

空氣污染與噪音類

橡膠廠 VOCs 廢氣處理及能源回收再利用

張光成*、林聖庭**

摘 要

環球橡膠公司製程產生的高濃度 VOCs 廢氣 (Volatile Organic Compounds, 揮發性有機化合物, 濃度約數千~數十萬 ppmv) 與低濃度 VOCs 廢氣 (3,000 ppmv 以下), 早年分別設置高空廢氣燃燒塔 (以下簡稱 Flare) 處理高濃度 VOCs 以及蓄熱式催化氧化爐 (Regenerative Catalytic Oxidizer, 以下簡稱 RCO) 處理低濃度 VOCs 廢氣。自 2015 年起設置 1 座附設鍋爐的蓄熱再生式氧化爐 (Regenerative Thermal Oxidizer, 以下簡稱 RTO#1 鍋爐), 規劃逐步將高濃度 VOCs 由高空廢氣燃燒塔轉移至 RTO#1 鍋爐進行處理並回收餘熱產生蒸汽, 以符合環保法規要求。

考量未來製程產能擴大將增加 VOCs 廢氣排放, 以及 RTO#1 鍋爐仍需與 RCO 爐輪流交替操作, 以處理低濃度 VOCs 廢氣, 因此, 於 2021 年新設 1 套具有高溫脈衝波反應器 (Pulse Detonation Reactor, PDR) 技術的 RTO#2 鍋爐 (PDR-RTO), 並改良廢熱鍋爐設置位置, 亦設置自動清灰系統, 能減少系統停俾清灰的頻率, 增加操作彈性。同時, 也透過 PDR 將高濃度 VOCs 在反應器內部連續週期性的爆轟反應, 將 VOCs 預先破壞、再利用 RTO 技術進行熱氧化處理, 所產生的高溫氣體再經過廢熱回收鍋爐產生蒸汽, 減少廠內對外採購蒸汽需求, 並降低處理廢氣所需之天然氣使用量。這套 PDR-RTO 系統, 經過驗證可以達成以下目標: (1) 安全且有效的分流、同步處理高濃度 VOCs 廢氣及低濃度 VOCs 廢氣; (2) 整體 VOCs 破壞效率高於法規要求的

2 橡膠廠 VOCs 廢氣處理及能源回收再利用

95% 以上；(3) 能有效回收能源供應廠內使用，達成污染防治目標以外，更符合節能、減碳、創造經濟效益的循環經濟目標。

【關鍵字】 VOCs廢氣處理、能源回收、高溫脈衝波反應器、RTO、節能減碳

* 環球橡膠股份有限公司小港廠

主任

** 環球橡膠股份有限公司小港廠

廠長

一、前言

由於 VOCs 廢氣有成分複雜、易燃易爆、具毒害性、且伴隨有臭味的特性，加上橡膠廠製程 VOCs 廢氣常有濃度快速變化、流量快速變化之情形，產業界經常面對污染防治設備意外頻傳的困擾。傳統上，VOCs 廢氣常使用「蓄熱再生型氧化爐」(RTO) 或「蓄熱再生型催化氧化爐」(RCO) 處理，但是高濃度 VOCs 廢氣若使用空氣或低濃度 VOCs 稀釋，很容易發生爆炸危害，所以國際健康安全協會 (HSE) (Newsholm, 2004) 及美國化工協會 (AIChE) (Walsileski, 2005; Walsileski, 2007) 均強烈建議：「高低濃度 VOCs 廢氣必須分流處理，且使用傳統的 RTO/RCO 處理 VOCs 廢氣時，濃度不宜超過 LEL(爆炸下限) 的 25%」。

環球橡膠公司小港廠(以下簡稱本廠)主要生產流程及原有 VOCs 廢氣處理系統，如圖 1 所示，主要廢氣來源為：(1) 各產線的批次式反應器因生產操作產生的高濃度 VOCs 廢氣及 (2) 工廠後處理區製程產生的低濃度 VOCs 廢氣。VOCs 廢氣在廠區內分為高濃度廢氣收集管線與低濃度廢氣收集管線，分流收集，以獨立管線送至 VOCs 廢氣處理及能源回收設備處理：

1. 高濃度 VOCs 廢氣：濃度由 5,000 ppmv 至數十萬 ppmv；典型的高濃度 VOCs 廢氣平均濃度及平均熱值變化如圖 2 所示，其特性是濃度變化快速、流量變化快速；主要來源為化學品貯存槽排氣、反應器置換氣等；每日的平均濃度與熱值也變化極大；圖 2 顯示高濃度 VOCs 廢氣的日平均熱值於 2021 年 7 月 26 日出現峰值時，但是濃度卻無類似趨勢，這正是化工廠高濃度廢氣的特性，其發生原因係廠內反應器生產置換氣批次排氣量較大，導致全日平均熱值較高所致；高濃度 VOCs 處理設備必須面對 VOCs 組成變化快速、濃度變化快速、流量變化快速的特性；例如，每隔一段時間，聚合反應器需要排氣置換時，不同溶劑貯存槽槽車進料時，都會產生熱值與濃度及流量的變化。
2. 低濃度 VOCs 廢氣：典型的濃度在 3,000 ppmv 或 5,000 mg/Nm³ 以下；其濃度與流量雖然隨季節、產品生產及系統負載而有變化，但其變化溫和且相對穩定。

4 橡膠廠 VOCs 廢氣處理及能源回收再利用

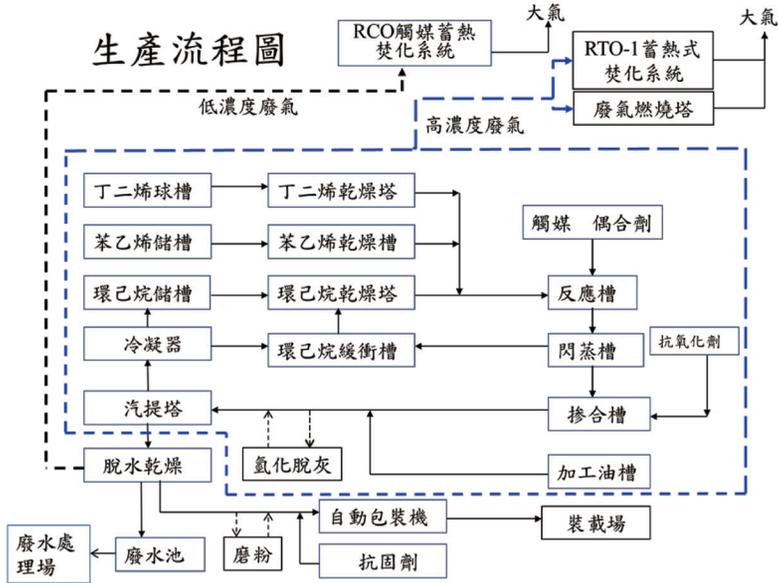


圖 1 本廠原有主要生產流程圖

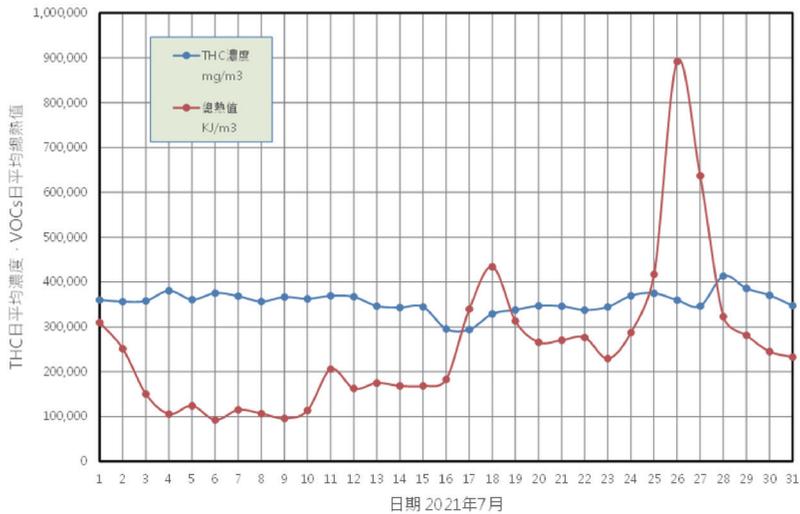


圖 2 典型的高濃度 VOCs 廢氣日平均濃度與熱值

註：原彩圖請至產業綠色技術資訊網站下載 <https://proj.ftis.org.tw/eta/index.aspx>

由於高濃度 VOCs 廢氣多為間歇性不連續操作排放，正常操作條件下，每小時約產出 500 ~ 1,500 Nm³ 的廢氣，這些高濃度 VOCs 廢氣原始處理方式是經過廠內的高空廢氣燃燒塔混合低壓蒸汽以燃燒的方式處理後直接對空排放，但這種處理方式卻又常常因為 VOCs 瞬間流量及濃度變化過大，使高空廢氣燃燒塔熄火或有燃燒不完全的困擾。

工廠後處理區隧道爐排氣的低濃度 VOCs 廢氣原始情況是直接進入廠內的 RCO 廢氣處理設施進行熱氧化分解，以目前產線的生產量預估，每小時約產出 30,000 Nm³/hr 的廢氣，而 RCO 的燃燒室溫度正常操作下約控制在 400 ~ 500℃，出口溫度理論上則是控制在 120℃ 以下。但是實際上 RCO 系統在處理橡膠廠低濃度 VOCs 廢氣時，由於 VOCs 廢氣濃度變化，加上催化氧化反應屬於放熱反應，兩者交互影響下，常常使得 RCO 爐內累積廢熱無法移除，故偶爾會發生 RCO 系統超溫跳車狀況。鑒於 RCO 廢氣處理設施焚燒處理能力受到系統超溫、處理風量等條件限制影響，因此，新設 1 套處理能力更大、去除效率更高且能穩定運轉的廢氣處理設施成為本廠投資改善的目標。

二、處理技術沿革

由於產業界處理 VOCs 廢氣經常面對回火、閃燃、爆炸意外的情況 (Walsileski, 2005 ; Walsileski, 2007 ; Windhorst, 2004 ; Ennis 2004 ; 張榮興, 2017) 本廠為了解決高濃度 VOCs 廢氣處理的問題，在選擇可用處理技術時，最主要的考量點是：(1) 要選擇或參與開發具有安全性與可靠性的技術、(2) 要能有效回收能源達成節能減碳的循環經濟目標。在 2015 年經過嚴格評選後，決定引進奧特拉斯公司的技術，新建第一代 RTO 處理設備，其爐體區設計小型廢熱鍋爐，規劃在處理 VOCs 時能回收廢熱，並產生蒸汽。雖然第一代 RTO#1 鍋爐有達成預計效果，但經過數年的操作，發現當廢氣因濃度或流量減少時，RTO#1 鍋爐的操作溫度會因鍋爐的循環水而驟降，導致燃燒機需要補充天然氣以維持 RTO#1 鍋爐的操作溫度。

6 橡膠廠 VOCs 廢氣處理及能源回收再利用

第一代 RTO#1 經過測試驗證性能後，決定這套系統主要作為廠區高濃度 VOCs 廢氣的處理設備，經歷多年的現場操作測試、測試調整、局部修正，經過幾年的耐受性考驗與使用，驗證了這項技術的可靠性及安全性。

在 2020 年，本公司為了配合政府全面提升 VOCs 廢氣管制，考量未來製程產能擴大將增加 VOCs 廢氣排放，以及現有 RTO#1 鍋爐仍需與 RCO 爐輪流交替，以處理低濃度 VOCs 廢氣，因此，決定新設 1 套具有高溫脈衝波反應器技術 (Pulse Detonation Reactor，以下簡稱 PDR) 的 RTO#2 鍋爐；引進奧特拉斯公司的專利技術 (張榮興，2017；張榮興，2012) 推動第二代 PDR-RTO 建設案，改善計畫如圖 3 所示。

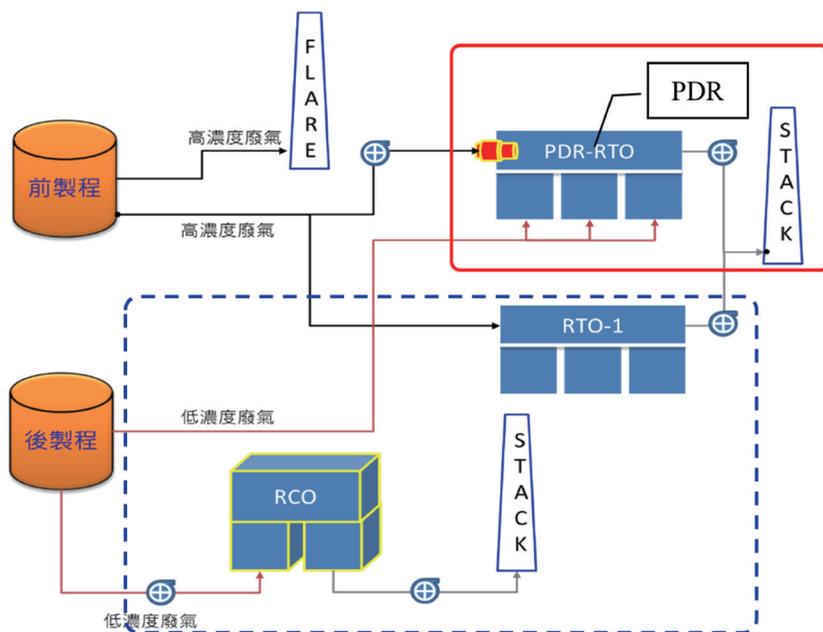


圖 3 改善計畫示意圖 (藍色虛線：改善前、紅色實線：改善後)

註：原彩圖請至產業綠色技術資訊網站下載 <https://proj.ftis.org.tw/eta/index.aspx>

經過與承包商奧特拉斯公司進行了詳細的研討規劃後，決定對新系統作多項設備調整與系統優化。其中包含 PDR 的傳熱技術優化、新一代雙重碟片舉升閥的開發、更周全的火焰防阻保護等。為了更安全且有效的處理 VOCs 廢氣，本公司在規劃設計興建 PDR-RTO 系統時，即採用全面性的製程安全性評估與風險分析 (HAZOP)，敦聘製程安全評估領域專家學者臨廠指導；而在製程安全設備採用上除了參考各項國際標準進行設計，並選用奧特拉斯公司獨家設計的防爆轟型火焰防阻器 (包含 RTO 3 個入口及三向閥直徑達 2000 mm 的大型火焰防阻器共 4 組、高濃度 VOCs 廢氣的管道火焰防阻器) 及 VOCs 廢氣的管道上設置附有火焰防阻芯件的防火焰型安全破裂片以確保系統操作安全性。於 2021 年中，完成第二套 VOCs 廢氣處理及能源回收 PDR-RTO 系統的建設，經過調試與性能測試合格後，正式投入現場使用。

此計畫提升了原有 RTO#1 鍋爐的性能，改良鍋爐的設置位置，藉此利用鍋爐來調控高溫燃燒室的溫度；當高濃度廢氣減少時，系統處理後的尾氣可循 RTO 傳統路徑由陶瓷蓄熱材回收因燃燒產生的廢熱；若高濃度廢氣增加時，則藉由 PDR 的連鎖爆轟反應產生大量的餘熱可使燃燒室的溫度維持在最佳操作溫度，處理後的餘熱除了可以經由蓄熱材吸收轉換為下一循環的進氣預熱的熱源，並減少原 RTO#1 鍋爐為維持操作條件所消耗的天然氣。

本計畫主要關鍵節能減碳技術為利用高溫脈衝波反應器 (PDR) 處理高濃度 VOCs 廢氣，以可控制的週期性爆轟反應將有機廢氣預先破壞分解其結構、使其爆炸風險消除，再與低濃度的 VOCs 廢氣一同在高溫燃燒室進行最終高溫氧化、破壞分解，高溫氧化後產生的廢熱再由 RTO 的蓄熱艙內的陶瓷蓄熱材吸附回收，或利用第四艙的廢熱回收鍋爐回收熱能產生蒸汽供應廠內製程使用。

三、高溫脈衝波反應器 (PDR)

PDR 技術的發明基本原理係在可控制的空間、利用可控制的逆流爆轟技術 (Countercurrent Detonation)，進行 VOCs 廢氣的破壞分解。爆轟技術是 19 世紀化學家就已經發現的物理現象。近年來，因超高速飛行器及航天飛行器需要使用爆轟引擎

8 橡膠廠 VOCs 廢氣處理及能源回收再利用

(Pulse Detonation Engine), 使得爆轟技術備受科技研發單位矚目。奧特拉斯公司利用的逆流爆轟技術發展出可用於 VOCs 廢氣處理的專利高溫脈衝波反應器 PDR, 並獲得台灣及中國多項專利; 爆轟技術的能量密度約為傳統燃燒技術的 1 億倍, 其燃料點火模式近似超音速爆轟噴射機引擎, 爆轟引發的高溫脈衝波能將 VOCs 污染物徹底破壞, 而且操作安全、性能穩定, 能夠安全且有效的解決 VOCs 廢氣濃度變化對火焰穩定性及焚化破壞率的影響。

PDR 的操作程序如圖 4 所示, VOCs 廢氣導入 PDR 經火星塞點火後, 會逆流產生週期性的高溫高壓爆轟衝擊波。利用這項專利技術開發成功的「高溫脈衝波反應器」典型外觀如圖 5 所示, 可利用法蘭安裝在熱處理設備上, 安全處理高濃度 VOCs 廢氣。PDR 系統由於能量密度遠高於傳統燃燒技術, 且高溫、高壓爆轟衝擊波本身的波動傳遞速度高達每秒 2,000 公尺以上、在衝擊波內部的溫度超過 2,000 °C、壓力超過 1.5 MPa, 對於 VOCs 廢氣的流量變化、濃度變化均不會受到明顯影響 (張榮興, 2017), 因此, 在處理高濃度 VOCs 氣體時, 可以承受瞬間的超載操作、流量快速變化、濃度快速變化、熱值的快速變化, 可以安全面對 VOCs 廢氣濃度及流量的快速變化, 因此, 將 PDR 與現有之各種 VOCs 熱處理技術 (包含 RTO、DFTO、焚化爐) 結合, 更能發揮其優點。

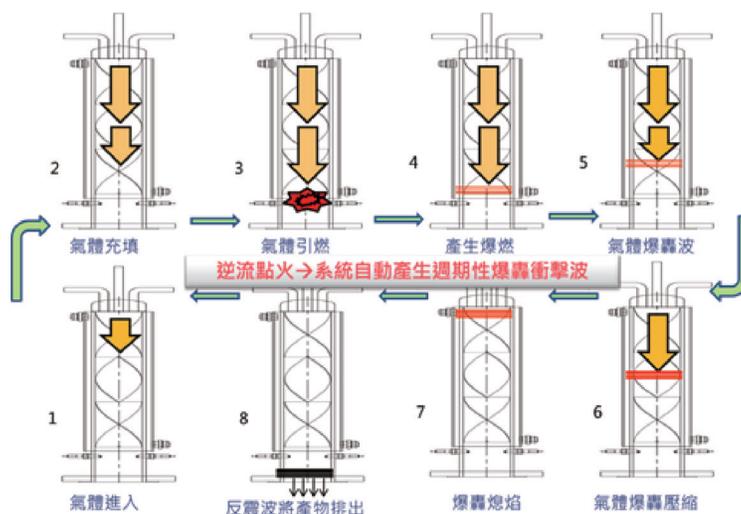


圖 4 脈衝波爆轟反應器 (PDR) 操作程序簡圖 (張榮興, 2012)

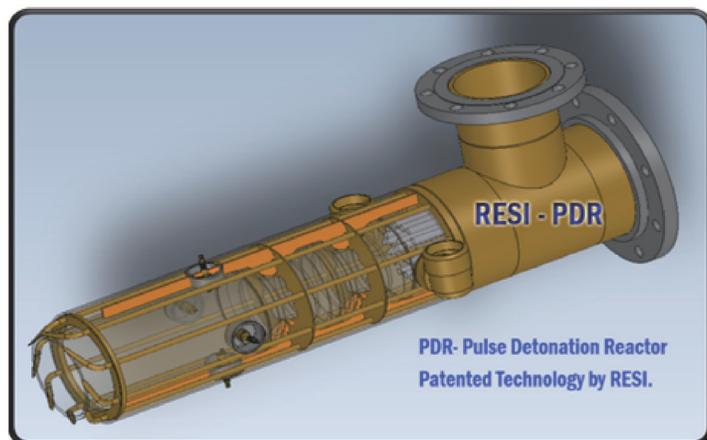


圖 5 脈衝波爆轟反應器 (PDR) 外觀圖 (張榮興, 2017)

PDR 設備主要用於處理安全疑慮最高、易燃、易爆的高濃度 VOCs 廢氣；因此，本廠在系統設計時，針對安全保護、可靠性設計上，特別講究。在系統組態上，高濃度 VOCs 廢氣先經過奧特拉斯公司特別設計的防爆水封槽作安全防護；防爆水封槽設有氣體分散裝置、阻火元件，提供第一層保護。高濃度 VOCs 廢氣再經防爆型全密封增壓風機增壓後，送至 PDR 處理；在增壓風機前端設有防爆轟型火焰防阻器保護，在每一個 PDR 入口也都設有防爆轟型火焰防阻器保護。此外，PDR 點火元件特別開發高精密度電流檢測元件，隨時監控點火元件的操作狀況，確保系統的高度安全性。

四、結合高溫脈衝波反應器的蓄熱式 燃燒爐 (PDR-RTO)

本廠所採用的 PDR-RTO 鍋爐係「脈衝波爆轟反應器 PDR」與傳統「蓄熱再生型氧化爐 RTO」，加上廢熱鍋爐進行餘熱回收產生蒸汽的整合應用，此系統同時也可以針對 VOCs 廢氣的流量及濃度變化，自動調整操作模式，達成以下目標：(1) 有效回收餘熱產生蒸汽，(2) 有效調控高溫燃燒室的溫度，避免燃燒室因過熱造成系統跳車，(3) 穩定調控系統操作條件，確保 VOCs 破壞去除率維持在 95% 以上。另外，全系統採用負壓操作避免洩漏，以及在關鍵設備節點加裝火焰防阻器或防爆破裂片，使製程操作安全得到 100% 的保障。

10 橡膠廠 VOCs 廢氣處理及能源回收再利用

本技術所應用的脈衝式爆轟反應器蓄熱再生型氧化爐 (PDR-RTO)，包含 1 組三槽式蓄熱再生型氧化爐 RTO 系統、2 組共 6 個 PDR 高溫脈衝波反應器、1 套水管式廢熱回收鍋爐以及周邊配套安全設備。其中，RTO 具有 3 個裝有模組化蜂巢狀陶瓷蓄熱材料的蓄熱槽、1 個高溫氧化室、及 2 組低 NO_x 天然氣燃燒機。這種結合高溫脈衝波反應器的三槽式蓄熱再生型氧化爐 PDR-RTO 基本運作原理如圖 6 所示。

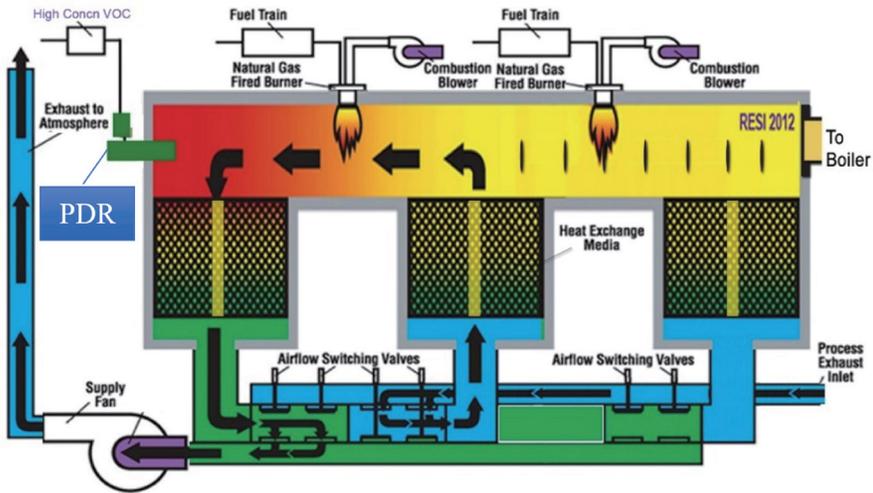


圖 6 高溫脈衝波反應器 PDR-RTO 的基本運作原理 (張榮興, 2017)

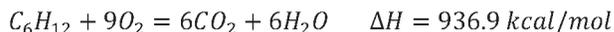
含有低濃度 VOCs 的廢氣首先經過 1 個已經預熱的陶瓷蓄熱材料填充床，吸收陶瓷材料的能量，被加熱到超過 750°C 以上，廢氣隨後進入高溫燃燒室進行氧化處理，PDR-RTO 的設計讓 VOCs 廢氣在高溫燃燒室中至少滯留 2 秒鐘以上，以確保 VOCs 的破壞去除效率；燃燒後的高溫廢氣再流經另一個陶瓷蓄熱材料填充床，交出能量將陶瓷材料加熱，使得廢氣的能量被蓄存在陶瓷材料內。經過一定時間後 (約 120 ~ 300 秒鐘)，蓄熱床的進出床互相交替，原先用以進氣加熱的蓄熱床，在能量被交換吸收後替換成清洗床；已經清洗潔淨的清洗床替換成出氣床，以吸收蓄積高溫廢氣處理後的熱能。利用這種操作方式，將能量蓄存、交換的方式，可以使三槽式蓄熱再生型氧化爐 RTO 的能源回收率能達到 95% 以上的目的，並且不會產生蓄熱床替換導致 VOCs 廢氣逸出的困擾。

含有高濃度 VOCs 的廢氣，則經安裝在燃燒室的高溫脈衝波反應器 PDR，利用高壓火星塞點火，產生逆流高壓高溫爆轟脈衝波加以處理。因高壓高溫爆轟脈衝波的能量密度為傳統燃燒的 108 倍，且爆轟波速度高達 2,000 m/s，溫度超過 2,000°C，氧化反應速度極快，可將高濃度 VOCs 成分有效破壞，不受濃度與流量變化而有限制，並能防止發生回火、燃爆意外發生。

PDR-RTO 系統搭配前處理系統與廢熱回收鍋爐系統的周邊設備，包含臥式旋風洗滌塔(用於低濃度 VOCs 廢氣的膠沫與水分去除，兼防爆水封之用)、防爆水封槽(用於高濃度 VOCs 廢氣)、軟水系統(鍋爐配套設備)、除離子水系統(PDR 間接冷卻用)、水管式鍋爐給水及加藥系統等設備。

PDR-RTO 系統採用 2 部天然氣燃燒機作為系統啟動烘爐階段的加熱源，待系統啟動完成，即 RTO 燃燒室溫度達到設定值 850°C，便可以分別導入低濃度 VOCs 及高濃度 VOCs 進行焚燒處理。因為高濃度 VOCs 會先通過 PDR 反應器預處理，高濃度 VOCs 反應器的爆轟反應會伴隨生成大量熱量，使得燃燒室溫度維持在 850~1,200°C，讓 VOCs 廢氣安全的徹底氧化。

本廠 VOCs 廢氣主要成分為環己烷，其氧化反應方程式為：



根據氧化反應平衡計算，假設使用單純的 RTO 且 VOCs 廢氣入口溫度為 50°C，系統氧化燃燒室的操作溫度為 900°C，則蓄熱室在舉升閥出口的平衡溫度如圖 7 所示，其中 T_{swap} 為閥門切換設定溫度， $\langle T \rangle$ 為閥門出口平均溫度；當 VOCs 廢氣濃度為 2,000 mg/Nm³ 時，出口平均溫度為 120°C，閥門切換溫度必須高達 191°C，否則 RTO 內部溫度會因為熱量排除不足，導致溫度逐漸上升。當 VOCs 廢氣濃度為 4,000 mg/Nm³ 時，出口平均溫度為 189°C，閥門切換溫度必須高達 329°C，否則 RTO 內部溫度會因為熱量排除不足，導致溫度逐漸上升。本廠低濃度 VOCs 廢氣常態濃度約為 3,000~5,000 mg/Nm³，亦即在常態操作條件下，若無熱量排除機制，系統一定會逐漸超溫失控，因此，設計廢熱回收系統確實有其必要性。

12 橡膠廠 VOCs 廢氣處理及能源回收再利用

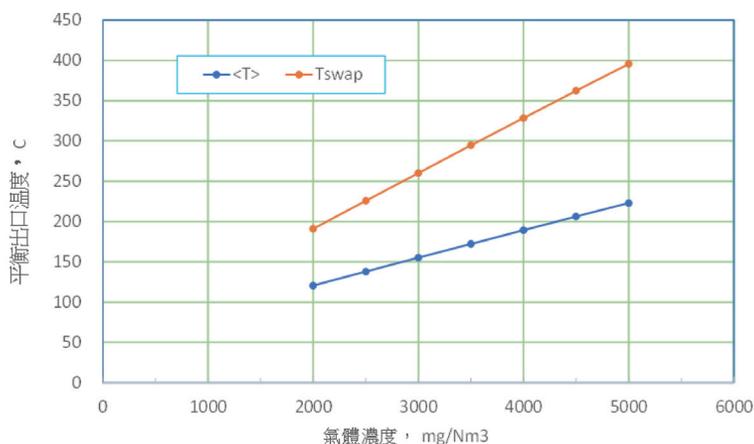


圖 7 環己烷的氧化能量釋放

註：原彩圖請至產業綠色技術資訊網站下載 <https://proj.ftis.org.tw/eta/index.aspx>

為使系統運作參數能持續優化，本系統另裝設包含各種運作所需公用資源的計量表、VOCs 的濃度與流量監控表，並將其匯流至 DCS 中，使用資料庫計算操作平均值，以獲得常態操作參數，若有大幅度偏離正常情況，會產生自動警報由人工進行處理，對未來產線設備保養、製程持續優化，乃至於未來工業 4.0 的產線自動化，均能有正面幫助。

五、控制系統與操作特性

PDR-RTO 設備除了主體設備採用防爆設計以外，也採用嚴謹的自動化控制系統，架構上採用 1 套雙 CPU 的容餘 PLC 負責程序控制、1 套經過 SIL 認證的安全 PLC 負責系統的安全連鎖自動控制；所有類比訊號均經過安全隔離柵與 PLC 通訊，所有數位訊號均經過安全繼電器與 PLC 通訊。系統儀表均採用 SIL 認證的本安型防爆儀表、轉動機械使用具有 TS 防爆認證的馬達、定位器使用防爆定位器、採用防爆接線器具及火焰防阻器，構成 1 套安全的 VOCs 廢氣處理系統。另外，重要控制迴路採用橫河單迴路控制器，負擔第一線的操作條件控制。PLC 負擔程序控制與安全連鎖；圖控人機界面提供訊息溝通界面。

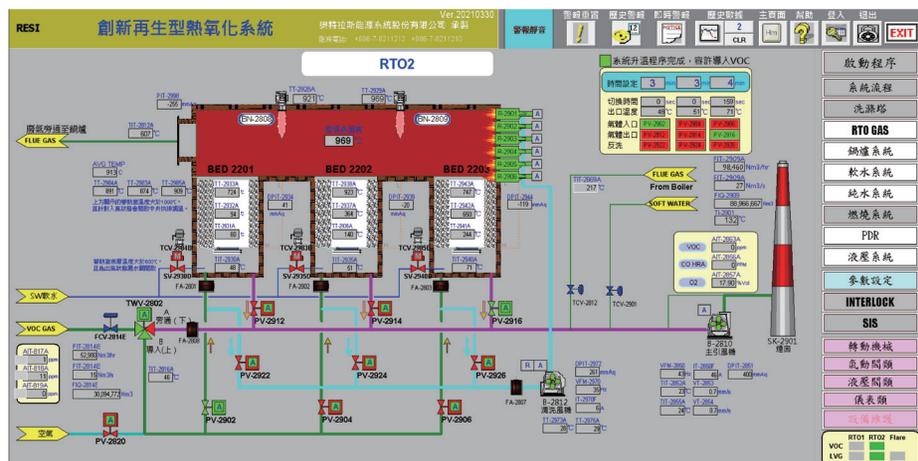


圖 8 PDR-RTO 控制畫面 (1)RTO 控制

註：圖 8~ 圖 12 原彩圖請至產業綠色技術資訊網站下載 <https://proj.ftis.org.tw/eta/index.asp>

PDR-RTO 系統中 VOCs 廢氣主要流程的控制畫面如圖 8 所示，蓄熱床的切換是以出口溫度及切換時間作控制，各蓄熱床可以獨立設定舉升閥切換時間，控制畫面可以即時顯示閥門切換狀態、蓄熱床及燃燒室溫度分佈，風車電流 / 軸承溫度 / 震動值。圖 8 顯示燃燒室的即時平均操作溫度為 969°C。為了確保系統能獲得最佳的破壞去除效率，本廠採用洩漏率低於 0.01% 的雙重金屬硬密封舉升閥作為 VOCs 廢氣切換閥門，搭配足夠的燃燒室滯留時間、較高的操作溫度，達成高破壞效率。RTO 的能源回收效率是以燃燒室溫度 (T_c)、RTO 入口溫度 (T_i) 及 RTO 蓄熱床出口溫度 (T_o) 計算，以操作數據燃燒室溫度達 950°C，RTO 入口溫度約為 50°C，蓄熱床出口平均溫度 90°C 以下，蓄熱床的能源回收效率 E_{RTO} 約為 95.6%：

$$E_{RTO} = \frac{T_c - T_o}{T_c - T_i} \times 100\% = \frac{950 - 90}{950 - 50} \times 100\% = 95.6\%$$

圖 9 為 PDR-RTO 系統的燃燒機控制畫面，所有燃料系統均採用符合 NFPA 及 ISA 規範的雙重遮斷閥，搭配嚴謹的安全連鎖，確保系統的操作安全。

14 橡膠廠 VOCs 廢氣處理及能源回收再利用

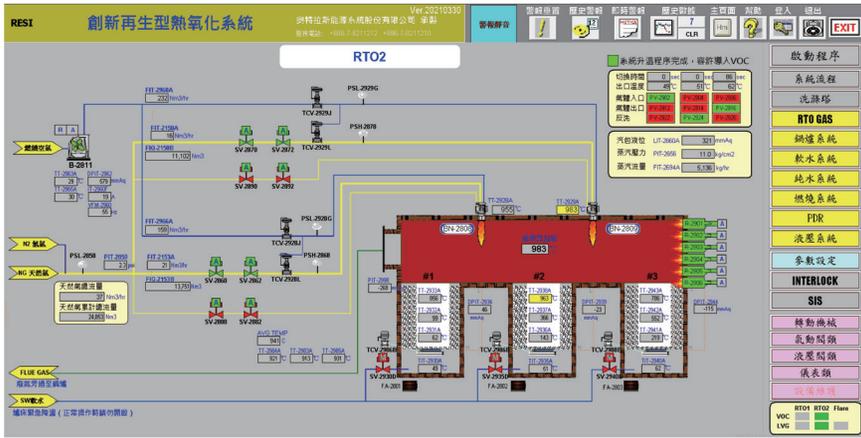


圖 9 PDR-RTO 控制畫面 (2) 燃燒機控制

PDR-RTO 系統中高濃度 VOCs 廢氣使用 PDR 處理的流程控制畫面如圖 10 所示，共使用了 2 組 PDR 模組，每一模組有 3 支高溫脈衝波反應器 PDR。高濃度 VOCs 廢氣經增壓風車 B-2800 增壓後，送至 PDR 處理。高濃度 VOCs 廢氣除了管道系統上安裝火焰防阻器，在每支 PDR 入口側也都安裝了防爆轟型火焰防阻器。PLC 控制系統管制系統的安全操作，所有高濃度 VOCs 廢氣的遮斷均採用符合 NFPA、API 及 ISA 規範的雙重遮斷閥，確保系統的操作安全。

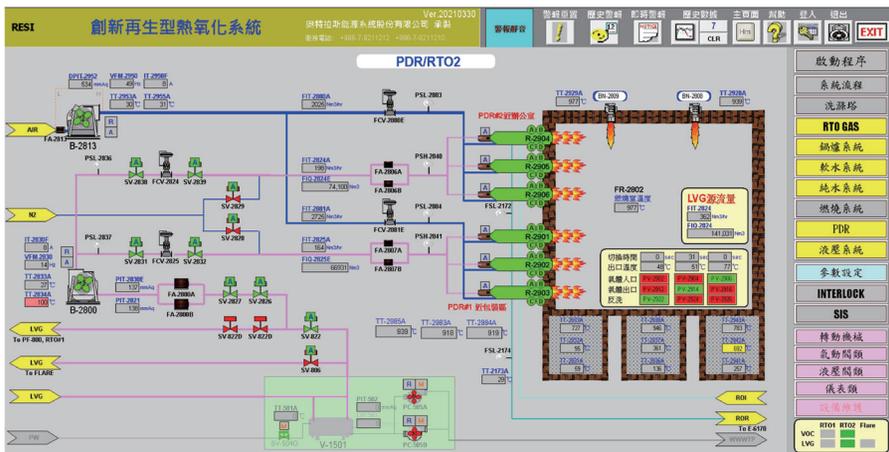


圖 10 PDR-RTO 控制畫面 (3) PDR 控制

圖 11 為 PDR-RTO 系統的廢熱回收鍋爐控制畫面，由於本廠處理廢氣含有流量及濃度相對穩定的低濃度 VOCs 廢氣，同時含有濃度快速變化、流量快速變化的高濃度 VOCs 廢氣，使得廢熱回收鍋爐的負載隨時可能快速變化，使用火管式鍋爐很容易造成意外，因此，選用建設成本較高的水管式鍋爐，並加大汽包的尺寸，使得鍋爐具有較佳可控制性。在鍋爐出口，安裝一組節熱器，有效回收能源，降低排氣溫度。PDR-RTO 系統的廢熱回收鍋爐設計最高處理容量為產生 10 Ton/hr 蒸汽，本廠目前操作產汽 4 ~ 8 Tons/hr，蒸汽產量受 VOCs 廢氣濃度及流量變化影響。

PDR-RTO 系統在建設初期就經過嚴謹的 HAZOP 分析，針對設計上需要特別注意的節點，並經過 LOPA 對策分析，據此設計安全連鎖系統；圖 12 為圖控系統上的安全連鎖表，在系統作動安全連鎖時，能明確顯示各個安全連鎖閥門、轉動機械的起停、閥門開關與切換、燃燒機的開關狀態。

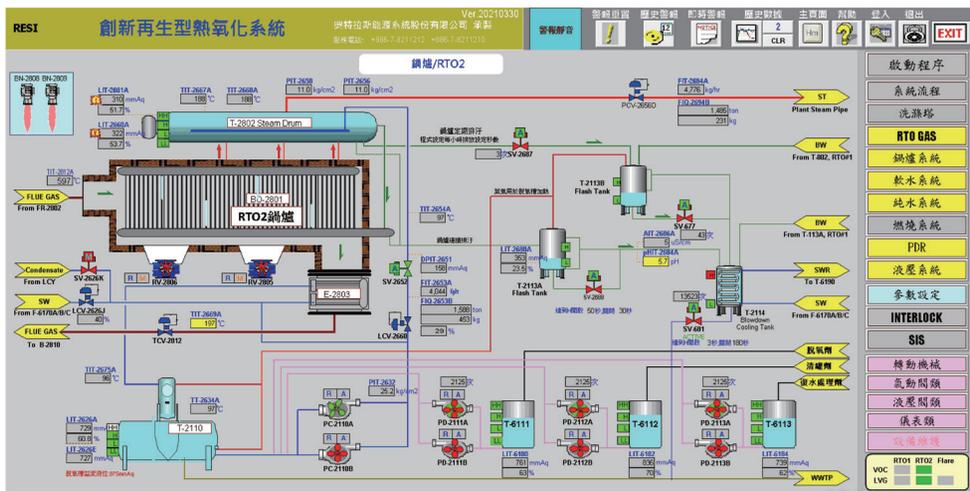


圖 11 PDR-RTO 控制畫面 (4) 鍋爐控制

16 橡膠廠 VOCs 廢氣處理及能源回收再利用

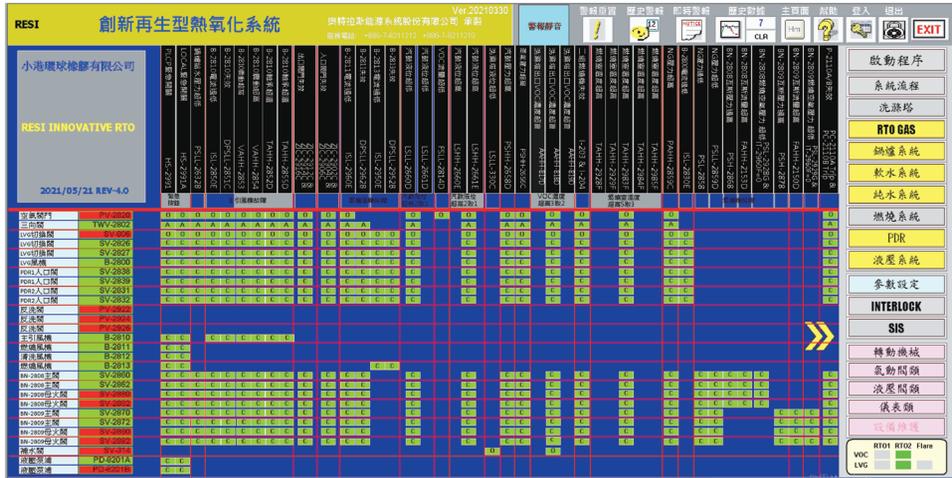


圖 12 PDR-RTO 控制畫面 (5) 安全連鎖表

六、系統性能評估

PDR-RTO 系統的典型高濃度廢氣組成及熱值，如圖 2 所示。THC 月平均濃度為 35.5%，最高日平均濃度為 41.33%，最小日平均濃度為 29.4%。總熱值的月平均值為 257,187KJ/m³，最高日平均熱值為 891,881 KJ/m³，最低日平均熱值為 92,637 KJ/m³，日平均值波動幅度極大；由原始的 GC 數據顯示，高濃度 VOCs 廢氣的瞬間濃度與熱值變化更是激烈。

PDR-RTO 系統的處理採樣分析結果顯示，VOCs 廢氣的入口濃度採樣 THC 濃度範圍為 2,811~3,660 mg/m³，設備出口濃度採樣分析結果為 0.52~14 mg/m³，破壞去除效率測試結果優於環保主管單位要求的 95% 以上破壞去除效率。能源回收效率則視進料濃度及流量機動調節，提供生產工廠使用，展現減碳及能源回收的循環經濟效益。

七、結語

本廠考量未來製程產能擴大將增加 VOCs 廢氣排放，於 2020~2021 年新設具有高溫脈衝波反應器技術的 PDR-RTO 系統，透過 PDR 將高濃度 VOCs 在反應器內部連續週期性的爆轟反應，將 VOCs 預先破壞，然後利用 RTO 技術進行熱氧化處理，低濃度 VOCs 廢氣直接導入 RTO 處理；所產生的高溫氣體再經過廢熱回收鍋爐產生蒸汽，減少廠內對外採購蒸汽的部分需求，並降低處理廢氣所需之天然氣使用量。這套 PDR-RTO 系統，經過驗證可以達成以下的設定目標：(1) 可以安全有效的處理濃度及流量都會快速變化的高濃度 VOCs 廢氣及廠區產生的低濃度 VOCs 廢氣；(2) 整體 VOCs 廢氣的破壞效率經過驗證均高於法定效率 95% 以上；(3) 系統能夠有效的回收能源供應廠內使用，達成污染防治目標以外，更符合節能、減碳、創造經濟效益的循環經濟目標。

致謝

「脈衝式爆轟反應器蓄熱再生型氧化爐 (PDR-RTO) 應用於 VOCs 熱回收技術改善計畫」：承蒙經濟部工業局產業低碳科技應用補助計畫 (編號 E10900040001-13) 補助。

參考文獻

- 張榮興、黃承榮、許文彥，化工企業的 VOCs 廢氣處理系統爆炸原因分析及預防對策，奧特拉斯股份有限公司，AIT Report 20170301.R0, 2017; 台灣化學工程師學會，VOCs 廢氣安全處理技術講習會，2017.
- 張榮興，高濃度 VOCs 廢氣安全處理技術 -- 高溫脈衝波反應器，奧特拉斯股份有限公司，AIT Report 20170303.R0, 2017; 台灣化學工程師學會，VOCs 廢氣安全處理技術講習會，2017.

18 橡膠廠 VOCs 廢氣處理及能源回收再利用

張榮興，一種使用氣體逆流爆轟衝擊波的連續化學反應方法及應用該方法之爆轟反應器，中華民國專利，I 448657，2012.

張榮興，一種連續化學反應方法及應用該方法之爆轟反應器，中國發明專利，ZL 2012 1 0143533.6，2012.

張榮興，一種揮發性有機化學廢氣處理並回收能源的方法及使用該方法的蓄熱再生氧化型蒸氣鍋爐，中華民國發明專利，I504844，2012.

張榮興，一種揮發性有機化學廢氣處理並回收能源的方法及裝置，中國發明專利，ZL 2012 1054 8700.5，2012.

Ennis, Tony, “Collect and Destroy Emissions Safely” , Chemical Engineering Progress, 100(5), pp. 22-27, May 2004.

Newsholm, Gordon, “THE SAFE USE OF THERMAL OXIDISER (INCINERATION) SYSTEMS FOR POTENTIALLY FLAMMABLE MIXTURES” HSE , October 2004 .

Walsileski, Robert F., “The Role of Basic Design Data in Preventing Explosions with Fired Equipment – A Case Study” , 55th Canadian Chemical Engineering Conference, 2005.

Wasileski, Robert F., ” The Role of Basic Design Data in Preventing Explosions within Fired Equipment: A Case Study” , AIChE, Process Safety Progress (Vol.26, No.3), 2007.

Windhorst, Jan, “Fired Equipment” , NOVA Chemicals Loss Prevention Standard 6.9, Rev. No. 3A, December 2004.