

污染防治技術譯介

控制揮發性有機物(VOC)的熱焚化 與觸媒焚化技術

吳 玫 玲 譯*

摘要

揮發性有機物的排放已逐漸引起各界各國與社會大眾的關切。在眾多的揮發性有機物廢氣處理技術中，焚化處理技術有別於一般濃縮或吸附的方式，它提供了一種最終地處理技術。本文便介紹這種的處理技術－熱與觸媒焚化爐系統。此系統的設計目的在處理含稀薄的揮發性有機物廢氣。在此定性分析的指標會被提出以供比較，另外，本文將以例子來說明如何對每個焚化爐計算其質量與能量平衡狀態的簡化程序。而所得的結果參數亦將被使用來估計每一種設計所需的初設及操作費用。

一、前言

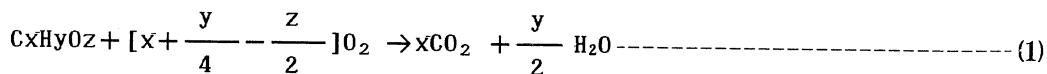
焚化處理是目前所知處理含揮發性有機物廢氣最好的方法之一，焚化處理不像其它種方法（如活性碳吸附），僅對廢氣中既難聞且易燃的化合物加以收集濃縮，而是將這些化合物予以破壞的一種根本的處理方式。焚化處理的一項主要優點為若使用適當的工程設計，則最終任何氣態的有機物都可能被安全且乾淨地焚化。

此處將討論熱與觸媒焚化技術在含揮發性有機物的廢氣上的特殊應用。美國環保署曾加以定義所有有機化合物，除非其被特別認定為非揮發性，否則皆為揮發性有機物。有些有機物（如甲烷）便被指明為不是揮發性有機物。雖然揮發性有機物及非揮發性有機物二者皆為易燃，然對焚化爐的設計皆各有其重要點。因此二者之間的區別便十分重要。含揮發性有機物的廢氣可由多種的來源產生，其中包含油漆或印刷的使用物（換句話說，即所使用的鹵代碳氫化合物溶劑）及化學藥品的製作過程（如酞酐）等。此外，本焚化技術可以處理更多難聞的揮發性有機物，包括了含鹵代碳氫化合物的廢氣，例如從聚合反應過程所產生的氯乙烯，及因製造農藥而產生的光氯等。本文乃是針對一份較早期的研究加以闡述及更新，並且是在OAQPS Control Cost Manual, Fourth Edition (EPA 450/3-90-006, January 1990, NTIS PB/90-169954/AS) 中所提及內容的一部份。

*環保署環境檢驗所第一組

二、處理程序描述

一般而言，欲以焚化處理之廢氣大都為複雜的有機化合物的混合槽，很少單一的成份。而此混合槽大都是由碳、氫、氧及其它種元素所組成，故由實驗及經驗上我們可得出一公式來代表此混合體。包含碳，氫，氧的有機化合物之混合體，其燃燒可由下列於熱反應式來描述：



經由完全燃燒所得的產物 CO_2 及 H_2O ，一般被認定比廢氣成份較不刺鼻且為無害之氣體，也因此使得焚化技術成為更吸引人的廢氣處理方法。但當混合體中出現含氯或含硫的化合物時，經由完全燃燒後所得到的產物，除了 CO_2 及 H_2O 外，尚含有酸的成份，例如 $HC1/C1_2$ 或 SO_2/SO_3 存在。這些酸的成份若含量很大，則需以洗滌塔將之去除掉，但此作法將影響焚化系統所需的費用甚鉅。而在此所討論的含氯揮發性有機物其濃度均不為高，所以洗滌塔將非必須。

在任何一個焚化爐系統的中心，都是一個燃燒室，而含揮發性有機物的廢氣便在其中以反應式(1)的方式進行燃燒反應。因為在廢氣入口處的溫度比燃燒所需的溫度低很多，所以我們必須提供出能量以提高焚化爐的溫度。廢氣中所有有機物（揮發性有機物及其它）之燃燒所釋放出的能量，很少足夠能提升其本身溫度至反應爐所需的溫度，因此必須另外加入天燃氣或重油等其它輔助燃料。

廢氣的燃燒通常可以一個熱焚化爐或是一個觸媒焚化爐來完成。在觸媒焚化爐中，觸媒被用來加速燃燒反應的速率，即使得燃燒反應可以在較低的溫度下進行。因為觸媒焚化爐可在比熱焚化爐還低的溫度下進行，所以將只需要使用較少的輔助燃料用以加熱廢氣。

此外，若能在廢氣入口及焚化爐排放物之間提供熱交換的話，則輔助燃料將可減少，能源效率亦可改善。焚化爐排放物包含了燃燒所得的產物和加在廢氣中的惰性氣體，此排放物可藉由一直接或間接的熱交換器，事先對欲處理的廢氣及輔助用的空氣加熱。對於能源回收的效率，可以下列直接熱交換器加以定義：

$$\text{能源回收效率} = \frac{\text{真正由排放物所回收之能源}}{\text{可被回收之最大能源}} \quad (2)$$

在方程式(2)中，所謂真正由排放物所回收之能源，是指廢氣或廢氣加上稀釋空氣被加熱後，所增加的顯熱；而可被回收之最大能源則是指廢氣被加熱至與燃燒室所排放出來的廢氣同溫度時，所需增加的顯熱。因為只有一無限大的熱交換器中，才有可能獲得可被回收之最大能源，故在表示以直接熱交換器來改善能源效率的成效時，能源回收效率十分有用。

能源效率尚可以在進一步加以改善。若在直接熱交換器之下，放置另外一個輔助熱交換器，可以由排放物中回收更多的能源（例如產生低壓蒸氣或熱水）。不過一般來說

，除非這些蒸氣或熱水有特殊的用途，輔助熱交換器不會被使用。

揮發性有機物廢氣大部份都是易燃氣體的稀薄混合體，在一些特殊的應用上（如空氣氧化過程），廢氣中含氧量可能不足。故視廢氣中含氧量的情形而定，有時需加入輔助空氣，以幫助廢氣中之有機物及其中的輔助燃料燃燒。

廢氣中之易燃氣體的濃度，在反應爐的設計及操作上，扮演了十分重要的角色。因為排放物的顯熱是操作費用中一個重要的考量點，所以為了滿足反應式(1)所加入之過量的空氣，應儘量減少。任何在易燃點界限內的混合體，不管其所需加入燃料的多寡，對一個工廠而言，都可能會有起火燃燒的危險。一個有機化合物的低爆限值，即定義為：能使一有機化合物，產生比提高其本身溫度至閃火點還高能量的最低濃度。因為含揮發性有機物的工業廢氣，大部份是稀薄的易燃氣體混合體，它們的熱值低，且含氧量比燃燒有機物廢氣（揮發性有機物及其它）和輔助用燃料所需值還高。由經驗中發現，空氣中有許多碳氫化合物的混合體，它們在低爆限值時，其熱值大約為50 Btu/scf。如果所產生的廢氣濃度高於50%的低爆限值（大約25 Btu/scf），則需加以稀釋，以避免起火燃燒。一般說來，雖然低爆限值的控制在25%至50%間的濃度仍可被接受，但通常廢氣的濃度都被控制在25%的低爆限值之下。

氣態有機物的高爆限值，表示其達可閃火點的最高濃度。一般揮發性有機物在高爆限值與低爆限值之間均有爆炸的特性，故必要時，需以空氣將其稀釋到低於25%的低爆限值之下。一般而言，焚化爐系統的主要目的，乃在於控制排放到外界大氣之揮發性有機物的量。至於揮發性有機物處理裝置的性能，則可以下列方程式所定義之處理效率來描述之：

$$\text{處理效率, \%} = \frac{\text{揮發性有機物輸入量} - \text{揮發性有機物排放量}}{\text{揮發性有機物輸入量}} \quad (3)$$

另外，有一點必須要特別注意的是當進入焚化爐的揮發性有機物沒有燃燒完全時，可能會產生原先沒有的揮發性有機物；例如，二氯甲烷氧化不完全，會產生乙烯。但是只要新產生的揮發性有機物能被檢測出來，則方程式所下的定義仍然有意義，不過這種情況，需要對廢氣的輸入及排放，做完全的化學分析，以證實其與規則相符。此外，焚化爐的性能，亦可單純由所排放的揮發性有機物的濃度來評估，通常是以ppm來表示，這種方法也需要對排放廢氣做完全的化學分析。

目前幾種主要商業化的焚化爐設計，分列在表1。

表 1 主要的揮發性有機物焚化技術

焚化系統種類	說明
直接火焰焚化爐	初設費用便宜 - 處理效率低
回復式焚化爐 (直接火焰加上熱交換器)	初設及操作費用稍貴
再生式焚化爐 (高效率熱交換器／焚化)	初設費用貴 - 但操作效率很高
觸媒系統	
固定觸媒床	
- 整體觸媒床	低壓降
- 填充床	高壓降 - 更容易代換
流動床	初設費用貴 - 對潛在性有毒物質容忍度較高 較適合用於處理較高濃度的揮發性有機物

三、熱焚化爐(thermal incinerators)

一般以外觀而言，熱焚化爐是一種直線形耐火容器，並配備有噴嘴燃燒器。此種焚化爐乃藉著輔助用燃料，混合廢氣及需要時所加入的輔助用空氣來運作（參見圖1）。當廢氣經過火焰上方時，廢氣的溫度，會從其入口處溫度（例如 100°F）被加熱至反應爐所需的溫度。每一種化合物所需的反應溫度皆不相同，通常都是經驗決定之。反應所需的溫度是指在廢氣停留在焚化爐中的時間（停留時間內），使得燃燒速率足夠讓揮發有機物達到預定破壞的程序，所需要的溫度。

反應所需要的溫度，與所欲達到揮發性有機物破壞的程度，及反應爐的設計都有關連。當欲達到的破壞程度愈高，或是廢氣在焚化爐內的停留時間愈短，則所需要的反應溫度愈高。大部份的熱焚化爐設計，在1200至2000°F的典型反應溫度下，其廢氣的停留不超過一秒。當焚化爐建造完成後，因其停留時間不易再更改，此時若改變所欲處理之廢氣種類，且欲達到相同之破壞效率，則需改變反應溫度。舉例來說，在一提供一秒停留時間的熱焚化爐中，若欲達到90%的破壞程度，對甲苯而言，需要的1341°F的反應溫度，但對氯甲烷而言，則需1596°F。

雖然焚化爐的廠商會以其經驗，提供客戶各種化合物所需反應溫度的參考值，不過一般說來，這些溫度並無法由計算而得。大部份的廢氣都是化合物的混合體，也因此使得預測這些溫度的工作，變得更為複雜。有些根據測試得到資訊所做的研究顯示，具有

0.75秒停留時間的焚化爐，其所需的溫度一般為1600°F，以便對非鹵化有機物達到的破壞程序。在有些國家中，對焚化爐的反應溫度及停留時間，皆有明確的規定，而不是去規定揮發性有機物的破壞效率。

在焚化爐的設計上，廢氣與易燃氣體的混合，是一個非常重要的考量點，但是若廢氣是已經經過稀釋的揮發性有機氣體時，這點便不再那麼重要了。在需要加入輔助用空氣的情況下，必須使混合的程度達到最大。無論如何，混合可用來確定爐焰所釋放出的熱能，會被有效地轉換到廢氣上面。若有部份的廢氣未被加熱至反應所需的溫度，將會產生一些高濃度的排放物。當焚化爐廠商在設計其焚化爐系統時，若能注意到混合的問題，則在系統啟動後，可經由排放氣體的監控，將焚化爐調整至最佳狀態。最後，一旦系統被建立以後，按照規定來使用及系統的維護，便是使用者的責任了。

3.1 熱焚化爐的能源回收

各種規格的熱焚化爐皆有一共同的目標，那就是：提高含揮發性有機物之廢氣的溫度至反應所需的溫度，以及在反應時間內，達到所要的破壞效率。此種系統最簡單的例子，就是直接加火焚化爐。如圖1所示，而直接加火焚化爐只包含了燃燒室。

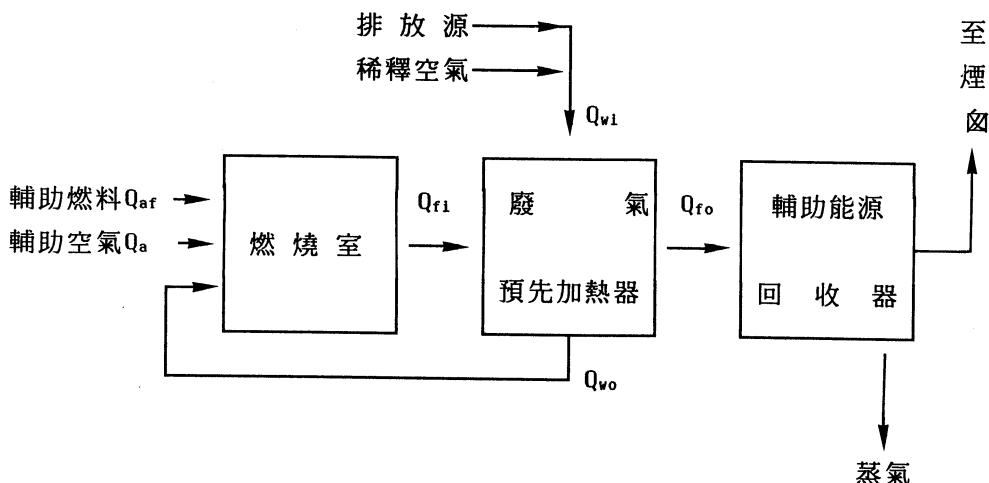


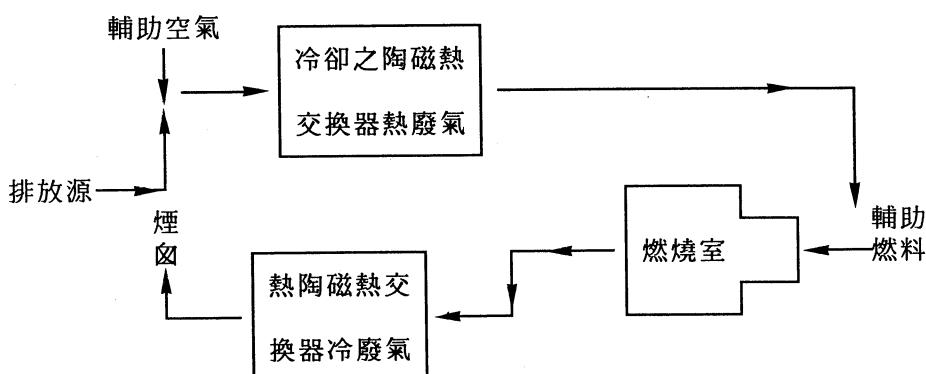
圖1 熱焚化爐——一般情況

經由直接能源回收法，以焚化爐所排出氣體，來對欲處理之廢氣和燃燒氣體事先加熱，可以節省下可觀的燃料，而此法最多可回收排放廢氣中，可被回收之能源的70%（請參考反應式2處的討論）。回復式焚化爐(recuperative incinerator)包含了燃燒室，廢氣預先加熱器，另外，如果有低壓蒸氣存在的話，還必須包括輔助能源回收熱交換器。廢氣被預先加熱的溫度，最高約不得超過1200°F，以避免在熱交換器中便發生燃燒或熔解的現象。不過非再生式的焚化爐系統便無此顧慮。

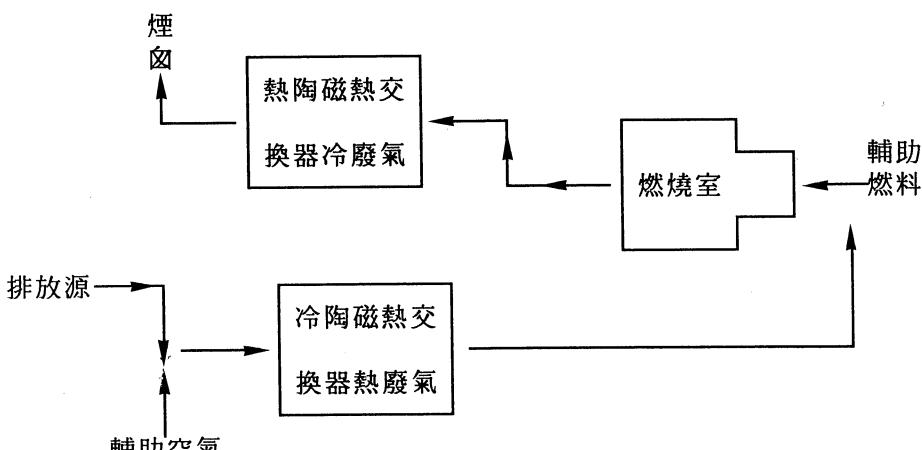
熱焚化爐可以用對預先加熱之溫度的限制來分類（見表1）。當廢氣熱值太低，無法維持在反應所需的溫度時，對排放廢氣中之能源，能轉換的更加徹底的焚化爐，可以

節省更多的燃料。這就是所謂再生式焚化爐系統 (excess-enthalpy or regenerable burner systems) 的概念。這些系統使用直接觸式的熱交換器，而此種熱交換器，是由可耐焚化爐中理廢氣之高溫的陶瓷所製成。

再生式系統的操作請參照圖 2。首先欲處理之廢氣先經過一陶瓷床，在此廢氣會被加熱，而此陶瓷床則會被冷卻。如果欲處理之廢氣無法達到所要的溫度，則必須把少量的輔助性燃料加到燃燒室中。然後這些加熱過的廢氣，便在燃燒室中開始反應並放出能量，經焚化後的廢氣則再被送到另一個陶瓷床，而把此陶瓷床加熱至燃燒室出口處的溫度，這時程序的流程又轉換成，由較熱之陶瓷床處加入欲處理之廢氣。這種循環式的處理程序，可提供高達 95% 的能源回收率。而這些高效能的熱交換器和燃燒室，所需較高的費用，可由節省下來的燃料費用來彌補，也因此使得本系統不失為一種經濟的方法。



型式 A



型式 B

圖 2 再生式熱焚化爐

四、觸媒焚化爐(catalytic incinerators)

觸媒焚化爐使用一個活性物質（觸媒）床，來促進反應式(1)的燃燒。觸媒有增加反應速度及使反應可在比熱焚化爐低的溫度下進行之功效。如同熱焚化爐一樣，欲處理之廢氣亦需加熱至足夠高的溫度（一般從300°F至900°F），以便使氧化反應開始進行。廢氣通常由直接經過燃燒室的方式，來達到反應所需的溫度，但是亦可由焚化爐的排放物，或是其它的熱交換方式來對廢氣加熱。經熱交換之後，廢氣再被傳送到觸媒上面，而氣與廢氣中污染物間的燃燒反應，便在此發生。

觸媒氧化系統與熱焚化爐一樣，無法預測要破壞含揮發性有機物混合體到預定程度，需要多少溫度及停留時間。Pope et al曾證明以 Co_3O_4 為觸媒時，欲破壞80%的污染物所需的溫度，可以從丙烯醛的 382°F，一直到1,1,1-三氯乙烷的 661°F。同一份研究亦顯示，這些數值與所使用的觸媒有非常密切的關係。

理論上來說，觸媒焚化爐技術可以破壞廢氣中所有的有機化合物。但實際上，由於有些種類的化合物對觸媒有破壞作用，故以觸媒來處理這些化合物時，所能得到的效果仍有一定的限度。例如含氯、硫或一些其它元素的氣體，便能使加入其中的貴重金屬觸媒（如鉑）無法發生作用。不過，仍可以使用一些特殊的金屬氧化物觸媒，來處理含氯的揮發性有機物。燃廢氣中若含有鉛、砷、磷時一般都被認定為對大部份的氧化觸媒具有破壞性，但是在考慮觸媒氧化作用時，它們可能因為濃度相當的低，導致其抑制活性的效率和代換觸媒所需的費用都非常低，而不用加以考慮。

此外，包括氣膠在內的粒狀物質，能夠迅速將觸媒表面遮蔽住使得觸媒失去作用。以此種型式來抑制觸媒活性的速度與觸媒表面積和焚化爐中廢氣的型態，以及廢氣濃度、量的分佈和粒狀物本身的性質有關。

觸媒焚化爐中廢氣流量，以及在這些廢氣中易燃物的濃度應該要保持固定，以使焚化爐的操作能達到最佳狀態。而廢氣中濃度和有機物之種類的任何改變，也都會影響到揮發性有機物污染物的轉化速度。至於廢氣的流速、有機物的濃度及廢氣中的化學組成的改變，一般都是因為產生廢氣的製造過程不穩定，而導致的結果。如果因為要採用觸媒焚化爐系統，而必須更換製造過程，就費用而言可能並不經濟，此時可考慮改採熱焚化爐技術作為控制系統。

觸媒焚化爐系統的操作請參見圖3，使含揮發性有機物的廢氣和觸媒接觸方法，可用来作為各種觸媒焚化爐系統的分類標準（見表1）。觸媒焚化爐可分為固定床式與流動床式，以下分別敘述之。

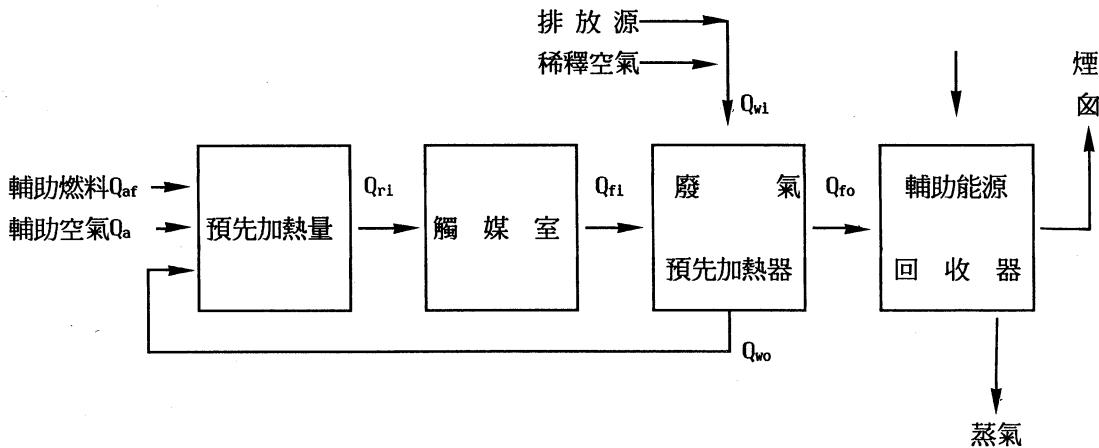


圖 3 觸媒焚化爐

• 4.1 固定床觸媒焚化爐

在含揮發性有機物廢氣和觸媒接觸的各方法中，最被廣泛使用的方法是整體觸媒床法。這種方法是將觸媒附著在一固狀物上，此固狀物具有與廢氣流平行方向且不相交的通道。在系統啓動造成熱膨脹，或是系統關機造成熱收縮時，整體觸媒床法可使觸媒的耗損達到最低，並且其整體的壓降亦很小。

第二種方法是使用簡單的填充床焚化爐，在這種焚化爐中，觸媒會被擺入一淺盤狀物體中，而廢氣則從此物體通過。顆粒狀觸媒由於代換很容易，如磷或矽的化合物，故在處理大量污染物時，將十分有用。

這兩種固定床的設計，都無法對燃燒反應所釋出的熱能，做有效地轉換。因此，必須非常小心地限制廢氣中的熱值，以避免其最高溫度太高，而會對觸媒有所損害（請參照設計程序一節）。

4.2 流動床觸媒焚化爐

第三種使用揮發性有機物廢氣和觸媒接觸的設計，是流動床法。由於固體的快速混合，對粒子熱轉換率來說，流動床焚化爐比固定床焚化爐具有更高的熱傳面積；也因此固定床焚化爐中所產生的一些集中的熱點，在流動床中將會被擴散開來，而對於焚化爐外的熱能交換，若有需要，亦可使用一熱交換器來加強。依此控制，便可以處理一些具有較高熱值的廢氣，而不會超過觸媒床所允許之最高溫度。同時因為流動觸媒粒子之間不斷互相地磨擦，所以流動床焚化爐對廢氣中之微粒子的容忍度，亦較固定床焚化爐為高。另外，使用流動床觸媒焚化爐必須準備較多量的觸媒，以免觸媒因磨損而造成嚴重的流失。

五、技術比較

熱焚化爐系統與觸媒焚化爐系統的設計，都是希望經由燃燒的方式，把揮發性有機物控制在國家規定的標準範圍之內。在這麼多可用的選擇中，很明顯可以看出，針對某一種特定的廢氣而言，並非所有的焚化爐都可以用相同的費用，來達到所需要的效果。在考慮如何選擇焚化爐，以降低揮發性有機物的排放時，若熱焚化爐技術與觸媒焚化爐技術皆可對廢氣造成所需的破壞效率的話，首先可考慮前面所提過幾種型式焚化爐的定量因素，對於幾種主要型式焚化爐的簡略介紹，已列於表 1。而對可能添購焚化爐系統的使用者，下列幾點應列入考慮之中：

1. 觸媒被污染的可能性。雖然觸媒已發展出抗氯性，但有些化合物對系統會有有破壞性，其中包括了重金屬、磷、和大部份的鹵素元素。
2. 因處理過程不穩定而釋出任何前面提過之有害物質，或是引起熱值小變動的可能性。此種可能性特別容易出現在熱焚化爐系統中。
3. 除了第二等級的燃料油外，其它等級的燃料油皆不可以當作觸媒焚化爐系統的輔助用燃料，因為這些燃料油中可能含有硫和鉌。
4. 熱焚化爐系統運作所需的溫度大約為1000°F，比觸媒焚化爐系統所需的溫度還高，也因此比觸媒焚化爐需要更多的燃料。這個對燃料需求所造成的差異，其重要性隨著廢氣熱值的減少而增加。

一般來說，觸媒焚化爐及再生式熱焚化爐的初設費用較高，而傳統式的熱焚化爐其操作費用則較高。

六、焚化爐設計程序

在評估焚化爐及設計其所需的輔助燃料時，必須使整個焚化爐的質量與能量達到平衡狀態，特別是在焚化爐中某些部份，例如燃燒室和預先加熱器。對於一個在穩定下的焚化爐而言，所謂平衡狀態是指：

A. 穩定狀態下的質量平衡

$$\text{輸入} - \text{輸出} = 0 \quad (4)$$

B. 穩定狀態下的能量平衡

$$\text{輸入} - \text{輸出} + \text{產生的能量} = 0 \quad (5)$$

這裡所說明的程序，主要是針對經過稀釋的揮發性有機物混合體廢氣（也就是說，廢氣中有超過20%的氧）而設計的。以下會使用一個例子來說明這個簡單的設計程序，至於對於那些需要輔助用燃料和輔助燃燒用空氣的情況而言，則必須更精確地計算質量與能量之間的平衡狀態。

1. 建立設計規格

設計程序的第一個步驟，是必須決定焚化爐與所欲處理廢氣的規格。以本所舉的

X_i =易燃元素*i* 所佔的量

=易燃元素*j* 的低爆限值(ppm)

n =混合體中易燃燒元素的種類數

已知道苯與氯甲烷的低爆限值分別為14,000和82,500，由此可計算出其LELmix為23,938 ppm，而其百分比為 8.4。這個百分比低於百分之二十五的安全界限。

4. 計算廢氣組成的燃燒熱 (Δh_{cw}) ,Btu/scf

廢氣組成的燃燒熱可由下式來表示：

$$(-\Delta h_{cw}) = \sum_1^n (-\Delta h_{cw}) \times X_i \quad (7)$$

以表2之廢氣組成為例，其廢氣熱值為4.18Btu/scf，若將此股廢氣視為空氣，則可將上值換算為56.6Btu/lb。在固定床觸媒焚化爐系統中，由含揮發性有機物之廢氣燃燒產生的熱能，正常狀態下應小於10Btu/scf，以避免觸媒床的溫度過高。

由於熱焚化爐系統與觸媒焚化爐系統設計程序上的差異，從步驟 5即分開個別討論。

七、熱焚化爐的特殊步驟

1. 計算焚化所需溫度， T_{f1}

如前面所討論過的，反應所需溫度是欲達到之破壞效率，廢氣之停留時間以及廢氣性質的函數。在本文所假設例題中，其目標是要達到 1秒的停留時間及 $T_{f1}=1600$ °F下的反應溫度。

2. 計算直接熱交換器出口處的廢氣溫度， T_{w0}

在直接熱交換器中熱交換的程度，是屬於技術與經濟上最佳化的問題，此處將不予以討論。對一個較大的熱交換器來說，當 T_{w0} 增加時，所需的輔助燃料便可相對的減少。為了避免熱能一直停留在直接熱交換器中， T_{w0} 必須不能高到可以使廢氣中的有機物開始燃燒的溫度，而且當流動的廢氣中含有酸的組成時，預先加熱器中的熱改變不可以使 T_{w0} 低於廢氣的酸露點。

這裡為了減化計算能量平衡的過程，廢氣中的比熱與密度 ρ 將被假定與純淨的空氣一樣。此外，在運轉間的廢氣，其溫度若有任何變化，則廢氣特性比熱的計算，將採用平均值或作溫度的校正。最後，為了定義能源回收效率，須先假設 $Q_w > Q_{af}$ 。在此假設下，可定義：

$$\text{能源回收率} = \frac{T_{w0} - T_{w1}}{T_{f1} - T_{w1}} \quad (8)$$

在本文的例題中能源回收效率為0.70，根據上式可計算出 T_{w0} 為1150°F。如果把這些假設應用在廢氣出入直接熱交換器上的話，可得出排放氣體的溫度 T_{fo} 為：

設計而言，表 2 列出了有關所欲處理的廢氣資料，必須注意的是，有些規格乃是根據國家標準的要求而定的。在此所討論稀釋過的廢氣，其性質被假定與純淨的空氣一樣。

表 2 例體的規格

設 計 參 數	量
預先加熱器入口處廢氣體積 流量 Q_{w1} , (scfm)	20,000
預先加熱器入口處廢氣溫度 T_{w1} , °F	100
成份	
苯 (ppmv)	1,000
氯甲烷 (ppmv)	1,000
空氣	平衡
粒狀物含量	可忽略
含水率	可忽略
控制效率目標, %	98
能源回收率目標, %	70

2. 確定廢氣中含氧量有超過 20%

廢氣中必須要有足夠的氧氣，有機物廢氣（含揮發性有機物）和因需要而加入的輔助燃料，才能順利進行燃燒。如果廢氣中的含氧量低於 20%，則需要再加入輔助用的空氣。從表 2 的例子所提供的各項數值，可以算出這種廢氣的含量達 20.86%。

3. 計算低爆限值與混合氣體低爆限值的百分比

有一點應該要注意，如果程序中流動的氣體內除含氮、氧成份外，尚包含大量的惰性氣體的話，則計算低爆限值與高爆限值之值便失去意義了，因為有對有機物與空氣的混合體，才需計算低爆限值與高爆限值。這種情況下，要完成設計程序，便需要做一份完整的化學分析。而這裡所舉的是非常典型的例子，亦即在廢氣中含有超過一種以上的揮發性有機物。Grelecki 提供了一種估計方法，可用來計算化合物混合體的低爆限值 LEL_{mix}：

$$LEL_{mix} = \frac{1}{\sum_j^n \frac{X_j}{(\sum_j^n X_j) \times LEL_j}} \quad (6)$$

X_i =易燃元素*i* 所佔的量

=易燃元素*j* 的低爆限值(ppm)

n =混合體中易燃燒元素的種類數

已知道苯與氯甲烷的低爆限值分別為14,000和82,500，由此可計算出其LELmix為23,938 ppm，而其百分比為8.4。這個百分比低於百分之二十五的安全界限。

4. 計算廢氣組成的燃燒熱 (Δh_{cw}) ,Btu/scf

廢氣組成的燃燒熱可由下式來表示：

$$(-\Delta h_{cw}) = \sum_1^n (-\Delta h_{cw}) \times X_i \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

以表2之廢氣組成為例，其廢氣熱值為4.18Btu/scf，若將此股廢氣視為空氣，則可將上值換算為56.6Btu/lb。在固定床觸媒焚化爐系統中，由含揮發性有機物之廢氣燃燒產生的熱能，正常狀態下應小於10Btu/scf，以避免觸媒床的溫度過高。

由於熱焚化爐系統與觸媒焚化爐系統設計程序上的差異，從步驟5即分開個別討論。

七、熱焚化爐的特殊步驟

1. 計算焚化所需溫度， T_{f1}

如前面所討論過的，反應所需溫度是欲達到之破壞效率，廢氣之停留時間以及廢氣性質的函數。在本文所假設例題中，其目標是要達到1秒的停留時間及 $T_{f1} = 1600^{\circ}\text{F}$ 的反應溫度。

2. 計算直接熱交換器出口處的廢氣溫度， T_{w0}

在直接熱交換器中熱交換的程度，是屬於技術與經濟上最佳化的問題，此處將不予以討論。對一個較大的熱交換器來說，當 T_{w0} 增加時，所需的輔助燃料便可相對的減少。為了避免熱能一直停留在直接熱交換器中， T_{w0} 必須不能高到可以使廢氣中的有機物開始燃燒的溫度，而且當流動的廢氣中含有酸的組成時，預先加熱器中的熱改變不可以使 T_{w0} 低於廢氣的酸露點。

這裡為了減化計算能量平衡的過程，廢氣中的比熱與密度 ρ 將被假定與純淨的空氣一樣。此外，在運轉間的廢氣，其溫度若有任何變化，則廢氣特性比熱的計算，將採用平均值或作溫度的校正。最後，為了定義能源回收效率，須先假設 $Q_w >> Q_{af}$ 。在此假設下，可定義：

$$\text{能源回收率} = \frac{T_{w0} - T_{w1}}{T_{f1} - T_{w1}} \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

在本文的例題中能源回收效率為0.70，根據上式可計算出 T_{w0} 為 1150°F 。如果把這些假設應用在廢氣出入直接熱交換器上的話，可得出排放氣體的溫度 T_{fo} 為：

$$T_{f1} - T_{fo} = T_{wo} - T_{wi} \quad \dots \quad (9)$$

在本例題中，可算出 T_{fo} 為 550°F，此值應比廢氣中的酸露點為高。

有一點值得注意的是， T_{wo} 必須要比當有機化合物（含揮發性有機物）的氧化速率變得顯著時的溫度還低。甚至在廢氣遠低於低爆限值時，這點仍應特別注意，因為反應氣體的溫度升高時，會使得廢氣狀態接近閃火點。足夠高的預先加熱溫度，將會釋放熱量在直接交換器中。這一點對熱交換器的構成物質會造成損害，不過再生式的熱交換器例外。本例中，再生式系統所能回收能源的95%可得到 T_{wo} 值為1525°F。

3. 計算輔助燃料的需要量， Q_{af}

在圖 1 中，當 $Q_a = 0$ 時，燃燒室週圍的質量平衡會導致 $(\rho Q)_{af} + (\rho Q)_{wo} = (\rho Q)_{f1}$ 。為了達到能量平衡，必須去估計焚化爐所損失的熱量 HL ，只是很難得到此估計值。因為參考溫度 T_{ref} 被假定為 77°F ，所以 HL 應該和反應溫度與 T_{ref} 之間的差距成正比。在計算中 HL 的值則重視以下式來估計：

$$T_{ref} = T_{af} = 77^{\circ}\text{F}$$

而能量平衡式可記為：

$$(\rho Q)_{af} = \frac{(\rho Q)_{w0} \times [Cp(1.1T_{f1}T_{w0} - 0.1T_{REF}) - (-\Delta hcw)]}{(-\Delta hcw) - 1.1Cp(T_{ref} - T_{w0})} \quad (11)$$

此處的 ρ_{wo} 和 C_p 之值須視純淨空氣特性而定。以甲烷為例， $\rho_{\text{af}} = 0.04081 \text{lb/ft}^3$ 且 $(-\Delta h_{\text{af}}) = 21502 \text{BTU/lb}$ ，由此可計算出 q_{af} 為 167scfm 。

4. 計算廢氣流經焚化爐的流速 Q_{fl} 。

離開焚化爐之廢氣體積流量被認為是排放廢氣的速度，並且與焚化爐所需費用有關。在77°F和1大氣壓的標準狀態下，廢氣的流速可由下式求出：

$$Q_{fi} = Q_{wo} + Q_a + Q_{af} \quad \dots \quad (12)$$

$$= 20,000 + 0 + 167$$

$$= 20,167 \text{ scfm}$$

請注意，此結果證明了先前的假設 $Q_{f1} = Q_{w_0}$ 。

八、觸媒焚化爐的特殊步驟

圖 3 顯示了再生式觸媒焚化爐系統。由於大部份觸媒所能忍受之溫度有一定的限制，故對觸媒焚化爐系統中計算的探討，與熱焚化爐系統有些微的差異。所以雖然欲處理之廢氣的溫度必須足夠使觸媒燃燒反應開始作用，但是在燃燒過程釋出能量時，廢氣的熱值必須限制在可能使觸媒床高於最高極限溫度的範圍內。這點亦可能同時影響到直接熱交換器對能源回收，所能達到的效果，因為欲處理之廢氣的溫度 T_{wo} 被限制了。下面步驟將探討如何辨認這個限制，並且將此限制併入計算程序中一起考慮。

1. 估算觸媒床需要的排放口溫度 T_{f1}

當廢氣通過觸媒床時，觸媒床中揮發性有機物的氧化作用所釋出之能量，會使廢氣的溫度提高 ΔT 。同時焚化爐排放口的溫度必須予以確認，以便確定揮發性有機物廢氣所需的破壞效率。如同在熱焚化爐系統中一樣，此溫度隨著化合物和觸媒的不同而變化。燃燒工程(Combustion Engineers)的指導手冊中指出，300至900°F的溫度可以得到百分之九十至九十五的破壞效果。

為了避免觸媒的不活動性，觸媒床的溫度最高不可超過1200°F。在本例題中，觸媒排放口的溫度 T_{f1} 假設為900°F，這是因為一般若要破壞含氯的化合物，需要更嚴苛的條件才行。

2. 計算在直接熱交換出口處的廢氣溫度 T_{w0}

與步驟6t相似，在本例題中，已知 T_{f1} 便可以由方程式 8來求出 $T_{w0} = 660°F$ ，同樣地，以方程式 9可求出 T_{fo} 為340°F。此值應該仍高於廢氣的酸露點。

3. 計算輔助燃料的需要量， Q_{af}

輔助燃料的需要量， Q_{af} ，是以可使預先加熱器中之燃燒室和觸媒床周圍的質量與能量能達到平衡狀態所需的量來計算。此處與步驟7t所導出之結果相同，一樣可利用方程式11來求出結果。而由步驟5c和步驟6c所得到的值代入方程式11中求出：

$$Q_{af} = 40 \text{scfm} \quad \dots \quad (13)$$

4. 估計觸媒床入口處的溫度， T_{r1}

觸媒床的入口處溫度必須足夠高，以確定能夠產生觸媒燃燒反應。此外， T_{r1} 必須如下式：

$$T_{r1} + \Delta T = T_{r1} \quad \dots \quad (14)$$

此處的 ΔT 是經過觸媒床所提高的溫度，並且 $T_{f1} = 900°F$ 。 T_{r1} 值可由燃燒器中之預先加熱器部份的能量平衡來決定，此部份計算使用之方程式與熱焚化爐系統中計算 $T_{f1} = T_{r1}$ 時的方程式11類似，只差在觸媒焚化爐假設廢氣中沒有任何有機物在預先加熱器內氧化。若使用7c計算出的輔助燃料，則此方程式便可導出 T_{r1} ：

$$T_{r1} = 693°F \quad \dots \quad (15)$$

對觸媒燃燒而言，這個結果比Popt et al所提供之典型的值還好。如果廢氣中有部份的有機物在預先加熱器中產生燃燒的話， T_{r1} 會變得更高，但是最後為了保持 T_{f1} 而需要的輔助燃料，其需要量不會改變，因為在觸媒焚化爐中將會釋出較少的能量。

5. 計算廢氣流經焚化爐的流速 Q_{f1} 。

同熱焚化爐系統一樣，可算出此處全部體積流量為20,040scfm。

6. 計算在觸媒床中觸媒的體積， V_{cat} 。

所需要的觸媒多寡是許多變數的函數，其中包括了焚化爐的設計，廢氣的組成以及需要的破壞效率等。對每一個系統的應用，廠商會提供指導手冊，但對含氯的廢氣(如本例題之廢氣)來說，其空氣流量大約定為300($ft^3/min \cdot ft^3$ 觸媒體積)。必須記住一點的是，傳統上這個值是根據60°F時的氣體流速而來，並非根據77°F。

$$V_{cat} = \frac{19436 \text{ ft}^3/\text{min}}{300 \text{ ft}^3/\text{min}\cdot\text{ft}^3} \quad (16)$$

$= 65 \text{ ft}^3\text{觸媒}$

九、結 語

目前已有許多不同種類的焚化爐在運轉，它但可用來處理稀薄且含揮發性有機物的廢氣。本文說明了在熱焚化爐的設計上其主要的特色，並且提供了一個經過簡化的例子。作者希望在使用者進行費用分析時，本文所討論的結果可以提供給使用者一個評估的基準。

本文譯自D. R. van der Vaart, W.M. Vatvuk and A. H. Wehe, Thermal and Catalytic Incinerators for the Control of VOCs, page 92-98; J. Air Waste Manage, Assoc.