

## 空污防制

# 次世代 TFT-LCD 產業揮發性有機廢氣 處理設備之最佳化設置研究

張豐堂\*、林育旨\*\*、白寶實\*\*\*、白曠綾\*\*\*\*、鄭石治\*\*\*\*\*

## 摘 要

薄膜電晶體液晶顯示器是國家重點發展兩兆雙星計畫之一，由於製作 590mm×670mm 面板之三代廠與 680mm×880mm 之四代廠，其廢氣流量與所排放之 VOCs 濃度不亞於半導體晶圓製造業，而該產業所運轉製作 1,100mm×1,250 mm 面板之五代廠，及興建中之 1,500mm ×1,850mm 面板之六代廠等所謂次世代新廠，其揮發性有機物排放量污染量預估更會高過半導體產業。

因此，本文依據累積之研究及實廠經驗探討次世代 TFT-LCD 廠如何因應未來即將公告實施之「光電製造業空氣污染管制及排放標準」，有效處理 VOCs 污染排放量，並針對 VOCs 控制技術提出分析，協助次世代 TFT-LCD 業規劃揮發性有機廢氣處理設備及處理措施。

【關鍵字】沸石吸附濃縮轉輪、活性碳流體化床、蓄熱式焚化爐、觸媒焚化

---

\*華懋科技股份有限公司副總經理、國立清華大學工程與系統科學系博士候選人

\*\*國立交通大學環境工程研究所博士

\*\*\*國立清華大學工程與系統科學系教授

\*\*\*\*國立交通大學環境工程研究所教授

\*\*\*\*\*華懋科技股份有限公司董事長

## 一、前 言

揮發性有機物 (volatile organic compounds, VOCs) 是台灣地區常見空氣污染物之一，其主要來自化學工廠、石化工業、印刷業、塗裝業以及目前新興之半導體與光電液晶顯示器產業。由於VOCs所具備之毒性以及引起臭氧產生與光化學效應形成之特質，所以若不加以控制使其恣意排放在大氣中，將會帶來相當重大之危害。

目前國內已訂立法規，對於石化工業<sup>[1]</sup>、塗裝業<sup>[2]</sup>、半導體業<sup>[3]</sup>與其他相關行業<sup>[4, 5]</sup>之VOCs排放污染均加以嚴格管制。目前國內重點發展之薄膜電晶體液晶顯示器 (Thin-Film Transistor Liquid-Crystal Display, TFT-LCD)，由於製作590mm×670mm面板之三代廠與680mm×880mm之四代廠，其廢氣流量與所排放之VOCs濃度根據研究顯示<sup>[6, 7]</sup>亦不亞於半導體晶圓製造業，而該產業所運轉製作1,100mm×1,250 mm面板之五代廠，及正在興建中之能製作1,500mm×1,850mm面板之六代廠等所謂次世代新廠，其VOCs污染量預估更會高過半導體產業所排放，所以行政院環保署也正研擬「光電製造業空氣污染管制及排放標準」，預計未來將公告實施、期望對VOCs排放量日趨增大之TFT-LCD產業能夠加以妥善管制。

先前本研究群已對半導體及光電產業VOCs控制設備進行選用評估<sup>[8]</sup>，因次世代TFT-LCD產業急速擴張，本文將持續探討如何有效處理VOCs污染排放量較過往TFT-LCD廠更大之次世代廠，並針對如何規劃其揮發性有機廢氣處理設備，作一最佳化設置分析研究。

## 二、TFT-LCD 產業製程及次世代廠(五代廠以後) VOCs 排放成份與特性分析

TFT-LCD 之典型製程如圖 1 所示，玻璃基板被清潔乾淨後依產品功能要求，需多次反覆進行薄膜形成、上光阻、顯影、蝕刻及去光阻等步驟。最後投入彩色濾光片、填充液晶，完成整個模組組裝及測試功能之後，產品包裝出貨。

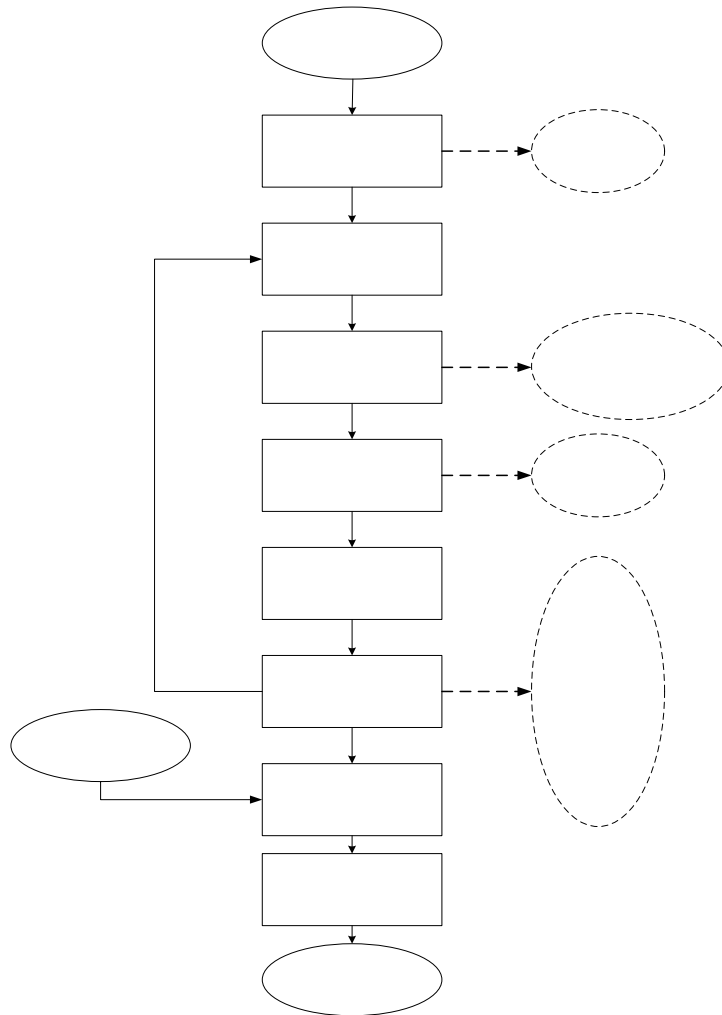


圖 1 TFT-LCD 典型製程及 VOCs 逸散來源

在這一連串製成當中需要投入大量之揮發性溶劑，因此一些揮發性有機氣體便會散逸出來。例如，在基板清洗會散逸異丙醇(Isopropyl alcohol, IPA)及丙酮(acetone)，光阻塗佈會散逸 2-庚酮(2-Heptanone)、乙酸第二丁酯(1-Methylpropyl acetate)、乙酸丙二醇單甲基醚酯 (Propylene Glycol Monomethyl Ether Acetate,

### 36 次世代 TFT-LCD 產業揮發性有機廢氣處理設備之最佳化設置研究

PGMEA)、單甲基醚丙二醇(Propylene Glycol Monomethyl Ether, PGME)及六甲基乙矽鉍(Hexamethyldisilazane, HMDS), 顯影會散逸環戊酮(Cyclopentanone), 去光阻會散逸二乙醇單丁醚(Diethylene Glycol Monobutyl Ether 或稱 butoxydiglycol, BDG)、乙醇胺(Ethanolamine, MEA)、二甲基亞砜(Dimethyl Sulfoxide, DMSO), 及去光阻後製程潤濕之異丙醇及丙酮等。

表 1 為 TFT-LCD 之主要揮發 VOCs 特性分析, 由表 1 可以得知其所揮發之 VOCs 除了丙酮與異丙醇外, 其他均屬於中高沸點 VOCs。因此, 該行業所排出之 VOCs 種類繁多且性質迥異, 處理時應妥善予以分流分類處理, 以確保防制設備性能之顯著。

表 1 TFT-LCD 之主要揮發 VOCs 特性分析

物種名稱	英文名稱	分子式	分子量	沸點(°C)	亨利常數 mole/(kg*bar)
丙酮	Acetone	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	58	56	30
異丙醇	Isopropyl alcohol (IPA)	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	60	82	130
乙酸第二丁酯	1-Methylpropyl acetate	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	116	112	--
單甲基醚丙二醇	Propylene Glycol Monomethyl Ether (PGME)	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	90	120	--
六甲基乙矽鉍	Hexamethyldisilazane (HMDS)	C <sub>6</sub> H <sub>19</sub> NSi <sub>2</sub>	161	125	--
環戊酮	Cyclopentanone	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	84	131	--
乙酸丙二醇單甲基醚酯	Propylene Glycol Monomethyl Ether Acetate(PGMEA)	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>3</sub>	132	146	--
2-庚酮	2-Heptanone	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	114	152	--
乙醇胺	Ethanolamine (MEA)	C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> NO	61	171	6.1×10 <sup>+6</sup>
二甲基亞砜	Dimethyl Sulfoxide (DMSO)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> OS	78	189	--
二乙醇單丁醚	Diethylene Glycol Monobutyl Ether (butoxydiglycol, BDG)	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O <sub>3</sub>	162	231	--
環己酮	Cyclohexanone	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O	98	157	--
甲醇	Methanol	CH <sub>4</sub> O	32	65	--

### 三、常見之VOC<sub>S</sub>污染防制設備簡介

已開發及商用之VOCs污染防制設備, 其基本可分為破壞性及非破壞性兩種方法。破壞性方法包括焚化、高溫與觸媒氧化, 在此機制下VOCs將轉化為CO<sub>2</sub>及水或

其他惰性等污染性較小之物質；而非破壞性方法則是利用吸附、吸收及冷凝等物理方法，將VOCs自排放廢氣中物理性質轉移、使其成為乾淨氣體。以下針對目前常見之VOCs污染防制設備作一簡介。

### 3.1 冷凝技術

一般傳統以冷凝法控制VOCs，其原理係利用冷凍設備先將含VOCs廢氣之溫度冷卻至該VOCs露點溫度(飽和溫度)以下，即可達到汽液相變化冷凝之效果。一般常見之VOCs冷凝系統<sup>[9, 10]</sup>主要包含除濕器及VOCs冷凝器兩項基本設備。裝設除濕器之目的在於將空氣中多餘之水份濕氣去除，避免在VOCs冷凝區將溫度降至 273°C 以下所發生之不利於冷凝之結冰效應。所以在系統前端裝設除濕器，並將其操作溫度控制略高於水之冰點，廢氣中所有之濕氣則可被冷凝下來；而曾有學者研究<sup>[11]</sup>指出，應用冷凝控制之成功關鍵因素，在於系統性能是否能達足夠低溫及廢氣中應含較高濃度之VOCs，以便獲得有效控制。

由於目前國內所研擬之光電法規嚴格管制 VOCs 之去除效率或排放量限制，所以傳統之冷凝器必須利用冷凍設備將操作溫度控制在相當低之溫度，方能以冷凝去除低濃度 VOCs，並確保處理後廢氣所含 VOCs 濃度值達到最低；不過如此傳統冷凝方式應用於 VOCs 廢氣排放量極大之 TFT-LCD 業，其為降溫所需付出之成本將會相當昂貴。

針對冷凝器欲處理高風量及低濃度之高沸點廢氣需求，在研究群曾探討結合降溫冷凝及液膜吸收之雙重效能之新穎設計概念<sup>[12]</sup>，將冷凝內盤管內以 5 至 10°C 之冰水實施循環操作，於此溫度條件下冷凝器之盤管壁面將有水份凝結之液膜(moisture film)產生，但不發生水份濕氣凍結結冰之現象下，當廢氣中所含之VOCs通過液膜時即可進行液氣相之吸收作用而去除之。如此結合低溫冷凝及液膜吸收之雙重效能有別以往傳統冷凝器僅考量單質VOCs及濃度較高之冷凝設計概念，而針對處理組成成分多樣化、大風量之次世代光電業TFT面板黃光製程中，上光阻塗覆機(coater) (thinner-PGME、PGMEA)及去光阻(stripper-MEA、DMSO、BDG、IPA)機台所排放之較高濃度VOCs廢氣，可預期其處理效率將會更加顯著，並且可以減少傳統冷凝器為達超低溫之不必要能源耗用。

### 3.2 固定床活性炭吸附

活性炭可由各種含碳化合物製成，製造時通常將原料置於 600°C 無氧中燃燒後，於 600~700°C 慢慢燃燒使其活性化，亦可在 800~900°C 高溫下通入水蒸氣或二氧化碳而活性化。粒狀活性炭之粒徑約 4×10 網目(mesh)。活性炭內部為相互聯繫之毛細管所構成巨大網狀組織，因此表面積很大。由於具有多孔結構與巨大之表面積，活性炭可以吸附大氣中及水中之各種雜質如 VOCs、有機物、氯及酚等。活性炭之吸附屬於物理吸附亦稱凡得瓦吸附，是由於吸附劑與吸附質分子間之靜電力，或凡得瓦力導致物理吸附所引起。當固體及氣體間分子引力大於氣體分子間引力時，即使氣體壓力低於操作溫度相對之飽和蒸氣壓，氣體分子也會冷凝在固體表面上。所以固定床活性炭吸附 VOCs 是相當簡易之處理程序。

活性炭種類繁多，不同活性炭之吸附量亦有所不同，若活性炭製造商沒有提供相關之吸附特性資料，往往會造成工程師於固定床活性炭規劃設計時，對於活性炭所需填充量與目標污染物去除效率之關係較難掌握，因此本研究群根據 Chemical Properties Handbook<sup>[13]</sup>所提供之可概括一般市面上常見活性炭吸附 VOCs 關係通式，推算出在不同進流濃度下每 100 克活性炭在一大氣壓、25°C 及乾燥環境中，針對半導體及光電業主要 VOCs 個別之飽和吸附預估量(如圖 2)，結果可提供對於欲處理 VOCs 種類與量能，以及所需活性炭投入量，以利進行事前分析。

由圖可知佔排放比率前兩大之丙酮與異丙醇，活性炭對其之重量吸附比最大不會超過 20% wt，而半導體及光電產業之個別進流濃度又很少超過 800 ppmv (parts per million by volume)，若以當量總碳氫化合物(total hydrocarbon, THC)濃度計算約為 2,400 ppmv，所以吸附效能並不是十分顯著，因此活性炭吸附塔應用於半導體或是 TFT-LCD 業作為 VOCs 主要污染防制設備時，為了符合法規要求，則換碳頻率就必須非常頻繁。對於新竹科學園區廠商使用活性炭去除效率不佳的原因，可歸納出下列三點原因<sup>[14]</sup>：

1. 廢氣進入吸附處理系統前未先以過濾、冷凝、去濕等方式預處理，並且未調整在最佳吸附溫度效率範圍內進行處理。
2. 半導體工廠排放有機污染物種類繁多，且其含量變化很大，再加上多種污染物會互相競爭活性炭的吸附表面位置，造成各種 VOCs 物種的處理效果有所差異。

3.工廠VOCs排放量與活性碳容量之評估有所差異，且部份工廠活性碳吸附塔已吸附飽和而未予以更換，因而發生破出現象（breakthrough），無法達到應有的處理效率。

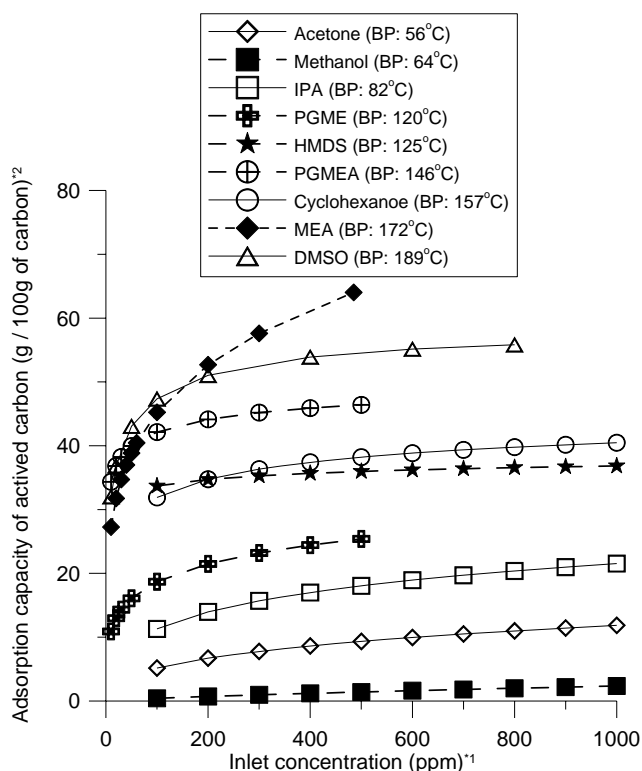


圖 2 活性碳對於不同濃度半導體及光電業主要 VOCs 之飽和吸附量評估

\*1: Inlet concentration (ppm) : 進流濃度 (百萬分之一)

\*2: Adsorption capacity of activated carbon (g / 100g of carbon): 活性碳吸附量(公克/每一百公克)

此外，活性碳材質本身亦有下列幾項問題需要克服<sup>[15, 16]</sup>：

- 1.在常溫下處理某些特定VOCs(如酮類或松脂類有機物，如ketones、cyclohexanone或turpentines)時，因本身吸附放熱至某一溫度時而發生觸媒催化作用<sup>[17]</sup>，會使有機物產生聚合或其他反應，進而引發活性碳著火之問題。
- 2.活性碳吸附易受溼氣影響，碳表面所含的氧化物及灰分會增進水蒸汽或其他極性物質的親和力，降低有機物及其他非極性物質的吸附。

## 40 次世代 TFT-LCD 產業揮發性有機廢氣處理設備之最佳化設置研究

3. 活性碳再生一般以水蒸汽脫附再生，若吸附質為含氮 VOCs 時，採用水蒸汽脫附可能會發生水解反應，而使回收之含氮 VOCs 發生改變，影響脫附產物之純度及再生活性碳之吸附效能。

### 3.3 沸石吸附濃縮轉輪焚化系統原理

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使 VOCs 裂解為無害之 H<sub>2</sub>O 及 CO<sub>2</sub>，其設備特性適合處理高流量、中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物。VOCs 廢氣進入系統後，首先係經過由疏水性沸石所組成之多通道蜂巢狀轉輪，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(adsorption zone)及兩個較小且面積相當之脫附區(desorption zone)、冷卻區(cooling zone)。第一階段之吸附程序是將進入系統後之 VOCs 廢氣於常溫下予以吸附淨化後直接排放至大氣，接著因轉輪之轉動而進入第二階段之脫附程序，此脫附所須之熱空氣是由冷卻區出口之預熱空氣與後端焚化系統熱交換後之熱空氣(約 180~220 °C)來提供，使其進入轉輪內將有機物脫附再生出來，此時出流污染物濃度大約為入流廢氣之 5~20 倍左右，而脫附再生出來之有機物則可於第三階段之熱焚化爐進行高溫(於 700°C 以上)之焚化或是進行低溫之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，並節省初設費用及運轉費用。

一般系統之吸附後與焚化後廢氣大多由同一支煙囪排出，根據本研究群<sup>[18-20]</sup>、國外學者<sup>[15, 21, 22]</sup>研究及實廠運作經驗<sup>[6, 7]</sup>，不論該系統應用在半導體晶圓業及 TFT-LCD 業，分析其進流端及出流端 THC 檢測值發現，其去除效率均可達 90% 以上，甚至長時間連續達 95% 以上。

圖 3 為本研究群規劃設計之沸石吸附濃縮轉輪焚化系統裝設於某 TFT-LCD 五代廠，其去除 VOCs 廢氣之歷史效率檢測，該廠除了沸石吸附濃縮轉輪焚化系統外，並在去光阻製程端加裝冷凝器，預先分流處理高沸點 VOCs(如 MEA、BDG、DMSO)。該廠之 VOCs 需處理風量約在標準狀態下每分鐘 1,200~1,500 立方公尺(standard cubic meter per minute, SCMM)，VOCs 進流 THC 濃度約在 750~1,100 ppmv，轉輪脫附溫度設定在 200°C，尾端焚化爐溫度為 730°C，經裝機運作 16 個月



之固定每月檢測資料顯示，該廠應用沸石吸附濃縮轉輪焚化系統，搭配前端 VOCs 分流、預先以冷凝器處理之措施，可讓整廠 VOCs 廢氣排放之去除效率穩定維持在 90% 以上。

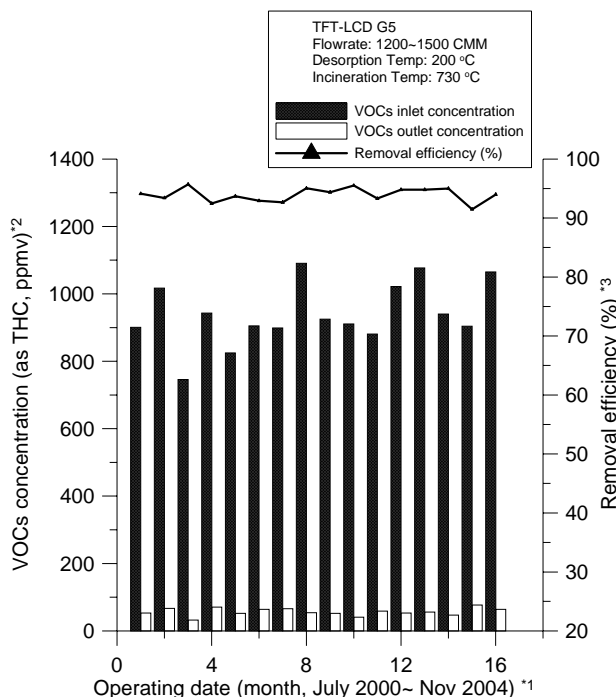


圖 3 某 TFT-LCD 五代廠裝設沸石吸附濃縮轉輪焚化系統之 VOCs 去除效率檢測

- \*1 Operating date (month, July 2000~ Nov 2004)：運作時間(月，2000 年 7 月至 2004 年 11 月)
- \*2 VOCs concentration (as THC, ppmv)：VOCs 濃度(以總碳氫化合物計算，百萬分之一)
- \*3 Removal efficiency (%)：去除效率 (百分比率)

### 3.4 活性碳流體化床吸附冷凝系統

活性碳流體化床吸附冷凝系統之處理流程，係為廢氣經由風車抽送、進入吸附塔之底部，吸附塔內部以平板分隔成數層，真球狀活性碳由吸附塔頂端落下，其特

## 42 次世代 TFT-LCD 產業揮發性有機廢氣處理設備之最佳化設置研究

殊性質可在隔板上方形成 2~3 公分之流體化浮動層，並沿著隔板一層一層地逐一落下、形成流體化活性碳層，當其與含有 VOCs 廢氣接觸時，數以千萬計之活性碳微粒可將 VOCs 有效吸附，氣體淨化後由塔頂排放。而吸附飽和之活性碳落至吸附塔底部貯槽後，以空氣輸送送入再生塔頂並進入高溫再生器內進行無氧環境再生程序；再生後之活性碳則從另一空氣輸送管再次送回吸附塔頂端，如此形成一連續操作之 VOCs 去除程序。由飽和活性碳脫附出含有極高濃度 VOCs 氮氣氣流，則進入至冷凝塔進行降溫冷凝成液體回收或直接送入燃燒機氧化分解。

該系統活性碳之脫附再生採用間接或直接加熱方式，不似一般傳統活性碳固定床係以蒸汽再生，因此濃縮脫附後之 VOCs 水份含量極低，所以除避免回收之高活性溶劑發生反應外，亦可減少廢水生成。此外，為了避免熱處理時造成危險，設計流體化床系統時，在脫附塔部分特別設計 N<sub>2</sub> 保安氣體，使所有高溫操作之流程均在低氧含量之狀態下 (O<sub>2</sub> < 2%) 進行，以保安全；且另設計有氧濃度偵測器隨時監控系統內之氧含量，並以可程式程序控制器 (PLC) 分兩階段連鎖控制，當氧含量 > 2% 時蜂鳴器發出警訊，並停止脫附塔之操作；氧含量 > 5% 時，蜂鳴器將發出警訊，此時系統將立刻停機外，緊急 N<sub>2</sub> 閥並會自動開啓，噴入大量 (平時 3 倍量) N<sub>2</sub> 以降低氧含量避免燃燒爆炸。

## 四、次世代 TFT-LCD 產業 VOC<sub>s</sub> 廢氣處理設備之設置最佳化分析與比較

次世代 TFT-LCD 產業揮發性有機廢氣，因面板尺寸越來越大、因此所造成之廢氣風量也隨著增加，同時由於該製程使用 VOCs 溶劑係用噴灑方式進行大面板清洗、光阻塗佈、光阻去除，因此所逸散之 VOCs 濃度 (THC 1,000~3,000 ppmv) 相對地比一般晶圓業以浸泡方式清洗 (THC 100~600 ppmv) 高出許多。而且目前實廠上所使用之 VOC<sub>s</sub> 物性分佈極為廣闊，要以單一系統處理整廠所排放出 VOCs 可能無法符合預期之理想。表 2 為以次世代 TFT-LCD 之 VOC<sub>s</sub> 廢氣排放特性-風量 1,500 SCMM 及 THC 濃度 1,500 ppmv 之處理系統比較。

表 2 VOCs 廢氣處理系統比較表 (for 1,500 SCMM)

處理大類別	沸石吸附濃縮轉輪焚化法			活性碳吸附法	焚化法		其他方式	
處理方式	轉輪式 Rotor		流體化床式(+冷凝) Fluidized Bed	固定床式 <sup>註1</sup> Fixed Bed	再生式焚化爐 RTO	觸媒式焚化爐 CTO	冷凝	生物濾床 <sup>註2</sup>
比較項目	焚化 (恢復式焚化爐)	焚化 (蓄熱式焚化爐, RTO)	冷凝法、廢液處理	活性碳更換再生	--	--	廢液處理	--
可達去除效率	95%以上	95%以上	90%以上	60~90%	97%以上	98%以上	<50%	60~80%
初設費用(NT \$)	2,100~2,500 萬	2,150~2,600 萬	2,400~3,000 萬	500~1,000 萬	2,800~3,500 萬	3,000~4,200 萬	<1,500 萬	1,000~1,500 萬
操作費用元/年	瓦斯費	50~200 萬	6~12 萬	--	--	540 萬以上	12~270 萬	--
	電費	76 萬	70 萬	176 萬	50 萬	175 萬	175 萬	≈285 萬
	材料更換費	≈20 萬	≈40 萬	90~570 萬	≈36,792 萬	≈50 萬	258 萬以上	≈5 萬
	二次污染物處理費	≈0	≈2	≈1000 萬	≈270 萬 (廢碳)	--	--	≈735 萬
	維修保養費	≈20 萬	≈20 萬	≈50 萬	≈10 萬	≈20 萬	≈40 萬	≈5 萬
N <sub>2</sub>	--	--	有	--	--	--	--	--
合計操作費用	166~316 萬/年	138~144 萬/年	1,316~1,796 萬/年	37,122 萬/年	≈785 萬/年	485~743 萬/年	≈1,095 萬/年以上	--
操作溫度	再生溫度≈180℃ / 燃燒溫度≈730℃	再生溫度≈180℃ / 燃燒溫度≈850℃	脫附：200~400℃ 冷凝：1~5℃ 冰水	常溫	燃燒 800℃ 以上	燃燒 300~400℃	0℃ 以下	常溫
佔地面積(m <sup>2</sup> )	≈80 m <sup>2</sup>	≈90 m <sup>2</sup>	≈64m <sup>2</sup> (8m×8m)	≈20.5 m <sup>2</sup>	≈50m <sup>2</sup> (5m×10m)	≈50m <sup>2</sup> (5m×10m)	≈24m <sup>2</sup> (8m×3m)	≈900 m <sup>2</sup>
設備重量(ton)	≈18	≈20	15~20	15	≈55	≈60	≈18	很大，適用小風量
使用年限	20 年以上 (轉輪 5~10 年更換一次)	20 年以上 (轉輪 5~10 年更換一次)	每年至少須更換或再生一次	更換頻繁	20 年以上		--	需好好保護濾材
適用廢氣濃度	3,000 ppmv THC 以下 均可	3,000 ppm THC 以下 均可	1,500 ppm THC 以下 均可	均可	6,000 ppm THC ~ 25% LEL		2,000 ppm THC 以上	1,000 ppm THC 以下

比較基準： 1. 風量：1,500 SCMM 2. 濃度：1,500 ppm THC value 3. VOCs 熱值以 IPA 為基準，設熱值 0.0585℃/ppmv as IP

註 1：因活性碳更換過於頻繁，此處評估結果不適用。

註 2：因佔地面積過大，此處評估結果不適用於處理大風量廢氣。

#### 44 次世代 TFT-LCD 產業揮發性有機廢氣處理設備之最佳化設置研究

依照表 2 分析顯示，沸石吸附濃縮焚化將是最佳選擇之一，因為除了已有 5 代廠實績驗證外，在符合長時間、高去除效率下亦是最經濟之系統。沸石吸附濃縮轉輪焚化系統，其中之焚化設備可搭配恢復式焚化爐(Recuperative Thermal Oxidizer)或再生式燃燒爐(Regenerative Thermal Oxidizer, RTO)，一般光阻製程所使用之光阻劑因為含有加強黏著劑HMDS( $C_6H_{19}NSi_2$ )物質，其所含有之Si成分在高溫焚化後會與 $O_2$ 產生二氧化矽粉末，值得注意的是若使用RTO爐作為最終焚化系統，若未在前端進行分流處理或預先去除HMDS，而讓HMDS物質進入RTO焚化爐，則所產生之二氧化矽粉末將會阻塞RTO爐之蓄熱材料、造成其壓損增加及功能失效。不過若使用恢復式焚化爐時，若其熱交換器之設計採平行排列且夠大管節距之管殼式，則不會有此顧慮；但是恢復式焚化爐之管殼式熱交換器熱回收效率最高僅達 65~70%，而RTO爐之熱回收效率平均可在 93%以上，因此次世代TFT-LCD廠為確保末端高去除效率及節約能源開銷，實施VOCs廢氣分流處理；而光阻製程廢氣則採用沸石吸附濃縮轉輪結合恢復式焚化爐處理。另外採用沸石吸附濃縮轉輪結合RTO爐或活性碳流體化床處理除去光阻製程之高沸點廢氣以外之非光阻製程廢氣是最佳之VOCs廢氣處理方案；一般沸石轉輪平時保養可藉由水洗或高溫脫附維護，進而可提升效能，且不影響使用壽命。

此外若工廠有瓦斯及火源安全之考量，則可選擇活性碳流體化床吸附冷凝系統，藉由安全度高之氮氣實施電熱濃縮脫附及冷凝回收 VOCs，仍能達到 90%以上之 VOCs 去除效率；流體化床之活性碳費用為 NT\$ 350~500(回收碳)、1,300 元/公斤(全新活性碳，又稱處女碳)。依某廠經驗，因廢氣中同時含有中低沸點 VOCs 及 HMDS 未分流處理，及少量聚合物(如 Styrene、MEA)之存在，亦將使活性碳失去吸附功能，會使一年約需換新二至四次全新活性碳或須進行線外再生活性碳始可達到未來法規要求(VOCs 去除效率大於 90%)，若無以上之問題，則一年僅須再生活性碳一次，在 1,500 SCMM / 1,500 ppmv THC 下一般約需要 2,500 公斤之活性碳來填充於系統中(此填充量與吸附塔大小、脫附塔大小及數量以及輸送管線大小及長度等有關)，以全新活性碳每 1 公斤更新費用為 1,200 元估算，則約為 3,000,000 元/次；若以線外再生費用計算每公斤約為 350 元估算，則約為 875,000 元/次。活

性碳流體化床吸附冷凝系統冷凝下來之溶劑含水率一般可控制達 25% wt，則 1,500 SCMM / 1,500 ppmv THC 之廢液量為  $112 \text{ kgs/hr} \times 90\% \times 1.25 = 126 \text{ kgs/hr}$ ，設每公斤廢液處理費為 10 元，所以綜合而論一年之廢液處理費約為 1,000 萬元。

雖然固定式活性炭吸附塔是最為簡易之系統、且初設成本是最經濟，但是若要維持高 VOCs 去除效率，其所需花費之操作維護費用是最為昂貴、且需不定時常常更換，程序相當繁雜，以工廠人員可能無法應付如此作業；依照圖 2 以及假設有環境水分濕度等競爭性吸附，一般活性炭固定床在表面風速 0.5 m/s，其為達到 90% 之去除率時活性炭貫穿前之活性炭平均有效平衡吸附量約為平衡吸附量之一半(以去除 IPA 廢氣濃度為 500 ppmv 而言，THC 濃度約為 1,500 ppmv，則對照圖 2 所得之每 100 克活性炭平衡吸附量 16%、乘以 50%，則可得活性炭平均有效平衡吸附量約在 8%) 左右，而進行流量為 1,500 SCMM、THC 濃度為 1,500 ppmv，則每小時約有 112 公斤之 VOCs 產生(以 IPA 分子量 60 g/mole 計算)，故每小時需耗用 1,400 公斤之活性炭方能達到 90% 以上效率，而一般活性炭線外再生 1 公斤之平均費用為 30 元，則一年所需花費為 367,920,000 元，因此固定床活性炭較適宜低風量低濃度使用。若為處理如此高風量、高濃度之 VOCs 廢氣，固定式吸附塔所需之單座填充量約為 41.16 公噸，且所佔面積亦相當可觀，假設活性炭之體密度(bulk density)為  $500 \text{ kg/m}^3$ ，每單座吸附塔填充需體積 82.3 立方公尺，若吸附塔高度 4 公尺則佔地 20.5 平方公尺。

直接焚化法與觸媒焚化法在處理高濃度高風量 VOCs 廢氣亦是良好之處理系統，不過其系統荷重相當大，一般半導體及光電工廠因空調順暢及空間所得不易都將空氣污染防治設置在頂樓，如此在結構安全考量之下，往往就無法使得直接焚化法與觸媒焚化法獲得應用。觸媒焚化法雖然可節省燃料，不過若以某公司之觸媒市售價格，顯示該系統所使用之觸媒本身若以處理量能、每小時體積空間速率(volume hour space velocity, VHSV)為 40,000 來預估，其所需之觸媒購買成本為  $(\text{流量 scfm} \times 60) / \text{VHSV} \times (\text{NT\$}64,000/\text{ft}^3) = (1,500 \text{ SCMM} \times 60 / 1.69) \text{ scfm} \times 60 / 40,000 \times (\text{NT\$}64,000/\text{ft}^3) \approx 517 \text{ 萬元}$ 。依某廠之經驗，一般觸媒本身應用於光電業之失活平均壽命為兩年，所以平均一年約需花費 258 萬元之材料更換費，若觸媒因 HMDS 或

#### 46 次世代 TFT-LCD 產業揮發性有機廢氣處理設備之最佳化設置研究

其他重金屬毒化時，其花費將遠高過此費用。

冷凝法若應用在末端廢氣處理，其所耗費之廢液處理成本將較設置在就地處理端時來得高，且末端廢氣中又有較高之水分濕度、VOCs 濃度又被其他合流氣體稀釋，這樣冷凝下來之溶劑，不但濃度較低、含水率可能又較高，因此使用在末端處理相較不合宜。若冷凝器效率為 50%、VOCs 每小時量為 112 公斤及冷凝下來之溶劑含水率為 50%，則所產生之廢液約為  $112 \text{ kgs/hr} \times 50\% \times 1.5 = 84 \text{ kgs/hr}$ ，以每公斤廢液處理費為 10 元估算，一年所花費之廢液處理費約為 735 萬元。

生物濾床法是最為經濟、且自然之生物處理 VOCs 程序，但是所需要之生物處理時間較長，應用在大風量廢氣處理，相對地反應床所需要之佔地面積就要更大，在台灣地區寸土寸金之高土地成本環境之下，生物濾床法就較不適用；以新竹某半導體廠為例，風量 200 SCMM 左右，佔地面積約  $120 \text{ m}^2$ 。若以 1,500 SCMM 為例，應用生物濾床之佔地面積則需  $120 \text{ m}^2 \times (1,500/200) = 900 \text{ m}^2$ ，因此生物濾床是較為適合低風量之應用。

所以針對次世代 TFT-LCD 業高風量、高濃度之 VOCs 廢氣處理，係以沸石吸附濃縮轉輪焚化系統為較佳之考量；工廠若有瓦斯及火源安全考量，則建議選擇活性碳流體化床吸附冷凝系統。除了系統選擇合宜之外，廢氣之分流處理、依 VOCs 特性處理亦相當重要，所以自排放源頭時就依照 VOCs 特性進行分流之程序，並逐一針對 VOCs 特性予以特定之控制設計，以冀彰顯污染防制設備之效能：如去光阻製程所含 VOCs 屬水溶性、高沸點；光阻製程所含 VOCs 屬 PGME、PGMEA、HMDS、微量光阻固形劑 (polymer 類物質)；其他如清洗機台所含 VOCs 屬異丙醇及丙酮等。

針對去光阻製程所散逸之 VOCs，其因為高沸點 VOCs 不適用於線上連續脫附，如活性碳流體化床在  $300^\circ\text{C}$  高溫脫附所形成水解及碳化堵塞微孔現象或是沸石轉輪吸附濃縮焚化系統中不易脫附之現象，都會影響設施之效能。建議以冷凝技術配合吸收塔來分道施行控制，且目前技術可控制冷凝下之 VOCs 可達一定之程序，因此甚至可加以回收、去除所含水分再回到製程使用。去光阻製程概況及高沸點與其他 VOCs 之揮發來源如圖 4 所示。

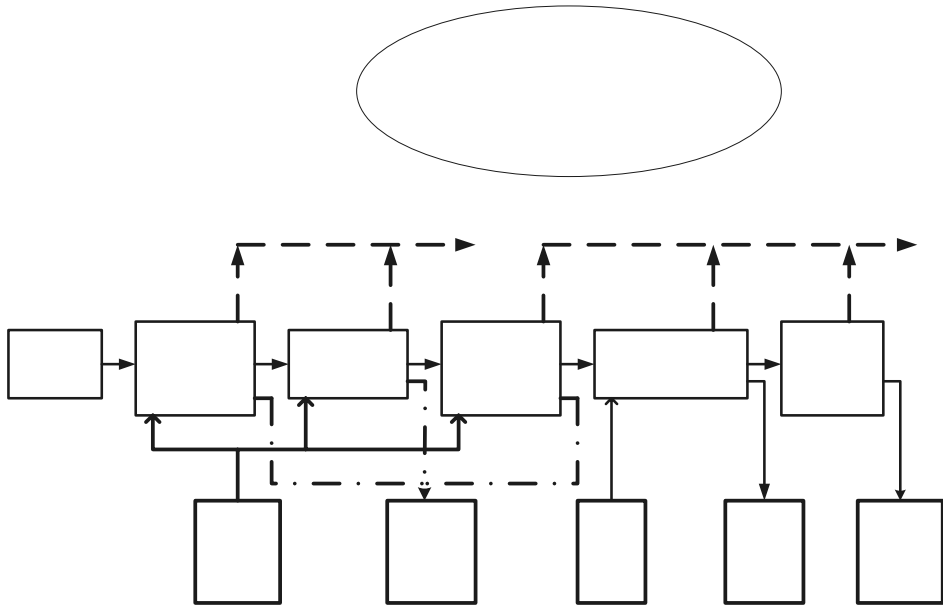
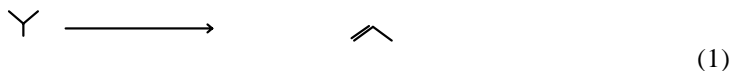
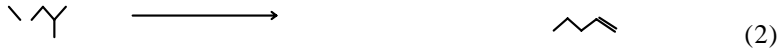


圖 4 去光阻製程簡要及高沸點與其他 VOCs 之揮發來源

至於光阻製程適用所揮發之PGME / PGMEA及其他如清洗機台所揮發之異丙醇及丙酮，建議可以使用沸石吸附濃縮焚化系統，此系統不論在實廠及學術研究上，對於連續操作吸脫附處理上述VOCs之效率值均可達到 95%以上。實廠運作後，所取下之沸石轉輪檢體顯示，HMDS對沸石轉輪不會造成任何的孔洞阻塞<sup>[23]</sup>；此外，活性碳流體化床吸附冷凝系統亦是控制PGME/PMGEA與異丙醇/丙酮效率可達 90% 以上之設備，不過本研究群在輔導裝置此設備之實廠時，首先發現當VOCs廢氣中同時混有PGME及異丙醇時，當一般設計飽和活性碳之有效脫附溫度操作在介於 250~400℃時，此兩物種將產生水解而形成幾乎不凝結且易爆易燃之丙烯類物質(如反應式 1 及 2 所示)。





除在活性碳顆粒上因丙烯重覆吸附、脫附及加熱、冷卻而可能於活性碳微孔洞形成碳化堵塞微孔影響吸附功能，不凝結丙烯也將蓄積在冷凝塔內影響脫附及冷凝功能。所以應用時需特別注意，需將 PGME/異丙醇分別分流控制，並調整脫附溫度避免形成不必要之水解反應問題；但其 VOCs 去除效率則不若沸石轉輪吸附濃縮來得高及穩定可靠。

## 五、結 論

本文針對現行 VOCs 控制技術提出分析，協助次世代 TFT-LCD 業規劃揮發性有機廢氣處理設備及處理措施。結果顯示，欲處理次世代 TFT-LCD 之 VOCs 廢氣首先必須先做好分流措施，如去光阻機台之高沸點 VOCs 物質(如 MEA、BDG 及 DMSO)，需要先行就地處理端先行處理控制，一些中低沸點 VOCs 再導引至管末進行處理，以確保管末終端處理系統之效能正常；管末處理設備之選擇，建議仍為在半導體業具有良好實績之沸石吸附濃縮轉輪並搭配 TO 或 RTO 爐作為最終焚化系統，由於其能長時間維持在高效率、且操作維護費經濟，因此仍是次世代 TFT-LCD 業較佳之選擇。若工廠有瓦斯來源考量及火源工安之顧慮，建議可以選擇活性碳流體化床吸附冷凝系統，搭配妥善 VOCs 分流處理措施，可讓次世代 TFT-LCD 仍然可達到法規之要求。

## 六、參考文獻

1. 行政院環保署，”揮發性有機物空氣污染管制及排放標準”，  
<http://w3.epa.gov.tw/EpaLaw/doc/040162.doc>，2004。
2. 行政院環保署，”汽車製造業表面塗裝作業空氣污染物排放標準”，  
<http://w3.epa.gov.tw/EpaLaw/doc/040156.doc>，2004。
3. 行政院環保署，”半導體製造業空氣污染管制及排放標準”，



- <http://w3.epa.gov.tw/EpaLaw/doc/040159.doc>，2004。
4. 行政院環保署，”聚氨基甲酸酯合成皮業揮發性有機物空氣污染管制及排放標準”，  
<http://w3.epa.gov.tw/EpaLaw/doc/040164.doc>，2004。
  5. 行政院環保署，”乾洗作業空氣污染防治設施管制標準”，  
<http://w3.epa.gov.tw/EpaLaw/doc/040169.doc>，2004。
  6. 國科會新竹科學工業園區管理局，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，新竹市，2001。
  7. 國科會新竹科學工業園區管理局，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，新竹市，2002。
  8. 林育旨、白曠綾、張豐堂，“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，23(1)，23-31，2004。
  9. Vatauvuk, W.M., “Part XVI: Costs of refrigeration systems,” Chem. Engr., 90-95, 1983.
  10. Vatauvuk, W.M., Estimating Costs of Air Pollution Control, Lewis Publishers, Chelsea, MI,  
1990.
  11. Zeiss, R. F. and Ibbetson, C., “Cryogenic Condensation Puts a Chill on VOCs,” Pollution  
Engineer, <http://www.pollutionengineering.com/archives/1997/pol0901.97/09adwlf0.htm>,  
1997.
  12. 張豐堂、林育旨、白曠綾、白寶實，“半導體產業 VOCs 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，新竹交通大學，1313-1319，2002。
  13. Yaws, C.L. Chemical Properties Handbook, McGraw-Hill Book Co.:USA, 1999.
  14. 張木彬、白曠綾、林宜長，新竹科學園區空氣品質環境保護計畫，1999。
  15. Blocki, S.W. Hydrophobic Zeolite Adsorbent: A Proven Advancement in Solvent Separation  
Technology; *Environmental Process*, 12(3), 226-230, 1993.
  16. 顏秀慧、鄭福田，”沸石對甲苯與丁酮之吸附研究”。第十三屆空氣污染控制技術研討  
會論文集，205-212，1996。
  17. US EPA Technical Bulletin “Choosing an Adsorption System for VOC: Carbon, Zeolite, or  
Polymers?” May, 1999.

## 50 次世代 TFT-LCD 產業揮發性有機廢氣處理設備之最佳化設置研究

18. Feng-Tang Chang, Yu-Chih Lin, Hsunling Bai, and Bau-Shei Pei, "Adsorption and Desorption Characteristics of VOCs' on the Thermal Swing Honeycomb Zeolite Concentrator", Journal of the Air & Waste Management Association, 53, 1384-1390, 2003.
19. F. T. Chang, Yu-chih Lin, Hsunling Bai, B. S. Pei and Ajay Gupta, "Effect of Operating Parameters on the Performance of ZSM-5 Zeolite Honeycomb Rotor for VOCs Treatment", 95th Air & Waste Management Association, Paper NO.43023, Session NO.AE-2b, 2002.
20. F.T. Chang, P.S. Pei and Y.K. Chuah, "Performance of Honeycomb VOCs concentrators for An Exhaust Gas.", 2000 8<sup>th</sup> Conference on Aerosol Science and Technology, 552-557, 2000.
21. Gupta, A.; Crompton D. Choosing the Right Adsorption Medium for VOC Control, Metal Finishing, 91(11), 68-72, 1993.
22. Mitsuma, Y.; Yamauchi, H.; Hirose, T. Performance of Thermal Swing Honeycomb VOC Concentrator, J. Chem. Eng. Japan, 31, 482-484, 1998.
23. 廖大惟、張豐堂、沈克鵬、粘竺耕、葉智雄，"光電業沸石濃縮轉輪處理系統效率提升改善實例探討"，2004 產業環保工程實務研討會。