

由突變和選擇造成在 分離技術發展上的進化

文/Harald Anlauf

關鍵字：分離技術(separation technology)、過濾(filtration)、過濾機(filter)、離心機(centrifuge)、固液分離(solid-liquid separation)

摘要

自液體中分離粒子是一項交錯複雜的技術，這幾乎與每個工業程序、我們的個人生活、以及週遭的環境相關聯。顯而易見的，為解決不同應用領域上所有的分離問題，是需要許多極為不同的分離原理和多樣性的高度專業設備。回顧這些裝置發展的歷史，可以發現許多與生物進化的過程之間存在著極有趣的類似現象。通常發展新分離技術的動力會來自於解決一個分離問題的急迫性與必須在市場上成功的壓力。一個新概念的成功，必須在眾多競爭的解決方案中能夠提供足夠的優勢。和自然形成對比的是，工程師具創造力的天賦與先進的知識相結合造就了更標靶與更快速的新發展。分離技術的一些進化過程將在本文中以過濾機和離心機作為討論的實例，文中亦將根據實際的趨勢來說明其最新的發展，並且指出一些未來的前景。

緒論

自液體中分離粒子是一項交錯複雜的技術，這幾乎關聯到每個工業程序、我們的個人生活、以及週遭的環境。固體和液體的分離可以聚焦於非常不相同的任務，例如增

濃(thickening)、除濕(demoisturing)、純化(purification)、清洗(washing)、分級(fractionation)、分類(sorting)、萃取(extraction)等。這些分離程序的應用必須在最極端的範圍內考慮粒子尺寸、分布和形狀，固體和液體的比重，懸浮液濃度和化學組成，懸浮液和液體的流變行為、流速、程序和技術上的邊界條件、以及最後，但並不侷限於，對分離結果的要求。很明顯的，爲了盡可能最佳地解決全部分離上的問題，是需要許多極不相同的分離原理和多樣性的高度專業設備。回顧這些裝置發展的歷史，可以發現與生物的進化過程之間有許多有趣的類比。當某些特殊物種與競爭者相比已經居於劣勢或者生活的條件已經被改變時，他們的存續或者滅絕係取決於對環境更加改善的需求。這種基於突變與選擇的自然發展法則，亦會在技術程序顯示類似性，當然這裡尤其指的是分離技術。通常分離技術新發展的動機與驅動力是真實，最好是急需，的解決實際上的一個分離問題與要在這個市場上必勝的壓力。如果，在多數情況下基於分離程序的物理和技術背景的淵博知識，一個聰明且與創新的想法出現，一個改進或者全新的解決方案就有機會實現並且佔有一定的市場。但是，必須符合像技術和經濟可行性的一些基本前提來建立一個新概

念，與競爭的解決方案相比，這個新概念必須有具體優勢才能成功，否則將再次消失。和自然形成對比的是，工程師具創造力的天賦與從有系統的基礎研究獲得的先進知識相結合，造就了更標靶與更快速的新發展。而現今改良的測量技術與功能強大的數值模擬更提供了進一步的幫助。近年來由於分離任務變得更複雜，使得跨領域的合作更增加其重要性。雖然，以有系統的方法支持具原創性的過程，例如「在類比中思考(thinking in analogies)」、「腦力激盪(brainstorming)」、「形態學箱(morphologic boxes)」等，對新發展的成功是不可或缺的。特別是在類比中思考以找出新的解決方案，這表示是將圖像轉移成完全是另一個情節的刺激幻想，將可由一些例子得到證明。本文中分離技術的一些進化過程將以過濾機和離心機作爲例子進行討論，亦將根據實際趨勢，例如能源效率或程序強化，來論證最新的發展，並且指出一些未來的前景。

從自然到分離技術的圖像轉移

首先，將以一些例子來說明「在類比中思考」的方法。類似於生物學，分離技術的族譜樹狀圖可以畫在圖1中。

從自然的源流開始，深層(depth)、濾餅(cake)和掃流(cross-flow)過濾以及粒子沈降等分離技術同時開始，伴隨著尖端過濾與沈降技術的發展已經有一段歷史^[1]。相似地，我們也能跟隨動物的演化，自

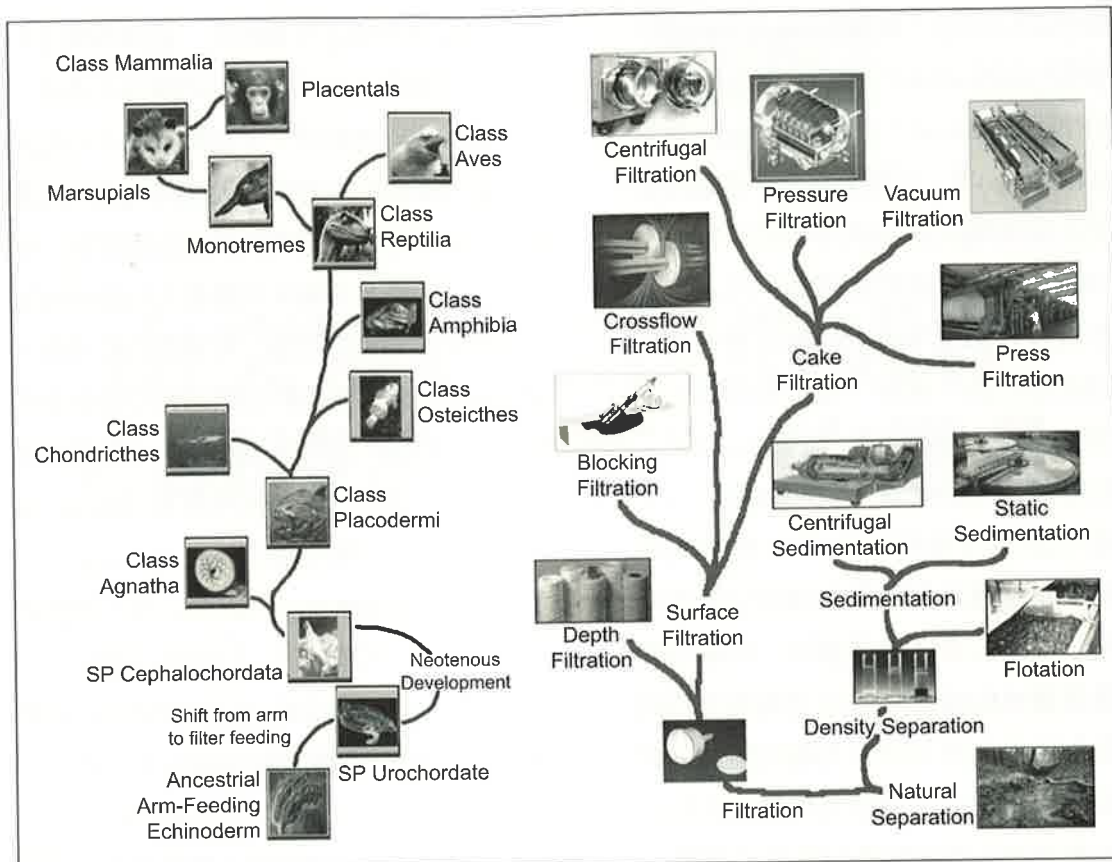


圖1 動物與分離技術的族譜樹狀圖

遠古的棘皮動物(ancestral arm-feeding echinoderms)到高度進化的物種像鳥類、爬蟲類與哺乳類。另一個在自然和技術之間類比的例子是物種被特殊的環境同化。如同在圖2中可見，棕熊和北極熊明顯地是被牠們的生活環境所同化，而演化出不同的毛色。

類似於這樣的例子，臥式離心機(peeler centrifuges)必須被調整以適合他們的工作條件。在化學品或礦冶工業中，臥式離心機不須像在分離醫藥品一樣符合衛生的設計原則。在第一個例子

中，可以安裝一只旋轉的虹吸管，這對過濾介質上底部的再生非常有效益，並且可以由額外添加的真空增加過濾壓力。但這並不被醫藥上的應用所允許，這是因為在過濾介質後方的虹吸碗中之濾液收集室難以接近，不能被清潔到必要的程度，而且在每個批式操作之後底部皆必須使用空氣完全清潔，以避免批次產品之間的交叉污染。

直接從自然轉變成現代分離技術的兩個例子可以由圖3進行圖解說明。人工腎臟的血液透析可以由掃流膜過濾來

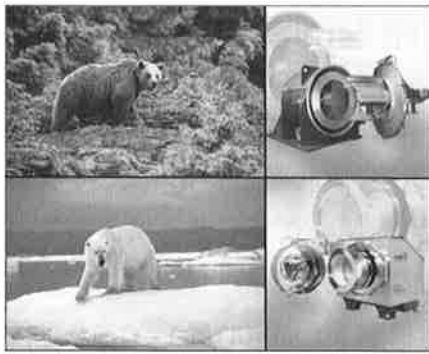


圖2 在自然和技術中被環境狀況所同化的例子

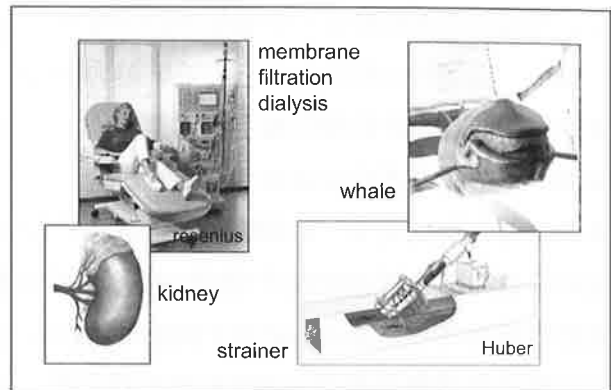


圖3 從自然界中學習

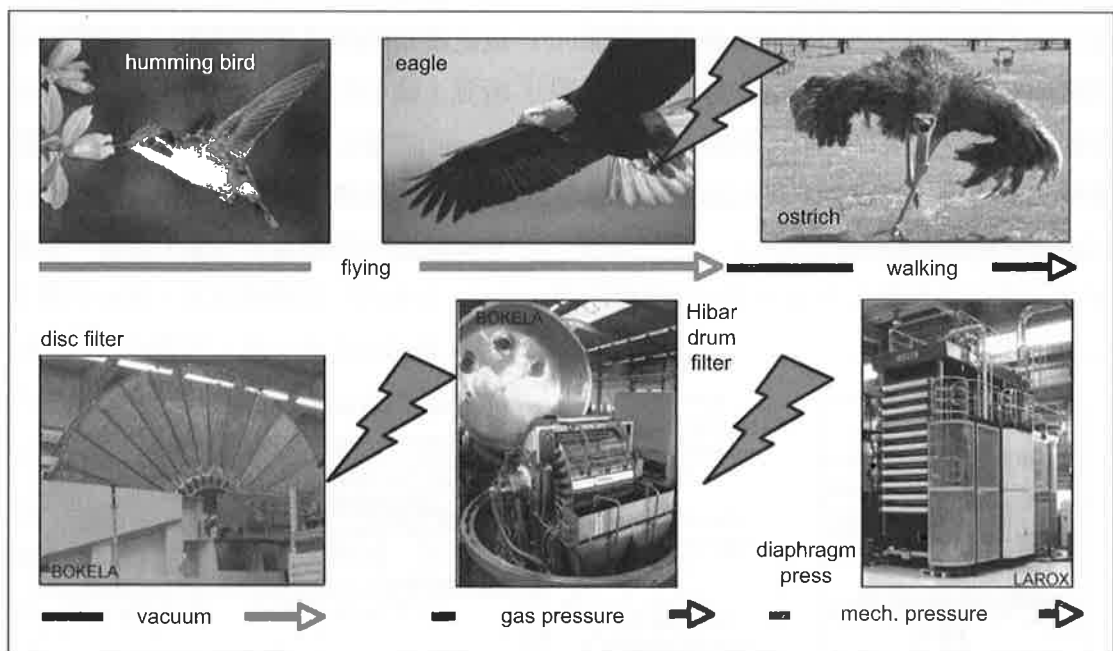


圖4 當達到限制時系統的變化

實現；而對過大尺寸物質進行預分離的過濾網正就類似於鯨魚的鯨鬚用來過濾海水裡的磷蝦。

第四個自然和分離技術之間類比的例子就如同圖4所示，當一個系統接近其具體的限制時就必須進行改變。

鳥的運動取決於他們的尺寸和重量。通常鳥類會飛行，但是如果牠們變得更大，大於一臨界值時，牠們將不能再飛行，而必須像駝鳥一樣的行走。如果微小尺寸的粒子必須被分離，一個碟式真空過濾器可以適用於分離大約10微

這對... 益，並... 過濾壓... 允許，... 碗中之... 累到必... 之後底... 避免批

技術的... 用。人... 過濾來

米直徑的相對粗糙粒子。但是如果粒子變得更小，濾餅的流動阻力和它的毛細壓力會增加，而且由於物理上真空在壓差上的限制，會造成太低的流量和太高的濾餅含水率出現。所以現下一種系統的變化是必要的，以高壓氣體過濾取代有限的真空過濾即可以獲得令人滿意的結果。但如果粒子的尺寸持續減小到大約1微米或更小，濾餅的結構會從堅固、易脆與不可壓縮轉變成脆弱、糊狀與可壓縮性。在這樣的情況下，去飽和(desaturation)通常會導致濾餅因收縮形成龜裂，而且壓縮機將會處於發生問題的危境。所以必須再次進行系統的改變，壓濾機，就像隔膜式壓濾機，就可以成功解決這樣的分離問題。

分離原理的演化

1. 瓶狀離心機(Decanter centrifuges)

第一台瓶狀離心機於1902年取得專利權^[2]。第一台瓶狀離心機係根據如圖5中的樣本所展示，在1907年的檔案文件中稱為「Jahn離心機」，完全是像圓錐的形狀。這種瓶狀離心機隨著時間的歷程逐漸被改變，根據沈降理論的推演，固體碗狀(solid bowl)容器的部分變成更纖細的圓柱/圓錐形狀，如同圖5中所見，圖中的例子為現代逆流(counter-current)式離心機的一些標準型式。固體由一個螺旋體運送到右側，而液體則自左側越過一道堰的上方離開機器。在進

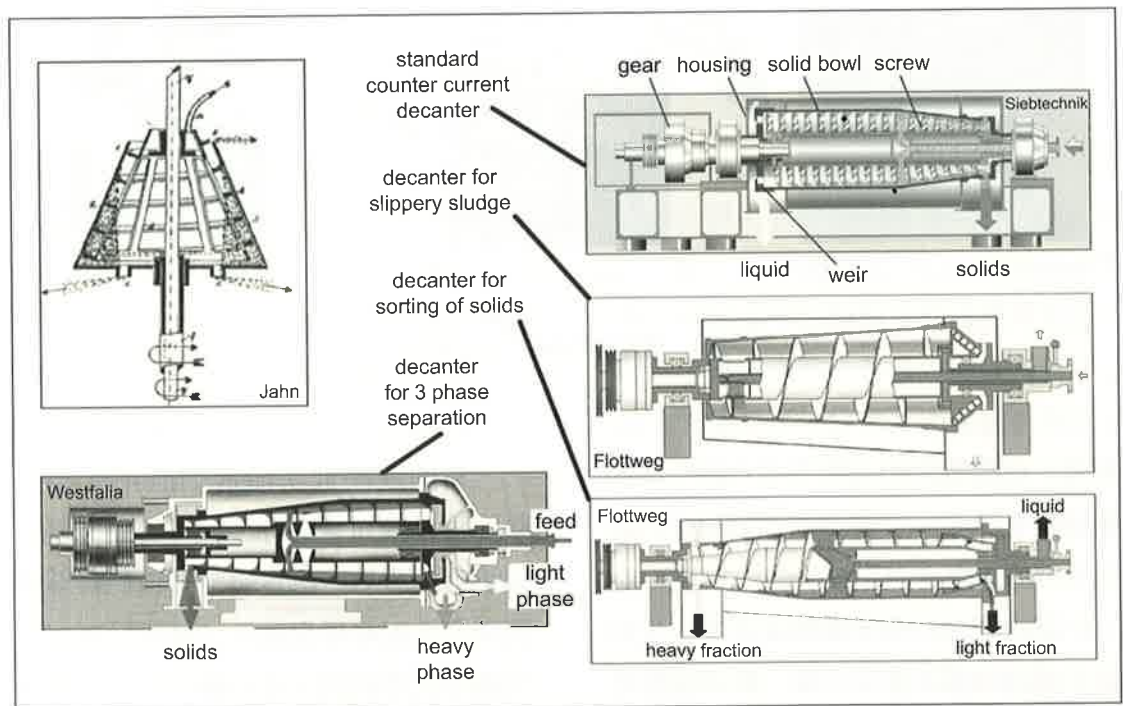


圖5 瓶狀離心機

化的過程中，瓶狀離心機具有建設性的原理被多樣化以符合非常不相同的分離任務，有一小部份的分類也顯示於圖5中。對於一些小和輕的難分離粒子，它們會形成脆弱且易滑動的沉積層，故已經發展了一個同流向(co-current)的特別概念，這被稱為「沉積瓶 (Sedicanter)」。

固體和液體以相同的流向流動，降低了粒子重新分散的風險與確保泥漿在擋板下輸送以提供足夠的靜壓來洩料。

在其他種類的瓶狀離心機裡，漂浮或者沉積在液體裡的輕或重質之粒子會被一個特別構造的運輸螺旋體所分類，沉積物與漂浮物會在相反的方向運送。另一個有建設性的變化型允許分離固體粒子和兩種不互溶的液體，例如油和水。一些進一步改善的結構會為了特殊的分離工作而存在，例如粒子分類、萃取、粒子清洗等。這證明了一個強有力的基本原理，這個原理可以在非常不相同的分離問題中的許多變化中被成功使用。對於瓶式離心機而言，離心數目的最大值(Froude數)大約是8000。過去試圖將這個數目提高超過10000是失敗了，這是由於動態的機械問題，可以參閱圖4，當接近系統的極限就必須有所改變。對於圓盤堆分離器(disc

stack separator)而言，可能正好適合將離心數目提高到大約15000^[3]。

更詳細的檢視沉積瓶之固體卸料(參閱圖5)，一個擋板(baffle plate)是實現泥漿以流體靜壓力安全輸送的決定性元素，茲將其尺寸放大繪於圖6中。使用「在類比中思考」的方法去尋找解決更多問題的新方案，也許有人會問，一塊擋板可以有甚麼其它功能或者如何將這個圖像轉到其它的應用領域。在圖6中給了3個非常不一樣的應用實例。除了在討論瓶式離心機中的泥漿卸料時，一塊擋板可以安裝在圓盤堆分離器充滿液體(水)的特殊圓形容器中。擋板亦可被固定並且浸入液體中，而這個容器和液體是正在旋轉的。離心力將液體保持在容器中，形成一水力密封(hydro-hermetic sealing)。一塊擋板的第3個功能可以透過在靜態矩形沉

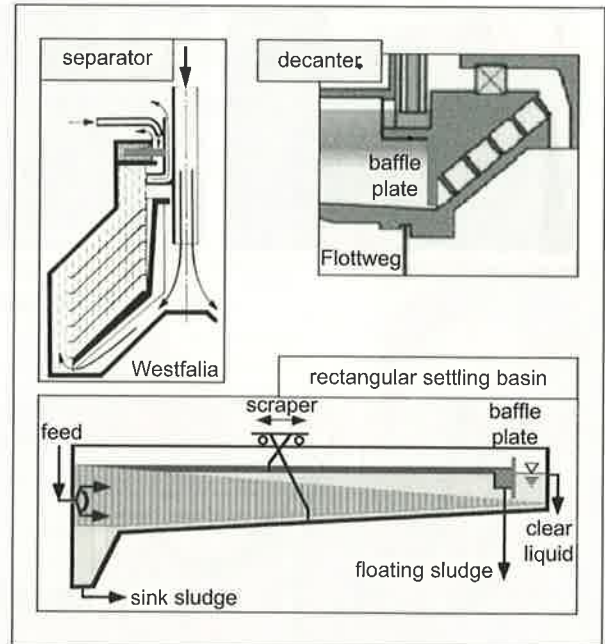


圖6 一塊擋板的不同功能

降槽中分隔往下沉降與往上浮升的泥漿來瞭解。澄清的液體必須下降通過板子的下方而後才能進入排放渠道，而飄浮的泥漿是沒有機會跟循的。

2. 連續操作的真空和壓力鼓式過濾機

(Continuous vacuum and pressure drum filters)

第一台真空鼓式過濾機在1872年取得專利權。連續操作的迴轉式過濾機的原理已經由不同的面向，例如變化(variation)、修改(modification)和強化(intensification)等，發展改進超過幾十年。過濾面積安排的變化促進了特別的過濾機特性。根據原理變化的發展，圖7中顯示了迴轉式過濾機的主

要類型，有鼓式(drum)、碟式(disc)、帶式(belt)和鍋式過濾機(pan filter)。

鼓式過濾機是最具有彈性的一種，碟式過濾機可以最低成本提供最大的流量，帶式過濾機最適合用於密集的濾餅洗滌，而鍋式過濾機能用於分離極大且快速沉降的粒子。

如同圖8中所見，根據不同濾餅卸除的可能性，鼓式過濾機已經被修改，使它們能夠分離各種性質的泥漿。

對於易脆濾餅的去飽和(或是乾燥)而言，以適度氣體逆吹輔助的刮刀卸餅是良好的標準型式。對具有高進口毛細壓力的極薄、糊狀、高粘性濾餅，則可以使用滾柱(roller)從過濾鼓上完全除去，而且含液

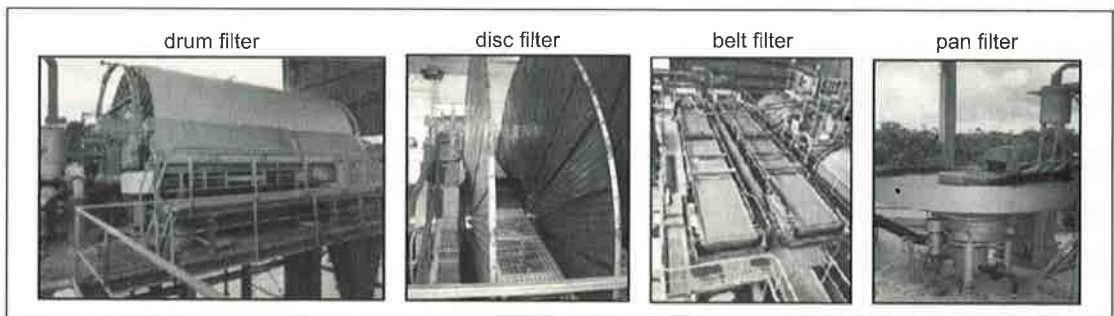


圖7 迴轉式真空過濾機的變化

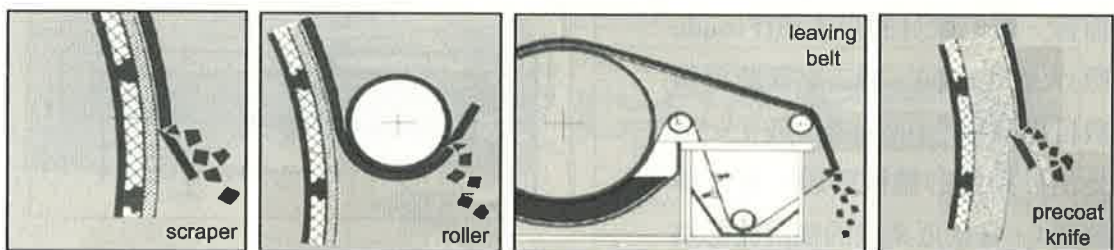


圖8 鼓式過濾機濾餅卸除系統的修改

的物質可以由一把梳子狀的刮刀切除。如果泥漿有非常迅速堵塞過濾介質的傾向，密集的濾布清洗就非常必要，這可以由附加脫離濾帶(leaving filter belt)的過濾鼓來進行。如果含極小顆粒且濃度非常低的泥漿必須進行分離，深層過濾機(depth filter)、掃流過濾機(cross-flow filter)、或圓盤堆分離器(disc stack separator)可能是正確的解決辦法。但是通常更好的選擇是使用預塗層(precoat)的鼓式過濾機，這需要一個特別修改的濾餅洩料，預塗層被堵塞的上層必須在每一個過濾循環之後被一把推進的刀子去除，對大部分現代的過濾機而言，最小的切除深度大約是50 μm。

在變化和修改之後，基本原理的強化應該被視為鼓式過濾機成功地進化發展的第3條途徑。考慮了液體的蒸氣壓之後，真空鼓式過濾機能夠應用的最大壓力差是有限的。為了克服這個限制，必須進行系統壓力來源的改變(參閱圖4)。如同圖9中可見，鼓式過濾機可以被安裝在一個壓力容器裡，則操作的壓力差可以提高到大約10 bar。

為了進一步強化這個原理，一個機械與熱結合的複合除濕方式可以被實現^[4]。在容器裡的加壓空氣可以被相等壓力的蒸汽所取代，然後在一個特別的蒸汽罩內操作。蒸汽流

動穿透在一活塞內的濾餅，非常有效率地替代孔洞內的液體。在此同時亦產生一些冷凝，這是一種完美的洗滌液體。為了最大利用這些現象的優點，過濾機的結構也必須優質化。最近有關這方面的觀點是將在濾液管線系統的水力限制減到最小，並且提高過濾單元的數目。更多的過濾單元能夠造成濾液急速的分離，使得高效率的逆向流(counter-flow)之濾餅洗滌也可以在鼓式過濾機中完成。

使用「在類比中思考」的方法去尋找新解決方案已經在第1節中以擋板作為例子討論過，現下這個方法應該也可以被應用於真空鼓式過濾機。在水力發電廠中落下的水所產生的作用力，如圖10所繪，如何能被使用來改進真空鼓式過濾機？

根據圖10所示，一台真空過濾機通常需要幫浦來產生真空與自系統排出濾液。如同圖11中可見，如果濾液有可能

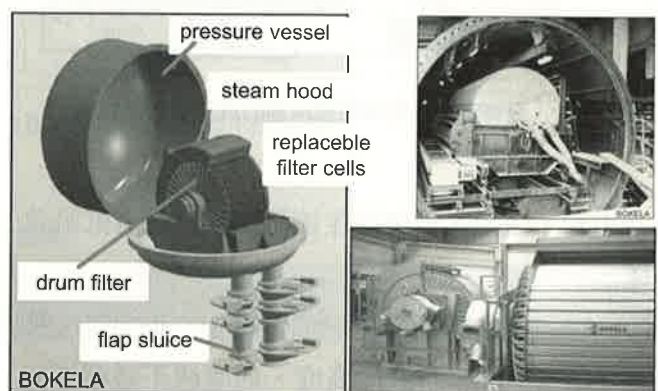


圖9 壓力式和蒸汽壓力式鼓式過濾機

帶式
重，碟
流量，
先滌，
速沉降
餅卸除
，使它
乾燥)而
餅是良
壓力的
使用滾
且含液



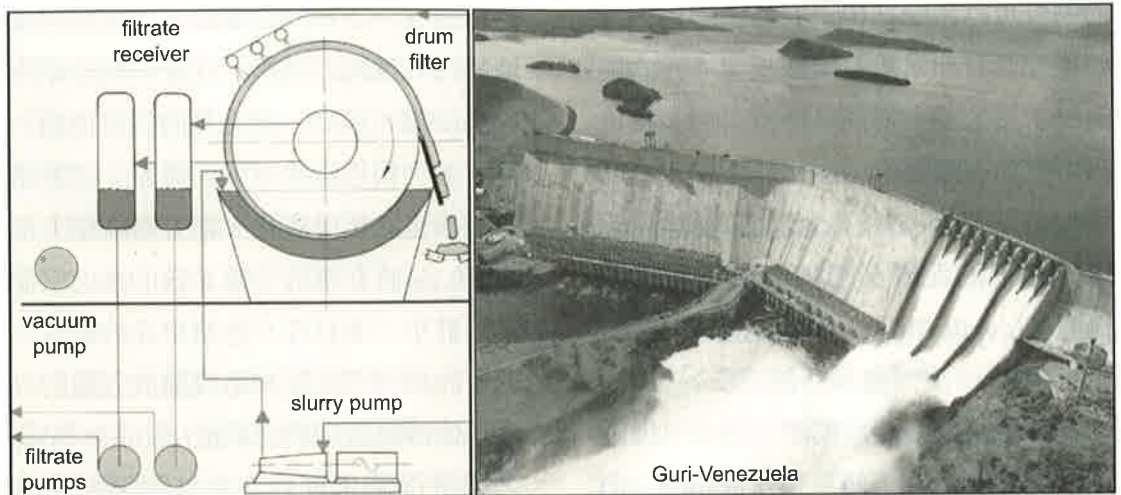


圖10 真空鼓式過濾機的安裝與水力發電廠

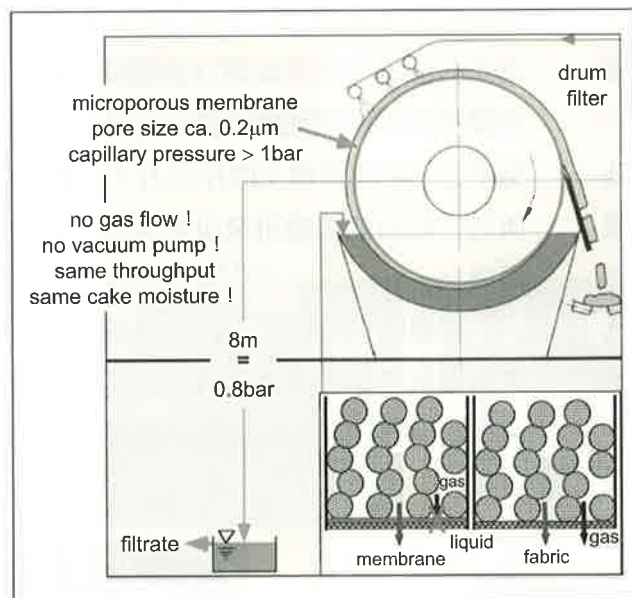


圖11 沒有安裝真空與濾液幫浦的真空鼓式過濾機

經由管子流出，則會產生流體靜壓力或者虹吸效應。

如果真空幫浦產生一個0.8 bar的壓力差，那表示會形成8 m的液柱高度，則濾液不需要任何濾液幫浦即可以流出管道，這已經是目前最新

的水準，並被稱為「氣壓柱 (barometric leg)」，在這個構造中真空幫浦仍然是必要的。

未來的前景將是在沒有任何真空或濾液幫浦的理想情況下操作，這係經由一超過0.8 bar毛細入口壓力的親水性微孔薄膜將過濾鼓覆蓋(薄膜孔徑 $<1 \mu\text{m}$)。在那樣的情況下，沒有氣體能夠在真空過濾期間流過薄膜^[5]，則過濾壓差即是由氣壓柱所產生，並且可以持續保持，而且因為薄膜的半滲透性行為，沒有氣流會中斷液柱，這也就是一件防水衣的原理(類比)被倒過來思考！

由基本原理的變化所造成的進化包含在所有的情况，選擇的觀點與一個新的程序只有

一個機會可以上市，亦即在與最新水準相比時可以展現一些優點。在圖12中顯示一個每年生產600 kt之聚對苯二甲酸 (polyterephthalic acid, PTA) 的程序流程圖。

傳統的程序中，在反應器與熱乾燥器之間必須有4個步驟來分離並且純化固體粒子。這個複雜的程序是可以被簡化，並且只用1個步驟取代原來4個步驟的安排方式，而這只需要2個高效能的壓力鼓式過濾機 (pressure drum filters)。

力鼓式過濾機 (pressure drum filters)。

表1比較了傳統和改進的PTA生產程序，這個例子令人印象深刻地證明，「如何更好」是「好」的敵人 (how the better is the enemy of the good)。

3. 不連續操作的壓濾機 (Dis-continuous filter presses)

第3個裝置演化發展的例子就應屬壓濾機。壓濾機的第一個專利應追溯到1834年，圖13顯示一個具有歷史意義

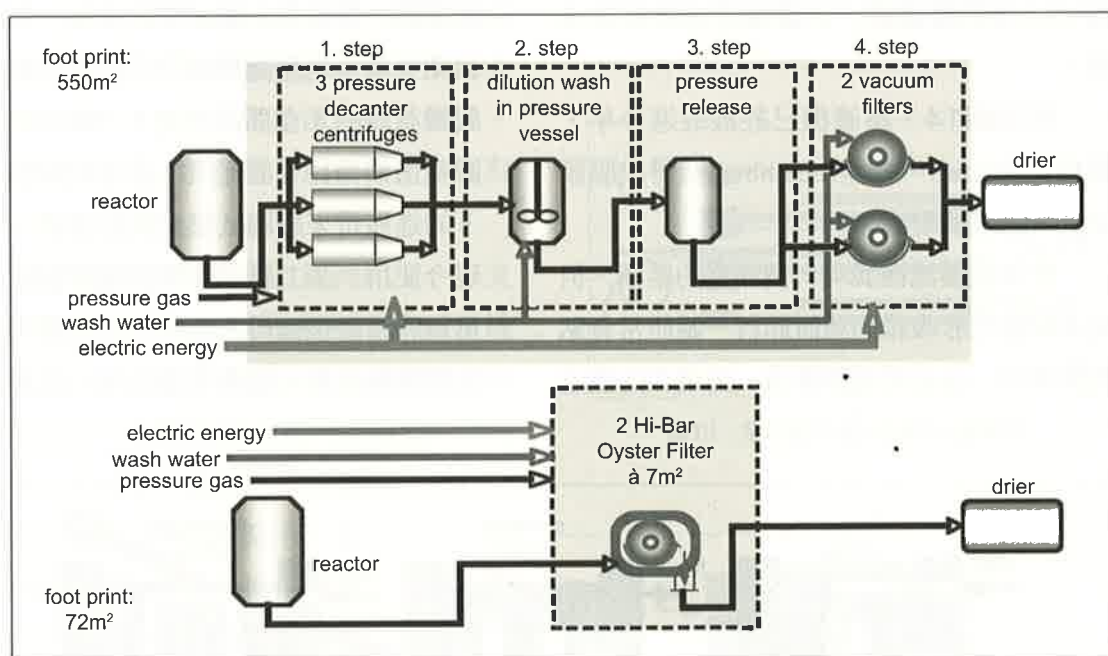


圖12 PTA生產(600kt /y) 程序的不同路徑

表1 以不同的觀點比較兩個PTA生產程序的差異

	佔地面積 m^2	能量需求 kWh per t PTA (el.)	洗滌水需求 m^3 wash water/t PTA	相對投資花費
4個步驟的傳統程序	550	13.5	1.75	100
1個步驟的新程序	72	1.2	0.9	30~40

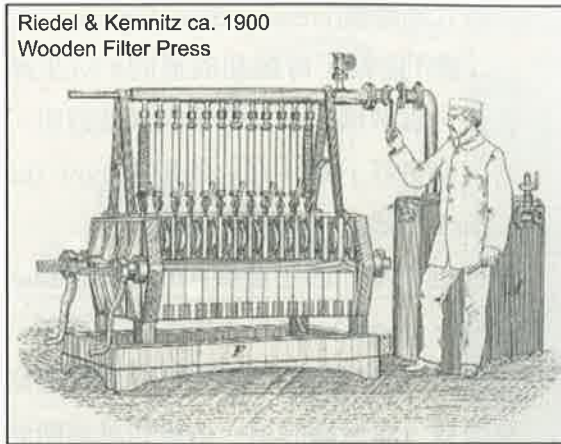


圖13 有歷史意義的壓濾機

的1900年的壓濾機，其濾盤是由木頭做成的。

根據圖14，壓濾機已經被改進多年，從框架(frame)、濾室(chamber)轉變成隔膜(diaphragm)式壓濾。

框架式壓濾機展現一個簡單的結構，但是其缺點在於複雜的濾餅卸料。濾餅常會黏在框架中，故必須破碎排出。更現代的濾室

型壓濾機具有更多結構上的優點，由過濾盤自行組成濾室，當壓濾機被打開時，濾餅會由於重力的作用自濾室掉出來。這個概念的缺點一方面在於濾餅的壓縮是相當不均勻的，特別是在濾盤大到 $2.5\text{ m}\times 2.5\text{ m}$ 時，這會導致無效的濾餅洗滌和相對高的濾餅含水量；而另一方面相對較厚的濾餅是必須的，如此才能獲得重力卸餅所需的足夠濾餅重量。這需要非常長的過濾時間，經常需要許多小時。在濾餅成長期間，若突然中斷泥漿的進料，則框架與濾室型壓濾機是沒有機會得到乾燥濾餅的，在那個情況下一部分的濾室仍然保持充滿泥漿。在幾個觀點下的進展帶來隔膜式壓濾機的發展，現今使用一張二維富彈性的橡膠隔膜可以將濾餅壓縮得非常均勻，與濾室型壓濾機比較，這會導致更佳的洗滌

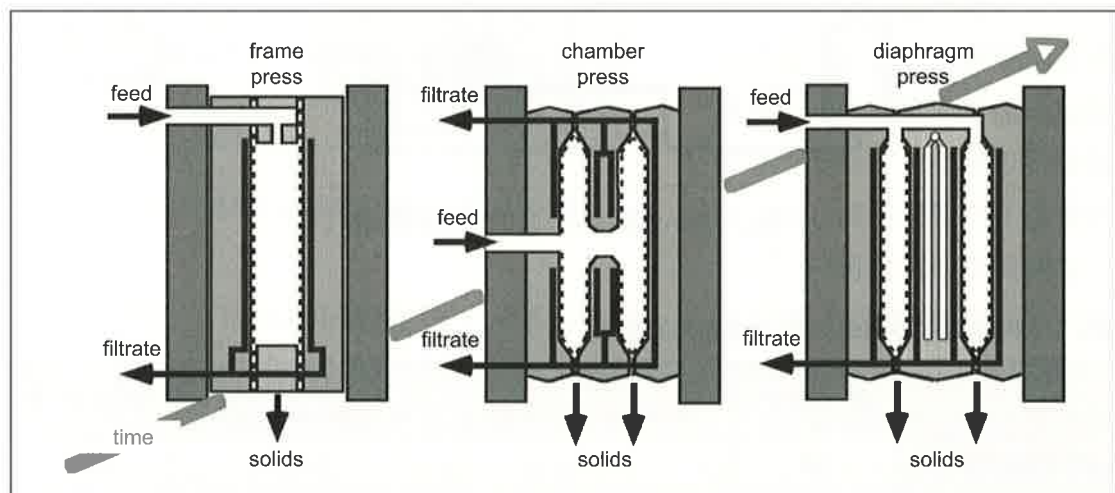


圖14 框架、濾室與隔膜式壓濾機的原理

與脫液結果，並且可保證在任何情況下固態濾餅皆能完全卸除。

由於無法保證濾餅的完全卸除以及必需有厚濾餅的問題仍然存在，爲了要克服這些問題，所以發展了垂直安裝濾盤之全自動化的隔膜式壓濾機，其簡圖如圖15所示。

在濾餅卸除時，壓濾機打開，無盡頭的濾帶(filter belt)移動了一濾室的長度，而藉此將濾餅輸送出濾室，當濾布圍繞滾軸翻轉時，堅硬的濾餅即會脫離，而一把額外刮刀的安裝可以更保證卸餅的完全。濾餅壓榨的均勻，洗滌液體的理想分佈，相對薄濾餅的可能性，以及濾餅卸除的保證是這個構造所獨有的特徵。

在壓濾機的進化發展裡的另一分支就像圖16中所繪，所謂的「熱壓濾機(hot filter press)」是機械與熱的複合式除濕裝置^[6]。這類似伴有迴轉過濾機的蒸汽壓力式過濾，該種型式已經在先前第2節中討論過。在濾餅形成與壓榨之後，熱液體可以被輸送穿過特別的加熱盤並且用來加溫濾餅。若同時在濾液出口使用真空，可以導致液體蒸發，因此濾餅即會被加熱乾燥。

注意這個前景，極端難過濾的泥漿如何能分離得比非連續操作的壓濾機更有效

率？進一步將系統改回壓力式迴轉過濾機(rotary pressure filters)應是大有希望的想法。與先前討論壓力式迴轉過濾機相反的是現在迴轉過濾程序必須修改成如圖17中的簡圖所示。由於極高的濾餅阻力，縱使在高過濾壓差下，亦只有小於1 mm非常薄的濾餅可以預期。非常高的毛細入口壓力將導致形成完全飽和的糊狀濾餅。像這樣程序的挑戰將可尋求相當合適的薄膜過濾介質(參閱圖11)，以及相當合適的濾餅卸除方法。同時，一些過濾介質的生產者能夠提供有希望的新產

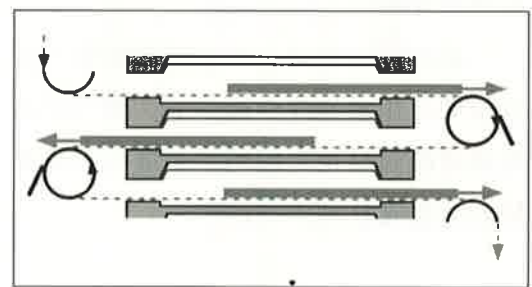


圖15 全自動垂直式隔膜式壓濾機

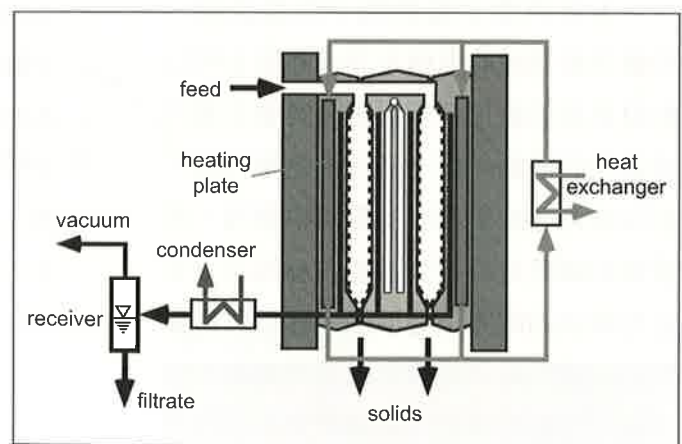


圖16 熱壓濾機

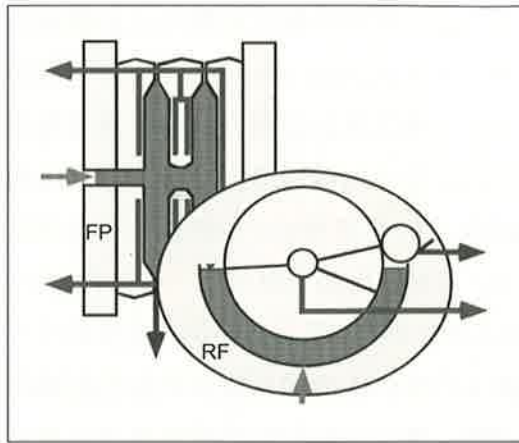


圖17 連續的薄層壓力式過濾

品，這樣即能對該新程序有所助益，而對濾餅脫除而言，一個特別的滾軸卸餅系統即可成功。

基於實驗數據的理論計算結果，可以預期在相當的操作條件下，壓力式迴轉過濾機對於特定固體的產量可以比傳統的壓濾機增加20~40倍^[7]。

結論

本文列舉了幾個例子作為證明，分離技術領域的進展在許多觀點上可以和自然界的進化互相對照。突變和選擇是進化的機制，這不僅在生物學方面，而且能夠在技術發展的脈絡中發現。新發展的驅動力是確實需要去解決還沒有充分解決的問題，發展的過程可以被紮實的知識及現代計算與數值模擬的工具加速，特別是創造力和想像力。「在類比中思考」的方法表示圖像可以轉移成

不同的脈絡，是找到新解決方案的有效方法。分離技術的領域中仍然需要新的解決方案，這是來自於新的應用領域以及關於純度(purity)、固體含水率(solids moisture)、選擇率(selectivity)、敏感度(sensitivity)、能源節約(energy saving)等分離結果的需求持續增加。^[6]

參考文獻

- [1]Anlauf, H., "Mechanische Fest/Flüssig-Trennung im Wandel der Zeit", Chemie Ingenieur Technik CIT, 75, 10, 1460-1463 (2003). DOI: 10.1002/cite.200303283
- [2]Stahl, W., "Industriezentrifugen Band II", DrM Press, Männedorf, Switzerland; ISBN 3-9522794-0-4; 125-130 (2004).
- [3]"Kopf, M.; Hamatschek, J.; Hegnauer, B., "The Centrifuges of Today and Tomorrow: Larger, More Efficient and More Specific", Global Guide of the Filtration and Separation Industry, VDL-Verlag, Rödermark, Germany, ISBN 978-3-00-024080-5, 167-172 (2008).
- [4]Bott, R., "Continuous Steam Pressure Filtration of Mass Mineral Products", AT/Mineral Processing, 43 (3); 19-30 (2002).
- [5]Anlauf, H., "Recent Developments in Research and Machinery of Solid-



翻箱倒櫃
尋找好貨色

隱藏在世界的角落中，
深藏不露令人讚嘆的能量，
累積已久的技術結晶，
等待被發掘。
歡迎各界專家學者，
與廣大讀者分享您的智慧、技術、經驗……

 投稿須知

欲投稿者，請將文章電子檔E-mail至
ann566@mmmpc.com.tw

歡迎各界踴躍投稿...

Liquid Separation Technology", *Drying Technology*, 24; 1235-1241 (2006).
DOI:10.1080/07373930600838066

[6]Anlauf, H., "Fest/Flüssig-Trennung auf derACHEMA-ACHEMA Berichte", *Chemie Ingenieur Technik CIT*, 81, 9, 1350-1357 (2009).

[7]"Anlauf, H., "Cake Filtration beyond the Possibilities of Today's Filter Presses-Continuous Ultrathin Film Filtration", *Global Guide of the Filtration and Separation Industry*, VDL-Verlag, Rödermark, Germany, ISBN 978-3-00-029751-9, 142-148 (2010).

作者簡介

Harald Anlauf

現職：Karlsruhe技術學院(KIT)機械程序工程與機械學院(MVM)資深學術顧問與資深科學家

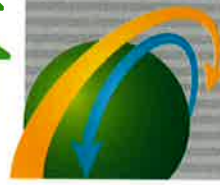
學歷：德國Karlsruhe大學工程博士

經歷：德國VDI/GVC「固-液機械分離」工作小組主席、歐洲化學工程師聯盟「過濾與分離」工作小組德國代表、世界過濾組織主席、德國代表

專長：固-液機械分離、過濾技術、沉降技術、離心分離等



化工技術



05

2013 Vol. 242

專輯 | 過濾技術與化工製程 專欄 | 化工與食品製程 特別企劃 | 微感測技術

創立於1975年
(逾70000台的銷售量)

產銷量最大圓篩專業廠

LS is Largest Round Separator Leading Manufacturer (over 70000 of total sales)



ISO-9001:2008 國際品質認證、CE

機器堅固、耐用

(正常使用下,可耐用20年)

大量外銷歐、美、日等國家

台灣製造



專利字號新型第208345號
碎解括刷振篩機



超音波
振動篩分機



專利字號發明
第1246440號
LS-500~1500
VIBRO SEPARATOR & FILTER

最新設計



老松機械股份有限公司

LAO SOUNG MACHINERY CO., LTD.

TEL: (02) 2990-0668
FAX: (02) 2990-0722
E-mail: laosoung@ms10.hinet.net
http://www.laosoung.com.tw