

VOC 廢氣安全處理技術



1. 化工企業的 VOC 廢氣處理系統

爆炸案例分析及預防對策

2. 工業 VOC 廢氣處理技術與最佳技術選用

3. 高濃度 VOC 廢氣安全處理技術

高溫脈衝波反應器

豐映科技股份有限公司
RESI CORPORATION

化工企業的 VOC 廢氣處理系統爆炸案例分析及預防對策

張榮興¹、黃承榮²、許文彥³

1.豐映科技股份有限公司董事長； 2.豐映科技股份有限公司總經理； 3.奧特拉斯能源系統股份有限公司總經理

摘要

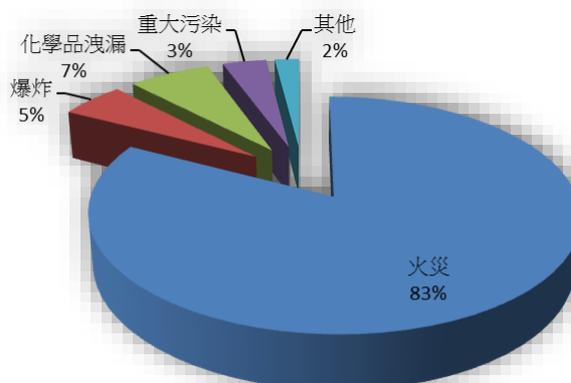
VOC 廢氣處理設備正常操作時一般不會產生爆炸事故，但是當有機 VOC 廢氣濃度瞬間高於爆炸下限 (LEL) 加上有火源存在時，就可能發生爆炸意外。本文以幾件有機 VOC 廢氣處理系統爆炸事故為案例，詳細分析其發生的原因，提出預防 VOC 廢氣處理系統爆炸的安全對策措施。並建議在建立 VOC 廢氣處理系統時，應確實作好 HAZOP 分析及對應，應絕對避免利用稀釋、混合措施降低 VOC 濃度，並要事先考慮事故狀態下的緊急排放和處理對策，確保有機 VOC 廢氣處理的安全性，消除爆炸的危害及維護人員的安全。

關鍵字：VOC 廢氣處理，爆炸意外，安全分析

1. 前言

2016 年臺灣地區工業區發生意外災害中，火災比例占 83%、化學品洩漏比例占 7%、爆炸意外占 5%，這三大類意外部分原因都與 VOC 化學品洩漏有關。化工企業的 VOC 廢氣一般為多組份混合氣體，成分複雜通常具有易燃、易爆、具毒害性、且伴有臭味等特徵，加上常常

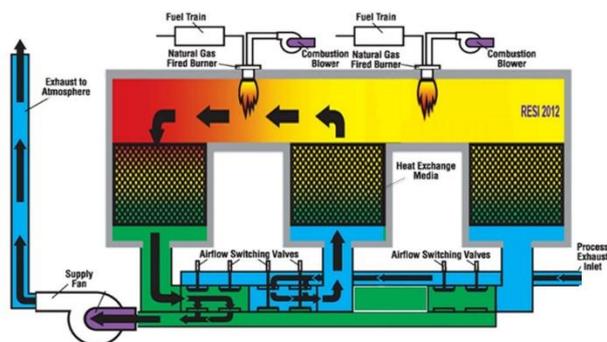
有濃度變化快速、流量變化快速等特性，處理不易，易對周邊環境造成污染。環保主管機關在



多年前就提出了『零排放』的概念，要求企業對 VOC 廢氣進行收集、治理，希望有效降低污染並降低意外災害發生的機會。

有機 VOC 廢氣治理常見方法有：冷凝回收法 (常壓冷凝、高壓冷凝)、化學吸收法、吸附法 (活性炭吸附、矽藻土吸附、直接吸附法、吸附-脫附-回收法、吸附濃縮-燃燒法)、直接燃燒法、催化燃燒法、蓄熱式燃燒法、UV 臭氧、生物處理、電漿處理等。

目前化工企業最常見的有機廢氣治理設施為蓄熱式熱氧化爐 (RTO) 及蓄熱式催化氧化法 (RCO)。與傳統的催化燃燒、直燃式熱氧化爐 (TO) 相比，具有熱效率高 ($\geq 95\%$)、運行成本低、能處理大風量低濃度等優點。其原理是把有機廢氣加熱到 (RTO : 800°C 以上、RCO: 400°C 以上)，使廢氣中的 VOC 氧化分解成二氧化碳和水。氧化產生的高溫氣體流經特製的陶瓷蓄熱



體，使陶瓷體升溫而『蓄熱』，此『蓄熱』用於預熱後續進入的有機廢氣，從而節省廢氣升溫的燃料消耗。陶瓷蓄熱體分成兩個 (含兩個) 以上的區或室，每個蓄熱室依次經歷蓄熱-放熱-清掃等程式，周而復始，連續工作。蓄熱室“放熱”

後應立即引入部分已處理合格的潔淨排氣對該蓄熱室進行清掃 (以保證 VOC 去除率在 95% 以上)，只有待清掃完成後才能進入『蓄熱』程式。RTO 及 RCO 技術原始發展的目的是適用於大風量、低濃度的 VOC 廢氣治理，是國際上治理有機 VOC 廢氣較成熟、實用的方法。

近幾年來，各級環保部門都在推廣 RTO/RCO 技術，但由於化工企業的 VOC 廢氣與電子、晶圓、光電產業的穩定 VOC 排放不同，經常需要面對瞬間的 VOC 濃度變化、快速的廢氣流量變化，導致每年都發生數起 VOC 廢氣處理系統爆炸事故。但由於各企業及政府相關單位基於保密因素都沒有對外發佈正式的事故調查報告，事故原因不明，使不少企業對 VOC 廢氣處理

系統心有餘悸，擔心使用 RTO/RCO 技術的風險。

Windhorst [2004] 回顧多起化工廠的意外事故，發現有許多爆炸意外是由於加熱處理設備所造成。其發生的基本原因通常是由於設備中有可燃性混合物累積，然後在設備的局限空間內點火造成意外發生。在廢氣處理設備中，為了維持燃燒處理溫度，火源通常會一直存在，這也會增加產生爆炸的機會。因此，在設計工業廢氣處理設備時，在設備內避免產生點火源，並不是可信賴的安全設計準則[Wasileski, 2005/2007; Ennis 2004]。

本文以幾起有機 VOC 廢氣處理系統爆炸事故為案例，來分析廢氣處理系統的爆炸原因，並提出安全對策及措施，以供化工企業進行 VOC 廢氣處理系統的設計時，能有安全的防爆措施或針對既有設備進行安全隱患排查及治理。

2. 有機 VOC 廢氣管道系統爆炸事故原因分析

意外事件

首先以一起某精細化工企業發生的有機廢氣管道爆炸事故作說明[王, 2014]。當日上午 10 點 50 分左右，該公司第 6 車間主任助理和班組長在第 6、7 車間之間西面的主道路管架（廢氣管）下，突然聽到一聲沉悶的聲響，緊接著又聽到一聲微爆響聲；此時發現廢氣管道法蘭介面有



點煙霧，響聲大致在 7、8 車間之間的這段廢氣管道上。兩聲響聲後又連著一聲爆炸響聲，發現 8 車間甲苯回收裝置上的廢氣管道的泄爆板衝開並有火焰冒出。

事故發生後，企業有關部門人員馬上到現場查看和處置，爆炸導致廢氣管上與車間對接塑膠管道焊接處衝開。到現場約 2 分鐘後發現第 5 車間西南角處廢氣管道發生燃燒，經近 20 分

鐘努力將明火撲滅，無人員受傷，但造成多處管道破損。

事故發生時企業生產狀況

1. 第 8 車間某產品反應釜用到的原料有：甲苯、硫酸、三氯化鋁等。三氯化鋁投料方式採用敞開式的人工投料，反應是在常壓情況下進行的。反應過程中，反應釜不密閉，而是採用料袋將投料口堵塞的方式。8 車間廢氣本來是由甲苯回收裝置吸附後，再排入廢氣總管。事故發生的當天，恰好甲苯回收裝置檢修停用，廢氣未經過甲苯吸附回收系統而直接排入廢氣總管內。
2. 第 5 車間用到的原料有：丙酮、三氯氧磷、甲苯、異丙醇等。
3. 第 6、7 車間停產檢修，車間廢氣管與總廢氣管已斷開，並有盲板密封。當天當時無任何接近廢氣管道的動火作業。

甲苯 (C ₇ H ₈)	
分子量：	92.14
沸點：	110.6 C
閃火點：	4 C
自燃溫度：	535 C
爆炸下限：	1.1%
爆炸上限：	7.1%

事故原因分析研討

在事故分析時，我們首先要搞清楚是什麼物質產生爆炸？該物質從哪裡來？爆炸的要素是否具備？我們按照爆炸“三要素”（氧化劑、點火源、可燃物）的思路查找事故原因。

1) 氧化劑為空氣

各廢氣吸入口在吸入廢氣的同時也吸入了空氣，廢氣管道中有大量空氣，氧氣（氧化劑）一直存在。

2) 可燃物為甲苯

通過排除法確認可燃物為來自 8 車間某產品反應釜原料甲苯蒸汽。根據車間工藝員於 2010 年 4 月對 8 車間反應釜甲苯廢氣排放濃度進行過測試，筆記中測試資料記錄表

明：第 8 車間反應釜廢氣出口管道中甲苯的含量在 5%~6%(v/v)左右。甲苯的爆炸下限為 1.1%(v/v)，爆炸上限為 7.0%(v/v)，第 8 車間反應釜廢氣出口管道中甲苯廢氣的含量處於爆炸極限之中。

3) 點火源為靜電或是 RTO 底部的火星點燃

該企業與其顧問分析認為是因為廢氣管道為塑膠材質，廢氣支管與總管連通為插入式三通，廢氣管道中氣體流速較大，在直角三通等處因為尖角易產生靜電（點火源）。但是類似的案例在使用 SUS-304 或是碳鋼管的 RTO 或 RCO 處理系統，而且氣體管道除了接地意外，法蘭面兩側也都依照接地標準作了銅導線跨接，但還是經常發生回火意外；推論也有可能是因為 RTO 或 RCO 底部的蓄熱材為多孔蜂巢狀結構，燃燒系統的火星有可能經過蓄熱材料的空隙，掉落到 RTO/RCO 的入氣室。而在入氣室剛好有微量 VOC 冷凝液，被點著而產生回火。如果此時管道內的 VOC 廢氣濃度低，火焰會沿著管道緩慢回火延燒。如果此時管道內的 VOC 廢氣濃度偏高，火焰會往回追逐高濃度 VOC 廢氣，並逐漸由燃燒火焰每秒數公尺的速度逐漸加速，並從燃燒焰加速變成爆炸波，將設備破壞。

在本案例中，正常情況下第 8 車間反應釜廢氣是先經冷凝器冷凝和活性炭吸附回收後，再排入廢氣總管。甲苯吸附回收裝置設備和管道均為金屬材質，電氣防爆，設備、管道進行防靜電接地。由於沒有點火源，故甲苯吸附回收裝置設備和管道沒有發生過爆炸事故。經過甲苯吸附回收裝置後的甲苯廢氣濃度很低，故廢氣總管未發生過爆炸事故。

事故發生的當天，恰好第 8 車間廢氣甲苯吸附回收裝置檢修停用，廢氣未經過甲苯吸附回收系統直接排入廢氣總管內。第 8 車間反應釜廢氣出口管道中甲苯的含量在 5%~6%(v/v)左右。由於廢氣管道中甲苯氣體濃度處於爆炸極限範圍內，系統具備了氣體爆炸發生的四個要素，因此發生了管道廢氣爆炸。

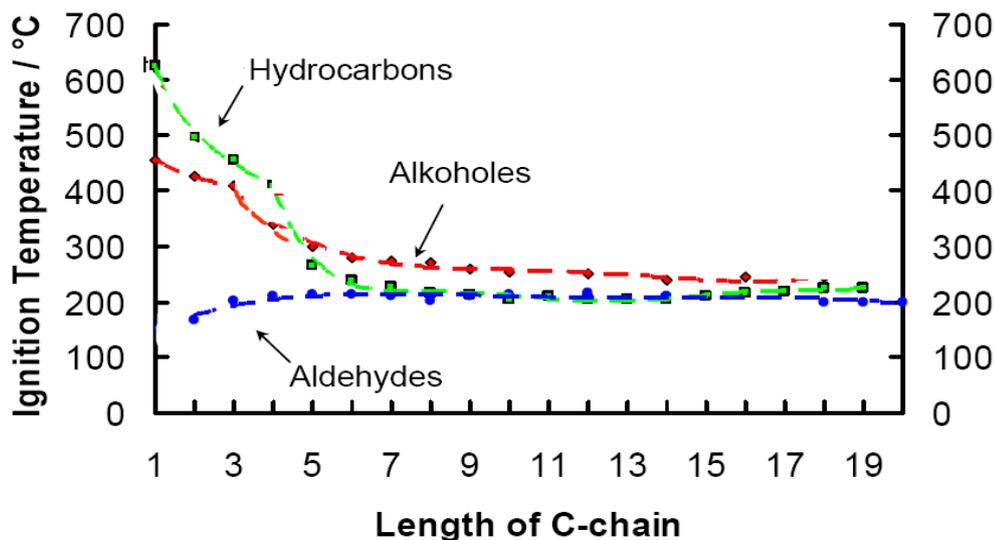


圖-1 有機化合物的點燃溫度與碳鏈長度的關係

改善方案

與本案例類似的，在國內也曾發生多起 VOC 管道回火、燃爆意外；另外，國內也有數起 VOC 廢氣經洗滌塔後，再導入 RTO/RCO 的系統，曾發生洗滌塔回火的意外。這類案例如果作 HAZOP 分析，就應該會發現第 8 車間反應釜廢氣出口濃度超過爆炸限度，其甲苯吸附回收裝置停車維修狀態，第 8 車間反應釜如果繼續將廢氣排入共同管道，就會發生立即的危險。因此，其改善方案有三項：

1. 反應釜廢氣甲苯吸附回收裝置應該增設備用系統；
2. 甲苯吸附回收裝置停車維修時，強制反應釜必須強制停工；
3. 反應釜出口端及甲苯吸附回收裝置出口端，都應該裝設火焰防阻器。

3. 聚苯乙烯廠 VOC 處理系統爆炸事故分析

其次，以一起聚苯乙烯工廠的爆炸意外作說明[Walsileski 2005,2007]。聚苯乙烯的生產，基本上是利用苯乙烯單體聚合生產顆粒狀的聚苯乙烯固體（SPS），然後再含浸發泡劑異戊烷



(C₅H₁₂) 加工變成聚苯乙烯發泡體 (EPS) 。在考慮處理設備時，工廠方曾經考慮過以下幾種設備：直燃式焚化爐 (DFTO) 、複熱式焚化爐、蓄熱式焚化爐 (RTO) 、蓄熱式催化焚化爐 (RCO) ，最後考慮系統濃度變化快速的因素，接受廠商建議採用 RCO 處理。

該公司在進行設備設計階段，設計基準考慮了幾種可能的廢氣來源及操作情況，決定 RCO 的設計基準如表一所示。設計階段已經考慮了氣體的平均流量、最高流量、平均濃度及最高濃度，並根據這些基本資料，擬定 RCO 的設計基準。

表一、VOC 廢氣來源 [Walsileski 2007]

廢氣源	操作模式	平均流量 Nm ³ /hr	最高流量 Nm ³ /hr	平均濃度 (%i-C ₅)	最高濃度 (%i-C ₅)	其餘 成分
反應器排氣 X2	批次	93.5	115.6	6.7	8.0	氮氣
輸送機排氣	連續	1093	1130	0.33	0.56	空氣
包裝逸散排氣	連續	173	175	0.016	0.058	空氣
包裝尾氣	連續	1525	1650	0.18	0.32	空氣
RCO 原設計基準	連續	3150	3570	0.24	0.30	空氣
計算設計基準	連續	2885	3071	0.44	0.68	空氣

在這個案例中，兩股從反應器排出的氣體，含有較高濃度的 VOC 異戊烷 (C₅H₁₂) ，其他氣體是保護氣體不會發生爆炸用途的氮氣，該股氣體屬於高濃度 VOC 廢氣 (HVOC) ；另外有三股低濃度氣體，基本上是被 VOC 異戊烷 (C₅H₁₂) 污染的空氣，也就是低濃度 VOC 廢氣 (LVOC) 。

異戊烷 (C ₅ H ₁₂)
分子量： 72.2
沸點： 28 C
閃火點： -51 C
自燃溫度： 426 C
爆炸下限： 1.4%
爆炸上限： 7.6%

異戊烷的爆炸下限濃度為 1.4% ，爆炸上限濃度為 7.6% ，任何管線或設備，如果內部氣體濃度在此範圍，就必須非常小心。另外，應注意 HVOC 是小流量，雖然流量約占總流量的 3% ，其濃度已經超過異戊烷 (C₅H₁₂) 的爆炸下限 1.4% 。LVOC 則是高流量，基本上濃度都在爆炸下

限的 25%以下，氣體在管道內輸送是安全的。

根據以上的流量及濃度資料分析，設計工程師認為由於 HVOC 流量只有占 3%，如果設計一個混合槽，將 HVOC 及 LVOC 導入混合槽中混合，混合槽再加上氮氣排氣設計以確保安全，則混合槽出口的 VOC 濃度根據他的計算只有 0.24~0.3%，仍低於 LEL 的 25%也就是 0.37% (LEL=1.4%)，設計工程師認為這種設計根據 HSE 的準則是安全設計。因此，根據這種設計概念，這個聚苯乙烯工廠的 VOC 廢氣處理系統流程圖就設計成如圖-1 所示。

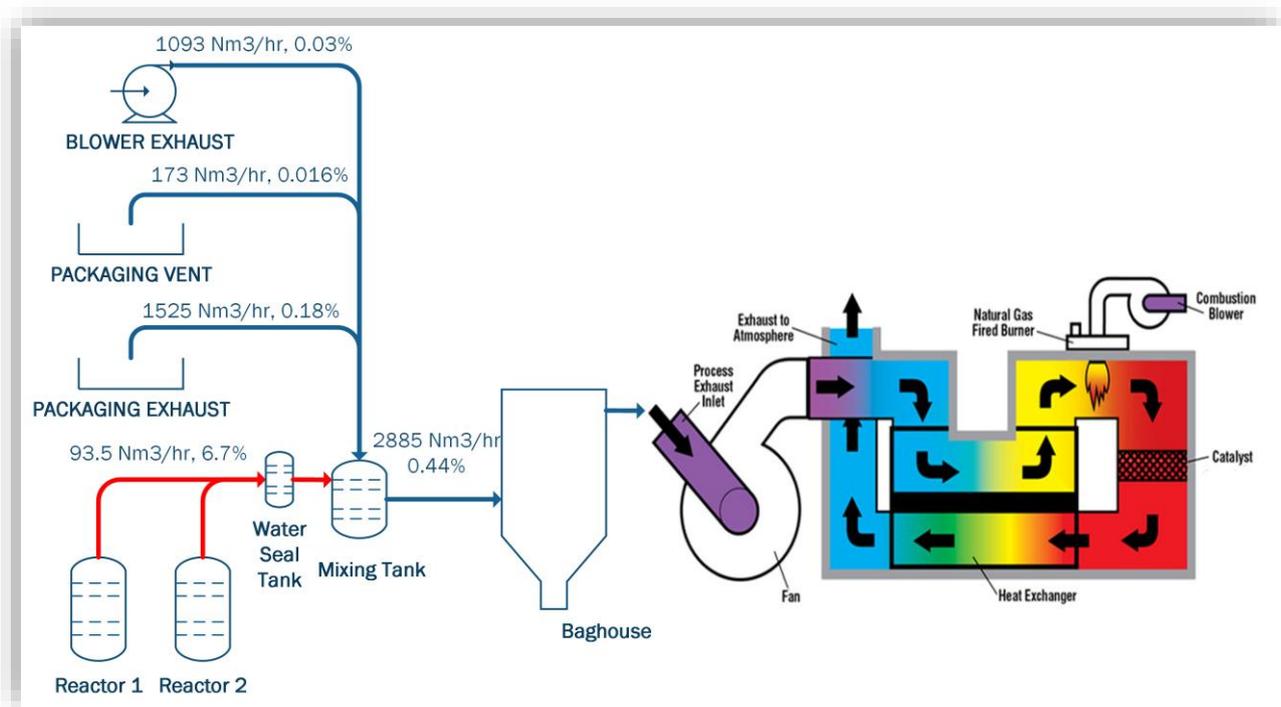


圖-1 聚苯乙烯廠的 VOC 處理系統

反應器 HVOC 排氣先經過一個水封槽，再送進混合槽，與包裝系統的逸散排氣及尾排氣、輸送機排氣等低濃度 LVOC 廢氣一起混合，混合後的 VOC 廢氣，再經過袋式集塵器將粒狀物過濾，然後送進 RCO 焚化處理。為了確保系統安全，設計工程師在袋式集塵器入口端及 RCO 出口端都裝置了 VOC 的 LEL% 偵測儀，設計概念是 VOC 濃度高於 LEL 的 25%，設計讓廢氣直接從誘引排風機出口，開啟旁通閥門直接排向煙囪，避免 RCO 回火造成風險。

而事實上，原設計工程師應該是設計計算錯誤，理論計算濃度已經達到 0.44%，最高濃度可達 0.68%，如表-1 的計算設計基準所示，混合 VOC 廢氣濃度已經高於 HSE 建議的低於 25%LEL 的設計建議。

根據原設計的概念，VOC 混合廢氣濃度與 LEL 及 UEL 的關係如圖-2 所示。LVOC 廢氣的濃度為 0.23%，此時沒有外加混合惰性氣體。HVOC 高濃度 VOC 廢氣的組成為 6.7% VOC，對應 93.3%氮氣。將這兩點連成一直線，就是 HVOC 與 LVOC 兩種氣體以各種不同流量比例混合的曲線。當 HVOC 及 LVOC 都以平均流量進入混合槽混合，其濃度為 0.44%，如圖中所示。

本個案在系統設計階段，對於混合物的混合曲線會通過爆炸範圍，曾引起計畫團隊的關切；但是設計團隊認為氣體在混合槽混合後，濃度會遠低於爆炸下限，而且在進入袋式集塵器前，氣體已經混合完成，且在該處沒有任何火源的存在，距離 RCO 也有相當距離，加上中間還有風車，因此，認為 RCO 的火焰不會穿過風車，將袋式集塵器前端混合槽內的氣體點燃，因此判斷不會有爆炸風險。

設備完成後，在試車階段，首先導入低濃度廢氣（LVOC），系統穩定操作，操作一段時間後，決定導入 HVOC，結果導入第一股 HVOC 時，燃燒室在 HVOC 開始導入後瞬間熄火，系統自動將 VOC 管道雙重閥門關閉。接著燃燒室內的可燃性氣體又自動點燃，並產



生燃爆跳車。燃燒室經過氣吹後，操作人員按 RESET，重新啟動燃燒機時發生爆炸，造成 RCO 設備毀損。

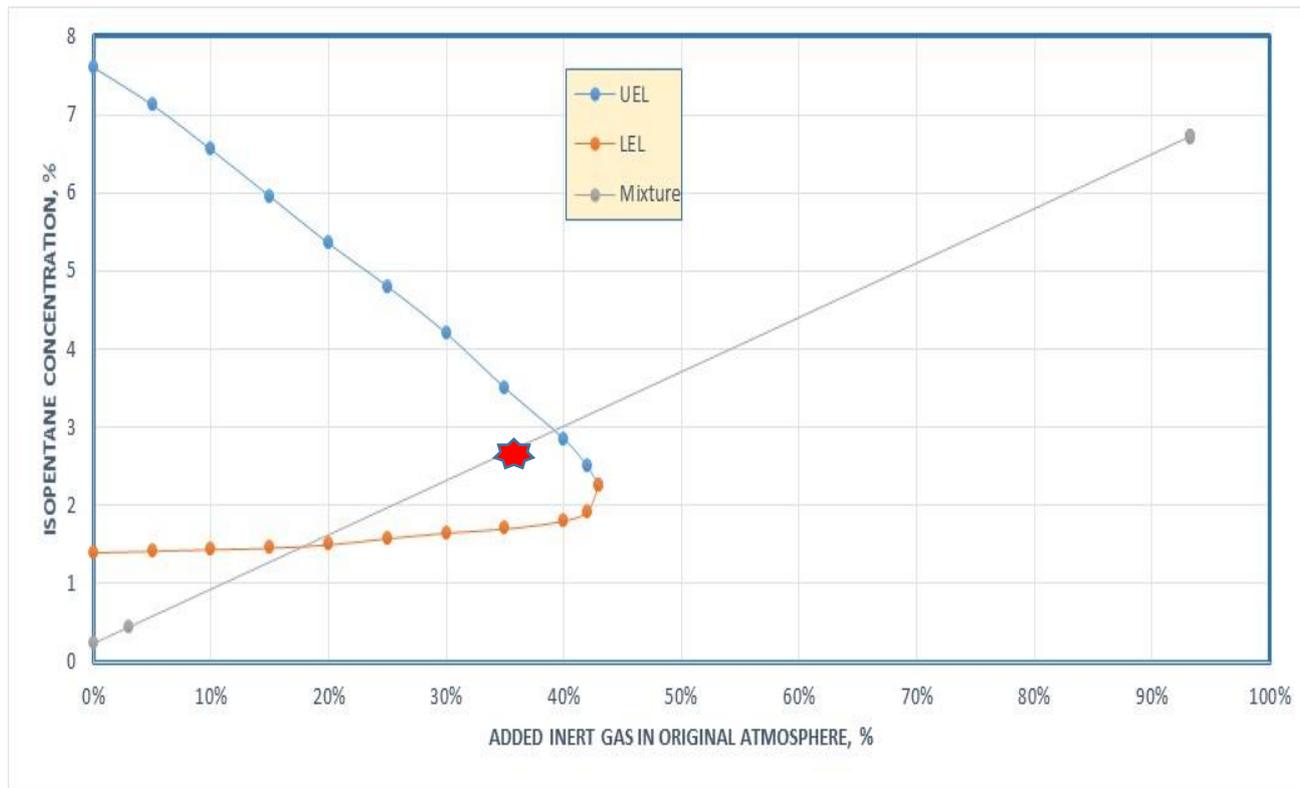


圖-2 VOC 廢氣混合曲線與爆炸極限的關係。

檢討這件事件，發現以下問題：

1. 設計基準的反應器排氣量及濃度，是前一段時間由顧問單位檢測的資料，報告的資料是平均值，而未反應瞬間流量的變化。
2. 當 HVOC 瞬間導入時，流量計曾顯示瞬間流量達到 1020 Nm³/hr，較原規劃的 93.5Nm³/hr 大了 10 倍以上，因此，當大量 HVOC 及氮氣進入 RCO，就使得 RCO 的燃燒室燃燒機空燃比瞬間受到影響而熄焰。接著可燃性氣體在燃燒室內又自動點燃，並產生燃爆跳車。整件事故從導入 HVOC 到發生爆燃，時間不到一分鐘。
3. 當燃燒室瞬間熄火後，混合槽上游端的 VOC 入口雙重閥門自動關閉，切斷 VOC 的導入，以保障前段制程的安全。但是這個動作也使得袋式集塵器在燃燒室接著發生爆燃時，瞬間超壓，使得袋式集塵器的爆裂片爆開，但是由於爆裂片未裝設任何檢測儀及

警告裝置，爆裂片爆開後控制室並無任何資訊。

4. 由於袋式集塵器爆裂片破裂，系統重新開機後，空氣由爆裂片位置被吸入，與 HVOC 混合，氧氣達到 13.5%，VOC 濃度約 2.7%，這股氣體一導入 RCO 就立即發生爆炸，造成 RCO 部分設備及蓄熱材料毀損。
5. VOC 的 LEL%線上偵測儀並沒有提供即時警告及控制作用，只有在爆炸發生後，發出 VOC 濃度超高的警報，但是為時已晚，爆炸已經發生。VOC 的 LEL%線上偵測儀顯示爆炸發生的濃度是在圖-2 中的紅星位置，表示是 VOC 氣體混合濃度變動產生的意外。

如果從 HAZOP 分析的觀念，圖-2 中的 VOC 廢氣混合曲線會經過爆炸範圍，就應該很仔細的檢討，有什麼條件會造成氣體濃度通過這個範圍？要如何防止這種情況的發生？系統在設計階段進行 HAZOP 分析，應該詳細考慮異常狀態、異常低流量、異常高流量、管道高溫、管道低溫等等狀態，系統有需要進行一序列的安全提升改進方案。

以本個案為例，設計上的風險有兩大項：(1) VOC 處理系統設計濃度太接近 LEL；(2) VOC 廢氣混合曲線通過爆炸範圍。這兩項都有很高的操作風險，以下狀況都需要加以檢討：

1. 當系統管線長期使用，產生冷凝液，遇到日曬升溫可能導致 VOC 揮發，VOC 的濃度可能升高，就可能會有回火或是爆炸風險。
2. 若前端化工制程系統如果發生濃度擾動，例如，反應器操作異常，導致 HVOC 排出濃度因故瞬間升高、或流量瞬間睜大，可能使得混合 VOC 排氣濃度高於 LEL，就有立即發生爆炸的危險。
3. 化工產業流量資料常常是平均值，但是瞬間流量及濃度變化常被忽略，一旦瞬間流量及濃度超過限制範圍，一導入燃燒設備，就有可能瞬間發生爆炸事件。

4. 若低濃度廢氣 LVOC 管道因排風機故障、部分生產線停工維護保養，都可能導致混合氣體濃度異常升高，造成爆炸風險。

本案例經過檢討發現在設計階段就埋下危險的引信，設計條件沒有考慮到瞬間流量及濃度變化，導致 HVOC 導入時，嚴重超載；加上系統發生第一次熄焰接著爆燃跳車，毀損了袋式集塵器的爆裂片，但是沒有人發現。接著，操作人員在發生爆燃意外後，認為沒有毀損，就直接按下 RESET，重新開機系統，導入 HVOC，終於導致發生爆炸意外。這是一連串的疏忽所造成，但是追根究底，也是設計者的嚴重疏忽。

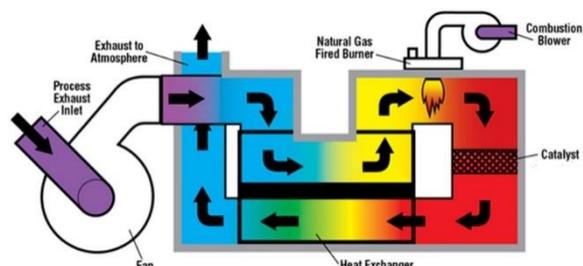
與這個案例類似的，許多爆炸意外案例顯示，在不同化工企業採用類似設計概念的系統，不論 RTC、RCO 都發生過大大小小的回火或爆炸意外。其共同點都是將 HVOC 稀釋，或利用 LVOC 與 HVOC 混合，企圖降低 VOC 濃度，通常都是在導入 HVOC 的瞬間發生爆炸意外。

此外，也有部分案例，LVOC 廢氣來源的前端制程是乾燥床，也發生過管道先回火，延燒到乾燥床，導致乾燥床瞬間著火，經過滅火後，由於乾燥床溫度太高，使得大量高濃度 VOC 經由管道流向處理設備，濃度超高有造成第二度的意外爆炸。

4 類似意外案例

案例 1- 丙烯酸樹脂(acrylic resin)製造廠的火災及爆炸意外，導致丙烯酸乙酯(ethyl acrylate) 貯存槽的毀損。

這家在英國的化工廠裝設了催化焚化爐 (Catalytic Thermal Oxidizer , CTO) 處理丙烯酸乙酯 (閃火點 16°C) 廢氣。CTO 正常操作狀況下，在催化劑床出口溫度約 350°C 至 500°C。系統設計當 CTO 出口溫度過高時，會發出警告並自動跳車。

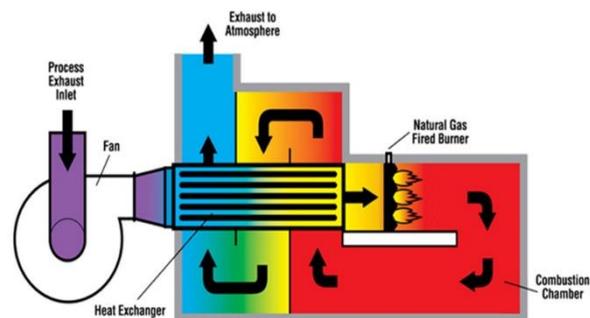


意外發生時，催化劑床出口溫度升高到 640°C。用於保護上游設備的火焰防阻器失效，導致火災及爆炸意外。這個意外主要發生原因是因為 VOC 濃度超過設計值，且系統火焰防阻器並非爆轟防護型設備，當系統超溫跳脫時，造成 VOC 回火，火焰防阻器無法承受 VOC 氣體連續流動並在火焰防阻器表面點燃，導致火焰防阻器被燒穿，引起 VOC 廢氣回火，導致丙烯酸乙酯貯存槽的毀損。

爆炸的原因經過檢討，發現系統設計者的許多異常缺失：（1）CTO 設計不當，無法有效控制系統溫度；（2）火焰防阻器設計及選用不當。

案例 2. 一家清洗油回收廠的 VOC 焚化爐產生連續兩起火災及爆炸意外。

這是一家提供工業界及汽車工業清洗油回收的資源回收再生廠，使用熱交換型廢氣焚化爐（Recuperative Thermal Oxidizer，TO）處理資源回收廠產生的油煙 VOC 廢氣。



意外首先在 TO 爐發生爆炸，然後，接著在其上游產生油氣 VOC 的制程發生爆炸。

油煙 VOC 廢氣一股導入 TO 爐，一股當 TO 爐發生異常狀況時排到 TO 爐的煙囪。導入 TO 爐的管道裝了火焰防阻器，但是緊急排放管道沒有裝火焰防阻器。意外發生時由於上游處理系統溫度失控，導致油氣濃度突升，造成 TO 爐熄火，接著油氣濃度回到爆炸濃度範圍，使得 TO 爐發生膛炸毀損。TO 爐爆炸瞬間，由於緊急排放管道沒有裝火焰防阻器，導致火焰回朔，接著使得上游處理系統發生爆炸。

爆炸的原因經過檢討，發現系統設計者的許多異常缺失：

（1）對 TO 爐的燃燒控制及爆炸風險缺乏認知與知識，

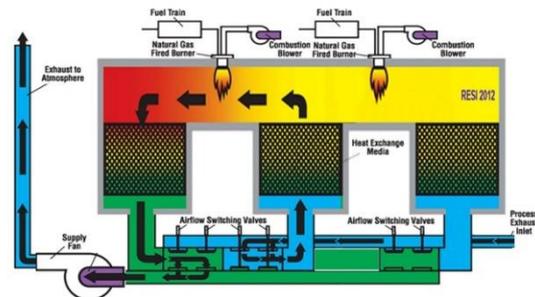
(2) 油品處理及貯存區缺乏良好的溫度控制，

(3) TO 爐設計不當，及

(4) 火焰防阻器設置不當。

案例 3 – 飲料工廠的三床式 RTO 發生一連串爆炸。

一家飲料工廠的鋁罐製造廠利用一套大型的三床式 RTO (大約 21m x 5m x 9m 高)處理鋁罐印刷、乾燥用的乾燥爐所產生的碳氫化合物揮發性有機氣體。



在 VOC 管道有裝設多組 VOC 偵測儀，當 VOC 濃度高於 LEL 的 20%以上，會發出警告，並將 VOC 廢氣緊急排放到緊貼著 RTO 入口端的緊急排放口。VOC 偵測系統也會在 VOC 濃度達到 LEL 的 40%以上，自動停止上游端噴漆乾燥爐的操作。

意外發生時，首先在 RTO 底部沉積的溶劑被點燃，火焰緩慢往上游蔓延，接著在 VOC 管道發生小火災，經年累月累積在煙道的殘留有機樹脂廢棄物被點燃，快速產生危險的高濃度 VOC 氣體。氣體在 VOC 偵測儀發出警告前，快速到達 RTO，瞬間引起 RTO 發生爆炸。在 RTO 發生爆炸瞬間，裝設在 RTO 入口端煙道上的爆裂片雖然有爆開，但是爆裂片的設計並不恰當，無法卸載系統發生爆炸產生的壓力，導致 RTO 毀損。接著，煙道安裝的自動滅火系統才作動，將火焰熄滅。

檢討這件意外，發現如果 (1) RTO 入口有裝設火焰防阻器，就不會發生煙道回火；(2) 若煙道的自動滅火系統設有溫度檢測，自動啟動滅火系統，意外也可避免。

案例 4 – 處理氫氣、氨氣及吡啶廢氣的 RTO 爐發生爆炸。

一家化工廠的廢氣含有氫氣、氨氣及吡啶廢氣，採用 RTO 廢氣焚化爐處理；RTO 焚化爐



使用丙烷當輔助燃料。在 RTO 焚化爐底部有一套濕式洗滌塔。VOC 廢氣先經過洗滌塔洗滌，然後進入 RTO 爐焚化。由於洗滌塔長期操作，氨水及吡啶濃度逐漸升高。

爆炸事件發生前，RTO 爐底部沉積的吡啶(沸點 115.2 C，爆炸範圍 1.8%–12.4%)先被點燃，火焰蔓延到洗滌塔，接著洗滌塔內的 VOC 被點燃，氨氣及吡啶快速釋出，高濃 VOC 氣體沖至 RTO 底部，瞬間產生爆炸。

檢討這件意外，發現系統風險操作評估 (HAZOP) 需要重新來過；不僅 RTO、上游的洗滌塔、管道、制程，都應該納入 HAZOP 檢討。

5. 預防廢氣處理系統爆炸的安全對策措施

直接燃燒法 (DFTO)、催化燃燒法 (RCO)、蓄熱式熱氧化爐 (RTO) 設備本身，通常設有燃燒機，在點火或導入高濃度 VOC 廢氣時，如果違反操作規程或設計不當，就有可能發生熄火、回火、燃爆等意外。冷凝回收法、化學吸收法、吸附法 (直接吸附法、吸附-回收法) 等廢氣處理設施本身不帶火源，一般不會產生爆炸。

由於化工廠的 VOC 廢氣排放，常需面對流量快速變化、濃度快速變化的操作情況，設備設計階段所得到的設計資料，必須很嚴謹的檢討，瞭解瞬間流量、意外狀況應對等設計工況，妥善預作因應。本案例的意外事件，建議化工企業在進行 VOC 廢氣處理系統規劃時，宜考慮以下事項：

1)、 對於 VOC 廢氣處理設備的規劃，要妥善考慮各種可能工況。

- (1). 化工企業不僅要關注正常狀況下，各廢氣吸入點吸入的廢氣濃度；更要關注非正常狀態下，各廢氣吸入點吸入的廢氣濃度，例如要考慮反應器沖料、安全泄放等高濃度有機氣體，常常高於爆炸下限，切不可直接排入只適用於低濃度有機廢氣

處理系統，以防廢氣管道系統和處理設施發生爆炸事故。由於廢氣管道連接許多設備和車間，廢氣處理系統的爆炸事故，嚴重時會引起其他設備或車間的連鎖反應。

- (2) . 對有可能產生沖料和反應失控的反應器，企業應預先研究採取安全排放的措施，首先應採取溫度和壓力的檢測報警或連鎖等安全自動化手段，防止沖料和反應失控現象的發生；其次應設計安全泄料設施，以滿足萬一發生沖料事故或反應失控安全泄放系統動作，大量有機體氣體的安全泄放和處理。
- (3) . 在廢氣處理系統設計前，要對各廢氣吸入點的可燃物濃度進行檢測分析，控制各廢氣吸入點的易燃物質的濃度，並要進行正常工作狀態或非正常工作狀態下的可燃氣體濃度檢測。確實做好高低濃度廢氣分流處理。當某廢氣吸入點各種工況可能吸入的可燃物濃度超過安全濃度時，要改變制程工藝或設備，如進行惰性化處理等。
- (4) . 反應釜應盡可能採用密閉式，避免有空氣（氧氣）進入反應釜和廢氣管道，降低高濃度廢氣中氧氣含量，當然能惰性化（如充氮）更好。
- (5) . 對各車間內產生的廢氣進行分析，存在禁忌物質的廢氣應分開處理。

2) 、 低濃度 VOC 廢氣使用熱處理設施，應嚴格限制入口濃度。[EN-12753:2005]

低濃度 VOC 廢氣經過預熱進入熱處理設施，其濃度應加以限制，以防濃度超過 LEL 的限值。為了避免 VOC 廢氣濃度超過 LEL 限值，應遵守以下限制：

- (a) 如果芳香族碳氫化合物的總質量小於所有可燃性物質總質量的 25%以下，不論預熱溫度為任何溫度，可燃性物質的總濃度不得高於 LEL（20 C, 1 kg/cm² A）的 25%以上。
- (b) 如果芳香族碳氫化合物的總質量大於所有可燃性物質總質量的 25%以上，不論預熱

溫度為任何溫度，可燃性物質的總濃度不得高於 LEL (20 C, 1 kg/cm² A) 的 20% 以上。

- (c) 不論芳香族碳氫化合物的總質量高低，如果預熱溫度超過 450 C，可燃性物質的總濃度不得高於 LEL (依熱交換器最高溫度及壓力計算) 的 50% 以上。

表-2 EN-12753 建議的 VOC 廢氣濃度限值

	預熱器最高溫度	芳香族碳氫化合物 質量分率	可容許濃度 以%LEL 表示	參考溫度
(a)	無關	< 25%	25%	20 C
(b)	無關	>25%	20%	20 C
©	450 C	無限制	50%	熱交換器溫度

3)、採用高溫熱處理的 VOC 廢氣處理設備必須保持母火常燃。

各種有機廢氣成分的自燃溫度不盡相同，加上化工廠 VOC 廢氣常帶有大量氮氣、濃度變化快速、流量變化快速，稍有不慎就可能發生熄火、瞬間燃爆的意外狀況，解決這種困難最簡單的方法就是在燃燒室永遠保留至少有一組母火是常保點燃狀況，以避免發生瞬間燃爆意外。一般燃燒機的母火都是用很小的天然氣流量，維持母火並不會對系統造成很大的負擔。部分燃燒機是在主火焰點燃後，立即關閉母火；這時可以在主火焰回路加上一個小口徑的 mini-Flow, 仍接受 UV 火焰偵測的安全管制與連鎖，確保系統操作安全。

4)、VOC 處理設備應考慮爆炸防護設計

如果為了防範設備針對 VOC 廢氣濃度限制的防護不足導致發生爆炸事件，可以作以下保護措施，以降低爆炸產生的破壞效應[EN 1127-1, 2007]：

(a) 抗爆炸結構設計

(b) 洩壓設計



(c) 爆炸抑制系統

(d) 預防火焰及爆炸波的蔓延

5)、 **高濃度 VOC 廢氣的適當處理對策：**

(1) . 什麼是高濃度 VOC 廢氣？

高濃度 VOC 廢氣是指廢氣中的揮發性有機化合物的濃度，在任何情況下只要有機會高於爆炸下限 LEL 的 25%以上者，就歸類為高濃度 VOC 廢氣，以確保處理設備的安全。

由於 VOC 廢氣通常為混合物，因此，在評估 VOC 廢氣濃度時，除了要考慮單一成分的爆炸下限，還要考慮氣體混合物的爆炸下限；只要任何一項成分或混合成分的濃度超過表-2 的 EN-12753 限制以上，就應該歸類為高濃度 VOC 廢氣。

(2) . 高濃度 VOC 廢氣可以作適當預處理或回收。

高濃度 VOC 廢氣可以使用加壓、冷卻或冷凍的方法先作有機物冷凝回收，高濃度 VOC 廢氣也可以使用吸附/脫附法先作預處理，將有機物分離、回收。採用金屬換熱器械（如板式冷凝器、殼管式熱交換器）或活性炭、矽藻土纖維吸附回收裝置，使其中的有機氣體安全地冷卻成液體回流或收集到適當容器，確保進入廢氣收集系統的廢氣濃度降低到安全濃度。[張， 2017]

(3) . 高濃度 VOC 廢氣建議不宜加空氣稀釋或與低濃度 VOC 廢氣混合稀釋[張, 2012]：

- a. 如果採用加空氣稀釋，當空氣供應系統設備異常、閥門誤關、流量調節閥故障或風車故障情況下，混合氣體濃度就有可能瞬間升高進入爆炸濃度範圍的風險。
- b. 如果採用高濃度 VOC 廢氣與低濃度 VOC 廢氣混合稀釋的方法，就需要考慮當低

濃度 VOC 廢氣減量、風車停車、控制閥門故障、閥門誤關、低濃度廢氣來源端停車維修沒有產生廢氣等情況，混合氣體濃度就有可能瞬間升高進入爆炸濃度範圍的風險。

- c. 建議在規劃高濃度 VOC 廢氣處理設施時，不宜考慮採用加空氣稀釋或與低濃度 VOC 廢氣混合稀釋的方案。高濃度 VOC 廢氣與低濃度 VOC 廢氣可以使用同一設備處理，但應該將高濃度 VOC 廢氣與低濃度 VOC 廢氣分流處理。

(4). 高濃度 VOC 廢氣必須有適當措施避免回火發生燃爆意外。

高濃度 VOC 廢氣管道必須有超高壓警告、超低壓警告、水封設備 (如圖-3 所示) 及火焰防阻組件 (如圖-4 所示)，以避免發生燃爆意外。

水封設備必須考慮如何減小

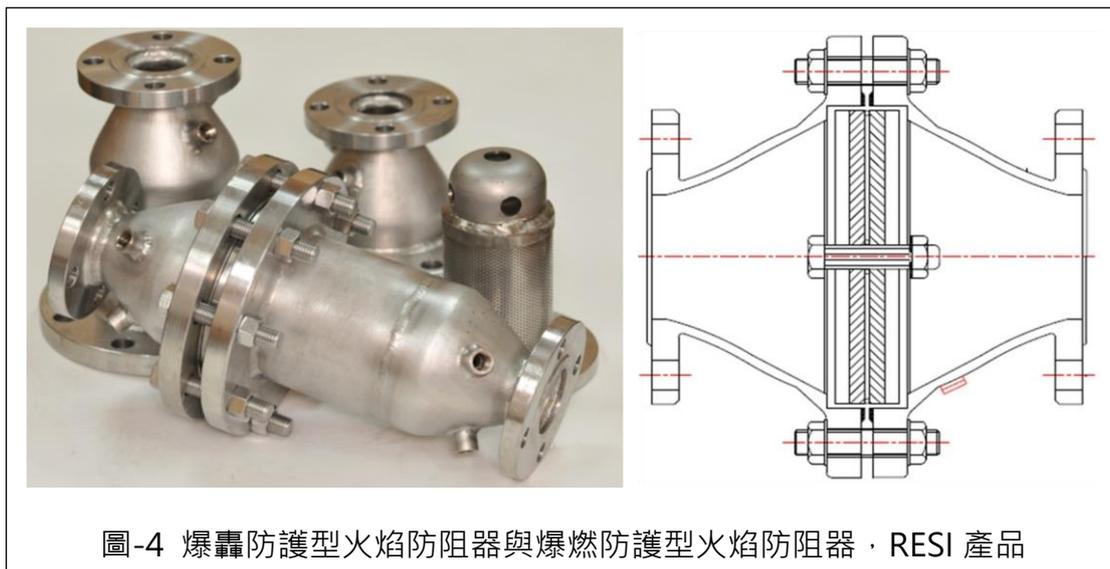


圖-3 安全防爆水封槽 (RESI 產品)

VOC 廢氣的氣泡直徑、有效分散氣泡以防止火焰的蔓延。火焰防阻器則要考慮各成分氣體的最大安全間隙 (MESH)，妥善選用適當的阻火組件；一般而言，火焰防阻器應該儘量靠近氣體點火源安裝，例如，緊貼著 RTO/RCO 安裝。如果阻火元件與氣體點火源的距離超過 10 倍管徑 (10D)、或中間有彎管 (Elbow)、三通 (Tee)、閥門、異徑管件等，就必須使用爆轟防護型火焰防阻器。

此外，高濃度 VOC 廢氣管道來源端壓力超高，會使得過量的 VOC 導入系統，造成燃燒系統超溫失控；高濃度 VOC 廢氣管道壓力超低，則有火焰回火的風險；

因此，VOC 廢氣管道應該裝設 PSH 及 PSL 壓力開關監控，並設置安全連鎖，當 PSH 或 PSL 壓力開關作動時，自動切斷 VOC 來源，並切換到旁通回路以保安全。



(5) . 高濃度 VOC 廢氣必須與低濃度 VOC 廢氣分流處理。

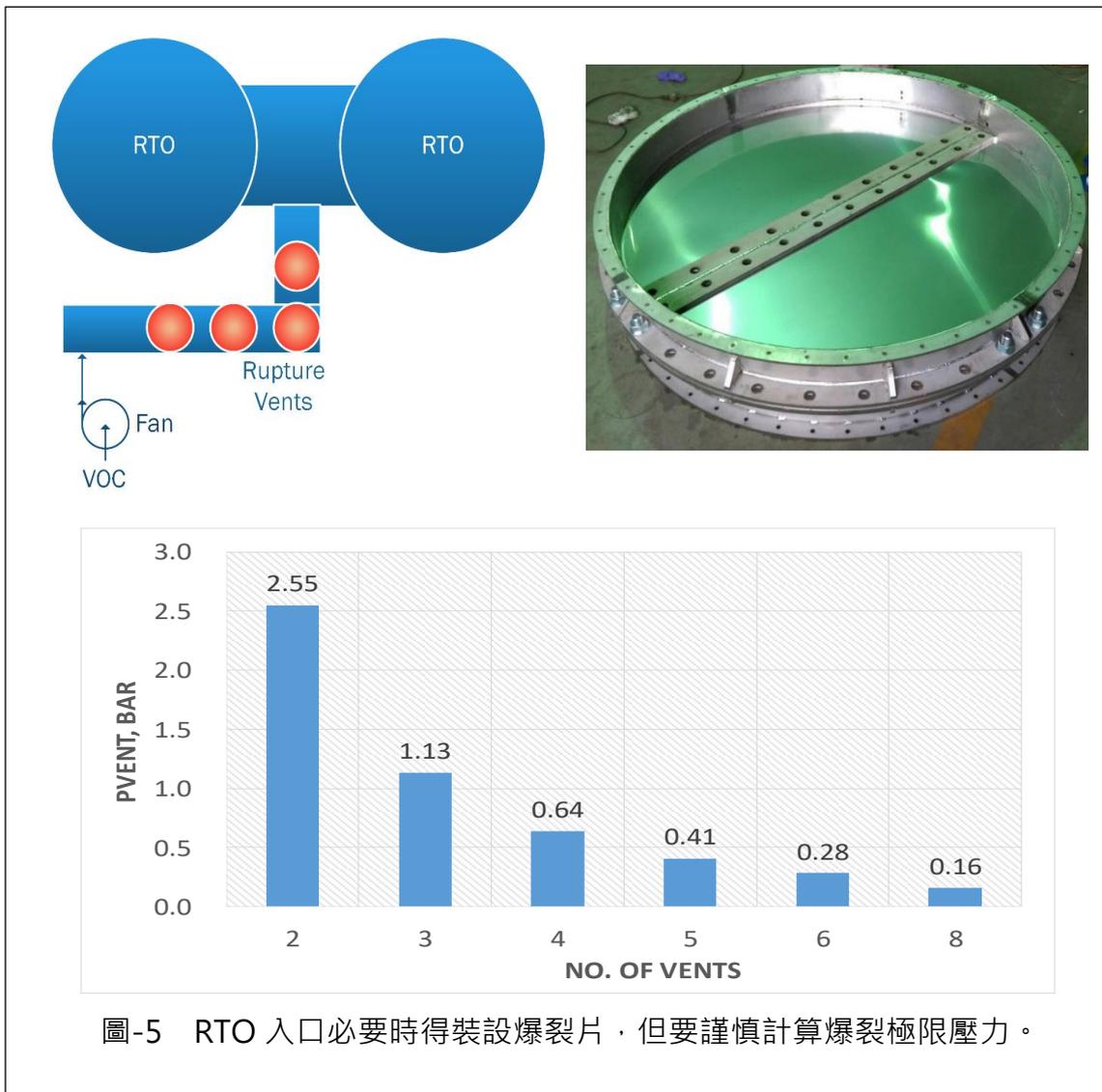
高濃度 VOC 廢氣絕對禁止與低濃度 VOC 廢氣混合處理，以避免爆炸意外的發生。

廢氣混合最大風險是前端制程區任何操作擾動，都有可能使得混合氣體濃度進入爆炸濃度範圍，造成爆炸意外。

如果化工企業的制程同時含有高濃度 VOC 廢氣與低濃度 VOC 廢氣的排出，建議可以妥善規劃收集管線，將高濃度 VOC 廢氣與低濃度 VOC 廢氣分流收集，並採用以下方案處理 [張, 2012]：

- a. 低濃度 VOC 廢氣採用 RTO/RCO 處理；高濃度 VOC 廢氣採用獨立的 DFTO 處理。其優點是系統獨立，安全性高；但缺點是能源消耗高。
- b. 低濃度 VOC 廢氣採用 RTO/RCO 處理；高濃度 VOC 廢氣採用高溫脈衝波反應器 (PDR) 處理後，併入 RTO/RCO 的燃燒室；再利用內置廢熱回收鍋爐

回收能源產生蒸汽。其優點是能源效率高、高低濃度 VOC 分流處理安全性高。



6)、 低濃度 VOC 廢氣的適當處理對策：

(1). 低濃度 VOC 廢氣管道，宜設置火焰防阻器或加裝適當的壓力爆裂片：

低濃度 VOC 廢氣管道在長時間操作後，管壁常會發生冷凝情況，在 RTO/RCO 等燃燒處理系統實際使用經驗，常會發生回火意外。積極的作法是在低濃度 VOC 接入 RTO/RCO/DFTO 等焚化燃燒設備處，裝設火焰防阻器，徹底杜絕火源，避免產

生回火風險。豐映科技公司於 2013 年接受經濟部補助，已經開發完成 RTO/RCO 專用的大型低風阻火焰防阻器，目前已經在產業界實際使用。

(2) . 如果 RTO/RCO 等高溫設備無法裝設火焰防阻器，為了避免系統發生回火引燃時，氣體流量會突增，使得壓力驟升造成設備損壞，建議宜設置適當的壓力爆裂片，以保護系統設備及操作人員的安全。設置壓力爆裂片時，應妥善計算發生燃爆使得壓力爆裂片發生爆裂的極限壓力，確認設備及管線可以承受這個極限壓力的衝擊，才能確保設備的安全。圖-5 為一個 RTO 設備裝設爆裂片的案例，設計過程必須作數量與承受壓力的考慮計算。

(3) . 低濃度 VOC 廢氣吸入點建議以爆炸下限 25%(v/v)為濃度設防值

廢氣處理系統爆炸的根本原因是廢氣中可燃氣體的濃度處於爆炸極限範圍內，同時存在氧氣及點火源，才會產生爆炸。因此，防止廢氣處理系統爆炸的主要措施，是要控制各廢氣吸入點吸入的各有機氣體濃度小於爆炸下限，建議依據表-2 所列的 EN-12753 的規定濃度限值(在此稱之為安全濃度)。以蓄熱式熱氧化爐 (RTO) 及蓄熱室催化氧化爐 (RCO) 為例，仔細閱讀其使用說明中，設備生產廠家均提到只適用於大風量、低濃度的 VOC 廢氣處理。

(4) . 低濃度 VOC 廢氣管道必要時應加裝爆裂片，保護系統設備。

低濃度 VOC 廢氣管道在接近有火源設備附近，建議可以考慮設泄爆板，以減少爆炸氣體大量回沖反應釜或制程設備，產生連鎖反應。

7)、 VOC 廢氣管道安全設計要點：

(1) . 與 VOC 來源的管道必須設有閘門，以便非使用情況可以切斷連接。

(2) . 如果有多組 VOC 廢氣管道銜接，匯合進入熱處理設施前，其濃度必須符合如表

-2 所示 EN-12753 的濃度限值。

- (3) . VOC 廢氣管道設計應避免產生冷凝及粒狀物堆積。
- a. 管道的設計與建造應設法避免產生冷凝及粒狀物堆積。如果粉體堆積是無法避免，則管道應設計成易於檢查及清理。粉體容易堆積的因素包括廢氣管道管徑及方向突然改變的地方，也容易受到管道長度及流速的影響。管道易於檢查及清理的設計方式，可以採用設置維修口、設置管道快拆組件等方式。
 - b. 在正常操作狀態下，除了系統啟動初期外，廢氣管道及熱交換器的溫度，必須高於流通氣體的露點。必要時，應該要做保溫處理。
 - c. 產生 VOC 廢氣的系統停車後，熱處理設施及相連接的煙道必須進行氣吹，以確保殘留的可燃性物質被徹底排出。通常，至少要氣吹排氣五倍以上體積的氣體，且氣吹的空氣流速最少要為系統設計流量的 25%以上。
- (4) . 一定要確保在 VOC 廢氣管道設計、安裝時須應考慮有一定的斜度，方便積液的收集與排除，避免積液積聚過多而導致廢氣管變形和殘留的混合物過多，引起二次爆炸；並對廢氣總管內的積液進行定時排液。
- (5) . 在各車間廢氣支管與總管連接處加裝阻火器，以防事故狀態下的火災蔓延。如經濟實力許可，廢氣管道應優先採用不銹鋼材料，以便更好地消除廢氣管道的靜電。

表-3 煙道設計最高流速

氣體	位置	最高流速	備註
高濃度 VOC 廢氣	管道	15 m/s	需設有傾斜度、廢液收集緩衝槽、廢液收集系統
低濃度 VOC 廢氣	管道	15 m/s	需設有傾斜度、廢液收集管、清理口
廢排氣	管道、煙囪	20 m/s	排風機出入口
廢排氣	煙囪出口	30 m/s	提高 Gas Plume 上升高度

- (6) . 當廢氣管道內可能沉積危險物質時（如活性碳、迭氮化合物等）時應考慮對廢氣管道進行定期清洗。廢氣管道內的氣體流速設計最高以 15 m/s 為宜。煙囪內流速設計以最高 20 m/s 為宜；煙囪出口流速最高以 30 m/s 為宜。

(7) . VOC 廢氣管道連接法蘭，應設跨接電纜，避免因電位差產生火花造成風險。

8) 、 VOC 廢氣誘引排風機設計，要提供足量供應。

為了避免系統排氣分量不足，導致進入熱處理設施的 VOC 濃度超過表-2 所示 EN-12753 的濃度限制，VOC 廢氣誘引排風機設計應遵循以下設計要點：

- (1) 在熱處理設備點火前，應先進行氣吹，以確保可燃性氣體濃度低於 LEL 的 25% 以下。(NFPA-86)

通常，至少要氣吹排氣五倍以上體積的氣體，且氣吹的空氣流速最少要為系統設計流量的 25% 以上(EN-12753)。氣吹時間最少要七分鐘以上 (NFPA)。

- (2) 強制送風系統需能對熱處理系統及連接管道的每一個部分進行氣吹，以避免任何可能的有機物濃度超限。與 VOC 來源的管道必須設有閘門，以便非使用情況可以切斷連接。
- (3) 熱處理設施需設有流量監測及控制設備，並設有安全連鎖，以確保系統調節維持熱處理設施高於安全要求的最小流量以上操作。
- (4) 如果使用變頻控制風車，變頻器的最低操作頻率應與最小安全流量安全連鎖。
- (5) 如果使用誘引排風機，要考慮熱處理系統排放溫度升高時，誘引排風機須有足夠容量排出。亦即，誘引排風機設計溫度要以容許系統操作的最高排放溫度設計。

9)、 要避免 RCO 的觸媒吸附 VOC 的可燃性物質。

使用催化燃燒系統的 VOC 廢氣處理設備，應具有以下措施防止 RCO 的觸媒吸附 VOC 的可燃性物質：

- (a) VOC 廢氣進入 RCO 的催化劑區應設定最低溫度並作監測。若溫度低於設定值，應自動切斷 VOC 氣體供應。
- (b) 在 RCO 升溫階段導入系統的氣體，不容許有可燃性氣體。
- (c) RCO 觸媒會隨著時間、硫化物及粒狀物堆積而劣化，應定期檢測其催化性能，並調節最適合的催化反應溫度。

10)、 VOC 廢氣處理設備必須採用防爆設計。

VOC 廢氣處理設備由於涉及爆炸性氣體的存在，因此，在規劃 VOC 廢氣處理設備時，首先應該畫出設備配置圖，並根據 VOC 廢氣或有機化合物可能出現的機會，依照 IEC60079 規範規劃出防爆區隔。並依照 IEC60079 規範選用適當的防爆電器、儀錶。

表-4 歐盟氣體分類標準 *European Standard Gas Groups (I 礦坑使用，II 工廠使用)*

氣體分組	MESG (mm)	測試氣體	測試氣體濃度 (% v/v in Air)	典型的氣體
IIA	>0.90	Propane	4.2	Methane, alkanes, alcohols, acetone, benzene
IIB3	>0.65	Ethylene	6.5	Ethylene, ethylene ether
IIB	>0.50	Hydrogen	45.0	Ethylene oxide, Butadiene
IIC	<0.50	Hydrogen	28.5	Hydrogen

VOC 氣體和蒸氣的可燃性以及爆炸性各有不同。特定氣體組成與空氣混合產生爆炸的相對嚴重程度，可以利用多種氣體的特性表示，包含：爆炸的上限及下限(LEL/UEL)、自燃溫度(AIT)、最小引火能量(MIE)、最低需氧濃度(LOC)以及最大試驗安全間隙(MESG)。為了便於評估，純氣體可依其反應的相似性分組。依資訊來源不同有幾種分組方式，其中以表-4 和表-5 所示兩種分類最廣泛使用。在這些分類表中，氣體組別是由 MESG 值的範圍來區分，表中所列典型的測試氣體可供火焰防阻器之類別測試及選用。

表-5 美國氣體分類標準 *US Equivalent Gas Groups*

氣體分組	MESG (mm)	典型的氣體
D	>0.75	Methane, alkanes, alcohols, acetone, benzene
C	>0.45	Ethylene, ethylene oxide
B	<0.45	Hydrogen
A	-	Acetylene

防爆電器防爆區域劃分

VOC 廢氣處理設備由於涉及爆炸性氣體的存在，因此，宜就爆炸性氣體出現的機會將設備區作適當的防爆區隔，並依照 IEC60079 規範選用適當的防爆電器、儀錶。依據 IEC60079 的規範，爆炸性氣體環境分為 3 個危險區：

- (1) 0 區：連續出現或長期出現爆炸性氣體混合物的環境；如處理容器的內部，與大氣相通的儲罐，在儲油(液)槽中油(液)上方的蒸氣空間和低於水平面的空間。
- (2) 1 區：在正常運行時可能出現爆炸性氣體混合物的環境；如設備正常運行時，會釋放易燃物質的泵、壓縮機和閥門的密封件處；正常操作時會向大氣釋放物質的取樣點。
- (3) 2 區：在正常運行時可能出現爆炸性氣體混合物的環境，或即使出現也僅是短時存在的爆炸性氣體混合物的環境。如法蘭、管接頭、連接件；在正常運行時不可能出現釋放的泵、壓縮機和閥門的密封件處、安全閥、排氣孔。

另外，按英國專家 R. H.卡恩迪根據出現爆炸性氣體混合物持續時間的概念論述：0 區：每年至少出現 1000 小時；1 區：每年在 10—1000 小時；2 區：每年在 10 小時以下。

防爆電器應按照防爆區域的劃分選擇

防爆區域分為 0 區、1 區、2 區，對應於三個危險區域應選擇不同的防爆產品，按 IEC60079-1996 爆炸性氣體環境用電氣設備 第 14 部分：危險場所電氣安裝（煤礦除外）中的規定，不分防爆燈具、電器和管件，因他們的防爆結構和原理是一樣的；各防爆區的電器選用原則如表-6 所示。

防爆標誌的含義

Ex e II T4-----“Ex”表示防爆總標誌；“e”表示增安型；“II”表示工廠用，“T4”表示溫度組別。適用於 A、B、C、三類氣體。

Ex de IIB T4--- “Ex”表示防爆總標誌；“de”表示主腔為隔爆型，接線腔為增安型，總體為複合型防爆結構；“II”表示工廠用；“B”表示使用環境中的易燃易爆的氣體為 B 類氣體；“T4”表示溫度組別。

表-6 各防爆區的電器選用原則

防爆區域	防爆電器要求	選用電器
0 區用防爆設備	電器設備和電路符合 IEC60079-11——本質安全型“i”要求	EX i
1 區用防爆設備	電器設備符合用於 0 區要求或下列防爆型式的一種或多種要求： 隔爆外殼“d”符合 IEC60079-1 要求 增安型“e”符合 IEC60079-7 要求 本安型“i”符合 IEC60079-11 要求 正壓型 p，充砂型 q，油浸型 o，澆封型 m	Ex d,e,l,p,q,o,m
2 區用防爆設備	0 區或 1 區用電器設備或“n”設備或特殊“s”設備	Ex d,e,l,p,q,o,m,n,s

表-7 電氣設備選擇

級別	最大試驗安全間隙 MESG (mm)	最小點燃電流比 MICR
IIA	MESG≥0.9	MICR > 0.8
IIB	0.9 > MESG > 0.5	0.8≥MICR≥0.45
IIC	0.5≥MESG	0.45 > MICR

表-8 電器設備溫度分組

溫度組別	自燃溫度 T(°C)	設備允許表面最高溫度(°C)
T1	$T \geq 450$	450
T2	$450 > T \geq 300$	300
T3	$300 > T \geq 200$	200
T4	$200 > T \geq 135$	135
T5	$135 > T \geq 100$	100
T6	$100 > T \geq 85$	85

對應使用電器設備環境級別，如表-7 所示。電器設備應按其最高表面溫度不超過可能出現的任何氣體或蒸氣的引燃溫度選型，如表-8 所示。

11)、VOC 廢氣處理設備安全檢核。

VOC 廢氣處理設備製造完成後，建議進行安全查核，以確保設備安全性。表-9 為豐映科技公司使用的安全檢核表供參考。

6 結論

- 1)、RTO 蓄熱式焚燒爐、RCO 蓄熱室催化焚化爐是明火設備，只要作好安全連鎖，常態性保持母火點燃狀態，設備本身一般不會產生爆炸事故。
- 2)、廢氣處理系統產生爆炸（廢氣管道爆炸、RTO 蓄熱式焚化爐或催化氧化裝置爆炸），其本質原因是其中的有機廢氣濃度高於爆炸下限，並存在靜電、高熱或明火等點火源所造成，因此，嚴格遵守 RTO/RCO 入口氣體高濃度 VOC 廢氣與低濃度 VOC 廢氣分流，絕對不作混合稀釋及/或加空氣稀釋，且確保低濃度 VOC 廢氣的入口濃度低於 25%LEL 的極限安全濃度，就能確保系統安全。
- 3)、企業在重視 RTO 蓄熱式熱力焚燒爐等廢氣處理設備安全自動化功能（有機廢氣的濃



度檢測和連鎖)的同時,更應重視各廢氣吸入點有機廢氣濃度的檢測和預處理,並考慮事故狀態下的緊急排放和處理,確保整個廢氣處理系統所有廢氣吸入點吸入的有機廢氣濃度處於安全濃度以下,從源頭上消除廢氣處理系統發生爆炸。

- 4)、環保部門在推廣 RTO 等廢氣處理技術時,應要求企業對廢氣收集系統進行安全性分析,才能確保廢氣收集管道系統及處理設備不會產生爆炸事故。

參考文獻

1. Essa, M Iqbal, and Tony Enn, "THERMAL OXIDISER FIRE & EXPLOSION HAZARDS", SYMPOSIUM SERIES No. 148, pp. 703-716, IChemE, UK., 2001.
2. Newsholm, Gordon, "THE SAFE USE OF THERMAL OXIDISER (INCINERATION) SYSTEMS FOR POTENTIALLY FLAMMABLE MIXTURES" HSE · October 2004 .
3. Walsileski, Robert F., "The Role of Basic Design Data in Preventing Explosions with Fired Equipment – A Case Study", 55th Canadian Chemical Engineering Conference, 2005.
4. 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.
5. Ennis, Tony, "Collect and Destroy Emissions Safely", Chemical Engineering Progress, 100(5), pp. 22-27, May 2004.
6. Windhorst, Jan, "Fired Equipment", NOVA Chemicals Loss Prevention Standard 6.9, Rev. No. 3A, December 2004.
7. British Standards · "Explosive atmospheres — Explosion prevention and protection — Part 1: Basic concepts and methodology", BS EN-1127-1:2007.
8. British Standards · "Thermal cleaning systems for exhaust gas from surface treatment equipment — Safety requirements" · BS EN 12753:2005
9. 王新民等人, "化工企業廢氣處理系統爆炸分析及預防措施", 寧波化工 · No. 1, p. 40-43, 2014.



10. 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”，中華民國發明專利，I448657，4/24/2012 申請。
11. 張榮興，“一種連續化學反應方法及應用該方法的爆轟反應器”，中國發明專利，201210143533.6 號, 2012。
12. 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.
13. 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.
14. 張榮興，“VOC 廢氣處理技術與最佳技術選用”， AIT Report 20170302，2017
15. 張榮興，“高濃度 VOC 廢氣安全處理技術--高溫脈衝波反應器”， AIT Report 20170303, 2017

表-9 VOC 廢氣處理設備安全檢核表 (RESI)

	熱處理設施的安全要求或保護措施	檢查	性能測試	量測	圖說與計算書檢查
1	一般性檢查				
2	火災與爆炸風險查核				
2.1	爆炸混合物風險預防 (VOC 濃度限值)				
2.1.2	入口濃度符合限值 (25%LEL 或 20%LEL)				
2.1.2	熱處理設施與多來源連接 · 濃度均符合限值				
2.1.3	管道設計能預防冷凝及粉體堆積				
2.2	預防排氣風量不足的措施				
2.2.1	系統循環要有氧化不足的預防措施				
2.2.2	使用循環氣體應防止 VOC 濃度超限				
2.3	RCO 的特別檢查				
2.3.1	RCO 應設有操作低溫連鎖				
2.3.2	RCO 應定期檢測性能並最適調節操作溫度				
2.4	所有設備必須確實接地				
2.5	設備防爆措施				
2.6	防止系統過熱超溫的措施				
2.6.1	避免冷凝及堆積的粉體燃燒				
2.6.2	系統溫度控制與超溫連鎖				
2.6.3	加熱元件的保護				
2.6.4	保溫				
2.7	控制系統檢查				
2.7.1	儀表設定檢查				
2.7.2	安全連鎖檢查				
2.7.3	VOC 檢測與安全連鎖				