



膜分離技術在化工程序強化上之新應用

童國倫^{1,2,3}、陳彥勳^{1,2}、周鼎勳^{1,3}、吳柏均^{1,2}、葉侑叡¹、陶方廷^{1,2}

¹ 國立臺灣大學化學工程學系

² 國立臺灣大學前瞻綠色材料高值化研究中心

³ 國立臺灣大學水科技與低碳永續創新研發中心

關鍵字：程序強化、薄膜科技、觸媒回收、溶劑回收、酸鹼回收、氣體分離

一、序言

化學工業與我們的日常生活息息相關，於食、衣、住、行、育、樂各方面都看得到化工產品的身影。一個化工產品的誕生，需經過反應、分離、純化等重重的關卡，而過程中如何提升能源使用效率以及有效回收製程中可再利用的物質，一直以來都是化學工業的一大課題[1]。近年來，在環保意識的高漲下促使化學工業加速轉型，循環經濟顯然成為了政府當前最有力的推力。此種將能源與資源有效充分循環再利用的化腐朽為神奇之工，則需仰賴新方法以及新單元設備的研發，以有效的使製程邁向高效化，因此「程序強化（Process Intensification, PI）」成了新世代化學工業的願景。

Ramshaw於2000年第一屆國際程序強化會議中首次提出了程序強化的構想，指出其概念為在產能不變的情況下，大幅減少化工廠體積的新措施[2]。事實上，這樣的定義有點過於狹隘，降低規模只是其中一個期許達成的目標。廣義上來說，降低工廠規模、減低製程能耗、增加生產效率以及廢棄物的控制與回收利用都是程序強化中不可或缺的一環。如圖1所示，一個成功藉由程序強化轉型的化工廠，將再也看不到高大的塔器、林立的煙囪，取而代之的是微型精密的設備、碧草如茵的綠地，能源及水資源有效回收利用，達成永續發展、綠色製程的宏願。

即使程序強化的理想早於20年前就已經萌芽，然而同時需要兼顧多方的考量而



圖 1 化工廠經過程序強化前後的面貌 [3]

設計出新的設備及製程實則不易，因此目前的發展仍然相當緩慢。舉例來說，為了使傳統的反應器能於同樣的產率下減少體積，勢必得升高操作的溫度或壓力。雖然規模縮小的問題解決了，但是製程的安全疑慮衍生而出。可以見得，想真正達成程序強化的理想，就必需研發出擁有「破壞式創新」的新科技。悄悄之中，一項兼具低能耗、輕薄短小、操作安全穩定的技術於百家爭鳴下脫穎而出——「膜分離技術」。

馬克士威惡魔（Maxwell's Demon）是物理學上非常著名的一個猜想，闡述了若有一個「小東西」能辨別氣體分子的速度，那麼就可以順利的將原本混合的氣體分開了。這隻聰明小惡魔的工作，好似於薄膜的基本概念！無論任何膜分離的程序中，都存在一個特殊設計的「介面」，在不同的驅動力下

由於介面本身對於混合物的相對大小或是親和性的差異等來達到分離的效果。相比於傳統的化工程序單元，由於薄膜同時具有低能耗、體積小、良好的選擇性、產生的廢棄物少以及操作環境相對安全的特性，因此對於程序強化的進展中佔有了非常重要的地位 [4]。藉由取代傳統較複雜的分離設備，抑或是把傳統的分離程序結合薄膜科技形成複合式的程序，將能使整個製程達到最佳化的條件 [5]。如圖2所示，傳統上要由空氣中分離出高純度的氮氣及氧氣，多半使用變壓吸附法（Pressure Swing Adsorption, PSA）。即使此項技術具有高純度、設備簡單、操作環境安全等優勢，然而體積龐大的吸附塔不但使工廠需要更大的佔地面積，同時也隱含著更高的投資成本。相比之下，使用薄膜程序後除了保有原本的優點之外，體積更是直接剩下原本的八分之一。從這個工業界中實



圖 2 兩種空氣分離程序佔地比較

際運作的例子，顯現出薄膜技術對於程序強化是一個絕佳選擇。事實上，薄膜的應用早已融入各行各業，目前也正如火如荼的發展中，無論是醫療、能源、水資源、環保、農業、食品等等領域都有著薄膜的應用性。因此，撰寫本文的目的，期許能以通俗、貼近市場現況的方式對於薄膜在程序強化的重要性作一深入淺出的闡明，吸引廣大的讀者來認識這項新興的技術，進而達到推廣的作用。

程序強化已成為化工界的焦點和願景，是未來化工廠積極發展的方向之一[6]。膜分離技術被視為程序強化最具潛力的推手之一，因此本文將以薄膜科技為主軸，論述如何將薄膜應用於化工傳統四類分離程序中。第一部分，介紹新穎的滲透蒸發技術來取代傳統製程難以達成的溶劑回收；第二部分，介紹薄膜程序應用於觸媒回收；第三部分，

介紹有效的以電透析方式同時回收酸液及鹼液；第四部份，介紹薄膜技術如何優化傳統高耗能、高佔地面積的氣體分離程序。期望讀者閱讀完本文後，對於膜分離技術於程序強化上的應用能更有基礎的認識，並邀請您一同揭開薄膜的奧秘！

二、滲透蒸發—蒸氣滲透法進行溶劑脫水

工業生產上經常使用多種有機溶劑，其種類多達百餘種，例如甲醇、乙醇、丙酮、異丙醇、二甲基甲醯胺等，其中有些產業像是半導體產業、光電業等在製程上有高純度有機溶劑的需求，需要高效率親水性有機溶劑的脫水，如果能將工業產生的大量廢液和水有效率的回收再利用，強化傳統程序，便能減輕對環境的負擔。現今常見的有機溶劑處理方法是利用傳統蒸餾純化法，藉由混合物中各物質的沸點不同而分離，但是較難分



離沸點相近、具共沸點、具同分異構物、具熱敏感物質之混合溶液，且能耗高、操作空間大，有很大的改良空間。

滲透蒸發 (Pervaporation, PV) 是藉由混合物中各物質對緻密具選擇性薄膜的親和性不同所造成的溶解度差異以及溶劑分子大小不同所造成的擴散速率不同，來達到分離的目的，而如果進料廢液有不揮發、溶解度低或是易沉澱之物質，則可以讓進料端為氣體再通過薄膜分離，也就是蒸氣滲透 (Vapor Permeation, VP)，如圖3所示[7]。滲透端抽真空減壓當作溶液移動的驅動力，使進料能確實通過薄膜。結合滲透蒸發與蒸氣滲透具有以下優點：

(一) 由於只藉由薄膜特性便能分離，故分離共沸物時不需要額外加入共沸添加劑 (Entrainer)，也不會有共沸添加劑被排

放出來，對環境衝擊小。[8]

(二) 與傳統蒸餾塔相比，薄膜模組較為小型，操作空間小且簡便。[9]

(三) 不論進料端是液體或氣體皆能處理且能同時處理多種有機溶劑混合之廢液。[9]

(四) 滲透蒸發不需要加熱至沸點即可分離，操作溫度低，能降低能源成本與操作成本。[10]

因此，以滲透蒸發—蒸氣滲透法來進行傳統程序的強化具有可行性。以乙酸乙酯製備為例，傳統製程是將乙酸與乙醇進行酯化反應產生乙酸乙酯與水並藉經反應蒸餾塔分離，但此方法無法有效脫水，乙酸乙酯純度低，但若加入滲透蒸發進行程序強化，如圖4所示，便可以將反應程序與分離程序結合，降低能耗成本與操作成本的同時提高乙醇的轉化率與產品純度。[11]

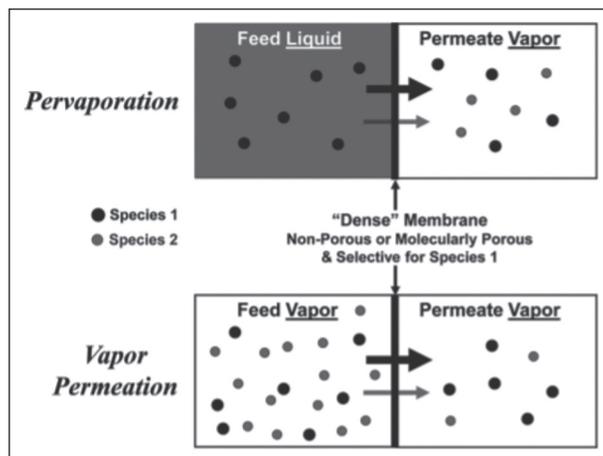


圖 3 滲透蒸發與蒸氣滲透示意圖 [7]

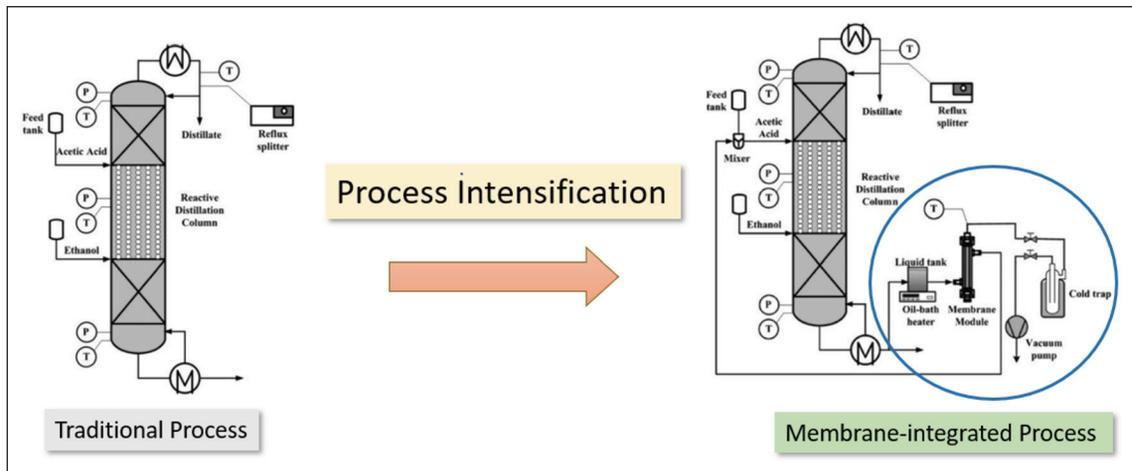


圖 4 乙酸乙酯製備程序強化 [11]

根據不同的需求所需要的選擇率 (Selectivity) 與滲透通量 (Flux of Permeation)，以聚乙烯醇、聚醯亞胺、沸石、非晶型全氟化高分子等為材料所製備的滲透蒸發—蒸氣滲透薄膜皆已有商業化的產品[12]，例如：日本三菱化學已經可以利用沸石製備滲透蒸發—蒸氣滲透薄膜並應用在乙醇、異丙醇、丙酮的脫水上，並且將廢液加以回收再利用，除了達到極好的分離效率之外，也大大降低能耗成本，同時減少了廢液回收成本，其設備規模也較傳統蒸餾製程小，如圖5所示。[13]



圖 5 滲透蒸發—蒸氣滲透製程規模 [13]

滲透蒸發—蒸氣滲透法能應用在傳統製程程序強化進行有機溶劑脫水與分離，將反應程序、分離程序與回收系統結合在一起循環利用，極具循環經濟與綠色化學的潛力與發展空間，是未來發展的方向之一。

三、膜分離程序在勻相觸媒回收之應用

近年來科技發展迅速，同時對於分離、純化的要求也越來越嚴苛，已經不再是侷限於非勻相的固液分離，更多的需求是勻相的分離程序。在工業界需求量很大一部分是有



機溶劑分離 (Organic Solvent separation)，薄膜技術可以應用在這方面主要包含滲透蒸發 (Pervaporation) 以及有機溶劑奈米過濾 (Organic Solvent Nanofiltration, OSN)，例如：甲醇與乙醇的分離、甲苯與甲醇的分離等等，而另一部分則是可溶性催化劑回收 (Soluble Catalyst Recycling)。觸媒的催化、轉化技術在現今的化學工業中有相當重要的地位，反應中有了觸媒的參與，可以加快反應的速率並提升整體製程效率，並能有效控制副產物的生成。觸媒使用過後若可以回收再利用，可以大大提升整體經濟效益並且達到循環經濟的效果，就需要利用分離純化技術將其回收。奈米過濾在這方面的催化劑回收上的應用已經證明了其對於酶 (Enzyme)、有機 (Organo-) 以及勻相 (Homogeneous) 催化程序的程序強化 (PI) 具有極大的潛力，不管是在實驗室規模亦或是在工業規模。因為酶、有機催化劑以及勻相催化劑價格昂貴，所以必須將催化劑的效率透過選擇性 (Selectivity) 與高周轉數 (Turnover Numbers) 等方面提升至最大化，而薄膜分離則是最有潛力達到此目標方法之一，另外還同時擁有程序強化以及淨化產品的附加效果。而現今的研究環境以及工業環境中，大部分的催化劑與被催化物是在溶劑中進行催化反應，所以觸媒回收與溶劑分離有著密不可分的關係。

在任何的分離程序中，針對不同的應用選擇適合的膜材，可以顯著地提高分離效

率。薄膜可以區分為有機 (高分子) 薄膜 (Polymeric Membrane) 與無機 (陶瓷) 薄膜 (Ceramic Membrane) 兩種，至今，這兩大類的薄膜都可以在市面上買到各種孔洞大小或是截留分子量 (Molecular Weight Cut-off, MWCO)，以處理不同的目標。而這兩大類的薄膜有著各自的優點以及缺點：陶瓷薄膜有良好的熱穩定性以及化學穩定性、堅強的機械性質、可以操作在高壓環境以及具有抗溶劑的特性，所以適合使用在條件嚴苛的環境之下，例如工業廢水、含酸鹼或是溶劑的過濾，但是陶瓷薄膜表面通常帶有具有極性的羥基 (OH group)，這會導致催化劑在其表面上過早分解。由於陶瓷薄膜表面極性的關係，通常在非極性的有機分子過濾時，會有較低的通量。過去有一些研究顯示，在陶瓷薄膜表面進行矽烷化的表面改質來實現表面疏水化，藉以獲得較高的通量，同時也可以適用於某些非極性的有機溶劑，例如：甲苯。耐溶劑一直是高分子薄膜的重大挑戰之一，因為其本身高分子的性質容易被溶劑破壞進而對過濾效能嚴重的影響，但隨著薄膜科技技術發展，現在已經可以在市面上看到一些應用於有機溶劑分離的高分子薄膜了。

催化反應之後的流體、溶劑、產物、催化劑彼此之間的分子量差異，將用MWCO來選定薄膜。對於選定的薄膜，其截流分子量曲線可以拿來參考分析物隨著分子量的增加而增加的阻擋率百分比，而對於具有高選

擇性的膜材的需求是很大的。另外一個重要的因素則是高的催化劑阻擋率以及通量之間的權衡，很明顯的是，若催化劑的分子量越低，截流分子量也必須越低，則流體、溶劑、產物以及催化劑的通量也會降低。依照這個特性我們可以選擇分離尚未進行催化的催化劑亦或者是將催化劑催化使其變大，增加阻擋率。

應用在催化劑回收的過濾形式主要分為三大類型，包含：(1)透析 (Dialysis) (圖6) [14]、(2)終端過濾 (Dead-End Filtration)、(3)掃流過濾 (Cross-Flow Filtration) (圖7) [15]。首先，薄膜透析主要應用在勻相過度金屬催化劑的回收以及生物催化劑的回收。利用反應物以及產物的濃度梯度形成驅動力，透過擴散原理傳輸通過薄膜，在反應結

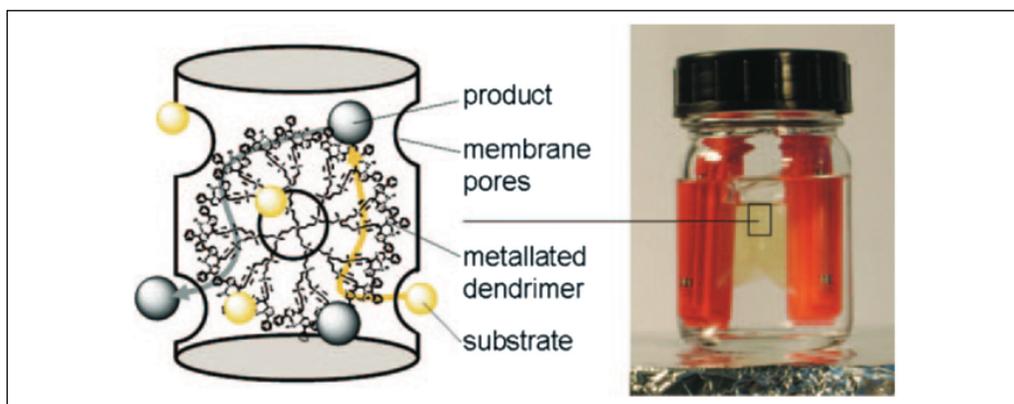


圖 6 透析法進行觸媒回收裝置圖 [14]

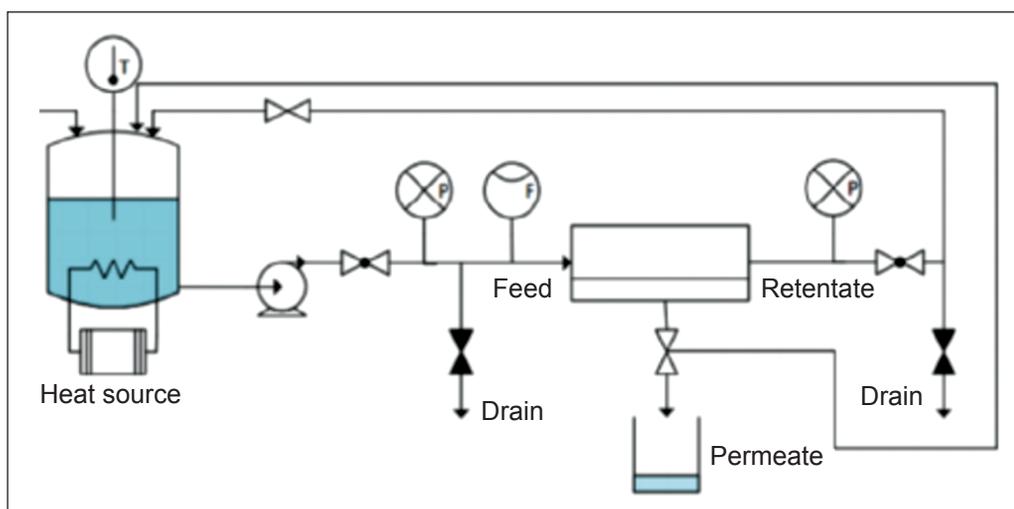


圖 7 掃流過濾進行觸媒回收示意圖 [15]



束之後再用新鮮、低濃度的溶液去替換產物溶液，催化劑就可以再次進行轉化，是裝置設備最為簡單的一種模式，但也比較僅限於實驗室規模。

後面兩種模式皆是利用壓力來做為驅動力進行薄膜分離程序。接下來是終端過濾，是主要用在實驗室、研究環境的過濾裝置，主要用以原理的應證，很難進一步地擴大規模。最後則是連續式的掃流過濾系統，這一類過濾方式需要比較多設備，因此在實驗室中比較困難發展，但是這類的過濾方式卻是最可以將薄膜性能發揮到最好的種類，並且容易放大規模，所以常常使用在工業工廠，甚至也有設備廠商製造出實驗室研究用整套

的觸媒回收掃流系統，可以見得薄膜過濾在觸媒回收是相當具有研究價值以及經濟價值的應用。

圖8為一有機催化劑回收的串聯系統，圖中T0~T3是緩衝槽，M1、M2是薄膜分離單元程序，M1用於保留催化劑同時讓產物透過、M2則是使用孔洞更小的薄膜將產物濃縮，同時產生純溶劑供M1重複使用。虛線表示控制幫浦維持緩衝槽以及滯留槽中水位的控制迴路[16]。在這樣一套設備中進行了兩次不同目地的過濾，同時讓濾液端回流，讓溶劑重複使用達到不只是催化劑，同時也是溶劑的回收再使用，是一種循環經濟的表現。

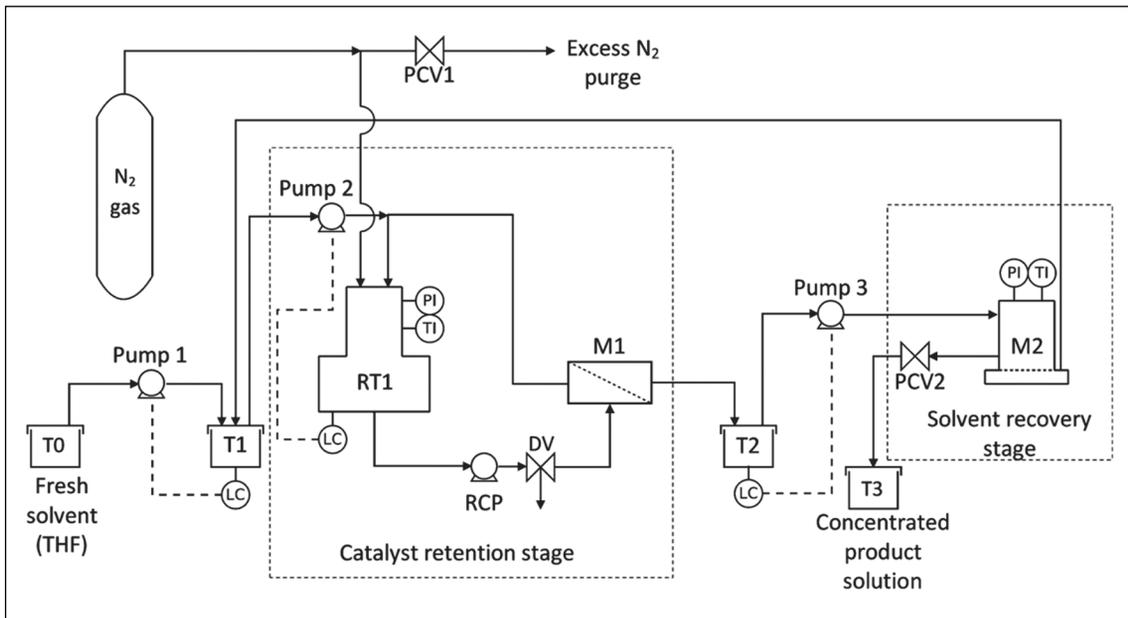


圖 8 有機催化劑回收串聯裝置示意圖 [16]

四、回收工業廢酸鹼

工業廢水的有價資材回收議題方興未艾，其中酸鹼回收因其用途廣泛、用量龐大，為產業界所矚目與優先發展的重點。將電透析作為酸鹼回收的有力工具，除了能在回收效率以及操作成本上具有競爭優勢外，亦可在設定範圍內得到回收品質的酸與鹼。作為電透析關鍵零組件的離子交換膜，在酸鹼回收應用上有多種選擇，以下針對其在技術應用上做一比較探討，以期為產業廢水資源化能有所裨益。

從循環經濟角度出發，生產原物料的綠色製程與循環使用，將能有效減少製程與環境成本。將生產程序所產生的廢水、廢氣甚至廢棄物，予以有效再利用而非單單減低濃度後排放，近年也逐漸成為環境技術的新興走向。其中廢水中有價物質的回收日益受到重視。從含有高濃度離子的廢水中提取具有商業價值之鹽、酸及鹼化合物，一般使用之回收技術大都為蒸餾、離子交換、溶劑萃取、吸附、共晶冷凍及電透析（Electrodialysis）等方法。

在諸多酸鹼回收（Acid-Alkali Recovery）技術中，電透析法（Electrodialysis；ED）利用電場驅動下可有效分離而非完全篩除水中無機離子之特性，優於使用壓力來分離的薄膜系統[17]。電透析技術依其系統構型與操作方式，又可分為電解去離子

技術（Electrodeionization；EDI）、倒極式電透析（Electrodialysis Reversal；EDR）[18, 19]及雙極膜電透析（Bipolar Membrane Electrodialysis；BMED）[20-22]，皆廣泛應用於脫鹽之水處理及回收技術，亦能有效應用於有價資材的回收。

（一）電透析於酸鹼回收上的應用

1. 雙極膜電透析應用的研究進展

雙極膜電滲析的原理（如圖9）是將用於鹽分離的電滲析與用於將鹽轉化為相應的酸和鹼的電滲析水分解相結合[23]。雙極膜促進水分解為質子和氫氧化物離子。雙極膜是一種特殊類型的分層離子交換膜，其中兩個聚合物層一個僅可滲透陰離子，另一個僅可滲透陽離子。與膜工藝不同，EBM不是用於分離目的，而是用於在陰離子和陽離子滲透層直接接觸的膜的雙極連接處發生反應。主要要求是：(1)優異的長期穩定性(2)潛力的低被動下降(3)水分解率高(4)高滲透選擇性(5)以及良好的機械穩定性[24]。電解過程中電極上的水分解不同，該反應不會形成副產物氣體，也不會使用氣體。雙極膜電滲析（EDBM）可以通過在電極處分解水來代替電解，並且還可以有更廣泛的應用。電滲析生產一摩爾溶液所需的電位差為0.83 V，相當於22 Wh的能量消耗。相比之下，理論電勢下降的電解產生相當於55 Wh的能量消耗。雙極膜技術的其他優勢包括相對簡單的設備配置、堆疊式設置的選項以及低投資成本。

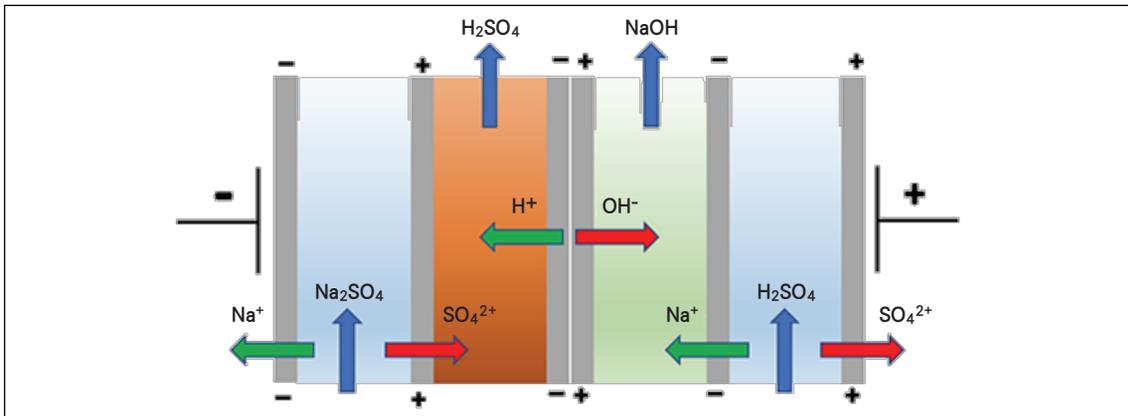


圖 9 通過將雙極膜應用於相應的酸和鹼，鹽離子分裂的示意圖 [23]

目前應用有許多，包括由有機酸鹽生產有機酸[25]、氨基酸鹽生產氨基酸[26]、用鹽廢液製酸製鹼[27]和由無機鹽生產酸和鹼[28]。

2. 單極膜電透析於酸鹼回收的應用

傳統單極膜（Monopolar Membrane；MPM）廣泛應用於電透析產業，由氯鹼工業伊始，應用技術有其特定優勢。單極膜於化工製程的製酸、產鹼應用上，大多結合由電極電解產生之 H^+ 、 OH^- ，結合受電場感應穿膜透析之離子而得到酸、鹼甚至鹽類，即隔膜電解系統。

此類系統較需注意的主要為易造成硬度積垢之鈣及鎂離子、易形成有機物堵塞的COD及TOC，以及矽酸鹽等。

近年典型隔膜電解案例如2010年Keramati等人的研究[29]，從模擬配置之硫醇氧化洗滌塔廢水中，以電透析法回收鹼，探

討兩室與三室槽體之電透析系統回收鹼之效能，如圖10所示。結果顯示三室槽體之回收率、電流效率與能耗皆優於兩室槽體，因 H^+ 會由系統中陽極反應生成，故於兩室槽體系統中， H^+ 易與 Na^+ 競爭透膜至陰極與 OH^- 反應。

藉由以上的簡單介紹後，根據文獻提出以單極膜與雙極膜構型兩種電透析構型系統，探討至少削減70%電導度背景要求下的酸鹼回收效益。說明此技術可有效達到酸鹼回收之目標，更可放大（scale-up）至工廠規格，為電透析薄膜立下了可大量工業化發展的指標，未來更可應用在生物技術、食品加工和廢水處理上。

五、氣體分離

氣體分離的應用主要有三種，目前氣體分離的應用主要有三種（如圖11），

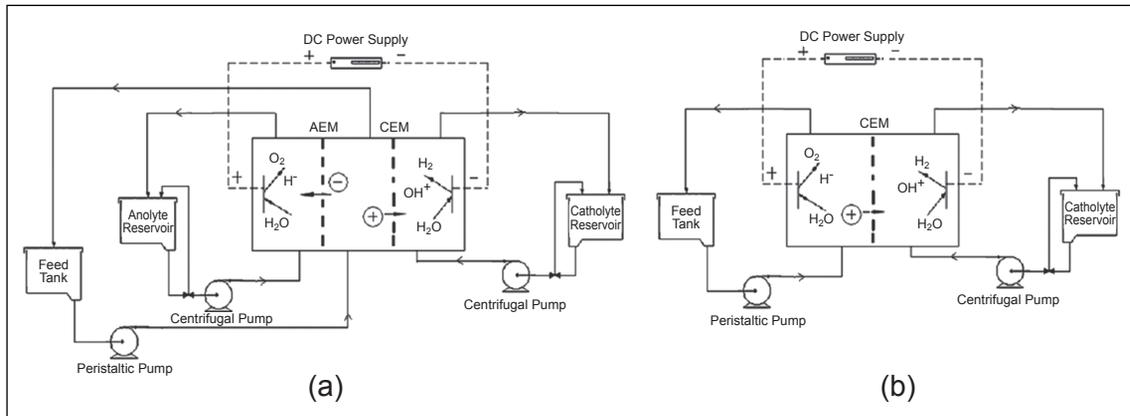


圖 10 批次式電透析系統，(a) 兩槽式單元；(b) 三槽式單元 [29]

- (一) 氮氣氧氣純化：空氣取之不盡，且價格低廉，空氣主要由氮氣及氧氣構成，只要從空氣中分離，就可得到極具價值的純氧和純氮，分別可以用於醫療用途及保存食物等，甚至是其他工業製程也會用到。
- (二) 氫氣回收：自水煤氣中分離出氫氣，除了用在工業製程中，同時還是最環保的燃料
- (三) 二氧化碳分離：二氧化碳捕捉可以避免將其排至大氣中，造成更嚴重的地球暖化。

因此，氣體分離在生活中扮演著不可或缺的角色。

而近年來，工業發展快速，工廠數量迅速增加，氣體的需求也日益漸增，因此科學家不斷地尋找更合適更便宜的氣體分離技術，以因應工業界的潮流。傳統技術如冷凍蒸餾 (Cryogenic Distillation)、變壓

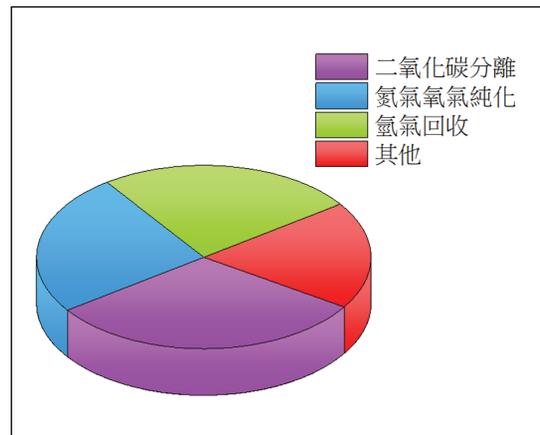


圖 11 全球氣體分離膜市場分布 (2015-2019) [30]

吸附 (Pressure Swing Adsorption)、化學吸收 (Chemical Absorption)，已發展一段時間，可能無法有衝擊性的進展，此時，尋找新的技術或許能帶來巨大的突破。薄膜分離做為一個新興的技術，具有低能耗、易操作的優點，相當具有前瞻性，也是未來研究的目標。

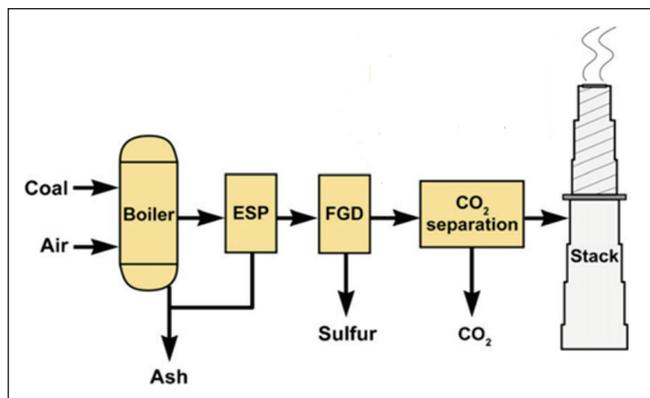


圖 12 燃煤發電廠煙道氣處理流程圖 [32]

由於低成本以及充足的煤炭來源，火力發電一直是主要發電的方式，但隨之而來的是大量二氧化碳的排放，2019年，美國能源產業約排放出51億公噸的二氧化碳[31]，使大氣中二氧化碳濃度急遽上升，而導致氣候變遷。因此，人們早已試圖尋找解決方法，碳捕捉技術也就成為眾所矚目的焦點，因此以碳捕捉中燃燒後處理式（Post-combustion）做比較，如圖12所示。燃燒廢氣首先通過靜電集塵器（ESP：Electrostatic Precipitator）去除大顆粒，再進入排煙脫硫（FGD：Flue Gas Desulfurization）去除硫化物，最後是碳捕捉的階段[32]。現今有各式各樣的碳捕捉技術，冷凍蒸餾、胺吸收（Amine Absorption）、變壓吸附、薄膜分離（Membrane separation）等。

冷凍蒸餾利用氣體之間的沸點差進行分離，但氣體的沸點很低，必須消耗相當大量能源到達低溫，因此在較大規模的程序才會

符合經濟效益，也因此應用的範圍並不廣。胺吸收是目前主流的二氧化碳捕捉技術，但它的缺點很明顯，它相當的耗費能源。假設想去除煙道氣中90%的二氧化碳，那利用燃煤發電產生的電力，將會有30%耗費在胺吸收法的碳捕捉上，處理每公噸的二氧化碳須耗費40-100美元[32]，真正能利用的能源並不多。而胺吸收的技術已成熟，未來進步的空間並不大，如果想減輕碳捕捉的成本，就得另尋其他方法。

薄膜大多以壓力差做為驅動力，再利用孔徑大小對不同大小的分子進行篩選，純化出想要的物質。薄膜可以在常溫常壓下操作、設備體積小、佔地小，易於放大或縮小規模（Scaling Up and Down），低能耗、低成本資本（Capital Cost）及低運作成本（Operating Cost）。在上述例子中，如使用薄膜進行碳捕捉，每公噸二氧化碳只須花費23美元[32]。相比之下，薄膜具有很高的競

爭力，也是未來極具發展性的技術。

參考文獻

1. 行政院環境保護署毒物及化學物質局 (109 年)。 <https://topic.epa.gov.tw/chemiknowledgemap/cp-452-9109-6b33d-5.html>
2. Ramshaw, C., "The Incentive for Process Intensification," *Proceedings, 1st Intl. Conf. Proc. Intensif. For Chem. Ind.*, 18, BHR Group, London, p. 1 (1995).
3. Stankiewicz, A. I., & Moulijn, J. A. (2000). Process intensification: transforming chemical engineering. *Chemical engineering progress*, 96(1), 22-34.
4. Drioli, E., Stankiewicz, A. I., & Macedonio, F. (2011). Membrane engineering in process intensification—An overview. *Journal of Membrane Science*, 380(1-2), 1-8.
5. Kołtuniewicz, A., & Drioli, E. (2008). *Membranes in clean technologies*. Wiley-VCH.
6. 閔恩澤、吳巍 (92 年)。綠色化學與化工。臺北市：五南。
7. Vane, L. M. (2013). Pervaporation and vapor permeation tutorial: membrane processes for the selective separation of liquid and vapor mixtures. *Separation Science and Technology*, 48(3), 429-437.
8. Jusoh, W. Z. A. W., Rahman, S. A., Ahmad, A. L., & Mokhtar, N. M. (2020). Modifications on Polymeric Membranes for Isopropanol Dehydration Using Pervaporation: A Review. *Applications of Nanotechnology for Green Synthesis*, 97-124.
9. León, J. Á., Prado-Rubio, O. A., & Fontalvo, J. (2019). Design of hybrid distillation and vapor permeation or pervaporation systems. *In Process Intensification*. De Gruyter. 243-275
10. Wu, Y., Meng, D., Yao, D., Liu, X., Xu, Y., Zhu, Z., ... & Gao, J. (2020). Mechanism analysis, economic optimization, and environmental assessment of hybrid extractive distillation–pervaporation processes for dehydration of n-propanol. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(11), 4561-4571.
11. Lv, B., Liu, G., Dong, X., Wei, W., & Jin, W. (2012). Novel reactive distillation–pervaporation coupled process for ethyl acetate production with water removal from reboiler and acetic acid recycle. *Industrial & engineering chemistry research*, 51(23), 8079-8086.
12. Vane, L. M. (2020). Review of pervaporation and vapor permeation process factors affecting the removal of water from industrial solvents. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 95(3), 495-512.
13. Shigeru Terada. 「Introduction to zeolite membrane for dehydration」, 「過濾分離 vs. 循環經濟」系列講習會 (三) 廢溶劑回收純化技術與挑戰」, 臺灣過濾與分離學會, 臺大, 臺北, 108 年 10 月
14. Gaab, M., Bellemin-Lapponaz, S., & Gade, L. H. (2009). "Catalysis in a Tea Bag": Synthesis, Catalytic Performance and Recycling of Dendrimer-Immobilised Bis-and Trisoxazoline Copper Catalysts. *Chemistry-A European Journal*, 15(22), 5450-5462.
15. Morshed, M., Simonaire, H., Alem, H., & Roizard, D. (2020). Investigation of OSN properties of PDMS membrane for the retention of dilute solutes with potential industrial applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(6), 48359.
16. Siew, W. E., Ates, C., Merschaert, A., & Livingston, A. G. (2013). Efficient and productive asymmetric Michael addition: development of a highly enantioselective quinidine-based organocatalyst for homogeneous recycling via nanofiltration. *Green chemistry*, 15(3), 663-674.
17. Allison, R.P., *Electrodialysis reversal in water reuse applications*. Desalination, 1995. 103(1-2): p. 11-18.
18. Bernardes, A., M. Rodrigues, and J. Ferreira, *Electrodialysis and water reuse*. 2016: Springer.
19. Oztekin, E. and S. Altin, *Wastewater treatment by electro dialysis system and fouling problems*. Turkish Online Journal of Science & Technology, 2016. 6(1).
20. Ghyselbrecht, K., et al., *Desalination of an industrial saline water with conventional and bipolar membrane electro dialysis*. Desalination, 2013. 318: p. 9-18.
21. Pourcelly, G., *Electrodialysis with bipolar membranes: principles, optimization, and applications*. Russian Journal of Electrochemistry, 2002. 38(8): p. 919-926.
22. Tongwen, X., *Electrodialysis processes with bipolar membranes (EDBM) in environmental protection—a review*. Resources, conservation and recycling, 2002. 37(1): p. 1-22.
23. Bazinet, L., F. Lamarche, and D. Ippersiel, *Bipolar-membrane electro dialysis: Applications of electro dialysis in the food industry*. Trends in food science & technology, 1998. 9(3): p. 107-113.
24. Yang, Y., et al., *An innovative beneficial reuse of seawater concentrate using bipolar membrane electro dialysis*. journal of membrane science, 2014. 449: p. 119-126.
25. Lei, C., et al., *Comparative study on the production of gluconic acid by electro dialysis and bipolar membrane electro dialysis: Effects of cell configurations*. Journal of Membrane Science, 2020. 608: p. 118192.
26. Sun, X., H. Lu, and J. Wang, *Recovery of citric acid from fermented liquid by bipolar membrane electro dialysis*. Journal of Cleaner Production, 2017. 143: p. 250-256.
27. Tian, W., et al., *Optimal treatment of hypersaline industrial wastewater via bipolar membrane*



- electrodialysis*. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019. 7(14): p. 12358-12368.
28. Zhang, X., et al., *Sustainable treatment of desulfurization wastewater by ion exchange and bipolar membrane electrodialysis hybrid technology*. Separation and Purification Technology, 2019. 211: p. 330-339.
 29. Keramati, N., A. Moheb, and M.R. Ehsani, *NaOH recovery from MEROX tower waste stream using the electrodialysis process*. Separation Science and Technology, 2010. 46(1): p. 27-32.
 30. Global Gas Separation Membranes Market Status(2015-2019) and Forecast(2020-20024) by Region, Product Type & End-Use.
 31. U.S. Energy-Related Carbon Dioxide Emissions, 2019, U.S. Energy Information Administration.
 32. Merkel, T. C., Lin, H., Wei, X., & Baker, R. (2010). Power plant post-combustion carbon dioxide capture: An opportunity for membranes. *Journal of membrane science*, 359(1-2), 126-139.