

沸石濃縮轉輪焚化系統

操作績效自我評估管理制度

參考手冊

第二版

白曠綾、林育旨、張豐堂、陳建志 編著

補助單位：科學工業園區管理局

執行單位：國立交通大學環境工程研究所

中華民國九十二年十二月

目錄

一、前言	1
二、沸石吸附濃縮轉輪焚化系統基本原理	3
三、沸石濃縮轉輪之模廠吸附特性測試	6
3.1 測試方法	6
3.2 不同進流溫度對去除效率之影響	10
3.3 不同進流濕度對去除效率之影響	12
3.4 主要操作參數對轉輪去除效率之影響	12
3.5 結論	22
四、沸石濃縮轉輪焚化系統操作之成本效率	24
4.1 實驗系統	24
4.2 沸石轉輪系統結合 RTO 與其結合直接焚化爐之比較	27
4.3 操作參數最佳化	30
4.4 結論	32
五、轉輪操作問題、處理方案與改善成果	35
5.1 沸石吸附濃縮轉輪主要之操作問題	35
5.2 建議處理方案	36
5.2.1 設置前端濾布過濾裝置	36

5.2.2 設置前端高沸點 VOC _S 物質冷凝處理設備.....	36
5.2.3 定期以潔淨水進行保養清洗.....	37
5.2.4 於操作程序中提高脫附熱容量.....	39
5.3 建議處理方案對系統處理效率改善成果.....	39
5.3.1 設置前端濾布後之系統改善狀況.....	39
5.3.2 裝設冷凝器前處理及執行水洗程序之系統改善狀況.....	48
5.3.3 於操作程序中提高脫附熱容量對於系統去除效率之改善.....	51
六、沸石吸附濃縮轉輪焚化系統之適用建議.....	53
七、沸石吸附濃縮轉輪焚化系統之操作維護記錄項目及績效自我評估.....	55
7.1 沸石吸附濃縮轉輪焚化系統之操作維護記錄項目.....	55
7.2 沸石吸附濃縮轉輪焚化系統之操作績效自我評估.....	57
參考文獻.....	60
附件 操作效能自我評估管理記錄表.....	62

表目錄

表 3.1 使用之沸石轉輪反應器之規格資料.....	9
表 4.1 沸石轉輪系統結合蓄熱燃燒爐與其結合直接焚化爐相較後之優缺點	29
表 4.2 沸石濃縮轉輪結合蓄熱燃燒爐及其結合直接焚化爐之成本比較.....	29
表 4.3 某半導體廠執行原廠參數與本研究群建議操作參數值之去除效率比較	34
表 4.4 某光電廠操作參數調整前後之處理效率變化.....	34
表 5.1 某半導體廠設置冷凝器前後個別成本與總成本比較.....	52
表 7.1 沸石吸附濃縮焚化系統建議紀錄項目填寫範例.....	56
表 7.2 沸石吸附濃縮焚化系統建議操作績效指標自我評估表範例.....	59
附表 1 沸石吸附濃縮焚化系統操作維護紀錄項目	63
附表 2 沸石吸附濃縮焚化系統建議操作績效指標自我評估表.....	64

圖目錄

圖 1.1 沸石吸附濃縮轉輪焚化系統處理流程.....	5
圖 3.1 模廠設備流程.....	8
圖 3.2 不同氣流進流溫度下對於系統去除 IPA 之效率影響.....	11
圖 3.3 不同氣流進流溼度(水份)與 VOC _S 在沸石轉輪上之競爭性吸附情形	13
圖 3.4 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.....	14
圖 3.5(a)不同轉速下，高濃度(THC _S =200ppmv)之主要半導體 VOC _S 於轉輪上 吸附去除效率.....	17
圖 3.5(b)不同轉速下，低濃度(THC _S =80ppmv)之主要半導體 VOC _S 於轉輪上 吸附去除效率.....	18
圖 3.6 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..	19
圖 3.7 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..	21
圖 4.1 本研究之沸石濃縮轉輪結合 RTO 系統處理半導體 VOC _S 廢氣流程	25
圖 5.1 轉輪建議清洗程序.....	38
圖 5.2 抽氣時間與濃度變化圖(IPA 為異丙醇；NBA 為乙酸正丁酯).....	41
圖 5.3 抽氣時間與濾布去除率關係圖(IPA 為異丙醇；NBA 為乙酸正丁酯)	41
圖 5.4 連續抽氣 16 天之濃度變化圖(IPA 為異丙醇；NBA 為乙酸正丁酯)	42
圖 5.6 某光電廠裝設濾布後風車變頻運轉效能與時間變化圖.....	42

圖 5.7 某光電廠有機排氣之粉末混合水中的靜置一天後之情形.....	44
圖 5.8 某光電廠有機排氣之粉末 0.08g 在(a)未加熱前；(b)180°C下加熱烘烤 11 分鐘；(c)180°C下加熱烘烤 15 分鐘後之粉末變化.....	44
圖 5.9 某光電廠有機排氣粉末混合於水中(a)未烘乾前；(b)100°C下烘乾； (c)130°C下烘乾.....	45
圖 5.10 某光電廠有機排氣粉末在 100°C下烘乾之塗覆表面(a)放大 3 千倍； (b)放大 1 萬倍.....	45
圖 5.11 某光電廠有機排氣粉末在 130°C下烘乾之塗覆表面(放大 30 倍)....	45
圖 5.12 某光電廠有機排氣粉末之元素分析.....	47
圖 5.13 沸石轉輪系統結合冷凝器與單一沸石轉輪系統進行轉輪清洗後處理 效率	49

一、前言

據研究調查分析結果顯示[1-3]，沸石吸附濃縮焚化系統處理揮發性有機廢氣，其處理效率可穩定達到大於 90 %，且部分廠家應用時亦能達到符合 VOC_s 排放量小於 0.6 kg/hr，是現行揮發性有機廢氣(volatile organic compounds, VOC_s)污染防制設備最能符合國內「半導體製造業空氣污染管制及排放標準」者，亦為新竹科學園區內半導體產業最廣為使用之 VOC_s 污染防制設備；而該系統係結合吸附、脫附及濃縮焚化三項操作單元為一體，是目前提供防制 VOC_s 之較完善設備，但造價及操作維護成本偏高，與不適用於直接處理高沸點揮發性有機物質為其限制所在。

為協助高科技廠家應用沸石吸附濃縮焚化系統之處理效能提升程序及日常操作維護有據可循，本研究群利用執行科學工業園區管理局委託研究計畫之機會，累積實廠輔導經驗，並配合以其他研究經費來源，執行實驗室模廠研究，以瞭解沸石轉輪吸脫附之基本特性，將成果編寫成本手冊。手冊內容涵蓋沸石吸附濃縮轉輪焚化系統基本原理、模廠吸附特性測試、系統操作之成本效率、轉輪操作問題、處理方案與改善成果、系統之適用建議、系統之操作維護記錄項目及績效自我評估等六大部分；而內容所提之各範疇可與該廠實際運作狀況相互對照，並可於實場操作上參酌調整、以省卻不必要之試誤程序。

最後，本手冊亦收錄操作效能自我評估管理制度、內含日常操作維護紀錄項目，其可提供廠家參考表格中之各項參數定期記錄，建立基本之自身操作績效資料庫，亦可推算所花費之 VOC_S 處理成本，而在處理效能符合法規要求、並達一定水準後，若為使操作成本經濟化，則可從中檢視支出最甚之項目，將其適切進行調整以節約成本。如此冀望藉由實務操作經驗紀錄檢視，使自我評估管理制度更趨完善，並讓工廠更能兼具操作績效且達到自我管理之目的。

二、沸石吸附濃縮轉輪焚化系統基本原理

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 VOC_s 廢氣，其主要應用於排放較稀薄且接近周界溫度之污染物工業，典型應用如影印、塗裝製程及半導體工廠等相關產業。沸石吸附濃縮轉輪焚化系統處理流程如圖 1.1[4]所示。

沸石吸附轉輪組合(Cassette)為一中心軸承與軸承周圍之支撐圓形框架支撐著轉體，轉體由沸石吸附介質與陶瓷纖維製成。轉輪上包含用以分開處理廢氣及處理後釋出乾淨氣體之密封墊，其材質為需能承受 VOC_s 腐蝕性及高操作溫度之柔軟材料製成（一般為 silicon）。密封墊將蜂巢狀沸石吸附轉輪組合隔離成基本之吸附區(Adsorption zone)及再生脫附區(Regeneration zone；desorption zone)，但為提升轉輪之吸附處理能力，則常見於前二區間加一隔離冷卻區(Cooling zone or Purge zone)。通常吸附區為較大，而脫附區及冷卻區則為兩個較小且面積相等之處理側。有時為特殊須求亦可分成更多串聯區；而吸附轉輪由一組電動驅動設備用以旋轉轉輪，故轉輪處理時為可變速、且可控制每小時旋轉 2 至 6 轉之能力。

工廠所排放出之 VOC_s 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，VOC_s 污染物質首先於轉輪上進行吸附；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經冷卻區處理後廢氣(約 180 至 250 °C)，使其通入轉輪內利用高溫將有機物脫附下來，此時出流污染物濃度大約可控制為入流廢氣之 5 至 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、操作經費及設備初設費用。

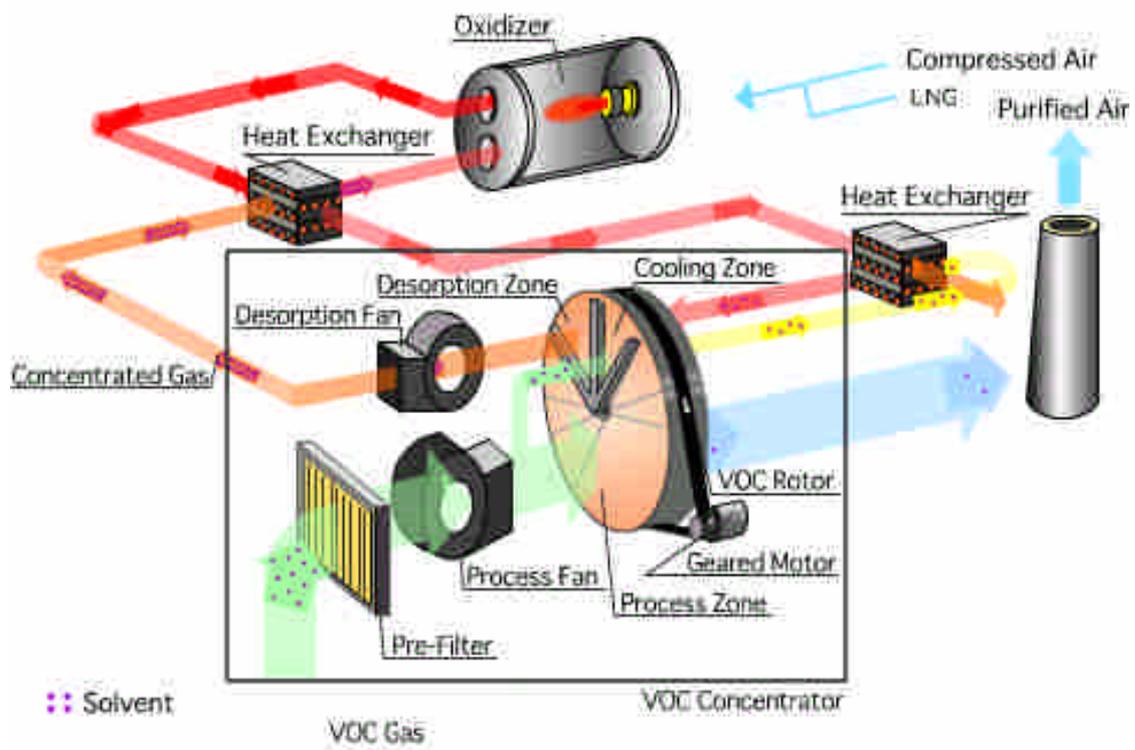


圖 1.1 沸石吸附濃縮轉輪焚化系統處理流程[4]

三、沸石濃縮轉輪之模廠吸附特性測試[5]

沸石濃縮轉輪之模廠吸附特性測試之目的為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。本研究於實驗室內架設一小型沸石轉輪系統模廠，並以國內半導體及光電產業使用比例較多之揮發性有機物質(volatile organic compounds, VOC_S)，如中沸點 VOC_S 物質之異丙醇 Isopropylalcohol(IPA)、丙酮(Acetone)，高沸點 VOC_S 物質之單甲基醚丙二醇(Propylene Glycol Methyl Ether, PGME)、乙酸乙二醇丁醚酯(Propylene Glycol Monomethyl Ether Acetate, PGMEA)等為研究物種[1]，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。

3.1 測試方法

本研究模廠設備流程圖如圖 3.1 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 VOC_S 曝氣設備調整所需之溼度與 VOC_S 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 VOC_S 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 3.1 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 VOC_S 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 VOC_S 濃度值，以了解其處理效率；檢測 VOC_S 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 μ m film thickness)、火焰偵測器與烘箱均設定為 200°C。

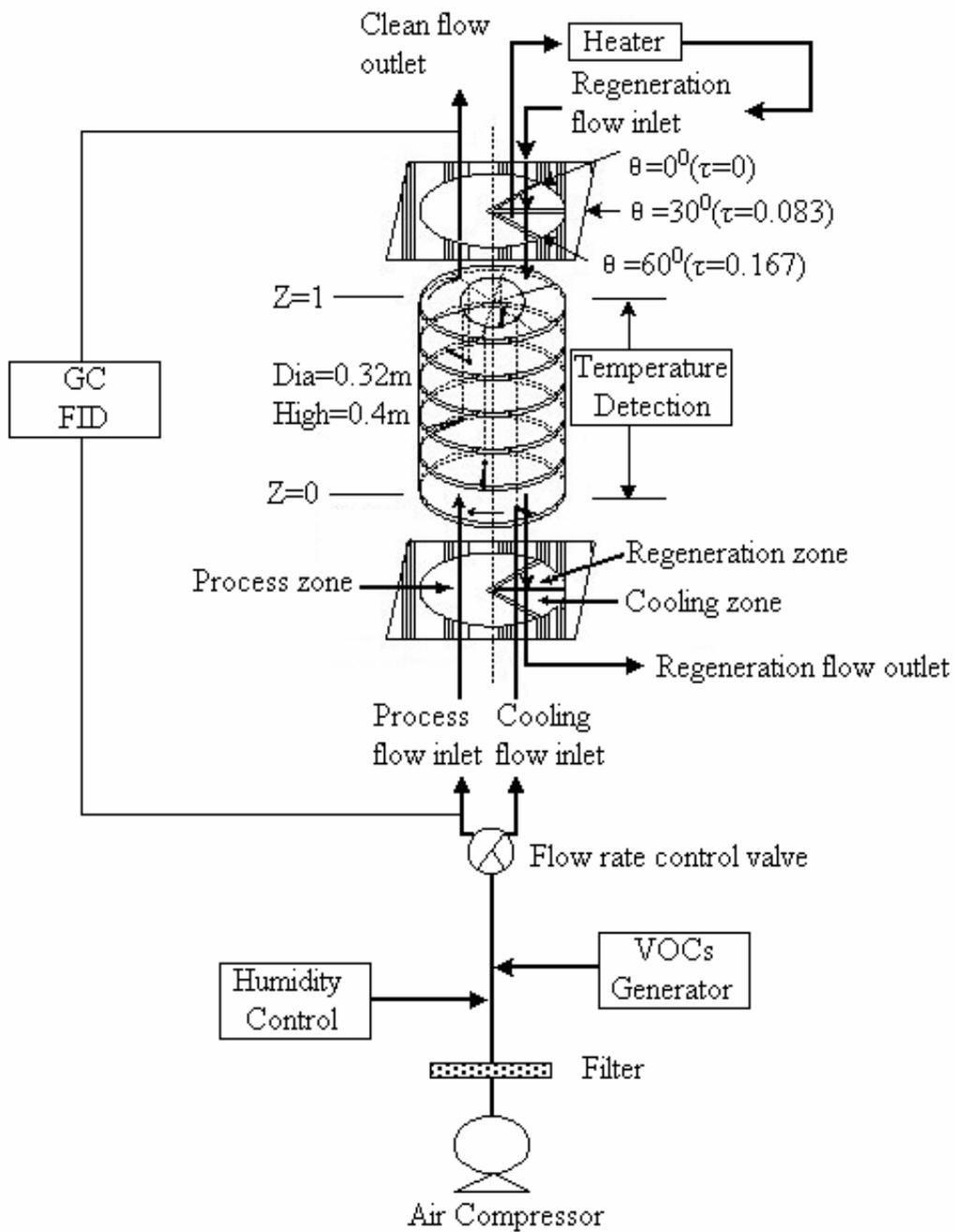


圖 3.1 模廠設備流程

表 3.1 使用之沸石轉輪反應器之規格資料

Diameter(mm)	320
Height (mm)	400
Bulk Density (kg/m ³)	250
Zone Area Ratio (Process/Regeneration/Cooling)	10:1:1
Channel Shape	Parabolic honeycomb
Channel Size (mm×mm×mm)	3.0(pitch)×1.6(height)×0.2(thickness)
Cell Per Square Inch(cpsi)	269
BET Surface Area (m ² /g)	241
Mass Fraction of Adsorbent in Matrix (%)	36.66
Adsorbent Type	ZSM-5
Si/Al Ratio of Adsorbent	166
Pore volume of Adsorbent (cm ³ /g)	0.321

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[1]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。

3.2 不同進流溫度對去除效率之影響

圖 3.2 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 3.2 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。

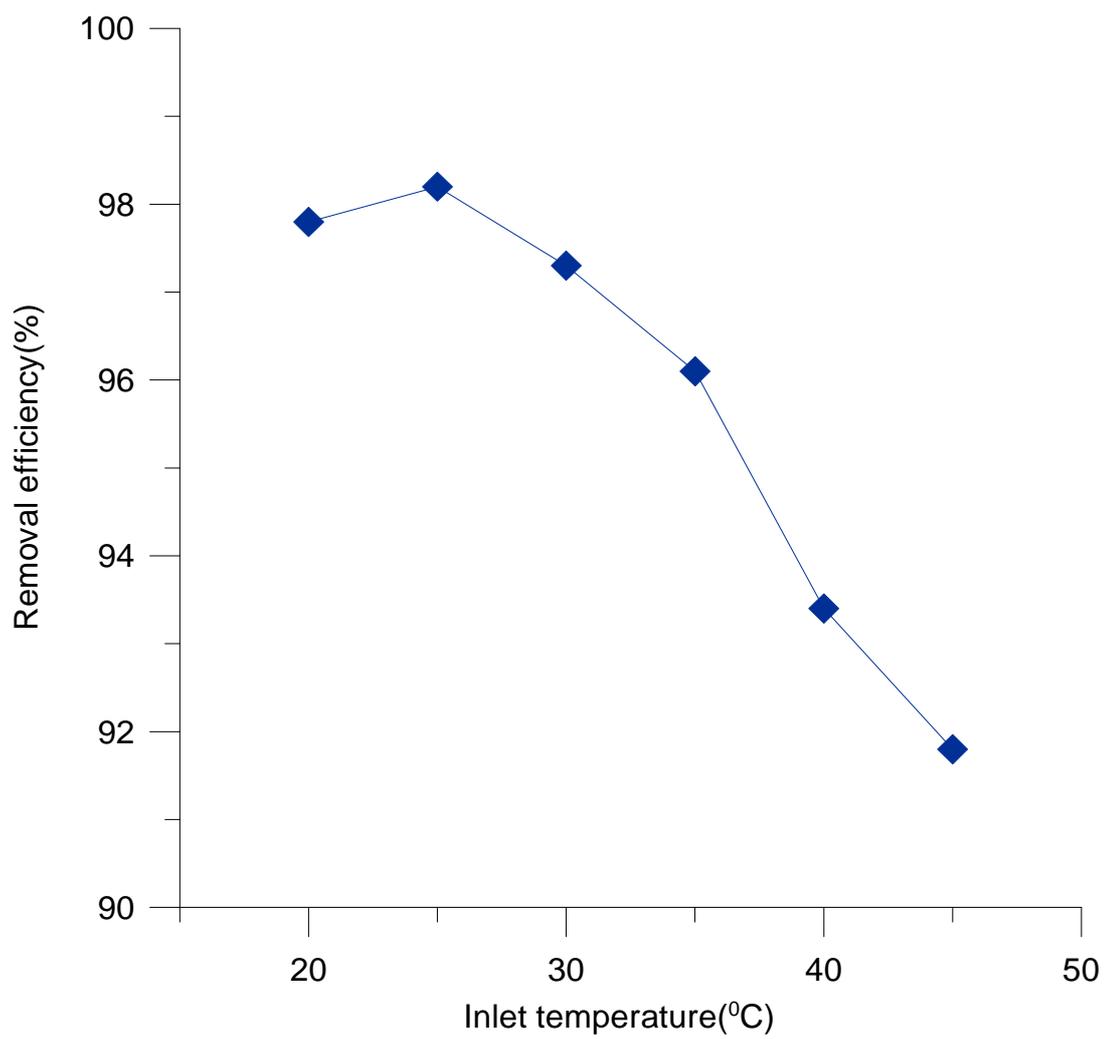


圖 3.2 不同氣流進流溫度下對於系統去除 IPA 之效率影響

3.3 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 3.3 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。

3.4 主要操作參數對轉輪去除效率之影響

1. 轉速之改變

圖 3.4 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 3.4 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

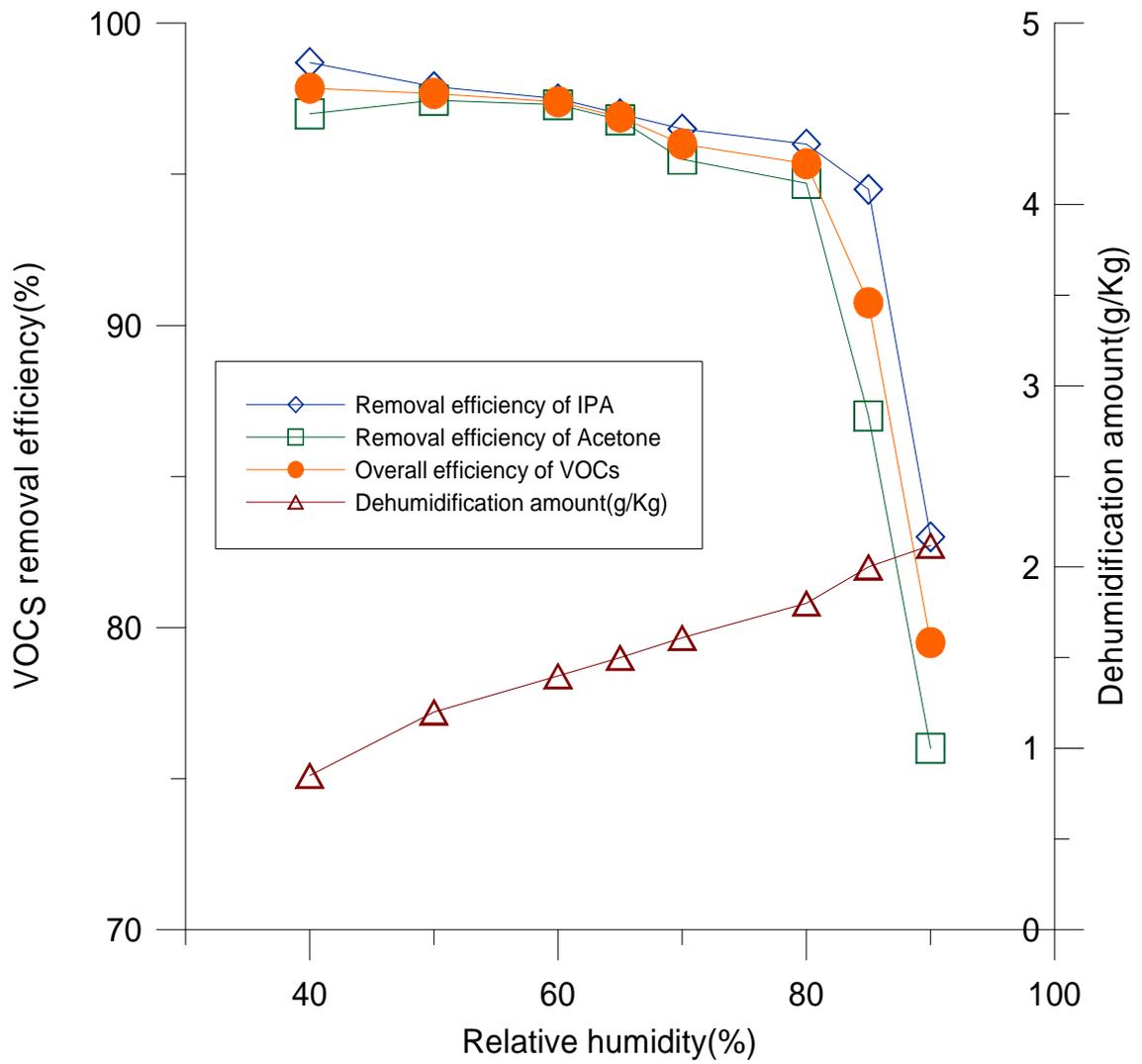


圖 3.3 不同氣流進流溼度(水份)與 VOCs 在沸石轉輪上之競爭性吸附情形

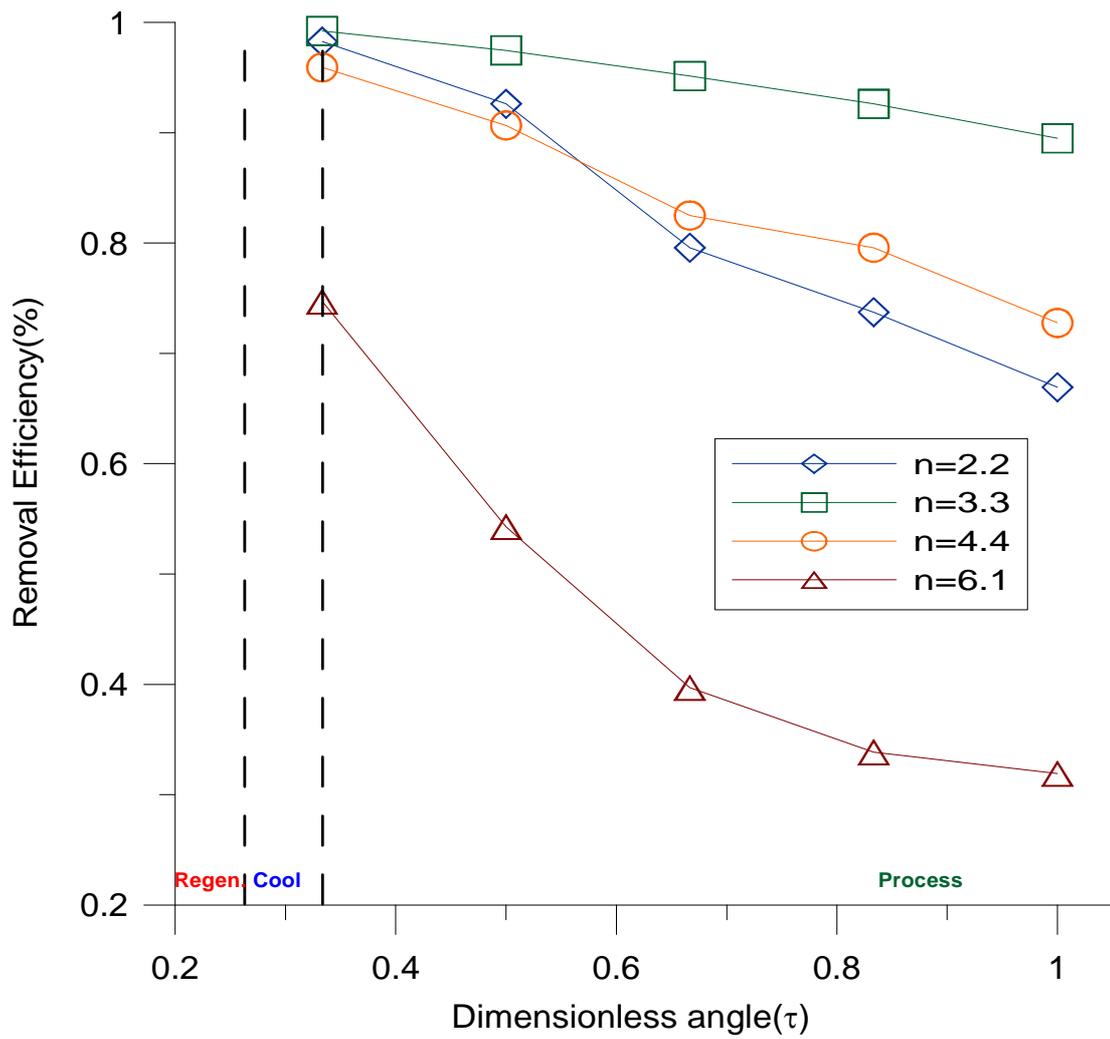


圖 3.4 不同轉速下，轉輪吸附區出口側表面各轉度位置之去除效率

仍有相當多之 VOC_s 未完全脫附出，佔據吸附位置、使得後續欲處理之 VOC_s 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 3.5 (a)及(b)為不同轉速下，半導體主要 VOC_s 之高、低進流濃度於轉輪上吸附去除效率情形。圖 3.5(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 3.5(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 3.5(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 3.5(a)中之 PGME 處理效率即未能達到 100%。

由圖 3.5(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 3.5(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 VOC_s 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 3.6 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。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。

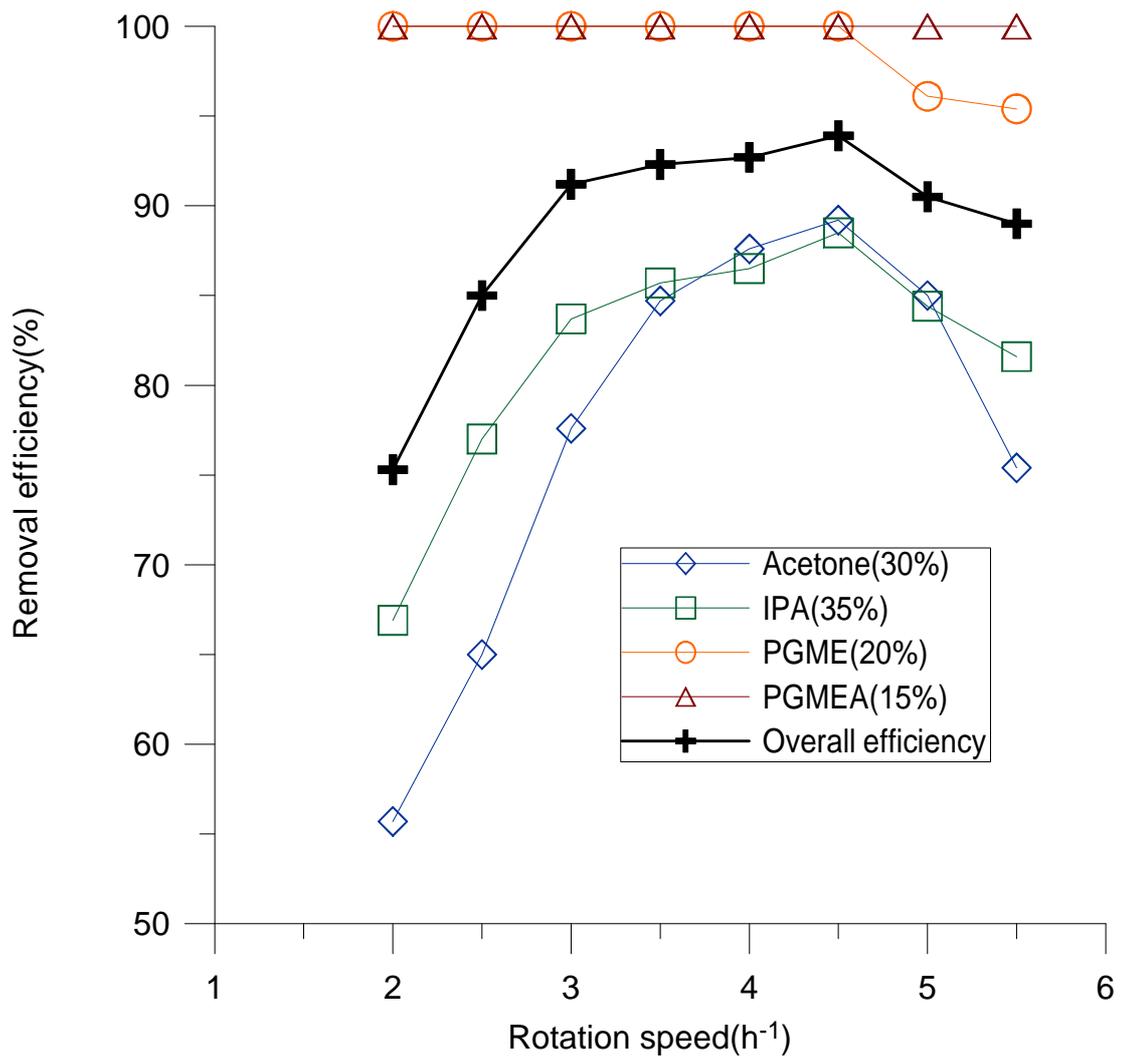


圖 3.5(a)不同轉速下，高濃度($THC_S=200ppmv$)之主要半導體 VOC_S 於轉輪上
 吸附去除效率

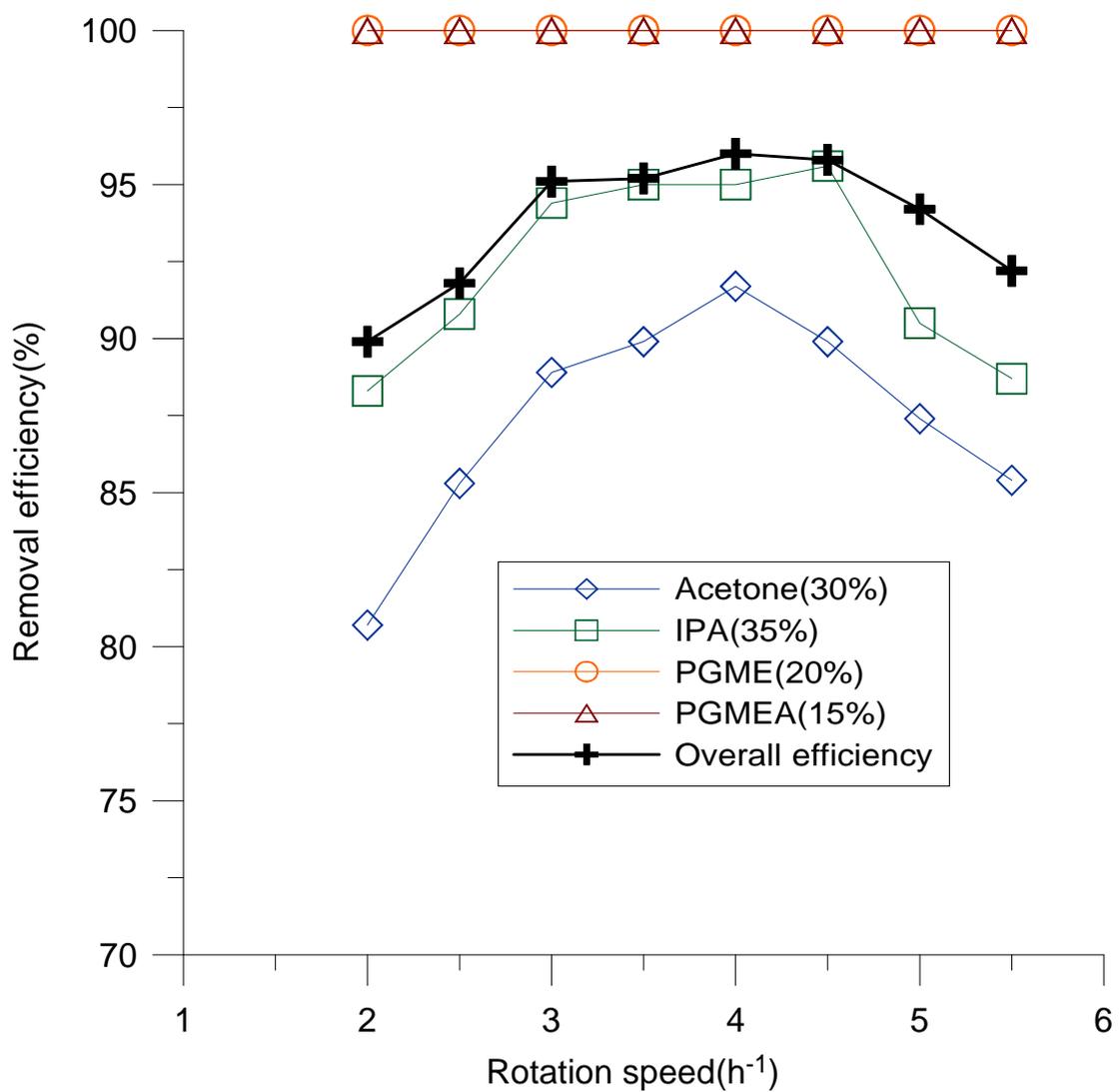


圖 3.5(b)不同轉速下，低濃度($THC_S=80ppmv$)之主要半導體 VOC_S 於轉輪上
 吸附去除效率

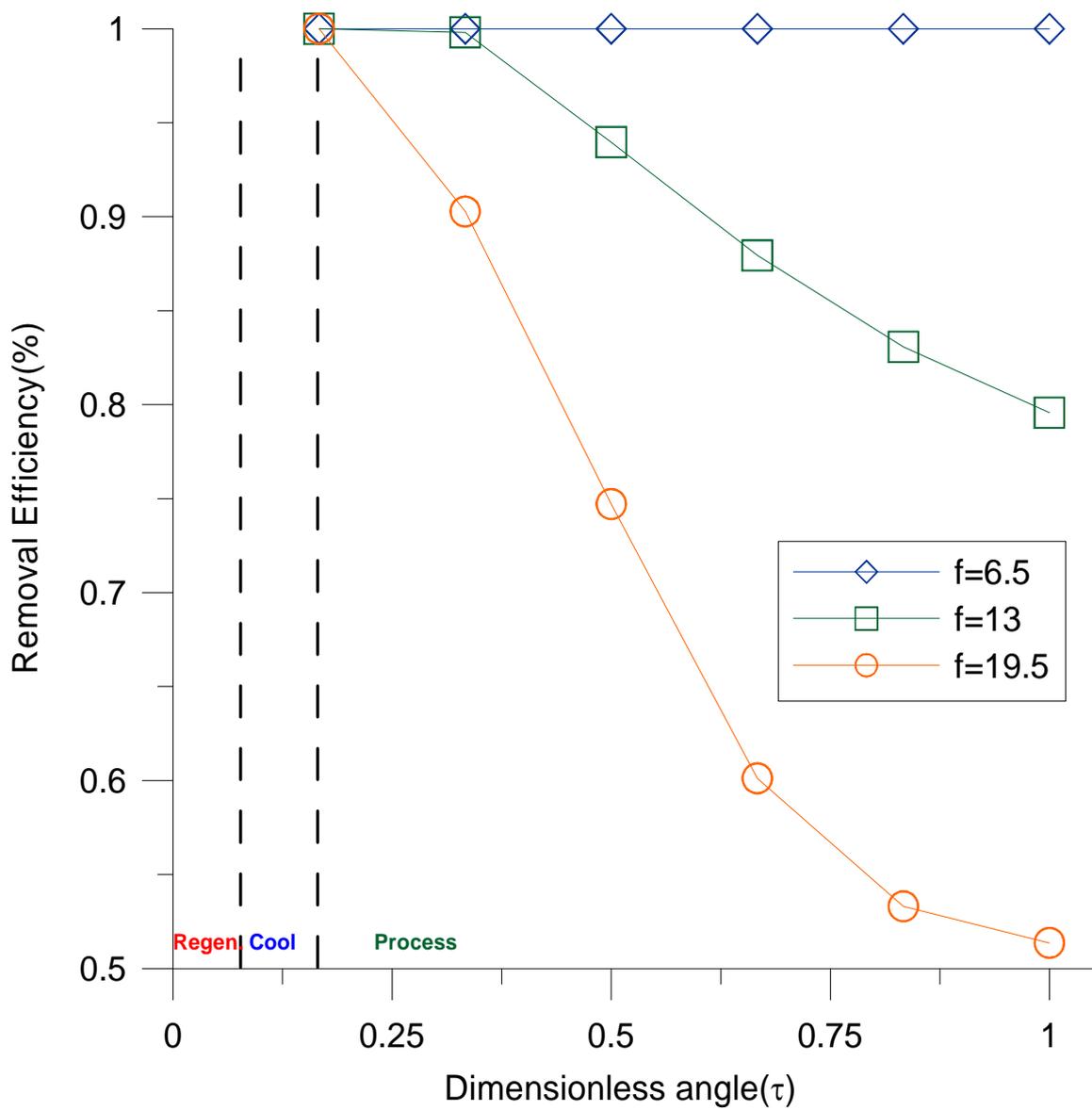


圖 3.6 不同濃縮倍率下，轉輪吸附區出口側表面各轉度位置之去除效率

3. 脫附溫度之改變

圖 3.7 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 VOC_s 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。

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。

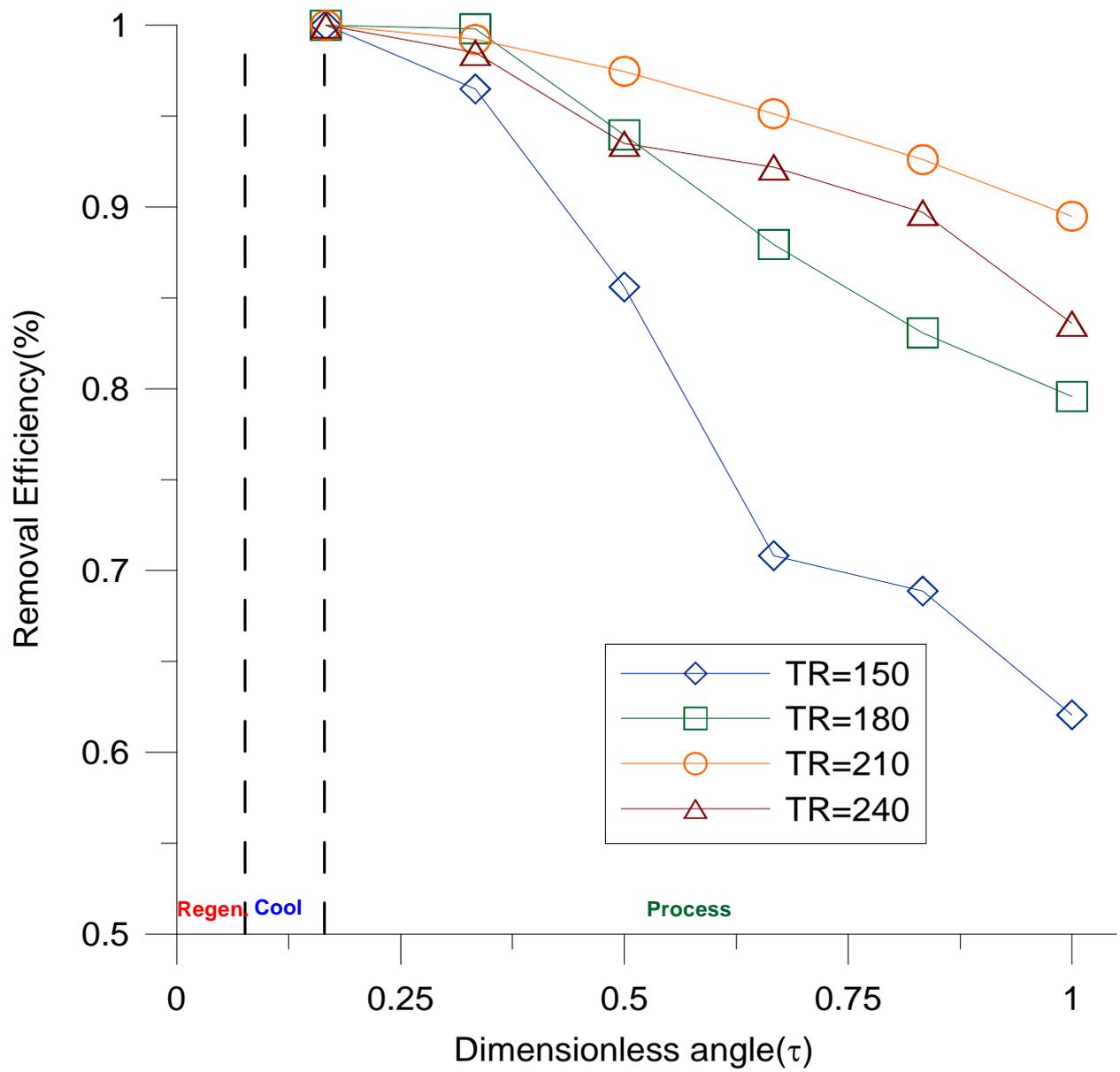


圖 3.7 不同脫附溫度下，轉輪吸附區出口側表面各轉度位置之去除效率

3.5 結論

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。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；惟值得注意得是台灣地區位處亞熱帶地區，夏季平均溫度多於 30°C 以上、加上管線直接於日曬下暴露，可能使得管線內欲處理之 VOC_S 氣流溫度提升，而造成沸石轉輪系統之處理效率未能達預期；而部分季節之過度潮濕氣候將促使進流溼度增加、進而凝結成水滴，如此將佔據沸石孔洞、阻塞吸附位置以及產生競爭性吸附現象，造成系統處理效率未盡理想。所以實廠應用沸石轉輪處理 VOC_S 廢氣若發現處理效能下降時，應檢查是否為進入沸石轉輪前之廢氣溫度及溼度高過本研究所發現之限值所肇致。

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，所以實場沸石轉輪系統處理效能若高於法規要求標準，可藉由調整濃縮倍率以

符合經濟需求；足夠之脫附溫度有助於脫附程序之進行，但研究結果顯示，過高之脫附溫度將可能使得轉輪基材之餘熱無法於冷卻區有效降溫，以致於吸附區時轉輪輪體仍處高溫狀態、不利於吸附程序進行。此外，雖然系統處理 PGME 及 PGMEA 等高沸點物質之吸附效率較佳，惟特別注意應需提供足夠之熱能量予以完全脫附，以免日久後形成稠密霧滴佔據吸附位置，反使系統吸附功能失效。

四、沸石濃縮轉輪焚化系統操作之成本效率[6]

沸石吸附濃縮轉輪焚化系統是國內半導體業界採用最多、且能穩定操作符合法規要求之揮發性有機氣體污染防制設備，不過卻有焚化能源呈現過多耗用，以及如何在既有設備上提升系統處理效能等均亟待解決之課題。

所以本研究群以蓄熱式燃燒爐(Regenerative Thermal Oxidizer, RTO)取代直接焚化爐結合沸石濃縮轉輪處理 VOC_s，評估其是否能夠提供更節能之焚化處理方式；此外，目前各廠均依照原設備提供商所建議之操作參數值進行實際運作、且其處理效能皆能大於 90%，可符合法規要求實屬良善。惟考量若單純依照廠家建議值執行運轉可能尚未達到最佳化之運作，所以為評估該系統最適化操作參數，本研究即考量不更動硬體設備、不需特別增加能源，進行實廠之適度操作參數調整下，冀望使整體系統處理效能再向上提升。

4.1 實驗系統

圖 4.1 本研究之沸石濃縮轉輪結合 RTO 系統處理半導體 VOC_s 廢氣流程。其中 RTO 中燃燒室之設計一般包括二個或三個蓄熱槽(Canisters)，

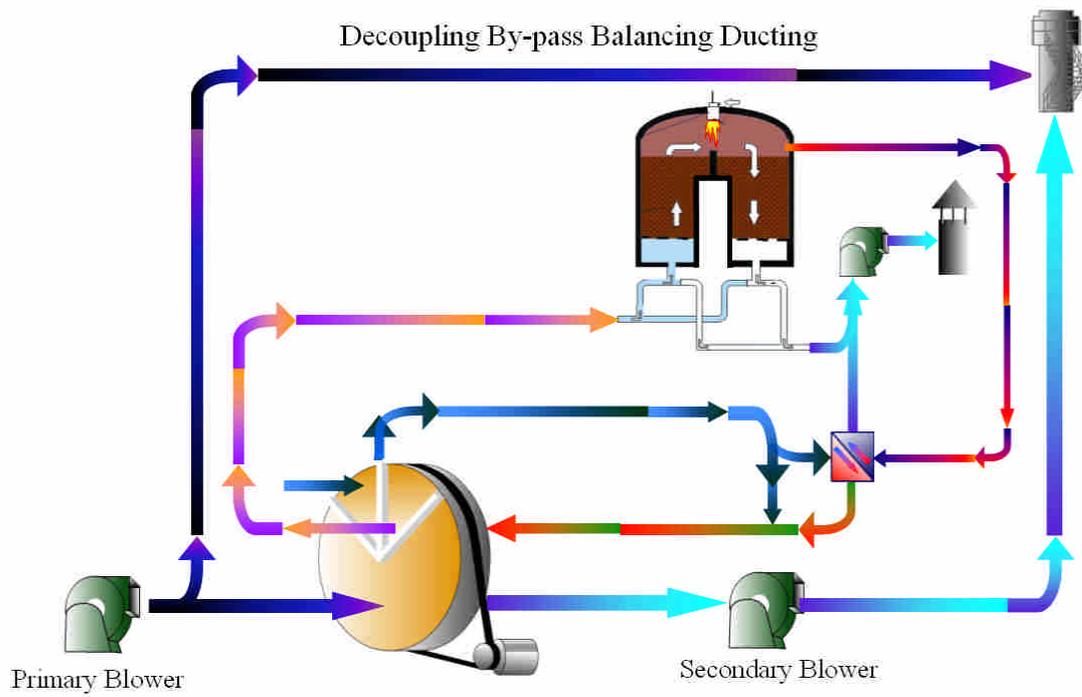


圖 4.1 本研究之沸石濃縮轉輪結合 RTO 系統處理半導體 VOC_S 廢氣流程

本研究則採行應用為最多且較實惠之兩個蓄熱槽設計，而此外 RTO 亦有其他之組件如進流控制系統、溫度控制及加熱裝置；蓄熱槽內所填充則為陶瓷性蓄熱材料(Ceramic Heat Media)，其具有火燄捕捉功能(Flame Arrester)及高熱容量(Heat Capacity)之特性，除能有效蓄積熱源及釋放熱能，並使得在系統於高溫燃燒 VOC_S 時，配合適當之 VOC_S 入流濃度及停滯時間，可使燃燒室達到無火焰燃燒 (Flameless Oxidation)，可大幅降低燃料費用及 NO_X 之產生。RTO 之燃燒流程為經沸石轉輪濃縮後之高濃度 VOC_S 氣體，其首先進入左邊第一個蓄熱槽預熱至一定溫度(約 750 至 850 °C)後並經燃燒器加熱至設定之燃燒溫度，藉以高溫燃燒反應去除 VOC_S，反應後高溫氣體通過右邊第二個蓄熱槽，氣體熱能將可傳送至原已冷卻之蓄熱材，此時高溫氣體之熱能已被儲存，使得處理後之氣體可在較低溫度排入大氣；而接續之欲處理高濃度 VOC_S 則轉而導入右邊儲有高熱能之蓄熱槽進行燃燒處理，反應後經由左邊蓄熱槽排出、而排出之熱能量則儲存左邊之蓄熱槽床，如此循環處理完成操作；由於考量 RTO 內之熱交換效率，所以其出口溫度往往只介於 90 至 120°C 之間，若欲於熱交換器進行沸石轉輪之再生氣流熱交換，其所含之熱能量稍有不足，因此本研究以自行開發一新型設計—由 RTO 之主燃燒室逕行導引約 5~10% 之 850°C 高溫氣流 (Hot Gas By-pass Device)，並藉由流量之控制達到熱交換後沸石轉輪所需之再生氣流溫度，如此可改善熱能不足或需再添設加熱器之困擾。

此外，依據本研究群多年實務及研究經驗，配合執行計畫統計分析結果，將針對兩個最具顯著影響性之操作參數值—提高脫附溫度或增加脫附氣流量，於不特別耗能、不變更或增加硬體設施原則下，冀以精進沸石吸附濃縮焚化系統之處理效能。

研究中利用 4 支 K 型式溫度感測器，分別裝在沸石濃縮轉輪之處理前側和處理後側，以及第二風機之出口處和去偶合風管上，藉以量得各處溫度值；整系統之 VOC_s 去除效率則利用依法規要求既設置之火焰離子化濃度偵測器(FID) THC_s 連續監測儀，進行沸石吸附濃縮焚化系統效率之檢測工作。

4.2 沸石轉輪系統結合 RTO 與其結合直接焚化爐之比較

表 4.1 沸石濃縮轉輪系統結合 RTO 與其結合直接焚化爐相較之優缺點。由於 RTO 內所使用之陶瓷具備高熱容量(Heat Capacity)之特性，其可將有機物燃燒所形成之燃燒熱轉換為儲存在陶瓷蓄熱材內，並適時釋放熱能量至氣流中，透過此項機能使其爐內熱回收效率高達 93% 以上，除可供給熱交換器足夠熱源提升沸石轉輪再生氣流溫度，亦可大幅減少其燃燒 VOC_s 所需之能源；而蓄熱材亦能緩衝 VOC_s 燃燒時溫度之巨大變動，如燃燒溫度在 850°C，則 RTO 容許溫度短時間變化至 1050°C，使得系統可保持安全穩定運轉。

此外，半導體有機廢氣濃度約在 700ppmv (THC_S as CH₄) 以上時，可藉由沸石濃縮轉輪將進流濃度濃縮至 13 倍左右，即達 RTO 操作於 850°C 時所需之自持濃度，如此僅需開機將 RTO 提升至 850°C 之能量，此後即不須添加任何輔助燃料，RTO 便可達 99% 以上之 VOC_S 焚化效率，大幅減少能源耗用。

不過值得注意的是使用 RTO 燃燒系統，最適之方式係需將含矽之 VOC_S 廢氣分流，如光阻製程中可能含有之加強黏著劑 HMDS 若一併引導排至 RTO 作最後焚化處理，相當容易形成 SiO₂，造成在 RTO 蓄熱材上堵塞之現象，影響燃燒效率並將加快汰換速率；而該系統從開機至達所需操作溫度 850°C，視燃燒室大小一般均需較長暖機時間約計 4 至 8 小時，若亦使用為備用機則無法及時提升至所需溫度是較不便之處；因 RTO 爐為兩燃燒槽之設計，在系統之兩槽蓄熱/釋熱模式進行每 1-2 分鐘連續切換程序時，若無適切之風管平衡系統調節，往往會造成壓力大幅之變動(一般為± 5 mmbar)，造成風壓控制不穩定而致使半導體製程之黃光區當機。

在沸石濃縮轉輪結合蓄熱燃燒爐及其結合直接焚化爐之成本方面，表 4.2 列出各項設計去除效率、初設費用、運作維護成本及設備重量與佔

表 4.1 沸石轉輪系統結合蓄熱燃燒爐與其結合直接焚化爐相較後之優缺點

處理方式 項目	沸石濃縮轉輪系統結合蓄熱燃燒爐
優點	<ol style="list-style-type: none"> 1. 蓄熱材之填充具備火燄捕捉功能(Flame Arrester) 2. 熱回收效率高(93%以上)，燃料費用省 3. VOC_S 進氣濃度達系統自持濃度，不須添加輔助燃料，即大幅減少能源耗用 4. 適切之焚化停滯時間，所以不產生 NO_X 二次污染 5. 簡易之全自動控制、安全性高 6. 燃燒溫度之容許波動幅度較大
缺點	<ol style="list-style-type: none"> 1. 廢氣中若含 HMDS 等矽化物時，易氧化形成 SiO₂ 造成 Heat Media 之堵塞 2. 暖機時間長 3. 系統切換時，壓力變動較大 (須配合去偶合平衡風管系統即可解決此問題)，且會有排放濃度驟增之現象，但為時甚短。

表 4.2 沸石濃縮轉輪結合蓄熱燃燒爐及其結合直接焚化爐之成本比較

比較項目	處理方式 Rotor + RTO	Rotor + Oxidizer
去除效率	95% 以上	95% 以上
初設費用(新台幣萬元)	2200~2600	2100~2500
運轉費用(新台幣萬元/年)		
電費 (包含二次風車及再生風車)	36	42
處理不同進流濃度所需燃料費(天然瓦斯)		
700ppmv、350ppmv、0ppmv* (THC _S as CH ₄)	4、64、125	72、72、142
備品更換	70	60
維修保養費	35	30
二次污染物處理費(Heat Media)	3	0
合計操作費用(萬元/年)	148、208、269	204、204、274
設備重量(ton)	40	36
佔地面積(m ²)	70	65

*各進流濃度所需燃料費計算假設基準條件為：(1) VOC_S 進流流量 800CMM；(2) VOC_S 進流溫度 25°C；(3) VOC_S 組成物種及比例為 IPA (30%)、Acetone (20%)、PGMEA (26%)、PGME (23.84%)、DMSO (0.08%) 及 NMP (0.08%)，而 VOC_S 分子燃燒熱可估算約為 6780 Kcal/kg；(4) RTO 燃燒溫度為 850°C。

地面積等比較項目。沸石轉輪結合 RTO 之初設成本平均較其結合直接焚化爐多出新台幣 100 萬元，增加主要為蓄熱材與硬體結構成本所致；若以假設處理進流流量 800CMM、進流溫度 25°C 之 VOC_S 廢氣，其中組成包含 IPA (30%)、Acetone (20%)、PGMEA (26%)、PGME (23.84%)、DMSO (0.08%) 及 NMP (0.08%) 等物種而言，在運轉費用方面兩者最主要之差異即為燃料費之使用，其中差異最大為進流濃度為 700ppmv (THC_S as CH₄)，由於此時濃度即達 RTO 之自持濃度，所以所需之年成本約為直接焚化爐之 5.5%，如此可大幅減少運轉成本。而與其他操作所需之成本如電費、備品替換、維修保養及二次污染處理費(如蓄熱材替換)等合計之後，沸石濃縮轉輪結合 RTO 之年操作維護成本最高每年可節省新台幣 56 萬元。可顯示若後端採用 RTO 設備在兩年後，所增加之初設成本可由所節省之操作維護費攤平，第三年之後即可以較經濟之條件進行 VOC_S 燃燒焚化。

4.3 操作參數最佳化

表 4.3 為某廠執行原廠參數與本研究群建議操作參數值之去除效率比較。於原廠參數操作下，VOC_S 之處理效能即可達到 95%。第一次測試經由調整熱交換器之參數，可使脫附熱氣流溫度不另耗能下，從原建議值 180°C 提升至 186.5°C，配合脫附氣流量為 7090CMH、及其他恆定之操作參數值：轉輪轉速 3.3RPH、廢氣焚化前預熱溫度 514°C、焚化溫度 732°C

等，整系統於處理實廠廢氣所含之 VOC_S 物質，以 THC_S 值計算所得之去除效率達 97.2%，故可驗證適度增加脫附溫度將有助於系統處理效率之提升。

第二次及第三次測試則冀於一經濟條件下、尋求可達到理想去除效率之操作參數。方法係利用熱力學第一定律觀念 ($\Delta H = \rho \times CP \times Q$)，略以求出、並供給不同之脫附氣流流速(即進入焚化爐濃縮之高濃度 VOC_S 氣流流量)至破壞溫度所需燃料量後，比較各不同條件下所得實際去除效率何為經濟、可行。

測試 2 所改變之參數為一脫附流量 8,962NCMH，其進入焚化之預熱溫度為 510°C，若於焚化時提升至 732°C 所需之燃料用量略約為測試 1 之 1.24 倍，但系統整體去除效率僅提升 0.6%，不甚顯著；隨後執行之測試 3 係將脫附流量降至 5,514NCMH，而其提升溫度至 732°C 所需燃料用量約為測試 1 之 0.78 倍，然檢視系統整體效率為 96.5% 僅較測試 1 降低 0.7%，如此結果可看出適度降低脫附流量，雖系統效能略有降低，但依然能維持高效能之標準、並減少可觀之燃料費用支出；另外，再將測試 3 與原廠建議操作值所得之結果相較，可發現藉由調整熱交換器參數使脫附溫度提升 7°C、並於節省 23% 之燃料用量下，測試 3 所得之系統整體處理效率仍優於原廠建議操作值。

針對上述結果，對於脫附溫度方面，本研究群建議溫度控制在 180 至 200°C 間，最高不超過 220°C，以免沸石上之餘熱影響下階段吸附效能、並減少悶燃之風險；而增加脫附風量即代表著降低沸石吸附濃縮倍率，以此程序取代脫附溫度之增加，可避免因溫度提升所造成之悶燃風險，以增加再生風量、達到充足再生熱容量之效果，但值得注意此舉將形成末端焚化設備耗能，使得運轉成本增加。

此外，表 4.4 為本研究群受科管局委託針對某光電廠之轉輪處理效率進行提升輔導結果[3]。除了原先規劃調整脫附溫度及脫附風量等兩項參數之外，因該廠 VOC_S 廢氣濃度較高，本研究群亦建議應適時調高轉輪轉速，縮短其吸附時間、吸附區提先進入脫附程序，使得不致呈現飽和狀態而造成吸附效率不彰；當中並視廢氣狀況需要加裝濾布用以過濾粒狀物(加裝之濾布對於 VOC_S 並無顯著之吸附效果，請詳見本文之第 5.3.1 章節)。由表中之結果顯示，經本研究群輔導後該廠沸石轉輪之去除效率已由 51% 大幅提昇至可達最佳狀態下之 85%。

4.4 結論

研究結果顯示沸石濃縮轉輪結合 RTO 系統除可達到一定之 VOC_S 去除效率，其成本亦將較現行沸石濃縮轉輪結合直接焚化爐經濟可行；另外，本研究藉以調整沸石吸附濃縮焚化系統之脫附溫度及脫附氣流流量兩

操作條件，可於不更動硬體設計、不需額外支出費用，甚至亦能減少能源耗用下，能讓廠家迅速簡易地尋得適切自身之沸石吸附濃縮焚化系統最佳經濟效能平衡點。惟廠家若欲調整此兩項參數應特別注意脫附溫度應不宜過高，以免影響吸附區效能，以及降低脫附氣流時，須考量焚化爐火焰速度避免回火與系統風壓之穩定以防當機。

表 4.3 某半導廠執行原廠參數與本研究群建議操作參數值之去除效率比較

參數 \ 測試編號	原廠建議 操作值	測試 1	測試 2	測試 3
實廠處理流量(NCMH)	82,453	52,800	52,800	52,800
實廠 VOCs 廢氣處理濃度(ppm)	250~280			
轉輪直徑、厚度(mm)	3950、4000	3950、4000	3950、4000	3950、4000
轉輪風面比(吸附、脫附、冷卻)	10 : 1 : 1	10 : 1 : 1	10 : 1 : 1	10 : 1 : 1
轉輪轉速(RPH)	3.3	3.3	3.3	3.3
廢氣進入焚化預熱溫度(°C)	512	514	510	512
焚化溫度(°C)	732	732	732	732
脫附溫度(°C)	180	186.5	187	187
脫附流量(NCMH)	7,170	7,090	8,962	5,514
濃縮比	11.5	7.4	5.9	9.6
VOCs 平均處理效率(%)	95	97.2	97.8	96.5

表 4.4 某光電廠操作參數調整前後之處理效率變化

操作參數	最初操作狀況	調整中數值	最佳操作值
脫附溫度(°C)	180	185	190
轉輪速度(Hz)	28	38	36
焚化爐溫度(°C)	750	750	760
冷卻風量(%)*	30	35	50
脫附風量(%)*	30	50	40
裝設濾布	無	無	有
去除效率(%)	51	—	85

*註：脫附風量及冷卻風量數值為風車開口截面積比

五、轉輪操作問題、處理方案與改善成果

5.1 沸石吸附濃縮轉輪主要之操作問題

經本研究群執行科管局歷年委託計畫[1-3]及相關研究中[7]顯示，沸石吸附濃縮轉輪最大之處理問題即為廢氣中含多量高沸點物質、惟脫附熱能量不足無法有效脫附而出，或廢氣中混排其它粒狀污染物，所導致之整體處理效率下降。

廢氣中含有較多量之高沸點物質，並不適合直接或單獨使用此系統處理之，例如光電業製程及使用之物料與半導體相近，但在含高沸點 VOC_S 去光阻劑之使用量上遠高於半導體業，故使得其排放廢氣組成上之高沸點 VOC_S 較多。高沸點 VOC_S 雖容易吸附於沸石轉輪上，但由於系統設計之安全考量，使得脫附高沸點 VOC_S 溫度不足，所以往往造成脫附不易，日久後高沸點 VOC_S 將蓄積其上、佔據吸附位置，影響系統整體效能，故成為部份光電業應用沸石吸附濃縮焚化系統效能不彰之因；而以往亦有廠家欲以提高脫附溫度、以增加高沸點物質脫附效率，但這項操作措施容易造成系統跳機、形成無通風之密閉狀態，若無緊急處理程序如灑水、噴入冷卻氮氣等，如此將造成 Cassette 處產生悶熱狀態，嚴重亦使得其局部溫度異常突升、讓沸石轉輪產生結構性之永久破壞[7]。

5.2 建議處理方案

若無法確認 VOC_S 廢氣中是否有其他排氣混入或含有較多量之高沸點物質，欲應用沸石吸附濃縮系統控制，本研究群建議：

- (1) 設置粒狀物過濾設備。
- (2) 設置前端高沸點 VOC_S 物質處理。
- (3) 定期以潔淨水進行保養清洗。
- (4) 於操作程序中提高脫附熱容量。

5.2.1 設置前端濾布過濾裝置

VOC_S 廢氣進入沸石轉輪系統處理之前，先經濾網預先處理、並過濾廢氣中可能含有之粒狀物，除了可確保沸石轉輪內之細微孔洞不受粒狀物阻塞進而影響吸附效能，亦可避免轉輪壓損過大所造成之轉輪壽命下降。

5.2.2 設置前端高沸點 VOC_S 物質冷凝處理設備

為了避免高沸點 VOC_S 物質吸附於沸石，造成脫附程序不易處理，可在廢氣進入沸石吸附濃縮轉輪焚化系統之前，加裝就地冷凝器(local condenser)、活性炭濾網(Pre-filter)或除霧器(De-Mister)，先將高沸點 VOC_S 物質預作處理，不使其進入沸石吸附濃縮轉輪焚化系統。

5.2.3 定期以潔淨水進行保養清洗

能承受水洗程序處理之轉輪，可依廠內所處理之廢氣所含高沸點 VOC_s 物質濃度狀況，適時以潔淨水清洗沸石吸附轉輪。惟清洗時須特別注意水質狀況，若其中含有大量鈣、鎂等離子，將可能會在沸石內生成碳酸鹽或碳酸氫鹽，阻塞沸石之蜂巢狀孔隙；而水中之氣仿可能佔據沸石內吸附位置，阻礙處理廢氣內所含 VOC_s 之吸附效能，此外水中所含微量之重金屬物質亦會毒化沸石，這將隨著清洗次數及水質水量狀況而有不同之影響；為克服沸石吸附轉輪之蜂巢狀孔道及其結構使得一般清洗水流無法深入轉輪內部，本研究群建議清洗程序如圖 5.1 所示[7]。

利用高壓噴嘴將清洗水形成微細霧滴狀，並以系統冷卻端之乾淨空氣氣流為載流，先將微細霧滴狀之清洗水攜入沸石孔道內實施逆洗程序後，再從另一邊之吸附端吸入乾淨空氣匯流，除可將附著於沸石內部之水氣攜出視為第二道清洗外，亦可完成沸石乾燥之程序，如此兩階段式之清洗轉輪，其耗水量經統計可為以往傳統方式之 20 至 30%，能大幅降低廢水量，故可在成本考量下順利、有效進行沸石轉輪之清洗。

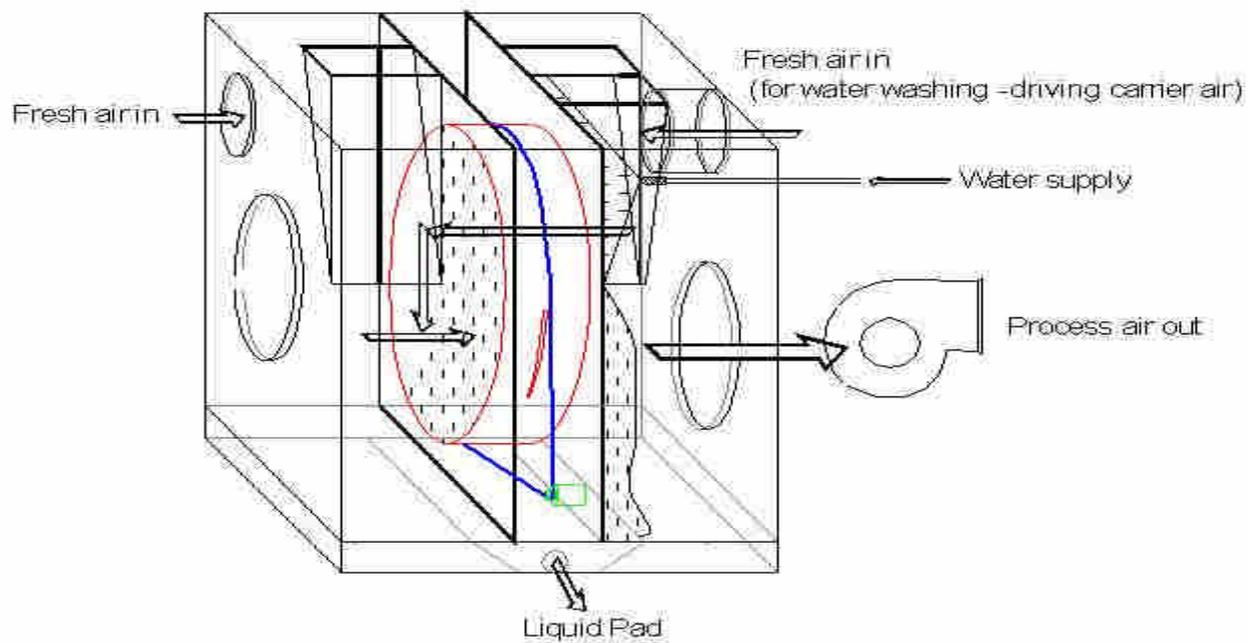


圖 5.1 轉輪建議清洗程序[7]

5.2.4 於操作程序中提高脫附熱容量

除於系統前增設預處理系統、定期實施水洗保養程序外，亦可藉由提升脫附熱容量之日常操作參數改善高沸點 VOC_S 對系統所造成之影響，其施行之方法可利用提高再生溫度及提高再生風量來達成。

建議系統操作運轉時，即給予足夠之熱容量貫穿整個沸石吸附區，使距再生端較遠處依然有充分之熱量將吸附其上之高沸點 VOC_S 物質脫附下來，減少其產生蓄積聚合、佔據吸附位置影響效能。

5.3 建議處理方案對系統處理效率改善成果

5.3.1 設置前端濾布後之系統改善狀況[3]

本研究群於 91 年度受科管局委託專案計畫中，除針對某光電廠之沸石轉輪操作參數進行最佳化輔導外(詳見 4.2.2 章節之表 4.4)外，亦為該廠沸石轉輪前裝設濾布去除高沸點物質及微粒之效能進行評估，以進一步瞭解其所發揮之功效。本計畫將濾布置於內徑為 2 公分之玻璃反應器內，後端用抽氣馬達以每分鐘 50 lpm 抽取 VOC_S 廢氣，抽氣速度模擬實廠之抽氣狀況，並採每兩個小時採樣一次之

方式，再以 GC/FID(SRI 8610C, USA)進行廢氣組成分析。其 VOC_s 採樣濃度結果如圖 5.2 所示，去除率則如圖 5.3 所示，其中廢氣組成之極大部分為異丙醇及乙酸正丁酯。由圖 5.3 可知在剛開始抽氣時濾布對異丙醇及乙酸正丁酯之去除率分別為 42 % 及 28 %；在抽氣 4 個小時內濾布對異丙醇及乙酸正丁酯即已呈吸附飽和狀態，此外經本計畫連續監測 16 天觀察結果發現濾布對異丙醇及乙酸正丁酯亦無任何去除效果(圖 5.4)，此兩項物質之沸點分別為 82.4°C 及 125°C，自燃溫度分別為 425°C 及 370°C，因此估計其對轉輪較無影響。

而在抽氣之後數個小時內濾布並未呈現顏色之變化，但在連續抽氣兩天後濾布顏色轉為黃色，另外在鐵弗龍採樣管及玻璃反應管內壁也附著此粉末，故排除粉末為濾布與廢氣反應所產生，並判定其應是實廠製程之產物。根據該光電廠裝設濾布一星期後，濾布上沾附有棕黃色粉末，隨著裝設時間越久其粉末累積也就越多，其壓差也會逐漸上升(如圖 5.5 所示，運轉效能越高表示壓差越大)，因此估計濾布對該廠所排放之黃色微粒應有部分之過濾功效，可避免微粒累積在後端之沸石轉輪上，而影響到轉輪之壽命。

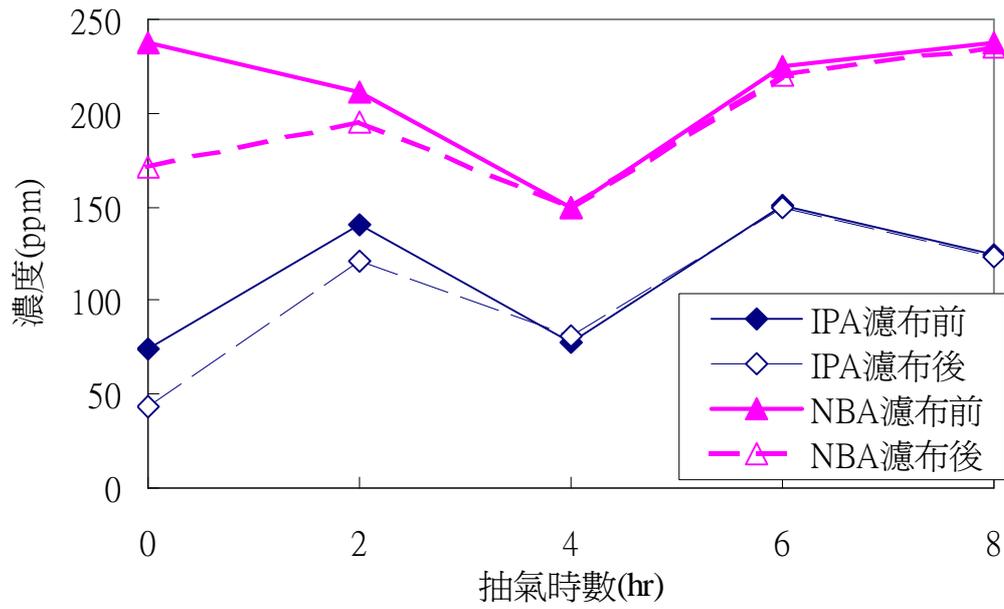


圖 5.2 抽氣時間與濃度變化圖(IPA 為異丙醇；NBA 為乙酸正丁酯)

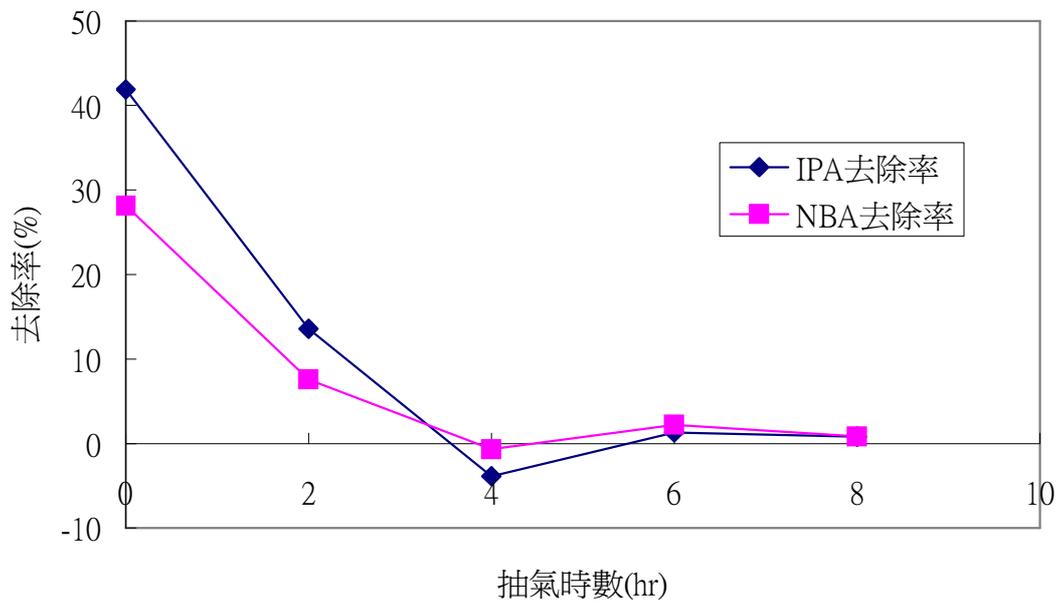


圖 5.3 抽氣時間與濾布去除率關係圖(IPA 為異丙醇；NBA 為乙酸正丁酯)

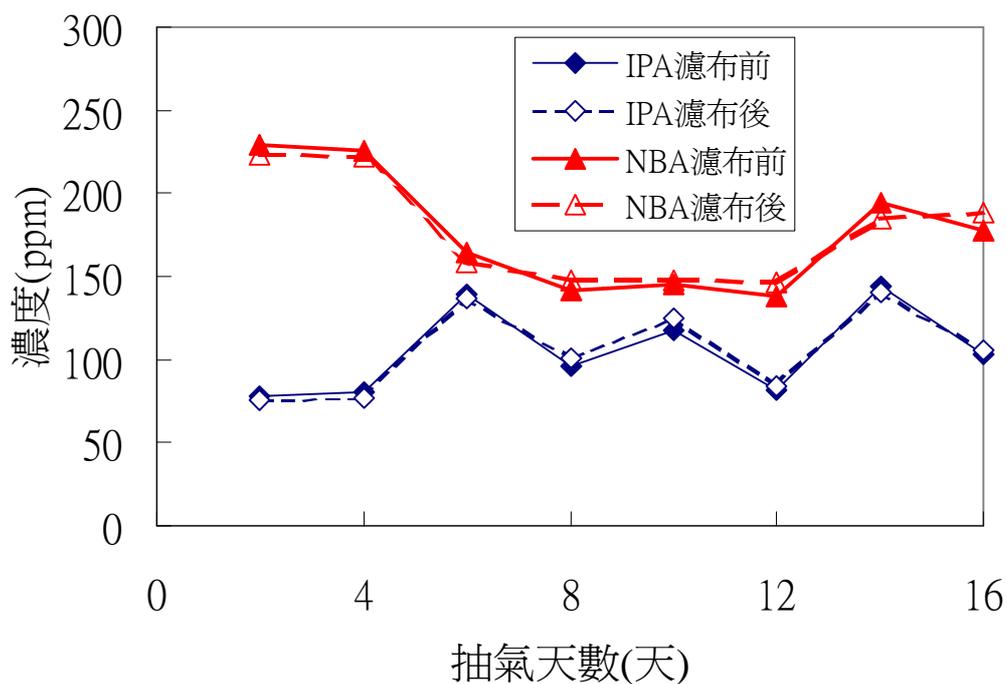


圖 5.4 連續抽氣 16 天之濃度變化圖(IPA 為異丙醇；NBA 為乙酸正丁酯)

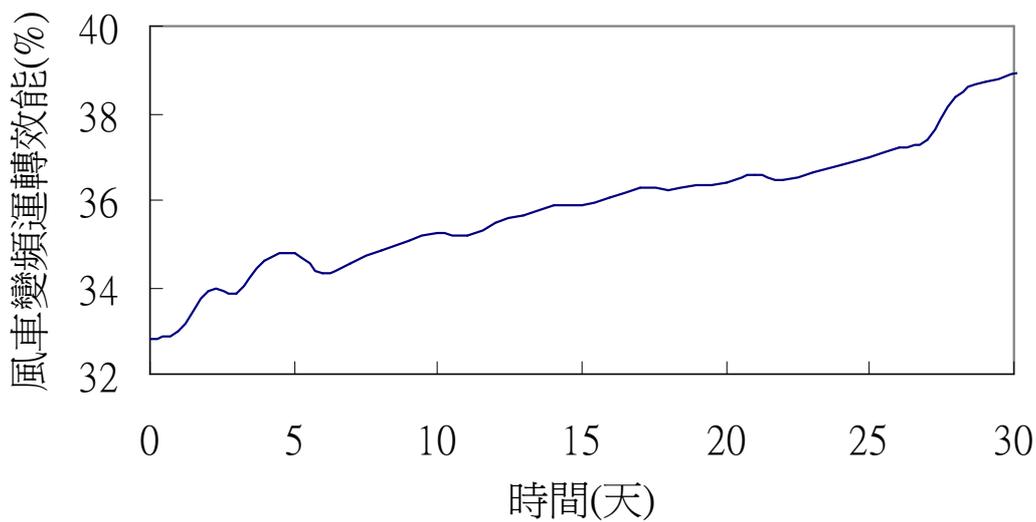


圖 5.6 某光電廠裝設濾布後風車變頻運轉效能與時間變化圖

為了解該廠所排放廢氣中之粉末物理性質，本研究群收集實廠濾布之粉末並試將其溶入含有去離子水之閃爍計數瓶內，結果發現部分粉末會溶解於水中，靜置一天後呈現棕色沈澱及黃色溶液(如圖 5.7)；此外，實驗中亦模擬粉末在轉輪之脫附溫度下隨時間變化情形，將 0.08 克粉末置於 180°C 下之烘箱內，發現 11 分鐘後粉末顏色即變成紫褐色，並附著在坩堝上，且變得不溶於水(圖 5.8(b))，15 分鐘後顏色轉變成紫黑色，而原本散布的粉末也成焦結狀 (圖 5.8(c))。由此可知若此物質進入轉輪內，將會在高溫脫附區形成焦結物，即使通入高溫氣體或用水洗之方式也難以將轉輪活化，而造成轉輪不可逆之傷害，此類微粒亦應為該輔導廠之沸石轉輪劣化之主因。

為瞭解粉末之元素組成及其表面形狀，本研究群以掃描式電子顯微鏡(SEM-EDS)做進一步分析，在分析前需先將樣本與水混合，塗覆在載玻片上(圖 5.9(a))，再將其烘乾；在烘乾過程中，此未知粉末因溫度的不同造成塗覆外觀不同，如圖 5.9(b)及(c)所示，而其 SEM 表面形狀分析，結果分別為圖 5.10 (於 100°C 下烘乾) 及圖 5.11 (於 130°C 下烘乾) 所示；由圖 5.10 可看出粉末微粒多在 5 μ m 以下，另外圖 5.11 因為其表面極為光滑，即使放大至 1 萬倍也無任何顆粒，



圖 5.7 某光電廠有機排氣之粉末混合水中的靜置一天後之情形

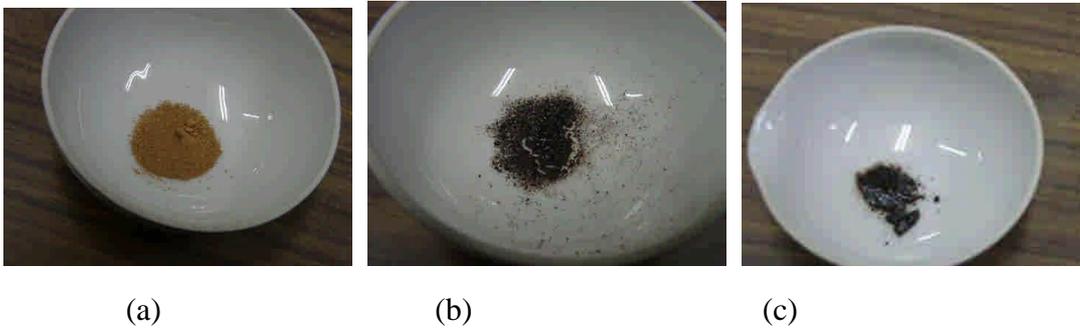


圖 5.8 某光電廠有機排氣之粉末 0.08g 在(a)未加熱前；(b)180°C下加熱烘烤 11 分鐘；(c)180°C下加熱烘烤 15 分鐘後之粉末變化

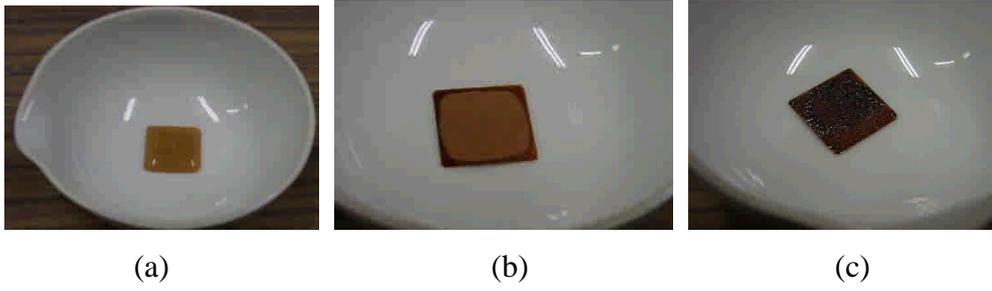


圖 5.9 某光電廠有機排氣粉末混合於水中(a)未烘乾前；(b)100°C下烘乾；(c)130°C下烘乾

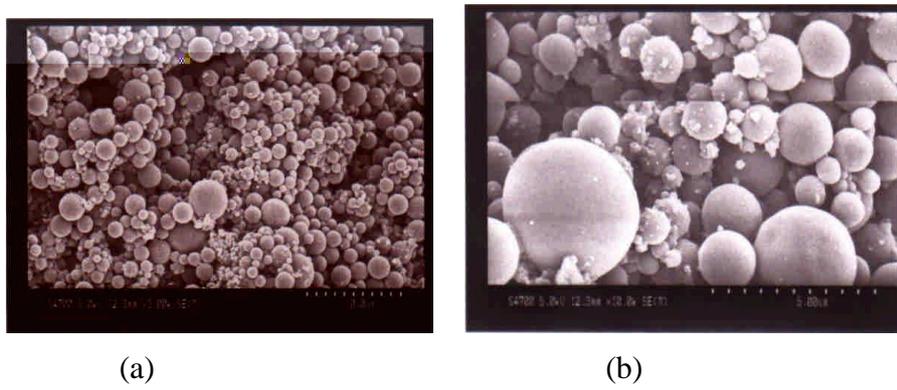


圖 5.10 某光電廠有機排氣粉末在 100°C 下烘乾之塗覆表面(a)放大 3 千倍；(b)放大 1 萬倍

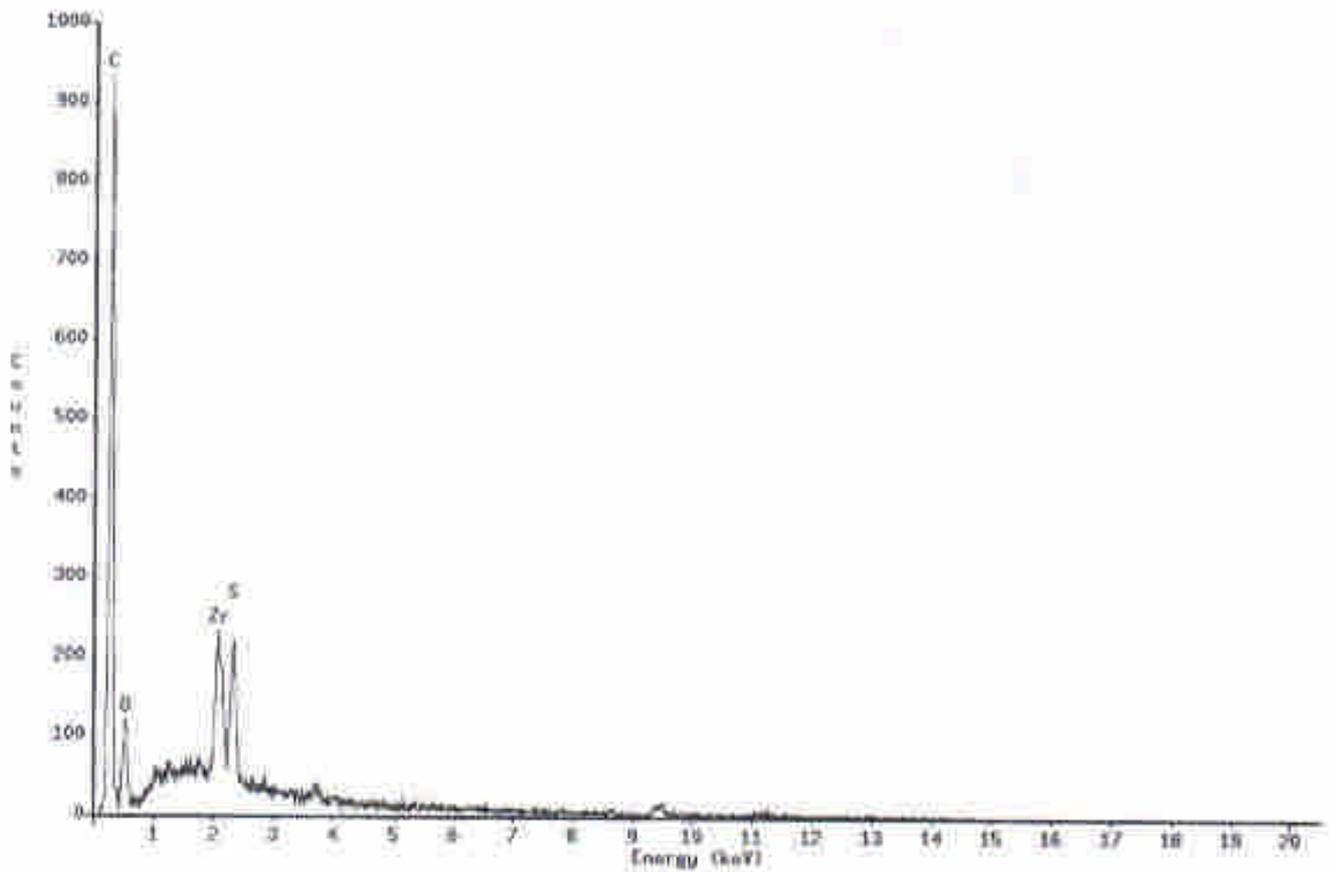


圖 5.11 某光電廠有機排氣粉末在 130°C 下烘乾之塗覆表面(放大 30 倍)

故只放大 30 倍看其整體之表面。

圖 5.12 為粉末之元素分析，其中 Zr 為穿透式電子顯微鏡分析時所鍍上之金屬，故此粉末組成元素有碳、氧及硫這三種元素，並無矽元素之存在，排除粉末含有 SiO_2 可能性。

由上述分析結果得知該光電廠之廢氣中含有微量之黃色粒狀物，該微粒經過 180°C (模擬沸石轉輪脫附溫度) 加熱後，先形成不可逆之紫褐色微粒附著其上，再經多次的轉輪脫附後形成紫黑色焦狀物，故該物質一旦進入沸石轉輪，將無法在脫附區內被有效脫附出，因此推論該微粒應為輔導廠轉輪劣化之主要原因；而微粒之化學成份經鑑定應為含硫之有機物質，故建議該廠先調查含硫有機物質之來源，並評估將其在製程後端分流之可行性，或加強該類微粒之收集過濾效率。另外濾布之裝設對於廢氣中微粒物質仍有部份過濾的功效，所以在未查明粉末顆粒形成原因及未改善其處理方式前，建議繼續使用濾布作為沸石轉輪之預處理設備。



Elements Present:
C(10), O(8), S(16), Zr(40)

Energy (keV)	Intensity (counts)	Elements Present
0.274	8515	C Ka
0.524	775	O Ka
2.074	1914	Zr La1
2.322	1900	S Ka

Thu Nov 07 11:10:53 2002

Filter Fit Method
Chi-sqr = 2.75 Lifetime = 79.0 Sec.
Standardless Analysis

Element	Relative k-ratio	Error (1-Sigma)	Net Counts (1-Sigma)	Error (1-Sigma)
C-K	—	—	7486 +/-	87
O-K	0.10975 +/-	0.01122	894 +/-	59
Zr-L	0.49645 +/-	0.03157	3460 +/-	220
S-K	0.22378 +/-	0.02173	2458 +/-	180

PSDZ Correction Acc.Volt. = 15 kV Take-off Angle = 30.00 deg
Number of Iterations = 7

圖 5.12 某光電廠有機排氣粉末之元素分析

5.3.2 裝設冷凝器前處理及執行水洗程序之系統改善狀況[8]

本研究群於實廠之沸石轉輪系統結合冷凝器，與單一沸石轉輪系統進行轉輪清洗後處理效率之成果如圖 5.13 所示。

先前該廠去光阻製程所產生之高沸點 VOC_S 均未經處理直接引導至沸石吸附濃縮焚化系統，由於該廠高沸點物質含量較多，且在系統安全考量之下，在沸石轉輪脫附溫度不宜恣意提升，故在所設定之操作溫度下不易完全將高沸點 VOC_S 脫附而出。所以從圖 5.13 可看出於運轉第 6 月份，系統整體處理效能出現下降趨勢、並趨近法規要求之最低許可處理效率 90%，而執行本研究群所建議之轉輪清洗程序後，即有效將蓄積於其上、佔據吸附位置導致吸附效率下降之高沸點 VOC_S 物質流洗而出，且系統處理效率亦達到接近 95% 之理想效能。

雖該廠之沸石轉輪可藉由定期清洗解決高沸點 VOC_S 物質所造成之效率下降問題，惟其頻率係半年一次、且視產能需要有時將縮短為每季執行一次，如此經常需停機清洗保養對其產量極大、且無第二套可滿足處理效能之設備廠家而言是極為不便，且如此頻繁之清洗轉輪次數亦可能提高轉輪體上沸石及其他吸附劑剝落之機會，

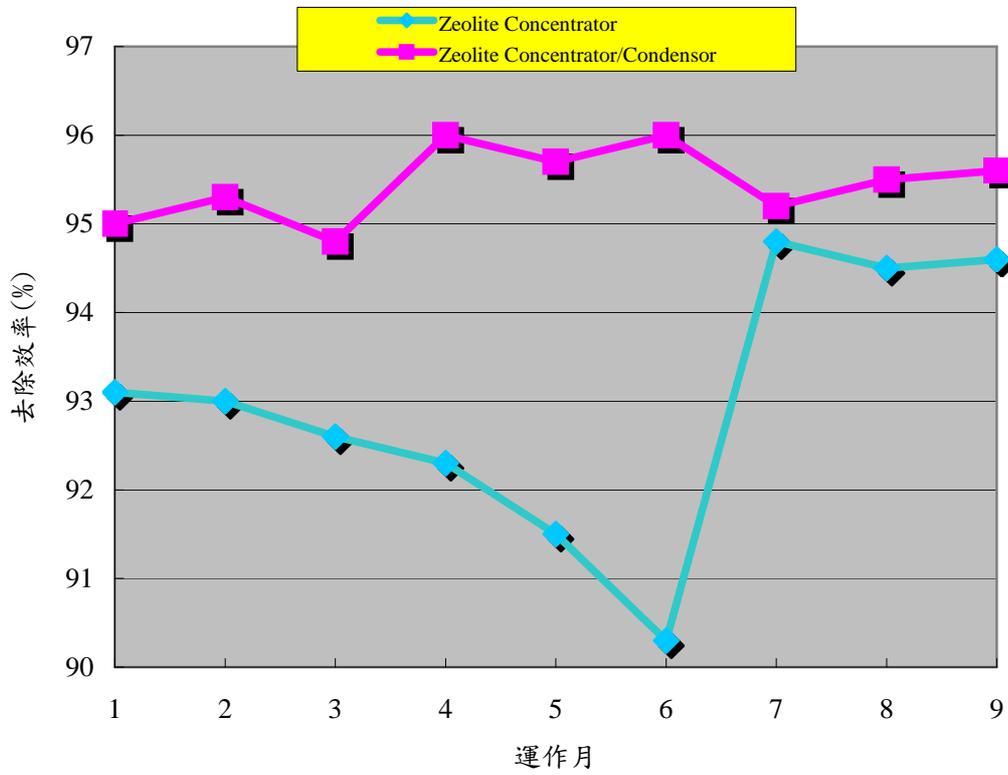


圖 5.13 沸石轉輪系統結合冷凝器與單一沸石轉輪系統進行轉輪清洗後處理效率

而經本研究群於其去光阻製程後直接設置冷凝器先行處理其含高沸點 VOC_S 廢氣，經實場運作後結果發現冷凝器可有效處理高沸點 VOC_S，雖然冷凝器處理中、低沸點之物質並不甚理想，但將其引導至沸石轉輪系統進行處理，則可得到極為妥善之整體去除效果。由圖 5.13 之冷凝器與沸石轉輪系統結合效率曲線顯示，於冷凝器設置運轉 9 個月後，其兩系統結合之 THC_S 去除效率值仍然保持 95% 以上。

如此兩系統結合之成本與之前僅由單一沸石轉輪處理 VOC_S 廢氣之成本相較是否具經濟可行性，亦是園區廠家是否採行應用之主要關鍵。表 5.1 為本研究群之實廠設置冷凝器前後個別成本與總成本比較。

在初期設置成本比較方面，本研究於實廠設置冷凝器兩部，其總成本約需增加新台幣 200 萬元；在不考慮焚化燃料費支出下，該廠原沸石轉輪系統主要操作維護項目為每月實施轉輪清洗一次，及每五年轉輪換新，則合計每年所需之操作維護費用約為新台幣 408 萬元。

兩系統結合主要操作費用項目為冷凝後有機廢溶劑之代處理費每年約新台幣 36 萬元，而至於反應器運作、冷卻水所需之電力費及年度維護費每年約新台幣 20 萬元，轉輪之部份假設每一年進行轉輪清洗一次、轉輪七年更換，則合計每年所需總操作維護費約為新台幣 166 萬元。而將兩系統結合前後總成本進行比較，則發現本研究群建

議之結合系統每年可節省約新台幣 222 萬元。

5.3.3 於操作程序中提高脫附熱容量對於系統去除效率之改善

為提升沸石轉輪系統之脫附熱容量，主要可調整之操作參數為增加脫附溫度及脫附風量，而此兩項亦包含在本研究群所建議之沸石轉輪效能最佳化調整參數之中；在本文 4.2.2 章節中，本研究群已分別在某半導體廠及某光電廠進行沸石轉輪效能操作最佳化調整，結果證實適時提升脫附熱容量，能有效將吸附在上之 VOC_S 有效脫附而出、顯著提升轉輪現行處理效率。

表 5.1 某半導體廠設置冷凝器前後個別成本與總成本比較[8]

設備名稱	增加之設置成本 (新台幣萬/年)	主要操作維護成本 (新台幣萬/年) (不含焚化燃料費)	合計 (新台幣萬/年)
沸石吸附濃縮焚化系統	--	轉輪清洗+轉輪換新	408
		408 ^{註2}	
沸石吸附濃縮焚化系統+ 冷凝器	20 ^{註1}	有機廢溶劑代處理 +轉輪換新 +冷卻水及運作所需電力費	186
		166 ^{註3}	

備註

1. 每部冷凝器成本約合新台幣 100 萬元，增設兩部之設置成本為新台幣 200 萬元，假設硬體使用壽命為 10 年，不考量最小投資報酬率下均攤 10 年，則每年負擔成本為新台幣 20 萬元。
2. 清洗轉輪一次約需 10 至 30 公噸水，故取其平均 20 公噸。若每月清洗一次，則一年所需清洗水及水洗後廢水代處理費約新台幣 288 萬元；轉輪更新部份，其原設備廠建議每七年更新一次，但由於廢氣中所含高沸點 VOCs 較高，因此假設需提前兩年更換，其更換費用於不考量最小投資報酬率下均攤五年，其每年所需負擔成本約新台幣 120 萬元。故合計操作維護成本為新台幣 408 萬元。
3. 冷凝後有機廢溶劑之代處理費每年約新台幣 36 萬元，反應器運作、冷卻水之電力費及年度維護費每年約新台幣 20 萬元，轉輪之部份假設每一年進行轉輪清洗一次、轉輪七年更換，則合計每年所需總操作維護費約為新台幣 166 萬元。

六、沸石吸附濃縮轉輪焚化系統之適用建議[9]

沸石吸附濃縮焚化系統具多年實廠運轉經驗、且成熟穩定，據調查資料顯示其處理效能多可符合目前國內半導體空污法規 VOC_S 廢氣處理效率大於 90% 以上之要求，甚至大多數設置之廠家亦能同時符合排放量小於每小時 0.6 公斤之要求。由於沸石吸附濃縮焚化系統係將廢氣吸附濃縮後，最終導入焚化系統處理 VOC_S，以能源節約及符合法規要求之觀點同時評估，其較適合每分鐘 600 立方公尺(cubic meter per minute, CMM)高風量以上、VOC_S 之總碳氫化合物濃度(total hydrocarbons, THC_S)介於 500~1000ppm(parts per million, ppm)之廢氣特性廠家應用。

但若廢氣中含有較多量之高沸點物質，則並不適合單獨、直接使用此系統處理之。如光電業應用結果，該產業製程及使用之物料與半導體相近，不過在含高沸點 VOC_S 去光阻劑之使用量上，以及其所可能產生之微粒濃度遠高於半導體業。高沸點 VOC_S 雖容易吸附於沸石轉輪上，但由於系統設計之安全考量，使得脫附高沸點 VOC_S 溫度不足，所以往往造成脫附不易，且高沸點 VOC_S 將蓄積其上、佔據吸附位置，影響系統整體效能，而本研究群所輔導之某 TFT-LCD 廠之含硫有機微粒亦會阻塞沸石轉輪吸附表面，此兩項因素成為部份光電

業應用沸石吸附濃縮焚化系統效能不彰之主要原因。

所以若 VOC_S 廢氣中含有較多量之高沸點物質，欲應用沸石吸附濃縮系統控制，建議於進入系統前端加裝冷凝器、活性炭網柵及除霧器(De-Mister)等設備，如此將可有效處理高沸點 VOC_S。而此些前置系統不易處理，所剩下之半導體及光電業 VOC_S 廢氣最大組成成分異丙醇及丙酮等中低沸點物質，則可引導至後端沸石吸附濃縮焚化系統作處理，即可解決以往高沸點 VOC_S 所造成之問題。

而若是廢氣中含有高濃度之顆粒，則必須以微粒處理裝置設置於沸石轉輪之前端，以避免這些顆粒於沸石之蜂巢結構中沈積，其中最簡單的微粒過濾裝置為單層濾布，但其僅對較大顆粒之過濾效率較佳，無法有效處理較小粒徑之顆粒，因此適用於既設、無空間之工廠，其對沸石轉輪之壽命延長仍然有限。而擬新設置之工廠，若能預留空間給較有效之微粒處理裝置（如袋式集塵裝置），方可使沸石轉輪設備之壽命有效延長之。

七、沸石吸附濃縮轉輪焚化系統之操作維護記錄項目及績效自我評估

根據多年實廠輔導及實驗室模廠研究經驗，為使沸石轉輪之日常操作維護及處理效能績效之提升程序有據可循，本研究群特規劃操作維護記錄項目及績效自我評兩項表格，廠家可參考表格中之各項參數定期記錄，建立基本之自身操作績效資料庫，亦可讓推算所花費之 VOC_s 處理成本，而在處理效能符合法規要求、並達一定水準後，若為使操作成本經濟化，則可從中檢視支出為甚之項目，將其適切進行調整以節約成本。

7.1 沸石吸附濃縮轉輪焚化系統之操作維護記錄項目

表 7.1 為本研究建議之沸石吸附濃縮焚化系統紀錄範例，其中計分為操作參數、定期保養與預處理設備三大項，並列出系統效率及成本紀錄等項目。操作參數部分包含轉輪轉速、脫附溫度、脫附氣流量與焚化溫度，根據本研究群執行去年計畫結果顯示，雖然廠家能依設備提供商之建議值將系統處理效能維持至符合法規標準，但由於產能變動將使得廢氣排放狀況如風量與進流濃度值隨之改變，因此廠家應視實際狀況適時調整操作參數，如本研究群研究結果顯示進流 VOC_s 濃度較高，轉輪轉速需比原先之轉速較快，其因係氣流所含之污染量

表 7.1 沸石吸附濃縮焚化系統建議紀錄項目填寫範例

設備編號：_____A106_____		檢查日期：__92__年__08__月__12__日				
紀錄項目		操作數值	系統效率	成本	備註	
操作參數	轉輪轉速 (RPH 或 Hz)	28 Hz	85%	(1) 運轉電費： 18.7 萬元/月	◎轉輪規格 轉輪直徑：3.5 m 轉輪厚度：45 cm 處理側風面比： 1：1：6	
	脫附溫度 (°C)	180		(2) 焚化費用： 30.6 萬元/月		
	脫附氣流量 (m ³ /hr)	3220				
	焚化溫度 (°C)	760				
定期保養	<input checked="" type="checkbox"/> 熱風脫附	執行頻率 (次/年)	4	保養前：	(3) 費用： 5 萬元/月	
	<input type="checkbox"/> 潔淨水清洗	流量 (m ³ /hr)	3000	80.5%		
	<input type="checkbox"/> 其他：	處理溫度 (°C)	300	保養後：		
		處理時間 (hr)	12	96%		
預處理設備	<input type="checkbox"/> 無設置				◎廢氣進流狀況 進流風量：876 CMM 進流濃度：513 ppm 出流風量：876 CMM 出流濃度：82.3 ppm 進流溫度：26°C 排氣濕度：3.11% ◎操作成本支出 (1)+(2)+(3)+(4)+(5) 55.62 萬元/月	
	<input checked="" type="checkbox"/> 濾布/濾網 材質：	更換頻率(次/年)	12	裝設前：		(4) 運轉電費： 1.2 萬元/月 (5) 耗材更換費： 0.12 萬元
		截面積 (m ²)	10.7	90%		
		厚度(cm)	1.5	裝設後：		
	<input type="checkbox"/> 活性炭吸附槽	活性炭粒徑(mm)		95%		
		更換頻率(次/年)				
		截面積(m ²)				
		厚度(m)				
	<input type="checkbox"/> 冷凝器	操作溫度 (°C)				
		反應器長度 (m)				
	<input type="checkbox"/> 就地水洗塔 (local scrubber)	循環水量(m ³ /hr)				
		循環水 pH 值				
<input type="checkbox"/> 無填充物 <input type="checkbox"/> 有填充物						
種類： 直徑： mm						

較多，若維持原先之轉速將可能使得吸附處理區提前趨近飽和，讓處理效率下降，所以進流濃度較高時，需將轉速提高，以使轉輪提前進入脫附區進行脫附處理，以維護系統最佳化運作。而適時提高脫附溫度與脫附氣流量可增加一定之處理效率值，不過提高脫附氣流量等於降低進入焚化設備之濃縮比，如此將增加後端焚化費用；轉輪運轉一定時間後，將產生效率下降之情況，而最簡便之措施即是停機進行定期保養，其常見方法為熱風脫附與以潔淨水清洗。廠家可以根據執行頻率、流量、處理溫度及處理時間等紀錄值，對於執行定期保養後系統處理效率改善進行掌握，以尋找出最適保養項目參數值；另外，目前亦有多數廠家為防止高沸點 VOC_S 物質進入沸石轉輪，而加裝濾網、活性碳吸附槽、冷凝器與就地水洗塔(local scrubber)等設備預先處理之。利用表列之預處理設備紀錄項目，廠家可定期檢視、並適時調整，增加其對整體 VOC_S 效率處理之助益。

7.2 沸石吸附濃縮轉輪焚化系統之操作績效自我評估

為了使廠家能簡便檢視自身沸石吸附濃縮轉輪焚化系統之操作績效，經綜整研究結果並考量不更動硬體設計、不額外增加其他設備，甚至減少能源耗用下，且能讓廠家迅速簡易地適切掌握自身之沸石吸附濃縮焚化系統最佳經濟效能平衡點。本研究群建議選擇沸石吸

附濃縮焚化系統之轉輪轉速、脫附溫度及脫附氣流流量等三項，作為該系統操作績效自我評估重要參數指標。廠家可參酌當時廢氣進流狀況、加以考量僅改變某一操作參數後，其相對之系統處理效率值為最大，與後端焚化燃料用量之成本影響因子為最小(如表 7.2)，則此操作參數極為首要之績效改進參考指標，並依此排定次要之績效指標。若系統處理效能未能達到理想，即可依序檢視、調整績效指標，使問題獲得改善。

惟廠家若欲調整脫附溫度及脫附氣流流量應特別注意：

1. 脫附溫度應不宜過高，以免影響吸附區效能。
2. 降低脫附氣流，須考量焚化爐火焰速度避免回火，與系統風壓之穩定以防當機。

表 7.2 沸石吸附濃縮焚化系統建議操作績效指標自我評估表範例

紀錄項目 時間	廢氣特性		與處理績效相關之建議調整操作參數			處理效率 (%)	焚化燃料費 (萬元/月)
	風量 (CMM)	THCs 濃度 (ppm)	轉輪轉速 (RPH 或 Hz)	脫附溫度 (°C)	脫附氣流量 (CMM)		
92/7/15	900	942	28 Hz	180	54	82	30(概估)
92/8/11	876	513	28 Hz	180	54	85	30.6

參考文獻

1. 白曠綾、李谷蘭、楊泰辰、黃文賢、林育旨(2000), ”園區半導體製造業廢氣處理及排放調查研究期末報告”。
2. 白曠綾、賴慶智、林育旨、康育豪、李谷蘭、曾映棠、劉政彰、陳建志、張國財、劉惠綺、楊德志(2001), “新竹科學園區半導體及光電製造業空氣污染防制設施績效提升輔導”。
3. 白曠綾、盧重興、曾映棠、許世杰、張國財、林育旨、林家欣、陳建志、洪錦德(2002), “新竹科學園區半導體及光電製造業空氣污染防制設施績效提升輔導 II”。
4. 日本西部技研公司網址 (2002) ,
http://www.seibu-giken.co.jp/corru/purosave_e.html
5. Feng-Tang Chang, Yu-chih Lin, Hsunling Bai, and Bau-Shei Pei (2003)“Adsorption and Desorption Characteristics of VOCs' on the Thermal Swing Honeycomb Zeolite Concentrator”, Journal of the Air & Waste Management Association, Vol. 53, pp. 1384-1390
6. 張豐堂、林育旨、白曠綾、白寶實(2003), “增益沸石濃縮轉輪焚化系統效能之探討”, 2003 高科技業空氣污染防制研討會, pp.58-62
7. 張豐堂、林育旨、白曠綾、白寶實 (2001), “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”, 第十八屆空氣污染技

術研究研討會，吸附相關研究議程，光碟版。

8. 張豐堂、林育旨、白曠綾、白寶實(2002), “半導體產業 VOC_s 廢氣應用冷凝器控制之實例探討”，第八屆海峽兩岸環境保護研討會，pp.1313-1319。
9. 林育旨、白曠綾、張豐堂、謝勝隆、王穎哲、何有忠(2003), “半導體及光電產業現行揮發性有機廢氣控制設備之選用評估”，工業污染防治季刊 (submitted)

附件 操作效能自我評估管理記錄表

附表 1 沸石吸附濃縮焚化系統操作維護紀錄項目

設備編號：_____		記錄日期：_____年_____月_____日				
紀錄項目		操作 數值	系統效率	成本	備註	
操作 參 數	轉輪轉速 (RPH)			(1) 運轉電費：	◎轉輪規格 轉輪直徑： 轉輪厚度： 處理側風面比：	
	脫附溫度 (°C)					
	脫附氣流量 (CMM)			(2) 焚化費用：		
	焚化溫度 (°C)					
定期 保 養	<input type="checkbox"/> 熱風脫附	執行頻率 (次/ 年)		保養前：	(3) 費用：	
	<input type="checkbox"/> 潔淨水清洗			保養後：		
	<input type="checkbox"/> 其他：	流量 (m ³ /hr)				
		處理溫度 (°C)				
	處理時間 (hr)				◎廢氣進流狀況 進流風量： 進流濃度： 出流風量： 出流濃度： 溫度： 排氣濕度：	
預 處 理 設 備	<input type="checkbox"/> 無設置				◎操作年成本支出 (1)+(2)+(3)+(4)+(5)	
	<input type="checkbox"/> 濾布/濾網 材質：	更換頻率(次/年)		裝設前：		(4) 運轉電費：
		截面積 (m ²)				
		厚度(m)		裝設後：		(5) 耗材更換費：
	<input type="checkbox"/> 活性炭吸附槽	活性炭粒徑(mm)				
		更換頻率(次/年)				
		截面積(m ²)				
		厚度(m)				
	<input type="checkbox"/> 冷凝器	操作溫度 (°C)				
		反應器長度 (m)				
<input type="checkbox"/> 就地水洗塔 (local scrubber)	循環水量(m ³ /hr)					
	循環水 pH 值					
	<input type="checkbox"/> 無填充物 <input type="checkbox"/> 有填充物 種類： 直徑： mm					

附表 2 沸石吸附濃縮焚化系統建議操作績效指標自我評估表

紀錄項目 時間	廢氣特性		與處理績效相關之 建議調整操作參數			處理效率 (%)	焚化燃料費 (萬元/月)
	風量 (CMM)	THCs 濃度 (ppm)	轉輪轉速 (RPH 或 Hz)	脫附溫度 (°C)	脫附氣流量 (CMM)		