

有機廢氣處理技術

空氣污染生物處理技術本土化之評析

邱創汎* 王耀銘** 張坦卿***

摘要

近幾年空氣污染生物處理技術在國外發展相當快速，國內也有多位學者及多處研究單位從事相關研究，本文首先簡單介紹生物處理技術之基本原理及處理槽類別。隨後即從生物濾床的特性，檢討該技術在台灣地區的適用性。根據分析結果顯示，生物濾床適用於低濃度廢氣的處理，目前國內工廠對於低濃度氣體處理意願不高，因此短期內推廣不易。未來若法規加嚴，強制工廠必需處理低濃度廢氣時，生物濾床所具有低成本的優點，值得工廠評估選用。

【關鍵字】

- 1.生物濾床(biofilter)
- 2.生物洗滌塔(bioscrubber)
- 3.生物滴濾床(biotrickling filter)
- 4.揮發性有機物(volatile organic compounds, VOC)
- 5.空氣污染(air pollution)

*邱創汎，美國普渡大學環工博士，工業技術研究院化學工業研究所研究員

**王耀銘，清華大學化工碩士，工業技術研究院化學工業研究所副工程師

***張坦卿，臺灣大學環工碩士，工業技術研究院化學工業研究所研究員

一、前　　言

空氣污染生物處理法顧名思義就是指利用生物來解決空氣污染問題的相關方法，廣義的範圍甚至包括廣植花木以降低大氣中二氧化碳比例的相關措施，但本文討論的範圍則限於在人造的反應器中，利用微生物來去除空氣中的污染物，以達到淨化空氣品質目的的處理技術。

生物處理法起源甚早，早自1920年即有人將廢水處理廠產生的臭氣以風管導入由土壤堆積而成的小丘底部，讓氣體通過土壤排出，藉土壤內微生物的作用去除臭味，亦即所謂的土壤濾床(soil bed)。隨後陸續開發出以其它材料(例如熟成之堆肥)替代土壤做成效果更佳的處理系統。生物濾床(biofilter)一詞也逐漸用來替代範圍較窄的土壤濾床。由於早期對濾床內實際發生的反應不甚瞭解，而且對此類生物濾床性能要求也不高，一切全憑土法煉鋼。根據報導，歐洲第一項有關空氣污染生物處裡的專利可能早在1934年就已提出了⁽¹⁾。但是早期技術發展緩慢，直到1980年代，由荷蘭學者Ottengraf為首，展開一系列對生物處理法的基礎及應用研究並大力推廣生物濾床，才使生物處理法在歐洲蓬勃發展，並擴展至其他地區。近年來，除了生物濾床之外，又陸續開發出生物滴濾塔、生物洗滌塔等其它型式的處理槽。應用範圍也由最早期的廢水處理場除臭，擴展至工廠排氣中揮發性有機物的處理。

國內在第十六屆廢水處理研討會(1991年)及第九屆空氣污染防治技術研討會(1992年)，就陸續有江氏⁽²⁾、高氏⁽³⁾及郭氏⁽⁴⁾等發表生物處理法之相關論文，至第十二屆空氣污染防治技術研討會(1995年)，相關之論文數目已增加至7篇，顯示國內參與生物處理法研究之人數有逐年增加的趨勢。至於在實廠應用方面，雖然至今尚無正式之統計資料，但已知至少有四家以上之工廠採用，許多工廠也紛紛評估生物處理法的適用性。

生物處理相關的技術原理在許多文章報導已有介紹⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾，本文主要的重點在從生物處理技術的特性檢討該技術在台灣地區的適用性，除可供作後續研發之參考外，也可作為工廠選用該技術的參考。

二、基本原理

生物處理法主要原理為利用微生物的能力去除空氣中的污染物，這裡所指的能力包括分解(3,3-dimethylglutaric acid分解成acetic acid及3,3-dimethylacrylic acid)、氧化(硫化氫氧化成硫酸)、轉化(丁醇轉化成丁酸)等反應。生物處理適用的對象以可被生物作用分解氧化的污染物為主。目前已知可以採用生物處理的污染物包括：碳氫氧組成的各類有機物、簡單有機硫化物、有機氮化物、硫化氫及氨氣等無機類。

值得注意的是，污染物通過生物處理系統的過程中，除了可能被生物作用轉化成其他無害性的物質之外，也可能是被物理吸附、溶解或進行化學反應轉變成其它物質。然而絕大部份的物化作用，除非不斷進行“再生”“補充”，否則終有耗盡之一日(少許除外)，因此要維持系統持續保有去除能力，生物轉化仍是生物處理系統不可或缺的機制。

三、處理槽型式

生物處理可概分為固定化微生物（生物濾床與生物滴濾塔）與懸浮微生物（生物洗滌塔）兩大型式。

無論是那一種處理槽，都具有類似的作用機制：空氣中的污染物首先必需由空氣中擴散至微生物膜(或微生物膠羽)表面的水層，再由水層擴散至細胞表面，經由微生物吸收進入細胞體內，後由一連串的酵素反應被轉化成產物，反應產物則循相反途徑傳送出來。處理槽的效率決定於污染物的傳送速率、氧氣的傳輸速率及生化反應速率。

3.1 生物濾床

生物濾床是目前使用最廣的生物處理法，其構造如圖1，其作用主要是讓空氣通過多孔隙的濾材，利用附著於濾材表面的微生物去除空氣中的污染物(與觸媒焚化器原理相似)。生物濾床的反應機制事實上已存在於地球上數十億年之久，我們只是提供最大的接觸表面積，讓污染物與微生物有充分的接觸；控制

濾床的溫度、濕度、pH值等，讓微生物在合適的環境下發揮最大活性，加速反應進行，提昇濾床效率。濾料(生物濾床內填充的濾材)需具有大量適合微生物附著的表面積，且孔隙度大、氣體流通散佈性良好，親水性及保濕性佳，不易密化、抗壓強度大，並能提供適當的營養源（如N、P、Fe、K、Mg、Ca、Ni等）和微生物生存的環境（如溫度、濕度、酸鹼值等），此外必須具有取得容易，品質穩定且價格適當等特性。在文獻中所應用的生物濾床多為土壤濾床和堆肥濾床，其成份大致為堆肥、泥碳土、牛糞或雞糞培養土與稻穀、蛇木屑、樹皮、保麗龍的適當比例混合物。

生物濾床的優點在於其比表面積可達 $1000\text{ m}^2/\text{m}^3$ 以上，遠大於其它處理槽（表1），而且其微生物幾乎是直接曝露於空氣中，質傳阻力遠低於其它反應器。結合這兩項特性，生物濾床對於低濃度氣體的處理效果，是其他處理槽難以競爭的。

生物濾床的缺點為濾料性質不穩定，微生物附著量與生物活性不易控制，酸鹼值不易控制和量測，一般濾床高度約只有1m因此佔地面積大。濾料易因重力壓迫或老化腐敗的因素而導致塌陷、密實、結塊，而使濾料的壽命難以掌握。此種老化密實的現象往往皆為不可逆，而且生物代謝產物可能會累積於槽內無法移除，進而影響長期操作，最後只得以翻堆或更換處理。

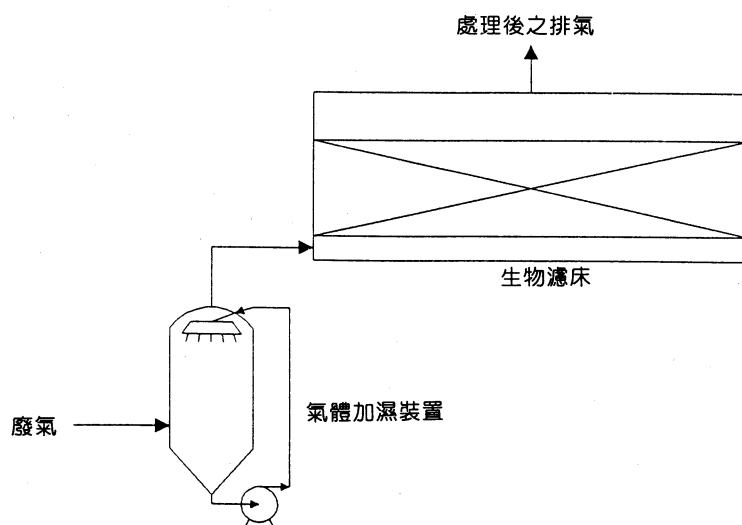


圖1 生物濾床示意圖。氣體加濕裝置目的為提高廢氣之濕度，以免濾料乾燥。部份濾床於濾料頂部設有淋灑系統在圖中沒有標示。

表1 三種主要生物處理槽之特性分析

處理槽種類	生物濾床	生物洗滌塔	生物滴濾塔
微生物狀態	微生物以菌落或生物膜型態散佈於濾料中	微生物懸浮於水中	微生物以生物膜型態附著於濾材表面
濾材比表面積或氣液接觸表面積 m^2/m^3	>1000	50-200	50-300
有效微生物量* kg/m^3	5-15	2-8	1-5
操作重點	濾料含水率是維持濾料活性的關鍵，一般濾床靠調整氣體的相對濕度或定期在濾料上淋水以調整濾料含水率。	洗滌液中微生物的濃度、營養份含量、pH值必需控制在最適當的範圍。 洗滌液必需維持於喜氣狀態否則會有酸敗或腐臭的問題。	循環水的噴灑量及其營養份含量、pH值必須控制在最適當的範圍。 濾材生長過度的生物膜必需清除。
營養補充	調配濾料時，已提供足夠之營養，因此操作時無需外加。	添加營養液	添加營養易於循環水中
多餘微生物之排除	無法排泥，微生物過度增殖會造成濾床堵塞。	排除微生物懸浮液並補充清水或營養液	反沖洗排除多餘之生物膜。
二次污染物	1.廢棄之濾料 2.廢水(調節濾床含水率的產生的廢水)	1.污泥 2.廢水	1.污泥 2.廢水

*有效微生物指的是可實際參予污染物分解的微生物而言。以生物膜為例，一般受限於質傳阻力，只有表層的微生物(約50-200微米)實際參予污染物的分解，底層的微生物因為缺乏基質或溶氧，對污染物的分解貢獻有限。

3.2 生物洗滌塔

生物洗滌塔，構造如圖2所示，主要是利用曝氣或液體噴淋的方式，使空氣與微生物懸浮液有充份接觸的機會，污染物由空氣中傳入水中，並由懸浮於水中的微生物分解。在生物洗滌塔中，去除能力受到質傳係數、氣液接觸面積

和驅動力的影響。對於低水溶性污染物質，液相的質傳阻力較大；對於高水溶性污染物質，氣相和液相的質傳阻力都必須一併考慮。通常洗滌塔是以攪拌或曝氣的方式來加大氣相、液相、微生物的接觸面積，並提高溶氧量及防止污泥結痂、堵塞、壞死。

生物洗滌塔的優點在於佔地面積較小，反應系統的酸鹼值及生物濃度、生物活性容易控制，易於應付不同的操作條件變動，可以改換污泥加以馴養以應付不同的污染物質。

生物洗滌塔的缺點為則為氣液接觸面積小，反應速率往往受限於質傳阻力，對於低水溶性的污染物效率不及生物濾床；且壓損大耗費能源；系統有起泡及堵塞的操作問題，目前仍少有成功的實廠案例發表。

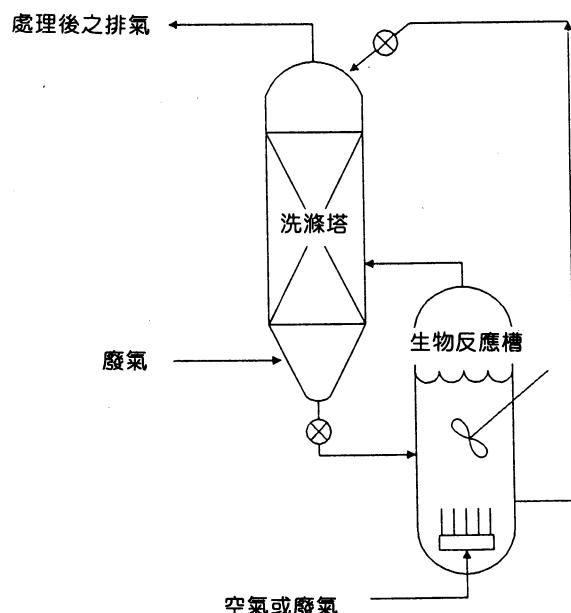


圖2 生物洗滌塔示意圖。於實際應用時，洗滌塔與生物反應槽可以合併成為一體。洗滌塔可以採用噴淋塔、曝氣槽、篩板塔等形式。生物處理槽曝氣的目的是防止溶氧不足。

3.3 生物滴濾塔

生物滴濾塔構造如圖3，微生物以生物膜的型態附著於塑膠濾材表面，空氣通過濾材時同時被微生物分解，調配有營養素的循環水不斷的淋灑於濾材之上，除保生物膜的潤濕之外，也提供微生物生長所需要的營養素。生長太厚的生物膜從濾材表面剝離之後，也靠循環水沖刷下來。

生物滴濾塔改善了生物濾床不易控制環境的缺點，微生物量也可經由排泥或補充污泥的方式控制，同時保有低壓損的優點。除此之外，生物滴濾塔採用塑膠濾材，處理槽可以設計成高塔狀，可節省土地。

但是生物滴濾塔為了讓循環水及污泥有足夠空隙通過，只能選擇低比表面積($50 \sim 300\text{m}^2/\text{m}^3$ 左右)的濾材，因而降低其效率。除此之外，在處理特定污染物時，生物滴濾塔也有類似生物洗滌塔的起泡困擾。

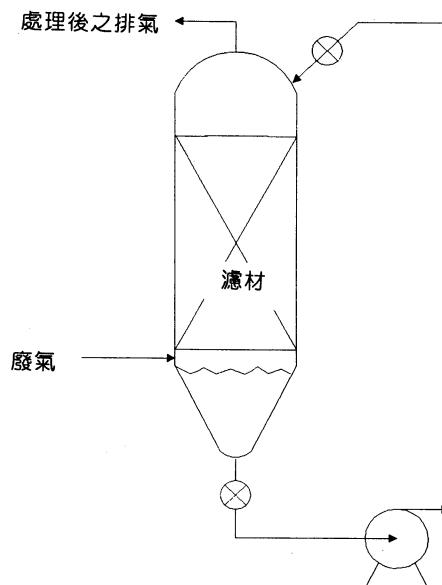


圖3 生物滴濾塔示意圖。廢氣可以由下而上或由上而下通過濾材區。

四、本土化之要件

常見文獻報導生物處理法，尤其是生物濾床，具有高效率、低成本，且完全分解(將污染物分解氧化成 CO_2 、 H_2O 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 等無害性之無機物)無二次污染之優點。嚴格說來，這種說法並不完全正確。一項技術的整體成本受許多地域性參數的影響，比較明顯的參數例如水費、電費高低，較少受人注意的包括土地價格、法令標準等。例如廢水處理中的氧化塘，不但去除率高，且操作成本低廉，沒有其他技術可與之競爭，在國外小型工廠使用頗多，但是相同的技術，在國內卻因佔地太大無法應用，因此技術能否在本土落實，技術本身的特質具有決定性的影響，廢氣生物處理法在國內推廣也有類似的情形。由於生物滴濾塔及生物洗滌塔仍屬開發中設備，尚有技術上待克服的問題，因此目前仍無法判斷彼等在本土的適用性。本文只針對技術較為成熟之生物濾床，探討該技術在本土的適用性。依生物濾床的技術特性分析，若該技術要在本土推廣必需先改善目前只適用於低濃度氣體的限制，其次必需克服現有處理槽體積太大、佔地太廣的問題，此外必需開發濾料含水率的控制及自動化的翻堆系統。

五、提高適用濃度範圍

已發表的生物濾床實廠長期操作的成功案例，大都使用於臭味去除及低濃度揮發性有機物的處理(1ppmv - 50ppmv)。在此濃度範圍，採用觸媒焚化及熱焚化雖然技術上可行，但需添加大量的燃料以提高氣體熱值，操作費用頗高。採用活性碳吸附或化學洗滌等處理技術也是可行的選擇，但活性碳及化學藥劑的成本往往令工廠卻步，因此生物處理法具有相對的競爭優勢。但是目前國內對臭味及VOC的管制標準仍屬寬鬆，此類低濃度排氣無需處理即可逕行排放。因此在法規修訂之前，生物處理技術若要在國內普遍推廣，必需在技術上突破濃度的限制，且證明在中高濃度範圍仍保持低成本的優點。

5.1 溶氧的傳送

生物濾床處理高濃度氣體，氧的傳輸速率是主要限制因子之一。氧化反應是生物處理主要機制，若是污染物濃度太高，導致生物膜底層或洗滌塔洗滌液內的溶氧不足，會使的微生物無法將污染物完全氧化。例如在溶氧充足的環境下，微生物可以將丁醇完全氧化成二氧化碳及水；但是若丁醇濃度太高，導致傳入液相中的氧不夠完全氧化丁醇，微生物可能將丁醇局部氧化成丁酸或丙酸之後，就無法繼續反應，因此系統中會有高濃度丁酸丙酸累積，這兩個化合物都是惡臭物質，在這種情況下，生物處理系統非但失去應有的處理效果，而且成為惡臭產生源。

Howell and Atkinson⁽⁸⁾曾推導出計算式可以用來估算生物膜內層是否會造成溶氧不足，Diks and Ottengraf⁽⁹⁾則利用該公式估算生物滴濾塔是否會因污染物濃度太高而造成生物膜溶氧不足：

$$\Gamma = \frac{D_o C_{oi}}{D_s V_{ols} C_{si}} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

其中：

D_o : 氧分子在生物層的有效擴散係數， L^2T^{-1}

D_s ：污染物在生物層的有效擴散係數， L^2T^{-1}

no/s：氯化單位重量的污染物所需要的氯量，無因次。

C_{oi} : 生物膜表面的溶氧浓度, ML^{-3}

C_{si} : 生物膜表面的污染物浓度, ML^{-3}

Γ ：溶氧指標，無因次

根據他們的推導，若是 $\Gamma > 1$ 就不會有溶氧不足的情況；反之，若是 $\Gamma < 1$ 則溶氧不足就很可能發生。若是進一步假設生物膜表層與氣相達成平衡，則可利用 EQ.1 推衍出 EQ.2。EQ.2 可以估算維持系統溶氧充足所允許的最高污染物濃度。

其中：

H_o ：氧的無因次氣液平衡常數，無因次

H_s ：污染物的無因次氣液平衡常數，無因次

C_{og} ：氣相的氧濃度，ML-3

C_{sg} ：氣相的的污染物濃度，ML-3

EQ.2可應用於推估生物濾床是否會有局部溶氧不足的情形。表二列舉一些常見的有機物，以EQ.2估算避免濾床生物膜溶氧不足造成中間物累積濾床內污染物的最高允許濃度。由結果中可以看出，溶氧不足容易發生在高水溶性的有機物。

表2 利用EQ.2估算為避免溶氧不足允許之濾床內濃度上限值

污染物	H_s (g/m ³)/(g/m ³)	$V_{o/s}$ gThOD/g	D_s m ² /sec	$C_{sg,max}$ ppmv
Methane	28.1	4	5.6×10^{-10}	35,000
Toluene	0.27	3.13	1.04×10^{-9}	400
Butyl acetate	0.01	2.11	0.8×10^{-9}	19
Butanol	0	2.59	0.8×10^{-9}	9.6
methanol	0.04	1.5	1.3×10^{-9}	25

* $D_o = 2.41 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$, $H_o = 34.4$

以上結果顯示，若要使用生物濾床處理高濃度水溶性污染物，氧的傳輸是主要的限制因子。若廢氣的污染物是間歇排放，濾床可以在低污染物濃度的時段進行再生，但是廢氣若是持續維持高濃度，則生物濾床可能因氧氣的傳送不足而無法發揮效率。

六、縮小處理槽體及減少處理槽佔地面積

根據文獻資料顯示，一般生物濾床氣體停留時間約15秒至數分鐘，以一分鐘附近最普遍。濾料填充高度約0.6-1.5 m，以1 m最常見，而濾料上下至少需

要各約0.5 m的空間以供安裝氣體分配及搜集的通路，因此一般濾床至少也有兩米高度。以排氣100 CMM (cubic meter per minute)為例工廠，濾床體積約200立方米，佔地約100平方米。對一般工廠而言，用地的取得可能是首要面臨的困難。

6.1 低濃度氣體

根據文獻報告，對於低濃度廢氣，生物濾床呈現一次反應的動力學行為，一般生物濾床氣體停留時間約15秒至數分鐘，主要是提供足夠停留時間以達到要求的去除率。要縮短停留時間而保有相同的去除率，除非使用粒徑小的濾料以提高濾料的比表面積。但是這與活性碳床為了增加氣固接觸面積，而採用小粒徑的碳粒一樣，雖可縮短接觸時間但會增加氣體通過的壓阻，且增加濾床堵塞的機會，在技術上有其困難性。

6.2 高濃度氣體

生物濾床是屬於生物膜反應槽。生物濾床因為無法排泥，因此其生物膜必須控制在一定的厚度，否則生物膜過度生長容易造成濾床堵塞。為維持濾床生物膜的穩定，濾床內微生物的增殖與衰減必需達成平衡。

假設生物膜內部沒有質傳阻力的在理想狀況下，生物膜內部基質濃度均一，則生物膜為了符合穩定生物膜的要求，其微生物增值速率必須低於或等於衰減速率，也就是

$$U_{ss} \leq \frac{K_d X}{Y} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

其中：

X：區域內微生物的濃度， ML^{-3}

U_{ss} ：維持濾床穩定操作之單位體積最大處理量， $MT^{-1}L^{-3}$

Y：基質/微生物轉化率(污泥產率)，無因次

k_d ：微生物衰減速率， T^{-1}

處理高濃度的廢氣時，生物濾床的停留時間主要決定於濾床的單位體積去除量(U)。根據廢水處理的經驗，微生物的 k_d 約為 $0.03\text{-}0.07 day^{-1}$ ，污泥產率Y值

約介於0.25-0.5 mgSS/mgCOD，生物濾床內微生物量約5-10 kg/m³，因此若以kd、Y、X分別為0.07、0.25、10代入EQ.3，可以求出生物濾床最大單位體積去除量約為2.8 kgCOD/m³/day。

若以甲苯為例，苯之理論COD為3.13，也就是濾床處理含苯氣體的最大體積去除量約為0.9 kg-Toluene/m³/day(38 g/m³/hr)。若以含甲苯1 g/m³(約300 ppmv)的廢氣而言，達到90%去除率所需要的停留時間約90秒，濃度愈高所需停留時間愈長。以上考慮的只是濾床本體(濾料部份)，若加上濾床上下所需的空間，加倍的停留時間是必須的。由以上的估算得知，處理高濃度廢氣，為避免濾床堵塞造成操作困擾，濾床體積非但無法縮小，反而需要加大。

七、濾料含水率控制與濾料翻堆

生物濾床濾料含水率為影響濾床效率的關鍵。長期通入低濕度的氣體，會使濾床水份逐漸被蒸發，嚴重時會使濾床乾燥而失去作用。即使進入濾床廢氣的相對濕度高達100%，仍然可能因濾床內進行氧化分解的放熱反應，造成水份蒸發。因此濾床大多設有頂部淋灑系統，以便必要時噴水增加濾料含水率，但是這種噴灑方式除了容易造成濾料中的小顆粒被沖刷至濾床底層，影響氣體流通之外，多餘的水份也會溶出濾料中所含的營養物，形成高濃度廢水排出。國外的濾床有些直接架設於地面上，因此多餘的水份會滲入泥土內；有些將多餘的水份排入廢污水搜集系統。國內工廠若已有廢水處理場，可利用既有處理場處理此股廢水，但對於沒有廢水生物處理廠的工廠，生物濾床廢水的處理是一個不可忽視的困擾。根本解決此一問題的辦法是改良生物濾床的濾料加濕方法，避免產生廢水。

先前提過生物濾床濾料會因重力壓迫或老化腐敗的因素而導致塌陷、密實、結塊，而必須定期翻攪(翻堆)，其頻率約三個月至一年需進行一次，目前該項操作仍仰賴人工執行，在操作上頗為困難，事實上，需要人工進行濾料翻堆，將是濾床推廣上最大的困難。除此之外，目前濾床濾料高度大都以1 m上下居多。理論上濾床可以採用多層化來減少佔地面積，但是如前所述，濾床在

濾料壓密時，需要以人工進行翻堆，多層化會阻礙此項工作之進行。因此翻堆的機械化不但可簡化濾床操作也可能縮小濾床佔地面積，是濾床本土化的關鍵技術。

加濕的改進與翻堆的機械化在技術上應無困難，但是一旦系統複雜化了之後，將使濾床造價大幅增加，生物濾床是否仍能維持低成本的優勢，必需重新評估。

八、結論

空氣污染生物處理法可依照處理槽形式分成生物濾床、生物洗滌塔、生物滴濾塔三種，其中以生物濾床技術較為成熟。生物濾床目前在國外主要應用於臭味或低濃度廢氣的處理。在國內現行法規管制下，工廠低濃度的廢氣大都無需處理可逕行排放，因此若在現階段要在本土推廣生物處理，必須在技術上改良，否則目前在國內應用機會不大。技術改良以擴大濾床的適用濃度，增加濾床效率以縮小處理槽體積，改善濾料含水率的控制與及翻堆的操作等為主要方向。但由以上的分析顯示這些改良有些受到濾床先天特性的限制，技術上難以突破；或有些基於經濟上的考量需深入評估。

未來若法規趨嚴，工廠選擇低濃度VOC處理技術時，生物處理技術，尤其是生物濾床是極值得列入考慮的技術，特別是對於用地不成問題且已有廢水生物處理場的工廠，生物處理法的效益將更為顯著。

參考資料

- 1.Ottengraaff, S.P.P; Diks, R.M.M., Process Technology of Biotechniques, Biotechniques for Air Pollution Abatement and Odour Control Policies, Dragt, A.J. and van Ham, J. (Editors), Elsevier Science Pub., pp 17-31, 1992.
- 2.江晃榮、春田一吉、Yochi, S., 微生物脫臭裝置之開發與應用，第十六屆廢水處理技術研討會論文集，pp 451-462, 1991。

- 3.高銘木、李素珠，利用除臭俊減除養雞場臭味之研究，第九屆空氣污染防治技術研討會論文集，pp 439-451, 1992。
- 4.郭盈顯、李勳宜、方鴻源，煉油廢氣生物處理，第九屆空氣污染防治技術研討會論文集，pp 453-466, 1992。
- 5.樓基中、蔡文立，以吸收生物分解法處理臭味廢氣，工業污染防治，第34期，pp 80-86，1990。
- 6.劉春木，微生物脫臭技術的現況和展望，工業污染防治，第37期，pp 81-96，1991。
- 7.吳俊耀，廢氣生物濾床處理技術，工業污染防治，第46期，pp 93-105，1993。
8. Howell, J.A. and Atkinson, B., Influence of Oxygen and Substrate Concentrations on the Ideal Film Thickness and Maximum Overall Substrate Uptake Rate in Microbial Film Fermenters, Biotechnology and Bioengineering, 18, pp 15-35, 1976.
9. Diks, R.M.M. and Ottengraf, P.P., Verification Studies of a Simplified Model for the Removal of Dichloromethane from Waste Gas Using Biological Trickling Filter, Bioprocess Engineering, 6, pp 93-99, 1991.