

## 氣態廢溶劑回收技術

簡龍舜\* 呂芳仁\*\* 陳素梅\*\*\* 王震綱\*\*\*

### 一、前　　言

台灣每年由產業界所產生之氣態廢溶劑約在10萬噸以上，主要產生之行業如PU合成皮乾式製程、電子業、印刷業、膠帶業、塗料業、塗佈業等<sup>1</sup>，凡是製程中需使用到有機溶劑，且需經過烘乾或揮發等階段而得成品之各種行業，均有氣態廢溶劑之問題存在。以往，由於產業正值發展期間，故政府對於業界污染防治之要求標準並不嚴格，其所產生之氣態廢溶劑均直接排放到大氣中，不只造成空氣污染、破壞生態，也是資源之一大浪費，尤其是廣泛使用於電子業之清洗溶劑及冷媒之CFC，對於臭氧層之破壞，日益嚴重，已成國際間高度重視的問題，此即氣態廢溶劑未能有效回收利用所造成的生態問題。近年來環保意識高漲，政府及民間均已體認到環保工作及生態保護的重要性，因此，對於產業界之污染防治要求標準將日漸提高，產業界如何儘速投資於氣態廢溶劑之設備及技術研究，已是刻不容緩之務了。

### 二、流體化床氣態廢溶劑回收系統簡介

本系統包括兩大主要部份：吸附塔與脫附塔及其他附屬設備如送風機、氣升器(air lift)、冷凝器、分相器等所構成，為日本所設計、開發，商品名稱為GASTAK<sup>2</sup>，所使用的活性碳亦為該公司所開發、生產，商品名稱為 G-BAC<sup>2,3</sup>。圖1所示為GASTAK 系統之設備流程圖，其主要構造及操作原理說明如後。

#### 2.1 吸附塔

廢氣經由一氣體分散器，均勻地進入吸附塔中，含有溶劑的廢氣以設計流速通過篩孔板，使板上之活性碳流體化。再生之活性碳由最上一層落下，經橫向移動由堰(down-comer)落到下一層板，每一層板上之堰之位置與下一層板之堰之位置相對，使活性碳之

\*工研院化工所製程室技術員

\*\*工研院化工所製程室助理工程師

\*\*\*工研院化工所製程室副工程師

移動方向做連續改變，經處理過之乾淨空氣便可排出。

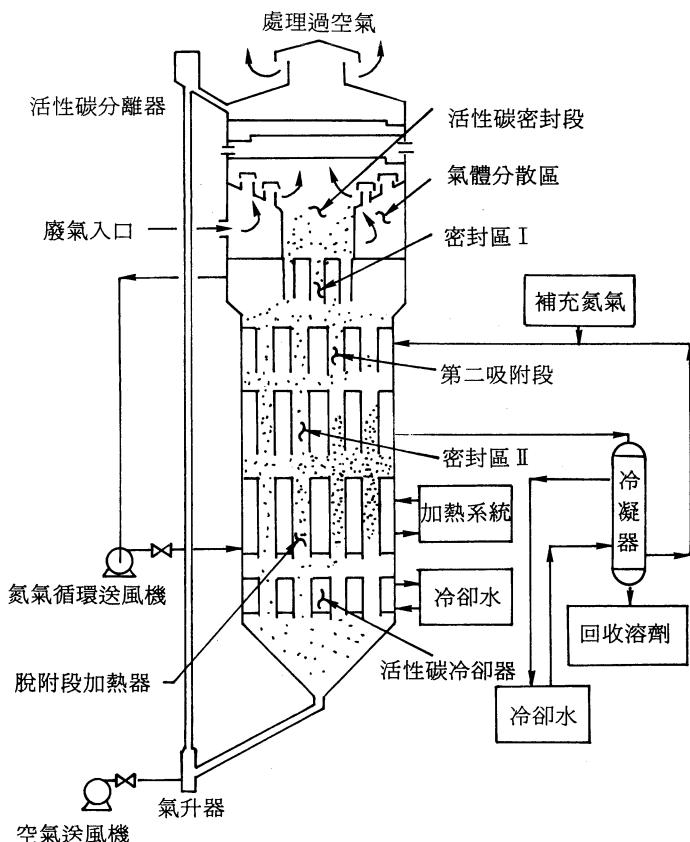


圖 1 流體化床系統(GASTAK)設備流程圖

此種堰的設計是為了使每一層流體化床維持在20~40mm之高度，以減低壓降及形成均勻之流體化床，整個塔之總壓降約在100~180mmH<sub>2</sub>O範圍，而廢氣之線速度在80~120 cm/sec，以獲得良好之流體化效果。

由於此種高氣體流速設計，所以系統之體積可以縮小，且廢氣與每一顆活性碳球均能均勻接觸，因此可獲得良好之質傳與熱傳速率，Naujokas<sup>4</sup> 曾進行一系列的實驗以探討熱點(hot spots)之形成與成長。熱點之形成原因是因為被吸附溶劑發生氧化作用所放出的熱使碳床溫度形成不規則上升的一種現象，根據實驗，氣體流速在35~40cm/sec以上時，不會有熱點發生，而氣體流速在40~50cm/sec時，所產生之冷卻效果可以將已形成之熱點消除。因此，在流體化床吸附塔中，由於氣體流速甚高，因而可避免熱點之形成、成長及碳床起火的危險，當廢氣中之溶劑含有醛、酮等反應性溶劑時，此項流體化床之特性即顯得特別重要。

## 2.2 脫附塔

含有溶劑之活性碳，掉到吸附塔底後，進入脫附塔或以氣升器，將其送到脫附塔中，脫附塔是由一系列密封區 (seal zones) 及熱交換器所組成，活性碳在塔中形成一移動床，經由這五個區域之管路往下移動。

脫附段是由管殼熱交換器 (shell-and-tube heat exchanger) 所構成，活性碳在管側被間接加熱，殼側以熱媒（如水蒸氣、熱油蒸氣）加熱，而惰性氣體（通常是氮氣）則往上升經這些管路，與往下移動之活性碳接觸，活性碳上吸附的溶劑即被脫附出來。

含有溶劑之脫附氮氣，離開熱交換器（脫附段）後，即進入冷凝器中冷凝回收溶劑。因為在密封區 II 碳床之壓降大於冷凝器及管路之壓降，故氮氣不會往上流動，而會進入冷凝器中。

離開冷凝器之氮氣中仍含有飽和濃度之溶劑（冷凝溫度下），若直接將此氮氣循環使用於脫附段，會使脫附效率降低，因此，許多 GASTAK 系統包含有第二吸附段 (secondary adsorption zone) 之設計，由冷凝器出來之飽和氮氣在此與 G-BAC 活性碳作逆流式接觸，進入第二吸附段之活性碳有足夠能力能吸附氮氣中剩餘的大部份溶劑，經吸附處理後之氮氣便可以以送風機送回脫附段中使用，如此氮氣構成一個循環迴路。

流經脫附段之 G-BAC 活性碳，進入冷卻段，冷卻段亦屬於管殼熱交換器，殼側通以冷水，將流經管側之熱活性碳冷卻到室溫。冷卻後之活性碳，則以氣升器將其送回吸附塔頂，繼續處理廢氣。氣升器中之遞送氣體，是以低壓送風機將周圍的空氣送入，而活性碳的循環速率可由氣升器中噴嘴間隙之調整來控制。

整個脫附段中是以惰性氣體維持，因此，此系統可以很安全地應用於當廢氣中之溶劑濃度超過最低爆炸界限 (LEL) 之範圍，由於脫附塔內是維持氮氣微正壓，因此，氧氣無法進入脫附塔中，而能保持安全操作，因為此種設計會有微量的氮氣由塔頂密封區 I 及塔底氣升器處洩漏，操作時必須補充部份氮氣到系統中，以彌補此部份之消耗。

此套 GASTAK 系統，沒有控制迴路及控制閥，所有的儀控設計只是在偵測系統中各處之溫度、壓力、氧氣濃度，及在不正常或不安全之操作條件下能自動停車而已。因此，操作上甚為簡便，且設計良好，很少需要人工操作維修。

## 2.3 G-BAC 活性碳

流體化床技術在氣體吸附上的應用，早在 1930~1970 年之間即已有很多人從事此方面之研究<sup>5~8</sup>卻沒有成功，最大的困擾即在於吸附劑之嚴重磨損。1970 年初期日本某公司成功地發展了一種球狀活性碳，商品名稱為 G-BAC，是由石油瀝青為原料，做成球體形狀，再以蒸汽進行碳化、活化，做成活性碳。由於其球體形狀（如圖 2），所以 G-BAC 具有相當良好之流動性，可以確保其能形成均勻之流體化床，且能很容易地在管線中流動輸送，而不致形成架橋，其流動性與各種活性碳之比較如圖 3 所示。

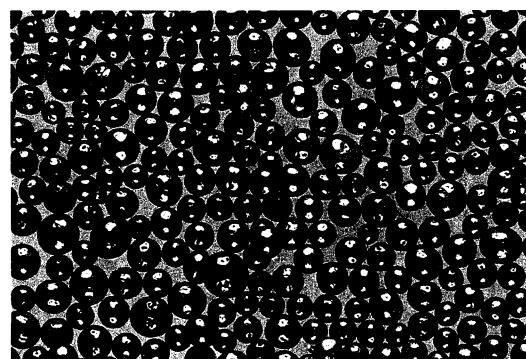


圖 2 G-BAC 之球體形狀

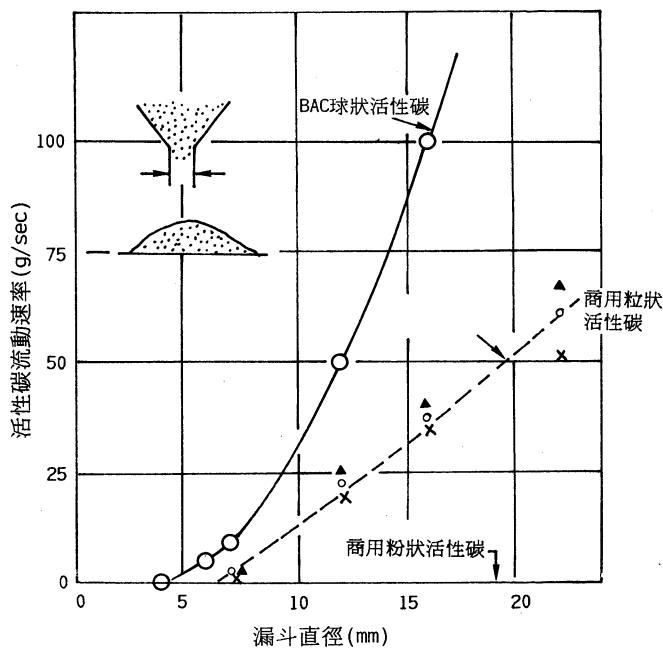


圖 3 活性碳之流動性試驗

每一個球體均具有均勻的結構及平滑的表面，所以不容易破裂及磨損，其良好的耐磨性質優於一般之顆粒活性碳（如圖 4 所示）。在 GASTAK 系統中，活性碳每年的耗損率低於 2%，而根據早期之流體化床系統之研究報告，活性碳之耗損率高達 50%。

G-BAC 活性碳之性質如表 1 所示，其吸附性質類似於一般之活性碳，而其具有之強度及流動性則可以和 GASTAK 系統配合，構成性能良好之流體化床吸附系統。

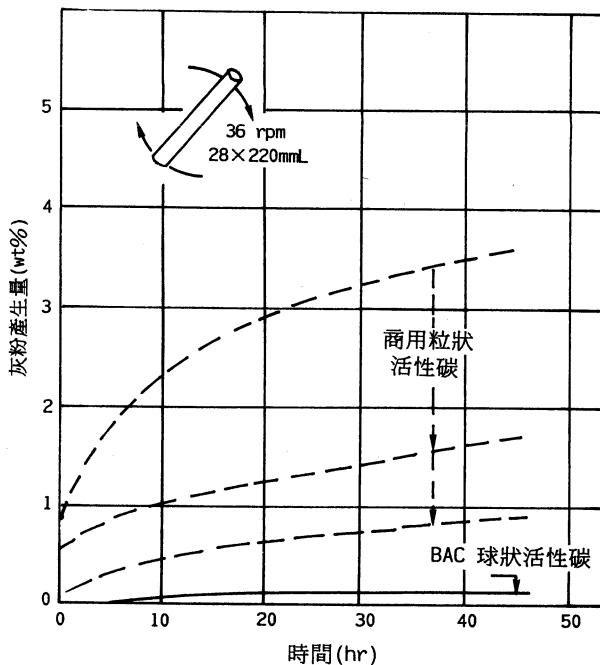


圖 4 活性碳之耐磨性試驗

表 1 G-BAC活性碳之性質

外 形	球 形
粒 徑	0.59~0.84mm
平均粒徑	0.7mm
假 比 重	0.58~0.61g/ml
表 面 積	800~1,200m <sup>2</sup> /g
吸 附 活 性	
• 苯	300~400mg/g
• 四氯化碳	600~650mg/g
強 度	98%
灰 份	~0.5%

### 三、流體化床系統之分類

流體化床式廢氣處理系統(GASTAK)依其用途不同，可分為六種，各有不同之適用範

圍，如氣態揮發溶劑之回收、脫臭以及目前舉世矚目之CFC 回收設備等；各種設備之特性如表 2 所示。

表 2 GASTAK之各種型式比較

型式	加熱媒體	脫附方式	主要用途	特徵
SS	水蒸氣	水蒸氣	一般溶劑回收	Gastak基本型式
SA	水蒸氣	空氣	氯乙烯 1,1,1-三氯乙烯 CFC-113 回收	操作費用低 回收溶劑含水率低 無冷凝水處理問題
SN	水蒸氣	氮氣	一般溶劑 水溶性溶劑回收	回收溶劑含水率低 無冷凝水處理問題
HN	• 热風 • 热媒油 • 電熱器	氮氣	一般溶劑 水溶性溶劑回收	回收溶劑含水率低 無冷凝水處理問題 處理氣體無臭化
HS	• 燃燒器 • 热媒油 • 電熱器	水蒸氣	脫臭	高溫脫附 處理氣體無臭化 脫附排氣燃燒處理
OS	水蒸氣 (直接加熱)	水蒸氣	氯化氫類回收	設備費特別便宜 不能使用高壓蒸氣

GASTAK在應用上，須根據不同之使用目的，而做不同之設計。以下以四種實際之溶劑回收操作為例子說明<sup>2</sup>，其操作條件與數據如表 3 所示。

#### [實例 1] 四氯乙稀之回收

此種溶劑廣泛地使用於乾洗業、金屬表面去油等用途。目前，此種溶劑之回收需求愈來愈多，一方面回收溶劑可降低成本，另一方面也可避免溶劑逸出污染環境，此種溶劑之回收可以用空氣脫附，因此，回收之操作成本低，且可得高品質之回收溶劑，含水率低。如圖 5 所示為  $15\text{Nm}^3/\text{min}$  之廢氣處理流程，脫附後之空氣冷卻到  $20^\circ\text{C}$  冷凝回收其中的溶劑，而空氣中仍含有少量之殘餘溶劑，再和進料廢氣合併進入吸附塔中處理，如此可以提高溶劑之回收效率，並減低排放空氣中之溶劑濃度。

表3 GASTAK在溶劑回收上之四種應用實例

溶劑	四氯乙烯	甲苯	四氯化碳	三氯乙烯*
原廢氣				
廢氣流量(Nm <sup>3</sup> /min)	15	240	50	9.3
溫度(°C)	40	47	25	20
濃度(ppm)	4,600	1,680	3,560	2,600
處理過空氣濃度(ppm)	30~40	≤50	≤50	20~30
脫附段				
氣體流量(Nm <sup>3</sup> /hr)	36(空氣)	80(氮氣)	70(水蒸氣)	47(水蒸氣)
溫度(°C)	145	160	140	110
活性碳				
用量(kg)	300	1,500	700	90
循環速率(kg/hr)	120	600	280	30
設備尺寸				
高度(mm)	5,200	8,000	5,600	5,200
吸附段(mm)	620φ	2,100φ	1,100φ	500φ
脫附段(mm)	840φ	1,320φ	850φ	450φ
吸附段板數	6	6	8	6
公用設施				
電力(kwh)	3.7	22	44.5	2.3
水蒸汽(kg/hr)	30	100	60	50
冷卻水(tons/hr)	0.6	3	8	1
氮氣(Nm <sup>3</sup> /hr)	—	0.5	—	—
回收溶劑量(kg/hr)	30	100	70	8

[註] \*直接加熱

### [實例 2] 甲苯氣態溶劑的回收

乃以氮氣做為脫附氣體，其操作流程圖如圖6所示，氮氣將溶劑脫附出來以後，進入冷凝器中，約90%以上之溶劑即被冷凝回收成液態溶劑，剩餘之氮氣再導入第二吸附段中（位於吸附段及脫附段中間）將殘存之溶劑除去，則氮氣中之溶劑濃度約可降至1,000ppm以下，此時，氮氣即可回到脫附段中做脫附氣體用，氮氣的補充量約占總循環量的0.5~3%，回收溶劑之含水率約0.05%。

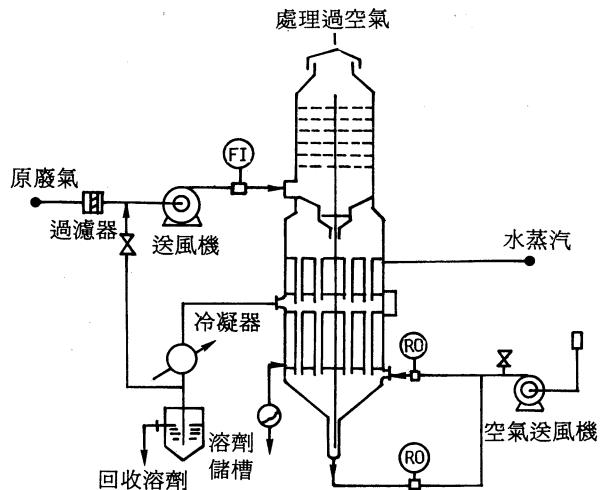


圖 5 四氯乙烯溶劑之回收流程

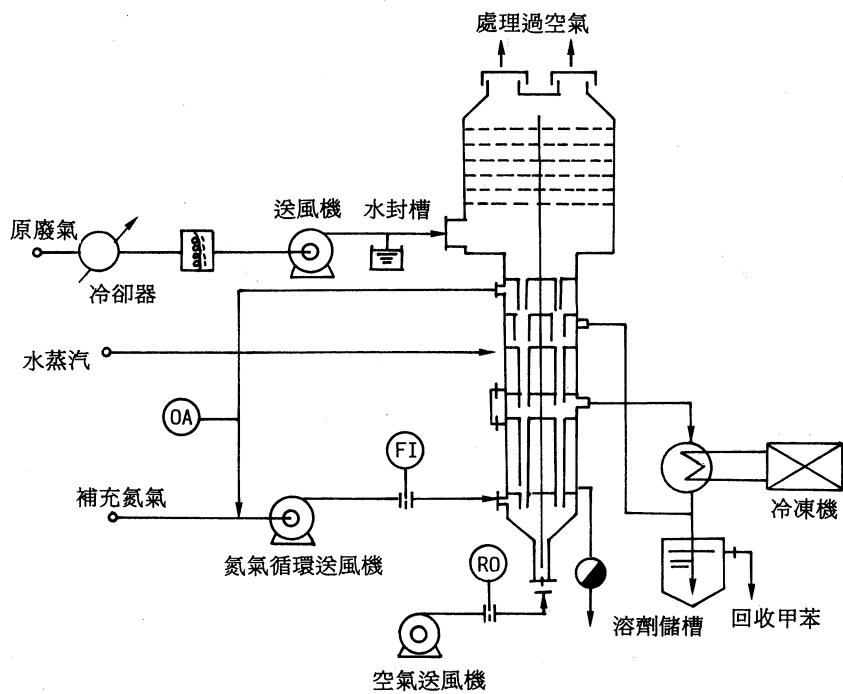


圖 6 甲苯溶劑之回收流程

[實例 3] 酸性類（如四氯化碳）溶劑之回收

在脫附時，若有少量之氧氣、水份及活性碳存在下，此類溶劑易分解產生鹽酸等腐蝕性物質會侵蝕脫附塔之金屬材質，因此，必須在脫附段加上襯裡，在這個例子中，是在脫附段內壁加上玻璃襯裡，而以電流通過活性碳床，使產生熱（四氯化碳非可燃性），再以蒸氣脫附再生，如圖 7 所示。

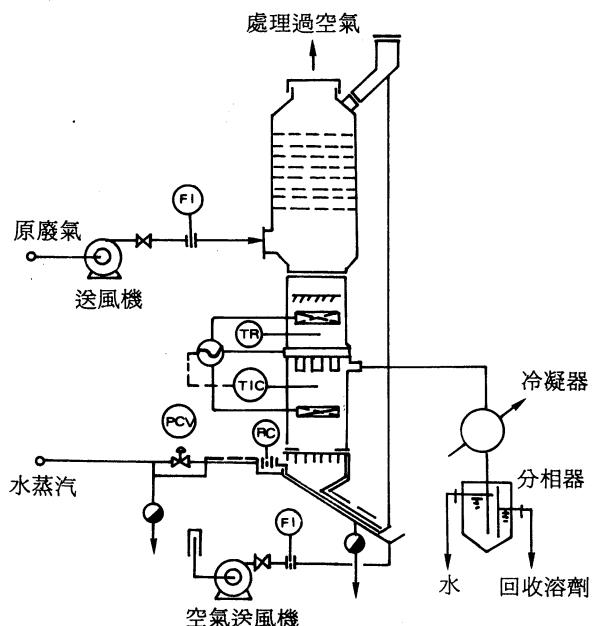


圖 7 四氯化碳溶劑之回收流程

[實例 4] 三氯乙烯之回收

三氯乙烯也是易於熱分解產生鹽酸的溶劑，此例中是在脫附段加上玻璃襯裡，再以蒸汽直接加熱再生，回收溶劑，如圖 8 所示。

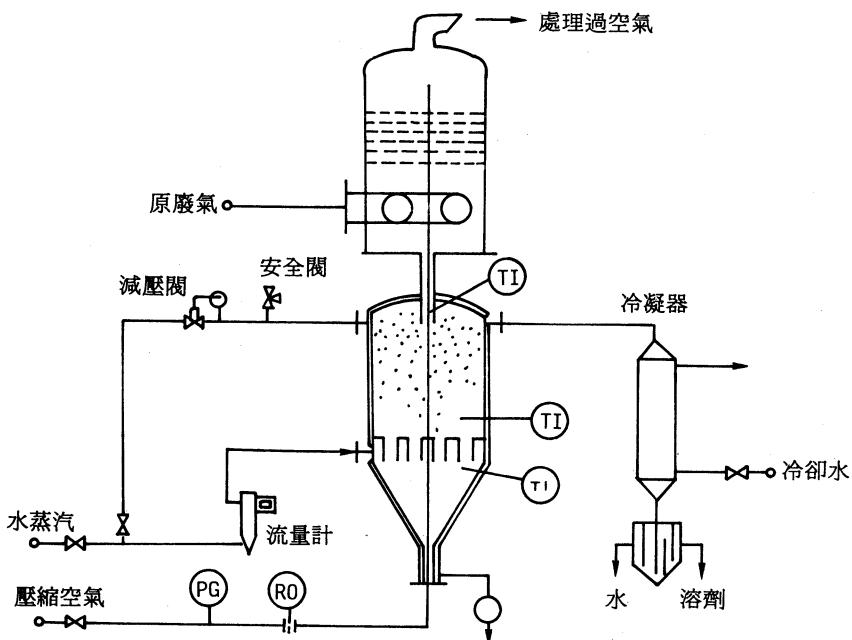


圖 8 三氯乙烯溶劑之回收流程

#### 四、GASTAK在PU皮乾式製程氣態溶劑回收之應用

在PU皮乾式製程中，會使用到大量的溶劑，這些溶劑在烘烤過程中，會由風管逸散到大氣中，所以排放的廢氣中便會有3,000~5,000ppm之氣態溶劑，不只是造成環境的污染，亦是資源之浪費。本研究即是以一家PU皮公司乾式製程風管所排出之氣態廢溶劑為對象，以 $1\text{m}^3/\text{min}$ 處理風量之小型GASTAK-HN試驗機，進行回收研究，其操作流程如圖9所示，廢氣中所含之氣態廢溶劑主要包含三種成份：丁酮(MEK)、甲苯(TOL)、二甲基甲醯胺(DMF)。

以往曾經使用過固定床系統，對於此種廢氣進行回收研究，但由於MEK是一種反應性溶劑，在碳床吸附時，會產生氧化作用，而放出大量的熱，形成熱點，而導致碳床起火，因此，接下來之研究工作，便以流體化床系統取代了固定床系統，以下即根據此套系統之操作變數及其安全性所作之說明。

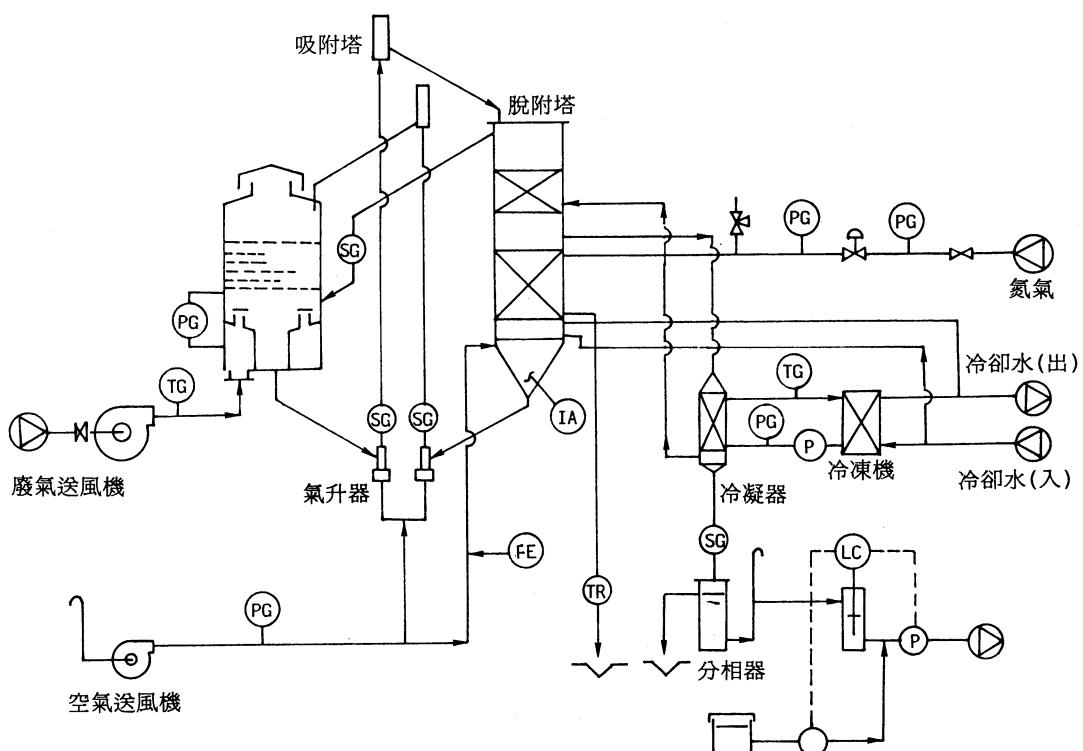


圖 9 GASTAK廢氣處理操作流程圖

#### 4.1 廢氣溫度之影響

由現場風管所排出之廢氣溫度約在 40~100°C 之間，根據吸附原理，溫度愈低時，活性碳之吸附能力愈好，為了觀察溫度對於流體化床系統操作性能之影響，我們在廢氣進入吸附槽之管線入口附近，以加熱帶將廢氣加熱以進行實驗。圖 10, 11 是進氣溫度 40°C, 60°C 時之操作結果，由結果可知，廢氣溫度 40°C 時廢氣之處理效果較好，排氣之濃度已低至 200ppm 以下，而廢氣溫度 60°C 時，處理效果較差，排氣之濃度會高至 500ppm 以上，因此，欲提高活性碳之吸附效率，達到良好之廢氣處理效果，現場之排放廢氣在進入吸附塔之前，須先降溫到 30~40°C 較為適當。

#### 4.2 脫附氮氣量之影響

吸附溶劑的活性碳在脫附塔中進行脫附再生，脫附時使用氮氣做為脫附氣體，活性碳在脫附段中加熱到脫附溫度後（約 150°C），以氮氣將溶劑脫附帶到冷凝器中進行冷凝回收，而脫附完成之活性碳又可以回到吸附塔中處理廢氣，因此，脫附用的氮氣量愈大

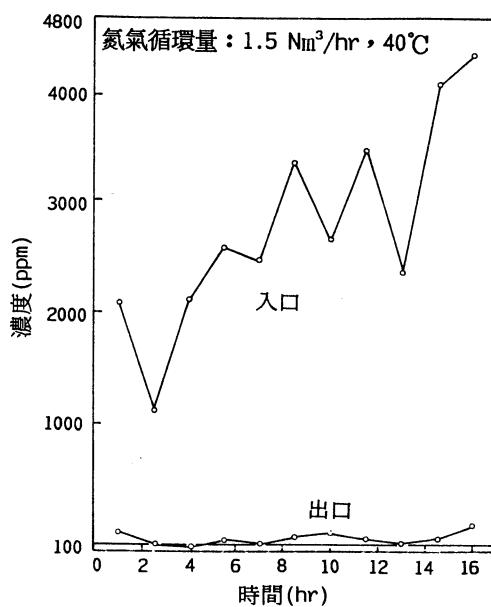


圖10 廢氣溫度對吸附效率的影響

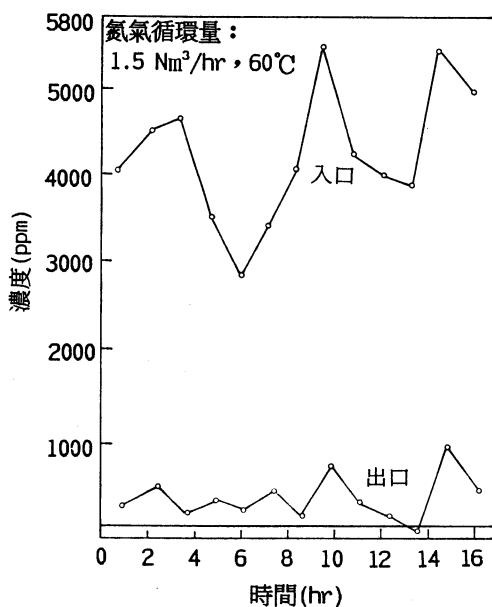


圖11 廢氣溫度對吸附效率的影響

，活性碳便會脫附愈完全，而殘留之溶劑愈少，在回到吸附塔時，其廢氣之處理效率便愈好。

脫附氮氣量有一最適用量存在，當脫附量太少時活性碳之再生不完全，則廢氣之處理效率降低，但脫附量太多時，則是成本的浪費，且容易使活性碳磨耗率增加，脫附氮氣用量和廢氣處理效果之關係如圖12所示，由圖中可以看出，脫附氮氣量在  $1.5\text{Nm}^3/\text{hr}$  以上時，可以得到較好之廢氣處理效果，排放廢氣濃度在200ppm以下。

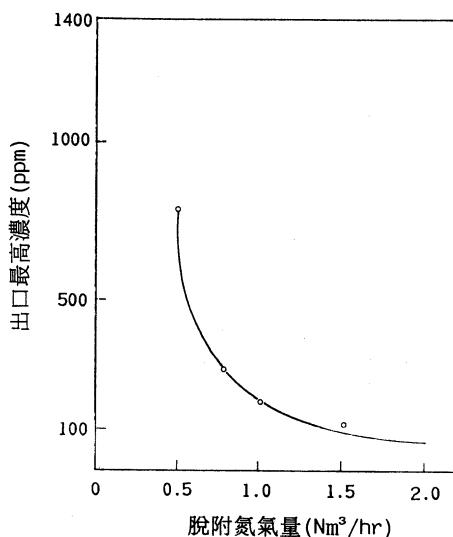


圖12 脫附氮氣量對廢氣處理之影響

#### 4.3 GASTAK系統之長時間安全性、穩定性運轉測試

為了驗證此套系統之操作性能及安全性，因此，在現場進行長時間之運轉測試，經過半年之操作及試驗，在適當的操作條件下，可以將廢氣有效處理至濃度100ppm以下，而已無碳床起火之危險，其連續操作情形及不同操作條件之處理效果如圖13所示。

本套系統為了安全上之考慮，設計有氧氣濃度偵測計，當脫附塔中之氧氣濃度達2%時會啓動警報器，而當氧氣濃度達5%時，則會自動停車。而系統在停止狀態時，均維持有200L/hr之保安氮氣流量流過脫附塔，因此，不會有碳床起火之危險，安全性高。

經長時間之運轉測試，此套系統可有效回收廢氣中之氣態廢溶劑，回收率達90%以上，而回收後之溶劑含水率約3~5%，須經過分離純化後，才可回到製程中使用。

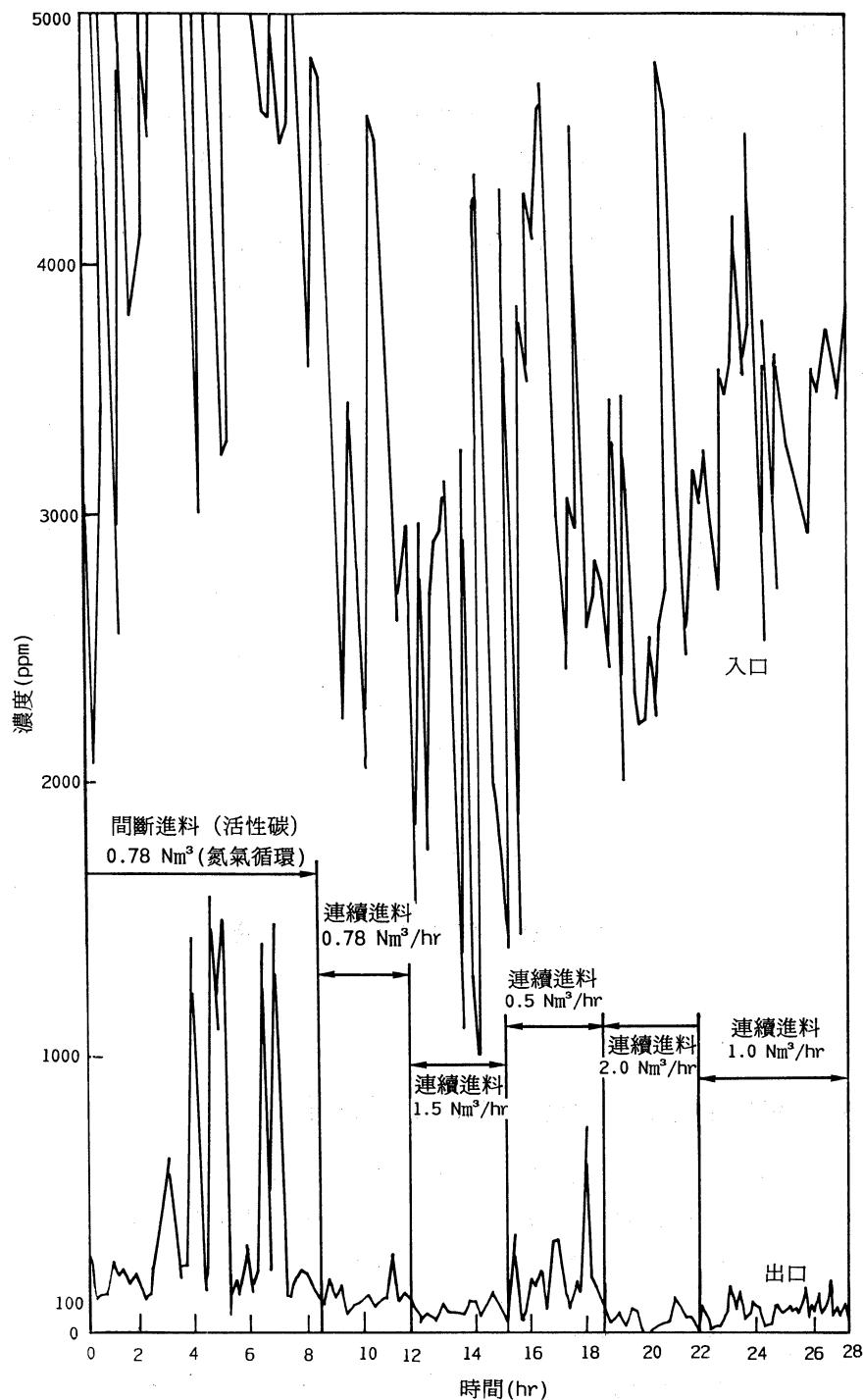


圖13 流體化床系統(GASTAK)之長時間安全性、穩定性運轉測試

## 五、回收溶劑之分離純化探討

經過GASTAK回收後之混合溶劑中，含有約4%之水份，而其製程中使用溶劑之含水率規格在1,000ppm以下且不帶顏色，因此，在回到PU皮乾式製程中使用之前，需要加以脫水除色處理，因此此套氣態廢溶劑回收製程包含氣態及液態兩部份，流程圖如圖14所示。回收溶劑之純化製程，由一支脫水塔及一支汽提塔所組成經由脫水塔蒸餾脫水後，可得無水混合溶劑，含水率在1,000ppm以下，合於規格，而所排出的水相中仍含有約10~20%溶劑，則進入汽提塔中，汽提回收其中之溶劑，而使塔底之排放COF<200ppm，可以排放。

由吸附塔回收之混合溶劑帶有淡黃色，經過脫水塔除水後，顏色會加深成黃色（比色計 $\alpha > 300$ ），經實驗探討，可以用活性碳或蒸發方式將其顏色除去，使 $\alpha < 20$ ，而得無水無色之混合溶劑，合於製程之規格，並能適用於乾式PU皮之生產製程。

## 六、氣態廢溶劑回收廠之興建

由於小型試驗機之運轉效果良好，經處理過後之廢氣均可合乎環保法規，且回收後之溶劑經分離純化後已可回到PU皮生產製程中使用，可以降低生產成本，因此該PU皮公司在化工所協助下已於81年投資數千萬元由日本一家公司購入此套大型氣態廢溶劑回收設備，於82年初已建廠，試俾完成，目前正順利運轉中，有效地回收廢氣中之氣態廢溶劑，改善了廠區之工作環境並達到污染防治及資源回收再利用的目的。

## 七、結論

以吸附方法處理廢氣是工業上經常使用的方法，其適用於廢氣濃度1,000~10,000ppm之範圍，處理效果好，吸附劑再生容易，且較為經濟。而流體化床吸附塔(GASTAK)經長時間之運轉測試，溶劑回收率高，可達90%以上，且安全性良好，以氮氣為脫附氣體，可避免碳床起火之危險。因此，很適合於氣態廢溶劑，尤其是含醛、酮等反應性溶劑之回收使用。

而回收後之溶劑，經脫水、除色之純化處理後，可以回到生產製程中使用，大大地降低了生產成本。

此套氣態廢溶劑之應用技術，不限於PU皮工業使用，凡是製程中會產生氣態廢溶劑之行業均可適用，若能廣為業界採用，相信必能有效解決台灣每年約10萬噸之氣態廢溶劑排放所造成的污染問題。

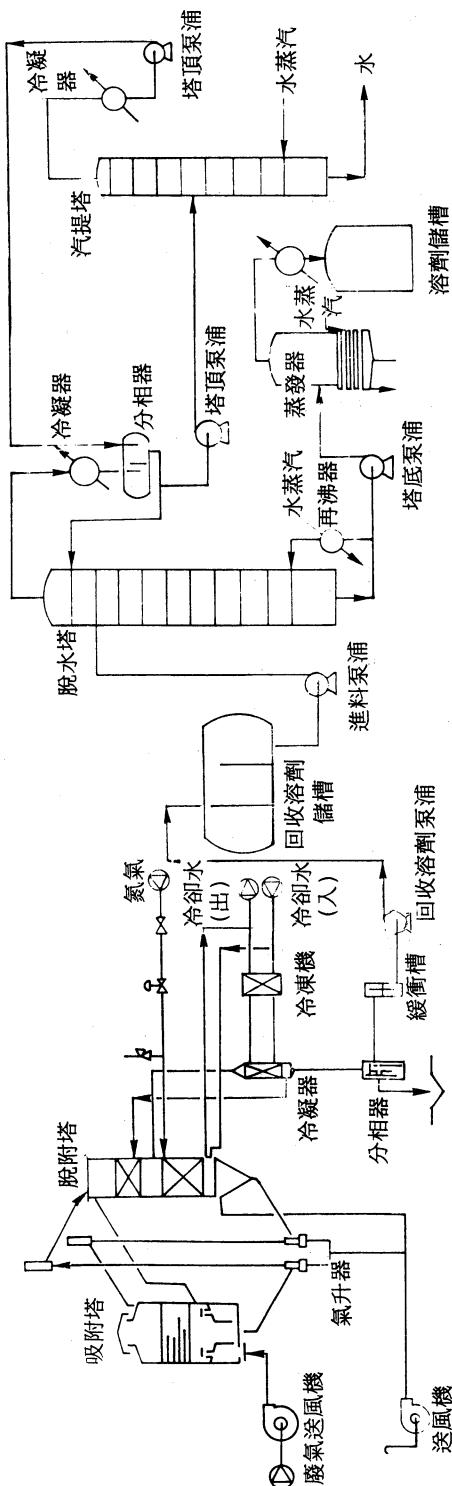


圖 14 氣態廢溶劑回收程序流程圖

## 八、参考文献

- 1.盧滄海、賴龍山，工業污染防治，Vol.29,p.102～117，1989年1月。
- 2.Yasuo Sakaguchi,Chemical Economy & Engineering Review, Vol.8,No.12(No.101), p.36～43,1976.
- 3.Nancy Golba and John W.Mason,Water-Borne & Higher Solids Coatings Symposium,p.265～278,New Orleans,LA,USA,Feb.17—19.1982.
- 4.Naujokas,A.A.Loss Prev.Vol.12,p.128～135,1978.
- 5.Pantenburg,V.U.S.Patent,No.1,784,536,1930.
- 6.Foster,A.L. Oil Gas J.Vol.47,No.15,p.90～100,1948.
- 7.Rowson,H.M.Brit.Chem.Eng.Vol.8, p.180～184,1963.
- 8.Avery,D.A;Boiston,D.A,Chem.Eng.(London),Vol.225(Jan.-Feb.),CE8-CE11,1969