀壓差計以量測壓差。上電極由多孔之不鏽鋼板所構成，其孔徑約爲2 mm，以讓懸浮顆粒及電極板上產生的氣泡等較易通過；而下電極室則由不鏽鋼金屬圓盤及一壓克力槽所組成，並在電極室上覆蓋一電透析薄膜，以避免電極所產生之氣泡浮昇累積在濾面下而影響電場。本實驗選用聚甲基丙烯酸甲酯(polymethyl methacrylate, PMMA)粉體以配製懸浮液，該粉體由日本Soken公司製造，球型度近1.0，

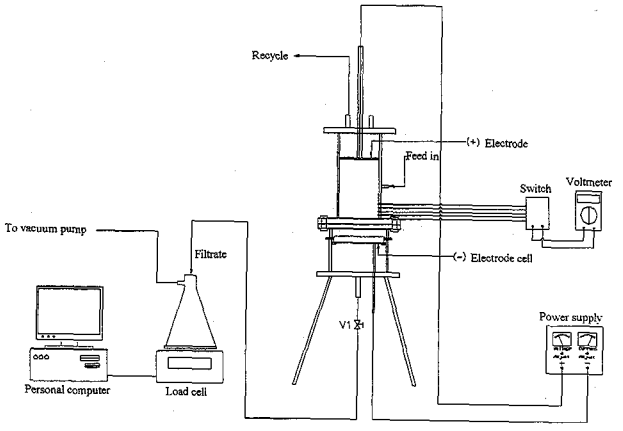


圖2　電場濾餅過濾實驗裝置

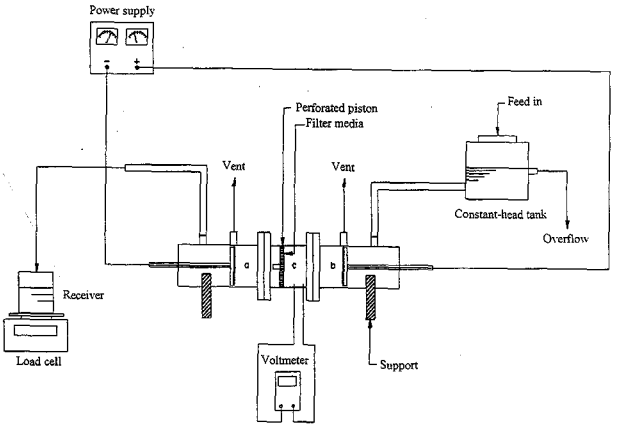


圖3　粒子床電滲透量測系統

其體積累積分率50%之粒徑（或稱中間粒徑，D50）爲0.65μm，而D_{90}及D_{10}分別爲1.09及0.4μm，在pH=6.5下，該懸浮粒子之界達電位爲-40mV。所選用之濾材爲Pall公司之微過濾膜，材質爲nylon 66，cut off孔徑爲0.2μm

二、粒子床電滲透量測系統

此部份裝置爲水平放置，如圖3所示以較易排除電極水解所產生之氣體。主體由三段內徑40mm之壓克力圓管所組成，左側(a)及右側(b)之電極室互相對稱，中央段(b)則爲填充粒子床，此段構造類似C.P.Cell，粒子填充後，推壓多孔活塞可得到孔隙度均一之粒子床。當施加電壓於兩電極板上時，由

探針量測填充粒子床內之電場強度，電滲透液則由電動天平上之燒杯收集。

由於前節過濾所用之PMMA粒徑小且與液體之密度甚近，較不易形成足夠厚度之粒子床以有效量測電場強度，故本實驗另選用試藥級高嶺土（D_{50}=6.3μm，ζ=−33mV，球型度≈0.55）配製懸浮液。

肆、結果與討論

一、電場強度對濾餅過濾的影響

(一) 對濾速的影響

圖 4 所示爲重量濃度 2% 之 PMMA 懸浮液，於 1.33×10^4 N/m^2（即 10 cmHg）之機械壓差下，電場過濾之 dt/dV 對 V 作圖。在電場過濾中，若欲使粒子完全不附著於濾材，其臨界條件爲提高電場強度，致使粒子電泳速度 v_e 恰與初始濾速（僅濾材阻力），q_m，相等，本實驗所用之 MF 膜於潔淨濾面時之阻力，R_m，爲 5×10^{10} (1/m)，在此機械壓差下，q_m 爲 2.66×10^{-4} m/sec，當以 $v_e=q_m$ 來決定臨界電場強度，E_c，則 E_c 需達 149.63 V/cm，由於高電場操作時，下電極室內電解所產生之大量氣體易使電導阻力大增，不利長時間操作，故本文中多以低電場 E=6.5 及 13 V/cm 兩組條件爲主。由此圖可看出，在沒有電場作用下，於這 50 分鐘之操作過程中，dt/dV 與 V 皆約成直線關係，即其濾速仍持續衰減；反之，若施以一外加電場伴隨過濾操作，粒子易藉電泳作用遠離濾面，其濾速很快便趨於一定值，如於 E=6.5 V/cm 及 E=13 V/cm 時，約各經 5 及 3 分鐘操作後，即趨於穩定濾速，各約爲 4.5×10^{-5} 及 8.8×10^{-5} m/sec，這亦表示電場強度提高一倍，其穩定濾速亦約增加一倍，亦即在穩定濾速下，粒子不再附著，此時偏離濾面之粒子電泳速度應與濾速相等。圖 5 爲機械壓差增爲 5.33×10^4 N/m^2（即 40cmHg）時之濾速變化，圖中 E=13 V/cm 條件下僅有操作 14 分鐘之數據，乃是於下電極室抽較高眞空度時，電解產生之少量氣體即佔了電極室大部份之體積，而限制了定電場強度之維持。（若實驗改成正壓操作或電極室有電解液循環以去除氣泡，應可克服此限制）。如同前述 $\Delta P_h=1.33\times10^4$ N/m^2 之結果，此圖亦

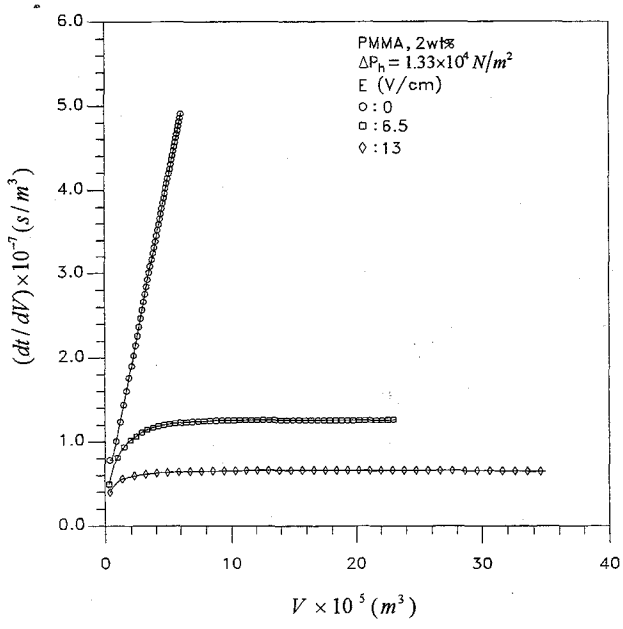


圖 4　電場強度對濾速變化之影響($\Delta P_h=1.33\times10^4$ N/m^2, conc.=2wt%)

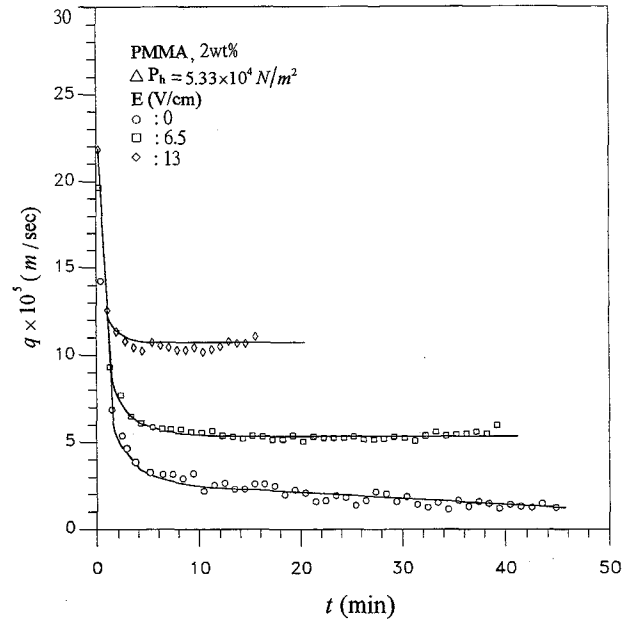


圖 5　電場強度對濾速變化之影響($\Delta P_h=5.33\times10^4$ N/m^2, conc.=2wt%)

顯示電場強度與穩定濾速約成正比關係。

當濾餅之平均過濾比阻及電滲透壓已知（其實驗決定方法於下節中有說明），由電場濾餅過濾方

程式（(4) 式）所預估之 dt/dV 與 V 的關係如圖 6 中實線所示，圖中亦列出實驗結果以相比較，顯示在機械壓差爲 40cmHg 時，預估值與實驗數據甚爲接近，在較低壓差時有較明顯差距，造成此差異的原因，是爲簡化計算，理論預估時過濾過程中之總有效壓差以定值視之，這對低機械壓差其電滲透壓佔總壓差有明顯比率時與實際情況會有所誤差。

前述皆是粒子濃度2wt%之結果，在此濃度下，經 30-50 分鐘操作後，發現濾餅表層有少許塊狀粒子團附著，此現象於較大電場操作時更是明顯，這應是電泳作用附著於上電極板之粒子集結後，因重力而剝落沉降所致，將導致濾餅量較無法有效量測。爲減少此效應，及了解懸浮液濃度變化時之電場濾餅過濾特性，本研究亦進行0.2wt%懸浮液之過濾實驗，其結果如圖 7 所示，顯示對此稀懸浮液，初始濾速較大時，粒子電泳作用對濾速的影響並不明顯，此現象在較大機械壓差時更明顯。

(二) 電場強度對濾餅平均過濾比阻及平均孔隙度的影響

傳統恆壓濾餅過濾常以 dt/dV 對 V 作圖的直線斜率推求其平均過濾比阻，但於電場濾餅過濾中，其 dt/dV 並非一直線（見(4)式或圖 4 及 7 所示），且必須考慮電場作用下，其有效壓差除來自外界機械壓差 ΔP_h 外，尚需考慮濾材及濾餅之電滲透壓，p_e，故在決定過濾比阻之前，應先量測或預估電滲透壓值。本研究中，把潔淨的濾膜浸置於 PMMA 懸浮液，於沒有機械壓差作用下，量測膜電滲透流率，q_{me}，其值與所施加之電場強度成正比。假設濾材電荷特性不隨過濾而變化，利用此 q_{me} 配合濾餅過濾實驗後所測得之濾材阻力 R_m，由 $P_{me}=\mu q_{me}R_m$ 之定義，可求得膜的電滲透壓 P_{me}，其值如表一所示。

至於濾餅之電滲透流率，其決定方式則係當過濾進行至濾速趨於一穩定值後，關掉電場，此時濾速瞬間下降，典型結果如圖 8 所示，此下降之濾速即爲濾材及濾餅兩者電滲透流率之和，經扣除前述之濾材的電滲透流率後，即可得濾餅之電滲透流率，q_{ce}，其值與電場強度約成正比關係。濾餅之電滲透壓 $P_{ce}=\mu q_{ce}\alpha_{av}w_c$，由過濾基本式：$\Delta P=\mu q(\alpha_{av}w_c+R_m)$及總壓差關係式：$\Delta P=\Delta P_h+P_e$，其中 $P_e=P_{me}+P_{ce}$，可得

$$\Delta P_h+\mu(q_{ce}\alpha_{av}w_c+q_{me}R_m)=\mu q(\alpha_{av}w_c+R_m) \qquad (13)$$

由實驗所得之 q_{me} 及 q_{ce}，配合濾餅過濾穩定濾

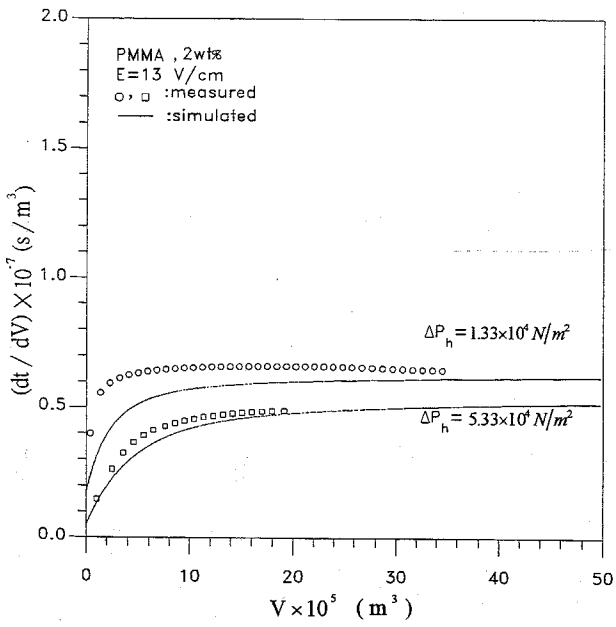


圖 6　濾速變化模擬與實驗值之比較

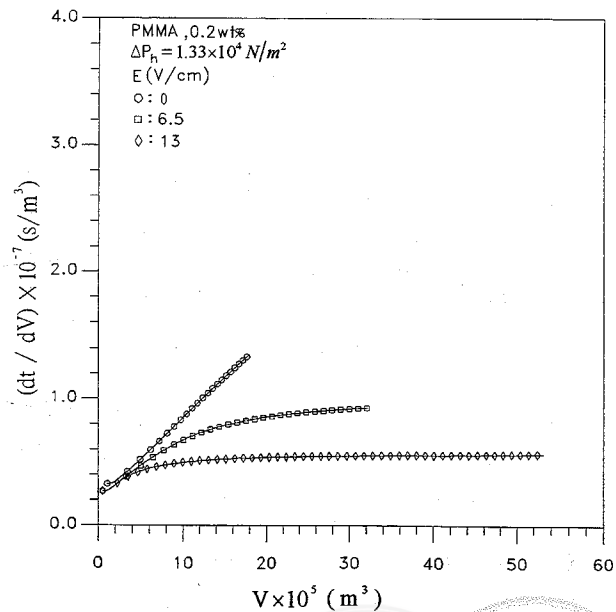


圖 7　電場強度對濾速變化之影響(ΔP_h=1.33×10⁴ N/m², conc.=0.2wt%)

表一　PMMA 懸浮液電場過濾擬穩態時之濾餅與濾材電滲透壓

PMMA Concentration (wt%)	ΔP_h (N/m^2)	P_{me}(N/m^2)		P_{ce}(N/m^2)	
		E=6.5V/cm	13V/cm	6.5V/cm	13V/cm
0.2	13333	1202.6	2713.3	188.7	188.1
0.2	53332	1124.1	2521.3	854.1	930.5
2.0	13333	1447.5	2978.5	230.5	206.7
2.0	53332	1419.4	2846.1	923.9	903.3

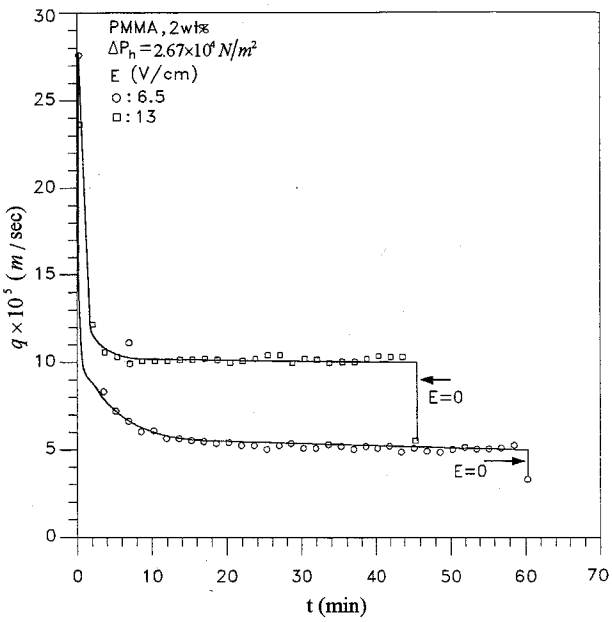


圖 8　電場過濾中斷電場之瞬時濾速變化

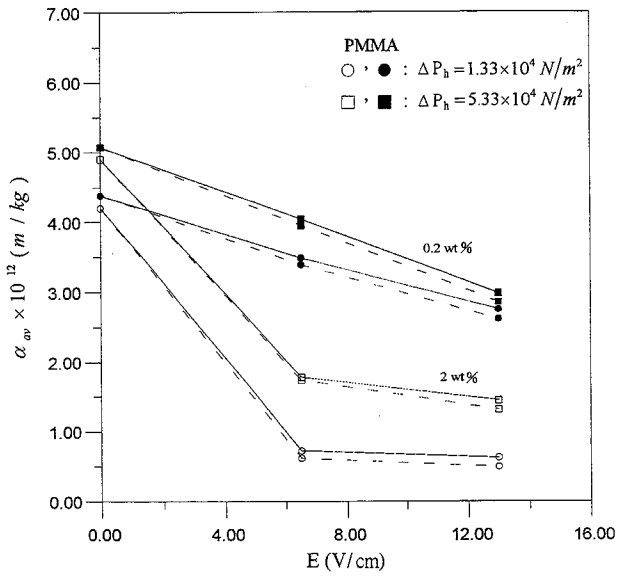


圖 9　電場強度對濾餅平均比阻之影響（實線爲考慮電滲透壓）

速q、濾餅量w_c及濾材阻力R_m等數據，可推得濾餅平均過濾比阻及濾餅之電滲透壓，表一中亦列出達穩定濾速後之濾餅電滲透壓，P_{ce}，雖然濾餅之電滲透流率隨電場強度提高而增大，但由於此粒子界達電位高達-40mV，提高電場會大幅減少濾餅量，使其濾餅電滲透壓沒有隨電場強度提高而增大現象。表一的數據明顯指出，本實驗中大部份之電滲透壓均來自濾材的電滲透作用。在E=13 V/cm條件下，ΔP_h=10 cmHg時之電滲透壓約爲總有效壓差之20%，在ΔP_h=40 cmHg時則僅佔5%左右，隨著電場強度的下降，電滲透壓所佔比例亦逐漸降低。

濾餅平均過濾比阻與電場強度之關係如圖 9 所示，其隨電場強度提高而下降，圖中實線是以實驗數據，由(13)式考慮電滲透壓效應所估算的結果，而虛線則是忽略電滲透壓作用，類似傳統恆壓過濾直接以ΔP_h爲過濾壓差所得之結果，顯示前者僅於低壓差及高電場時有微大於後者之現象，這是因在此稀懸浮液過濾中，電滲透壓甚低於機械壓差，總有效壓差僅微大於機械壓差所致。

本研究中，以乾濕濾餅重之比來估算其平均孔隙度ε_{av}，圖 10 顯示孔隙度隨電場強度增加而提高，在較高機械壓差時，較大的粒子間壓縮作用導致電場強度（電泳作用力）對濾餅內粒子堆積結構之影響變爲較不明顯。

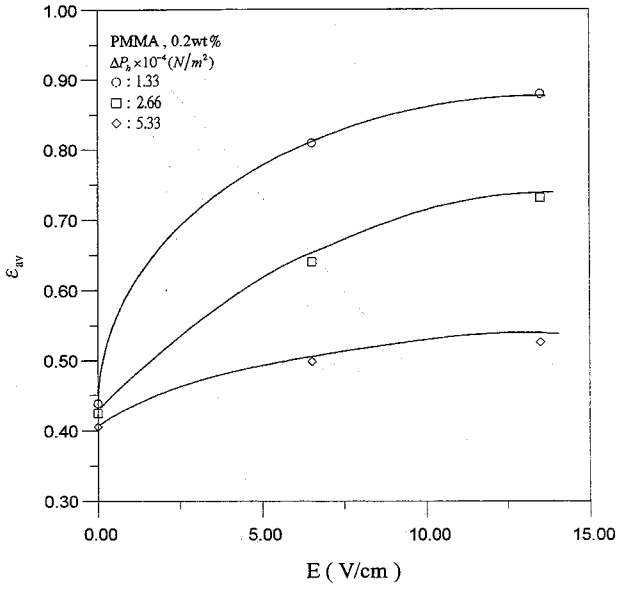


圖 10　電場強度對濾餅平均孔隙度之影響

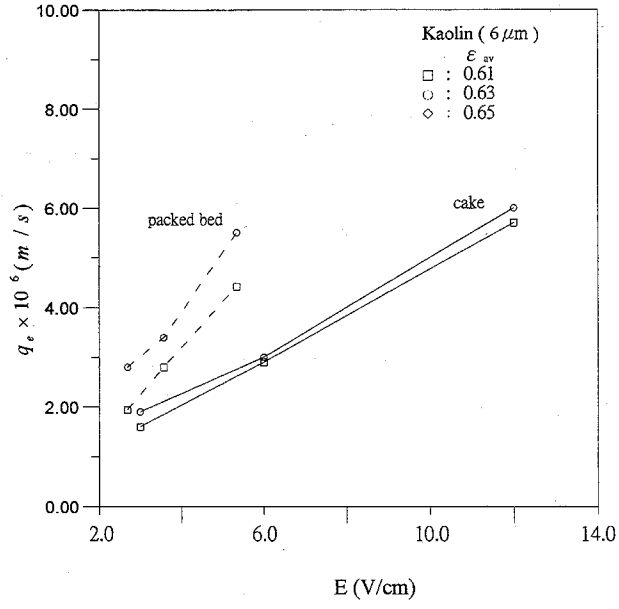


圖 12　相同平均孔隙度之填充床與濾餅的電滲透流率

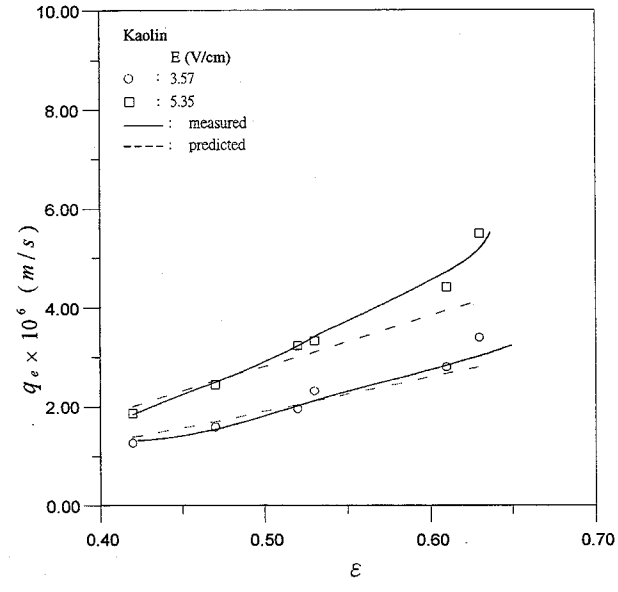


圖 11　填充床之電滲透流率與孔隙度的關係

二、粒子填充床與濾餅之電滲透

前述濾餅過濾所用之0.65μmPMMA懸浮粒子不易沉降，難以形成足夠厚度之粒子床以進行電滲透量測，此處改以6μm之高嶺土粉體泥漿，經重力沉降、壓縮所形成之孔隙度均一的粒子床進行電滲透量測，結果如圖11所示，電滲透速率隨孔隙度增大而提高，圖中亦列出由(7)式理論預估之結果，其與實驗值甚接近，顯示該理論式可定量的預估粒子床之電滲透速率。實驗中亦發現，施加電場於較高孔隙之粒子床（壓縮較不緻密）時，操作一段時間後，粒子床內近負電極處易形成斷層（其形成機制有待探討），這可能是較高孔隙時實驗與理論預估有較明顯差異的原因。

於前一節中曾說明PMMA電場過濾時濾餅之電滲透速度與電滲透壓，但該濾餅甚薄，約僅1~2mm厚度，濾餅內之電場強度無法有效決定，故此處本研究改以未加電場之恆壓過濾方式，以高嶺土泥漿先形成某特定高度（約爲 2.4 cm）之濾餅，接著在固定平均電場強度之條件下對該濾餅進行電滲透速率量測。圖12比較有相同平均孔隙度之濾餅與粒子填充床兩者之電滲透差異，雖然兩者之平均孔隙度相同，但前者有孔隙度分佈而後者孔隙度均一，結果顯示填充床的電滲透流率甚大於同平均孔隙度之濾餅者。對此高嶺土泥漿，經重力沉降法所決定之濾餅表層孔隙度 ε_i 爲 0.88 ，若以(10)~(11)式表示其孔隙度分佈，假設在濾餅上層 $z/L>0.95$ 處因粒子間壓縮壓力小，其 ε_z 皆以 ε_i 存在，則可由 ε_i 及濾餅平均孔隙度 ε_{av} 之量測值，決定孔隙度分佈式中之 ε_o 及 n 值，例如在 $\varepsilon_{av}=0.61$ 時，所求得之濾材附近濾餅孔隙度 ε_o 爲 0.50 ，（若假設 $z/L>0.9$ 以上 $\varepsilon_z=\varepsilon_i$ ，

表二　高嶺土濾餅之電滲透流率預估值與實驗值比較

average cake porosity, ε_{av}	average E (V/cm)	measured $q_e\times10^6$(m/s)	predicted $q_e\times10^6$(m/s)
0.61	3	1.6	1.8
	6	2.9	3.4
0.63	3	1.9	2.1
	6	3.2	4.1

則所推求之 ε_o=0.46 ，與上述 0.50 之差距爲 8% 左右）。由於濾餅中孔隙度之變化亦會影響電場強度分佈，對此 ε_{av}=0.61 ，平均電場強度爲 3V/cm 之濾餅，利用(12)式所估算之濾餅最底層局部電場強度爲 3.54V/cm ，在孔隙度爲 0.5 及 E=3.54 V/cm 之條件，由填充床之結果可預估電滲透流率約爲1.8×10^{-6} m/s ，這與 ε_{av}=0.61 之濾餅所量測得者 1.6×10^{-6} m/s 甚爲接近，由此可預期濾餅的電滲透流率決定於濾材附近較緻密濾餅層的電滲透作用，表二列出由濾餅底層電滲透所預估之濾餅電滲透流率，並與量測值作一比較，顯示在較低電場時，預估值與實驗結果非常接近。

圖13所示爲依據(8)式所模擬之濾餅內電滲透壓分佈，顯示在濾餅表層(z/L=0.8~1.0)處其電滲透壓甚小，而在接近濾材(z/L<0.3)後，其電滲透壓約呈線性增加。由於濾餅電滲壓分佈的量測需在濾液出口閥關閉的條件下進行，但此時濾餅上層較大之電滲透流易在管壁（放置壓力或電場探針處）造成液體回流，而使得該處濾餅產生鬆垮之現象，故尚無電滲透壓分佈之實驗數據加以比較。

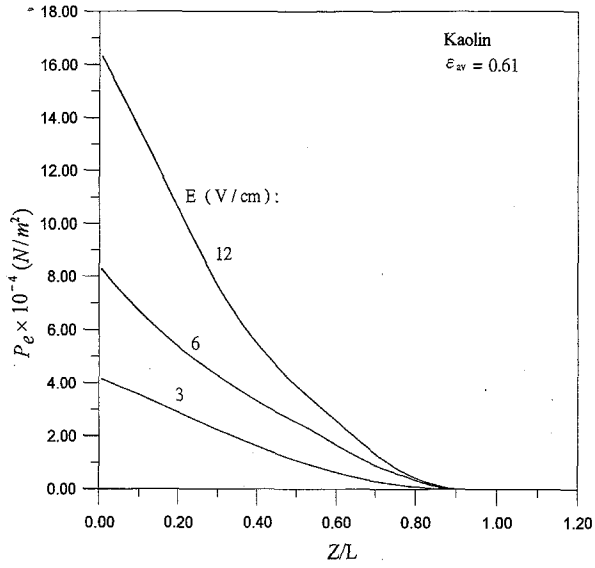


圖 13　濾餅內模擬之電滲透壓分佈

伍、結　論

經由恆機械壓差電場過濾實驗及理論方程的建立，本研究探討了電場濾餅過濾中，電場強度對濾速、濾餅平均過濾比阻及有效過濾壓差等的影響；另一方面，也由實驗與理論分析了填充床及濾餅之電滲透。茲將所獲得之主要結果分述如下：

1. 由於粒子電泳偏離濾面作用，稀懸浮液電場過濾進行一甚短時間後，濾速即趨於一穩定態，此穩定濾速與電場強度成正比。經與實驗結果相比較，證實本文所提出之過濾方程式，除在甚低機械壓差下，可有效預估稀懸浮液於電場濾餅過濾時之濾速變化。
2. 雖然濾材與濾餅之電滲透流率皆與電場強度成正比，但電場強度增加，濾餅量隨之減少，導致濾餅之電滲壓受電場之影響甚不明顯。對本研究所採用之稀懸浮液，僅在低機械壓差下操作時，電滲透壓方佔總有效過濾壓差之較明顯比例，顯示電場過濾之濾速提高主要來自粒子電泳減少濾餅量之作用。
3. 延伸單一毛細管之電滲透模式，本研究建立了填充床之電滲透方程，其預估值與實驗結果甚接近。
4. 在電場濾餅過濾操作中，濾餅之電滲透速度由濾餅底層（堆積最緻密）之電滲透所決定，以該底層之局部電場強度與孔隙度，對應同條件之填充床的電滲透數據，可有效預估濾餅之電滲透速率。
5. 延伸填充床之電滲透方程，本文亦模擬濾餅內之電滲透壓分佈，顯示在濾餅上層其電滲透壓甚小，而在接近濾材處則約隨距離呈線性增加。

誌　謝

本研究承蒙國科會之經費補助，謹助謝忱。

參考文獻

1. Bollinger J. M. and Adams R. A., "Electrofiltration of Ultrafine Aqueous Dispersions", Chem. Eng. Prog., p54~58 (1984).
2. Bowen W.R. and Ahmad A.L. "Pulsed Electrophoretic Filter-Cake Release in Dead-End Membrane Processes", AIChE J., 43, p959-970 (1997).
3. Freeman M.P. "Vacuum Electrofiltration", Chem. Eng. Prog. P74-79 (1982).
4. Happel, J. and Brenner, H., "*Low Reynolds Number Hydrodynamics With Special Applications to Particulate Media*", Prentice- Hall, New Jersey , 2nd ed.(1965).
5. Heikkinen, J., Tuori, T., Wakeman, R.J., Gallego-Juarez J.A., Elvia,L., Rodriguez,G., Kaess, G., James, A. and Ekberg, B., "Development of Deliquoring Method Enhanced by Electric and Acoustic Force Fields", Proc. of 8th World Filtration Congress, Brighton, UK, PP767-770(2000).
6. Hiemenz P. C. , "*Electrophoresis and other Electrokinetic Phenomena*", Principles of Colloid and Surface Chemistry , p737~790(1986).
7. Iritani E.,Ohashi K. and Murase T., "Analysis of Filtration Mechanism of Dead-end Electro-Utrafiltration for Proteinaceous Solutions", J. Chem. Eng. Japan., Vol. 25, p383~388(1992).
8. Kobayashi K. , Yukawa H. , Iwata M. and Hosoda Y., "Fundamental Study of Electroosmotic Flow Through Perforated Membrane", J. Chem. Eng. Japan, Vol. 12, p466~471(1979a).
9. Kobayashi K. , Yukawa H. , Hakoda M. , Hosoda Y. and Iwata M. "Electroosmotic Flow Through Particle Beds and Electroosmotic Pressure Distribution", J. Chem. Eng. Japan, Vol. 12, p492~494 (1979b).
10. Moulik S. P. ,"Physical Aspects of Electrofiltration", *Envi. Sci. & Tech.*, Vol. 5, p771~776(1971).
11. Moulik S. P. , Cooper F. C. and Bier M. ,"Forced-Flow Electrophoretic Filtration of Clay Suspensions: Filtration in an Electric Field", J. of Colloid and Interface Sci., Vol. 24, p427~432(1967).
12. Rice, C.L. and Hicks, R."Electrokinetic Flow in a Narrow Capillary", The J. of Phy. *Chem.*, 69, PP4017-4023 (1965).
13. Tiller F. M. , "*Theory and Practice of solid-liquid separation*", Univ. of Houston, 1975.
14. Yukawa H. , Kobayashi K. , Tsukui Y. , Yamano S. and Iwata M.," Analysis of Batch Electrokinetic Filtration", J. Chem. Eng. *Japan*,Vol. 9, p396~401(1976).
15. Yukawa H. , Kobayashi K. and Hakoda M.,"Study on Performance of Electrokinetic Filtration Using Rotary Drum Vacuum Filter", *J. Chem. Eng. Japan*, Vol. 13, p390~396(1980).

Fundamental Study of Electro-Cake Filtration

CHING-JUNG CHUANG AND ENN-CHONG TSENG

Department of Chemical Engineering
Chung Yuan Christian University
Chung-Li, Taiwan 32023, R.O.C.

ABSTRACT

One of the reasons for that the electro-filtration has not yet received wide acceptance in industries is an inadequate knowledge at the process. The research studied the influences of electric field on the filtration rate, average specific filtration resistance of cake and the electroosmotic pressure etc. by conducting experiments in constant hydraulic pressure electro-filtration. Theoretical analysis for predicting the filtration rate was also performed and showed results agree with the experimental data. It was concluded that in the case of filtering suspensions with high zeta potential, the increase of filtration rate is almost due to the contribution of electrophoretic migration of particles away from the septum.

The electroosmosis theory in a capillary was modified to yield expressions for predicting the electroosmotic flow rate in packed beds. The prediction was confirmed by the experimental data. Electroosmosis in cakes was also analyzed and showed that the electroosmotic flow rate through cake is controlled by the local porosity and electric field strength at the highly compressed cake layer near the filter media.

Key words: *Cake Filtration, Electric Field, Electrophoresis, Electroosmosis*