

活性污泥鬆化現象及其控制

張訓中*

一、前　　言

以活性污泥法來處理家庭污水或含有有機性污染物之工業廢水是目前廢（污）水處理常採用之方式，當家庭污水或工業廢水經由收集管渠進入污水處理廠時，必需先經過攔污柵、沈砂池、初步沉澱池等設施，以移除污水中較大型固體及可沉降物質，包括樹枝、碎布、砂粒等，其目的為保護處理廠中較下游之機械設備、管線及控制閥，增加處理池之容量、使用壽命，經過這些初級及一級處理程序，污水進入曝氣池中曝氣，再經二級沉澱池，可以除去溶解性之有機物及大量之生物污泥，這種二級生物處理法對生化需氧量（Biochemical Oxygen Demand, BOD）及懸浮性固體物（Suspended Solid, SS）之去除效率約在85-98%之間。由於活性污泥法之處理係藉著曝氣池中大量生長之細菌、微生物之新陳代謝，將污水中之溶解性有機物質分解消耗作為補充其食物及能源之來源，而將有機污染物去除。進入二級生物處理系統之污水水量、水質、操作方式、曝氣池生長環境等均將影響細菌、微生物之生長而改變處理之成效。由於活性污泥法對污水性質變化適應性大，有機污染物移除率高，故被大量的用於處理含有有機污染物之廢水，而在本項處理法中，通常存在有活性污泥鬆化之困擾，由於污泥發生鬆化會降低處理系統之成效，或造成系統失敗之結果，而必需重新培養污泥，不唯嚴重影響承受水體之水質，亦增加操作及維護之工作，本文將探討污泥發生鬆化之原因，可能產生之影響，及其改正控制之方法。

二、活性污泥鬆化現象及其影響

(一)活性污泥之沉澱

在曝氣池中大量生長之活性污泥必需在二級沉澱池中予以沉降分離，以產生清澈之上澄液或出水，達到設計出水水質之要求；良好之污泥沉澱可以減少出水中之懸浮固體濃度及生化需氧量。污泥沉澱可觀察其沉降性（Settleability）及壓縮性（Compressibility）而判斷是否正常，而沉降性及壓縮性通常以污泥之沉降速度（Settling Velocity, SV）及污泥容積指數（Sludge Volume Index, SVI）來表示，前者係指污泥靜置於量筒中產生層沉降之污泥沉澱速度，沉降速度快而連續表示污泥沉降性佳，後者係指1公升污泥於量筒中靜置30分鐘後量測污泥所佔容積，並分析污泥含量，以每克乾污泥所佔之容積為污泥容積指數，良好沉降污泥其SVI通常小於100，污泥沉降性與SVI之關係示於表一中。

活性污泥之沉降性與生物污泥之特性有很大之關連，而與其在曝氣池中之生長環境也有不可分之關係，事實上進流污水之水量、水質、pH、溫度、曝氣池中之溶解氧（Dissolved

*中興工程顧問社環境工程師

表一、污泥沉降性與 SVI 值之關係

SVI值	污泥沉降性
50	極佳
100	良好
150	普通
200	不良

Oxygen, D. O.) 濃度、污水停留曝氣時間等不同生長條件均會影響生物族羣之生長及數量，而產生不同沉降性之污泥，所以活性污泥系統之操作控制，必需將重點放在生物族羣之培養控制及適當之二級沉澱池設計，以將在曝氣池中大量生長之生物污泥適當的移除分離，產生清澈之上澄液，方能達到處理之目的。

(三)活性污泥鬆化現象

活性污泥鬆化 (Sludge Bulking) 係指在二級沉澱池中之活性污泥因沉降性及壓縮性不佳致沉澱緩慢或完全不沉澱，在此情況下，污泥之容積指數 (SVI) 趨高，沉澱池中污泥迅速堆積而溢流於出水中；這種現象有異於另外一種沉澱池之異常情形—污泥上昇 (Sludge Rising)，因為污泥上昇是指沉澱池有整塊污泥浮起，帶有氣泡上昇之現象，此時其污泥之沉降性及壓縮性均佳。其形成之主要原因係污泥在沉澱池之停留時間過久或因厭氣作用產生甲烷氣體，或因脫氮 (Denitrification) 作用而釋出氮氣，這些氣體上浮而將污泥帶起，因其與污泥鬆化成因不同，故在判別上必需小心，才能採取適當之改正措施。

(四)污泥鬆化之影響

污泥鬆化之影響包括：

- 1.破壞出水水質增加承受水體之負荷。
- 2.增加污泥系統之操作及能源消耗。
- 3.由於「沖洗」作用 (Wash-out) 而使處理系統失敗

這些影響分別說明如下：

- 1.當污泥發生鬆化時，二沉池污泥因不沈澱而堆積，至一定高度時會隨著溢流水排出而進入承受水體，如河流、湖泊中，這些污泥之流出增加排放水中之 BOD 及 SS 含量，一方面破壞了出水水質，另一方面也增加了承受水體的有機負荷。
- 2.在沉澱池中經沉降之污泥常需部份迴流至曝氣池中，以維持曝氣池中混合懸浮固體物之濃度 (Mixed Liquor Suspended Solids, MLSS) 及保持較高之有機物移除率，由於污泥壓縮性差、濃度低，為了維持定量污泥之迴流必需提高迴流率，同時為了減少污泥堆積厚度或去除沉降性不佳之污泥，也必需增加污泥之廢棄量，如此將增加污泥系統之操作及消耗較多之能源。
- 3.當懸浮固體物由沉澱池溢流出去，或增加污泥迴流及廢棄時，大量之混合懸浮固體物

(MLSS)，極易被「沖洗」出去，而使系統中之總懸浮固體物量減少，而降低處理效果，或造成「系統失敗」(System Failure)。

以下將就污泥鬆化現象產生之原因及其控制補救方法做詳細之討論說明。

三、活性污泥鬆化之原因

活性污泥若發生鬆化會破壞生物處理系統之質量平衡，影響處理效果，故國外早已有許多學者針對可能造成污泥鬆化之原因進行研究探討，這些因素包括活性污泥之菌種變異，系統之有機負荷及食微比 (Food to Microorganism Ratio, F/M) 過高，營養劑不足，污水負荷突變，曝氣流型不良等，希望能由形成原因中，找出控制補救之方法，現將各原因說明如下：

1. 污泥細菌種類之影響

活性污泥之菌種，基本上有絲狀菌及非絲狀菌兩種，而至目前止由許多學者之研究證實，絲狀菌 (Filamentous Bacteria) 之大量生長被認為是污泥產生鬆化之主要原因，當然絲狀菌之生長與污水水質、曝氣池之生長環境有密切之關係；生物污泥之沉降係由於污泥膠羽之形成，而污泥膠羽之凝結必需依賴非絲狀菌及少量絲狀菌之膠結纏繞而成，當污水中溶氧較低，或膠羽團中溶氧不高時，絲狀菌立即大量生長，由污泥團內部伸出於外，這些延長伸出部份將污泥塊隔開，使其無法結合成較大污泥團而沉澱，Storms 及 Jenkins 發現污水中約有20種以上之絲狀菌，其中在低溶氧狀態能大量生長的有 *Sphaerotilus natans*，在低食微比 (F/M) 能生長的有 *Microthrix parvicella*，在高含硫量時容易生長的有 *Thiothrix spp.* 及 *Beggiaota spp.*；在低溶氧時其他細菌之生長遲緩受抑制，而使 *S. natans* 之生長較 zoogloal 族羣之生長為快，而後者係污泥生長良好沉澱性佳之生物指標；Cheudoba 曾以顯微鏡檢查發現污泥沉降指數 (SVI) 隨絲狀菌存在之數量而增高，Finestein 及 Sezgin 等人亦量測絲狀菌之總長度，發現污泥容積指數與絲狀菌之總長度成正比，當每毫克乾污泥中含有絲狀菌總長度大於 $10^7 \mu\text{m}$ 時或其 SVI 大於 150ml/g 時，有顯著污泥鬆化情形發生，但是有部份學者亦發現污泥中如果沒有足夠之絲狀菌，則污泥膠塊之形成可能太弱或分散為小塊而無法沉澱，同時污泥中若有部份較短之絲狀菌，則可包圍纏繞部份污泥塊而沉澱，故活性污泥系統控制之較佳狀況為使絲狀菌及非絲狀菌之生長達一穩定而平衡之狀況，在此情形下污泥之 SVI 為最小，而有最佳之沉澱分離。

2. 曝氣池中之溶氧量太低

絲狀菌之大量生長是造成污泥鬆化的主要原因，但是絲狀菌在活性污泥系統中之生長卻受曝氣池中溶解氧濃度之影響，美國柏克萊大學教授 Jenkins 指出絲狀菌之生長始於污泥塊內部溶氧較低處，Palm 之實驗亦說明低溶氧為絲狀菌生長之主要原因，在這些實驗中，亦發現 *S. natans* 為主要之菌種，*S. natans* 在長期低氧狀態下能繼續生長繁殖，而其他細菌之生長則較遲緩或受抑制，故 Jenkins 建議曝氣池中之平均溶解氧濃度應維持在 2.0mg/l 以上，以確保污泥塊之內部有足夠之溶氧以防止產生適於 *S. natans* 生長之環境。

3. 有機負荷過高 (食微比 F/M 過高)

活性污泥系統之有機負荷係進入系統有機物量 (BOD) 與系統微生物之比，又稱為食

微比，食微比是活性汚泥處理系統之基準，不同的處理方式，如傳統式、高率式、階梯曝氣式等均有不同之設計值，以傳統式活性汚泥法而言，其食微比採用值約 $0.2\sim0.4$ kg BOD/kg MLVSS·day，前者即每天進入曝氣池之 BOD 量，後者為曝氣池中之微生物量，以揮發性懸浮固體物 (MLVSS) 為代表值，當系統之操作在高有機負荷，即 F/M 大於 0.3~0.4 以上時，容易有絲狀菌之生長而產生汚泥不容易沉降情形，Lngan 及 Budd 之實驗指出 F/M 值小於 0.3 時，汚泥之 SVI 值小，沉降性佳，而當 F/M 增高而大於 0.3 時，其 SVI 值迅速增加，Pipes 亦指出當 F/M 大於 0.3~0.4 時汚泥有顯著鬆化情形發生。事實上若進流水中含有大量容易分解之碳氫化合物，雖然 F/M 值未偏高，有時也會有汚泥鬆化之發生，可能是因為這類物質較易被分解利用，在短期內造成某種細菌類之大量生長，耗用大量氧氣，使曝氣池中之溶氧無法維持，溶氧降低則致生大量 S. natans 絲狀菌而產生汚泥鬆化之困擾。

4. 計養劑及微量元素不足

活性汚泥之生長必需供給適量之營養劑及微量元素，如氮、磷、鐵等，一般 BOD:N:P 之值約為 100:5:1 (重量)。污水中營養劑不足經部份學者研究發現亦會致生汚泥鬆化現象；Wood 及 Tchobanoglous 在其報告中指出，木材廢水因缺乏多種微量營養素而使絲狀菌大量生長，美國賓州大學吳永成博士之實驗亦證明 $SVI > 200$ 之汚泥鬆化主要為氮源不足所致。

5. 低 pH 值及低溫等不良生長環境之影響

當進流水之 pH 值較低且未經適當調整時，曝氣系統中容易有絲狀菌之生長，曝氣池污水溫度太低時，生物之新陳代謝作用緩慢，不利於膠團性細菌之生長繁殖，部份絲狀菌不受影響，在生長速率上佔優勢，此時容易形成鬆化之情形。

6. 曝氣系統之突增負荷

系統之突增負荷包括水力及有機物突增負荷，這兩種突增負荷有時加上機械設備損壞也會造成菌種之改變，絲狀菌生長之有利條件，這些因素如食微比增加，耗氧量提高而使溶氧降低或不足，部份營養劑供應不足等均是；一般工業廢水由於操作生產程序之需要，常做間斷性及高濃度之廢水排放，若未予以適當充份之調和而直接排入曝氣池極易有突增負荷之情形發生。

四、活性汚泥鬆化之控制及改正

當活性汚泥鬆化時必需要採取控制及補救之措施，以減少及去除因鬆化而產生不良影響，由於鬆化原因不同，首先必須經觀察取樣分析及記錄追蹤之步驟，判斷惡化之過程及原因，再採適當的補救改正方法，基本上改正方法可以分為下列三種：

1. 暫時性改正方法
2. 較長時性的改正方法以及
3. 永久性的改正方法

茲就各種可能採行之方法分述如下：

1. 暫時性改正方法

(1)添加化學氧化劑如氯 (Cl_2) 及過氧化氫 (H_2O_2) 用以抑制污泥中絲狀菌之生長，這種改正方法係假設絲狀菌有較大之面積／體積比，而對化學抑制劑之加入較具敏感性，易被破壞去除，所需加氯量據部份處理廠之實際經驗以 0.1 至 10 公斤之量加入於 1000 公斤之迴流污泥中，可得理想之效果，若加入過量會將有益於污泥沉降及有機物分解之原生動物類 (Protozoa) 殺死，並且抑制硝化作用，及由於細胞之分解而使出水混濁，故必需小心控制其使用量，也有以 $10 \sim 20 \text{ mg/l}$ 之劑量加入曝氣池中，使其濃度維持在 $5 \sim 10 \text{ mg/l}$ 左右；Jenkins 指出污水處理系統若配合有加氯系統可用於改正沉降作用，則系統污泥之 SVI 值雖稍偏高，出水仍能維持理想水準。過氧化氫通常加入於迴流污泥中，加入之濃度為 100mg/l 或更多，由經驗顯示加入量至 200mg/l 時對有益細菌生物仍無影響，但是在加入過氧化氫後，曝氣系統必需維持池內有適當之溶氧，有些學者認為加入過氧化氫之部份處理效果係由於供給部份溶氧所致，過氧化氫較常用於工業廢水污泥鬆化之控制改善。

(2)添加無機性混凝劑

加入混凝劑於污水中可以增加污泥在二沉池中之沉降性，以減少污泥因鬆化溢流之流失量，經常使用之混凝劑有多元聚合物、鋁鹽、鐵鹽及石灰等，而石灰及鋁鹽之添加會增加污泥中之惰性污泥量，且若加入過量會影響曝氣池生物系統之操作，使用這種方式因加入混凝劑量不易確定，且未能根本消除絲狀菌生長之原因，實際效果不大。

(3)增加迴流及廢棄污泥量

增加迴流污泥量主要功用為保持污泥於曝氣系統內，減少污泥在二沉池中堆積或溢出，增加廢棄污泥量一方面可以達到上述之目的，另一方面可以去除部份之絲狀菌，但是這兩種方法均未能減除絲狀菌之生長。

2. 較長時性之改正方法

(1)調整供給氧氣量

由於絲狀菌在低溶氧時大量生長，故調整曝氣系統之供氧量亦為可行之改正方法之一，若系統之曝氣設施容量充份，可經由操作調整增加供氧量以提高曝氣池中之溶氧，若原設置曝氣容量不足，無法增加供氧量，則必需增置曝氣設施，充份供給所需之氧氣，以節用能源之觀點言，曝氣池之最低溶氧量可維持在 0.5mg/l 即可，但因污泥在二沉池中仍需呼吸消耗氧氣，如最好在曝氣池出口處再提高污水之溶氧量至 2.0mg/l 左右。

(2)供給必需之營養劑

污泥鬆化經判斷若因營養劑不足而引起，則必需加入適量之營養劑。如氮、磷、鐵鹽等以改善生物之生長，加入量需將水樣經分析計算後得出，同時必需適時適量的加入營養劑。

(3)調整系統之食微比

就整個活性污泥系統之控制及負荷而言，較恰當之改正方法為檢討及調整系統之食微比，可行之方式為控制進流污水之流量，藉增加迴流污泥量提高曝氣池中混合懸浮性固體物之濃度，若系統負荷量增加，相對的也必需增加曝氣供氧量，若系統處理量不足，則必需增建處理設備以平均系統之有機負荷。

3. 永久性之改正方法

(1)曝氣池採用栓流(Plug Flow)流型

曝氣池之設計基本上有兩種流型即完全混合式(Complete Mix)及栓流(Plug Flow)式，前者係使進流污水與曝氣池中混合液完全攪拌混合，後者係較狹長式之流型，污水多做徑向之混合，此種流型初期基質(Substrate)濃度較高，增加zooglae之生長，而後濃度做梯度遞減，亦使沉降性較低之生物性族羣大量生長，而增加污泥之沉澱性。

(2)在系統中加入缺氧段(Anoxic zones)

在曝氣系統中加入缺氧段，通常用於有硝化設計之活性污泥廠以加強除氮作用，若將此缺氧段改設於曝氣池之入口處，使進流污水及迴流污泥在此區域內以機械設備攪拌混合，經觀察可以使污泥鬆化現象回復而改善出水，其真正之原因仍不明白，但可能是在缺氧狀態下受脫硝作用或因在需氧狀態下吸收基質之影響而改變細菌生長情況，實際上採用時只需在曝氣池入口段加上隔板造成部份區域產生缺氧狀況即可。

(3)採用多段分隔式(Multi-Stage and Multi-Compartment)曝氣系統

目前本方式仍在實驗研究中，設置上之改善係在栓流系統中加入分障牆或版，使成多段分隔曝氣，這種方式兼有上述栓流型及缺氧段區之優點；根據日本 Sumitomo Jukikai Envirotech 公司之實驗證明採用本方式節省能源約 20%左右，在高負荷時之去除率較低負荷時為高，其平均去除率亦較完全混合系統為高，通常分隔之段數約在 4~6 段，此種處理方式經 Cheudoba, Grau 及 Ottova 等人以人工合成廢水進行實驗亦證明有效，美國賓州大學吳永成博士以家庭污水從事實驗結果亦十分良好，唯對工業廢水之適應性，尚需做進一步之研究分析。

五、防止污泥鬆化在設計操作上之考慮

防止污泥鬆化發生可以分設計及操作兩方面來考慮，分別說明如下：

(一)設計上之考慮

活性污泥系統在設計階段必需考慮防止污泥鬆化在工程上可採用之方法，而將必要之設施做充份而適當之設計，必需考慮之要點包括：

- 1.選取適合活性污泥系統處理之有機負荷為設計參數時考慮設置流量、水質調和設施，以減少突增負荷。
- 2.曝氣設施之設計容量必須充足，曝氣量應可調整，在低負荷時減少曝氣量節省能源，高負荷時又可充份供給所需之溶氧量。
- 3.針對廢水水量，水質特性，選擇適合之曝氣型式、流型(Flow Type)，設置可改變之入口，以控制基質及溶氧之分佈。
- 4.設置調節 pH 及添加營養劑所必需之加藥設備，加氯管線引至曝氣池或二沉池，必要時進行污泥鬆化加氯控制。
- 5.將處理之工廠或地區，若已有足量廢水之產生及排放時，在進行功能設計之前，宜先進行系統模擬試驗，以確定選用處理方式及操作參數能配合廢水之特性，而得較佳之處理效果，同時避免泥污鬆化之發生。

(二)操作上之考慮

若活性汚泥系統已經設計施工完成，則污泥鬆化之防止必需從小心而正確之操作控制方面着手，以下分為正常操作及改正操作兩方面說明：

1. 正常操作

在系統正常操作情形下，必需遵循下列之原則：

- (1)所有操作人員均需熟悉系統操作控制之正確方法，並確實依標準程序進行操作。
- (2)主要操作負責人必需明瞭系統操作之原理及控制方法，以正確的指導及糾正操作人員之操作。
- (3)所有的機械設備均需予以適當之維護，以避免不必要之故障或停車而影響系統功能。
- (4)所有處理程序均必需依建議（操作維護手冊）之方式進行取樣分析，對各種單元處理小心觀察，所有之實驗分析、現場量測、操作記錄等都要小心整理，妥善保存，以做為系統操作評核及修正之依據。

2. 改正操作

當活性汚泥系統發生鬆化現象而必需採取改正措施時，下列原則可供參考：

- (1)主要操作負責人平時必需熟悉有關污泥鬆化可能成因及可行之改正方法。
- (2)全廠必需有緊急應變計畫，對系統突增負荷、機械故障或停車等均能做緊急處置，減少損害及失常時間。
- (3)若有污泥鬆化情形發生，應以現場觀察，取樣分析及操作記錄判斷其可能成因，再採取較可行之改正方式。
- (4)系統在初期試運轉期間，由於廢水特性之變異，生長環境條件之不穩定，要使系統步入正常操作，在此段試誤期間之特有現象及操作，改正方式均需詳細記錄，以供日後重複發生時，採行改正之參考。
- (5)由於各種發生成因及採行改正可能均係判斷，故必需逐步小心實施，避免做急劇而突然之改變，而使系統處理完全失敗。

六、結論

活性汚泥法由於處理有機性廢水效果良好，具有較大之適應性，仍被廣泛的設計採用，國內多處工業區之污水處理廠，亦多為活性汚泥系統，在設計上均已小心考慮防止污泥鬆化之因素，唯因廢水性質特異，流量變化殊大及其他操作方面之因素，是否常有污泥鬆化情形發生，因未追蹤，缺乏具體資料，但可能為不可免，本篇當可提供有關設計及操作人員之參考。

1. Settleability of Activated Sludge in Response to Growth Conditions. Y. C., Wu University of Pittsburgh USA. 1981
2. Treatment of Beer Brewery Wastewater Sumitome Jukikai Envirotech, Inc. JAPAN

3. The Bulking Problem in Activated Sludge, Causes and Control Strategies.
Antonio O. Lau, University of California, Berkeley USA.
4. Allnified Theory of Filamentous Activated Sludge Bulking Sezgin et. al.
JWPCF, USA. 1978
5. Relationship Between Organic Loading, Dissolved Oxygen Concentration
and Sludge Sectleability Palm et. al. JWPCF. USA. 1980
6. Identification of Filamentous Microorganism in Activated Sludge Storms.
et. al. 54th WPCF Annual Conference, USA.
7. The Effect of Dissolved Oxygen Concentration in Activated Sludge Process
Performance Sezgin M. Umniversity of California, Berkeley USA. 1977
8. Hydrogen Peroxide Cures Filamentous Growth in Activated Sludge Cole
et al JWPCF, USA. 1973
9. Control of Activated Sludge Filamentous Bulking Cheudoba et. al. JWPCF,
USA. 1973
10. Multistage Aeration System Sumitomo Jukikai Envirotech, Inc. JAPAN
11. Control of Sludge Bulking in the Brewing Industry Henry Schwartz et.
al. Miller Brewing Co. WI. USA. JWPCF 1980.
12. Bulking Deflocculotion and Pinpoint Floc. Pipes W. O. JWPCF, USA,
1979