

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

沸石吸附濃縮轉輪去除半導體及光電產業 VOCs 廢氣之關鍵 影響因子探討(1/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2211-E-009-011-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立交通大學環境工程研究所

計畫主持人：白曠綾

計畫參與人員：林育旨, 楊雅葳

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫涉及專利或其他智慧財產權，2年後可公開查詢

中 華 民 國 92 年 5 月 16 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫期中進度報
告

沸石吸附濃縮轉輪去除半導體及光電產業 VOCs 廢氣
之關鍵因子探討

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 91-2211-E-009-011

執行期間： 91年 08月 01日 至 92年 07月 31
日

計畫主持人：白曠綾教授

計畫參與人員：林育旨、楊雅葳

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整
報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究
計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可
公開查詢

執行單位：國立交通大學環境工程研究所

中 華 民 國 92 年 05 月 日

摘要

沸石吸附濃縮焚化系統是目前新竹科學園區內被多數半導體業界採用來控制其所排放之 VOC_S 廢氣，且是符合半導體空污法規之最穩定設備；實場上沸石吸附濃縮轉輪因諸多考量下，不易詳盡了解環境條件及主要操作參數對其系統效率之影響，所以本研究於實驗室內架設一小型沸石轉輪系統，針對進流廢氣可能之溫、濕度變化及各重要操作參數，進行該系統去除效率之影響探討。研究結果顯示，系統去除效率隨廢氣進流溫度升高而減低，當進流溫度在 40°C 以下時去除效率可維持於 91.7% 以上，仍符合現行法規要求；當進流相對溼度若控制在 85% 以下時，則可避免廢氣中所含有之溼氣凝結成水滴，而造成系統去除效率降至 90% 以下之現象；故進流溫、溼度之兩環境條件建議可列為實廠系統效率下降之檢核因子。研究中亦發現沸石轉輪最佳之 VOC_S 去除效能介於轉速每小時 3 至 4.5 轉之間，而系統最佳效能所相對應之轉速將隨著 VOC_S 進流濃度上升而增加；而當降低系統處理時之濃縮倍率將有助於 VOC_S 去除效率之提升，不過所增加之濃縮倍率將相對使得後端焚化能源耗用增多。

此外，本研究針對半導體實廠中主要出現之 VOC_S 物質，如 IPA、Acetone、PGME 及 PGMEA 等，於沸石轉輪系統進行競爭性吸附探討。初步研究結果發現 PGME 及 PGMEA 於系統之去除效率優於 IPA 及 Acetone，其主要係因為高沸點物質將優先吸附於沸石轉輪上；本研究亦發現此多成分混合廢氣之進流總濃度亦將影響轉輪去除效率最佳轉速之數值，在處理較高之進流總濃度（200ppmv）時，需將轉輪轉速調校至較高之轉速，俾使沸石轉輪處理效率達至最佳。

關鍵詞：沸石吸附濃縮焚化系統、異丙醇、丙酮、高沸點物質、半導體產業、光電產業

ABSTRACT

The use of a honeycomb zeolite concentrator and an oxidation process is one of the most popular methods demonstrated to be applicable to control VOC_S in waste gases from semiconductor manufacturing plants. This study attempts to characterize the performance of a concentrator in terms of the removal efficiencies of semiconductor VOC_S (mainly composed of IPA, acetone, PGME and PGMEA) under several parameters that govern the actual operations. Experimental results indicate that, at an inlet temperature of under 40°C and a relative humidity of under 80%, the removal efficiency of zeolite concentrator can be maintained well over 90%. The optimal rotational speed of concentrator is between 3 to 4.5 rph in this study. The optimal rotation speed increases with the concentration of VOC_S at the inlet. Furthermore, reducing the concentration ratio helps to increase the removal efficiency, but it also increases the incineration cost. With reference to competitive adsorption, PGMEA and PGME are more easily adsorbed on a zeolite concentrator than IPA and acetone due to their high boiling points and molecular weights.

Keywords : zeolite concentrator, Isopropyl-alcohol(IPA), Acetone, High boiling-point VOC_S, Semi-conductor industry, Electro-optical industry

一、前言

隨著半導體工業快速發展，行政院環保署在民國 89 年 7 月 1 日正式施行「半導體製造業空氣污染管制及排放標準」，嚴格管制品圓製造等相關半導體產業所排放之空氣污染物。半導體製造及代工業之晶圓製造程序，在光罩、顯影等過程均大量使用光阻劑、顯影液及蝕刻液，其中主要成份為 MEA、NMP、PGME 及

PGMEA，而後續晶圓清洗等過程使用大多包括丙酮(Acetone)、異丙醇(IPA)、乙二醇等有機溶劑^{1,2,3}。為控制這些揮發性有機物控制，目前常見之實場應用技術包括吸收法、吸附法、沸石吸附濃縮轉輪焚化系統、冷凝法及生物處理法等^{4,5}。

沸石吸附濃縮轉輪焚化系統係利用吸附-脫附濃縮-焚化之三項連續程序，適合處理半導體及其相關製造業之高排放量、低 VOCs 濃度及 VOCs 成份多樣化廢氣。其處理原理係為廢氣進入疏水性沸石轉輪，有機物可同時於轉輪上進行吸附及脫附，通常轉輪被分為三部分：較大之吸附區及其他兩個較小區域且面積相等之脫附區、冷卻區。脫附是將預熱過之空氣通入轉輪內，將有機物脫附下來，其出流濃度大約為入流廢氣之 5~20 倍左右，而脫附下來之有機物則可進行焚化或是冷凝回收再利用，如此可以節省後續之廢氣處理單元尺寸，並節省初設及運轉費用。經一般實場運轉及實驗室模組測試⁵⁻¹⁰，發現其效能可達 90% 以上，故為目前新竹科學園區內多數半導體業界應用控制其所排放之 VOCs 廢氣、且是符合半導體空污法規之最穩定設備，不過國內使用該設備者卻極為仰賴原廠操作參數、遇高沸點 VOCs 將引起系統效能下降，及操作成本偏高之情況。

二、研究目的

本年度研究計畫即於實驗室內架設一小型沸石轉輪系統，並以國內半導體及光電產業使用比例為重之揮發性有機物質⁵(volatile organic compounds, VOCs) 如中沸點 VOCs 物質之異丙醇 Isopropylalcohol(IPA)、丙酮(Acetone)，高沸點 VOCs 物質之單甲基醚丙二醇(Propylene Glycol Methyl Ether, PGME)、乙酸乙二醇丁醚(Propylene Glycol Monomethyl Ether Acetate, PGMEA)等為研究物種，並依據以往研究及執行計畫規納出可能影響沸石濃縮轉輪焚化系統參數，如進流廢氣之溫、濕度變化，及各重要操作參數如轉輪轉速、濃縮倍率與再生溫度等，逐項進行影響該系統去除效率探討，所得結果除了能妥善瞭解沸石濃縮轉輪焚化系統於各操作狀況下之運作效能，並可為其系統建立操作參數資料庫之基礎外，亦能提供實場調整之參考、以省卻不必要之試誤程序。

三、文獻探討

沸石吸附濃縮轉輪焚化系統係利用吸附-脫附-濃縮焚化等三項連續程序，其設備特性適合處理高流量、低污染物濃度及含多物種之 VOCs 廢氣，其主要應用於排放較稀薄且接近周界溫度之污染工業，典型應用如影印及塗裝製程、半導體工業…等。

工廠所排放出之 VOCs 廢氣進入系統後，第一階段係經過疏水性沸石所組成之轉輪，VOCs 污染物質可同時於轉輪上進行吸附及濃縮脫附；通常沸石轉輪可分為三部分：較大之吸附區及兩個較小且面積相等之脫附區、冷卻區。第二階段之脫附程序是由與後端焚化系統熱交換後預熱之空氣(約 180°C~200 °C)，使其通入轉輪內將有機物脫附下來，此時出流污染物濃度大約為入流廢氣之 5~20 倍

左右，而脫附下來之有機物則可於第三階段進行溫度於 700°C 以上之焚化或是進行冷凝回收再利用等程序，如此可以減少後續之廢氣處理單元尺寸，並節省初設費用。

沸石吸附濃縮焚化系統整體效能已由文獻上⁵⁻¹²實場運轉及實驗室模組測試得知皆能達到 90% 以上，且發現其主要設計及操作參數為：轉輪寬度、轉輪吸附/脫附/冷卻風面比、轉輪轉速、脫附氣流流速、脫附溫度及焚化溫度。Mitsuma (1998)⁸ 等人以縮小比例沸石轉輪系統進行模擬，並歸納在適切吸附轉輪轉速 (n_{opt})、轉輪脫附面積比 (f)、轉輪寬度 (L) 及脫附氣流流速 (U_R) 等因素控制下 ($U_R/f \cdot L \cdot n_{opt} = 450$)，沸石轉輪處理效率將達到 90% 以上、沸石吸附濃縮比亦達到 10 倍以上，而此操作參數亦能驗證於當地之實場運作。另外 Chang (2000)⁶ 等人進一步研究，加入沸石轉輪基體與廢氣熱傳性質、再生溫度、脫附濃縮比、VOCs 進流濃度及轉輪寬度等實際影響沸石轉輪性能之應用操作參數值，修正 Mitsuma 等人之最適化無因次操作參數，其推論結果除與實場運作效能驗證後更具一定之可信度外，亦發現 VOCs 濃度過高或是再生溫度太低，會在質量與熱能平衡限制之下，導致沸石轉輪系統處理效率顯著下降。

在國內，李氏¹² 運用乙套於新竹科學園區某家半導體工廠實際運轉之沸石轉輪吸附濃縮設備，進行改變操作參數驗證處理實場廢氣之吸附效率研究探討。在其研究中發現不同沸點之 VOCs 物質，在以同濃度相較之下，沸點低其吸附效率差、脫附效率高，沸點高 VOCs 則反之；而此外操作環境溼度若大於 60%，則其對去除效率之影響將較 60% 以下來得大；轉輪速度提高將影響吸附效率下降、減少沸石轉輪濃縮比；連氏(1993)¹³ 利用轉輪基體和氣體間之質量與能量守恆關係，推導分別適用於沸石轉輪處理週期及再生之整體吸/脫附效能預測數值解方程式，而系統之統御方程式參數包括了轉輪操作條件、熱質傳輸性質及熱力性質，其模式模擬分析結果，可提供預測沸石轉輪最適化操作參考。

白(2001)¹¹ 等人執行之研究計畫中，經於一實場沸石吸附濃縮焚化系統，進行調校再生溫度及再生風量等兩個操作參數值適度後，其系統效能為 96.5% 大於原廠建議操作值下 95%，亦可相對節省 23% 之後段焚化燃料費用。張(2001)¹⁴ 等人初步研究發現實場沸石轉輪處理高沸點揮發性有機物，因現行再生脫附熱容量不足、使得其不易脫附，日久將於離吸附側形成蓄積聚合，佔據沸石吸附位置，造成整體處理效能下降及操作不甚所引發之沸石轉輪悶燃等現象。

四、研究方法

本研究實驗設備流程圖如圖 1 所示。空氣壓縮機產生氣流、經流量計控制所需流量後，以過濾器去除氣流中之粒狀污染物，再以溼度控制器及 VOCs 曝氣設備調整所需之溼度與 VOCs 濃度值。於進入反應器前，氣流閥門與流量控制器將分別控制進入反應器吸附區及冷卻區之吸附氣流量及冷卻氣流量(脫附氣流量)，且由前者除以後者所得之值即為定義之濃縮比；反應器處理吸附氣流及冷卻氣流所含之污染物後，吸附氣流導引至抽氣櫃排至大氣，冷卻氣流則循環導入

加熱器成為脫附氣流、並加熱至所需之脫附溫度，再進入反應器之脫附區將吸附其上之 VOCs 脫附而出。本研究之反應器旋轉及轉速由步進馬達控制，沸石轉輪反應器之規格資料如表 1 所示。

在吸附區出口側共有六個檢測點，每個點距之角度為 50° ；本研究中亦針對反應器高度及旋轉角度分別定義兩個無因次參數： Z 及 τ 。無因次化高度參數 Z 之計算為由吸附區入口側所量測而得之高度除以反應器總高度；無因次化旋轉角度 τ 之定義為反應器轉入脫附區開始計量每個溫度與 VOCs 取樣點之角度除以 360° 所得之值。為了解反應器之處理性能效率，本研究利用氣相層析儀/火焰離子化偵測法(GC/FID)，藉以檢測反應器於各操作條件下之吸附前後 VOCs 濃度值，以了解其處理效率；檢測 VOCs 濃度之方法為每隔 60 秒以自動採樣方式分別對反應器前後之氣流取樣 5ml 後，注入 GC/FID(Shimadza GC14B)，其內分析管柱為 J&W DB-Wax(30m×0.53mm I.D., 1.0 ~ m film thickness)、火焰偵測器與烘箱均設定為 200°C 。

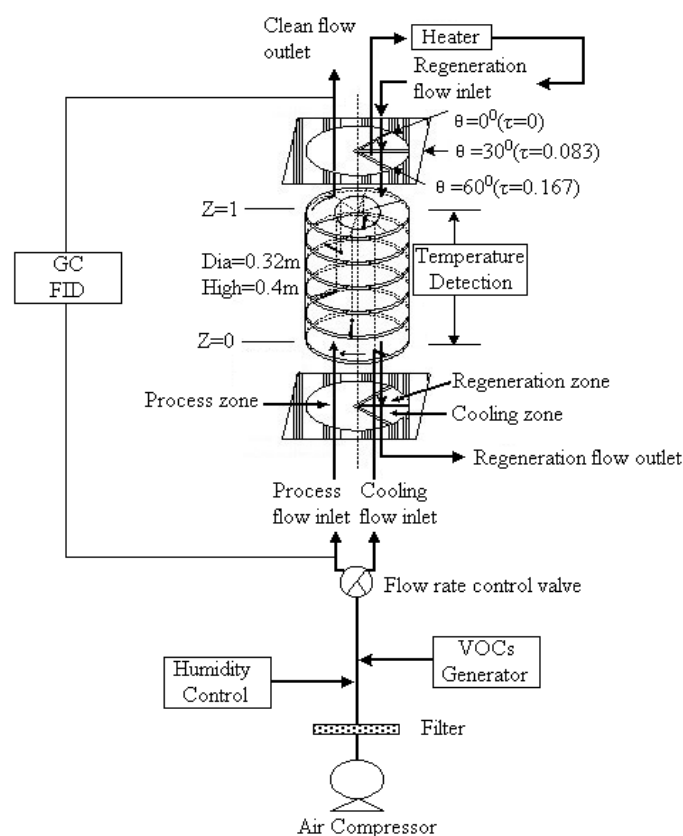


圖 1 實驗設備流程

表 1 本研究所使用之沸石轉輪反應器之規格資料

Rotor Diameter(mm)	320	BET Surface Area (m^2/g)	241
Height of the Rotor (mm)	400	Mass Fraction of Zeolite in Matrix (%)	36.66
Bulk Density (kg/m^3)	250	Adsorbent Type	ZSM-5
Zone Area Ratio (Process/Regeneration/Cooling)	10:1:1	--	--

五、結果討論

本研究初步結果係針對沸石吸附濃縮轉輪處理半導體 VOC_S 廢氣之主要影響參數，如進流廢氣可能之溫、濕度變化及各重要操作參數如轉輪轉速、濃縮倍率與再生溫度等，進行該系統去除效率探討。經調查⁵顯示目前台灣地區半導體業排放 VOC_S 廢氣中，平均以 IPA 所佔比例為最多，故本研究以異丙醇(Isopropyl alcohol, IPA) 為主要研究物種，其他探討之 VOC_S 包含了丙酮(Acetone)、PGME 及 PGMEA 等。

5.1 不同進流溫度對去除效率之影響

圖 2 為不同氣流進流溫度下對於系統去除 IPA 之效率影響，進流 IPA 濃度為 200ppm、脫附溫度為 180°C，濃縮比為 13 倍，氣流進流濕度為 11g/kg，再生氣流流速為 1.77m/s，轉速為每小時 3.3 轉。由於吸附為放熱反應，進流溫度增加將不利於吸附處理程序，在圖 2 中可看出當溫度高於 35°C 後，系統之處理效率將明顯下降，研究中亦發現當吸附溫度達到 45°C，系統處理效率降至 92% 以下；另外，理論上溫度降低有助於吸附程序之進行，但此時氣流中之相對溼度將相對增加，如溫度在 20°C 時、其相對溼度為 75%，此時較高之相對溼度將使得水分凝結於轉輪上、佔據蜂巢孔徑及吸附位置，使得吸附效率下降。

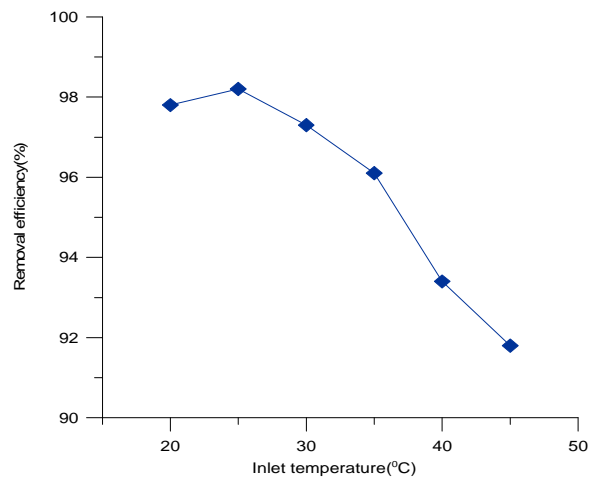


圖 2 不同氣流進流溫度下對於系統去除 IPA 之效率影響

5.2 不同進流濕度對去除效率之影響

為進一步了解氣流中溼度(水份)與 VOC_S 在沸石轉輪上之競爭性吸附情形，圖 3 為進流氣流中所含 IPA 濃度 200ppm、Acetone 濃度 100ppm，進流溫度控制於 25°C、脫附溫度 180°C、濃縮倍率 13 倍，脫附氣流量 1.77m/s、轉輪轉速每小時 3.3 轉，於不同相對溼度下沸石轉輪去除 IPA 與 Acetone 等 VOC_S 效率變化與每單位除濕量狀況。在進流相對溼度於 40 至 80% 之間時，系統處理 IPA 與 Acetone 之效率仍可達 95% 以上；當相對溼度大於 90% 時，系統對於處理 VOC_S 整體效率僅有 80%，而以個別物種之處理效率來看，IPA 仍有 80% 以上、而 Acetone 卻僅達 75%。探求 IPA 處理效率優於 Acetone 之原因為 IPA 之沸點及分子量均高於 Acetone，所以使得其較容易吸附於沸石上。

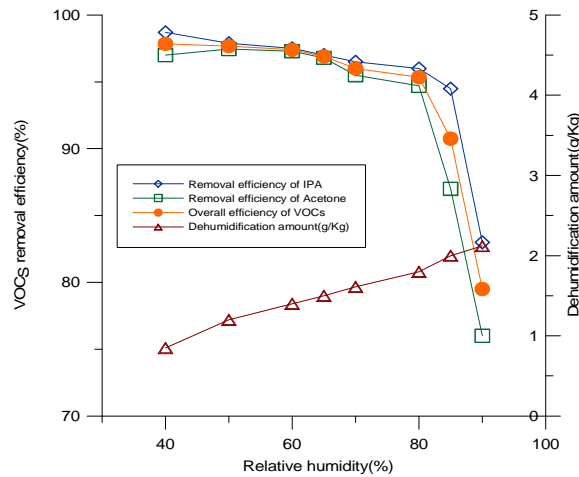


圖 3 不同氣流進流溼度(水份)與 VOCs 在沸石轉輪上之競爭性吸附情形

5.3 主要操作參數對轉輪去除效率之影響

1. 轉速之改變

圖 4 為不同轉速下，於轉輪吸附區出口側表面各轉度位置所量測之去除效率。由圖 4 可知隨著轉速之增加，轉輪吸附效率有下降之趨勢，分析其因係過快之轉速將使得轉輪於脫附區即無法有充裕時間進行脫附程序，所以當轉輪操作於轉速每小時 6.1 轉時，仍有部分之沸石吸附位置仍有相當之 VOCs 未完全脫附出，佔據吸附位置、使得後續欲處理之 VOCs 無法獲得妥善吸附，造成剛進入吸附區處理後之去除效率即低於 80% 以下；而過慢之轉速，則可能使得轉輪於吸附區之停留時間延長、讓轉輪內飽和吸附區增加，造成效率略為下降。所以為使轉輪達最理想之去除效果，必須根據進流廢氣之狀況作一定之調整，而本研究於進流 IPA 濃度 200ppm、進流溫度 25°C、脫附溫度 220°C、進流溼度控制 11g/kg 及濃縮倍率為 13 時，所得最佳去除效率所對應之轉速為每小時 3.3 轉。

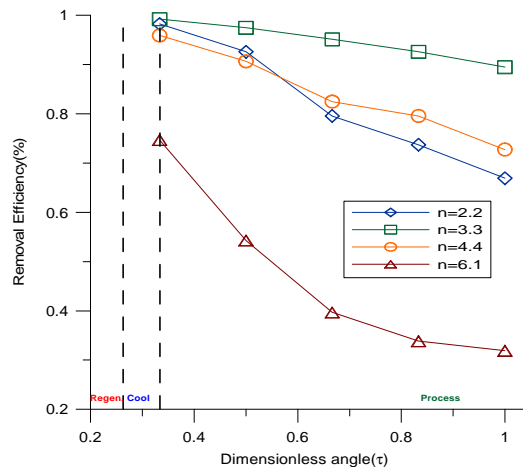


圖 4 不同轉速下，轉輪吸附區出口側表面各轉度位置之去除效率

圖 5(a)及(b)為不同轉速下，半導體主要 VOCs 之高、低進流濃度於轉輪上吸附去除效率情形。

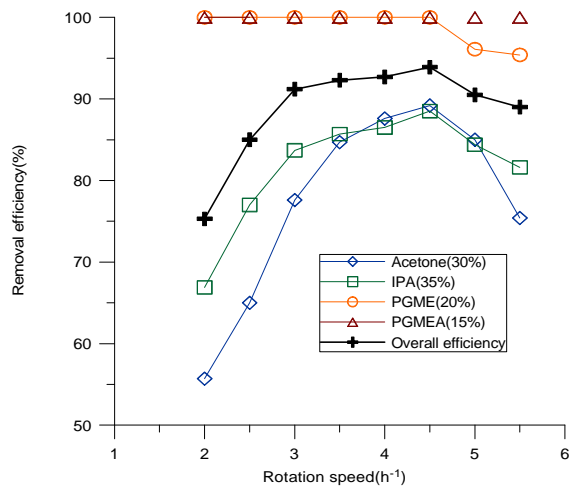


圖 5(a)不同轉速下，高濃度(THC=200ppmv)之主要半導體 VOC_s 於轉輪上吸附去除效率

圖 5(a)主要操作條件為再生溫度 180°C、濃縮倍率 14 倍，當進流 VOC_s 濃度為 200ppmv(各成分所佔比例：IPA35%、Acetone30%、PGME20%、PGMEA15%)時，系統最佳轉速為每小時 4.5 轉；而如圖 5(b)所示當進流濃度降為 80ppm，則系統最佳轉速隨之降為每小時 4.0 轉。

分析較高進流 VOC_s 濃度，其所得最佳效率之對應轉輪轉速較快之因係為氣流中所含之污染量較多，若轉速過慢將使吸附處理區提前趨近飽和、造成處理效率下降。此現象可由圖 5(a)中所得知，當轉速操作於每小時 2 至 2.5 轉，系統處理效率即降至 90% 以下，故進流濃度較高時，需將轉速提高以使轉輪提前進入脫附區進行脫附處理；但轉速過快會讓脫附區處理未妥、隨即進入吸附區處理，轉輪上之沸石吸附位置仍有殘存 VOC_s，如此將使得轉輪上之競爭性吸附更趨於顯著，如圖 5(a)中之 PGME 處理效率即未能達到 100%。

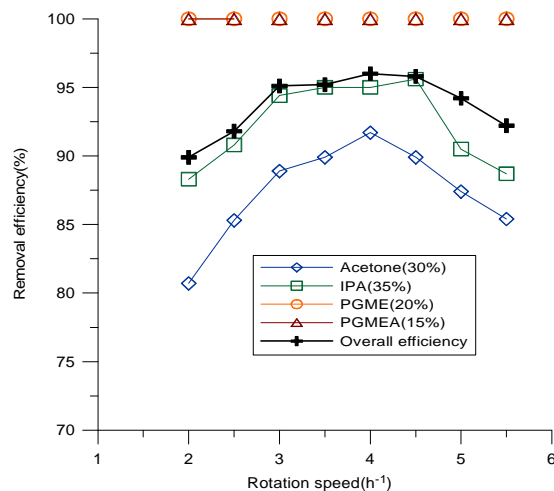


圖 5(b)不同轉速下，低濃度(THC=80ppmv)之主要半導體 VOC_s 於轉輪上吸附去除效率

由圖 5(b)可發現，進流濃度於 80ppmv 時，則只要介於每小時 2 至 5.5 轉，其 VOC_s 總去除效率均可達到 90% 以上；而相對比較圖 5(a)進流濃度為 200ppm 時，轉速僅於每小時 2.8 至 4.5 轉區間，方達到 90% 以上。所以由上述結果可得

知，系統於實場操作時應需定期檢視進流 VOCs 濃度值，並適時調整轉輪之轉速俾使處理效率達到最佳。

2. 濃縮倍率之改變

圖 6 為不同濃縮倍率下，於轉輪吸附區出口側表面各轉度位置所量測之去除效率。

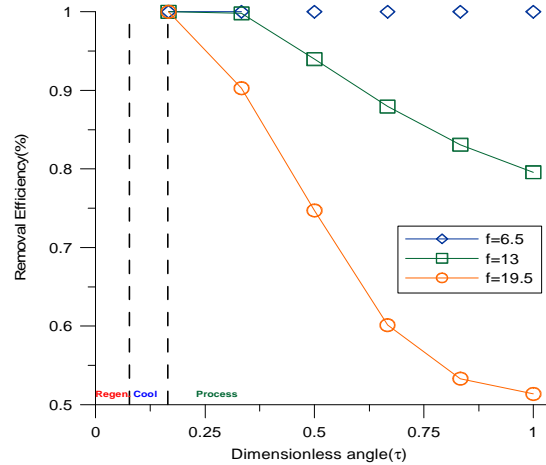


圖 6 不同濃縮倍率下，轉輪吸附區出口側表面各轉度位置之去除效率

其中可發現轉輪之去除效率將隨著濃縮倍率減少而增加，因為濃縮倍率減少代表進入吸附區氣流減少、進入冷卻區與脫附區之氣流量增加。所以當濃縮倍率為 6.5 時，轉輪吸附區可以完全處理此風量下所含之污染量、吸附效率可達 100%。雖然較低之濃縮倍率可以同時增加轉輪於吸附區及脫附區之處理效率，但實廠應用上這代表進入後端之焚化爐處理之風量亦隨之增大，造成更多焚化燃料耗用。所以為使效率與能源同時達到理想情況，應視實際之需要隨時調整濃縮倍率值。

3. 脫附溫度之改變

圖 7 為不同脫附溫度下，於轉輪吸附區出口側表面各轉度位置所量測之去除效率。由於脫附溫度增加，可使轉輪於脫附區獲得充足熱能、將吸附其上之 VOCs 全數脫附而出，如此進入吸附區之轉輪吸附效率也隨之增加；不過過高之脫附溫度將使得轉體深層殘餘熱過多，反而不利吸附程序之進行，如實驗中當脫附溫度操作於 240°C，轉輪之去除效率反而較 210°C 下降。

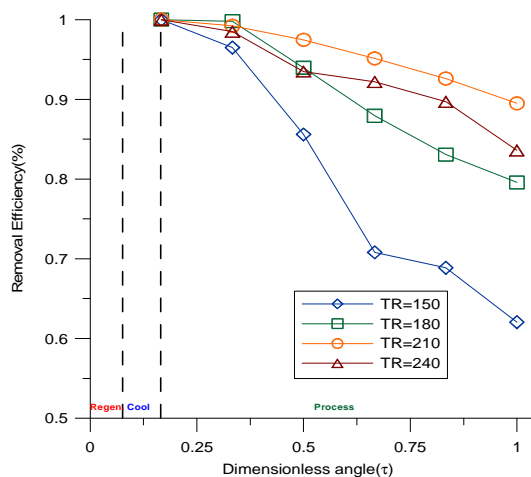


圖 7 不同脫附溫度下，轉輪吸附區出口側表面各轉度位置之去除效率

所以綜合以上研究結果顯示，各 VOC_S 物種於轉輪上競爭吸附，可發現 PGMEA > PGME > Acetone > IPA，此可能因為 PGMEA 及 PGME 之沸點分別為 146 及 120°C，而 Acetone 與 IPA 之沸點為 56.5 及 82°C，故使得 PGME 及 PGMEA 於轉輪上之吸附特性較佳而優先吸附。雖實場上脫附溫度均操作於 180°C 以上時，理論即可有效將 PGME 及 PGMEA 脫附而出，惟實際上轉輪基材熱傳效應及脫附氣流空間速度，將使得脫附側後端局部脫附熱能量不足，所以於安全考量下建議脫附溫度最高提升至 210°C 左右，並情況適時減少濃縮倍率（增加脫附風量），如此可提供充裕之脫附熱能量以使其能有效脫附而出，並且配合定期轉輪之清洗，不因日久蓄積形成高粘度液滴佔據轉輪孔徑或沸石吸附位置，影響整體處理效能。

六、計畫成果自評部份

本研究於實驗室內架設一小型沸石轉輪系統，針對進流廢氣可能之溫、濕度變化及各重要操作參數如轉輪轉速、濃縮倍率與再生溫度等，進行系統效能之影響分析。本年度研究結果充份探討實場各項主要操作參數影響沸石濃縮焚化系統效能狀況，並針對半導體及光電產業之主要 VOC_S 物質、且包含中高沸點範圍，研究系統處理該類物種時所出現之競爭性處理效應問題。

本研究結果發現若控制進流溫度低於 40°C、相對溼度小於 80% 以下，沸石轉輪處理半導體主要 VOC_S 廢氣之效能均可優於目前法規要求標準。轉輪操作於過快或是過慢之轉速將使得系統處理效率降低，研究結果顯示系統之最佳處理效能位於每小時轉輪轉速 3 至 4.5 小時之間，而此應隨著進流 VOC_S 濃度值條件之不同而須隨之調整變動；增加濃縮倍率將使得系統去除效率隨之降低，但卻可使得後端焚化設備減少燃料使用。

由以上結果可知，本年度研究成果相當契合計畫主題「沸石濃縮轉輪去除半導體及光電產業 VOC_S 廢氣之關鍵影響因子探討」，並為現行各研究成果中能充份分析影響現行系統效能操作參數之前驅研究報告，除可為基本操作參數資料庫之建立外，亦可確實提供實場應用之參考，達到原先預期目標。

本研究成果亦整理完畢，業已發表於民國 91 年 10 月由國科會主辦之第一屆高科技工業環保技術及安全衛生學術及實務研討會，目前已投稿至國科會環工學門核訂之 A 級學刊 Journal of A&WMA 進行刊載審查中。

七、參考文獻

1. 經濟部工業局，「半導體製造業污染防治技術」，(1996)。
2. 吳學翰，「半導體製程尾氣分析之研究」，雲林科技大學環境與安全工程學系碩士論文，(1998)。
3. 廖海瑞，「半導體製程使用氣體的職業危害」，工業安全科技，(1995)。
4. Brookman, R.P.; Flaherty, E.; and Weadock, D.K., “Engineering for Toxic Gas Abatement”, Semiconductor International, (1988) .
5. 國科會新竹科學工業園區管理局，「園區半導體製造業廢氣處理及排放調查研究」，(2000)。
6. Chang, F.T.; Pei, P.S.; and Chuah, Y.K., “Performance of Honeycomb VOC_S concentrators for An Exhaust Gas. ”, 2000 8th Conference on Aerosol Science and Technology, pp.552-557, (2000).
7. Mitsuma, Y.; Yamauchi, H.; and Hirose, T. “Analysis of VOC Reversing Adsorption and Desorption Characteristics for Actual Efficiency Prediction for Ceramic Honeycomb Adsorbent.”, J. Chem. Eng. Japan, Vol.31, pp. 253-257, (1997).
8. Mitsuma, Y.; Yamauchi, H.; and Hirose, T., “Performance of Thermal Swing Honeycomb VOC Concentrator”, J. Chem. Eng. Japan, Vol.31, pp. 482-484, (1998).
9. Mitsuma, Y.; Ota, Y.; Kuma, T.; and Hirose, T., “Practice of the VOC Abatement by Thermal Swing Ceramic Monolith Adsorbers”, Proc. 4th Japan-Korea Symposium on Separation Technology, pp. 479-482, Tokyo Japan, (1996).
10. Kuma, T.; Hirose, T. ; Mitsuma, Y.; and Ota, Y., “Removal Efficiency of Volatile Organic Compounds, VOC_S, by Ceramic Honeycomb Rotor Adsorbents,” Proc. 5th Int. Conf. Fundamentals of Adsorption, LeVan, M.D. ed., pp.465-472, Kluwer, Academic Publisher, Boston, USA, (1996).
11. 白曠綾、賴慶智、林育旨、康育豪等，「新竹科學園區半導體及光電製造業空氣污染防治設施績效提升輔導」，國科會科學工業園區管理局，民國九十年十二月。
12. 李俊洋，「蜂巢狀沸石轉輪吸附濃縮 VOC_S 之分析研究」，元智大學機械工程研究所碩士論文，民國 87 年。
13. 連長松，「利用吸附式除臭轉輪於廢氣處理的電腦模擬與性能分析」，逢甲大學化學工程研究所碩士論文，民國 82 年。
14. 張豐堂、林育旨、白曠綾、白寶實，「蜂巢狀濃縮吸附沸石轉輪受高沸點去光阻劑之影響與預防措施」，第十八屆空氣污染控制技術研討會論文集光碟，民國 90 年 12 月。