

模組化 VOC 氣流亭之設計與工程實例 介紹

謝文德*

摘要

由於一般塗裝工廠之揮發性有機物為近年來工業污染防治工作之重點之一。本文將介紹一種空氣污染防治設備---模組化氣流亭，不僅能改善工作人員之安全衛生及有效控制周遭環境品質，工安與環保之結合勢必為未來之所趨，同時亦能達到工廠之清潔生產及節能減廢之目的。本文將以一鋼瓶塗裝工廠之工程實例作說明，提供工廠及相關業者參考。

【關鍵字】

1. 挥發性有機物(volatile organic compounds)
2. 模組化(modularized)
3. 氣流亭(environmental control booth)
4. 工安與環保(industrial safety and environmental protection)
5. 塗裝工廠(painting factories)
6. 清潔生產(cleaner production)

*工研院工安衛中心工業通風研究室研究員

一、前　　言

目前國內工廠普遍缺乏對 VOCs 的控制，不但造成作業環境空氣品質惡化，且影響周圍環境，若再經由光化反應(photochemical reaction)則產生更具危害性之二次污染⁽¹⁾。一般塗漆作業經常造成開放表面污染源之散逸，其中主要以油漆之甲苯(Toluene)、二甲苯(xylene)所造成的污染最嚴重。傳統氣罩乃針對點污染或局部污染捕捉有害氣體或粉塵，但對於面積廣闊的污染源只利用局部排氣系統其改善效果並不顯著，而且密集的氣罩、風管，除了維修保養困難、太佔空間、風機噪音問題嚴重，甚至會妨礙作業人員工作之順利進行⁽²⁾。由於傳統氣罩有以上諸多缺失，因此氣流亭產品乃蘊育而生，表 1 為氣流亭與傳統局排系統之比較表：

表 1 氣流亭與傳統局排系統之比較

項目	氣流亭	傳統局排系統
捕捉污染源能力	佳	有限
管路維修問題	無	有
噪音問題	不大	嚴重
設備所佔空間	不大	大
工作環境	佳	不佳
製作成本(單套)	稍高(視配備而定)	較低
模組化能力	強	無

由上表可知 ECB 不僅捕捉能力比傳統氣罩強，況且具有模組化功能，可因應作業空間大小而調整，可調性(flexibility)相當強。另外其不需要任合管路設備(no ductwork)，可減少安裝成本(installation cost)，而無管路維修保養問題，更可降低其運轉成本(running cost)。過去本研究室承接粉塵氣流亭工程案設計，對於粉體作業環境改善相當顯著，並獲得廠商一致肯定⁽³⁾。然而國內並未設計針對揮發性有機溶劑 VOCs 作業場所之氣流亭產品，究其原因或過濾 VOCs 與粉塵之濾材設計困難度不同，或處理污染源方式不同(如表 2 所示)等因素。一般控制 VOCs 方式包括：

燃燒焚化、凝結、吸附等各種方法，其中吸附法可處理低濃度廢氣，且 VOCs 可回收再利用，因此常被使用。以氣流亭結構而言，仍以活性碳吸附(VOCs)與過濾式集塵(一般粉塵)方式較適合。本文將以最近之鋼瓶塗漆業工程案例做為輔助說明，並對系統之各個元件之設計做詳細探討。

表 2 VOCs 與粉塵處理方式對照表

VOCs	粉塵
活性碳吸附	過濾式集塵
熱焚化	慣性集塵或離心式集塵(如旋風機)
觸媒焚化	重力集塵
冷凝法	靜電集塵
洗滌法	水洗式集塵(如噴灑塔、文式管集塵)

二、模組化 VOC 氣流亭之設計流程

模組化 VOC 氣流亭之設計流程如圖 1 所示，下節將針對各主要元件 (component) 之設計部分做詳細說明。

104 模組化 VOC 氣流亭之設計與工程實例介紹

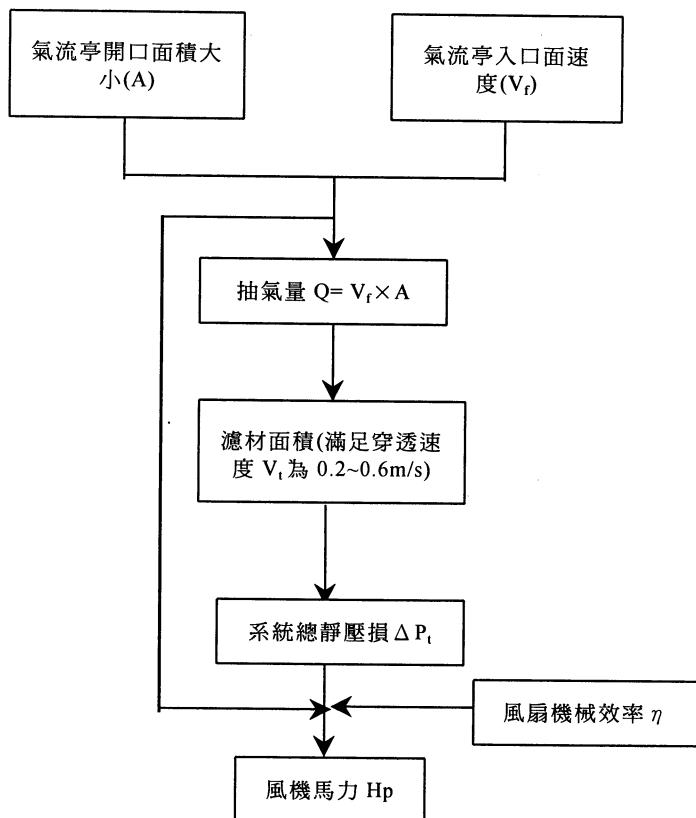


圖 1 模組化 VOC 氣流亭之設計流程

三、設計方法與工程實例

本案於鋼瓶塗漆區距測漏設備約 $8m^L \times 3m^W$ 的平面空間，設置四套 VOC 氣流亭，為配合現場作業方式之故，以活動式 PVC 簾簾(curtain)分成 A、B 二組，每組為二套 VOC 氣流亭，現場平面圖如圖 2 所示。圖 3a~b 分別為每套氣流亭之正視與側視圖，其各組合元件(component)設計規格如下所述：

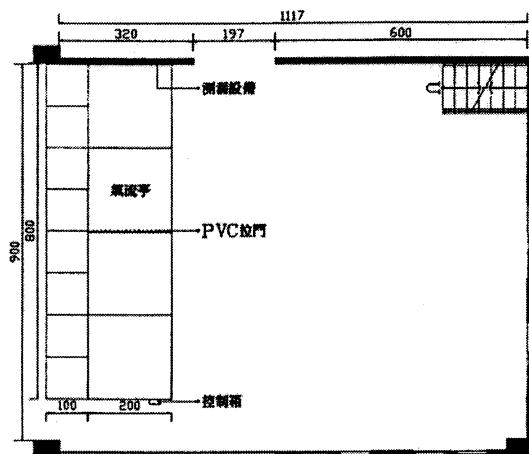


圖 2 塗漆作業區現場平面圖

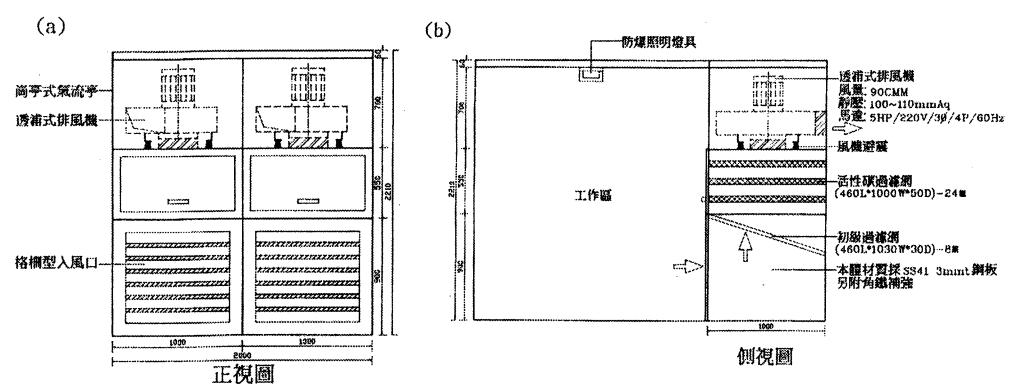


圖 3 (a)VOC 氣流亭正視圖、(b)VOC 氣流亭側視圖

3.1 氣流亭硬體

每套氣流亭尺寸為 $3m^L \times 2m^W \times 2.2m^H$ ，其中工作區為 $2m^L \times 2m^W \times 2.2m^H$ ，而過濾區為 $1m^L \times 2m^W \times 2.2m^H$ ，其材質為 SS41 3mm^t 鋼板。為符合勞工安全衛生法規 "有機溶劑中毒預防規則" 第 12 條⁽⁴⁾，包圍式(崗亭式)氣罩入口面之最低速度為 $0.4m/s$ ，本計畫以 $0.7m/s$ 為設計值，每套抽氣量 $Q=V \times A = 0.7m/s \times 60s/min \times 2m \times 2.2m = 184.8m^3/min$ (CMM)，每一個模組(module)其流量為 $184.8 \div 2 = 92.4CMM$ ，本案選擇 90CMM 為設計值。

3.2 空氣清淨裝置(air cleaner)

此部分為粉塵與 VOC 氣流亭之主要差異處，其中粉塵 ECB⁽³⁾ 主要以濾袋(bag filter)過濾各類之粉體粒子，網目(mesh)則針對粒子大小而定。而 VOC ECB 則主要以活性碳為吸附劑吸附 VOCs、各種廢氣及臭味(odor)。由於濾袋及活性碳之種類很多，並非在本文所探討範圍內，但與整個系統設計良窳有絕對關係。

由圖 2 所示，當 VOC 氣流由下方進入百葉窗型(louver)入風口，先經由細孔不織布(non-woven)之初級過濾網(如圖 4a 所示)，初級過濾網(pre-filter)卡匣(cartridge)先行過濾入口氣流中之雜質及較大粉塵顆粒，不僅可增加活性碳壽命，防止風管內堆積有機溶劑/粉塵引起火災，而且避免粉塵附著於風扇葉片上，造成風機馬達的損傷及能量的耗損。由於本案屬於低濃度 VOC 作業區，因此可採用薄層吸附床。至於活性碳濾網，本案採用波浪型(wave type)不織布活性碳卡匣(如圖 4b 所示)，為何不使用較普遍之顆粒狀活性碳(Granulated Activated Carbon, GAC)卡匣？由空氣污染控制工程之吸附法淨化氣態污染物中發現，氣流速度增大，不僅增加壓力損失，而且氣體分子與吸附劑(adsorbent)接觸時間過短，不利於氣體的吸附。氣體流速小，又會使設備增大，浪費成本與空間。因此吸附器的氣流速度要控制在一定範圍內，一般通過固定床吸附器的氣流速度，均控制在 $0.2\sim0.6m/s$ 範圍內⁽⁵⁾。此設計理念與粉塵濾袋(bag filter)之氣布比(濾布穿透速率)類似，一般建議值為 $0.0083m/s\sim0.05m/s$ ⁽⁶⁾，若高於 $0.05m/s$ 則其過濾效率則不佳。為使所設計之氣流亭能符合此一準則，進行以下性能(performance)分析評估：

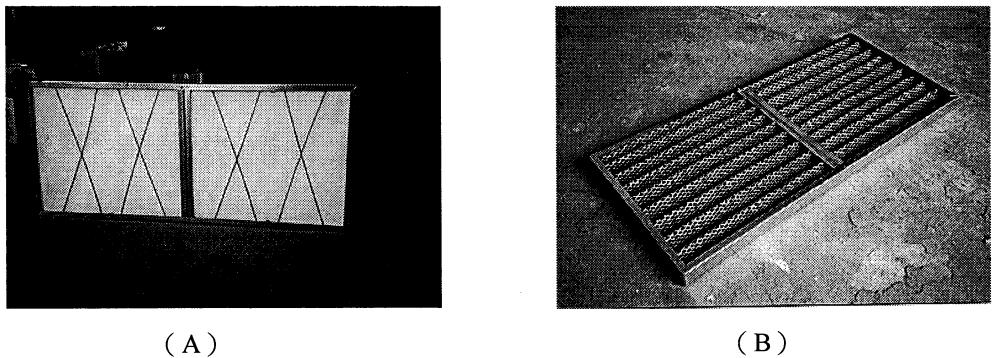


圖 4 (A)初級過濾網 (B)波浪型活性碳不織布

1. 顆粒式活性碳卡匣:

欲使通過活性碳之穿透速度(垂直於濾材之有效速度) V_t 介於 0.2~0.6m/s(本

$$A_c = \frac{Q}{V_t} = \frac{90 m^3 / min}{0.6 m / s \times 60 s / min} = 2.5 m^2 / module$$

案取 0.6m/s 為設計值), 每個模組之活性碳面積 A_c 計算如下式以每個模組過濾區之面積 $A_f=1m^L \times 1m^W=1m^2/module$, 90CMM 之流量通過此一面積其穿透速度高達 1.5m/s, 此吸附器形同虛設其吸附效果必定不佳。為了達到穿透速度 0.6m/s, (a) 必須將活性碳面積擴大為 $2.5m^2$, 過濾區改變為 $2.5m^L \times 1.0m^W$, 如此即違反模組化氣流亭結構體之緻密性(compactness), 亦即過濾區空間應小於工作區空間。(b) 若過濾區空間不變則此類卡匣要以波浪型式組成 $2.5m^2$ 面積, 無論從設備所占空間、成本及更換方便性均不符合吸附劑之工程設計理念。雖然顆粒式活性碳之吸附效率不錯, 但明顯地並不適合做為模組化氣流亭之清淨裝置。

2. 不織布活性碳卡匣:

由上述已知為使穿透速度達到 0.6m/s, 其所需的面積為 $2.5m^2$, 因此可將 $2.5m^2$ 活性碳不織布, 並將其製作成波浪型式, 放入卡匣中。由於波浪型活性碳不織布材質輕且不占空間, 加工成形性佳, 具相當大的彈性(flexibility), 因此本

108 模組化 VOC 氣流亭之設計與工程實例介紹

計畫採用每一模組 2 個卡匣，每個卡匣濾網面積為 $1m^L \times 1.2m^W = 1.2m^2$ ，如此其穿透速度約為 $0.6m/s$ ，已較顆粒式活性碳之 $1.5m/s$ 獲得 60% 之改善。

許多業主最初安裝空氣清淨設備時並未考慮活性碳設計是否符合上述原則，以致於事後發現 VOC 污染情形並未改善，於是業者乃增加活性碳濾材厚度。事實上增加厚度並無法改善活性碳穿透速度，以上述例子，若濾材厚度為 50cm 則 $1.5m/s$ 之穿透速率，只需要 0.3 秒即穿透厚 50cm 之濾材。一般活性吸收速率並不高，但業者常犯此項錯誤，而且活性碳濾材厚度增加不僅系統壓損增加，動力源馬力數亦同樣必須增大，才能達到所需求之抽風量。不僅浪費雙重成本，又無法改善捕捉 VOC 之效率，此點著實為工程設計案所最不希望發生的。可見濾材設計不當(本文主要針對活性碳濾材之穿透速率而言)，其所造成影響甚鉅，若濾材無法修改的話，最後整個系統必須重新設計(redesign)，所付出之成本更是十分可觀。本文提出改變活性碳設計理念，以增加過濾材之面積，達到穿透速率之標準，一方面是為希望業者能重視此項觀念，更重要者是為 VOC ECB 設計適合其規格之空氣清淨裝置。至於有關濾材材質之選用將是未來十分重要之研究工作，因為其與後續所探討之系統壓損與動力源估算有直接關係。

3.3 系統壓損估計

系統壓損的估算在局部排氣系統是十分重要且艱鉅的工作，一般傳統氣罩均有一些經驗式可估算其壓力損失(ΔP)，但 VOC/粉塵氣流亭其壓力損失主要源自於濾材部分，然而很不幸的這些濾材之壓損並無法獲得詳細的資料，事實上由於一般濾材廠商之濾材為國外進口，或因商業機密，或濾材技術(know-how)保密性，甚少提供這方面之資訊，這將是此類 VOC 或粉塵氣流亭欲商品化，所必須解決之首要之務。本案目前以一般活性碳濾材壓損為 $4inAq=101.6mmAq$ 預估之，合併入風口及尾管壓損等，本計畫系統總壓損 ΔPt 估計為 $110mmAq$ 。對於流量、系統壓損與風機馬力之 相互關係(correlation)，可由以下公式進一步分析了解⁽⁷⁾，假設 $\Delta Pt=\Delta$

$$H_p = \frac{Q \times \Delta P_f}{4500 \times \eta}$$

$P_{prefilter} + \Delta Pa.c. + \Delta Pfan + \Delta Pothers$ ，其中 $\Delta P_{prefilter}$ 與 $\Delta Pa.c.$ 是主要因素(dominant factors)，其它皆為次要因素，因此若本計畫一但 $\Delta P_{prefilter}$ 與 $\Delta Pa.c.$

能預測準確，再加上尾管口徑增大，相信本系統所需風機馬力數應可以再減少，對業者亦是節省投資成本，因此系統壓損的估算其重要性並不亞於濾材之設計。

3.4 動力及防爆系統

已知設計風量 Q 及壓損 ΔP_t ，則可由下列公式計算出風機馬力其中 η 為馬達機

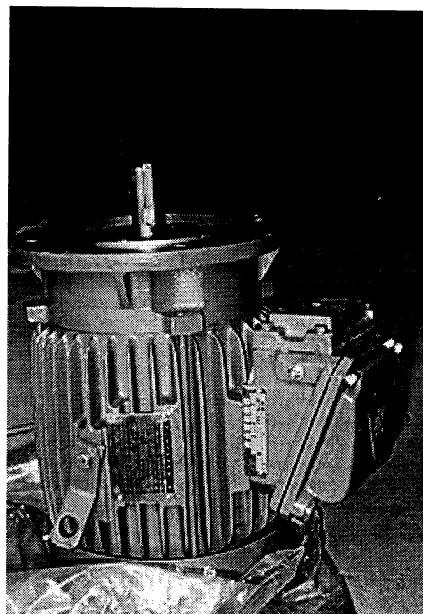
$$Hp = \frac{Q \times \Delta P}{4500 \times \eta} = \frac{90 \times 110}{4500 \times 65\%} \cong 3.4(Hp)$$

械效率(Mechanical Efficiency)，為了能達到所需要的風量，本案選用 5Hp 之三相 220V 馬達。由於考量本案塗漆作業區之安全性，馬達、氣流亭日光燈及二次側(二次配電)管路均採用防爆設備(如圖 5a~c 所示)。風扇採用離心式風扇(Centrifugal Fans)中之輻射型(Radial Type)(見圖 5d)，此類風扇其輪葉強度高於其它型式，常用於運輸粉塵或腐蝕性氣體，且葉片有自行清潔功能，葉片磨耗時容易現場更換，能作高速旋轉以獲得高靜壓值。風扇驅動方式則是採馬達直接驅動方示，此乃為配合 VOC/粉塵氣流亭較密實(compacted)之過濾空間，與傳統局排系統由皮帶(鍊條)驅動不同，容易維修保養，此亦為 ECB 之特色之一。

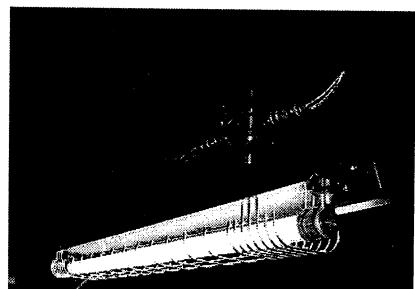
3.5 排氣尾管及採樣設施

對於有機溶劑其最小搬運速度 10m/s 左右，本案排氣尾管選用管徑 300mm 鍍鋅鐵皮螺旋風管，管內搬運速度經估算為 21m/s，因此風管壓力損失較高，為降低風壓損失可加大管徑。採樣設施包括煙囪防雨罩、採樣孔(100mm)、安全採樣平台、扶梯及電源設備(如圖 6 所示)。依據空氣污染防治法第二十一條第四項，檢測孔位置應設於造成擾流(如管道彎曲、收縮或放大處)下游大於管道直徑八倍處，該孔位置亦應距下一擾流至少二倍於管道直徑距離。本案檢測孔管徑 100mm，距肘管下游八倍直徑且距排氣出口上游二倍直徑。

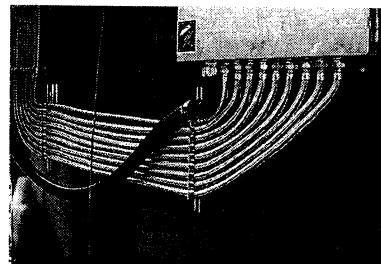
110 模組化 VOC 氣流亭之設計與工程實例介紹



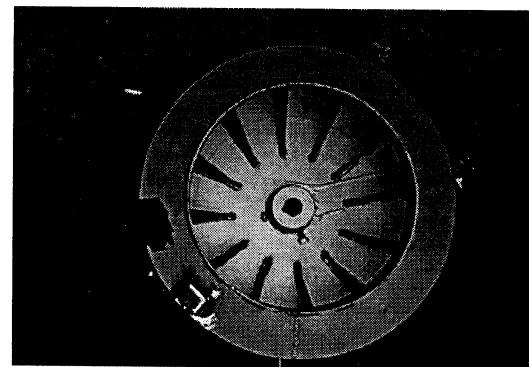
(A)



(B)



(C)



(D)

圖 5 (A)防爆馬達 (B)防爆日光燈 (C)防爆管路 (D)輻射型離心風扇



圖 6 排氣尾管及採樣設施

四、風速測定及甲苯、二甲苯濃度檢測結果

4.1 風速測定

圖 7 為氣流亭完工側視圖，本案於完工試車時，於氣流亭入口面平均速度經測試均大於 0.7m/s (見圖 8)，而於尾管所量測之平均流量亦在 90CMM 左右，因此均滿足設計值之需求。A、B 二組之流量與其入口面速度之量測值分別如表 2 及表 3，量測儀器為 TSI VelociCalc® Plus V/T/P/RH% Meter 流速計。

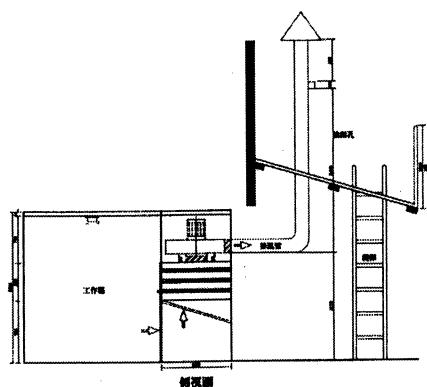


圖 7 VOC 氣流亭完工側視圖

112 模組化 VOC 氣流亭之設計與工程實例介紹

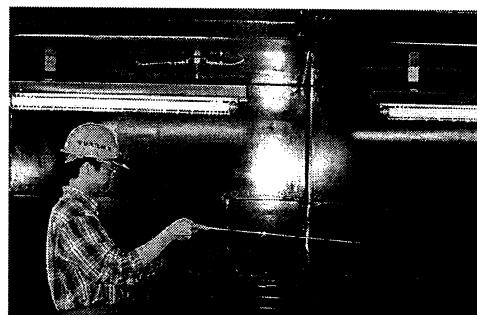


圖 8 氣流亭入口面風速量測

表 2 A 組流量與其入口面速度之量測結果

Q(CMM)	81	91.63	89	91.63		
V(m/s)	0.91	0.82	0.87	1.03	1.15	
	0.86	0.87	0.83	0.89	0.82	
	0.96	1.05	0.98	0.89	0.74	
V _{av} (m/s)	0.91			0.89		

V_{av}:每一套九個量測點面速度之平均值

表 3 B 組流量與其入口面速度之量測結果

Q(CMM)	90.9	87.77	91.7	88.55	
V(m/s)	0.91	0.82	1.02	1.06	0.94
	0.87	1.01	1.0	0.98	1.01
	0.95	1.04	0.89	1.0	0.85
V _{av} (m/s)	0.965			0.94	

4.2 作業環境檢測

作業環境檢測由認證之檢測單位於四套 VOC 氣流亭內總共取 10 點採樣點，以低流量採樣器加活性碳管(如圖 9a 所示)，配合氣相層析(GC)方式分析，其結果如表 4 所示：

表 4 VOC 氣流亭作業環境檢測結果

測定點	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
採樣 pump 流速(mL/min)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
採樣時間(min)	285	285	285	285	282	282	280	280	278	278
較正後採樣量(L)	55.21	55.21	55.21	54.63	54.63	54.24	54.24	54.24	53.85	53.85
分析物:甲苯(Toluene) 分子量:92.14 法定容許濃度:100ppm										
分析量(mg)	0.0068	ND	0.012	0.0075	0.0075	0.1886	ND	ND	ND	0.0069
空氣中濃度(ppm)	0.03	ND	0.06	0.04	0.04	0.92	ND	ND	ND	0.03
分析物:二甲苯(Xylene) 分子量:106.17 法定容許濃度:100ppm										
分析量(mg)	0.0136	0.0178	0.0296	0.0288	0.0371	0.0134	ND	0.0202	0.0106	0.0308
空氣中濃度(ppm)	0.06	0.07	0.12	0.12	0.16	0.06	ND	0.09	0.05	0.13

測定條件:氣壓 752mmHg 溫度:31.4°C

註 1:ND:未檢測出分析物

註 2:空氣中濃度:(ppm)=[待測物分析量(mg)/分子量]×[24.45(L)/校正後採樣量(L)]×10³

註 3:檢測單位:典試科技股份有限公司

由以上結果發現作業環境空氣中濃度之平均值為 0.2ppm，遠低於容許濃度，可見作業區之 VOC 污染源均被 ECB 有效捕集。

4.3 排放管道檢測

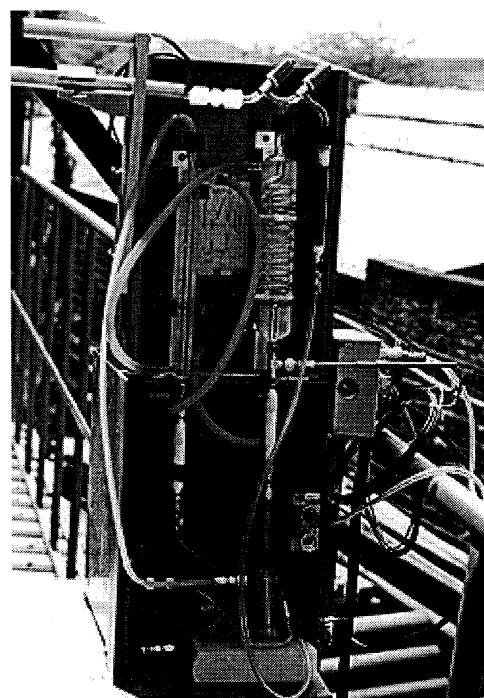
本案由認證之檢測單位選擇二個採樣點(二支排氣尾，管如圖 9b 所示)，以 NIEA A721.70B 氣相層析質譜儀 GC/MS 方法分析，其檢測結果如表 5：

由上表結果可發現，流速與流量值均與本研究室於完工試車時量測值相近。管路中流量較初次測試時之流量減少 5~6%，其原因乃由於初級過濾網已有塗漆 particles 堵塞(設備已使用二星期左右)，造成壓損增加，而使得流量減少。甲苯及二甲苯之測試濃度亦比標準濃度降低二個數量級(Order of Magnitude)。

114 模組化 VOC 氣流亭之設計與工程實例介紹



(A)



(B)

圖 9 (A)作業環境採樣檢測 (B)排放管道採樣檢測

表 5 VOC 氣流亭排氣管道檢測結果

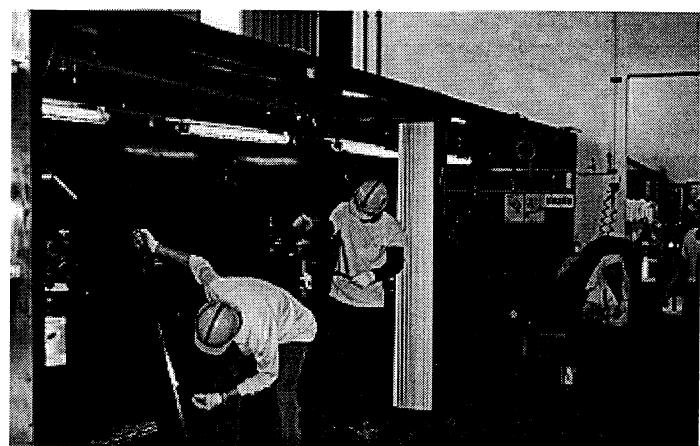
尾管 編號	相對濕 度(%)	溫度(°C)	速度 (m/s)	流量 (CMM)	甲苯量測 濃度 (g/s)	甲苯標準濃 度(g/s)	二甲苯量測 濃度 (g/s)	二甲苯標準 濃度(g/s)
P001	2.8	31.8	20.05	77	4.05×10^{-3}	0.151	4.05×10^{-3}	0.171
P005	2.7	31.5	21.47	85	7.74×10^{-3}	0.215	1.32×10^{-3}	0.248

駐:檢測單位:上準環境科技股份有限公司

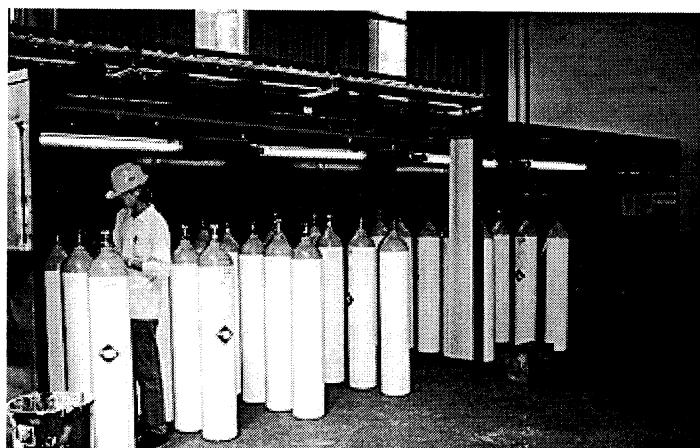
五、結論與建議

1. 本次工程所設計之模組化 VOC 氣流亭系統，對鋼瓶塗裝區確實達到良好的通風改善效果，員工反應均不錯(如圖 10 所示)。甲苯及二甲苯之作業環境與排放管道檢測結果，均低於容許濃度值(Threshold Limit Value，TLV)。
2. 本案例雖為低濃度作業區，但由作業區與排放管道之濃度差異，可發現作業區之 VOCs 均被 ECB 捕捉，同時波浪型活性碳不織布之穿透速度已控制在設計值範圍內，因此活性碳仍達到其吸附效率。未來工作將針對各種活性碳濾材效率進行評估⁽⁷⁾，以了解其真正性能，並建立相關資料庫(data bank)。
3. 由於初級過濾網經常會有阻塞現象而造成壓損增加，必須定期檢查更換，以維持正常功能之運轉。至於活性碳不織布視其塗層(coating)的量，亦須在固定工作時數(本案為 50 小時)後更換，以符合煙道排放標準。
4. 模組化 VOC 氣流亭經本次工程之驗證，具有取代傳統局排系統之潛力(potential)，是一項值得研發並推廣之技術，相信對工業界通風改善助益頗大。但本系統仍必須對其他不同濃度之作業環境進行測試，尤其是空氣清淨裝置之評估(assessment)如選用適當之濾材、壓損估算等，以探討模組化 VOC 氣流亭之適用性(applicability)。

116 模組化 VOC 氣流亭之設計與工程實例介紹



(A)



(B)

圖 10 氣流亭內(A)鋼瓶塗漆作業 (B)鋼瓶嘴除鏽作業

參考文獻

1. 蔣本基，活性碳物理化學特性對 VOCs 吸附之影響，工業污染防治，第 58 期，pp 144-162, 1996。
2. ACGIH, Industrial Ventilation-A Manual of Recommended Practice 22nd ed., American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1995,.
3. 陸忠憲, 粉塵/VOC 作業場所用氣流控制亭 FCB, 工業安全科技，第 25 期， pp15-19， 1997。
4. 行政院勞工委員會，有機溶濟中毒預防規則，1991。
5. 郝吉明，馬廣大, 空氣污染控制工程, 科技圖書公司, 1993。
6. 空氣污染控制技術訓練講義，經濟部工業局, 81 年 8 月。
7. 全陸詩, 通風經驗設計，徐氏基金會, 1974。
8. 柯澤豪，李建鴻，胡忠華，活性碳纖維之發展及其應用，化工技術，第六卷, 第四期, pp134-141, 1998。