製程 VOCs 廢氣之收集與處理

林文川*

摘　要

現有法規對空氣污染物的管制，已由早期傳統性污染物如粒狀物、SOx、NOx，漸次轉移比重到 VOCs。工業製程運用有機溶劑相當普遍，大多數工業製程都不免有 VOCs 污染問題。工廠如何從眾多處理技術中，選採經濟有效之控制設備，爲工廠管理者或專責人員執行環保工作之重要課題。

本文介紹 VOCs 廢氣之收集及處理技術，因 VOCs 污染源大多具有逸散特性，故說明局部排氣系統及氣罩應有的作爲。而控制技術則包括燃燒式控制(直接焚化、觸媒焚化)及非燃燒式控制(吸附、冷凝、吸收及生物處理)等 2 大類，除先從整體面做特性、優缺點及其設計因子之比較外，亦逐項說明各項技術，包括處理原理與應用、設備概述、主要設計參數或影響性能因素及操作注意事項等，提供業者選用防制技術及設備操作維護之參考，以因應日趨嚴格之環保標準。

【關鍵字】揮發性有機物、VOCs、局部排氣系統、氣罩、廢氣收集、控制技術、焚化、吸附

*傳閔工程股份有限公司 總經理

一、前　言

近年來由於環保意識的覺醒，促使群眾對生活水平的要求不斷提昇，因而現有環保法令對空氣污染物的管制，亦已由早期傳統性空氣污染物如粒狀污染物、SOx、NOx，漸次轉移比重到揮發性有機物(volatile organic compounds, VOCs)；尤其生活精緻化，有機溶劑使用量日益增多，使 VOCs 因光化學反應產生二次污染物(如 O_3)，對空氣品質的惡化有逐年增加之趨勢。

工業製程對於有機溶劑之運用相當普遍，無論是產品即爲揮發性有機化合物，或產品含有某比例之 VOCs 成份，或是將其做爲生產、加工過程之媒介，大多數工業製程都不免有 VOCs 之空氣污染問題。是以工廠在追求利潤之同時，亦應善盡企業責任，做好 VOCs 防制之工作。

但工廠如何從眾多 VOCs 處理技術中，選採經濟有效之控制設備，使製程廢氣之排放符合法規要求，爲工廠管理者或專責人員執行環保工作之重要課題。再加上 VOCs 污染除部份來自管道排放外，亦有不少污染源兼具逸散排放之特性，使得逸散性廢氣需經氣罩之有效收集後，方能讓所選適當之控制設備得以妥善處理而發揮應有的防制功能。

因此，本文內容旨在說明含 VOCs 廢氣之收集及處理技術，包括處理原理與應用、設備概述、主要設計參數或影響性能主要因素及操作注意事項等，提供業者選用防制技術及設備操作維護之參考，以因應日趨嚴格之環保標準。並在面對揮發性有機物空氣污染防制費第二期程開徵作業即將推動之同時，因應收費費率由 12 元/kg 調高至 15~30 元/kg 不等(隨排放量規模及所處防制區之級別而定)之對策上，當欲評估 VOCs 廢氣處理方案以節省空污費繳交之成本支出時，得以應用本文提供業者選擇經濟有效控制設備之參考。

二、局部排氣系統之適用時機及流程

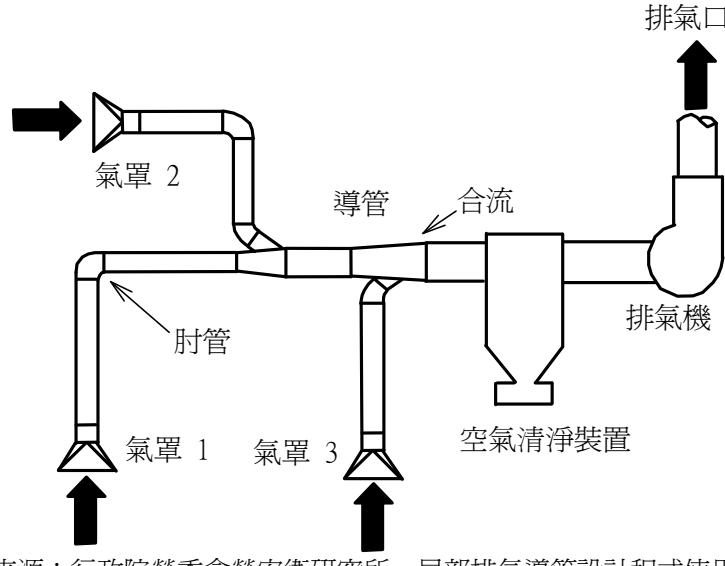
2.1 局部排氣系統之適用時機

隨著各項工業製程特性之不同，VOCs 逸散的特性亦有相當差異；且各個工廠的管理方式不同，儘管是有相同的製程，亦可能因管理不當而導致污染物大量排放。對於工業製程所逸散 VOCs 之控制對策有：加強設備之操作維護、製程改善及裝設局部排氣系統。工廠面對逸散性 VOCs 之防制問題時，首要之務應先檢討設備(包括生產設備與既有之防制設備)平日之操作維護等工作是否落實管理，進而評估製程改善之可行性(例：改用低溶劑含量塗料以降低 VOCs 的排放)，最後再考慮是否新設或增設局部排氣系統。

工業製程 VOCs 污染問題之解決，除藉加強管理、製程改善等廠內改善外，對於無法避免產生之污染物，則有賴於裝設局部排氣系統，將污染物收集及處理至符合管制標準後始予排放。局部排氣系統是工業製程逸散源控制空氣污染之最常用的方法，尤其是工廠在面臨具急迫性污染問題需求解決之時。

2.2 局部排氣系統之流程及組成

典型局部排氣系統之組成包括：氣罩、風管(導管)、控制設備、風車(排氣機)及煙囪等，其處理流程如圖 1 所示，乃藉由氣罩收集製程中所逸散之 VOCs 廢氣，續經風管輸送至控制設備處理，再經由煙囪(排放管道)予以排放；系統中所需之動力係由風車提供。局部排氣系統組成單元之功能及設置原則如表 1 所示。



資料來源：行政院勞委會勞安衛研究所，局部排氣導管設計程式使用手冊。

圖 1　典型局部排氣裝置

表 1　局部排氣系統組成單元之功能及設置原則

單元	功能	設置原則
氣罩	捕集逸散源之空氣污染物	確保最小抽氣風量，達到最高捕集效率
風管	輸送氣流之管道，使系統成爲一體	避免污染物沈積、壓損過大
廢氣處理設備	處理污染物至符合管制標準之各項規定	設置時需考慮：污染物濃度、污染物特性、廢氣特性、環保法令要求、設置成本、操作費用、二次污染處置等
風車	局部排氣系統之動力來源	•抽引風量需確保氣罩所需之最小捕集風量(控制風速) •靜壓需大於系統中各單元之壓力損失的總和
煙囪	確保由煙囪排放之空氣污染物足以有效擴散	高度需符合現行空氣污染物排放標準之各項規定

資料來源：行政院環保署，逸散性污染源控制，空氣污染防制專責人員訓練教材，民國 98 年 3 月。

2.3 局部排氣與整體換氣之比較

局部排氣與整體換氣兩者最大的差異在於局部排氣適用在污染物一旦生成即需立即排除，去除效率較佳；而整體換氣則允許污染物逸散到整個作業場所，只要不超過容許濃度即可，兩種系統之比較如表 2 所示。

表 2 局部排氣與整體換氣之比較

分類 項目	局部排氣	整體換氣
目　的	高濃度氣體、蒸氣、粉塵等污染源無法密閉且發生量大或其毒性太高時，於發生源處設置局部排氣系統，將作業環境污染物捕集，處理後再予以排出，以防止作業勞工接觸。	氣體、蒸氣、粉塵等污染源爲低毒性、污染源不大，且污染源遠離作業人員時，使用整體換氣系統，利用大量新鮮空氣將發生源稀釋，使污染物濃度降低至容許濃度以下。
效益評估	1.使用效果佳且較經濟，於工業通風上較常使用，惟設置與操作成本較高。 2.局部排氣系統之控制風速、搬運速度、控制設備處理效率及風車適用與否等皆爲評量局部排氣效果好壞之參考。	1.自然換氣不易獲取預期之效果，且較難維持所需換氣量；惟整體換氣系統之費用較局部排氣系統便宜許多。 2.換氣量應足夠且均勻擴散於作業空間，呼吸域不得有超過容許濃度之污染物存在，以作爲評量整體換氣效果好壞之依據。
適用時機	1.污染物毒性強或濃度高時。 2.污染物產生量多時。 3.污染物進入空氣流速快之場所。 4.作業人員距離污染源近時，可就近收集污染物。 5.換氣風量少，近距離捕集 VOCs，易控制 VOCs 擴散範圍 6.包圍式氣罩最理想，但不易應用於大範圍污染源。 7.外部式氣罩捕集效果易受側風(橫風)影響。 8.有安裝風管系統的可用空間，以導引氣罩接近污染源。	1.污染物濃度較低之場所。 2.污染物產生量少時。 3.污染發生源均勻且廣佈時 4.發生源遠離呼吸帶或濃度低時，可提高室內空氣置換率。 5.換氣風量大，控制設備初設置成本較高。 6.整體換氣需考量氣流方向，避免廢氣產生累積現象。

三、製程 VOCs 廢氣之收集

3.1 集氣設施對 VOCs 逸散源之重要性

逸散性 VOCs 排放源多爲需以人工操作之工作間、工作檯、無法密閉之連續式生產設備或需要偶而啓閉之設備裝卸口，常見之例子如表 3 所示。

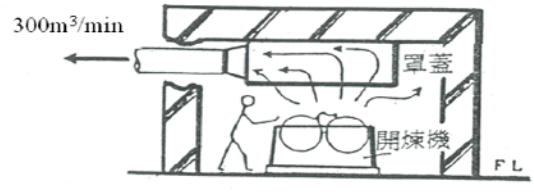
表 3　逸散性 VOCs 排放源之舉例

區分	VOCs 逸散源舉例
工作間	橡膠開煉廠房 噴漆房 塗裝室 溶劑塗料摻配房 印刷機房 凹版印刷機房(機台上部具熱風烘乾箱) 成型機房 貼合室
工作檯	塗裝換氣作業檯 油墨攪拌檯 電子零件溶劑除脂檯 溶劑清洗/洗滌槽檯
無法密閉之 連續式生產設備	烘乾機 乾燥機 輸送帶裝卸口
偶而啓閉之 設備裝卸口	化學反應器投料孔 稀釋操作設備 混合槽 溶劑乾洗設備 污水處理槽人孔

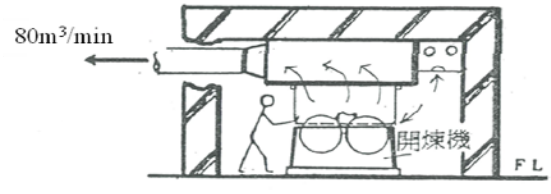
資料來源：經濟部工業局，氣態污染物控制技術，民國 81 年 11 月。

集氣設施爲控制此種逸散性 VOCs 排放源最重要設備之一，其設計裝置是否適當，將影響集氣效果及後續處理設施之規模甚鉅。以圖 2 之橡膠開煉機房集氣罩設計爲例，圖 2 之(a)單以上吸式氣罩收集之集氣風量達 300m^3/min 時，仍不免尙有死角而無法完全收集；若改成圖 2 之(b)於上吸式氣罩下方加裝圍封側罩，將廢氣於進一步逸散前導引進入氣罩，並延伸管道開口至房頂角落後，風量僅需 80m^3/min 即

可達到有效集氣目標。由前述可知，集氣系統設計良窳顯然爲逸散性 VOCs 排放源控制成敗之關鍵。



(a)改善前：單以上吸式氣罩抽引



(b)改善後：加裝圍封側罩及延伸管道開口

資料來源：經濟部工業局，氣態污染物控制技術，民國 81 年 11 月。

圖 2　橡膠開煉機房集氣罩改善前後之比較

3.2 氣罩之型式

氣罩係指局部排氣系統之入口端，乃是包圍排氣、蒸氣、粉塵等污染源，或指未能包圍時儘可能接近污染源所設之開口部(含狹縫)，而於此開口部以抽引氣流吸入污染物。氣罩依其與污染源及污染物散佈之相對位置，主要可分爲圍封式、廂式、外部式、接收式及推拉式等 5 種型式，如圖 3 所示。

1.圍封式氣罩

外型幾乎完全包圍污染源，僅有物品出入口、檢視孔等較小之開口，其所需抽引氣流極少，即可達最佳之抽(排)氣效果。

2.廂式氣罩

係指污染源周圍除因作業需要而留下一面外，其餘各面基本上皆須圍封之氣罩；而爲防止污染物逸散出氣罩，需於開口部進行抽引氣流，以控制污染物避免外洩。

3.外部式氣罩

(1)當無法將污染源包圍時，在不妨礙作業之原則下，與污染源分開而獨立設置之氣罩。

(2)本型氣罩需抽引開口面外污染源所產生之污染物，通常無法避免吸入多餘空氣，且易受外部亂流干擾所抽引之氣流等缺點。

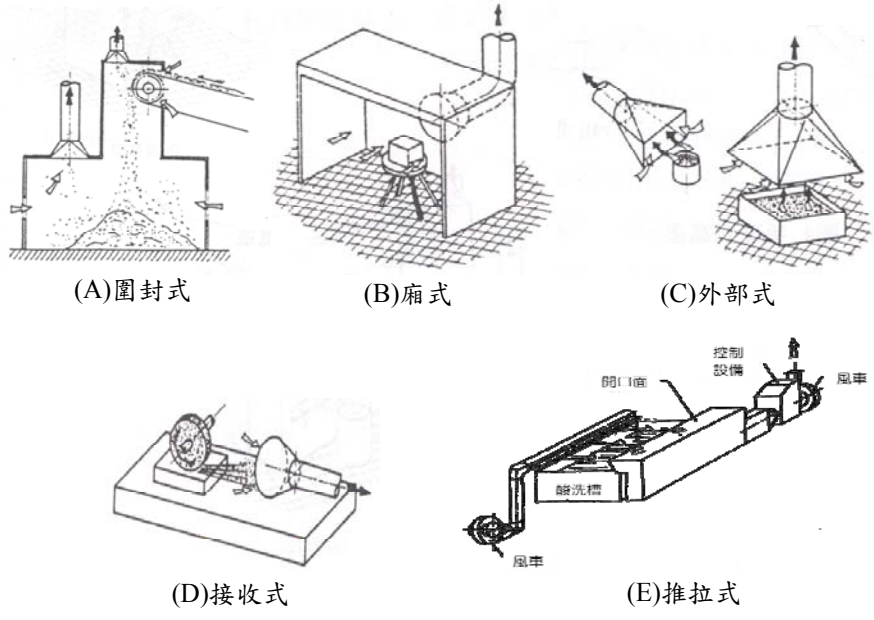
(3)開口面外捕集點之抽引氣流之流場分佈非直線性，因此，欲抽引距開口面較遠處之污染物時，需較大抽氣量。

4.接受式氣罩

由於污染源排放因熱浮力產生之上昇氣流，或因機具轉輪迴流運轉產生之慣性氣流等具固定方向之廢氣時，順著氣流方向以接受的方式捕集氣流所設之氣罩。其構造外觀與外部式氣罩較相似，但其機能特性迥然不同。

5.推拉式氣罩

當噴塗作業時，欲清洗、塗佈之物件過大而影響排氣之流線時；或外部氣罩與污染源相距過大時，單靠抽吸作用往往控制不了污染物的擴散，則可以在外部氣罩的對面設置吹氣口，將污染物吹向氣罩口，藉由吹吸氣流之綜合作用，以提高集氣效果。



(A)圍封式　(B)廂式　(C)外部式

(D)接收式　(E)推拉式

資料來源：經濟部工業局，局部排氣氣罩設計實例，民國 85 年。

圖 3　不同型式之氣罩種類

3.3 氣罩之控制風速

以氣罩完全吸引 VOCs 廢氣所需之氣體流速稱爲控制風速，其定義爲氣罩前緣，氣體所須具備之最小速度，以克服相反之氣流，使污染之空氣能流入氣罩之內。於實際設計上，當有控制風速之具體參考資料或作業別控制風速資料時，則可依該資料所列者選定；若無前者資料可予參考使用時，各種污染物質及發生狀況之常用控制風速如表 4 所示。

決定控制風速大小之因素一般包括：

1.氣罩型式：愈佳之氣罩型式，控制風速可較低。

2.污染物質之物理特性，例：分子量、比重、粒徑大小等。

3.VOCs 或有害物質之危害程度，例：毒性大小。

4.發生源及捕集點(飛散界限內之點均稱之)周圍氣流之大小與方向。

5.捕集點與氣罩之相關位置。

6.污染物質於發生源之狀況，例：擴散速度、慣性力大小、方向等。

7.周圍氣流(例：橫風)對氣罩吸引空氣流線之影響。

表 4　不同條件之控制風速參考值

發生或擴散之狀況	實　　例	控制風速(公尺/秒)
以無實質速度之狀態逸散於靜止之空氣中	由儲槽或液面蒸發、油脂溶解	0.3～0.5
以低速逸散於較靜止之空氣中	噴霧房、間歇性操作之裝箱或容器、低速輸送帶、銲接作業 電鍍液貯槽、金屬之酸液清洗	0.5～1.0
以活潑之發生擴散於有急速氣流之空氣中	較淺或狹長之噴漆房、卸料口、 粉碎機、輸送帶(機)之裝卸、裝袋作業	1.0～3.0
以甚快初速排放至快速運動之空氣中	磨碎機、研磨、噴砂、滾筒打磨	3.0～10

資料來源：行政院環保署，逸散性污染源控制，空氣污染防制專責人員訓練教材，民國 98 年 3 月。

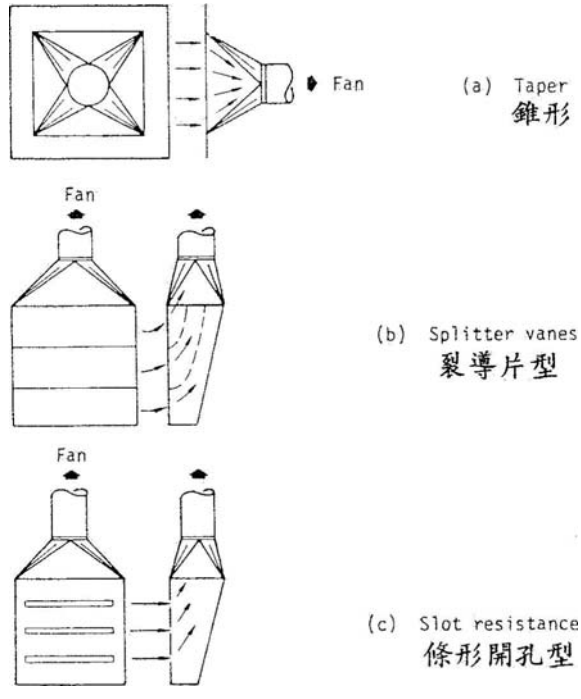
有 2 個因素會影響外部式之捕捉型氣罩的效能，即控制風速是否足夠與控制風速是否均勻分佈。爲使進入氣罩時能均勻分佈，可藉圖 4 之氣罩達成之。

1.錐形氣罩(taper)：通常錐體角度爲60°，但對大型氣罩而言，則此型不切實際。

2.裂縫型氣罩(splitter vanes)；此類型之好處爲氣流阻力小，節省空間。

3.狹縫型氣罩：此型氣罩只能使進入氣罩之控制風速均勻，但無法增加控制風速，通常此種氣罩無法捕捉約0.6m 以外之廢氣，狹縫寬如不超過長之20%，則可達到速度均勻分佈之目的。

對於外部式氣罩，由於氣罩之吸引氣流原理，隨著於離氣罩開口面的距離增加，其吸引流速之減少相當顯著，即隨著離開氣罩口距離漸遠而風速急遽降低(如圖 5 所示)，其降低程度幾乎隨著距離之平方成正比；換言之，當欲設計捕捉距氣罩更遠之處的污染物質或廢氣時，其所需要的控制風量數值將會變得非常大，此於設計應用上是不切實際效益，由公式 $Q= V (10X^2+A)$中，「風量(Q)」隨著「距離(X)」之平方倍而增加即可知曉。若開口面至捕集點間之距離中的最大距離爲 X，對直徑爲 D 之圓形氣罩，建議 X≦D；對短邊爲 W 之矩形氣罩，建議 X≦1.5W。



資料來源：經濟部工業局，局部排氣系統設計與案例(2006 更新版)，民國 95 年。

圖 4　三種促使控制風速均勻分佈之氣罩設計方式

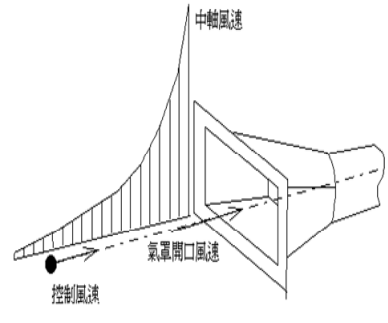


圖 5　控制風速與距氣罩開口面之距離的相互關係

3.4 氣罩控制風量之決定

當決定氣罩型式後即可估算所需抽風量，主要係依據氣罩開口型式、面積、相對距離及控制風速等條件求得。圍封(密閉)或箱式氣罩之控制風量，可以開口面吸引速度大於控制風速之原則計算，設計時並應考量氣流分佈之均勻性。外部氣罩之捕集點均在開口面外各處，故氣罩型式及控制風量，須以飛散界限內各捕集點之吸引速度大於控制風速之原則設計之。有關常見氣罩型式之控制風量計算如表 5 所示，其中氣罩面附裝凸緣(或稱法蘭)之吸風口，可防止吸風口邊緣產生渦流，可降低控制風量，並可減少氣罩進口之壓力損失(壓力降)。

表 5　不同氣罩型式及其控制風量計算

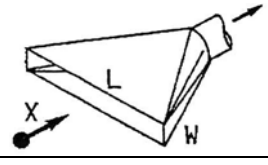
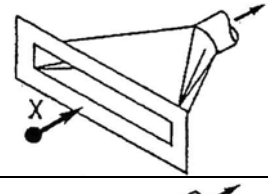
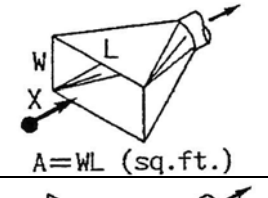
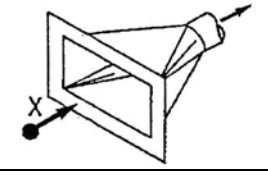
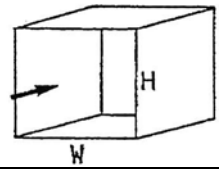
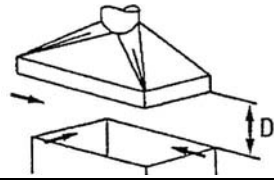
氣罩型式	說　　明	外形尺寸	風　　量
	狹縫型	W/L≦0.2	Q＝3.7LVX
	凸緣狹縫型	W/L≦0.2	Q＝2.8 LVX
	簡單開口型	≧0.2 及圓弧形	Q＝V (10X^2＋A)
	凸緣開口型	≧0.2 及圓弧形	Q＝0.75V (10X^2＋A)

表 5　不同氣罩型式及其控制風量計算(續)

氣罩型式	說　　明	外形尺寸	風　　量
	亭型	視工作台而定	Q＝VA＝VWH
	傘頂型	視工作台而定	Q＝1.4PDV P＝工作台之周長 D＝距離工作台之高度

資料來源：經濟部工業局，局部排氣系統設計與案例(2006 更新版)，民國 95 年。

3.5 氣罩四周之亂流的防止

氣罩四周之亂流如達到足以影響控制風速至不容忽視之程度時，若不採取適當防止措施，不但需要較大之控制風速，且亦足使氣罩失去正常的集氣性能。爲防止此類亂流或橫風之影響，可設置如圖 6 所示之阻礙板(buffer)或導風板(guide)，以阻止亂流並保持氣罩之正常性能。

對於亂流之起因，可區分二類，其中產生亂流之最大原因常爲門窗開放產生之通風，以夏天爲例，通常均開放上方之窗戶，使得局部排氣之效果大打折扣：

1.因作業產生者

(1)熱空氣流，特別是來自熱過程或生熱之作業上。

(2)機械之運動、轉動或振動，例：研磨之輪子、輸送之帶子等。

(3)物料之裝卸、轉運或運輸，例：傾卸、容器裝填等。

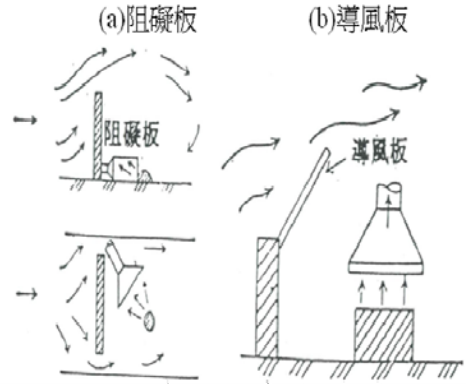
2.由四周而來者

(1)因門、窗開放而產生之通風。

(2)供氣氣流。

(3)散熱器或爐等產生之對流。

(4)操作者之移位或物體之移動。



資料來源：中華民國工業安全衛生協會，工業通風設計講習基本教材-局部排氣裝置設計基本篇。

圖 6　氣罩四周之亂流的防止措施

3.6 氣罩設置之常見缺失及應注意事項

1.氣罩設置之常見缺失

氣罩爲局部排氣系統入口部份，是整個系統中相當重要的一環。氣罩型式及排氣量均將影響後續單元，如風車、風管及控制設備等之容量大小及消耗動力，其排氣效果更直接影響作業環境改善及污染防制成效。因此，氣罩若無實際之集氣效果，或雖具良好效果但妨礙作業之進行，均非設計良好之集氣設備；於工廠對逸散排放之防制工作上，當有設置氣罩時，其常見之主要缺失如下。至於其出現於不同行業別集氣之常見問題與改善對策如表 6 所示。

(1)氣罩型式選用不適切。

(2)氣罩面積未有效涵蓋污染源。

(3)氣罩開口部面積過大。

(4)氣罩距污染源過遠。

(5)控制風速不足(原因可能來自：系統壓損過大、風車老舊或維護不良)

(6)集氣效果受橫風干擾。

(7)氣罩破損、洩漏。

表 6　不同行業別集氣之常見問題與改善對策

行業別	集氣問題	改善對策
印刷電路板業	1.一次銅、二次鍍銅酸氣捕集效率不佳	(1)檢查現有集氣罩之設置位置是否恰當及抽氣系統之抽風量是否足夠
		(2)電鍍槽設置推拉式集氣罩
		(3)槽體旁設置一排側吸式集氣罩
		(4)電鍍作業區圍封，並作整室換氣
	2.文字印刷過程中，VOCs 逸散未捕集	(1)於作業區設置可涵蓋作業區之傘頂式集氣罩
		(2)改善空調、增加室內換氣次數
	3.防焊印刷機集氣罩捕集效率不佳	(1)於現有氣罩下方設置活動式擋板，防止橫風干擾
	4.綠漆攪拌槽未設集氣罩	(1)攪拌槽上方設置活動式集氣罩
家具製造業	1.氣罩設計不良，收集效率不高	(1)儘可能包圍污染源以減少抽氣量與橫風干擾
		(2)減少氣罩之開口面積
		(3)氣罩位置重新檢討規劃
	2.水幕式洗滌台對塗裝之集氣效率不佳，致 VOCs 逸散	(1)設立塗裝室，加強局部排氣
		(2)檢討抽氣風量，並設置擋板以阻擋橫風干擾集氣
	3.採用空氣式噴槍塗裝，造成 VOCs 逸散	(1)改良塗裝方式，例：採用靜電塗裝，以提昇塗佈效率
		(2)設置局部排氣系統
金屬表面塗裝業	1.噴塗室密閉性不夠	(1)除將不必要之開口密封或安裝活動門，並利用風車抽風之動力，使噴塗室維持微負壓之情形
	2.塗裝室氣罩之抽引風速不足造成 VOCs 逸散	(1)加大抽氣機之馬力
		(2)於入料口加設透明塑膠簾幕予以圍封
	3.水幕式氣罩對油漆所含之 VOCs 處理效果不佳	(1)設立塗裝室，加強局部排氣
		(2)加裝廢氣處理設備
	4.脫脂及酸洗採浸置方式易產生酸鹼氣之逸散	(1)設置簡易防腐蝕槽蓋
		(2)設置推拉式集氣罩
	5.浸漆程序未設廢氣收集及處理設備	(1)採用狹縫式氣罩，經收集後可採用活性碳吸附塔處理

表 6　不同行業別集氣之常見問題與改善對策(續)

行業別	集氣問題	改善對策
印刷業	1.油墨槽及後段乾燥處理時 VOCs 逸散	(1)可採用圍封抽氣處理方式減少 VOCs 逸散
		(2)凹版印刷機之烘乾箱由吹入改爲吸入方式而爲負壓系統，並將印刷品出口處改爲空氣入口處，及於印刷品入口處連接風管、風車以抽引排氣，使得烘乾箱兼具氣罩功能
	2.噴粉乾燥、隔頁過程未設集氣設備或位置不當	(1)採用液態噴粉方式及新式印刷油墨如 UV 油墨
		(2)於噴粉處及底之收粉盒附近加裝集氣管收集，再以袋濾集塵機過濾處理
	3.水槽液液中 IPA 所占之比例高於 8%，廠內會有較明顯之 VOCs 產生	(1)降低IPA之含量(低於5%)或降低水槽液之溫度(5℃～6℃)
		(2)將濕潤系統予以密封
	4.清洗墨輥及橡皮布表面造成 VOCs 逸散	(1)將溶劑罐密封，減少開口之逸散面積
		(2)使用過之抹布，應置於封閉容器內
		(3)設置外部式狹縫型氣罩
	5.上光及膠裝均使用有機溶劑，加熱烘乾後產生 VOCs 逸散	(1)將攪拌槽上方之開口處加以蓋封
		(2)廢氣以上吸式氣罩收集
塗料製造業	1.槽體周圍未設置任何抽氣罩	(1)設置適合作業環境之抽氣罩
		(2)將逸散污染源圍封抽氣處理
	2.現場集氣效果不佳	(1)更換風車馬力，以增進抽氣效果
		(2)變更氣罩型式，增進捕集效率
		(3)修正集氣罩之控制風速

資料來源：行政院環保署，工廠空氣污染防制控制輔導與示範執行專案工作計畫，民國 96 年 12 月。

2.氣罩設置應注意事項

(1)應視作業方法、擴散狀況，選擇適當之氣罩型式及大小。

(2)氣罩應儘可能設置於每一發生源及接近發生源。

(3)不使被污染之空氣流動經作業人員之呼吸帶。

(4)必須具備足夠之控制風速。

(5)爲避免因抽引距氣罩開口面過遠處之污染物而導致抽氣量過大的狀況出現，就圓型氣罩(設直徑爲 D)，其抽引距離以不超過 1 倍的 D 爲原則；就矩型氣罩(設寬爲 W)，其抽引距離以不超過 1.5 倍的 W 爲原則。

(6)儘量密閉發生源及製程，儘可能使用圍封式氣罩。

(7)氣罩抽氣方向儘可能與污染源氣流運動方向一致，以充分利用污染氣流之初始動能。

(8)減少或消除周圍氣流對氣罩吸引空氣流線之影響。

(9)氣罩於必要時可加裝凸緣，其風量約可降低 20~50%，而壓損約可降低 50%。

(10)儘量減少集氣罩之開口面積，以減少抽氣量。

(11)應使用氣罩抽引污染空氣，儘可能不使用風管抽引。

(12)作業時間內應保持有效運轉。

3.氣罩結構與材料選用重點

(1)氣罩結構

若溫度與污染物之腐蝕性不太嚴重，氣罩材料通常選用鍍鋅鋼製就足敷所需。如果有「彎頭」及「連接處」，其金屬材料之厚度至少要比所連接管道板材者爲大。除了較小的氣罩外，通常都需要架裝角鋼加以補強。

(2)高溫材料

溫度於 480℃以下時，建議採用黑鐵(非不銹鋼之鐵材類)；溫度於 200~260℃之間通常用厚度約 2.6mm 的金屬板材。其所需厚度與溫度成正比例增加，一直到 76mm 的厚度爲止。溫度高過 480℃甚至到 870~980℃時必須使用不銹鋼，若氣罩的溫度周期性地高過 980℃，或者是長時期的高於 870℃者，則必須使用具有耐火性的金屬材料。

(3)抗腐蝕性材料

有許多材料能適用於有腐蝕性的情形，合板用於輕質塵埃或暫時性的設備。有時也可以在鋼上面塗一層橡皮或塑膠，就像塗油漆一樣。如果腐蝕性很嚴重的話，氣罩必須用 PVC 板、纖維玻璃或其他耐腐蝕材料等。

(4)氣罩與管道之連接

雖然設計氣罩最重要的項目是大小、形狀、氣罩面方位及排氣風量等，氣罩之深度及其與管道連接處之形狀亦要考慮在內。若氣罩太淺，其效果無異

是只在管道的開口加裝凸緣而已；但是如果太深則將浪費許多磨擦耗損之能量。於氣罩與管道之間必須有一個圓錐形的連接部，其角度小於 60°，此一連接部之形狀是氣罩「壓損」的決定因素。

3.7 氣罩配合作業場所之應用示例

對於 VOCs 控制設備是否能有效運轉，就要看從排放源所逸散的廢氣，有多少能被吸入氣罩中。而爲達有效收集，故須考量裝設適合於污染源狀態之型式的氣罩，此時除應設計有足夠的控制風速與風量及能克服系統壓損而能提供必要風量之風車外，往往尙需瞭解生產過程、作業方法、生產設備構造或型式、污染發生狀況(逸散方向及慣性力大小)等資訊，儘量找到可讓吸入方向與逸散流動方向一致的位置，裝設適合於吸引的型式及其大小的氣罩。惟因氣罩常要設於靠近發生源之位置，不免會與生產作業人員之操作的方便性有所衝突，此時在爲也能兼顧有效集氣及生產操作方便之期望下，有時需要花些巧思或創意設計氣罩的安裝，以下茲舉數例氣罩配合作業場所之應用示例如圖 7 之(1)~(5)所示，以期能收拋磚引玉之效。

1.圖7之(1)，因圍封式氣罩之所需控制風量均要比相同條件下之外部式氣罩爲高，故應儘量密閉。若因作業空間需求而無法密閉，仍儘量採用圍幕包圍，非不得已才使用外部式氣罩。

2.圖7之(2)，反應槽基本上於操作時均會密蓋，頂多也只是某些污染會從槽蓋之閉合不良處或空隙逸散出來，此時可配合槽蓋形狀設計圓錐形氣罩置於上方予以集氣。而於反應作業完成後之掀蓋階段時，因上方投料作業佔據原有空間，因可撓管之設計使得上吸式氣罩可配合調整爲側吸式，仍可持續進行集氣。

3.圖7之(3)，網版印刷後之半成品於經滾輪輸送進入烘乾機之前，因與空氣接觸而造成 VOCs 逸散，此時可設置覆蓋型之圍封式氣罩予以集氣，再與來自烘乾機廢氣一併抽引至控制設備處理。此覆蓋型之圍封式氣罩可設計成掀背式，以配合現場檢修作業之所需而可予掀啓。

4.圖7之(4)，浸漆槽之側吸式氣罩採用摺疊式設計，當浸漆作業完成後，於出架、取出移動及下一批次上架等操作時，側吸式氣罩往下摺疊，以方便現場作業員工之操作。

5.圖7之(5)，電鍍槽、酸洗槽或其它作業槽，當槽寬過長而不利單以一面之側吸式氣罩捕集廢氣時，即考量吸入氣流稍爲離開氣罩開口面就會急遽降低抽引能量，故可設計採用雙側吸式，氣罩與污染源之距離就不會過大。本案於另一側也可設計成吹出氣流而爲推拉式氣罩，利用吹出氣流直到比較遠之處仍可持續其能量密度而降低有限之特性，以提升集氣效率。再者，吹出氣流會形成氣幕(air currtain)而對橫風或側風之亂流干 擾具有良好的阻斷能力。

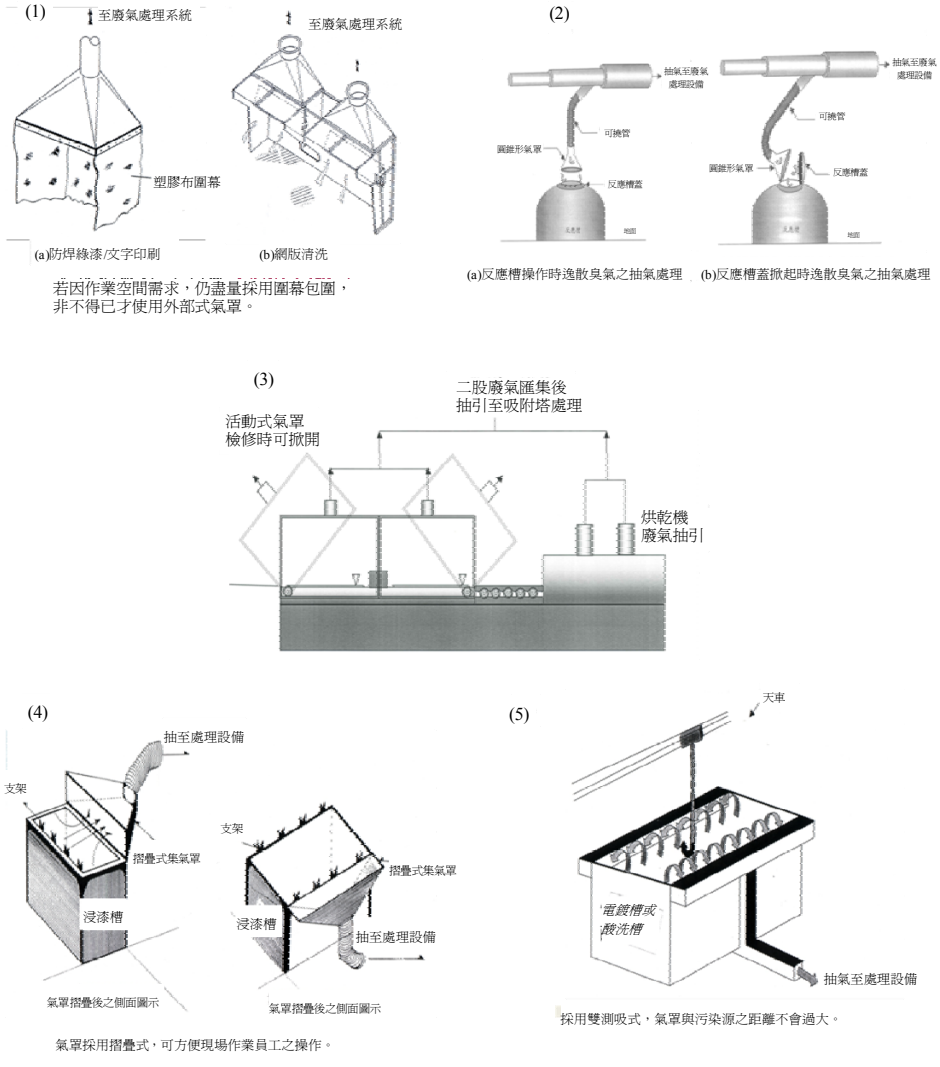


圖 7　氣罩配合作業場所操作之應用設計

3.8 氣罩控制效能評估

1.勞安衛法規對氣罩性能之規定

因氣罩位於局部排氣系統之入口，故其控制風速攸關局部排氣系統之性能。勞工安全衛生法規有關局部排氣系統控制風速之規定，主要出現於「有機溶劑中毒預防規則」及「粉塵預防危害標準」中。前者將氣罩之型式區分爲包圍型、外裝型(又分側吸式、下吸式、上吸式)，分別規定各式氣罩應有 0.4~0.8m/sec 不等以上之控制風速；後者則加上考量不同之粉塵發生源，亦規定各式氣罩應有 0.7~1.3m/sec 不等以上之控制風速。惟因控制風速與勞工曝露並無直接相關，目前勞安衛法規對於控制風速之規定均已刪除。

2.環保法規對氣罩性能之規定

至於環保法規對於氣罩性能之規定，首度出現於「聚氨基甲酸脂合成皮業揮發性有機物空氣污染管制及排放標準(86.12 訂定發布)」中，其係直接參照「有機溶劑中毒預防規則」，對所裝置之 VOCs 逸散局部集氣設施，施予控制風速之規定。惟其並無氣罩控制風速測定之相關標準檢測方法或配套措施之公告，使得此等控制風速之規定於稽查可行性不易落實。

有鑑於控制風速不易執行稽查，故「膠帶製造業揮發性有機物空氣污染管制及排放標準」於 97 年 3 月訂定發布，已轉朝向逕以「設施規範」搭配「煙流判定」對集氣系統進行規定，其要項如下：

(1)新設製程及全廠含 VOCs 原(物)料許可用量達 400T/yr 以上者，均應：

A.採用圍封式集氣系統，其指以阻隔物包圍污染源，使污染源與廠房其他空間隔絕之系統。該系統之圍封空間應維持負壓操作狀態，使污染源排放之空氣污染物能完全收集至污染防制設備。

B.於作業區開口處設置壓差計，每日應確實記錄操作時之壓損，以確認該系統之負壓操作情形。

(2)非屬前述之製程者，其混拌、塗布及烘乾操作單元應：

A.採用圍封式集氣系統或局部集氣系統，採用局部集氣系統者，應依煙流判定作業確認有效集氣。

B.局部集氣系統：指將製程設備所產生之空氣污染物利用動力吸引、收集進防制設備處理之系統。

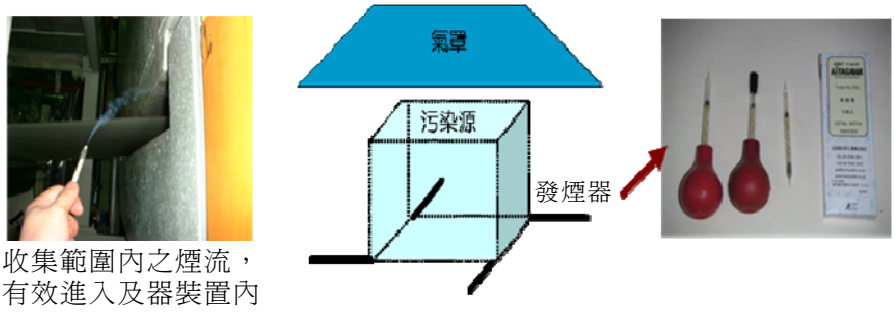
C.煙流判定：指以目測判定發煙器之煙流方向，確認收集範圍內任一處之氣體是否進入集氣系統內所爲之測定。

3.氣罩控制性能評估

(1)煙流判定

A.參採目前勞委會使用發煙器方式，因應不同之氣罩與污染源相對位置，調整測試位置，以確認氣罩功能。

B.發煙器放置位置與污染源處於同一水平面，並且放置於污染源的四個角落位置，如圖 8 所示。



資料來源：行政院環保署，膠帶製造業揮發性有機物空氣污染管制及排放標準法規說明，民國 97 年 5 月。

圖 8　煙流判定作業之示例及發煙器

(2)勞工曝露評估

A.局部排氣裝置運轉時與停止時，分別於勞工呼吸帶採樣測定，比較二者差異。

B.以氣罩所在作業人員之個人採樣結果爲判定基準。

(3)氣罩外測濃度測定

A.於氣罩外所測濃度稱爲「抑制濃度」，比較運轉時與停止時之濃度測值，以評估控制性能。

(4)控制風速測定

雖勞安衛法規已將控制風速之規定刪除，但在效能評估上或設計時對於控制風速之選採，可來自其他相類似污染源之氣罩具良好集氣效果時，現場量測取其實際值以供設計之參考，控制風速之測定仍屬一務實之方法。

A.測定時先以發煙管偵知流線方向，採具方向性之風速計於垂直流線測定。

B.對於包圍式氣罩，將其開口面分割成 16 個以上之方格，邊長 0.5m 以下，量測各方格中心之速度，取其最小者爲該氣罩之控制風速。

C.對於外部式氣罩，則量測污染發生源或作業位置距離氣罩最遠點之處的風速，爲該氣罩之控制風速。

D.局部排氣系統開始使用時測定各氣罩之控制風速，使用一段時間後再予以測定各氣罩之控制風速，與前者比較，以瞭解其性能狀況。

四、VOCs 控制技術之比較及選擇

4.1 VOCs 控制技術之比較

常見 VOCs 控制技術包括燃燒式控制(直接焚化法、觸媒焚化法)及非燃燒式控制(吸附法、冷凝法、吸收法及生物處理法)等 2 大類，業者爲符合相關法規排放標準之要求，必須依廠內之污染產生源之廢氣特性，評估選擇預處理或串聯不同處理設備之方式來達到預期之目標，而控制技術之優缺點及其設計因子則請參考表 7。

就能源回收效率而言，以蓄熱式焚化最高(大於 95% 以上)，其他焚化方式也都可額外裝設熱交換器，以有效回收熱源。熱回收對於許多有熱需求之行業別部份烘乾製程(如塗裝、膠帶、印刷、PU 合成皮製造等)，或是做爲廢氣之預熱，皆可將熱源做最有效的應用，也能節省相關燃料或能源費用，因此目前國內許多業者已將具廢熱回收之熱焚化處理方式，做爲較爲優先選擇之處理設備。

就 VOCs 處理效率而言，仍以焚化處理方式最高，一般去除效率皆可大於 95% 以上。而活性碳吸附方式則需視活性碳之裝填量及其各項設計、操作參數而定，一般也可達 90% 以上之效率，但需定期更換或線上再生活性碳，或脫附濃縮後另外連接冷凝或焚化設備，進行回收或破壞去除。而生物處理及冷凝回收之處理效率

比較低，但一般也都可達到 70% 之效率。

各類技術依其原理及特性需要不同的前處理，包括稀釋、預熱、除濕、冷卻及干擾物質(粒狀物、高沸點物質、毒化物、矽化物)之去除等，以避免影響後續控制設備之正常運轉及處理效率。不同技術亦會有不同的二次污染產生，其中直接焚化與蓄熱式焚化等技術會因高溫而產生 NOx 問題，其他如觸媒焚化法、吸附法、生物處理法之二次污染物則以廢棄物爲主，分別爲廢棄之觸媒、飽和活性碳及濾料等。而吸收法與生物處理法則分別以水爲洗滌液與增濕，不免會有排放廢水之問題。

表 7　VOCs 控制技術之優缺點及設計因子

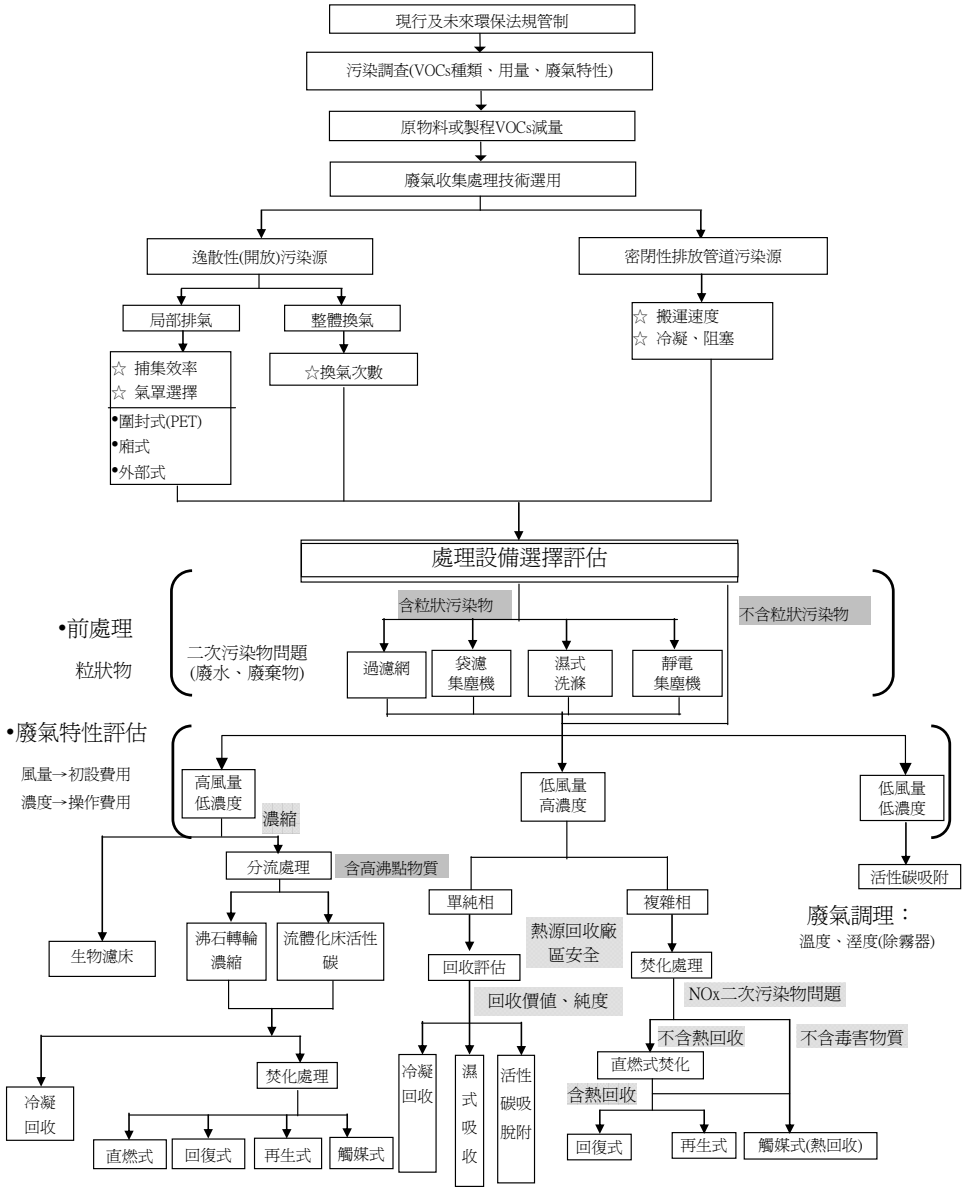
處理技術	優點	缺點與限制	設計因子
直接焚化	可達 95%以上之熱回收	不宜用於批式操作	燃燒溫度、停留時間、氧氣含量、混合程度、排氣流率、VOCs 濃度、排氣組成、排氣燃料值
觸媒焚化	可達 70%以上之熱回收	熱效率受操作條件變化影響，鉛、砷、磷、氯、硫、粒狀物會使觸媒中毒	操作溫度、空間速度、觸媒性質、排氣流率、氧氣含量、VOCs 濃度、排氣組成、排氣燃料值
冷凝處理	可回收產物	不宜用於沸點 38℃之物質，冷凝器易受污垢累積	排氣組成、冷凝溫度、排氣流率、混合物露點
吸附處理	可回收產物，可做爲後處理設備之濃縮器，適用於週期性操作	不宜用於相對濕度大於 50%之氣體，酮、醛及酯類會阻塞碳之孔洞	排氣流率、吸附容量、排氣組成、進氣溫度、平衡性
吸收處理	可回收產物	需要外來洗滌介質，缺乏平衡數據情況下設計有困難，氣流中粒狀物會堵塞填料	填料種類、排氣流率、進氣溫度、氣液平衡
生物處理	對於低濃度氣流有效，較低操作成本	需要大量空間，微生物在 10~38℃溫度範圍有效，若適當的濾床濕度與 pH 值無法維持，微生物將死亡	濾料大小、濾料材質、排氣流率、排氣組成、氣流溫度、廢氣前處理

資料來源：經濟部工業局，揮發性有機物廢氣減量及處理技術手冊，民國 93 年 12 月。

4.2 VOCs 控制技術之選擇

選擇控制設備時，須兼顧生產條件、廢氣特性、處理效率、環境因素、操作彈性及經濟效益等，以評選最佳技術。國內外環保設備的製造技術不斷提昇，業者也

有許多不同種類技術的改良及研發，因此 VOCs 處理效率已不斷提昇，設備本身也各有特色及優缺點。對於使用者而言，要能夠考量製程及廠內不同需求，選擇最適當的控制技術，才能夠發揮其效能，有關控制技術選用考量原則及流程如圖 9 所示。



資料來源：經濟部工業局，揮發性有機物廢氣減量及處理技術手冊，民國 93 年 12 月。

圖 9　VOCs 控制技術選用原則及流程

五、製程 VOCs 廢氣之處理

5.1 焚化技術

5.1.1 處理原理及應用

1.處理原理

焚化法係將廢氣中 VOCs 成份於高溫下氧化分解，而達清淨之廢氣後排放。此法優點爲適用於所有可燃性成份，缺點爲燃料消耗量大、操作成本高。

焚化爐設計需能供給氧氣、滿足燃燒溫度、停留時間及廢氣擾流等 4 個燃燒條件，其中各條件皆可視需要情況加以修正，並準確控制，以完全燃燒廢氣。再者，VOCs 氣體在與空氣於一定溫度下混合時，其體積之濃度分率需在燃燒界限範圍內才可燃燒。

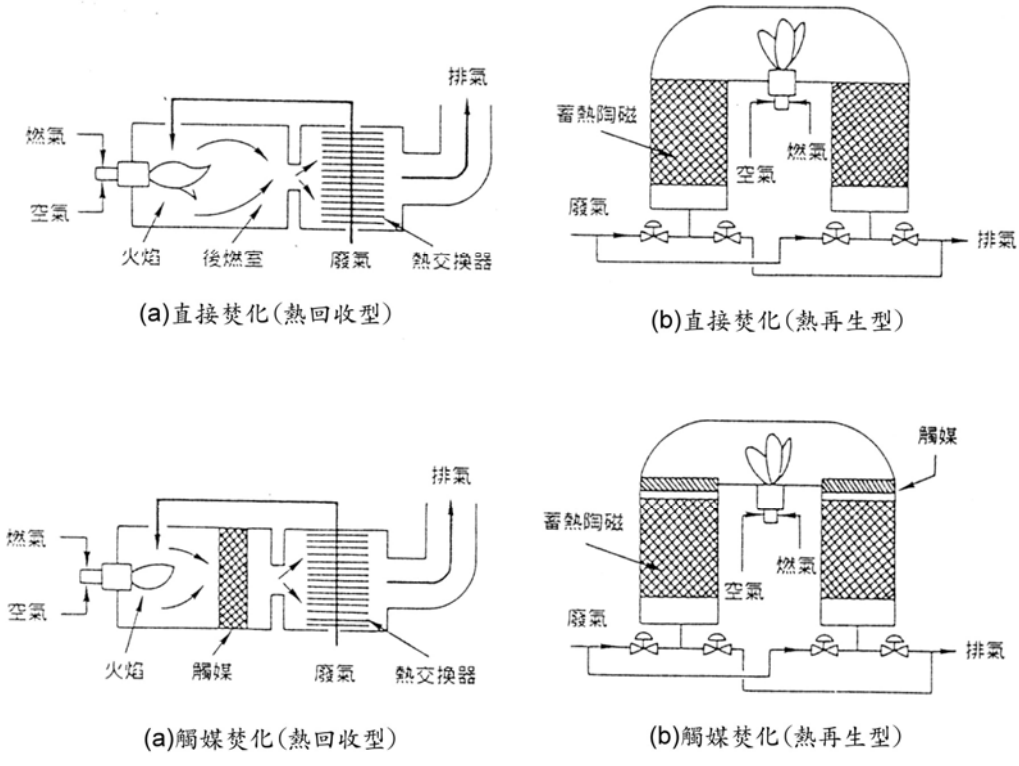
2.焚化技術之應用

用焚化法處理 VOCs 爲一有效的控制方法，最簡單的焚化方式爲直接焚化，但因燃燒溫度較高(650～850℃)，故需考量降低燃燒溫度與廢熱回收問題(一般採回復式熱交換器之最高熱回收率僅可達 70%)。前者可藉觸媒的催化作用而降低 VOCs 的氧化溫度(250～400℃)，後者近來已發展出一種高熱回收率之蓄熱式焚化法，其熱回收率可達 95%以上，大大地減少了所需輔助燃料的用量。

因此焚化設備之分類方式，可依觸媒的有無及熱回收方法分類，前者可分爲無觸媒之直接焚化法及觸媒焚化法 2 種，其主要差異在於燃燒溫度的不同及觸媒之有無；後者則可分爲熱回收型(thermal recuperative)及熱再生型(thermal regenerative)。

熱回收型又稱熱回復式，係以表面式熱交換器(surface heat exchanger)回收高溫排氣之熱量，但熱回收率小於 70% ；熱再生型又稱蓄熱式，係以陶磁或石質蓄熱材回收排氣熱量，一般熱回收率可達 85%以上；焚化設備之分類如圖 10 所示。

對於大風量之 VOCs 廢氣處理而言，若採直接焚化處理，則可能甚不經濟，故針對此類廢氣之處理，可採用轉輪濃縮技術先行將廢氣濃縮後再予以焚化。



資料來源：行政院環保署，揮發性有機物空氣污染防制及排放標準技術輔導計畫─環保人員手冊，民國 87 年 4 月。

圖 10　不同型式之焚化設備

5.1.2 直接焚化法

1.設備概述

直接焚化設備對含任何濃度 VOCs 之廢氣，可藉由特定燃燒溫度以獲得高處理效率。來自製程 VOCs 廢氣進入裝設於焚化爐附近之熱交換器，藉由處理後排氣之餘熱先進行熱回收，已經預熱之廢氣再進入焚化爐內進行氧化處理。爲經常保持一定之燃燒溫度，焚化爐應安裝保溫裝置，以防止爐內之溫度降低。其裝置構造簡圖如圖 11 所示，焚化設備主要有三大部份：

(1)餘熱利用(熱交換器)

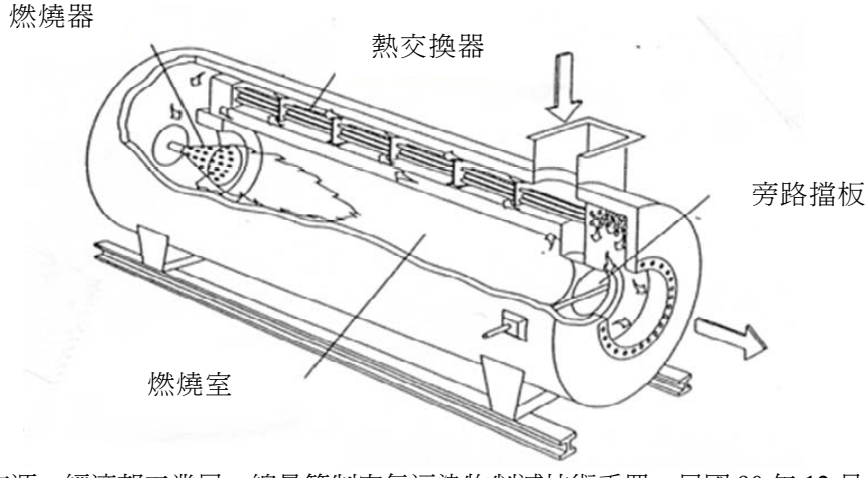
直接焚化爐之燃燒溫度一般約爲 650～850℃，可利用燃燒後高溫廢氣之餘熱預熱待處理廢氣，以節約燃燒時之燃料用量。餘熱利用效率與停留時間之大小有關，若停留時間大則預熱效果充分。

(2)燃燒器(噴嘴)

經預熱後之待處理廢氣，即可進入焚化爐藉由瓦斯燃燒噴嘴所噴出火焰進行燃燒，設計時應考慮燃燒器之燃燒容量足以負荷廢氣風量，以免造成燃燒不完全。

(3)焚化爐體(燃燒室)

焚化爐之內部需要能經常維持適宜之燃燒溫度，故其耐火材外側構造須具有保溫裝置。焚化爐在構造設計上雖有足夠之處理容量，但若不具能足以維持適宜燃燒溫度之保溫裝置時，將會造成爐內溫度降低，致有機物質燃燒不完全情形發生之虞。此外，隨著溫度提升而致風量之增加，若其停留時間不足 0.3～0.6 秒，則廢氣亦有燃燒不完全之虞。



資料來源：經濟部工業局，總量管制空氣污染物削減技術手冊，民國 90 年 12 月。

圖 11 直接焚化爐之設備構造

2.設計操作重點

(1)3T 條件及處理效率

一般熱焚化的火焰溫度可達 1,370℃，混合氣體在燃燒室燃燒溫度爲 650~850℃，氣體停留時間爲 0.3~0.5 秒，氣流速度爲 3~15m/s。在上述條件下，VOCs 之處理率可達 99%以上。

焚化所需溫度一般視廢氣成份、停留時間及處理效率而定，表 8 爲典型 VOCs 及臭味氣體之燃燒溫度與處理效率之代表值，表 9 爲建議之燃燒溫度，若燃燒溫度愈高，則處理效率愈高。設計時須準確的控制燃燒溫度、停留時間及廢氣的擾流強度等三個主要因素，以使廢氣獲得完全燃燒。

(2)可能二次污染狀況

直接焚化法之優點爲適於處理各類有機廢氣及臭味氣體，完全燃燒之生成物通常爲 H_2O、CO_2、NOx、SOx 等；但缺點爲燃料費可觀、操作成本高，同時若無連續且高濃度之廢氣污染源，則會造成能源之浪費。若燃燒不完全時，可能產生甲醛、有機酸、芳香酐等具有惡臭味之物質，因此燃燒器應設計使含 VOCs 及惡臭物質廢氣直接通過火燄，並使氣體在燃燒室有足夠燃燒溫度、停留時間及擾流強度，以確保處理效率。

表 8　燃燒溫度與處理效率之關係

有機成份	停留時間(秒)	燃燒溫度(℃)	處理效率(%)
乾性油樹脂	0.45	640	80
聚酯樹脂	—	695	99.6
低級脂酸、胺類	0.3	720	無臭
低級脂酸、丙烯類	0.5	550	無臭
酚、氨	0.5	700	無臭
油臭	0.5	700	98
甲醛、一氧化碳	1.0	650	無臭
甲苯、二甲苯	—	650	92
照相凹版印墨、光油	—	735	97
碳氫化合物*	0.3～0.5	590～680	90 以上
碳氫化合物＋一氧化碳	0.3～0.5	680～820	90 以上

註*：甲烷、芳香劑、溶纖劑轉化率爲 90%以上時，反應溫度爲 760～820℃。
資料來源：經濟部工業局，揮發性有機物廢氣減量及處理技術手冊，民國 93 年 12 月。

表 9　直接焚化之建議燃燒溫度

污染源	燃燒溫度(℃)
臭味	700～850
油脂排煙	650～850
烤漆爐	650～820
揮發溶劑	700～820
漆包線	760
精製操作	650
炊具上漆	650
乙烯塑料溶膠處理	650～760
燻煙	650
註：廢氣停留時間控制於 0.3～0.5 秒	

資料來源：林文川，臭味控制技術的介紹，台北國際環保暨能源展專刊─環保特刊，民國 85 年。

(3)主要設計參數

設計直燃式焚化爐時，一般設計的步驟包括：決定爐體燃燒溫度、計算空燃比、計算廢氣量、計算爐體尺寸。此外，VOCs 處理效率主要受爐溫及停留時間所影響，因此一般設計參數如下：

A.燃燒溫度：650～850℃。

B.停留時間：0.3～0.5 sec。

C.焚化爐內氣體流速：6～12 m/sec。

D.VOCs 處理效率：95%以上。

E.熱回收率：

・單一熱交換單元：35～40%。

・二個熱交換單元：45～50%。

・三個熱交換單元：65～70%。

F.系統壓損如表 10 所示。

表 10 直接焚化系統熱交換率與壓損關係

設　　備	熱交換率(%)	壓損(mmH_2O)
焚化爐本體	0	105
加設熱交換器	35	105
	50	210
	70	385

資料來源：財團法人中技社，揮發性有機氣體控制技術，民國 92 年元月。

G.設置與操作成本：輔助燃料用量爲最主要之操作成本項目。

H.設備尺寸大小與所需空間。

(4)操作注意事項

A.燃燒室溫度須確保在 650℃以上、0.3～0.5 秒的停留時間，且須掌握溫度分佈的均一性，以免局部區域溫度過高或過低。

B.廢氣中 O_2 含量若在 10%以下或 CO 濃度太高時，則燃燒溫度最好提高至 800℃以上，以有效分解惡臭成分，但燃燒溫度儘可能控制於 1,000℃以下，以免高溫 NOx 之產生。

C.若廢氣中含有多量水份、煙霧、粉塵或其他不適燃物質，則必須先利用過濾或集塵設備進行前處理。

D.爲防患有機廢氣濃度達到爆炸界限，甚至反向回燒，必須加裝緊急排放、稀釋或防止回火的安全裝置。

E.減少開停爐次數，並避免加熱或冷卻速率過快，致使耐火材料發生龜裂、脫落現象。

5.1.3 觸媒焚化法

1.設備概述

(1)本體構造

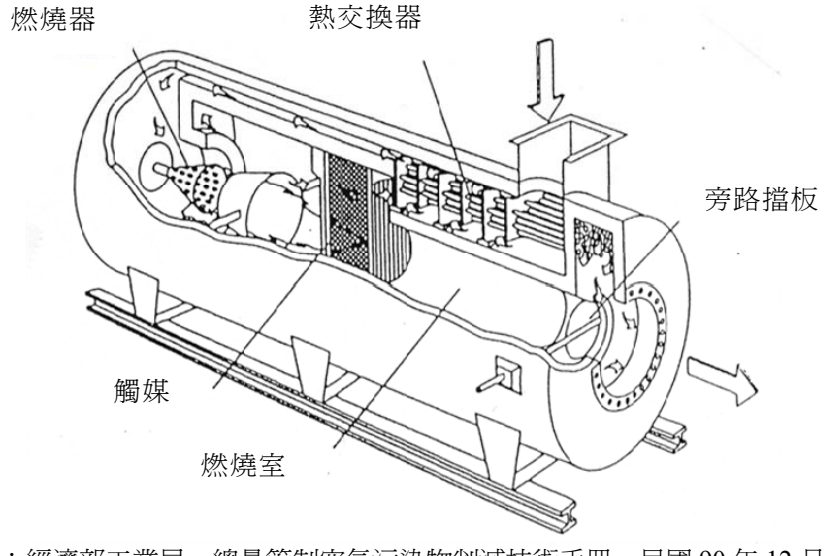
觸媒焚化設備之構造如圖 12 所示，廢氣由風車送經熱交換器預熱後，再進入燃燒室燃燒，最後經觸媒床反應而將有機廢氣成份予以破壞；同時由於安全之考量，進流廢氣 VOCs 濃度應該在 VOCs 燃燒下限(LEL)之 25%以下。焚化爐中裝置燃燒器，於操作未穩定前(例如剛開機)如廢氣溫度尚未達到催化所

需燃燒溫度，此一燃燒器可自動打開補足所需熱量。燃燒室排出之廢氣，在通過熱交換器時，將一部份熱能傳給進來之低溫廢氣，再由煙囪排放至大氣。

(2)觸媒種類、材質及特性

觸媒具有特殊的化學性質，能將 VOCs 在較低溫度(250～450℃)下破壞而轉化成無害物質，其可依不同的廢氣成分、濃度及所需的處理效率而選用不同的觸媒與操作溫度。在一般使用狀況下，觸媒每 1～3 年需更換或再生(若觸媒有損毀狀況，則再生效果差)，以維持其處理功能。

觸媒種類因擔體形狀而有不同型式，其特性及適用場合如表 11 所示。而在觸媒的材料選擇上，包括貴重金屬(Pt、Pd、Ag、Au)、金屬氧化物(Cr_2O_3、CuO、NiO、MnO_2)等，觸媒可能爲單物質、合金被覆在擔體上。一般使用觸媒常爲鉑金屬之合金，而以多孔性形態沉積於惰性擔體上，而其附著或支撐物材質則以惰性物質(如 Al、陶瓷)爲佳。



資料來源：經濟部工業局，總量管制空氣污染物削減技術手冊，民國 90 年 12 月。

圖 12　觸媒焚化爐之設備構造

貴重金屬觸媒是將白金添加少許鈀使其成爲一種催化劑，此催化劑被塗佈於安定物質的表面，因其具有相當大的活性，且不易破碎，故在處理相同廢氣量時所需之用量較少，但價錢較昂貴；因此適當的選用與設計，除可確保觸媒之使用壽命及效率外，亦可減少觸媒之購置費用。

表 11 不同種類觸媒之比較

觸媒種類	特性	適用場合
金屬帶狀、發泡金屬	•壓損大、易阻塞 •觸媒被覆效果較差	•低風量廢氣處理 •不含酸性成份物質之廢氣
金屬蜂巢	•壓損小、耐碰撞 •使用效果佳 •可配合製作各類外型、尺寸 •國內已能量產供應	•高風量廢氣處理 •不含酸性成份物質之廢氣
陶磁蜂巢	•壓損小、效果佳 •易碎裂 •國內可製作，但品質不穩定	•高風量廢氣處理 •含酸性成份物質之廢氣
顆粒	•壓損很大 •製作成本便宜	•低風量廢氣處理 •儀器(如檢測分析設備)排氣處理

資料來源：經濟部工業局，揮發性有機物廢氣減量及處理技術手冊，民國 93 年 12 月。

2.設計操作重點

(1)觸媒操作溫度及處理效率

觸媒焚化法其構造原理及方法均與直接焚化法類似，而主要差異在於前者藉觸媒可在較低溫度(約 250～450℃)下完成破壞 VOCs，可大幅節約燃料費用；同時於低溫操作可抑制 NOx 的形成。但是相對其缺點則因觸媒易爲粉塵、煙霧、有機矽、鹵素化合物、硫磺化合物及各種重金屬等所劣化或毒害，因此必要時需做前處理去除之。

對於中濃度有機廢氣(VOCs 含量 500～5,000mg/Nm^3)，觸媒焚化法屬於經濟有效處理方法之一，表 12 爲觸媒焚化法在工業上的應用及觸媒反應所需的

操作溫度。一般而言，在同樣操作條件下，有機物之觸媒焚化難易程度由易而難依次爲：醇、醛、芳香烴、酮、乙酸、脂肪烴、氯烴。

以使用鉑族金屬作爲催化劑之觸媒焚化爐，其需在 315～450℃之條件下進行有機氣體之燃燒。整體而言，觸媒焚化爐之燃燒溫度不能太高，否則觸媒會產生燒結作用而降低處理效果；且燃燒溫度亦不能太低，否則氧化反應將無法自行持續地進行。

觸媒焚化 VOCs 觸處理效率與空間速度(每小時處理單位體積廢氣所需觸媒體積)、操作溫度、VOCs 組成及溫度有關，觸媒系統在 450℃操作下、空間速度 3×10^4～12×10^4 $m^3/m^3\cdot hr$，VOCs 一般處理效率可達 95%以上；高效率觸媒焚化爐對 VOCs 更具有 97.9～98.5%之處理效率。

表 12　觸媒焚化於工業上之應用及其操作溫度

污染源	污染物質	操作溫度(℃)
瀝青氧化	醛、蒸氣、碳氫化合物	315～370
催化裂解	CO、碳氫化合物	345～425
焦炭烘烤	石蠟、油霧蒸氣	315～370
甲醛製造	H_2、CH_4、CO、HCHO	345
金屬石版烘烤	有機溶劑、樹脂	260～400
辛基苯酚製造	酚	315～425
酞酐製造	順丁烯二酸、酞酸、CO、HCHO	315～345
印刷製程	有機溶劑	315
凡立水	碳氫化合物	315～370
漆包線製造	有機溶劑、凡立水、樹脂	315～370

資料來源：林文川，臭味控制技術的介紹，台北國際環保暨能源展專刊─環保特刊，民國 85 年。

(2)主要設計參數及影響因子

A.氣流均勻性

爲避免 VOCs 廢氣通過觸媒時因氣流分佈不均勻，致使局部觸媒因操作溫度過高而造成觸媒金屬或擔體燒結；或廢氣集中於某部份觸媒處理，而使該部位觸媒之使用壽命縮短。因此，設置良好之氣流分配器，使廢氣平均通過觸媒截面，以達觸媒有效之利用，增加其使用壽命，並提高處理效率。

B.空間速度(volume hourly space velocity,VHSV)

空間速度乃指單位觸媒體積所處理之氣流流量，如下式所示：

$$\text{空間速度}(h^{-1}) = \frac{\text{處理氣體流量}(m^3/hr)}{\text{觸媒體積}(m^3)}$$

當空間速度愈大，則停留時間愈短，因而造成控制效率下降之現象；然若空間速度值設計過低，即停留時間增長，雖能提高處理效率，卻因觸媒需求體積增加，而提高初設成本。一般而言，空間速度之設計值多介於 12,000～30,000hr^{-1}，亦即停留時間宜維持在 0.3～0.6 秒之間。

C.觸媒種類

影響觸媒處理效率之因素有觸媒種類、金含量、觸媒形狀、觸媒使用時間及燒結程度，一般而言，觸媒之活性愈大、比表面積愈大、活性位置愈多或觸媒被覆越均勻，則其處理效率愈佳。此外，對於不同的觸媒可能產生之空間速度並不同，如表 13 所示。

表 13　不同種類觸媒之空間速度

觸媒種類	空間速度	
	90%轉化率 (hr^{-1})	95%轉化率 (hr^{-1})
貴重金屬	40,000	30,000
鹼金屬	15,000	10,000

資料來源：財團法人中技社，揮發性有機氣體控制技術，民國 92 年元月。

D.壓力損失

系統壓損之大小直接關係風車功率之需求及將來操作成本之多寡，其爲觸媒床深、廢氣空塔速度、觸媒孔隙率及熱交換器效率之函數。

•觸媒床深：其設計深度與污染物之去除效率(即其進、出口濃度)有關。

•空塔速度：觸媒床之壓力損失與廢氣流速成正比，一般爲避免系統之壓損過大，空塔速度之設計值以不大於 10m/s 爲原則。

•熱交換器：熱交換器若欲獲得較高之熱回收率，就必須增加氣體與金屬管壁的接觸面積，因而亦提高壓力損失，根據 Katari 等國外專家所發表文獻，不同熱回收率交換器之壓力損失如表 14 所示。

E.觸媒焚化之設計原則與直接焚化類似，故其他設計參數同直接焚化法，惟獨觸媒床所需體積可由廢氣量除以空間速度設計值得之。

表 14 不同熱交換率觸媒焚化爐之壓損比較

設備	熱交換率(%)	壓損(mmH_2O)
觸媒焚化爐本體	0	105
加設熱交換器	35	160
	50	210
	70	385

資料來源：財團法人中技社，揮發性有機氣體控制技術，民國 92 年元月。

(3)操作注意事項

觸媒焚化法是利用觸媒來氧化 VOCs，故爲了維持觸媒良好的使用壽命及處理效果，須注意下列操作事項；而表 15 所列則爲一般的污染物對觸媒所造成的不良後果及其處理對策：

A.觸媒活性依對象化合物而各有不同，一般以白金、鈀等貴重金屬最爲優良；然若只用一種觸媒，則其對廢氣之分解仍會受到限制，故最好使用 2 種以上之混合體。

B.粉塵會附著於觸媒表面上，使其表面活性下降，並引起堵塞，而致壓降增大；Pb、Cd、Hg 等重金屬會與貴金屬反應形成低活性合金，故廢氣於進入觸媒床前應先經預熱並去除粉塵、重金屬等會阻塞及毒害觸媒之物質。

C.不純物如無機鹽類氧化後的生成物，會附著在觸媒表面而使觸媒活性降低，甚至永久中毒；如潤滑油中之含磷物，會反應沈積在 Al_2O_3 上，降低觸媒活性。故須注意保持觸媒表面的清潔，以免影響燃燒效率，降低處理效果。

D.觸媒焚化系統操作最重要者爲觸媒床進出口溫度之控制，因觸媒不耐高溫，故須將觸媒床溫度保持於 650℃以下(勿超過 700℃)。即處理氣體的熱值不可過高，否則大量放熱，會使觸媒產生燒結作用，降低處理效果。

E.對於含硫廢氣之處理，SO_2、SO_3 在低於 300℃時會化學附著於 Pt 表面，進而縮短觸媒壽命，故須特別注意露點操作溫度。

F.硫化物及鹵化物合物經氧化分解的物質會使觸媒腐蝕、中毒，而某些酸、鹼性氣體如 HCl 及 NH_3 會化學吸著於觸媒活性端導致失活現象。

G.裝置之氣密性及氣體混合的均勻性，均會影響處理效果。

H.其他

- 管路中廢氣濃度宜控制於燃燒下限的 25%以下。
- 排風管道氣體流速應大於 5m/s，以免回火發生危險。
- 廢氣中可能含有膠質物質，當溫度降低時，容易附著在觸媒及管壁上，因而增加壓降，而降低了觸媒的處理效果。故廢氣管道應保溫，以減少油漬粘附。且應時常清除管道內的油垢，以免有著火之虞。

表 15　觸媒失活之原因及防制對策

失活原因		失活狀態	防制對策	再生方式
積碳	焦油	暫時	調整溫度與濃度	加熱燒除積碳
	粉塵	暫時	觸媒前加裝過濾裝置	高壓空氣吹除或水洗
高溫	觸媒金屬燒結	永久	避免不當高溫操作	化學再生
	擔體燒結	永久	避免不當高溫操作	無法再生
中毒	Cl、Br、S	暫時	提高操作溫度	高溫空氣再生
	Si、P、Pb	永久	觸媒前加裝前處理設備	化學再生配合高溫空氣再生
	Pb、Cd、Hg 等重金屬	永久	--	無法再生

資料來源：經濟部工業局，VOC 臭味控制技術講習會，民國 91 年 6 月。

5.1.4 蓄熱式焚化法

1.設備概述

(1)本體構造

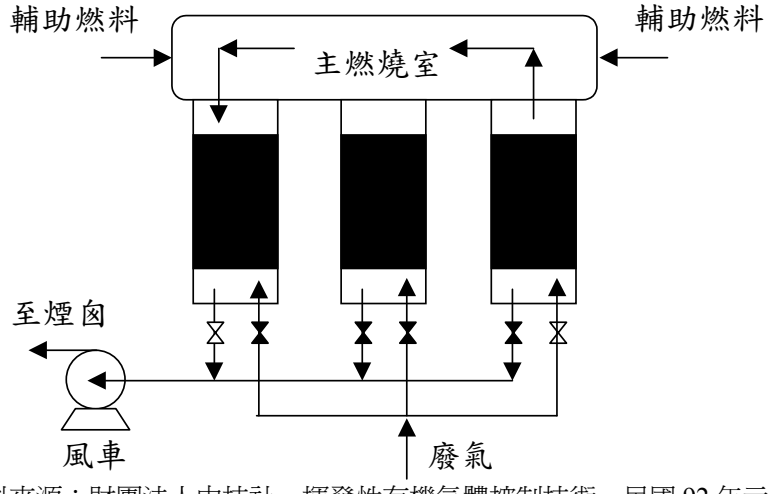
蓄熱式焚化法係爲因應提高熱交換率而發展出來的一種高熱回收率焚化裝置，其屬於直接焚化爐的一種衍生體，處理設備流程如圖 13 所示(3 床式)，亦有雙床式構造如圖 14 所示。

一般系統至少包括 2 個蓄熱床(預熱室)、進排氣控制裝置、加熱裝置及溫度控制單元等，蓄熱床內填充石質或陶瓷等蓄熱材，待處理廢氣先進入一蓄熱床預熱至所需溫度以去除 VOCs；處理後高溫氣體通過另一蓄熱床時，將氣體熱能傳入冷卻之蓄熱材成爲高溫床，經熱交換的氣體則以低溫排放。待一定時間(約 1~2min)後，另一股待處理廢氣導入該已經藉回收廢熱之高溫床預熱，經焚化處理後高溫氣體導入其他蓄熱床回收熱能後排入大氣，完成一操作循環；所有陶瓷填充床均循序做加熱、冷卻、淨化的循環。

廢氣於進入主燃燒室之前，部份 VOCs 已先於預熱室中燃燒破壞，剩餘 VOCs 則在高溫主燃燒室中(1,000～1,500°K)完全燃燒去除，以達到預定的處理效率。預熱室中填充陶瓷材質或能耐高溫的石質填充物，其蓄熱效果甚佳，熱回收率可高達 95%以上，故僅須極少量的輔助燃料即可將 VOCs 完全破壞去除，設備使用年限更可高達 20 年。對於 85%及 95%之熱回收率操作，系統壓損分別約爲 400 及 500mmH_2O。

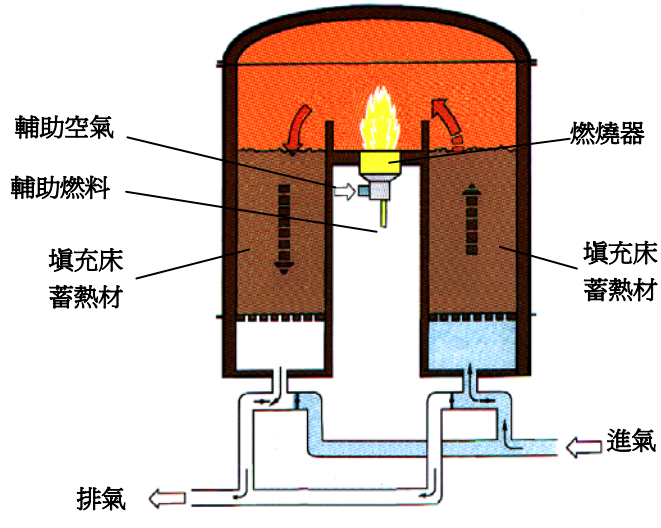
(2)輔助燃料之使用方式

不同型式的 RTO 均在相同的基本原則下進行操作，其目的均以回收廢熱以提供進流廢氣可進行預熱以減少熱能之損失；但一般不同設計結構的蓄熱床與控制系統，則是爲了以最低成本達成最高處理效率。此因 RTO 無法達成 100%燃燒熱之回收，且熱能會經由隔熱牆而造成損失，因此當廢氣中沒有足夠的 VOCs 來維持燃燒時，通常需增加額外的輔助燃料。燃料以使用天然氣較多，並混合空氣進行燃燒。



資料來源：財團法人中技社，揮發性有機氣體控制技術，民國 92 年元月。

圖 13　蓄熱式焚化設備處理流程(3 床式)



資料來源：經濟部工業局，揮發性有機物廢氣減量及處理技術手冊，民國 93 年 12 月。

圖 14　蓄熱式焚化爐構造(雙床式)

2.設計操作重點

(1)適用廢氣條件

A.一般而言，廢氣之絕熱燃燒升溫(℃/gVOCs/Nm^3 空氣)40℃以上、VOCs 濃度在 15%LEL 以下者，均適用 RTO 處理。

B.廢氣成份若有 90%之絕熱燃燒升溫超過 40℃，則以 RTO 處理時可不需添加輔助燃料。

C.若廢氣 VOCs 濃度小於 2,000mg/Nm^3，致其絕熱燃燒升溫低於 50℃，則需添加輔助燃料或電熱，以提高其燃燒升溫高於 50℃。

D.若廢氣流量大(例：大於 300Nm^3/min)且 VOCs 濃度極低(例：小於 500mg/Nm^3 或 100~200ppm)，則需考量以轉輪吸附濃縮法+RTO 或以其他非熱破壞法處理。

E.若廢氣 VOCs 濃度超過 3,000mg/Nm^3，致其絕熱燃燒升溫超過 60℃，則廢氣經 RTO 處理後仍將有較高之排氣溫度。

F.若廢氣 VOCs 濃度超過 10,000mg/Nm^3，致其絕熱燃燒升溫超過 200℃，可考慮以直接焚化法配合 70%熱回收率之回復式熱交換器處理，或由 RTO 系統回收部份熱量供其他系統使用。

(2)主要設計參數

一般 RTO 設計及操作參數如表 16 所示，其重要者包括：床數選定、蓄熱材規格、進氣空塔流速及閥門切換時間等。

A.床數選定

RTO 爲雙蓄熱床時，進流廢氣於閥門轉換瞬間，將會使部份未焚化之 VOCs 倒流入處理後之排氣中而使得排放濃度突增，導致處理效率下降。而 3 床式 RTO 則增加一吹驅操作，於閥門轉換時隔內，設定足夠之吹驅空氣量將積存含 VOCs 排氣吹出至燃燒室焚化，以維持應有之處理效率。惟因雙床式 RTO 平均去除率之降低有限，而 3 床式 RTO 佔地面積較大，若前者平均去除率之降低幅度不致影響標準限值之符合度時，後者較不經濟。

B.蓄熱材規格

蓄熱材材質及尺寸於 RTO 系統中屬最重要者，其需具有熱穩定、高單位體積蓄熱能力、適當的熱傳導係數、適當的粒徑或厚度等性質。蓄熱材如爲顆粒狀，一般爲倒入之隨意堆填；若爲成型塊狀，則以疊填方式裝入填充床。

C.進氣空塔流速

對於一既定蓄熱床截面積之 RTO，當進氣空塔流速提高時，處理氣體流量、系統壓損均隨之增加；而熱回收效率則隨之降低。

D.閥門切換時間

RTO 之熱回收效率可藉由入出口切換風門之時間長短來調整，即熱回收效率隨操作循環時間(爲閥門切換時間之 2 倍)之增加而降低。

表 16　一般 RTO 設計及操作參數

參數	範圍
蓄熱床數	2 或 3 床
蓄熱床填充高度	2.4~2.7m(1"馬鞍型填料，95%熱回收率)
填料材質	陶磁(氧化矽及氧化鋁)，真比重 2.4~3.0
填料構造	1"馬鞍型，蜂巢式(7~70 方孔/平方英寸)、疊板式(1.5 mm t)
填充層填充比重	0.6~1.1
填充層比表面積	160~820 m^2/m^3
填充層空隙率	60~74%
焚化區溫度	760~816℃
進氣空塔流速	0.5~1.0 m/s (進氣空塔流速=進氣流量÷單一濾床填充層空塔截面積)
氣體通過蓄熱床之壓損	250~500 mmH_2O
熱回收率	95%
進氣 VOCs 濃度	<15% LEL
VOCs 處理效率	99%(3 床)、98%(2 床)
閥門切換時間	0.5~2.0 min(操作循環時間之半)
輔助加熱能源	電熱或瓦斯
風車馬力	10 Hp/100 Nm^3/min(蜂巢型填料)、 20 Hp/100 Nm^3/min(馬鞍型填料)

資料來源：環保署/國科會空污防制科研合作計畫，臭味及揮發性有機物控制，民國 93 年 12 月。

(3)操作注意事項

A.廢氣若含粒狀物、有機矽化物(例：半導體業之三甲基矽胺 hexamethy1 disilazane，$(CH_3)_3SiNHSi(CH_3)_3$)、易熱聚合物質(例：同時含酚、甲醛之廢氣)、有機氣膠(例：膠帶業、印刷電路板業、馬達漆包軸心烘烤排氣中之氣膠)，則位於床底之蓄熱材表面將逐漸積存粒狀物(鋁、鈣、鎂、鐵、矽等之氧化物)、膠液狀物或有機積垢等，致使蓄熱床逐漸堵塞，引起氣體壓損增加；或膠液狀物脫附於排氣中，降低 VOCs 去除率。

B.如聚合物或膠液狀物積存於蓄熱材表面，可以熱焙法(bake out)清除之。其係將閥門切換時間延長至排氣溫度升高至約 480℃，使出口端濾料表面以粘結物焦化脫除。此時需注意排氣粉塵或 VOCs 濃度增高問題，排氣閥門亦應爲耐高溫操作型或排氣先行混入常溫控氣冷卻後再經閥門排放。

C.對於含粒狀物或氣膠之廢氣，建議以袋濾集塵機、靜電集塵機或其他有效前處理裝置等先行去除，使用靜電集塵機時需注意 VOCs 之爆炸安全評估。

D.對於廢氣含有氣膠或易熱聚合物質者，亦可以一前礫石或陶瓷層濾除，其表面粘結物再定時以火焰烘焙脫除;但烘焙排氣也需處理,其中粒狀物及 VOCs 可續以二次焚化爐燒除。

E.廢氣若含有機鹵化物或硫化物，則排氣將含鹽酸或硫酸，此時宜使用硬質之抗腐蝕耐火材及金屬，以取代一般之陶瓷纖維及金屬。

F.因廢氣之流向需不斷地加以切換，故切換閥門之機械應力須加以考慮。

G.對於清洗(purge)作業，若來自吹洗空氣所含 VOCs 導致廢氣之排放濃度突增而有不符法規之虞時，則需加以處理。

H.因蓄熱床填充石質或陶瓷等材料，使得本體之重量較一般焚化設備爲重，當置於屋頂樓面時，需注意樓層載重結構之負荷承受度。

5.2 吸附技術

5.2.1 處理原理及應用

1.處理原理

吸附爲一溶質之濃縮現象，利用此現象，以使用內部比表面積較大的多孔

性固體粒子(吸附劑)分離氣體或液體混合物之操作，稱之爲吸附操作。吸附爲一放熱反應，且其效能隨溫度之升高而降低，故操作前應預先冷卻廢氣溫度以提高吸附效率。以吸附原理處理 VOCs，一般常用粒狀活性碳或活性碳纖維。

2.吸附技術之應用

吸附技術於 VOCs 處理之應用類別如圖 15 所示，活性碳吸附反應與廢氣的特性有關，若廢氣含有液體或固體顆粒、高沸點有機物或能聚合之物質，須先經過預處理(如過濾)之程序；若廢氣具高相對濕度(相對濕度大於 50%)，必須先經除濕的前處理；若廢氣溫度過高(超過 40℃)，爲避免吸附效率降低，甚至於引起著火之現象，須先加以冷卻。

吸附操作一段時日後活性碳會達飽和狀態，此時須將活性碳更換或再生，再生可分爲廠外再生及廠內線上再生，前者係交由廢活性碳專業處理廠商施予再生賦活，一般再生處理比更換之購買新品節省約 30~40%的成本；後者於廠內再生時，可以過熱蒸氣、高溫惰性氣體或減壓等方法，將活性碳表面所吸附之有機物質脫附排出。一般處理高風量、低濃度的廢氣時，於脫附過程採較小風量進行濃縮，即將廢氣風量下降及同時濃度增加而成高濃度廢氣，再行後處理以降低操作費用。例廢氣以沸石轉輪吸附濃縮後，再以燃燒焚化或冷凝等方法做後處理。

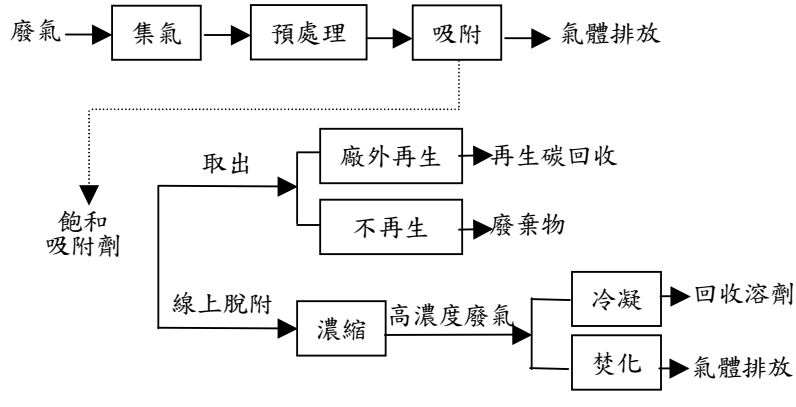


圖 15　吸附技術於 VOCs 處理之應用

活性碳吸附法在工業上常使用的型式，包括顆粒狀的固定床式、活性碳纖維的蜂巢式及珠碳的流動床式等，其相關特性比較如表 17 所示，一般以固定床式較常使用。相對於固定床式吸附設備，流動床式改善蒸氣脫附之耗費及廢水處理問題，但是活性碳粒易劣化的缺點依然存在；而活性碳纖維吸附設備雖改良活性碳粒的問題，仍留有廢水問題需處理。

表 17　各式吸附設備之特性比較

裝置 / 項目	固定床式吸附設備		流動床式吸附設備
	顆粒狀式	活性碳纖維	
吸附材	粒狀活性碳	纖維狀活性碳	球狀活性碳
吸附方式	填充層	圓筒形單體	空中浮游式
脫附媒體	蒸氣(大量)	蒸氣(中量)	氮氣(少量)
脫附溫度	120～130℃	100～110℃	150～160℃
吸脫循環時間	60～120min	10～15 min	30～60 min
處理效率	97%以上	99%以上	95%以下
回收品中酸份(分解物)	10 ppm 以上	1 ppm 以下	10 ppm 以上
分離水量(kg 水/kg 溶劑)	1～7	1～5	(原廢氣中濕分凝結)0～0.2
著火危險性	高	輕	高
操作安定性	安定	安定	較不安定※

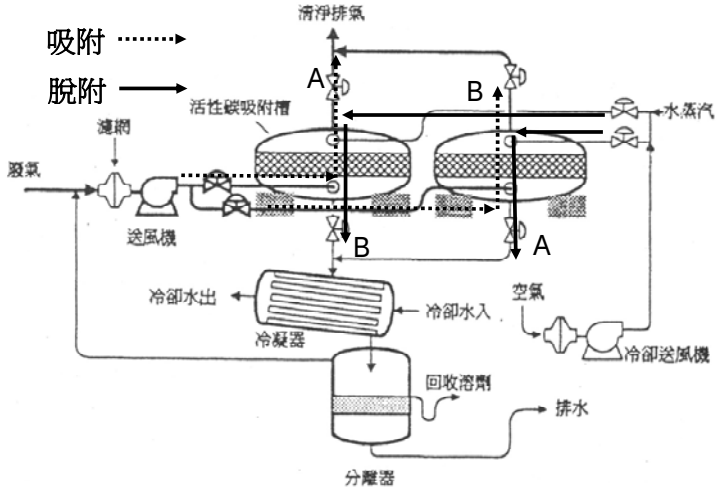
※：流動床式易受到溫度、溶劑濃度、壓力等條件影響，而呈現不安定情況。
資料來源：經濟部工業局，VOC 控制技術講習會，民國 82 年 9 月。

5.2.2 活性碳吸附設備

1.設備概述

(1)粒狀活性碳吸附設備

圖 16 爲典型活性碳吸附／脫附操作流程，含 VOCs 廢氣於進入吸附塔前須先經一前置過濾器，以去除氣體中粉塵雜質，再經冷卻系統將氣體冷卻至 40℃以下，由風車送入吸附槽進行吸附，經活性碳吸附後之乾淨氣體則由煙囪排至大氣中。



資料來源：經濟部工業局，揮發性有機物廢氣減量及處理技術手冊，民國 93 年 12 月。

圖 16　典型活性碳吸附／脫附操作

(2)活性碳纖維吸附設備

針對活性碳粒易劣化、破碎產生粉塵，以及流動床式需高溫脫附、循環時間長、溶劑易分解、發熱著火等缺點，可採用活性碳纖維爲回收材料；圖 17 所示回收系統係採固定床式兩槽、蒸氣吸脫附方式設計，以減短吸脫附循環時間，避免回收溶劑劣化及活性碳吸熱發火之危險性。

(3)流動床式活性碳吸附設備

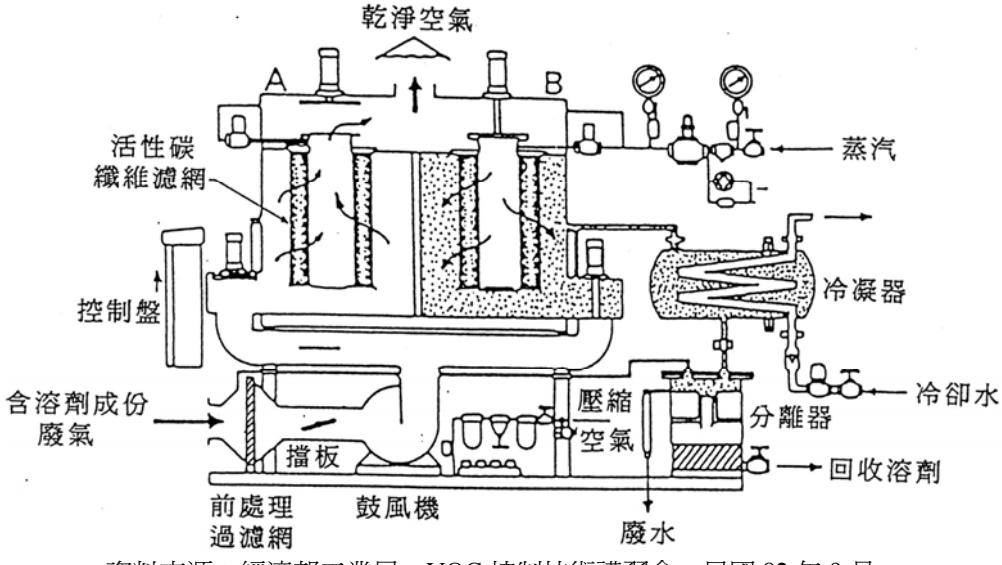
利用活性碳吸附，但改以氮氣爲脫附之載體氣體，採活性碳粒流動循環的方式設計，以改良固定床式佔地體積大、回收水溶性溶劑須再加裝蒸餾設備等缺點。爲了改善固定床吸附系統的缺點，國內業者與日本技術單位共同發展出一種流體化床的吸附系統，請參考「濃縮處理技術」一節。

2.吸附劑之種類與特性

(1)吸附劑之種類

一般所使用的物理吸附劑中，各種不同型式的活性碳約佔大半部份，而矽膠、分子篩、合成沸石及活性白土等的實用例則較少。常用之活性碳又可依製造原料及其形狀的不同而予以區分爲粉末狀活性碳、粒狀活性碳及纖維狀活

性碳等三類，在氣體吸附之應用上以後兩者較爲常用，而粒狀活性碳與活性碳纖維之優缺點比較如表 18 所示。



資料來源：經濟部工業局，VOC 控制技術講習會，民國 82 年 9 月。

圖 17　活性碳纖維回收設備

表 18　粒狀活性碳與活性碳纖維優缺點比較

項目	粒狀活性碳	活性碳纖維
優點	1.價格便宜(約 70～180 元/kg)。 2.可充填於各式各樣的吸附槽。 3.有較好的吸附床利用率。 4.對於極性較強的吸附質有較佳的吸附效果。	1.纖維極細，比表面積大，吸附容量高。 2.表面平滑不易脆裂，損耗小。 3.不純物及重金屬含量極少。 4.脫附速度快，回收溶劑品質高，特別是應用於氯系溶劑。 5.操作簡單，設備體積小且易於安裝。 6.受溫度影響較小。
缺點	1.運送時易碎化，吸附、脫附氣體時會耗損。 2.偏鹼性，脫附時易造成水解現象。 3.比表面積小，飽和吸附量較低。	1.價格昂貴。 2.結構較膨鬆，易生渠流效應，吸附床利用率較低。

資料來源：經濟部工業局，揮發性有機物廢氣減量及處理技術手冊，民國 93 年 12 月。

(2)影響吸附效率之主要因子

決定選用吸附劑前要審慎評估，因不同之吸附劑可能適用於不同之吸附質，且尚須考慮諸多因子，如價格、吸附容量、物化特性、容易取得及再生或棄置處理等，有時外在環境因子也會對不同之吸附劑造成不同程度之影響。

A.溫度：因吸附爲放熱反應，故溫度愈低愈有利吸附作用；一般入口溫度宜控制於 40℃以下。

B.濕度：相對濕度愈大，活性碳飽和吸附容量愈低，且吸附質濃度愈低或溶解度愈大者其受影響愈大；一般入口濕度宜控制於 50%以下。

C.流量：流量增大會使貫穿時間縮短，但只要流速低於理論反應時間，則流量之增加對飽和吸附量之影響不大。

D.熱傳效果：選擇吸附塔半徑及管壁厚度較小者，可增加散熱作用，提高吸附效果。

E.不適合活性碳吸附處理之 VOCs 包括：

- 反應性化合物：有機酸、醛類、部份酮類、某些單體。
- 高沸點物質：可塑劑、樹脂類、長鏈碳氫化合物(C＞14)、酚類、二元醇、胺類。

(3)飽和吸附容量

一般固定床式之吸附操作可概分成 4 個階段(如圖 18 所示)，起初吸附的效果良好，出口濃度 C_1、C_2 遠低於入口濃度 Co；然而隨著已處理氣體體積之增加，直至一貫穿點時(出口濃度爲 C_3)，活性碳即已達到飽和，此時應進行更換或再生吸附劑之程序。

活性碳對各種有機物質之飽和吸附容量(保存量)之求取試驗，係以椰子殼活性碳預先將有機物質達到飽和吸附，再通過空氣後，被吸附氣體的一部份或大部份，即很容易脫離，留下的即保存在活性碳中；保存量則以單位活性碳的重量百分比表示其值。

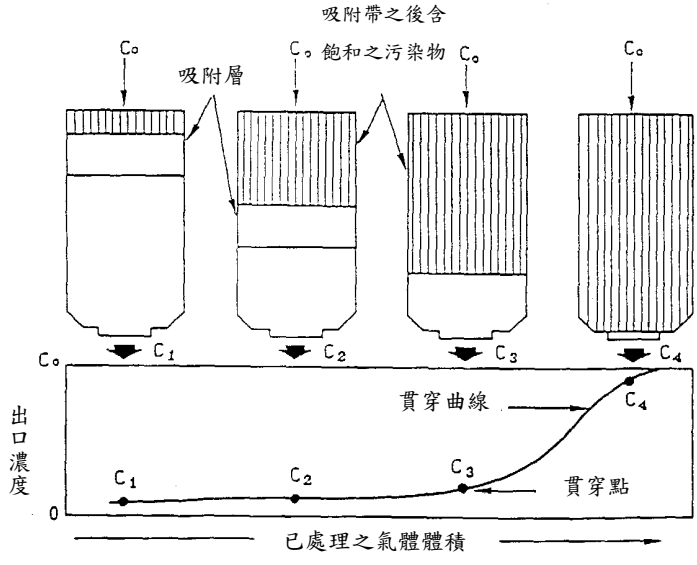


圖 18　吸附過程的四階段及出口濃度

3.設計操作重點

(1)主要設計參數

固定床式活性碳吸附塔之設計，一般依再生系統之有無而予以區分，若廢氣中 VOCs 濃度較高可回收，或吸附劑成本相對於再生成本很貴時，可選用再生式吸附床；倘若廢氣中 VOCs 濃度只有數 ppm 或其中摻雜有害、毒性或臭味物質，其回收不具經濟效益時，可不設再生設備，而委託合法廠商再生或處理。但廢棄吸附劑之處置應符合法令規定，以避免造成環境之污染。

A.吸附操作

- 吸附床斷面流速：0.2～0.5 m/sec
- 吸附床深：0.45～1.0 m
- 停留時間：1～2 sec
- 操作壓損：70～150 mmH_2O
- 吸附效率：大於 90%

•吸附週期：大於 2 hr(再生系統 8～12hr)

•廢氣入口溫度：小於 40℃

•廢氣濕度：小於 50%

•廢氣中塵粒含量：小於 0.5 mg/m^3

•工作容量(working capacity)或飽和吸附容量：10～50%

B.脫附操作

•脫附溫度：110℃以上

•脫附時間：30～60 min

•蒸氣用量：0.25～0.35 kg @15psig/kg-carbon

(2)操作注意事項

A.需確實掌握廢氣特性，如組成、濃度、溫度、濕度、粉塵量及干擾物質等，以確保吸附效果並降低操作費用。

B.若廢氣中含有硫化氫、胺類、醛類等不適合吸附物質時，可以利用化學吸附方式(如活性碳表面酸鹼處理)或配合藥液清洗法等處理之。

C.高沸點物質(如黏著劑、可塑劑、安定劑、樹脂、酚類、胺類或沸點大於 260℃者)通常易與活性碳起化學反應，而沉積於活性碳表面細孔上，降低其吸附能力，且再生時此沉積物亦不易去除，故須加裝前處理設備濾除之。

D.廢氣於進入活性碳床前須先經過濾網過濾，以去除細粒雜質(尤其是粒徑大於 5μm 之顆粒)，並須保持碳床的均一性，避免堵塞或形成氣流渠化(gas channeling)現象。

E.當廢氣包含二種以上 VOCs 時，吸附效率會降低，因分子量較大者爲優勢吸附質，使分子量較小者之貫穿時間縮短，故此時需加高吸附床深或縮短操作週期。

F.對於水溶解度較大者，其飽和吸附容量受濕度影響較大，且濃度愈低，所受影響程度愈大。當以蒸氣脫附時，水溶解度較大者(或極性較大者)其回收率較佳，但其分離時愈複雜困難。

G.當廢氣中含有酮類、酯類或鹵素等溶劑時，因其易氧化分解或水解，且分解反應的生成物具有腐蝕性，故設備材料的選擇要非常注意。

H.粒狀活性碳因偏鹼性，且金屬含量較活性碳纖維高，對於含氯之 VOCs 進行脫附時，具有不利影響。

I.當吸附系統阻力明顯增大時，需檢查濾網、活性碳床，並予以清洗或更換。

J.對於易燃性氣體操作時的安全考量，一般安全規定入口蒸氣濃度不可超過其 LEL 的 25%。此外，設備上最好採用防爆型及防靜電。

5.3 濃縮處理技術

對於具有大風量、低濃度之廢氣(一般大風量係指風量大於 10,000m^3/hr，而低濃度則指濃度小於 1,000ppm，或含 VOCs 在 1,000～2,000mg/Nm^3 之間)，若直接引入焚化爐處理，則所需之初設成本與操作費用均相當可觀，將無法符合經濟效益之需求。但若經由沸石轉輪或流體化床兩種技術，將廢氣先行濃縮後再予焚化或冷凝處理，則不僅可降低後續設備之處理容量，更可大幅減少設置與操作成本。

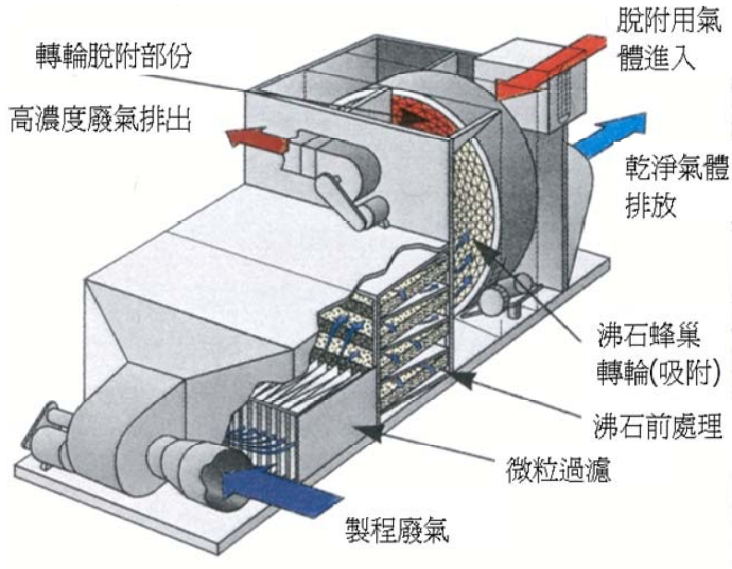
5.3.1 沸石濃縮轉輪

對於高風量、低濃度 VOCs 廢氣之處理，可採用轉輪吸附濃縮搭配焚化處理技術，一般濃縮轉輪之吸附劑最常採用疏水性沸石，其目的爲將大流量、低濃度廢氣轉換成小流量、高濃度氣流，使後端焚化系統於之耗用燃料更爲經濟。

1.設備概述

沸石轉輪系統如圖 19 所示，轉輪分爲吸附區、脫附(再生)區及冷卻區等 3 個操作區間，轉輪表面有 3/4 爲廢氣處理用途，其餘 1/4 爲冷卻及脫附用途。製程廢氣經前處理過濾微粒後進入轉輪之吸附區，將 VOCs 吸附後成爲乾淨氣體排放。當轉輪表面吸附劑至接近飽和時，即旋轉至脫附區，以高溫(約 180~220℃)之空氣流，將吸附 VOCs 進行脫附，形成一般高濃度之廢氣流。

此股廢氣流再送入一次熱交換器，利用焚化之廢熱回收預熱後，再送入燃燒室焚化。經脫附再生處理後之轉輪再旋轉至冷卻區降溫後，繼續進行吸附處理，系統完全以連續操作，不需停機再生。此外，利用燃燒之廢熱進行二次回收，即爲再生轉輪用脫附氣體之熱源，更節省燃料費用。



資料來源：ANGUIL ENVIRONMENTAL SYSTEM,INC.

圖 19　沸石濃縮轉輪系統

2.吸附濃縮轉輪特性

(1)蜂巢狀沸石具很大內表面之孔穴，可吸附大量 VOCs 分子(即吸附量大)。

(2)吸附劑具離子性，孔徑大小較整齊均一，可依分子大小與極性之不同進行選擇性吸附。

(3)對某些極性分子於較高溫度、低分壓下，仍能保持很強之吸附能力。

(4)可處理高相對濕度之廢氣，而不會降低其處理效率。

(5)疏水性沸石不可燃，可耐溫至 1,000℃，惰性、無機物、不具催化效果。

3.影響性能主要因素

影響沸石濃縮轉輪性能之主要因素包括轉輪轉速、濃縮倍率、脫附溫度、廢氣 VOCs 成份、廢氣 VOCs 濃度及廢氣之溫/濕度等，其設計及操作之考量重點如表 19 所示。

表 19　沸石濃縮轉輪性能之影響因素及其設計操作考量

性能影響因素	設計及操作考量重點
轉輪轉速	• 過快將使脫附區無法有充裕時間進行脫附，導致 VOCs 無法完全脫附，造成轉輪快速飽和，無法繼續處理後續進入之廢氣。 • 過慢則可能因停留於吸附區的時間過長，使轉輪在吸附區提前飽和，造成去除效率降低。 • 轉速一般爲 2~6 轉/hr，惟須依賴實際廢氣之狀況及欲達到的 VOCs 處理效率作適當的調整，方能達到理想操作。
濃縮倍率 (濃縮比)	• 濃縮倍率爲輪吸附區與脫附區之風量比，若其值降低表示進入吸附區的風量減少，進入脫附區的風量增加。 • 降低濃縮倍率可以增加轉輪處理效率，但脫附風量大表示進入焚化爐的處理風量亦隨之變大，將增加焚化爐燃料耗用量。 • 脫附風量若大於焚化爐的設計處理風量，亦會造成系統處理效率降低。 • 典型濃縮比應用範圍介於 10~20，惟爲顧及效率與能源能同時達到最佳狀況，須視實際狀況隨時調整濃縮倍率。
脫附溫度 (進入轉輪脫附區之氣流溫度)	• 若脫附溫度不足，則脫附區無法得到充分的熱能，吸附於轉輪內之 VOCs 無法完全脫附排出，吸附位置被佔據，造成處理效率降低。 • 若脫附溫度增加，可使脫附區得到充分的熱能，將吸附於轉輪內之 VOCs 完全脫附，增加處理效率。 • 但過高將使得轉輪轉體深層之殘餘熱過多，而無法於冷卻區有效降溫，將不利於下一階段的吸附程序，造成整體處理效率下降。
廢氣 VOCs 成份	• 因沸石轉輪之構造爲陶瓷基材加吸附劑，不同吸附劑之效果會隨 VOCs 成份而異，故在選購沸石轉輪前，須先分析物種特性。 • 在變更製程條件時，亦須事先評估不同的排放氣體對吸附效果的影響，避免影響處理效率。
廢氣 VOCs 濃度	• 在同一轉速之下，廢氣進口濃度不同，轉輪的處理效率亦有差異。例：高濃度廢氣因污染量較多，將使吸附區提前飽和，造成處理效率降低，此時可調整加快轉輪轉速。 • 惟轉速亦不宜過快，以免造成脫附區之處理時間不足，讓轉輪無法有充足之吸附位置處理下一階段之吸附程序。

表 19　沸石濃縮轉輪性能之影響因素及其設計操作考量(續)

性能影響因素	設計及操作考量重點
表廢氣之溫/濕度	•因吸附屬放熱反應，廢氣進流溫度高者不利轉輪吸附，故處理效率隨廢氣溫度之升高而降低；即廢氣溫度若超過 40℃，必須先進行冷卻。 •理論上若廢氣溫度降低有助於沸石吸附作用，惟因溫度降低而引起進氣流的濕度相對增加，而產生過多之水分子將凝結於轉輪上，與 VOC_S 產生競爭性吸附，使得處理效率降低。 •疏水性沸石濃縮轉輪系統對於 80%以下之相對濕度狀況，其處理效率受影響不大；但廢氣中不能含有水滴，或可在風車前安裝除霧器以去除水滴。

資料來源：經濟部工業局，揮發性有機物廢氣減量及處理技術手冊，民國 93 年 12 月。

4.應用條件或限制

較常用之轉輪直徑，從可處理 10,000m^3/hr 風量的 1,500mm，至可處理 50,000～60,000m^3/hr 風量的 3,500mm。在同一套設備中可並聯使用兩個 3,500mm 的轉輪，使處理風量增加，達到 120,000m^3/hr。同一廢氣處理風量下，大尺寸之轉輪較不經濟，例：一座 5,000mm 的轉輪與二座 3,500mm 的轉輪相較，其所能處理的廢氣量相同，但前者之建造成本增加約 10%，且需現場組裝而機械效果亦較差。

當污染源之廢氣風量小於約 115m^3/min 時，採用沸石濃縮轉輪焚化爐所節省之燃料及電力費用，與直接焚化爐相較之差距不大，此時採用沸石濃縮轉輪系統之初設成本較高，不符經濟效益。

一般而言，當廢氣 VOCs 濃度超過 1,000ppmv 時，沸石濃縮轉輪焚化爐將不比蓄熱式焚化爐節省操作費用。

5.3.2 流體化床濃縮系統

一般固定床吸附系統於遇有高反應性 VOCs 之處理時，常因被吸附之化學品於脫附時發生水解反應，造成碳床腐蝕或著火：

1.碳床腐蝕：例吸附酯類化學品後，再生過程中易分解爲醇類及酸類，而腐蝕碳

床。

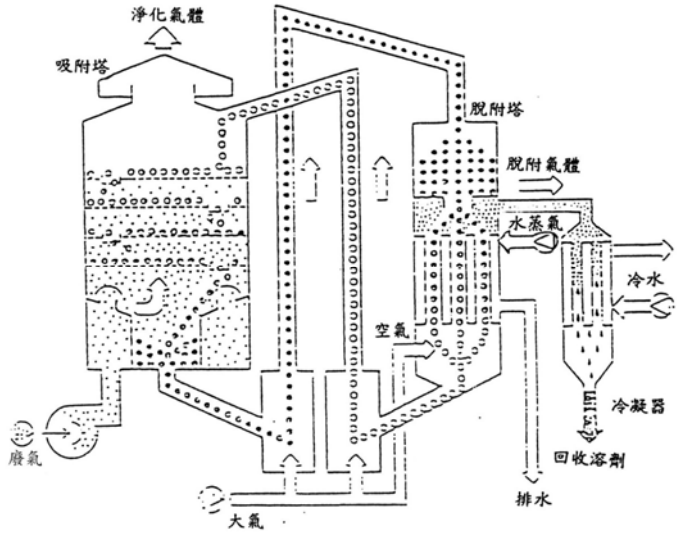
2.碳床著火：例吸附處理醇或酮時，因被吸附溶劑之氧化反應，放出大量的熱，造成碳床因散熱不佳而發生著火現象。

爲了改善上述缺點，國內業者引進流體化床吸附系統，將改良活性碳的吸附及飽和碳的脫附再生設計爲連續操作，依使用目的之不同可爲溶劑回收或廢氣濃縮除臭之用，適合處理大風量及排放濃度屬低至中範圍(100 ~ 1,000 ppm as CH_4)之 VOCs 廢氣。

1.設備概述

流體化床系統如圖 20 所示，吸附過的活性碳於吸附塔底部收集，再藉由輸送管路送到脫附塔內。流入脫附塔內的活性碳，可藉由高溫蒸氣或氮氣將活性碳內的 VOCs 吹出後，此高濃度氣體接續進入冷凝塔將 VOCs 以液態方式收集。

因 VOCs 成份種類很多，脫附過程中可能會有少許的成份(例：PGMEA、DMSO 等高沸點成份)因殘存蓄積形成不結晶碳，堵塞活性碳之微孔洞而不易被脫附，使得活性碳在不斷的循環使用下，將逐漸喪失吸附能力。目前設備業者發展出旁流線上活化再生裝置(side stream regenerator, SSR)，其將來自脫附塔脫附完成的活性碳，以部份溢流之方式流入 SSR 裝置反應爐內加熱並吹入蒸氣，藉 800~900℃之反應溫度使活性碳內不易脫附的物質排出，以維持活性碳之性能；而活化所產生之殘餘物可經冷凝塔一併收集處理。



資料來源：經濟部工業局，揮發性有機物減量管理研討會，民國 86 年 5 月。

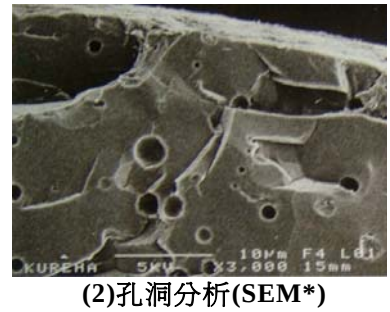
圖 20　活性碳流體化床處理流程

2.微珠球狀活性碳特性

流體化床系統用以吸附之活性碳爲微珠球狀，其外觀如圖 21 所示，不論其吸附性、耐磨耗性、流動性均較一般活性碳爲佳，適合做爲連續吸附、脫附之媒介，微珠球狀活性碳之特性如表 20 所示。



(1)外觀



(2)孔洞分析(SEM*)

* SEM：scanning electron microscope，掃瞄式電子顯微鏡。

資料來源：經濟部工業局，揮發性有機物廢氣減量及處理技術手冊，民國 93 年 12 月。

圖 21 微珠球狀活性碳之外觀及孔洞分析

表 20 微珠球狀活性碳之特性

項目	特性
平均粒徑(mm)	0.4 ~ 0.7
容積密度(g/ml)	0.5 ~ 0.6
實際密度(g/ml)	1.9 ~ 2.1
表面面積(m^2/g)	800 ~ 1,300
碘(mg/g)	800 ~ 1,300
消耗損失(wt %)	< 1/10
灰塵接觸比率(wt %)	< 0.5

資料來源：華懋科技公司。

3.影響性能主要因素

影響流體化床性能之主要因素包括設計時選擇的參數、單元設備性能及微珠球狀活性碳再生效益等，茲說明如下：

(1)設計參數的選擇

A.一般以線速度 1m/s 設計，惟吸附塔內部隔層板數、珠球狀活性碳浮動分佈及再生速度等均影響處理效率，故設計前應充份掌握風量、溫度、濕度，VOCs 組成及濃度等廢氣特性。

B.因 VOCs 之分子大小、分子量及極性等各異，使得活性碳對各成份之吸附能力及吸附速度亦不相同，故宜依 VOCs 之等溫度吸附線，擬訂操作曲線做爲設計的參數。

(2)單元設備性能及微珠球狀活性碳再生效益

流體化床濃縮系統主要單元設備包括：吸附塔、脫附塔及冷凝塔等 3 部份：

A.吸附塔：若設計參數選擇正確，並控制氣體分散以避免短流(channeling)，使廢氣與活性碳均勻接觸，即可確保處理效率。

B.脫附塔：

(A)影響處理效率最大，若脫附不良時，活性碳內可再利用之孔洞減少，處理效率也隨之下降。

(B)一般操作溫度介於 170~400℃，隨 VOCs 成份沸點之不同而異。

(C)脫附塔內停留時間需夠長，才可充分再生活性碳。

(D)若以 N_2 爲攜帶氣體，爲節省消耗量，一般有 N_2 回用設計，故 N_2 的攜帶量及純度亦會影響再吸附的性能。

C.冷凝塔：主要目的是將脫附出來的高濃度 VOCs 冷凝，一般採用 5~7℃的冰水，並供給足夠的冰水量。

5.4 冷凝技術

5.4.1 處理原理及應用

1.處理原理

冷凝技術係利用廢氣成分中凝結溫度之不同而將較易冷凝之成份分離出來，包括兩種方式：(1)在定壓下，降低系統之溫度；(2)在定溫下，增加系統之壓力。因加壓所需設備較多且操作成本較貴，一般都使用降溫方式以達到冷凝之目的。

2.冷凝技術之應用

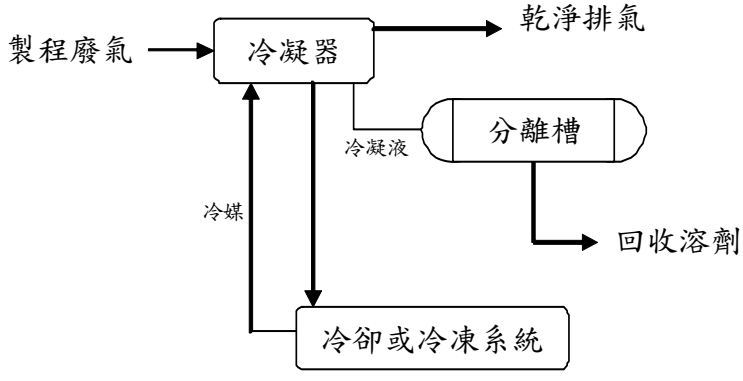
冷凝法係將廢氣降溫至 VOCs 之露點溫度(dew point)以下，使之凝結爲液態並加以回收的方法。冷凝法普遍應用於原料或產品之分離及純化，亦可做爲控制 VOCs 之用。冷凝法之回收效率與 VOCs 濃度、能被冷卻的溫度及冷媒的種類等有關。由於以此方法回收 VOCs 之成本較高，因此一般常用於欲回收之 VOCs 具高回收價值且成分單純、濃度高之情況。若廢氣流量過高或氣流中含有大量無法冷凝的有機氣體時，則冷凝器的熱交換面積需求過大，此時將不符經濟價值。

5.4.2 冷凝設備

1.設備概述

冷凝法是將廢氣導入數個串聯之熱交換器中進行熱交換(間接接觸式或表

面式)，或是與液態氮或超冷溶劑直接接觸(又稱接觸式)，使廢氣之溫度低於其中成份溶劑之露點而使其凝結成液體，其流程如圖 22 所示，一般常用的冷凝設備如表 21 所示。



資料來源：經濟部工業局，揮發性有機物減量管理研討會，民國 86 年 5 月。

圖 22　冷凝系統處理流程

(1)直接接觸

冷卻液體直接與排放氣體接觸，因熱傳係數較大，冷凝回收效率較高，但冷媒與 VOCs 混合，須加以分離以避免排放而造成二次污染，故通常以採用間接接觸冷凝方式爲多。一般直接接觸式構造簡單，附屬設備少，維護容易且較便宜。同一般之濕式集塵設備如文氏洗滌塔、噴霧塔等不但可以去除廢氣中的塵粒，同時可以達到吸收冷凝氣體或蒸氣之效果。

(2)間接接觸

爲一種能促進某種流體到另一種流體間熱傳送之設備，但兩種流體間不直接接觸，由一隔牆隔開。其中在工業上使用最廣者爲殼管式冷凝器(shell-and-tube condensors)，冷凝液體由管中通過，氣體由殼部分通過，在管外遇冷凝結。其依前、後端設備及殼型式而有不同構造型式，本法冷凝下之溶劑純度高，可回收使用，且冷凝劑因未與溶劑蒸氣接觸而亦可回收。

表 21　常用冷凝設備之比較

項　　目	直接接觸冷凝	間接接觸冷凝
設　　備	濕式旋風分離器、噴霧塔、填充式洗滌塔、文氏洗滌塔	殼管式熱交換器
熱傳係數 (kcal/hr・m^2・K)	2,000～3,000	50～75
特　　性	1.易產生水霧之白煙現象，須設置除霧器(demister)。 2.對易溶於冷媒之 VOCs 須另以蒸餾或分餾等方法分離之。	1.成本較高。 2.不受 VOCs 是否溶於冷媒之影響，均可回收。
主要單元	冷卻塔、分離器、送風機、泵浦、溶劑儲槽	殼管式冷凝器、送風機、泵浦、溶劑儲槽

資料來源：經濟部工業局，揮發性有機物減量管理研討會，民國 86 年 5 月。

2.冷媒之種類及特性

表 22 列出不同冷凝液體之種類及其適用溫度範圍，常用之冷媒有水、冰水、冰鹽水、冷凍劑及乙二醇水溶液等。一般排放處理用冷凝器很少使用冷卻水，因爲排放氣體的壓力約爲常壓(1atm)，一般 VOCs 的凝結點多低於冷卻水溫度(25～40℃)；如以水作冷媒，則於該水溫下，有機化合物飽和狀態的 VOCs 濃度最高仍爲 10,000～20,000ppm，因此若要有效控制 VOCs，須另選用適當之化學藥劑做爲冷媒。

表 22　冷凝液體的適用範圍

冷凍劑	冷凝溫度(℃)
水	25～40
冰水	7～15
冰鹽水(氯化鈣、乙二醇)	－34～7
氯氟化合物(如 Freon-12)	－68～－34

資料來源：經濟部工業局，揮發性有機物減量管理研討會，民國 86 年 5 月。

3.設計操作重點

(1)設計基本步驟

冷凝作用實際上即爲熱交換的一種，因此設計須考慮到系統的熱平衡，即(冷凝器需移走的熱量)=(蒸氣溫度降至露點以下所需的熱量)+(蒸氣冷凝所需熱量)。一般設計冷凝器之基本步驟爲：

A.決定待冷凝物質之露點。

B.決定蒸氣露點。

C.決定釋出之熱量及對數平均溫差(log mean temperature difference,LMTD)：熱交換器大小或面積與對數平均溫差成反比，當溫度過於接近時，則出入口之溫度差小，將導致較低的 LMTD，而影響熱交換器之操作效率。

D.計算總熱傳係數(overall heat-transfer coefficient)。

E.計算所需傳熱面積。

(2)操作注意事項

A.VOCs 濃度須在 5,000ppm(0.5%)以上，才適於冷凝分離，其效率在 50～85%之間；若濃度超過 10,000ppm(1%)以上，則效率可達 90%。

B.接觸時間不足時效率不顯著，廢氣中的 VOCs 無法完全去除，故設計時應保持足夠的停留時間，如加大處理設備或增設隔板等方法。

C.高溫廢氣經接觸冷卻後排出的氣體因帶有水蒸氣而產生白煙，應增設除霧器(demister)以去除排氣中之水霧。

D.殼管式冷凝器之管子容易積垢阻塞，使用一段時間須清除管內積垢。

E.爲確保冷凝效率，冷卻劑(冷媒)入口之溫度要低於冷凝尾氣溫度至少 5℃以上，一般爲 7~8℃。

5.5 吸收技術

5.5.1 處理原理及應用

1.處理原理

將氣體溶解在液體中之過程稱爲吸收，吸收法爲氣態污染物於廢氣與洗滌液接觸時，藉由紊流、分子擴散等質量傳送及化學反應等現象傳入洗滌液，使

污染物質分離去除，以達淨氣之效果。

2.吸收技術之應用

在原料或產品的回收技術中，常用吸收法分解及純化含有高濃度 VOCs 的氣體。因此當廢氣中含有高濃度、溶解性及反應性之污染物，採用吸收法可達到較高的效率。

吸收法對 VOCs 的去除率與所選擇之吸收劑種類、吸收塔之設計及系統操作條件等有關，對於使用有機液體爲吸收劑的系統，通常針對塔底流出液會再裝設一氣提裝置，以回收液體中所含之吸收劑及溶質(溶解在液體中的物質)成份。

一般工廠製程廢氣所含 VOCs 以來自使用有機溶劑之揮發爲主，雖工業用溶劑之成份其對於水之溶解度普遍不高，然亦不大可能於管末處理上又再使用有機液體當吸收劑，而造成操作及處置上之麻煩。

5.5.2 吸收設備

1.設備概述

一般的吸收程序包括：吸收單元、再生單元及一些輔助設備等，吸收單元的主體爲吸收塔，廢氣從吸收塔底進入，而吸收劑從塔頂進入，以進行吸收接觸。自塔頂流出之氣體爲經處理過的乾淨氣體，可逕行排放或導入其他單元做後處理，而從塔底流出之液體則送入再生單元處置。

一般吸收設備有噴霧塔、填充式洗滌塔及篩板式洗滌塔等，基於經濟性與效率之考量，以填充式洗滌塔最爲常見。

2.污染物氣液平衡之特性

如何找到一種適當的吸收劑，使得 VOCs 能有效的被洗滌液吸收，並且用過的吸收劑能容易地再生使用或處理，爲一重要課題。因一般工廠對於製程廢氣當採洗滌塔時，仍慣常使用水當吸收劑，表 23 爲常見 VOCs 對於水之亨利常數值，當 VOCs 廢氣以水洗滌處理時，較適用於低級醇類、胺類、酮類、醛類及低級有機酸等具親水性之物質。

因溶解效果與亨利常數成反比，表中小數點後到第 6 位均爲 0 者(例：DMF)

之吸收效果就相當好；但當小數點後第 5 位、第 4 位開始出現不爲 0 者之成份，其吸收效果就不佳；換言之，其洗滌水需求量會增大，才能達到某種程度之吸收效果。至於小數點後第 3 位即出現不是 0 者之成份(例：苯、甲苯)，即使加大洗滌液用量，其吸收效果亦相當有限。

表 23　常見 VOCs 成份於 25℃,1atm 下之亨利常數值

化合物	亨利常數 (atm/mol/m^3)	化合物	亨利常數 (atm/mol/m^3)
Methanol	0.0000052	DMF	0.0000002
Ethanol	0.0000303	MEA	0.0000256
iso-Propanol	0.000015	Ethyl Acetate	0.000128
Acetone	0.000025	Butyl Acetate	0.000164
MEK	0.00013	Toluene	0.0064201
Ethyl Acrylate	0.000254	m-Xylene	0.0074341

資料來源：沈克鵬，VOCs 空氣污染控制技術與操作審核要點，民國 98 年 3 月。

3.設計操作重點

(1)主要設計參數

設計填充式洗滌塔時，一般設計的步驟如下：

A.計算洗滌液量。

B.決定吸收塔本體直徑。

C.計算傳送單位數(number of transfer unit，NTU)及傳送單位高度(height of transfer unit，HTU)。

D.決定吸收塔本體高度。

E.計算操作壓力損失。

(2)操作注意事項

A.在以符合環保相關法規之前提下，通常需設計較高的液氣比及接觸時間，因此往往會設計較大之吸收塔容量及洗滌液使用量，如此將相對造成較高的初設費用及廢水處理的問題。

B.吸收法是將空氣污染轉變爲水污染，因此需要另外設置廢水處理場處理洗滌廢液。如果要對吸收後的溶劑回收處理，則可採用氣提法(即吸收法之逆處理)，但需要考量是否具經濟效益。由於吸收液經氣提處理後，所含有機物濃度要相當低才值得回收，因此氣提塔的設置費用都相當高。

C.VOCs 特性的液、氣平衡圖值，不只影響有機氣體的吸收性，也直接影響吸收系統的設計。然而，此值對於對特殊的 VOCs 卻不一定有用。

5.6 生物處理技術

5.6.1 處理原理及應用

1.處理原理

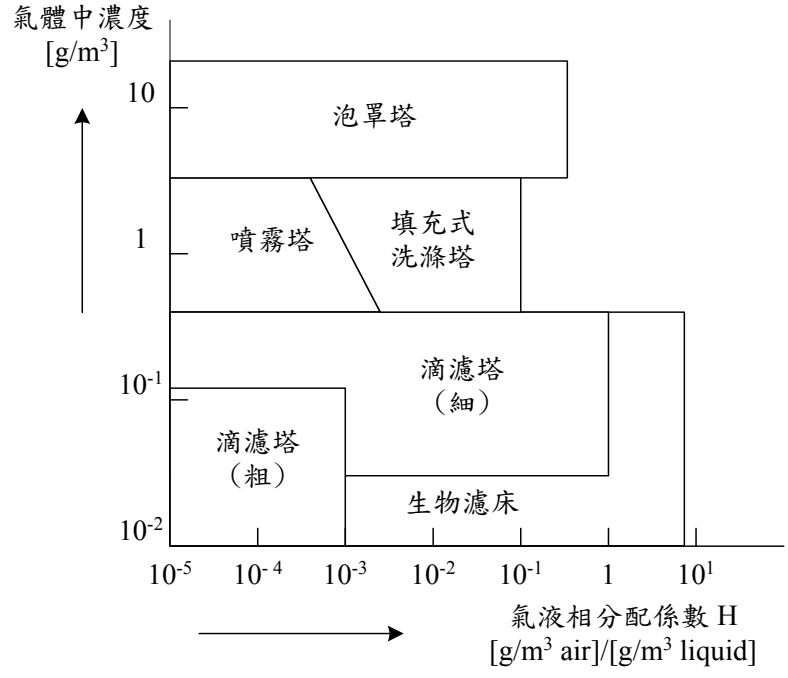
VOCs 廢氣被強制通過一裝填生物濾料之填充床，生物濾料上有大量的微生物附著，並於濾料上形成一層微生物膜(biofilm)。污染物依靠質傳由氣相傳送到氣相與濾料上之生物膜的界面，然後爲微生物膜所吸收；或是傳送至氣相與濾料層的界面，而爲濾料所吸附，再利用微生物膜、濾料中的微生物將污染物分解去除。

在生物膜內，污染物可以作爲微生物食物的碳源及能量的來源，藉著微生物的新陳代謝，將污染物分解成無害的 CO_2、H_2O、無機酸鹽類(NO_3^-、SO_4^{2-})及產生新的細胞質量(cell mass)。

2.生物處理技術之應用

生物處理法依微生物之型態，可區分爲固定床式之生物濾床(biofilter)與生物滴濾塔(biotrickling filter)及懸浮式之生物洗滌塔(bioscrubber)等 3 種。生物洗滌塔、生物滴濾塔較適於處理水溶性高之污染物，例如丁酮、丙酮、醇類、硫化氫等污染物；而生物濾床除可處理上述水溶性較高的污染物以外，對水溶性較差的苯環類(苯、甲苯、二甲苯及乙基苯)污染物亦具一定的處理效率。

圖 23 爲對於不同生物反應器型式之適用的 VOCs 負荷與污染物氣液相分配係數(distribution coefficients，即亨利常數)之關係，當廢氣中污染物負荷較高時，適合以生物洗滌塔處理，而生物滴濾塔與生物濾床則適於處理低有機負荷的廢氣；當氣液分配係數較大(即水溶性較差)時，則以生物濾床較適合。



資料來源：經濟部工業局，揮發性有機物廢氣減量及處理技術手冊，民國 93 年 12 月。

圖 23 不同 VOCs 負荷、氣液分配係數與生物反應器型式應用關係

5.6.2 生物處理設備

1.設備概述

3 種不同的生物處理設備如圖 24 所示，茲說明如下：

(1)生物濾床

生物濾床可包含預過濾器(處理粒狀物或高分子黏性物質)、增濕裝置、廢氣分配裝置及濾床等 4 部分，而濾床的主要填充物質包含生物膜所依附之固體，如堆肥、分散度改良劑及酸鹼度緩衝劑等。生物濾床法具有設備及操作費用低廉之優點，惟缺點是濾料易產生乾化與酸化，必需置換且持久性不佳。

(2)生物滴濾塔

生物滴濾塔與生物濾床類似，但填充物多爲木材、陶瓷及塑膠等物質，此外還包含循環水系統以控制 pH 值變化及去除生成的鹽類。由於生物滴濾塔

的操作條件較爲複雜，且需自動監控系統控制，故初設成本較高。因濾床由塑膠等材質構成，將使系統壓損低於生物濾床，且無濾料酸化或乾化而須置換之問題；但當有機負荷過高時，則易形成生物膜厭氣狀態與剝落等問題。

(3)生物洗滌塔

廢氣量爲數十 CMM 時，可以中壓(2,000mmAq)或高壓(5,000mmAq) 活性污泥曝氣鼓風機配合曝氣管，將廢氣直接注入 1.0~1.5 或 4.0~4.5m 深之活性污泥曝氣池中進行生物分解。

廢氣量大於 100CMM 時，可以填充式或板層式洗滌塔，以活性污泥處理後之澄清廢水或活性污泥混合液先將 VOCs 吸收，再流至活性污泥曝氣池中進行生物分解。

2.設備特性比較

生物處理技術的處理效率，依污染物本身的水溶性、生物可分解性及在生物反應器中停留時間的長短等而有所不同，平均處理效率約可達到 85%以上；各項生物處理技術之特性分析與比較如表 24 所示。

表 24 各項生物處理技術之特性分析與比較

種類 / 項目	生物濾床	生物洗滌塔	生物滴濾塔
微生物狀態	微生物以菌落或生物膜型態散佈於濾料中	微生物懸浮於水中	微生物以生物膜型態附著於濾材表面
本體特性	1.生質(biomass)固定化 2.水相固定化 3.單一反應器	1.生質固定化 2.單一反應槽體 3.水相可移動	1.生質大部份爲懸浮態 2.水相可移動 3.兩個槽體
應用面	1.污染物濃度< 1.0g/m^3 2. H [註2]< 10	1.污染物濃度< 0.5g/m^3 2. H [註2] < 1	1.污染物濃度 < 5g/m^3 2. H [註2] < 0.01
濾材比表面積或氣液接觸表面積(m^2/m^3)	＞1,000	50～200	50～300
營養補充	調配濾料時，已提供足夠之營養，因此操作時無需外加	添加營養液	添加營養液於循環水中

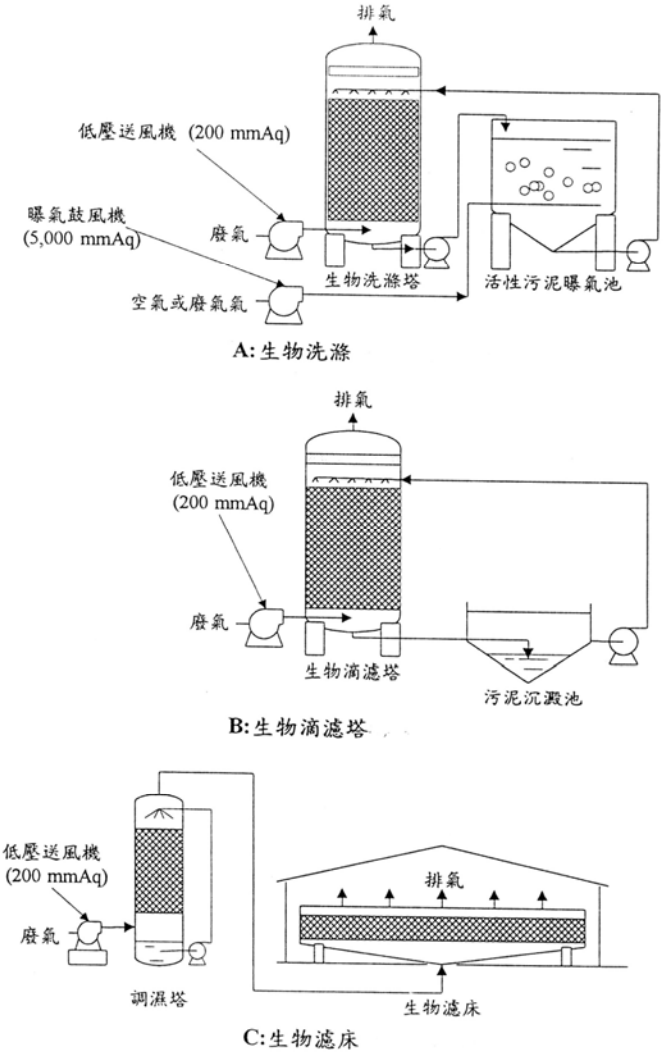
表 24　各項生物處理技術之特性分析與比較(續)

種類 / 項目	生物濾床	生物洗滌塔	生物滴濾塔
有效微生物量[註1] (kg/m^3)	濾料含水率是維持濾料活性的關鍵,一般濾床靠調整氣體的相對濕度或定期在濾料上淋水，以調整濾料含水率	1.洗滌液中微生物的濃度、營養份含量、pH 值必需控制在最適當的範圍 2.洗滌液必需維持於喜氣狀態，否則會有酸敗或腐臭的問題	1.循環水的噴灑量及其營養份含量、pH 值必須控制在最適當的範圍 2.濾材生長過度的生物膜必需清除
多餘微生物之排除	無法排泥,微生物過度增殖會造成濾床堵塞	排除微生物懸浮液並補充清水或營養液	反沖洗排除多餘之生物膜
二次污染物	1.廢棄之濾料 2.廢水(調節濾床含水率所產生的廢水)	1.污泥 2.廢水	1.污泥 2.廢水
優點	1.高氣液接觸表面積 2.適於處理低濃度臭味及 VOCs 廢氣 3.操作、啓動容易 4.可處理濃度不穩定之廢氣 5.低初設、操作成本 6.無二次污染	1.可處理中、低濃度臭味及 VOCs 廢氣。 2.反應條件(pH 值及營養份)較易控制 3.低初設、操作成本	1.可處理較高濃度臭味及 VOCs 廢氣 2.反應條件(pH、營養份)較易控制 3.可避免反應產物累積 4.洗滌設備構造簡單 5.壓損低
缺點	1.易因濾料壓密、結塊造成穿流(channeling)現象，降低處理效率 2.反應條件(pH 值及營養份)不易控制 3.含水率易失控；太乾時，易造成乾透、失效；過濕時，壓損增加及造成厭氧 4.對於瞬間濃度劇烈變化廢氣，無法處理 5.佔地面積需求大	1.易因有機物負荷過高而使生物膜過度生長，造成生物膜內層厭氧發臭 2.啓動程序較複雜 3.易產生生物污泥 4.操作費用較高	1.需兩個反應槽體，初設投資成本較高 2.爲避免有機物負荷過高，造成洗滌循環液厭氧發臭，需加強生物反應槽之曝氣與停留時間 3.啓動程序較複雜 4.易產生生物污泥 5.操作費用較高

註：1.有效微生物指的是可實際參與污染物分解的微生物而言，以生物膜爲例，一般受限於質傳阻力，只有表層的微生物(約 50~200μm)實際參與污染物的分解，底層的微生物因爲缺乏基質或溶氧，對污染物的分解貢獻有限。

2.H：亨利常數(氣液相分配係數)，$[g/m^3]$gas phase / $[g/m^3]$liquid phase 。

3.資料來源：行政院環保署，揮發性有機廢氣生物處理系統建立及評估計畫，民國 89 年 12 月。



資料來源：行政院環保署，揮發性有機廢氣生物處理系統建立及評估計畫，民國 89 年 12 月。

圖 24 生物處理系統

3.設計操作重點

(1)主要設計參數

生物濾床主要之設計參數包括：空床接觸時間(EBCT)、表面負荷、質量負荷、體積處理能力(elimination capacity)，一般之參數範圍如表 25 所示。惟

實務上廢氣常混雜有多種污染物成份，對廢氣溫度與相對濕度等物理條件之考慮，不同微生物之消化代謝能力，以及濾料本身之差異性等，均會影響處理效率。故此等參數僅能作爲生物濾床一般化的設計參考，尚難直接引用進行設計。因此，運用小型模廠設備以進行實際污染源長期測試的工作非常重要，對於生物濾床實廠的尺寸規格具有決定性的影響。

表 25 生物濾床一般設計及操作參數

參數名稱	參數意義	參數範圍
空床接觸時間(秒)	氣體於濾床內停留時間之量度 =濾床體積/氣體體積流率	15~60
表面負荷($m^3/m^2/h$)	氣體體積負荷 =氣體體積流率/濾床表面積	50~200
質量負荷($g/m^3/h$)	單位濾床體積之污染物質量負荷 =氣體體積流率×進氣濃度/濾床體積	10~160
體積處理能力($g/m^3/h$)	單位濾床體積之污染物質量負荷 =氣體體積流率× (進氣濃度－尾氣濃度)/濾床體積	10~160
去除效率(%)	濾床處理能力之量度 =(進氣濃度－尾氣濃度)/進氣濃度×100%	90~99

資料來源：經濟部工業局，揮發性有機物廢氣減量及處理技術手冊，民國 93 年 12 月。

(2)操作注意事項

生物濾床於操作維護上以濾料含水率控制、營養劑添加、pH 之緩衝及濾料翻堆等項目爲主，其操作要求如表 26 所示。

表 26　生物濾床操作維護之重點項目及其要求

項目	操作要求
濾料含水率之控制	• 濾料水份含量之過乾與太濕，對處理效率皆有不利的影響。含水率過高時，濾料易因水份佔據孔洞空間而造成高壓損與減低氣體的停留時間；同時因水膜過厚導致 O_2 傳輸減少，形成局部厭氧狀態，促使臭味氣體之生成與減緩 VOCs 之分解速率。此外濾料中微生物生長所需之營養份也會被沖洗流失，而產生需要另外處理之高強度(高 BOD)的滲濾液(leachate)。 • 含水率過低時，濾料會因乾燥而收縮，隨之碎裂、分解、坍塌及壓密，進而減低氣體停留時間;同時亦會使微生物失去活性,影響處理效率。
營養份之補充	• 一般以堆肥爲基礎的濾料，因可提供微生物充足的營養份，而不需要額外營養份的添加。 • 惟於某些情況，特定營養份的足夠與否，可能成爲微生物消化代謝程序的限制因子。
濾料 pH 值之調整	• 採堆肥濾料之生物濾床之最佳的 pH 值在 7～8 之間。 • pH 值的降低對於一般有機化合物(如 BTEX)的分解通常並不成問題，但對於含有硫、氮及氯的化合物之氧化作用會導致酸性中間物的生成，使濾床的 pH 值降低。 • 因此對於處理具產生酸性產物潛在性的污染物時，於濾料中添加緩衝鹽類，緩衝 pH 值的變動。
濾料之翻堆	• 濾料使用 2~3 年後，易因所含營養份減少，與本身重力而產生結塊、破碎、壓密等老化現象；或因處理含硫、氯、氮之化合物成份廢氣，致使濾料產生酸化現象，造成處理效率降低。 • 在無法藉由外界以灑水方式添加營養份、pH 值緩衝劑時，即需進行濾料之翻堆，並於翻堆時加入營養鹽與 pH 值緩衝劑，調整其 pH 值於 7~8 之間。 • 必要時，最終甚至需更換濾料，以維持微生物生長之活性。

資料來源：經濟部工業局，揮發性有機物廢氣減量及處理技術手冊，民國 93 年 12 月。

六、參考文獻

1.行政院勞委會勞安衛研究所，局部排氣導管設計程式使用手冊。

2.行政院環保署，逸散性污染源控制，空氣污染防制專責人員訓練教材，民國98年3月。

3.經濟部工業局，氣態污染物控制技術，民國81年11月。

4.經濟部工業局，局部排氣氣罩設計實例，民國85年。

5.經濟部工業局，局部排氣系統設計與案例(2006更新版)，民國95年。
6.中華民國工業安全衛生協會，工業通風設計講習基本教材-局部排氣裝置設計基本篇。
7.行政院環保署，膠帶製造業揮發性有機物空氣污染管制及排放標準法規說明，民國97年5月。
8.國科會/環保署科技合作研究計畫，半導體產業產生有害空氣污染物處理技術，民國88年5月。
9.經濟部工業局，揮發性有機物廢氣減量及處理技術手冊，民國93年12月。
10.財團法人中技社，揮發性有機氣體控制技術，民國92年元月。
11.行政院環保署，甲級空氣污染防制專責人員訓練教材，民國98年。
12.行政院環保署，揮發性有機物空氣污染防制及排放標準技術輔導計畫─環保人員手冊，民國87年4月。
13.經濟部工業局，總量管制空氣污染物削減技術手冊，民國90年12月。
14.林文川，臭味控制技術的介紹，台北國際環保暨能源展專刊─環保特刊，民國85年。
15.經濟部工業局，VOC 臭味控制技術講習會，民國91年6月。
16.環保署/國科會空污防制科研合作計畫，臭味及揮發性有機物控制，民國93年12月。
17.經濟部工業局，VOC 控制技術講習會，民國82年9月。
18.行政院環保署，惡臭防制技術參考手冊第三冊，民國77年。
19.經濟部工業局，揮發性有機物減量管理研討會，民國86年5月。
20.沈克鵬，VOCs 空氣污染控制技術與操作審核要點，民國98年3月。
21.行政院環保署，揮發性有機廢氣生物處理系統建立及評估計畫，民國89年12月。
22.經濟部工業局，揮發性廢氣處理技術講習會，民國92年7月。
23.行政院環保署，揮發性有機廢氣生物處理技術手冊，民國89年12月。
24.沈克鵬，揮發性有機物空氣污染防制最佳可行控制技術(BACT)技術手冊，民國93年11月。