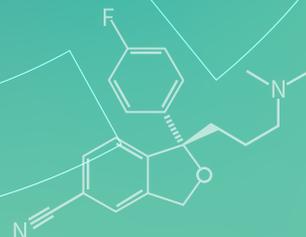
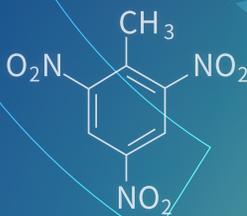
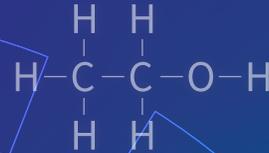
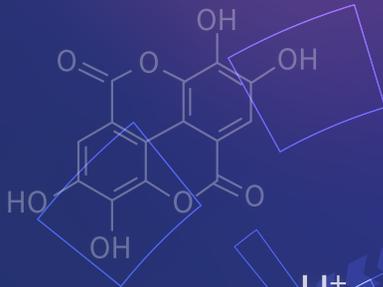




工程

- ▶ 中國工程師學會暨各專門工程學會110年聯合年會
- ▶ 蔡總統接見並嘉勉110年得獎人
- ▶ 膜分離技術在化工程序強化上之新應用
- ▶ 以變壓吸附法捕獲燃煤電廠煙道氣中二氧化碳
- ▶ 蒸餾節能設計在化工製程上的開發與應用
- ▶ 高效氣固旋風分離器的發展與應用
- ▶ 保健食品常用之分離純化流程

化工分離技術 的應用與進展





皇昌營造股份有限公司

Hwang Chang General Contractor Co., Ltd.



本公司承攬之桃園市觀音區草漯第一、三、六區整體開發單元市地重劃統包工程

本工程位於草漯市中心之成功路及大觀路上，分為三個工區，開發面積約 147.88 公頃，以綠色、韌性、循環、智慧、創新科技等五大指標，大量使用再生材料，落實循環經濟，創造智慧、綠能、低碳城市。



台北市內湖區行善路 353 號 8 樓、(02)2792-2988、www.hcgc.com.tw





化工分離技術的應用與進展

化工分離技術利用混合物各成分的性质差異，將其轉化成分兩項或更多的產品，達成分級、分離、濃縮、純化等效果，為民生、醫藥、環境等產業的關鍵環節，直接影響生產成敗，也主宰成本耗費與產品競爭力。伴隨著產業蓬勃發達，化工分離技術也快速進展，或開發新穎技術、或設計改善方案、或耦合多種分離程序等，均以提效、節能、低碳、降排、回收、增益為發展目標。本專輯很榮幸邀請到五位專家學者介紹：薄膜、吸附、反應蒸餾、旋風分離、保健食品原料製程等分離技術，期盼廣為周知，也期待臺灣在此領域的研發與實務運用更加精進，增加競爭力。

活動報導

- 02 中國工程師學會暨各專門工程學會110年聯合年會圓滿順利成功
- 08 蔡總統接見並嘉勉110年得獎人
- 11 2021知識分享研討會
- 18 中華台北亞太暨國際工程師增能培育課程
- 21 2021海外工作經驗分享暨座談
- 23 「永續經營-循環營建」研討會與參訪

化工分離技術的應用與進展

客座主編：孫幸宜 / 國立中興大學化學工程學系 教授

- 27 膜分離技術在化工程序強化上之新應用 / 童國倫、陳彥勳、周鼎勳、吳柏均、葉侑叡、陶方廷
- 41 以變壓吸附法捕獲燃煤電廠煙道氣中二氧化碳 / 魏子倫、郭家禎、李柏霖、曾致堯、周正堂、楊明偉、莊宗諭、張弘震
- 62 蒸餾節能設計在化工製程上的開發與應用 / 李豪業
- 81 高效氣固旋風分離器的發展與應用 / 陳晴語、楊令琇、黃安妮、郭修伯
- 93 保健食品常用之分離純化流程 / 蔡岳樺

理事長：施義芳

常務理事：李世光 胡湘麟 許鈺漳 楊偉甫

理事：王宇睿 王錫欽 伍勝園 江秀丹

余信遠 宋裕祺 李順欽 杜俊

林聰利 俞克維 張武訓 莫仁維

陳仲賢 陳哲生 陳國隆 楊正宏

楊宗興 廖學瑞 歐善惠 鄭文隆

鄭光遠 賴建信

常務監事：廖慶榮

監事：邱琳濱 高宗正 陳宗德

秘書長：李元唐

副秘書長：李瑋聆

發行所：中國工程師學會出版委員會

主任委員：黃炳勳

委員：王宇睿 李元唐 吳天寶 林建華

林根勝 孫幸宜 莫仁維 陳哲生

陳榮貴 楊正宏 廖學瑞 蘇程裕

總編輯：張鈺輝

客座主編：孫幸宜

編輯：李宥萱 李綺馨 林秀琴 袁雅玲

梁愛倫 許舜雅 蔣雪芬

聯絡地址：114710 臺北市內湖區陽光街323號

電話：(02) 8797-3567轉8200、8225、8234

傳真：(02) 8797-4585

會址：100026 臺北市仁愛路二段1號3樓

電話：(02) 2392-5128

傳真：(02) 2397-3003

網址：<http://www.cie.org.tw>

郵政劃撥：00059892

戶名：社團法人中國工程師學會

編印：英杰企業有限公司

地址：106411 臺北市大安區復興南路二段293-3號10樓之1

電話：(02) 2732-1234

行政院新聞處出版事業登記證局版臺誌0765號
中華郵政臺北誌字第721號執照登記為雜誌交寄
入會申請手續請上本會網站查詢

※版權所有，本刊圖文未經同意，不得轉載。



中國工程師學會暨各專門工程學會 110年聯合年會圓滿順利成功

「數位轉型 工程先行」

中國工程師學會暨各專門工程學會110年聯合年會於11月22日假台北晶華酒店舉行，活動當天計有來自全國各地的會員、得獎者及貴賓約500人與會。

為了擴大辦理今年的慶祝活動，本屆年會由施義芳理事長兼任籌備會主任委員，邀請台灣世曦工程顧問股份有限公司負責籌辦，活動以「數位轉型 工程先行」為主

題，期許工程界以前瞻性的思維，共同為未來的經濟建設及科技發展注入能量，並響應政府六大核心戰略產業，加速臺灣的轉型與升級，邁向「創新、包容、永續」的智慧國家。

年會活動在御鼓坊帶來「凱旋擊鼓 祥獅獻瑞」的表演中揭開序幕，為年會增添喜氣。今年總統因行程緊湊無法出席，故委請



▲ 施義芳理事長致詞



▲ 新境界文教基金會洪耀福副董事長蒞會致詞



▲ 施義芳理事長（右三）及洪耀福副董事長（左三）與本年度會士合影

新境界文教基金會洪耀福副董事長代為出席與會發表致詞，為工程界加油打氣。洪副董事長除祝賀本學會會務昌隆，並表示該基金會為國家重要的智庫，誠摯希望各界不吝給予寶貴政策之建議，以利召集相關單位進行討論，願為工程界與國家之重要溝通橋梁。

施理事長於開幕時感謝各界熱情參與，表示臺灣發展工程4.0最大的挑戰在於傳統的工程業要跨界整合高科技產業，要讓跨領域的專家互相溝通整合，迫切需要產業界和學研界攜手合作，本會樂意擔任整合平台，讓國家從工程開始數位轉型，共創臺灣榮景。



▲ 施義芳理事長（右五）與傑出工程教授得獎人合影



▲ 施義芳理事長（中）與傑出工程師得獎人合影

施理事長並報告近期會務推動重點，包括：推動專業工程師國際資格認證與合作、出版工程會刊、學刊、電子報及製作線上有聲節目CIE Podcast，並進行本會120年發展策略白皮書的修訂。在國際合作及國際組織參與除固定與亞洲開發銀行（ADB）舉辦「知識

分享研討會」，並持續參與世界工程組織聯盟（WFEO）、國際工程聯盟（IEA）、亞洲及太平洋工程組織聯盟（FEIAP）等國際工程組織活動，同時，為擴大我國在國際間的能見度及影響力，本會已向FEIAP提出爭取2024年大會在臺舉辦。



▲ 施義芳理事長（中）和高宗正主任委員（左五）與優秀青年工程師得獎人合影



▲ 高宗正主任委員頒贈詹天佑論文獎

此外，本會也特別編印出版創會110年紀念專刊，就各工程領域下一世代的願景工程提出前瞻性的思維，施理事長表示，在瞬息萬變的世界局勢中，特別是在後疫情的時代，希望可以讓我們工程界更快速的掌握新的競爭優勢，迎接未來的新挑戰。

本年會士遴選了4位，分別為國立臺灣科技大學廖慶榮講座教授、交通部高速鐵路工程局張武訓前副局長、中興工程顧問股份有限公司陳仲賢董事長及國立成功大學蔡明祺講座教授，均親自出席年會，由洪副董事長頒發會士證書。



▲ 施義芳理事長（中）與工程論文獎得獎人合影



▲ 施義芳理事長（中）與產學合作績優單位代表合影

本屆年會表揚之各類工程獎項，包括「傑出工程教授獎」、「傑出工程師獎」、「優秀青年工程師獎」、「詹天佑論文獎」、「石延平教授工程論文獎」、「工程論文獎」、「工程優良獎」、「產學合作績優單位」、長青會

員表揚等，頒獎典禮歡欣隆重。另考量「優秀工程學生獎學金」、「沈怡獎學金」得獎人已畢業，已先於8月5日假本會會議室頒贈，相關得獎名單已公告於本學會工程會刊第94卷第2期之會務佈告。



▲ 施義芳理事長(右六)與產學合作績優單位代表合影

本年度的年會活動，原訂於6月5日舉辦，因疫情關係延至11月22日，特別感謝各界的大力支持，使活動得以順利舉行。至原預訂於年會間舉辦的研討會，已改以預錄方式完成，由工研院及資策會李世光董事長主講「數位科技驅動產業創新」，以及中華電信公司郭水義總經理主講「5G數位轉型，工程結盟先行」，影片已放置於本會官網。本次年會照片及影音檔亦放置本學會官網及臉書粉絲團，歡迎前往瀏覽下載。



▲ 李元唐秘書長進行會務報告



蔡總統接見並嘉勉110年得獎人

蔡總統於11月16日上午10時在總統府接見並嘉勉中國工程師學會110年度各獎項的得獎人，由本會施義芳理事長率領，包括總統府李大維秘書長及工程會顏久榮副主任委員亦出席是項活動。

總統致詞時首先恭喜在座的得獎人，並表示每一位得獎人的努力，都讓臺灣的工程領域不斷進步發展，也藉今天的機會，感謝施理事長帶領的中工會團隊，持續凝聚工程界的力量，支持政府的各項政策。

總統表示，面臨極端氣候的挑戰，打造具有韌性的基礎建設、守護民眾生命財產的安全是當前最重要目標，期盼得獎人運用專業的工程技術，追求環境的永續發展。同時，也相信中工會會繼續發揮「工程師宣言」的精神，為下世代打造更美好的社會。

施理事長引言時代表本會向總統表達最大的敬意與謝意，能在公務繁忙當中特別安排接見本會110年度各獎項的得獎人，並為工程界揭示未來努力之方向，不斷給予本會



▲ 蔡總統與得獎人合影



▲ 施義芳理事長引言



▲ 賴建信署長代表致詞

協力發展國家進步的能量。未來本會將持續整合工程界的力量，配合國家建設的施政方針，推動臺灣工程科技智慧化與創新化的發展，以及跨領域的人才培育，加速將臺灣人才與產業推向國際，善盡我們工程師對國家、社會的責任。

水利署賴建信署長為本年度傑出工程師得獎人，代表致詞時表示氣候變遷為全球關注議題，日前召開COP 26期望達成2050年淨零碳排的目標，不僅需要各國政府加快腳步推動相關策略，更需全民共同努力配合，以降低極端氣候產生的災害。



▲ 施義芳理事長致贈本會創會 110 年紀念專刊予蔡總統



▲ 蔡總統與得獎人合影

會談結束後，由蔡明祺會士代表接受總統贈禮，施理事長致贈紀念品及本會創會110年紀念專刊予總統，接著總統與全體與會人員至一樓大廳合影。晉見結束後，得獎人在志工導覽下參觀總統府文物館，分享總統府的建築奧妙和歷史回顧。

2021知識分享研討會

在行政院公共工程委員會指導下，本學會與亞洲開發銀行（Asian Development Bank, ADB）共同舉辦「2021知識分享研討會（2021 Knowledge Sharing Seminars）」，於8月23日至9月17日期間，就交通（Transportation）、都市（Urban）、水（Water）、健康（Health）等4個領域辦理6場演講活動並進行研討。

一、開幕式

8月23日下午於本學會舉行知識分享研討會開幕式，亞銀由曾欲朋副執行董事及亞銀永續發展暨氣候變遷局（SDCC）首席部門主管Robert Guild（Chief Sector Officer）代表

出席，本學會李元唐秘書長、對外關係委員會王子安主任委員及吳錫賢執行秘書、中華台北亞太暨國際監督委員會洪向民副主任委員、秦中天副主任委員、孫以濬顧問、王祥驪執行長、林建華副執行長，及接續兩場研討會的演講人共同出席。

曾欲朋副執董首先致詞說明今年活動改以視訊方式進行研討，分享我國的工程技術和管理經驗，首場的交通領域對於亞銀是非常重要的，特別是有關智慧交通及智慧城市的發展歷程，應可為其他會員國提供建設性的參考。Robert Guild表示亞洲城市人口稠密，需要考慮公共運輸系統的多元性和共享機制，而都市的公共運輸系統不只是建設，



▲ 知識分享研討會開幕



還必須持續透過新的管理技術來進行升級，所以許多會員國都向亞銀尋求協助，希望經由公共運輸系統的改進來提高出行的便利性，讓生活變得更好，這也是亞銀的終極目標。

李元唐秘書長致詞時表示感謝亞銀的支持及主講人的分享，使本學會可以持續在工程相關領域中為亞銀會員國提供技術信息以協助發展，未來希望與亞銀有更多層面的交流，進一步擴大合作關係。洪向民副主委則表示藉由

與不同地區的專業人士進行知識交流和經驗分享，是增加知識深度並證明技術合理的最佳方法，很高興本學會有這個機會與亞銀共同努力為亞洲區域的發展貢獻心力。

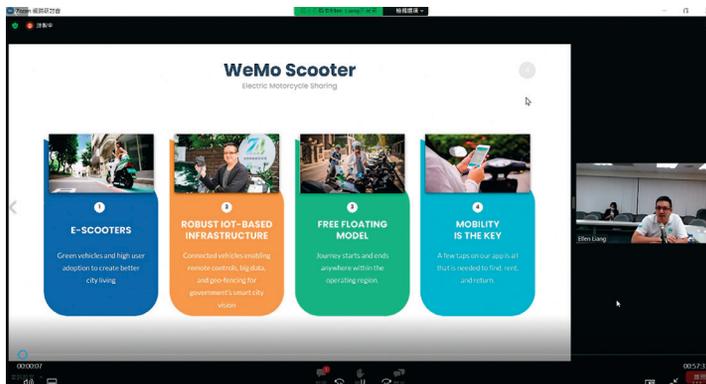
二、研討會

(一) Transportation Sector

8月23日就交通領域舉辦2場研討會，由亞銀主任交通專家Bertrand Goalou (Principal



▲ Transportation Sector- 凌羣電腦主講



▲ Transportation Sector- 威摩科技主講

Transport Specialist) 主持。第1場演講由凌羣電腦股份有限公司劉瑞隆總經理簡報「Inter-City Bus Terminal Goes Smart」，第2場演講由威摩科技公司鄭捷共同創辦人暨技術長簡報「Using Sharing Motorcycles to create Taiwan's largest fleet of IOT」，2場演講的與談人邀請孫以濬顧問擔任。

劉瑞隆總經理介紹凌羣電腦負責開發的台北轉運站智慧售票系統，乘客綁定電子支付後，即可使用手機完成買票和訂位，系統採用非接觸技術，在疫情嚴峻期間成功降低接觸感染的風險。亞銀方面就電子付款的相容性、系統應用範圍、成本及維修等問題提出詢問。鄭捷技術長介紹威摩科技採用B2B車聯網全方位解決方案所建置亞洲最大的機車共享平台，亞銀方面就停車、基礎設施費用等提出詢問。研討會總結時，曾欲朋副執行董事對兩位主講人提供的豐富資訊表示感謝，並說明亞銀對改善空污的議題相當重

視，許多亞洲國家也都有交通問題，相信智慧運輸的技術將可有效改善相關的問題。

(二) Urban Sector

9月7日舉辦都市領域研討會，由中華台北亞太工程師監督委員會楊亦東主委致詞，UCCRTF顧問Ma. Victoria B. Antonio (Vicky) 主持 (Consultant, Urban Climate Change Resilience Trust Fund)，中興工程顧問社防災科技研究中心曹鼎志副主任簡報「State of the art hazard mapping—case study of debris flow」，說明我國近年以經驗值及數值模擬模式預測土石流範圍及距離的方式，以及談人為都市發展專家Laxmi Sharma (Urban Development Specialist)。

研討會總結時，亞銀都市部門主管Manoj Sharma表示感謝本學會的合作和主講人精采的演講，線上討論很有趣也很熱烈，希望未



▲ Urban Sector- 中興工程顧問社主講



來繼續保持交流。從這次的研討會中可以了解災害管理需要法規、制度以及專責機關的支持，如此才會有足夠的資源對潛在的災害區域進行劃設和管理，像水土保持局這樣的機構就非常重要，同時我們也學到了一些實用的分析技術。亞銀及會員國在面對氣候變遷、天然災害，乃至Covid-19的威脅時，如何使我們居住的城市更有韌性、更永續、更宜居都是艱難的挑戰，這次的研討會提供了許多有用的資訊。

(三) Water Sector

9月9日舉辦水領域第1場研討會，由亞銀都市發展專家Sunghoon Kris Moon (Urban Development Specialist) 主持，主題為「Intelligent Water Management System: WISE」，由台灣世曦工程顧問公司地理空間資訊部許家成計畫經理主講，台北自來水事業處黃欽稜副工程司協助說明及答詢，由王

子安主委擔任與談人。亞銀方面就低收入國家如何建置高成本的WISE，以及北水處如何達成收支平衡提出詢問，黃副工程司說明WISE的費用採用資本門投資40年折舊的方法來分攤建置成本，另簡報中提到的建置成本除軟體開發之外，還包括既有GIS資料庫的轉換、現場測量數據補正、水力分析等其他項目，因此總費用較高，若單純引進WISE系統，所需費用可大幅降低。

9月10日舉辦水領域第2場研討會，由楊亦東主委致詞，亞銀組合管理主任專家Natsuko Totsuka (Principal Portfolio Management Specialist, CWRD) 主持。經濟部水利署賴建信署長先行介紹水利署的組織和任務，接著由陳明城簡任正工程司主講「Drought Fighting under Climate Change: The Case in 2020-2021」，賴署長協助答詢。

陳明城正工程司說明整個乾旱應對計畫



▲ Water Sector- 台灣世曦主講

是以管理策略配合適當的監督作為來達成目標，包括透過完整的監測系統即時掌握乾旱狀況提出預警，辨識最脆弱的系統環節然後採取量身定制的因應措施，以減低乾旱風險並強化整備。賴建信署長於提問時說明氣候變遷對預測乾旱及水患等天然災害造成很大的挑戰，必須事先就工業、農業及民生用水的分配和調度進行規劃，以降低氣候變遷的不確定性所帶來的衝擊。

研討會總結時，亞銀水部門主管Neeta Pokhrel表示感謝主講人分享水資源管理和應對氣候變遷的相關策略及作法，希望未來可以持續進行交流。曾欲朋副執行董事亦表示感謝本學會及水部門共同合作安排這次的研討，希望雙方持續就相關議題進行交流。

(四) Health Sector

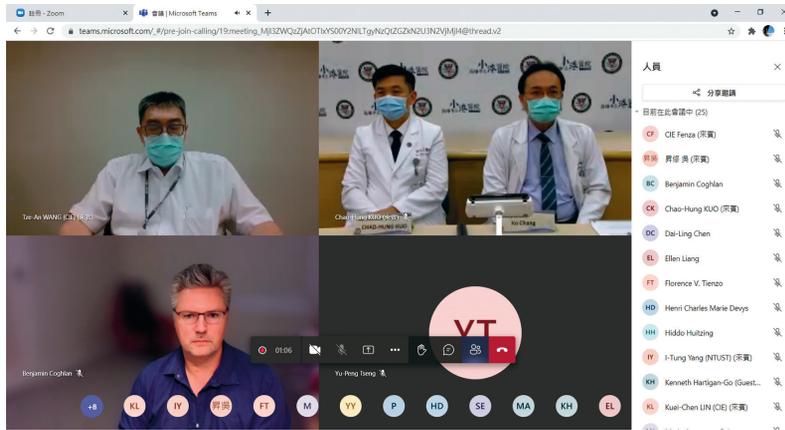
9月17日舉辦健康領域研討會，由王子

安主委致詞，亞銀資深健康專家Benjamin Coghlan (Senior Health Specialist) 主持，主題為「Strengthening Clinical Care and Community Services to Fight Covid-19」，由高雄市立小港醫院郭昭宏院長主講，該院張科醫師協助說明及答詢，與談人由台灣世曦工程顧問股份有限公司林貴貞協理擔任。郭昭宏院長首先說明高雄市立小港醫院是衛生醫療設施採用促參（PPP）模式執行的典範，介紹該院配合Covid-19防疫政策所建立的機制和系統、採用的智慧化措施及防疫成果。亞銀方面就PPP效益、疫情降低到院機制及政府補助等提出詢問。

曾欲朋副執董總結時盛讚本年度的研討會非常成功，討論的領域除Transportation與Water之外，更擴大到Urban與Health。亞銀同仁參與各個場次的情形相當踴躍，答詢討論也非常熱烈，相信這些寶貴的知識和經驗對亞銀會員國的發展會有相當大的幫助。曾



▲ Water Sector- 水利署主講



▲ Health Sector- 高雄市立小港醫院主講

副執董特別感謝亞銀及本學會的共同努力，成功促成雙方在許多領域的交流，如果亞銀對這次研討會的議題內容希望進一步瞭解，可直接與本學會聯繫以即時取得相關資訊，並希望亞銀及本學會很快可再安排相關交流活動，加強雙方的合作關係。

三、結語

本年度研討會係首次以視訊座談方式與亞銀共同舉辦，為使活動達到最佳效益，由本學會直接與各部門就議題規劃、研討內容、舉辦時間及人員安排等進行協調。依據過去與亞銀合作的經驗，本次提送的議題除推介我國的優勢技術和管理經驗之外，也同時考量會員國在後疫情時代的特殊需求，因此特別納入健康及防災的議題。各場次研討會結束後，亞銀部門主管及各場次的主持人分別來函感謝本學會所邀請專業人士的熱誠

分享，希望可與本學會持續保持聯繫和交流，其中Water Sector已表示將有進一步的合作提案，以及討論拓展自來水管理系統WISE應用的可能性。

本學會感謝各參與單位鼎力支持協助，包括行政院公共工程委員會、經濟部水利署、臺北市自來水事業處、台灣世曦工程顧問股份有限公司、中興工程顧問社防災科技研究中心、凌羣電腦股份有限公司、威摩科技公司及高雄市立小港醫院等單位，使活動得以順利圓滿完成。

同時特別感謝財政部駐亞銀的曾欲朋副執行董事居中協調安排，使研討會可持續推動辦理，協力推動會員國的發展，並使亞銀官員進一步瞭解台灣工程產業的能力和成就，希望未來可進一步推動我國工程業者取得亞銀大型建設計畫之契機。



本年度的知識分享研討會因為採用視訊方式，因此得以開放我國亞太暨國際工程師上線參加，藉以促進專業工程師對於我國工程技術發展現況的了解，並提升國際視野。

亞銀共同舉辦的知識分享研討會為我國的工程技術與管理經驗建立了一個對外推介的窗口，透過這個窗口可以與亞銀的官員和專家、亞銀會員國及貸款國的官員和專家進行對話，經由彼此相互交流進一步參與亞銀的援助和貸款計畫，也可以透過這些對話引導工程標案納入空間技術、數位應用、智慧交通、智慧醫療等具有創新性的元素以及多元化的商業模式，不僅可以協助開發中國家以更有效率的投資達成更高的計畫目標，同時也提升了我國廠商爭取標案的機會。



中華台北亞太暨國際工程師 增能培育課程

為進一步協助亞太及國際工程師擴展國際視野、學習能力培養、了解國際工程產業現況，本學會中華台北亞太暨國際工程師監督委員會假張榮發基金會國際會議中心舉辦2場增能培育課程，邀請6位在美國經驗豐富及事業有成的台灣工程師和企業主管進行專題演講。

第1場於10月25日舉辦，主題是有關領導、溝通和生涯轉變等非工程領域的技能。邀請寰宇新聞台葉思敏主播擔任主持人，活動開始由監委會洪向民副主委致詞，並說明此課程邀請3位美國專家授課及分享，主題涵

蓋管理實務、人際溝通與財務知識、跨界思考等綜合性的課題，希望能提昇各位工程師朋友的軟實力，也鼓勵學員踴躍發問，把握機會多多交流。

第2場於11月1日舉辦，主題是有關美國即將推出的基礎建設法案。由年輕工程師徐梓隆主持，監委會秦中天副主委致詞，說明此課程以近期美國政府全力發展的基礎建設為主軸，包括介紹橋梁建設、捷運系統、水的建設等關鍵設施及機會，藉此協助學員掌握美國基礎建設發展機會，並提昇競爭力。6位講師姓名及講題詳後附之議程表。



▲ 第1場課程由洪向民副主委致詞



▲ 第2場課程由秦中天副主委致詞



▲ 本次課程採線上與實體複合的形式

本次2場增能培育課程均透過王華弘博士協助連繫，邀請美國專家授課及分享，因此由王博士擔任引言人，向與會人員介紹演講人學經歷及課程要點。本次課程採用虛實複合的形式，遠端主持人和主講人因分處美國各地，透過線上會議系統參與，本地的與會者包括本地主持人、貴賓和學員以實體方式

參與，效果非常良好。

本次課程透過主講人的豐富經驗，搭配實務案例分享，有效提昇中華台北亞太及國際工程師的職能及知識，並藉由學員之間跨領域經驗交流，多面向互動增進學習成果，活動順利圓滿。



Chinese Taipei APEC Engr./IntPE Continuing Professional Development Course - 1

October 25, 2021

Time	Program	Speaker
09:00 - 09:30	Registration	
09:30 - 09:35	Opening Remarks	Mr. Sam Hung, Vice Chairman of CTAEMC, CIE
09:35 - 10:05	Lessons in Corporate Leadership	Mr. Matthew Yu, Maintenance, Repair, and Overhaul (MRO) systems lead at the Boeing Companies
10:05 - 10:20	Q&A	
10:20 - 10:30	Coffee Break	
10:30 - 11:00	Engineer Communication from a Financial Management Perspective	Mr. David Kuan, Vice President, Corporate Finance and Business Planning, Kingston Technology Co.
11:00 - 11:15	Q&A	
11:15 - 11:45	Paradigm Shift of Life: From An Engineer/ Scientist to Entrepreneur – Opportunities and Challenges after the Pandemic	Dr. Tai Lin President/Chief Executive Officer/Chairman at Ariel Premium Supply, Inc.
11:45 - 12:00	Q&A	
12:00 -	Closing	

November 1, 2021

Time	Program	Speaker
09:00 - 09:30	Registration	
09:30 - 09:35	Opening Remarks	Dr. C.T. Chin Vice Chairman of CTAEMC, CIE
09:35 - 10:05	Bridge Structure - the Largest Investment since the Construction of the Interstate Highway System	Dr. Shawn Wang Senior Bridge Engineer
10:05 - 10:20	Q&A	
10:20 - 10:30	Coffee Break	
10:30 - 11:00	Transit System - the Largest Funding Gains in terms of Percentage Increases	Mr. Wen Huang Construction Manager
11:00 - 11:15	Q&A	
11:15 - 11:45	Water Infrastructure - Improving Weatherization of Critical Facilities against Droughts and Floods	Dr. Jay Lin Sr. Project Manager Tunnel Group Manager
11:45 - 12:00	Q&A	
12:00 -	Closing	

2021海外工作經驗分享暨座談

本學會於10月28日假孫運璿科技人文紀念館多功能講堂，舉辦工程人員海外工作經驗分享暨座談，計有60餘位出席者，活動順利圓滿。

本次分享座談會邀請兩位在海外市場擁有豐富經驗的資深工程師專題演講，第一位是展群營造集團翁崇華副總經理，講題為

「捷運軌道工程海外輸出實務經驗分享」。展群的主要業務是各類軌道系統的製作、安裝、檢測和維修，翁副總在展群主管技術部門並負責海外業務，包括對馬來西亞、越南、泰國和菲律賓等地分公司的督導，因此得以從技術、經營和管理三個面向分析東南亞地區軌道工程的市場潛力和我國軌道技術輸出的競爭力，進而說明如何在全球供應鏈



▲ 本次座談與會人員合影



▲ 楊亦東主委主持 Q&A

之中確立自身的地位，據以充實各種技術資源，包括軌道工程需要的眾多機具和熟練的操作人員，這場演講為與會者清晰描繪了海外專業營造市場的整體面貌。

第二位主講人是世曦工程顧問公司捷運工程部譔家瑞副理，講題為「捷運工程設計海外輸出實務經驗分享」。譔副理在捷運和鐵道工程設計方面具有廣泛的經驗，包括在

印度、印尼和越南等海外的工作資歷，因此得以用許多實例指出看似單純的設計工作，也會因為技術規範、實體環境、設計工具和工程慣例的差異，出現與國內截然不同的設計結果，以致在審查中甚至業務上遭遇困擾。除專業性問題之外，譔副理也分享了海外專案在動員和生活安置方面所看到的現象，使與會者更貼近海外工作的實際狀態。

「永續經營-循環營建」研討會與參訪

為使資源不斷循環以達到零廢棄物之目標，循環經濟為各界矚目之議題，本學會環境與能源委員會於11月2日假台電公司綜合研究所禮堂舉辦「永續經營-循環營建」研討會，探討我國營建產業之循環經濟推動方向。

活動首先由環境與能源委員會楊偉甫主任委員致詞，邀請財團法人臺灣營建研究院呂良正院長主講「營建產業如何加速導入循環經濟」、台灣大學森林環境暨資源學系副教授兼生物多樣性研究中心邱祈榮主任主講「林業資源循環利用-木構造建築機會與挑戰」、工業技術研究院綠能所呂穎彬推廣經理主講「循環材料驗證與媒合平台介紹」。

環境與能源委員會於會後安排與會人員參訪綜研所樹林所區、台電公司綠能生態園區及飛灰釉陶瓷工藝，體驗資源再利用之實踐案例，活動順利成功。



▲ 楊委甫主委致詞



▲「永續經營-循環營建」研討會現場



化工分離技術的應用與進展－專輯序言

國立中興大學化學工程學系教授 / 孫幸宜

化工分離程序主要將進料混合物分開為組成相異的兩種或多種產物，是石化、塑膠、能源、食品、生技醫藥、資源環境等產業中非常重要的關鍵環節，諸如：石油煉製、海水淡化、氫氣純化、天然物萃取濃縮、生物製品或藥物精製等，都與化工分離技術緊密相關。尤其對產品的純度、濃度、回收率等具高標準需求時，分離技術的優劣至關重要，通常主宰了生產成本與產品競爭力，進而影響整個工業生產的經濟效益。並且，隨著經濟之高度發展，環境保護及資源永續意識提高，污染防治、減碳、淨零排放等訴求越受矚目，廢水與廢氣的妥適處理成為關注課題，例如：廢水中污染物與危害物質之去除、燃煤發電廠煙道氣之脫硫與溫室氣體分離等，也均離不開化工分離技術的運用。產業從前端產程把關至末端排放防治環環相扣，分離程序又是關鍵步驟，必須確實執行且嚴謹完成指標，方能在製備高品質產物的同時達成節約能源、有效利用資源、與控制環境污染，以獲得經濟優裕且安全舒適的生活環境。

化工分離技術乃利用混合物各成分的物性或化性差異，將其轉化分成兩項或更多的產品，操作效果包括：分級、分離、濃縮、純化等。因進料混合物的相態與性質多種多樣，故有不同類型之分離技術，且常需串聯或耦合多種分離技術於一生產程序，才能達成所訴求之分離標的。若按照相態分類，則有固-固、液-固、氣-固、液-液、氣-液、氣-氣等多類混合物分離方法。而若基於物質傳輸現象之發生與否，則可分為機械分離和質傳分離兩大類。第一類機械分離：目的是分開由兩相所組成之混合物的各相，通常有一相為固相，故使用機械方式即可達成，且分開的兩相間並無物質傳送現象發生，例如：過濾、沉降、離心、旋風分離等，此類操作之耗費較低。第二類質傳分離：多應用於均相混合物的分離，過程中會發生質量傳遞現象，依據其分離之驅動原理，又可分成平衡分離與速率分離兩種程序。平衡分離是藉助分離媒介使均相混合物變成兩平衡相，且混合物的各成分於兩相中具有不同的分配行為，因而實現分離效果，例如：蒸發、蒸



餾、吸收、吸附、離子交換、萃取、提取、乾燥、結晶等單元操作程序，應用廣泛。速率分離則是在驅動力作用下，有時需搭配選擇性膜層的功能，利用混合物各成分之擴散速率差異達到分離效果，驅動力包括：壓力差、濃度差、溫度差、電位差等；此類程序的產物通常和進料為同一相態，僅於組成上有所差別，多種薄膜分離、電場分離等技術即屬於速率分離程序，在分離效率、能耗、環保等方面展現優越性。

化工分離設備一般佔工業生產程序中大半的投資成本，因此分離操作效率直接影響該生產程序的成敗，足見化工分離技術之重要性。伴隨著產業的蓬勃發達，化工分離技術也同時快速進展，或是針對所遭遇問題或新原料設計改善方案，或是開發新穎分離技術，或是強化、耦合多種分離程序等，均以提高分離效率、加大處理能力、節能減排、循環經濟為追求目標，亦是產業界與學術界當務之急。為了增進讀者對化工分離技術之認識，本刊特別邀請國內在此領域的五位專家學者分別就其專長撰文，說明各類分離技術的豐富應用、目前進展、與未來可期之發展趨向。

本專輯首篇邀請臺灣大學化工系童國倫教授的研究團隊，以深入淺出方式介紹「膜分離技術在化工程序強化上之新應用」。文中先強調程序強化之重要性，包括：降低工廠規模、減小製程能耗、增加生產效率、

以及廢棄物的產出控制與回收利用。因薄膜分離技術具有諸多優勢：可在常溫常壓下操作、設備體積小且佔地小、易於放大或縮小規模、固定成本及操作成本低、能耗低、分離選擇性佳、產生的廢棄物少、操作環境相對安全等，故可直接取代傳統耗能的分離技術、或與傳統分離技術耦合形成複合式程序，以達到最佳分離效果，實為程序強化之最佳幫手。本文以四項化工傳統分離程序為例，說明薄膜技術的更優應用與進展：

(一) 介紹滲透蒸發薄膜技術應用於傳統難達成的溶劑回收；(二) 介紹薄膜程序應用於觸媒回收；(三) 介紹電透析程序應用於酸液及鹼液之同時回收；(四) 介紹薄膜技術對於傳統氣體分離程序之優化。本文採用淺顯通俗且貼近行業現狀的闡述方式，期將薄膜分離技術廣為周知。

第二篇專文為中央大學化材系周正堂教授團隊與台電公司合作的「以變壓吸附法捕獲燃煤電廠煙道氣中二氧化碳」。二氧化碳排放造成全球暖化、熱室危機，減碳降排已是當勢所趨，因此碳捕獲與封存技術越受重視。臺灣目前仍以燃煤之火力發電為主要供電來源，且二氧化碳為最大宗的排放溫室氣體，故精進燃煤發電廠煙道氣的碳捕捉技術乃刻不容緩。本文先介紹各種二氧化碳捕獲與純化方法並比較優缺點，進而採用具操作簡單、操作成本低、對環境衝擊小等優點的變壓吸附程序，以沸石為吸附劑實際應用於臺中燃煤發電廠所排放預處理後之煙道氣的



二氧化碳捕捉，並詳述原理、設備、與操作方式等，切實分離出高純度且高回收率的二氧化碳。此為成功的化工分離技術產學合作案例，且為國內燃煤發電廠污染防治提供可行之解決管道。

本專輯第三篇文章邀請臺灣科技大學化工系李豪業教授，就其程序設計之專長與豐富經驗，詳細介紹「蒸餾節能設計在化工製程上的開發與應用」，屬於蒸餾分離技術的新穎進展。常用於化工產業的反應蒸餾程序集反應與分離於一效，唯蒸餾最為耗能，因此改良程序之各種熱整合方式因應而生，希求降低能源消耗。本文除闡明反應蒸餾程序的精髓外，重點敘述新式複合型熱整合之設計概念，並以碳酸二苯酯反應蒸餾程序為範例，針對複合型熱整合組態的節能效益評估與比較，證實此新穎熱整合組態可有效節能及降低操作成本，也可消除再混合效應，提升整體程序的經濟效益。

第四篇為臺灣大學化工系郭修伯教授與長庚大學綠色科技中心黃安妮副教授之研究團隊所撰寫的「高效氣固旋風分離器的發展與應用」專文。旋風分離器為產業中常見之利用離心原理的氣-固、液-固分離設備，具有高效分離、操作容易、製造與操作成本低、操作條件範圍廣等特性，應用與發展多元。本文為詳實的氣固旋風分離器回顧文章：先介紹構造、操作、與設計原理，彙整流場模型與指標效能預估公式；繼而闡述文獻中

利用計算流體力學軟體改良優化旋風分離器的結構與效能之設計案例；最後則說明該團隊對於旋風分離器的新穎設計與實務應用，並總結旋風分離器於各產業的多樣用途。

第五篇專文由昱倫生物科技公司蔡岳樺副總分享「保健食品常用之分離純化流程」，以其自身在保健產品包裝劑型之多年經驗，所接觸與了解的常用保健食品原料（食品濃縮粉或萃取物），向讀者簡介一些熱門原料的生產製程，包括：膠原蛋白、清酒酒粕、乳清蛋白、豬血紅素鐵粉、薄荷萃取物、乳燕窩萃取物、印加果油、紅藻萃取油（含蝦紅素）、金盞花（含葉黃素）等，均經由多種連續的分離純化步驟而得，其中過篩、過濾、濃縮、乾燥是最常使用於此產業的分離技術。本文並介紹保健產品的包裝劑型（膠囊、錠狀、粉包等）、功效作用、安全考量等資訊，於注重身體保健之今日應能引發讀者閱讀的濃厚興趣。

最後，非常感謝以上各專文的作者們在百忙中抽空撰稿，分享寶貴的知識與經驗。期盼透過此一專輯所提供化工分離技術的應用與進展之相關資訊，可讓讀者清楚了解產業分離程序走向提效、節能、低碳、降排、回收、增益的發展趨勢，且對於未來各產業選擇與應用化工分離技術能有進一步的幫助。我們也期待臺灣在化工分離程序的研發進展與產業運用更加蓬勃發達，兼顧環境永續發展，增加競爭力，甚而居領先地位。



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]

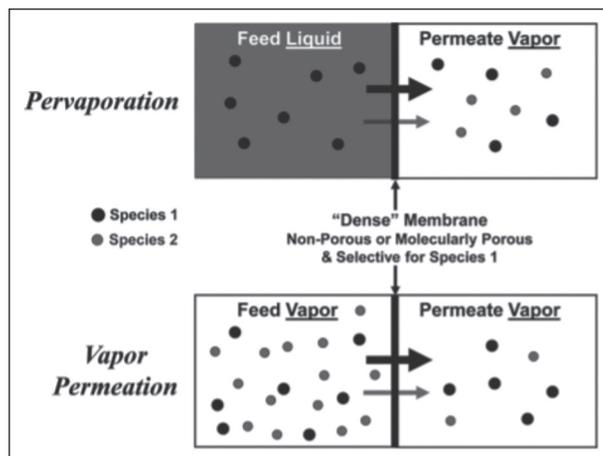


圖 3 滲透蒸發與蒸氣滲透示意圖 [7]

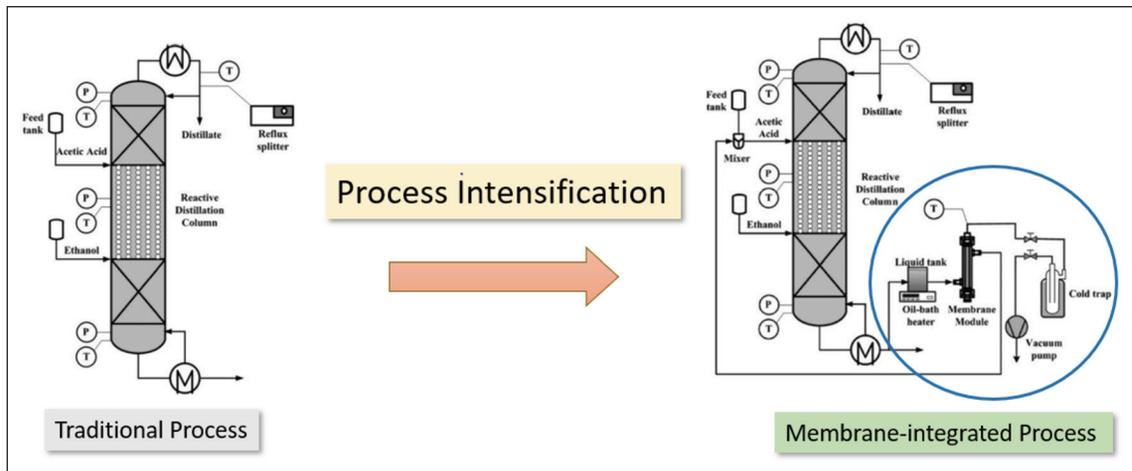


圖 4 乙酸乙酯製備程序強化 [11]

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

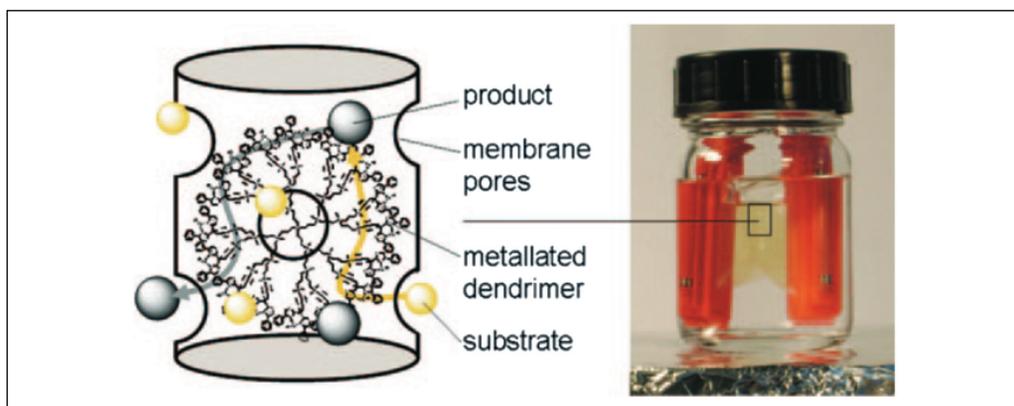


圖 6 透析法進行觸媒回收裝置圖 [14]

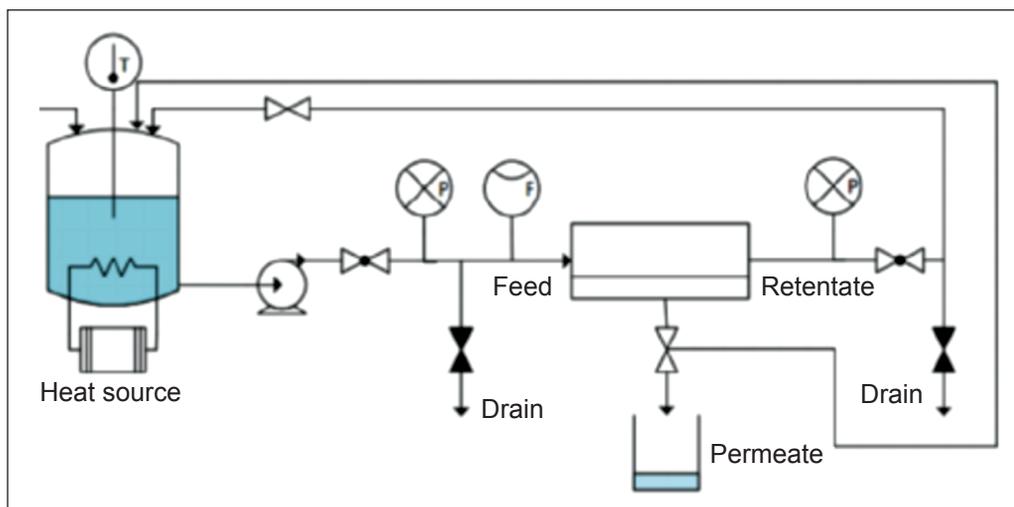


圖 7 掃流過濾進行觸媒回收示意圖 [15]



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。

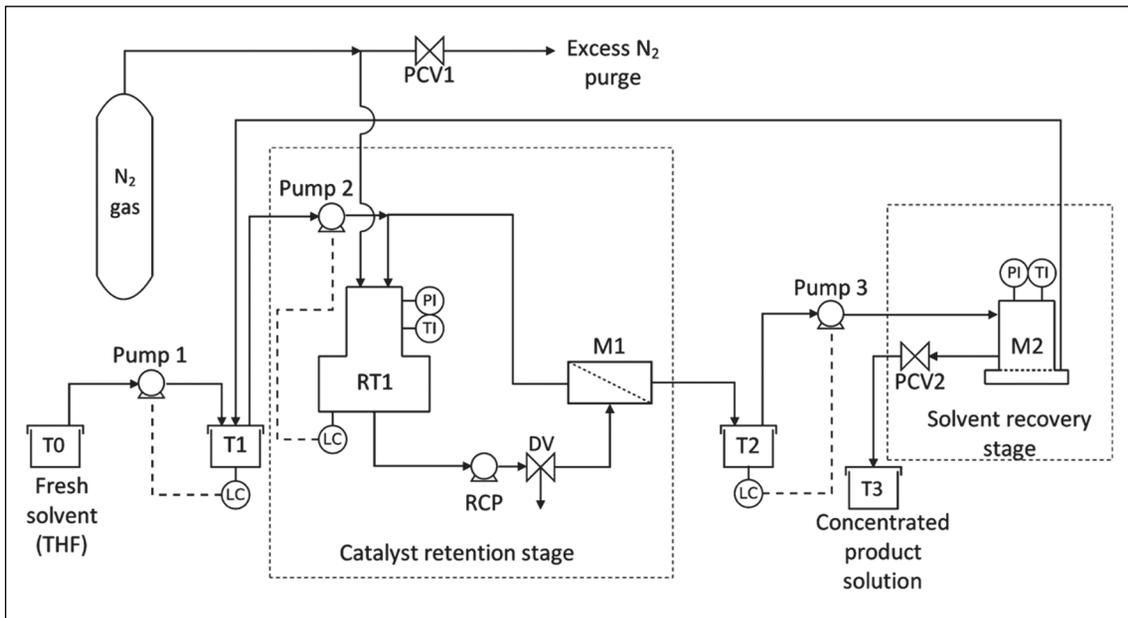


圖 8 有機催化劑回收串聯裝置示意圖 [16]

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。

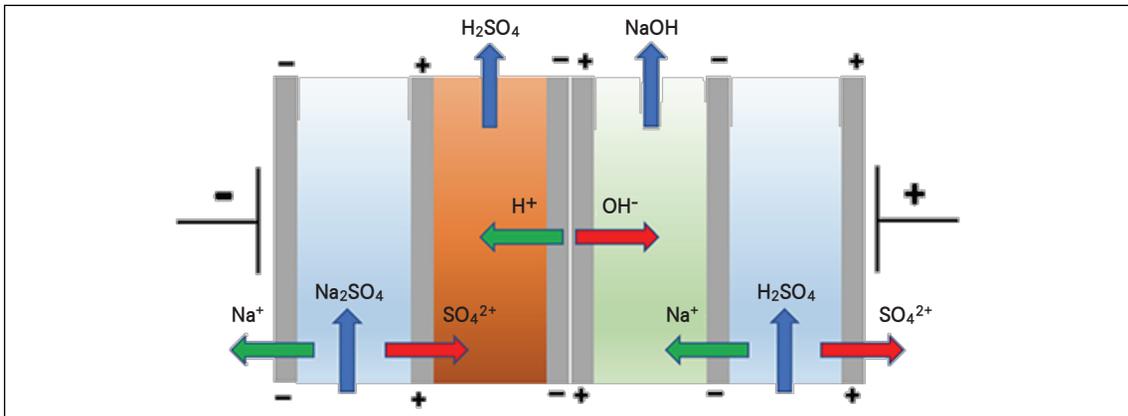


圖 9 通過將雙極膜應用於相應的酸和鹼，鹽離子分裂的示意圖 [23]

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），

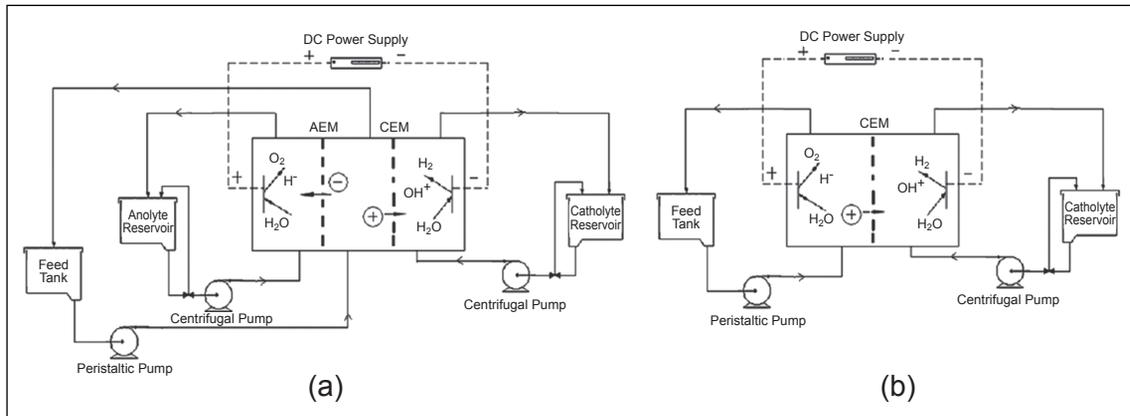


圖 10 批次式電透析系統，(a) 兩槽式單元；(b) 三槽式單元 [29]

- (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

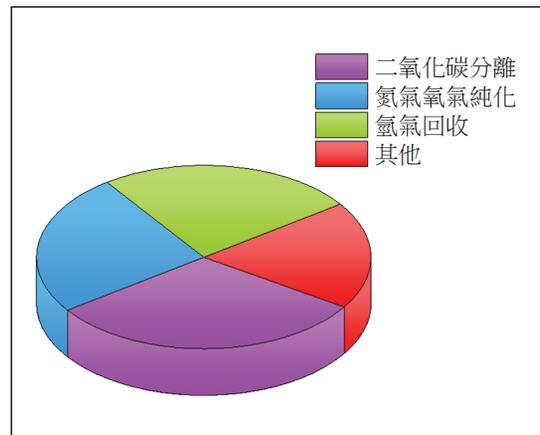


圖 11 全球氣體分離膜市場分布 (2015-2019) [30]

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。

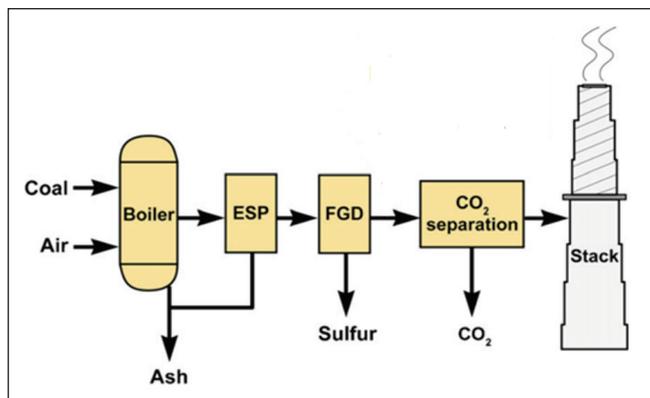


圖 12 燃煤發電廠煙道氣處理流程圖 [32]

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.



以變壓吸附法捕獲燃煤電廠煙道氣中二氧化碳

國立中央大學化學工程與材料工程學系碩士班研究生 / 魏子倫、郭家禎、李柏霖
國立中央大學化學工程與材料工程學系博士 / 曾致堯
國立中央大學化學工程與材料工程學系教授 / 周正堂
台電綜合研究所化學與環境研究室資深研究專員 / 楊明偉
台電綜合研究所化學與環境研究室助理研究專員 / 莊宗諭
廣興儀器材料有限公司經理 / 張弘震

關鍵字：碳捕獲、二氧化碳、變壓吸附、燃煤電廠煙道氣、13X 沸石

摘要

近年來，為了減少二氧化碳排放量以減緩全球暖化現象，碳捕獲、利用與封存（Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS）的相關技術扮演了重要的角色。在眾多碳捕獲方法中，變壓吸附（Pressure Swing Adsorption, PSA）因具有較低能耗、低操作成本與簡單操作等優點而逐漸備受重視，其原理主要是藉由吸附劑對於混合氣體選擇性高低的差異，以及吸附劑在低壓時利於脫附、高壓時利於吸附之特性，來達到氣體分離的目的。本研究以EIKME 13X沸石（zeolite）作為吸附劑搭配三塔九步驟真空變

壓吸附程序捕獲台電臺中燃煤發電廠排放後經預處理之煙道氣中二氧化碳，預處理後之煙道氣進料含有的二氧化碳濃度約為9.00% - 11.74%，經過實驗設計分析後得到最佳PSA分離結果為二氧化碳純度92.01%、二氧化碳回收率84.18%、真空幫浦能耗2.20 GJ/tonne-CO₂。

一、前言

近年來，討論全球暖化的議題越來越多，造成全球暖化的主要因素是排放過多的二氧化碳。聯合國氣候變遷小組（Intergovernmental Panel on Climate Change，



IPCC) 於2021年8月9日發表氣候變遷第六次綜合評估報告指出，地球暖化速度比科學家先前觀察到的還要快，全球均溫很可能在大約十年內就升高攝氏一點五度，突破巴黎協定的升溫幅度限制。報告依據人類努力減碳的程度，模擬出五種可能性，結果顯示，不論哪一種可能性，全球均溫都會在2030年代升高超過攝氏一點五度，比IPCC三年前推估的早十年[1]。臺灣氣候變遷科學團隊依照IPCC報告，2021年8月10日發表「臺灣版氣候變遷報告」，未來台灣將「乾愈乾、濕愈濕」，侵臺颱風變少但強度增強，且在最劣情境下，最快2060年臺灣就沒有冬天。該團隊回顧臺灣本地氣候觀測發現，過去110年間，臺灣平地年平均氣溫上升攝氏一點六度，比全球平均一點〇七度還高，且近50年至30年增溫還有加速趨勢。減碳是全球勢在必行的措施。

臺灣位於一個四面環海、自然能源匱乏的位置，因此仰賴石化能源的比例很高。從經濟部能源局的108年能源統計手冊占比，煤及煤產品占29.85%，原油及石油產品占46.92%，天然氣（含液化天然氣）占14.97%，核能的部分占6.31%，其他再生能源只占了1.95% [2]。而很大部分的能源都用在產生電力上面。根據台灣電力公司歷年所統計的發購電量構成比，在西元2019年發購電量占比為79.2%火力發電、13.4%核能發電、6.0%再生能源發電、及1.4%抽蓄水力發電。其中在火力發電中，燃煤占47.12%、

燃氣占48.22%、燃油占2.40%、汽電共生占了2.25% [3]。在西元2015年，聯合國氣候變化綱要公約 (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) 通過了「巴黎協定」，期望在21世紀末全球氣溫升高不超過工業化前的2°C，在此同時台灣也通過了溫室氣體減量及管理法，計畫長期減量目標。在國際能源署的資料中顯示，由於低碳燃料、再生能源及COVID-19的疫情影響，2020年能源所產生的二氧化碳排放量可能較2019年下降8% [4]。但在火力發電的方式中，排放的二氧化碳仍是很可觀的。在2018年行政院環保署的統計，二氧化碳為我國所排放溫室氣體中最大宗，約占95.38% [5]。

對於二氧化碳的減量，透過碳捕獲及封存 (Carbon Capture and Storage, CCS) 為成本最低且技術較成熟的減碳方案[6]。這樣的方式是直接從發電廠或製造業工廠中捕集二氧化碳，然後透過管線等方式運輸至合適地點進行封存。藉由這樣的方式長期隔絕二氧化碳和大氣，使大氣層中的溫室氣體濃度維持穩定，延緩全球暖化。

捕獲二氧化碳的行徑如圖1，可以分為三種：富氧燃燒法 (oxy-fuel combustion)、燃燒前捕獲 (pre-combustion)、燃燒後捕獲 (post-combustion)，其中燃燒後捕獲的行徑對現今產業燃燒製造過程衝擊最小，因此為目前主要的捕獲方法。燃燒後產生之煙道氣中，二氧化碳的濃度並不高，以燃煤跟燃

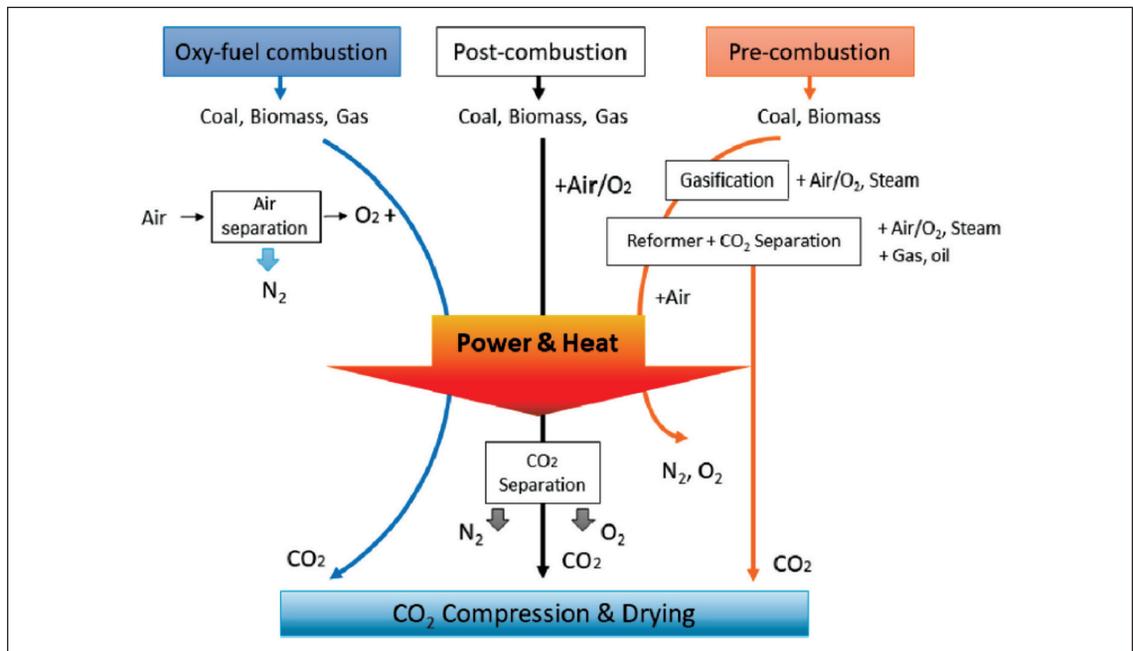


圖 1 不同的碳捕獲方式 [10]

氣發電廠為例，燃煤電廠產生煙道氣含二氧化碳濃度約為10-18%，而燃氣電廠濃度約為3-8% [7]。而燃燒前捕獲方法是將煤或生質物料氣化後，經水煤氣反應生成由CO₂、H₂組成的合成氣，再從合成氣中分離CO₂，有高效率 and 低污染的優點，但因成本過高，較少商業應用[8]。富氧燃燒技術是在燃燒過程中使用高濃度氧氣或純氧，燃燒產生高濃度二氧化碳的煙道氣，可以直接儲存，其優點是節能及低污染，但在產生高濃度氧氣或純氧的過程中需較大製氧廠和燃燒時需耐高溫鍋爐，因此較缺少應用[9]。

二氧化碳純化的方法主要可以分為三種：吸收法 (absorption)、薄膜分離

(membrane separation) 和吸附法 (adsorption)。薄膜分離是使用薄膜本身對氣體分子的選擇性以及氣體的擴散機制來分離二氧化碳，其以高分子膜為主，但缺點為不耐高溫和不抗腐蝕。根據Chao et al. [10]，利用乙醇胺 (monoethanolamine, MEA) 吸收法捕獲火力發電廠中煙道氣的二氧化碳是目前最為廣泛的捕獲技術，但這項技術有能耗大且有腐蝕設備等缺點。本研究所使用的變壓吸附法，其優點具有低成本、操作簡單、對環境衝擊小等。利用壓力的不同造成氣體的吸附跟脫附，然後選擇合適的吸附劑，達到分離不同氣體的目的。在純化氣體方面，吸附法具有相當潛力。



台電綜合研究所於臺中發電廠建置減碳技術園區，本研究以園區內三塔九步驟真空變壓吸附程序（Vacuum Pressure Swing Adsorption, VPSA）之裝置探討捕獲燃煤發電廠1 kw排氣量，經預處理之煙道氣中二氧化碳。

二、吸附原理

當氣體分子或液體分子接觸到固體表面時，會因為固體表面的不飽和力影響，產生相互吸引的作用力，導致氣體分子或液體分子滯留固體表面，此現象為吸附。此時滯留的分子稱為吸附物質（adsorbate），固體稱為吸附劑（adsorbent）。

根據吸附物質與吸附劑之間所產生的作用力可以分為物理吸附和化學吸附。物理吸附是依據分子間作用力的凡得瓦力，吸附劑表面會有多層吸附物質排列滯留，物理吸附屬於放熱反應，當吸附劑吸附物質後，會造成溫度上升，而降低吸附劑吸附，在脫附後，吸附物質性質不會改變，屬可逆反應。化學吸附則是利用吸附劑跟吸附物質產生的化學鍵進行吸附作用，因此吸附劑表面只有單層吸附物質排列滯留，化學吸附會造成吸附物質在脫附後產生性質變化，較難脫附，在現今較少使用在環境工程上。

依照程序操作變因的不同區分為：變壓吸附程序（PSA）、變溫吸附程序（Tem-

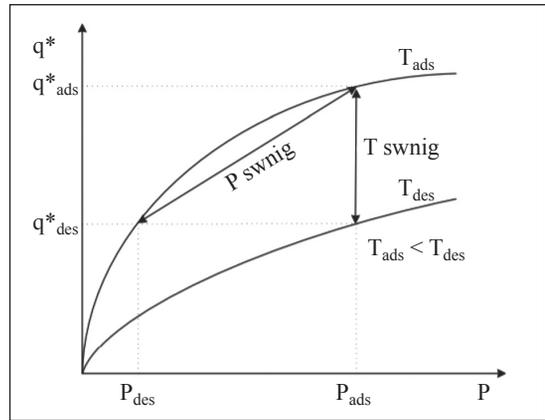


圖 2 不同溫度壓力下平衡吸附量的變化 [11]

perature Swing Adsorption, TSA)，兩者是藉由程序上不同的壓力或不同的溫度，使得氣體的平衡吸附量不同，造成氣體分離的效果，因此塔內溫度及壓力變化就會造成氣體的吸附或脫附，這樣的方式可以達到混合氣體的分離並且讓吸附劑脫附氣體再生以利下次的循環（cycle）使用。

圖2為常見吸附劑的等溫平衡吸附曲線（isotherm），在變壓吸附（PSA）程序中，選定操作溫度（ T_{ads} ），在高壓（ P_{ads} ）時因吸附劑有較大的平衡吸附量（ q_{ads}^* ），因此進行吸附，此時強吸附氣體會吸附在吸附劑表面，弱吸附氣體會從塔頂被排出。當達到飽和吸附量時，程序壓力會降到脫附壓力（ P_{des} ），此時壓力低會有較小的平衡吸附量（ q_{des}^* ），吸附劑會使強吸附物脫出，然後再生。而在變溫吸附（TSA）程序中，擇定操作壓力（ P_{ads} ），在低溫（ T_{ads} ）時吸附劑有

較大平衡吸附量 (q_{ads}^*) 會造成吸附物吸附，當達到飽和吸附量時，會升溫至脫附溫度 (T_{des})，這時跟變壓吸附 (PSA) 相同，會使得平衡吸附量下降，強吸附氣體會被脫出並同時讓吸附劑再生。

三、變壓吸附程序介紹

最先提出變壓吸附程序的理論是由 Skarstrom [12] 所提出，起初是為了分離空氣設計，後來演變為乾燥空氣的商業程序，稱為 Skarstrom cycle，一個循環包括了進料加壓、產氣、逆向減壓、低壓沖洗四個步驟，示意圖如圖3。然後隨著不一樣吸附製程的改

良與翻新，越來越多的操作程序可供選擇，其中包括增加塔的數量跟兩階段的變壓吸附程序等。

以下是常見的操作步驟：

1. 進料加壓 (Pressurization)

在高壓下，把欲分離之混合氣體從塔底進料端通入吸附床內且關閉塔頂排氣端，使混合氣體在吸附塔內累積，並且同時讓壓力升高。根據吸附劑在不同氣體有不同的選擇性，吸附劑會吸附較多強吸附氣體，弱吸附性氣體比較少被吸附，使得氣相中強吸附氣體成分濃度降低、弱吸附氣體成分濃度提高。

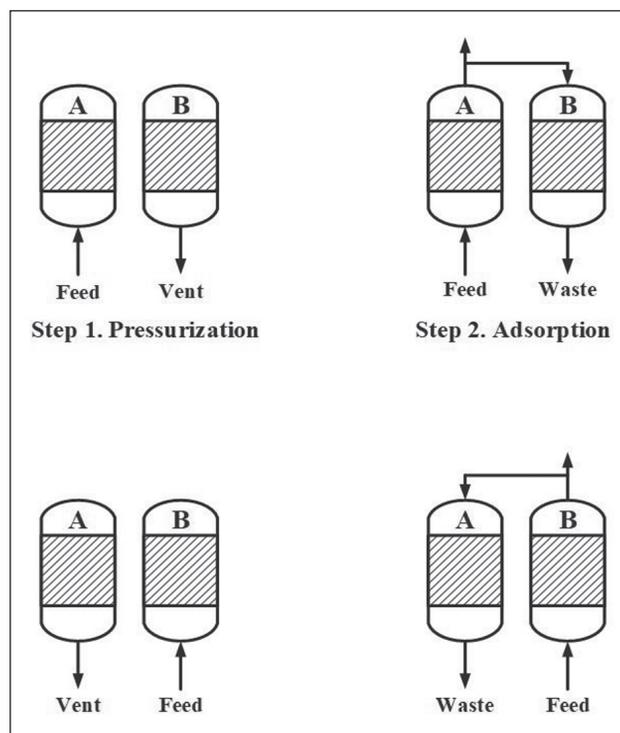


圖 3 Skarstrom cycle.



2. 高壓吸附 (Adsorption)

接著進料加壓後面的步驟，開啟塔頂排氣端，且持續讓進料從塔底進入高壓的塔內。由於吸附劑會吸附強吸附物，弱吸附物會從塔頂排出，塔頂排出的氣體多為弱吸附物，被稱為萃餘 (raffinate) 氣[13]。吸附過程中，塔內會產生濃度波前 (concentration wavefront)，在濃度波前未到達的氣相區域濃度還是以弱吸附氣體為主，直到濃度波前通過塔頂排氣端為止，此時稱為突破 (breakthrough)。當吸附塔達突破時，萃餘氣中強吸附物氣體濃度會大幅度上升，因此進料時間的選擇將影響強吸附物回收率的優劣 [14]。

3. 逆向減壓 (Countercurrent depressurization)

吸附塔中氣體會從塔底進料端釋出 (blowdown)，因為塔內壓力降低，吸附劑上的強吸附氣體會脫附，使得強吸附氣體從塔底產出，此時氣體稱為萃取 (extract) 氣，同時也使得吸附劑得以再生。

4. 低壓沖洗 (Purge)

利用高壓吸附所產生的部分萃餘氣從塔頂通入吸附塔內進行沖洗，藉由濃度差將存在於在吸附劑孔隙內強吸附物沖洗出來，以提高吸附劑的再生效果。此步驟可以讓吸附劑內強吸附物量極低，達到增加萃取氣中強吸附物氣體的回收率，但會降低強吸附氣體濃度。

接著是四個基本操作步驟之外的步驟流程：

1. 同向減壓 (Cocurrent depressurization)

這個步驟塔內氣體流出流向與進料流向相同，且塔內減壓，與前面的逆向減壓不同處在於塔內氣體流出流向相反，且此步驟通常操作於收集強吸附氣體的步驟前。目的在將塔內弱吸附氣體從塔頂排出，並同時增加塔內氣相的強吸附氣體濃度，以提高下個步驟收集強吸附氣體的濃度，最早使用於 Union Carbide 公司的程序 [15]。

2. 壓力平衡 (Pressure equalization)

藉由高壓吸附塔與低壓吸附塔相連，高壓吸附塔會從塔頂排氣端把氣體通入低壓吸附塔而降壓，低壓吸附塔會從塔頂排氣端接收高壓吸附塔排氣而加壓，目的在於可以節省加壓所需之能耗[14]；適時的加入此步驟可以提升產物的純度和回收率，Jahromi et al. [16]在變壓吸附上結合LNG (liquefied natural gas) /NRU (nitrogen rejection unit) 裝置下生產氮氣，從中發現原本三塔三步驟的條件，加上壓力平衡步驟變成三塔五步驟之程序，可以讓塔頂氮氣純度從73.2% 提升到94.3%，且回收率從19.0% 大幅升至62.1%。

3. 真空脫附 (Vacuum)

將吸附塔抽至真空的步驟以代替低壓沖洗或逆向減壓的步驟，目的以提高強吸附氣體的純度和回收率，此步驟由de Montgareuil 和Domone [17]在1964年提出。Air Products 公司則在1970年代將此步驟應用在同時產生氮氣和氧氣的分離程序上面，利用了真空

脫附步驟的變壓吸附程序，稱為真空變壓吸附程序。

4. 前處理床 (Pretreatment beds)

將變壓吸附程序結合前處理床是由Heinze所提出[18]。因為空氣中的水氣對沸石有較強的吸附性且不易脫附容易累積在吸附塔內。因此在變壓吸附程序前添加前處理床的步驟是一個解決辦法。對於去除水氣，常見前處理床會裝填矽膠或氧化鋁以去除水氣。

5. 產物潤洗 (Rinse)

這個步驟與低壓沖洗 (purge) 的不同之處在於使用高濃度的強吸附氣體潤洗，而低壓沖洗為使用高濃度的弱吸附氣體沖洗。此步驟的氣體進料及流動方向跟高壓吸附相同，強吸附氣體會通入吸附塔塔內空隙沖洗，並吸附在吸附劑上面，目的在於提高強吸附氣體在塔底的純度[14]，但如果潤洗時間過長，則會造成塔底產物回收率大幅降低[19]。

6. 溫度平衡 (Temperature equalization)

吸附時的放熱反應會使塔內溫度上升，和脫附時的吸熱反應會使塔內溫度下降，兩者造成的溫度變化都不利分離程序的進行。為了達到恆溫操作，Chihara和Suzuki [20]利用變壓吸附程序進行空氣乾燥時發現，把循環時間與流量減少可以使變壓吸附程序的溫度變化在 10°C 內，然而在大型分離程序中效果有限。Collins [21]提出在塔內設置加熱器

的設計，不僅可以減少溫度變化，也明顯增加產物的濃度和回收率。

7. 多塔PSA程序 (Multibed PSA process)

為了提高雙成份混合氣體中產物的純度和回收率，也為了在多成份混合氣體中得到兩種以上的產物，多塔多步驟的程序被開發應用。Doong 和Yang [22]以5A沸石作為吸附劑，利用四塔變壓吸附程序進行氫氣純化，使得氫氣濃度可達99.99%以上。Jiang et al. [23]利用五塔十一步驟變壓吸附程序自混合氣體中分離氫氣，以得到氫氣的最佳化回收率。Rudelstorfer和Fuderer [23]提出七到十塔絕熱變壓吸附程序可有效純化氫氣。

四、實驗裝置

(一) 預處理裝置

本研究的預處理裝置主要為水洗塔 (scrubber) 以及吸附式氣體乾燥機。煙道氣經由魯式鼓風機輸送至減碳園區進行PSA程序前會先送入水洗塔除去煙道氣中的硫氧化物 (SO_x)，水洗塔之外觀如圖4所示，煙道氣由下往上進入水洗塔，水則是使用幫浦由儲水槽抽至水洗塔上半部並噴灑下來，再流回底部的儲水槽，儲水槽內設有pH值偵測器以隨時監測放流水的pH值，以實驗而言，pH值大約介於5.5~6.5之間都屬正常，此外，pH值需高於5.5方可進行實驗，否則可能會對後端裝置造成損害。



圖 4 除硫水洗塔



圖 5 吸附式氣體乾燥機真空變壓吸附裝置

進行水洗後之煙氣會使用加壓幫浦送至一煙氣儲槽，接著經由迴轉式空氣乾燥器初步乾燥後再送至外觀如圖5的吸附式氣體乾燥機，進一步去除煙道氣中絕大部分的水分，最後經由精密過濾器將進料煙道氣中剩餘的少許水分與粉塵過濾後才會送至乾燥煙道氣儲槽中。

吸附式氣體乾燥機內填充乾燥劑，裝置本身能自動進行吸附水分與再生的程序，乾燥機外會顯示乾燥完成後送出氣體之露點溫度（dew point temperature），露點溫度通常需低於負50度C才可送至變壓吸附裝置端。

本研究之真空變壓吸附裝置共有3個吸附



圖 6 三塔式真空變壓吸附裝置

塔，外觀如圖6所示。吸附塔外徑15.24 cm，內徑14.44 cm，吸附塔內填充吸附劑長度40 cm。每一個吸附塔上均設有塔內溫度偵測器與塔內壓力偵測器，其他裝置包括真空幫

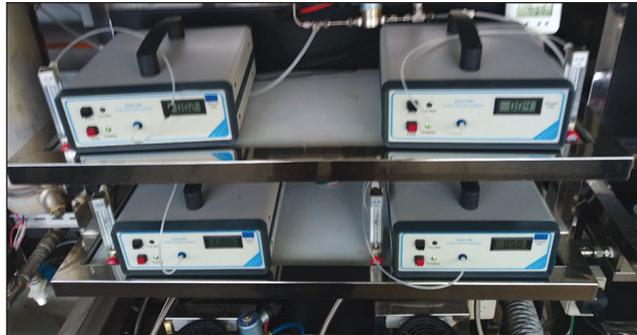


圖 7 二氧化碳分析儀

(註：四台二氧化碳分析儀分別測量進料處、上產品管路處、同向減壓管路處與逆向減壓抽真空的下產品處的二氧化碳濃度)

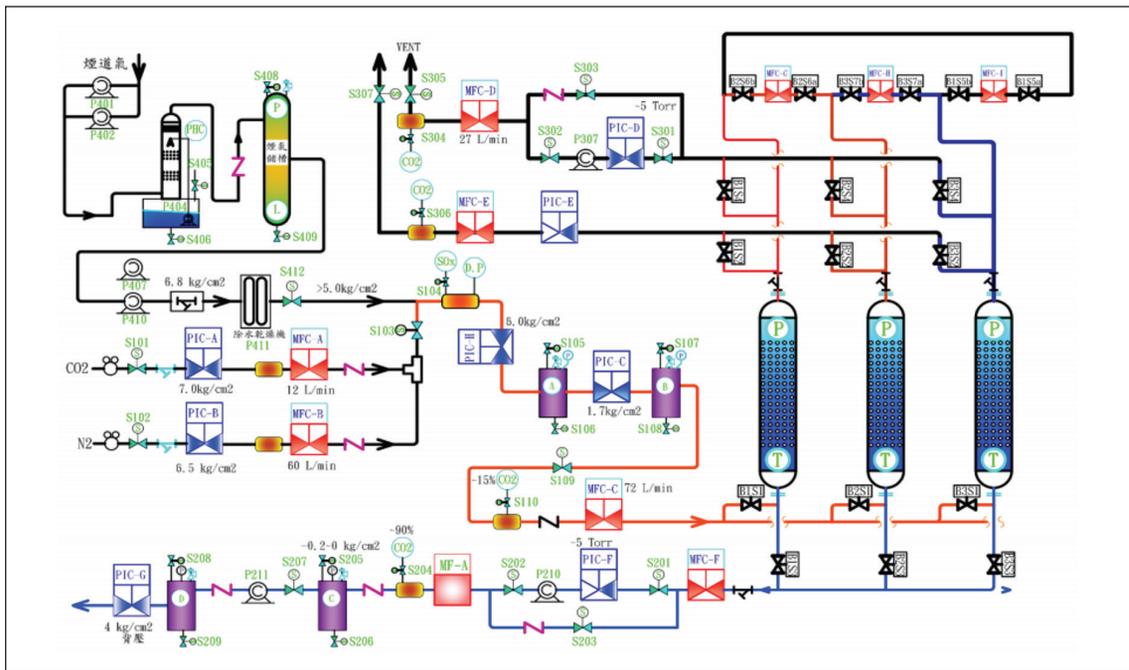


圖 8 三塔式真空變壓吸附測試平台裝置圖

浦、質量流量控制器 (Mass flow controller, MFC)、壓力控制器 (Pressure indicator controller, PIC)、加壓幫浦、外觀如圖7的二氧化碳濃度分析儀, 以及各種閥件如氣動

閥、電磁閥與手動式球閥等。圖8為三塔式真空變壓吸附測試平台裝置圖, 圖9為人機介面的控制畫面。

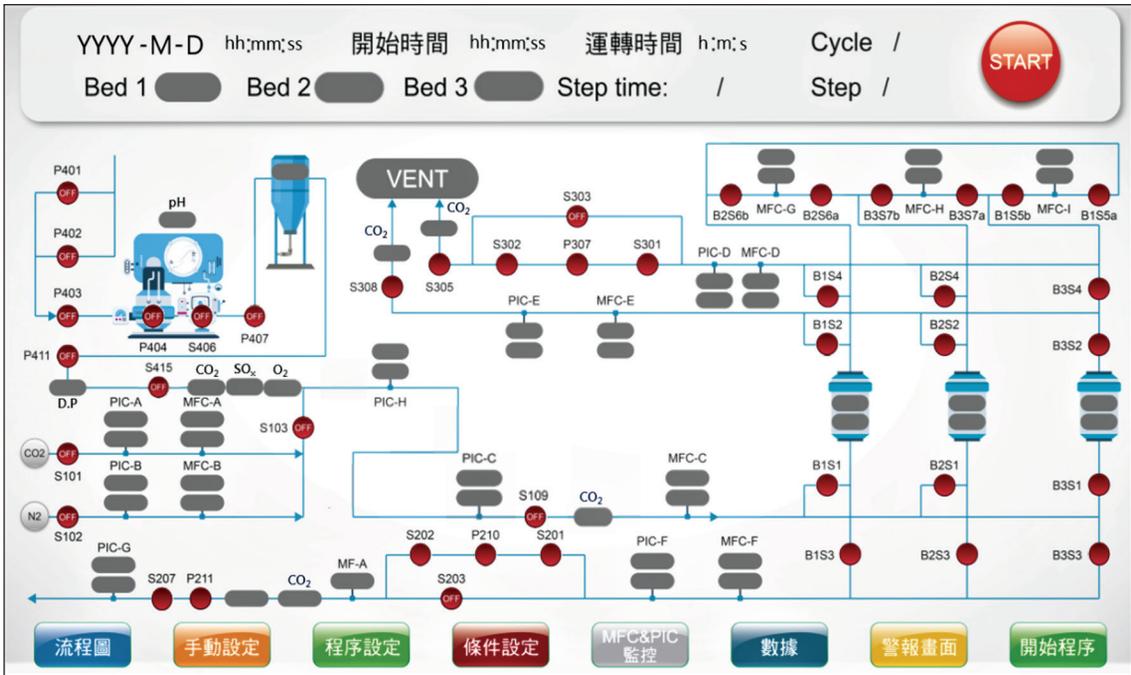


圖 9 人機界面的控制畫面

五、三塔九步驟真空變壓吸附程序

本研究使用真空變壓吸附裝置分離煙道氣中二氧化碳之實驗是採用三塔九步驟的操作程序進行，包含高壓吸附 (adsorption)、同向減壓 (cocurrent depressurization)、逆向減壓 (countercurrent depressurization)、壓力平衡 (pressure equalization)、靜置 (idle) 組成九個步驟，示意圖與步驟對照表如圖10與表1所示。

接下來將以吸附塔1 (Bed 1) 的運轉步驟說明實驗情境：

1. Step 2、3：高壓吸附 (adsorption)

將塔底進氣端與塔頂連通至上產品出料端 (以圖9來說明即為通過PIC-E與MFC-E的管路) 的氣動閥開啟 (即B1S1與B1S2開啟) 後，乾燥煙道氣會以壓力2.2 barg與流量60 SLPM持續進料，由於塔頂連通至上產品端中途的PIC-E設定值為1.8 barg，因此可使塔內壓力累積並維持在高壓狀態，此時吸附劑會吸附大部分的強吸附物質 (CO₂)，幾乎為弱吸附物質 (N₂) 組成的混合氣體則由塔頂排出，同時以MFC-E和二氧化碳分析儀紀錄上產品中的流量與二氧化碳濃度。

表 1 實驗之三塔九步驟程序對照表

Step	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Bed 1	P.E.	Adsorption		P.E.	P.E.	Co-D	Counter-D	P.E.	Idle
Bed 2	Counter-D	P.E.	Idle	P.E.	Adsorption		P.E.	P.E.	Co-D
Bed 3	P.E.	P.E.	Co-D	Counter-D	P.E.	Idle	P.E.	Adsorption	

(註：P.E. = Pressure Equalization; Counter-D= Countercurrent Depressurization; Co-D = Cocurrent Depressurization)

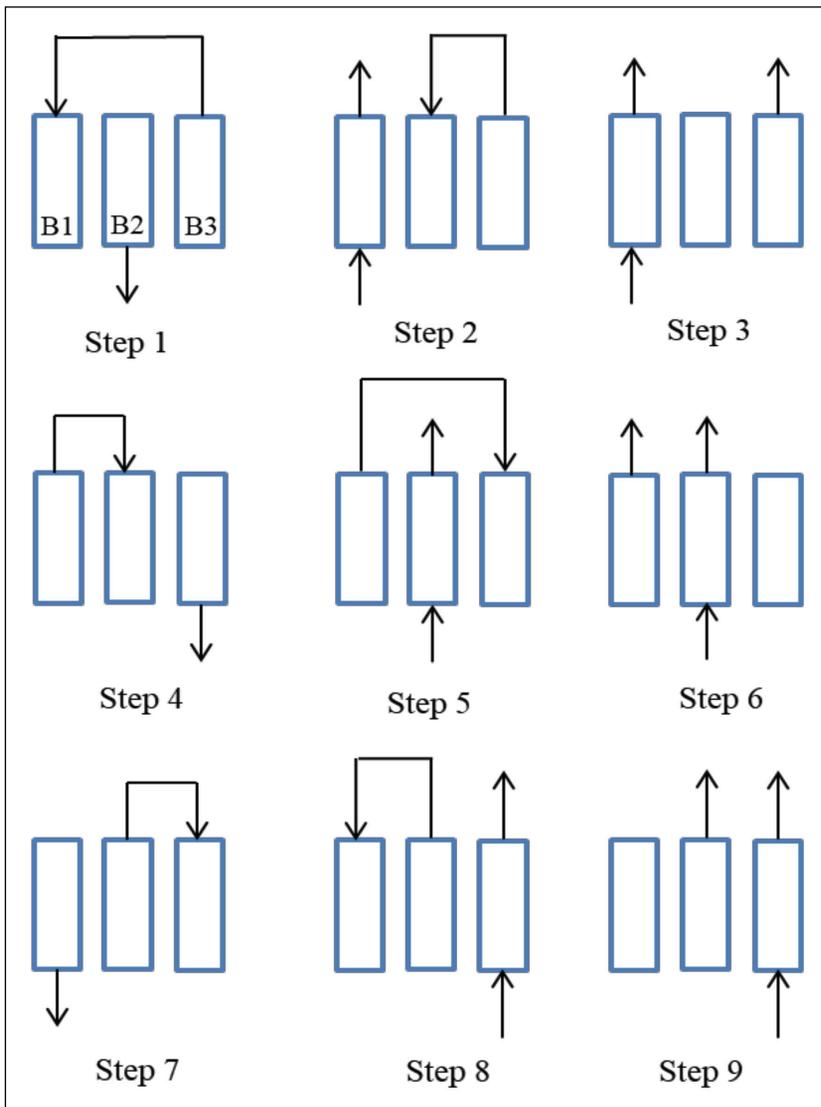


圖 10 實驗之三塔九步驟程序圖



2. Step 1、4、5、8：壓力平衡（pressure equalization）

以單一吸附塔為主體來看，本研究的壓力平衡可分為2種情形，就塔1而言，第一種情形是塔1內的壓力較高，連通至塔內壓力較低者而使塔內壓力下降，如步驟4和5，如此能減少接續的同向減壓與逆向減壓步驟時抽真空所需的能耗；第二種則是塔1內的壓力較低，與塔內壓力較高者連通而提高塔內壓力，如步驟1和8，此做法可縮短高壓吸附步驟進料時塔內壓力提升至高壓的時間。

3. Step 6：同向減壓（cocurrent depressurization）

開啟塔頂排氣端（B1S4）、電磁閥S301、S302、S305與真空幫浦P307，關閉其餘與塔1連通的閥件進行同向減壓，並以MFC-D與PIC-D控制其流量與壓力、二氧化碳分析儀偵測其濃度，此步驟可由塔頂將塔內大部分的弱吸附物質與少部分的強吸附物質抽出，進而提高逆向減壓步驟時收集強吸附性氣體的濃度。

4. Step 7：逆向減壓（countercurrent depressurization）

進行逆向減壓時，需開啟塔底排氣端（B1S3）、電磁閥S201、S202、S207與真空幫浦P210，並關閉其餘與塔1連通的閥件，利用真空泵浦將塔內壓力抽氣至低壓，並以MFC-F與PIC-F控制流量與壓力、同時利用二氧化碳分析儀偵測其濃度。

此時隨著塔內壓力下降至接近真空，吸附在吸附劑上的強吸附物質（CO₂）漸漸脫附，使得塔內的CO₂氣相濃度逐漸上升，氣體從塔內自塔底排出。

5. Step 9：靜置（idle）

為了靜待其他吸附塔運行相關之步驟，此時會將連通至塔1內的所有閥件關閉。

接著討論全因子實驗設計（Design of Experiments, DOE），本實驗挑選步驟1/4/7時間（Step 1/4/7 time，壓力平衡/逆向減壓時間）、步驟2/5/8時間（Step 2/5/8 time，高壓吸附/壓力平衡時間）、步驟3/6/9時間（Step 3/6/9 time，高壓吸附/同向減壓時間）共三個變因作為探討對象，並使用兩水準之實驗設計方法，意即每個操作變因都須選用高低水準兩種條件去進行排列，即2^k之全因子實驗設計，也就是說，假使要執行完所有組合條件的實驗，共需2^k次實驗。

本次研究選用三個因子作為操作變因進行二水準的全因子實驗設計（2k Design），總共需作2³ = 8組實驗，並使用Minitab作為分析軟體，而全因子設計之高低水準數值及代號如表2所示，步驟1/4/7時間（300秒及400秒）、步驟2/5/8時間（200秒及240秒）、步驟3/6/9時間（90秒及160秒）。表3為建構8組實驗之詳細內容與數值，而表中以+（正號）代表各變因之高水準，-（負號）代表低水準。

表 2 三塔九步驟 VPSA 實驗之變因高低水準數值及代號

變因	代號	低水準	高水準
步驟 1/4/7 時間 (秒) (壓力平衡 / 逆向減壓時間)	A	300	400
步驟 2/5/8 時間 (秒) (高壓吸附 / 壓力平衡時間)	B	200	240
步驟 3/6/9 時間 (秒) (高壓吸附 / 同向減壓時間)	C	90	160

表 3 三塔九步驟 VPSA 實驗之 2 水準 3 變因全因子實驗設計

Run	Factor		
	A	B	C
1	300 (-)	200 (-)	90 (-)
2	400 (+)	200 (-)	90 (-)
3	300 (-)	240 (+)	90 (-)
4	400 (+)	240 (+)	90 (-)
5	300 (-)	200 (-)	160 (+)
6	400 (+)	200 (-)	160 (+)
7	300 (-)	240 (+)	160 (+)
8	400 (+)	240 (+)	160 (+)

由於本實驗僅有8組實驗數據，為避免誤差值影響其顯著性之判斷，因此選定 $\alpha = 0.05$ 作為顯著水準 (significant level)，一般而言，顯著水準愈小，表示其決定顯著與否之標準愈嚴格。

六、實驗結果

實驗設計分析上通常會利用效應常態機率圖 (normal plot of effects)、效應半常態機率圖 (half normal plot of effects) 及效應柏拉圖 (Pareto chart of effects) 來判斷顯著因子與各因子的重要性。效應常態機率圖可

以判斷因子影響之重要性和方向性，因子若在藍線的左側為負效應，右側則為正效應，顯著程度越高就會離圖中的藍線越遠；效應半常態機率圖則顯示了效應常態機率圖 (從最大效應到最小效應) 的絕對值；而效應柏拉圖除了能判別顯著因子之外，還能比較主要因子與交互作用因子影響結果的相對大小。

圖11與圖12分別為二氧化碳純度的效應常態機率圖和效應半常態機率圖，由圖中可看出對於三塔九步驟真空變壓吸附實驗之塔底二氧化碳純度而言，只有Step 3/6/9 time

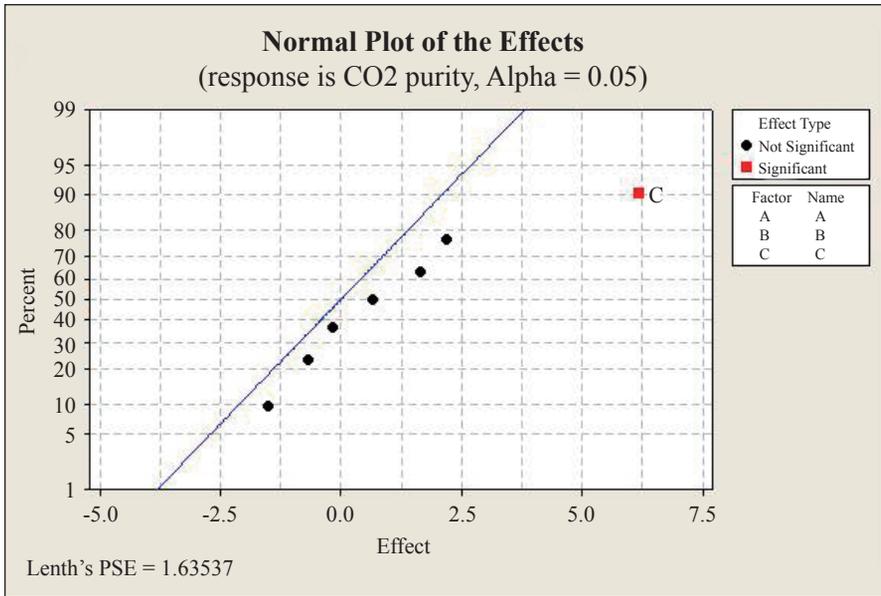


圖 11 二氧化碳純度的效應常態機率圖

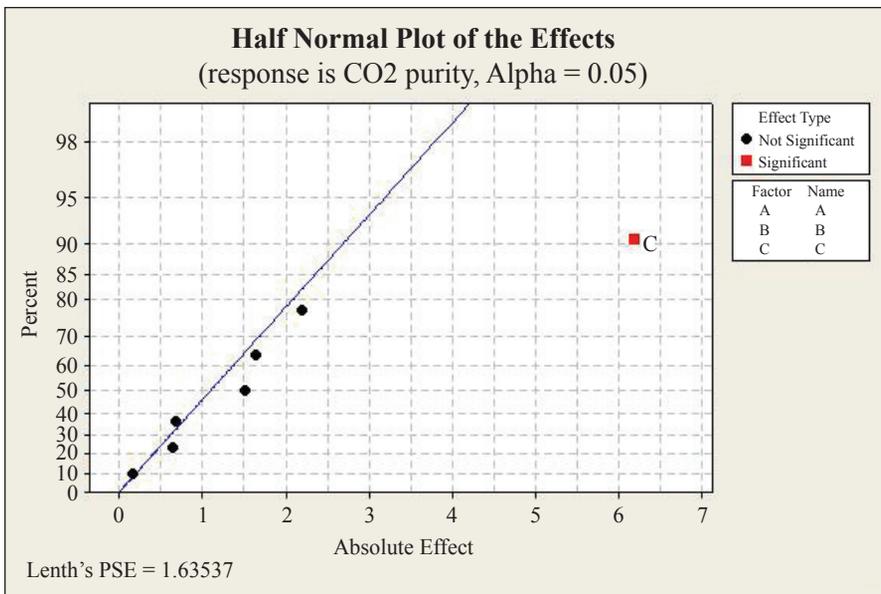


圖 12 二氧化碳純度的效應半常態機率圖

(C)具有顯著性，因為此因子在效應常態機率圖和效應半常態機率圖中都離藍線最遠，

離藍線越遠的因子代表越顯著，而由純度的效應柏拉圖如圖13所示，由圖中也可看出

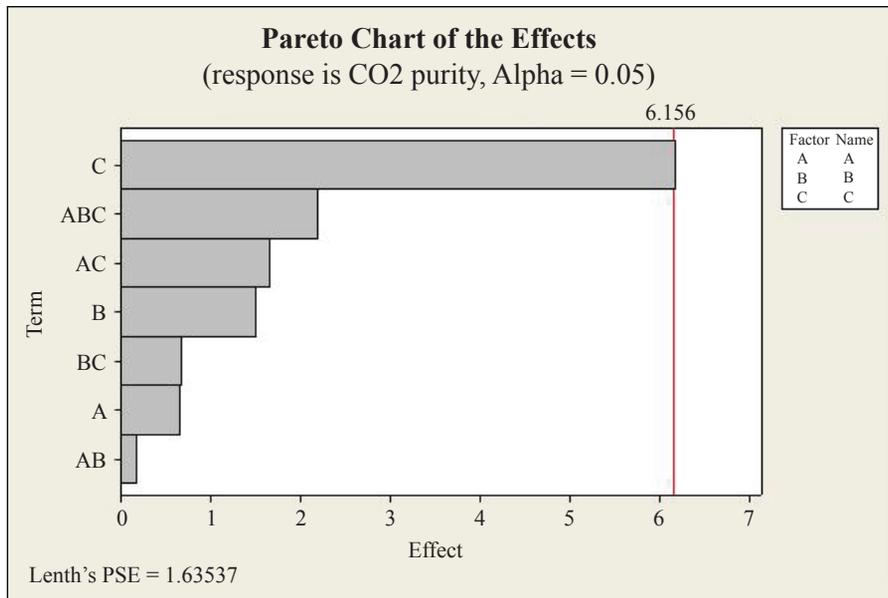


圖 13 二氧化碳純度的效應柏拉圖

Step 3/6/9 time (C)的影響性最高，其餘由大到小依序為Step 1/4/7 time與Step 2/5/8 time與Step 3/6/9 time的交互作用(ABC)、Step 1 time與Step 3/6/9 time的交互作用(AC)、Step 2/6/8 time (B)、Step 2/6/8 time與Step 3/6/9 time的交互作用(BC)、Step 1/4/7 time (A)、Step 1/4/7 time與Step 2/5/8 time的交互作用(AB)。

塔底二氧化碳回收率的效應常態機率圖、效應半常態機率圖分別為圖14和圖15，由圖中可以得知，Step 1/4/7 time(A)和Step 3/6/9 time(C)對塔底二氧化碳回收率具有顯著性的影響，不過在效應半常態機率圖中，Step 1/4/7 time(A)位於藍線的右側，Step

3/6/9 time(C)則在左側，此情形表示對塔底二氧化碳回收率而言，Step 1/4/7 time(A)為正效應，其數值越大，塔底二氧化碳回收率會越高；反之，Step 3/6/9 time(C)則為負效應，其數值越低，塔底二氧化碳回收率才會越高。而經由圖16的回收率的效應柏拉圖可得知影響的因子強度由大至小分別為Step 3/6/9 time (C)、Step 1/4/7 time (A)、Step 2/5/8 time (B)、Step 2/5/8 time與Step 3/6/9 time的交互作用(BC)、Step 1/4/7 time與Step 2/5/8 time的交互作用(AB)、Step 1/4/7 time與Step 2/5/8 time與Step 3/6/9 time的交互作用(ABC)，最後則為Step 1/4/7 time與Step 3/6/9 time的交互作用(AC)。

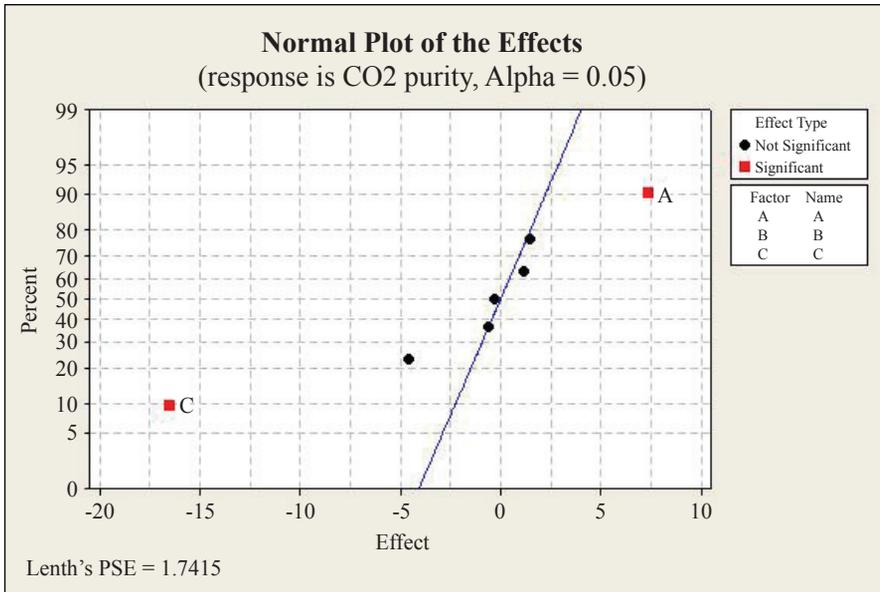


圖 14 二氧化碳回收率的效應常態機率圖

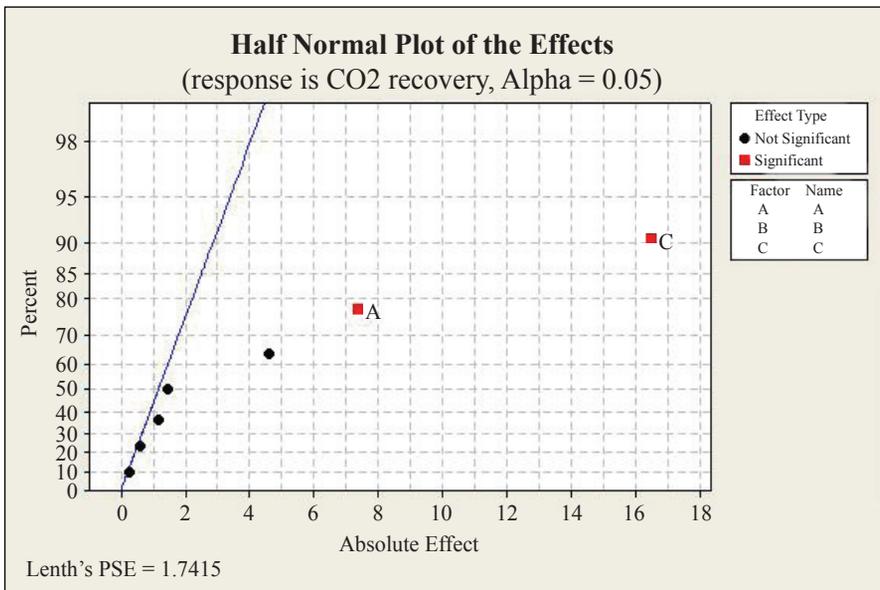


圖 15 二氧化碳回收率的效應半常態機率圖

真空幫浦能耗的效應常態機率圖、效應半常態機率圖以及效應柏拉圖如圖17、圖18

和圖19所示，由效應常態機率圖與效應半常態機率圖中可看出沒有任何主要因子或交互

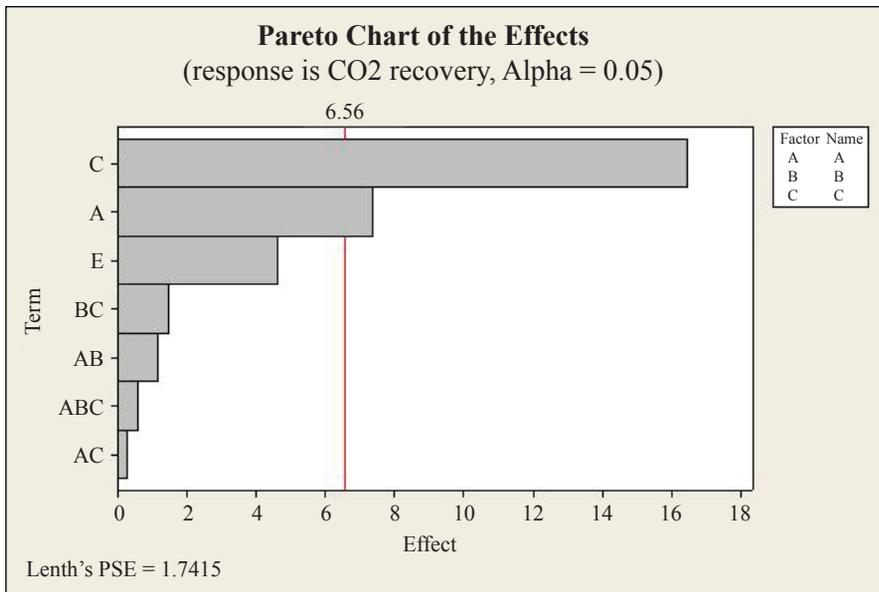


圖 16 二氧化碳回收率的效應柏拉圖

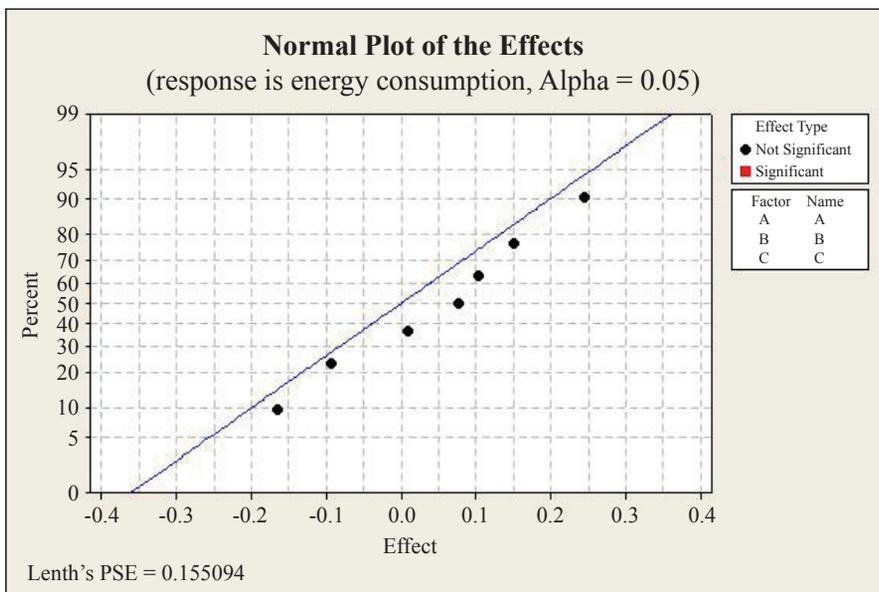


圖 17 能耗的效應常態機率圖

作用因子對真空幫浦能耗有顯著影響，不過仍可由效應柏拉圖中看出影響能耗的因子與

交互作用因子由大到小依序為Step 1/4/7 time (A)、Step 2/5/8 time (B)、Step 3/6/9 time

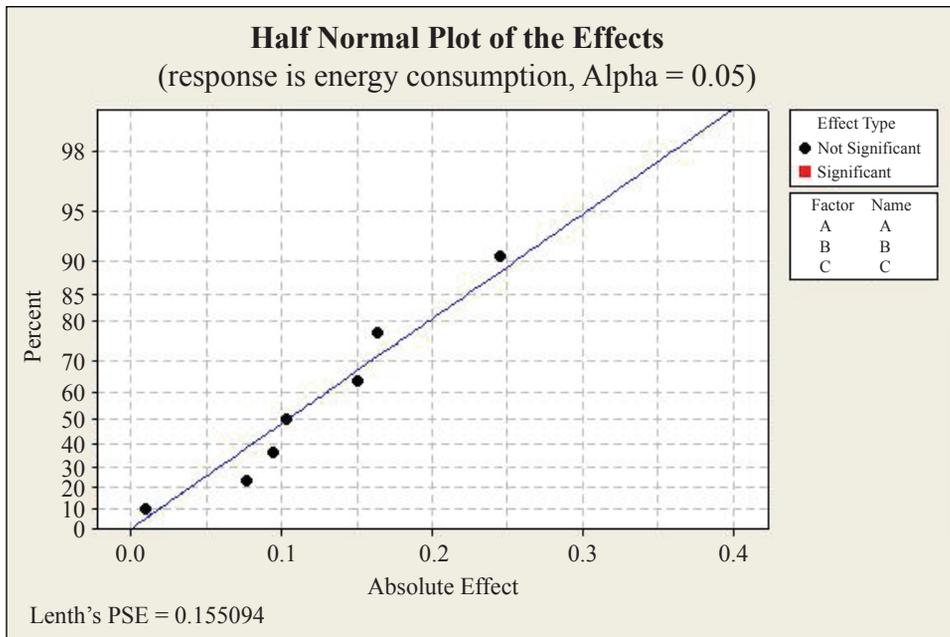


圖 18 能耗的效應半常態機率圖

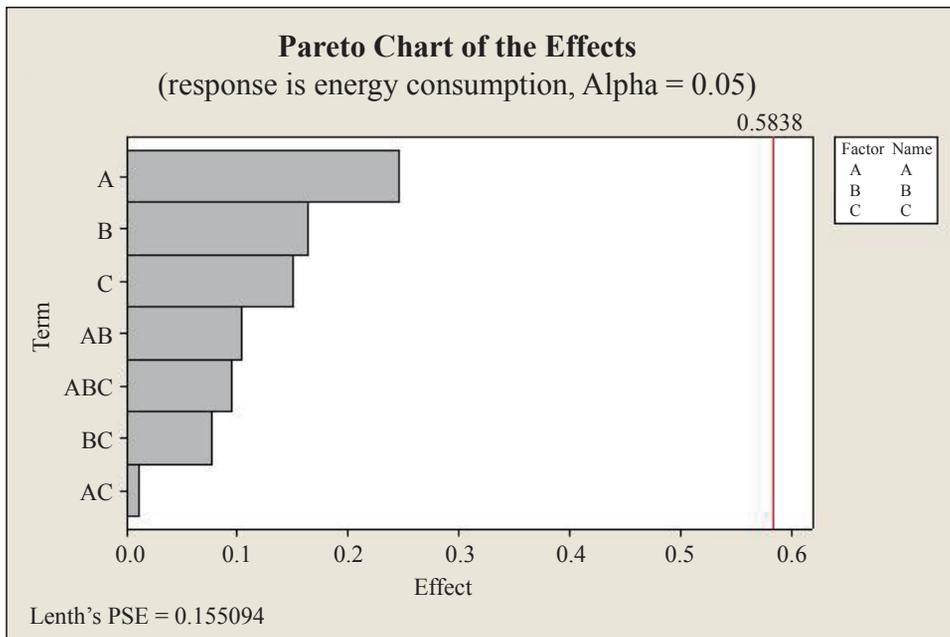


圖 19 能耗的效應柏拉圖



(C)、Step 1/4/7 time與Step 2/5/8 time的交互作用(AB)、Step 1/4/7 time與Step 2/5/8 time與Step 3/6/9 time的交互作用(ABC)、Step 2/5/8 time與Step 3/6/9 time的交互作用(BC)，最後則為Step 1/4/7 time與Step 3/6/9 time的交互作用(AC)。

表4為最適化實驗結果，此結果是利用控制處理後煙道氣之進料流速的MFC-C、控制上產品(top product)出口流速的MFC-E、控制同向減壓(cocurrent depressurization)流速的MFC-F、控制逆向

減壓(countercurrent depressurization)流速的MFC-F、四個二氧化碳分析儀，讀取並記錄到的數值進行計算所得，而每組實驗的各項結果均以該組實驗達穩定週期狀態的最後3個循環進行統計與計算所得，各項流速控制器之相對位置可參照圖8。

式(1)與式(2)為純度與回收率的計算方式，式中的t為單一循環的總時間，藉由這兩個公式可計算出每個循環的二氧化碳純度與回收率，之後將最後3個循環的數值加總後平均即可算出表4中的結果。

$$\text{純度(purity)} = \frac{\sum_0^t(\text{該出口流速}[SLPM] \times \text{該出口二氧化碳濃度}[\%])}{\sum_0^t(\text{該出口流速}[SLPM])} \quad (1)$$

$$\text{回收率(recovery)} = \frac{\sum_0^t(\text{該出口流速}[SLPM] \times \text{該出口二氧化碳濃度}[\%])}{\sum_0^t(\text{進料流速}[SLPM] \times \text{進料二氧化碳濃度}[\%])} \quad (2)$$

以本研究的三塔九步驟真空變壓吸附程序而言，其能耗來源主要為同向與逆向減壓時的真空幫浦作動，因此本次實驗主要紀錄的能耗為同向減壓與逆向減壓時共2台真空幫浦的電流以及電壓數值再換算為電功率。在實驗進行時，人機介面本身的系統會每隔10秒紀錄一次電流與電壓，電流與電壓會在

真空幫浦作動時有所變化(主要是電流值的變化較大)，利用式(3)可算出該循環的真空幫浦能耗，表4中實驗之真空幫浦能耗則是先計算出最後3個循環的真空幫浦能耗後再進行平均所得。單一循環中的真空幫浦能耗計算：

$$\begin{aligned} \text{Energy consumption of vacuum pump (based on one cycle)} & \left(\frac{\text{GJ}}{\text{tonne} - \text{CO}_2} \right) \\ & = \frac{[\sum(\text{電壓}(V) \times \text{電流}(I) \times 10(s))] (J) \times 10^{-9} \left(\frac{\text{GJ}}{J} \right)}{\text{該循環捕獲之二氧化碳重量}(g) \times 10^{-6} \left(\frac{\text{tonne}}{g} \right)} \quad (3) \end{aligned}$$



表 4 三塔九步驟真空變壓吸附最佳實驗結果

Run 2		
Feed pressure (bar)		3.2
Cocurrent depressurization pressure (bar)		0.3
Countercurrent depressurization (vacuum) pressure (bar)		0.1
Factor	A. Step 1/4/7 (P.E. / Counter-D) time (s)	400
	B. Step 2/5/8 (P.E. / Adsorption) time (s)	200
	C. Step 3/6/9 (Adsorption / Co-D) time (s)	90
Feed CO ₂ average concentration and range (%)		10.21 ± 0.21
Top product	CO ₂ purity (%)	1.68
	CO ₂ recovery (%)	13.17
Cocurrent depressurization	CO ₂ purity (%)	4.55
	CO ₂ recovery (%)	2.30
Bottom product	CO ₂ purity (%)	92.01
	CO ₂ recovery (%)	84.18
Energy consumption of vacuum pump (GJ/tonne-CO ₂)		2.20

註：P.E.= Pressure Equalization；Counter-D = Countercurrent Depressurization；Co-D = Cocurrent Depressurization

六、結論

本研究以EIKME 13X沸石為吸附劑，以台電臺中發電廠減碳技術園區三塔九步驟真空變壓吸附程序捕獲燃煤電廠經預處理之 1 kw排氣量煙道氣中二氧化碳。預處理後的煙道氣中二氧化碳濃度約為9.00%-11.74%，其九步驟程序係由高壓吸附、同向減壓、逆向減壓、壓力平衡及靜置等所組成。經過實驗設計分析後得到最佳結果為二氧化碳純度 92.01%、二氧化碳回收率84.18%、真空幫浦能耗2.20 GJ/tonne-CO₂，其進料壓力為3.2 bar，同向減壓壓力為0.3 bar，逆向減壓（真空脫附）壓力為0.1 bar，步驟1/4/7時間（壓力平衡/逆向減壓時間）：400秒、步驟2/5/8

時間（高壓吸附/壓力平衡時間）：200秒、步驟3/6/9時間（高壓吸附/同向減壓時間）：90秒。未來擬進一步改進 PSA程序，以期達二氧化碳純度及回收率均在90%以上，以及降低能耗。

參考文獻

1. 聯合報，2021-08-10, A1 版，聯合國報告：緊急警報化石燃料正在摧毀地球，110 年。
2. 經濟部能源局，108 年能源統計手冊，June 2020.
3. 台灣電力股份有限公司，<https://www.taipower.com.tw/tc/Chart.aspx?mid=194>, 2021-08-10.
4. IEA, Global Energy Review: CO2 Emissions in 2020, <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020/global-energy-and-co2-emissions-in-2020>, 2021-08-15
5. 行政院環境保護署，溫室氣體排放統計，<https://www.epa.gov.tw/Page/81825C40725F211C/6alad12a-4903-4b78-b246-8709e7f00c2b%E3%80%80>, 2021-08-15.



6. 科技大觀園，什麼是碳捕存(CCS)? 原理及重要性，<https://scitechvista.nat.gov.tw/Article/C000003/detail?ID=2c4ea6d5-28f9-4ded-b61b-fa892a4c033b>, 2021-09-02.
7. 楊閔舜、周正堂，變壓吸附程序在二氧化碳捕獲技術之發展與研究，化工，63 卷 1 期，pp. 83-97，105 年。
8. 談駿嵩、王志盈，二氧化碳捕獲，科學發展，510 期，pp. 32-37，104 年。
9. 張育誠、吳國光、焦鴻文、簡國祥、歐陽湘，富氧燃燒技術之應用與分析，台灣能源期刊，二卷 3 期，pp. 323-331，104 年。
10. C. Chao, Y. Deng, R. Dewil, J. Baeyens and X. Fan, Post-combustion carbon capture, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 138, article 110490, 2021.
11. A. Agarwal, Advanced Strategies for Optimal Design and Operation of Pressure Swing Adsorption Processes, PhD thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 2010.
12. C. W. Skarstrom, Method and apparatus for fractionating gaseous mixtures by adsorption, US Patent 2944627, 1960.
13. A. E. Rodrigues, M. D. LeVan and D. Tondeur, Adsorption: Science and Technology, Kluwer Academic Publishers, London, 1988.
14. W. Choi, T. Kwon and Y. Yeo, Optimal Operation of the Pressure Swing Adsorption (PSA) Process, Korean Journal Chemical Engineering, vol. 20, pp. 617-623, 2003.
15. R. T. Yang, Gas Separation by Adsorption Process, Imperial College Press, London, 1997.
16. P. E. Jahromi, S. Fatemi, A. Vatani, J.A. Ritter and A. D. Ebner, Purification of Helium from a Cryogenic Natural Gas Nitrogen Rejection Unit by Pressure Swing Adsorption, Separation and Purification Technology, vol. 193, pp. 91-102, 2018.
17. P. G. de Montgareuil and D. Domine, Process for Separating a Binary Gaseous Mixture by Adsorption, US Patent 3155468, 1964.
18. G. Heinze, Belgian Patent 613267, assigned to Farbenfabriken Bayer AG, 1962.
19. B. K. Na, H. L. Lee, K. K. Koo and H. K. Song, Effect of Rinse and Recycle Methods on the Pressure Swing Adsorption Process to Recover CO₂ from Power Plant Flue Gas Using Activated Carbon, Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 41, pp. 5498-5503, 2002.
20. K. Chihara and M. Suzuki, Air Drying by Pressure Swing Adsorption, Journal of Chemical Engineering of Japan, vol. 16, pp. 293-299, 1983.
21. J. J. Collins, Air Separation by Adsorption, US Patent 4026680, 1975.
22. S. J. Doong and R. T. Yang, Hydrogen Purification by the Multibed Pressure Swing Adsorption Process, Reactive Polymers, vol. 6, pp. 7-13, 1987.
23. L. Jiang, V.G. Fox and L.T. Biegler, Simulation and Optimal Design of Multiple-Bed Pressure Swing Adsorption Systems, AIChE Journal, vol. 50, pp. 2904-2914, 2004.
24. E. Rudelstorfer and A. Fuderer, Selective Adsorption Process, US Patent 3986849, 1976.



蒸餾節能設計在化工製程上的開發與應用

國立臺灣科技大學化學工程系教授 / 李豪業

關鍵字：反應蒸餾、熱耦合、多效熱整合、複合型熱整合

於化工產業中，蒸餾程序為最為耗能之分離程序。因此各種節能之熱整合方式如多效熱整合、熱耦合組態等因應而生。本文嘗試結合多效熱整合及熱耦合組態之優點介紹一複合型熱整合組態，同時達到總能耗下降及能源再利用之目標。研究上，本文以碳酸二苯酯（Diphenyl carbonate, DPC）反應蒸餾程序作為範例，進行複合型熱整合組態與其他傳統熱整合組態之節能效益比較。穩態設計以Aspen Plus做為模擬工具。穩態模擬結果顯示，複合型熱整合組態於節能及減少操作成本方面皆有最傑出之表現，程序之複合型熱整合組態能節能35%。複合型熱整合組態也可消除再混合效應，但與熱耦合組態相比其第二座蒸餾塔冷凝器浪費之能源較少。與多效熱整合相比複合型熱整合組態可減少兩塔間熱傳所需之熱傳面積。而年操作成本結

果顯示，複合型熱整合組態其所需之熱媒量比原始反應蒸餾組態少，且反應物回收塔不須額外使用低壓蒸汽，故其年總操作成本比原本的設計降低26.7%，為四種設計中最具經濟價值者。

壹、反應蒸餾

傳統之化工製程通常由許多單元所構成，主要可以區分為反應及分離兩個區塊。分離程序中又以蒸餾程序最為耗能。傳統設計中，能源利用效率低、能耗較高之製程將逐漸被淘汰。於近年來之研究中，將反應區塊與分離區塊結合之反應蒸餾程序（Reactive distillation）已開始應用於工業生產上。國際上也有相當多研究探討具有節能效益之熱整合設計（Wright [1]；Andreovich

and Westerberg [2]; Robinson and Gilliland [3])，主要如熱耦合 (Thermal coupling) 方式、多效熱整合 (Multi-effect) 等方式。

於傳統之化工製程中，反應區塊主要由反應器構成。而化學反應常常伴隨大量吸放熱之現象，因此能源之輸入或移除為必要之操作。而分離區塊主要之單元為蒸餾塔，蒸餾塔之操作必須於塔底加入能源，於塔頂則需移除能源。反應蒸餾技術結合反應區塊及分離區塊於同一單元，此單元如圖1所示。一般反應蒸餾塔之設計由上而下可分為精餾段 (Rectifying section)、反應段 (Reactive section) 及汽提段 (Stripping section)。反應物於反應段轉化成產物後由精餾段及汽提段進行分離。當反應物於反應段中生成產物後，沸點較低之產物會因蒸餾之效果不斷於塔頂被移出，沸點較高之產物則可於塔底得到。依據勒沙特列原理 (Le Chatelier's Principle)，不斷移出產物即有利於正向反應進行，可提高反應效率。

一般而言，反應蒸餾程序於設計上與傳統蒸餾程序相比有以下幾種優勢：

1. 由於單元數下降，可減少設備成本。
2. 產物不斷由蒸餾被移出，可突破平衡轉化率之限制，提升反應之轉化率。
3. 對於高放熱之化學反應，可有效利用其反應熱。
4. 設計上可將會產生共沸組成之反應物完全轉化，減少後續分離上之困難度。

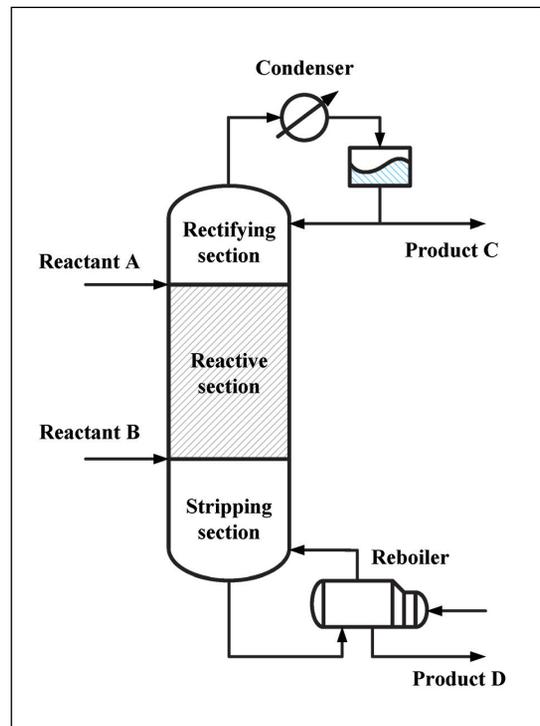


圖 1 反應蒸餾塔 (RD) 結構圖

熱整合設計之研究主要目的在於節省能源之消耗。主要之研究方向皆在於探討對一般分離程序之節能效益。而將反應蒸餾程序進行熱整合之研究則較為稀少。Wang et al. [4]接續Lin [5]之理想反應蒸餾程序研究結果，將九種可行之反應蒸餾程序皆進行熱耦合設計，研究顯示熱耦合設計結果皆有省能之效果。Lee et al. [6]; Wu et al. [7]; Cheng et al. [8]利用程序模擬軟體，針對文獻中之各式酯類製程進行熱耦合設計，設計結果皆有大小不等之省能效果。證明熱耦合設計與反應蒸餾程序結合是具有可行性的。



二、熱整合設計

(一) 熱耦合設計

於Wright [1]之專利中，熱耦合之概念首度被提出，此概念之後更衍生出隔板式蒸餾塔 (Divided Wall Column, DWC) 設計。於傳統多成分分離程序中，於塔底或塔頂常有成分之組成先上升後下降之現象，稱為再混合效應 (Remixing effect)。傳統程序經熱耦合設計後可同時消除再混合效應並減少程序能耗。Glinos and Malone [9]；Annakou and Mizsey [10]；Emtir et al. [11]等文獻已顯示傳統程序經熱耦合設計結果可減少30%能耗量。隔板式蒸餾塔與熱耦合組態之理論熱力學效益於Kaibel [12]之研究中已證明兩者相等。熱耦合組態及隔板式蒸餾塔之控制也

已經於Ling and Luyben [13, 14]；Wang and Wong [15]中進行討論。

(二) 多效熱整合設計

多效熱整合概念源自於Robinson and Gilliland [3]，其概念為利用操作於不同壓力下之蒸餾塔，可將高壓塔塔頂冷凝器移除之能源傳送至低壓塔再沸器再利用。最常見於文獻中為雙塔之雙效熱整合設計。設計上有兩種方式，一種為將進料分為兩股 (Feed split)，分別送入不同壓力之蒸餾塔，使兩塔間可進行熱回收 (Andrecovich and Westerberg [2])。Andrecovich and Westerberg [2]文中提出Feed split之設計方式並比較分析進料分流數對節能效益之影響。結果表示於圖2。結果顯示分流數越多外加能源需求越

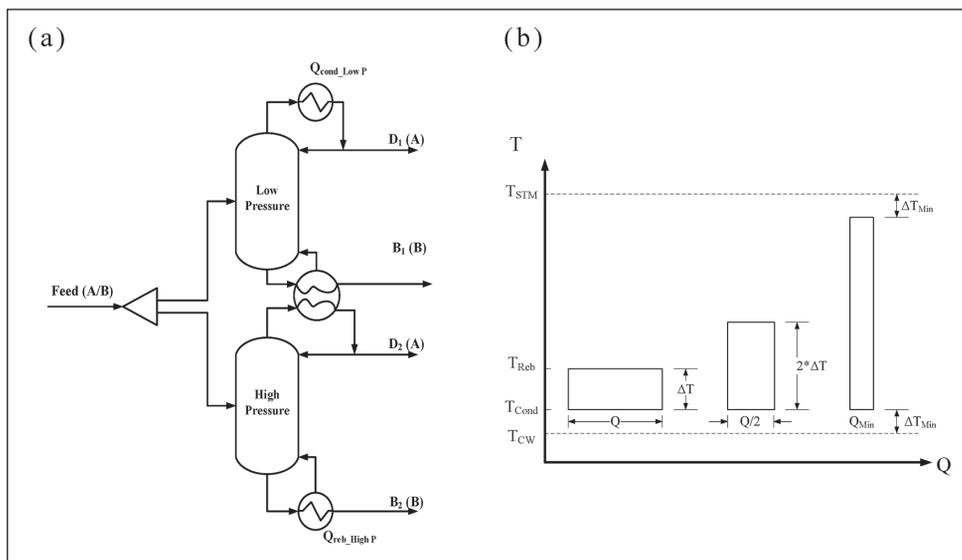


圖 2 (a) Feed split 設計概念 (b) 進料分流數對程序能耗之影響

少，但分流數越多會使蒸餾塔數增加，且佔地面積會變大。

另一種為將原始兩塔之程序，將其中一座蒸餾塔操作於較高壓力下，使兩塔間可進行熱回收 (Luyben [16]; Lee et al. [17])。Alcántara-Avila et al. [18]提出一種類似多效熱整合之熱整合設計方式。其概念為利用兩塔塔板間之溫差進行熱整合，可應用於塔底或塔頂溫度較極端之程序或加壓會造成能耗大幅增加之程序。但由模擬結果顯示，經由塔中段加入能源類似一側再沸器 (Side-boiler)，加入之能源並無法完全用於補充再沸器之能耗。且加入能源之位置越接近塔頂，熱傳能源損失越嚴重。

2-3 新式複合型熱整合設計概念

本文針對間接序列式設計之反應蒸餾程序進行不同熱整合方式其效益探討，並提出改良方式。於文獻之研究結果可知，多效熱整合組態雖然能提高能源利用率，卻無法消除再混合效應，使高壓塔塔頂必須操作於汽液兩相區較大之操作點，導致熱傳過程溫度變化大之問題。而間接序列式程序之熱耦合設計，無冷凝器之蒸餾塔其塔頂產物無冷凝直接送入下一座蒸餾塔，其能量傳遞之效應類似一側再沸器，導致能源利用率不高。本文結合這兩種設計之特性，提出一複合型 (Hybrid) 之改良設計，其概念如圖3所示。

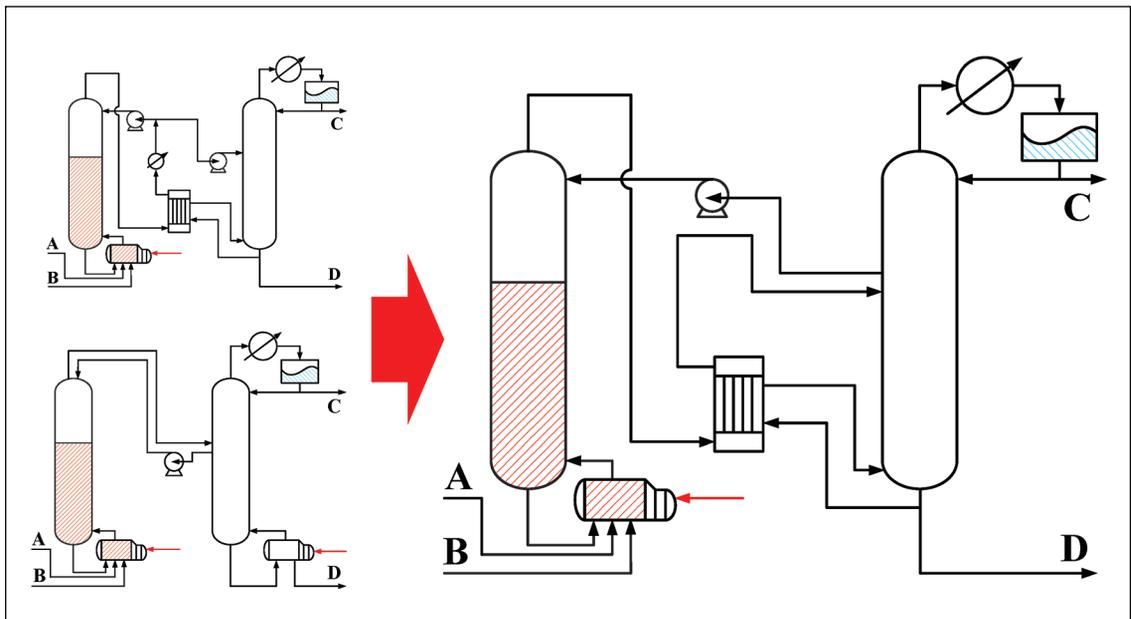


圖 3 新式複合型熱整合設計概念



複合型熱整合設計預期含有熱耦合組態減少總能耗之優點同時能具有多效熱整合之特性提高熱耦合組態下第一座蒸餾塔塔頂蒸汽所含之能源其能源利用率。以進一步減少蒸餾程序所須外加之能量，降低操作成本。

三、熱力學及動力學模式

(一) DPC 反應蒸餾程序之熱力學模式

由於環境保護之因素，發展無光氣 (Phosgene-free) 之碳酸二苯酯 (DPC) 產品為重要的製程開發。為了進行模擬，必須先了解製程中的物性。Cheng et al. [8]曾針對此程序進行熱力學的驗證。其程序中主要含有五種成分。分別為碳酸二甲酯 (Dimethyl carbonate, DMC)、乙酸甲酯 (Methyl acetate, MA)、碳酸苯甲酯 (Methyl-phenyl carbonate, MPC)、乙酸苯酯 (Phenyl acetate, PA) 及碳酸二苯酯。其五個成分常壓下之沸點表示於表1。

為求模擬之準確性，模擬結果之汽液相平衡數據必須與實驗數據對照，且必須互相吻合。其中DMC-MA、DMC-PA、MA-PA

之相平衡數據可由姚志通[19]獲得。而MA-DPC及PA-DPC則只有平衡時之液相數據。此研究，熱力學模型直接採用理想模型(Ideal model)進行模擬，相平衡數據模擬結果與實驗結果之比較表示於圖4，沒有實驗值的部份則同樣直接以理想模型估算。由DMC、PA、MA與DPC兩兩成份的五組模擬結果與實驗值比較，已經顯示模擬結果相當準確。

(二) DPC 程序之動力學模式

而碳酸二苯酯(DPC)之合成反應動力學參數參考自鄭凱[20]，其中DPC之合成其觸媒催化結果參考自Shen et al. [21]。反應觸媒使用勻相觸媒tetra-n-butyl orthotitanate ($Ti(OC_2H_5)_4$)，濃度為0.6%。由於Shen et al. [21]只提供實驗數據，並沒有進行動力學參數回歸。鄭凱[20]由Shen et al. [21]提供之實驗數據並利用Matlab數學軟體回歸求得化學反應之反應動力式。

碳酸二苯酯 (DPC) 合成反應是為一兩階段之轉酯化反應，第一階段反應由反應物碳酸二甲酯 (DMC) 及乙酸苯酯 (PA) 經轉酯化反應生成中間產物碳酸苯甲酯 (MPC) 及副產物乙酸甲酯 (MA)。第二階段反應可能

表 1 DPC 程序中常壓下各成分之沸點

	DPC	MPC	PA	DMC	MA
Boiling point (°C)	302	234.7	195.7	90.2	57.1

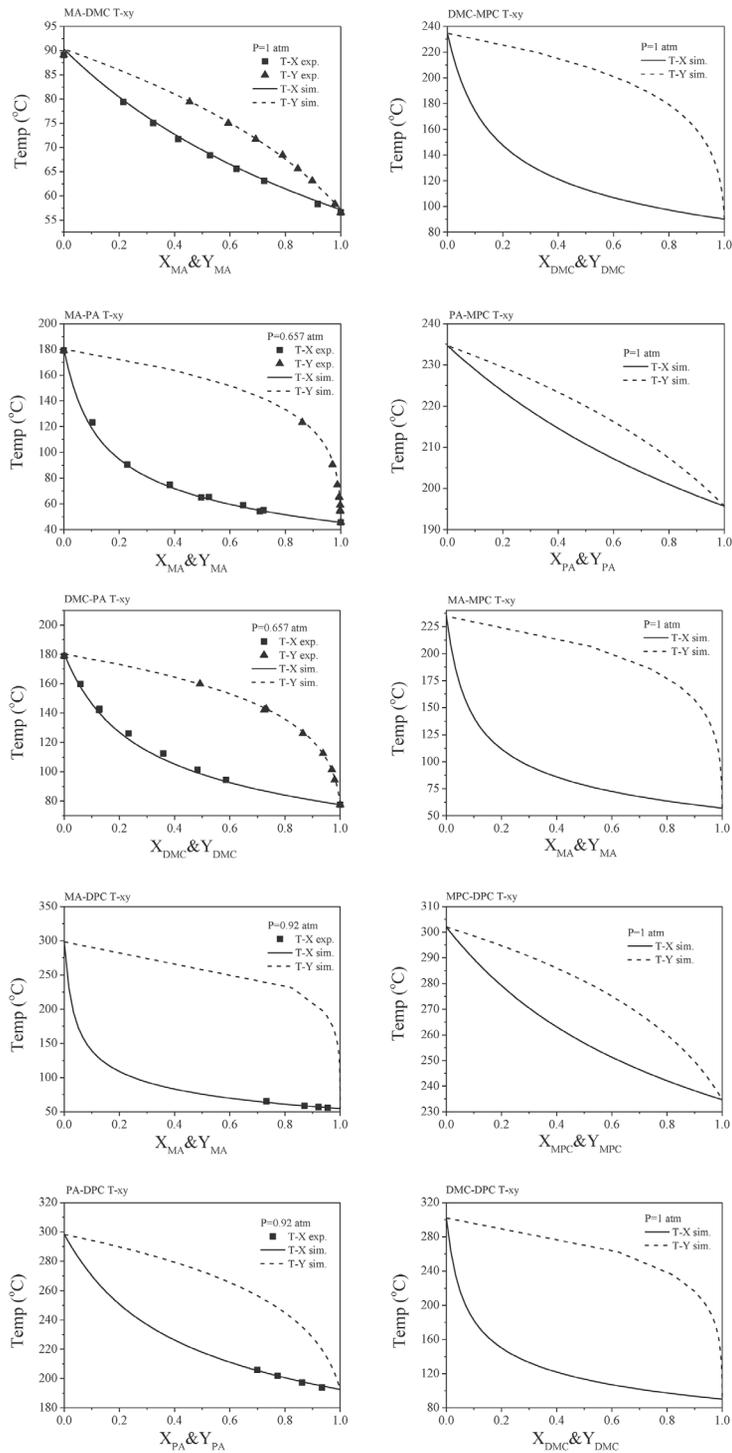
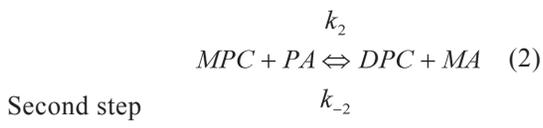
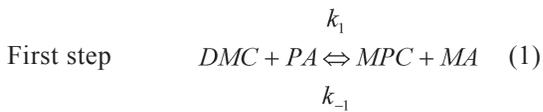


圖 4 DPC 程序中各成分之 T-xy 圖



有兩種途徑，第一種為碳酸二甲酯（DMC）及乙酸苯酯（PA）進行轉酯化反應生成產物碳酸二苯酯（DPC）及副產物乙酸甲酯（MA），第二種為碳酸苯甲酯（MPC）自身重組為產物碳酸二苯酯（DPC）及碳酸二甲酯（DMC）。完整之化學反應表示如下：



總反應反應式表示如下：



各成分之反應速率如下所示，式中 r_1 、 r_2 、 r_3 為三反應之反應速率， k_1 、 k_2 、 k_3 為三反應之正向反應速率常數， k_{-1} 、 k_{-2} 、 k_{-3} 為三反應之逆向反應速率常數， C 為各成分之體積莫爾濃度（Molarity）。

$$r_1 = k_1 C_{PA} C_{DMC} - k_{-1} C_{MPC} C_{MA} \quad (5)$$

$$r_2 = k_2 C_{PA} C_{MPC} - k_{-2} C_{DPC} C_{MA} \quad (6)$$

$$r_3 = k_3 C_{MPC}^2 - k_{-3} C_{DPC} C_{DMC} \quad (7)$$

反應之速率常數由阿瑞尼式方程式

表 2 DPC 合成反應之反應動力學參數

	k_0 (m ³ /kmol.s)	E_a (kJ/kmol)
k_1	135	54200
k_{-1}	52	54900
k_2	1210	61500
k_{-2}	611	56200
k_3	82000	76800
k_{-3}	109000	70800

（Arrhenius equation）表示，阿瑞尼式方程式之參數則取自鄭凱（2012），表示於表2。其中 k_0 為指數前常數， E_a 為反應之活化能。阿瑞尼式方程式表示如下：

$$k_i = k_0 e^{-E_a/RT} \quad (8)$$

四、DPC 反應蒸餾程序之熱整合設計

（一）程序原始組態及熱耦合組態

於Cheng et al. [8]之研究中，由Shen et al. [21]提供之反應，以碳酸二甲酯及乙酸苯酯為原料進行轉酯化反應，產物為碳酸二苯酯及乙酸甲酯。程序之設計採用反應蒸餾之概念以增加其轉化率。進料方式採碳酸二甲酯過量之過量設計，使反應物乙酸苯酯可完全反應產物可由反應蒸餾塔塔底產出。碳酸二苯酯反應蒸餾程序原始設計表示於圖5。由於反應物及產物間皆不會產生共沸物，故程序只包含一反應蒸餾塔（C1）及反應物回收塔（C2）。進料碳酸二甲酯及乙酸苯酯皆採

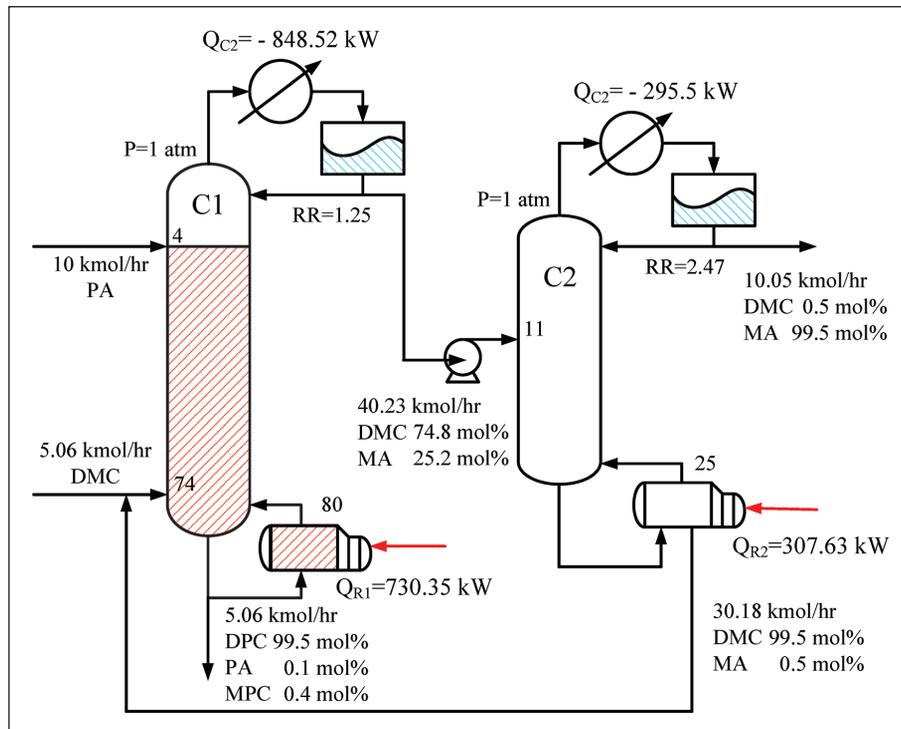


圖 5 DPC 反應蒸餾程序原始設計

純成分進料。碳酸二甲酯為沸點較低之反應物，其進料量為 5.06 kmol/hr ，與回流之碳酸二甲酯 30.2 kmol/hr 混合後，由反應蒸餾塔第74板進料。較高沸點之反應物乙酸苯酯，其進料量設計為 10 kmol/hr ，由反應塔第4板進料。反應塔之總板數由最適化結果設計為80板，只包含精餾段及反應段，無汽提段。上半部由第1板至第6板為精餾段，下半部由第7板至第80板為反應段。反應塔塔底出料為產物碳酸二苯酯，其組成設定為 $99.5 \text{ mol}\%$ 。反應塔塔頂出料為副產物乙酸甲酯及過量之反應物碳酸二甲酯，送入反應物回收塔（C2）進行分離，進料位置為第11板。反應物回收

塔總板數為25板，塔頂出料為副產物乙酸甲酯，組成設定為 $99.5 \text{ mol}\%$ 。塔底出料為回收之反應物碳酸二甲酯，其組成設定為 $99.5 \text{ mol}\%$ ，以避免過多之產物回流反應段，影響反應進行。

由模擬結果顯示，反應塔所需之能耗大於反應物回收塔。反應塔之能耗為 730.35 kW 。而反應物回收塔之能耗為 307.6 kW 。反應塔液相組成分佈表示於圖6。結果顯示反應塔頂部碳酸二甲酯之液相組成呈現先上升後下降之再混合效應。故若進行熱耦合組態設計可節省能源使用量。

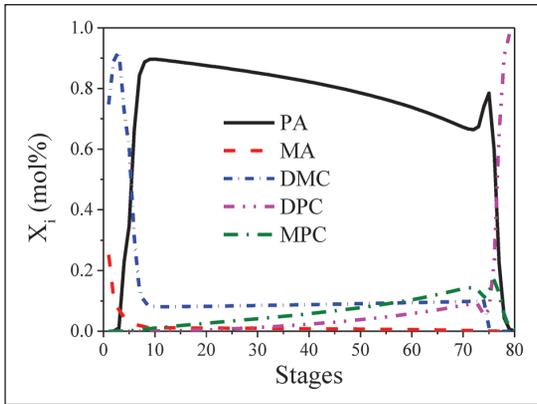


圖 6 DPC 程序原始設計反應塔液相組成分佈

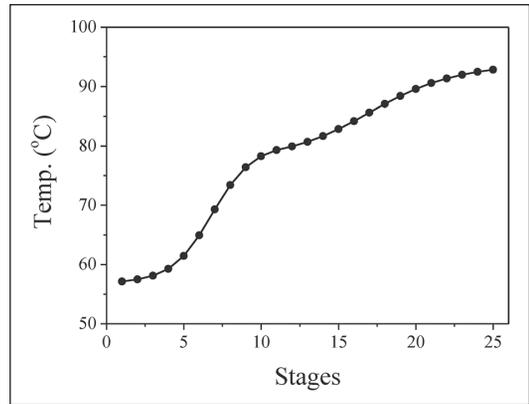


圖 8 DPC 反應蒸餾程序原始組態反應物回收塔 (C2) 之溫度分佈

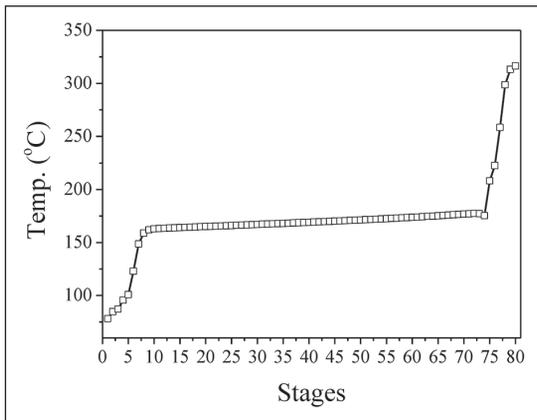


圖 7 DPC 反應蒸餾程序原始組態反應塔 (C1) 之溫度分佈

物回收塔之溫度分布變化較平緩，塔頂處主要是低沸點之乙酸甲酯，故塔頂溫度較低。越接近塔底則沸點較高之碳酸二甲酯濃度越高，因此溫度分佈隨之上升。

Cheng et al. [8]提出一以原始設計為基礎，進行熱耦合組態設計之程序。設計結果顯示程序總能耗減少24%。結果顯示塔頂之再混合效應已消除。但反應塔上半部之組成分佈卻轉換至另一種穩態。因此Cheng et al. [8]另提出一修正之熱耦合程序。修正之熱耦合程序之組態與原始設計之熱耦合組態差異只在於反應段板數。修正後之熱耦合組態反應塔總板數減少至76板，碳酸二甲酯之進料板移動至70板。結果顯示原始設計之熱耦合組態其能耗與修正後之程序差異相當小。因此研究上選用修正之熱耦合程序進行能耗比較。修正後之熱耦合組態及組成分佈表示於圖9及圖10。觀察熱耦合設計結果反應物回收

碳酸二苯酯反應蒸餾程序原始組態反應塔 (C1) 及反應物回收塔 (C2) 之溫度分布表示於圖7及圖8。反應塔中，由於高沸點成分乙酸苯酯之液相組成於第四板開始即快速上升，因此反應塔溫度也於第4板處劇烈上升。至塔底75板處由於產物碳酸二苯酯組成增加，反應塔溫度分佈因而再度上升。反應

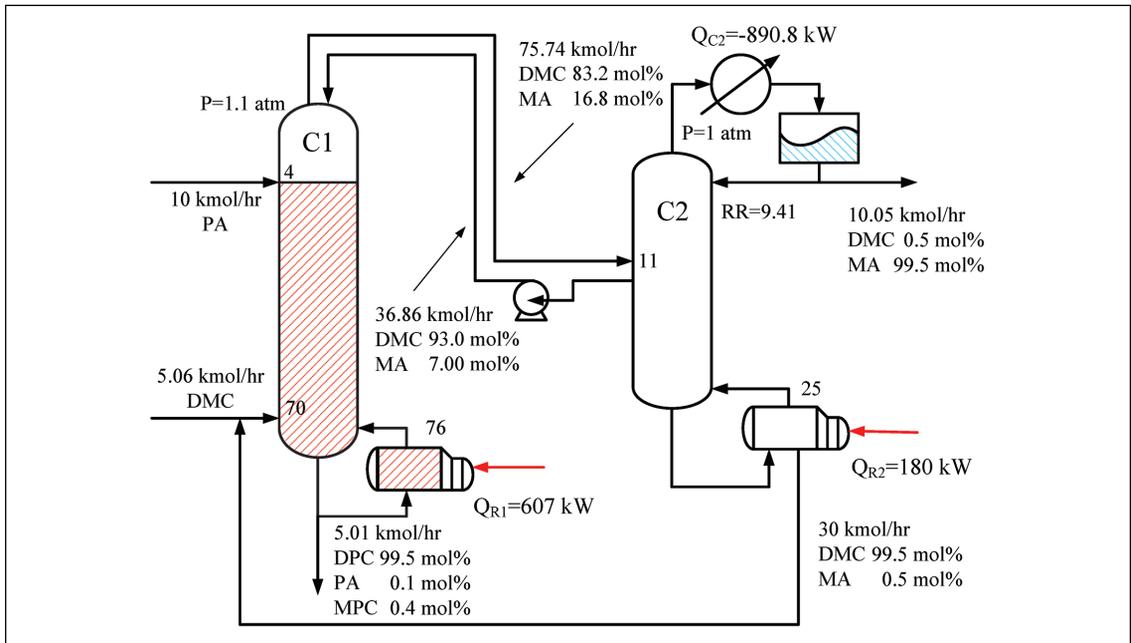


圖 9 DPC 反應蒸餾程序修正後之熱耦合設計組態

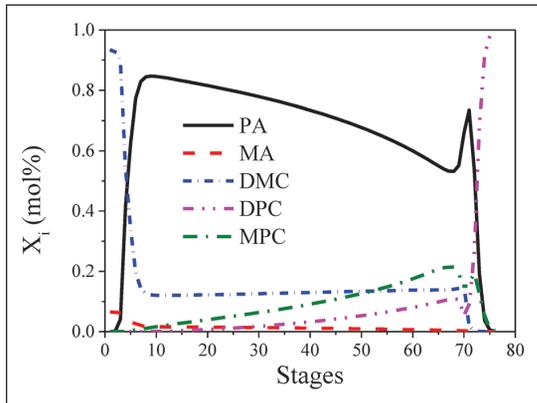


圖 10 熱耦合設計下反應蒸餾塔液相組成分佈

塔塔頂冷凝器負載可發現，其附載量由原始設計之295.5 kW上升至890.8 kW，此種熱耦合組態冷凝器負載上升之現象與理想程序熱耦合組態之結果相同。

熱耦合組態反應塔（C1）及反應物回收塔（C2）之溫度分布表示於圖11及圖12。由於熱耦合組態兩塔之液相組成分佈與原始組態類似，因此其溫度分佈之變化也類似。但因熱耦合組態反應塔塔頂再混合效應（Remixing effect）已經消除，故較高沸點成分碳酸二甲酯之液相組成於反應塔塔頂並不會有下降之情形，因此熱耦合組態反應塔塔頂之溫度會比原始組態之溫度高。

（二）DPC 反應蒸餾程序雙效熱整合組態

碳酸二苯酯反應蒸餾程序原始設計下反應塔塔頂冷凝器負載為848.5 kW，大於反應物回收塔塔底再沸器能耗。且反應塔塔頂產

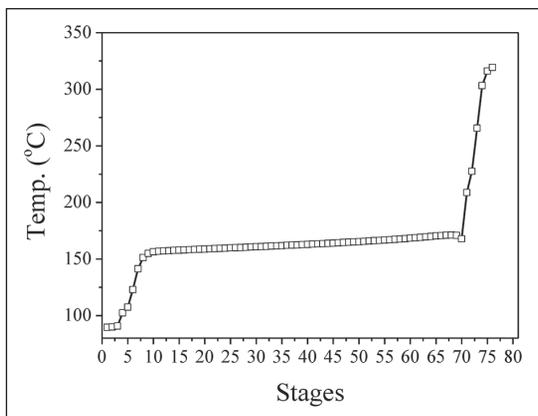


圖 11 DPC 反應蒸餾程序熱耦合組態反應塔 (C1) 之溫度分佈

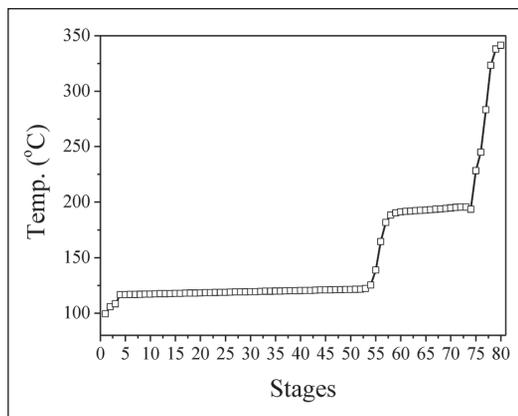


圖 13 DPC 程序 1.9 atm 下反應塔之溫度分佈

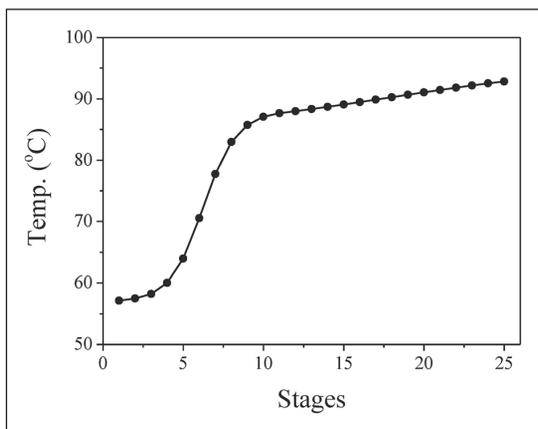


圖 12 DPC 反應蒸餾程序熱耦合組態反應物回收塔 (C2) 之溫度分佈

物中高沸點成分碳酸二甲酯之組成較高，因此反應塔塔頂之溫度與反應物回收塔塔底之溫度較為接近，因此可進行雙效熱整合設計。

能量傳送之驅動力為溫度差，為了使反應塔塔頂溫度高於反應物回收塔塔底溫度，必須對反應塔進行加壓設計。由於原始設計

下反應塔 (C1) 塔底溫度為 316°C ，而反應物回收塔 (C2) 塔底溫度為 93°C ，塔頂不到 60°C ，若採用將反應物回收塔加壓之方式，必須加壓至相當高之壓力反應物回收塔之能量才可傳送至反應塔再沸器，實際操作上並不可行。因此在雙效熱整合設計上採用將反應塔加壓，使能量可由反應塔塔頂傳送至反應物回收塔再利用。

為了進行熱傳，反應蒸餾塔頂部與回收塔底部之溫度差設計假設必須大於最小有效溫度差 (10°C)。溫度差之計算採用熱傳前後之對數平均溫度差，熱傳前後之對數平均溫度差計算公式與理想程序雙效熱整合相同。加壓測試結果顯示，反應塔加壓至 1.9 atm 時，進入熱交換器前反應塔塔頂蒸汽出料與反應物回收塔塔底之溫度差為 12.2°C 。熱傳總包係數設定為 $0.17\text{ kW/m}^2\cdot\text{hr}$ 。反應塔塔頂 1.9 atm 下反應塔之溫度分佈表示於圖 13。常

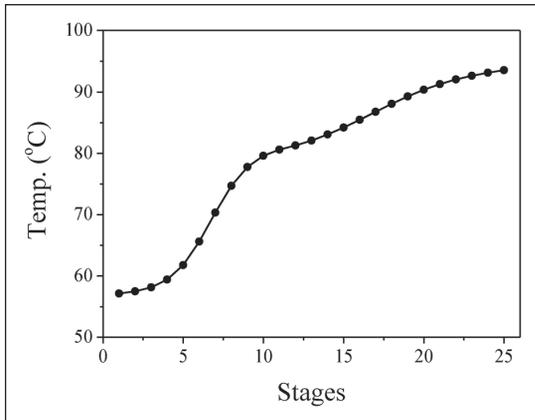


圖 14 DPC 程序常壓反應物回收塔之溫度分佈

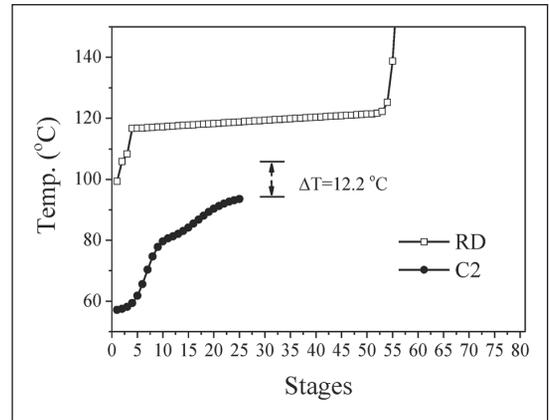


圖 15 DPC 程序高壓反應塔與反應物回收塔之溫度分佈比較

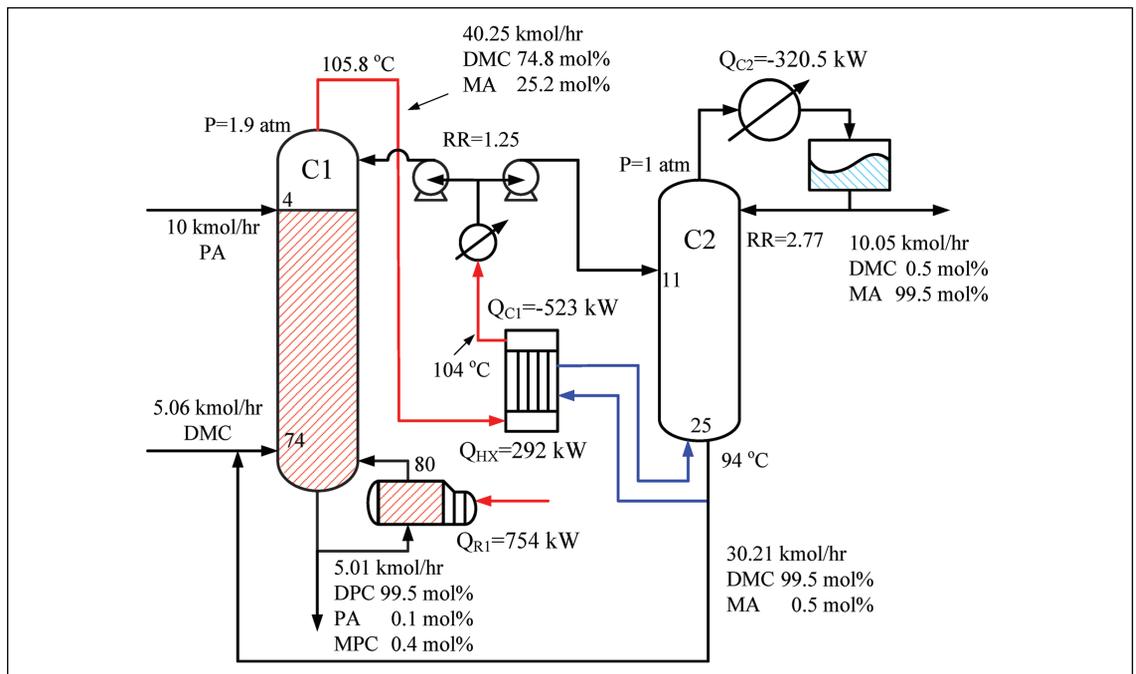


圖 16 碳酸二苯酯反應蒸餾程序雙效熱整合組態

壓反應物回收塔之溫度分佈表示於圖 14。反應塔與反應物回收塔之溫度分佈比較則表示於圖 15。

碳酸二苯酯反應蒸餾程序雙效熱整合設計組態表示於圖 16，兩塔之板數結構皆採用與原始設計相同。程序設計上利用一熱交換



器 (Heat exchanger, HX) 將能量傳送至反應物回收塔塔底，多餘之能量再由一輔助冷凝器移除至飽和液態。全冷凝後之反應塔塔頂產物部分作為回流 (Reflux flow) 回反應塔塔頂，部分送入反應物回收塔作為進料。

碳酸二苯酯反應為吸熱反應，而加壓會使反應塔溫度上升，故有利於反應進行，但加壓會導致程序中各成分之沸點上升，且對分離有不好之影響。模擬結果顯示反應塔之能耗為754.0 kW，比起原始設計之結果略為上升。反應物回收塔之能耗為292.0 kW，可完全由反應塔塔頂之熱傳提供，熱傳後多餘之能量為523.0 kW，由輔助冷凝器移除。模擬結果兩塔間熱傳之對數平均溫度差為11°C，由熱傳公式可計算求得熱交換器面積為156.1 m²。

碳酸二苯酯程序雙效熱整合設計後反應塔之液相組成分表示於圖17，結果顯示因雙效熱整合設計無法消除再混合效應，故再混合效應仍然存在。反應段自第4板至第60板碳酸二甲酯之組成皆非常高，此結果與原始設計常壓反應塔不同，此結果顯示於高壓下反應塔之組成呈現於原始設計下另一個能耗相等之穩態。

(三) DPC 反應蒸餾程序複合型 (Hybrid) 熱整合組態

於碳酸二苯酯反應蒸餾程序熱耦合組態

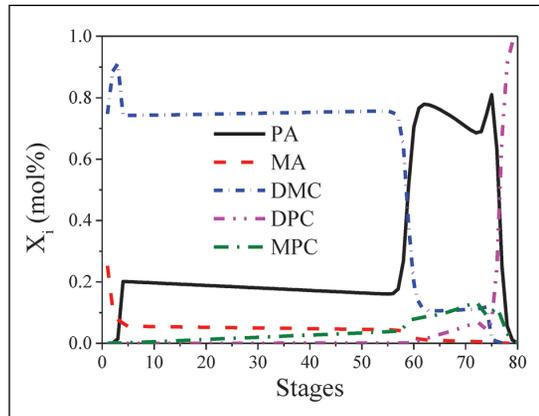


圖 17 雙效熱整合組態碳酸二苯酯反應蒸餾塔液相組成分佈

顯示，反應物回收塔 (C1) 冷凝器負載由原始設計之295.5 kW上升至890.8 kW，冷凝器負載上升約3倍。因此，此程序應有進行複合型熱整合設計之潛力。

碳酸二苯酯反應蒸餾程序之複合型熱整合組態設計以熱耦合設計之組態為基礎，反應塔及反應物回收塔之板數及結構設定與熱耦合組態相同。設計上藉由加壓反應塔，使反應塔塔頂移除之能源可傳送給反應物回收塔再利用。再進行複合型熱整合設計前必須對反應塔進行加壓設計。使反應塔塔頂與反應物回收塔塔底熱傳前後之對數平均溫度差大於最小有效溫度差 (10°C)，加壓測試結果顯示反應塔需加壓至1.8 atm，進入熱交換器前反應塔塔頂蒸汽出料與反應物回收塔塔底之溫度差為11.6°C。1.8 atm下DPC反應塔之溫度分佈表示於圖18，常壓之反應物回收塔

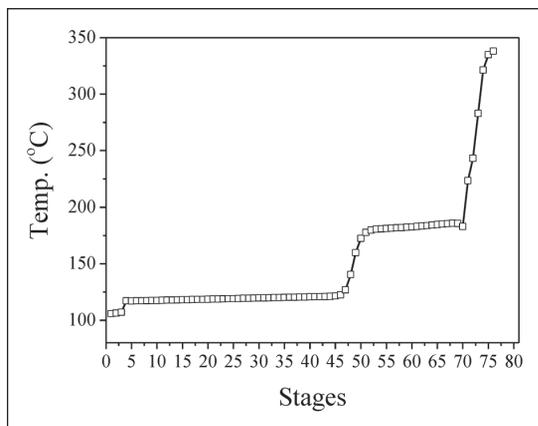


圖 18 DPC 複合型熱整合組態反應塔溫度分佈

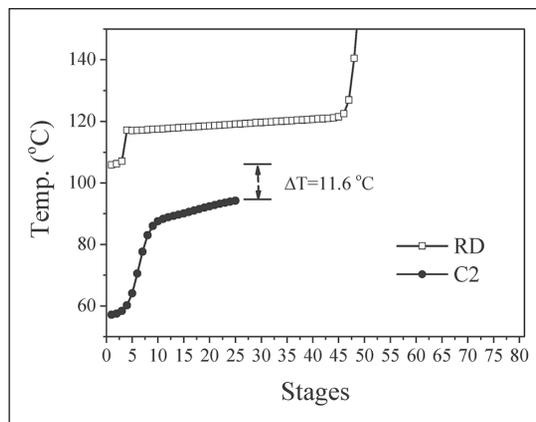


圖 20 DPC 複合型熱整合組態反應塔與反應物回收塔溫度比較

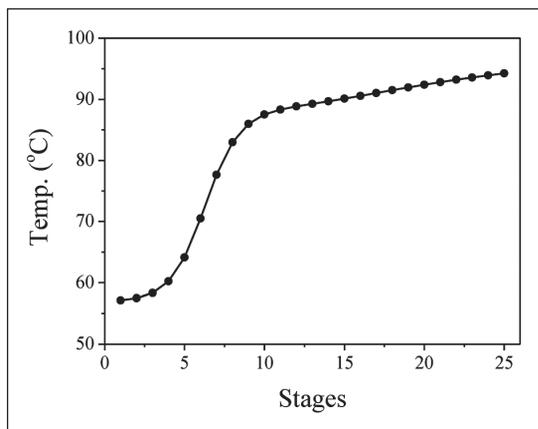


圖 19 DPC 複合型熱整合組態反應物回收塔溫度分佈

溫度分佈表示於圖19。高壓反應塔與常壓反應物回收塔之溫度分佈比較表示於圖20。

複合型熱整合設計熱傳之溫度差與雙效熱整合相近，方便進行比較。熱傳計算之公式與理想程序之熱傳計算公式相同，熱傳總包係數設定為 $0.17 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{hr}$ 。

複合型熱整合設計組態表示於圖21。設計上加壓後之反應塔塔頂蒸汽出料先經過一熱交換器(HX)將能量傳給反應物回收塔塔底，再送入反應物回收塔第11板。反應塔之迴流則由反應物回收塔第11板抽出一股液流提供。由模擬結果顯示反應塔之能耗為 657.0 kW ，反應物回收塔之能耗為 204.3 kW ，可全部由反應塔塔頂移除之能源提供。複合型熱整合組態中反應物回收塔冷凝器負載為 750.0 kW 。與熱耦合組態結果相比，複合型組態反應物回收塔冷凝器負載只有熱耦合組態之85%。反應塔塔頂出料夾帶之能源其能源利用率於複合型熱整合組態中較高。

複合型熱整合設計組態反應蒸餾塔液相組成分佈表示於圖22。反應塔頂之液相組成分佈與熱耦合組態相同，組成分佈顯示，複合型熱整合設計組態再混合效應也會消除。然而反應塔上半部組成分佈也與修正後之

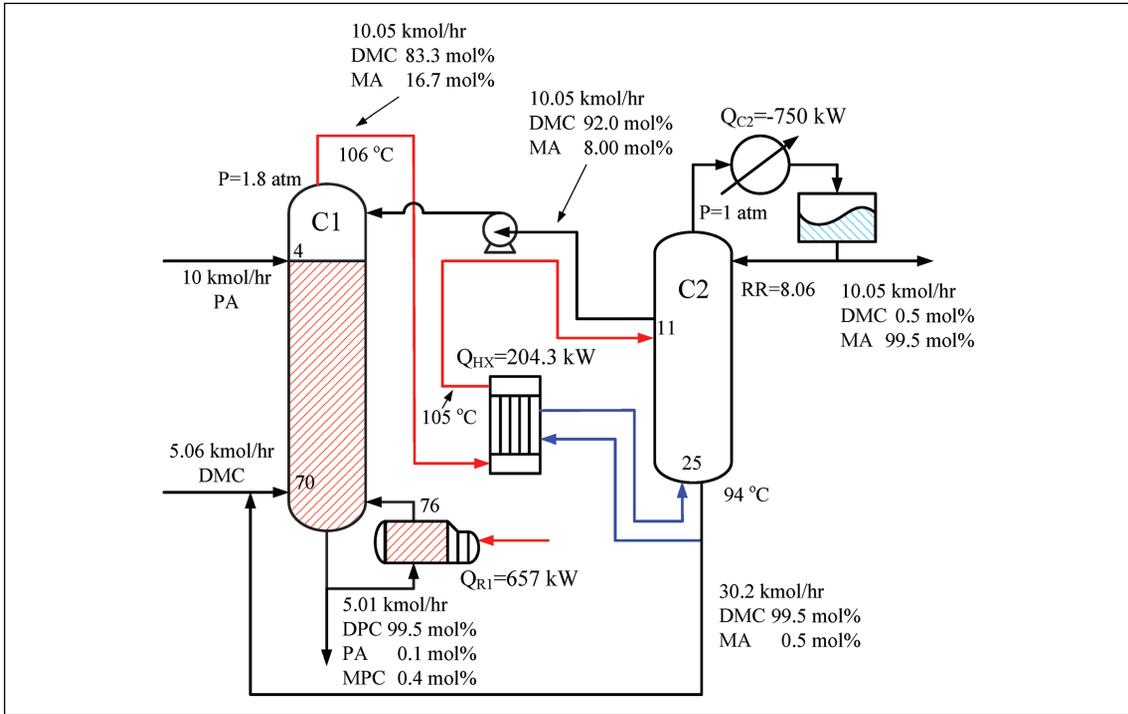


圖 21 碳酸二苯酯反應蒸餾程序複合型熱整合組態

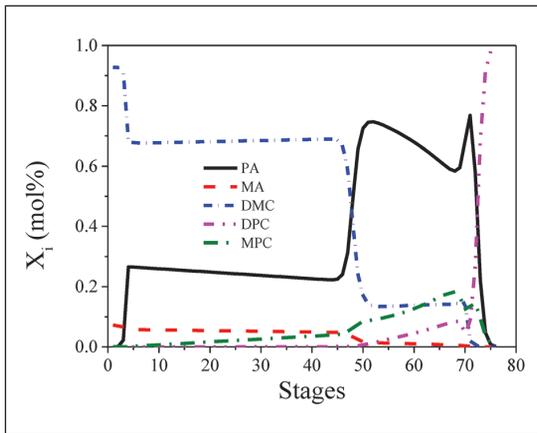


圖 22 複合型熱整合設計下反應塔液相組成分佈

熱耦合組態不同，結果顯示，加壓設計反應塔之組成分佈會有不同於原始設計之另一等

能耗穩態。

(四) DPC 程序複合型熱整合組態效益評估

碳酸二苯酯反應蒸餾程序進行雙效熱整合及複合型熱整合結果顯示，在熱傳之熱交換器進出口對數平均溫度差相同之情況下，雙效熱整合組態之反應塔必須加壓至 1.9 atm，複合型熱整合設計只需加壓至 1.8 atm。兩種設計反應塔所需壓力不同之原因可由反應塔塔頂組成於汽液平衡圖之位置進行探討。

由於反應物乙酸苯酯因過量設計已於反

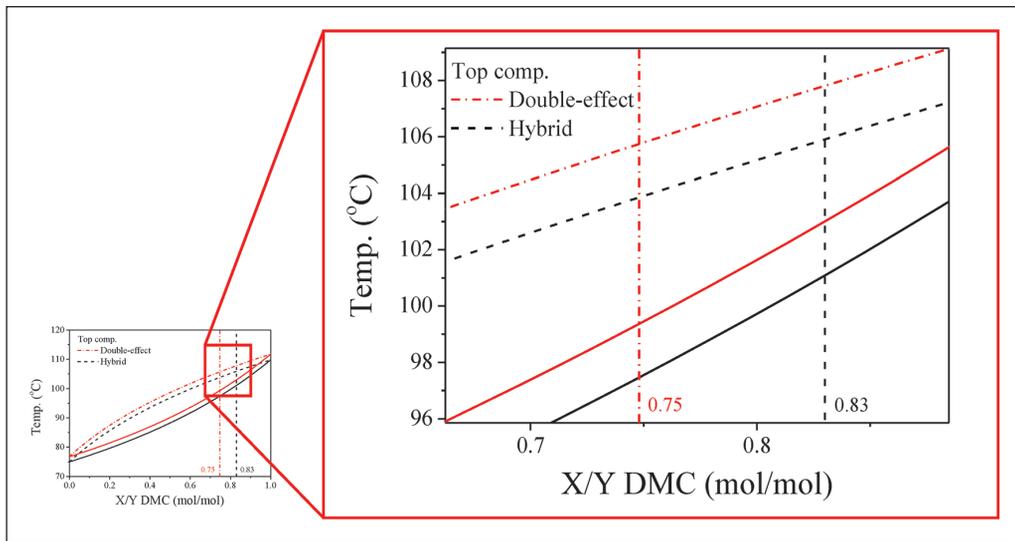


圖 23 雙效及复合型熱整合設計反應塔塔頂出料位置比較

應段完全消耗，反應塔塔頂出料只含有過量之反應物碳酸二甲酯及副產物乙酸甲酯。雙效熱整合組態及复合型熱整合組態反應塔塔頂組成表示於圖23。雙效熱整合組態中，由於再混合效應之影響，反應塔塔頂出料碳酸二甲酯組成落於0.75，屬於汽液平衡圖之較低溫區，而复合型熱整合設計下因再混合效應已消除，反應塔塔頂出料碳酸二甲酯之組成提升至0.83，落於汽液平衡圖中之較高溫區。因此於相同壓力下复合型熱整合組態反應塔塔頂之溫度高於雙效熱整合組態。

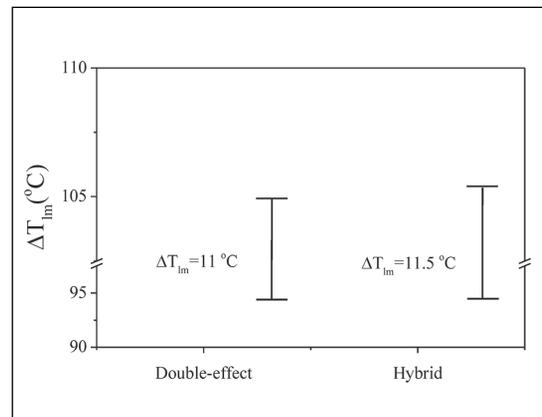


圖 24 雙效及复合型熱整合設計反應塔塔頂出料熱交換前後之對數平均溫度差

於圖23上，Double-effect表示雙效熱整合組態塔頂組成，Hybrid表示复合型熱整合組態反應塔塔頂之組成位置。結果顯示雙效熱整合組態中反應塔塔頂蒸汽出料之溫度等於复合型熱整合設計塔頂出料溫度，但因雙

效熱整合設計下熱傳量較大，且其塔頂組成位置落於汽液兩相區較大處，因此其塔頂出料於熱傳結束後溫度變化較大。雙效及复合型熱整合組態中反應塔塔頂出料於熱傳之熱交換器進出口溫度表示於圖24。



圖24中，藍色區塊之高度代表反應塔塔頂出料熱交換前後溫度之變化，I字標示則代表熱交換器進出口之對數平均溫度差。結果顯示因雙效熱整合設計因熱交換量較大，且反應塔塔頂出料組成落於兩相區較大處，導致其溫度變化較复合型熱整合設計大，因此於雙效熱整合設計中，反應塔須加壓至較高之壓力。

雙效熱整合組態及复合型組態兩塔間熱傳所需之熱交換器面積比較表示於圖25。雙效熱整合組態之熱交換器面積為156.1 m²，而复合型組態之熱交換器面積只有104.5 m²，只有雙效熱整合組態之67%。此結果與理想反應蒸餾程序之設計結果相同，皆顯示复合型組態可減少兩塔間熱傳所需之熱交換器面積。

碳酸二苯酯反應蒸餾程序於三種熱整合設計下之能耗與原始反應蒸餾程序比較表示

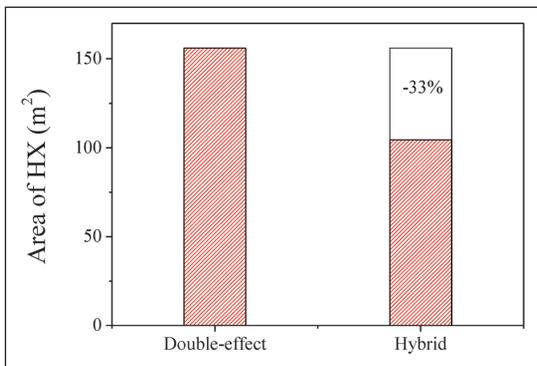


圖 25 DPC 反應蒸餾程序雙效熱整合及复合型熱整合組態兩塔間熱傳所需之熱交換器面積 (m²)

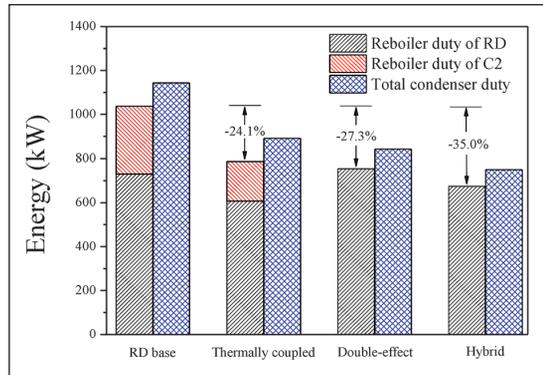


圖 26 碳酸二苯酯程序不同設計下程序能源需求比較

於圖26。由於反應塔之溫度較高，使用之能源等級與反應物回收塔不同，故兩塔之能耗採用不同顏色表示。反應塔之能耗採用黑色表示，反應物回收塔之能耗則由紅色表示，藍色則為程序冷凝器總負載。結果顯示熱耦合組態下反應塔及反應物回收塔之能耗量皆有下降，且冷凝器總負載量也比原始設計低。而雙效熱整合組態反應塔之能耗比原始設計略高，但因其反應物回收塔不必額外加入能源，故其仍然有省能效果。复合型熱整合組態下反應塔之能耗已經比原始設計低，且反應物回收塔不必額外加入能源，故其總能耗為四種設計下最低者。比較四種設計冷凝器總負荷量即可發現，复合型熱整合組態所需移除之能源最少，故其能源利用率最高。

由Douglass (1988) [22]提供之附表可計算出碳酸二苯酯反應蒸餾程序原始組態及三種熱整合組態之年操作成本。其中因碳酸二

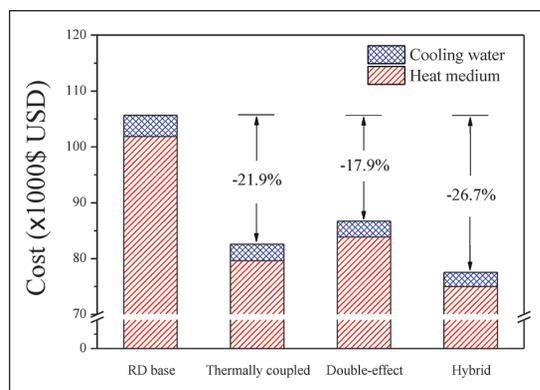


圖 27 碳酸二苯酯反應蒸餾程序原始組態與三種熱整合組態年操作成本比較

苯酯反應蒸餾塔塔底溫度已超過 300°C ，因此使用熱媒 (Fuel) 作為熱源，而反應物回收塔則採用 15 psig 低壓蒸汽作為熱源。四種設計下之年操作成本表示於圖 27。其中紅色表示加熱能源成本，藍色表示冷凝水成本。與能源成本相比，冷凝水成本非常小，對年操作成本大小無太大影響。年操作成本結果顯示，熱耦合組態因反應塔能耗較低，因此消耗之高價熱媒較少，其年操作成本比雙效熱整合組態低。雙效熱整合組態不須低壓蒸汽，但加壓導致反應塔能耗上升，因此所需之熱媒量增加，因此其年操作成本較高。而複合型熱整合組態其所需之熱媒量比原始反應蒸餾組態少，且反應物回收塔不須額外使用低壓蒸汽，故其年總操作成本上為四種設計中最具經濟價值者。

伍、結論

本文提出一種應用於間接序列式設計之

新式複合型熱整合方式，並應用於反應速率較慢之過量進料反應蒸餾程序。複合型熱整合組態之設計以熱耦合組態為基礎，藉由加壓之方式使第一座蒸餾塔塔頂溫度高於第二座蒸餾塔塔底溫度。因此可以將第一座蒸餾塔塔頂蒸汽所帶之能源藉由熱交換器傳至第二座蒸餾塔塔底再利用。此種複合型熱整合方式同時包含熱耦合組態可降低程序總能耗及多效熱整合概念可提升能源效率兩種優點。在與熱耦合組態、雙效熱整合組態相比皆顯示出其最低能耗之優點，於年操作成本之比較也顯示複合型組態擁有最低年操作成本之優勢。於本研究結果，Hybrid 組態於間接序列式程序有相當好之節能表現。

參考文獻

1. Wright, R. O. (Standard Oil Development Co., Elizabeth, NJ). U.S. Patent 2471134, May 24, 1949.
2. Andreovich, M. J. and Westerberg, A. W. A Simple Synthesis Method Based on Utility Bounding for Heat-Integrated Distillation Sequences, *AIChE J.*, 31, 363-375, 1985.
3. Robinson, C. S. and Gilliland, E. R. Element of Fractional Distillation, 4th ed., McGraw-Hill: New York, 1950.
4. Wang, S. J.; Lee, H. Y.; Ho, J. H.; Yu, C. C.; Huang, H. P. and Lee, M. J. Plantwide Design of Ideal Reactive Distillation Processes with Thermal Coupling, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 49, 3262-3274, 2010.
5. Lin, L. C. Effects of Relative Volatility Ranking to the Design of Reactive Distillation: Excess-Reactant Design, *MS Thesis, National Taiwan University, Taipei*, 2007.
6. Lee, H. Y.; Lai, I. K., Huang, H. P. and Chien, I. L. Design and Control of Thermally Coupled Reactive Distillation for the Production of Isopropyl Acetate, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 51, 11753-11763, 2012.
7. Wu, Y. H.; Lee, H. Y.; Lee, C. H.; Huang, H. P. and Chien, I. L. Design and Control of Thermally-Coupled Reactive Distillation System for Esterification of an Alcohol Mixture Containing n-Amyl Alcohol and n-Hexanol, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 52(48), 17184-



- 17197, 2013.
- Cheng, K.; Wang, S. J. and Wong, D. S. H. Steady-State Design of Thermally Coupled Reactive Distillation Process for the Synthesis of Diphenyl Carbonate, *Comput. Chem. Eng.*, 52, 262-271, 2013.
 - Glinos, K. A. and Malone, M. F. Optimality Regions for Complex Column Alternatives in Distillation Systems, *Chem. Eng. Res. Des.*, 66, 229-240, 1988
 - Annakou, O. and Mizsey, P. Rigorous Comparative Study of Energy-Integrated Distillation Schemes, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 35, 1877-1885, 1996.
 - Emtir, M.; Rev, E. and Fonyo, Z. Rigorous Simulation of Energy Integrated and Thermally Coupled Distillation Schemes for Ternary Mixture, *Appl. Therm. Eng.*, 21, 1299-1317, 2001.
 - Kaibel, G. Distillation Columns with Vertical Partitions, *Chem. Eng. Tech.*, 10, 92-98, 1987.
 - Ling, H. and Luyben, W. L. Temperature Control of the BTX Divided-Wall Column, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 48, 189-203, 2009.
 - Ling, H. and Luyben, W. L. New Control Structure for Divided-Wall Columns, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 48, 6034-6049, 2009.
 - Wang, S. J. and Wong, D. S. H. Controllability and Energy Efficiency of a High-Purity Divided Wall Column, *Chem. Eng. Sci.*, 62, 1010-1025, 2007
 - Luyben, W. L. Design and Control of a Fully Heat-Integrated Pressure-Swing Azeotropic Distillation System, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 47, 2681-2695, 2008.
 - Lee, H. Y.; Lee, Y. C.; Chien, I. L. and Huang, H. P. Design and Control of a Heat-Integrated Reactive Distillation System for the Hydrolysis of Methyl Acetate, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 49, 7398-7411, 2010.
 - Alcántara-Avila, J. R.; Hasebe, S. and Kano, M. New Synthesis Procedure to Find the Optimal Distillation Sequence with Internal and External Heat Integrations, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 52, 4851-4862, 2013.
 - 姚志通, 「乙酸甲酯、碳酸二甲酯、乙酸苯酯、碳酸二苯酯雙成份混合物之相平衡與與蒸汽壓沸點之研究」, 私立義守大學生物技術與化學工程研究所碩士論文 (101 年)。
 - 鄭凱, 「醋酸苯酯與碳酸二甲酯合成碳酸二苯酯之熱結合反應蒸餾系統的設計」, 國立清華大學化學工程研究所碩士論文 (100 年)。
 - Shen, R. C.; Fang, Y. J.; Xiao, W. D. and Zhu, K. H. Synthesis of Diphenyl Carbonate from Dimethyl Carbonate and Phenyl Acetate, *Petrochem. Tech.*, 31, 897-900, 2002 (in Chinese).
 - Douglas, J. M. *Conceptual Design of Chemical Processes*, McGraw-Hill, New York, 1988.



高效氣固旋風分離器的發展與應用

國立臺灣大學化學工程學系助理 / 陳晴語
國立臺灣大學化學工程學系碩士生 / 楊令琇
長庚大學綠色科技研究中心副教授 / 黃安婉
國立臺灣大學化學工程學系教授 / 郭修伯

關鍵字：旋風分離器、離心分離、CFD 模擬、粒徑

摘要

旋風分離器常見於工廠中的氣-固分離單元，其應用從19世紀發展至今已越發複雜、多元。本文先介紹旋風分離器的構造與分離原理、流態及指標效能，並彙整文獻中流速與壓力降的經驗式；設計上，也介紹如何以計算流體力學（Computational Fluid Dynamics, CFD）進行新型高效旋風分離器的設計。最後再彙整分離器結構、流態、顆粒分佈與濃度、操作溫度對於分離效率的影響。

一、前言

旋風分離器是利用離心力的原理，將固

相顆粒從氣相或液相中分離的設備。由於其對於數十微米以上的顆粒具有高效分離、操作容易、低製造與操作成本、且操作條件範圍廣…等特性，故常作為工廠反應單元中、末端排放之氣-固、液-固分離或提濃單元，如循環式流體化床、氧氯化反應器、焚化爐末端之廢氣處理。良好的旋風分離器操作可有效降低後端分離單元之負載量、穩定流體化床中的觸媒量，同時也能保護後端管線不被粉粒體堵塞與侵蝕。

儘管基本的旋風分離器內部氣流、壓力降與分離效率的設計經驗式已可由文獻中獲得，但由於紊流的不穩定性、氣體與固體交互作用的多種可能組合等因素，經驗式預測的準確度仍相當有限。現今工業實務



的旋風分離器操作條件（如高溫操作、高顆粒密度操作）、分離效能（如更小顆粒）已與早期的使用情形與要求規格相距甚遠。此外，為因應工業與家用需求，現今已開發出各式新型態旋風分離器，如多旋風分離器（multi-cyclone）、多入口旋風分離器（multi-inlet cyclone）、離心吸塵器…等許多改變結構的新機械設計。而計算流體力學（Computational Fluid Dynamics, CFD）等數值模擬工具提供了不同新旋風分離器的機械設計、操作條件與分離效率的完整設計資訊，為現今研究中不可或缺的輔助工具。

二、旋風分離器之構造、操作與設計原理

標準的旋風分離器構造主要分為五個部分：入口導管（inlet duct）、切線連接圓柱部（cylinder with tangential connector）、錐形縮管加速部（conical accelerator）、顆粒收集桶（dust collector）、以及氣體出口圓管（vortex finder），如圖1所示[1]。當挾帶固體顆粒的氣體由入口導管切線進入旋風分離器後，高速渦流狀的氣體流體會沿著壁面由圓柱部逐漸下降至錐形縮管之某一高度，因為分離器在該處的壓力場梯度，造成氣流方向改變，流體之軸向速度反轉向上。此外圈往下、內圈往上流動的氣體流態，在分離器中形成內外反向的雙層氣體渦流，如圖2[2]。此「雙渦流結構」為旋風分離器中流動氣體的特色。但兩個渦流本身並不穩定，故反轉點會在徑向方向上的任一高度震動，此現象

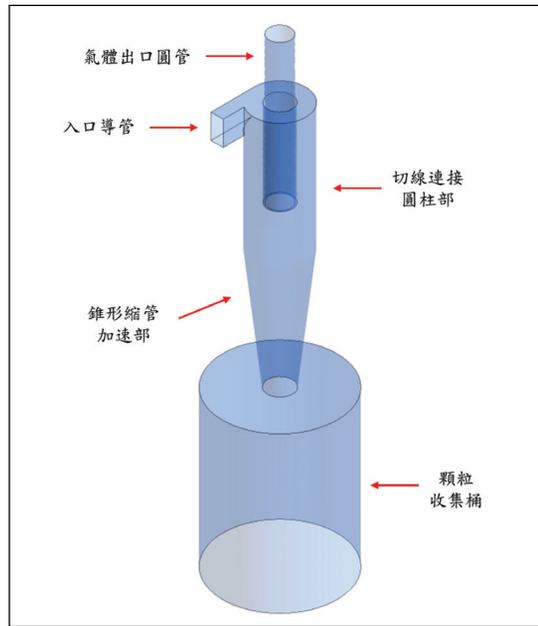


圖 1 旋風分離器之構造示意圖

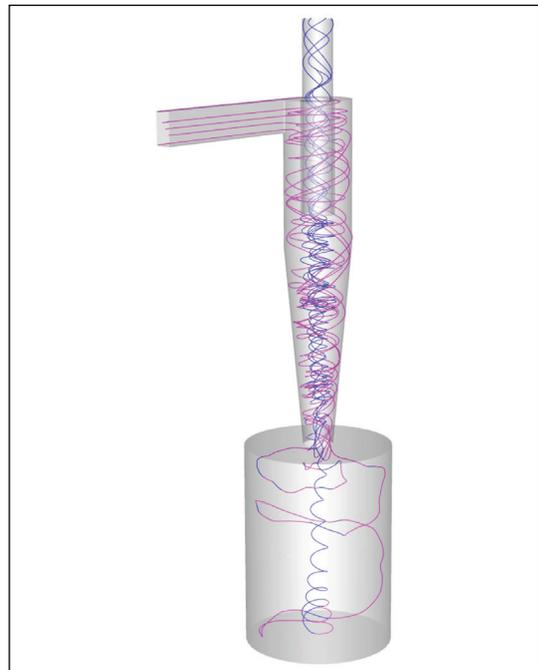


圖 2 旋風分離器內之流場示意圖

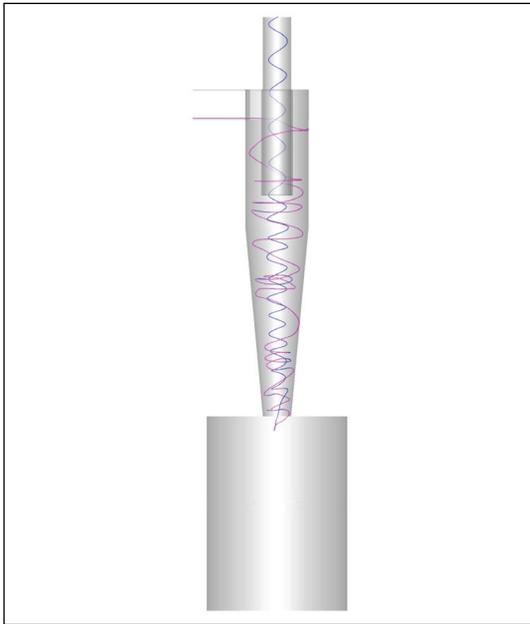


圖3 進動渦核現象示意圖

稱為進動渦核現象（precessing vortex core, PVC），如圖3。在低流速、器壁摩擦係數高的時候，一次渦流反轉為二次渦流的現象可能在高度較高的壁面上提早發生[3]。

大部分的氣固分離是在反轉發生前的向下渦流中進行，當反轉發生後，上升渦流將較細小的顆粒由上方帶離系統。為使進料一次渦流穩定而不受中央二次渦流的干擾，該上方出口通常會以空心圓管筒隔離兩個渦流，形成氣體出口圓管構造。當氣體中的固體濃度較低時，較大的顆粒在進入分離器後的受力係由離心力主導，故受離心力拖曳離開原本的氣體流場，與器壁持續碰撞，直至失去動能後再沿著壁面滑落至錐形縮管加速

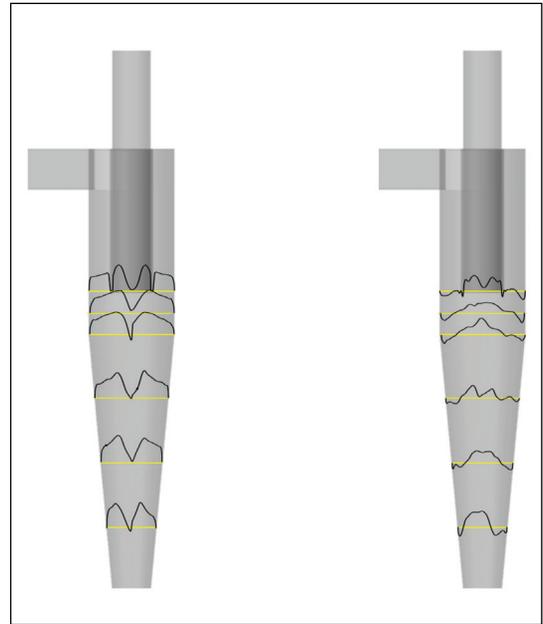


圖4 旋風分離器內的氣體流速分佈圖(a)切線向(b)軸向速度

部，由收集桶收集；若固體負荷稍高，在進入分離器後，大顆粒會挾帶小顆粒，一併快速被收集，僅留下少量的粉塵沿器壁螺旋式滑落，分離效率提升；若固體負荷更高，則一次渦流流態會因大量固體運動而破壞，造成分離效率下降。

分離器中的氣體在切線向及軸向之速度分布如圖4，其中以圖4(a)切線向流速主導。此切線向的氣體流場造成對顆粒的離心力，當切線向流速愈大，離心力愈大而分離效果愈佳。圖4(b)的軸向速度說明近牆區為向下的流場，氣固拖曳力與顆粒本身所受的重力總力，決定顆粒最終是捕捉或是慣性被氣體帶離系統。

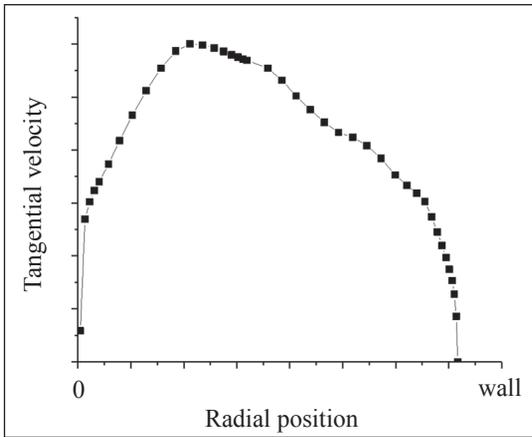


圖 5 旋風分離器中切線速度與徑向位置關係圖

將圖4(a)中的切線速度與徑向位置局部放大，兩者關係如圖5，大致可分為外側的一次渦流與內側的二次渦流。ter Linden在1949年即以阮肯渦流（Rankine vortex）模型提出這兩個渦流的近似分析[4]。他將圖5分為內側的強制渦流與外側的自由渦流兩個區段，其切線速度與半徑的關係如式(1)：

$$V_t r^n = C \quad (1)$$

其中， V_t 為切線速度； r 為顆粒的徑向位置； C 為常數； n 為隨徑向位置改變之指數。靠近軸心的位置為強制渦流區，此時 n 趨近於 -1 ；距器壁較近的位置為自由渦流區，此時 n 趨近於 1 。然而，由於式(1)並未考慮與器壁之摩擦力以及顆粒濃度兩個重要參數，故不能準確描述氣體在旋風分離器中的速度。

分離效率為旋風分離器最重要的指標效

能，其定義為「被收集的顆粒數」相對於「進入系統中的顆粒數」之比值。Hoffmann等人將分離效率定義如式(2)：

$$\eta = \int_0^{\infty} f(x)\eta(x)dx \quad (2)$$

其中， η 為總分離效率； x 為顆粒粒徑； $f(x)$ 為粒徑分布函數； $\eta(x)$ 為 x 粒徑顆粒之分離效率。不同粒徑顆粒的典型的分離效率 $\eta(x)$ 圖形如圖6。「小」顆粒較容易跟隨二次渦流被帶出分離器，「大」顆粒則受離心力較大，易平衡慣性力，隨一次渦流被收集於顆粒收集桶，故典型的「顆粒粒徑-分離效率分佈圖」呈現S型曲線。此S型曲線可應用於顆粒分級（大顆粒捕捉、小顆粒離開），其彎折曲率是分級效果好壞的關鍵。而旋風分離器的捕捉分離效率，通常以分離效率為50%的粒徑 d_{50} 說明，其意義即為分離效率為50%之顆粒粒徑大小，如圖6的旋風分離器分離效率 d_{50} 為 $1.2 \mu\text{m}$ 。

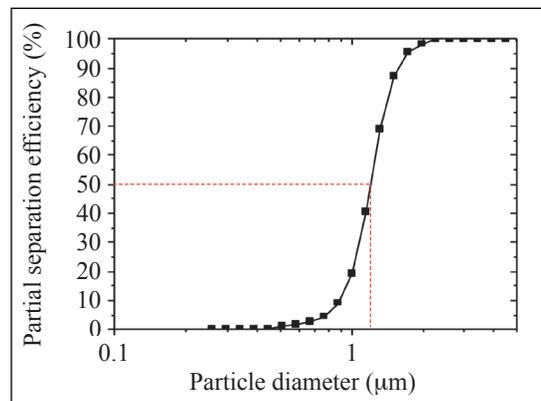


圖 6 典型的旋風分離器顆粒粒徑 - 分離效率分佈圖



旋風分離器的另一項指標效能為壓降。為加強渦流與提升分離效率，我們往往會增加入口氣體流速，但入口氣體流速增加會造成壓降損耗上升，增加能耗的操作成本。故雖然增加氣體流速能提升分離效率，卻也會提升壓力損耗，因此在操作上仍需尋找兩者之間的最佳平衡。以一切線向進料之旋風分離器為例，壓力損耗由以下四個因素貢獻：(1)氣體由入口導管流入分離器時之膨脹損耗、(2)氣體流入入口與出口圓管之縮管損耗、(3)渦流之渦流損失及氣體與壁面摩擦之損耗、(4)出口圓管、下方收集桶的耗散損失，其中以(3)為主要的壓降損耗。旋風分離

器的壓降損耗可由式(3)估算：

$$\Delta P_c = \xi_g \xi_s \frac{\rho_g u_i^2}{2} \quad (3)$$

其中， ΔP_c 為旋風分離器的壓降損耗； ξ_g 為低顆粒濃度下考慮氣體為主時之壓降係數，其值受旋風分離器之幾何構型影響，可由表1中不同的模型估算； ξ_s 為高顆粒濃度下（0.125至4.42 kg-固體/m³-空氣[5]），修正不同進料濃度的壓降係數，低濃度時， $\xi_s = 1$ 。經驗上，Coker模型對於標準Stairmand旋風分離器，在低濃度操作下，具有可接受的壓降預測能力。

表 1 低顆粒濃度時，旋風分離器之壓降係數計算式

ξ_g 模型	公式
Shepherd and Lapple[6]	$\xi_g = 16 \left(\frac{ab}{D_c^2} \right) \quad (4)$
Casal and JM[7]	$\xi_g = 11.3 \left(\frac{ab}{D_c^2} \right)^2 + 3.33 \quad (5)$
Ramachandran et al.[1]	$\xi_g = 20 \left\{ \left(\frac{ab}{D_c^2} \right) \left[\left(\frac{S}{D} \right) / \left(\frac{H}{D} \right) \left(\frac{h}{D} \right) \left(\frac{B}{D} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \right\} \quad (6)$
Coker 1993[8]	$\xi_g = 9.47 \frac{ab}{D_c^2} \quad (7)$

儘管目前已有公式(1)計算旋風分離器之流場、經驗式(2)可描述分離效率、公式(3)-(7)以預測壓降損耗，但這些公式在非標準Stairmand旋風分離器或是高顆粒濃度時，會

因更複雜的氣-固體流態導致預測能力欠佳。現今，計算流體力學（Computational Fluid Dynamics, CFD）理論發展完整，加上電腦計算能力快速增長，旋風分離器內的複雜流場



與氣體-固體作用力已能相當精確的預測，也因此有許多新型態的旋風分離器被設計出，如多旋風分離器、多入口旋風分離器等等。

CFD模擬能以數值方法分析氣體流態，進而以單向或雙向耦合運算預測顆粒的運動軌跡，為當今相當盛行的旋風分離器研究方法。由於計算流體力學常用的k-ε紊流模型會因為紊流黏度過大而造成誤差，故目前較常使用Reynolds Stress Model (RSM) 模型搭配拉格朗日粒子追蹤法 (Lagrangian particle tracking) 模擬旋風分離器中的氣-固體流態。考量隨顆粒濃度增加，顆粒會逐漸對氣體紊流程度造成影響，且在顆粒體積百分率 $>10^{-3}$ 時，顆粒之間的碰撞會間接造成附近流場改變，以CFD模擬顆粒運動時，選擇的計算模型可依據顆粒在氣體中的體積百分率分為以下幾種：

1. 顆粒體積百分率 $<10^{-6}$ ：單向耦合Lagrangian離散相（僅考慮流體對顆粒的影響）
2. $10^{-6} <$ 顆粒體積百分率 $< 10^{-3}$ ：雙向耦合Lagrangian離散相（另增加顆粒對流體的影響）
3. 顆粒體積百分率 $>10^{-3}$ ：四向耦合Lagrangian離散相（另增加雙向顆粒對顆粒的影響）

實務上，增加流體中的固體體積分率，會降低流體流速並抑制紊流，故可減少顆粒

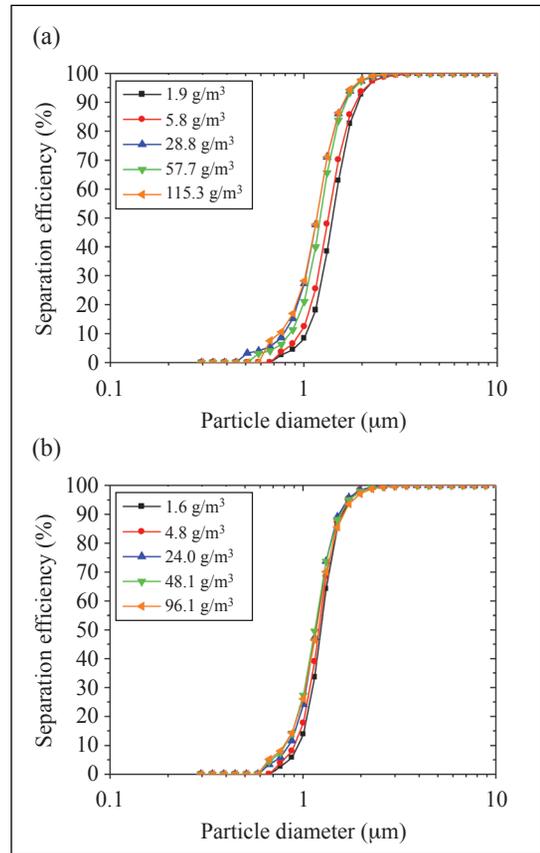


圖 7 顆粒進料量對分離效率之影響 (a) 15 m/s (b) 18 m/s [9]

運動的散亂性，使顆粒較不容易進入二次渦流而被拖曳出系統；然而減弱的渦流也會降低顆粒速度，使顆粒的受到的離心力變小。因此顆粒進料量對分離效率亦有提升和抑制的雙效的影響。在Huang等人關於顆粒進料量對旋風分離器流態與分離效率之影響的研究結果如圖7：在流速15 m/s下，隨固體進料濃度增加，近牆區的顆粒濃度上升，大顆粒掃流小顆粒的效應和小顆粒團聚作用較顯著，因此有提升分離效率的效果；然而若將

流速增加至18 m/s，則會導致聚集作用受抑制，使分離效率較不受固體進料影響[9]。

多旋風分離器 (multi-cyclone) 的設計上，則將兩個以上的旋風分離器以串聯或並聯的方式使用，可用於分離大量、高顆粒濃度之氣體。然而使用並聯旋風分離器處理高顆粒濃度氣體時，易產生有氣流分佈不均的問題，造成積垢、整體分離效率下降。Masnadi等人在並聯兩個旋風分離器的實驗中發現，在較稀的顆粒濃度操作下（進料顆粒與空氣質量比 (C_T) ≤ 24.5 kg-固體/kg-空氣），氣體較易呈現均勻分佈[10]。Zhang等人指出，兩旋風分離器並聯使用時，氣體均勻分布與否與 C_T 、出口圓管直徑相對圓柱部直徑比 (d_r) 有關，並利用過去文獻資料整理出一張氣體分佈與 C_T 、 d_r 之關係圖。由於 d_r 與渦流的穩定度有關，若想要避免高 C_T 操作引起氣體分佈不均的現象， d_r 應小於0.32[11]。

三、旋風分離器的效能與改進

為增加分離效能，新設計的旋風分離器針對改良條件如入口切線速度增加，減少氣體在出入口因壓縮、膨脹、和與壁面摩擦造成的壓降損耗，降低雙層渦流的交叉，或是在不同的外在操作條件下改變操作參數…等，都應用了CFD技術進行開發研究。

Elsayed等人指出在固定流量下，增加入

口導管尺寸會降低氣體在分離器中的最大切線速度，儘管可以減少分離器壓降，其分離效率會因為渦流強度減弱而下降[12]。Zhao等人在入口導管處設計內彎管以使顆粒更靠近器壁，並增長彎管使流體導入時能更靠近切線方向進入。在12 m/s-20 m/s的流速下，新入口導管設計使1-5 μm 的顆粒分離效率提升約8%-20%[13]。Misiulia等人將入口導管傾斜，使流體由上往下斜角式地進入，以增強氣體向下的運動。在相同的體積流率下，若以斜角的方式進入分離器則切線速度下降，造成離心場下降， d_{50} 增大，分離效率降低；但氣體的出入口壓力損耗下降，有助於節能。平衡兩者效益，以 10° - 15° 向下斜角進入為最佳[14]。Wasilewski等人考慮在實務上，將入口導管處前的轉接彎管從左右側或上下側銲接入口導管。結果顯示這些銲接角度對於分離效率的影響有限，但對於壓降損耗卻可能差異達5.7倍[15]。

Zhao等人探討雙入口導管與單入口導管旋風分離器之分離效率差異。雙入口導管分離器的流態顯示比單入口導管更為對稱，徑向壓力梯度更小。穩定的氣體流態可以減少操作時的能量損耗及顆粒被重新挾帶入分離器的機率。同時，使用雙入口導管可提升顆粒在入口處外側的濃度，使粒子在進入分離器前達到預分離的效果[16]。

Brar等人設計具不同長度之圓柱部和錐形縮管加速部的旋風分離器。在固定流量



下，增加錐形縮管加速部的長度，能更有效地增加分離效率，降低渦流動量損失[17]。雖然較長的錐形縮管會增加氣體與器壁間的摩擦損耗，卻也能降低渦流動量損失，使整體的壓降下降。Demir等人也有類似的研究，壓降確實隨圓柱部和錐形縮管長度增長而降低[18]。

Parvaz等人在錐形縮管加速部另加入倒圓錐的設計，用以初步隔開兩渦流。此倒圓錐能有效隔離雙渦流而降低系統壓降損耗。此外，此設計因佔據相當體積，可加速錐形縮管加速部的氣體切線速度，並增加二次渦流的軸向上升速度，故倒圓錐愈長，氣體切線速度加速愈快，分離效率愈佳；但倒圓錐直徑過大時，將影響一次渦流發展空間而不利分離，且可能會受顆粒衝擊而被侵蝕[19]。

Pei等人在氣體出口圓管下方增加十字切板，可破壞進出口前的二次渦流，有效降低壓降損耗[20]。在Parvaz等人的報告中，若氣體出口圓管稍微偏離中心（10%以內），將對於分離效率造成負面的影響：氣體的切線速度雖因偏離中心可以加速，但由於兩側的氣體速度不同，造成流體震盪，此震盪強度隨一次渦流前進放大，在二次渦流時達到最大值，使系統不穩定而不利於操作[21]。相似的偏離效果研究，也曾由Brar等人，利用AI人工智慧模型技術進行分析[22]。

Liu等人設計將出口的流體先導入顆

粒收集桶，以破壞二次渦流的壓力損失，並利用顆粒收集桶所累計的顆粒床捕捉更小的顆粒。為達成此目的，此逆流二階分離器（inverse two-stage dynamic cyclone separator）以螺旋轉盤產生一次渦流。此設計使該旋風分離器在轉盤轉速為1500 rpm和高氣體流量（20,000 m³/d）下，可以捕捉91%的5 μm顆粒[23]。

以上案例主要為利用CFD，在入口、出口等結構進行優化改變的新型旋風分離器，但對於分離器的實際運作影響仍需進行優化測試以確保最佳效率。

四、新型旋風分離器的設計示範

筆者曾以CFD設計數個不同應用層面的新旋風分離器。Huang等人曾在入口導管加裝如圖8的氣體整流管，使氣體能以層流的狀態進入旋風分離器。由實驗及CFD模擬結果發現，加裝整流管能避免顆粒在進入分離器

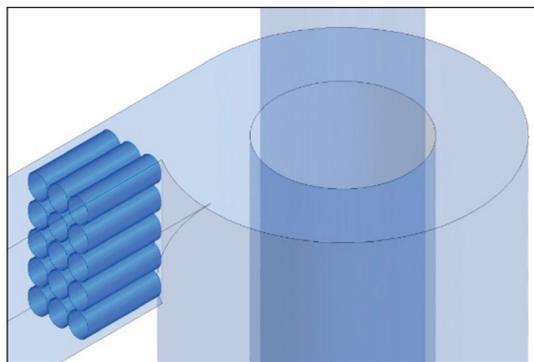


圖 8 加裝整流器之旋風分離器入口導管 [24]

時集中在入口導管內側，使顆粒較不容易由氣體出口圓管溢出系統，故儘管加裝整流器會增加分離器壓降耗損，但是能顯著提升分離效率[24]。

Huang等人曾在錐形縮管加速部切開如圖9(a)的細縫，細小顆粒能從細縫中離開一次渦流而被捕捉，不從二次渦流被帶離系統。由實驗及CFD模擬結果發現，在較低的位置切開的細縫，因切線速度造成的離心力場較大，能捕捉更小的顆粒。在15 m/s的入口流速下，細縫能捕捉 $1\ \mu\text{m}$ 以下的顆粒，如圖9(b)。其實驗和CFD模擬的 d_{50} 可分別達 $0.83\ \mu\text{m}$ 與 $0.69\ \mu\text{m}$ [25]。此設計對於PM2.5顆粒的捕捉，相當地具有發展性。

旋風分離器常用於焚化廠、電廠之懸浮顆粒去除，故常在高溫條件下進行操作。然而溫度的增加會使氣體的黏滯度隨之升高，使氣體對顆粒的拖曳力變強，不利於收集固體。另外，顆粒在高溫下會有局部熔鹽現象發生，進而附著在分離器器壁上，影響旋風分離器的連續操作。Huang等人曾在旋風分離器的圓柱形壁面加入引入冷風的流道，使旋風分離器在處理燃燒爐的高溫氣體時得同步降溫。結果顯示該設計雖然會降低分離效率，卻能減緩顆粒熔鹽現象發生，使分離器在高溫下仍能連續操作。此改善後的旋風分離器目前實務應用於生質燃料電廠中（圖10）[26]。

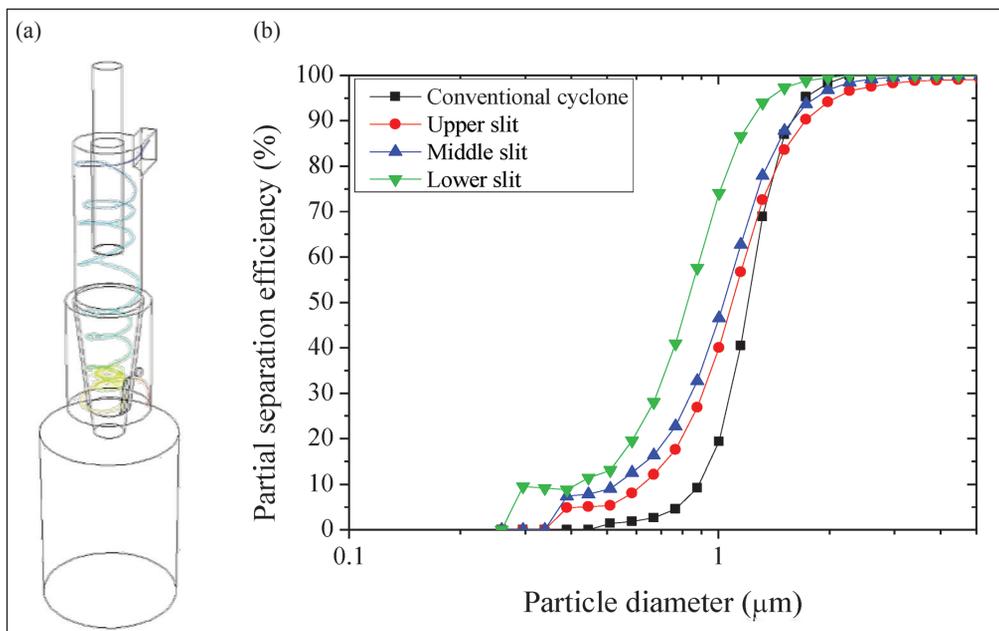


圖 9 (a) 錐形縮管加速部切開細縫以捕捉微小顆粒；圖中的線為 $1\ \mu\text{m}$ 顆粒穿過細縫被捕捉的軌跡 (b) 改變細縫位置於錐形縮管加速部的上、中、下時，顆粒的分離效率與原始設計的比較圖 [25]

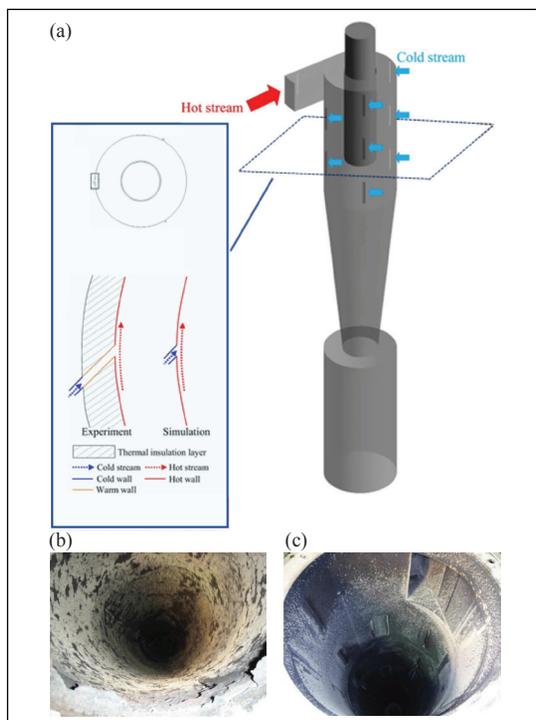


圖 10 (a) 加入冷風流道之旋風分離器設計 (b) 高溫操作下之器壁沉積情形 (c) 引入冷風後之器壁沉積情形 [26]

旋風分離器除了作為工廠中的空氣純化單元，還有許多不同層面的應用。由於室內粉塵粒徑大多大於 $2\ \mu\text{m}$ ，恰好為旋風分離器適用的分離範圍。1978年，James Dyson剛增建完工場中的旋風分離器，在將油漆微粒由氣流中分離時，他打開吸塵器中被塵垢堵塞的集塵袋，開始思考旋風分離器於吸塵器的應用。測試了5127個試驗原型機後，全球第一個Dyson無濾袋吸塵器被發明（圖11）[27]。

此外，旋風分離器亦可用於採集不同粒

徑的固體顆粒，如室內室外粉塵、過敏原以及生物氣膠[28]。除了氣-固旋風分離器外，還有氣-液、固-液型的旋風分離器，三者在製乳業都扮演著重要的角色：氣-液旋風分離器可將蒸氣與濃縮乳製品分離，避免蒸氣殘留而將產物稀釋；固-液旋風分離器則用於將固體從廢水中分離。

五、結論

旋風分離器是常用於工廠中氣-固分離的單元，其簡單的構型、低操作成本使之從19世紀被發明至今仍持續受業界歡迎。目前已有許多研究提出計算旋風分離器之氣流流態、壓力分佈、分離效率的經驗式，然而因為分離器的運作仍受器壁摩擦力、顆粒間作用力…等多種因素影響，並且有許多改良與特殊操作條件使相關運算更為複雜，除了需要投入更多研究來提升這些公式的準確度外，也需搭配CFD模擬才能獲得更精確的解析。而除了作為工廠中的分離單元，旋風分離器也被應用於吸塵器、粉塵採集、無葉片風扇等領域。旋風分離器未來的應用發展無窮，我們一方面提升旋風分離器的操作效率、改善製程與排放，一方面也可能發展出以流體力學為基礎，更多元的應用層面。希望我們的研究能如Dyson官網所說：“Doing more with less!”。

參考文獻

1. Ramachandran, G.; Leith, D.; Dirgo, J.; Feldman, H. *Aerosol Science and Technology*, 2, 15, 135-148, 1991.
2. Cortes, C.; Gil, A. *Progress in Energy and Combustion*

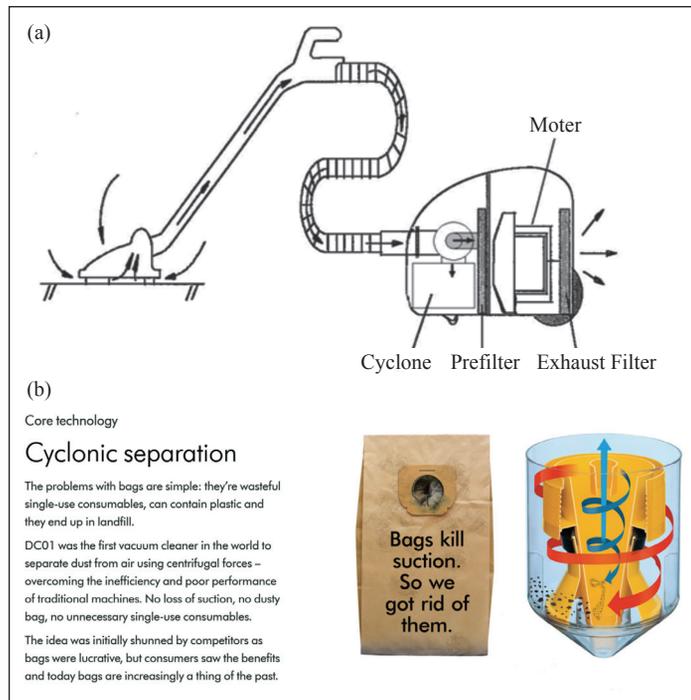


圖 11 旋風分離器於吸塵器中的應用 (a) 含旋風分離器之吸塵器剖面圖 [29] (b) 吸塵器中之旋風分離器設計 [27]

- Science, 5, 33, 409-452, 2007.
- Liden, G.; Gudmundsson, A. Journal of Aerosol Science, 5, 28, 853-874, 1997.
- ter Linden, A. J. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1, 160, 233-251, 1949.
- Li, S.; Yang, H.; Wu, Y.; Zhang, H. Chemical Engineering and Technology, 9, 34, 1507-1513, 2011.
- Shepherd, C. B.; Lapple, C. E. Industrial and Engineering Chemistry Research, 8, 31, 972-984, 1939.
- Casal, J.; Benet, J. M. M.; Leonardo, E. V. J. I. q. Ingeniería Química, 239, 115-124, 1989.
- Coker, A. K. Chemical Engineering Progress, 12, 89, 51-55, 1993.
- Huang, A. N.; Ito, K.; Fukasawa, T.; Fukui, K.; Kuo, H. P. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 90, 61-67, 2018.
- Masnadi, M. S.; Grace, J. R.; Elyasi, S.; Bi, X. T. Separation and Purification Technology, 1, 72, 48-55, 2010.
- Zhang, C. X.; Wang, Q.; Jia, Z.; Muhammad, U.; Qian, W. Z.; Wei, F. AIChE Journal, 12, 62, 4251-4258, 2016.
- Elsayed, K.; Lacor, C. Applied Mathematical Modelling, 4, 35, 1952-1968, 2011.
- Zhao, B. T.; Wang, D. S.; Su, Y. X. Powder Technology, 353, 64-71, 2019.
- Misiulia, D.; Andersson, A. G.; Lundstrom, T. S. Powder Technology, 305, 48-55, 2017.
- Wasilewski, M.; Brar, L. S. Separation and Purification Technology, 213, 19-33, 2019.
- Zhao, B.; Su, Y.; Zhang, J. Chemical Engineering Research & Design, 84, 1158-1165, 2006.
- Brar, L. S.; Sharma, R. P.; Elsayed, K. Powder Technology, 286, 668-677, 2015.
- Demir, S.; Karadeniz, A.; Aksel, M. Powder Technology, 295, 209-217, 2016.
- Parvaz, F.; Hosseini, S. H.; Elsayed, K.; Ahmadi, G. Separation and Purification Technology, 201, 223-237, 2018.
- Pei, B. B.; Yang, L.; Dong, K. J.; Jiang, Y. C.; Du, X. S.; Wang, B. Powder Technology, 313, 135-144, 2017.
- Parvaz, F.; Hosseini, S. H.; Ahmadi, G.; Elsayed, K. Separation and Purification Technology, 187, 1-13, 2017.
- Brar, L. S.; Elsayed, K. Separation and Purification



- Technology, 207, 269-283, 2018.
23. Liu, P. Q.; Ren, Y. T.; Feng, M. Y.; Wang, D.; Hu, D. P. Powder Technology, 351, 28-37, 2019.
 24. Huang, A. N.; Maeda, N.; Shibata, D.; Fukasawa, T.; Yoshida, H.; Kuo, H. P.; Fukui, K. Separation and Purification Technology, 174, 408-416, 2017.
 25. Huang, A. N.; Ito, K.; Fukasawa, T.; Yoshida, H.; Kuo, H. P.; Fukui, K. Separation and Purification Technology, 190, 25-32, 2018.
 26. Huang, A. N.; Maeda, N.; Sunada, S.; Fukasawa, T.; Yoshida, H.; Kuo, H. P.; Fukui, K. Separation and Purification Technology, 183, 293-303, 2017.
 27. Dyson Official Website <https://www.dyson.co.uk/inside-dyson/sustainability/overview> (accessed Sep, 23, 2021).
 28. Noh, S. Y.; Heo, J. E.; Woo, S. H.; Kim, S. J.; Ock, M. H.; Kim, Y. J.; Yook, S. J. Powder Technology, 338, 145-152, 2018.
 29. Ahn, Y. C.; Jeong, H. K.; Shin, H. S.; Hwang, Y. J.; Kim, G. T.; Cheong, S. I.; Lee, J. K.; Kim, C. Korean Journal of Chemical Engineering, 6, 23, 925-930, 2006.



保健食品常用之分離純化流程

昱倫生物科技股份有限公司副總廠長 / 蔡岳樺

關鍵字：萃取物、保健食品、軟膠囊、液體膠囊

摘要

臺灣食品業的製程範疇很廣，舉凡簡單的烘培乾果分裝到生物科技的萃取物都是。因應國人保健觀念日盛，吃藥都是不得已生病後的醫療步驟且有副作用的問題，預防保健的營養補充品就應運而生。這一類的保健產品劑型與藥品相似度很高，多是以膠囊（含軟膠囊/動物膠囊/植物膠囊/液體膠囊/光漾膠囊）、錠狀、與粉包，只是主成分多為非藥品的食品濃縮粉或萃取物，營養補充食品原料經由適當的分離純化步驟而得，例如：紅麴、納豆、益生菌、綠茶、膠原蛋白、金盞花（含葉黃素）、魚油、南瓜籽油、與印加果油等，適當的補充對於人體確實有體感效果。專業的保健食品代工廠（ODM/OEM）需充分掌握原料端的製程資訊，也可以依據原廠提供之文件而更了解純化分離後的濃縮/萃取物的規格差異，進而設計食用後

有保健體感的代工產品。

一、產業現況

食品級萃取物之獲得或藥品規格的差異，通常在於有效成分純度或單一性之規格，越高的等級且效價活性又高，就越接近藥品等級當然就越貴。天然萃取的成本又不一定比化學合成便宜，這反而給了取巧的操作空間。例如西印度櫻桃萃取粉是以天然萃取的維生素C做為原料定量標準，但是有些廠商會在境外以果汁粉混合維生素C粉末再進口販賣。以下就針對各個常用原料收集彙整出常見的幾個製程中涉及分離純化案例。需注意的是，本文提到的相關製造/純化/分離流程均是由原料供應商所提供之簡化概述，詳細的參數條件恐涉及製程特殊性或專利性而無法明確揭露在本文。

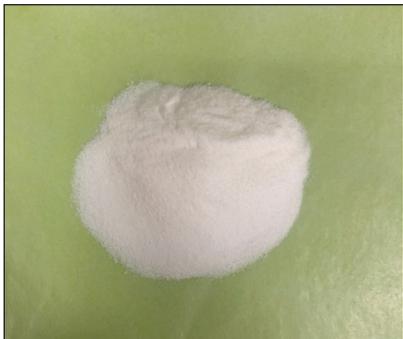


圖 1 膠原蛋白粉



圖 2 清酒酒粕粉

(一) 常用保健食品原料製程

1. 膠原蛋白[1]

Raw Materials/原料→Hydrolysis/水解→Filtration/過濾→Concentration/濃縮→Sterilization/殺菌→Spray Dry/乾燥→Sieving/過篩→Packaging/分包裝

屬動物性萃取物來原為主的萃取物，從牛骨、豬皮或魚（含魚鱗）加工而得，美容美白常用的保健素材。分離純化的流程須先水解，再過濾經濃縮/殺菌/噴霧乾燥/過篩等等。據原廠提供文獻指出一般食用劑量約3-5g/日，白色或米白色粉末且略有腥味，常常單獨做為粉包，或搭配其他素材做為複方的膠囊或錠劑或粉包產品。膠原蛋白常伴隨明膠製程純化而得，例如德國膠原蛋白大廠GELITA，本身也是生產明膠的上游廠商，而明膠就是膠囊或軟糖的主要成分。

2. 清酒酒粕[1]

Raw Materials /Rice/米→Steaming /蒸煮

→Fermentation/發酵→Filtration/過濾→Wine/酒+ Wine meal/酒粕→二次發酵→Filtration/過濾→Spray Dry/噴霧乾燥→Sieving/過篩→Packaging/分包裝

富含酵素、膳食纖維與蛋白質的發酵粉末，藉由二次發酵剔除醱類後，原料本身除了發酵的酵母更有水果酵素類似的功效，甚至有降低膽固醇與抑制膽結石的效果，常與益生菌搭配做成調整腸胃道的產品。市售有些調整腸胃道的產品，不乏些緩瀉劑加料的產品，若在安全的添加範圍則尚可，令人擔心的是有些業者或消費者為求速效，食用超過每日劑量的產品反而造成身體的負擔。

3. 乳清蛋白粉[2]

milk/牛奶→pasteurization/巴氏殺菌→Membrane Filtration/薄膜過濾→Vacuum concentration/濃縮→Spray Dry/噴霧乾燥→Packaging

牛奶中富含多種乳清蛋白，經殺菌後透過薄膜孔徑的設計，保留多數蛋白後再濃縮



圖 3 乳清蛋白粉



圖 4 豬血紅素鐵粉

乾燥成粉末就可直接加工使用。牛奶中常用來保健的蛋白有乳清蛋白之外另有免疫球蛋白與乳鐵蛋白，一般廣泛的乳清蛋白都是做為運動員增長肌肉之營養補充劑或是做為減重餐包的蛋白質主要來源，免疫球蛋白與乳鐵蛋白需要更講究的專一性分離與純化步驟，常與益生菌搭配做為過敏免疫調節的主原料，當然賣價成本自然更高。



圖 5 薄荷萃取物

4. 豬血紅素鐵粉[1]

Hemoglobin Powder+Water→Proteinase/酵素催化→Hydrolyzation/水解→Inactivation→Ultrafiltration/超過濾→Heat Sterilization/殺菌→Spray Dry/乾燥→Sieving/過篩→Packaging

食用之豬血經由適當的前處理後與水混合，經由催化水解再過濾等步驟乾燥後取得的粉末，富含鐵質之血紅素粉末，常與綜合維生素搭配做為女性補鐵產品。亦或是搭配大豆異黃酮、當歸或膠原蛋白，做不分年齡層女性調理產品。

5. 薄荷萃取物[1]

Raw Materials→Mixing/Blending（混合水煮）→pasteurization/巴氏殺菌→Filtration/過濾→Spray Dry/噴霧乾燥→Packaging/分包裝

一般不定量有效成分之植物性萃取物包含中草藥，多是類似上述的製程提取主成分，有的在過濾純化端會有其他的方式或新的處理步驟來增加特定成分的比例。薄荷在食品的用途以調味香料居多，另外就是搭配益生菌做免疫調節的產品。近來新冠肺炎疫

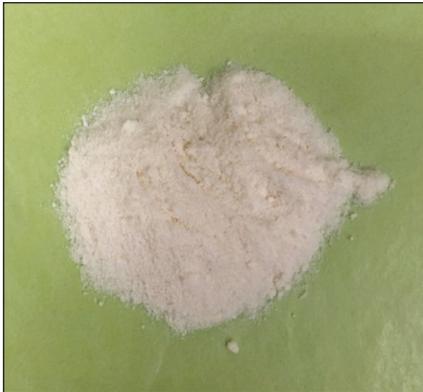


圖 6 乳燕窩萃取物

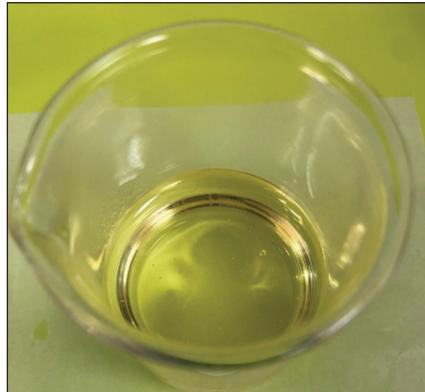


圖 7 印加果油

情問題而有臺灣清冠一號中藥劑的誕生，簡稱清冠一號、英文名NRICM101，是2020年由中華民國國家中醫藥研究所開發的緩解輕症嚴重特殊傳染性肺炎的中草藥複方。其相關原料也多是食品也可用的素材，例如：魚腥草、薄荷、桑葉等等，有相關業者就以非中藥製程條件做食品萃取物，行銷著重是免疫調節抗病毒的保健食品。

6. 乳燕窩萃取物[3]

Starting milk → Renneting / 凝乳 → Separation → Supernatant → Hydrolysis / 水解 → Ultrafiltration (UF) / 超過濾 → Concentration / 濃縮 → Freeze-drying / 冷凍乾燥 → Packaging / 分包裝

燕窩中含特殊的燕窩酸成分，做為傳統美容頂級素材。分離純化流程須先凝乳再水解，經超過濾後再去除溶劑濃縮，冷凍乾燥後或德燕窩萃取粉末（含燕窩酸）。原料為白色粉末且易吸溼受潮，在市場上常設計與蜂

王漿、膠原蛋白、Q10、賽洛美搭配做為美白美容保養產品。

7. 印加果油[4]

Raw Materials → Crushing the seeds / Heating / 烘焙 → Cold pressing system / 冷壓榨油 → Filtering / 過濾 → Packaging / 分包裝

印加果原豆經烘培後，在低溫環境直接加壓榨油，經過簡單的篩網過濾就可加工使用，富含Omega3含量約佔46%、Omega6佔35%，Omega3和Omega6的比例約為1.2：1，趨近於建議的攝取比例1：1，也因此被歸類為好油而受注意。常被當作為素魚油，有些長期吃素的族群適合補充食用，可以預防心血管疾病、失智與抗發炎。進階版為取代魚油搭配金盞花葉黃素作為護眼的保健產品。

8. 紅藻萃取油（含蝦紅素）[5]

Haematococcus pluvialis / 發酵培養 → Supercritical CO₂ Extraction / 超臨界萃取

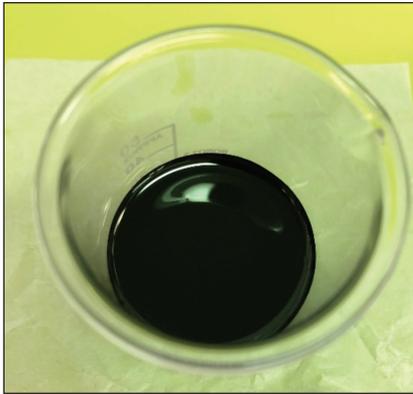


圖 8 紅藻萃取油

→Blending/Standardization (Carrier Oil)/添加基底油→Packing/分包裝

深海的紅藻細胞經生化工程發酵培養後，富含抗氧化極品-蝦紅素所以呈現深紅色，以液態二氧化碳超臨界萃取，再溶解保存在基底油體（多為一般食用油）當中避免接觸空氣而氧化。適合與含DHA的魚油或藻油添加作為預防心血管疾病的保健產品，也可以搭配金盞花葉黃素製作成市售護眼保健產品。

9. 金盞花萃取物（含葉黃素/玉米黃素）[1, 3]

Raw Materials →Pressing/Filtering/Extraction (Hexane)/正己烷→Saponification (PotassiumHydroxide)/皂化→Mix/Heat/加熱→Centrifuge/離心分離→Drying / Crystallization/乾燥與再結晶→Blending and Processing (Carrier Oil)/混溶於基礎油→Packing/分包裝

近年來智慧型手機發展迅速，眼睛的保



圖 9 金盞花萃取物（油狀含葉黃素/玉米黃素）/金盞花萃取粉（含葉黃素/玉米黃素）

健逐漸跨越年齡層界線，所謂的「3C保母」也早侵蝕至幼童雙眼，致使各個年齡層因不同因素而都有攝取葉黃素/玉米黃素需求。金盞花先經加壓/過濾經正己烷萃取，再透過皂化熱處理後以離心方式分離雜質，接著施以乾燥與再結晶步驟，最後溶解在基礎食用油中保存，也可微包覆處理成易於加工的粉末。這一類的素材常與魚油、藻油、山桑子、黑豆、龍眼花多酚（綠蜂膠）、透明質酸（玻尿酸）等搭配，作為金盞花葉黃素保健產品。

（二）小結 - 彙整常用之分離純化步驟

簡單的物理性過篩是最簡易也最常用的步驟，依據篩網的大小剔除夾雜在原料中的異物，也是萃取物粉末加工後段的整粒步驟（增加粉末顆粒均勻性）。其次，簡易的過濾或超過濾，均是利用孔徑大小進行更細緻的分離純化，配合後端去除溶劑來純化濃縮有效成分，例如：上述的膠原蛋白、乳清蛋白或是燕窩萃取粉等等。

另外，在環保意識逐漸抬頭的時代，傳



統萃取多是以有機溶劑萃取而得，過去常使用溶劑如丙二醇、二氯甲烷等毒性較高有機溶劑，近來逐步減少使用頻率並以超臨界萃取方式取代，降低使用有機溶劑避免環境汙染[1, 6]。

二、保健食品產業簡介

上述1-1已舉例原料之製程與簡介，客戶（通常是品牌商）會希望有主打的原料做為體感效果的主訴求，國際品牌原料也經常是主行銷訴求選項。臺灣市場小又多變且消費者偏愛短時間有食用體感的產品，在有限的成本空間如何設計單方（單一成分）或複方（多種成分）產品，就看原料規格資料上能提出多少證據而定。委託代工方針對產品多會提出劑型選擇的想法，原料配方即以此展開設計與食用體感評估。因此，承接產品代工業務對於各類原料的商業化規格要有一定程度的熟悉，下單前必須要與業主的企劃/研發/品管/採購人員充分討論相關細節。

（一）保健食品原料供應商類別

保健食品原料商在臺灣也是各據山頭，有些原料商販賣多種保健原料，有些只專注某幾類，目前就所週知的原料商販賣素材自行分類為：1.維生素與稀有元素類，例如：維生素A、B、C或葉酸、泛酸、酵母硒等等；2.植物萃取類（含可食用之中藥），例如：枸杞、薄荷、蟲草、樟芝、苦瓜、蔓越

莓、金盞花（含葉黃素）、鳳梨等等；3.胺基酸蛋白質類，例如：綜合胺基酸、膠原蛋白、軟骨素、綜合酵素（含鳳梨、木瓜、奇異果、香蕉等）；4.鹽類或金屬複合粉，例如：葡萄糖胺鹽酸鹽、氧化鎂、珠貝鈣（含碳酸鈣）等等；5.益生菌類，例如：ABS乳酸菌、芽孢菌、嗜脂乳酸菌、雙包埋嗜乳酸桿菌等等；6.油脂類，例如：魚油、藻油、木鱉果油、沙棘果油等等；7.食品添加物類，例如：乳化劑（Tween系列）、甲基纖維素或食品加工之助劑等等；8.一般食品素材，例如：乾果類、各類穀粉等等。

（二）保健食品之劑型

一般保健食品的劑型與藥品相似度甚高，多為錠劑、膠囊（含液體膠囊）、軟膠囊、鋁箔包、茶包（粉劑、水劑或果凍條）、補精瓶（含傳統雞精瓶）等等。依原料性狀區分來說，水萃物除了可做水劑類的產品（圖10）外，也經常再以噴霧乾燥步驟做成易加工的粉末，例如：薄荷、玫瑰花瓣與綠茶等植萃取物原料，可用來做膠囊、錠狀或粉包（圖11）。富含油脂類原料在萃取後也通常以液態桶裝方式貯存，例如印加果油、DHA藻油、木鱉果油、酪梨油、沙棘籽油或魚油等，適合加工為軟膠囊與液體膠囊（圖12），也有少部分的油脂經微包覆也做成易加工的粉末原料，後續加工也比照粉劑類方式處理。



圖 10 水劑類果凍條 / 補精瓶或液態鋁袋充填



圖 11 膠囊 / 錠劑 / 粉包



圖 12 動物性軟膠囊（葷）/ 液體膠囊（使用一般硬膠囊加工 - 葷素皆可）[7]

（三）藥品與保健食品的界線

藥物的每日服用劑量有些不會很高，從幾微克 μg 到幾毫克 mg 的範圍都有，可是錠劑

跟膠囊劑少也有50-500 mg的粒重容量，這些空間多半是由賦形劑（藥用輔料）所填滿，例如：微結晶纖維、澱粉、麥芽糊精、二氧化矽與硬脂酸鎂等等。除了做為簡單的填充



物外，也必須考慮藥物黏合/崩散性與抗凝結性的作用，這種種都必須建立在藥物穩定性與副作用安全性前提上，劑量配方組成才可獲得確認。同時，在進行動物實驗開始之研發階段到後期的人體試驗，少說也有10-20年時間投入，賦形劑種類的搭配與最適化的劑型設計（膠囊劑/錠劑/軟膠囊劑等等）也會有足夠的時程測試完成。因此，一個新藥從研發到上市是需要許多年的時間才會完成的。

相較之下，食品類的萃取物劑量就因有效成份純度與專一性程度較低，生產純化流程難度較藥物原料容易，多是食物來源也比較不會有藥物的副作用產生，但功效性萃取物每日食用劑量自然就高出許多且體感會比藥品較溫和。針對保健素材流行趨勢，當季迅速崛起的新素材要加速商品化，在不用種種藥品模式的耗時測試下是可以立即上市的，只是設計搭配賦形劑與選擇合適的劑型，就必須依賴相當製程的經驗才可成功誕生質量好的保健產品。

此外，各藥廠必須有衛福部之藥物生產許可證（藥證）才可生產藥物，而一張藥證就是代表一個藥物產線准許投產，但是食品廠卻沒有生產許可之核備限制，只要產品配方劑量符合食品法規且能做好清潔確效就可逐批生產。雖說藥廠與保健食品廠之機器設備相似度很高（都可能有膠囊充填機、打錠機與膜衣機等等），但是藥廠管理辦法基於交叉污染之顧忌而明文規範藥物食品產線不可

共用，意即藥品廠區產線若生產了藥品就不得生產保健食品，反之亦然。原因在於：擔心低劑量之藥物殘留萬一汙染食品產線，只要落在極低範圍內的汙染就會對人體造成的巨大傷害，故只能全面禁止產線共用。這也說明眾多藥廠的保健食品，除非自己有可區隔的其他廠區設備，不然幕後也多是委託代工廠生產的原因。

三、結論

總之，具有營養價值可食用之動植物部位，經乾燥後粉碎或簡單的物理性處理（如過篩/烘培/加壓榨油等等），或搭配較高階的過濾或超過濾，再經由加熱濃縮或簡易去除溶劑步驟，如此看似簡單化的分離純化設計，只要能將大部分營養成分析出且保持一定程度的功效性成分，就可做為食品原料分離純化之流程。再講究一點的就是涉及化學反應或有機溶劑萃取流程，這一類多半需要有機溶劑的參與或反應工程（或生化工程）的設計，但是也必須確認化學物質殘留量與基本食品安全性評估。

近年，超臨界流體萃取（Supercritical fluids extraction, SFE）作為傳統溶劑萃取的替代方案。二氧化碳是最受歡迎的SFE溶劑，因為它安全、容易獲得，且成本低。超臨界二氧化碳（supercritical CO₂, SC-CO₂）為親脂性（非極性）化合物的良好溶劑，而它與極性化合物的親和力較低，主要萃取物



為醇類、酯類、醛類和酮類，包括萜烯、倍半萜烯、脂肪酸/脂質、香精化合物、類黃酮、花青素、蝦青素、類胡蘿蔔素、生物鹼等。如果要增加對極性分子的溶解能力，一般會添加乙醇作為共溶劑，因為它在最終提取物中的存在微量並不會影響使用或食用安全[8, 9]。根據科技進步與環保問題，分離純化製程與效果專利-高活性效價與低汙染都要兼顧，目前國內食品法規已逐步禁用毒性高之有機溶劑，多改為水萃、酒萃（乙醇）或超臨界萃取模式，以實踐綠能與環境友善製程（eco-friendly process）[10, 11]之目的。

食品業中親水萃取物多是做成易於貯存與加工的粉末，而親油性的萃取物也常會以油之狀態呈現或貯存，必要時再加微包覆流程做成利於加工的粉末，保健食品劑型選擇，也必須考量原料物性、配方設計與兼顧劑型穩定性而定。

藉機也感謝恩師國立中興大學化工系（所）孫幸宜教授當年的指導，讓我在保健食品製程整合能力比一般代工廠更具優勢!!

參考文獻

1. 韋鎮實業股份有限公司提供之原料製造流程簡介
2. 麥司克股份有限公司提供之原料製造流程簡介
3. 創百股份有限公司提供之原料製造流程簡介
4. 新樂康有限公司提供之原料製造流程簡介
5. 振芳股份有限公司提供之原料製造流程簡介
6. Q. W. Zhang, L. G. Lin, W. C. Ye, Techniques for extraction and isolation of natural products: a comprehensive review. *Chinese Medicine*, 13 (2018) 20.
7. 昱倫生技網頁 <https://www.yuluen.com.tw/>
8. K.-Y. Khaw, M.-O. Parat, P. N. Shaw, J. R. Falconer, Solvent supercritical fluid technologies to extract bioactive compounds from natural sources: a review. *Molecules*, 22 (2017) 1186.
9. Q. Lang, C. M. Wai, Supercritical fluid extraction in herbal and natural product studies – a practical review. *Talanta*, 53 (2001) 771-782.
10. K. Ameer, H. M. Shahbaz, J.-H. Kwon, Green extraction methods for polyphenols from plant matrices and their byproducts: a review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16 (2017) 295-315.
11. Silvia Fraterrigo Garofalo1 & Tonia Tommasi & Debora Fino. A short review of green extraction technologies for rice bran oil: *Biomass Conv. Bioref.* (2021) 11: 569-587



Glory Diversity Family



Join us

建中工程股份有限公司



ARTC試車場工程，是建中公司與日本鋪道株式會社，組成工作團隊聯合承攬財團法人車輛研究測試中心試車場工程，引進日本土木工程技術與試車場施工經驗，完美結合並發揮土木工程技術之極限

專業 穩健 誠信 求新

瀝青混凝土
改質瀝青瀝青混凝土
彩色瀝青
GUSS瀝青混凝土
自由車場及試車場 高坡度工程



鋪築人生美好道路

仁德戰備道幻象戰機升空起飛照，圖1可以看出戰機起飛時發動機火焰直接噴射於鋪面的情況，故使用高強度複合式改質瀝青。高強度複合式改質瀝青同時也應用在需要高耐磨、抗剝脫與高抗滑的大鵬灣國際賽道(圖2)及高雄大魯閣草衙道迷你鈴鹿卡丁車賽道(圖3)

10652 台北市大安區新生南路一段111號7樓
TEL:(02)2772-7711 FAX:(02)2772-1108

中宇

卓越
誠信
技術
品質

股票上市公司

ISO9001 / ISO45001

驗證通過

- 水處理及回收工程
Water Treatment & Recycling
- 汽電共生廠及發電廠工程
Co-generation Plant & Power Plant Turnkey
- 生物製劑及藥廠建廠統包工程
Turnkey Project for Biotech & Biopharmaceutical Facility
- 整廠機電及公共設施工程
Mechanical & Electrical & Utility Engineering Systems
- 廢棄物處理及空氣污染防治
Waste Treatment & Air Pollution Control
- 耐火材料工程
Refractory Engineering
- 工業級LED燈具之製作 & 銷售
Industrial-grade LED Lighting (Production & Sales)
- 工業/家用型空氣清淨機及濾材開發製作 & 銷售
Industrial/Residential Air Purifier, Filters Manufacturing & Sales



澄清湖高級淨水處理設備工程
Chenchin Lake Advanced Water Treatment Plant



生技廠工程
Biopharmaceutical Plant



工業廢水純化場
Industrial Waste Water Purification Plant



化工廠工程
Chemical Plant



空氣污染防治系統
Air Pollution Control System



中宇環保工程股份有限公司
CHINA ECOTEK CORPORATION

高雄市前鎮區成功二路88號8樓
8F., NO.88, CHENGGONG 2ND ROAD, CIANJIEN DIST.,
KAOSIUNG CITY 80661, TAIWAN, R.O.C.
TEL : 07-3336138 FAX : 07-3363030
E-mail address : guest@ecotek.com.tw
Web : http://www.ecotek.com.tw



CSC GROUP

中鋁集團

UG 聯合大地工程顧問股份有限公司
UNITED GEOTECH, INC.

台北市內湖區瑞光路583巷21號5樓 <http://www.ugi.com.tw>
TEL : +886-2-27985198 · FAX : +886-2-26580958
E-Mail : services@mail.ugi.com.tw



大地工程之調查規劃設計與監造
Geotechnical Engineering

隧道設計、監造與檢測補強
Design、Construction Supervision &
Rehabilitation of Tunnels

工程地質與工址調查、地球物理探測
Engineering Geology、Site Investigation &
Geophysical Prospecting

水利水保工程之規劃設計與監造
Hydraulic Engineering、Soil & Water Conservation



土木運輸工程之規劃設計與監造
Transportation Engineering

專案管理
Project Management



調查 · 規劃 · 設計 · 監造 · 專案管理

Investigation · Planning · Design · Construction Supervision · Project Management



南亞光電股份有限公司
NAN YA PHOTONICS INC.

全新產品

- 高效路燈
- 投光燈&天井燈
- 防爆燈
(提供各種安裝形式)

光效155lm/W 以上

G4天井燈



G4路燈

光效150lm/W 以上



G3防爆燈

光效145lm/W 以上

聯絡資訊

營業處 (LED照明)
02-27122211 #5906、5907、5908

工程服務處 (安防監控)
02-26806311 #5560、5564、5572

綠能服務處 (太陽能系統)
02-27122211 #5915、5917



南亞光電
產品網頁



LINE 加入
好友

歡迎來電洽詢

<https://www.nypi-lighting.com>

高鐵路 振興五倍券 專案

5折券 驚喜送

消費高鐵產品使用振興五倍券，滿額立享5折乘車券
超狂優惠驚喜無限！



了解更多

精 緻

鋼廠
www.ccec.com.cn

智能製造

精進效能

數位管理

先進技術