

工業製程水循環再生及利用專題

節能蒸發技術於廢水零排放應用

刁仁康*、蔡宜宸*

摘 要

天候異常導致台灣長期供水不穩定，友達光電股份有限公司龍潭廠則是全台灣第 1 座廢水零排放全回收的廠區。鑒於廢水回收後的濃縮廢液，處理極為困難，為達成 100% 零排放目標，則需信賴穩定的技術，因此使用石化業常用的蒸發設備，惟一般石化業有廢熱可供應用，面板業並無廢熱可用，所以如何節能成為處理技術外另一重要課題。舉凡先期研究、技術評估、設備選擇至後續工程建置所採用之應用技術，除了處理效能，操作簡便之外，同時如何兼顧節能減碳與環保永續，無疑是零排放蒸發技術持續精進開發的目標。

【關鍵字】廢水全回收、零排放、節能、蒸發罐

*友達光電股份有限公司 高級工程師

一、前言

地球暖化造成氣候極端，水資源分布異常而使供水陷入危機，台灣於此環境下在 2015 年 12 月 29 日向廢水全回收零排放邁出了第一步，此即友達光電股份有限公司龍潭廠啟用首座的廢水全回收零排放廠區，不僅解決了廢水排放衍生的環境爭議問題，同時將外部用水需求大幅減低 70% 以上。鑒於各流程回收後，仍會產生數百噸濃度 2~3% 的含鹽類雜質濃縮廢液，委外清運處理對運轉成本將造成極大負擔，因此如何將此廢液濃縮減量並達成全回收目標，以可行並商業化穩定的設備為首要考量重點下，蒸發(Evaporation)就成為了最終減量所設置的設備。

蒸發技術常利用在化工、食品、醫藥及電子業中，針對產品進行脫水以達到濃縮目的，但水的潛熱(latent heat)相當大，蒸發操作需耗費大量熱能。因此，如何利用蒸出之純水的二次蒸汽的廢熱，即決定了蒸發操作的經濟性，是以從整個評估研究測試，至於後來的工程規劃設備選用，都包含了大量效能評估，以把節能技術應用到實廠的設備上，達成最佳經濟效能並有效降低碳排放量。

二、測試與節能評估

研究之初因不了解濃縮後水質，故與工業技術研究院材料與化工研究所(以下簡稱工研院材化所)合作，進行一連串的模廠測試分析及推導，實驗流程如圖 1。在蒸發測試階段，以模擬水樣於無任何節能設備條件下，處理每噸濃縮 10 倍的水樣得知，能耗成本均超過新台幣 2,000 元，因此節能技術勢須評估應用才能合乎經濟效益。現今常用的節能技術中，多效蒸發(Multi-effect Evaporation)與蒸汽再壓縮蒸發(Vapor Recompression)係屬提高蒸發操作能源利用最經濟的 2 個途徑。

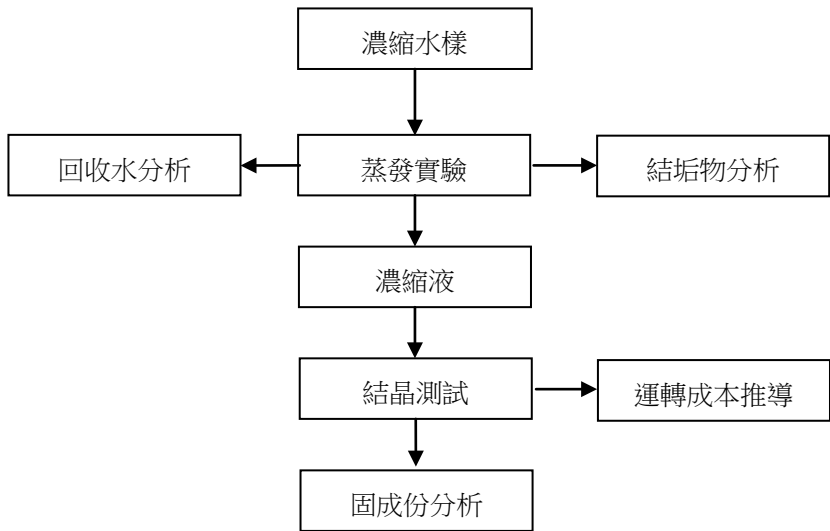


圖 1 濃縮廢水處理評估流程

2.1 多效蒸發

多效蒸發器的原理為將串聯多個蒸發器，利用前一效蒸發器的二次蒸汽做為下一效蒸發器的加熱蒸汽，同時下一效蒸發器的加熱室便是前一效蒸發器的冷凝器，此項技術不但可節省生蒸汽(fresh steam)的用量，又可省略冷凝器的設置，此係因採用多效蒸發所需的生蒸汽量遠較單效蒸發時為小，因此提高了生蒸汽的利用率。

多效蒸發除末效外，各效的二次蒸汽均可做為下一效蒸發器的加熱源，相較於單校蒸發，相同的生蒸汽量 S ，可蒸發更多的水量 W ，即提高生蒸汽的利用效率(W/S)。根據工研院材化所經驗，不同效數之生蒸汽的利用效率大致如表 1 所示。由表可知，效數越高之蒸發的生蒸汽，利用效率就越高，所以在蒸發大量水分時廣泛採用多效蒸發，可提高其經濟性。五效以後，節能效果與經濟效益就不再明顯。因此，工業用多效蒸發通常不多於五效蒸發。此外，多效蒸發需要多個蒸發器，而為便於製造和維修，各蒸發器的傳熱面積大致相同，且多效蒸發的設備費和效數亦近於正比。

表 1 生蒸汽於不同效數之利用效率

效數	單效	雙效	三效	四效	五效
生蒸汽的利用效率(W/S)	0.91	1.75	2.5	3.33	3.70

2.2 蒸汽再壓縮(MVR/TVR)蒸發系統

將單效蒸發之二次蒸汽絕熱壓縮後，利用蒸發器的加熱室，二次蒸汽經壓縮後溫度升高，與蒸發器內沸騰液體形成足夠的傳熱溫差，故可重新做為加熱蒸汽使用。如此僅須補充一定量的壓縮功(電力)，便可利用二次蒸汽的大量潛熱。其中蒸汽再壓縮(或稱熱泵)蒸發分為 2 種：機械式蒸汽再壓縮(Mechanical Vapor Recompression, MVR)和蒸汽動力式壓縮(Thermal Vapor Recompression, TVR)。

機械式蒸汽再壓縮(MVR)蒸發系統係將蒸發器出來的二次蒸汽在壓縮機中絕熱壓縮，其升高溫度及壓力，然後再送入蒸發器做為加熱蒸汽，並在加熱室中冷凝後排出。這種蒸發器只在啟動階段需要提供生蒸汽，但壓縮機需消耗電力，在電價與生蒸汽比較相對便宜的地區較適用。壓縮機的溫度上升越多(壓縮比越大)，蒸發器的傳熱溫差就越大，蒸發器的傳熱面積會越小，蒸發器的設備投資就越小，但壓縮機的投資及耗功率便會增加。

熱蒸汽再壓縮(TVR)蒸發系統是以少量高壓蒸汽為動力，將部分二次蒸汽經過蒸汽噴射泵(steam ejector)壓縮並混合後，與生蒸汽一起進入加熱室做為加熱蒸汽。熱蒸汽再壓縮蒸發系統只能利用一小部分二次蒸汽，其餘的二次蒸汽需送冷凝器冷凝，因此在能量利用上不及機械式蒸汽再壓縮蒸發系統。一般估算 TVR 之熱效率約相當於 2~3 效蒸發之間，而 MVR 則相當於 8~10 效蒸發系統，但其本身結構簡單，費用低廉，消耗蒸汽而不耗電，可以在投資較少的前提下取得較大的節能效果和經濟效益，因而適用於處理量較小之系統。惟與 MVR 系統相同的是，TVR 也存在著最佳的蒸發器傳熱溫差之設計問題。

雖然多級蒸發器可以提高能源利用效率，但在今日節能減碳以及新技術的發展之下，相對機械蒸汽再壓縮(Mechanical Vapor Recompression, MVR)(US EPA,2001)，若無大量廢熱，多級蒸發器已經不符合高效經濟的要求，MVR 蒸發與多級蒸發技術相比，若以氨基酸溶液蒸發濃縮生產為例，MVR 至多可節省 85.7%的能源消耗(高麗麗等,2012)，因此中國國務院《"十二五"節能環保產業發展規劃》以及國家發展與改革委員會 2011 年的「當前優先發展的高技術產業化重點領域指南」中，明定 MVR 蒸發等相關技術為環保產業重點領域。

綜合多效蒸發及 MVR 的優點，在考慮實際應用廠址用地限制及設置成本條件下，以規劃 MVR 做為蒸發節能方式，重新規劃節能流程，以 ASPEN TECHNOLOGY 公司開發之 Aspen Plus® V.7.1 化工製程模擬軟體為技術平台，模擬經 MVR 蒸發技術製程結果得知運轉費用可大幅降低，相較未節能前約僅不到十分之一。表 2 為評估所推導出最佳流程，廢液蒸發流程中各項單元所占成本比例，其中操作成本約占 8 成比例費用，電費及蒸氣產生亦為主要費用之一。

表 2 蒸發製程之生產成本比例推估

項目	比例	備註
設備	37%	
電力-Compressor(k Wh)	17%	計畫模擬
電力-Pump(k Wh)	0.1%	計畫模擬
蒸氣(3kg/cm ²)-蒸發系統(ton)	19%	計畫模擬
人力及管總	5%	每人每年 90 萬元，2 人*3 班
廢棄物處理	27%	廢棄物清運費=8,000NT\$/ton
維護、保險、稅金(5% Direct Capital Cost)	10%	
總淨操作成本(Total Net Operating Costs)	79%	
設備攤提(10% Total Capital Investment)	21%	
總生產成本(Total Annual Production Costs)	100%	

三、工程技術評估

3.1 工程前實驗評估

對壓縮機的選擇進行特殊考慮，確定壓縮機的最關鍵參數之一係準確預測鹽水的沸點升值，對於文獻資料中的純淨鹽混合物，升值容易確定，但對混合鹽而言，這卻更加困難 (Samuel J. Griffin, 2014)，所以在得到前段濃縮水樣，對於工程規劃以實驗進行，整體工程計畫依據圖 2 流程規劃，詳細測試沸點升溫及結垢，水樣蒸發實驗如圖 3 及圖 4 完成後，設定設備大小及蒸發倍率，實驗可有助於後續設備配置，降低設計失真所衍生的問題，並減少運轉頻繁啟停所增加的能耗。

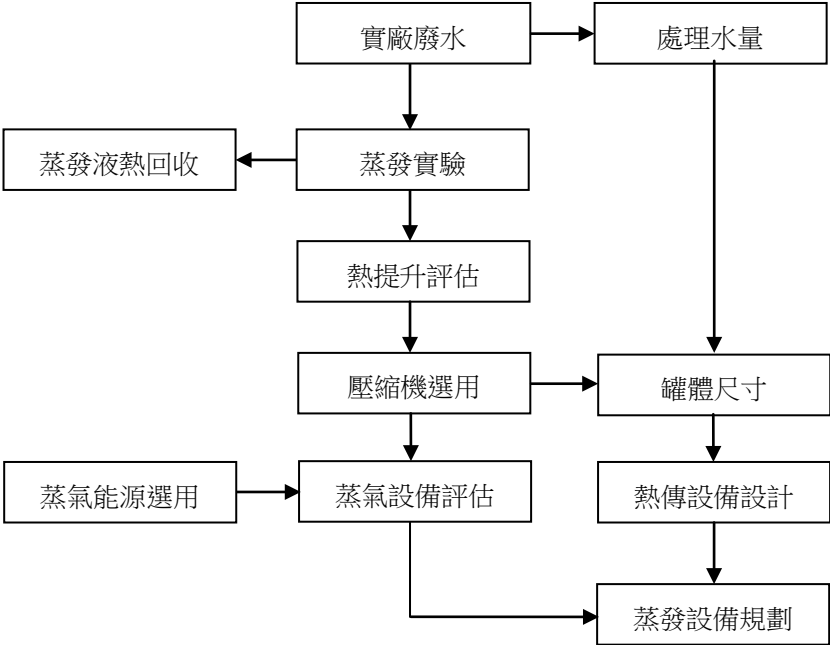


圖 2 蒸發工程設備評估流程



圖 3 蒸發實驗

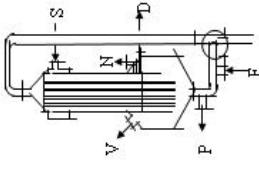
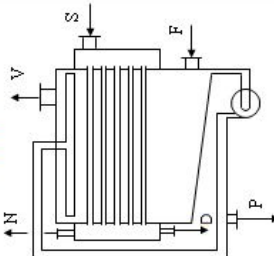
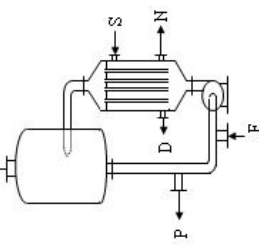
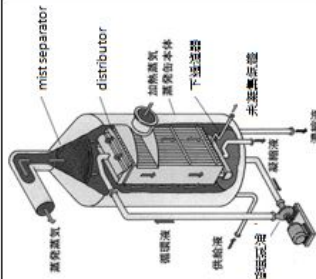


圖 4 蒸發完成濃縮液

3.2 蒸發罐結構選用

設備的選用與蒸發的能耗相關性甚高，各型式蒸發罐的比較如表 3 所列，臥式蒸發罐與高塔式蒸發罐相較，高塔式蒸發罐水流由上而下，接觸時間長，對蒸氣的熱能有較高的利用效果，相對可減低熱源所需能源消耗；而於高度限制未受限的狀況下，型式設定以高塔型為優先考量，內部熱交換型式一般以施作容易管式為主，此項單元考量先不考慮初設成本，而以液體熱交換面積愈大者越具節省能源效益，故使用了一般市面較少的板式蒸發罐，除了液體接觸更為平順，可提升熱交換面積外，同時具備結垢易於清除維護的優點。

表 3 不同型式蒸發罐比較

型 式	管 式			plate free flow
	液膜流下(F F) ／垂直長管型 管外蒸氣 (FF: Falling Film)	液膜流下(F F) ／水平管型 罐內蒸氣 (FF: Falling Film)	強制循環(F C) (FC: Forced Circulation)	板式蒸發罐
模 式 圖				
優 點	<ul style="list-style-type: none">• 運轉負荷變動範圍廣(60~100%)• 循環幫浦使用電力較FC少• 對於熱敏性或熱變性的液體，有可用低循環量或不循環的 one through type (retention time 設定為最小，而鍋垢性最差)	<ul style="list-style-type: none">• 運轉負荷變動範圍廣(60~100%)• 循環幫浦使用電力較FC少	<ul style="list-style-type: none">• 運轉負荷變動範圍廣(60~100%)• 可以對應高粘度(600mPaS)• 管式蒸發罐中耐鍋垢性最佳。• 可用於結晶析出性的液體。• 比其它型式更能對應腐蝕性液體• 傳熱係數高	<ul style="list-style-type: none">• 運轉負荷變動範圍廣(60~100%)• 可以對應高粘度(600mPaS)• 耐鍋垢性較其它所有型式都強• 對於板外的凝結垢有容易清洗的效果• hold up所需液量較少，開始準備運轉時間短(約0.5~2hr)• 可簡單的全自動切換洗淨。• 容易分離腐蝕性氣體。• 與蒸氣一起揮發的不純物少，可得到澄清的冷凝水。• 傳熱係數高• 設置面積小。
缺 點	<ul style="list-style-type: none">• 無法對應中粘度液體(100mPaS)• 容易結垢。• 產生結垢後效能易下降。• 管內鍋垢很難去除。• 去除鍋垢需用人力的機械式洗淨。• 開始運轉所花時間長(數小時到半天)。• hold up液體較多，不支援切換洗淨。• 循環幫浦使用電力較板式的產品多。(以傳熱面積 1000m2的蒸發罐約要	<ul style="list-style-type: none">• 無法對應中粘度液體(100mPaS)• 容易結垢。• 產生結垢後效能易下降。(傳熱面積耐著鍋垢，噴嘴會堵塞)• 管外鍋垢不易去除。• 去除鍋垢需用人力的機械式洗淨。• 對特定液體容易有發泡現象。• 蒸氣空塔空間較小，易有不純物件隨而出。(污染排水口，及有價產品的流失)	<ul style="list-style-type: none">• 管外鍋垢不易去除。• 去除鍋垢需用人力的機械式洗淨。• 開始運轉所花時間長(數小時到半天)。• hold up液體較多，不支援切換洗淨。• 循環幫浦使用電力很大。(傳熱面積 1000m2蒸發罐約要 700kw)	<ul style="list-style-type: none">• 營運成本及操作成本較其它型式便宜• 可在短時間內回收初始設置成本。• 對於熱敏性或熱變性液體，目前可對應濃度下降等，使 retention time 最小化。• 需要使用循環幫浦(但電力的使用較FC或一般的FF來的少)(傳熱面積 1000m2的蒸發罐約要 45kw)

3.3 機械式蒸汽再壓縮(MVR)蒸發系統設置

機械式蒸汽再壓縮(MVR)蒸發系統，最初評估即列為必要節能設備，於此次工程建置時即將此項設備加入其中。至於如何將電能利用至最佳，除了一般常用的變頻控制，在設備上是否可以調整而達成節能效果，因此與供應蒸發罐之日本技師及台灣廠商研究討論後，決定改用德國製較小型較低轉速蒸汽再壓縮設備串連設置，取代慣用的日本大型高轉速蒸汽再壓縮設備。

此設置方式因分散蒸汽壓縮溫度提升，所以高低變頻幅度較小，不僅減少了用電量，同時轉速較低，噪音及振動亦得明顯改善。除了蒸汽再壓縮大幅減少蒸汽補充量，另外於蒸發罐抽負壓保持真空度，可降低水的沸點，將 100℃ 的沸點降低至 70~80℃，如此在設備啟動後蒸發罐即無需大量補充蒸汽，可利用本身排出的熱能經由壓縮，轉化為熱源注入罐體，達成一個蒸汽密閉循環的系統，整體蒸汽於設備內部循環及溫度提升，圖 5 即蒸發系統內各單位階段的溫度平衡狀況。

試驗結果顯示，蒸發運轉的能耗大約 75% 為電力的應用，蒸汽的能耗則大幅降低至總運轉能耗的 25%，以最先評估須大量應用蒸汽，相對每噸水處理成本極高的狀況，以各方式有效回收應用熱能，而達到經濟有效的節能應用於廢水蒸發設備，因區域因素必須使用柴油做為鍋爐燃料，故導致蒸汽成本略升，但仍可將每噸處理成本控制於 100 餘元的範圍內。

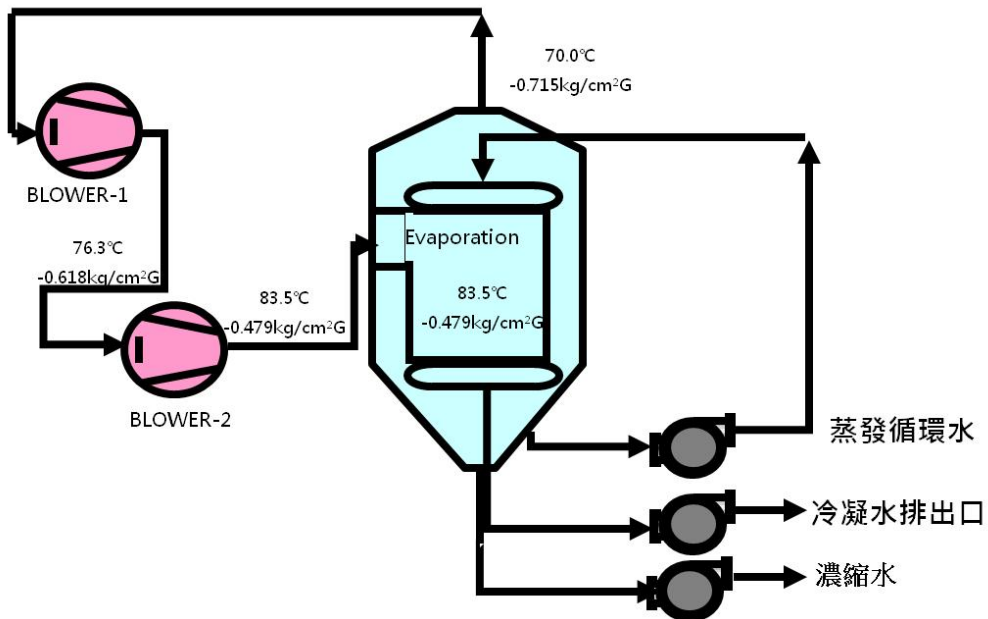


圖 5 蒸發系統內各單位階段溫度平衡狀況

四、蒸發設備運轉與結論

歷經 5 年含開發研究評估及工程施作後，2015 年陸續開始測試運轉台灣首例大型廢水處理蒸發系統，正式啟用期間除了調整能耗外，另一須克服者係結垢問題，在圖 6 可看到初期運轉產生的結垢，這對運轉及能耗會造成許多困擾，因此在反覆調整後，結垢可自然剝落排除(如圖 7)，故能維持穩定運轉並將能耗波動控制於最小範圍內。

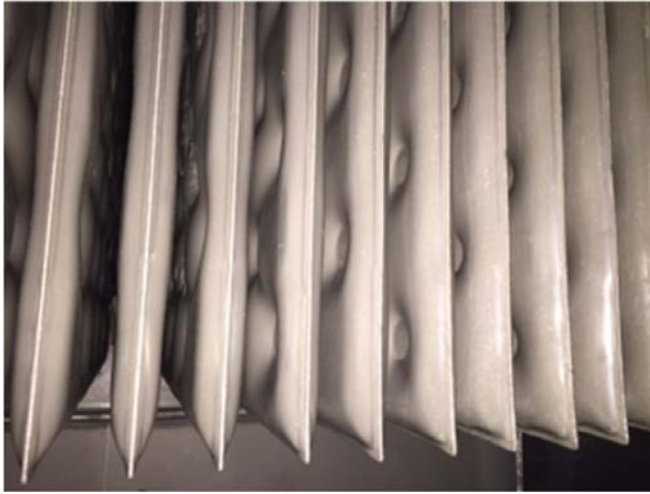


圖 6 加熱板結垢情形



圖 7 結垢物運轉自行剝落

完成廢水零排放全回收後，不僅可增加年回收水量，達到 1 座寶山水庫的有效蓄水量 538 萬立方公尺，另完成後的蒸發罐設備亦與自然的綠樹融為一體(如圖 8、9)。此項成功均是友達廠務技術暨工程服務部為了獲得切實經濟可行的技術，投入了難以數計的夜晚，並在相關設備及工程廠商的通力合作下，而於龍潭成就了台灣指標性的廢水零排放設施投入運轉，期盼藉由這些經驗技術的累積，並與台灣相關產業通力合作，共同邁向產業鏈「水中和」的目標，為台灣的永續發展，做出實實在在的貢獻。



圖 8 完工的蒸發罐設備



圖 9 綠樹中的蒸發罐設備

五、參考文獻

高麗麗、張琳、杜明照(2012)，MVR 蒸發與多效蒸發技術的能效對比分析研究，現代化工，第 32 卷第 10 期。

Evaluation of the Hadwaco MVR Evaporator for the Metal Finishing Industry, U.S. Environmental Protection Agency Environmental Technology Verification Program For Metal Finishing Pollution Prevention Technologies, 2001, [https://archive.epa.gov/nrmrl/archive-etv/web/pdf/06 tp hadwaco.pdf](https://archive.epa.gov/nrmrl/archive-etv/web/pdf/06_tp_hadwaco.pdf)

Samuel J. Griffin(2014), 近零液體排放(ZLD)廢水處理系統中的混合鹽結晶器的優勢 www.gewater.com。